

# 燃料被覆管内圧クリープ歪量自動測定技術の開発

Development of Technique for Creep Test with Laser Method

1980年5月

動力炉・核燃料開発事業団  
東海事業所

この資料は、社内における検討、周

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2001



## 燃料被覆管内圧クリープ歪量自動測定技術の開発

### Development of Technique for Creep Test with Laser Method.

実施責任者	三 浦	信 *
報 告 者	佐 藤 政	一 **
	五十嵐	幸 *
	妹 尾 重 男	*

期 間 1 9 7 7 年 9 月 1 日 ~ 1 9 7 9 年 2 月 2 8 日

目 的 燃料被覆管の強度評価試験の一つである高温内圧クリープ試験におけるクリープ歪自動測定装置の試作開発。

要 旨 従来より行われてきた非照射下内圧クリープ試験では、試験状態にある試験片のクリープ歪を測定することは困難であった。しかし、直接通電加熱とレーザ測長技術を組み合わせた本試作装置の開発により、これまで試験を中断して測定する方法でしか得ることのできなかつたクリープ情報の連続かつ自動的な収集が可能となり、更に計算機の利用によって詳細なクリープ評価ができるようになった。

\* 技術部検査開発課

\*\* 現, Pu 燃部製造二課

## 目 次

1	はじめに	1
2	レーザー光による歪測定 の原理	2
3	試作装置	4
3-1	構 成	4
3-2	特 徴	8
3-3	試 験 片	9
3-4	試験片の装着と加熱法	9
3-5	温度調節と温度の測定	12
3-6	試験片の歪測定位置	14
3-7	クリープ歪測定 のコントロール	14
3-8	試作装置 の出力データ	16
4	試験片の温度分布測定	19
4-1	二色放射温度計 の性質	19
4-2	熱電対と二色放射温度計による表面温度の測定	19
4-2-1	測定方法	19
4-2-2	熱電対による表面温度の測定	23
4-2-3	二色放射温度計による表面温度の測定	25
5	外径測定 の精度	31
5-1	レーザー外径測定装置 の精度	31
5-2	内圧クリープ試験下での外径測定 の精度	36
5-2-1	実験の方法	36
5-2-2	真空及び大気雰囲気での外径測定精度	36
5-3	軸方向熱膨張の測定	44
6	内圧クリープ試験	46
6-1	供 試 材	46
6-2	試験方法	46
6-3	試験結果	48
6-3-1	試験結果概要	48
6-3-2	試験後試験片の観察	48
6-3-3	従来法との比較	55
6-3-4	変形量の測定	57

6-3-5	内圧クリープ試験出力データ .....	62
6-3-6	内圧クリープ試験データの計算機処理 .....	67
1)	データフォーマット .....	67
2)	計算機 .....	67
3)	プログラム .....	67
4)	計算機処理の結果 .....	69
4)-1	K2018-2試験片 .....	69
4)-2	K4129-2試験片 .....	71
4)-3	K4129-3試験片 .....	71
7	結 論 .....	90

## 1. はじめに

高速炉の重要構成部材の一つである被覆管は、中性子照射、内部発熱、Na冷却、FP等によるスウェリングなどの厳しい環境下において、長期間にわたり機械的強度を維持し、内部の燃料を保護しなければならない。

現在、この厳しい条件に耐え得る被覆管として、SUS316（オーステナイトステンレス鋼）を材料とした薄肉細管が使われている。今日まで、この薄肉細管の破壊、変形に対する機械的性質を十分に把握しておく必要性から種々の条件での強度評価試験が行われてきた。FPの内圧による高温クリープを想定した内圧クリープ試験もその一つである。一般にクリープ挙動は、クリープによる歪量とクリープ破断の時間で評価されるが、この内圧クリープ試験には、単軸引張クリープ試験のような試験装置、試験方法、試験片についての統一規格（例えばJIS）がないことや、試験条件の問題から、その試験要領は引張クリープ試験に準ずるなど、試験担当者の考えにゆだねられてきた。

PNCにおいても、内圧クリープ歪の測定は、試験を中断して試験片を機外に取り出し、マイクロメータにより外径を測定する方法で行われており、破断時間を測定するクリープ破断試験とは区別して行われている。このため、内圧クリープ試験には手間と時間を要し、データ解析も不便であった。そこで、クリープ破断試験中にクリープ歪を連続して測定できる方法を検討した結果、加熱方法は構造が単純になる直接通電方式とし、歪測定には集束性の良いレーザ光を利用して、試験中の歪変化を連続測定できる非接触形の内圧クリープ試験装置を開発、試作した。

本報告書は、この装置の性能と、この装置を使用して得られたレーザ測定によるクリープ試験の結果について報告するものである。

## 2. レーザ光による歪測定の実理

レーザーは、単色性に優れたコヒーレントな光なので、簡単に平行光線が得られるとともに、集束性が良いという大きな特徴を持っている。近年、このレーザーの特質を測長技術に応用し、円筒材料等の外径を、高精度で測定する装置も市販されてきている。図1はレーザーを用いた一般的な外径寸法測定の実理図を示したものである。

この図1において、レーザー発振器から出力されたレーザー光は、走査するために光路変換ミラーによって、まず信号処理部と同期して回転する多面体回転ミラーに導かれる。この回転ミラーで振られたレーザー光はレンズL1によって平行ビームに修正され、走査幅が設定される。レンズL1に入射しない反射光は密閉構造を持った暗箱内で吸収され、他への影響が生じないように考慮されている。平行走査幅内(1-4)に設置されている試験片に走査されたレーザー光が当たると、試験片後方にその幅と走査速度の関係で定まる影が一走査毎に生ずることになる。試験片幅を越えて通過したレーザー光はレンズL2によって集光され、焦面位置に置かれた光電素子によって検出される。

光電素子からの出力は、測定しようとする試験片の外径を走査する時間だけレーザー光が到達しないため、OFF状態になるので、この時間幅を信号処理部で積分回路などを用いて測定することにより、外径寸法を計測することが出来る。

以上がレーザーを用いた試験片外径測定の実理であり、本試作装置にもこの方式の外径測定装置が組込まれている。

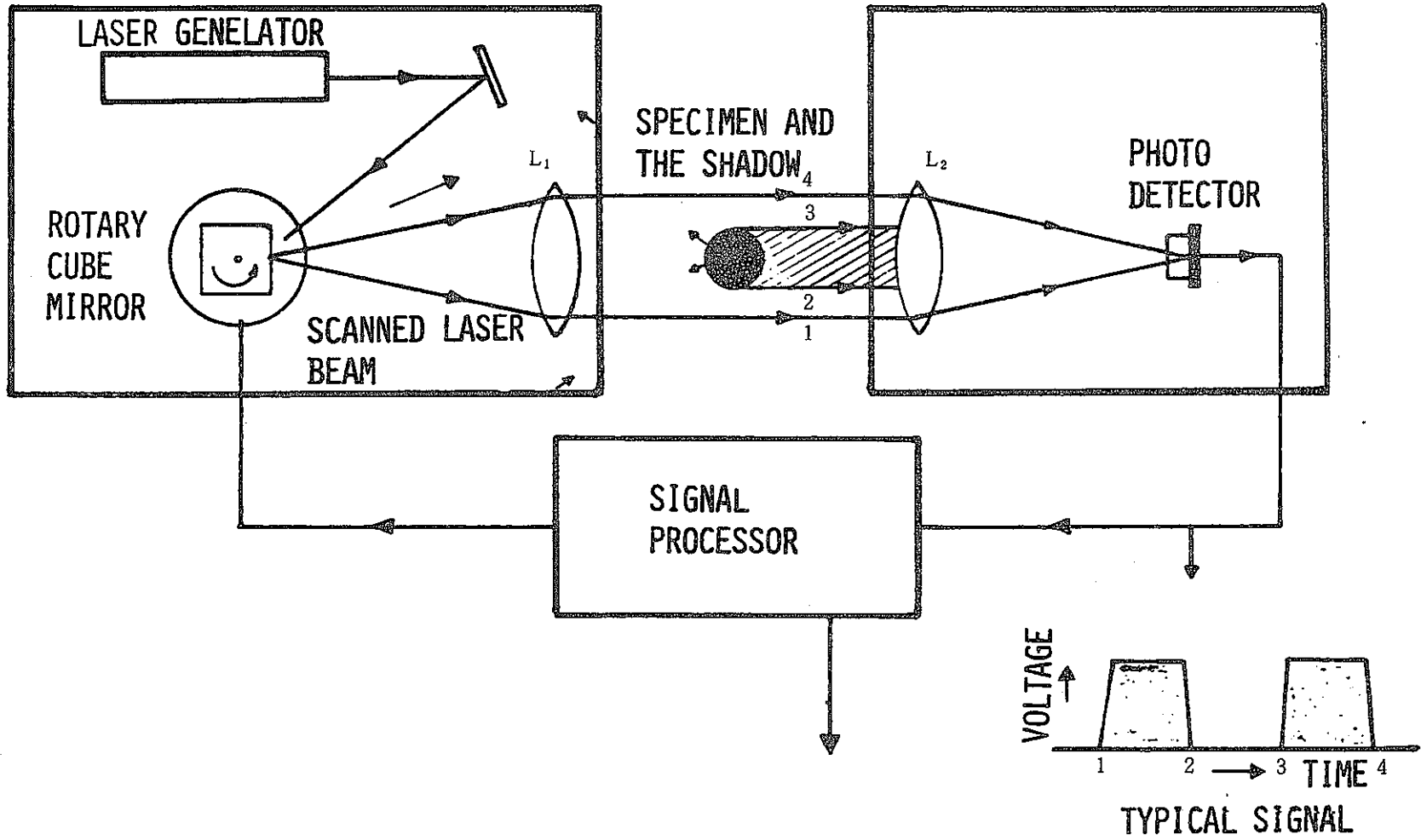


図1 レーザ光による寸法測定の原理



### 3. 試 作 装 置

#### 3-1 試作装置の構成

内圧クリープ試験試作装置の外観を写真1に示す。

この装置は大きく分けて、試験片を加熱、加圧し、クリープ歪を測定する試験部本体と、クリープ歪測定のためのタイムコントロールを行ない、試験片外径、温度等の測定結果を出力する制御部本体から成っている。図2はこの試作装置を図解したものである。試験部本体は図2に示すように、レーザ送光部、レーザ受光部、試験容器、そして試験容器内に納められた試験片を回転させる回転駆動部から構成されている。試験片に圧力を導く圧力導管は試験片の回転に対処するため、図の如くウズマキ状に作られており、試験片の回転位置検出には光検出器が利用されている。

尚、試作装置主構成機器の仕様は以下の通りである。

#### イ) 試験部本体

- |                     |   |
|---------------------|---|
| 1) レーザ管             | He-Ne 6,328 Å 5 mW  |
| 2) レーザ光学系           | 2面体回転ミラー 1,800 rpm<br>平行, 集光レンズ 各5枚                           |
| 3) 光電素子<br>(光検出器)   | シリコンフォトダイオード 5<br>(早川電気-OPP D80P1)                            |
| 4) 二色放射温度計          | 300~800°C 測定波長 2.15 / 2.3 μm<br>測定精度 ± 1%<br>(千野製作所 IR-QH-50) |
| 5) 二色放射温度計<br>首振り装置 | 首振り角 15°<br>首振り時間 170 s / ストローク<br>(千野製作所 CMD-022SP)          |
| 6) 温度コントロー<br>ル装置   | C・A熱電式 基準接点温度補償<br>ON-OFFパルス形PID動作方式<br>(千野製作所 UA-161)        |
| 7) スイッチ付真空計         | ピラニ真空計<br>(日本真空 GP-ISRY)                                      |
| 8) 真空ポンプ            | 回転式 50ℓ/min 10 <sup>-4</sup> Torr<br>(日本真空 PCD-060A)          |
| 9) 交流定電圧装置          | 単相 入力 200V ± 15%<br>周波数 48~51 Hz 能率 85% / 定格以上                |

出力安定度 0.2% 負荷容量 650VA

ロ) 制御部本体

1) アナログ記録計

○温度記録

EU-06SP 50mm/h

○外径記録

EU-06SP 50mm/h (千野製作所)

2) 二色放射温度計

総合変換器

折線加算方式

信号処理 4 POINT トラッキングホールド

出力 0~10mV リニア

4 POINT 並列出力

3) デジタルプリンター

NADA

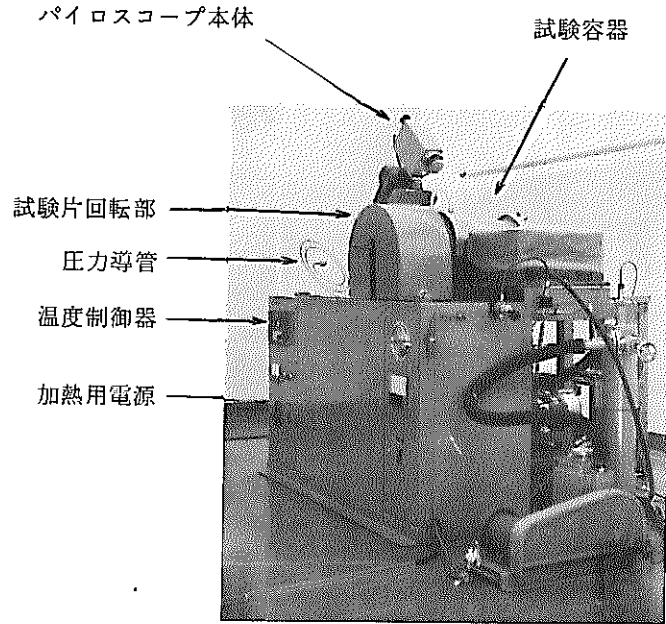
4) 紙テープパンチャー

RICOM TP-60

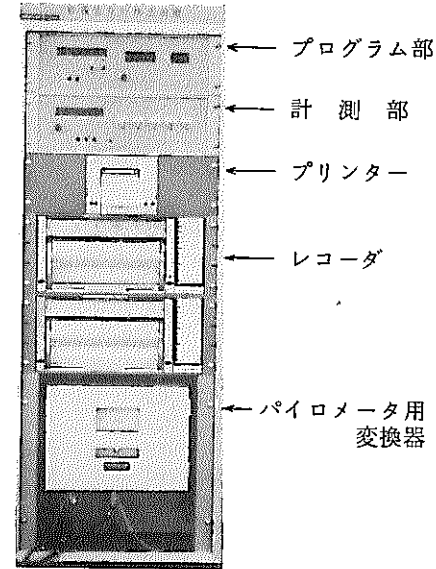
5) 計測プログラム設定

信号処理部

東京光電子



MAIN APPARATUS  
(試作部本体)



SIGNAL PROCESSOR  
AND RECORDERS  
(制御部本体)

写真1 試作装置外観

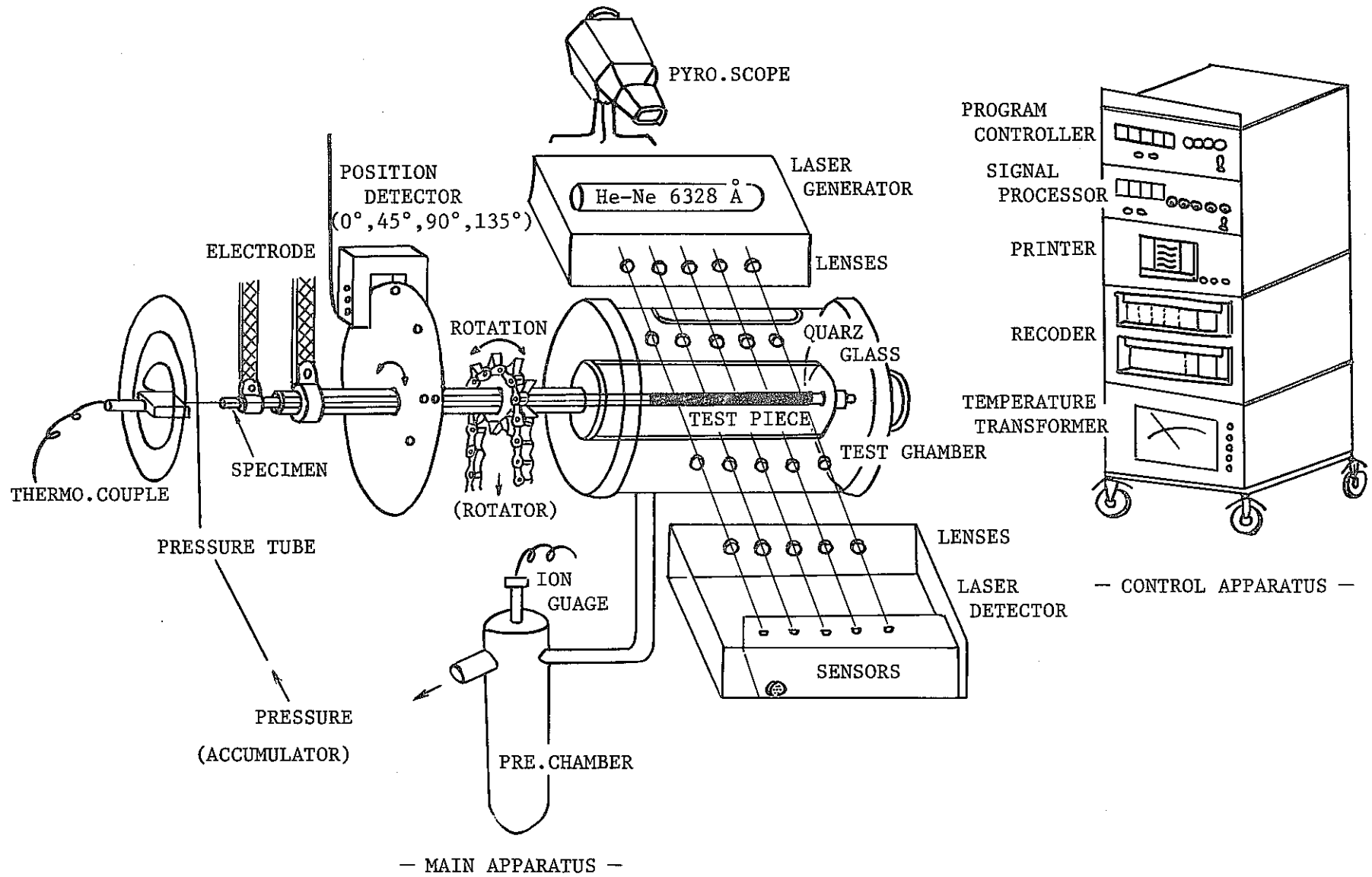


図2 試作試験装置の構成

### 3-2 試作装置の特徴

この試作装置の最も大きな特徴は、レーザー光を用いて試験片の外径を非接触で、しかも精度良く連続・自動測定できることである。試験片の加熱に従来の間接抵抗加熱方式に代り、レーザー光通過に都合の良い直接通電加熱を採用することにより、試験片周囲の空間にゆとりが出来、試験容器に小窓を取り付ける設計が可能になった。この結果、本試作装置はこの小窓を通して、クリープ歪量を外部から光学的手段で連続測定すること、及び二色放射温度計による試験片表面の温度分布の連続測定を可能にした。この小窓には、試験片からの熱ふく射、レーザー光の透過を考慮して、光学的に優れた石英ガラスが使われている。この小窓を有する試験容器はまた、発熱状態にある試験片のクリープ歪を高精度測定するために、内部を真空に保つことができるように気密性の良い構造になっている。表1は本試作装置の特徴を従来装置と比較して簡単にまとめたものである。

この装置の安全装置として、停電時とクリープ破断の際動作するようなりレーが使用されており、それぞれ、試験時間のホールドなどクリープデータと構成機器を保護するよう、十分な注意が払われている。

表1 従来装置との機能比較

	試 作 装 置	従 来 装 置
加 熱 の 方 法	直 接 通 電 (3V, 200A)	間 接 抵 抗
温 度 測 定 の 方 法	二色放射温度計 (試験片表面)	熱 電 対 (模擬試験片表面)
温 度 制 御 の 方 法	試験片内部雰囲気 (熱 電 対)	炉内部雰囲気 (熱 電 対)
ク リ ー プ 歪 の 測 定 法	自 動 (レーザー光)	手 動 (マイクロメータ)
装 置 の 運 転	連 続	非 連 続
試 験 片 の 観 察	可	不 可
ク リ ー プ 歪 測 定 点 数	軸方向5×周方向4	任 意

### 3-3 試験片

本試作装置で用いられる試験片の形状を図3に示す。

試験片は、試験部（供試材）、端栓、圧力導管より構成されている。試験部の長さは200mmで、端栓、圧力導管との嵌合部はHe雰囲気中での突合せTIG溶接がなされている。そして、圧力導管の圧力導入口は圧力封入を機械的シール法で行うために、その接続面は1.5S程度に高精度仕上げされている。端栓に設けられたネジは、試験部外で発熱が生じないように、端栓側電極を固く締めつけて接触抵抗を軽減するためのものである。

### 3-4 試験片の装着と加熱法

試験容器に取付けられた試験片の状況を図4に示す。

回転機構に直結している試験片支持枠（ホルダー）に収納される試験片は、回転に伴う、ネジレ、スベリが生じないように、フクロナット、補助電極部での締め付けは完全にしておく必要がある。また加熱の為に通電は加熱電極A↔ホルダー↔補助電極↔供試材↔導管部↔フクロナット↔電極Bの回路で行われるが、供給材の抵抗率が $74.0 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}$ （20°C）であり、高温においてもその抵抗率は比較的小さい値（ $271.4 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$ （650°C））を持つことから、通電回路における損失抵抗を極力小さくする必要がある。このため、接触抵抗が増大すると考えられる補助電極、フクロナット内部、加熱電極A、Bの接続面は電流密度を高くするために、良く研磨して強く締めつけておかなければならない。特にフクロナット部の締め付けはフクロナット内の銅製通電材が試験容器の真空シールを兼ねているため十分な注意が必要である。

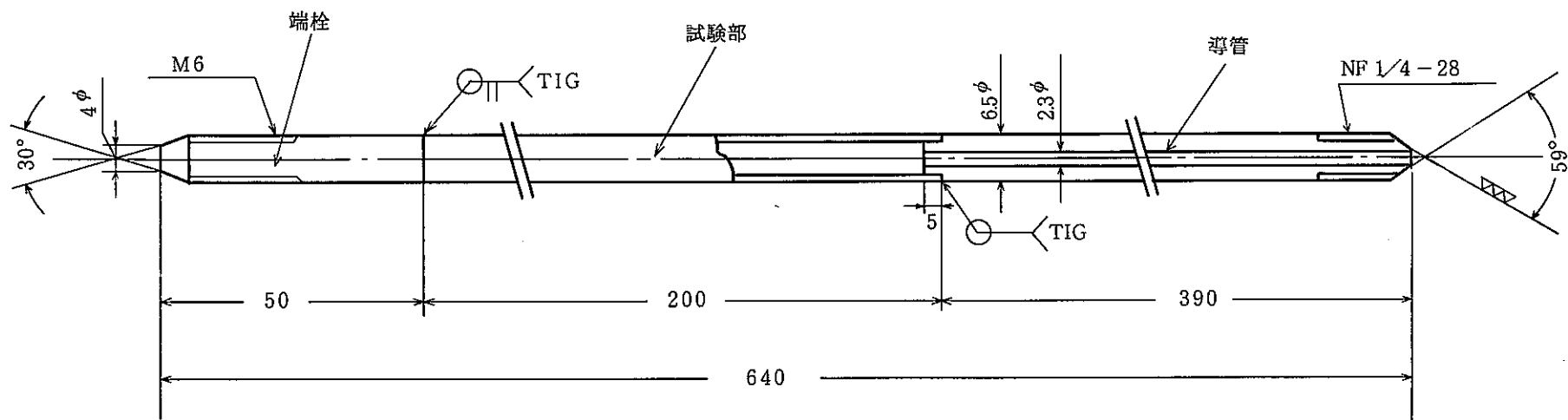


図3 試験片の形状

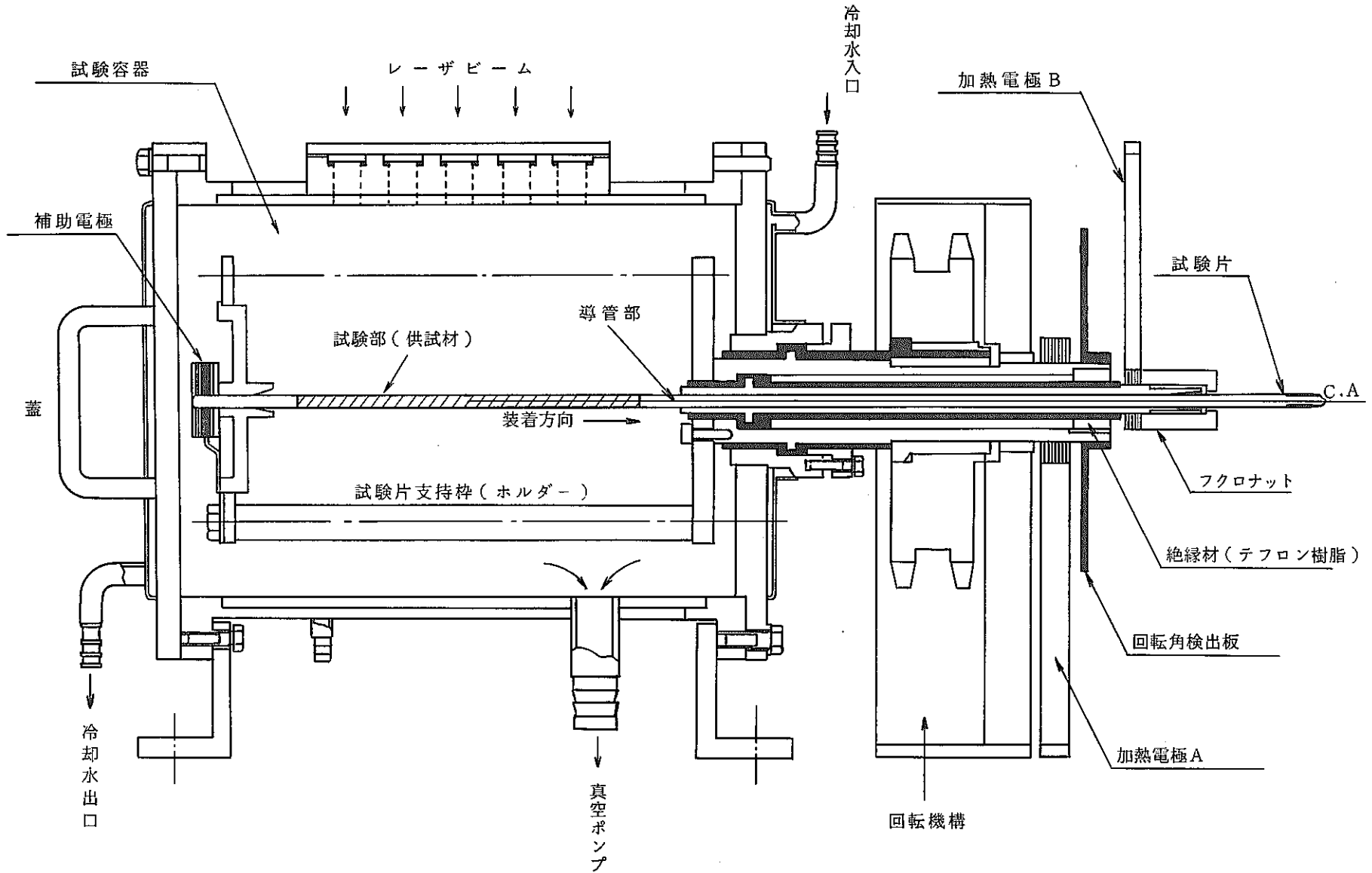


図4 試験片の装着と試験容器構造



### 3-5 温度制御と温度測定法

試験片の温度は、試験片内部の雰囲気温度が設定試験温度と同じであるという前提の下に、シース型熱電対により検出され、試験温度の制御に使用されている。図5は試験片の内部雰囲気温度と表面温度の測定状況を図にしたものである。

熱電対（ $1.5\text{mm}\phi$ , 0.75級）による温度の測定は供試材の中心で行われるが、測温部の供試材内壁との接触により加熱電流の漏洩が起り正しい温度の測定ができなくなることもあるので、ガラスウール管あるいはアルミナ罫子管などの熱伝導の良い絶縁管を挿入しておくこともある。

このクリープ試験で最も問題となることは温度である。すなわち、試験片が試験温度到達後熱平衡状態にはいった供試材全長がクリープ試験条件を満たす温度範囲にあるかどうかということである。従って二色放射温度計による表面温度の分布測定は非常に重要な項目と言える。この二色放射温度計は試験片から600mm離れた位置に据えられており、試験片からの輻射熱を検出するものである。この検出は1走査170秒の周期でクリープ試験中連続して行われる。

尚、表面温度の測定位置は、首振り角 $15^\circ$ で設定される走査幅内の任意の4ヶ所を、走査幅を10とした目盛で制御部総合変換器の4つのツマミにより設定することが出来る。

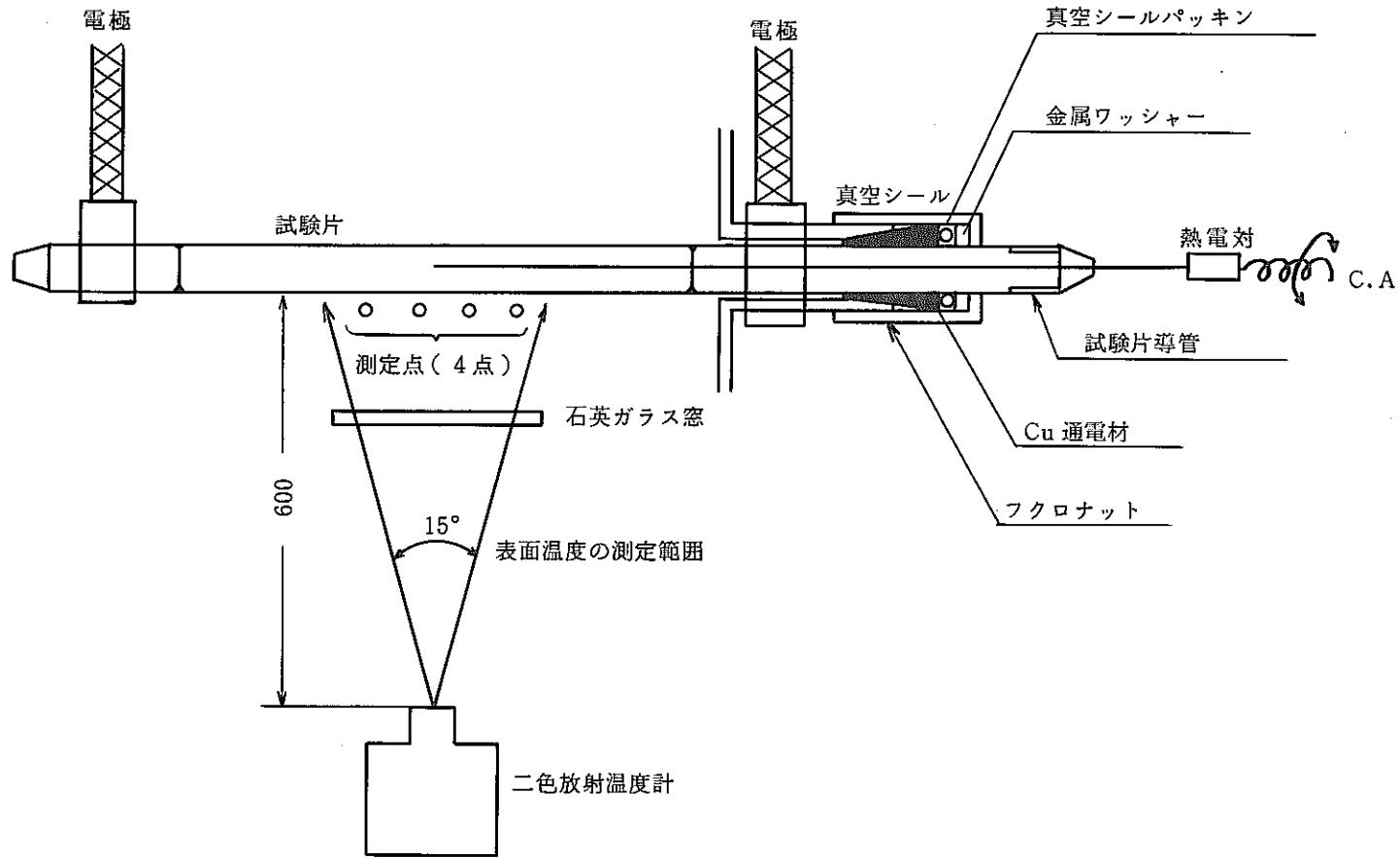


図5 試験片の温度測定方法

### 3-6 試験片の歪測定位置

この装置による歪測定位置は図2で示したように供試材の軸方向5点と回転機構による周方向4点の計20点である。レーザ発振管より出力したレーザ光はハーフミラーにより30mm間隔で5分割されるため、試験容器内に取付けられた試験片の軸方向測定位置も30mm間隔となる。この位置での周方向の測定は回転部に取付けられた回転角検出器により45°毎の4角度を検出して回転停止(0°, 45°, 90°, 135°)することにより行われる。尚、周方向の測定は、135°の位置検出、歪測定後、0°の位置に戻る反復回転により継続される。

これらの歪測定位置はデータ処理上、チャンネル(1-5)と角度NO(1-4)で表わされている。すなわち、軸方向は導管側より5チャンネルまで、周方向は0-135°の位置が、それぞれ1-4の角度NOに対応している。

### 3-7 クリープ歪測定のコントロール

この試作装置は、試験片外径を制御部に設定された時間のプログラムに従って、自動的に測定を継続する「自動運転」とプログラムに無関係に測定を行う「手動運転」の二つのモードを持っている。この時間のプログラムは、ウォームアップ、計測、休止の三つのプログラムから構成されており、任意の時間間隔で運転することができる。図6は運転プログラムに関するタイムチャートを示したものである。

主電源投入後、運転の選択を“自動”に設定すると、まずレーザ発振管及び信号処理部のウォームアップのための電源が自動投入され、1時間保持される。このタイマーの動作と同時に試験時間の積算が始まり、試験片の破断、あるいは停電等、不測の事態が生ずるまで行われる。このウォームアッププログラムが終了すると、次に、試験部外径を測定するプログラムが実行される。このプログラムの動作時間は10分から24時間まで(現在は改造され、1分から設定できる)任意に設定することができる。設定時間中、試験片は反復回転を続け、外径測定が継続され、同時にデータの記録が行われる。

この二つのプログラムが終了すると、試験片の回転は停止し、次の休止プログラムが実行され、レーザ発振管を含む測定系の電源が全てOFF状態になる。このプログラムの動作時間は0-99時間まで設定することができる。このプログラムの終了1時間前にウォームアップタイマーが動作して、次のプログラムの準備段階にはいる。

従って、休止時間が1時間以内に設定されると、電源はOFFされず外径測定が継続された状態になる。以後、3つのプログラムは順次繰り返され、積算時間が3,000(hour)になるまで試験を自動運転で実施することができる。

尚、運転の選択が“手動”の場合には、積算時間はカウントされず外径を測定するプログラムのみが実行される。

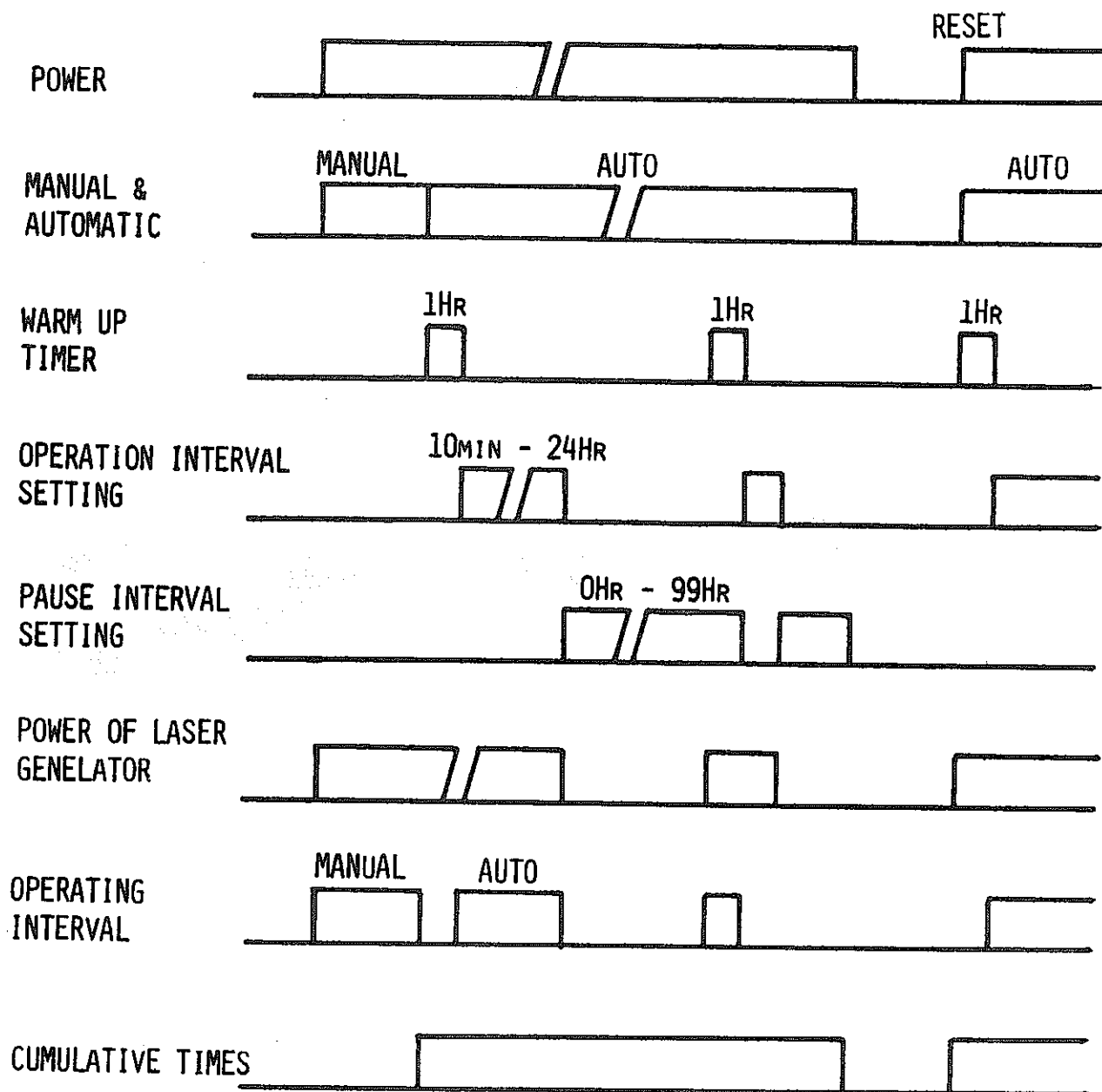


図6 試作装置の運転タイムチャート

### 3-8 試作装置の出力データ

この試作装置が計測、記録するデータは試験片供試材の外径測定位置と外径値、クリープ試験積算時間、試験制御温度、表面温度の5つである。外径測定位置、外径値、積算時間の3データはクリープ歪のデータとして保存及びデータ解析のために下図7に示すように、デジタルプリントと紙テープパンチが行われる。(紙テープパンチはS・54・6記録方式を変更した。1) 奇数パリティ→偶数パリティ, 2) 積算時間データ後にキャリッジリターン, ラインフィードの付加)

また、これらの3データは同時に、試験片の歪状況を一目で理解できるよう、各チャンネル毎に打点記録されている。この記録の様式図を図8に示す。この記録はデータを見易くするために、各チャンネルにバイアスが与えられている。

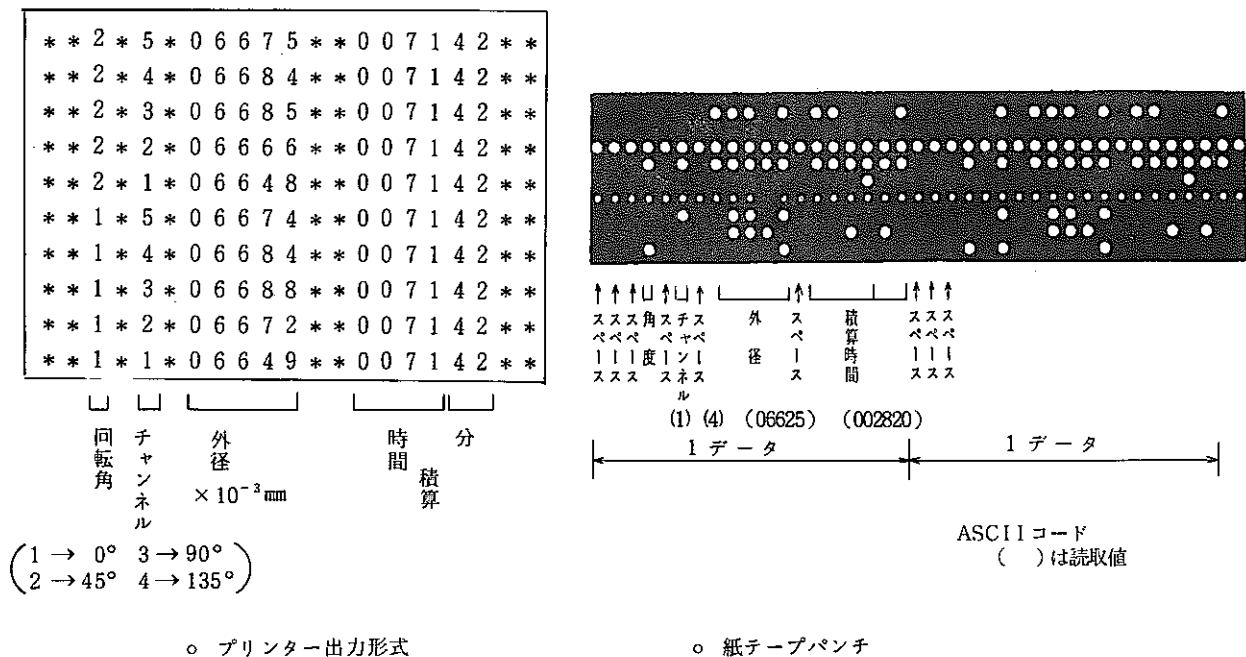


図7 外径データの出力

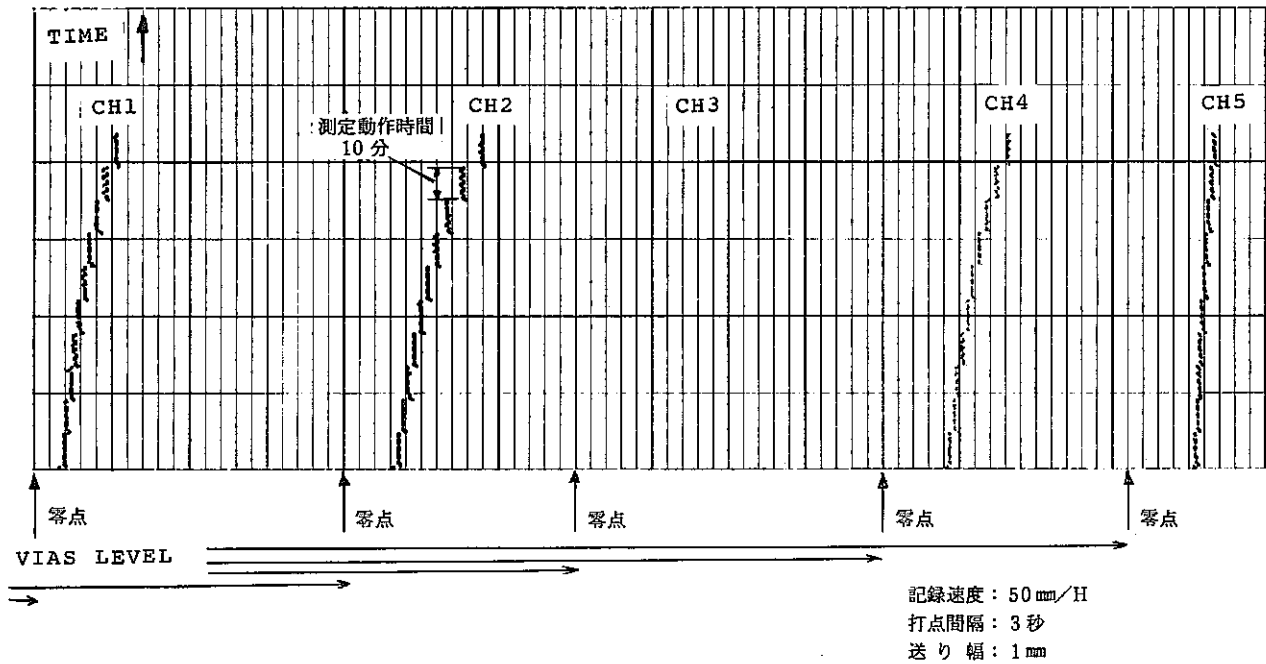


図8 外径変化のアナログ記録

また、温度に関するデータとして、熱電対 (C・A) が測定する加熱温度と二色放射温度計が測定する4ヶ所の試験片表面温度がクリープ試験中、打点記録されている。図9に温度記録の模式図を示す。图中、PYROは表面温度を示しており、実際は各測定点が色別で表わされている。尚、二色放射温度計の最小測定面積は約12mm<sup>2</sup>である。

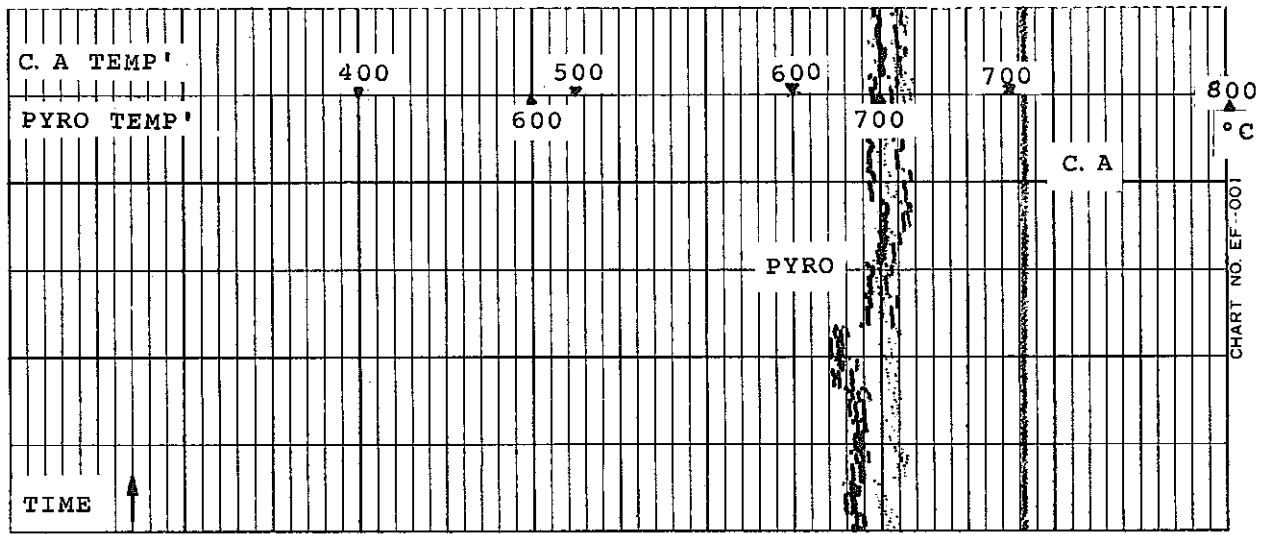


図9 温度の記録例

送り速度：50mm/H  
制御温度：700℃

## 4. 試験片の温度分布測定

### 4-1 二色放射温度計の性質

一般に放射エネルギーを利用する温度計を使う場合に問題となることは、その実測値が測定対象の形状、寸法、放射率、環境に左右されることである。中でも最も注意を要する点は、測定対象物表面の熱放射率である。この種の温度計は完全放射体（黒体）、すなわち放射率 $\epsilon = 1.0$ で校正されているため、黒体以外の物体の測温の際には、その物体の放射率をあらかじめ補正しなければ正しい測定値を得ることは不可能であるという欠点を持っている。この試作装置に組込まれている二色放射温度計は、測定波長が $2.15 \mu\text{m}$ と $2.30 \mu\text{m}$ の近赤外線をPbs素子で検出する方式のものである。この測定原理は、黒体の場合、特定の2波長の強度比から温度が一義的に決められることを基礎にして、一般物に対しては、それぞれの波長による放射率比を考慮して、強度比の等しい黒体温度を一般物の温度とするものである。この温度計の放射率比は2波長が近接しているため、その値にほぼ1.0がとられ真の温度に近い測定ができる。しかし、2波長の放射率が違う場合、測定温度は信頼性を欠いたものになるので、この二色放射温度計には放射率比補正值（0.95～1.05）の設定により、測定温度が補正できる機能が付加されている。

従って、この二色放射温度計を使う際には、測温物の放射率比の値を知っておかなければ分布状態はともかく、真の値に近い温度を計測することは困難である。

### 4-2 熱電対と二色放射温度計による表面温度の測定

クリープ試験における試験片の温度分布はクリープ強度評価の点から観て非常に重要な項目であり、その測定に利用している二色放射温度計は信頼性の高いものでなければならない。この試作装置での二色放射温度計の使用については、①直接通電の加熱特性により温度（放射率）が試験片位置によって異なる。②時間とともに放射率、放射率比が変化する。等の原因により発生する測定誤差の問題があるので、これを解決するため、絶対値を出力する熱電対を用いて表面温度の分布を調べ、試験温度（制御）との関係から二色放射温度計の測定値の補正を検討した。

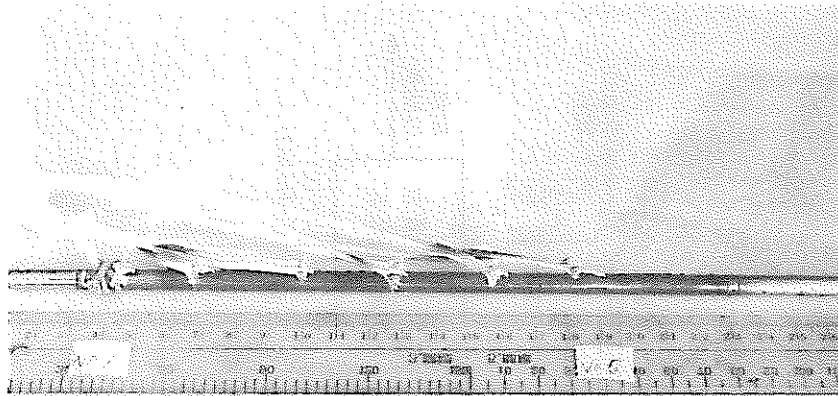
#### 4-2-1 測定方法

試験片表面の温度分布を熱電対と二色放射温度計で同時に測定ができるように、熱電対は写真2に示すように供試材の軸方向同一線上に取り付けた。試験片の試験容器への装着は熱電対取り付け面と反対の軸方向面が二色放射温度計に相対するように行った。熱電対出力を試験容器外部の温度記録計に接続する必要から、この表面温度の測定は大気雰囲気で行な

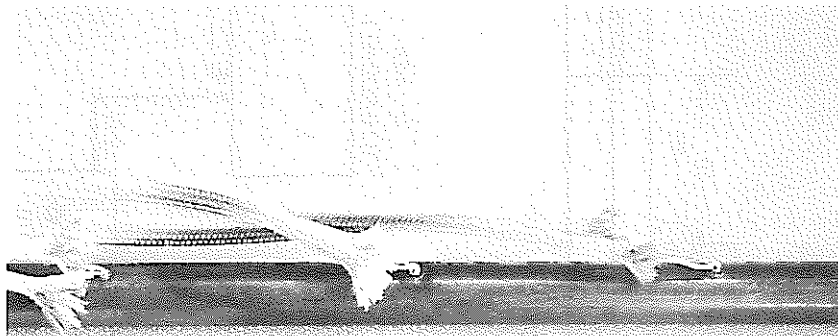


ればならなかった。この測定法を図 10 に示す。

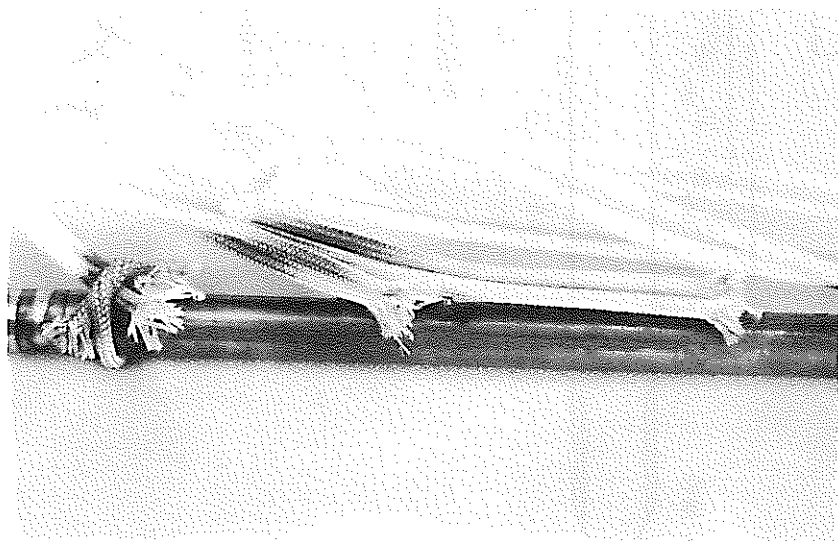
尚、この測定には研磨面を有する新品の試験片を用い、熱電対には  $0.5\text{ mm}^{\phi}$  の白金-白金ロジウム (13%) を使用した。



全体外観



取付状況①  
No.4 ~ No.6の  
熱電対



取付状況②  
No.1 ~ No.3の  
熱電対

写真2 熱電対の取付状況

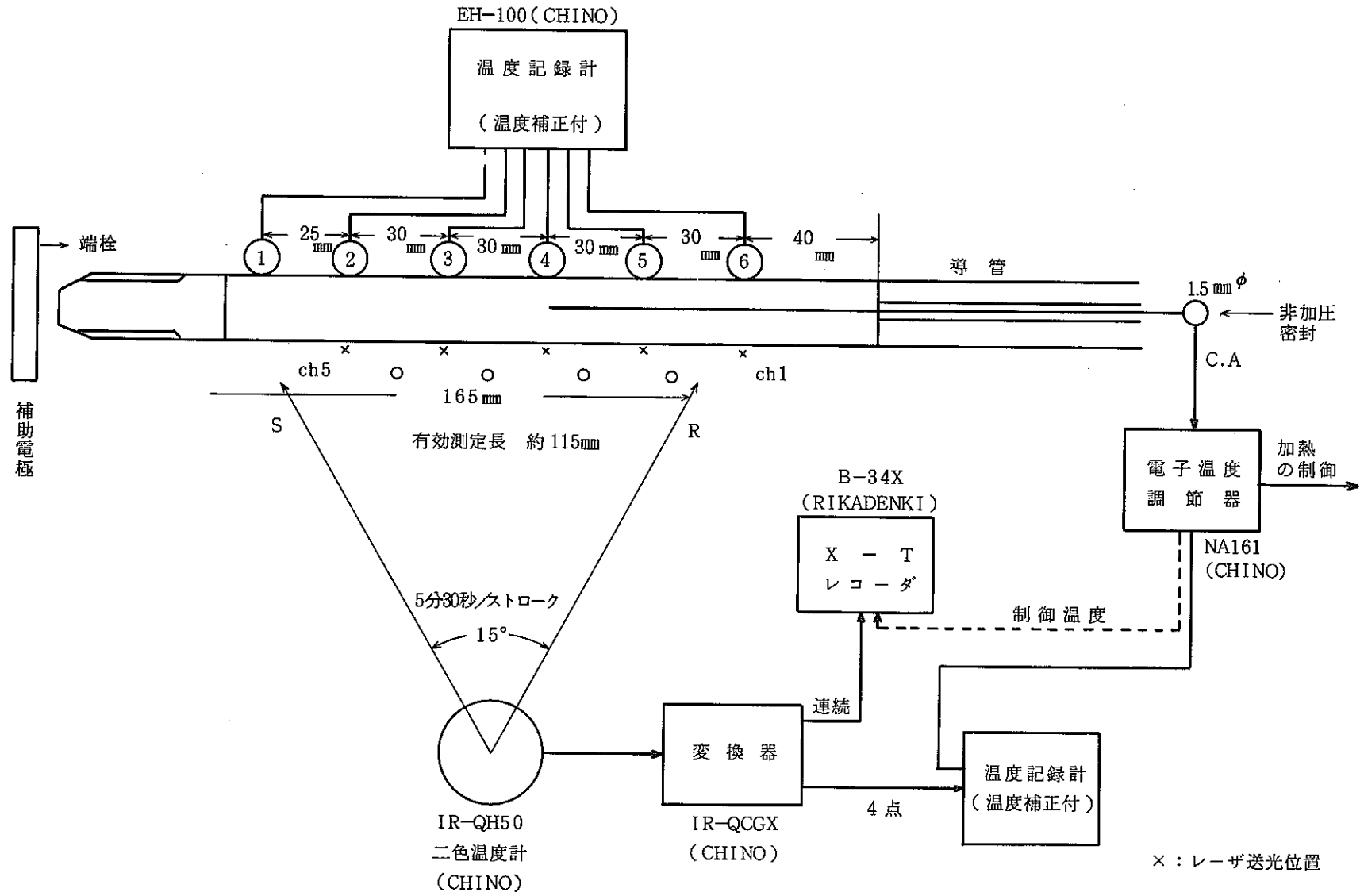


図10 試験片表面の温度分布測定方法 (大気雰囲気)

## 4-2-2 熱電対による表面温度の測定

図10の方法で得た熱電対測定による温度分布の記録を判り易くグラフにしたものが図11である。この図から明らかなように、軸方向中心にあるNo.4の熱電対出力が全ての制御温度で最大値を示しており、その分布形態も各制御温度で同じ形を示している。No.4の位置(中心)から両端方向に同距離にあるNo.2とNo.6を比較した場合、その出力はNo.6の方が大きく、試験片加熱部は導管側になだらかな勾配を持っているが、端栓側はNo.1で判るように急激な温度低下を示している。これは試験片と試験片ホルダーとの接触による熱伝導と伝導後の大気中への熱放出による熱平衡の状態を表わしているものであり、No.4の出力が制御温度の上昇とともに、制御温度との差が大きくなるのも同じ影響と考えられる。導管側についての温度分布は、この分布測定がNo.6の位置までしか行っていないため、導管溶接部までの40mmの状態は明らかではない。しかし、これと同様な方法で測定した結果によると、端栓側で生じている温度低下が導管側でも同様に生じていることが明らかとなった。またこれらのデータは均熱部分が $\pm 4^{\circ}\text{C}$ で70mm程度であることを明確に示しており、クリープ試験としてはあまり良い温度条件ではないことがわかる。特に、両端近辺は赤熱状態( $700^{\circ}\text{C}$ )にある試験片の目視観察でも明るさの差が確認できるほど大きなものである。ここで、軸方向各位置での周方向断面の温度分布を考えてみると、内部雰囲気は密封であるとすると、内部雰囲気の温度はどの軸方向位置でも、伝導、対流によってほぼ平均化され、一定温度になっていると考えて良い。

従って、制御温度 $700^{\circ}\text{C}$ の場合のNo.4とNo.1の表面温度との差を見ると、試験片供試材の肉厚0.45mmの間に、No.1の位置で約 $150^{\circ}\text{C}$ 、No.4の位置で $50^{\circ}\text{C}$ の温度勾配が生じていることになる。

しかし、実際にこの装置を使ってのクリープ試験は、真空中で長時間定温加熱するものであり、温度制御用の熱電対は高圧力の雰囲気に置かれる。このため、試験片表面からの熱損失は無視でき、熱損失は装置本体との伝導によるものだけになる。また、熱電対の測定効率も良くなる。このようなことから実際の試験では図11のデータよりも温度分布、測温値とも安定した結果が得られることが考えられる。(S・54・6装置の改造に伴い、真空雰囲気中で表面温度分布を熱電対で測定した。この結果、軸方向中心の温度が内部雰囲気制御温度と全く一致していること、中心より30mmの位置で $\pm 2\sim 3^{\circ}\text{C}$ の変動であることを確認した。)

この図11のデータにJIS引張クリープの試験温度規格( $600^{\circ}\text{C}\sim 800^{\circ}\text{C}$ で $\pm 4^{\circ}\text{C}$ )を適用した場合、200mmの試験部寸法に対して軸方向中心付近の70mm程度が均熱を持っていると言える。

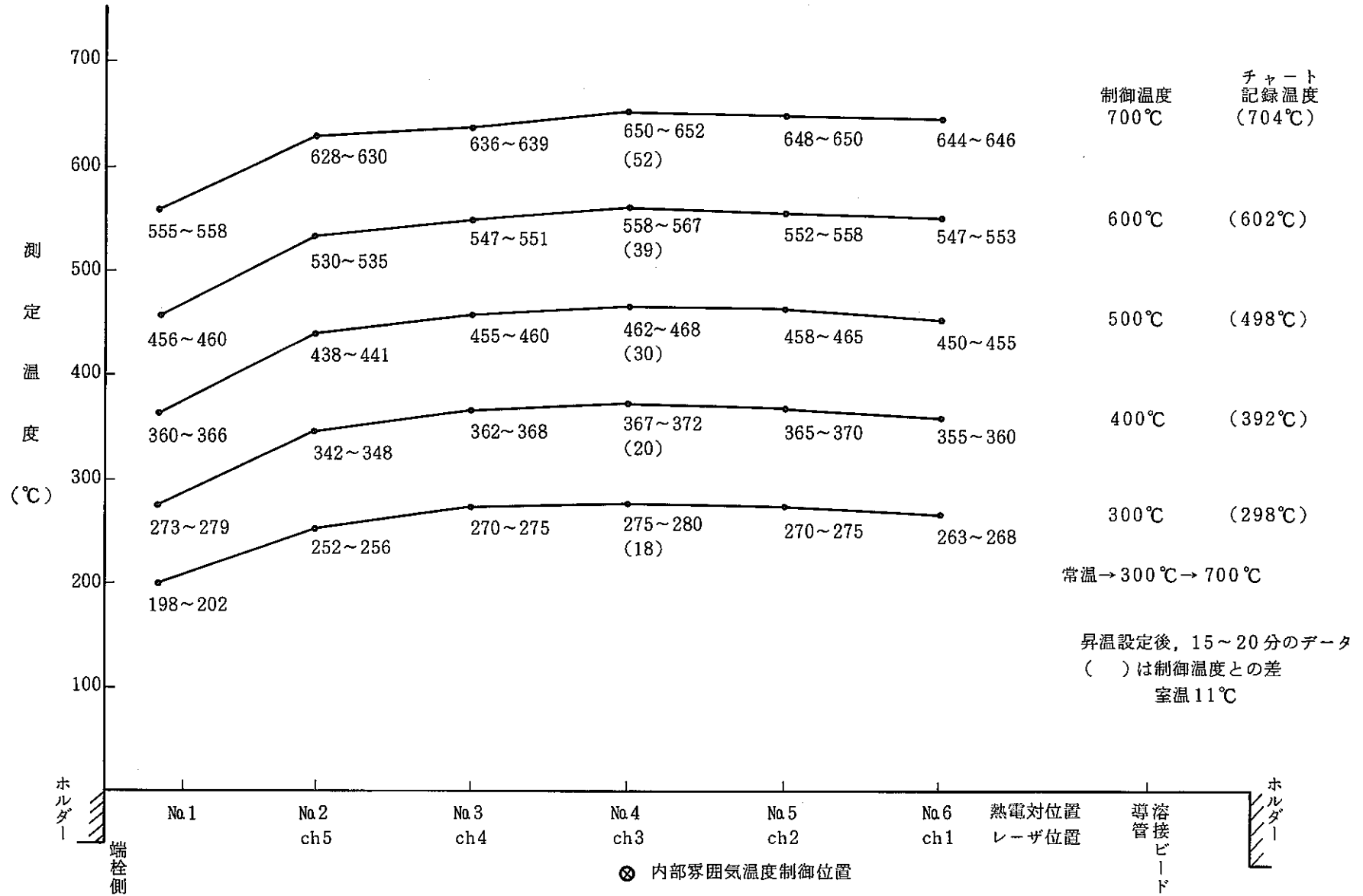


図 11 熱電対による表面温度分布の測定 (大気)

#### 4-2-3 二色放射温度計による表面温度の測定

図 10 に示す温度分布測定方法において、二色放射温度計は試験片までの距離と首振り角で決められる 165mm の測定幅 (S-R) を S→R, R→S の折り返し測定を行っている。この出力は変換器で連続と 4 点に分けられ、それぞれ X-T レコーダ、打点式温度記録計に記録される。4 点の出力の場合、その測定位置は前述したように変換器パネル上の 4 つのつまみにより走査幅を 10 等分したダイヤル目盛値で設定するようになっている。そこで、試験片上の測定位置設定とダイヤル目盛との関係を計算すると、1 目盛は 1.65 mm となり、レーザー外径測定位置に相当するダイヤル目盛値は ch2→9.0, ch3→7.2, ch4→5.4, ch5→3.7 であった。

金属光沢を持つ試験片を加熱する場合、試験の進行と温度に従って表面の酸化状態も進むので、加熱部 (供試材) の放射率は温度分布の影響を受け、高温部が最も大きい放射率を持つことになる。この測定では放射率比補正値を 1.04 に設定して測定を行った。これは、加熱部の放射率比がどの場所でも補正値の逆数である 0.96 であれば真の温度を測れることを表わしている。図 12, 図 13 は熱電対との表面温度の同時測定の結果を連続出力で示したものである。図中にレーザー走査位置、放射温度計の折返し測定位置、供試材軸方向中心位置を明記しておいた。また○で囲んだ A, B, C の部分は二色放射温度計特有のノイズである。A は走査が有効測定内に入った際、放射エネルギーの演算回路によって生ずるオーバーシュートで、B, C は温度計自体の測定動作の自動切換え時に生ずるものである。このための測定データとしては、折返し点 (R) から端栓側への測定データの方が ch5 付近の出力状態が明確になっている。これらの連続出力のデータは熱電対測定の温度分布とは比較的一致しているが、各制御温度で高い側の温度を記録しており、制御温度が高くなる程、温度差が小さくなる傾向を示している。これは昇温時 (図 12), 降温時 (図 13) のデータともこの傾向は変わらず、各制御温度での出力電圧も大きな変化はない。このことから、各制御温度での放射率比の傾向は変わらないが、試験温度が高くなるにつれて、放射率比が測温値を小さくする方向に変動することが考えられる。すなわち、放射率比は酸化状態のみならず試験温度にもその値が左右されると考えられるのである。

そこで、放射率比の酸化による変動と試験温度による影響を調べる為、新しい試験片を用いて、②真空雰囲気、650℃、72時間加熱における出力変動の測定 ⑤酸化試験片での各試験温度に対する放射率比補正の特性測定 の 2 つの追測定試験を行った。

②の試験では放射率比補正値に 1.00 を設定し、温度計からの出力を 4 点出力で記録した。図 14 は各試験時間における 4 点出力の変動を見易くしたものである。図中①～④は 4 点の測定位置で表わしており、その範囲は端栓溶接部から 70mm 離れた位置を中心とした約 30 mm である。

この図から明らかなように、試験開始直後は①より④の方が温度が高く、①より早く酸化されることが1.5時間、3時間のデータに良く表わされている。そして、5時間の④③②の出力は一時チャート範囲を越えるほど大きくなり、20時間には範囲内に収まる。しかし、①の出力はチャート外に記録されている。33時間以後は、全出力がチャート内に記録され温度が安定してきている。この状況は一時期1.0以上に増大した放射率比が時間と共に減少して、ほぼ一定してきたこと、温度測定範囲内(30mm)の放射率比の差が無くなってきたことを表わしている。更に71時間の出力温度を見ると、①～④までの温度分布幅が小さくなってきており、酸化状態が安定したこと、及び測定表面温度はだいたい610°Cであることを示している。

⑤の試験は、④の試験に使用した試験片をさらに酸化させた後、真空雰囲気において、各試験温度での温度計が得た連続出力の最大値から放射率比補正值との関係を調べたものであり、これらのデータを判り易く整理したものが図15である。

この図では、各制御温度で放射率比補正值を変えた時の測定温度の変化を—のラインで示しており、この結果得られた試験温度に対する放射率比補正の“傾き”が×—×のラインで表わされている。このように充分酸化した試験片を用いて700°Cの試験を行う場合、補正值は図から読みとれるように1.002程度に設定すれば良いことになるが、試験部に700°C以外の、例えば600°C、500°C、400°Cが存在する場合、その部分の放射率計による測定指示温度は低い温度ほど高い側への測定誤差(図中、波線)が生ずる。これは各制御温度での放射率比が異なることによるもので、同一であれば図15の×—×のラインは全くの垂直のラインになるはずである。従って、現在の試験片では大きな温度差を正しく検出することは不可能であり、まだ酸化が足りないと言える。しかしながら、この試験片程度の酸化状態であれば、熱電対での表面温度分布の測定で知り得た均熱部分については、比較的真の温度が測定できるはずである。このような結果から、本装置での二色放射率計の使用は、適宜適切な放射率比補正值を選ぶことによって、だいたいの温度分布を知ることができるが、測定値そのものを絶対値とするにはやや無理があることがわかった。また、試験片については、試験に先立って十分に洗浄した後、一昼夜ほどの加熱による酸化処理が必要であることもわかった。この計画的な酸化は現在の所、研磨面を有する試験片の放射率比を試験前より一定にしておくという本クリープ試験に最も適した手段と言える。

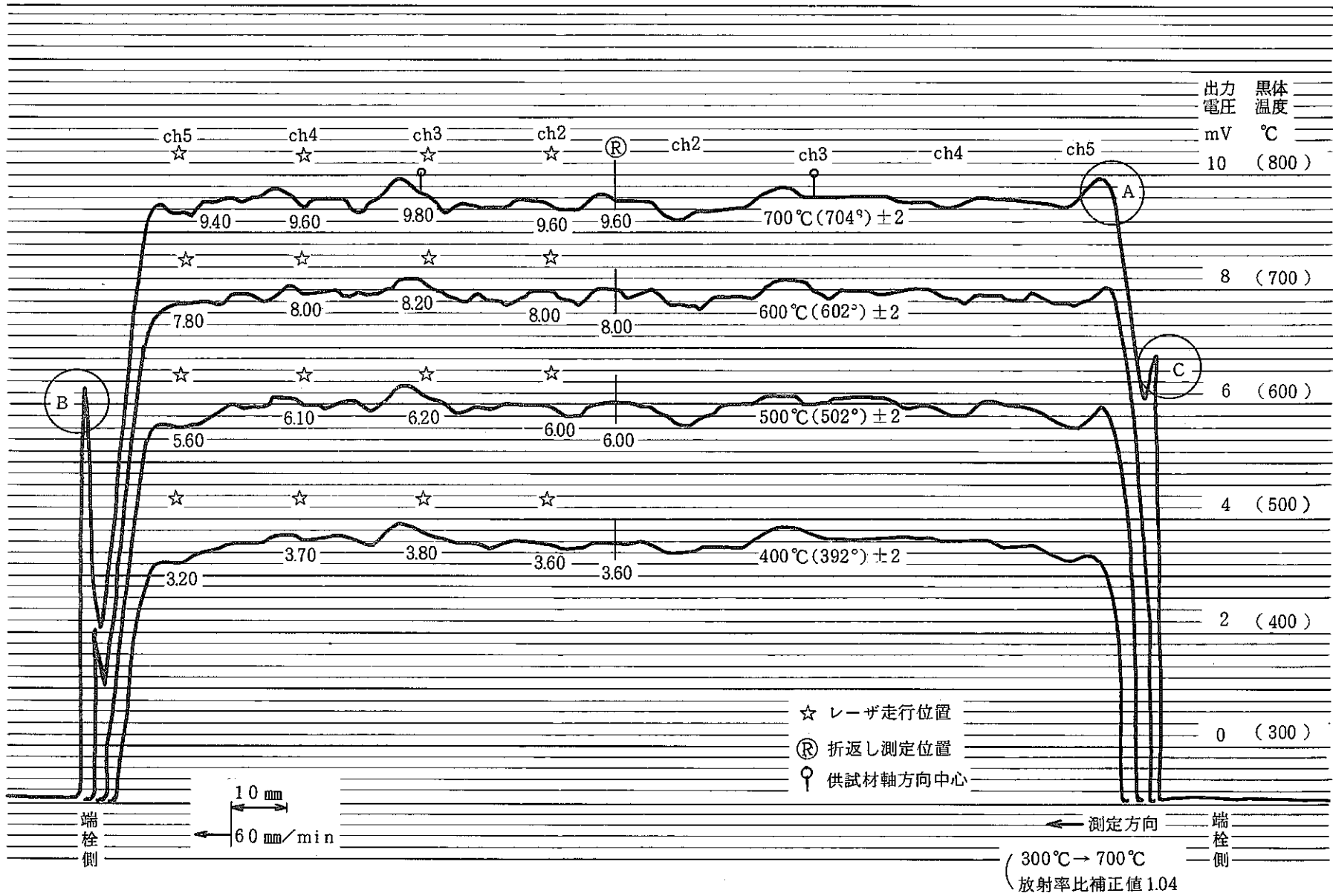


図 12 二色放射温度計による表面温度分布の測定 (昇温時)



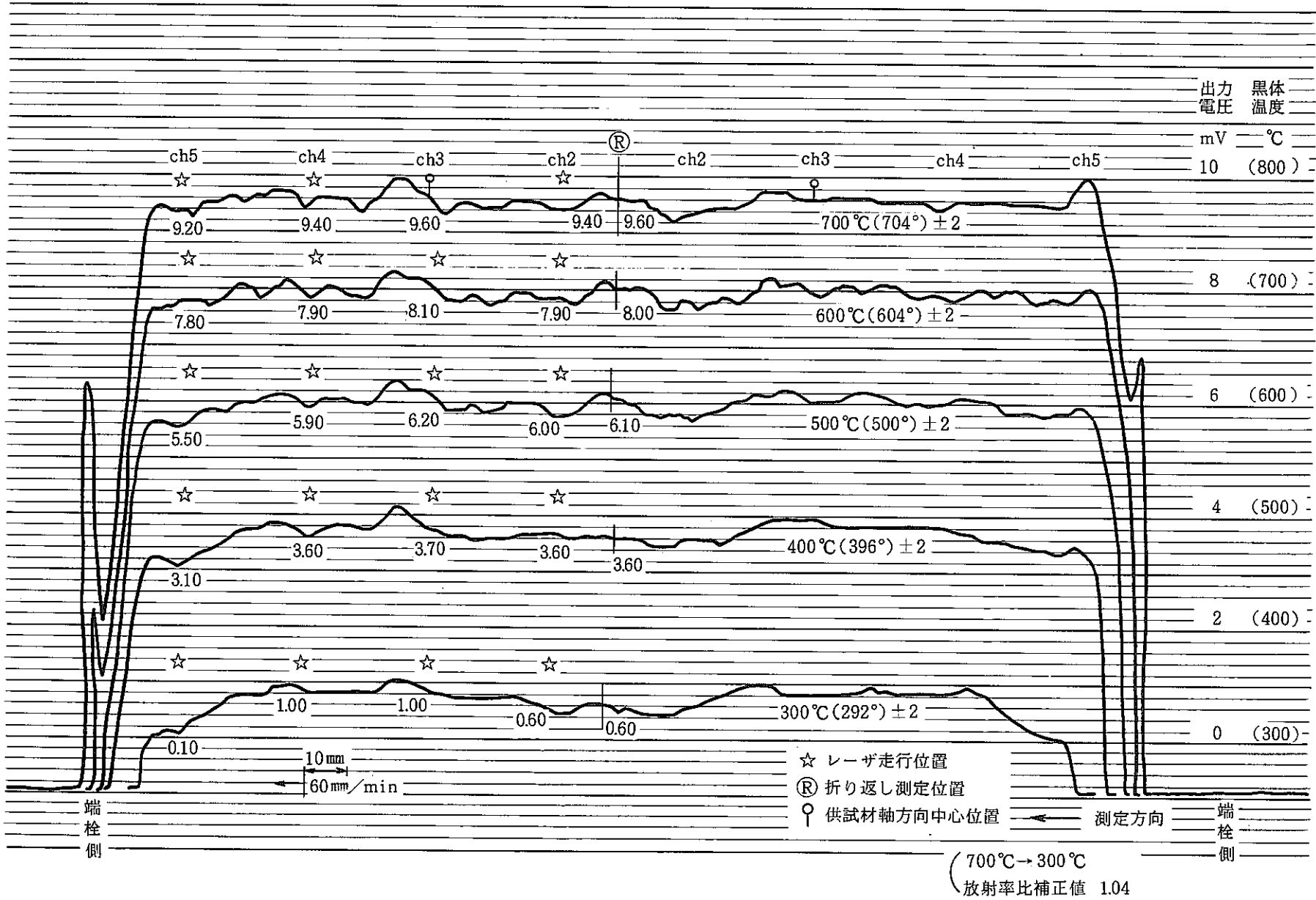


図13 二色放射温度計による表面温度分布の測定(降温時)

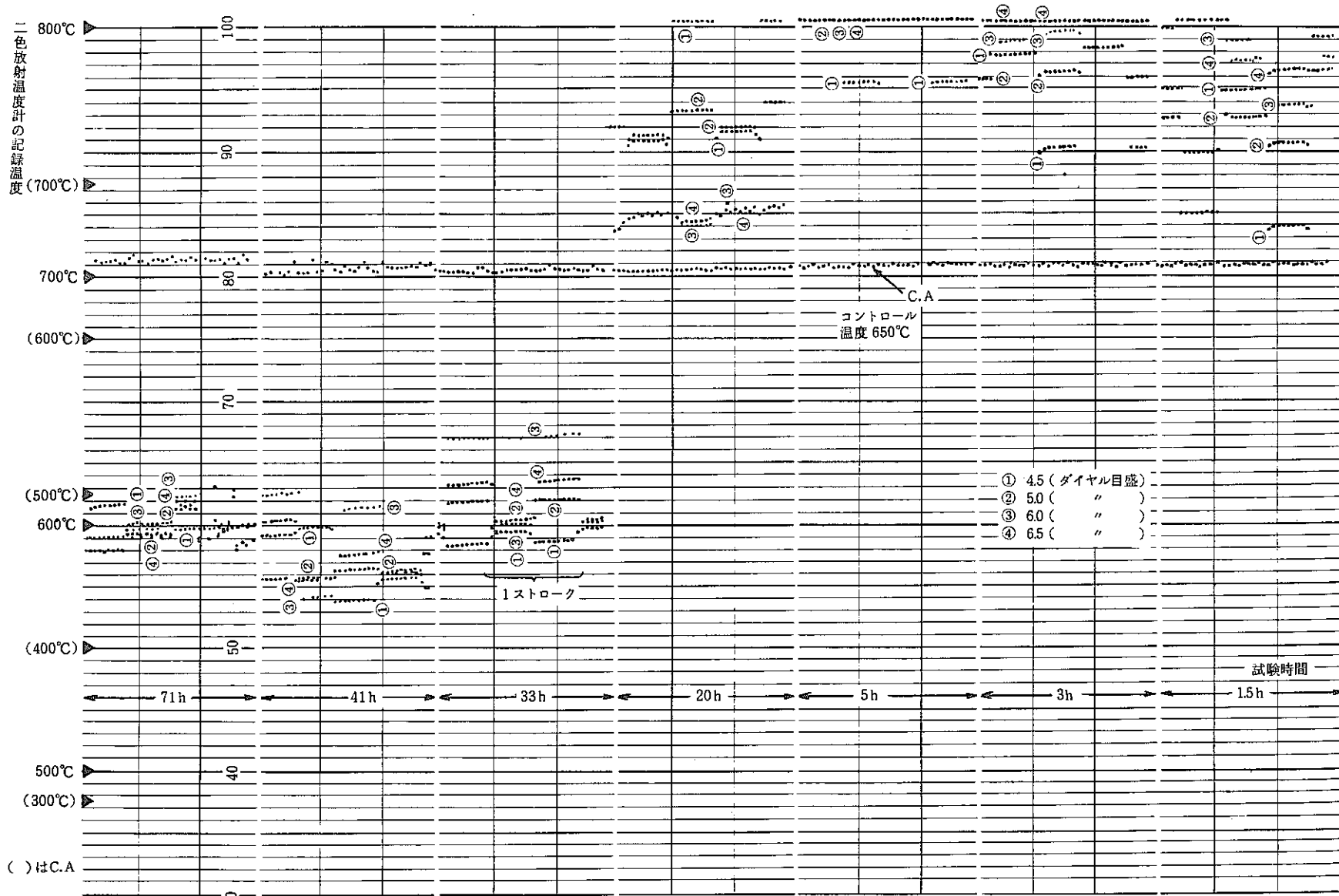


図14 酸化による放射率比の変動(真空中)放射率比補正值1.00

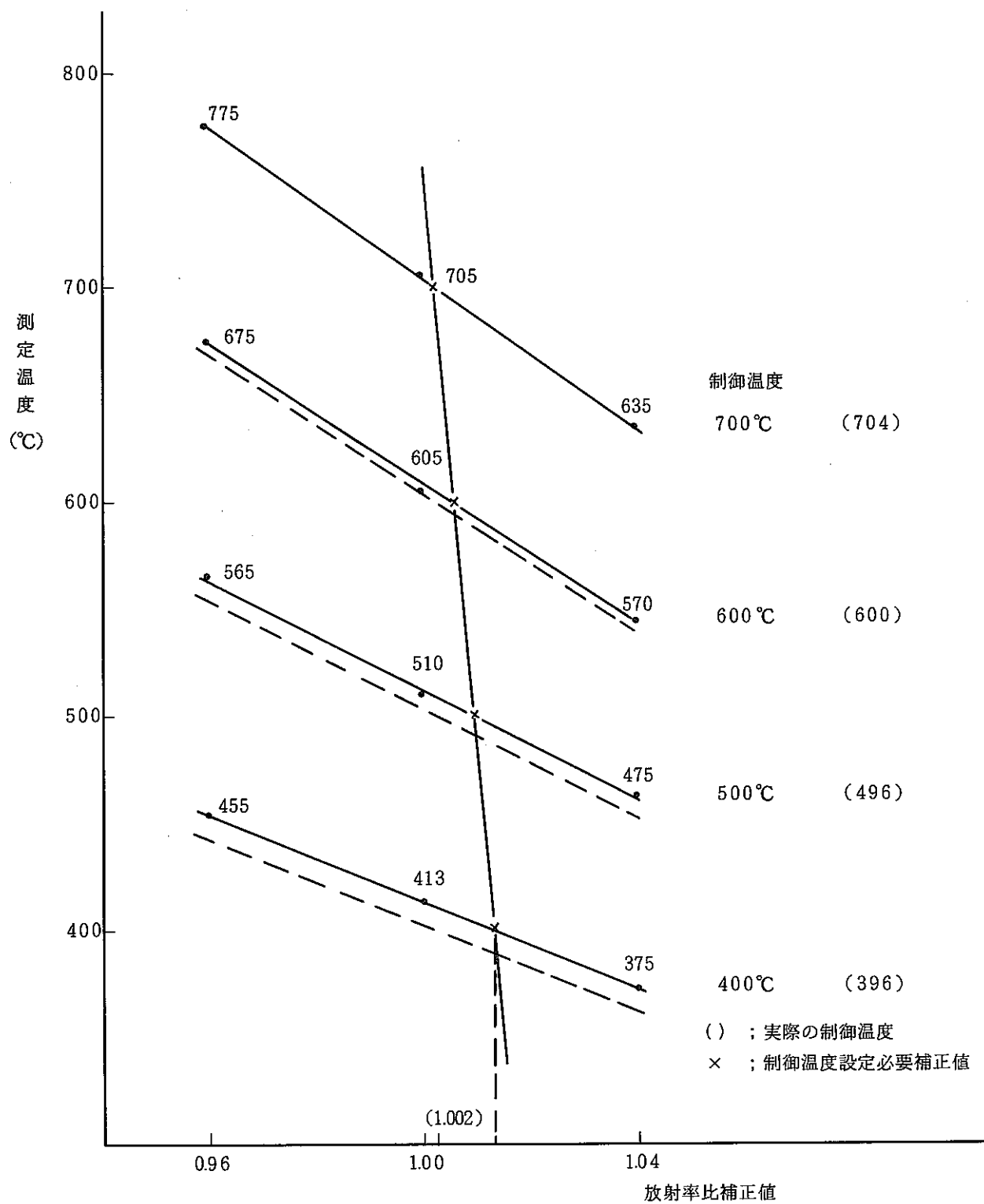


図 15 放射率比補正值と測定温度の関係  
 (・ 4 点出力 5.1 目盛位置  
 (・ 充分酸化した試験片

## 5. 外径測定の精度

### 5-1 レーザ外径測定装置の精度

本装置に組込まれているレーザ外径測定装置の測定精度を図16に示す形状の高精度外径ゲージ(5.500~6.530)を利用して調べた。測定は、これらのゲージを試験片と同じように試験片ホルダーに取り付け、常温・大気雰囲気で行なった。表2はこのゲージの検定値であり、表3はデジタルプリンターで記録した外径測定値である。表3で示すように各チャンネルはゲージ寸法に対してほぼ $\pm 1 \mu\text{m}$ の精度で測定しており、その直線性は極めて良好である。図17にチャンネル3のゲージ寸法と測定値の関係を示しておく。尚、表3において、チャンネル間で同一ゲージに対する測定値が異なるのは、本外径測定装置がチャンネル個々の測定値校正回路を持たないことによるものである。(注 S・54・6 改良により個別校正ができるようになった。)

このレーザ外径測定装置は、外径寸法が $12 \text{ mm}^{\phi}$ 程度のもので測定できるレーザ走査幅を持っている。このクリープ試験の場合には、各チャンネルの測定精度は測定絶対値も当然であるが、特に広範囲な寸法測定に対して良好な直線性が重要である。参考までに、図18に5.200~7.150までの測定結果を示しておく。

レーザーマイクロメータ用外径ゲージの検定結果

1. 測定箇所と測定方向

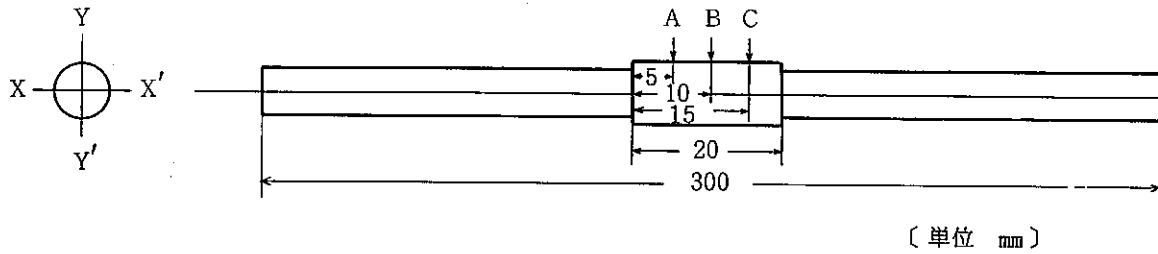


図16 ゲージの形状

測定箇所 A, B, Cの3箇所につきX, Y方向を測定。

但し, X方向はゲージに刻印されている文字に対し, 直角方向を測定。

Y方向はゲージに刻印されている文字方向を測定。

2. 検定値

表2 ゲージ検定値

	呼び径	X 方 向			Y 方 向		
		A	B	C	A	B	C
もんじゅ	6.470	6.470	6.470	6.470	6.470	6.469	6.469
	.485	.485	.485	.485	.485	.485	.485
	.500	.500	.500	.500	.500	.500	.500
	.515	.515	.515	.515	.515	.515	.515
	.530	.530	.530	.530	.530	.530	.530
MKIⅡ	5.470	5.470	5.471	5.471	5.470	5.471	5.471
	.485	.485	.485	.485	.485	.485	.485
	.500	.500	.500	.500	.500	.500	.500
	.515	.515	.515	.515	.515	.515	.515
	.530	.530	.530	.530	.530	.530	.530

(単位 mm)

表3 各チャンネルのゲージ読み取り値

ゲージ法	周方向測定位置 軸方向位置	外径測定値
<u>5.500</u>	*1* 5*05501*	**000000**
	*1* 4*05501*	**000000**
	*1* 3*05502*	**000000**
	*1* 2*05502*	**000000**
	*1* 1*05499*	**000000**
		└──────────┘ 積算時間
<u>5.530</u>	*1* 1*05530*	**000000**
	*1* 2*05530*	**000000**
	*1* 3*05532*	**000000**
	*1* 4*05531*	**000000**
	*1* 5*05533*	**000000**
<u>6.470</u>	*1* 5*06470*	**000000**
	*1* 4*06469*	**000000**
	*1* 3*06468*	**000000**
	*1* 2*06469*	**000000**
	*1* 1*06468*	**000000**
<u>6.485</u>	*1* 1*06485*	**000000**
	*1* 2*06484*	**000000**
	*1* 3*06484*	**000000**
	*1* 4*06484*	**000000**
	*1* 5*06485*	**000000**
<u>6.500</u>	*1* 5*06500*	**000000**
	*1* 4*06499*	**000000**
	*1* 3*06500*	**000000**
	*1* 2*06499*	**000000**
	*1* 1*06500*	**000000**
<u>6.515</u>	*1* 5*06515*	**000000**
	*1* 4*06514*	**000000**
	*1* 3*06515*	**000000**
	*1* 2*06514*	**000000**
	*1* 1*06513*	**000000**
<u>6.530</u>	*1* 1*06529*	**000000**
	*1* 2*06529*	**000000**
	*1* 3*06529*	**000000**
	*1* 4*06530*	**000000**
	*1* 5*06530*	**000000**

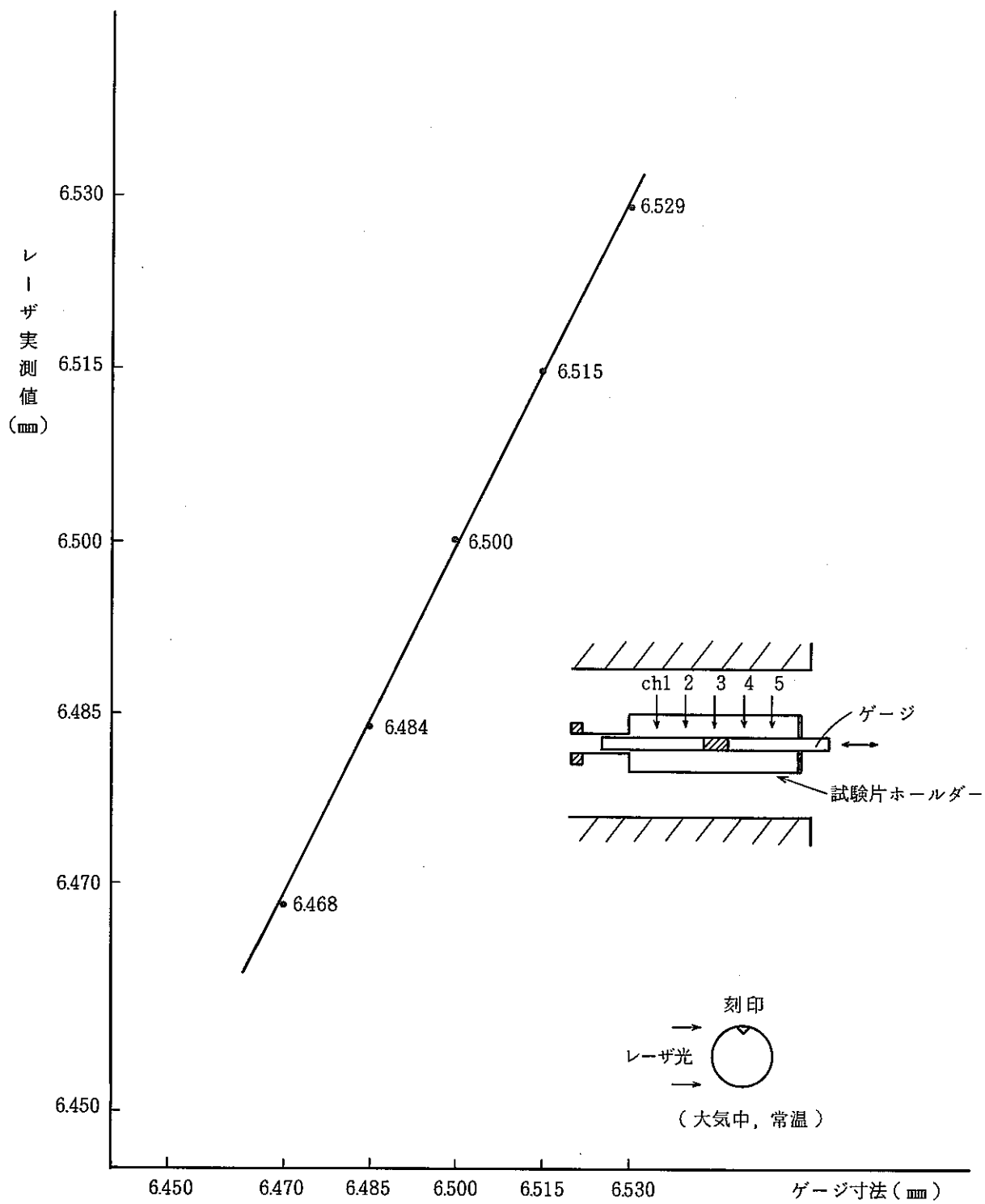


図17 レーザ測定 of 直線性 (ch3)

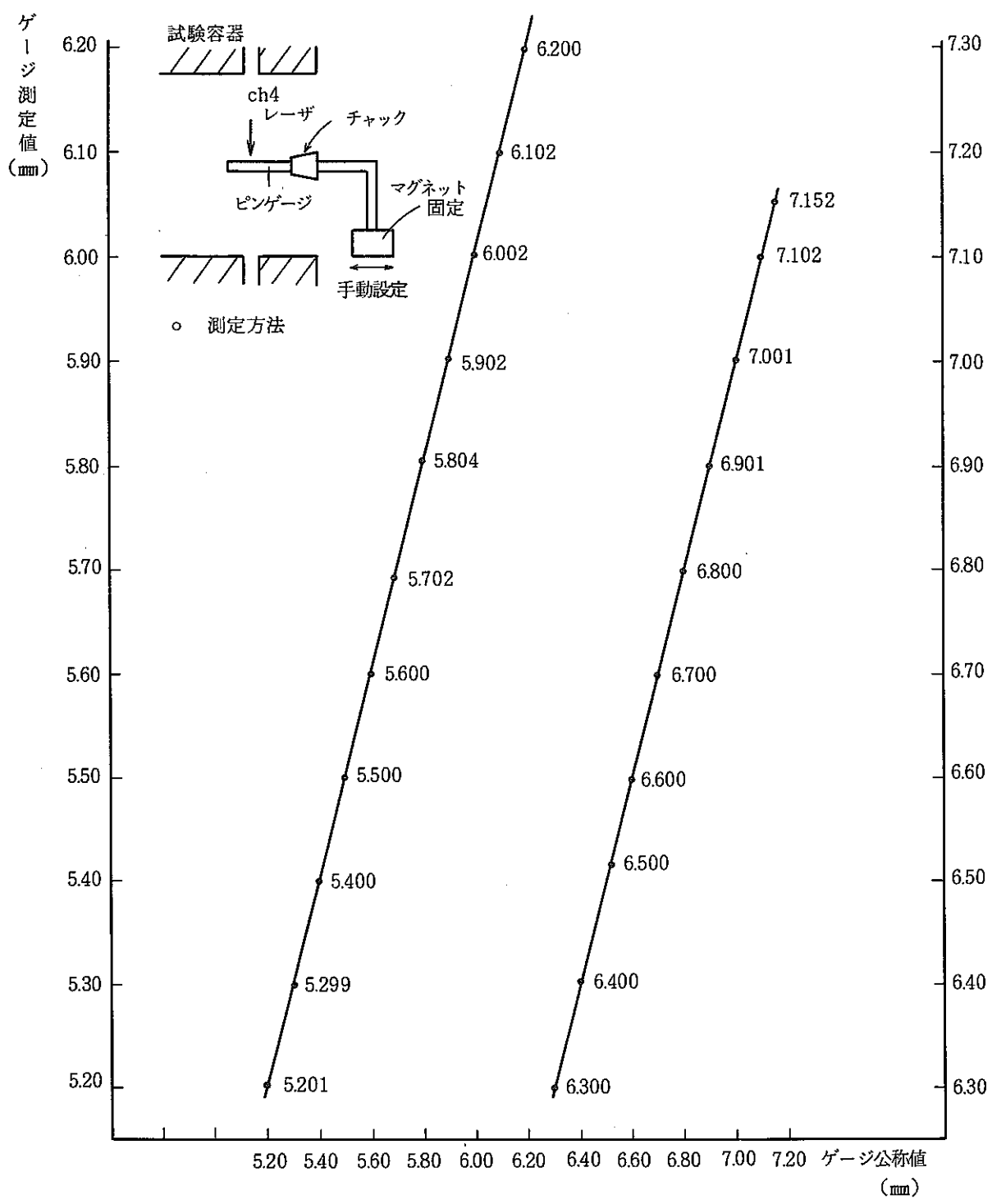


図 18 ゲージ (5.200~7.150) レーザ測定直線性 …… ch4



## 5-2 内圧クリープ試験下での外径測定精度

### 5-2-1 実験の方法

内圧クリープ試験では、常温大気中とは異なり発熱状態にある試験片の外径を測定することになるので、試験容器内の特殊な雰囲気による光学的な測定誤差を考慮しておかなければならない。そこで、真空及び大気雰囲気中でこの測定を行ない、外径測定精度を調べた。

これらの実験は、試験容器内をそれぞれの雰囲気に保持した後、試験片の加熱温度を700℃まで100℃毎に昇・降温制御してゆく過程での熱膨張による外径変化を測定する方法で行なった。

この実験で得るレーザ測定値を信頼性のあるものとするために、実験の前後に試験片の外径をマイクロメータで測定しておいた。この結果を表4に示す。各測定位置での変動は測定及び読取り誤差の範囲内であり、この実験が試験片に影響を与えていないことを示している。

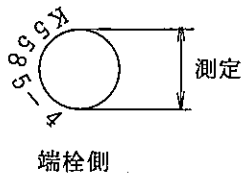
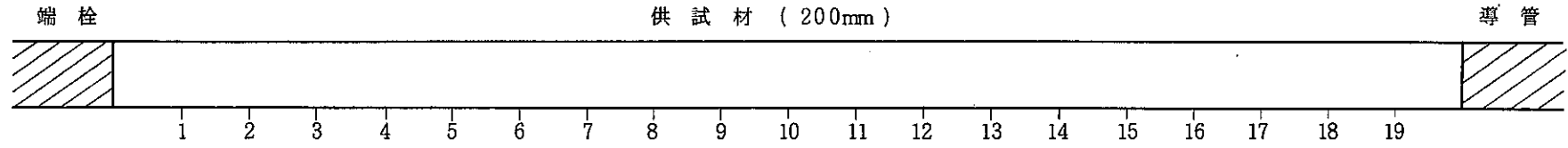
### 5-2-2 真空及び大気雰囲気での外径測定精度

真空及び大気雰囲気での外径測定の結果を表5、表6に示す。真空雰囲気での測定値は変動幅が小さく、時間的に安定しており、昇温・降温時とも良い再現性を示している。それに比べ、大気雰囲気の外径測定値は、変動が高い温度で大きくなっており真空雰囲気での値より全般に小さい値を示している。

このような現象のうち、大気雰囲気の測定値の変動については、温度制御に伴う温度変化による外径変化ではなく、試験片の温度と周辺空気の対流によって空気密度が変化し、レーザ測定への影響が生じたものと考えられる。また、大気雰囲気での測定値が小さいことについては、試験片加熱部の周辺雰囲気への熱流出によって表面温度が低下した結果、熱膨張が小さくなったことが原因と考えることもできる。

表7は表5、表6で得られた各制御温度での外径平均値と常温での外径平均値との差を示したものである。昇温時のデータは加熱前の常温での測定値、降温時のデータは加熱後の常温での測定値を基準にしている。このデータのうち、真空雰囲気での昇温と大気雰囲気での昇温についてプロットしたものを図19、図20に示す。これらの図が示す各チャンネルのプロットカーブはゆるやかな放物線を描いており、図21で示すSUS316の熱膨張温度係数から求めた熱歪のカーブと同一形態を示している。そこで真空及び大気雰囲気での昇温時における熱膨張変化をチャンネル5で代表すると、図19で明らかなように、真空雰囲気での熱膨張は大気雰囲気に比べ大きい傾向を示しており、大気中700℃加熱の熱歪は真空中660℃加熱に相当する歪になっている。このようなことから、本試作装置による大気雰囲気での内圧クリープ試験は、レーザ光による外径測定だけでなく試験温度にも影響を及ぼすと考えられるため真空雰囲気で実施することが望ましい。

表4 マイクロメータ測定による実験前後比較



$\frac{1}{1000}$ マイクロメータ (測定ヘッド6.5 mm  $\phi$ )  
室温 10 °C

位置 測定	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
実験前	6.494	6.493	6.493	6.493	6.494	6.494	6.494	6.493	6.494	6.494	6.494	6.493	6.493	6.493	6.493	6.493	6.493	6.495	6.496
実験後	6.495	6.493	6.493	6.494	6.493	6.493	6.493	6.493	6.494	6.493	6.494	6.493	6.494	6.493	6.492	6.494	6.494	6.495	6.497

表5 昇温時の試験片外径寸法

制御温度 (°C)	測定位置 (チャンネル)	真空中での測定値 (mm)	大気中での測定値 (mm)
常 温 (15°C)	1	6.486 ~ 6.487 (1)	6.487 ~ 6.488 (1)
	2	6.487 ~ 6.488 (1)	6.486 ~ 6.487 (1)
	3	6.486 ~ 6.487 (1)	6.486 ~ 6.487 (1)
	4	6.488 ~ 6.489 (1)	6.485 ~ 6.486 (1)
	5	6.485 ~ 6.486 (1)	6.484 ~ 6.486 (2)
100	1	6.495 ~ 6.496 (1)	6.495 ~ 6.496 (1)
	2	6.503 ~ 6.504 (1)	6.497 ~ 6.498 (1)
	3	6.493 ~ 6.494 (1)	6.492 ~ 6.493 (1)
	4	6.496 ~ 6.497 (1)	6.494 ~ 6.496 (2)
	5	6.491 ~ 6.492 (1)	6.490 ~ 6.492 (2)
200	1	6.506 ~ 6.507 (1)	6.505 ~ 6.506 (1)
	2	6.513 ~ 6.515 (2)	6.507 ~ 6.509 (2)
	3	6.506 ~ 6.507 (1)	6.503 ~ 6.505 (2)
	4	6.508 ~ 6.509 (1)	6.504 ~ 6.506 (2)
	5	6.501 ~ 6.503 (2)	6.499 ~ 6.501 (2)
300	1	6.517 ~ 6.518 (1)	6.516 ~ 6.517 (1)
	2	6.523 ~ 6.524 (1)	6.518 ~ 6.520 (2)
	3	6.517 ~ 6.518 (1)	6.514 ~ 6.516 (2)
	4	6.519 ~ 6.521 (2)	6.514 ~ 6.516 (2)
	5	6.513 ~ 6.515 (2)	6.510 ~ 6.512 (2)
400	1	6.530 ~ 6.531 (1)	6.526 ~ 6.529 (3)
	2	6.535 ~ 6.536 (1)	6.528 ~ 6.530 (2)
	3	6.529 ~ 6.531 (2)	6.526 ~ 6.528 (2)
	4	6.532 ~ 6.533 (1)	6.526 ~ 6.528 (2)
	5	6.526 ~ 6.528 (2)	6.523 ~ 6.525 (2)
500	1	6.544 ~ 6.545 (1)	6.538 ~ 6.540 (2)
	2	6.549 ~ 6.550 (1)	6.538 ~ 6.540 (2)
	3	6.542 ~ 6.544 (2)	6.538 ~ 6.541 (3)
	4	6.544 ~ 6.546 (2)	6.537 ~ 6.540 (3)
	5	6.541 ~ 6.543 (2)	6.535 ~ 6.538 (3)
600	1	6.557 ~ 6.558 (1)	6.550 ~ 6.553 (3)
	2	6.563 ~ 6.565 (2)	6.549 ~ 6.552 (3)
	3	6.556 ~ 6.558 (2)	6.550 ~ 6.552 (2)
	4	6.558 ~ 6.559 (1)	6.550 ~ 6.553 (3)
	5	6.556 ~ 6.557 (1)	6.550 ~ 6.552 (2)
700	1	6.571 ~ 6.572 (1)	6.563 ~ 6.566 (3)
	2	6.577 ~ 6.579 (2)	6.560 ~ 6.563 (3)
	3	6.569 ~ 6.571 (2)	6.564 ~ 6.567 (3)
	4	6.571 ~ 6.573 (2)	6.563 ~ 6.566 (3)
	5	6.571 ~ 6.573 (2)	6.563 ~ 6.567 (4)

( )は変動値を $\mu\text{m}$ で示す。

※ 制御温度到達後6~7分の測定値

表 6 降温時の試験片外径寸法

制御温度 (°C)	測定位置 (チャンネル)	真空中での測定値 (mm)	大気中での測定値 (mm)
700	1	6.570 ~ 6.572 (2)	6.558 ~ 6.563 (5)
	2	6.579 ~ 6.581 (2)	6.561 ~ 6.565 (4)
	3	6.569 ~ 6.571 (2)	6.564 ~ 6.567 (3)
	4	6.571 ~ 6.573 (2)	6.560 ~ 6.562 (2)
	5	6.571 ~ 6.572 (1)	6.563 ~ 6.567 (4)
600	1	6.557 ~ 6.559 (2)	6.546 ~ 6.550 (4)
	2	6.567 ~ 6.569 (2)	6.546 ~ 6.550 (4)
	3	6.556 ~ 6.558 (2)	6.550 ~ 6.554 (4)
	4	6.558 ~ 6.560 (2)	6.547 ~ 6.551 (4)
	5	6.556 ~ 6.558 (2)	6.550 ~ 6.554 (4)
500	1	6.543 ~ 6.545 (2)	6.534 ~ 6.538 (4)
	2	6.552 ~ 6.554 (2)	6.533 ~ 6.537 (4)
	3	6.542 ~ 6.544 (2)	6.538 ~ 6.542 (4)
	4	6.544 ~ 6.546 (2)	6.535 ~ 6.538 (3)
	5	6.541 ~ 6.543 (2)	6.536 ~ 6.540 (4)
400	1	6.530 ~ 6.531 (1)	6.524 ~ 6.528 (4)
	2	6.537 ~ 6.539 (2)	6.521 ~ 6.524 (3)
	3	6.529 ~ 6.531 (2)	6.526 ~ 6.530 (4)
	4	6.532 ~ 6.533 (1)	6.523 ~ 6.525 (2)
	5	6.528 ~ 6.529 (1)	6.524 ~ 6.527 (3)
300	1	6.517 ~ 6.518 (1)	6.511 ~ 6.517 (6)
	2	6.524 ~ 6.525 (1)	6.510 ~ 6.513 (3)
	3	6.517 ~ 6.519 (2)	6.515 ~ 6.518 (3)
	4	6.519 ~ 6.521 (2)	6.512 ~ 6.515 (3)
	5	6.514 ~ 6.516 (2)	6.509 ~ 6.512 (3)
200	1	6.506 ~ 6.508 (2)	6.501 ~ 6.504 (3)
	2	6.511 ~ 6.513 (2)	6.500 ~ 6.504 (4)
	3	6.505 ~ 6.507 (2)	6.503 ~ 6.506 (3)
	4	6.509 ~ 6.510 (1)	6.500 ~ 6.503 (3)
	5	6.504 ~ 6.505 (1)	6.498 ~ 6.501 (3)
100	1	6.495 ~ 6.496 (1)	6.490 ~ 6.494 (4)
	2	6.500 ~ 6.501 (1)	6.492 ~ 6.495 (3)
	3	6.493 ~ 6.495 (2)	6.493 ~ 6.495 (2)
	4	6.496 ~ 6.497 (1)	6.491 ~ 6.493 (2)
	5	6.492 ~ 6.493 (1)	6.490 ~ 6.491 (1)
常 温	1	6.487 ~ 6.488 (1)	6.483 ~ 6.486 (3)
	2	6.490 ~ 6.491 (1)	6.482 ~ 6.484 (2)
	3	6.486 ~ 6.487 (1)	6.487 ~ 6.491 (4)
	4	6.488 ~ 6.489 (1)	6.484 ~ 6.486 (2)
	5	6.486 ~ 6.488 (2)	6.488 ~ 6.490 (2)

( )内は変動値を $\mu\text{m}$ で示す。

※ 700°Cについては、制御温度到達後20分

600~常温

"

6~7分の値である。

表7 常温測定値に対する各温度での変位量

測定条件	レーザチャンネル	常温での値	試験温度による外径変化量 ( $\mu\text{m}$ )							備考
			100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃	
真空・昇温時	1	6.487	9	20	31	44	58	71	85	昇温→降温は連続して行った。
	2	6.488	16	26	36	48	62	76	90	
	3	6.487	7	20	31	43	56	70	83	
	4	6.489	8	20	31	44	56	70	83	
	5	6.486	6	16	28	41	56	71	86	
真空・降温時	1	6.488	8	19	30	43	56	70	83	
	2	6.491	10	21	34	47	62	77	89	
	3	6.487	7	19	31	43	56	70	83	
	4	6.489	8	21	31	44	56	70	83	
	5	6.487	6	18	28	42	55	70	85	
大気・昇温時	1	6.488	8	18	29	40	51	64	77	昇温→降温は連続で行った。
	2	6.487	11	21	32	42	52	64	75	
	3	6.487	6	17	28	40	53	64	79	
	4	6.486	9	19	29	41	53	66	79	
	5	6.485	6	15	26	39	52	66	80	
大気・降温時	1	6.485	7	18	29	41	51	63	76	
	2	6.483	11	19	29	40	52	65	80	
	3	6.489	5	16	28	39	51	63	77	
	4	6.485	7	17	29	39	52	64	76	
	5	6.489	2	11	22	37	49	63	76	

※ 試験温度700℃の値は制御温度が700℃に到達後6~7分経過のデータを昇温、20分経過のデータを降温とした。

又、本データは変位測定値の平均(4捨5入)をとって常温からの変位量を求めている。

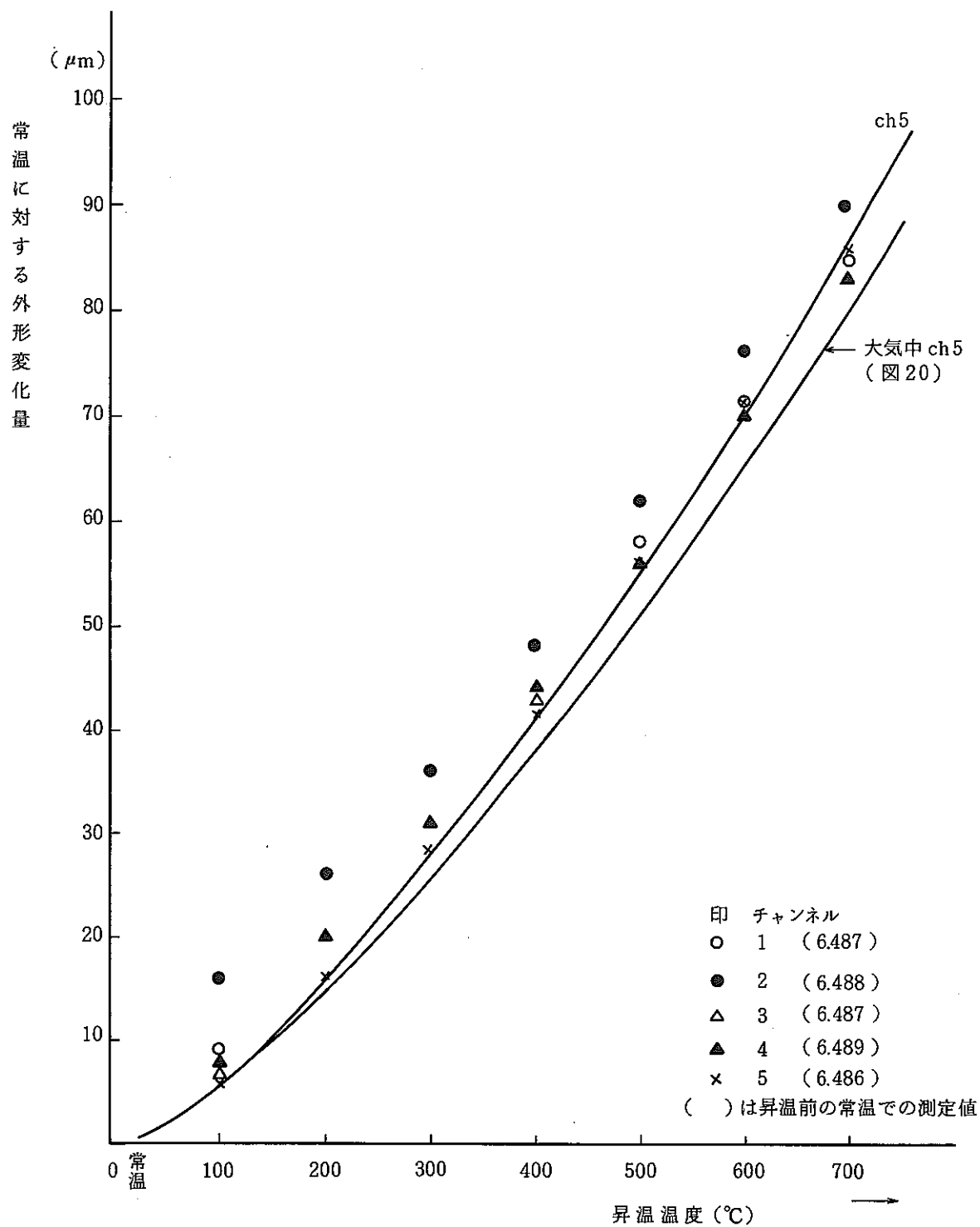


図19 真空中での外径変化(異温)

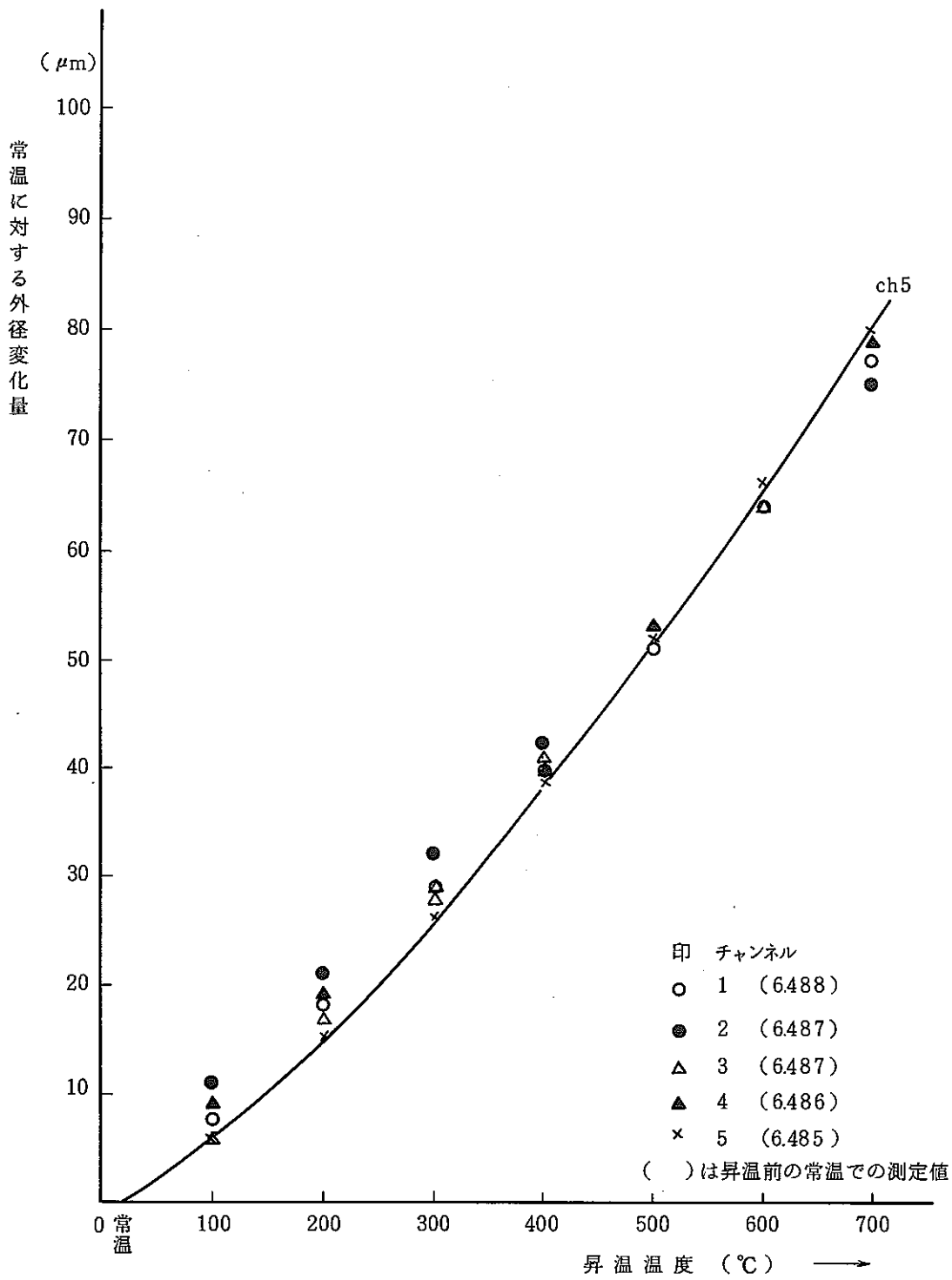


図 20 大気中での外径変化 (昇温)

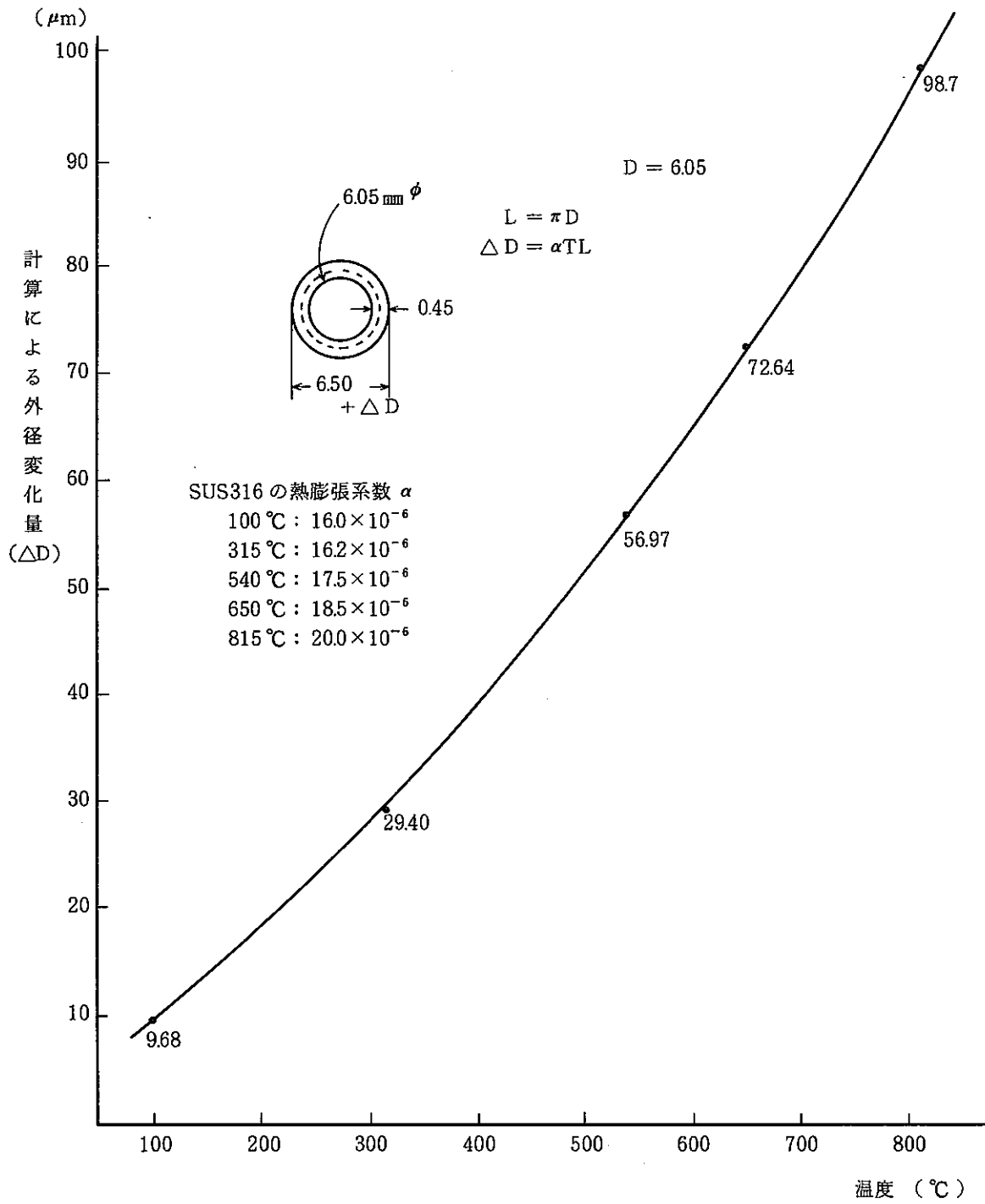


図 2 1 温度と熱膨張係数による歪の計算



### 5-3 軸方向熱膨張の測定

これまで径方向の熱膨張を測定してきたが、ここで参考までに軸方向の熱膨張を図22に示しておく。これは、試験片を収納している試験容器の蓋を取り外した状態の大気雰囲気中で加熱を行ない、端栓及び導管側の末端部で電氣的絶縁材の触針を持った2つのダイヤルゲージでその変位を測定したものである。この図より明らかな様に、試験片が固定されていない端栓側の伸びが、通電材によって半固定されている導管側に比べ大きく、全伸びの殆んどを占めている。そして、このプロットカーブの形態は先の図21と同様な傾向を示している。以上の様に「もんじゅ」タイプ試験片の大気雰囲気での700℃加熱による実測熱膨張は、径方向に約80μm、軸方向に3mm程度であり、以下に示す計算値と良く一致している。

#### <被覆管の熱膨張計算>

試験片加熱部の軸方向熱膨張は

$$(\text{加熱部長さ}) \times (\text{熱膨張率}) \times (\text{上昇温度})$$

で表わされる。20℃~700℃の熱膨張係数を

$$20.2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \quad \text{として計算すると}$$

$$200 \text{ mm} \times 20.2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \times 680 ^\circ\text{C}$$

であり約2.75mmとなる。

同様に径方向の熱膨張を肉厚中心の全周長さから単純計算すると

$$\begin{aligned} (605 \text{ mm} \times \pi \times 20.2 \times 10^{-6} \times 680 ^\circ\text{C}) \times \frac{1}{\pi} &= 0.0831 \text{ mm} \\ &= 83.1 \mu\text{m} \end{aligned}$$

となる。

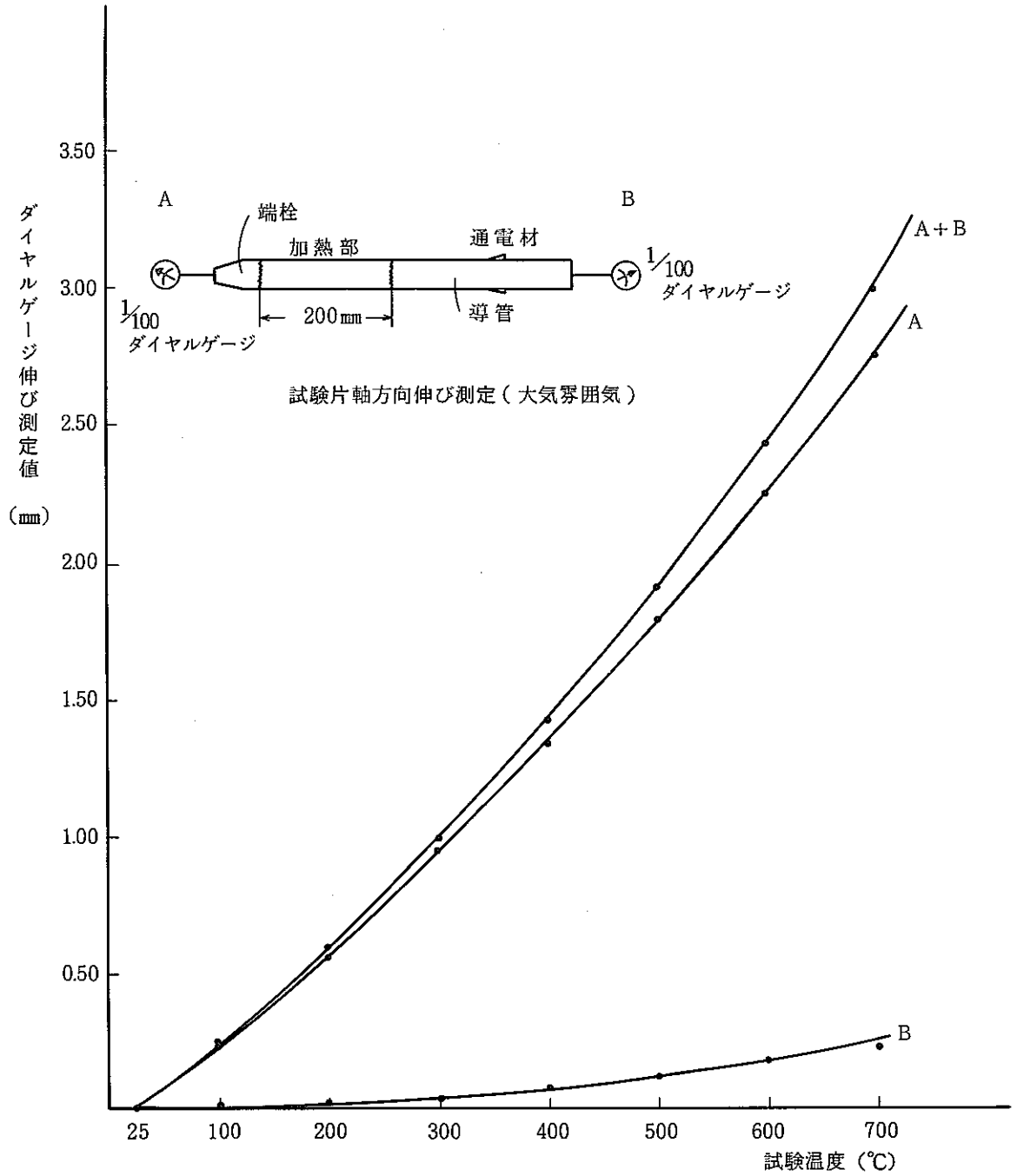


図 2 2 軸方向熱膨張の測定

## 6. 内圧クリープ試験

### 6-1 供試材

供試材には冷間加工度17.5%(No. K2018)及び20%(No. K4129)の2種類の「もんじゅ」タイプ被覆管を使用した。これら被覆管の素材成分を表8に、機械的性質を表9に示す。

試験片はこの2本の被覆管から4本製作し、それぞれにK2018-2, K4129-1, K4129-2, K4129-3の試験片Noをつけた。

### 6-2 試験方法

K4129-2の試験片を除く3本は、試験中の放射温度計による測定値の変動を見るために研磨面の状態のまま試験を行ない、K4129-2の試験片のみ、大気中、690℃、3時間の初期酸化を行ない、少し表面状態を整えた上で試験を行った。加熱温度を制御する熱電対も、この試験片のみガラスウール管に納めて試験片内部に挿入した。

これら試験片の試験条件は、加熱温度が700℃、内圧力は200, 220, 250kg/cm<sup>2</sup>の3条件とし、外径測定雰囲気は真空とした。

本装置の運転モードは“自動運転”に設定し、運転プログラムの時間設定は測定動作時間に10分、測定休止時間に1時間を設定した。この時間の設定はクリープ試験の進行に伴い、定常クリープ状態のように外径測定値の変化が小さい場合には無駄な記録を少なくするよう、適宜調整した。

表8 供試材の化学成分

		化 学 成 分 wt. %											
		Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	B	N
K2018	Ladle	Bal	0043 0045	065 066	164 167	0010 0011	0005 0005	1369 1381	1750 1744	227 228	004 004	00003 00003	0006 0005
	Check	Bal	0045 ~0056 0045 ~0051	065 ~071 062 ~066	157 ~170 157 ~166	0008 ~0011 0008 ~0011	0006 ~0007 0005 ~0006	1382 ~1394 1370 ~1383	1729 ~1779 1726 ~1770	222 ~225 224 ~225	0036 ~0038 0036	00003 ~00004 00002 ~00003	0006 ~0007 0007 ~0008
K4129 C.W 20.0%	Ladle	Bal	0057 0058	051 051	184 187	0007 0006	0006 0005	1390 1385	1678 1668	232 230	001 001	00004 00005	00066 00057
	Check	Bal	0058	048	179	0004	0005	1381	1688	241	002	00007	00047

表9 供試材の機械的性質

試験片 No	引張試験						結晶 粒度 (ASTM)	硬度 (HV)
	常 温			高 温 (650°C)				
	抗張力 kg/cm <sup>2</sup>	0.2%耐力 kg/cm <sup>2</sup>	伸 び %	抗張力 kg/cm <sup>2</sup>	0.2%耐力 kg/cm <sup>2</sup>	伸 び %		
K 2018	87.5	78.5	15	60.6	54.0	8	No 9	293
	88.7	81.9	14	60.2	54.4	8	No 9	295
K 4129	85.7	77.4	20	51.2	48.8	17	No 9	271
	85.6	78.0	20	51.3	49.0	15	No 9	287

### 6-3 試験結果

#### 6-3-1 試験結果概要

表10は各試験片のクリープ破断の結果を示したものである。表に示したレーザ外径測定  
の破断時および破断後歪は加熱前の供試材外径測定値を基準にしたもので、5チャンネル中  
最も変化の大きいチャンネルの測定値について計算したものである。破断部歪についても同  
様で、マイクロメータで測定したものである。レーザ測定チャンネルは固定であるため、破  
断部がうまく測定位置と一致しないことが多い。従って、レーザ測定の破断後歪は全体に  
マイクロメータ測定による破断部歪より小さくなっている。

#### 6-3-2 試験後試験片の観察

各試験片破断部の状況を写真3～写真7に示す。

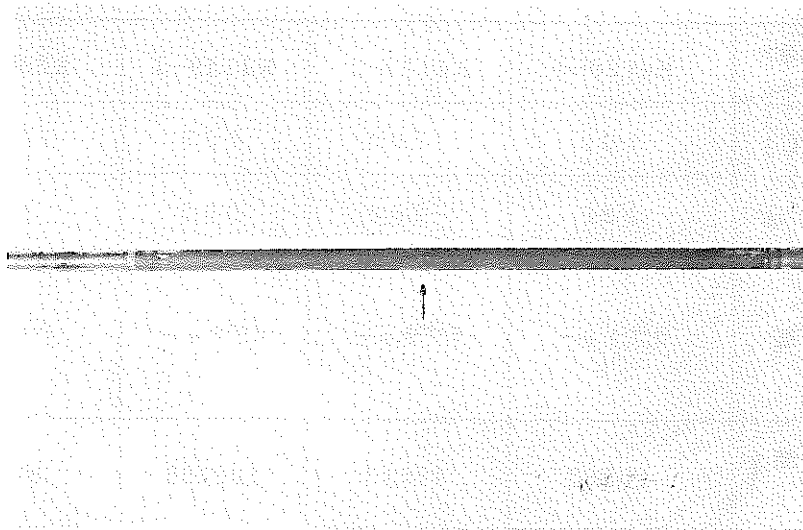
本装置による加熱法では、特にラプチャー破断部における局所的な電気抵抗の増大がある  
ことから、クリープ破断（特に3次クリープ）の加速傾向が見られた。例えばK4129-3  
の場合、ラプチャー直前の試験片の観察から、赤熱状態にある試験部の1部分に白いスポッ  
トが見られ、局部加熱が生じていることを示していた。このように、局所的な抵抗変化が温  
度分布に、そしてクリープ破断時間に影響を与えることがこの直接通電加熱の欠点となる可  
能性がある。しかし、試験後の破断状態、着色状況などは従来の試験方法のものと全く差異  
は認められない。

破断はK2018-2のバーストを除き、軸方向開口をとまなうラプチャーで、軸方向中央  
部での破断が4本中2本を占めていた。

表10 内圧クリープ試験結果

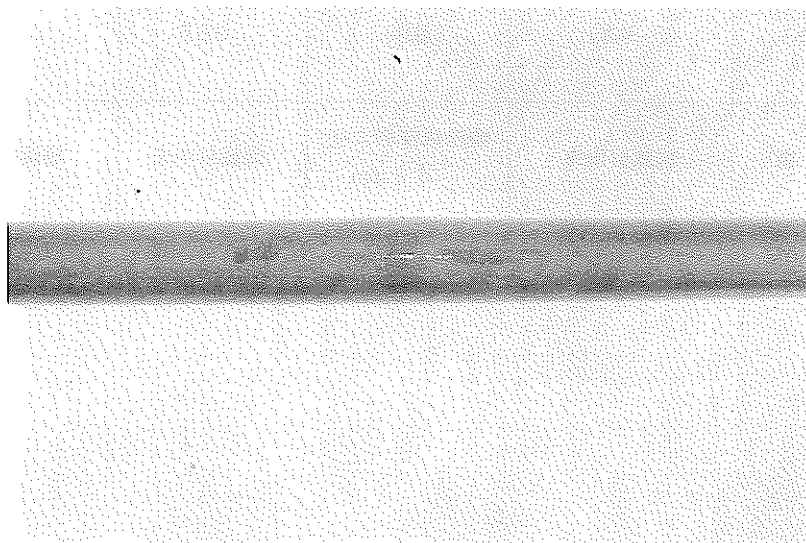
項目		試験片	K4129-1	K4129-2	K4129-3	K2018-2	参考
試験条件	温度 (°C)		700	700	700	700	10 <sup>-3</sup> Torr
	圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )		220	250	200	250	
破断状態			ラプチャー	ラプチャー	ラプチャー	バースト	
破断時間 (hour)			265.83	170.13	1,021.65	61.15	
レーザ外径測定	破断時歪 (%) 〔チャンネル max〕		8.422	9.162	2.83	17.12	試験中
	破断後歪 (%) 〔チャンネル max〕		8.11	7.79	1.44	—	常温大気
マイクログラ	破断部歪 (%) 〔max〕		9.01	8.61	3.67	—	
破断位置			供試材中央	端栓溶接部より 4.3 mm	供試材中央	導管溶接部	

○ ラプチャーの位置



( 供試材中央 )

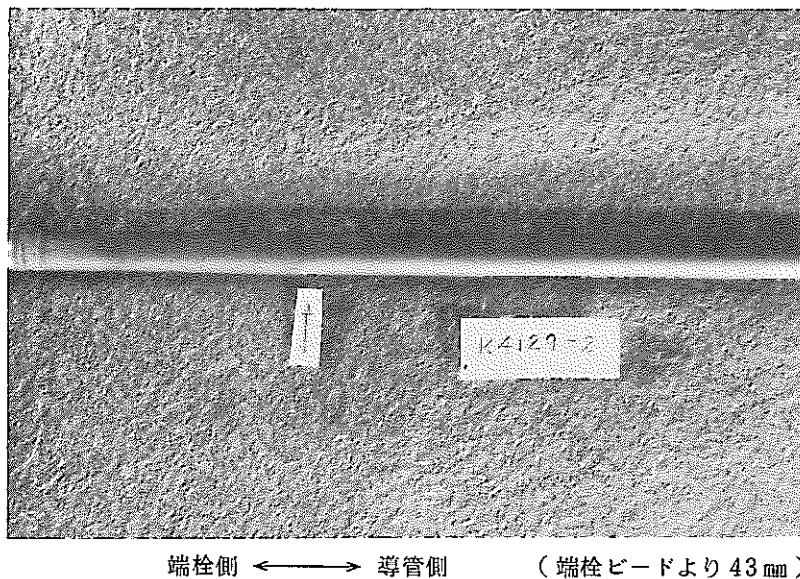
○ ラプチャーの状況



( 開口部長さ : 約 5.5 mm )

写真3 K4129-1 試験後外観写真

○ ラプチャーの位置



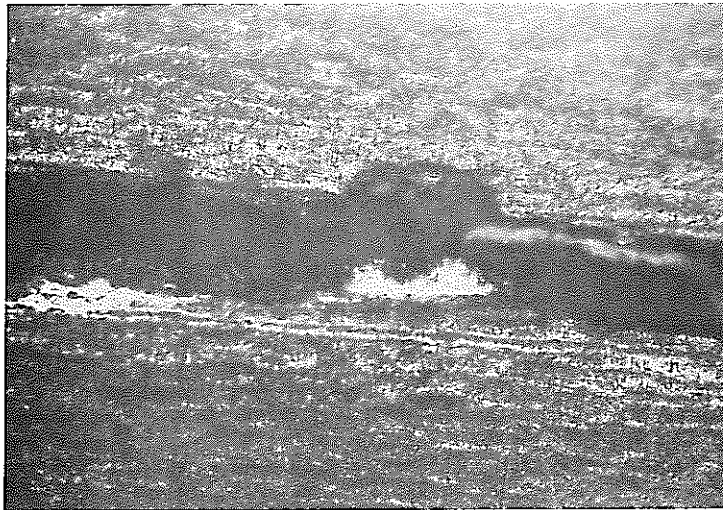
○ ラプチャーの状況



写真4 K4129-2 試験後外観写真

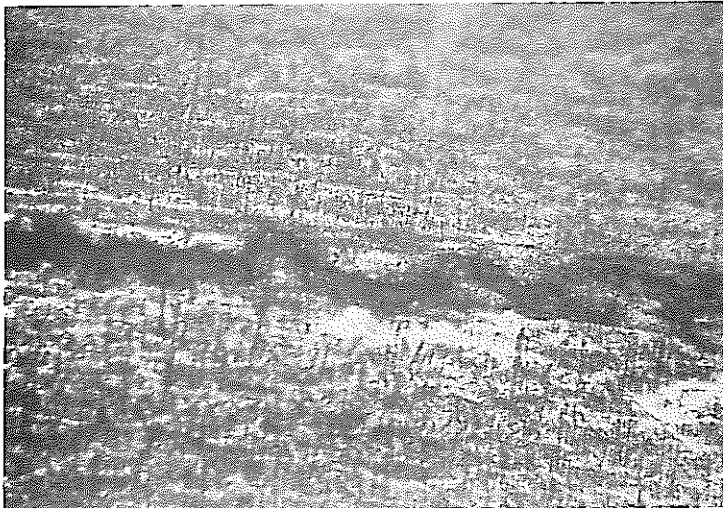


① ラプチャー部



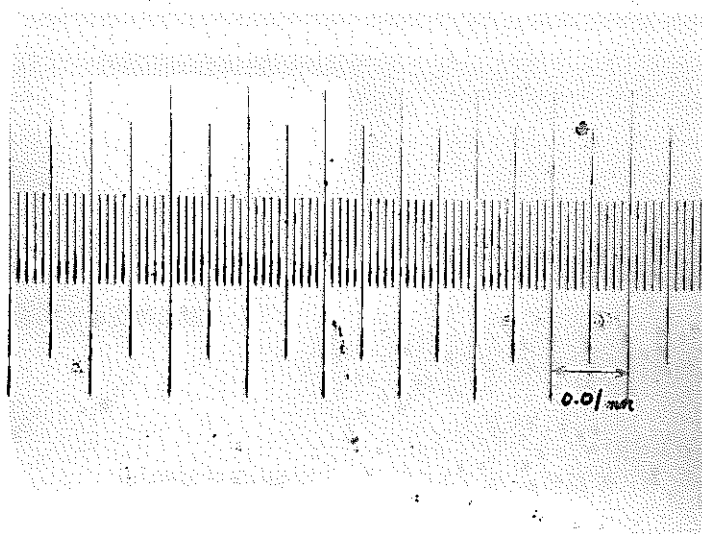
× 100

② ラプチャー部



× 100

③ 基準スケール



× 100

写真5 K4129-2 ラプチャー部拡大写真

○ ラプチャー部の状況（供試材中央）

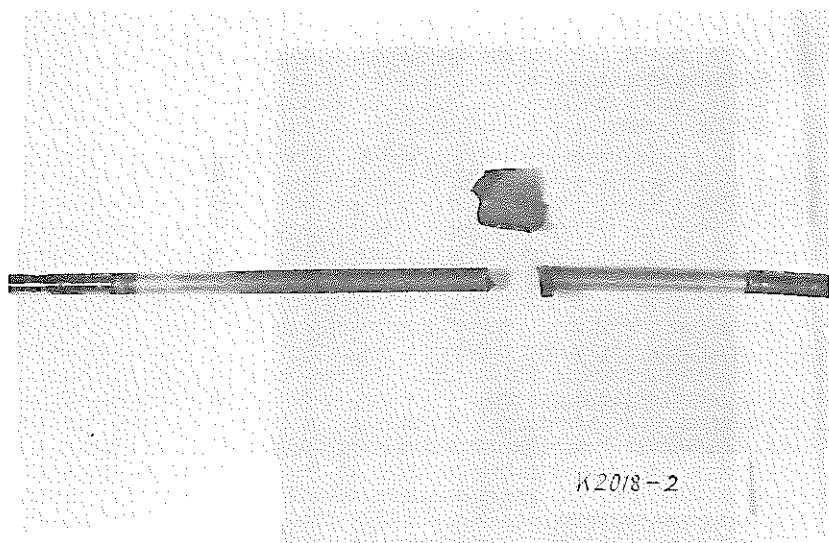
↔ 軸方向



└─┘ 0.02 mm

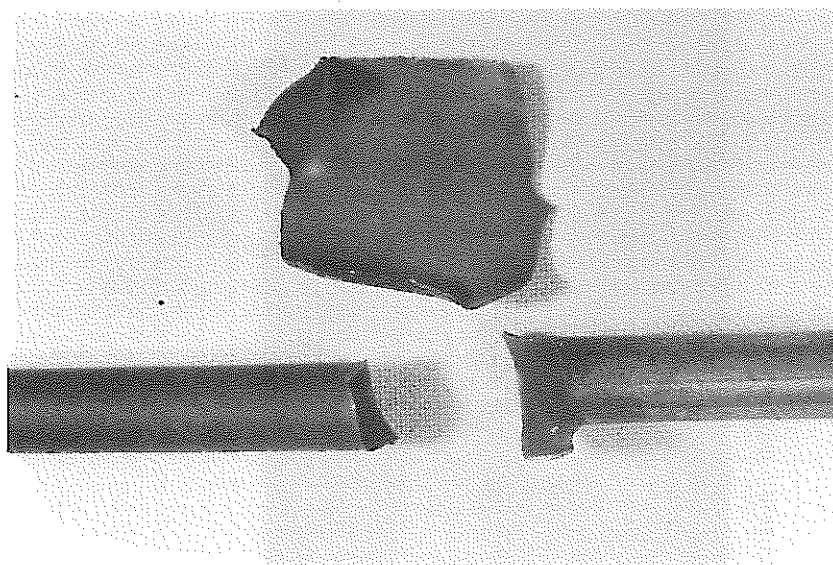
写真6 K4129-3 試験後外観写真

○ 破断の位置



端栓部 ← → 導管側 (導管ビードより約70mm)

○ 破断の状況 (バースト)



(破断長: 約21mm)

写真7 K2018-2 試験後外観写真

## 6-3-3 従来法との比較

これらの試験片の破断時間は表10に示した通りであるが、試験温度700℃における圧力と破断時間の関係を、同一ロットで製作した被覆管を供試材とした試験片について、従来より行なわれている方法である間接抵抗加熱による破断試験の結果と比較してみた。この結果を図23に示す。

図中、●印はK2018と同一ロットで製作された被覆管の従来法での破断結果であり、同様に■印はK4129材についての破断結果である。この試作機での結果を○印(K2018-2)及び□印(K4129-1~3)で示している。この図から明らかなように、本装置により得られたデータは従来法で得たデータラインと比較しても、ある程度のバラツキはあるものの、試験法の違うことによる影響を見ることはできなかった。

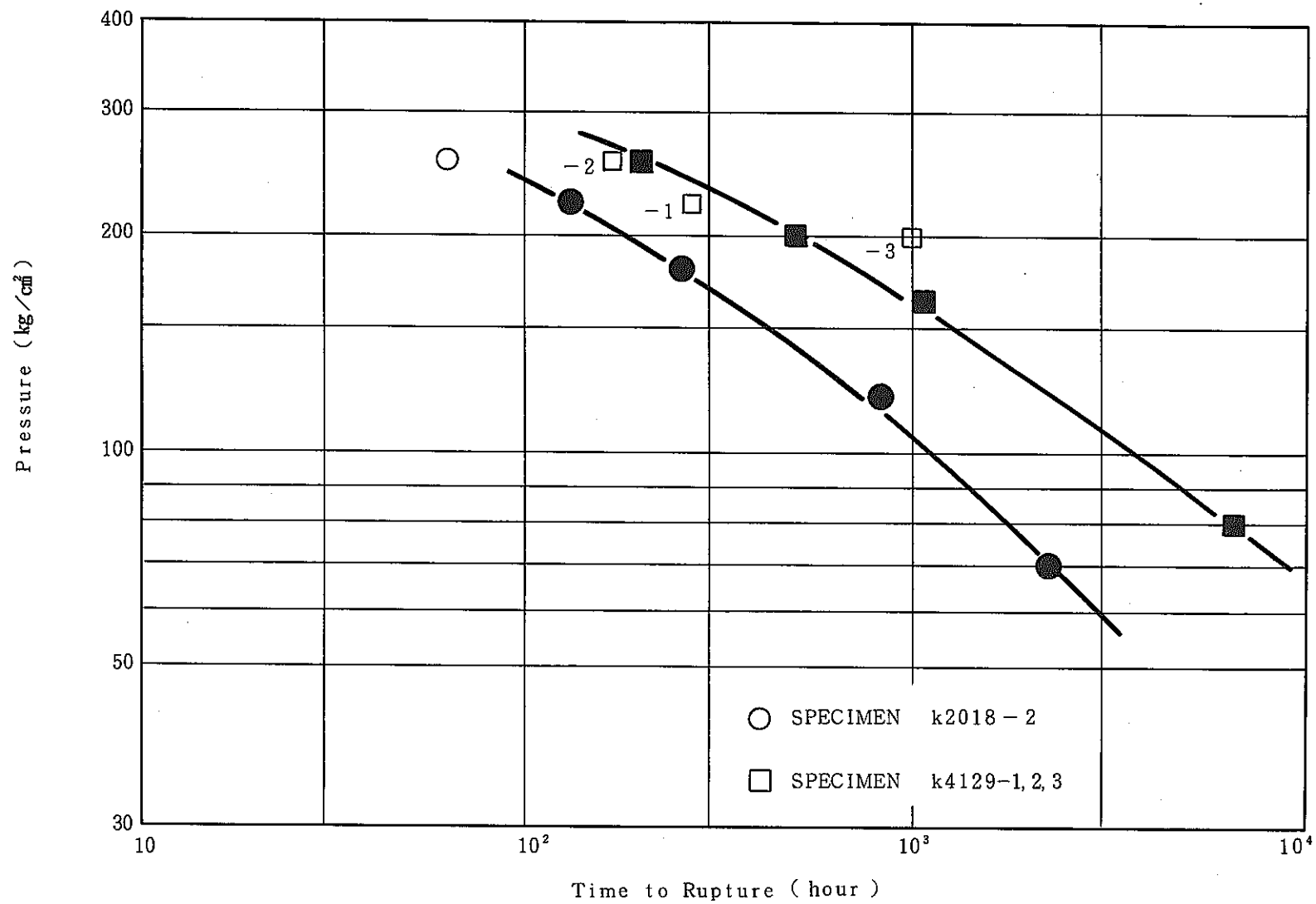


図 23 内圧クリープ破断試験結果 (試験温度 700°C)

## 6-3-4 変形量の測定

内圧クリープ試験における試験片の外径変化量を試験前、破断前、破断後について、マイクロメータで測定した外径値及びレーザ測定装置が出力した外径値を用いて調べた。試験片 K2018-2 はバースト破断であるので、変形量の測定は K4129-1~3 の3本について行った。これらの結果は同一形態であるため、ここでは K4129-3 の結果のみ示すことにする。

図24~図27は試験片 K4129-3 の外径測定位置 ( $0^{\circ}$ ~ $135^{\circ}$ ) を  $45^{\circ}$  毎に変えた時の軸方向上での外径変化を示したものである。図中①は試験終了後の常温・大気雰囲気において、マイクロメータを用いて軸方向に 10mm ピッチで測定したデータである。②はレーザ測定装置が記録した破断寸前の外径測定データである。そして③は試験片の破断により、装置が自動的に停止した後のレーザ測定データである。②と③は同じ位置を測定しているため、両者の測定値の差は、破断により生ずる内圧及び加熱の除荷が原因する外径値の変化を示していることになる。また、①と③は同一状態にある試験片を測定しているので、正しく測定されていれば同一傾向を示すはずである。図24~図27にこれらのプロットカーブを観ると、各周方向測定位置 ( $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ ,  $135^{\circ}$ ) で各データ (①~③) は全て同一傾向を示しており、円周方向への変形が各軸方向位置で均一であることを示している。①と③のデータも破断部を除いて非常に良く一致している。また、②と③の差はどの軸方向測定位置でも一定 ( $0.13\sim 0.14\text{mm}$ ) していることが表わされている。先の二点については、K4129-1, K4129-2 の結果も同様であり、これらの結果から、本試作装置のレーザ測定は、供試材のクリープ歪を忠実に再現していることが明らかである。今後実施する内圧クリープ測定では、必ずしも外周全部について測定する必要はないことが明らかとなった。

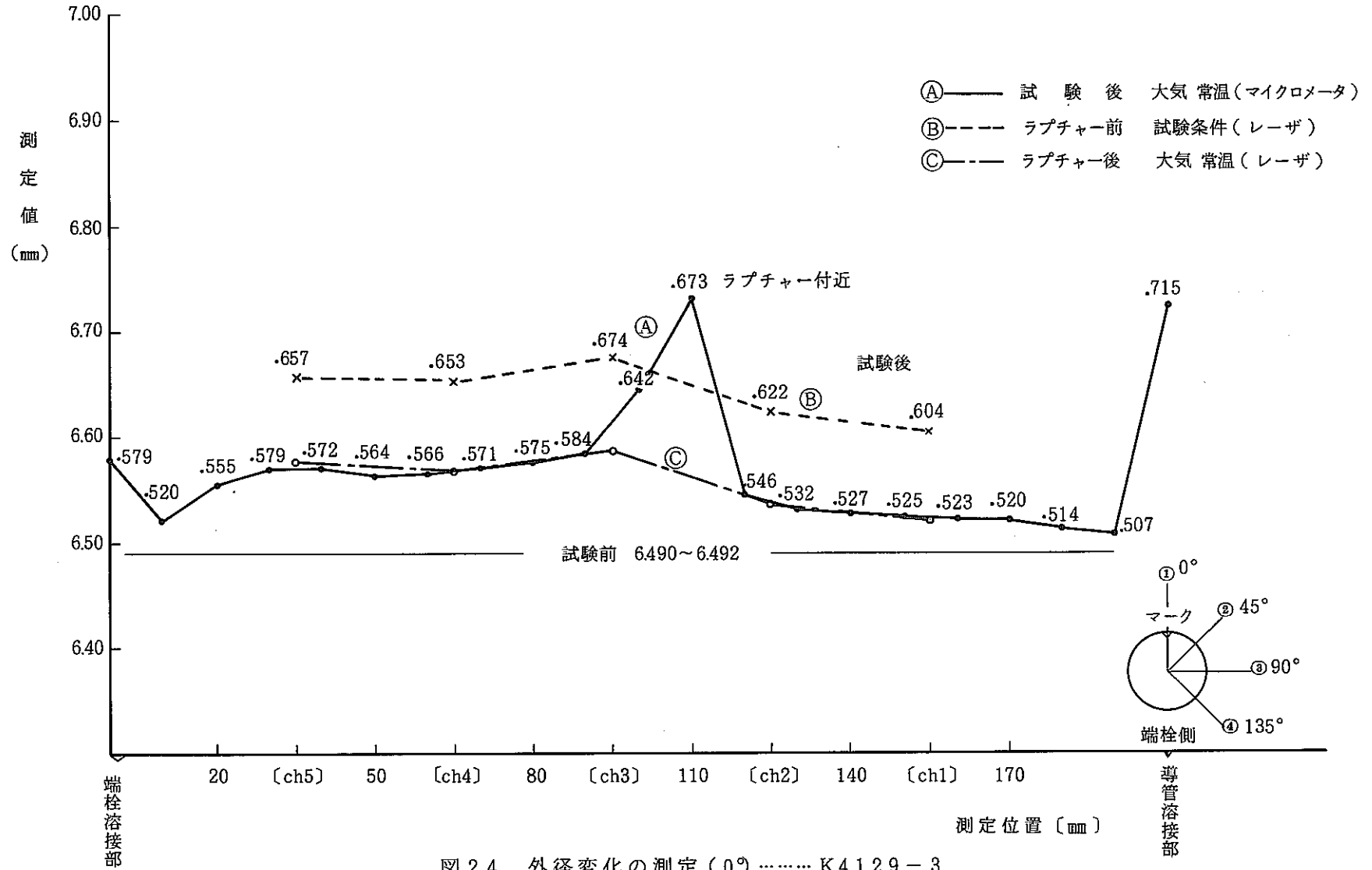


図 2.4 外径変化の測定 (0°) ..... K4129-3

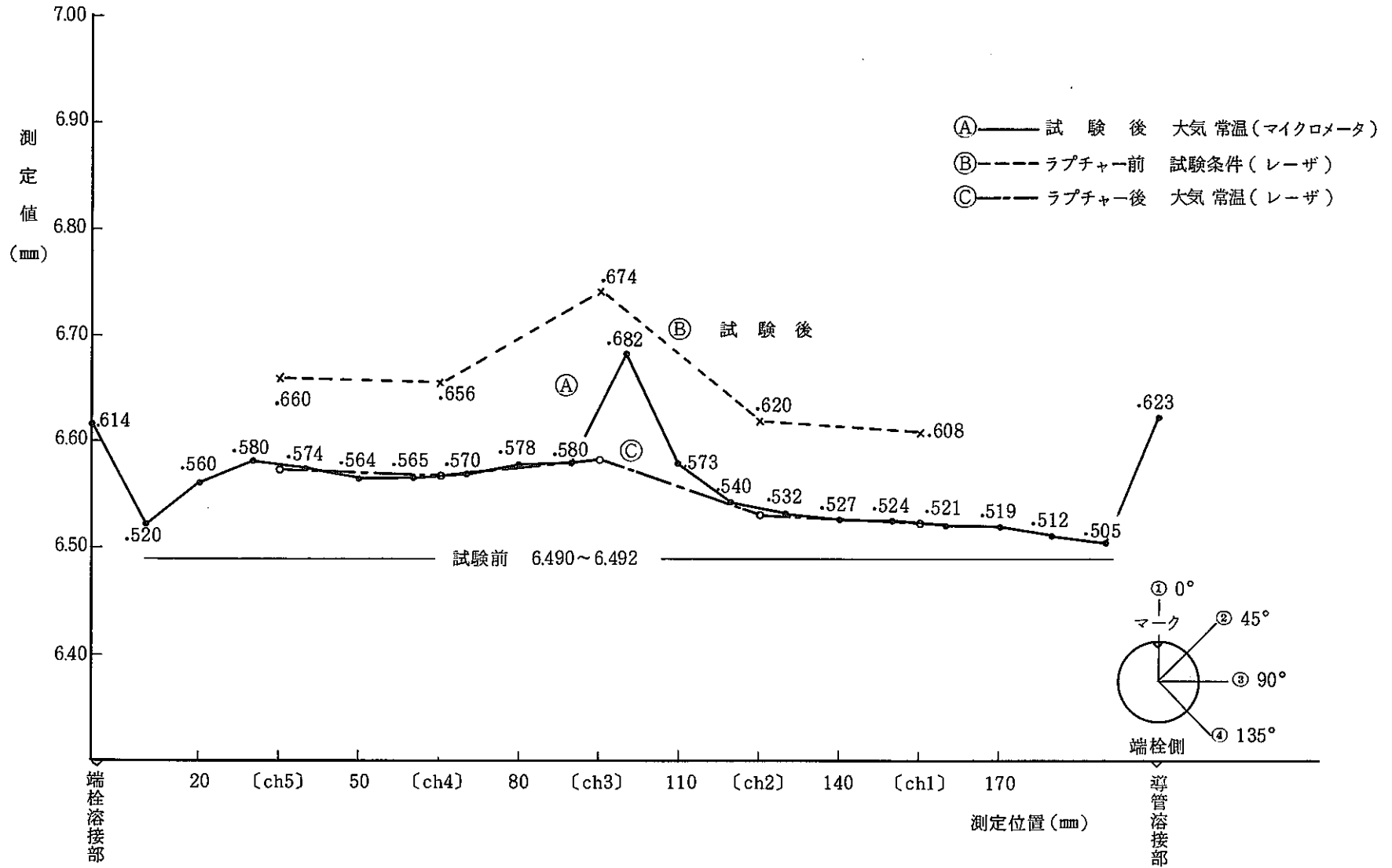


図 25 外径変化の測定 (45°) ..... K4129-3



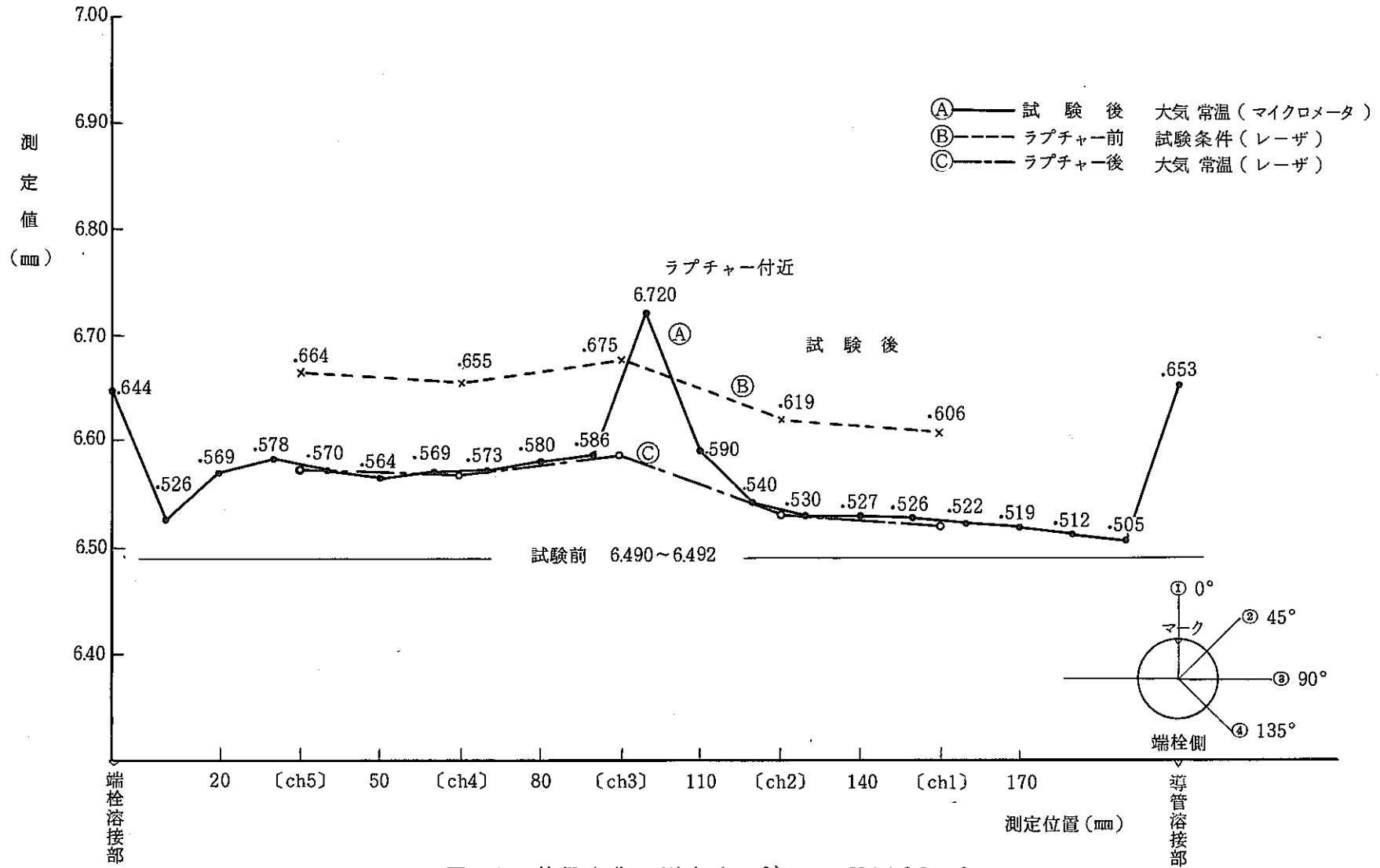


図 26 外径変化の測定 (90°) .....K4129-3

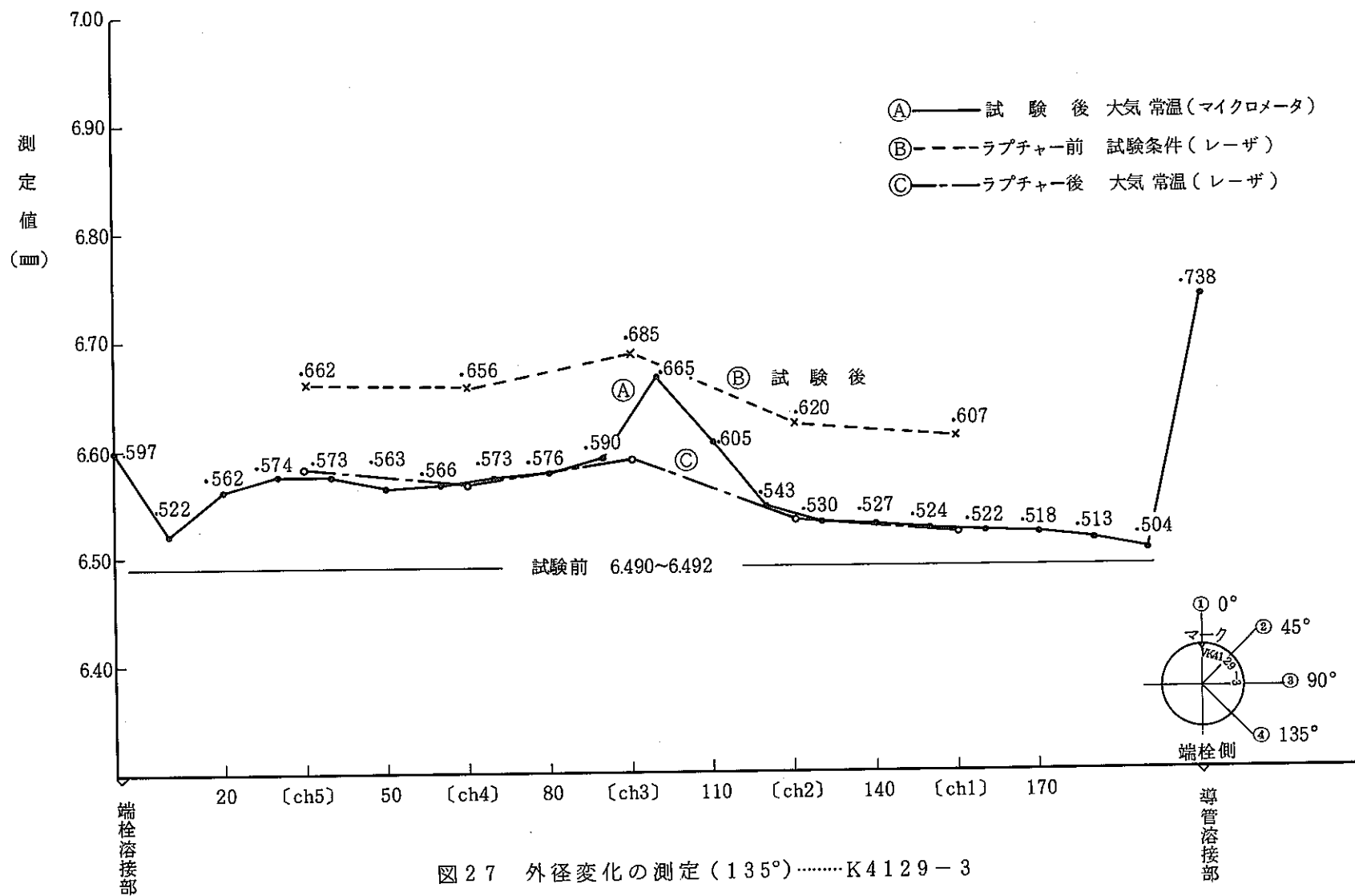


図 27 外径変化の測定 (135°) ..... K4129-3

## 6-3-5 内圧クリープ試験出力データ

本試作装置のデータ記録は3-8で述べたように、温度及び外径測定値（チャンネル別）の打点記録と外径測定位置、外径測定値、試験時間のデジタル記録、そしてデジタル記録の内容と同データを記録する紙テープ記録の3つである。紙テープ記録は、試験後のデータ整理、記録保存が目的であり、試験中の試験片の動向を知るためには、アナログ値により温度、外径値を打点記録しているチャートとデジタル記録のプリント内容を観察しなければならない。そこで、紙テープによるデータ整理の前に、これら記録の状況を図28、図29に示しておく。図28はK4129-2試験片の試験温度の変動と測定値を示したもので、試験開始から約30時間経過した時のものである。温度を制御している熱電対の出力は $700^{\circ}\text{C}\pm 4^{\circ}$  ( $1\text{ div}=8^{\circ}\text{C}$ )であり、試験温度がこの範囲で制御されていることを示している。また、二色放射温度計の測定出力（4点）は、レーザ走行間の中心をそれぞれ測定したもので、 $660^{\circ}\text{C}\sim 690^{\circ}\text{C}$ （放射率比補正值=0.99）の範囲の分布を示している。このように試験温度の制御が安定している場合、クリープ歪、クリープ速度の計算は高精度が期待できるため、全ての試験片は、このような温度状態が試験終了時まで続くことが望まれる。

次の図29は、やはりK4129-2試験片の外径測定記録の1部分を示したものである。各チャンネルの打点は円周方向4点の測定値を含んでいるが、打点の測定値増減方向でのバラツキが小さいことから、円周方向には均一にクリープ変形が生じていることがこのチャートからも読みとれる。チャンネル2の打点記録の乱れについては、同時に得たデジタル記録には乱れが記録されていないことから、記録計の電氣的不安定によるものと考えられる。

これらは試験状態を監視するのに最適のものであり、これらの情報を参考にして、試験温度の補正、二色放射温度計測定値の補正、運転プログラムの時間設定の制御が行なわれる。

参考までに、図30、図31に長時間試験であったK4129-3試験片の試験中の温度制御状況の結果を付加しておく。

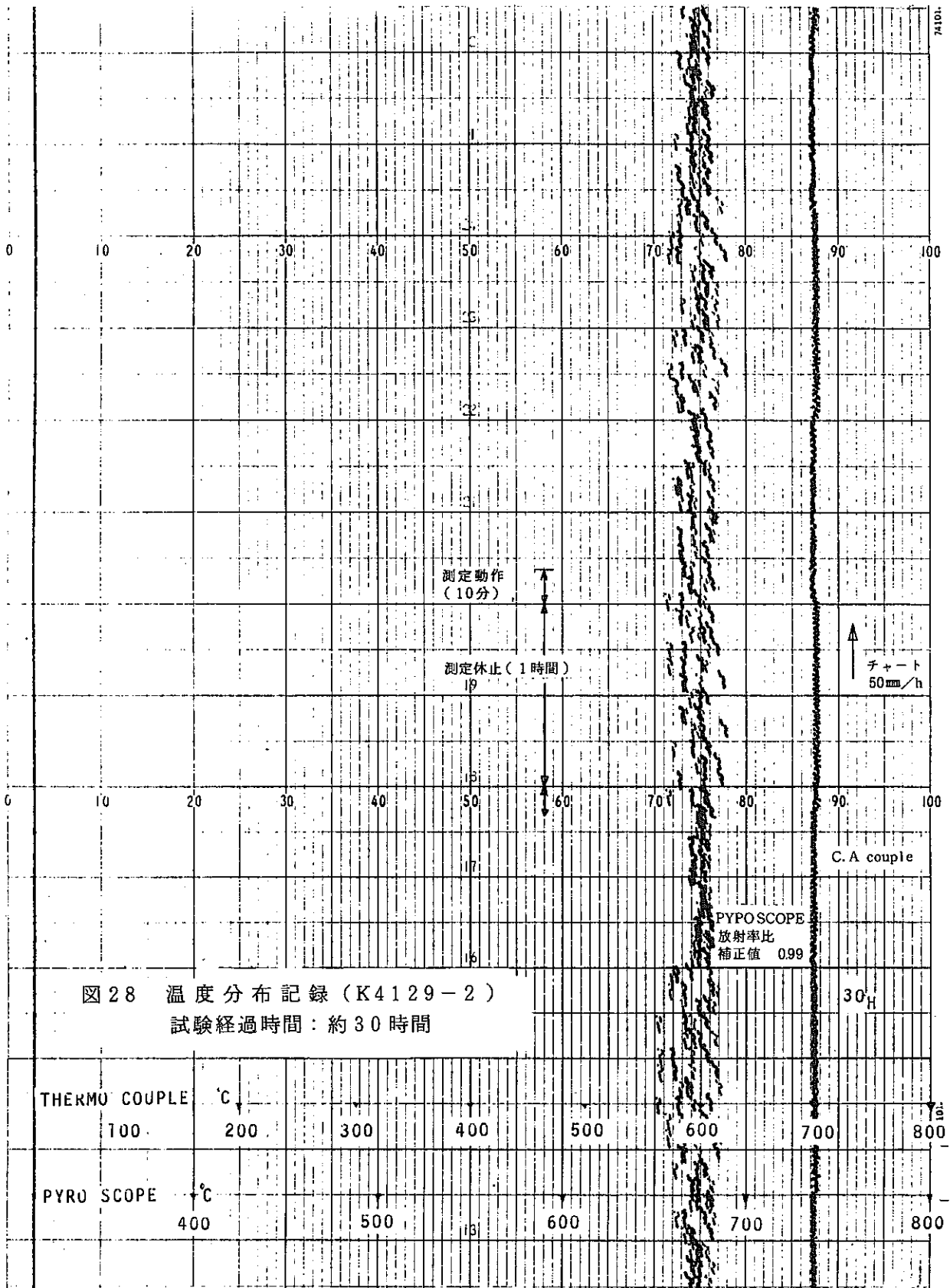


図 28 温度分布記録 (K4129-2)

試験経過時間：約 30 時間

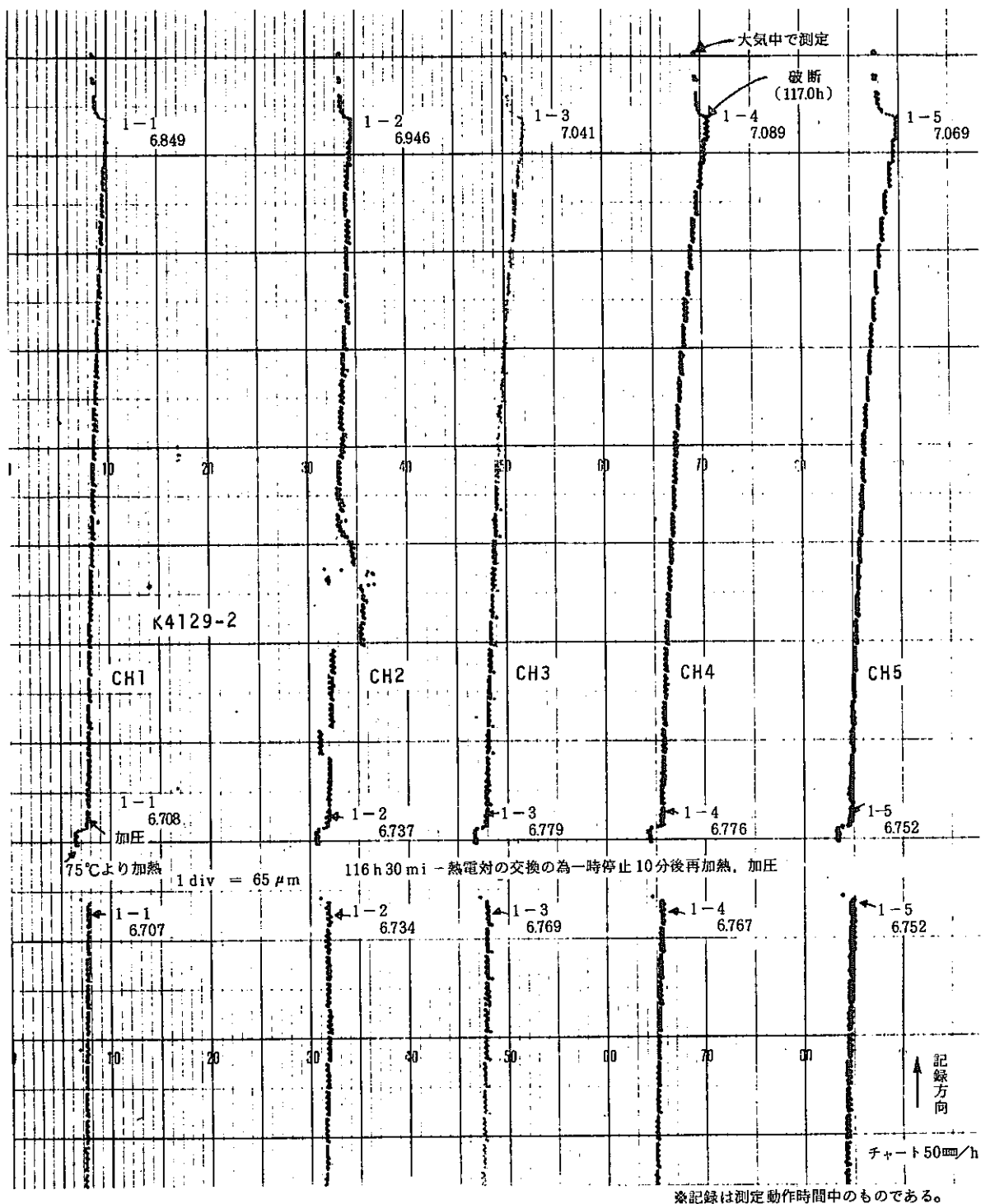
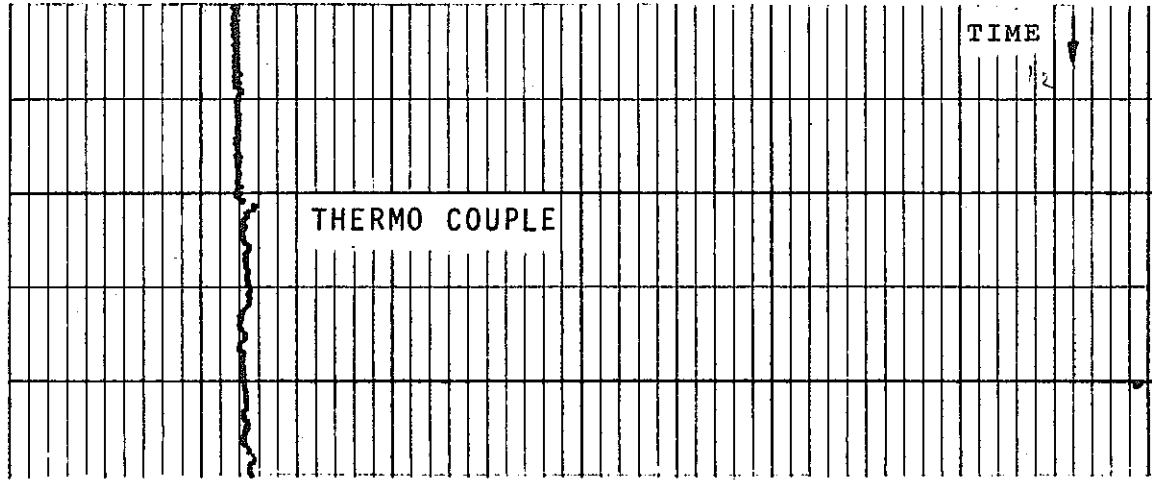


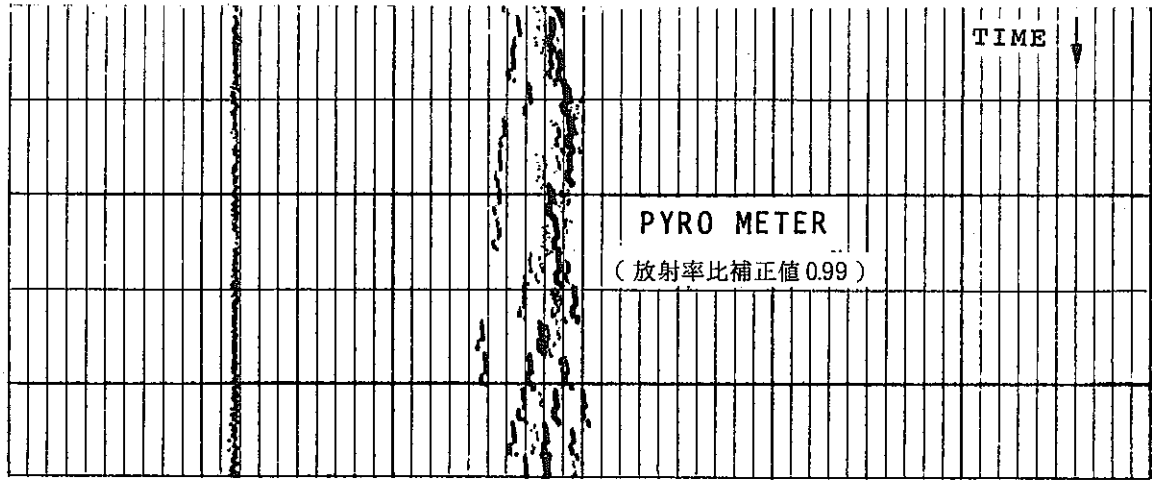
図29 レーザ測定記録 (K4129-2)

THERMO COUPLE 700°C 600°C 500°C 400°C 300°C

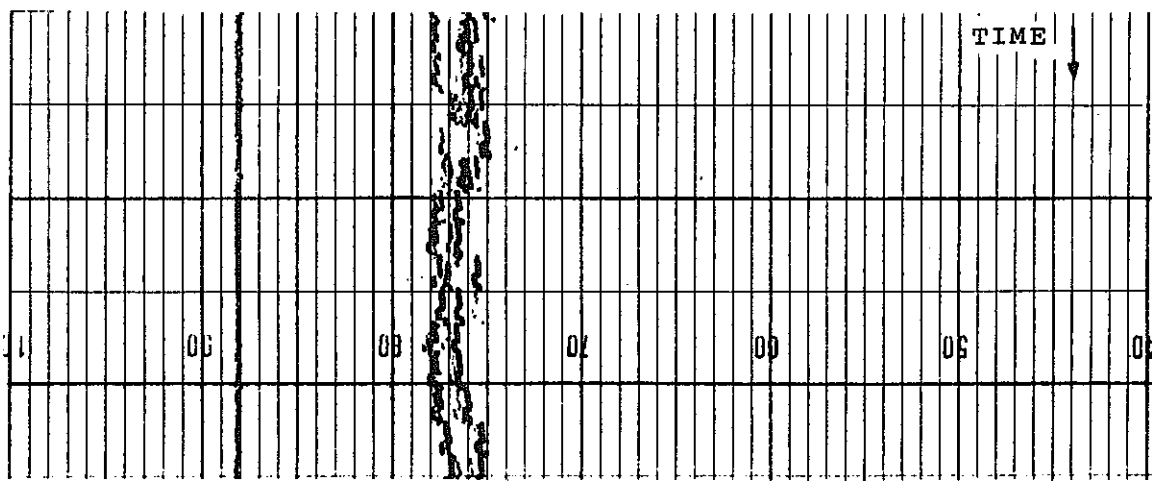
PYRO METER 700°C 600°C 500°C



(二色放射温度計出力はチャート外) 12 HR



50 HR



300 HR

図 30 K4129-3 試験中の温度制御の状況

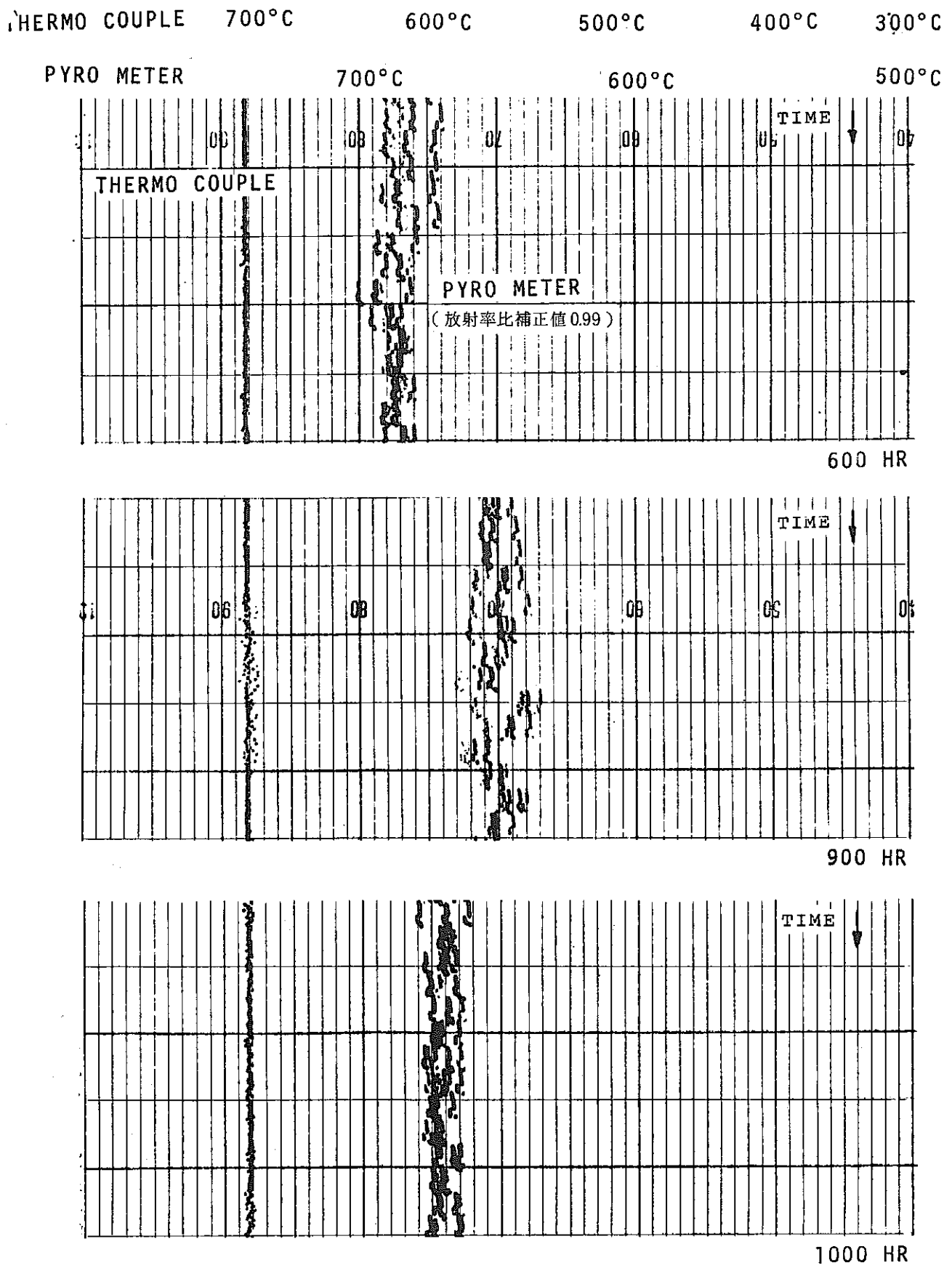


図 31 K4129-3 試験中の温度制御の状況

### 6-3-6 内圧クリープデータの計算機処理

内圧クリープ試験を実施した4本（K4129-1, 2, 3とK2018-2）の試験片について、クリープデータ（測定位置、外径測定値、積算時間）を記録した紙テープを用いて、「クリープ歪-時間」、「クリープ速度-クリープ歪」の関係を計算機を利用して処理、作図を行い、クリープ挙動の解析を行った。

#### 1) データフォーマット

紙テープに記録されるデータは本試験機の運転プログラムで設定された測定動作時間に取得される全てのものである。この一連の試験では測定動作時間に10分を設定しておりこの時間内に試験片は5回の反復回転を繰り返し、データは、周方向測定位置No.4を除いて5チャンネル分の測定値が5回記録される。尚、No.4位置での測定値は4回だけ記録される。これらのデータの紙テープへの記録は奇数パリティASCIIコードで行われ、各データの区切りはスペース（EIA等価10進値（32））で行われている。（現在このコードは偶数パリティASCIIに変更されている。）

#### 2) 計 算 機

クリープデータの処理、作図に利用した計算機は横河ヒューレットパッカード社のパーソナルコンピュータMODEL30である。周辺機器としてグラフィックプロッタ（9862A）テープリーダー（9863A）、テープカセット（9865A）、熱ペンラインプリンタ（9866A）を使用した。これらを取り扱う為のプログラムはBASIC言語で生まれ、入力及び作成記録はカセットテープにより行った。

#### 3) プログラム

紙テープデータを処理するため、次のようなプログラムを作成した。

- ① 回転角別 各チャンネル測定値変位一覧  
（試験前、外径測定値を基準）
- ② 回転角別 単チャンネル測定値の変位  
（熱膨張外径測定値を基準）
- ③ 回転角別 5チャンネル測定値平均変位  
（熱膨張外径測定5チャンネル平均値を基準）
- ④ 回転角別 単チャンネル測定値の変位速度  
（1単位時間前の外径測定値基準）
- ⑤ 回転角別 5チャンネル測定値の平均変位速度  
（1単位時間前の外径測定5チャンネル平均値を基準）

プログラム①～③は積算試験時間に対する外径測定初期値からの変位量を計算したもので、④、⑤は外径測定初期値からの変位量に対する各積算試験時間での単位時間当りの外



径値変位量をパーセント(%)で表わしたものである。

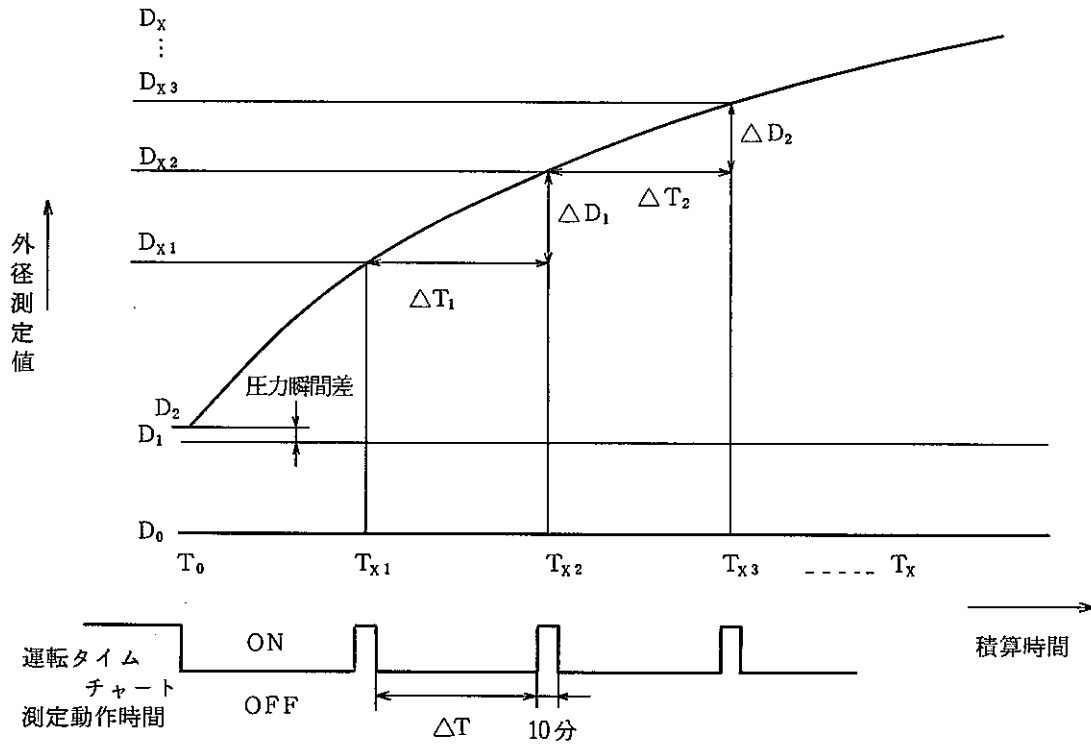


図 32 クリープ歪, クリープ速度の求め方

図 32 は、プログラム①～⑤でのクリープ歪, クリープ速度を求める考え方を示したものである。图中、 $D_0$  は試験前の常温、大気（真空）雰囲気でのレーザ外径測定値であり  $D_1$  は試験温度（700℃）に到達後の熱膨張を含んだ真空雰囲気での測定値である。 $D_2$  は内圧を加えた時の測定値である。そして、 $T_{x1}$ ,  $T_{x2}$ ,  $T_{x3}$  …… $T_x$  は測定動作時の積算試験時間を表わしており、 $D_{x1}$ ,  $D_{x2}$ ,  $D_{x3}$  …… $D_x$  はそれぞれの時間における外径測定値を示している。尚、 $T_x - T_{(x-1)}$  で求められる  $\Delta T$  は、運転プログラムに設定した測定休止時間を表わしている。①のプログラムでは、歪測定の外径測定基準に  $D_0$  の値が設定されており、②～⑤のプログラムでは、 $D_1$  が基準にされている。図 32 より明らかなように、ある試験時間  $T_x$  の時刻における外径測定値を  $D_x$  とすると、その時刻でのクリープ歪  $\epsilon$  (%) は

$$\epsilon = (D_x - D_1) / D_1 \times 100 \quad (\%)$$

として求めることができる。また、 $T_x$  におけるクリープ速度を求める場合、例えば試験時間が  $T_{x2}$  であり、その時の外径測定値が  $D_{x2}$  であるとする。そして、1 測定休止時間前の試験時間  $T_{x1}$  における外径測定値が  $D_{x1}$  である時、試験時間の差（単位時間） $\Delta T_1$  は  $T_{x2} - T_{x1}$  で表わされ、外径測定値の差である  $\Delta D_1$  は  $D_{x2} - D_{x1}$  で表わされる。ここで、外径

測定値の基準に変化前の値  $D_{x1}$  を設定すると、 $T_{x2}$  におけるクリープ速度は

$$V = \frac{\Delta D_1}{\Delta T_1} \times \frac{1}{D_{x1}} \times 100 (\%/H)$$

で表わされる。次の試験時間  $T_{x3}$  における場合も同様に

$$V = \frac{\Delta D_2}{\Delta T_2} \times \frac{1}{D_{x2}} \times 100 (\%/H)$$

で表わすことができる。尚、③、⑤のプログラムでは、これらの式の変数、定数は5チャンネルの平均値で計算している。

このような処理を行うデータは紙テープから得るわけであるが、運転プログラムの測定休止時間 ( $\Delta T$ )、測定動作時間が変わった時、あるいは外径測定値、積算試験時間に予期せぬ値が存在した場合などには、クリープ挙動を推測する計算処理 (クリープ歪、速度) に対してプログラム上で常に正しい処理値が選択されるよう考慮が必要である。例えば単位時間における外径値の変位 ( $\Delta D$ ) が0あるいは負である時、クリープ速度の値はそれぞれ0又は負になる。クリープ速度が負になることは、レーザ測定の誤差、試験条件の変動と考える以外現実問題としては考えられないことである。これらのプログラムでは負になった際、そのデータはカットされ、次の試験時間のデータが処理されるようになっている。(現在、これらのプログラムは処理速度を速めるため、フォートランIV言語を用いたプログラムに変更されている。計算処理の方法は同じであるが、紙テープ (偶数パリティASCII) の内容を一度ディスクに収納した後、ディスクからデータを読み出し、処理、作図する方法をとっている。使用計算機は日本ミニコンNOVA, MODEL 01である。)

#### 4) 計算機処理の結果

3) で報告した5種類のプログラムを使って紙テープの計算機処理を行った。処理の結果得られる5種類のデータは1目で理解できるよう、全てグラフで表わした。作図の内容はプログラムによって異なるが、大別すると「クリープ歪-時間」、「クリープ速度-歪」に関するものである。図33-図48はこの作図結果を3本の試験片 (K2018-2, K4129-2,3) について示したものである。以下に各試験片の作図結果について簡単な説明を記す。

##### 4) -1 K2018-2 試験片

図33-図38に破断時間が最も短かったK2018-2の試験片の処理結果を示す。図33, 図34は①のプログラムで得た試験片軸方向上での外径変位を直角二方向 ( $0^\circ$   $90^\circ$ ) について整理したもので、次の図35は、これらの図より特定の測定位置について、その外径変位を拡大してデータプロットしたものである。これらは、「クリープ歪-時間」のプロットカーブであり、その形が示すように、試験時間が15時間~20

時間にかけてはクリープ歪変化の停滞が見られ、41時間～45時間にかけてはクリープ歪の急激な増大が観察されている。これらの原因は試験中得られるアナログ打点記録（温度、外径値）のデータから明確にされており、その原因が温度変化にあることがわかっている。15時間～20時間の間では700℃の試験温度に対して、約680℃で試験されており、41時間～45時間では逆に740℃と高くなっていた。このような温度変動をもたらす原因は熱電対と試験片内壁の接触にあることが、これもやはり、試験中の打点温度記録計のデータから知ることができた。これは測定動作時間中（試験片回転）にだけ、試験温度が20℃程度低くなったり、ばらつく現象から明らかになったものである。従ってこれらの図では、歪はやや低目にプロットされている可能性がある。図33、図34は0°、90°の回転角（周方向）位置での作図結果であるが、他の角度でも全く同一のデータが得られており、試験片は円周方向に均一にクリープが生じていることがわかった。同様に、図35に示すプロットカーブの形からは、第3次クリープ前の試験温度の上昇（700℃→740℃）がその時点でのクリープ歪量に要する時間だけ破断時間を速めたことが推測（図中仮想カーブ）されるとともに、試験時間7時間～8時間までは第1次（遷移）クリープであり、40時間付近までが第2次（定常）クリープであると考えることが出来た。

次に④のプログラムから外径変位に対する単位時間当りのクリープ速度の変化を調べた。この“クリープ速度-歪”の結果を回転角0°、チャンネル2の測定位置について作図したものを図36に示す。これは先の図35のデータを基に処理されており“クリープ歪-時間”カーブにおけるクリープ速度の変化を良く表わしている。歪値2.0～4.0（%）付近のクリープ速度の増大は、試験時間が41時間～43時間に生じた温度上昇によるものであり、これを除くと下に凸の典型的なクリープ速度カーブが得られている。特にクリープ歪が4.0（%）に到達後のクリープ速度の増加はクリープ歪カーブの第3次クリープの状態を非常に良く表わしている。図37は③のプログラムにより試験片軸方向5チャンネルの外径測定値の平均変位から、“クリープ歪-時間”のカーブを回転角0°について作図したものである。このプロットカーブは、他の角度で測定したものと形、及び変形絶対量はほとんど同じ傾向にあり、先に説明したクリープ歪が円周方向に均一であることを裏付けるものとなった。このプロットカーブに相応するクリープ速度の変化を求めたものが図38である。これも、プロットカーブは全回転角で全く同じ形を示していた。このように、各々の角度におけるクリープ歪量は殆んど同じであることから6-3-4項変形量の測定で述べたように、内圧クリープ試験における試験片外径の測定は1方向の角度について行うだけで充分であることが示された。

## 4) - 2 K 4 1 2 9 - 2 試験片

次に破断時間が 170 時間と短かく、ラプチャー破断を示した K 4 1 2 9 - 2 の試験片の回転角  $0^\circ$  についてのクリープ歪結果を図 39 に示す。この試験片は他の 3 本と異なり、温度制御を行う熱電対測温部が試験片内壁に接触しないよう絶縁保護を施しており、前述の K 2 0 1 8 - 2 と同じ試験条件で試験したものである。これにより、他の試験片に比べ終始安定した温度制御を行うことができた。しかしながら、試験開始後 14 時間～18 時間には若干の温度の乱れ ( $700^\circ\text{C} \rightarrow 680^\circ\text{C}$ ) が生じ、116.5 時間には熱電対コード切断の為に試験中断、熱電対取換え後、再度試験を行っている。

この試験片の試験後写真より、破断部に最も近い外径測定チャンネルは ch4 であることが判っているが、図 39 から ch4 の外径変位が最も大きく破断部に近いことが表わされている。30mm 離れた隣接チャンネルである ch3、ch5 は ch2、ch1 に比べ、その変化は大きく、破断部を中心にして軸方向に測定位置が離れるほど、クリープ歪が減少することを良く示している。(先の K 2 0 1 8 - 2 では、このようなクリープ歪の軸方向傾斜は見られなかった。)

図 40 は、クリープ歪が最も大きかったチャンネル ch4 の測定データの中から、 $0^\circ$  の回転角位置での外径測定値の変位を拡大して作図したものである。この図中のプロットカーブには前述した温度の乱れ、試験中断—再試験の状態を確認することができる。また、試験時間が 50 時間～60 時間付近のプロット点の乱れは、内圧力の調整によるものであることが判っている。これは試験時間 28.4 時間にそれまで下がっていた圧力を調整 ( $240 \rightarrow 250 \text{ kg/cm}^2$ ) し、52 時間経過後再び調整 ( $245 \rightarrow 250 \text{ kg/cm}^2$ ) したことによるものである。

図 40 の作図データ (回転角  $0^\circ$ , チャンネル 4) を基にした "クリープ速度—歪" のプロットカーブを図 41 に示す。この図から、定常クリープにおけるクリープ速度の変動はだいたい  $0 \sim 0.05$  ( $\%/H$ ) であり、破断直前のクリープ速度は  $0.25$  ( $\%/H$ ) になっていることがわかる。次の図 42 は軸方向 5 チャンネルの外径測定の平均変位を表わす "クリープ歪—時間" のプロットカーブを  $0^\circ$  の回転角について示したものであり、図 43 はそれを求めたデータより "クリープ速度—歪" のプロットカーブを作成したものである。これらの図より、この試験片のクリープの動向として、10 時間付近までを 1 次クリープ、140 時間までを 2 次クリープ、それ以後を 3 次クリープと考えることができる。

## 4) - 3 K 4 1 2 9 - 3 試験片

この試験片は長時間試験を目的として、内圧をこれまでより低く設定 ( $200 \text{ kg/cm}^2$ ) して試験を行ったもので、その破断はラプチャー破断であり、破断時間も 1,021 時間と

長くなっている。この試験片の回転角 $0^{\circ}$ における外径測定値の変化を図44に示す。試験片の破断は、図からも明らかなように、歪変化が最大となったch3の測定位置付近で生じていた。これまでの試験片のような短時間クリープ試験と違い、そのクリープ歪量は小さく、ch1及びch2の測定データについては第3次クリープを見ることはできない。そして、破断後における応力除去状態でのプロット点を見ると、試験中、クリープ歪の大きかったch3、ch4、ch5の測定位置では、試験片破断前の最大クリープ歪に対して約50%が回復しており、ch1の測定位置付近では歪の殆んどが回復していることが示された。

ch1とch2の測定位置での歪量がch3とch5の歪量より低くなっている傾向については、1つに、試験片軸方向の温度分布が均一でなかったことが考えられる。試験温度の制御については、全般にわたって一度の中断はあったものの、問題となる様な大きな温度の乱れはなく良好であった。(参考として、6-3-5項図30、図31に試験温度の状況を示している。)しかし、これまでの試験同様、試験開始12時間～13時間付近より温度の乱れが生じ、 $700^{\circ}\text{C}$ 制御に対して約 $685^{\circ}\text{C}$ の試験温度になっていた。これは5時間経過後に調整された。その他に130時間付近で $680^{\circ}\text{C}$ に低下することがあった。試験の中断は650時間に発生した回転角検出器の故障(光電スイッチランプの消灯)によるものである。また、これらの図中で50時間～70時間における外径変位データの欠如部分は制御部本体のパネル上にあるチャンネルセレクトSWのチェックの際のリセットミスによるものである。(セレクトSWはch1、ch2、ch3、ch4、ch5、AUTOがありAUTOセットの状態ですべてのチャンネルのデータが出力される。)同様に、150時間付近のデータ欠如は紙テープパンチャーのパンチ部の紙ツマリによるものである。

次の図45は、破断部に最も近い測定位置であるch3の周方向測定位置が $0^{\circ}$ の“クリープ歪-時間”のプロットカーブであり、クリープ歪の変化を1目盛 $25\mu\text{m}$ に拡大してプロットしたものである。このプロット点のデータは試験時間の間隔を不規則に紙テープより抜出したものである。図より、圧力による初期歪は約 $10\mu\text{m}$ であり、 $10\mu\text{m}$ までのプロットデータ(プロット点数3)の形より、10時間前後までを1次クリープと考えることができる。そして、試験温度( $700^{\circ}\text{C}$ )の微調整( $15\sim 20^{\circ}\text{C}$ )によって約 $5\mu\text{m}$ の外径値の増加が見られている。380時間付近の歪量の減少は、温度、圧力の変化が観察されなかったことから、レーザ測定上のミスあるいはデータパンチミスと考えられる。このプロットカーブの形状から800時間付近までを2次クリープ、それ以後を3次クリープと見ることができる。

この試験片の破断は試験中の観察から、破断部の局部加熱により変色が生じていたこ

と、内圧力指示メータのわずかな指示低下が生じていたこと、によって破断を確認したものである。この破断は典型的なラプチャー破断であり、開口部は肉眼では見つけにくい程小さいものであった。図中の破断後のプロット点は、試験温度は変わらないが、内圧力だけが $120\text{kg/cm}^2$ に低下した時のものであり、圧力の低下分だけ外径変位が小さくなっていることがわかる。本試作装置は試験片破断時の自動停止機構を装備しているものの、このような微量の圧力リークを生じる破断では、これを検知することが難しいために、この種の破断では特に内圧力変動の監視が必要であることが判った。

続いて、圧力、加熱を停止して、試験片の温度が常温に達してから、外径値を測定したものが最後のプロット点である。応力除去による外径のもどりは大きく、この試験で得た最大クリープ歪（熱膨張外径値基準） $100\ \mu\text{m}$ は殆んど回復している。これは、破断位置がch3の測定位置と少しずれているためにこれだけの回復効果があるのか、ラプチャーの形によるのかははっきりしていない。また、局部加熱が生じた破断部の温度は、先の金相写真で炭化物（ $\sigma$ 相）の析出が集中していたことから、温度的には高いものの再固溶する程の温度には達していなかったことが考えられる。

図46は、軸方向測定位置がch3で回転角が $0^\circ$ の時の測定データよりクリープ速度の変化を求めたもので、縦軸のクリープ速度の1目盛は $0.005$ （%/H）になっている。この図を見る限り、3次クリープの存在を明確にすることはできないようである。また2次クリープに相応するクリープ速度の変化部分においては、単位時間当りの変動値が非常に小さく、特に、クリープ速度が $0$ （%/H）と $0.01$ （%/H）の範囲での変動は試験温度のON、OFF制御による測定値のバラツキによるものと考えられる。

図47は、試験片の回転角が $0^\circ$ の位置について、軸方向全チャンネルの外径測定値の平均よりクリープ歪の変化を求めたものである。試験時間が20時間～25時間付近に見られるプロット点の乱れは温度調整によるものである。図48に平均クリープ速度を求めた結果を示す。破断時間に近くなる程、温度制御による測定値のバラツキの中にクリープ歪成分が加えられ、ややクリープ速度が大きくなる傾向が見られた。

以上、ここでは3本の試験片について、試験結果を説明したが、残りのK4129-2試験片についても、作図結果については同様であったことを付記しておく。

DIFFERENCE OF DIAMETER FOR CREEP  
 TEMP=700°C PRESS= 250KG/CM<sup>2</sup>

ANGLE NO- 1 CHANNEL NO- 1,2,3,4,5

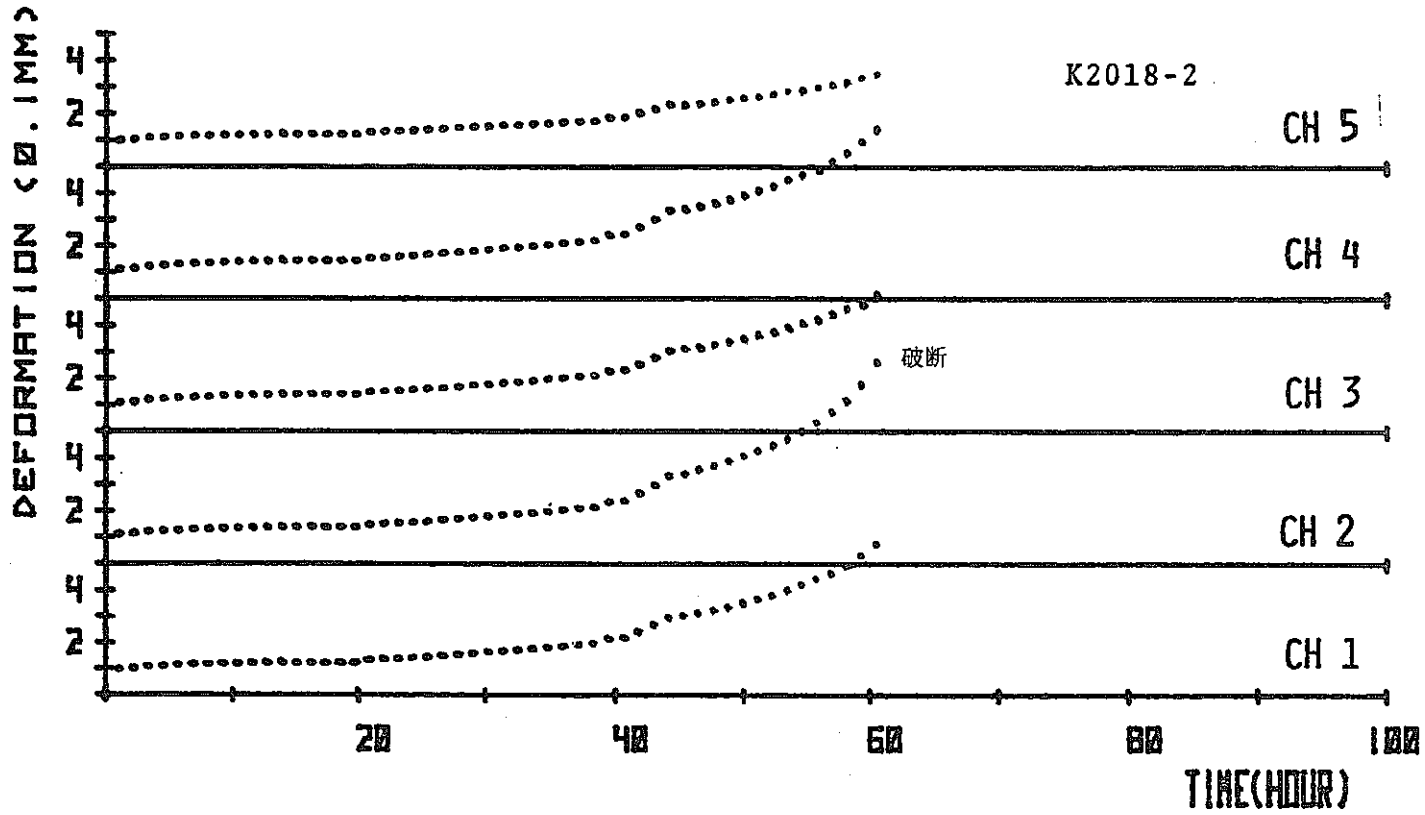


図 33 軸方向の外径変位 (K2018-2, 回転角 0°, 試験前外径値基準)

DIFFERENCE OF DIAMETER FOR CREEP  
 TEMP=700°C PRESS= 250KG/CM<sup>2</sup>

ANGLE NO- 3 CHANNEL NO- 1,2,3,4,5

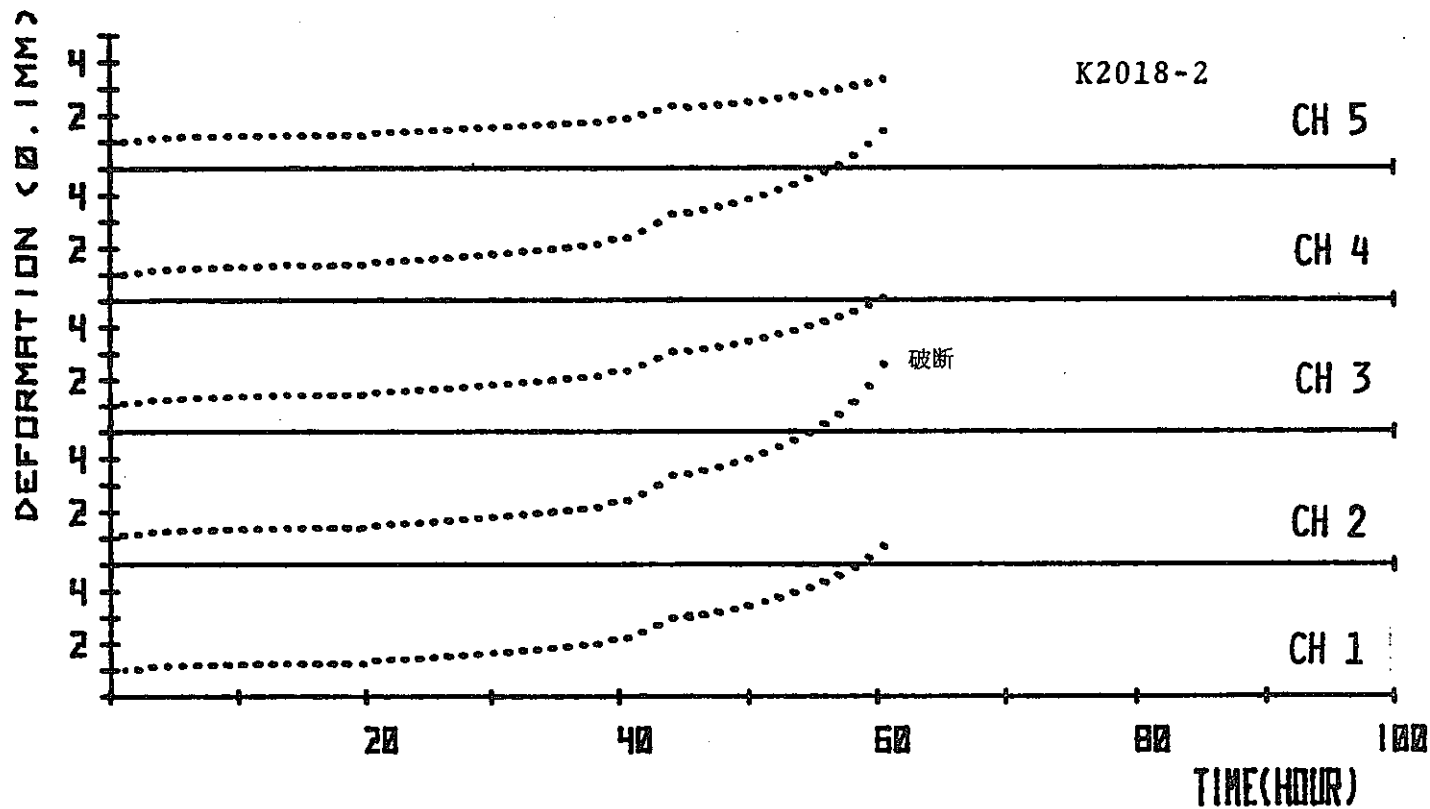


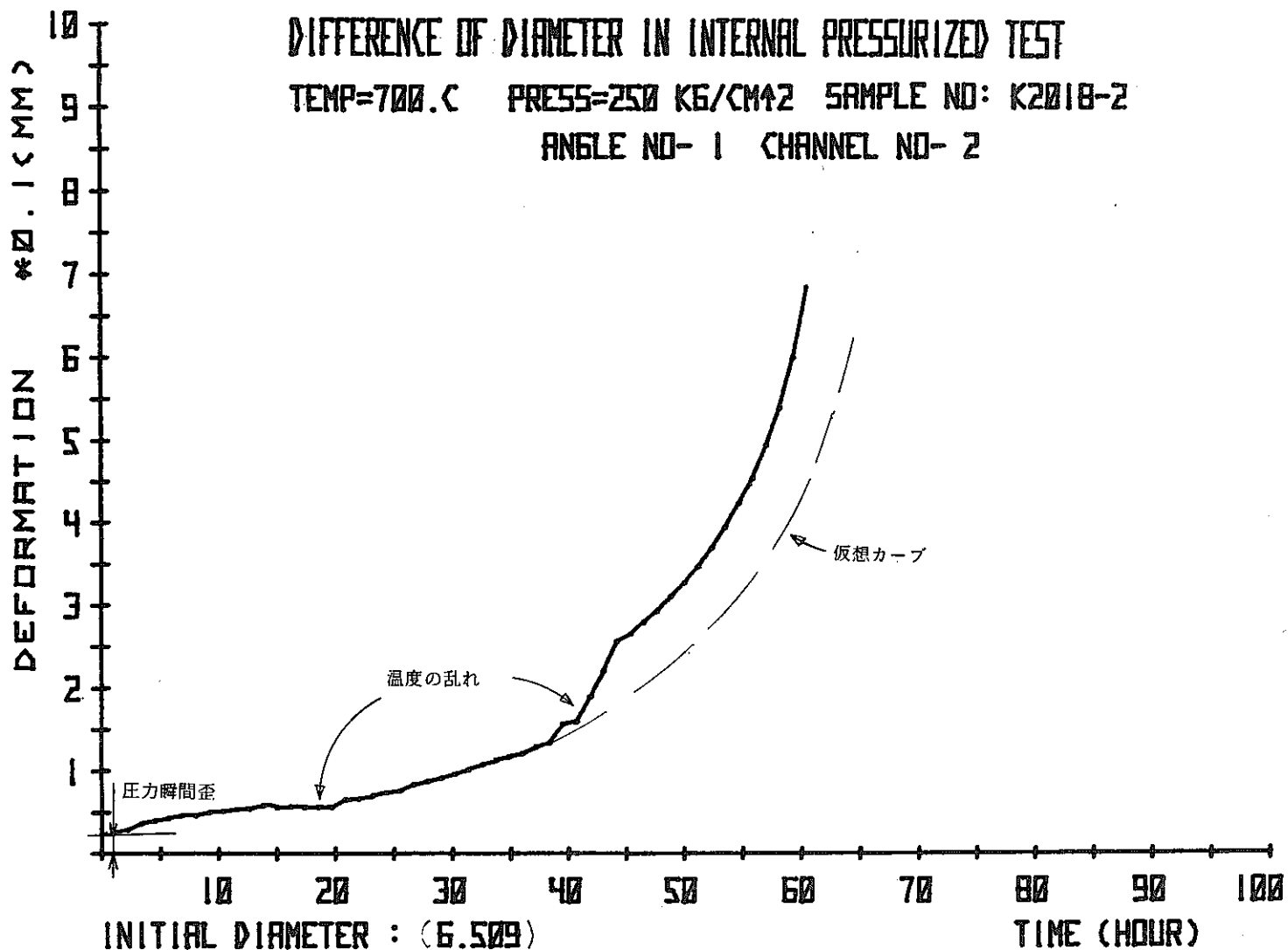
图 34 轴方向外径变位 (K2018-2, 回轉角 90°, 試驗前外径值基準)



### DIFFERENCE OF DIAMETER IN INTERNAL PRESSURIZED TEST

TEMP=700.C PRESS=250 KG/CM<sup>2</sup> SAMPLE NO: K2018-2

ANGLE NO- 1 CHANNEL NO- 2



INITIAL DIAMETER : (6.509)  
 THERMAL EXPANSION D: 6.591  
 RUPTURE TIME(HOUR) : 61.15

図35 チャンネル測定位置における外径測定値の変位

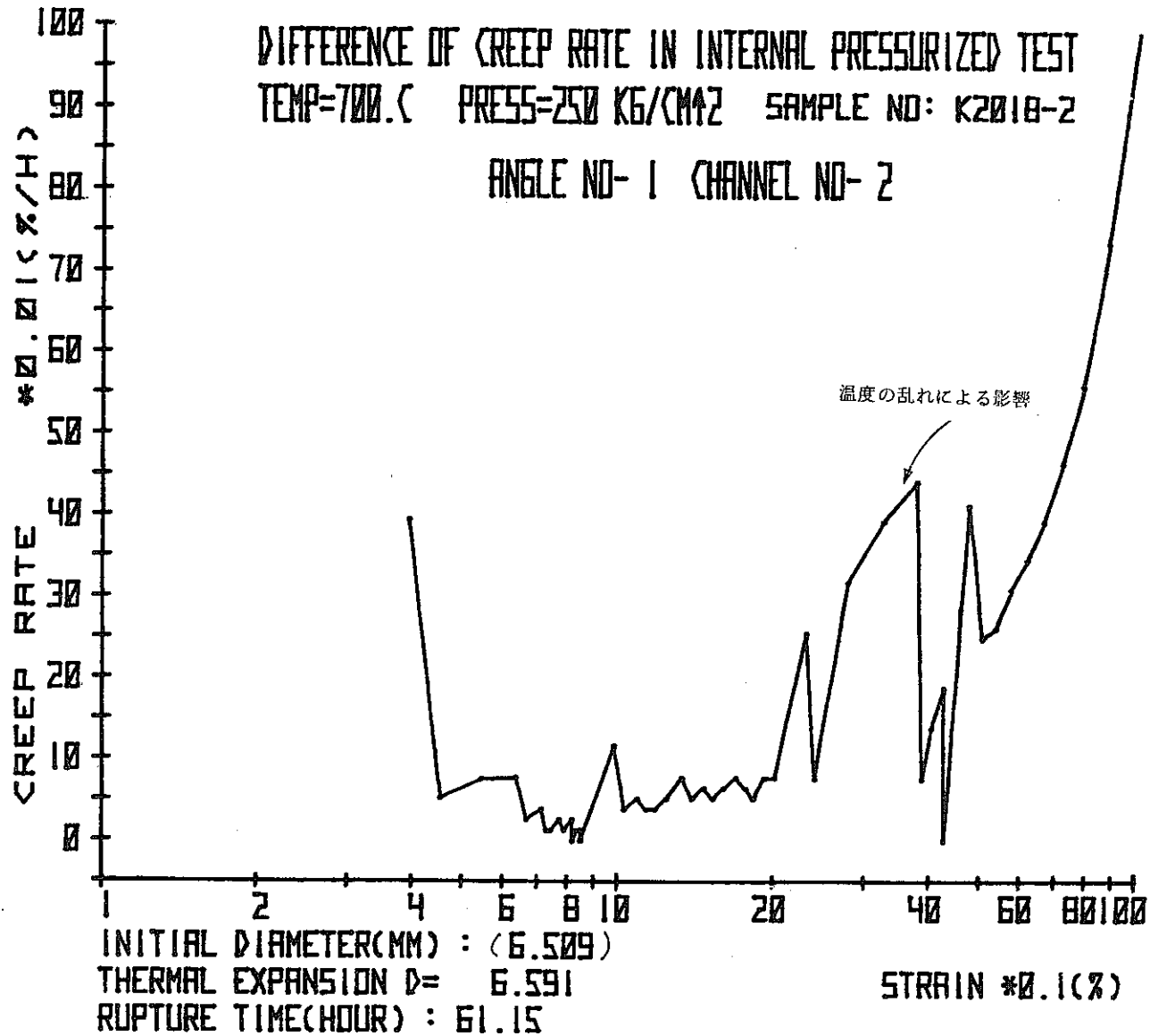


図 36 チャンネル測定位置におけるクリープ速度の変化

DIFFERENCE OF DIAMETER IN INTERNAL PRESSURIZED TEST

TEMP=700.C PRESS=250 KG/CM<sup>2</sup> SAMPLE NO: K2018-2  
 ANGLE NO- 1 CHANNEL NO:(1-5)

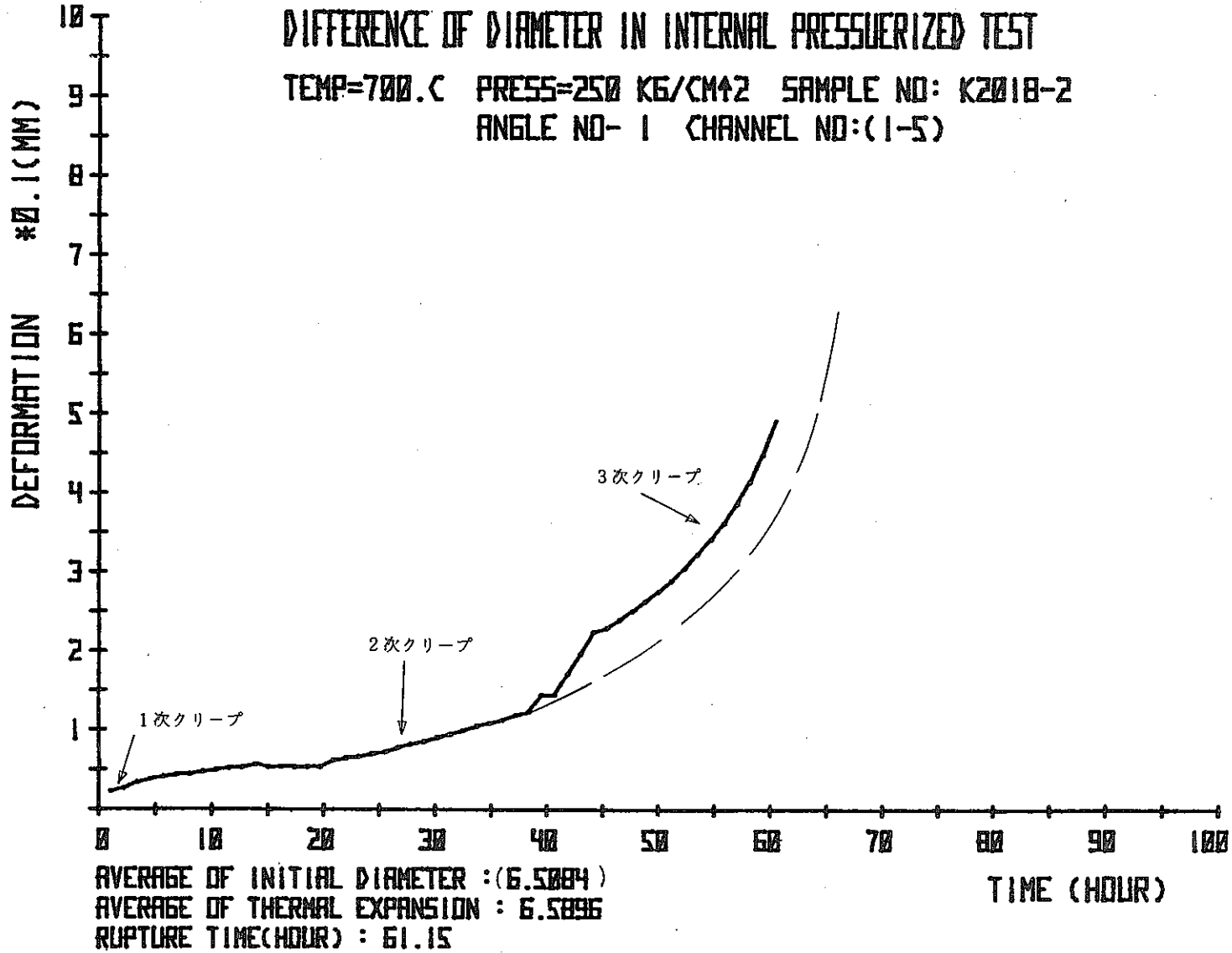


図 37 軸方向 5 チャンネルの外径測定平均値の変位

# DIFFERENCE OF CREEP RATE IN INTERNAL PRESSURIZED TEST

TEMP=700.C PRESS=250 KG/CM<sup>2</sup> SAMPLE NO: K2018-2  
ANGLE NO- 1 CHANNEL NO:(1-5)

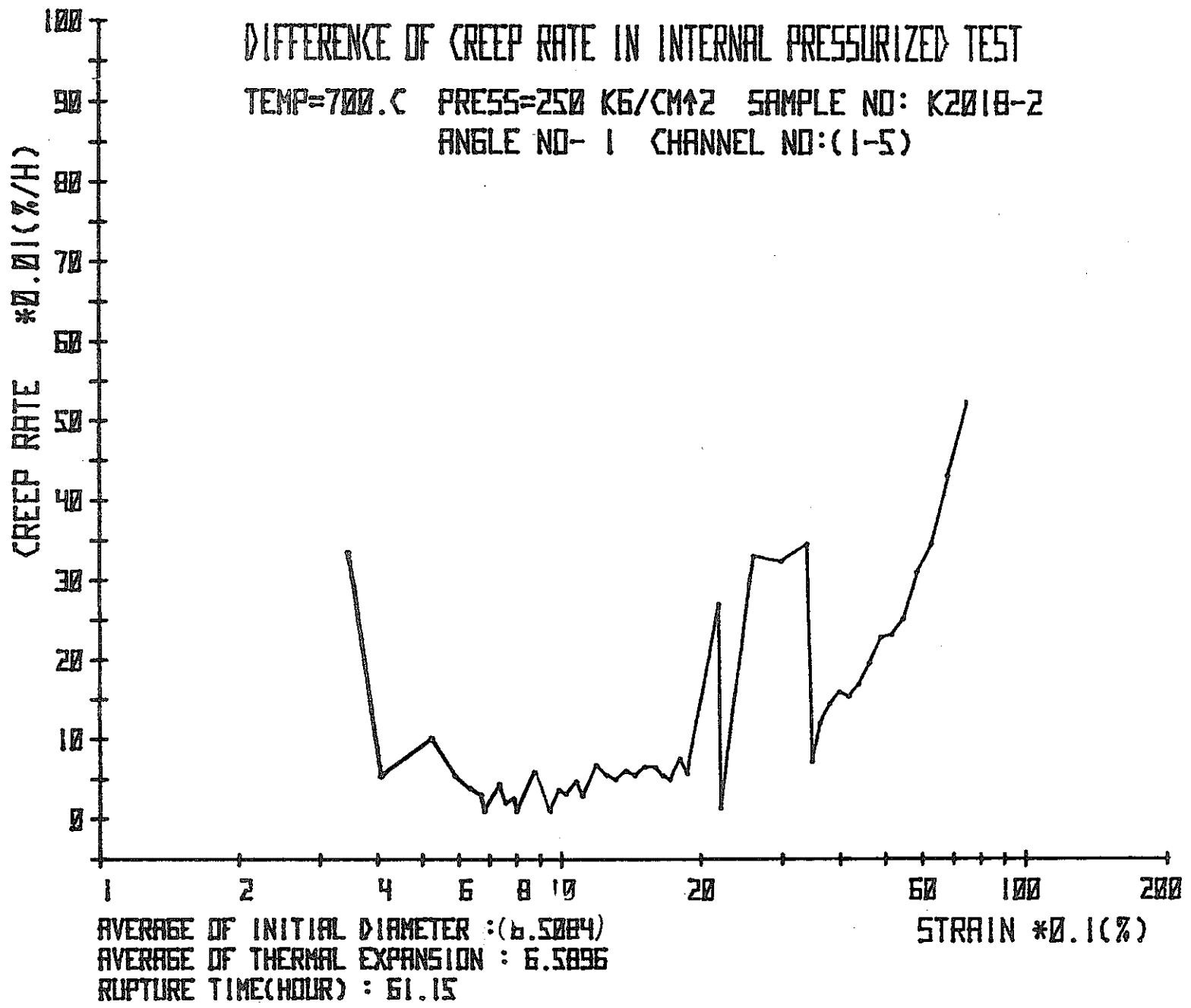


図38 軸方向5チャンネルの平均クリープ速度の変化

DIFFERENCE OF DIAMETER IN CREEP  
TEMP=700 °C PRESS=250 KG/CM<sup>2</sup>

ANGLE NO-1 CHANNEL NO-1,2,3,4,5

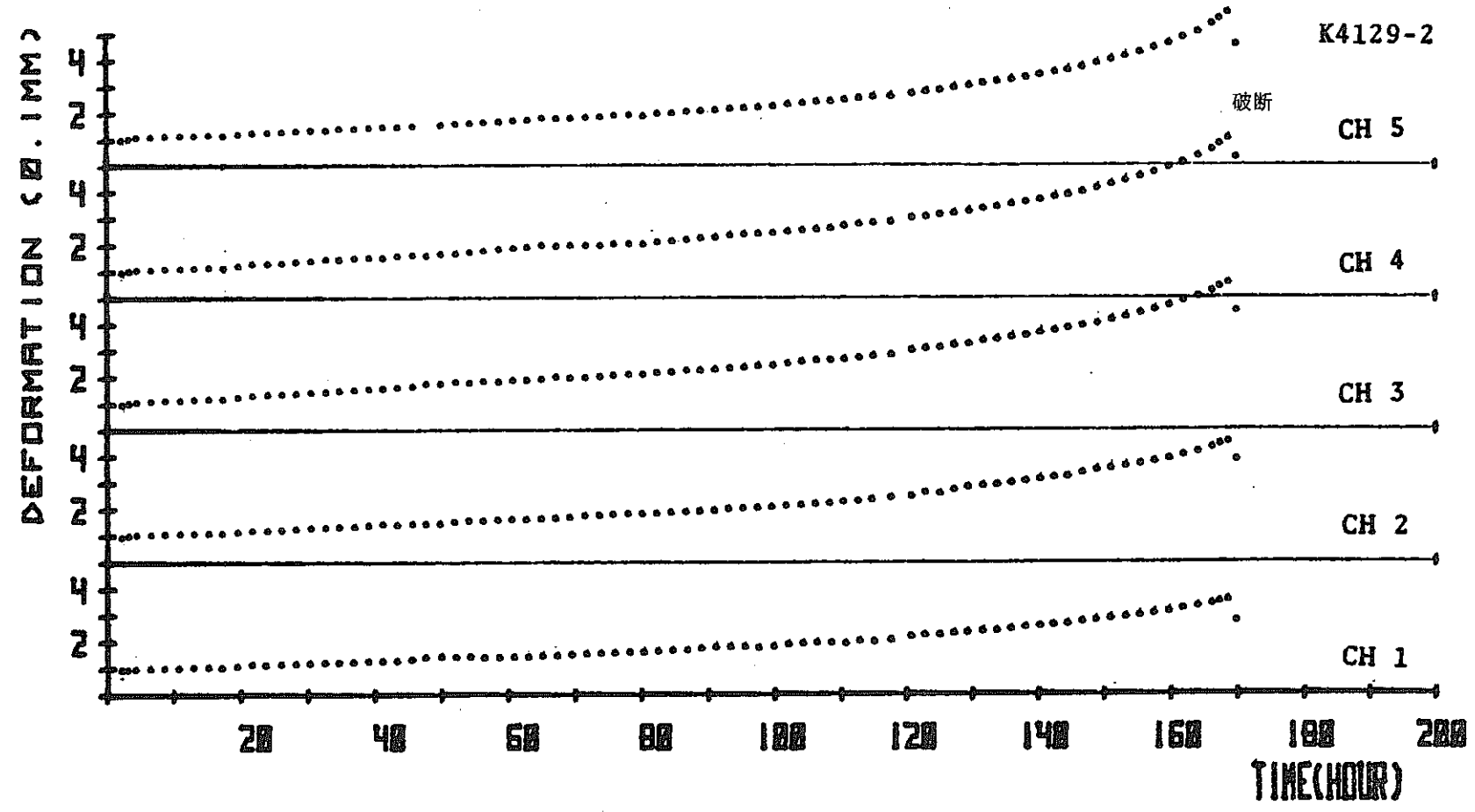


图 39 轴方向外径变位 (K4129-2, 回轉角 0°, 試驗前外径值基準)

DIFFERENCE OF DIAMETER IN INTERNAL PRESSURIZED TEST  
 TEMP=700.C PRESS=250 KG/CM<sup>2</sup> SAMPLE NO:K4129-2  
 ANGLE NO- 1 CHANNEL NO- 4

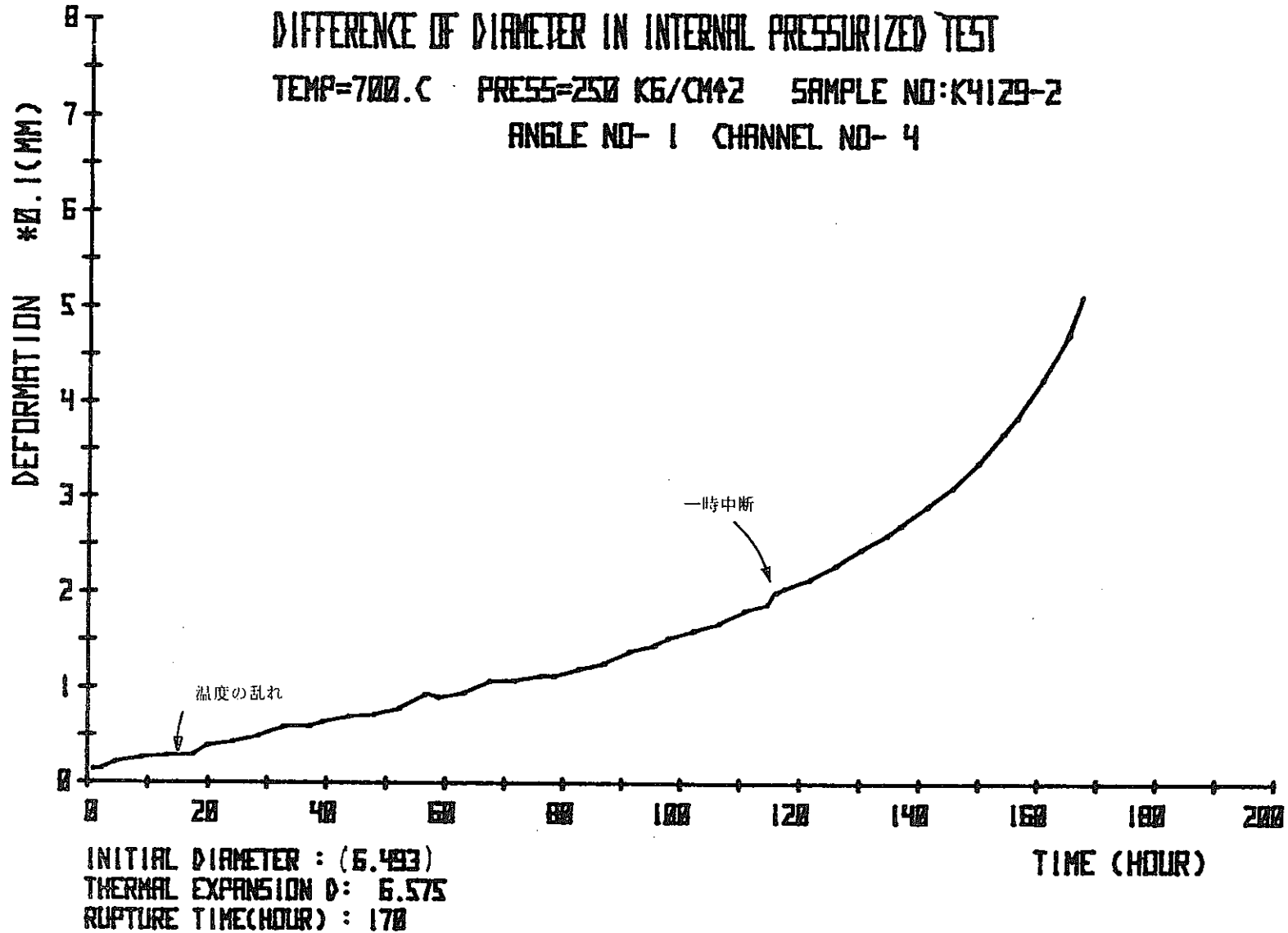


図40 チャンネル測定位置における外径測定値の変位

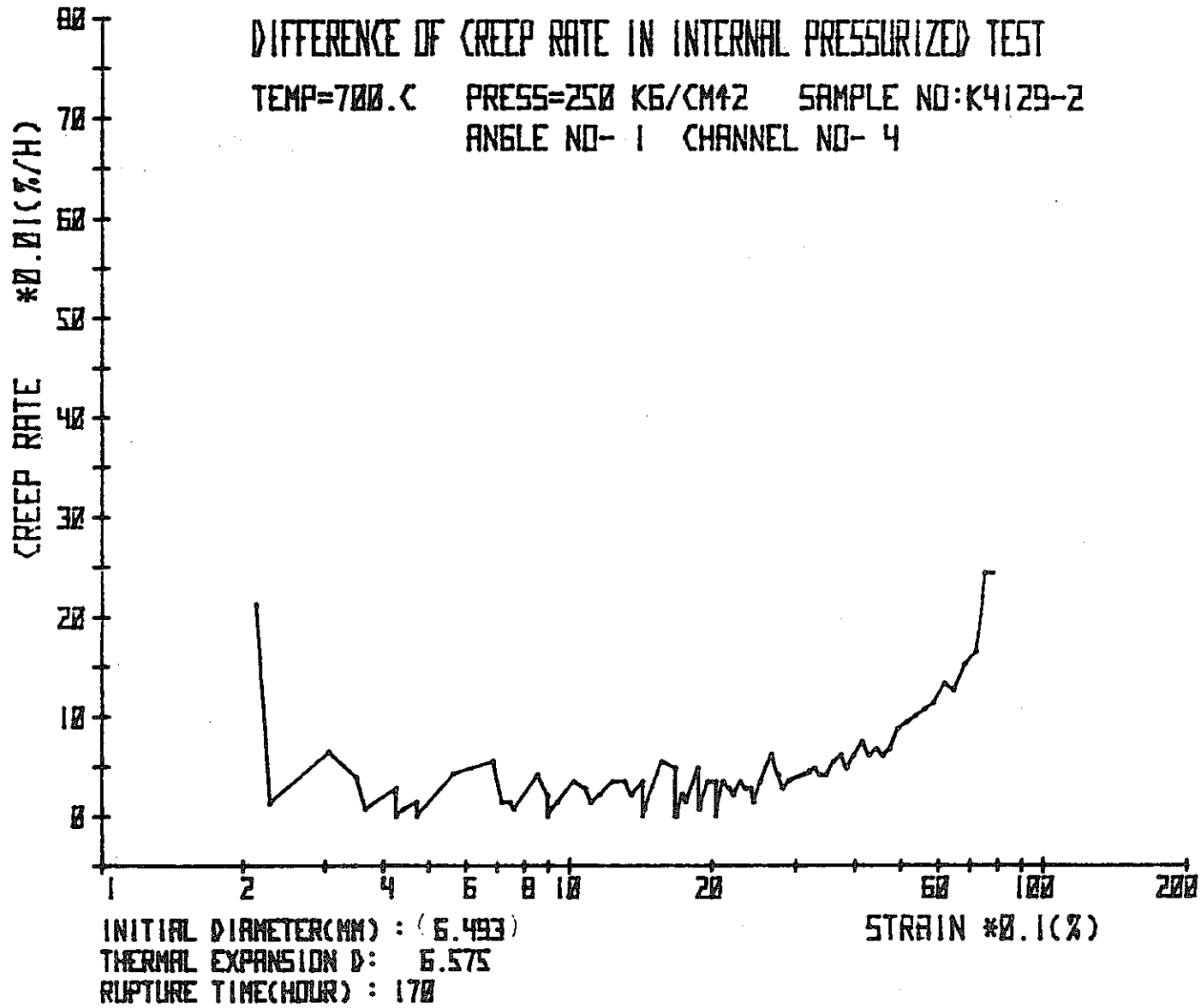


図41 チャンネル測定位置におけるクリープ速度の変化

# DIFFERENCE OF DIAMETER IN INTERNAL PRESSURIZED TEST

TEMP=700.C PRESS=250 KG/CM<sup>2</sup> SAMPLE NO: K4129-2  
 ANGLE NO- 1 CHANNEL NO:(1-5)

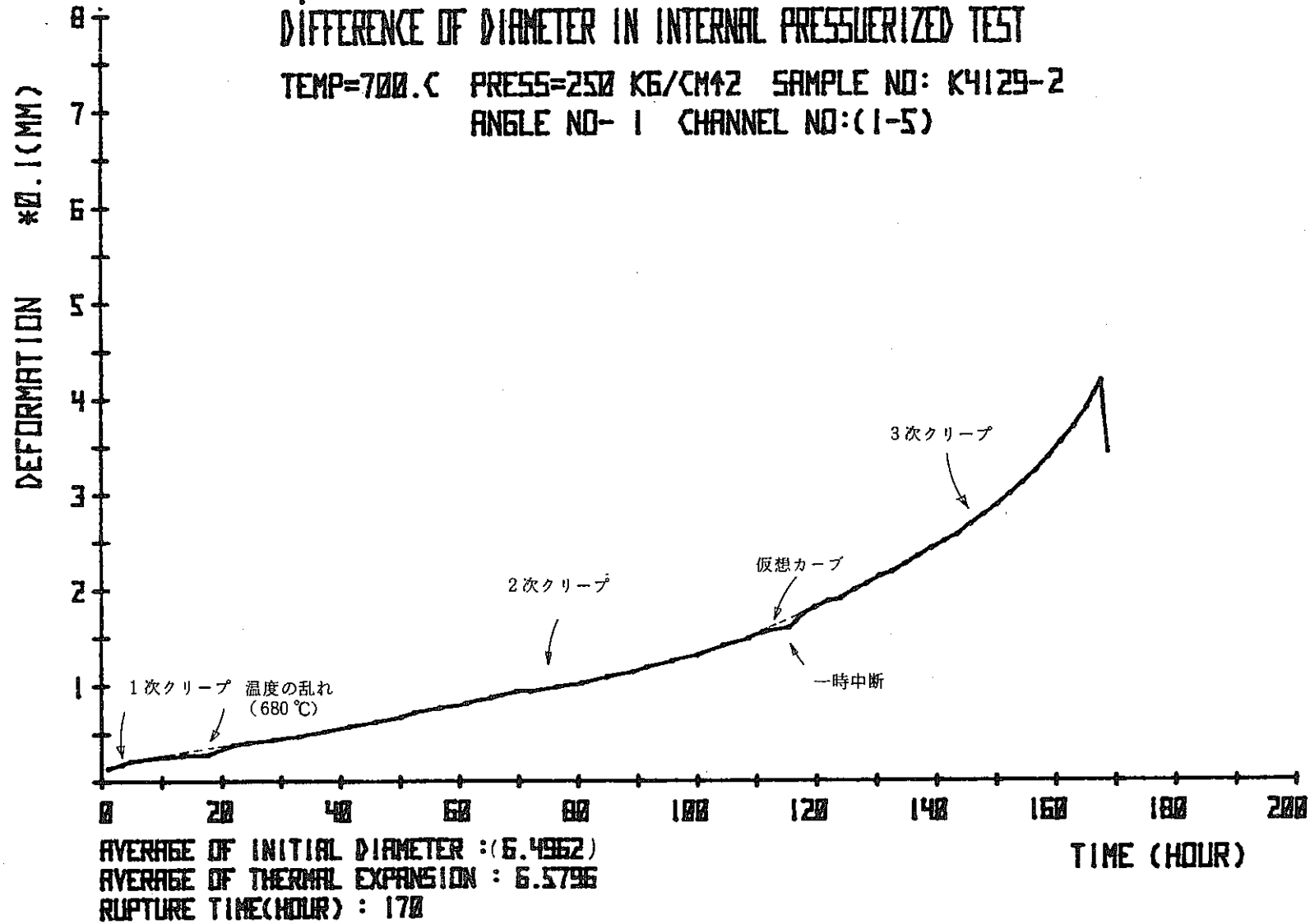


図 42 軸方向 5 チャンネルの外径測定平均値の変位



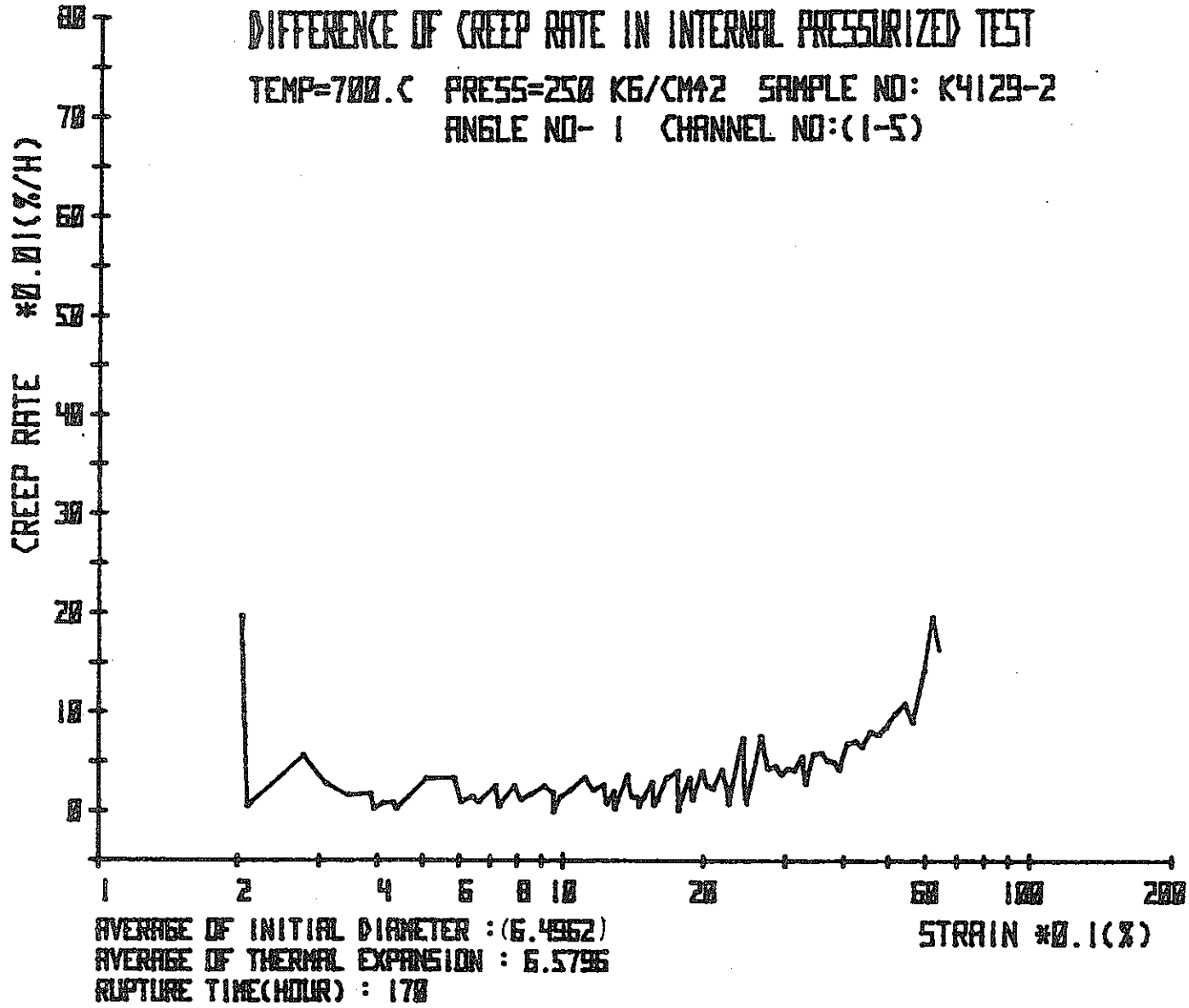


図 43 軸方向 5 チャンネルの平均クリープ速度の変化

DIFFERENCE OF DIAMETER IN CREEP  
TEMP=700°C PRESS=200KG/CM<sup>2</sup>

ANGLE NO- 1 CHANNEL NO-1,2,3,4,5

K4129-3

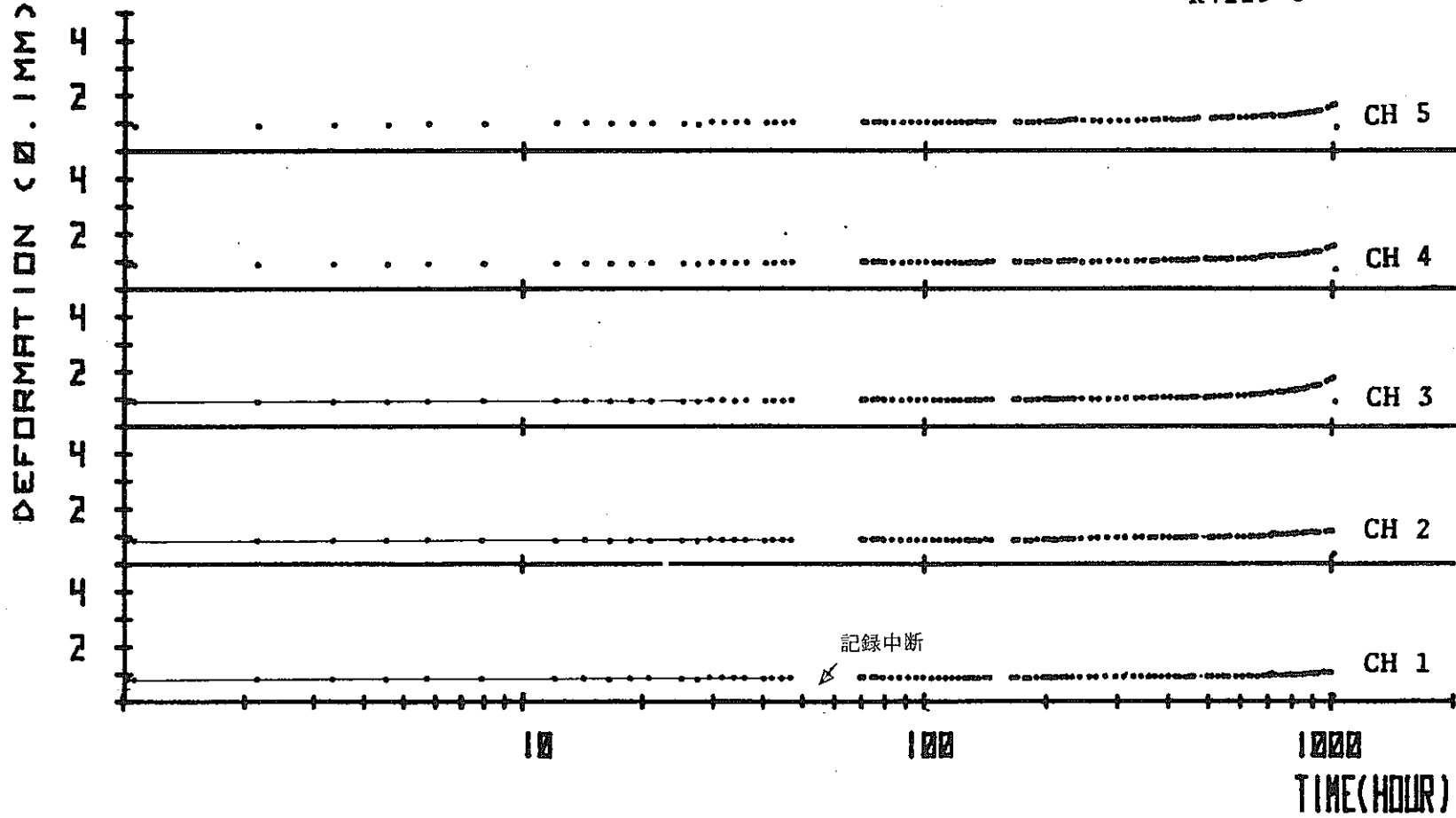
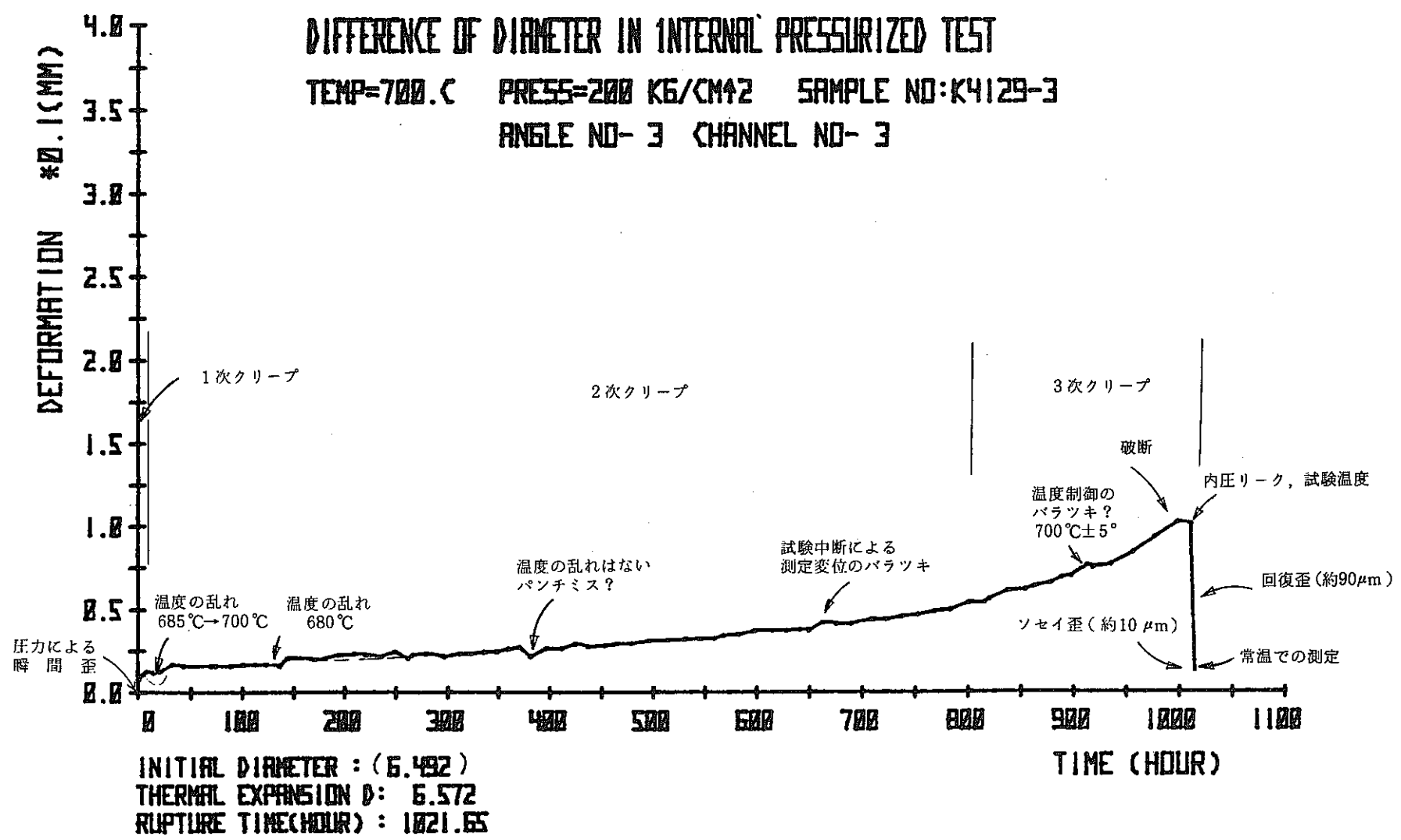


図 44 軸方向外径変位 (K4129-3, 回転角 0°, 試験前外径値基準)

# DIFFERENCE OF DIAMETER IN INTERNAL PRESSURIZED TEST

TEMP=700.C PRESS=200 KG/CM<sup>2</sup> SAMPLE NO:K4129-3

ANGLE NO- 3 CHANNEL NO- 3



- 86 -

図 45 チャンネル測定位置における外径測定値の変位

# DIFFERENCE OF CREEP RATE IN INTERNAL PRESSURIZED TEST

TEMP=700.C PRESS=200 KG/CM<sup>2</sup> SAMPLE NO:K4129-3  
ANGLE NO- 1 CHANNEL NO- 3

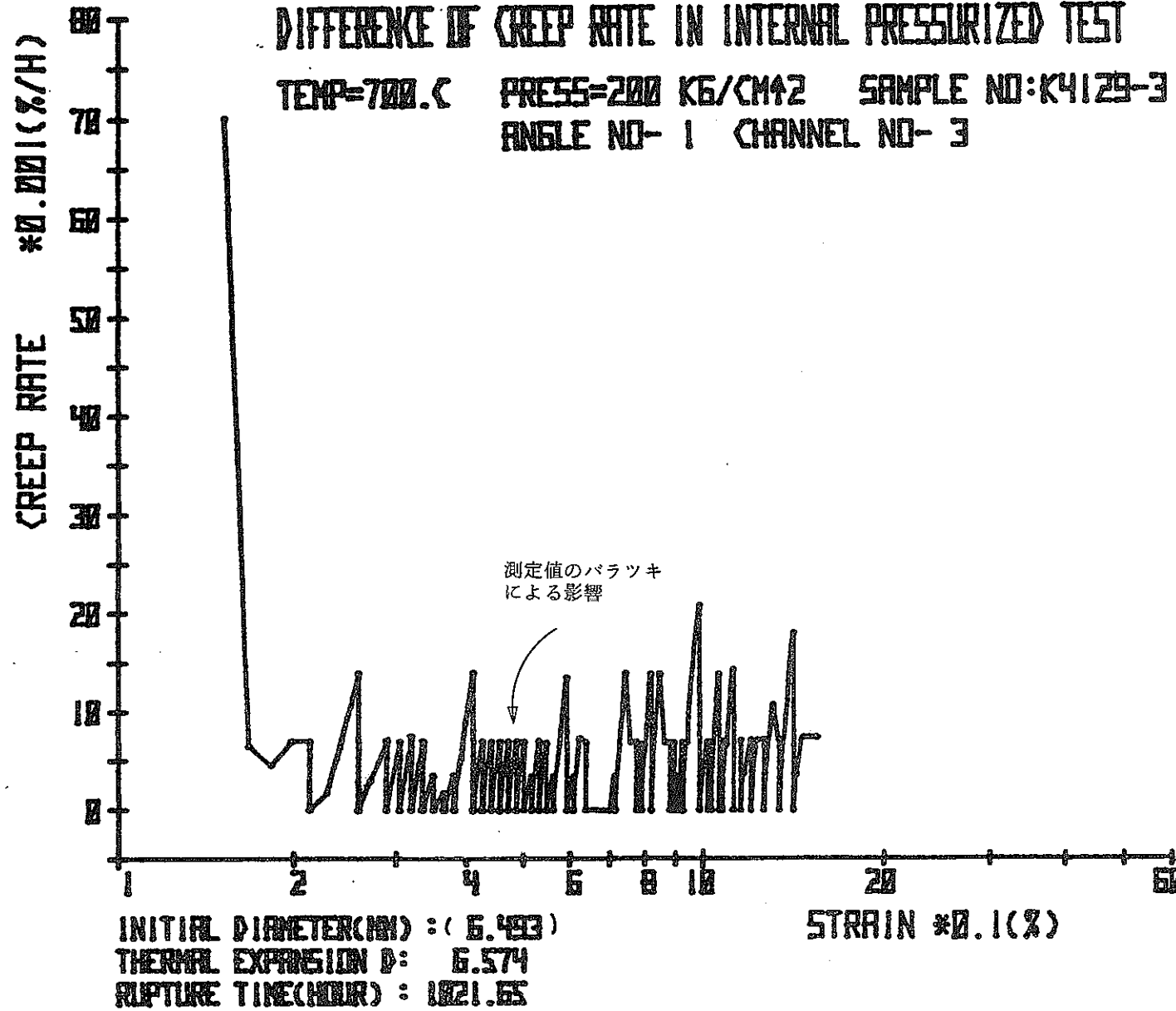


図 46 チャンネル測定位置におけるクリープ測度の変化

### DIFFERENCE OF DIAMETER IN INTERNAL PRESSURIZED TEST

TEMP=700.C PRESS=200 KG/CM<sup>2</sup> SAMPLE NO: K4129-3

ANGLE NO- 1 CHANNEL NO:(1-5)

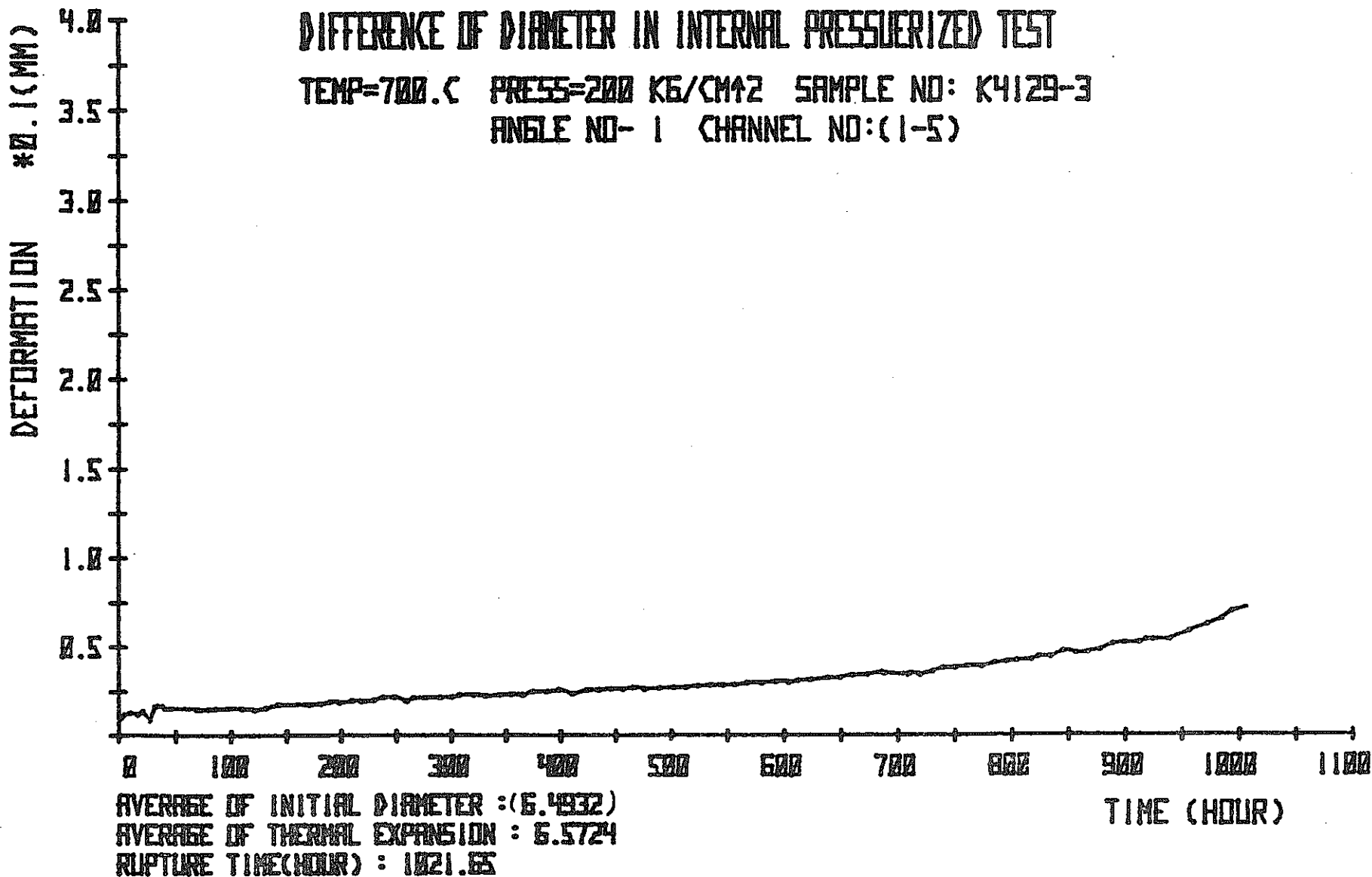


図47 軸方向5チャンネルの外径測定平均値の変位

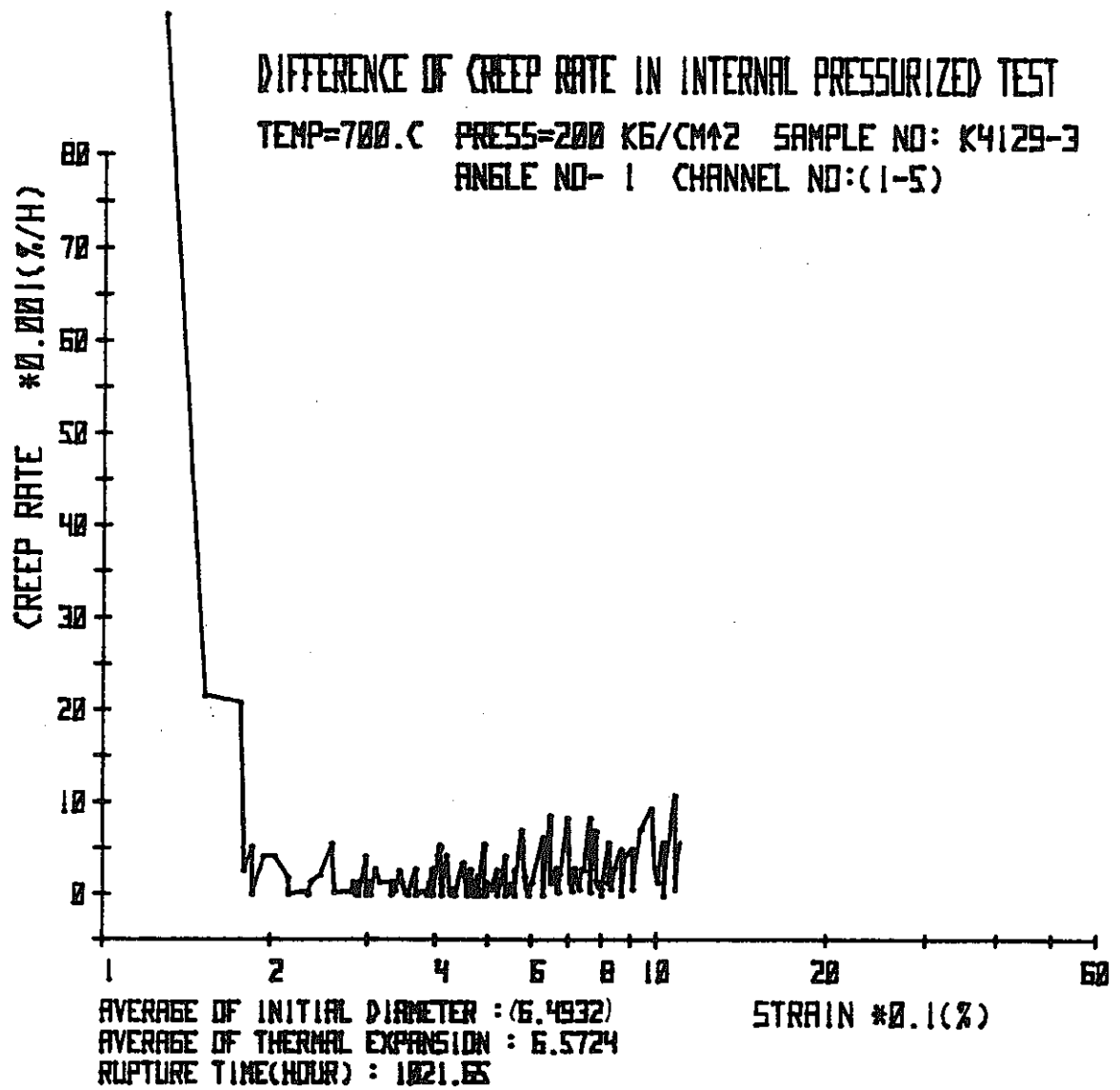


図 48 軸方向 5 チャンネルの平均クリープ速度の変化

## 7. 結 論

これまで、この内圧クリープ試験では、燃料被覆管のような薄肉円筒材のクリープ歪の変化を試験中に連続検出したというデータは皆無と言ってよい。本試作装置が、内圧クリープ試験としてはやや試験条件に問題があったものの、試験中のクリープ歪の変化をレーザ測定により高精度で連続計測できることを実証したことは、今後の試験装置開発に極めて有益であり、試作装置としては1つの目的を果たしたと言える。

以下に試作装置の試験方法、クリープデータの測定方法、及び実験の結果についての結論を報告する。

① クリープ歪の測定に利用しているレーザ測定法で考慮しておかなければならない測定誤差は、測定雰囲気中の光屈折率の変化によるものである。これは測定雰囲気中の対流現象が原因であるため、試験中、試験容器内を真空に保つことで、この現象を取り除くことができ、試験片の加熱温度と無関係に安定した正確なレーザ外径測定ができることがわかった。

② 二色放射温度計による温度測定値は試験片表面の放射率及び放射率比の変化のために不安定であった。

試験中での測定値のバラツキを小さくするためには放射率比を一定にする必要があり、実験に先立って、試験片表面の酸化を必要とした。

③ 直接通電加熱は、クリープ歪の測定と内圧クリープ試験条件が共存するための最良の方法と考えられるが、供試材の長さ200mmに対して、均熱部は中央付近約70mmであり余り良い温度分布を作ることができなかった。これが内圧クリープ試験試作装置として最大の課題になっている。

④ 内圧クリープ試験中、制御部本体に設定された運転プログラムに従って、測定動作時間中の全てのデータが紙テープ及びデジタルプリンターに記録されるために、長時間試験になると、試験終了までのデータは膨大な量になる。

このことから、測定動作時間中に同一測定データを4～5回記録する現在の最低設定時間10分を、もっと短かくする改良が必要であった。

(昭和54年6月、改良を実施し分単位設定とした。)

⑤ 試験温度を安定させるためには、熱電対が試験片内壁に接触しないように試験片内にあらかじめ高温絶縁材を入れておくか、熱電対を高温絶縁材で覆って試験片に挿入することが必要であることがわかった。

⑥ この試作装置の加熱が直接通電であるので、破断部では電気抵抗の増大が起こり、局所的な加熱が生じることがわかった。

⑦ 試験温度(700℃)が試験片の金属組織に影響を及ぼし、試験開始後12～13時間付近より

試験片の電気抵抗が変化することが加熱電気系統の操作を通して明らかになった。しかし、現在の所、この原因が電極接合部の酸化によるものか、試験片自身の組織変化によるものか、また他に原因があるのかははっきりしていない。

- ⑧ 内圧クリープ試験においては、温度の変動が試験片のクリープ歪に与える影響が極めて大きいことが“クリープ歪-時間”のプロットカーブの変曲によって知ることができた。また、試験中、試験片は比較的大きな歪が生じているものの、試験後（常温・大気）にはある程度回復することが明確にされた。
- ⑨ これまで初期歪を含む第1次クリープは、単軸クリープ試験同様、極めて短時間で終了すると考えられてきたが、この方法での試験、レーザ測定の結果からは応力にもよるが、数時間（10時間前後）までを第1次クリープとみなせることがわかった。

以 上