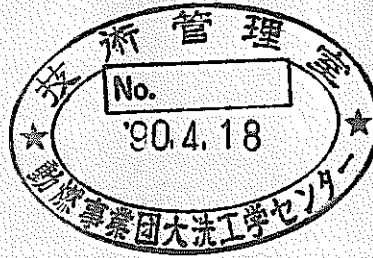


2重伝熱管における片側壁破損 水リーク時の健全性確認試験



1989年8月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
T	N9410 89-146
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

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

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

2重伝熱管における片側壁破損 水リーク時の健全性確認試験

浜田広次*, 宇佐美正行*,
田辺裕美*, 姫野嘉昭*

要旨

(目的)

2重伝熱管に内管リークが発生した場合の、蒸気による外管損耗の可能性を評価することを主な目的にして、試験を実施した。

(試験)

加工上の制限から予め外管に人工の欠陥孔を設けた2重管の供試体を制作し、それに実機設計例相当の高温・高圧蒸気を注入する蒸気試験と、比較用データ取得のため窒素ガスを高温で通気するガス試験を行った。注入・通気時間はプラントでのリーク検出時間の当面の目標値である数時間よりも長く、保守的な結果となるように24時間とした。各試験の前後には、Heガスを用いた欠陥孔を含む流路の流動抵抗の測定から欠陥孔の等価断面積(直径)の変化量を調べた。試験後は、伝熱管壁の蒸気損耗の有無を明らかにするため、供試体の金相検査を実施した。

(結果)

試験後は欠陥孔の等価直径が小さくなり、閉塞に至るケースも一部見られ、蒸気損耗に起因する欠陥孔の拡大は生じていない。金相検査からは、欠陥孔近傍表面に付着物やその状況・状態の軽微な変化が一部の供試体の内外管界面部に見られたが、蒸気の衝突による有為な形状変化や組織・材質的な変化は認められない。

(結論)

実機設計例条件下での24時間の蒸気噴出では伝熱管壁に損耗が生じないことより、2重管に内管リークが発生してから24時間以内に噴出蒸気による損耗で外管が貫通破損する可能性は無い。

*) 大洗工学センター 安全工学部 プラント安全工学室

Integrity Confirmation Test for Duplex-Wall Heat
Transfer Tubes in case of its Inner-Wall Leak

H. Hamada*, M. Usami*, H. Tanabe*, Y. Himeno*

ABSTRACT

Steam wastage tests of the duplex-wall heat transfer tubes for the steam generators were conducted by placing its emphasis on the investigation of the possible occurrence of a subsequent failure on an outer-wall of the tube in case of its inner-wall leak.

Based on the limitation from the test rig, the test tubes, each of which has an artificial crack on its outer-wall instead of on its inner-wall, were manufactured and were subjected to the test. In the test, a super-heated and pressurized steam as conceptual plant design or a nitrogen gas was fed to the tube and was impinged against the inner-wall through its crack for 24 hours which are conservative enough to evaluate test results. The test with a nitrogen gas was to obtain reference data. Before and after the test, equivalent hydraulic diameter of the crack was determined by measuring a pressure drop due to a flowing helium assuming that the crack can be regarded as an orifice. Then, changes in the equivalent diameter of the crack were determined. After the test, the tubes were subjected to the post-test metallurgical examination.

Results thus obtained are as follows:

- (1) In all tubes, equivalent diameter of the cracks decreased after the test. Some cracks were even plugged by steam corrosion products. No enlargements of the crack, therefore, was found.
- (2) Post-test metallurgical examination showed no evidence of a steam wastage. Only steam corrosion products were found in the gap between the inner and outer walls.

In conclusion, within the extent of the present test, failure possibility of the duplex-wall tube following a generation of an initial crack on an inner-wall is negligible.

* FBR Plant Safety Engineering Section, Safety Engineering Division, O-arai Engineering Center, PNC

目次

	Page
1 緒論	1
2 試験	2
2.1 目的	2
2.2 試験条件	2
2.3 試験装置及び試験方法	3
2.3.1 試験体	3
2.3.2 試験装置及び試験方法	5
(1) ガス試験	5
(2) 蒸気試験	6
(3) 水質検査	6
2.3.3 試験後検査	7
2.4 試験結果	9
2.4.1 ガス試験	9
2.4.2 蒸気試験	9
2.4.3 水質検査	10
2.4.4 欠陥孔径の変化	10
2.4.5 試験後検査	11
2.5 まとめ	15
3 検討	16
4 結論	20
参考文献	21
APPENDIX-A 内外管破損モードの検討（要約抜粋）	22
APPENDIX-B 欠陥孔径の決定根拠	25
APPENDIX-C 欠陥孔径の測定	29

表リスト

	Page
表1 試験条件一覧表	33
表2 試験体製作仕様	34
表3 水質検査結果一覧	35
表4 本試験と実機(もんじゅ)での水質比較	36
表5 試験後の試験体の外観状況	37
表6 試験後の試験体の表面状況(SEM観察)	38

図 リ ス ト

	Page
図1 試験体形状	39
図2 欠陥孔の等価孔径測定法を示す概念図	40
図3 ガス試験用試験装置	41
図4 蒸気試験用試験装置	42
図5 ガス試験時の試験体温度履歴(T-10)	43
図6(a) 蒸気試験時の試験体温度履歴(T-06)	44
図6(b) 蒸気試験時の試験体温度履歴(T-08)	44
図7 蒸気試験時の水加熱器圧力履歴(T-06)	45
図8 蒸気流入流量の推移(T-08, T-11試験)	46
図9 等価孔径の試験前後の比較	47
図10 試験後の供試体の表面粗さ測定結果	48
図11 試験後の供試体の溝部寸法測定結果	49
図12(a) 流路に沿った圧力変化の模式図(溝部欠陥孔)	50
図12(b) 流路に沿った圧力変化の模式図(ギャップ部欠陥孔)	50
図13 噴流断面内の流速分布の模式図	51
図14(a) 欠陥孔を含む横/縦断面の模式図(内管側欠陥孔)	51
図14(b) 欠陥孔を含む横/縦断面の模式図(外管側欠陥孔)	51
図A.1 2重伝熱管破損メカニズム	58
図B.1 溝部形状のモデル図	59
図B.2 欠陥孔～溝部計算モデル	59
図B.3 欠陥孔径と蒸気流量/動圧の関係	60
図B.4 欠陥孔径/溝部径の大小による流速変化の概念	61
図C.1 ノズル較正方法の概念図	62

写真リスト

	Page
写真1 内管の外表面SEM観察 T-04	5 2
写真2 内管の外表面SEM観察 T-08	5 3
写真3 断面顕微鏡観察(ノ-エツフ) T-04, T-08 溝形比較	5 4
写真4 断面顕微鏡観察(ノ-エツフ) T-04 溝形の位置的变化	5 5
写真5 断面顕微鏡観察(ノ-エツフ) T-10, T-11 中心点	5 6
写真6 断面顕微鏡組織観察 T-04	5 7

1 緒論

昨年度報告^[1, 2]された2重伝熱管の内外管破損モードについての検討では、国内外のSG伝熱管破損事故の調査と分析から伝熱管の破損メカニズムを抽出し、これを基に健全管から片側破損及び貫通リークに至るまでのフォルトツリーを作成して、その検討から内外管同時破損を排除するために必要なR&D項目を抽出している。この検討結果の要点をAPPENDIX-Aに示す。

ここではその結果に基づいて、内管に発生した初期リークから高温・高圧の蒸気が流入した場合に、外管が破損し貫通リークに至るか否かを明らかにするために片側壁破損水リーク時の健全性確認試験^[3, 4]を実施し、結果の詳細な評価・検討を行った。

2 試験

2.1 目的

内管リークが発生し、そこから水／蒸気が流入した場合に、外管が破損するか否かを試験によって明らかにする。

2.2 試験条件

主な試験条件は、以下の項目が明らかとなるように選定した。

- (1)欠陥孔設置位置の影響
- (2)欠陥孔径の影響
- (3)流入する流体条件の影響
- (4)2重管タイプの影響

この試験条件の一覧を表1に示す。尚、本試験のリファレンスケースはT-04とし、それと他のケースとの比較で上記項目の影響を調べた。

欠陥孔は、密着型の溝部或いはギャップ部に設置した。欠陥孔径は0.05, 0.1, 0.5 mmの3種類で、その決定根拠はAPPENDIX-Bに示した。

リファレンスの流体条件としてここでは、蒸気圧力：150atg, 蒸気温度：500℃の過熱蒸気を設定した*1。

*1 前年度の報告書^[1, 2]で示された実証炉2次系設置型SGの設計例を採用すると、本研究で対象となる蒸気発生器(SG)の基本仕様(ヒートバランス)は、

SG入口Na温度： 510℃

SG出口蒸気温度： 487℃

SG出口蒸気圧力： 174 atg

となる。本来の試験条件はこれに合わせることが望ましいが、試験装置の制約から、表記の試験条件とした。

また流体条件の比較としては、流体圧力は上記と同じで温度が300℃であるサブクール水を用いた。

2重管タイプは、リファレンスとして外径19mmの密着2重管を、またその比較として多孔質金属（組網線）入り2重管を使用した。

水／蒸気の注入時間は、報告書^[1, 2]（「2次系削除型蒸気発生器の要素試験研究」の中）で暫定的に設定しているリーク検出時間の目標値（内管リーク検出時間として1時間、外管リーク検出時間として24時間）の長い方を採用し、24時間とした。

2.3 試験装置及び試験方法

本試験では2重管の外管に初期欠陥孔を設置し*²、試験条件の高温・高圧の水／蒸気を注入して、そのとき内管に生じる蒸気損耗の有無を調べた。試験は水／蒸気を注入する蒸気試験と窒素ガスを注入するガス試験の2つに大きく分かれ、前者は動燃所有のSWAT-3装置注入系の一部を改造して使用し、後者はSWAT-1装置を使用し、蒸気試験の比較用データを得る目的で実施した。

2.3.1 試験体

試験体形状を図1に示し、2重管の製作仕様を表2に示す。図に示すように、2BのSUS製の試験体の胴の中には外管に人工の欠陥孔を有する供試体の2重管が設置されている。胴に囲まれた右側空間の第1セルには試験中に高温の水／蒸気を供給して、2重管を加熱し、欠陥孔へ流入した蒸気が内外管の

*² 供試体の加工技術上の理由から、2重管の内管に模擬欠陥孔を設置するのは困難である。よって本試験では、外管に模擬欠陥孔を設置した。2重管の界面部（溝部＋ギャップ部）の曲率半径は欠陥孔径に比べて十分大きく、欠陥孔からの流体は界面部に対してほぼ直角に衝突するものと考えられるため、欠陥孔設置位置の内管と外管による違いはさほど影響ないと考える。

界面部で凝縮しないような構造になっている。また、試験体の外壁にはマイクロヒータが巻き付けてあり、これにより全体が均一な温度になるよう設計してある。

第1セル内の蒸気は、欠陥孔から界面部を抜け左側の第2セル内に噴出する。その蒸気は試験体へ接続した配管により外部の蒸気トラップへ導き、そこで凝縮水を回収及び計量する。

試験体の第1セル内には蒸気温度計測用の熱電対を、また試験体外壁には試験体温度制御用の熱電対を設置している。2重管の内管には、蒸気噴出による内管破損を検知するために圧力計を接続している。

全ての試験体について、各試験（後述する蒸気試験やガス試験）の前後にHeガスを使用した欠陥孔の孔径測定を実施した。この測定では、欠陥孔から界面部を通り管外に至る全流路パスを単一ノズルとみなして、その流力的な等価断面積（あるいは等価直径）を次の方法で求めた。

測定に使用した装置の概念を図2に示す。図のタンクの容積を V とする。測定の開始前にタンクを気体（Heガス）で充填し、その初期圧力を P_0 とする。タンクには、欠陥孔への流入気体と等しい量の気体をポンペから供給し、 P_0 が常に一定となるようにする。このようにして、時刻 $T=0$ のときHeガスの供給を瞬時に止めると、その後は試験体の欠陥孔へのガス流入によって、次第にタンク圧は減少する。ある一定時間を経過した時刻 $T=t$ 時のタンク圧を測定し、その値を P とする。

試験体の欠陥孔～界面部でのHeガスの流れを等エントロピー流とし、かつ試験中タンク圧は常に十分高圧であるため試験体界面部での流れは臨界流になっているものと仮定すると、タンク圧の時間的な変化（ただし気体の温度変化によるタンク圧の変化は十分小さく無視できるものとしている）は以下の式で近似できる。

$$P = P_0 \cdot \exp(-\omega t) \quad (1)$$

$$\omega = A / V \cdot \sqrt{\{k \cdot (2 / (k + 1))\}^{(k+1)/(k-1)} \cdot R^* \cdot T} \quad (2)$$

$$\left[\begin{array}{l} \text{ここで、} R^* ; \text{気体定数 (= } R / M \text{)} \\ T ; \text{気体温度} \\ k ; \text{気体の比熱比} \\ A ; \text{欠陥孔等価断面積} \end{array} \right]$$

上式より、圧力の変化と時間から試験体の全流路の流力的等価断面積： A （ $= \pi D^2$ ）を逆算して、等価直径： D を求める。APPENDIX-Cに、上式の詳細な算出法を示した。

2.3.2 試験装置及び試験方法

(1) ガス試験

蒸気のみによる伝熱管の損耗を定量的に明らかにするためには、蒸気試験と同一温度である500℃の状態では試験体を24時間保持して、欠陥孔、内外管の界面、内外管界面部の多孔質金属の状態、及び材料の組織などがどのように変化するかを知っておく必要がある。そこで、図3に示すSWAT-1の装置を用いてこれを調べる試験を行った。試験装置は内容積0.03m³の水加熱器（No.2）、上下2系統の注水配管、及びガス集合装置で構成されており、ガス試験ではこの水加熱器を試験体への窒素ガス供給用タンクとして使用した。水系配管の先端に接続した前記2.3.1節の試験体は、外壁に取り付けた熱電対の信号により温度制御が行われ500℃に均一保持した。同時に、ガス供給タンクから常時圧力約8kg/cm²gの窒素ガスを供給して、試験体の酸化防止を図った。

(2) 蒸気試験

試験装置のフローシートを図4に示す。装置は、有効保有水量700ℓの水加熱器、水又は蒸気を試験体に供給するための2系統の注水配管、試験体を収納する試験容器、試験体を通過した水／蒸気を凝縮水として捕獲するための蒸気トラップ、凝縮水を回収する回収容器および試験体の酸化を防止する保護ガス供給系で構成されている。

試験体に供給する流体には、蒸気と水の違いによる伝熱管の損耗状況を調べるために、過熱蒸気およびサブクール水の2種類を用いた。過熱蒸気を用いた試験では、溶存酸素追い出し（100℃、大気圧で1時間の保持）操作後、水加熱器で温度340℃、圧力150kg/cm²gの飽和水まで昇温し、水加熱器から試験体に至るまでは注水配管のトレースヒーターで更に飽和蒸気を加熱し、試験体部での注入蒸気が500℃の過熱蒸気になるようにした。サブクール水を用いた試験では、上記と同様な溶存酸素追い出し操作後、水加熱器に約39kg/cm²gのガス加圧を行い、加熱操作で昇温して300℃、150kg/cm²gのサブクール水を作成した。

(3) 水質検査

蒸気試験に使用した供給水の水質を把握しておく為、代表的な試験について水加熱器及び蒸気凝縮水のサンプリング及び水質検査を行った。主な検査項目及び方法は、以下の通りである。

① pH

・ JIS K 0101 11.1 (ガラス電極法)

② 全鉄 (T-Fe)

・ 原子吸光光度法 (AAS)

③ 塩素イオン (Cl⁻)

・ イオンクロマトグラフィー (IC) 法

④全銅 (T-Cu)

・原子吸光光度法 (AAS)

⑤イオン状シリカ (SiO_2)

・JIS K 0101 44.1.2 (モリブデン青法)

⑥溶存酸素

・JIS K 0101 24.2 (ウインクラー・アジ化ナトリウム変法法)

⑦ヒドラジン

・JIS B 8224 18.1 (P-ジメチルアミノベンズアルデヒド吸光光度法)

⑧電気伝導率

・JIS K 0101 12 単位 $\mu\text{s/cm}$

⑨全固形分 (全蒸発残留物)

・JIS K 0101 16.2

⑩ナトリウムイオン (Na^+)

・イオンクロマトグラフィー (IC) 法

⑪濁度

・JIS K 0101 9

2.3.3 試験後検査

試験を終了した全供試体 (2重管) について金相検査を実施し、伝熱管壁の変化を調べた。この時の主な検査項目及び検査要領は以下の通りである。

(1) 供試体の外観検査 (カラー写真及び50倍の白黒写真)

供試体は、欠陥孔から蒸気の流れ方向と反流れ方向に各々約10mmの位置で輪切りにし、欠陥孔を基準としてそれを60°, 300°方向で縦切りにした。写真観察はその試験体の内外管を分離して行う。この観察は、内外管の分離が可能な密着型2重管についてのみ実施し、分離が不可能な多孔質金属入り2重管については実施しなかった。

(2)走査型電子顕微鏡観察（SEM観察）

表面状態の変化を調べるため、密着2重管外管の内表面及び内管の外表面を走査型電子顕微鏡により観察、撮影した。

(3)表面粗さ測定

密着2重管外管の内表面及び内管の外表面の長手方向に沿って、表面粗さ測定を実施し、 R_{max} （最大高さ）を求めた。

(4)断面の顕微鏡観察（ノーエッチ）

断面状況、特に溝部、内外管界面のギャップ及び欠陥孔中心断面での形状変化等を確認するため、供試体の周方向断面のノーエッチ観察を行った。観察位置は、欠陥孔より離れた位置（欠陥孔より流れ方向に10mm）、欠陥孔近傍（流れ方向に0.5, 0.3, 0.1mm）、及び欠陥孔中心とした。

(5)断面の顕微鏡組織観察

伝熱管の周方向及び長手方向断面の顕微鏡組織観察を行った。観察は、蒸気の影響が比較的小さいと考えられる位置（欠陥孔より流れ方向に $\pm 10\text{mm}$ ）と欠陥孔近傍（欠陥孔中心及び $\pm 1\text{mm}$ ）で実施し、比較した。

2.4 試験結果

2.4.1 ガス試験

試験体の第1セル内に設置した熱電対の出力から求めた典型的な試験体温度の履歴を図5に示す。これより、供試体の2重管は、24時間の試験期間中、常に約500℃に保たれていた。

2.4.2 蒸気試験

試験体の第1セル内に設置した熱電対出力から求めた、典型的な試験体温度の履歴を図6の(a), (b)に示す。T-11試験を除く試験体は、図に示すように24時間の試験中、常に約500℃(T-04, 05, 07, 08)あるいは約300℃(T-06)の設定温度に保たれていた。(T-11試験では、欠陥孔への流入蒸気流量が多くて、ヒータの供給熱量を上回っていたために、蒸気注入直後から500℃の蒸気温度が350℃程度まで降下した。)

水加熱器内の圧力の典型的な履歴を図7に示す。これより、供給水/蒸気の圧力は、試験中常に約150kg/cm²gに保たれていた。

注入試験中、試験体から常に凝縮水を回収できたのは、T-08, 11の試験であった。この時の凝縮水量と回収時間から算出した蒸気流入流量の推移を図8に示す。最終的に得た全凝縮水量を蒸気流入時間で除すことで試験中の時間平均的な蒸気流入流量を得たが、これはT-08とT-11の試験でそれぞれ0.91g/s, 0.77g/sとなった。これらは、APPENDIX-Bで計算した流量より幾分大きい。T-11の試験体は多孔質金属入り2重管であるためAPPENDIX-Bで示した計算値が必ずしも当てはまらないが、特に大きめの流量となった。

他の供試体では試験中に凝縮水は得られなかったが、試験体撤去の際にその下流の配管内に凝縮水が蓄積していたことから、注入開始の初期には同様な流量で蒸気が流れていたものと推定する。

2.4.3 水質検査

水質検査の結果一覧を表3に示す*³。この一覧表に示す最大値と、実プラントの代表例として「もんじゅ」SGでの通常運転時の水質管理基準値を比較したものを表4に示す。これより、試験に用いた水が「もんじゅ」の水質基準値よりもかなり不純物を含んだ水質で、より伝熱管の損耗現象が生じ安易い条件にあったものといえる。

2.4.4 欠陥孔径の変化

ガス試験及び蒸気試験の前後で実施した供試体の等価孔径の変化を図9に示す。図より以下のことが分かる。

- ① 程度差はあるが、ほとんどの供試体で試験後の等価孔径は小さくなっている。
- ② 窒素ガスを流入した供試体では、等価孔径の減少割合が小さい。蒸気を流入させた場合は、その減少割合が大きく、閉塞する場合もあった。これは、蒸気によって酸化物スケールが生成されたためと推定する。
- ③ 蒸気試験では、試験前の等価孔径が大きいと試験後の等価孔径の減少する割合は小さく、又閉塞の割合も低い。初期等価孔径の小さい試験体では、逆により閉塞し易くなる。

*³ 表中の“凝縮水”とは、蒸気試験中に2重管の欠陥孔～界面部を通過して蒸気トラップ内で凝縮して得られた水加熱器からの噴出水を示す。“水加熱器(試験後)”とは、蒸気試験後に水加熱器内に残った水を冷却して採集したものである。“水加熱器(フロー水)”とは、蒸気試験時に装置の水ブローラインから水をブローして得た凝縮水である。“水加熱器(純水)”とは、水加熱器に注入した水(純水に相当)そのものであり、容器内で水質調整(ヒドラジン注入)、加熱、及び溶存酸素追い出し操作を実施していない水である。

- ④試験前後の等価孔径の比較から、蒸気の損耗現象に起因した欠陥孔径の拡大は生じていない。

2.4.5 試験後検査

(1) 試験後の試験体の外観

試験体の外観検査の結果を表5にまとめた。検査からは、多孔質金属入り2重管を除き、外管の内表面及び内管の外表面に薄い錆の見られたものがT-01, T-04, T-08の3ケースあり、これらは何れも比較的径の大きい欠陥孔が溝部に設置され、試験中蒸気或いはガスが多く流出したものに相当する。一方、錆の見られないものは、T-02, T-05, T-06, T-07の4ケースあり、これらは何れも欠陥孔径が比較的小さいか或いはそれがギャップ部に設置されたもので、これらは試験中の蒸気或いはガスの流れが少ないか、或いは途中で閉塞したケースに相当する。

(2) 表面走査型電子顕微鏡 (SEM) による観察

欠陥孔から離れた位置の表面に軽微な付着物がみられた。また、供試体のT-04, 06, 07, 08では、欠陥孔部近傍の表面に付着物以外の軽微な変化(なめられた様な滑らかな表面や欠陥孔の加工痕)が見られた。これらの状況をまとめて表6に、また代表的なSEM写真を写真1～2に示す。

写真1はT-04試験の供試体の内管の外表面で、(a)は外管の欠陥孔直下の表面、(b)はその拡大である。写真からは表面を覆う様に付着物が見られるが、(c)からも示されるように中心から離れると多数の粒状の付着物となる。写真(d)は欠陥孔直下から十分離れた点であるが、それには付着物が見られず、所々に小さなピット状の穴が見られる。このピット状の穴は蒸気/ガス試験を実施してない伝熱管にも程度の差はあれやはり観察されているため、それは本試験に起因した現象ではなく伝熱管の製造過程で生じたものと考ええる。

写真2は欠陥孔に比較的多くの蒸気が流入したT-08試験の供試体のもので、(a)が欠陥孔直下、(b)、(c)、(d)がその拡大である。ここでは写真1に見られたような付着物は見られず、全体的に表面は滑らかであるが、小さなピット状の穴は所々に見られる。(b)、(c)は、それぞれ下流側、上流側での観察結果であるが、それらの相互比較では表面上に有為な差が見られない。

(3) 表面粗さ

図10に表面粗さの測定結果をまとめて示す。これは各供試で、欠陥孔（或いは欠陥孔直下の点）を中心に、そこから流れ方向及びその反対の方向の表面粗さ（最大高さ:Rmax）を測定した結果であるが、位置に依存する特徴的な表面粗さは認められない*4。

(4) 断面の顕微鏡観察（ノーエッチ）

写真3～4に伝熱管断面（溝部）の代表的な顕微鏡写真*5を示す。これは欠陥孔より離れた位置（欠陥孔より流れ方向に10mm）、欠陥孔近傍（流れ方向に0.5、0.3、0.1mm）、及び欠陥孔中心を示したもので、いずれも溝底凹部（R部）に長さ数 μ m程度の小さなクラックや溝部、ギャップ部の付着物が見られたが、これ以外には溝部形状や界面ギャップ等に異常が認め

*4 2重管の外管内表面と内管外表面での粗さを比較すると、前者は後者より相対的に高い値となっているが、これは蒸気によるものではなく製造過程に起因するものと考えられる。

*5 欠陥孔近傍や欠陥孔中心での断面写真では、2重管からサンプル形状に切断して内外管を剥離し、それを重ね合わせて断面の写真撮影したものであるため、その重ね合わせ位置が必ずしも一致していない。

られなかった。溝底凹部に見られた小さなクラックは、蒸気/ガス試験を実施していない供試体にも見られた事から、それはやはり伝熱管の製造過程で発生したものと判断する。なお、内外管のギャップ間隔は1～2 μm程度であった。

写真3の(a)と(b)はそれぞれ、蒸気流量の異なるT-04, T-08試験体の断面を比較したものであるが、ここでも蒸気流量による有為な差は見られない。

写真4は、蒸気の流れ方向に沿って欠陥孔からの異なる距離における断面写真である。写真からは、距離の違いによる溝部形状の大きな変化は見られない。写真から求めた溝部寸法の測定結果を図11に示す。ここでは外管の溝部、対応する内管の凸部について溝底部までの高さ(h)と溝巾(b)とを求めた。図から、傾向として10mm下流の位置より欠陥孔側でh, bが増加する様子が見られるが、伝熱管の製造に起因するバラツキの範囲であり、大きな寸法の変化では無いと考える*6。

写真5は多孔質金属入り2重管の欠陥孔部での断面写真で、(a)～(c)は蒸気試験のT-11を、(d)はガス試験のT-10を示している。写真からは、場所によって多孔質金属(組網線)に密度の違いが見られるが、これは報告書^[1, 2]でも示されたように伝熱管の製造に起因するもので、蒸気による影響では無い。写真の中の(c)と(d)は、蒸気の噴出が無い場合(写真(c)のT-10試験)と有る場合(写真(d)のT-11試験)を比較して示したものであるが、欠陥孔径の形状の違い(加工過程に起因する違い)や多孔質金属の並び方(製造上に起因する違い)以外には有為な違いは認められない。

*6 欠陥孔近傍及び欠陥孔中心部での測定値は、前頁の脚注からも推定されるように、内外管の接触面に面圧が付加されていない状態での測定値である。一方、10mm下流位置での測定値は、2重管を周方向に切断したものを写真撮影したものであり、内外管の接触面に面圧が付加されている状態での測定値である。この面圧の違いによる影響も関与していると考えられる。

(5) 断面の顕微鏡組織観察

T-04試験の供試体の組織写真を写真6に示す。ここでは蒸気噴出にともなう組織的な変化を見るため、欠陥孔中心を含む欠陥孔近傍と欠陥孔からそれぞれ1mmと10mm離れた位置を示した。写真観察からは場所の違いによる組織的な変化は見られず*7、組織はフェライトに微細な炭化物が析出した9Cr系鋼特有の組織であると確認できた。

*7 密着型試験体の溝部内面には、微細な凹状のクラックが認められる。これは、伝熱管の製造時に生じた引き抜きシワと考える。

2.5 まとめ

2重管に内管リークが発生した場合の外管の蒸気による損耗現象を調べ、内外管貫通リークまでの亀裂進展の可能性の有無を明らかにする目的で、2重管の外管に設けた初期欠陥孔から高温・高圧の蒸気を流入し、そのときの内管に生じる損耗現象の有無を調べた。

試験時の欠陥孔への流入流体は、150気圧、500℃の過熱蒸気或いは300℃のサブクール水で、流入時間は24時間である。また比較試験として、2重管を500℃に高温保持し24時間窒素ガスを注入する試験も行った。

試験前後の孔径測定値の比較から、以下の結果を得た。

- ①ほとんどの供試体では、試験後の等価直径が小さくなり、その傾向は窒素ガスより蒸気を噴出した方が顕著で、閉塞に至るケースもあった。
 - ②初期等価直径の小さい方が、大きい場合に比べ孔径の減少割合が大きい。
- これらの結果から、蒸気損耗による欠陥孔の拡大は生じていないものと判定した。

試験後検査からは、以下の結果を得た。

- ①SEM観察では多くの供試体の内外管の界面部に軽微な付着物が認められ、一部には欠陥孔近傍に付着物以外の変化も認められた。
- ②表面粗さ(最大高さ: R_{max})の測定では、測定位置の違いによる有意な変化は認められていない。
- ③伝熱管の断面顕微鏡観察(1-エッチング)からは、製造過程に起因すると思われる溝底凹部(R部)の小さなクラックや、溝部、界面部の付着物等を認めただけで、溝部形状や界面ギャップ等の極端な変形・変化は認められていない。
- ④断面顕微鏡組織観察では、フェライトに微細な炭化物が析出した9Cr系鋼特有の組織以外は、欠陥部近傍での塑性流動、変質層等の組織的な変化が認められない。

3 検討

前章で得られた試験結果を実機と関連づけて評価するうえで必要となる試験と実機の条件の違いについて検討する。実機との対応上必要な検討項目は2つあり、(1)試験に用いた蒸気/水圧力の違いと、(2)伝熱管に設置した欠陥孔の位置(外管/内管)の違いである。それらについて以下で述べる。

(1) 蒸気/水圧力について

試験と実機での蒸気/水圧力は、2.2節にも示したようにそれぞれ150 atg, 174atg (SG出口)であり、実機に比べ試験は24atg程低い。この違いがどの程度影響するかをここで検討する。

実際の試験では2重伝熱管の片側壁に設置した人工欠陥孔から高温の蒸気/水が流出し、他方の伝熱管壁に衝突する。このとき欠陥孔と相対する伝熱管壁は、衝突する流体の圧力(静圧)と流速の影響により損耗が生じると考えられる。以下で、それぞれについて検討する。

① 圧力について

欠陥孔へ流入する流体は高温・高圧の過熱蒸気/水であり、それが欠陥孔から界面部に沿った比較的短い流路(表2に示すように欠陥孔から出口までの流路長は125mmから135mm程度である)を流れ、2重管の出口から大気へ放出される。圧力の減少する様子を模式的に図12に示した。図(a), (b)はそれぞれ欠陥孔を溝部, ギャップ部に設置した場合に相当する。図に示すように、欠陥孔を含む界面部流路の領域内のある位置(例えば図(a)の x_2 , 図(b)の x_3)で流体は臨界状態となり、そこでの圧力は臨界圧(図中の P_{1c} , P_{2c})となる。尚、注入する流体の背圧は大気圧(P_a)に比べ十分大きいため試験(P_1)と実機(P_2)の圧力の違いによる臨界圧の差は小さく、また損耗が生じ

やすい位置（図(a)の x_3 、図(b)の x_4 ）は臨界圧以下で殆ど大気圧に等しいと考えられる。尚、ギャップ部設置の欠陥孔直下の位置（図(b)の x_2 ）では、試験と実機との圧力の違いが直接影響するが、静圧としての圧力は伝熱管の壁面に垂直に作用する力であることを考えると、結果的に試験と実機での蒸気／水圧力の違いからくる圧力の影響は小さいと考える。

② 流速について

試験と実機との圧力の違いは流速（臨界流量）の違いとして影響する可能性はある。しかしながら2.4.5節の試験結果からも示される様に蒸気流量の違いによる損耗現象の変化は極軽微であったことから、たとえ試験と実機とで欠陥孔を含む界面部内での流速に違いがあってもその影響は小さいと考える。

以上から、試験と実機での蒸気／水の圧力の違いによる結果の影響は無視できる程度と考える。

(2) 欠陥孔の位置について

今回の試験のように欠陥孔を外管に設置してそこから内管側に蒸気／水がリークした場合と、実機で想定されるような内管に生じた欠陥孔から外管側に蒸気／水がリークした場合との違いを以下で検討する。ここでは、欠陥孔が2重伝熱管の溝部或いはギャップ部にある場合とで蒸気／水の流れが異なると考えられるため、それぞれの場合に分けて検討する。

① 欠陥孔が溝部にある場合

以下では説明を簡単にするため、リファレンスの欠陥孔径を代表例にとって説明する。

流体は径0.1mmの欠陥孔から径0.3mm（Appendix-BのB.2節参照）の

溝部へと流れ、そのとき断面積比1 : 9の急拡大に伴う流体の急減速が起こる。流体が高温・高圧の蒸気の場合はそこで噴流が形成されるが、一般的に噴流のコア領域（流速が最大でその断面分布が一様である領域）は欠陥孔の出口面近辺のごく限られた範囲内に限定され、出口面から距離が離れてくると、噴流断面内の流速分布が相似則で扱えるようになる比較的乱流の発達した流れとなる。図13に噴流断面内の流速分布の概念を示す。実際の試験体系は、欠陥孔径が0.1mmで溝部の高さは図11に示すように約0.23~0.25mmとなるため噴流が完全に発達した流れであるか否かの判断は難しいが、噴流内の流速はその中心部で最大となり、中心部から離れると次第に減少する。

図14に欠陥孔を中心とした伝熱管の横断面と縦断面の概念図を示す。図(a), (b)はそれぞれ内管側と外管側に欠陥孔を設置した場合である。まず内管／外管設置の欠陥孔の違いを伝熱管の横断面上で考えると、噴流が曲率が十分大きい面に垂直に衝突（外管に欠陥孔を設置した場合）するか、ある程度の曲率を持った面に垂直に衝突（内管に欠陥孔を設置した場合）するかの違いとなるが、欠陥孔直下の中心点について考えるなら、そこに衝突する流速は噴流中心の最大値と仮定する事もでき、その最大値は欠陥孔出口面からの距離に依存して一義的に定まるものである。このため、欠陥孔の内管／外管設置には影響されない。中心からずれた点で壁面に衝突する流速は、欠陥孔の内管／外管設置に依存して異なることも考えられるが、流体が流れる溝部は軸方向長にしか延びておらず、欠陥孔を含む横断面上の周方向への流速の変化量は元々小さいため、中心から離れた点での周方向への流れの影響、即ち流速の影響はさほど大きくないと考える。むしろ流体は軸方向への流速の変化量が大きいためこちらの方が重要となるが、形状的にみた欠陥孔を含む縦断面は欠陥孔の内管／外管設置の違いによらず溝部内でほぼ同様な流れになると予測できるために、結局軸方向流速及びその変化に伴う影響も小さいと考える。

②欠陥孔がギャップ部にある場合

2.3.1節の脚注でも述べたように、2重伝熱管の界面ギャップ部の曲率半径は欠陥孔径に比べて十分大きいいため、欠陥孔からの噴出流体はギャップ部に対してほぼ直角に衝突すると近似できる。さらに、欠陥孔径0.1mmの大きさに比べギャップ部の間隔は、2.4.5の(4)節で記述したように1～2 μ m程度と十分小さい。このことから、欠陥孔を流れる流体はギャップ部でほとんど滲み出るように伝熱管の周方向に流れ、溝部へ至ると考える。(欠陥孔近辺では、軸方向への流れは少なく、そのほとんどは周方向へ流れるものと考え。)よって、ギャップ部での流体の流れから考える限りでは、欠陥孔の外管/内管設置による大きな違いはなく、その影響も小さいと推定する。

以上の①、②を考慮して、欠陥孔の外管/内管設置による違いは試験と実機で大きな違いにはならないと判断した。

4 結論

試験及び試験後検査により、以下の結果が得られた。

- (1) ほとんどの供試体では、試験後の欠陥孔等価直径は小さくなり、閉塞に至るケースが見られ、蒸気損耗に起因した欠陥孔の拡大は生じていない。
- (2) 試験後検査では、一部の供試体の欠陥孔近傍の表面に表面付着物の状況・状態に変化が見られたが、蒸気の衝突による形状変化や組織・材質的な変化は認められていない。

実機設計例条件下での24時間の蒸気噴出では伝熱管壁に損耗が生じないことより、2重管に内管リークが発生してから24時間以内に噴出蒸気による損耗で外管が貫通破損する可能性は無い。

参考文献

- [1] 亀井満, 仲井悟, 金子義久, 酒井隆雄, 保田仁司, 田村政昭, 浜田広次, 関成一, 笠原直人, 山下英俊, 佐藤裕二, 鐘ヶ江直道, 「共同研究報告書 2次系削除型蒸気発生器の要素試験研究(I)」, PNC SY9471 88-005(1), 1988.3
- [2] 亀井満, 仲井悟, 金子義久, 酒井隆雄, 保田仁司, 田村政昭, 浜田広次, 関成一, 笠原直人, 山下英俊, 佐藤裕二, 鐘ヶ江直道, 「要約版 共同研究報告書 2次系削除型蒸気発生器の要素試験研究(I)」, PNC SY9471 88-005(2), 1988.3
- [3] 亀井満, 金子義久, 木曾原直之, 田村政昭, 浜田広次, 関成一, 笠原直人, 山下英俊, 佐藤裕二, 「共同研究報告書 2次系削除型蒸気発生器の要素試験研究(I)」, PNC SY 9471 89-003(1), 1989.3
- [4] 亀井満, 金子義久, 木曾原直之, 田村政昭, 浜田広次, 関成一, 笠原直人, 山下英俊, 佐藤裕二, 「共同研究報告書 2次系削除型蒸気発生器の要素試験研究(I)」, PNC SY 9471 89-003(2), 1989.3

A P P E N D I X - A

内外管破損モードの検討^[2] (要約抜粋)

A.1 目的

2重伝熱管での内外管貫通リークに至る破損メカニズムの抽出およびフォルトツリーの作成を通して伝熱管の支配的な破損モードを整理検討し、内外管同時破損モードを排除するために必要となるR&D項目の抽出を行う。

A.2 内外管破損モードの調査・分析

まず、現存するFBR, PWR, 火力の各プラントSG及びそのR&D施設での伝熱管破損例の調査・分析を行ない、破損原因, 破損箇所, 破損メカニズム(図A.1参照)を整理・検討し、それを基にFBR・SG単管の破損メカニズムを抽出した。これより、各破損要因が結合し貫通リークにまで進展する時のパスである疲労破壊, 腐食疲労, 応力腐食割れ(SCC), 応力割れ, 脆化破壊には伝熱管の応力要因, 例えば繰り返し応力とか応力集中, が関係すること、腐食自体は単独の破損要因とはならず他の要因との重畳で破損を早めること、更に伝熱管の初期欠陥は一つの独立な破損要因であることを示した。

密着2重管特有の設計・製作時に生じる破損要因としては、内外管に作用する残留応力と内外管の溶接熱影響部(HAZ)の存在がある。通常運転時の破損要因としては、外管溝部での熱応力や繰り返し応力, 界面部の間隙腐食, 過渡時の管-管板応答差, 内外管固着, 内外管熱膨張差等に起因する伝熱管各所での摩擦, せん断力, 軸力等が想定される。

内管破損時の外管破損要因としては、①外管蒸気損耗, ②間隙腐食, 伝熱性能変化による③高温・過熱と④熱応力が考えられる。外管破損時の内管破損要因としては、やはり上記の②, ④が考えられる。

多孔質型は程度の差はあれ、密着型と基本的に大きく変わらない。

A.3 フォルトツリーの作成

以上で得られた破損メカニズムを基にフォルトツリーを作成した。ここでは、最上位事象を貫通リークとし、最下位事象には疲労破壊，腐食疲労，SCC，応力割れ，脆化破壊，初期欠陥を，また片側破損後の破損要因は上記の最下位事象に加え、蒸気損耗，高温・加熱を考えた。破損確率は、現存プラントの伝熱管破損例の調査結果から求めた値を用いることで、最上位事象の確率を算出した。

A.4 まとめ

以上の検討結果やフォルトツリーの作成から、2重管SGの健全性評価上重要な破損パスあるいは解明すべき問題点として摘出した項目の内、現状の試験・研究レベルでは未知でありその影響の有無を評価・判断できないもの、かつその影響が2重管の貫通リーク発生と大きく関係してくると考えられるものとして、本試験の「2重伝熱管における片側壁破損水リーク時の健全性確認試験」を選定した。

A P P E N D I X - B

欠陥孔径の決定根拠

B.1 概要

試験では、欠陥孔径の大小の結果に及ぼす影響を調べるために、欠陥孔径を変化させた。ここでは、その欠陥孔の決定根拠を示す。

B.2 伝熱管溝部の円孔換算等価直径

伝熱管溝部の等価直径： D_{gv} は、試験に用いる欠陥孔径： D_{LK} の大きさを決定するに際して一つの判断基準となる。それは、 D_{gv} と D_{LK} の大小関係により、流れのクリティカルとなる場所が変化してくると考えられるからである。まず始めに溝部の等価直径： D_{gv} を以下で算出する。

①面積換算等価直径： D_{gv1}

溝部形状を図B.1に示す半円形で模擬して考える。この時の溝部直径を D_{gv} ($= 2 \cdot r_{gv}$)としたときの溝部の流路断面積： S_{gv} は、面積がそれと等しいと仮定したときの等価直径： D_{gv1} を用いて以下の式

$$S_{gv} = \pi D_{gv}^2 / 8 \approx \pi D_{gv1}^2 / 4 \quad (B.1)$$

で表せる。従って、溝部の面積換算等価直径： D_{gv1} は以下となる。

$$D_{gv1} = D_{gv} / \sqrt{2} \approx 0.707 \cdot D_{gv} \quad (B.2)$$

②ぬれぶち面積換算等価直径： D_{gv2}

溝部形状は上記と同じとする。この時、溝部のぬれぶち長さ： P_{gv} は

$$P_{gv} = (\pi + 2) D_{gv} / 2 \quad (B.3)$$

であるから、ぬれぶち長さより求められる溝部の等価直径： D_{gv2} は、以下となる。

$$D_{gv2} = 4 \cdot S_{gv} / P_{gv} = \pi D_{gv} / (\pi + 2) \approx 0.611 \cdot D_{gv} \quad (B.4)$$

上記2つの直径 D_{gv1} , D_{gv2} のうち、どちらを等価直径に選定するかが問題となるが、 r_{gv} を0.2~0.25mm（注：本研究の対象とする伝熱管の測定値範囲）とすると、 D_{gv1} は0.28~0.35mmとなり、また D_{gv2} は0.24~0.31mmとなる。これら両者を加味すると、およその溝部等価直径： D_{gv} として0.3mm程度を選定するのが妥当と考える。よってこれ以降の簡易計算においては、 $D_{gv} = 0.3\text{mm}$ を採用する。

B.3 欠陥孔径をパラメータにした臨界流量の計算

溝部の等価直径を0.3mmに固定し、欠陥孔径をパラメトリックに変化させた場合の蒸気流量を計算した。計算条件は、試験体系及び試験条件に合わせるものとし、この計算には動燃所有の臨界流計算用TSTELAコードを使用した。

計算時の欠陥孔から溝部に至るまでの流路モデルを図B.2に示す。欠陥孔部と溝部の流路長はそれぞれ、2, 100mmとし、欠陥孔径は0.04~1.0mmと変化した。また、欠陥孔入口部での流体条件は、以下に示す過熱蒸気とした。

蒸気温度： 500℃

蒸気圧力： 150気圧

B.4 臨界流量計算結果

流量の計算結果を図B.3に示す。同図から、欠陥孔径が小さい（0.1mm以下）所では、各計算点は傾き約2の直線上に乗ってくる事がわかる。これは、欠陥孔部での蒸気の流れが臨界流となっていることを示す。（流量は欠陥孔径により決定される。）

一方、欠陥孔径が大きい所（0.5mm以上）では、流量が欠陥孔径に依存しなくなる。これは、欠陥孔部でなく溝部で蒸気が臨界流になっているためである。

B.5 欠陥孔部での動圧計算結果

上記B.4節の臨界流量計算結果を基にして、欠陥孔部での動圧を算出した。ここでの動圧：Pは、 $P = \rho \cdot v_{LK}^2$ で定義する。 ρ は欠陥孔部での蒸気密度、 v_{LK} は蒸気流速である。計算結果を図B.3に示す。

同図より、欠陥孔径の小さな所（0.1mm以下）では臨界流速が欠陥孔部ではほぼ一定となるために、動圧もほぼ一定値となる。一方、欠陥孔径が大きい所（0.1mm以上）では、溝部での臨界流速がほぼ一定となるのに対し欠陥孔部での流速が欠陥孔径の増加と共に減少し、このため結果的に欠陥孔部での動圧は欠陥孔径の増加と共に急激に低下してくる。

B.6 試験時の欠陥孔径の決定

以上の計算結果から、欠陥孔径と溝部径の大小関係により、欠陥孔部と溝部での流速の大小関係が変化し、それに対応して動圧が変化することがわかる。そのときの欠陥孔径の大小関係と流速変化の概念を図B.4に示す。

図B.4(a)は、欠陥孔径が溝部径に比べ十分小さい場合であるが、この時には溝部での流速が欠陥孔部での流速に比べ十分小さい。一方図B.4(b)は、欠陥孔径がB.4(a)より幾分大きくなっているが、それでも欠陥孔径は溝部径より小さい場合である。B.4(a)とB.4(b)では、欠陥孔部での動圧は両方ともほぼ同等で、溝部での蒸気流速が異なる事による損耗への影響が推定できる。

図B.4(c)は、欠陥孔径と溝部径が同程度の場合である。この時、欠陥孔部と溝部での流速はほぼ同程度となる。一方、図B.4(d)は欠陥孔径が溝部径より大きい場合であるが、この時には溝部での流速に比べ欠陥孔部での流速が小さくなる。B.4(b)とB.4(d)を比較する事で、欠陥孔部での動圧の違いによる損耗の影響を推定できる。

以上の検討結果から、実験時の欠陥孔径の大きさを図B.3の計算結果をもとに決定する。つまり、図B.4(a)のケースとして欠陥孔径0.05mmを、また図B.4(b)のケースとして欠陥孔径0.1mmを、更に図B.4(c)のケースとして欠陥孔径0.5mmを定めた。

A P P E N D I X - C

欠陥孔径の測定

簡単のため、理想気体を仮定すると、

$$P = R^* \rho T \quad (C.1)$$

が成り立つ。但し、 P は気体圧力、 R^* は気体定数、 ρ は気体密度、 T は気体温度である。上式を時間 t で微分し圧力の時間的変化を求め、簡単にすると、

$$P^{-1} \cdot dP/dt = \rho^{-1} \cdot d\rho/dt + T^{-1} \cdot dT/dt \quad (C.2)$$

となる。図C.1に示すように、断面積： A のノズルをタンクに設け、初期圧力： P_0 の状態から気体を噴出させるとする。このとき、タンクの温度変化による圧力の変化は、気体の噴出による圧力の変化に比べ十分小さく無視できるものとする、上式は簡単になり、

$$P^{-1} \cdot dP/dt \approx \rho^{-1} \cdot d\rho/dt \quad (C.3)$$

と近似できる。

次に、ノズルでの流れは一次元等エントロピー流れと仮定すると、臨界流量として、

$$G_{max} = A \sqrt{\left\{ \rho P^k \left(2 / (k+1) \right)^{(k+1)/(k-1)} \right\}} \quad (C.4)$$

が得られる。一方、密度の時間的変化を考えると、

$$d\rho/dt = -G_{max}/V \quad (C.5)$$

とおけるから、最終的に(C.3)式の右辺は、

$$\rho^{-1} \cdot d\rho / dt = -A/V \cdot \sqrt{\{R \cdot T k (2 / (k+1))\}^{(k+1)/(k-1)}} \quad (C.6)$$

となる。上式の右辺は時間の関数でなく一定値（注：ただし P_0 は臨界圧以上である必要がある）となるから、右辺を ω ($= \text{const.}$) とおく。そのとき (C.3) 式は、

$$P^{-1} \cdot dP / dt = -\omega \quad (C.7)$$

の一次常微分方程式となり、この式を初期条件 ($P = P_0$ at $t = 0$) を与えて解くと、

$$P = P_0 \cdot \exp(-\omega t) \quad (C.8)$$

が得られる。この式がタンク内の圧力降下を表わす。

さて、初期に P_0 であった圧力が P まで下がるのに要する時間を t とすると、上式より、

$$-\omega t = \ln(P/P_0) \quad (C.9)$$

が得られるから、(C.6) 式の右辺を ω に代入して変形すると、等価断面積として

$$A = -t^{-1} \cdot \ln(P/P_0) \cdot V / \sqrt{\{R \cdot T k (2 / (k+1))\}^{(k+1)/(k-1)}} \quad (C.10)$$

が得られ、これに対応する等価直径を求めると以下となる。

$$D = \sqrt{(4A/\pi)} \quad (C.11)$$

尚、以上で算出した等価直径は簡単な場合であり、実際にはピリアル係数等の補正も考慮して、等価直径の計算を行った。

表1 試験条件一覧表

試験体 No.	2重管 タイプ	欠陥孔径 (mmφ)	欠陥孔 位置	流体	流体 温度 (°C)	流体 圧力 (atg)	噴出 時間 (時)	備 考	
T01	密着型	0.50	溝部	窒素	-	-	24	• 試験前後の比較用	
T02			界面部						
T04		0.10	溝部	蒸気	500	150		• レファレンスケース	
T05			界面部					• 欠陥孔設置位置の比較	
T06			溝部	水	300			• 流体条件の比較	
T07				蒸気	500			• 欠陥孔径の比較	
T08		0.50							
T10		多孔質型	0.50	-	窒素	-		-	24
T11	0.10		蒸気		500	150	• 2重管タイプの比較		

表2 試験体製作仕様

試験体 No.	2重管 タイプ	拡管率 (%)	欠陥孔 タイプ	欠陥孔 加工法	欠陥孔径 (mmφ)	欠陥孔 位置	試験体 本数 (本)	製作 No.	欠陥孔から 出口部まで の長さ(mm)	備考
T01	密着型	2.0	円孔型	機械加工	0.50	溝部	1	-	134.0	
T02						界面部			125.0	
T04				レーザ加工	0.10	溝部		0TTC9109-A	135.5	
T05						界面部		0TTC9109-G		
T06								0TTC9109-D		
T07						溝部		0TTC9109-E		
T08				機械加工	0.50			-	134.0	
T10				多孔質型	-	円孔型		レーザ加工	0.50	
T11	機械加工	0.10								

表3 水質検査結果一覧

試料名	分 析 項 目										
	p h	電気伝導率	溶存酸素	濁 度	ヒドラジン	T-Fe	T-Cu	Cl ⁻	Na ⁺	蒸発残留物	SiO ₂
T-08 凝縮水	6.9 (17°C)	52.0 (17°C)	-	11	<0.010	<0.010	0.091	0.081	0.071	28	0.027
T-08 水加熱器 (試験後)	8.2 (18°C)	26.0 (18°C)	1.72	2	<0.010	0.33	<0.010	0.17	0.41	28	1.13
T-11 凝縮水	6.3 (19°C)	50.0 (19°C)	-	5	0.012	0.012	0.39	0.028	0.018	<1	0.043
T-05 水加熱器 T-07 (試験後)	7.5 (16°C)	26.0 (16°C)	1.90	5	<0.010	0.55	<0.010	0.23	0.68	81	1.10
T-06 水加熱器 (ろ水)	6.4 (17°C)	21.0 (17°C)	-	測定不可能 (>100)	<0.010	0.16	0.040	0.46	0.92	168	0.86
T-06 水加熱器 (純水)	8.1 (17°C)	7.0 (17°C)	-	<1	<0.010	0.035	0.020	0.11	0.096	<1	0.046
T-06 水加熱器 (試験後)	6.5 (19°C)	21.0 (19°C)	-	<1	<0.010	0.79	<0.010	0.42	0.40	9	1.70
単 位	-	μs/cm	mg/l	度	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l

表4 本試験と実機（もんじゅ）での水質比較

項目	もんじゅ*1	本試験*2
pH (at 25°C)	9.3~9.5	6.3~8.2
全鉄 (T-Fe)	< 7 PPb	< 790 PPb*4
Cl (Cl ⁻)	< 5 PPb	< 460*3 PPb
全銅 (T-Cu)	< 2 PPb	< 390 PPb
シリカ (SiO ₂)	< 20 PPb	< 1,700 PPb
O ₂ (溶存酸素)	< 7 PPb	< 1,900 PPb
ヒドラジン	10~20 PPb	< 12 PPb
電導率(電気電導率)	< 0.3 μΩ/cm	< 52 μs/cm
全固形分(蒸発残留物)	< 50 PPb	< 81,000*3 PPb
Na (Na ⁺)	< 5 PPb	< 920*3 PPb
濁度		< 11*3 度

*1) 通常運転時（運転負荷30%以上）での蒸発器入り口での水質基準値。

*2) 本試験で得られた結果に基づく。（表3参照）

*3) T-06水加熱器(7^号-水)での水質検査結果は、他の試験ケースに比べ異常に高い値を示しており、これはブロー系配管内での不純物(工業用オイル)による影響であった可能性が大きいと考えられるため、ここではその対象から除外した。

*4) 10³PPb = 1PPm = 1mg/l

表5 試験後の試験体の外観状況

No	外管-外表面	外管-内表面	内管-外表面
T01	1. 所々に錆が付着している。 2. 約0.5mmφの欠陥孔。	1. ほぼ全面に薄い錆が付着。 2. 約0.5mmφの欠陥孔。	1. ほぼ全面に薄い錆が付着。 2. 溝底凸部には周方向の加工痕と欠陥孔作成時のドリル痕(≒0.5mmφ)
T02	1. 所々に錆が付着。 2. 約0.6mmφの欠陥孔。	1. 錆の付着は見られない。 2. 約0.2mmφの欠陥孔。	1. 錆の付着は見られない。 2. 約0.2mmφのドリル痕
T04	1. 欠陥孔は2段で外孔の内と周辺に強固な錆が付着。 2. 外孔：3mmφ、内孔：閉塞	1. ほぼ全面に薄い錆が付着。 2. 欠陥孔(≒0.06mmφ)周辺が黒く変色。	1. ほぼ全面に薄い錆が付着。 2. 溝底凸部には周方向の加工痕とドリル痕(黒く着色)があり、周方向：0.5mm、長手方向1mmの変色域がある
T05	1. 欠陥孔は2段孔で外孔の内と外表面に錆が付着。 2. 外孔：3mmφ、内孔：閉塞	1. 全体的に薄く変色している 2. 約0.03mmφの欠陥孔。	1. 全体的に薄く変色している
T06	1. 錆の付着は見られない 2. 欠陥孔は2段孔で、外孔：3mmφ、内孔：約0.1mmφ	1. 同左 2. 溝側面に約0.06mmφの欠陥孔があり、周囲が黒く変色している。	1. 同左 2. 溝底凸部には周方向の加工痕と約0.06mmφのドリル痕がある。
T07	1. 欠陥孔は2段孔で、外孔の内と外表面に錆が付着。 2. 外孔：3mmφ 内孔：約0.05mmφ	1. 錆の付着は見られない。 2. 欠陥孔は確認出来ない。	1. 錆の付着は見られない。 2. 溝底凸部には周方向の加工痕と長手方向に傷が見られる。
T08	1. 錆の付着は見られない。 2. 約0.5mmφの欠陥孔。	1. 所々に薄い錆が付着。 2. 約0.4mmφの欠陥孔。	1. 同左 2. 溝底凸部には周方向の加工痕と約0.06mmφのドリル痕が見られる。
T10	1. ほぼ全面に錆が付着している。 2. 約0.5mmφの欠陥孔。	—————	—————
T11	1. 錆の付着は見られない。 2. 欠陥孔：1mmφで2段孔と思われるが内孔は見えない	—————	—————

表6 試験後の試験体の表面状況（SEM観察）

No	外管-内表面	内管-外表面
T04	<p>1. 低倍観察より、欠陥孔周りにバリ状の突起があり、欠陥孔近傍の溝側面で滑らかな様相が見られる。</p> <p>2. 高倍観察より、溝凹部の欠陥孔近傍では粒状の付着物が多く、欠陥孔から離れるに従って付着物が減少している。</p> <p>溝側面は、欠陥孔近傍で極端に滑らかな様相となる。</p>	<p>1. 低倍観察より、欠陥孔対称位置には、粒状の付着物が多数見られる。</p> <p>2. 高倍観察より、溝凸部では、多数の粒状の付着物が見られ、離れるに従って、数、大きさも減少し、1mmの位置では、小さなピット状の穴が見られる。</p>
T06	<p>1. 欠陥孔近傍の溝側面では、表面の加工痕が見られず、滑らかな様相を呈している。</p> <p>2. 粒状の付着物は見られない。</p>	<p>1. 他の領域と比較して、加工痕跡が弱く、滑らかな表面状態を呈し、小さなピット状の穴が見られる。</p>
T07	<p>特に変化は認められない。</p>	<p>1. 欠陥孔対称位置だけに粒状の酸化物がなく、明瞭な加工痕が見られる。</p> <p>2. 他の領域には、酸化物が見られる。</p>
T08	<p>同上</p>	<p>1. 加工痕が見られず、滑らかな様相を呈し、小さなピット状の穴が見られる。</p>

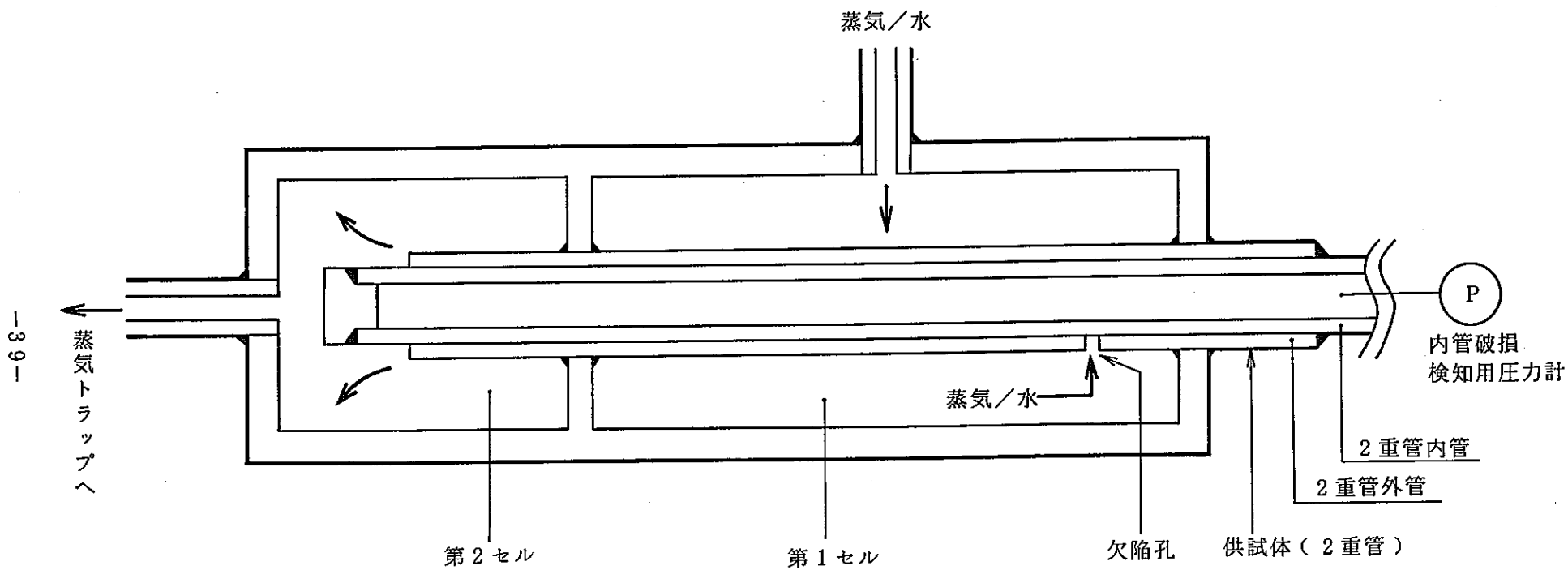


図1 試験体形状

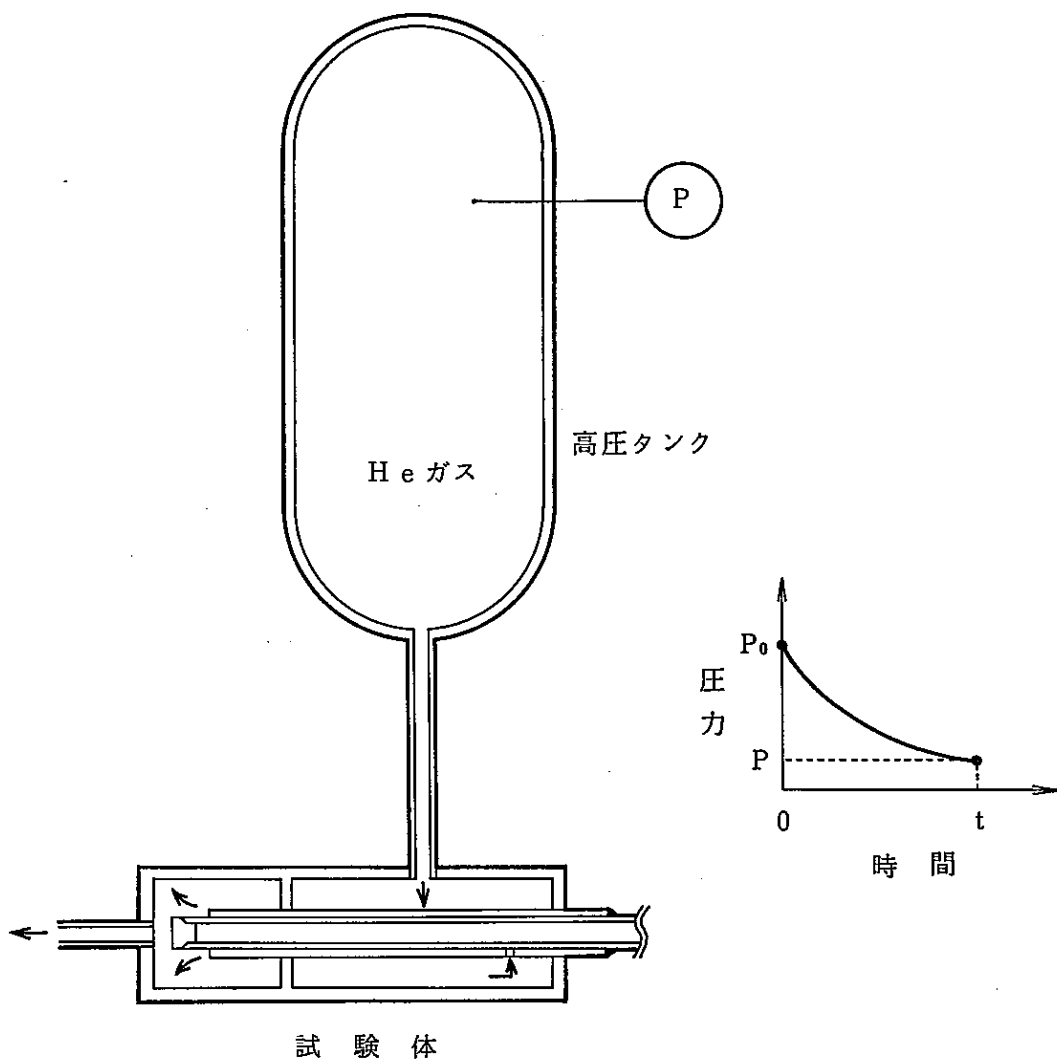


図2 欠陥孔の等価孔径測定法を示す概念図

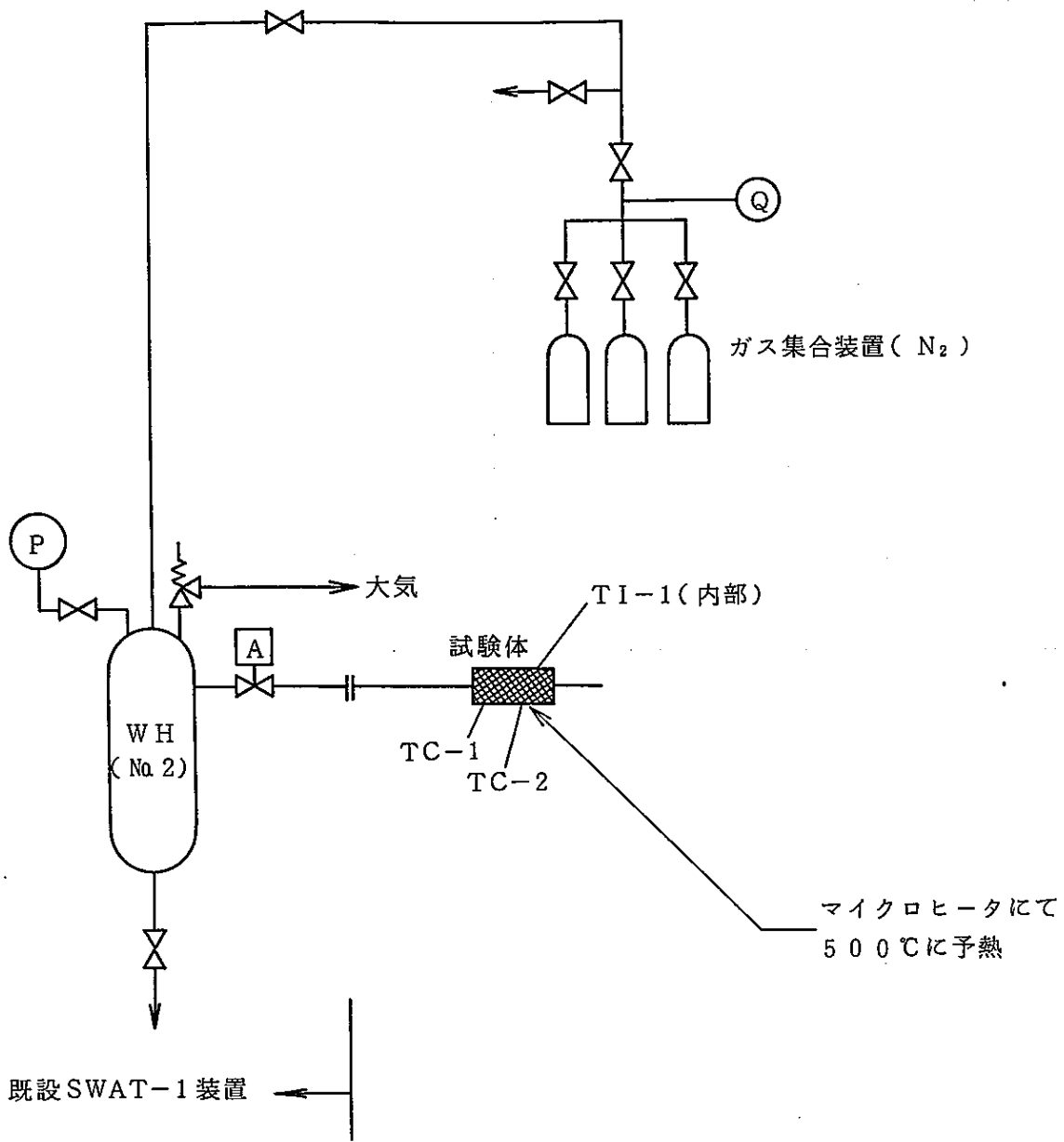


図3 ガス試験用試験装置

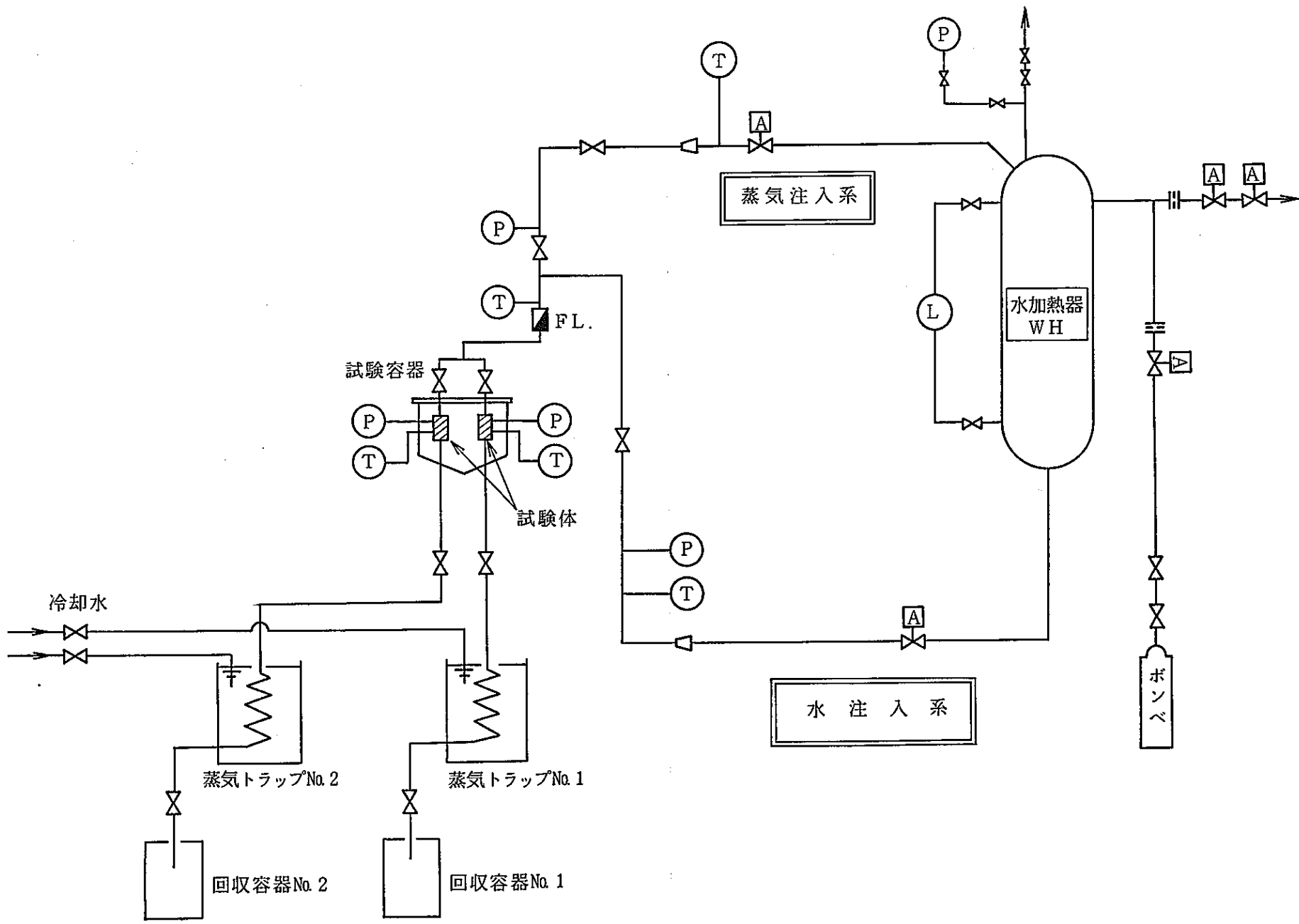


図4 蒸気試験用試験装置

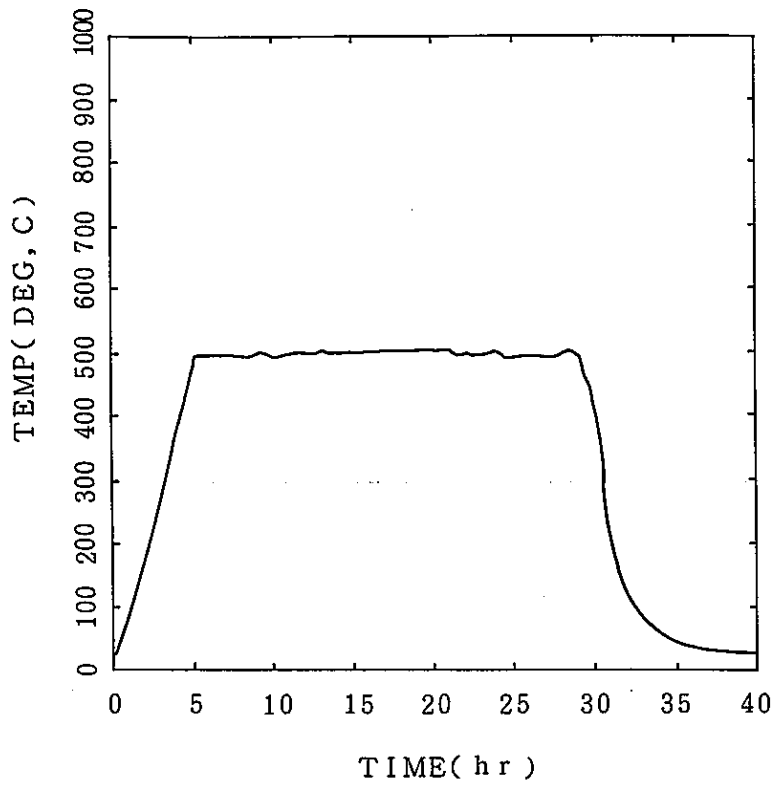


図5 ガス試験時の試験体温度履歴(T-10)

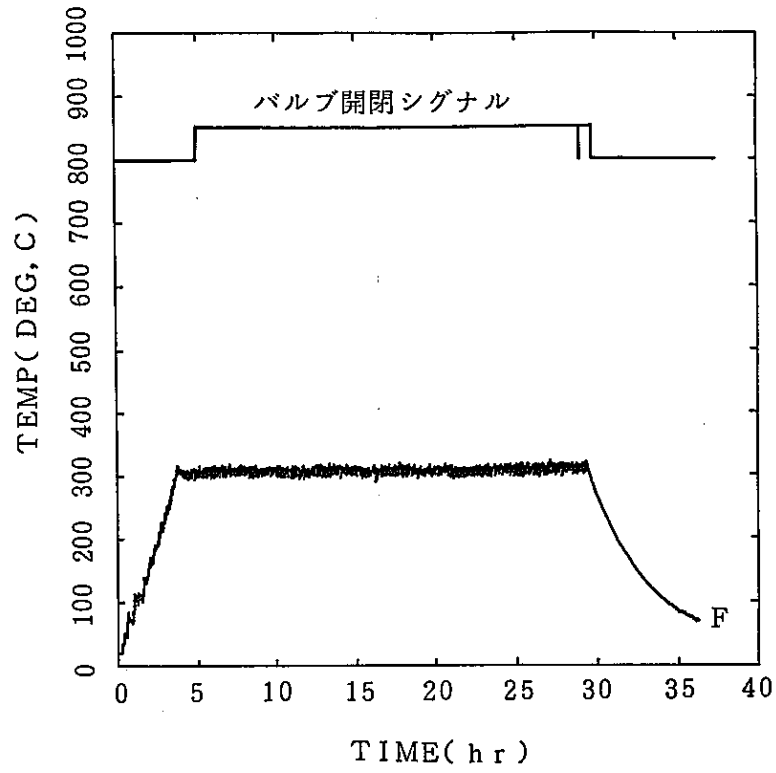


図 6(a) 蒸気試験時の試験体温度履歴 (T-06)

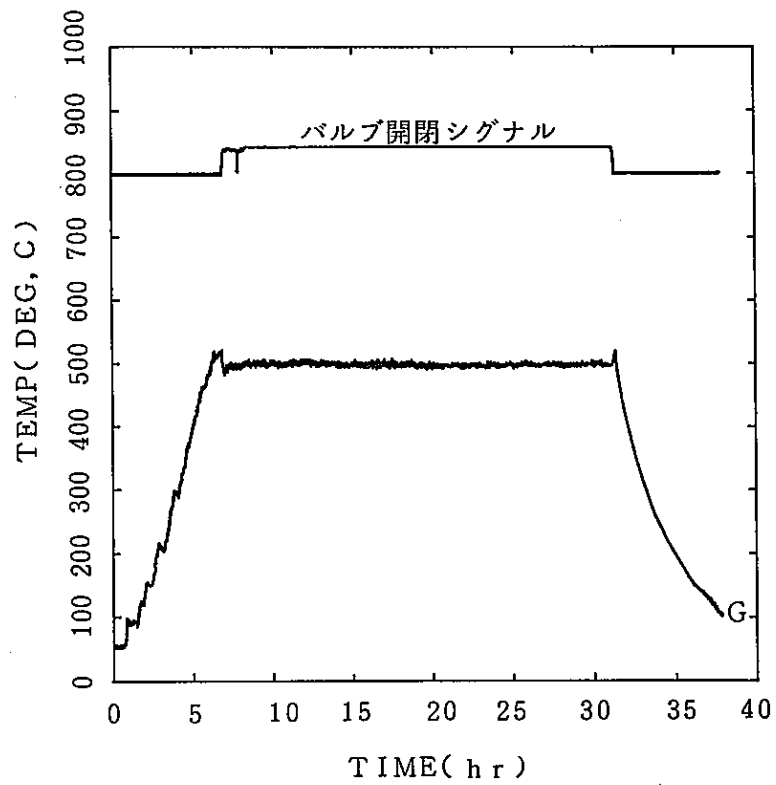


図 6(b) 蒸気試験時の試験体温度履歴 (T-08)

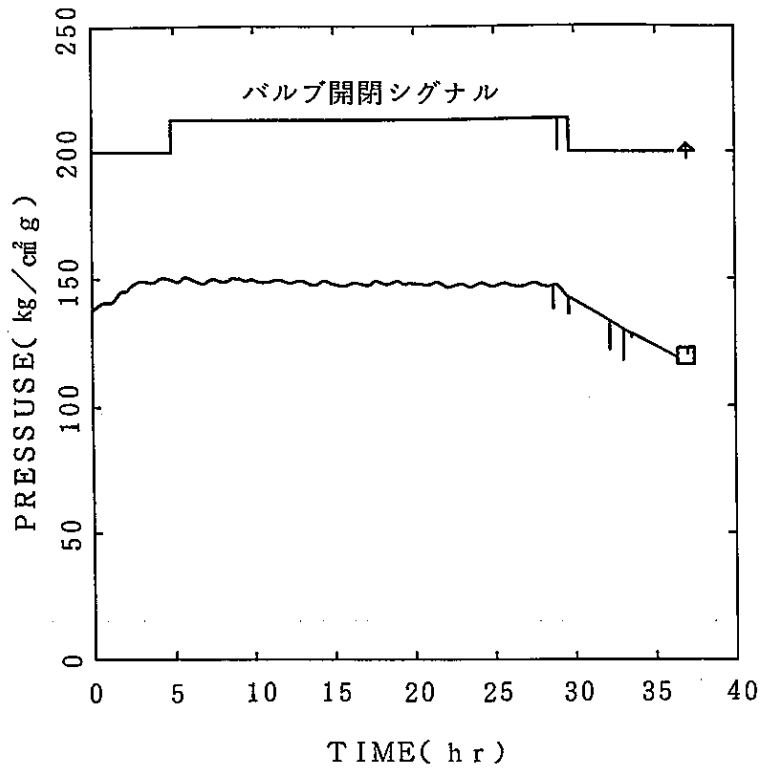


図7 蒸気試験時の水加熱器圧力履歴 (T-06)

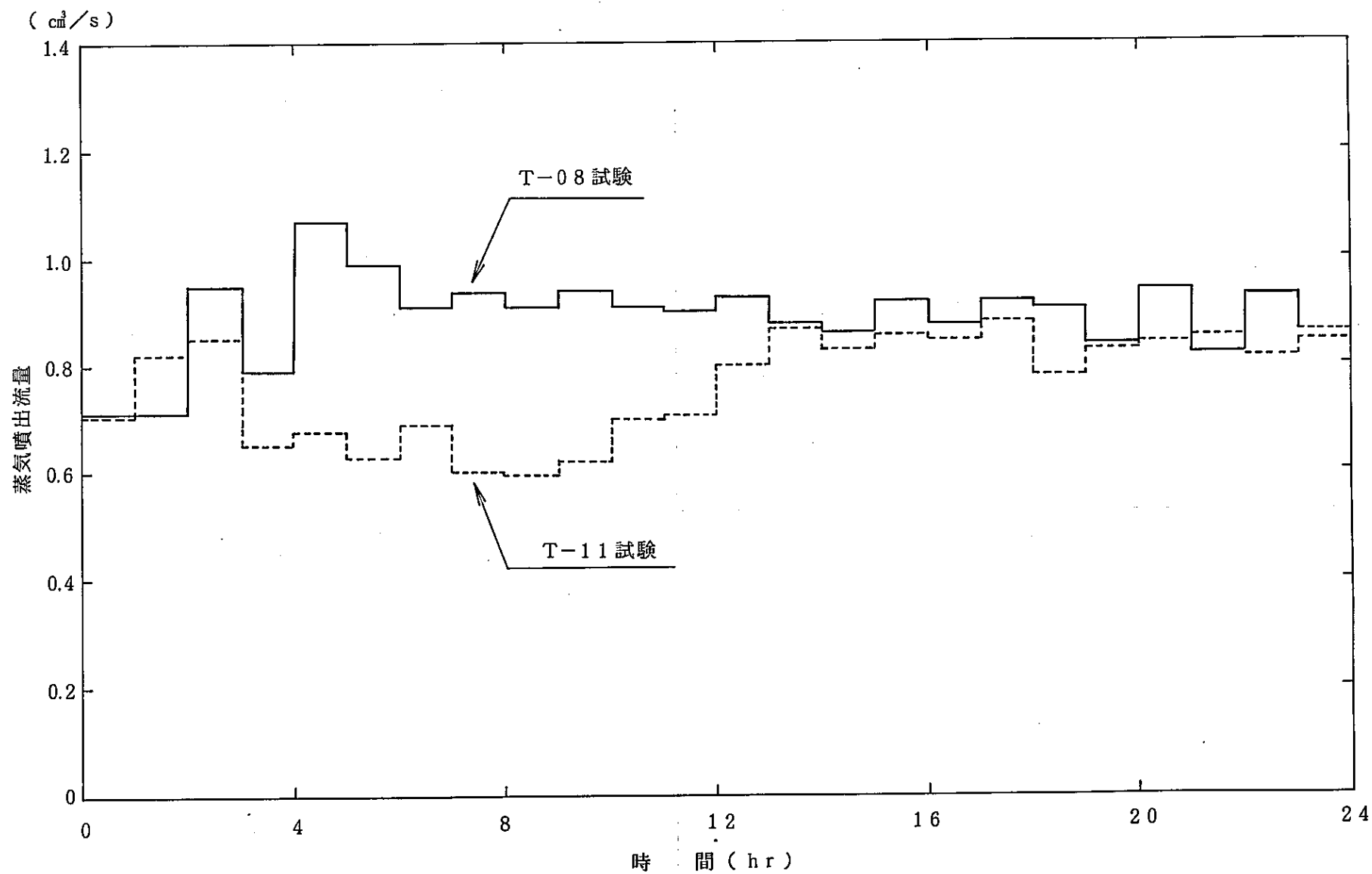


図8 蒸気流入流量の推移 (T-08, T-11 試験)

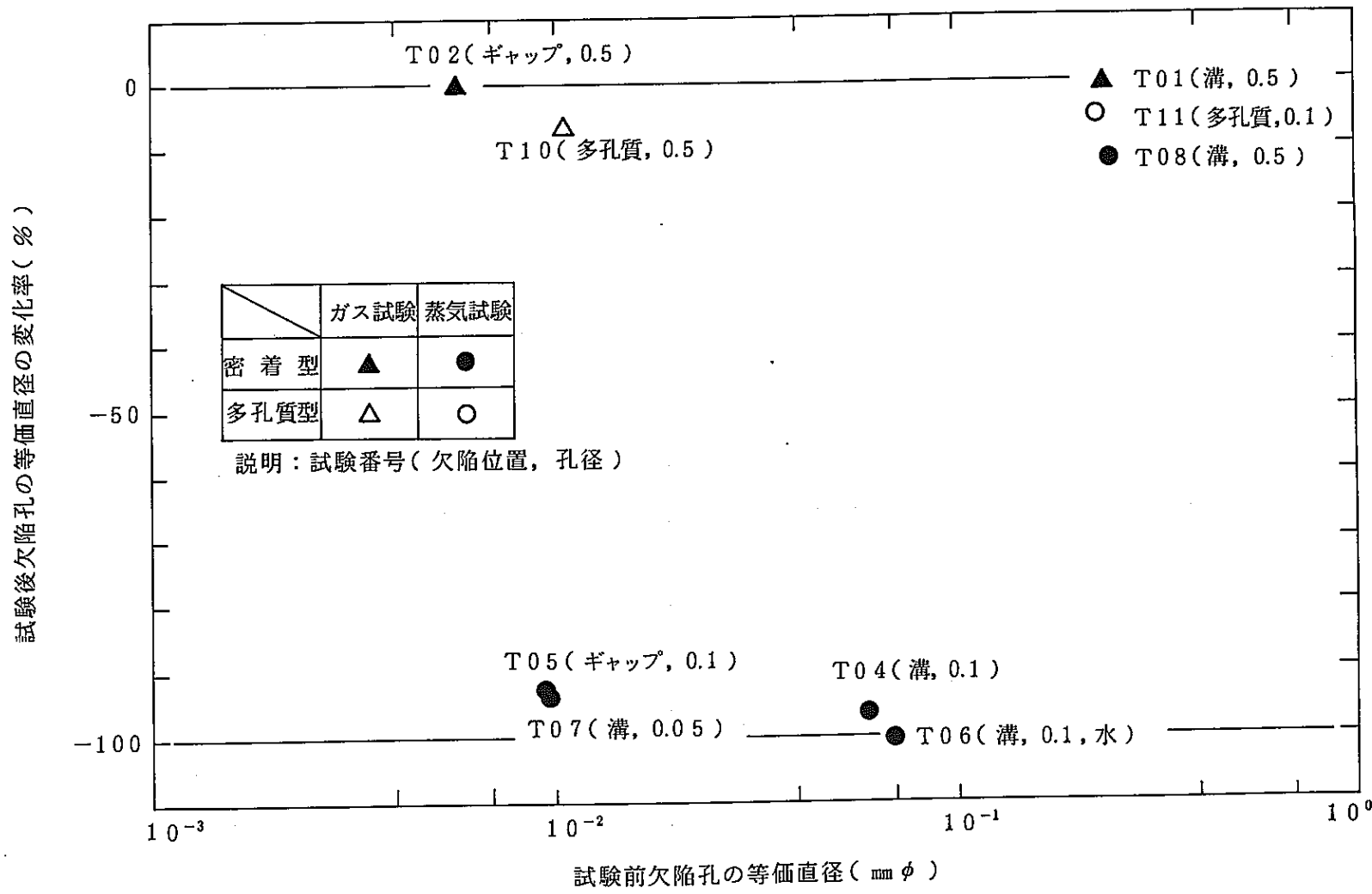
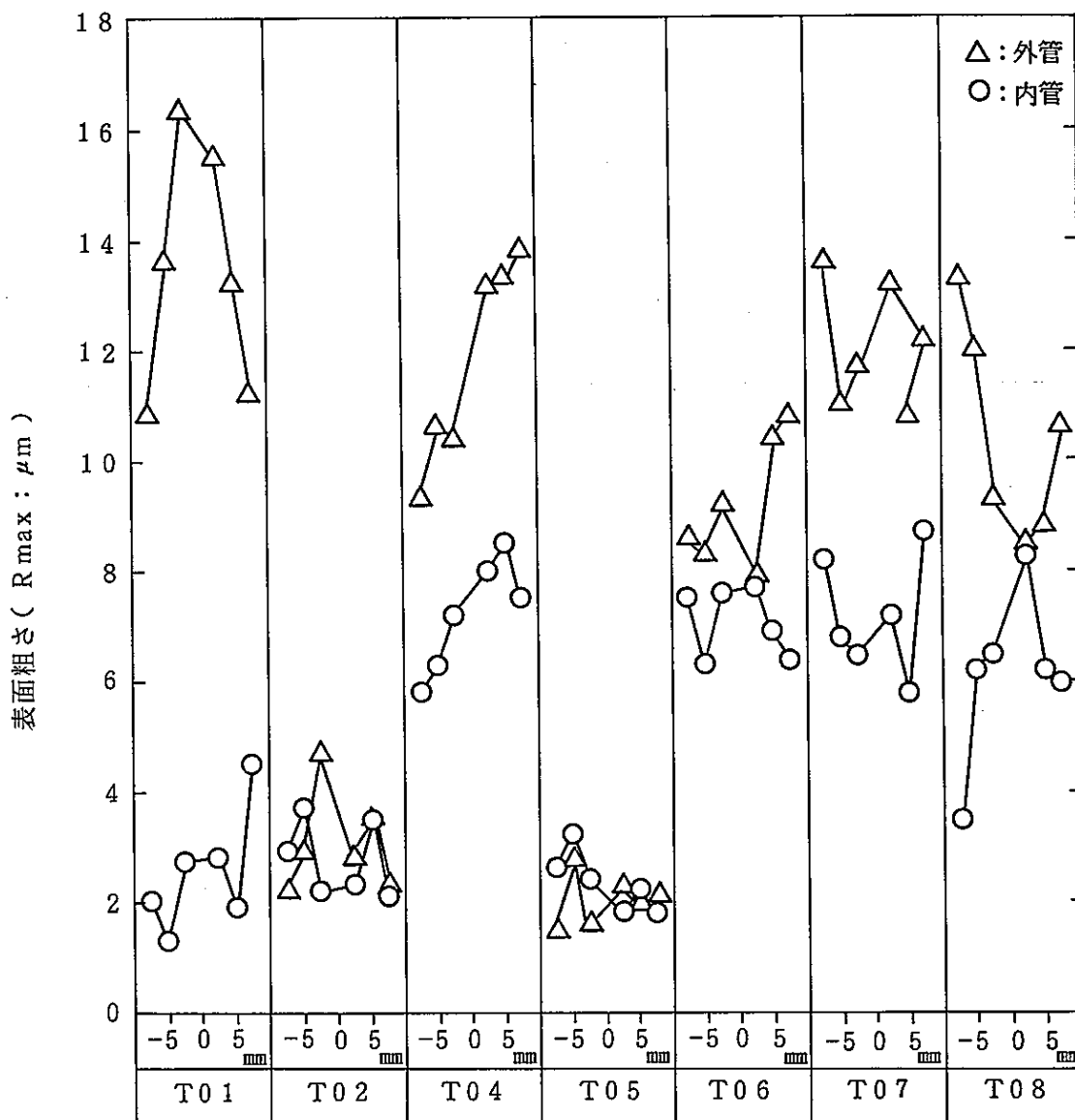
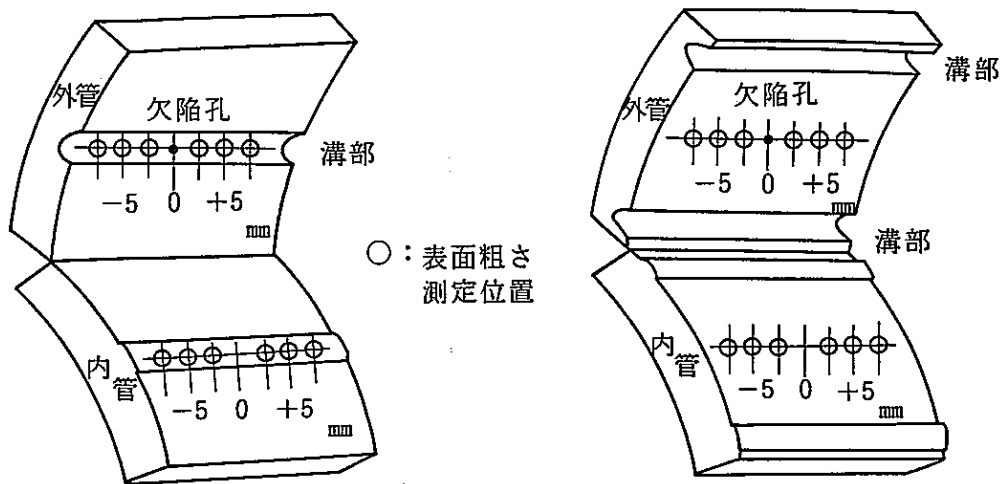


図9 等価孔径の試験前後の比較

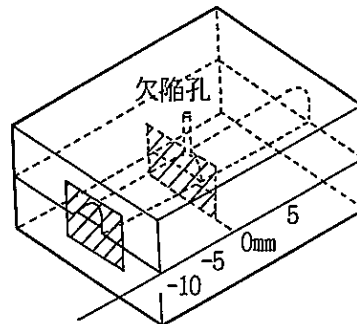
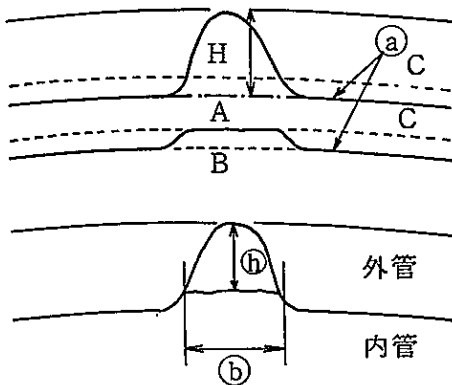
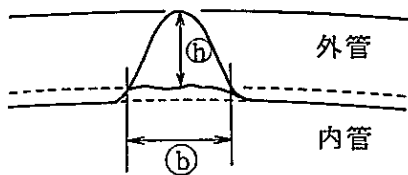


試験体及び測定位置

図10 試験後の供試体の表面粗さ測定結果

分割部 (0.5 mm 0.3 mm 0.1 mm 0mm)

未分割部 (10mm)



測定要領

- A : 外管内径仮設曲線
- B : 内管外径仮設曲線
- C : 内管凸部仮設曲線

- h : 溝高さ $h = H - a$
- b : 溝幅
- a : 内管凸部高さ
- H : 外管内径仮設曲線からの溝高さ (見掛高さ)

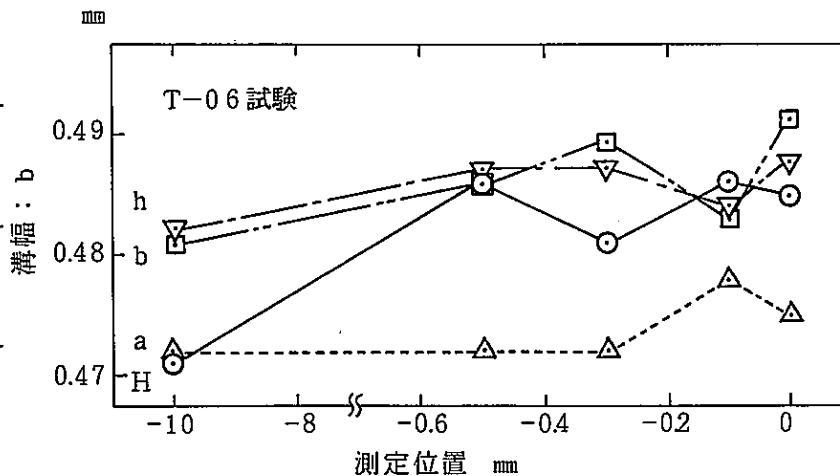
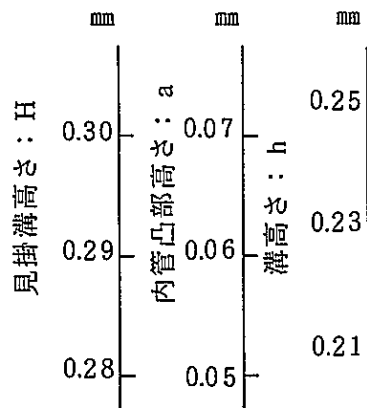
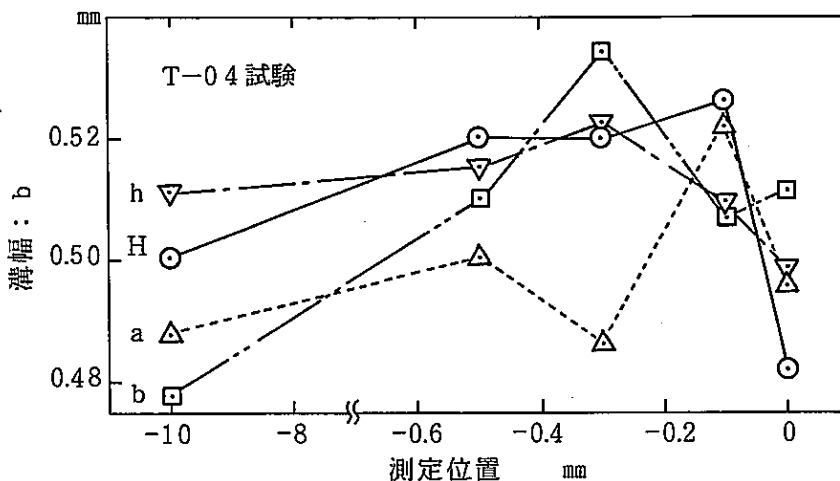
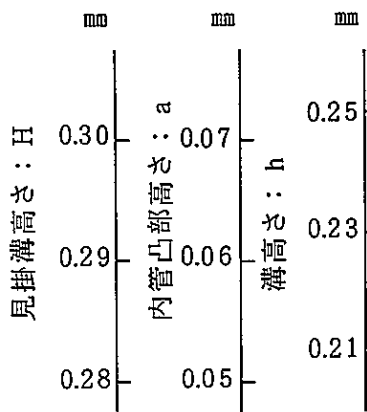


図 1 1 試験後の供試体の溝部寸法測定結果

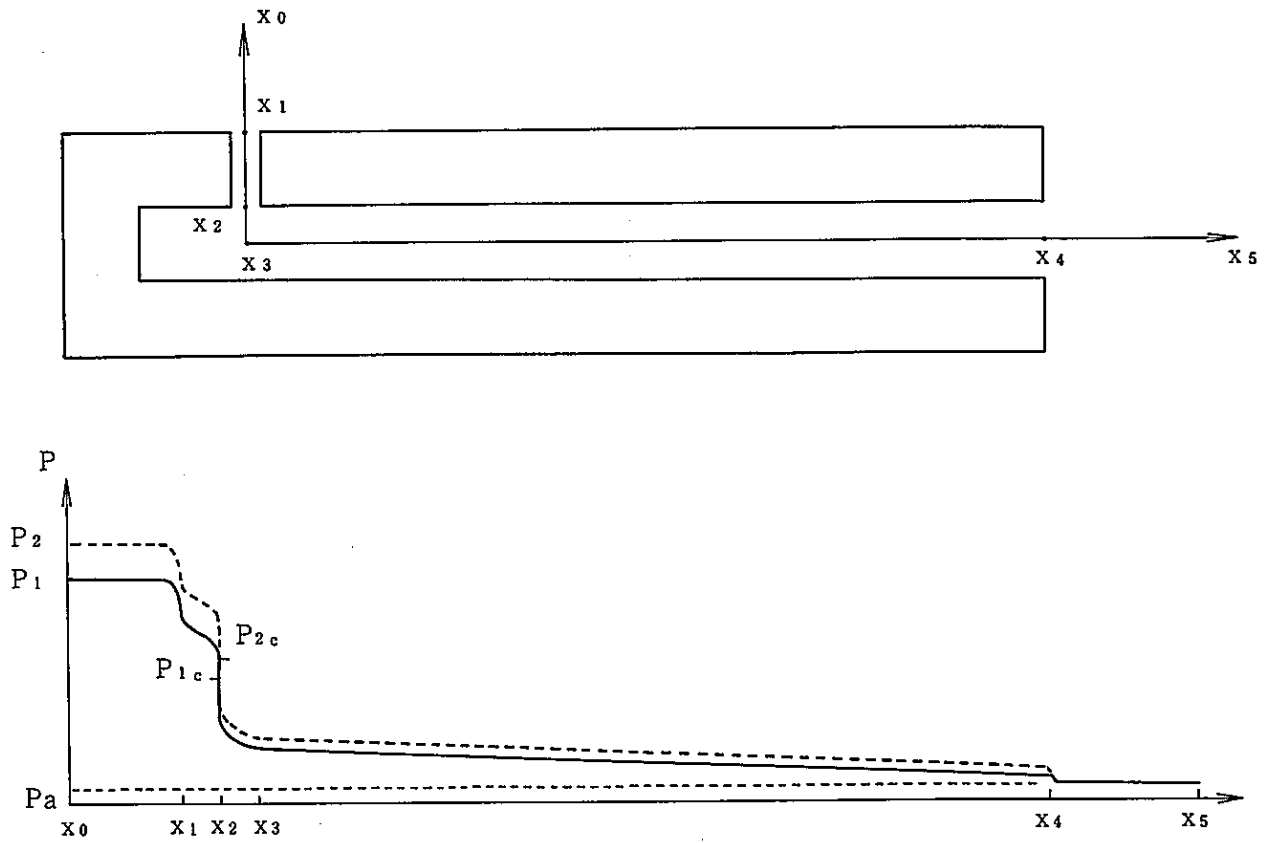


図 1 2(a) 流路に沿った圧力変化の模式図 (溝部欠陥孔)

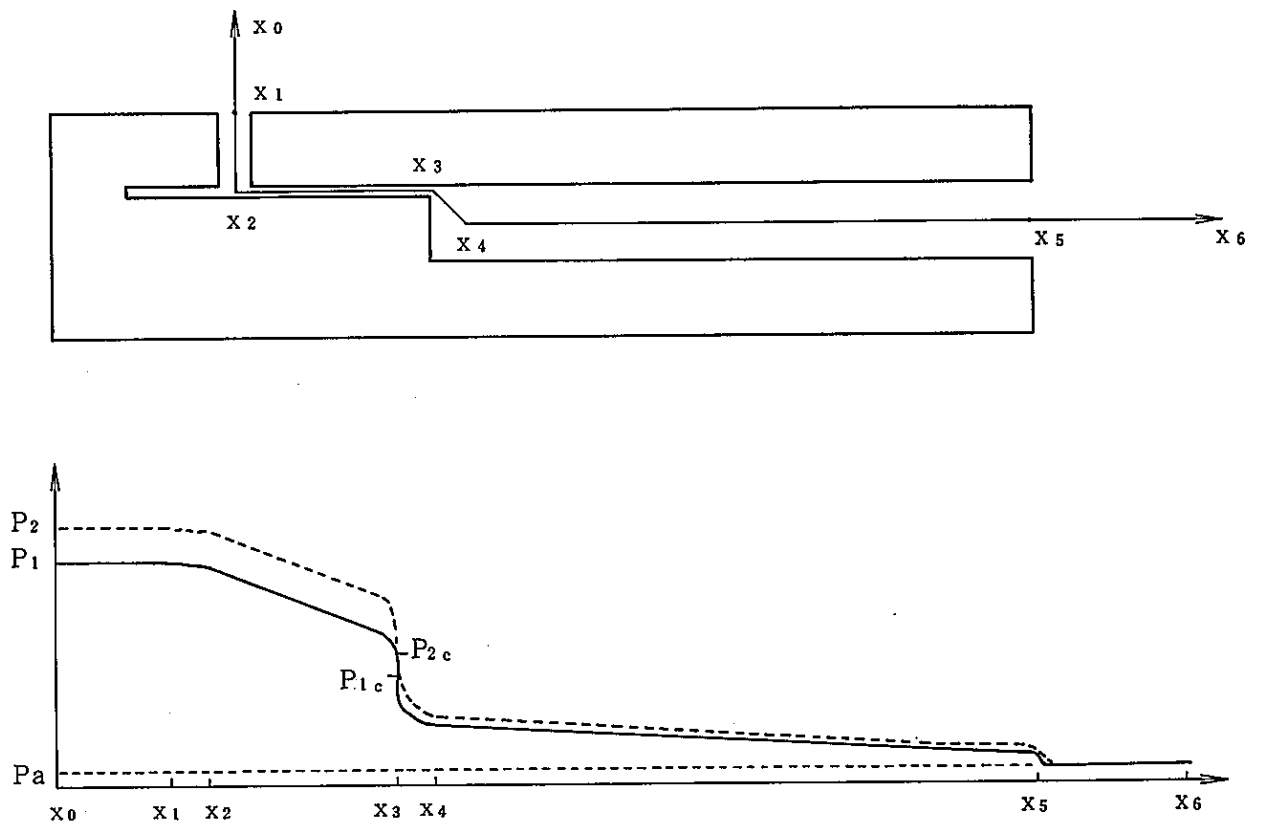


図 1 2(b) 流路に沿った圧力変化の模式図 (ギャップ部欠陥孔)

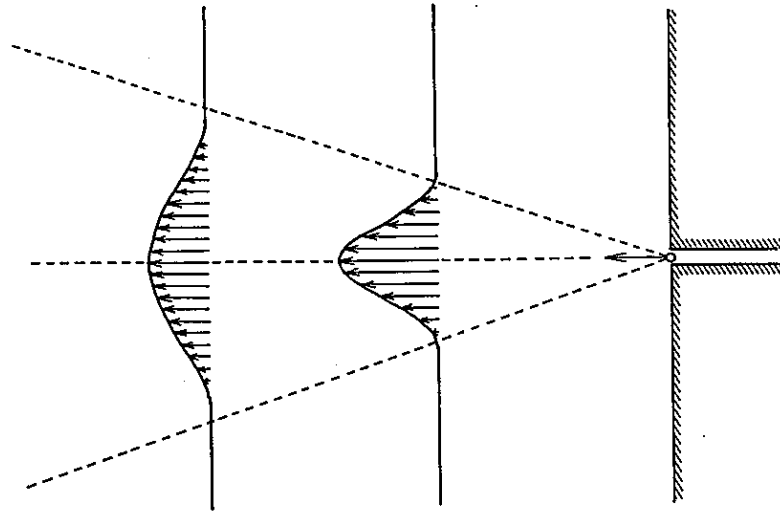


図 1 3 噴流断面内の流速分布の模式図

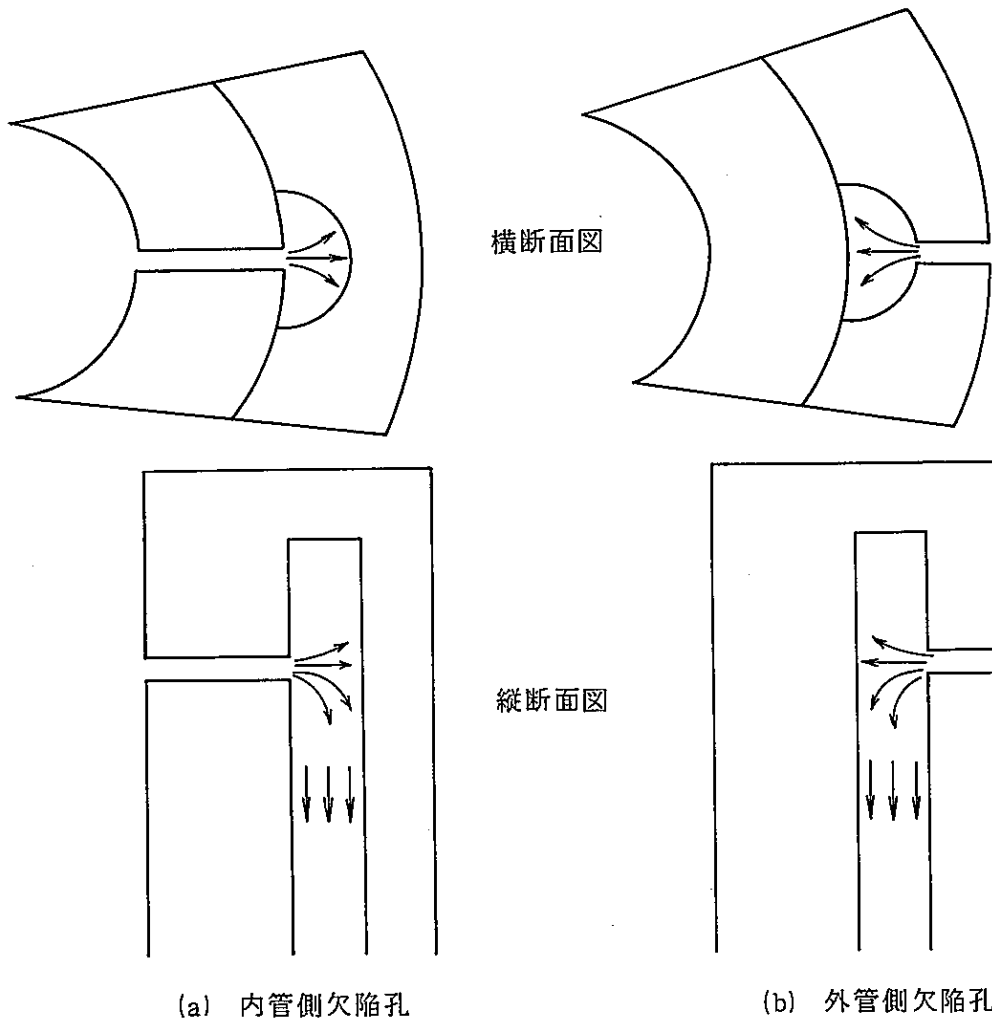
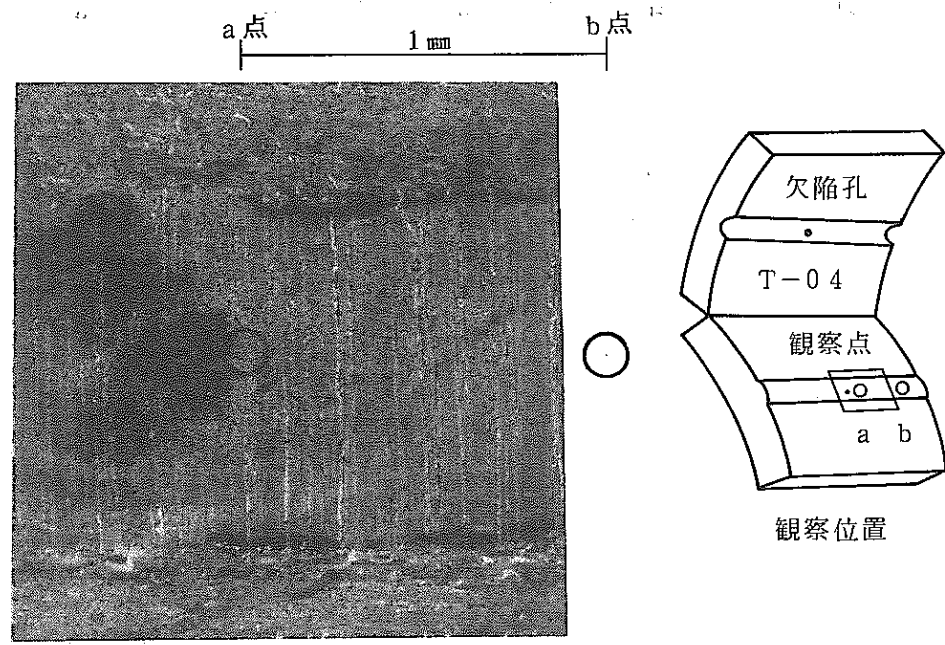
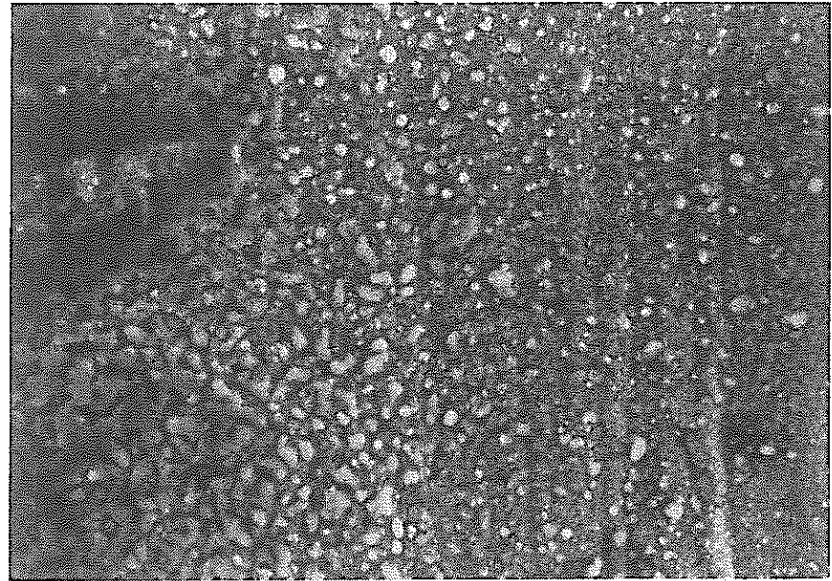


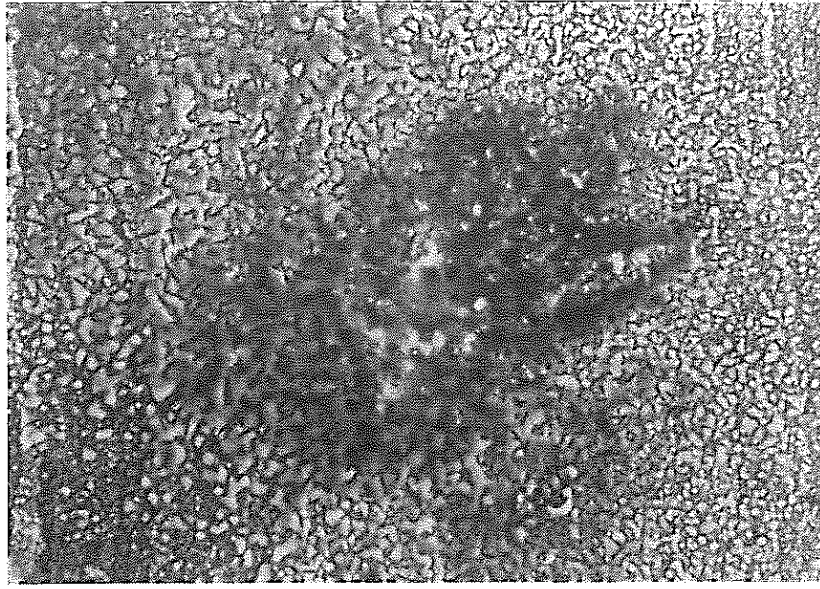
図 1 4 欠陥孔を含む横／縦断面の模式図



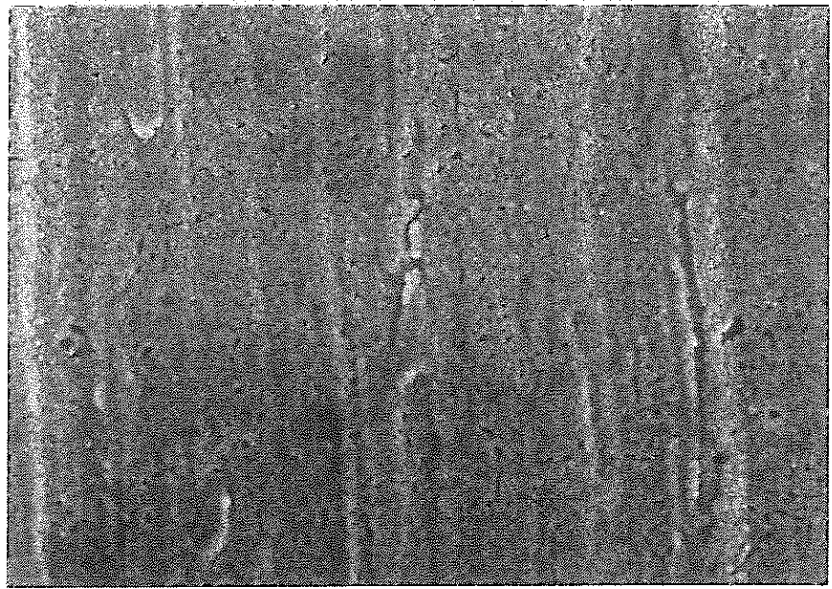
(a) SEM観察拡大位置 (×100)



(c) a点拡大 (×1000)



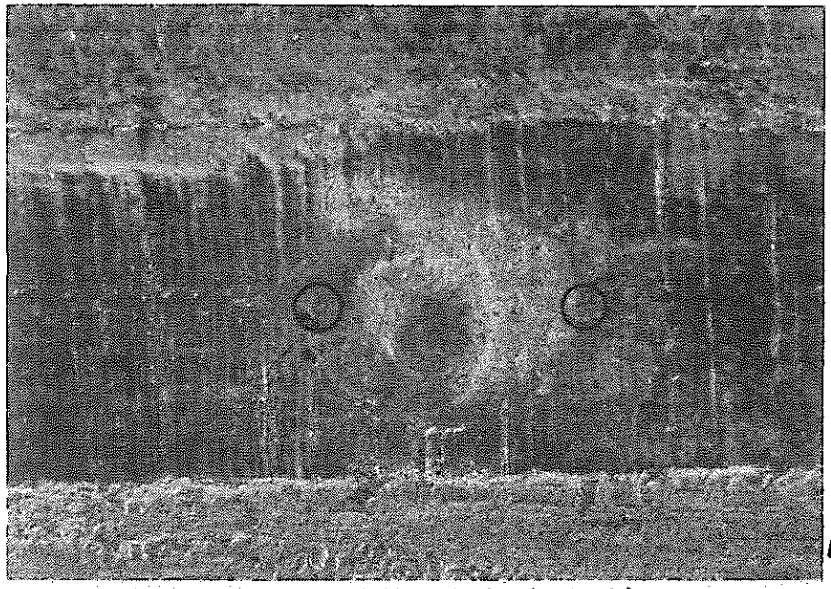
(b) 同上拡大 (×500)



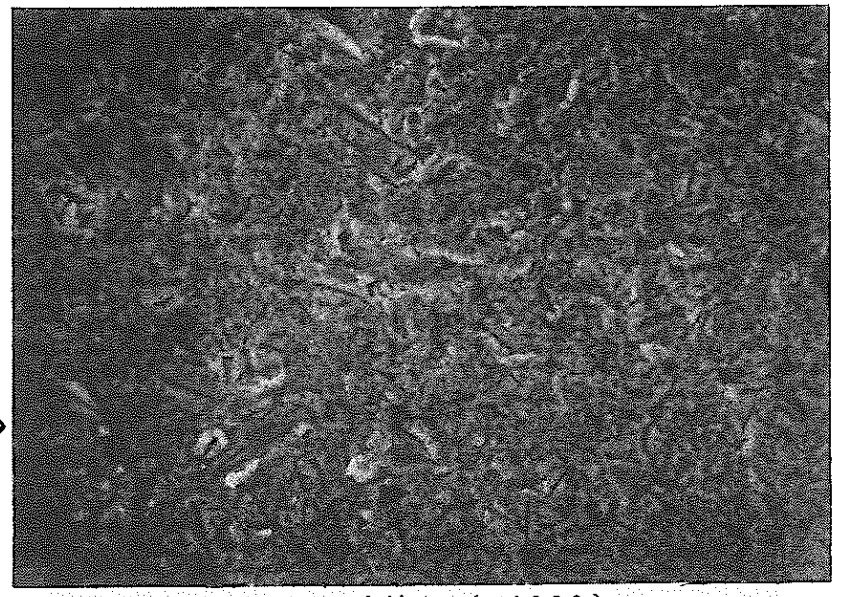
(d) b点拡大 (×1000)

写真1 内管の外表面SEM観察T-04

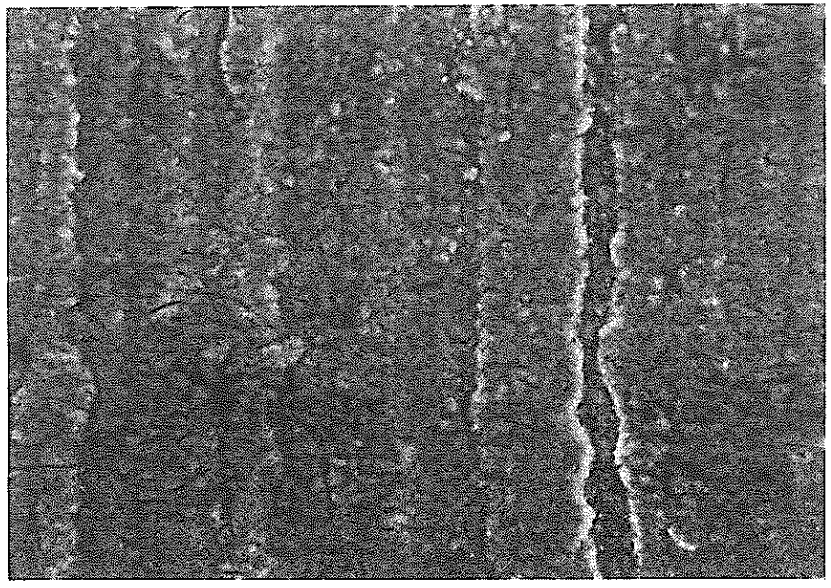
c点 1mm d点 a点 1mm b点



(a) SEM観察拡大位置 (×100)



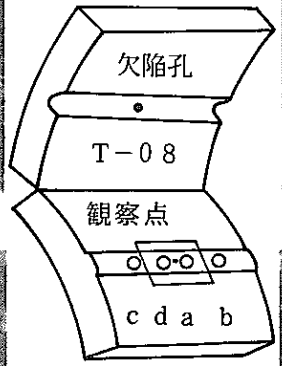
(d) a点拡大 (×1000)



(b) c点拡大 (×1000)

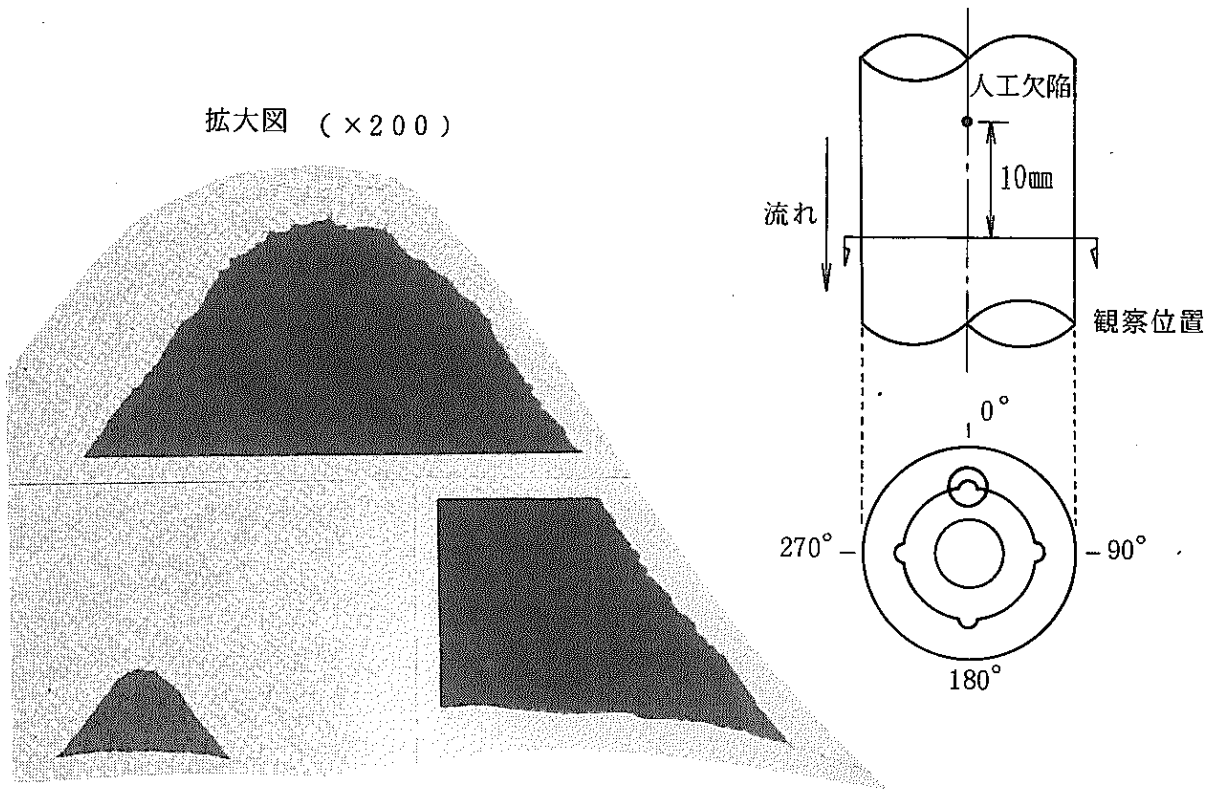


(c) b点拡大 (×1000)



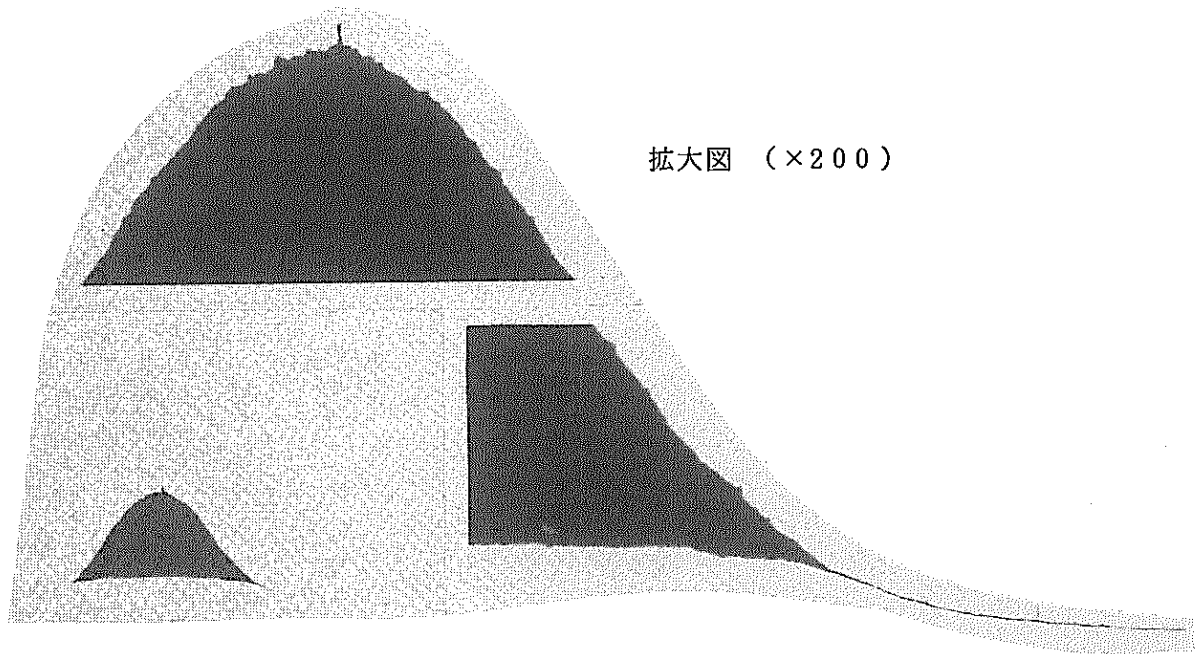
-53-

写真2 内管の外表面SEM観察T-08



(a) T-04 供試体溝部 (×50)

拡大図 (×200)



(b) T-08 供試体溝部 (×50)

拡大図 (×200)

写真3 断面顕微鏡観察(ノエッチ) T-04, T-08 溝形比較

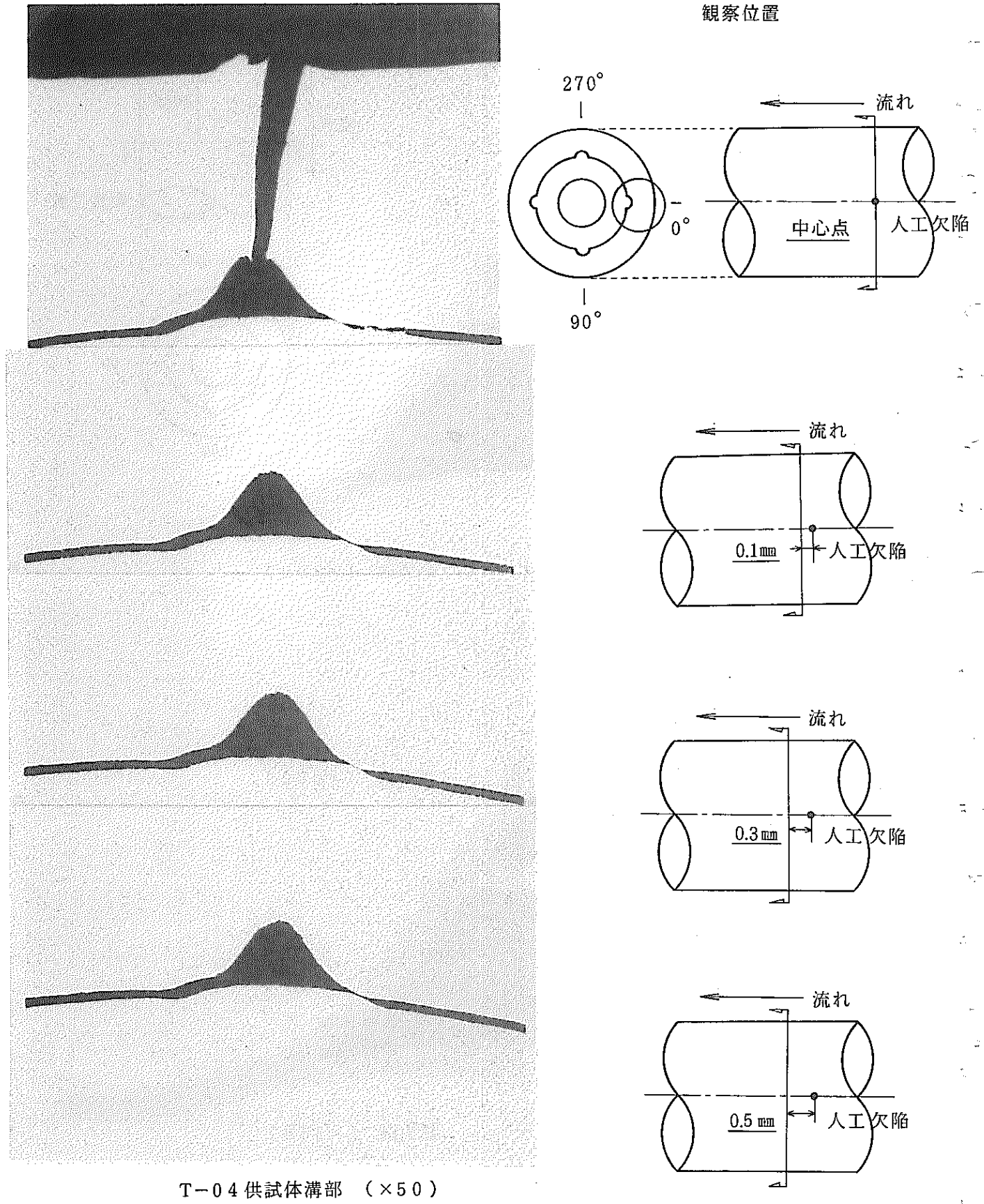
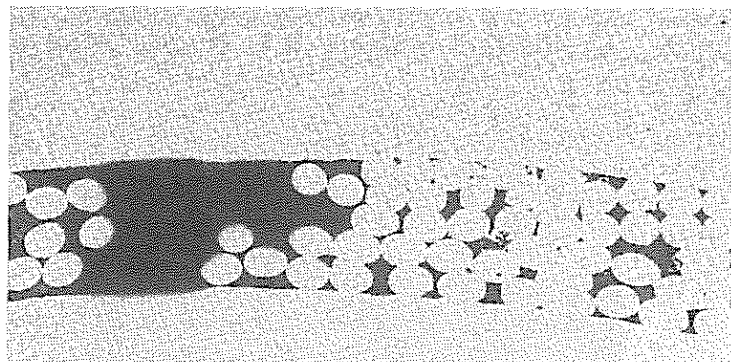
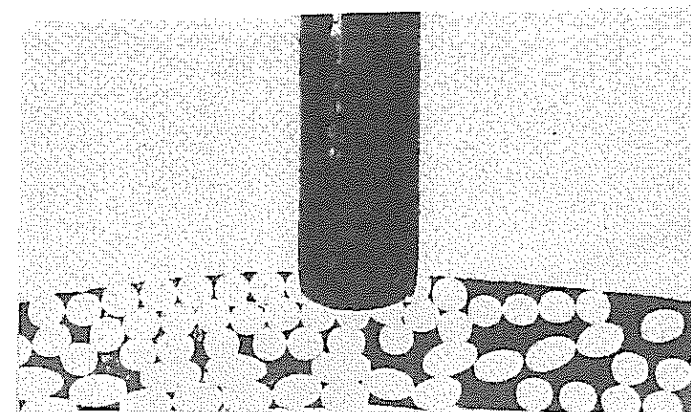


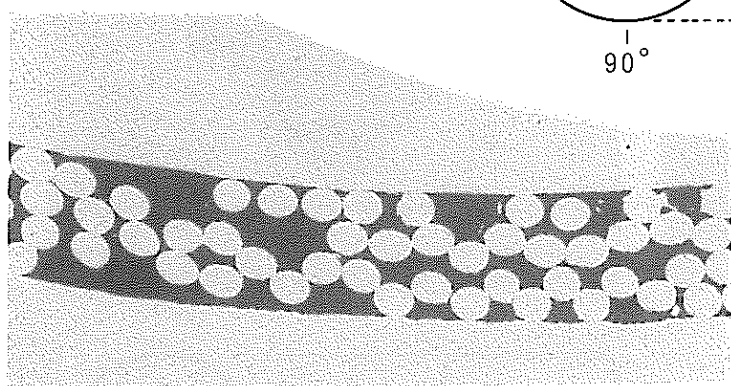
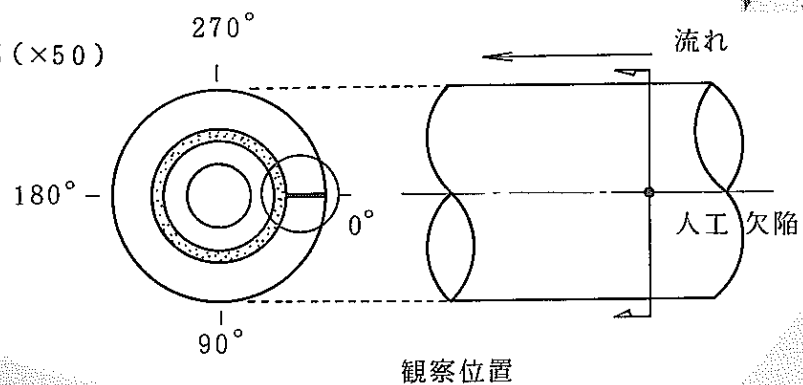
写真4 断面顕微鏡観察(ノエッチ) T-04 溝形の位置的变化



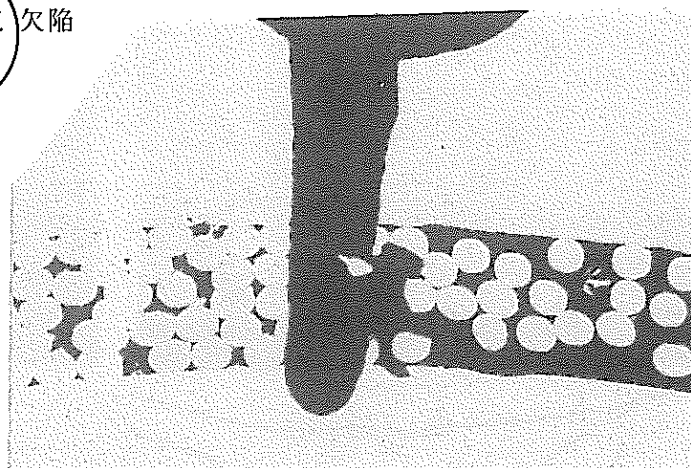
(a) T-11 供試体溝部 (×50)
270° 位置



(d) T-10 供試体溝部 (×50)
欠陥孔部

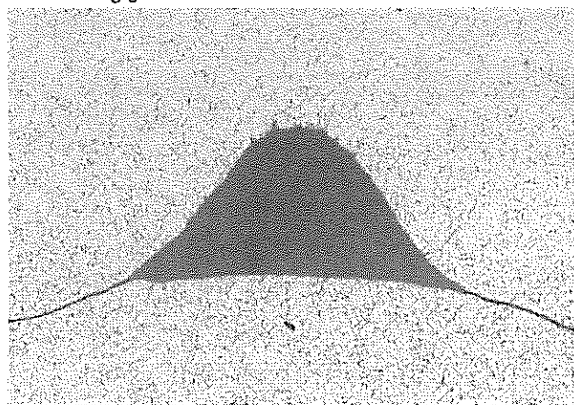
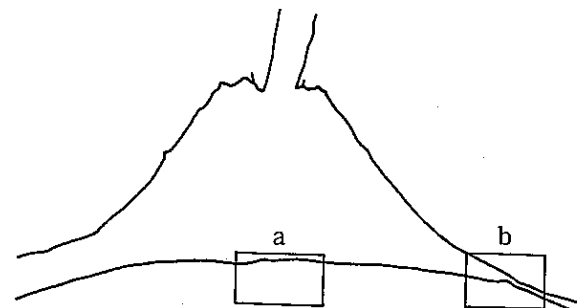
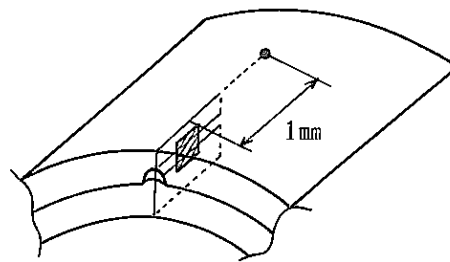
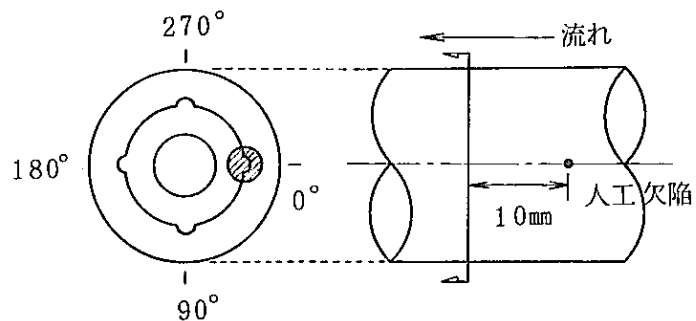


(b) T-11 供試体溝部 (×50)
90° 位置

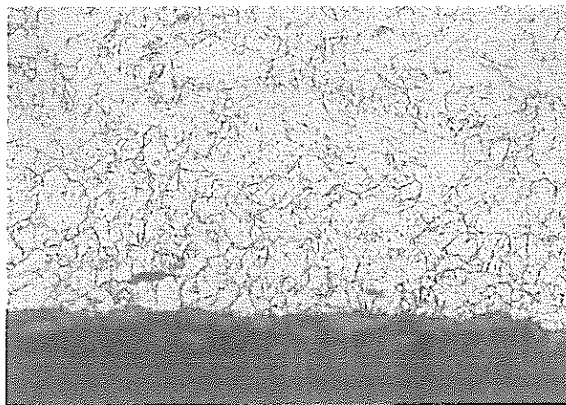


(c) T-11 供試体溝部 (×50)
欠陥孔部

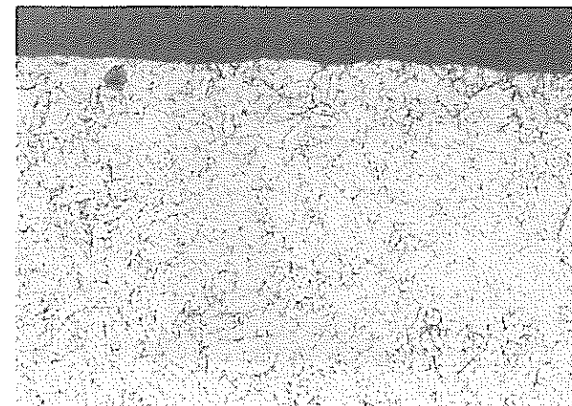
写真5 断面顕微鏡観察(ノエッチ) T-10, T-11 中心点



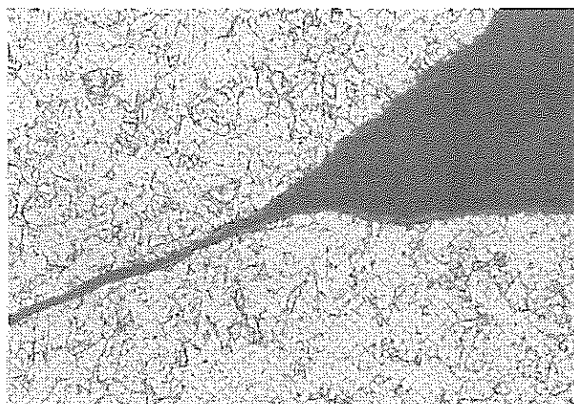
(a) 溝部下流点 10 mm
($\times 100$)



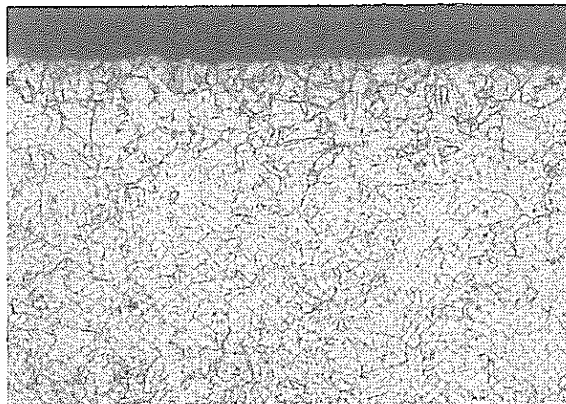
(c) 溝部下流点 1 mm
外管断面 ($\times 400$)



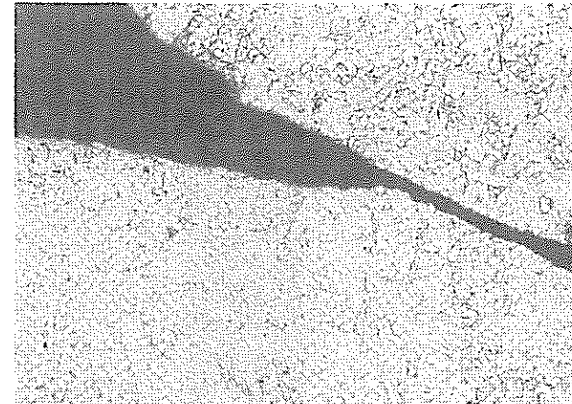
(e) 欠陥孔中心点
上图 a 点 ($\times 400$)



(b) 溝部下流点 10 mm
同上拡大 ($\times 400$)

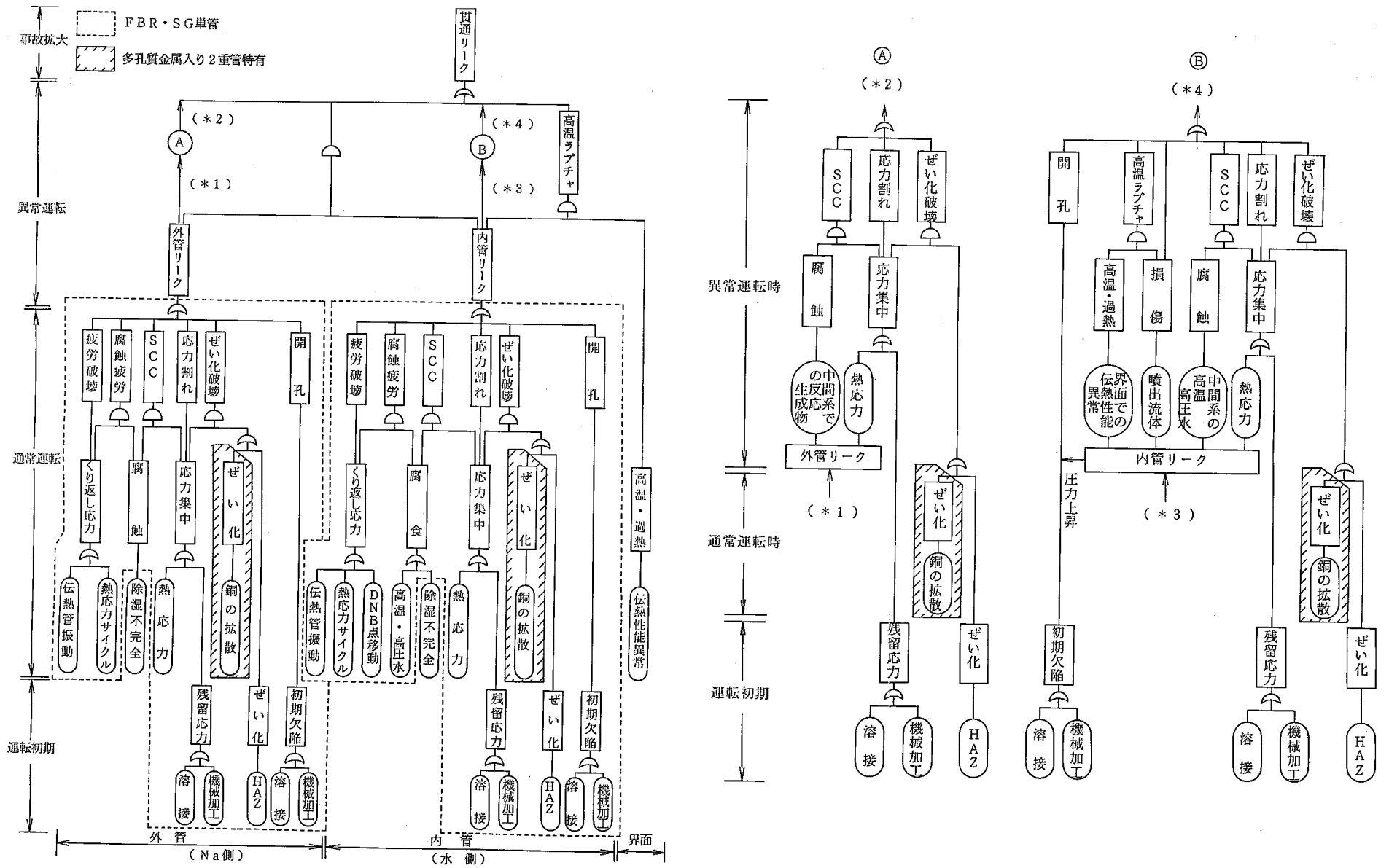


(d) 溝部下流点 1 mm
内管断面 ($\times 400$)

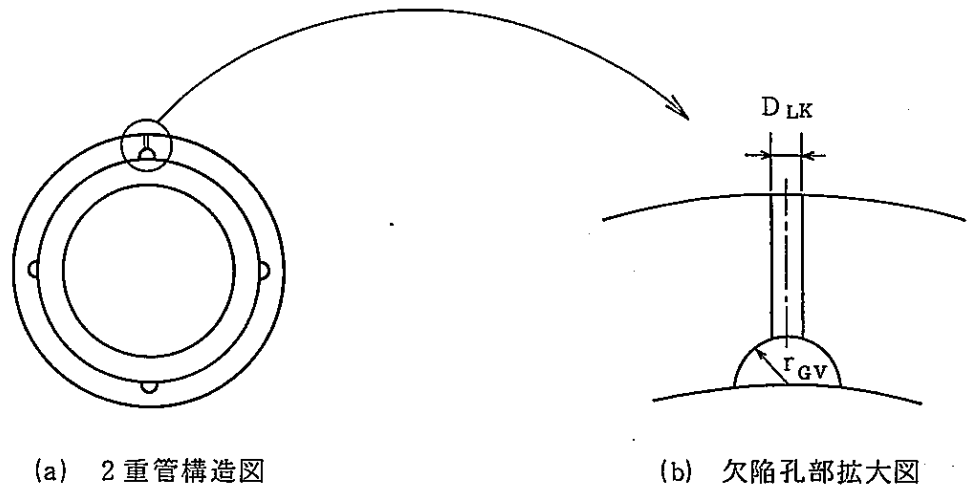


(f) 欠陥孔中心点
上图 b 点 ($\times 400$)

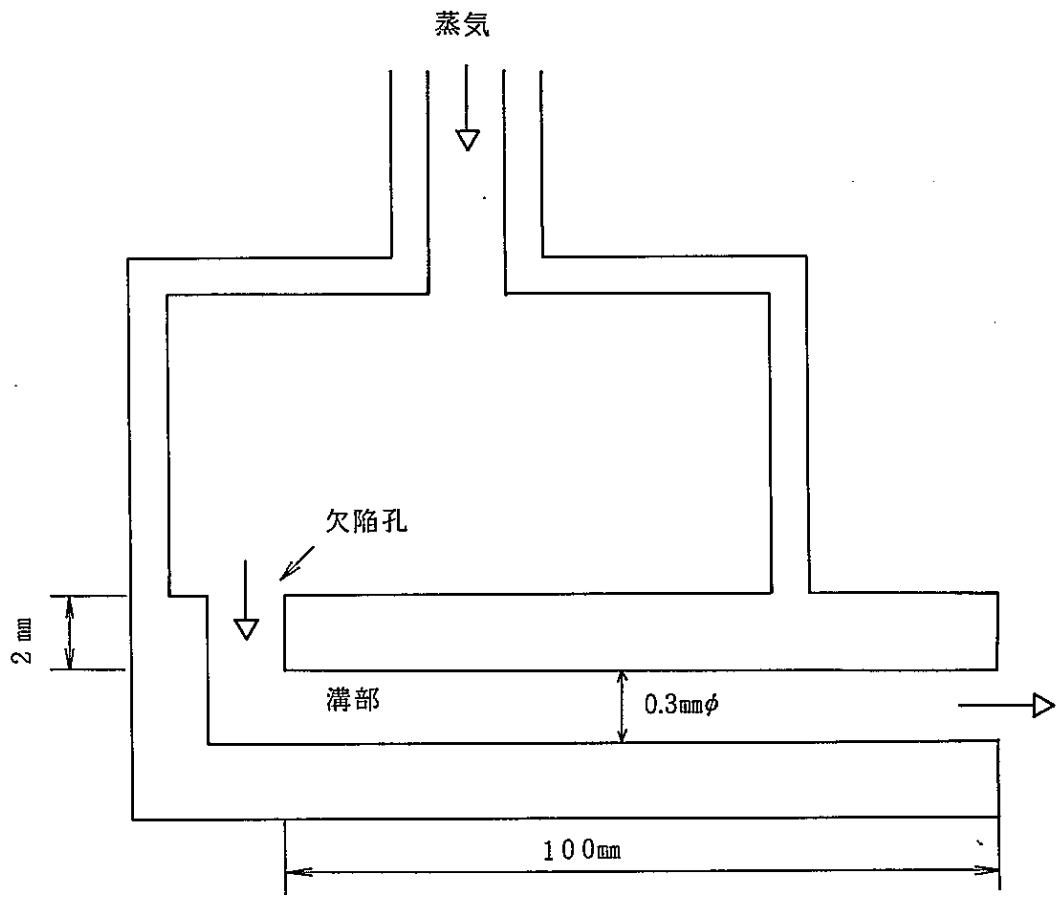
写真 6 断面顕微鏡組織観察 T-04



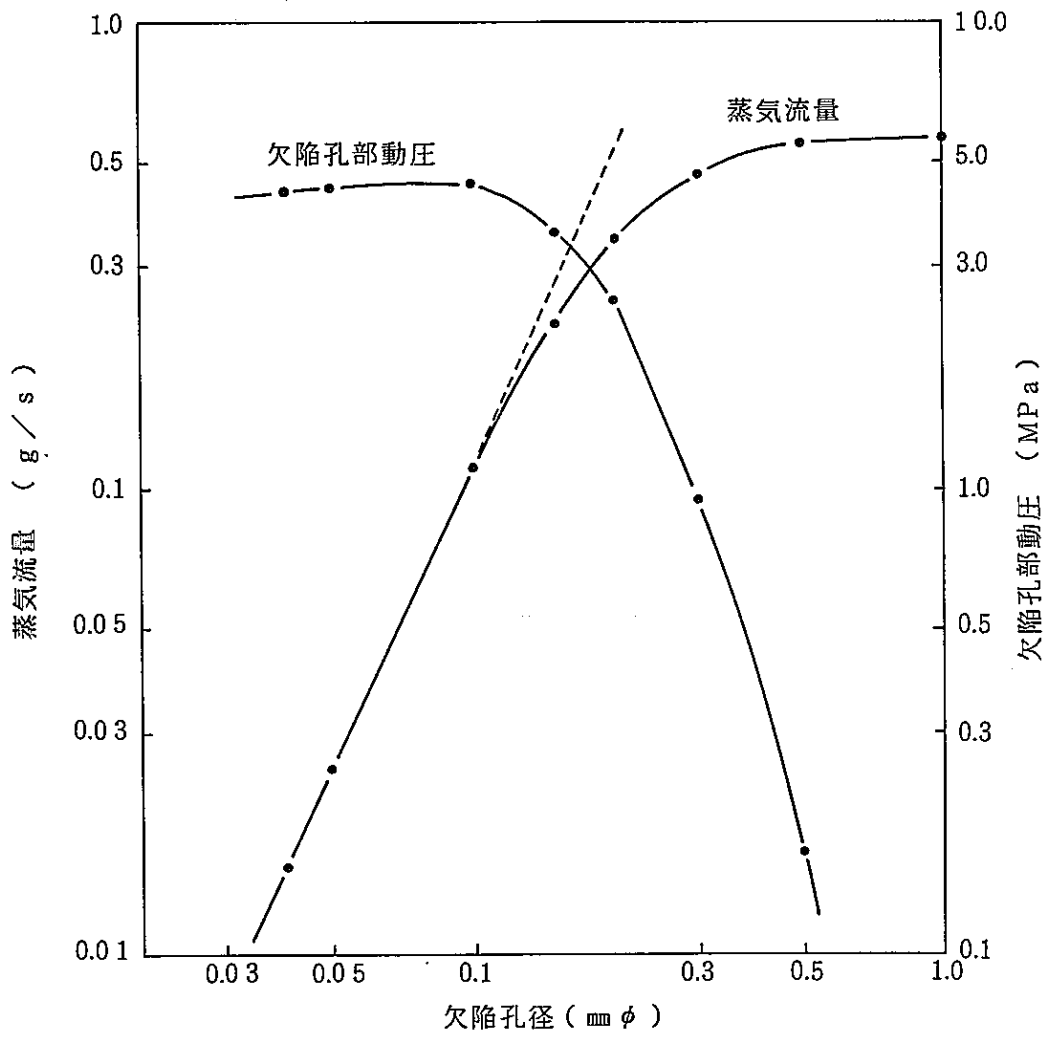
図A.1 2重伝熱管破損メカニズム



図B.1 溝部形状のモデル図

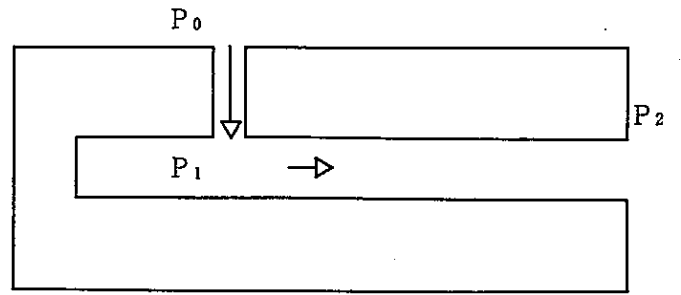
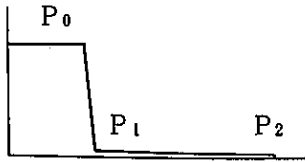


図B.2 欠陥孔～溝部計算モデル

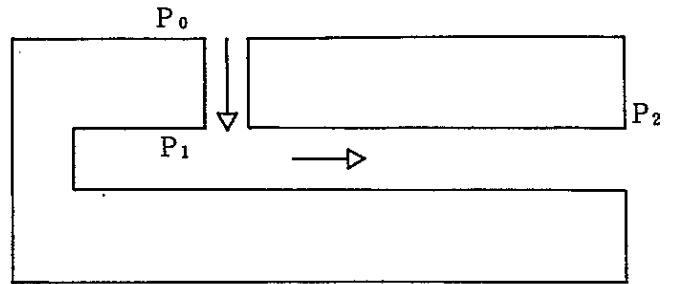
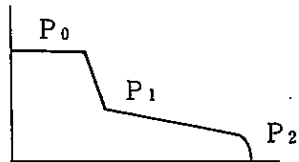


図B.3 欠陥孔径と蒸気流量／動圧の関係

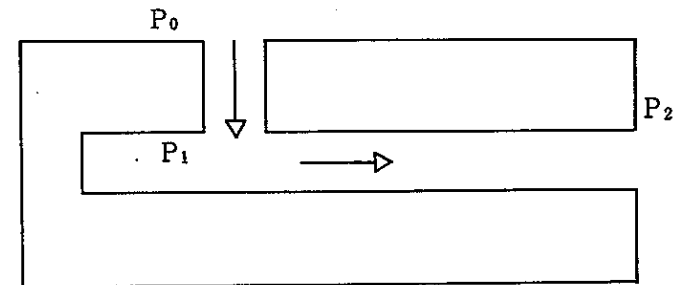
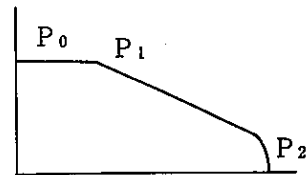
- (a) 欠陥孔径が溝部孔径に
比べ十分小さい場合
(Ex: $D_{LK} \approx 0.05 \phi$)



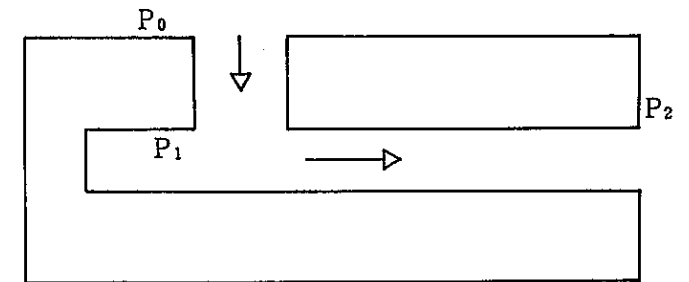
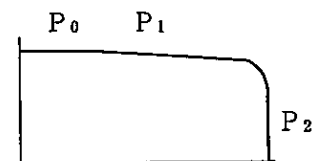
- (b) 欠陥孔径が溝部孔径に
比べ小さい場合
(Ex: $D_{LK} \approx 0.1 \phi$)



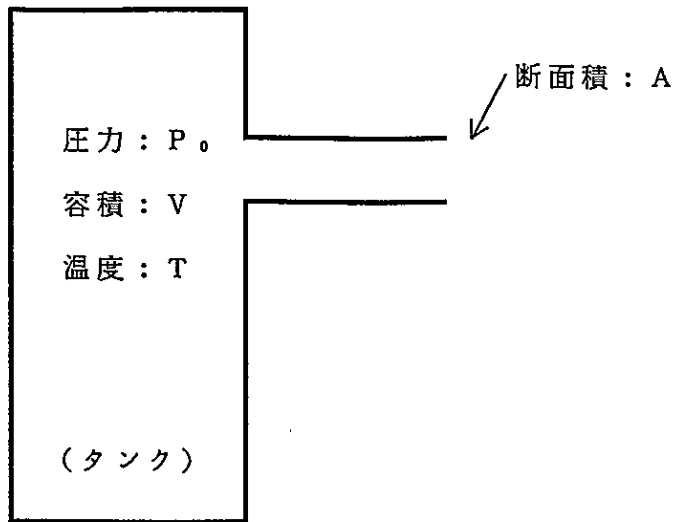
- (c) 欠陥孔径と溝部孔径が
同程度の場合
(Ex: $D_{LK} \approx 0.3 \phi$)



- (d) 欠陥孔径に比べ溝部孔
径が小さくなった場合
($D_{LK} \approx 0.5 \phi$)



図B.4 欠陥孔径／溝部径の大小による流速変化の概念



図C.1 ノズル較正方法の概念図