

熱応力緩和構造モデル(2)熱過渡強度試験

第2報 熱過渡試験・解体検査

1991年1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2報 熱過渡試験・解体検査

梅田 寿雄* , 菊池 政之* , 渡士 克己*
岩田 耕司*

要 旨

本試験研究の目的は、高速炉機器における耐熱応力設計法の開発のために実機構造モデルの熱過渡強度試験を実施し、クリープ疲労破損データを得て、安全裕度の適正化および強度評価法を確立することにある。本報では一連の報告書の第2報として、熱過渡試験、超音波探傷試験および試験後の供試体の解体検査結果を述べる。

構造物強度確性試験施設による熱過渡強度試験を実施した結果、第1報で示した強度試験対象部全てにクリープ疲労破損データを得た。性能・機能保持確認対象部のうち、整流装置については熱過渡の影響を受けず健全であった。管-多孔板溶接部については表面、内側ノッチ部にき裂が生じていた。その接合面にはナトリウムが付着していたものの腐食はなかった。熱抵抗体については熱抵抗体廻りへのナトリウムの流れ込みや熱抵抗体内部へのナトリウム流入により、その性能の確認はできなかった。解体検査前に実施した超音波探傷試験では、厳密な深さを促えることは無理でもクリープ疲労で生じた微少なき裂にも有効であった。

伝熱応力解析および破壊力学解析に供せられる温度データおよび強度データをうることができた。

Creep Fatigue Test of Thermal Stress Mitigation Structure Model (2)
under Thermal Transient Loadings
vol.2 Thermal Transient Test and Crack Observasion

UMEDA.H. *, KIKUCHI.M. * , WATASHI.K. *
and IWATA.K.

Abstract

The objective of this test is to obtain structural failure data of a typical structural model representing FBR components subjected to thermal loadings, and thereby to develop structural strength evaluation methods. This report provides the test results and crack observasion on the Stress Mitigation Structure Model(2).

Thermal creep-fatigue test was conducted with the Thermal transient Test Facility for Structures(TTS). The test was successfully performed, and we observed creep-fatigue cracks at all expected portions. The flow straightner which is a tested portion for confirmation of function appeared to be safety. Cracks were found on the surfaces of perforated plate and also inside of the tube-to-perforated plate weldments. There was no corrosion although sodium adhered to the joining face. The Performance of a thermal insulator could not be confirmed because sodium flowed inside it. The ultrasonic examination before inspection was effective for fine cracks even though it was impossible to catch exact depth.

The temperature data and creep-fatigue cracks, that can be utilized to develop the design methods of the FBR components, could be obtained.

目 次

1. まえがき	1
2. 供試体形状	2
3. 熱過渡強度試験方法	4
3.1 試験方法	4
3.2 計測方法	4
3.3 運転経緯	5
4. 熱過渡強度試験結果	15
4.1 温度の試験結果	15
4.2 変位の結果	109
5. 超音波探傷試験結果	112
5.1 条 件	112
5.2 探傷結果	114
5.3 探傷結果のまとめ	115
6. 解体検査結果	127
6.1 検査項目と方法	127
6.2 き裂の状況と分布	135
6.3 き裂の詳細観察と考察	169
6.4 硬 さ	191
6.5 機器機能	197
6.6 解体検査結果のまとめ	225
7. まとめ	226
8. 謝 辞	227
参考文献	228

表 リ ス ト

表 3. 1	供試体試験条件および運転実績表	6
表 5. 1	比較試験片の仕様	116
表 6. 2. 1	強度評価部位に生じたき裂の寸法	139
表 6. 2. 2	強度評価部位に生じたき裂の表面形態	140
表 6. 3. 1	破面様相	172
表 6. 3. 2 (a)	断面マイクロ組織	173
表 6. 3. 2 (b)	断面マイクロ組織	174
表 6. 5. 1 (a)	拡管把握力測定結果のまとめ(1)	202
表 6. 5. 1 (b)	拡管把握力測定結果のまとめ(2)	203
表 6. 5. 2 (a)	ひずみと面圧の関係 (多孔板)	204
表 6. 5. 2 (b)	ひずみと面圧の関係 (対比用)	205
表 6. 5. 3	管引き抜き後の管外径	206

図 リ ス ト

図 1. 1	熱応力緩和構造モデル(2) 研究フロー	1
図 2. 1	供試体の形状	3
図 3. 1	T T S フローシート	7
図 3. 2	供試体計装取付図 (本体)	9
図 3. 3	供試体計装取付図 (多孔板廻り)	10
図 3. 4	供試体計装取付図 (整流装置廻り)	11
図 3. 5	胴 - 板接合部近傍に生じた周方向き裂	13
図 4. 1	供試体 温度再現性確認用熱電対取付位置	22
図 4. 2	入口ノズル主流路温度各サイクル比較図	23
図 4. 3	入口ノズルコーナ部主流路温度各サイクル比較図	24
図 4. 4	Yピース主流路温度各サイクル比較図	25
図 4. 5	多孔板部上部表面温度各サイクル比較図	26
図 4. 6	多孔板下部主流路温度各サイクル比較図	27
図 4. 7	整流装置温度各サイクル比較図	28
図 4. 8	熱抵抗体表面温度各サイクル比較図	29
図 4. 9	支持スカート主流路温度各サイクル比較図	30
図 4. 10	出口ノズル主流路温度各サイクル比較図	31
図 4. 11	供試体出・入口温度(1)	32
図 4. 12	供試体出・入口温度(2)	33
図 4. 13	入口ノズル半径方向温度分布(1)	34
図 4. 14	入口ノズル半径方向温度分布(2)	35
図 4. 15	入口ノズル半径方向温度分布(3)	36
図 4. 16	入口ノズル軸方向温度分布	37
図 4. 17	上部スカート半径方向温度分布(1)	38
図 4. 18	上部スカート半径方向温度分布(2)	39
図 4. 19	上部スカート大気部軸方向温度分布	40
図 4. 20	上部スカート大気部半径方向温度分布(3)	40
図 4. 21	上部胴周方向温度分布	41

図 4.22	上部胴半径方向温度分布(1)	42
図 4.23	上部胴半径方向温度分布(2)	43
図 4.24	上部胴半径方向温度分布(3)	44
図 4.25	Yピース半径方向温度分布(1)	45
図 4.26	Yピース半径方向温度分布(2)	46
図 4.27	Yピース半径方向温度分布(3)	47
図 4.28	多孔板半径方向温度分布(1)	48
図 4.29	多孔板半径方向温度分布(2)	49
図 4.30	多孔板半径方向温度分布(3)	50
図 4.31	多孔板半径方向温度分布(4)	51
図 4.32	多孔板半径方向温度分布(5)	52
図 4.33	多孔板半径方向温度分布(6)	53
図 4.34	多孔板半径方向温度分布(7)	54
図 4.35	多孔板半径方向温度分布(8)	55
図 4.36	多孔板半径方向温度分布(9)	56
図 4.37	多孔板半径方向温度分布(10)	57
図 4.38	多孔板半径方向温度分布(11)	58
図 4.39	多孔板半径方向温度分布(12)	59
図 4.40	多孔板半径方向温度分布(13)	60
図 4.41	多孔板半径方向温度分布(14)	61
図 4.42	多孔板半径方向温度分布(15)	62
図 4.43	多孔板半径方向温度分布(16)	63
図 4.44	多孔板板厚方向温度分布(1)	64
図 4.45	多孔板板厚方向温度分布(2)	65
図 4.46	多孔板板厚方向温度分布(3)	66
図 4.47	多孔板板厚方向温度分布(4)	67
図 4.48	多孔板板厚方向温度分布(5)	68
図 4.49	多孔板軸方向温度分布(1)	69
図 4.50	多孔板軸方向温度分布(2)	70
図 4.51	多孔板軸方向温度分布(3)	71
図 4.52	多孔板周方向温度分布	72
図 4.53	支持スカート半径方向温度分布(1)	73
図 4.54	支持スカート半径方向温度分布(2)	74

図 4.55	支持スカート半径方向温度分布(3)	75
図 4.56	支持スカート周方向温度分布	76
図 4.57	支持スカート大気部周方向温度分布	77
図 4.58	支持スカート大気部半径方向温度分布(1)	77
図 4.59	支持スカート大気部半径方向温度分布(2)	78
図 4.60	支持スカート大気部半径方向温度分布(3)	78
図 4.61	支持スカート軸方向温度分布	79
図 4.62	支持スカート大気部軸方向温度分布(1)	80
図 4.63	支持スカート大気部軸方向温度分布(2)	80
図 4.64	出口ノズル半径方向温度分布(1)	81
図 4.65	出口ノズル半径方向温度分布(2)	82
図 4.66	出口ノズル半径方向温度分布(3)	83
図 4.67	出口ノズル半径方向温度分布(4)	84
図 4.68	熱抵抗体半径方向温度分布(1)	85
図 4.69	熱抵抗体半径方向温度分布(2)	86
図 4.70	熱抵抗体軸方向温度分布	87
図 4.71	供試体胴内面軸方向温度分布	88
図 4.72	熱抵抗体廻り流動解析(設計)との比較	89
図 4.73	熱抵抗体内外面温度各サイクル比較図(1)	90
図 4.74	熱抵抗体内外面温度各サイクル比較図(2)	91
図 4.75	整流装置半径方向温度分布(1)	92
図 4.76	整流装置半径方向温度分布(2)	93
図 4.77	整流装置半径方向温度分布(3)	94
図 4.78	整流装置半径方向温度分布(4)	95
図 4.79	整流装置軸方向温度分布	96
図 4.80	主流路軸方向温度分布(1)	97
図 4.81	主流路軸方向温度分布(2)	98
図 4.82	流動解析と実験結果との比較(コールドトランジェント)	99
図 4.83	流動解析と実験結果との比較(ホットトランジェント)	99
図 4.84	入口ノズル廻り各サイクル温度分布(1)	100
図 4.85	入口ノズル廻り各サイクル温度分布(2)	101
図 4.86	入口ノズル廻り各サイクル温度分布(3)	102
図 4.87	入口ノズル廻り各サイクル温度分布(4)	103

図 4.88	入口ノズル軸方向温度分布 (20サイクル)	104
図 4.89	入口ノズル軸方向温度分布 (85サイクル)	105
図 4.90	入口ノズル軸方向温度分布 (100サイクル)	106
図 4.91	入口ノズル軸方向温度分布 (250サイクル)	107
図 4.92	入口ノズル軸方向温度分布 (500サイクル)	108
図 4.93	供試体変位データ図 1 / 2	110
図 4.94	供試体変位データ図 2 / 2	110
図 5.1	超音波探傷試験対象位置	117
図 5.2	基準エコー高さ	118
図 5.3	基準位置図	119
図 5.4	探傷検査記録 (事前検査、上部スカート)	120
図 5.5	探傷検査記録 (事前検査、下部支持スカート)	121
図 5.6	探傷検査記録 (事前検査、R部粒界エコー)	122
図 5.7	探傷検査記録 (熱過渡数 833回、上部スカート)	123
図 5.8	探傷検査記録 (熱過渡数 833回、下部支持スカート)	124
図 5.9	探傷検査記録 (熱過渡数 833回、R部粒界エコー)	125
図 5.10	探傷検査記録 (熱過渡数 833回、R部粒界エコー)	126
図 6.1.1	供試体切断位置	129
図 6.2.1	き裂位置と形態	141
図 6.2.2 (a)	供試体表面のき裂分布(1) - 内表面	142
図 6.2.2 (b)	供試体表面のき裂分布(2) - 外表面	143
図 6.2.3 (a)	部材断面のき裂状況(1)	144
図 6.2.3 (b)	部材断面のき裂状況(2)	145
図 6.2.3 (c)	部材断面のき裂状況(3)	146
図 6.2.3 (d)	部材断面のき裂状況(4)	147
図 6.2.3 (e)	部材断面のき裂状況(5)	148
図 6.2.3 (f)	部材断面のき裂状況(6)	149
図 6.2.3 (g)	部材断面のき裂状況(7)	150
図 6.2.3 (h)	部材断面のき裂状況(8)	151
図 6.3.1	詳細検査対象位置 (内面側からの展開図)	175
図 6.4.1	上鏡母材部の硬さ分布	192

図 6. 4. 2	外胴上部周溶接部近傍の硬さ分布	193
図 6. 4. 3	内筒の多孔板付け根破断部近傍硬さ分布	194
図 6. 4. 4 (a)	外胴下部周溶接部近傍硬さ分布(1)	195
図 6. 4. 4 (b)	外胴下部周溶接部近傍硬さ分布(2)	196
図 6. 5. 1	拡管把握力測定対象箇所	207
図 6. 5. 2 (a)	管の引き抜き試験における荷重－時間曲線（多孔板）	208
図 6. 5. 2 (b)	管の引き抜き試験における荷重－時間曲線（対比用）	209
図 6. 5. 3	管の肉厚減少率と拡管把握力の関係	210
図 6. 5. 4	管の肉厚減少率と面圧値の関係	210
図 6. 5. 5	管孔変形と拡管把握力の関係	211
図 6. 5. 6	剪断抗力の温度依存性（フリーズシールバルブの特性データ）	212

写真リスト

写真 6. 1. 1 (a) 解体過程における供試験体外観(1)	131
写真 6. 1. 1 (b) 解体過程における供試験体外観(2)	133
写真 6. 2. 1 入口ノズル各部の P T 指示模様	153
写真 6. 2. 2 上鏡～上部スカート of P T 指示模様	155
写真 6. 2. 3 外胴上部～内筒 of P T 指示模様	157
写真 6. 2. 4 外胴下部～支持スカート of P T 指示模様	159
写真 6. 2. 5 出口ノズル部 of P T 指示模様	161
写真 6. 2. 6 擬似欠陥のき裂表面状況	163
写真 6. 2. 7 多孔板 of P T 指示模様	165
写真 6. 2. 8 熱抵抗体の外観と P T 指示模様	167
写真 6. 3. 1 入口ノズル付け根のき裂破面	176
写真 6. 3. 2 入口ノズルコーナーのき裂破面	177
写真 6. 3. 3 上鏡のき裂破面	178
写真 6. 3. 4 外胴上部シンニング部のき裂破面	179
写真 6. 3. 5 Y ジャンクション部のき裂破面	180
写真 6. 3. 6 胴板接合部 (上部) のき裂破面	181
写真 6. 3. 7 擬似欠陥部のき裂破面	182
写真 6. 3. 8 熱抵抗体のき裂破面	183
写真 6. 3. 9 入口ノズルコーナーの周断面	184
写真 6. 3. 10 上鏡の縦断面	185
写真 6. 3. 11 Y ジャンクション部の縦断面	186
写真 6. 3. 12 指示スカート部の縦断面	187
写真 6. 3. 13 内筒の縦断面	188
写真 6. 3. 14 出口ノズルコーナーの周断面	189
写真 6. 3. 15 溶接部の形状とき裂	190
写真 6. 5. 1 整流装置分解前後の外観	213
写真 6. 5. 2 (a) 管-多孔板溶接部の縦断面(1)	215
写真 6. 5. 2 (b) 管-多孔板溶接部の縦断面(2)	216
写真 6. 5. 2 (c) 管-多孔板溶接部の縦断面(3)	217
写真 6. 5. 2 (d) 管-多孔板溶接部の縦断面(4)	218
写真 6. 5. 3 管-多孔板縦断面の状態	219
写真 6. 5. 4 管-多孔板接触面の状態	221
写真 6. 5. 5 拡管把握力試験の実施状況	223

1. まえがき

本報告書は、「熱応力緩和構造モデル(2)熱過渡強度試験」の一連の試験研究のうち、構造物強度確性試験施設(TTS)による当該モデルの熱過渡強度試験結果と非破壊検査結果および解体検査結果をまとめたものである。

上記強度試験に関連する一連の研究は図1.1に示す通りであり、第1報で設計・製作された供試体をTTSで試験し、本報告書のデータを用いて流動伝熱解析、伝熱応力解析およびき裂の解析が実施され、①構造不連続部クリープ疲労評価法、②管-多孔板継手評価法、③管板設計評価法、④熱抵抗体・整流装置健全性評価に寄与される。

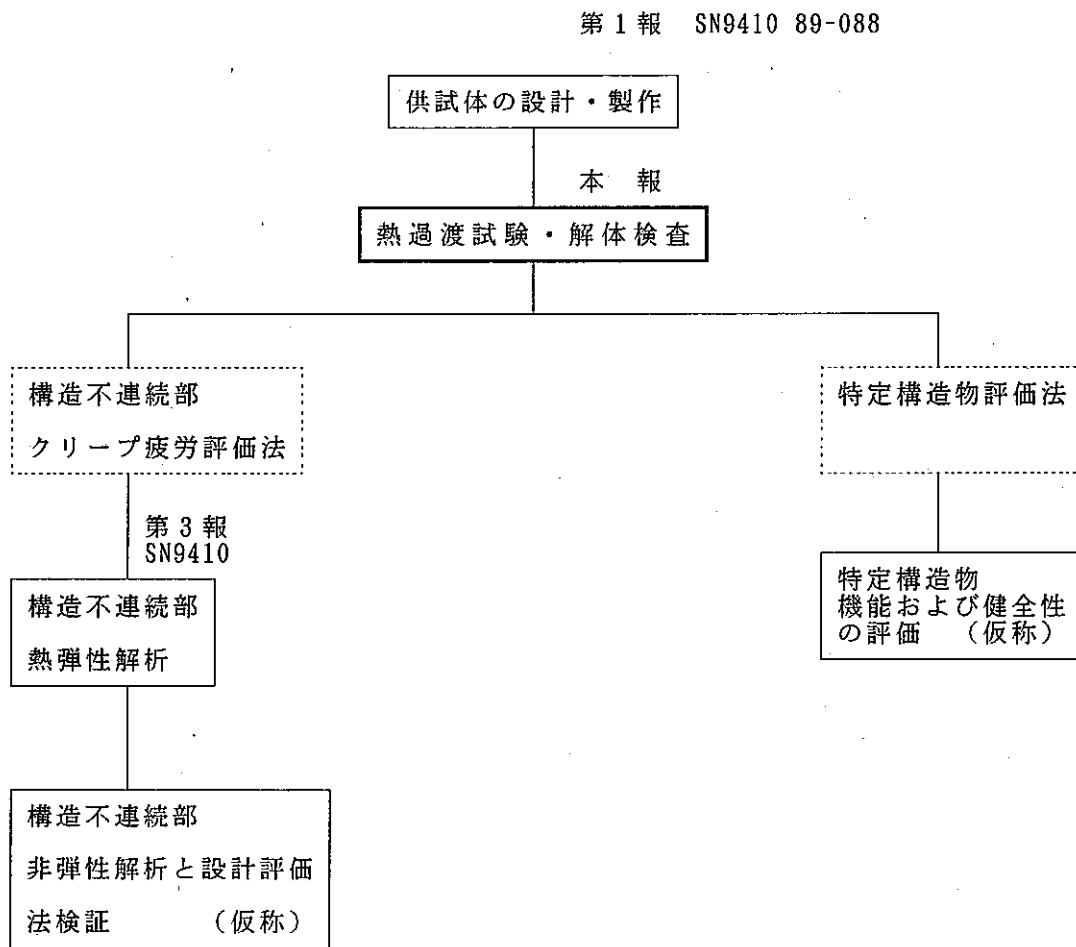


図1.1 熱応力緩和構造モデル(2)研究フロー

2. 供試体の形状

供試体はFBR実証炉原子炉容器および冷却機器を対象としたもので、強度試験部と性能確認試験部に大きく分けられる。図2.1中○印が強度試験部であり、それ以外は性能確認試験部である。詳細は既報⁽⁷⁾による。

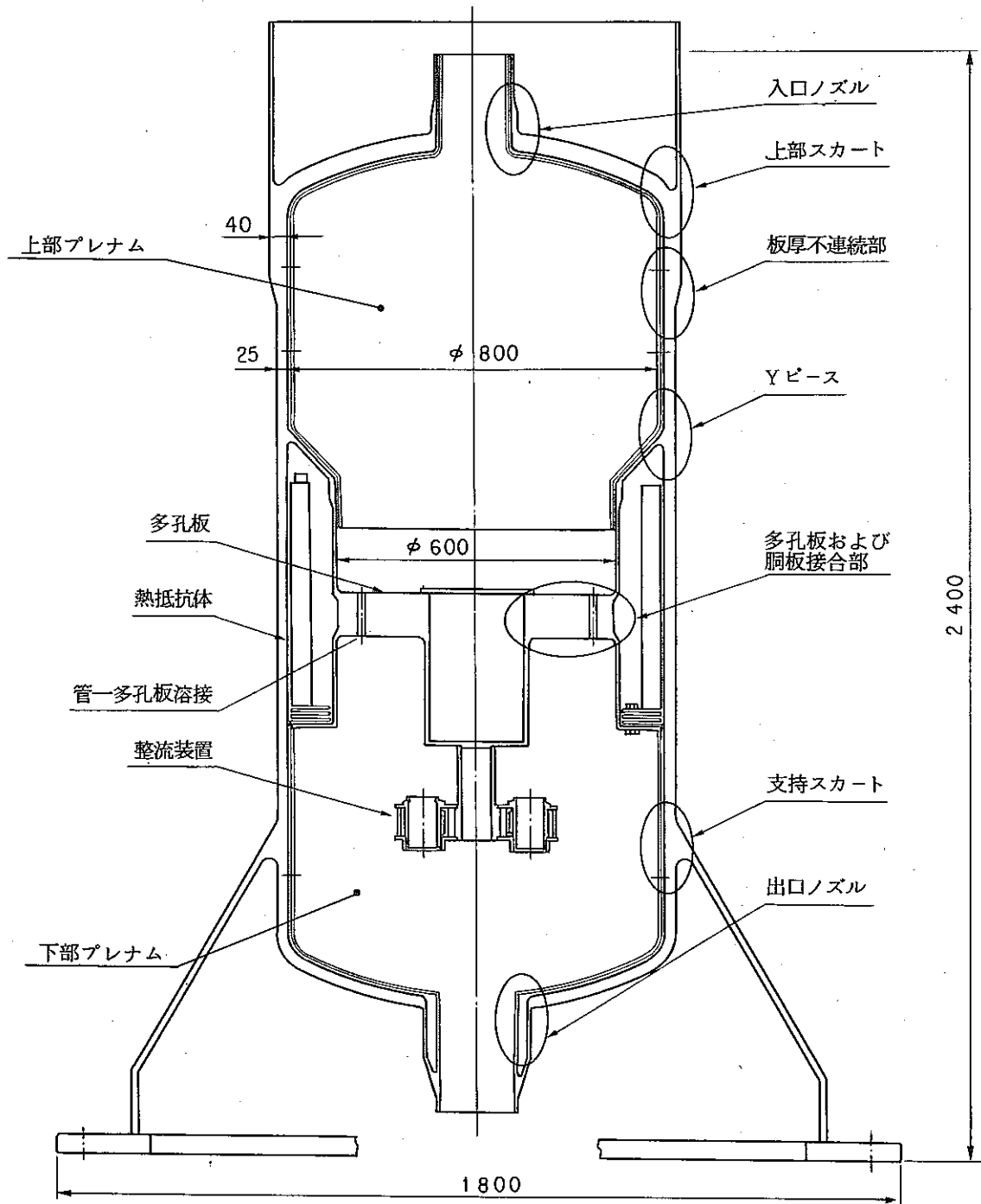


図 2.1 供試体の形状

3. 熱過渡強度試験方法

3.1 試験方法

熱応力緩和構造モデル(2)を供試体（以下熱緩(2)とする）として、構造物強度確性試験施設（T T S）を用いたナトリウムによる熱過渡強度試験を実施した。

試験は、高温ナトリウムと低温ナトリウムを交互に自然落下にて、繰り返し供試体に流入させることによりクリープ疲労破損強度データを取得するものである。試験条件は、高温側ナトリウム温度を600℃、低温ナトリウム温度を250℃とし（温度差 350℃）、600℃ \longleftrightarrow 250℃の最大温度変化時間は40℃/sec でナトリウムの流速を1 m³/min とした。1 サイクルの時間を120分（高温保持時間90分、低温保持時間30分）として833回繰り返した。

T T Sの概要、試験方法、運転方法についての詳細は既報⁽¹⁾による。T T Sのフローシートを図3.1に示す

3.2 計測方法

供試体に取り付けられた温度、変位の各種計装品のうち内面温度測定用については計装ノズルを通り、端子盤を介して計装セルの各種アンプへ送られ増幅される。これらの信号はデータ集録装置（T I 990/10Aミニコンピュータ：D A S）に送られA/D変換された後ディスクに一時記録される。各種データは、記録量が一定容量になった時点で磁気テープに自動的に転送、記録される。D A Sは他にキャラクターディスプレイからのプリント出力が可能であり、またオンラインモニターも可能である。供試体の計装取付図を図3.2～3.4に示す。

(1) 温度の計測

熱過渡強度試験時における供試体内流況確認および各部温度確認のための周方向温度分布、軸方向温度分布、熱抵抗体温度分布、整流装置温度分布等の測定を実施するため、供試体内・外面に熱電対を取付けた。熱電対はC A型シース1Φの非接地のものを使用し、内表面に137点、外表面に55点取付けた。内表面に取付けた熱電対は計装ノズルからフリーズシールメタル方式にて取出した。熱電対はシース先端部に予め約30mmのチップ（溶接棒）を溶接し、供試体に取付ける際にチップを溶かして取付けた。また測温部およびシースは厚さ0.1mmのステンレス箔で固定し、ステンレス箔間は熱膨張を考慮し、たわみをもたせた。

(2) 変位の計測

変位計は熱過渡強度試験時における供試体の半径方向変位を測定するために供試体外表面に4点取付けた。使用した変位計はSheavitz社のLVDT GCA-121-500である。供試体の変位は、供試体に溶接された座からスーパーアンバー線、SUSワイヤー（編み込み）を介してLVDTに伝達される。

変位計のストロークは30mmであるが、リニアになるように測定範囲を25mmとし、プラス側に12.5mm変位した時が10V、マイナス側に12.5mm変位した時が-10Vになるようにアンプと変位計本体を校正した。その時の最大誤差は0.03%だったため誤差は無視した。

3.3 運転経緯

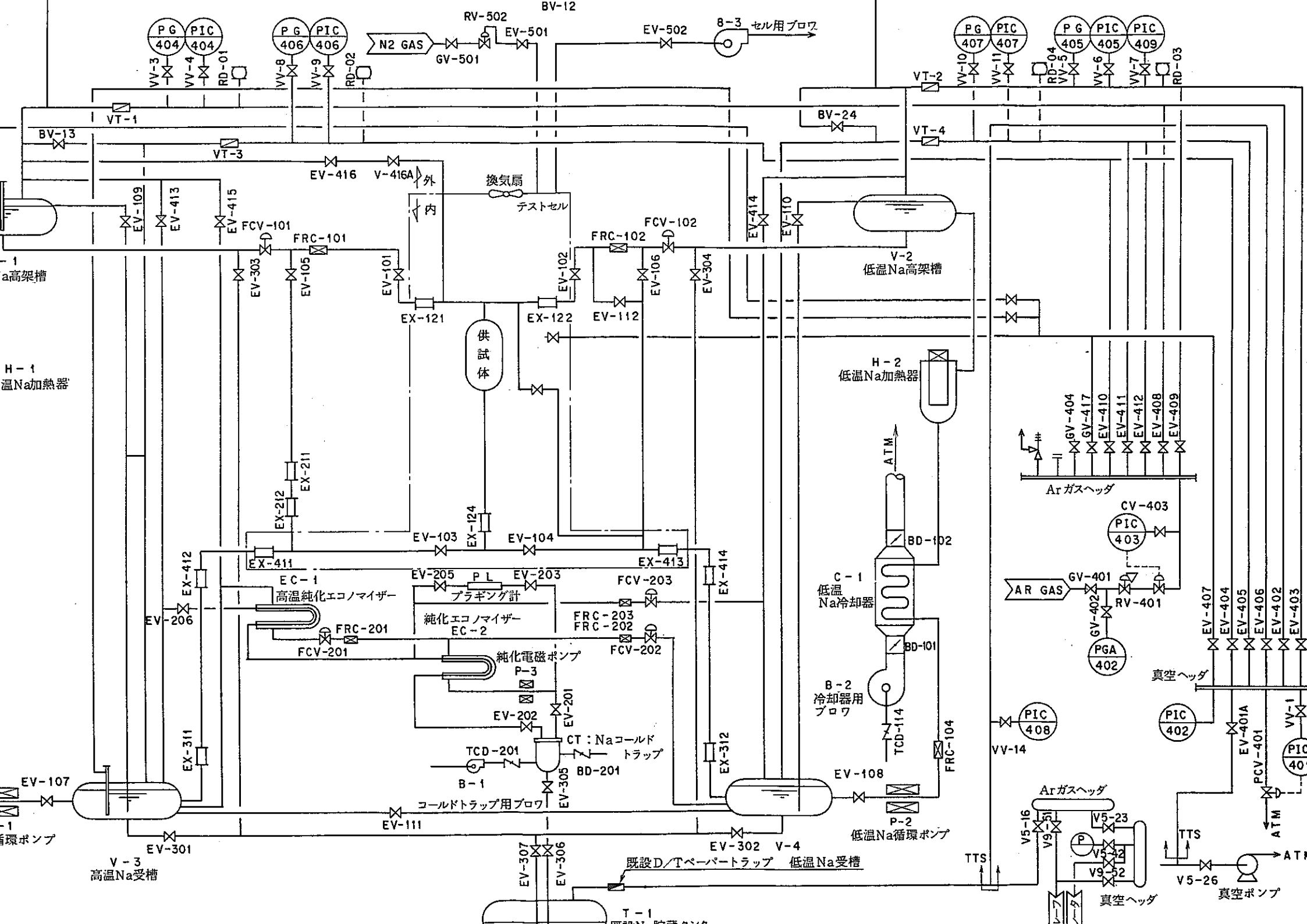
運転実績を表3.1に示す。600℃ \longleftrightarrow 250℃の熱過渡試験を833サイクル実施したが、504サイクル時に供試体入口ノズルコーナー部よりナトリウム漏洩が発生したため試験を一時停止した。原因は、入口ノズル廻りのライナー破損によりナトリウムがライナー内側に流れ込み、当初設定した熱過渡より厳しい熱過渡が入口ノズル廻りに加わり破損したものである。残りの試験回数を300～500回に設定し当該部の補修を行った。結果、329（総繰り返し数833）回で補修構造の一部が破損したことにより試験を終了した。

また、補修前に供試体内部をファイバースコープで確認した際、胴-板接合部で貫通き裂を確認した（図3.5）。

表 3.1 供試体試験条件および運転実績表

*1 試験開始から終了まで
 *2 予熱ONからOFFまで

No.	供試体名	試験条件			荷重 (ton)	回数 & 温度				Na漏洩	ループ 不具合	試験実績			備考
		H温度 (°C) 保持(min)	C温度 (°C) 保持(min)	min/cycle		予熱	充填	昇温	ドレン (緊急)			期間 *1	期間 *2 (h)	サイクル数	
	熱応力緩和構造(2)供試体	600 90	250 30	120	—	2回	4回	2回	4回	供試体 入口/炉 コナ部	高温加熱器 (H-1) 電気 トリップ	S. 63 10/20 }	S. 63 10/5 }	833	
										供試体 入口/炉 補修構造 内(揚底 鏡板)	Ar ガス放 出弁 (PCV-401) シーリーク	12/1 }	12/11 }		
												H. 1 6/12 }	H. 1 5/10 }		
												7/10 }	7/24 }		
												1728 hr	3456 hr		
															合計 833



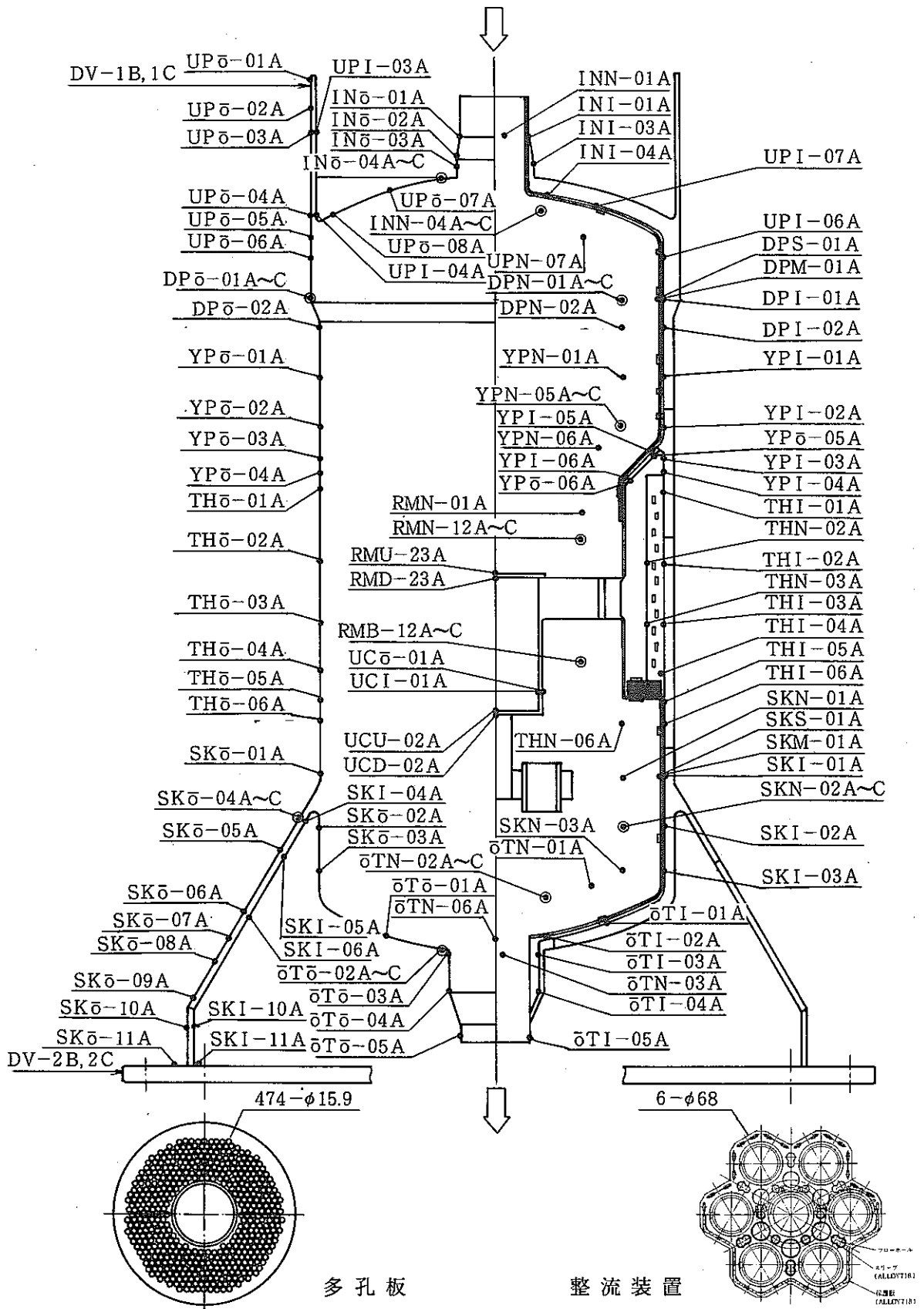


图 3.2 供試体計装取付図 (本体)

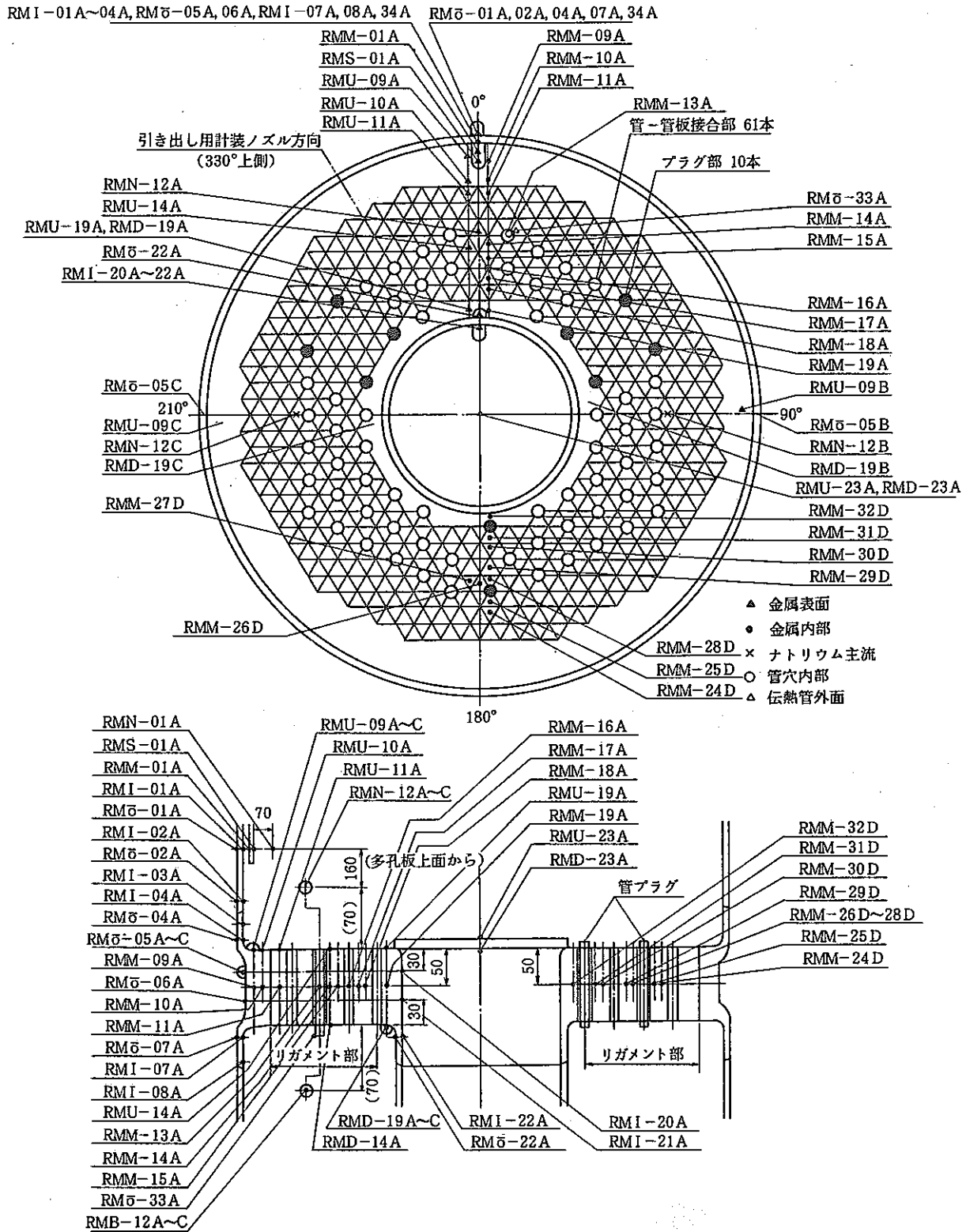


図 3. 3 供試体計装取付図 (多孔板廻り)

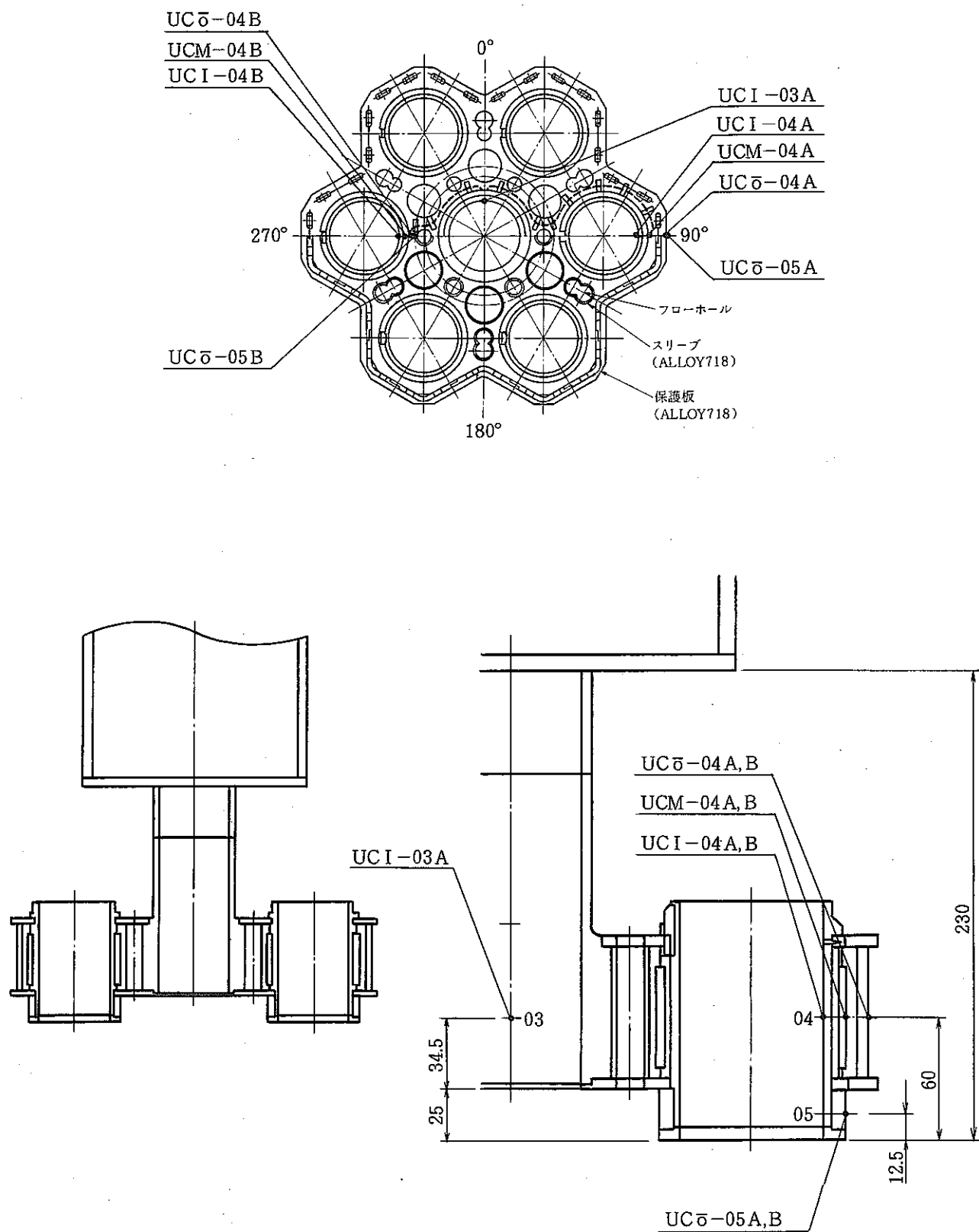
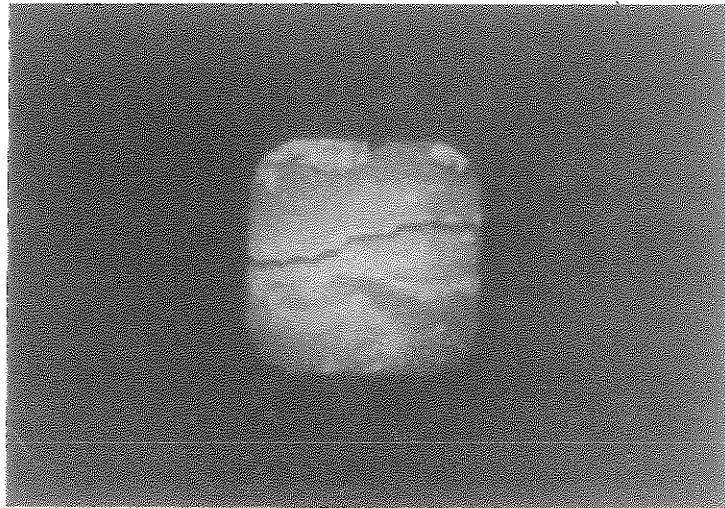
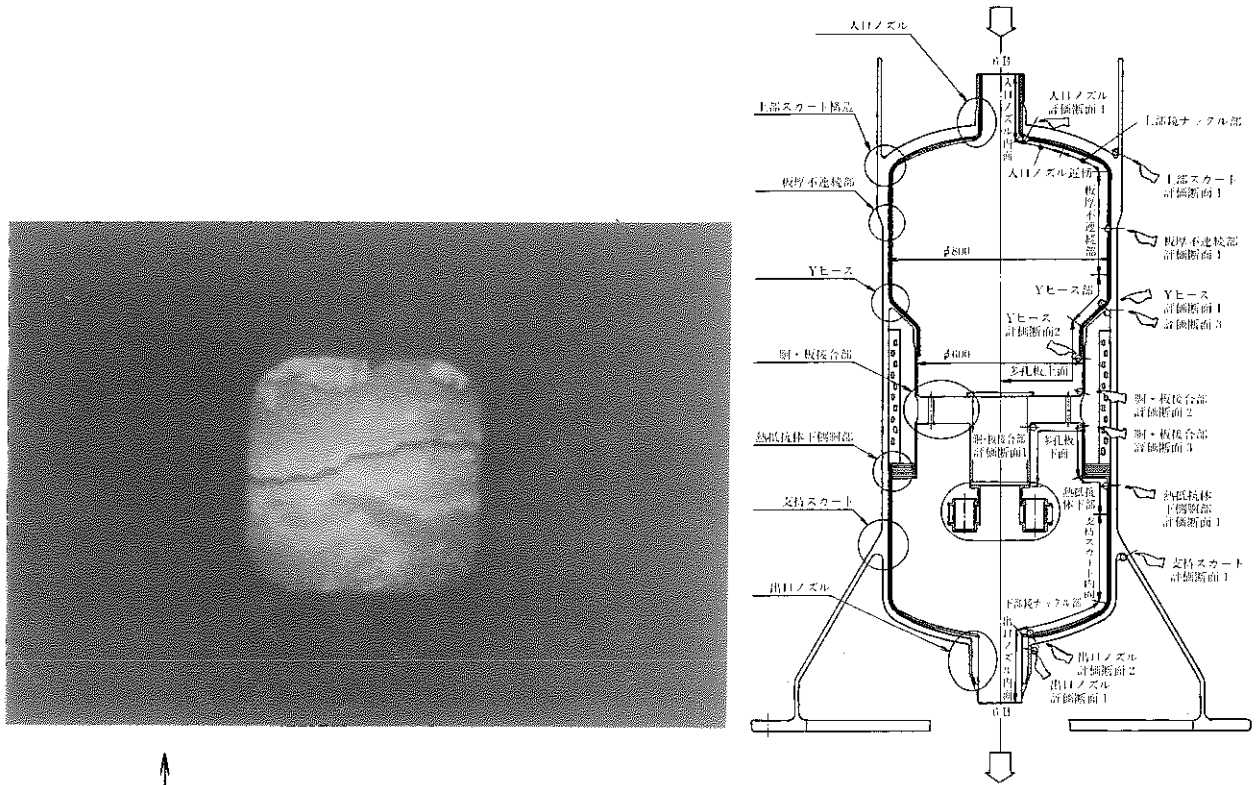
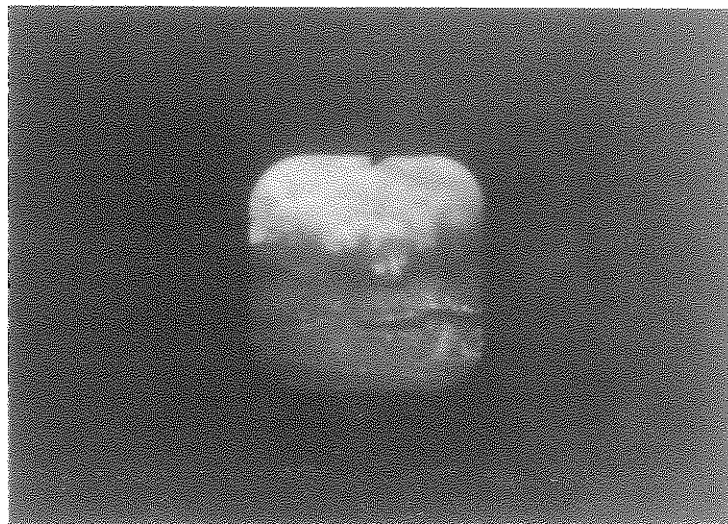


図 3.4 供試体計装取付図 (整流装置廻り)



↑
方位 180度 (南側)

方位 90度 (西側) →



熱過渡数：504回

撮影日：1989.4.11

使用機器：オリンパス社製ファイバースコープ

図 3.5 胴-板接合部近傍に生じた周方向き裂

4. 熱過渡強度試験結果

本章では、温度および変位の計測結果を示す。温度の結果は熱過渡（600℃ ↔ 250℃）の繰り返し（833サイクル）において、供試体主流路および滞留部の熱電対温度データの再現性を確認した。図4.1～4.10に示すように各部位の温度変化を各サイクル毎に比較した結果、大きな変化（50℃を超える温度差）は見られなかった。ただしINN04Aは、100サイクル以降温度挙動に変化があり、300、400サイクルで温度が一定していることから熱電対が断線したものであると思われる。これらデータから各サイクルで大きな変化がないこと、また熱電対が健全である100サイクル目を代表として表した。ただし各サイクルでデータの異なる部分については個別に表した。

4.1 温度の試験結果

温度のデータは基本的に強度試験対象部と性能確認試験対象部に分かれ、そのなかでも内部温度と外部温度に分かれる。本項でこれらの温度変化の挙動を順次述べる。計測結果は、熱過渡挙動の低温（250℃）ナトリウムが供試体を循環する30分間（コールドトランジェント、以下コールドと略す。600℃ → 250℃）とそれに続いて高温（600℃）ナトリウムが供試体を循環する90分間（ホットトランジェント、以下ホットと略す。250℃ → 600℃）のうち基本的にそれぞれ定常状態になる15分間だけ出力させた。供試体出入口温度データを図4.11、4.12に示す。図4.11はゴールド、ホット開始300秒間を出力させた。

ナトリウムの主流は図2.1の入口ノズルから上部プレナムに入り、多孔板を介して下部プレナムへ移行し出口ノズルへと流れる。滞留部は熱抵抗体のあるYピース・外胴間アニユラス部と多孔板・整流装置間の小胴である。

4.1.1 強度試験対象部

強度試験対象部は、入口ノズル、上部スカート、板厚不連続部、Yピース、多孔板、支持スカート、出口ノズルである。

(1) 入口ノズル（図4.13～4.16）

① 板厚方向および周方向温度分布

主流路熱電対（INN01A）に対するライナー内面、供試体外表面熱電対の応答に大きな変化はないが、ライナー内面の温度については、INI01Aでコールド、ホット共に1分30秒当たりでナトリウムの流出入による温度変化が見られる（図4.13）。他の03A、04Aでも時間の差はあれ、同様の温度変化が見られる（図4.14、15）。INI01AとINO01Aの内外面温度差は薄肉であることから、

コールド、ホット共ほとんど差がない（図4.13）。INI03AとINO03Aではコールド開始50秒当たりで最大100℃の温度差があるが、ホットでは開始直後に約140℃の温度差がある（図4.14）。INI04AとINO04Aではコールド開始1分で100℃の温度差があり、ホットでは開始50秒当たりで275℃の温度差があった（図4.15）。

② 軸方向温度分布

コールド開始1分30秒まではINI03A→04A→01Aの順で温度変化しているが、それ以降は01Aの応答が早くなっている。ホットではホット開始1分までは04A→03A→01Aの順で温度変化しているが、それ以降は01Aの応答が早くなっている。

(2) 上部スカート（図4.17～4.20）

① 板厚方向温度分布

UPI06A、UPO06Aの最大温度差はコールド開始3分後の140℃、ホット開始2分後の170℃である（図4.17）。UPI04A、UPO04Aについてはコールド、ホット共ほとんど差がない（図4.18）。UPO08AとUPI04Aではコールドで開始12分後の80℃、ホットで開始8分後の100℃が最大である（図4.18）。大気部の内外面温度は同一温度である（図4.20）。

② 軸方向温度分布

スカート外表面に取付けられた熱電対は上部ではナトリウム温度変化に対しても一定であり、下部ではナトリウム温度変化に対して緩やかに対応している（図4.19）。

(3) 上部胴（図4.21～4.24）

① 板厚方向温度分布

DPN01A～Cのコールドで温度ゆらぎが見られ、ホットでも若干ゆらぎが見られる。しかし、この部位での偏流による周方向温度分布はないと言える（図4.21）。DPN01Aのコールド開始2分後（図4.22）で600℃から350℃（ ΔT は250℃）に対し、ホット開始2分後で250℃から540℃（ ΔT は290℃）であり、この部位ではホット側が若干早い応答を示している。これは下流側のDPN02A、YPN01Aのラインでもホット側が早い（図4.23、4.24）。

ナトリウム主流路（DPN01A）とライナー内表面（DPS01A）ではコールド時温度差がほとんどなしでホット時最大30℃の温度差に対し、ライナー内表面（DPS01A）とライナー外表面（DPM01A）ではコールド時最大20℃の温度差、ホットでは最大70℃の温度差があり、5mm1枚ライナーが熱過渡を緩和して

いるのがわかる。この部位では急激な温度変化が見られないことから、ナトリウムの流れ込みは少なく熱伝導による影響が大きいと考えられる（図4.22）。

(4) Yピース（図4.25～4.27）

① 板厚方向温度分布

この部位（図4.25）での主流路温度応答（Y P N 05A）はコールド開始2分後で600℃から320℃（ ΔT は280℃）、ホット開始2分後で250℃から530℃（ ΔT は280℃）であり、コールド・ホット共同じ応答を示している。ただし内表面（Y P I 05A）の温度応答はコールド開始5分後で600℃から350℃（ ΔT は250℃）、ホット開始5分後で250℃から550℃（ ΔT は300℃）であり、ホット側の方が若干早い応答を示している。これはYピースコーナー部のY P I 02Aについても同様である（図4.26）。

主流路（Y P N 05A）と内表面（Y P I 05A）の温度差はコールド開始2分後で最大100℃に対し、ホット開始1分後で最大100℃である。またコールド側では15分後になっても同一温度にならないが、ホット側では3分後には同一温度になっている。内表面（Y P I 05A）と滞留部（Y P O 05A）の温度差はコールド開始3分後で最大150℃に対し、ホットでは50℃である（図4.25）。これらのことから、この部位でホット時のナトリウムの流れ込みが顕著であると言える。流れ込みは、Yピースコーナー部のガス抜き穴（周方向4ヶ、3Φ）および熱電対通し穴（周方向8ヶ、3Φ）が原因と考えられる。Y P N 06Aのライン（Y P N 06A、Y P I 06A、Y P O 06A）でも同様に内表面と滞留部のホット側はほとんど同一温度である（図4.27）。

(5) 多孔板（図4.28～4.52）

① 板厚方向および周方向温度分布

RMN01Aのラインではコールド、ホット共主流路側から順序よく応答している。そのラインの最外部RMO01A（滞留部）ではコールド開始3分後でRMI01Aとの温度差が120℃あるにもかかわらず、ホットでは開始1分後で最大100℃の温度差があり1分以降ほとんど同一温度であることから、この部位でもホットの流れ込みが考えられる。RMN01Aは、コールド開始2分後で600℃から310℃（ ΔT は290℃）、ホット開始2分後で250℃から540℃（ ΔT は290℃）でありコールド、ホット共同じ熱過渡が負荷されているのがわかる（図4.28、4.29）。

多孔板上部表面の熱電対についてはコールド、ホット共開始1分後で ΔT 250～260℃、2分後で ΔT 310～320℃であり、ほとんど同じ熱過渡であると言え

る（図4.30、4.31）。

多孔板内面（金属内）の熱電対はRMM09Aを除きほとんどがコールド、ホット共開始2分後で ΔT 270～280℃である（図4.32～4.40）。RMM09Aは開始2分後で180℃であり、滞留部の温度の影響と考えられる（図4.34）。

多孔板下部表面の熱電対については多孔板上部表面に沿った応答を示している（図4.41～4.43）。

RMD14AとRMD09Aのコールド、ホットを比較するとコールドでは開始1分で最大150℃差、ホットでは開始1分で最大50℃差であり、主流路に近い側が早い応答を示している（図4.43）。滞留部近くのRMD09Aはコールド、ホット共RMM09Aより早い応答を示しており、特にホットの開始1分後で150℃の温度差がある（図4.44）。RMD09Aのコールド、ホットを比較すると、コールドでは開始1分後で600℃から520℃で ΔT 80℃、2分後で600℃から400℃で ΔT 200℃である。ホットでは開始1分後で250℃から450℃で ΔT 200℃、2分後では250℃から520℃で ΔT 270℃であり、ホットの方が応答が早い（図4.43、4.44）。

多孔板上面、内面、下面の板厚方向温度について供試体中心部側では、大きな温度差はないが（図4.45）、供試体胴側ではコールド開始30秒～60秒にかけて最大100℃～120℃の温度差がある（図4.46～4.48）。

胴板接合部廻りの軸方向温度分布の流路側（図4.49）では、コールド、ホット共RMI02A、04Aが最も早い。上流のRMI01Aは、熱遮蔽板があるためコールドでは3番目ホットでは1番遅い応答になっている。滞留部側（図4.50、4.51）ではコールド、ホット共全チャンネル温度差はほとんどない。ただしコールド120秒以降上流の応答が悪くなっている。

胴板接合部の滞留部周方向温度分布はコールド、ホットとも偏流等による温度差はない（図4.52）。

(6) 支持スカート（図4.53～4.63）

① 板厚方向温度分布

主流路側（SKN01A）のコールドでは開始2分後に600℃から350℃で ΔT 250℃に対し、ホットでは開始2分後に250℃から550℃で ΔT 300℃とホット側が若干早い応答を示しているが、熱遮蔽板内外表面、胴内面に従い逆にホットの応答が遅くなっている（図4.53）。これは下流側（SKN02AおよびSKN03Aのライン）についても同様であり、この部位では、ホット時主流路を除く熱電対の応答が3分以降著しく悪くなっている（図4.54、4.55）。これは3分を境に

熱遮蔽板同士の隙間が狭められ、高温ナトリウムが熱遮蔽板内へ流れ込みづらくなったものと考えられる。

主流路での周方向温度分布については温度ゆらぎがあるものの同一温度だと言える（図4.56）。

大気部の内外面温度についても大きな変化はなく同じ温度だと言える（図4.57～4.60）。

② 軸方向温度分布

流路側の軸方向分布はコールド、ホット共下鏡や出口ノズルに比べ応答が遅く、特に上流側のSK I 01A, 02Aが一番遅い（図4.61）。大気側の内側および外側の軸方向分布はベース板に向かって順序よく応答している（図4.62、63）。

(7) 出口ノズル（図4.64～67）

① 板厚方向温度分布

主流路（OTN 02A、03A）ではコールド開始2分後に600℃から350℃で ΔT 250℃、ホット開始2分後に250℃から500℃で ΔT 250℃であり、同じ熱過渡と言える（図4.64、4.65）。OTN 02Aのラインにおける内面温度でのコールド、ホットの比較をすると熱過渡の開始1分後コールド側 ΔT 120℃、ホット側30℃、2分後でコールド 210℃、ホット 160℃、3分後でコールド 260℃、ホット 230℃、4分後でコールド 280℃、ホット 260℃であり、全体的に見てコールド側の応答が早くなっている（図4.64）。これは下流側でも同じである（図4.65～4.67）。

4.1.2 性能試験対象部

性能試験対象部は、熱抵抗体と整流装置である。

(1) 熱抵抗体（図4.68～4.74）

① 板厚方向温度分布

RM I 02Aのラインの熱抵抗体内外面（THN 02A、TH I 02A、図中□・△）で熱過渡開始3分後の温度差は、コールド時140℃、ホット時160℃である（図4.68）。RM I 07Aのラインの熱抵抗体内外面（THN 03A、TH I 03A、図中□・△）で熱過渡開始2分後の温度差は、コールド時100℃、ホット時220℃である。以上のことから熱抵抗体が熱過渡を緩和しているのがわかる（図4.69）が、設計時に行った流動解析と比べる（図4.72）と非常に応答が良く、熱抵抗体の性能そのものを満足していない。これは熱抵抗体と供試体胴との間へ、上部Yピースの熱電対通し穴やガス抜き穴および下部熱抵抗体押さえリングの隙間からナトリウムが流入していると考えられる。

図4.73、74に熱抵抗体内外面温度の各サイクル比較図を示す。T H N 02A、03Aのラインでコールド、ホット共内外面温度差の最大値および温度応答が、300サイクル以前と350サイクル以降で異なる。T H N 02Aのコールド時の内外面温度差は、300サイクルまで150℃前後、350サイクル以降50℃前後であり、ホット時では300サイクルまで180℃前後、350サイクル以降50℃前後である。T H N 03Aのコールド時は、300サイクルまで100℃前後、350サイクル以降30℃前後であり、ホット時では300サイクルまで230℃前後、350サイクル以降70℃前後である。またT H N 02A、03Aのライン共コールド、ホットで、内面側の温度応答が300サイクル以前より350サイクル以降（この間未集録）で遅くなっており、外面側では350サイクル以降の方が早くなっている。

以上温度データより、300サイクル～350サイクル間で熱抵抗体の一部が貫通し、内部にナトリウムが流入し熱抵抗体の内外面温度差が小さくなったものと考えられる。

② 軸方向温度分布

熱抵抗体の内側（供試体中心に向かって）ではコールド、ホット共同じ温度であるにもかかわらず（図4.70）、外側ではコールド時に下部の応答が早く、ホットでは上部の応答が早くなっている（図4.71）。これは熱抵抗体と供試体胴間に上部では高温ナトリウムが、下部では低温ナトリウムが若干流れ込んでいると考えられる。

(2) 整流装置（図4.75～4.79）

整流装置廻りのほとんどの熱電対がコールド、ホット共開始2分後で ΔT 250℃前後であり同じ熱過渡と言える。他整流筒内面のみコールド時50℃前後の温度ゆらぎが見られた。

4.1.3 主流路温度

(1) 上部プレナム（図4.80）

上部プレナムは、入口ノズルから多孔板までである。

コールド、ホット共入口ノズルから流入してきたナトリウムは、一旦多孔板まで流入している。最も遅いのは上鏡部であり、この部位でナトリウムが澱んでいるのがわかる。

(2) 下部プレナム（図4.81）

下部プレナムは、多孔板から出口ノズルまでである。

コールドではあまり温度差はないが、多孔板を抜けたナトリウムはホットのナトリウムと混合しながら出口ノズルへ流入している。ここでは熱抵抗体下部が若干遅

くなっており、コールド時のみ澱んでいる。ホットでは多孔板から熱抵抗体下部、スカート、出口ノズルへと順序よく軸方向に変化している。

4.1.4 設計時の流動解析と実験結果との比較

設計時に実施した流動解析結果と実験結果との比較図を図4.82、4.83に示す。

主流路における温度結果についてはコールド、ホット共流動解析と比較して良く一致しているのがわかる。

4.1.5 供試体入口ノズル廻り

504 サイクルで貫通き裂のあった入口ノズル廻りの温度データを図4.84～92に示す。データは、INI 01A、03A、04A、UPI 07Aのコールド、ホットについて20、85、100、200、500 サイクルを比較したもの（図4.84～87）と各サイクルについて入口ノズル廻りの軸方向温度変化を比較したもの（図4.88～92）である。主流路 INN 01Aの温度については各サイクル毎で再現性がある（図4.2）にもかかわらず、熱遮蔽板内では再現性がない。これは入口ノズルの熱遮蔽板の溶接部が破損し、熱過渡の繰り返しにおいてナトリウムが流入したりしなかったりしたためである。INI 01A、03Aではコールド、ホット共各サイクルで大きなバラツキがあるが、下流のINI 04A、UPI 07Aではコールド、ホット共若干バラツキがある。

軸方向温度分布を各サイクル毎に比較した図（図4.88～92）から、コールドでは全体的に見て03Aの応答が早く、次に01Aあるいは04Aと続く。ホットでは全体的に見て04Aの応答が早く、01Aあるいは07Aと続く。入口ノズルコーナー近傍の03A、04Aは全体的に熱過渡が厳しかったことがわかる。

以上より、この部位での熱過渡が厳しいことからき裂発生におよんだものと考えられる。

4.1.6 温度結果のまとめ

- (1) 入口ノズル、Yピース熱遮蔽板および熱抵抗体廻り滞留部で熱遮蔽板破損や熱電対通し穴、ガス抜き穴によりナトリウムの流入が見られたが、試験対象部に数℃～40℃/secの熱過渡が繰り返し負荷された。
- (2) 熱抵抗体は温度データから、熱抵抗体と供試体外胴間へのナトリウム流入および試験途中での熱抵抗体内ナトリウム流入により、その性能を確認できなかった。
- (3) 主流路でのナトリウムは上部プレナムではコールド、ホット共一旦多孔板まで流入している。下部プレナムではコールド、ホット共軸方向に大きな温度差はない。
- (4) 設計時に行った流動解析と実験値との比較では、良く一致していた。

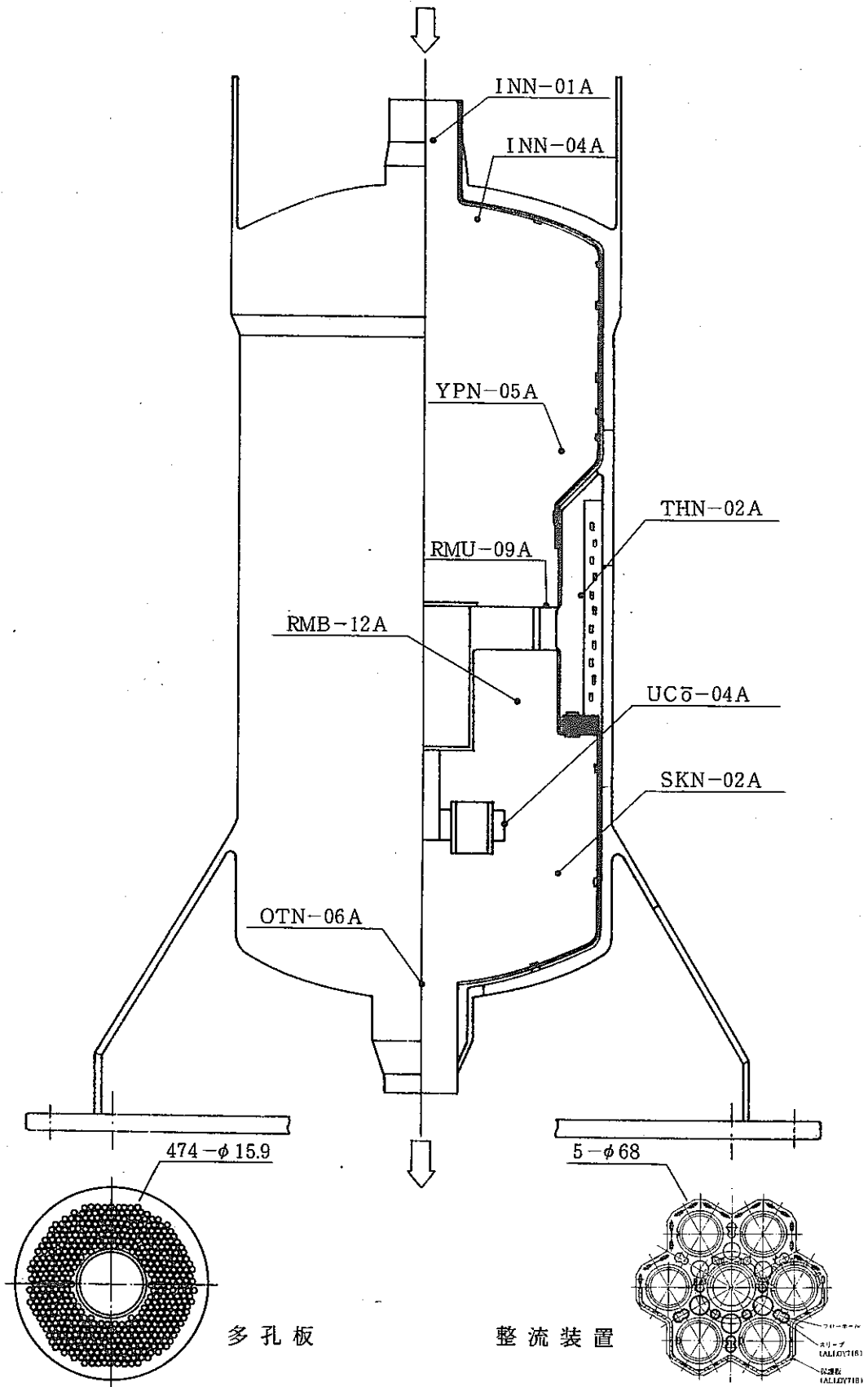


图 4.1 供試体 温度再現性確認用熱電対取付位置

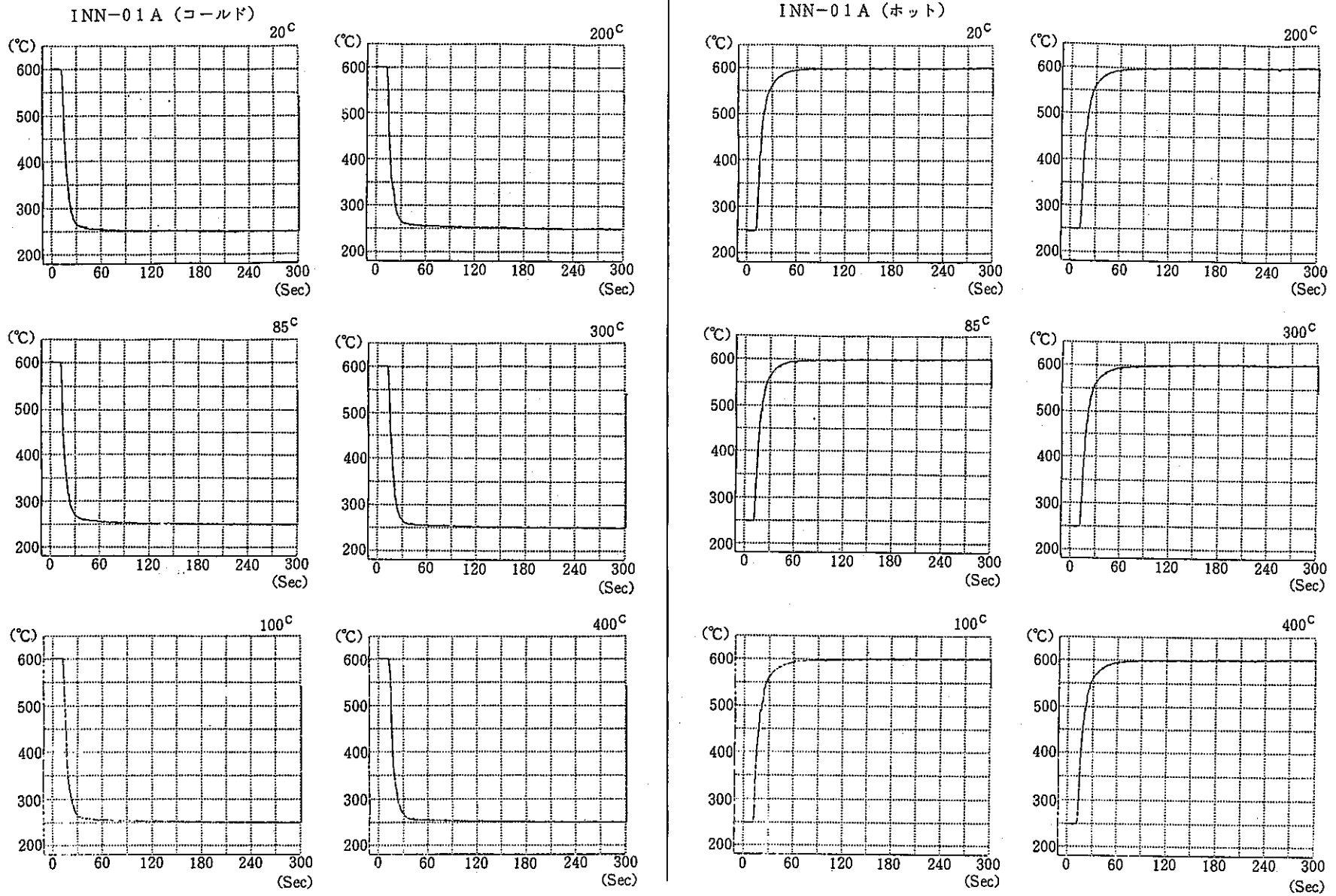


図 4.2 入口ノズル主流路温度各サイクル比較図

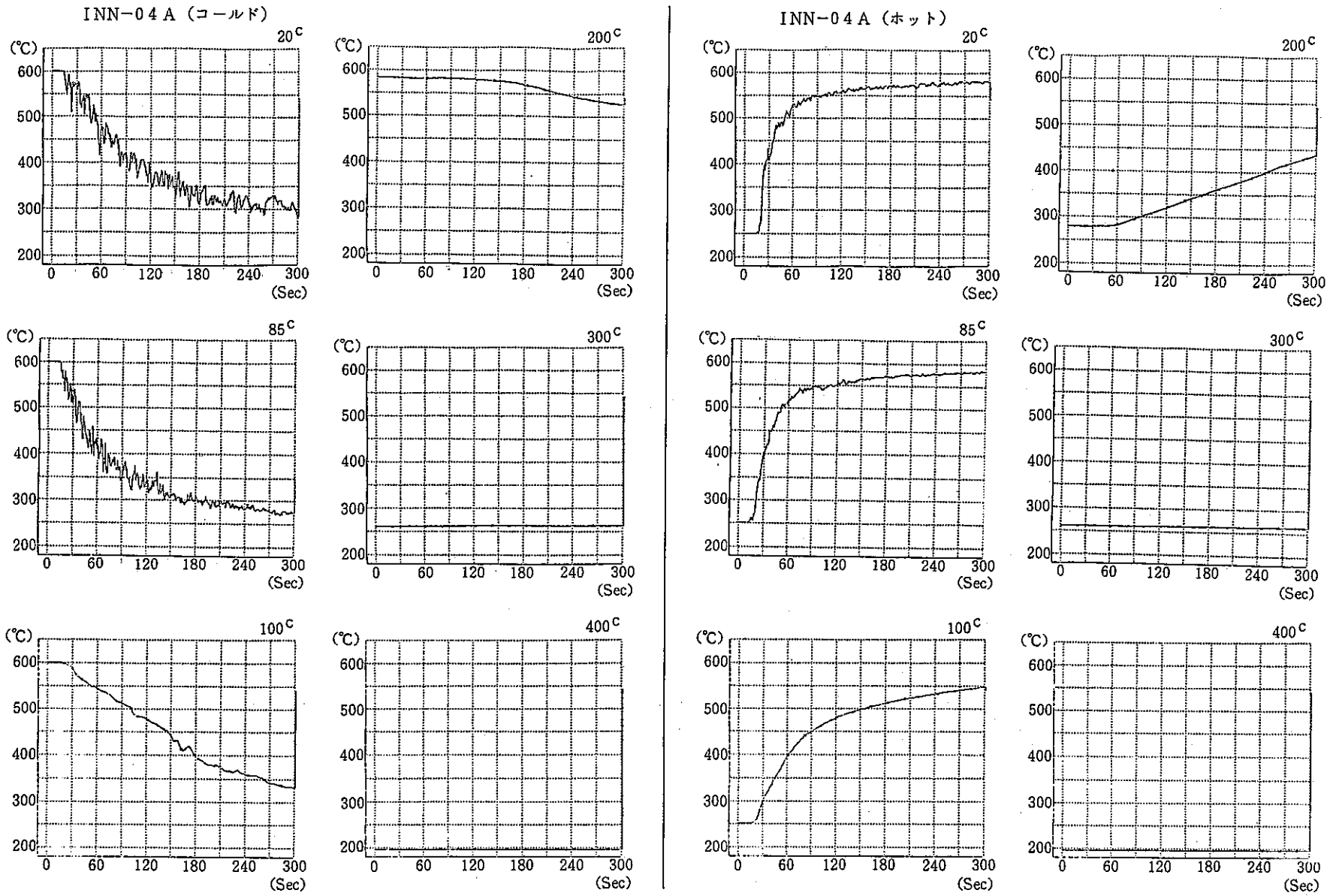


図 4.3 入口ノズルコーナー部主流路温度各サイクル比較図

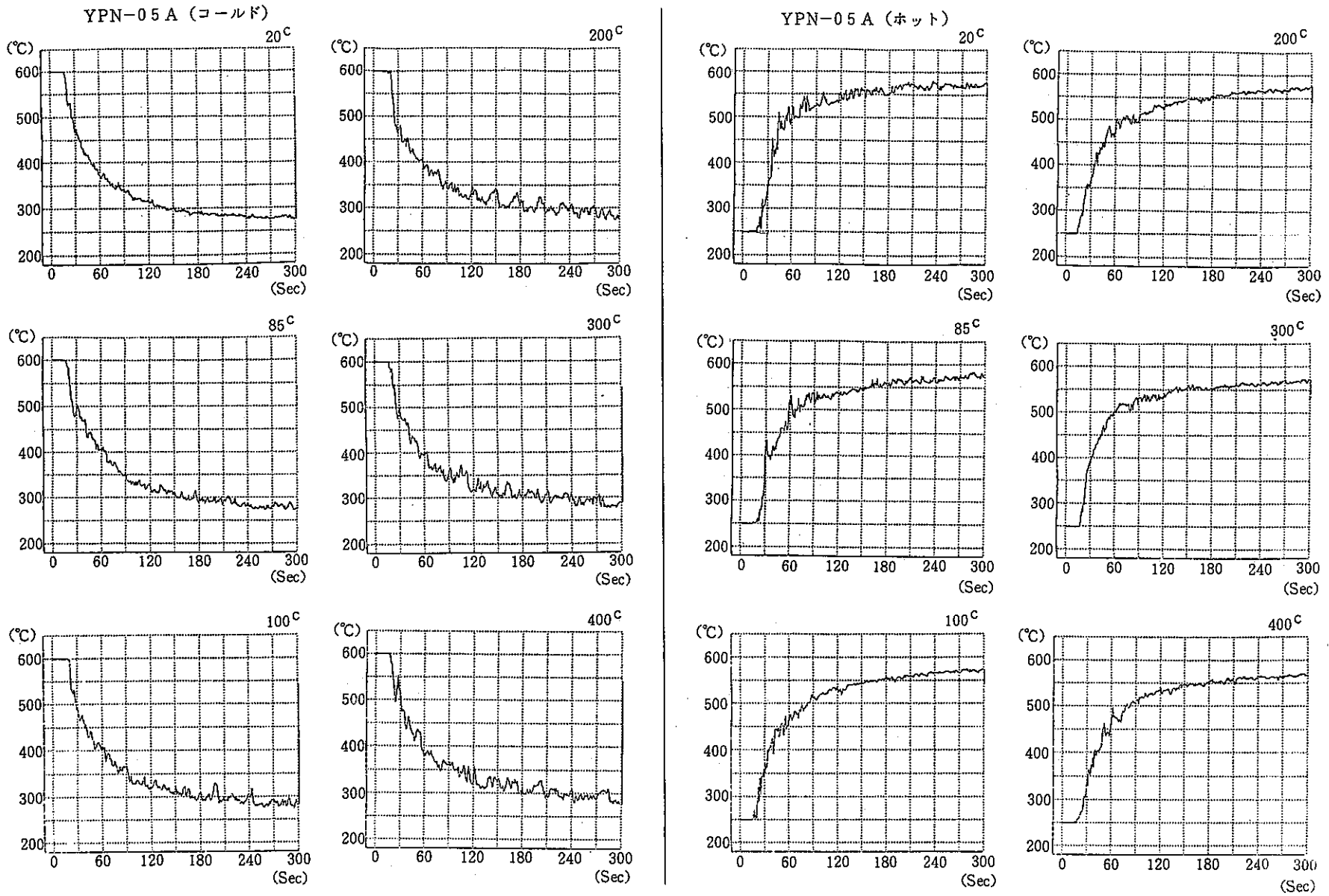


図 4.4 Yピース主流路温度各サイクル比較図

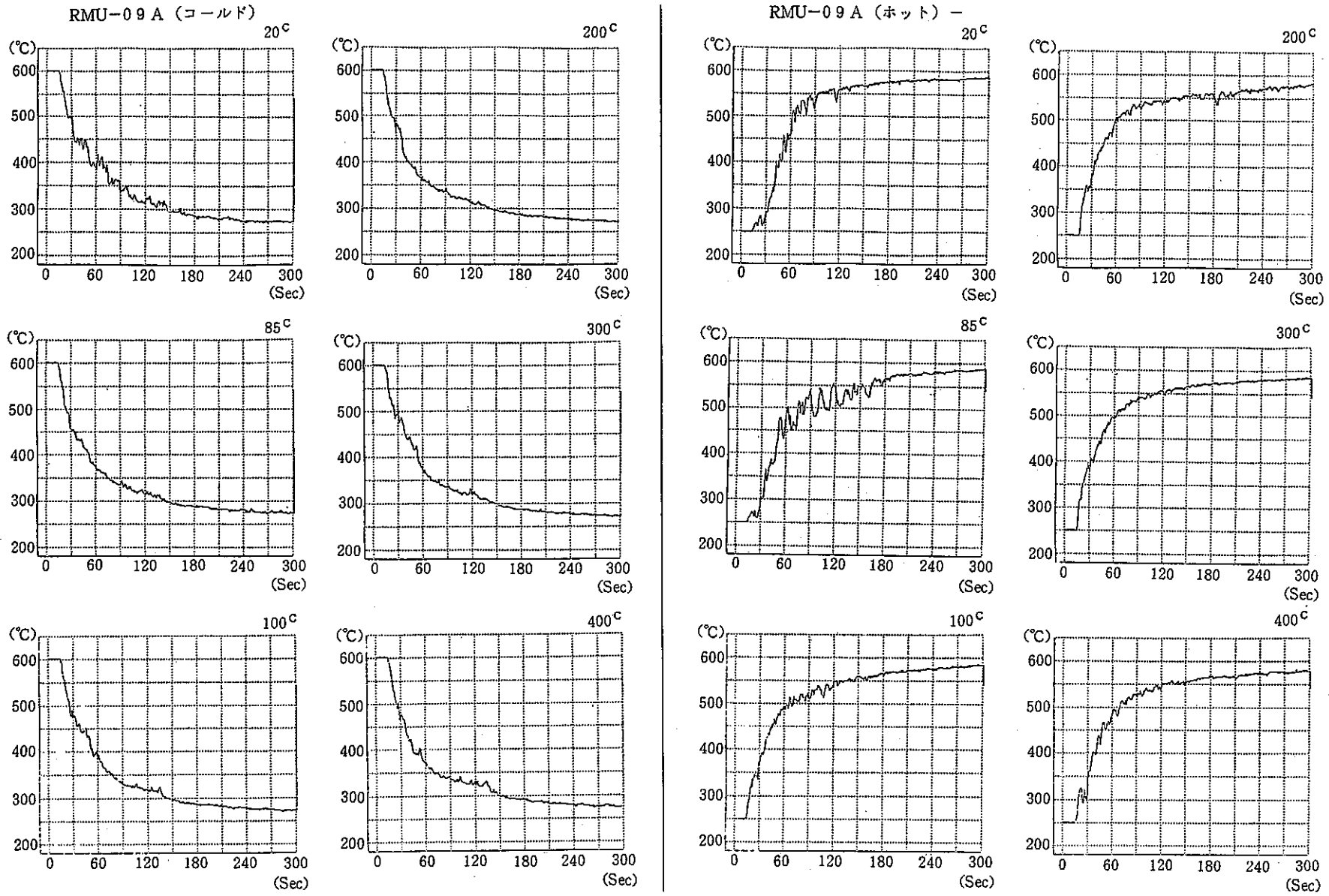


図 4.5 多孔板部上部表面温度各サイクル比較図

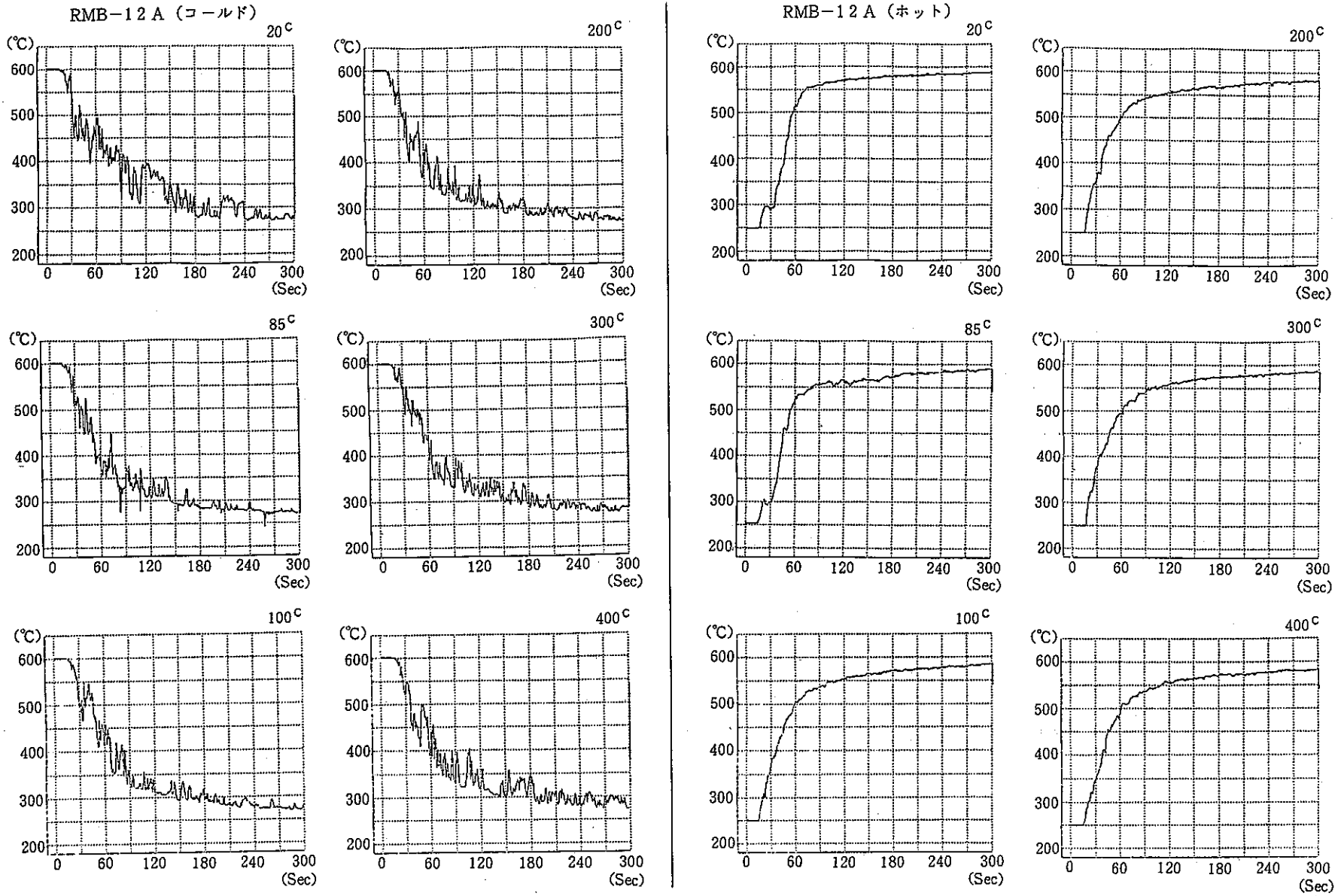


図 4.6 多孔板下部主流路温度各サイクル比較図

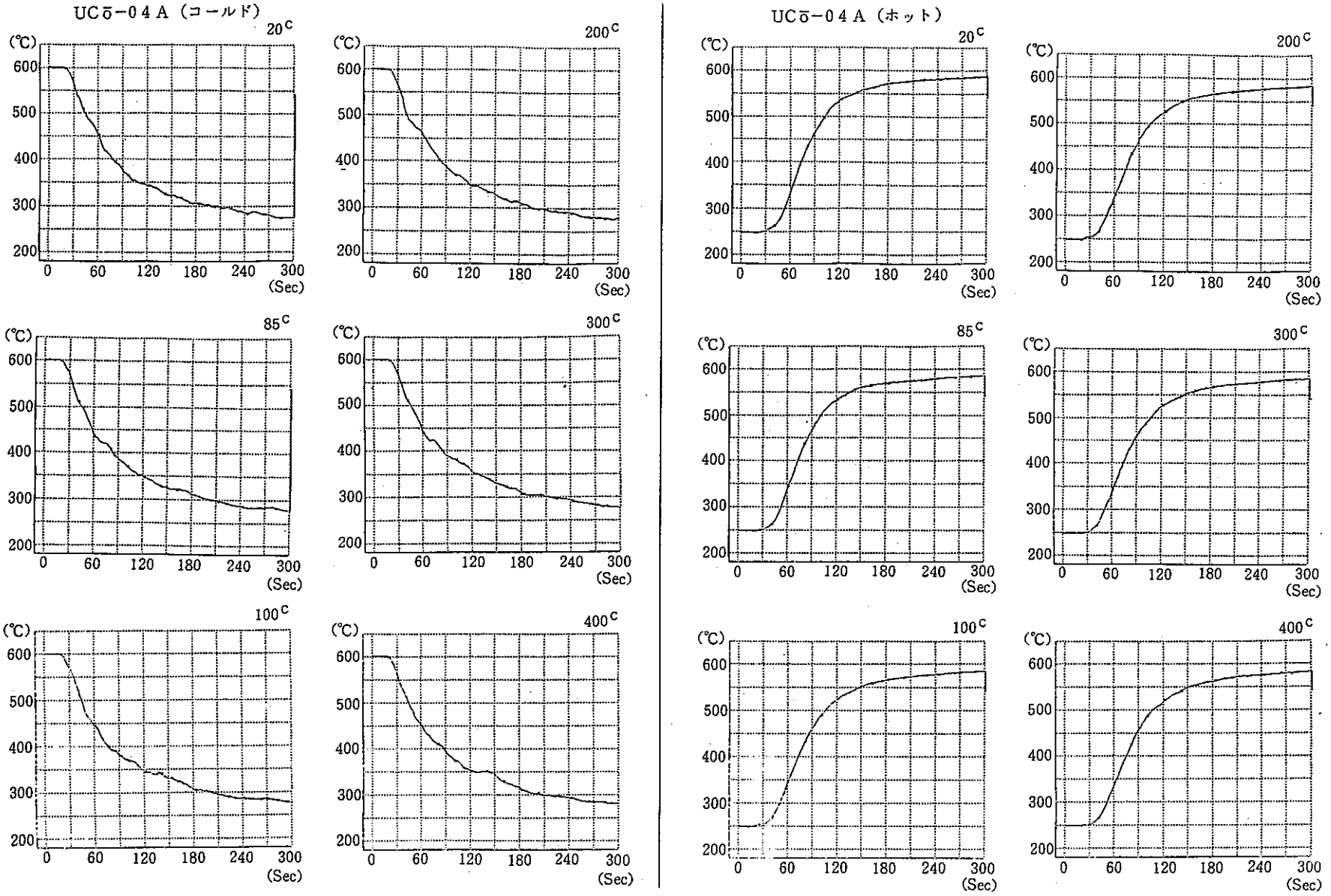


図 4.7 整流装置温度各サイクル比較図

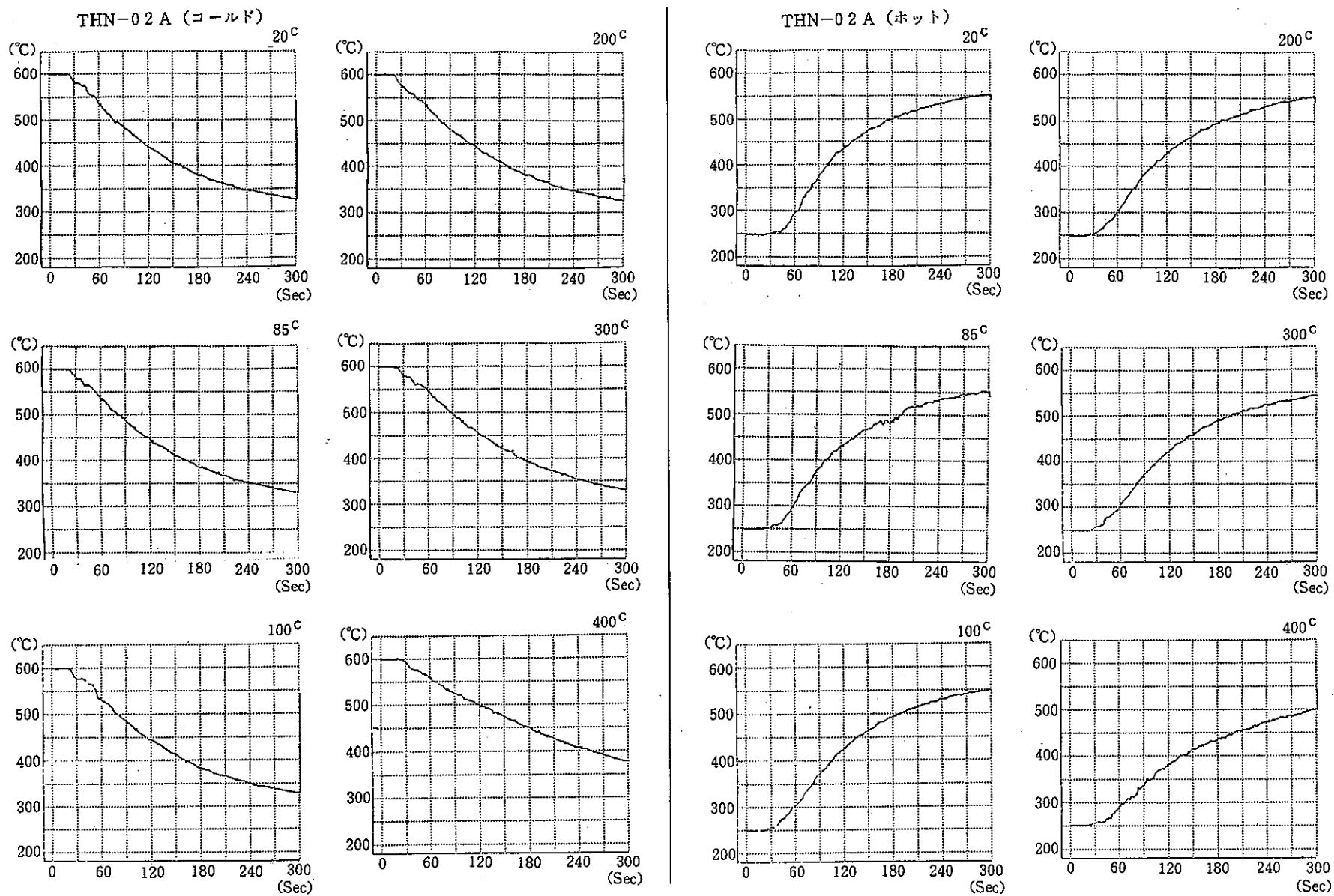


図 4. 8 熱抵抗対表面温度各サイクル比較図

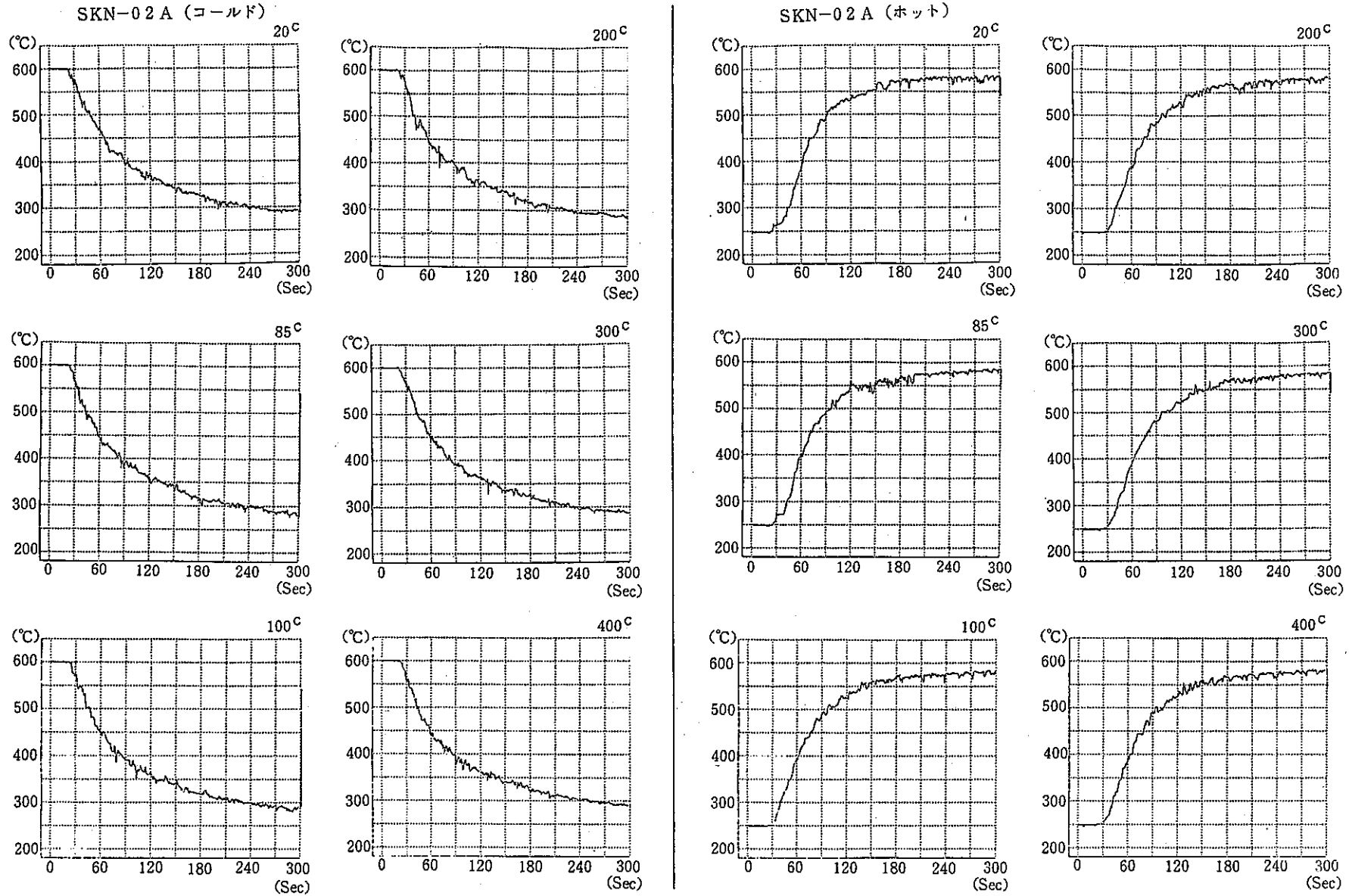


図 4.9 支持スカート主流路温度各サイクル比較図

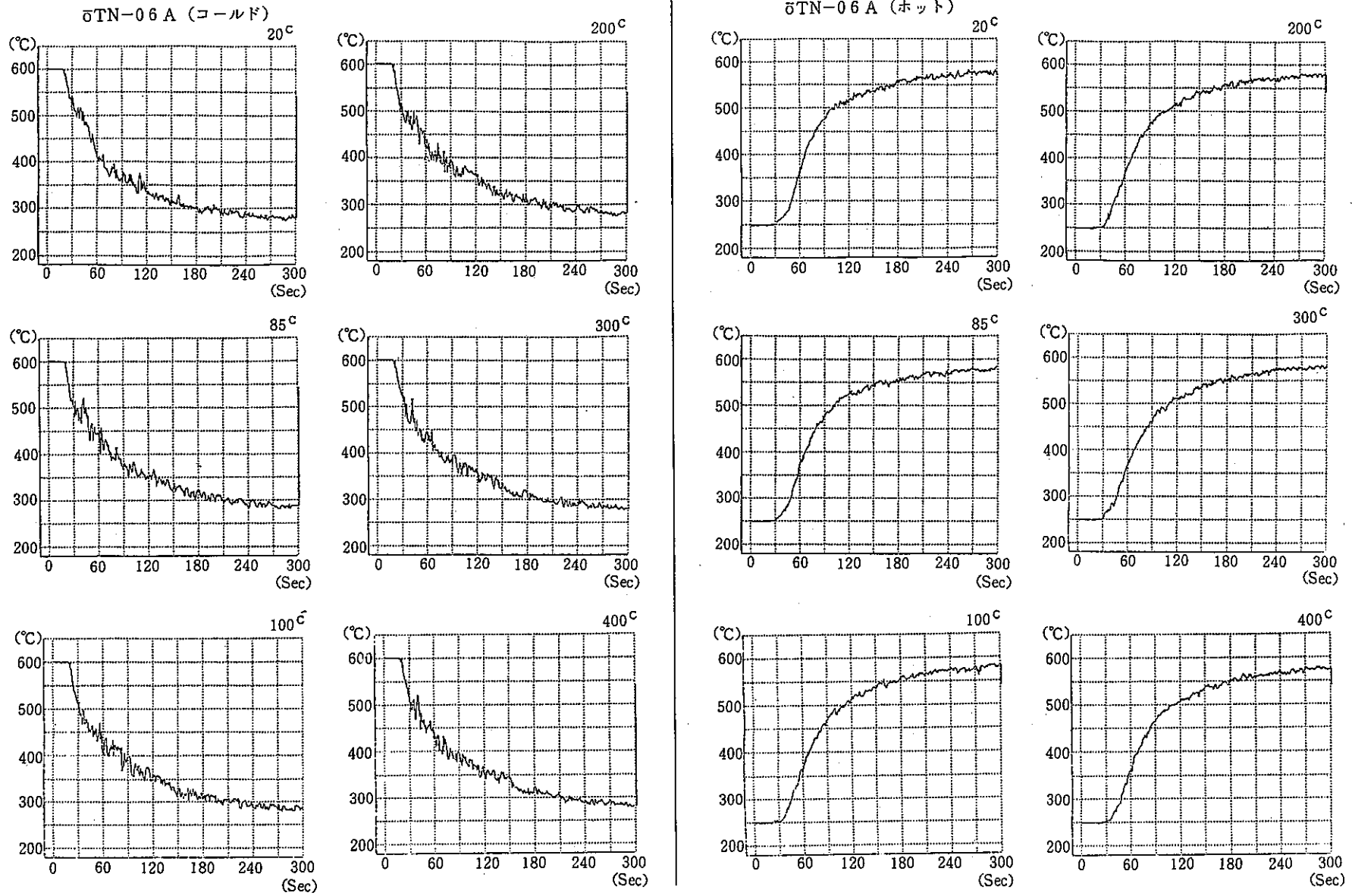


図 4.10 出口ノズル主流路温度各サイクル比較図

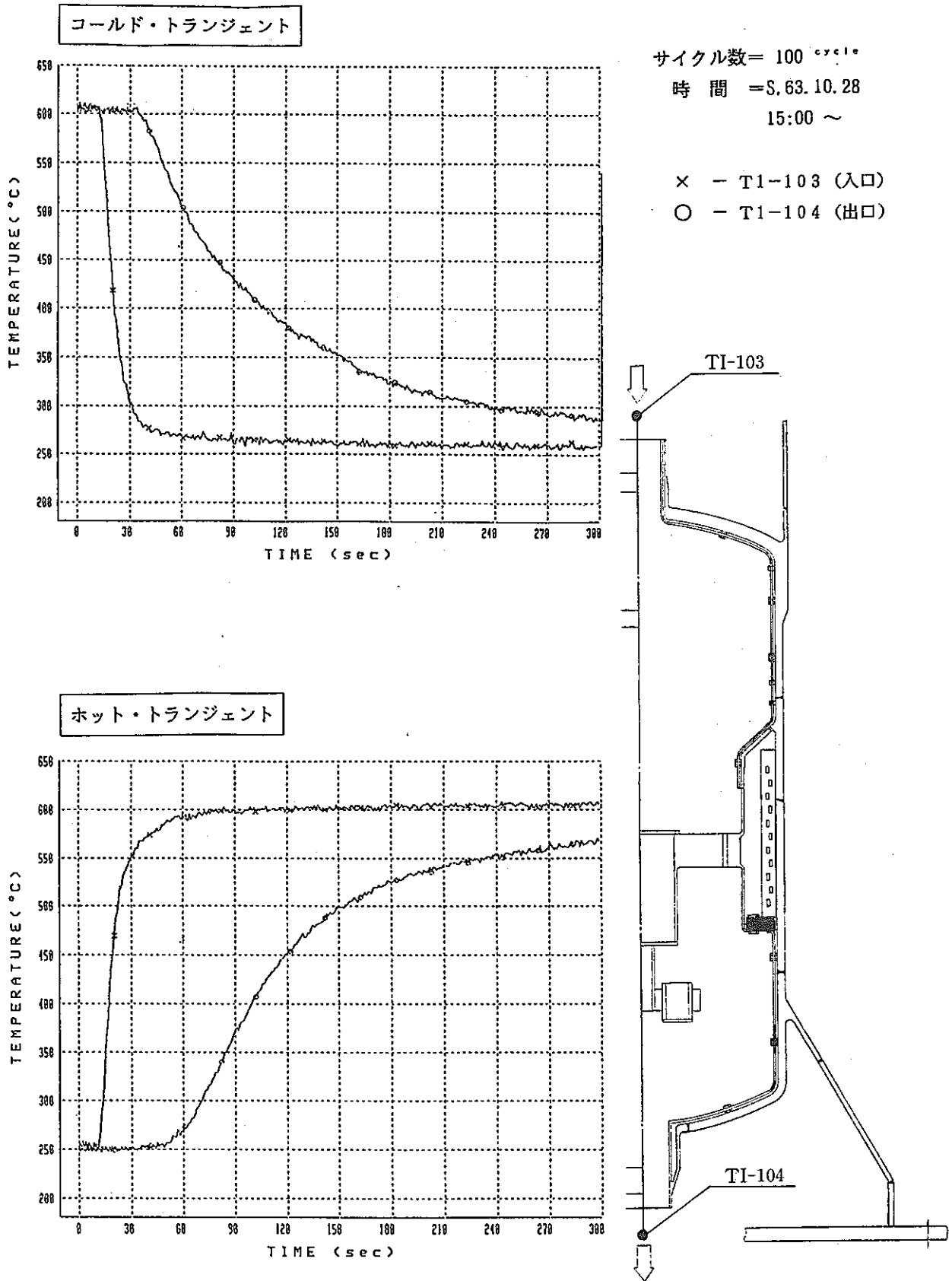
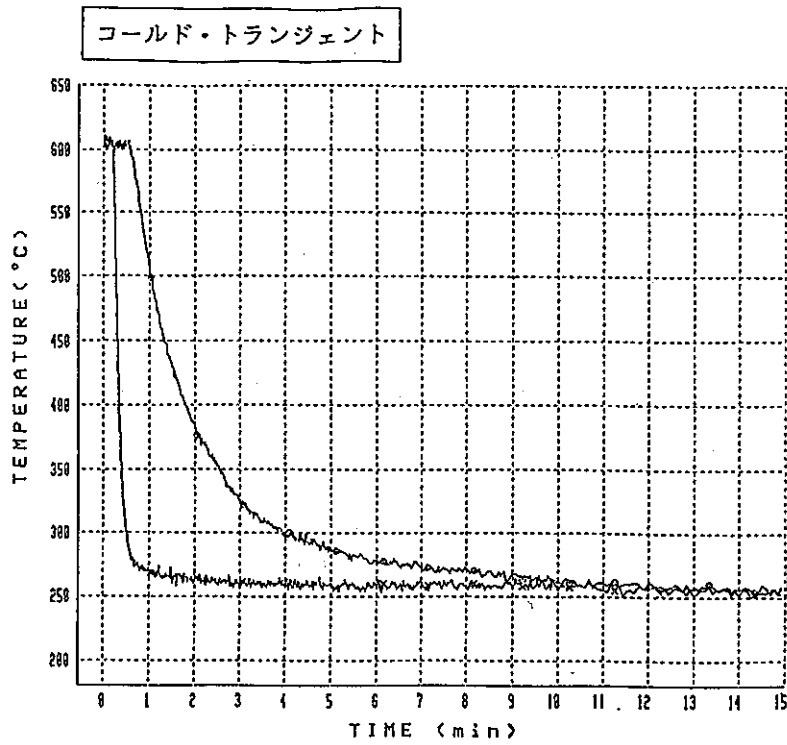


図 4.11 供試体出・入口温度(1) (300秒)



サイクル数 = 100 cycle

時間 = S.63.10.28

15:00 ~

× - T1-103 (入口)

○ - T1-104 (出口)

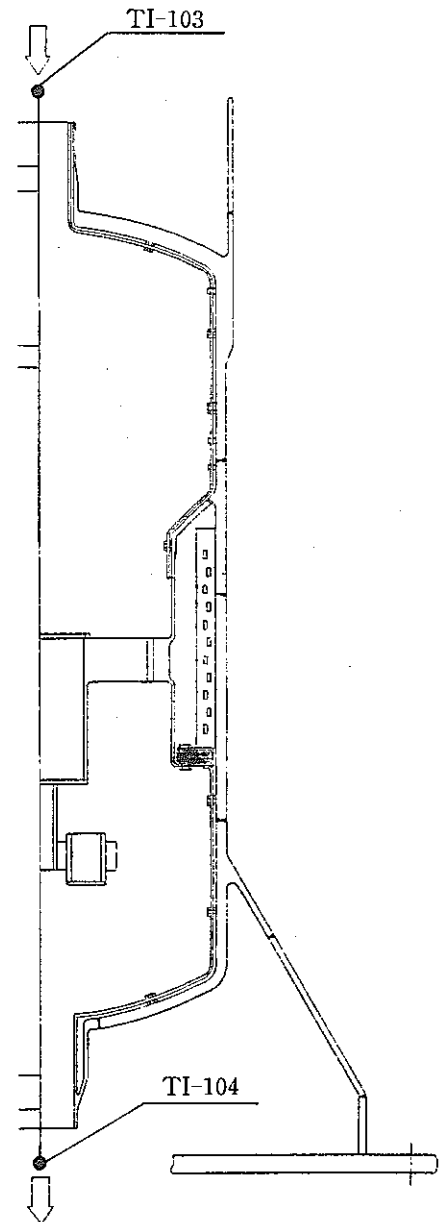
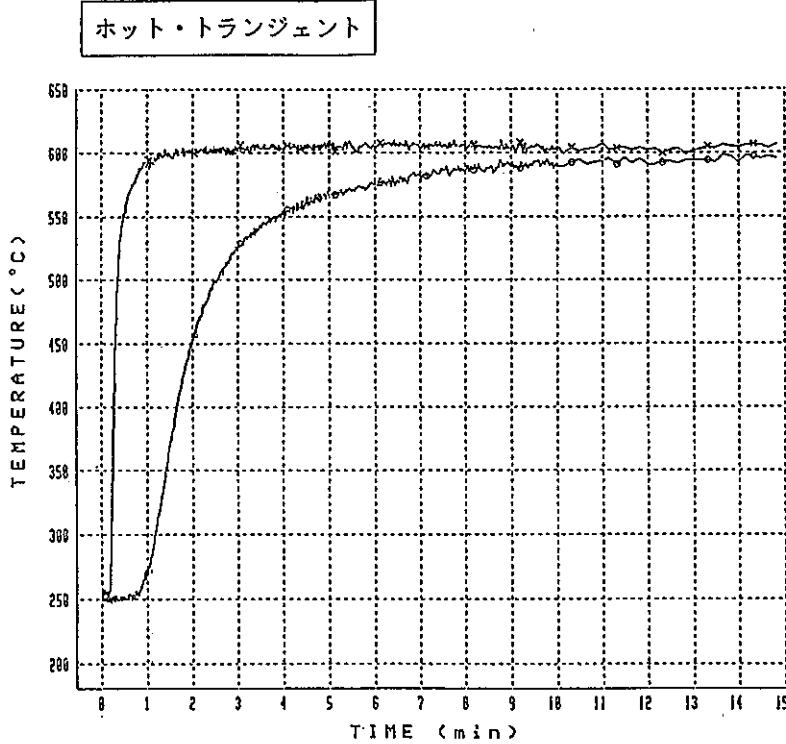
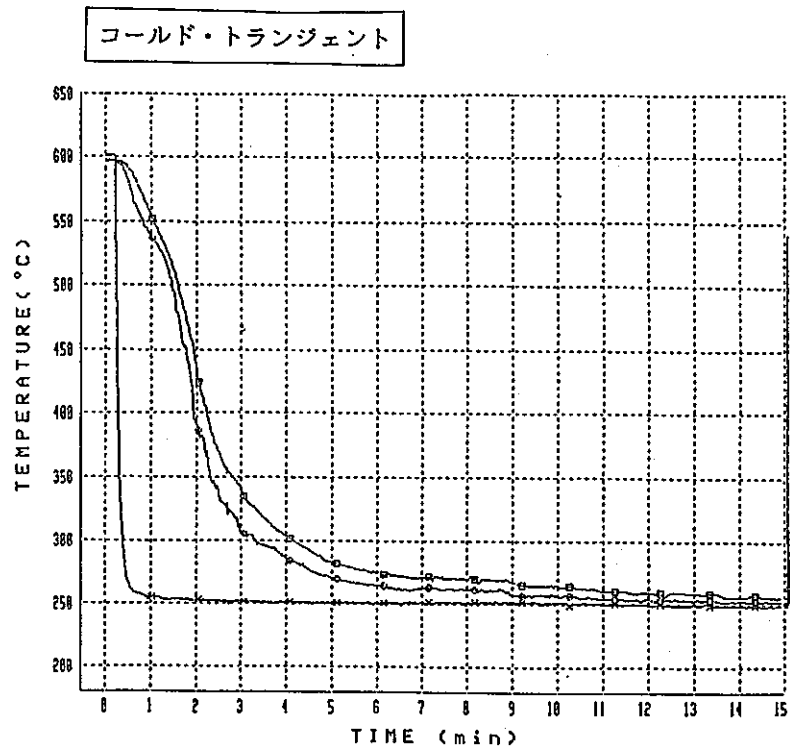


図 4.12 供試体出・入口温度(2) (15分)



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

- × - INN-01A
- - INI-01A
- - INO-01A

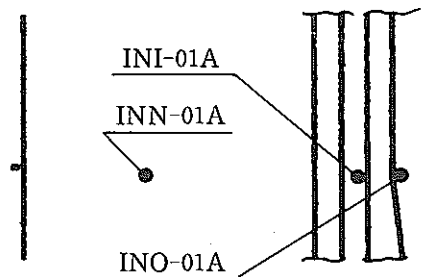
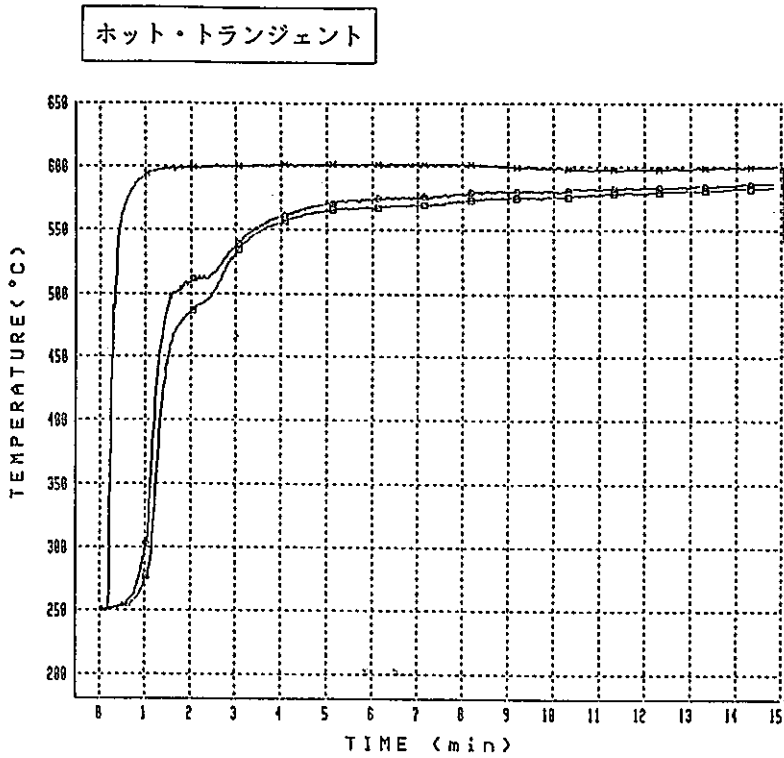
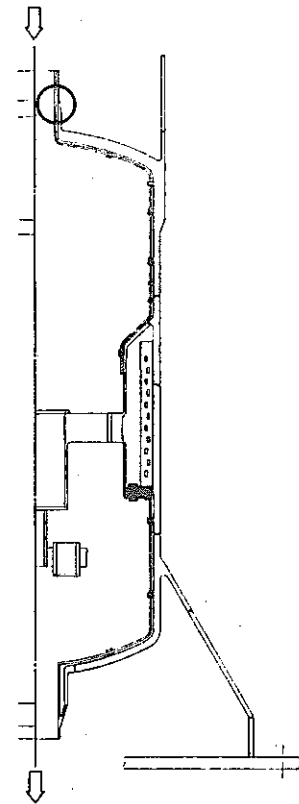
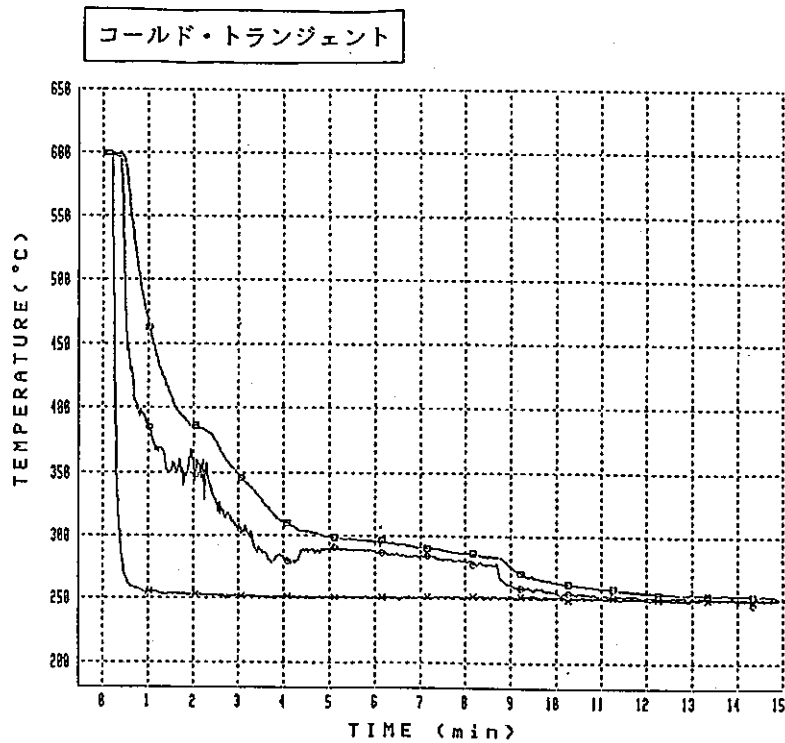


図 4.13 入口ノズル半径方向温度分布(1)



サイクル数 = 100
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

- × - INN-01A
- - INI-03A
- - IN5-03A

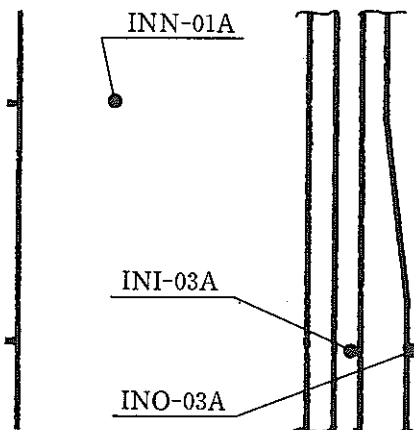
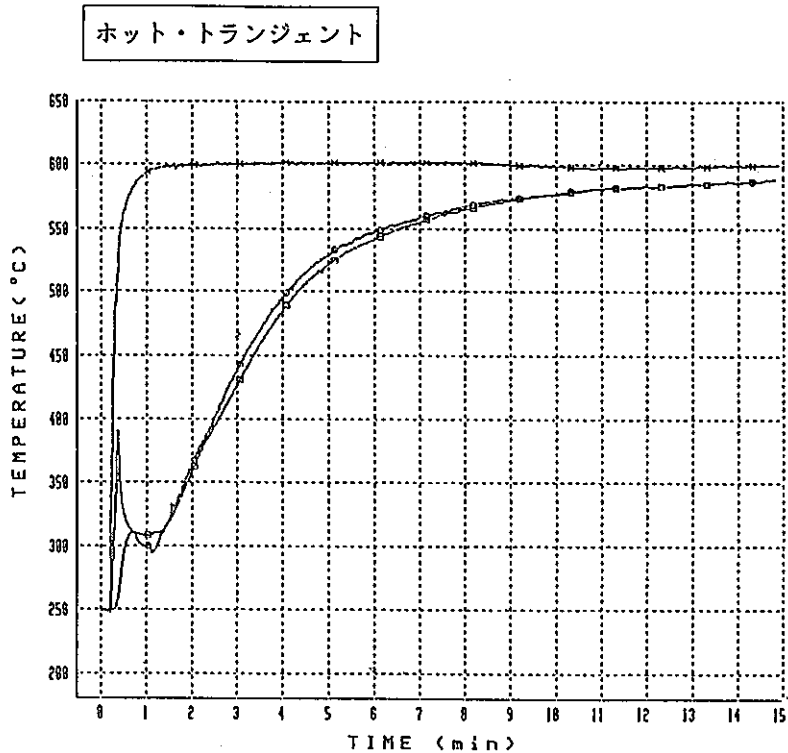
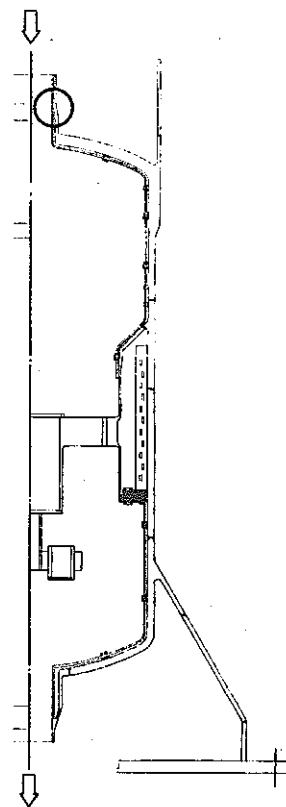
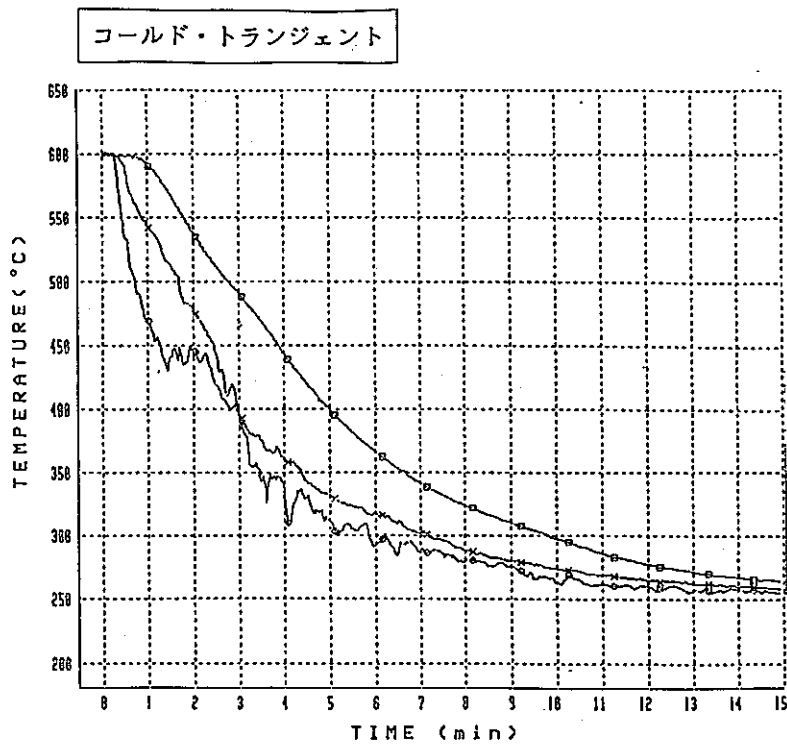


図 4.14 入口ノズル半径方向温度分布(2)



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

- × - INN-04A
- - INI-04A
- - INO-04A

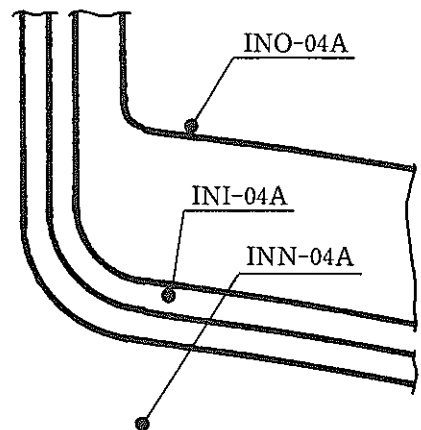
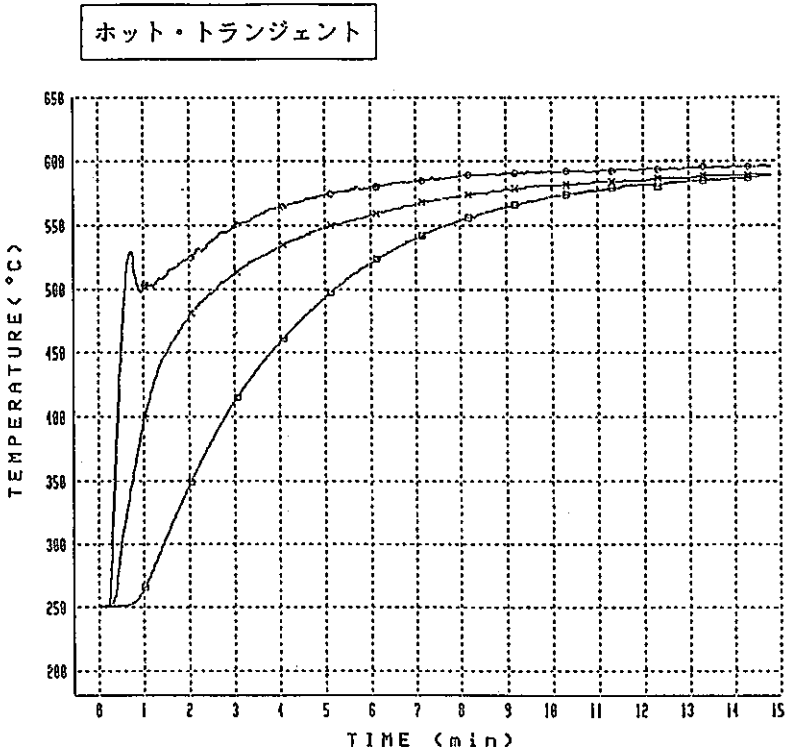
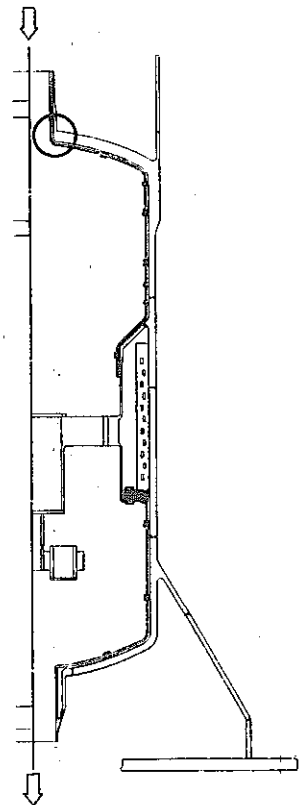
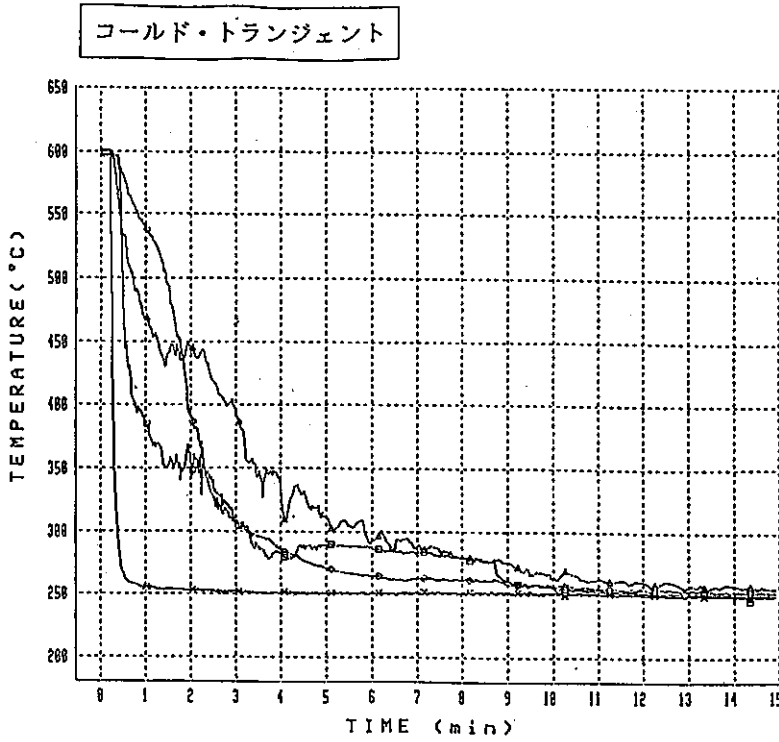


図 4.15 入口ノズル半径方向温度分布(3)



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

- × - INN-01A
- - INI-01A
- - INI-03A
- △ - INI-04A

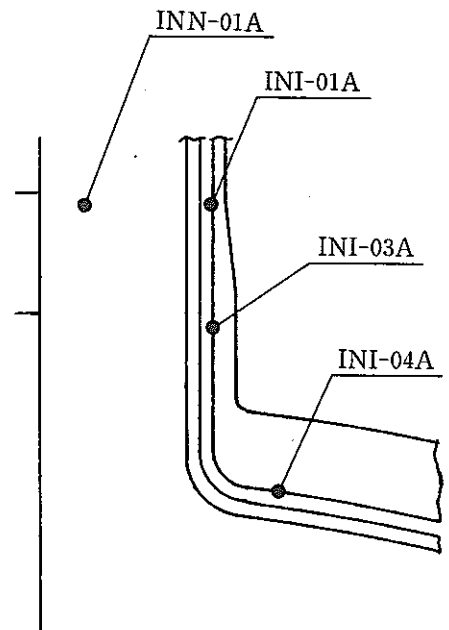
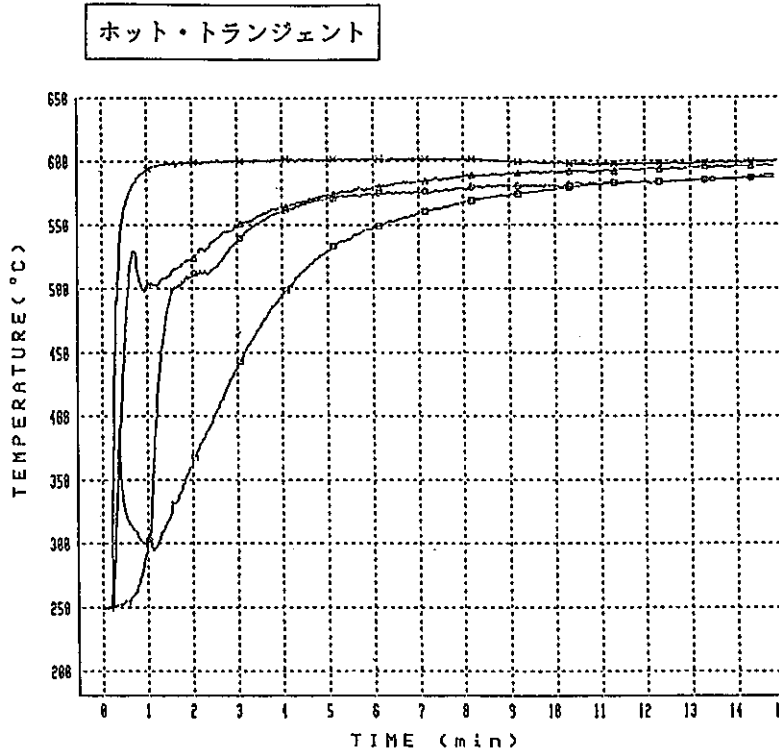
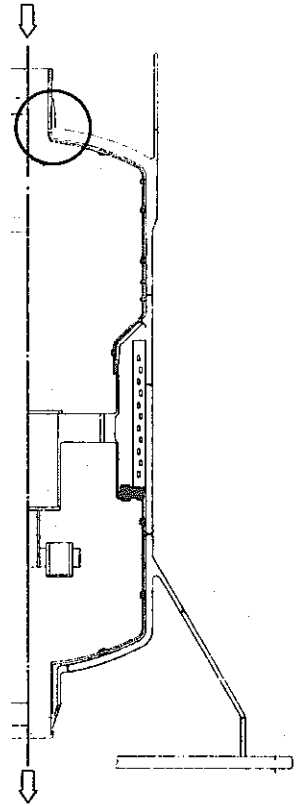
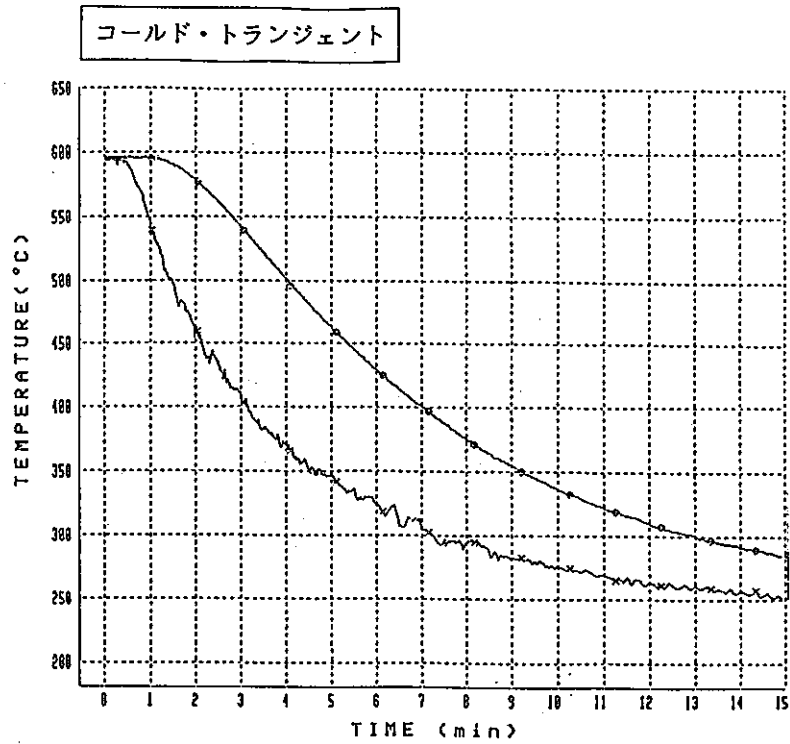


図 4.16 入口ノズル軸方向温度分布



サイクル数 = 100 cycle

時間 = S. 63. 10. 28

15:00 ~

× - UPI-06 A

○ - UP5-06 A

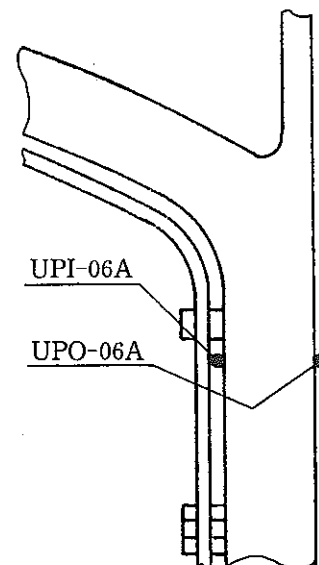
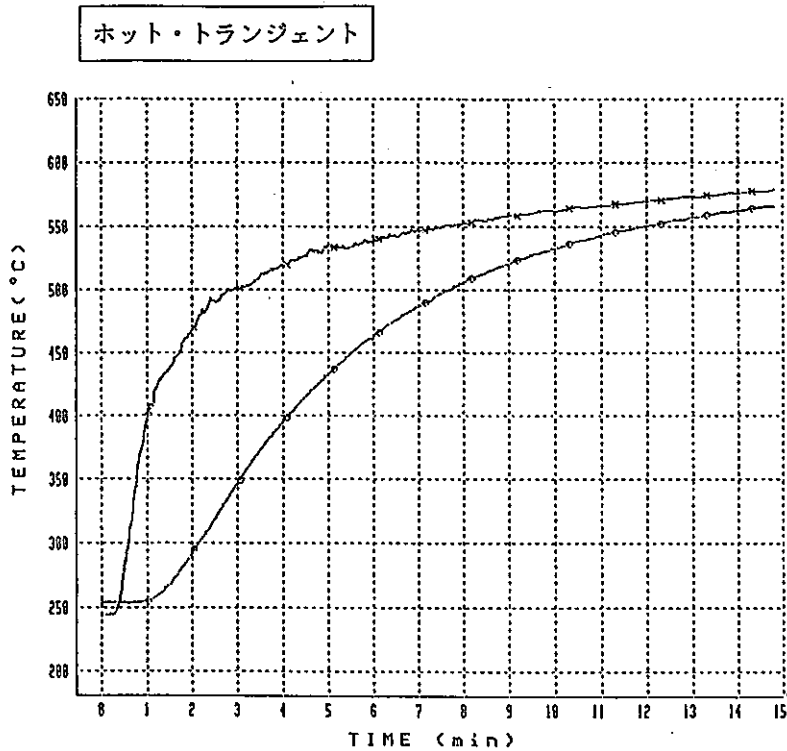
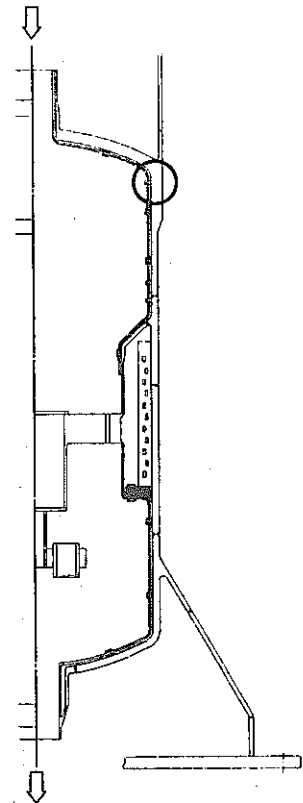
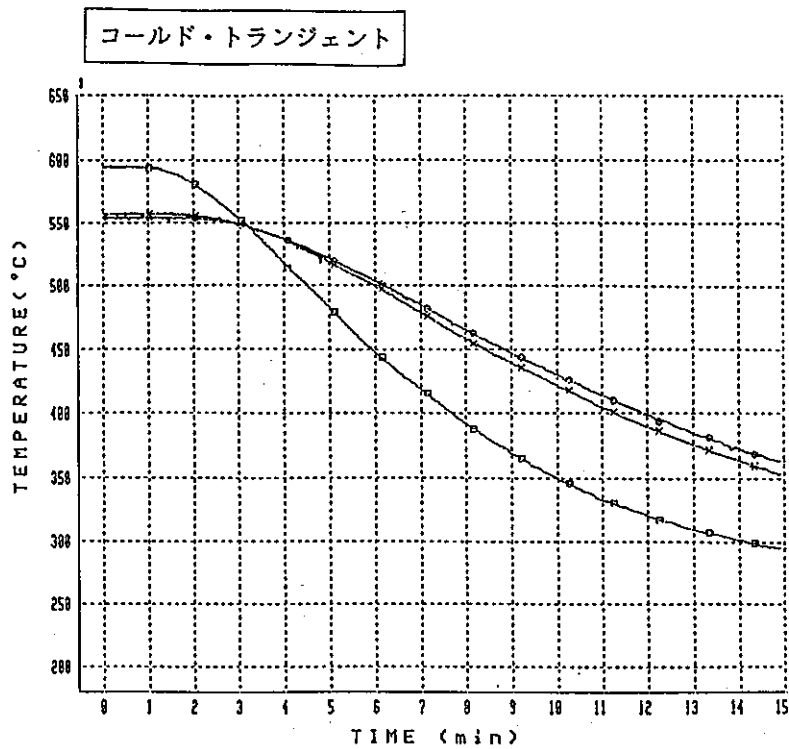


図 4.17 上部スカート半径方向温度分布(1)



サイクル数 = 100 回
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

- × - UPI-04A
- - UP0-04A
- - UP0-08A

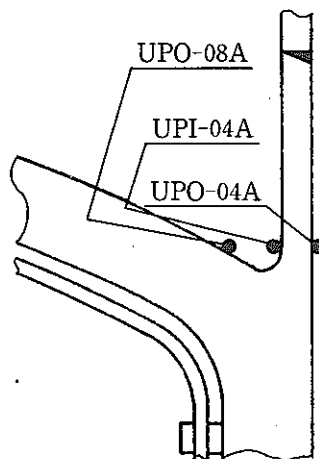
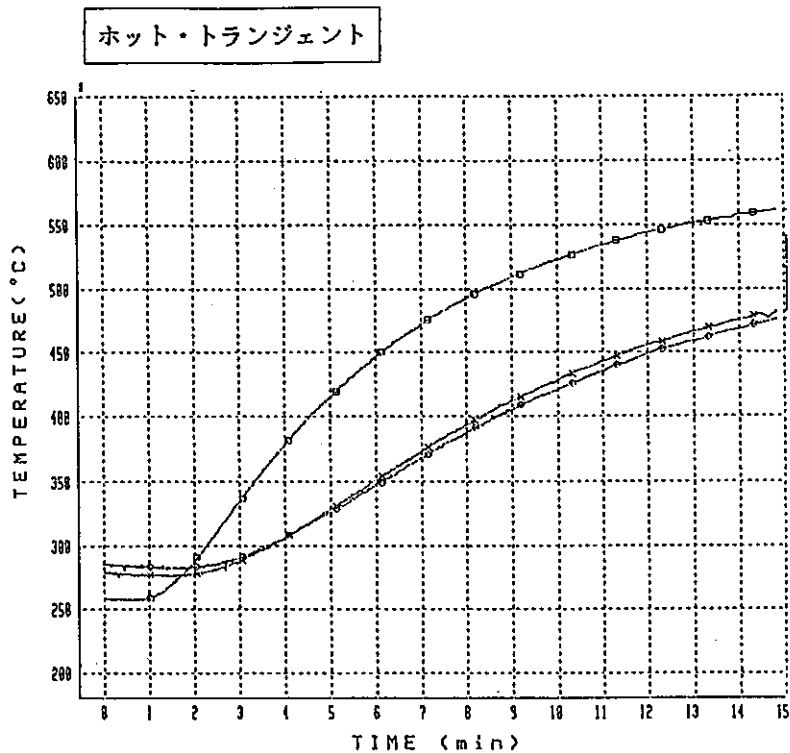
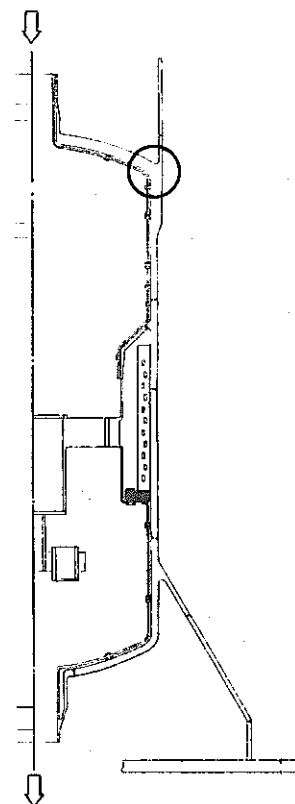
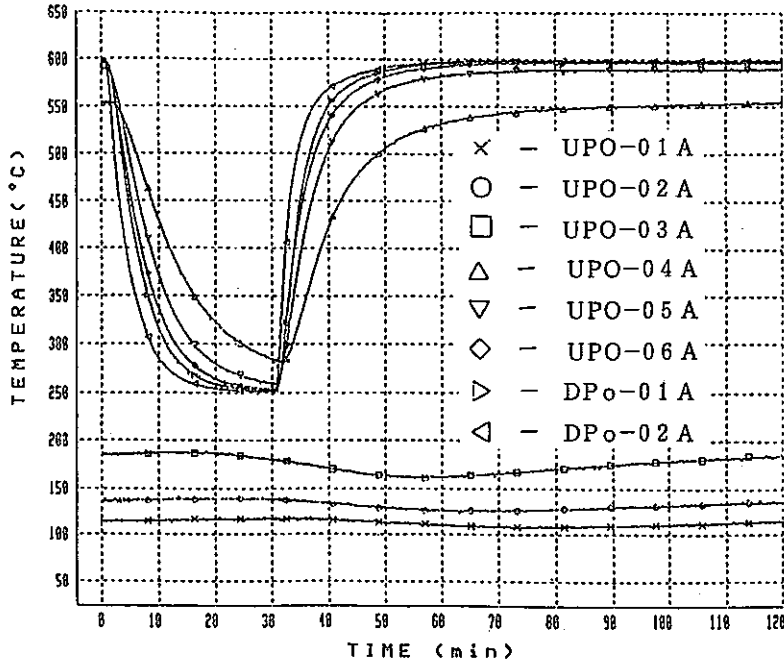


図 4.18 上部スカート半径方向温度分布(2)



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S.63.10.28
 15:00 ~

図 4.19 上部スカート大気部軸方向温度分布

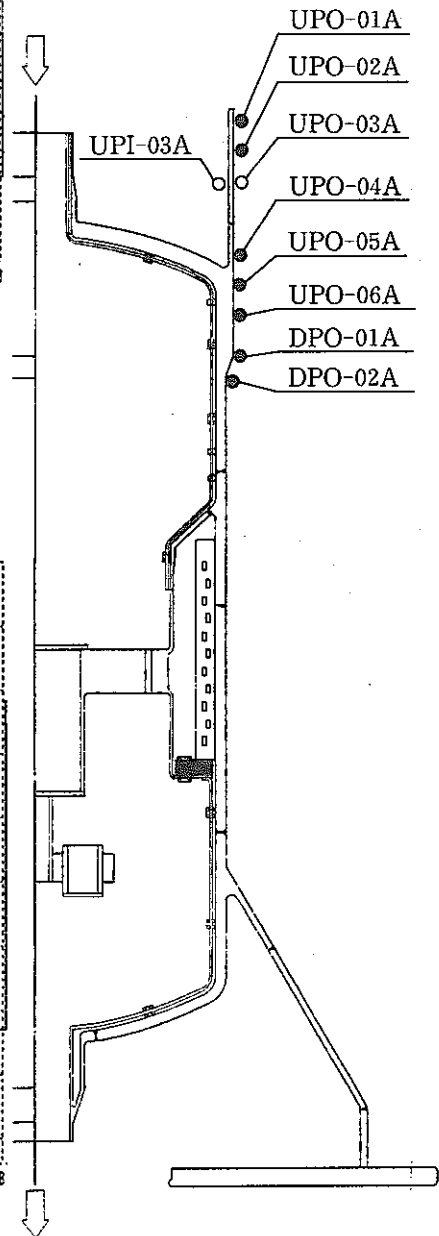
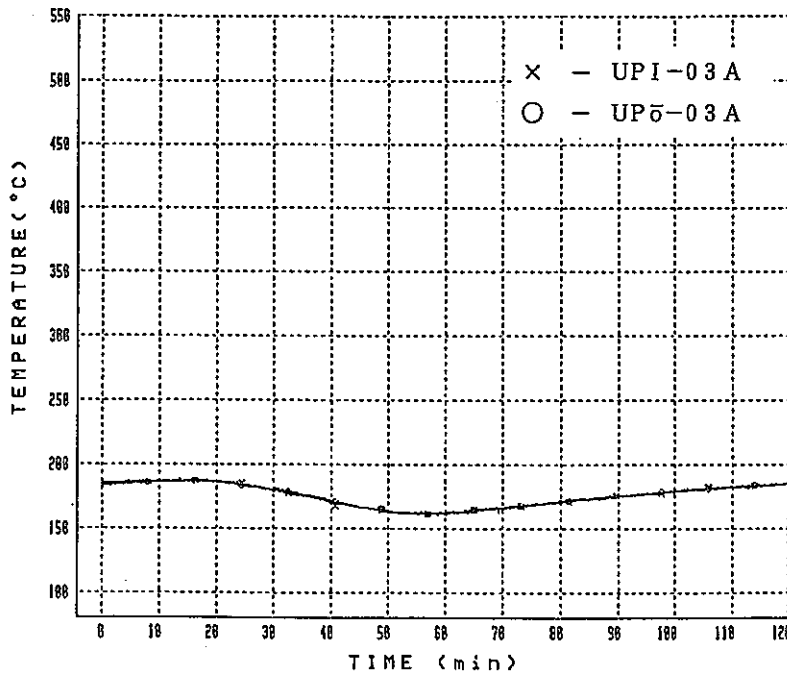
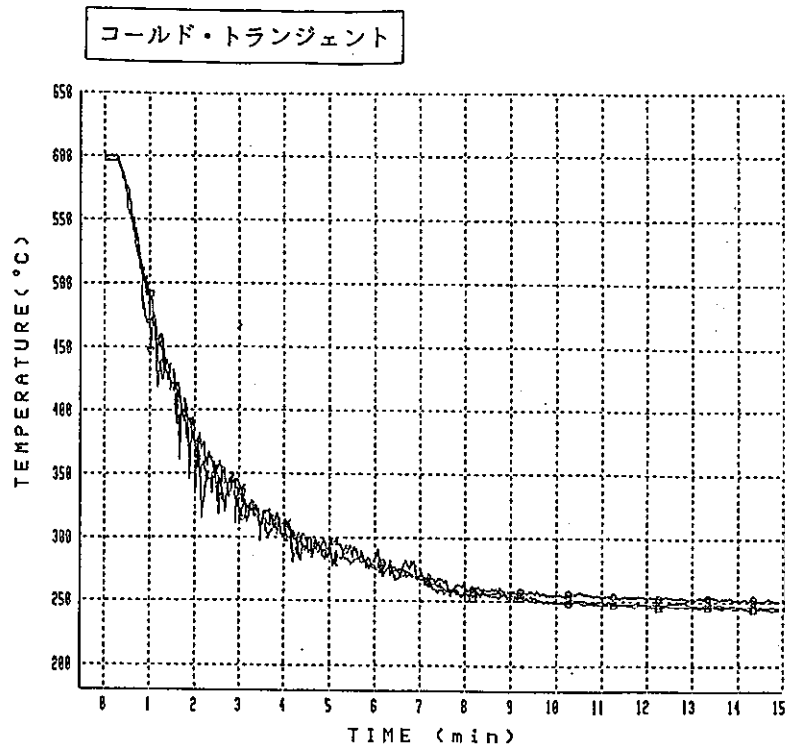


図 4.20 上部スカート大気部半径方向温度分布(3)



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

- × - DPN-01 A
- - DPN-01 B
- - DPN-01 C

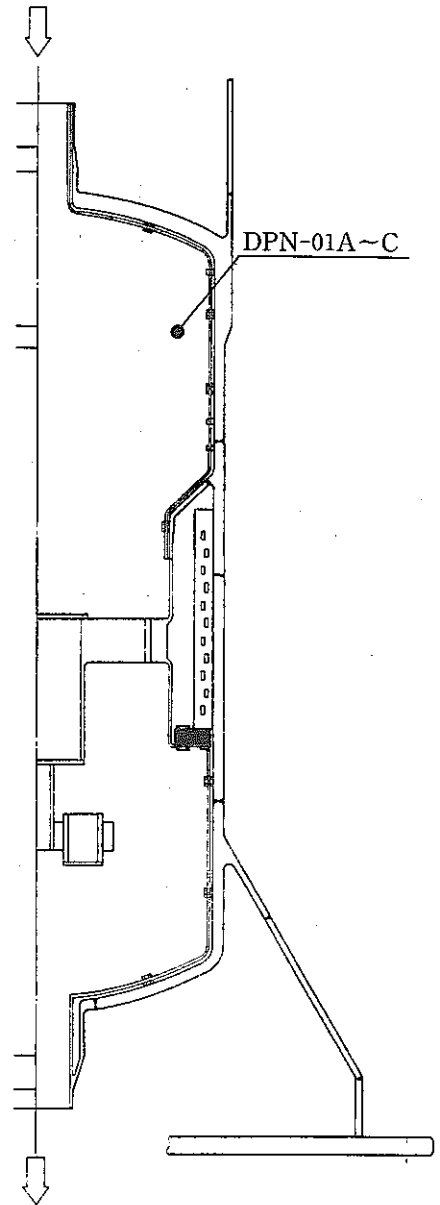
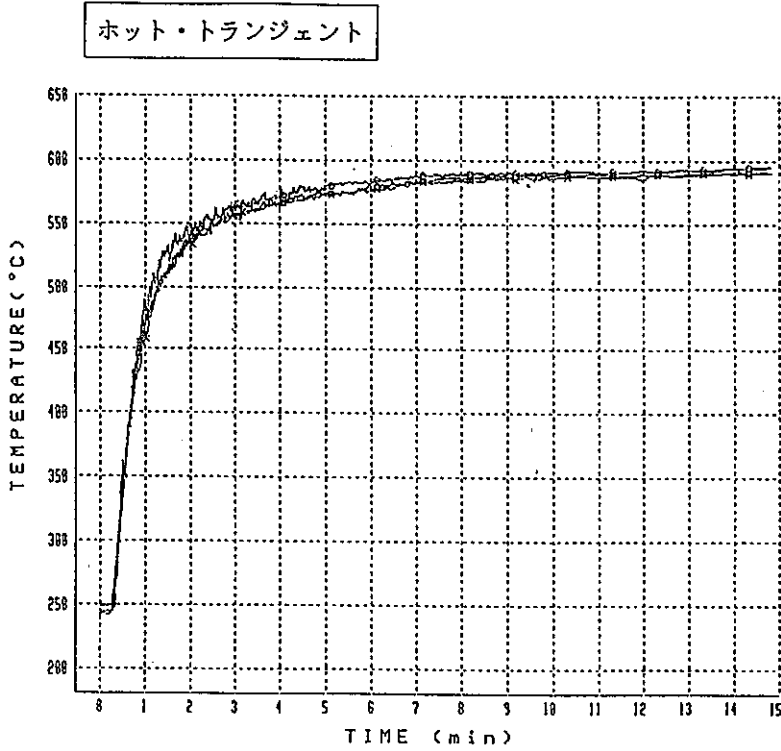
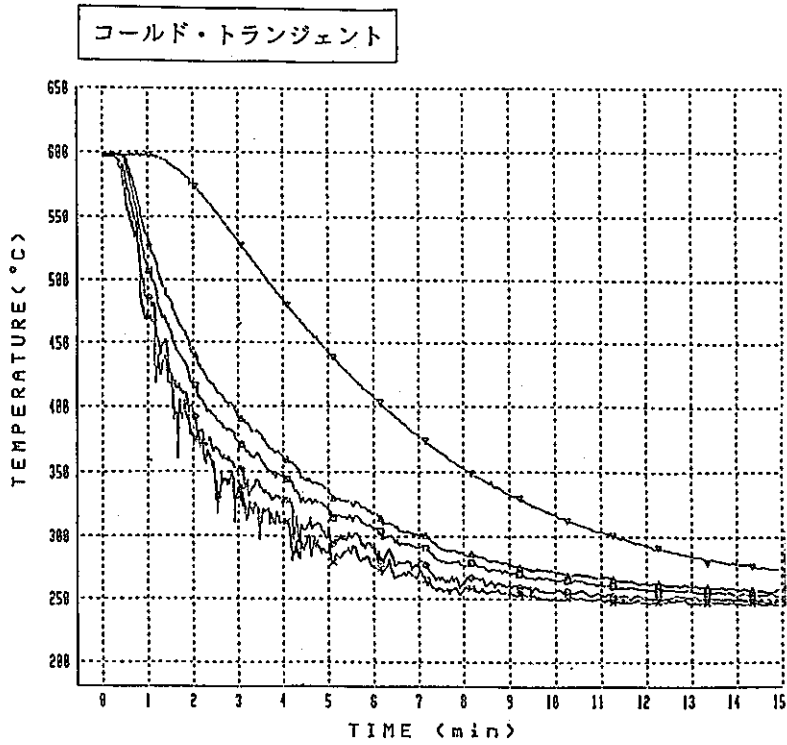


図 4.21 上部胴周方向温度分布



サイクル数 = 100 cycle

時間 = S. 63. 10. 28

15:00 ~

- × - DPN-01A
- - DPS-01A
- - DPM-01A
- △ - DPI-01A
- ▽ - DPO-01A

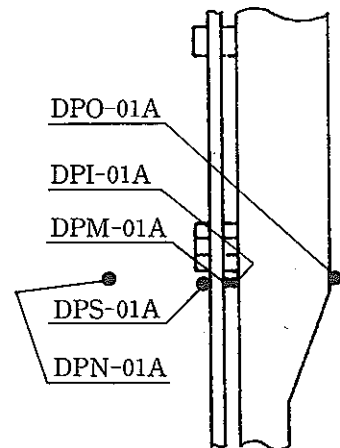
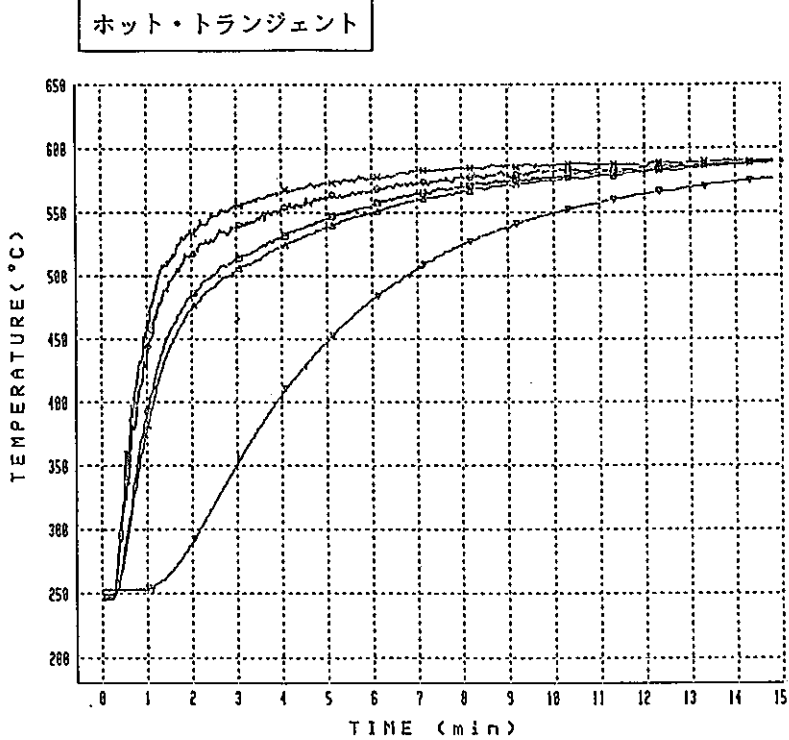
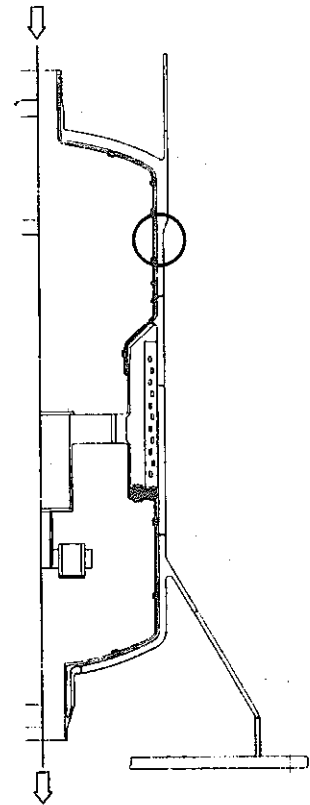
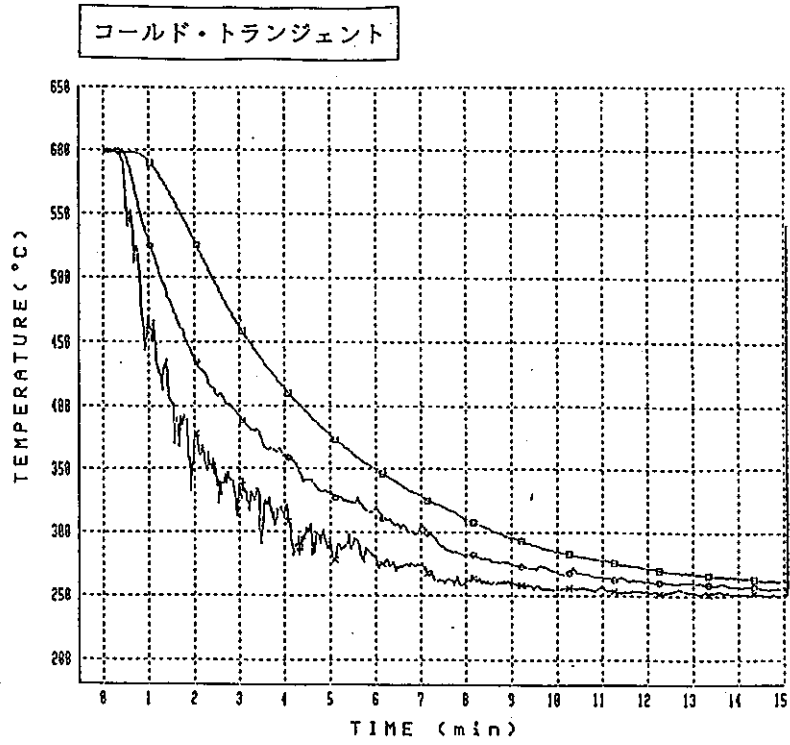


図 4.22 上部胴半径方向温度分布(1)



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S.63.10.28
 15:00 ~

- × - DPN-02A
- - DPI-02A
- - DPO-02A

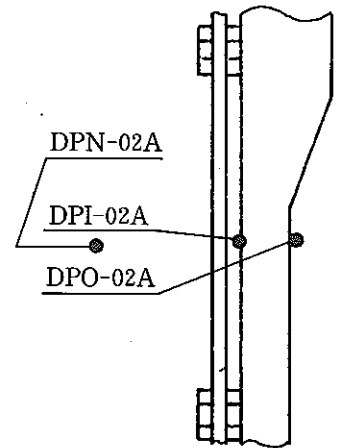
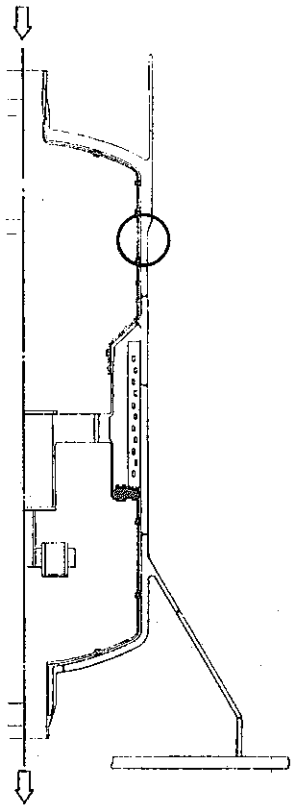
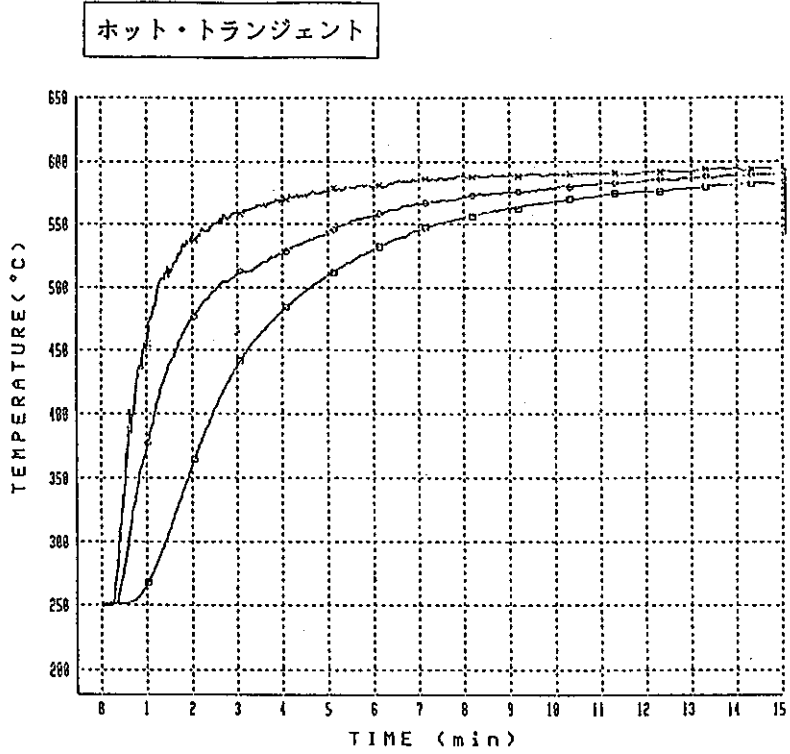
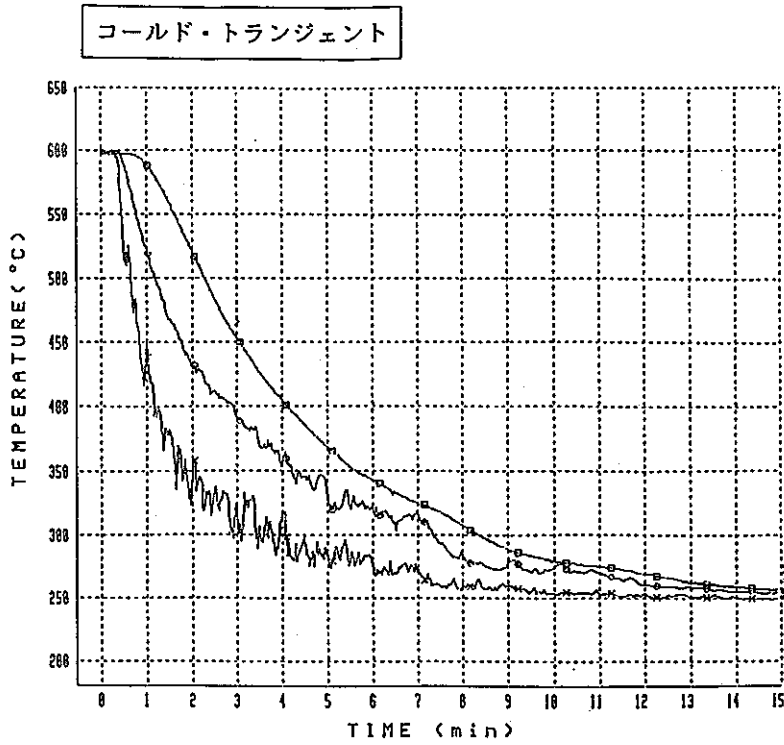


図 4.23 上部胴半径方向温度分布(2)



サイクル数 = 100 cycle

時間 = S. 63. 10. 28

15:00 ~

- × - YPN-01A
- - YPI-01A
- - YPδ-01A

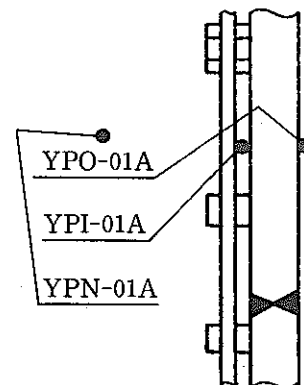
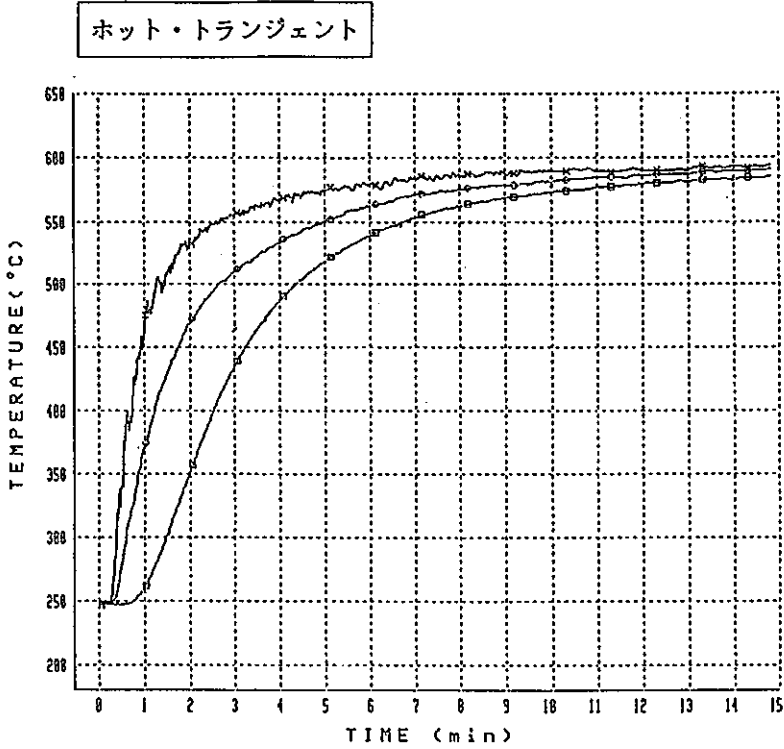
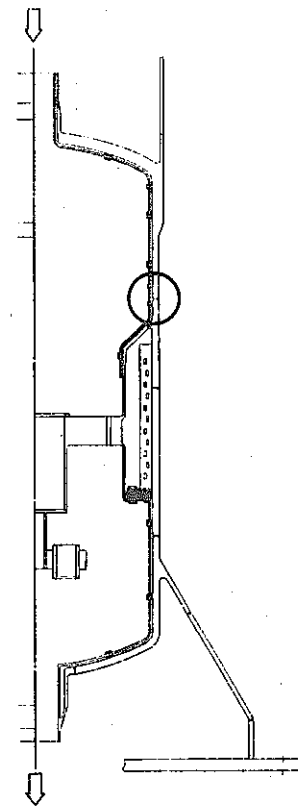
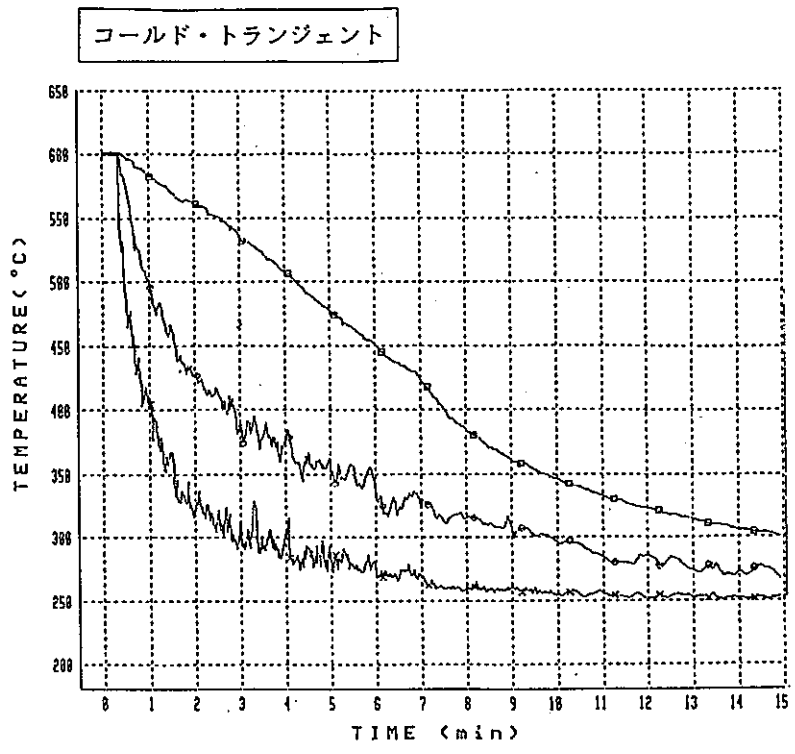


図 4.24 上部胴半径方向温度分布(3)



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

- × - YPN-05A
- - YPI-05A
- - YPO-05A

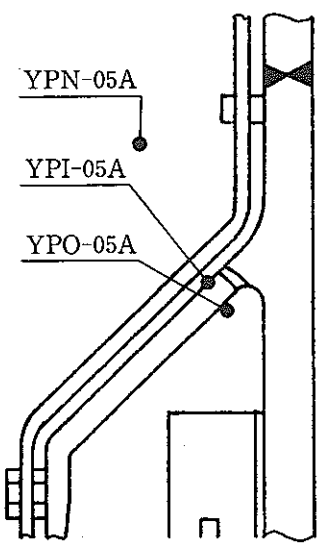
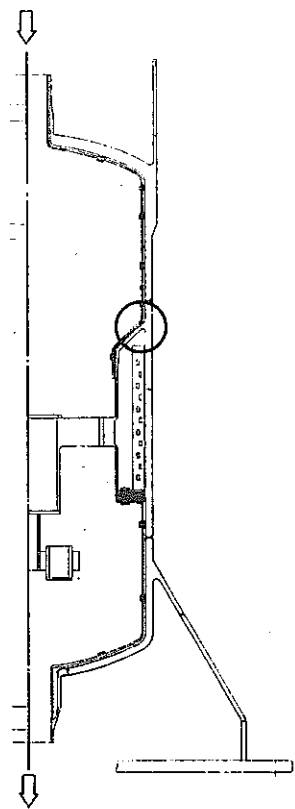
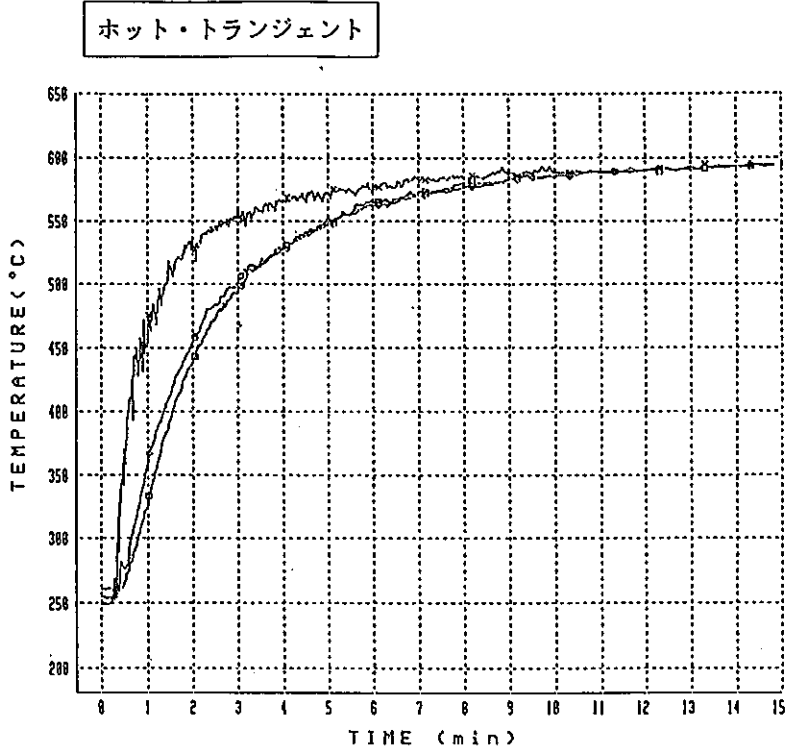
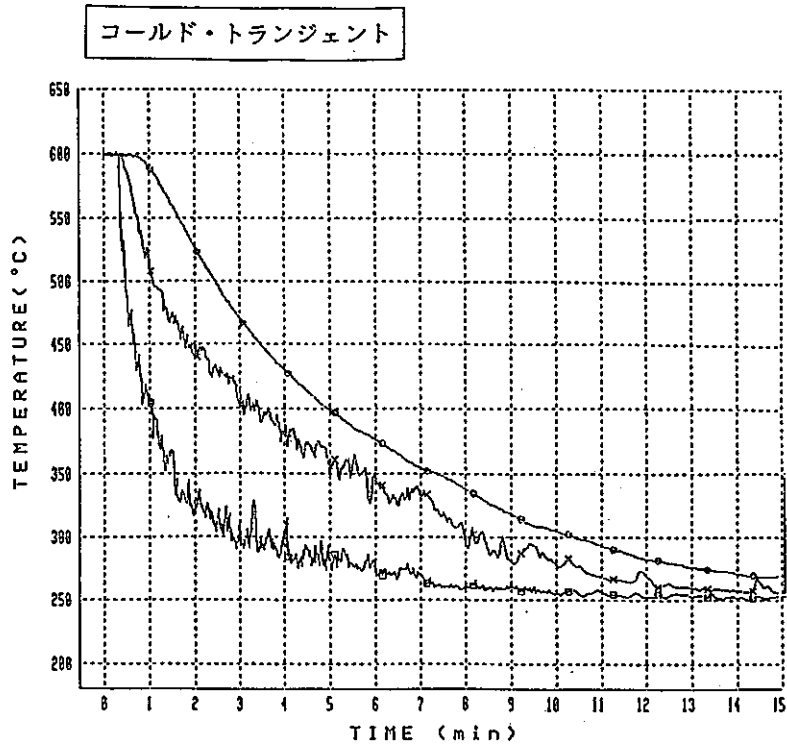


図 4.25 Yピース半径方向温度分布(1)



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

- × - YPI-02A
- - YPO-02A
- - YPN-05A

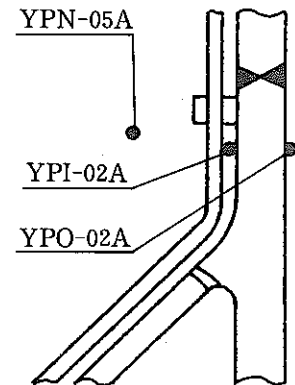
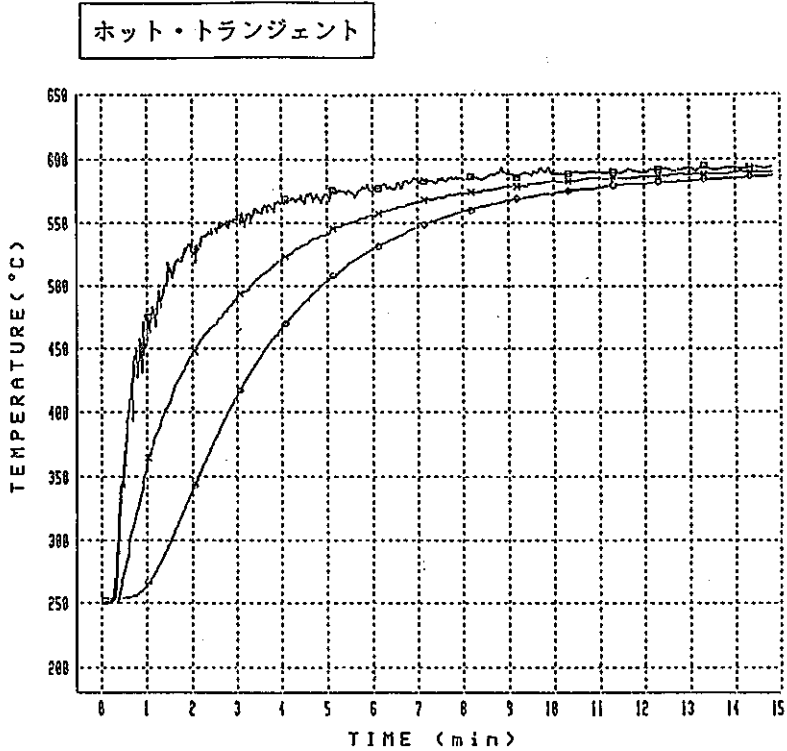
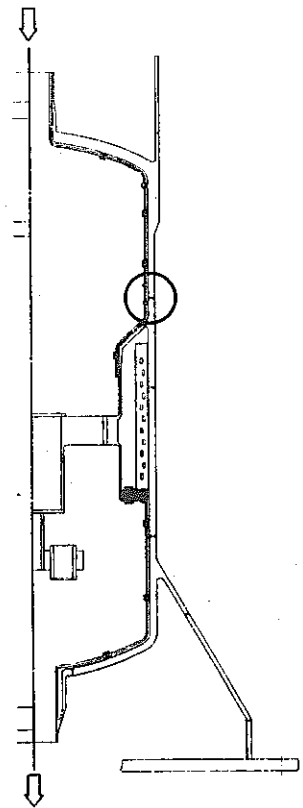
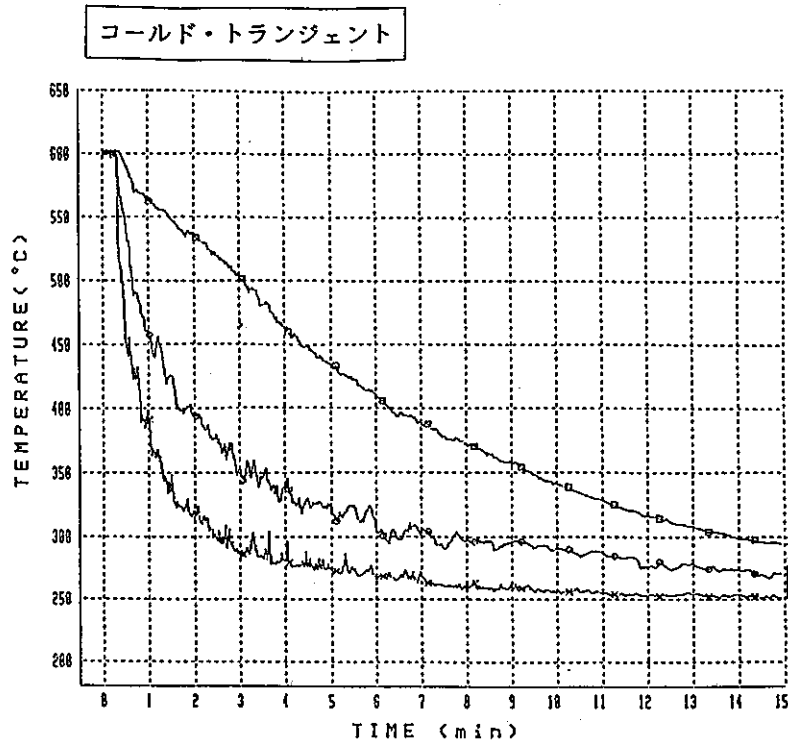


図 4.26 Yピース半径方向温度分布(2)



サイクル数 = 100 回
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

- × - YPN-06A
- - YPI-06A
- - YPO-06A

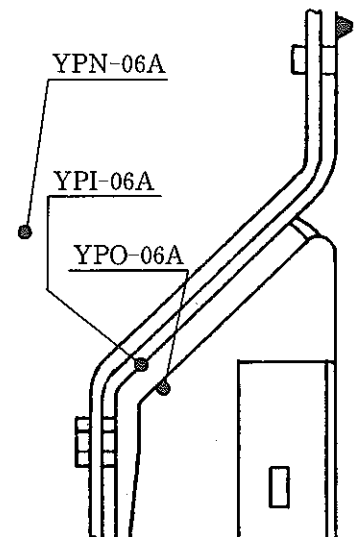
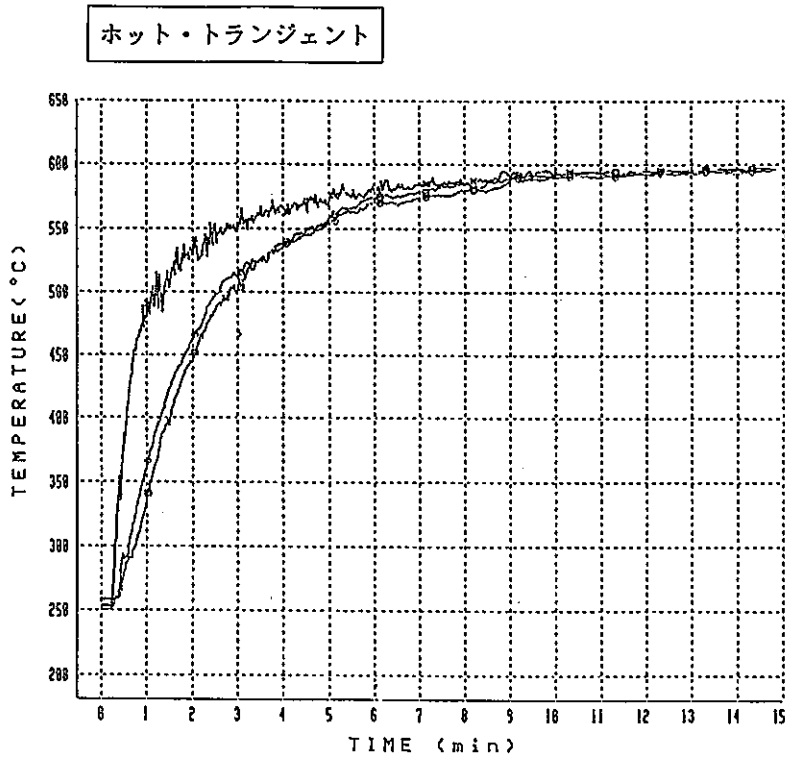
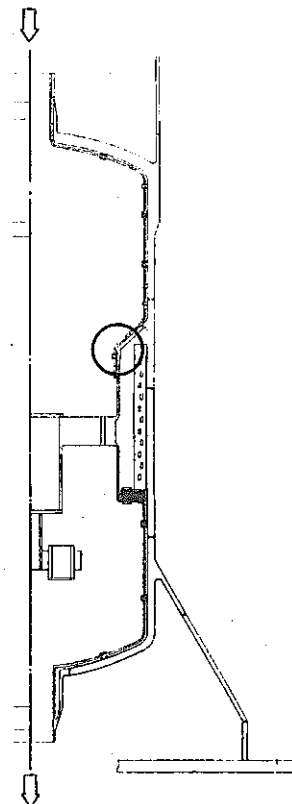
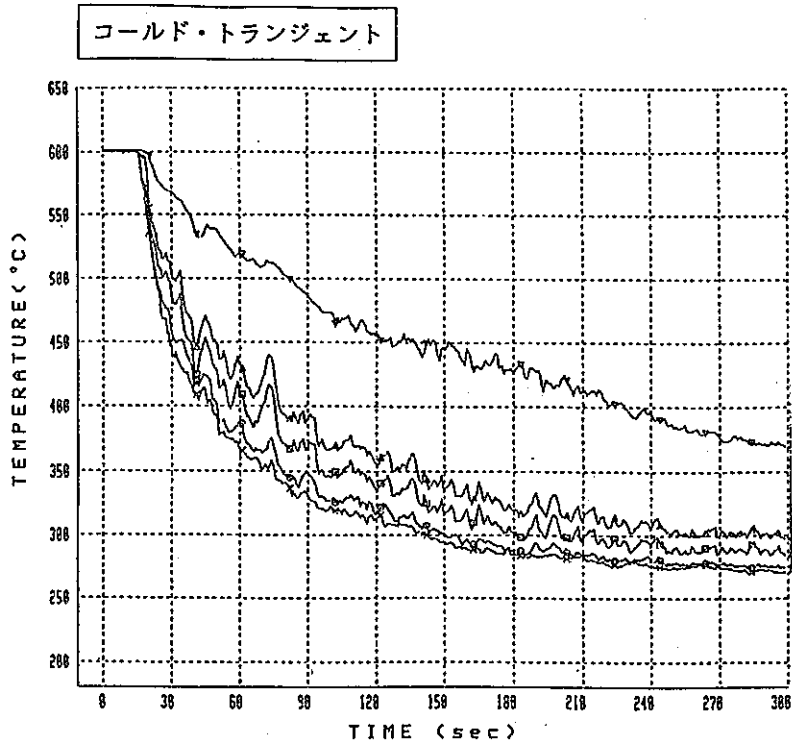


図 4.27 Yピース半径方向温度分布(3)



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

- × - RMN-01A
- - RMS-01A
- - RMM-01A
- △ - RMI-01A
- ▽ - RMσ-01A

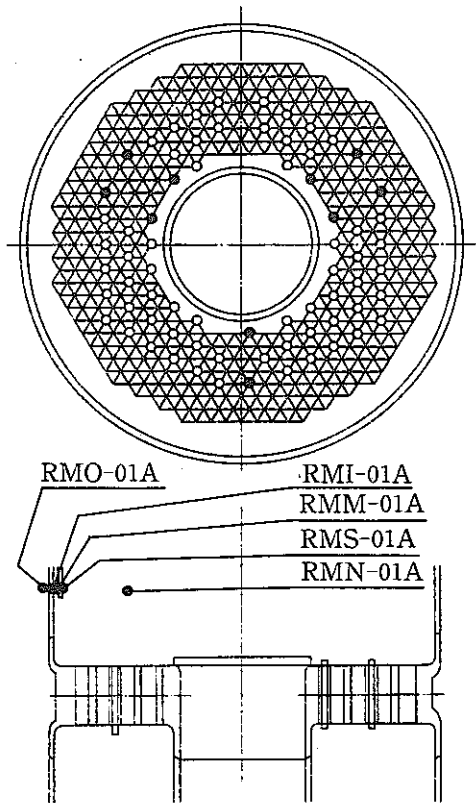
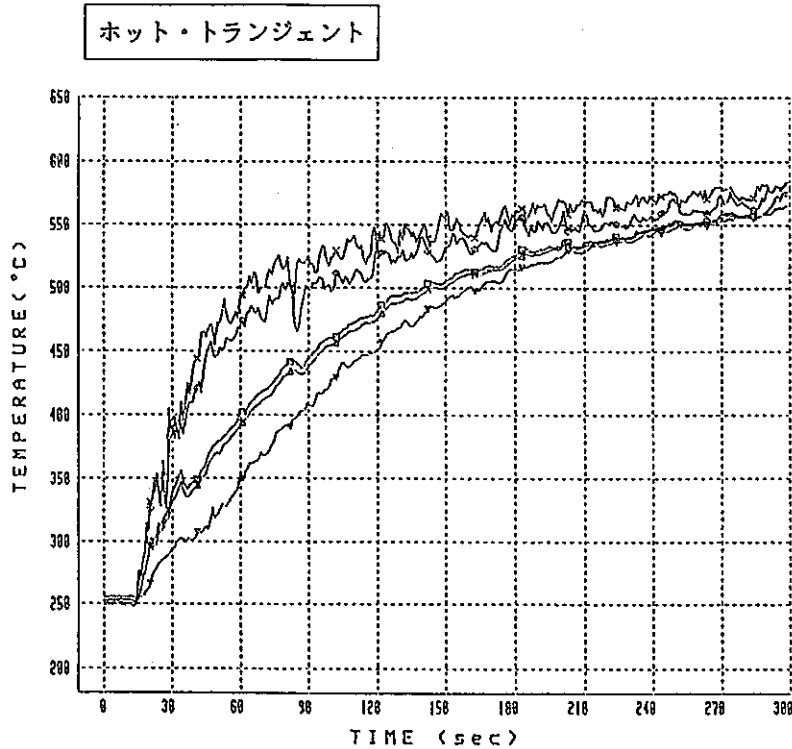


図 4. 28 多孔板半径方向温度分布(1)

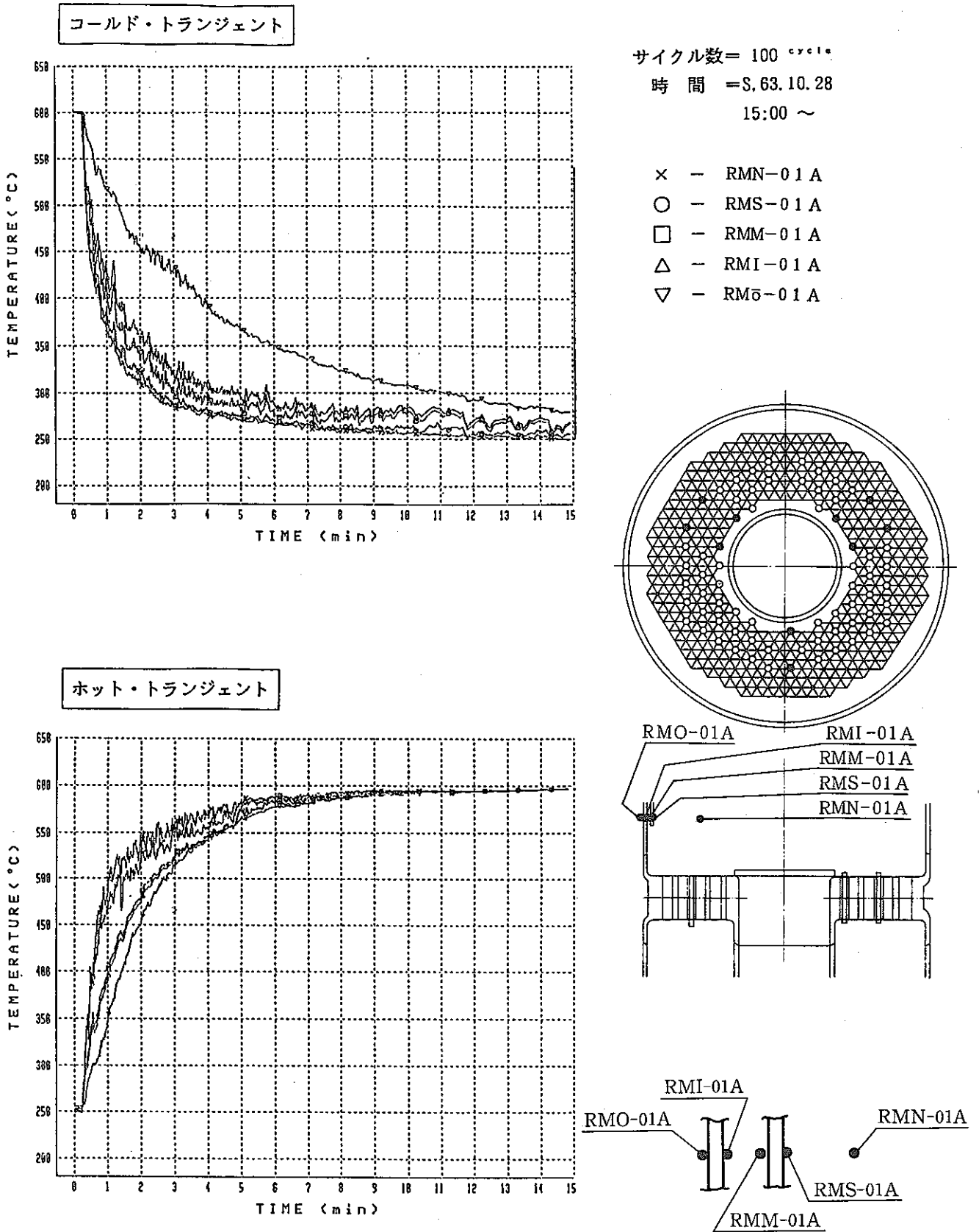
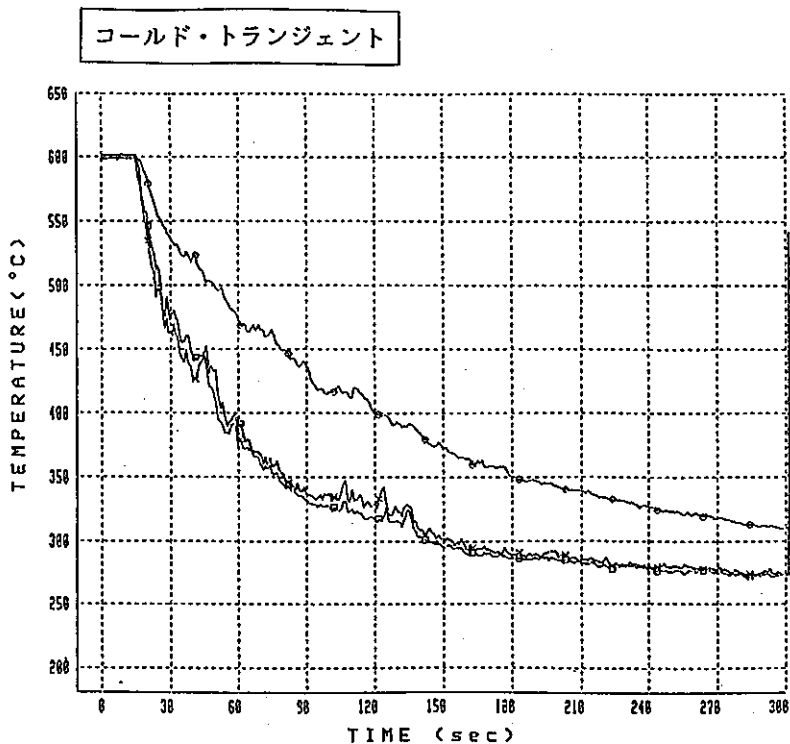


図 4.29 多孔板半径方向温度分布(2)



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

- × - RHI-04 A
- - RMO-04 A
- - RMU-09 A

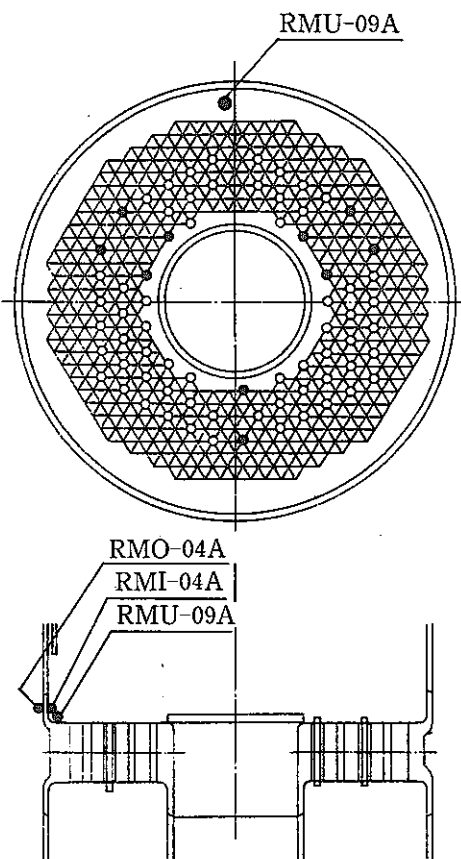
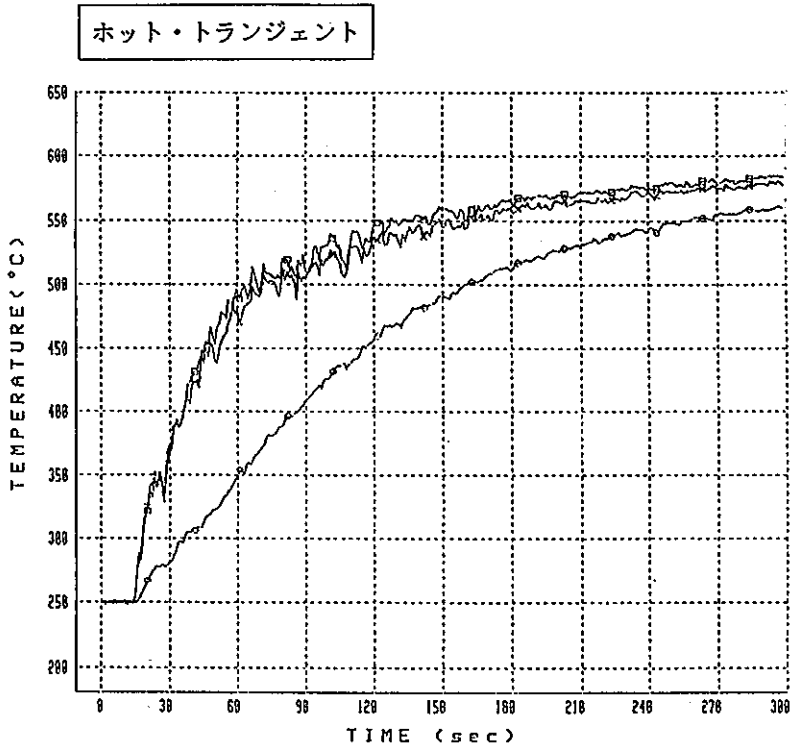


図 4.30 多孔板半径方向温度分布(3)

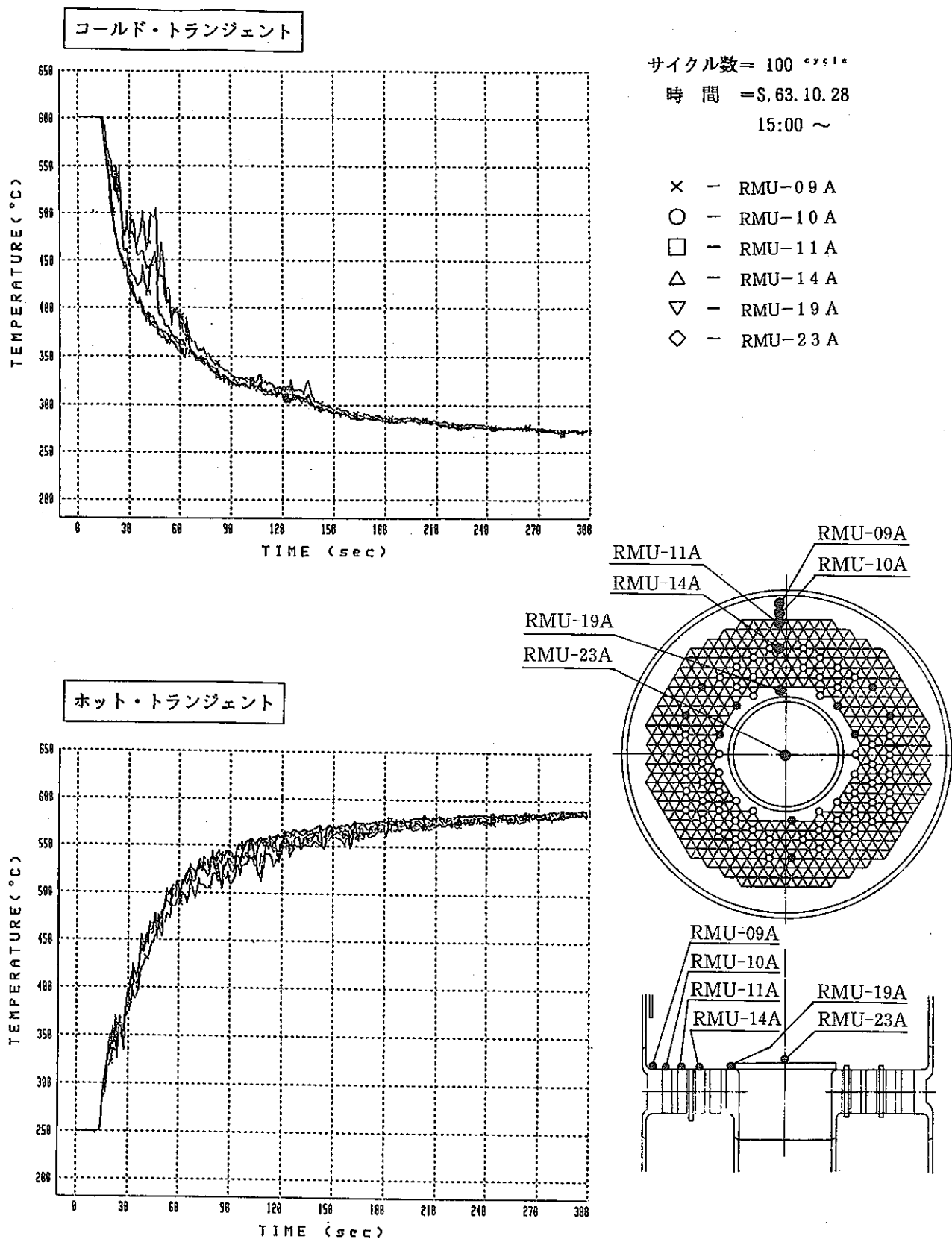


図 4.31 多孔板半径方向温度分布(4)

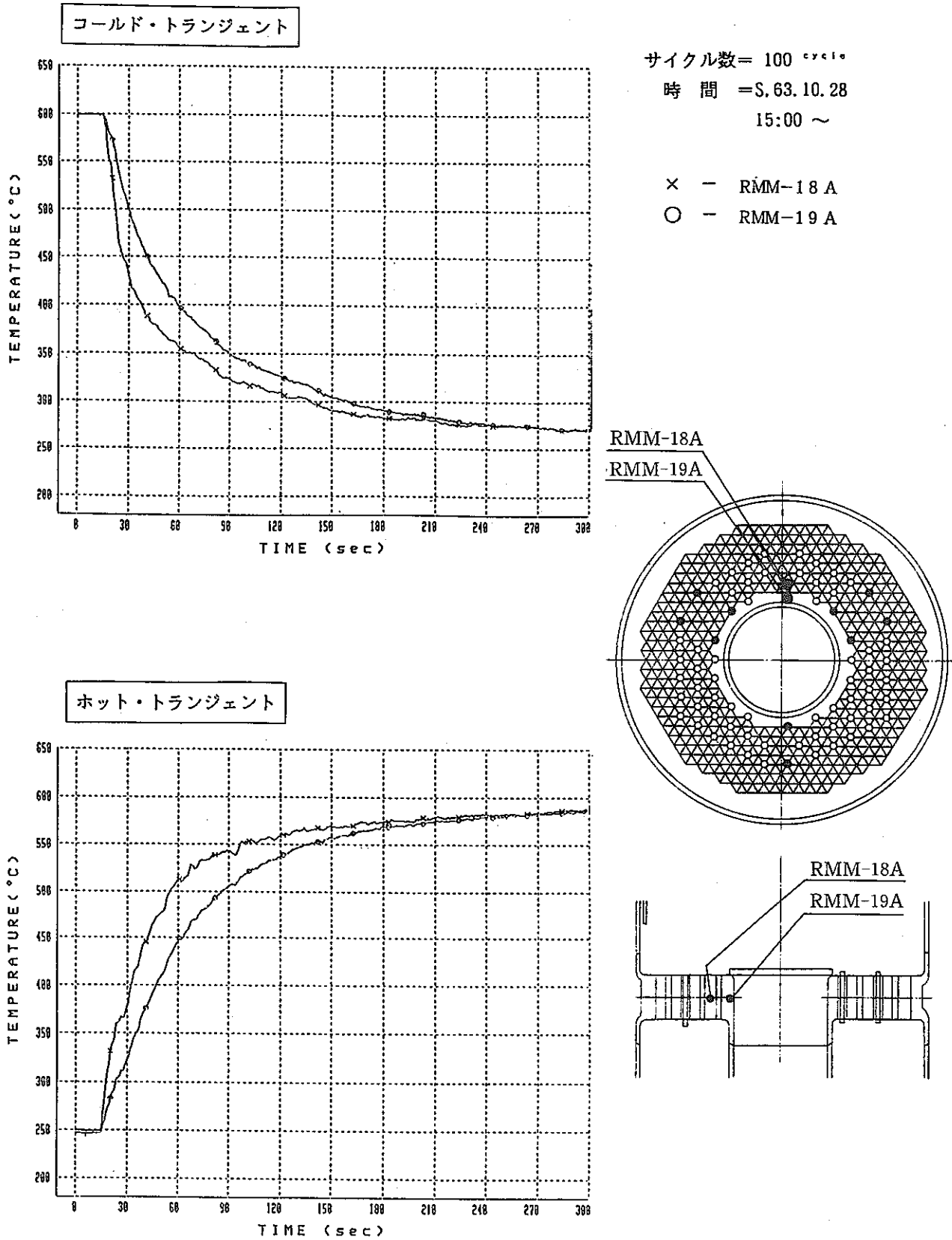
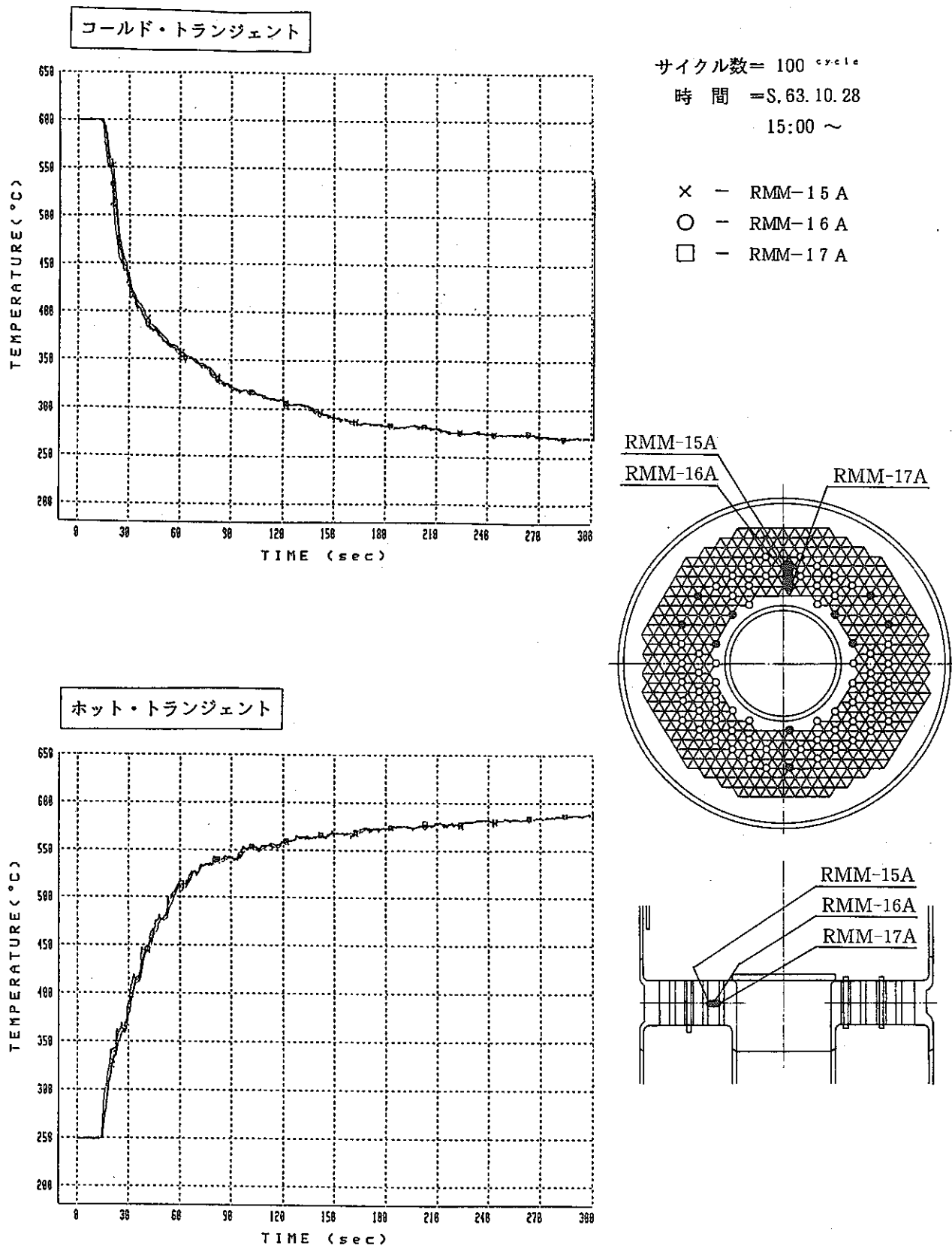


図 4.32 多孔板半径方向温度分布(5)



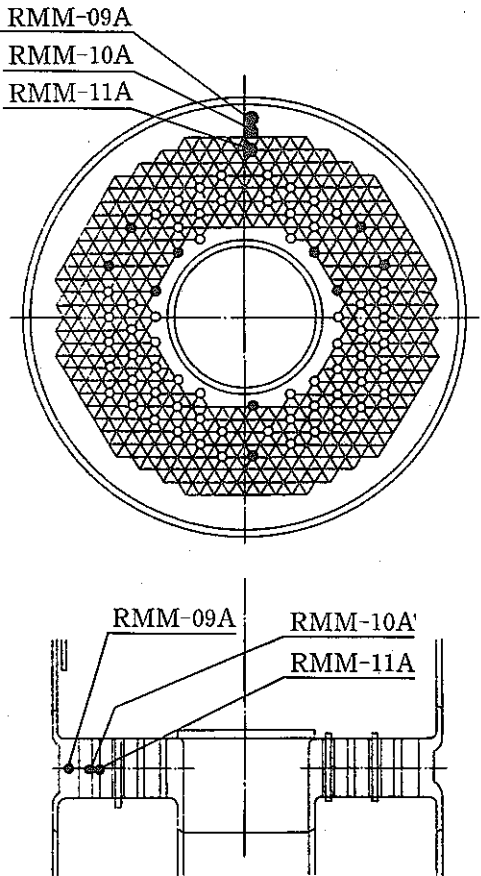
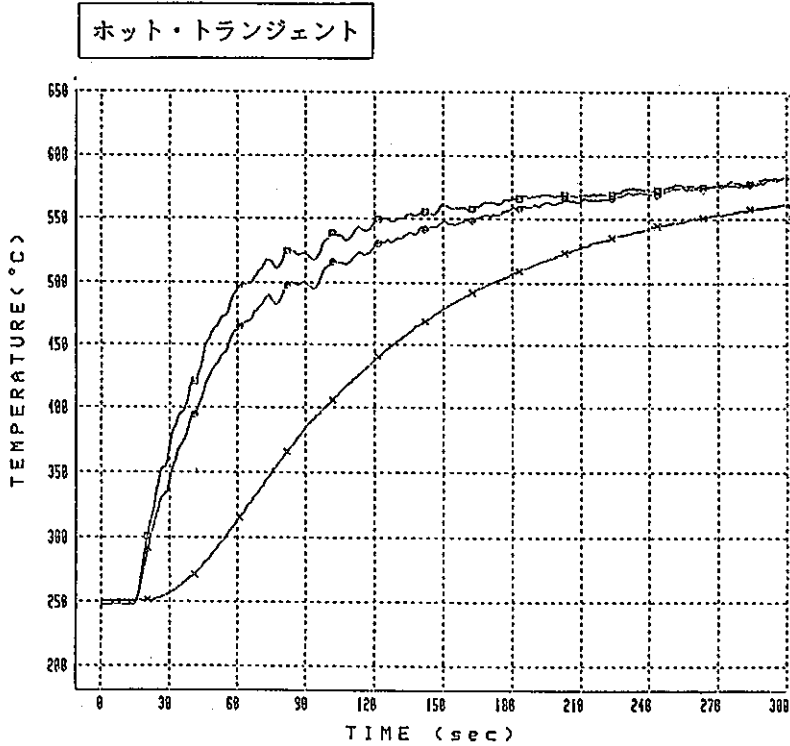
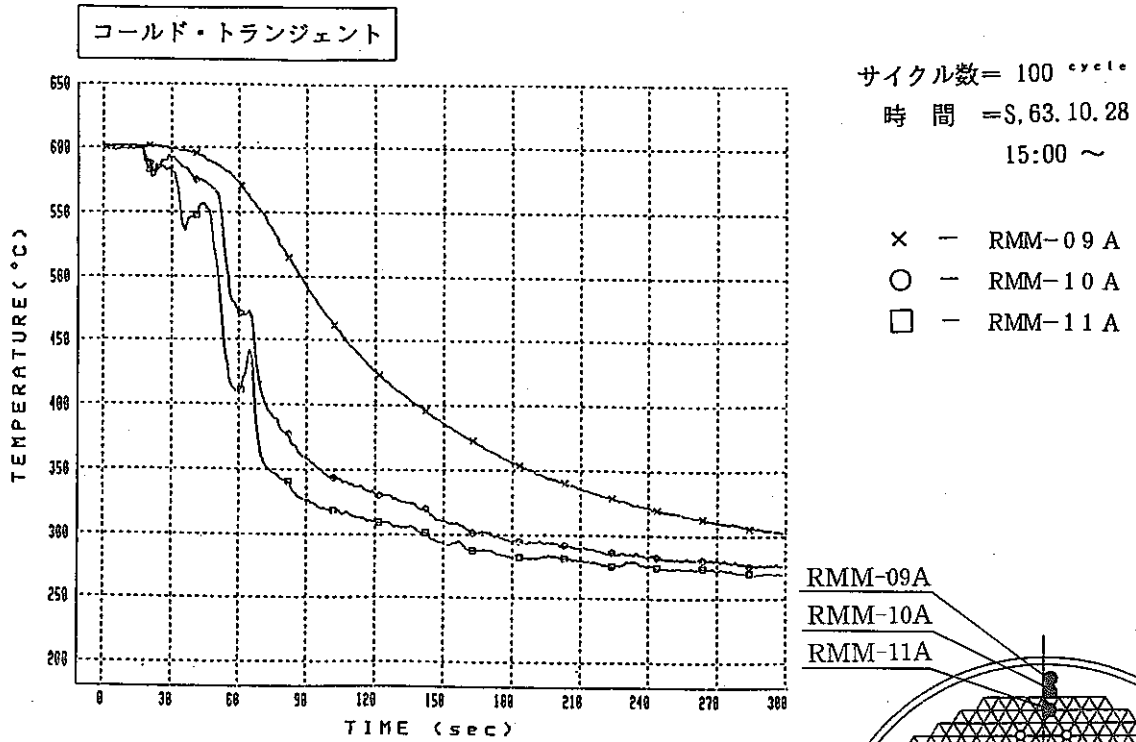


図 4.34 多孔板半径方向温度分布(7)

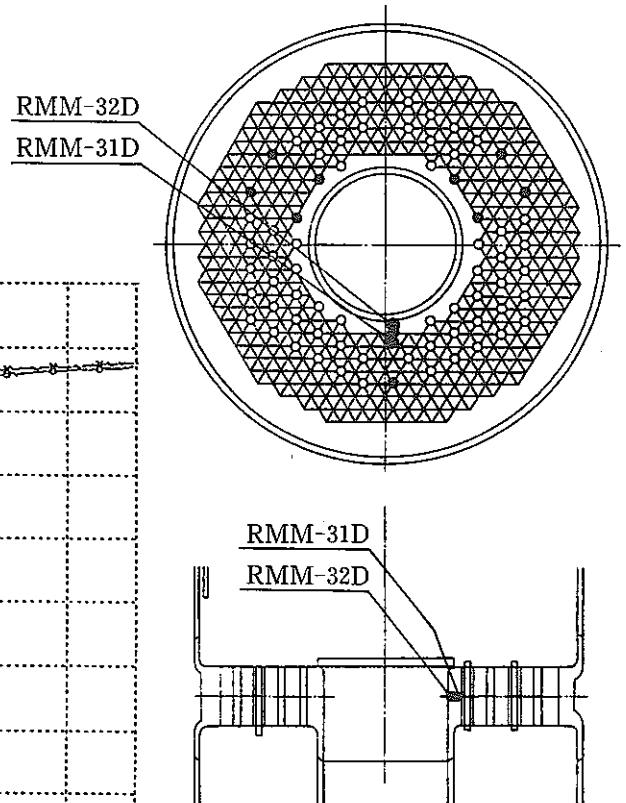
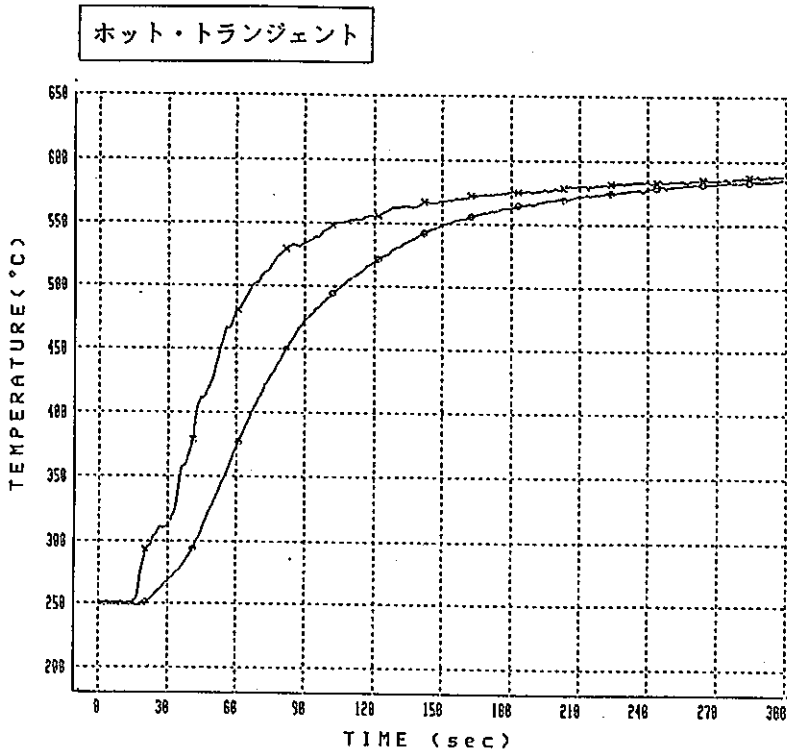
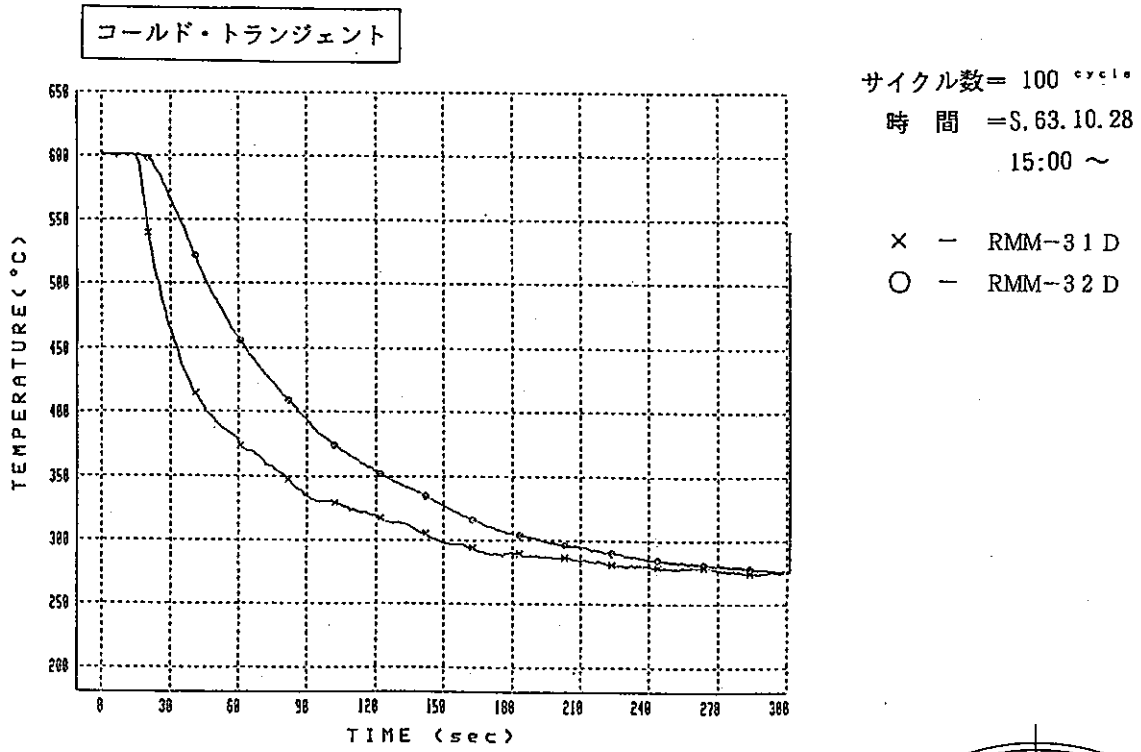
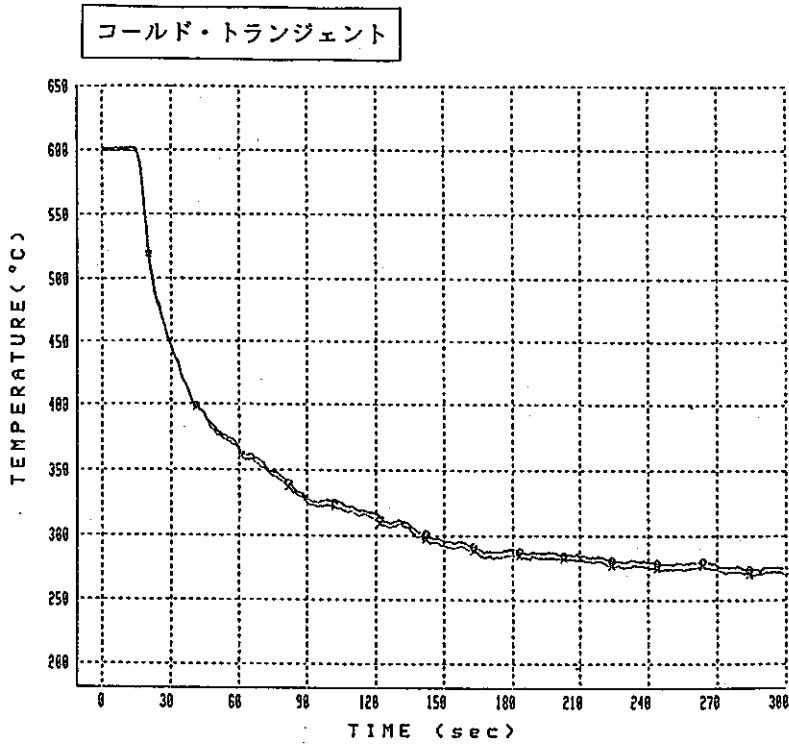


図 4.35 多孔板半径方向温度分布(8)



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

× - RMM-29D
 ○ - RMM-30D

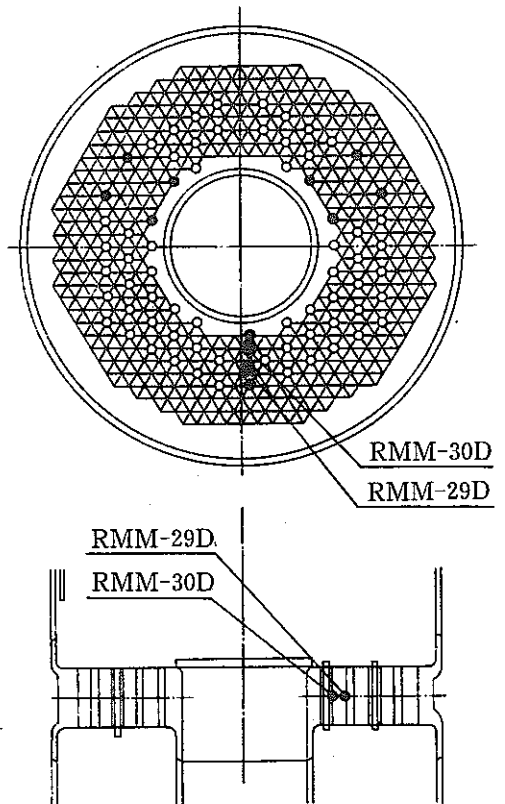
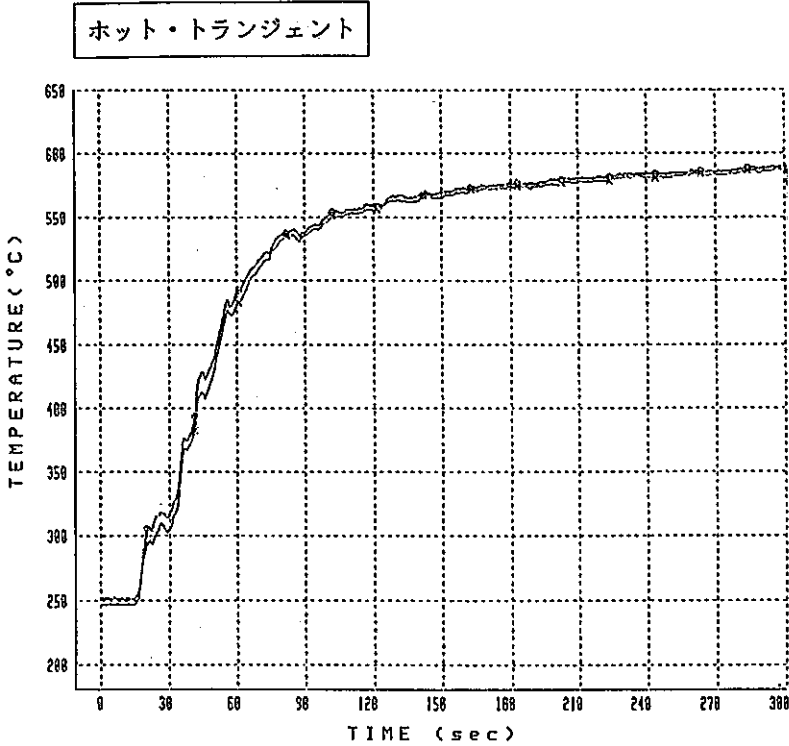


図 4.36 多孔板半径方向温度分布(9)

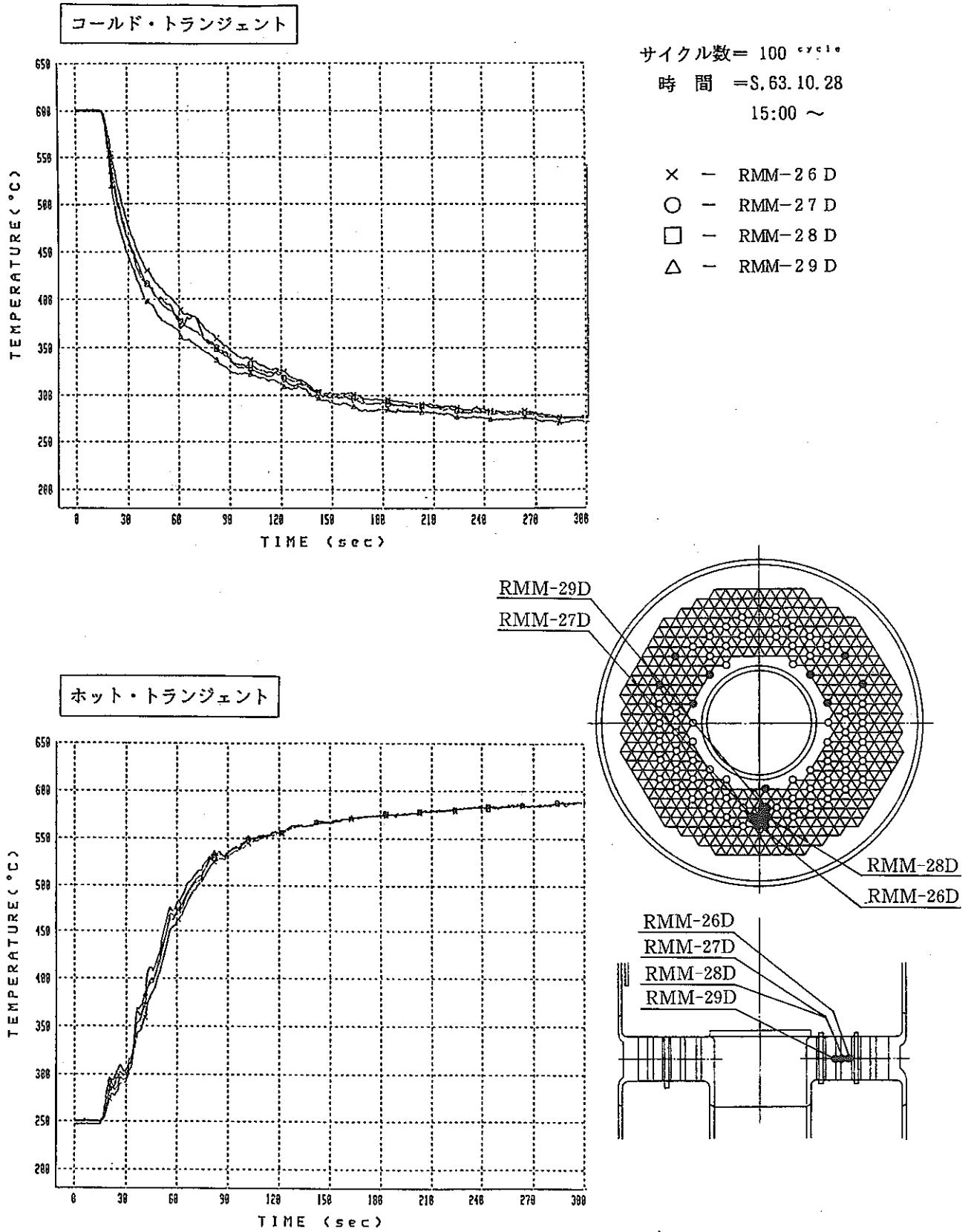
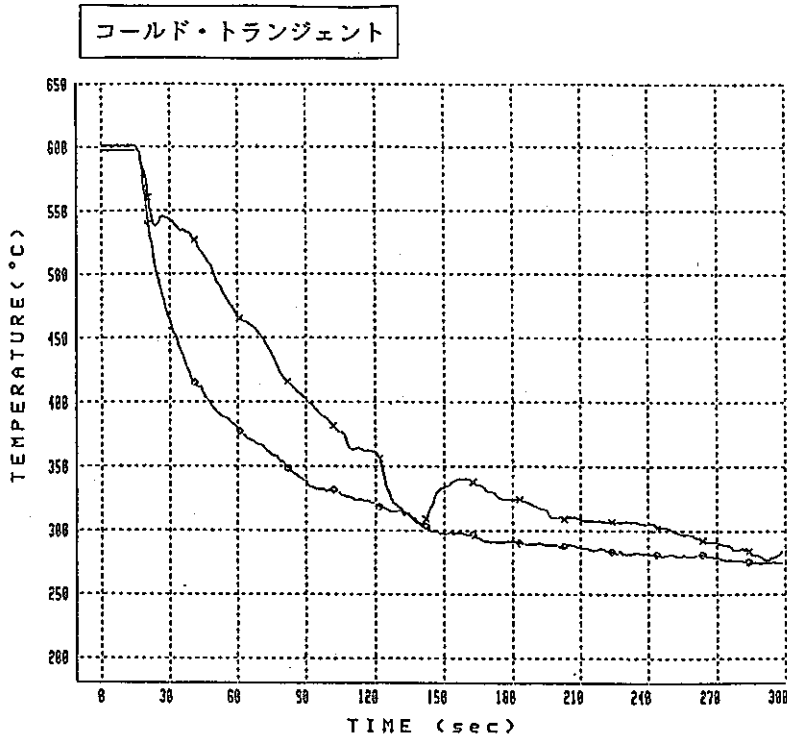


図 4.37 多孔板半径方向温度分布(10)



サイクル数 = 100 cycle

時間 = S. 63. 10. 28

15:00 ~

× - RMM-25 D

○ - RMM-28 D

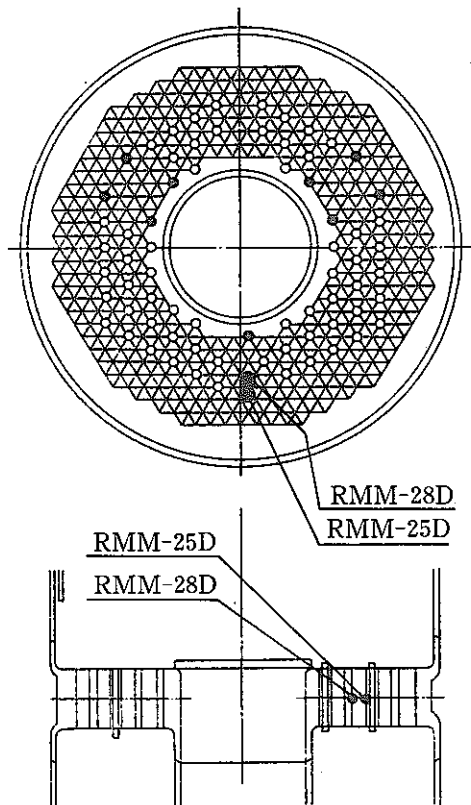
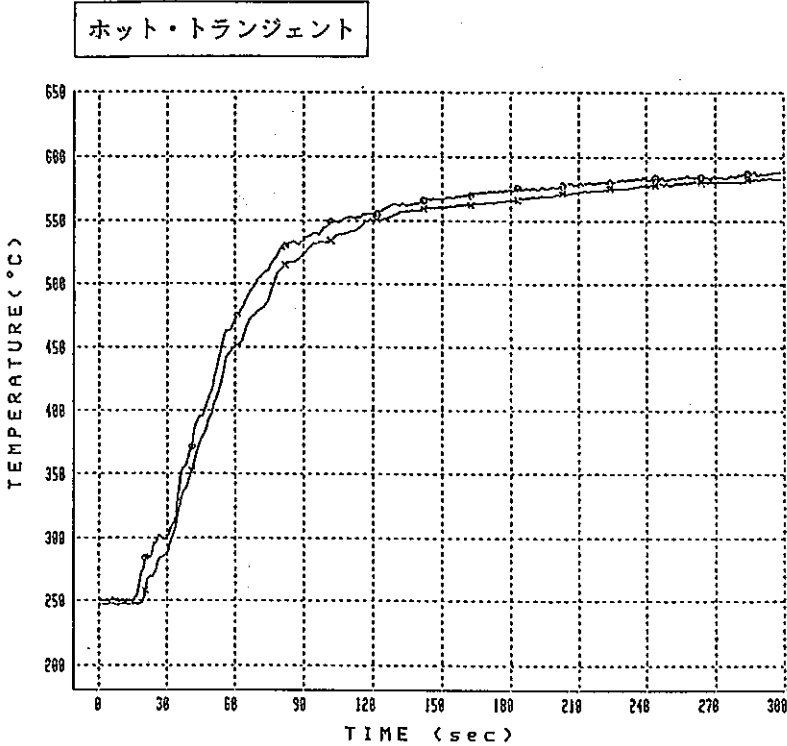


図 4.38 多孔板半径方向温度分布(1)

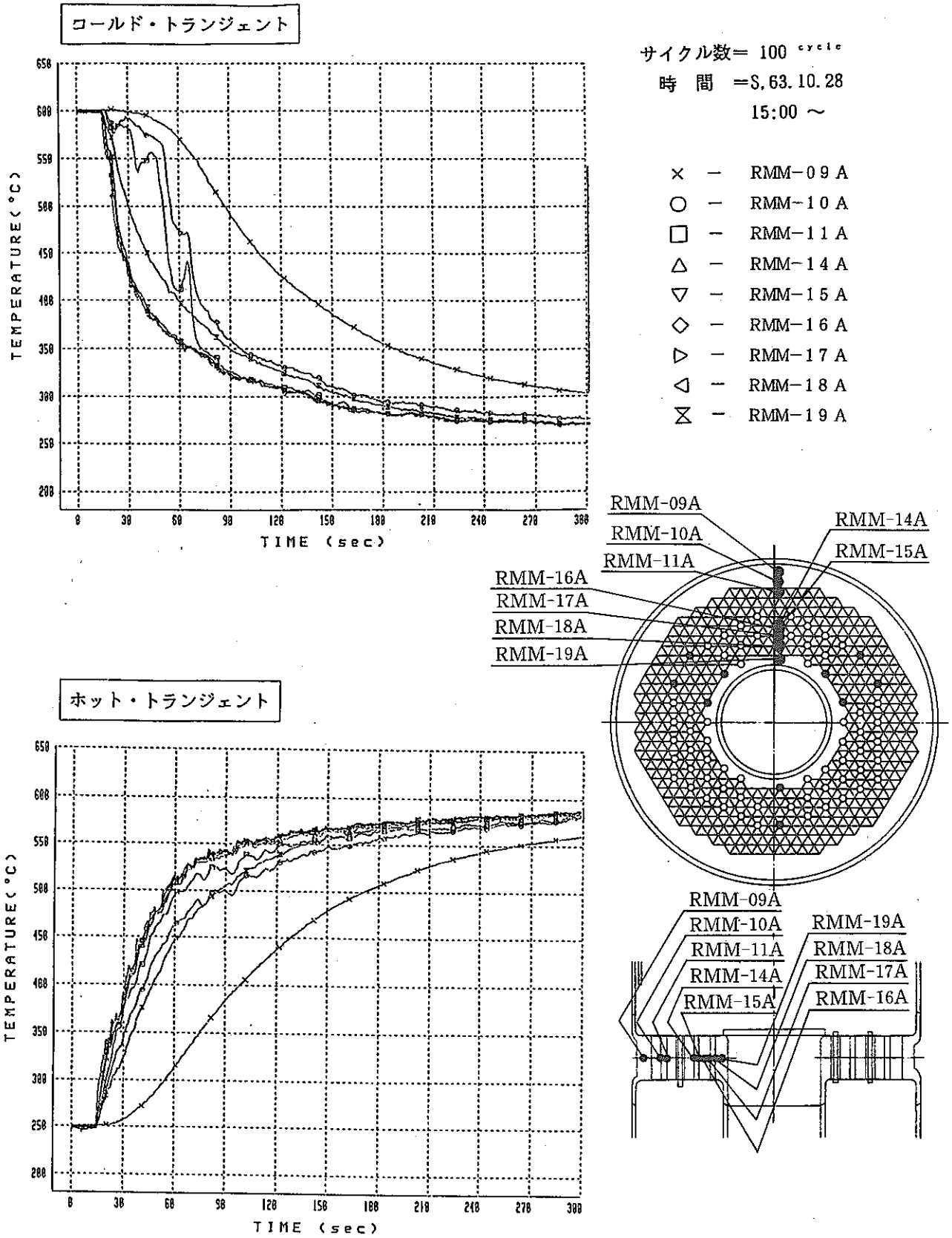
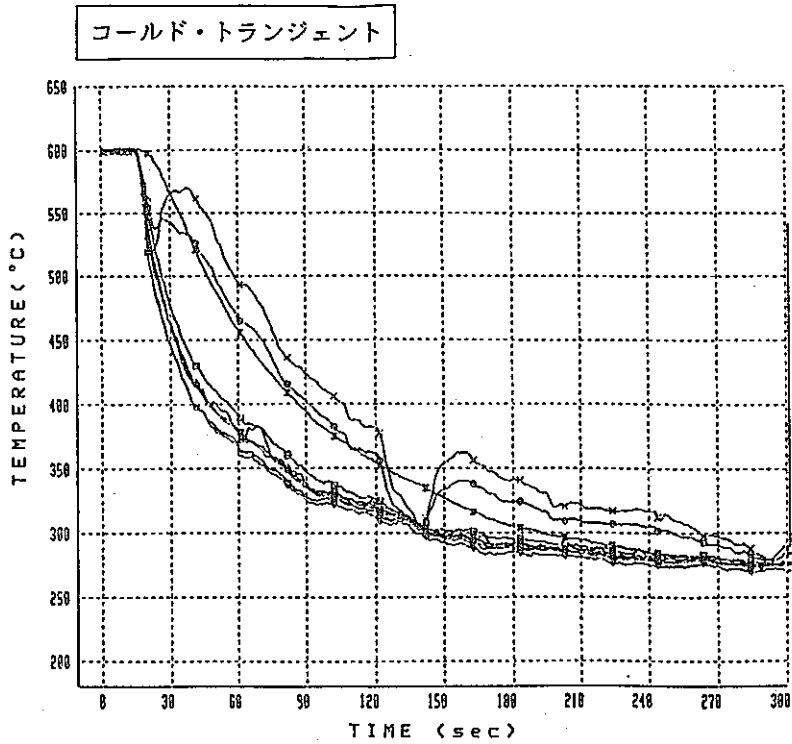
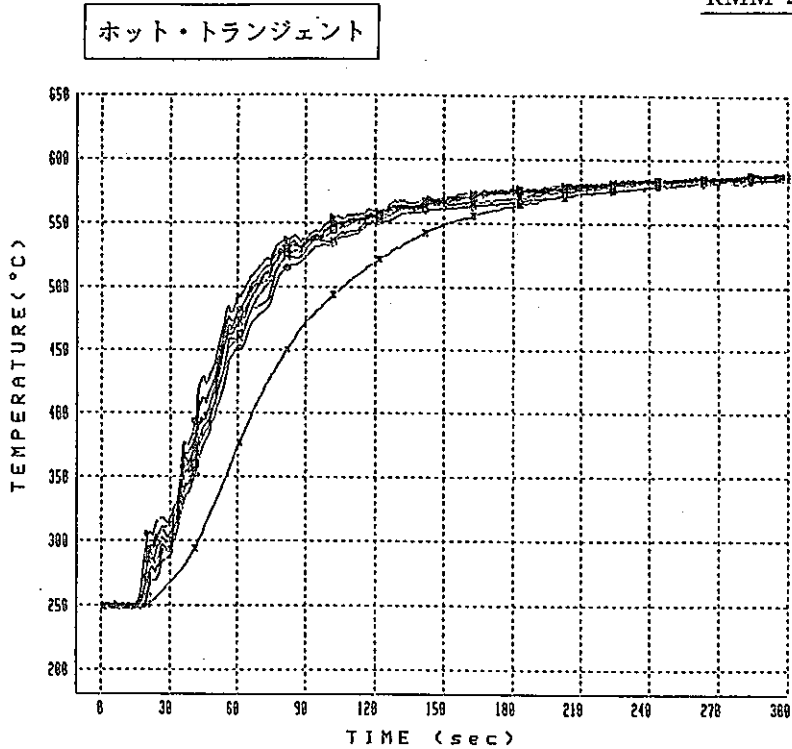


図 4.39 多孔板半径方向温度分布(12)



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

- × - RMM-24 D
- - RMM-25 D
- - RMM-26 D
- △ - RMM-27 D
- ▽ - RMM-28 D
- ◇ - RMM-29 D
- ▷ - RMM-30 D
- ◁ - RMM-31 D
- ⊗ - RMM-32 D



RMM-32D
 PNC TN9410 91-253
 RMM-30D
 RMM-27D
 RMM-26D

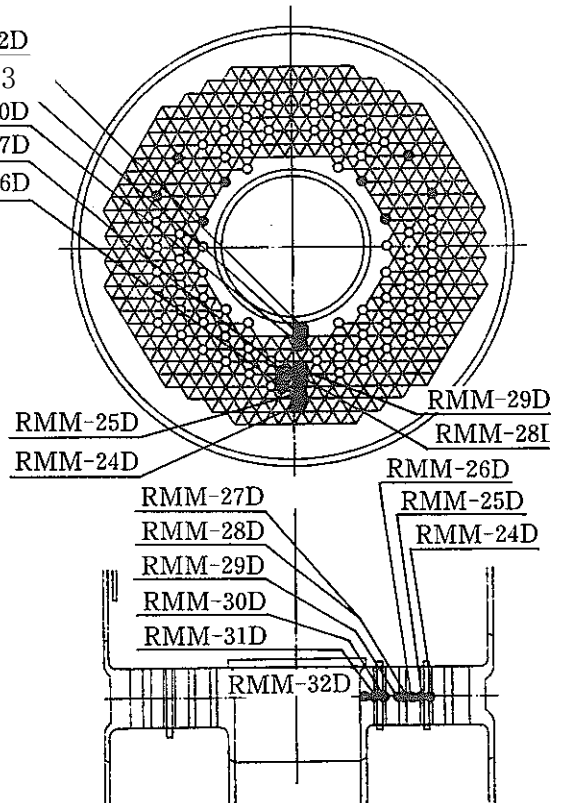
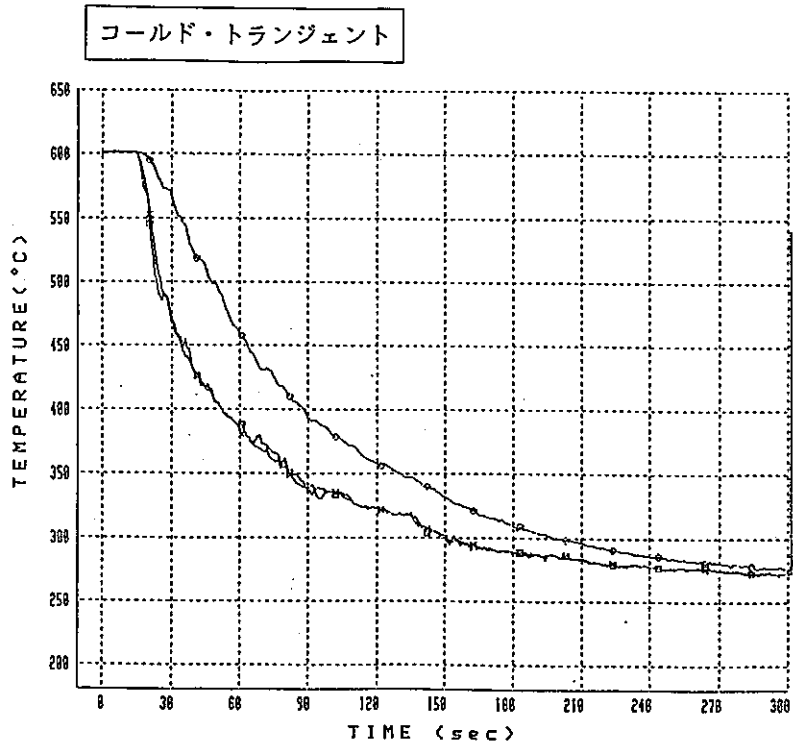


図 4.40 多孔板半径方向温度分布(13)



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S.63.10.28
 15:00 ~

- × - RMD-19A
- - RMI-22A
- - RMO-22A

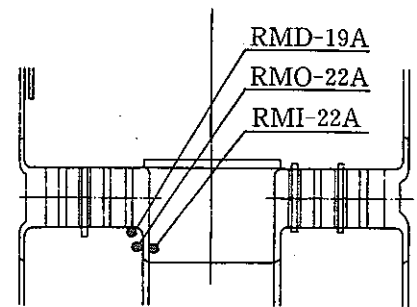
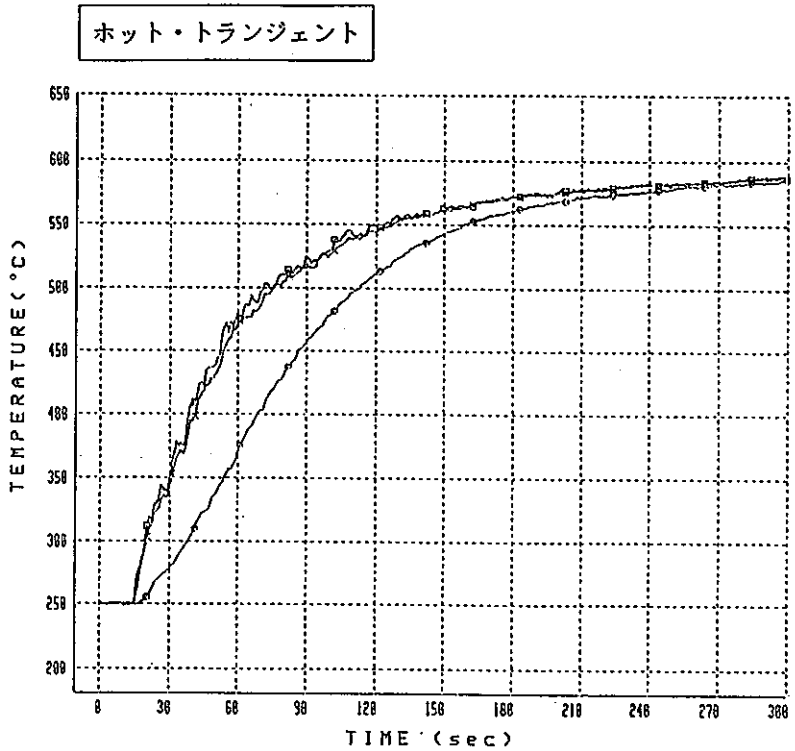
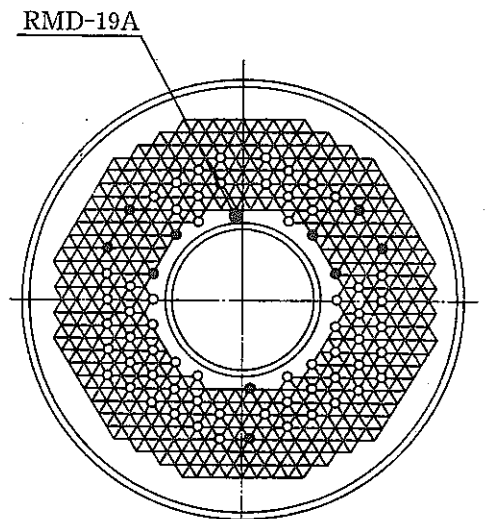
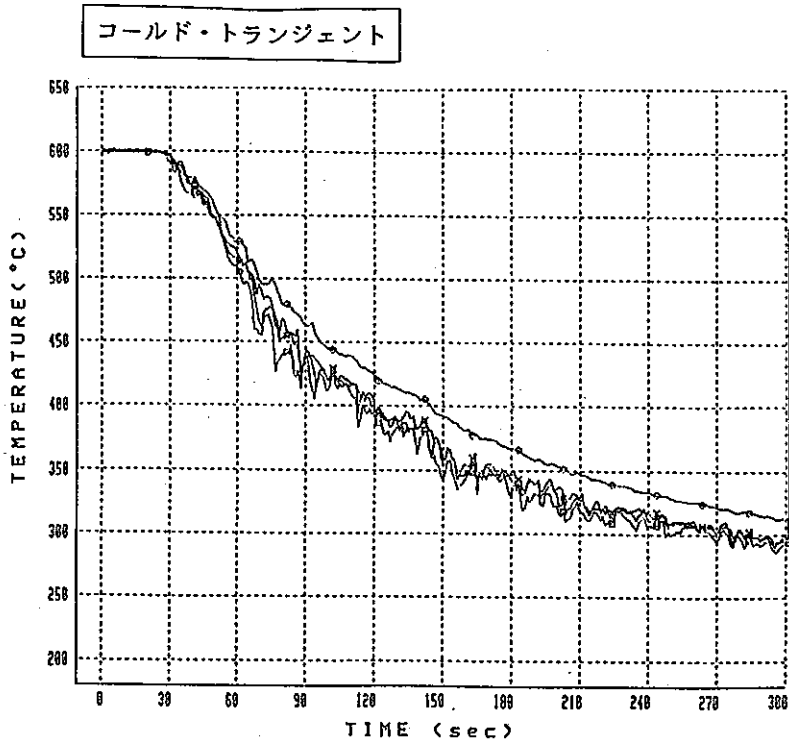


図 4.41 多孔板半径方向温度分布(14)



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S.63.10.28
 15:00 ~

- × - RMI-07A
- - RM5-07A
- - RMI-08A
- △ - RMD-09A

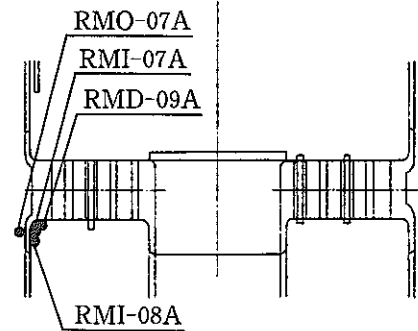
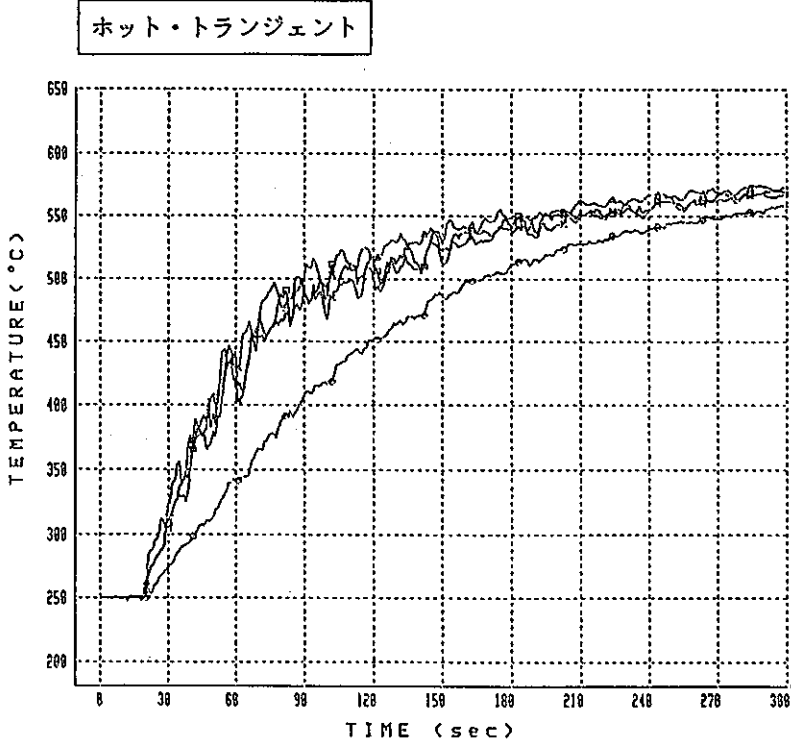
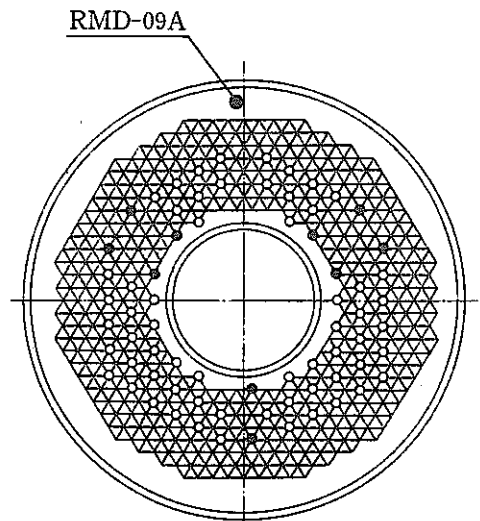


図 4.42 多孔板半径方向温度分布(15)

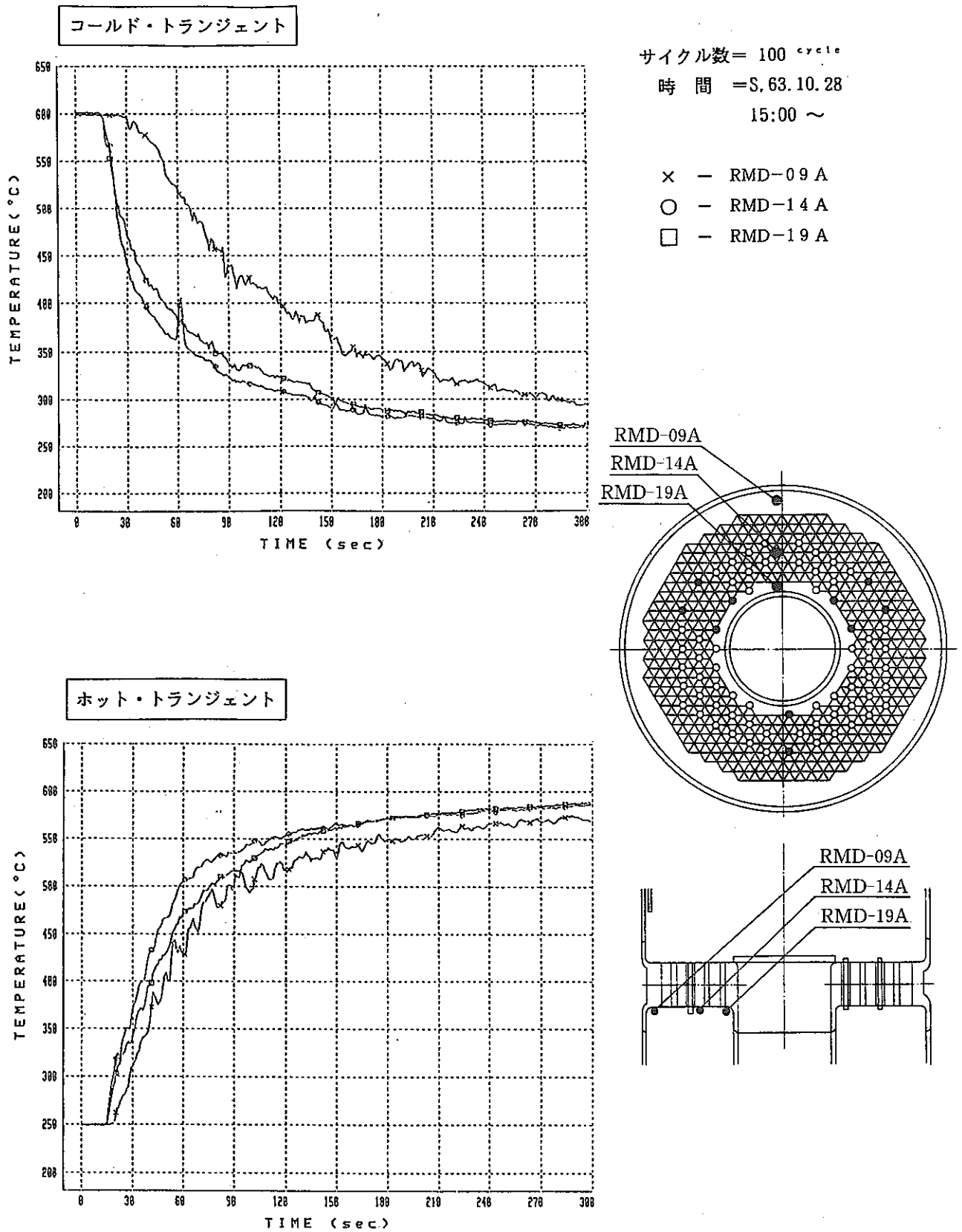


図 4.43 多孔板半径方向温度分布(10)

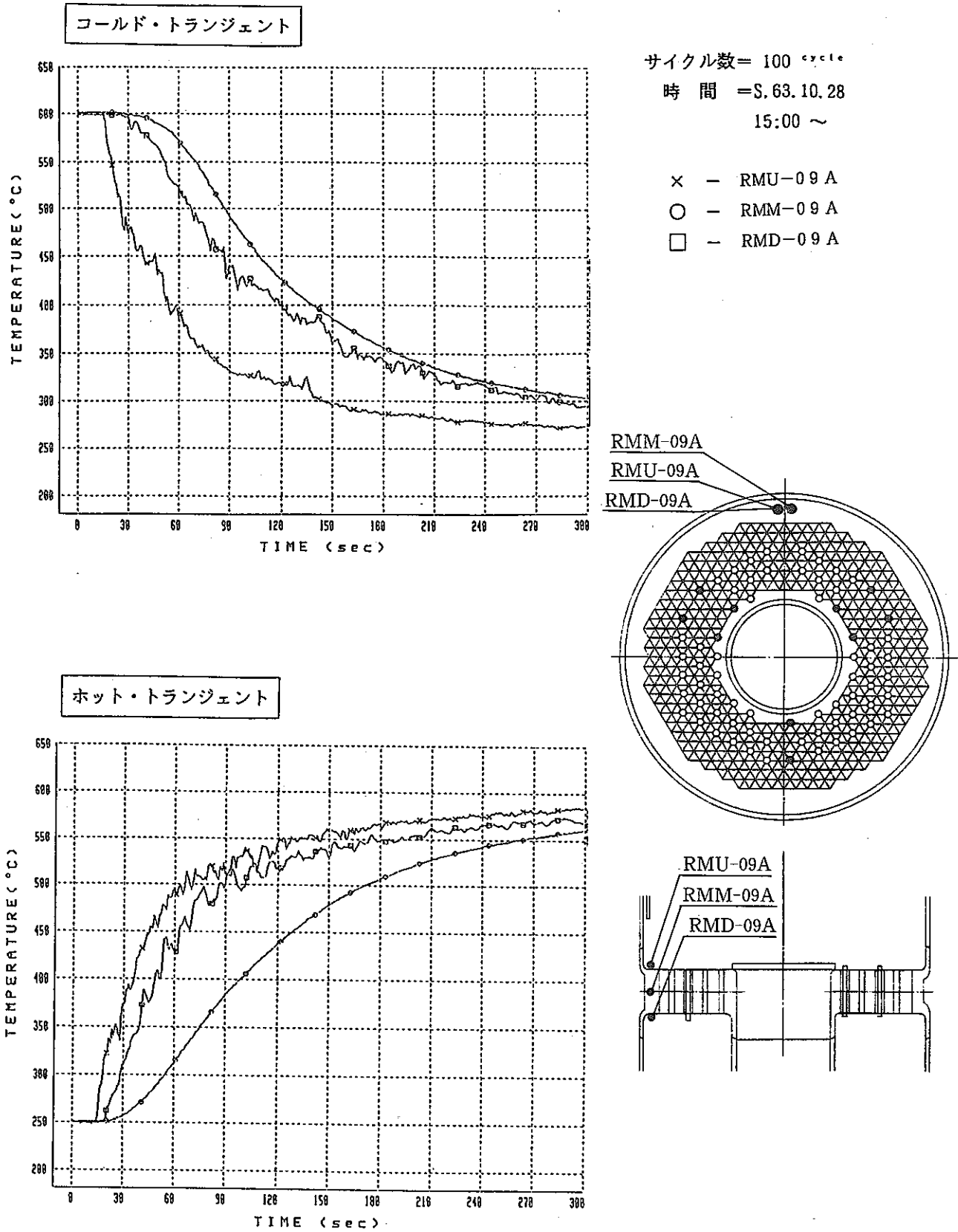


図 4.44 多孔板板厚方向温度分布(1)

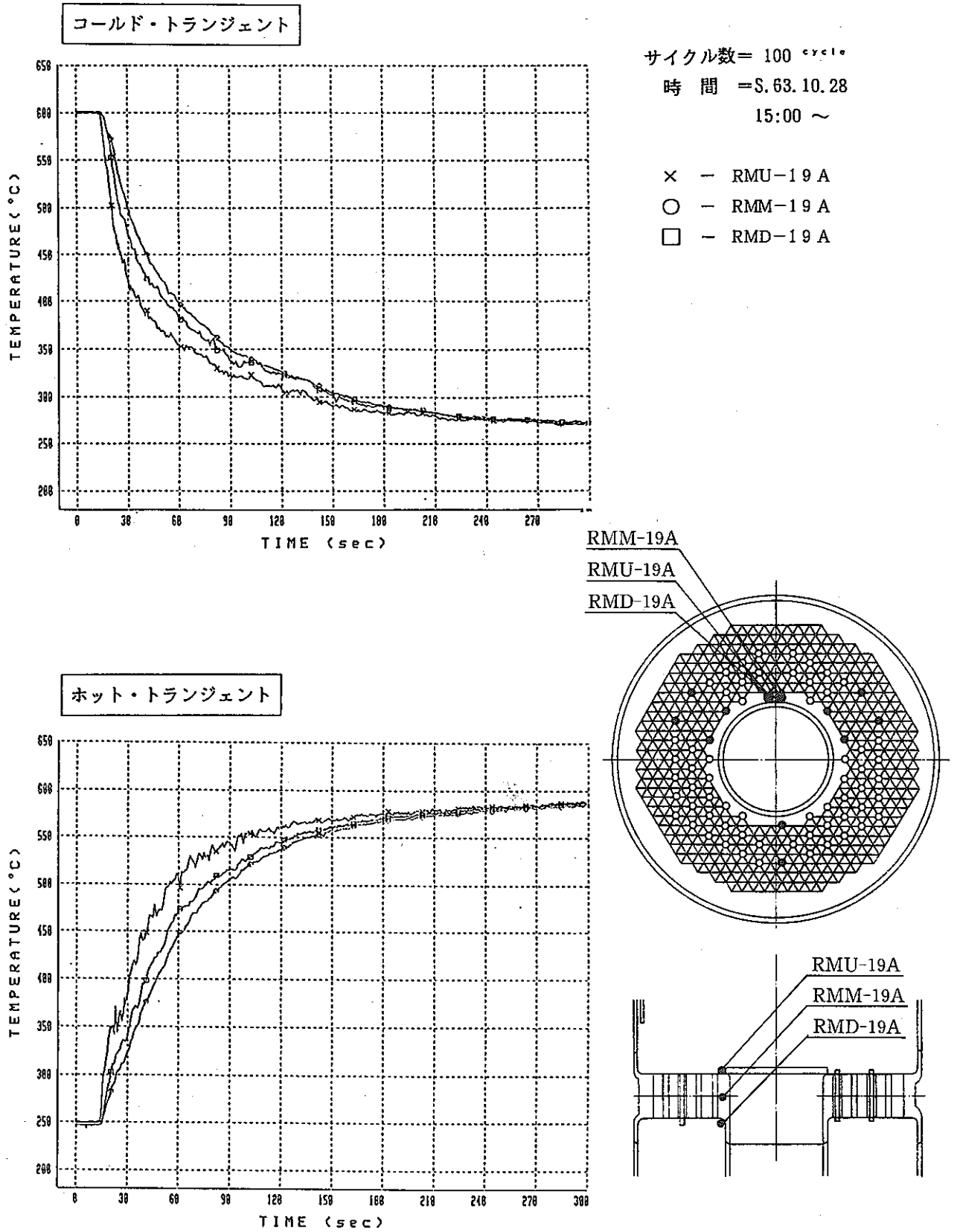


図 4.45 多孔板板厚方向温度分布(2)

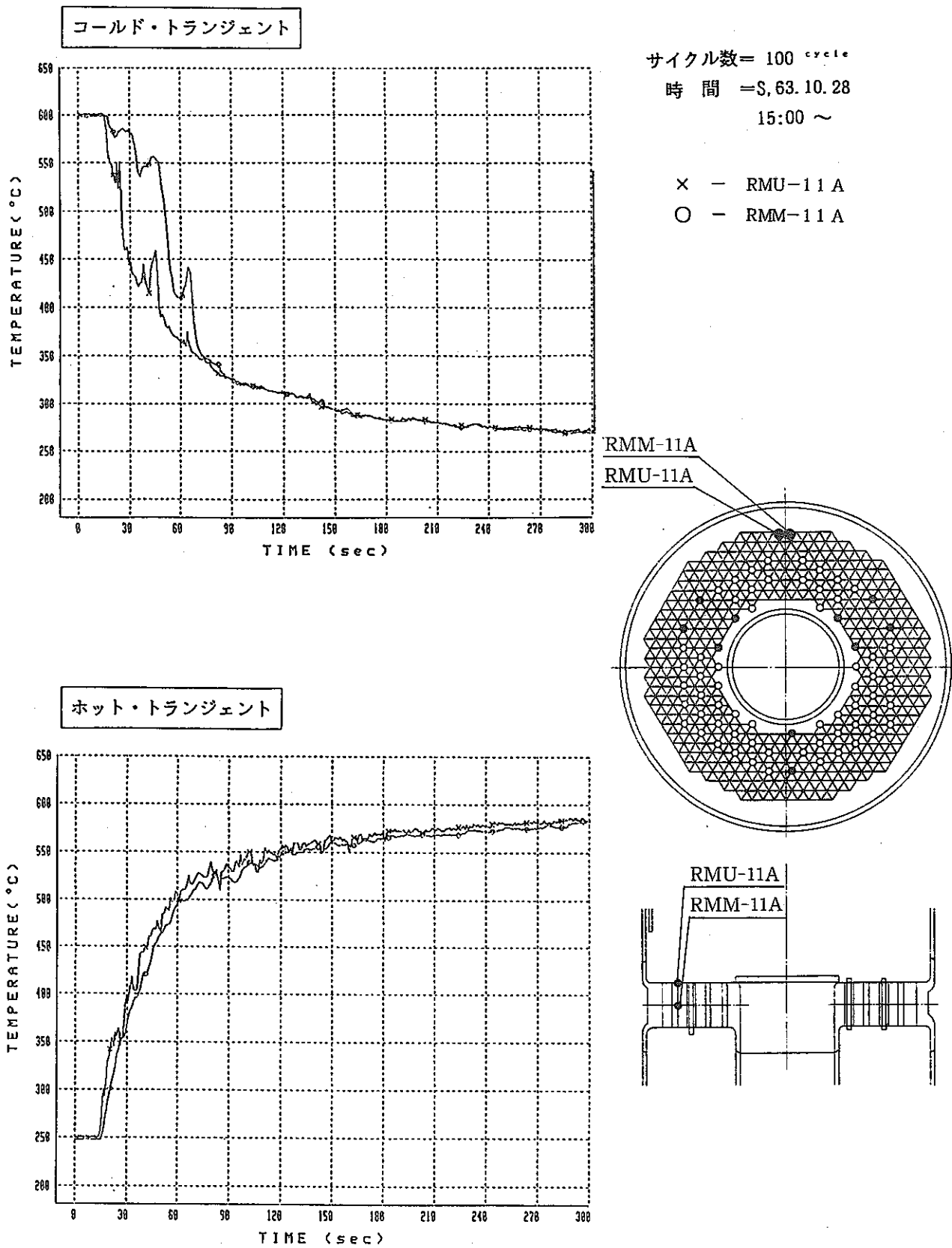
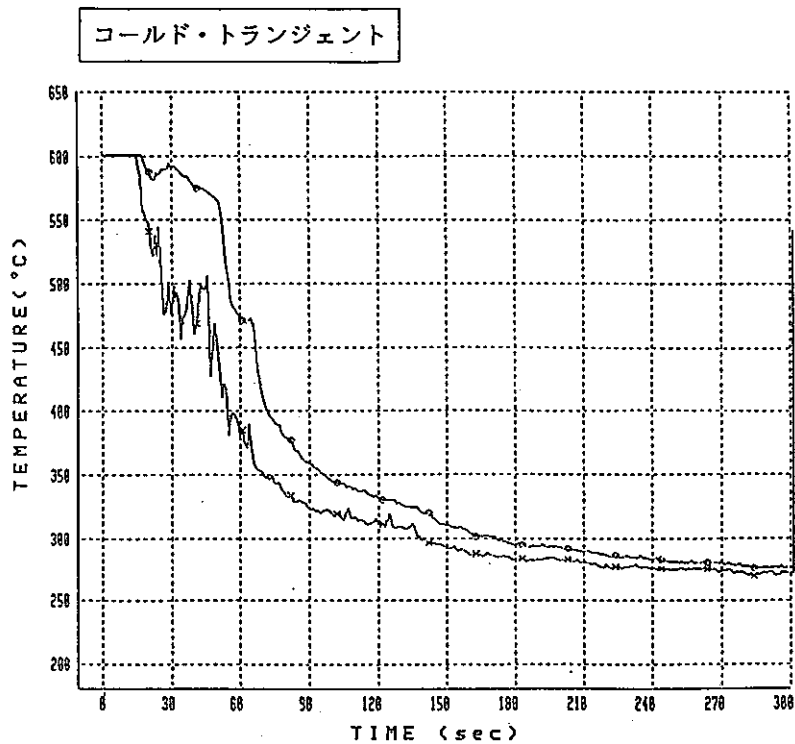


図 4.46 多孔板板厚方向温度分布(3)



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S.63.10.28
 15:00 ~

× - RMU-10A
 ○ - RMM-10A

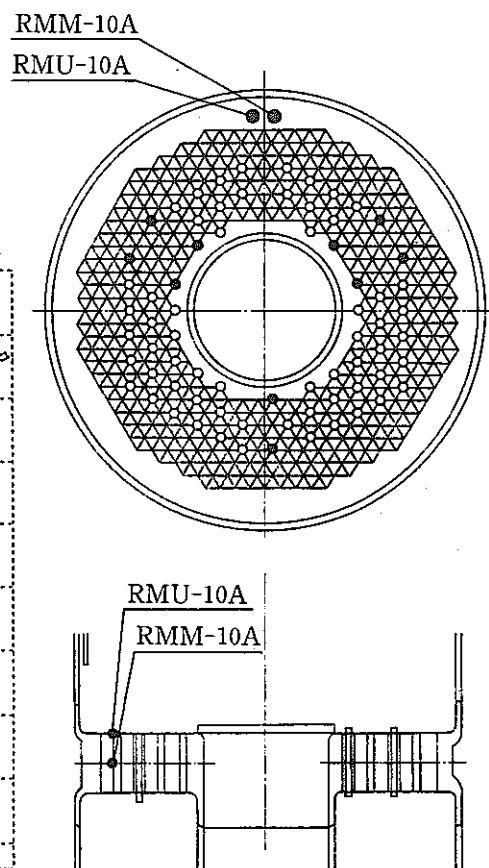
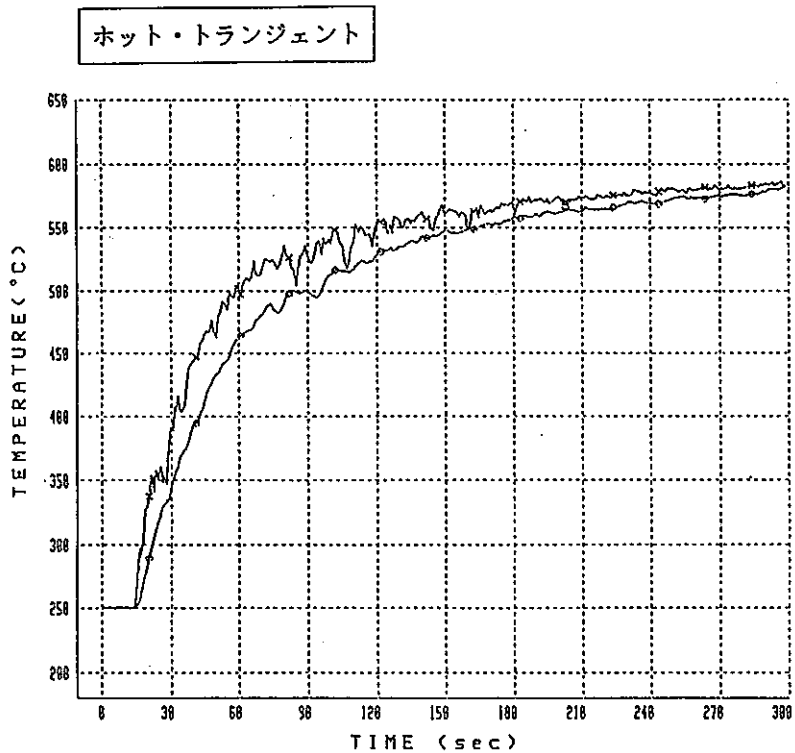
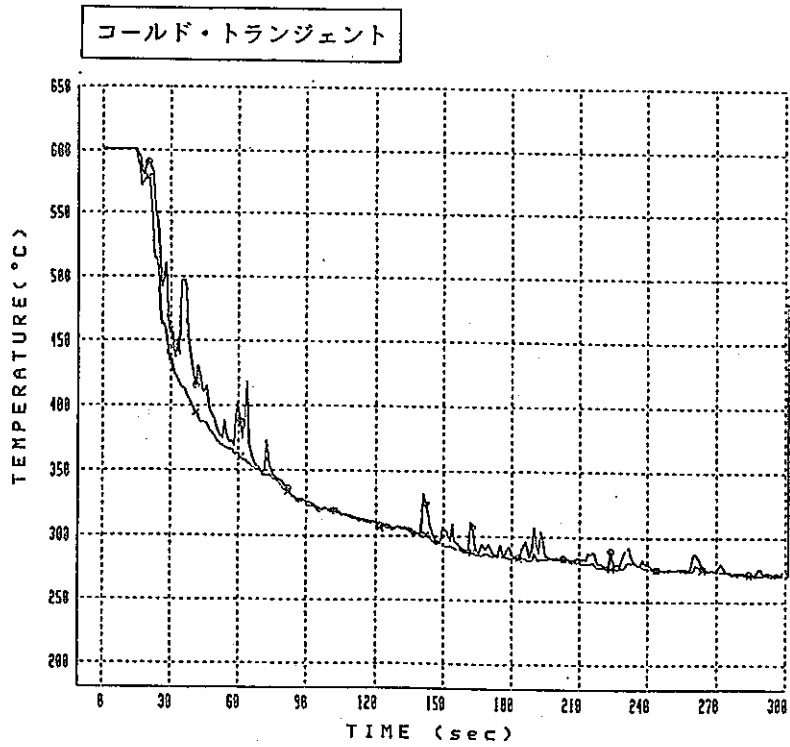


図 4.47 多孔板板厚方向温度分布(4)



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

× - RMM-13A
 ○ - RMO-33A

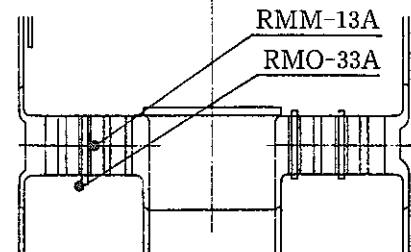
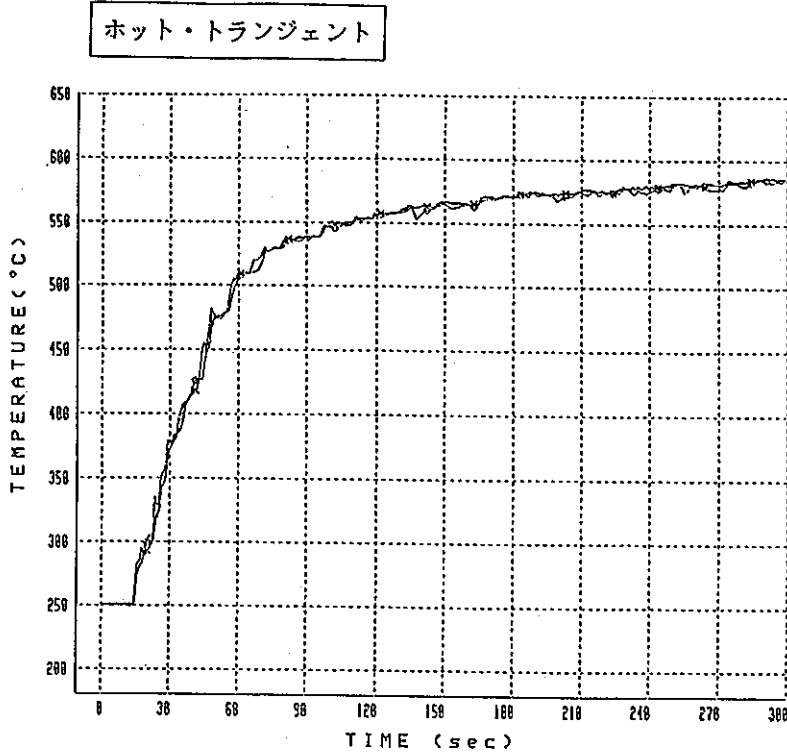
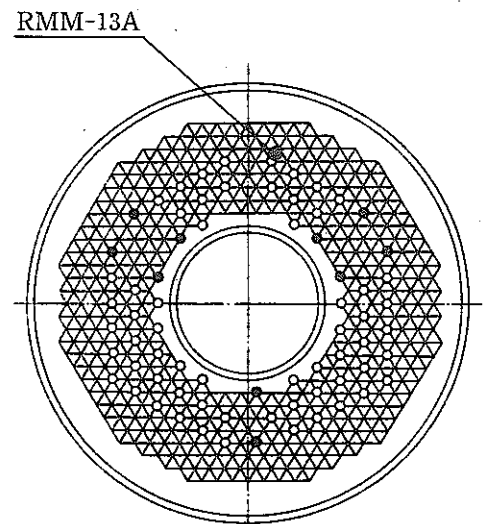
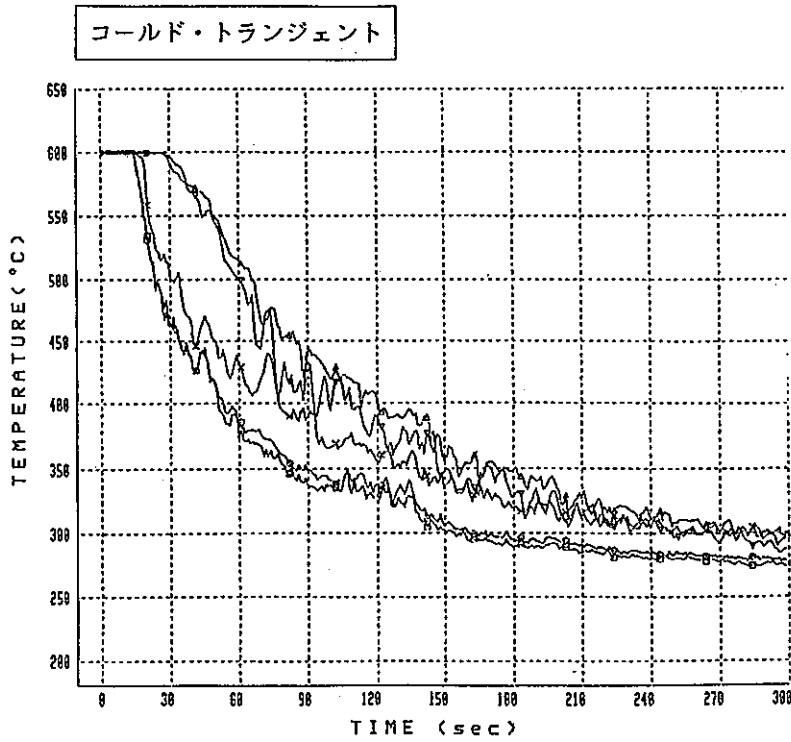


図 4.48 多孔板板厚方向温度分布(5)



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

- × - RMI-01 A
- - RMI-02 A
- - RMI-04 A
- △ - RMI-07 A
- ▽ - RMI-34 A

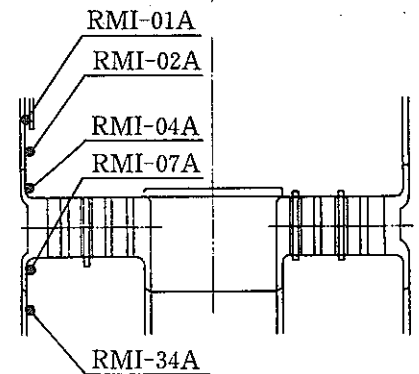
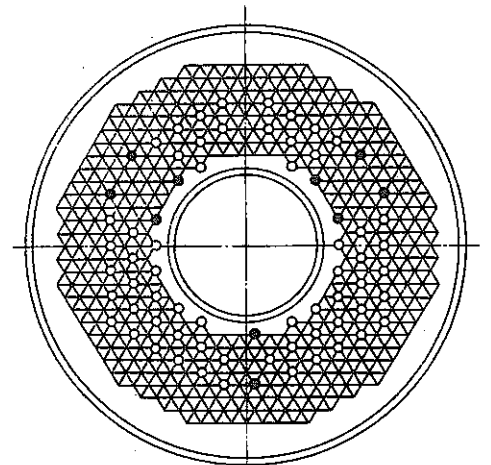
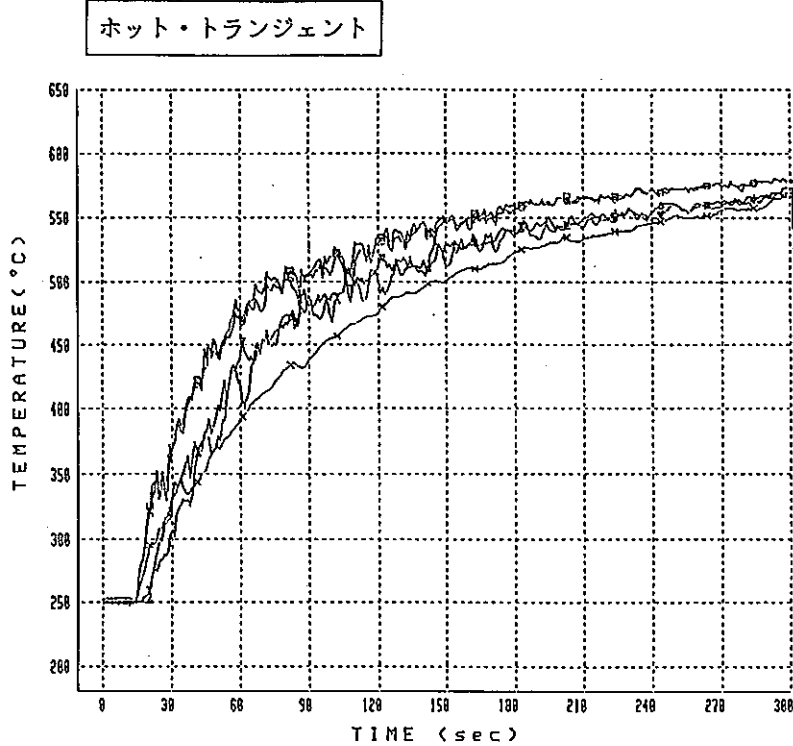


図 4.49 多孔板軸方向温度分布(1)

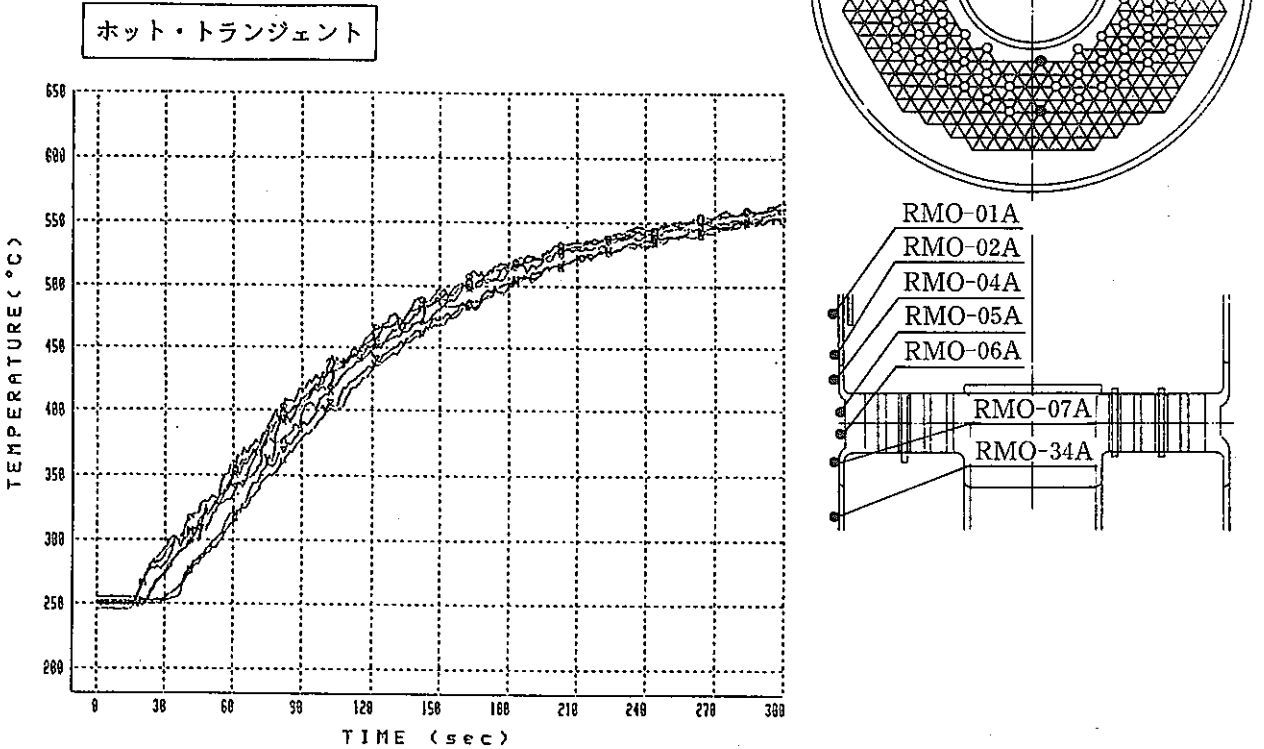
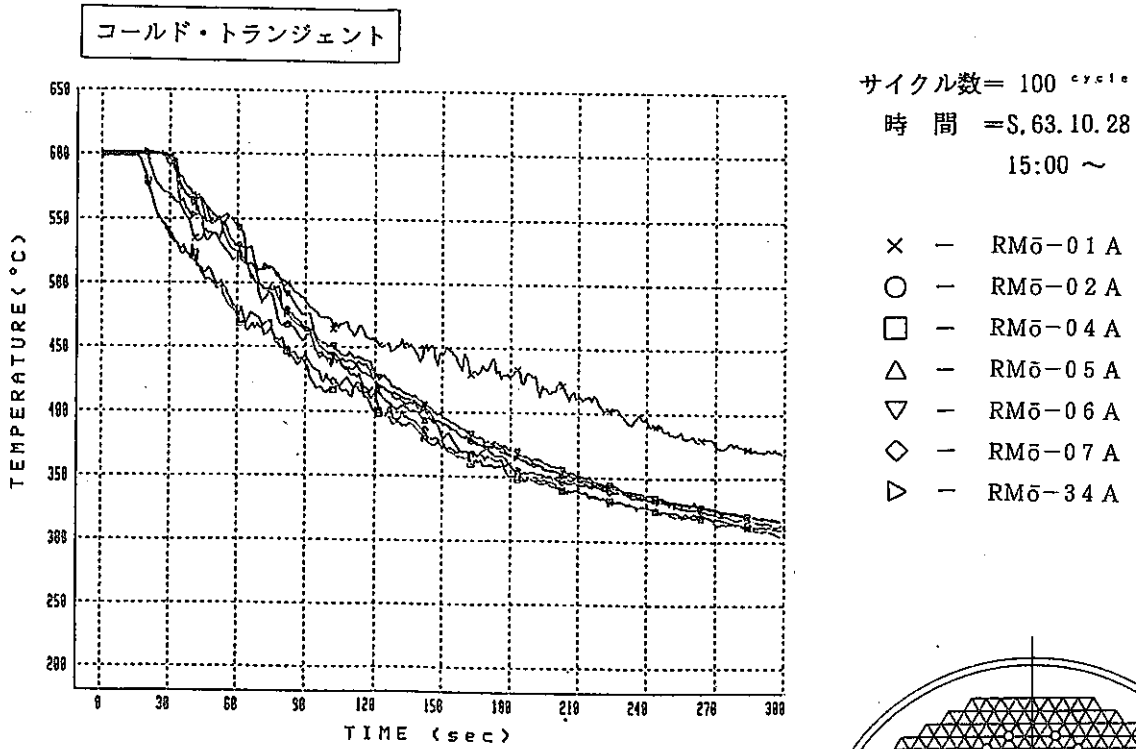
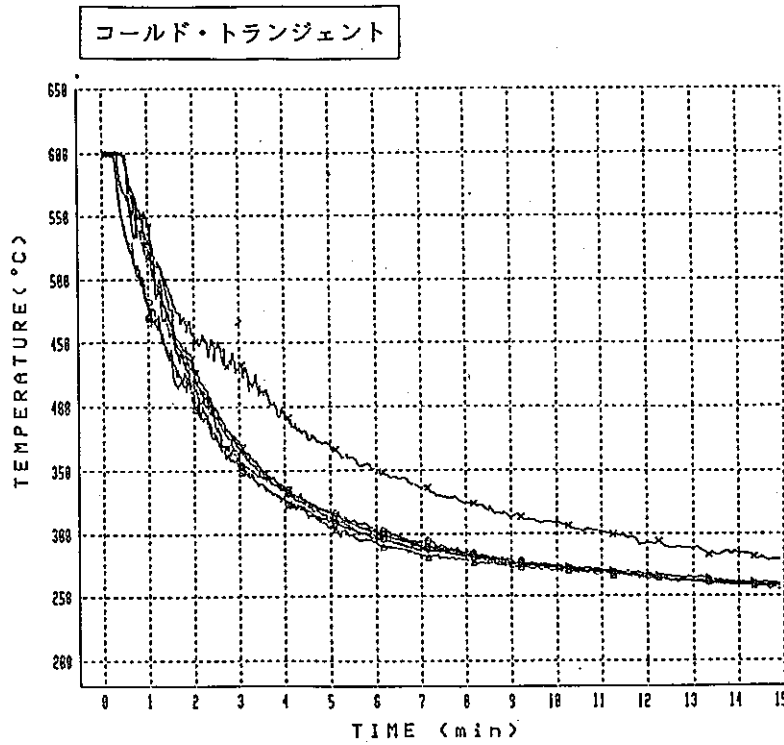


図 4.50 多孔板軸方向温度分布(2)



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

- × - RM0-01A
- - RM0-02A
- - RM0-04A
- △ - RM0-05A
- ▽ - RM0-06A
- ◇ - RM0-07A
- ▷ - RM0-34A

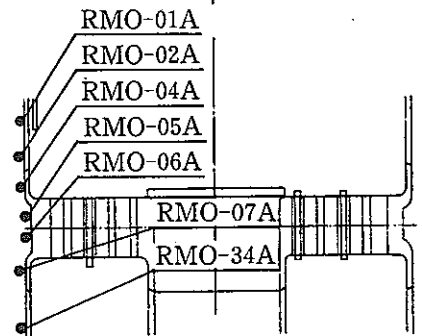
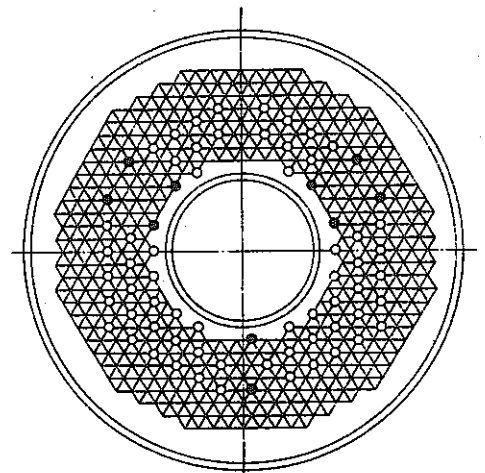
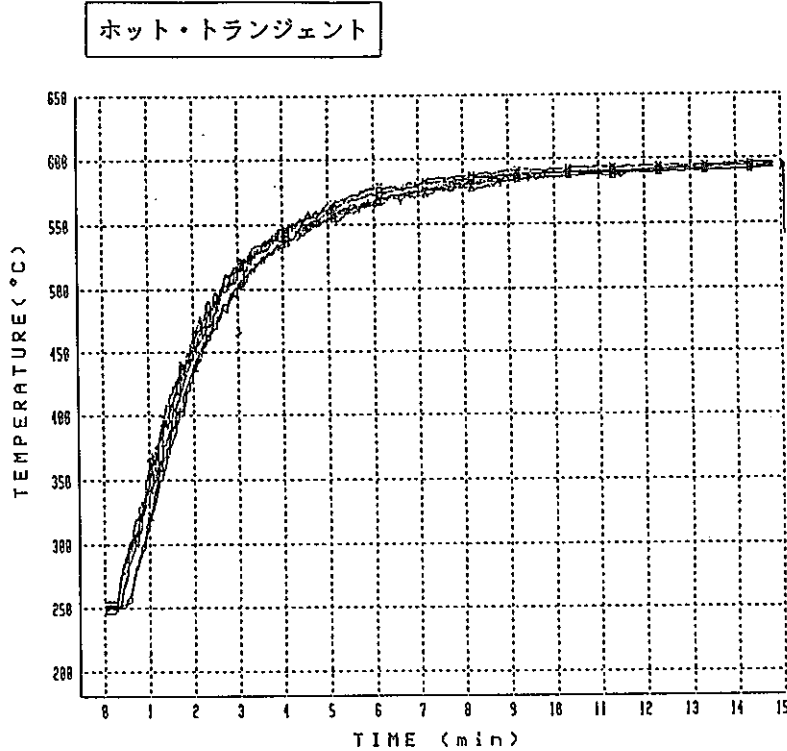
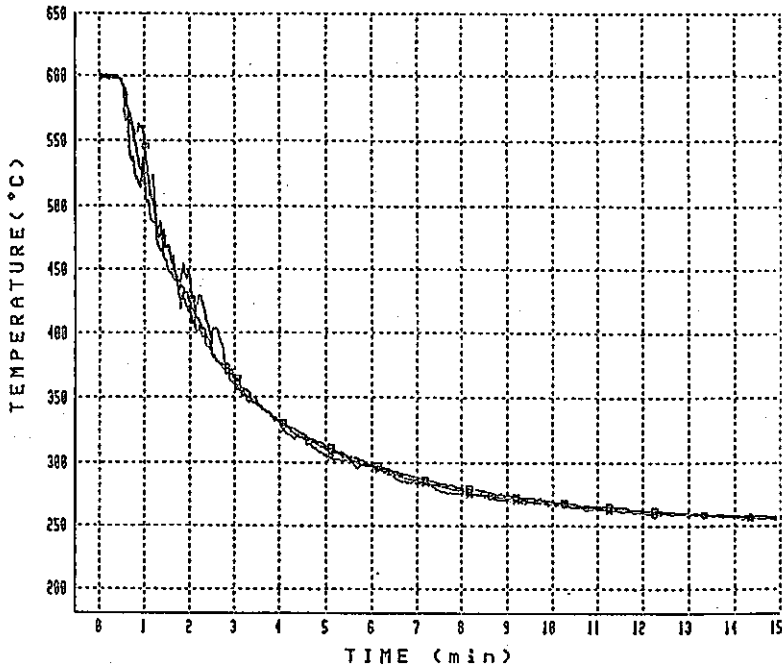


図 4.51 多孔板軸方向温度分布(3)

コールド・トランジェント



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

- × - RMo-05 A
- - RMo-05 B
- - RMo-05 C

ホット・トランジェント

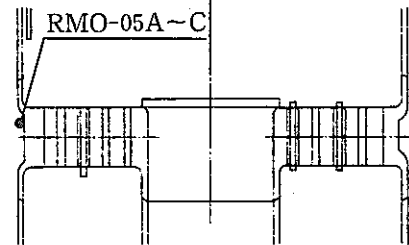
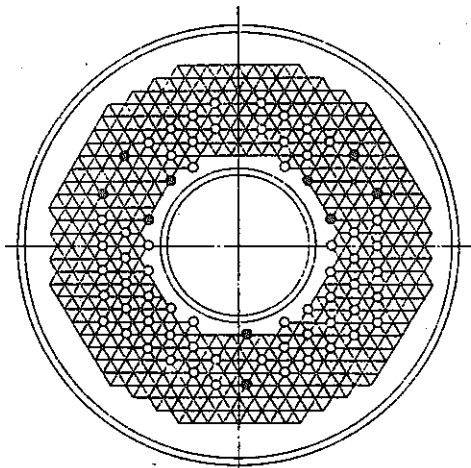
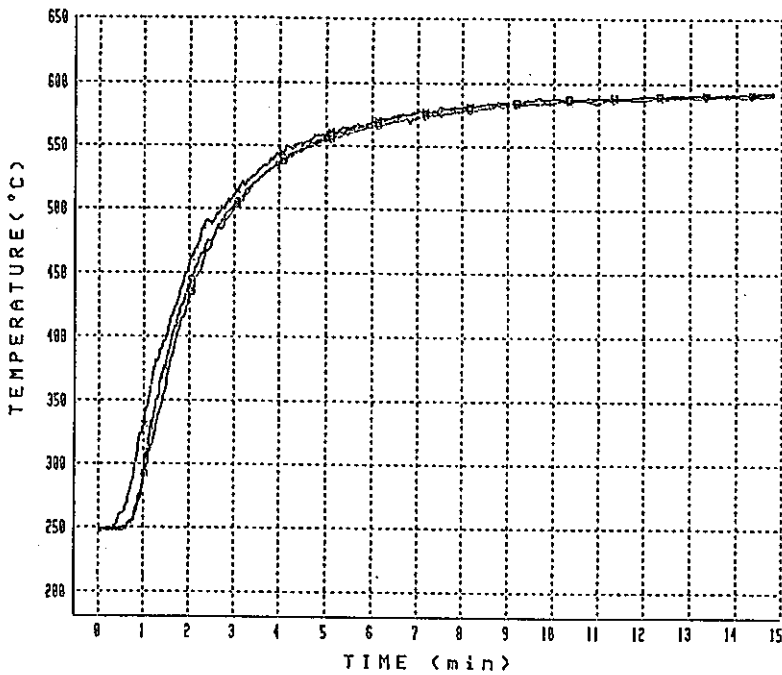
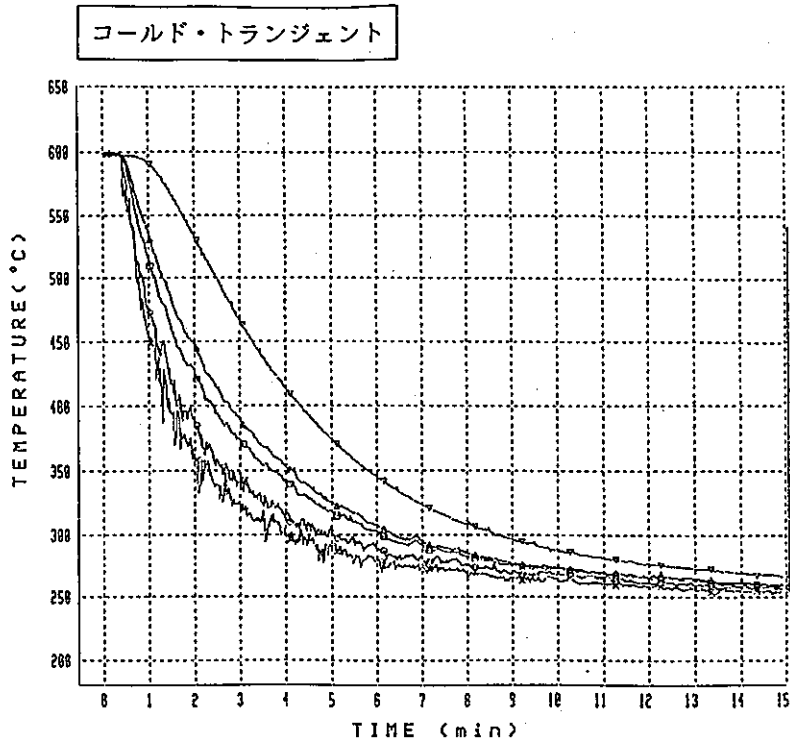


図 4.52 多孔板周方向温度分布



サイクル数 = 100
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

- × - SKN-01A
- - SKS-01A
- - SKM-01A
- △ - SKI-01A
- ▽ - SKO-01A

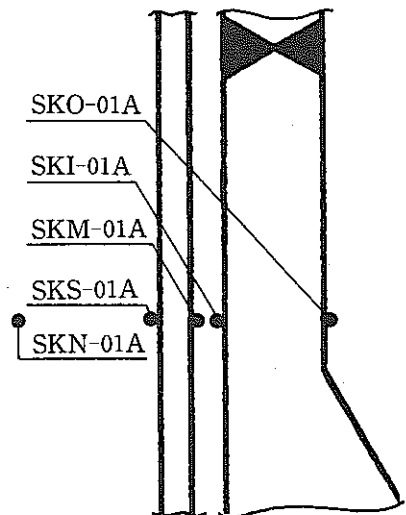
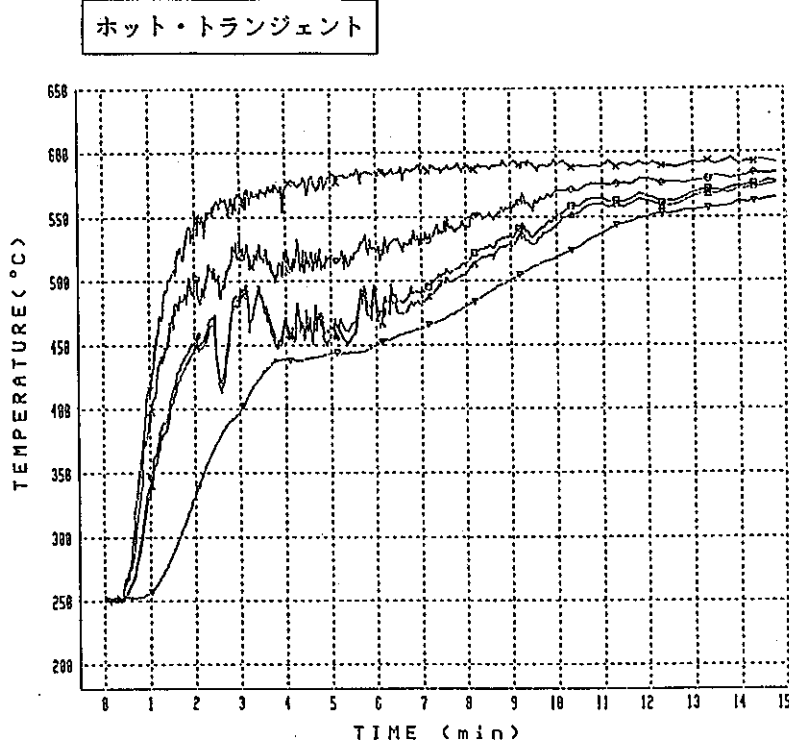
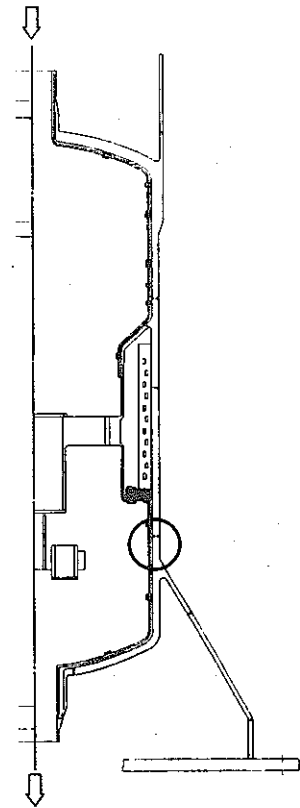


図 4.53 支持スカート半径方向温度分(1)

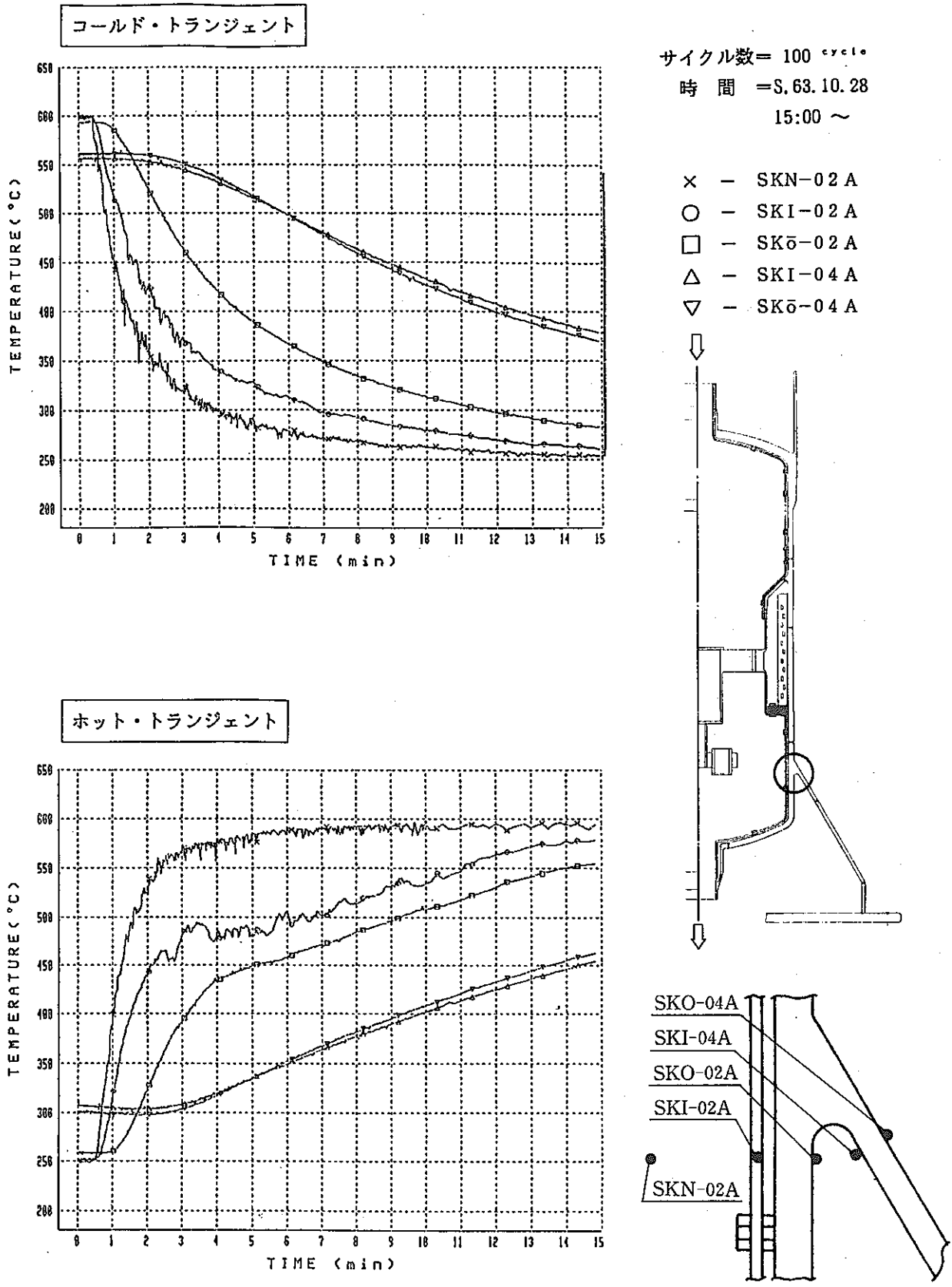
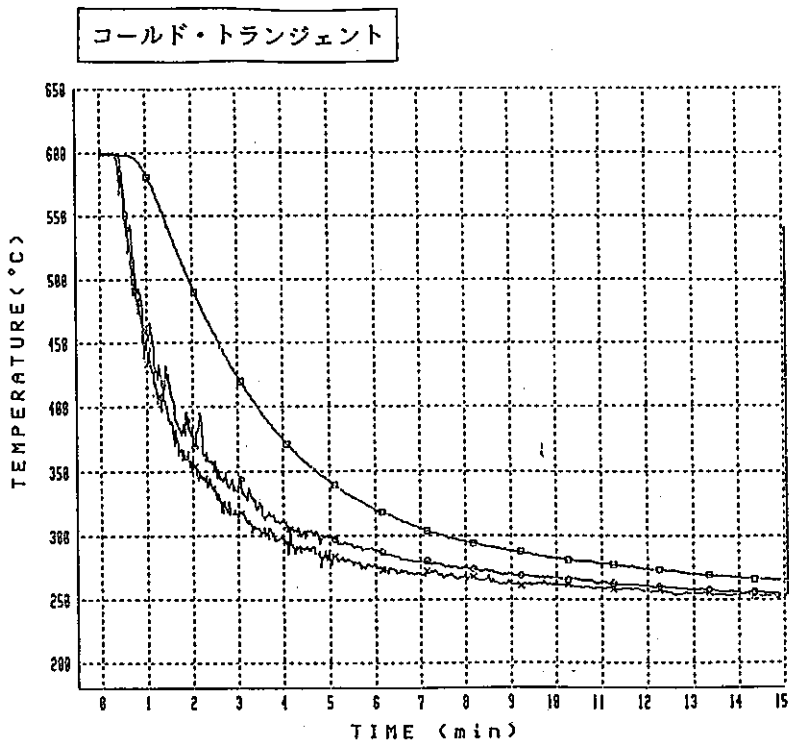


図 4.54 支持スカート半径方向温度分(2)



サイクル数 = 100 回
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

- × - SKN-03A
- - SKI-03A
- - SKO-03A

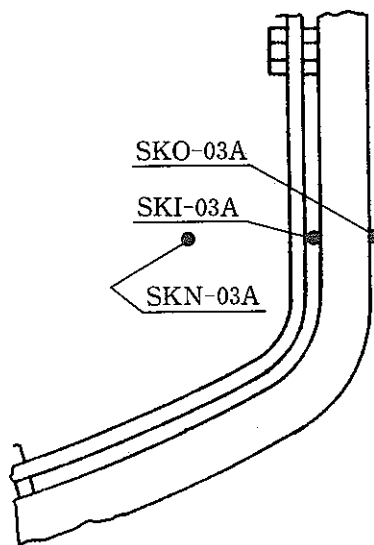
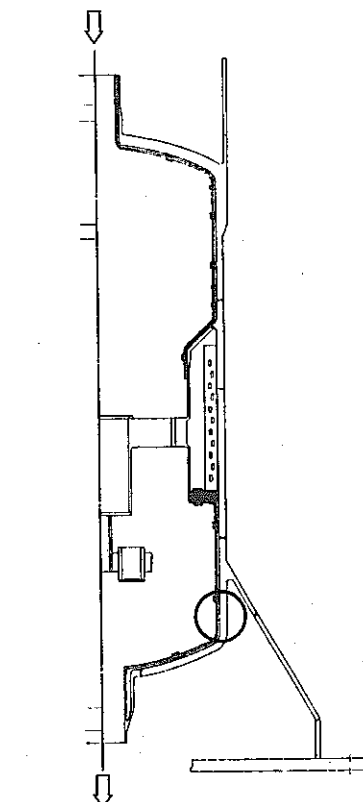
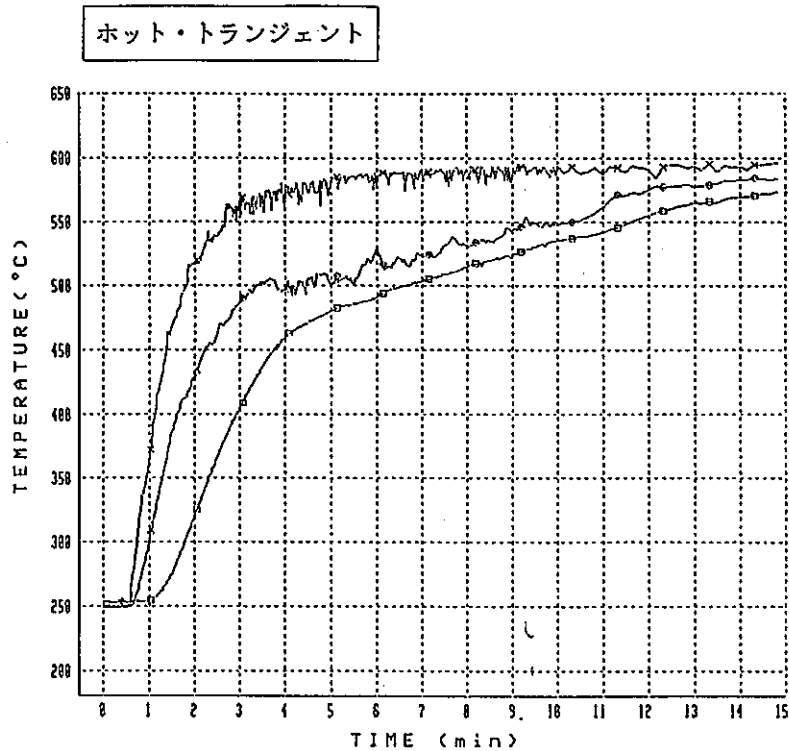
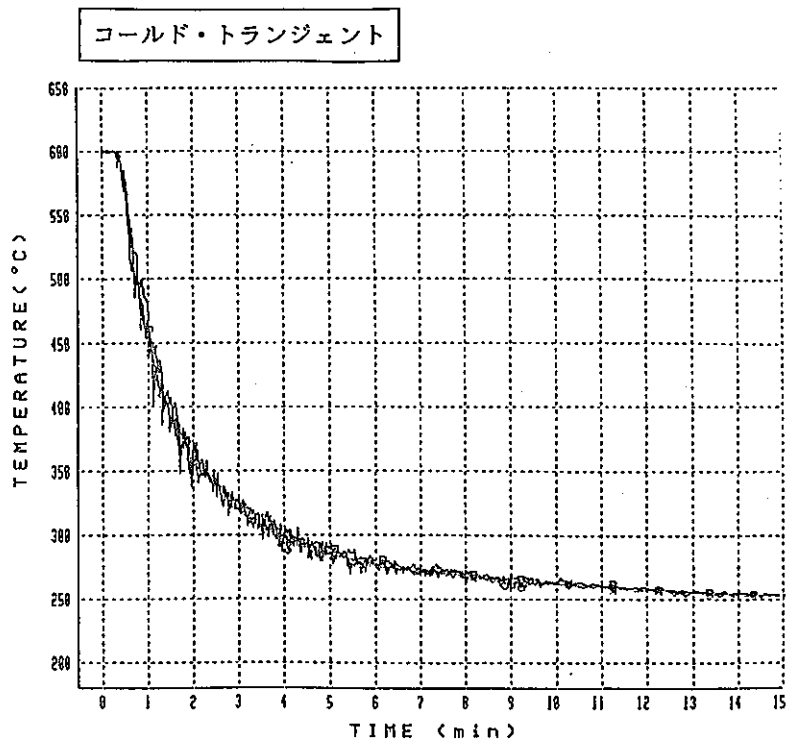


図 4.55 支持スカート半径方向温度分(3)



サイクル数 = 100 cycle

時間 = S. 63. 10. 28

15:00 ~

- × - SKN-02 A
- - SKN-02 B
- - SKN-02 C

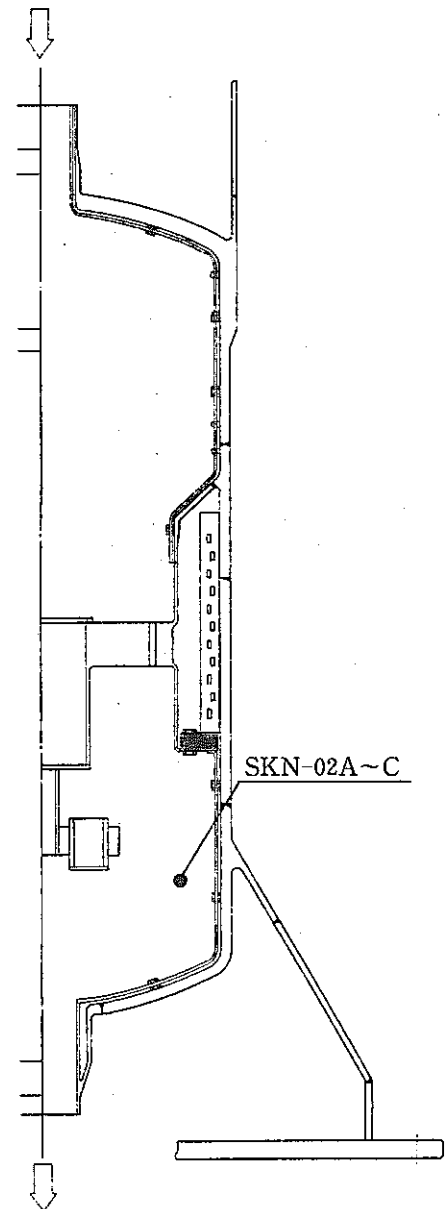
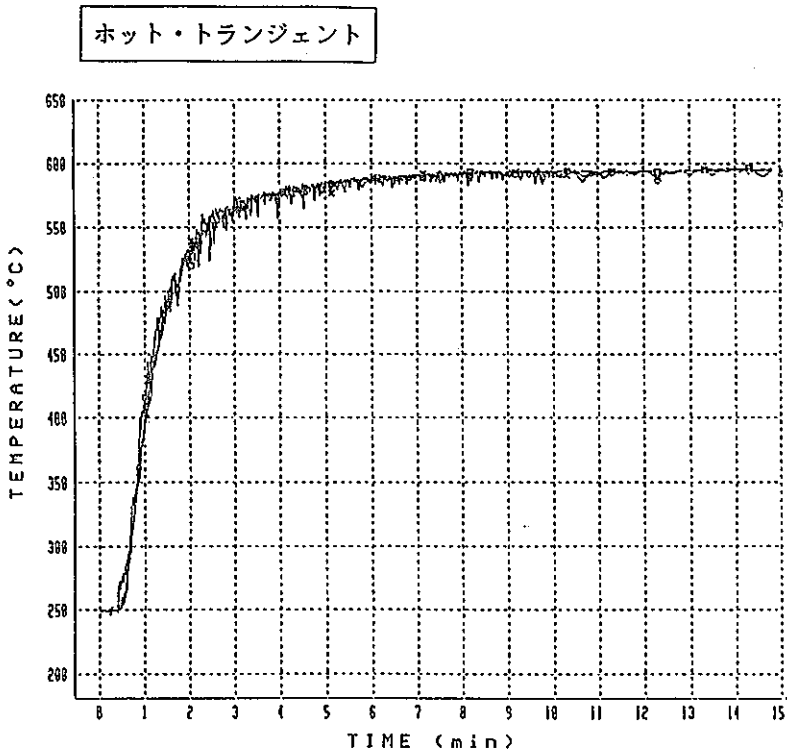


図 4.56 支持スカート周方向温度分布

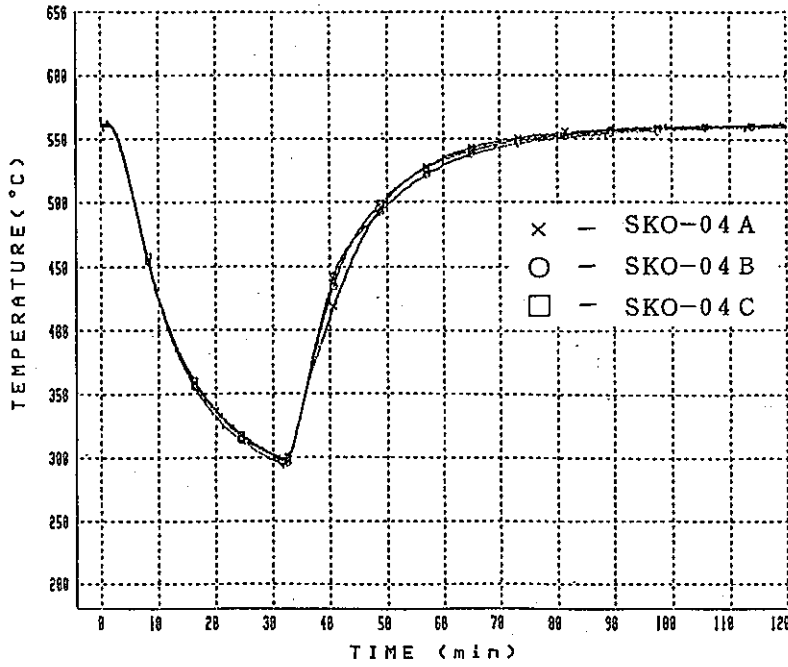


図 4.57 支持スカート大気部周方向温度分布

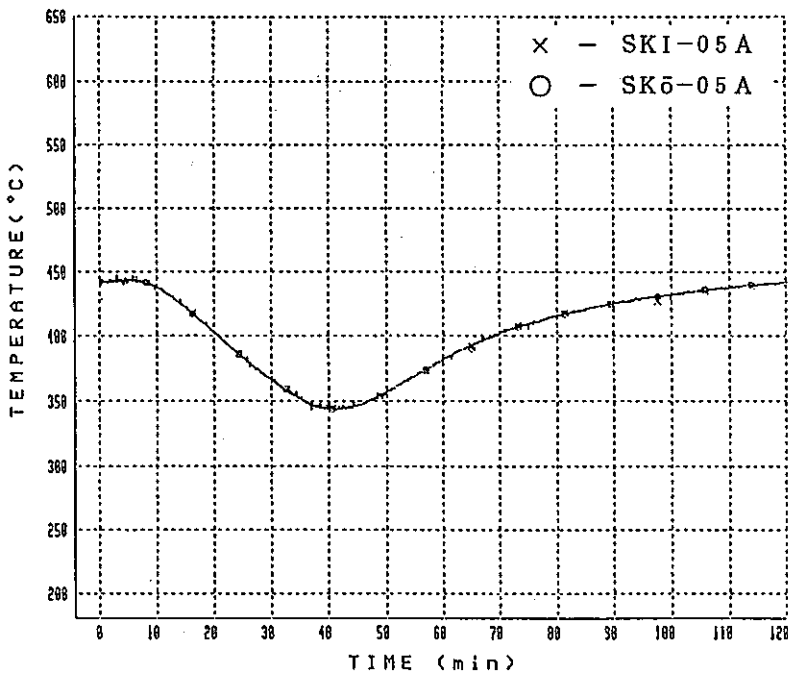
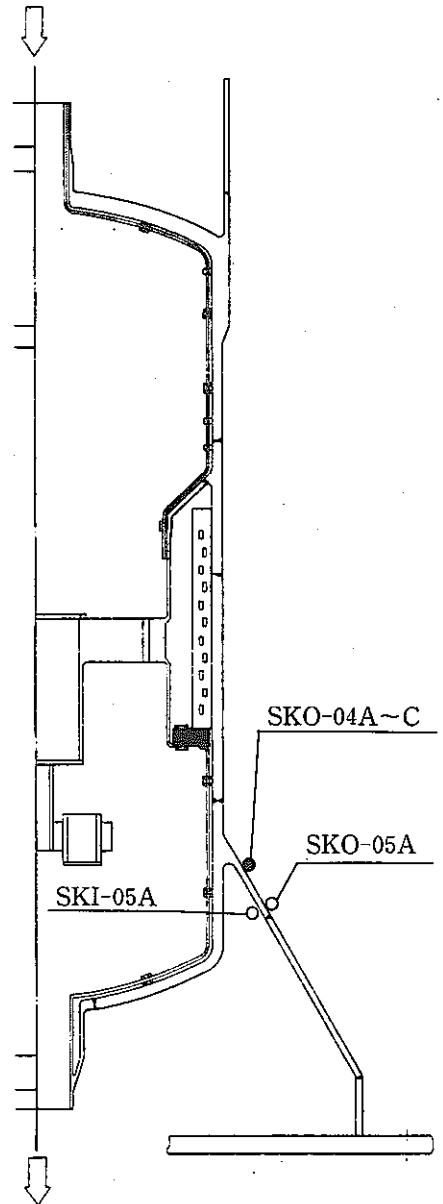
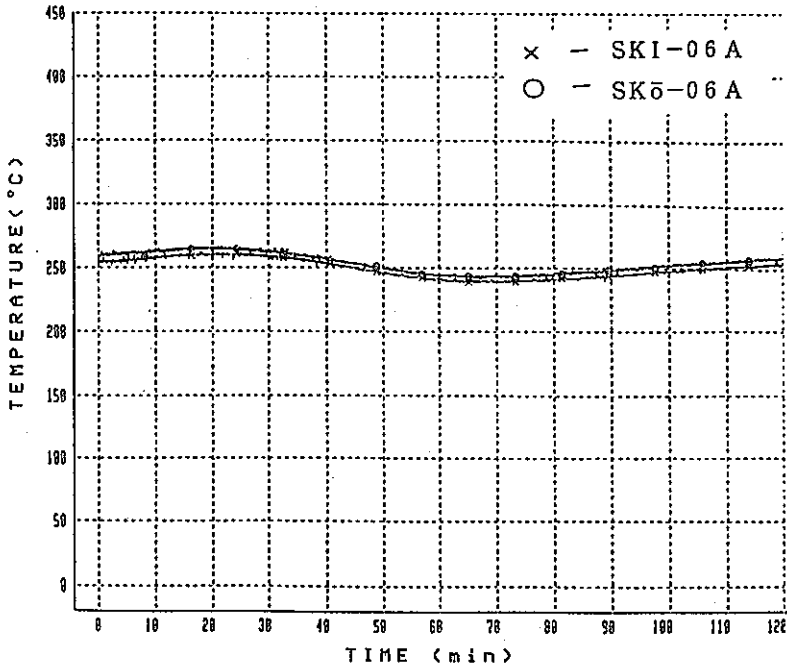


図 4.58 支持スカート大気部半径方向温度分布(I)

サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~





サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S.63.10.28
 15:00 ~

図 4.59 支持スカート大気部半径方向温度分布(2)

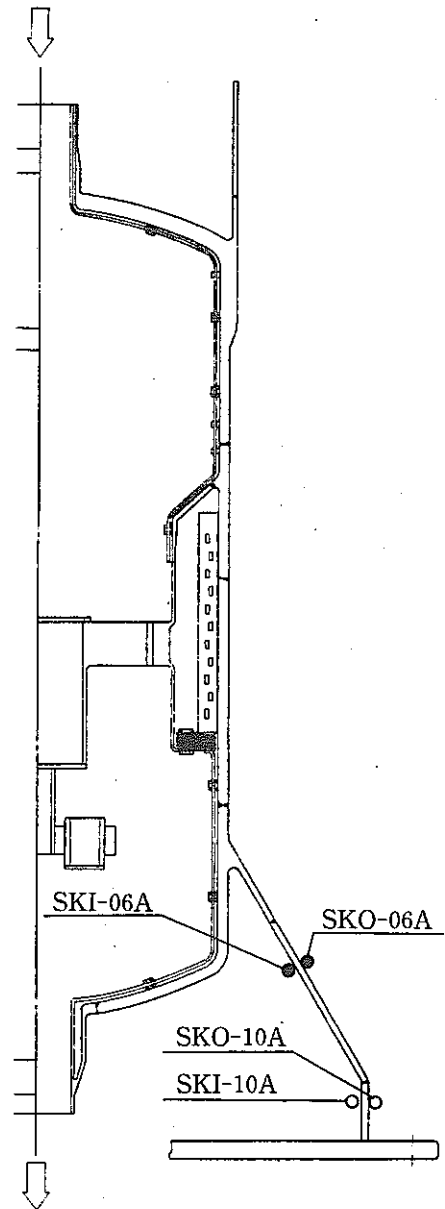
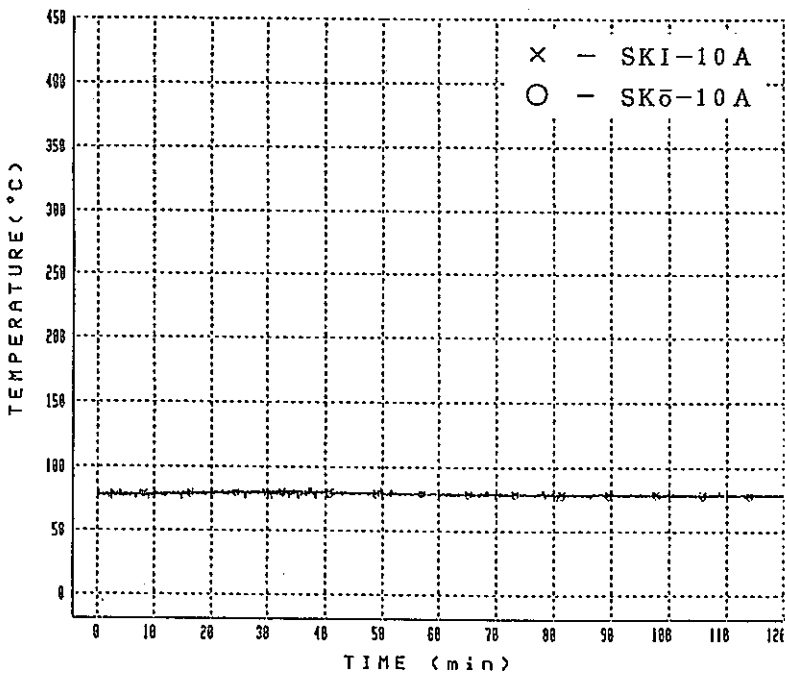
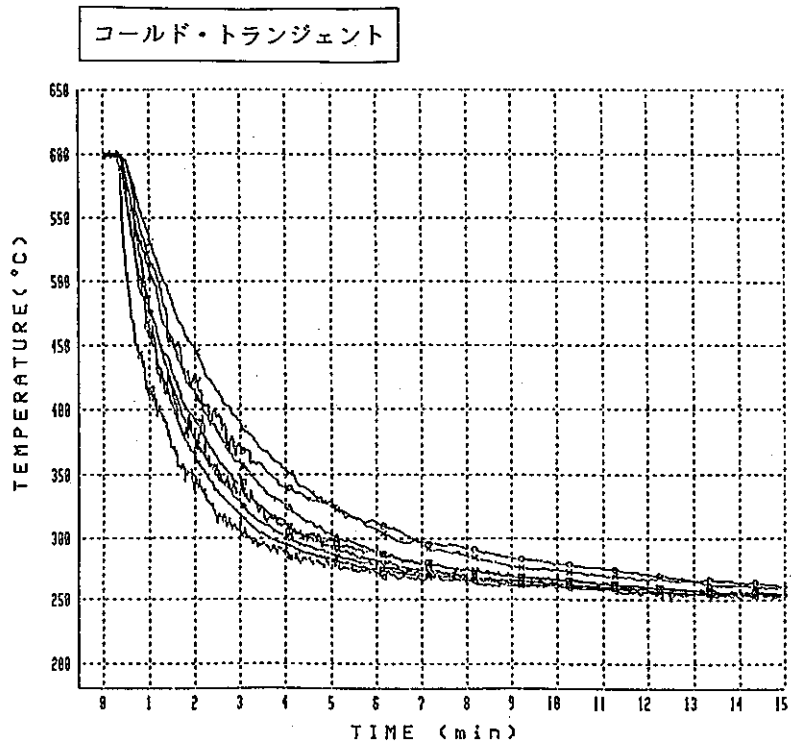


図 4.60 支持スカート大気部半径方向温度分布(3)



サイクル数 = 100 cycle

時間 = S. 63. 10. 28

15:00 ~

- × - SKI-01A
- - SKI-02A
- - SKI-03A
- △ - OTI-01A
- ▽ - OTI-02A
- ◇ - OTI-03A
- ▷ - OTI-04A
- ◁ - OTI-05A

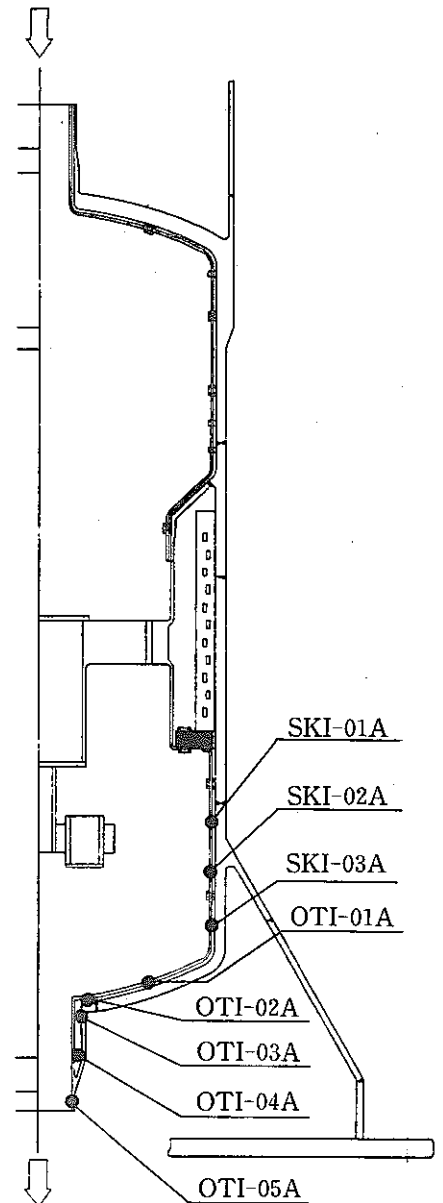
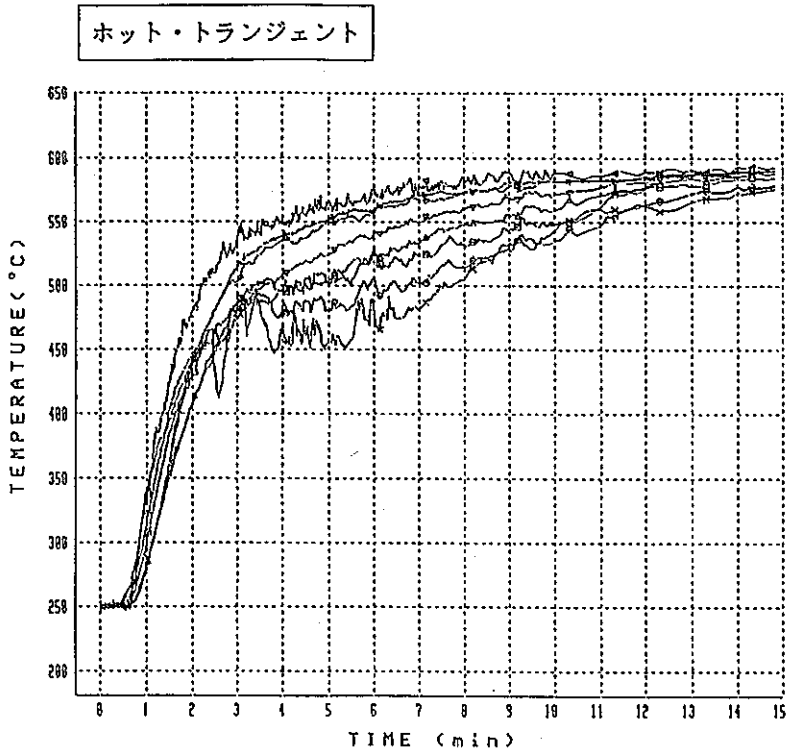


図 4.61 支持スカート軸方向温度分布

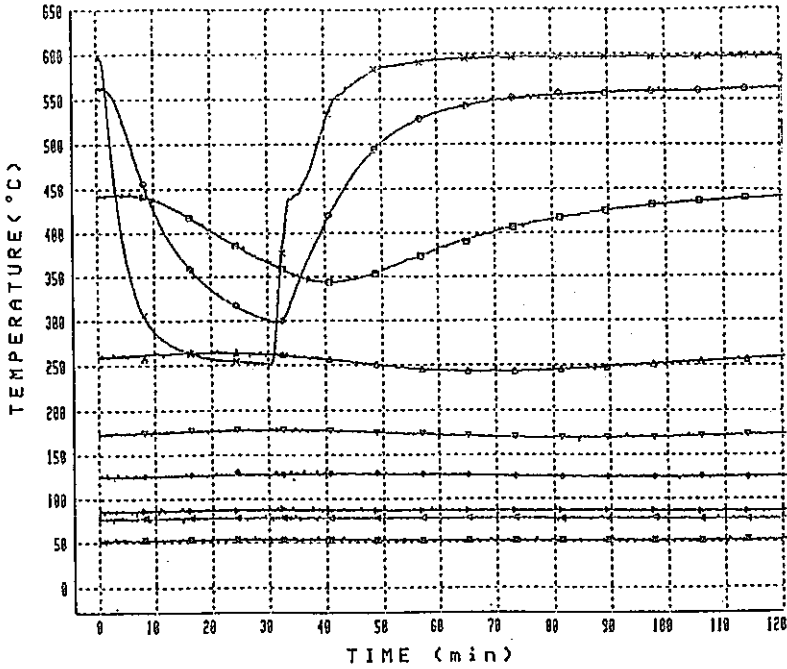


図 4.62 支持スカート大気部軸方向温度分布(1)

サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S.63.10.28
 15:00 ~

- × - SKo-01A
- - SKo-04A
- - SKo-05A
- △ - SKo-06A
- ▽ - SKo-07A
- ◇ - SKo-08A
- ▷ - SKo-09A
- ◁ - SKo-10A
- ⊗ - SKo-11A

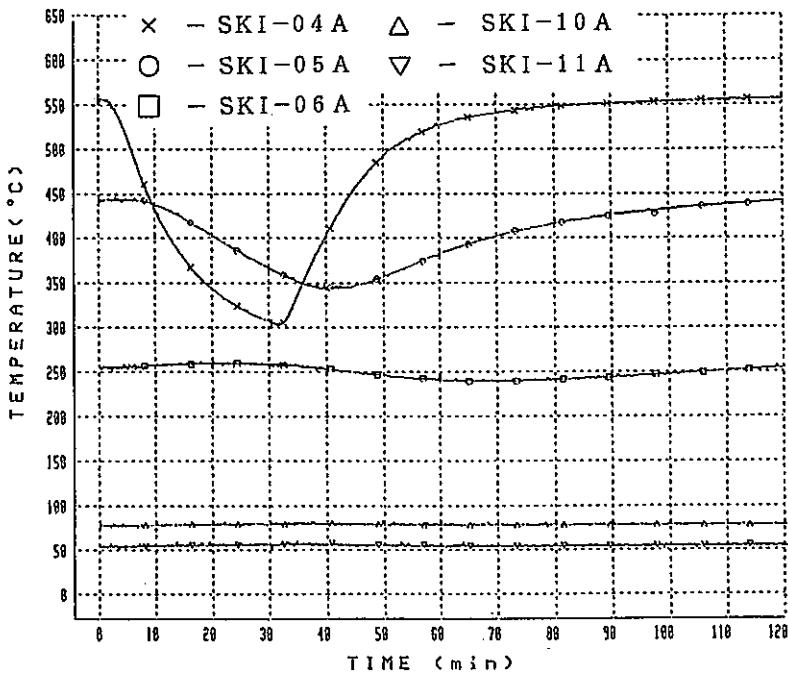
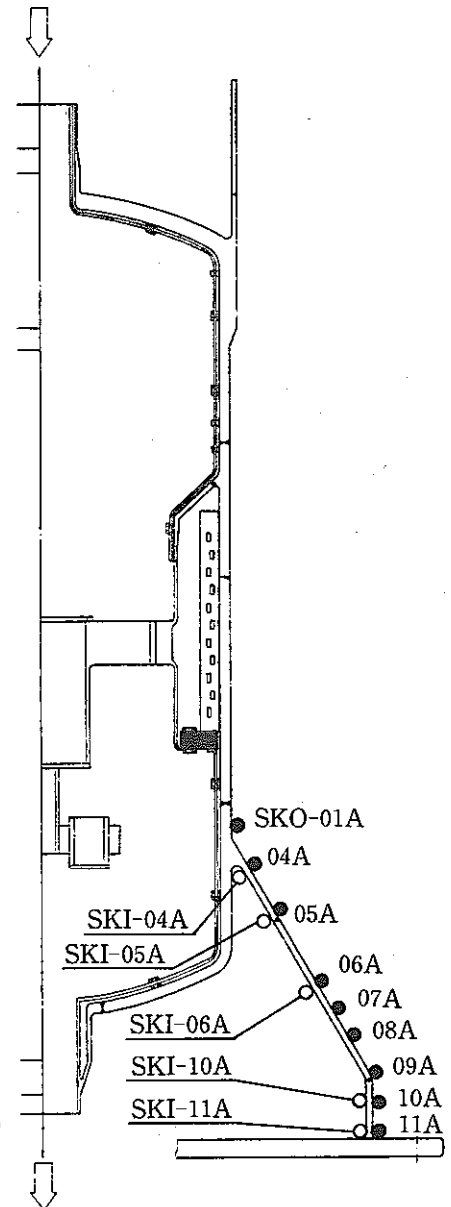
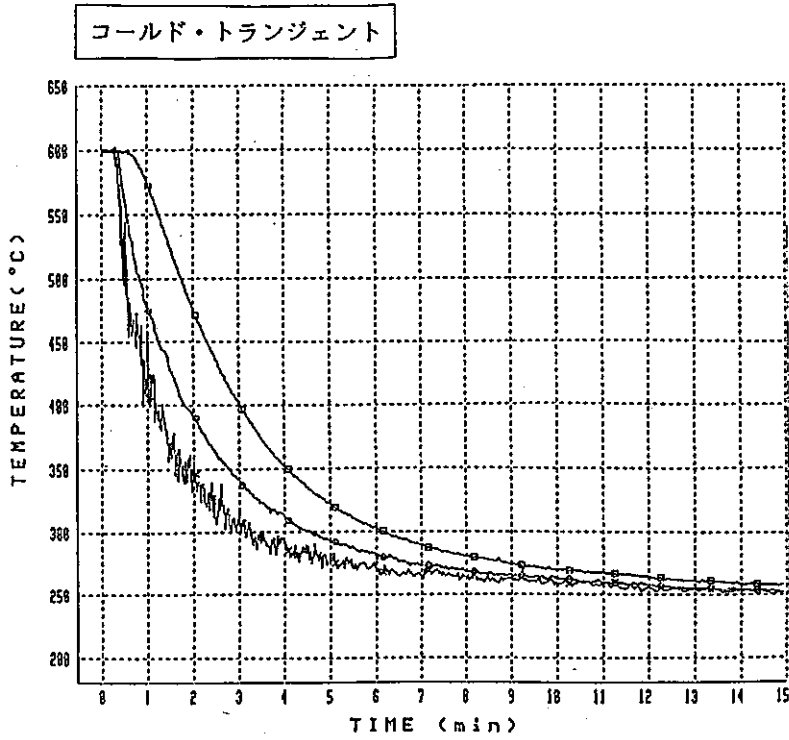


図 4.63 支持スカート大気部軸方向温度分布(2)





サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

- × - δ TN-02A
- - δ TI-02A
- - δ T δ -02A

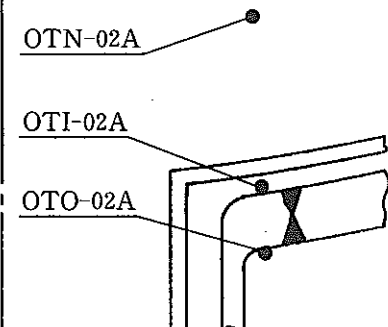
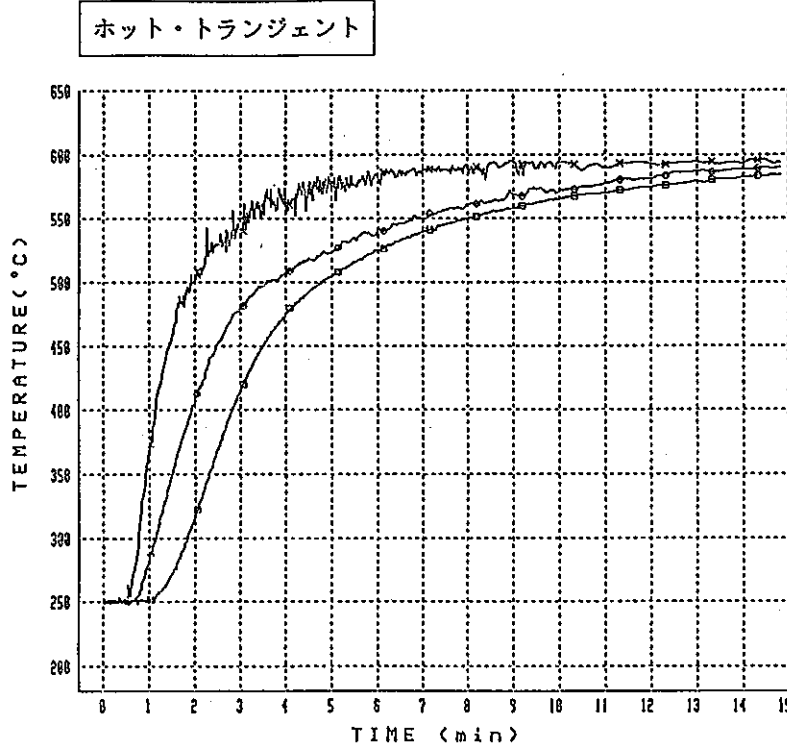
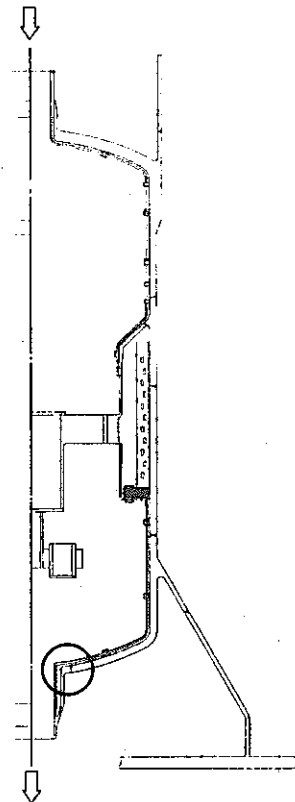
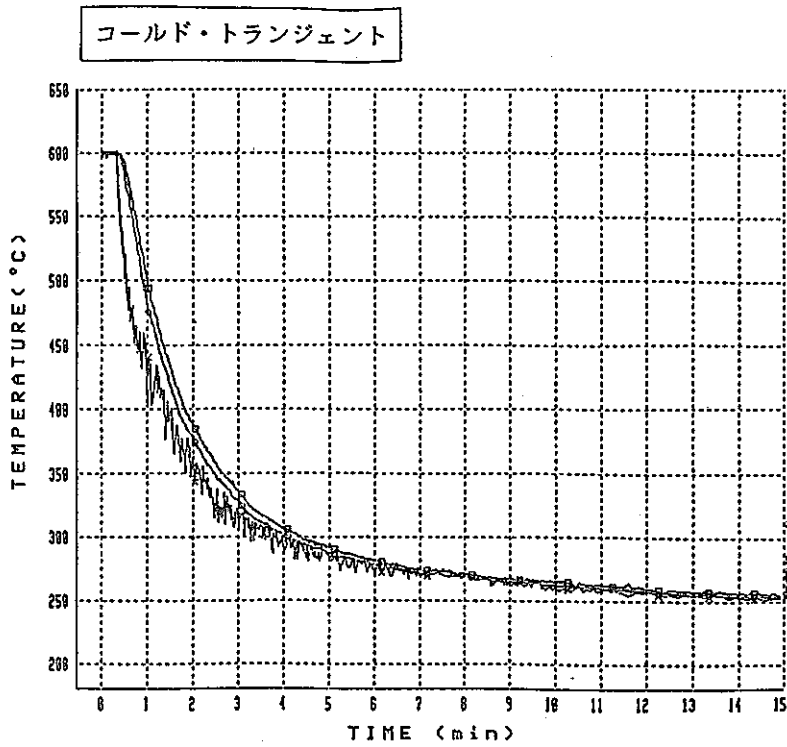


図 4.64 出口ノズル半径方向温度分布(1)



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

- × - OTN-03A
- - OTI-03A
- - OTθ-03A

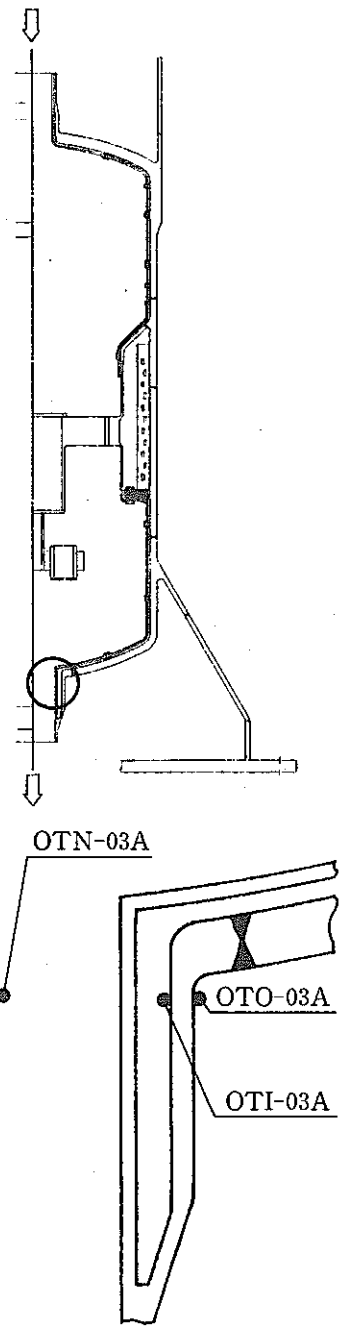
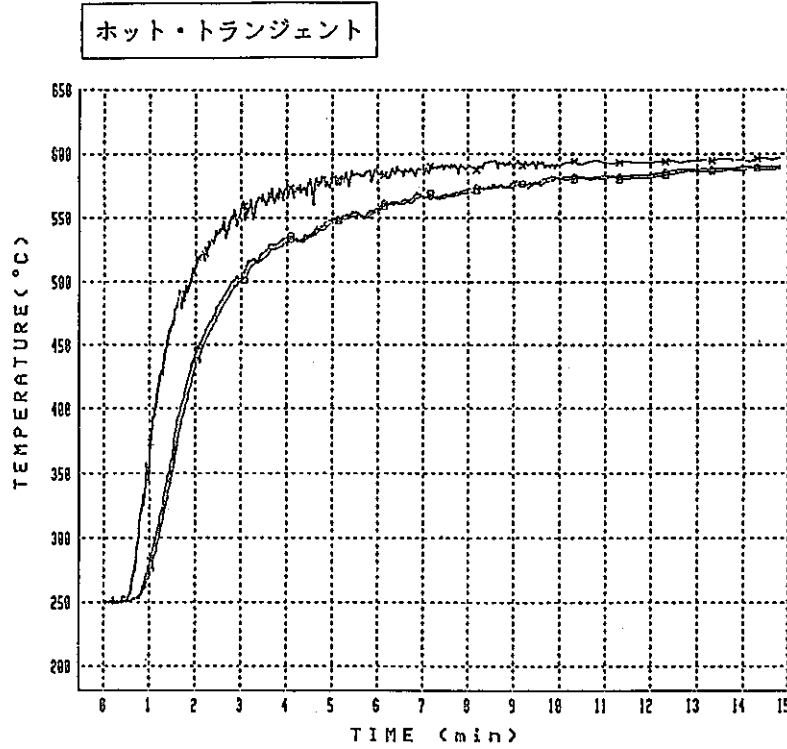
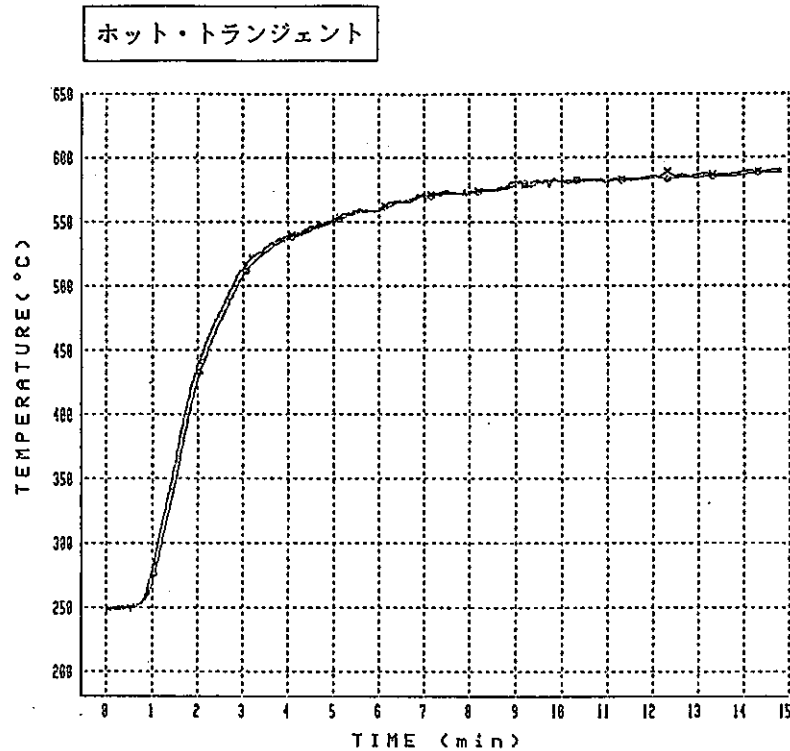
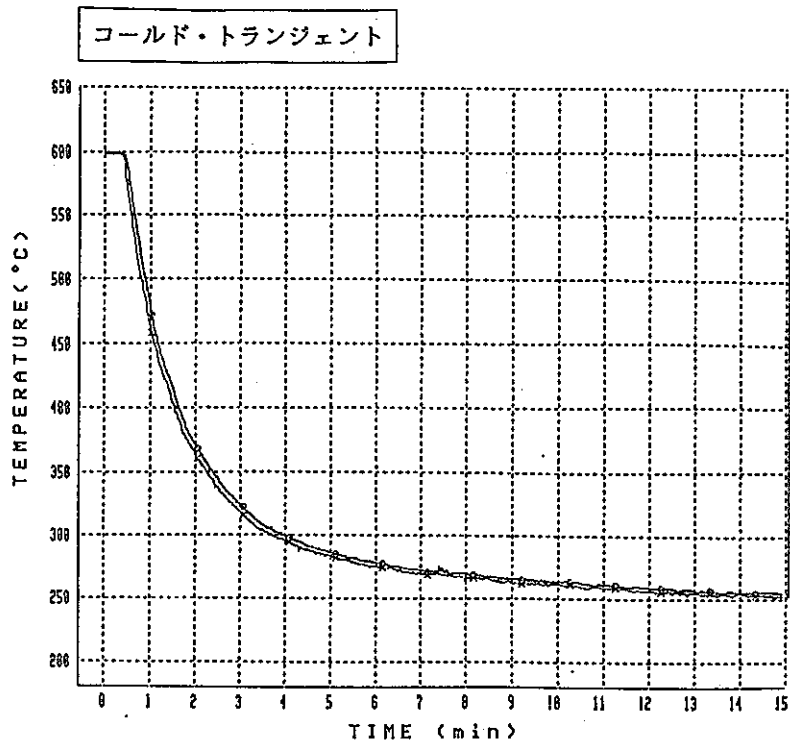


図 4.65 出口ノズル半径方向温度分布(2)



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

× - $\delta T_I-04 A$
 ○ - $\delta T_O-04 A$

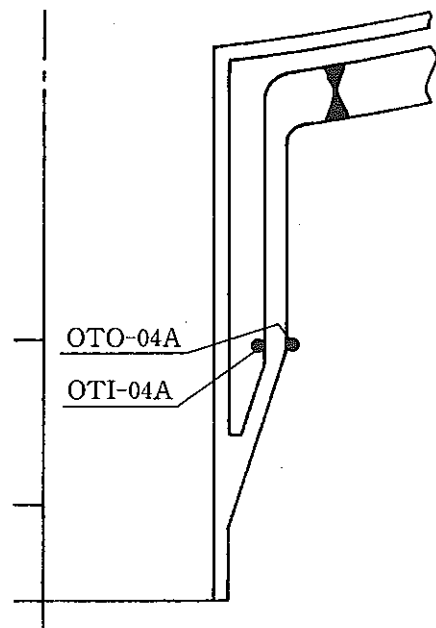
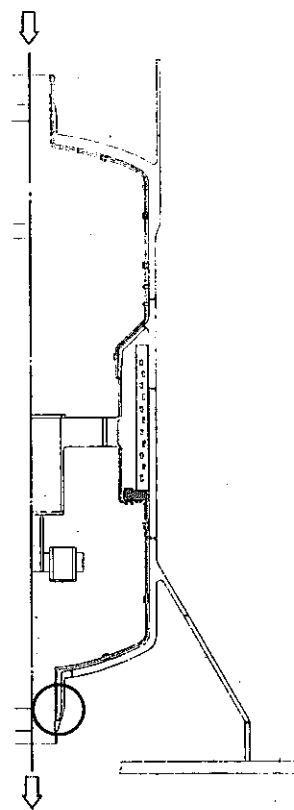
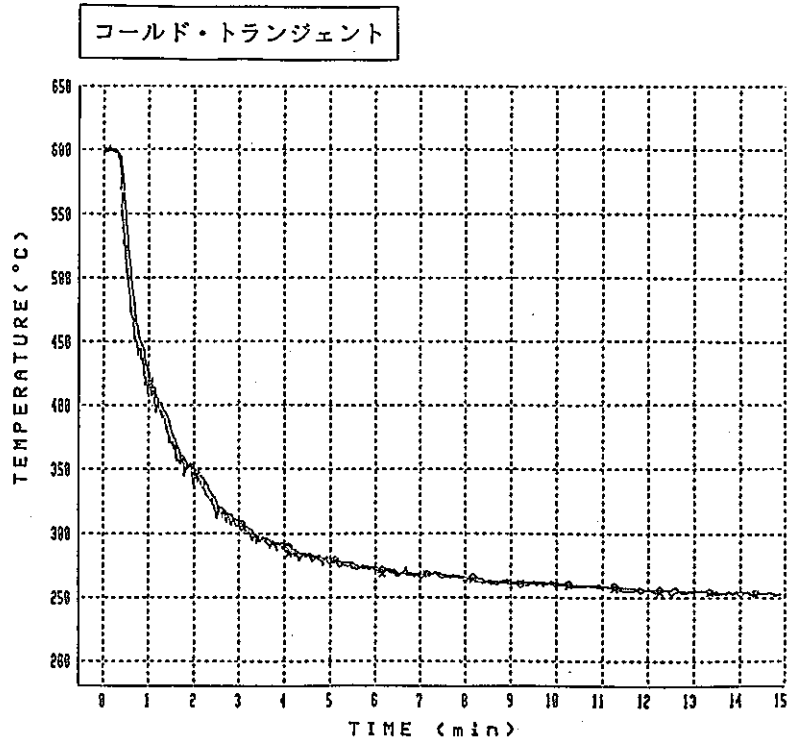


図 4.66 出口ノズル半径方向温度分布(3)



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S. 63.10.28
 15:00 ~

× - $\bar{\sigma}_{TI-05A}$
 ○ - $\bar{\sigma}_{To-05A}$

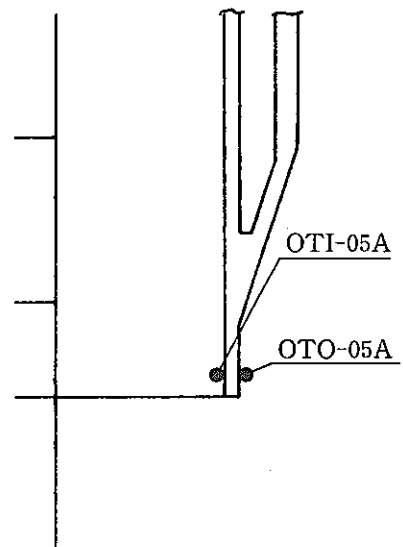
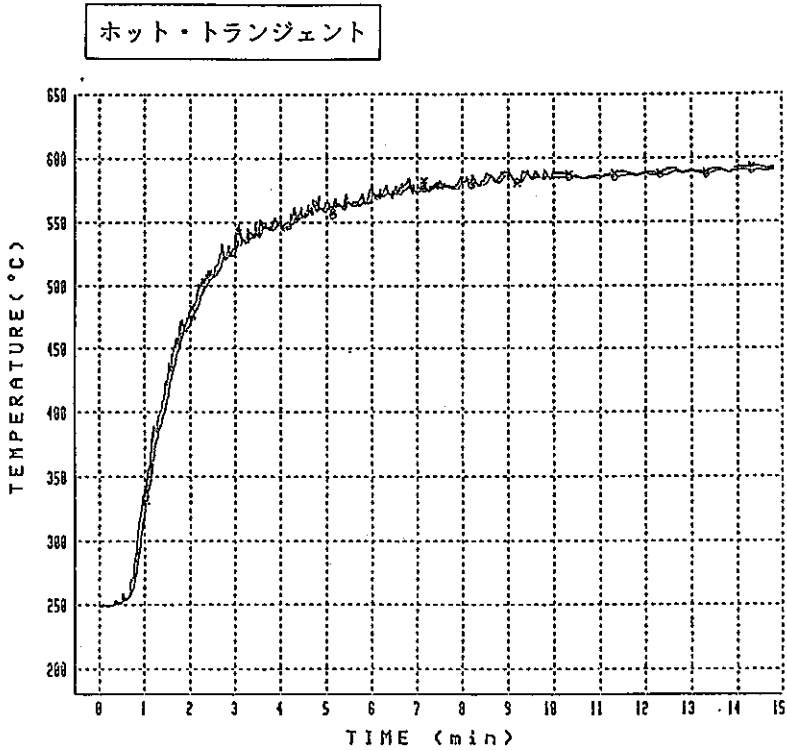
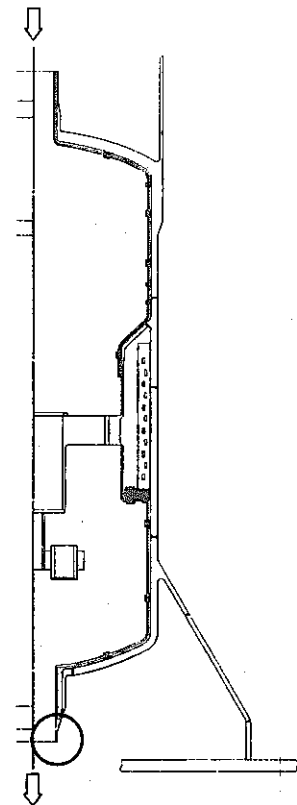
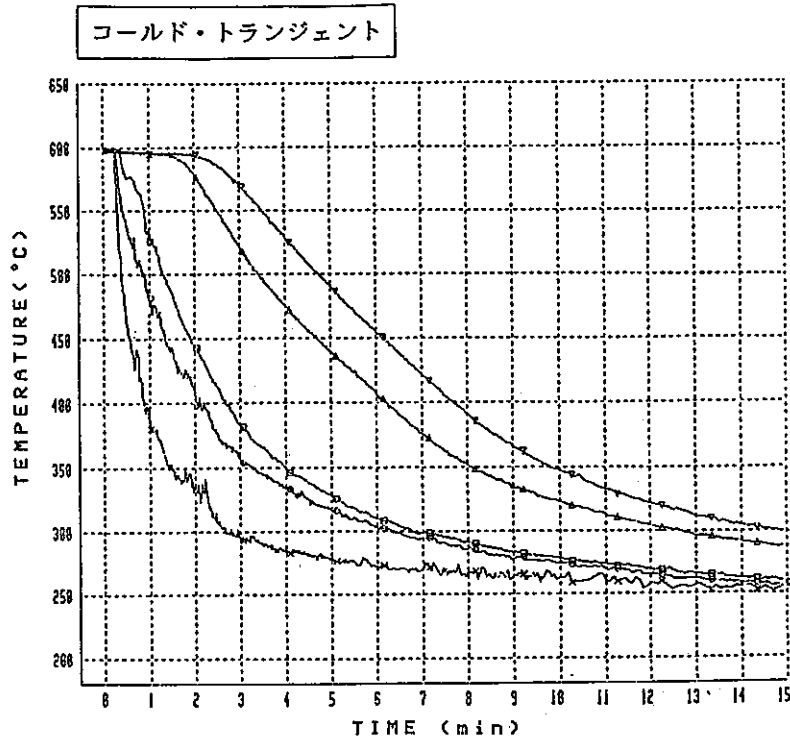


図 4.67 出口ノズル半径方向温度分布(4)



サイクル数 = 100 cycle

時間 = S. 63. 10. 28

15:00 ~

- × - RMI-02A
- - RMO-02A
- - THN-02A
- △ - THI-02A
- ▽ - THO-02A

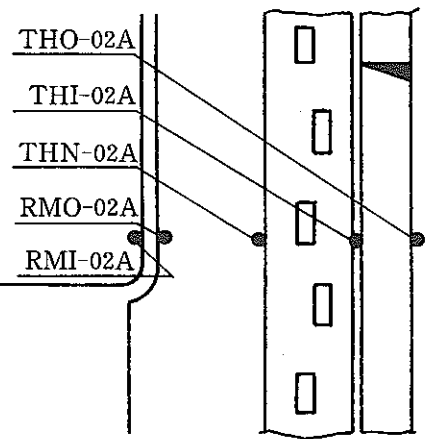
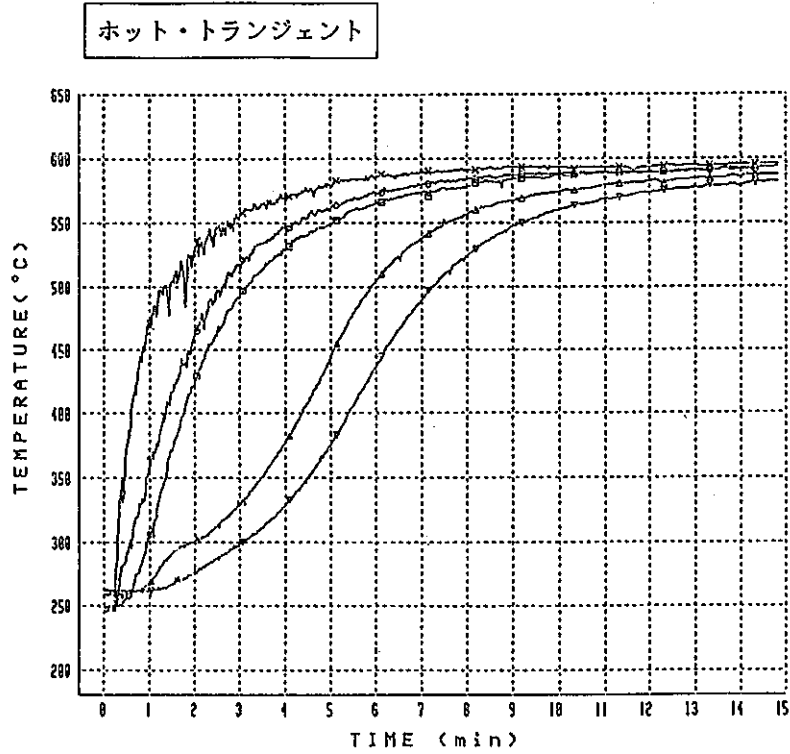
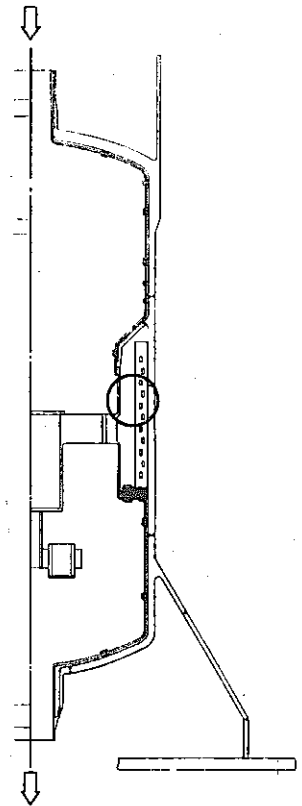
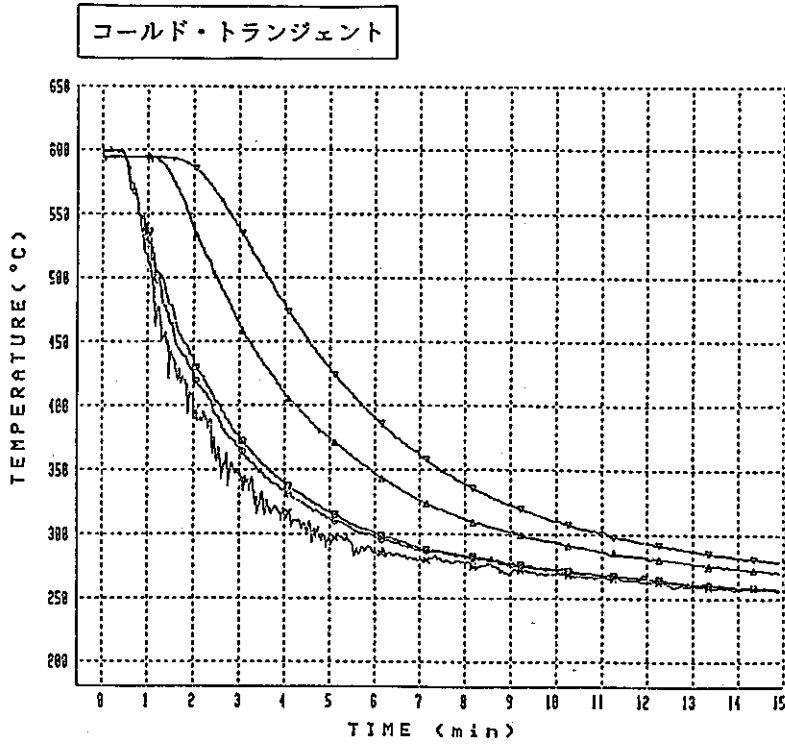


図 4.68 熱抵抗体半径方向温度分布(1)



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S.63.10.28
 15:00 ~

- × - RMI-07 A
- - RMO-07 A
- - THN-03 A
- △ - THI-03 A
- ▽ - THO-03 A

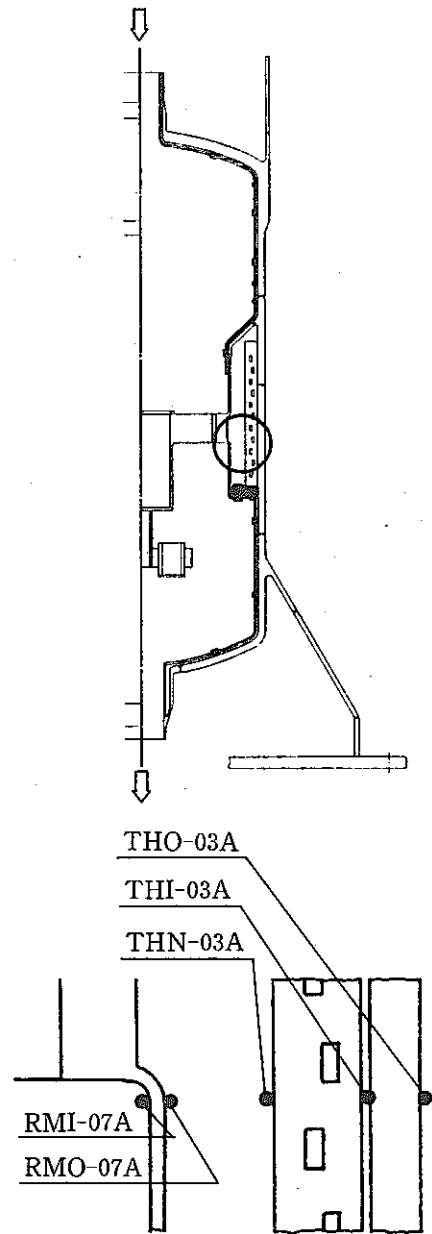
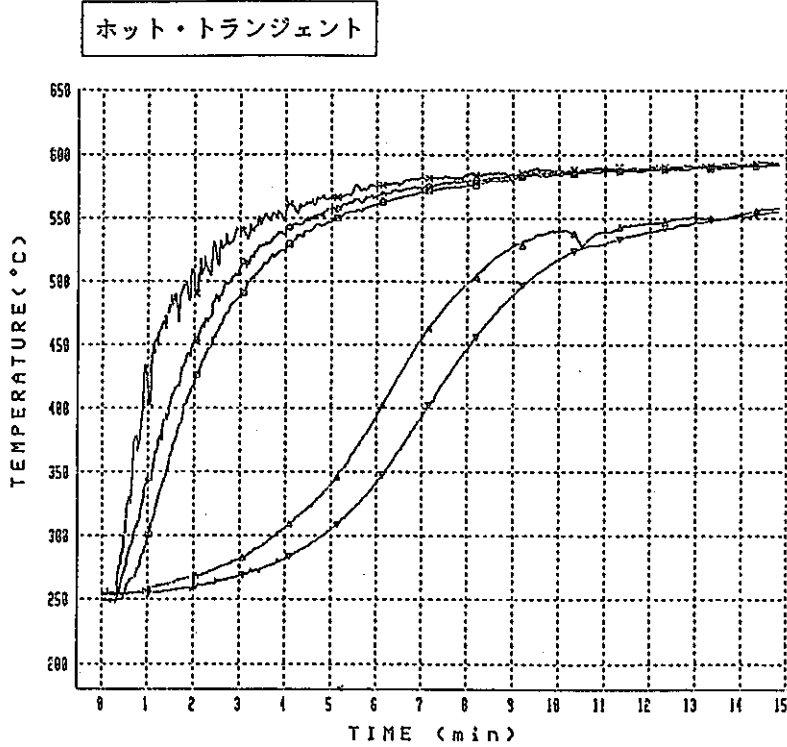
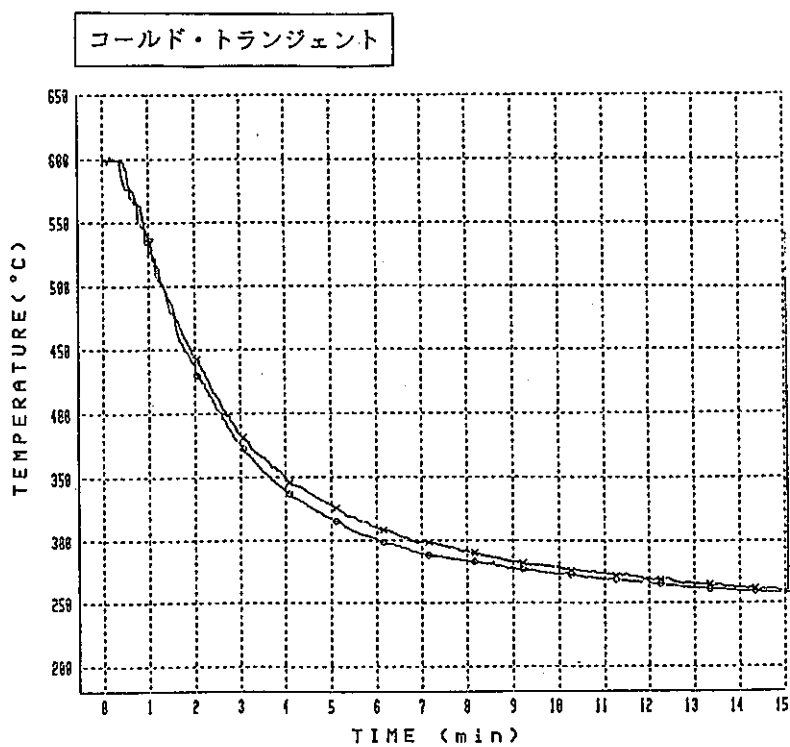


図 4.69 熱抵抗体半径方向温度分布(2)



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

× - THN-02A
 ○ - THN-03A

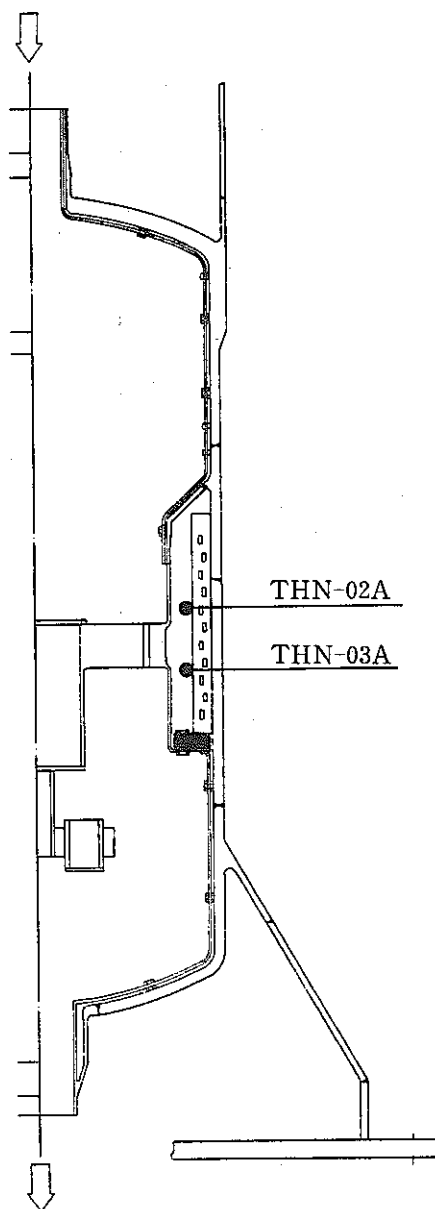
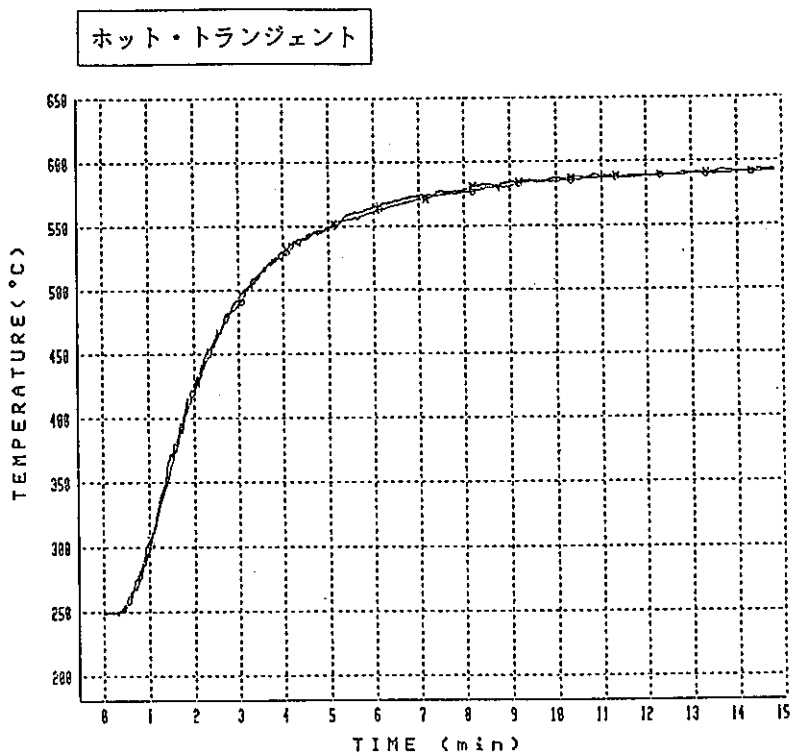
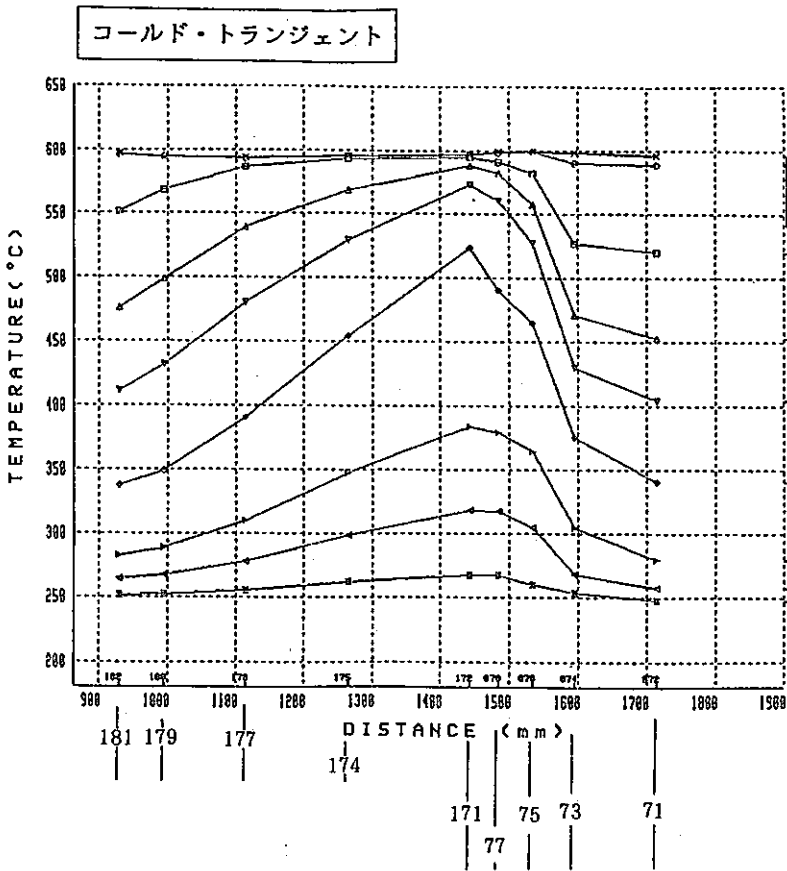


図 4.70 熱抵抗体軸方向温度分布



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

- × - 0 sec
- - 60 sec
- - 120 sec
- △ - 180 sec
- ▽ - 240 sec
- ◇ - 360 sec
- ▽ - 600 sec
- △ - 900 sec
- ⊗ - 1800 sec

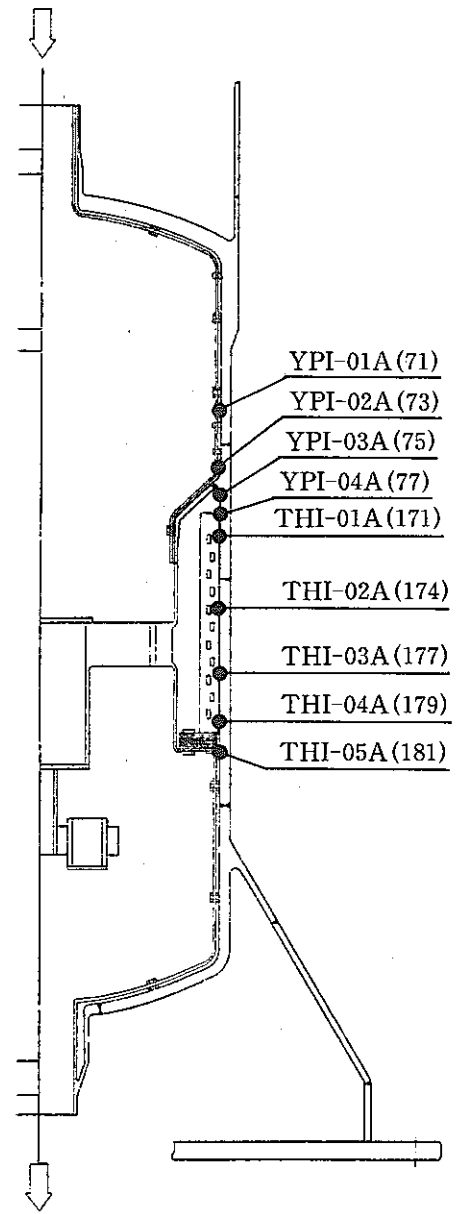
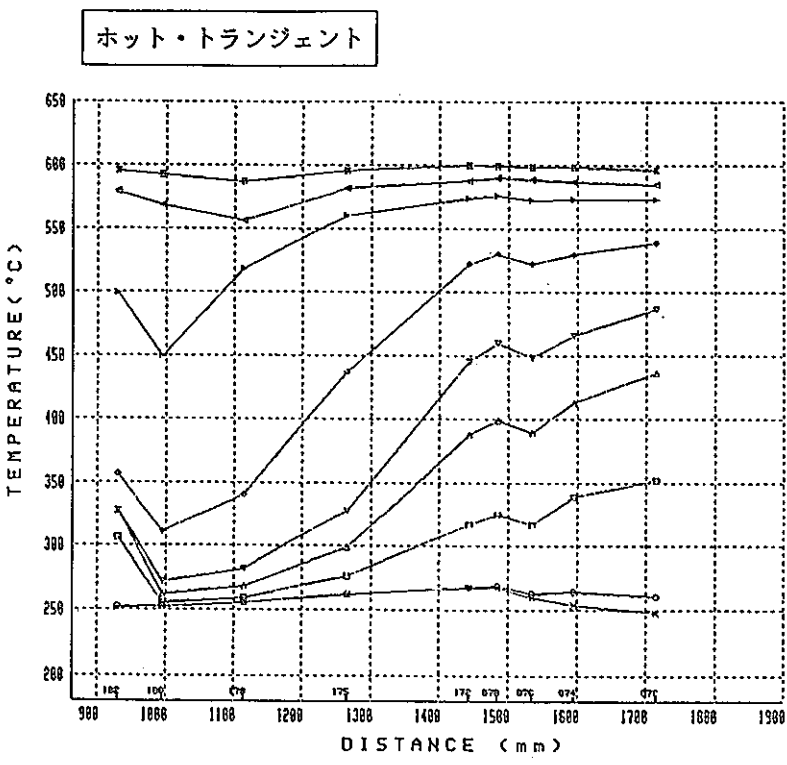


図 4.71 供試体胴内面軸方向温度分布

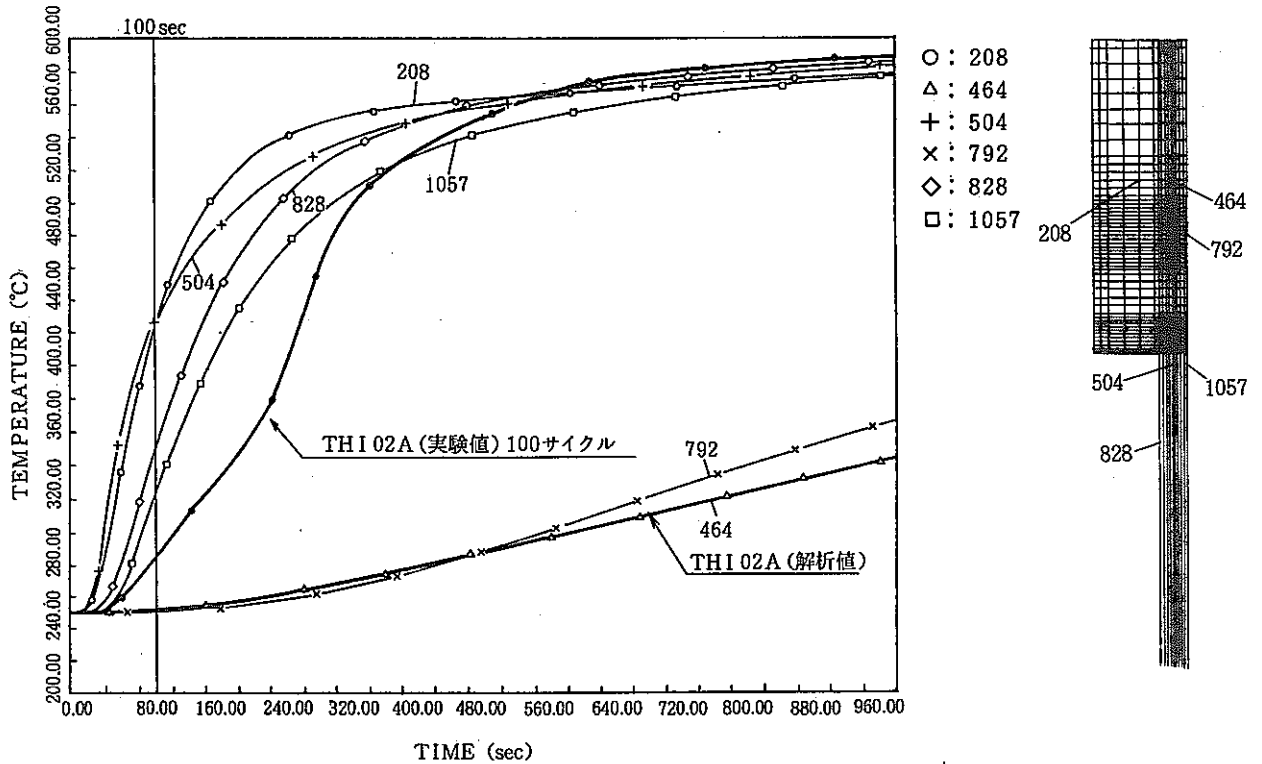
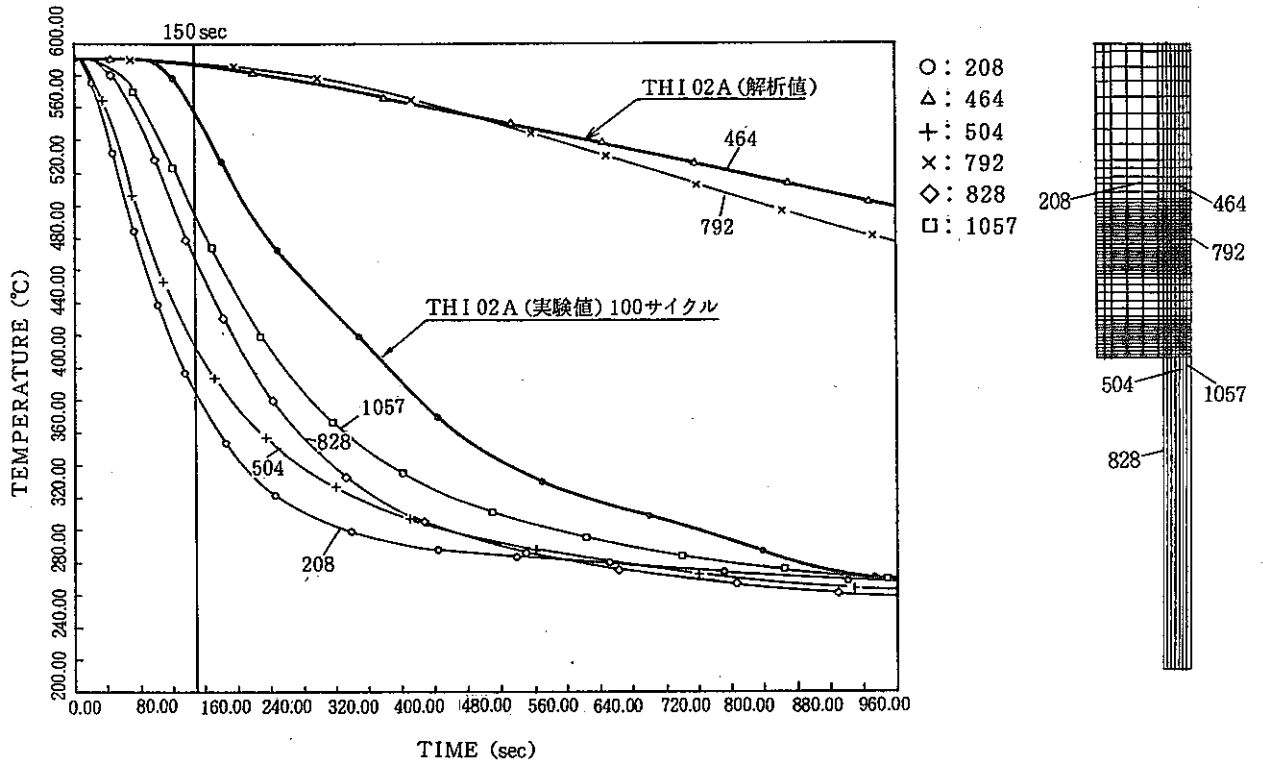
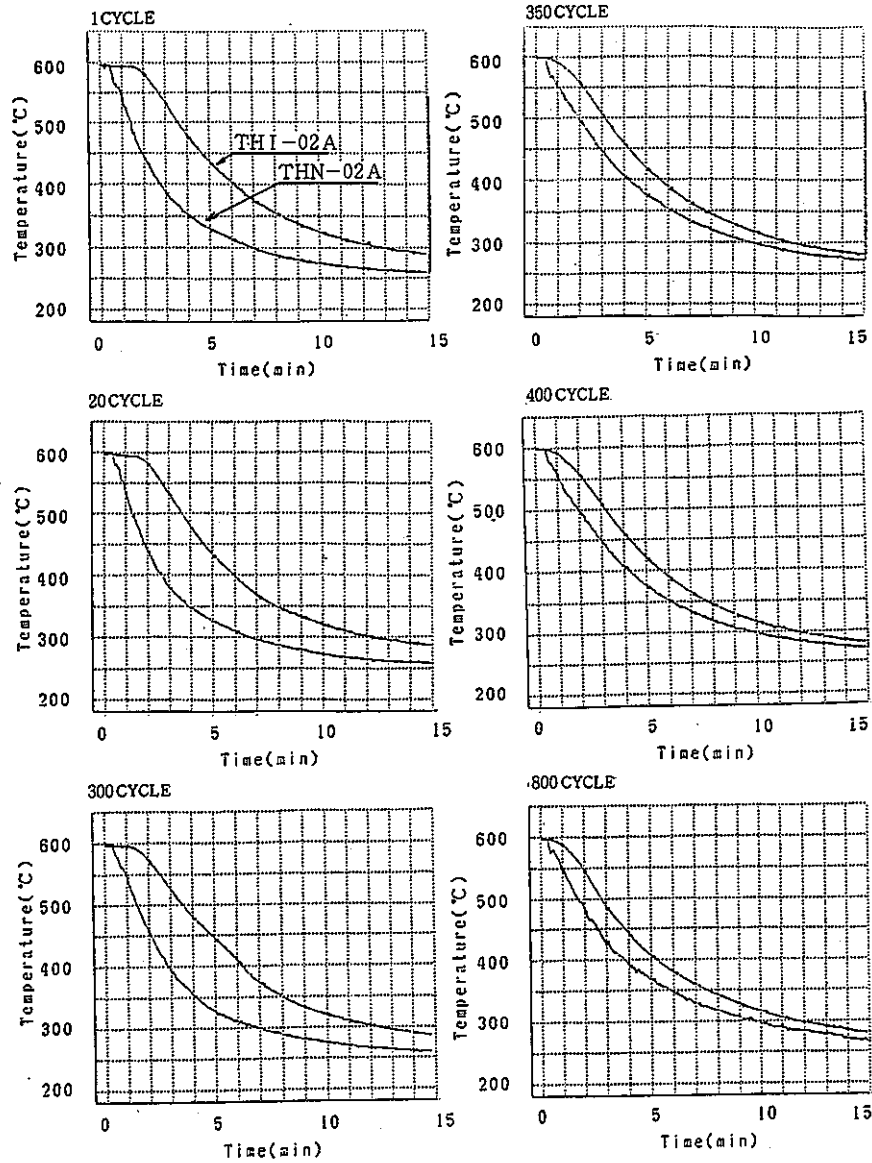
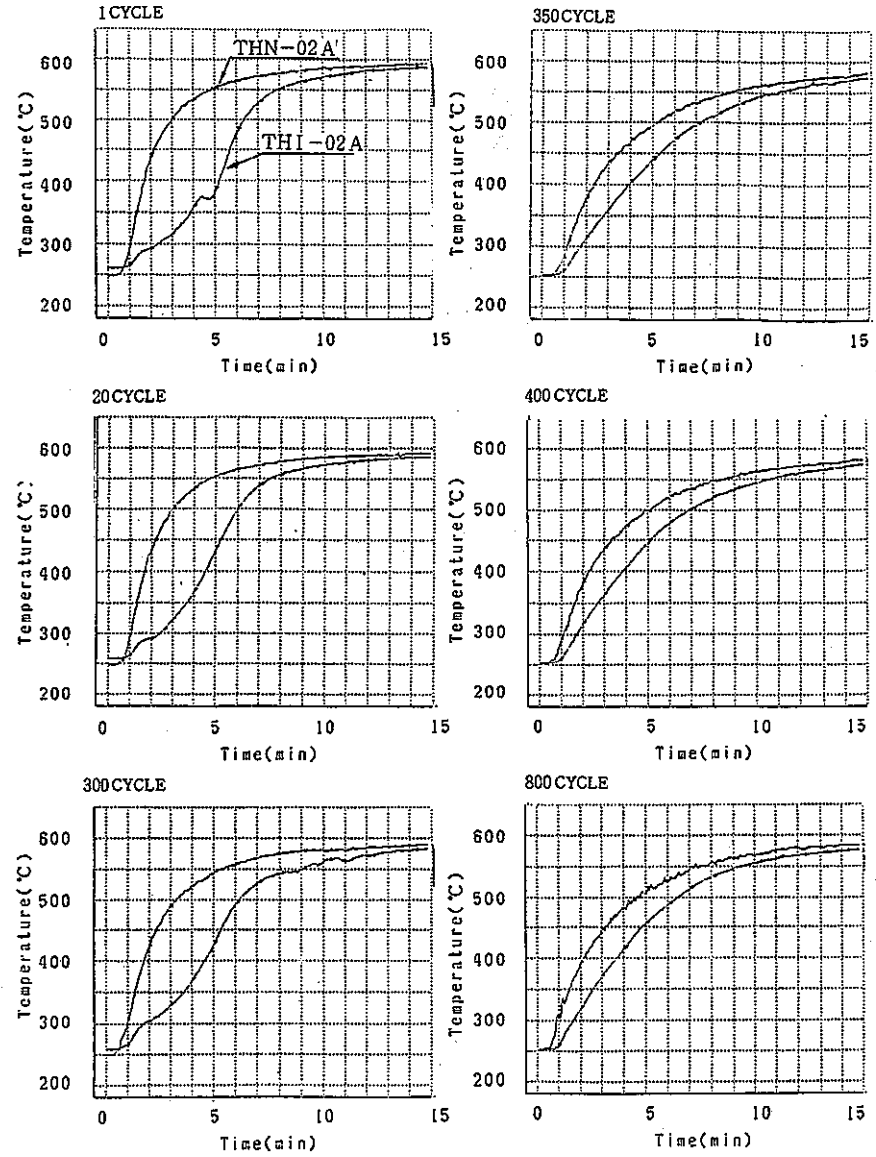


図 4.72 熱抵抗体廻り温度解析 (設計) との比較

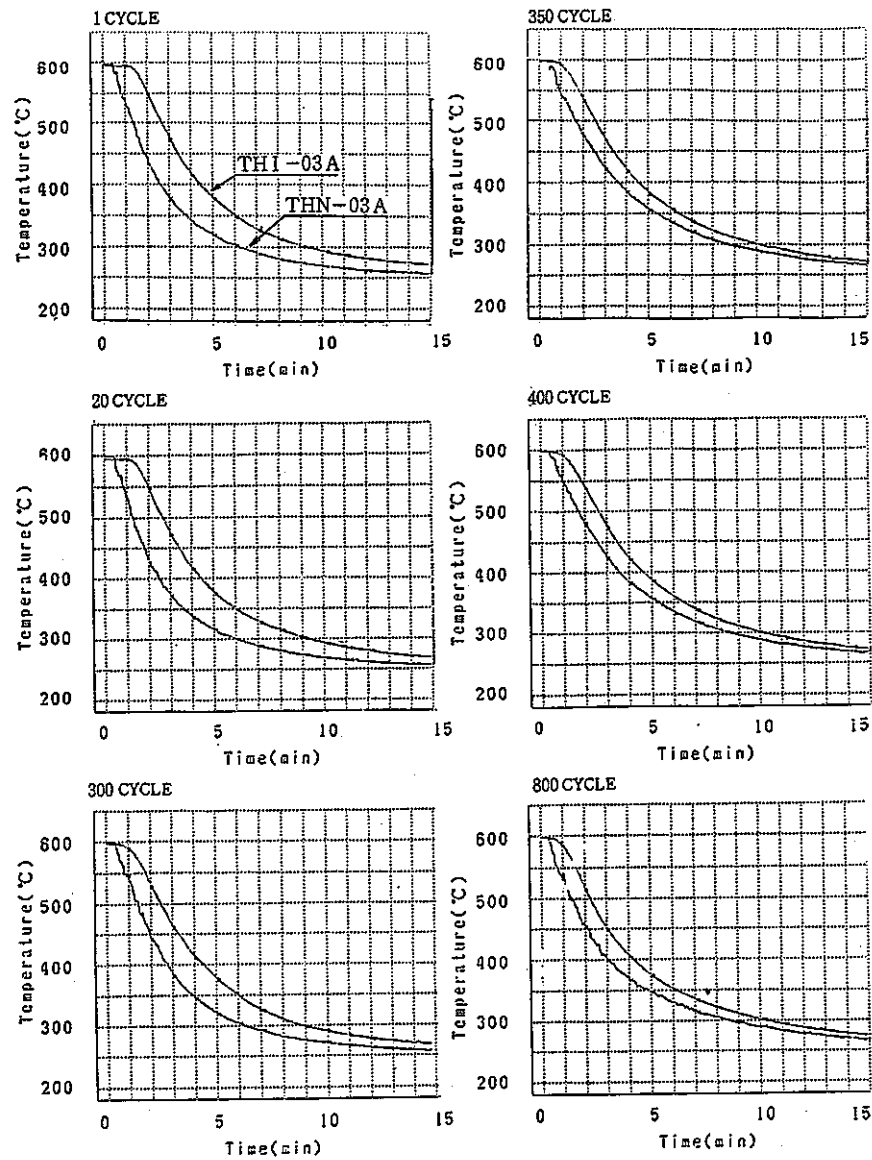


コールドトランジェント

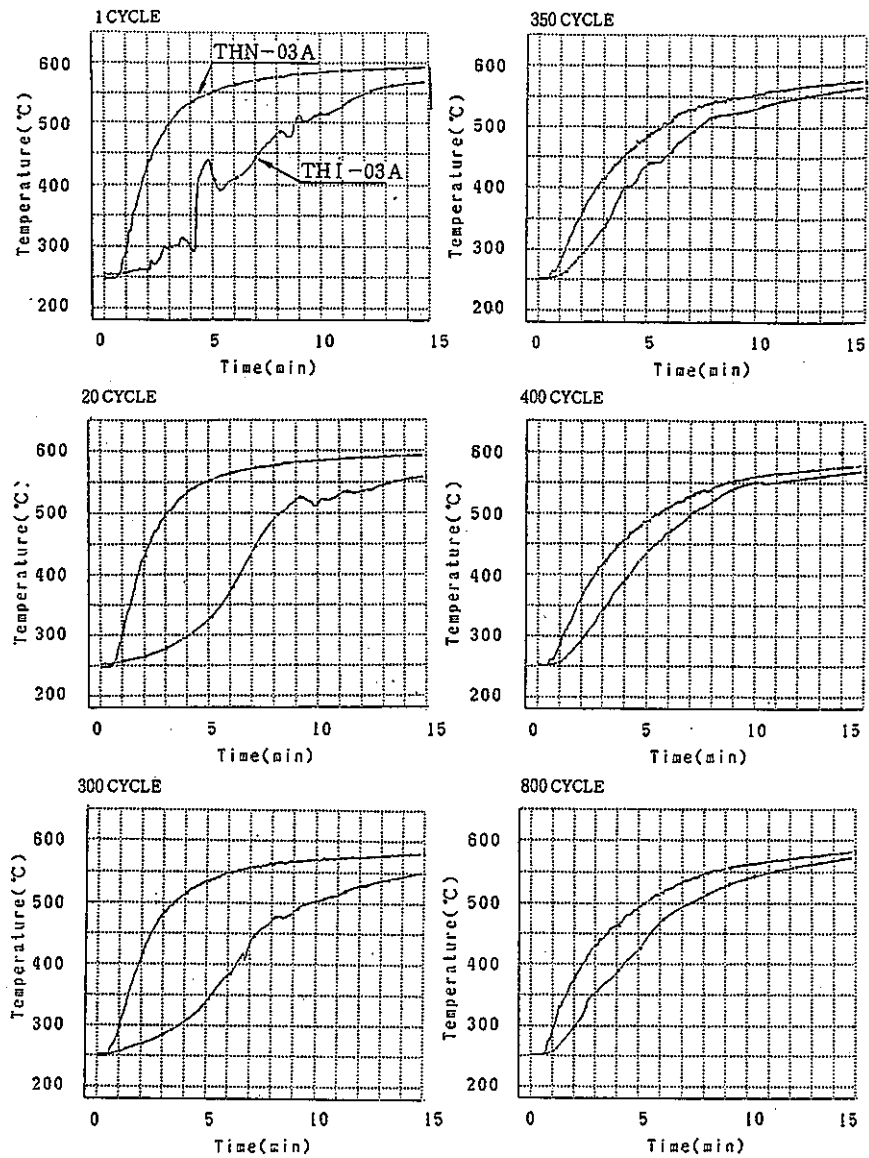


ホットトランジェント

図 4.73 熱抵抗体内外面温度各サイクル比較図(1)

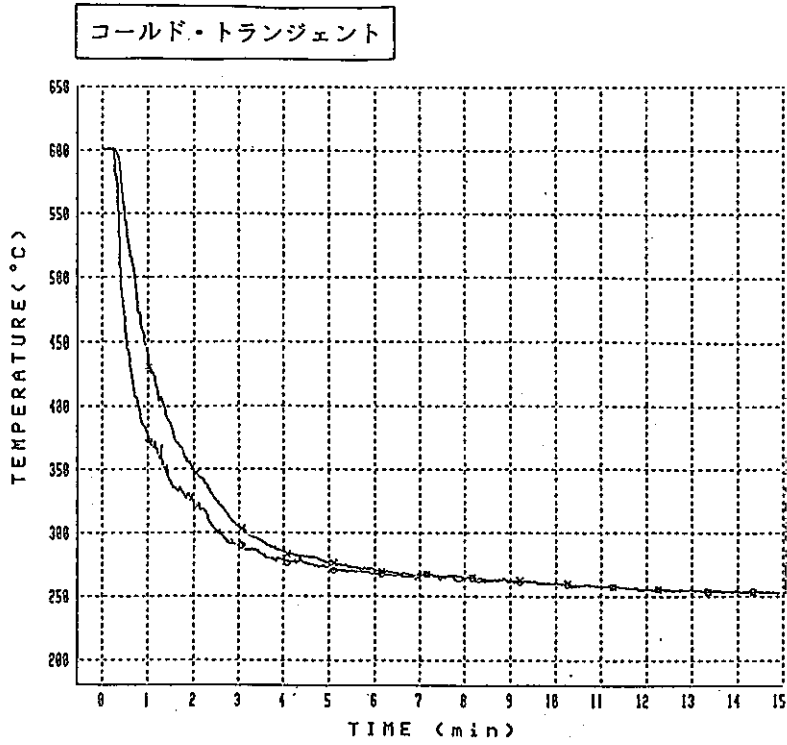


コールドトランジェント



ホットトランジェント

図 4.74 熱抵抗体内外面温度各サイクル比較図(2)



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

× - UCI-01A
 ○ - UCO-01A

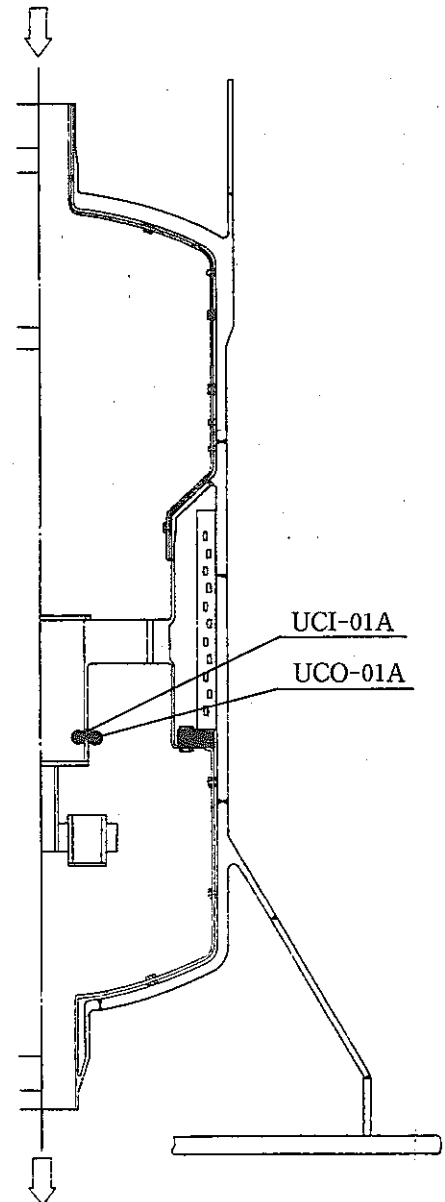
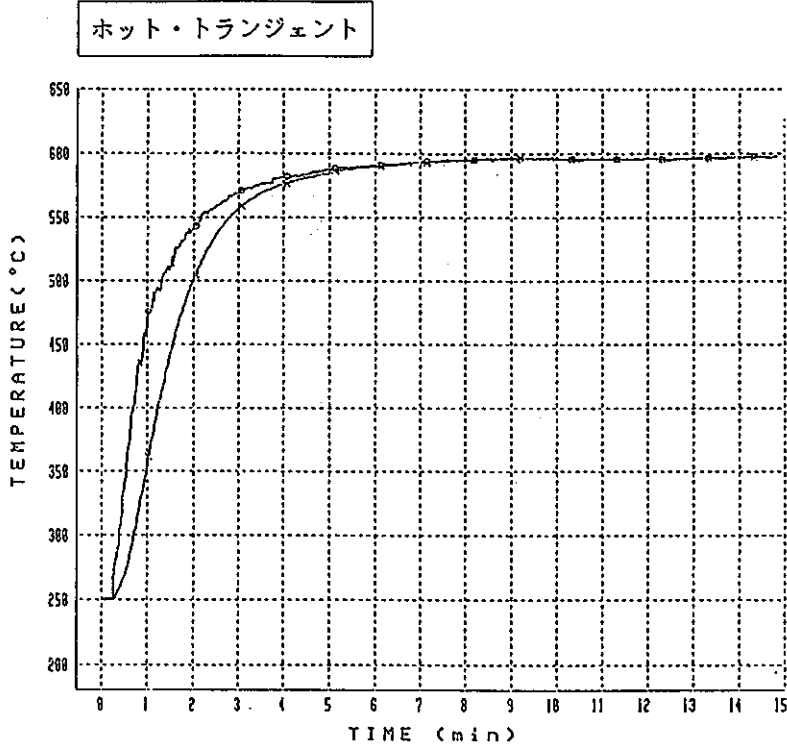
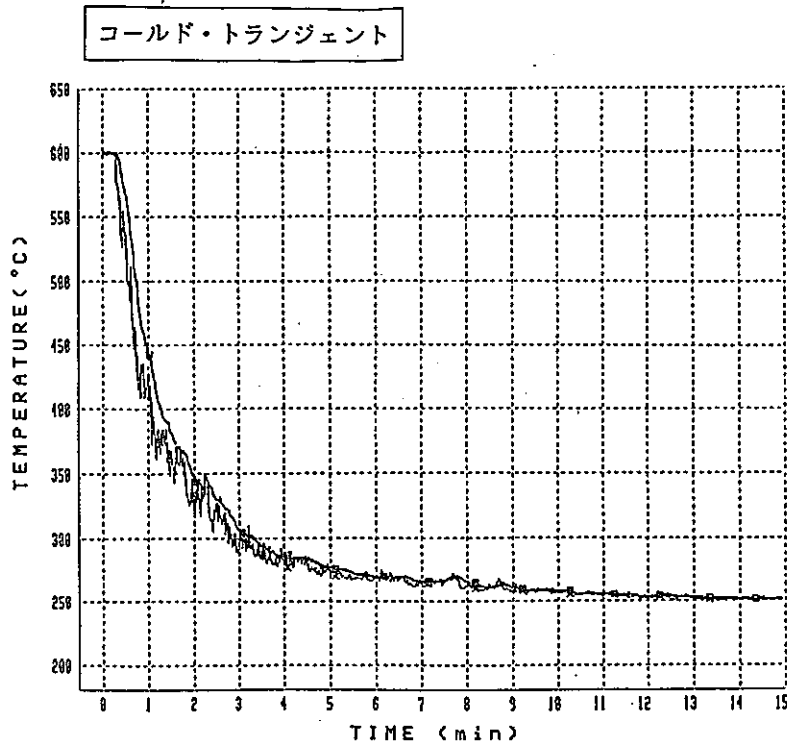


図 4.75 整流装置半径方向温度分布(1)



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

- × - UCI-04 A
- - UCM-04 A
- - UCδ-04 A

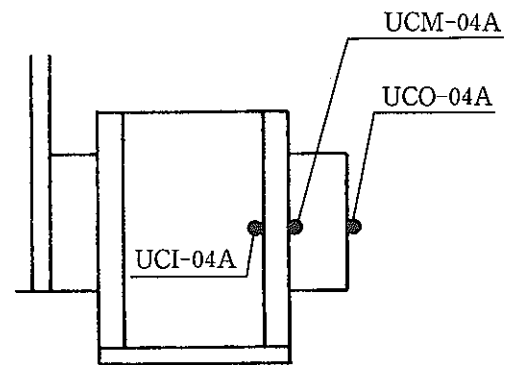
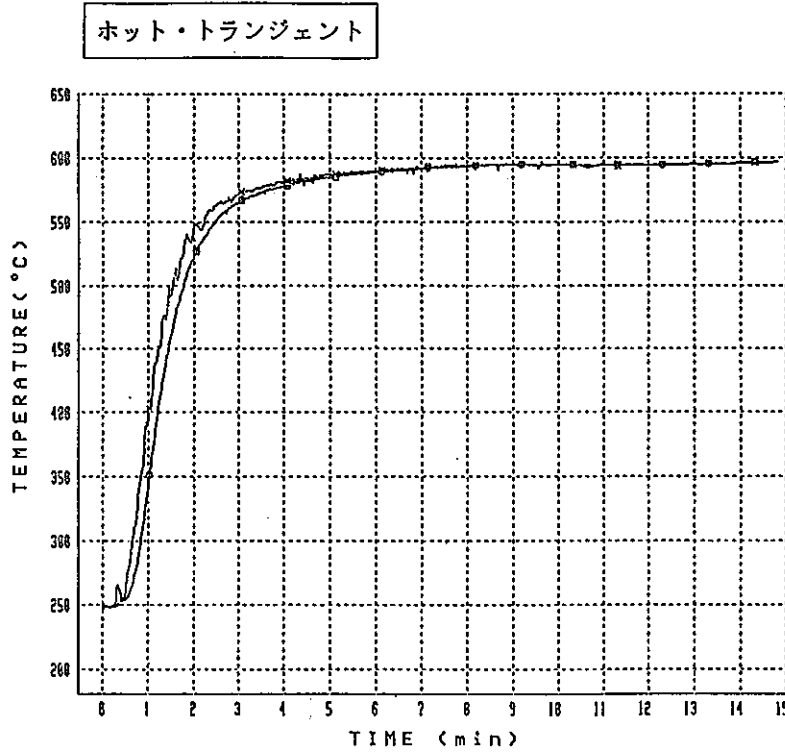
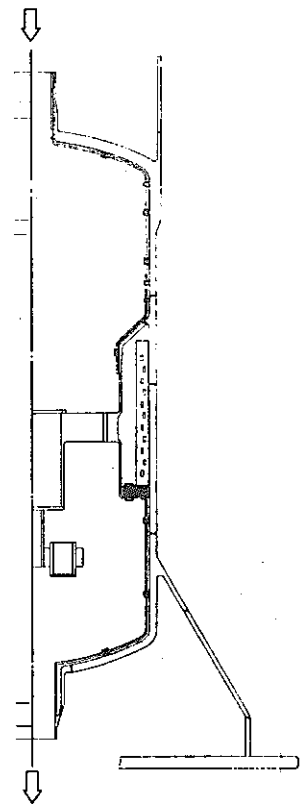
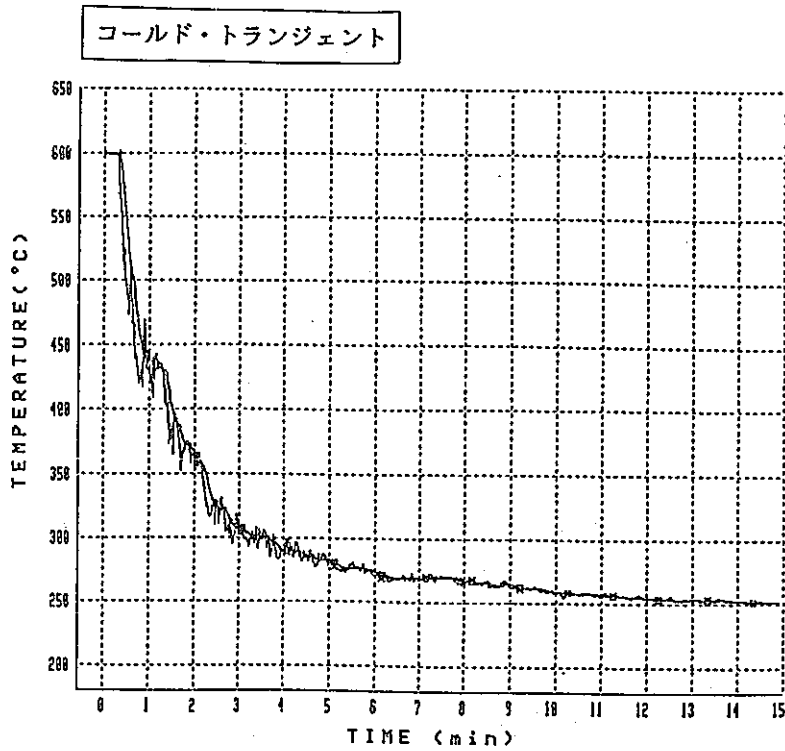


図 4.76 整流装置半径方向温度分布(2)



サイクル数 = 100 回
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

- × - UCI-04B
- - UCM-04B
- - UC̄-04B

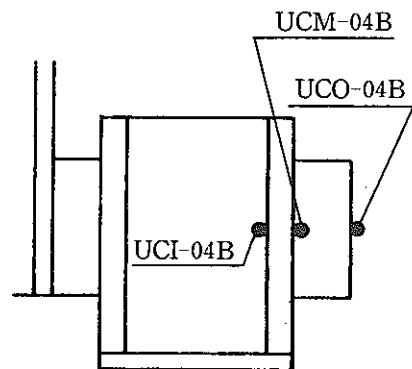
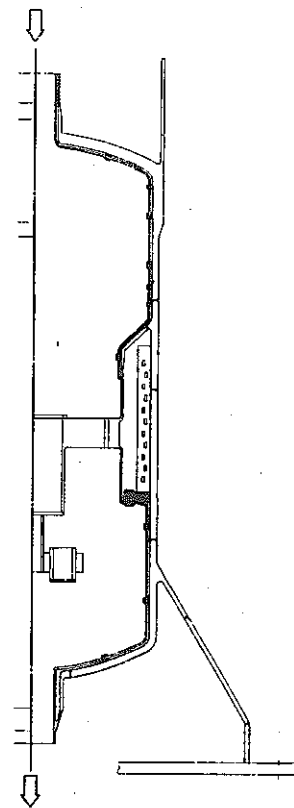
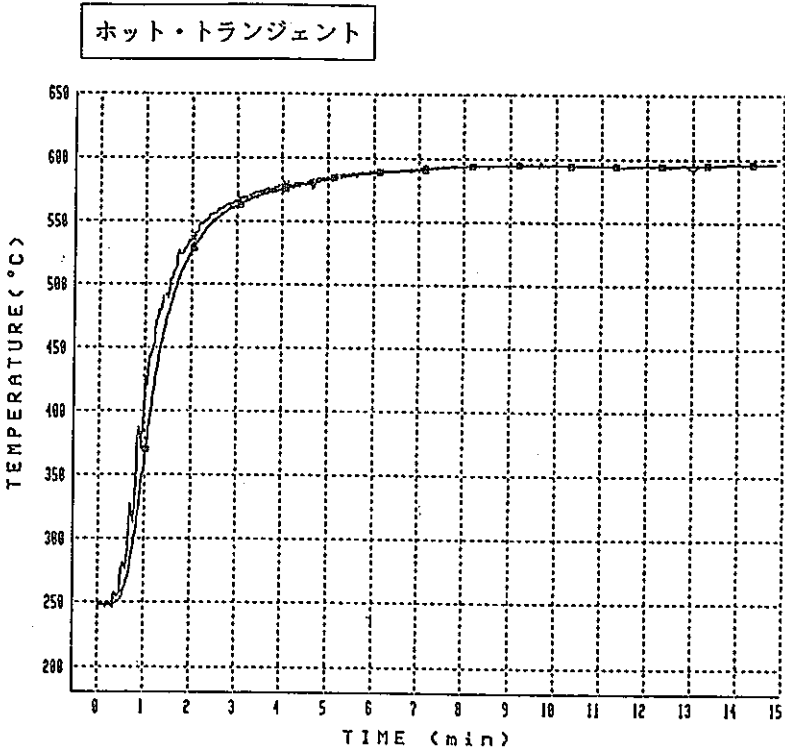
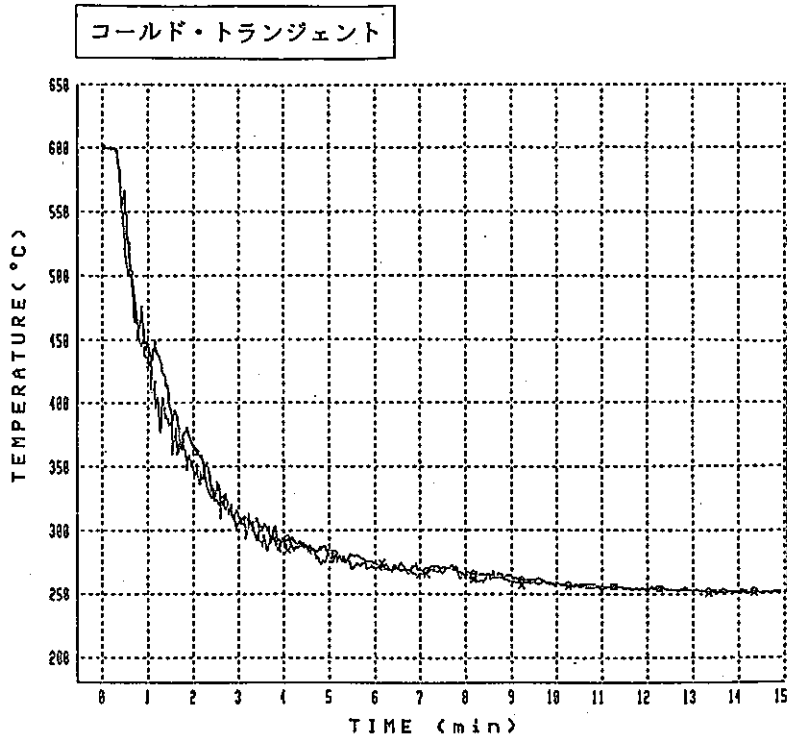


図 4.77 整流装置半径方向温度分布(3)



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

× - UCo-05 A
 ○ - UCo-05 B

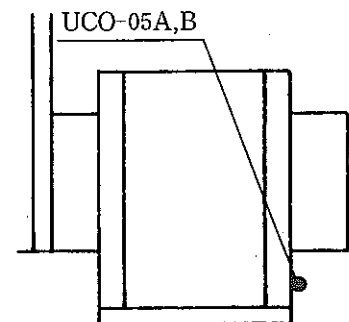
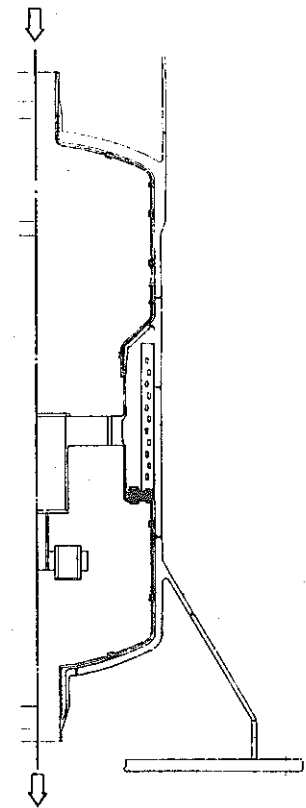
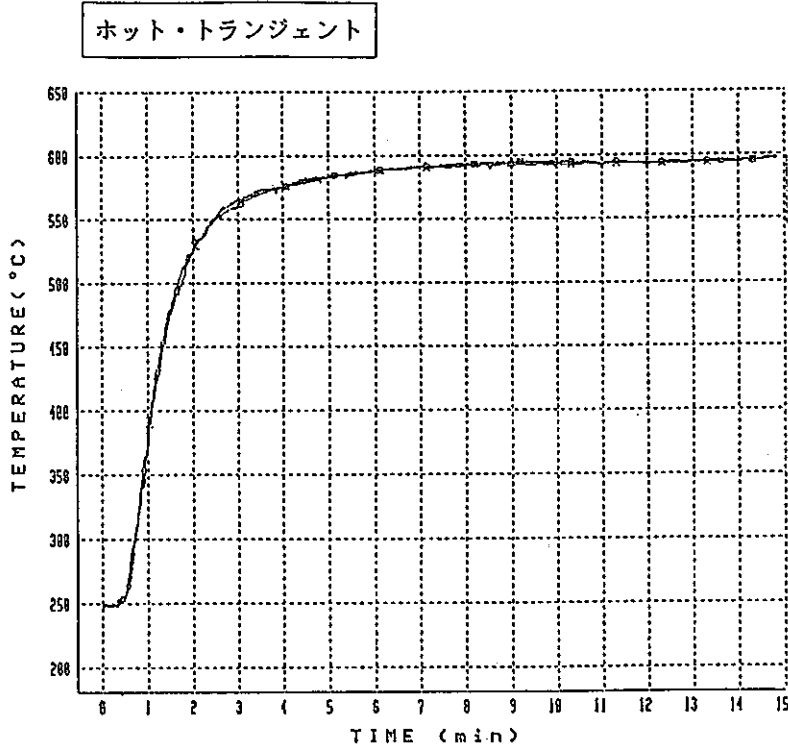
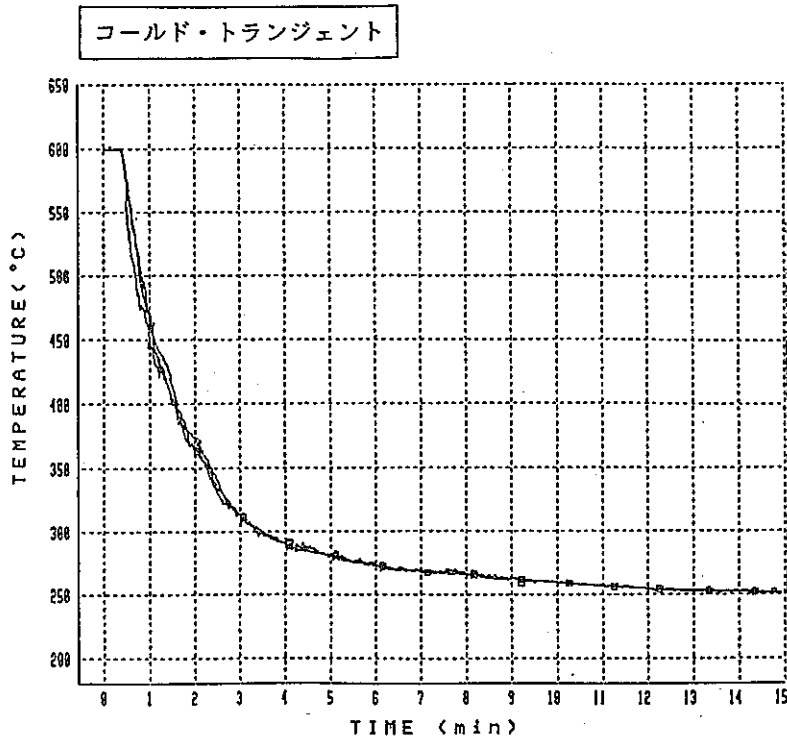


図 4.78 整流装置半径方向温度分布(4)



サイクル数 = 100 ^{circle}
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

- × - UCU-02A
- - UCD-02A
- - UCI-03A

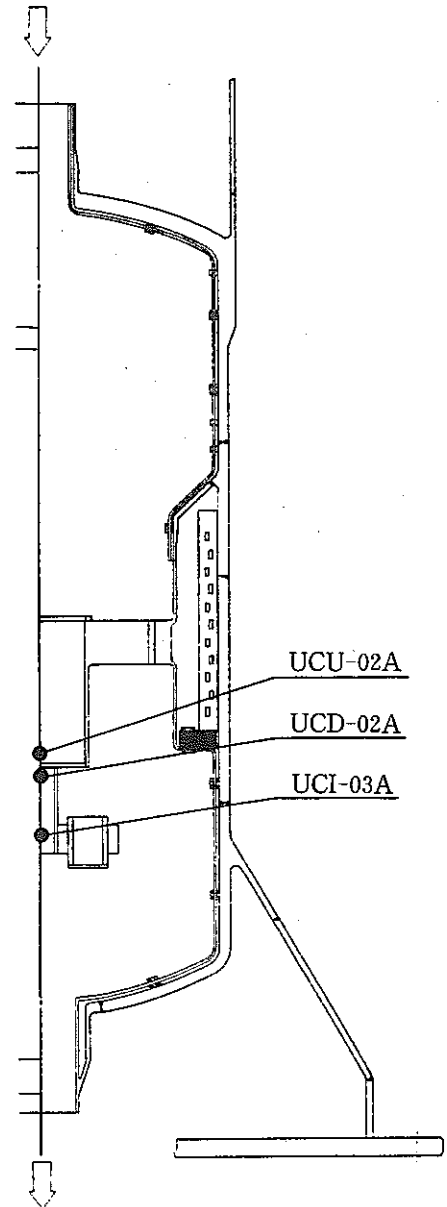
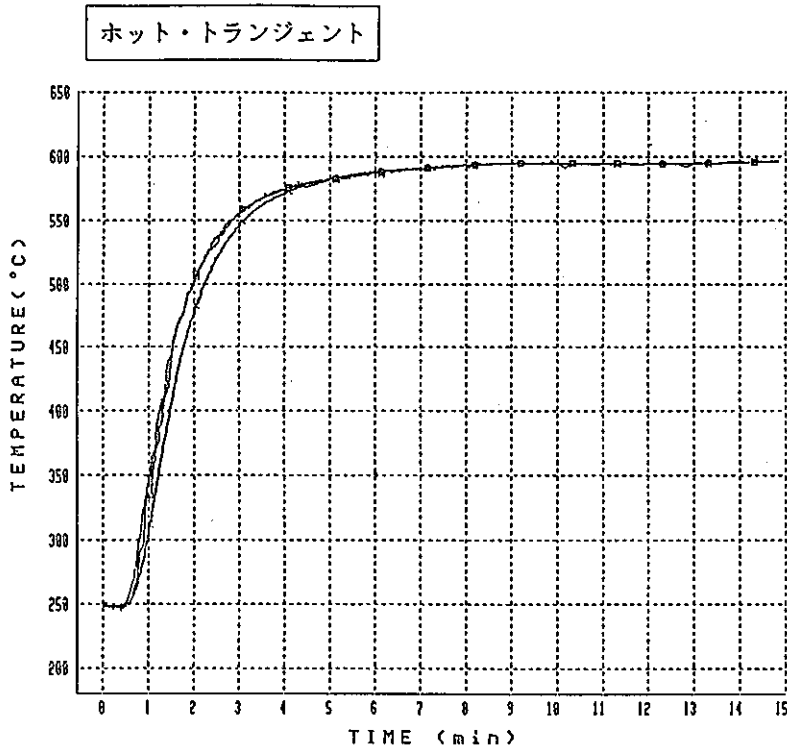
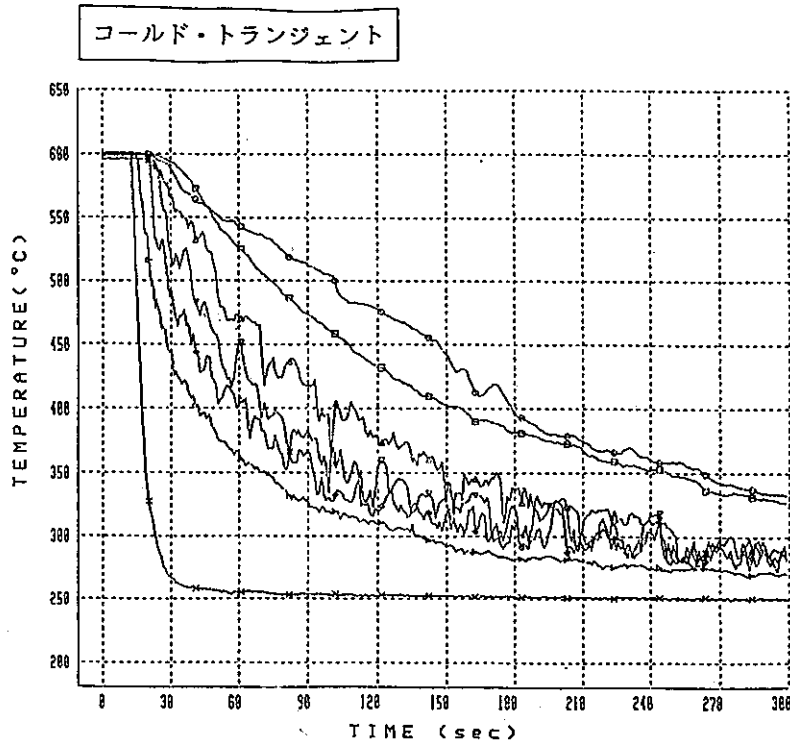


図 4.79 整流装置軸方向温度分布



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S. 63. 10. 28
 15:00 ~

- × - INN-01 A
- - INN-04 A
- - UPN-07 A
- △ - DPN-01 A
- ▽ - YPN-01 A
- ◇ - YPN-05 A
- ▷ - RMN-02 A

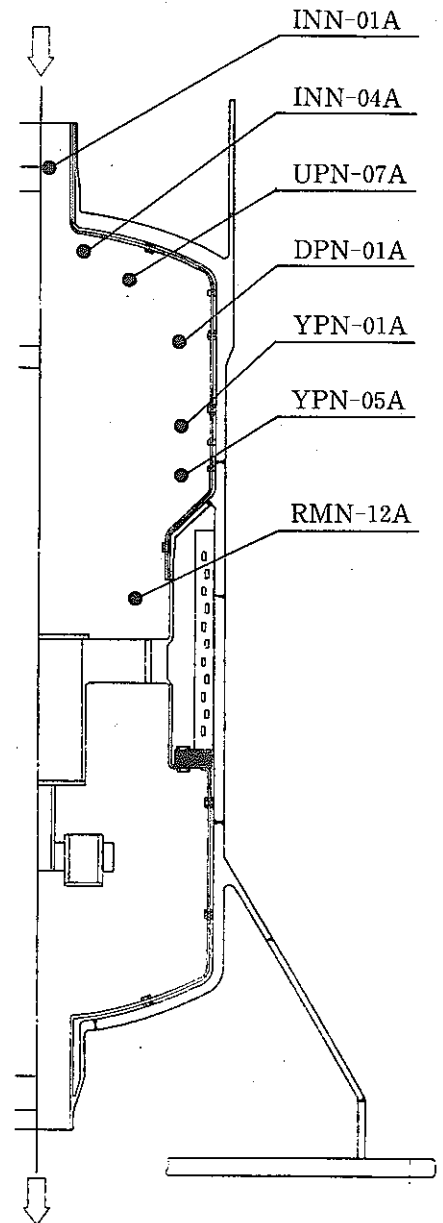
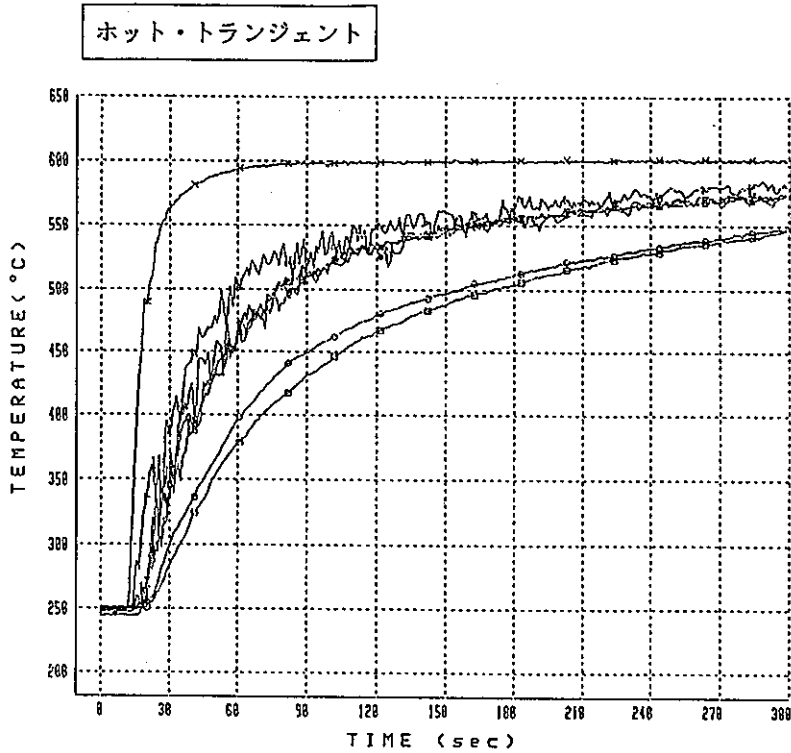
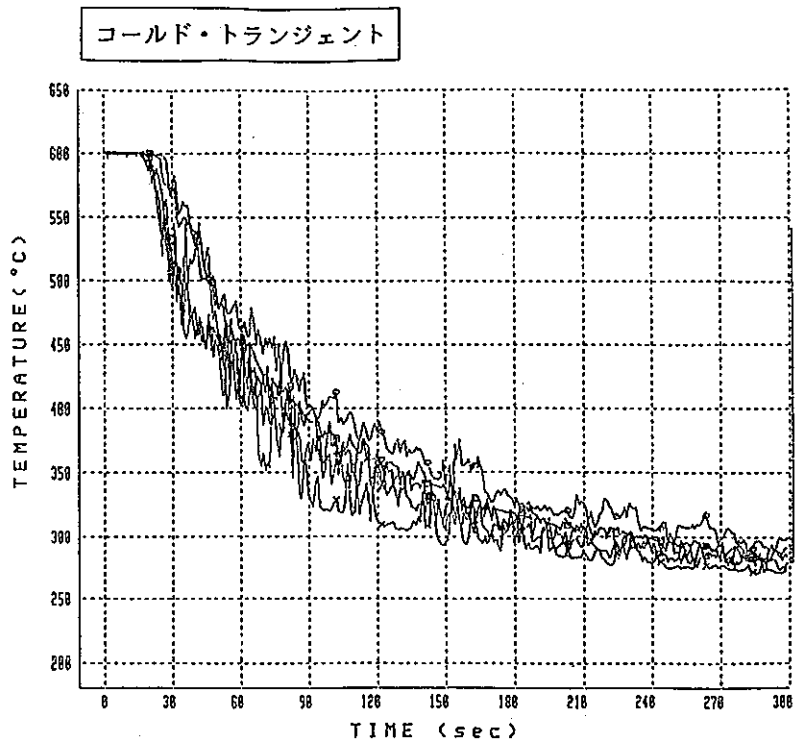


図 4.80 主流路軸方向温度分布(1)



サイクル数 = 100 cycle
 時間 = S.63.10.28
 15:00 ~

- × - RMB-12A
- - THN-06A
- - SKN-02A
- △ - OTN-02A
- ▽ - OTN-06A

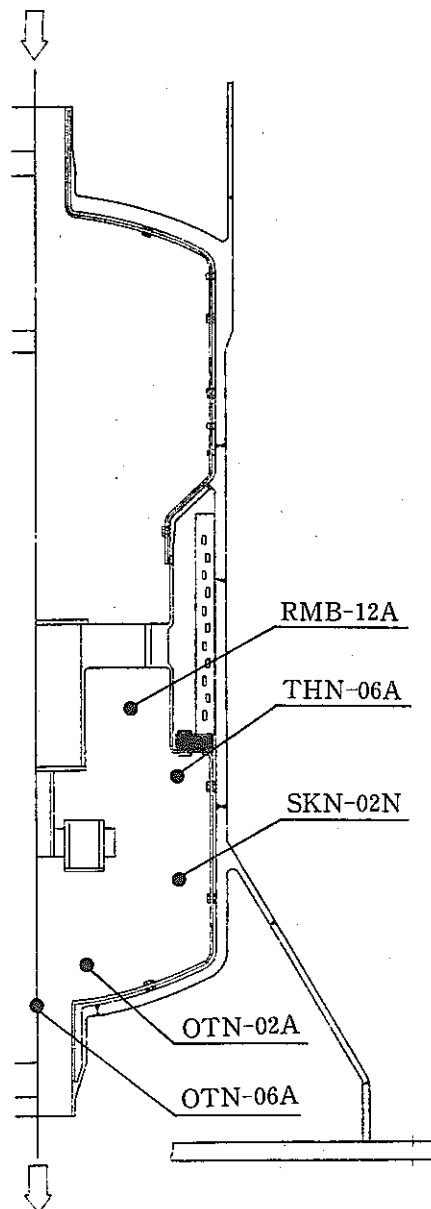
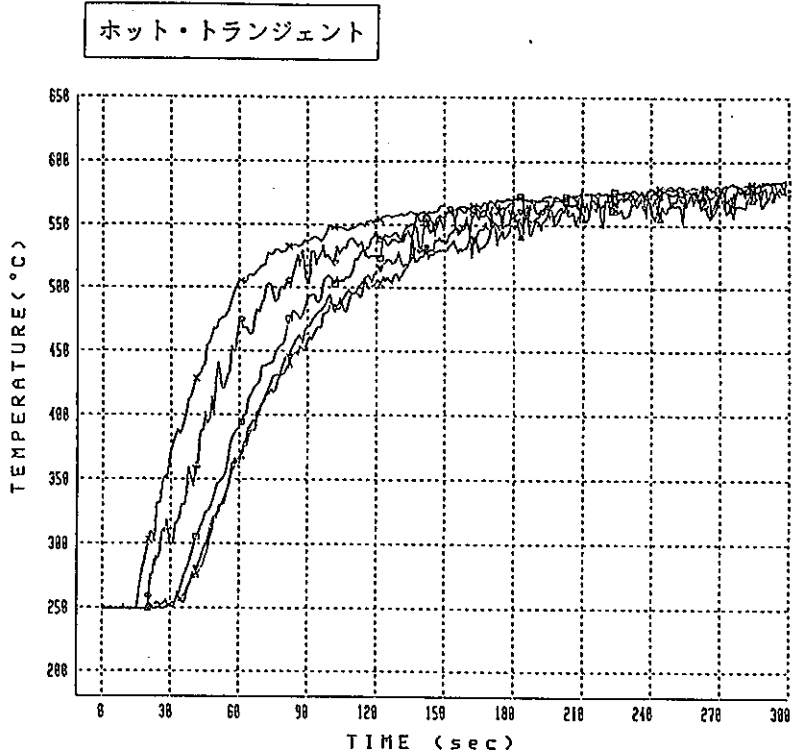


図 4.81 主流路軸方向温度分布(2)

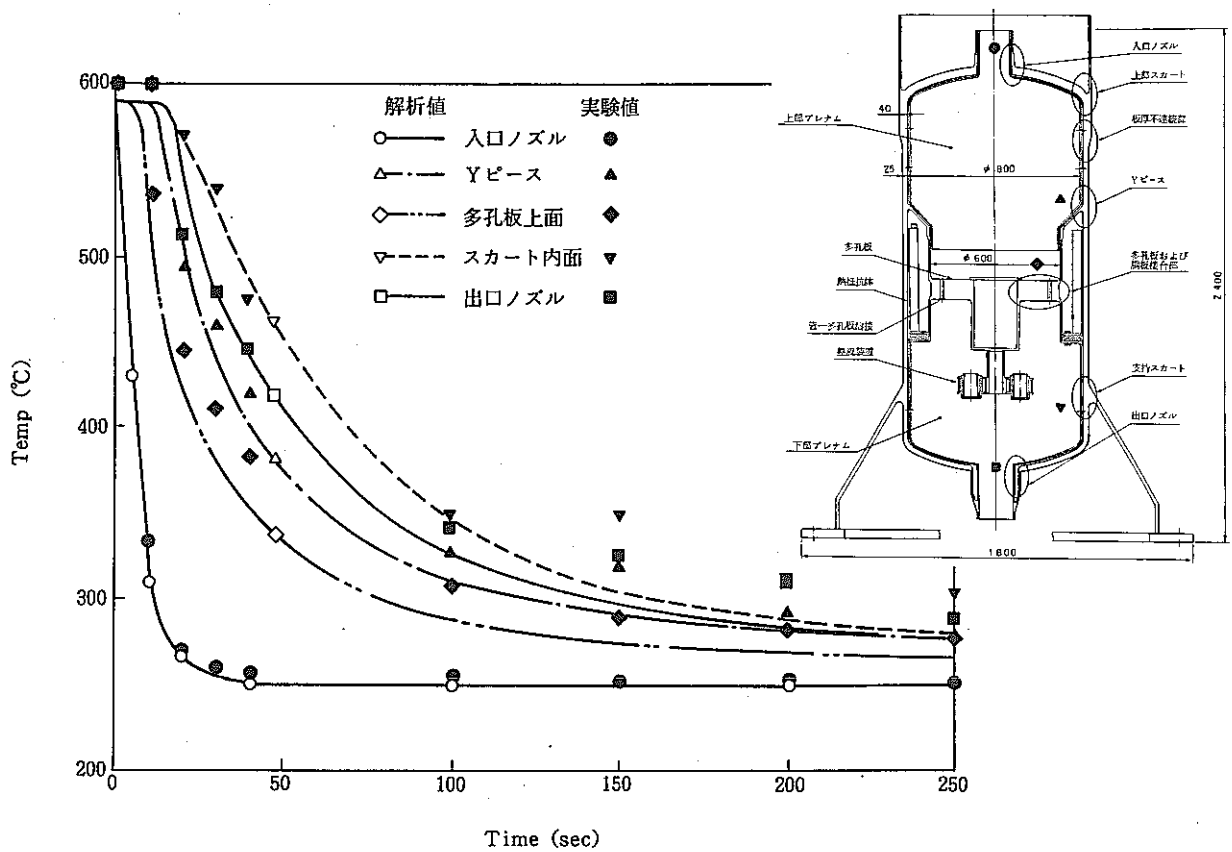


図 4.82 流動解析と実験結果との比較 (コールドトランジェント)

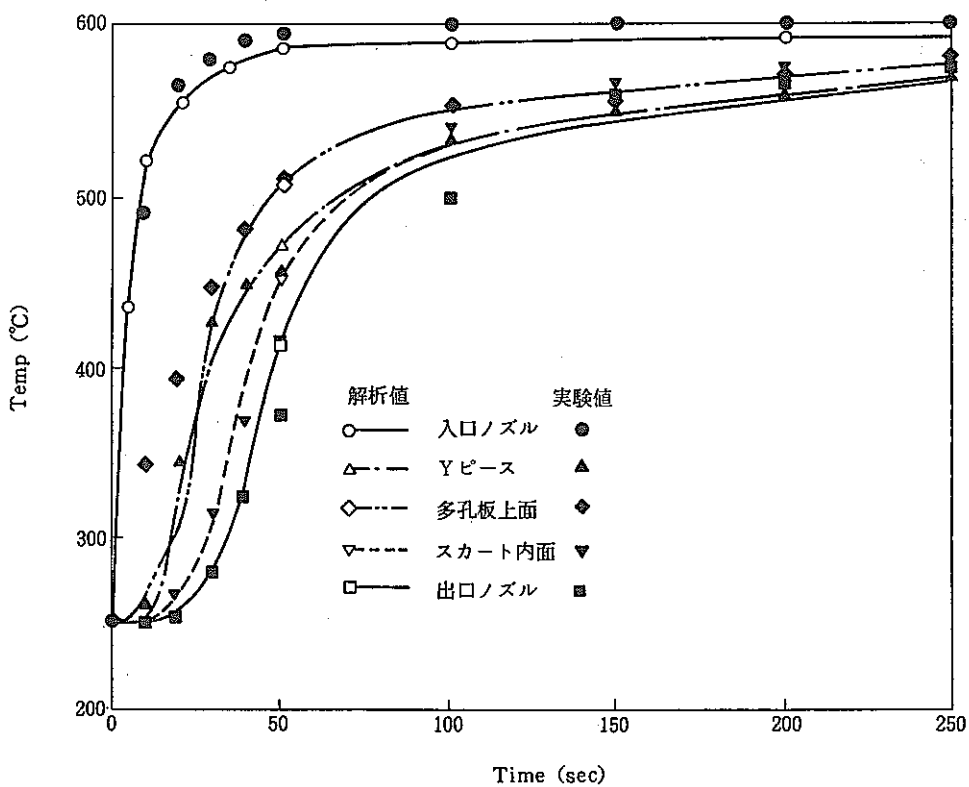


図 4.83 流動解析と実験結果との比較 (ホットトランジェント)

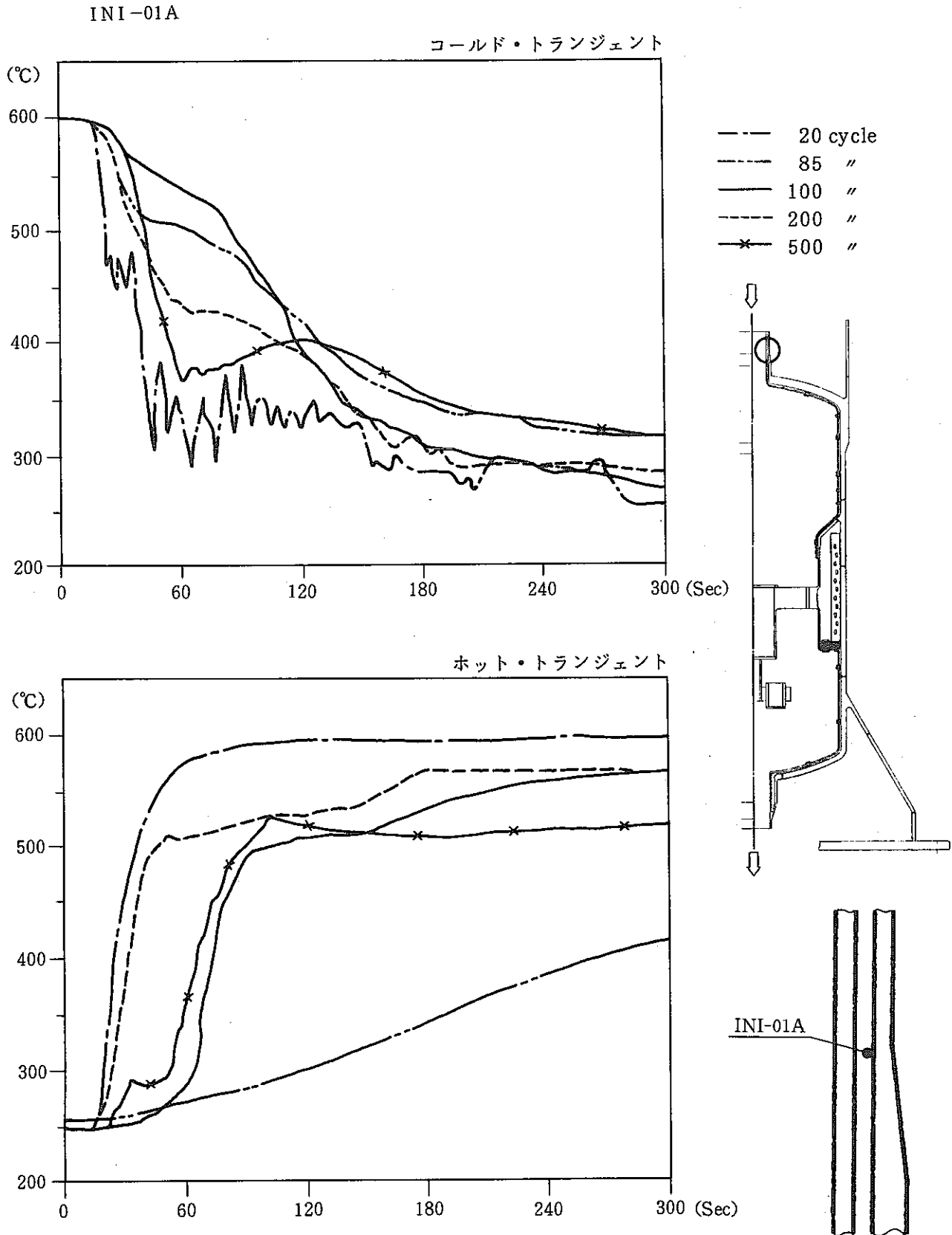


図 4.84 入口ノズル廻り各サイクル温度分布(1)

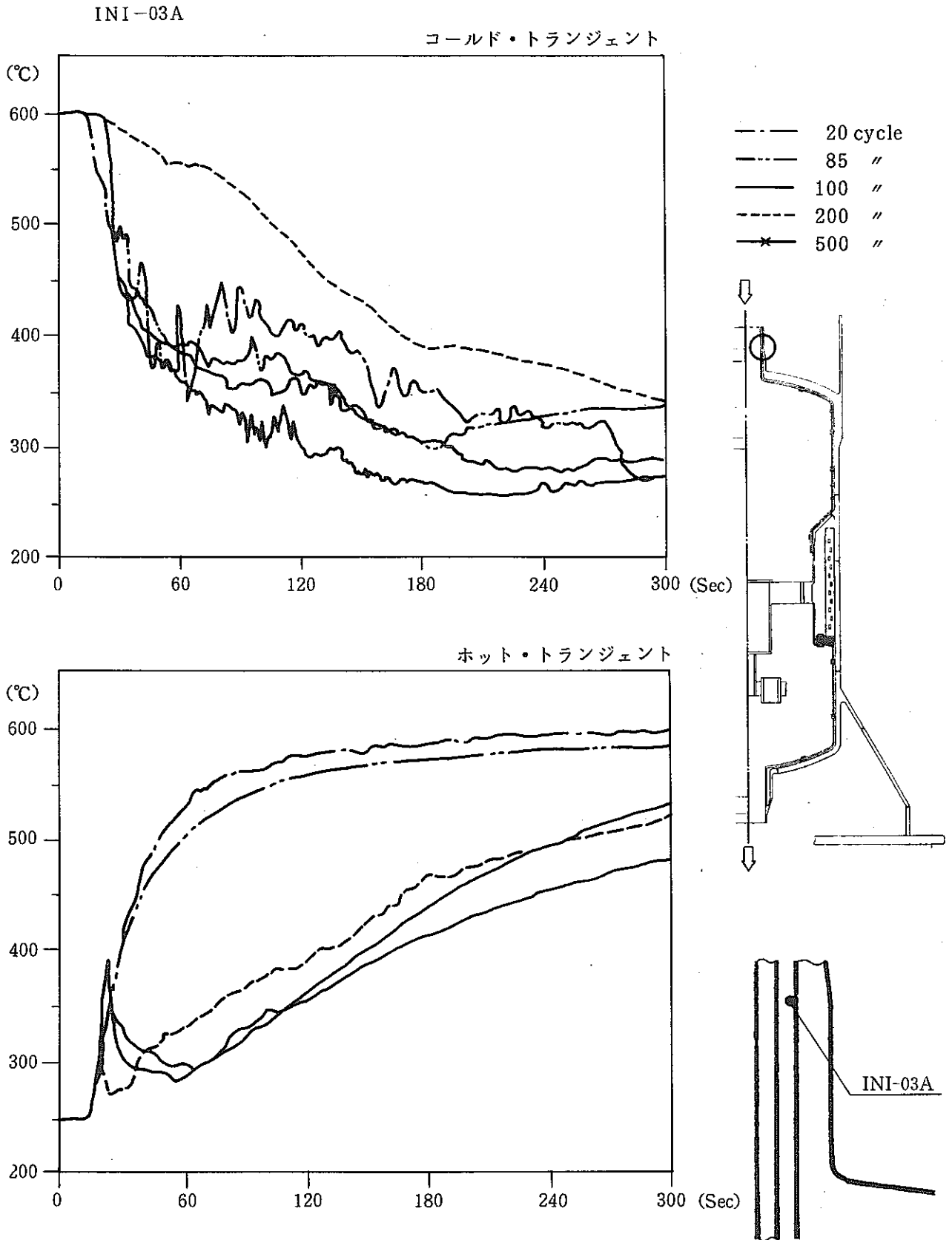


図 4.85 入口ノズル廻り各サイクル温度分布(2)

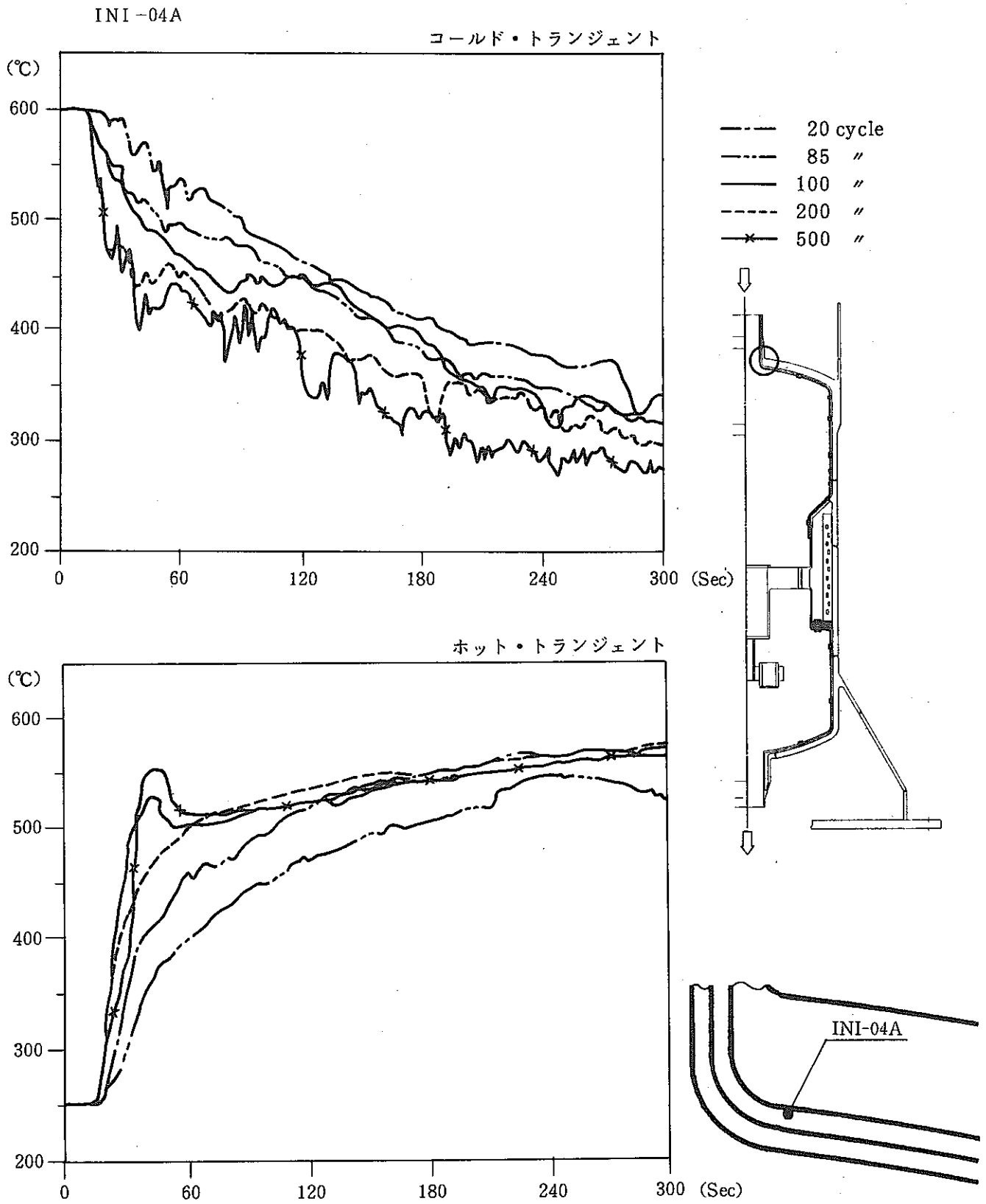


図4.86 入口ノズル廻り各サイクル温度分布(3)

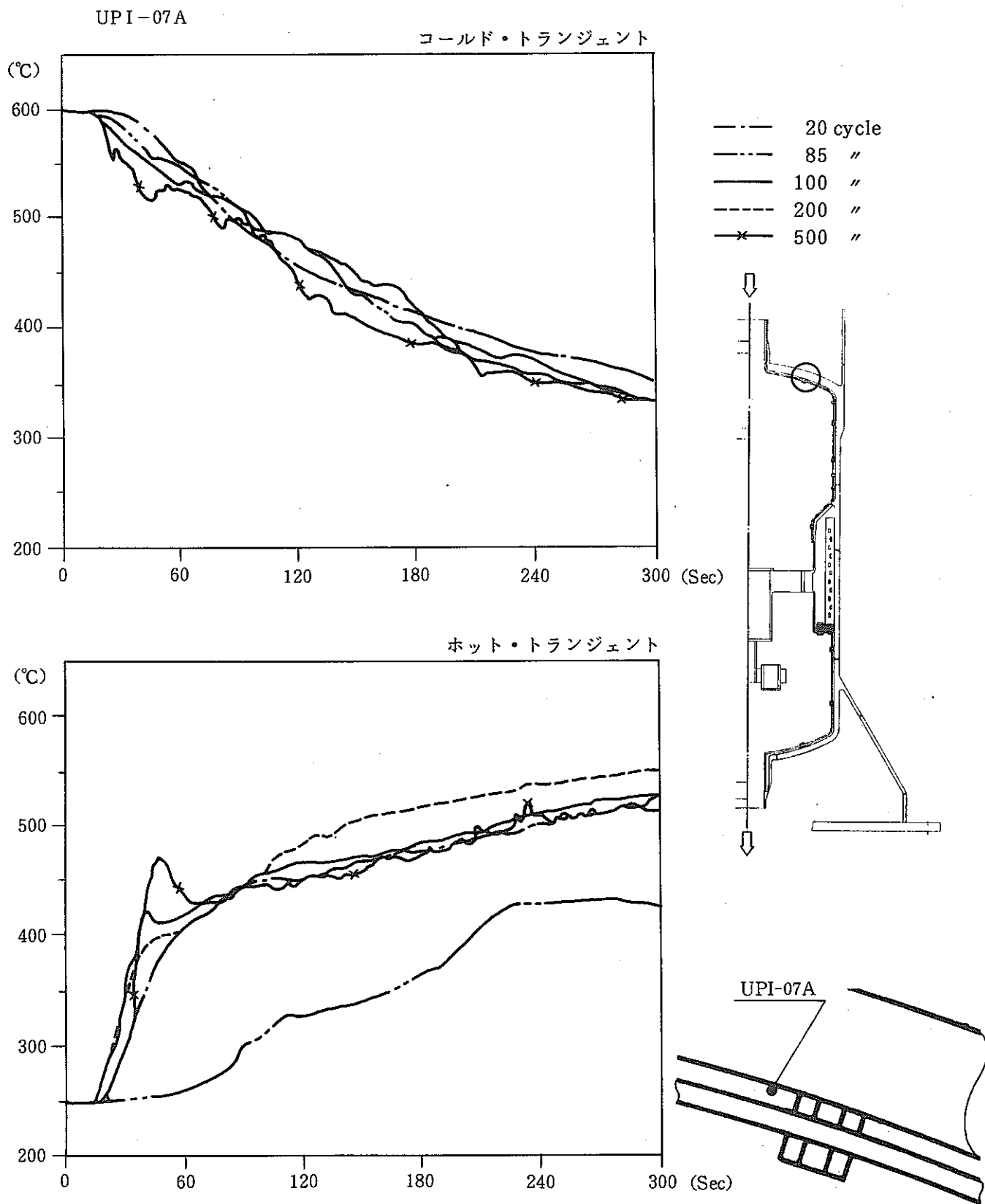
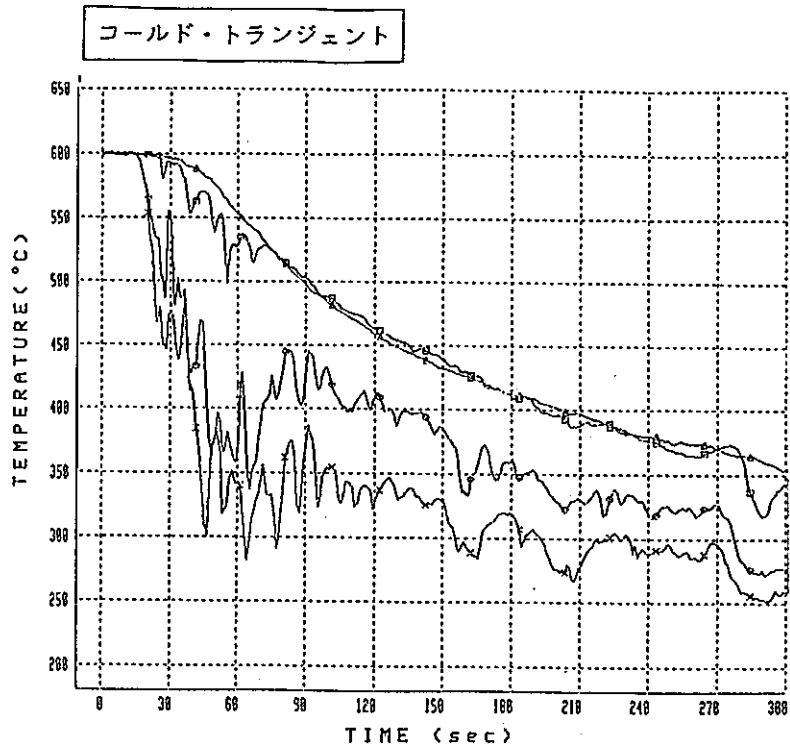


図 4.87 入口ノズル廻り各サイクル温度分布(4)



サイクル数 = 20
 時間 = S 63.10.21
 23:00~

- × - INI-01A
- - INI-03A
- - INI-04A
- △ - UPI-07A

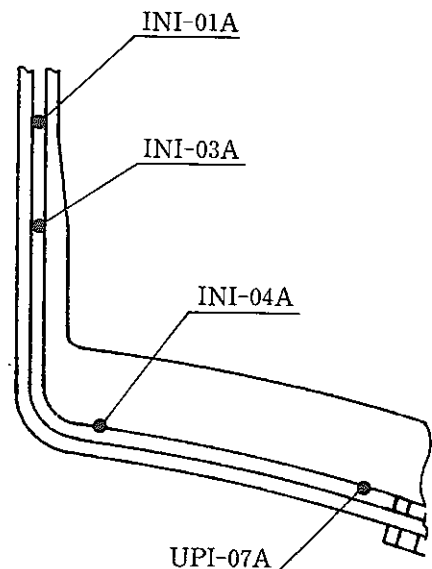
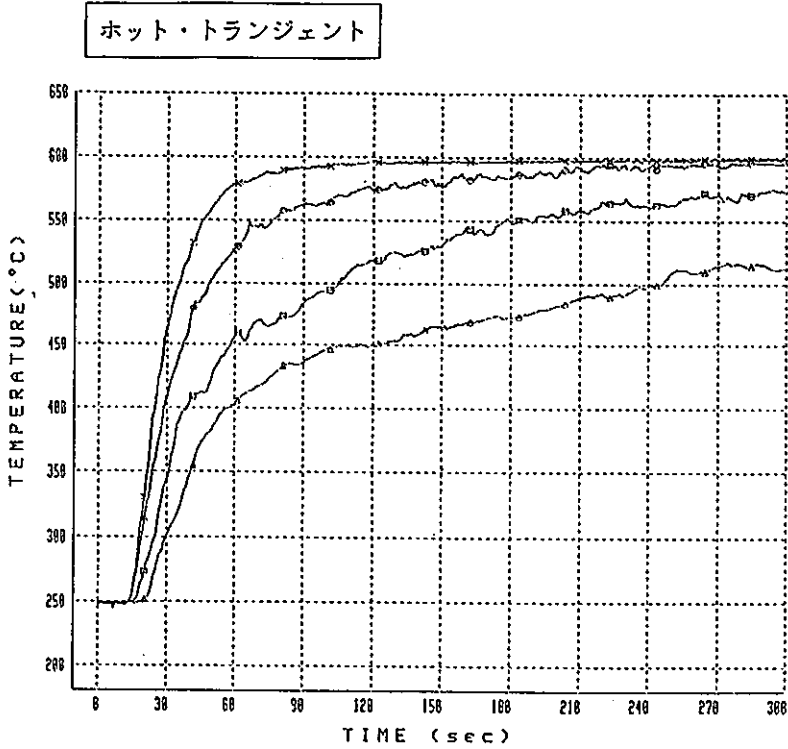
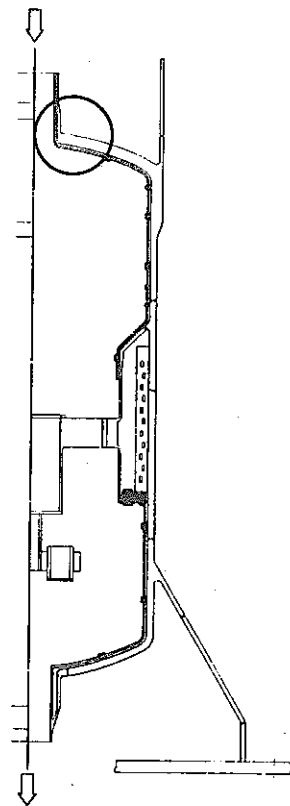
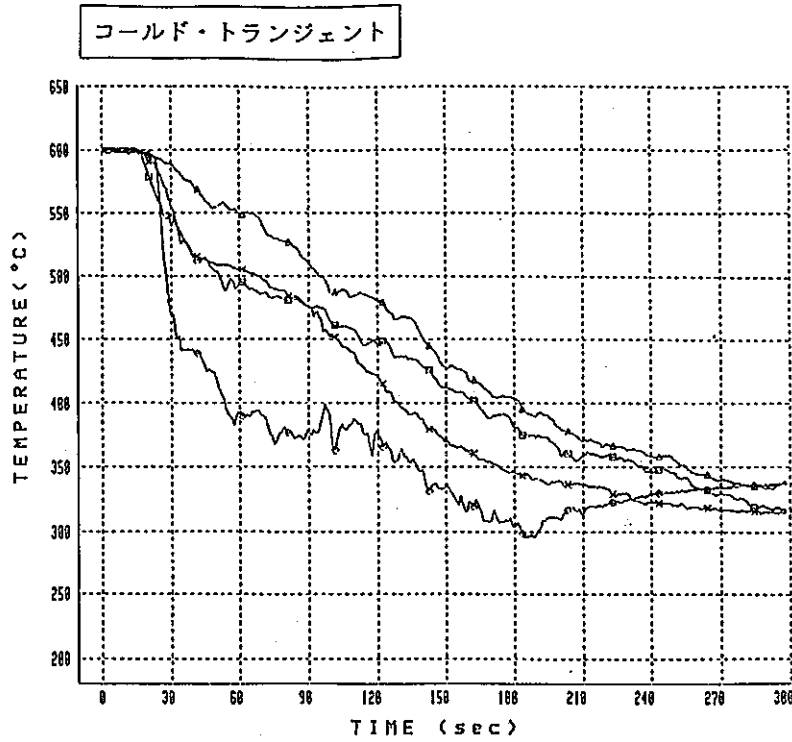


図 4.88 入口ノズル軸方向温度分布 (20サイクル)



サイクル数 = 85
 時間 = S 63.10.27
 9:00~

- × - INI-01A
- - INI-03A
- - INI-04A
- △ - UPI-07A

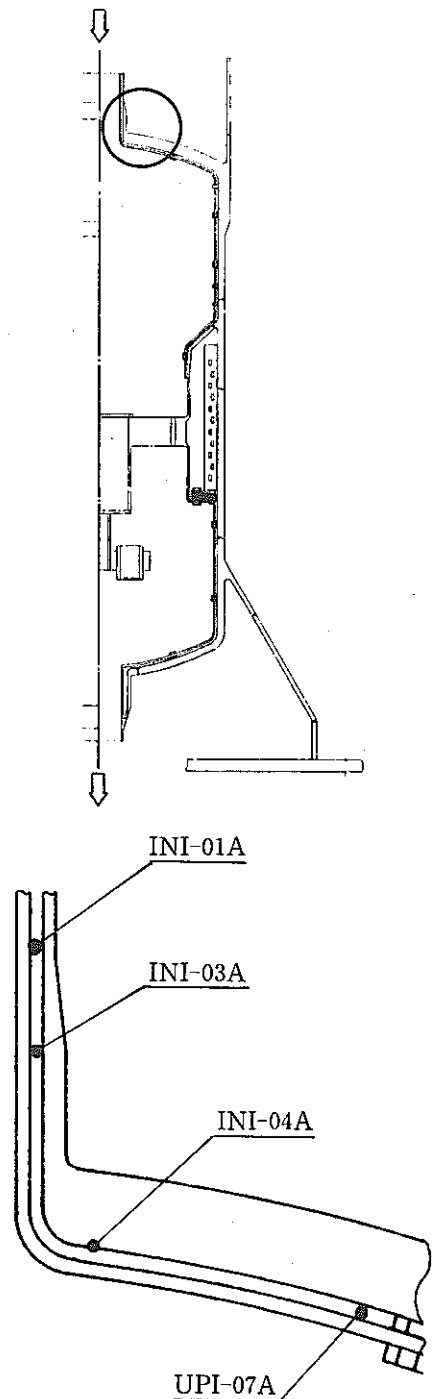
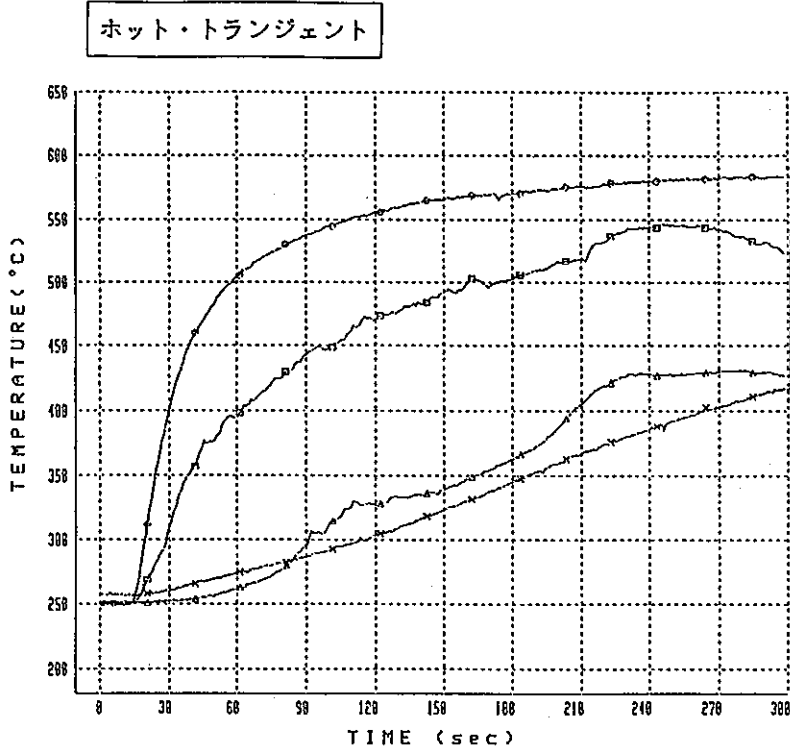
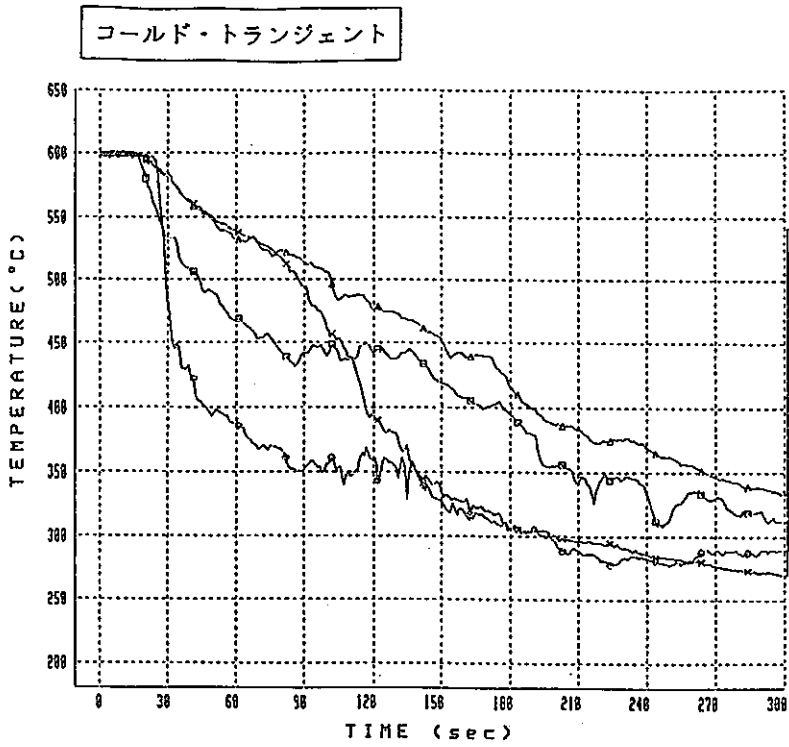


図 4.89 入口ノズル軸方向温度分布 (85サイクル)



サイクル数 = 100
 時間 = S 63.10.28
 15:00~

- × - INI-01A
- - INI-03A
- - INI-04A
- △ - UPI-07A

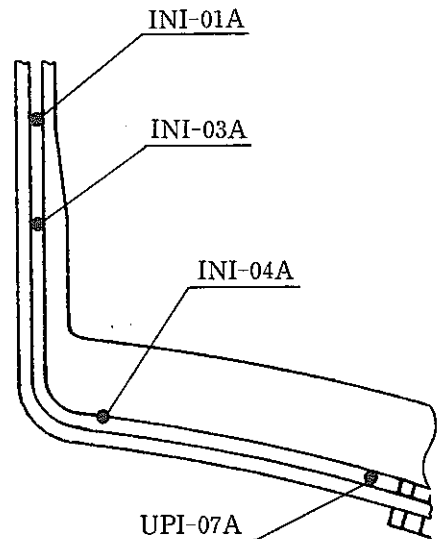
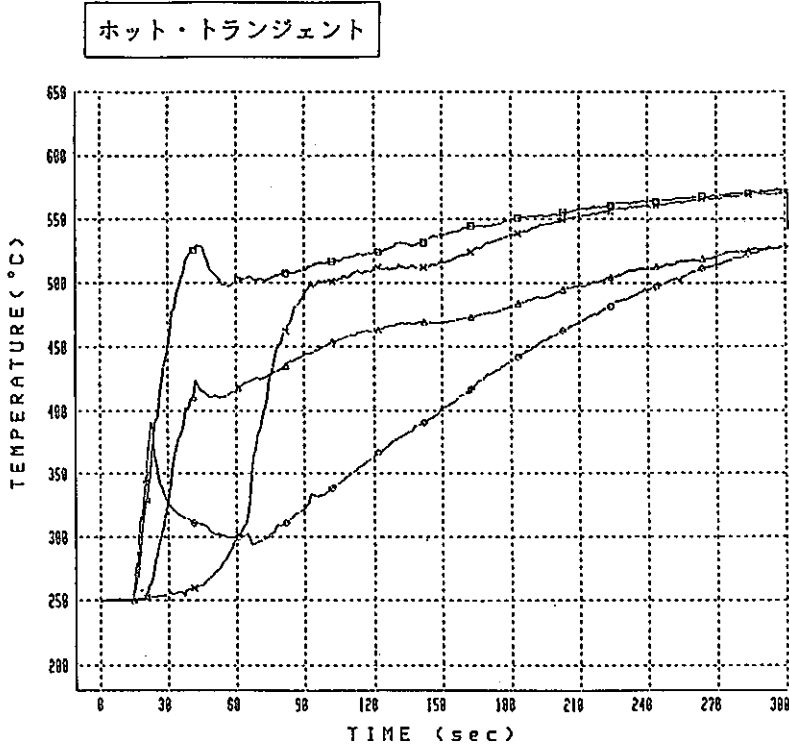
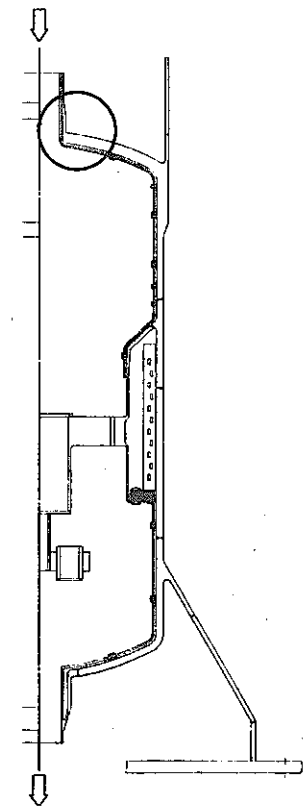
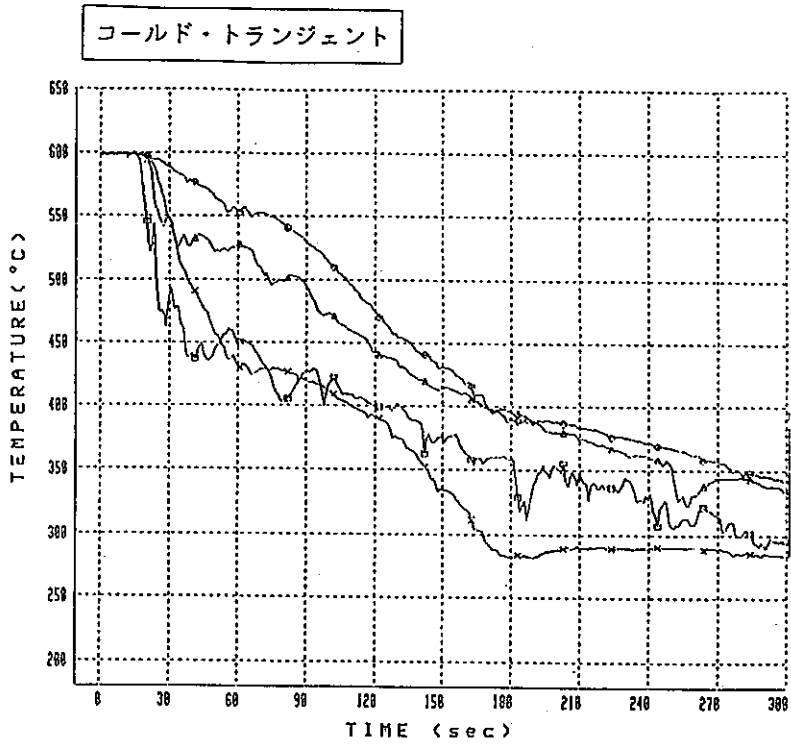


図 4.90 入口ノズル軸方向温度分布 (100サイクル)



サイクル数 = 250
 時間 = S 63.11.10
 3:00~

- × - INI-01 A
- - INI-03 A
- - INI-04 A
- △ - UPI-07 A

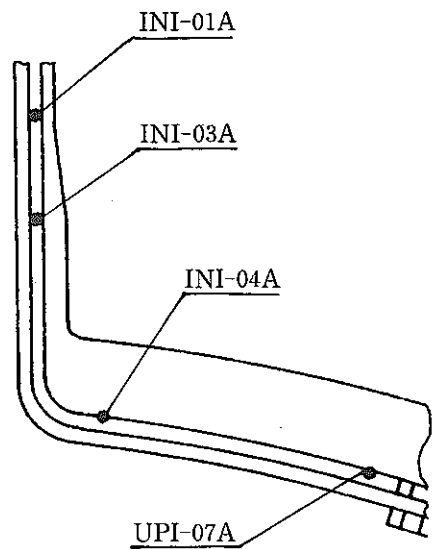
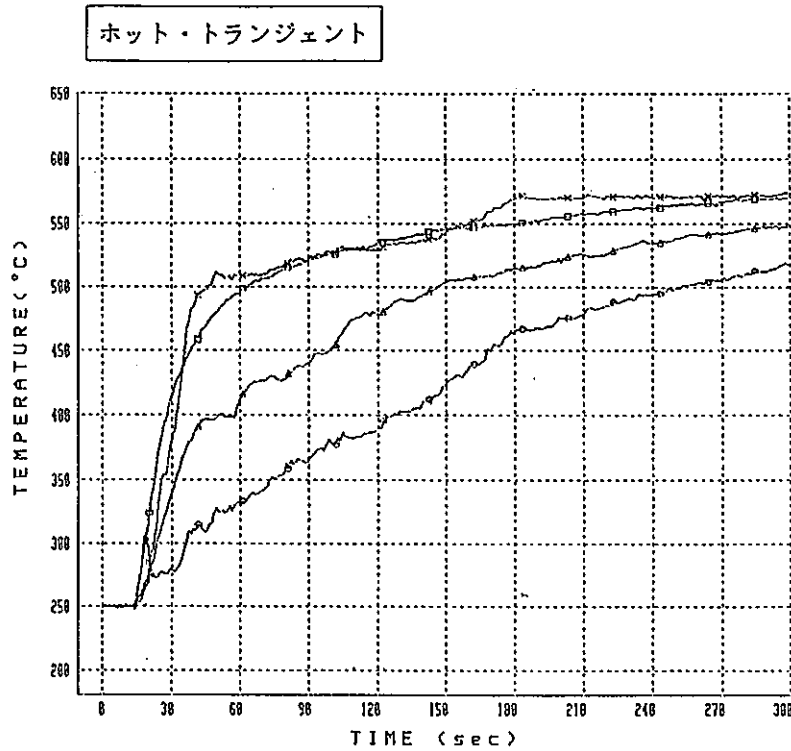
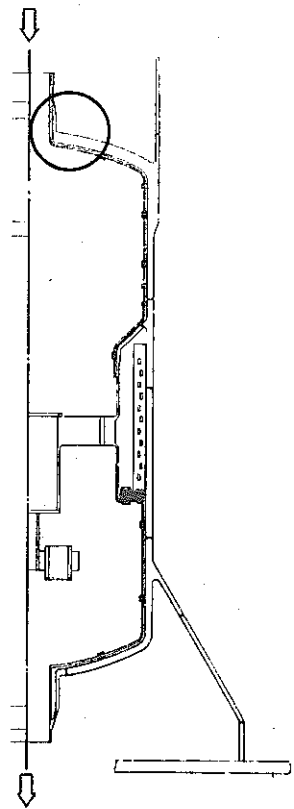
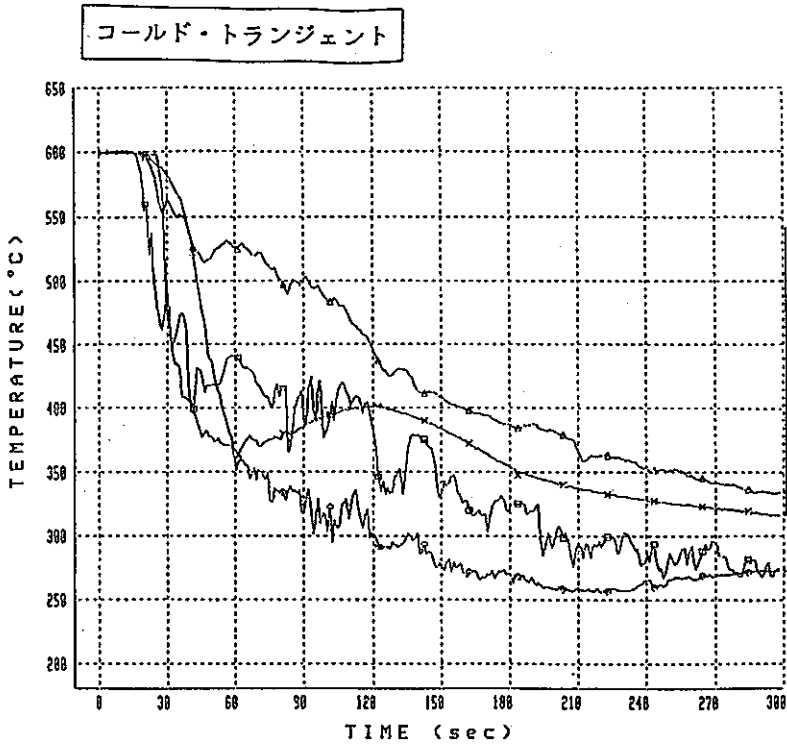


図 4.91 入口ノズル軸方向温度分布 (250サイクル)



サイクル数 = 500
 時間 = S 63.11.30
 23:00~

- × - INI-01A
- - INI-03A
- - INI-04A
- △ - UPI-07A

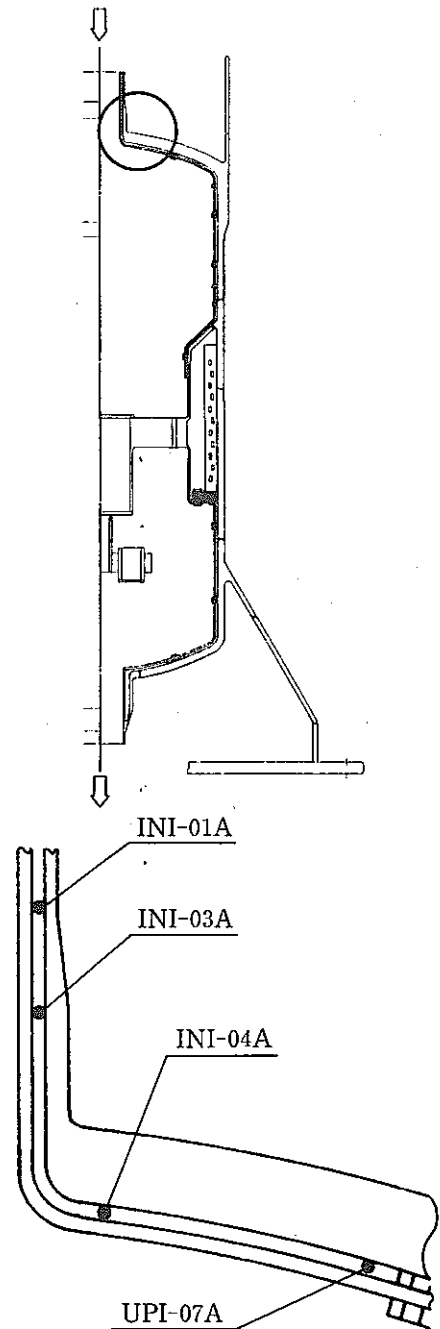
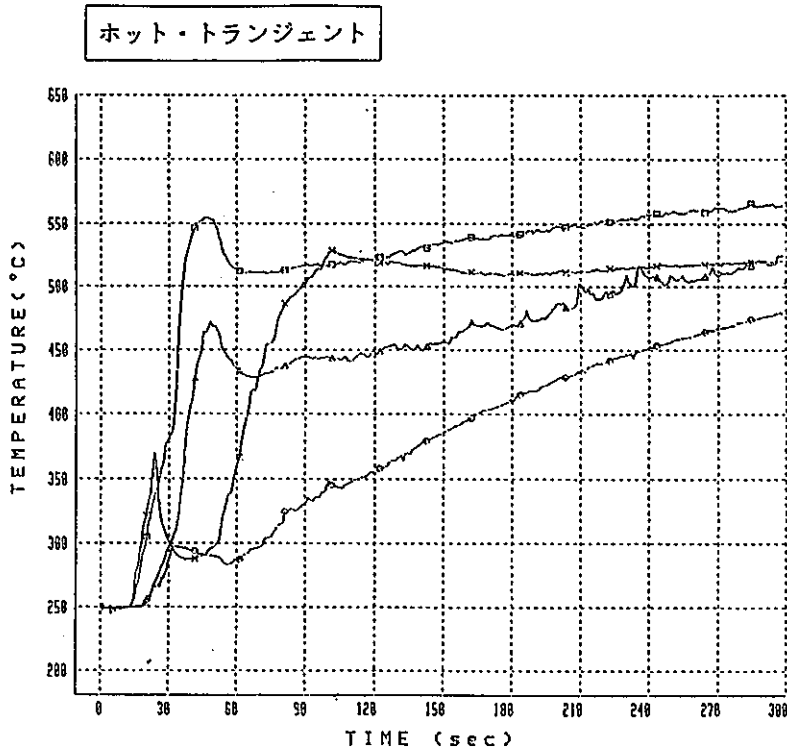


図 4.92 入口ノズル軸方向温度分布 (500サイクル)

4.2 変位の結果

変位計は供試体の異常変形を確認するため供試体の上部スカート部とベース板の45°、135°にそれぞれ取付けた。データ(図4.93、94)は予熱からプロットし、試験中は各サイクル毎のデータおよび代表サイクルをプロットした。また供試体入口ノズルコーナー部補修後のデータもプロットした。ベース板では補修前後で大きな変化はないが、上部スカートでは1サイクル当たりの変位量が45°より135°の方が大きくなっている。特に補修前は5mmの差がある。入口ノズルコーナーの破損箇所が135°方向であることから、その影響がでていていると思われる。

以上より上部スカートで若干いびつになっているが、全体的に見て異常変形は生じなかった。

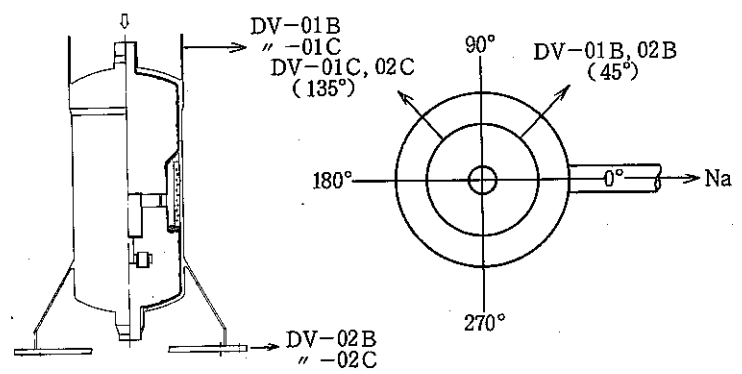
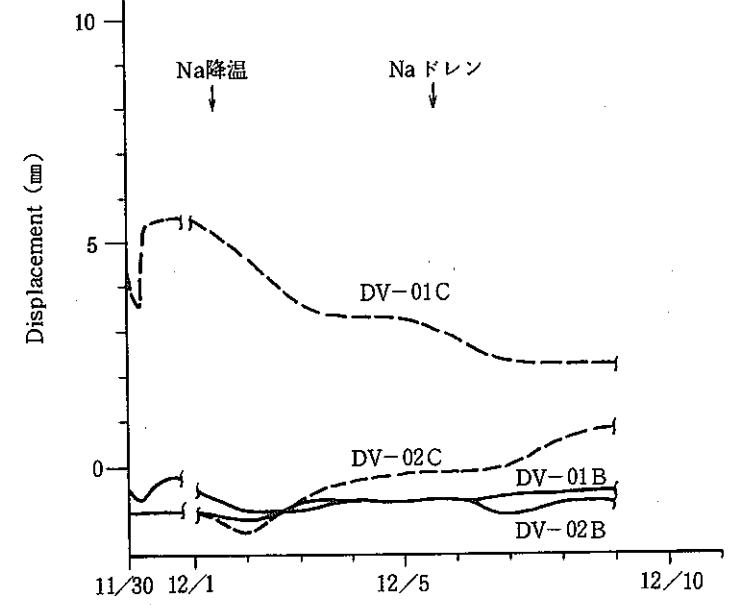
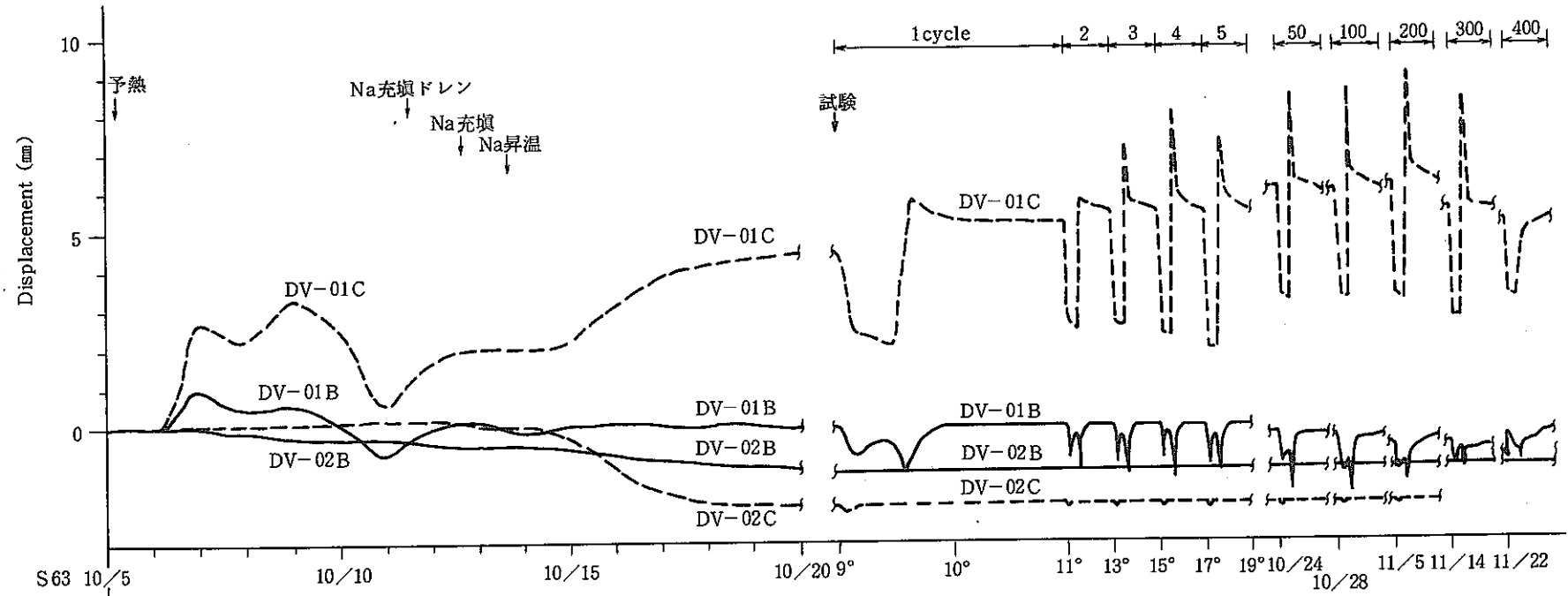


図 4.93 熱・緩(2)供試体変位データ図 1 / 2

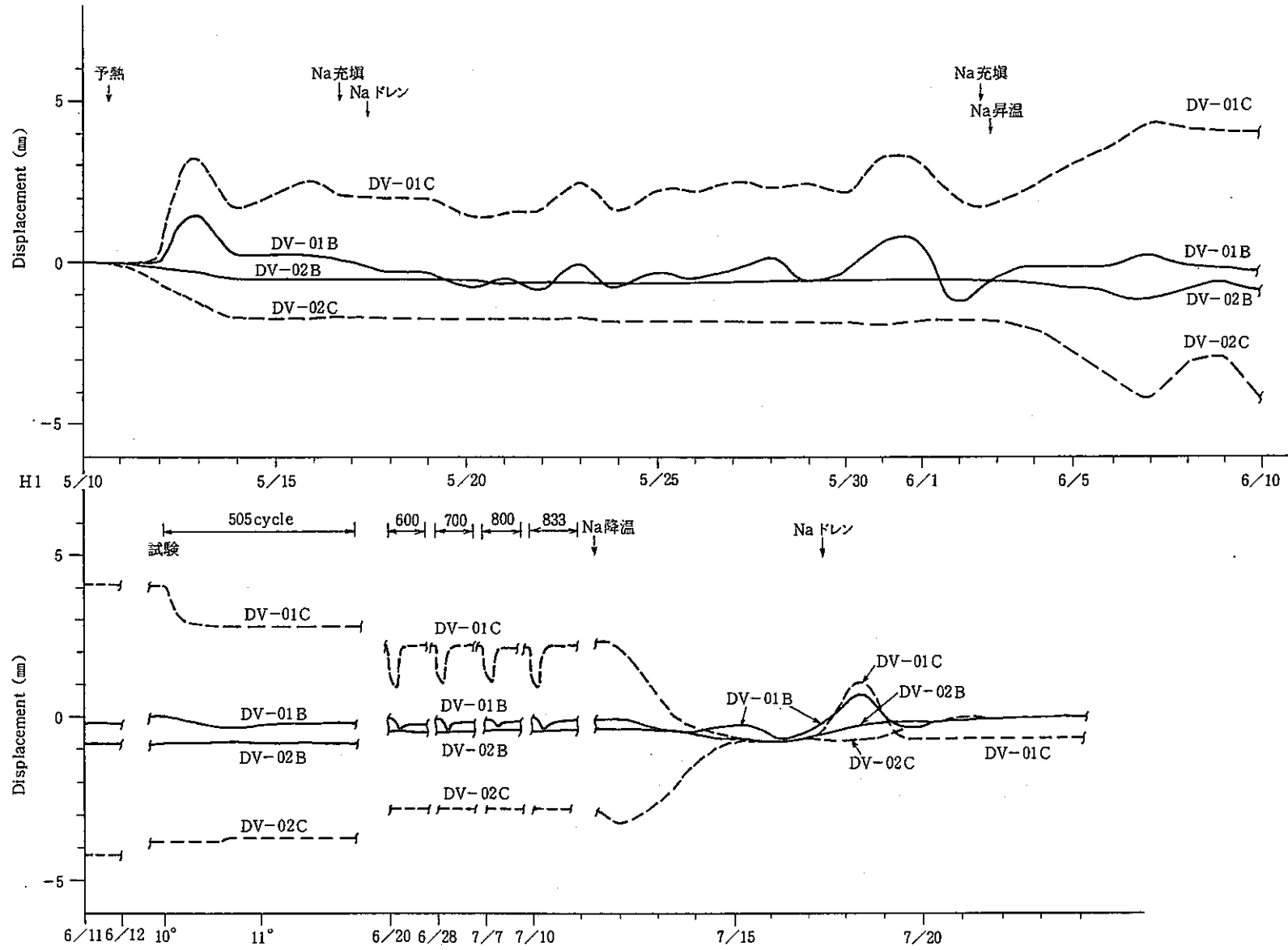


図 4.94 熱・緩(2)供試体変位データ図 2 / 2

5 超音波探傷試験

試験終了の判断材料の一つとするために、強度試験対象部のうち供試体の上部スカートおよび下部支持スカート付け根の” Yピース” 部（いずれも S U S 304材）を対象として超音波探傷試験（以下 U T と記す）を行った。

これらの部位は T T S - D S による事前の損傷評価値が上部スカート付け根部で 3.00 と供試体全体の中では比較的高く、また、下部指示スカート付け根部で 1.64 と比較的低い（590℃ - 90min、250℃ - 30min、1800Cycle）⁽⁷⁾ 箇所である。

検査実施時期は熱過渡試験開始前（事前検査；無欠陥状態でのバックグラウンドデータを得ることが主目的）と熱過渡繰返し数 833 回終了時点である。熱過渡繰返し数 833 回の時点では事前の損傷評価結果から供試体各部の損傷がある程度進んでいるものと予想された。

5.1 条 件

5.1.1 検査位置

検査対象位置を図 5.1 に示す。検査位置は、この部分（供試体上下部スカート）の形状が供試体の中心軸回りに対称な構造であることから熱過渡条件および損傷度合いも円周線上で均一であると想定し、円周上の 225° 位置を中心に周長約 300mm の範囲とした。検査対象範囲内の供試体外側に取りつけた保温材は取り外し可能な構造、即ち着脱式で、その寸法は 300（円周）× 500（縦）mm である。また、保温高さ（厚み）は 200mm である。

5.1.2 探傷条件

U T 対象部と同形状・同材質で、放電加工により人工欠陥を設けた「比較試験片」を製作し、探傷方法について検討して検査のための条件設定、探触子の選択を行った。使用した機器の仕様は次のとおりである。

- (1) 探傷器本体 ; クラウトクレーマ製 U S L 32 型
- (2) 探 触 子 ; パナメトリックス製 M 109（5 MHz、 ϕ 0.5inc） [斜角用]
 ジャパンプローブ製 5 Z 10 N（集束範囲 0 ~ 26mm） [垂直用]
 ジャパンプローブ製 5 Z 15 S（集束範囲 6 ~ 17.5mm） [垂直用]
 ジャパンプローブ製 5 Z 30 A（集束範囲 15 ~ 47mm） [垂直用]
- (3) 接 触 媒 質 ; グリセリン
- (4) 標準試験片 ; S T B A 3
- (5) 比較試験片 ; 表 5.1 に示す。

事前検討の結果、検査は屈折角45度の斜角探傷を主にして行うこととした。また、垂直探傷の可能な箇所についてはこれも行うこととした。

感度設定は、斜角（45度）探傷の場合には表5.1に示した比較試験片の人工欠陥番号1（模擬き裂深さ1mm）での指示エコー高さをCRT上で70～80%とし、更に12db高めたものとした。垂直探傷の場合は同じく人工欠陥番号13（模擬き裂深さ1mm）での指示エコー高さをCRT上で70～80%とした。このときのCRT表示を図5.2に示す。

時間軸、屈折角の調整は音速をステンレス鋼の縦波が5800m/s、横波が3100m/s、炭素鋼の縦波が5900m/s、横波が3230m/sとして換算を行った。

探触子の走査は、斜角および垂直とも走査速度は約150mm/sec以内として走査範囲内を縦に直線状に走査して行った。走査範囲および探傷のための位置基準を図5.3に示す。検査時の供試体外表面温度は約30℃であった。

検査は日本非破壊検査協会認定の超音波探傷試験1級技術者の資格を有する者が実施した。

5.2 探傷結果

5.2.1 事前検査

熱過渡試験開始前の時点で行った事前検査では、本検査（熱過渡試験の途中で行う検査）での割れの検出の妨害になるような指示エコーは認められなかった。このときの探傷検査記録（CRT表示）の代表的なものを図5.4～図5.5に示す。また、斜角にて探傷感度を20db高めた結果、粒界エコーを捕らえることができた。探傷検査記録（CRT表示および解析図、以下同じ）の代表的なものを図5.6に示す。

5.2.2 本検査

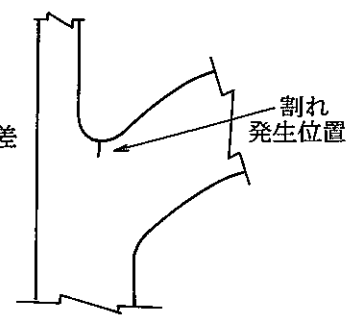
熱過渡数 833回終了時点で事前検査と同一箇所を検査した。その結果、上部スカート付け根部および下部支持スカート付け根部とも斜角および垂直の両方において事前検査では認められなかった有意なエコーが認められた。探傷検査記録を図5.7～図5.8に示す。

両方の部位の欠陥高さ（深さ）を解析するために欠陥端部のピークエコーの検出を試みたが、それは確認できなかった。このことから、欠陥深さは僅かなものと推定された。このため欠陥深さを『-6dbドロップ法』で算出した。これによると欠陥の深さは上部スカート部で1.5mm、下部支持スカートで1.8mmと推定された。このような指示エコーは子午線上では1箇所、円周上では検査範囲（300mm）内の走査部各点に認められた。

なお、粒界エコーの指示模様は熱過渡試験前の事前検査時に得たものと同様であった。粒界エコーの探傷検査記録を図5.9～図5.10に示す。

『-6dbドロップ法』

欠陥部の最大エコー高さの位置のビーム路程 W_1 とエコー高さが半分（-6db）になる位置のビーム路程 W_2 との差を読み取り、屈折角を θ として次式で計算する。

$$d = (W_1 - W_2) \cos \theta$$


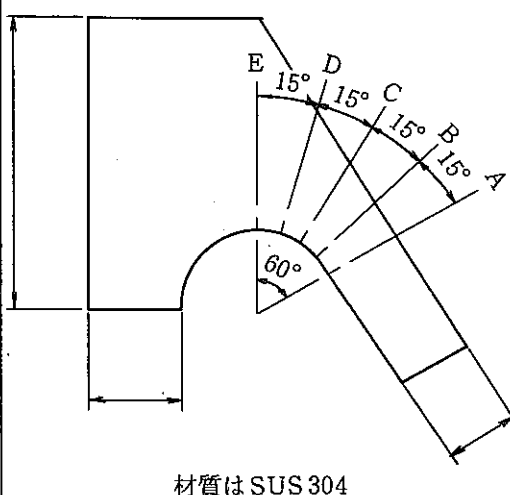
5.3 探傷結果のまとめ

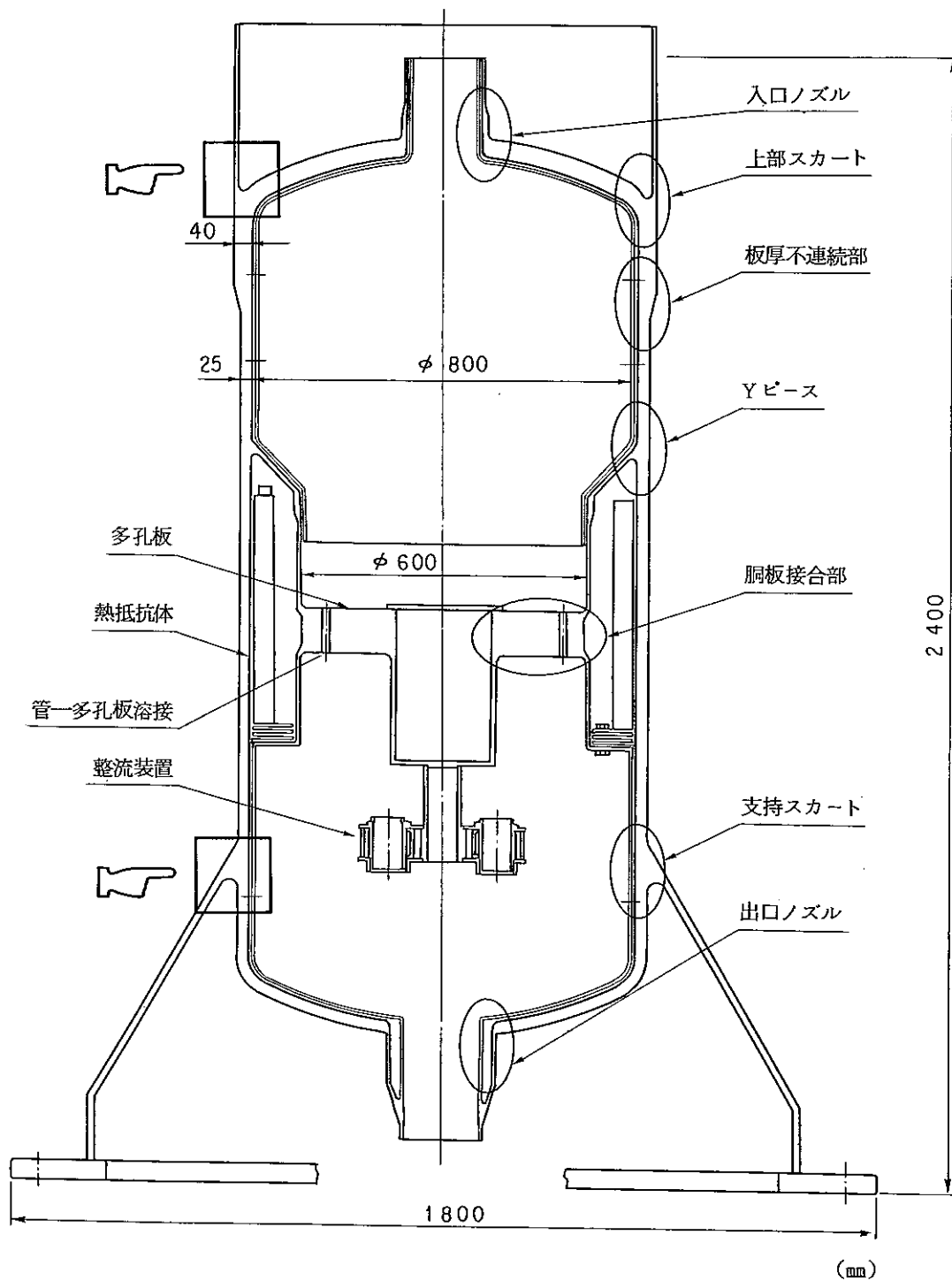
供試体の熱荷重によるクリープ疲労き裂の有無を検査することを目的に、上部スカート付け根および下部指示スカート付け根に対し超音波探傷試験を適用した。

検査に先立ち探傷条件の事前検討を行うとともに熱過渡試験開始前（健全状態）に事前に検査を行い基準データを取得した。熱過渡試験の途中において試験を中断し事前検査と同条件で探傷した結果、事前検査時には認められなかった有意な欠陥指示が探傷範囲内の全長（周線方向）に表れた。

この欠陥指示の高さ（深さ）を -6 dB ドロップ法で算出した結果、上部スカート部で 1.5 mm 、下部支持スカートで 1.8 mm と推定された。

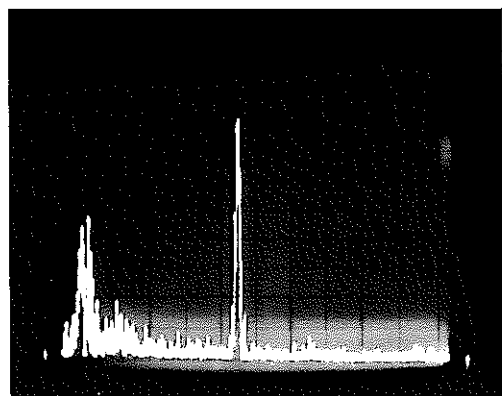
表 5.1 比較試験片の仕様

人口欠陥 No.	模擬き裂 位置	模擬き裂 深さ (mm)	備 考	模 擬 き 裂 位 置
1	A	1	スリット深さは 模擬き裂位置 A における屈折角 45° での音圧反 射率の観点か ら、1 mm、2 mm 5 mmとする。	 <p>材質は SUS 304</p>
2		2		
3		5		
4	B	1		
5		2		
6		5		
7	C	1		
8		2		
9		5		
10	D	1		
11		2		
12		3		
13	E	1		
14		2		
15		3		

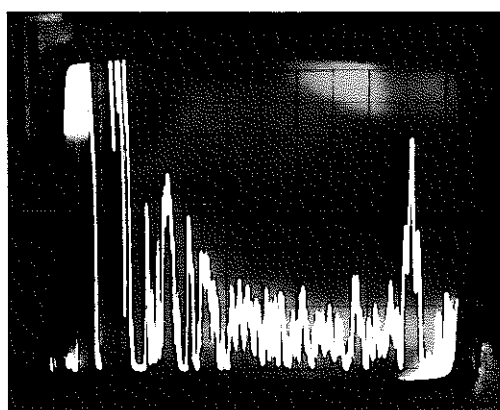
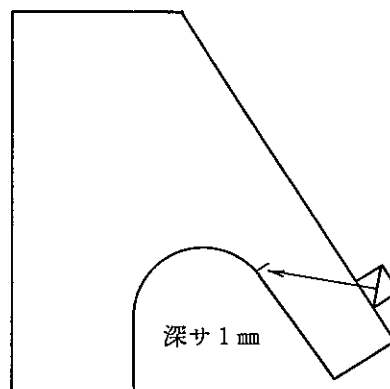


 検査箇所

図 5.1 超音波探傷試験対象位置



斜角 (45°)
人工欠陥No.1をCRT上で80%
(60+18dB)



垂直 (0°)
人工欠陥No.13をCRT上で80%
(40+22dB)

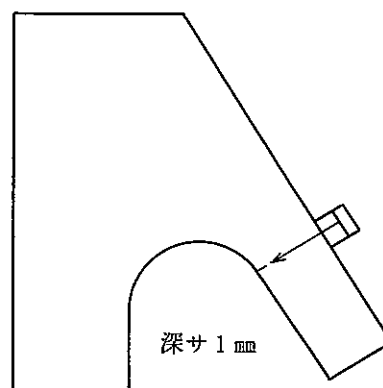


図 5.2 基準エコー高さ

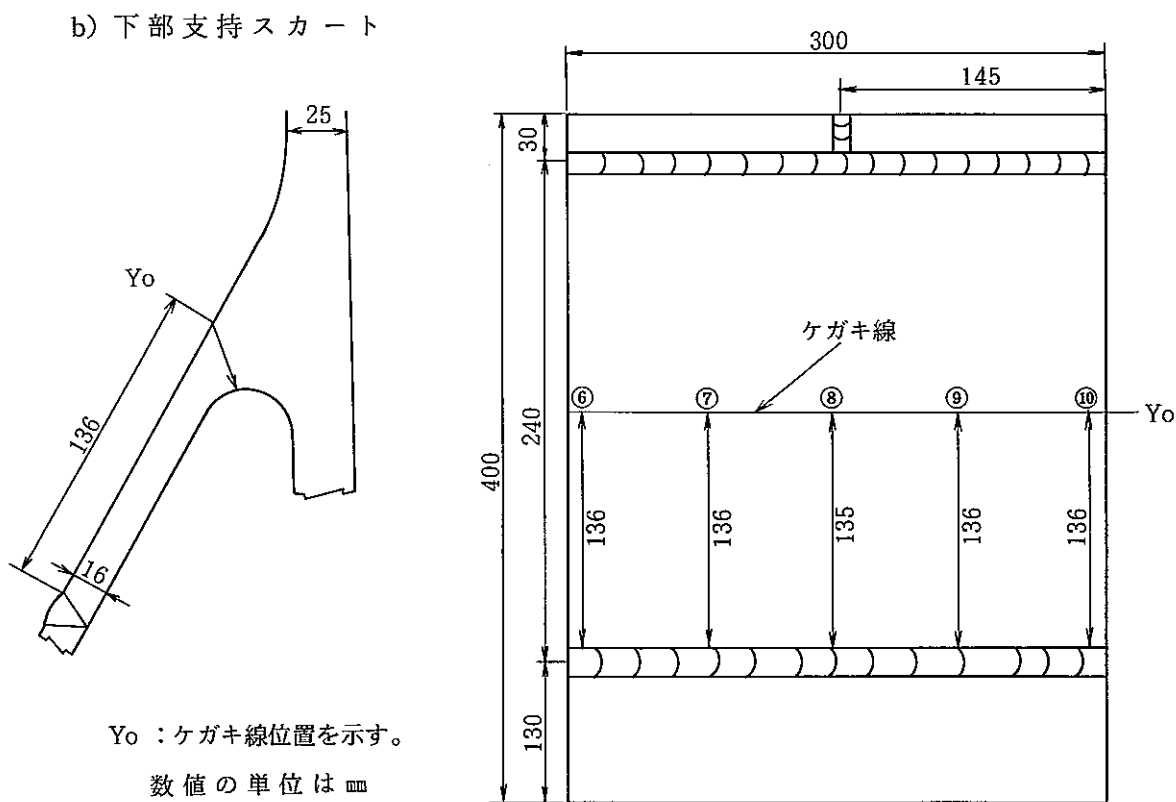
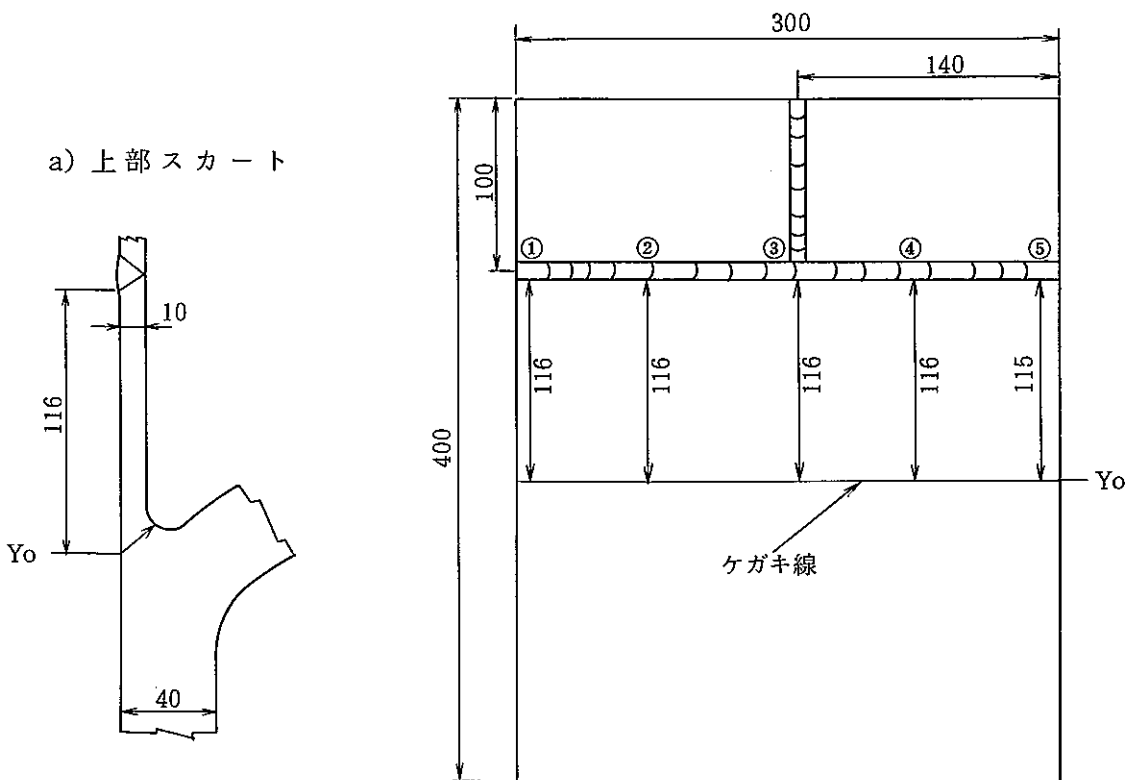


図 5.3 基準位置図

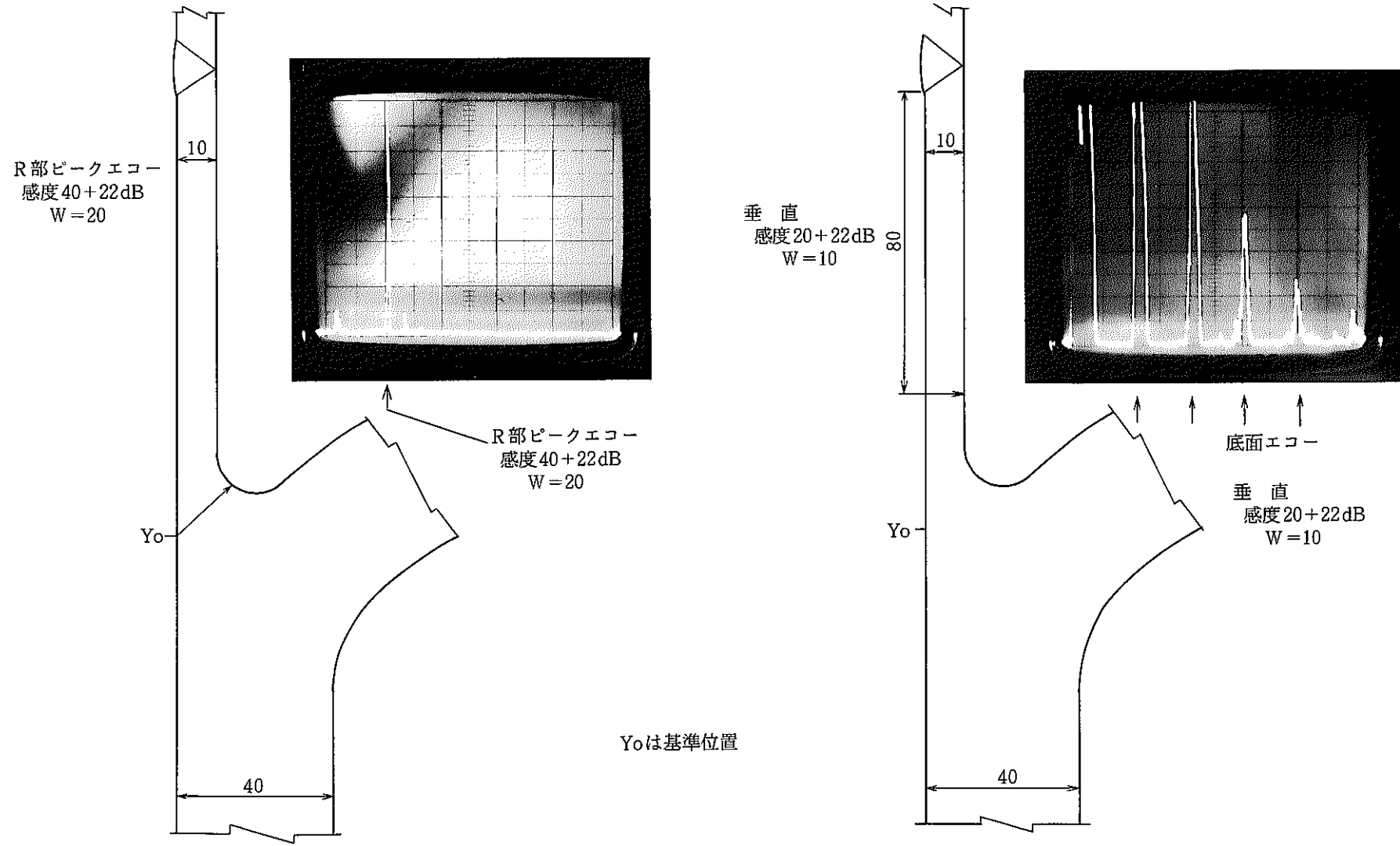


図 5. 4 探傷検査記録 (事前検査、上部スカート)

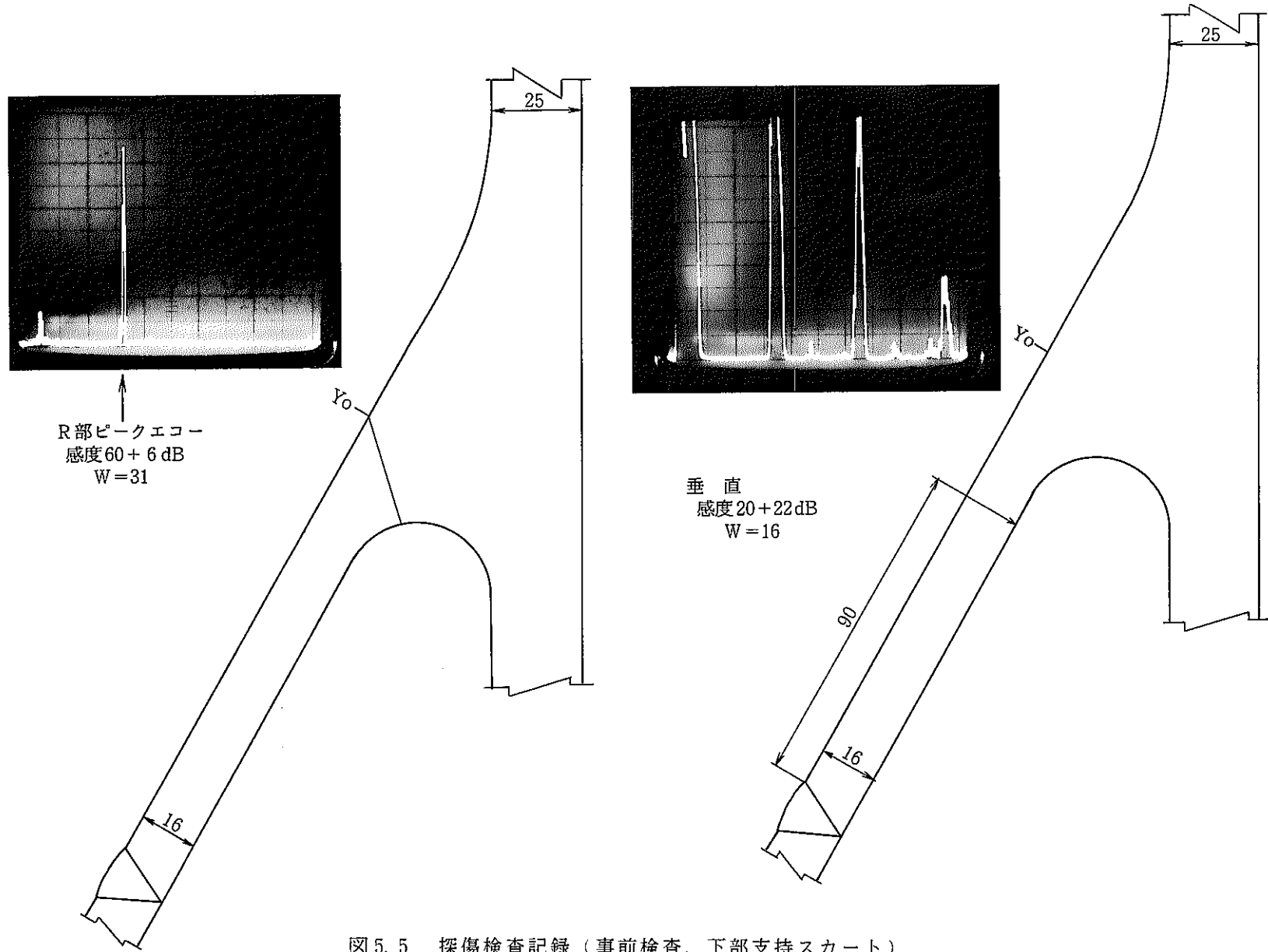


図 5. 5 探傷検査記録（事前検査、下部支持スカート）

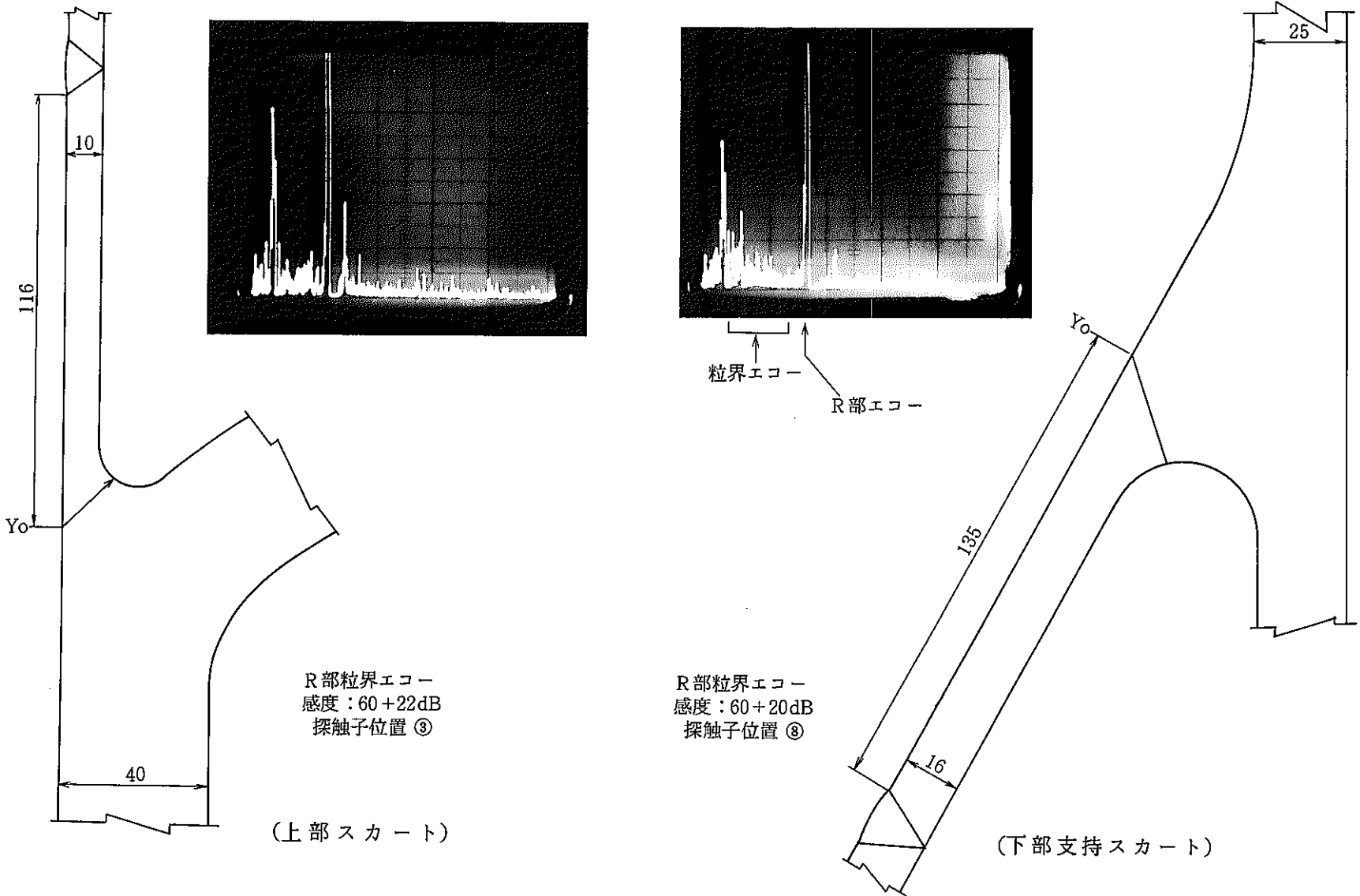


図 5. 6 探傷検査記録 (事前検査、R部粒界エコー)

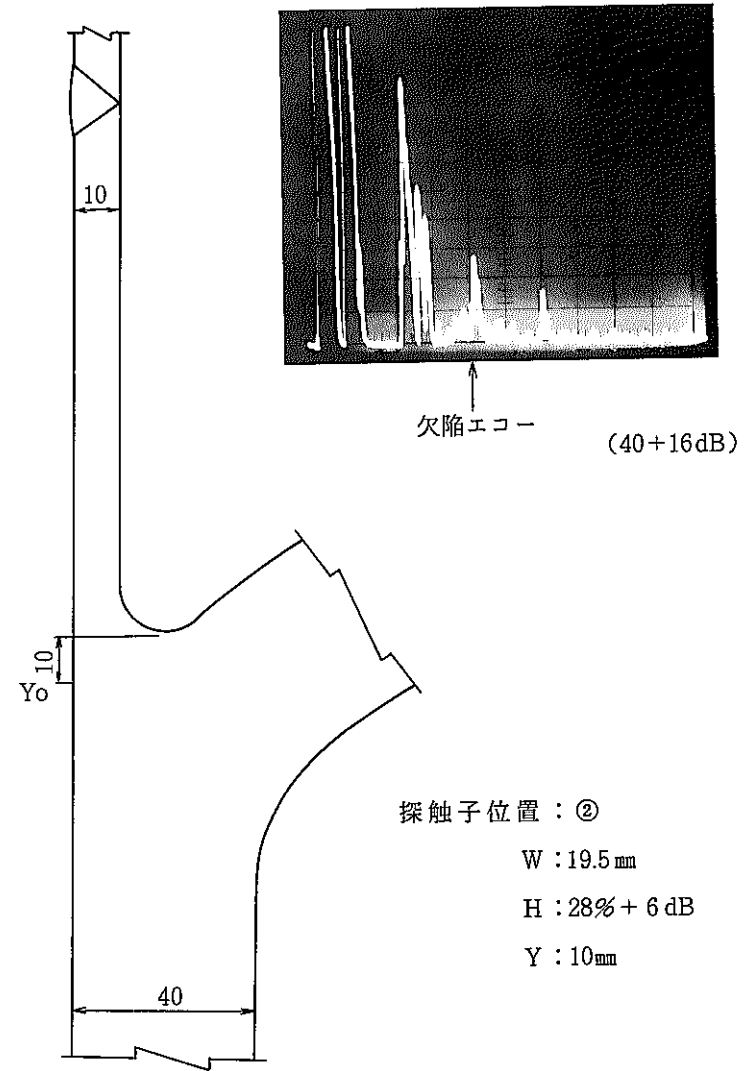
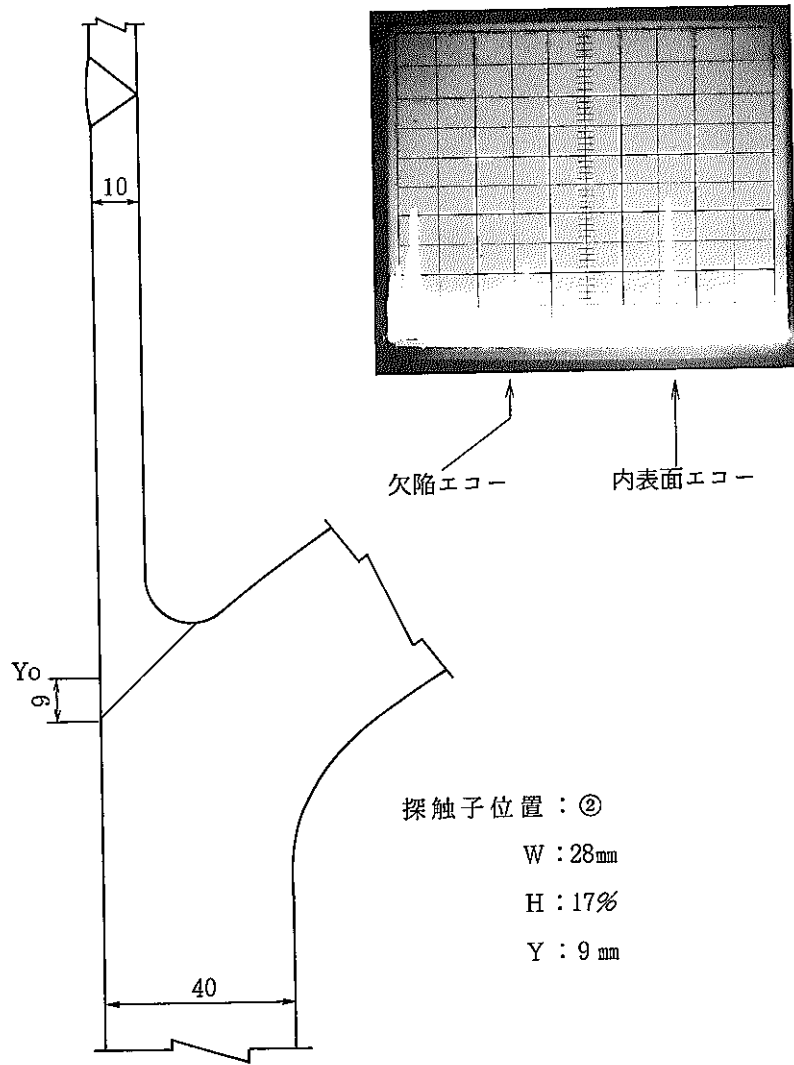


図 5.7 探傷検査記録 (熱過渡数 833回、上部スカート)

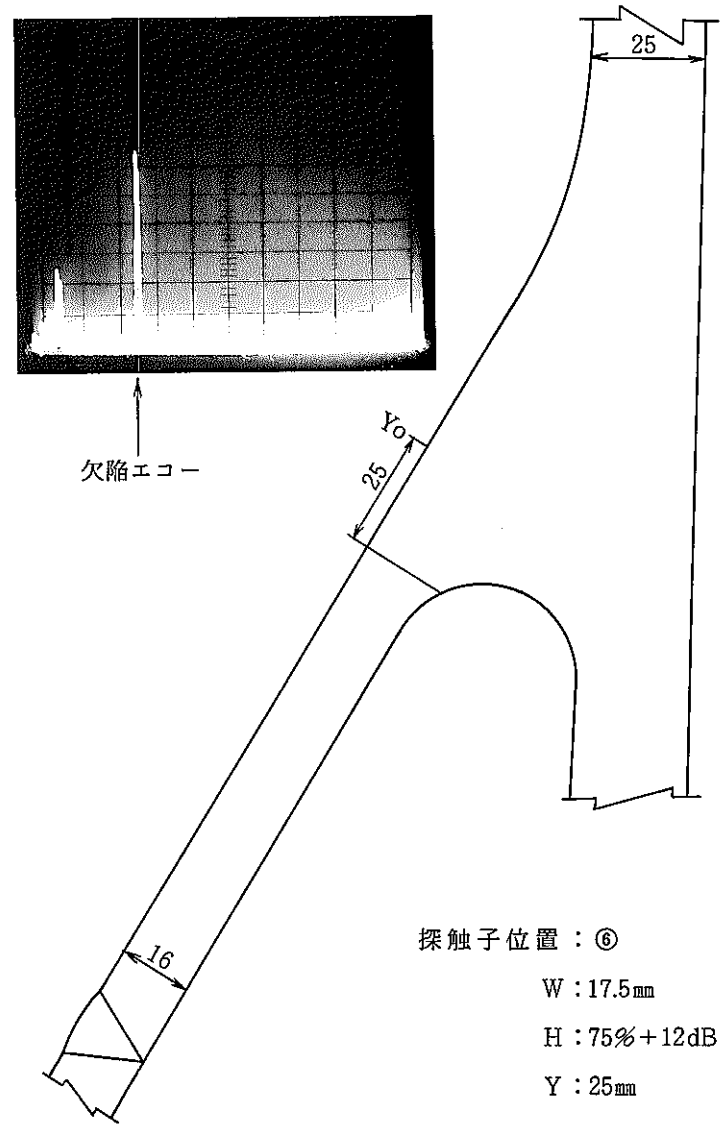
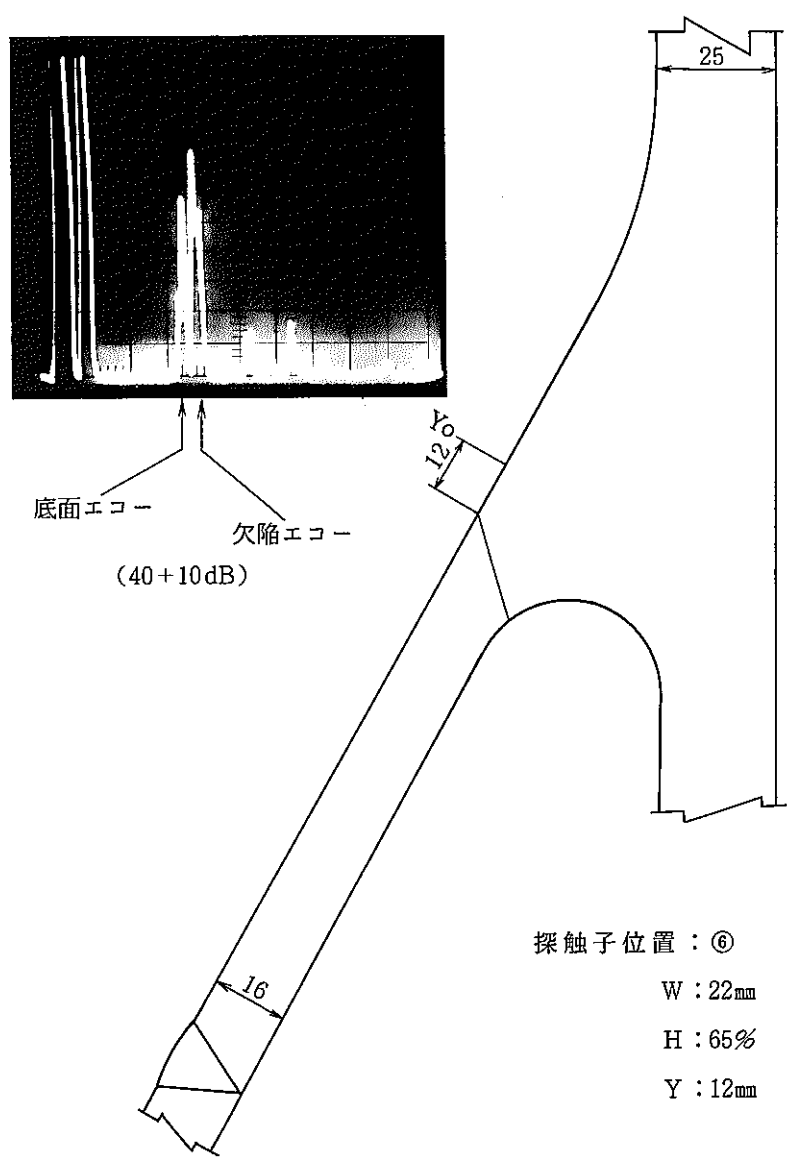


図 5. 8 探傷検査記録 (熱過渡数 833回、下部支持スカート)

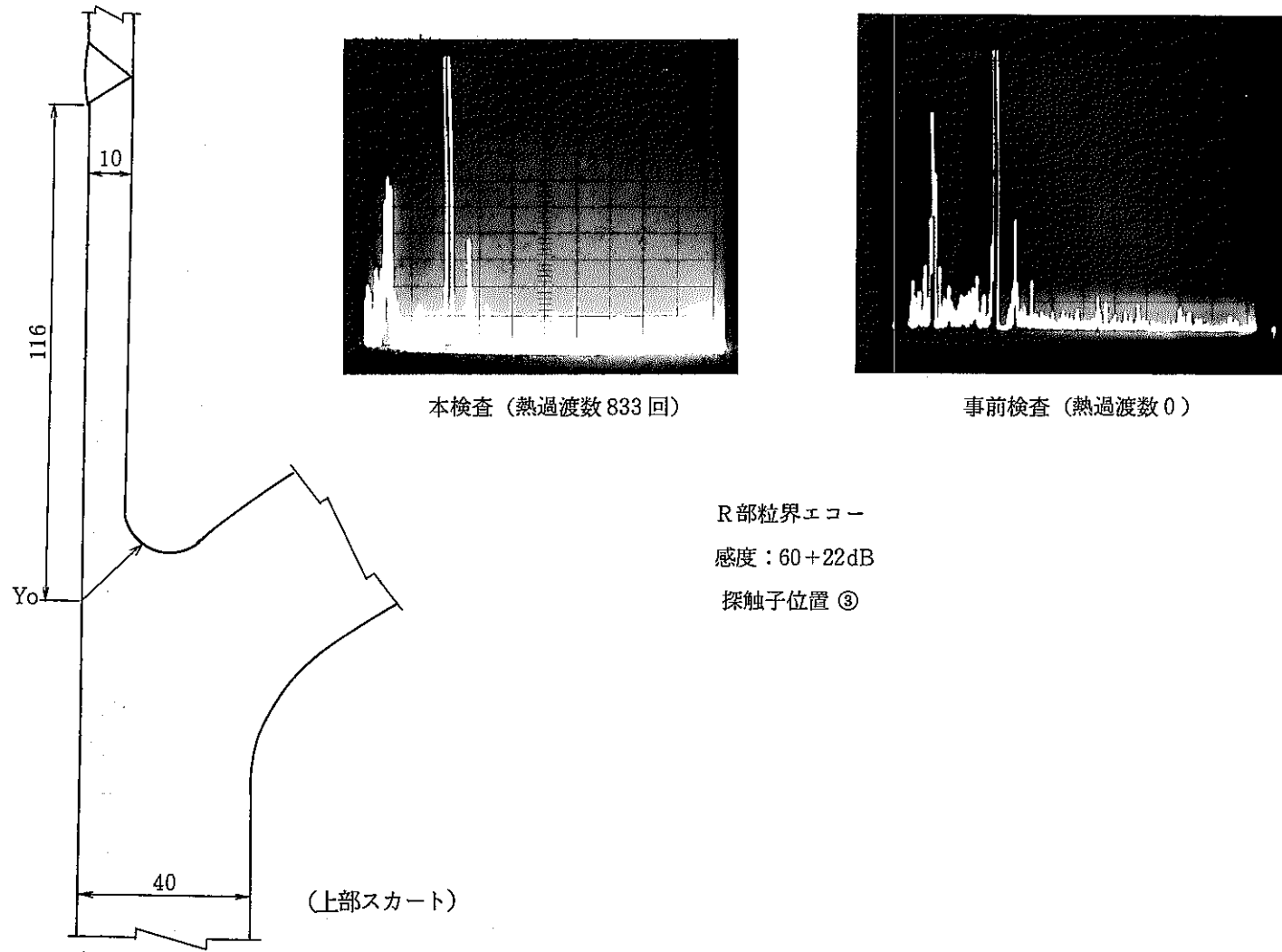
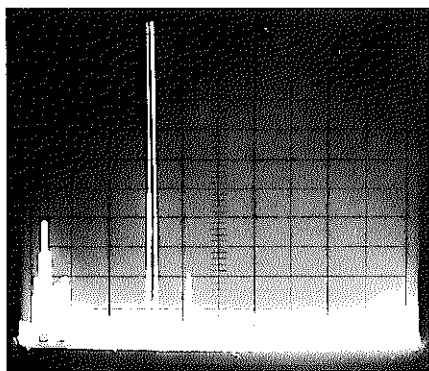
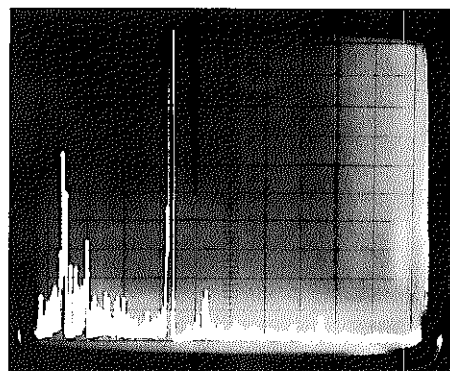


図 5.9 探傷検査記録 (熱過渡数 833回、R部粒界エコー)

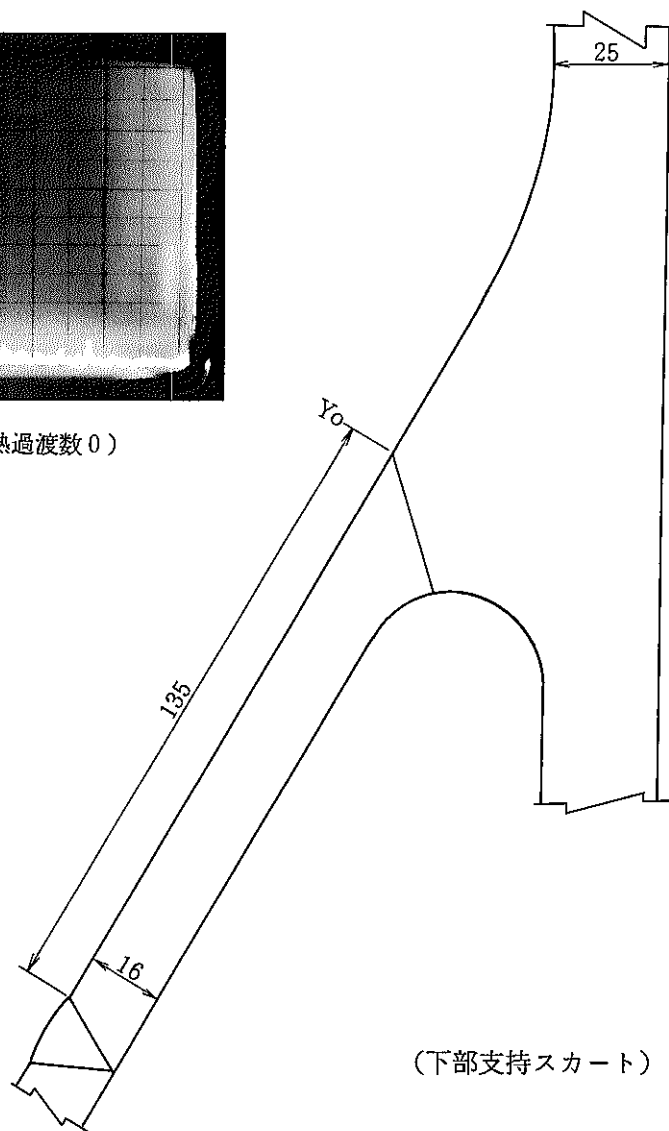


本検査 (熱過渡数 833 回)



事前検査 (熱過渡数 0)

R部粒界エコー
感度：60+20dB
探触子位置 ⑧



(下部支持スカート)

図 5.10 探傷検査記録 (熱過渡数 833回、R部粒界エコー)

6 解体検査

熱過渡による強度評価部位のき裂分布・形態および内部装着機器の機能変化について供試体を解体して検査した。以下にその方法と結果について示す。

6.1 検査項目と方法

供試体を機械的に切断しながら、その過程で液体浸透探傷試験（以下「PT」と記す）、光学顕微鏡および走査電子顕微鏡による詳細観察、硬さ試験、外観・寸法検査および内部装着機器の機能等試験を行った。供試体切断位置をFig. 6.1.1に、解体過程での供試体外観をPhoto. 6.1.1に示すとともに検査内容を以下に記す。

なお、検査に先立ち供試体内残存ナトリウムの処理・洗浄をアルコール循環法にて行った。これに要した時間は35.5時間、残存ナトリウム量は中和濃度からの推定で2.5ℓであった。

6.1.1 液体浸透探傷試験（PT）

き裂の分布、深さ（板厚方向進展量）をPTにより検査した。対象部位は供試体内外表面全域および強度評価部位の板厚断面とした。この際、板厚断面については機械（ボール盤、鋸盤）切断面をグラインダーで平滑に仕上げて行った。

6.1.2 詳細観察

き裂の断面・破面形態およびき裂発生位置、形状を光学顕微鏡および走査電子顕微鏡により観察した。対象は強度評価部位および溶接部に生じたき裂の中の代表的なものとした。観察倍率は断面や発生位置、形状観察の場合で1～400、破面観察の場合で1～2000とした。

6.1.3 硬さ試験

本供試体材料の機械的な性質を把握するための一つとして、ビッカース硬さ試験を実施した。対象部位は上鏡母材、外部胴上周溶接部近傍、外部胴下周溶接部近傍、胴-多孔板接合部の4ヵ所とし、圧延材、鍛造材、溶接部を代表する箇所とした。

6.1.4 機器の機能等検査

整流装置、管-多孔板、熱抵抗体についてそれぞれ以下のように行った。

(1) 整流装置

装置を分解しながら各構成部品についてPT、目視検査、寸法検査を行った。

(2) 管-多孔板

(a) 拡管把握力

引張試験機を用いた管の押出試験および管開放時のひずみ測定を行うことにより調べた。押出試験では室温下において、管-多孔板溶接部の機械的な除去⇒管と管押出用プラグの溶接⇒引張試験機への多孔板のセット⇒ストローク制御による管押出用プラグへの負荷、の要領で実施し、押出荷重とストローク（時間）の関係を記録したとともに管の動き始めを判定した。

管開放時のひずみ測定試験からは、管が多孔板から開放されたときの管内面の歪み量をもとに計算した面圧として求めた。

(b) 溶接部のき裂

管-多孔板を縦（管軸方向）に切断し、溶接部断面をP Tおよび光学顕微鏡により観察した。また、全断面をP Tおよび目視により検査し、管-多孔板接触面の状態を調べた。

(c) 接合面の腐食および接合部隙間の状態

管-多孔板を縦（管軸方向）および水平（径方向）に切断し、縦断面における管と多孔板の隙間をP Tおよび目視検査した。また、管と多孔板を分離し、双方の接合面の状態（主に腐食）を目視検査した。

(3) 熱抵抗体

外観検査および重量測定を行った。

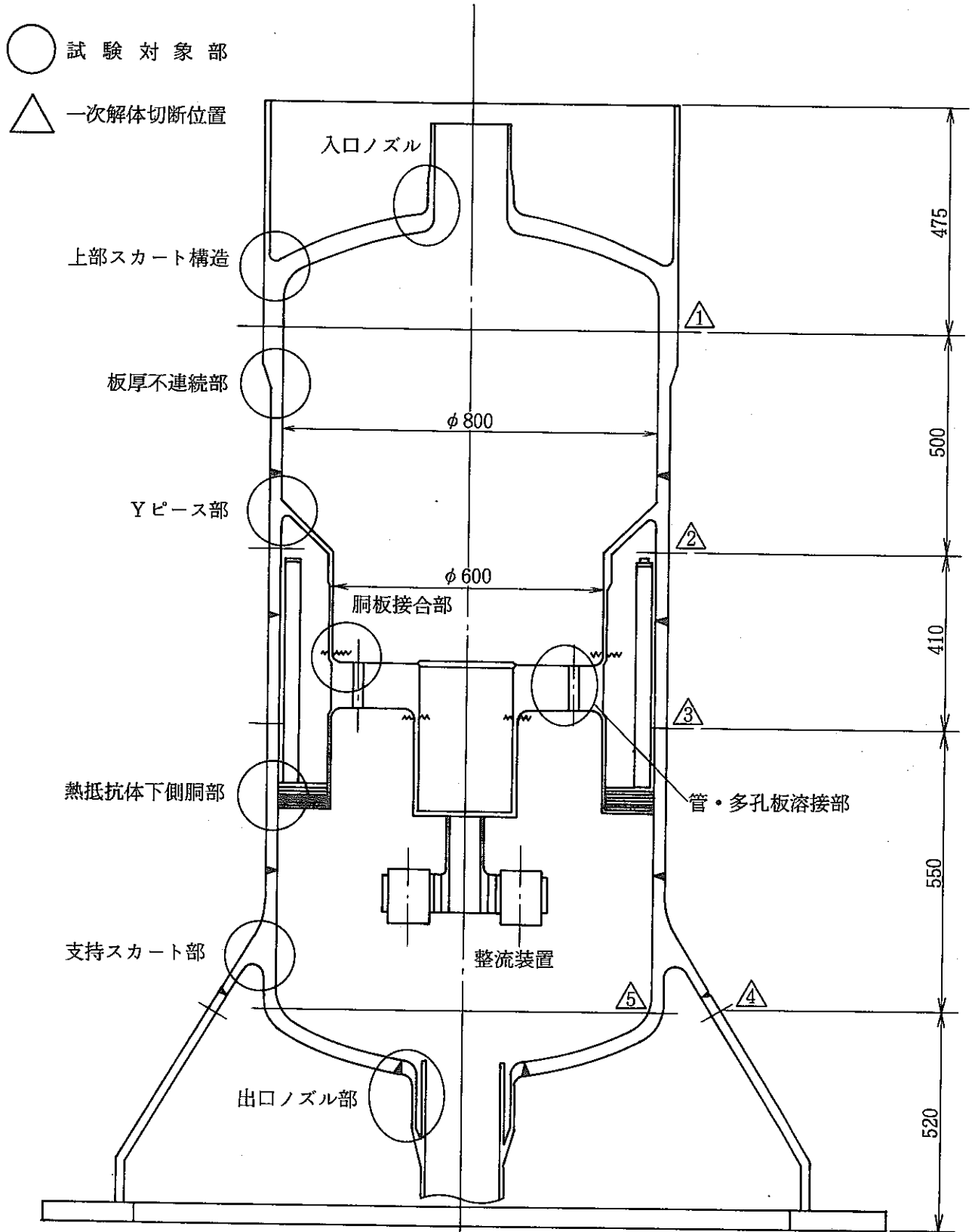
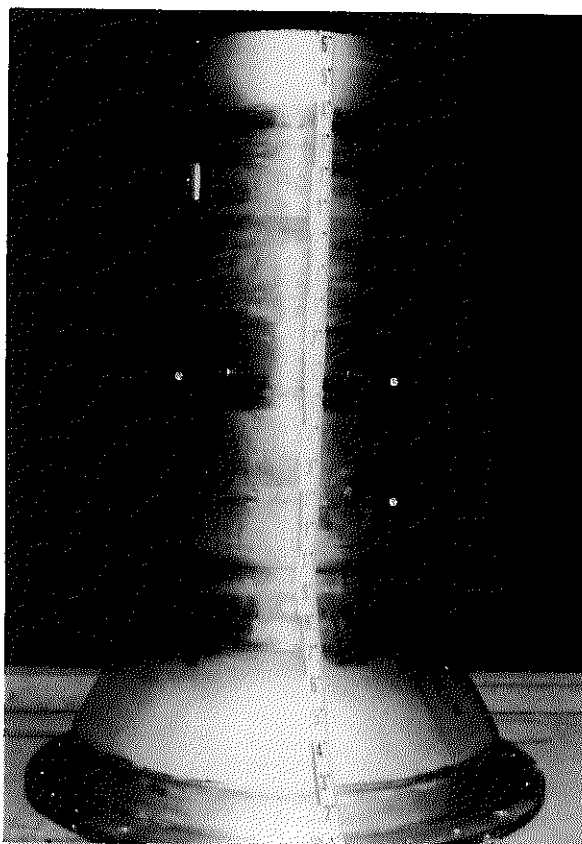
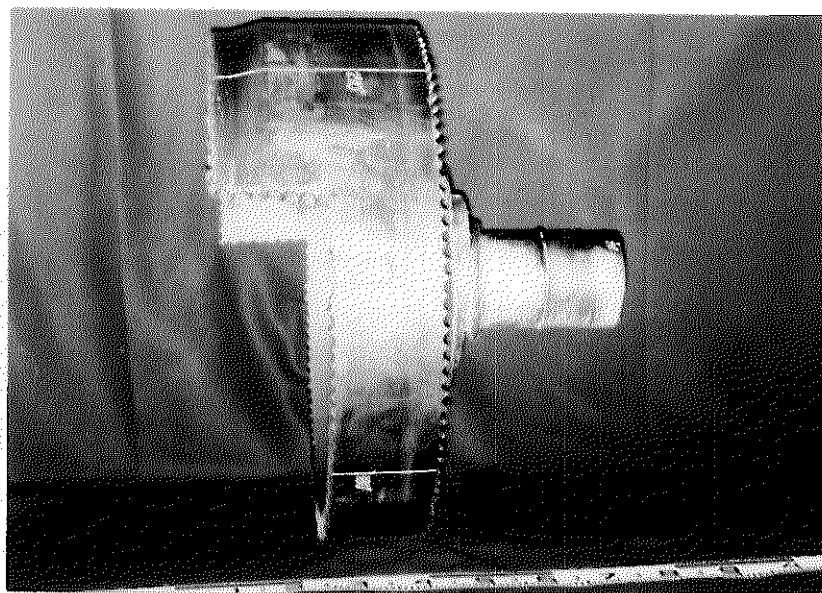


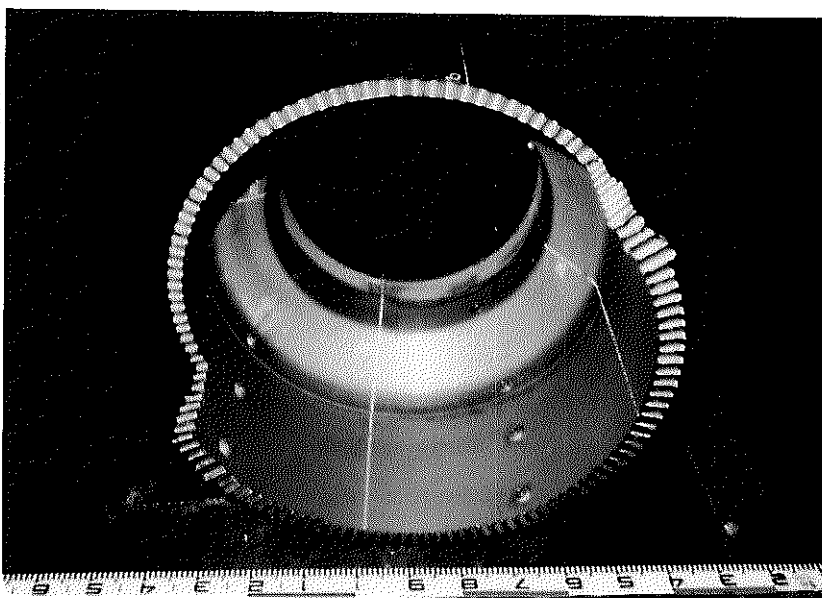
図 6. 1. 1 供試体切断位置



㊶ 供試体全景

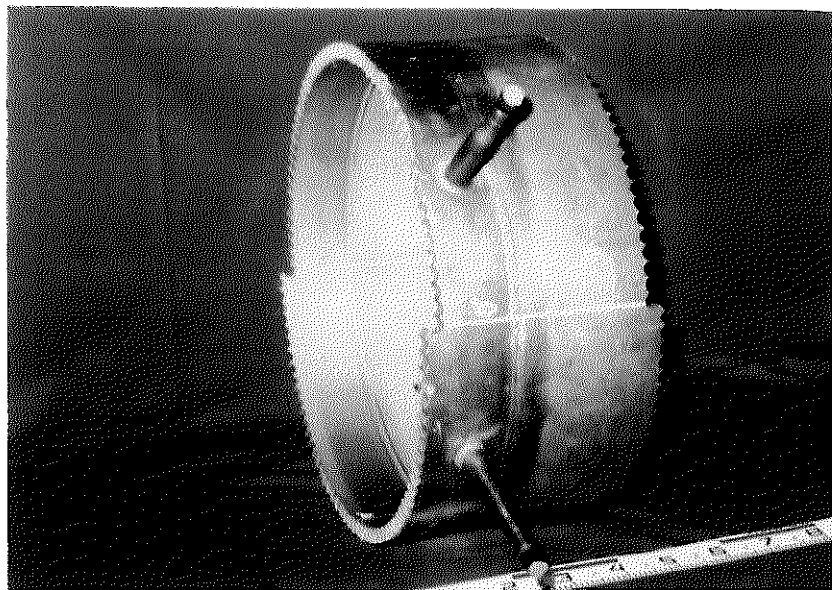


㊷ 入口ノズル&
外部胴上部

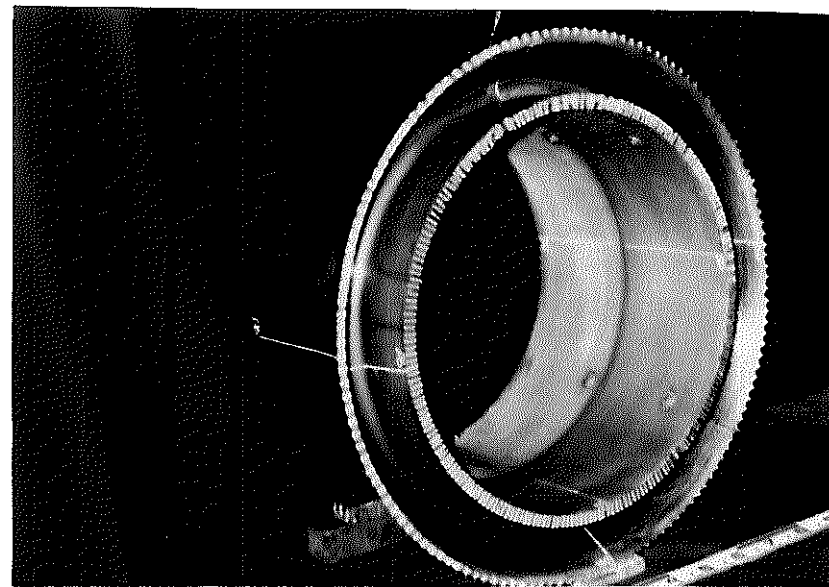


㊸ 外部胴上部～Yピース
～内部胴（内面）
〔上方からの視〕

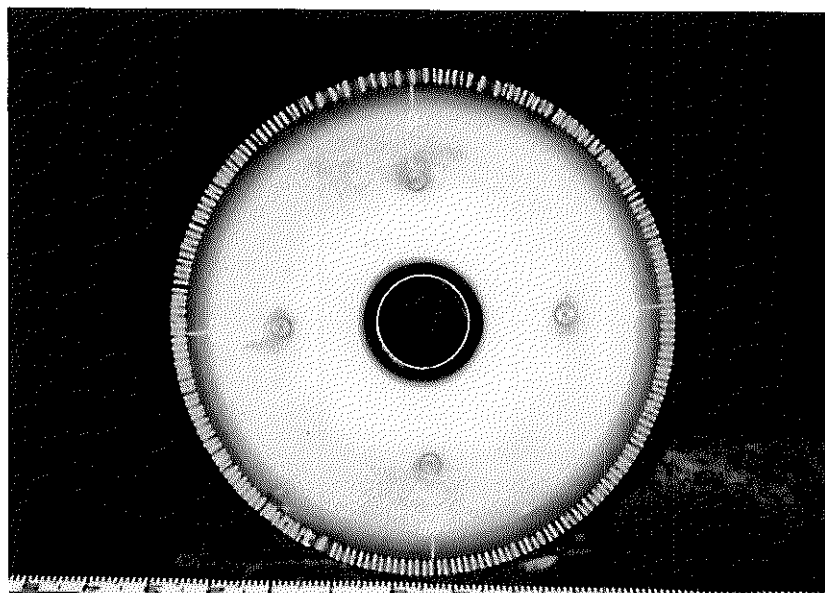
写真6.1.1(a) 解体過程における供試験体外観(1)



Ⓐ 外部胴（中間部）



Ⓑ 外部胴下部～支持スカート
〔下方からの視〕



Ⓒ 下部鏡～出口ノズル（内面）

写真 6. 1. 1 (b) 解体過程における供試験体外観(2)

6.2 き裂の状況と分布

P T結果に基づく供試体上のき裂位置をFig. 6.2.1、き裂の分布状況をFig. 6.2.2、部材断面のき裂の状況をFig. 6.2.3に示すとともに、これらの状況を構造部位ごとに以下に記す。また、Table 6.2.1、Table 6.2.2に各部位の主要き裂の寸法の形態をまとめて示す。き裂深さはP Tおよび部材断面の拡大観察による最大値である。

6.2.1 入口ノズル

入口ノズル各部のP T指示模様をPhoto. 6.2.1に示す。

管側テーパ部（写真(c)に示す⇒部）には内外面とも方位 225° 近傍に周方向き裂が生じていた。分布範囲は、内面側が周方向に30mm、縦方向に20mm程度、外面側が周方向にのみ30mm程度である。また、き裂寸法は内面側が長さ約2mm（深さの指示なし）、外面側が長さ約30mm、深さ1.8mmである。なお、この部位は局部的な（半径方向への）変形（断面がS字形状）を生じていた。

管側付け根コーナー端（薄肉部）には、内外面とも全周に連なった周方向き裂が生じ、このうち約3/4周では板厚貫通に至っていた。このき裂は熱過渡試験中（熱過渡数504回の時点）にて外表面側のみ確認されていた。その時点では表面長約3mmのき裂が約3/4周に渡り密に存在し、その中の一部が約15mmに渡り板厚貫通に至っていた。

コーナー曲率部には内面の全域に子午線方向き裂が林状に密に生じていた。き裂寸法は長さが約100mm、深さがコーナー中央部で9mmである。

6.2.2 上部スカート、上鏡

上鏡および上部スカート付け根のP T指示模様をPhoto. 6.2.2に示す。

上鏡にはノズルコーナーから外胴上部にかけての内面全域に亀甲状のき裂が生じていた。き裂深さは10.4mmである。この亀甲状き裂は全体的には縦（子午線方向）方向がやや支配的であるが、上部スカート付け根部近傍および鏡の外部胴側コーナー端では縦、周の割合が同等なものである。なお、熱遮蔽板取付け座周辺では亀甲状き裂に代わり溶接止端部周囲およびそこから放射状にき裂が生じていた。放射状に伸びたき裂の長さは～30mm程度である。

上部スカート付け根には内外面ともスカート側コーナー端に微小な周方向き裂が生じていた。き裂は全周に渡って存在しているが内面側の方が外面側よりも顕著である。き裂寸法は外面側が長さ約2mm（深さの指示なし）、内面側が長さ約5mm、深さ0.5mmである。

6.2.3 外胴上部～内筒

外部胴上部～内部胴にかけてのP T指示模様をPhoto. 6.2.3に示す。

外部胴上部のシンニング部内外面には、全周に渡って周方向き裂が生じていた。外面側き裂はシンニング端に、内面側き裂はシンニング端を中心に約50mmの拡がりを持って帯状に分布している。き裂寸法は外面側が長さ約5mm（深さの指示なし）、内面側が長さ約10mm、深さ8.4mmである。

周溶接部内面には溶接金属内上部と下側溶接止端部の2ヶ所に全周に渡って周方向き裂が生じていた。溶接金属内のき裂は微細なものであるが溶接止端部に生じたき裂は全周に連なったものである。き裂寸法は上側が長さ約3mm（深さの指示なし）、下側が深さ2.6mmである。

熱遮蔽板取付け座溶接部には溶接止端部周囲およびそこから放射状にき裂が生じていた。放射状に伸びたき裂の長さは～25mm程度である。

最終周溶接部には内外面ともき裂は生じなかった。この部分は内側に熱抵抗体が内装されているとともにYピース-内部胴-多孔板-内部胴によりナトリウムが滞留しやすい構造である。

Yピース付根には外部胴側コーナー端に内面全周に連なった周方向き裂が生じていた。き裂深さは6.1mmである。

6.2.4 外部胴下部～支持スカート部

外部胴下部～支持スカートにかけてのPT指示模様をPhoto. 6.2.4に示す。

周溶接部内面には上側溶接止端部と溶接金属内下部の2ヶ所に、全周に渡って周方向き裂が生じていた。外部胴上部の周溶接部同様、溶接金属内のき裂は微少なものであるが、溶接止端部に生じたき裂は全周に連なったものである。き裂寸法は溶接止端部が深さ10.8mm、溶接金属内が長さ約3mm、深さが0.5mm以下である。

縦溶接部内面には溶接線の両止端部に縦き裂が生じていた。き裂長さは溶接部下端からその上方約160mmに渡る。なお、き裂の上端位置（周溶接部の上方約160mm）は熱抵抗体の下端位置とほぼ対応している。き裂深さは、一方が4.7mm、もう一方が0.5mmであり、同じ溶接止端部に生じたき裂でも顕著な差がある。

胴内面の熱遮蔽板取付け座溶接部には溶接止端部周囲およびそこから放射状にき裂が生じていた。放射状に伸びたき裂の長さは約5mmである。

支持スカートにはコーナー部内面のスカート側コーナー端に、全周に渡った周方向き裂が生じていた。き裂寸法は長さ約4mm、深さ0.4mmである。

6.2.5 下鏡～出口ノズル

出口ノズル部のPT指示模様をPhoto. 6.2.5に示す。

出口ノズルには内面コーナー部の方位135°～315°にかけて、子午線方向の微細なき裂が生じていた。き裂寸法は長さ約5mm、深さ0.55mmである。

人工的に加工した円孔型擬似欠陥（計6ヶ所）部⁽⁷⁾には、子午線方向のき裂が円孔を2分割するように孔の淵から2本反対向きに生じていた。円孔から進展したき裂の状況をPhoto. 6. 2. 6に、き裂の長さや深さを下表に示す。

〔擬似欠陥部き裂の長さや深さ〕

擬似欠陥寸法 (径×深さ) (mm)	擬似欠陥位置とき裂寸法 (mm) [l:表面長さ、d:深さ]		
	溶接金属内	溶接止端部	母材 (ノズルコーナー)
2.0 Φ×1.5 l	き裂なし	~ 4 l*	~ 10 l* / 3.7 d
0.8 Φ×1.5 l	き裂なし	~ 8 l* / 3.3 d	~ 4 l*
(無欠陥部)	き裂なし	~ 3 l	~ 5 l / 0.55 d

*印：孔淵から半径方向両側に伸びた子午線方向き裂の全長（孔径を含む）

表から、き裂の表面長さは同様位置の無欠陥部と擬似欠陥部で比較した場合、同等か擬似欠陥部が2倍程度長いといえる。また、き裂長さの縦横比（深さと表面長さの比）を無欠陥部のノズルコーナーに生じたき裂と比較すると深さ方向の進展が著しいこと、また、擬似欠陥から進展したき裂の深さは擬似欠陥の口径比にさほど影響されないこと、がいえる。

下鏡の熱遮蔽板取付け座溶接部には溶接止端部周囲にき裂が生じていた。

6. 2. 6 胴-板接合部、多孔板、整流装置

多孔板のPT指示模様をPhoto. 6. 2. 7に示す。

内部胴-多孔板上部接合付け根は、周方向の板厚内貫通き裂により内部胴と多孔板とが全周に渡って分離していた。この状態は熱過渡試験中（熱過渡数 504回）に確認されていた。き裂の位置は内部胴側コーナー端である。

内部胴-多孔板下部接合付け根には、その内面に全周連なった周方向き裂が生じていた。このうちほぼ半周（315° ~ 360(0)° ~ 150°）では板厚を貫通していた。き裂の位置は内部胴側コーナー端である。

多孔板下部の小胴接合付け根は、周方向の板厚内貫通き裂により多孔板と小胴とが全周に渡って分離していた。き裂の位置は小胴側コーナー端である。

この他、多孔板には上下面、内周胴表面、管穴側面にき裂が生じていた。これらのき裂は上下面では内周側コーナー部、管穴コーナー部、管穴-管穴間、管穴-熱電対通し穴間に、全体的に観て半径方向に放射状に生じている。また、縦方向への進展は方位0° および 180° 近傍のき裂が他の部分よりも際だっていた。なお、方位90° お

よび 270° 近傍では上面の外周管穴が僅かに楕円化していた。

整流装置には表面上のき裂は生じていなかった。

6.2.7 熱抵抗体

熱抵抗体の外観と P T 指示模様を Photo. 6.2.8 に示す。

熱抵抗体の内胴縦溶接部には、上下の中間（上板から 250mm 下がった箇所）に板厚貫通き裂が十字状（縦および周方向）に生じていた。さらにこの縦溶接部は全長（490mm）に渡り顕著な変形を生じていた。変形形状は溶接線が中心軸方向に円弧状に反ったもので、上下の中間（十字状き裂存在箇所）を節として 2 山存在するものであった。十字状き裂はこの変形部の中央に位置し、縦方向き裂は溶接止端部（片側のみ）に、周方向き裂はくの字状に変形した頂点に生じたもので、長さはそれぞれ約 46mm および約 29mm である。

この他、内胴内面側の縦溶接と上板周溶接の交叉部に長さ約 80mm 程の周方向き裂、縦溶接と下板周溶接の交叉部に長さ約 2mm の周方向き裂、また、中空ツバの溶接部とボルト穴周辺にき裂が生じていた。

6.2.8 熱遮蔽板

熱遮蔽板には変形、き裂とも生じていなかった。なお、熱遮蔽板取付ボルトおよび座金は半数以上の箇所（43/80箇所）で緩み、内、3箇所では舌付座金・ボルトが脱落していた。

表 6.2.1 強度評価部位に生じたき裂の寸法

き裂存在箇所		き裂の 向 き	き裂の範囲・状況 (単位はmm)	き裂長さ (mm)		き裂深さ (mm)			部材板厚 (mm)
強度評価部位	位 置			[P T]	[破面]	[P T]	[破面]	[断面]	
入口ノズル	上部テーパ端外面	周方向	線状に約30	~30	—	~1.8	—	—	3.4
	" 内面	周方向	ミソ 模様に約30	~2	—	~1以下	—	—	3.4
	コーナ-上端内外面	周方向	細い帯状、貫通	—	一周長	—	~破断	—	10.0
	コーナ-部内面	縦方向	林状に全周	~100	—	~9.6	約11.2	11.4	10.0
上部スカート	付根コーナ-端内側	周方向	細い帯状に全周	~5	—	—	—	—	10.0
	" 外側	周方向	細い帯状に所々	~2	—	~0.56	—	—	10.0
板厚不連続部	外部胴テーパ 端内面	周方向	帯状に全周	~10	—	~8.4	約3.2	—	25.0
	" 外面	周方向	ほぼ線状に所々	~5	—	—	—	—	25.0
Y ピ ー ス	コーナ-端外面	周方向	線状に全周	—	一周長	~5.9	約5.6	6.1	25.0
胴板接合部	上部(600Φ)	周方向	線状、全周貫通	—	一周長	—	貫 通	—	5.0
	下部(600Φ)内面	周方向	線状、3/4周貫通	—	一周長	—	貫 通	—	5.0
	下部(200Φ)	周方向	線状、全周貫通	—	一周長	—	貫 通	—	8.0
支持スカート	付根コーナ-端内側	周方向	ほぼ線状に一部	~200	—	~約0.4	—	0.4	15.0
出口ノズル	コーナ-部内面	縦方向	線状に全周	~5	—	~0.55	—	0.3	25~8
擬似欠陥	240度(0.8Φ)	縦方向	線状き裂1本	10	10	3.3	—	—	25~8
	300度(2.0Φ)	縦方向	線状き裂1本	8	8	3.7	—	—	25~8

き裂の向き：縦方向には子午線方向を含む。また、全方向は亀甲状き裂を表す。

き裂長さ：P TはP T指示値、破面は破面のマクロ観察値による。

き裂深さ：P TはP T指示値、破面は破面のマクロ観察値、断面は断面のミクロ観察値による。

P T指示値；縦3断面（ほぼ全長）、周1断面（1/8周長）の中の最大値

断面観察値；代表部位1ヶ所についての値

破面観察値；代表部位1ヶ所についての値

表 6. 2. 2 強度評価部位以外に生じたき裂の表面形態

き裂存在箇所	き裂の 向 き	き裂の範囲・状況 (単位はmm)	き裂長さ (mm)		き裂深さ (mm)			部材板厚 (mm)
			[PT]	[破面]	[PT]	[破面]	[断面]	
上 鏡 内 面	全方向	亀甲状に全面	—	—	~10.4	約 10.6	8.6	40.0
外部胴厚肉部内面	全方向	亀甲状に全面	—	—	~ 4.5			40.0
外部胴 上部周溶接内面止端部	周方向	溶接線沿いに全周	一周長	—	~ 2.6		2.7	25.0
外部胴 下部周溶接内面止端部	周方向	溶接線沿いに全周	一周長	—	~10.8	11.2	11.1	25.0
外部胴 縦溶接部内面止端部	縦方向	溶接線沿い 1箇所	160		~ 4.6	6.2	4.8	25.0
熱抵抗体 内胴縦溶接部	縦/周	十字形に 1箇所	46/28.5	46/—			貫 通	2.0
内部胴 上部周溶接部	—	き裂なし	—	—				5.0
内部胴 下部周溶接部	—	き裂なし	—	—				5.0

き裂の向き：縦方向には子午線方向を含む。また、全方向は亀甲状き裂を表す。

き裂長さ：PTはPT指示値、破面は破面のマクロ観察値による。

き裂深さ：PTはPT指示値、破面は破面のマクロ観察値、断面は断面のミクロ観察値による。

PT指示値；縦3断面（ほぼ全長）、周1断面（1/8周長）の中の最大値

断面観察値；代表部位1ヶ所についての値

破面観察値；代表部位1ヶ所についての値

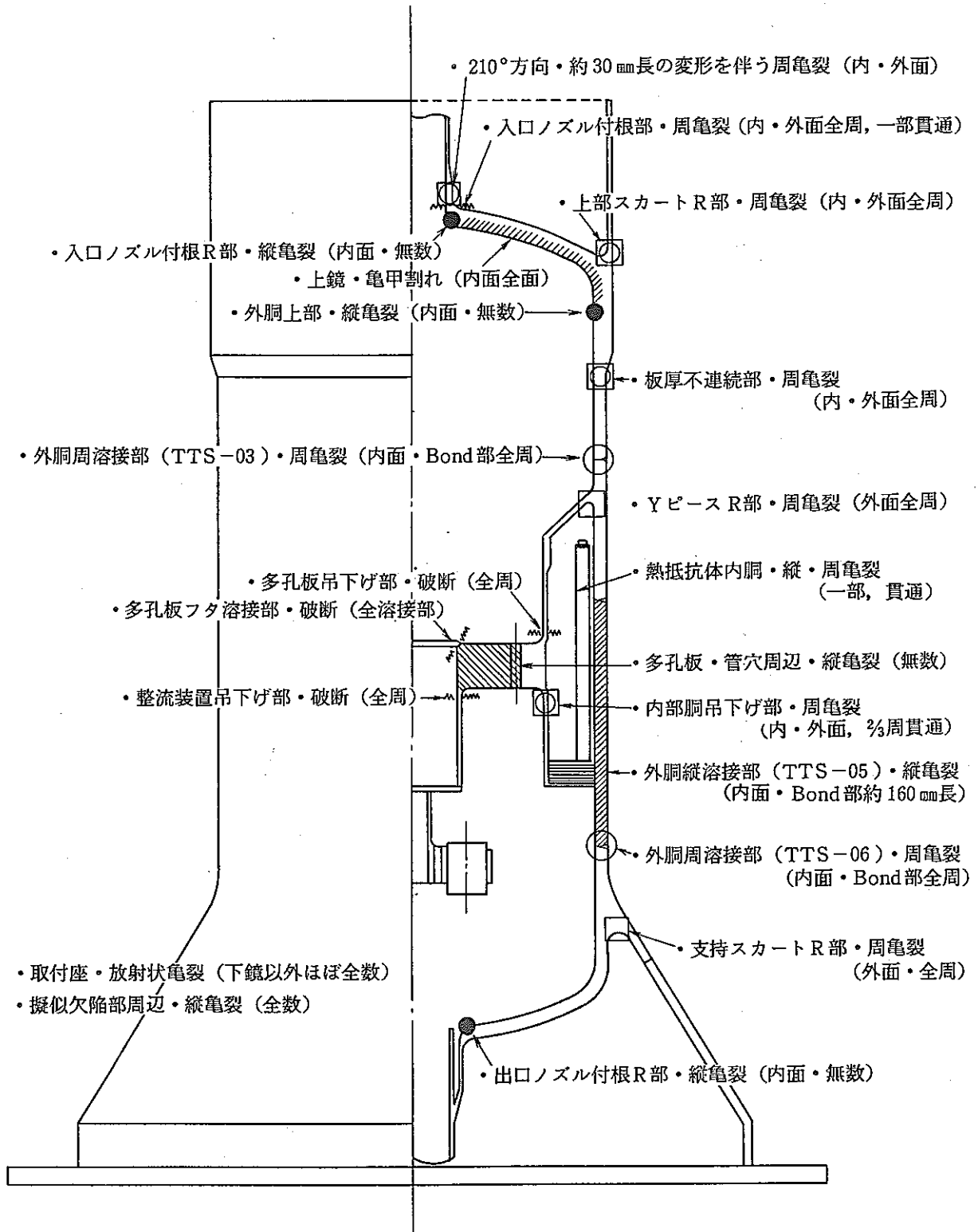


図 6. 2. 1 き裂位置と形態

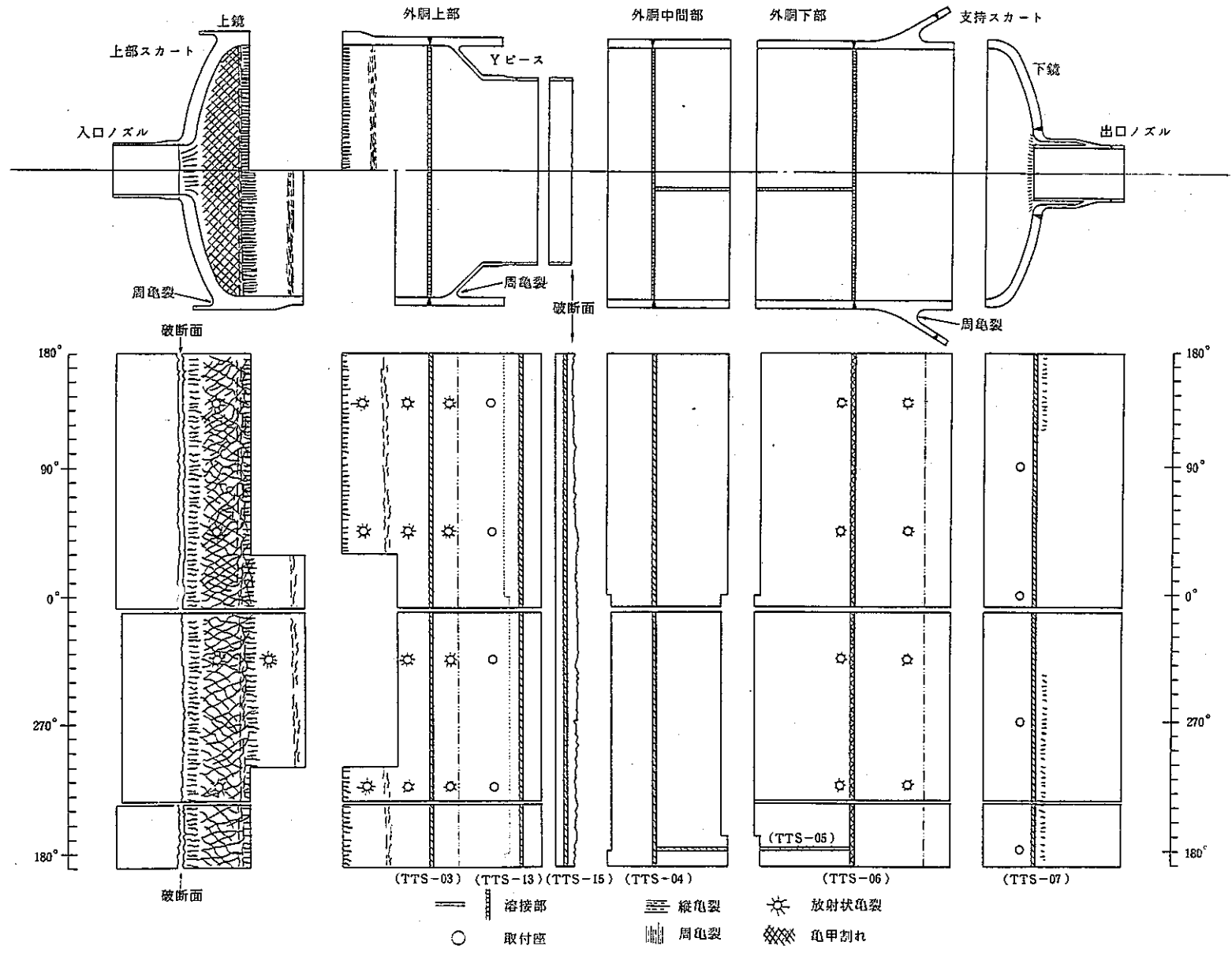


図 6. 2. 2 (a) 供試体表面のき裂分布(1) - 内表面

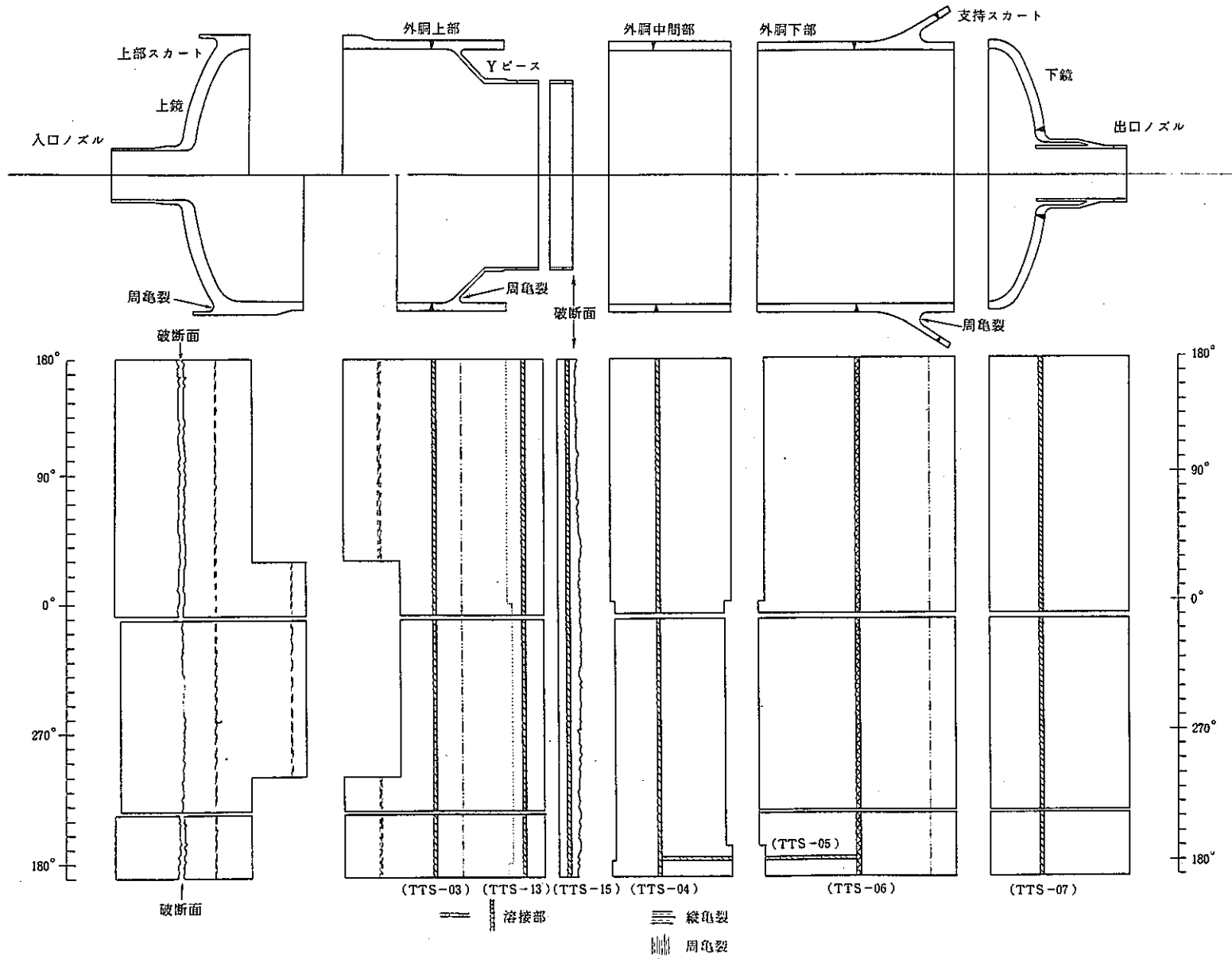


図 6. 2. 2 (b) 供試体表面のき裂分布(2) - 外表面

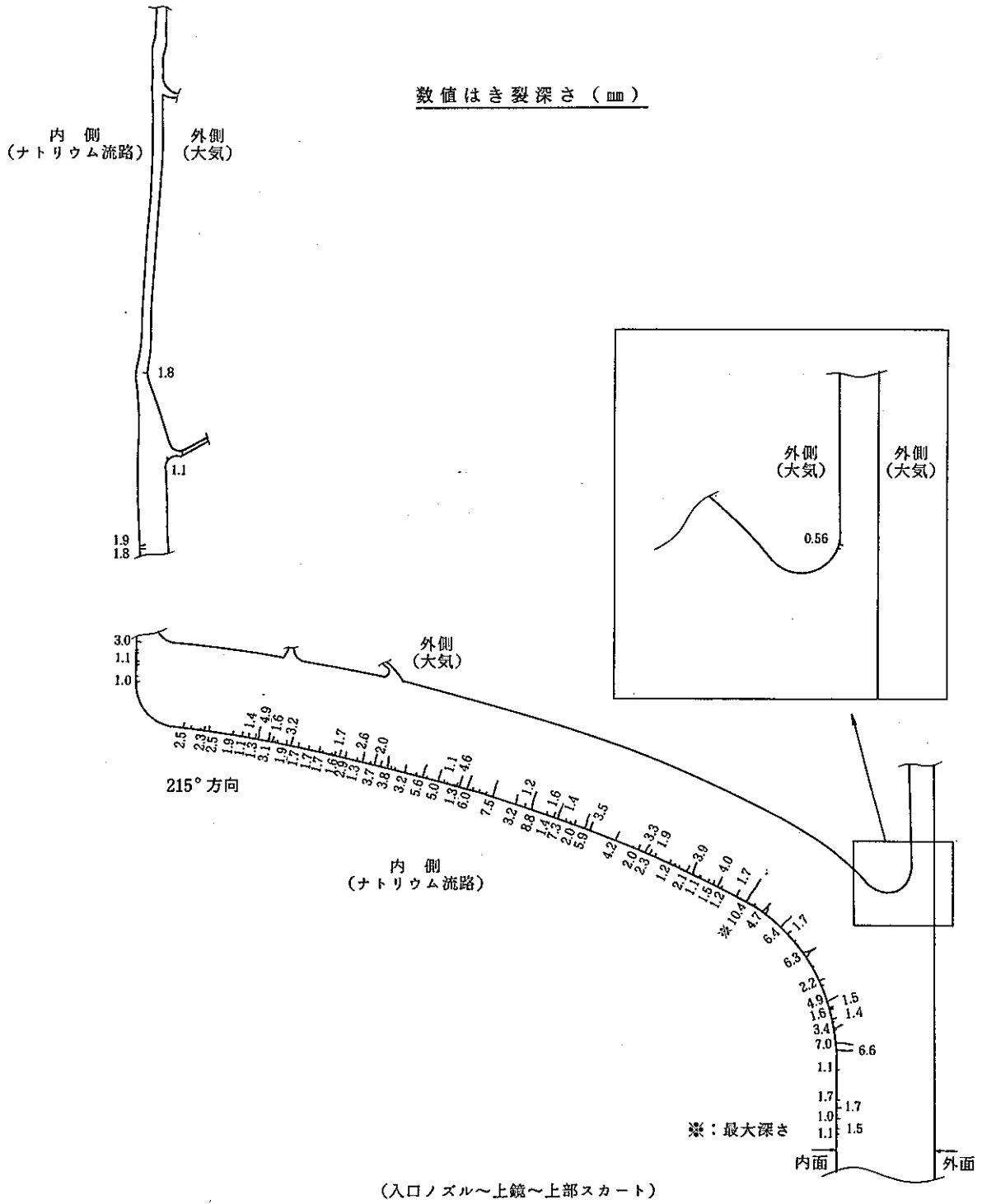
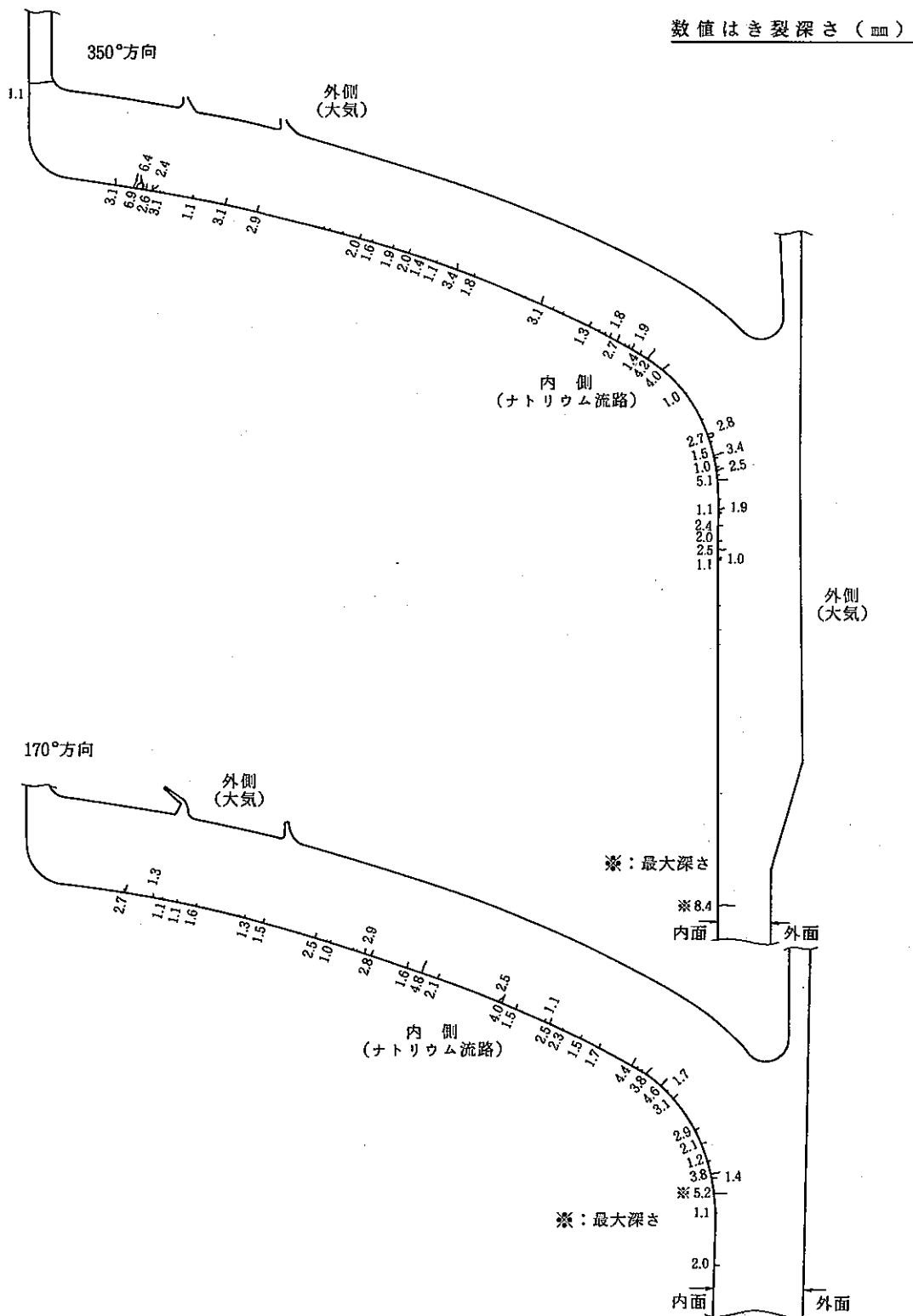


図 6. 2. 3 (a) 部材断面のき裂状況(1)



(入口ノズルコーナー～上鏡～上部スカート)

図 6. 2. 3 (b) 部材断面のき裂状況(2)

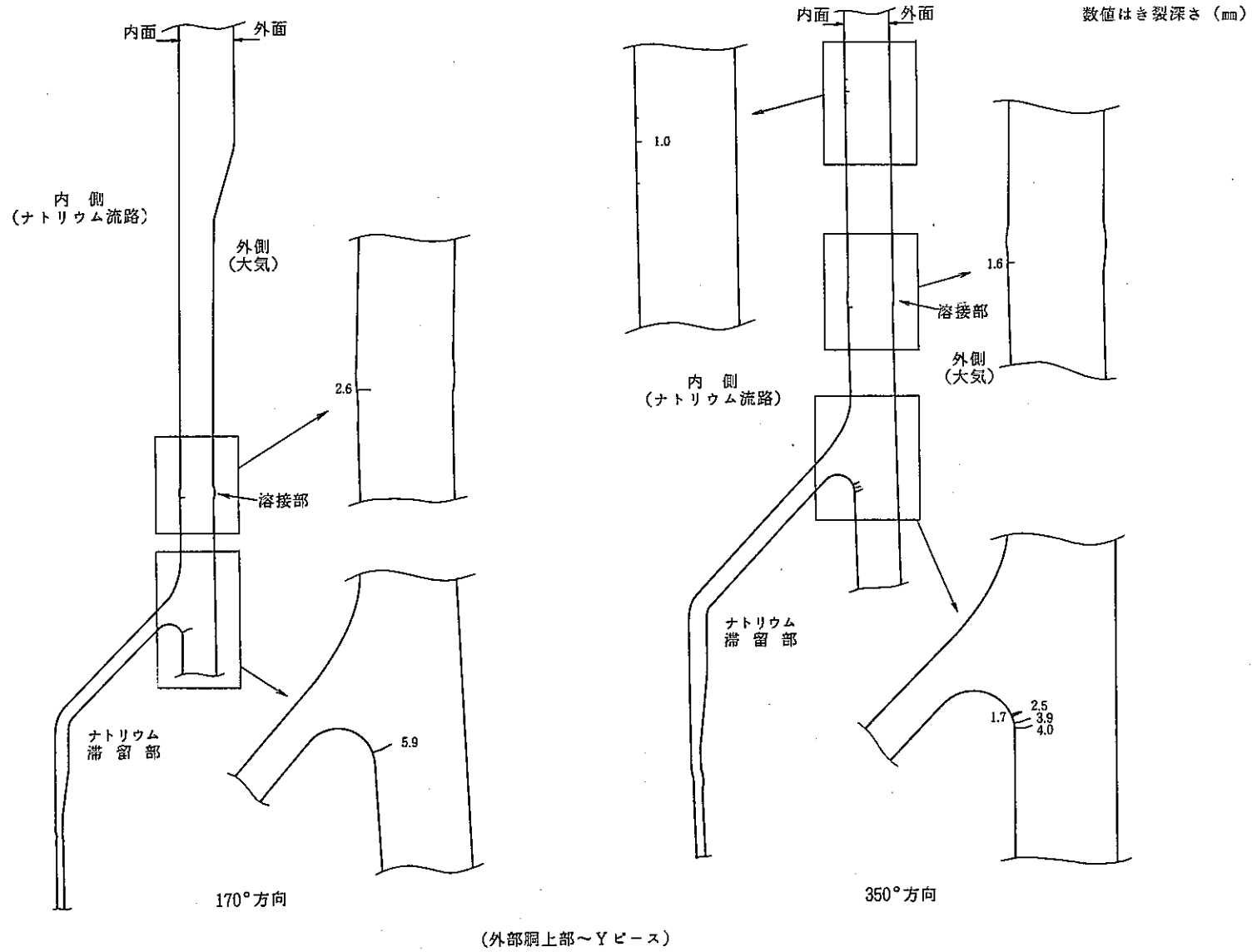
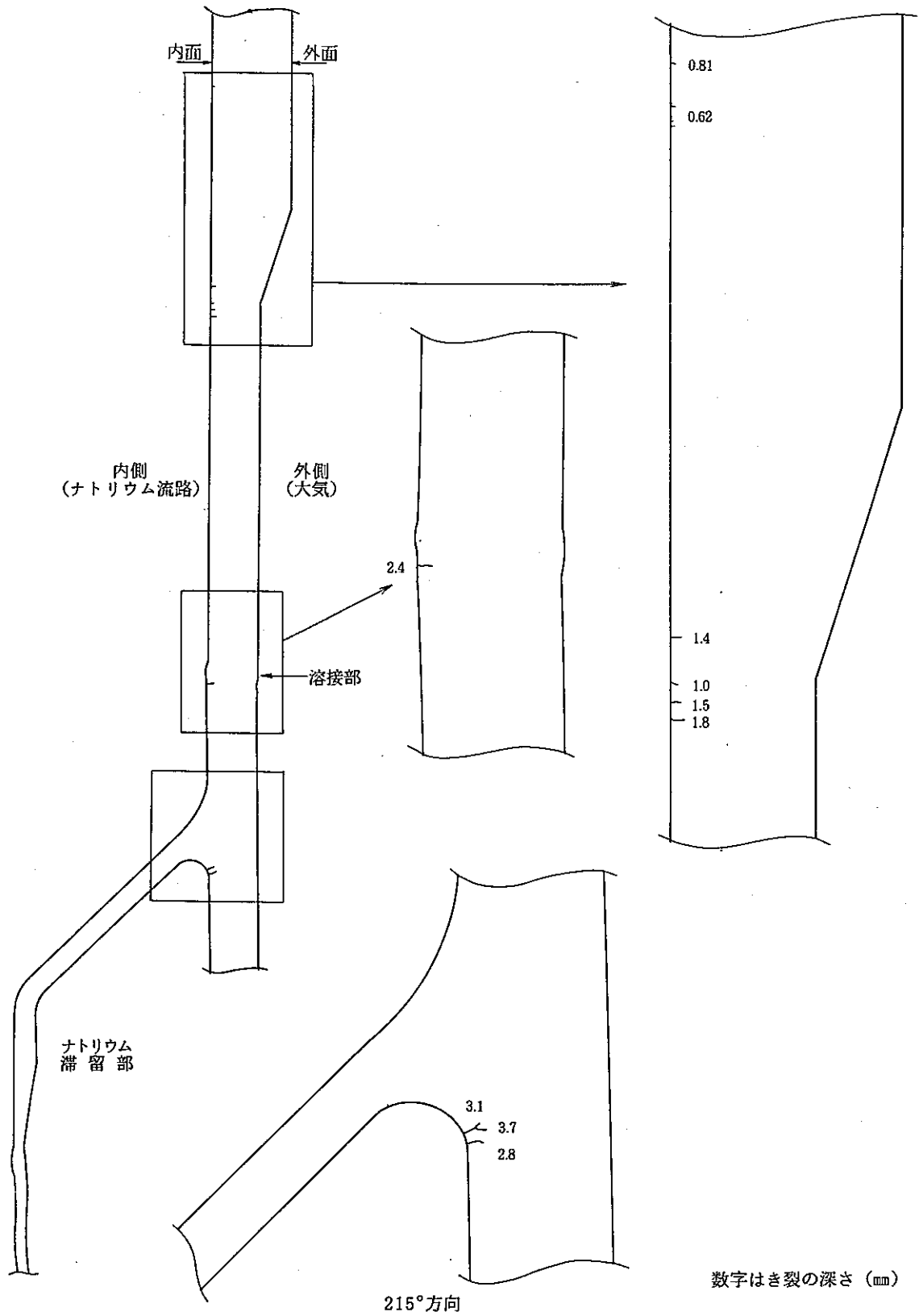


図 6. 2. 3 (c) 部材断面のき裂状況(3)



(外部胴上部~Yピース)
図 6. 2. 3 (d) 部材断面のき裂状況(4)

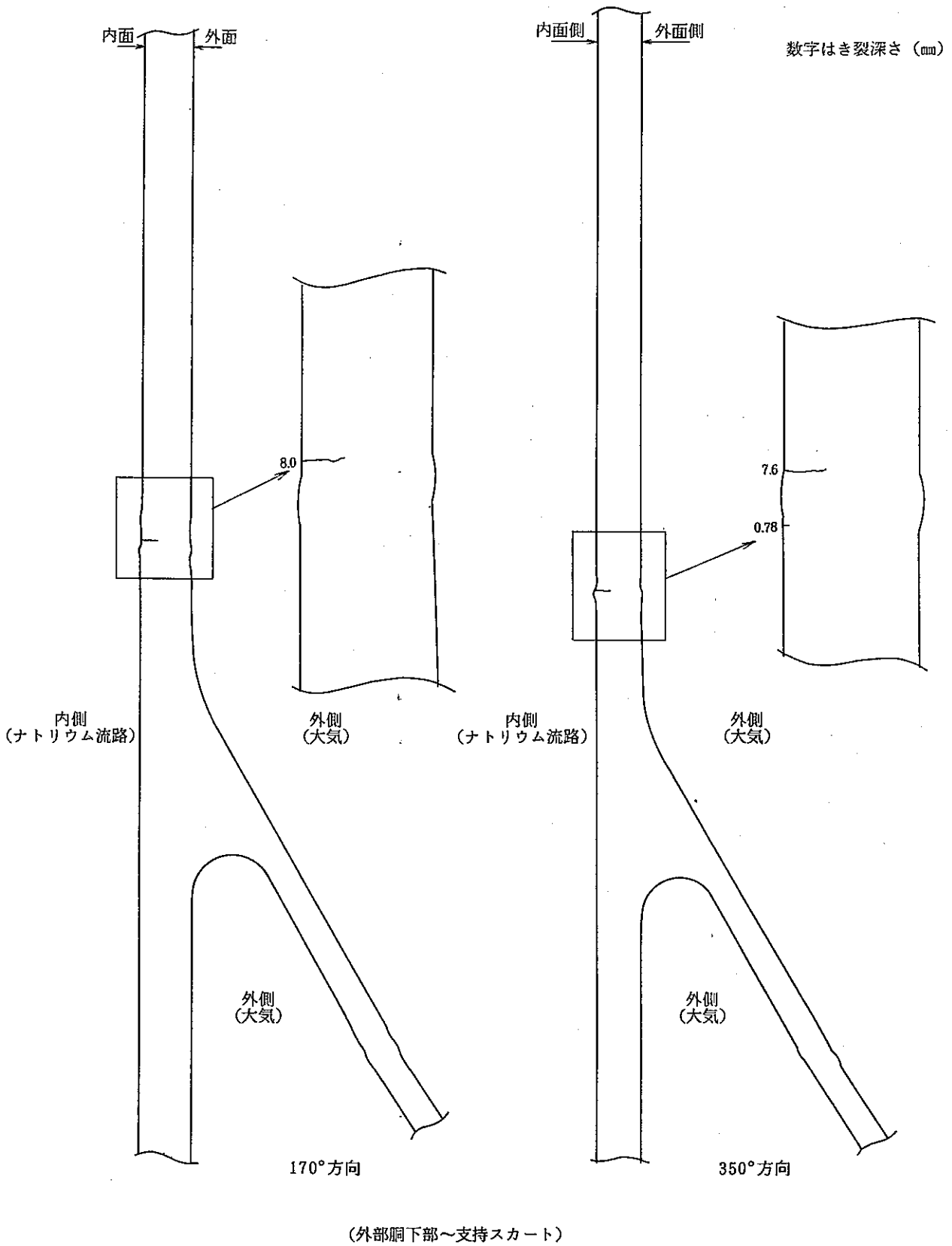
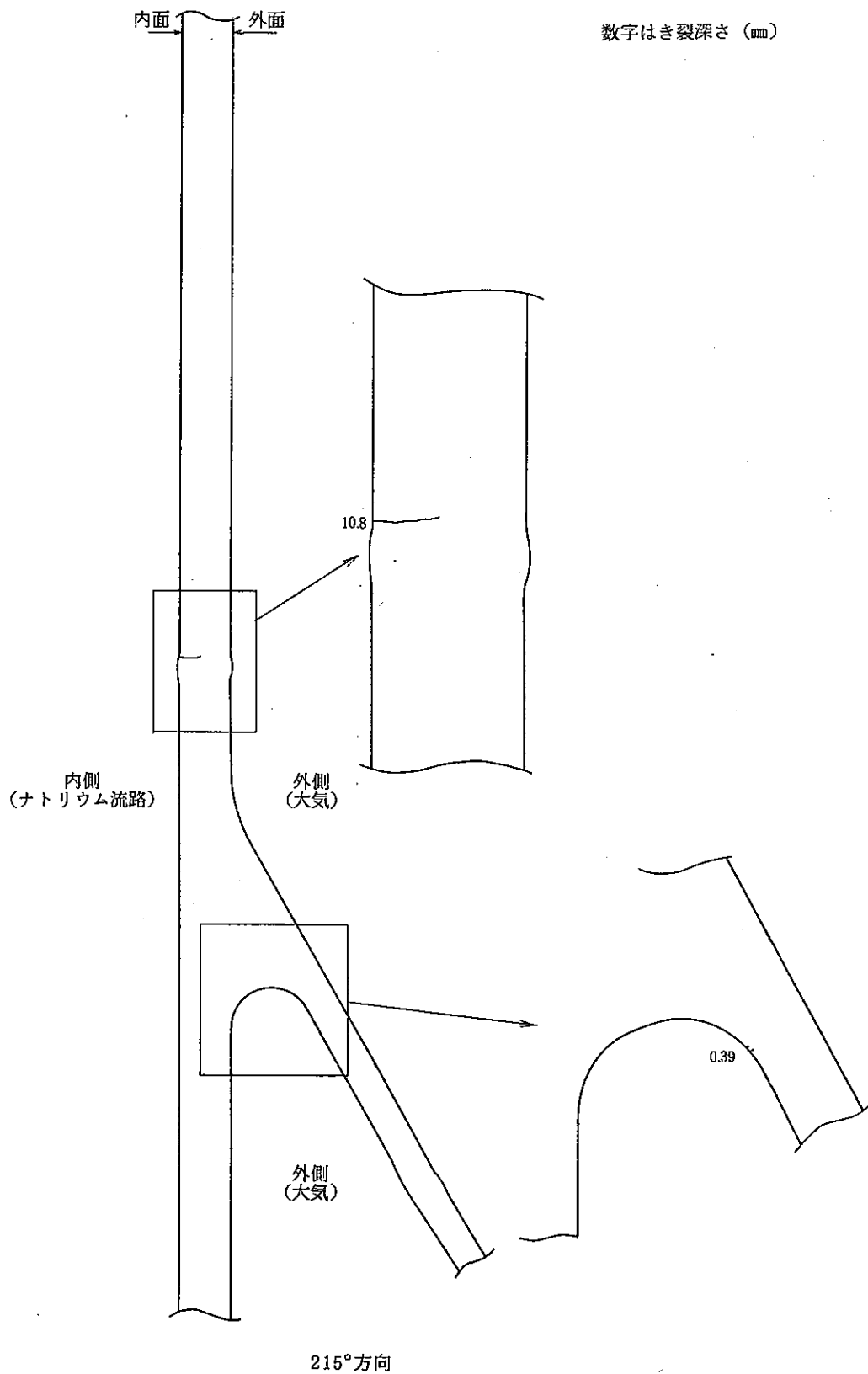


図 6. 2. 3 (e) 部材断面のき裂状況(5)



(外部胴下部～支持スカート)

図 6. 2. 3 (f) 部材断面のき裂状況(6)

数字はき裂深さ (mm)

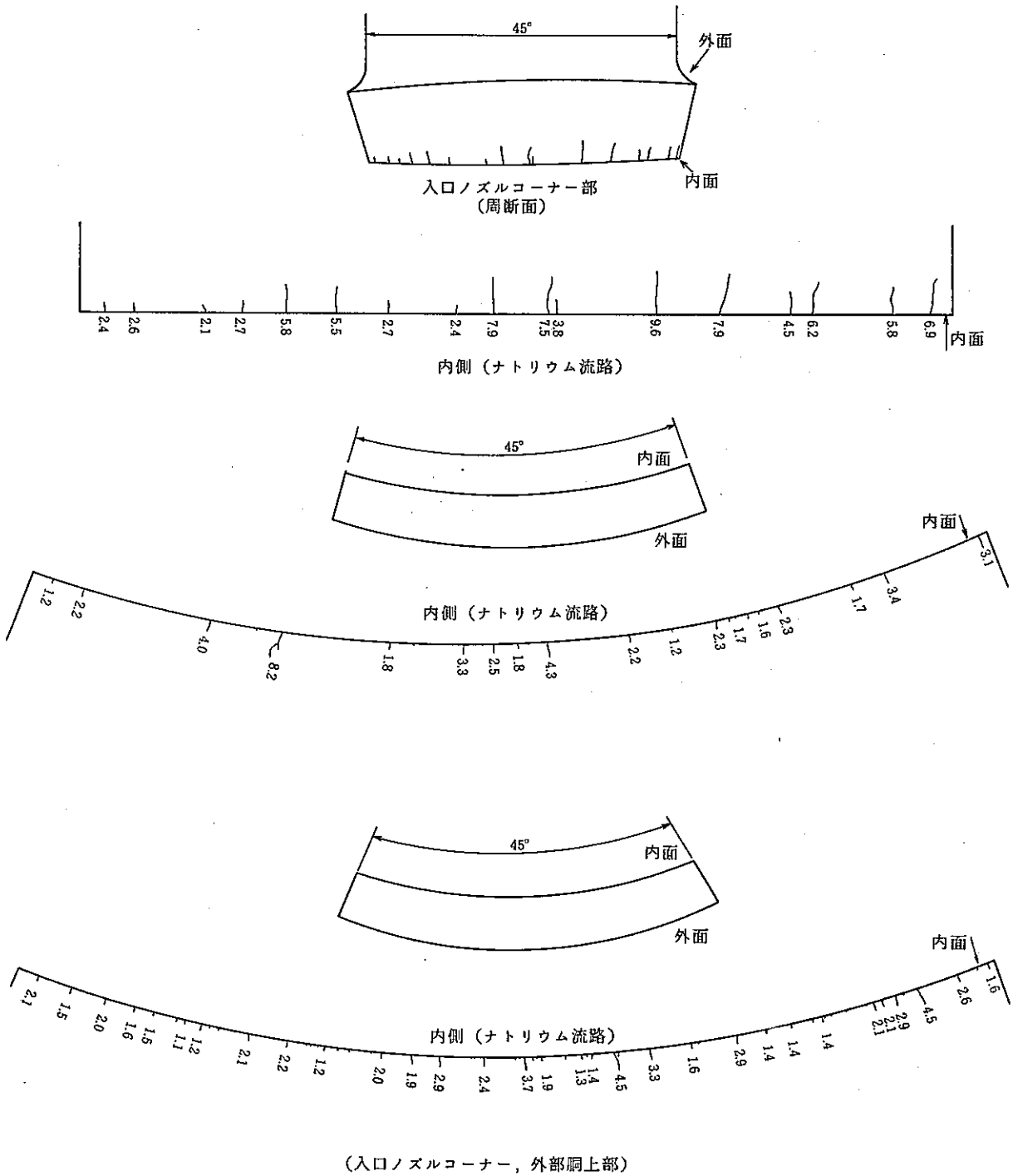
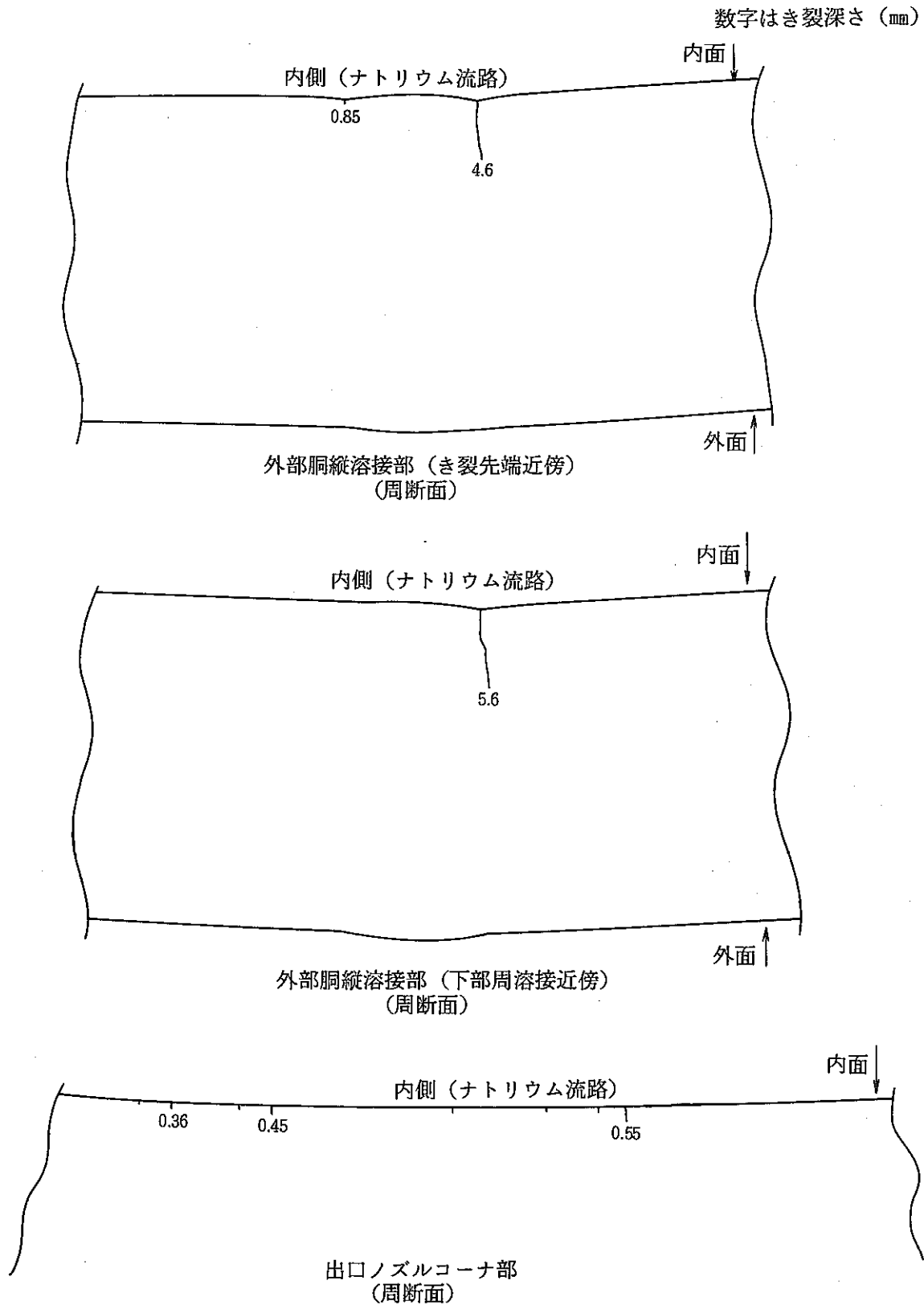


図 6. 2. 3 (g) 部材断面のき裂状況(7)



(外部胴下部, 出口ノズルコーナー)

図 6. 2. 3 (h) 部材断面のき裂状況 (8)

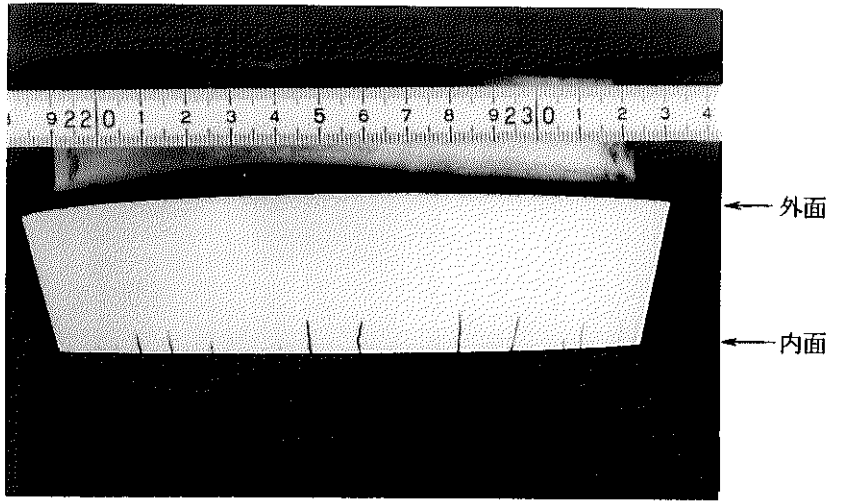
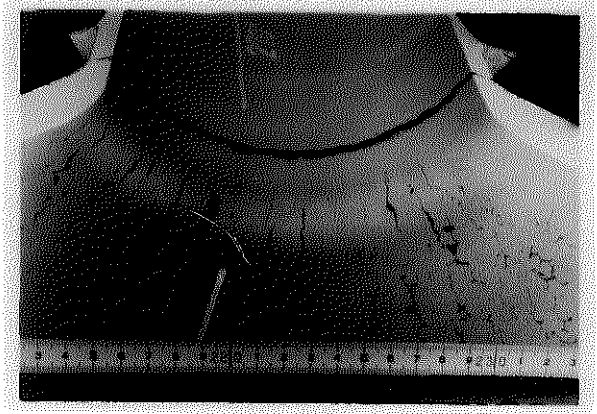
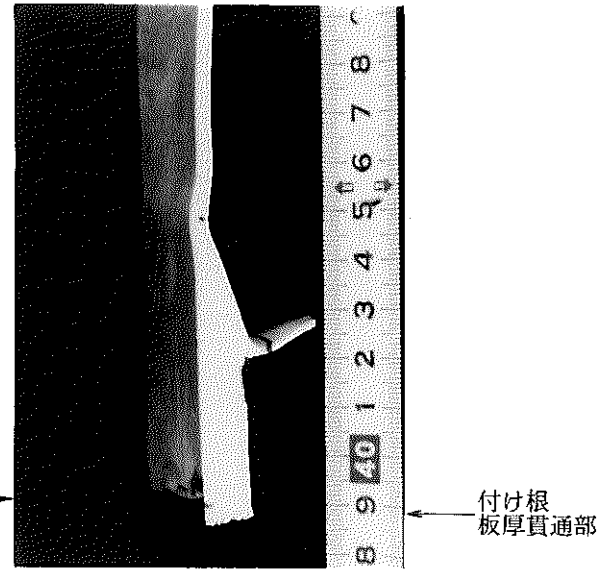
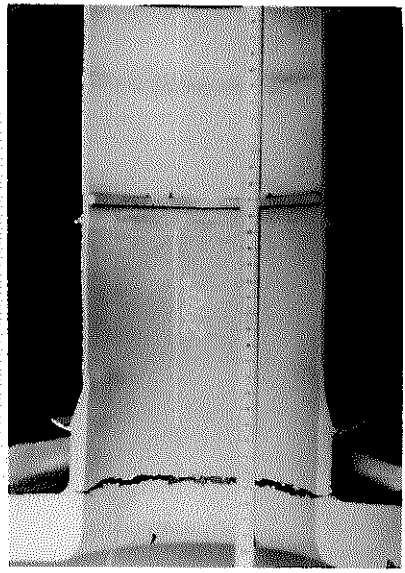
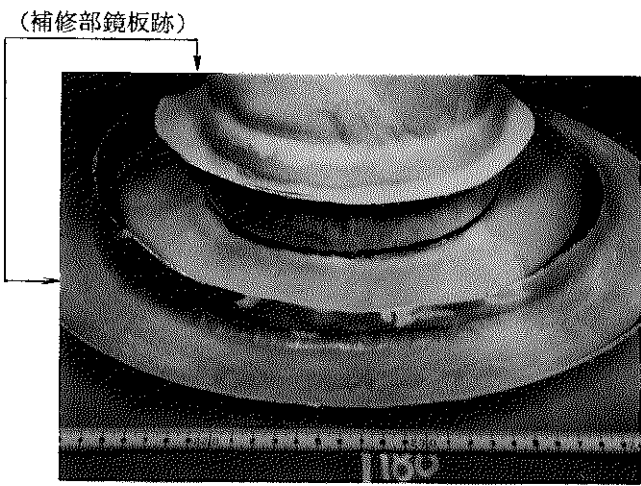
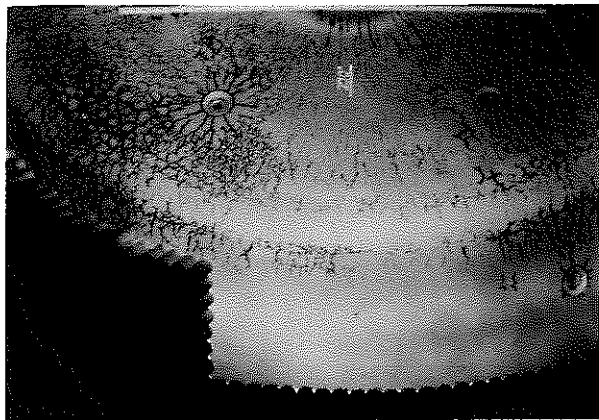
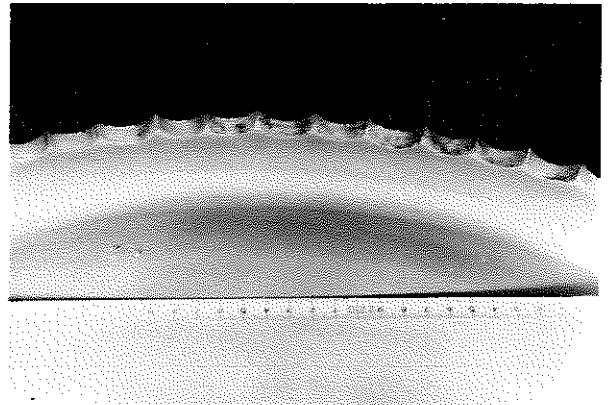


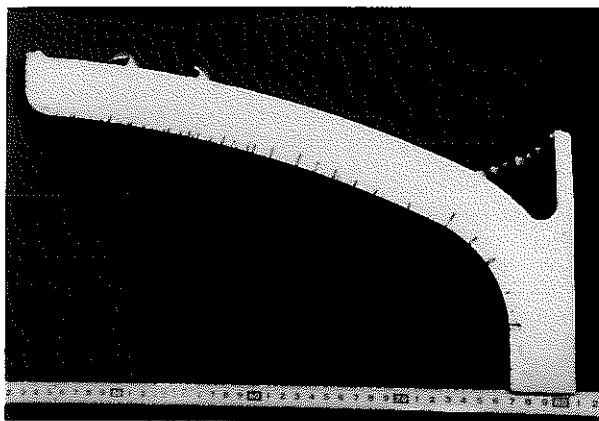
写真 6. 2. 1 入口ノズル各部の P T 指示模様



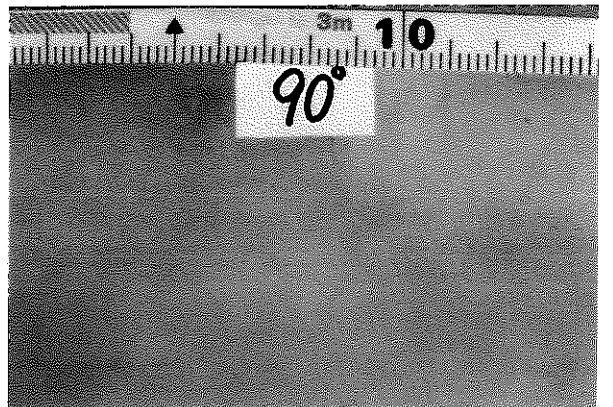
㉑ 鏡内面



㉒ 上部スカートコーナー部内面



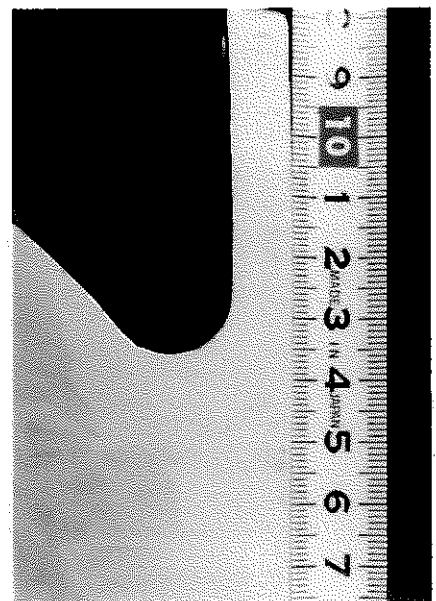
㉓ 鏡縦断面 (右上)



㉔ 上部スカート付け根外面

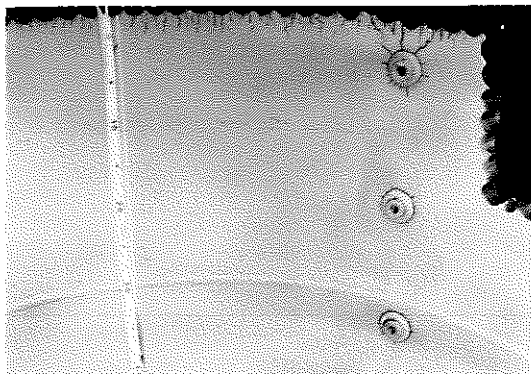


㉕ 鏡-外部胴境界部周断面 (右)

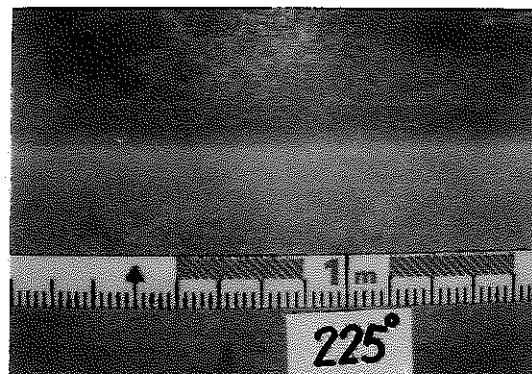


㉖ 上部スカートコーナー部縦断面

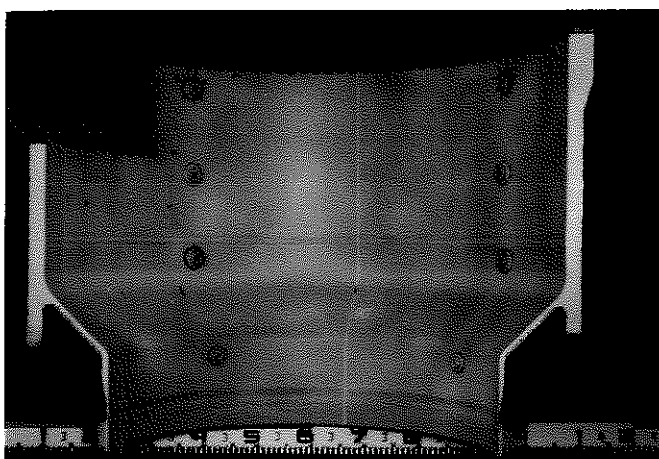
写真 6. 2. 2 上鏡～上部スカートの P T 指示模様



Ⓐ 外部胴上部内面 (板厚不連続部)



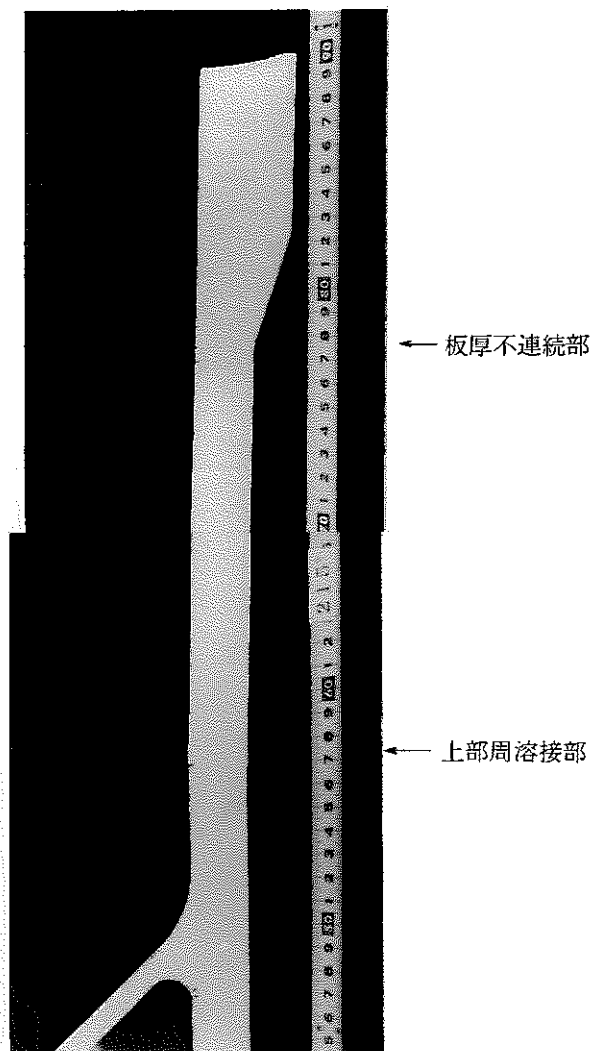
Ⓑ 同左外面



Ⓒ 外部胴上部～Yピース～内部胴



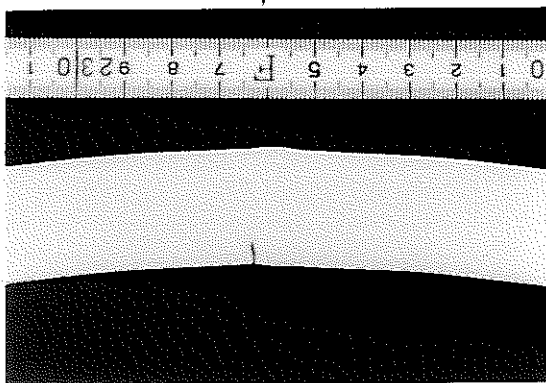
Ⓓ Yピース内側コーナー部 (下方からの視)



Ⓔ 外部胴上部～Yピースコーナー部縦断面 (右)

写真 6. 2. 3 外胴上部～内筒の P T 指示模様

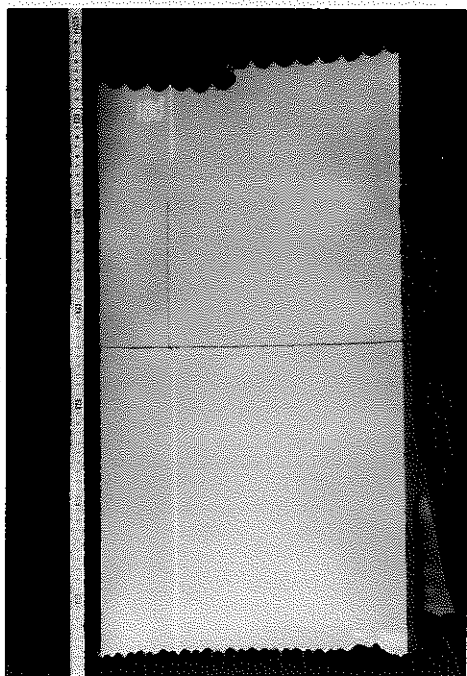
縦溶接部



① 外部胴下部周断面



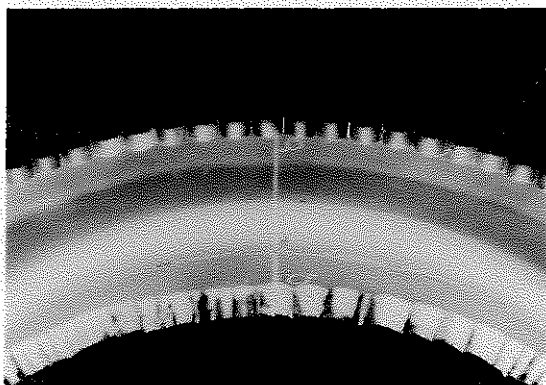
④ 外胴-支持スカート溶接部縦断面



② 外胴下部～支持スカート内面

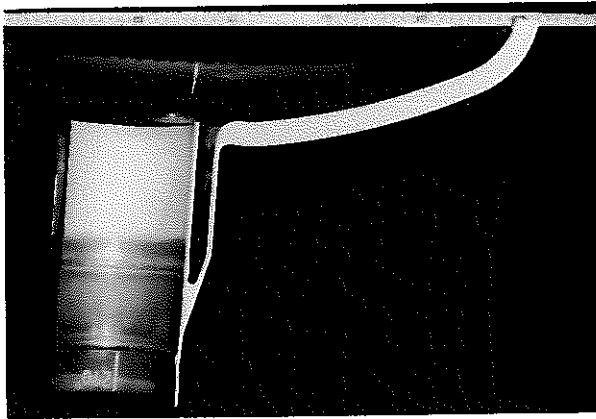


⑤ 支持スカートコーナー部縦断面

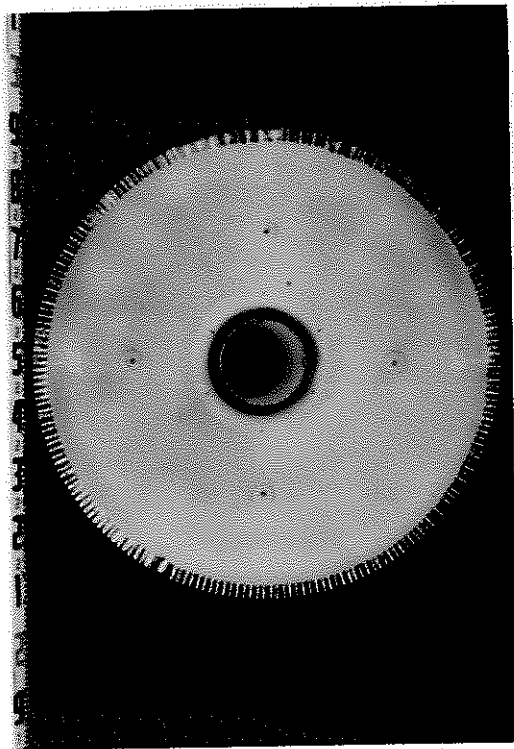


③ 支持スカート内側コーナー部 (下部からの視)

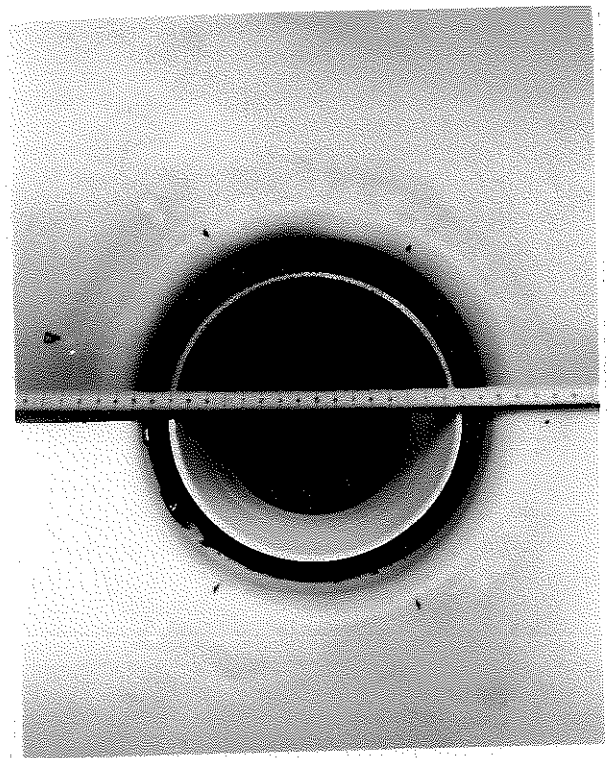
写真 6. 2. 4 外胴下部～支持スカートの P T 指示模様



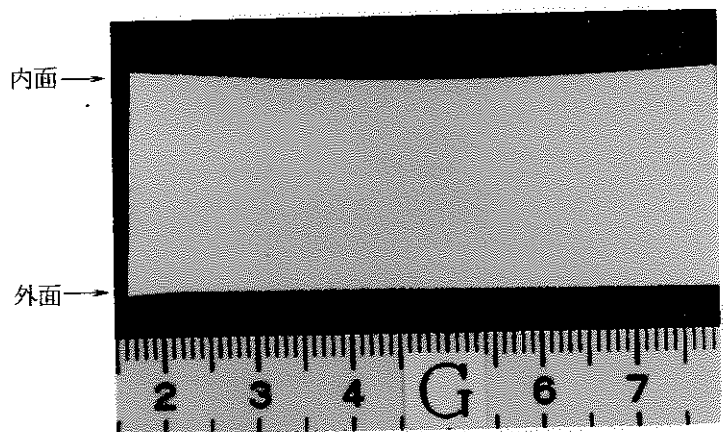
㉑ 下部鏡～出口ノズル縦断面



㉒ 下部鏡～出口ノズルコーナー部内面

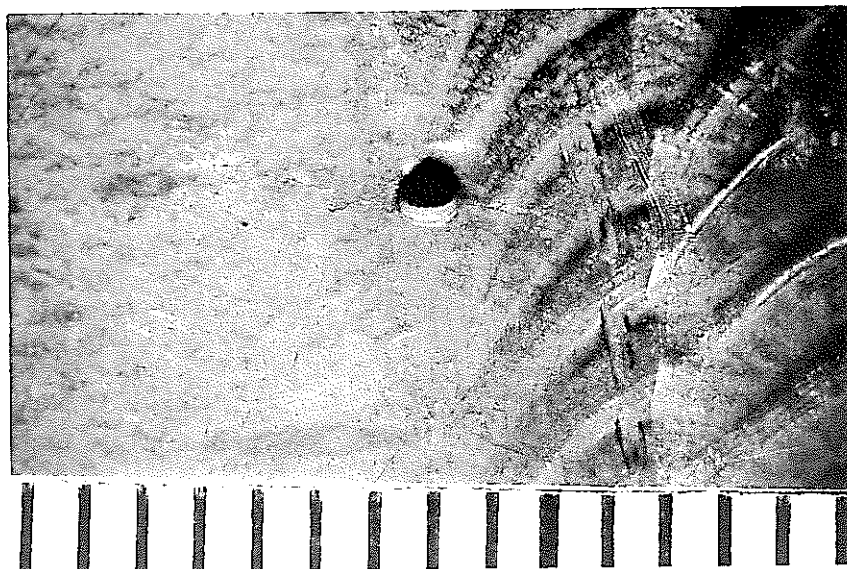


㉓ 出口ノズルコーナー部内面

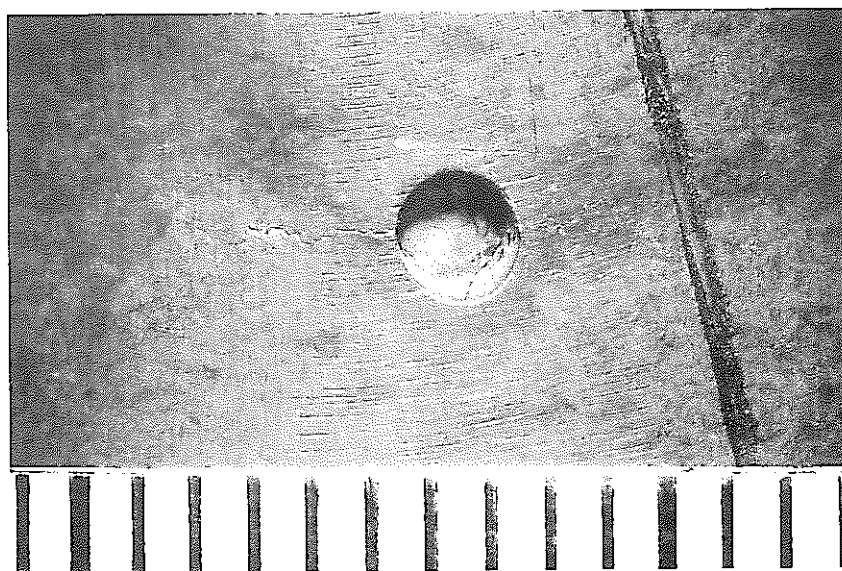


㉔ 出口ノズルコーナー部周断面

写真 6. 2. 5 出口ノズル部の P T 指示模様

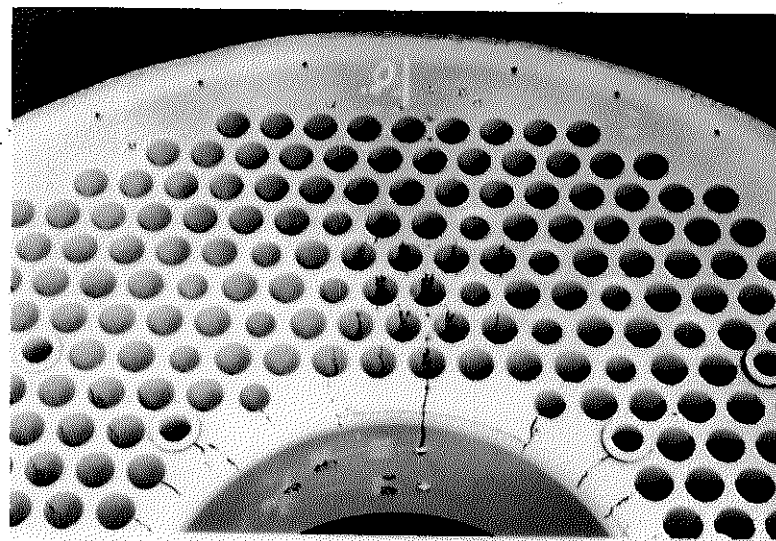


㊦ 溶接止端部 (0.8 ϕ \times 1.5 h孔)

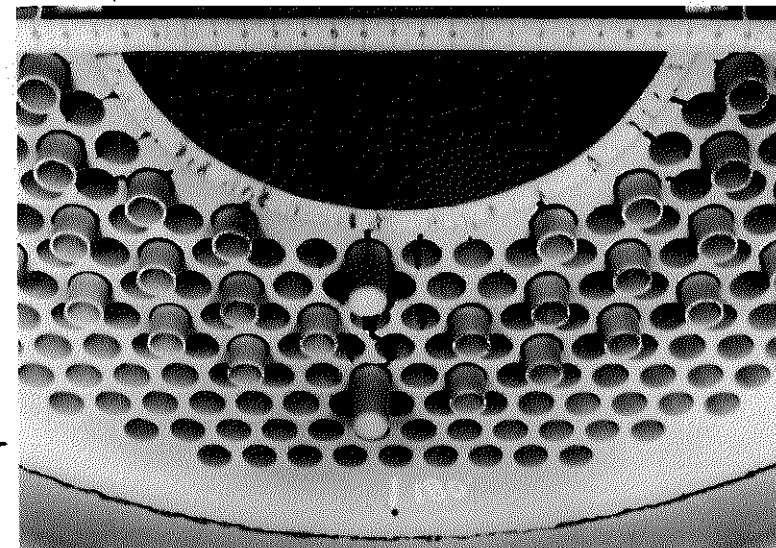


㊧ 母材 (コーナー) 部 (2.0 ϕ \times 1.5 h孔)

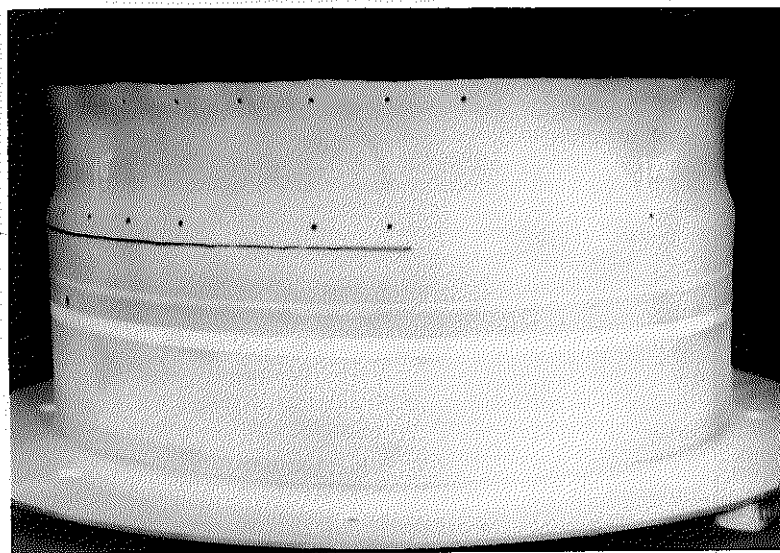
写真 6. 2. 6 擬似欠陥のき裂表面状況



⑥ 多孔板上部 (右上)



⑦ 多孔板下部 (右)



⑧ 多孔板～内部洞下部外面

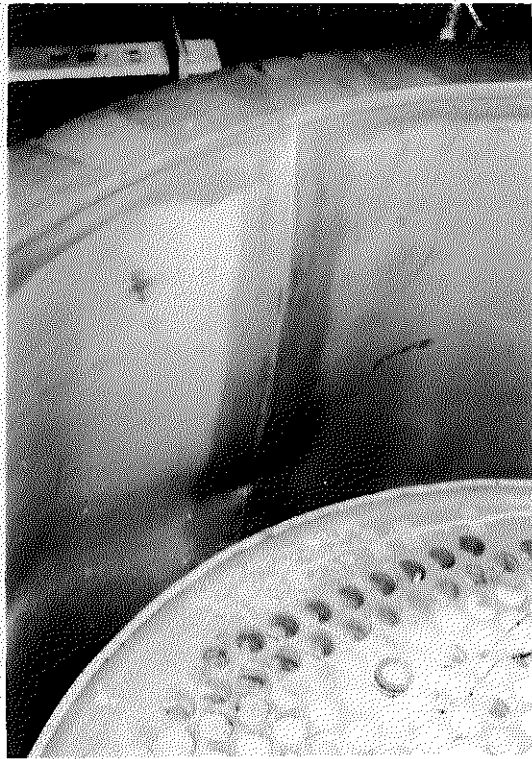
洞一板
接合部
(下部)

洞一板
接合部
(上部)

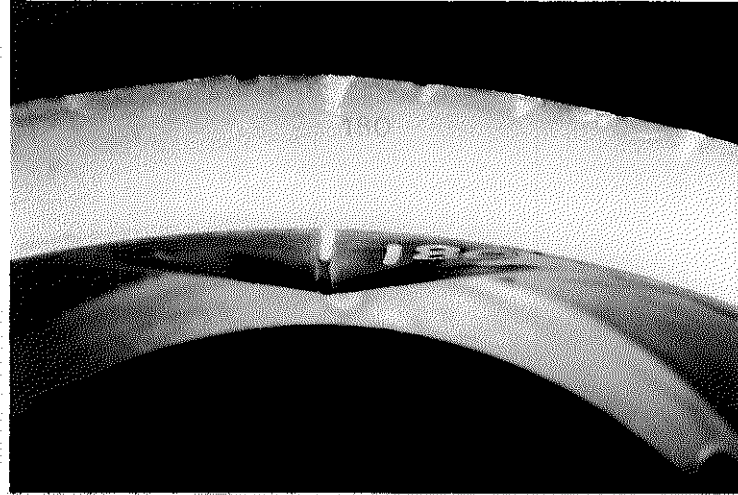
小洞一板接合部

洞一板
接合部
(下部)

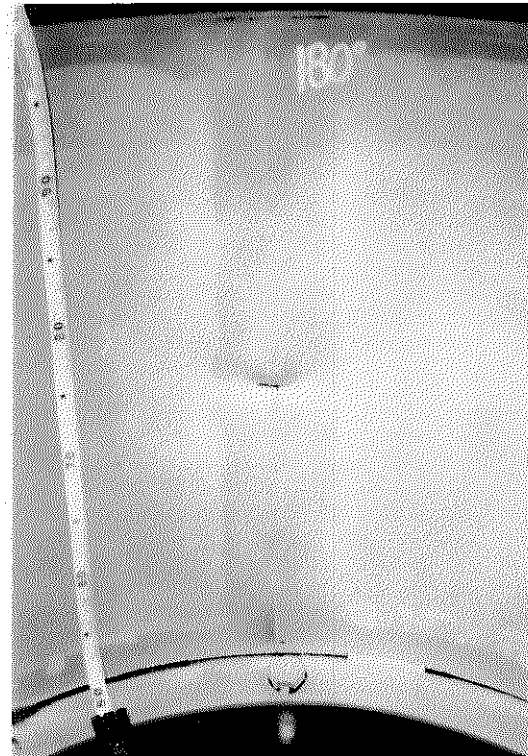
写真 6. 2. 7 多孔板の P T 指示模様



③ 内胴縦溶接部（上部）内面



② 内胴縦溶接部（上）
（上方からの視）



① 内胴縦溶接部
内面（右）

写真 6.2.8 熱抵抗体の外観と P T 指示模様

6.3 き裂の詳細観察と考察

代表的な部位のき裂について、その破面・断面の様相、特徴をTable 6.3.1、6.3.2に示す。また、以下にこれらの状況を記す。

6.3.1 破面の状態

Fig 6.3.1に破面詳細観察位置を示す。また、Photo. 6.3.1～6.3.7に強度評価部やその他の主な部位に生じた代表的なき裂の破面を示す。

母材部に生じたき裂の破面は観察した全ての箇所で見られるロックキャンディー状の凹凸を有する形態、つまり粒界割れ特有の様相が支配的であった。全体的にはき裂の進展にともない粒内割れ様相破面の存在割合が増してくる傾向にあり（代表例としてPhoto. 6.3.2、6.3.3）、また、粒内割れ様相部分にはストライエーションが刻まれていた（Photo. 6.3.2から6.3.4）。代表的なき裂について実測したき裂深さとストライエーションデータから逆算して求めた負荷繰返し数を下表に示す。

対象き裂	ストライエーションのピッチ (mm/本) 〔 〕内はデータ数*	き裂深さ** (実測値)	負荷繰返し数	
			計算値***	実験値最大
入口ノズルコーナー部	.153/16〔2箇所〕	11.2 mm	1171 回	833 回
上鏡 (外胴より)	.034/29〔1箇所〕	2 mm	1706 回	833 回
外部胴シンニング部	.033/23〔2箇所〕	3.3 mm	2300 回	833 回
胴-板付け根貫通部	.058/14〔2箇所〕	4.5 mm	1086 回	503 回

〔* 板厚内で複数のデータを有する箇所はそれらの平均値とした〕

〔** 破面からの値〕

〔***ストライエーションピッチが熱過渡1回に対応すると仮定し、

(計算値) = (き裂深さ) ÷ (ストライエーションピッチ) とした値〕

上鏡についてはストライエーションピッチを破面に対して若干の傾きをもって評価したことから実際のピッチは更に広がり、計算熱過渡数が少なくなる方向にある。しかしながら、4ヶ所とも計算熱過渡数が実験値を上回り、本ストライエーションデータからき裂進展データ（き裂発生時点や進展速度）を推定するには無理があると言える。上述したように（ストライエーションが刻まれていた粒内割れ部分は破面の板厚方向全域に渡って生じたものではない）、このストライエーションが板厚全体を代表するものではないことによる。

入口ノズルに近い箇所に生じたき裂の破面には黒色域や酸化スケールの付着部が存在した（Photo. 6.3.1、6.3.2）。この原因としては、試験期間中期に供試体内部観察を行った（熱過渡数 503回）際に空気が混入したためと考えられる。よって、上記

部分では熱過渡数 503回以前にき裂が発生していたと考えられる。入口ノズル付け根周方向き裂および入口ノズルコーナー部子午線方向き裂の黒色域の板厚方向範囲と最終き裂深さを下表に示す。

	黒色域の奥行き	き裂深さ
入口ノズル付け根周方向き裂*	6.8 mm	10 mm(板厚)
入口ノズルコーナー部子午線方向き裂	5.8 mm	11.2 mm **

〔* 熱過渡数 504回で一部板厚(10mm)貫通〕

〔**破面からの値〕

熱抵抗体の貫通き裂破面をPhoto. 6.3.8に示す。縦き裂破面には目視により～4本程度のビーチマーク状模様が観られた。この状況(ビーチマーク状縞模様の拡がり回数)および6.2に記した変形状態から、き裂は外面(熱抵抗体の内周面)側から発生し内面に向かって進展した、き裂発生・進展と大変形のもととなった負荷はかなり大きく同一のものであった、と推察される。なお、周き裂はその破面状況から内外両面から発生・進展したものと言える。

6.3.2 断面の状態

Fig 6.3.1に断面詳細観察位置を示す。また、Photo. 6.3.9～6.3.15にき裂の生じた強度評価部位の代表的断面を示す。母材部に生じたき裂の板厚方向進展形態は、き裂の進展にともない粒内割れの存在割合が増してくる傾向にあるものの、全長に渡り粒界割れ支配型であり、前記の破面形態と整合性のあるものであった。また、き裂の近傍では多くの部分でき裂開口端側表面層にすべり線と変質層が見られた。

胴-板接合コーナー部の周破断面近傍内面側には変質層内部に微細なき裂がいくつも見られた。また、胴-板接合溶接部でも内面側溶金内部に微細なき裂が見られた(Photo. 6.3.13)。いずれの箇所も外面側にき裂は見られないことから、上記破断面き裂は内面側から先に発生進展したと考えられる。

6.2の「き裂の状況と分布」で記したように、外部胴下部の縦溶接部および周溶接部ではともに溶接線に添ってその両側に生じたき裂の表面長さ・深さに明らかな差が見られた。縦溶接部のき裂は両側とも溶接止端部に生じたものであるが、その深さを比較すると、一方が4.7mm、もう一方が0.52mmであった。両者の溶接止端部断面形状を比較すると、き裂進展の著しい側が他方よりも形状不連続性が顕著である(Photo. 6.3.15(a))。供試体が軸対称構造であり、また、この部分が同一材溶接部であることから、負荷条件(ナトリウムの流状)の相違および材質の影響は考えにくく、形状不

連続性が応力集中の差となって現れていると考えられる。また、周溶接部では溶接止端部のき裂深さが圧延材側で11.1mm、鍛造材側で拡大観察で初めて判る程度(0.04mm)であった。この部分ほどではないが上部周溶接部でも溶接線の両側のき裂進展に差が見られた。上述の縦溶接部同様、これらの箇所断面形状を比較した結果、き裂進展の著しい側で他方よりも形状不連続性が顕著であった(Photo 6.3.15(b)、(c))。上部周溶接部が鍛造材間の溶接であり、いちがいに鍛造部ではき裂が生じ難いとは言えず、また、負荷条件が厳密には供試体の上下流で異なるが、溶接ビード幅による差が生じるとは考え難い。よってこれらの部分についても溶接止端部の形状不連続性が応力集中の差となって現れていると考えられる。この結果き裂の発生時点が異なり、一方でき裂が発生することにより他方では応力が解放されてき裂の発生進展が鈍くなることによりき裂の進展量に差が生じると考えられる。

表 6. 3. 1 破面様相

	マクロ的特徴	ミクロ的特徴
入口ノズル付根 板厚貫通周き裂	<ul style="list-style-type: none"> 破面全体に酸化スケール付着 	<ul style="list-style-type: none"> ロクキャンディー 状の凹凸模様が支配的 き裂先端部にストライエーション
入口ノズル付根 コーナー内面 縦き裂	<ul style="list-style-type: none"> 内面表層側数カ所に楕円状の黒色域が存在（深さは約5.6mm） 黒色域に全体に酸化スケール付着 	<ul style="list-style-type: none"> 内面表層側はロクキャンディー 状の凹凸模様が支配的 進展に伴いストライエーション 模様の割合増加 先端部でストライエーション 模様が支配的
上鏡内面亀甲状 き裂	<ul style="list-style-type: none"> 内面表層側に酸化スケール若干付着 	<ul style="list-style-type: none"> ロクキャンディー 状の凹凸模様が支配的 先端部でストライエーション 模様の割合増加
上鏡～外部胴上部 内面縦き裂	<ul style="list-style-type: none"> 表面開口部に粒状スケール付着 	<ul style="list-style-type: none"> 開口側でロクキャンディー 状の凹凸模様が支配的 き裂先端でストライエーション 模様の割合増加
板厚不連続部 内面周き裂		<ul style="list-style-type: none"> ロクキャンディー 状の凹凸模様が支配的 き裂先端でストライエーション 模様の割合増加
胴－板接合上部 板厚貫通周き裂	<ul style="list-style-type: none"> 全体に酸化スケールが付着 	<ul style="list-style-type: none"> ロクキャンディー 状の凹凸模様が支配的 所々にストライエーション 模様
Yピースコーナー 周き裂		<ul style="list-style-type: none"> ロクキャンディー 状の凹凸模様が支配的 進展部の一部にストライエーション 模様
外部胴縦溶接部 内面縦き裂	<ul style="list-style-type: none"> 粒子が全体的に細粒（一部粗粒） 	<ul style="list-style-type: none"> ロクキャンディー 状の凹凸模様が支配的 表面側にストライエーション 模様
外部胴下周溶接部 内面周き裂	<ul style="list-style-type: none"> 細粒の中に一部粗粒の部分が混合 	<ul style="list-style-type: none"> 表層部はロクキャンディー 状の凹凸模様が支配的 進展部にストライエーション 模様
擬似欠陥部	<ul style="list-style-type: none"> 内表面から円弧状に進展 	<ul style="list-style-type: none"> ロクキャンディー 状の凹凸模様とストライエーション 模様の混在

表 6. 3. 2 (a) 断面ミクロ組織

観察部位	観察位置	組織状況
入口ノズル 付根コーナー 縦き裂	母材部	<ul style="list-style-type: none"> ・内面表層部にすべり線、変質層 ・開口端側で粒界割れ、進展するに従い粒内割れ混在
上鏡内面 亀甲状き裂	母材部	<ul style="list-style-type: none"> ・表層部にすべり線、変質層 ・開口端側で粒界割れ、進展するに従い粒内割れ混在
外胴上部 周溶接部	内面溶接部	・開口端側で粒界割れ、進展するに従い粒内割れ混在
	外面溶接部	・き裂なし
	母材部	<ul style="list-style-type: none"> ・内面表層部にすべり線、変質層 ・外面表層部にすべり線 ・すべり線、変質層はなし、一部細粒域があり
胴-板接合部	上部破断部	<ul style="list-style-type: none"> ・粒界割れ支配、粒内割れ混在 ・内面表層部にすべり線、変質層 ・外面表層部にすべり線、塑性流動域 ・破断部近傍内面側変質層内に微細き裂
	胴板溶接部 (上部)	<ul style="list-style-type: none"> ・内面上側溶金内に微細き裂 ・外面側はき裂なし

表 6. 3. 2 (b) 断面ミクロ組織

観察部位	観察位置	組織状況・亀裂深さ等
Yピース コーナー部	母材部	<ul style="list-style-type: none"> ・表層部にすべり線 ・開口端側は粒界割れ、先端に粒内割れ混在
外部胴 縦溶接部	内面溶接部	<ul style="list-style-type: none"> ・き裂全長に渡り粒界割れ
	外面溶接部	<ul style="list-style-type: none"> ・き裂なし
	母材部	<ul style="list-style-type: none"> ・母材内面表層部にすべり線、変質層 ・外面表層部にすべり線 ・溶接部近傍の内外面表層部は細粒域
外部胴 下周溶接部	内面溶接部	<ul style="list-style-type: none"> ・開口端側は粒界割れ。進展部、先端部は粒内割れが混在
	母材部	<ul style="list-style-type: none"> ・圧延材・鍛造材両母材の内面表層部にすべり線 変質層 ・外面表層部にすべり線 ・溶接部内面表層部は細粒域
支持スカート コーナー部	母材部	<ul style="list-style-type: none"> ・表層部にすべり線 ・粒内貫通割れ、き裂内部は酸化スケール
出口ノズル コーナー部	母材部	<ul style="list-style-type: none"> ・粒界割れ

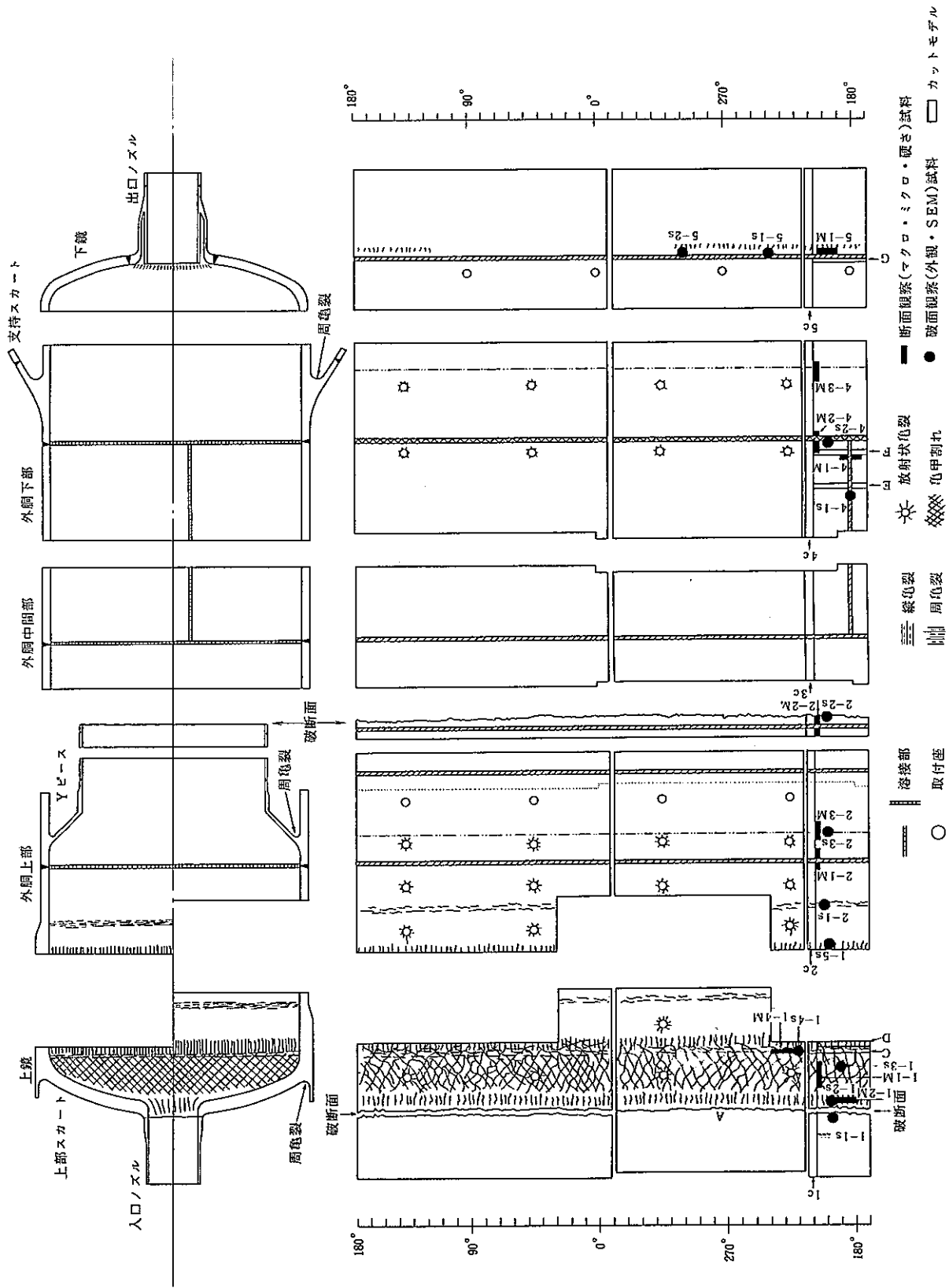
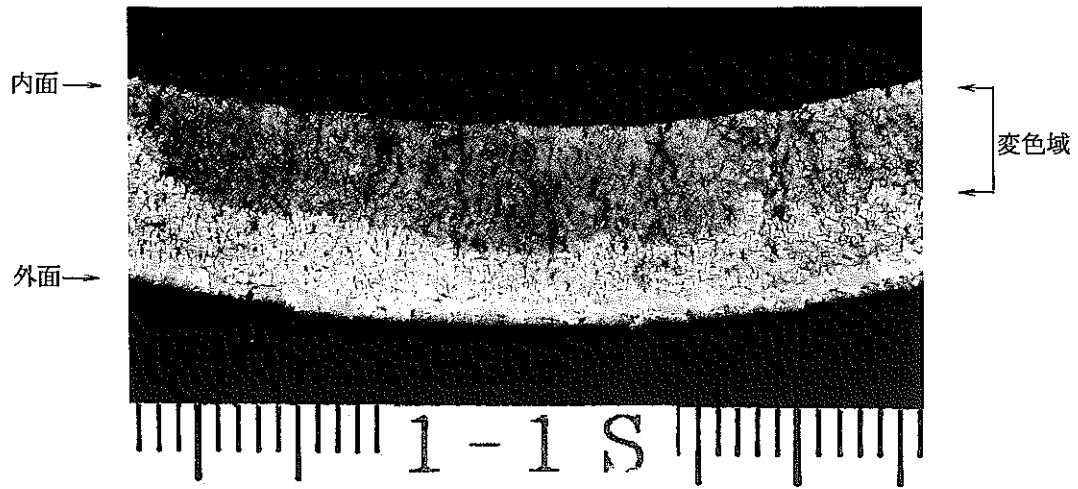
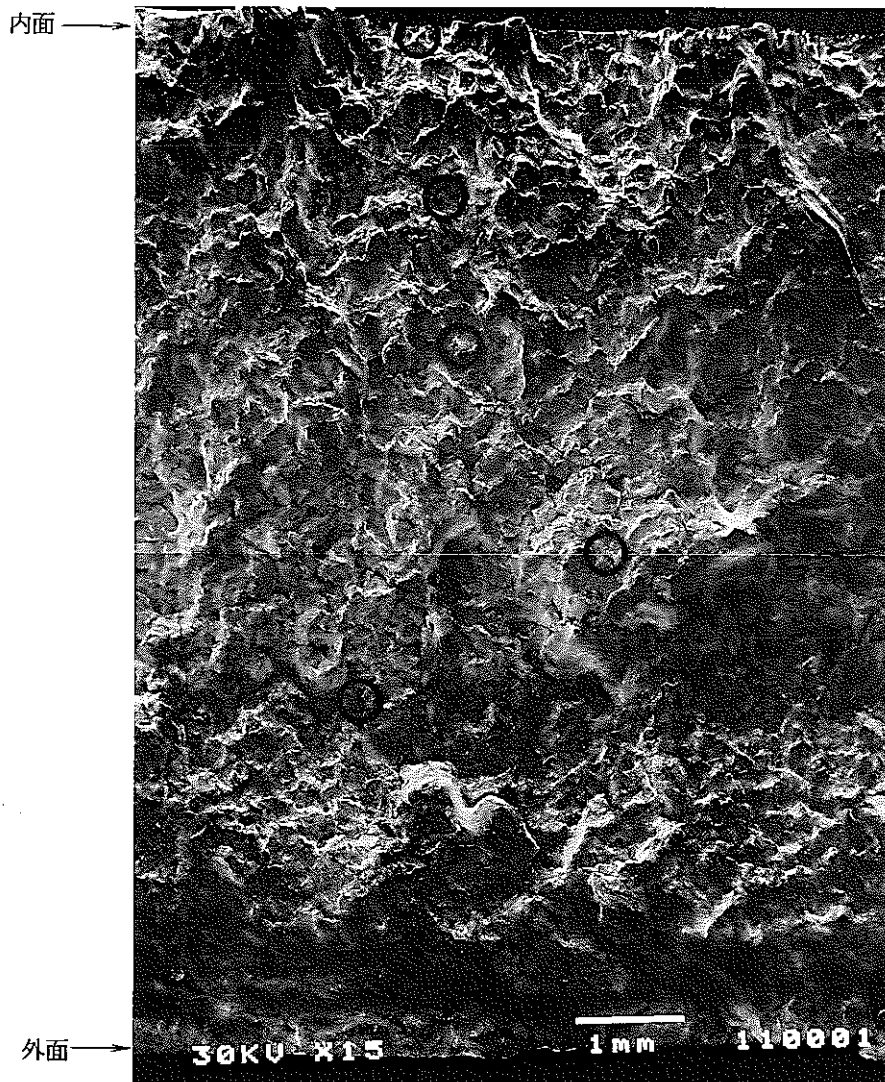


図 6.3.1 詳細検査対象位置 (内面側からの展開図)

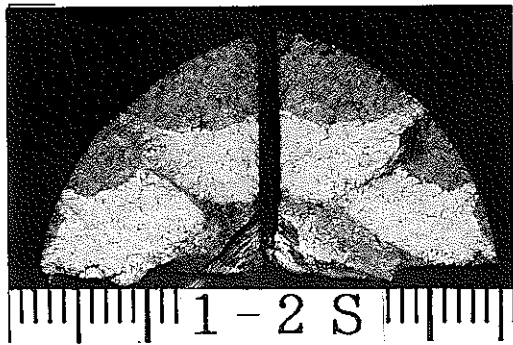


① マクロな模様

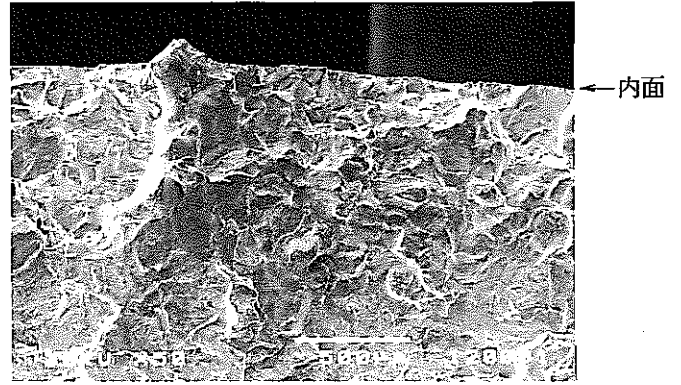


② SEM観察模様 (写真① 中央部)

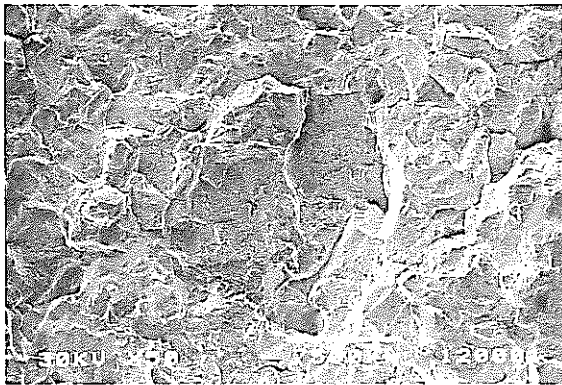
写真 6.3.1 入口ノズル付け根のき裂破面



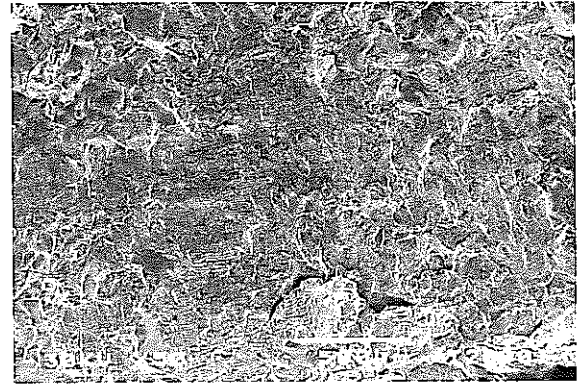
① マクロな模様



② SEM観察模様：内面側



③ SEM観察模様：き裂進展中央

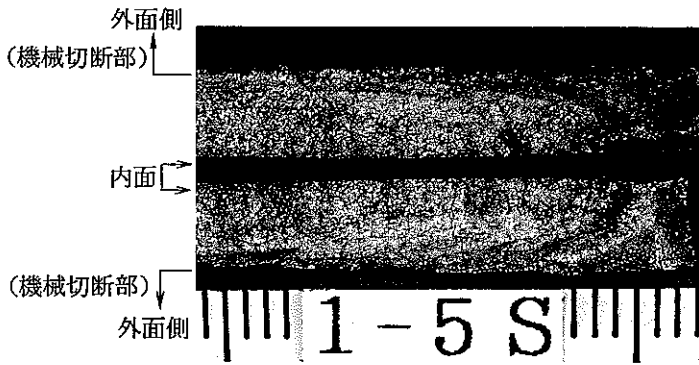


④ SEM観察模様：き裂先端

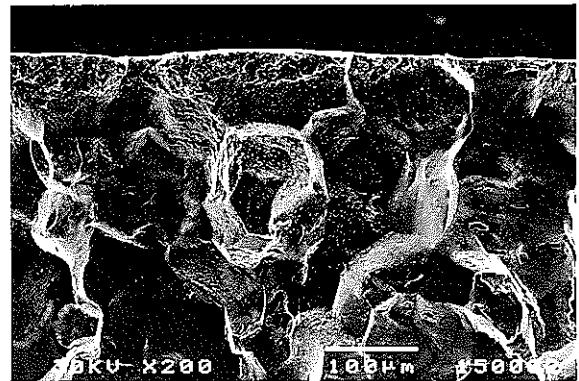


⑤ 写真③中央部拡大

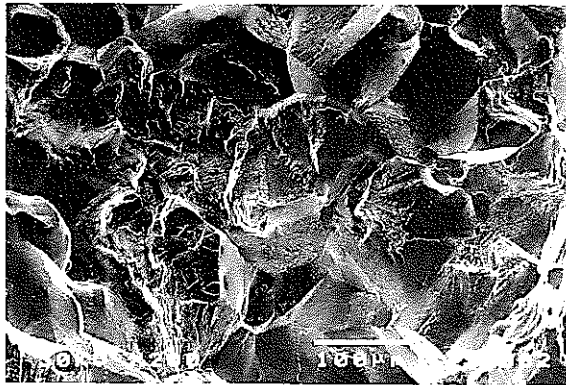
写真 6. 3. 2 入口ノズルコーナーのき裂破面



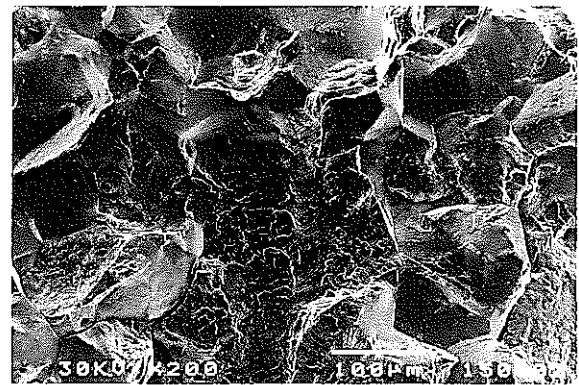
㉑ マクロな模様 (外部胴近傍：縦破面)



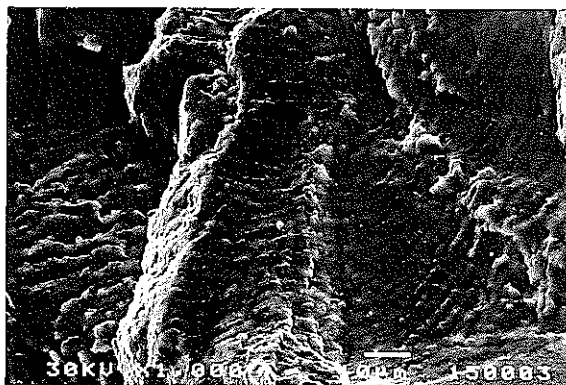
㉒ SEM観察模様：内面側 (右上)



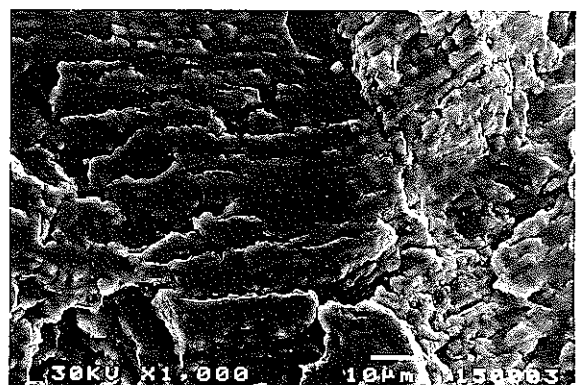
㉓ SEM観察模様：内面から 1.1 mm



㉔ SEM観察模様：内面から 1.8 mm



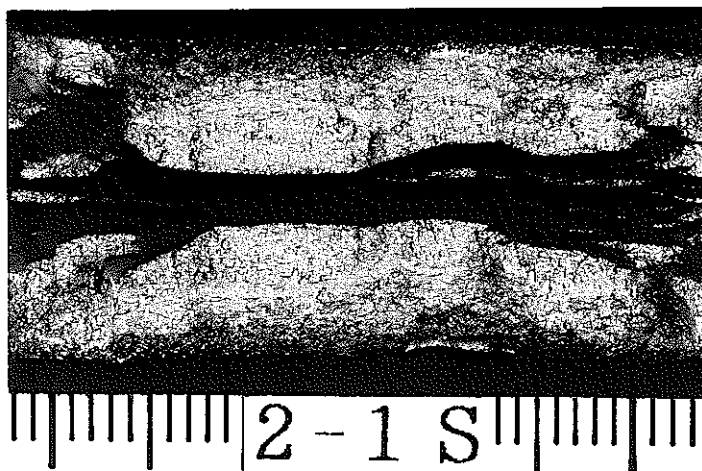
㉕ 写真㉓ 中央部拡大



㉖ 写真㉔ 中央部拡大

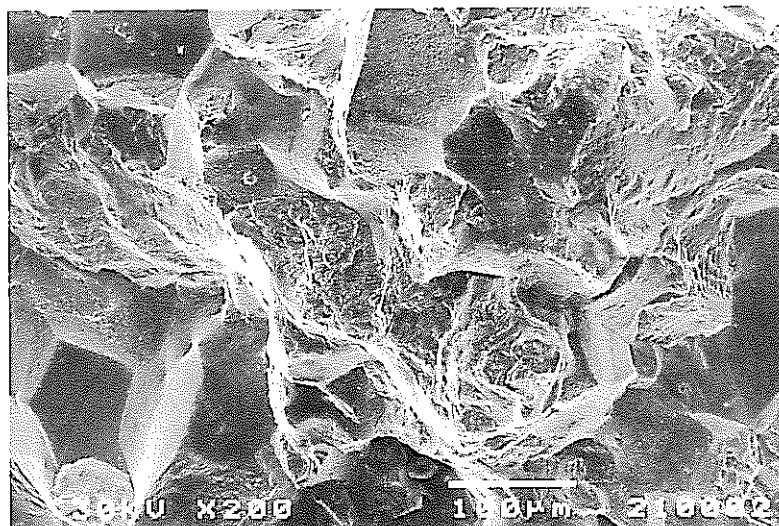
写真 6. 3. 3 上鏡のき裂破面

① マクロな模様
(周破面)



外面側
↑ (機械切断部)
← 内面
↓ (機械切断部)
外面側

② SEM観察模様：
内面から1.2mm



③ 写真②
中央部拡大

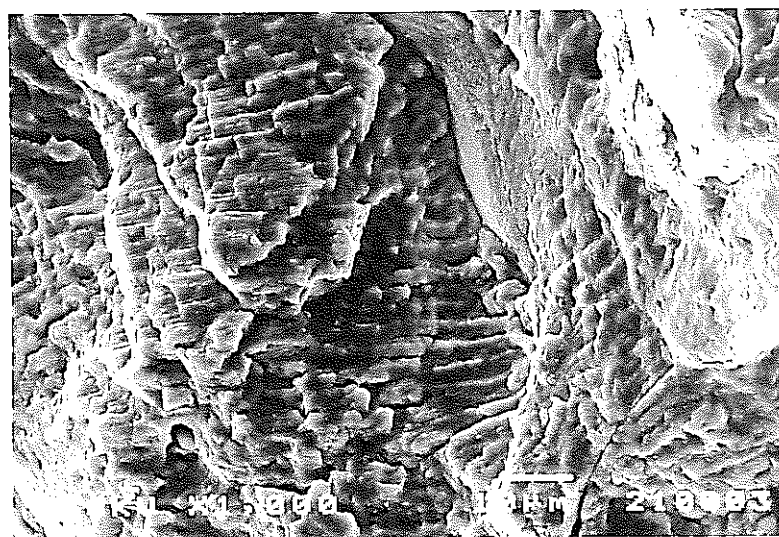


写真6.3.4 外部胴上部シニング部のき裂破面

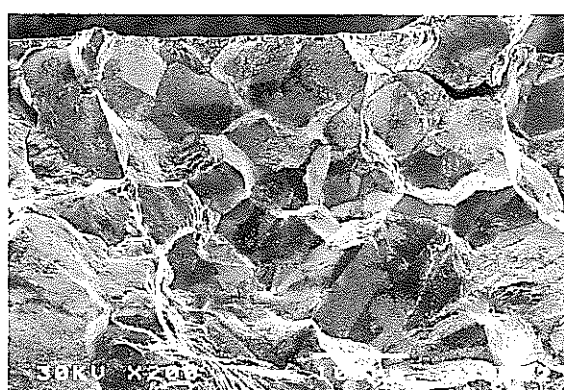
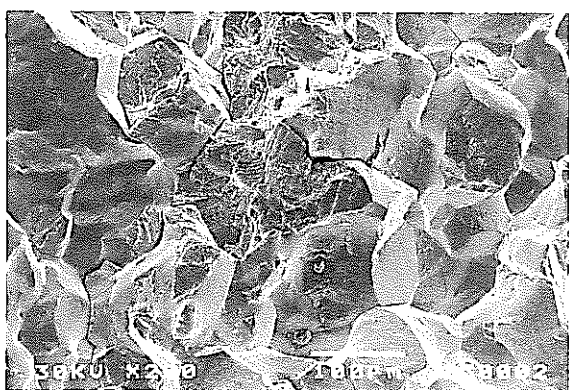
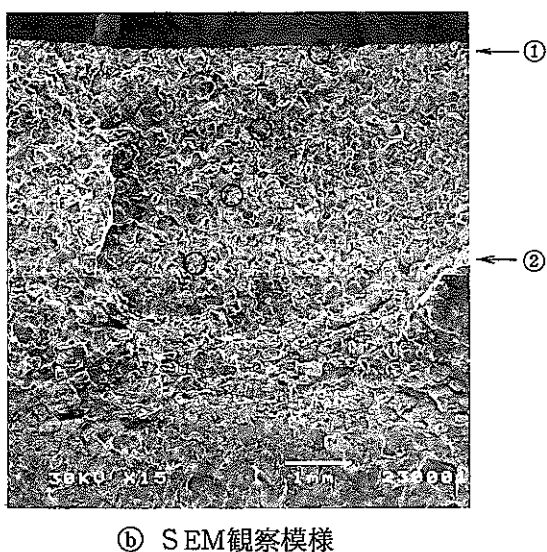
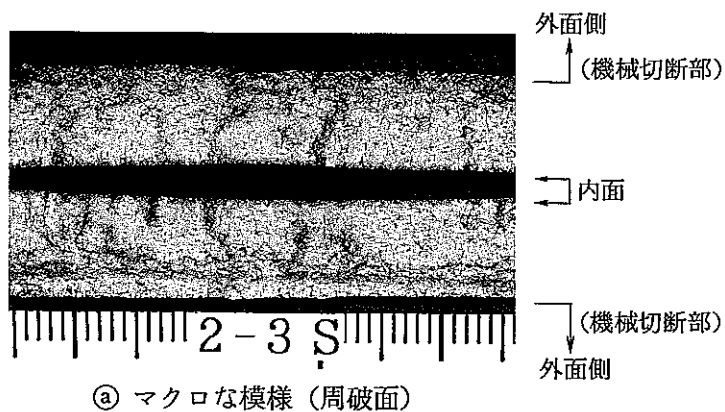
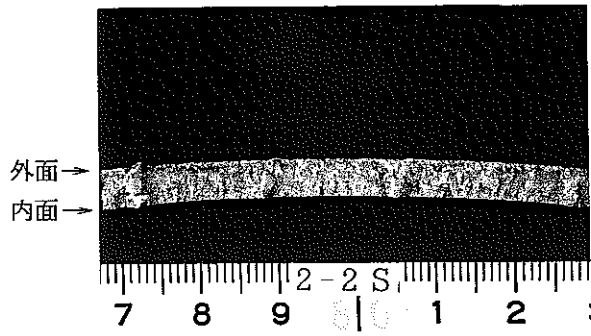
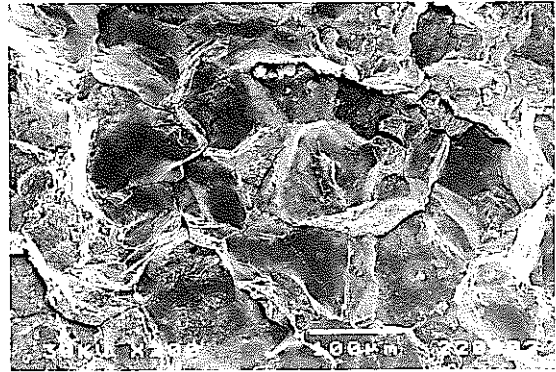


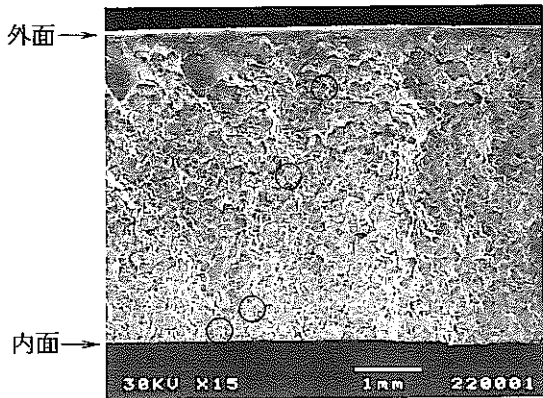
写真 6. 3. 5 Yジャンクション部のき裂破面



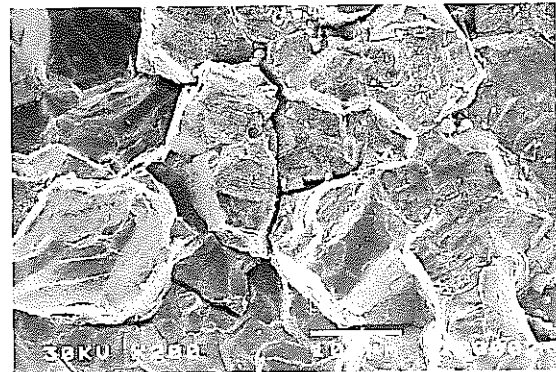
① マクロな模様



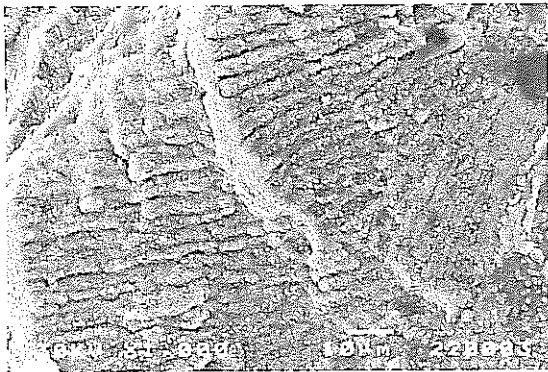
② SEM観察模様：外面から0.9mm



③ SEM観察模様



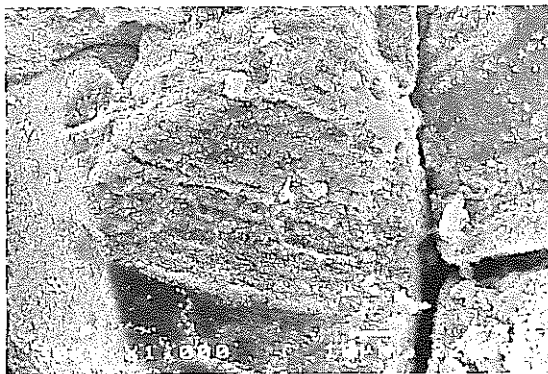
④ SEM観察模様：外面から2.6mm



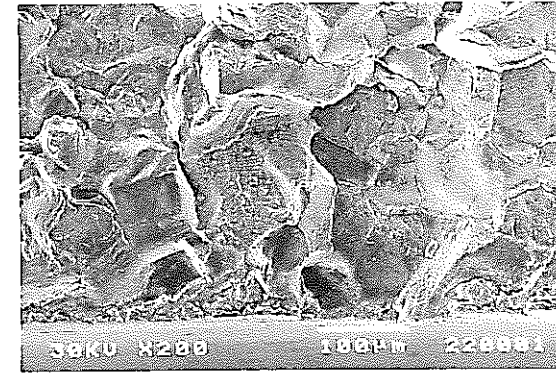
⑤ 写真①中央部拡大



⑥ SEM観察模様：内面から0.5mm

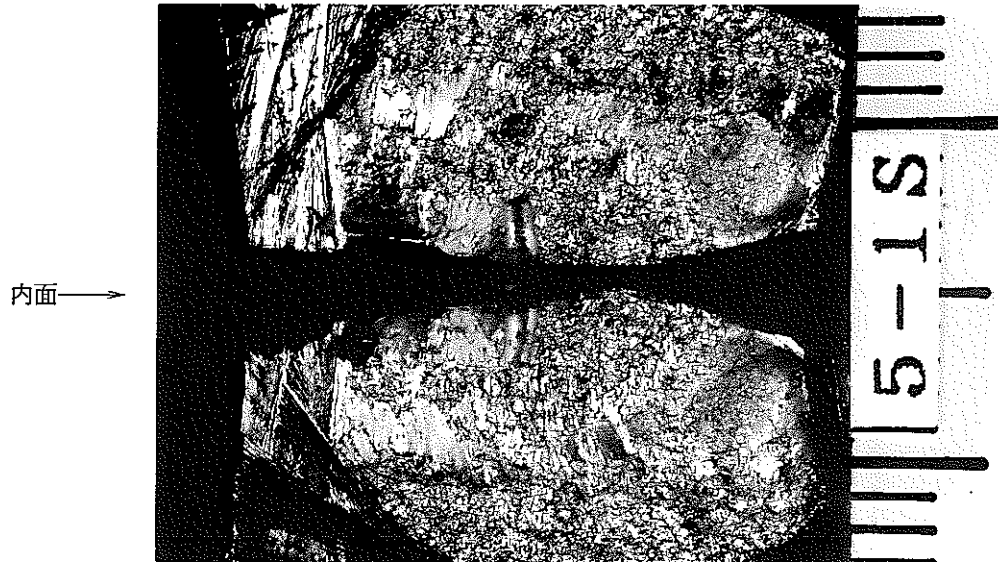


⑦ 写真⑥中央部拡大

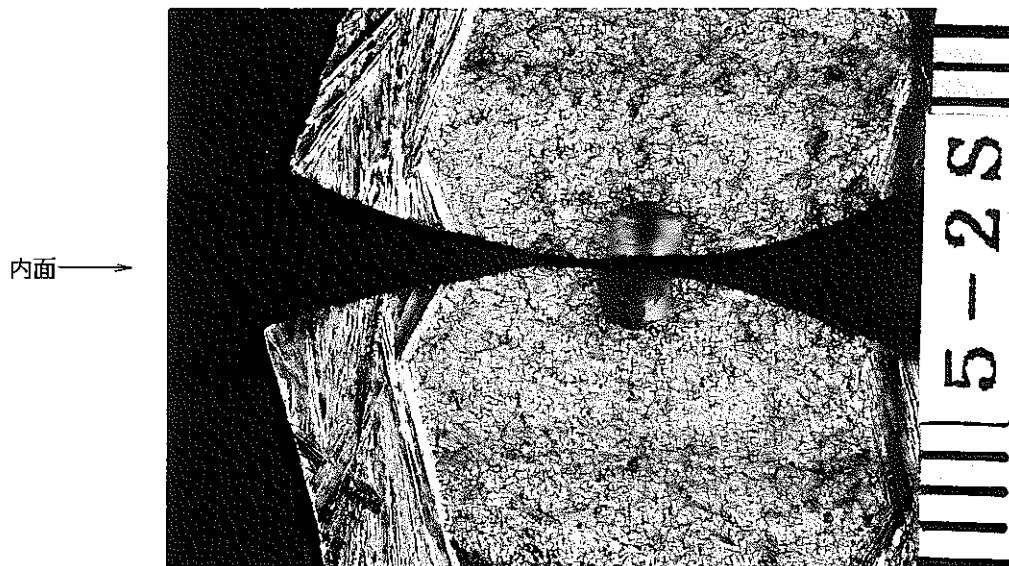


⑧ SEM観察模様：内面寄り

写真6.3.6 胴板接合部（上部）のき裂破面



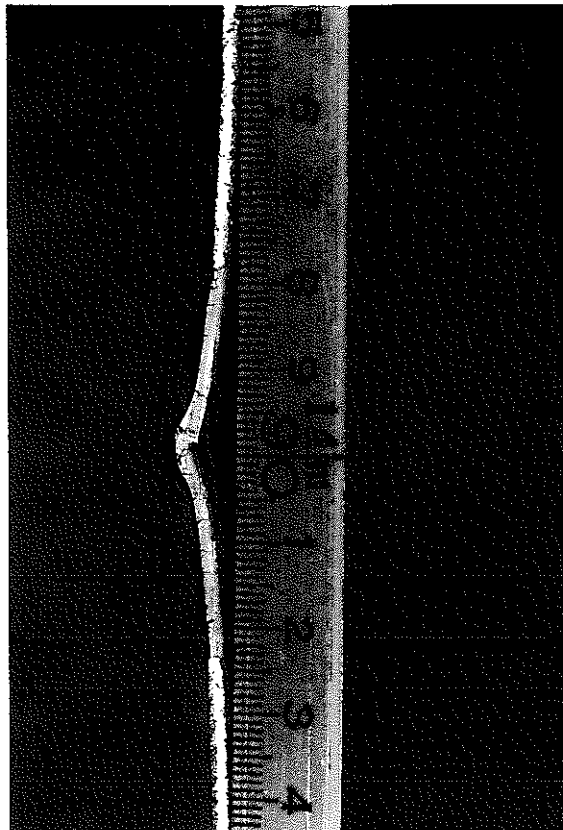
㊸ 溶接止端部 ($0.8\phi \times 1.5h$)



㊹ 母材 (コーナー) 部 ($2.0\phi \times 1.5h$)

写真 6. 3. 7 擬似欠陥部のき裂破面

真空側 ← | → ナトリウム
流路側



① 縦き裂



② 周き裂 (約1/2長)

写真 6. 3. 8 熱抵抗体のき裂破面

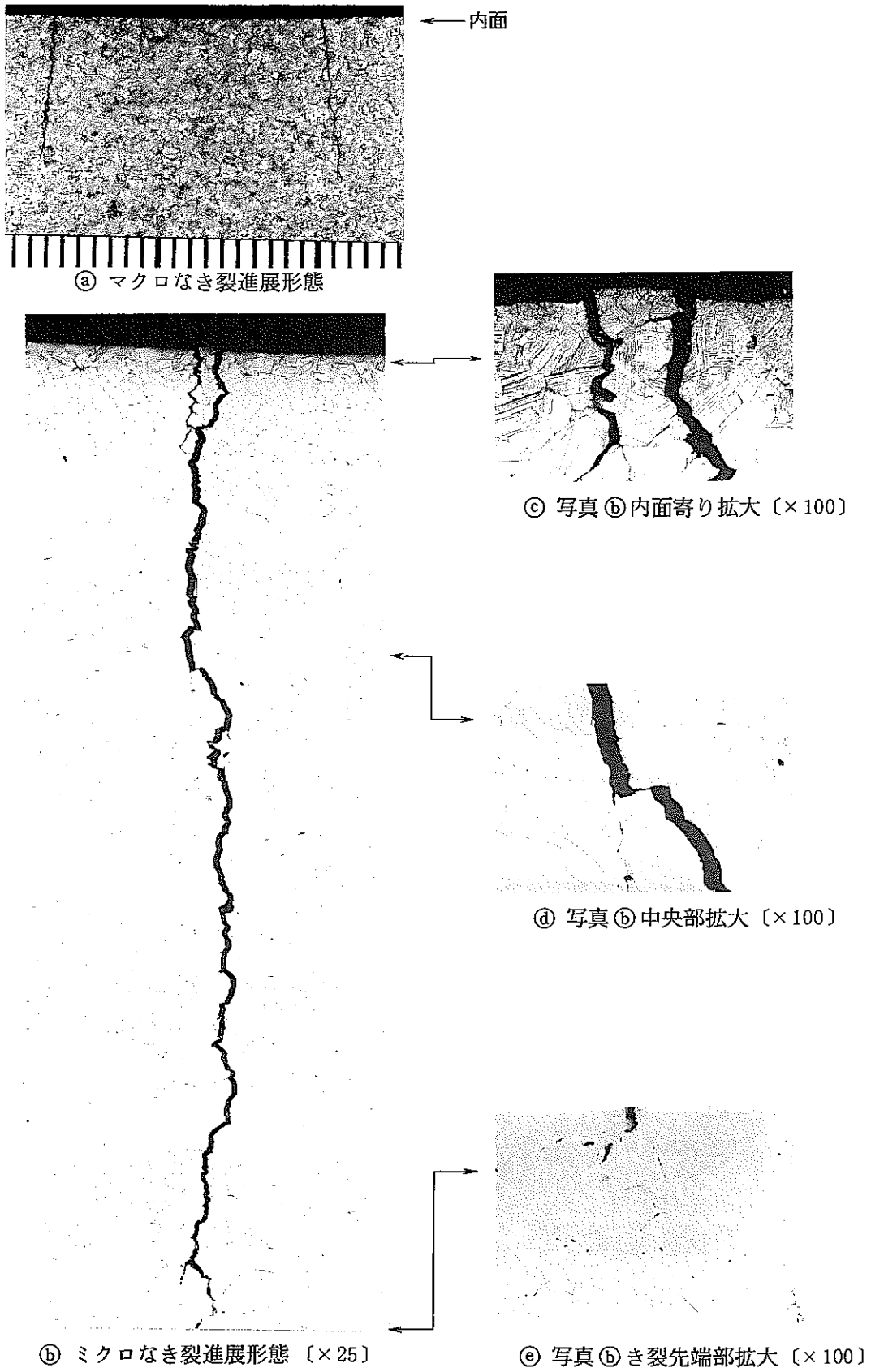


写真6.3.9 入口ノズルコーナーの周断面

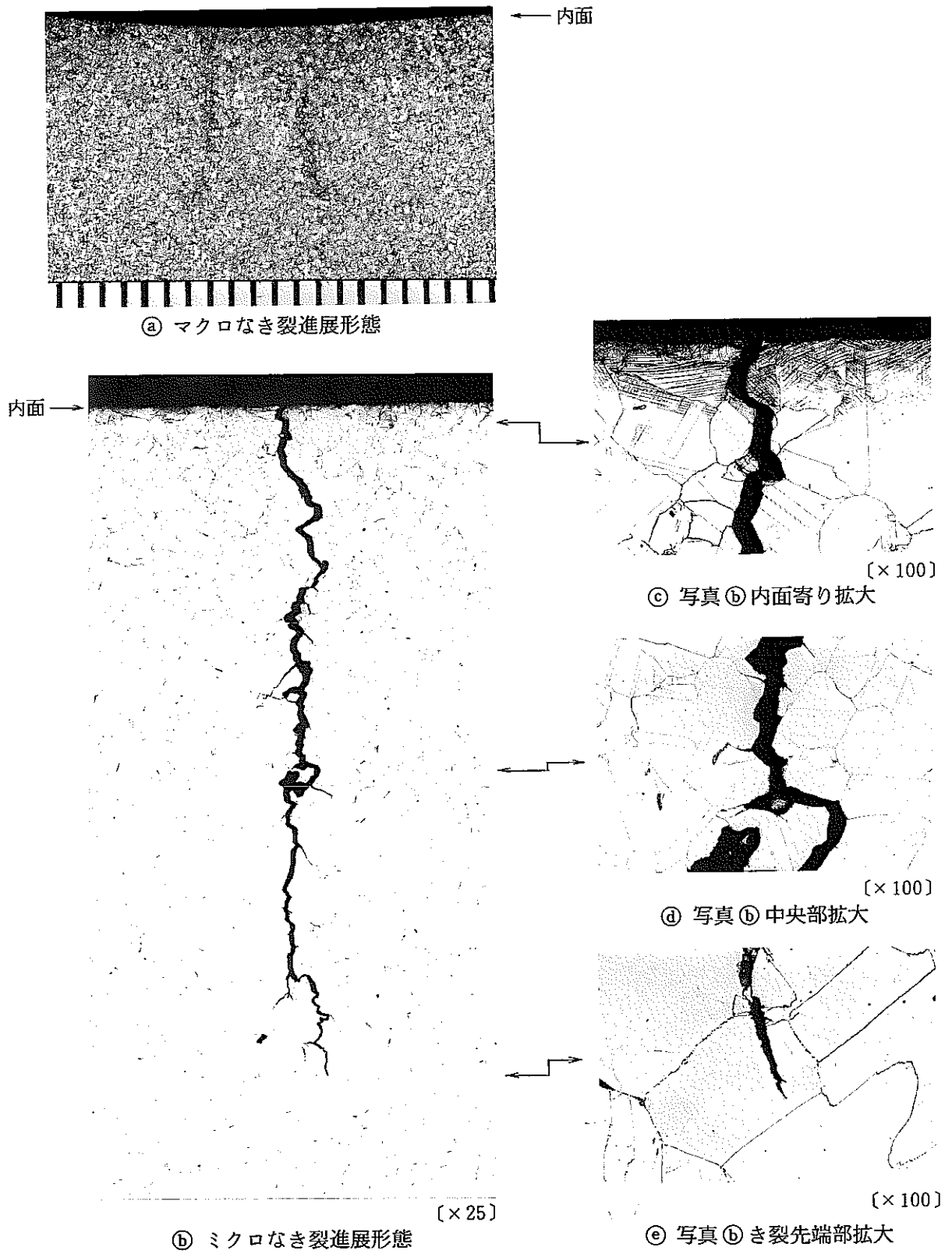


写真 6. 3. 10 上鏡の縦断面

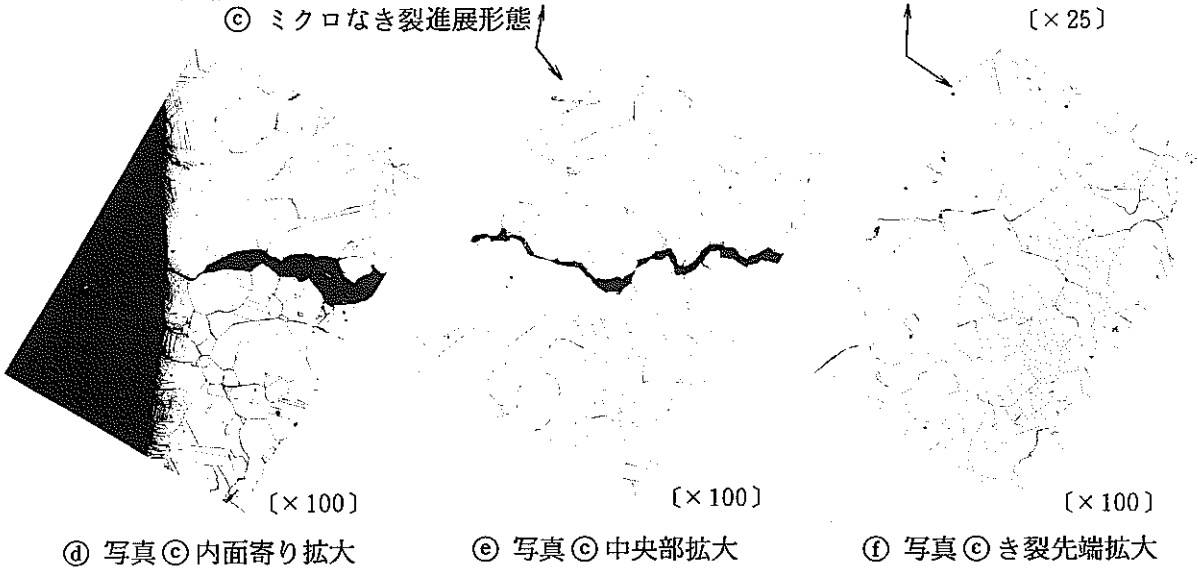
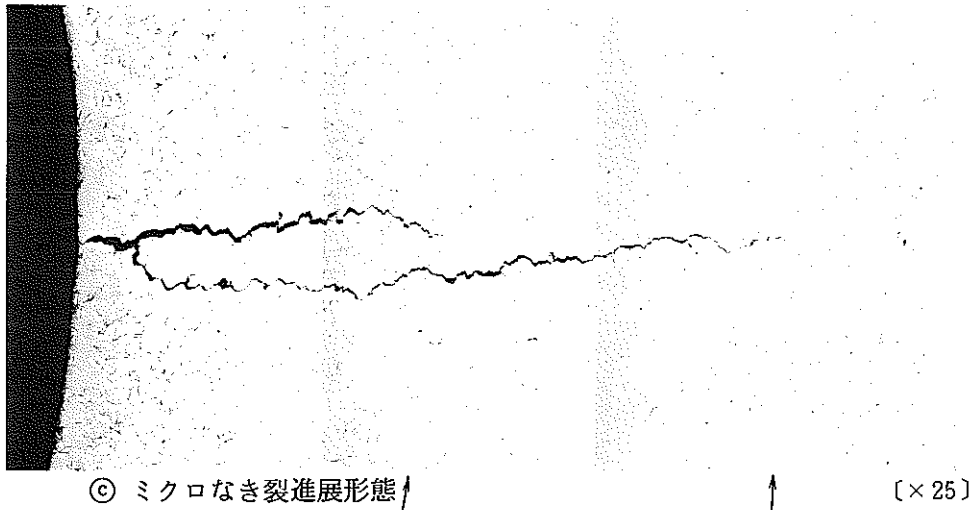
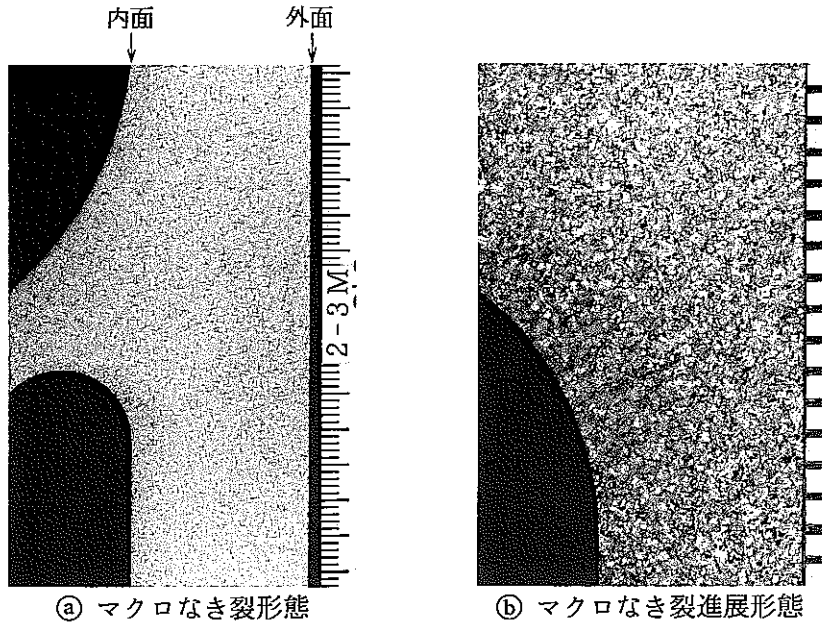


写真 6. 3. 11 Yジャンクション部の縦断面

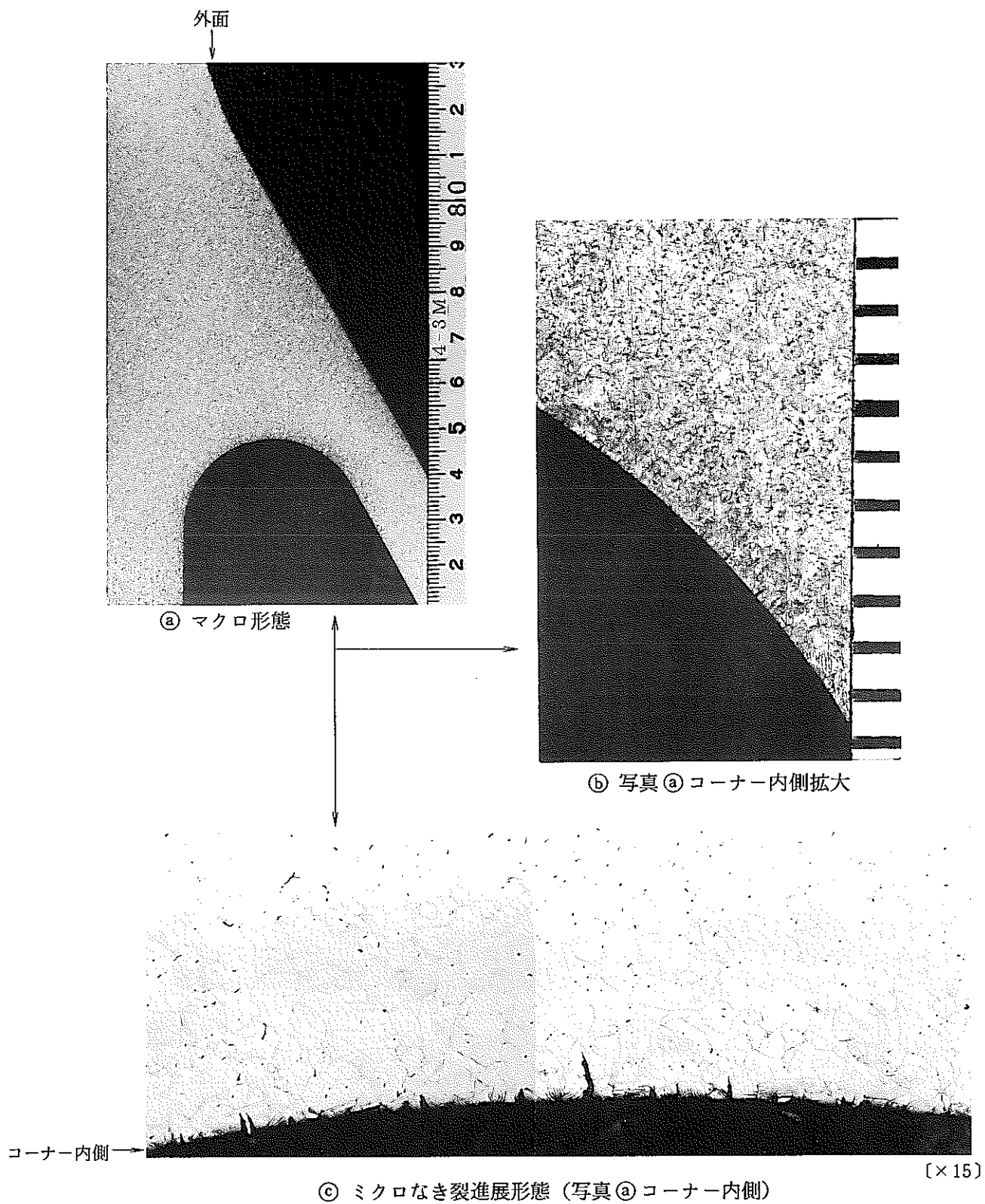
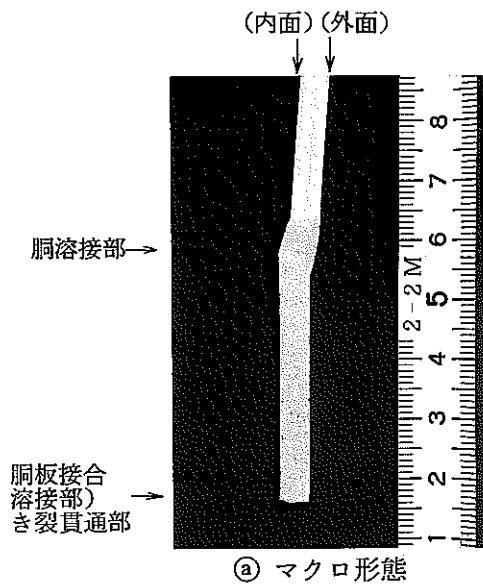
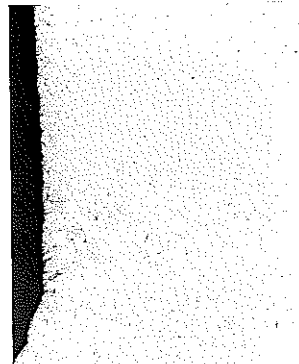


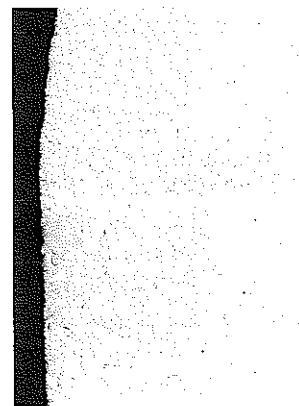
写真 6. 3. 12 指示スカート部の縦断面



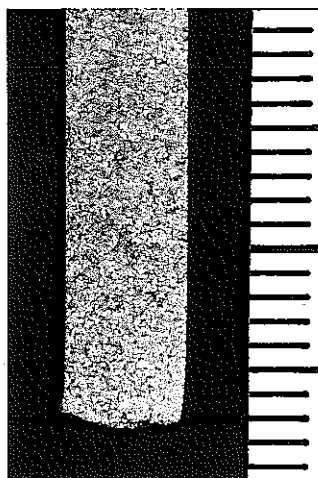
① マクロ形態



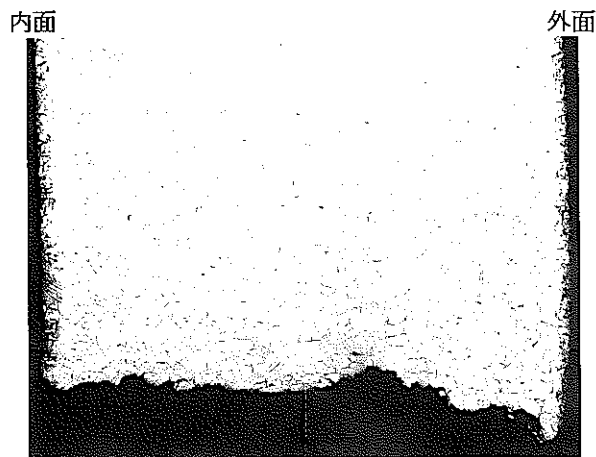
② 写真① 溶接止端部拡大
〔× 25〕



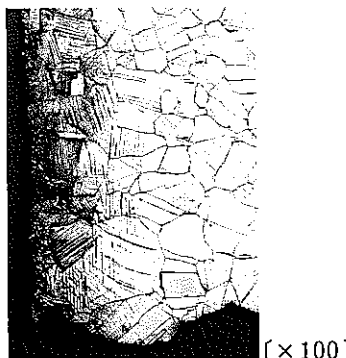
③ 写真① 溶接止端部拡大
〔× 25〕



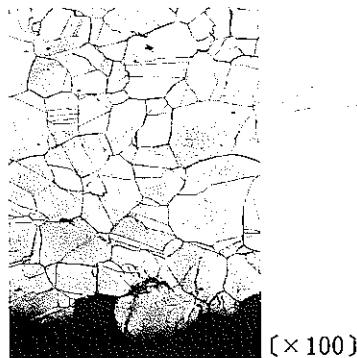
④ 写真① 下部拡大



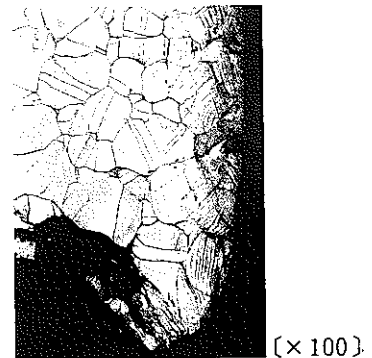
⑤ 写真④ 下部
拡大〔× 25〕



⑥ 写真⑤
最下部内面寄り拡大



⑦ 最下部中央部拡大



⑧ 最下部外面寄り拡大

写真 6. 3. 13 内部洞の縦断面

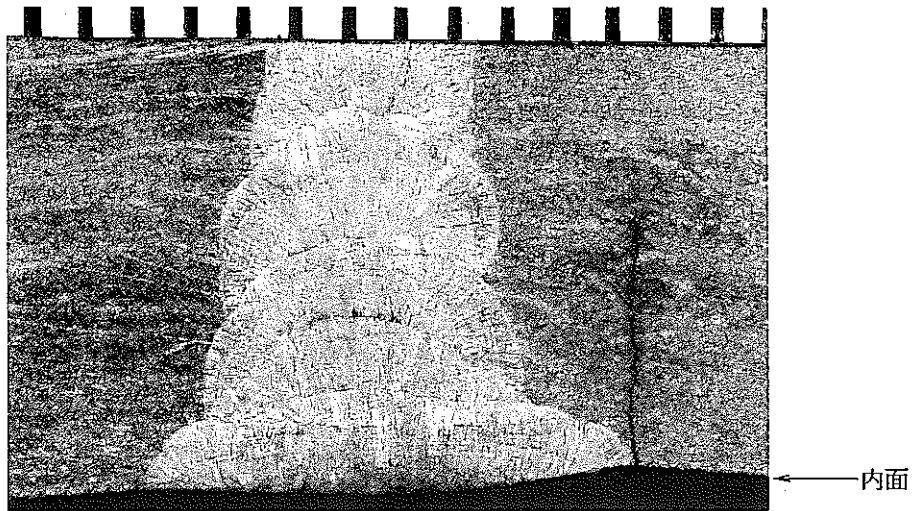


① マクロ形態

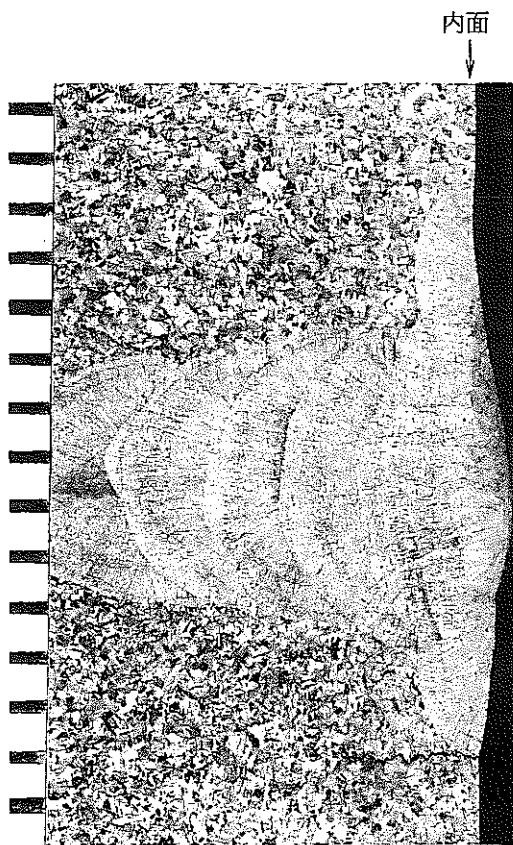


② ミクロなき裂進展形態

写真 6. 3. 14 出口ノズルコーナーの周断面



① 外部胴下部縦溶接部周断面



② 外部胴上部周溶接部縦断面



③ 外部胴下部周溶接部縦断面

写真 6. 3. 15 溶接部の形状とき裂

6.4 硬 さ

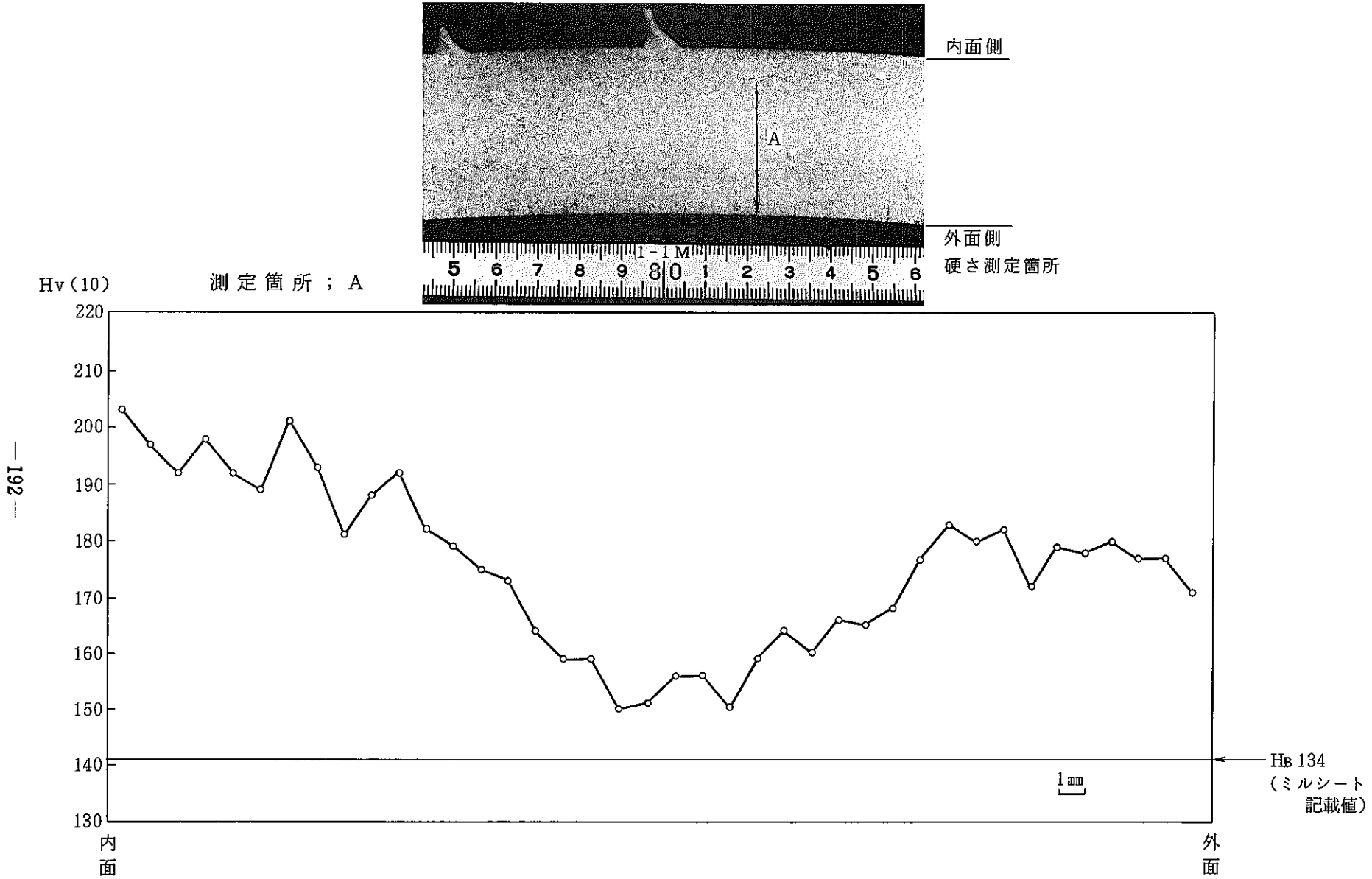
上鏡母材部、外部胴上周溶接部近傍、内部胴－多孔板接合破断部（上部）近傍および外部胴下周溶接部近傍の4ヶ所についてピッカース法により測定した。測定結果をFig. 6. 4. 1～6. 4. 5に示す。

上鏡および外部胴上部の鍛造材の板厚方向分布では内面側がMHv180～200、板厚中央部がMHv150～165、外面側がMHv170～180と中央部が低く内面側がやや高い傾向を示した。また、外部胴上部周溶接部から鍛造母材部にかけての縦方向分布では溶接金属部よりも母材部の方がやや硬い傾向を示した。（Fig. 6. 4. 1、Fig. 6. 4. 2）

内部胴－多孔板接合破断部の内面側、板厚中央、外面側の長手方向分布では、破断面近傍で若干高く、破断部から遠ざかるにしたがって低下し、また、外面側より内面側の方が高い傾向を示した。（Fig. 6. 4. 3）

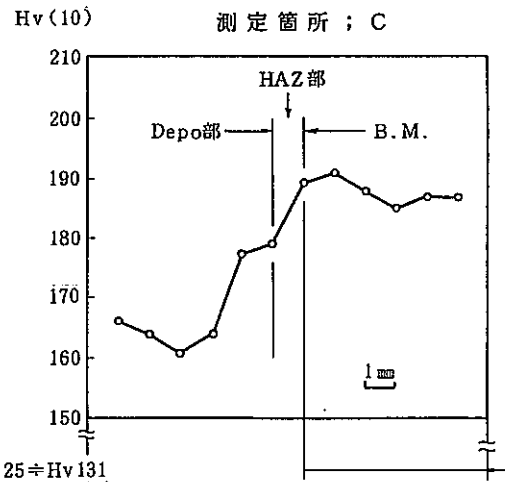
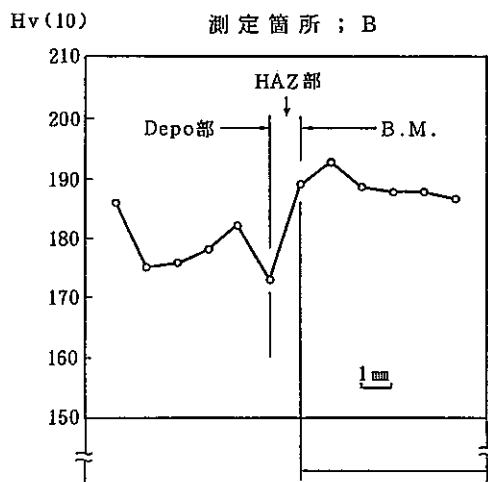
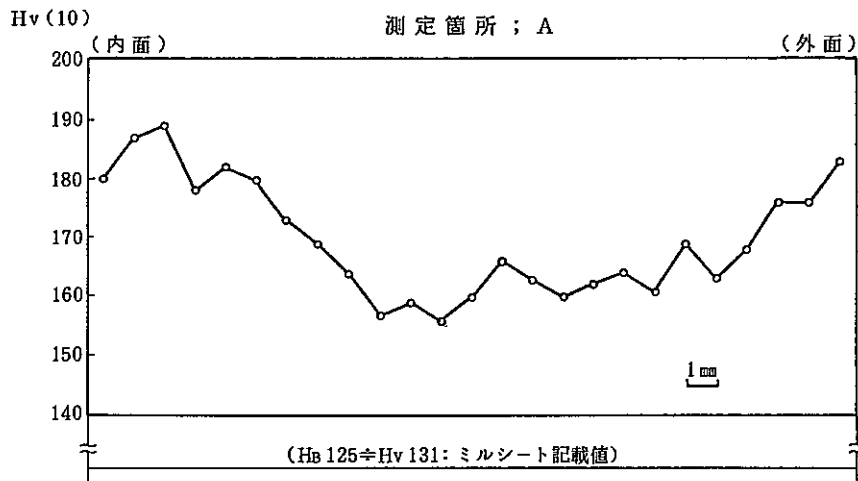
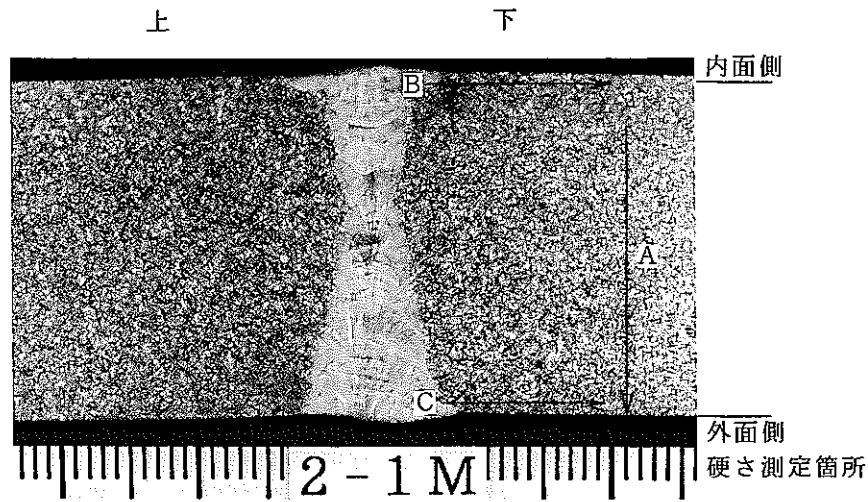
外部胴下部周溶接部の長手方向分布では、母材部がMHv180～200に対し、溶接金属部がMHv 160～185となり、溶着金属が母材に比較して低い傾向を示した。また、母材部（鍛造材と圧延材）板厚方向分布では両材とも、内面側から外面側にかけてMHv185～205程度であり、上記上鏡および外部胴上部の鍛造材母材部のような板厚中央が低くなる傾向は見られなかった。（Fig. 6. 4. 4、Fig. 6. 4. 5）

なお、図には素材製作時の材料メーカー測定値（ミルシート記載値）を参考として示したが、本測定値はそれと比べて全体的に高めであった。



試料No.； 1 - 1 M (上鏡内面亀甲割れ部縦断面)

図 6. 4. 1 上鏡母材部の硬さ分布

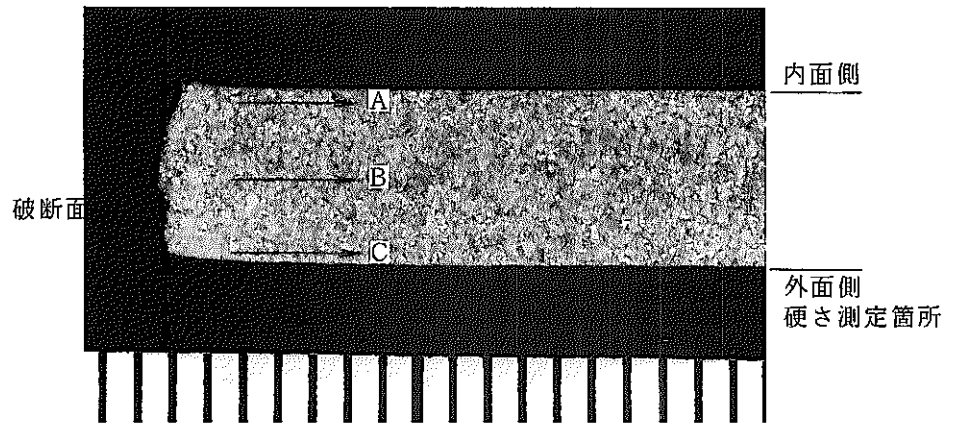


Hb 125 ≒ Hv 131 (ミルシート記載値)

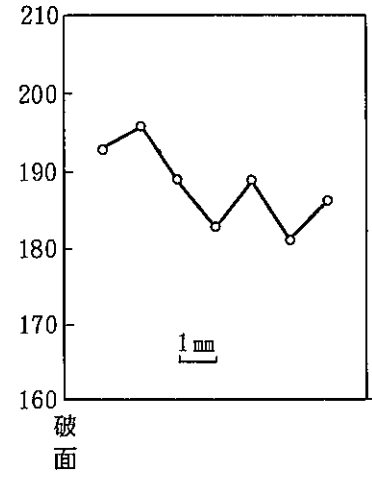
Hb 125 ≒ Hv 131 (ミルシート記載値)

試料No; 2-1 M (外胴上部周溶接部周亀裂の縦断面)

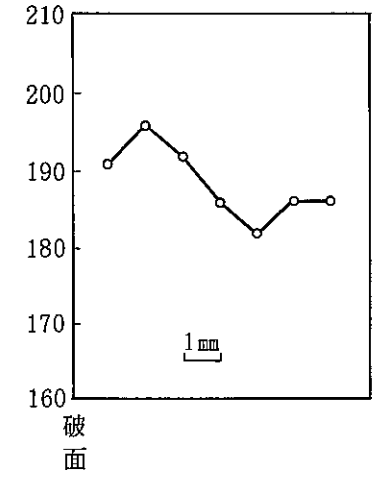
図 6. 4. 2 外胴上部周溶接部近傍の硬さ分布



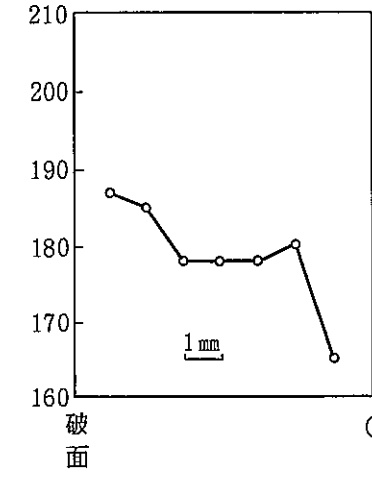
Hv(10) 測定箇所 ; A



Hv(10) 測定箇所 ; B



Hv(10) 測定箇所 ; C



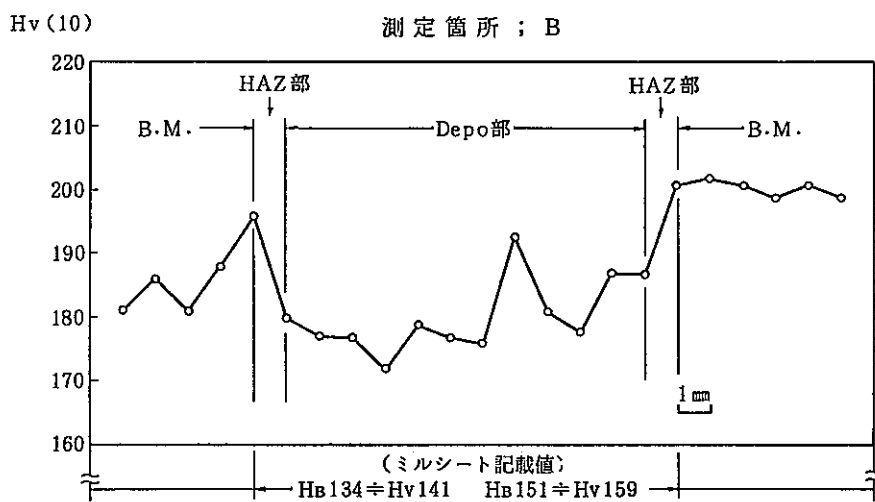
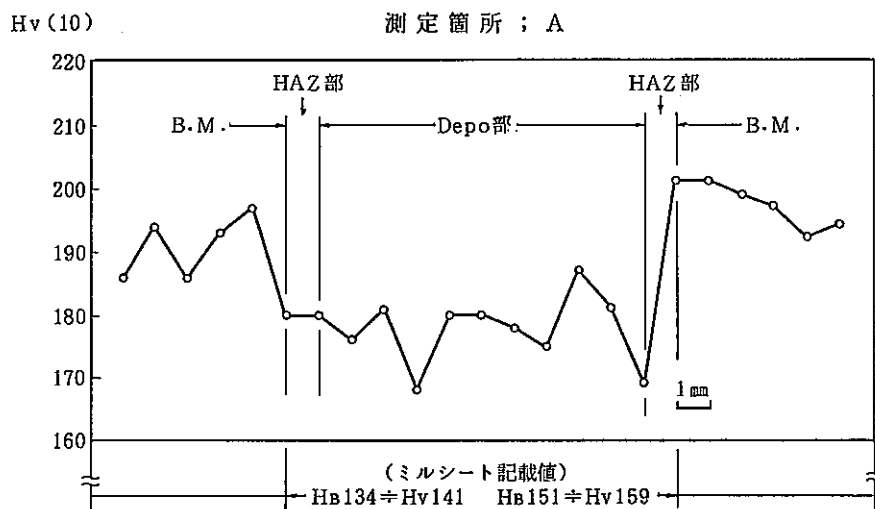
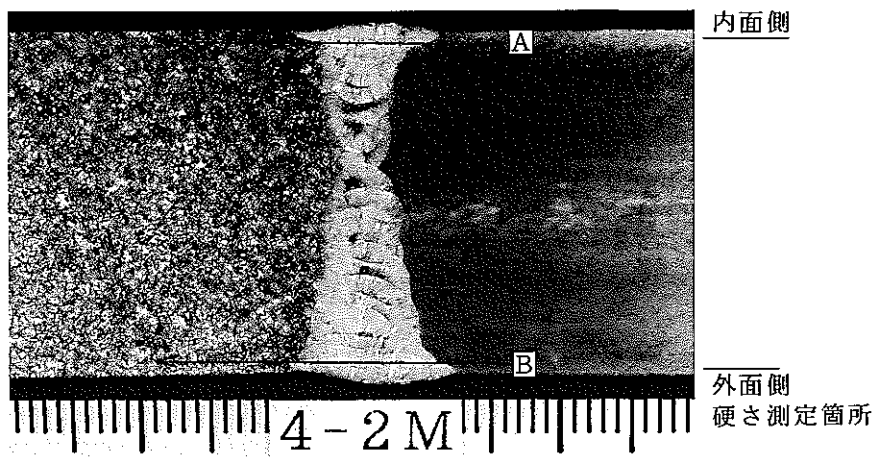
HRB 82
(ミルシート記載値)

HRB 82
(ミルシート記載値)

HRB 82
(ミルシート
記載値)

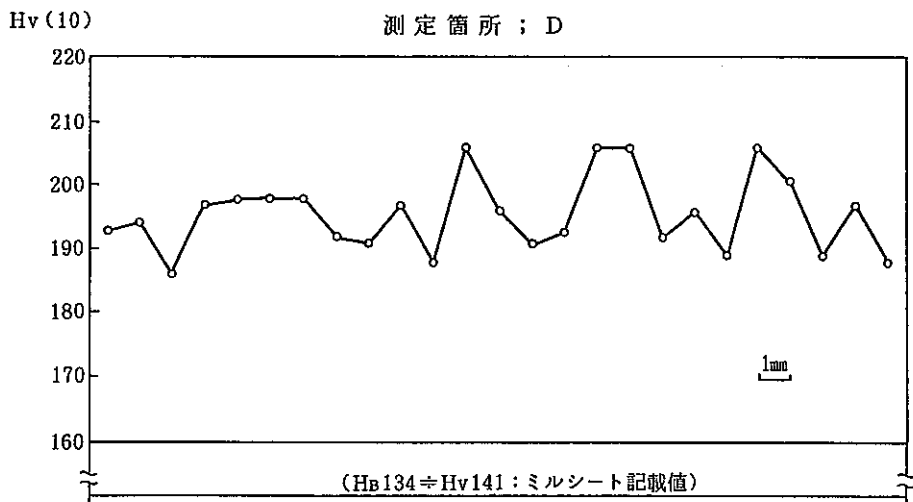
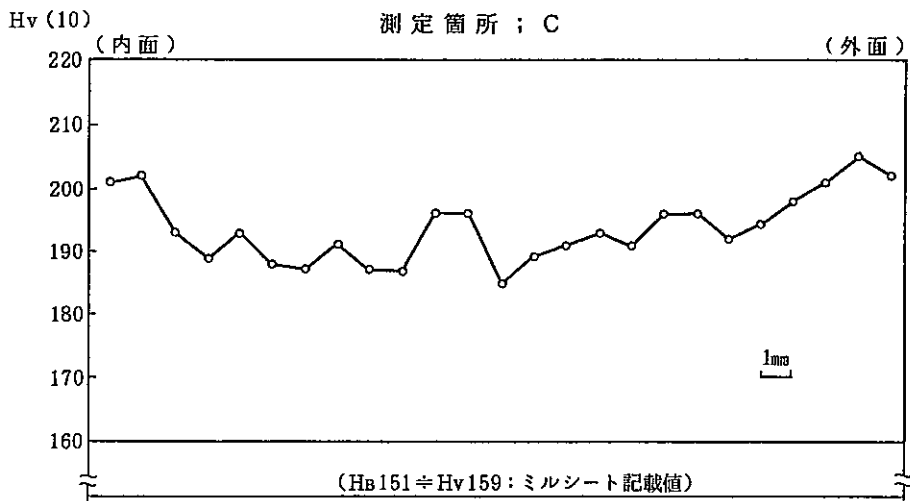
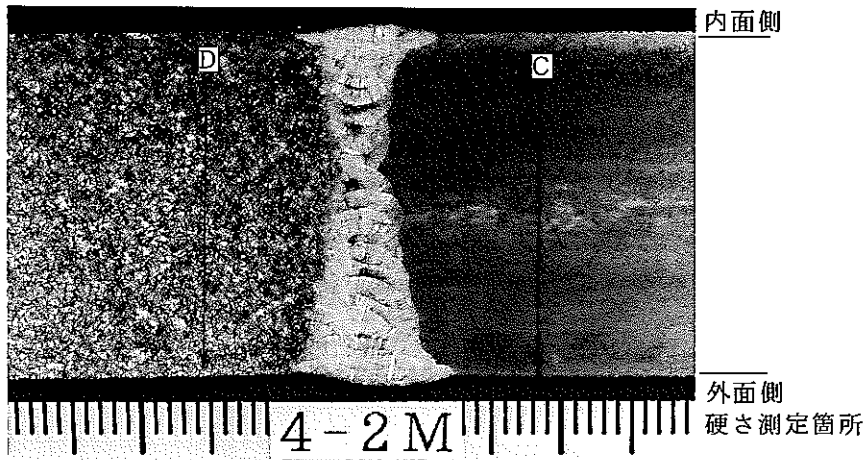
試料No. ; 2-2M (多孔板吊下げ破断面と胴-板接合部縦断面)

図 6. 4. 3 内筒の多孔板付け根破断面近傍硬さ分布



試料No ; 4 - 2 M (外胴下部周溶接部周亀裂の縦断面)

図 6. 4. 4 (a) 外胴下部周溶接部近傍硬さ分布(1)



試料No ; 4 - 2 M (外胴下部周溶接部周亀裂の縦断面)

図 6. 4. 4 (b) 外胴下部周溶接部近傍硬さ分布(2)

6.5 機器機能

供試体に内装した整流装置、多孔板、熱抵抗体の熱過渡による機能変化の有無を検査した。結果を以下に示す。

6.5.1 整流装置

整流装置を分解しながら外観、P T、寸法検査を行った。分解した部品の外観をPhoto. 6.5.1に示す。解体前の組立状態、解体後の各々の部品とも、組立構造のガタ、緩みおよびP Tによる欠陥指示は無かった。分解作業は、ネジ部のかじり・焼きつき、インロウ部等の隙間の少ない部分における変形や歪みもなく、容易に行うことができた。分解した主要部品の寸法に関しては、一部の部品に熱過渡試験前後で0.1mmの変化が見られたが、これが測定器の精度や読み取り誤差程度であることから、実質的な変化は無かったと言える。以上のように、本整流装置については熱過渡試験による異状・変化は見られなかった。

6.5.2 管-多孔板部

管-多孔板に関して、①管-多孔板溶接部のき裂の有無、②管-多孔板接合隙間面の腐食の有無、③管の拡管把握力、について検査した。

(1) 管-多孔板溶接部のき裂の有無

代表的な10本の管について光学顕微鏡による縦断面の拡大観察を行い、管-多孔板溶接部を主眼にき裂の有無を検査した。観察結果の代表例をPhoto. 6.5.2に示す。また、き裂の状況についてまとめると、

- ① 大半の試料で内側ノッチ部から溶接金属内にき裂が生じていた。き裂長さはノッチ部から溶接金属外面へ貫通した1試料以外では最大0.8mmであった。
- ② 大半の試料で多孔板側上面の溶接止端部にき裂が見られた。き裂長さは最大1mmであった。
- ③ 管内面側の溶接止端部にもき裂が観られた。き裂長さは内側ノッチ部に貫通した1試料以外は微細なものであった。
- ④ 管内面側に粒界脱落部が存在し、そこからき裂が管内部へ進展し板厚を貫通したものが1試料にのみ見られた。

この管-多孔板溶接部についてマイクロビッカース法による硬さ測定をした結果、溶接金属、管母材、多孔板部材間に極端な差は無かった。

(2) 管-多孔板接合面の腐食の有無

代表的な10本の管についてその縦断面のP Tを行なうとともに、管-多孔板接合面の状態を目視により観察した。断面のP T状態をPhoto. 6.5.3に、接合面の状況をPhoto. 6.5.4に示す。これらについてまとめると、

- ① 接合面（管外面・多孔板内面）には腐食の痕跡は見当たらない。
- ② 拡管部にはナトリウムが付着・残存していたが、非拡管部には無かった。
- ③ 2 試料については多孔板側接合面に上下部とも縦方向き裂が生じていた。
長さは上部で18～19mm（溶接部からの進展を仮定）、下部が下面から13～15mmである。
- ④ 接合部断面のPTの結果、拡管長さ46mmおよび82mmの試料とも拡管部には欠陥指示がなく、逆に、非拡管部では明瞭な指示が確認できた。このことから拡管部接合面は密着性のよいことが窺えた。

(3) 管の拡管把握力

材料試験機を用いた管の押出試験を室温下で行い、その際の管の動き始めの荷重を測定した。試験の実施状況をPhoto. 6. 5. 5 に、拡管把握力測定対象箇所をFig. 6. 5. 1 に示す。測定対象部位は管－多孔板溶接部にき裂が無いこと、拡管条件および管－多孔板溶接部の溶接方法の差異を考慮して選定した。プラグ部はその多くでプラグ周囲の多孔板にき裂が存在することから除外した。

押出試験における時間－荷重曲線をFig. 6. 5. 2 に示す。図中、矢印は管の動き始めを示している。拡管把握力を『管が動き始めたとき』と定義した場合の拡管把握力の値等をTable 6. 5. 1 に、管の肉厚減少率と拡管把握力の関係をFig. 6. 5. 3 に示す。結果の図表には、備東芝が本供試体多孔板と同一の仕様で製作した多孔板について本測定と同様の方法で得た値を併せて示した。この結果、当初予想した同一の拡管把握力条件において、熱過渡を负荷した多孔板の拡管把握力は熱過渡を受けていない対比用多孔板の拡管把握力より定性的に小さいという明瞭な結果は得られなかった。

上記の結果については、押出試験において拡管の種類によらず管－多孔板接合面にナトリウムが付着していることが確認されており（(2)②で記した拡管部接合面間へのナトリウム付着の裏付けとなる）、ナトリウムの静摩擦力や剪断力が含まれることが考えられる。

管と多孔板を分離して応力が開放されたときの管内面の歪み量を測定し、ひずみ量から面圧を求めた。測定対象部位をFig. 6. 5. 3 に、ひずみ測定結果および面圧計算値をTable 6. 5. 2 に、管の肉厚減少率と面圧値の関係をFig. 6. 5. 4 に示す。拡管歪み測定対象はプレッシャーロールおよびコンタクトロールのいずれも拡管範囲82mmのものとした。ひずみ測定位置は管内面の上下2箇所とし、その値は管の応力を開放する前の状態を零とした。面圧算出式は次式による。

$$P = \frac{1}{2} \left(\frac{r_i^2}{r_o^2} - 1 \right) \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_c + \nu \varepsilon_1)$$

P	:	面圧	r _i	:	管の内径	r _o	:	管の外径
E	:	管の縦弾性係数	ν	:	管のポアソン比			
ε _c	:	円周方向ひずみ	ε ₁	:	軸方向ひずみ			

Fig. 6.5.4には(株)東芝が本供試体多孔板と同一の仕様で製作した多孔板について本測定と同様の方法で得た値を併せて示した。この結果、熱過渡を負荷した多孔板の拡管把握力は熱過渡を受けていない対比用多孔板の拡管把握力より低い傾向を示した。

面圧がマイナスである原因については、熱による応力緩和、多孔板の変形等が関係しているものと考えられる。これは前述した多孔板の楕円化傾向やプラグ孔の楕円化、さらに多孔板を切断して応力を開放しても管と多孔板は簡単に分離しなかったことに基づき推測するものである。

以上の試験の事前作業として、管-多孔板の外観・寸法検査およびPTを行った。その結果をまとめると以下のようなものである。

- ① 内径 200Φmmの孔の淵を一端とした半径方向のき裂が生じていた。特に0°、180°近傍が顕著である。また、最内周の管-多孔板溶接部に半径方向のき裂が、熱電対通し孔部にもき裂が生じていた（PTの結果は6.2および6.3に示す）。
- ② 多孔板縦方向中央において外径を測定した結果、次表に示すように90°-270°方向に拡がり、0°-180°方向に縮んでいることが判った。

	0° - 180°	90° - 270°
熱過渡試験前	590.0 mm	590.0 mm
熱過渡試験後	589.5 mm	590.9 mm

- ③ 外周側の複数の管孔（管、プラグが取りついていない箇所）は90°-270°方向に径が増加する楕円化を生じていた。最大変形値は上面側、下面側の内径平均で真円に対して±0.85mmであった。

以上の他、拡管把握力に影響する事項として、①管の外径、②多孔板の変形、③ナトリウムのせん断力について検討した。

① 拡管把握力測定後の管外径測定

拡管把握力測定後に管の外径測定を行った。結果をTable 6.5.3に示す。供試体に使用したのと同じの管の外径に比べ0.03~0.10mm程度小さく、拡管把握力は小さくなる方向にあると言える。

② 多孔板の変形と拡管把握力の関係

多孔板の外周部90°、270°近傍の管孔変形と拡管把握力の関係を調べた。結果をFig. 6.5.5に示す。これらの間に相関関係は見られなかった。

③ ナトリウムのせん断力

今回室温下で行った拡管把握力測定結果については、管-多孔板隙間に入っているナトリウムのせん断力が含まれるものと考えられる。ナトリウムのせん断力に関しては、フリーズシールバルブの特性に関して実験を行って、温度、回転速度の影響を調べた文献⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾がある。これらのデータをFig. 6.5.6に示す。回転速度については、本拡管把握力測定では回転が生じないため、代わりに荷重-速度関係から変位速度に換算した場合1mm/min程度である。室温下のこの速度域の剪断抗力値を外挿して2kg/cm²と仮定すると、剪断面積が47.5cm²であり、剪断力は95kgとなる。この値は拡管把握力測定値に比べてかなり小さい値である。

なお、管の引き抜き試験を高温下で行うことについて事前に検討した結果、附着ナトリウムに対する安全上の対策、並びにこれを考慮した加熱方法が困難であることから、今回は室温下での実施とした。

6.5.3 熱抵抗体

熱抵抗体の真空性を確認するために、外観検査および重量測定を行った。

外観検査結果は本章の2および3項で記したように、180°方向の内胴縦溶接部が膨らみ(最大高さ約15mm)、上端から約250mm下がった位置で座屈(折れ曲がり)しており、円周方向に約40mmに渡る窪みが生じていた。また、この部分にはき裂が周、縦方向に十字状に生じていた。き裂を開放して破面を観察した結果このき裂はいずれも板厚を貫通していることがわかった。

4章に記したようにこの部位の300~350サイクルにおける温度変化はき裂貫通によるナトリウムの内部侵入と対応するものと考えられる。この結果から、真空性がこの時点で失われ、当初期待した性能は試験期間全体に渡り維持できていなかったものと思われる。

なお、重量測定の結果、熱抵抗体と中空ツバ1枚を合わせて118kgであり、設計重量103.8kgに対して約13.2kg増加していた。重量測定後解体して内部を調べた結果ナトリウムの残積が確認された。

表 6.5.1(a) 拡管把握力測定結果のまとめ(1)

	対比試験用多孔板			多 孔 板			
	管 番 号	管の肉厚減 少率 %	拡管把握力 kgf	管 番 号	管の肉厚減 少率 %	拡管把握力 kgf	押出時最大 荷重 kgf
プレッシャーロール 拡管長さ46mm	Y 1	6.3	1774	Y 1	7.1	375	700
	Y 2	7.2	1840	Y 2	7.5	1960	2950
プレッシャーロール 拡管長さ82mm	Y 3	7.7	2471	Y 3	8.1	1070	1350
	Y 4	8.7	2315	Y 4	7.4	630	1140
中 間 ロ ー ル 拡管長さ82mm	Y 5	4.2	2391	Y 5	4.4	720	2090
	Y 6	4.3	2285	Y 6	3.4	450	780
コンタクトロール 拡管長さ82mm	Y 7	2.9	2184	Y 7	2.7	730	730
	Y 8	3.2	1800	Y 8	2.9	900	900

(注) 拡管把握力=管が動き始める荷重

表 6.5.1 (b) 拡管把握力測定結果のまとめ(2)

	対比試験用多孔板			多 孔 板			
	管 番 号	管の肉厚減 少率 %	拡管把握力 kgf	管 番 号	管の肉厚減 少率 %	拡管把握力 kgf	押出時最大 荷重 kgf
プレシャールール 拡管長さ46mm	H 1	6.4	1470	H 1	6.7	2530	2530
	H 2	5.5	2200	H 2	6.3	2560	2560
	H 3	6.0	1980				
	H 4	6.3	1960				
	H 5	6.3	1960				
	H 6	6.8	2000				
プレシャールール 拡管長さ82mm	H 7	9.6	2580	H 3	9.4	2955	2955
	H 8	7.8	2570	H 4	6.3	2810	2810
	H 9	8.6	2780	H 5	6.7	3080	3215
	H 10	7.3	2490	H 6	6.9	1060	1060
				H 7	8.0	1900	1900
中 間 ロ ー ル 拡管長さ82mm	H 11	4.5	2190	H 8	3.3	910	910
	H 12	4.4	2180	H 9	5.2	2420	2440
	H 13	4.1	2270	H 10	4.6	2370	2670
	H 14	4.5	2495				
	H 15	3.9	2340				
	H 16	3.8	2240				
コンタクトロール 拡管長さ82mm	H 17	3.0	2320	H 11	2.7	545	545
	H 18	1.9	2000	H 12	2.5	575	890
	H 19	2.6	2120	H 13	2.5	860	860
	H 20	2.7	1940	H 14	3.6	760	760
				H 15	4.4	560	560

(注) 拡管把握力=管が動き始める荷重

表 6. 5. 2 (a) ひずみと面圧の関係 (多孔板)

供試体	拡管条件	測定位置		ひずみ値 $\times 10^{-6}$			拡管寸法 (mm)		面 圧 (kg/cm ²) 計算値
				軸方向	周方向	$\epsilon_2 + V \epsilon_1$	外 径	内 径	
				ϵ_1	ϵ_2				
多 孔 板	フレックサ-ロール 82mm (G 3)	A	1-1	123	-733	-697	16.155	13.895	-196
			1-2	121	-338	-303	16.155	13.895	-85.2
		B	1-3	313	-3747	-3656	16.115	13.855	-1030
			1-4	97	238	266	16.115	13.855	75
	フレックサ-ロール 82mm (G 4)	A	2-1	362	475	580	16.15	13.87	164.5
			2-2	183	-1689	-1635	16.15	13.87	-463.8
		B	2-3	170	-61	-12	16.14	13.86	-3.4
			2-4	113	675	708	16.14	13.86	201
	コンタクトロール 82mm (G 7)	A	3-1	214	-3724	-3662	16.195	13.895	-1044
			3-2	149	730	773	16.195	13.895	220.5
		B	3-3	-386	-1086	-1198	16.165	13.865	-342.3
			3-4	218	80	143	16.165	13.865	41
	コンタクトロール 82mm (G 8)	A	4-1	-12	-843	-846	16.09	13.79	-243
			4-2	323	-6406	-6312	16.09	13.79	-1811
		B	4-3	350	480	582	16.115	13.82	166.4
			4-4	-	-	-	-	-	-

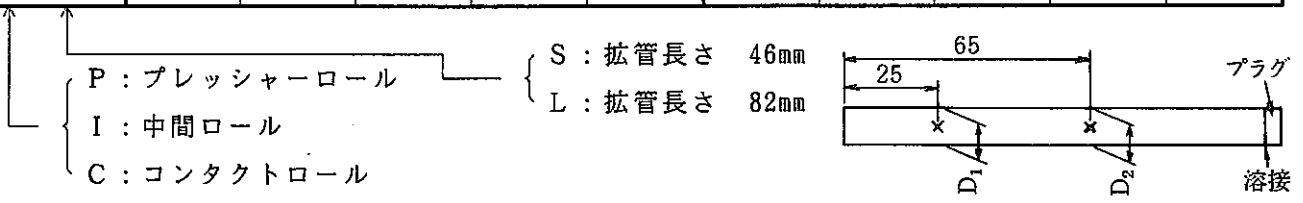
表 6. 5. 2 (b) ひずみと面圧の関係 (対比用)

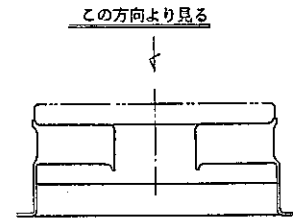
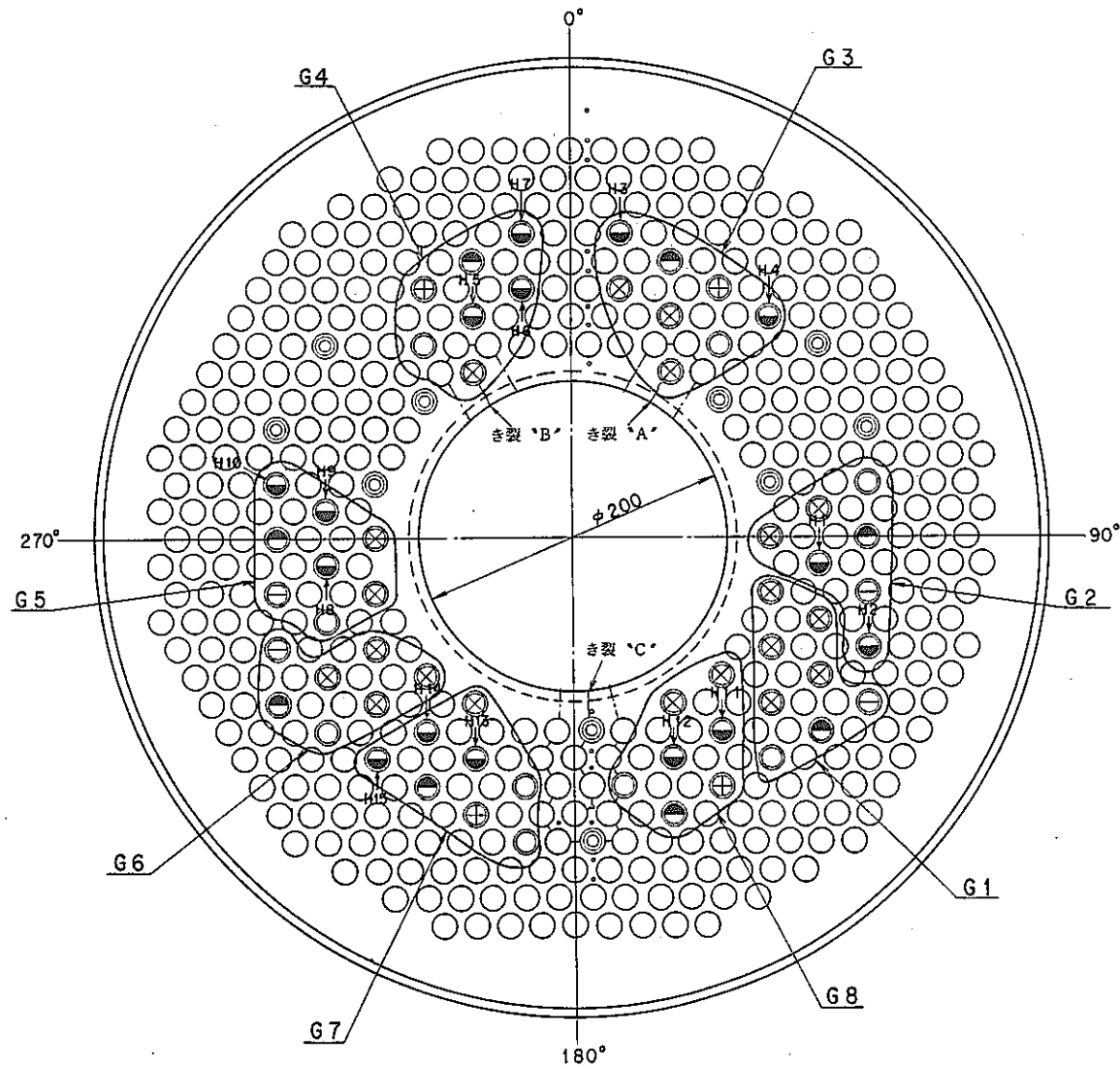
供試体	拡管条件	測定位置		ひずみ値 $\times 10^{-6}$			拡管寸法 (mm)		面 圧 (kg/cm ²) 計算値
				軸方向 ϵ_1	周方向 ϵ_2	$\epsilon_2 + V \epsilon_1$	外 径	内 径	
対 比 試 験 用 多 孔 板	プレシャ-ロール 82mm	A	1-1	-118	1840	1810	16.21	13.93	511.6
			1-2	-102	1347	1317	16.21	13.93	372.3
		B	1-3	-624	-317	-498	16.19	13.92	-140.4
			1-4	501	2115	2260	16.19	13.92	636.9
	プレシャ-ロール 82mm	A	2-1	-200	2201	2143	16.23	13.95	605.1
			2-2	-234	2126	2058	16.23	13.95	581.1
		B	2-3	353	2260	2362	16.24	13.97	663.8
			2-4	476	2343	2481	16.24	13.97	697.3
	コンタクトロール 82mm	A	3-1	369	1269	1376	16.14	13.83	395.3
			3-2	-233	1404	1336	16.14	13.83	383.8
		B	3-3	614	1816	1994	16.15	13.83	574.7
			3-4	693	1760	1960	16.15	13.83	564.9
	コンタクトロール 82mm	A	4-1	574	2031	2197	16.13	13.80	636.5
			4-2	171	1181	1230	16.13	13.80	356.4
		B	4-3	498	1654	1798	16.15	13.82	520.3
			4-4	398	1885	2000	16.15	13.82	578.1

表 6.5.3 管引き抜き後の管外径

単位 : mm

拡管条件	対比試験用多孔板				多 孔 板			
	管番号	D ₁	D ₂	平 均	管番号	D ₁	D ₂	平 均
P S	Y 1	16.002	16.146	D ₁ ave =15.994	Y 1	15.916	16.155	D ₁ ave =15.908
	Y 2	16.026	16.157		Y 2	15.906	15.897	
	H 1	15.949	16.122		H 1	15.907	16.125	
	H 2	15.937	16.131		H 2	15.902	16.105	
	H 3	16.015	16.137	D ₂ ave =16.145				D ₂ ave =16.071
	H 4	15.986	16.162					
	H 5	15.967	16.149					
	H 6	16.071	16.159					
P L	Y 3	16.167	16.164	16.166	Y 3	16.133	16.139	16.136
	Y 4	16.150	16.138	16.144	Y 4	16.128	16.139	16.134
	H 7	16.144	16.130	16.137	H 3	16.204	13.142	16.173
	H 8	16.144	16.131	16.138	H 4	16.131	15.920	16.026
	H 9	16.180	16.181	16.181	H 5	16.140	15.839	15.990
	H 10	16.150	16.131	16.141	H 6	16.142	16.137	16.140
					H 7	16.158	16.181	16.170
I L	Y 5	16.156	16.145	16.151	Y 5	16.086	16.075	16.081
	Y 6	16.139	16.137	16.138	Y 6	16.113	16.097	16.105
	H 11	16.111	16.101	16.106	H 8	16.082	16.092	16.087
	H 12	16.122	16.125	16.124	H 9	16.106	15.989	16.048
	H 13	16.132	16.117	16.125	H 10	16.120	15.937	16.029
	H 14	16.132	16.131	16.132				
	H 15	16.127	16.118	16.123				
	H 16	16.137	16.122	16.130				
C L	Y 7	16.114	16.118	16.116	Y 7	16.076	16.084	16.080
	Y 8	16.122	16.106	16.114	Y 8	16.093	16.077	16.085
	H 17	16.103	16.114	16.109	H 11	16.078	16.068	16.073
	H 18	16.105	16.142	16.124	H 12	16.076	16.059	16.068
	H 19	16.113	16.109	16.111	H 13	16.086	16.086	16.086
	H 20	16.121	16.103	16.112	H 14	16.075	16.089	16.082
					H 15	16.089	16.099	16.094





管-多孔板接合部の8グループ

記号	拡管条件		溶接条件
	拡管力	拡管長さ	
G1	プレッシャー ロール	46mm	1層
G2			2層
G3			1層
G4			2層
G5	中間ロール	82mm	1層
G6			2層
G7			1層
G8	コンタクト ロール		2層

記号	説明	数値	備考
管-多孔板 接合部	拡管把握力予備測定箇所	8	—
	拡管把握力本測定箇所	15	—
	断面検査箇所	4	—
	溶接部にき裂が有る箇所	20	解体検査実施せず
	その他	9	解体検査実施せず
◎	プラグ-多孔板接合部	10	解体検査実施せず
○	管孔	404	管、プラグなし
•	熱電対用穴	17	—
□	き裂破断面検査箇所	3	ずれる可能性有り

(注) 断面検査箇所とは、「管-多孔板溶接部の断面検査」及び「管-多孔板接合部隙間部全長にわたる断面検査」を実施する箇所である。

図 6.5.1 拡管把握力測定対象箇所

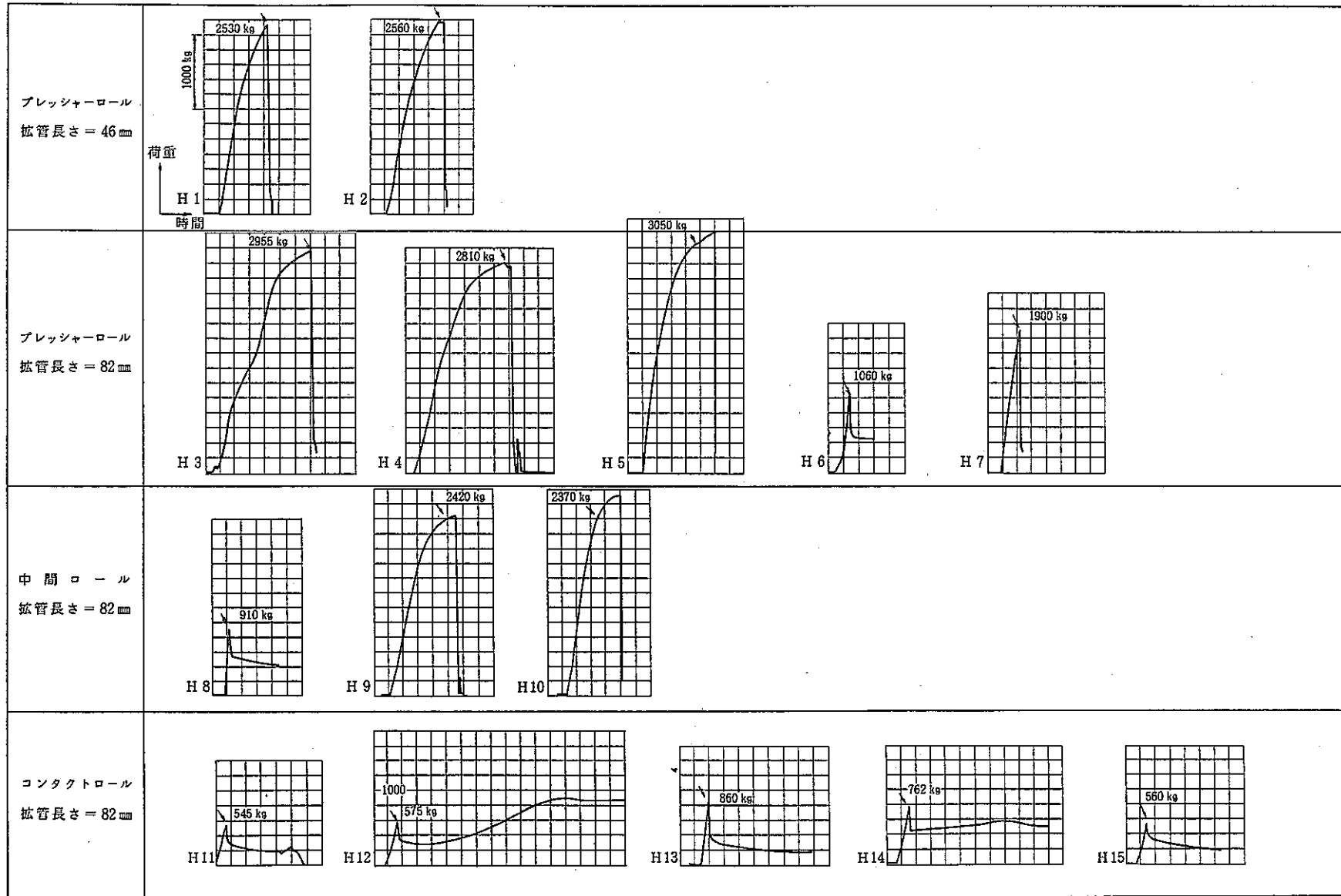


図 6. 5. 2 (a) 管の引き抜き試験における荷重-時間曲線 (多孔板)

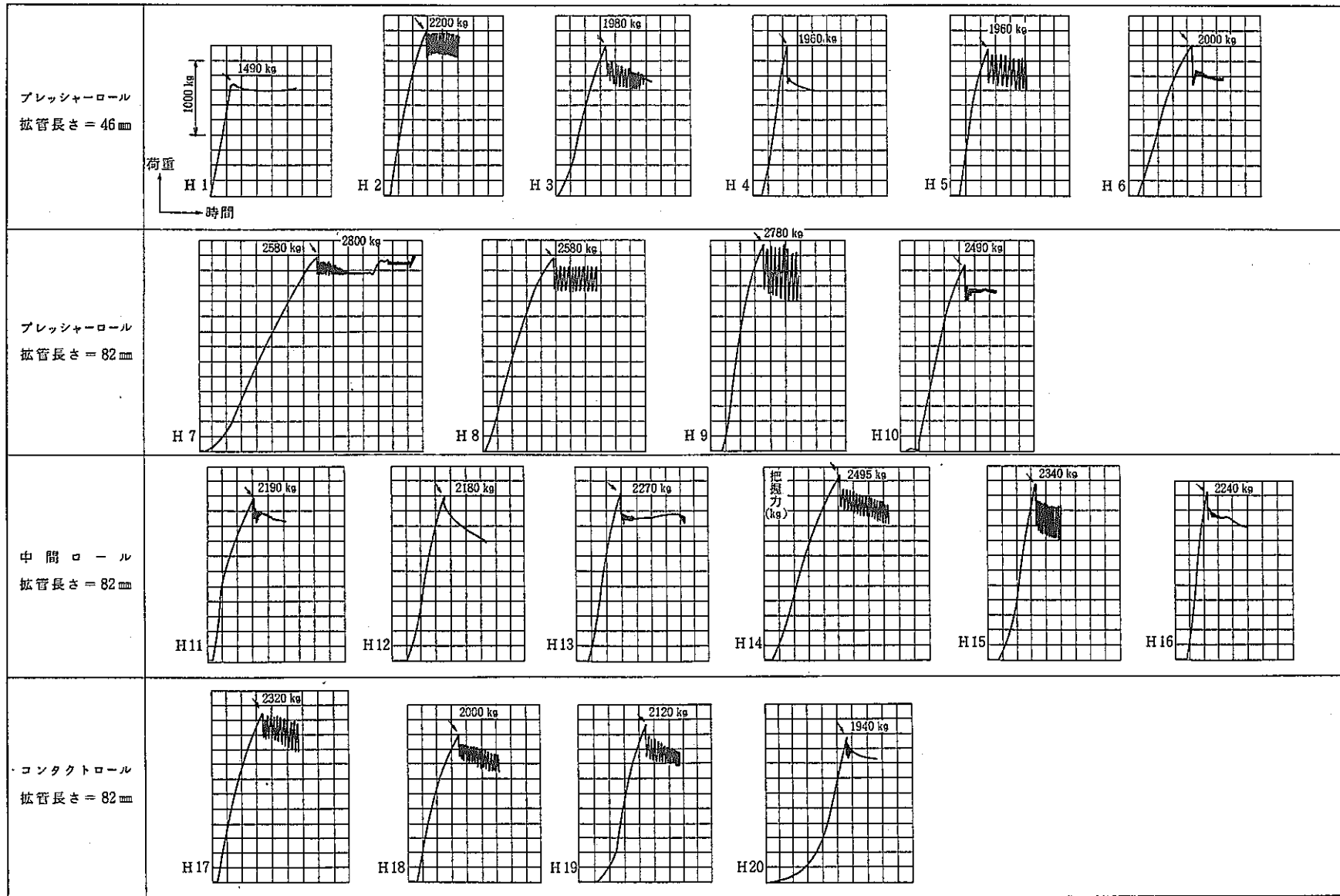


図 6. 5. 2 (b) 管の引き抜き試験における荷重-時間曲線 (対比用)

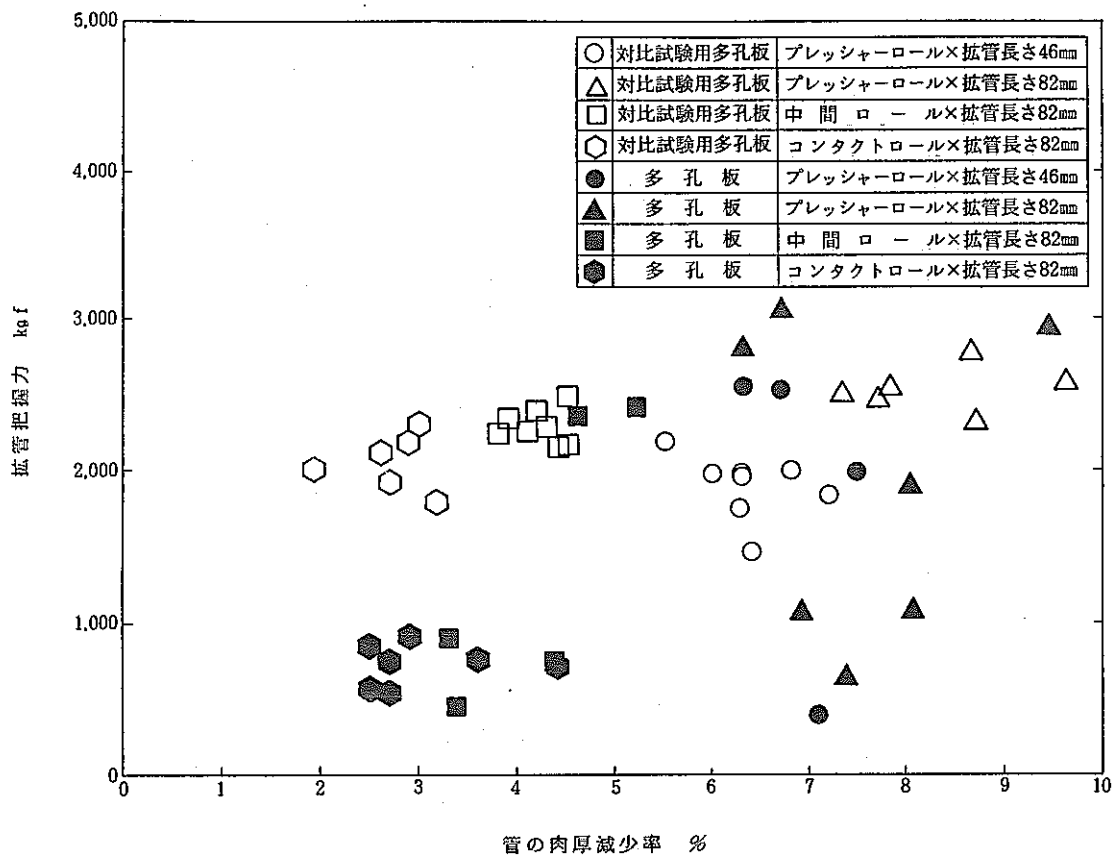


図 6. 5. 3 管の肉厚減少率と拡管把握力の関係

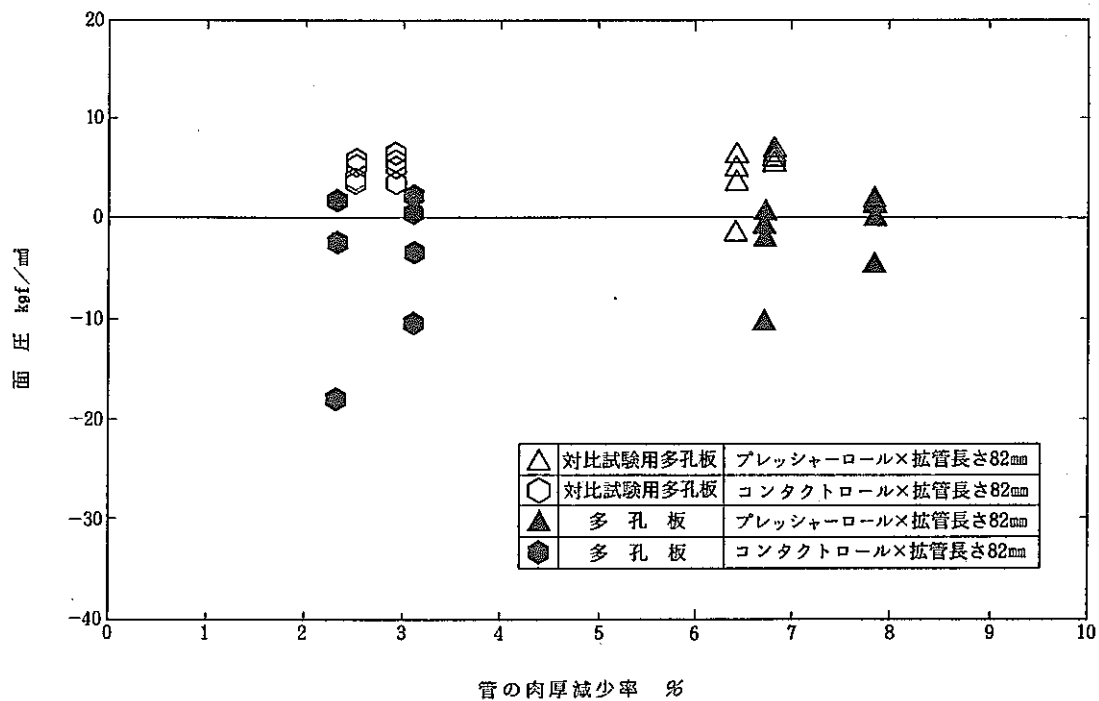
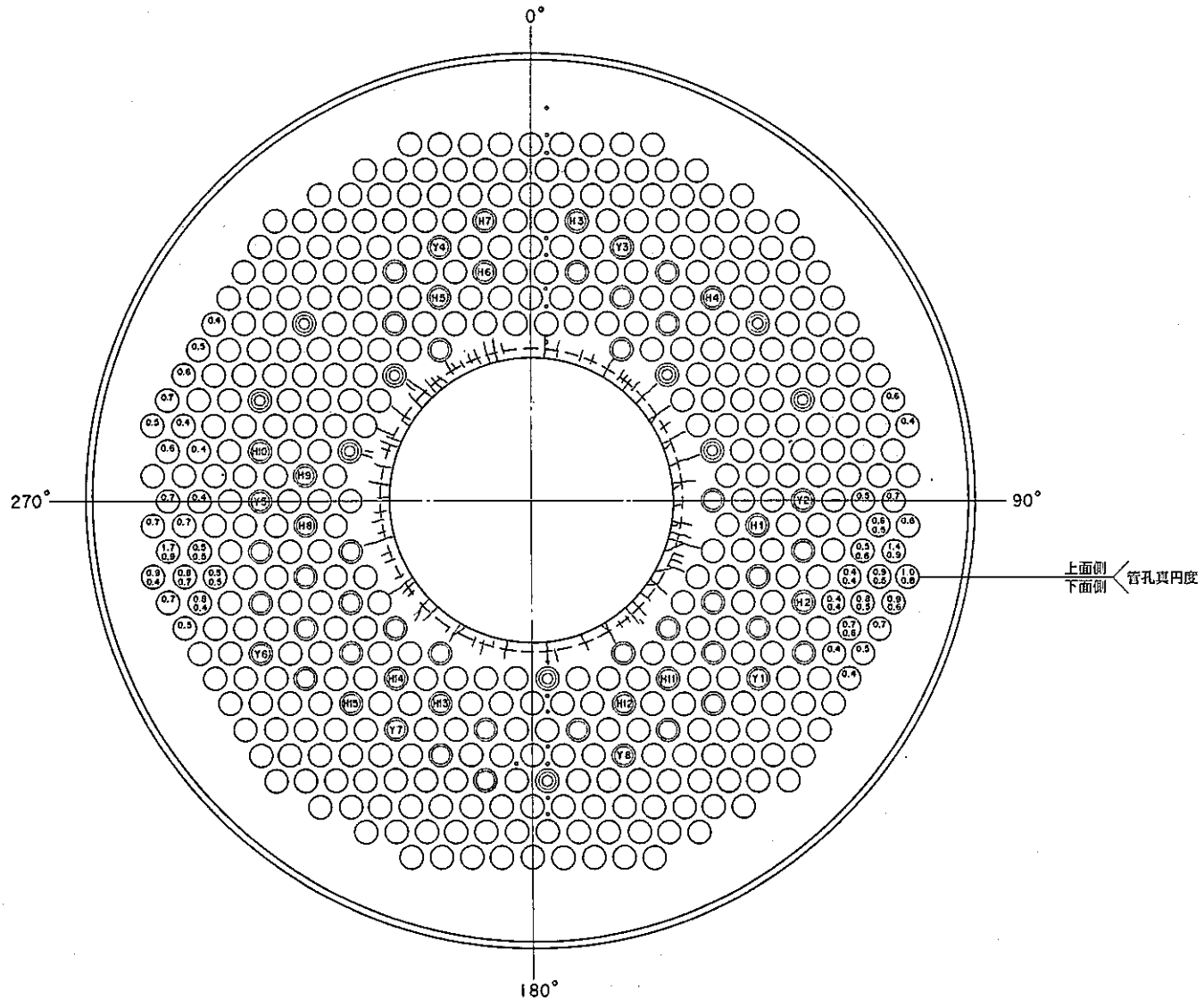


図 6. 5. 4 管の肉厚減少率と面圧値の関係



管 番 号	拡管把握力 kgf	拡管条件
Y 1	375	PS
Y 2	1960	PS
Y 3	1070	PL
Y 4	630	PL
Y 5	720	IL
Y 6	450	IL
Y 7	730	CL
Y 8	900	CL
H 1	2530	PS
H 2	2560	PS
H 3	2955	PL
H 4	2810	PL
H 5	3080	PL
H 6	1060	PL
H 7	1900	PL
H 8	910	IL
H 9	2420	IL
H10	2370	IL
H11	545	CL
H12	575	CL
H13	860	CL
H14	760	CL
H15	560	CL

P : プレッシャーロール
 L : 中間ロール
 C : コンタクトロール
 S : 拡管長さ 46mm
 L : 拡管長さ 82mm

図 6. 5. 5 管孔変形と拡管把握力の関係

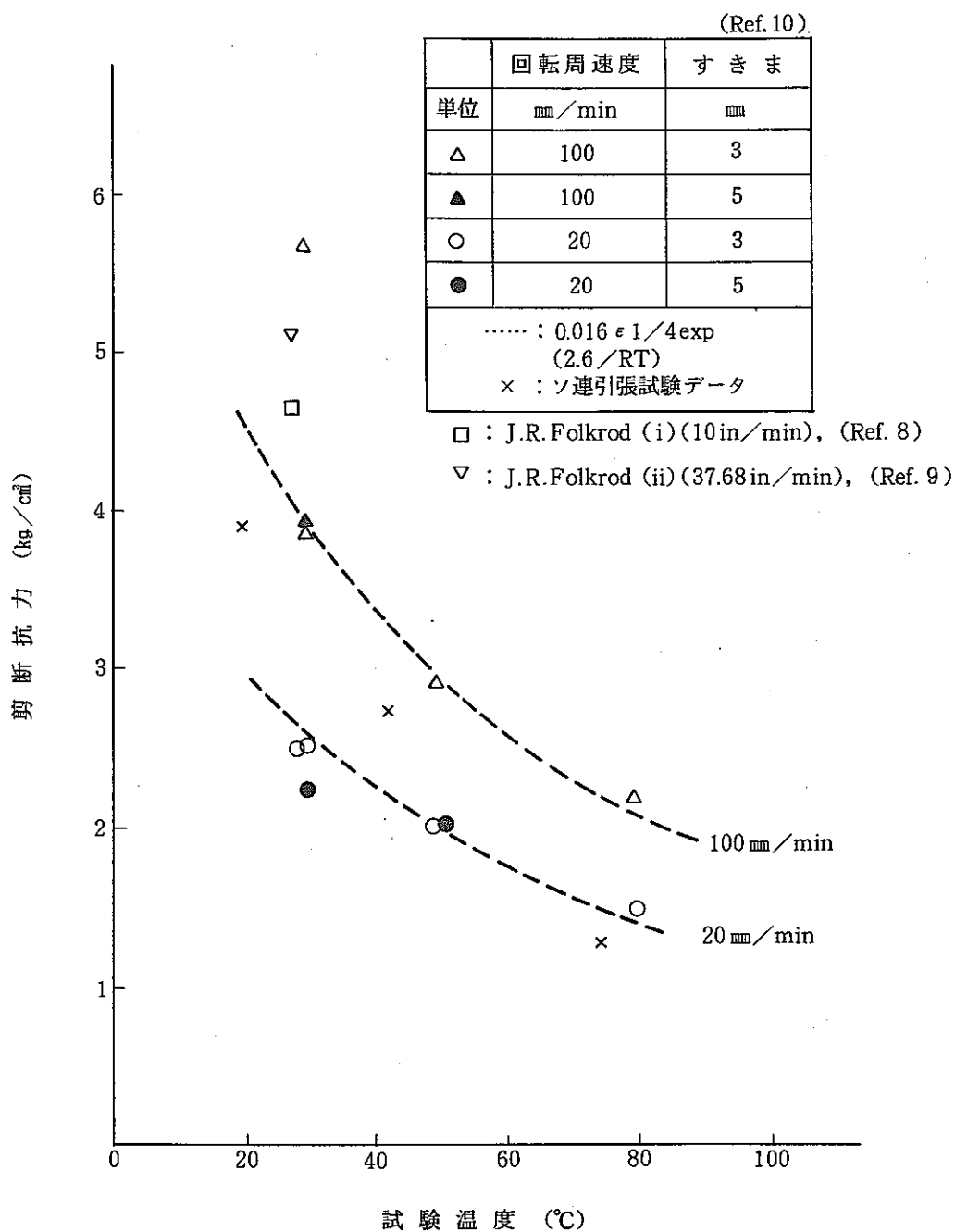
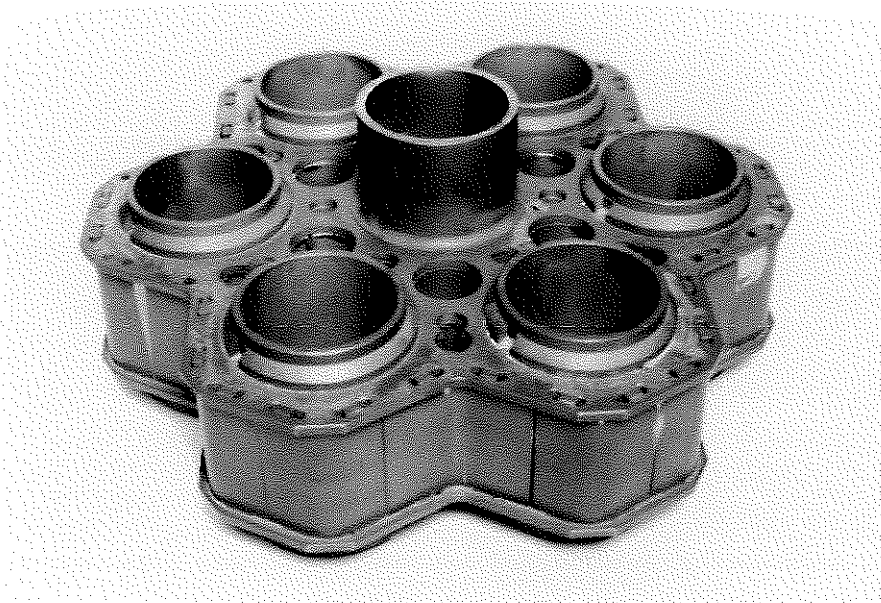
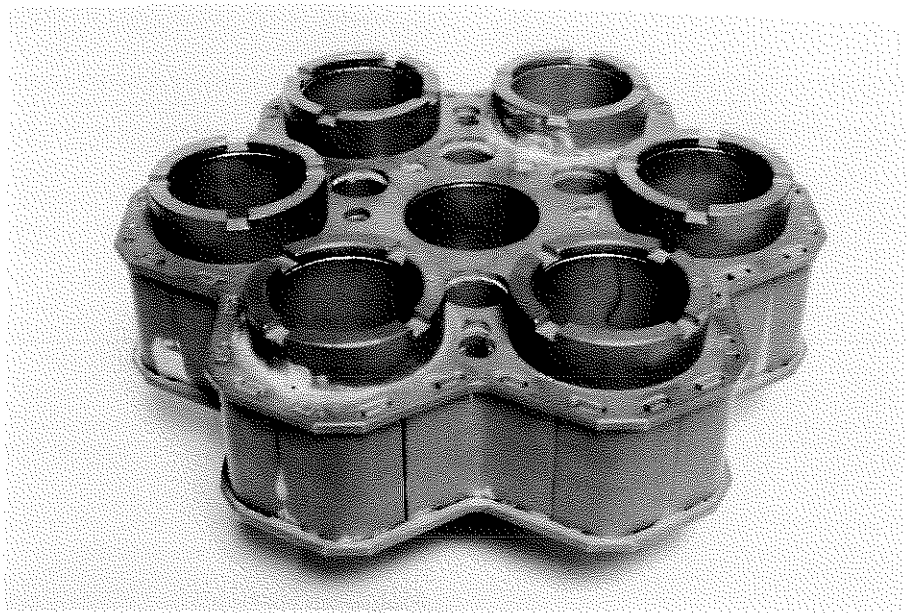


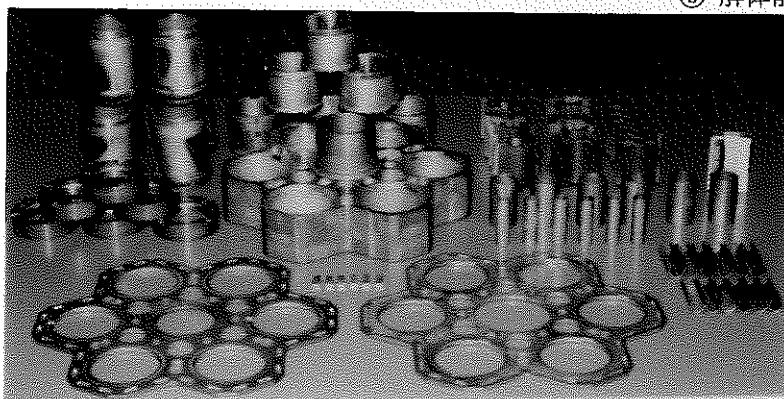
図 6. 5. 6 剪断抗力の温度依存性 (フリーズシールバルブの特性データ)



㉑ 解体前 その1



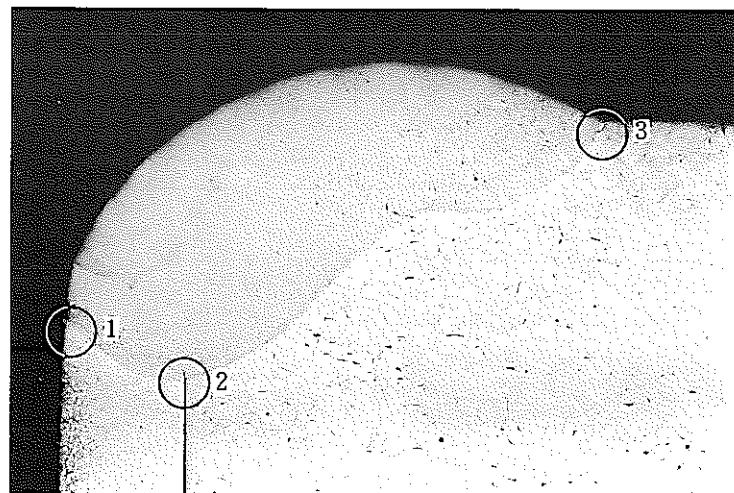
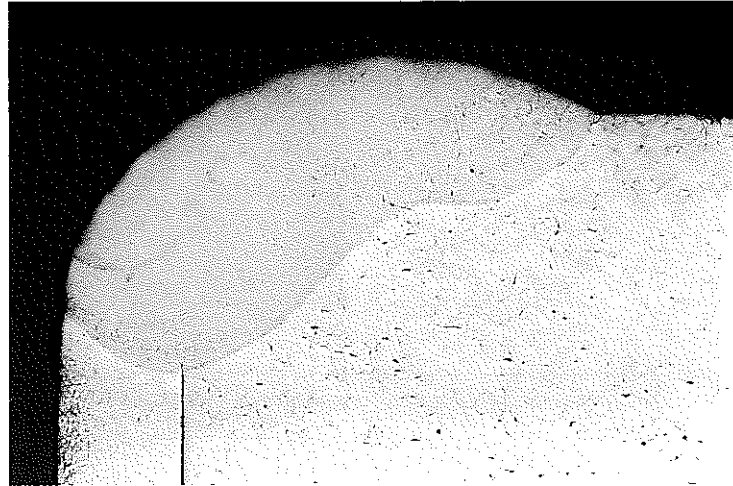
㉒ 解体前 その2



㉓ 解体後 (全部品)

写真 6.5.1 整流装置分解前後の外観

試料No ; G2-d 拡管条件 ; プレッシャーロール 46mm 溶接条件 ; 二層



拡大観察位置

写真 6. 5. 2 (a) 管 - 多孔板溶接部の縦断面(1)

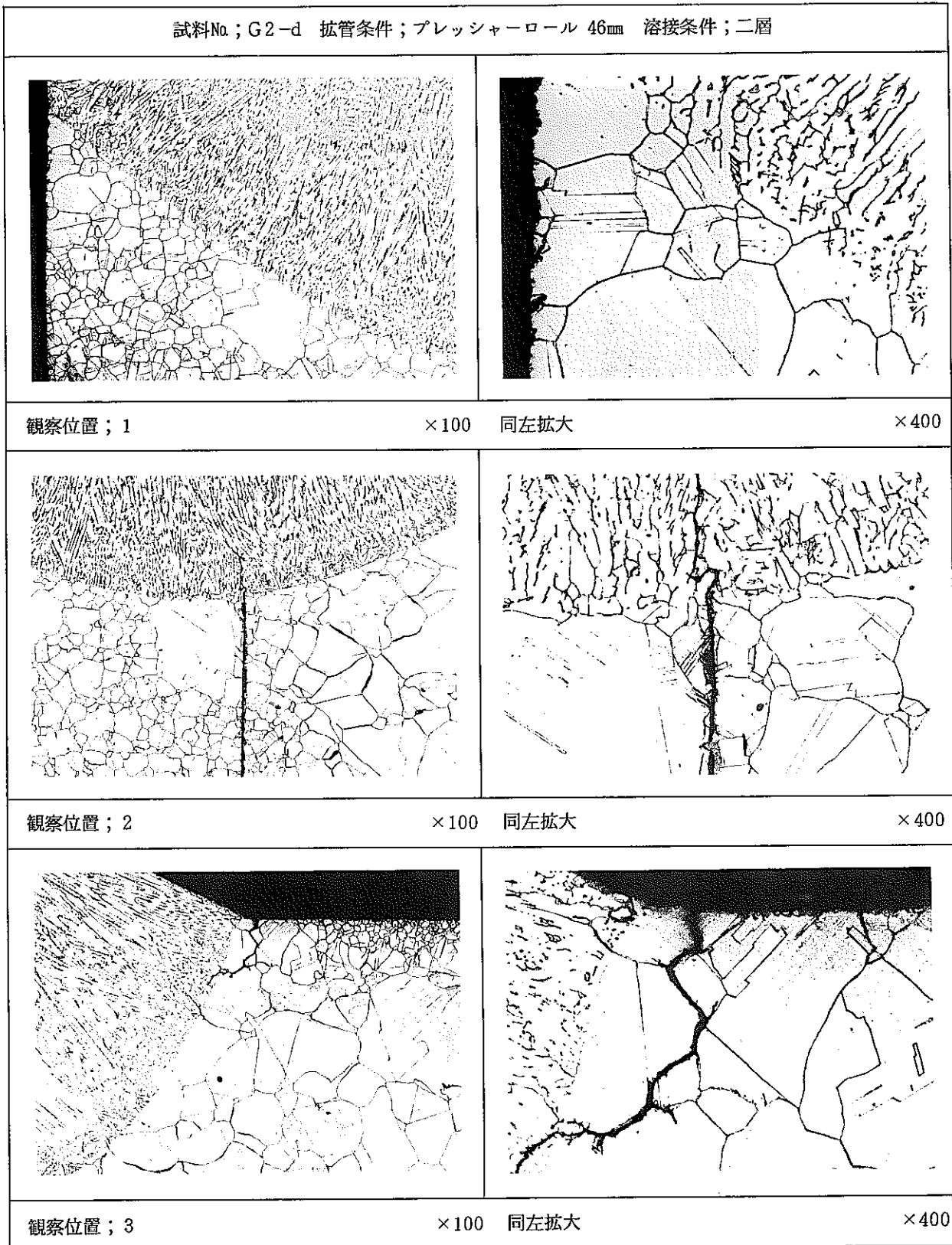
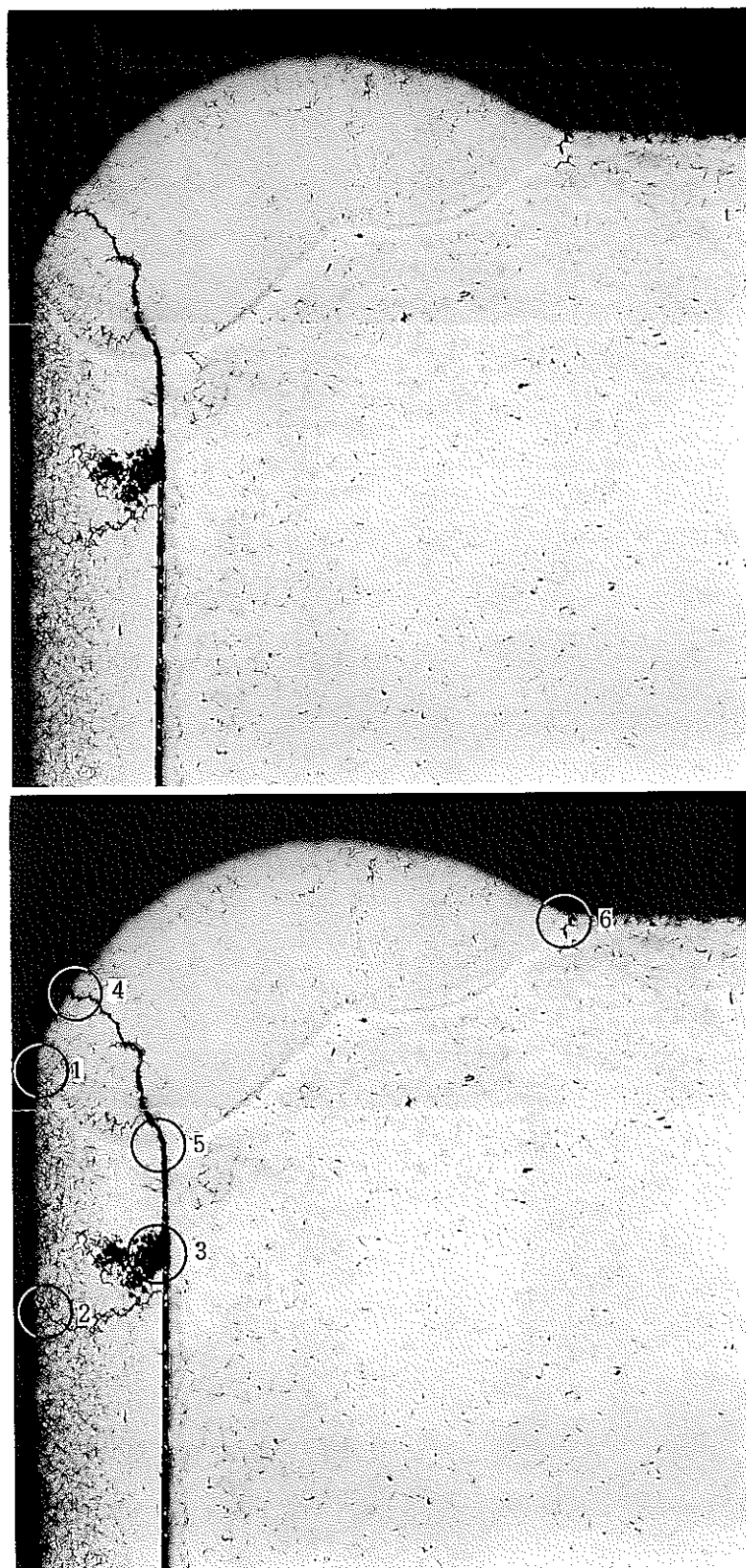


写真 6. 5. 2 (b) 管 - 多孔板溶接部の縦断面(2)

試料No ; G 3内-a 拡管条件 ; プレッシュャーロール82mm 溶接条件 ; 一層



拡大観察位置

写真6.5.2 (c) 管-多孔板溶接部の縦断図(3)

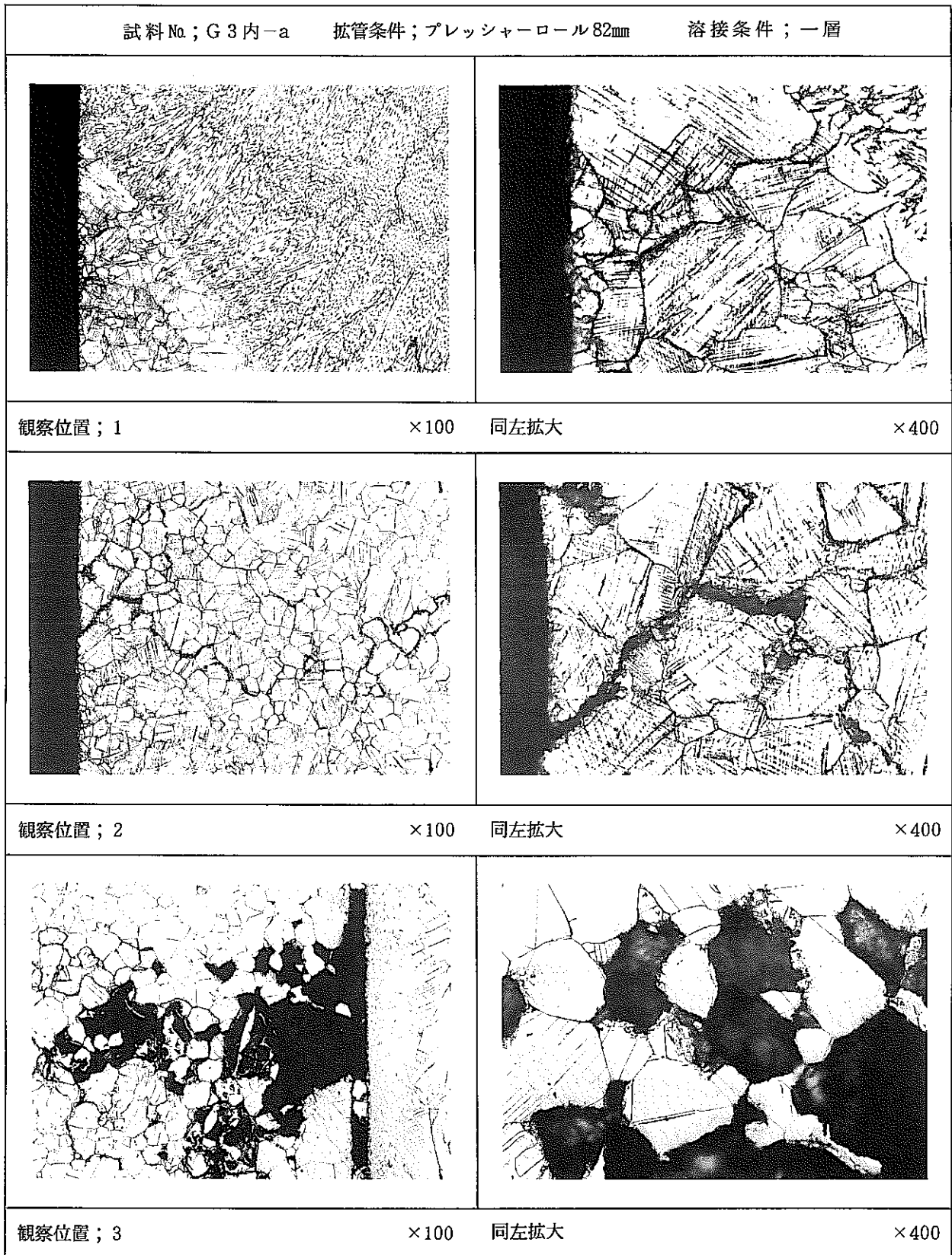
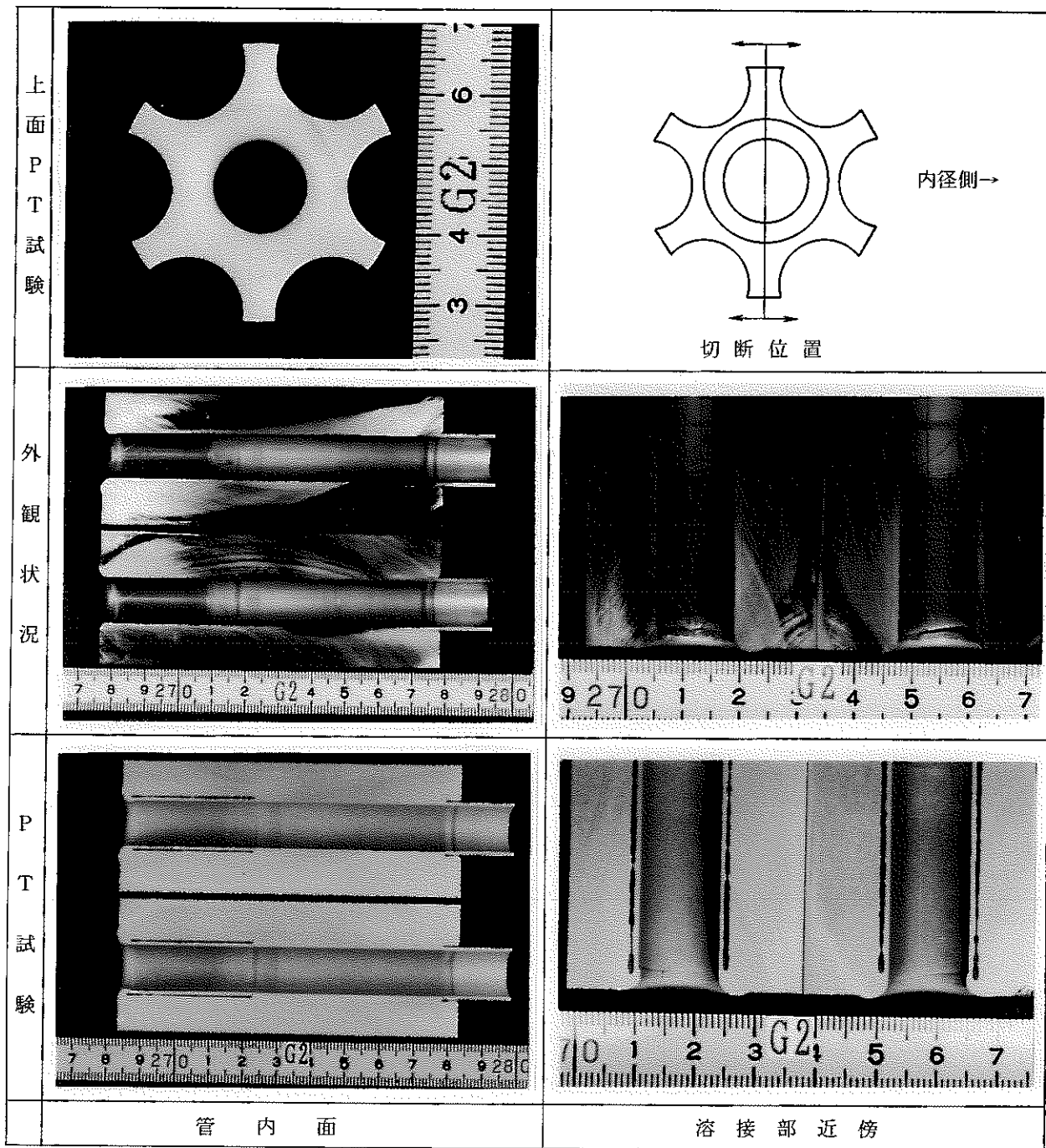
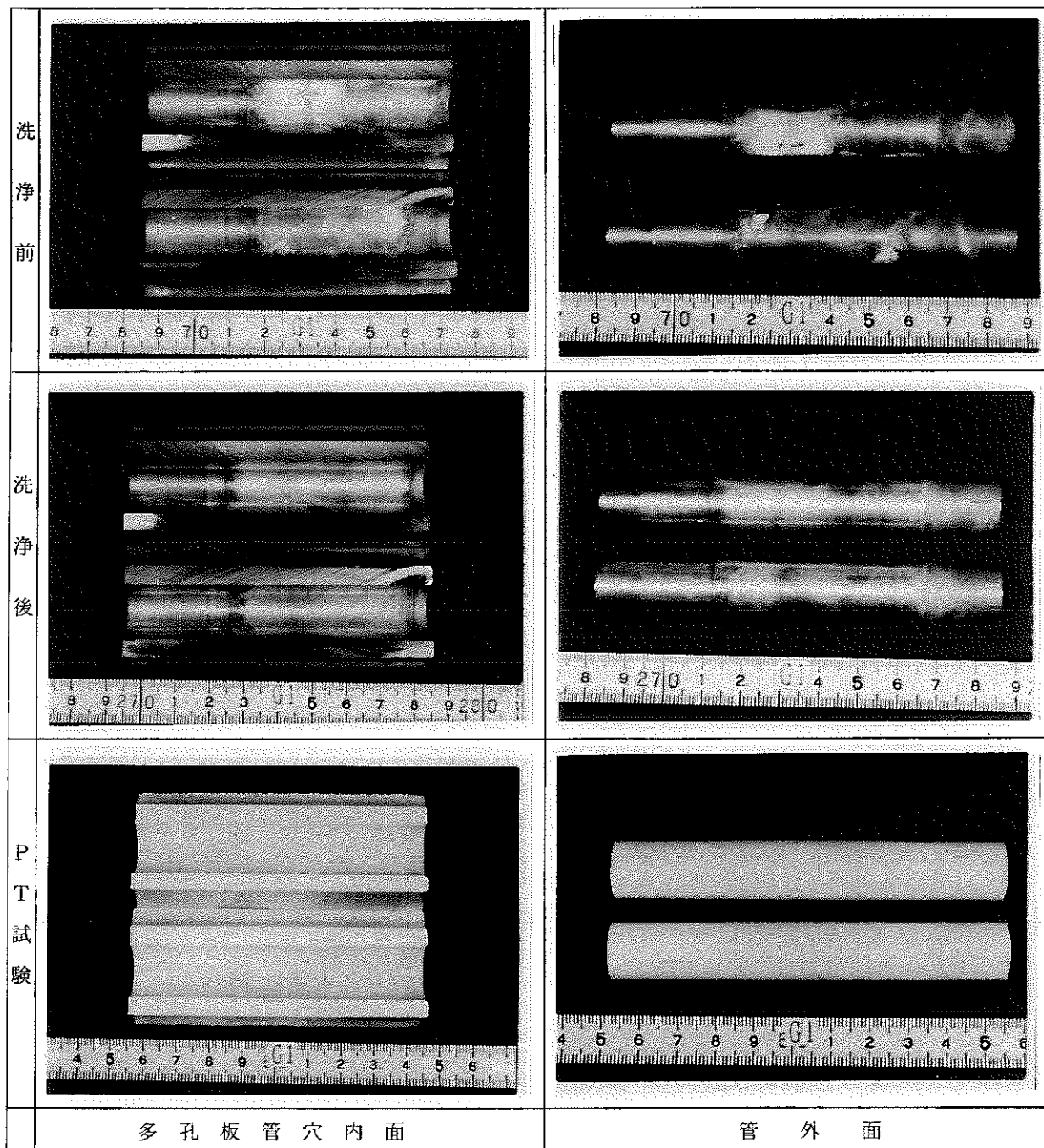


写真 6.5.2 (d) 管-多孔板溶接部の縦断図(4)



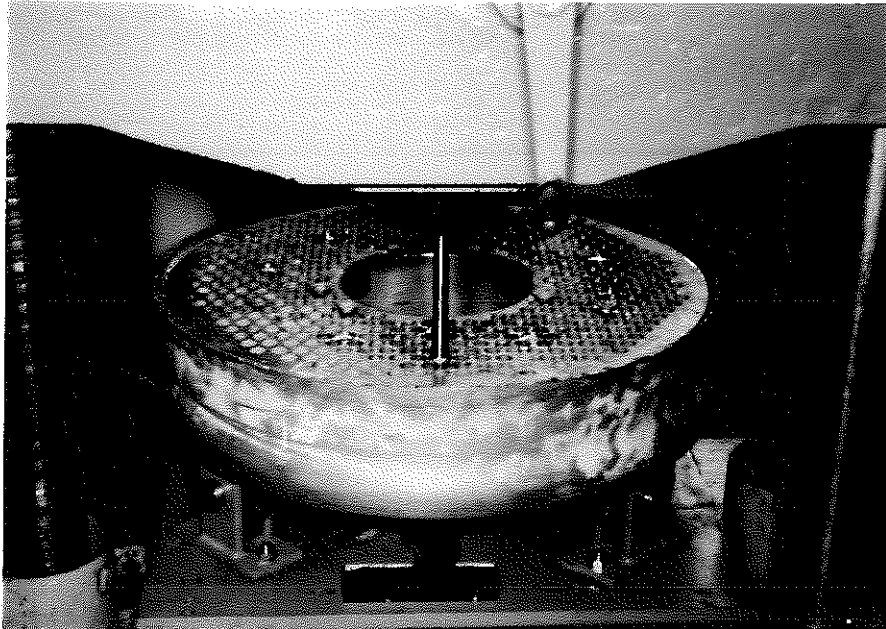
試料No ; G2 拡管条件 ; プレッシャーロール 46mm 溶接条件 ; 二層

写真 6. 5. 3 管 - 多孔板縦断面の状態

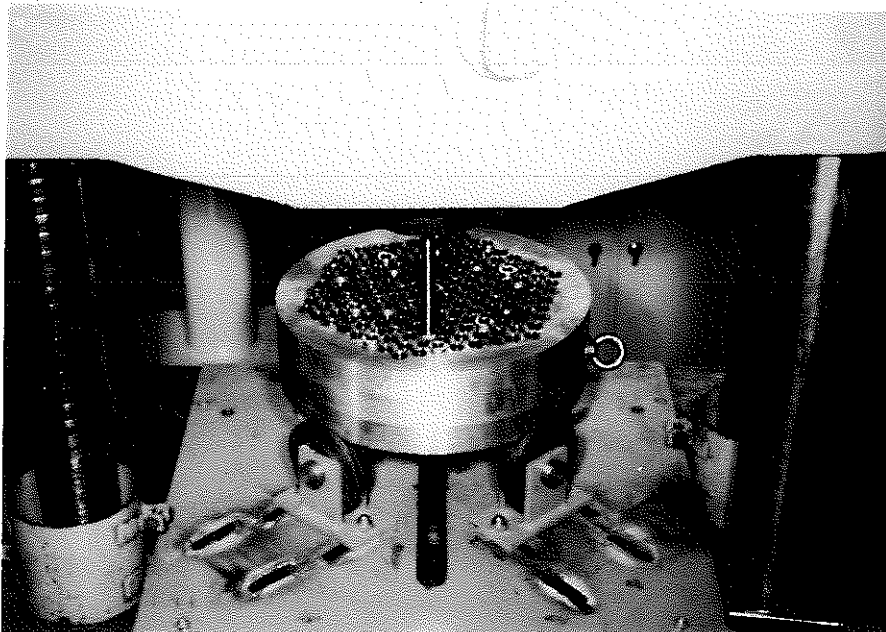


(試料No ; 1G 拡管条件 ; プレッシャーロール46mm 溶接条件 ; 一層)

写真 6. 5. 4 管 - 多孔板接触面の状態



㊶ 拡管把握力試験（供試体多孔板）



㊷ 拡管把握力試験（対比用多孔板）

写真 6. 5. 5 拡管把握力試験の実施状況

6.6 解体検査結果のまとめ

温度 600℃と 250℃のナトリウムによる熱過渡を 833回繰り返し負荷した供試体を解体し、表面、断面のPTおよび光学顕微鏡や走査型電子顕微鏡による観察を行った。その結果について以下にまとめる。

- (1) 供試体の各強度評価部位には周、縦、亀甲状および放射状の有意なき裂が生じた。これらのき裂は、進展形態が主に粒界割れ、破面形態が主にロックキャンディー状と、いずれもクリープ疲労特有のものであった。
- (2) 供試体外部胴の周・縦溶接部にはき裂が内面の溶接線に沿って生じた。ただし、熱抵抗体が内装され且つ内筒・多孔板によりナトリウムスタグナント部を形成する中間胴部の周・縦溶接部にき裂は生じなかった。
- (3) 出口ノズルのコーナー近傍に設けた擬似欠陥部のき裂の有無は、これと同等位置の無欠陥部のき裂の有無に対応していた。しかし、き裂の表面長さは擬似欠陥部の方が無欠陥部に生じたき裂よりも長い傾向にあり、また、深さ方向への進展量は顕著なものであった。
- (4) 外部胴上下周溶接部および縦溶接部では、溶接線に沿ってその両側に生じたき裂の進展具合に顕著な差が観られた。この差はき裂相互の干渉による（応力解放）ものと思われるが、溶接止端部の形状不連続性に注目してその断面形状を比較した結果、き裂進展量の顕著な側で形状不連続性が大きく、これに起因していると考えられる。
- (5) 整流装置は高速原型炉もんじゅの炉心上部機構の整流装置部の一部を模擬したものであるが、ガタもなくまた、容易に分解することができ、また、き裂や顕著な歪みもなく、本試験条件内では熱過渡に対する健全性を示した。
- (6) 熱過渡の有無による拡管把握力の大小関係は、押出試験の結果からはばらつきが大きく明確でなかったが、拡管歪み測定から面圧を算出して比較した結果では、熱過渡を受けていない対比用の管よりも熱過渡を受けている本供試体多孔板の管の方が低い傾向を示した。
- (7) 管-多孔板溶接部には表面、内側ノッチ部ともにき裂が生じていた。特に内側ノッチ部は、多孔板と管の熱伝達特性が異なる部分であることから熱過渡による応力が生じるのみでなく、その形状から応力拡大効果を有すると予想される。接合面である管外面と多孔板内面に腐食等は無かった。
- (8) 熱抵抗体は内胴縦溶接部が変形していたとともに、そこに板厚貫通き裂が生じておりナトリウムが流入していた。このことから、試験期間全体に渡る性能確認はできなかった。

7. ま と め

熱応力緩和構造(2)供試体に 833サイクルの熱過渡を与えた熱過渡強度試験の結果および得られた知見を以下に示す。

- (1) 解体検査結果から、入口ノズル、上部スカート、板厚不連続部、Yピース、胴板接合部、支持スカート、出口ノズルの強度試験対象部に有意なクリープ疲労強度データが得られた。そのほとんどが粒界割れであった。
- (2) 整流装置は、各構成部品ともき裂や有意な変形が無く、熱過渡に対して影響を受けず健全であった。
- (3) 拡管把握力について、熱過渡を受けた本供試体と熱過渡を受けていない対比用試験片の両者を比較したところ、管の引き抜き試験では管と多孔板の接合面に付着したナトリウムの影響によると思われるばらつきが大きく、明確な傾向は表れなかったが、ひずみ測定試験では熱過渡を受けていない対比用試験片の方が低い傾向を示した。
- (4) 管-多孔板溶接部には表面、内側ノッチ部共き裂が生じていた。管-多孔板接合面（管外面および多孔板内面）にはナトリウムが付着していたが腐食はなかった。
- (5) 熱抵抗体には局部的な変形とともにそこに貫通き裂が生じており、内部にナトリウムが浸漬していた。き裂破面にはビーチマーク状の跡がみられることからき裂は熱過渡により生じたと推定される。き裂の貫通は、温度データから 300～ 350サイクル間に起こったものと考えられる。
- (6) 試験終了時に室温状態にて、上部スカートおよび支持スカートの付け根のYピース部について超音波探傷試験を実施し欠陥を確認した。このときの欠陥指示エコーから-6dbドロップ法によりき裂深さを評定したが、解体検査において液体浸透探傷試験により確認した結果に対し1mm以上大きめの値であった。これによりYピースの特殊構造にもかかわらず、クリープ疲労で生じた0.5mm程度の微小なき裂を捉えることは可能だが、深さを評定するまでには至らない、といえる。

8. 謝 辞

本供試体の製作および解体検査は(株)東芝で実施された。同社大坪徹氏をはじめ関係各位に感謝致します。超音波探傷試験は(株)瑞豊産業に実施して頂いた。五味伸広氏に感謝致します。

本試験は大洗工学センターナトリウム機器構造第一試験室に設置された構造物強度確性試験施設を用いて実施した。当該建屋を管理されている機器システム開発室の中本香一郎室長、運転管理班の方々および直接装置の運転、試験データの集録、処理、整理を担当して下さった富田光氏はじめ常陽産業(株)直員の方々並びに田中宏氏に御尽力を頂いた。また、当室の笠原直人氏、木村公隆氏（現(株)東芝）には試験および検査全般に渡り助言して頂いた。ここに感謝致します。

参考文献

- (1) 中西他；構造物強度確性試験施設の概要
PNC SN941 84-170 1984.12
- (2) 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 ZN9410 86-009 1986.1
- (3) 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 1986.4
- (4) 渡士他；原子炉容器モデル熱過渡強度試験 第7報 超音波探傷およびAEによる探傷
PNC ZN9410 86-100 1986.8
- (5) 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 87-169 1987.12
- (6) 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 89-170 1989.6
- (7) 木村他；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
PNC SN9410 89-088 1989.6
- (8) ANST. 1972-6 Annul Meeting, Las Vegas Vol.15 No.1,p236~237
Study of Shear Stress of Sodium for Design of Freeze-Seal Valves.
J.R.Folkrod, Balafhadra Misra(ANL)
- (9) ANST. 1973-2, p185, Rotary-Motion Shear Properties of Sodium Freeze Seals
Comparison with Linear-Motion Sheals.
J.R.Folkrod, B.misra, R.R.Rohda(ANL)
- (10) A.V.Drobyshev, Yu.I.Likhochev & I.M.Saratov : Frozen Sodium Seals.
NASA TTF 522 p412 ~436, 1969