

分置

### 3 本棒熱クリープラケット試験

1994年1月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

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

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

### 3本棒クリープラケット試験

柄谷 和輝\*, 堀切 守人\*\*

#### 要 旨

非弾性解析を高度化する高精度な構成モデルの適用性を評価するため、単純な3本棒構造の試験体に高温保持を含む温度変動を与え、発生するラケット変形の計測を行った。一方で汎用非線形構造解析システムFINASにより、構成モデルとして非線形繰返し非硬化領域モデルを用いた解析を行った。これら試験と解析の結果を比較することにより温度変動のある弾塑性クリープ領域での構成モデルの適用性を評価した。

本研究で得られた結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 試験により一次応力がなくとも圧縮側にラケット変形が発生することを確認した。また、試験により得られた1サイクルあたりのラケット変形はサイクル数進行とともに減少し、15サイクル程度でほぼ一定値となった。
- (2) 汎用非線形構造解析システムFINASにより、構成モデルとして非線形繰返し非硬化領域モデル(大野モデル)を用いて試験を模擬したFEM解析を実施した。クリープに関する時間係数を $\alpha_c=1/3$ とすることにより、試験で計測されたラケット変形を精度よく予測することができた。これにより弾塑性クリープ領域においても非線形繰返し非硬化領域モデルにより高精度の解析を行えることを確認した。
- (3) 高温保持時間を変化させた解析を行うと保持時間の増大と共に発生するラケット変形が増大した。これにより、高温保持によるクリープ変形が圧縮側のラケットひずみを促進させることを確認した。

---

\* 大洗工学センター 機器構造開発部 構造工学室 (現 ㈱CRC総合研究所)

\*\* 大洗工学センター 機器構造開発部 構造工学室

## Creep Ratchetting Test of Three Bar Specimen

Kazuteru Garatani\* , Morito Horikiri\*\*

### Abstract

To evaluate the applicability of a precise constitutive model to the prediction of inelastic behavior of structural materials, a creep ratchetting test using a 3-bar structure model subjected to cyclic thermal loads was conducted and analysis of the creep ratchetting test was performed by using the nonlinear cyclic hardening constitutive model (Ohno model) installed in FINAS.

The following results were obtained.

- (1) It is confirmed that the compressive creep ratchetting deformation occurs under cyclic thermal loads only. Ratchetting strain per cycle measured in the test decreased cyclically and became constant after about 15-th cycle.
- (2) The analysis of the 3-bar model in which the time constant  $\alpha_c$  equals to 1/3 predicts the creep ratchetting deformation observed in the test very well. Consequently, the nonlinear cyclic hardening constitutive model is applicable to the creep ratchetting analysis of structures.
- (3) It is confirmed by the analysis that the ratchetting strain increases as increasing of the hold time at high temperature and the compressive ratchetting strain is enhanced by the creep deformation.

---

\* Structural Engineering Section, Oarai Engineering Center, PNC  
(Presently CRC Research Institute, Inc.)

\*\* Structural Engineering Section, Oarai Engineering Center, PNC

## 目 次

緒言	1
1. 試験方法	2
1.1 概要	2
1.2 試験体	2
1.2.1 試験体仕様	2
1.2.2 試験体の試験検査成績	3
1.3 試験装置	3
1.4 計測	4
1.4.1 温度計測	4
1.4.2 ひずみ計測	4
1.4.3 変位計測	4
1.5 試験条件	4
2. 試験結果	5
2.1 概要	5
2.2 計測結果	5
2.2.1 温度計測結果	5
2.2.2 ひずみ計測結果	5
2.2.3 変位計測結果	6
2.3 考察	6
2.3.1 テーパー部の温度	6
2.3.2 温度履歴	6
2.3.3 その他の部分の温度上昇	7
2.3.4 A棒の発生ひずみ	7
3. 解析方法	8
3.1 概要	8
3.2 FEMモデル	8
3.2.1 構造のモデル化	8
3.2.2 材料のモデル化	9
3.2.3 負荷のモデル化	9

4. 解析結果	10
4.1 予備検討	10
4.2 試験を模擬した解析	10
4.2.1 平行部のみの構造モデル (Case-1)	10
4.2.2 全体の構造モデル (Case-2)	11
4.2.3 クリープに関する物性値の影響を考慮したモデル (Case-3)	11
4.3 考察	11
結言	13
謝辞	14
参考文献	15

## L i s t o f F i g u r e s

Fig. 1.2-1	Configuration and Dimensions of the Test Assembly	18
Fig. 1.3-1	Sliding Mechanism	21
Fig. 1.3-2	Heating System	22
Fig. 1.3-3	Water Cooling System	23
Fig. 1.3-4	Heater and Cooler Arrangements	24
Fig. 1.4-1	Measuring System	26
Fig. 1.4-2	Thermo Couple Position	27
Fig. 1.4-3	Strain Gauge Position	29
Fig. 1.4-4	Dial Gauge Position	31
Fig. 1.5-1	Loading Pattern for TR-04	32
Fig. 2.2-1	Temperature History (TC-No.4 / Parallel Reduced Section / Top Face)	33
Fig. 2.2-2	Temperature History (TC-No.5 / Parallel Reduced Section / Top Face)	34
Fig. 2.2-3	Temperature History (TC-No.6 / Parallel Reduced Section / Top Face)	35
Fig. 2.2-4	Temperature History (TC-No.7 / Parallel Reduced Section / Top Face)	36
Fig. 2.2-5	Temperature History (TC-No.8 / Parallel Reduced Section / Top Face)	37
Fig. 2.2-6	Temperature History (TC-No.24 / Parallel Reduced Section / Under Face)	38
Fig. 2.2-7	Temperature History (TC-No.25 / Parallel Reduced Section / Under Face)	39
Fig. 2.2-8	Temperature History (TC-No.26 / Parallel Reduced Section / Under Face)	40
Fig. 2.2-9	Temperature History (TC-No.27 / Parallel Reduced Section / Under Face)	41

Fig. 2.2-10	Temperature History (TC-No.28 / Parallel Reduced Section / Under Face)	..... 42
Fig. 2.2-11	Temperature History (TC-No.1 / Restraint Section / Top Face)	..... 43
Fig. 2.2-12	Temperature History (TC-No.2 / Restraint Section / Top Face)	..... 44
Fig. 2.2-13	Temperature History (TC-No.3 / Taper Section / Top Face)	..... 45
Fig. 2.2-14	Temperature History (TC-No.14 / Taper Section / Top Face)	..... 46
Fig. 2.2-15	Temperature History (TC-No.9 / Taper Section / Top Face)	..... 47
Fig. 2.2-16	Temperature History (TC-No.15 / Taper Section / Top Face)	..... 48
Fig. 2.2-17	Temperature History (TC-No.10 / Restraint Section / Top Face)	..... 49
Fig. 2.2-18	Temperature History (TC-No.11 / Restraint Section / Top Face)	..... 50
Fig. 2.2-19	Strain History / Parallel Reduced Section of Bar-A1 (RTG-No.1/2 : Two Active Gage Method of Opposite Side)	... 51
Fig. 2.2-20	Strain History / Parallel Reduced Section of Bar-A1 (RTG-No.3/4 : Two Active Gage Method of Opposite Side)	... 52
Fig. 2.2-21	Strain History / Parallel Reduced Section of Bar-A2 (RTG-No.5/6 : Two Active Gage Method of Opposite Side)	... 53
Fig. 2.2-22	Strain History / Parallel Reduced Section of Bar-A2 (RTG-No.7/8 : Two Active Gage Method of Opposite Side)	... 54
Fig. 2.2-23	Elongation History (DG-1 / Bar-A1 Side)	..... 55
Fig. 2.2-24	Elongation History (DG-2 / Bar-A2 Side)	..... 56
Fig. 2.3-1	Temperature Distribution of Taper Section	..... 57
Fig. 2.3-2	Heating and Cooling Process (Parallel Reduced Section of Bar-B)	..... 58



Fig. 3.2-1	Finite Element Model (Parallel Part Only)	61
Fig. 3.2-2	Finite Element Model(Detailed Model)	62
Fig. 4.1-1	Ratchetting Strain at each Cycle (changed Hold Time) Creep Ratchet Analysis (OHNO Model) / Case-1 (Basic Model)	63
Fig. 4.1-2	Plasticity Strain at each Cycle (changed Hold Time) Creep Ratchet Analysis (OHNO Model) / Case-1 (Basic Model)	64
Fig. 4.1-3	Creep Strain at each Cycle (changed Hold Time) Creep Ratchet Analysis (OHNO Model) / Case-1 (Basic Model)	65
Fig. 4.2-1	Stress - Strain Relationship of Bar-A Creep Ratchet Analysis (OHNO Model) / Case-1 (Basic Model)	66
Fig. 4.2-2	Stress - Strain Relationship of Bar-B Creep Ratchet Analysis (OHNO Model) / Case-1 (Basic Model)	67
Fig. 4.2-3	Ratchetting Strain History of Bar-A Creep Ratchet Analysis (OHNO Model) / Case-1 (Basic Model)	68
Fig. 4.2-4	Stress - Strain Relationship of Bar-A Creep Ratchet Analysis (OHNO Model) / Case-2 (Detailed Model)	69
Fig. 4.2-5	Stress - Strain Relationship of Bar-B Creep Ratchet Analysis (OHNO Model) / Case-2 (Detailed Model)	70
Fig. 4.2-6	Ratchetting Strain History of Bar-A Creep Ratchet Analysis (OHNO Model) / Case-2 (Detailed Model)	71
Fig. 4.2-7	Stress - Strain Relationship of Bar-A Creep Ratchet Analysis (OHNO Model) / Case-3 (Detailed Model / $\alpha_e=1/3$ )	72
Fig. 4.2-8	Stress - Strain Relationship of Bar-B Creep Ratchet Analysis (OHNO Model) / Case-3 (Detailed Model / $\alpha_e=1/3$ )	73
Fig. 4.2-9	Ratchetting Strain History of Bar-A Creep Ratchet Analysis (OHNO Model) / Case-3 (Detailed Model / $\alpha_e=1/3$ )	74
Fig. 4.2-10	Experimental and Analytical Ratchetting Strain History of Bar-A Creep Ratchet Analysis (OHNO Model) / Case-1,2,3)	75

### List of Tables

Table 1.1-1	Test Conditions for Thermal Ratchetting Test	16
Table 1.2-1	Summary of Manufacturing Specification SUS304 Stainless Steel Plate (A7)	17
Table 1.2-2	Certified Material Properties of SUS304 Stainless Steel Plate (A7)	20
Table 1.4-1	Thermo Couple Position	28
Table 1.4-2	Strain Gauge Position	30
Table 1.4-3	Dial Gauge Position	30
Table 1.5-1	Time Duration for TR-04	31
Table 1.5-2	Thermal Conditions for TR-04	31
Table 2.3-1	Heating Pattern of Bar-B	59
Table 2.3-2	Cooling Pattern of Bar-B	59
Table 3.2-1	Analyses Conditions	60
Table 3.2-2	Finite Element Model (Parallel Part Only)	61
Table 3.2-3	Finite Element Model(Detailed Model)	62
Table 3.2-4	Time Interval for Analyses (TR-04)	60
Table 3.2-5	Thermal Conditions for Analyses (TR-04)	60

### List of Photographs

Photo. 1.2-1	Test Assembly	19
Photo. 1.3-1	Scene of the Experiment	25

## 緒 言

大型高速炉では合理的な機器設計を実現し、建設費の低減を図るために非弾性解析を一層有効に活用することが期待されている。このためには非弾性解析法を高度化し、構造部材に発生する応力・ひずみを精度よく、かつ効率的に予測できるようにする必要がある。非弾性解析の適用性と精度は主に材料の力学的特性を記述する構成モデルに支配され、その高度化のためには材料挙動の記述性にすぐれ、計算効率のよい非弾性構成モデルの開発が不可欠である。特に高速炉の主要構造材料であるオーステナイトステンレス鋼の設計では熱疲労の防止が主要な課題となり、合理的な設計を行なうには温度変動下における繰返し変形挙動の評価が重要となる。

近年、このような解析を行なうために高精度の構成モデルが各種提案されているが、これらは材料試験レベルにおける非弾性挙動の記述性の議論に留まっている。よってこのような構成モデルを用いた高精度な非弾性解析を実用化するためには、実際の問題に適用し、その評価を行っていく必要がある。

構造工学室ではこのために一連の非弾性挙動検証試験を行っているが、本試験はその一環である3本棒クリープラチェット試験に関するものである。3本棒クリープラチェット試験は従来行なわれてきた3本棒熱ラチェット試験において、さらに高温保持によるクリープ変形を発生させたものである。

さて、クリープ変形は高温で生じるため、今回の3本棒モデルでは発生するクリープ変形は常に圧縮側になる。つまりクリープ変形は圧縮側のラチェット変形を促進するが、逆に引張側のラチェット変形を打消す効果を持っており、クリープ変形がラチェット変形に及ぼす影響を検討する場合、圧縮側のラチェットを発生させる方がその値が大きくなるために都合がよい。このモデルに圧縮側のラチェット変形を発生させるためには一般に1次応力として圧縮力を負荷する必要があるが、試験体の曲がりやねじれを生じるなどの試験技術上の困難が伴う。一方、1次応力が無くとも降伏応力の温度依存性により圧縮側のラチェット変形を発生させられることを非弾性挙動検証試験において既に検証<sup>3)</sup>している。よって本研究では1次応力の無い状態で試験体に高温保持を含む温度変動を与え、圧縮側のラチェット変形がクリープにより促進されることを確認する。

また、この試験を模擬した解析をSUS304鋼の非弾性挙動を精度よく表わす非線形繰返し非硬化領域モデルを用いて行ない、試験結果と比較・検討することにより同構成モデルの熱弾塑性クリープ領域における適用性を評価する。

## 1. 試験方法

### 1.1 概要

高温保持のある温度変動を簡単な3本棒構造の試験体（3本棒熱ラチェット試験体）に繰返し負荷し、発生するラチェット変形を計測する試験を行った。用いた3本棒熱ラチェット試験体は概念的には2本棒熱応力ラチェットモデルと一般に呼ばれているものに対応し、試験体の曲げ変形を防ぐために一定温度に保つ棒Aの断面積を半分にして両端に配し3本棒構造としたものである。なお本報告書では一連の3本棒熱ラチェット試験で Table 1.1-1 に示すうち的高温保持によるクリープを扱う TR-04を対象としている。

### 1.2 試験体

#### 1.2.1 試験体仕様

試験体は、室温及び高温における材料特性データが整備されている当事業団 大洗工学センター 機器構造開発部 材料開発室で保管していた高速増殖炉主要機器材料である SUS304 圧延材鋼板（A7材、もんじゅ原子炉容器と同一ヒート材）を機械加工して製作した。素材の製造仕様概略を Table 1.2-1 に示し、試験体の形状・寸法を Fig. 1.2-1 に示す。また、試験体の外観を Photo. 1.2-1 に示す。

試験体の形状は、全長480mm、全幅320mm、標点間長さ100mm、標点間の板厚20mm、中央棒の幅20mm、端部棒の幅10mmである。また、Fig. 1.2-1 に記すように試験体の3本の棒状部について両端をA1棒、A2棒（または総称してA棒）、中央をB棒と呼び、さらに各々の棒について平行部、テーパ部、拘束部の呼称を用いる。

試験体は次のような工程にて製作した。

- 1) 試験体材料1000mm×1000mm×40mmの平板から490mm×330mm形状にて6体分の試験体材料を切り出す。
- 2) 試験体を旋盤にのせてドリルで穴をあけ切削機の刃を通して切削加工する。その時、試験体の温度が上がらないように油を流して冷却する。
- 3) 試験体の形状がほぼできあがった状態で切削加工で残った削りしろをバフ仕上げで仕上げる。
- 4) 試験体のB棒の両端（拘束部）に、水冷ジャケットをTig溶接により取付ける。

### 1.2.2 試験体の試験検査成績

熱応力ラチェット試験に用いた試験体の製作前及び完成時における試験検査結果は次の通りである。

#### 1) 素材の検査

素材のミルシートに記載されている化学成分及び機械的性質がJISの規格に合格していることを確認した。その結果を Table 1.2-2 に示す。

#### 2) 製品検査（形状・寸法検査）

試験体の形状・寸法はJIS Z7701に基づいて製作されたが、仕上がった段階で寸法計測した結果寸法誤差は許容範囲内であることを確認した。

### 1.3 試験装置

本試験では1次応力を加えないために特別な負荷装置は使用しなかったが、試験体の上下方向の変形を防止する目的で、片端をBHAT装置に他端を端部スライド機構 Fig. 1.3-1 に接続した。端部スライド機構はこの試験のために製作されたもので、試験体における3本棒の軸方向変形を許し、上下方向の変形のみを拘束するものである。なお一連の3本棒ラチェット試験のうち、本報告書で扱うTR-04と別報告（執筆予定）のTR-05のみがこの端部スライド機構を採用している。

試験体のB棒に2次熱応力を加えるための加熱装置は、加熱ヒーターと制御設備によりなり、B棒を昇温させ、一定温度に保つことができる。加熱装置の形状・寸法をFig. 1.3-2 に示す。また試験では試験体のB棒のみを加熱し、その他は室温状態に保つ必要があるため、B棒拘束部に水冷ジャケットおよびA棒平行部に空気冷却ファンを設置した。冷却ジャケットの形状及び試験体への取付位置状況をFig. 1.3-3に、加熱炉を含む設置状況 Fig.1.3-4 に示す。また、Photo. 1.3-1 にこれらの写真を示す。

### 1.4 計測

本試験では試験体に温度変動を繰返し与えた時の試験体温度、ひずみ及び標点間変位を計測した。Fig. 1.4-1 に計測系統図を示す。

計測したデータは、増幅器を経てデータ集録・処理ネットワークシステム（DASN ET）により処理した。データのサンプリングは各サイクル（6.5時間）毎に20秒間隔で360回、2分間隔で102回、20秒間隔で120回、2分間隔で12回の計594回とした。

#### 1.4.1 温度計測

試験体の温度計測は、ネクステル被覆K(CA)熱電対をスポット溶接により試験体に取り付け使用した。熱電対の配置を Fig. 1.4-2 に示し、その取り付け位置一覧を Table 1.4-1 に示す。

#### 1.4.2 ひずみ計測

試験体のひずみ計測は、抵抗線型の室温用箔ひずみゲージ；共和電業(株)製 KF G-5-120-C1-16 を使用した。ひずみゲージの配置を Fig. 1.4-3 に示し、配置一覧を Table 1.4-2 に示す。

なお、RTG-01~08 は 2 ゲージ法により不用な曲げひずみを消去する計測法を用い、計測値は上下および左右の平均値（2 倍の出力となるため）とした。

#### 1.4.3 変位計測

試験体の標点間変位は、ダイヤルゲージ；共和電業(株)製 DT-20-D により計測した。取り付け位置一覧を Table 1.4-3 に示し、Fig. 1.4-4 にダイヤルゲージの配置図を示す。

#### 1.5 試験条件

試験条件は、Table 1.1-1 に示す一連の試験と昇・降温条件は同一であるが、本試験では一次応力が無くともラチェット変形がクリープにより促進されることの確認試験であることから高温保持を有するものとした。

試験は、まず供試体全体を室温に保ち、その後 B 棒の平行部が室温（約 20℃）から約 30 分で 100℃ になるように加熱装置により加熱し、100℃ で 30 分の保持を行ったのち、30 サイクルの高温保持付き繰返し温度変動を与えた。これら B 棒に加えた温度負荷パターンを Fig. 1.5-1 に示し、試験時間条件を Table 1.5-1、温度条件を Table 1.5-2 に示す。

## 2. 試験結果

### 2.1 概要

試験結果は各計測点の中から有意なものを選択し、以下の3項目、計16点を本報告書における出力対象とした。各データは1.4節で述べたように各サイクル毎に594回、計17820回以上の計測を行っており、データ個数が膨大なため、解析との比較等においてはサンプリング処理によりその個数を減らしている。

- ・温度 : B棒上下面のネクステル被覆K(CA)熱電対の10点
- ・ひずみ : A1、A2棒各々2ゲージ法の4点
- ・変位 : A1棒側、A2棒側の2点

### 2.2 計測結果

#### 2.2.1 温度計測結果

平行部各点の温度履歴をFig. 2.2-1 ~ Fig. 2.2-10 に示す。横軸は計測時間(hour)とした。これら図よりほぼ試験条件通り安定した温度負荷が加えられたことがわかる。温度計測値を詳細に見ることよりB棒の中央50mm部分平均での高温側保持温度は599.4℃、低温側保持温度は90.6℃であり、この両外側25mm部分平均の高温側保持温度は573.35℃であった。また試験体の初期温度(室温)は20.5℃であった。その他のテーパ部および拘束部の温度履歴はFig. 2.2-11 ~ Fig. 2.2-18 に示す通りであり、下面においても同様な温度挙動を呈していた。

#### 2.2.2 ひずみ計測結果

2ゲージ法によるひずみ計測結果を Fig. 2.2-19 ~ Fig. 2.2-22 に示す。この値より全体的に圧縮方向のラチェットが発生していることが認められる。また1サイクルあたりのラチェットひずみは10サイクルまで徐々に減少するが、これ以降はほぼ一定となる。また計測値を詳細に見ることより、A1棒側の計測値は上下と左右で多少の差が生じているが、A2棒側にはこのような差が見られず安定した値を示している。よって以降A2棒上下の計測値(RTG-05,06平均=ch-42)を本試験により得られたラチェットひずみの計測値とする。1ゲージ法にて計測したデータについては平行部の曲がりおよびねじれの影響により計測値の信頼性が低くデータとしては取り扱わないものとした。

### 2.2.3 変位計測結果

変位計測結果をFig. 2.2-23, 2.2-24 に示す。変位計測結果は左右に多少のばらつきが見られるもののその値についてはひずみゲージの出力とほぼ同等となっている。しかし、各サイクルでの変位振幅はひずみゲージ出力値にくらべ約30%小さく、この計測が試験体の各サイクル挙動を完全に再現できなかったと考えられる。これは使用したダイヤルゲージの測定範囲に対して測定量が微小であったことと、標点間内平行部の曲がり及びねじれが影響したものと考えられ、一部計測技術に課題を残す結果となった。

## 2.3 考察

### 2.3.1 テーパー部の温度

試験では平行部に均一な温度分布を作るため、テーパー部も温度上昇が発生した。この温度上昇は後の詳細解析において重要となるため、熱電対を配し温度計測を行っている。Fig.2.3-1 に7サイクル目の最高温度時におけるテーパー部での温度分布を示す。図よりテーパー部(0~40mm)の温度は平行部から離れるに従ってほぼ直線的に下降していることがわかる。この傾向は試験体の上下、右左についても同様であり、他のサイクルにおいてもほぼ同様な傾向を示している。さらにこの温度分布は本試験において計測を行った表面での値のみならず、板厚方向の内部でもほぼ同じ値となることを埋め込み熱電対を配した予備試験により確認している。従って、ここではテーパー部の最高温度時での温度分布を以下の式で表わし、この分布形状を保ったまま平行部の温度に比例して温度変動が起ると仮定する。

$$T = 542.0 - 8.275y$$

T : テーパー部の温度(℃)

y : 平行部よりの距離(mm) [0<y<57]

ただし、上式が成立するのは水冷ジャケットまでであり、これ以降は急激に温度が低下すると考えられる。

### 2.3.2 温度履歴

試験条件では、昇温および降温時間を0.5時間としたが、計測結果によれば熱伝導に時間がかかることと一定の温度分布を得る必要から平行部の中心ではこれよ



りある程度の遅れが発生している。Fig. 2.3-2はこのようなB棒中心の温度履歴を示したものであり、7サイクル目の昇温および降温開始時刻を0としている。これより計測値は上下面でほとんど差はないものの降温時にかなりの遅れが発生していることがわかる。よってここでは昇温、降温パターンをTable 2.3-1, 2.3-2のように仮定し、解析の温度条件に用いるものとする。

### 2.3.3 その他の部分の温度上昇

試験条件ではB棒の平行部のみに温度変動を与え、その他の部分は室温としたが、試験では内部の熱伝導及びヒータからのふく射によってテーパ部以外でも温度上昇が発生した。これらの温度上昇は量的には少いものの拘束部では断面積が大きいために詳細解析との比較においては重要な問題となる。よってこれらの位置に付けた熱電対の計測結果より概略以下のような温度変動があることを確認した。

- ・ B棒拘束部

TC-1,11,21,31の平均振幅より 39.0°C

- ・ A棒

TC-12,13の平均温度振幅より 2.3°C

### 2.3.4 A棒の発生ひずみ

本試験では、試験体の上下方向の変形を防止するために端部スライド機構を拘束部に接続し、3本棒の軸方向変形を許して上下方向のみを拘束した。しかし、結果的にA1棒、A2棒の平行部は試験後における形状寸法計測にて曲がりやねじれを有していた。これらの変形は、純粹な熱クリープラチェット変形ではなく、圧縮側の進行性変形に伴って生じた不安定挙動の一種である。フランスでは、このような進行性変形に起因する座屈を Progressive Buckling と呼んでいるが、本試験は1次荷重を負荷していないこと及び累積ひずみが比較的小さいため、Progressive Buckling には到らなかったものと考えられる。これらの変形は、1ゲージ法のひずみ計測によっても確認されている。一方、今回採用した2ゲージ法は、対辺2アクティブゲージにより曲げと引張圧縮が混在するような場合に引張圧縮の成分のみを計測することからA棒の発生ひずみはこの計測結果を用いれば熱クリープラチェットによる変形だけを抽出できる。よって、2.2.2に記した計測値を用いるものとする。

## 3. 解析方法

### 3.1 概要

SUS 304 の非弾性挙動を精度よく表す高精度な構成モデルの適用性を検討するため、試験条件を模擬した F E M 解析を実施した。この結果を試験と比較することにより、構成モデルのクリープ領域における適用性を検討する。F E M 解析は汎用非線形構造解析システム F I N A S <sup>1)</sup> により、非線形繰返し非硬化領域モデルを用いた。

### 3.2 F E M モデル

3 本棒熱ラチェット試験を有限要素によりモデル化し、汎用構造解析プログラム F I N A S (V11.0 ED08) を用いて解析を行なった。構造モデルとしては平行部のみの簡易なモデルとテーパ部、拘束部を含めたモデルの 2 種類、構成モデルとしては大野らによる非線形繰返し非硬化領域モデル(大野モデル)<sup>4)</sup> を用いた。これら F E M モデルによる解析条件の一覧を Table 3.2-1 に示す。

#### 3.2.1 構造のモデル化

解析において以下に示す 2 種類の構造モデルを用いた。

##### (a) 平行部のみの構造モデル

まず供試体の平行部のみをモデル化した。これは A1、A2 棒を 1 の要素、棒 B を 2 の要素とし、2 つの要素を同一の節点に結合したもので、予備解析及び Case-1 で使用した。このモデルを Fig. 3.2-1、Table 3.2-2 に示す。

##### (b) 全体の構造モデル (テーパ部、拘束部を考慮)

3 本棒ラチェット試験体は、加熱ヒーターを平行部でなく拘束部との接続部分であるテーパ部に取り付け、その外に冷却ジャケットを置いている。従って 2.3.1 で述べたように、B 棒は加熱時に平行部だけでなくその外側にも温度上昇が見られた。これをモデル化するために(a)のモデルにテーパ部及び拘束部の要素を付加する。テーパ部では平行部に比べ断面積が大きいいため塑性状態とはならないが、大きな温度分布を持つため、両側 40mm 計 80mm を 5 等分して棒要素 5 本でモデル化した。拘束部については水冷ジャケットの内と外の温度差を考慮して 2 本の棒要素とした。これら付加した要素の断面積は軸剛性が等しくなるように設定している。このモデルは Case-2、Case-3 にて使用しており、詳細を Fig. 3.2-2、Table 3.2-3 に示す。

### 3.2.2 材料のモデル化

試験体の材料は、SUS 304 であり解析ではこの非弾性挙動を精度よく表わす非線形繰返し非硬化領域モデル(大野モデル)を用いた。これは大野らによって提案された構成モデル<sup>4)</sup>であり、降伏曲面と限界曲面の2曲面により非線形硬化特性を、非硬化ひずみ領域の概念により繰返し硬化を精度よく表現することができる。解析に使用した材料データは文献<sup>2)</sup>による。

また、クリープ解析にはFINAS組込みのSUS 304クリープひずみ<sup>1)</sup> [ $\alpha_c$ をパラメータとし、設計でも用いる値 $\alpha_c=1.0$ および $\alpha_c=1/3$ ]を用い、塑性とクリープの連成は考慮していない。

### 3.2.3 負荷のモデル化

今回の試験における負荷は、B棒に加えられた温度変動である。試験条件としてはFig. 1.5-1 およびTable 1.5-1、1.5-2 に示すものであるが、解析においては試験計測結果より、B棒平行部中央の値としてTable 3.2-4、3.2-5 に示すような値を用いる。そしてテーパ部及び拘束部のモデル化において、これらの温度変動はTable 3.2-3 に示した温度変動比率により平行部中央の値を比例的に減少させて定める。また、解析においては最大温度変化が約10℃になるように解析ステップの大きさを設定した。

高温保持によるクリープ変形は保持温度である最高温度に達してから、一定温度でクリープ変形が生じるとした。これは塑性とクリープの相互作用を現状では考慮できないことによる。これにより昇温、降温時間の30分でクリープが発生する425℃以上の領域での10分間程度は無視するものとする。また、この時間におけるクリープ変形は、材料のばらつきに依存し、高々10分程度の誤差を問題にしても材料のばらつきの方が大きいことから、本解析では顕著な差として現れないものと考えられるためである。

これによってクリープ変形と塑性変形は解析において各々別々のステップで発生することになる。

## 4. 解析結果

### 4.1 予備検討

高温保持時間の違いによるクリープ変形がラチェット挙動におよぼす影響を見るために簡単な構造モデル3.2.1 (a) について0～10時間まで保持時間を変化させて解析を行った。この結果、発生したラチェットひずみを各サイクル終了時についてFig. 4.1-1に示す。この図より発生するラチェット変形は保持時間が長いほど大きく、このモデルではクリープ変形が圧縮側のラチェット変形を促進していることを確認した。また、発生する1サイクルあたりのラチェットひずみはいずれの場合もサイクル数の進行によって減少していく傾向を示すが、保持時間を0にした場合のみは15サイクル程度でその進行が止っている。このような傾向は保持時間のないTR-06<sup>3)</sup>の試験結果においても見られ、今回の試験で1サイクルあたりのラチェット変形が0でなく定常な値になったのは高温保持によるクリープ変形の影響であることを裏付けるものである。

さらに、解析結果より各サイクル終了時のクリープひずみ及び塑性ひずみをFig. 4.1-2、4.1-3に各々示す。これらの図によればクリープ変形はラチェット変形に同様、高温保持時間とともに圧縮側に大きな値をとるが、塑性ひずみは高温保持時間が大きなき、逆に引張り側の増分を持つことがわかる。よってこのモデルでは、クリープは圧縮側のラチェット変形を促進する効果を持つが、保持時間を長くした場合、ラチェット変形の増加以上のクリープ変形が発生していることを解析により明らかにした。

### 4.2 試験を模擬した解析

非線形繰返し非硬化領域モデルを用い、試験を模擬した解析を行った。この解析は3種類実施しており各々Case-1、Case-2とし、さらにクリープに関する物性値の影響を考慮検討したCase-3である。

#### 4.2.1 平行部のみの構造モデル (Case-1)

Case-1は試験体の平行部のみをモデル化したもので、解析結果よりA棒、B棒の応力-ひずみ履歴とラチェットひずみをFig. 4.2-1～4.2-3に各々示す。このモデルは試験を詳細に模擬したものではないため定量的な議論はできないが、1サイクルあたりに発生するラチェットひずみは繰返し硬化が進行し、応力範囲が増加することによって小さくなるという定性的な傾向を捉えることができる。また、今回のように高温保持がある場合には繰返し硬化が飽和してもクリープ変形によ

りラチェット変形が進行することを確認できる。

#### 4.2.2 全体の構造モデル (Case-2)

Case-2 は試験で計測された平行部以外での温度上昇を考慮するために平行部だけでなくテーパ部および拘束部もモデル化し、詳細な温度変動を与えたものである。この解析結果よりA棒、B棒の応力-ひずみ履歴とラチェットひずみをFig. 4.2-4 ~ 4.2-6 に各々示す。このモデルでは試験体全体をモデル化したために各サイクル毎のひずみ振幅はかなり試験結果に近い値となっているが、全体にラチェットひずみが試験よりやや大きめの値となっている。

#### 4.2.3 クリープに関する物性値の影響を考慮したモデル (Case-3)

前項において詳細な構造モデルを用いた Case-2 の解析結果は試験結果にくらべてやや大きめのラチェット変形を与えた。ここでラチェット変形が異なる理由として、試験体材料の物性値のばらつきが考えられる。材料のばらつきには、塑性に関する物性値のばらつきとクリープに関する物性値のばらつきの二つがあるが、塑性に関する物性値の妥当性は先に行った熱ラチェット試験<sup>3)</sup>の解析により得られている。一方、クリープひずみ挙動のばらつきは時間係数 $\alpha_c$ で表され、SUS 304では $\alpha_c=1/3 \sim 3.0$ の範囲でばらつくことが知られている。Case-1 および Case-2では $\alpha_c=1.0$ で実施。しかし、試験結果の方がやや小さめのラチェットひずみを与えていることから、試験体に用いた材料の $\alpha_c$ は1.0より小さめの値を持っているものと考えられる。このような予測の基に、クリープひずみ挙動のばらつきを表す時間係数を $\alpha_c=1/3$ としてCase-3の解析を行った。

Case-3の解析結果であるA棒、B棒の応力-ひずみ履歴とラチェットひずみをFig. 4.2-7 ~ 4.2-9 に各々示す。Fig. 4.2-10 には Case-1 ~ Case-3 と試験で得られたラチェットひずみのプロット結果を示す。Case-3のラチェットひずみは、試験結果にほぼ一致していることがわかる。

### 4.3 考察

予備検討から高温保持時間の違いによるクリープ変形がラチェット挙動におよぼす影響は、保持時間が長いほど大きく、クリープ変形が圧縮側のラチェット変形を促進している。これは、保持時間を0とした場合においてラチェット変形が十数サイクルでその進行を停止するのに対し、保持時間を有するものではラチェット変形が定常的な増加を示すとともに、保持時間をさらに長くすると塑性変形以上のクリープ変形が発生することによるものである。同様に Case-1では繰返し硬化が飽和し

てクリープ変形によりラチェット変形が進行することが明かとなった。

Case-1 および Case-2 においては、詳細な温度変動を与えた Case-2 が試験結果のサイクル毎のひずみ振幅を良く再現したが、Case-1 および Case-2 とも全体のラチェットひずみについてはやや大きめの値となっている。また、Case-3 ではクリープに関する物性値のばらつきの影響を考慮し、時間係数  $\alpha_c=1/3$  で行くと試験で得られたラチェットひずみと良く一致した。

以上、クリープ変形がラチェット挙動に及ぼす影響を試験より明かとし、解析では弾塑性クリープ領域においても非線形繰返し非硬化領域モデルによりこの挙動を高精度で解析が行なえることを確認した。

## 結 言

簡単な3本棒構造の試験体に高温保持によるクリープ変形を含む繰返し温度変動を与え、その非弾性挙動の取得を行なう試験(3本棒クリープラチェット試験)を行なった。

また、汎用非線形構造解析システムFINASにより、非線形繰返し非硬化領域モデルを用いた解析を行ない、これを試験結果と比較することにより、もちいた構成モデルの熱弾塑性クリープ領域における適用性の検討を行なった。

以下に本報の結論をまとめる。

- (1) 試験により一次応力がなくとも圧縮側にラチェット変形が発生することを確認した。また、試験により得られた1サイクルあたりのラチェット変形はサイクル数の進行とともに減少し、15サイクル程度でほぼ一定値となった。
- (2) 汎用非線形構造解析システムFINASにより、構成モデルとして非線形繰返し非硬化領域モデル(大野モデル)を用いて試験を模擬したFEM解析を実施した。解析結果は試験で計測されたラチェット変形を精度よく予測することができた。これにより弾塑性クリープ領域においても非線形繰返し非硬化領域モデルにより高精度の解析を行えることを確認した。
- (3) 高温保持時間を変化させた解析を行うと保持時間の増大と共に発生するラチェット変形が増大した。これにより、高温保持によるクリープ変形が圧縮側のラチェットひずみを促進させることを確認した。また、保持時間が無い場合は発生する1サイクルあたりのラチェット変形は最終的に0となった。
- (4) 今回実施したクリープラチェット試験結果は、クリープひずみに関する時間係数を $\alpha_c=1/3$ とすることにより、その挙動を良く表せることがわかった。

## 謝 辞

本研究の実施にあたっては、開発部長代理 岩田耕司氏、構造工学室長 永田敬氏、同室の山下卓哉氏、岡田純二氏から有用な助言をいただいた。また、本試験の実施にあたっては東興機械工業(株)の金子友好、根本一美、大和進、深作博諸氏の御協力によるところが大きい。ここに深甚の謝意を表す。



## 参 考 文 献

- 1) 汎用非線形構造解析システム F I N A S (VERSION 11.0) 使用説明書  
: PNC N9520 89-019 (1989)
- 2) SUS304繰返し塑性構成モデルの検討 -非線形繰返し非硬化領域モデルの評価-  
: PNC SN9410 90-108 (1990)
- 3) 一次応力が無い場合の3本棒熱ラチェット挙動の検討  
: PNC ZN9410 91-350 (1991)
- 4) 大野, 佐藤, 高橋, 桑原 / 温度変動下のSUS304の繰返し塑性構成方程式  
: 日本機械学会論文集(A編), 54巻, 501号, 1140-1150 (1983)

Table 1.1-1 Test Conditions for Thermal Ratchetting Test

試験体名	負荷サイクル	1次応力	2次応力(温度変動)	高温保持
TR-01	1~30サイクル	+ 12.50 Kg/mm <sup>2</sup>	100°C~300°C	なし
	31~60サイクル		100°C~400°C	なし
TR-02	1~30サイクル	+ 6.25 Kg/mm <sup>2</sup>	100°C~400°C	なし
	31~60サイクル	+ 12.50 Kg/mm <sup>2</sup>		
TR-03	1~60サイクル	+ 12.50 Kg/mm <sup>2</sup>	100°C~400°C	なし
TR-04	1~30サイクル	なし	100°C~600°C	5h (600°C)
TR-05	1~30サイクル	なし	100°C~600°C	0.5h (600°C)
TR-06	1~30サイクル	なし	20°C~500°C	なし

- ・ 棒 B 以外は室温にて一定とする。
- ・ 負荷は初期状態(無負荷, 室温)より、まず一次応力がある場合はこれを負荷してから棒 B を100°Cに昇温し、そして棒 B にサイクリックな温度変動(2次応力)を与える。
- ・ TR-05は予備試験として負荷を60サイクルまで継続した。

Table 1.2-1 Summary of Manufacturing Specification of SUS304 Stainless Steel Plate (A7)

項 目	内 容																											
適 用 規 格	1. JISG4304-1977「熱間圧延ステンレス鋼板」 2. 通産省告示第501号-昭和55年10月 「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」																											
製 造	1. 製造方式：電気炉製鋼後，真空脱ガス処理を行った鋼塊を熱間圧延方式により製造 2. 熱 処 理：JIS G4304による固溶化熱処理 1,010～1,150℃ 水 冷																											
品 質 管 理	1. 化学成分（とりべ分析値，％） <table border="1" data-bbox="395 981 1358 1227"> <thead> <tr> <th>C</th> <th>Si</th> <th>Mn</th> <th>P</th> <th>S</th> <th>Ni</th> <th>Cr</th> <th>Co</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.04</td> <td rowspan="2">≤1.00</td> <td rowspan="2">≤2.00</td> <td rowspan="2">≤0.040</td> <td rowspan="2">≤0.030</td> <td>8.00</td> <td>18.00</td> <td rowspan="2">≤0.25</td> </tr> <tr> <td>0.08</td> <td>10.50</td> <td>20.00</td> </tr> </tbody> </table> 2. 機械的性質 <table border="1" data-bbox="395 1335 1331 1518"> <thead> <tr> <th>0.2％耐力 (kg/mm<sup>2</sup>)</th> <th>引張強さ (kg/mm<sup>2</sup>)</th> <th>伸 び (％)</th> <th>ブリネル硬さ (H<sub>a</sub>)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>≥21</td> <td>≥53</td> <td>≥40</td> <td>≤187</td> </tr> </tbody> </table>	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co	0.04	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	8.00	18.00	≤0.25	0.08	10.50	20.00	0.2％耐力 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	伸 び (％)	ブリネル硬さ (H <sub>a</sub> )	≥21	≥53	≥40	≤187
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co																					
0.04	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	8.00	18.00	≤0.25																					
0.08					10.50	20.00																						
0.2％耐力 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	伸 び (％)	ブリネル硬さ (H <sub>a</sub> )																									
≥21	≥53	≥40	≤187																									
試 験 お よ び 検 査 方 法	1. とりべ分析：JIS G1253 2. 製 品 分 析：JIS G1211～G1217およびJIS G1222 3. 引 張 試 験：JIS Z 2241, G0567 4. 硬 さ 試 験：JIS Z 2243 5. 超音波探傷試験：通産省告示第501号 垂直法による100％走査																											

左

右

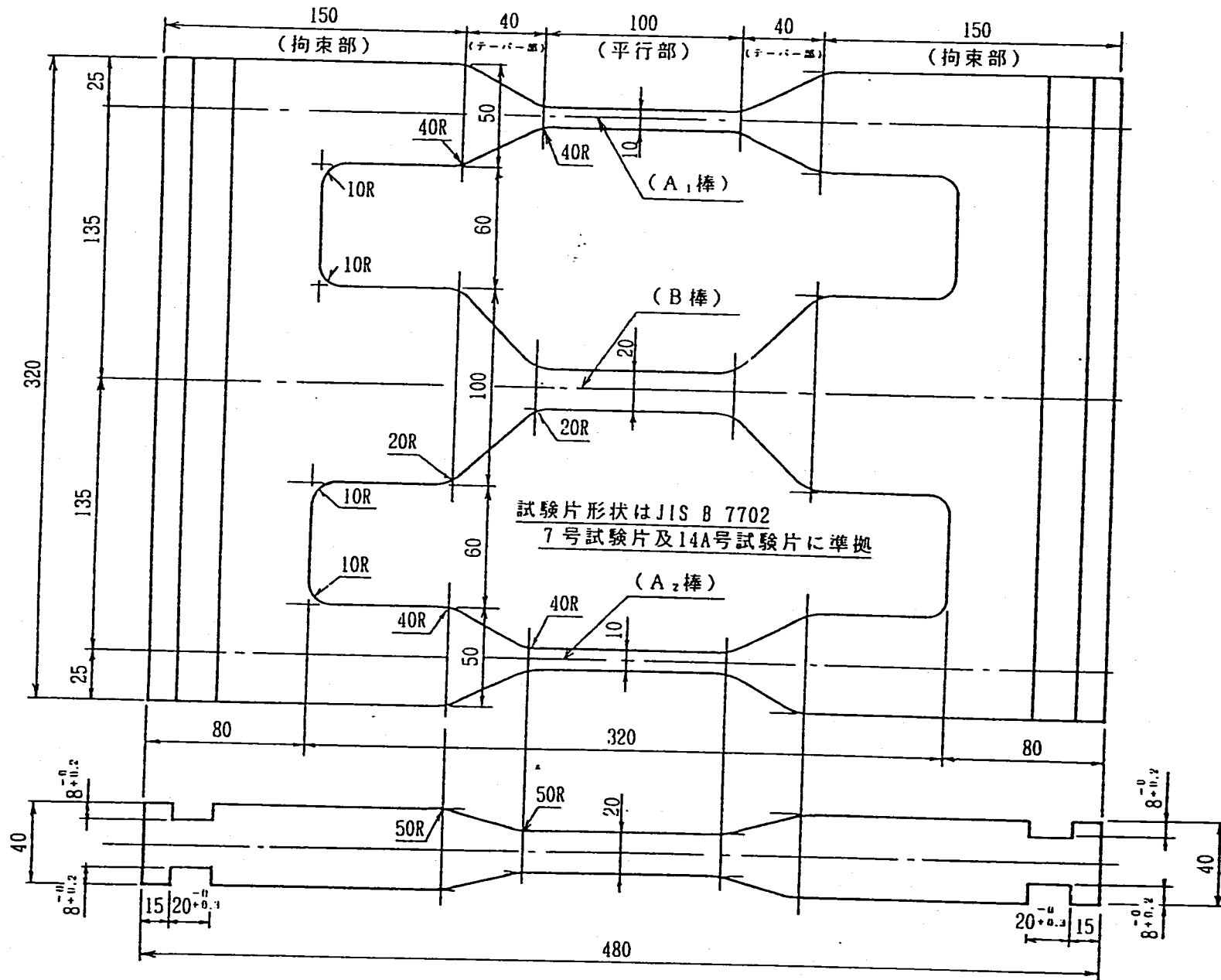
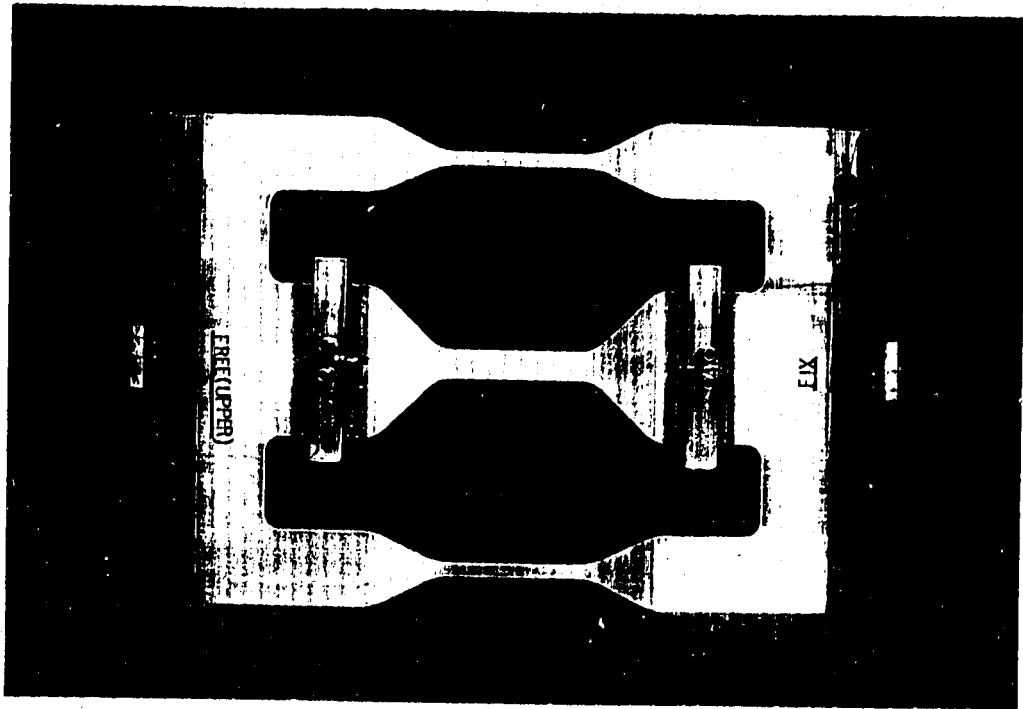
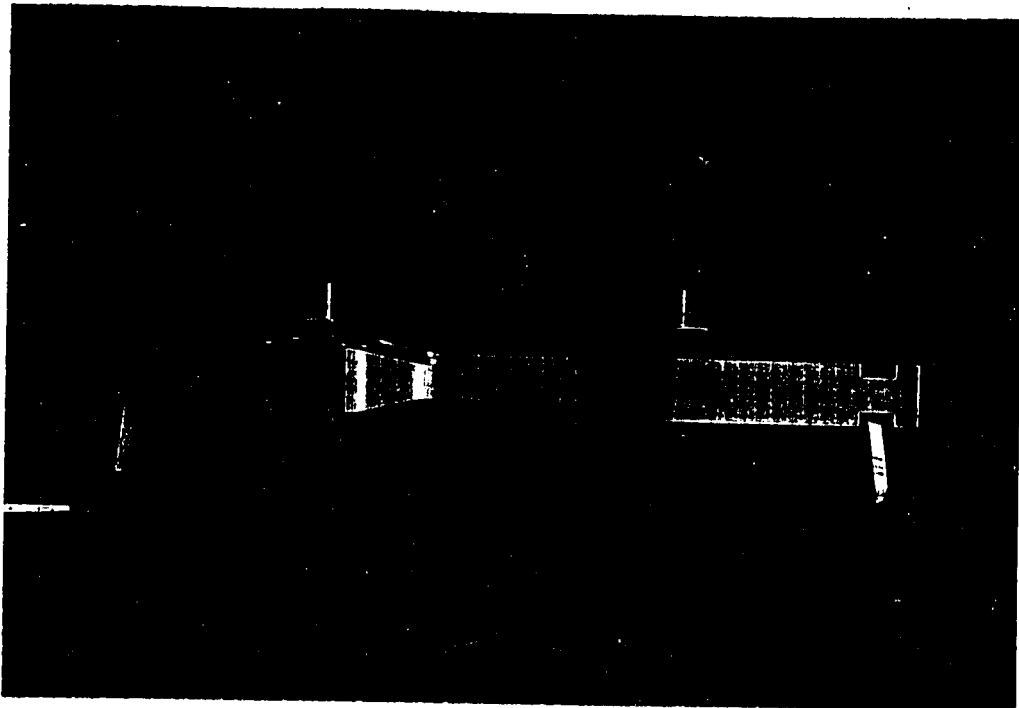


Fig. 1.2-1 Configuration and Dimensions of the Test Assembly



Test Specimen (Top View)



Test Specimen (Side View)

Photo 1.2-1 Test Assembly

Table 1.2-2 Certified Material Properties of SUS304 Stainless Steel Plate (A7)

## (1) 化学成分

項目		成分 (%)						
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
規格値	レードル分析	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.04	≤0.030	8.00/10.50	18.00/20.00
分析値	レードル分析	0.05	0.59	0.87	0.027	0.003	8.98	18.47
	チェック分析	0.05	0.60	0.87	0.026	0.002	8.94	18.59

(注) JIS G4304 熱間圧延ステンレス鋼板, SUS304 HP相当。

## (2) 製造条件

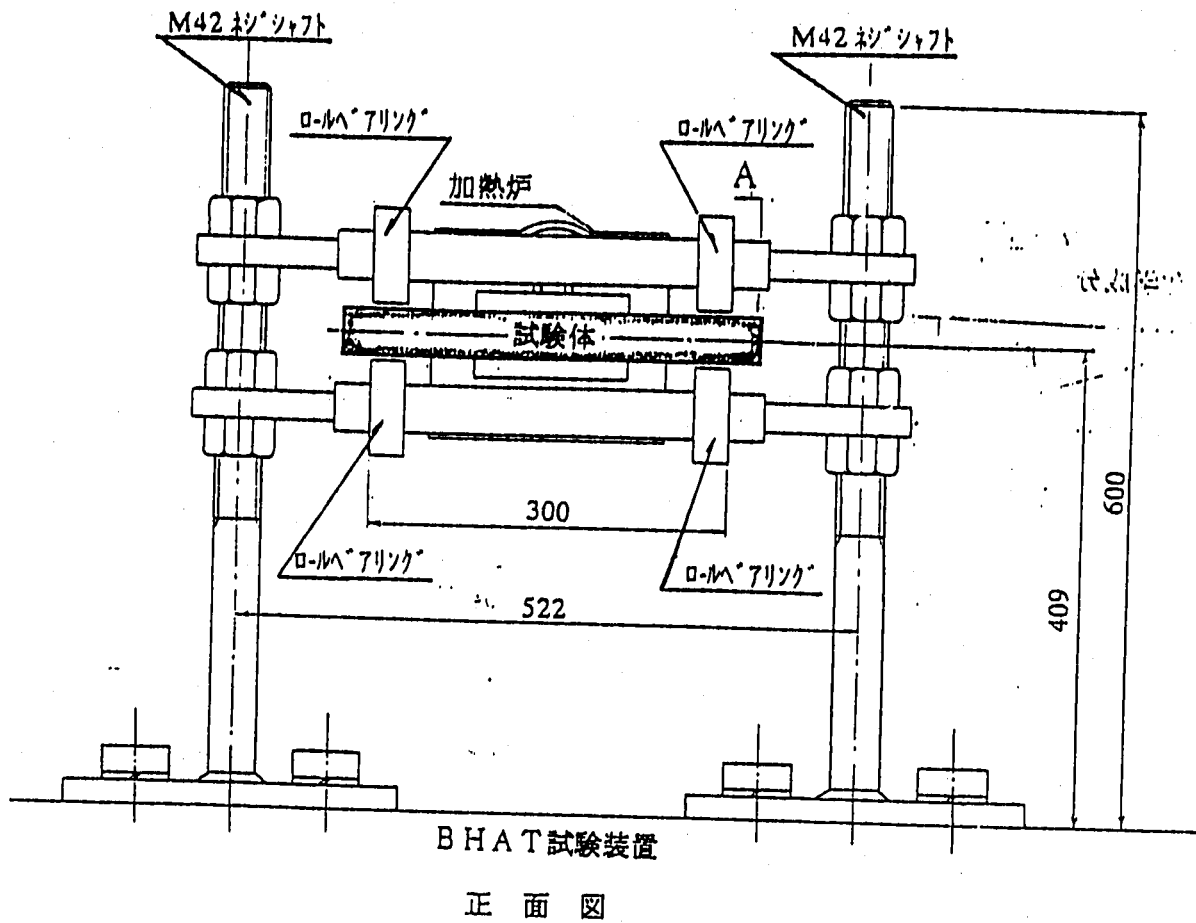
溶解加工 熱処理	電気炉溶解 (30 ton), 真空強制脱酸, 鋼塊圧延比 160, 厚板圧延比 7; (熱間圧延), 1,100 °C × 48 分, 水冷
-------------	--

## (3) 機械試験結果

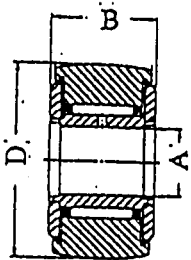
項目		引張試験			かたさ試験
		0.2%耐力 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	H <sub>B</sub>
規格		≥ 21	≥ 53	≥ 40	≤ 187
試験結果	室温	23	64	63	135
	550 °C	12	39	40	

## (4) その他の試験検査結果

結晶粒度	外観検査	寸法検査	超音波探傷試験
4.5	良	良	良



ロールベアリング



- [仕様]
- 定格荷重 ; 5,060 (kgf)
  - 許容回転数 ; 3,500 (rpm)
  - 主要寸法 ; A : 40 (φ)
  - B : 30 (mm)
  - D : 80 (φ)

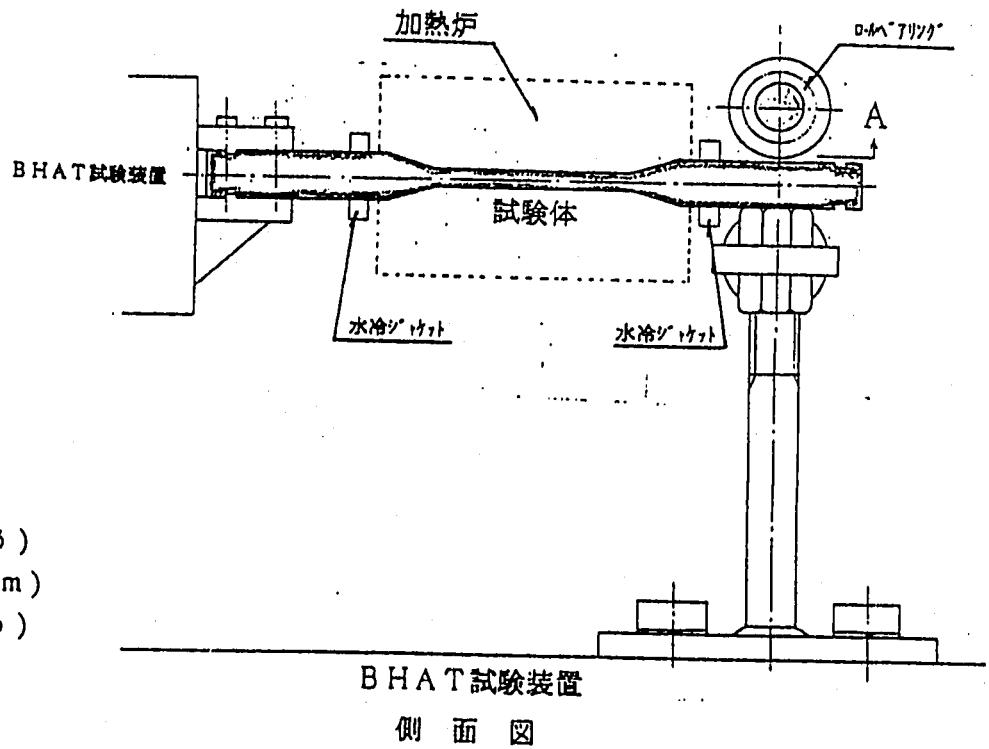
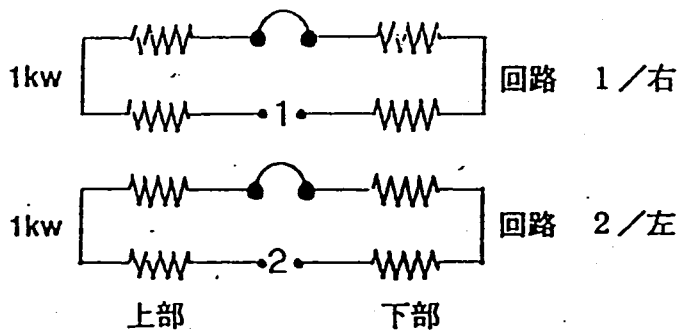
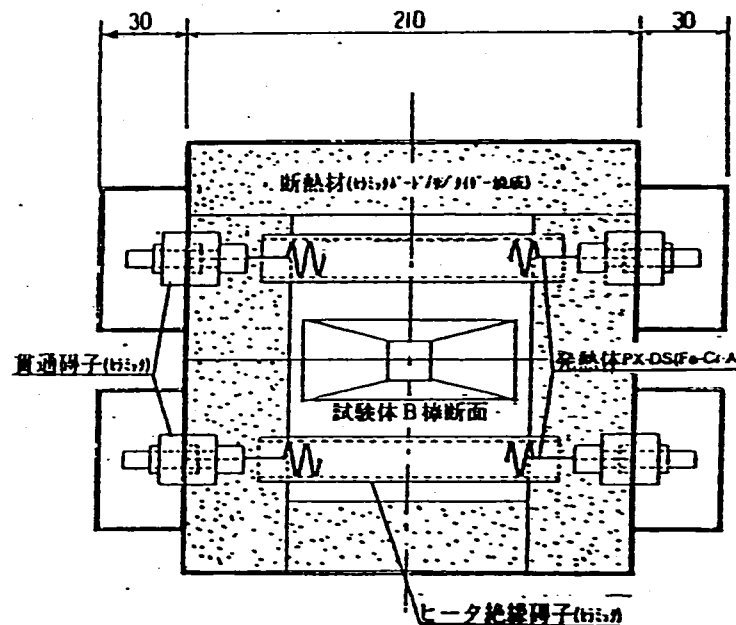
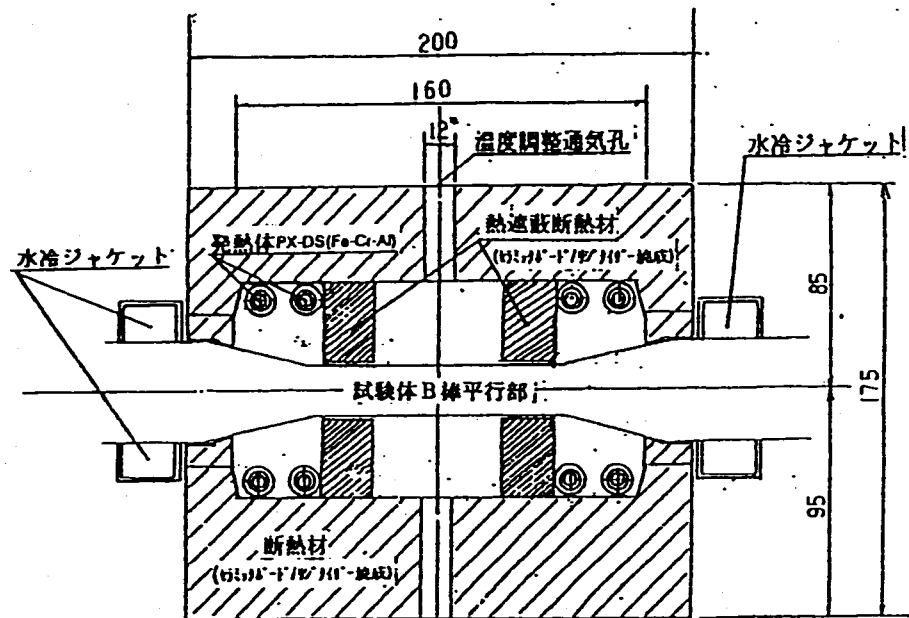


Fig. 1.3-1 Sliding Mechanism



仕様 :

- 加熱装置外寸法 ; 210W x 200L x 175H (mm)
- 加熱装置内寸法 ; 170W x 160L x 70H (mm)
- 断熱材厚さ ; 50t, 20t
- 断熱材 ; セラミック・ド (リジタイル-焼成)
- 発熱体 ; PX-DS(Fe-Cr-Al) 1.6φ
- 容量 ; 90V x 11.15A 1,003.5W (1kw)
- 制御回路数 ; 2回路 (左右)

Fig. 1.3-2 Heating System



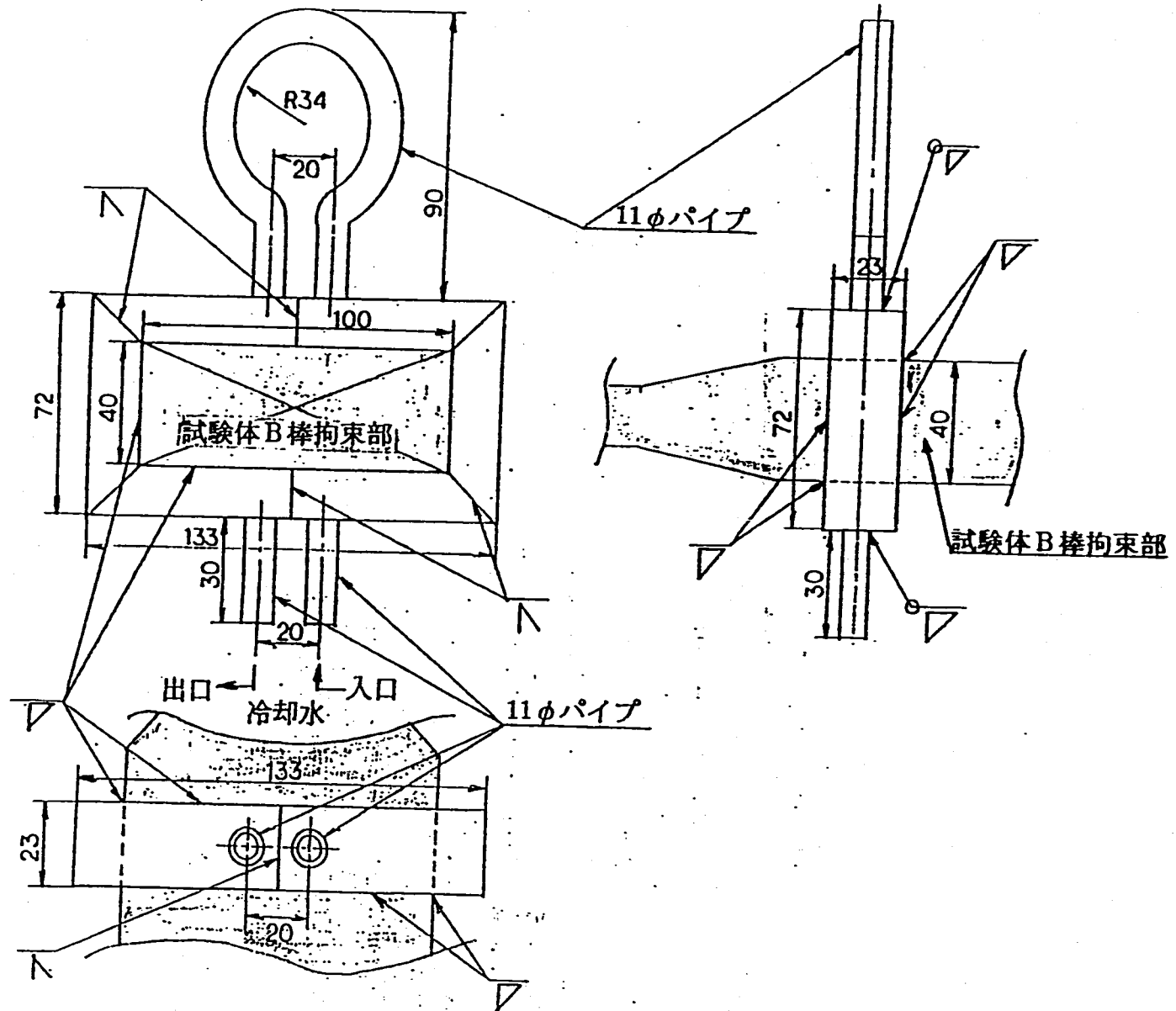
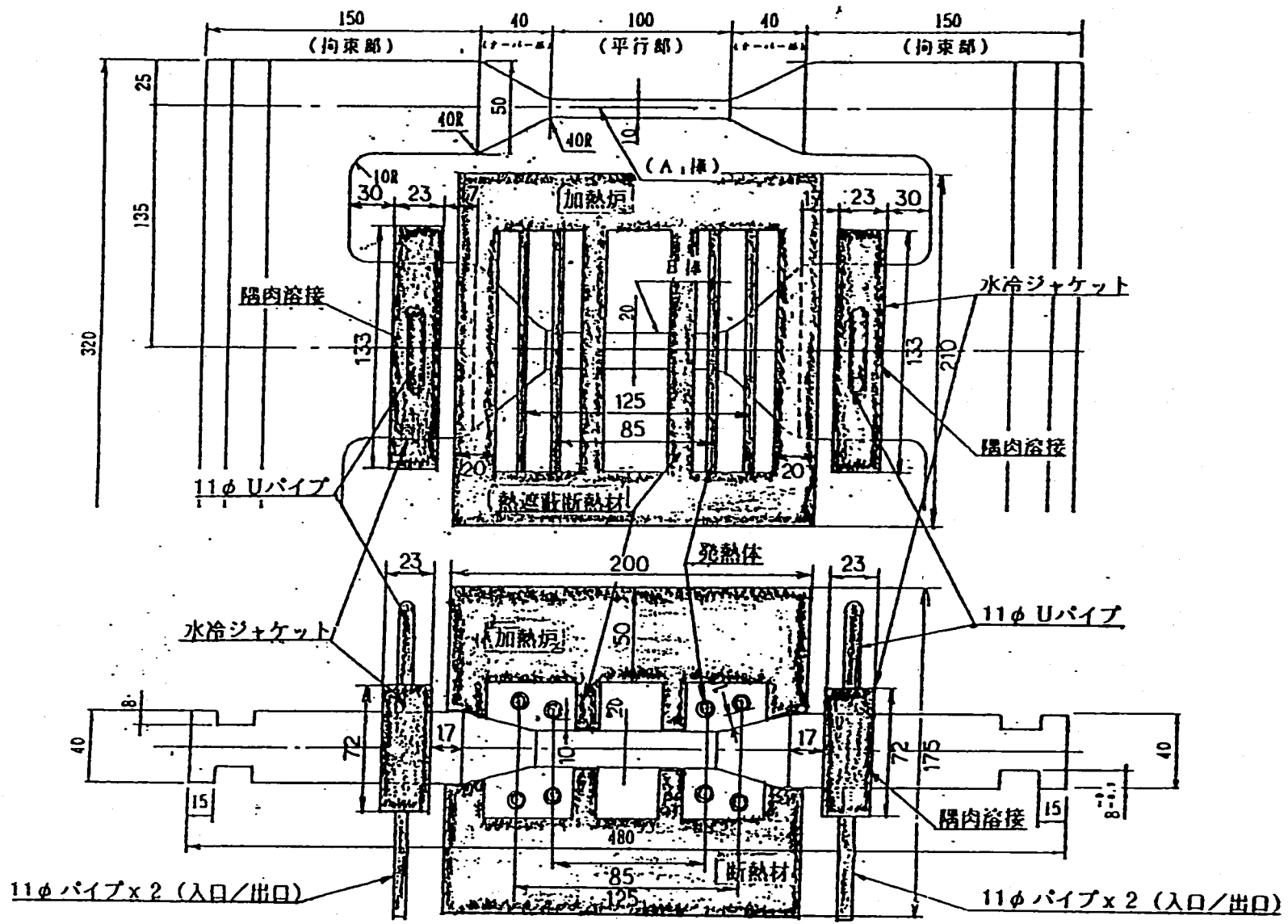
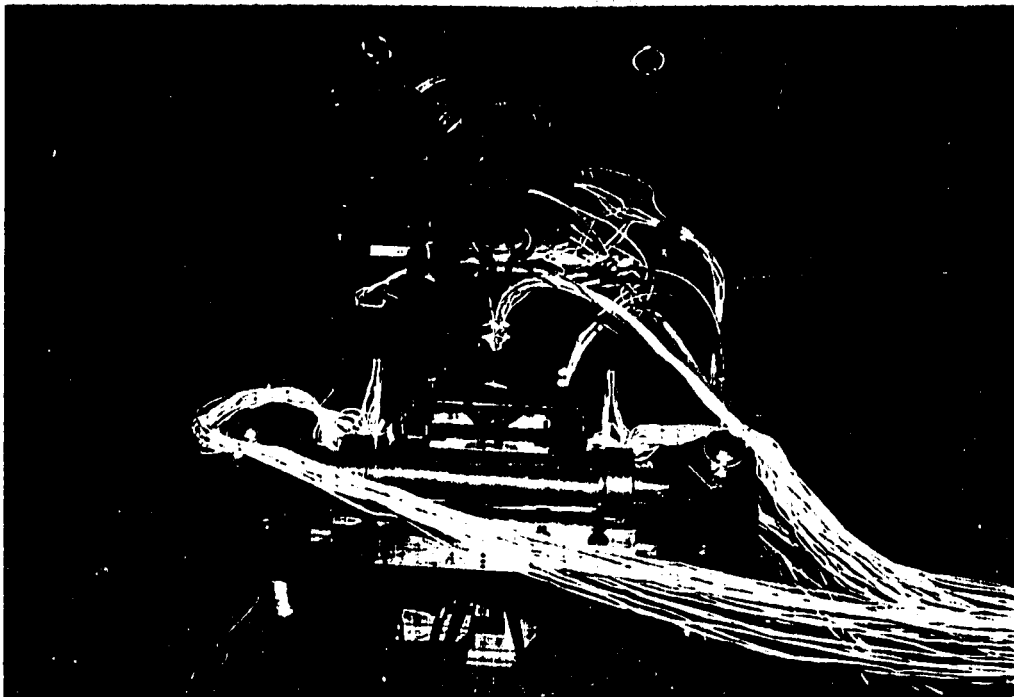


Fig. 1.3-3 Water Cooling System



試験体B棒における加熱ヒータと水冷ジャケットの配置

Fig. 1.3-4 Heater and Cooler Arrangements



Test Equipment View



Heating Furnace Arrangement

Photo 1.3-1 Scene of the Experiment

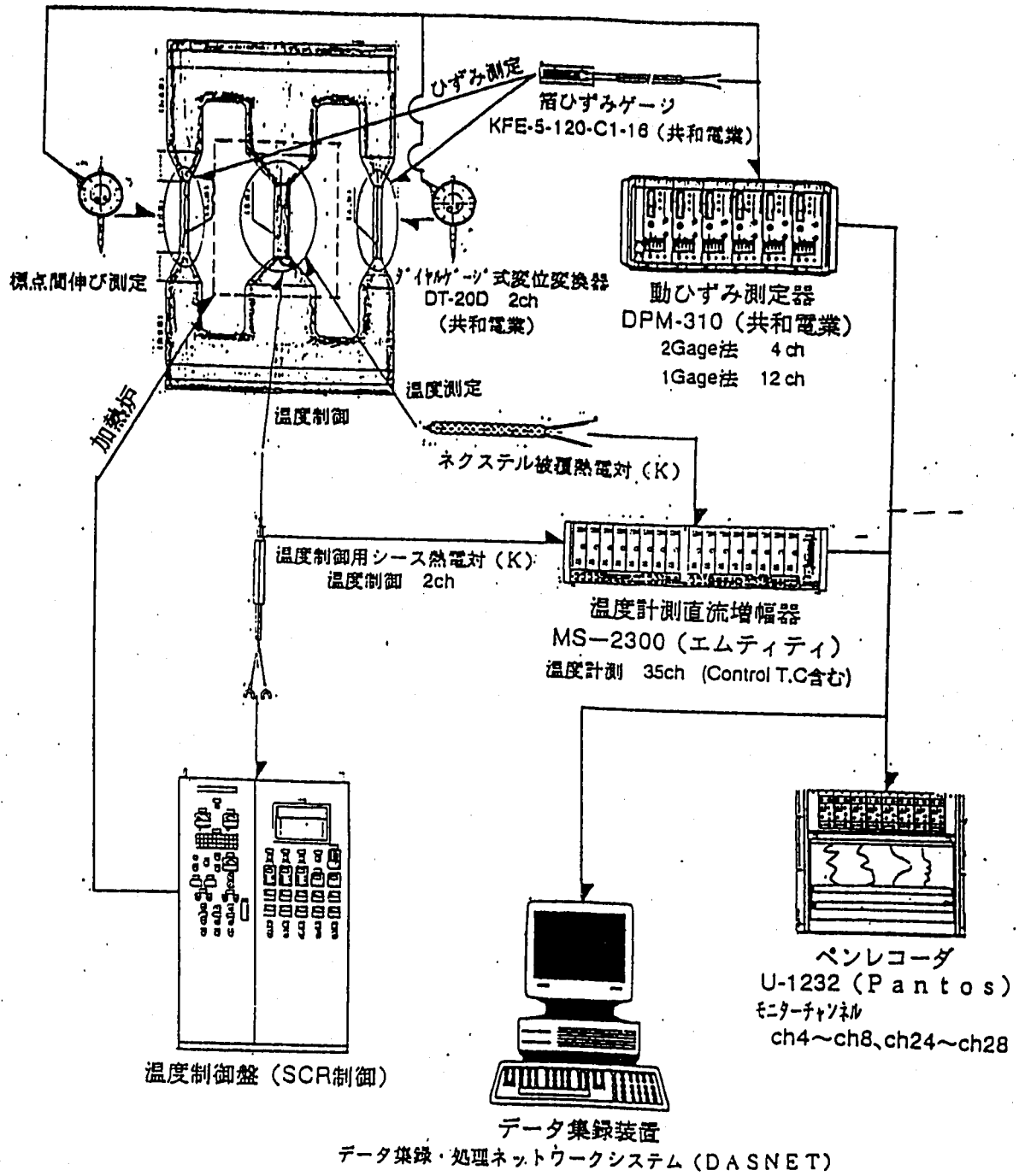
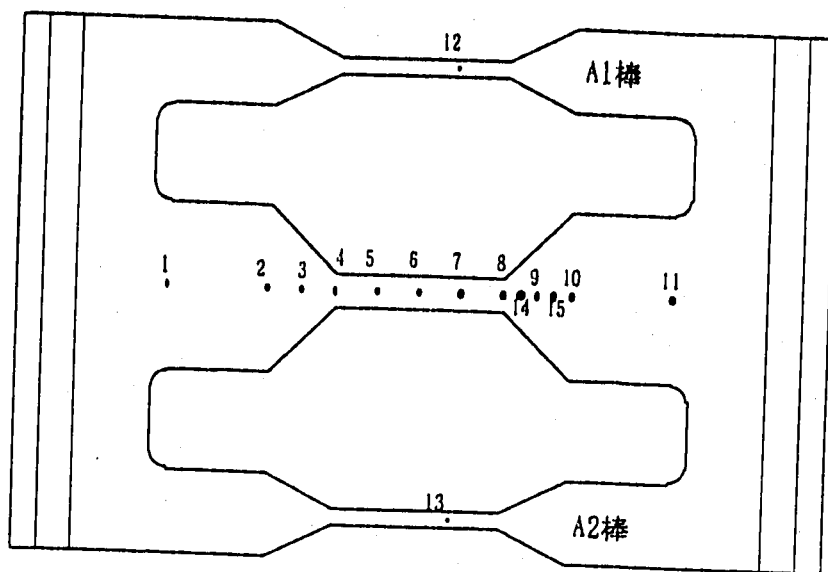
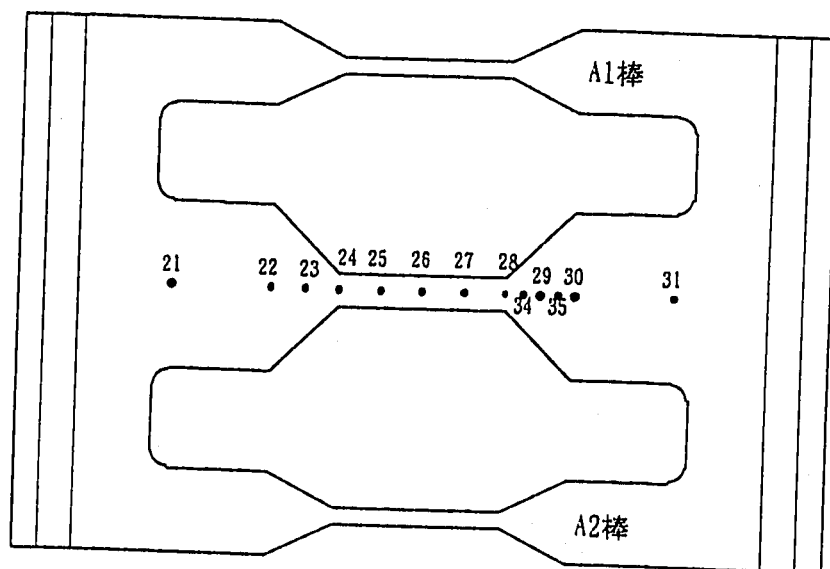


Fig. 1.4-1 Measuring System



供試体上面



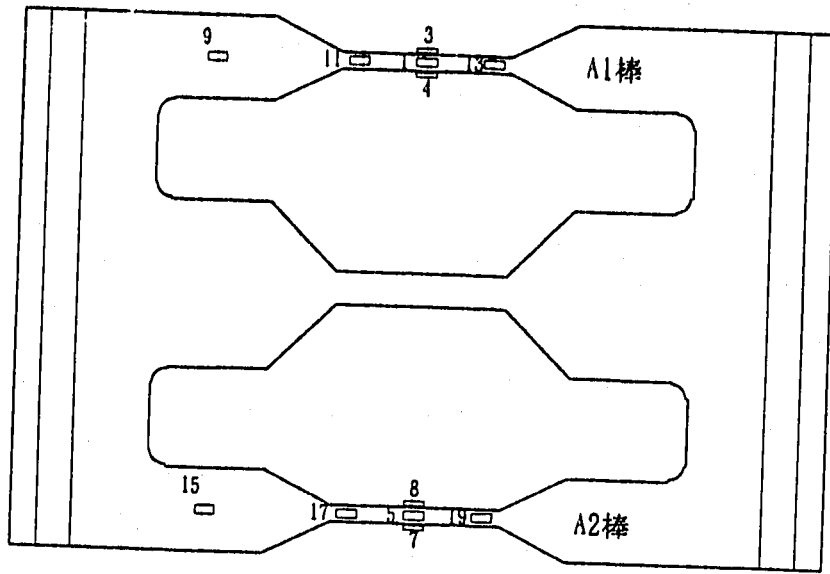
供試体下面

熱電対番号 (TC-No.)

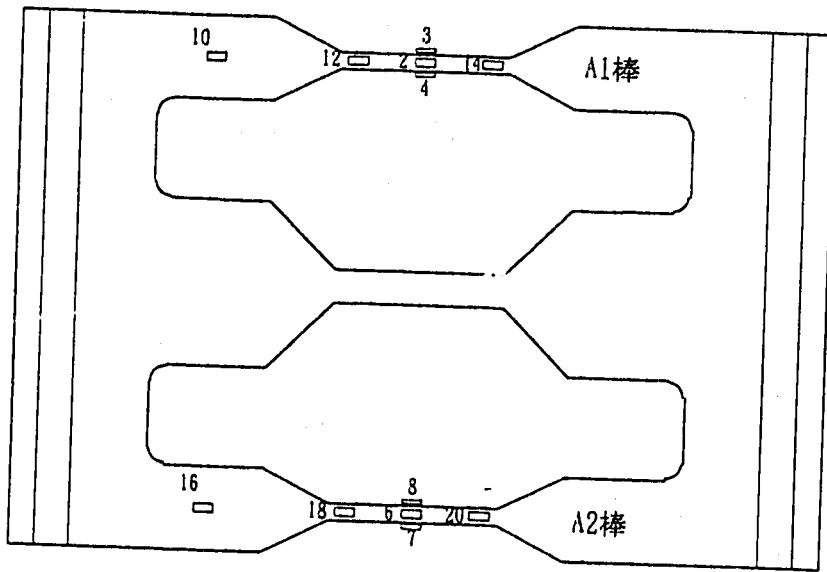
Fig. 1.4-2 Thermo Couple Position

Table 1.4-1 Thermo Couple Position

チャンネル 番号	熱電対 番号	取 付 位 置			備 考
		X[mm]	Y[mm]	Z[mm]	
ch-10	TC-01	-150	0	20	B棒拘束部付根左上面
ch-11	TC-02	-90	0	20	B棒テーパ部左上面
ch-12	TC-03	-70	0	15	B棒テーパ部左上面
ch-13	TC-04	-50	0	10	B棒平行部左端上面
ch-14	TC-05	-25	0	10	B棒平行部左上面
ch-15	TC-06	0	0	10	B棒平行部中央上面
ch-16	TC-07	25	0	10	B棒平行部右上面
ch-17	TC-08	50	0	10	B棒平行部右端上面
ch-18	TC-09	70	0	15	B棒テーパ部右上面
ch-19	TC-10	90	0	20	B棒テーパ部右上面
ch-20	TC-11	150	0	20	B棒拘束部付根左上面
ch-21	TC-12	40	135	10	A <sub>1</sub> 棒平行部上面
ch-22	TC-13	40	-135	10	A <sub>2</sub> 棒平行部上面
ch-23	TC-14	60	0	12.5	B棒テーパ部右上面
ch-24	TC-15	80	0	17.5	B棒テーパ部右上面
ch-25	TC-21	-150	0	-20	B棒拘束部付根左下面
ch-26	TC-22	-90	0	-20	B棒テーパ部左下面
ch-27	TC-23	-70	0	-15	B棒テーパ部左下面
ch-28	TC-24	-50	0	-10	B棒平行部左端下面
ch-29	TC-25	-25	0	-10	B棒平行部左下面
ch-30	TC-26	0	0	-10	B棒平行部中央下面
ch-31	TC-27	25	0	-10	B棒平行部右下面
ch-32	TC-28	50	0	-10	B棒平行部右端下面
ch-33	TC-29	70	0	-15	B棒テーパ部右下面
ch-34	TC-30	90	0	-20	B棒テーパ部右下面
ch-35	TC-31	150	0	-20	B棒拘束部付根左下面
ch-36	TC-32	-50	0	12	B棒平行部左端上面 (温度制御用)
ch-37	TC-33	40	0	12	B棒平行部右端上面 (温度制御用)
ch-38	TC-34	60	0	-12.5	B棒テーパ部右下面
ch-39	TC-35	80	0	-17.5	B棒テーパ部右下面



供試体上面



供試体下面

ひずみゲージ番号 (RTG-No.)

Fig. 1.4-3 Strain Gauge Position

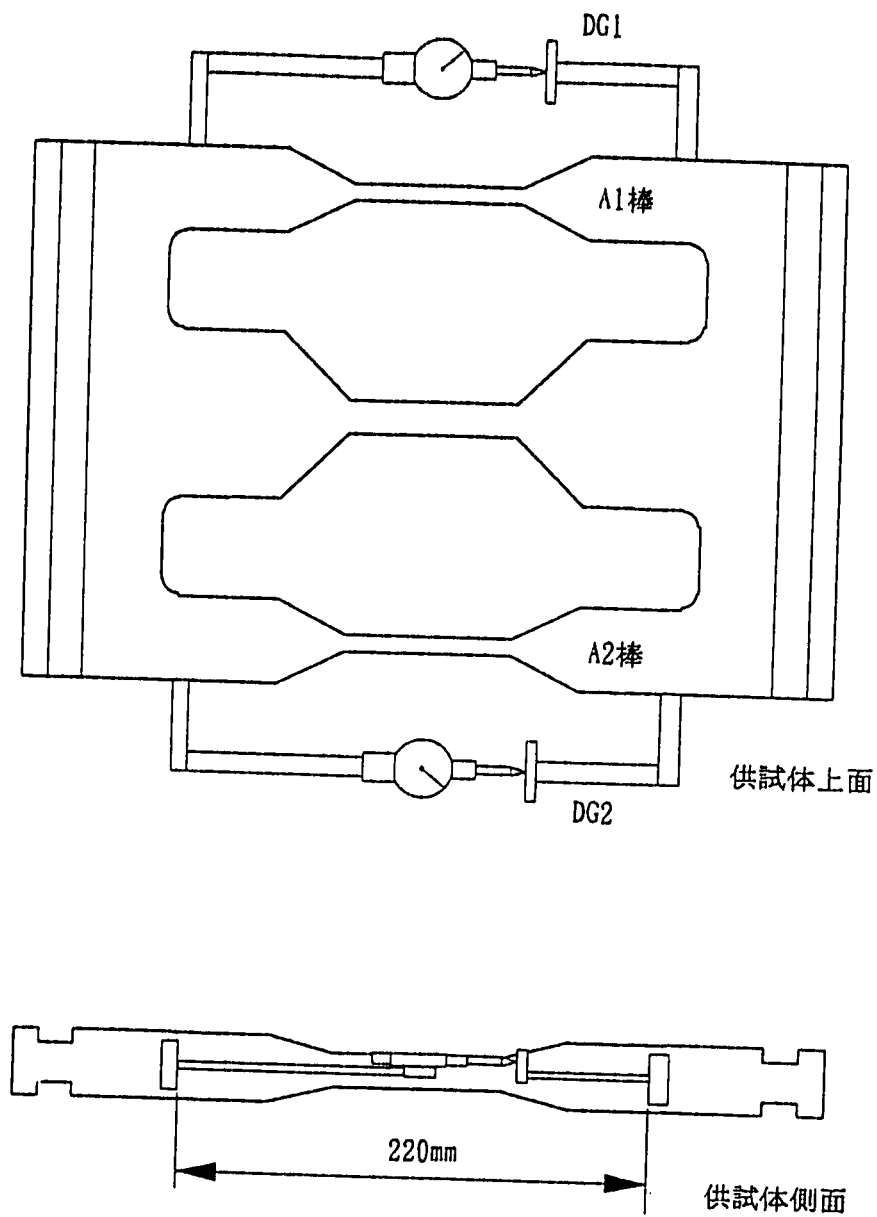
Table 1.4-2 Strain Gauge Position

チャンネル 番号	ゲージ 番号	取 付 位 置			備 考
		X[mm]	Y[mm]	Z[mm]	
ch-40	RTG-01	0	135	10	A <sub>1</sub> 棒平行部中央上面 (2ゲージ法)
	RTG-02	0	135	-10	A <sub>1</sub> 棒平行部中央下面 (2ゲージ法)
ch-41	RTG-03	0	140	0	A <sub>1</sub> 棒平行部中央外面 (2ゲージ法)
	RTG-04	0	130	0	A <sub>1</sub> 棒平行部中央内面 (2ゲージ法)
ch-42	RTG-05	0	-135	10	A <sub>2</sub> 棒平行部中央上面 (2ゲージ法)
	RTG-06	0	-135	-10	A <sub>2</sub> 棒平行部中央下面 (2ゲージ法)
ch-43	RTG-07	0	-140	0	A <sub>2</sub> 棒平行部中央外面 (2ゲージ法)
	RTG-08	0	-130	0	A <sub>2</sub> 棒平行部中央内面 (2ゲージ法)
ch-44	RTG-09	-125	135	20	A <sub>1</sub> 棒拘束部左上面
ch-45	RTG-10	-125	135	-20	A <sub>1</sub> 棒拘束部左下面
ch-46	RTG-11	-40	135	10	A <sub>1</sub> 棒平行部左上面
ch-47	RTG-12	-40	135	-10	A <sub>1</sub> 棒平行部左下面
ch-48	RTG-13	40	135	10	A <sub>1</sub> 棒平行部右上面
ch-49	RTG-14	40	135	-10	A <sub>1</sub> 棒平行部右下面
ch-50	RTG-15	-125	-135	20	A <sub>2</sub> 棒拘束部左上面
ch-51	RTG-16	-125	-135	-20	A <sub>2</sub> 棒拘束部左下面
ch-52	RTG-17	-40	-135	10	A <sub>2</sub> 棒平行部左上面
ch-53	RTG-18	-40	-135	-10	A <sub>2</sub> 棒平行部左下面
ch-54	RTG-19	40	-135	10	A <sub>2</sub> 棒平行部右上面
ch-55	RTG-20	40	-135	-10	A <sub>2</sub> 棒平行部右下面

Table 1.4-3 Dial Gauge Position

チャンネル番号	ゲージ番号	備 考
ch-56	DG-1	A <sub>1</sub> 棒側 (標点間距離280mm)
ch-57	DG-2	A <sub>2</sub> 棒側 (標点間距離280mm)





ダイヤルゲージ取付位置

Fig. 1.4-4 Dial Gauge Position

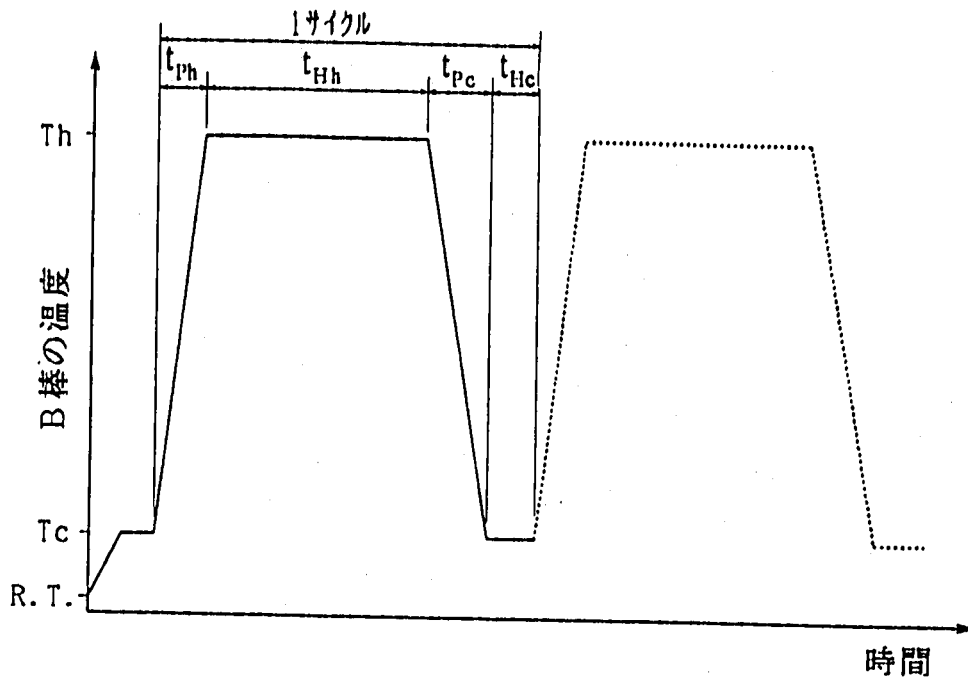


Fig. 1.5-1 Loading Pattern for TR-04

Table 1.5-1 Time Duration for TR-04

	昇温時間 $t_{ph}$	高温保持 $t_{Hh}$	降温時間 $t_{pc}$	低温保持 $t_{Hc}$	1サイクル あたり
TR-04	0.5h	5.0h	0.5h	0.5h	6.5h

Table 1.5-2 Thermal Conditions for TR-04

	室温 R. T.	最高温度 $T_h$	最低温度 $T_c$
TR-04	20°C程度	600°C	100°C

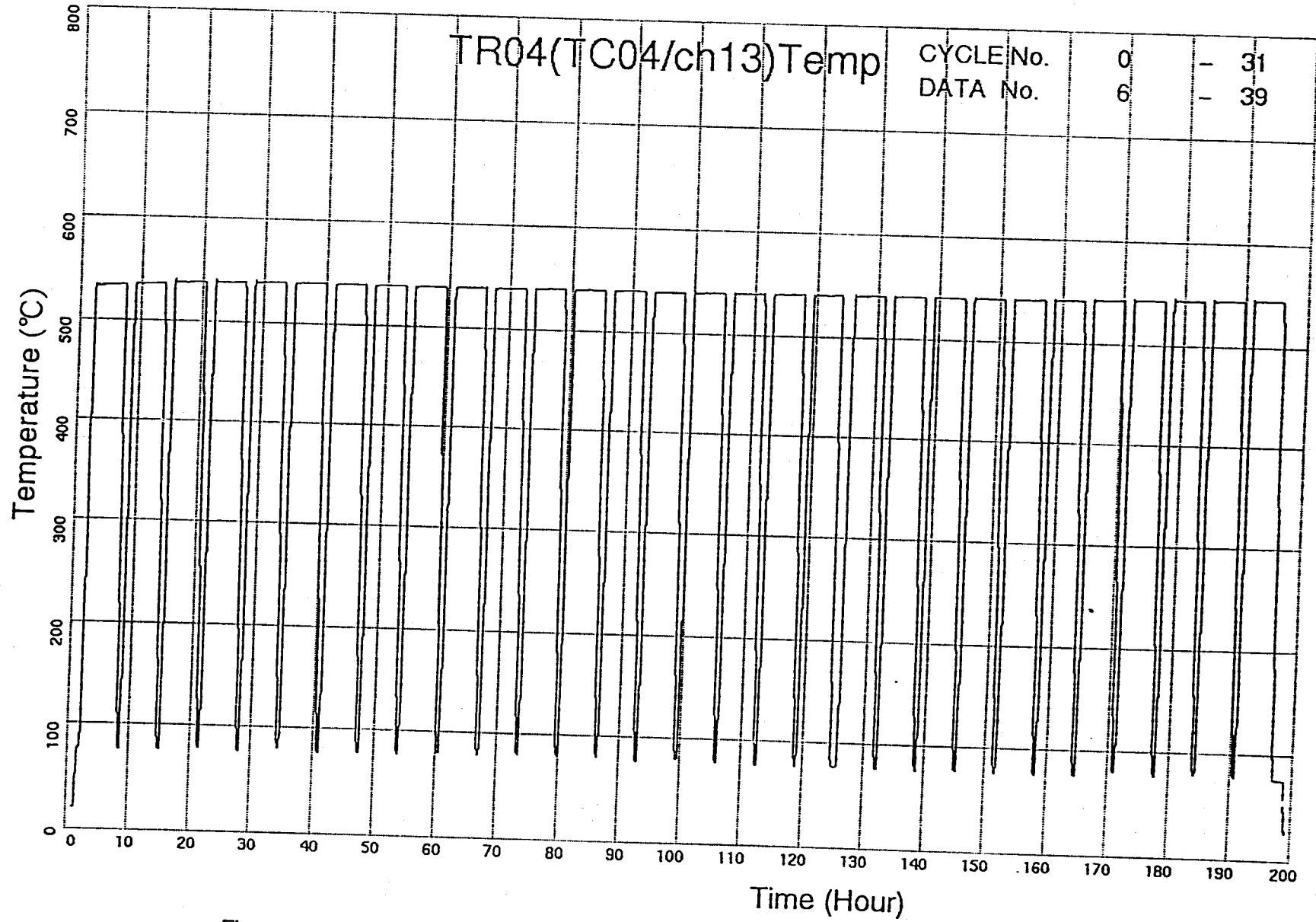


Fig. 2.2-1 Temperature History (TC-No.4 / Parallel Reduced Section / Top Face)

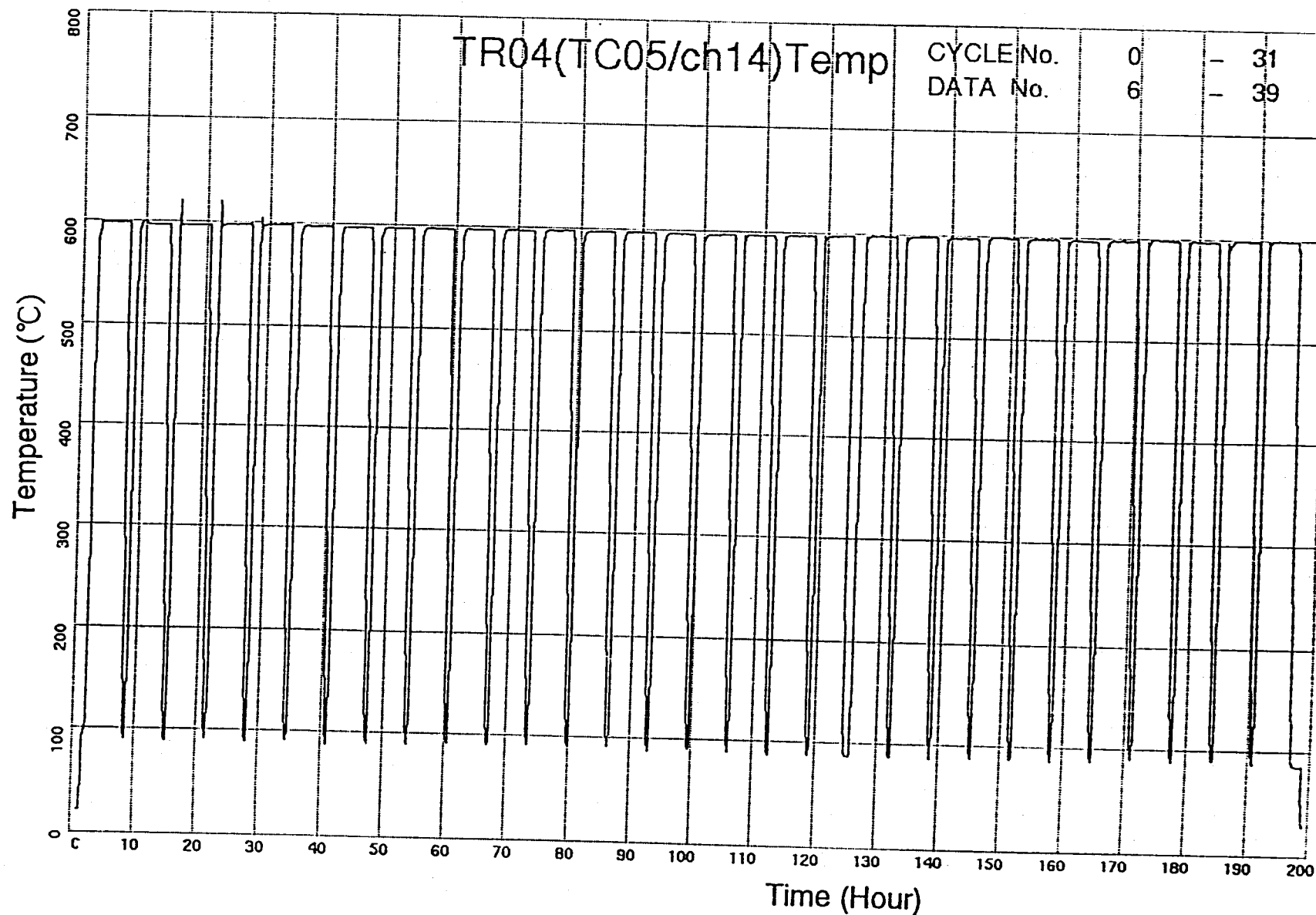


Fig. 2.2-2 Temperature History (TC-No.5 / Parallel Reduced Section / Top Face)

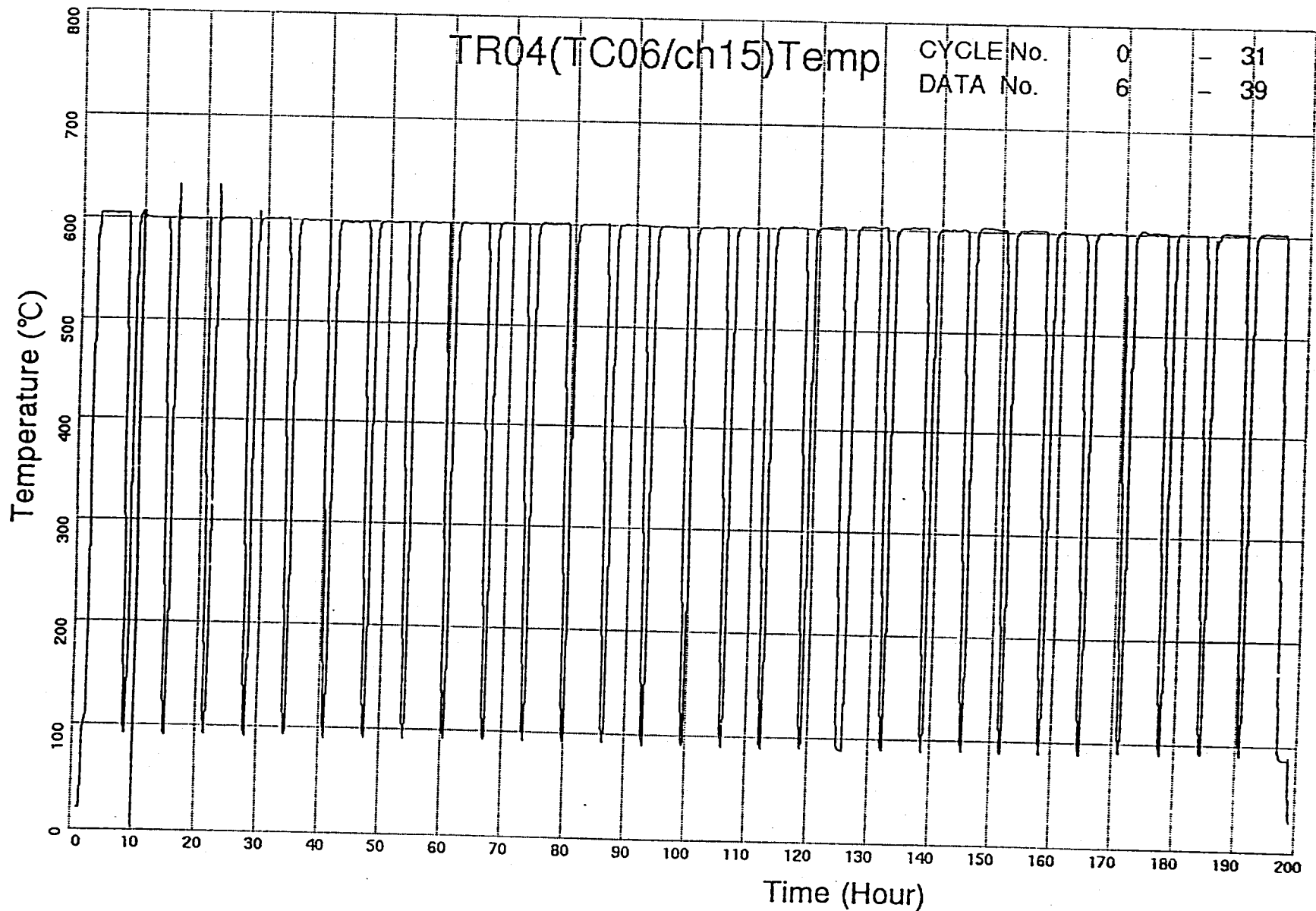


Fig. 2.2-3 Temperature History (TC-No.6 / Parallel Reduced Section / Top Face)

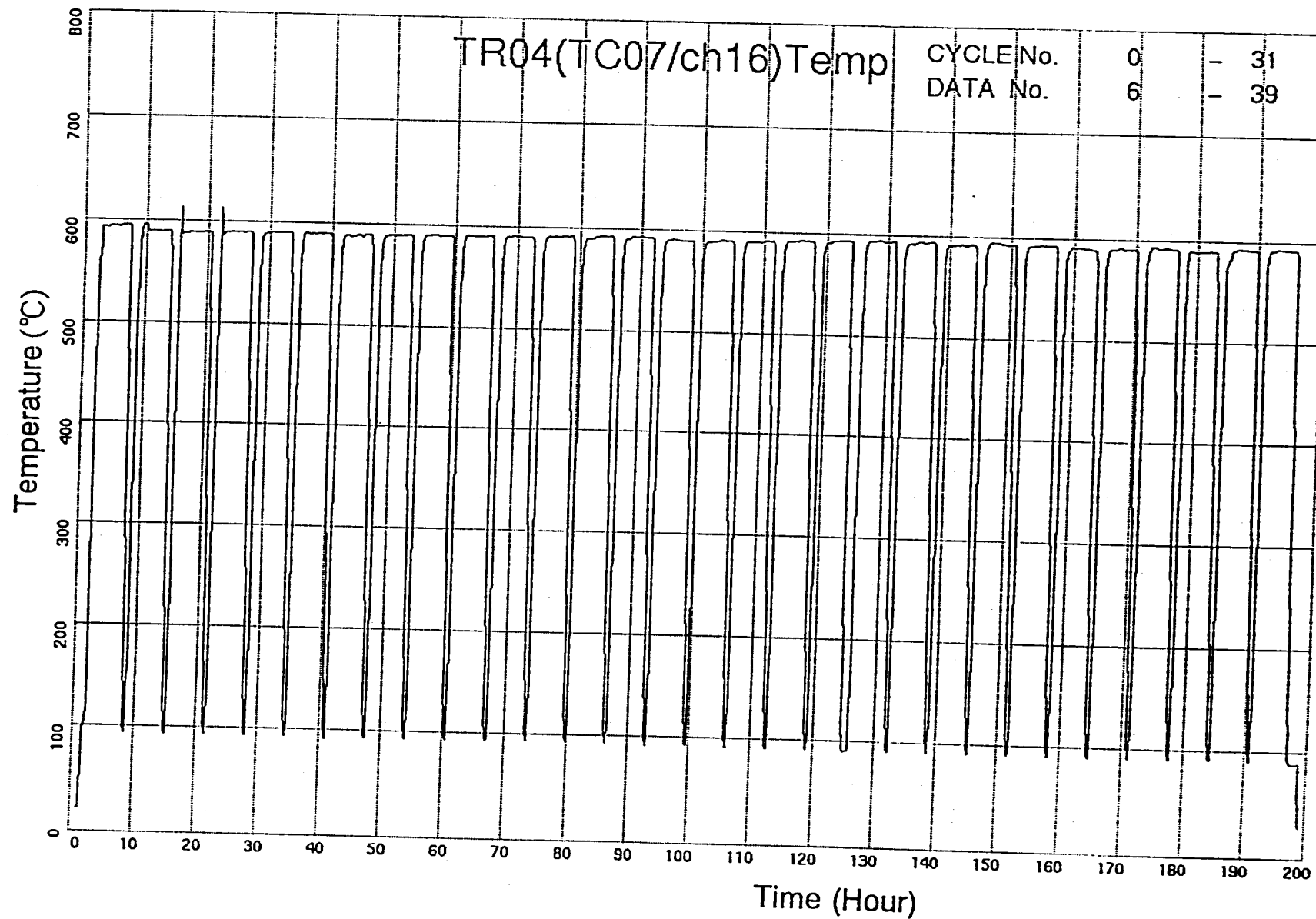


Fig. 2.2-4 Temperature History (TC-No.7 / Parallel Reduced Section / Top Face)

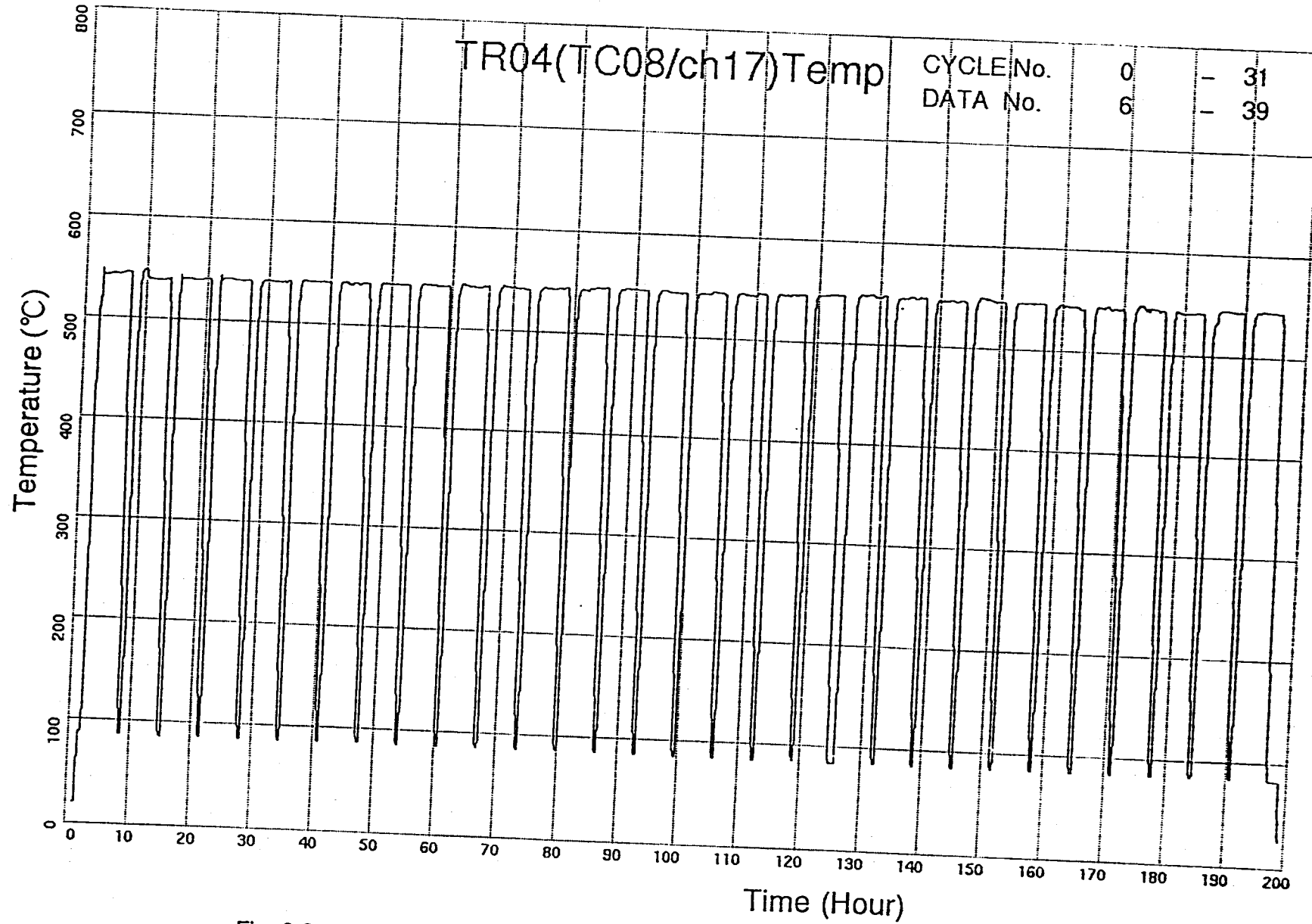


Fig. 2.2-5 Temperature History (TC-No.8 / Parallel Reduced Section / Top Face)

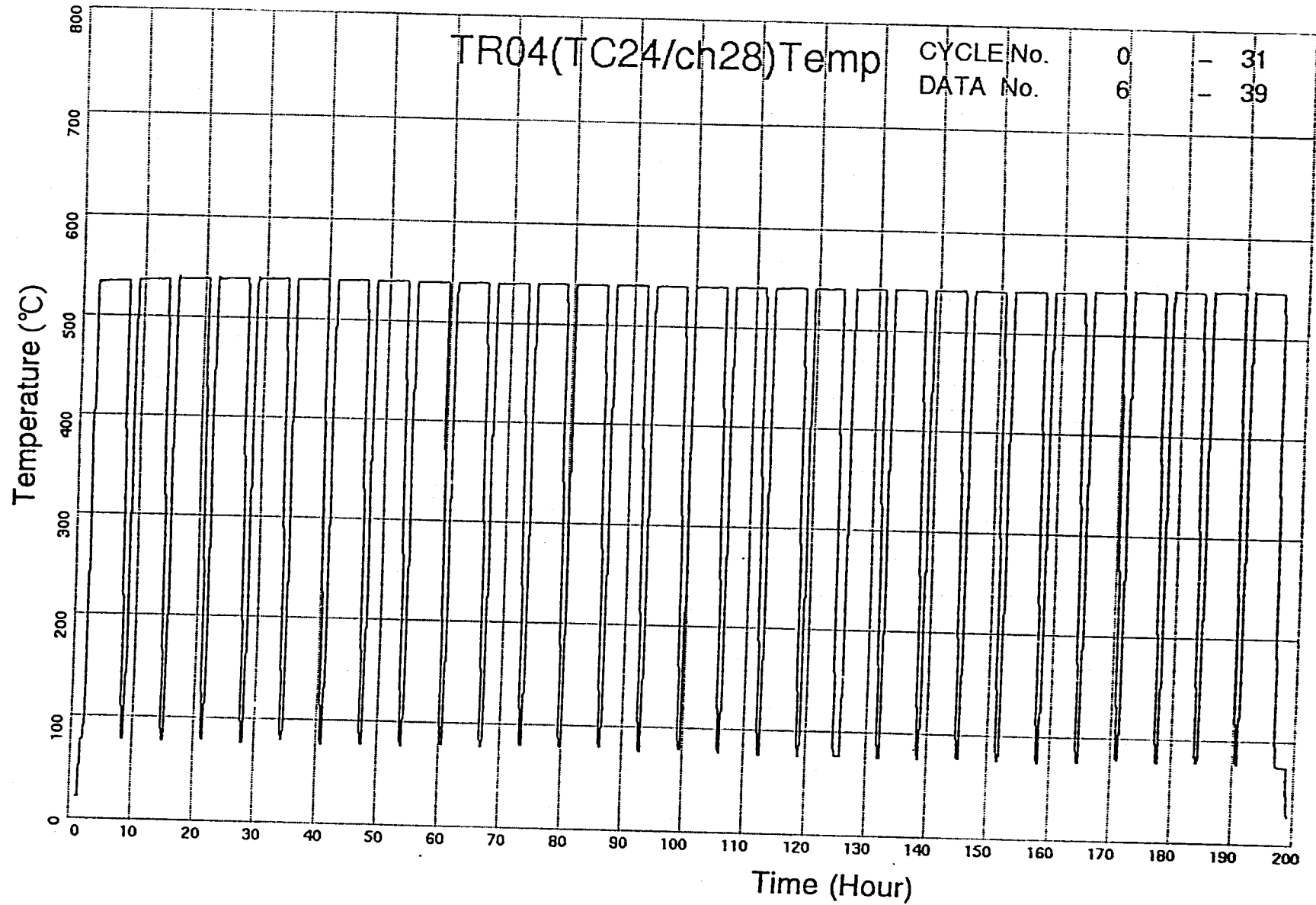


Fig. 2.2-6 Temperature History (TC-No.24 / Parallel Reduced Section / Under Face)



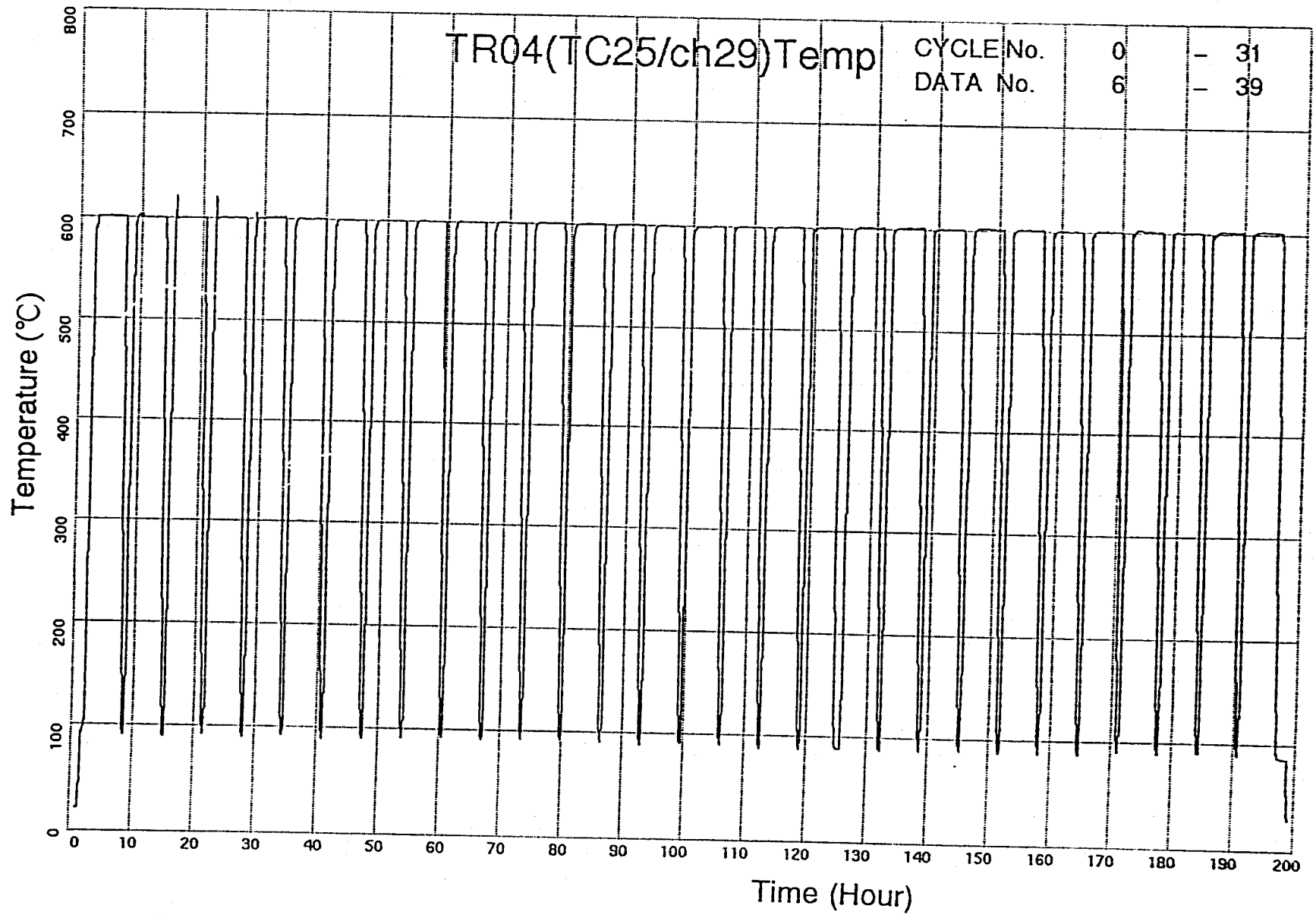


Fig. 2.2-7 Temperature History (TC-No.25 / Parallel Reduced Section / Under Face)

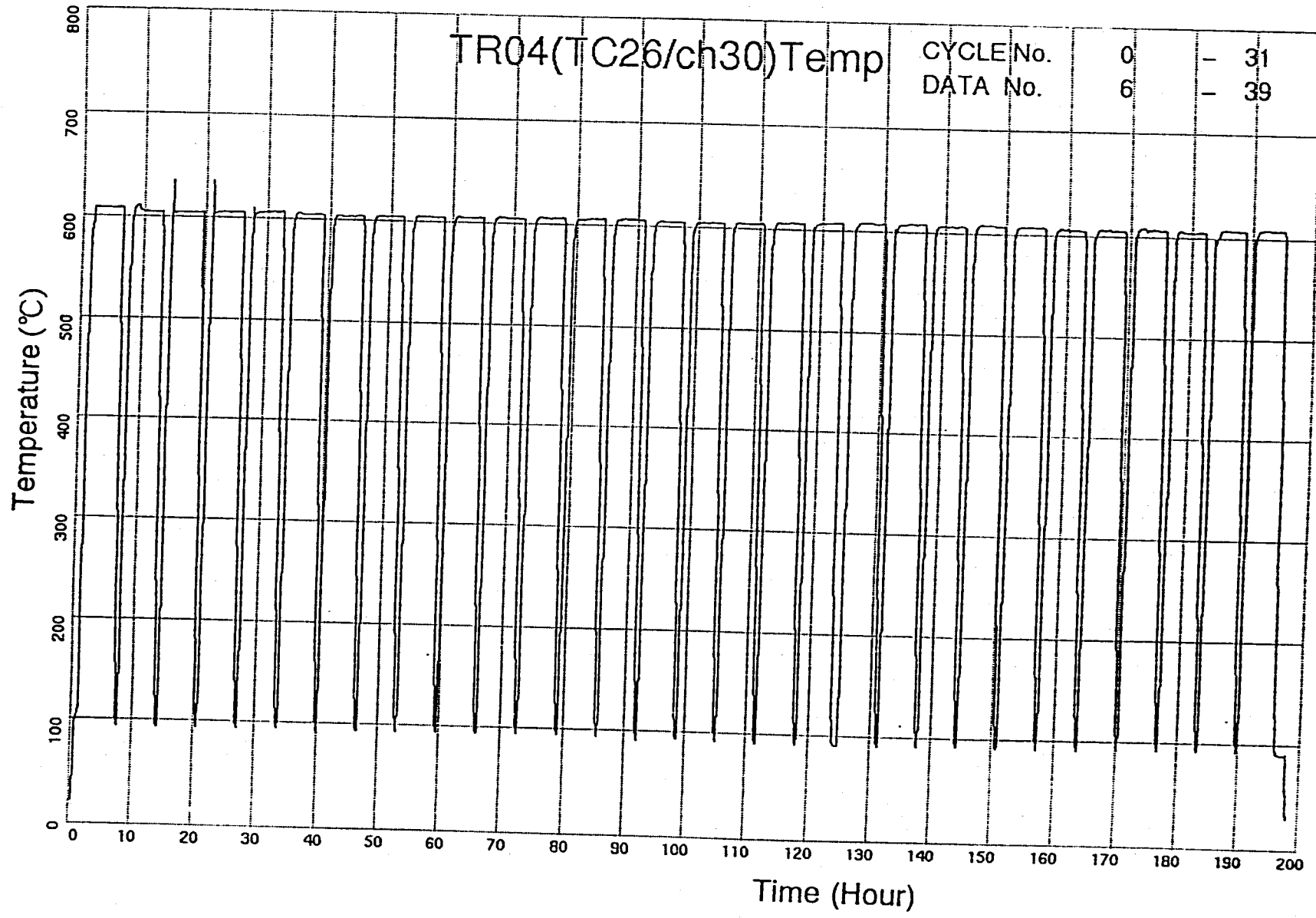


Fig. 2.2-8 Temperature History (TC-No.26 / Parallel Reduced Section / Under Face)

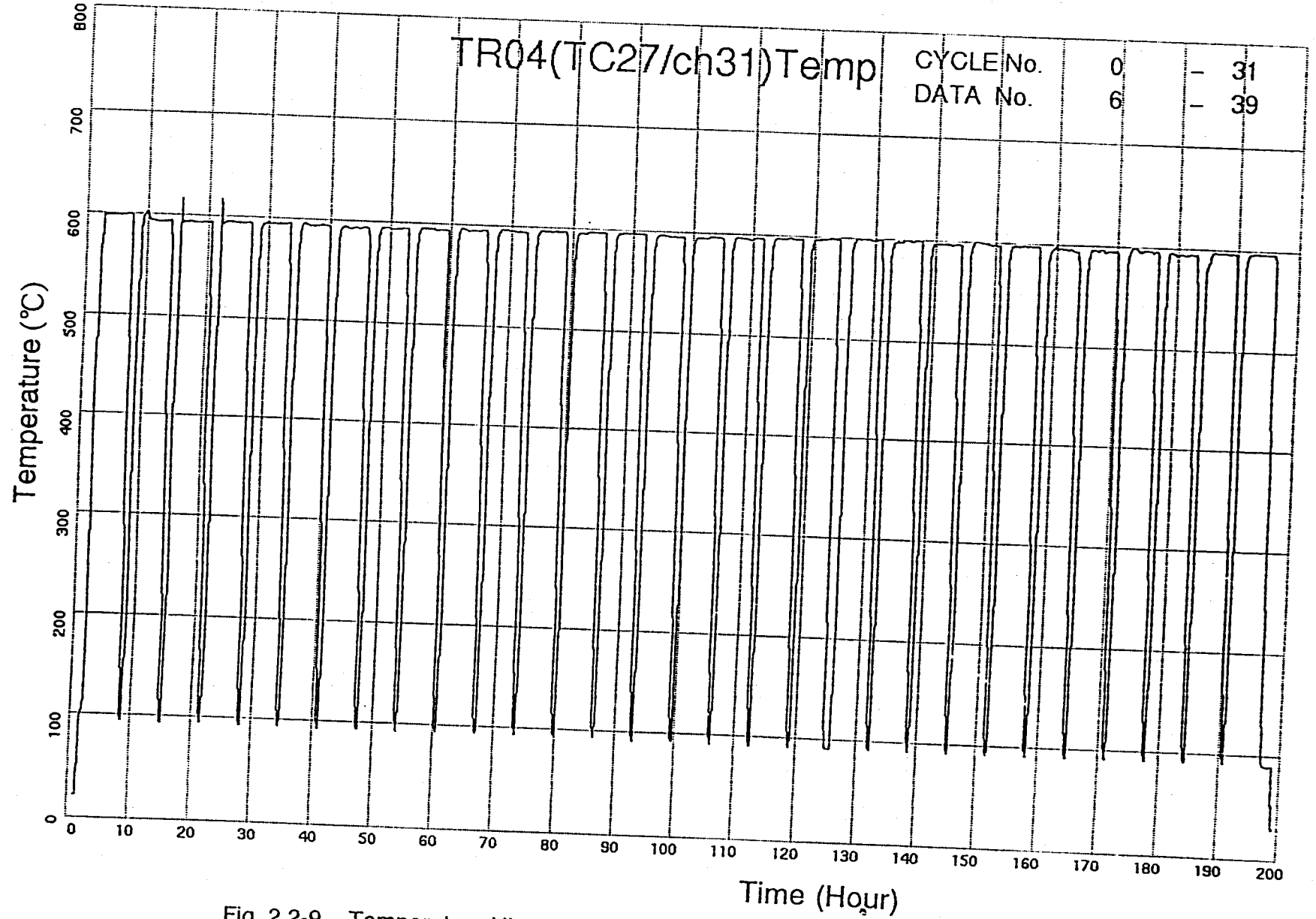


Fig. 2.2-9 Temperature History (TC-No.27 / Parallel Reduced Section / Under Face)

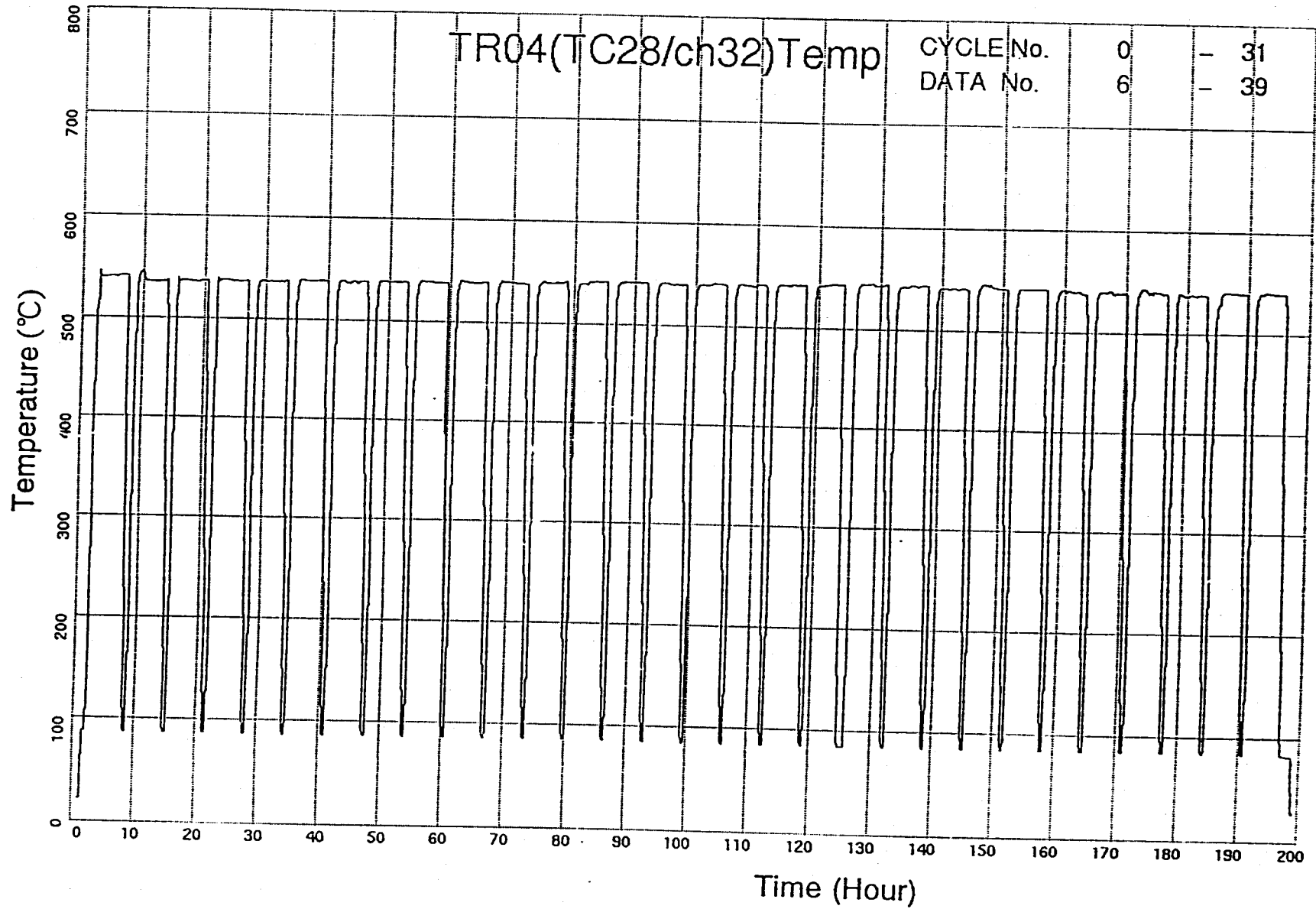


Fig. 2.2-10 Temperature History (TC-No.28 / Parallel Reduced Section / Under Face)

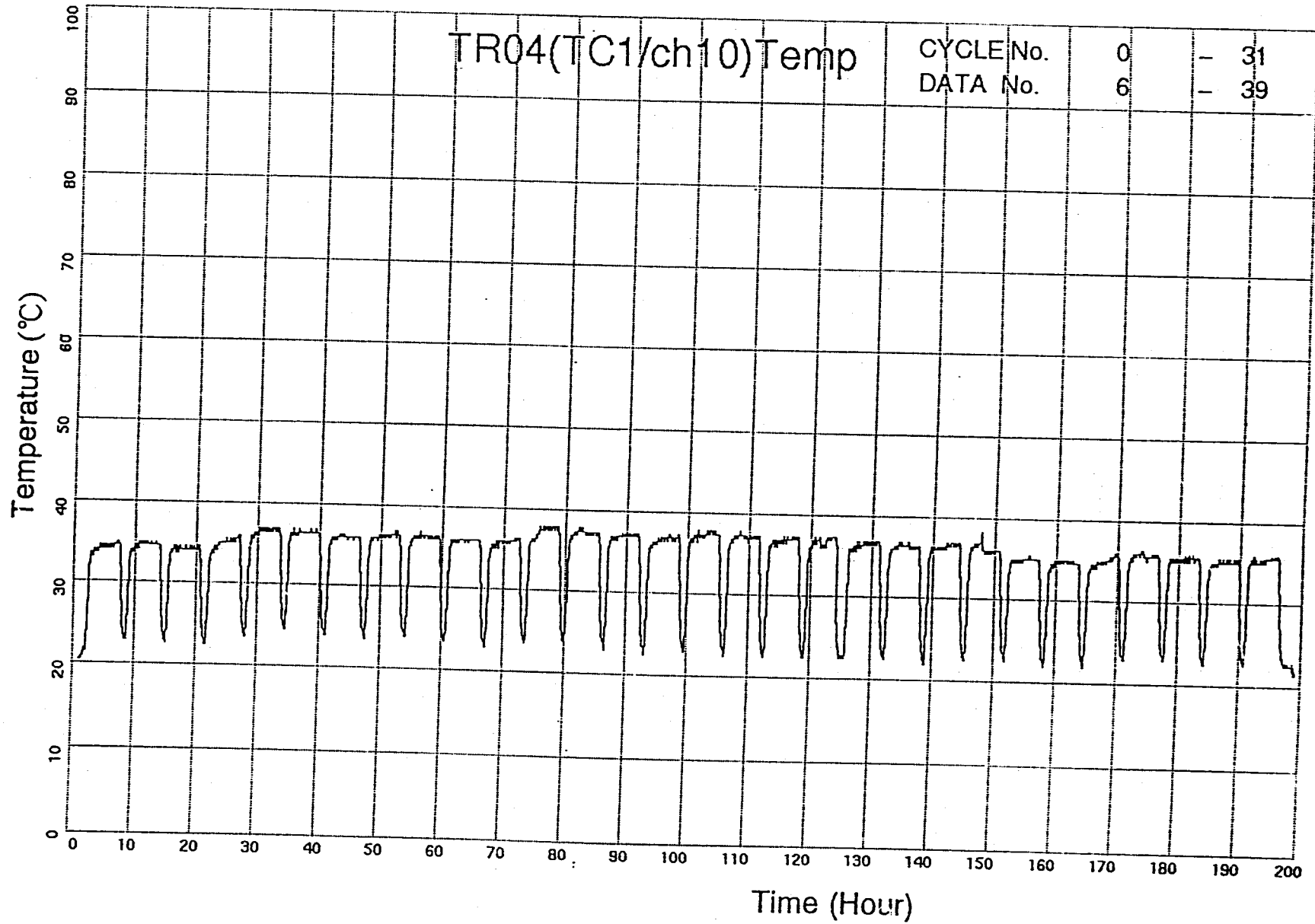


Fig. 2.2-11 Temperature History (TC-No.1 / Restraint Section / Top Face)

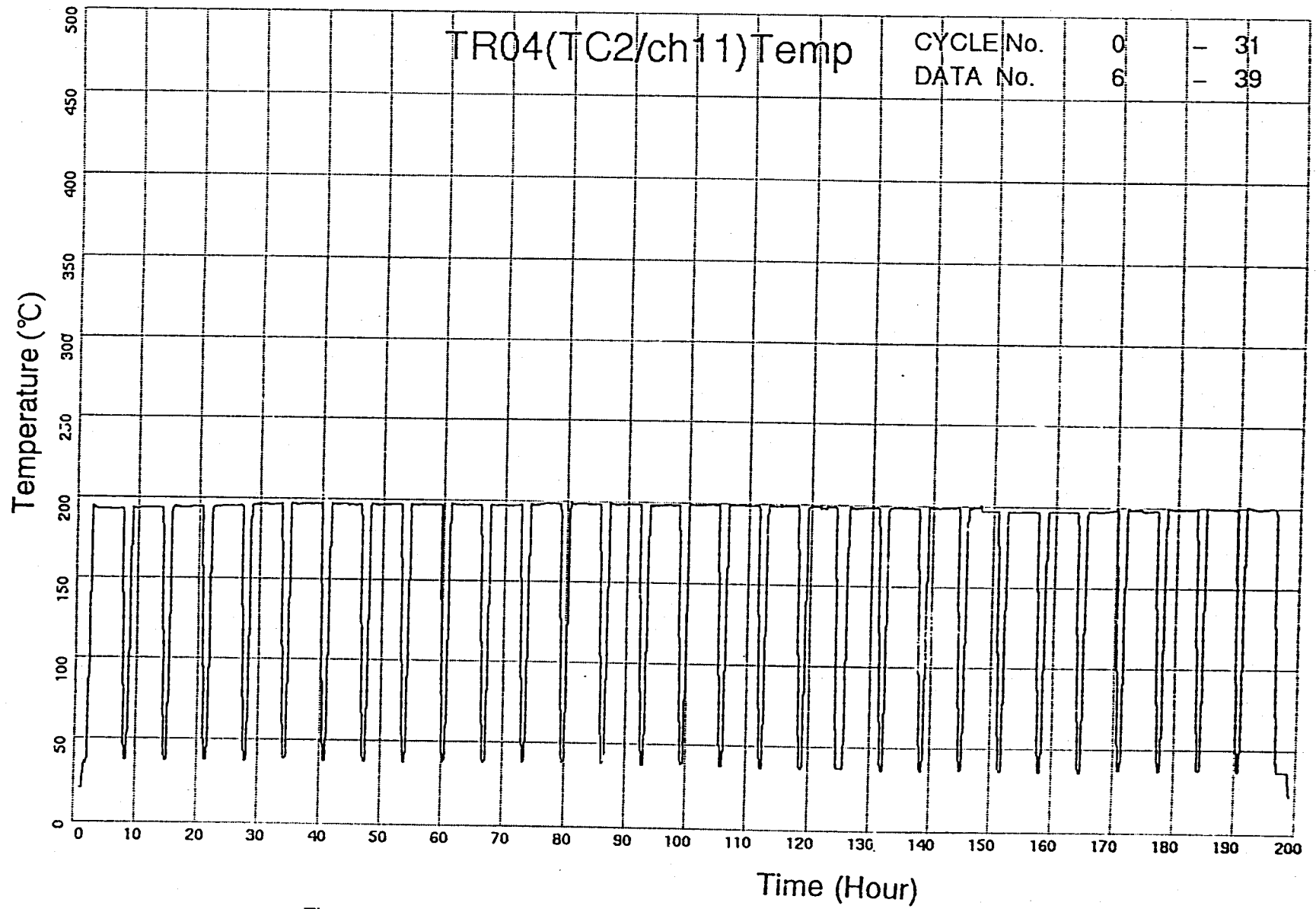


Fig. 2.2-12 Temperature History (TC-No.2 / Restraint Section / Top Face)

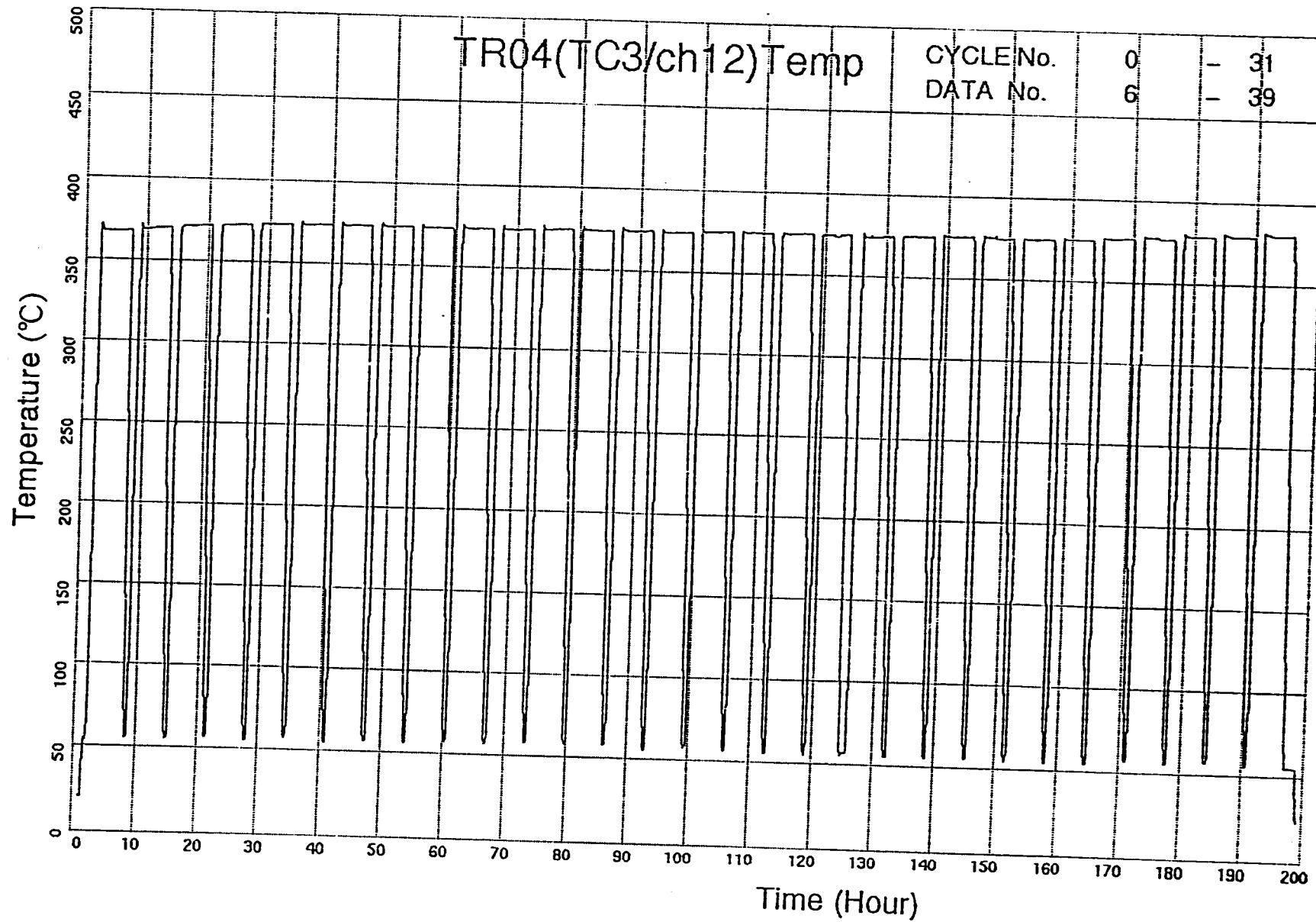


Fig. 2.2-13 Temperature History (TC-No.3 / Taper Section / Top Face)

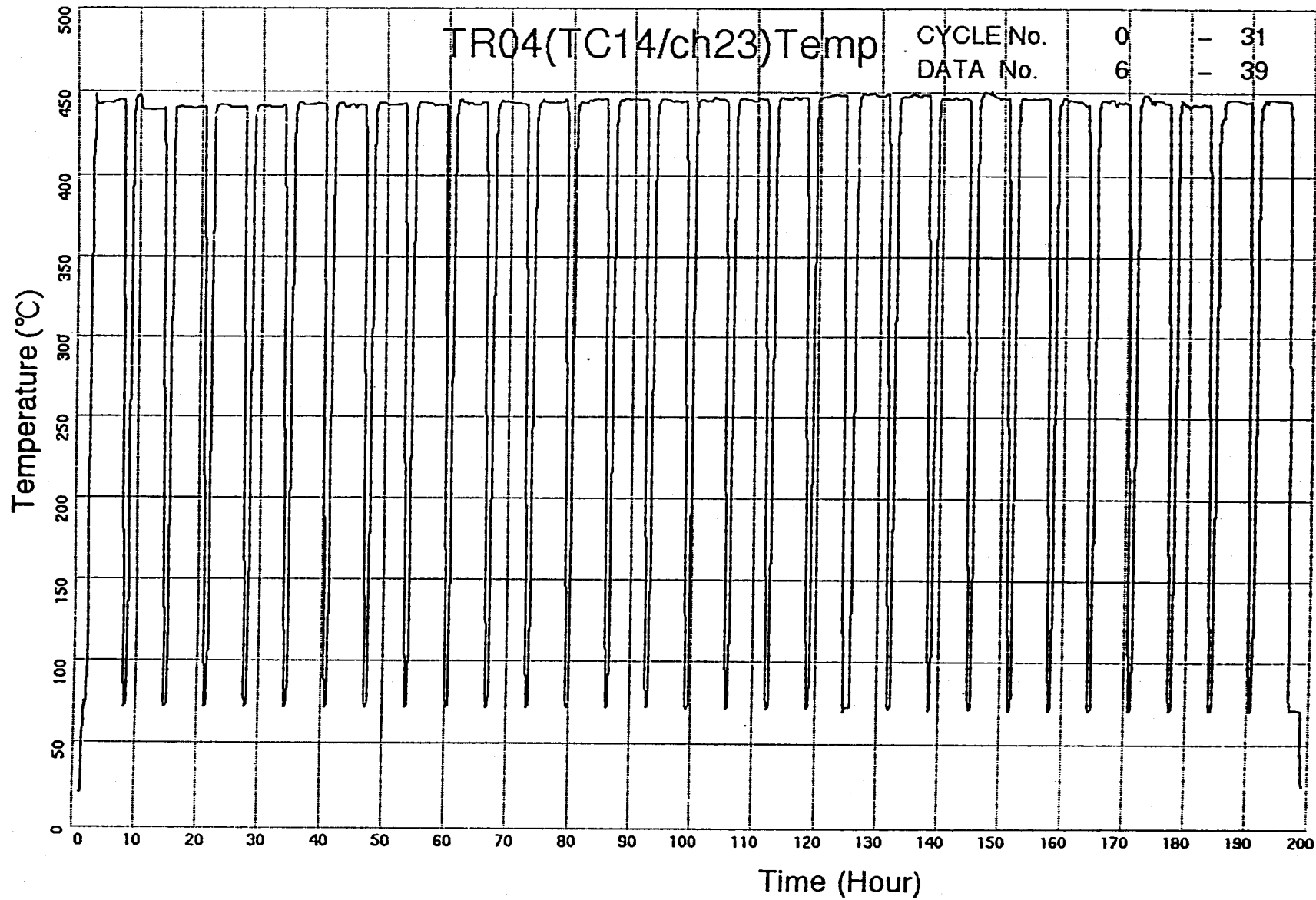


Fig. 2.2-14 Temperature History (TC-No.14 / Taper Section / Top Face)



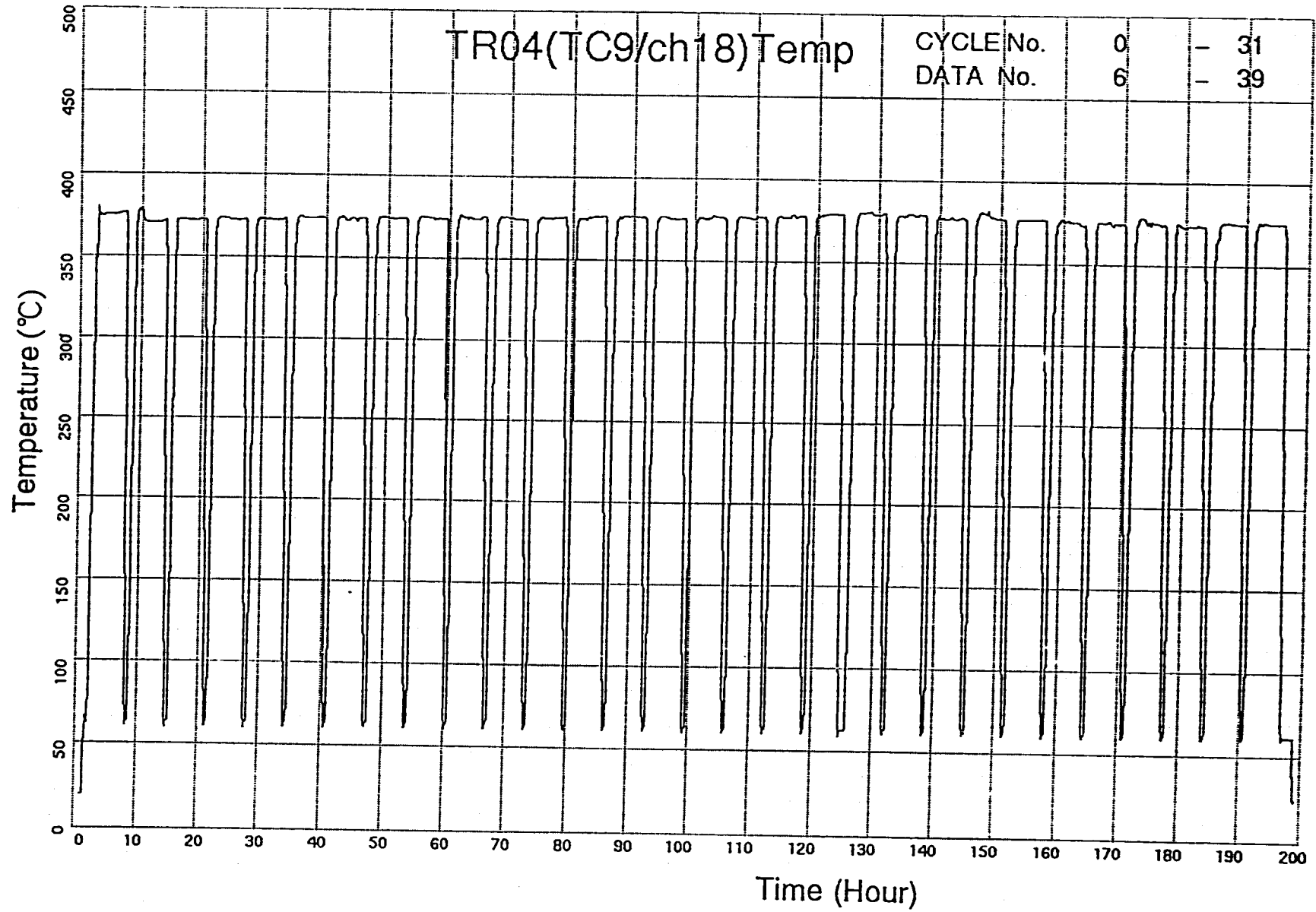


Fig. 2.2-15 Temperature History (TC-No.9 / Taper Section / Top Face)

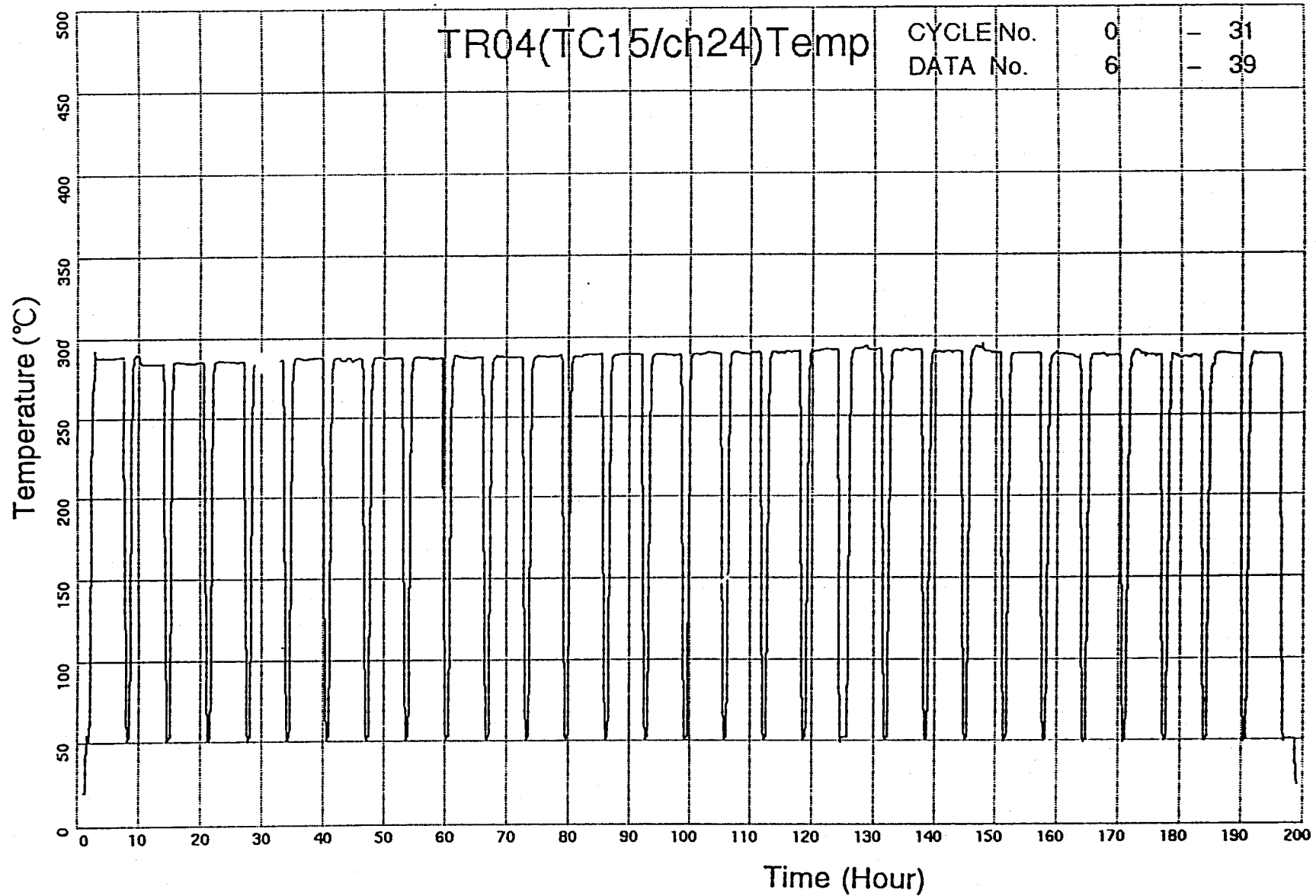


Fig. 2.2-16 Temperature History (TC-No.15 / Taper Section / Top Face)

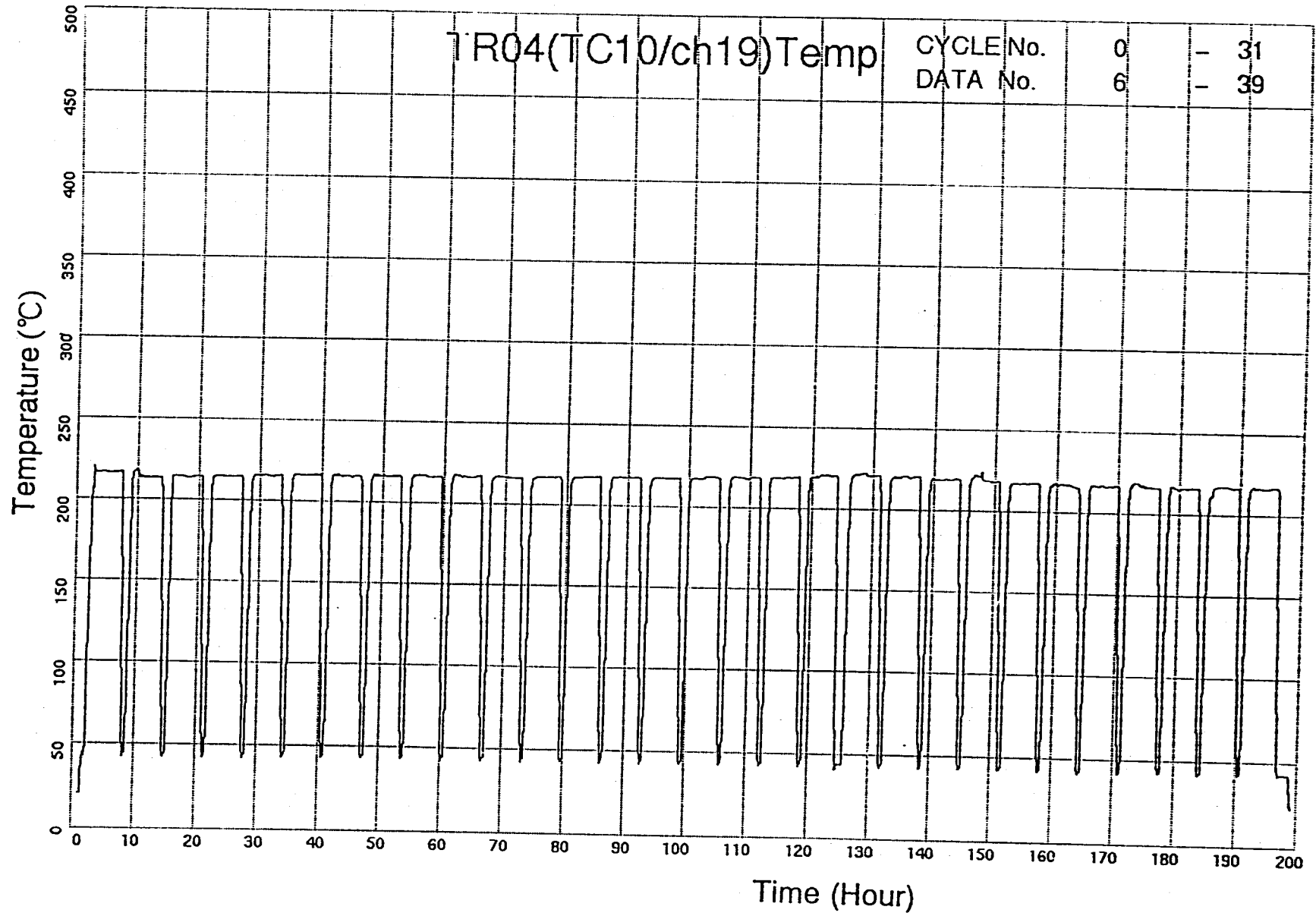


Fig. 2.2-17 Temperature History (TC-No.10 / Restraint Section / Top Face)

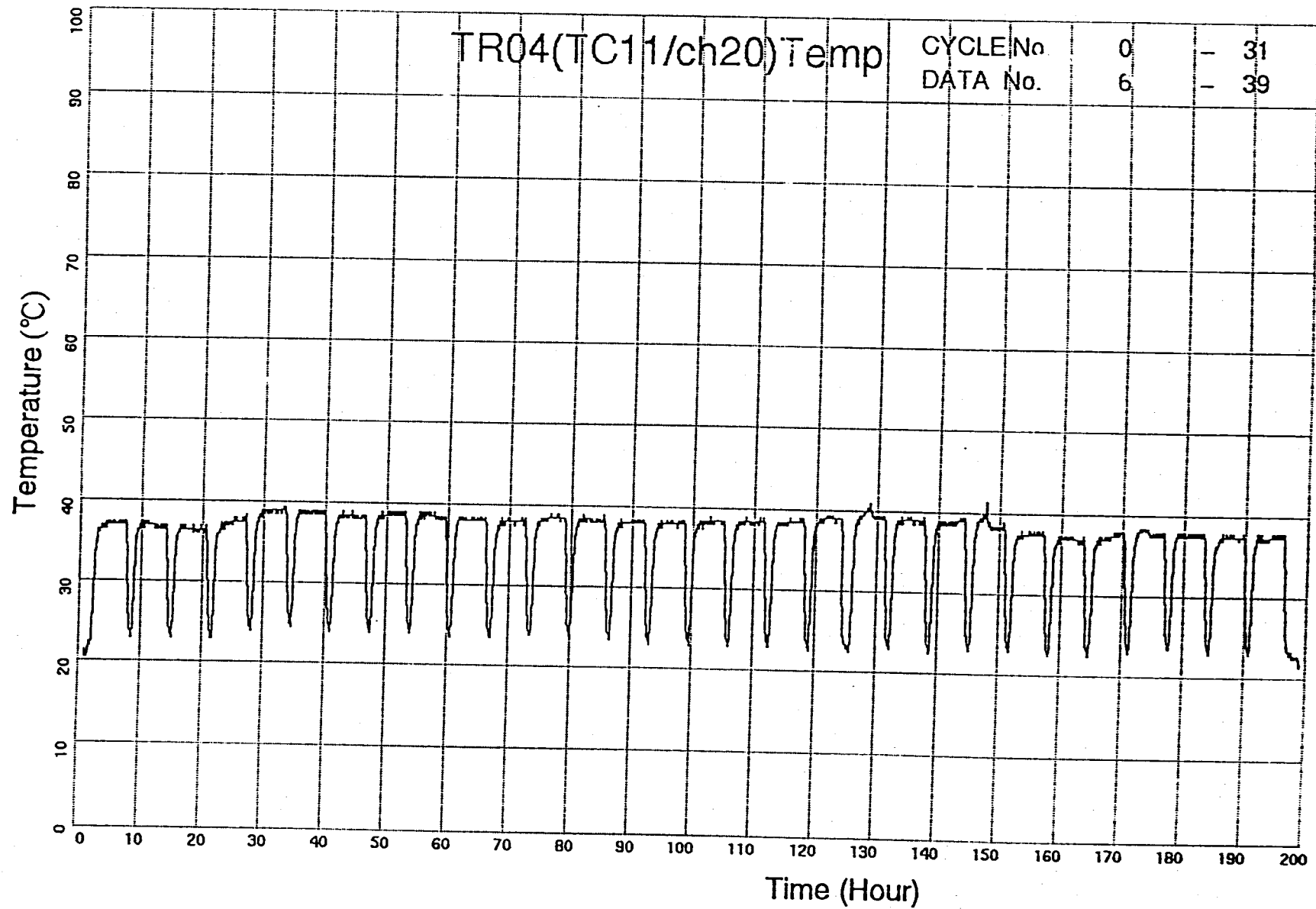


Fig. 2.2-18 Temperature History (TC-No.11 / Restraint Section / Top Face)

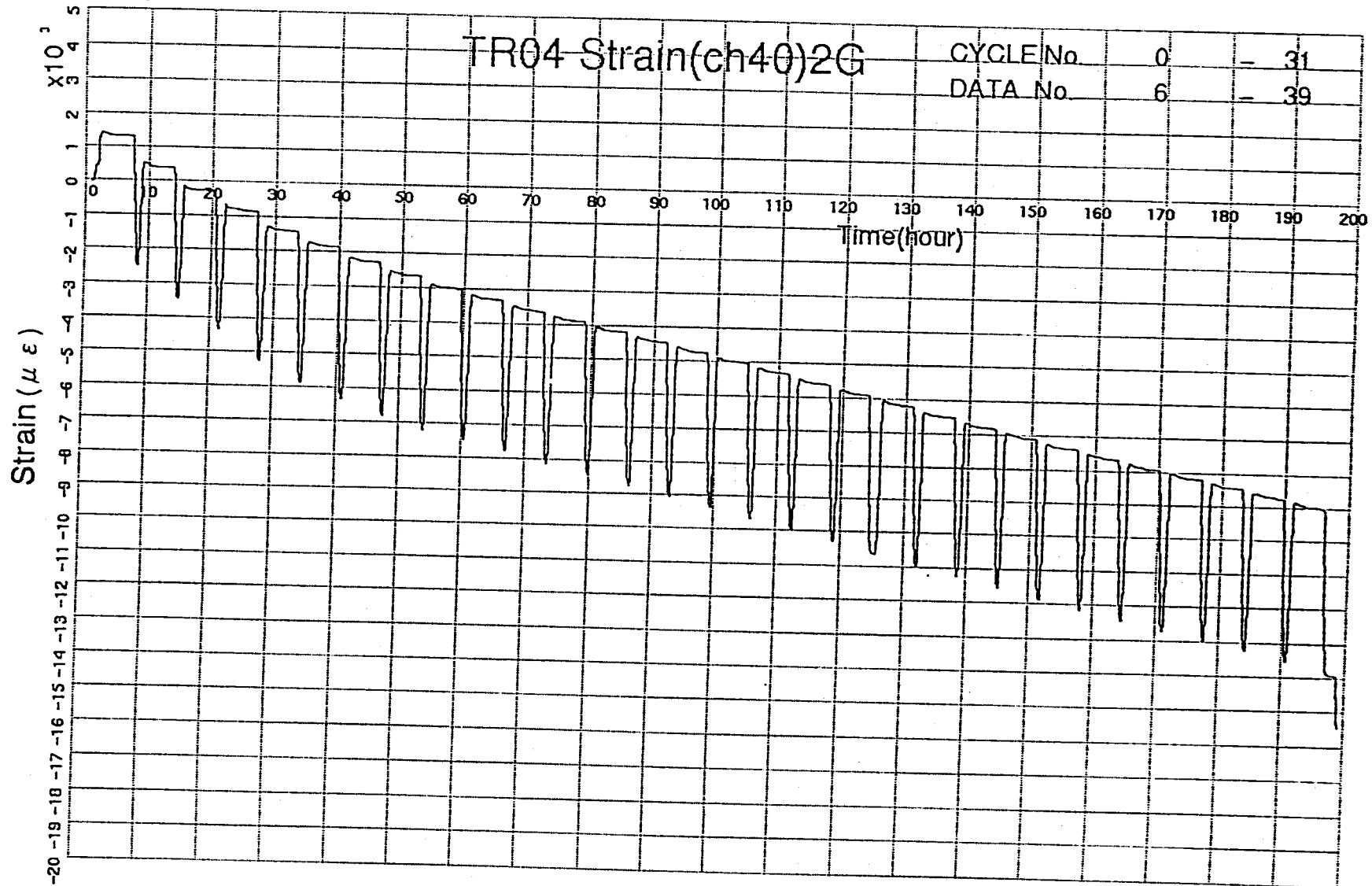


Fig. 2.2-19 Strain History (RTG-No.1/2 : Two Active Gage Method of Opposite Side)  
Parallel Reduced Section of Bar-A1

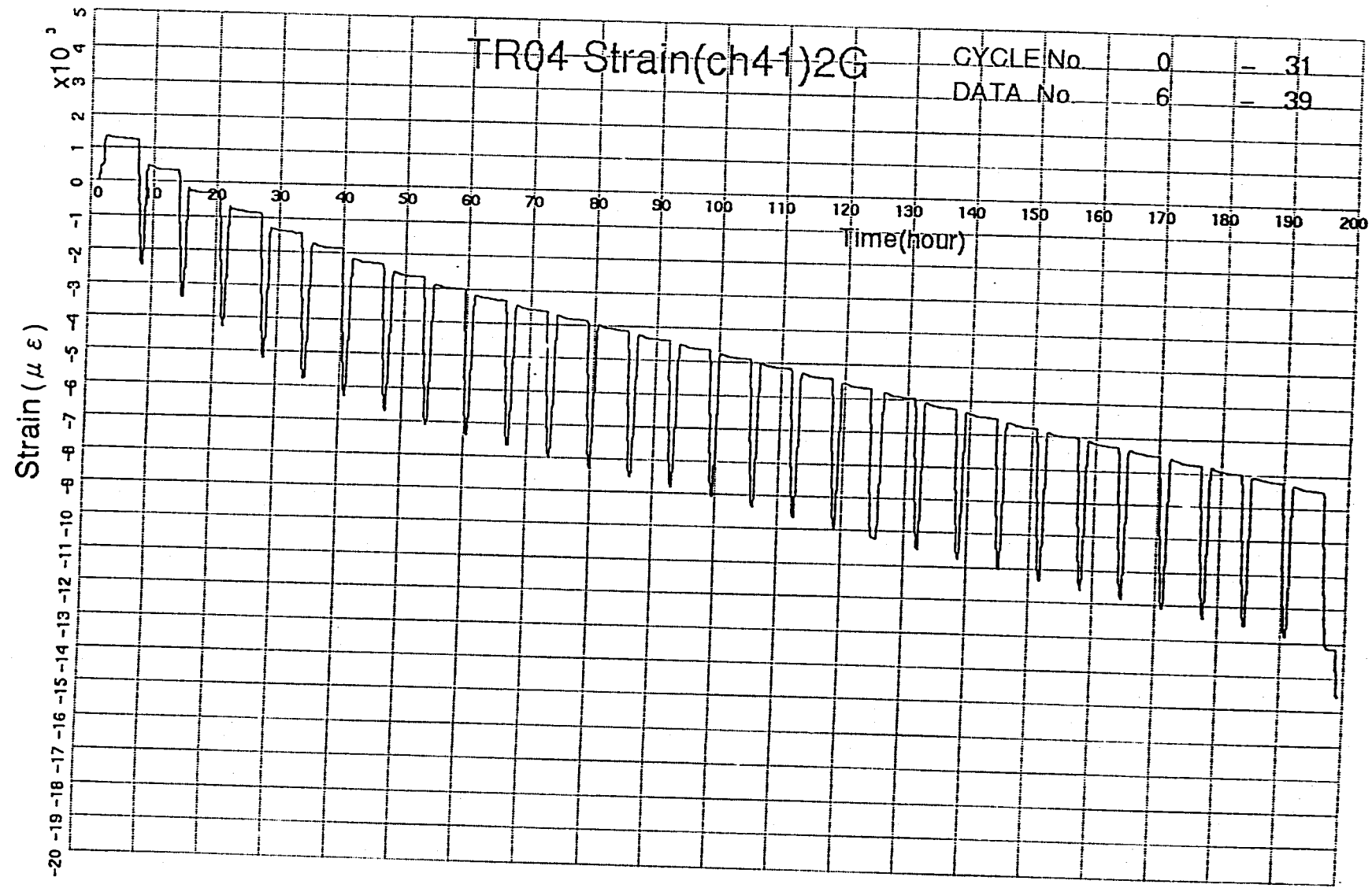


Fig. 2.2-20 Strain History (RTG-No.3/4 : Two Active Gage Method of Opposite Side)  
Parallel Reduced Section of Bar-A1

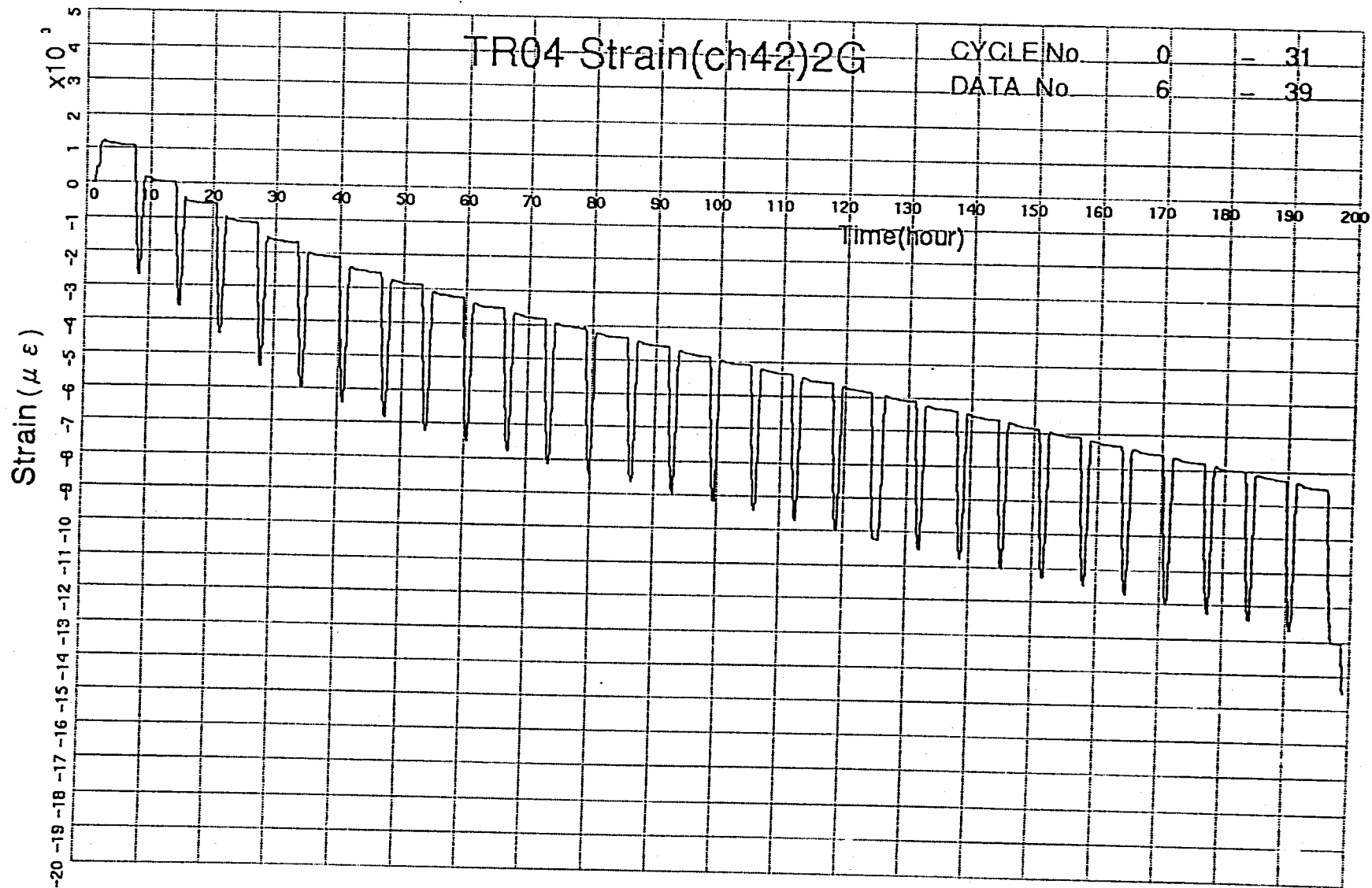


Fig. 2.2-21 Strain History (RTG-No.5/6 : Two Active Gage Method of Opposite Side)  
Parallel Reduced Section of Bar-A2

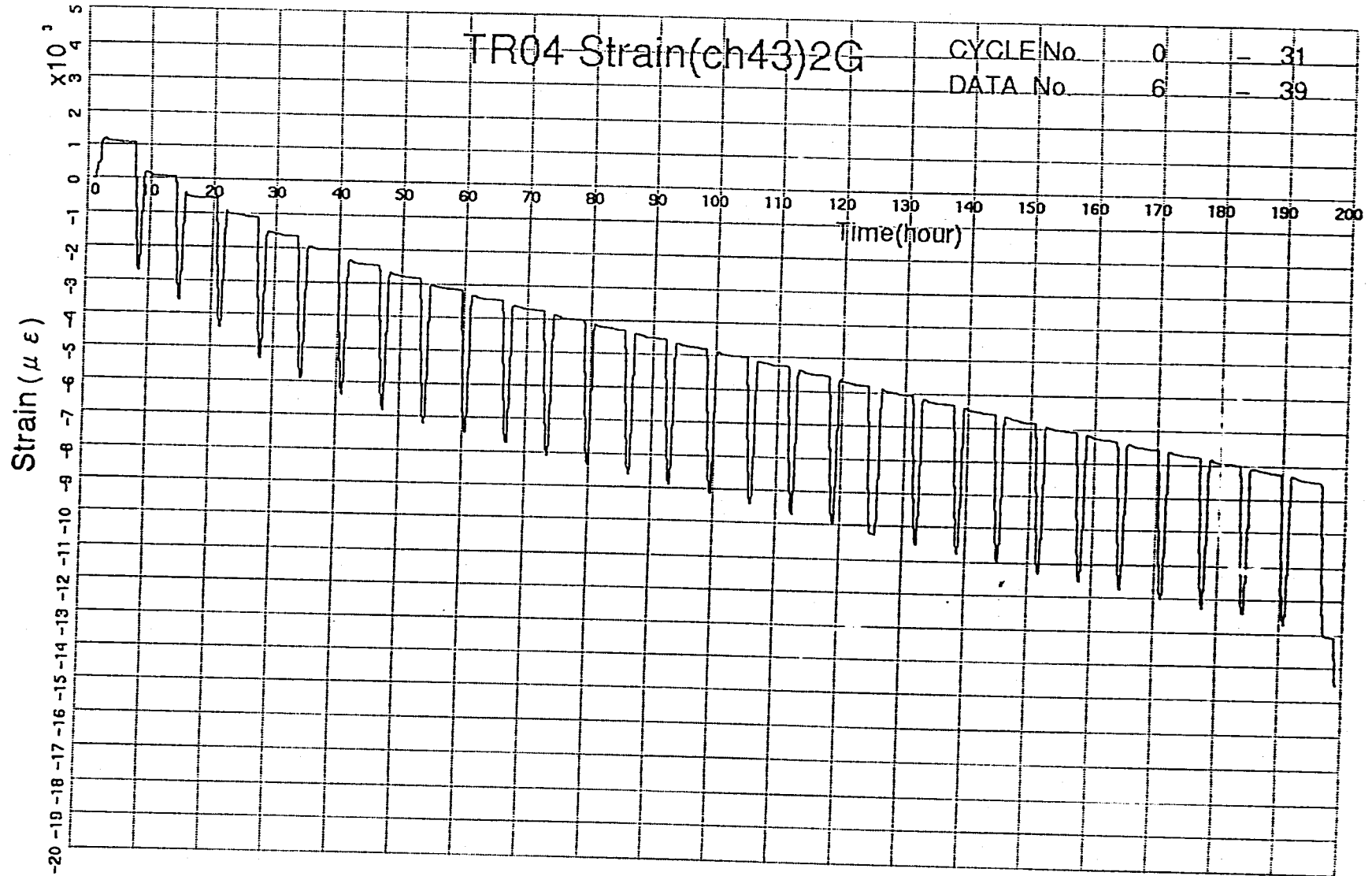


Fig. 2.2-22 Strain History (RTG-No.7/8 : Two Active Gage Method of Opposite Side)  
Parallel Reduced Section of Bar-A2



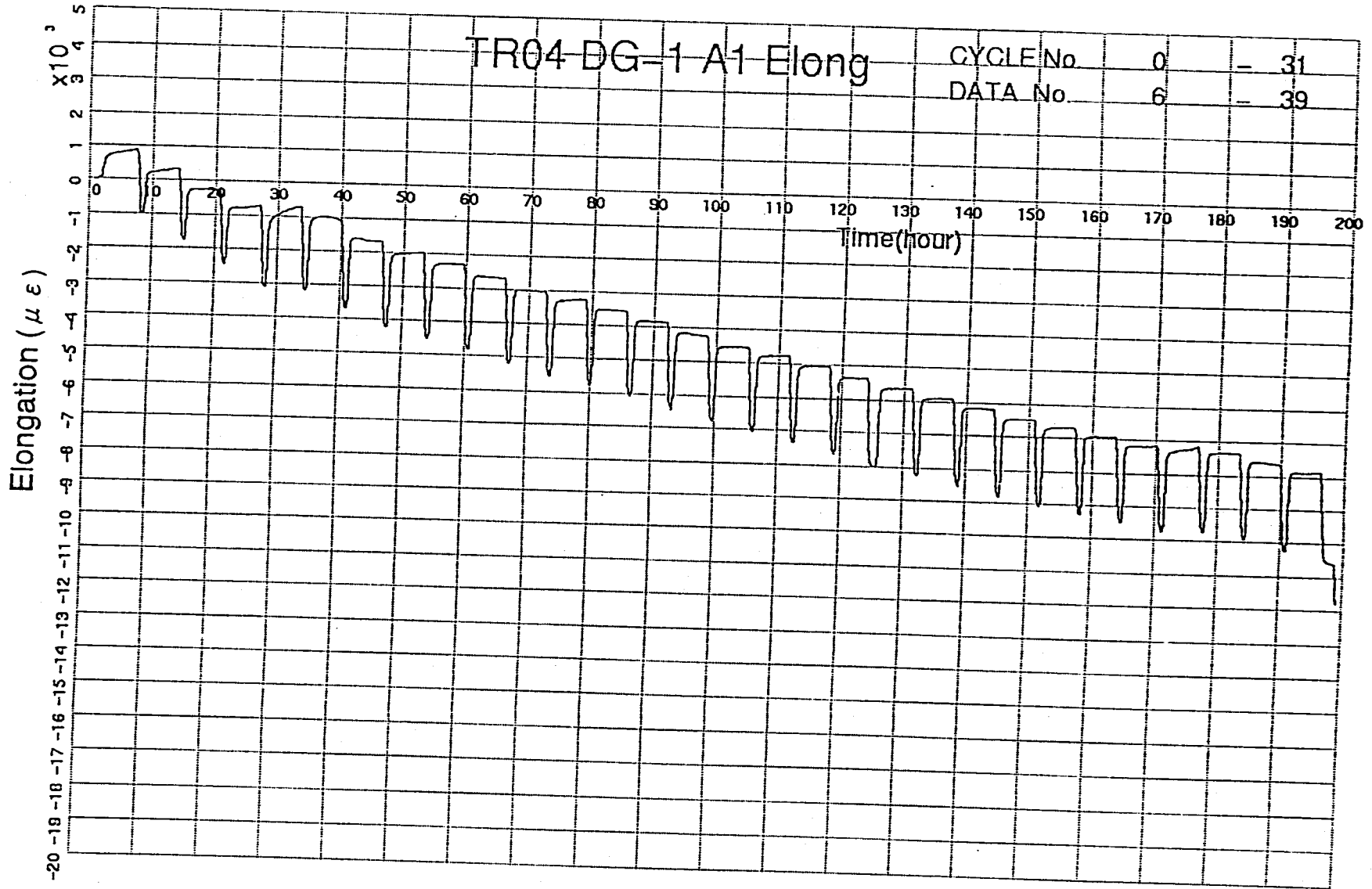


Fig. 2.2-23 Elongation History (DG-1 / Bar-A1 Side)

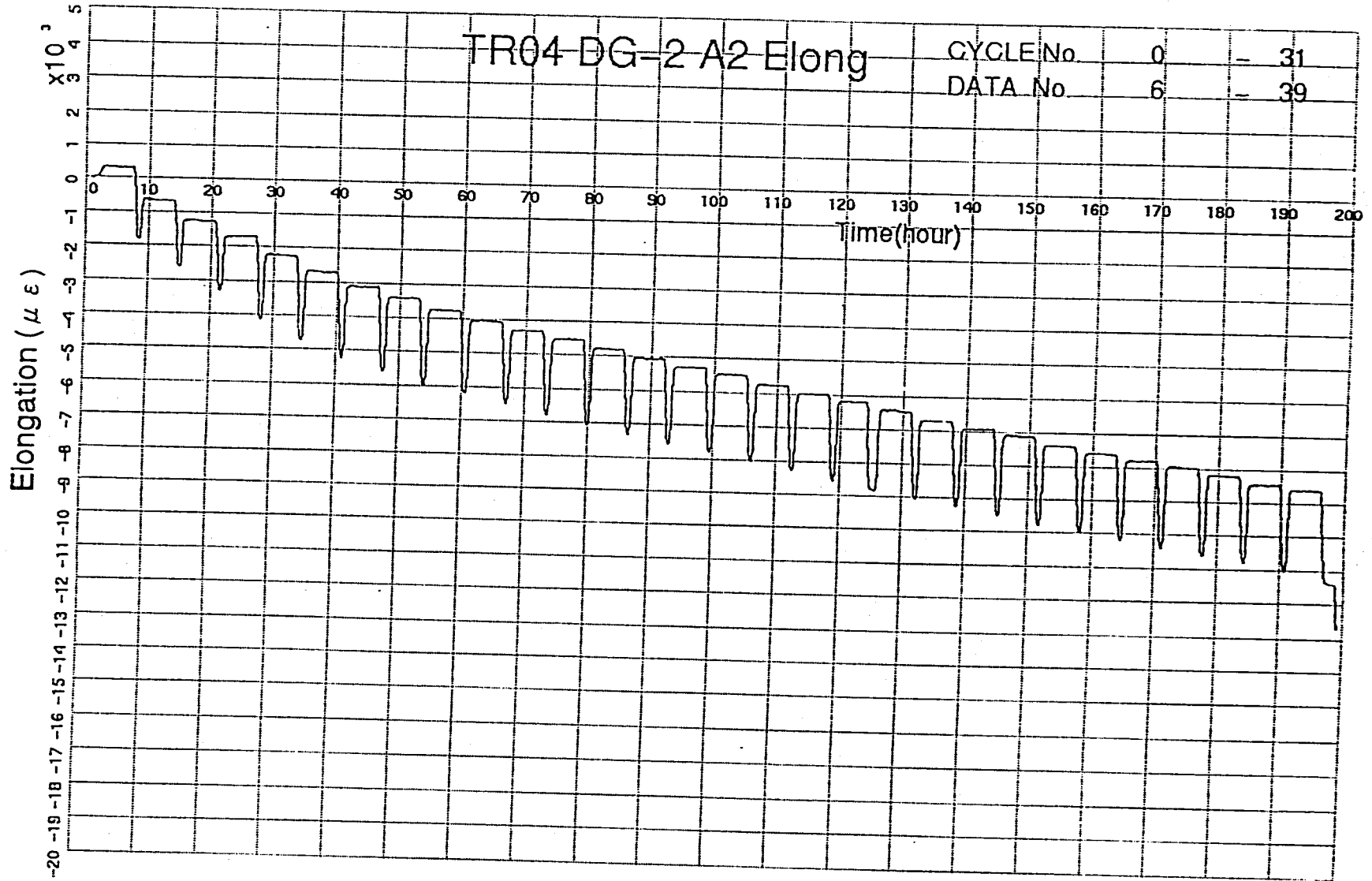


Fig. 2.2-24 Elongation History (DG-2 / Bar-A2 Side)

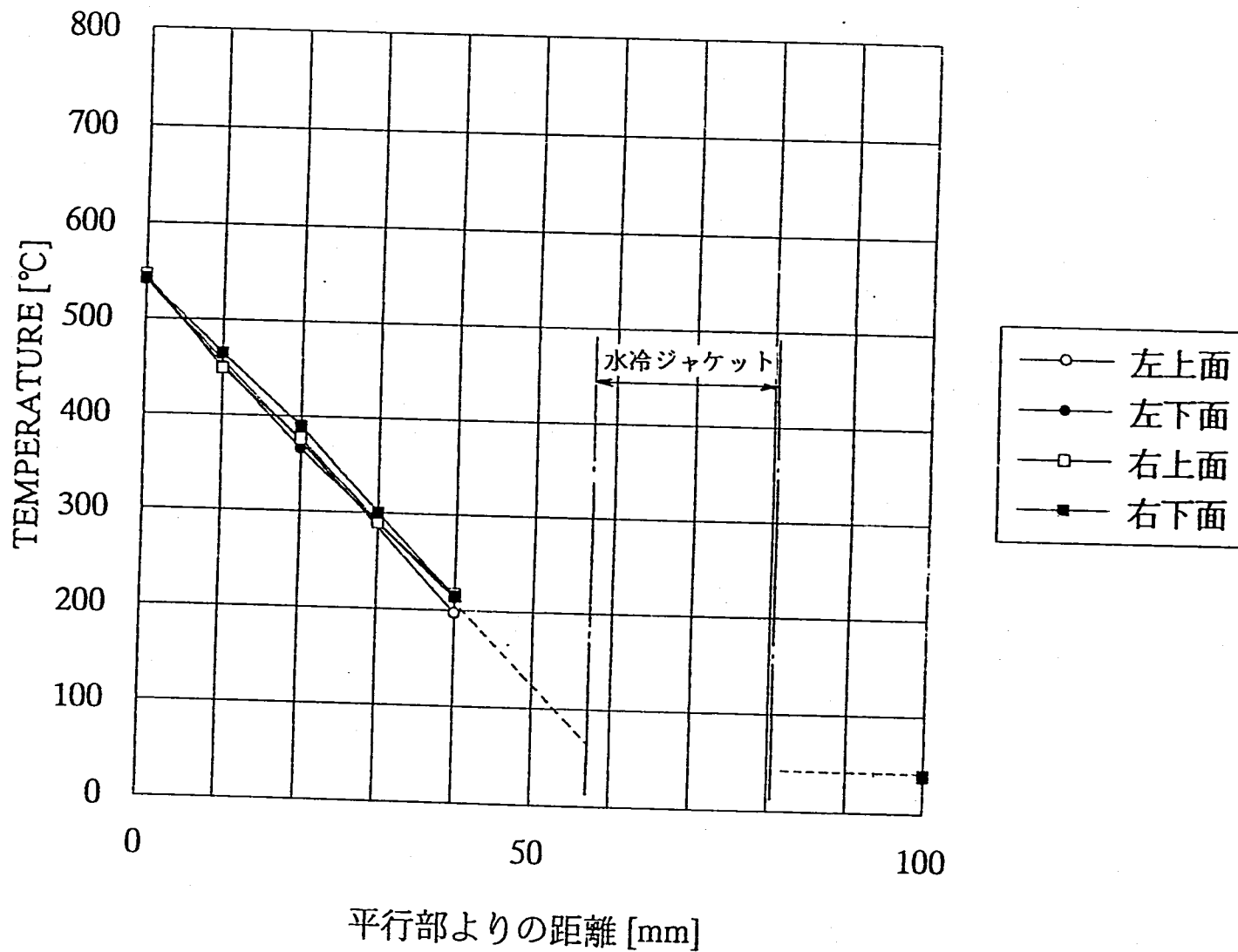


Fig. 2.3-1 Temperature Distribution of Taper Section

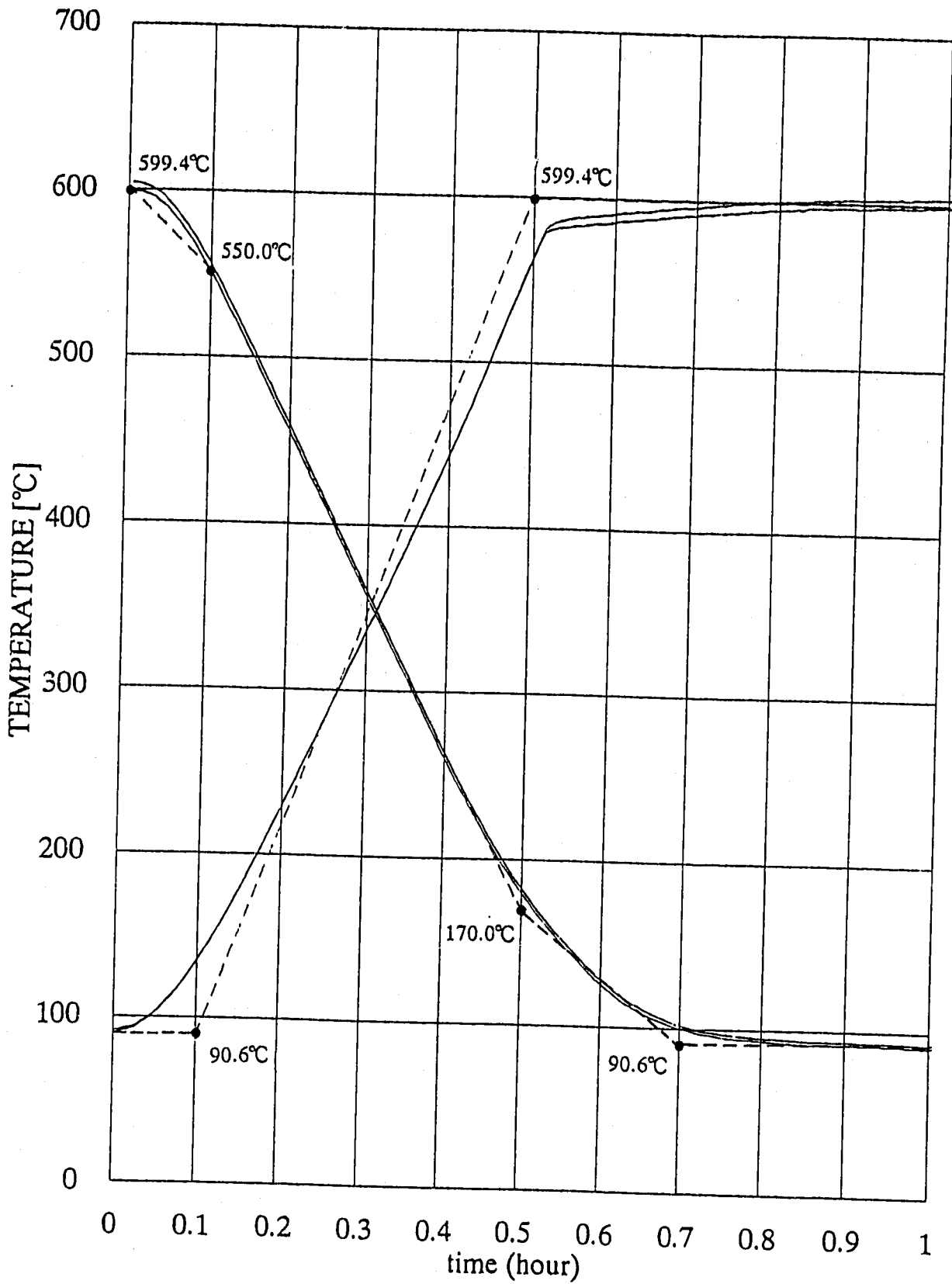


Fig. 2.3-2 Heating and Cooling Process(Parallel Reduced Section of Bar-B)

Table 2.3-1 Heating Pattern of Bar-B

昇温開始からの経過時間	B 棒中心温度
0.0時間	90.6℃
0.1時間	90.6℃
0.5時間	599.4℃

Table 2.3-2 Cooling Pattern of Bar-B

降温開始からの経過時間	B 棒中心温度
0.0時間	599.4℃
0.1時間	550.0℃
0.5時間	170.0℃
0.7時間	90.6℃

Table 3.2-1 Analyses Conditions

解析ケース	構造モデル	備 考
予備検討	(a)	高温保持による影響を見るための解析
Case-1	(a)	簡単な構造モデルによる解析
Case-2	(b)	試験を模擬した構造モデルによる解析
Case-3	(b)	初期降伏曲面の移動を考慮した解析

※材料モデルは全て非線形繰返し非硬化領域モデルとした。

※温度条件は全てTable 3.2-4, 5に従った。

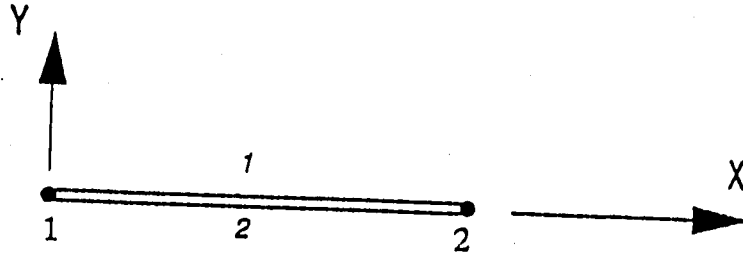
Table 3.2-4 Time Interval for Analyses (TR-04)

	昇温時間 $t_{ph}$	高温保持 $t_{th}$	降温時間 $t_{pc}$	低温保持 $t_{hc}$	1サイクル あたり
TR-04	0.5時間	5.0時間	0.7時間	0.3時間	6.5時間

Table 3.2-5 Thermal Conditions for Analyses (TR-04)

	室温	最高温度	最低温度
TR-04	20.5℃	90.6℃	599.4℃

平行部だけの構造モデル



・要素

ROD2 (3次元棒要素)

・境界条件

節点1において  $U_x=U_y=U_z=0$

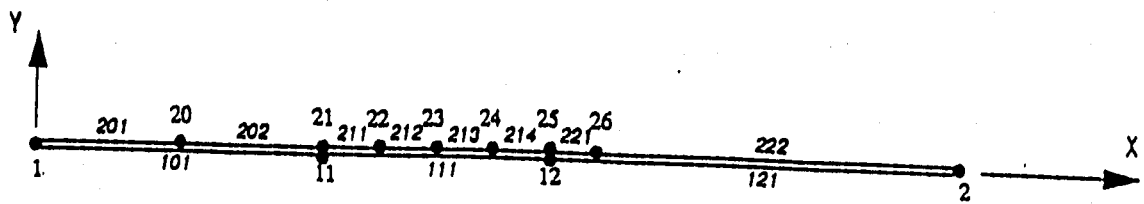
節点2において  $U_y=U_z=0$

Fig. 3.2-1 Finite Element Model (Parallel Part Only)

Table 3.2-2 Finite Element Model (Parallel Part Only)

要素番号	長さ [mm]	断面積 [mm <sup>2</sup> ]	備 考
1	100	400	A1, A2棒 2本をモデル化
2	100	400	B棒をモデル化

全体の構造モデル



・要素

ROD2 (3次元棒要素)

・境界条件

節点1において  $U_x=U_y=U_z=0$

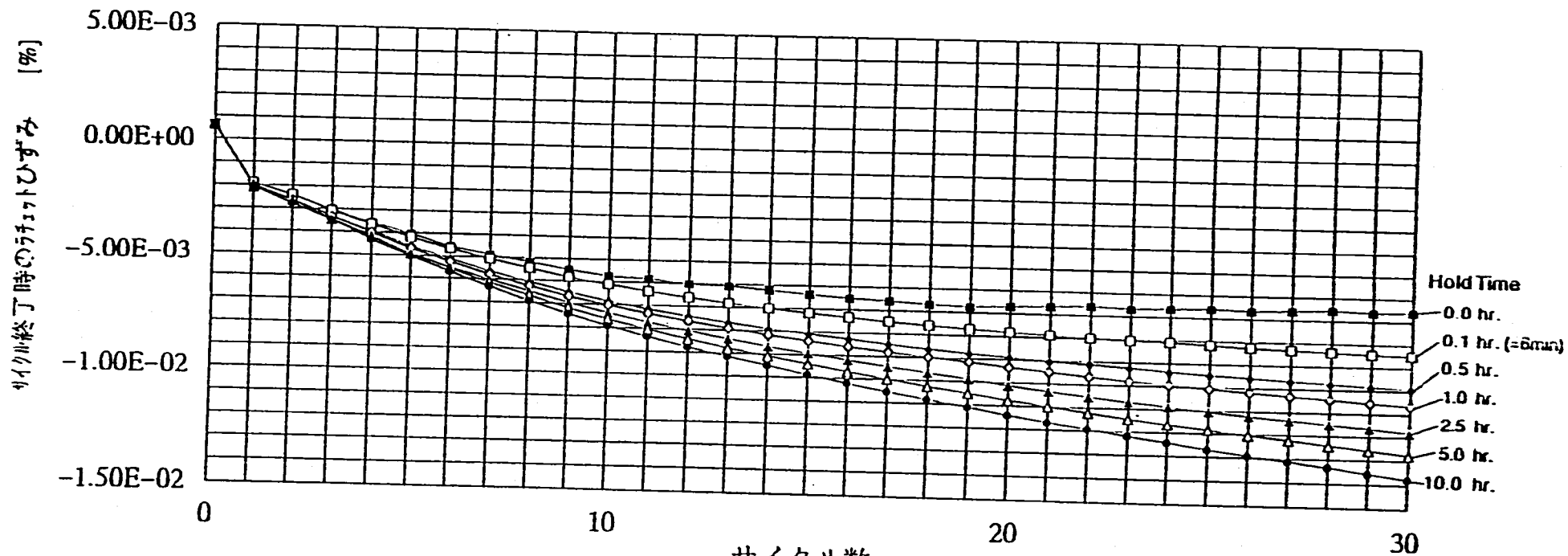
その他の節点において  $U_y=U_z=0$

Fig. 3.2-2 Finite Element Model(Detailed Model)

Table 3.2-3 Finite Element Model(Detailed Model)

要素番号	長さ [mm]	断面積 [mm <sup>2</sup> ]	温度変動比率	モデル化した領域
101	100	400.00	0.0040	A棒の平行部
111	80	1281.54	0.0320	A棒のテーパ部
121	140	3800.00	0.0320	A棒の一般部
201	50	400.00	1.00	B棒の平行部中央
202	50	400.00	0.9550	B棒の平行部両端
211	20	632.39	0.8294	B棒のテーパ部10mm
212	20	1308.89	0.6864	B棒のテーパ部10mm
213	20	2161.30	0.5435	B棒のテーパ部10mm
214	20	3192.49	0.4005	B棒のテーパ部10mm
221	16	3800.00	0.1641	B棒の拘束部(水冷ジャケットの内)
222	124	3800.00	0.03200	B棒の拘束部(水冷ジャケットの外)

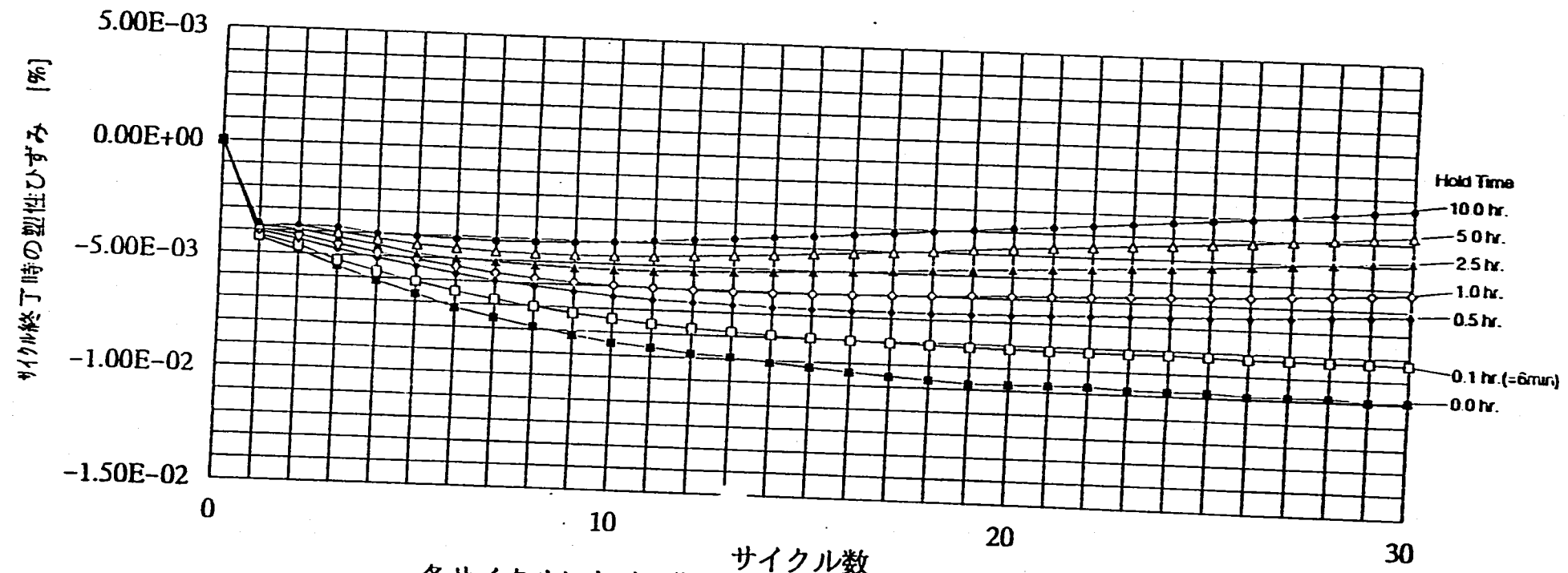




各サイクルにおけるラチェットひずみ (TR04 試験条件の選定)  
 構成材料: 大野材料 / 一次荷重なし / B棒に100℃~600℃の温度変動 / 保持時間を変化させた場合

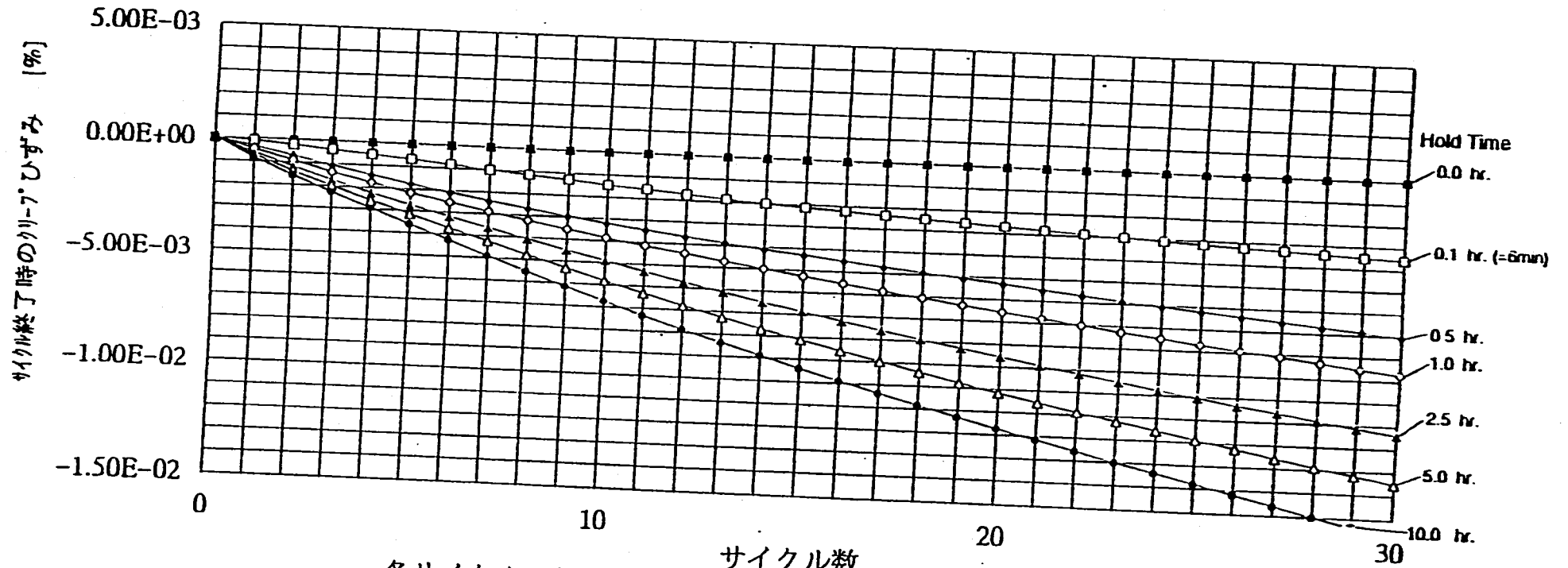
Fig. 4.1-1 Ratchetting Strain at each Cycle (changed Hold Time)

Creep Ratchet Analysis (OHNO Model) / Case-1 (Basic Model)



各サイクルにおける塑性ひずみ (TR04 試験条件の選定)  
 構成材料: 大野行 / 一次荷重なし / B棒に100℃~600℃の温度変動 / 保持時間を変化させた場合

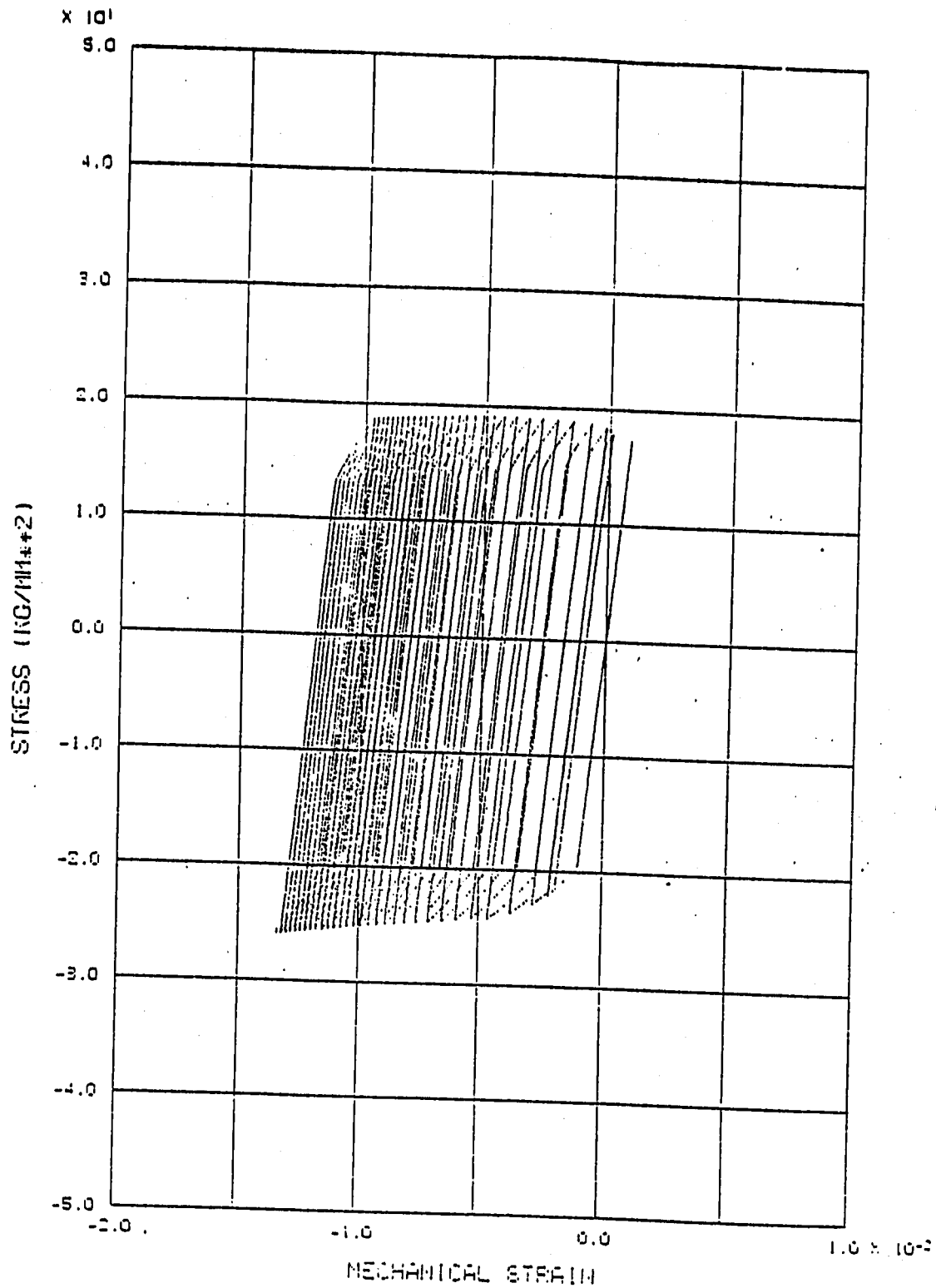
Fig. 4.1-2 Plasticity Strain at each Cycle (changed Hold Time)  
 Creep Ratchet Analysis (OHNO Model) / Case-1 (Basic Model)



各サイクルにおけるクリープひずみ (TR04 試験条件の選定)  
 構成材料: 大野材料 / 一次荷重なし / B棒に100℃~600℃の温度変動 / 保持時間を变化させた場合

Fig. 4.1-3 Creep Strain at each Cycle (changed Hold Time)  
 Creep Ratchet Analysis (OHNO Model) / Case-1 (Basic Model)

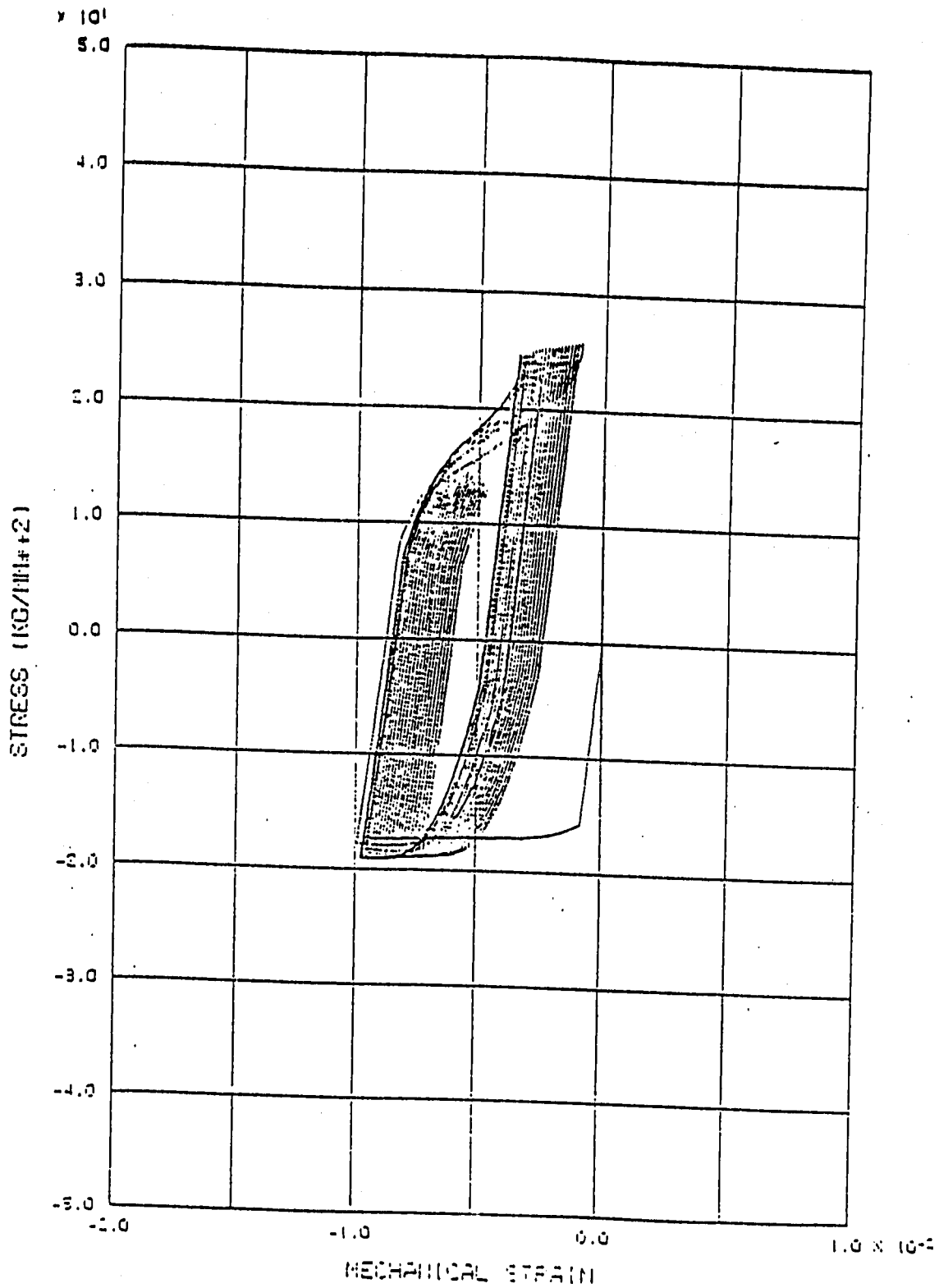
FINAS STATIC ANALYSIS



STRESS-MECHANICAL STRAIN RELATIONSHIP BAR-A  
TR04 CREEP RATCHET ANALYSIS (OHNO MODEL)  
CASE-1 (BASIC MODEL)

Fig. 4.2-1 Stress - Strain Relationship of Bar-A  
Creep Ratchet Analysis (OHNO Model) / Case-1 (Basic Model)

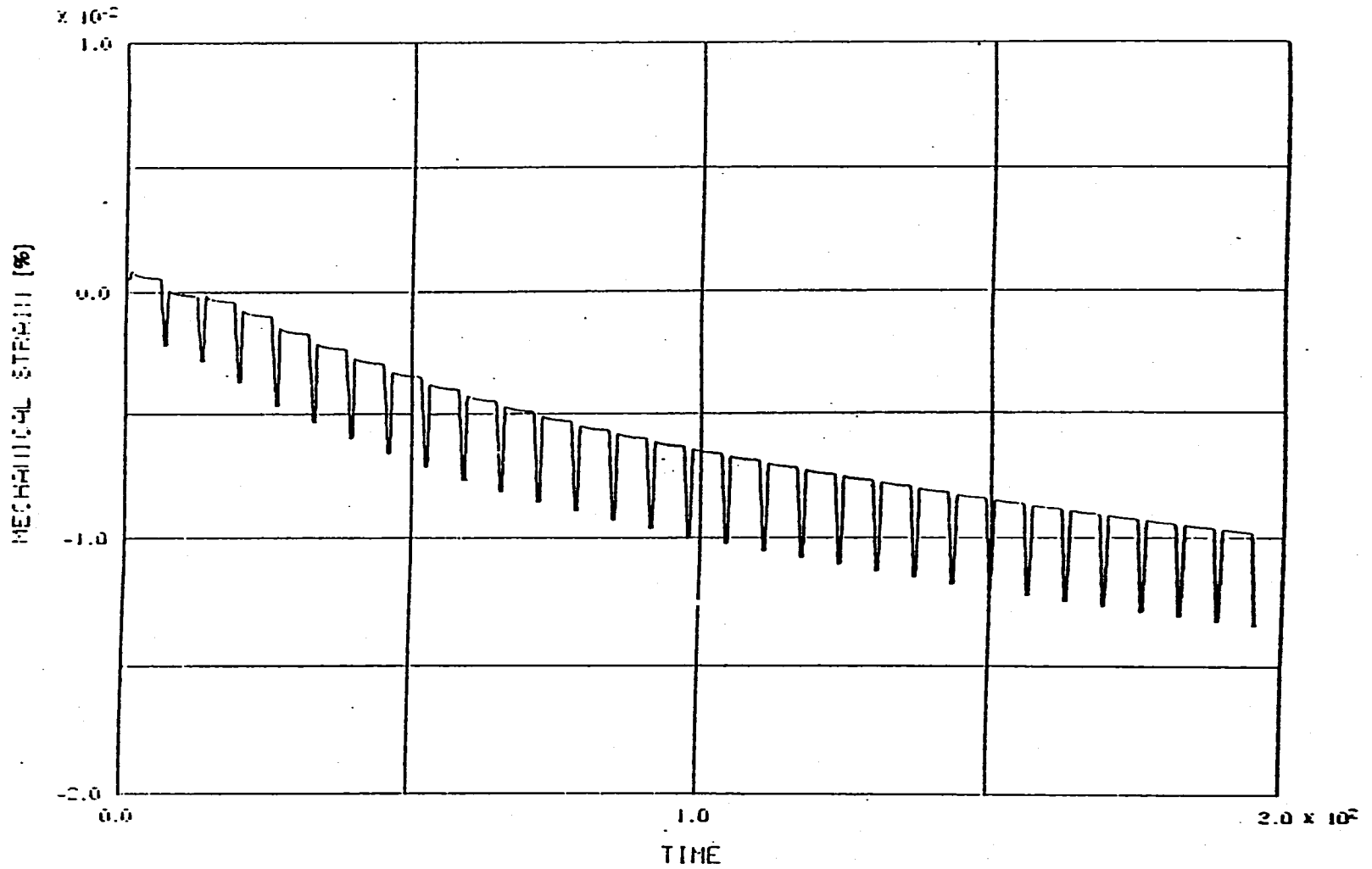
FIIAS STATIC ANALYSIS



STRESS-MECHANICAL STRAIN RELATIONSHIP BAR-B  
TPO4 CREEP RATCHET ANALYSIS (OHNO MODEL)  
CASE-1 (Basic MODEL)

Fig. 4.2-2 Stress - Strain Relationship of Bar-B  
Creep Ratchet Analysis (OHNO Model) / Case-1 (Basic Model)

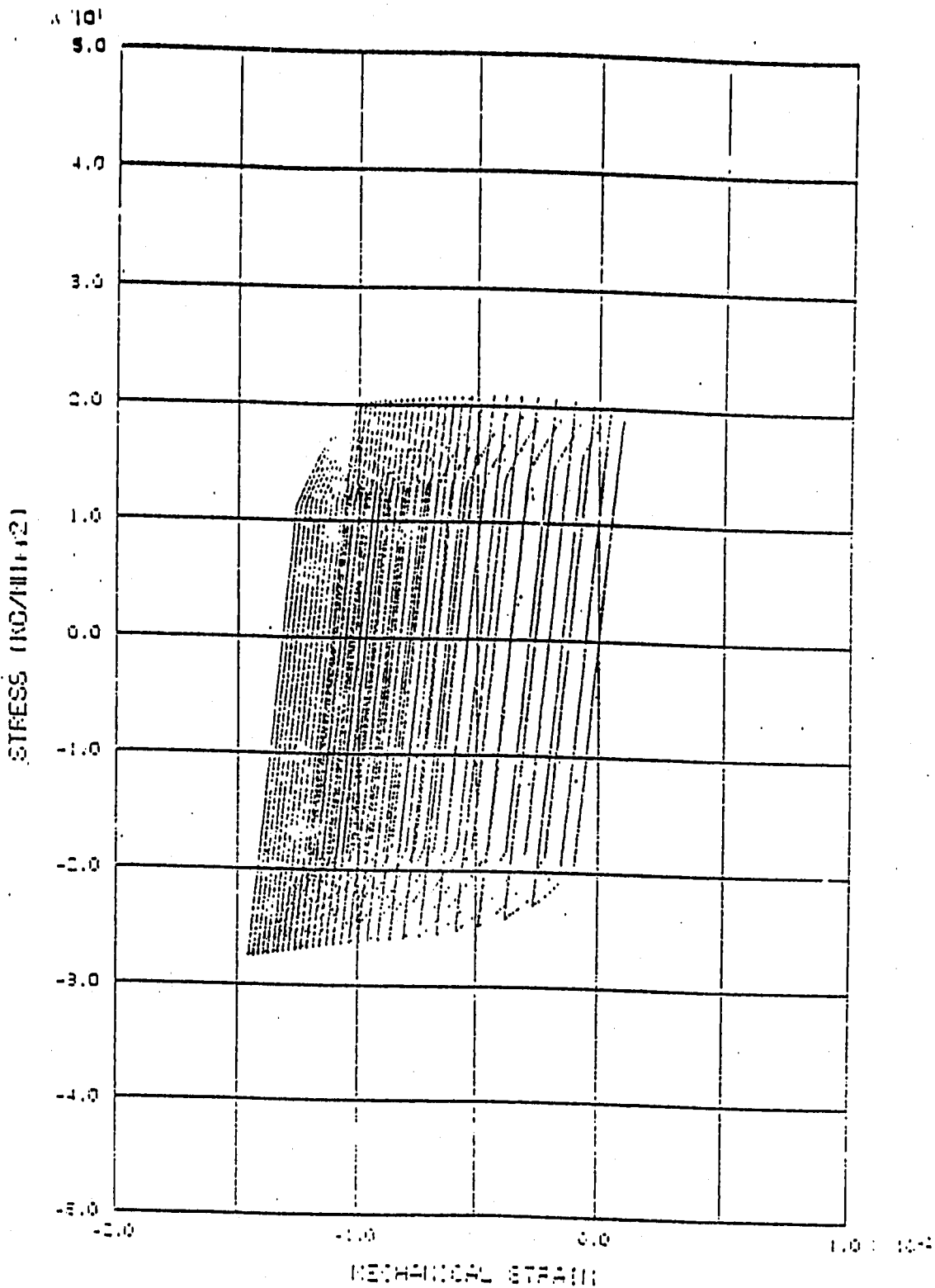
FINISH STATIC ANALYSIS



MECHANICAL STRAIN HISTORY OF BAR-A  
TR04 (CREEP RATCHET ANALYSIS (OHNO MODEL)  
CASE-1 (BASIC MODEL)

Fig. 4.2-3 Ratchetting Strain History of Bar-A  
Creep Ratchet Analysis (OHNO Model) / Case-1 (Basic Model)

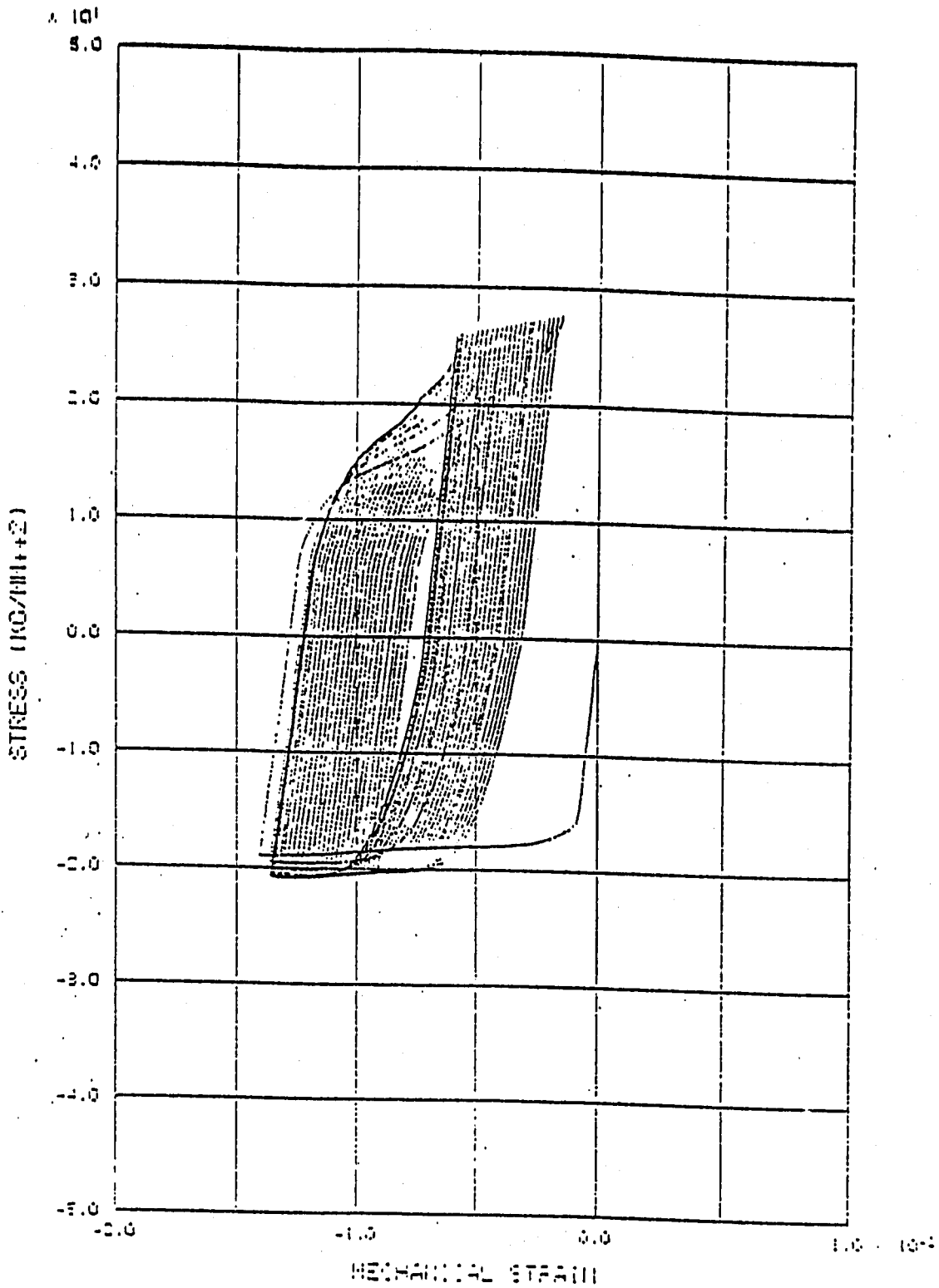
FINNS STATIC ANALYSIS



STRESS-MECHANICAL STRAIN RELATIONSHIP BAR-A  
FROM CREEP RATCHET ANALYSIS (OHNO MODEL) / CASE-2 (DETAILED MODEL)

Fig. 4.2-4 Stress - Strain Relationship of Bar-A  
Creep Ratchet Analysis (OHNO Model) / Case-2 (Detailed Model)

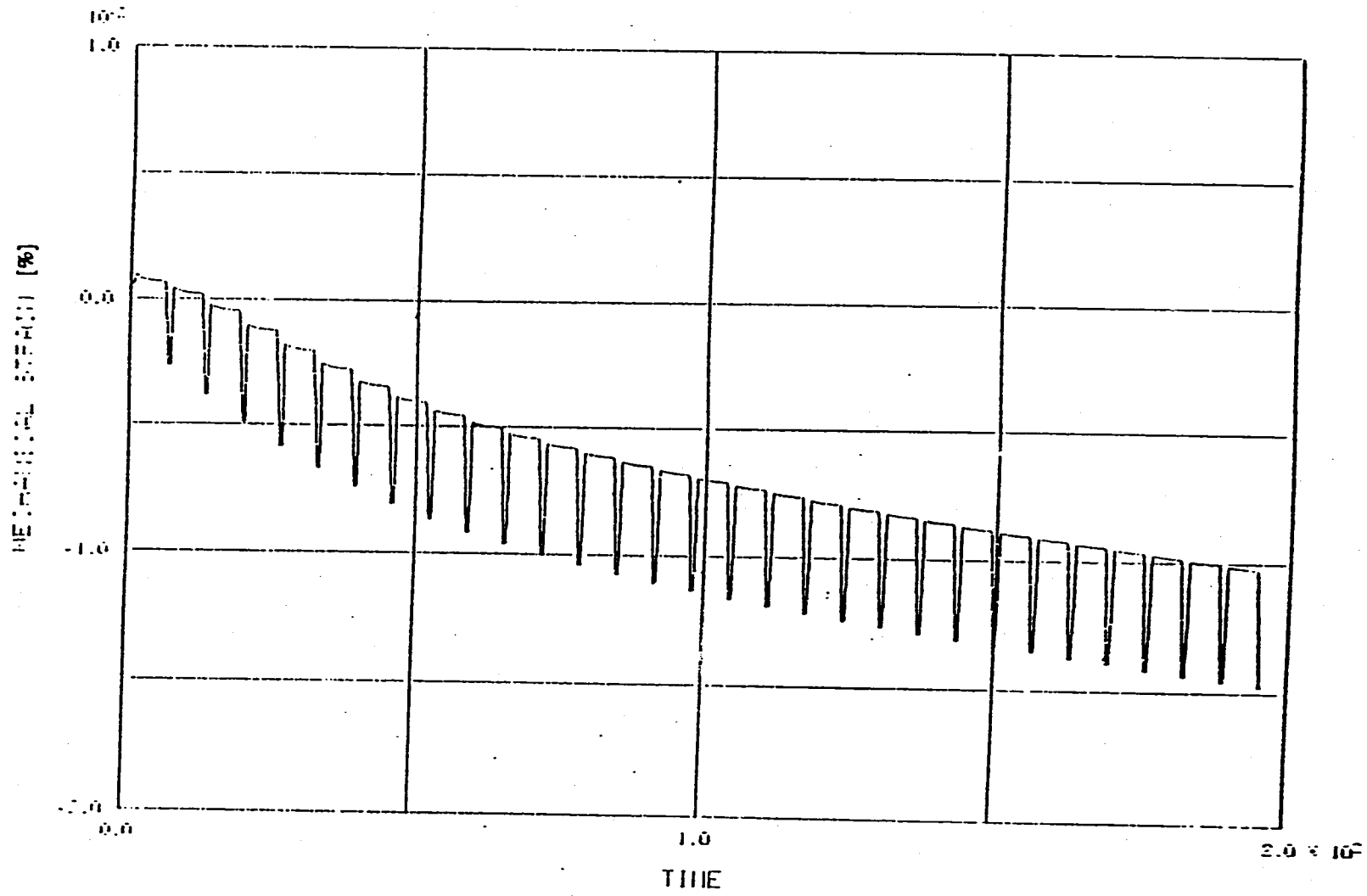
FINITE STATIC ANALYSIS



STRESS-MECHANICAL STRAIN RELATIONSHIP BAR-B  
FROM CREEP RATCHET ANALYSIS (OHNO MODEL) /  
CASE-2 (DETAILED MODEL)

Fig. 4.2-5 Stress - Strain Relationship of Bar-B  
Creep Ratchet Analysis (OHNO Model) / Case-2 (Detailed Model)



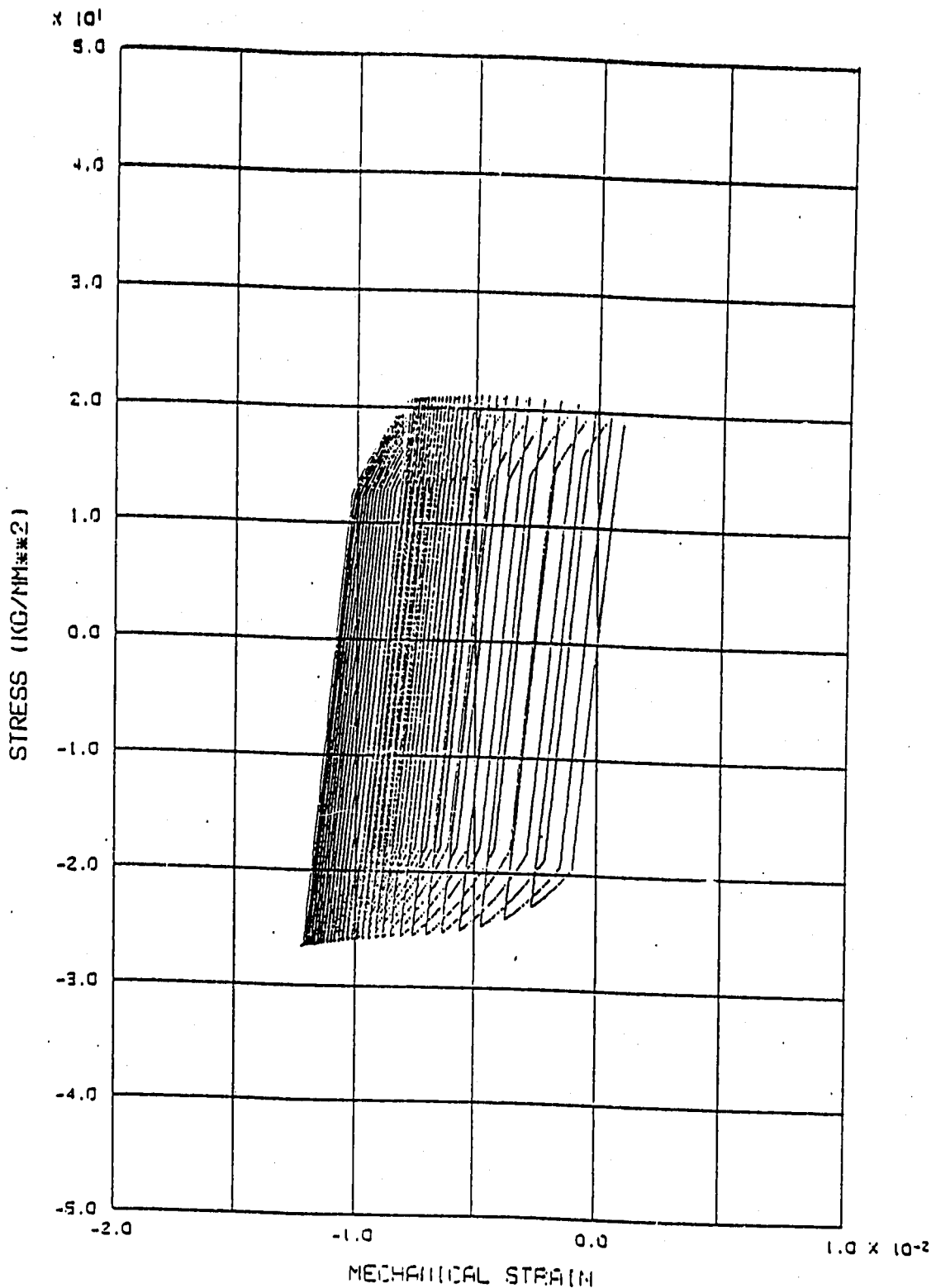


MECHANICAL STRAIN HISTORY OF BAR-A  
1991 CREEP RATCHET ANALYSIS (OHNO MODEL),  
CASE-2 (DETAILED MODEL)

Fig. 4.2-6 Ratchetting Strain History of Bar-A  
Creep Ratchet Analysis (OHNO Model) / Case-2 (Detailed Model)

-71-

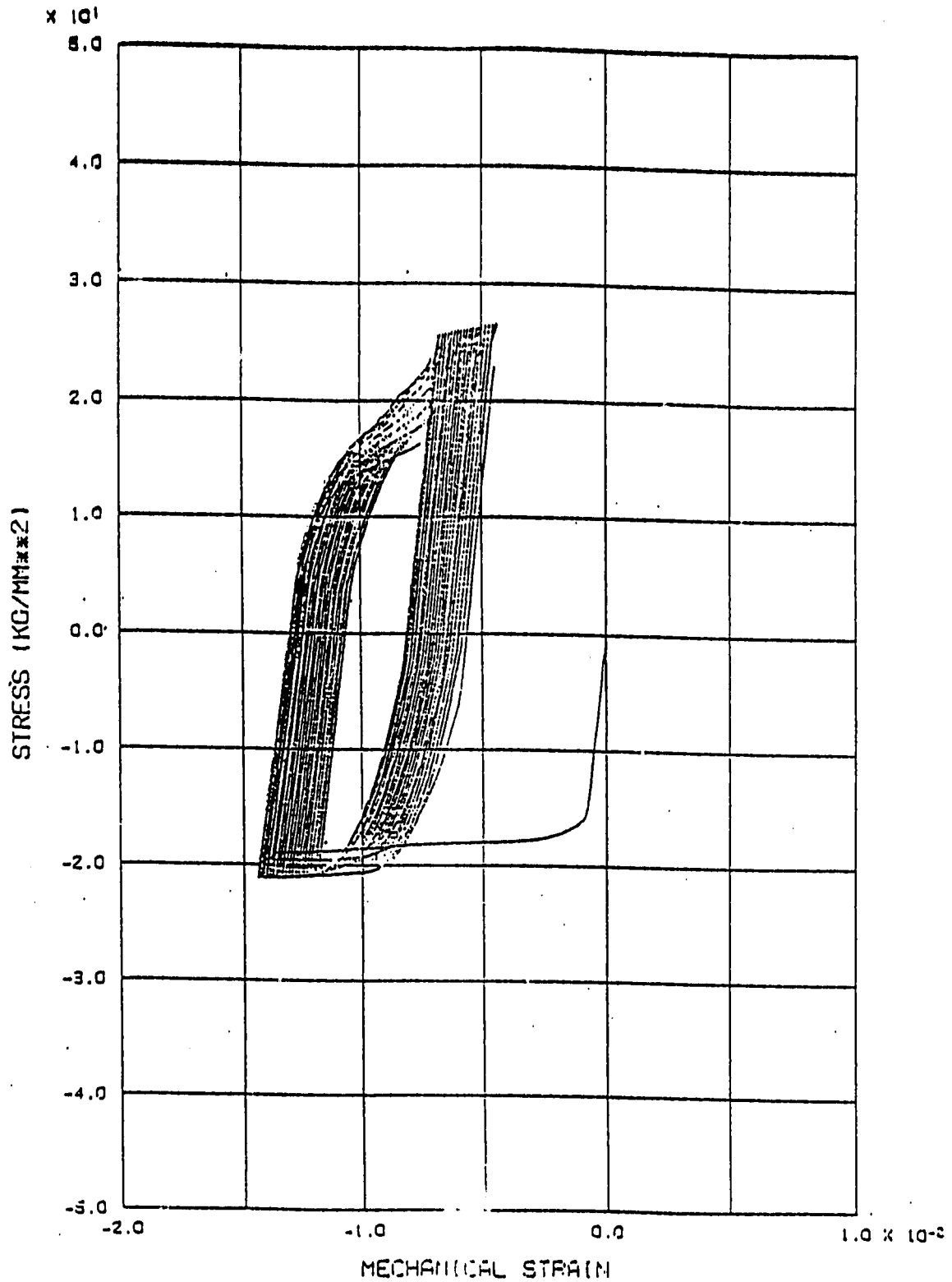
FINAS STATIC ANALYSIS



STRESS-MECHANICAL STRAIN RELATIONSHIP BAR-A (ALPHC=1/3)  
TR04 CREEP RATCHET ANALYSIS (OHNO MODEL).  
CASE-2 (DETAILED MODEL ALPHC=1/3)

Fig. 4.2-7 Stress - Strain Relationship of Bar-A  
Creep Ratchet Analysis (OHNO Model) / Case-3 (Detailed Model /  $\alpha_c = 1/3$ )

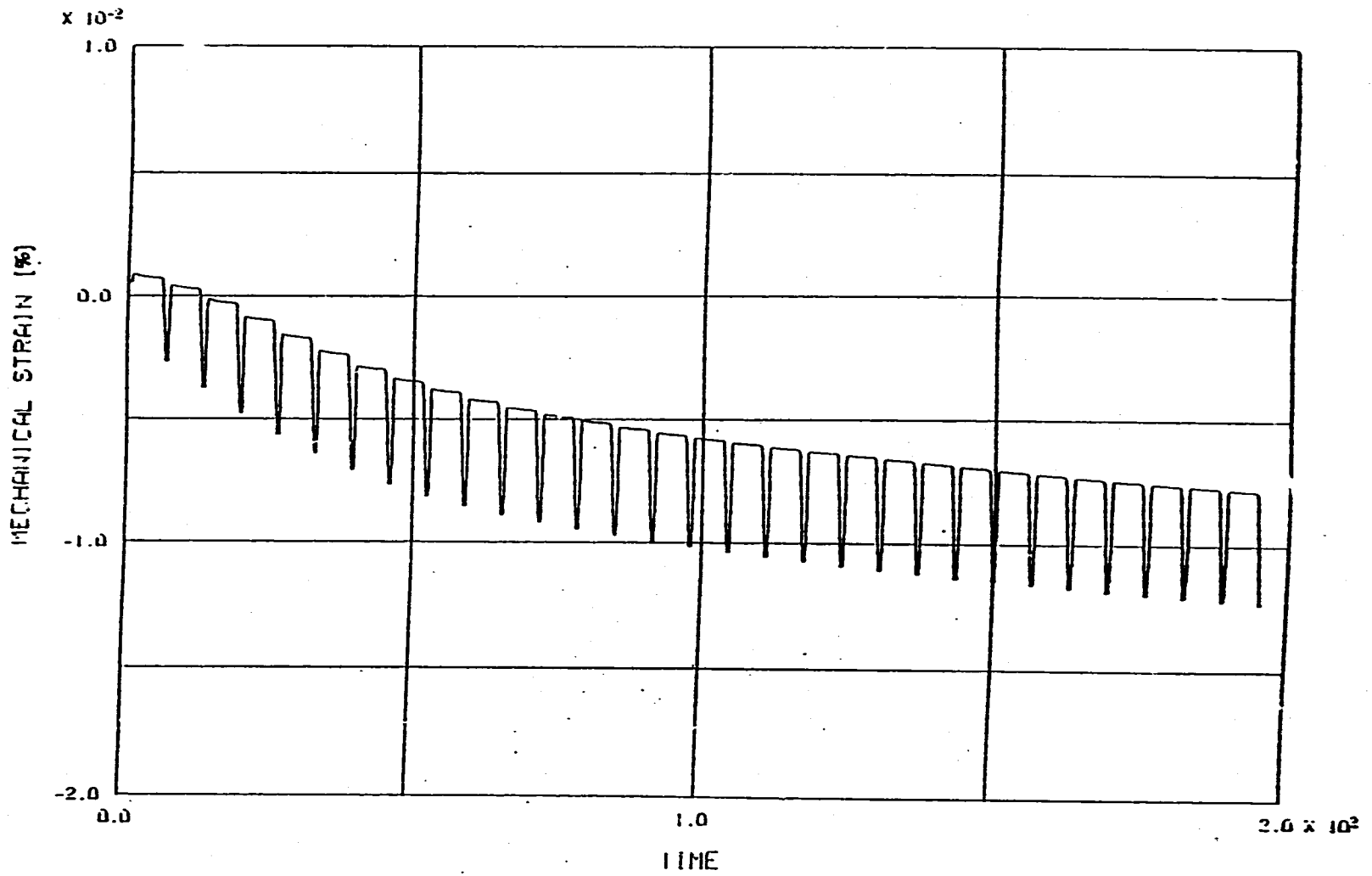
FINAG STATIC ANALYSIS



STRESS-MECHANICAL STRAIN RELATIONSHIP (P BAR-B (ALPHC=1/3)  
 TRC4 CREEP RATCHET ANALYSIS (OHNO MODEL).  
 CASE-2 (DETAILED MODEL ALPHC=1/3)

Fig. 4.2-8 Stress - Strain Relationship of Bar-B  
Creep Ratchet Analysis (OHNO Model) / Case-3 (Detailed Model /  $\alpha = 1/3$ )

FINAS STATIC ANALYSIS



-74-

MECHANICAL STRAIN HISTORY OF BAR-A (ALPHC=1/3)  
TRD-1 CREEP RATCHET ANALYSIS (OHNO MODEL).  
CASE-2 (DETAILED MODEL ALPHC=1/3)

Fig. 4.2-9 Ratchetting Strain History of Bar-A  
Creep Ratchet Analysis (OHNO Model) / Case-3 (Detailed Model) /  $\alpha = 1/3$

## 3本棒クリープラチェット試験(TR-04)結果および解析結果

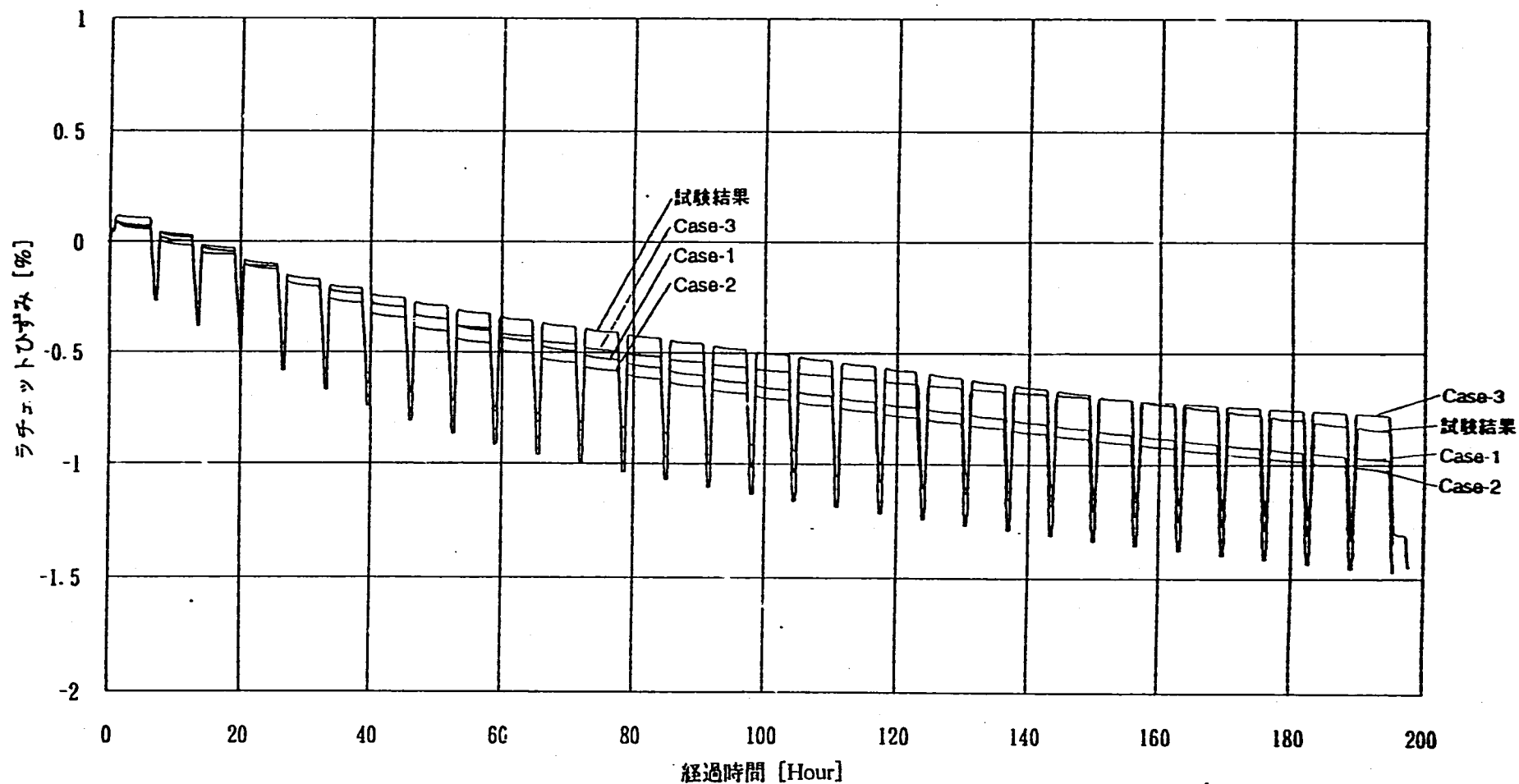


Fig. 4.2-10 Experimental and Analytical Ratchetting Strain History of Bar-A  
 Creep Ratchet Analysis (OHNO Model) / Case-1,2,3