

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

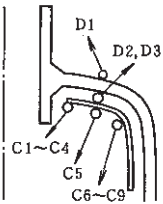
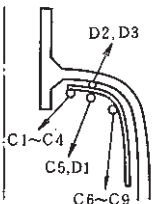
1986年4月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに配布するものです。ついては供覧、複製、転載、引用等を絶対に行わないよう厳重に管理して下さい。なお、開示制限が解除になった場合は、その旨通知しますが、それ以前に関連業務が終了した場合は直ちに返却して下さい。

PNC ZN9410 86-035 原子炉容器モデル熱過渡強度試験

正誤表

ページ	行	変更前	変更後	備考
i	10	過熱	熱過	
i	14	染色浸透	浸透探傷	
i	15	ト	ド	
7	6	—	C-1	追加
8	23	H 6	EC-1	
8	28	H 4	EC-2	
10	8	ン	ス	
12	11	ウ	ワ	
16	18	伝用	伝達用	
31				
135	4	偏所	偏析	
148	2	Fig. 4.6	Fig. 4.7	
148	4	(A)	(A点)	
193	7	き亀	き裂	

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

渡士克己* 金沢誠一* 梅田寿雄*
石崎公人* 中西征二* 今津 彰*

要 旨

本報告書は高速炉高温構造設計方針に定められているクリープ疲労強度の評価手法の裕度を定量的に把握する目的で構造物強度確性試験施設を用いて、原型炉の原子炉容器相当材及び施工法にて製作したまゆ型容器状の供試体を用いて実施した繰返し熱過渡強度試験の試験内容と、試験後の供試体の解体検査結果について述べたものである。得られた主要な結果を以下に示す。

- (1) 供試体に250℃のナトリウムを15分間、600℃のナトリウムを105分間流入させる過熱度サイクルを連続で1002サイクルまで繰返した。
- (2) 1002サイクルの時点で試験を休止し、供試体中を200℃のナトリウムが流動している状態で超音波探傷を実施し、欠陥指示が確認できたので、その時点で試験を終了した。
- (3) 供試体の撤去、洗浄、解体を行い、染色浸透試験を実施した結果、出入口ノズル、計装ノズル、胴部及びライナースタット部に周方向、半径方向又は亀甲状のき裂が入っていた。
- (4) 各き裂の代表部から試験片を切り出し、光学顕微鏡による観察及び走査電子顕微鏡による破面及びその断面を観察した結果、破面の殆んど全てが粒界であること、ストライエーションの認められる場所は非常に少いこと及びストライエーションの間隔は1 μ m程度であることがわかった。
- (5) き裂の深さは板厚40mmの胴部や鏡部で20～30mm程度あり、ストライエーションの間隔と熱過渡1サイクルが対応しないことがわかった。

本報告書に示した試験データは、今後の流動・伝熱・応力解析及び高速炉設計方針の裕度の実証に用いられる予定でありそれらの成果については続報にて報告する。

*大洗工学センター，構造工学室

April 1986

Thermal Transient Strength Test of Reactor Vessel Model

Thermal Transient Strength Test

K. Watashi*, S. Kanazawa*, H. Umeda*

K. Ishizaki*, S. Nakanishi*, and A. Imazu*

Abstract

This report describes the thermal transient strength test results of the MONJU reactor vessel model, which purpose is to verify the safety margin for creep-fatigue failure described in the MONJU Design Guide, The main results are as follows.

- (1) The testing model was subjected to cyclic hot and cold shocks (250°C \pm 600°C) during 15 min. After each hot shock the model was holded at 600°C for 105 min.
- (2) The thermal transient test was stopped at 1002 cycles, then ultrasonic examination was performed at 200°C and many indications were observed. This test was ended at that time.
- (3) The test model was removed, cleaned, cut into some parts, then many circumferential, axial and craze cracking were found on the surfaces of the testing model by dye penetrant test.
- (4) The observation by optical and scanning electron microscope clarified that the most of crack surfaces were intergranular, and striation area was very limited.
- (5) There was no correspondence with striation spacing of about 1 μ m and one thermal cycle, because crack depths were 10 \sim 30 mm.
- (6) The data described in this report will be used for flow-heat transfer-stress analysis and verification of the safety margin against creep-fatigue failure.

* Structural Engineering Section, O-Arai Engineering Center

目 次

1. ま え が き	1
2. 試 験 方 法	2
2.1 試 験 施 設 と 試 験 方 法	2
2.1.1 試 験 施 設 の 概 要	2
2.1.2 装 置 の 全 体 仕 様	3
2.1.3 各 機 器 の 主 要 仕 様	6
2.1.4 試 験 方 法	10
2.2 供 試 体	13
2.3 試 験 条 件	13
2.4 データ集録	16
2.4.1 温 度 の 計 測	16
2.4.2 歪, 変 位 の 計 測	16
2.4.3 データ処理	16
2.5 非破壊検査	16
2.5.1 AE探傷	16
2.5.2 超音波探傷	29
2.6 試 験 経 過	29
3. 試 験 結 果	31
3.1 温 度 の 試 験 結 果	31
3.1.1 内 面 温 度	31
3.1.2 外 面 温 度	70
3.2 変 位	99
3.3 歪	99
4. 破 面 の 観 察 結 果	104
4.1 破 面 の 観 察 方 法	104
4.2 亀 裂 の 発 生 状 況	107
4.3 断 面 マ ク ロ 組 織 観 察	135

4.4	亀裂の発生位置と深さの分布	135
4.5	断面マイクロ組織観察	147
4.6	破面観察	147
5.	結 論	193
6.	謝 辞	194
	参考文献	195

List of Tables

Table 2.1	Test Conditions
Table 2.2	Test Schedule
Table 3.1	Time attained Temperature Difference 300°C
Table 3.2	Results of Radial Displacements
Table 4.1	Striation Spacing

List of Figures

Fig. 1.1	Position of This Report in This Study
Fig. 2.1	Flow Diagram of Sodium Loop
Fig. 2.2	Operating Flow Diagram
Fig. 2.3(a)	Configuration of Reactor Vessel Model
Fig. 2.3(b)	Correspondence of Reactor Vessel Model to Reactor Vessel
Fig. 2.4	Sodium Temperature Change in Inlet Piping
Fig. 2.5(a)	Location and Configuration of Thermocouples for Temperature Measurement in Reactor Vessel Model
Fig. 2.5(b)	Location and Configuration of Thermocouples for Temperature Measurement in Reactor Vessel Model
Fig. 2.6	Location of strain gauges
Fig. 2.7	Location of LVDT and details
Fig. 2.8	Flow Diagram of Strain, Displacement and Temperature Measurement and Data Aquisition System
Fig. 2.9	Attachment for Acoustic Emission sensor
Fig. 2.10	Location of AE sensor and Monitering Area
Fig. 2.11	Area of Ultrasonic Examination
Fig. 3.1.1-1	Temperature Change of Liner's Inner Surface of Upper Head
Fig. 3.1.1-2	Temperature Change of Liner's Inner Surface of Upper Head
Fig. 3.1.1-3	Temperature Change of Liner's Inner Surface of Upper Head
Fig. 3.1.1-4	Temperature Change of Liner of Upper Head
Fig. 3.1.1-5	Temperature Change of Liner's Inner Surface of Upper Part of Vessel
Fig. 3.1.1-6	Temperature Change of Liner's Inner Surface of Upper Part of Vessel

- Fig. 3.1.1-7 Temperature Change of Liner's of Upper Part of Vessel
- Fig. 3.1.1-8 Temperature Change of Liner's Inner Surface of Lower Part of Vessel
- Fig. 3.1.1-9 Temperature Change of Liner's Outer Surface of Lower Part of Vessel
- Fig. 3.1.1-10 Temperature Change of Liner's Inner Surface of Lower Part of Vessel
- Fig. 3.1.1-11 Temperature Change of Liner's Inner Surface of Lower Part of Vessel
- Fig. 3.1.1-12 Temperature Change of Liner's Outer Surface of Lower Part of Vessel
- Fig. 3.1.1-13 Temperature Change of Liner of Lower Part of Vessel
- Fig. 3.1.1-14 Temperature Change of Liner's Inner Surface of Lower Head
- Fig. 3.1.1-15 Temperature Change of Liner of Inner Surface of Lower Head
- Fig. 3.1.1-16 Temperature Change of Liner's Inner Surface of Lower Head
- Fig. 3.1.1-17 Temperature Change of Liner's Inner Surface of Lower Head
- Fig. 3.1.1-18 Temperature Change of Liner's Inner Surface of Lower Head
- Fig. 3.1.1-19 Temperature Change of Liner of Lower Head
- Fig. 3.1.1-20 Temperature Change of Inner Surface of Upper Part of Vessel
- Fig. 3.1.1-21 Temperature Change of Inlet Nozzle Outer Surface
- Fig. 3.1.1-22 Temperature Change of the Center of Outlet Nozzle
- Fig. 3.1.1-23 Temperature Change of Outlet Nozzle Inner Surface
- Fig. 3.1.1-24 Temperature Change of Outlet Nozzle Safeend
- Fig. 3.1.1-25 Temperature Change of Outlet Nozzle Safeend
- Fig. 3.1.1-26 Temperature Change of Outlet Nozzle Safeend
- Fig. 3.1.1-27 Temperature Change of Outlet Nozzle Safeend
- Fig. 3.1.1-28 Temperature Change of Outlet Nozzle Safeend along Axial Direction
- Fig. 3.1.1-29 Temperature Change of Outlet Nozzle Safeend along Axial Direction
- Fig. 3.1.1-30 Order of Thermal Transient
- Fig. 3.1.1-31 Temperature Change of the Center of Inlet Nozzle
- Fig. 3.1.1-32 Temperature Change of Inner Nozzle Safeend along Axial Direction
- Fig. 3.1.1-33 Temperature Change of Inner Nozzle Safeend along Axial Direction

- Fig. 3.1.1-34 Comparison of Temperature Change between Design Value and Experimental Data (cold shock)
- Fig. 3.1.1-35 Comparison of Temperature Change between Design Value and Experimental Data (hot shock)
- Fig. 3.1.2-1 Temperature Change of Inlet Nozzle Outer Surface
- Fig. 3.1.2-2 Temperature Change of Inlet Nozzle Outer Surface
- Fig. 3.1.2-3 Temperature Change of Inlet Nozzle Outer Surface
- Fig. 3.1.2-4 Temperature Change of Upper Head Outer Surface
- Fig. 3.1.2-5 Temperature Change of Upper Head Outer Surface
- Fig. 3.1.2-6 Temperature Change of Upper Head Outer Surface
- Fig. 3.1.2-7 Temperature Change of Upper Part of Vessel Outer Surface
- Fig. 3.1.2-8 Temperature Change of Upper Part of Vessel Outer Surface
- Fig. 3.1.2-9 Temperature Change of Upper Part of Vessel Outer Surface
- Fig. 3.1.2-10 Temperature Change of Lower Part of Vessel Outer Surface
- Fig. 3.1.2-11 Temperature Change of Lower Part of Vessel Outer Surface
- Fig. 3.1.2-12 Temperature Change of Lower Part of Vessel Outer Surface
- Fig. 3.1.2-13 Temperature Change of 3-Pieces Junction Outer Surface
- Fig. 3.1.2-14 Temperature Change of 3-Pieces Junction Outer Surface
- Fig. 3.1.2-15 Temperature Change of Lower Head Outer Surface
- Fig. 3.1.2-16 Temperature Change of Lower Head Outer Surface
- Fig. 3.1.2-17 Temperature Change of Outlet Nozzle Outer Surface
- Fig. 3.1.2-18 Temperature Change of Outlet Nozzle Outer Surface
- Fig. 3.1.2-19 Temperature Change of Outlet Nozzle Outer Surface
- Fig. 3.1.2-20 Temperature Change of Outlet Nozzle Safeend Outer Surface along Axial Direction
- Fig. 3.1.2-21 Temperature Change of Outlet Nozzle Safeend Outer Surface along Axial Direction
- Fig. 3.1.2-22 Temperature Change of Skirt
- Fig. 3.1.2-23 Temperature Change of Skirt
- Fig. 3.1.2-24 Temperature Change of Base Plate
- Fig. 3.1.2-25 Temperature Change of Middle Stand Upper Surface
- Fig. 3.1.2-26 Temperature Change of Middle Stand Body
- Fig. 3.1.2-27 Temperature Change of Outer Surface along Axial Direction
- Fig. 3.1.2-28 Temperature Change of Outer Surface along Axial Direction
- Fig. 3.2 Displacement of Inlet Nozzle Outer Surface
- Fig. 3.3-1 Strain of Upper Part of Vessel Outer Surface

Fig. 3.3-2	Strain of Lower Part of Vessel Outer Surface
Fig. 3.3-3	Strain of 3-Pieces Junction Outer Surface
Fig. 4.1	Cutting out of test specimen
Fig. 4.2	Crack Distributions of Inlet Nozzle
Fig. 4.3	Crack Distributions of Upper Part of Vessel
Fig. 4.4	Crack Distributions of Lower Head and Outlet Nozzle
Fig. 4.5	Crack Distributions of Stud Bolt and Instrumental Nozzle
Fig. 4.6	Crack Propagation in the Granular Media
Fig. 4.7	Image of Crack Propagation Pattern

List of Photograph

Photo. 4.1	Results of Liquid Penetrant Test of Outer Surface of Reactor Vessel Model
Photo. 4.2	Results of Liquid Penetrant Test of Inlet Nozzle
Photo. 4.3	Results of Liquid Penetrant Test of Inner Surface of Vessel
Photo. 4.4	Results of Liquid Penetrant Test of Inner Surface of Lower Head and 3-Pieces Junction
Photo. 4.5	Results of Liquid Penetrant Test of Inner Part of Outlet Nozzle Safe-end
Photo. 4.6	Results of Liquid Penetrant Test of Inner Surface of Outlet Nozzle
Photo. 4.7(a)	Results of Liquid Penetrant Test of Stud Bolt of Upper Part of Vessel
Photo. 4.7(b)	Results of Liquid Penetrant Test of Stud Bolt of Lower Part of Vessel
Photo. 4.7(c)	Results of Liquid Penetrant Test of Stud Bolt of Upper Head
Photo. 4.7(d)	Results of Liquid Penetrant Test of Stud Bolt of Lower Part of Vessel
Photo. 4.8	Results of Liquid Penetrant Test of Inner Surface of Instrumental Nozzle
Photo. 4.9	Results of Liquid Penetrant Test of Liner of Lower Head
Photo. 4.10	Macroscopic Profiles of Inner Nozzle (0°, 180°)
Photo. 4.11	Macroscopic Profiles of Upper Head and Vessel (0°)

- Photo. 4.12 Macroscopic Profiles of Upper Head and Upper Part of Vessel (220°)
- Photo. 4.13 Macroscopic Profiles of 3-Pieces Junction and Lower Head (0°, 180°)
- Photo. 4.14 Macroscopic Profiles of Outlet Nozzle (180°)
- Photo. 4.15 Macroscopic Profiles of Liner Stud Bolt
- Photo. 4.16 Macroscopic Profiles of Instrumental Nozzle (180°)
- Photo. 4.17 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Inlet Nozzle (0°)
- Photo. 4.18 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Inlet Nozzle (0°)
- Photo. 4.19 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Inlet Nozzle (180°)
- Photo. 4.20 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Inlet Nozzle (180°)
- Photo. 4.21 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Weld of Upper Head and Upper Part of Vessel (0°)
- Photo. 4.22 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Thinning Portion
- Photo. 4.23 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Upper Head (220°)
- Photo. 4.24 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Upper Head and Upper Part of Vessel (220°)
- Photo. 4.25 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Upper Part of Vessel (220°)
- Photo. 4.26 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Thinning Portion (I-1-D)
- Photo. 4.27 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Upper Part of Vessel (220°)
- Photo. 4.28 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Weld of Upper and Lower Part of Vessel (0°)
- Photo. 4.29 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Lower Part of Vessel
- Photo. 4.30 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Lower Part of Vessel along circumferential direction
- Photo. 4.31 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Lower Part of Vessel (0°)

- Photo. 4.32 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Weld of Lower Part of Vessel and 3-Pieces Junction (0°)
- Photo. 4.33 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Weld of 3-Pieces Junction and Lower Head (0°)
- Photo. 4.34 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Weld of 3-Pieces Junction and Lower Head (180°)
- Photo. 4.35 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Outlet Nozzle
- Photo. 4.36 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Outlet Nozzle Safe-end (180°)
- Photo. 4.37 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Weld of Upper Part of Vessel Liner Stud Bolt (30°)
- Photo. 4.38 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Weld Lower Part of Vessel Liner Stud Bolt (30°)
- Photo. 4.39 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Instrumental Nozzle (180°)
- Photo. 4.40 Macroscopic Profiles of Cracks Initiated at the Inlet Nozzle (0°, 180°)
- Photo. 4.41 Macroscopic Profiles of Cracks Initiated at the Upper and Lower Part of Vessel and 3-Pieces Junction
- Photo. 4.42 Macroscopic Profiles of Cracks Initiated at the Upper and Lower Part of Vessel and 3-Pieces Junction
- Photo. 4.42 Macroscopic Profiles of Cracks Initiated at the Upper Head and Upper Part of Vessel
- Photo. 4.43 Macroscopic Profiles of Cracks Initiated at the Lower Part of Vessel
- Photo. 4.44 Macroscopic Profiles of Cracks Initiated at the Lower Head
- Photo. 4.45 Macroscopic Profiles of Cracks Initiated at the Instrumental Nozzle
- Photo. 4.46 Striation Patterns on Crack Surfaces of Inlet Nozzle (0°)
- Photo. 4.47 Striation Patterns on Crack Surfaces of Inlet Nozzle (180°)
- Photo. 4.48 Striation Patterns on Crack Surfaces of Inlet Nozzle (180°)
- Photo. 4.49 Striation Patterns on Crack Surface of Weld of Upper Head and Upper Part of Vessel
- Photo. 4.50 Striation Patterns on Crack Surface of Weld of Upper and Lower Part of Vessel (0°)

- Photo. 4.51 Striation Patterns on Crack Surface of Weld of Upper Head and Upper Part of Vessel (220°)
- Photo. 4.52 Striation Patterns on Crack Surface of Upper Part of Vessel (220°)
- Photo. 4.53 Striation Patterns on Crack Surface of Upper Part of Vessel (220°)
- Photo. 4.54 Striation Patterns on Crack Surface of Lower Part of Vessel (0°)
- Photo. 4.55 Striation Patterns on Crack Surface of Lower Part of Vessel
- Photo. 4.56 Striation Patterns on Crack Surface of Weld of 3-Pieces Junction and Lower Head (0°)
- Photo. 4.57 Striation Patterns on Crack Surface of Stud Bolt
- Photo. 4.58 Striation Patterns on Crack Surface of Instrumental Nozzle (180°)

1. ま え が き

本報告書は「原子炉容器モデル熱過渡強度試験」の一連の試験研究のうち、構造物強度確性試験施設による当該モデルの熱過渡強度試験方法と試験結果およびモデルを解体してき裂の破面検査を実施した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成果報告書はFig. 1.1に示す通りであり、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、簡易流動伝熱応力解析コード（PEGASUS）の改良と検証、高速炉高温第1種機器の構造設計方針に含まれる設計裕度の検討、き裂進展の評価手法の開発並びに熱過渡強度試験における探傷技術としての超音波探傷法とアコースティックエミッション（AE）の応用技術の開発が本強度試験に継続して実施される。

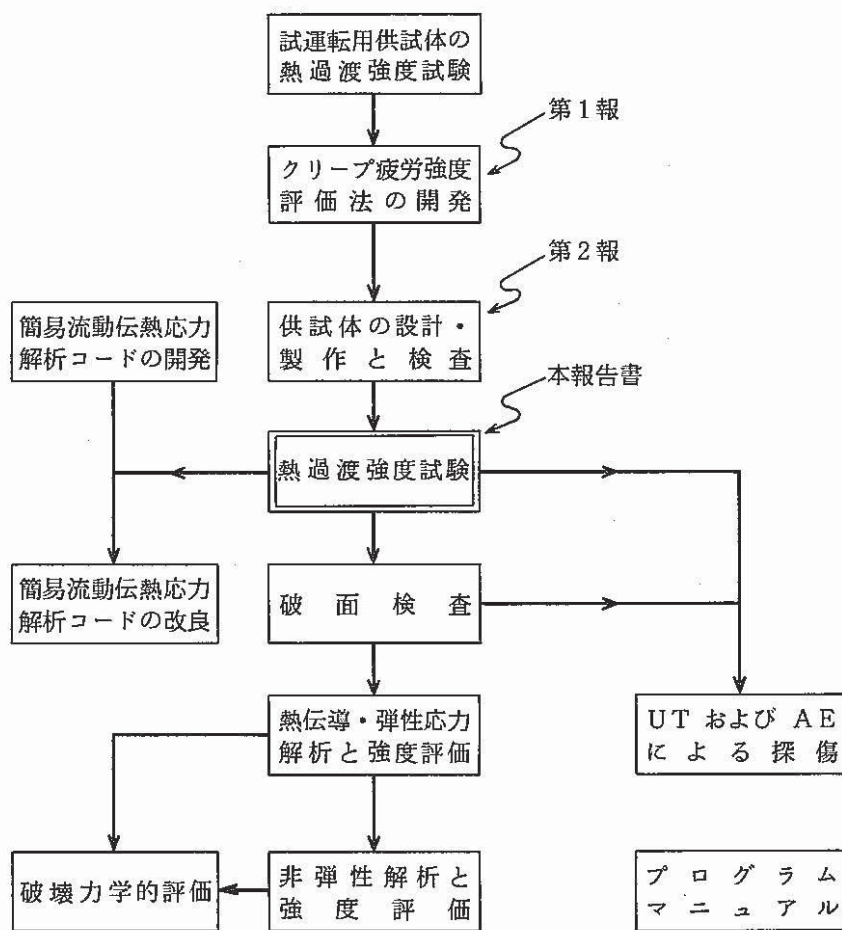


Fig. 1.1 Position of This Report in This Study

2. 試験方法

2.1 試験施設と試験方法

2.1.1 試験施設の概要

本試験は、大洗工学センター、機器構造開発部に設置されたナトリウムループ「構造物強度確性試験施設」(Thermal Transient Test Facility For Structures)(TTS)で実施された。本ループの概要については、概に報告されている⁽³⁾のでここでは、簡単にその概要を記すにとどめる。

Fig. 2.1 は本装置のフローダイアグラムである。本装置は大別してナトリウムループ及びその制御装置、テストセクション、荷重負荷装置、データ集録装置で構成されている。ナトリウムループは高温系、低温系、純化系、ドレン・汲上げ系、ガス系に大別される。高温系および低温系の各ループでは、それぞれ最高運転温度 650℃および 450℃までの任意温度にナトリウム温度を設定し、独立に循環運転できるようになっている。高温系および低温系には配管の熱膨張変位の吸収と配管系の短縮化を目的とした各々 5 個および 3 個の配管ベローズ継手が使用されている。純化系は高低温各系のナトリウムを同時に、又は片方ずつ純化できるようになっている。ナトリウム純度の計測は、プラギング計(P.L.)にて行い、高低温受槽より汲上げた純化される直前のナトリウムについて計測される。ドレン・汲上げ系はナトリウムループからのドレン又はナトリウムループへの汲上げのために設けられている。ダンプタンクからのナトリウムの汲上げはループを真空引きにして大部分行い、足りない分はダンプタンクを加圧することにより行っている。

ガス系は真空ライン、アルゴンガスラインおよび共通ラインに大別される。真空ラインは、ナトリウムループを真空引きする際に用いるラインであり、ナトリウム充填やガス置換及びループカバーガスの排気に用いられる。アルゴンガスラインは、ループのカバーガスの供給に使用される。異常な圧力上昇は安全弁及び破壊板により防止している。共通ラインは、真空ライン、アルゴンガスラインと高・低温ナトリウム系とを結ぶものでナトリウムベーパーを大気中に放出させない機能をもっている。

その他窒素ガス供給系があり自動弁の操作用ガスを供給する一方、供試体からのナトリウム漏洩時に備え窒息消火のための窒素を供試体廻りに送ることができる。

供試体を含めた機器・配管の予熱制御は予熱制御盤で行うが、ループの他の部分は電子計算機による制御システムを用い試験中は全自動運転可能な方式となっている。監視および操作は中央制御室に設置されたカラーディスプレイとキーボードによる集中監視操作方式がとられている。補助的にループ全体の状態を表示できるグラフィックパネル、警報表

示灯，テレビモニターを有する監視盤や高速打点記録計，ペンレコーダーを有する計器盤による監視が行える。ループに異常が生じた場合には保護の必要のある機器についてはインターロックを設けてあり，電子計算機が自動的に異常処理することが可能である。

テストセクションは供試体を設置する定盤とその上に半気密構造のテストセルを設けたものである。定盤は高さ 1.4 m，幅 5.4 m，長さ 9.6 m で供試体の設置場所が任意に選べるよう直径 50 mm ピッチ 250 mm の穴が格子状にあけられている。テストセル内にはナトリウムループの中で熱過渡が極めて厳しい機器・配管が納められている。又中央制御室で漏洩が監視できるようテストセル内部に煙検知器を設け，2 台同時に作動した場合には自動的にループの運転が停止され，弁により各機器が互いに隔離される。又異常を中央制御室で監視できるよう 3 台のテレビカメラが設けられている。

供試体に機械的荷重を負荷するため電気油圧サーボ方式の荷重負荷装置が設けられている。アクチュエータは 20 ton の容量を有するものが 2 台あり，別個又は同時に制御させることができる。最大変位は各々 ± 100 mm であり，繰返し速度は 2 台同時作動時には 0.4 Hz/ ± 100 mm，単独作動時には 0.8 Hz/ ± 100 mm である。

供試体に取り付けられた熱電対，ひずみゲージ，変位計により得られる温度，ひずみ，変位の信号は A/D 変換された後ミニコンピュータ TI-990/10A (DAS) に送られ，ディスクに収納されたデータは，オンライン又はバッチジョブで一定のフォーマットの図形処理が可能である。

2.1.2 装置の全体仕様

装置の設計寿命は 15 年であるが，一部の機器・配管については 1～5 年の寿命を設定している。

(1) ナトリウムループ

設計温度	高温ループ：670℃ 低温ループ：470℃
設計圧力	5 kg/cm ² G～1 kg/cm ² G
最高運転温度	高温ループ：650℃ 低温ループ：450℃
設定温度範囲	高温ループ：450℃～650℃ 低温ループ：250℃～450℃
最大温度変化幅	： 400℃
熱過渡条件	： 250℃から 650℃まで及び 650℃から 250℃までの供試体入口部 ナトリウム温度変化時間 10 秒 (± 40 ℃/sec)
温度サイクル	： 温度変化幅が 400℃の場合約 60 分/サイクル (供試体*各部の温

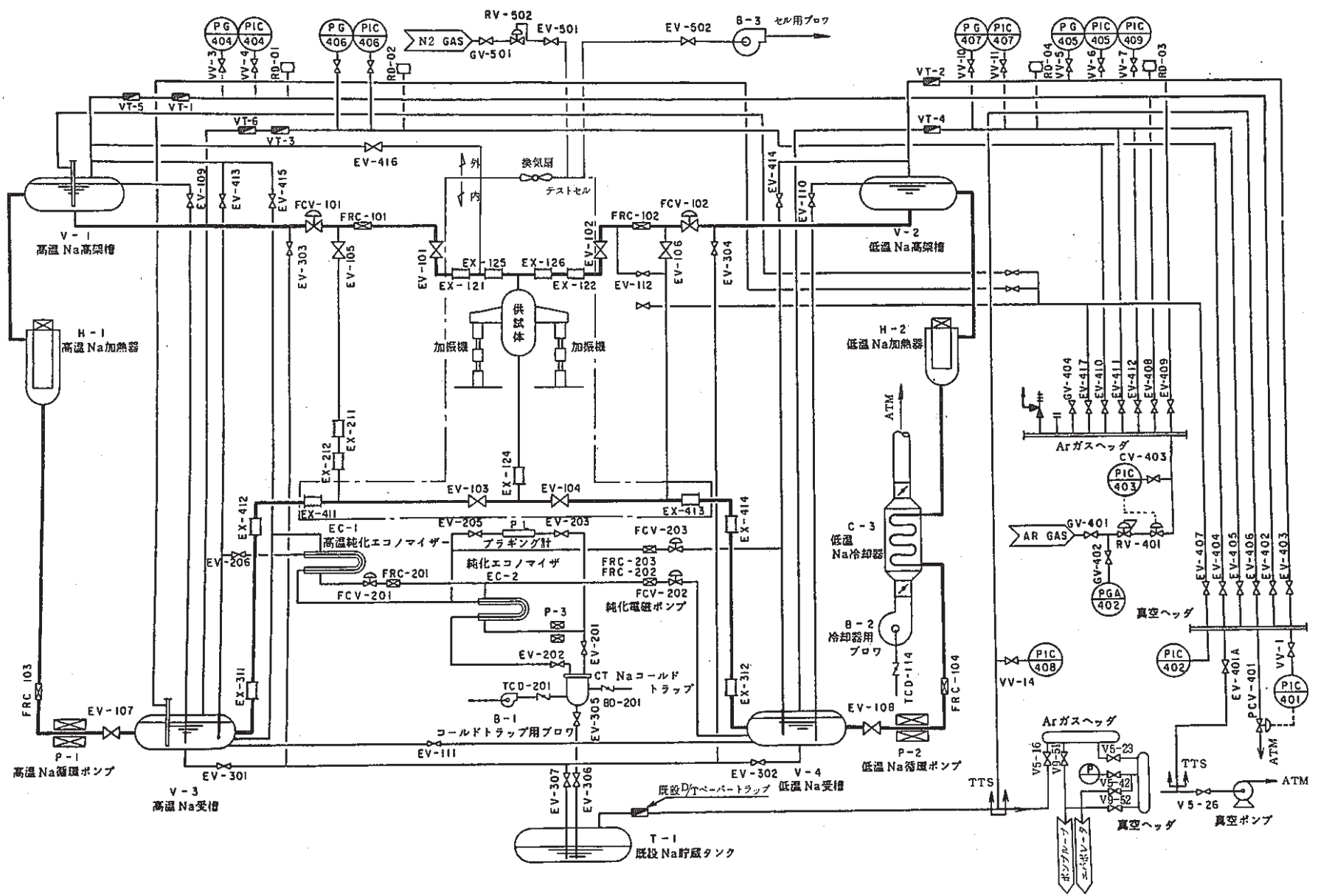


Fig. 2.1 Flow Diagram of Sodium Loop

度がほぼ定常に達するまでの時間を半サイクルの所要時間とした場合)

* 但し、板厚 50mm, 直径 1.5 m, 長さ 3 m のまゆ型供試体

流 量 : 繰返し熱過渡を負荷する場合 1 m³/min
1 回のみ熱過渡を負荷する場合 4 m³/min (高架槽を 4 kg/cm² に加圧することにより可能)

主要配管径 : 6 インチ。但し供試体 - 受槽間は 10 インチ

ナトリウムインベントリ : 34 m³

ループ制御 : 電子計算機による自動運転
但し予熱のみ手動設定

(2) 機械荷重負荷装置

油圧ユニット容量 : 75 kw (油圧ポンプ 2 基)

油圧アクチュエータ : 負荷荷量 : ± 20 ton が 2 基。単独並びに同時操作可能

変 位 : ± 100mm

繰返速度 : 0.4 Hz / ± 100mm (2 基同時操作)

0.8 Hz / ± 100mm (単独操作)

冷却ユニット容量 : 圧力 15 kg/cm²G, 吐出量 95 ℓ/min

(3) テストセル

大 き さ : 長さ 9.2 m, 幅 5 m, 高さ 8.5 m

構 造 : 半気密構造

機 能 : 100 トンの死荷重及び 20 トンのアクチュエータ 2 台が作用した場合の定盤の変形量 1 mm

(4) データ収録システム

最大収録チャンネル数 : 384 ch

熱 電 対 248 ch

ひずみゲージ 36 ch

変 位 計 20 ch

そ の 他 83 ch

最高サンプリング速度 : 30 ch/30msec

2.1.3 各機器の主要仕様

(1) ナトリウムループ

(a) ダンプタンク T-1

型 式 : 横置円筒密閉型
容 量 : 100 m³
主要寸法 : 約 4.0 m ϕ × 7.0 m ℓ
材 質 : SUS304

(b) 高温ナトリウム受槽 V-3

型 式 : 横置円筒密閉型
容 量 : 約 13 m³
主要寸法 : 約 2.0 m ϕ × 4.8 m ℓ
材 質 : SUS304

(c) 低温ナトリウム受槽 V-4

型 式 : 横置円筒密閉型
容 量 : 約 13 m³
主要寸法 : 約 2.0 m ϕ × 4.8 m ℓ
材 質 : SUS304

(d) 高温ナトリウム高架槽 V-1

型 式 : 横置円筒密閉型
容 量 : 約 5 m³
主要寸法 : 約 1.2 m ϕ × 5.0 m ℓ
材 質 : SUS304

(e) 低温ナトリウム高架槽 V-2

型 式 : 横置円筒密閉型
容 量 : 約 5 m³
主要寸法 : 1.2 m ϕ × 5.0 m ℓ
材 質 : SUS304

(f) 高温ナトリウム加熱器 H-1

型 式 : シースヒータ内挿型円筒直接加熱式
容 量 : 1,180 kw
主要寸法 : 1.0 m ϕ × 2.2 m ℓ
材 質 : SUS304

- (g) 低温ナトリウム加熱器H-2
型式 : シースヒータ内挿堅型円筒直接加熱式
容量 : 60 kw
主要寸法 : 0.32 m ϕ × 1.4 m ℓ
材質 : SUS304
- (h) 低温ナトリウム冷却器
型式 : フィンチューブ空冷式
容量 : 800,000 kcal/hr
主要寸法 : 1.5 mw × 1.6 m ℓ × 2.0 mh
材質 : 伝熱管SUS304, ケーシングSS41
- (i) 低温ナトリウム冷却器用ブロワB-2
型式 : 単段片吸込ターボ型遠心ファン
容量 : 220mmAq × 36,000 Nm³/H
主要寸法 : 吸込側及び吐出側口径40B
材質 : 炭素鋼
- (j) 高温ナトリウム循環ポンプP-1
型式 : 電磁ポンプ
容量 : 流量 1,300 l/min, 吐出圧 2 kg/cm²G
主要寸法 : ダクト口径 3 $\frac{1}{2}$ B sch 20
材質 : 主要部SUS304
- (k) 低温ナトリウム循環ポンプP-2
型式 : 電磁ポンプ
容量 : 流量 1,300 l/min, 吐出圧 2 kg/cm²G
主要寸法 : ダクト口径 3 $\frac{1}{2}$ B sch 20
材質 : 主要部SUS304
- (l) 高温ナトリウム流量計 (高温受槽出口流量測定用) FRC103
型式 : 永久磁石式電磁流量計
容量 : 1.5 m³/min
主要寸法 : 流路管口径 6 B sch 20
材質 : 主要部SUS304
- (m) 高温ナトリウム流量計 (高温側供試体入口流量測定用) FRC101
型式 : 永久磁石式電磁流量計
容量 : 5 m³/min

- 主要寸法 : 流路管口径 6 B sch20
材 質 : 主要部 SUS316
- (n) 低温ナトリウム流量計 (低温受槽出口流量測定用) FRC104
型 式 : 永久磁石式電磁流量計
容 量 : 1.5 m³/min
主要寸法 : 流路管口径 6 B sch20
材 質 : 主要部 SUS304
- (o) 低温ナトリウム流量計 (低温側供試体入口流量測定用) FRC102
型 式 : 永久磁石式電磁流量計
容 量 : 5 m³/min
主要寸法 : 流路管口径 6 B sch20
材 質 : 主要部 SUS304
- (p) コールドトラップ CT
型 式 : 金網充填式堅型円筒
容 量 : 定格流量 15 l/min
主要寸法 : 約 0.6 m ϕ × 1.2 mh
材 質 : SUS304
- (q) コールドトラップ用ブロワ B-1
型 式 : 単段片吸込ターボファン型遠心ファン
容 量 : 2,400 Nm³ × 300 mmAq
主要寸法 : 吐出側口径 12 B
材 質 : 炭素鋼
- (r) 高温純化エコノマイザー H6
型 式 : 並列二重管式
容 量 : 伝熱面積約 0.28 m²
主要寸法 : 約 L 4,200, 外管 OD 34.0 × t 3, 内管 OD 15.0 × t 0.6
材 質 : 外管 SUS304, 内管 SUS316
- (s) 純化エコノマイザー H4
型 式 : 並列二重管式
容 量 : 伝熱面積約 0.14 m²
主要寸法 : 約 L 8,600, 外管 OD 34.0 × t 3, 内管 OD 15.0 × t 0.6
材 質 : 外管 SUS304, 内管 SUS316

(t) 純化ナトリウム循環ポンプP3

型式 : 電磁ポンプ
容量 : 50 ℓ/min
主要寸法 : ダクト口径 1/2B sch20
材質 : 主要部 SUS304

(u) プラギング計PL

型式 : 空冷自動連続式
容量 : 流量 1 ℓ/min
主要寸法 : 出入口ノズル 1/2B sch20
材質 : ナトリウム系 SUS304

(v) 純化系流量計FRC201, 202, 203

型式 : 永久磁石式電磁流量計
容量 : 50 ℓ/min
主要寸法 : 流路口径 1/2B
材質 : SUS304

(w) 真空ポンプ

型式 : オイルロータリー式
容量 : 15,000 ℓ/min
主要寸法 : 吸込口径 6B
材質 : 炭素鋼

(2) 機械荷重負荷装置

(a) アクチュエータ

型式 : 電気油圧サーボ方式
容量 : 動的±20ton, 静的±30ton
ストローク : 最大±100mm
サーボ弁 : MOOG社製
材質 : 炭素鋼

(b) 主油圧源

容量 : 圧力 210 kg/cm², 吐出量 135 ℓ/min
ポンプ型式 : 定吐出量型高圧歯車ポンプ 2台
モータ : 防滴保護形誘導電動機 37 kw × 2台
タンク容量 : 750 ℓ
油冷却器形式 : 水冷式油冷却器

(c) ロードセル冷却用油圧源

容 量 : 圧力 15 kg/cm², 吐出量約 95 ℓ/min

モ ー タ : 防滴保護形誘導電動機 11 kw

タンク容量 : 約 350 ℓ

油冷却器形式 : 水冷式

2.1.4 試験方法

TTS の運転方法について、以下 Fig. 2. 2 に運転フローを示す。本施設は予熱を除き運転は、電子計算機のプロセン制御システム (DCS) で自動的に行われる。ループの状況は中央制御室に置かれたディスプレイ上に表示され、異常が生じた場合には運転員に警報として連絡される。各機器あるいはシステムとしての操作は DCS のキーボードにより行われる。運転は各工程毎に行われ、工程内の操作は自動化されている。以下に各工程の概要を述べる。

(1) 運転前準備

機器、装置の健全性の確認及び運転に必要な条件の設定、確認等を実施する。

(2) 予 熱

予熱制御盤面の操作スイッチにて、起動、停止操作を行い、起動後は中央制御室の記録調節計により自動 ON-OFF 制御する。高・低温及び循環ポンプの予熱は DCS により誘導加熱する。

(3) バルブの開閉チェック

DCS のキーボード操作により、開閉指示すると自動的にナトリウム弁作動の異常を系統毎又は 1 台毎に確認する。又同時に開閉状態を CRT 画面上に表示する。

(4) 真空引き

DCS キーボード操作により開閉指示すると自動的に真空引き動作が順次行なわれ、設定真空度に達すると自動的に終了する。この時、既設ダンプタンクは隔離してある。

(5) ナトリウム充填

DCS のキーボード操作により開始指示すると各バルブの開閉が自動的に設定され、コールドトラップより順次ループ内に充填される (ループと既設ダンプタンクとの圧力差による)。充填の完了は高架槽の液位で検出され、自動的に終了する。

(6) カバーガス供給

DCS のキーボードにより開始指示すると自動的にアルゴンガス供給弁が開となり、ループにカバーガスを供給する。ループのカバーガス圧力制御はドレン後まで自動的に継続する。

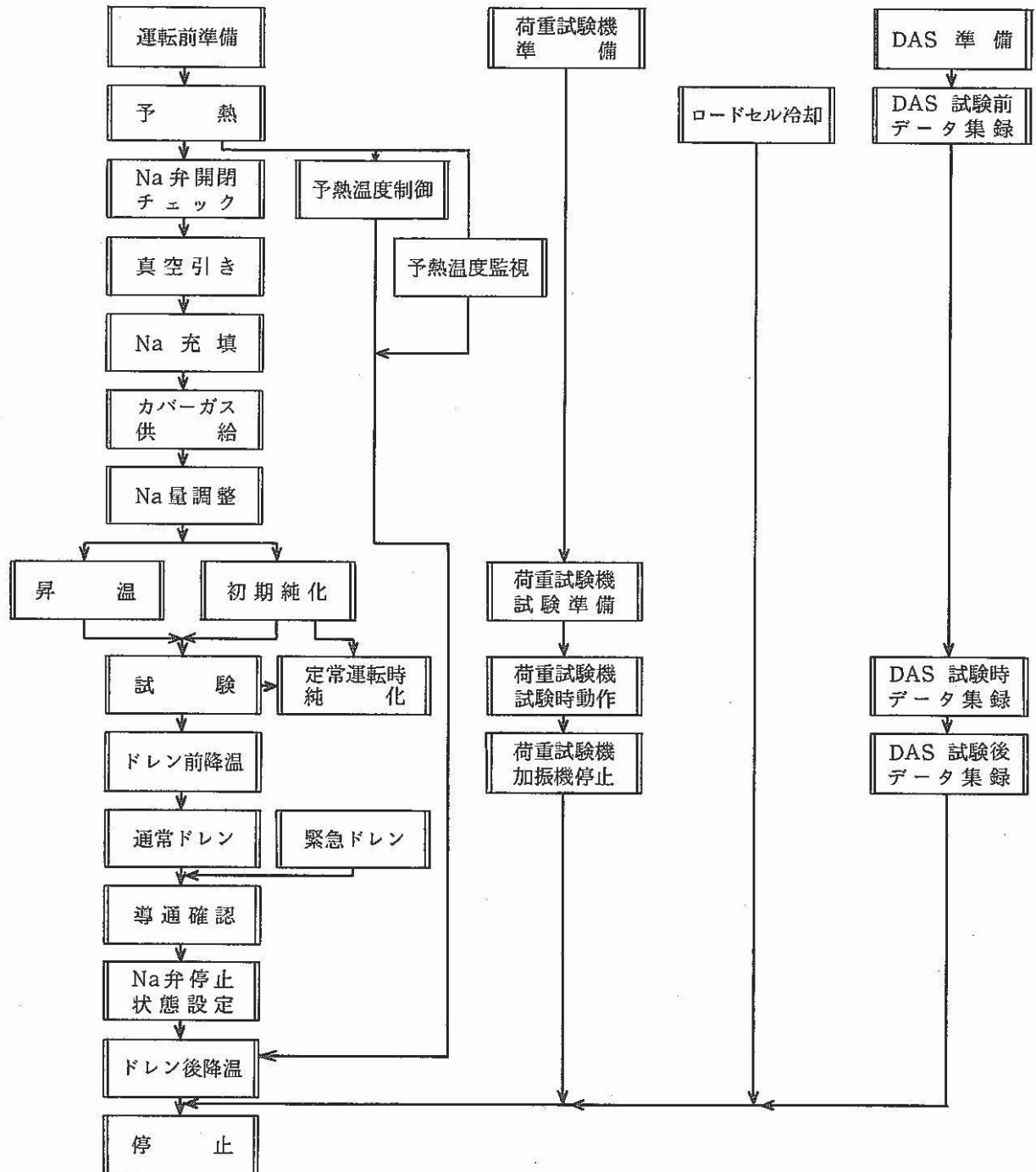


Fig. 2.2 Operating Flow Diagram

(7) ナトリウム量調整

DCS キーボード操作により開始指示すると自動的に高・低温循環ポンプが起動され高・低温主ループのナトリウム量調整をする。ナトリウム量調整が終了するとナトリウム循環を指示する事で自動的に供試体へ高・低温ナトリウムが交互に供給される。

(8) 昇温

DCS キーボード操作により開始指示すると加熱器が起動され、設定された昇温曲線に沿って昇温され、自動的に終了する。昇温完了後はループのナトリウム温度を自動的に制御する。

(9) 純化

DCS キーボード操作により指示すると純化ポンプが起動され、自動的に高・低温ループの純化流量が制御される。コードトラップのブロウを起動することにより、ダンパの開度が自動的に制御される。純度の監視はプラッキング計で行う。純化運転は(7)~(10)の工程中はいつでも起動、停止できる。

(10) 試験

DCS キーボードにより試験条件を設定する。設定された試験開始時刻になると試験が自動的に開始される。同時にデータ収録装置と荷重負荷装置に開始信号がDCSより発信される。試験中は供試体出入口弁が自動的に開閉され、供試体へ高・低温ナトリウムを交互に供給する。ループのナトリウム温度、流量、カバーガス圧力及び高・低温受槽の液位は自動的に制御される。荷重負荷装置により供試体に設定された荷重を負荷する。ナトリウムループ及び荷重負荷装置の運転状態と供試体からの計測データはデータ収録装置へ送られ、保存される。設定されたサイクル数に達すると自動的に試験が終了し、データ収録装置と荷重負荷装置へ終了信号が送られ、荷重負荷装置は自動的に停止する。

(11) ドレン前降温

DCS キーボード操作により開始指示すると設定された降温曲線に沿って予熱温度まで降温され、自動的に終了する。終了の指示を出すと高低温加熱器が停止する。

(12) 通常ドレン

DCS キーボードにより開始指示すると自動的に高低温ポンプが停止し、予熱モードとなり、高・低温純化ループのドレン弁が開となってループのナトリウムを既設のダンプタンクにドレンされる。

(13) 導通確認

DCS キーボード操作により開始指示するとあらかじめ定められたモード順毎に自動的にアルゴンガスパーズが行われ、圧力変化速度を自動的に測定することにより導通を確認する。

(14) ドレン後降温

DCSキーボード操作で開始指示した後予熱制御盤によりステップ状に降温し、その後予熱ヒータスイッチを切る。降温終了後終了指示を出すことにより高・低循環ポンプが停止され、電源が切られる。

(15) 緊急停止と緊急ドレン

運転中に異常が発生するとインタロックが作動し、加熱器、高・低温循環ポンプ、コールドトラップブロア、低温冷却器用ブロア、荷重負荷装置が自動的に停止する。又ループは各弁が自動的に設定された弁状態となり、一担ホールド状態となる。各計装盤、CRT上で異常の有無を確認し、かつ現場巡視を実施し、緊急ドレンか循環降温するか判断する。緊急ドレンを計装盤から指示すると自動的に全系ドレンが開始される。

2.2 供試体

供試体は「もんじゅ」原子炉容器をモデル化した肉厚40mm、高さ2,100mm、胴部内径800mmのまゆ型容器である。Fig. 2.3(a)に供試体形状を示す。材質は「もんじゅ」原子炉容器用SUS304相当材である。また「もんじゅ」原子炉容器と対応させてFig. 2.3(b)に示す。原子炉容器の代表的な構造不連続部を含むもので、出入口ノズル、Yピース、板厚不連続部、胴熱しゃへい板（上部胴に厚さ1mmを6枚、下部胴に厚さ6mmを1枚）及びその取付スタッドボルト、厚肉胴溶接継手等をモデル化したものである。

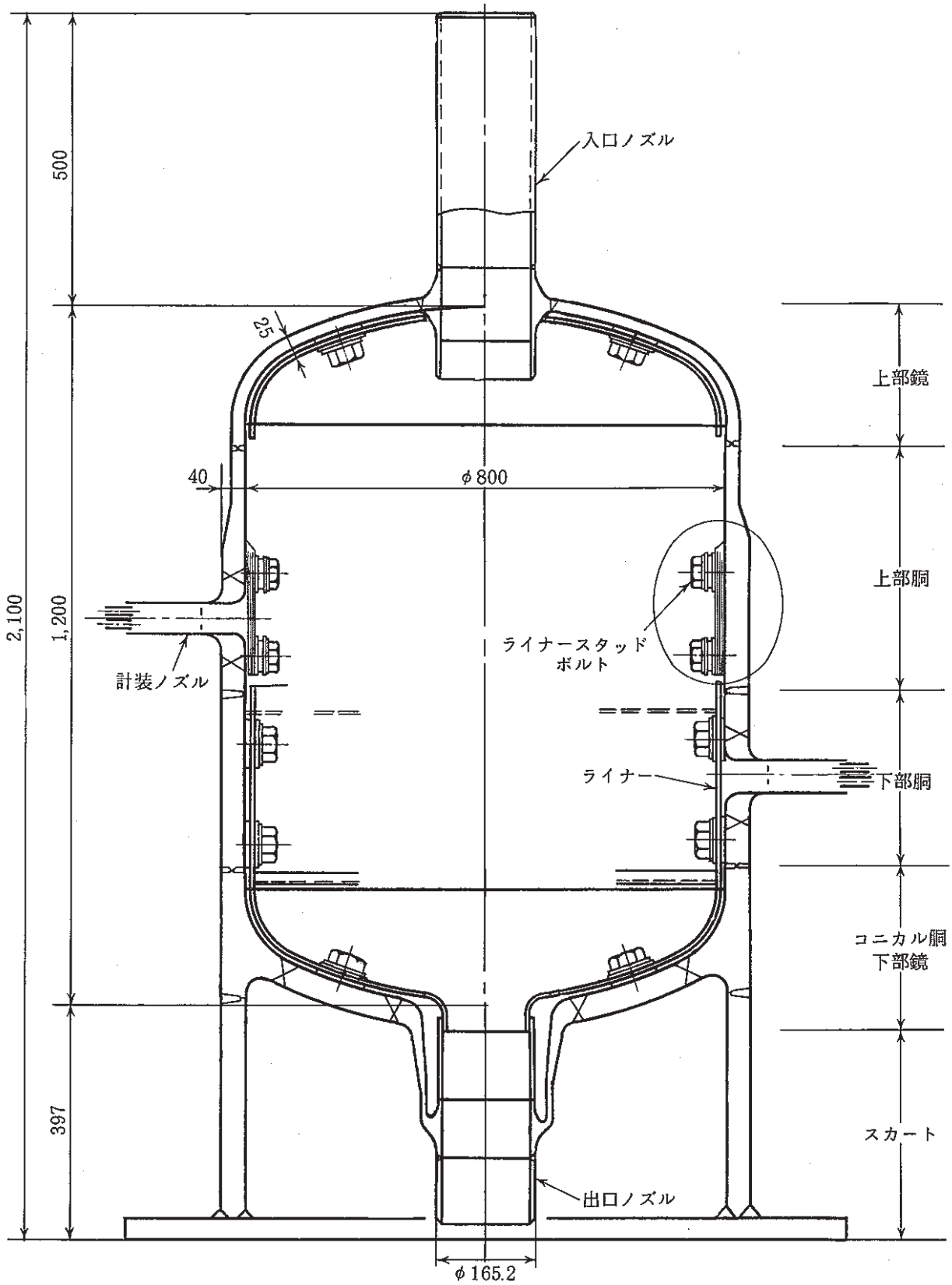
供試体の設計、製作、検査の詳細については前報(1)を参照されたい。

2.3 試験条件

Table 2.1 に試験条件を示す。表に示したように温度条件は、高温ナトリウム温度600℃、低温ナトリウム温度250℃（温度差 $\Delta T = 350^\circ\text{C}$ ）、ナトリウム流速は約1m/sec、繰返し数1,002回、1サイクル120min（高温105min、低温15min）である。供試体入口配管内ナトリウムの温度変化をFig. 2.4に示す。

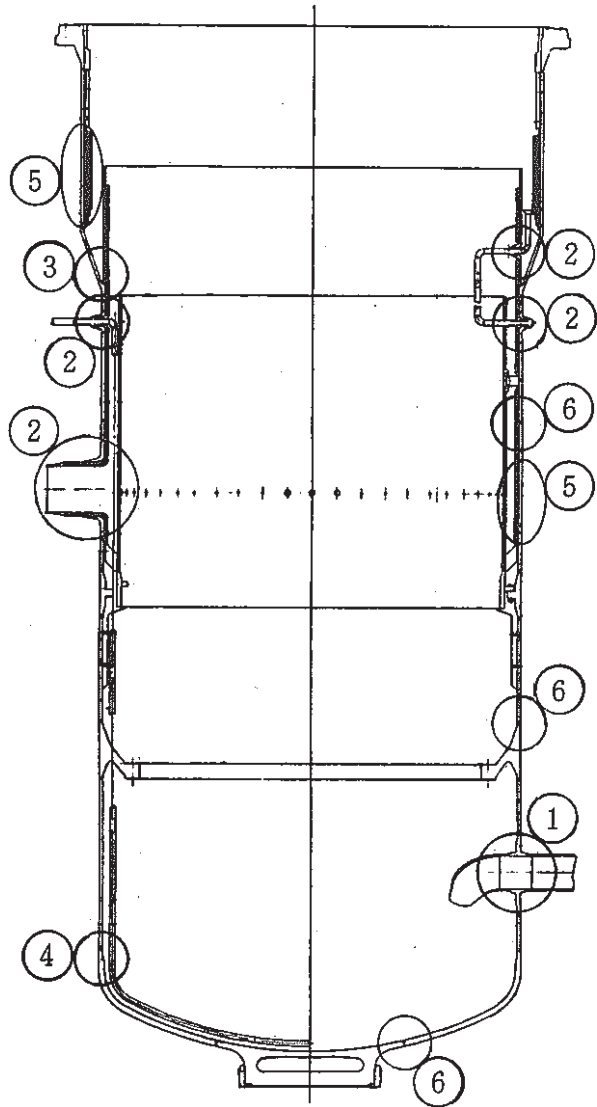
Table 2.1 Test Conditions

Sodium Temperature (°C)			Number of Thermal Cycles	Velocity of Sodium Flow (m/sec)
Hot Sodium	Cold Sodium	Temperature Difference		
600	250	350	1,002	~ 1



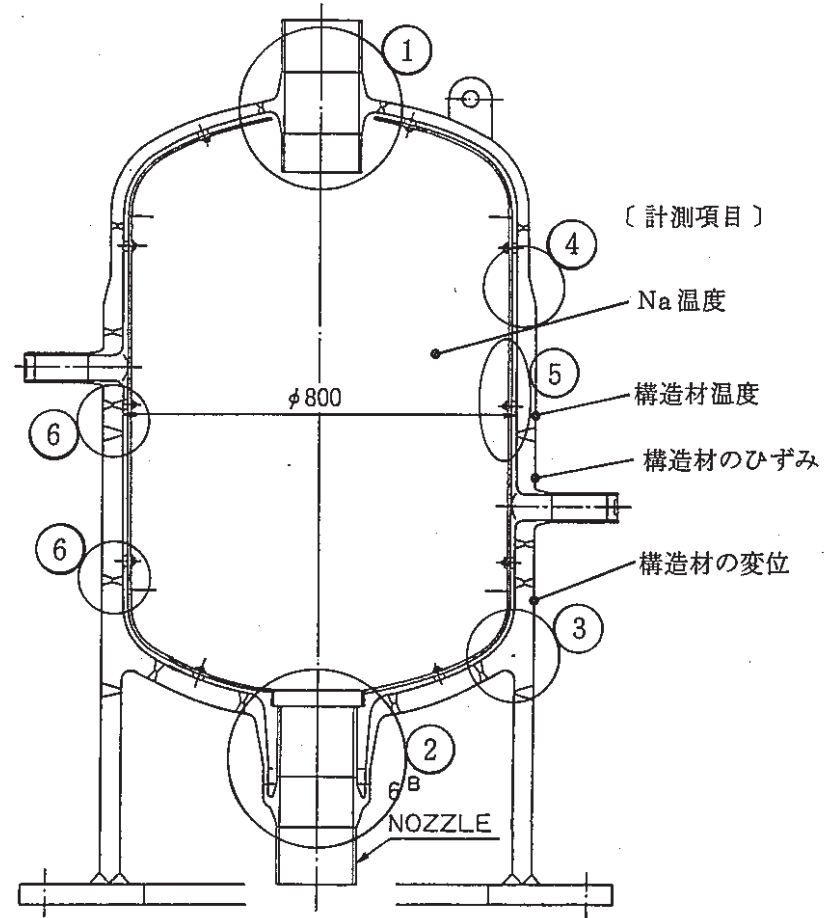
(a) Shape and Namings

Fig. 2.3 Configuration of Reactor Vessel Model



「もんじゅ」原子炉容器

- ① 入口ノズル
- ② 出口ノズル
- ③ Yピース
- ④ 板厚不連続部
- ⑤ 胴熱遮へい板
- ⑥ 厚肉胴溶接継手



「もんじゅ」炉容器モデル試験体
(構造不連続部を含む容器型モデル)

- 〔計測項目〕
- ④ Na 温度
 - ⑤ 構造材温度
 - 構造材のひずみ
 - 構造材の変位

Fig. 2.3(b) Correspondence of Reactor Vessel Model to Reactor Vessel

2.4 データ集録

2.4.1 温度の計測

熱過渡負荷時における供試体およびライナーの肉厚方向の温度分布およびナトリウムの温度変化測定のために、供試体各部に熱電対を取り付け温度測定を行った。Fig. 2.5(a)に使用した熱電対の形状および供試体への取り付け位置を示す。熱電対の取り付け数は、供試体外表面に50本、内表面に70本である。使用した熱電対はJIS 0.75級、直径1.0mm ϕ および0.65mm ϕ の非接地型、シース型CA熱電対である。

熱電対の供試体への取り付け方法は、供試体計装ノズルからさし込んでおり、シースおよびケーブルはステンレス箔（厚さ0.8mm）にて押えて点溶接にて固定した。壁面温度はFig. 2.5(b)のType 1，Na温度はType 2を使用した。

2.4.2 歪，変位の計測

熱過渡試験時の供試体の外表面の周方向歪および半径方向変位を測定した。Fig. 2.6に歪ゲージの形状と取り付け位置を示す。歪ゲージは外表面に7枚取り付けた。使用した歪ゲージは抵抗型歪ゲージAILTECH MG-425である。取り付け方法は熱電対と同様である。Fig. 2.7に変位計の形状と取り付け位置を示す。変位計は10本取り付けた。使用した変位計はSchaevitz社のLVDT GCA-121-500である。取り付け方法は変位伝達用ワイヤ（スーパーアンバー ϕ 1.0）及び取り付け用アダプタをTIG溶接にて供試体に取り付け、保温層外で変位伝用ワイヤとロックナットでSUSワイヤ（ ϕ 2.0）と接続し、滑車を介してLVDTに接続した。

2.4.3 データ処理

Fig. 2.8に上で述べたような方法で測定した温度，歪，変位各データの処理フロー図を示す。供試体に取り付けられた温度信号は零接点を通り，リニアライズされ，増幅される。これらの信号はA/D変換された後，ミニコンピュータTI-990/10Aに送られ，ディスクに収納される。データはディスク容量のある一定量に達すると，自動的に磁気テープに記録される。一方ディスクに収納されたデータはキャラクタディスプレイで定まったフォーマットの図形処理ができる。A/D変換器の最高サンプリング速度は30ch/30msecである。

2.5 非破壊検査

供試体の非破壊検査としてAEによる探傷，超音波による探傷（UT）を実施した。本報告書では概要のみとし，詳細は別報にて報告する。

2.5.1 AE探傷

AEのセンサはFig. 2.9に示すようにウェーブガイド取り付けバンドを用いて，ウェーブガイ

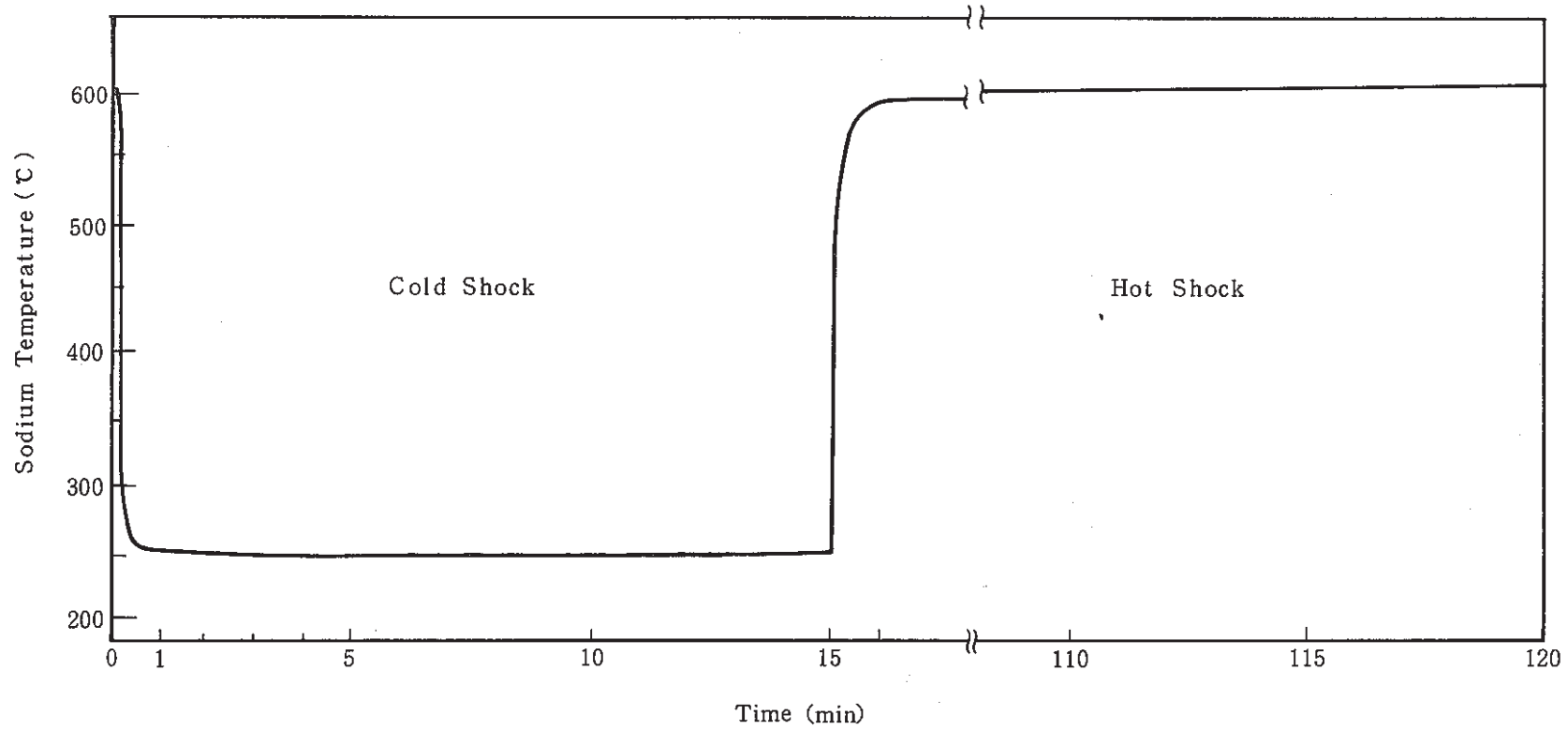


Fig. 2.4 Sodium Temperature Change in Inlet Piping

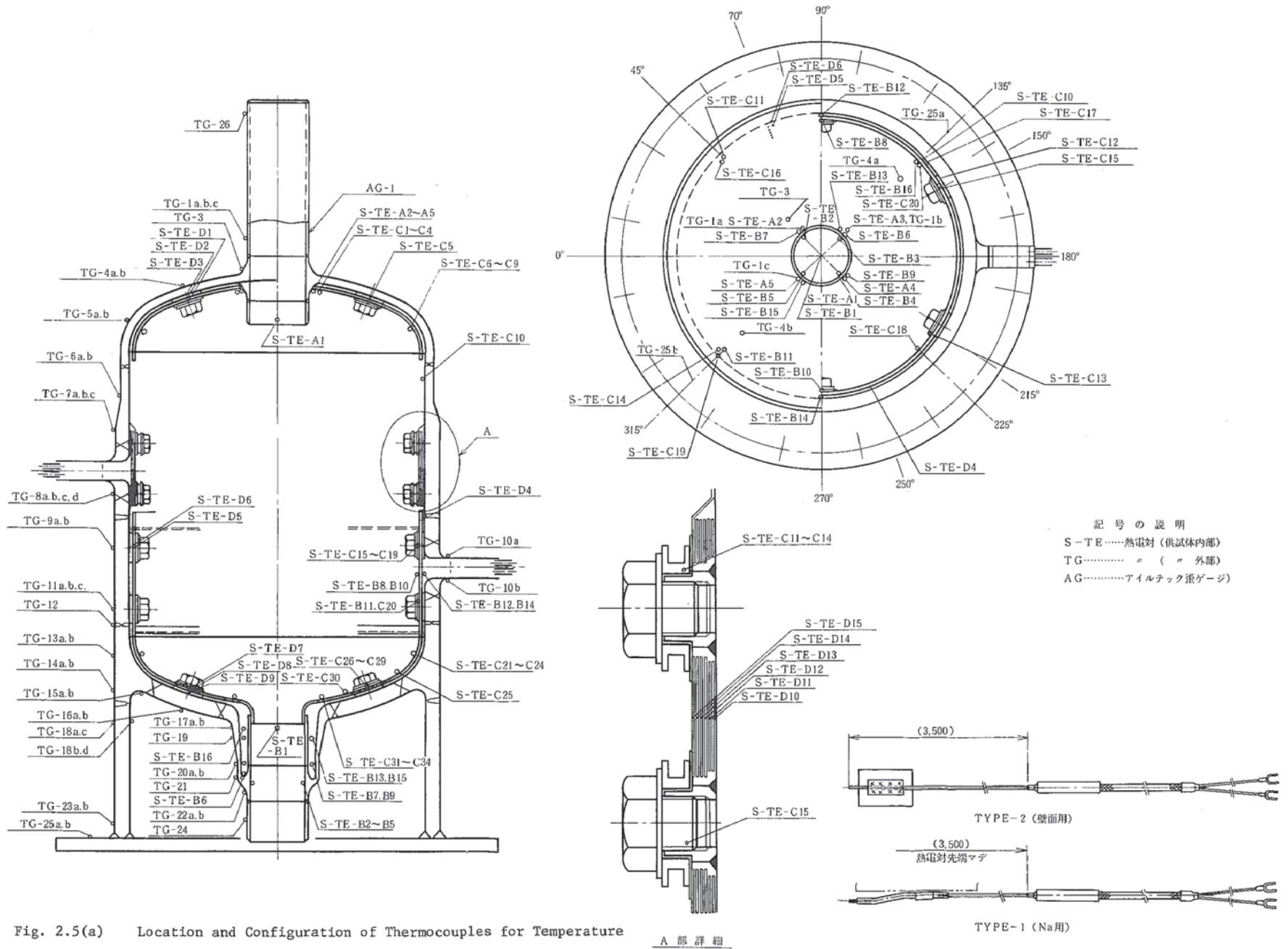


Fig. 2.5(a) Location and Configuration of Thermocouples for Temperature Measurement in "Monju" Reactor Vessel Model (a)

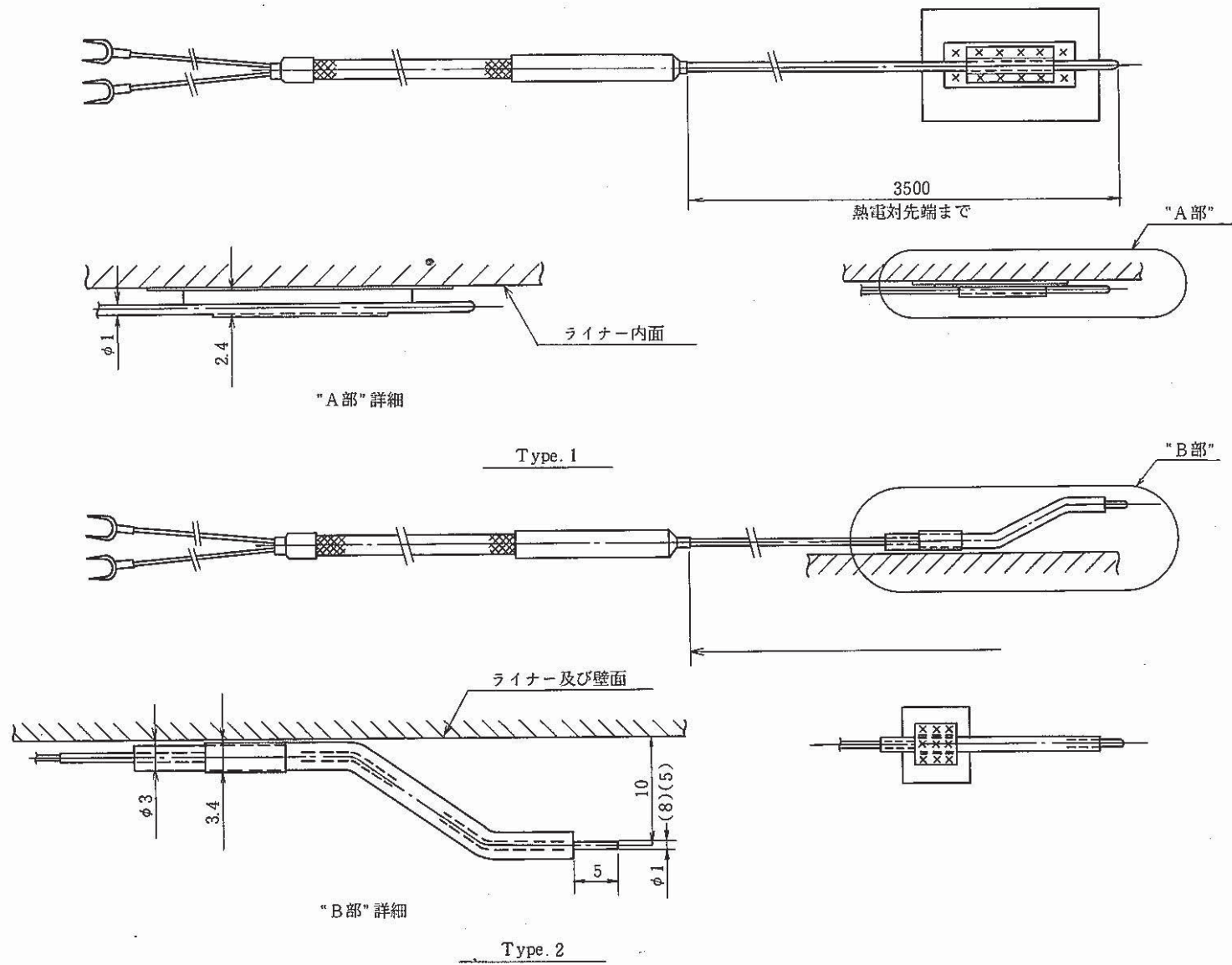


Fig. 2.5(b) Location and Configuration of Thermocouples for Temperature Measurement in Reactor Vessel Model

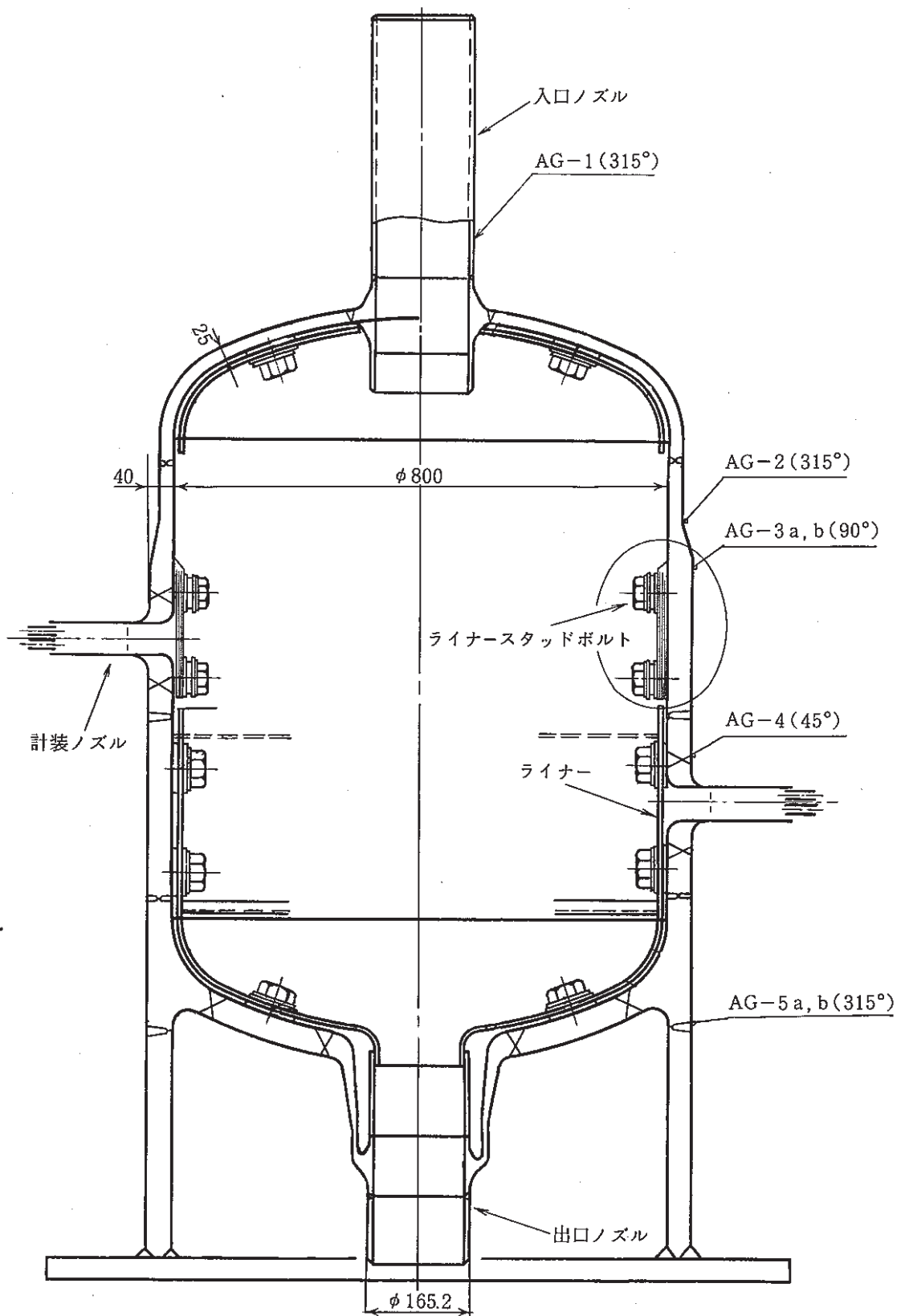


Fig. 2.6 Location of strain gauges

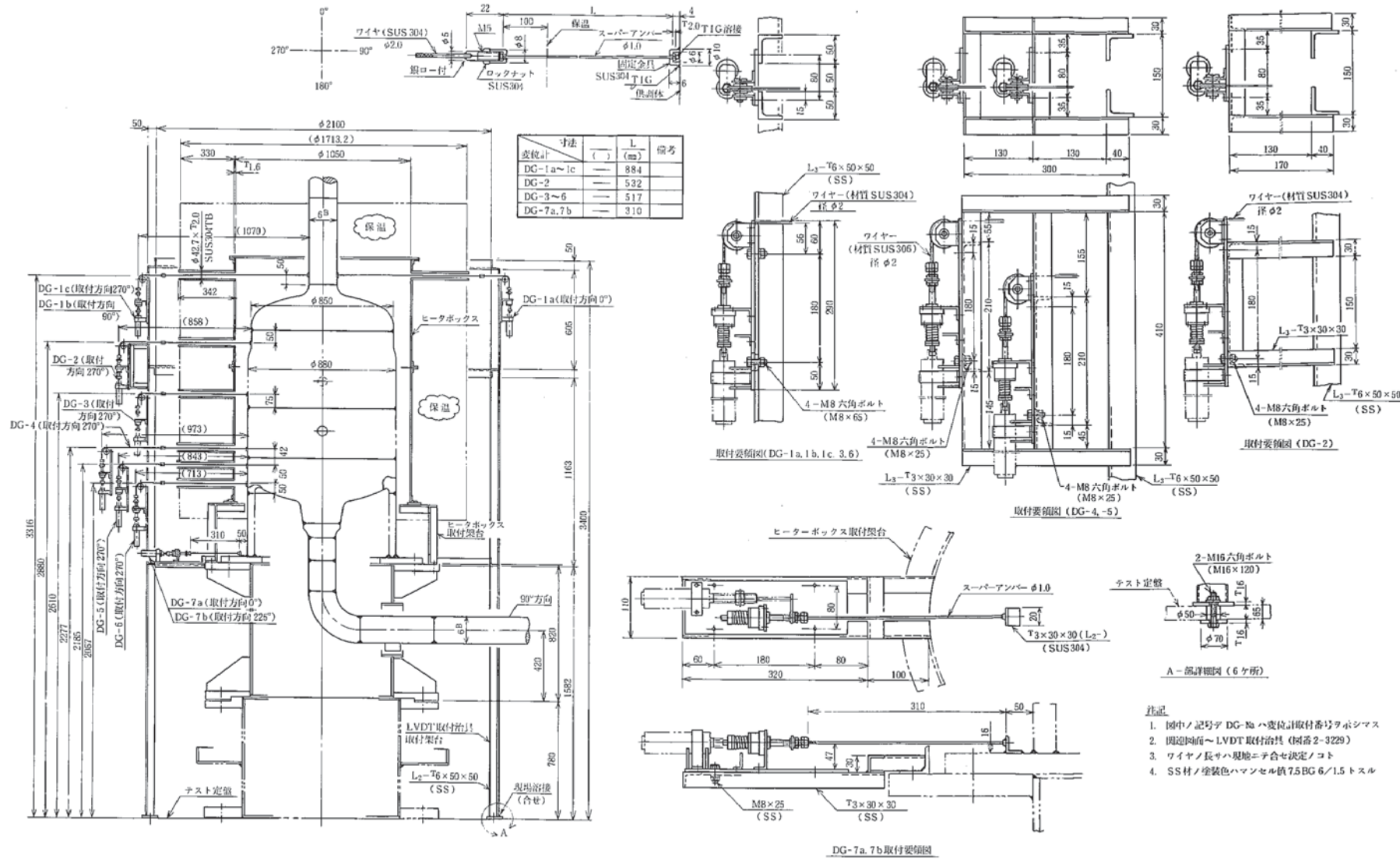


Fig. 2.7 Location of LVDT and details

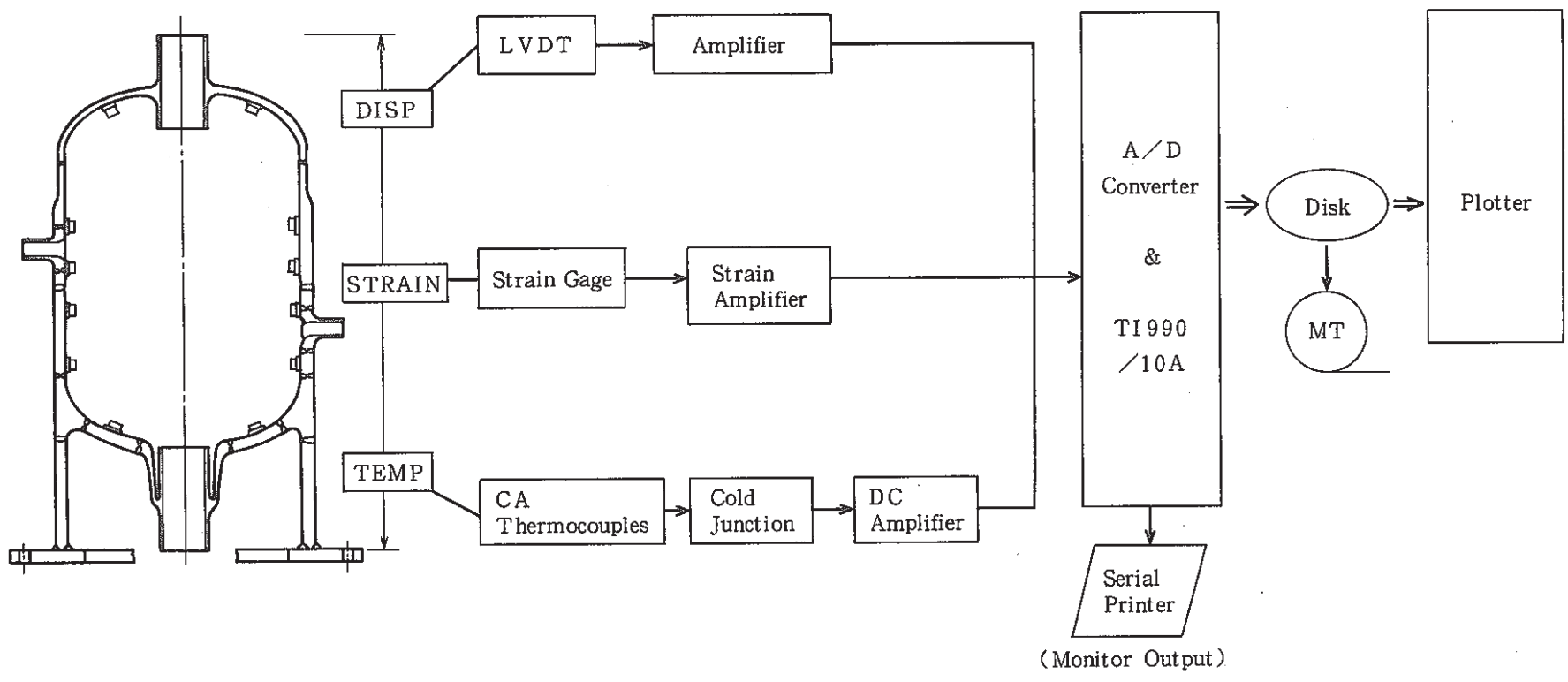


Fig. 2.8 Flow Diagram of Strain Displacement and Temperature Measurement and Data Acquisition System

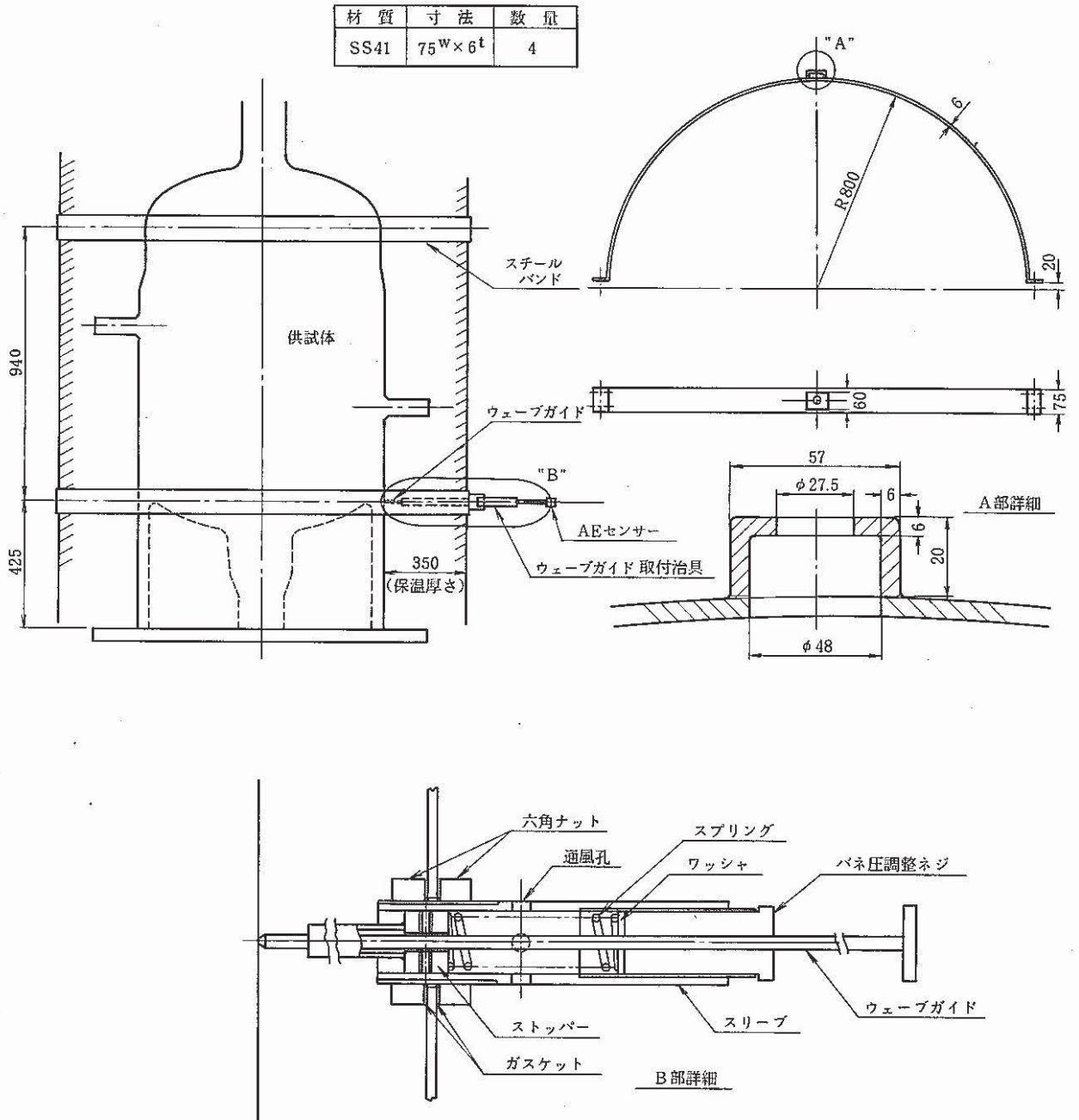


Fig. 2.9 Attachment for Acoustic Emission sensor

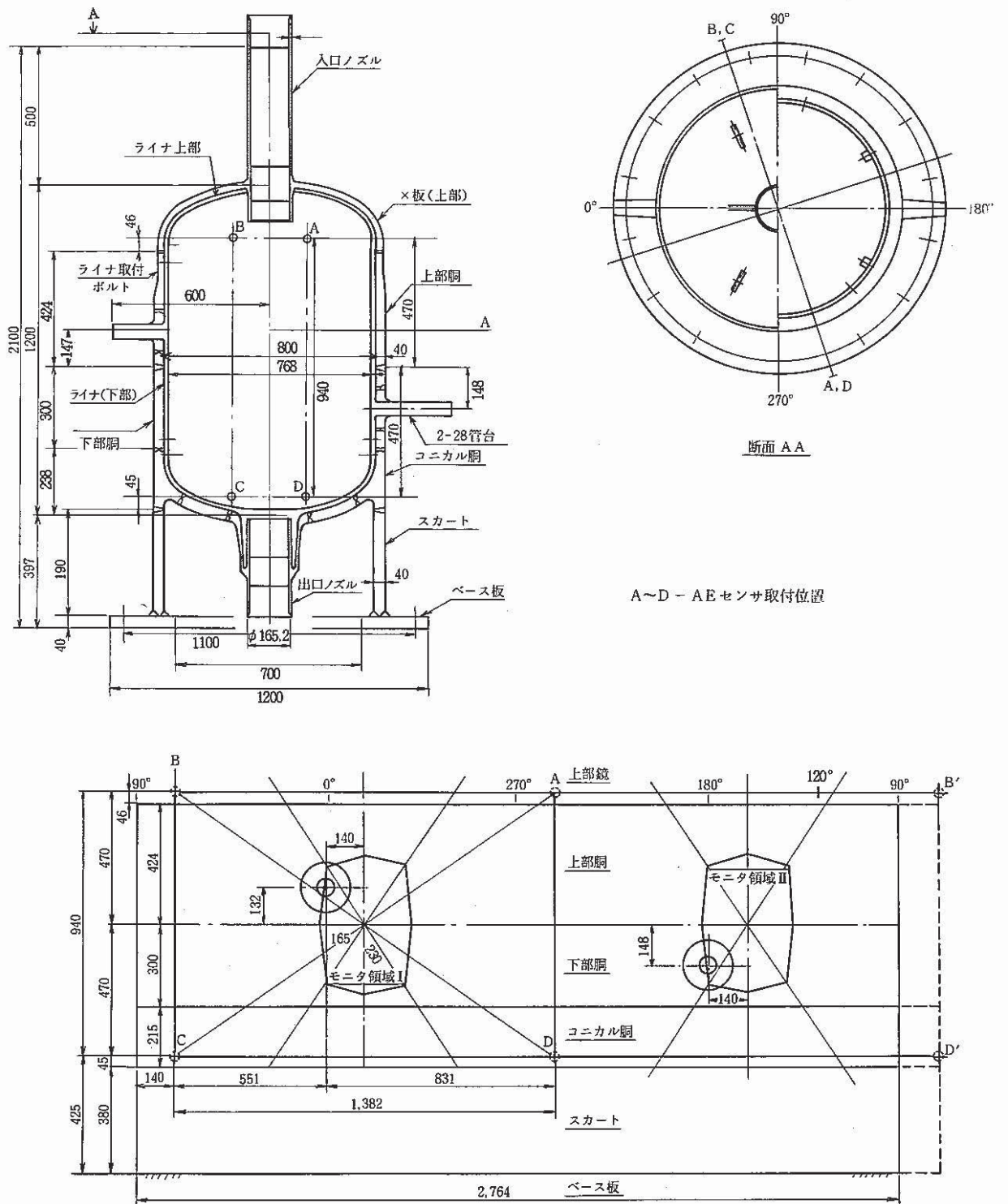


Fig. 2.10 Location of AE sensor and Monitoring Area

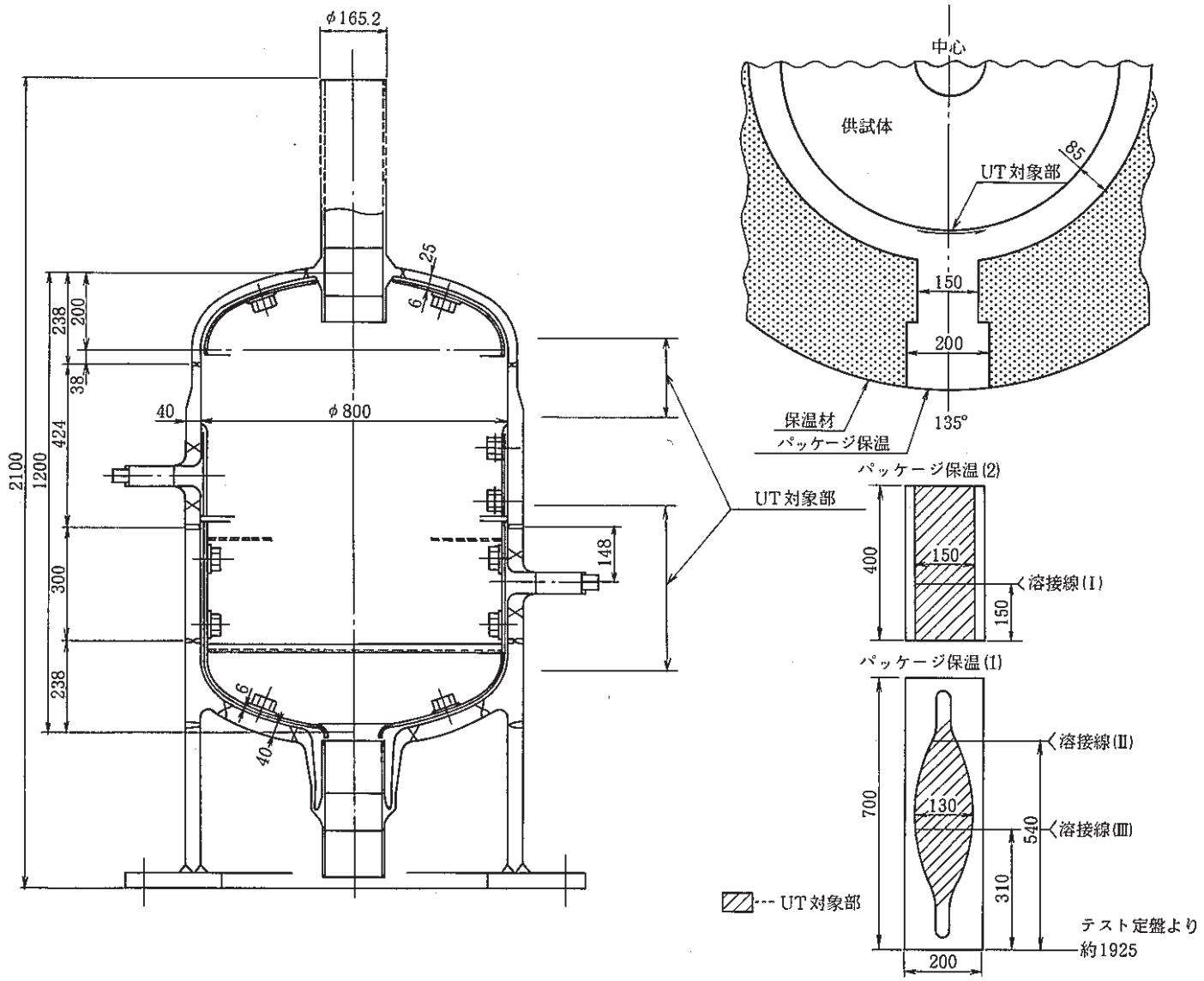


Fig. 2.11 Area of Ultrasonic Examination

ド取付治具を取り付け、そのウェーブガイドを介して供試体と音響的に結合させた。AE センサの取付位置とモニタ領域をFig. 2.10 に示す。AE の計測は熱過渡試験期間中継続して行われた。

2.5.2 超音波探傷

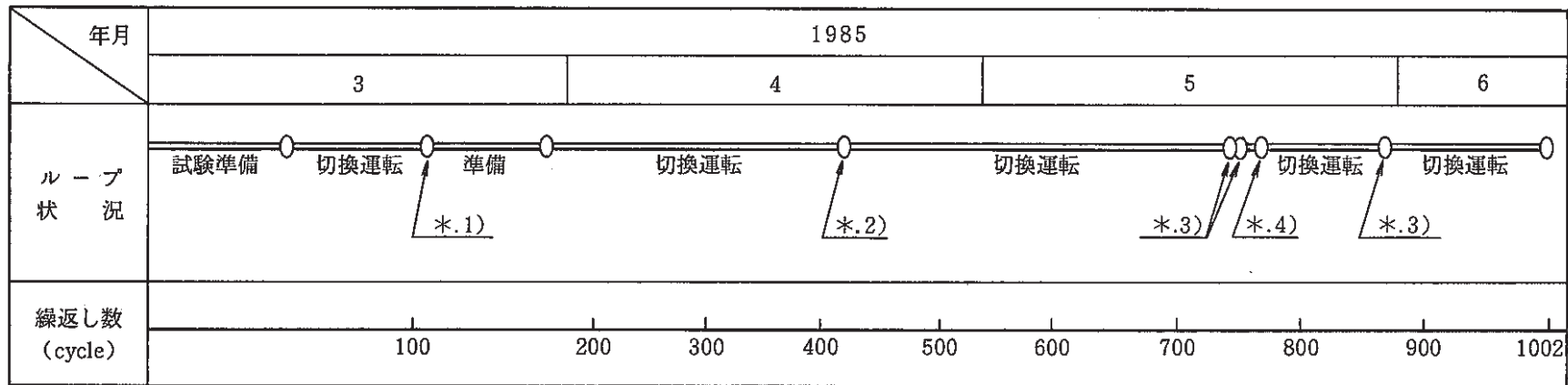
Fig. 2.11 に示すように超音波探傷部の保温材はパッケージ保温とし簡単に取りはずしができるようにした。探傷範囲は3ヶ所の溶接線（材厚 25 mm, 40 mm）および母材部であり、円周方向の内面欠陥を主対象に探傷した。供試体の温度は約 200 °C、内部にナトリウムが 1 m³/min で流動する状態で探傷した。

探触子には圧電素子を使用した高温用超音波探触子、探傷周波数約 2 MHz、屈折角約 45°を使用した。探傷器はクラウトクレマ USIP-11 を使用した。カプラントはシリコンオイル KF-54 を用いた。

2.6 試験経過

Table 2.2 に試験経過を示す。試験前準備に約 10 日間、試験期間中ナトリウム空操弁の作動用窒素ガス供給断、ナトリウム空操弁（EV-101, EV-105）作動不良、ナトリウム漏洩誤警報等の異常が生じた。繰返し数 1,002 回で試験を終了した。その後、高低温系のナトリウム温度を 200 °C に降温して、供試体一部の超音波探傷の結果供試体に欠陥指示が認められたので運転を終了した。

Table 2.2 Test Schedule



- *.1) ナトリウム空操弁作動用窒素ガス配管誤切断
- *.2) ナトリウム弁 (EV-101) 異常
- *.3) " (EV-105) "
- *.4) 供試体入口配管ナトリウム漏洩誤警報

3. 試験結果

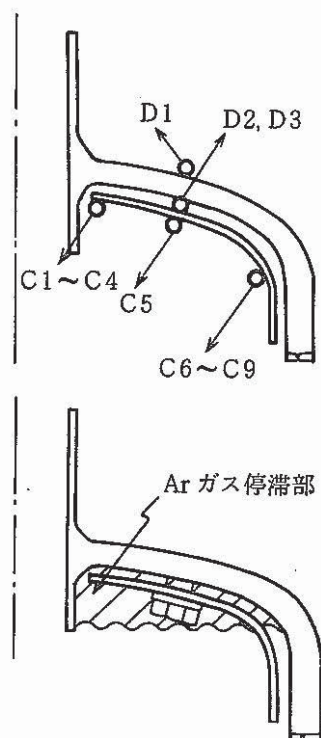
本章では、温度、変位及び歪の計測データを示す。これらのデータは、熱過渡（600℃↔250℃）の繰り返し（1,002 サイクル実施）に於いて、基本的には同一であったので、ここでは試験中頃の 584 サイクル目のデータを代表とする。一部繰り返しにつれて変化の生じたものについては、以下の各部に於いてその都度説明する。

3.1 温度の試験結果

温度のデータは、供試体の内部温度と外部温度に大きく区分され、供試体内部温度は更に各部温度及び供試体全体としての軸方向温度分布に分けることができる。次節でこれらの温度変化の挙動を順次述べる。熱過渡挙動は低温（250℃）のナトリウムが供試体を循環する 15 分間（コールドショック以下 C.S. と略す、600℃→250℃）とそれに続いて高温（600℃）のナトリウムが供試体を循環する 105 分間（ホットショック以下 H.S. と略す、250℃→600℃）で異なるので説明ではこの上にも注意を払った。供試体の内面熱電対は供試体内ナトリウムの流況、ライナーの性能確認等に 70 点、外面熱電対は供試体板厚分布、ライナーの性能確認及び歪計の温度補償用等に 50 点、計 120 点取り付けた。

3.1.1-1 ライナー内外面の挙動

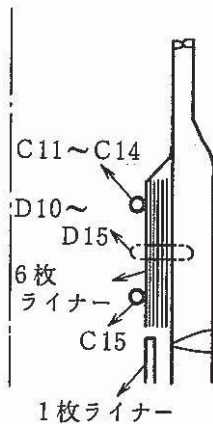
(1) 上鏡ライナー（ch No. C1～C4, C5, C6～C9, D1～D3）



上鏡ライナーには、熱電対を内側 9 点、外側 1 点、ライナー～供試体間 Na 部 2 点全 12 点取り付けた。ここでは熱電対の応答より Ar ガス停滞部が運転中に成長した為まず代表的な C6～C9 について述べる。C.S. において 600℃ から 300℃（以下 4T300℃）になるまで約 4 分かかっているが H.S. では 250℃ から 550℃（以下 4T300℃）になるまで約 3 分と早い。C.S. で温度ゆらぎが最大 50℃～60℃なのに対し H.S. では 10℃で殆んど無いと言ってよい（Fig. 3.1.1-3）。これは温度応答が C.S. 側で遅く H.S. 側で早いことを意味している。他の 8 点を見ると 600℃→250℃の熱過渡が得られていない。これは供試体入口ノズル部がガス抜き構造になっていなかった為上鏡内にカバーガスである Ar ガスが循環中に停滞して起った現象であり 8 点全てが 430℃以下になっていないことが分かる。（Fig. 3.1.1-1, 2, 4） 図 3.1.1-4 で D2 の温

度応答が良いのは、ライナー端部がナトリウムに浸されて熱伝導により変化しているものと考えられる。

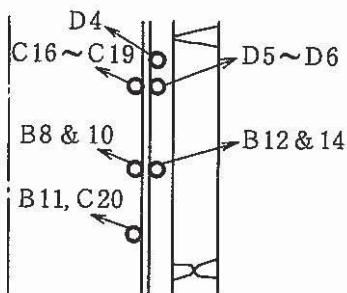
(2) 上部胴ライナー (ch No. C11~C14, C15, D10~D15)



上部胴ライナーには熱電対を内側5点、6枚ライナー各層外側に1ケずつ(6点)計11点取付けた。C11~C14においてC.S.及びH.S.の温度応答は4T300℃になるまでそれぞれ3分と殆んど変化無い。温度ゆらぎは約20℃であり。 (Fig. 3.1.1-5) この部位での軸方向温度応答をC11~C14とC15(150mm差)で比較して見るとC.S.側はあまり変わらないがH.S.側において4T300℃になるまでC11~C14では3分、C15では5分と下流側が遅くなっている。(Fig. 3.1.1-5, 6) 6枚ライナー各層外側の熱電対D10~D15に転じて見るとC.S.2~3分後で1層目(供試体壁側)と6

層目(供試体中心側)の温度差が最大40℃ある。H.S.では30秒~2分後で最大70℃あり、C.S.側に比べH.S.側でのライナーの層間温度差が大きいことが言える。全体的に各層温度応答は比較的滑らかである。又ライナー3層目ではC.S.6分、H.S.7分30秒で4T300℃になっている。(Fig. 3.1.1-7)

(3) 下部胴ライナー (ch No. B8 & 10, B11, B12 & 14, C16~C19, C20, D4, D5~D6)



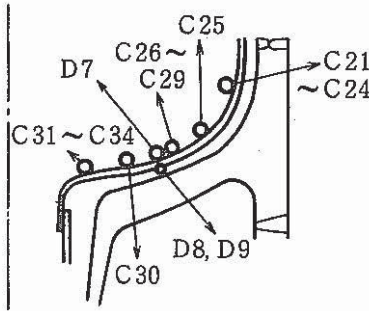
下部胴ライナーには熱電対を内側8点、外側4点、ライナー~供試体間ナトリウム部1点計13点取付けた。この部位でのライナー内側、外側、ナトリウム部共C.S.側での温度ゆらぎは無くなっているが、H.S.側においてライナー内側での温度ゆらぎ幅が大きくなっている (Fig. 3.1.1-8~13)。

ライナー外側では殆んど温度ゆらぎは見られないがD4については若干の温度ゆらぎから6枚ライナーと1枚ライナー間隙

からのナトリウム流入の影響がある (Fig. 3.1.1-12)。しかしD4から74mm下流のD5, D6には温度ゆらぎがD4よりなく温度応答もD4よりも若干緩くなっていることからナトリウム流入の影響がない (Fig. 3.1.1-13)。平均的に見てライナー内側の温度応答はC.S.2分30秒、H.S.3分で4T300℃となる。この部位での軸方向温度分布は上部胴のような変化は見られなかった。ライナーの内側(内側: B8 & 10と外側: B12 & 14)に転じて見ると内外温度差がC.S.1~3分で最大70℃、H.S.1分で最大100℃ある。外側の温度応答はC.S.6分H.S.7分で4T300℃になっており上部胴ライナー3

層目の温度応答とほぼ同等である (Fig. 3. 1. 1 - 8, 9)。

- (4) 下鏡ライナー (ch No C 21 ~ C 24, C 25, C 26 ~ C 29, C 30, C 31, ~ C 34, D 7 ~ D 9)

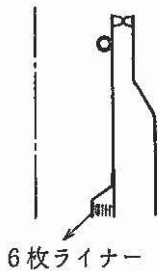


下鏡ライナーには熱電対を内側15点, 外側1点, ライナー~供試体間ナトリウム部1点計17点取り付けした。ライナー内側の温度応答は (C 21 ~ C 24, C 25, C 26 ~ C 29, C 30, C 31 ~ C 34) 下部近傍においてC.S. 2分30秒後, H.S. 3分後で ΔT 300°Cに到達しているのに対し, 出口ノズルに近づくに従がい応答が早くC.S. & H.S. 共2分後で ΔT 300°Cとなっている (Fig. 3. 1. 1 - 14 ~ 18)。ライナー内外では (内側: D 7, 外側: D 8, D 9) C.S., H.S. 共に最大温度差 50°C, 温度応答は内側でC.S. 2分30秒後 H.S. 3分後, 外側でそれぞれ5分, 7分と緩やかになっている (Fig. 3. 1. 1 - 19)。

外側: D 8, D 9) C.S., H.S. 共に最大温度差 50°C, 温度応答は内側でC.S. 2分30秒後 H.S. 3分後, 外側でそれぞれ5分, 7分と緩やかになっている (Fig. 3. 1. 1 - 19)。

3. 1. 1 - 2 他部位での挙動

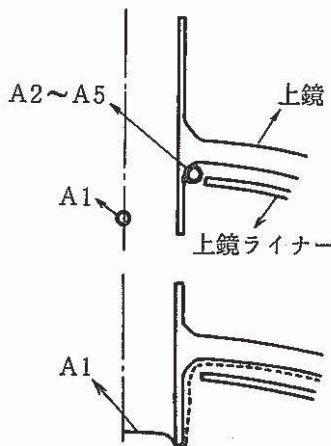
- (1) 上部胴ライナーなし (ch No C 10)



6枚ライナー

ここでは厚板 25mmの内面に熱電対を1点取り付けした。C.S., H.S. 共若干の温度ゆらぎが見られるが上鏡と上部胴のライナー内側の温度ゆらぎより少ない (Fig. 3. 1. 1 - 20)。温度応答はC.S. 4分 H.S. 3分で ΔT 300°Cになっている。

- (2) 入口ノズル (ch No A 1, A 2 ~ A 5)

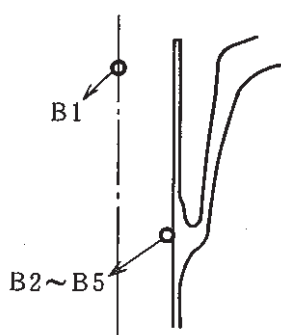


A 1 取付寸法

入口ノズルには熱電対をノズル中心1点, ノズル外側4点計5点取り付けしたが, ノズル外側 (A 2 ~ A 5) については前述の Fig. 3. 1. 1 - 1 (1)の上鏡ライナーガス停滞部に位置している。Fig. 3. 1. 1 - 21よりガス層であるにもかかわらず, C.S. 270°CまでH.S. 580°Cまで到達しているのは入口ノズルからの熱伝導が大きい為と思われる (Fig. 3. 1. 1 - 21)。入口ノズル中心の熱電対 (A 1) は約 120 サイクルで厳しい熱過渡にて断線してしまった。

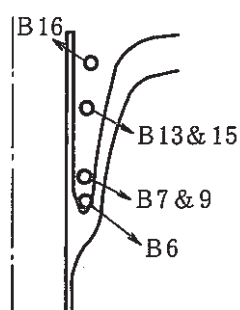
参考までに 49 サイクルの A 1 の応答はC.S. 約10秒 H.S. 約20秒で ΔT 300°Cになっている (Fig. 3. 1. 1 - 31)。

(3) 出口ノズル (ch No. B1, B2~B5)



出口ノズルには熱電対をノズル中心1点ノズル内面4点計5点取り付けしたが、ノズル中心温度(B1)は入口ノズル部に比べ熱過渡が緩やかな為最終サイクルまで測定している。Fig. 3.1.1-22, 23 からC.S., H.S.共約10秒で温度が急変しており出口ノズルまで一旦流入してから上部へ移行しているのがわかる。中心部の応答はC.S. 2分 H.S. 1分30秒で内面の応答はC.S. 共2分30秒である。

(4) 出口ノズルセーフエンド (ch No. B6, B7 & 9, B13 & 15, B16)



ここは熱電対を軸方向4ヶ所周方向2ヶ所計6点取り付けしたが軸方向温度差は殆んどない。温度応答はC.S. 3分30秒, H.S. 6分30秒で他のライナー外側温度に比べ早くなっているが温度応答曲線が緩やかになっている (Fig. 3.1.1-24 ~ 27)。Fig. 3.1.1-28, 29にはこの部位での軸方向温度分布を示す。軸方向には大きな温度差は無いがC.S.とH.S.の温度応答がC.S.側で若干良くなっている。C.S. 3分で ΔT 280℃ H.S. 3分で250℃でありセーフエンド部内で対流が生じていると考えられる。

3.1.1-3 全体的挙動

今まで述べてきたことについてまとめてみると入口ノズルより流入してきたナトリウムの主流は出口ノズルまで一旦到達してから上部へ移行して行く。C.S.では温度ゆらぎが少ないが、中でも上鏡ライナー内側のみゆらぎが大きい。H.S.では殆んどゆらいでいる。これは高温ナトリウムと低温ナトリウムが混合する時発生する浮力の効果の温度成層化の影響によるものと考えられる。

温度差300℃を達成するために必要な各箇所の時間及び順序をTable 3.1とFig. 3.1.1-30に示す。供試体内部でナトリウムはFig. 3.1.1-30のように流れているものと考えられる。

3.1.1-4 軸方向温度分布

供試体内面の軸方向の代表8点の温度の時間的な変化をFig. 3.1.1-32, 33に示す。これらは既に前節に述べたものであるが (Fig. 3.1.1-30), 同一の図で比較すると温度応答の傾向を把握しやすい。概略次のような傾向が読み取れる。

- 上鏡ライナー内側 (TE-C7) の温度応答がC.S.時最も遅い。
- 入口ノズル中心 (TE-A1) の応答が最も早く、出口ノズル中心 (TE-B1) の応答が最も遅い。

上鏡ライナー内側

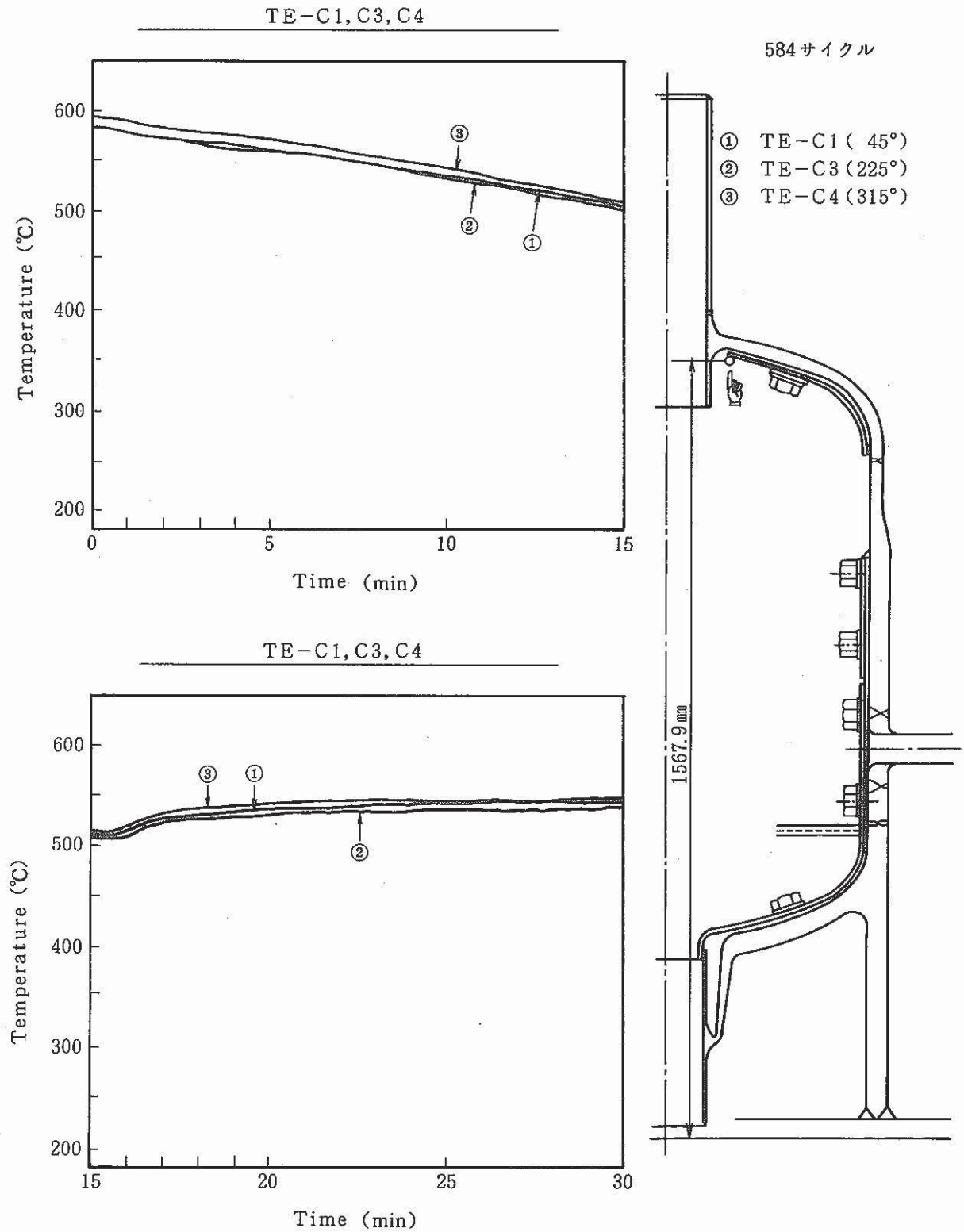


Fig. 3.1.1-1 Temperature Change of Liner's Inner Surface of Upper Head

上鏡ライナー内側

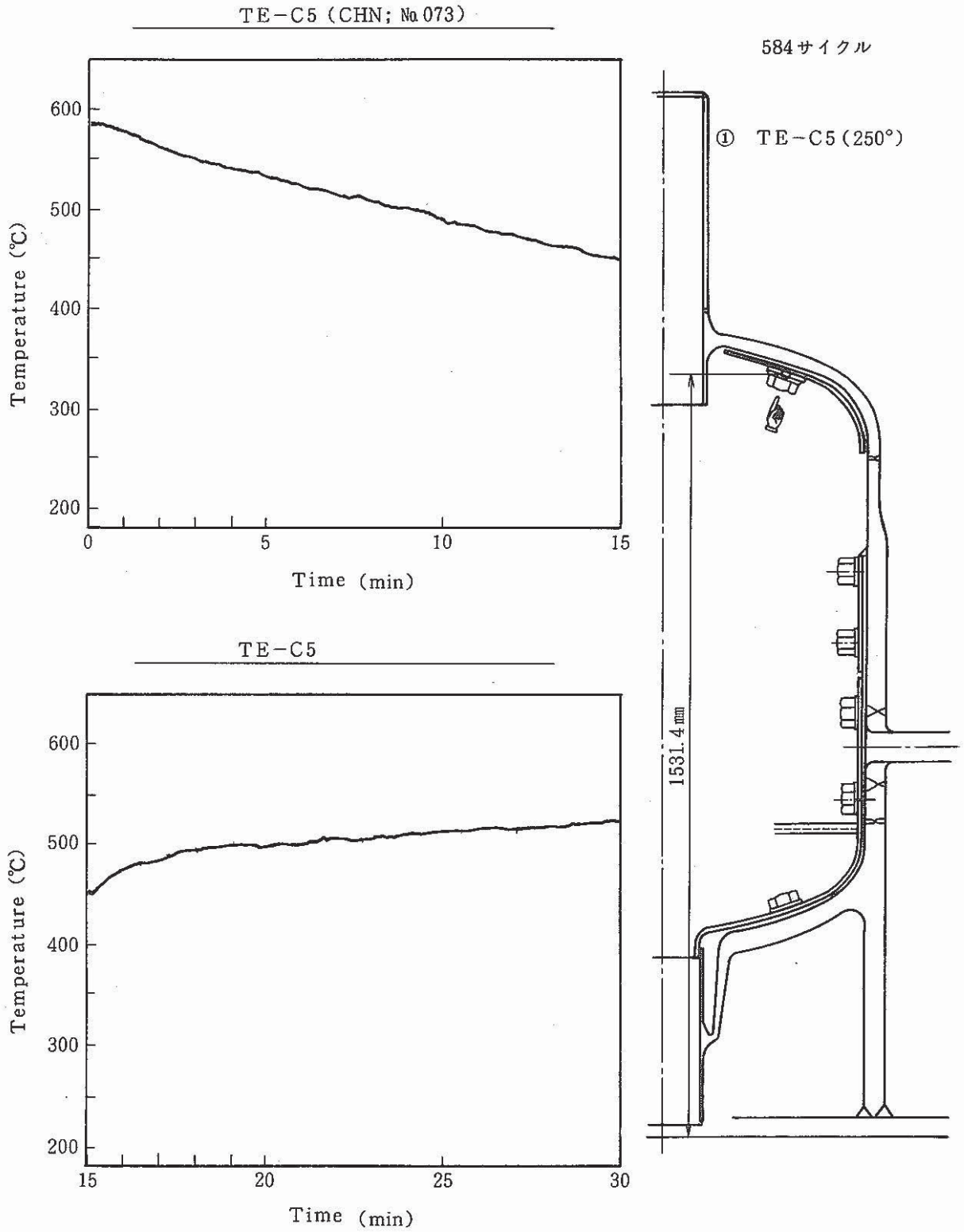
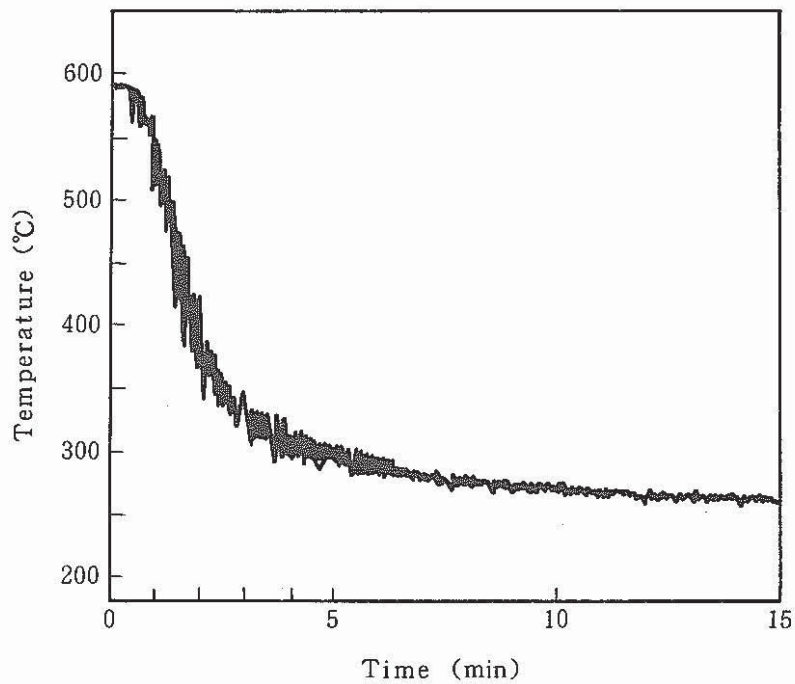


Fig. 3.1.1-2 Temperature Change of Liner's Inner Surface of Upper Head

上鏡ライナー内側

TE-C6, C7, C8, C9 (CHN ; No. 074, 075, 076, 077)

584 サイクル



TE-C6, C7, C8, C9

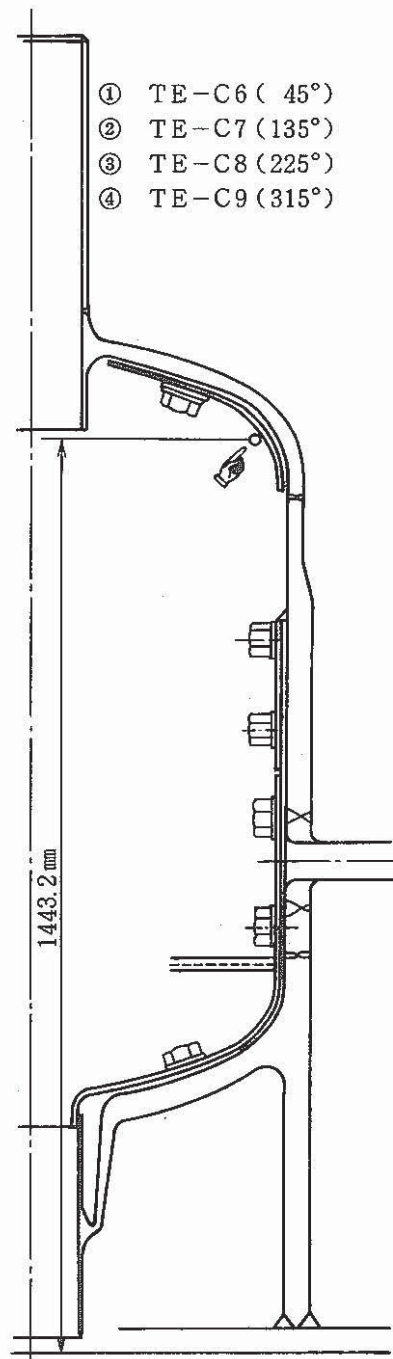
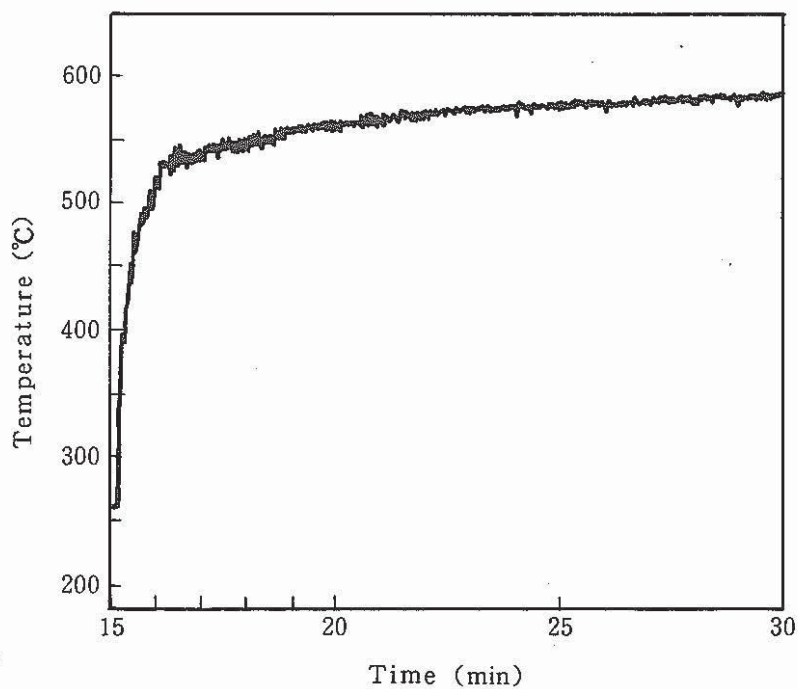


Fig. 3.1.1-3 Temperature Change of Liner's Inner Surface of Upper Head

上 鏡 ラ イ ナ ー

- ① ライナー内側
- ② ライナー外側
- ③ ライナー～上鏡Na部

TE-D1, D2, D3 (CHN; No. 103, 104, 105)

584 サイクル

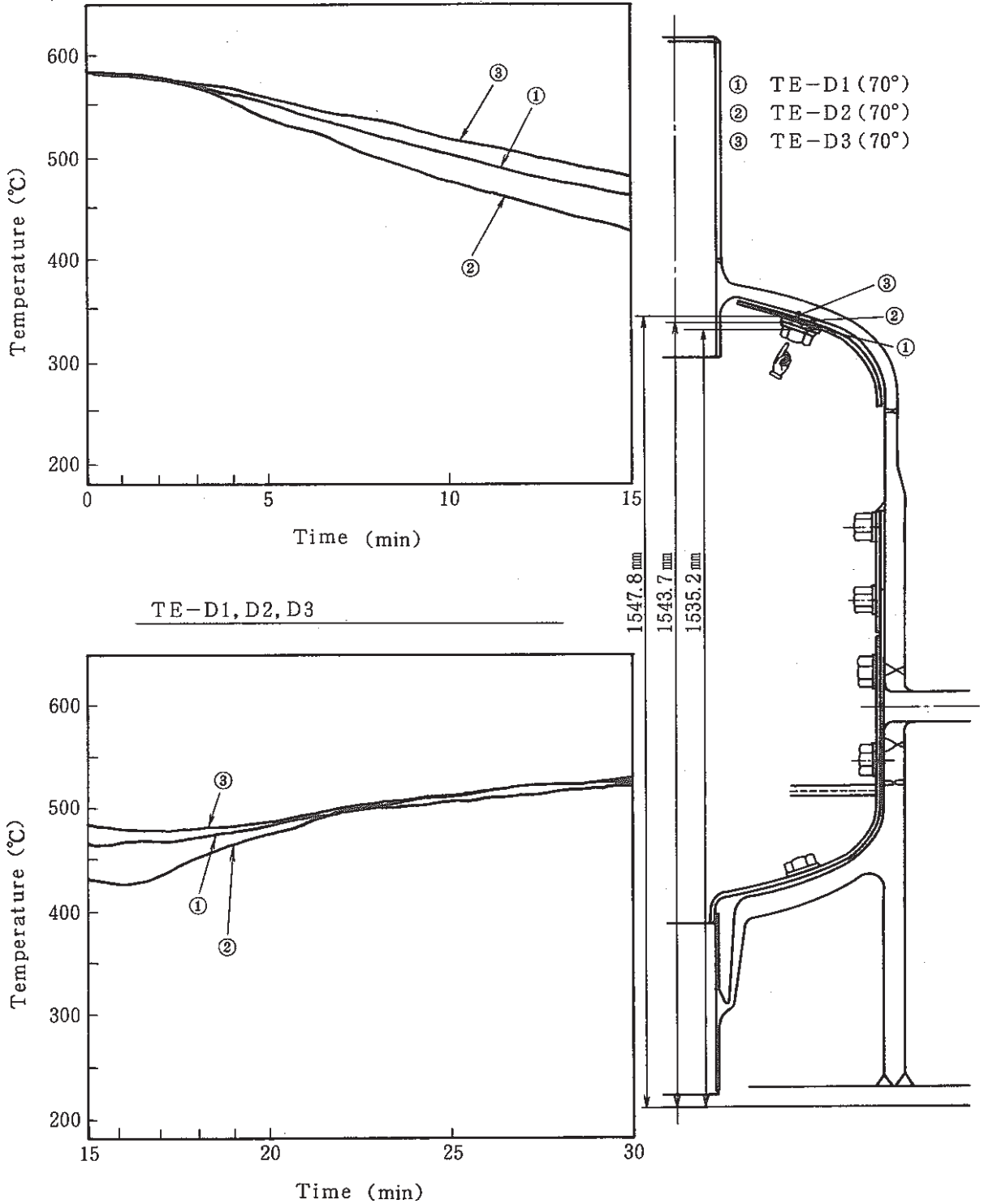
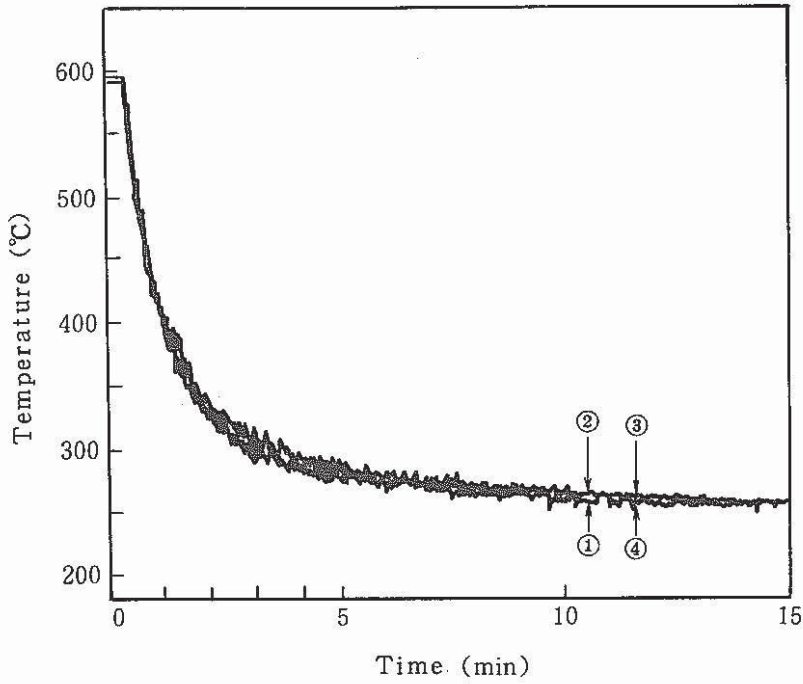


Fig. 3.1.1-4 Temperature Change of Liner of Upper Head

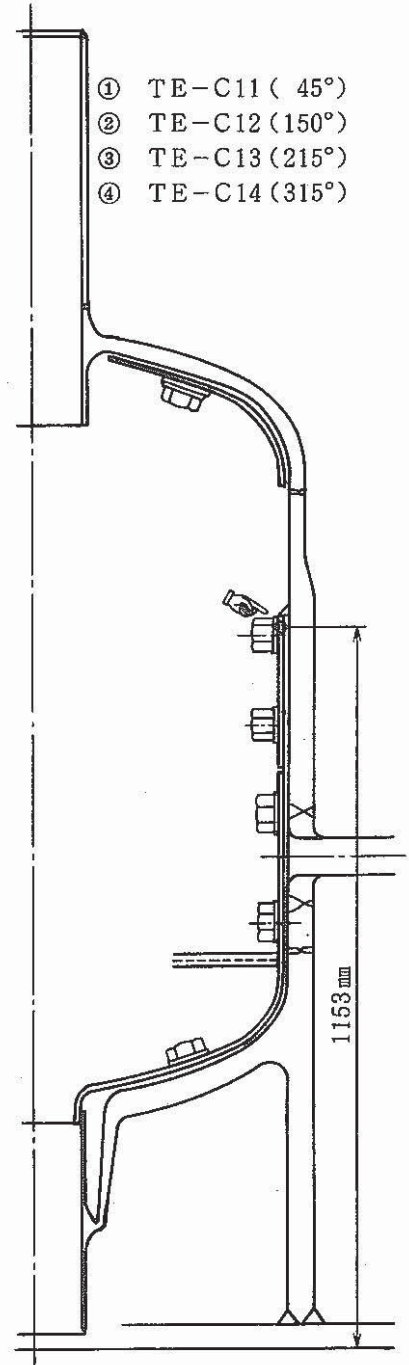
上部胴ライナー内側

TE-C11, C12, C13, C14(CHN ; No 79, 80, 81, 82)

584サイクル



- ① TE-C11 (45°)
- ② TE-C12 (150°)
- ③ TE-C13 (215°)
- ④ TE-C14 (315°)



TE-C11, C12, C13, C14

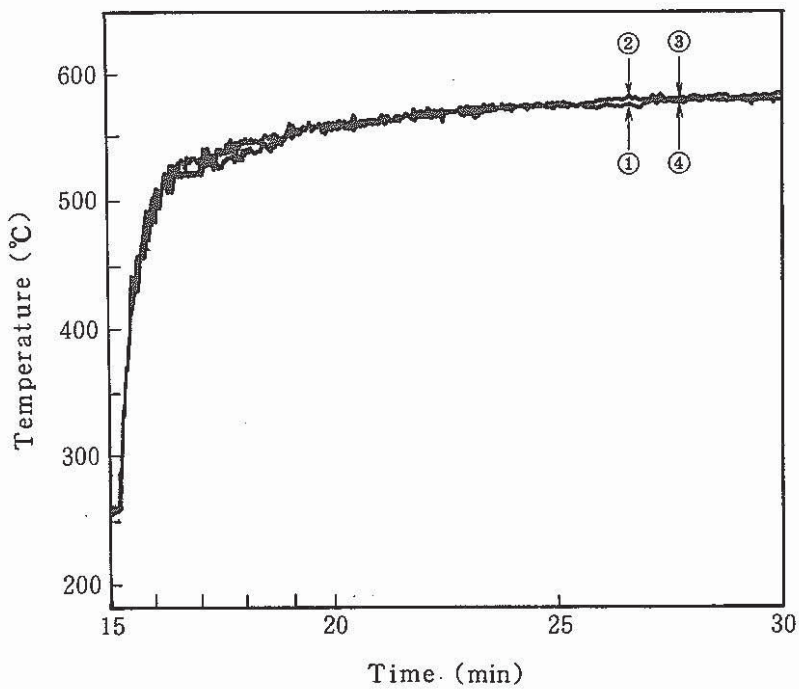


Fig. 3.1.1-5 Temperature Change of Liner's Inner Surface of Upper Part of Vessel

上部胴ライナー内側

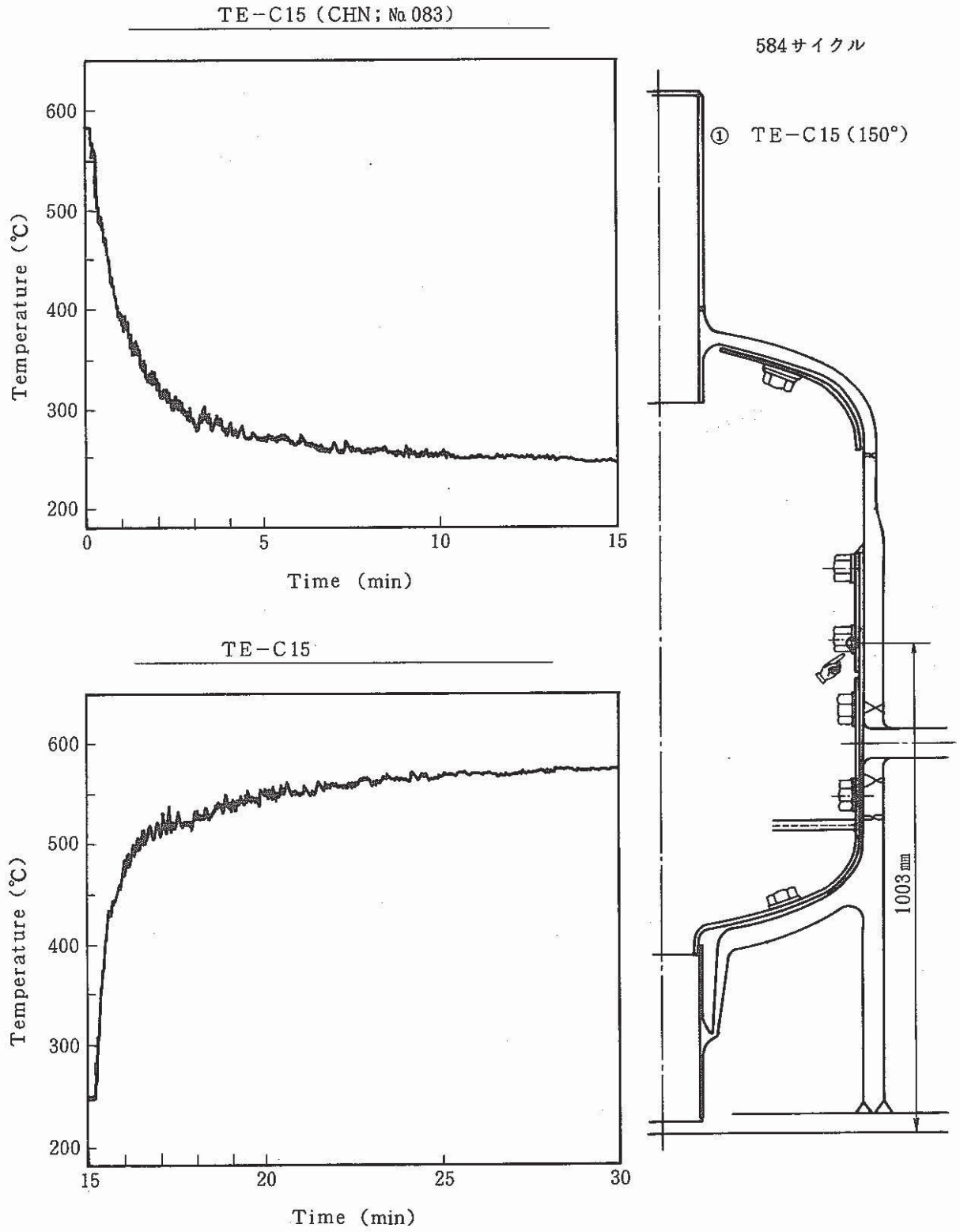


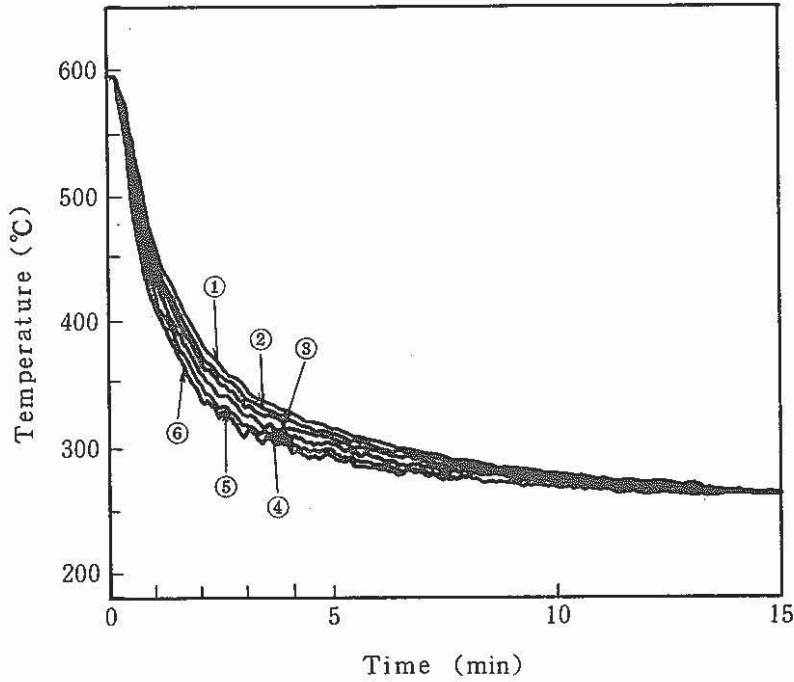
Fig. 3.1.1-6 Temperature Change of Liner's Inner Surface of Upper Part of Vessel

上部胴ライナー

- ① ライナー 1 層目外側
- ② " 2 "
- ③ " 3 "
- ④ " 4 "
- ⑤ " 5 "
- ⑥ " 6 "

TE-D10, D11, D12, D13, D14, D15 (CHN; No. 005, 010, 006, 007, 008, 009)

584 サイクル



TE-D10, D11, D12, D13, D14, D15

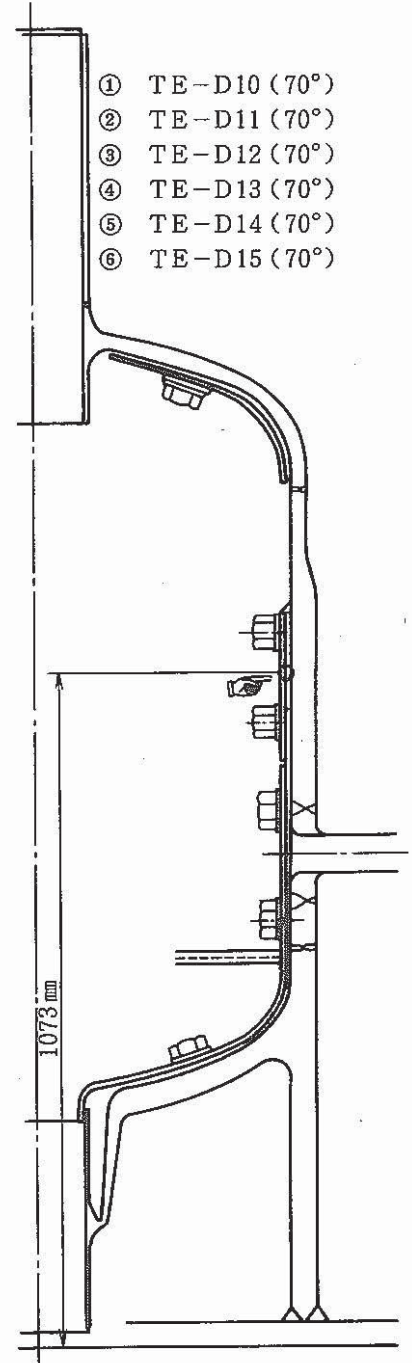
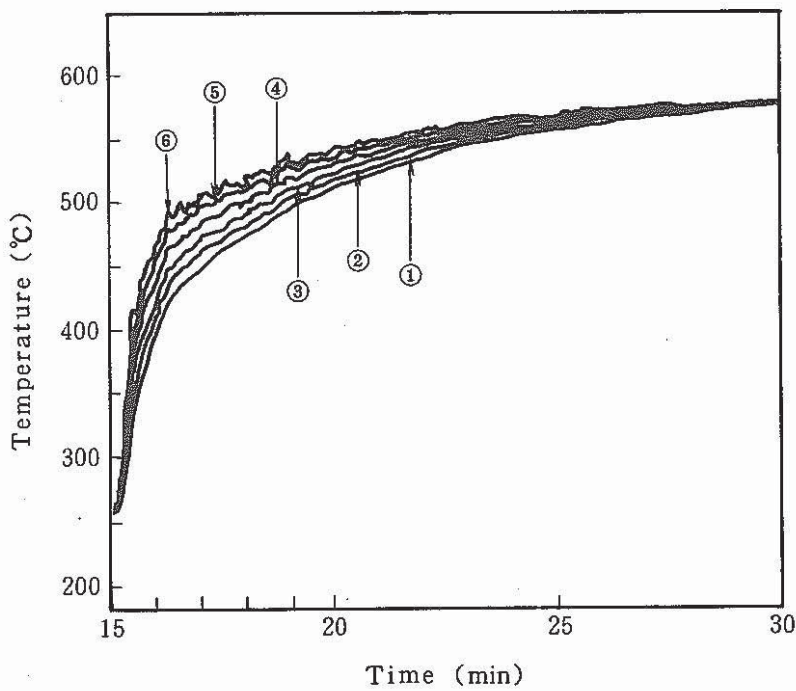


Fig. 3.1.1-7 Temperature Change of Liner's of Upper Part of Vessel

下部胴ライナー内側

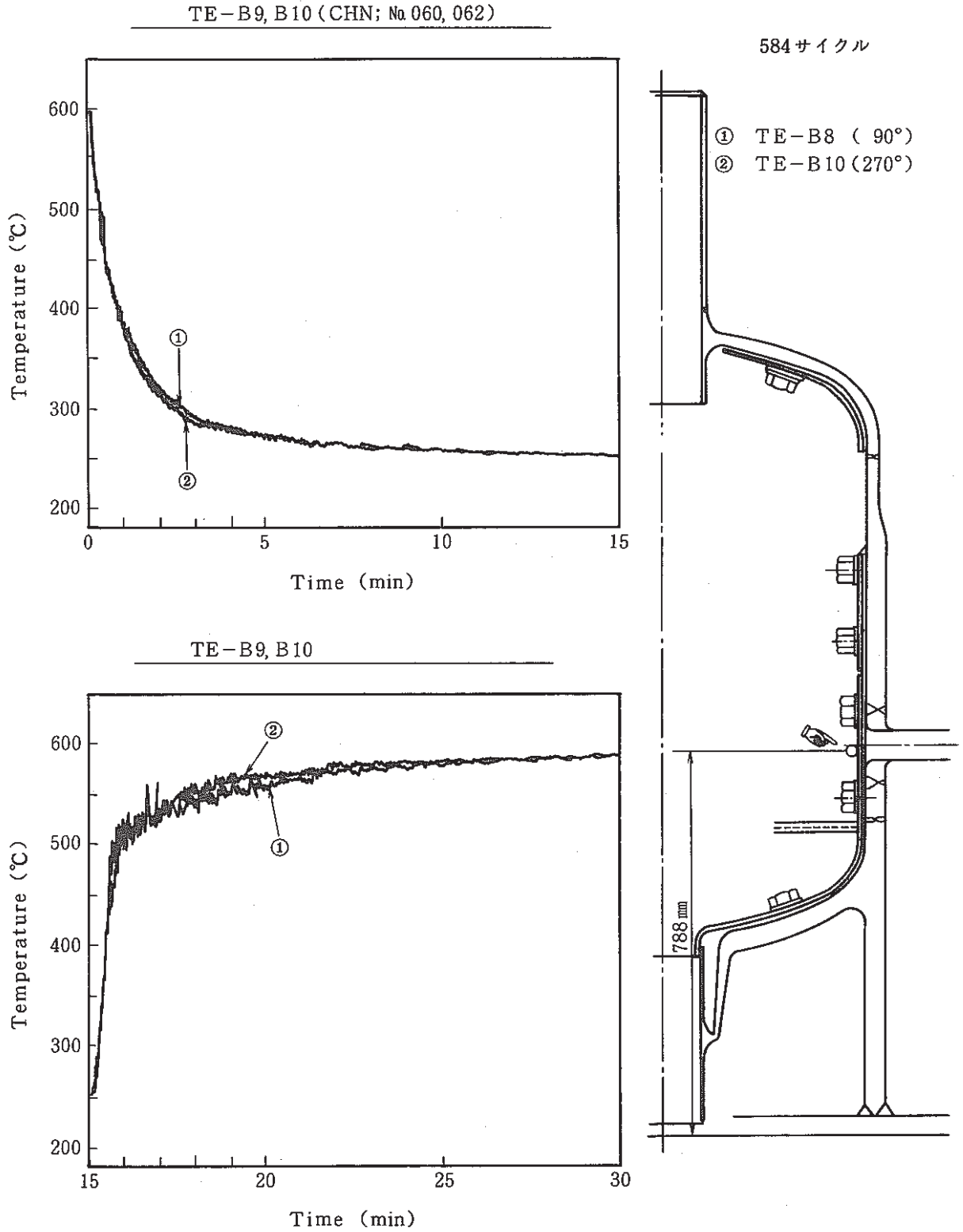
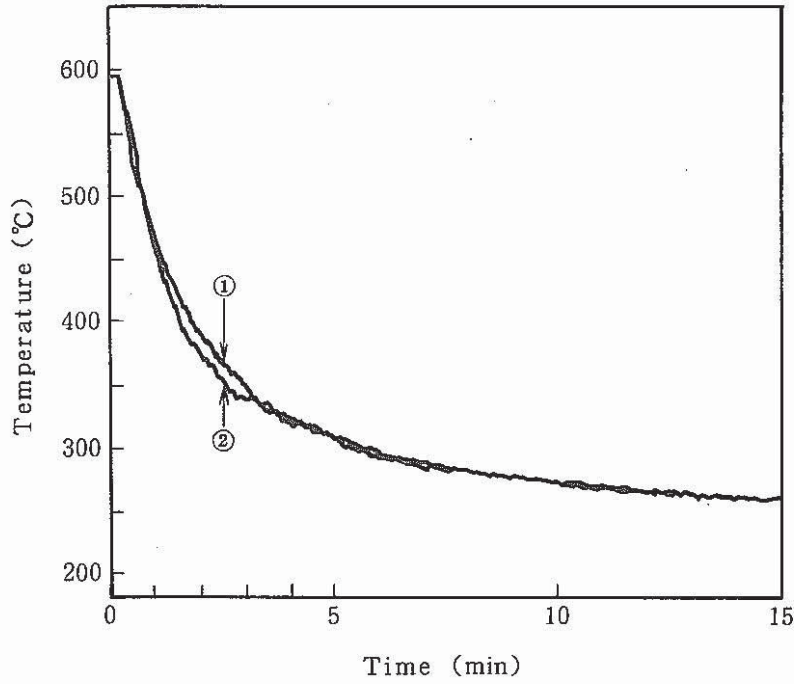


Fig. 3.1.1-8 Temperature Change of Liner's Inner Surface of Lower Part of Vessel

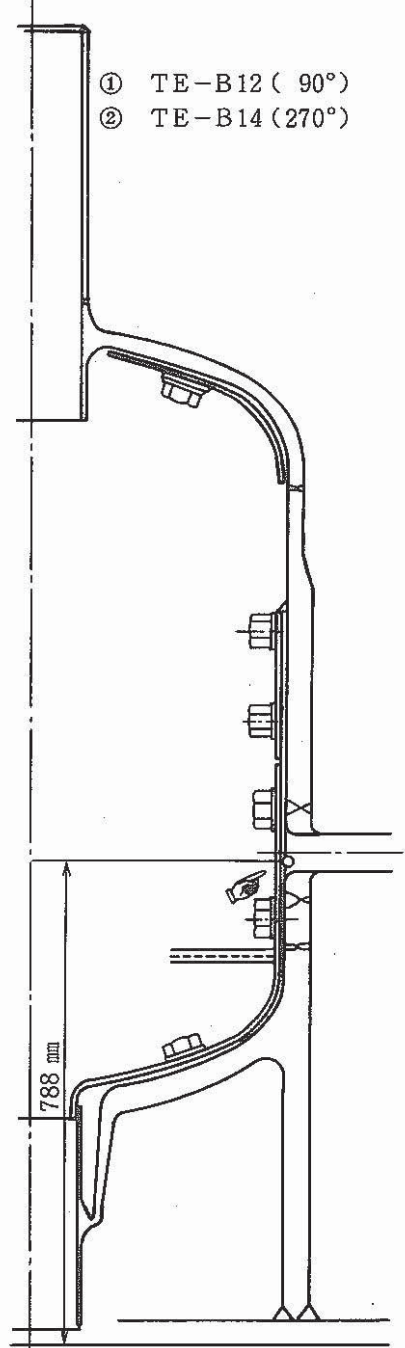
下部胴ライナー外側

TE-B12, 14 (CHN; No. 064, 066)



584サイクル

- ① TE-B12 (90°)
- ② TE-B14 (270°)



TE-B12, B14

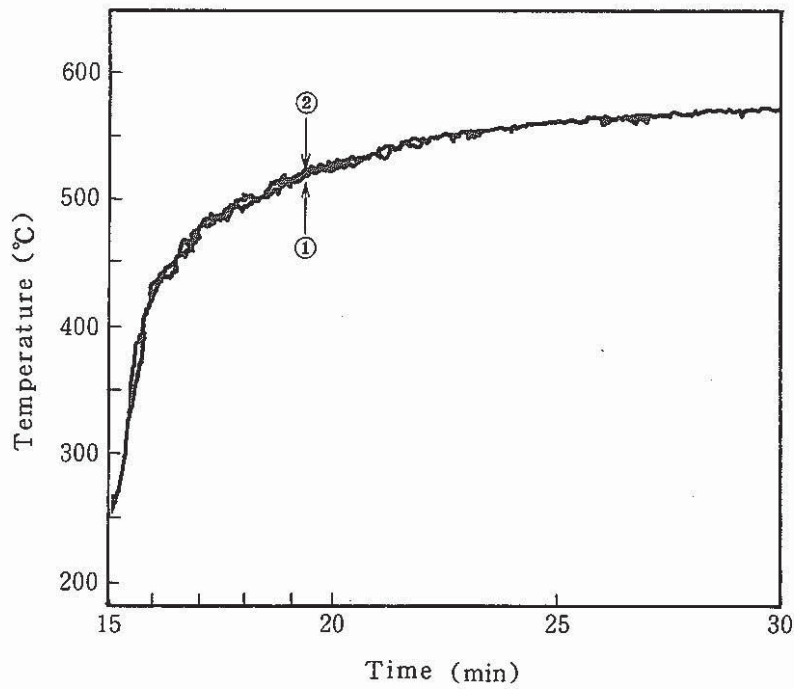
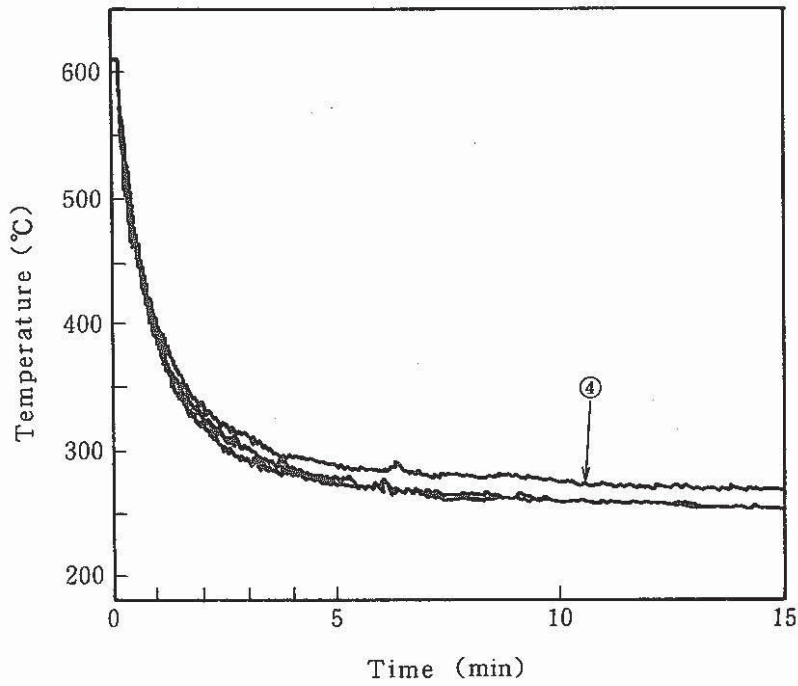


Fig. 3.1.1-9 Temperature Change of Liner's Outer Surface of Lower Part of Vessel

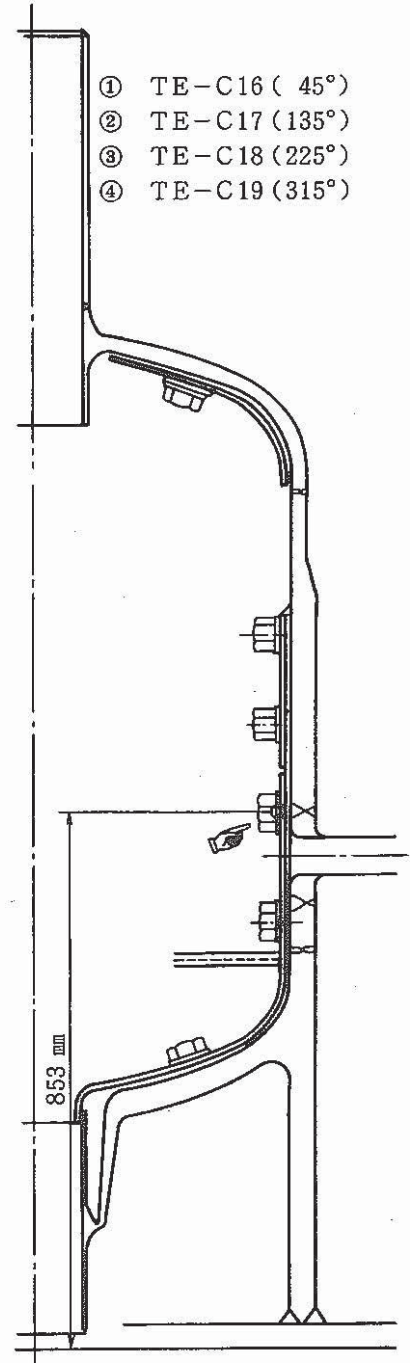
下部胴ライナー内側

TE-C16, C17, C18, C19 (CHN; No. 084, 085, 086, 087)

584サイクル



- ① TE-C16 (45°)
- ② TE-C17 (135°)
- ③ TE-C18 (225°)
- ④ TE-C19 (315°)



TE-C16, C17, C18, C19

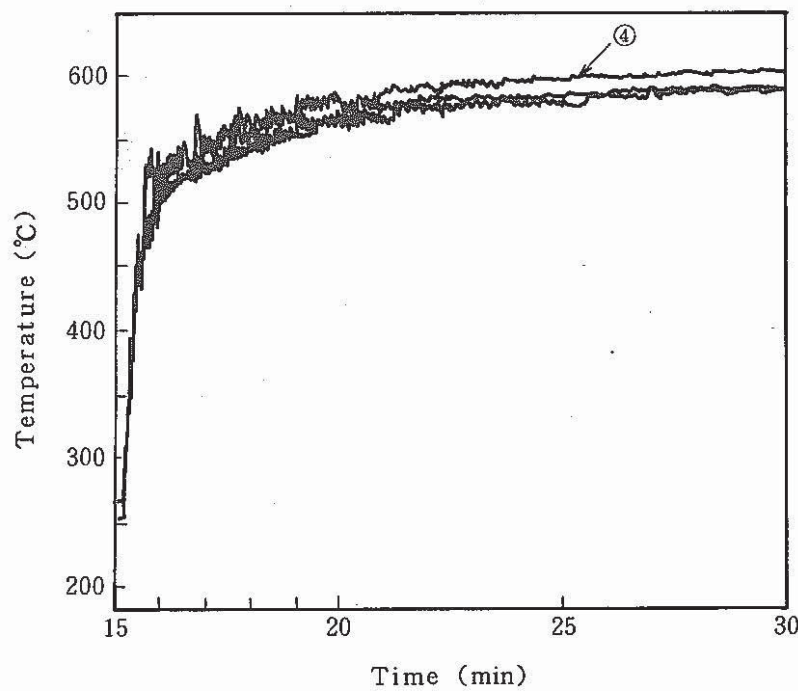


Fig. 3.1.1-10 Temperature Change of Liner's Inner Surface of Lower Part of Vessel

下部胴ライナー内側

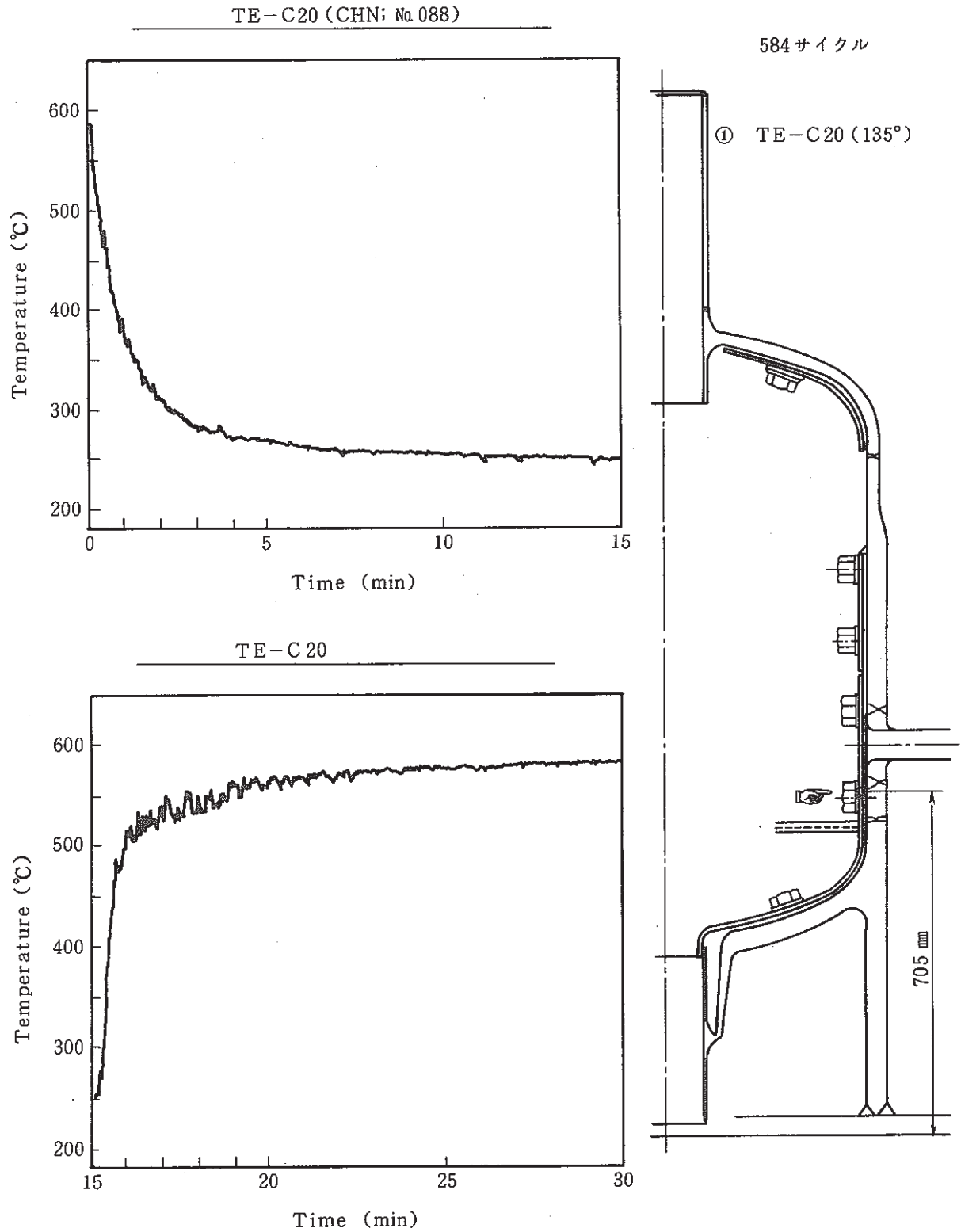


Fig. 3.1.1-11 Temperature Change of Liner's Inner Surface of Lower Part of Vessel

下部胴ライナー外側

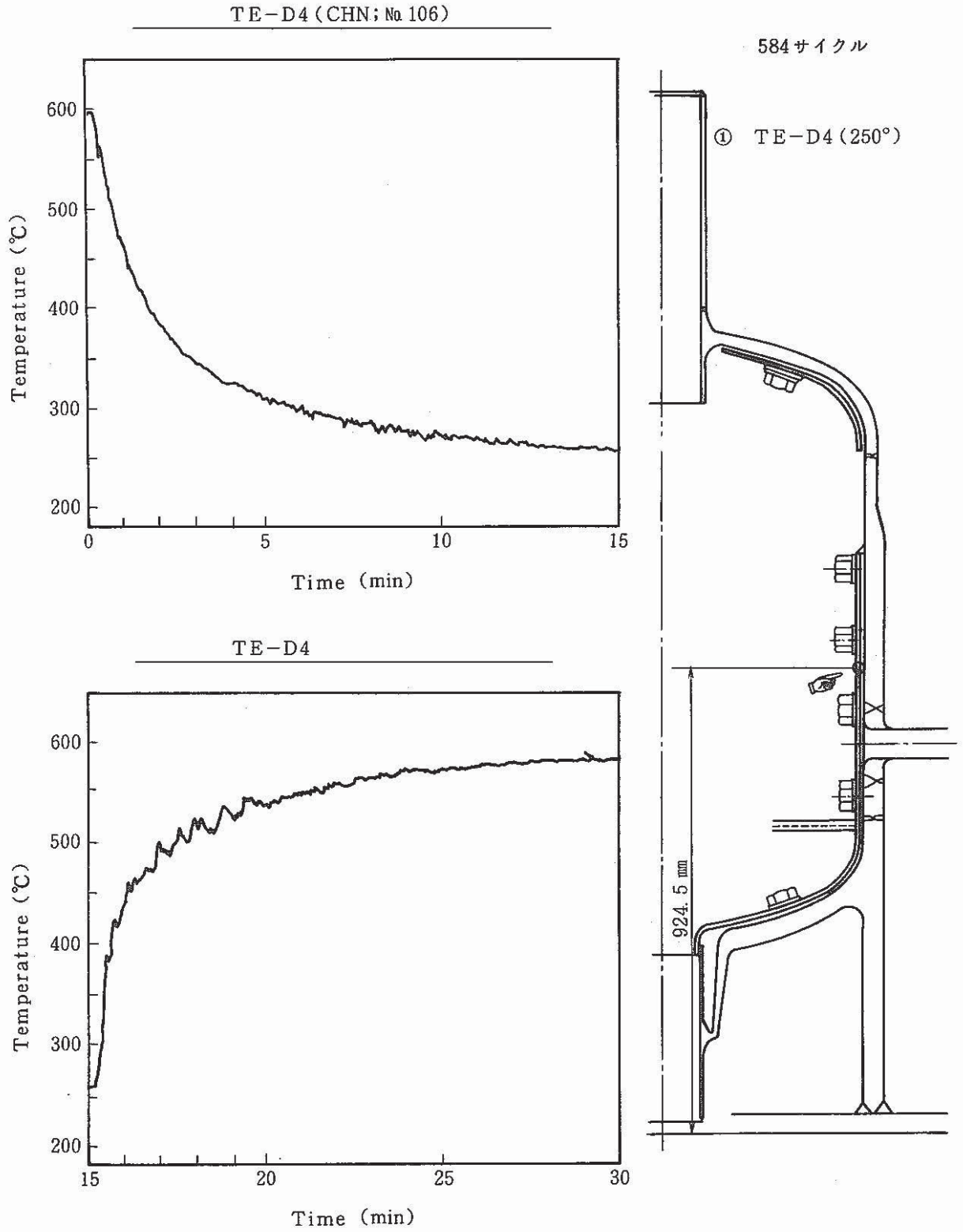
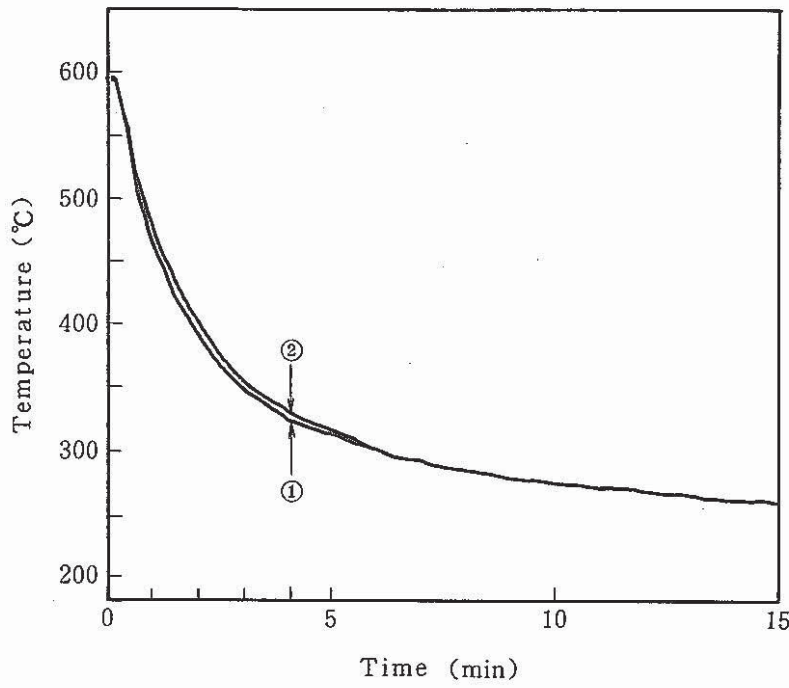


Fig. 3.1.1-12 Temperature Change of Liner's Outer Surface of Lower Part of Vessel

下部胴ライナー

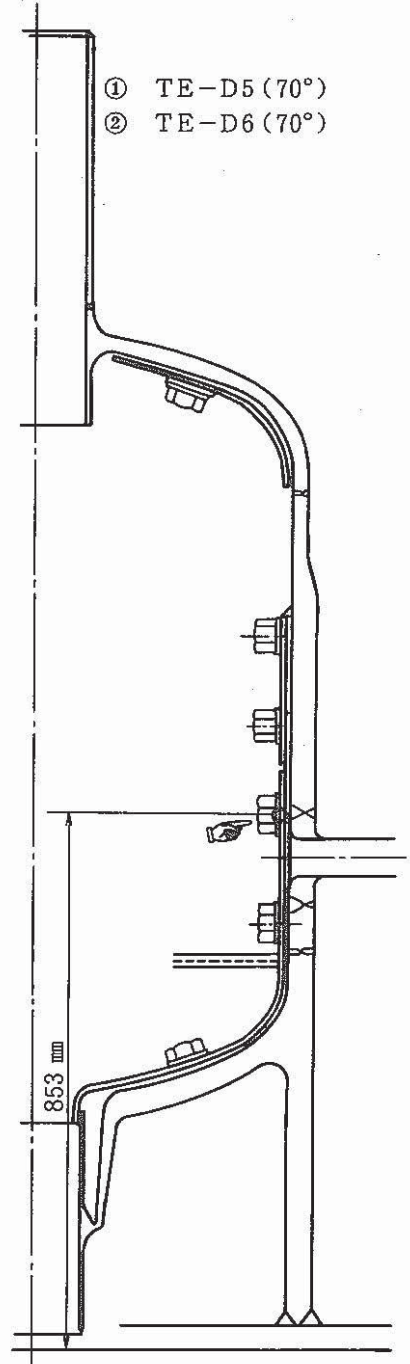
- ① ライナー外側
- ② ライナー～下部胴Na部

TE-D5, D6 (CHN; No.000, 001)



584サイクル

- ① TE-D5 (70°)
- ② TE-D6 (70°)



TE-D5, D6

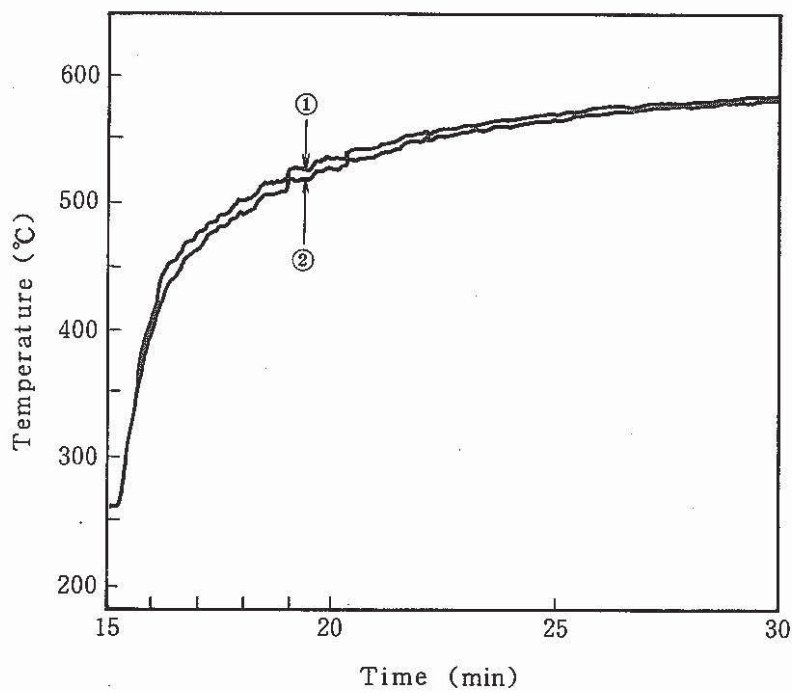
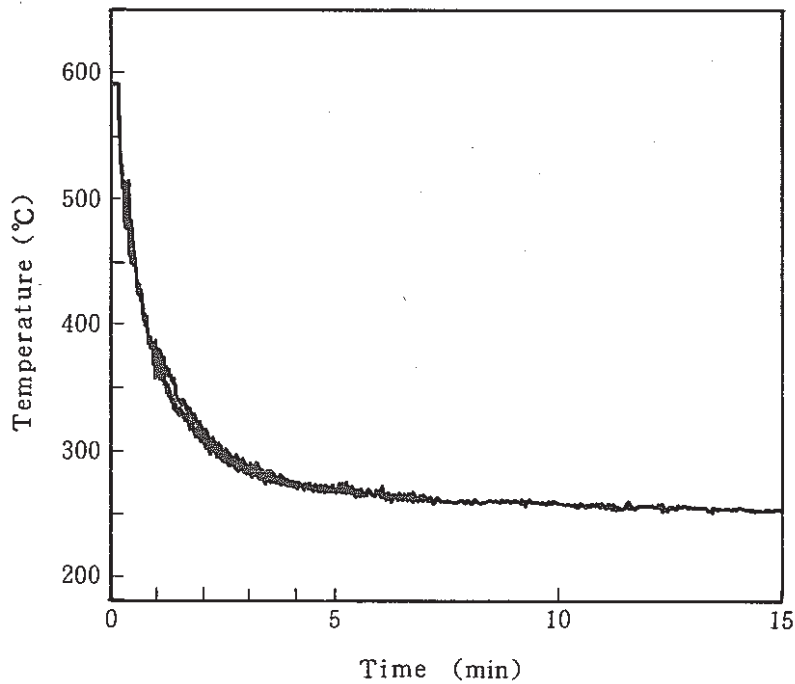


Fig. 3.1.1-13 Temperature Change of Liner of Lower Part of Vessel

下鏡ライナー内側

TE-C21, C22, C23, C24 (CHN; No. 089, 090, 091, 092)

584 サイクル



TE-C21, C22, C23, C24

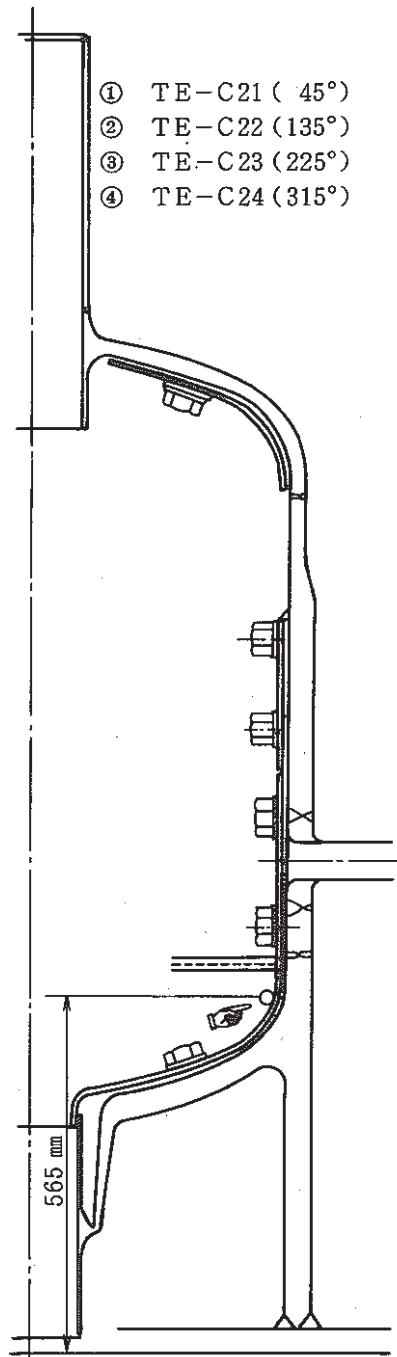
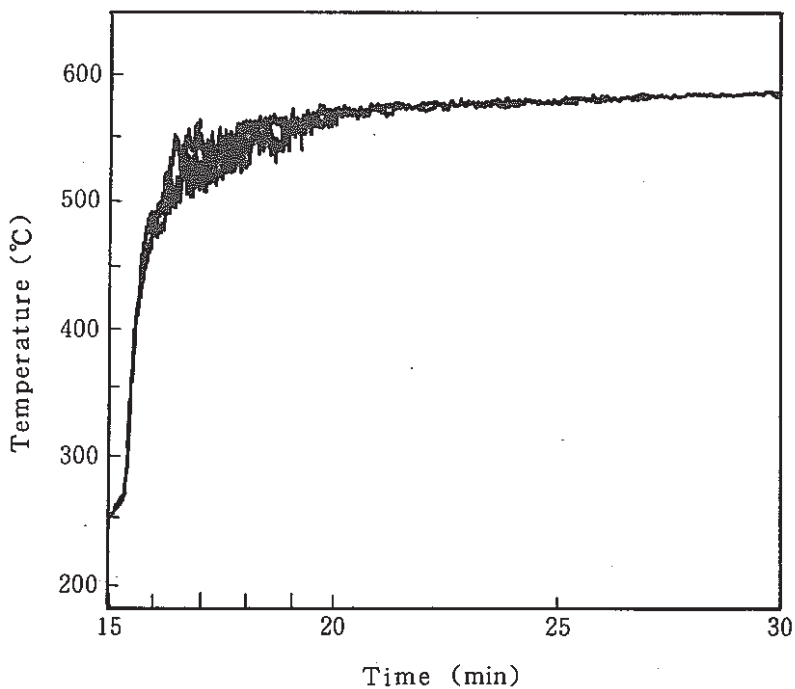


Fig. 3.1.1-14 Temperature Change of Liner's Inner Surface of Lower Head

下鏡ライナー内側

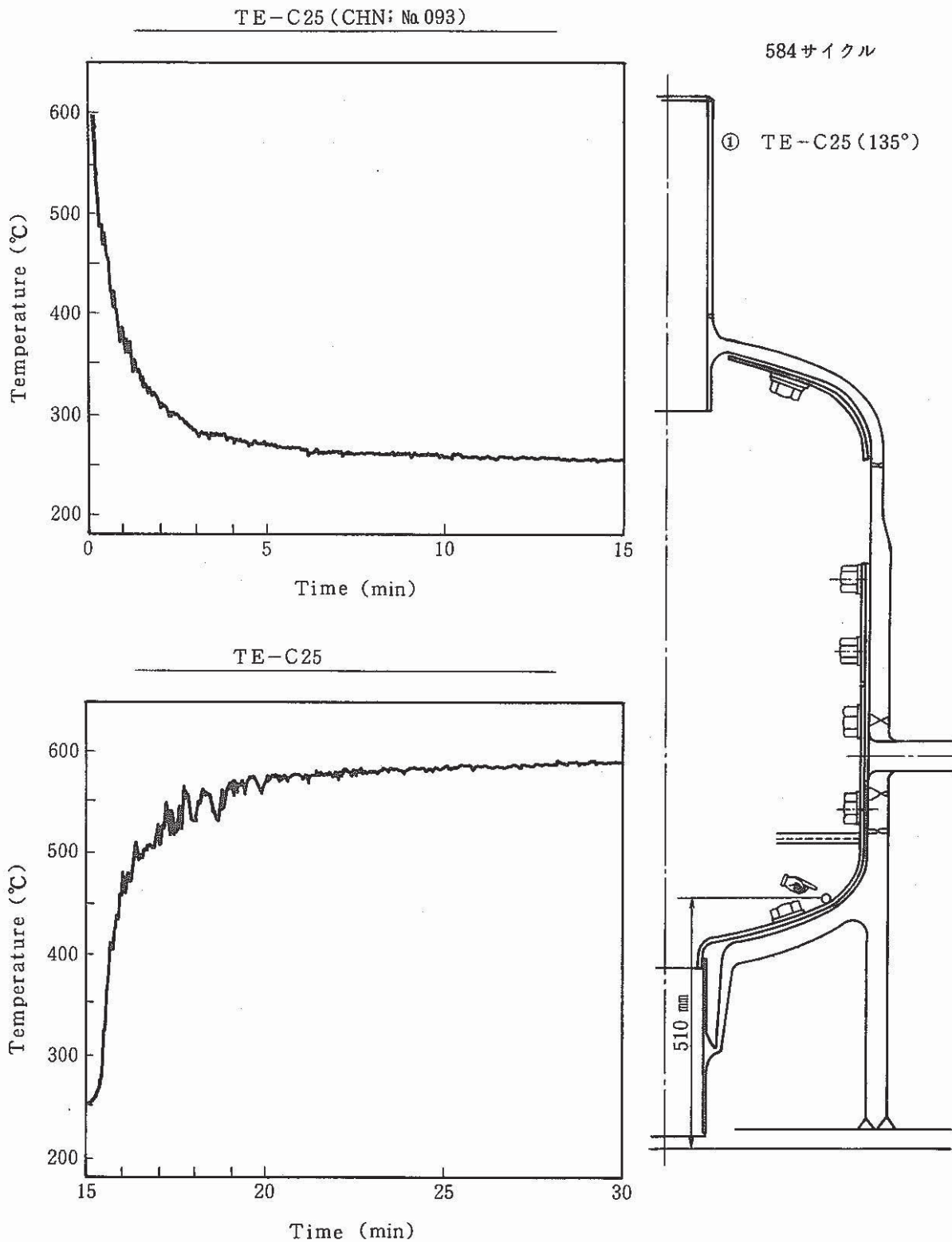
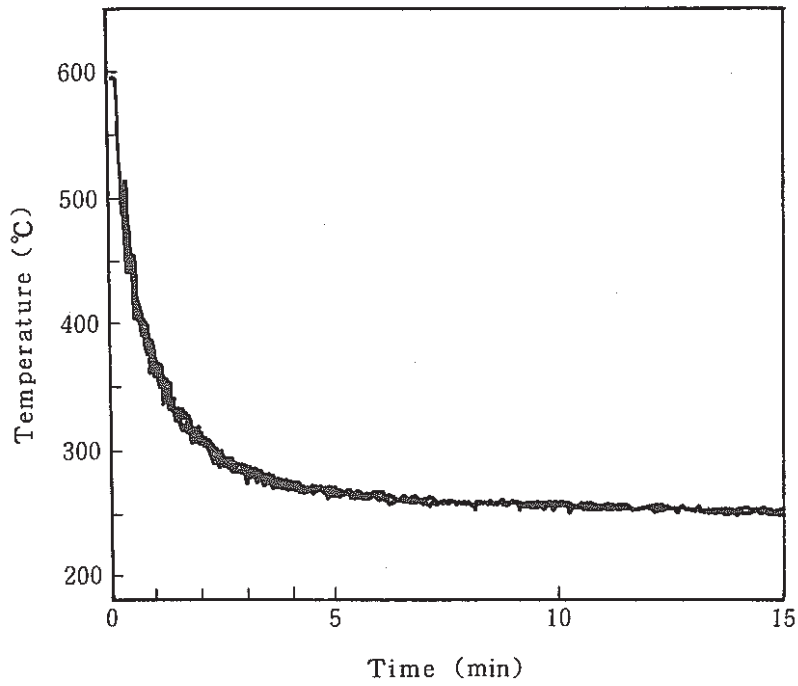


Fig. 3.1.1-15 Temperature Change of Liner of Inner Surface of Lower Head

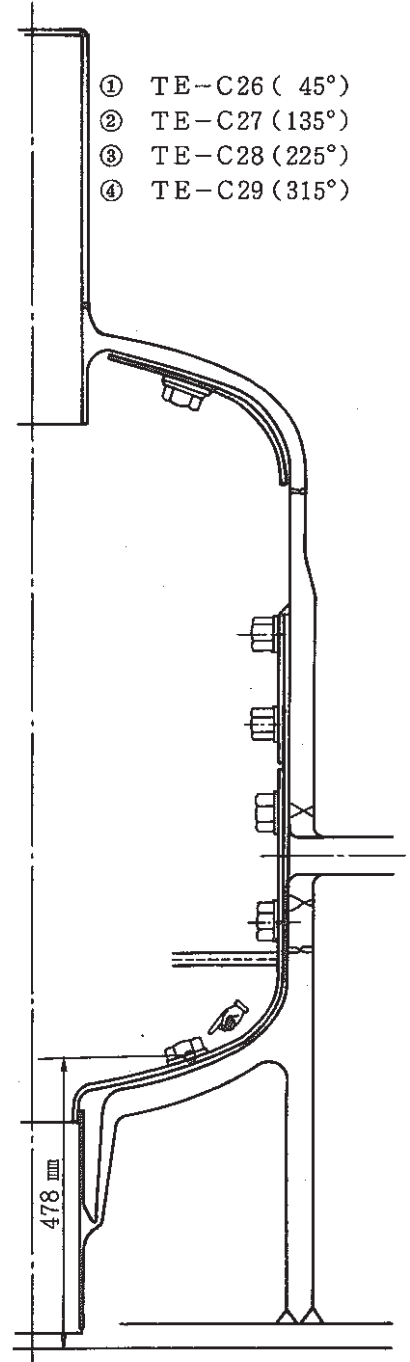
下鏡ライナー内側

TE-C26, C27, C28, C29 (CHN; No.094, 095, 096, 097)



584サイクル

- ① TE-C26 (45°)
- ② TE-C27 (135°)
- ③ TE-C28 (225°)
- ④ TE-C29 (315°)



TE-C26, C27, C28, C29

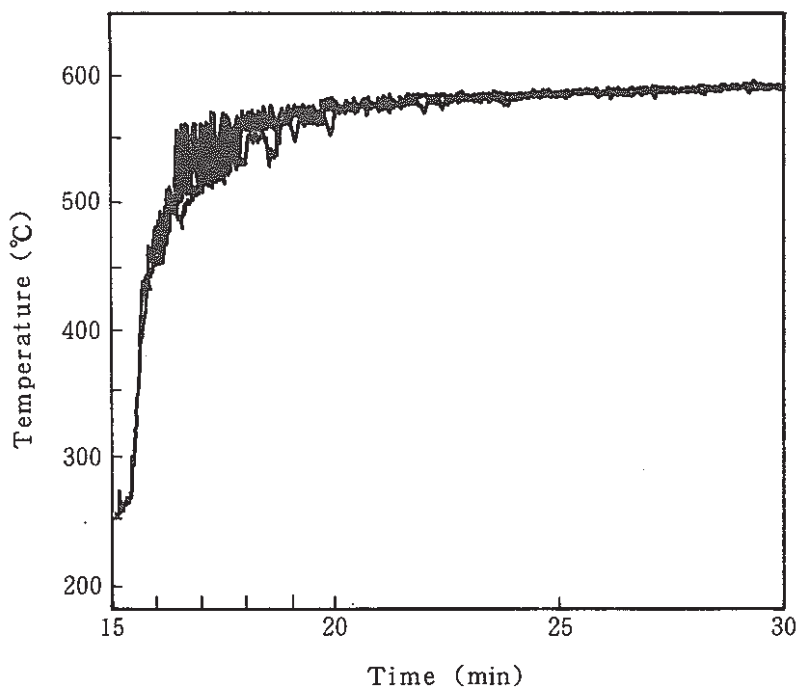


Fig. 3.1.1-16 Temperature Change of Liner's Inner Surface of Lower Head

下鏡ライナー内側

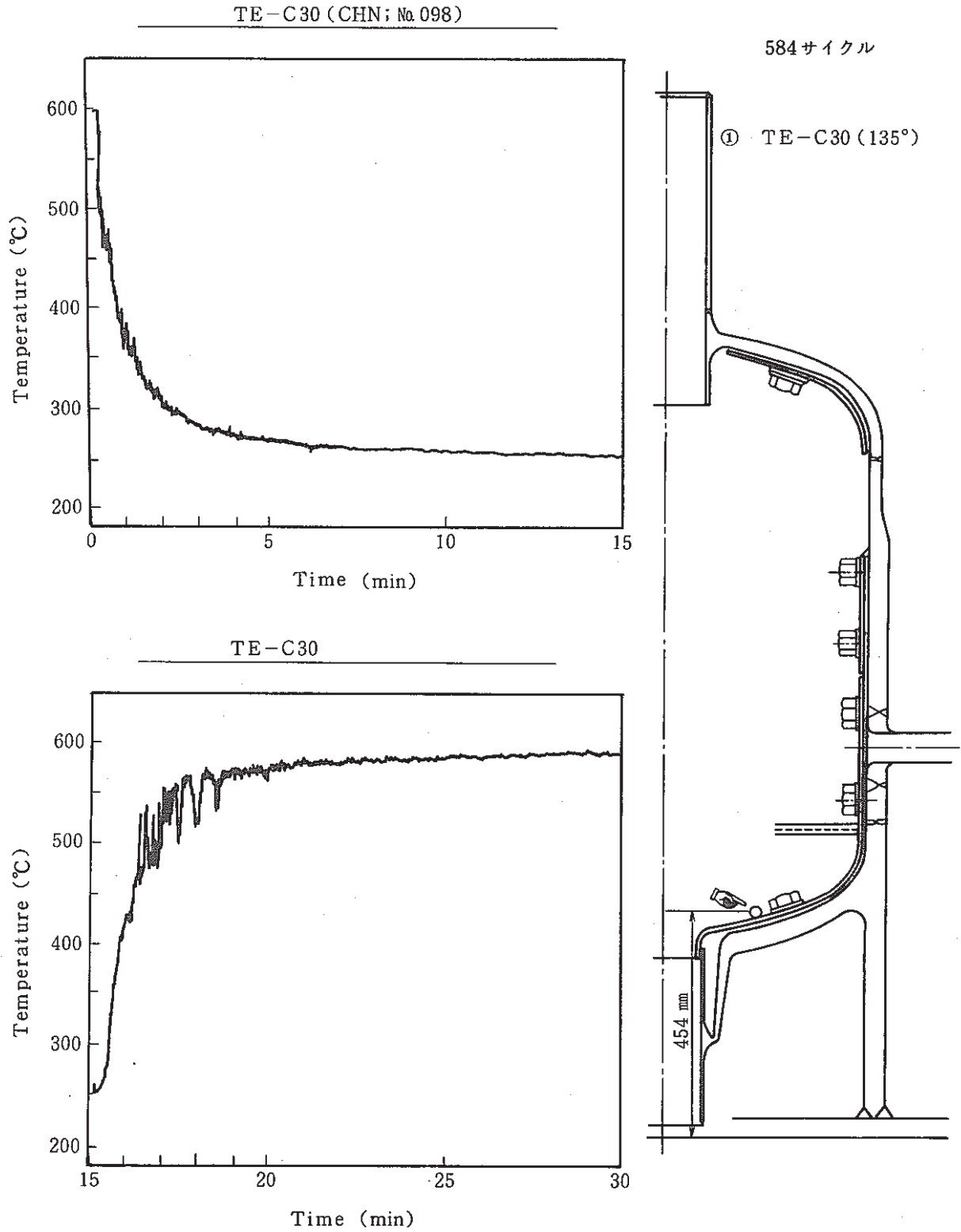
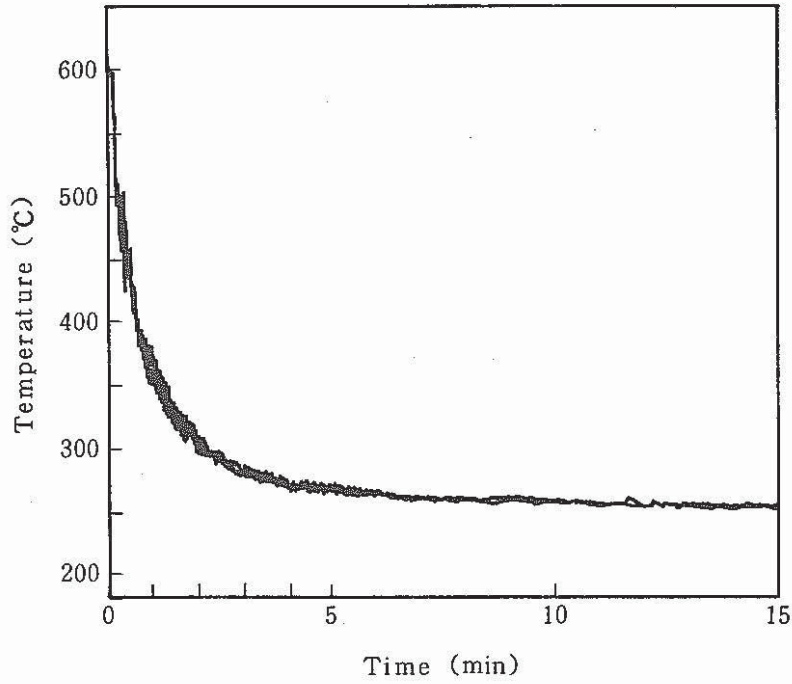


Fig. 3.1.1-17 Temperature Change of Liner's Inner Surface of Lower Head

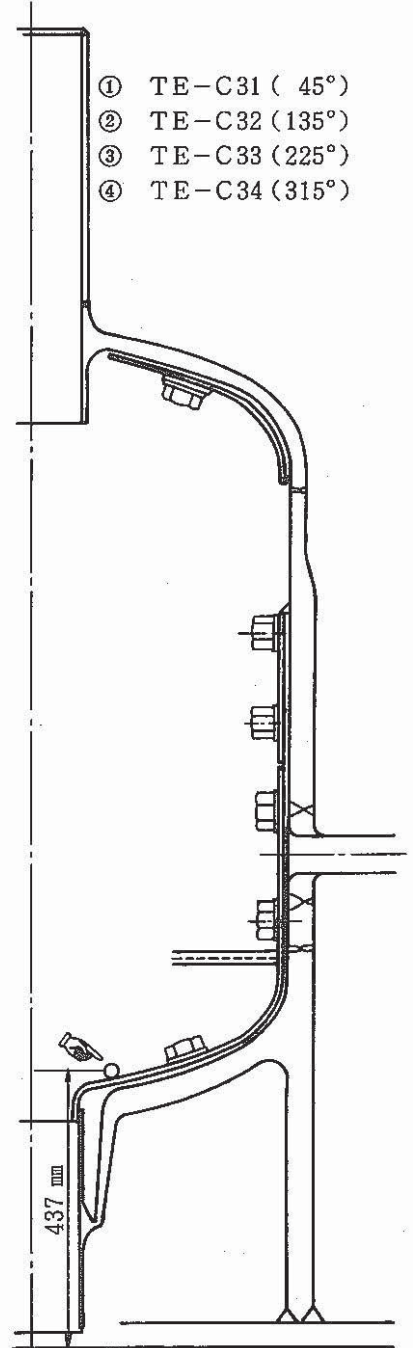
下鏡ライナー内側

TE-C31, C32, C33, C34 (CHN; No. 099, 100, 101, 102)

584 サイクル



- ① TE-C31 (45°)
- ② TE-C32 (135°)
- ③ TE-C33 (225°)
- ④ TE-C34 (315°)



TE-C31, C32, C33, C34

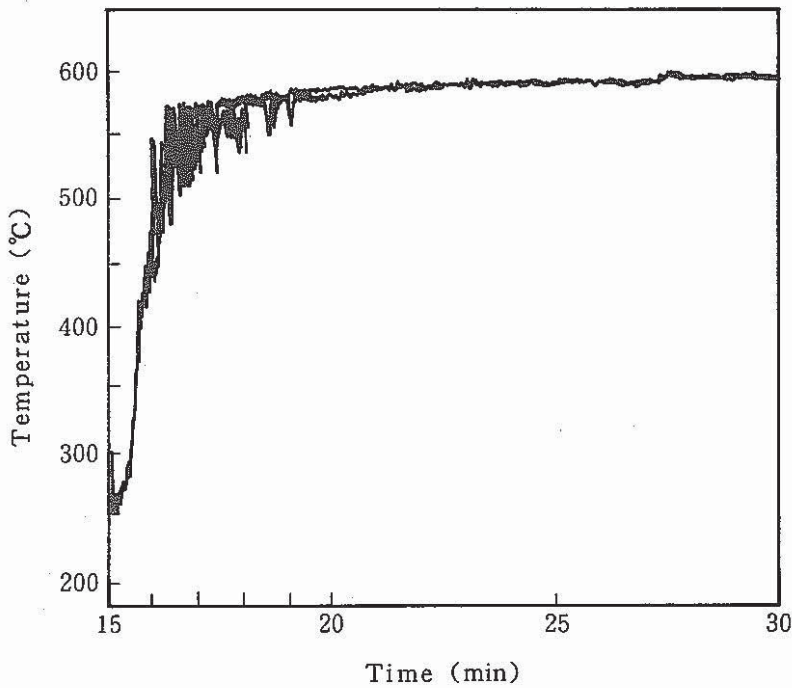


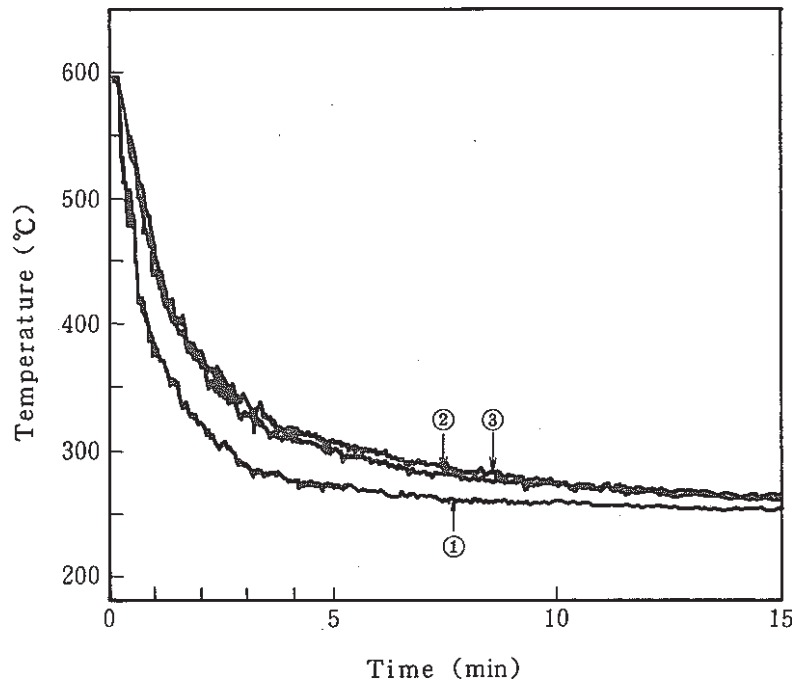
Fig. 3.1.1-18 Temperature Change of Liner's Inner Surface of Lower Head

下 鏡 ラ イ ナ ー

- ① ライナー内側
- ② ライナー外側
- ③ ライナー～下鏡部 Na

TE-D7, D8, D9 (CHN; No.002, 003, 004)

584 サイクル



- ① TE-D7 (70°)
- ② TE-D8 (70°)
- ③ TE-D9 (70°)

TE-D7, D8, D9

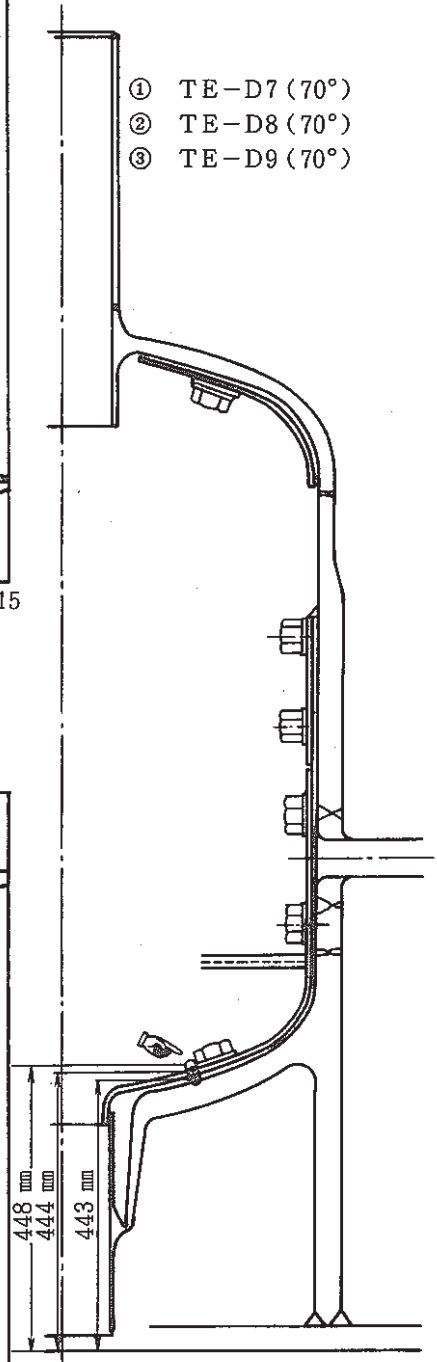
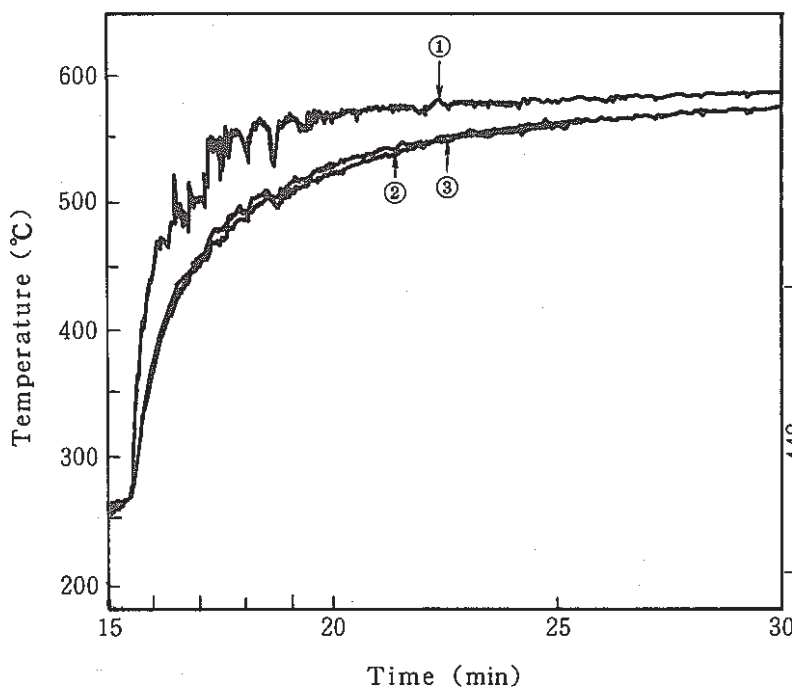


Fig. 3.1.1-19 Temperature Change of Liner of Lower Head

上部胴 (25 mm) 内面

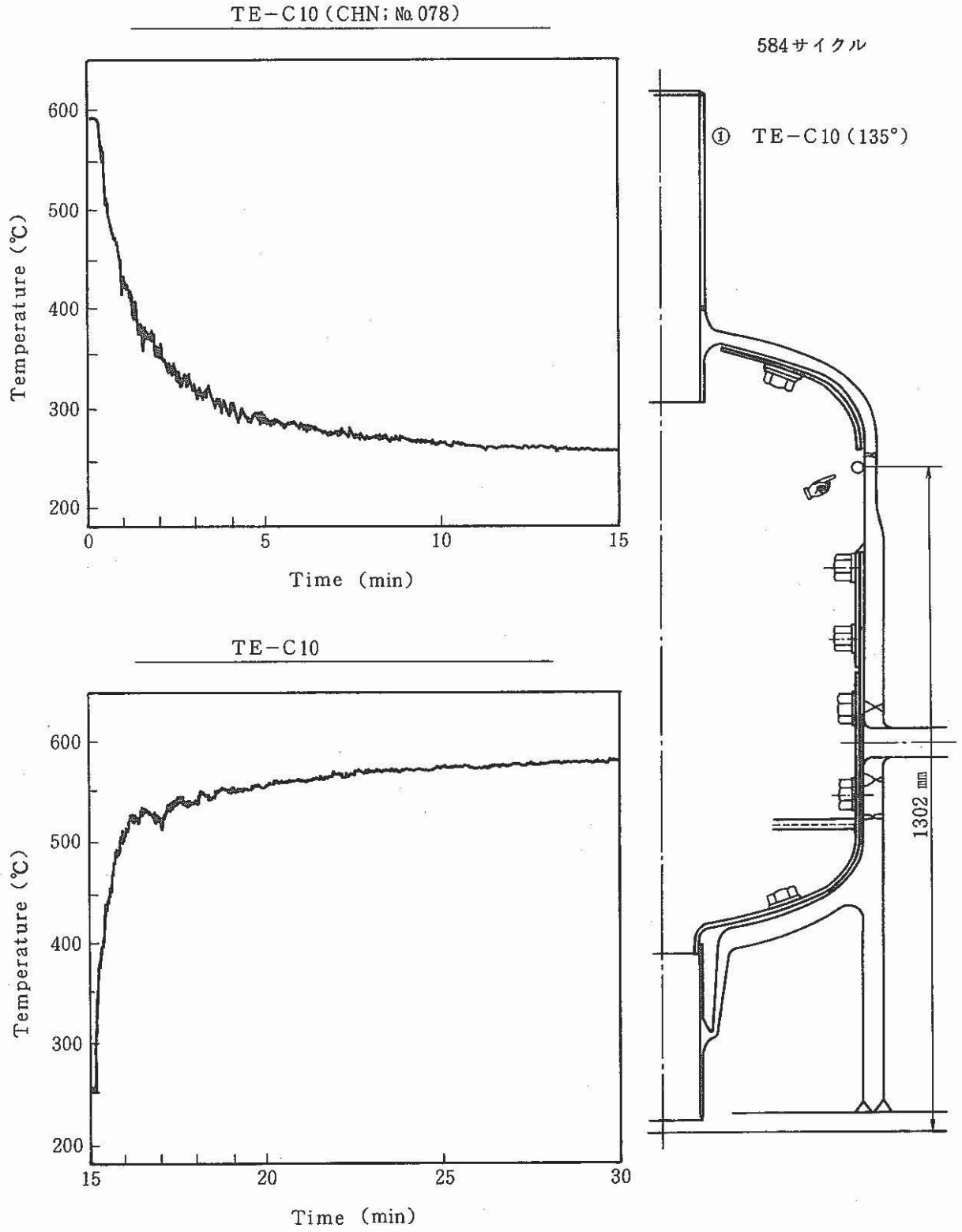
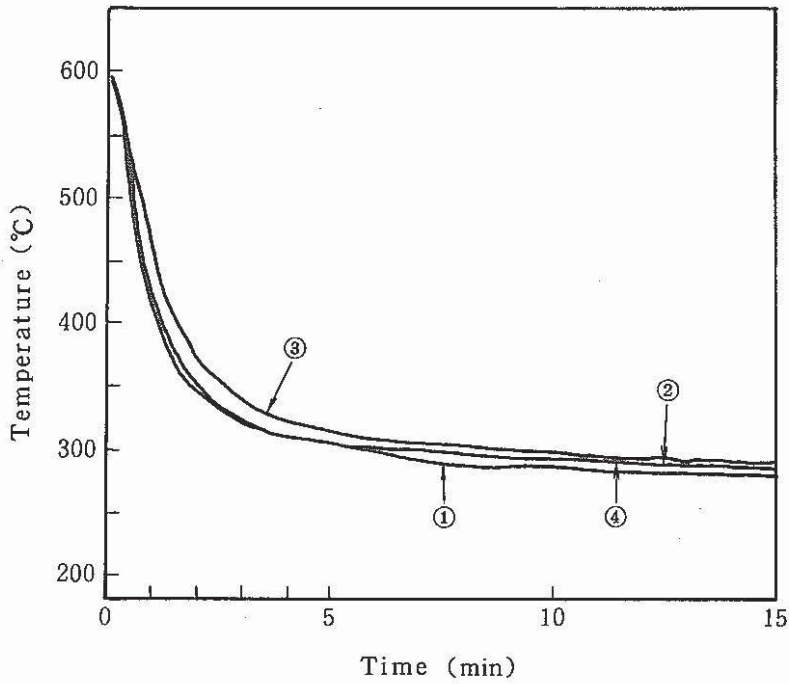


Fig. 3.1.1-20 Temperature Change of Inner Surface of Upper Part of Vessel

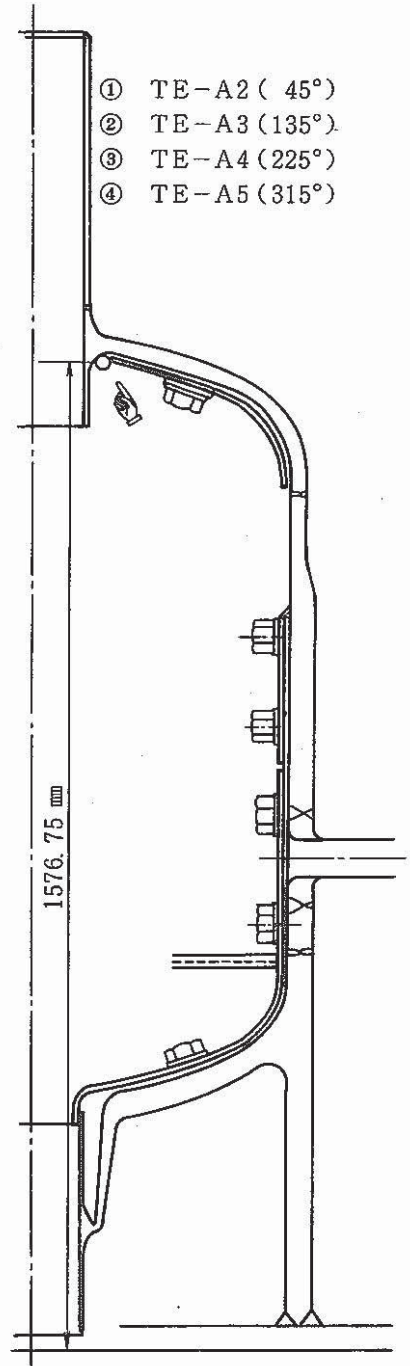
入口ノズル外側

TE-A2, A3, A4, A5 (CHN; No. 049, 050, 051, 052)



584サイクル

- ① TE-A2 (45°)
- ② TE-A3 (135°)
- ③ TE-A4 (225°)
- ④ TE-A5 (315°)



TE-A2, A3, A4, A5

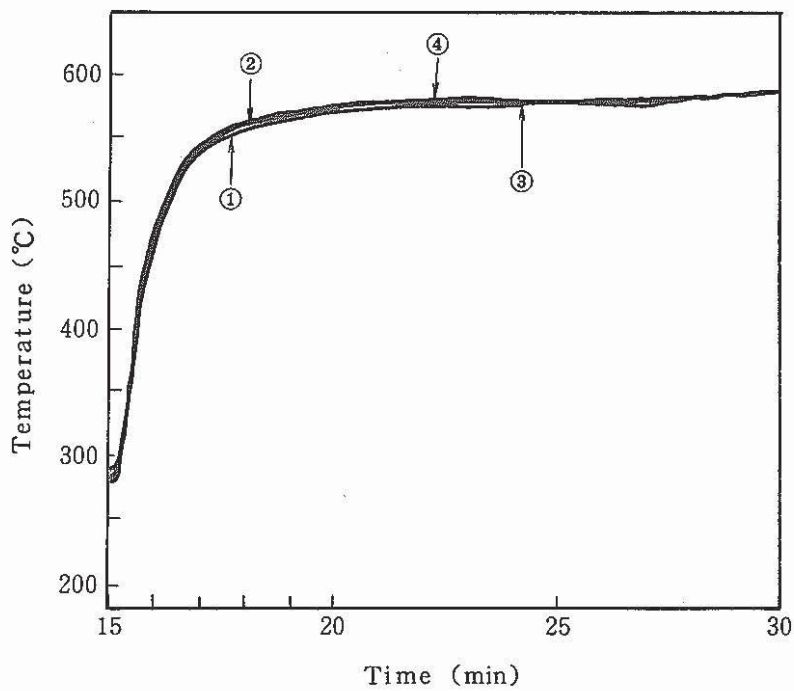


Fig. 3.1.1-21 Temperature Change of Inlet Nozzle Outer Surface

出口ノズル中心

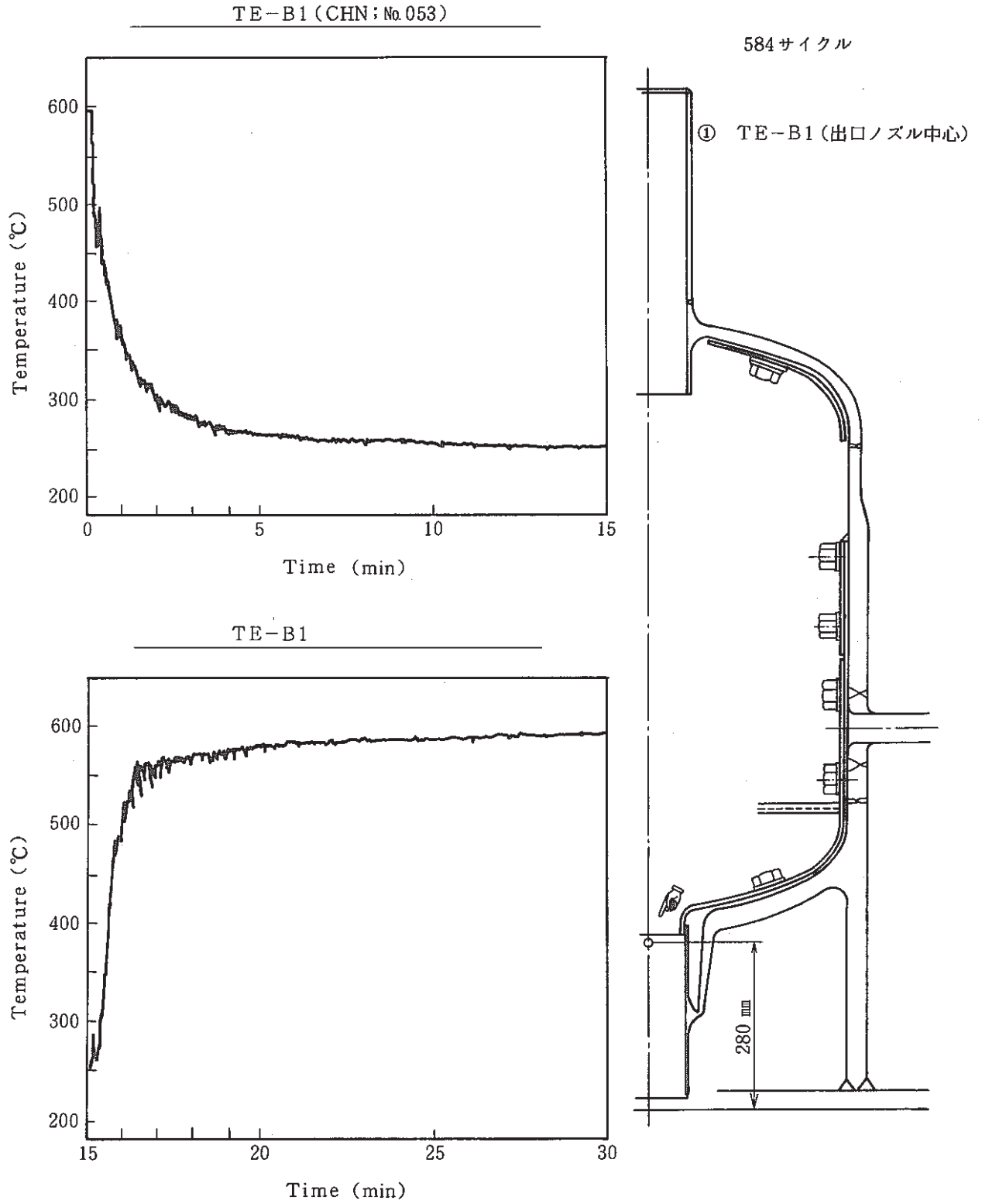
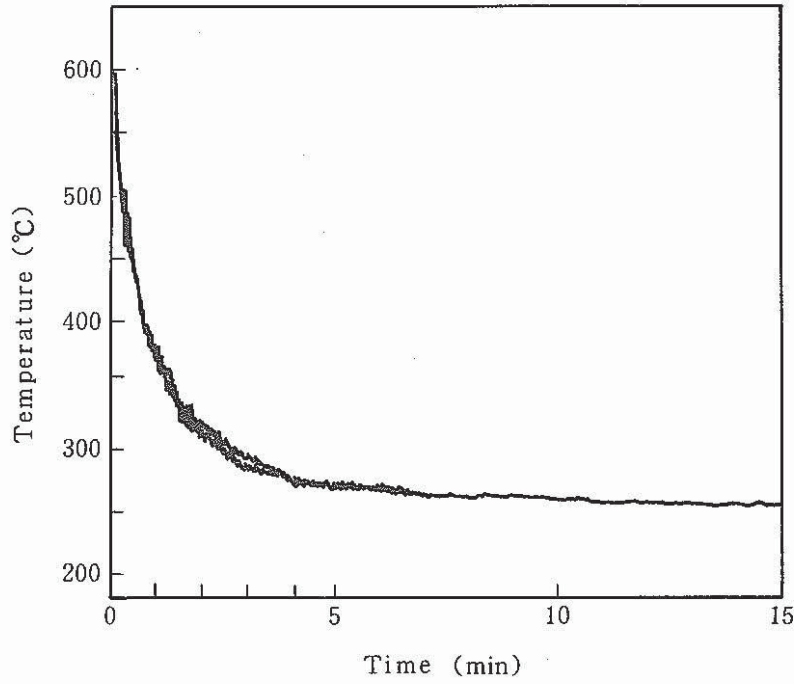


Fig. 3.1.1-22 Temperature Change of the Center of Outlet Nozzle

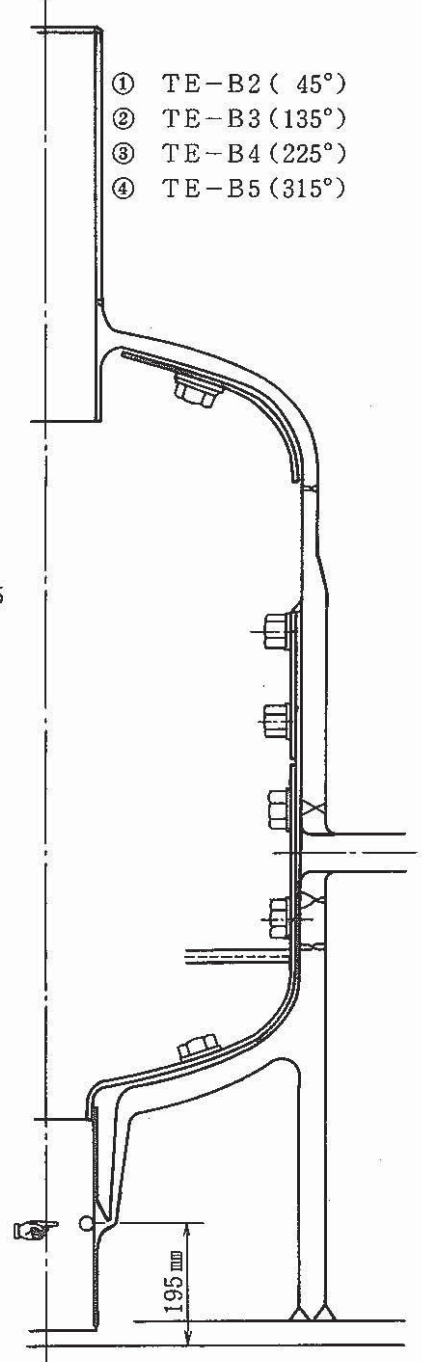
出口ノズル内面

TE-B2, B3, B4, B5 (CHN: No. 054, 055, 056, 057)



584サイクル

- ① TE-B2 (45°)
- ② TE-B3 (135°)
- ③ TE-B4 (225°)
- ④ TE-B5 (315°)



TE-B2, B3, B4, B5

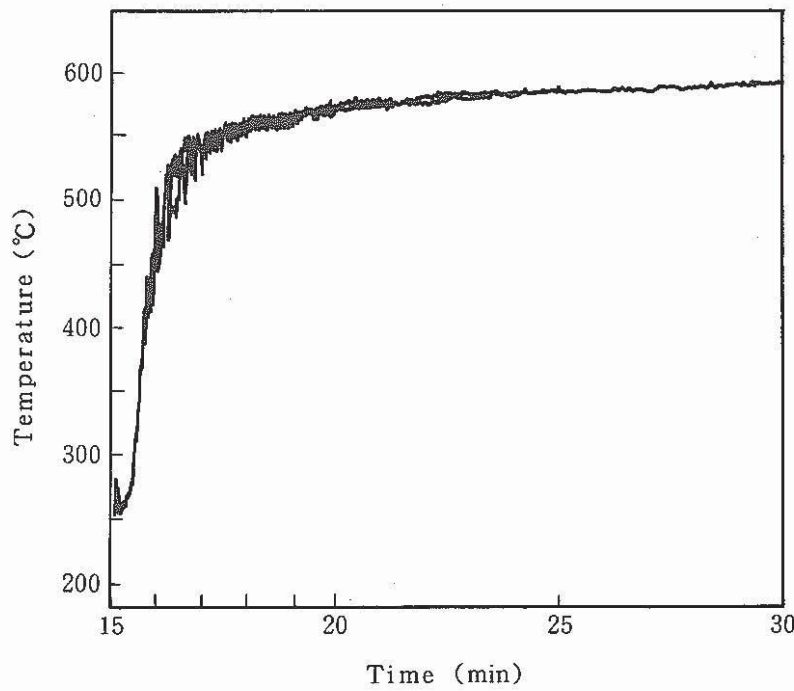


Fig. 3.1.1-23 Temperature Change of Outlet Nozzle Inner Surface

出口ノズル セーフエンド部

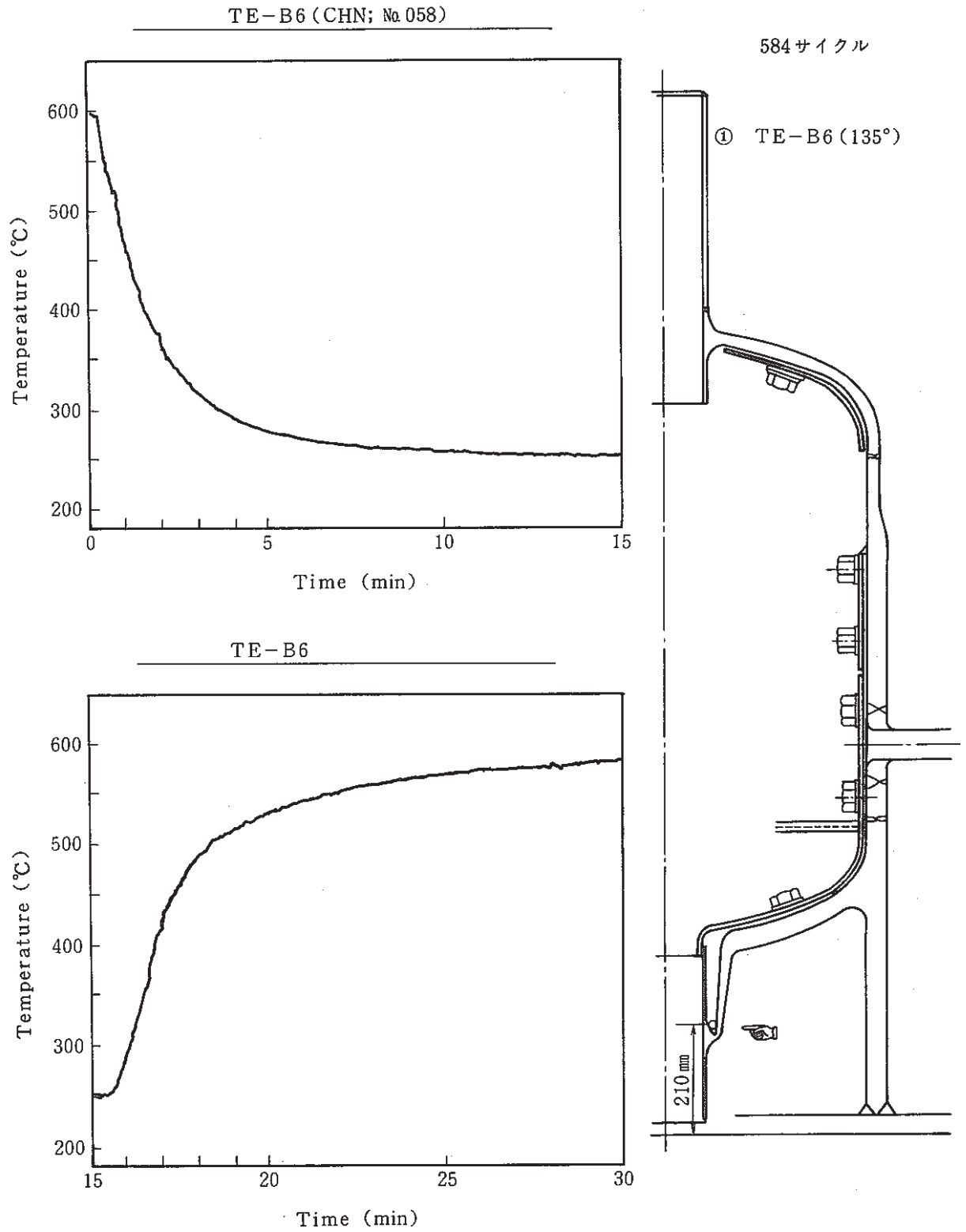


Fig. 3.1.1-24 Temperature Change of Outlet Nozzle Safeend

出口ノズル セーフエンド部

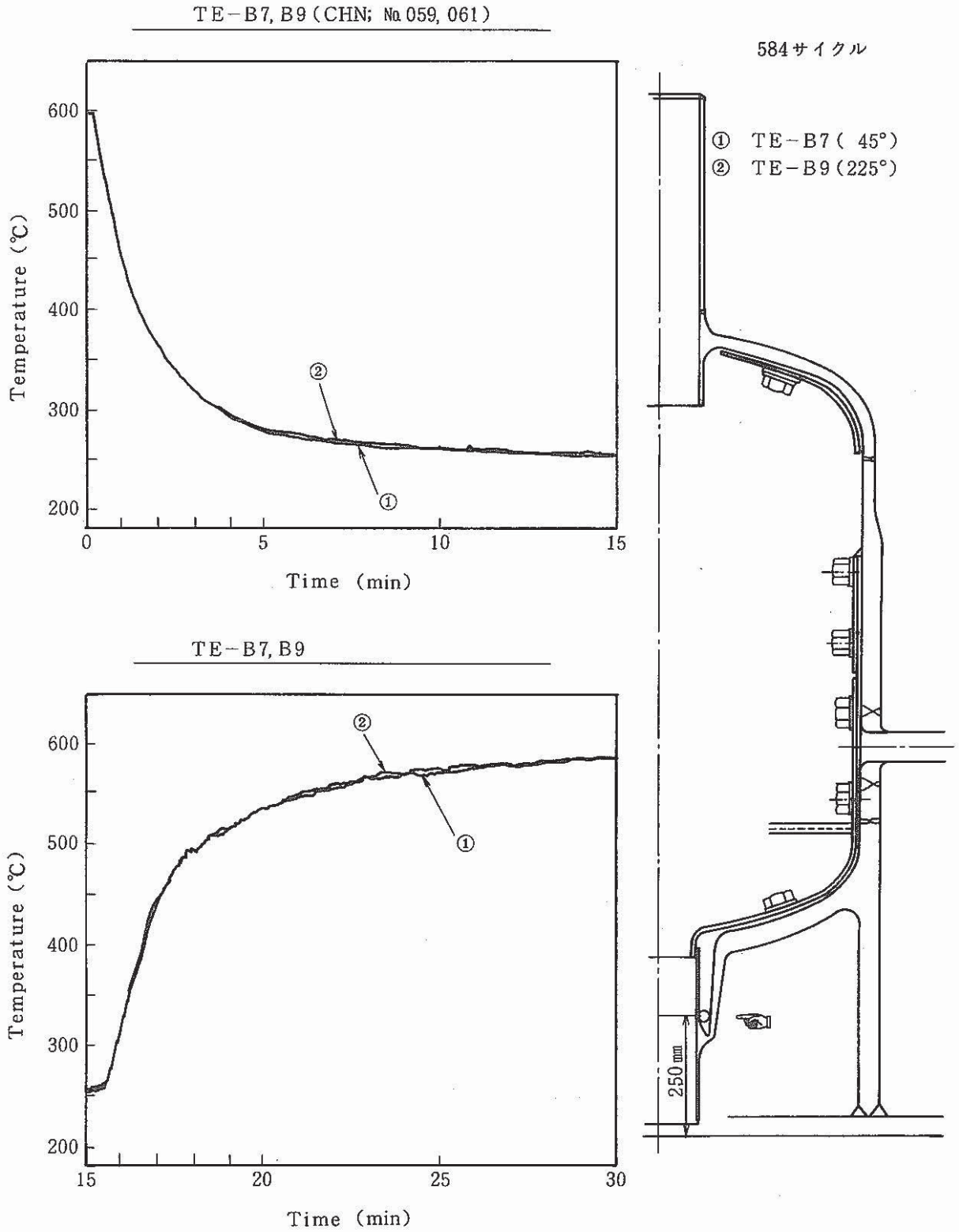
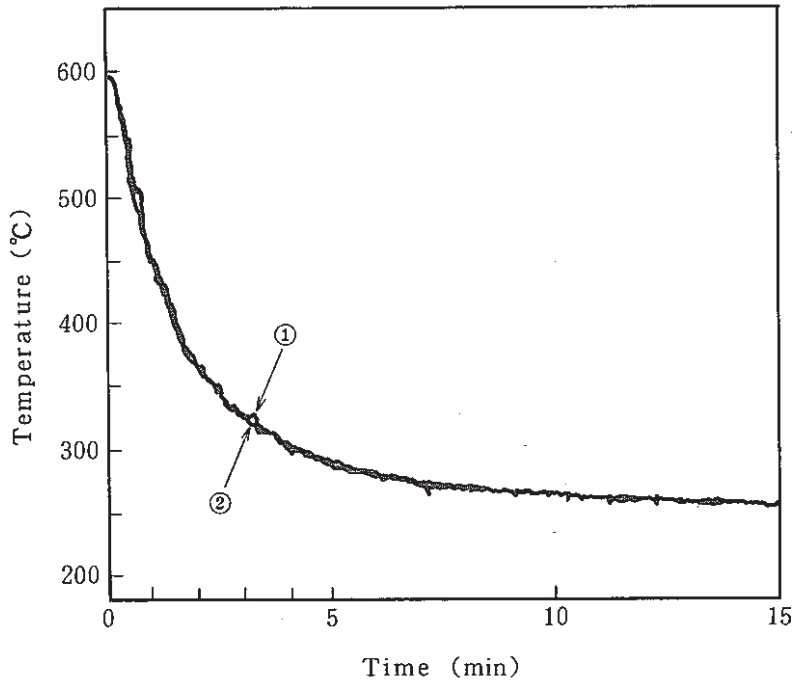


Fig. 3.1.1-25 Temperature Change of Outlet Nozzle Safeend

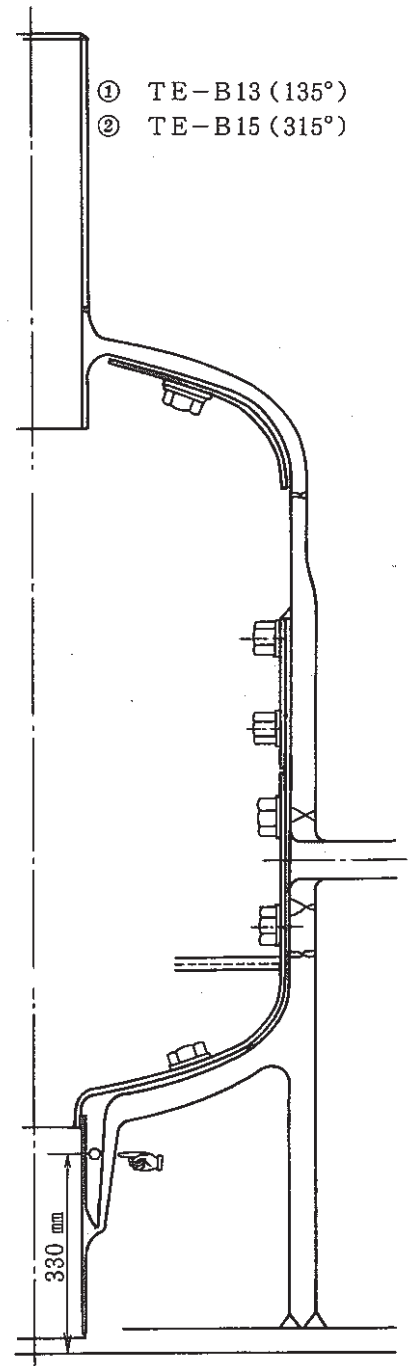
出口ノズル セーフエンド部

TE-B13, B15 (CHN; No.065, 067)



584サイクル

- ① TE-B13 (135°)
- ② TE-B15 (315°)



TE-B13, B15

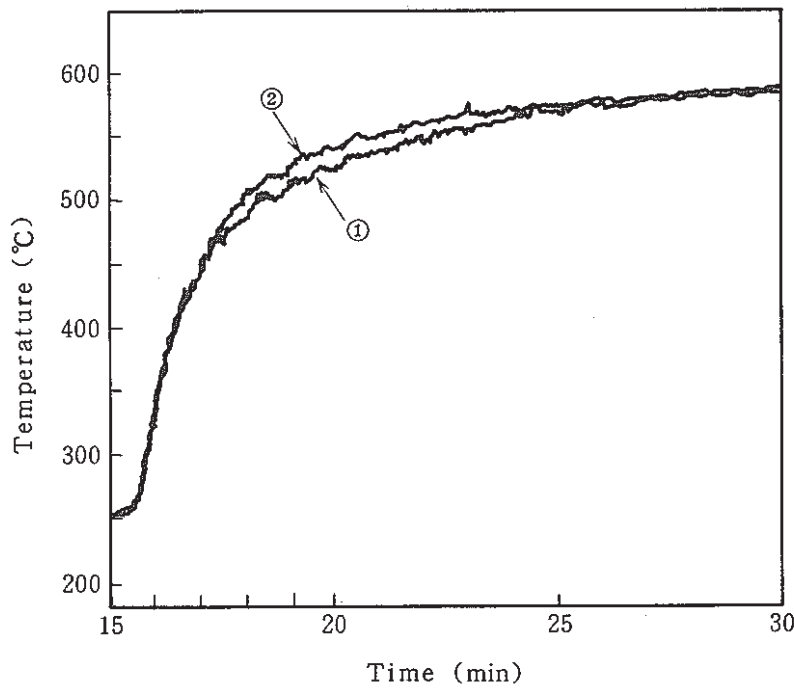


Fig. 3.1.1-26 Temperature Change of Outlet Nozzle Safeend

出口ノズル セーフエンド部

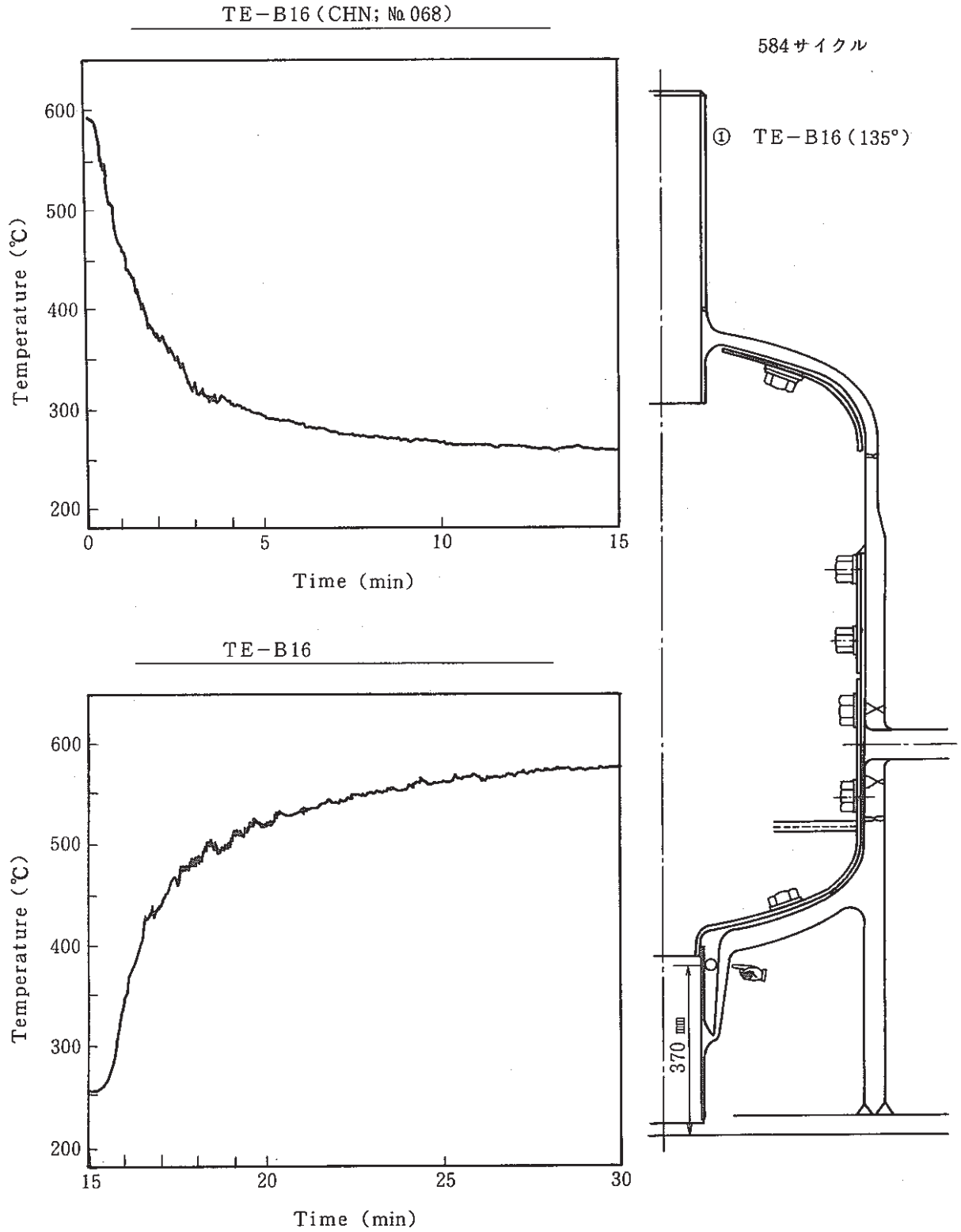


Fig. 3.1.1-27 Temperature Change of Outlet Nozzle Safeend

TE-B6, B7, B9, B13, B15, B16

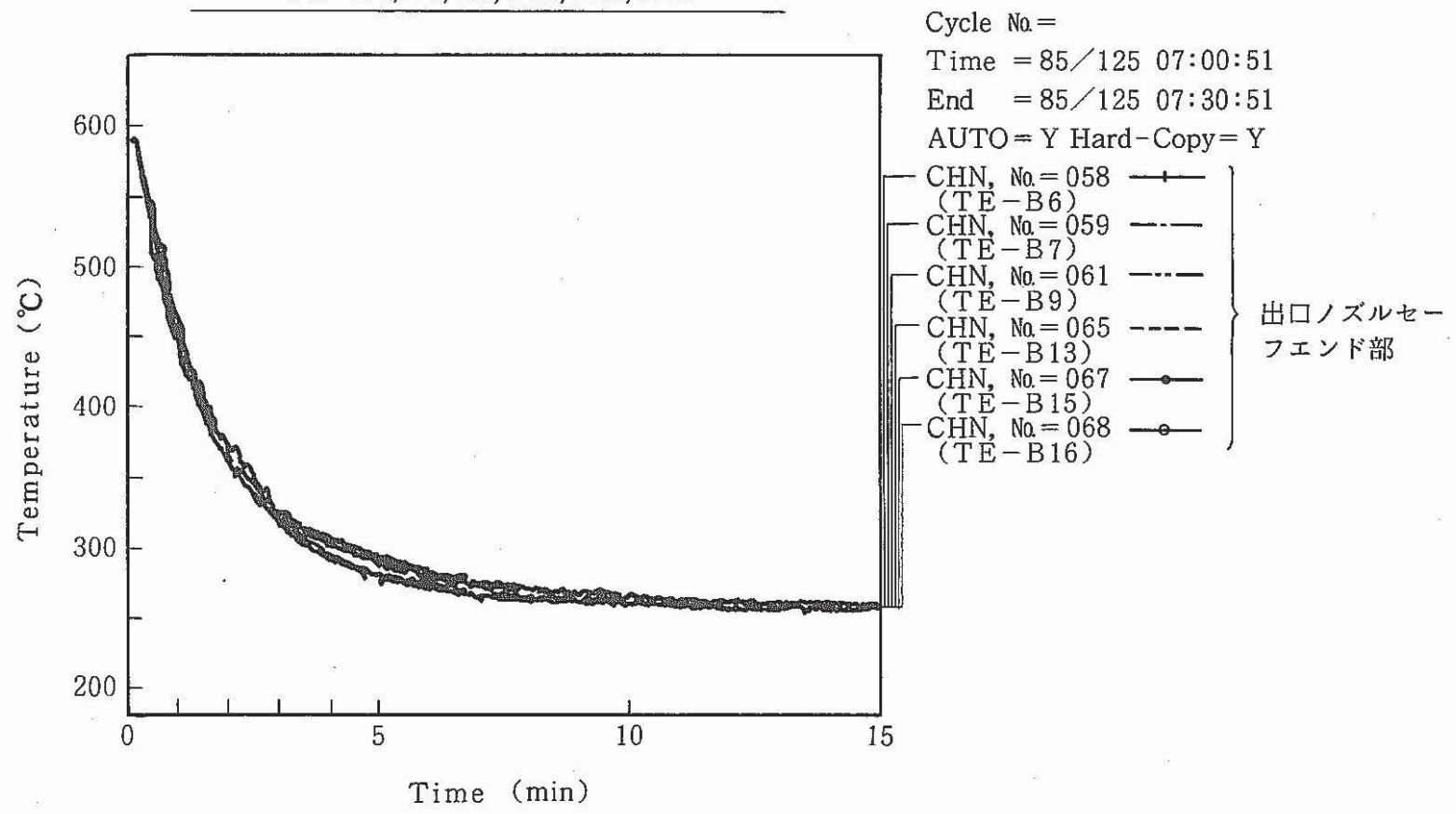


Fig. 3.1.1-28 Temperature Change of Outlet Nozzle Safeend along Axial Direction

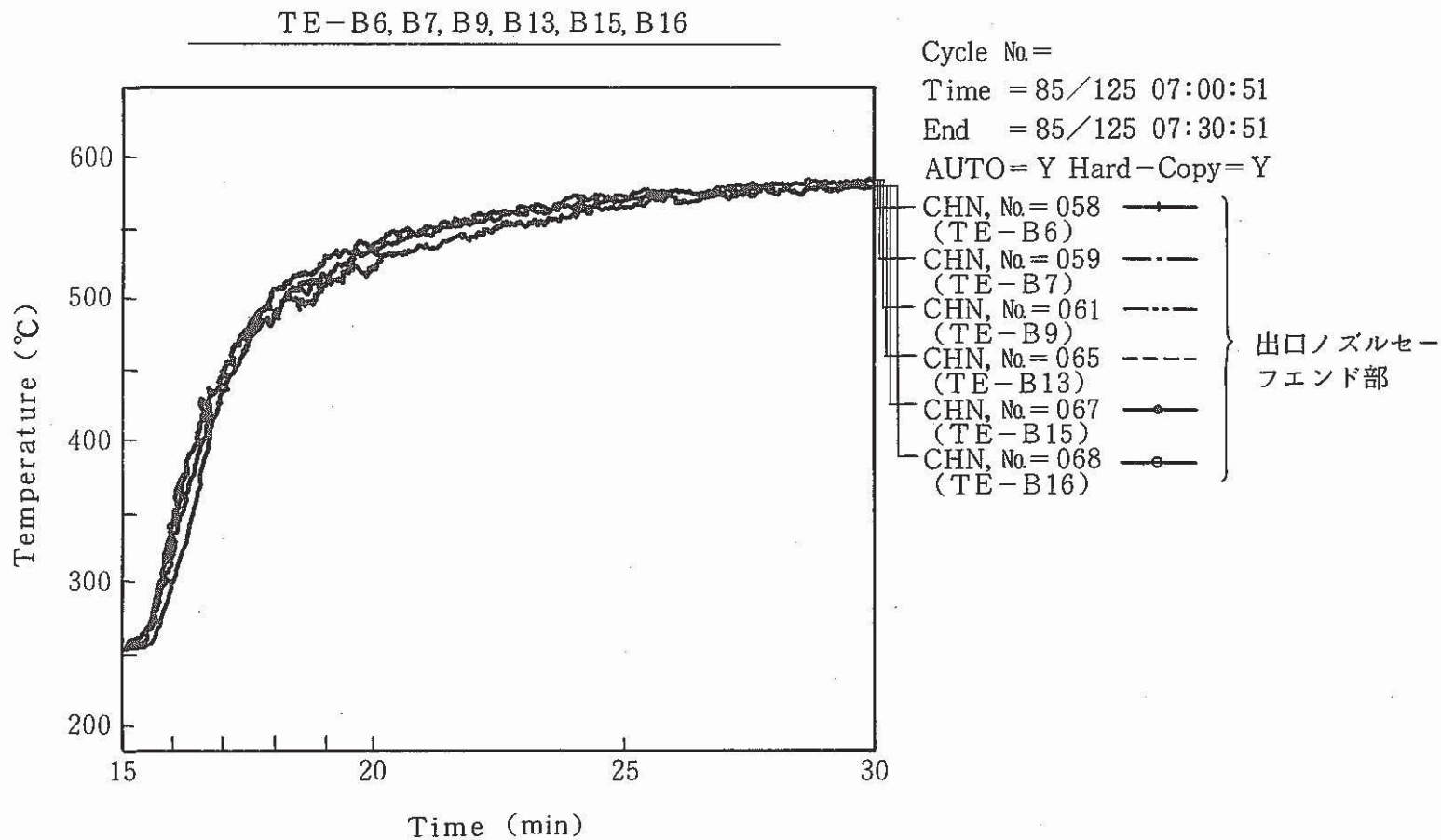


Fig. 3.1.1-29 Temperature Change of Outlet Nozzle Safeend along Axial Direction

Table 3.1 Time attained Temperature Difference 300°C

		COLD	HOT	COLD	HOT
入口ノズル	中心	10 秒 *1	20 秒 *1	(①)	(①)
	外側	— *2	— *2	—	—
上鏡ライナー	内側	4 分	3 分	⑦	⑤
	外側	— *2	— *2	—	—
上部胴ライナー	内側	3 分	4 分	⑥	⑦
	外側	6 分	6 分	⑩	⑧
下部胴ライナー	内側	2.5分	3 分	④	⑤
	外側	6 分	6 分	⑩	⑧
下鏡ライナー	内側	2 分	2 分	②	③
	外側	5 分	7 分	⑨	⑩
上部胴		4 分	3 分	⑦	⑤
出口ノズル	中心	2 分	1.5分	②	②
	内面	2.5分	2.5分	④	④

* 1 : 49 サイクルのデータ * 2 : ガス層

注) 表中○数字は温度変化の早い順である。

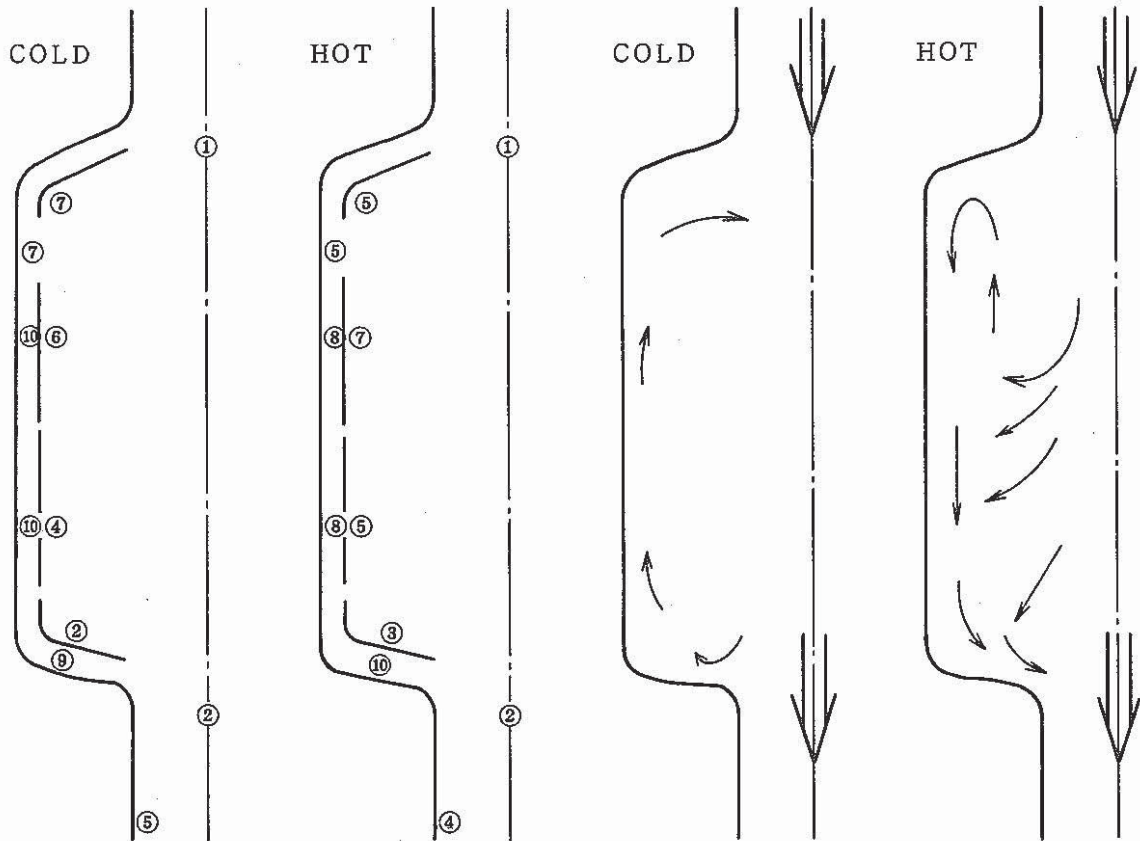


Fig. 3.1.1-30 Order of Thermal Transient

入口ノズル中心

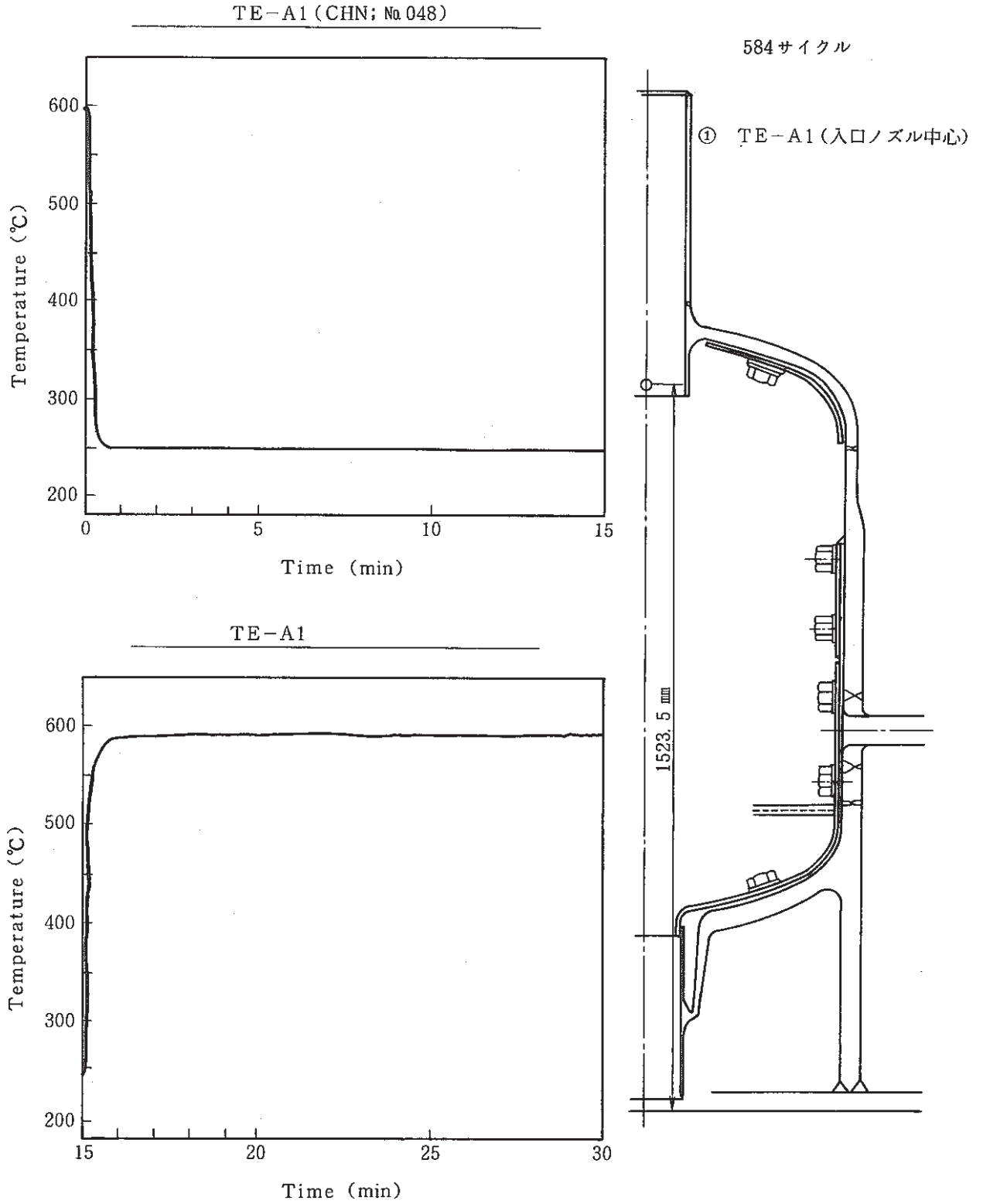


Fig. 3.1.1-31 Temperature Change of the Center of Inlet Nozzle

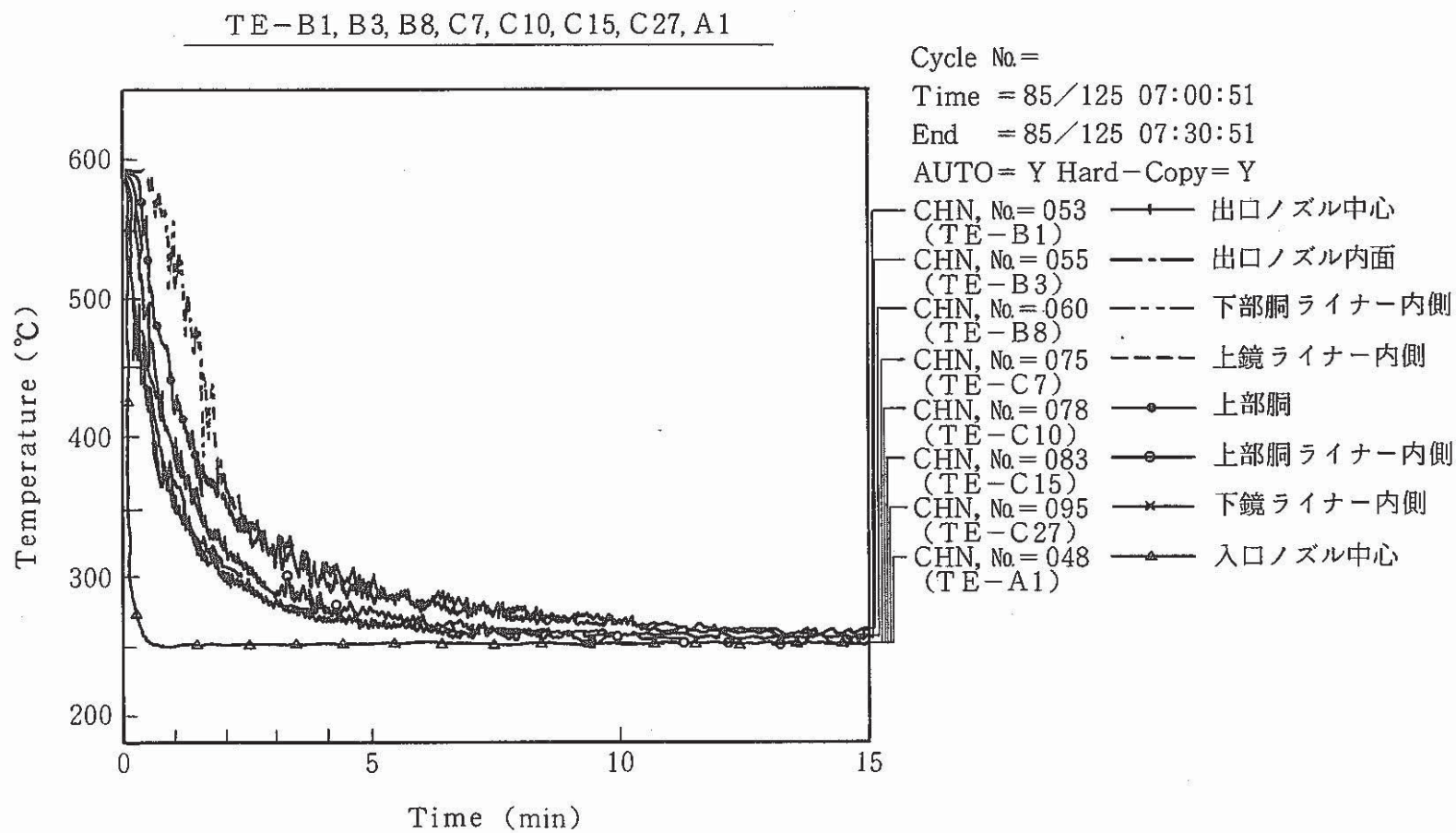


Fig. 3.1.1-32 Temperature Change of Inner Nozzle Safeend along Axial Direction

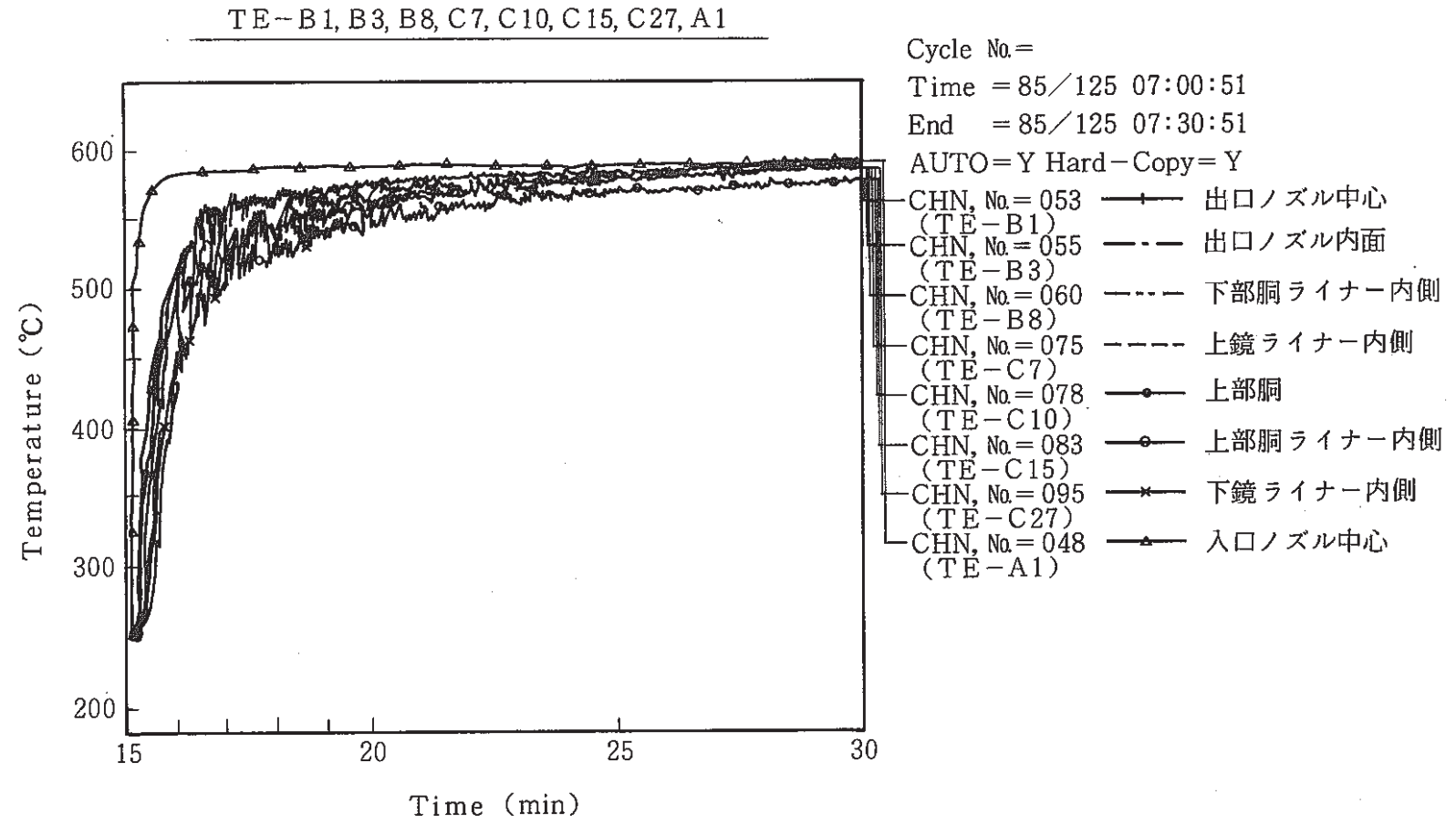


Fig. 3.1.1-33 Temperature Change of Inner Nozzle Safeend along Axial Direction

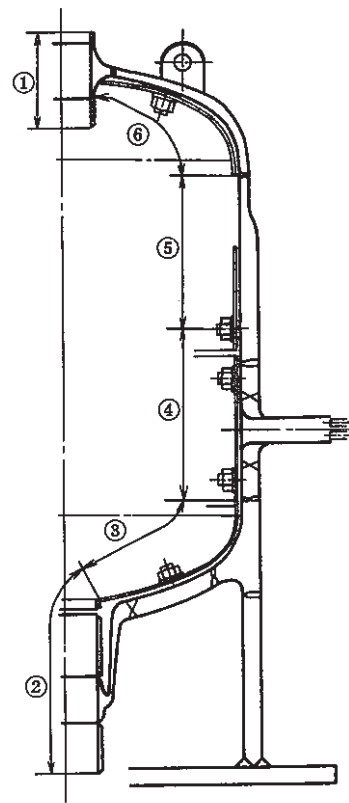
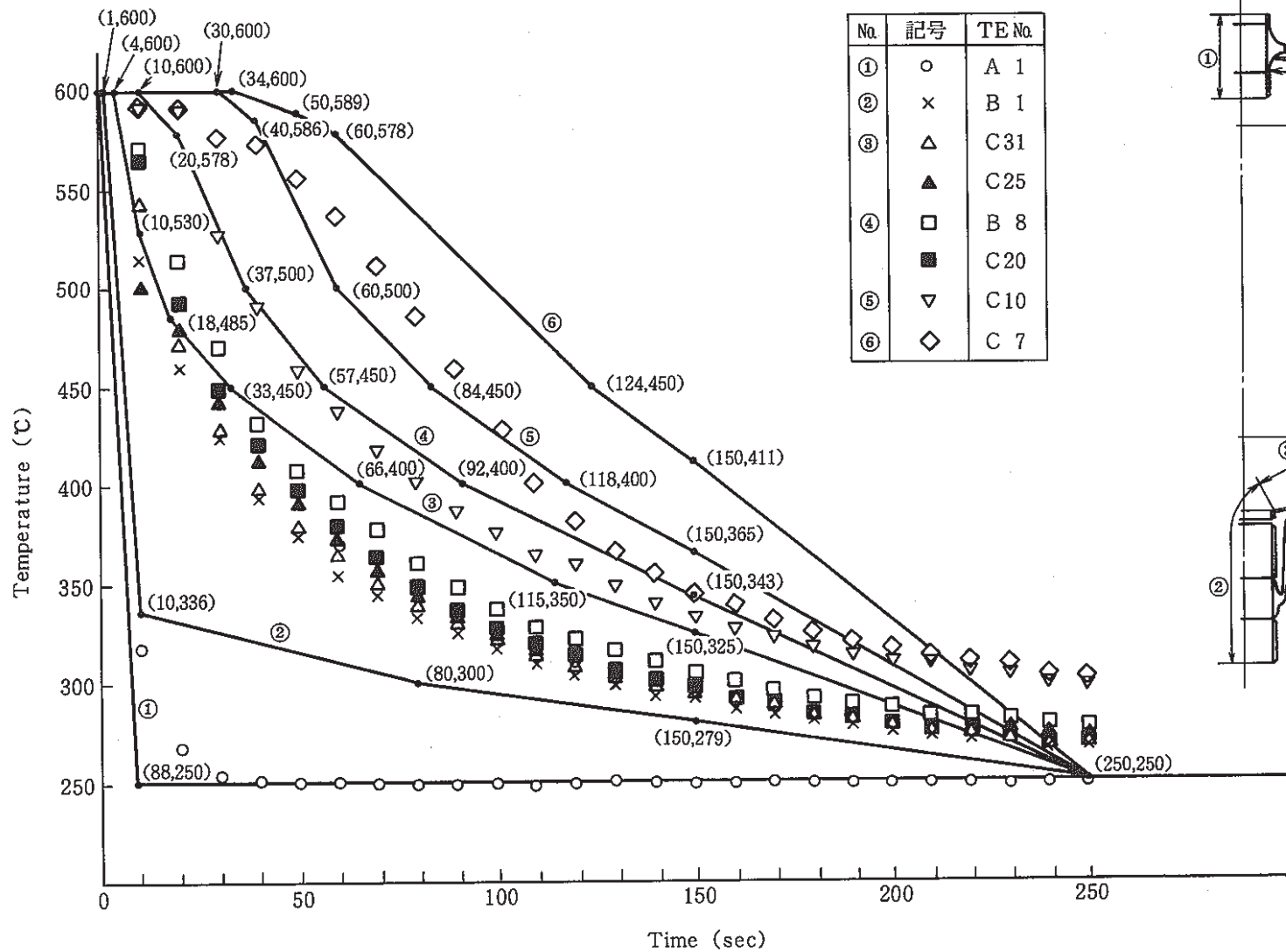


Fig. 3.1.1-34 Comparison of Temperature Change between Design Value and Experimental Data (cold shock)

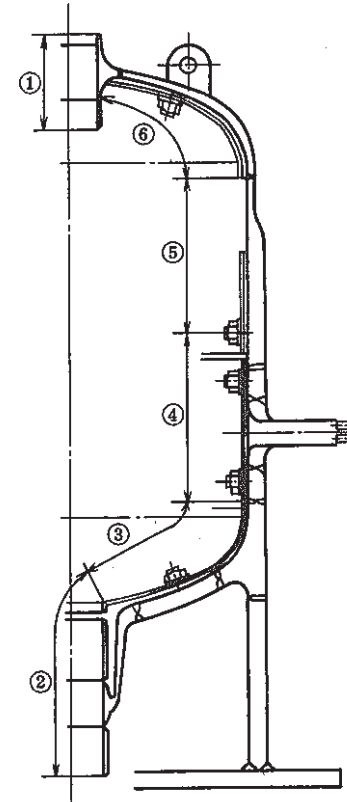
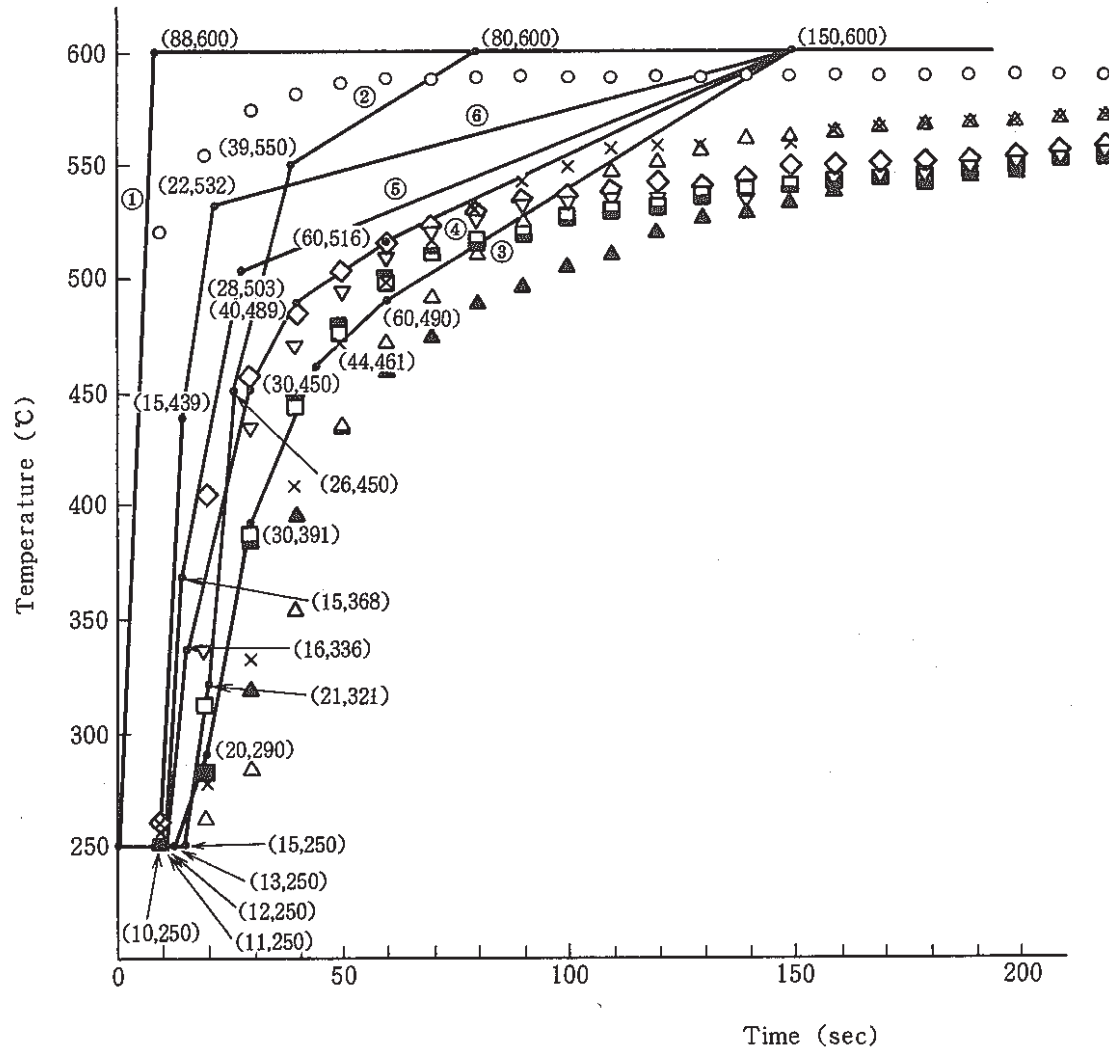


Fig. 3.1.1-35 Comparison of Temperature Change between Design Value and Experimental Data (hot shock)

。その他の箇所の温度応答はほぼ同じ程度の早さである。

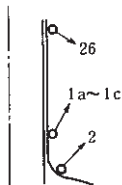
3.1.1-5 流動伝熱解析との比較

本供試体製作時に流動伝熱解析にて得た供試体各部の温度変化を本試験結果と比較して Fig. 3.1.1-34, 35に示す。C.S.では②部を除いて全体的に試験の方が温度応答が早く H.S.では全て試験の方が温度応答が遅くなっている。

3.1.2 外面温度

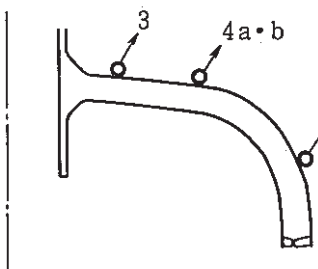
3.1.2-1 各部温度

(1) 入口ノズル (ch No. 1a~1c, 2, 26)



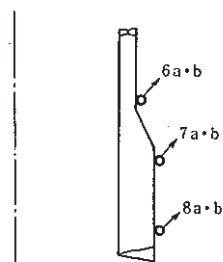
入口ノズルには熱電対を5点3レベルに取り付けたが各レベルそれぞれ3.4mm, 7.1mm, 約23mmと肉厚が違う為温度応答が違っている。(Fig. 3.1.2-1~3)

(2) 上鏡 (ch No. 3, 4a・b, 5a・b)



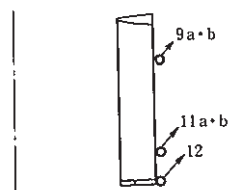
上鏡にも熱電対を5点取り付けたが3及び4a・bは内面がガス層だった為、内面温度C1~C4, C5のグラフと同じ傾向を示している。(Fig. 3.1.2-4, 5) 5a・bについてはC.S.よりH.S.の方が若干早く温度変化している。(Fig. 3.1.1-6)

(3) 上部胴 (ch No. 6a・b, 7a・b, 8a・b)



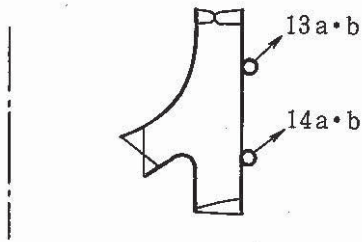
上部胴には熱電対を6点取り付けた。肉厚25mmの6a・bはH.S.の方が早く変化しているが40mmの7a・b, 8a・bは殆んど同じである。(Fig. 3.1.2-7~9)

(4) 下部胴 (ch No. 9a・b, 11a・b, 12)



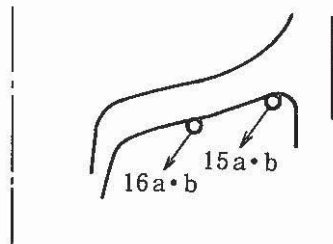
下部胴には熱電対を5点取り付けた。下部に行くに従い、C.S.の方が早く変化している。(Fig. 3.1.2-10~12)

(5) コニカル胴 (ch No 13 a・b, 14 a・b)



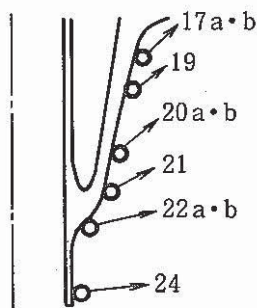
コニカル胴には熱電対を4点取り付け付けた。13 a・b についてはC.S.開始後15分で $\Delta T 240^{\circ}\text{C}$ H.S.開始後15分で $\Delta T 180^{\circ}\text{C}$ であるが、温度が変化しはじめるのと1分30秒ぐらい時間遅れがある。14 a・b は周方向で 20°C の温度差があり温度が変化しはじめるのと約3分の遅れがある。(Fig. 3.1.2 - 13, 14)

(6) 下鏡 (ch No 15 a・b, 16 a・b)



下鏡には熱電対を4点取り付け付けた。コニカル胴近傍の15 a・b は16 a・b に比べ応答が緩やかになっており、これはスカート側への熱伝導が大きい為であると考えられる。(Fig. 3.1.2 - 15, 16)

(7) 出口ノズル (ch No 17 a・b, 19, 20 a・b, 21, 22 a・b, 24)



出口ノズルには熱電対を9点取り付け付けたが584サイクルでは4点しか測定できなかった。エンド部(ナトリウム滞留部)とそうでない部位, TG-17 a・b, 20 a・b とTG-24 を比較すると温度応答曲線は $580^{\circ}\text{C} \leftrightarrow 260^{\circ}\text{C}$ と大体同じであるが温度応答はセーフエンド部の方が緩やかである (Fig. 3.1.2 - 17 ~ 19)。Fig. 3.1.2 - 20, 21 は軸方向温度分布を示すが肉厚の薄い部分から順序よく温度変化しているのが分かる。

(8) その他の熱電対 (ch No 18 a~d, 23 a・b, 25 a・b, 27, 28)

スカート上部内外2点ずつ (TG-18 a~d), 下部2点 (TG-23 a・b), ベース板上に2点 (TG-25 a・b), 中間受台ベース板上に1点 (TG-27), 中間受台胴部に1点 (TG-28) 取り付け付けた。TG-18 a~d は保温層内でそれ以外は保温外であり, TG-18 a~d は供試体からの熱伝導が若干あるが他熱電対は温度一定で影響はない。(Fig. 3.1.2 - 22 ~ 26)

3.1.2 - 2 軸方向温度分布

供試体全体の軸方向温度分布 (Fig. 3.1.2 - 27, 28) では、内面と同様にC.S.で上部胴より下部胴及び下鏡の方が早く変化しH.S.では上部・下部胴が下鏡より早く変化してい

る。C.S., H.S.開始後3分後における入口ノズル部との温度差を下表に示す。

	C. S.	H. S.
入口ノズル — 上鏡	200 ℃	130 ℃
” — 上部胴 (25mm)	150 ℃	100 ℃
” — ” (40mm)	240 ℃	220 ℃
” — 下部胴	220 ℃	220 ℃
” — 下鏡	220 ℃	250 ℃
” — 出口ノズル	20 ℃	30 ℃

入口ノズル外面

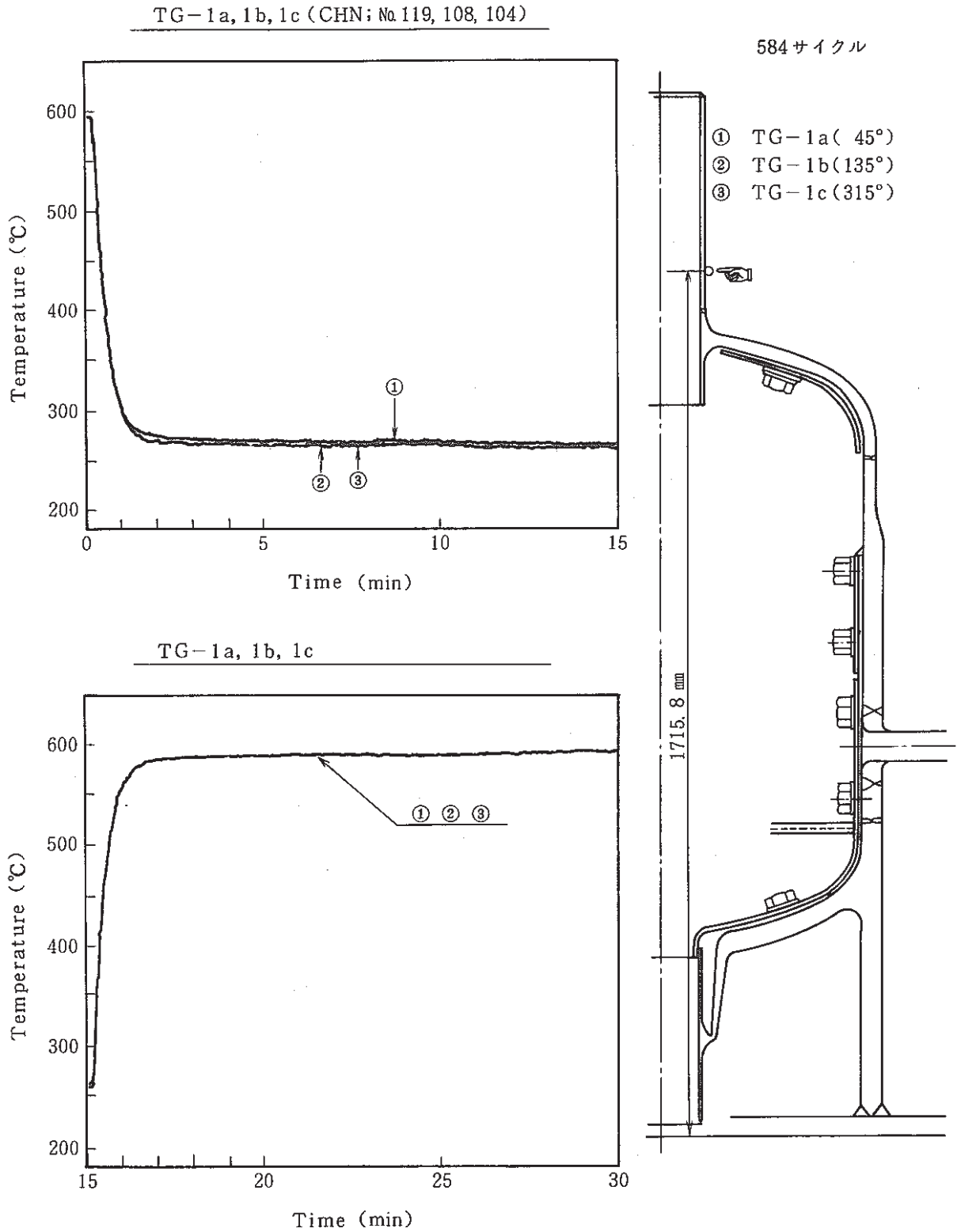


Fig. 3.1.2-1 Temperature Change of Inlet Nozzle Outer Surface

入口ノズル外側

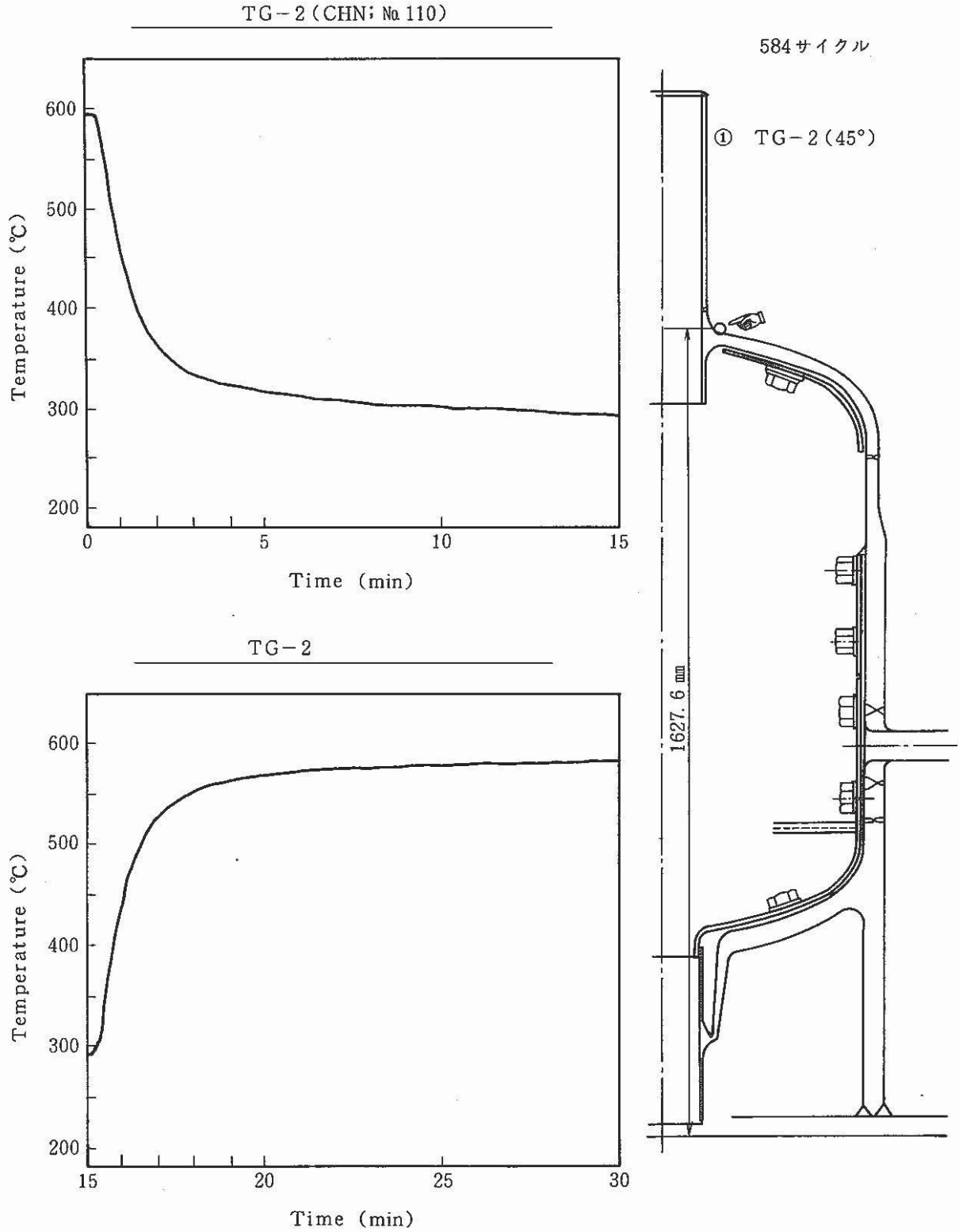


Fig. 3.1.2-2 Temperature Change of Inlet Nozzle Outer Surface

入口ノズル外面

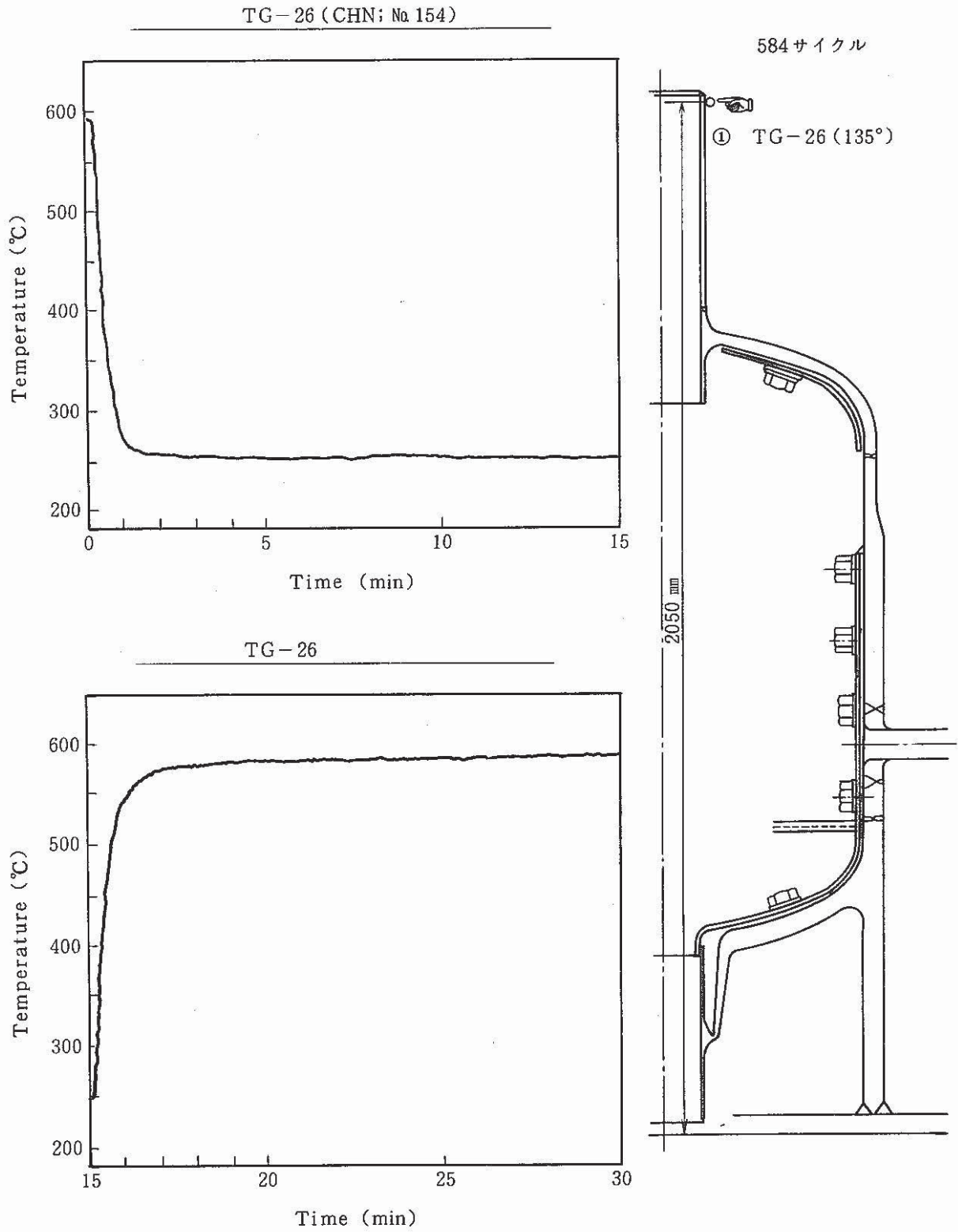


Fig. 3.1.2-3 Temperature Change of Inlet Nozzle Outer Surface

上 鏡 板 外 面

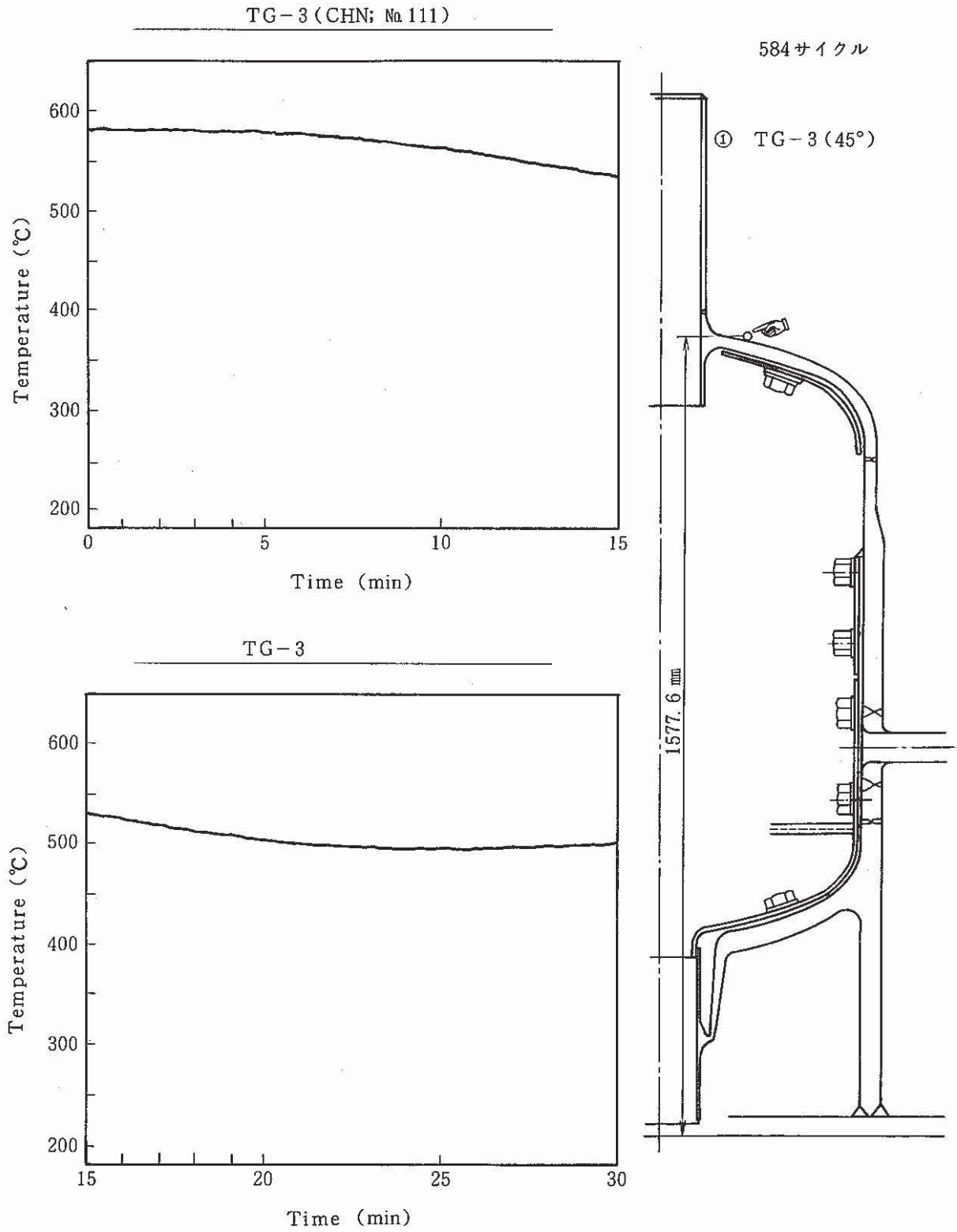


Fig. 3.1.2-4 Temperature Change of Upper Head Outer Surface

上 鏡 板 外 面

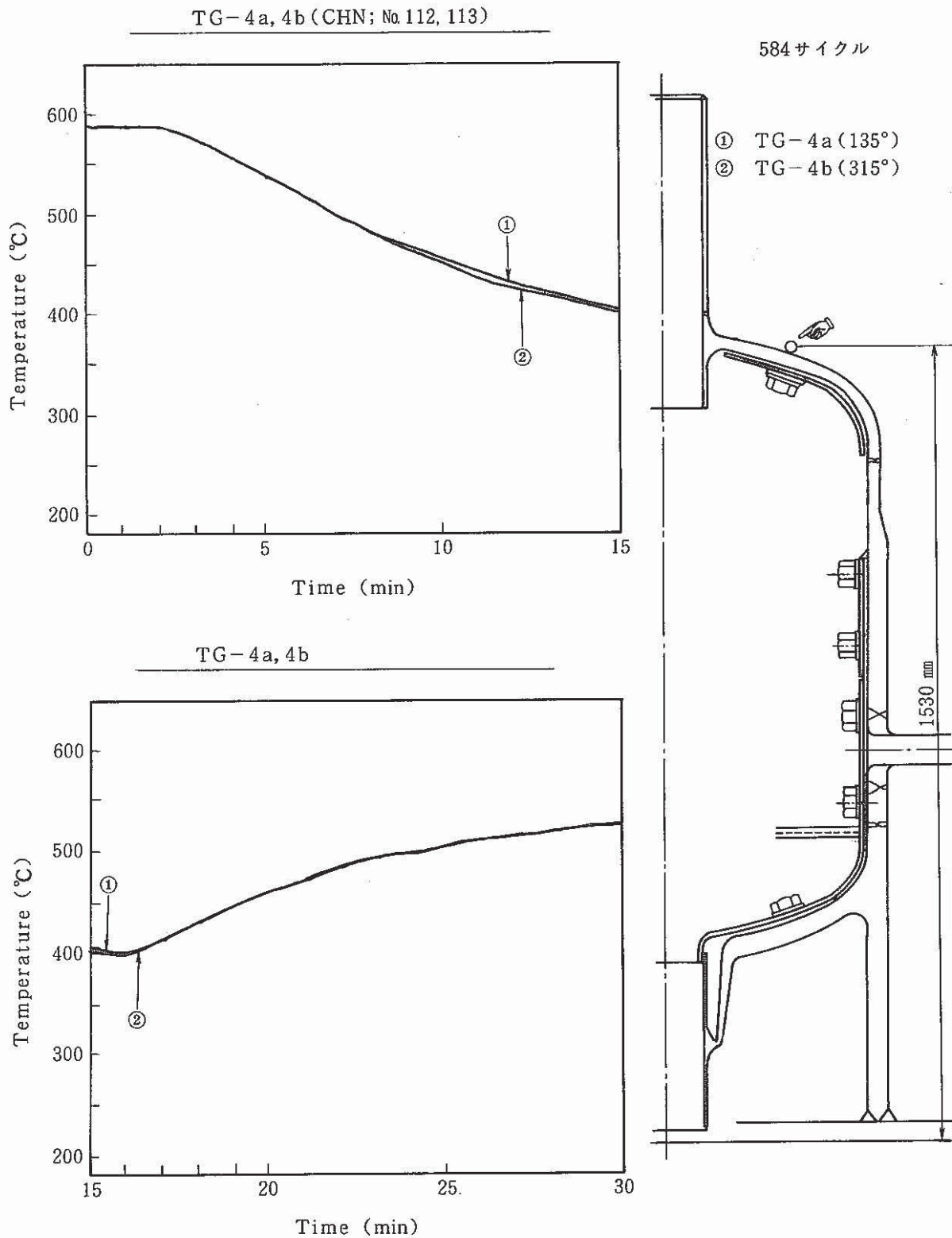


Fig. 3.1.2-5 Temperature Change of Upper Head Outer Surface

上 鏡 板 外 面

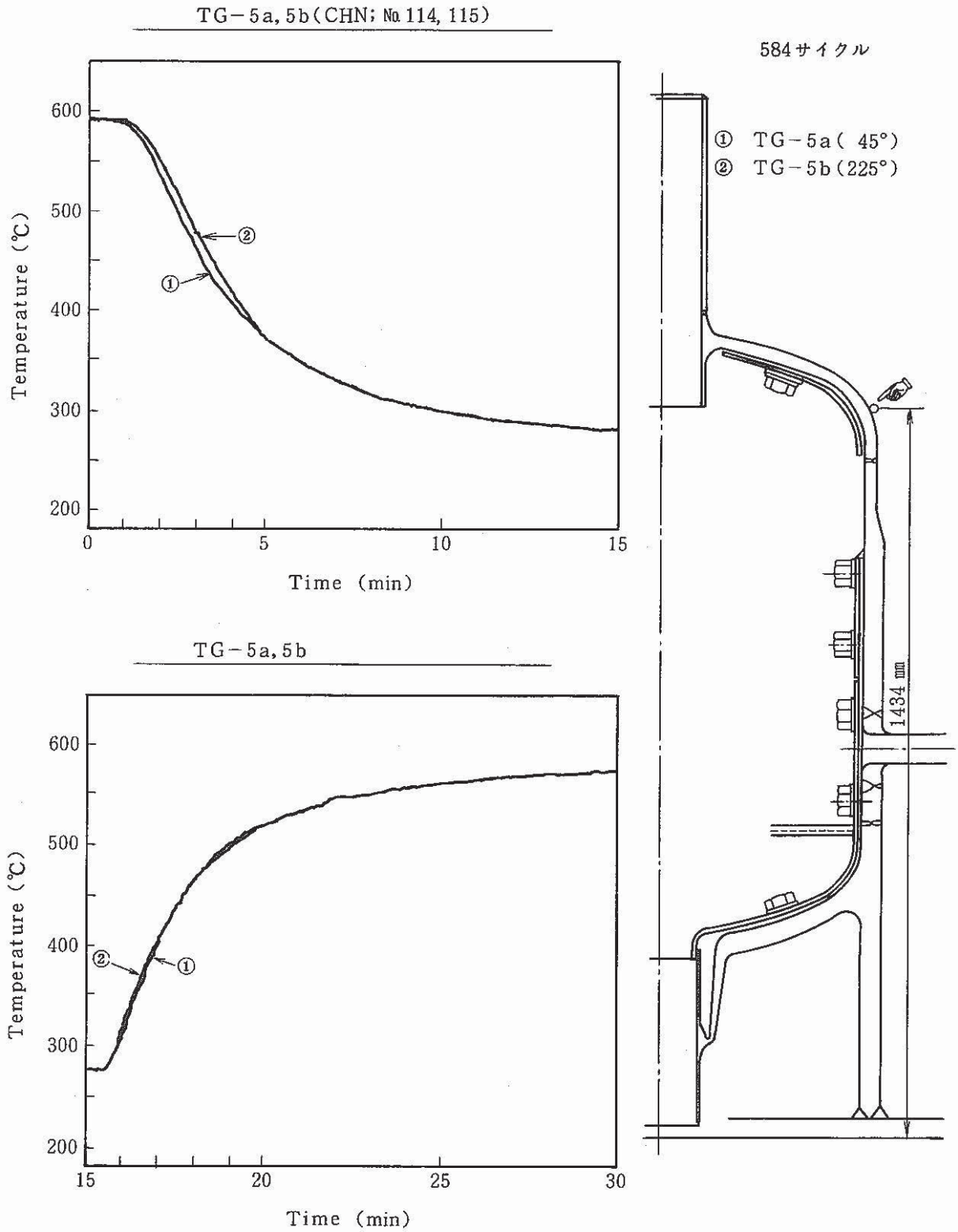


Fig. 3.1.2-6 Temperature Change of Upper Head Outer Surface

上部胴 (25 mm) 外面

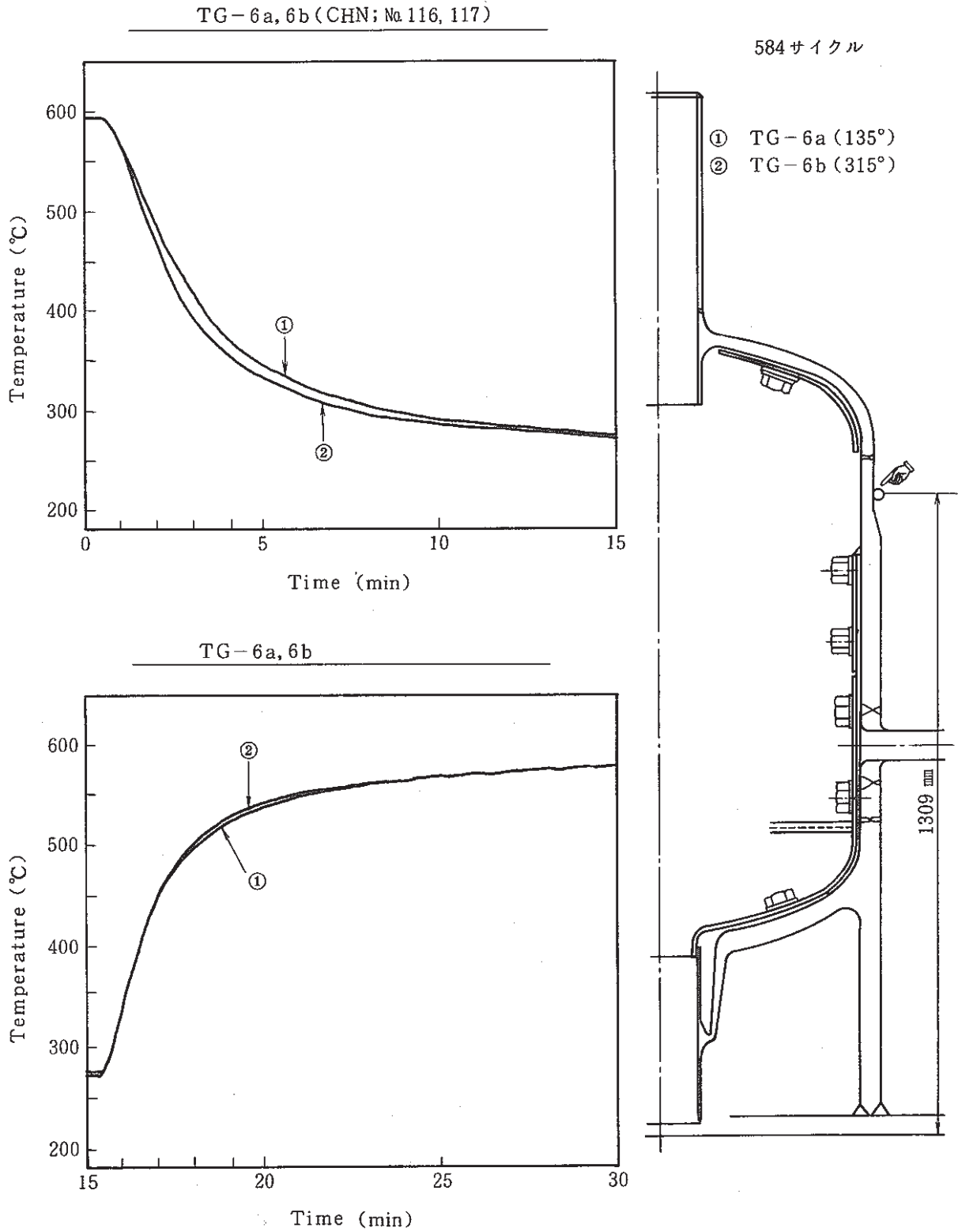


Fig. 3.1.2-7 Temperature Change of Upper Part of Vessel Outer Surface

上部胴 (40 mm) 外面

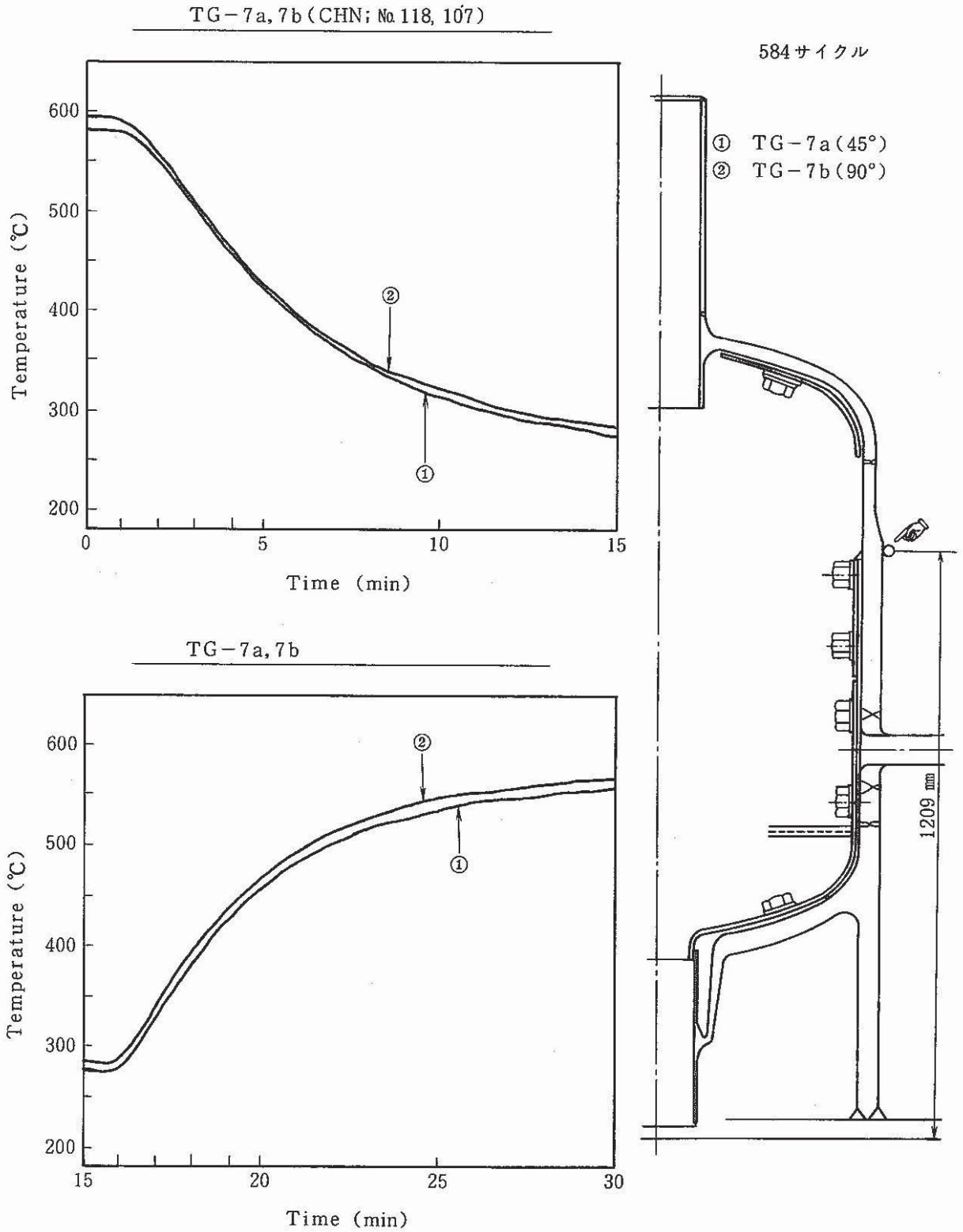


Fig. 3.1.2-8 Temperature Change of Upper Part of Vessel Outer Surface

上 部 胴 外 面

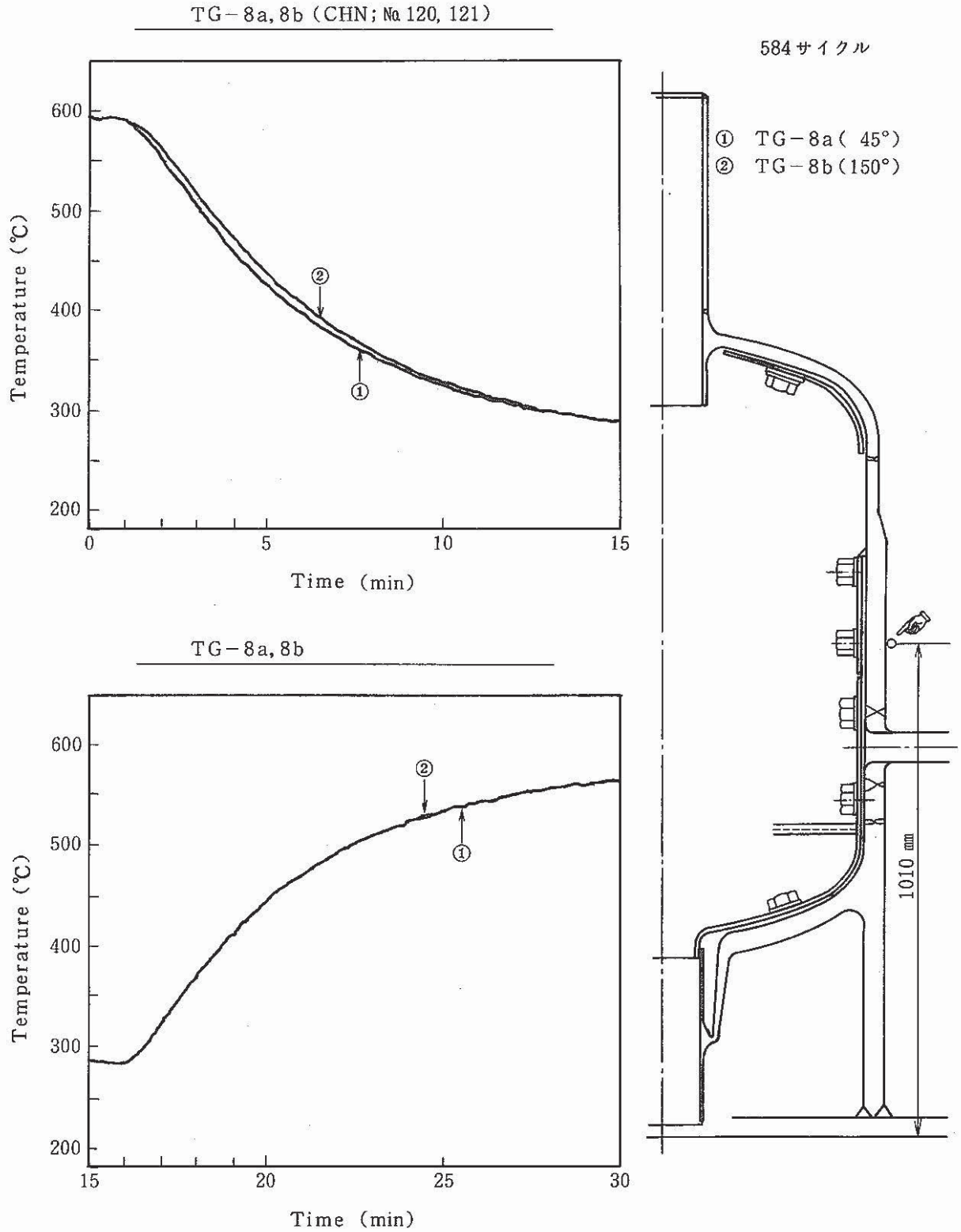


Fig. 3.1.2-9 Temperature Change of Upper Part of Vessel Outer Surface

下部胴外面

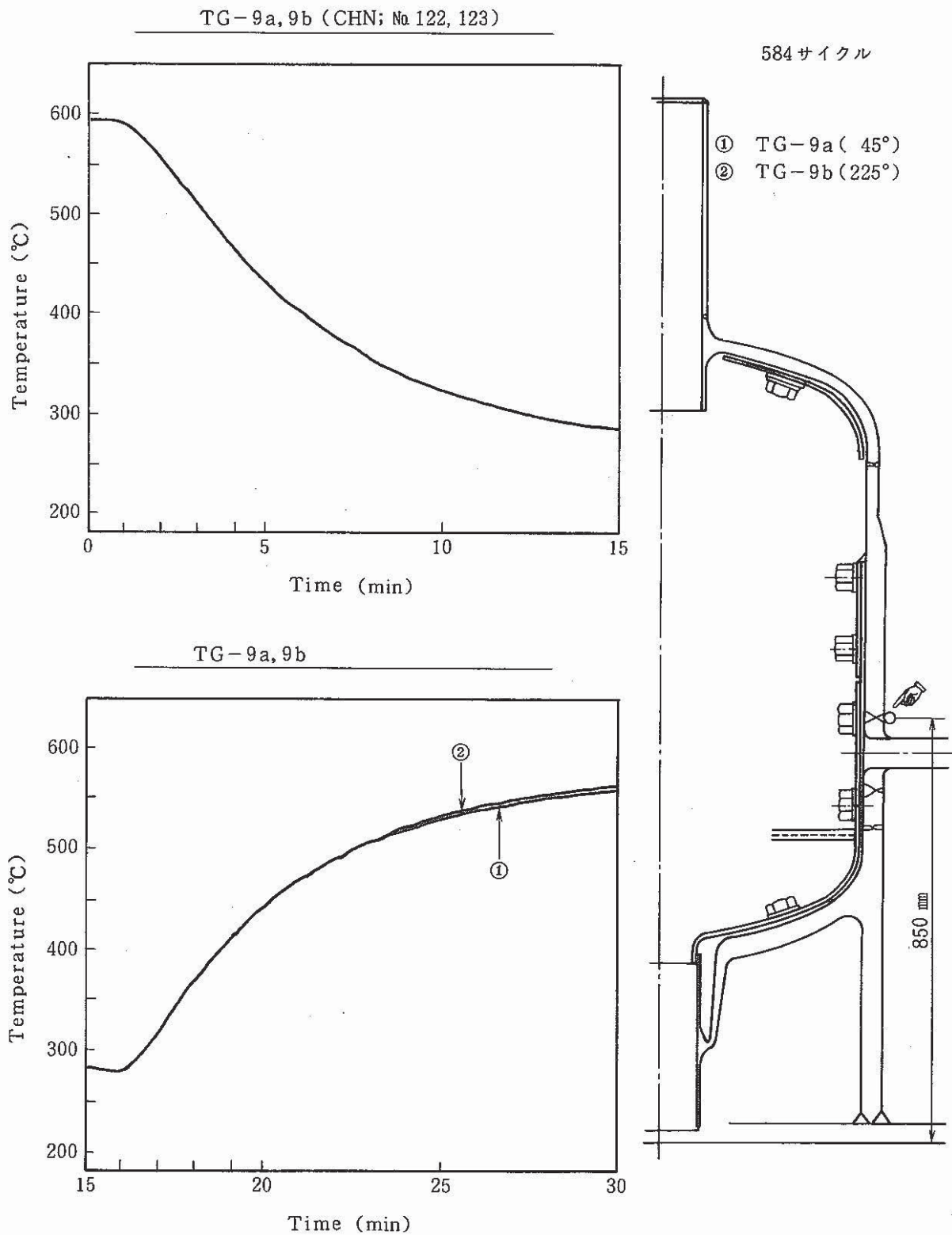


Fig. 3.1.2-10 Temperature Change of Lower Part of Vessel Outer Surface

下部胴外面

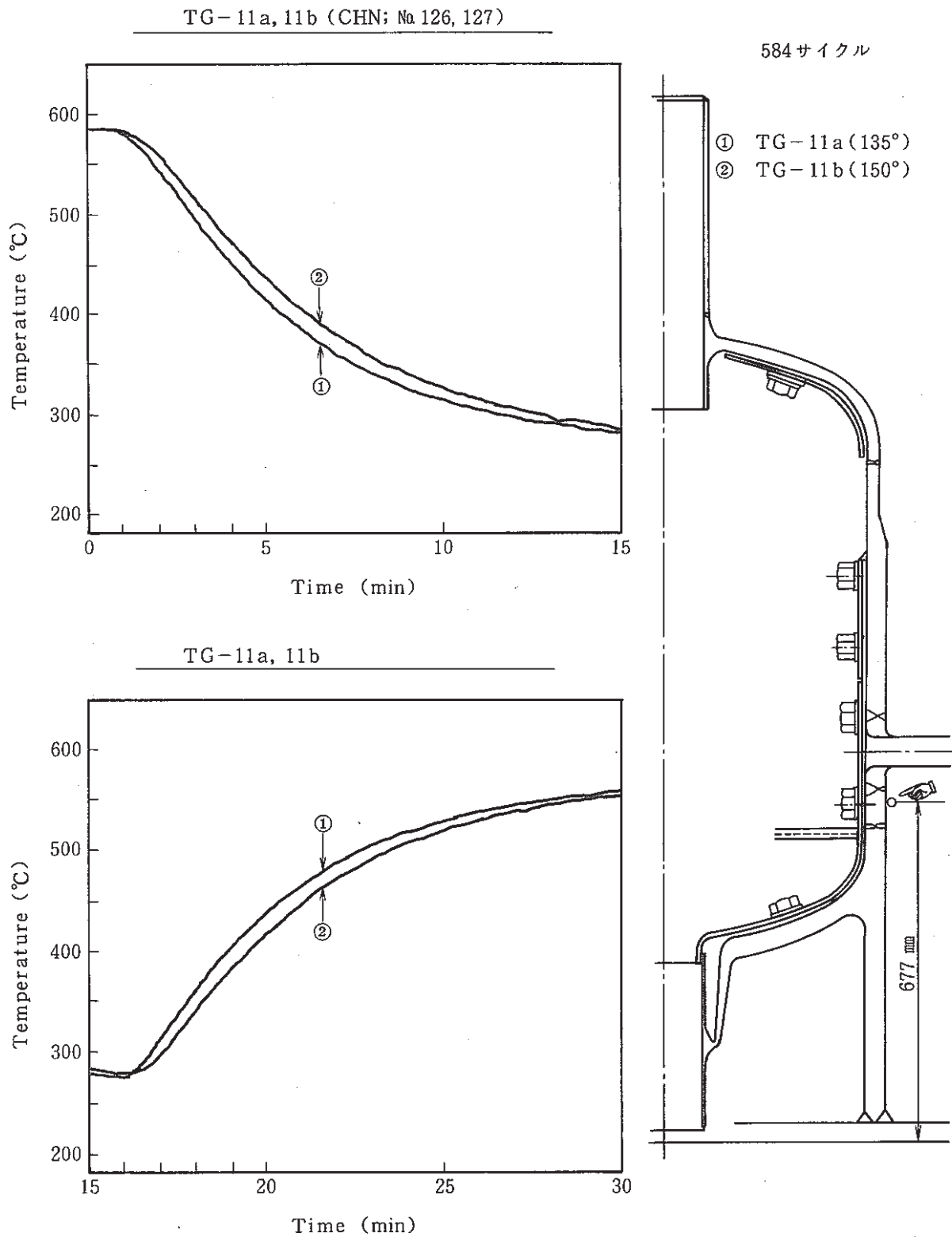


Fig. 3.1.2-11 Temperature Change of Lower Part of Vessel Outer Surface

下部胴外面

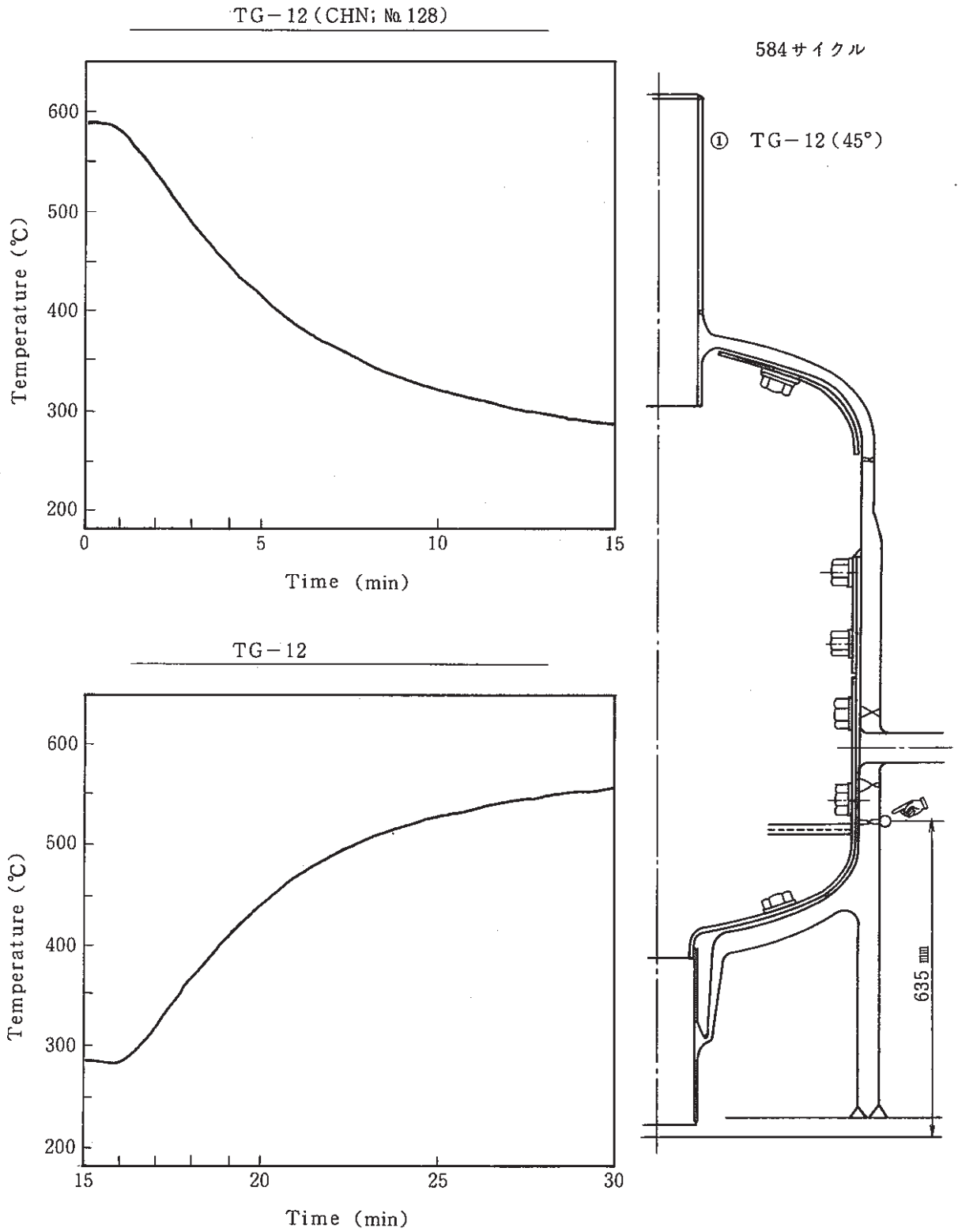
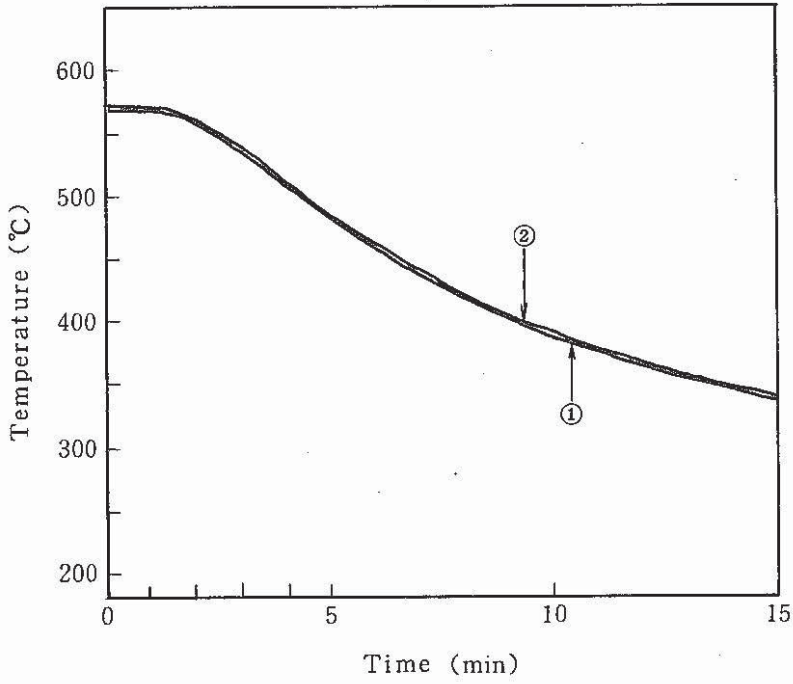


Fig. 3.1.2-12 Temperature Change of Lower Part of Vessel Outer Surface

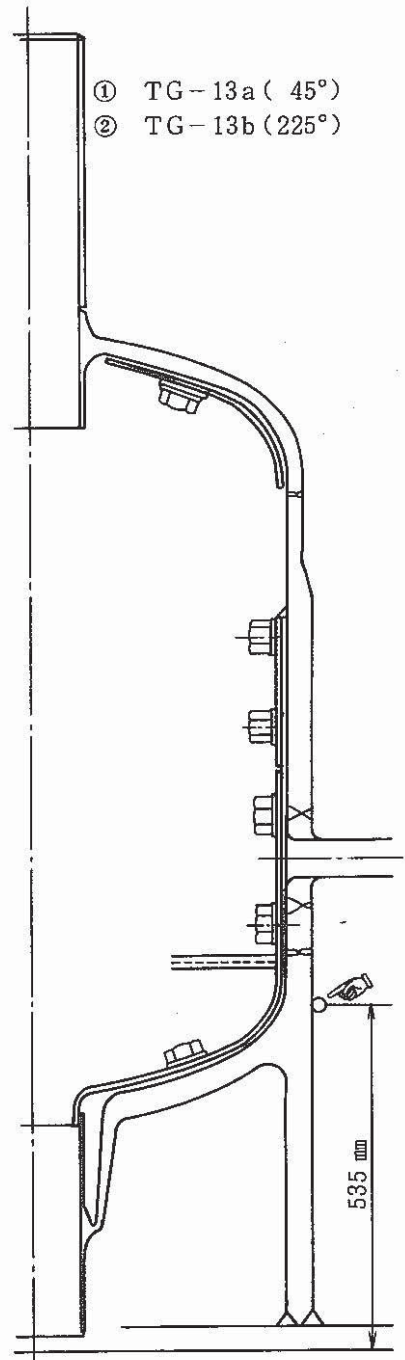
コニカル 胴外面

TG-13a, TG-13b (CHN; No.129, 130)



584サイクル

- ① TG-13a (45°)
- ② TG-13b (225°)



TG-13a, TG-13b

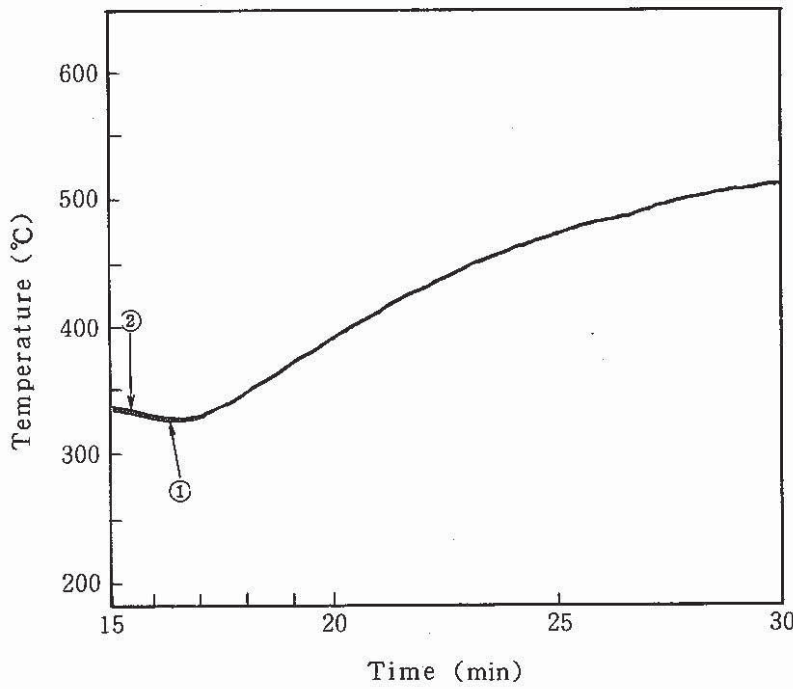


Fig. 3.1.2-13 Temperature Change of 3-Pieces Junction Outer Surface

コニカル胴外面

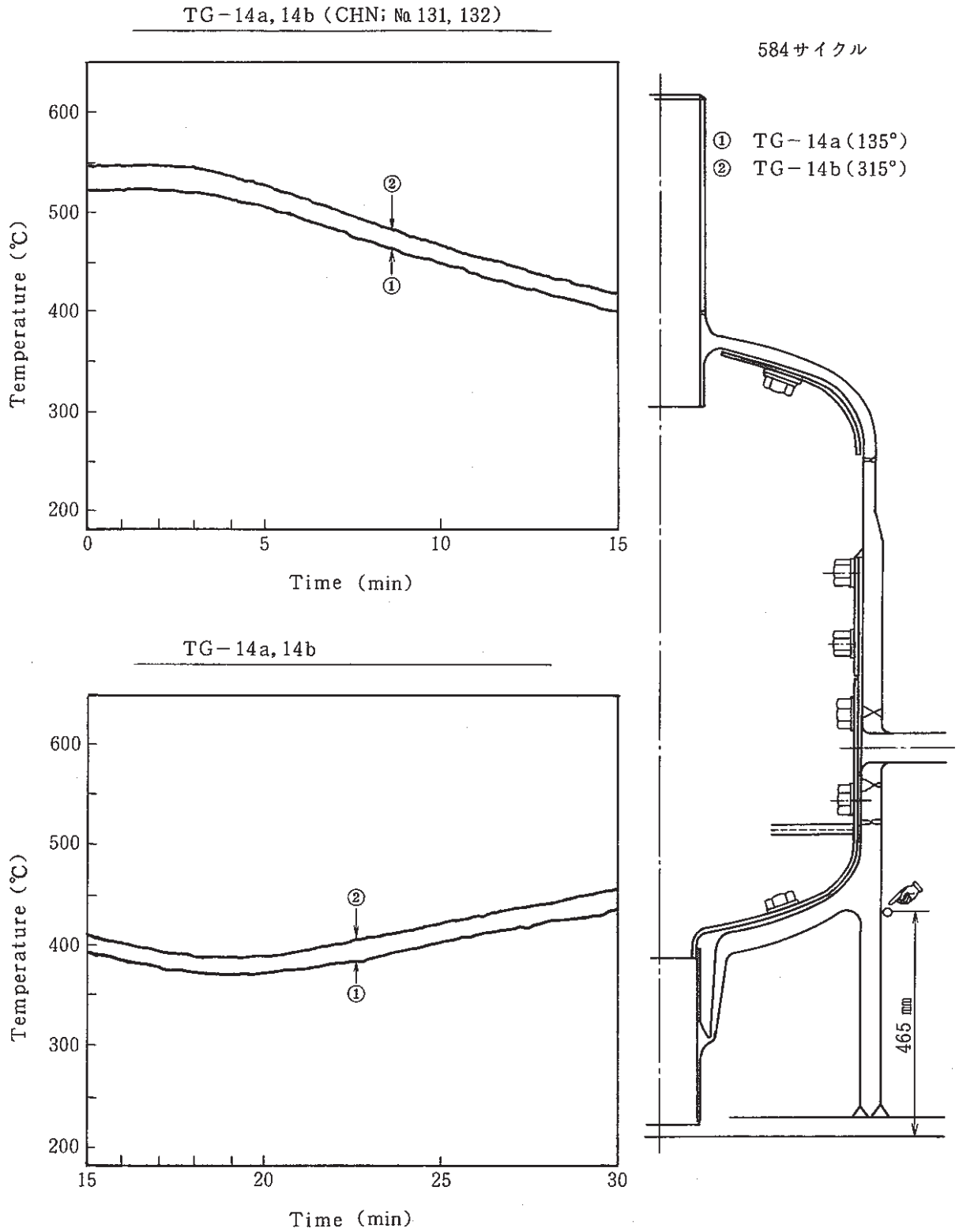


Fig. 3.1.2-14 Temperature Change of 3-Pieces Junction Outer Surface

下 鏡 板 外 面

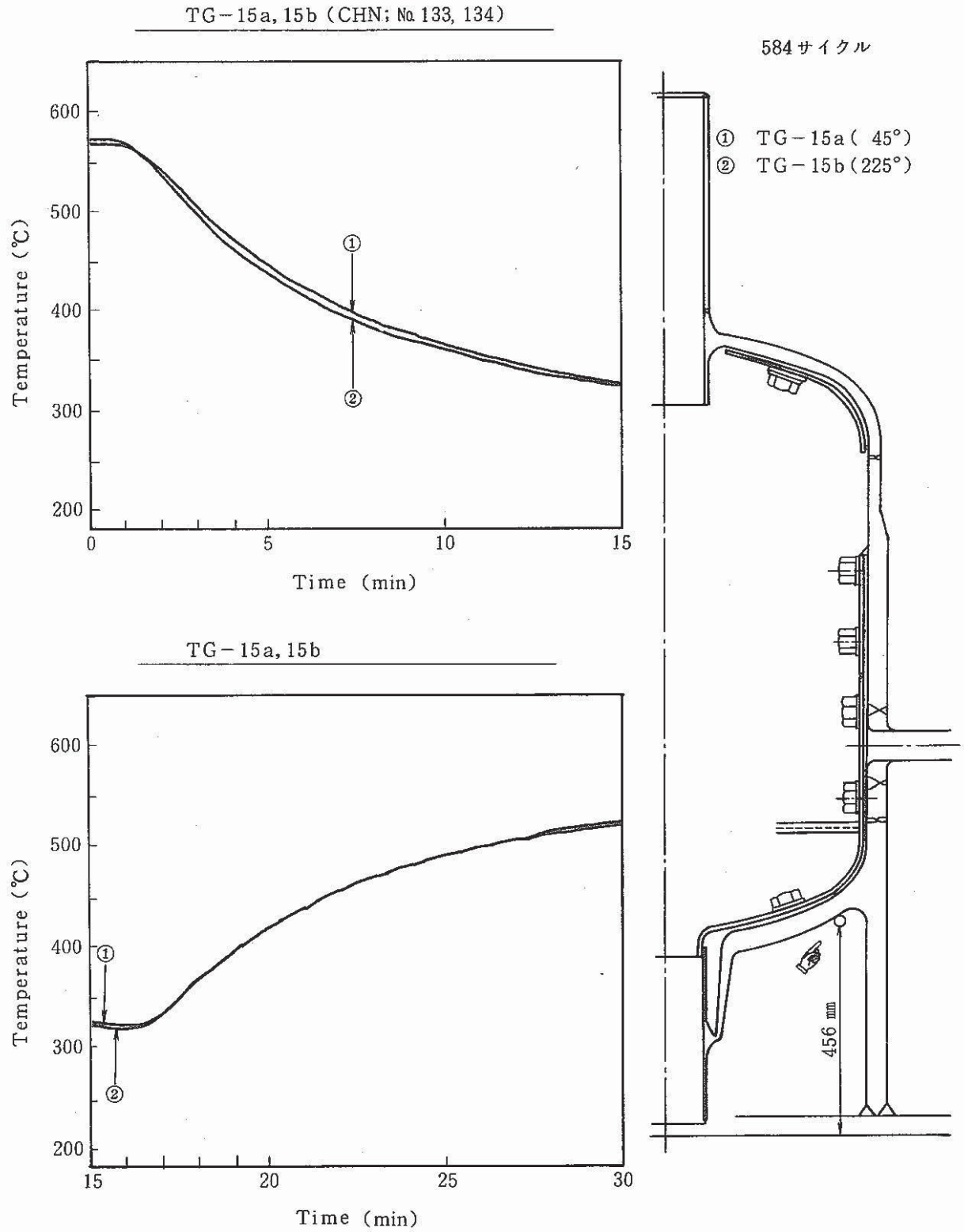


Fig. 3.1.2-15 Temperature Change of Lower Head Outer Surface

下 鏡 板 外 面

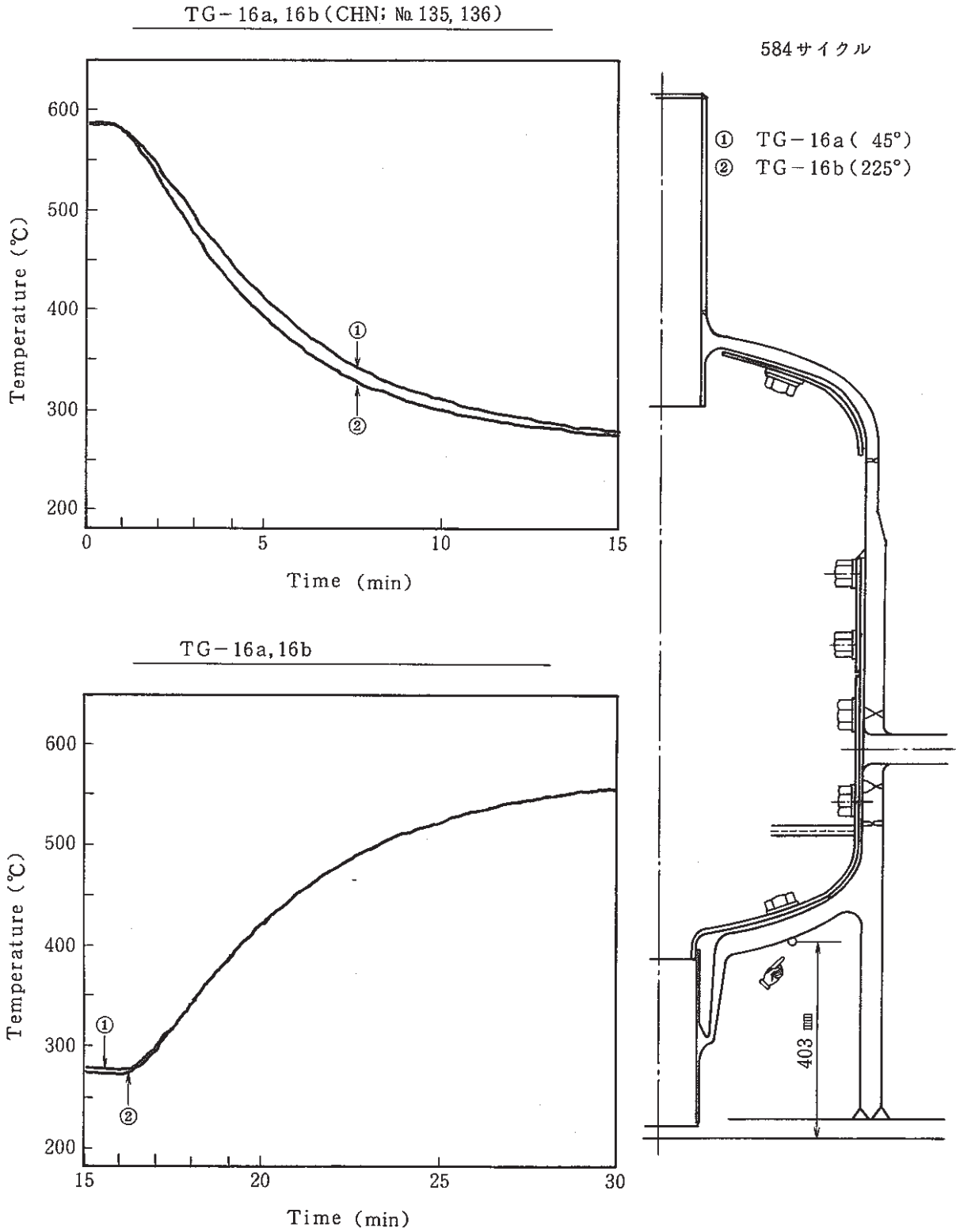
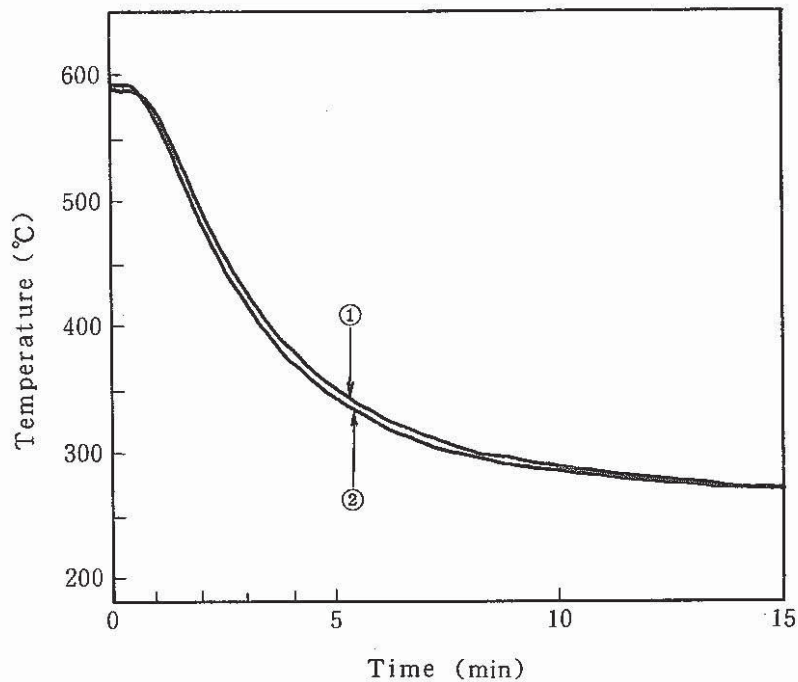


Fig. 3.1.2-16 Temperature Change of Lower Head Outer Surface

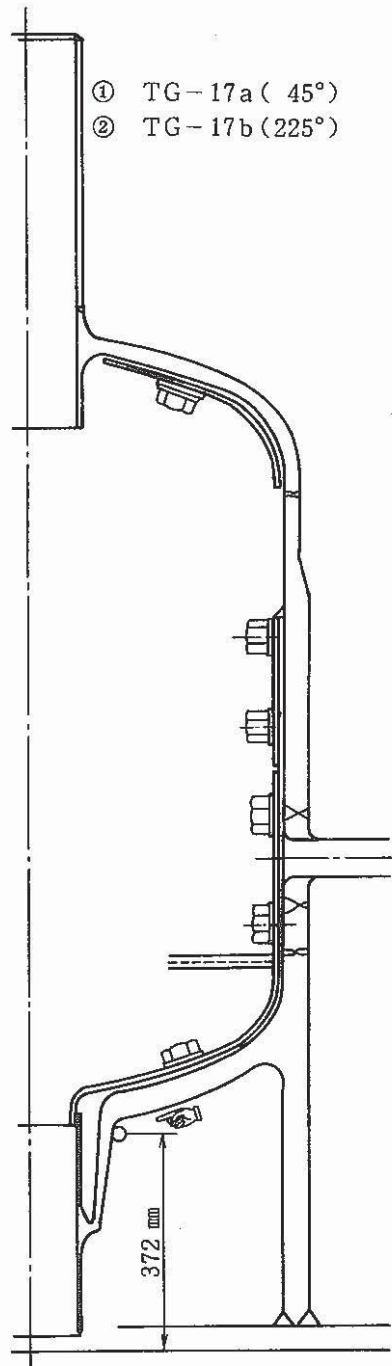
出口ノズル外面

TG-17a, 17b (CHN; № 137, 138)



584サイクル

- ① TG-17a (45°)
- ② TG-17b (225°)



TG-17a, 17b

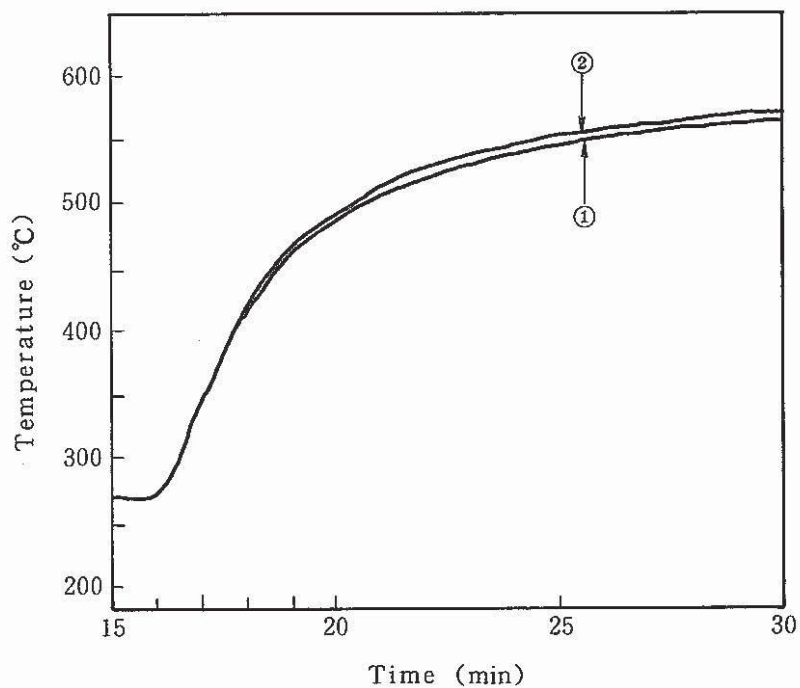


Fig. 3.1.2-17 Temperature Change of Outlet Nozzle Outer Surface

出口ノズル外面

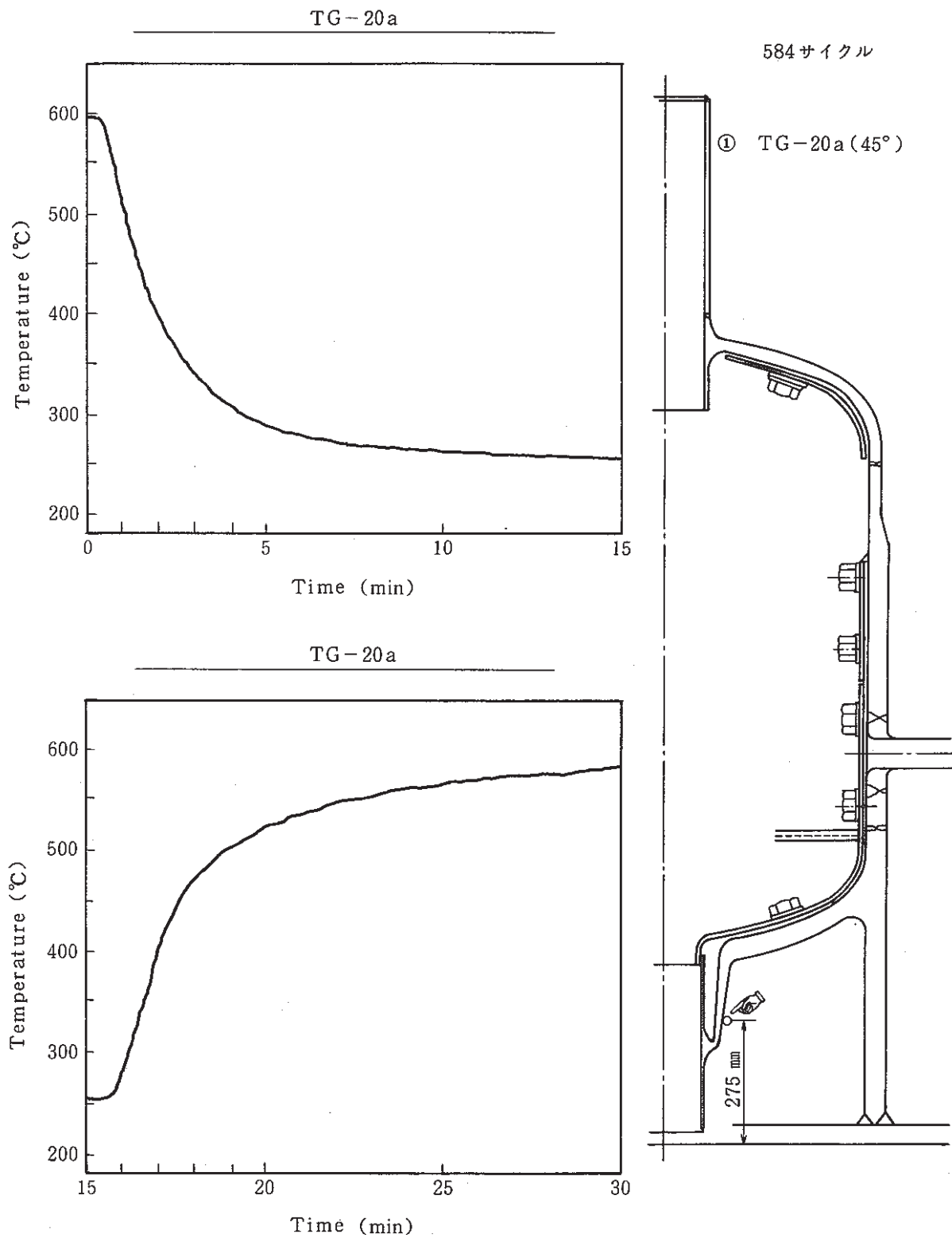


Fig. 3.1.2-18 Temperature Change of Outlet Nozzle Outer Surface

出口ノズル外面

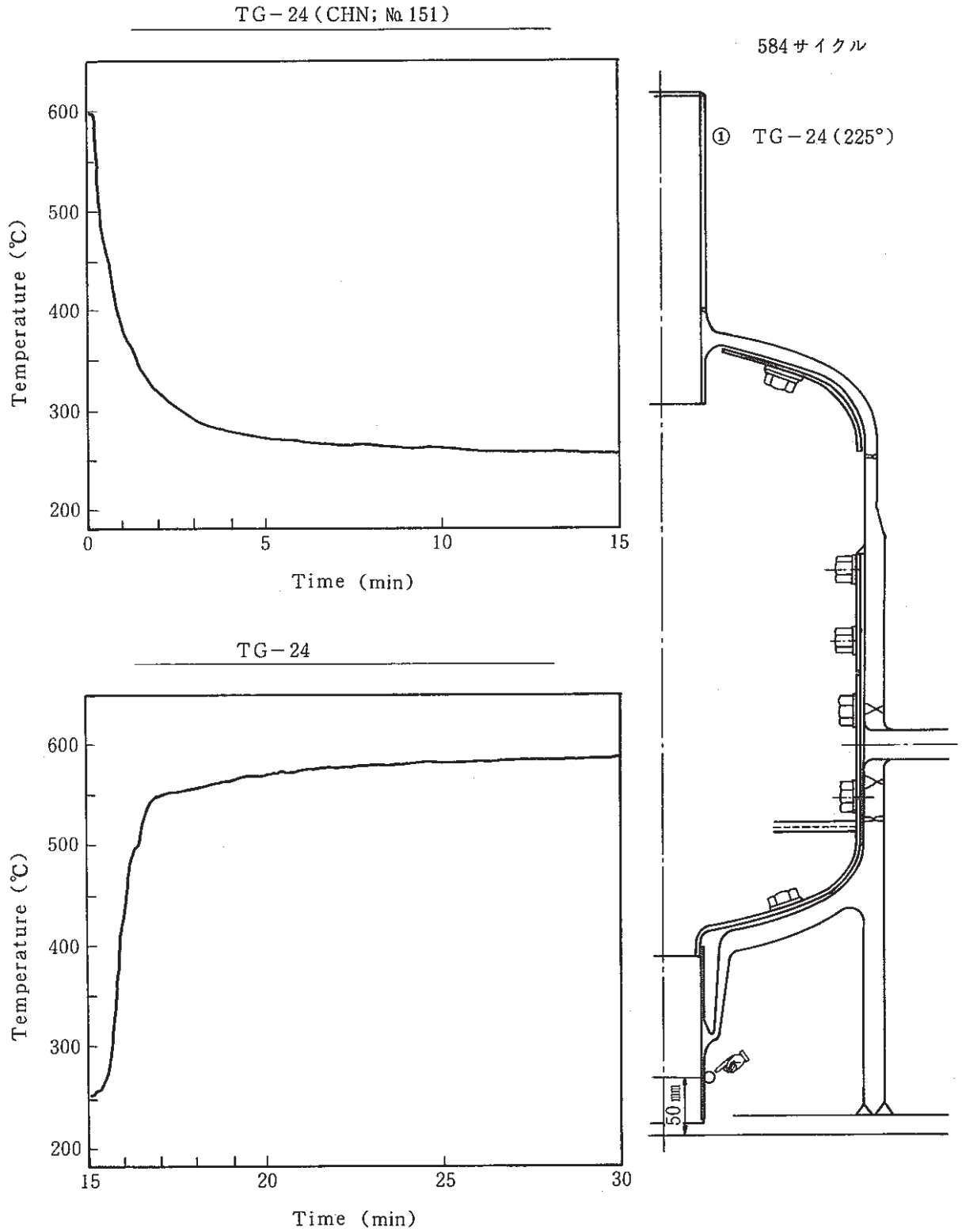


Fig. 3.1.2-19 Temperature Change of Outlet Nozzle Outer Surface

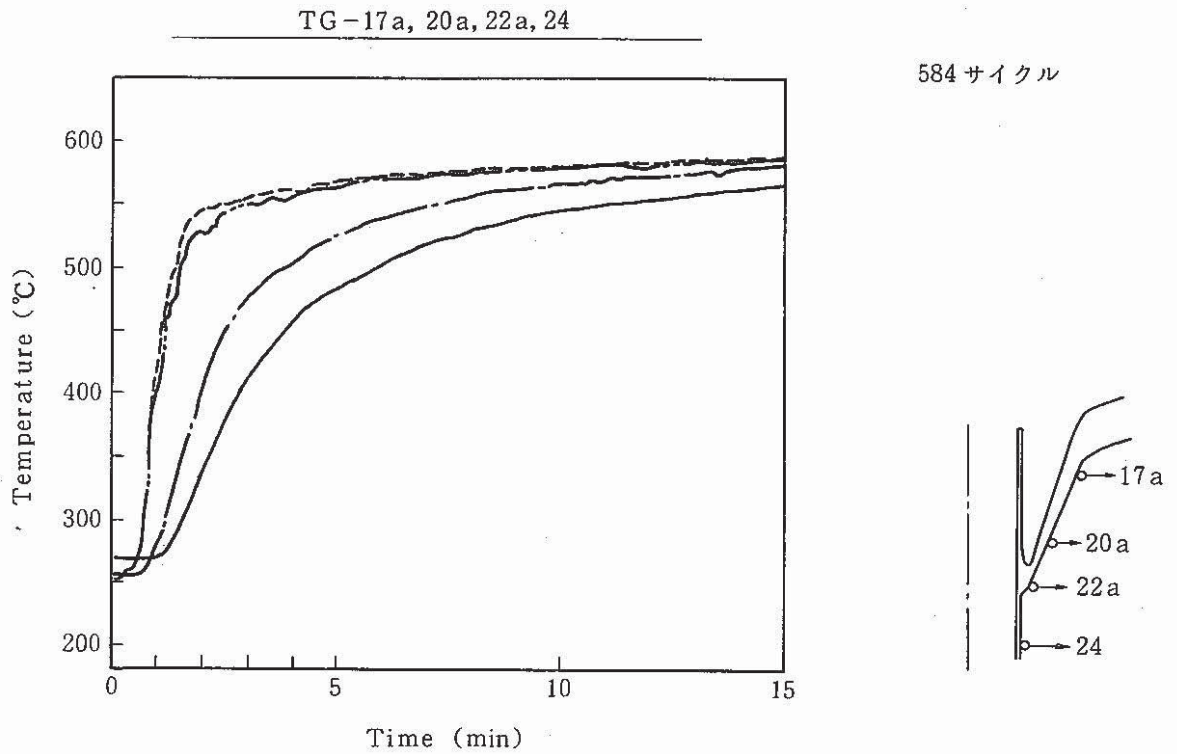


Fig. 3.1.2-20 Temperature Change of Outlet Nozzle Safeend Outer Surface along Axial Direction

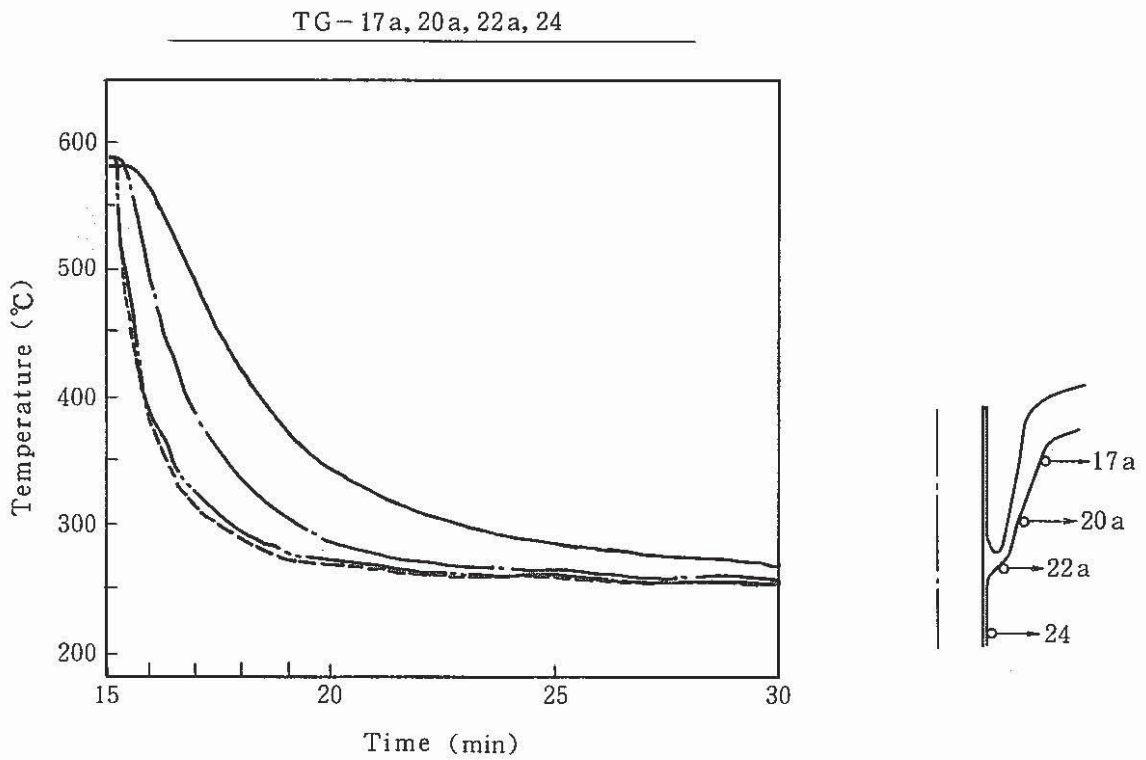
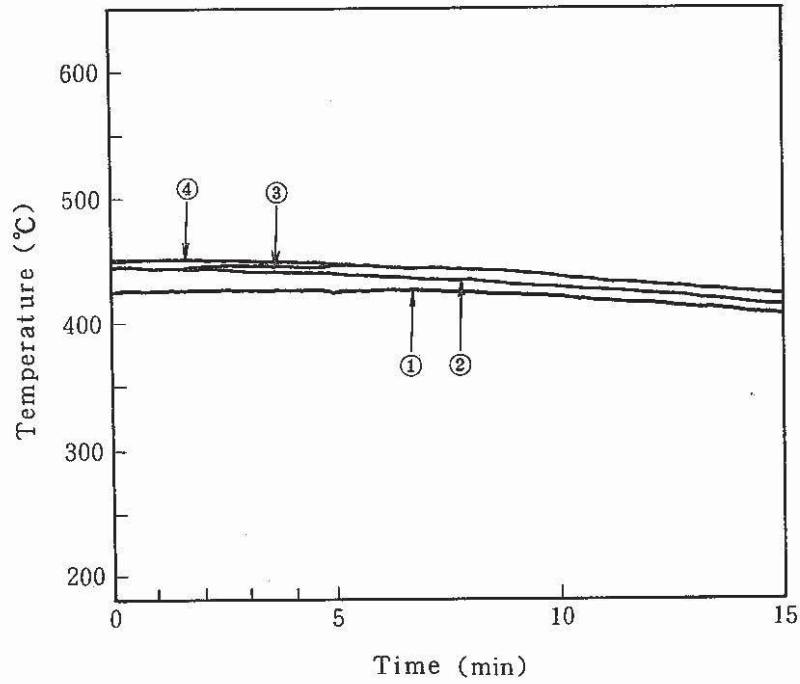


Fig. 3.1.2-21 Temperature Change of Outlet Nozzle Safeend Outer Surface along Axial Direction

スカート

TG-18a, 18b, 18c, 18d (CHN; No 139, 140, 141, 142)

584サイクル



- ① TG-18a (45°)
- ② TG-18b (45°)
- ③ TG-18c (225°)
- ④ TG-18d (225°)

TG-18a, 18b, 18c, 18d

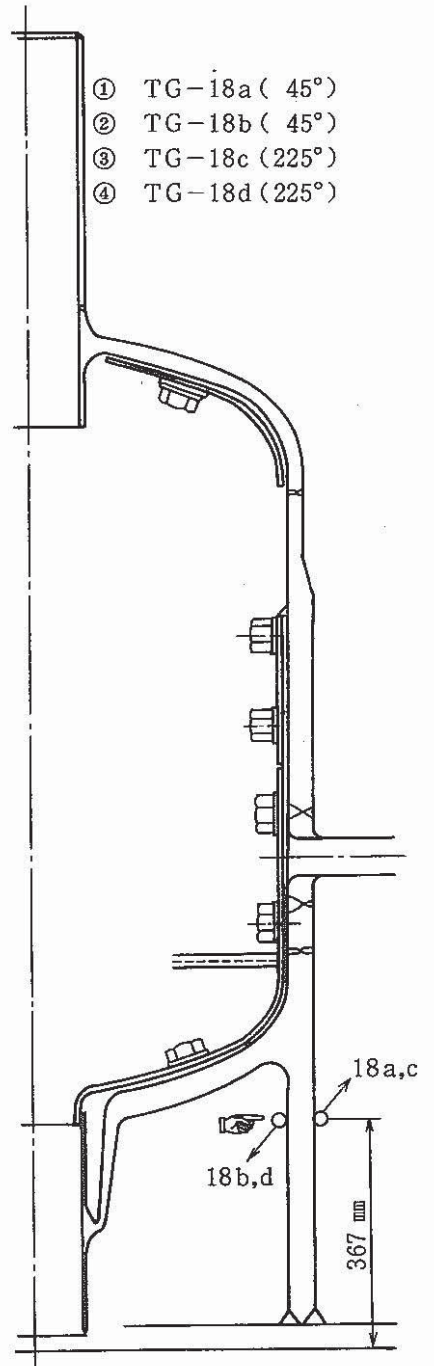
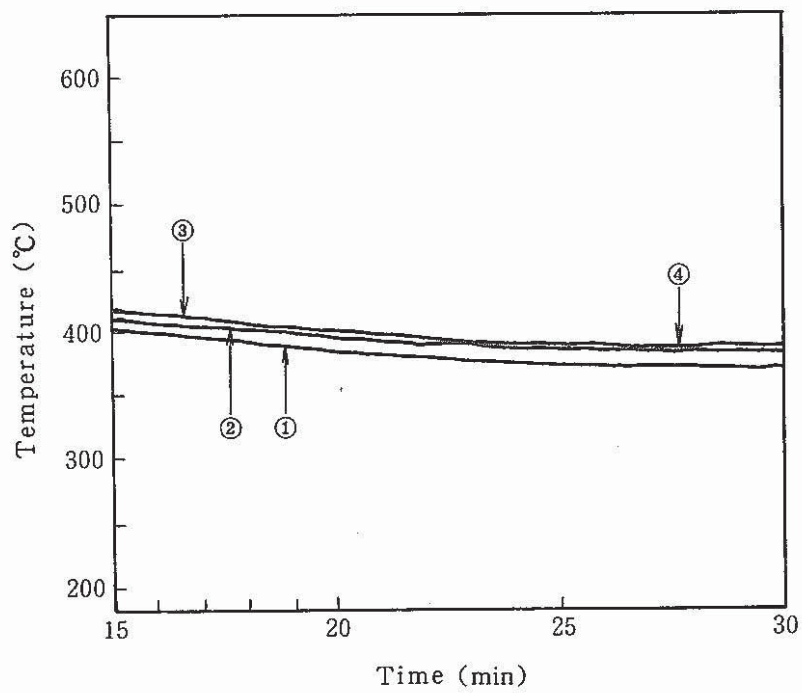


Fig. 3.1.2-22 Temperature Change of Skirt

スカート

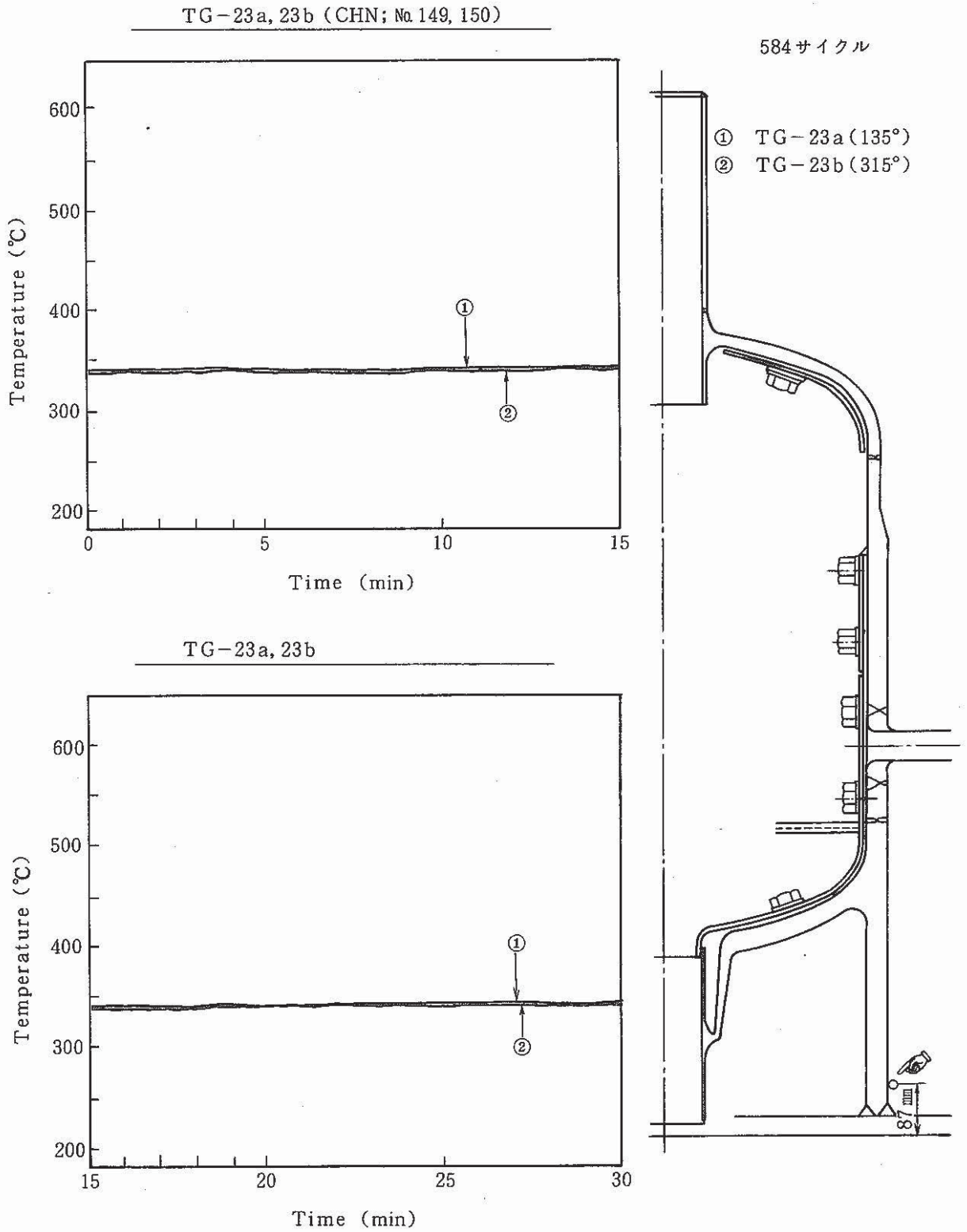


Fig. 3.1.2-23 Temperature Change of Skirt

ベース板上面

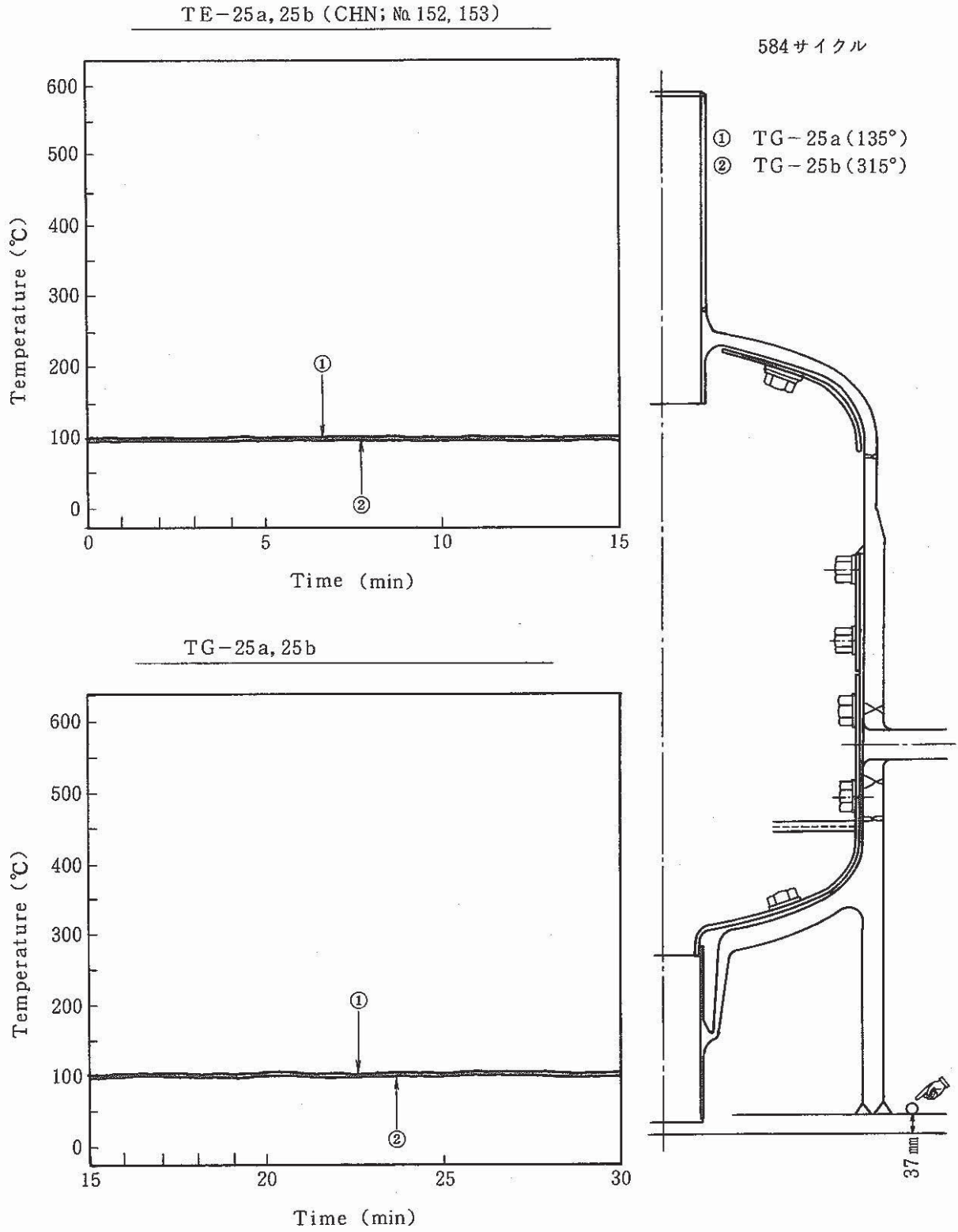


Fig. 3.1.2-24 Temperature Change of Base Plate

中間受台ベース板上面

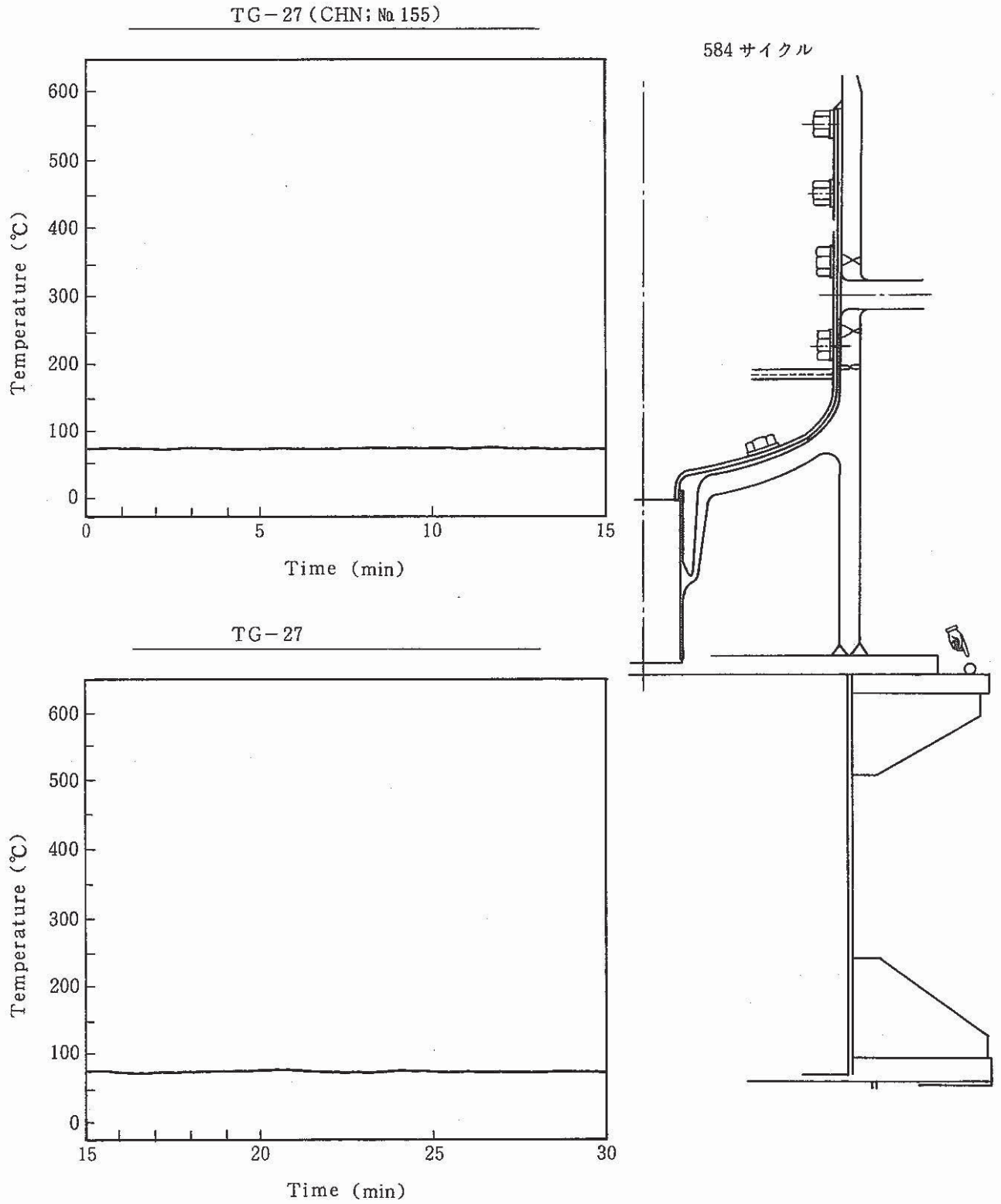


Fig. 3.1.2-25 Temperature Change of Middle Stand Upper Surface

中間受台胴部

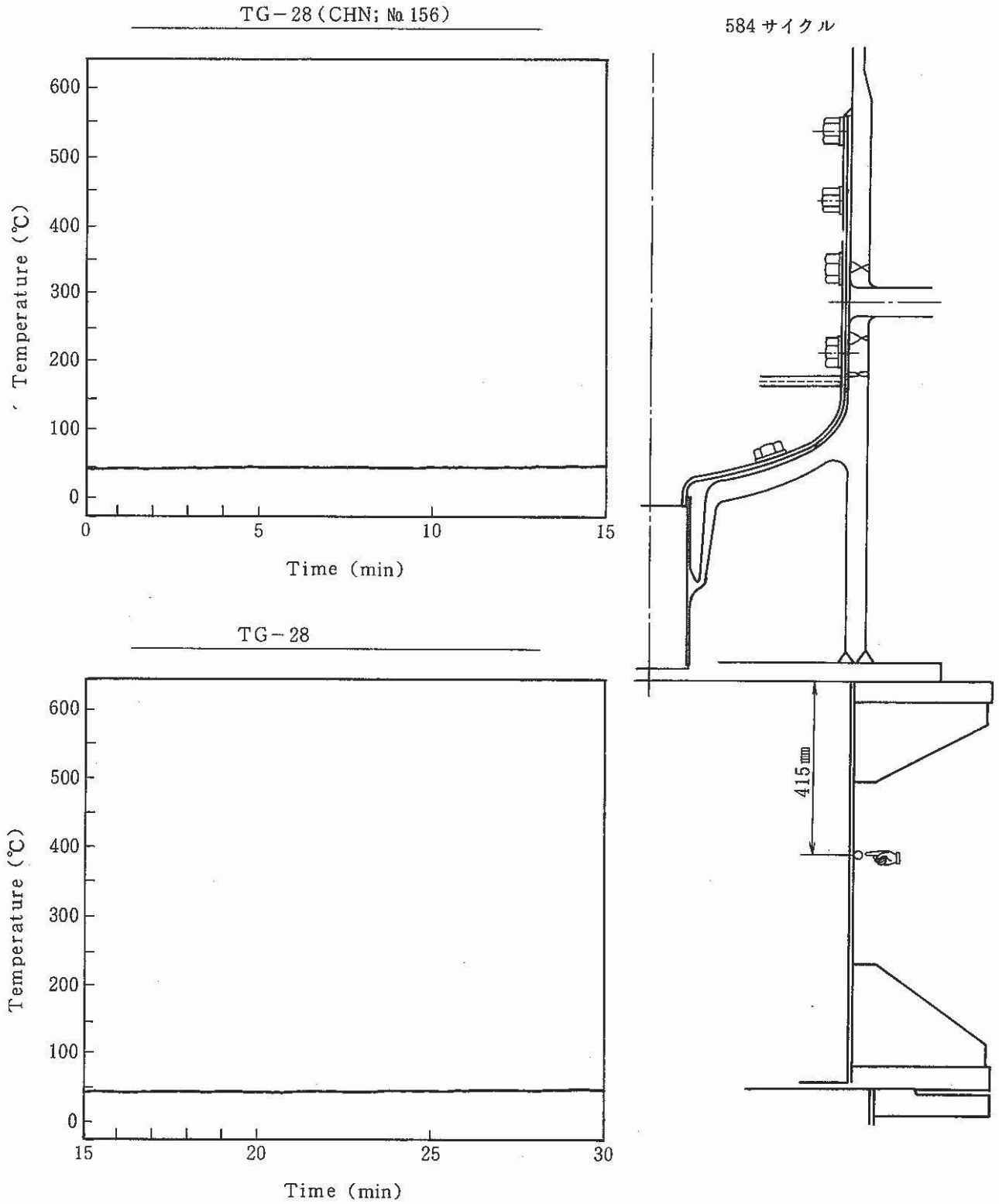


Fig. 3.1.2-26 Temperature Change of Middle Stand Body

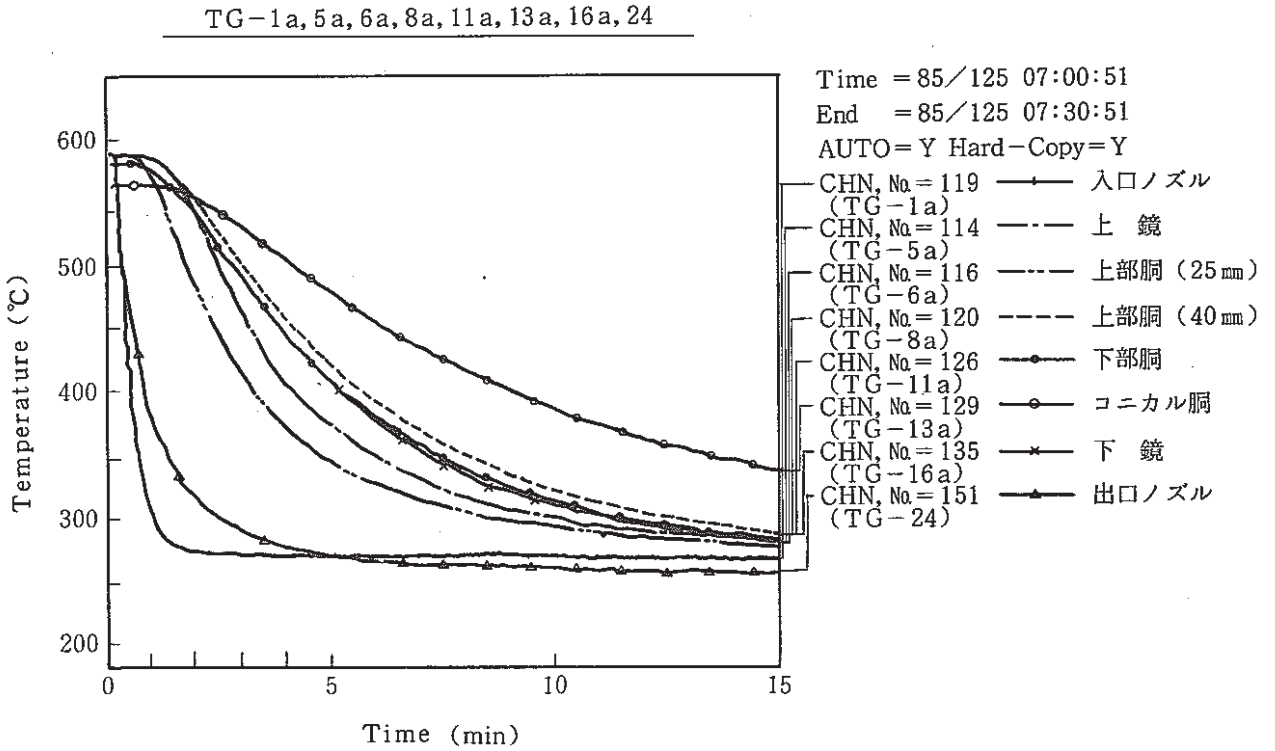


Fig. 3.1.2-27 Temperature Change of Outer Surface along Axial Direction

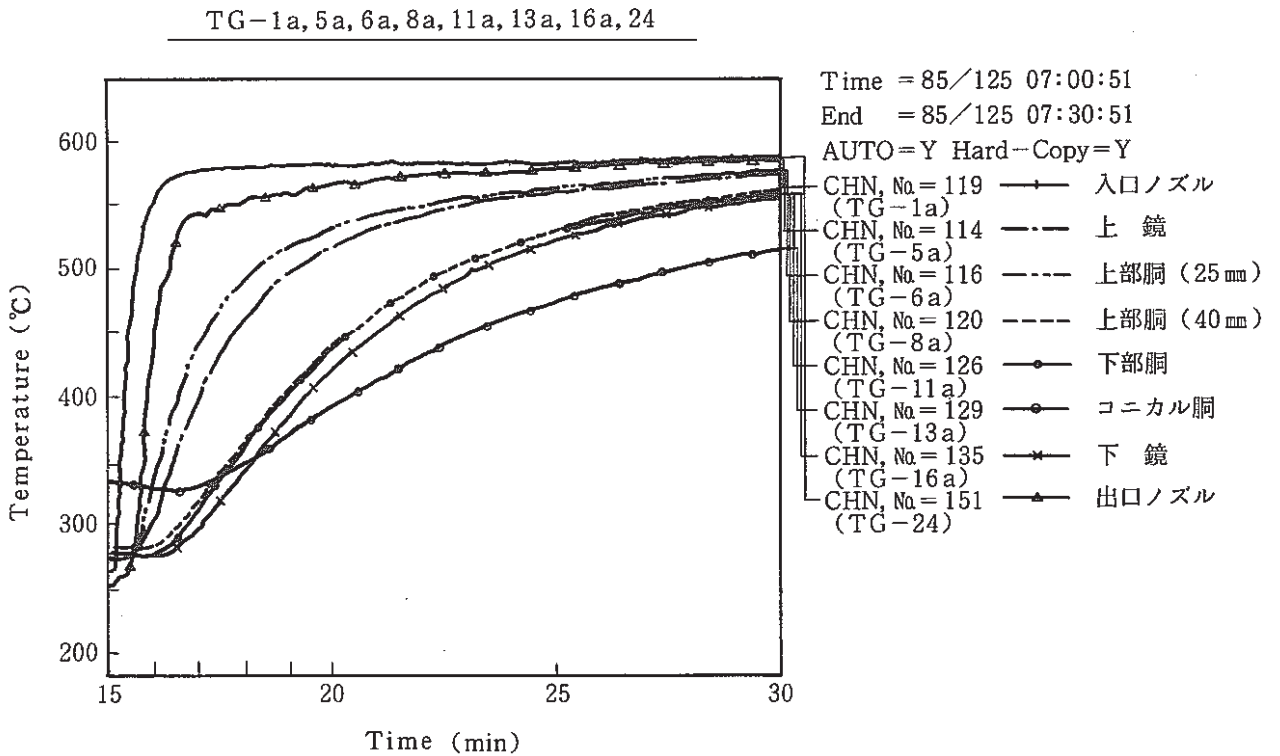


Fig. 3.1.2-28 Temperature Change of Outer Surface along Axial Direction

3.2 変位

2章 (Fig. 2-6) で示したように変位計は供試体入口T管, 入口ノズル, 上部胴, 下部胴, コニカル胴及びベース板に合計11点取り付けられた。

入口T管の変位計 (DG-8) は, 供試体入口側の高温と低温ナトリウム配管系が非対称な配置であるため当該T管に進行性変形が発生するのを懸念して取り付けられたものであるが有意な進行性変形は認められなかった。DG-2のC.S.とH.S.による変動範囲は12.2mmであり, 供試体アンカー点 (ベースプレート) から変位計までの距離2,073mmの自由膨張を考えた場合の変位 $2,073\text{mm} \times 1.98 \times 10^{-5} \times 350^\circ\text{C} = 14.4\text{mm}$ と同程度の大きさである。

ベース板の変位計 (DG-7a及び7b) について供試体はそのベースプレートに24φの穴を設け中間受台の穴27φに8本のM22のボルトにて取り付けられているが供試体スカート部と中間受台の相対的溫度差にて半径方向に均一に熱膨張する事を確認するために設けたものである。DG-7aの変動範囲は2.3mm, DG-7bで2.0mmであり均一に熱膨張しており設計時に設定した熱膨張の余裕代2.5mmは適切であったことが分かる。

DG-1AからDG-6は供試体の半径方向変位計の計測用であり, Table 3.2に計測結果を示す。

Table 3.2 Results of Radial Displacements

	変動範囲 mm	進行性変位量 mm	位置
DG-1A	1.3	8.5 *	入口ノズル
2	3.3	3.0	上部胴 (25mm)
3	3.0	-	" (40mm)
4	3.0	1.3	下部胴
5	3.0	-	コニカル胴
6	2.0	1.1	スカート

*ただし766サイクルまでの値, それ以降は集録しなかった。

3.3 歪

2章 (Fig. 2-5) で示したように歪計は入口ノズル, 上部胴, 下部胴及びコニカル胴に合計7点取り付けられた。歪計は製作時解析で評価断面とした部位近傍にAILTECH製MG-425タイプを取り付けたが測定できたのは4点であった。これら4点について温度変化によるみかけ上の歪は校正した。

上部胴 (25mm) に取り付けられたAG-2はC.S.時MAX 2,300μストレイン, H.S.時2,000μストレインでC.S.の方が若干大きく (Fig. 3.3-1) であり歪範囲では4,600μストレ

インであった。

下部胴のAG-4はC.S., H.S.共1,200 μ ストレインであった (Fig. 3.3-2)。

コニカル胴AG-5a・bでは, 実験結果 (Fig. 3.3-3) が約2,000 μ ストレインであった。

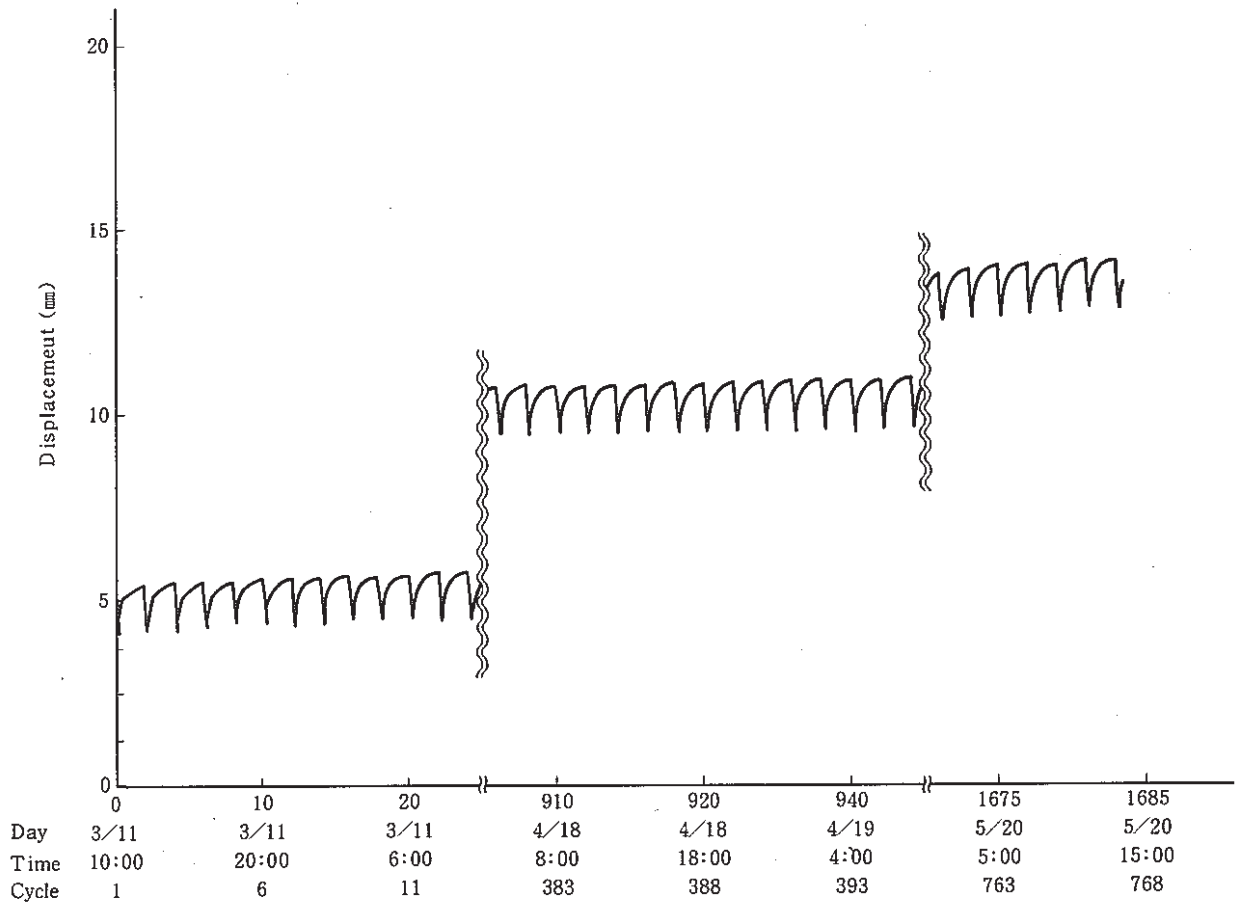


Fig. 3.2 Displacement of Inlet Nozzle Outer Surface

上部胴 (25 mm) 外面

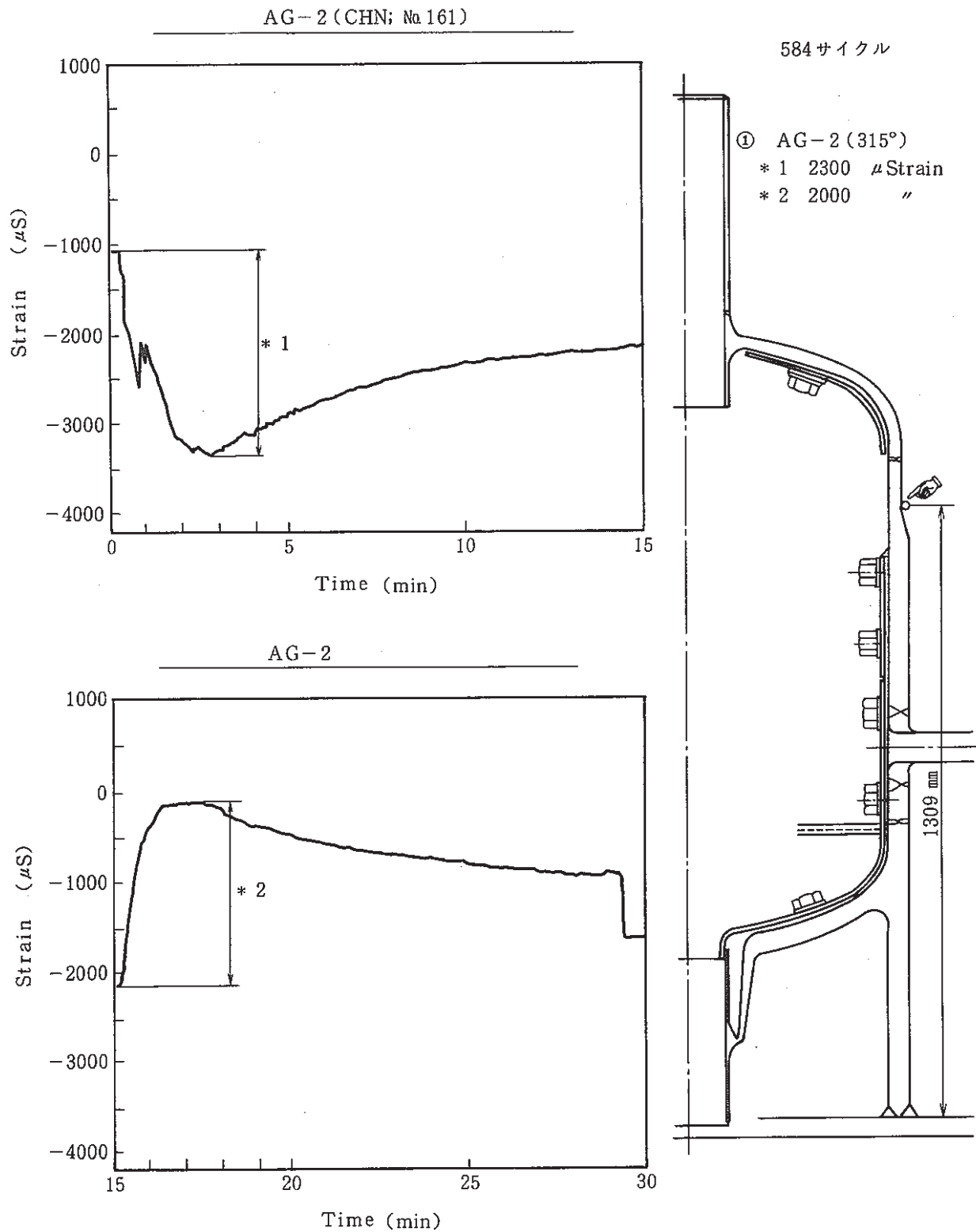


Fig. 3.3-1 Strain of Upper Part of Vessel Outer Surface

下部胴外面

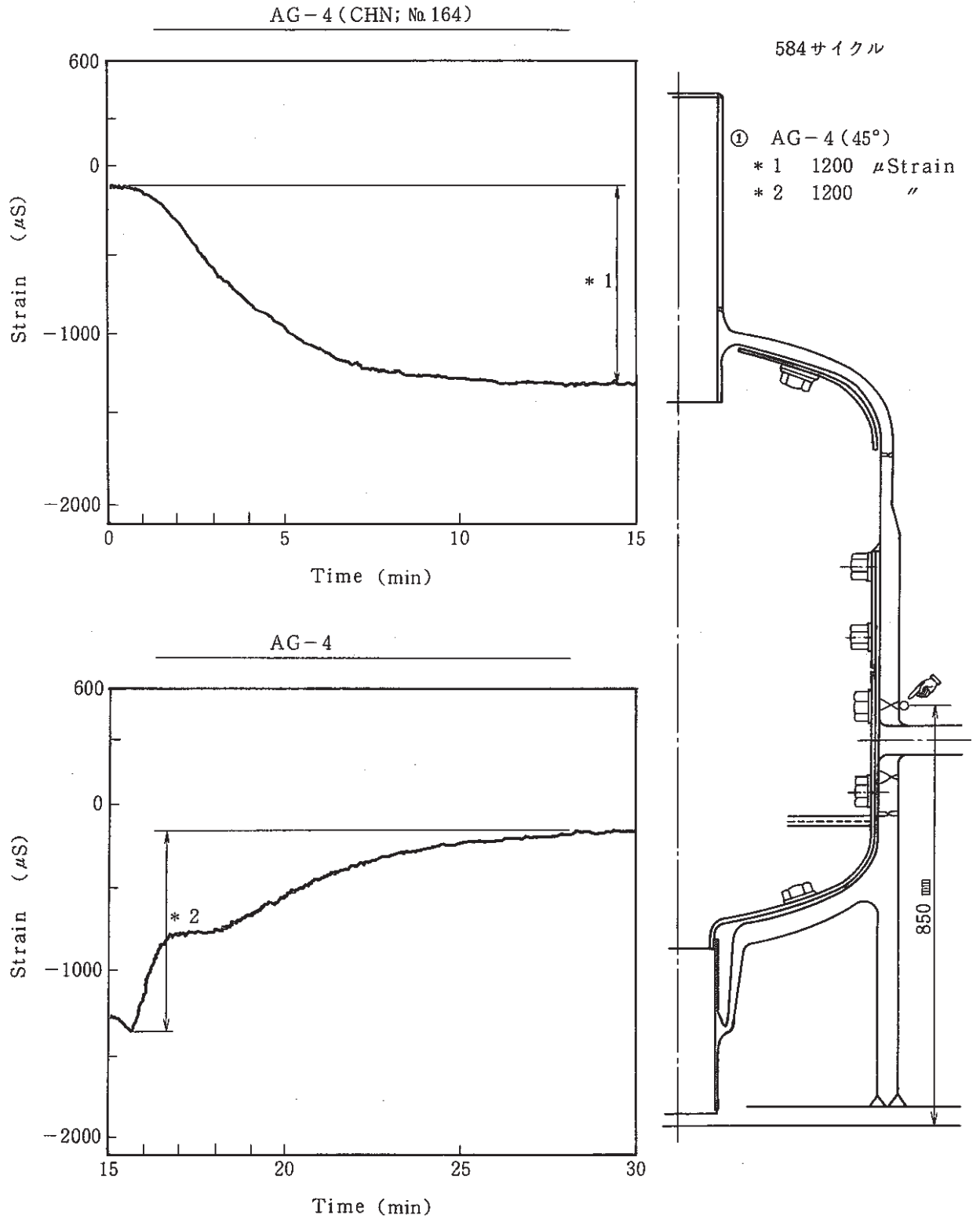


Fig. 3.3-2 Strain of Lower Part of Vessel Outer Surface

コニカル胴外面

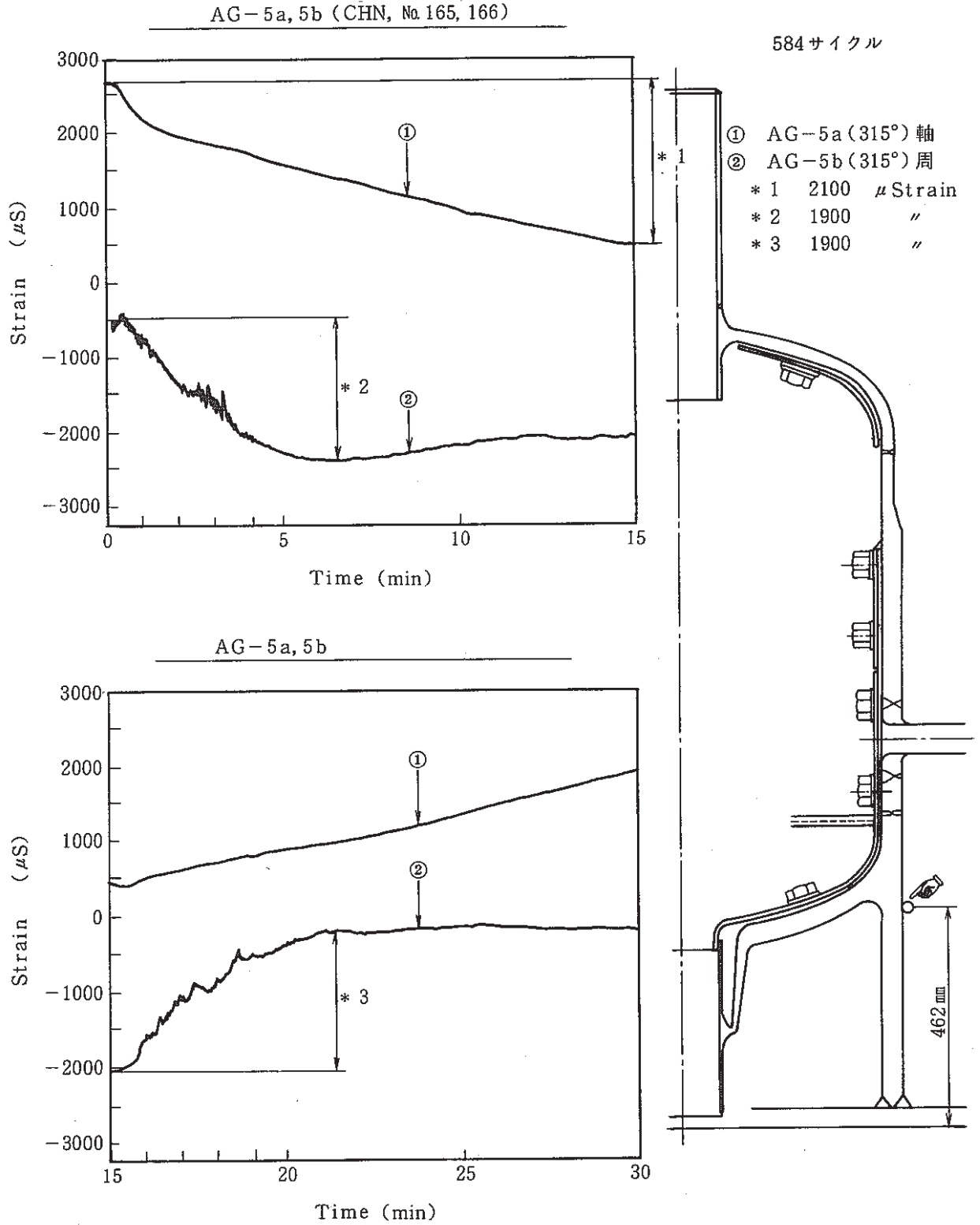


Fig. 3.3-3 Strain of 3-Pieces Junction Outer Surface

4. 破面の観察結果

4.1 破面の観察方法

熱過渡強度試験終了後、供試体をテスト部から取りはずして内部に付着残存しているナトリウムをアルコール循環洗浄装置によって約32時間洗浄し、付着したナトリウムを除去した。その後供試体の外表面について液体浸透探傷検査を実施し、切断解体後のサーマルライナーの取り外し、アルコールによる残存ナトリウムの除去、内面の液体浸透探傷検査、細分割による試料採取を行い、光学顕微鏡および走査電子顕微鏡（SEM）にてき裂の観察を行った。

(1) 液体浸透探傷検査

供試体の外表面を液体浸透探傷検査（PT）した。ついで供試体を Fig. 4.1(a) に示す位置で堅旋盤によって水平方向に4分割した。4分割された供試体の内面のPTを行い、立割りの場所を決定した。Fig. 4.1(b) に供試体の立割りの位置を示す。立割りは大型の鋸盤により6分割した。6分割された供試体の内面PTを行い、断面形状、亀裂発生状況、ミクロ観察を行う場所を決定した。

(2) 断面形状観察

入口ノズル部軸方向 0° 、 180° 、スタッドボルト 30° 、上部鏡一胴部（周方向、軸方向） 0° 、 220° 、コニカル胴一下部鏡方向 0° 、 180° 、出口ノズル部軸方向 180° 、計装ノズル 180° の断面マクロ組織を光学顕微鏡で観察し、写真撮影した。観察面はバフ研磨後、王水で腐食して観察した。

(3) 亀裂発生状況観察

観察断面をエメリーペーパーにて研磨した後バフ研磨し、プロジェクター（Nikon 万能投影器 V-12 型）を用いて倍率50倍で亀裂の位置と深さを測定した。

(4) 亀裂状態のミクロ観察

入口ノズル部、上部鏡一上部胴、上部胴シンニング部、上部胴一下部胴（最終溶接部）、下部胴、下部胴一コニカル胴、下部鏡、下部胴ライナスタッド、計装ノズルに発生した亀裂のうち代表的なもののミクロ形態を金属顕微鏡（Nikon 高級型メタフォトVMS型）により観察した。観察面は、研磨後、王水で腐食して組織観察した。

(5) SEM観察

観察対象とされた亀裂を液体窒素中で開口し、破面外観を写真撮影した。ついで破面のストライエーション間隔を小型走査型電子顕微鏡（日本電子製：JSM25S型）により観察した。

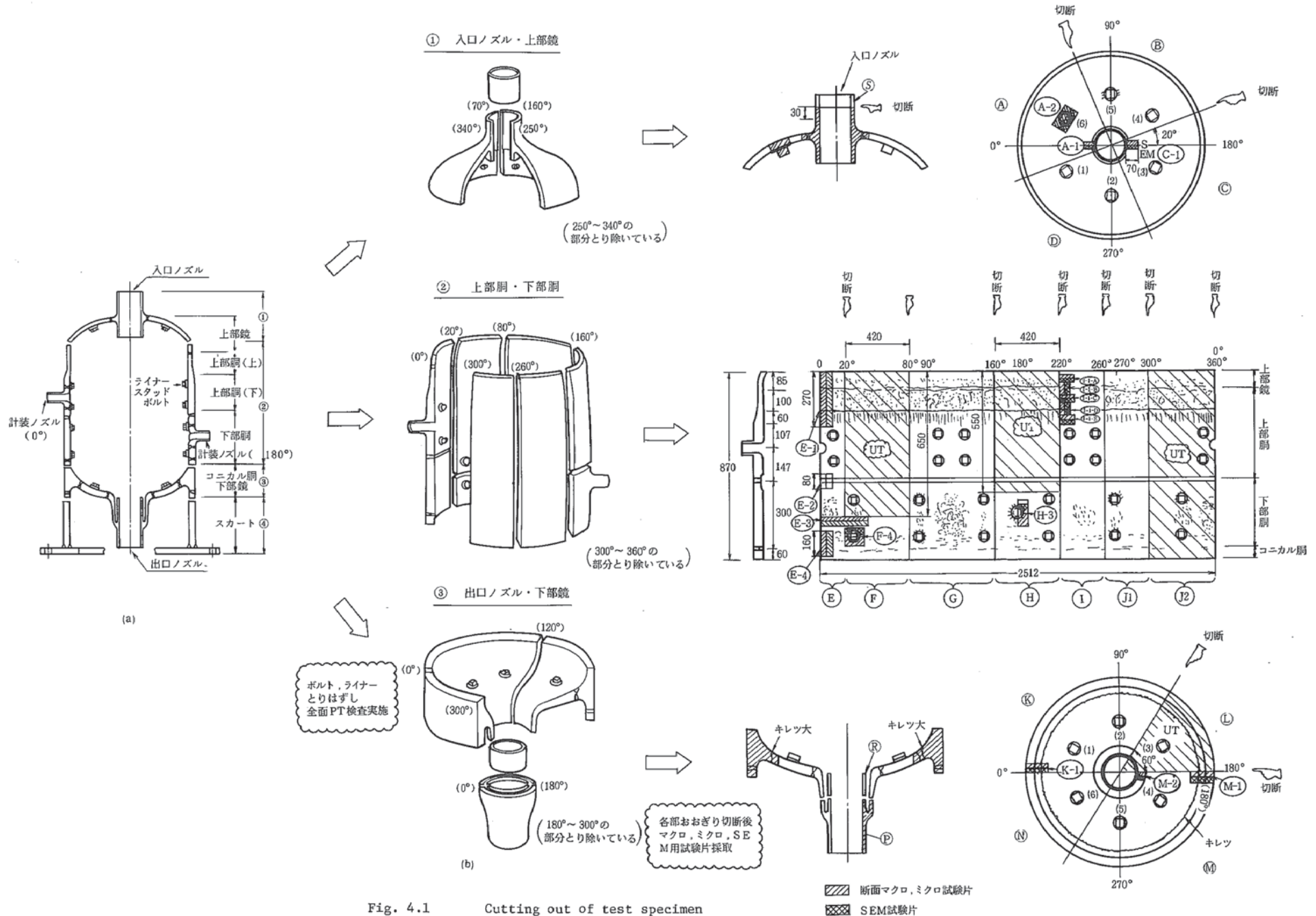


Fig. 4.1 Cutting out of test specimen

4.2 亀裂の発生状況

4.2.1 供試体外面の液体浸透探傷検査（PT）結果

photo 4.1 に供試体外面のPT写真を示す。供試体外面の亀裂発生状況をまとめると以下のとおりである。

(1) 入口ノズル・上部鏡

亀裂は見られなかった。

(2) 上部胴・下部胴

① 上部胴母材（肉厚 25mm）シンニング部全周に亀裂が発生している。

② 上部胴・下部胴（肉厚 40mm）溶接部に全周亀裂が発生している。その他母材部，溶接部，計装ノズル部には亀裂は見られなかった。

(3) コニカル胴・下部鏡・出口ノズル

HAZ 部全周に微細亀裂が発生している。

(4) スカート

亀裂は見られなかった。

4.2.2 供試体内面の液体浸透探傷検査（PT）結果

供試体内面の亀裂発生状況をまとめると以下のとおりである。

(1) 入口ノズル・上部鏡

① 入口管台母材部に円周亀裂の優勢な亀甲亀裂が全周に発生していた。

② 入口管台・入口内部短管溶設部（シンニング部）全周に2ヶ所円周亀裂が発生していた。

③ 入口内部短管母材部に軸方向亀裂の優勢な亀甲亀裂が全周に生じていた。Photo 4.2(a)に入口ノズルPT写真を示す。

④ 上部鏡板・入口管台溶接部全周に亀裂が発生していた。Photo 4.2(b)に上部鏡板・入口管台溶接部PT写真を示す。

(2) 上部胴・下部胴

Photo 4.3 に上部胴・下部胴PT写真を示す。

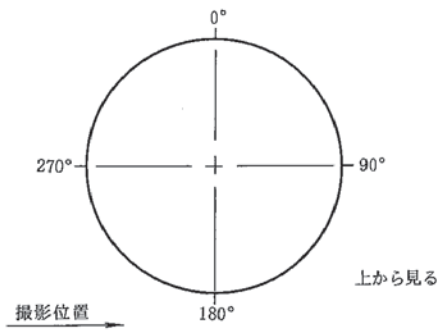
① 上部鏡板母材部に亀甲割れが全周に発生していた。

② 上部胴母材部（肉厚 25mm）に円周亀裂の優勢な亀甲割れが全周に発生していた。

③ 出口内部短管セーフエンド溶接部（180°～270°）に微細な亀裂が発生していた。

(3) 下部鏡付け根部

Photo 4.4 に下部鏡内面PT写真を示す。下部鏡付け根部には全周にわたって亀裂が発生していた。



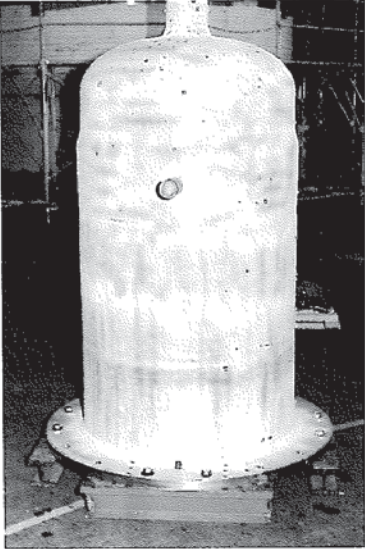
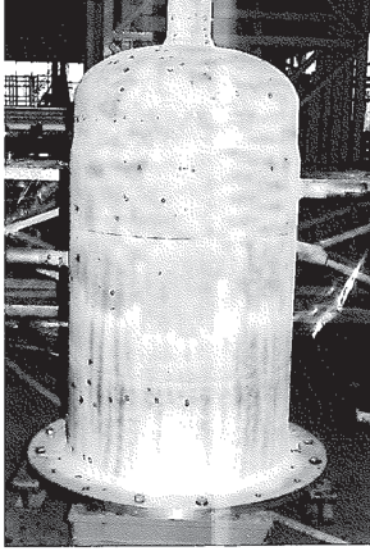
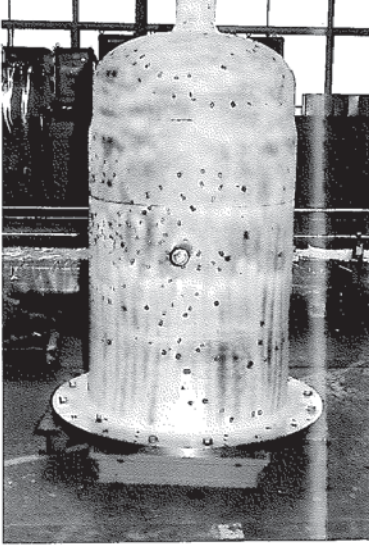
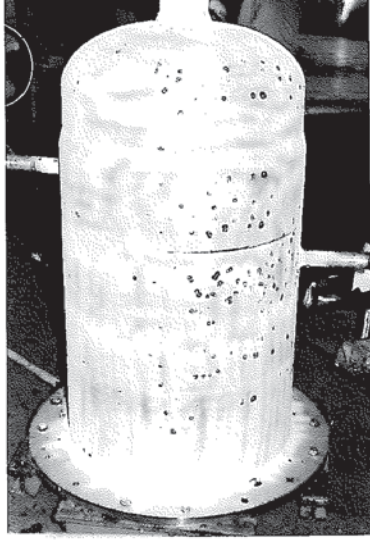
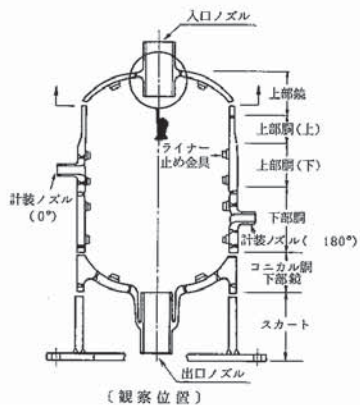
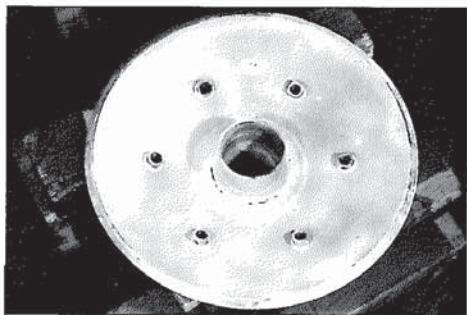
位置 倍率	0°		90°		180°		270°	
	(90°)	(270°)	(180°)	(0°)	(270°)	(90°)	(0°)	(180°)
×0.4								

Photo. 4.1 Results of Liquid Penetrant Test of Outer Surface of Reactor Vessel Model

全景



	入口内部短管 - 入口管台内面 (ナトリウム側)	入口内部短管 - 入口管台外面 (ナトリウム側)
0°		
90°		
180°		
270°		

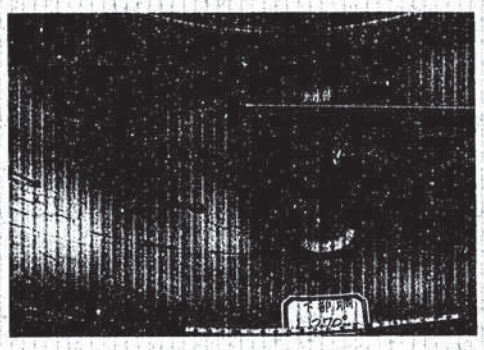
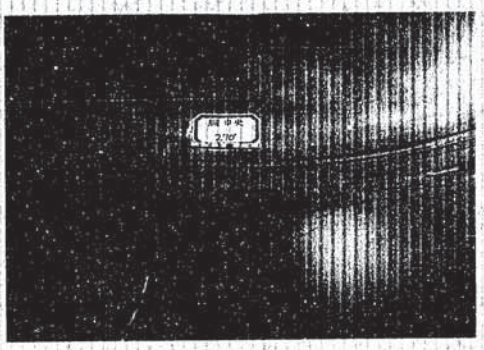
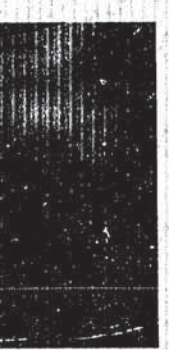
(入口内部短管)
(入口管台)

(a)

(b)

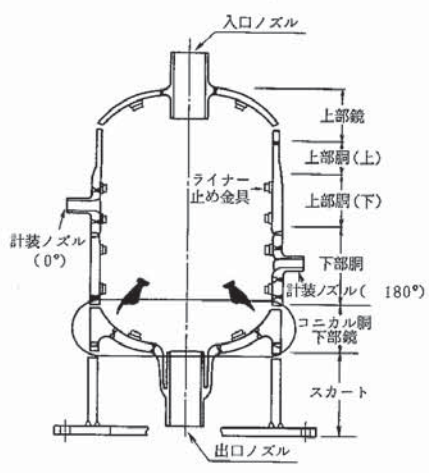
Photo. 4.2 Results of Liquid Penetrant Test of Inlet Nozzle

270°



1mm
ライナ有
——
ライナ無

6mm ライナ境界



(観察位置)

全景

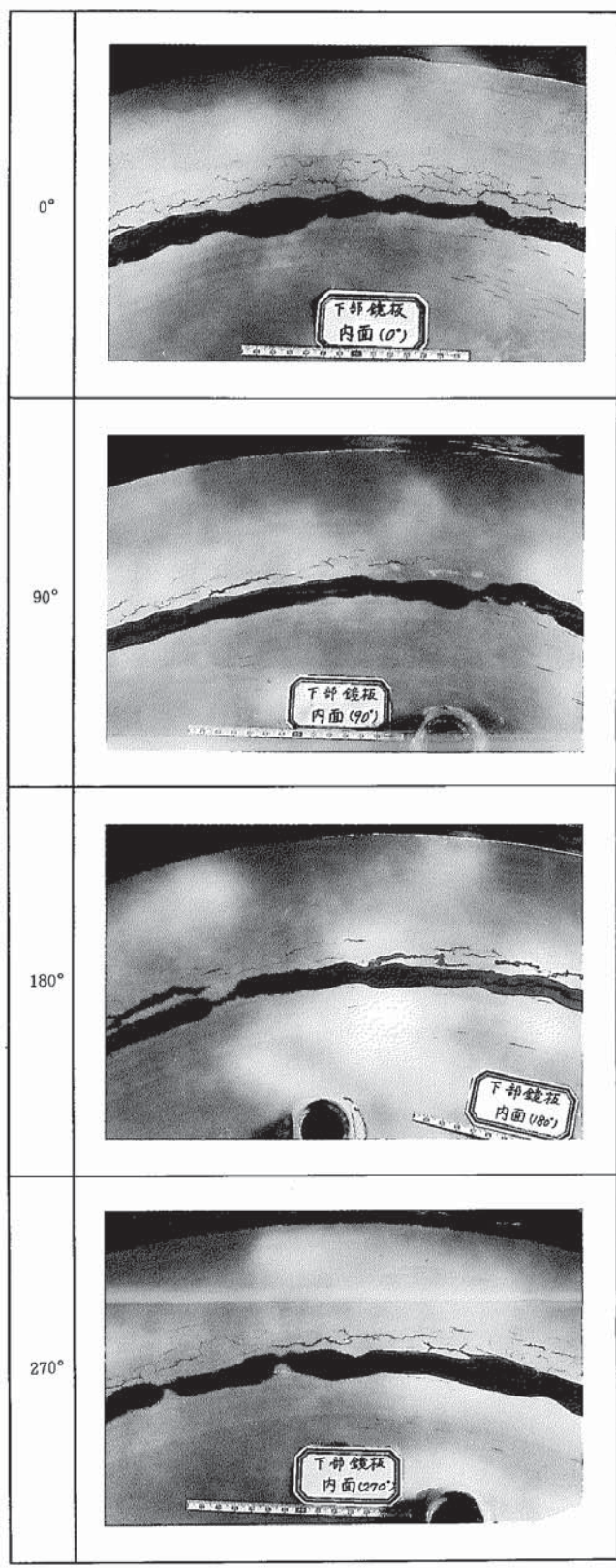
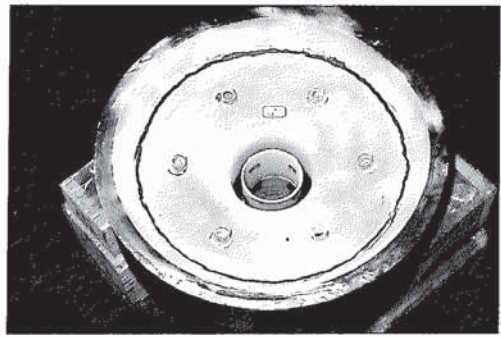


Photo. 4.4 Results of Liquid Penetrant Test of Inner Surface of Lower Head and 3-Pieces Junction

(4) 出口ノズル

出口ノズルセーフエンド内部 (Photo 4.5) には亀裂は存在しなかったが、ノズル内面には全周にわたって亀裂が観察された (Photo 4.6)。

(5) ライナースタッドボルト

上部胴12個, Photo 4.7(a), 下部胴12個, Photo 4.7(b)のライナースタッド隅肉溶接全てにおいて溶接部止端部全周及びそこから放射状にわたって亀裂が発生していた。また, 上部鏡では2個, Photo 4.7(c), 下部鏡では6個に溶接部止端部に亀裂が発生している。Photo 4.7(d)。

(6) 計装ノズル

0°, 180°の内面側のノズル引出し用管台部で放射状にわたって亀裂が発生していた。特に180°側では全周に亀裂が発生していた。Photo 4.8。

(7) ライナー

下部鏡ライナー内面側の溶接部で微細な亀裂が発生していた。Photo 4.9。上部鏡ライナー, 上部胴1mmライナー, 下部胴6mmライナーには亀裂は見られなかった。

- ① シンニング部に軸方向亀裂が全周に生じている。これは他の亀甲割れより開口量が大きいの。
- ② 上部鏡板・上部胴溶接部の溶接金属内に(2本)全周亀裂が生じていた。
- ③ 下部胴母材部6mmライナー境界部に軸方向に優勢な亀甲割れが発生していた。
- ④ 下部胴・コニカル胴に周方向に亀裂が発生していた。

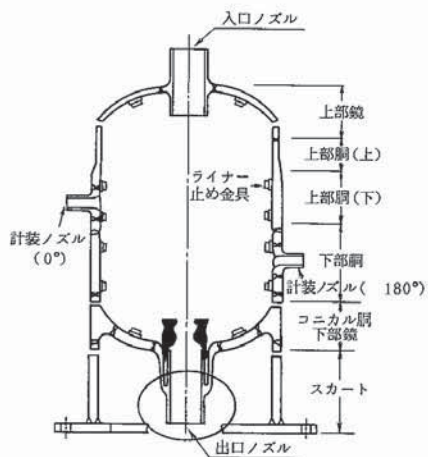
(8) コニカル胴・下部胴

Photo 4.4にコニカル胴・下部鏡のPT写真を示す。

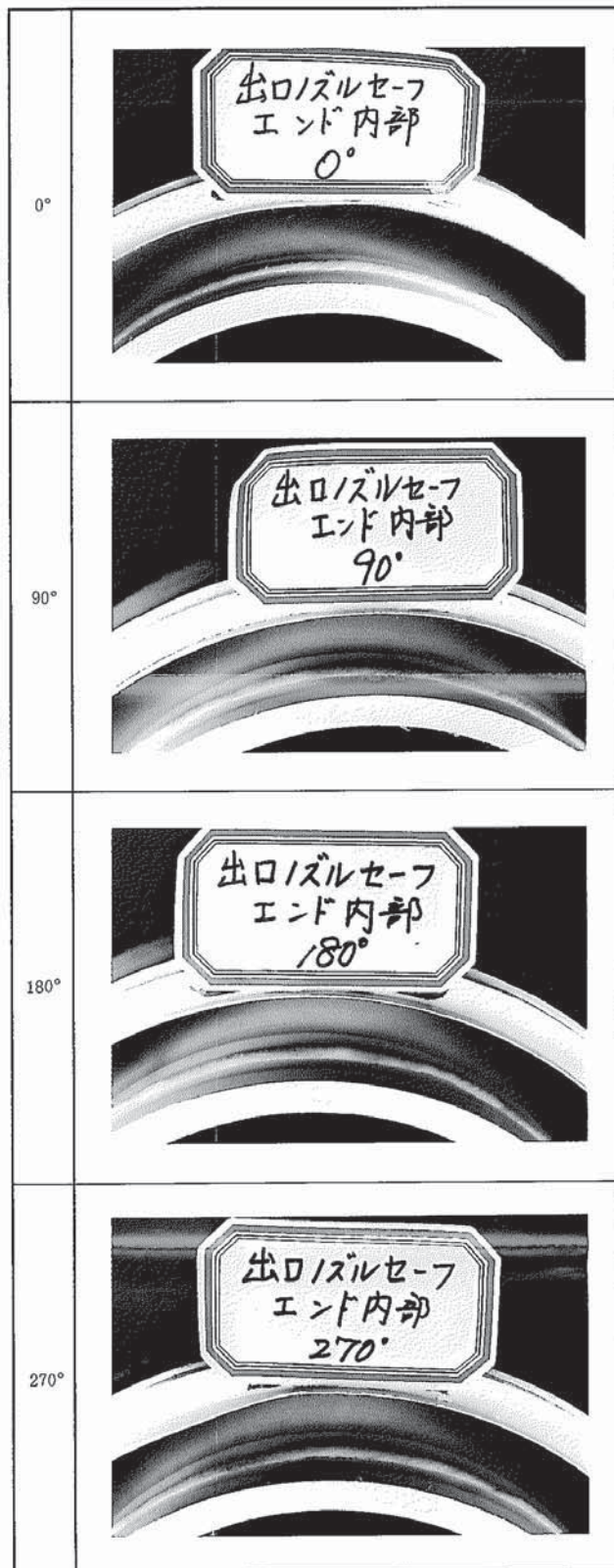
- ① コニカル胴母材部に円周亀裂の優勢な亀甲割れが全周に発生していた。
- ② コニカル胴・下部鏡溶接部近傍(コニカル胴側HAZ部)に全周にわたって亀裂が発生していた。これは最も開口量大きい。
- ③ コニカル胴スカート溶接部, 下部鏡母材, 下部鏡板, 出口管台溶接部には亀裂は見られなかった。

(9) 出口ノズル

- ① セーフエンド内部には亀裂は見られなかった。Photo 4.5。
- ② サーマルスリーブ内面溶接部に円周亀裂が全周に発生していた。Photo 4.6。

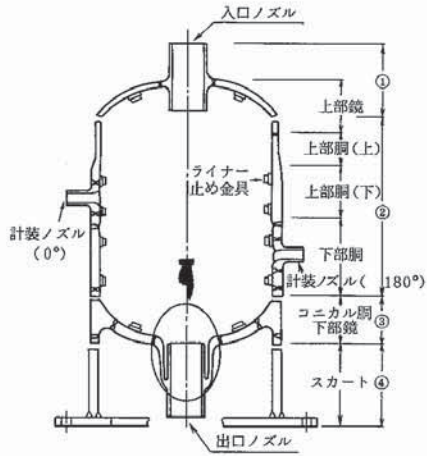


〔観察位置〕

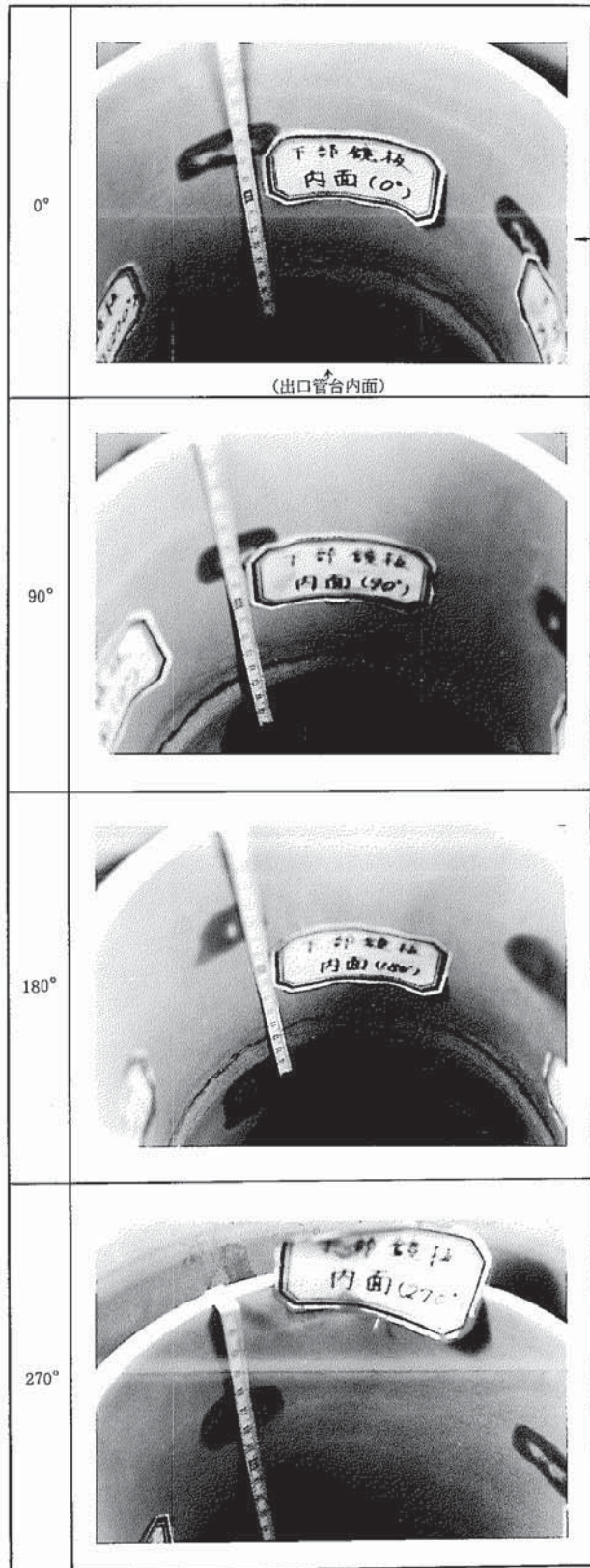
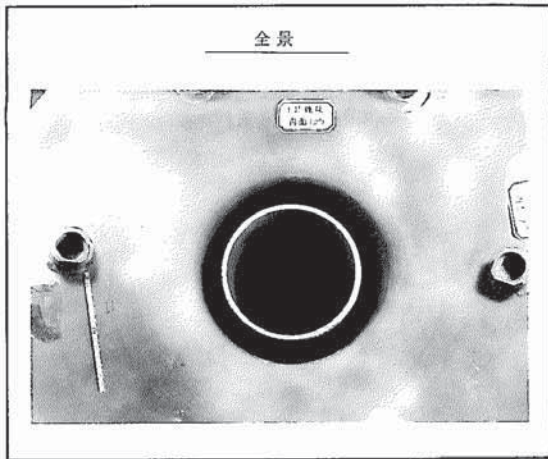


ノズルセーフエンド内部ではPT指示認められない。

Photo. 4.5 Results of Liquid Penetrant Test of Inner Part of Outlet Nozzle Safe-end



〔観察位置〕



サーマルスリーブ内面 270° 方向
に微細 PT 指示

Photo. 4.6 Results of Liquid Penetrant Test of Inner Surface of Outlet Nozzle

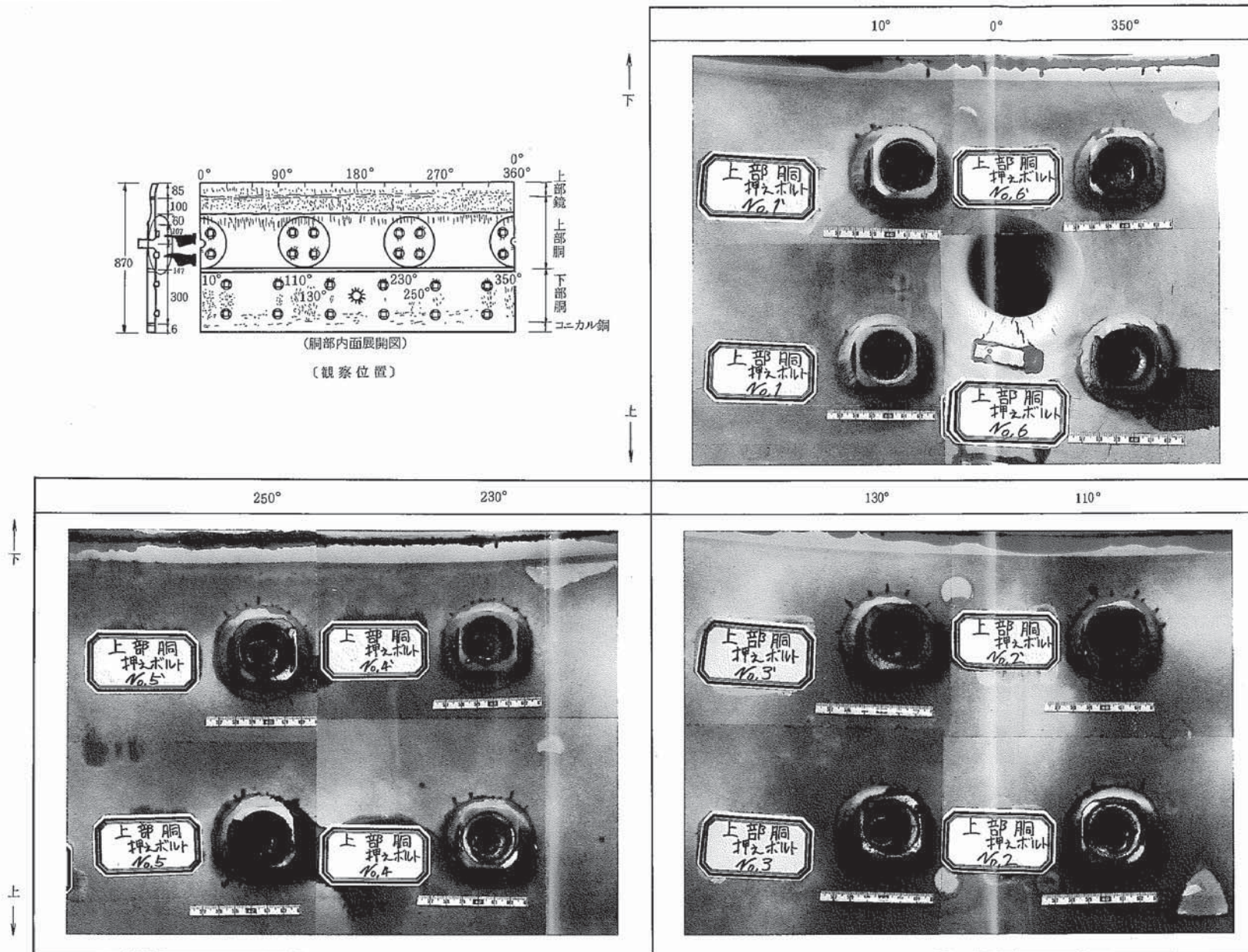
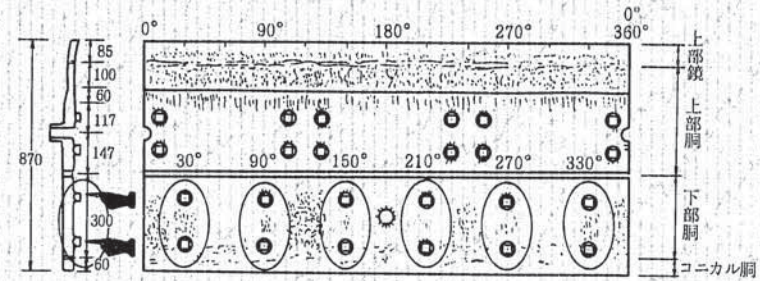


Photo. 4.7(a) Results of Liquid Penetrant Test of Stud Bolt of Upper Part of Vessel



(胴部内面展開図)

(観察位置)

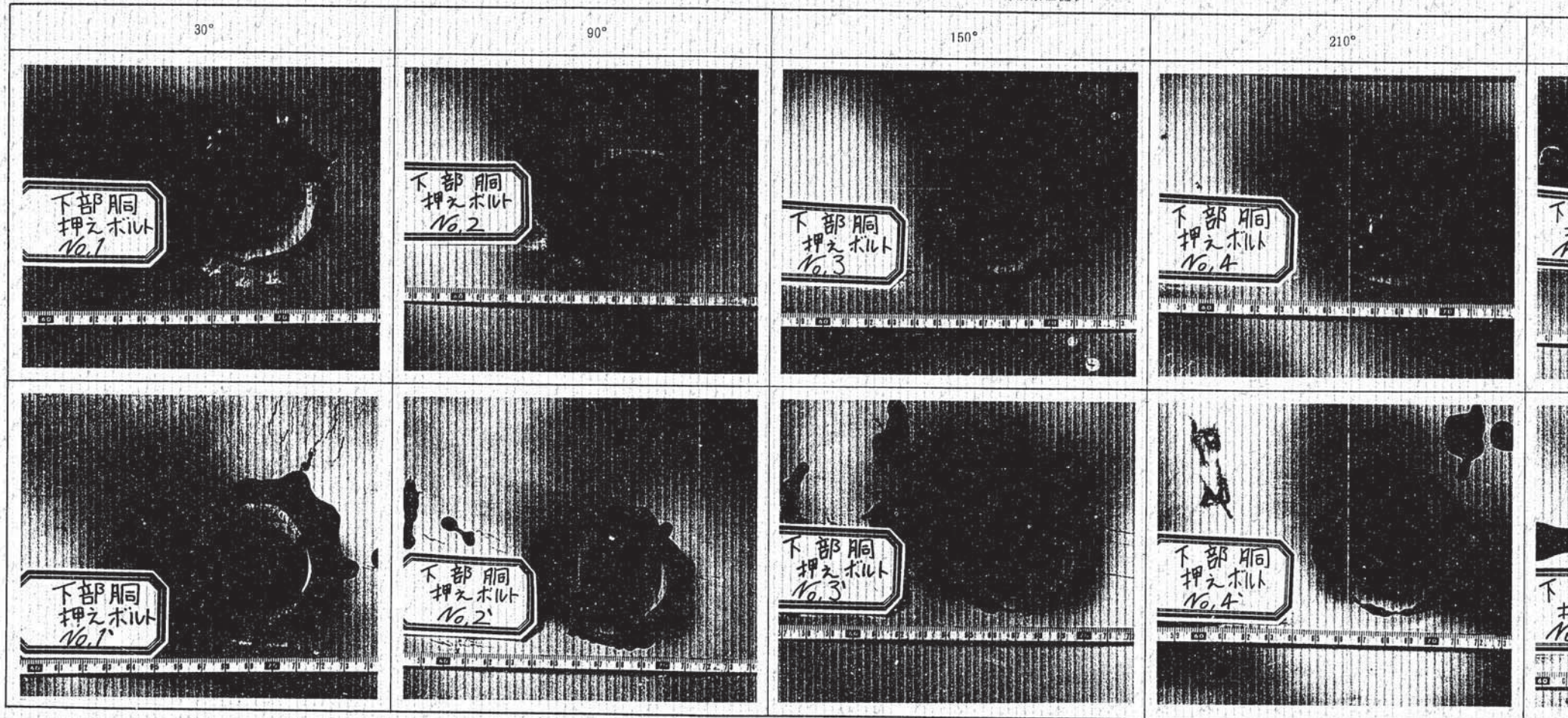
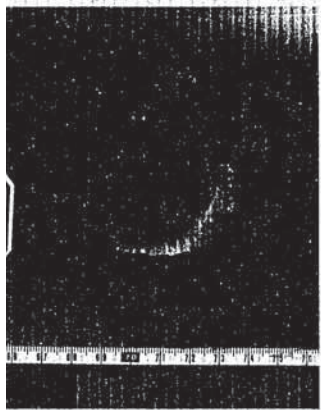
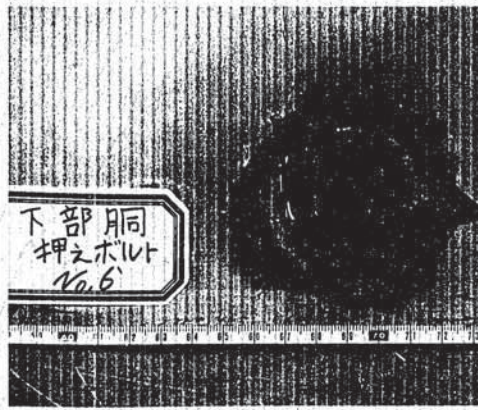
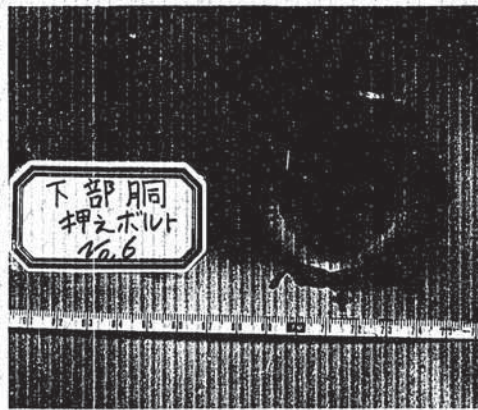


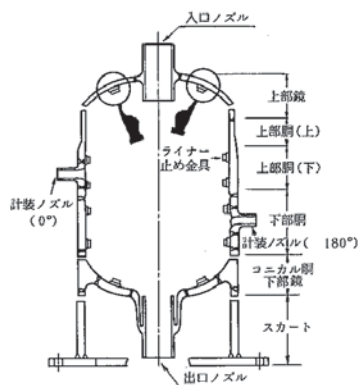
Photo. 4.7(b) Results of Liquid Penetrant Test of Stud Bolt of Lower Part of Vessel

270°

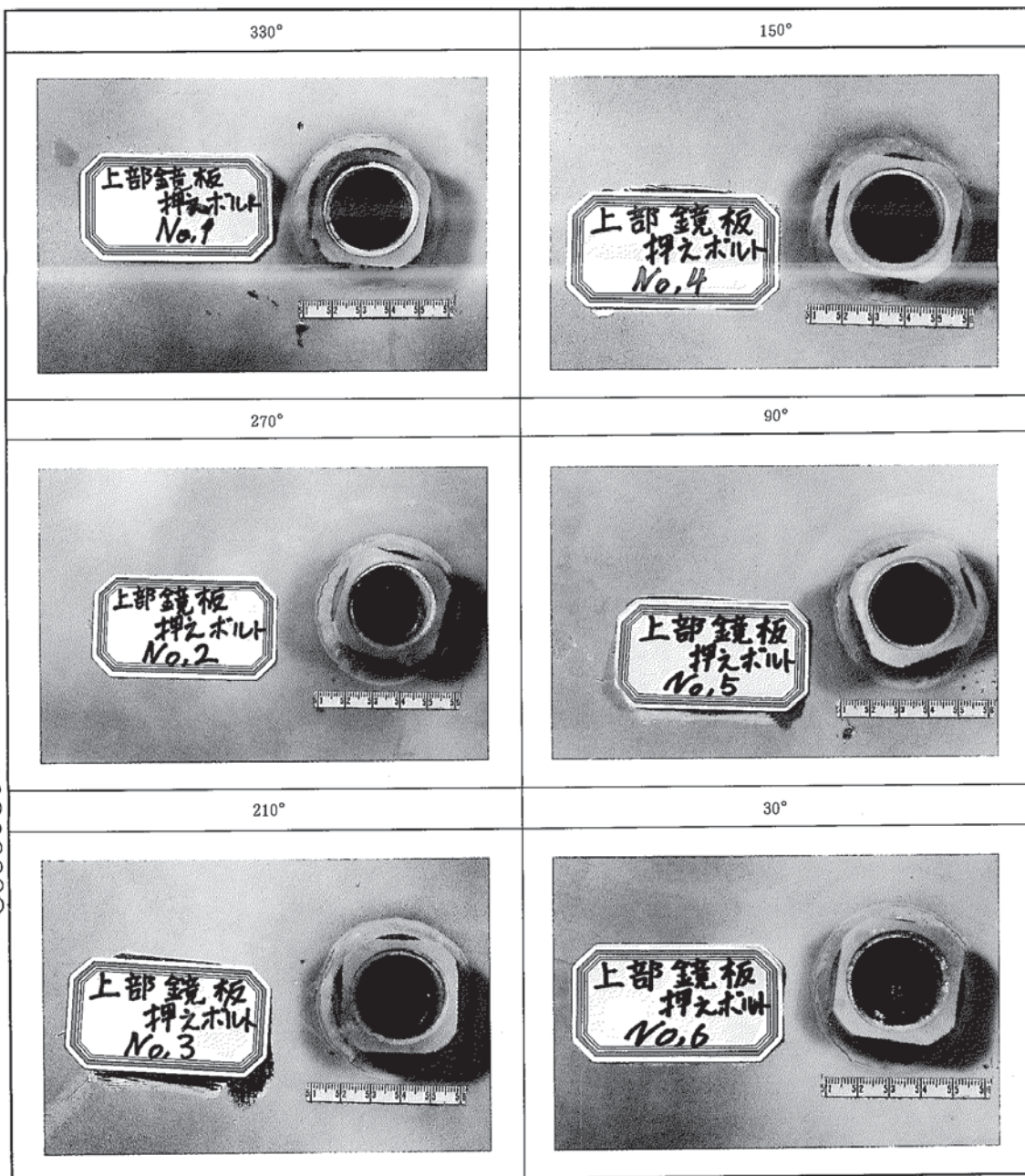


330°



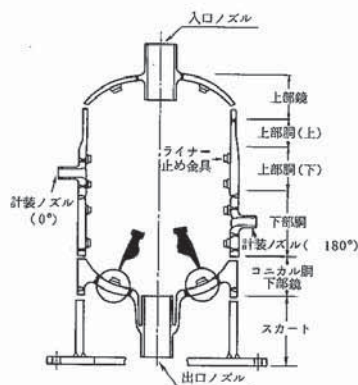


〔観察位置〕

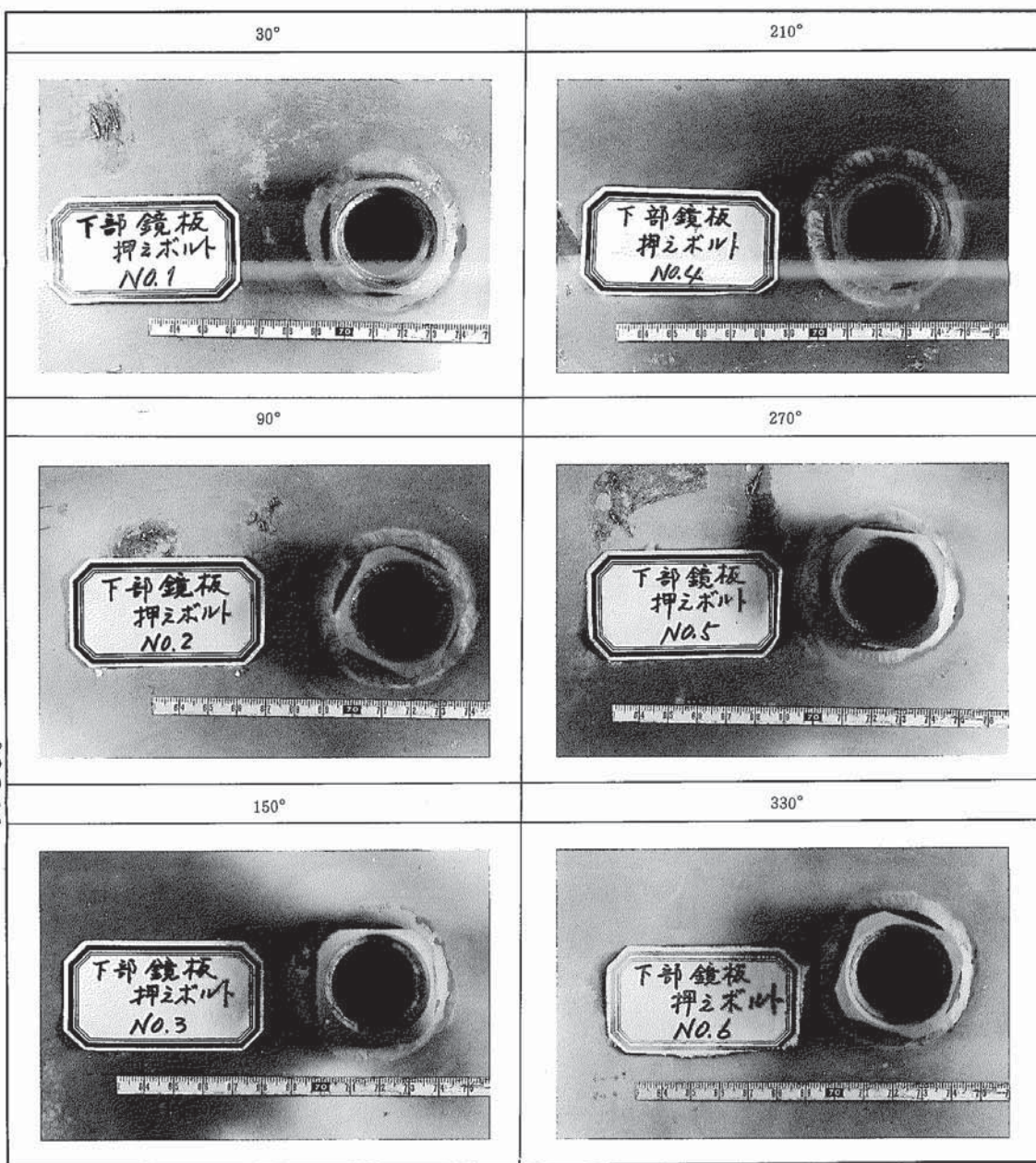


No.5, No.6は
すみ肉溶接部の止
端部に欠陥指示模
様あり
他はPT欠陥と違
うものと考えられる

Photo. 4.7(c) Results of Liquid Penetrant Test of Stud Bolt of Upper Head

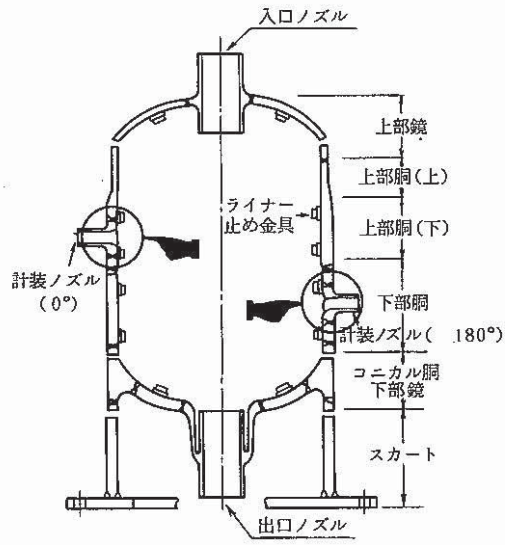


(観察位置)



すみ肉溶接部
止端部にいず
れもPT指示
みられる

Photo. 4.7(d) Results of Liquid Penetrant Test of Stud Bolt of Lower Part of Vessel



〔観察位置〕

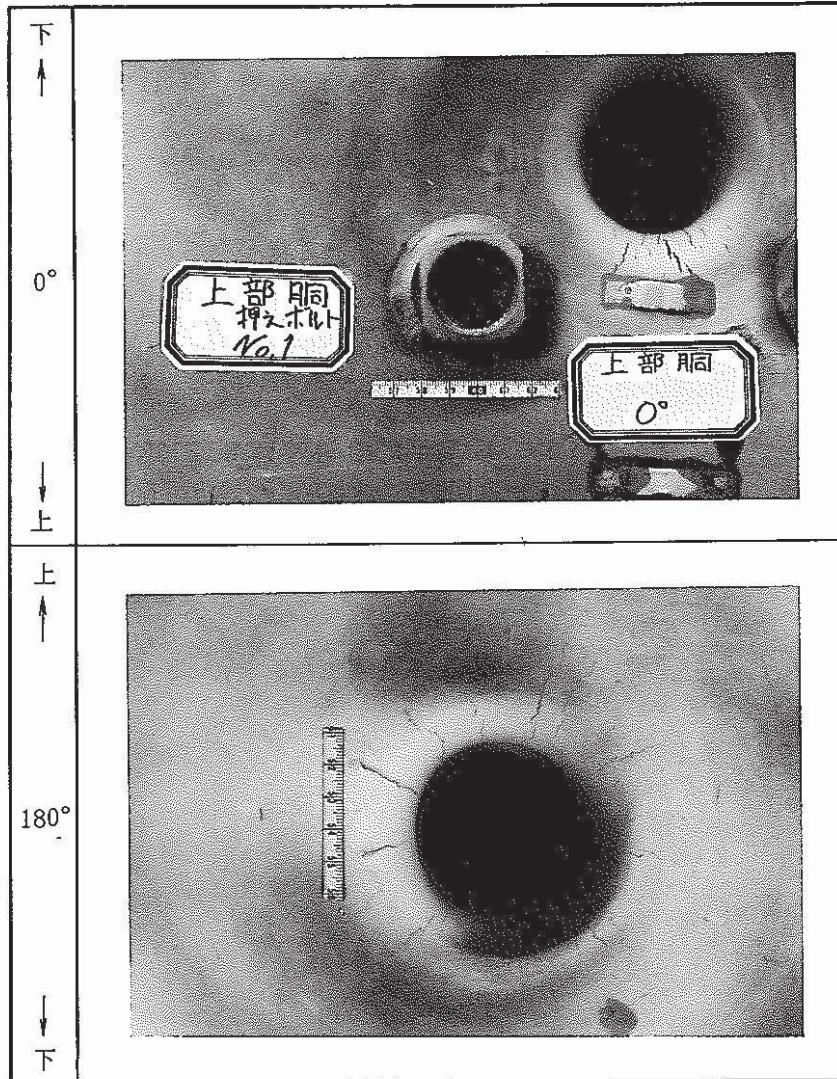
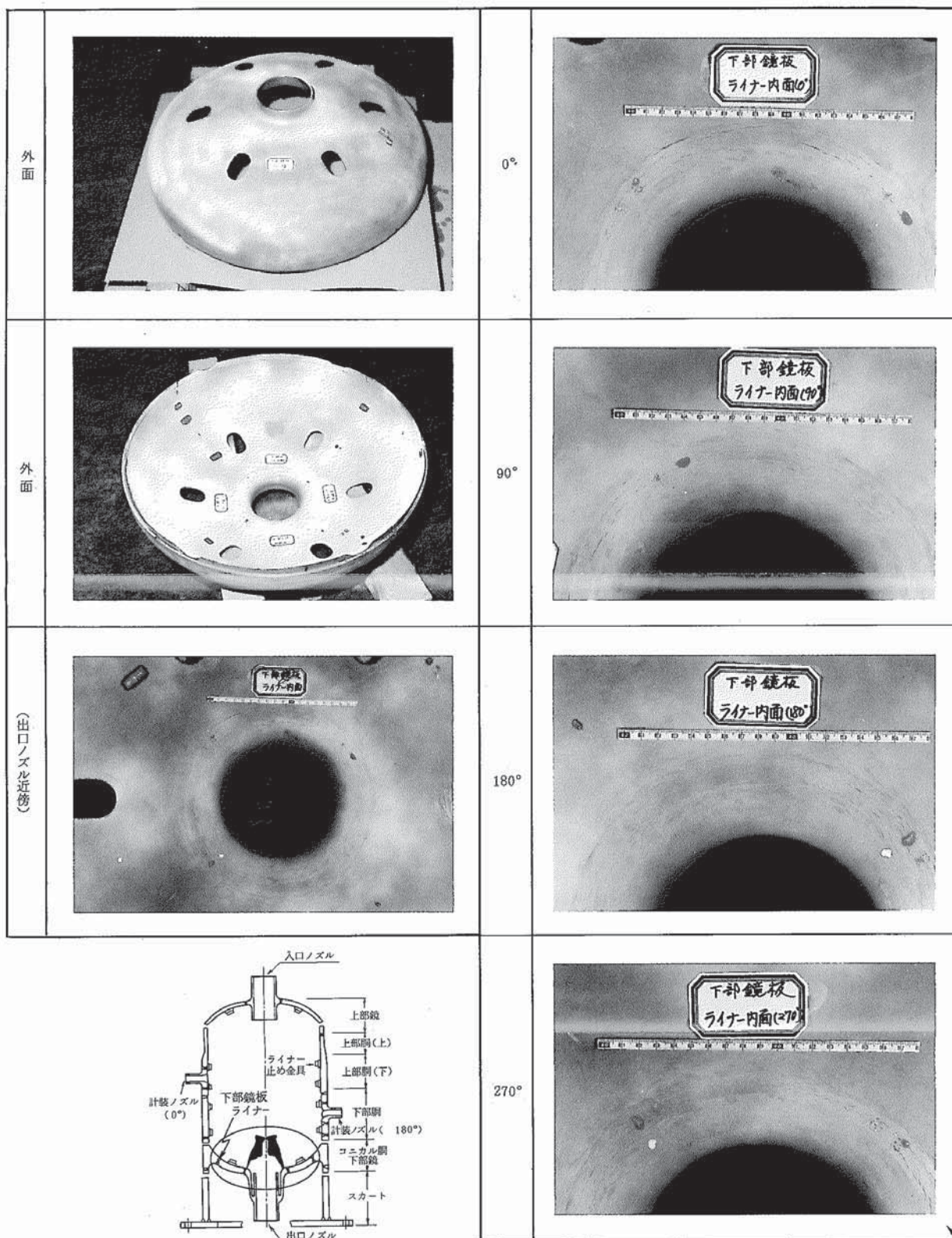


Photo. 4.8 Results of Liquid Penetrant Test of Inner Surface of Instrumental Nozzle



ノズル溶接部
全周にPT指示あり

Photo. 4.9 Results of Liquid Penetrant Test of Liner of Lower Head(6mm)

4.3 断面マクロ組織観察

Photo 4.10～Photo 4.16 に各部の主として0°及び180°の位置における軸方向あるいは周方向断面のマクロ組織を示す。

各部で粒度の違いにより組織状況に若干の違いが見られるが、偏所、欠陥などはみられなかった。

4.4 亀裂の発生位置と深さの分布

(1) 入口ノズル部

Fig. 4.2 に入口ノズル部の亀裂発生状況を示す。入口内部短管，入口管合部で多数の微細亀裂が発生していた。最深亀裂は5.3mmであった。

(2) 胴部

Fig. 4.3 に胴部の亀裂発生状況を示す。

胴部の外面側（大気側）では，上部胴シンニング部，上部胴一下部胴最終溶接部などで亀裂が発生していた。亀裂深さは，1mm以下の浅いものであった。

一方，胴部の内面側（ナトリウム側）では，母材部，溶接部の各部に多数の亀裂が発生していた。大半は5mm以下の亀裂深さであるが，上部胴シンニング部では，約15mm，12mmの2本及び上部胴一下部胴最終溶接部では約27mm，15mmの2本が非常に深い亀裂であった。

(3) コニカル胴一下部鏡，出口ノズル部

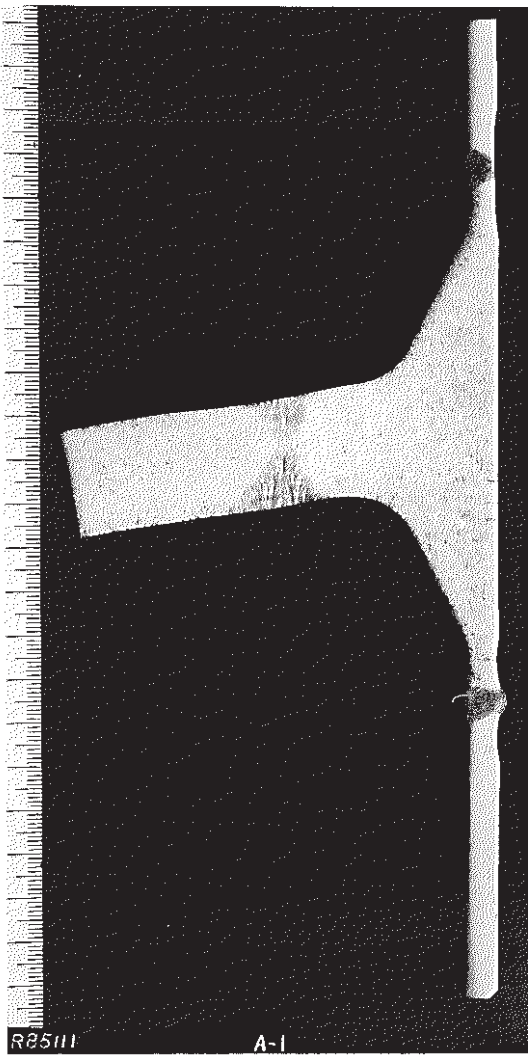
Fig. 4.4 に下鏡部，出口ノズル部の亀裂発生状況を示す。コニカル胴一下部鏡の溶接近傍では，内外面側で亀裂が発生していた。外面の亀裂深さは全て1mm以下であった。一方，内面側のコニカル胴側HAZ部に最深亀裂31mmに至るものがあり，本供試体の中では最も深い亀裂であった。

出口ノズル部の最深亀裂は約3mmであった。その他は1mm以下の浅いものであった。

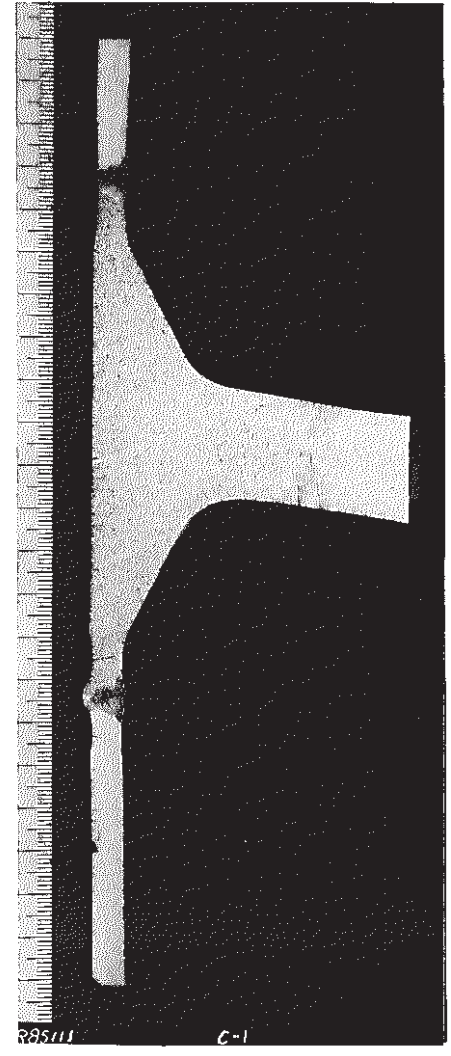
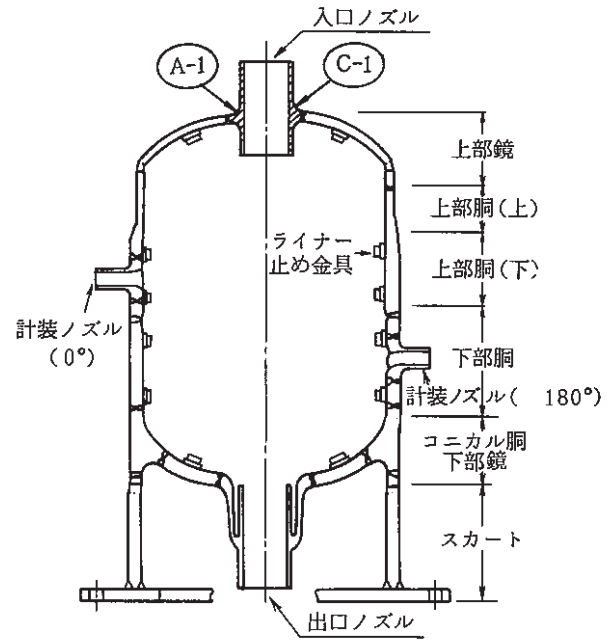
(4) スタッドボルト，計装ノズル

Fig. 4.5 にスタッドボルト，計装ノズル部の亀裂発生状況を示す。上部鏡（30°方向）スタッドボルトの偶肉溶接部では，1mm以下の浅い亀裂が発生していた。下部鏡（30°方向）スタッドボルトの偶肉溶接部では，約13mmの深さの亀裂が発生していた。

また，計装ノズル（180°方向）内面側では，約11mmの深さの亀裂が発生していた。

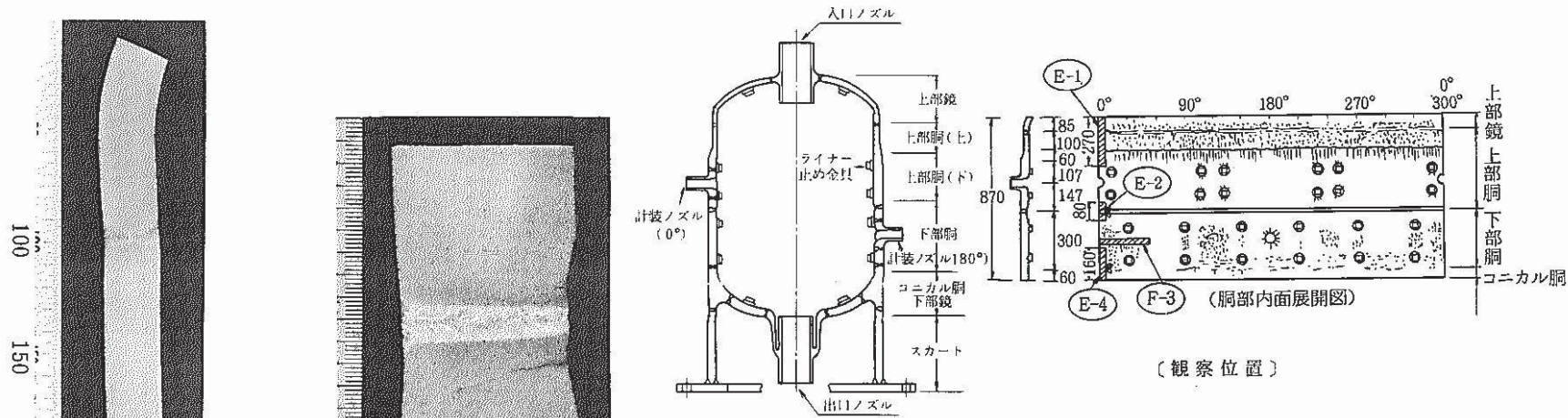


A-1(0°)

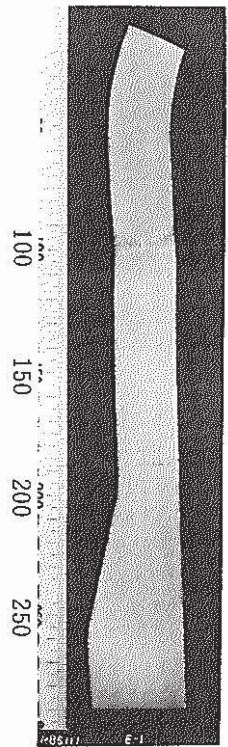


C-1(180°)

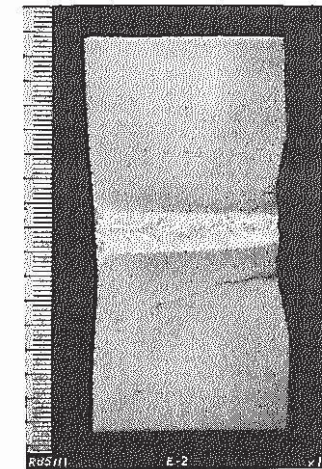
Photo. 4.10 Macroscopic Profiles of Inner Nozzle (0°, 180°)



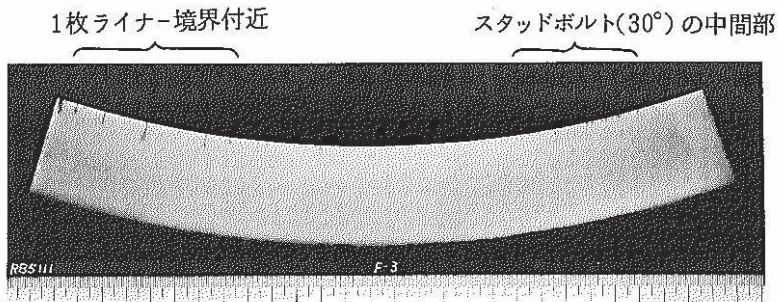
(観察位置)



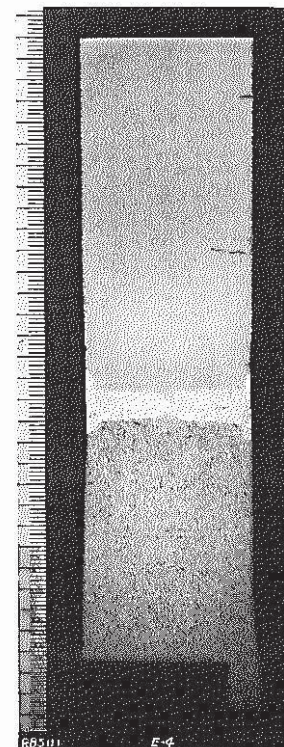
E-1 : 上部鏡-上部胴シンニング部
軸方向断面 (0°)



E-2 : 上部胴-下部胴最終溶接部
軸方向断面 (0°)

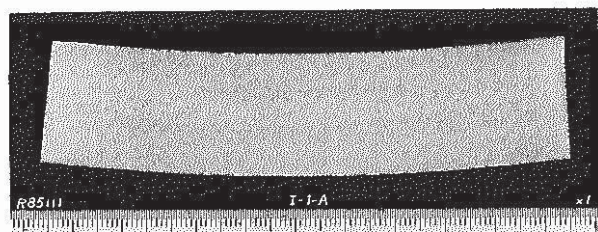


F-3 : 下部胴周方向断面 (0°~40°)

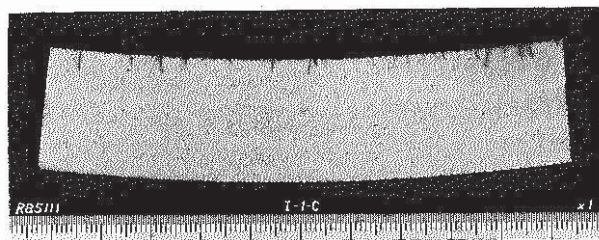


E-4 : 下部胴-コニカル胴軸方向断面 (0°)

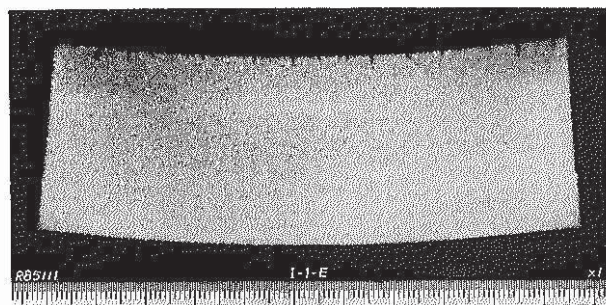
Photo. 4.11 Macroscopic Profiles of Upper Head and Vessel (0°)



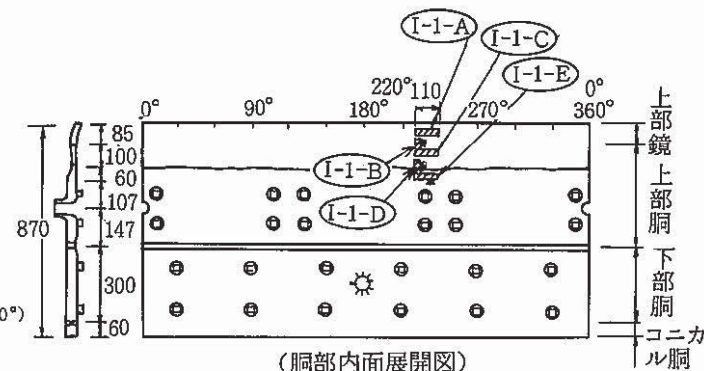
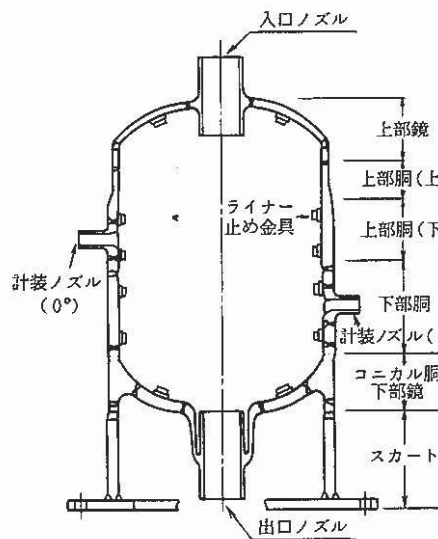
I-1-A: 上部鏡周方向断面 (220°~240°)



I-1-C: 上部胴 (t₂₅) 周方向断面 (220°~240°)

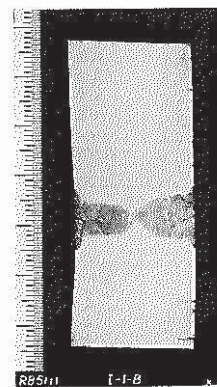


I-1-E: 上部胴 (t₄₀) 周方向断面 (220°~240°)

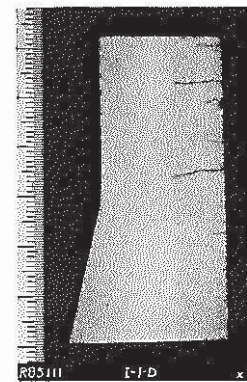


(胴部内面展開図)

〔観察位置〕



I-1-B: 上部鏡・上部胴溶接部
軸方向断面 (220°)



I-1-D 上部胴シニング部
軸方向断面 (220°)

Photo. 4.12

Macroscopic Profiles of Upper Head and Upper Part of Vessel (220°)

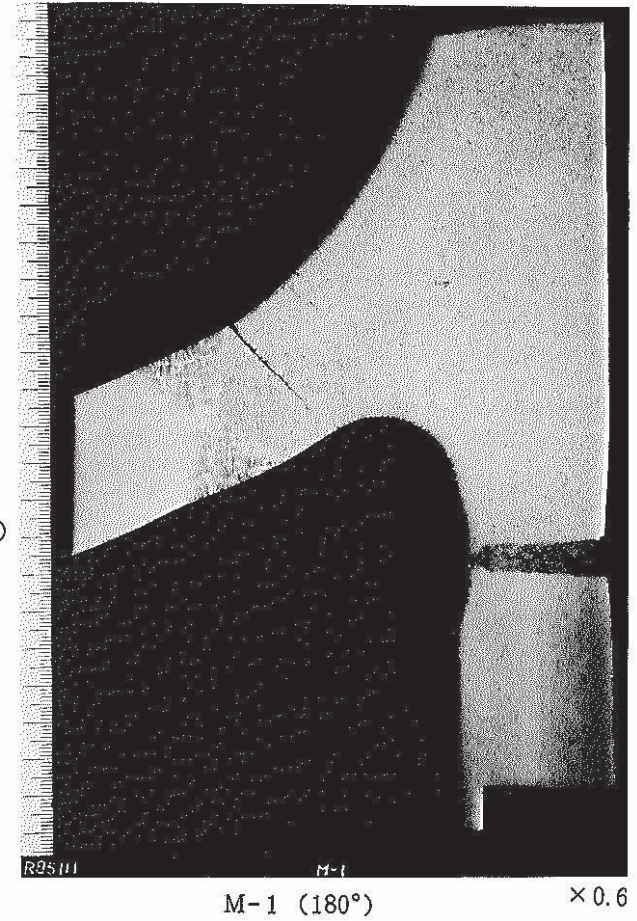
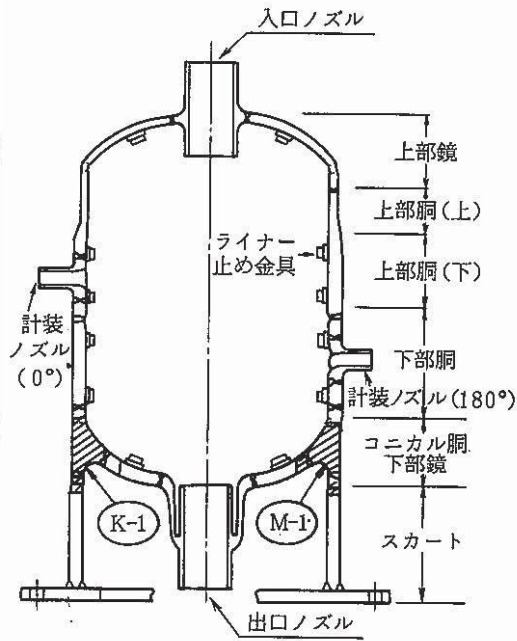
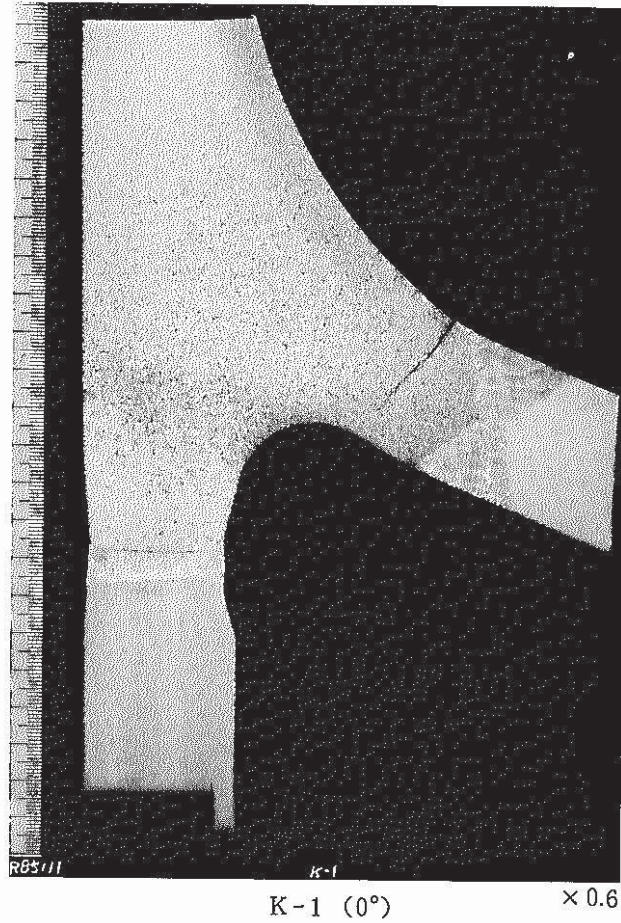
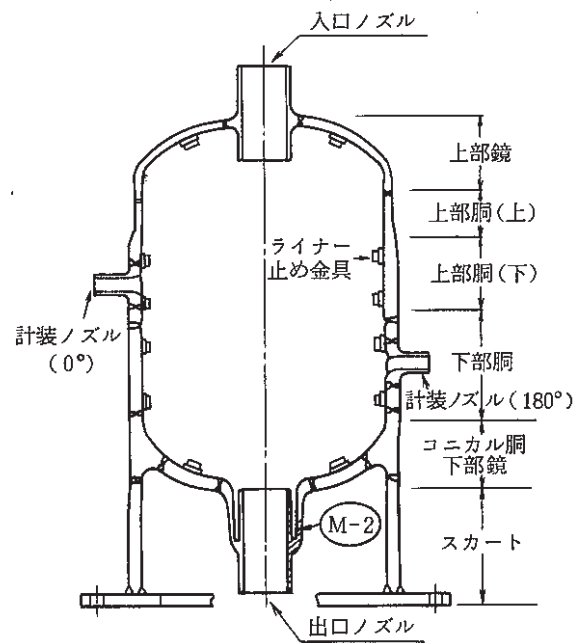
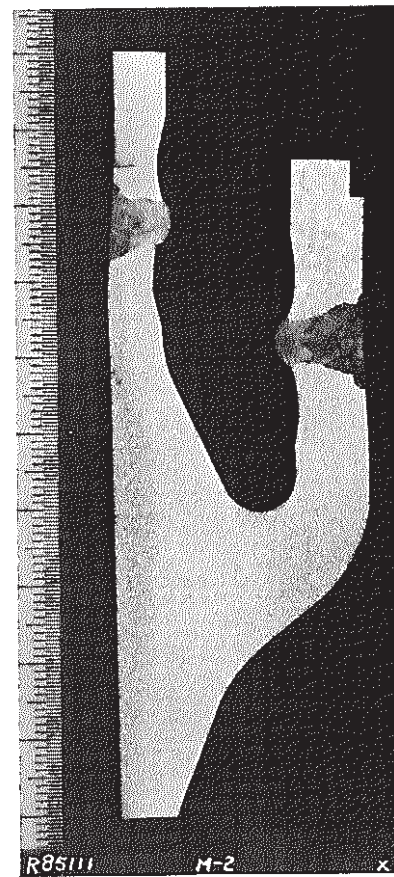


Photo. 4.13 Macroscopic Profiles of 3-Pieces Junction and Lower Head (0°, 180°)

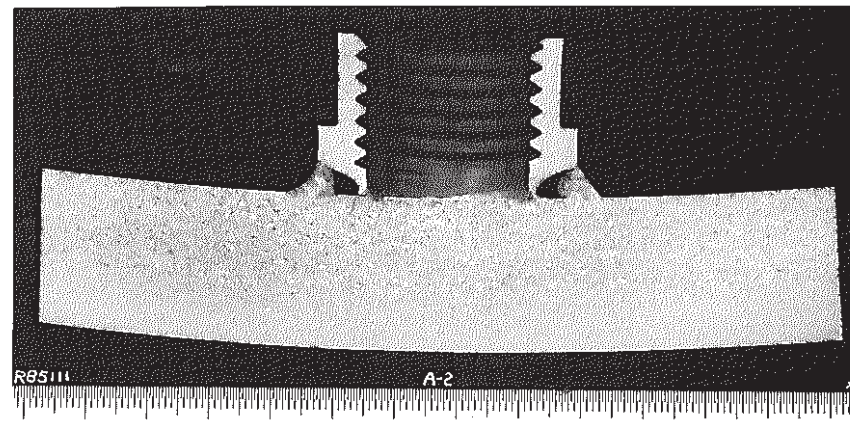
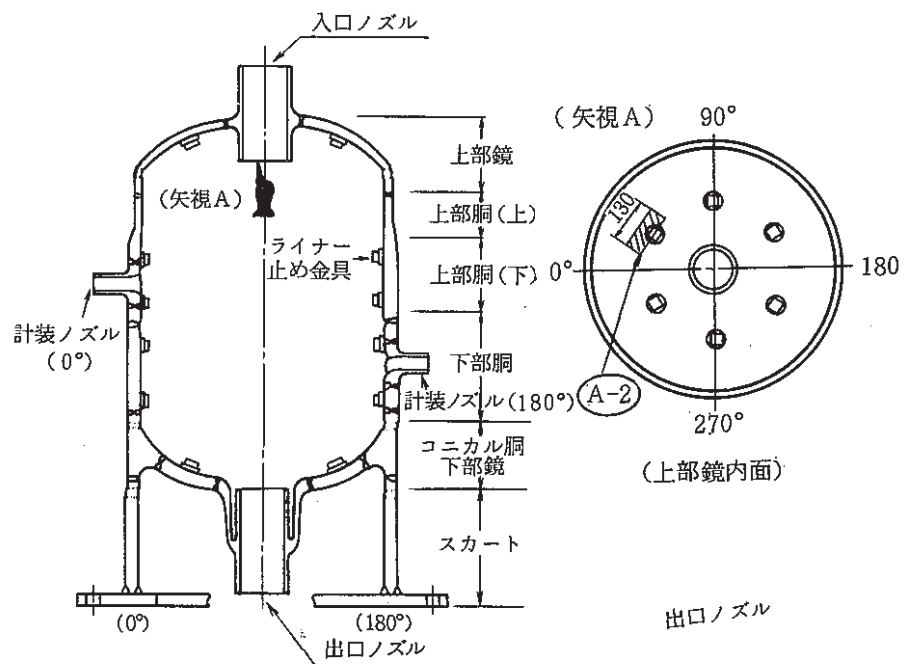


(観察位置)

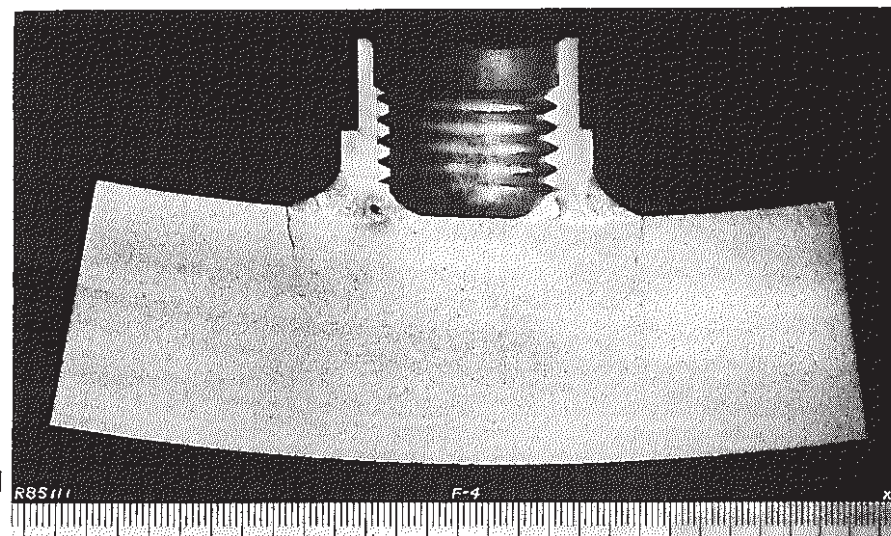


M-2 (180°)

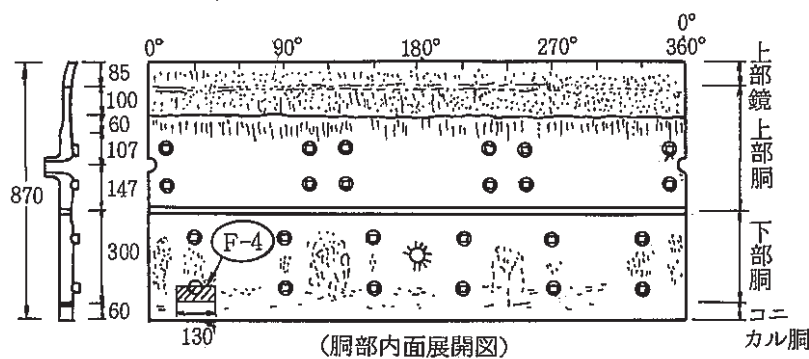
Photo. 4.14 Macroscopic Profiles of Outlet Nozzle (180°)



A-2 : 上部鏡ライナー・スタッドボルト (30°)



F-4 : 下部胴ライナー・スタッドボルト (30°)



(観察位置)

Photo. 4.15 Macroscopic Profiles of Liner Stud Bolt

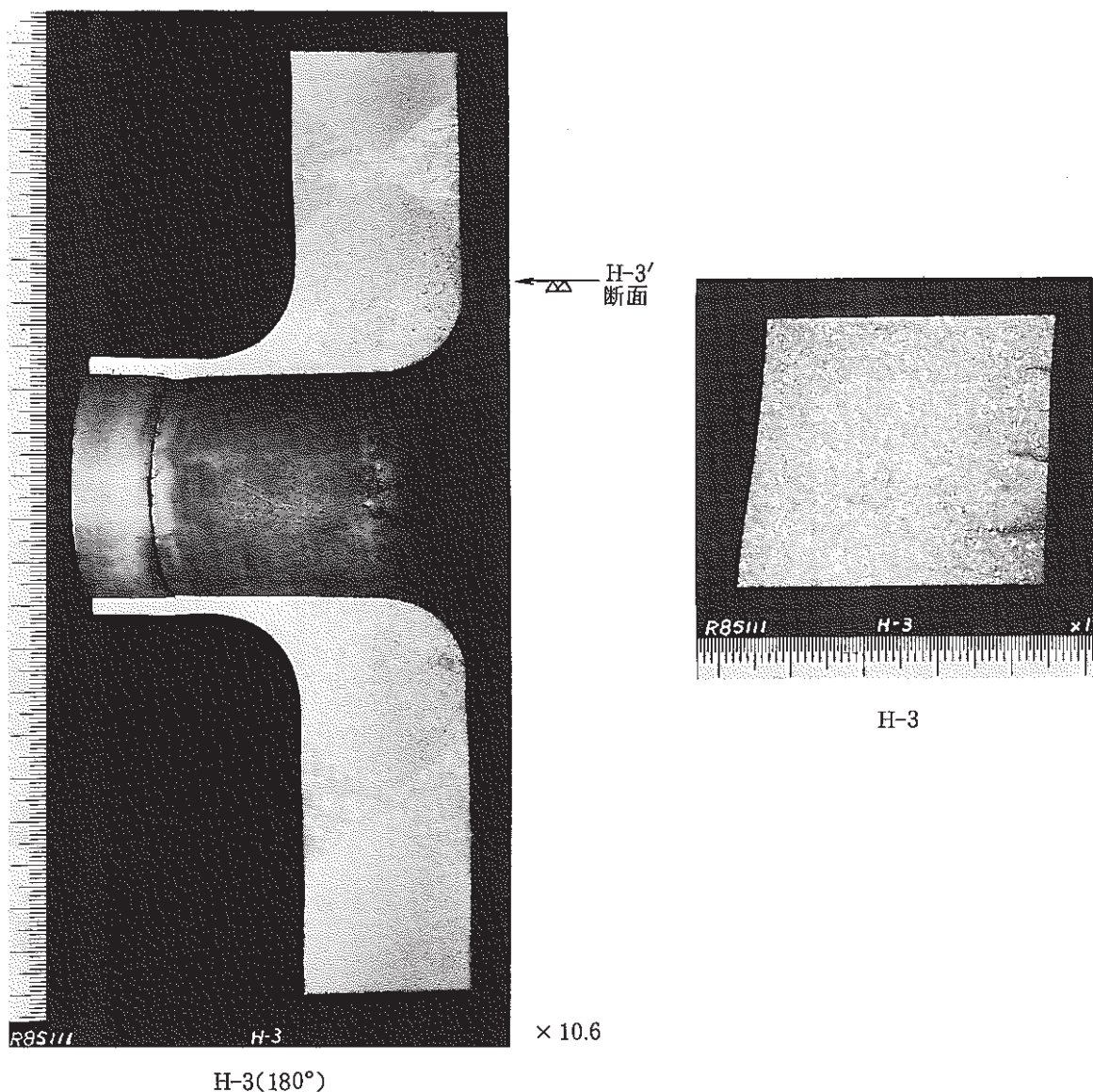
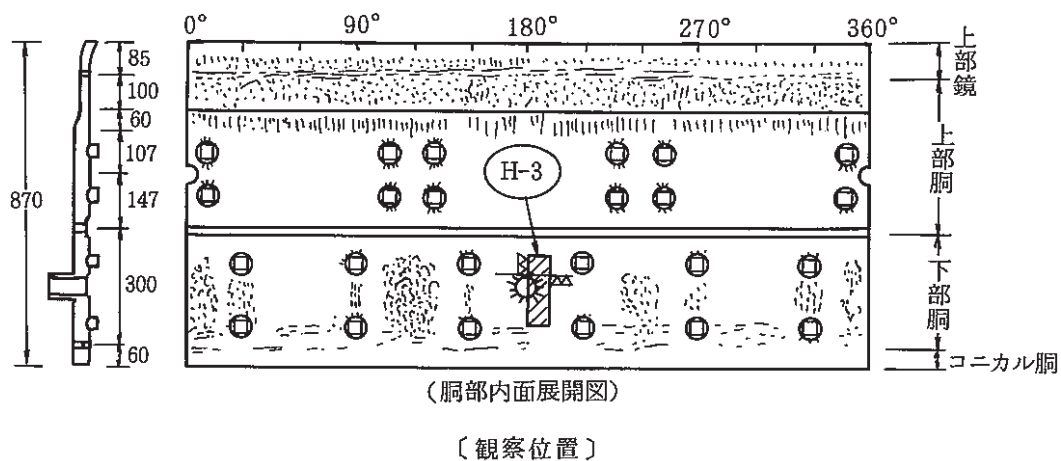


Photo. 4.16 Macroscopic Profiles of Instrumental Nozzle (180°)

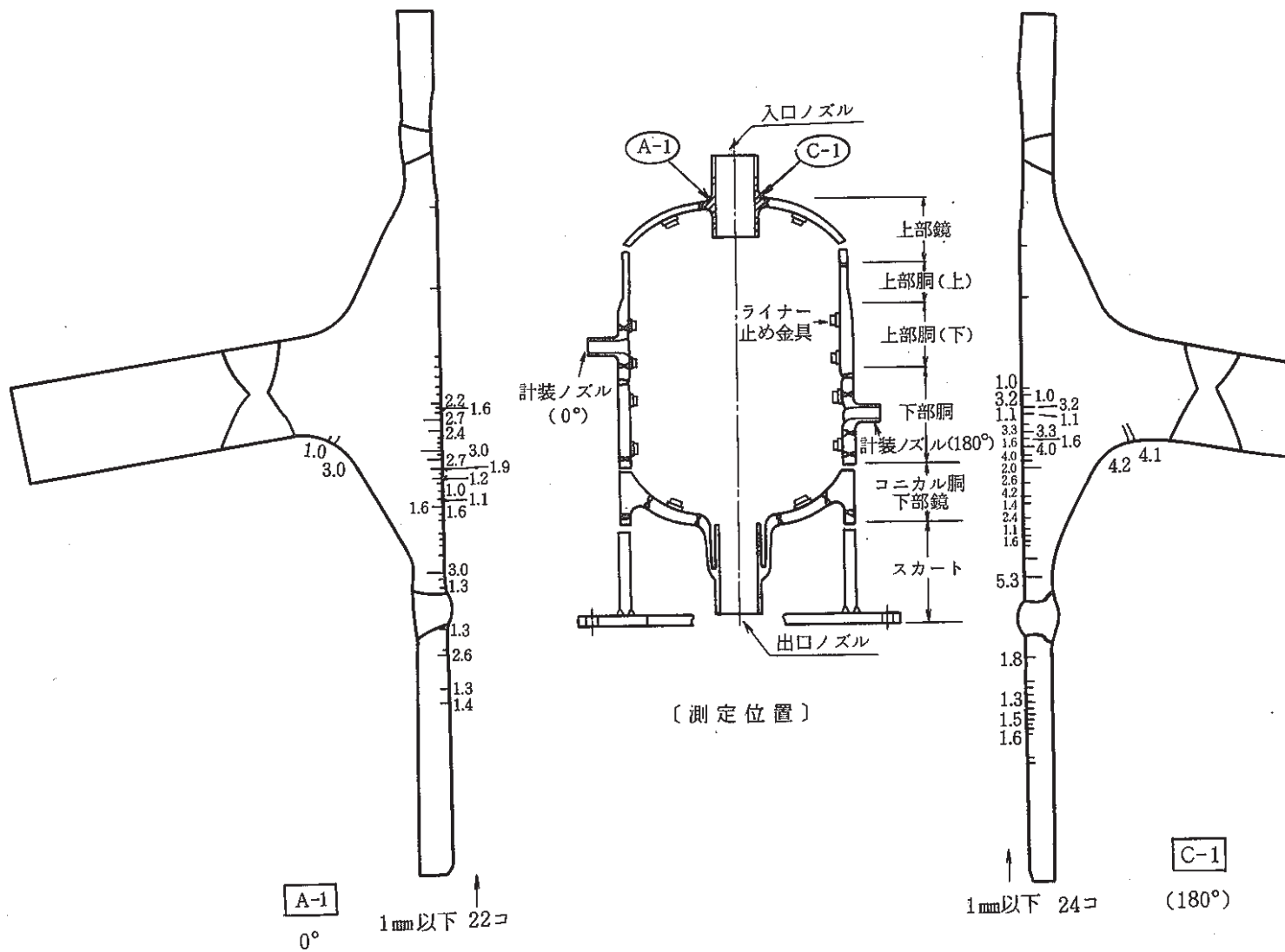


Fig. 4.2 Crack Distributions of Inlet Nozzle

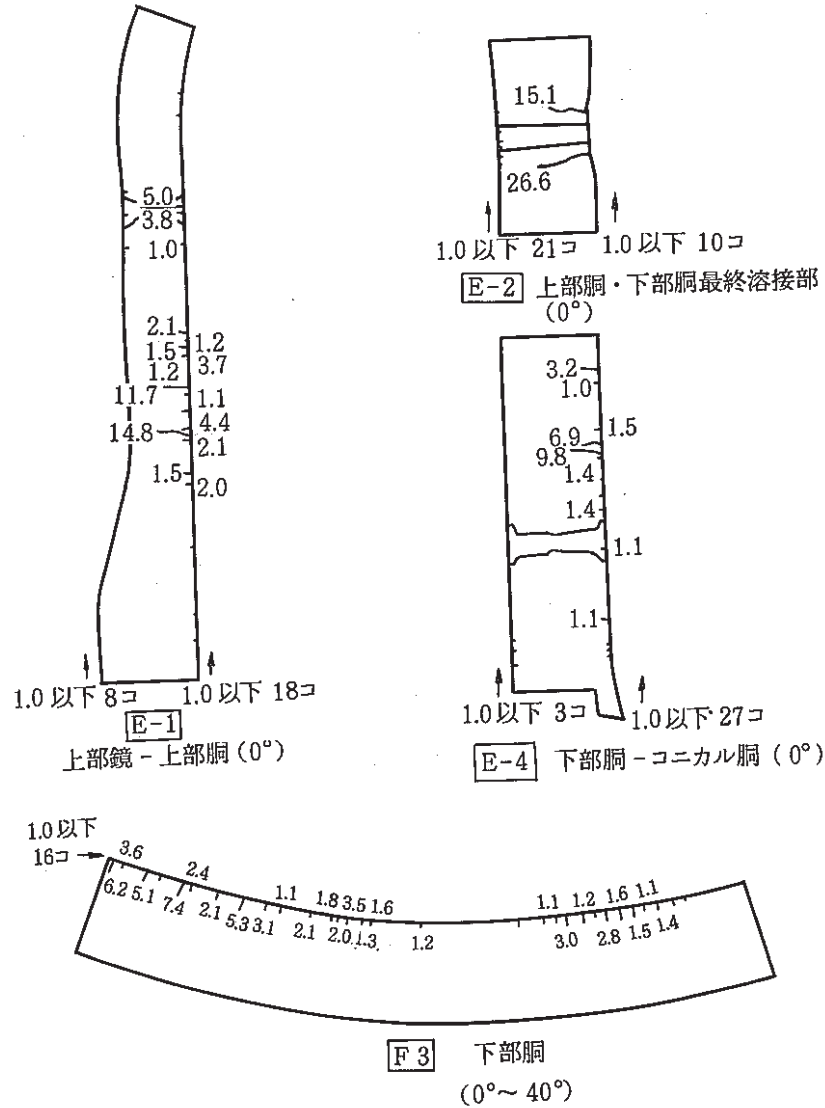
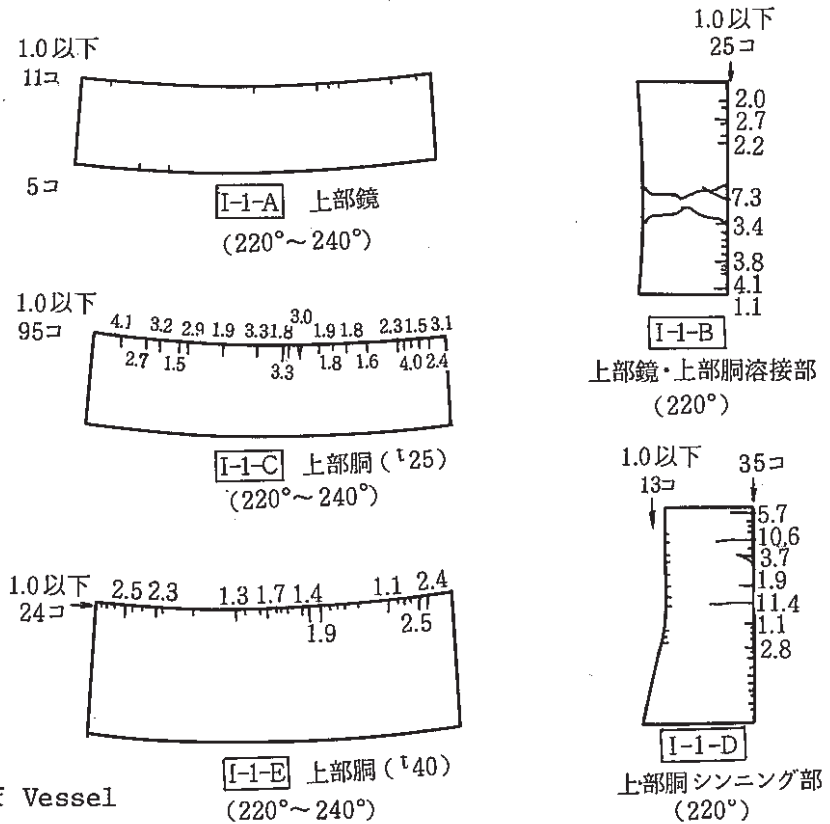
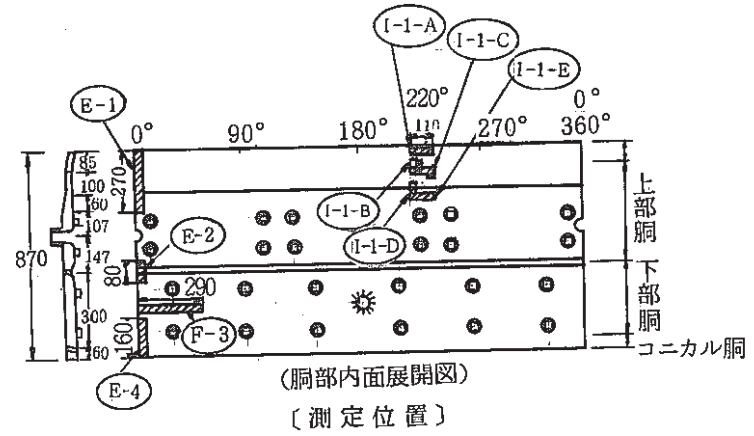


Fig. 4.3 Crack Distributions of Upper Part of Vessel



(単位: mm)

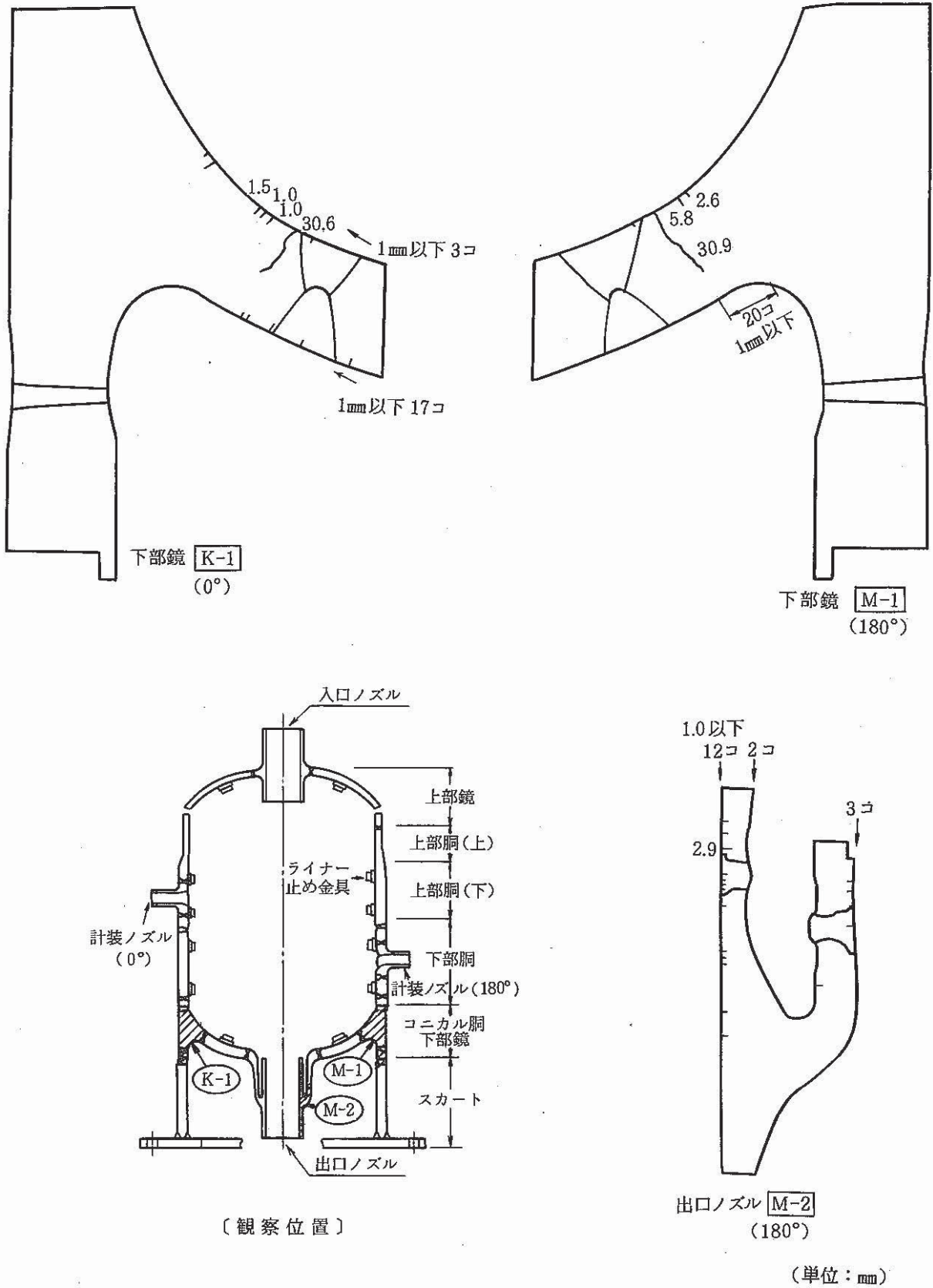


Fig. 4.4 Crack Distributions of Lower Head and Outlet Nozzle

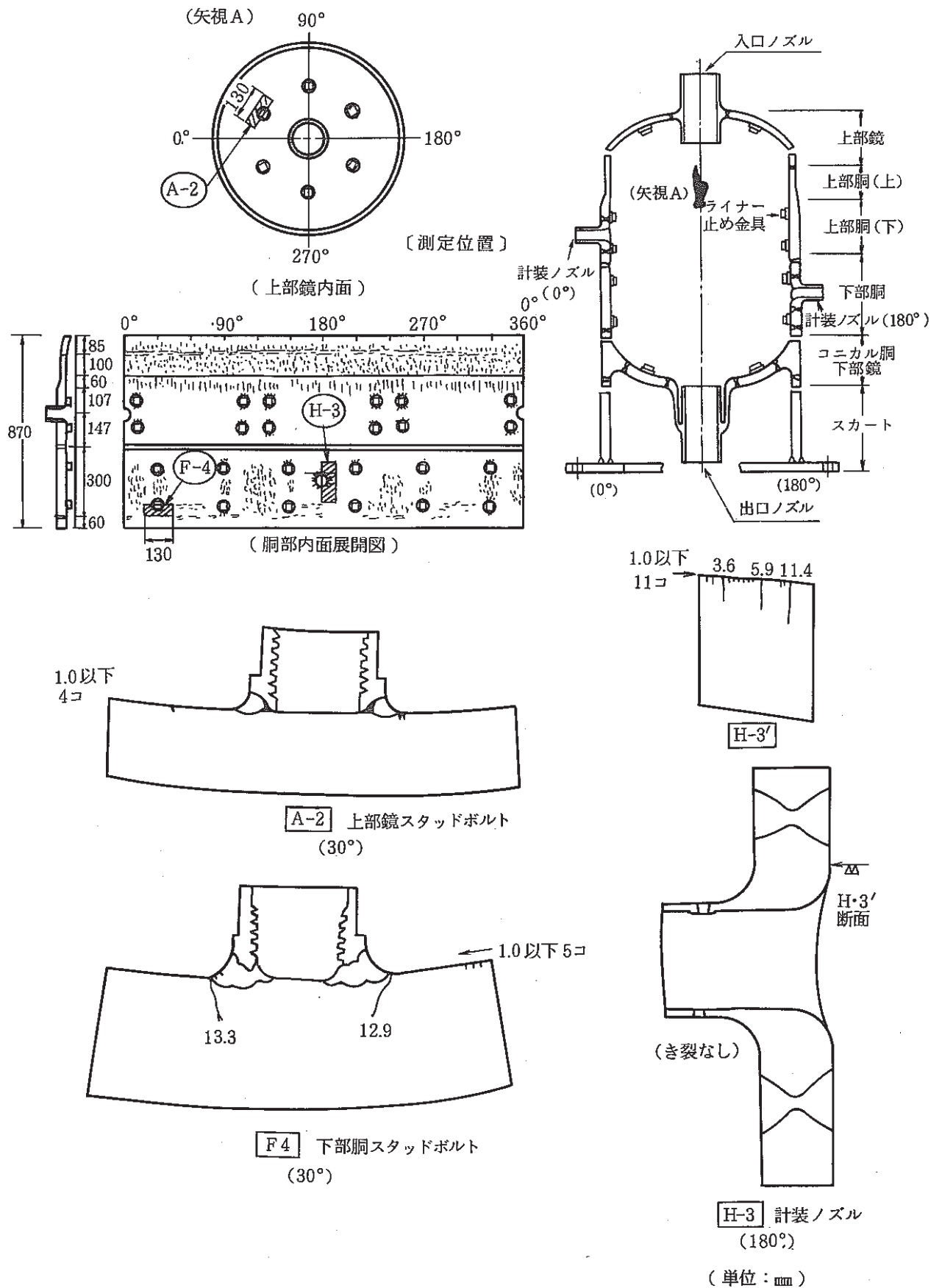


Fig. 4.5 Crack Distributions of Stud Bolt and Instrumental Nozzle

4.5 断面ミクロ組織観察

Photo 4. 17 ~ Photo 4. 39 に各部の主として 0° 及び 180° (220°)の位置における軸方向あるいは周方向断面の亀裂部ミクロ組織を示す。これらの亀裂形態をミクロ組織から観察した結果をまとめると以下のようなものである。

- (1) ナトリウム側の亀裂形態は各部材の母材，熱影響部（HAZ）とも粒界を主体に進展し，わずかに粒内割れの混じった性状を示していた。一部入口ノズル管台内面側のR部の亀裂形態のみ逆に粒内割れを主体とし，粒界割れの混じった性状であった。（Photo 4. 18, 4. 20）
- (2) 溶接金属部の亀裂形態は該部の柱状晶に沿って進展し，粒界を主体に粒内割れの混じった性状であった。
- (3) 外面（大気側）の亀裂形態はいずれも粒内割れを示し，亀裂深さは最大でも約0.15mm程度と浅いが，亀裂先端は開口していた。（Photo 4. 22, 4. 26, 4. 28, 4. 34）

4.6 破面観察

断面ミクロ組織で観察した亀裂の代表箇所を解放し，破面観察を行った。Photo 4. 40 ~ Photo 4. 45 にマクロ破面，Photo 4. 46 ~ Photo 4. 57 にSEM破面を示す。得られた結果をまとめると以下のようなものである。

- (1) 各破面は前述のミクロ組織で観察したように，いずれも粒界割れが主体であり，亀裂終端付近で粒内割れの混合した破面を呈していた（ナトリウム側に見られた亀裂の破面のみ観察）。一部に入口ノズル管台内面側R部の破面のみ粒内割れが主体で，粒界破面率は約20%程度であった。（Photo 4. 47）
- (2) 破面は粒界割れを主体とするため，明瞭なストライエーションの観察された箇所は極めて少なかった。ストライエーションのほとんどは，わずかな粒内破面のうちごくわずかに粒内面上に現われたものであり，ごく一部に粒界面上にストライエーションの認められたものがあつた。（Photo 4. 48）
- (3) これらわずかなストライエーションより測定されたストライエーション間隔をTable. 4. 1に示す。これより，観察されたストライエーション間隔から推測される亀裂進展速度は $0.6 \sim 4 \times 10^{-3}$ mm/cycle（殆どが 1×10^{-3} mm/cycle以下）であり，これは本供試体の試験繰返し数（1,002サイクル）からみるとかなり小さい値である。これは以下の理由によるものと考えられる。

破面全体は殆ど粒界破壊を呈しており，局所的に粒内破面が存在するのみである。これを模式的に示せばFig. 4. 6(a), (b)のような破面はクリープによる粒界破壊の進行過程において，たまたま粒界に沿って亀裂が進展しにくい時に，亀裂先端の結晶

粒を貫通して進展した痕跡が残った物と考えられる。

一方、クリープ支配的な場合と、疲労支配の場合の亀裂進展速度は Fig. 4.6 のようになる⁽⁶⁾。即ち、同じ応力、ひずみ状態（同じ繰返しJ積分値）で比べると、疲労支配の da/dn (B点) に比べてクリープ支配の da/dN (A) の方が著しく速い。このため、粒内破壊部から観察されるストライエーションは主たる粒界亀裂の進展速度に比べて小さい値となる。従って、このようなストライエーションは主亀裂の進展速度とは一致せず、本供試体についてもストライエーション間隔から亀裂発生繰返し数を逆算することは適切ではない。

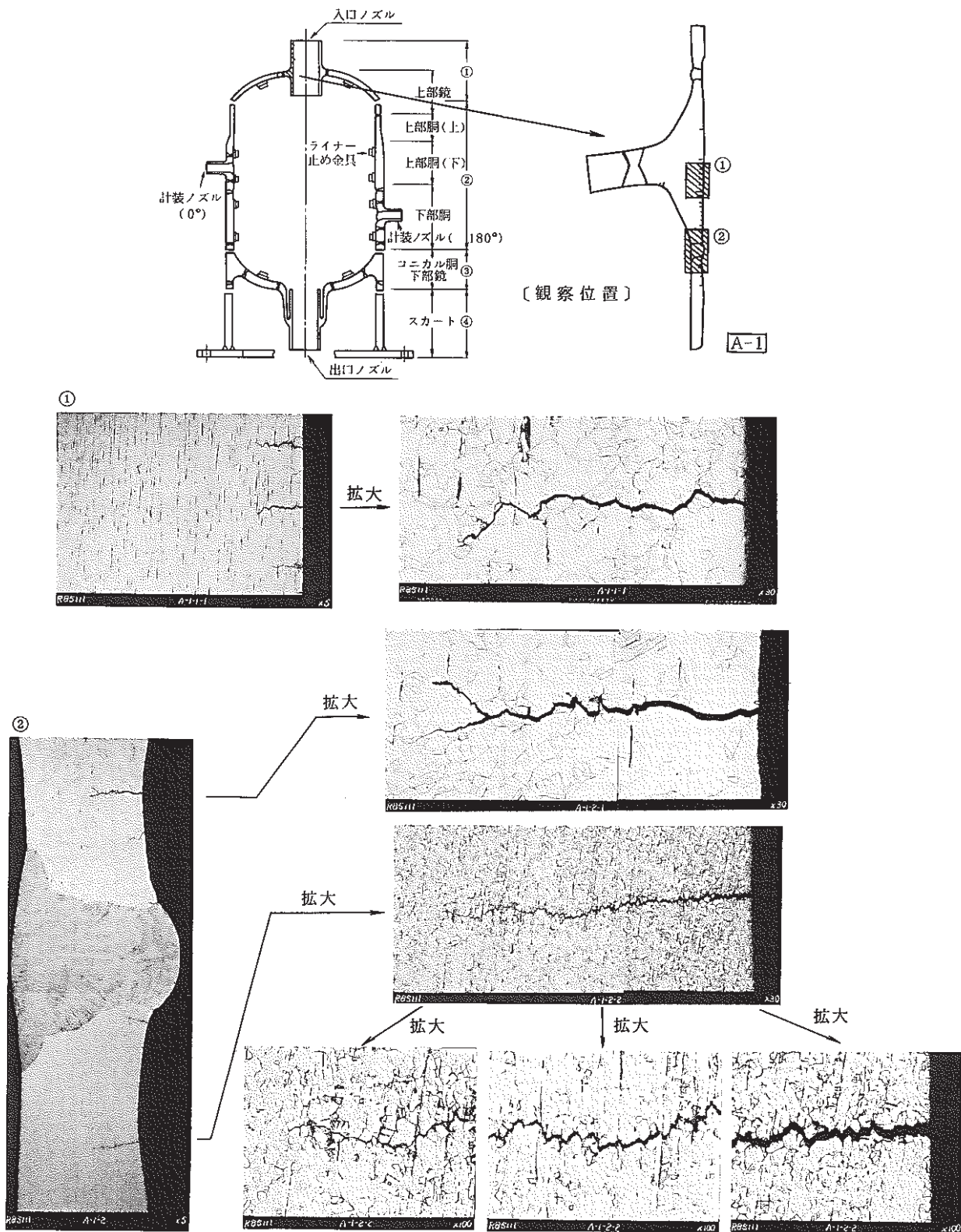


Photo. 4.17 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Inlet Nozzle (0°)

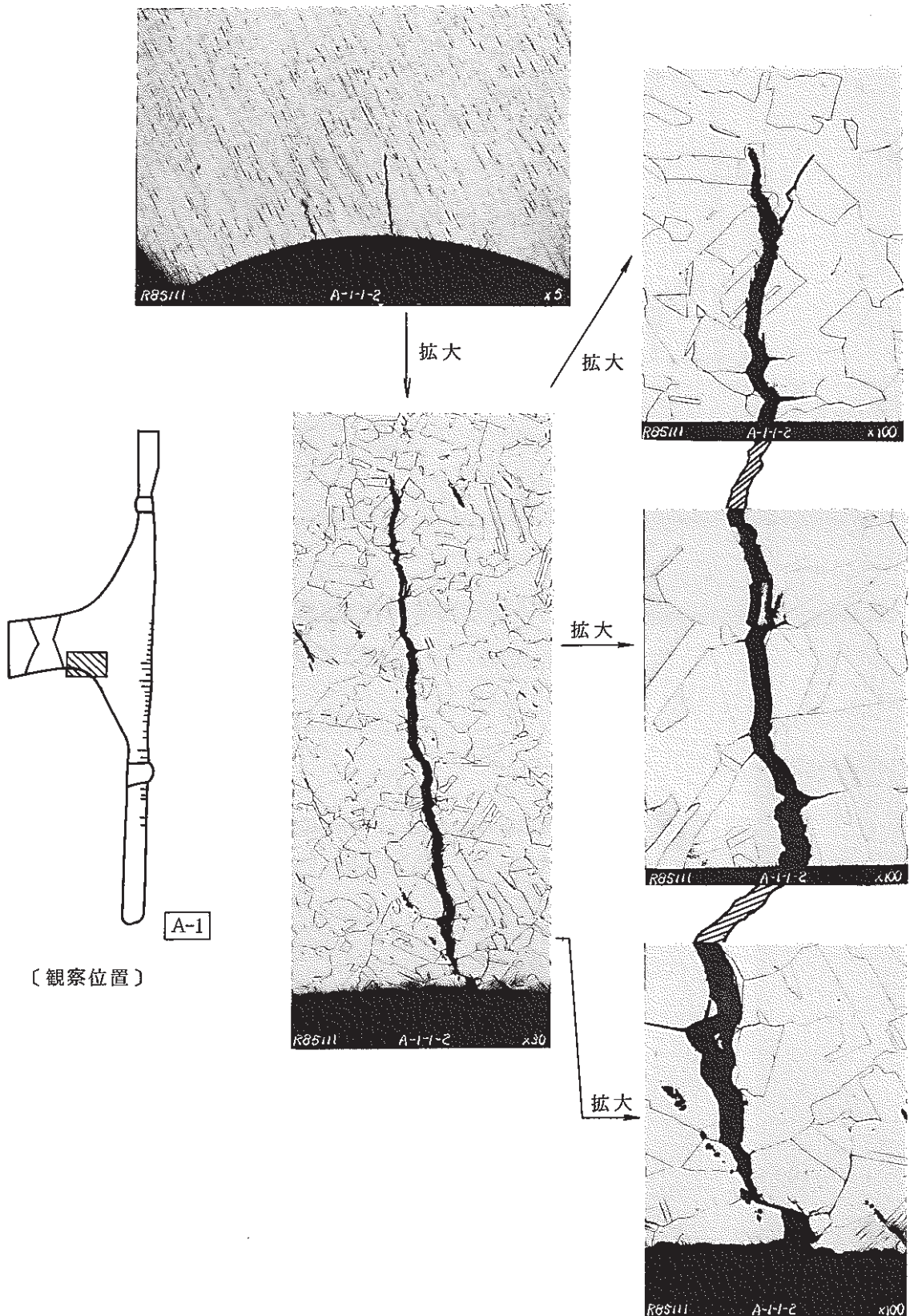


Photo. 4.18 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Inlet Nozzle (0°)

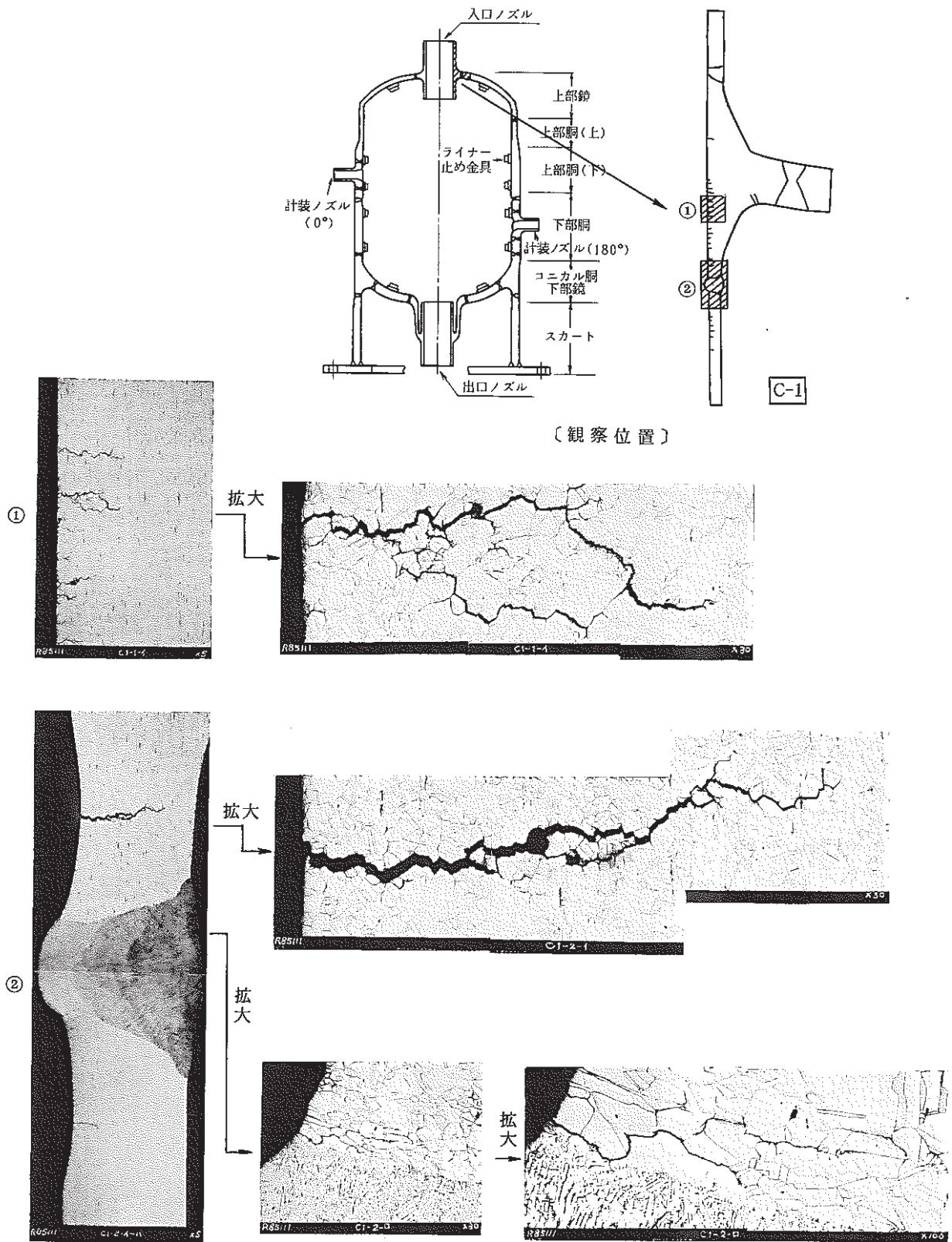


Photo. 4.19 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Inlet Nozzle (180°)

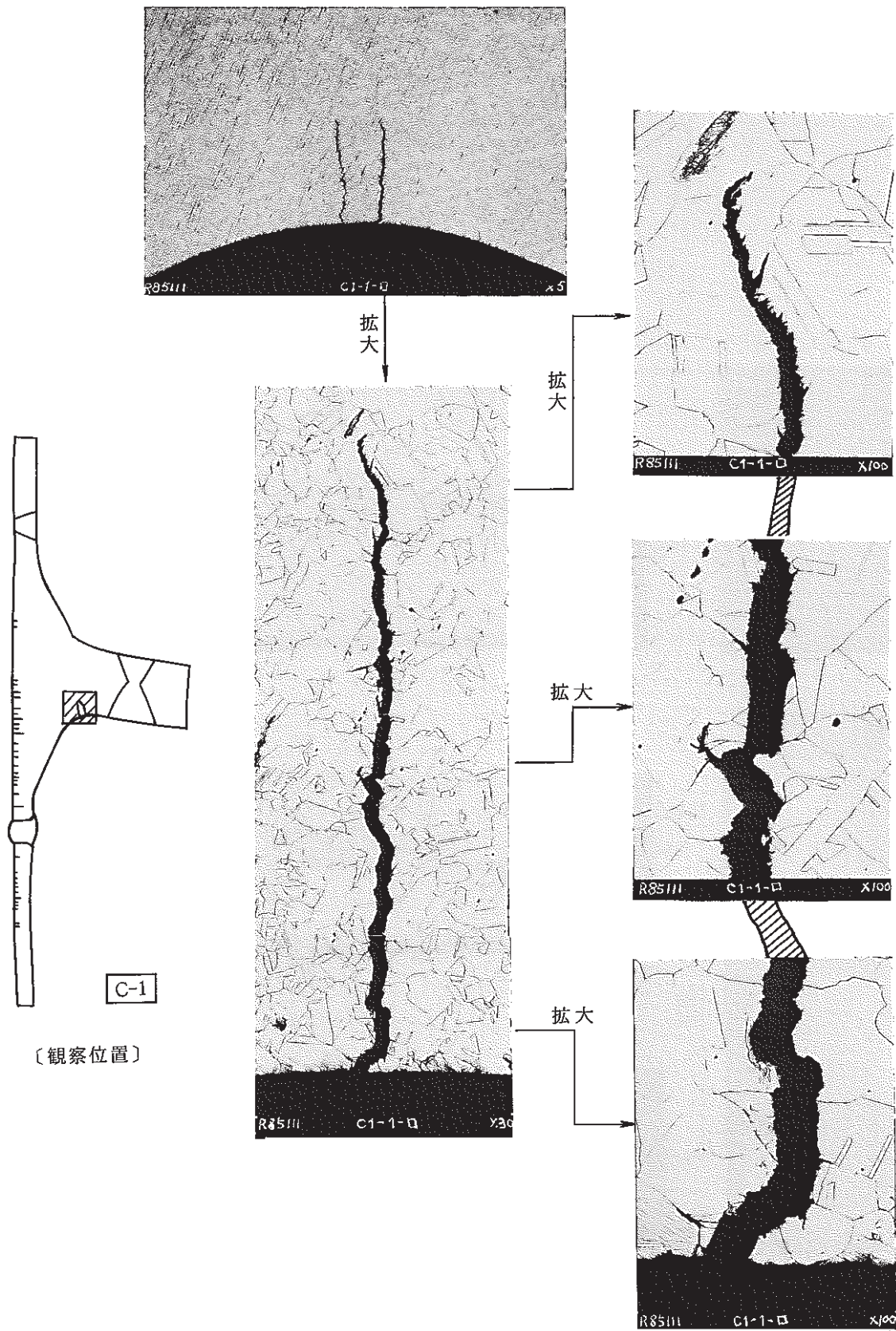
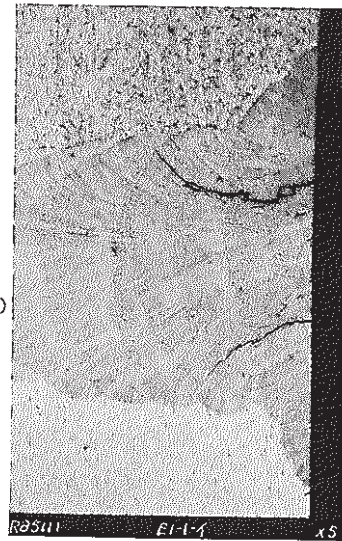
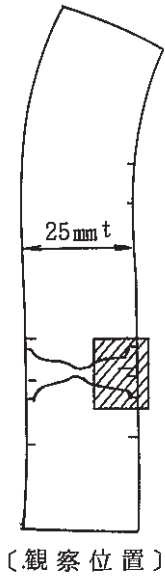
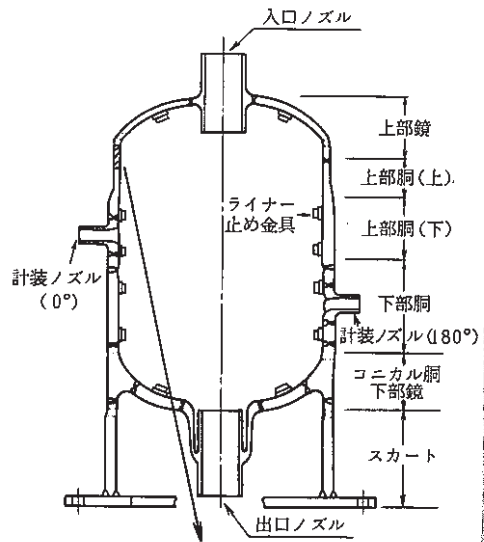
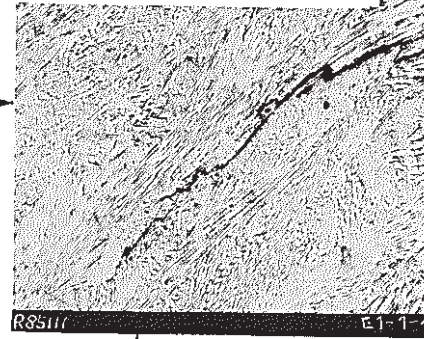


Photo. 4.20 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Inlet Nozzle (180°)



拡大



拡大

拡大



大
拡

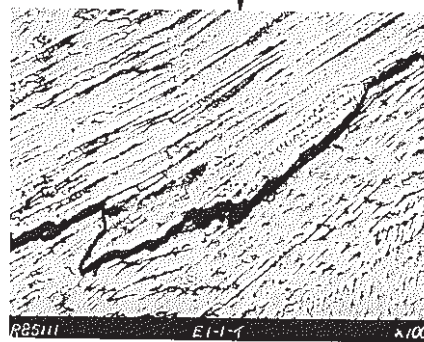
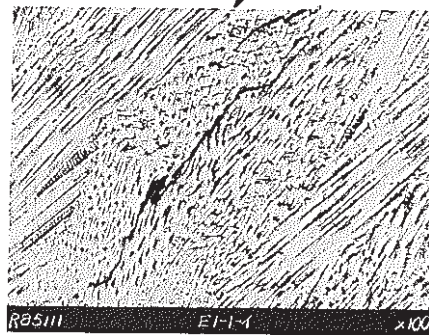


Photo. 4.21 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Weld of Upper Head and Upper Part of Vessel (0°)

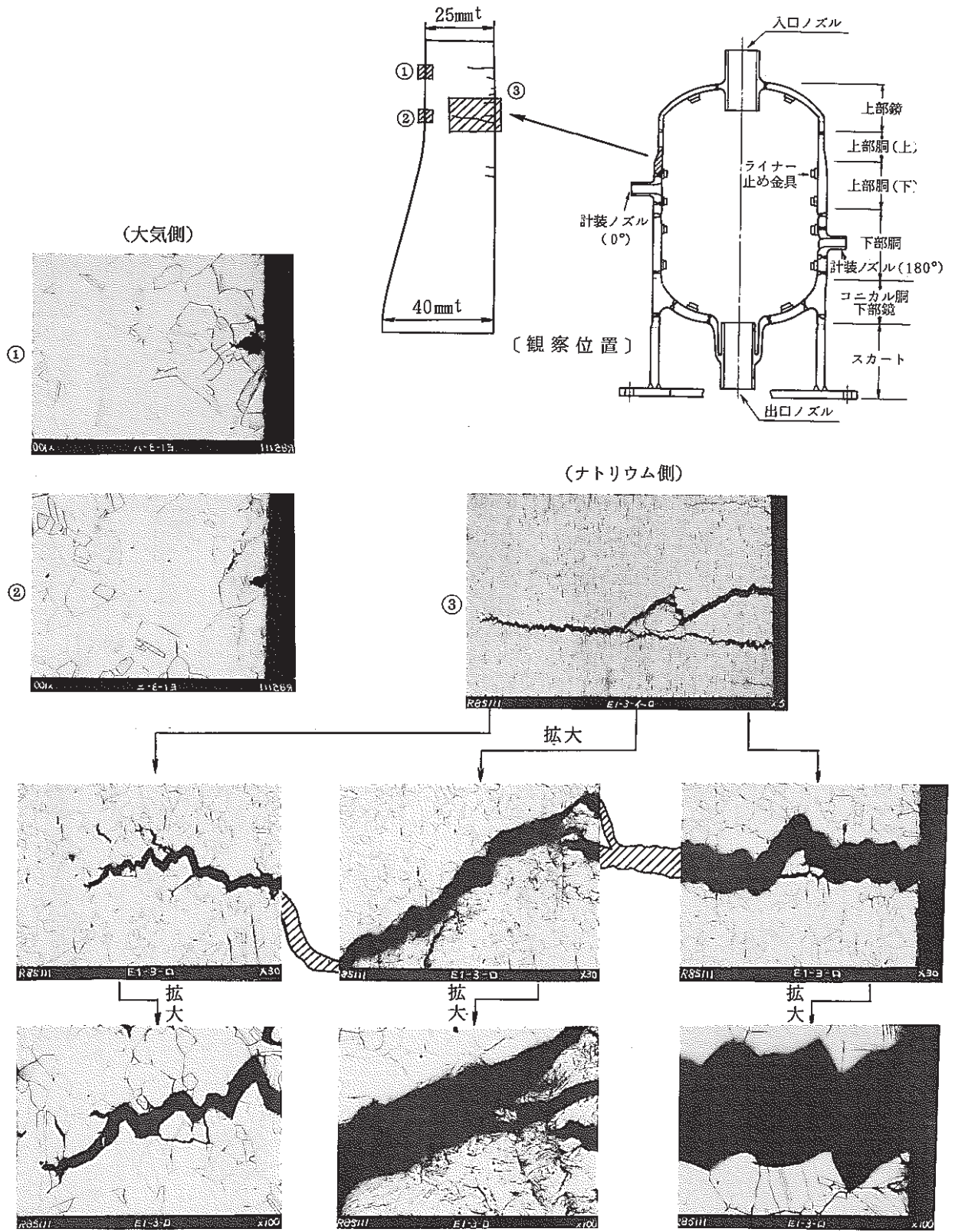


Photo. 4.22 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Thinning Portion

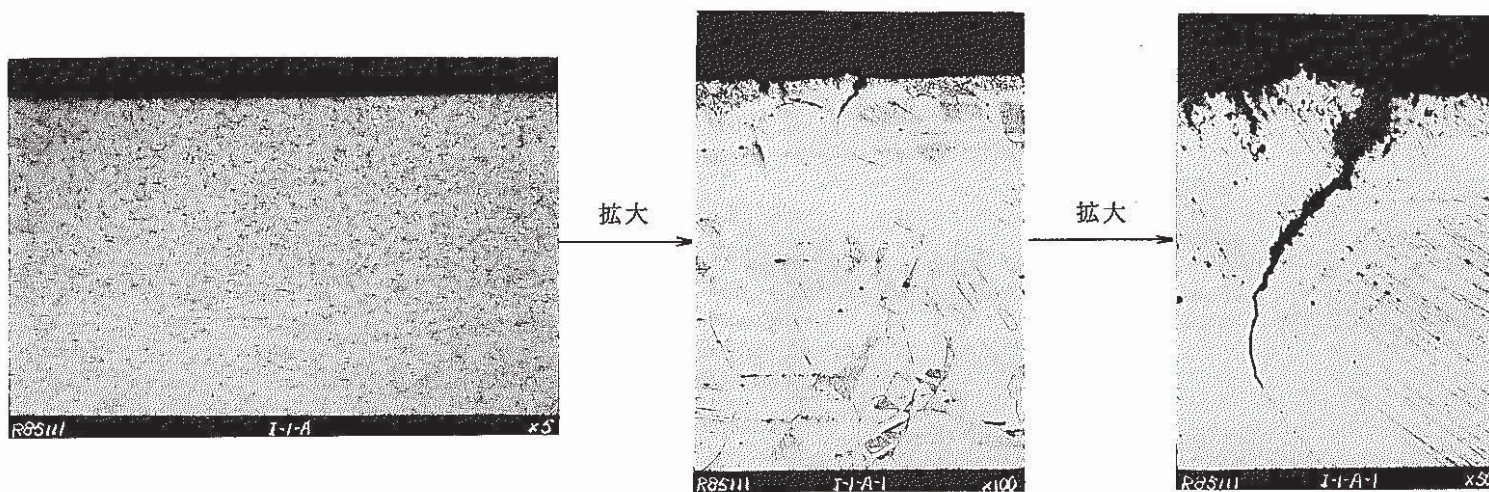
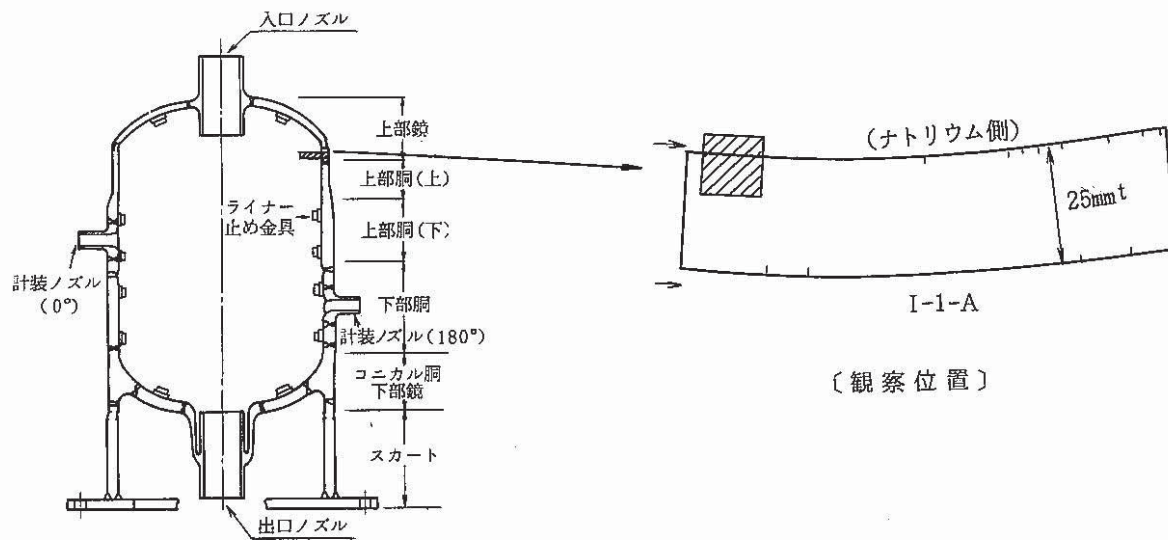


Photo. 4.23 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Upper Head (220°)

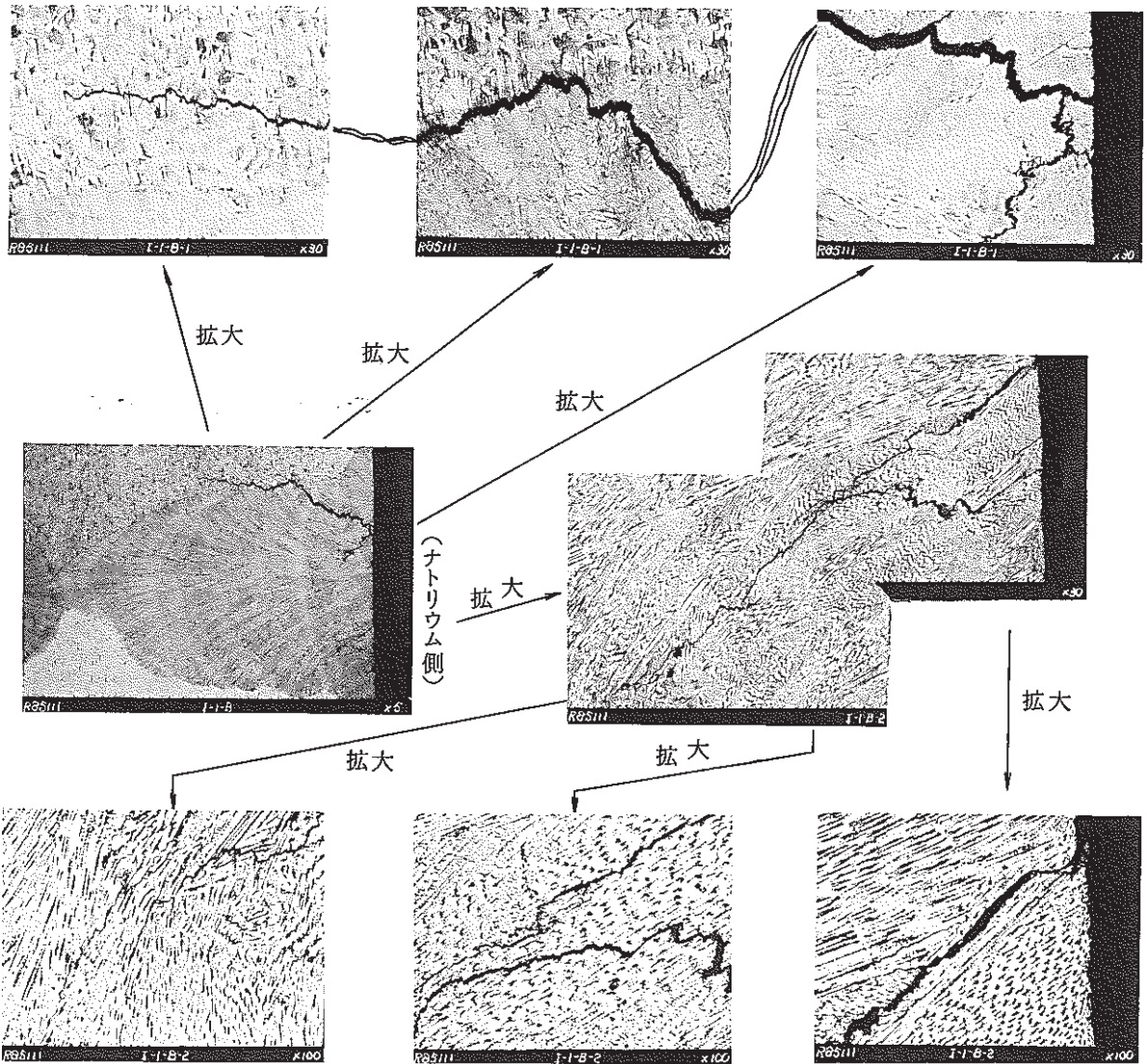
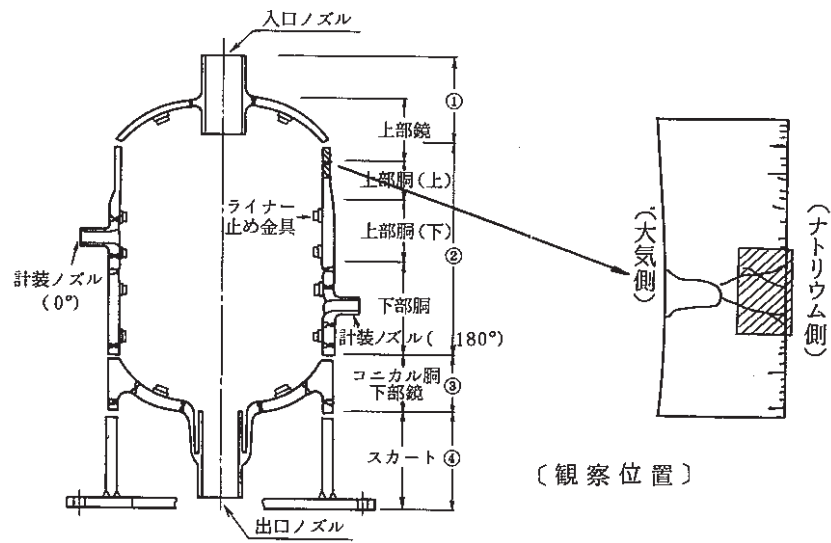


Photo. 4.24 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Upper Head and Upper Part of Vessel (220°)

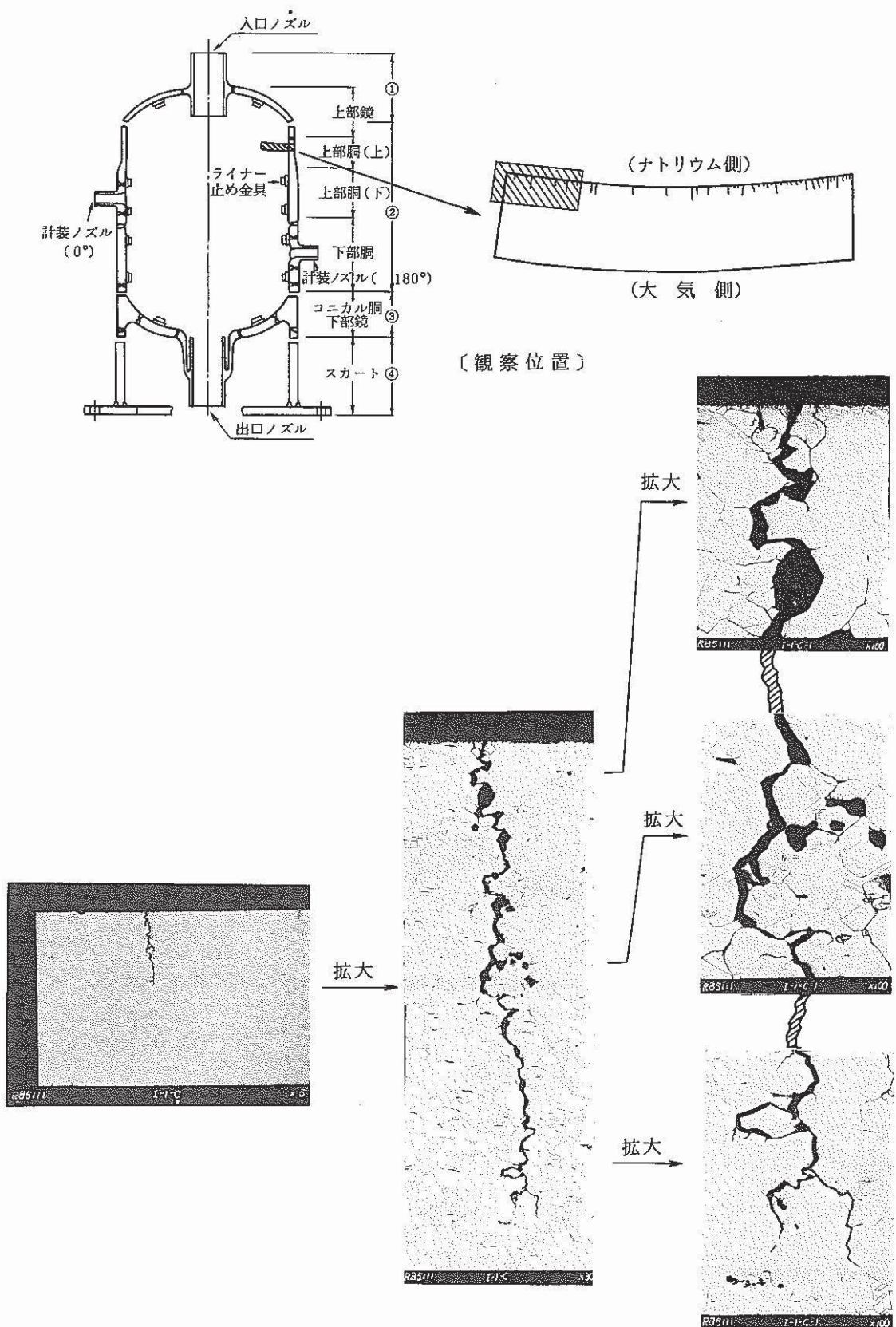


Photo. 4.25 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Upper Part of Vessel (220°)

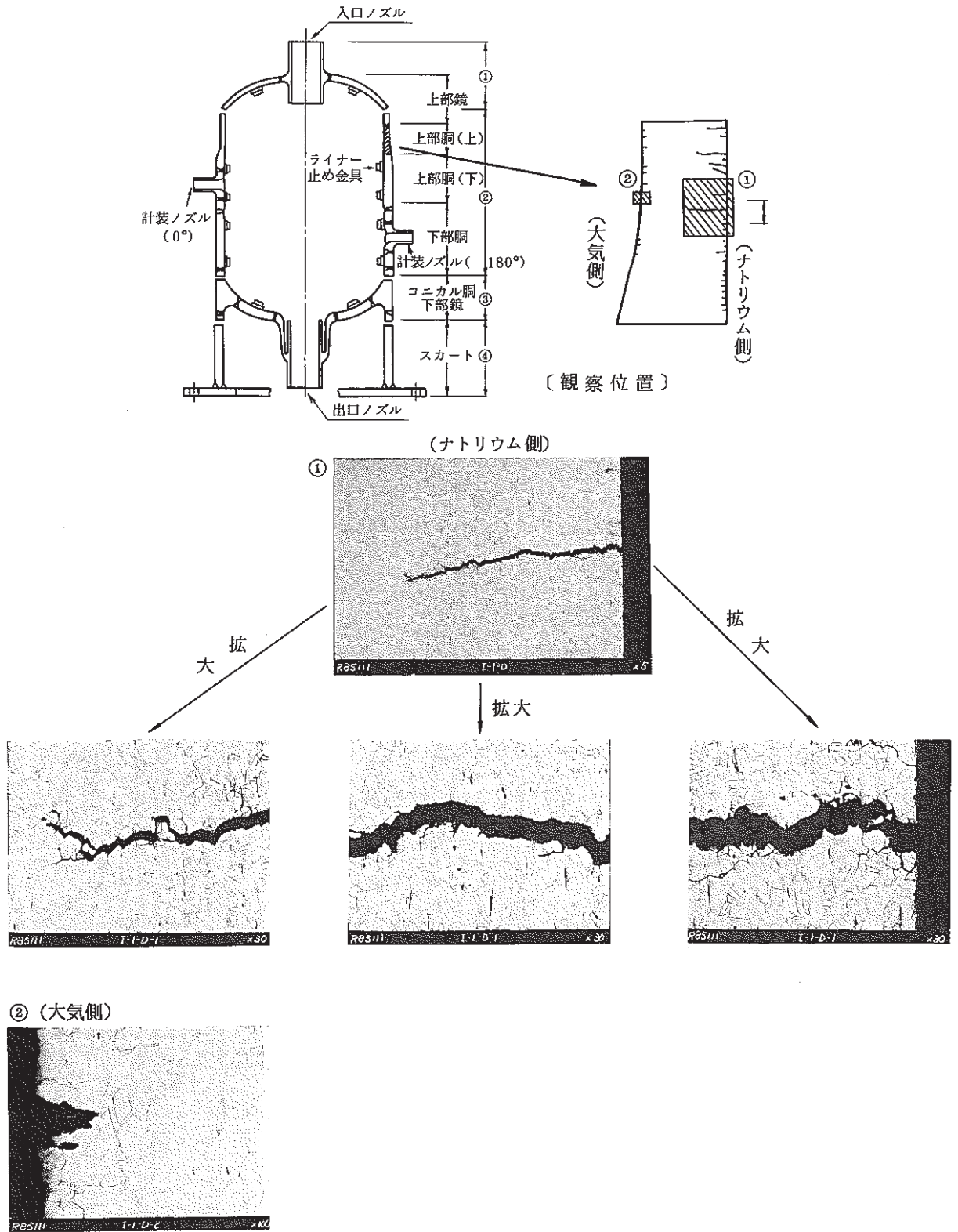


Photo. 4.26 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Thinning Portion (I-1-D)

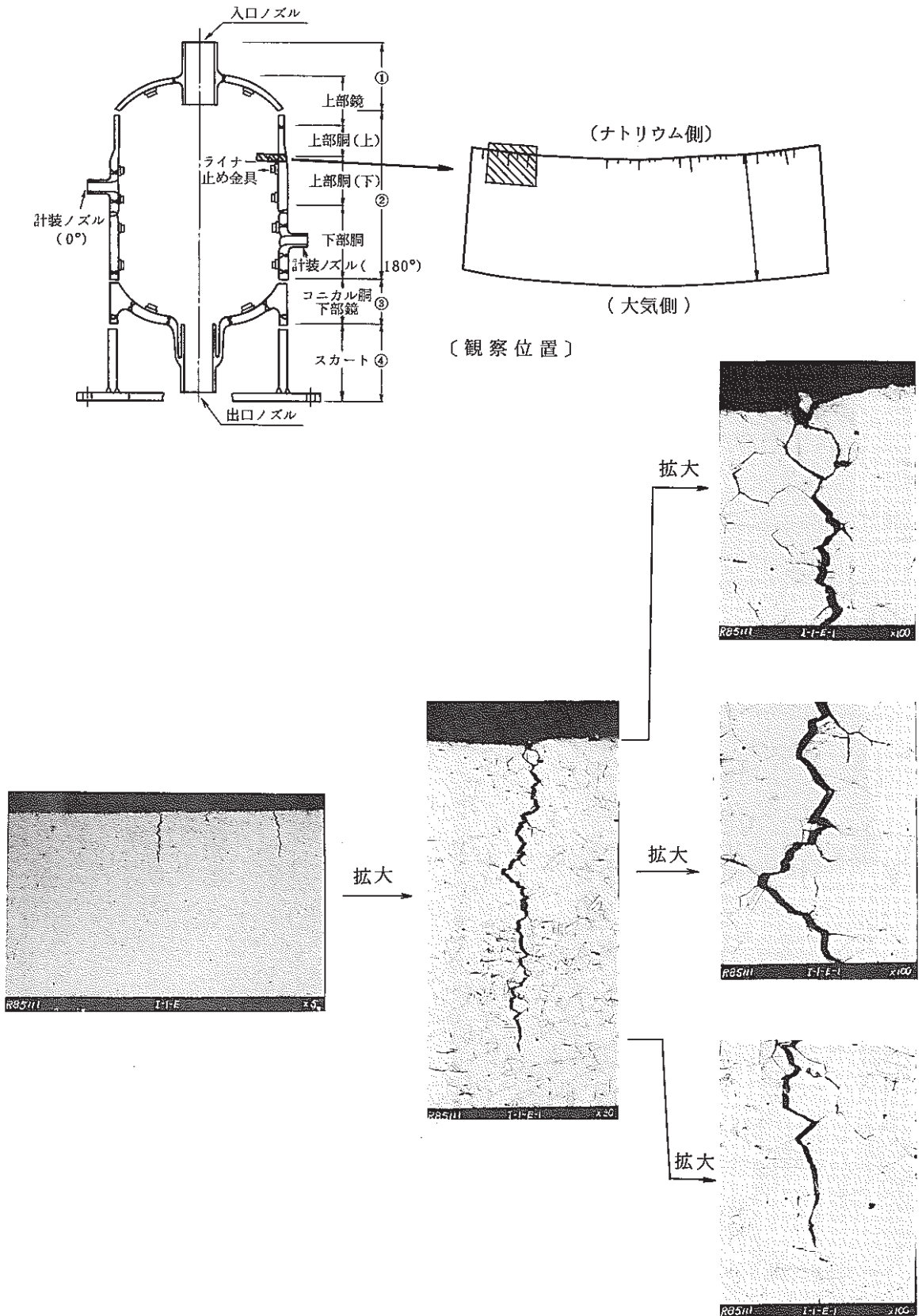


Photo. 4.27 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Upper Part of Vessel (220°)

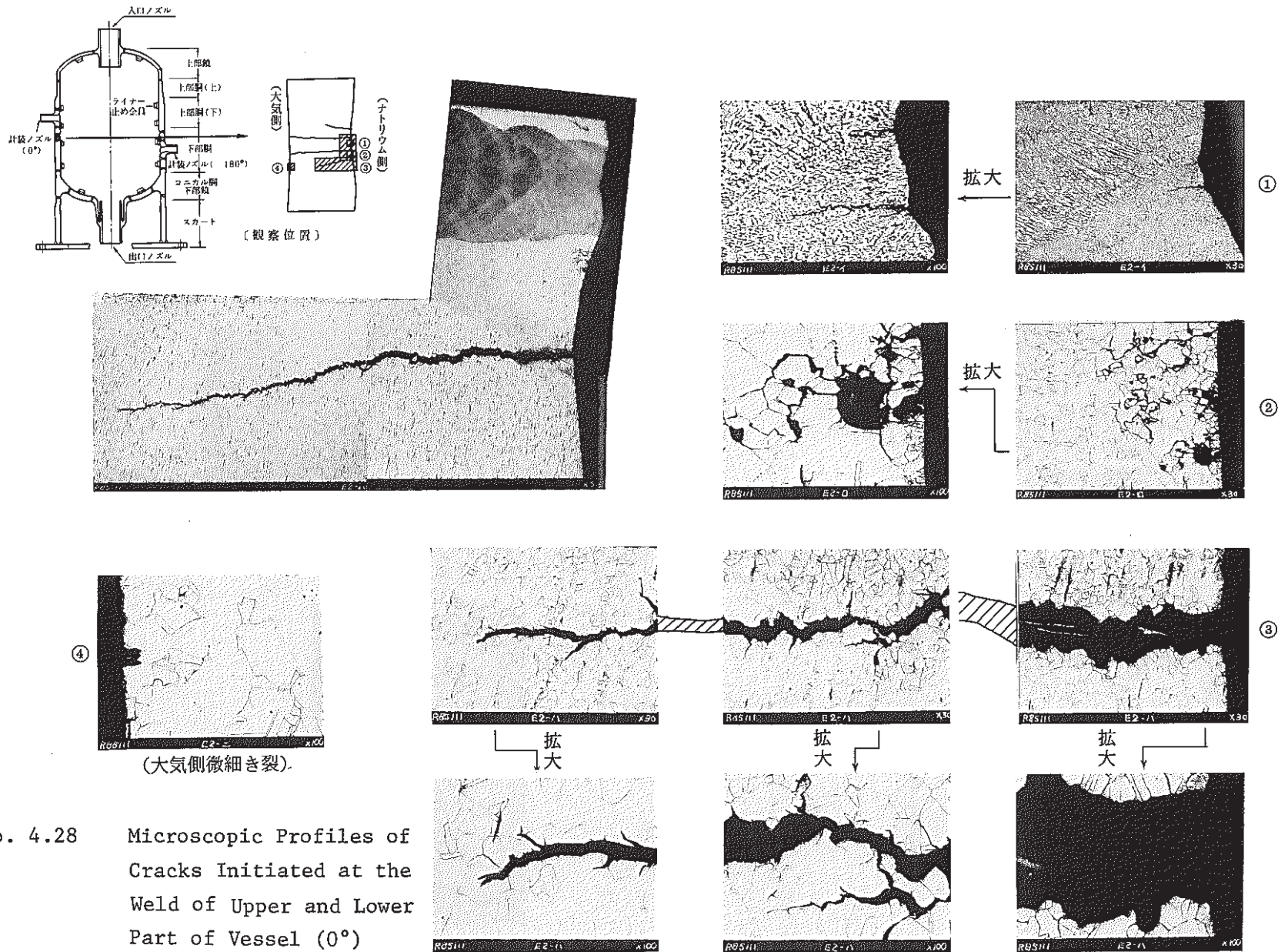


Photo. 4.28 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Weld of Upper and Lower Part of Vessel (0°)

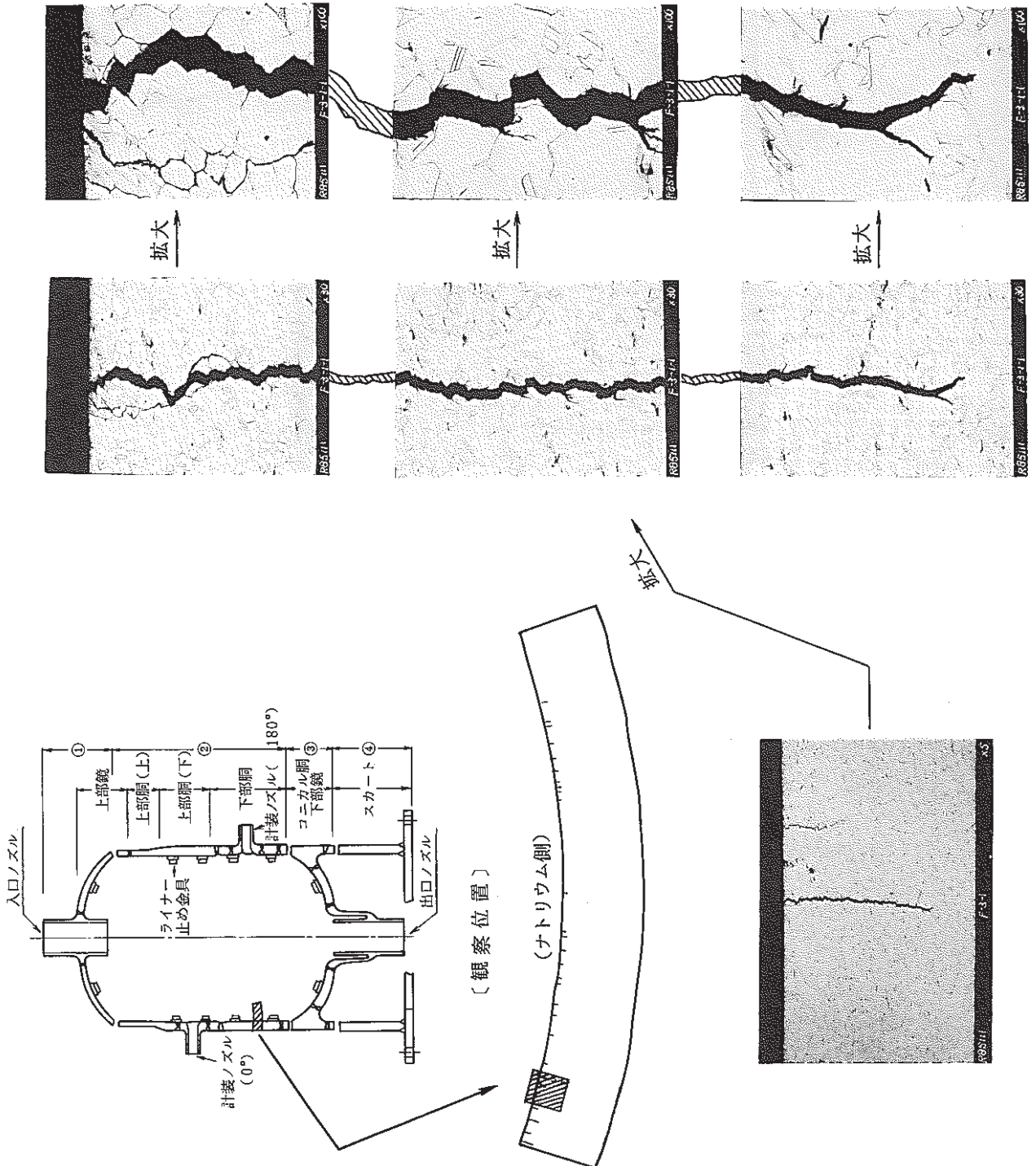


Photo. 4.29 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Lower Part of Vessel

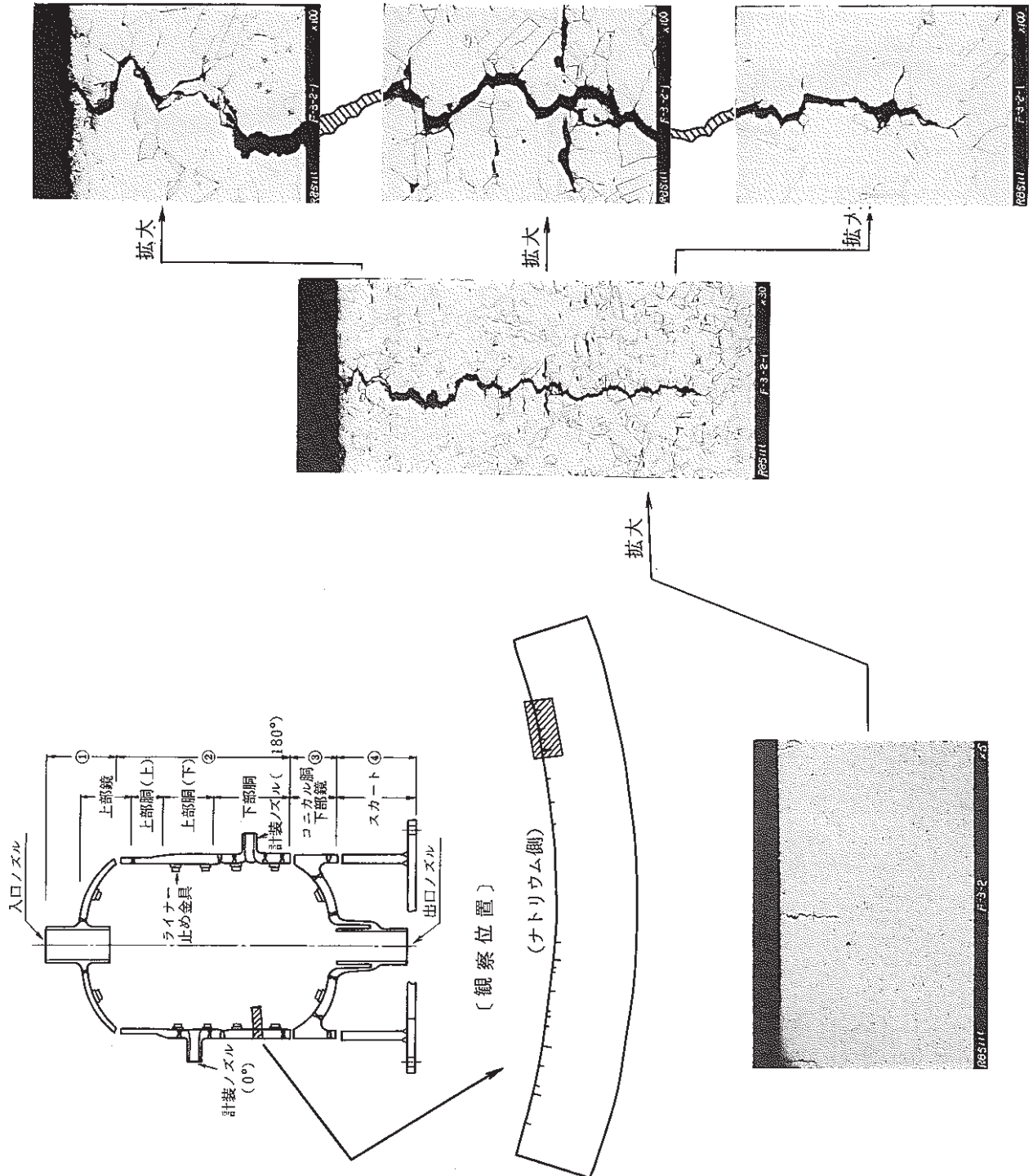


Photo. 4.30 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Lower Part of Vessel along circumferential direction

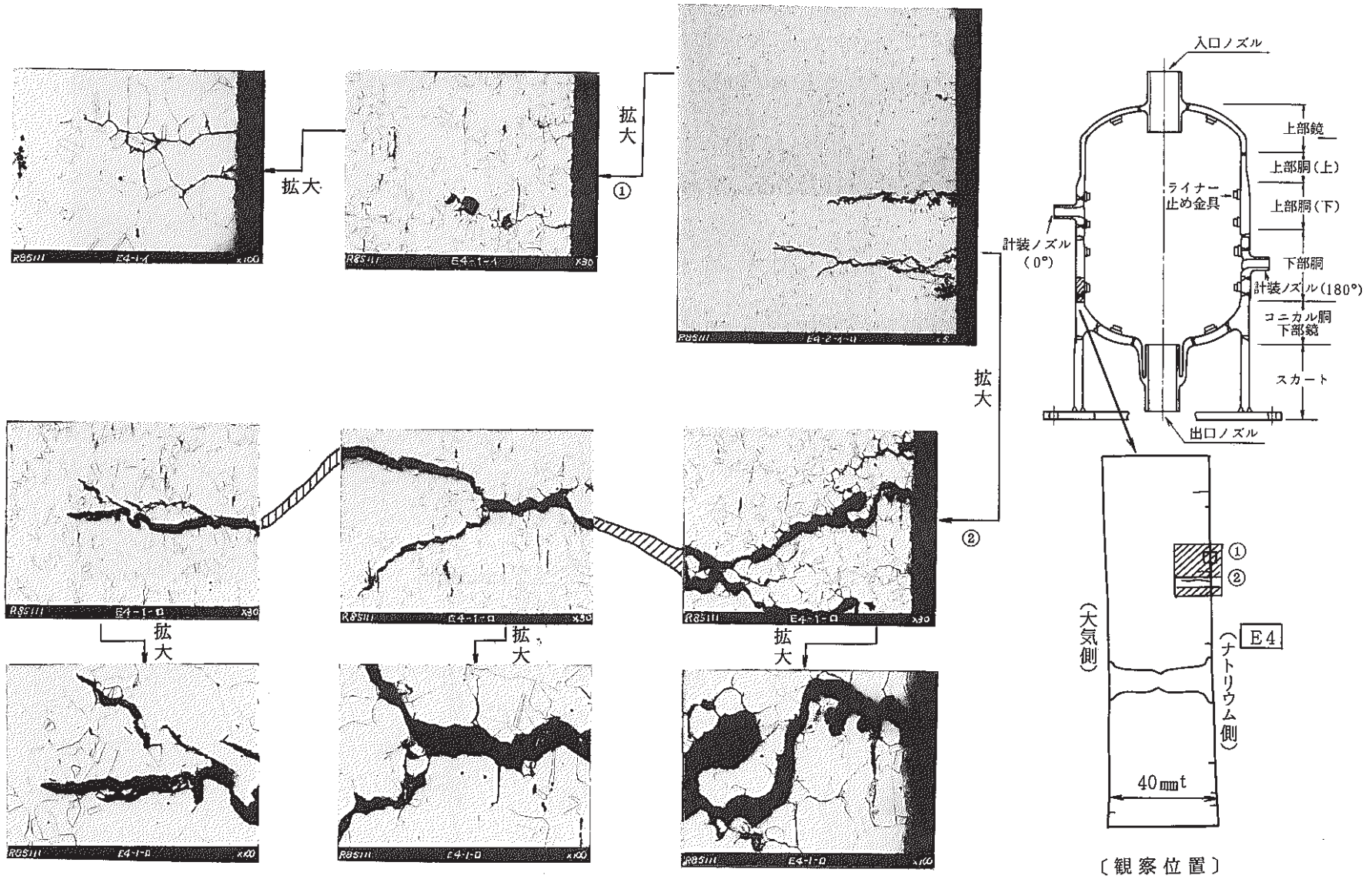


Photo. 4.31 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Lower Part of Vessel (0°)

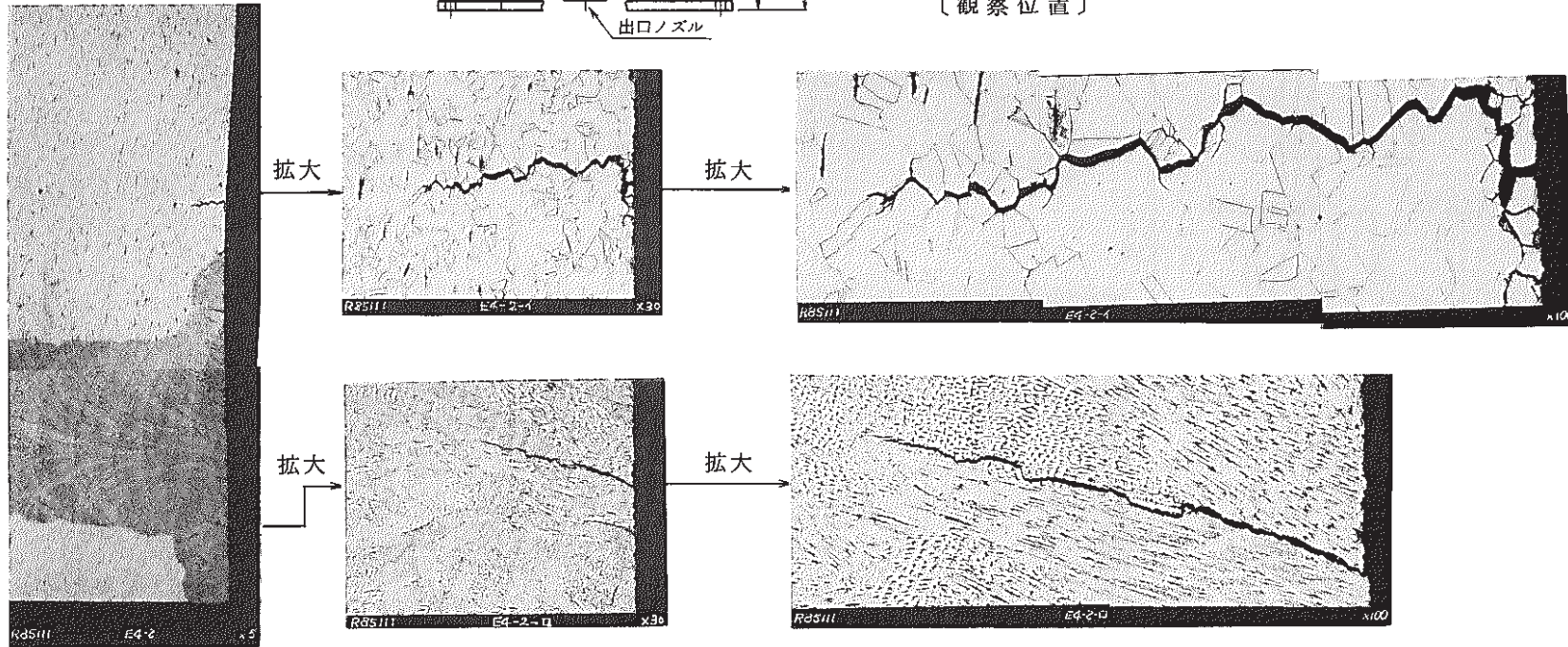
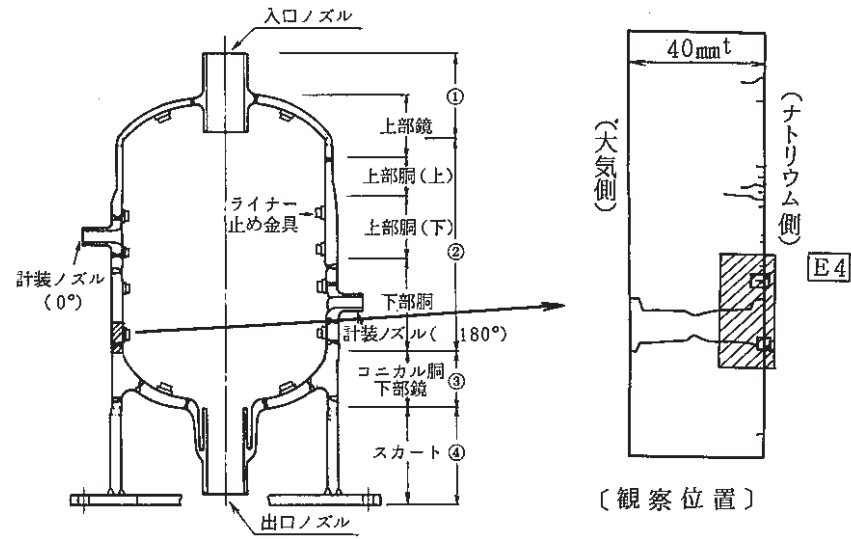


Photo. 4.32 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Weld of Lower Part of Vessel and 3-Pieces Junction (0°)

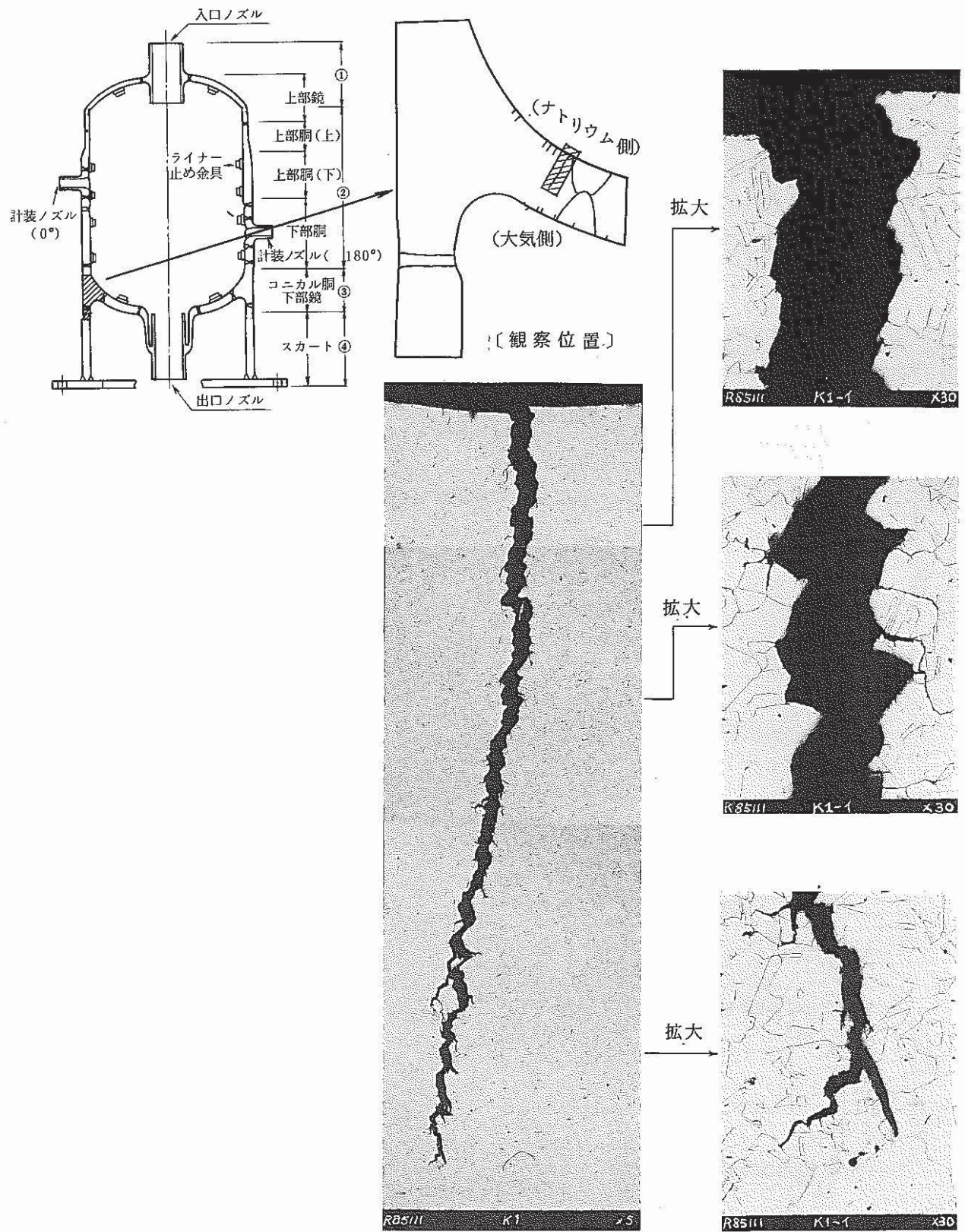


Photo. 4.33 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Weld of 3-Pieces Junction and Lower Head (0°)

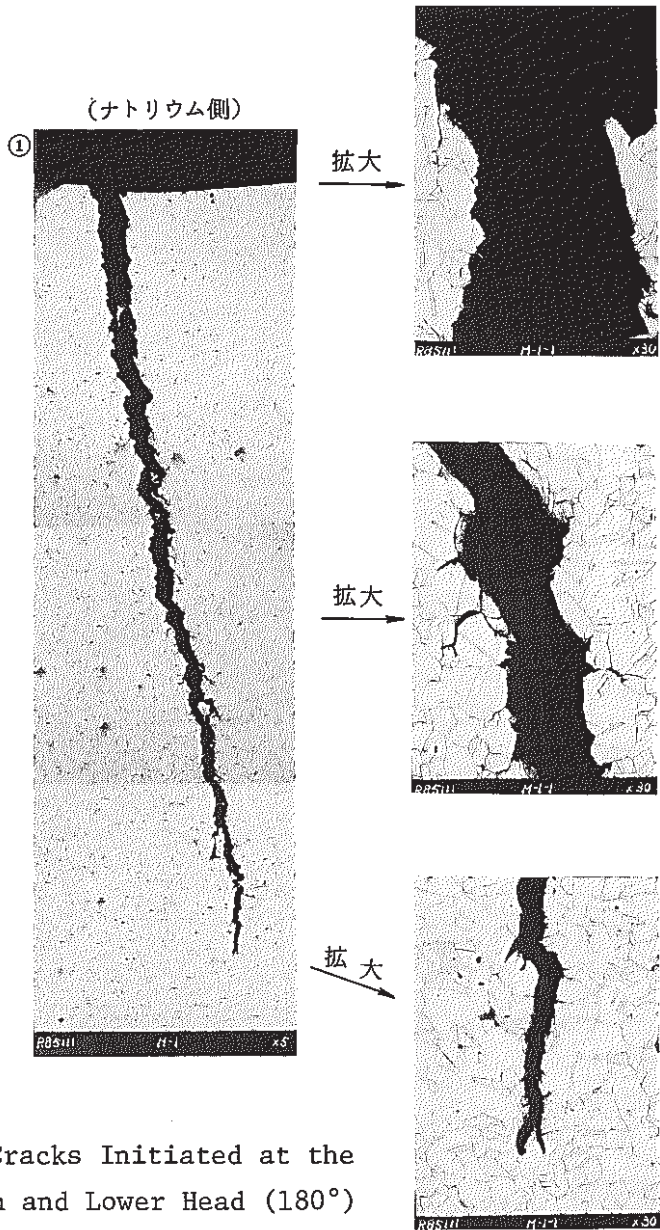
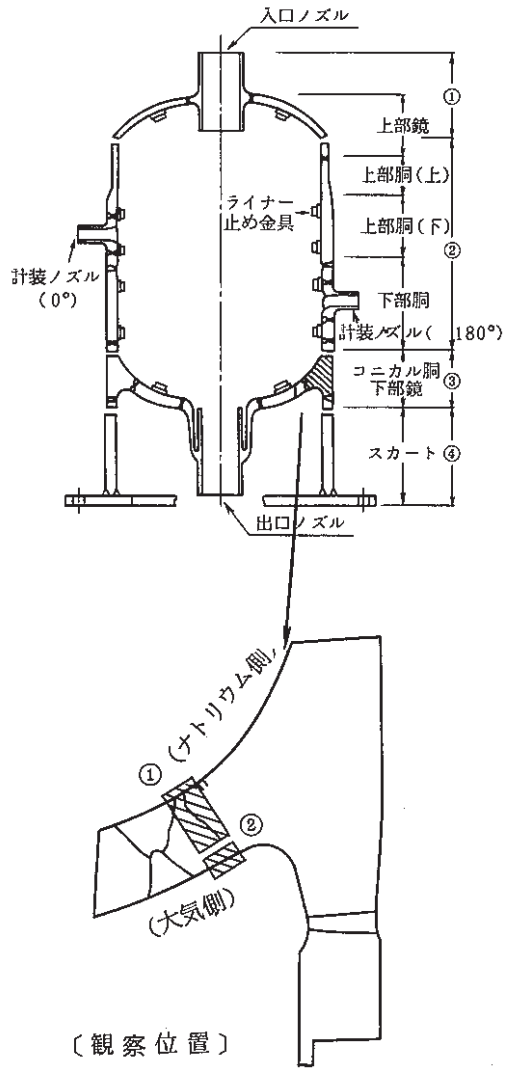


Photo. 4.34 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Weld of 3-Pieces Junction and Lower Head (180°)

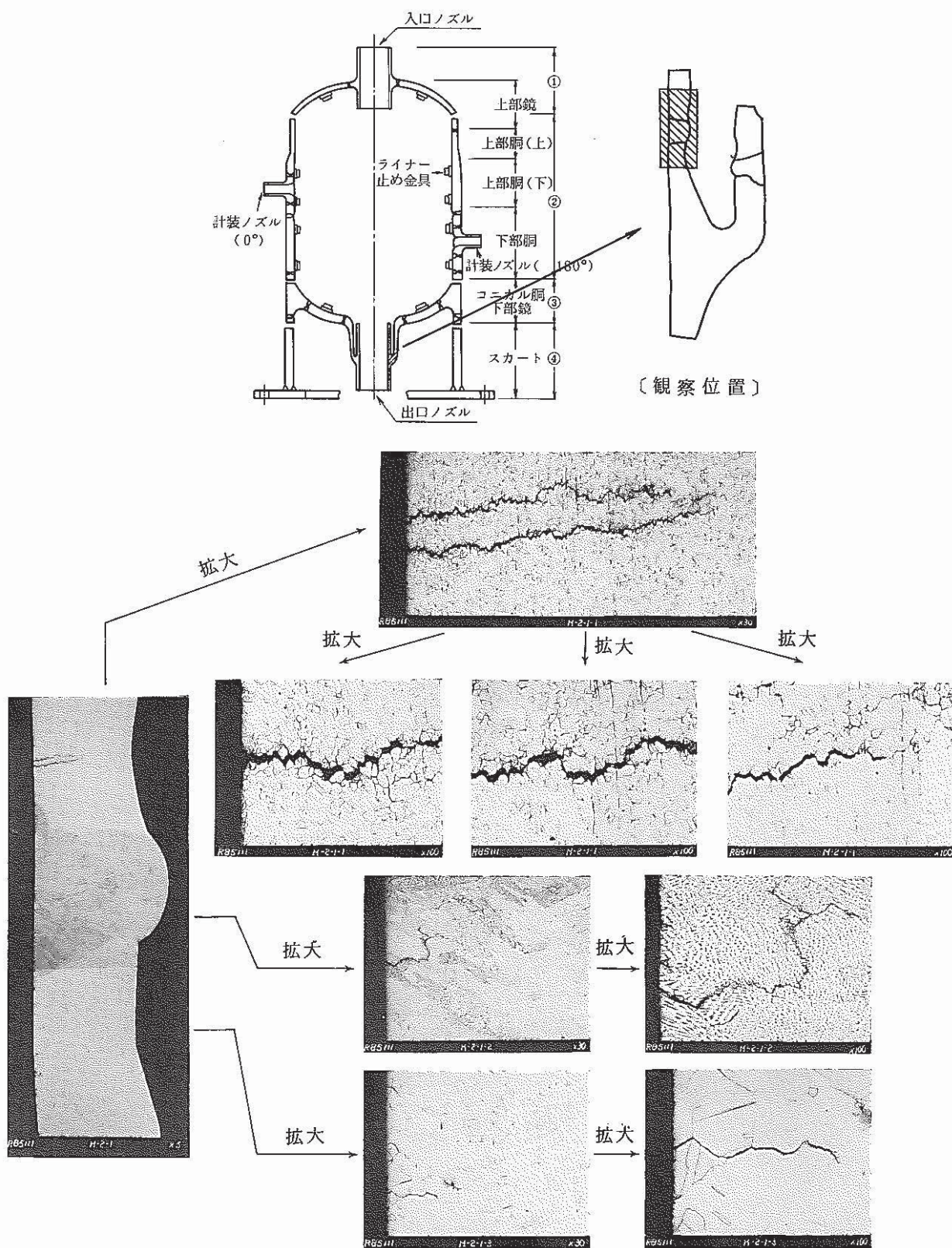


Photo. 4.35 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Outlet Nozzle

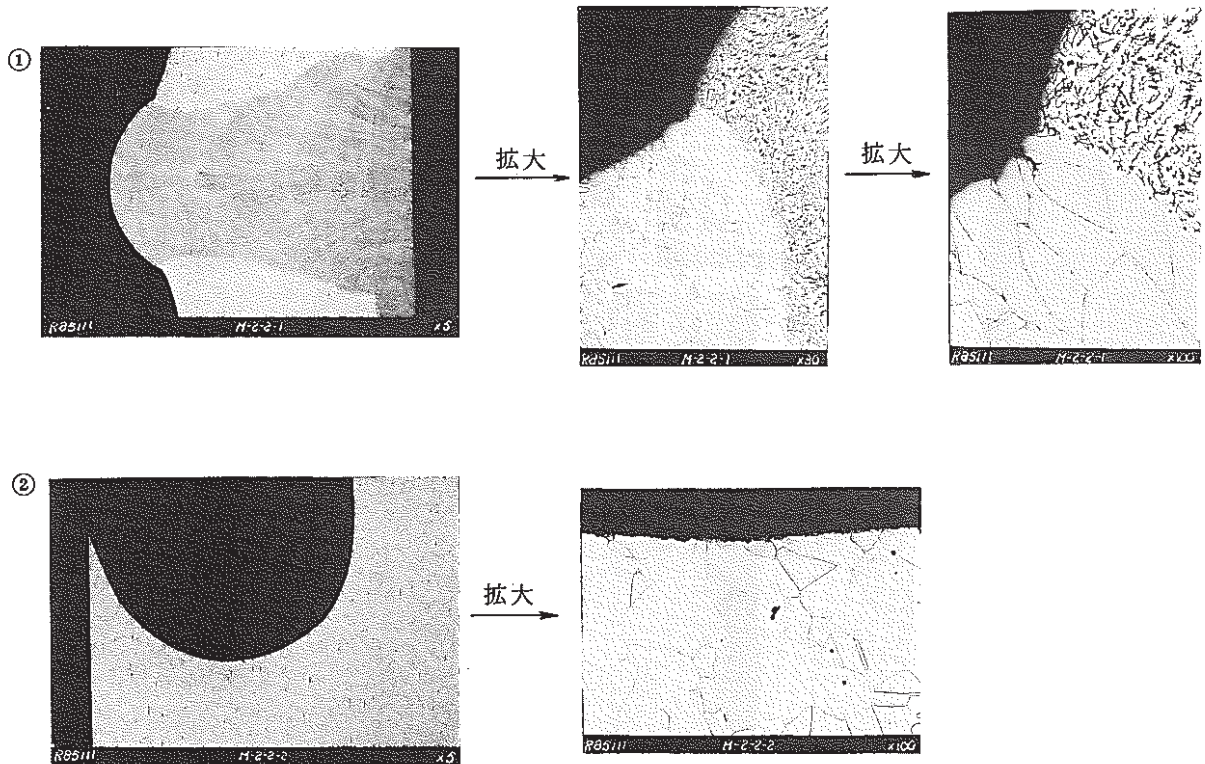
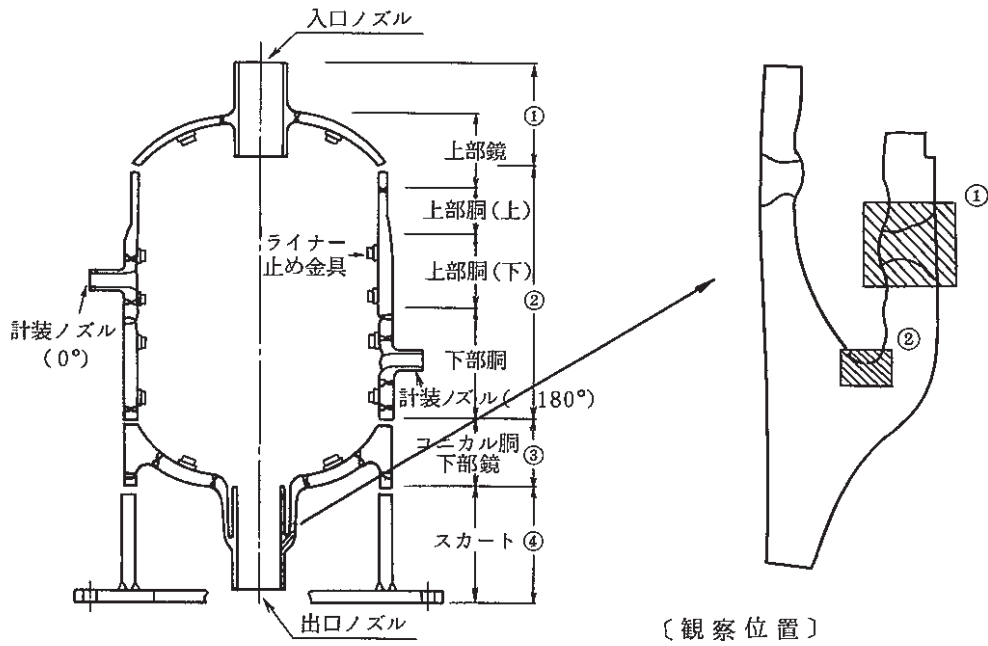


Photo. 4.36 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Outlet Nozzle Safe-end (180°)

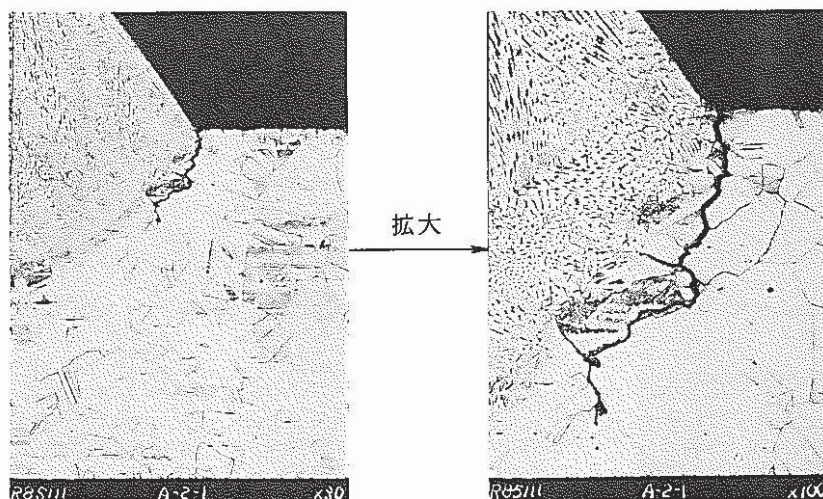
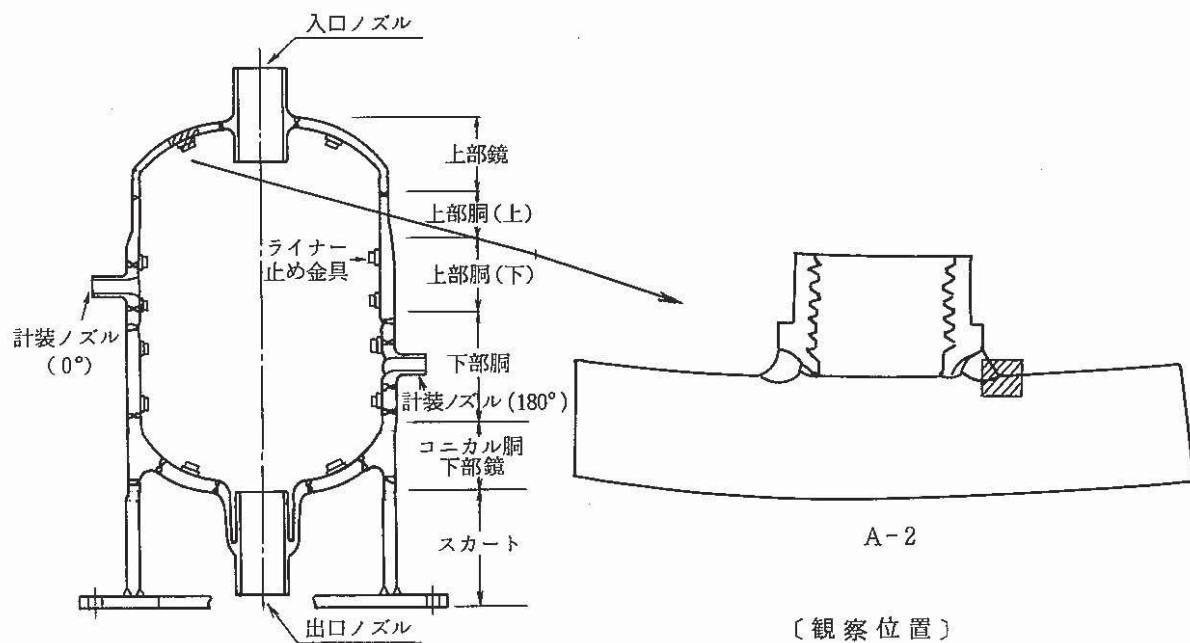
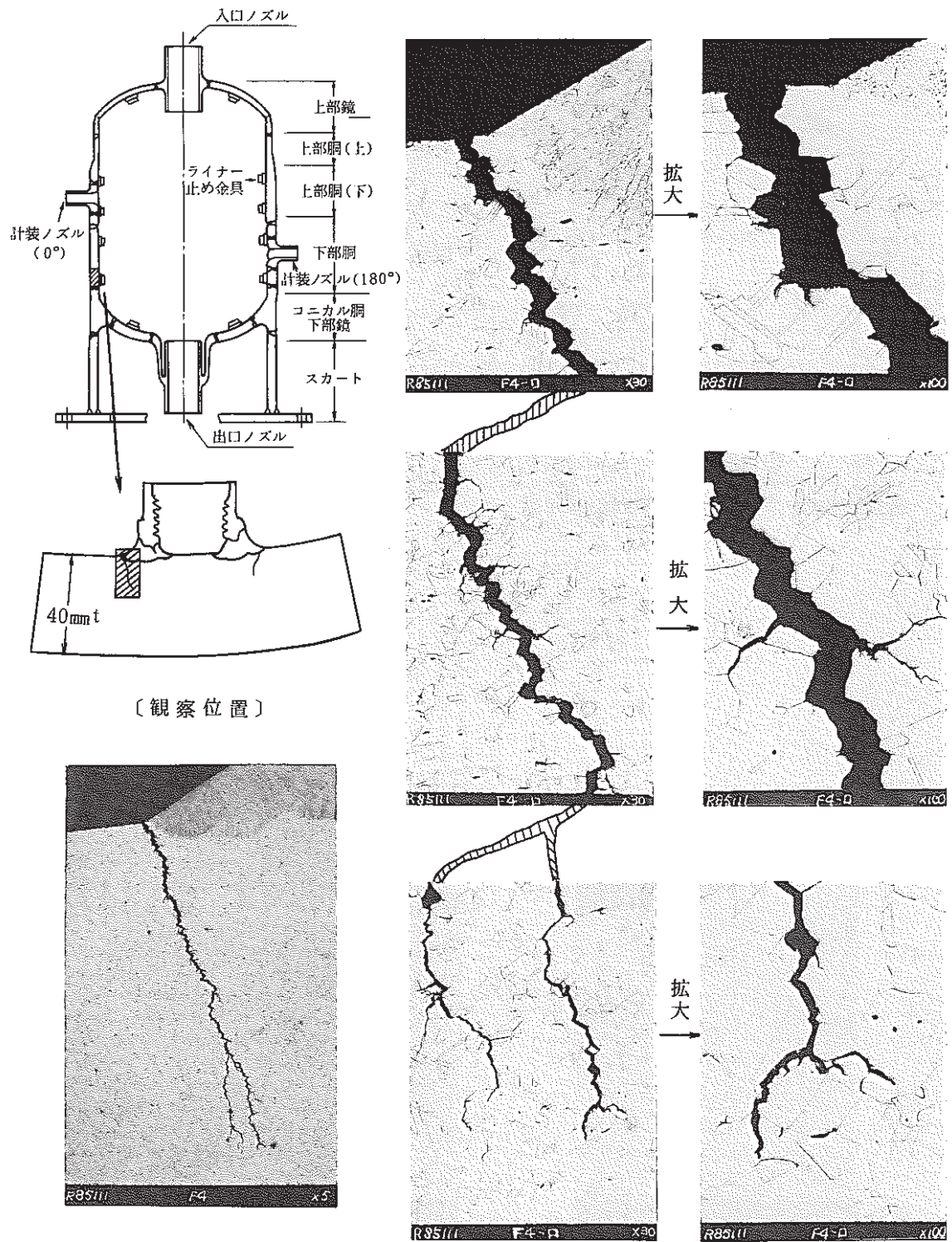
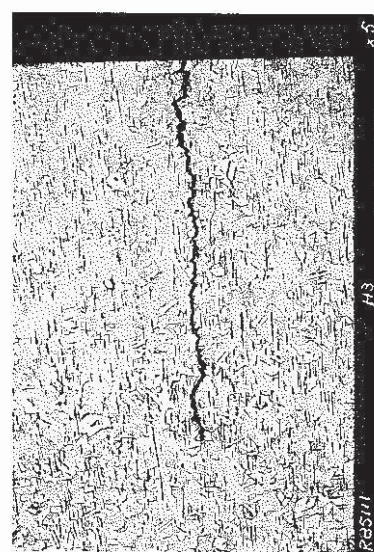
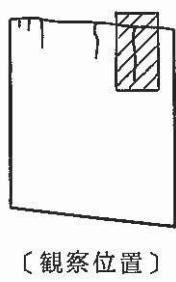
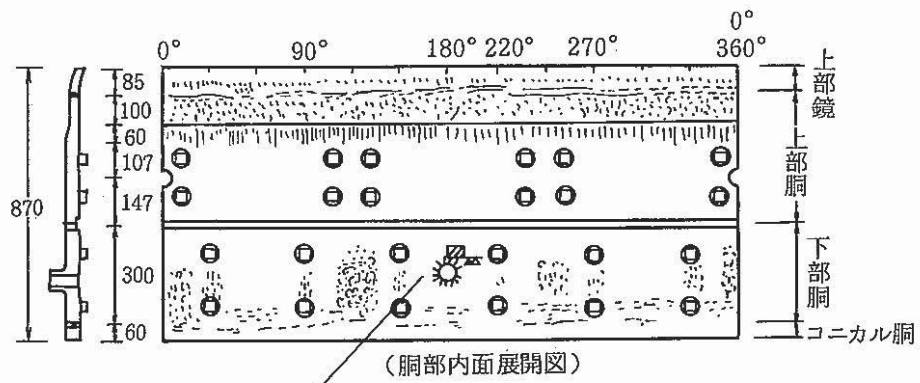


Photo. 4.37 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Weld of Upper Part of Vessel Liner Stud Bolt (30°)



(観察位置)

Photo. 4.38 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Weld Lower Part of Vessel Liner Stud Bolt (30°)



拡大

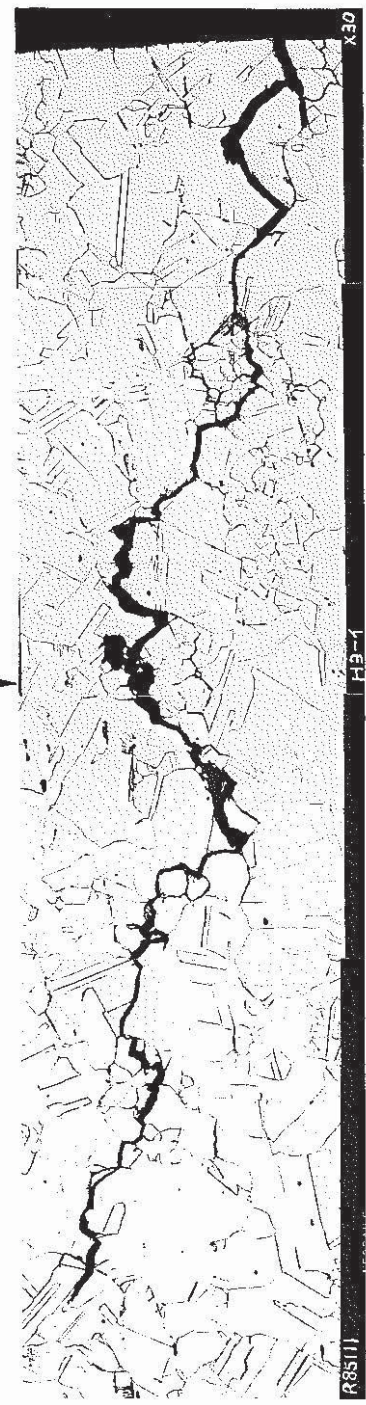
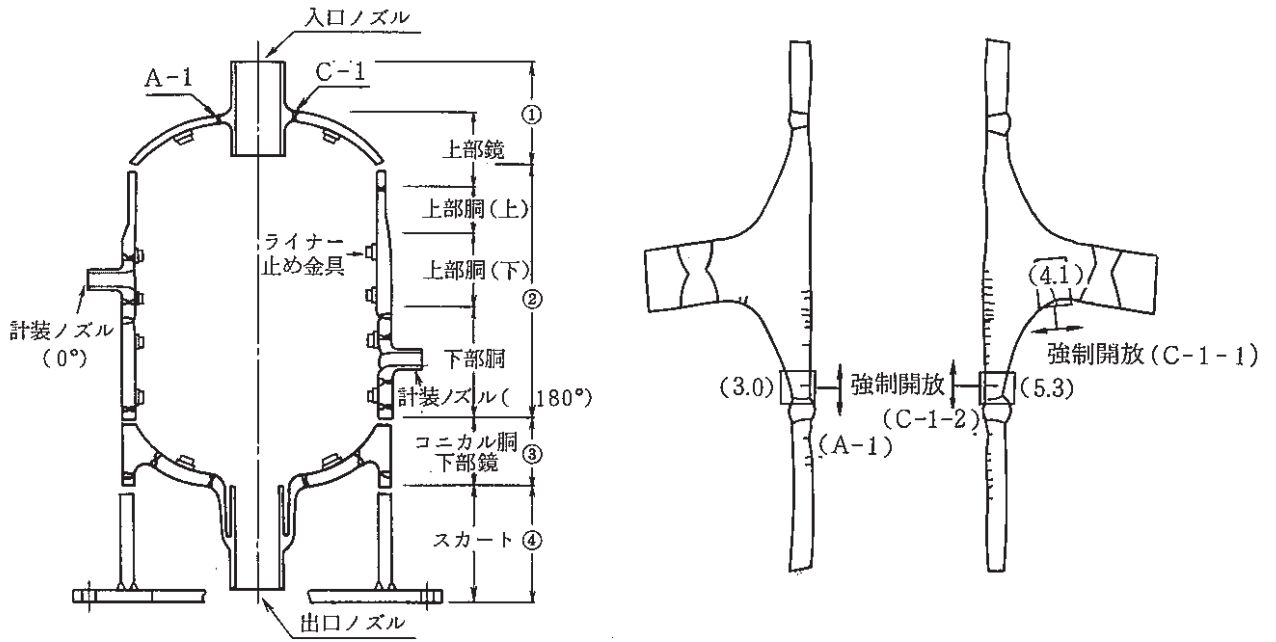


Photo. 4.39 Microscopic Profiles of Cracks Initiated at the Instrumental Nozzle (180°)



試験片採取位置図

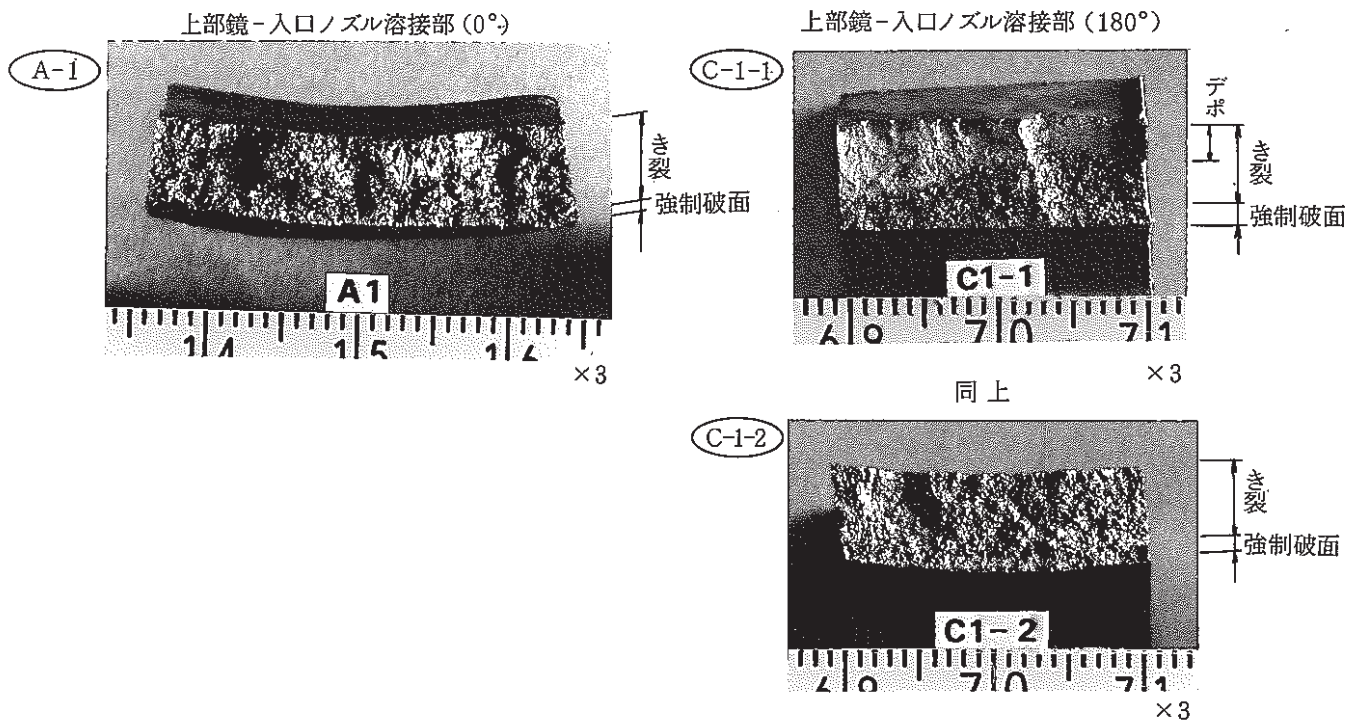


Photo. 4.40 Macroscopic Profiles of Cracks Initiated at the Inlet Nozzle (0°, 180°)

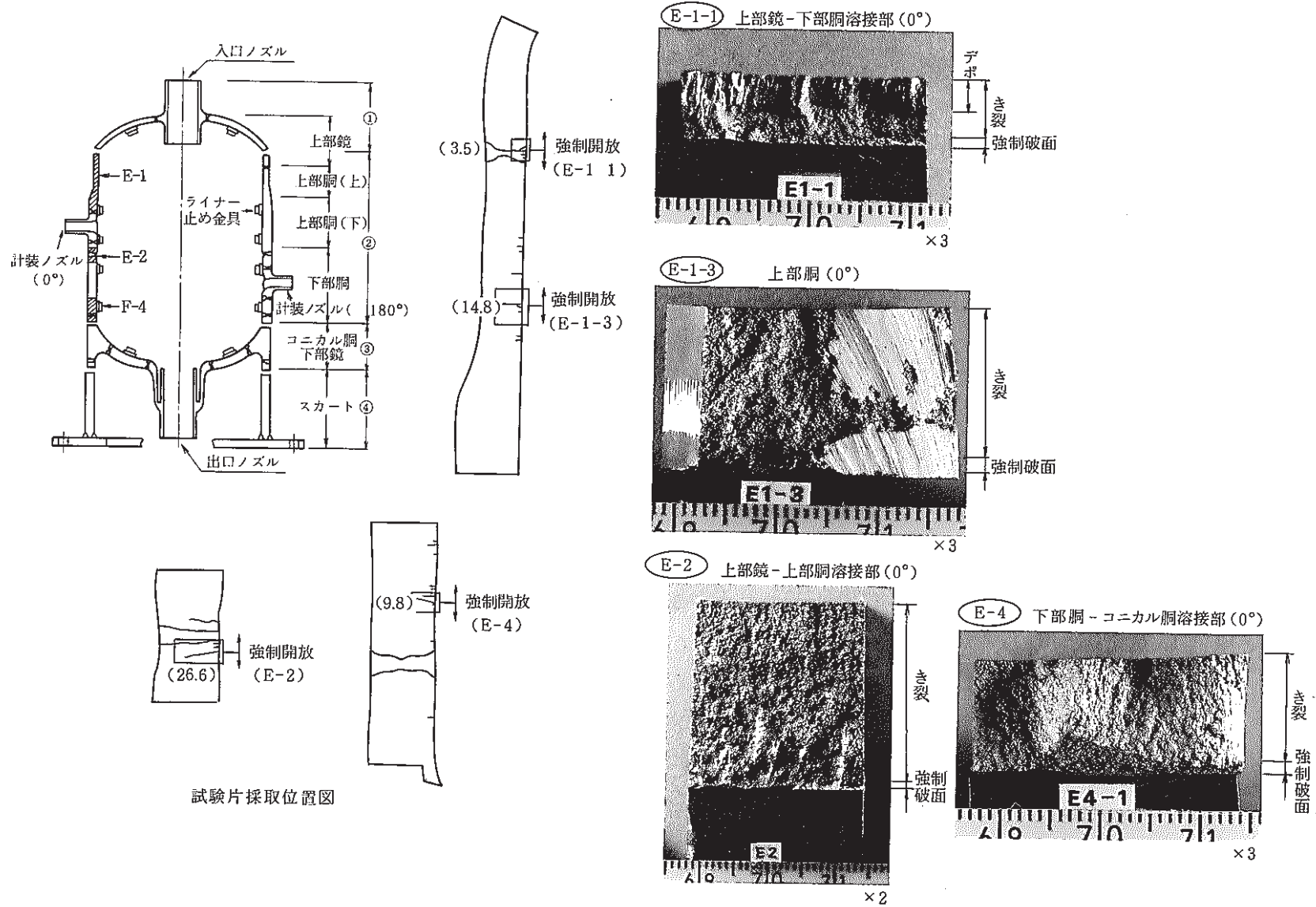
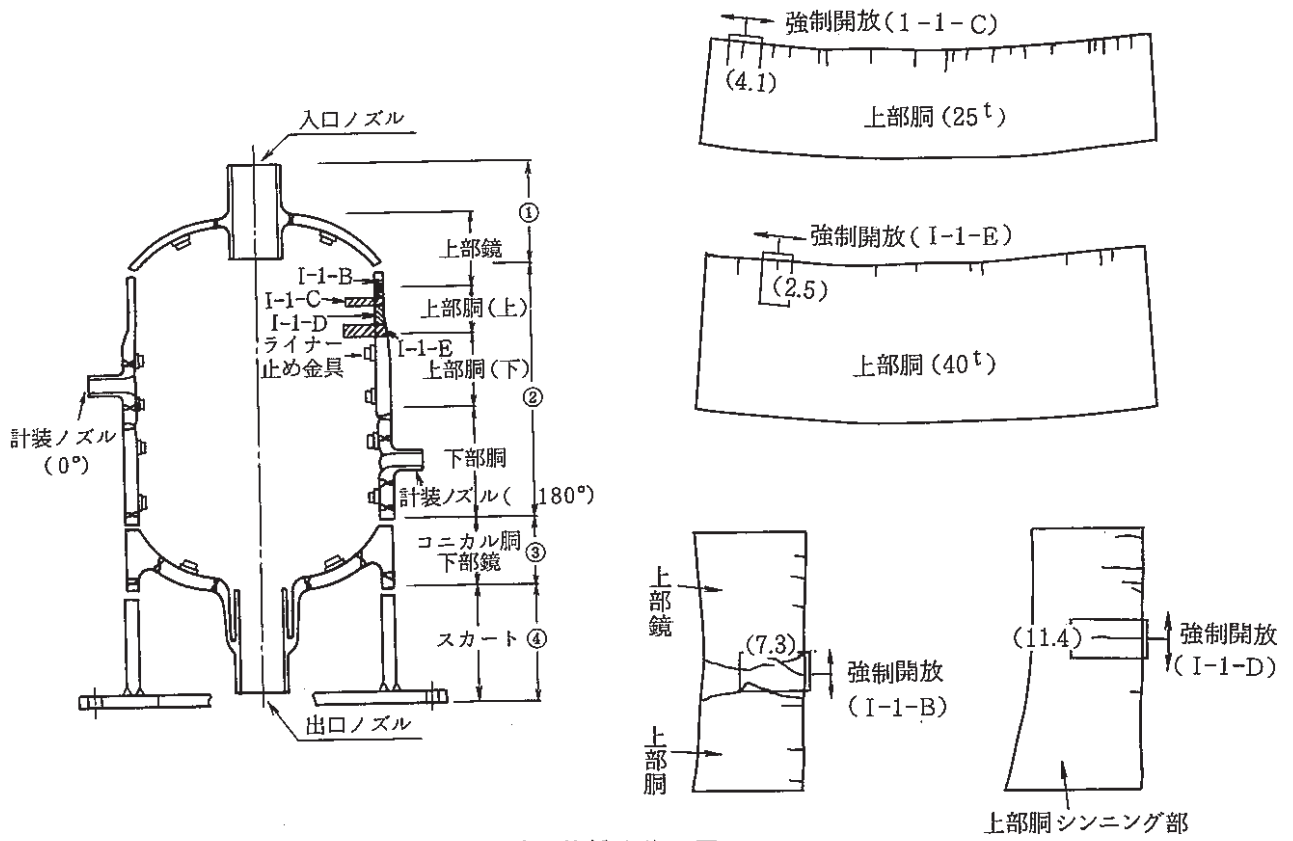


Photo. 4.41 Macroscopic Profiles of Cracks Initiated at the Upper and Lower Part of Vessel and 3-Pieces Junction



試験片採取位置図

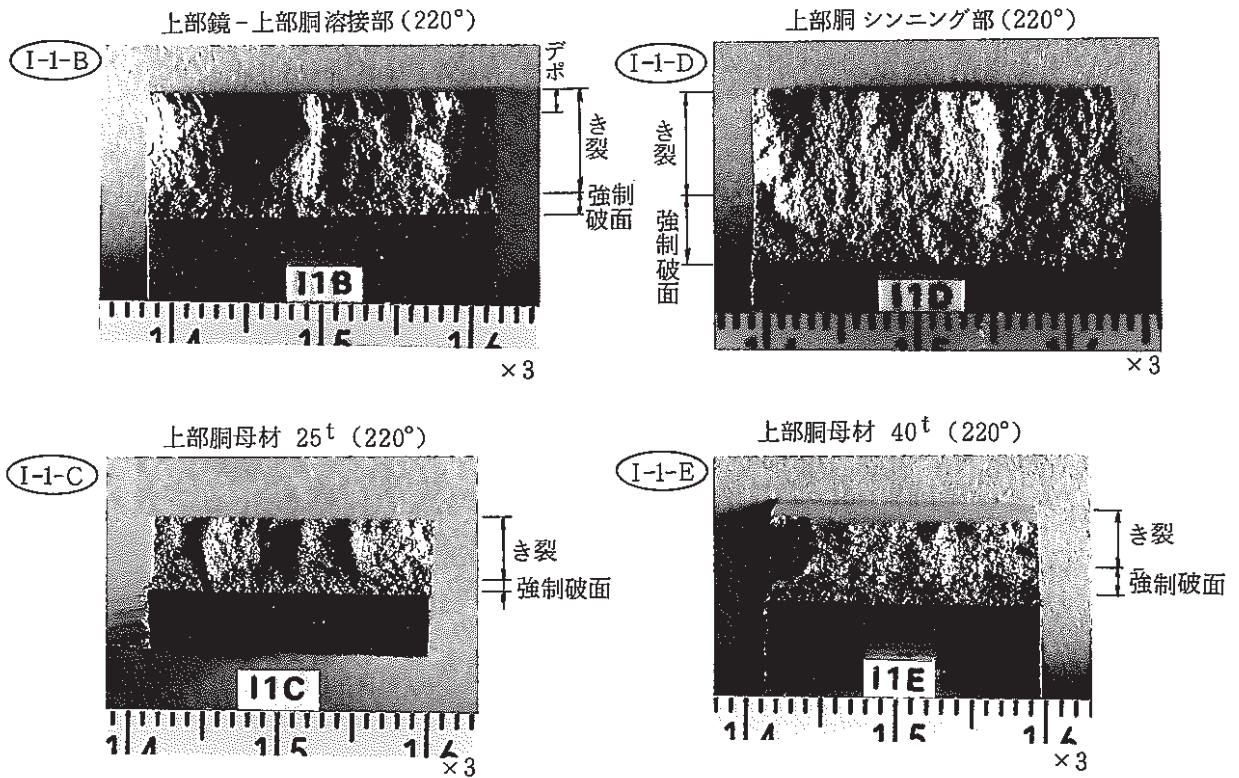
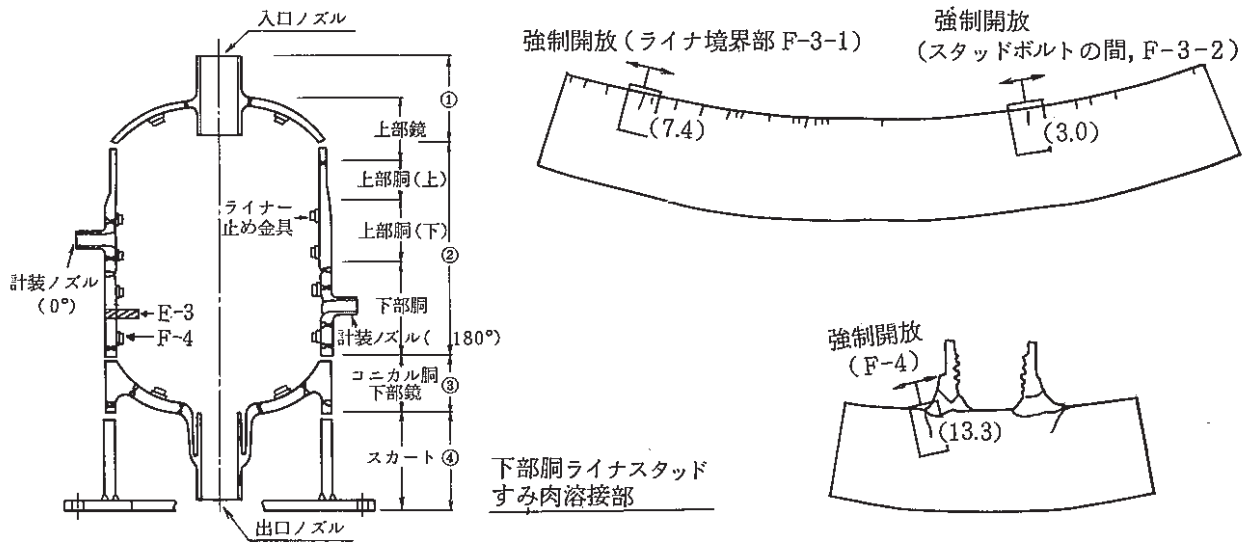
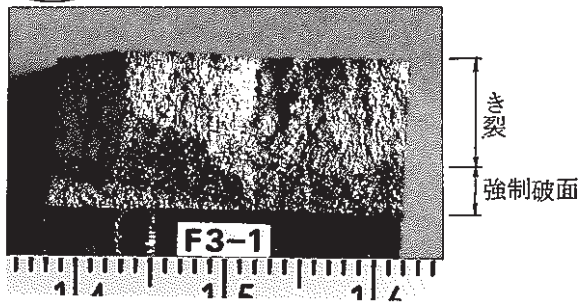


Photo. 4.42 Macroscopic Profiles of Cracks Initiated at the Upper Head Upper Part of Vessel

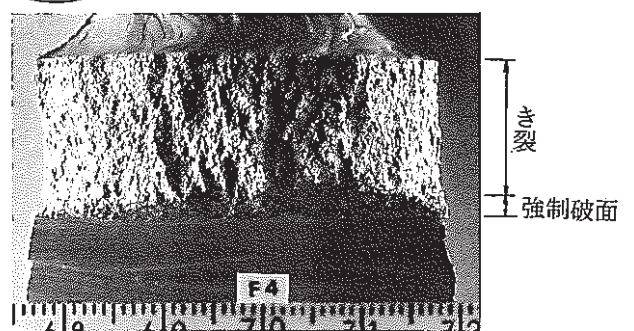


試験片採取位置図

F-3-1 下部胴母材 (6mm ライナー境界部 0°)



F-4 下部胴ライナスタッドすみ肉溶接部 (30°)



F-3-2 下部胴母材 (スタッドボルトの間 30°)

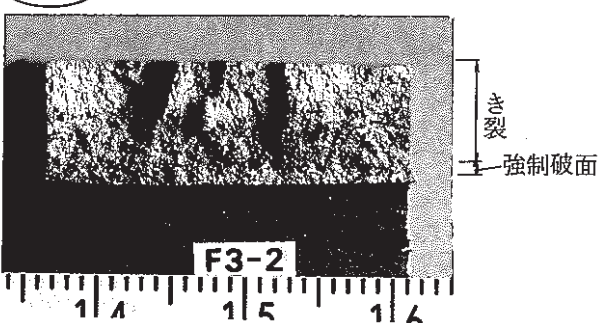
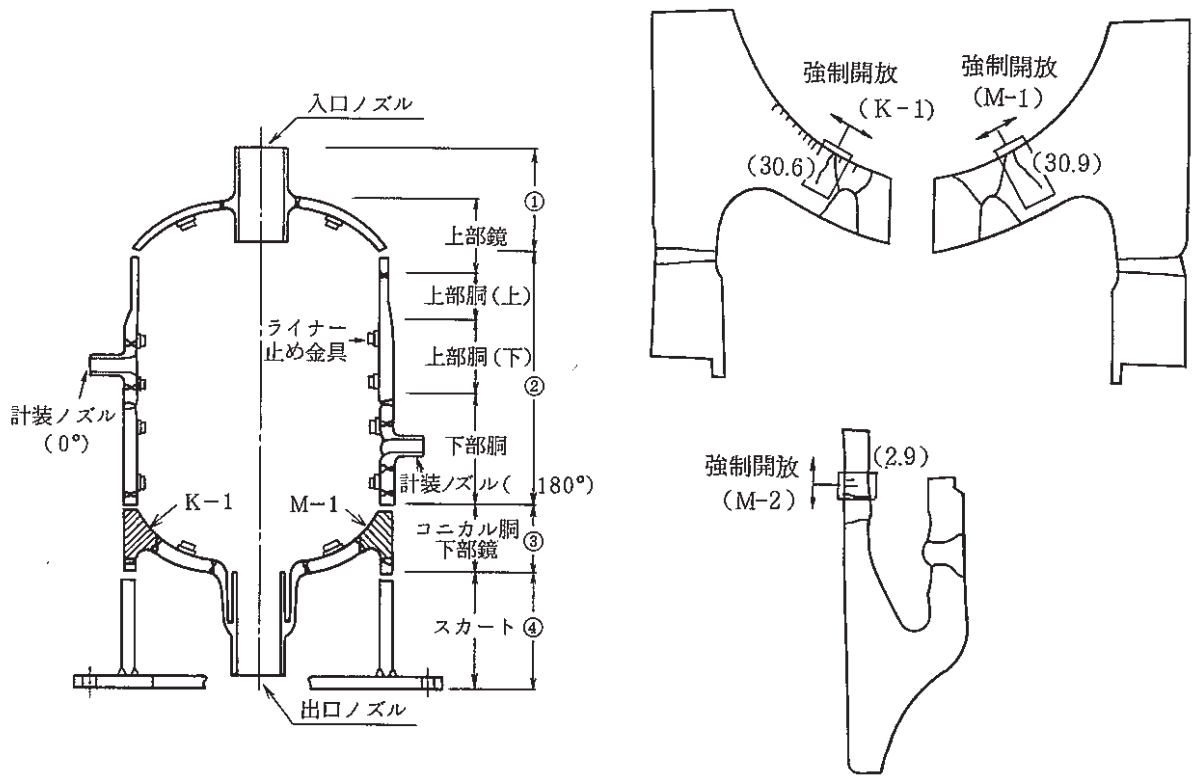


Photo. 4.43 Macroscopic Profiles of Cracks Initiated at the Lower Part of Vessel



試験片採取位置図

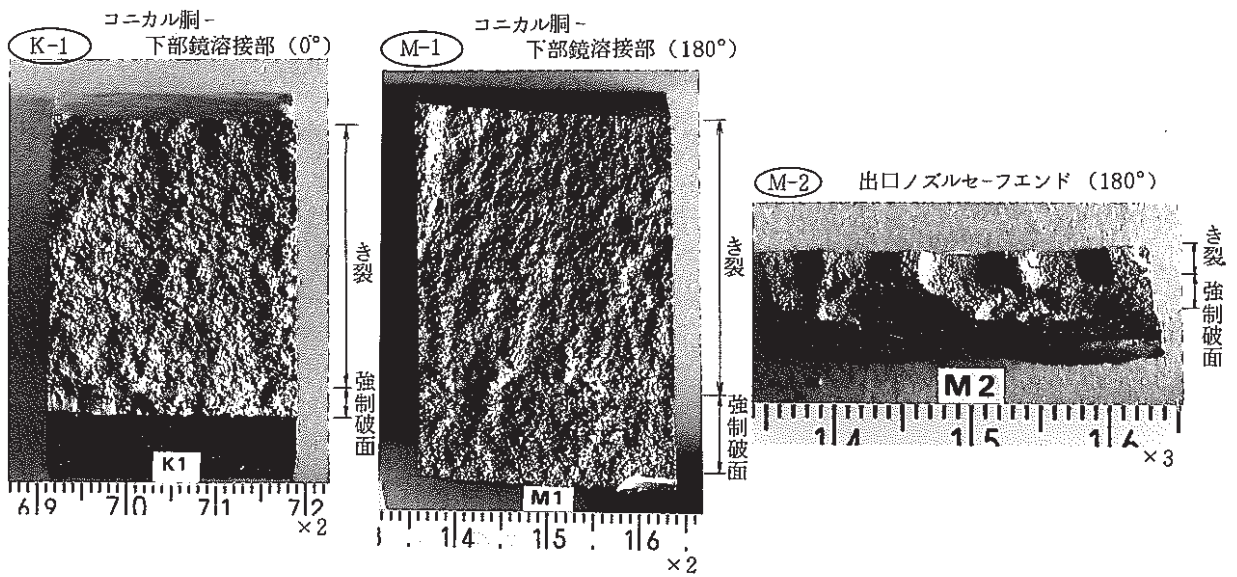
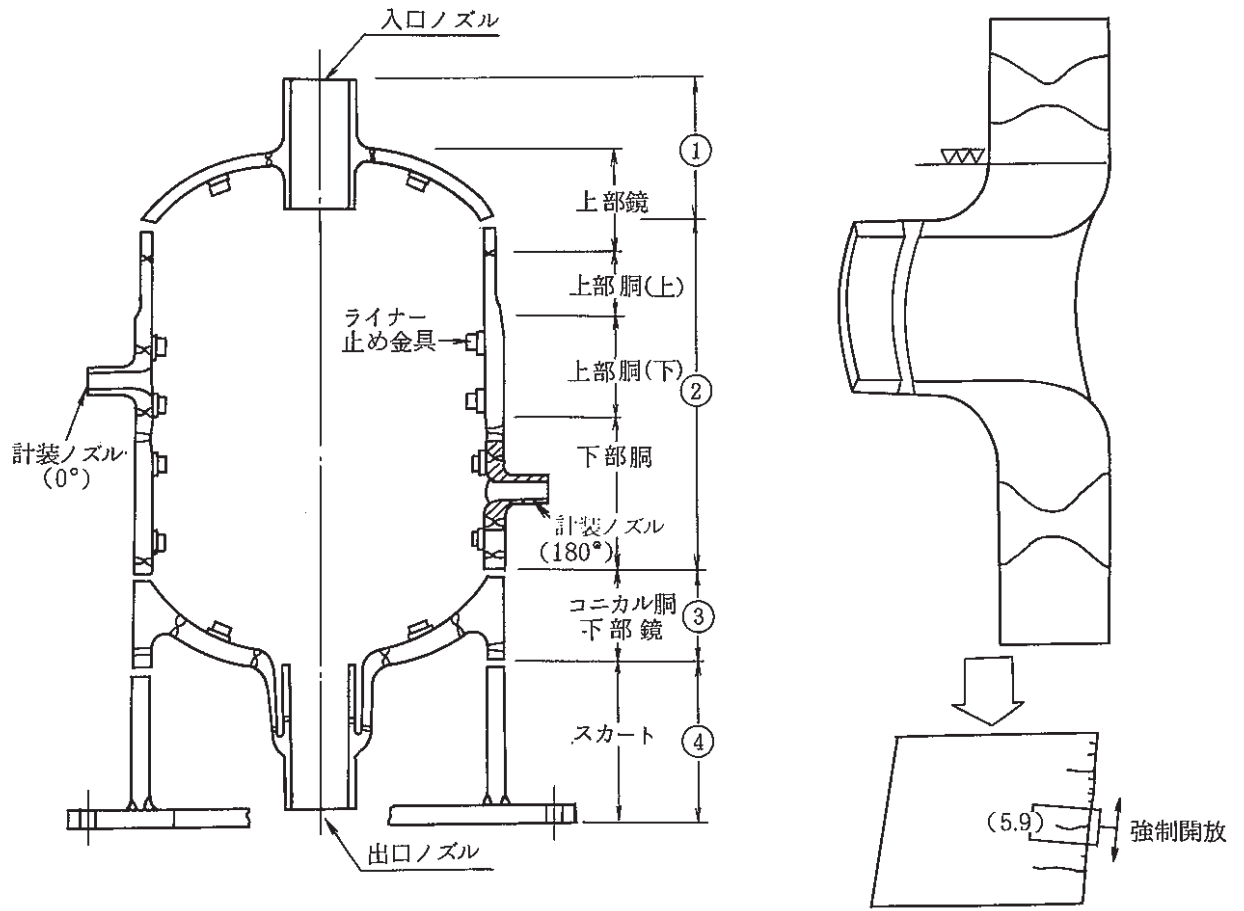


Photo. 4.44 Macroscopic Profiles of Cracks Initiated at the Lower Head



試験片採取位置図

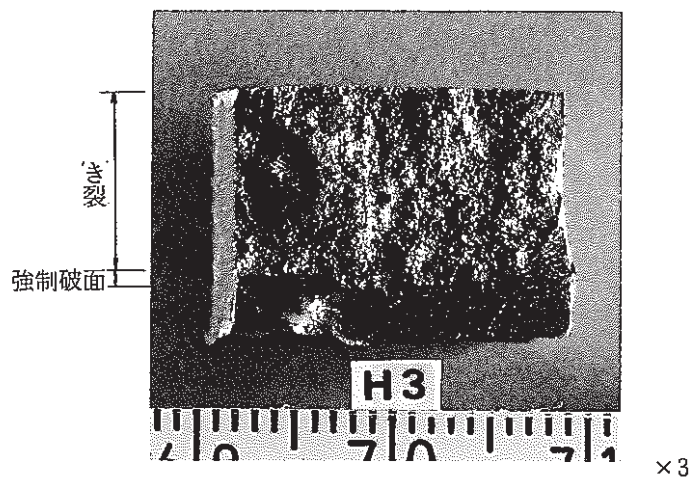
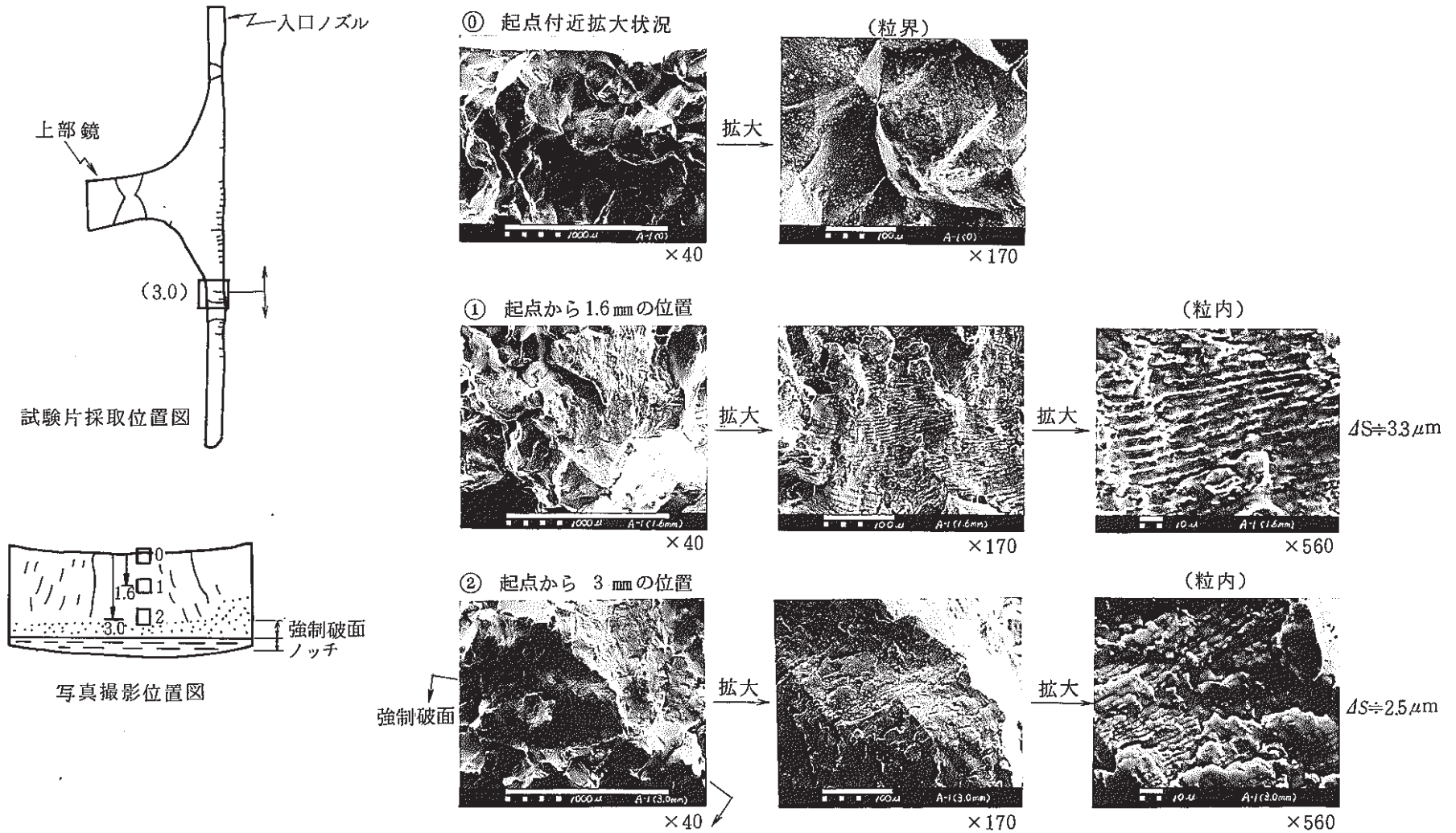
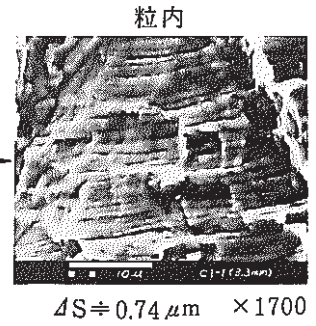
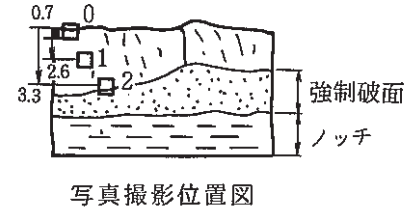
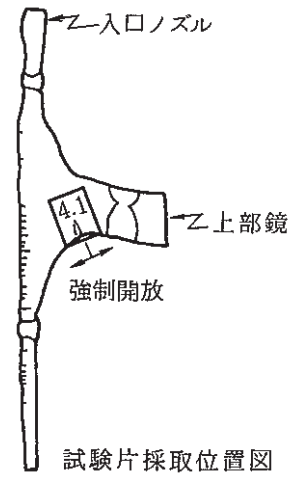
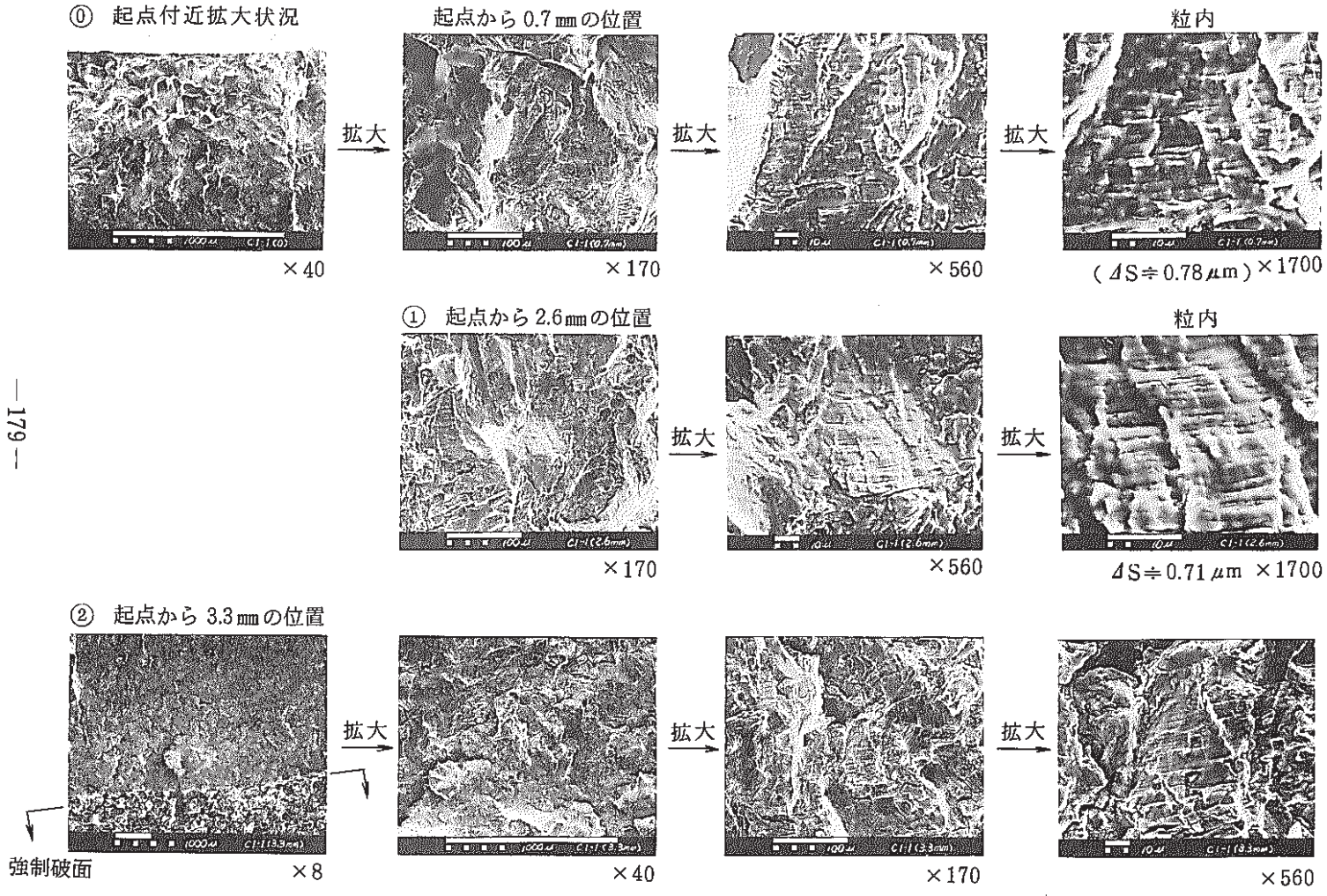


Photo. 4.45 Macroscopic Profiles of Cracks Initiated at the Instrumental Nozzle



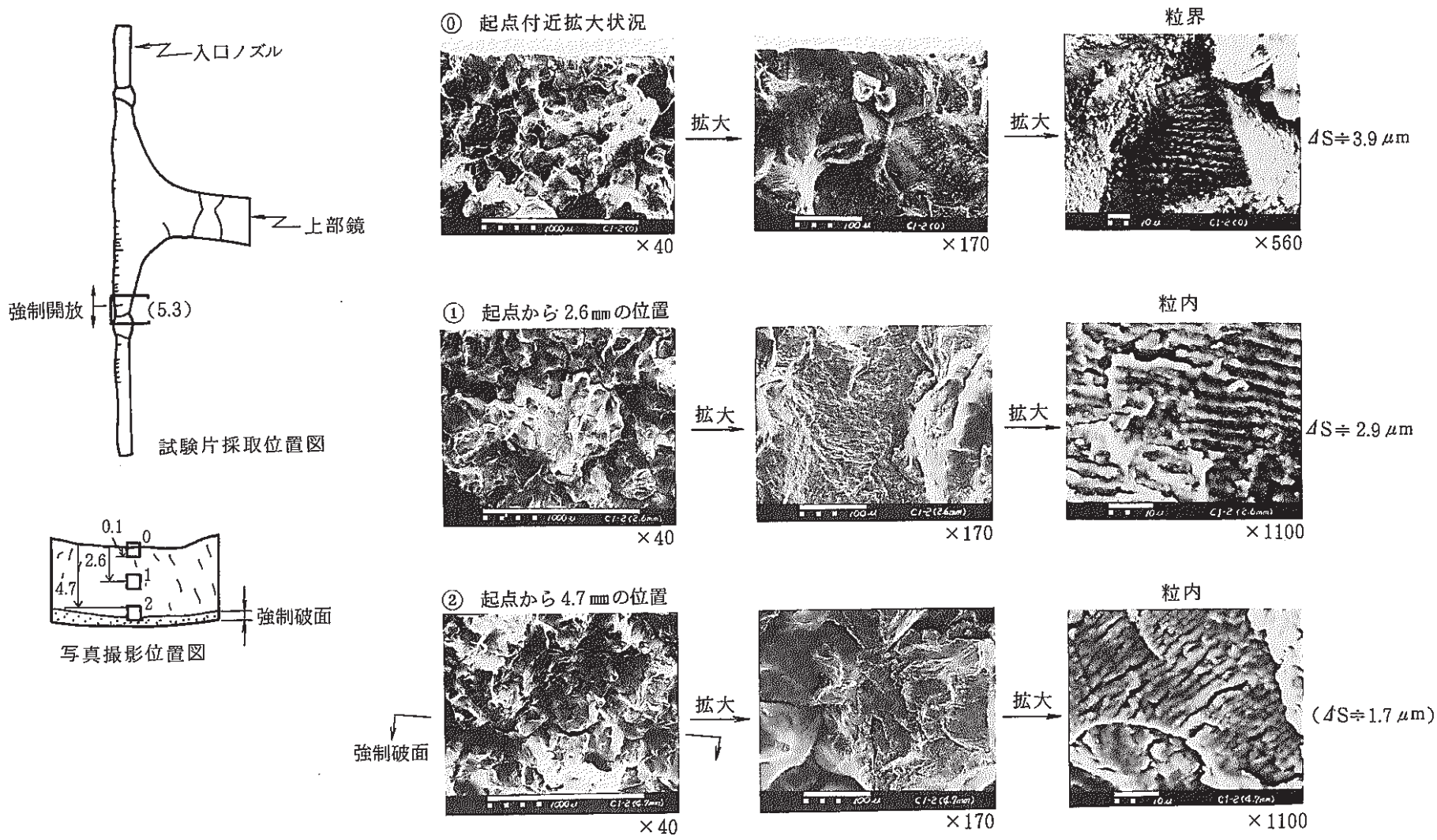
(参考：粒界破面率…約 80%)

Photo. 4.46 Striation Patterns on Crack Surfaces of Inlet Nozzle (0°)



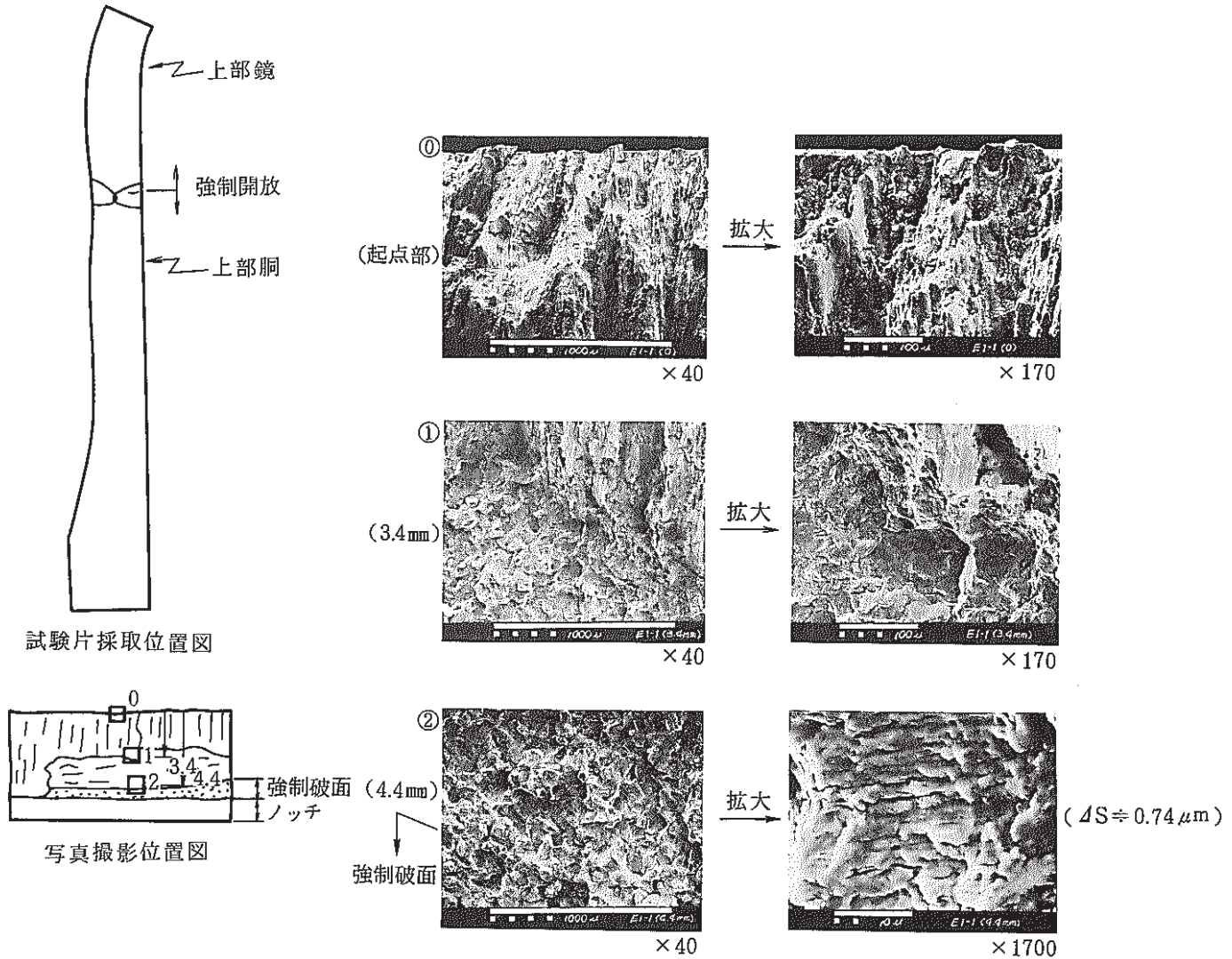
(参考：粒界破面率…約20%)

Photo. 4.47 Striation Patterns on Crack Surfaces of Inlet Nozzle (180°)



(参考：粒界破面率…約90%)

Photo. 4.48 Striation Patterns on Crack Surfaces of Inlet Nozzle (180°)



(参考：粒界破面率…約90%)

Photo. 4.49 Striation Patterns on Crack Surface of Weld of Upper Head and Upper Part of Vessel

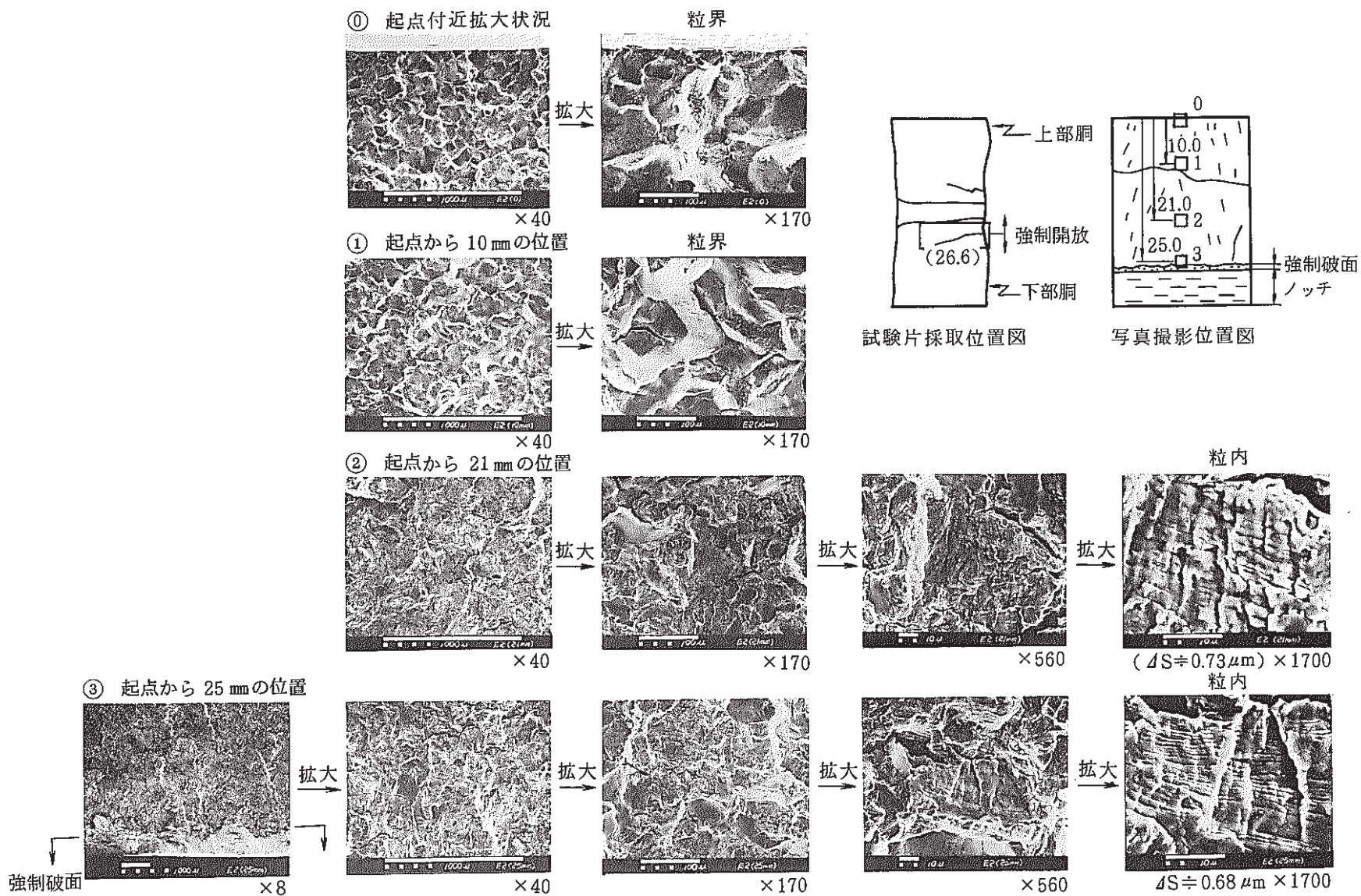
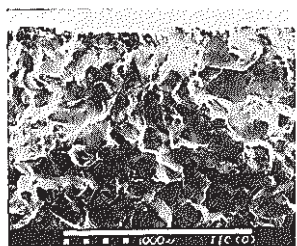


Photo. 4.50 Striation Patterns on Crack Surface of Weld of Upper and Lower Part of Vessel (0°)

(参考：粒界破面率…約90%)

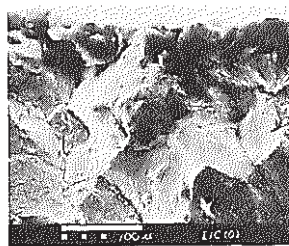
① 起点付近拡大状況



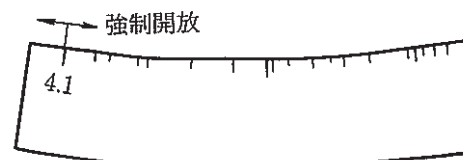
×40

拡大

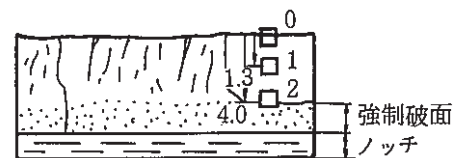
(粒界)



×170

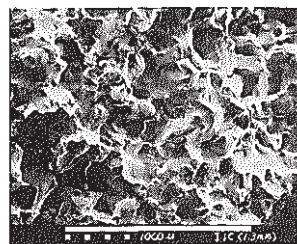


試験片採取位置図



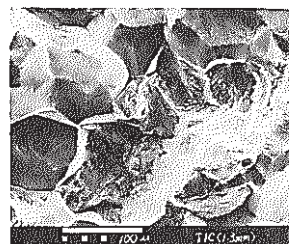
写真撮影位置図

① 起点から 1.3mm の位置



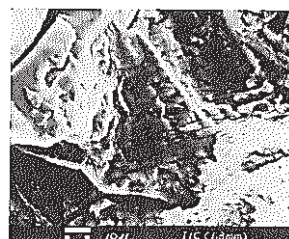
×40

拡大



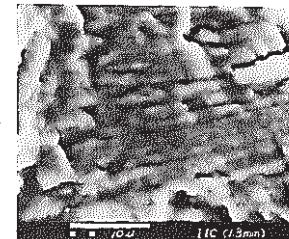
×170

拡大



×560

拡大



×1700

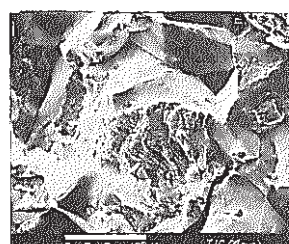
(粒内)

② 起点から 4mm の位置



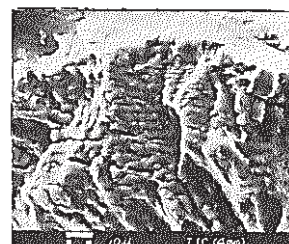
×40

拡大



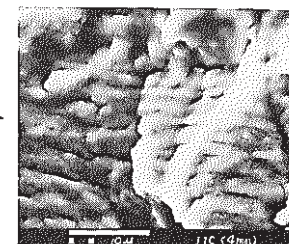
×170

拡大



×560

拡大



×1700

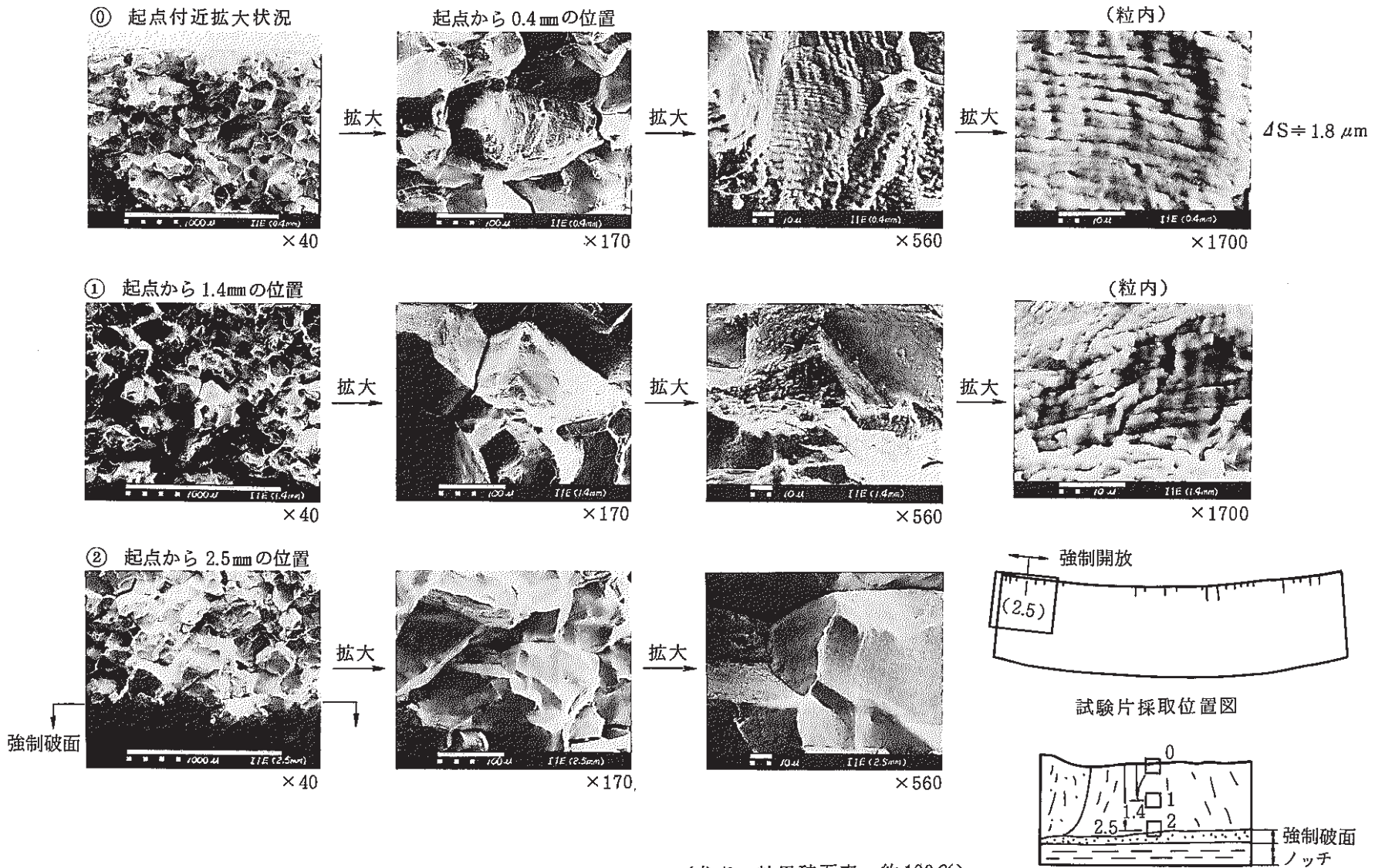
(粒内)

($\Delta S \approx 1.8 \mu m$)

強制破面

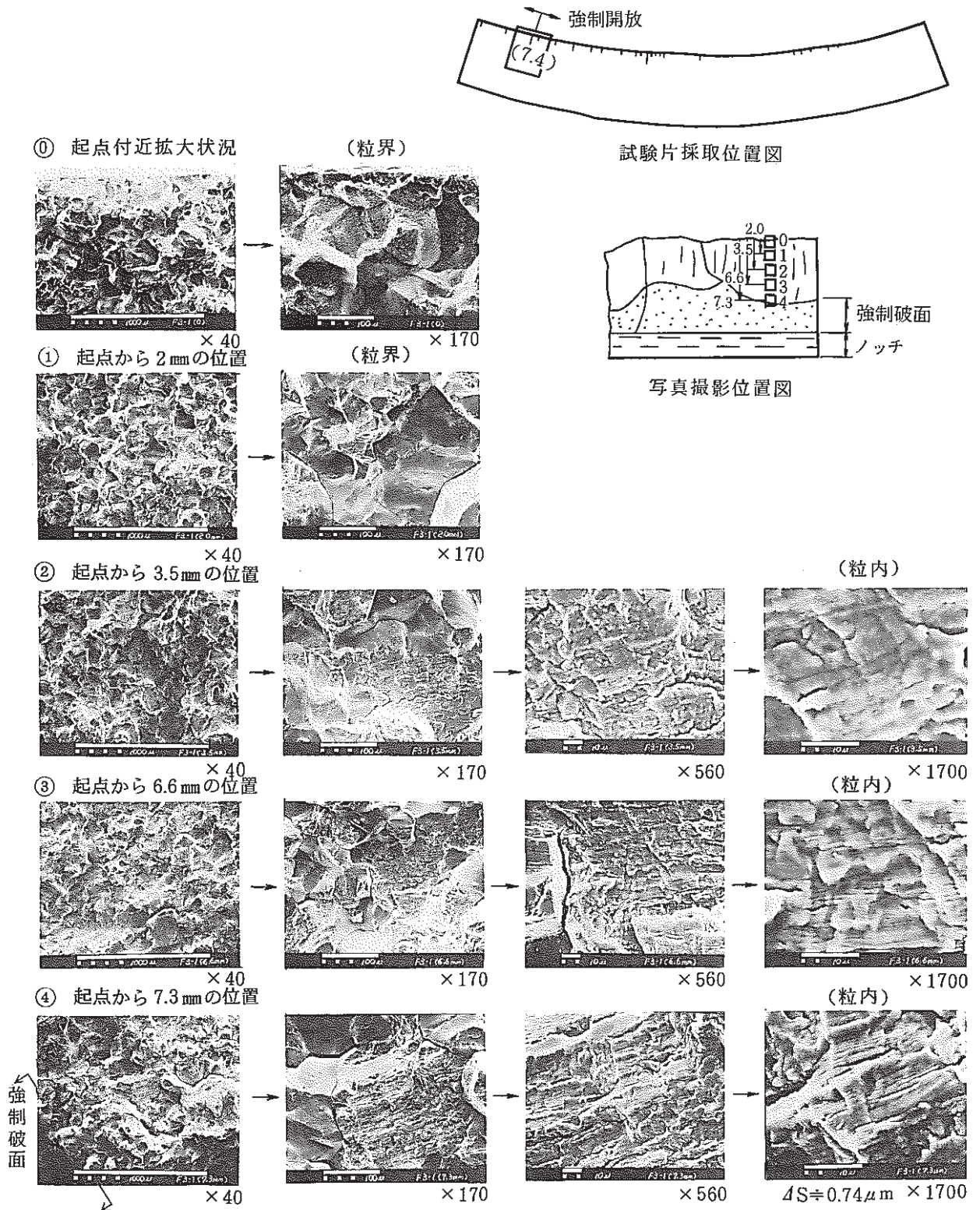
Photo. 4.52 Striation Patterns on Crack Surface of Upper Part of Vessel (220°)

(参考：粒界破面率…約100%)



(参考：粒界破面率…約100%)

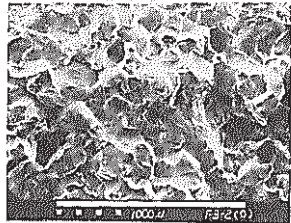
Photo. 4.53 Striation Patterns on Crack Surface of Upper Part of Vessel (220°)



(参考：粒界破面率…約90%)

Photo. 4.54 Striation Patterns on Crack Surface of Lower Part of Vessel (0°)

① 起点付近拡大状況



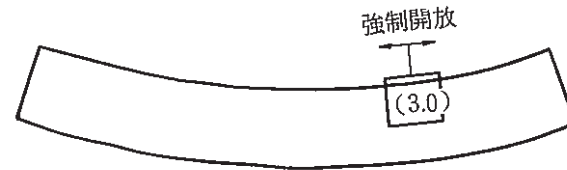
×40

(粒界)

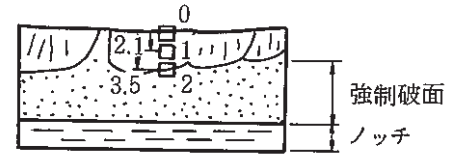


×170

拡大

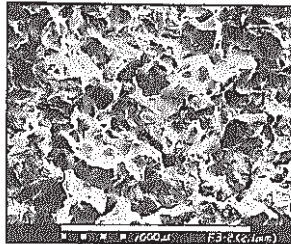


試験片採取位置図



写真撮影位置図

② 起点から 2.1mm の位置



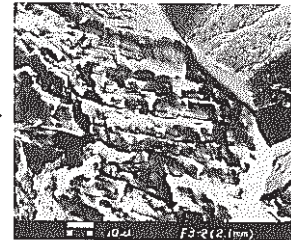
×40



×170

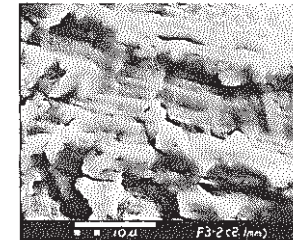
拡大

拡大



×560

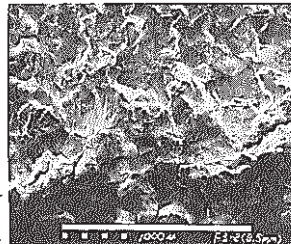
拡大



×1700

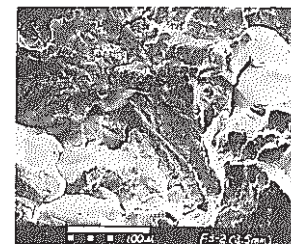
(粒内)

③ 起点から 3.5mm の位置



×40

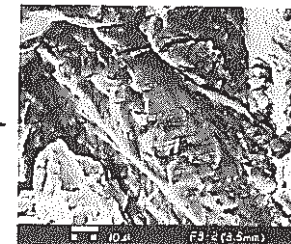
強制破面



×170

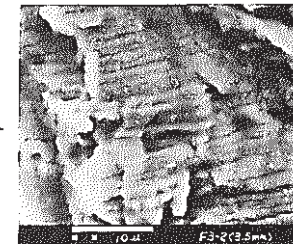
拡大

拡大



×560

拡大



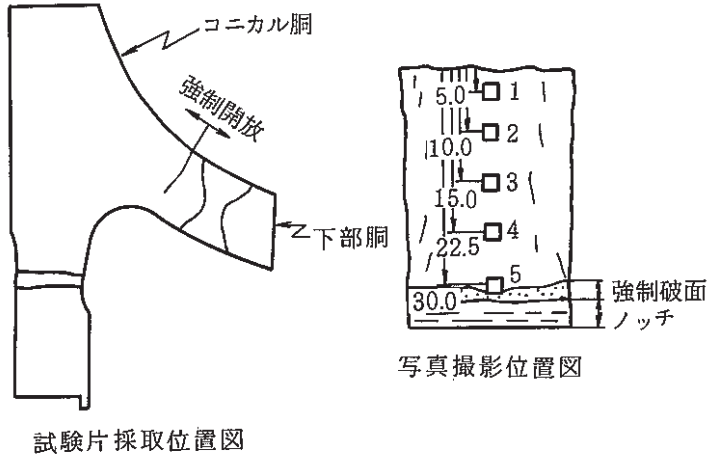
×1700

(粒内)

($\Delta S \approx 0.98 \mu m$)

Photo. 4.55 Striation Patterns on Crack Surface of Lower Part of Vessel

(参考：粒界破面率…約95%)



試験片採取位置図

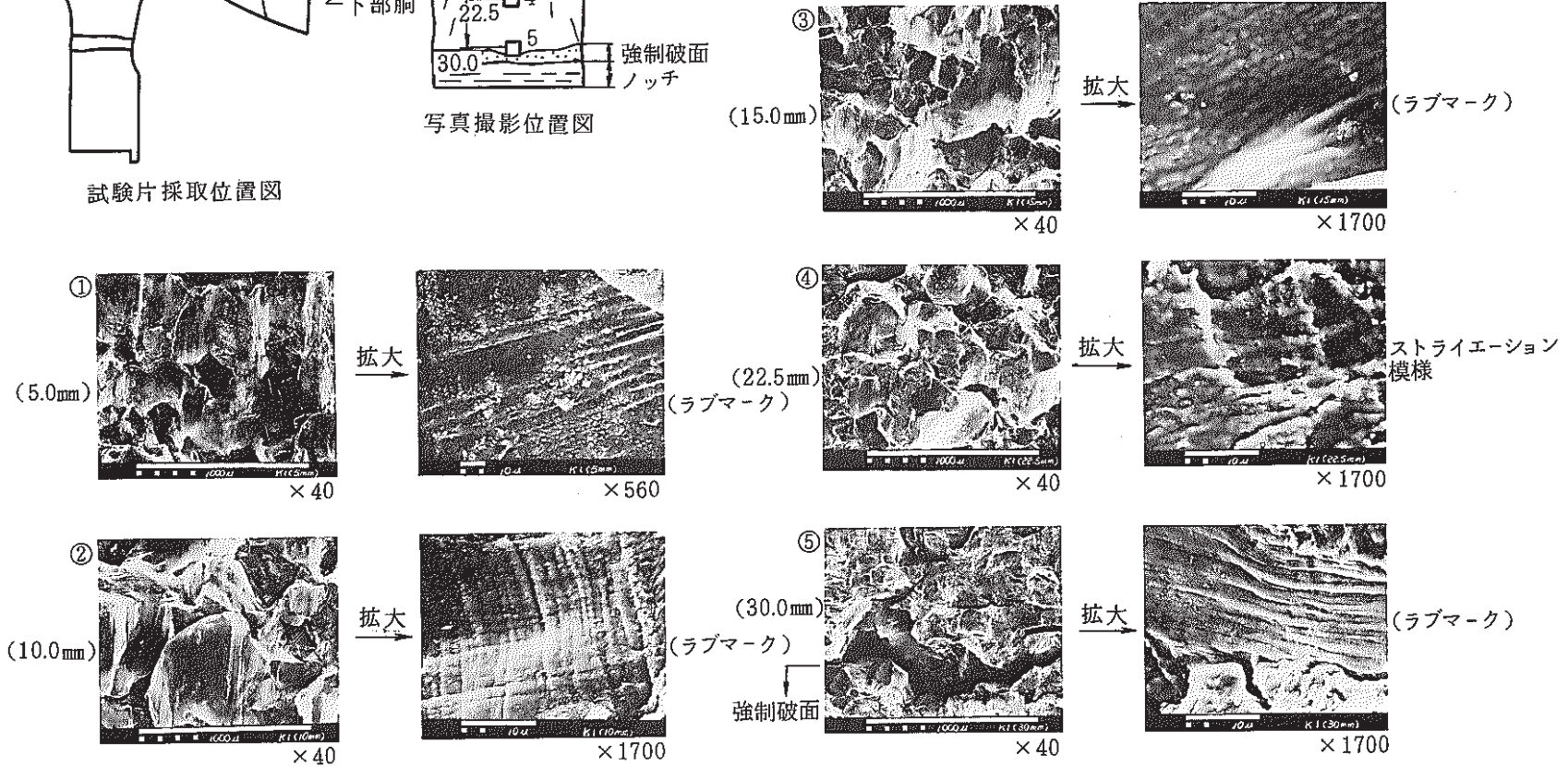


Photo. 4.56 Striation Patterns on Crack Surface of Weld of 3-Pieces Junction and Lower Head (0°)

(粒界破面率…約95%)

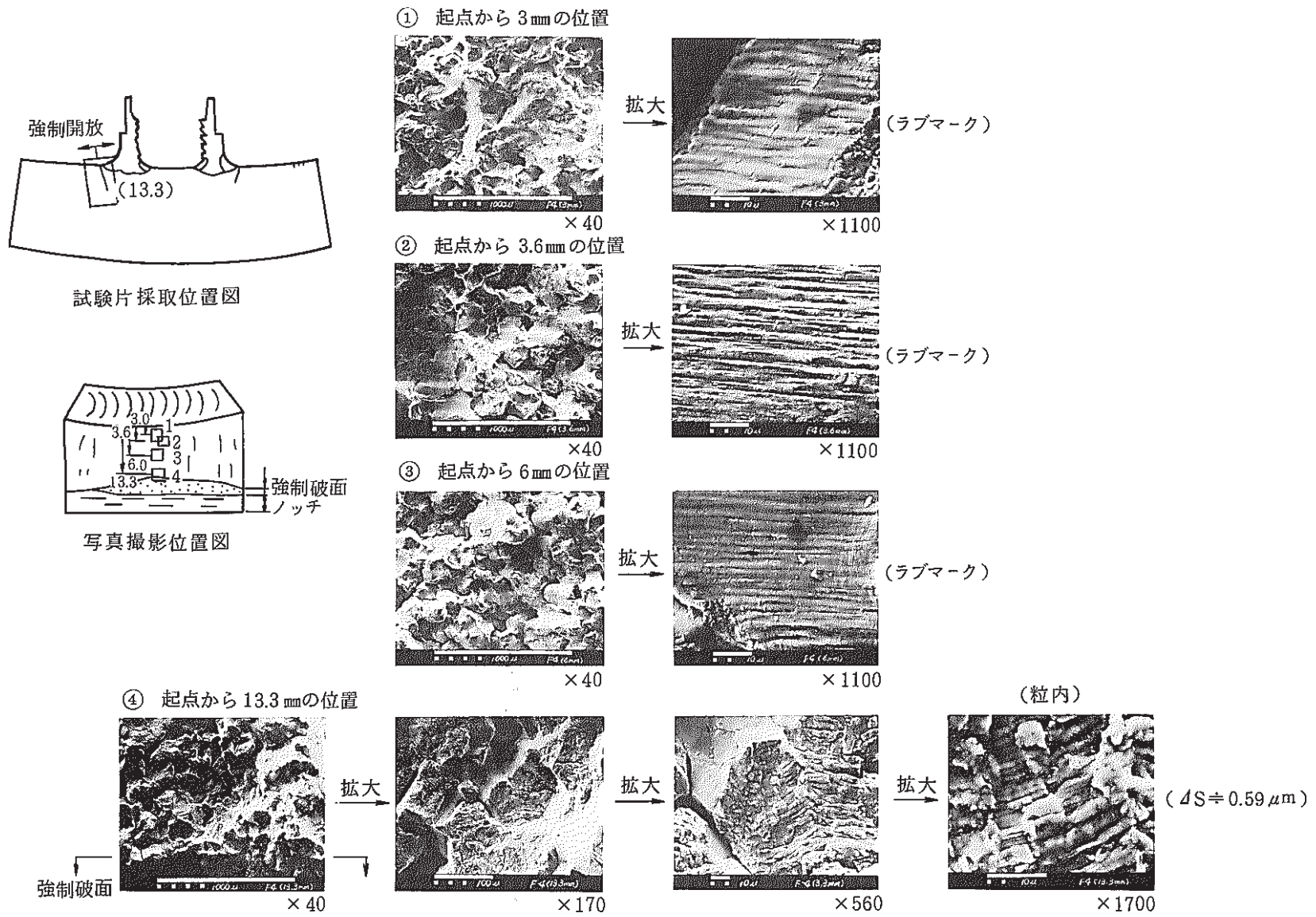
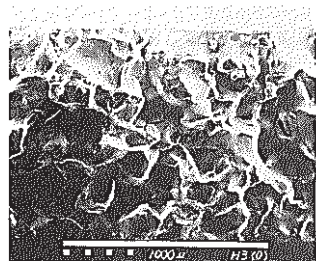


Photo. 4.57 Striation Patterns on Crack Surface of Stud Bolt

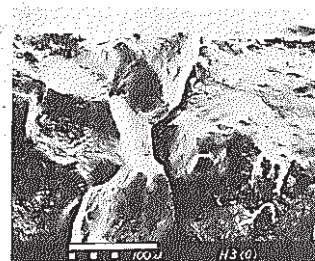
① 起点付近拡大状況



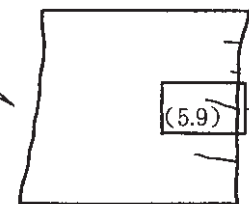
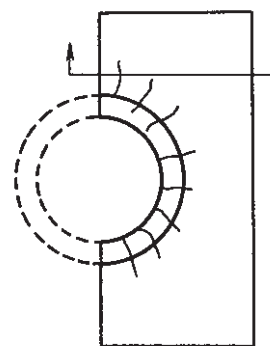
×40

拡大

(粒界)



×170



強制開放

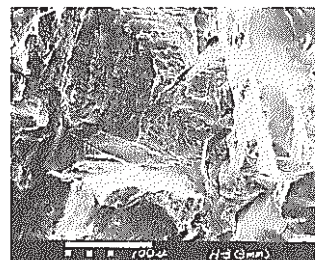
試験片採取位置図

① 起点から 3mm の位置



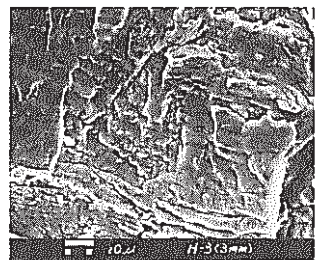
×40

拡大



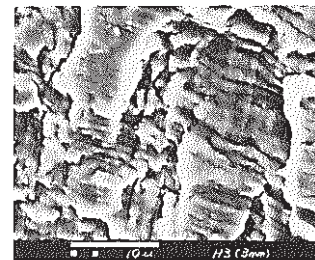
×170

拡大



×560

拡大

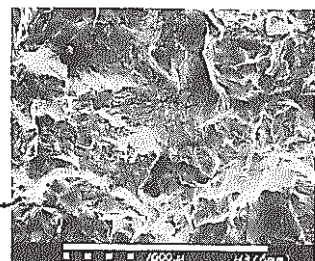


×1700

(粒内)

($\Delta S \approx 0.88 \mu\text{m}$)

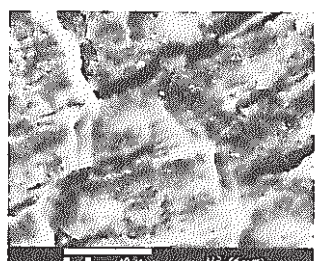
② 起点から 6mm の位置



×40

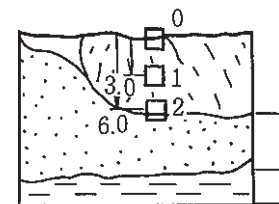
強制破面

拡大



×1700

(粒内)



強制破面

ノッチ

写真撮影位置図

Photo. 4.58 Striation Patterns on Crack Surface of Instrumental Nozzle (180°)

Table 4.1 Striation Spacing

部 材 名	試片マーク	き裂深さ a (mm)	ストライエーション(1) 間隔 ΔS (μm)	備 考 (2)
* 入口ノズル (0°)	A-1	1.6 3.0	3.3 2.7	Photo. 4.46
* 入口ノズル (180°)	C1-2	0.1 2.6 4.7	3.9 2.9 (1.7)	← 粒界 ストライエーション Photo. 4.48
入口ノズル (180°)	C1-1	0.5 2.6 3.2	(0.78) 0.71 0.74	粒界破面率 (20%) Photo. 4.47
** 上部鏡・上部胴溶接部 (0°)	E1-1	4.4	(0.74)	Depo → HAZ Photo. 4.49
** " (220°)	I-1-B	4.1	(0.98)	Depo → HAZ Photo. 4.51
上部胴・下部胴溶接部 (0°)	E-2	21 25	(0.73) 0.68	Photo. 4.50
上部胴 (25 t) (220°)	I-1-C	4	(1.8)	Photo. 4.52
" (40 t) (220°)	I-1-E	0.4	1.8	Photo. 4.53
下部胴 (0°)	F3-1	6.6 7.3	0.78 0.74	Photo. 4.54
下部胴 (30°)	F3-2	3.5	(0.98)	Photo. 4.55
下部胴ライナスタッドボルト 溶接部 (30°)	F-4	13.3	(0.59)	Photo. 4.57
計装ノズル (180°)	H-3	3.0	(0.88)	Photo. 4.58

注) *, ** は周方向のき裂位置が対応している。

(1)の () は不明瞭な値を示す。

(2)他の粒界破面率はいずれも 80%以上を示す。

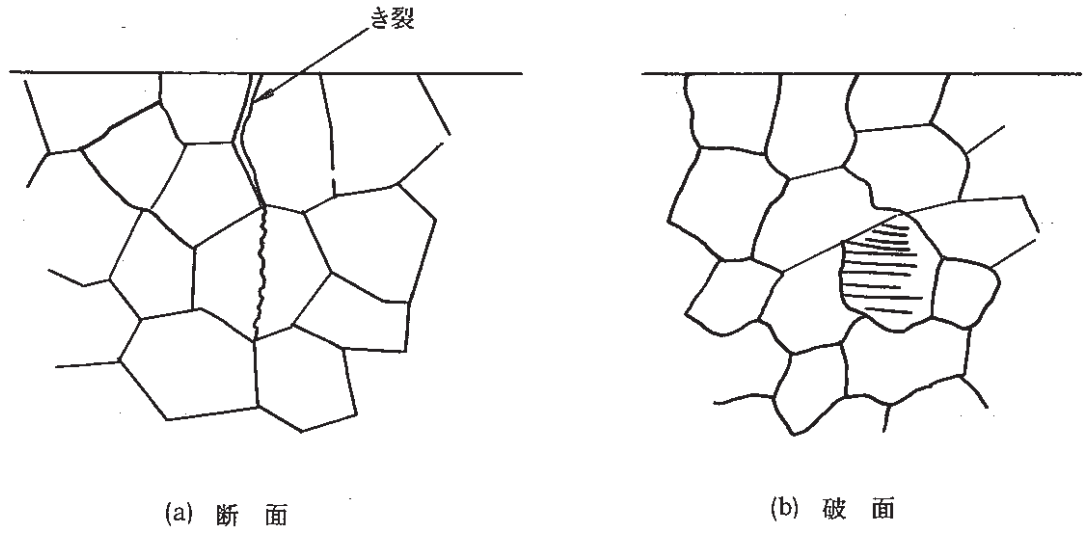


Fig. 4.6 Crack Propagation in the Granular Media

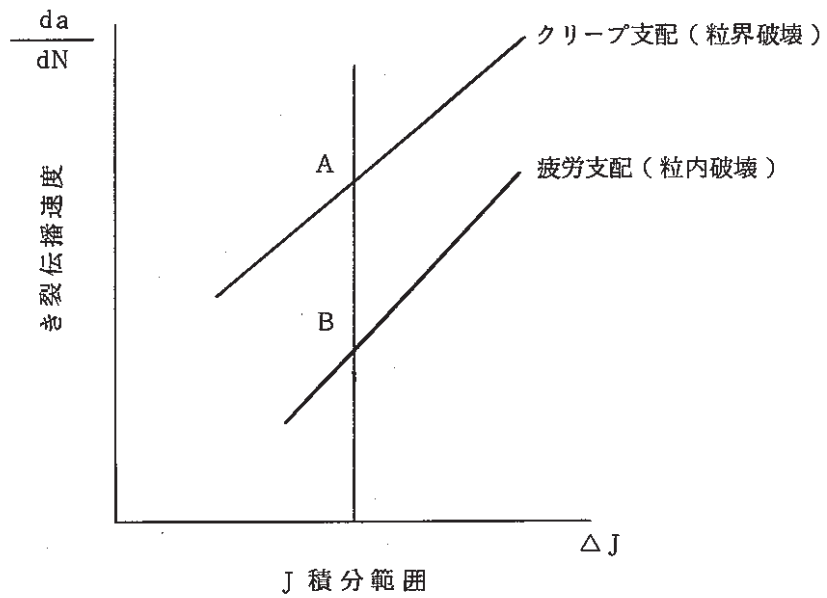


Fig. 4.7 Image of Crack Propagation Pattern

5. 結 論

原子炉容器モデルの繰返し熱過渡強度試験を実施した結果、次の結論を得た。

- (1) 供試体に与えた繰返し熱過渡の程度は、設計時に予測したものよりも全体的に幾分なだらかではあったが、供試体各部の温度変化の順序を含めて良く予測できていた。
- (2) 設計時に想定した熱過渡を1,002サイクル供試体を与えることによって、予定通り供試体の試験対象部位にき裂を生じさせることができた。
- (3) き亀は殆どが典型的な粒界割れを示すロックキャンディパターンであった。粒内割れの一部に幅1 μm 程度のスライエーションが観察されたが、これは主要な破損様式ではなかった。
- (4) 今後の流動・伝熱・応力解析で参照できるよう、供試体の温度データ等を整理して示した。

6. 謝 辞

本試験は大洗工学センターナトリウム機器構造第1試験建屋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。当該建屋の管理担当である高速炉機器開発室各位には試験の準備や後処理中を含めて種々の便宜をはかって頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) 渡士, 他: 原子炉容器モデル熱過渡強度試験
第2報 供試体の設計・製作, 1986, PNC-SN-9410 86-009
- (2) 同 上
第1報 クリープ疲労強度評価法, 1985, PNC-SN-(手続き中)
- (3) 中西, 他: 構造物強度確性試験施設の概要, PNC-SN941 84-170
- (4) 平 : 材料の高温強度論, オーム社(1980)220P