

JAERI-Tech

96-005



遠隔操作型高温疲労試験装置の開発

1996年2月

近江正男・三村英明・石井敏満・深谷 清・米川 実
後藤一郎・加藤佳明・齋藤順市・衛藤基邦・酒井陽之

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課(〒319-11 茨城県那珂郡東海村)あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター(〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内)で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1996

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 刷 (株)高野高速印刷

遠隔操作型高温疲労試験装置の開発

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

近江 正男・三村 英明・石井 敏満⁺・深谷 清⁺
米川 実・後藤 一郎・加藤 佳明・齋藤 順市
衛藤 基邦⁺・酒井 陽之

(1996年1月24日受理)

高温工学試験研究炉（以下，H T T R）用压力容器鋼材の中性子照射に対する耐久特性として疲労強度データを取得するために，高温真空雰囲気中で疲労試験が行える遠隔操作型高温疲労試験装置を開発した。

本装置は，試験機の駆動に油圧を必要とするなどその複雑さからホットセルでの使用経験が少なく，また，ホットセルにおいて遠隔操作で使用しなければならないため，試験機各部の操作を自動的に行えるように設計をする必要があった。

今回開発した装置は，高温真空雰囲気中で疲労試験を行うための試験片掴み，伸び測定等，試験機各部に数々の改良が施され，十分にその仕様を満足するものである。

本報告書では，装置を開発するために実施した疲労試験機の調査結果，装置の機能，開発項目，性能及びH T T R用压力容器鋼の非照射材及び照射材の低サイクル疲労試験結果について報告する。

Development of a Remote Controlled Fatigue Testing Apparatus
at Elevated Temperature in Controlled Environment

Masao OHMI, Hideaki MIMURA, Toshimitsu ISHII⁺, Kiyoshi FUKAYA⁺
Minoru YONEKAWA Ichiro GOTO, Yoshiaki KATO, Junichi SAITO
Motokuni ETO⁺ and Haruyuki SAKAI

Department of JMTR
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received January 24, 1996)

The fatigue characteristics of reactor structural materials at high temperature are necessary to be evaluated for ensuring the safety of the High Temperature engineering Test Reactor (HTTR). Especially, the high temperature test data on safety research such as low cycle fatigue property and crack propagation property for reactor pressure vessel material are important for the development of the HTTR. Responding to these needs, a remote controlled type fatigue testing machine has been developed and installed in a hot cell of JMTR Hot Laboratory to get the fatigue data of irradiated materials.

The machine was developed modifying a commercially available electro-hydraulic servo type fatigue testing machine to withstand radiation and be remotely operated, and mainly consists of a testing machine frame, environment chamber, extensometer, actuator and vacuum exhaust system.

It has been confirmed that the machine has good performance to obtain low cycle fatigue data through many demonstration tests on unirradiated and irradiated specimens.

Keywords : Hot Laboratory, Fatigue Test, Apparatus, Remote Controlled System,
Elevated Temperature, HTTR Materials, Demonstration Test

⁺ Department of High Temperature Engineering, Tokai Research Establishment

目 次

1. はじめに	1
2. 装置の開発方針	1
3. 疲労試験装置	3
3.1 試験機本体	3
3.2 試験片掴み	4
3.3 加熱装置	4
3.4 伸び測定器	5
3.5 真空排気装置	5
3.6 自動制御試験システム	5
3.7 その他の装置	6
4. 試験装置の性能確認	6
4.1 軸心測定	7
4.2 荷重検定	7
4.3 伸び計検定	7
4.4 温度測定	7
5. 低サイクル疲労試験	8
5.1 非照射材試験	8
5.2 照射材試験	8
6. まとめ	9
謝 辞	10
参考文献	10

Contents

1. Introduction	1
2. Design Concept for Fatigue Testing Apparatus	1
3. Specifications of Fatigue Testing Apparatus	3
3.1 Fatigue Testing Machine	3
3.2 Chuck jig	4
3.3 Heating System	4
3.4 Extensometer	5
3.5 Vacuum Pump System	5
3.6 Automatic Control Testing System	5
3.7 Other Apparatus	6
4. Confirmation Test of Functions	6
4.1 Center of Rig	7
4.2 Load	7
4.3 Extensometer	7
4.4 Temperature	7
5. Low Cycle Fatigue Test of 2 1/4Cr-1Mo Steel	8
5.1 Un-irradiate Materials	8
5.2 Irradiated Materials	8
6. Summary	9
Acknowledgements	10
References	10

1. はじめに

原子炉等で使用される材料で、特に高温で使用される構造材料の耐久特性の解明は、原子炉の安全性を評価する上で不可欠である。

中性子照射された材料の耐久特性データを取得するこの種の試験は、従来からその必要性が切望されていたにも拘わらず、ホットセル用の遠隔操作型試験装置の製作に困難を伴い、実施されていなかった。特に、HTTR開発においては、原子炉圧力容器鋼の低サイクル疲労特性及び亀裂伝播特性の試験データによる安全解析が必要であり、この種の試験が重要な課題であった。

このため、材料試験炉（以下、JMTR）で照射した材料の照射後試験により、これらのデータを提供するために、ホットラボにおいて遠隔操作型高温疲労試験装置を開発整備した。

本装置は、耐久特性データを取得するための低サイクル疲労試験及び亀裂伝播特性試験ができることはもちろんのこと、短時間強度特性データを取得するための静的引張試験及び破壊力学特性データを取得するための破壊靱性試験ができるものである。

2. 装置の開発方針

本装置の開発に当たっては、上に示した多くの機能を備えたものとするために、以下の項目について調査、検討を行った。

- (1)試験機の機種及び配置の検討
- (2)試験片加熱方法の検討
- (3)試験片伸び測定方法の検討
- (4)試験片掴み方法の検討
- (5)主な試験項目の検討
- (6)長時間運転対策の検討

これらの項目について調査・検討を行い、Table 1 に示すような知見を得た。これらの知見等に基づいて以下に記述するような疲労試験機を開発することとした。

(1)に関しては、一般の機械螺子式アクチュエータと油圧式アクチュエータを使用する疲労試験機を比較した場合に、後者は大型で付属設備として油圧源を必要とすることで、ホットセル内で使用することは不向きとされていた。近年、照射後試験の高度化や耐熱材料の耐久特性の評価が必要になり、また、機械螺子式アクチュエータでは補えない高速度応答性があるため、動的な試験が行える油圧式の疲労試験機が必要不可欠となっている。このために、ホットセル内で使用できるよう試験機形状と配置の検討を行い、試験機の小型化と油圧源の遠隔操作化により、狭いスペースでも設置可能な疲労試験機を開発することとした。

1. はじめに

原子炉等で使用される材料で、特に高温で使用される構造材料の耐久特性の解明は、原子炉の安全性を評価する上で不可欠である。

中性子照射された材料の耐久特性データを取得するこの種の試験は、従来からその必要性が切望されていたにも拘わらず、ホットセル用の遠隔操作型試験装置の製作に困難を伴い、実施されていなかった。特に、HTTR開発においては、原子炉圧力容器鋼の低サイクル疲労特性及び亀裂伝播特性の試験データによる安全解析が必要であり、この種の試験が重要な課題であった。

このため、材料試験炉（以下、JMTR）で照射した材料の照射後試験により、これらのデータを提供するために、ホットラボにおいて遠隔操作型高温疲労試験装置を開発整備した。

本装置は、耐久特性データを取得するための低サイクル疲労試験及び亀裂伝播特性試験ができることはもちろんのこと、短時間強度特性データを取得するための静的引張試験及び破壊力学特性データを取得するための破壊靱性試験ができるものである。

2. 装置の開発方針

本装置の開発に当たっては、上に示した多くの機能を備えたものとするために、以下の項目について調査、検討を行った。

- (1)試験機の機種及び配置の検討
- (2)試験片加熱方法の検討
- (3)試験片伸び測定方法の検討
- (4)試験片掴み方法の検討
- (5)主な試験項目の検討
- (6)長時間運転対策の検討

これらの項目について調査・検討を行い、Table 1 に示すような知見を得た。これらの知見等に基づいて以下に記述するような疲労試験機を開発することとした。

(1)に関しては、一般の機械螺子式アクチュエータと油圧式アクチュエータを使用する疲労試験機を比較した場合に、後者は大型で付属設備として油圧源を必要とすることで、ホットセル内で使用することは不向きとされていた。近年、照射後試験の高度化や耐熱材料の耐久特性の評価が必要になり、また、機械螺子式アクチュエータでは補えない高速度応答性があるため、動的な試験が行える油圧式の疲労試験機が必要不可欠となっている。このために、ホットセル内で使用できるよう試験機形状と配置の検討を行い、試験機の小型化と油圧源の遠隔操作化により、狭いスペースでも設置可能な疲労試験機を開発することとした。

(2)に関しては、加熱方法としては一般に、高周波加熱法¹⁾、直接通電法及び抵抗加熱法が用いられている。Fig.1 に各加熱方法の比較を示す。高周波加熱法では、局部加熱方式であることから、試験片の平行部のみを加熱することができるため、試験片掴みと試験片の焼き付きがない。反面、温度分布の均一性を保つことが他の加熱法と比較してやや困難とされている。さらに、操作性においては、試験片の周囲に高周波コイルを必要とするために、遠隔操作での試験片の着脱が困難である。直接通電法は、大電流を必要とするため電気設備が大型となり、ノイズ等の発生が考えられる。また、試験片の形状によっては温度分布の均一性を保つことが困難である。抵抗加熱法は、加熱炉内で試験片以外の試験片掴み部分まで高温となるため、歪検出及び試験片掴みの焼き付きに課題があるが、温度分布の均一性は、高周波加熱法と比較して良好であり、また特殊形状の試験片に対しても均一な温度が得られる。なお、焼き付き防止対策として、窒化ボロン等の焼き付き防止塗布材があり、遠隔操作でも容易に行えるものがある。検討結果においては、各加熱方法で一長一短があるが、本装置の加熱法としては、遠隔操作性、試験片の温度分布の均一性及びコスト面から考慮して抵抗加熱法を採用することとした。

(3)に関しては、疲労試験を高温真空雰囲気中で行う場合、伸び測定法が重要開発課題となる。伸び測定は、雰囲気容器内の試験片の正確な伸びを検出する必要がある。本装置では、非接触型伸び測定器と接触型伸び測定器について検討した。Fig.2 に非接触型測定器（レーザーマイクロゲージ）の概要を示す。非接触型伸び測定器の特徴としては、試験片の標点部を測定するためのセンサーが試験片に接することなく測定できるために遠隔操作での使用が容易である。実際にJMTRホットラボにおいては、非接触型伸び測定器としてレーザーマイクロゲージを使用して、クリープ変形試験のための伸び測定を実施している。しかし、クリープ変形試験の伸び測定は、試験片平行部を連続的に測定するのみである。疲労試験では、試験片の伸びを精度良く測定できるとともに、さらに試験片平行部の伸びによって試験機アクチュエータを制御するために、測定データを試験機の制御部にフィードバックする必要があり、その信号は連続的に出力する必要が生じる。レーザーマイクロゲージでは、デジタル信号（30 msec/個）となるために微細部分では伸びの変化が階段状となり、制御信号としては適切でない。また、現状では、試験片の平行部に突起部（鏢）を設ける必要がある。

Fig. 3 に接触型伸び測定器の特徴を示す。接触型伸び測定器は、試験片平行部にセンサーを接触させて測定するために確実に試験片伸び測定を行えるが、雰囲気槽を装備した本装置では伸び測定器の取り付け位置及び雰囲気温度によっては使用できるセンサーに制限がある。本装置では第一段階として、この接触型伸び測定器を用いることとし、このために、試験片標点部に伸び計の取り付けが真空中でも行えるようなX-Yステージの開発、試験片の接触圧力を検出するための圧力検出機構を考案して、遠隔操作でも十分に使用できるものを開発する。なお、非接触法での伸び測定は、今後も検討を継続する予定である。

(4)に関しては、低サイクル疲労試験を行う場合、試験片に負荷される引張荷重と圧縮荷重に対して、試験片（ボタンヘッド型）の掴み部で強固に固定し、さらに試験軸がずれないように取り付けなければならない。手動操作では螺子による固定法が主流で用いられているが、遠隔操作では試験片の取り付け及び固定が非常に困難である。ホットセル内で遠隔操作での引張試

験では、Fig. 4 試験片固定方法の比較①に示すように、試験片の取り付けが容易な落とし込み方式のチャックが用いられている。この方法では一方向が開口部となっているために試験片固定時に歪が生じて試験軸がずれてしまうことがわかった。この改善策として次に Fig. 4 試験片固定方法の比較②に示すように、開口部を前後方向に設けて均等に歪が生じるようにすることを検討したが、落とし込み部の面積が狭まり逆に試験片の掴み部に変形が生じることがわかった。このために、油圧シリンダーと試験片受け板を用いて、真空中においても、さらに遠隔操作でも容易に試験片の固定ができるとともに高温にも耐えることができる試験片掴み、Fig. 4 試験片固定方法の比較③を開発することとした。

(5)に関しては、照射後試験を行うためのホットセルは限られたスペースとセル数で付加価値が高いために、設置する装置はより有効利用を図る必要がある。本装置では大型試験片の引張試験、破壊靱性試験及び亀裂伝播試験等ができるように、アクチュエータのストロークを大きくすること。また、各試験における試験片の変位測定をその試験にあった測定器が使用できるようにする。

(6)は、疲労試験としては一般に長時間の連続運転となることから、アクチュエータの自動停止回路、加熱炉の自動停止回路、冷却水断水警報回路等を設けて、無人運転時に試験片を保護するための十分な安全保護回路を設けると共に、長時間安定したデータを取得できるよう、パソコンによるデータ収集ができるようにする。

3. 疲労試験装置

本装置は、市販されている電気油圧サーボ式疲労試験機を小型化し、遠隔操作で使用できるように改造した疲労試験機本体、真空中及び不活性ガス中で行うための雰囲気槽と試験片を加熱するための加熱装置、試験片を固定するための試験片掴み、試験片の変位を測定するための接触型と非接触型伸び測定器、データ処理装置及び加熱装置を冷却するための水冷却システム等により構成される。また、本装置により実施可能な試験は、疲労試験、亀裂伝播試験、破壊靱性試験及び静的引張試験等であり、これらの試験を行うための付属機構として、直流・交流安定化電源、端子点溶接装置及び試料穴明け装置、変位計取り付け装置を装備している。本装置で行う標準的な疲労試験片は、長さ160mm、平行部直径10mmのスプリットエンド型である。ホットセルで取り扱う試料としては、かなり大型の試験片となるため、試験機容量を100KNとし、試験片の固定には油圧シリンダーを用いた試験片掴みを採用した。

Table 2に疲労試験機の本機仕様、Fig. 5に疲労試験機の外観、Fig. 6にセル内設置概要、Fig. 7に試験機ダイアグラム、Fig. 8に疲労試験部詳細及びFig. 9に本試験機で試験可能な試験片を示す。

3.1 試験機本体

試験機本体は、電気油圧サーボ式疲労試験機（東京衡機製）で2本の支柱と上部トラバース、

験では、Fig. 4 試験片固定方法の比較①に示すように、試験片の取り付けが容易な落とし込み方式のチャックが用いられている。この方法では一方向が開口部となっているために試験片固定時に歪が生じて試験軸がずれてしまうことがわかった。この改善策として次に Fig. 4 試験片固定方法の比較②に示すように、開口部を前後方向に設けて均等に歪が生じるようにすることを検討したが、落とし込み部の面積が狭まり逆に試験片の掴み部に変形が生じることがわかった。このために、油圧シリンダーと試験片受け板を用いて、真空中においても、さらに遠隔操作でも容易に試験片の固定ができるとともに高温にも耐えることができる試験片掴み、Fig.4 試験片固定方法の比較③を開発することとした。

(5)に関しては、照射後試験を行うためのホットセルは限られたスペースとセル数で付加価値が高いために、設置する装置はより有効利用を図る必要がある。本装置では大型試験片の引張試験、破壊靱性試験及び亀裂伝播試験等ができるように、アクチュエータのストロークを大きくすること。また、各試験における試験片の変位測定をその試験にあった測定器が使用できるようにする。

(6)は、疲労試験としては一般に長時間の連続運転となることから、アクチュエータの自動停止回路、加熱炉の自動停止回路、冷却水断水警報回路等を設けて、無人運転時に試験片を保護するための十分な安全保護回路を設けると共に、長時間安定したデータを取得できるよう、パソコンによるデータ収集ができるようにする。

3. 疲労試験装置

本装置は、市販されている電気油圧サーボ式疲労試験機を小型化し、遠隔操作で使用できるように改造した疲労試験機本体、真空中及び不活性ガス中で行うための雰囲気槽と試験片を加熱するための加熱装置、試験片を固定するための試験片掴み、試験片の変位を測定するための接触型と非接触型伸び測定器、データ処理装置及び加熱装置を冷却するための水冷却システム等により構成される。また、本装置により実施可能な試験は、疲労試験、亀裂伝播試験、破壊靱性試験及び静的引張試験等であり、これらの試験を行うための付属機構として、直流・交流安定化電源、端子点溶接装置及び試料穴明け装置、変位計取り付け装置を装備している。本装置で行う標準的な疲労試験片は、長さ160mm、平行部直径10mmのスプリットエンド型である。ホットセルで取り扱う試料としては、かなり大型の試験片となるため、試験機容量を100KNとし、試験片の固定には油圧シリンダーを用いた試験片掴みを採用した。

Table 2に疲労試験機の本仕様、Fig. 5に疲労試験機の外観、Fig. 6にセル内設置概要、Fig. 7に試験機ダイアグラム、Fig. 8に疲労試験部詳細及びFig. 9に本試験機で試験可能な試験片を示す。

3.1 試験機本体

試験機本体は、電気油圧サーボ式疲労試験機（東京衡機製）で2本の支柱と上部トラバース、

下部ベット及び上部トラバース移動用油圧ジャッキを取り付けた本体フレーム(容量: 100 KN)、試験片に荷重を負荷するためのアクチュエータ(動的容量: 100 KN)とセルサービスイリアに設けた油圧源、負荷荷重を測定するためのロードセル(容量100 KN)、試験片を加熱するための抵抗式加熱装置、試験片の変位を測定するための接触型伸び計と非接触伸び計、及び試験片掴み具を操作するための油圧操作バルブで構成される。試験片に荷重を負荷するためのアクチュエータは、下部クロスヘッドに取り付けられており、セル外に設置した油圧源(圧力: 28MPa)から耐圧金属配管を使用して圧力が供給され、制御用サーボバルブ(容量: 3.8 l/sec, 18 l/sec)による油圧制御により試験片に荷重を負荷することができる。なお、サーボバルブは異常が生じた場合を考慮して2つのバルブが取り付けられるように設計されている。さらに、市販のアクチュエータは、ピストンの摺動部にポリアミド樹脂を使用して滑りが良くなるように設計されていたが、調査した結果、ポリアミド樹脂の耐放射線性は、良くないことが判明したため、この樹脂を使用せずに製作した。なお、ポリアミド樹脂を使用しないアクチュエータの場合でも性能的には殆ど変わらないことを確認している。

以下に低サイクル疲労試験を行うために整備した試験機各部の詳細について述べる。

3.2 試験片掴み

低サイクル疲労試験は、試験片に引張-圧縮応力を負荷するために、この応力に耐える試験片掴みを使用しなければならない。さらに、試験中においては、試験片に挫掘が生じないように、掴みの軸心を精度良く調整されていなければならない。

このようなことから、疲労試験の試験片の掴みは、遠隔操作で精度良く、且つ容易に固定できるよう油圧シリンダーと試験片固定板を組み合わせて行うものとした。Fig.10に試験片の掴みの詳細を示す。試験片は、試験片の掴み部を上下方向に駆動する油圧シリンダーと径方向に動作する試験片固定板の間に取り付けられ、セル内に設けた油圧切替えレバーによって脱着できる。試験片を固定するための押し付け圧力は、油圧シリンダーに加わる油圧を調節することによって任意に変えられるものとした。また、油圧シリンダーは、高温に耐えるようにシリンダー周囲に水冷却を施し、固定用ロッドは、接続部にセラミックを用いることにより熱伝達を防止した。さらに試験片掴み接続部にセラミック製断熱材を施し、長時間の試験において試験機各部に熱伝達が生じないようにした。(本掴みは特許を申請しており、国内においてはまだ申請中であるが、外国(USA)特許は取得した。)

3.3 加熱装置

雰囲気槽内において試験片を加熱する方法としては、抵抗加熱方式、高周波加熱方式及び直接通電方式があり、いずれも一長一短はあるが、前述した検討結果を踏まえて、試験片の全体が加熱され、且つ均熱範囲の広い抵抗加熱方式を採用した。

雰囲気槽内に取り付けられた試験片を加熱するためのヒータは、モリブデン線を使用した抵抗式のものである。ヒータの周囲には、上下に遮熱板を3重に施し、さらに遮熱板周囲に水冷ジャケットを取り付けた。これにより雰囲気槽の外側は、323K以下にすることができた。

使用温度範囲は673 K～1023 K、最高使用温度は1173 Kである。温度精度は使用温度範囲において±2 Kである。Fig.11 に加熱炉の概要を示す。

3.4 伸び測定器

本試験装置では、遠隔操作で、さらに高温真空雰囲気において試験片の伸びを測定するために、当初、非接触法での伸び計としてレーザマイクロゲージにより、試験片の罫間を測定することを検討したが、Table 3 に示すように測定精度としては十分であるが試験機を制御するためのフィードバック信号としては信号数が少なく(現状の装置で max.30msec/1 個で少なくとも1msec /1 個は必要)スムーズに制御ができないことが確認された。このため、レーザマイクロゲージは、試験片の罫間伸びの確認用とし、試験機の歪み制御用伸び計としては、接触法の歪みゲージ式伸び計を用いることとした。

歪みゲージ式伸び計の高温での使用限界は、523 K程度であるため、伸び検出用歪みゲージ部を雰囲気槽周囲の温度の低い場所に配置して、加熱炉ヒータの遮熱板の外からセラミック製測定棒を試験片に接触させて行う方法を採用した。Fig. 12 に接触型伸び測定器の詳細を示す。伸び計は雰囲気槽の蓋に取り付け、蓋の開閉動作で試験片近傍位置になるようにした。設置台は、電動式X-Yステージになっているため、真空引き昇温後においても試験片の任意の位置にセットが可能である。また接触荷重については、接触部がナイフエッジになっているため、低い圧力で接触させることが望ましいが、あまりに低い荷重では試験中に滑りが生じてしまう恐れがある。このため、伸び計の接触荷重を調整する板バネの部分に荷重の感知部(歪みゲージ方式)を設けて、4.9 Nから9.8 Nの間で調整できるようにした。また、伸び計の温度が上昇しないように、周囲に冷却ジャケットを設けて冷却ができるようにした。これらの工夫によって、試験片を加熱後に伸び計の取り付けが可能となり、試験治具の熱ひずみ等による伸び計のたわみが防止できるようになった。

3.5 真空排気装置

真空排気装置は、ホットセル背面側サービスエリアに設置して、ステンレス管でセル内の雰囲気槽に接続した。装置は、排気能力507 l/min の油回転ポンプと1200 l/sec の油拡散ポンプで構成され、バルブ類の操作は全て操作室の試験機操作盤からの遠隔操作で行えるものである。雰囲気槽は、円筒型を前後に2つに割った形状のもので、セル遮蔽窓から槽内全体の確認が可能である。槽の周囲には、レーザ光のためのガラス窓、伸び計取り付け用ポート、また槽上下にはφ100の試験片チャック治具を通す穴とベローズが取り付けられている。さらに不活性ガス中で行うために槽壁には細管を回して水で冷却をできる構造とした。到達真空度は、 1×10^{-3} Pa 以下である。Table 4 に圧力上昇試験性能表を示す。

3.6 自動制御試験システム

本装置は、試験機本体の荷重計、ストローク検出器及び歪み検出器の各増幅器からインターフェースを介してパソコンによる自動制御により、低サイクル試験、J1C・K1C 試験及び亀

裂伝播試験が行えるように設計されている。Fig. 13 に疲労試験装置の自動制御ダイアグラムを示す。また、疲労試験機には長時間の無人での連続運転ができるように、各種の警報装置を取り付けた。Table 5 に各種の機器間インターロック表を示す。

3.7 その他の装置

低サイクル疲労試験の他、亀裂伝播特性試験及び破壊靱性試験のための付属設備として、以下の装置を整備した。

①直流・交流電源装置

亀裂伝播特性試験において、亀裂長さの変化を電位差法により求めるための負荷電源として、交流法及び直流法の負荷電源の整備、及び出力電圧を測定するためのマイクロボルトメータを整備した。Fig. 14 に交流直流電源装置の外観を示す。

②端子溶接装置及び端子穴開け装置

亀裂長さの変化を電位差法により求めるための試験片電極端子取り付け用治具として、端子接続のための溶接機を整備した。また、破壊靱性試験用試験片に接続用ピンを使用して端子を接続するための穴開けを行う圧空駆動方式の高速ドリルを整備した。これらの装置は同一のX-Y-Zステージに取り付けられている。Fig. 15 に端子溶接装置及び穴開け装置の外観を示す。

③変位計取り付け装置

破壊靱性試験用開口変位測定用クリップゲージを、試験片エッジ部へ容易に遠隔操作で取り付けるための変位計取り付け装置を整備した。Fig. 16 変位計取り付け装置の外観を示す。

④加熱装置及び油圧装置冷却システム

加熱装置及び油圧装置の冷却は、材料試験関連加熱装置全般の冷却設備として使用している、閉回路の水冷却システムによって行うこととした。本システムは、水圧： 3 kg/cm^2 、流量： 150 l/min で、温度設定が任意にできる。また、長時間の連続運転となることから、冷却水の水質管理を行う必要があり、配管系内に設置したフィルターとイオン交換樹脂を使用して精製することにより維持することとした。本試験機では、本システムの冷却水を、加熱装置の電流入力端子及び雰囲気槽表面の冷却に 2 l/min 、油圧装置のオイルの冷却のために $10 \sim 20 \text{ l/min}$ の流量で使用した。

4. 試験装置の性能確認

本装置整備完了後、軸心測定、荷重計検定、伸び計検定及び昇温試験を行い、装置各部の性能を確認した。疲労試験を行う場合に、試験機ロッド及び試験片チャックの軸心精度が試験データの精度に大きな影響を及ぼすことは知られており、推奨実験法(ASTM-E 606-80 Standard Recommended practice for CONSTANT-AMPLITUDE LOW CYCLE FATIGUE

裂伝播試験が行えるように設計されている。Fig. 13 に疲労試験装置の自動制御ダイアグラムを示す。また、疲労試験機には長時間の無人での連続運転ができるように、各種の警報装置を取り付けた。Table 5 に各種の機器間インターロック表を示す。

3.7 その他の装置

低サイクル疲労試験の他、亀裂伝播特性試験及び破壊靱性試験のための付属設備として、以下の装置を整備した。

①直流・交流電源装置

亀裂伝播特性試験において、亀裂長さの変化を電位差法により求めるための負荷電源として、交流法及び直流法の負荷電源の整備、及び出力電圧を測定するためのマイクロボルトメータを整備した。Fig. 14 に交流直流電源装置の外観を示す。

②端子溶接装置及び端子穴開け装置

亀裂長さの変化を電位差法により求めるための試験片電極端子取り付け用治具として、端子接続のための溶接機を整備した。また、破壊靱性試験用試験片に接続用ピンを使用して端子を接続するための穴開けを行う圧空駆動方式の高速ドリルを整備した。これらの装置は同一の X-Y-Z ステージに取り付けられている。Fig. 15 に端子溶接装置及び穴開け装置の外観を示す。

③変位計取り付け装置

破壊靱性試験用開口変位測定用クリップゲージを、試験片エッジ部へ容易に遠隔操作で取り付けるための変位計取り付け装置を整備した。Fig. 16 変位計取り付け装置の外観を示す。

④加熱装置及び油圧装置冷却システム

加熱装置及び油圧装置の冷却は、材料試験関連加熱装置全般の冷却設備として使用している、閉回路の水冷却システムによって行うこととした。本システムは、水圧： 3 kg/cm^2 、流量： 150 l/min で、温度設定が任意にできる。また、長時間の連続運転となることから、冷却水の水質管理を行う必要があり、配管系内に設置したフィルターとイオン交換樹脂を使用して精製することにより維持することとした。本試験機では、本システムの冷却水を、加熱装置の電流入力端子及び雰囲気槽表面の冷却に 2 l/min 、油圧装置のオイルの冷却のために $10 \sim 20 \text{ l/min}$ の流量で使用した。

4. 試験装置の性能確認

本装置整備完了後、軸心測定、荷重計検定、伸び計検定及び昇温試験を行い、装置各部の性能を確認した。疲労試験を行う場合に、試験機ロッド及び試験片チャックの軸心精度が試験データの精度に大きな影響を及ぼすことは知られており、推奨実験法(ASTM-E 606-80 Standard Recommended practice for CONSTANT-AMPLITUDE LOW CYCLE FATIGUE

TESTING)²⁾では、軸心誤差が±5%以内とされている。特に引張—圧縮による低サイクル疲労試験では、軸心の調整は重要である。荷重計は長時間の安定性と本荷重計の特徴である低荷重域での精度が重要である。伸び計は、低サイクル試験時に150～300 μm で±1%の精度を有するようなものでなければならない。

4.1 軸心測定

本装置の軸心測定においては、4枚のホイール型歪ゲージを張りつけた試験片を掴みに取り付け、引張と圧縮荷重を30kNまで負荷して、その時の各ゲージの出力を確認した。この方法でさらに測定位置を変えて確認した。Table 6 に軸心測定データを示す。測定結果は、上記の標準試験法を十分に満足できるものであった。

4.2 荷重検定

本装置に使用したロードセルは、引張・圧縮両用の動的容量100kNで1/20レンジの低レンジにおいても±0.5%の精度を保証ができるものとした。すなわち、強度の小さい試験片でもロードセルの交換を必要としないものとしたことにより、軸心等の調整作業を省くことができるものとした。Table 7 に荷重検定結果を示す。荷重検定結果は、全レンジにおいて、±0.5%以内であり、十分に精度内である。

4.3 伸び計検定

伸び計は、疲労試験を行っている間、精度良く試験片の伸びを検出していなければならない。このため、伸び計の校正は、高精度マイクロメータ(1 μm)を使用した校正治具により伸び計のみをセル外で校正するとともに、さらに、セル内において雰囲気槽に取り付けた状態で校正可能な治具を製作した。これにより疲労試験試験の前後に伸び計の性能確認が随時できるようになった。Table 8 に伸び計の校正結果を示す。校正結果は、全レンジにおいて、±1%以内の誤差であり、十分に精度内である。

4.4 温度測定

一般に試験中の試験片温度の測定は、試験片平行部に熱電対を接触させ縛りつけるか、又は溶接を行って測定を実施する方法がある。疲労試験の場合、試験片は表面粗さ精度が重要であり、溶接法で熱電対を取り付けた場合、溶接部に亀裂が入る恐れがあるために一般的には前者をとる。しかし、遠隔操作による疲労試験では熱電対の取り付けが困難なために、同一形状の非照射試験片に熱電対を接触させ縛りつけ、試験片の近傍に設けた加熱ヒータ制御熱電対との温度差を求める方法で試験片温度と制御温度との校正曲線を取得することとした。

温度校正は、試験片掴み具に取り付けた試験片の平行部に3本の熱電対を取り付け、試験片近傍に設けた制御用熱電対で加熱ヒータを制御して目標とする温度まで昇温し、この時の温度差を確認した後、再昇温試験を行い目標温度を確認した。Fig.17 に昇温試験データ例として、制御用熱電対の設定温度を808Kとし、723Kまで加熱した試験片平行部の温度—時間チ

ヤートを示す。再昇温試験の結果、使用温度範囲の673 Kから1173 Kにおいて、温度精度 ± 2 Kを十分に満足するものであった。

5. 低サイクル疲労試験

金属材料の高温低サイクル疲労試験は、広く研究機関で行われている。しかし、その試験法に関しては、米国のASTM、日本J SMS、J W E Sの規格あるいはHanford、Thomasの提案などがあり(Table 9)、国際的な標準試験法があるわけではない。これらの試験法の内容も一般的記述であるために試験片形状を始めとした試験条件は、各機関独自の方法で実施されているのが現状である。

本試験は、ASTM-E 606-80の推奨実験法で行った。Table 9に各試験法の比較を示す。

本試験装置を用いて、原子炉圧力容器材2 1/4Cr-1Mo鋼の低サイクル疲労試験^{3,4)}を実施した。試験は、非照射材及び照射材について行い、有効な疲労試験データを得ることができた。以下に、これらの試験結果について述べる。

5.1 非照射材試験

H T T R原子炉圧力容器材2 1/4Cr-1Mo鋼の非照射材を用いた低サイクル疲労試験は、コールド試験機(東海研究所、熱エネルギー研究室)と遠隔操作型試験機との機差を確認するため、同一ロット材料、同一形状の試験片を用いて行った。コールド試験機は、試験片を加熱するために高周波を用い、伸び計は、今回開発した遠隔操作型疲労試験機と同様に接触方式により測定するものである。

試験は、温度: 723 K、ひずみ速度: 0.1%/sec、試験片歪量: 0.75%、1.0%、1.5%の3条件で実施した。試験雰囲気は真空中(1×10^{-3} Pa)とした。なお、試験片形状は、平行部に銑付きと銑無しものを準備した。Table 10に試験に使用した材料の成分を示す。また、Fig. 18に試験片形状を示す。銑付き試験片は、非接触方法で伸びを測定するために準備したものである。

試験結果は、後述の照射後試験結果と合わせてFig. 19に示す。試験片ひずみ量と疲労サイクル数の関係図から、コールド試験機と遠隔操作型試験機の間機差の無いことが確認された。

5.2 照射材試験

照射材(照射量: 1×10^{23} n/m²)の低サイクル疲労試験は、非照射材試験と同様の試験片を用いて、試験温度723 Kにおいて、試験片歪量が0.75%、1.5%の三角波及び1.5%で引張側10分保持時間の台形波、歪み速度を0.1%/secで実施した。Fig. 19に非照射材及び照射材の試験結果を示す。Fig. 20に試験温度: 723 K、歪速度: 0.1%/sec及び歪量: 1.5%の試験条件で実施した低サイクル疲労試験における非照射材と照射材の引張側荷重一

ヤートを示す。再昇温試験の結果、使用温度範囲の673 Kから1173 Kにおいて、温度精度 ± 2 Kを十分に満足するものであった。

5. 低サイクル疲労試験

金属材料の高温低サイクル疲労試験は、広く研究機関で行われている。しかし、その試験法に関しては、米国のASTM、日本J SMS、J W E Sの規格あるいはHanford、Thomasの提案などがあり(Table 9)、国際的な標準試験法があるわけではない。これらの試験法の内容も一般的記述であるために試験片形状を始めとした試験条件は、各機関独自の方法で実施されているのが現状である。

本試験は、ASTM-E 606-80の推奨実験法で行った。Table 9に各試験法の比較を示す。

本試験装置を用いて、原子炉圧力容器材2 1/4Cr-1Mo鋼の低サイクル疲労試験^{3,4)}を実施した。試験は、非照射材及び照射材について行い、有効な疲労試験データを得ることができた。以下に、これらの試験結果について述べる。

5.1 非照射材試験

H T T R原子炉圧力容器材2 1/4Cr-1Mo鋼の非照射材を用いた低サイクル疲労試験は、コールド試験機(東海研究所、熱エネルギー研究室)と遠隔操作型試験機との機差を確認するため、同一ロット材料、同一形状の試験片を用いて行った。コールド試験機は、試験片を加熱するために高周波を用い、伸び計は、今回開発した遠隔操作型疲労試験機と同様に接触方式により測定するものである。

試験は、温度: 723 K、ひずみ速度: 0.1%/sec、試験片歪量: 0.75%、1.0%、1.5%の3条件で実施した。試験雰囲気は真空中(1×10^{-3} Pa)とした。なお、試験片形状は、平行部に銑付きと銑無しものを準備した。Table 10に試験に使用した材料の成分を示す。また、Fig. 18に試験片形状を示す。銑付き試験片は、非接触方法で伸びを測定するために準備したものである。

試験結果は、後述の照射後試験結果と合わせてFig. 19に示す。試験片ひずみ量と疲労サイクル数の関係図から、コールド試験機と遠隔操作型試験機の間に機差の無いことが確認された。

5.2 照射材試験

照射材(照射量: 1×10^{23} n/m²)の低サイクル疲労試験は、非照射材試験と同様の試験片を用いて、試験温度723 Kにおいて、試験片歪量が0.75%、1.5%の三角波及び1.5%で引張側10分保持時間の台形波、歪み速度を0.1%/secで実施した。Fig. 19に非照射材及び照射材の試験結果を示す。Fig. 20に試験温度: 723 K、歪速度: 0.1%/sec及び歪量: 1.5%の試験条件で実施した低サイクル疲労試験における非照射材と照射材の引張側荷重-

疲労サイクル数の関係、及びFig. 21 に代表的な疲労破面を示す。

試験結果は、本試験の照射量において、鏝無し試験片では非照射材と照射材の疲労寿命に差がないこと。また、鏝付き試験片では疲労試験初期の段階で、最大応力の増加が見られるため、照射材の疲労寿命が非照射材の疲労寿命に比べて僅かに減少していることが確認された。

6. まとめ

遠隔操作により高温真空中での疲労試験が可能な装置を開発し、所期の目標を達成するとともに、以下のような知見を得ることができた。

1. 油圧シリンダーと試験片受けを用いた試験片掴み具を開発したことにより、容易にマニプレータ操作で試験片の着脱が可能となった。特に低サイクル疲労試験のように引張-圧縮荷重のかかる試験片の固定には有効な手法である。
2. 伸び測定において、高温真空中で伸び測定ができるものではなく、また接触荷重を測定できるものはなかった。このため、真空中で使用できるX-Yステージと接触荷重検出機構を開発したことにより、疲労試験において遠隔操作で伸び測定が可能となった。
3. 油圧サーボ型疲労試験機では制御信号に対してアクチュエータが高速度で追従するために、高サイクル疲労試験のような動的荷重での試験ができる反面、異常歪信号に対してもアクチュエータが高速度で追従し、試験片の破壊にも繋がりがかねない。例えば、試験片平行部に伸び計をセットして歪制御での試験中、伸び計に滑りが生じた場合、試験片に予定外の変形が起ってしまう。照射後試験に供される試験片数は限られた数量（鏝付き：3本、鏝無し：3本程度）であるため、このようなことを防止する必要があり、このアクチュエータと伸び計からの信号の偏差を取り、異常信号が発生した場合には油圧源をカットする方法を採用した。これにより、伸び計の滑り、ノイズ等による異常信号によって試験片を破壊することがなくなった。
4. 高温試験での各種治具の熱伝達を少なくするために、継ぎ手部にセラミック材（ホトベール）を挟み込むんだ。セラミック材は、一般に圧縮荷重には強靱であるが、引張力に対しては弱いため、ボルトで挟み込むことにより引張荷重負荷での試験治具の使用を可能とした。
5. 非接触法での伸び測定法は、高温真空雰囲気中及び遠隔操作においては有効な方法である。この方法については、今後も開発を継続していく考えである。

疲労サイクル数の関係、及びFig. 21 に代表的な疲労破面を示す。

試験結果は、本試験の照射量において、鍔無し試験片では非照射材と照射材の疲労寿命に差がないこと。また、鍔付き試験片では疲労試験初期の段階で、最大応力の増加が見られるため、照射材の疲労寿命が非照射材の疲労寿命に比べて僅かに減少していることが確認された。

6. まとめ

遠隔操作により高温真空中での疲労試験が可能な装置を開発し、所期の目標を達成するとともに、以下のような知見を得ることができた。

1. 油圧シリンダーと試験片受けを用いた試験片掴み具を開発したことにより、容易にマニプレータ操作で試験片の着脱が可能となった。特に低サイクル疲労試験のように引張-圧縮荷重のかかる試験片の固定には有効な手法である。
2. 伸び測定において、高温真空中で伸び測定ができるものはなく、また接触荷重を測定できるものはなかった。このため、真空中で使用できるX-Yステージと接触荷重検出機構を開発したことにより、疲労試験において遠隔操作で伸び測定が可能となった。
3. 油圧サーボ型疲労試験機では制御信号に対してアクチュエータが高速度で追従するために、高サイクル疲労試験のような動的荷重での試験ができる反面、異常歪信号に対してもアクチュエータが高速度で追従し、試験片の破壊にも繋がりがねない。例えば、試験片平行部に伸び計をセットして歪制御での試験中、伸び計に滑りが生じた場合、試験片に予定外の変形が起ってしまう。照射後試験に供される試験片数は限られた数量（鍔付き：3本、鍔無し：3本程度）であるため、このようなことを防止する必要があり、このアクチュエータと伸び計からの信号の偏差を取り、異常信号が発生した場合には油圧源をカットする方法を採用した。これにより、伸び計の滑り、ノイズ等による異常信号によって試験片を破壊することがなくなった。
4. 高温試験での各種治具の熱伝達を少なくするために、継ぎ手部にセラミック材（ホトベール）を挟み込むんだ。セラミック材は、一般に圧縮荷重には強靱であるが、引張力に対しては弱いため、ボルトで挟み込むことにより引張荷重負荷での試験治具の使用を可能とした。
5. 非接触法での伸び測定法は、高温真空雰囲気中及び遠隔操作においては有効な方法である。この方法については、今後も開発を継続していく考えである。

謝辞

本試験装置の開発に当たり、有益な助言をいただいた新保利定材料試験炉部長、小山田六郎材料試験炉前部長に深く感謝致します。また、本報告書をまとめるに当たっては、桜井文雄照射第1課長及びホットラボ課の諸氏に多くの貴重な助言をいただいた。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 辻 宏和・近藤 達男: 多目的高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中高温疲労試験装置の開発
JAERI-M82-082 (1982)
- (2) ASTM E606-80, Standard Recommended Practice for Constant-Amplitude Low-Cycle Fatigue Testing
- (3) Sehwan Chi, Masahide Suzuki, et.al : The Effect of Hold Time on Low Cycle Fatigue Behavior of 2 1/4 Cr-1Mo Steel, ISIJ International, Vol. 32(1992), No4, pp. 545-552
- (4) G.B.Thomas and C.Amzallag : Constant-Amplitude Low Cycle Fatigue Testing, Guidelines for a Comparative Programme (Revised April 1985)

謝辞

本試験装置の開発に当たり、有益な助言をいただいた新保利定材料試験炉部長、小山田六郎材料試験炉前部長に深く感謝致します。また、本報告書をまとめるに当たっては、桜井文雄照射第1課長及びホットラボ課の諸氏に多くの貴重な助言をいただいた。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 辻 宏和・近藤 達男: 多目的高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中高温疲労試験装置の開発
JAERI-M82-082 (1982)
- (2) ASTM E606-80, Standard Recommended Practice for Constant-Amplitude Low-Cycle Fatigue Testing
- (3) Sehwan Chi, Masahide Suzuki, et.al : The Effect of Hold Time on Low Cycle Fatigue Behavior of 2 1/4 Cr-1Mo Steel, ISIJ International, Vol. 32(1992), No4, pp. 545-552
- (4) G.B.Thomas and C.Amzallag : Constant-Amplitude Low Cycle Fatigue Testing, Guidelines for a Comparative Programme (Revised April 1985)

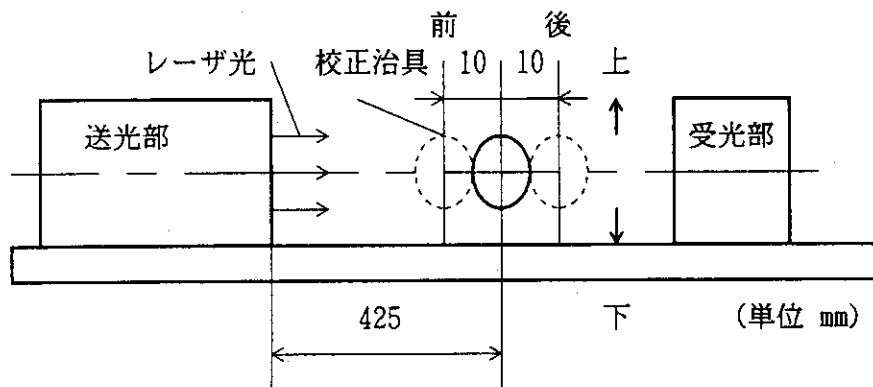
Table 1 疲労試験装置の検討

検 討 項 目	種 類	特 徴
①疲労試験機	機械螺子式アクチュエータ	<ul style="list-style-type: none"> ・占有面積が小さい ・応答速度が遅い ・バックラッシュが生じる
	<u>電気油圧式アクチュエータ</u>	<ul style="list-style-type: none"> ・高サイクル・低サイクル試験等のような試験にも対応できる
②試験片固定	螺子固定式チャック	<ul style="list-style-type: none"> ・遠隔操作での締め付けが困難 ・容易に軸芯等の調整ができる
	<u>油圧固定式チャック</u>	<ul style="list-style-type: none"> ・締め付け機構が大きくなる ・高温での使用に工夫が必要 ・バルブ操作での固定が容易
③伸び検出器	<u>接触型</u> （歪ゲージ式）	<ul style="list-style-type: none"> ・サンプリング速度が早い ・試験片接触部に傷が着きやすい ・冷却を必要とする
	非接触型（レーザーマイクロゲージ）	<ul style="list-style-type: none"> ・サンプリング速度が遅い ・覗き窓を通して測定ができる
④試験片加熱	高周波加熱法	<ul style="list-style-type: none"> ・均熱範囲が狭い（コイルの調整が必要） ・試験片の装着が困難
	<u>抵抗加熱法</u>	<ul style="list-style-type: none"> ・温度が一定になるまでに時間がかかる ・均熱範囲が広くとれる
	直接通電法	<ul style="list-style-type: none"> ・設備が大型となる ・均熱範囲が狭い

Table 2 疲労試験機的主要仕様

①試験機型式	電気油圧サーボ式疲労試験機
②アクチュエータ容量	100KN
③操作圧力	28MPa
④荷重計容量	動的±100KN 静的±80KN
⑤荷重精度	F. S ± 0.5%
⑥周波数	100Hz以下
⑦ストローク	±50mm
⑧試験温度	max. 1173K
⑨温度精度	±2K
⑩試験雰囲気	真空中または不活性ガス中
⑪到達真空度	1×10^{-3} Pa

Table 3 レーザマイクロゲージの精度確認データ



①校正治具φ20mm ±1.5 μm φ

上下/ 前後	前10mm	中心	後10mm
上 15	20.002	20.001	20.001
上 10	20.003	20.003	20.003
上 5	20.002	20.001	20.002
走査中心	19.998	19.998	19.999
下 5	19.999	20.000	20.000
下 10	19.999	19.999	20.000
下 15	19.997	19.998	20.000

②校正治具φ25mm ±1.5 μm φ

上下/ 前後	前10mm	中心	後10mm
上 15	25.002	25.001	25.001
上 10	25.003	25.002	25.002
上 5	24.997	24.997	24.997
走査中心	24.997	24.997	24.998
下 5	24.999	25.000	25.001
下 10	24.998	24.999	25.000
下 15	24.999	25.001	25.002

③校正治具φ30mm ±1.5 μm φ

上下/ 前後	前10mm	中心	後10mm
上 15			
上 10	30.003	30.002	30.000
上 5	30.000	30.000	30.000
走査中心	29.998	29.999	29.999
下 5	30.000	30.000	30.001
下 10	30.001	30.000	30.004
下 15			

④校正治具φ40mm ±2 μm φ

上下/ 前後	前10mm	中心	後10mm
上 5	39.999	39.999	39.998
走査中心	39.999	40.000	40.001
下 5	39.998	40.000	40.001

⑤校正治具φ50mm ±2 μm φ

上下/ 前後	前10mm	中心	後10mm
上 5			
走査中心	49.999	49.999	50.000
下 5			

Table 4 圧力上昇試験性能表

装置名		疲労試験機用真空加熱炉				
排気系 説明 細	名称	排気速度	到達真空度	所要電力		水量
	油拡散ポンプ SF-6	1200 ℓ/sec	5×10^{-7} Torr	1φ 200V, 1kW		3 ℓ /min
	油回転ポンプ D-650K	507 ℓ/min	2×10^{-4} Torr	3φ 200V, 1.1kW		
室温	17°C	漏洩量	7.2×10^{-6} Torr ℓ/s	容器径	φ450	
湿度	44%	到達圧力	2.7×10^{-6} Torr	内容量	74 ℓ	
真空槽の状態		600 °C, 30min ベーキング後, 連続排気 11hr				

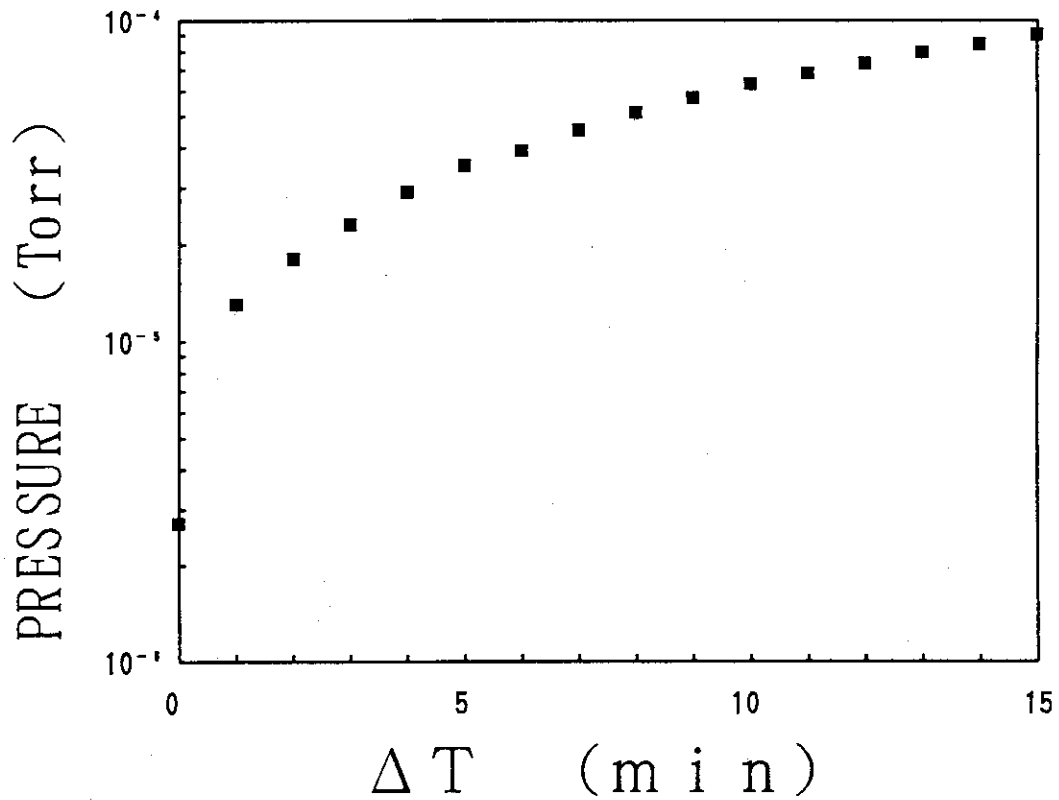


Table 5 機器間インターロック表

	インターロック		各機器の動作							備考
	項目	設定値	恒温槽(t- θ)	油圧源	スタートストップ弁	発振器	ブザー	アラーム表示		
制御装置	レベル設定オーバー	12.5V ~ -12.5	—	—	off	off	on	Limit 1 ~ 4		
	カウンタプリアセット到達	0 ~ 99999999回	—	—	off	off	on	Count over		
	電位差法リミット		—	—	off	off	on	Limit 4		
	油圧源異常	—	—	off	off	off	on	Pump		
油圧源	油温上昇	60 °C	—	off	off	off	on	Oil Temp. -H		
	油面低下		—	off	off	off	on	Oil Level-L		
	フィルタ目づまり	3.5kgf/cm ²	—	—				Filter		
	ポンプモータ過電流	35A	—	off	off	off	on	Pump O.-Curr.		
	サクションモータ過電流	1.4A	—	off	off	off	on	Suction O.-Curr.		
	冷却水断水	20 l/min	—	off	off	off	on	Water Flow		
	冷却水過昇温	40 °C	—	off	off	off	on	Water Temp.-H		
	恒温槽異常	—	off	off	off	off	on	Heater		
	冷却水断水	1.5 l/min	off	off	off	off	on	Water Flow		
	冷却水過昇温	40 °C	off	off	off	off	on	Water Temp.-H		
恒温槽	試験温度過昇温	+10°C	off	off	off	off	on	Test Temp.-H		
	試験温度過降温	-10°C	off	off	off	off	on	Test Temp.-L		

Table 6 校正治具による軸心測定

load kN	dir. of Load	Strain gauge No.				(A)	(B)	(B)
		G 1	G 2	G 3	G 4	$\frac{G1+G2+G3+G4}{4}$	$\frac{G_{max} - G_{min}}{2}$	$\frac{(B)}{(A)}$ %
5	Ten.	302	327	319	305	1253/4=313	25/2=12.5	3.99
10	Ten.	635	652	658	645	2590/4=648	23/2=11.5	1.77
15	Ten.	948	938	949	929	3764/4=941	20/2=10	1.06
20	Ten.	1229	1242	1255	1223	4949/4=1237	32/2=16	1.29
25	Ten.	1561	1587	1594	1562	6304/4=1576	33/2=16.5	1.04
30	Ten.	2585	2600	2663	2606	10454/4=2614	78/2=39	1.49
5	Com.	313	295	288	303	1199/4=300	25/2=12.5	4.16
10	Com.	626	601	625	630	2482/4=621	29/2=14.5	2.33
15	Com.	898	876	901	892	3567/4=892	25/2=12.5	1.40
20	Com.	1212	1154	1201	1175	4742/4=1186	58/2=29	2.44
25	Com.	1534	1500	1548	1542	6124/4=1531	48/2=24	1.56
30	Com.	2265	2209	2355	2312	9141/4=2285	146/2=73	3.19

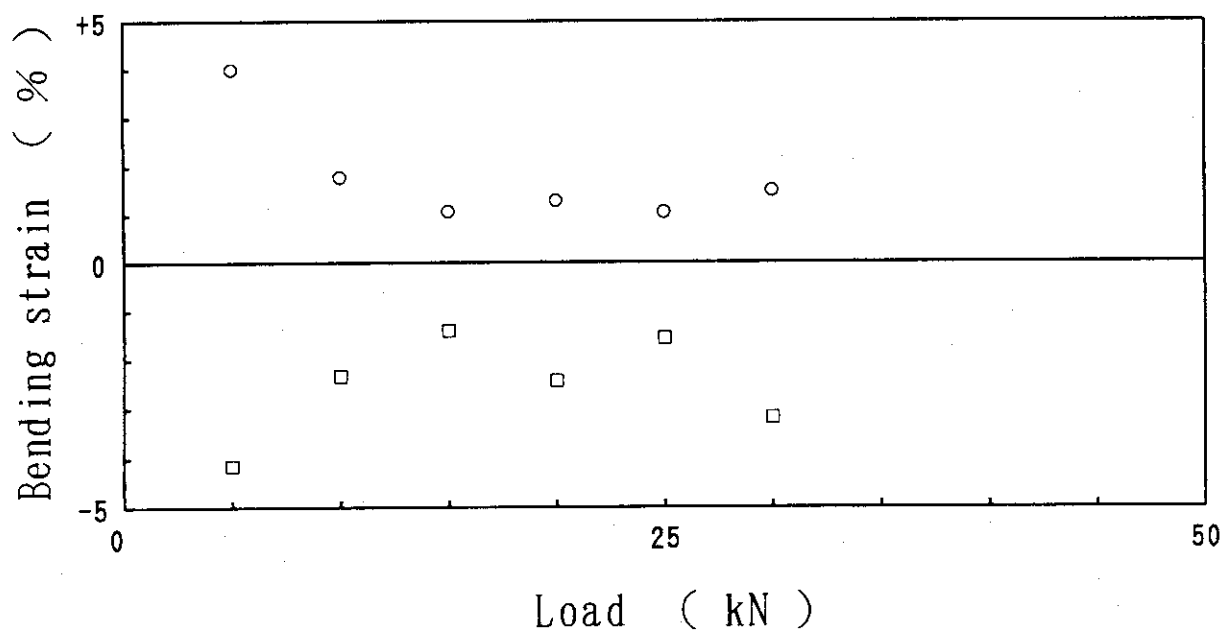


Table 7 荷重検出器検査成績表

荷重レンジ 1 (0~±10tf)			荷重レンジ 2 (0~±5tf)		
基準荷重(tf)	指示値(tf)	誤差	基準荷重(tf)	指示値(tf)	誤差
10	10.0006	+0.006			
8	8.0004	+0.004			
6	6.0001	+0.001			
4	3.9999	+0.001			
2	1.9996	+0.004			
0	0.0000	0.000			
-2	-0.0002	+0.002			
-4	-0.0009	-0.001			
-6	-0.0011	+0.001			
-8	-0.0008	-0.001			
-10	-0.0004	-0.006			

荷重レンジ 5 (0~±2tf)			荷重レンジ 10 (0~±1tf)		
基準荷重(tf)	指示値(tf)	誤差	基準荷重(tf)	指示値(tf)	誤差
2	2.0024	+0.012			
1.6	1.6000	+0.010			
1.2	1.2000	+0.011			
0.8	0.7999	+0.009			
0.4	0.4017	+0.009			
0	0.0000	0.000			
-0.4	-0.4017	+0.009			
-0.8	-0.8000	+0.008			
-1.2	-1.2000	+0.008			
-1.6	-1.6000	+0.022			
-2	-2.0037	-0.019			

荷重レンジ 2 (0~±5tf)			荷重レンジ 5 (0~±1tf)		
基準荷重(tf)	指示値(tf)	誤差	基準荷重(tf)	指示値(tf)	誤差
5	5.0003	+0.006			
4	4.0002	+0.004			
3	2.9998	+0.004			
2	1.9998	+0.002			
1	0.9998	+0.004			
0	0.0000	0.000			
-1	-0.9998	+0.004			
-2	-1.9999	-0.002			
-3	-3.0001	+0.002			
-4	-4.0002	-0.004			
-5	-5.0003	-0.006			

Table 8 伸び計検査成績表

×1レンジ (±1mm/±10V)			×2レンジ (±0.5mm/±10V)		
基準歪(mm)	指示電圧(V)	誤差(%)	基準歪(mm)	指示電圧(V)	誤差(%)
1.0	9.925	-0.75			
0.8	7.943	-0.57			
0.6	5.973	-0.27			
0.4	3.998	-0.16			
0.2	1.996	-0.04			
0	0.000	0.00			
-0.2	-2.004	0.04			
-0.4	-4.001	0.15			
-0.6	-6.015	0.15			
-0.8	-8.034	0.34			
-1.0	-10.054	0.54			

×5レンジ (±0.2mm/±10V)			×10レンジ (±0.1mm/±10V)		
基準歪(mm)	指示電圧(V)	誤差(%)	基準歪(mm)	指示電圧(V)	誤差(%)
0.20	10.003	-0.03			
0.16	7.998	-0.14			
0.12	5.995	-0.15			
0.08	4.000	0.02			
0.04	2.005	0.05			
0	0.000	0.00			
-0.04	-2.007	0.07			
-0.08	-4.011	0.17			
-0.12	-5.999	-0.02			
-0.16	-7.993	-0.23			
-0.20	-9.977	-0.23			

×1レンジ (±1mm/±10V)			×2レンジ (±0.5mm/±10V)		
基準歪(mm)	指示電圧(V)	誤差(%)	基準歪(mm)	指示電圧(V)	誤差(%)
0.5	10.059	0.59			
0.4	8.047	0.47			
0.3	6.026	0.26			
0.2	4.012	0.12			
0.1	2.001	0.01			
0	0.000	0.00			
-0.1	-2.015	0.15			
-0.2	-4.004	0.04			
-0.3	-6.007	0.07			
-0.4	-8.001	0.01			
-0.5	-9.986	-0.14			

Table 9 高温低サイクル疲労試験法の比較

	ASTM E606	Hanford	JSMS	JWES	Thomas
Specimen	Diameter d Parallel length L Gauge length GL Shoulder radius R	2d~4d	10mm 40mm d~2d	≥6mm ≥GL+d GL/d ≥ 1 R/d ≥ 2	6~12 mm 2d~4d 2d~4d R/d < 2
	Surface roughness	≤ 0.2 μm	Emery No. 400 or better (≤ 0.6 μm)	Emery No. 400 or better	Roughness sensitive material < 0.2 μm
Testing machine	Bending strain ≤ 5 % of min. Δε	Bending stress ≤ 5 % of axial stress	No torsion load at specimen setting	Bending stress ≤ 5 % of axial stress	Bending stress ≤ 5 % of axial stress
	Temperature control	—	Less than ±10°C during heating and cooling period	—	R.T ~ 600 °C ± 3°C 600 ~ 800 °C ± 4°C 800 ~ 1000 °C ± 6°C
Thermocouple setting	—	Spot weld or winding	Spot weld	Spot weld for induction heating Winding for furnace heating	Spot weld on shoulder induction heating Winding for furnace heating
Definition of failure	Complete separation or cycle when σ _{tens.} ≤ x % of σ _{comp.}	Cycle when Δσ ≤ 0.95Δσ _{res.}	Cycle when Δσ _{tens.} ≤ 3/4 Δσ _{tens.}	Cycle when Δσ _{tens.} ≤ (3/4 or 0.9) × Δσ _{tens.}	Several methods

Table 10 2 1/4Cr-1Mo 鋼 試験片の化学成分

(in wt %)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
0.10	0.13	0.55	0.005	0.004	—	—	2.44	1.05	—

加熱方法	設備	加熱方式	均熱範囲
高周波加熱法	大型装置が必要	局部加熱方式	狭い
直接通電法	大電流が必要	局部加熱方式	狭い
抵抗加熱法	比較的小型	全体加熱方式	広い

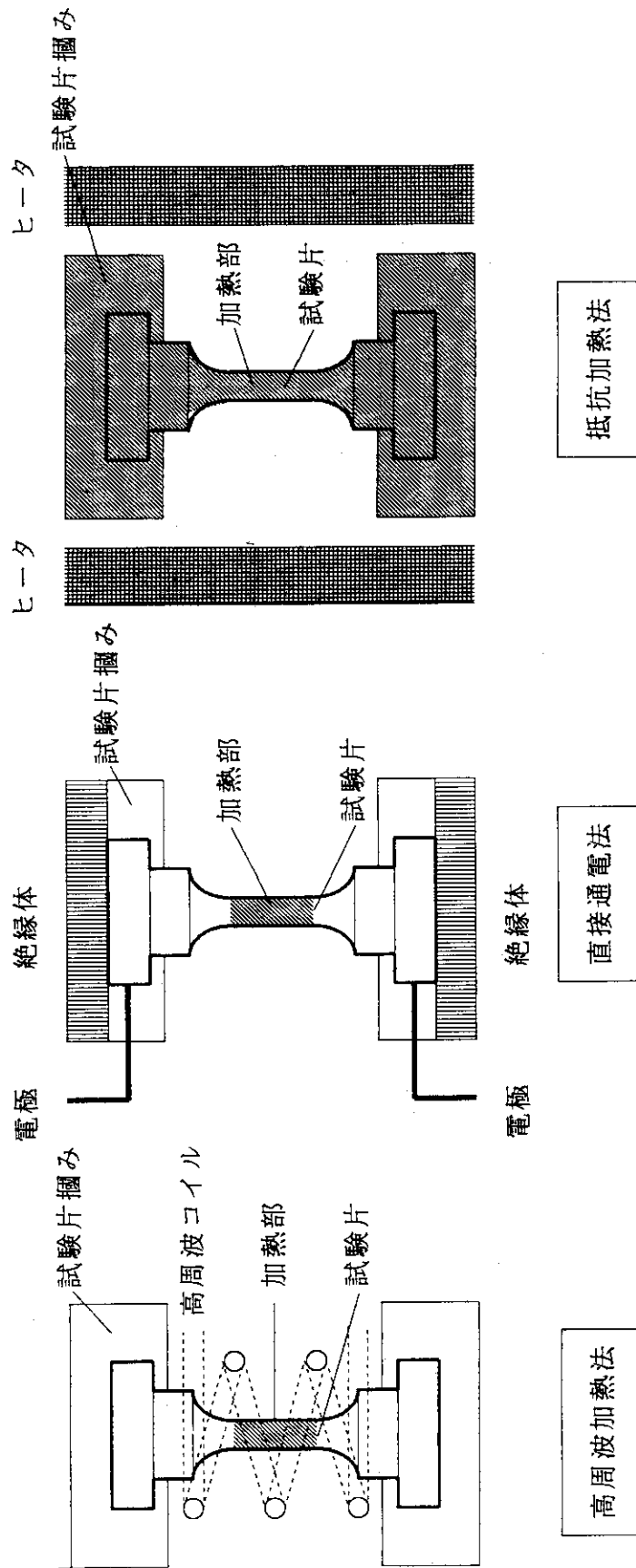


Fig. 1 試験片加熱方法の比較

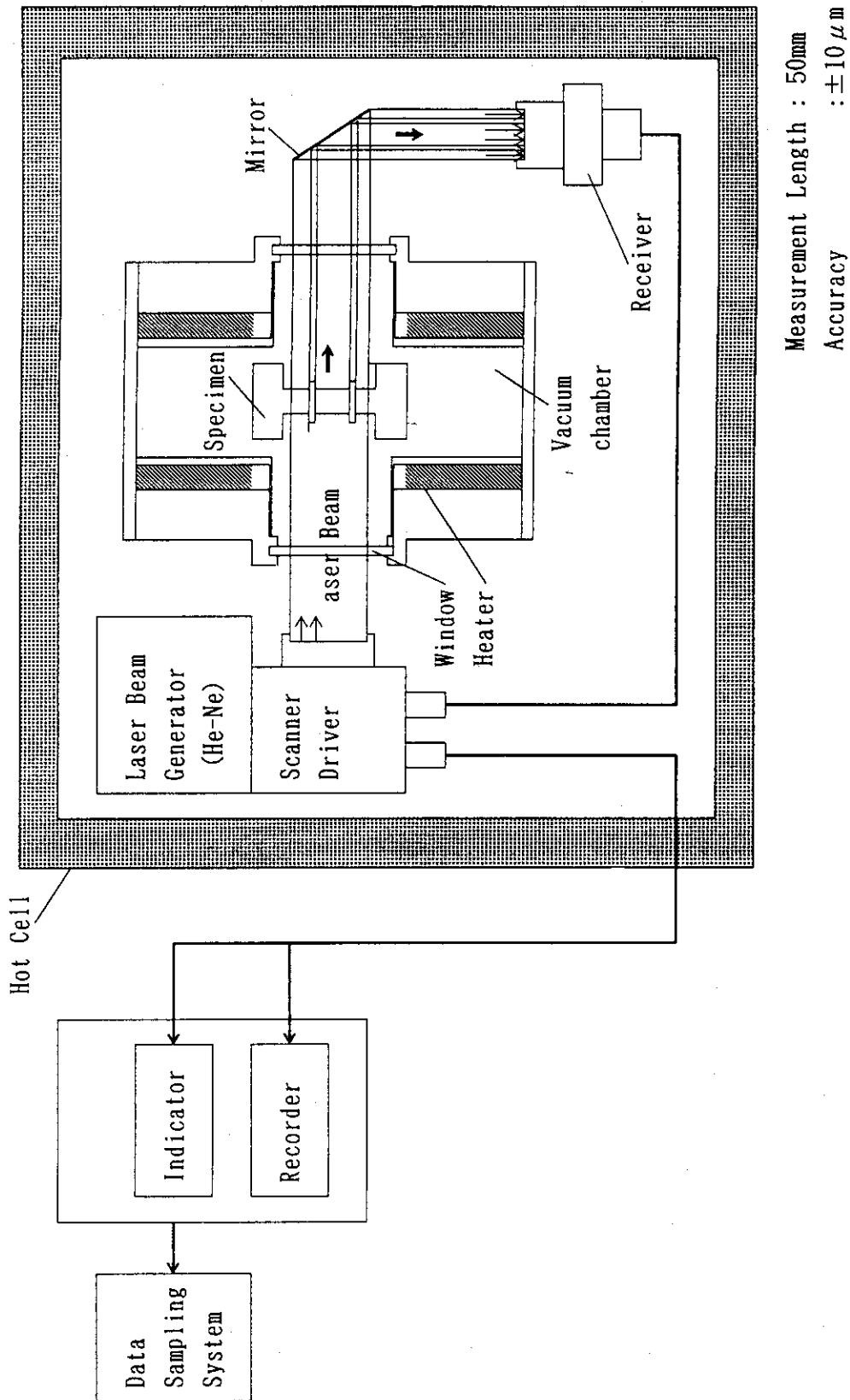


Fig. 2 非接触型伸び測定器の特徴

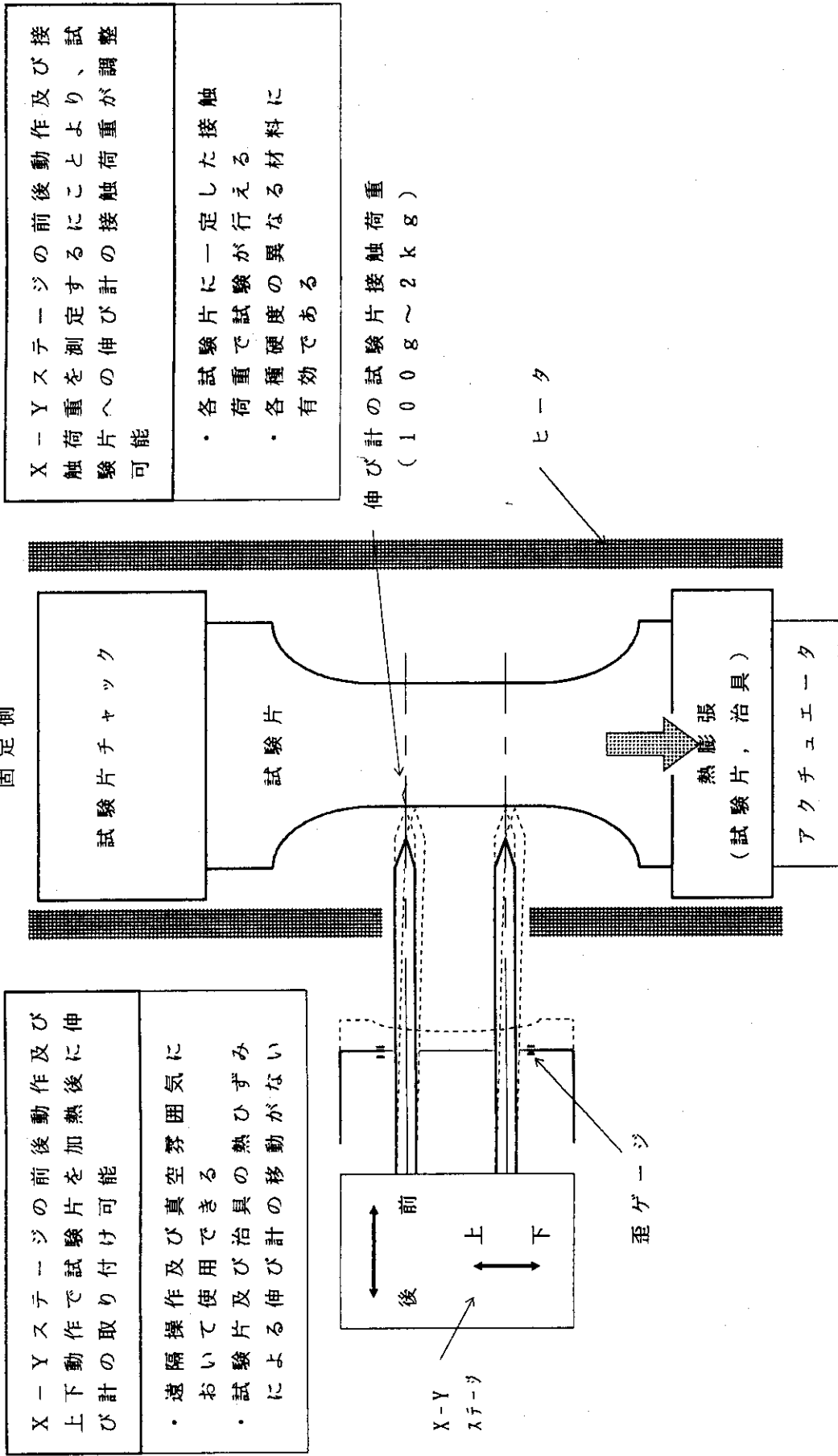
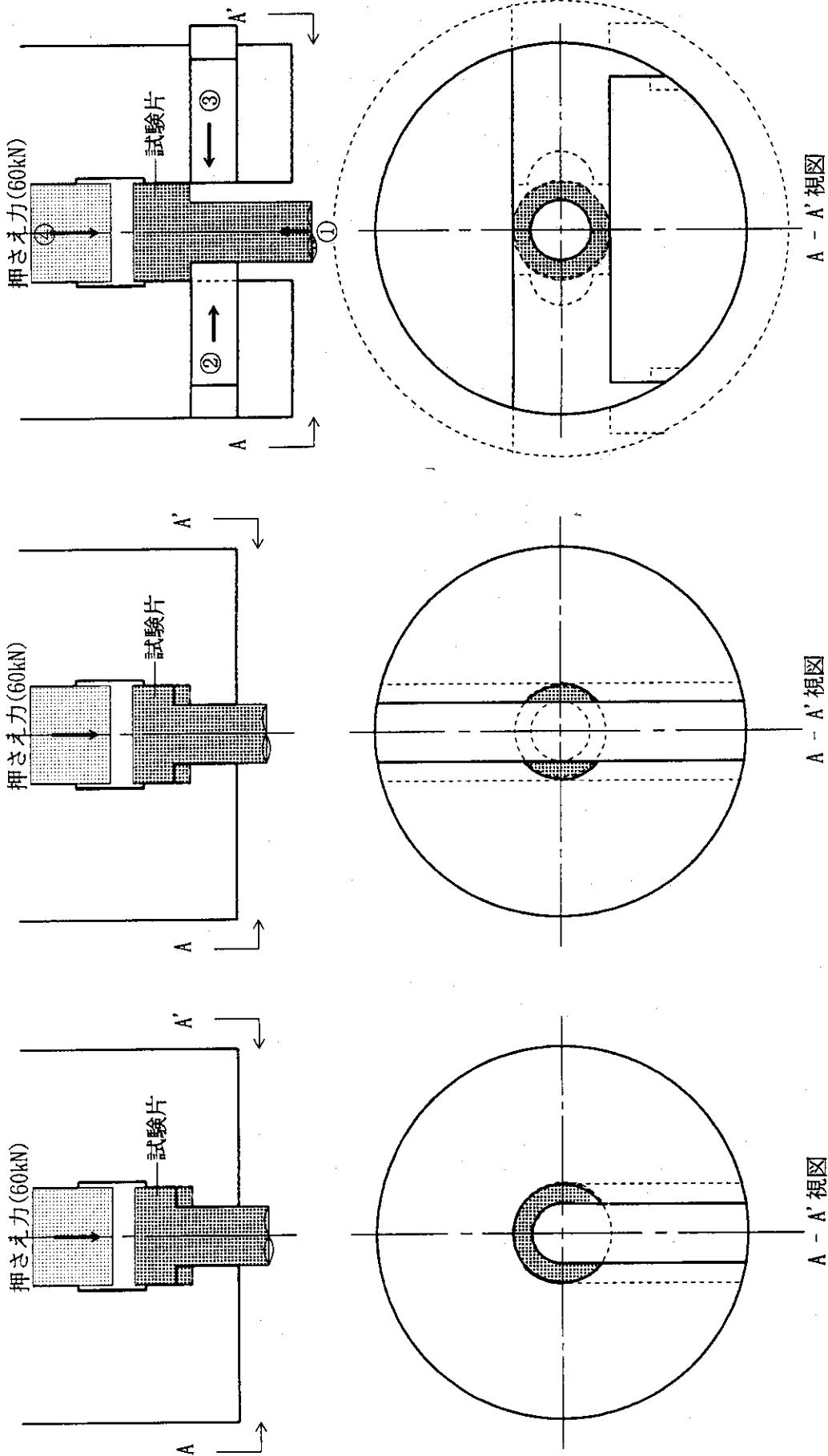


Fig. 3 接触型伸び測定器 (レーザーマイクログージ)



③平行板受け型

①落とし込み型 (前後方向空き)

②落とし込み型 (前方向空き)

Fig. 4 試験片固定方法の比較

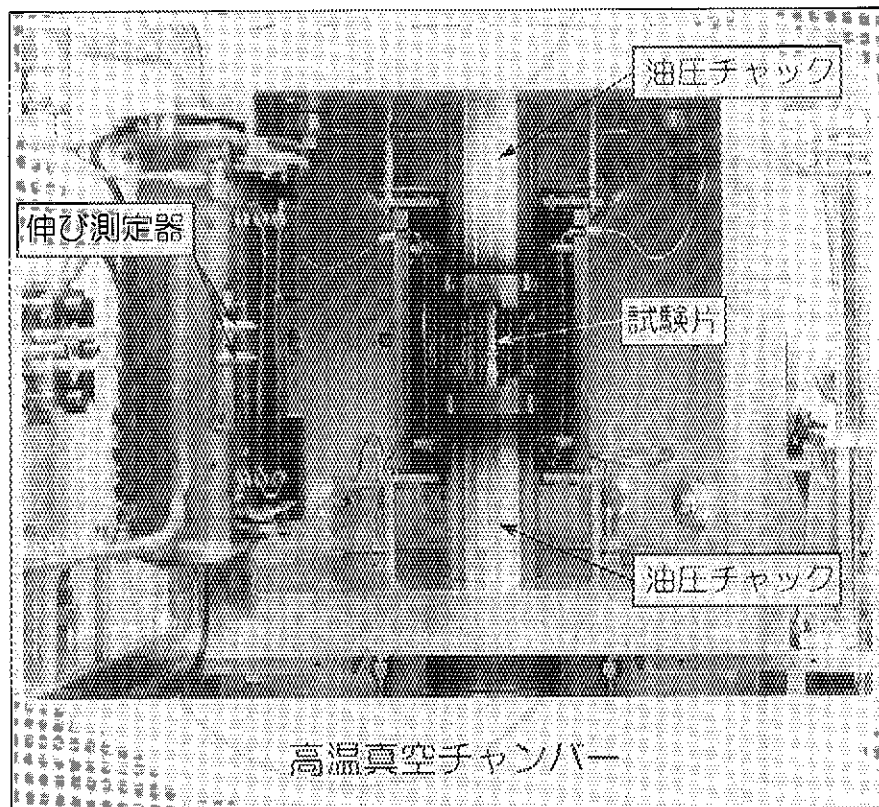
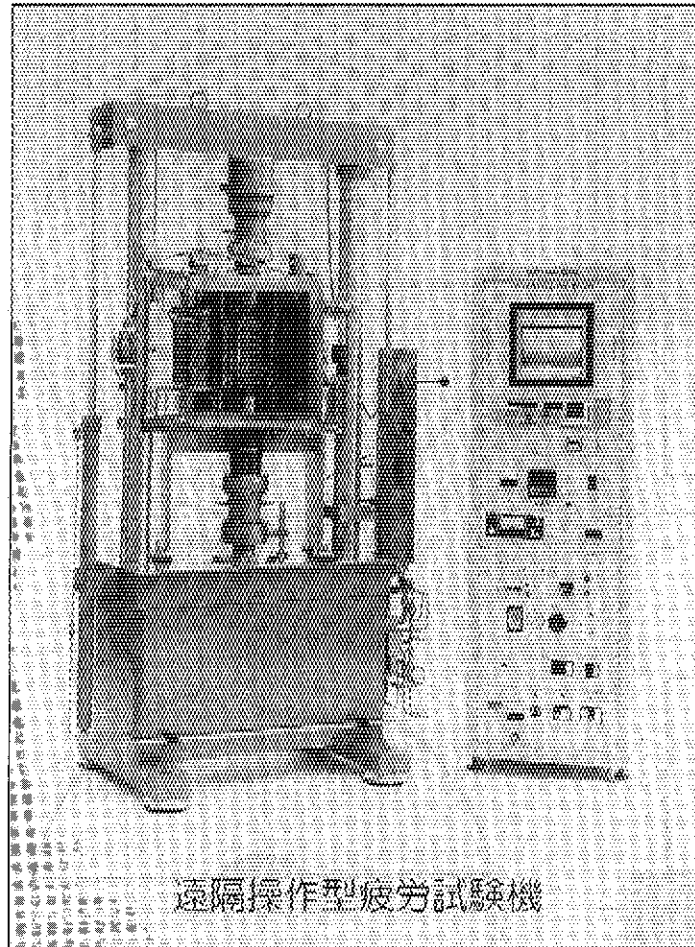


Fig. 5 疲労試験機の外観
-24-

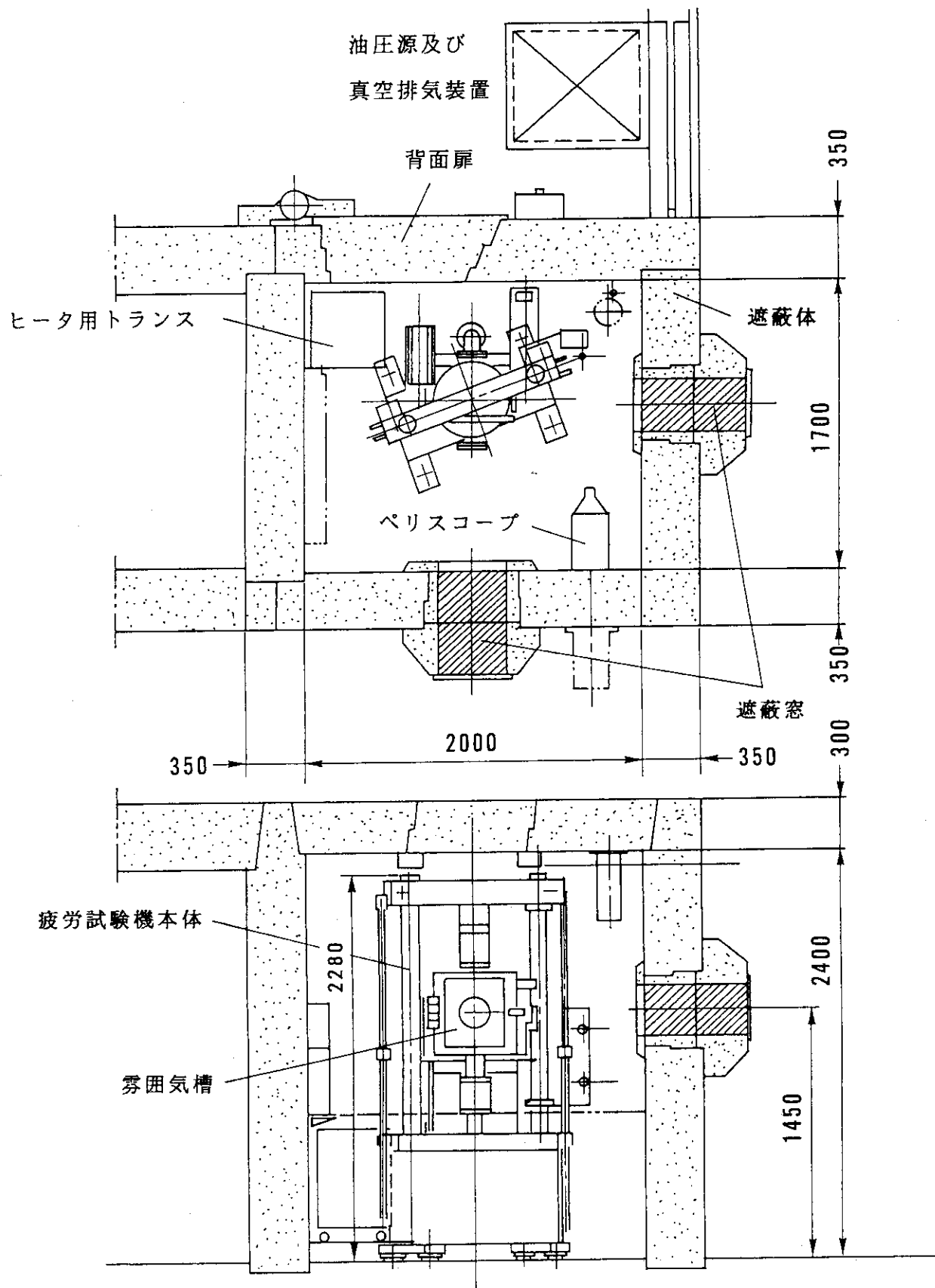


Fig. 6 疲労試験機セル内設置概要

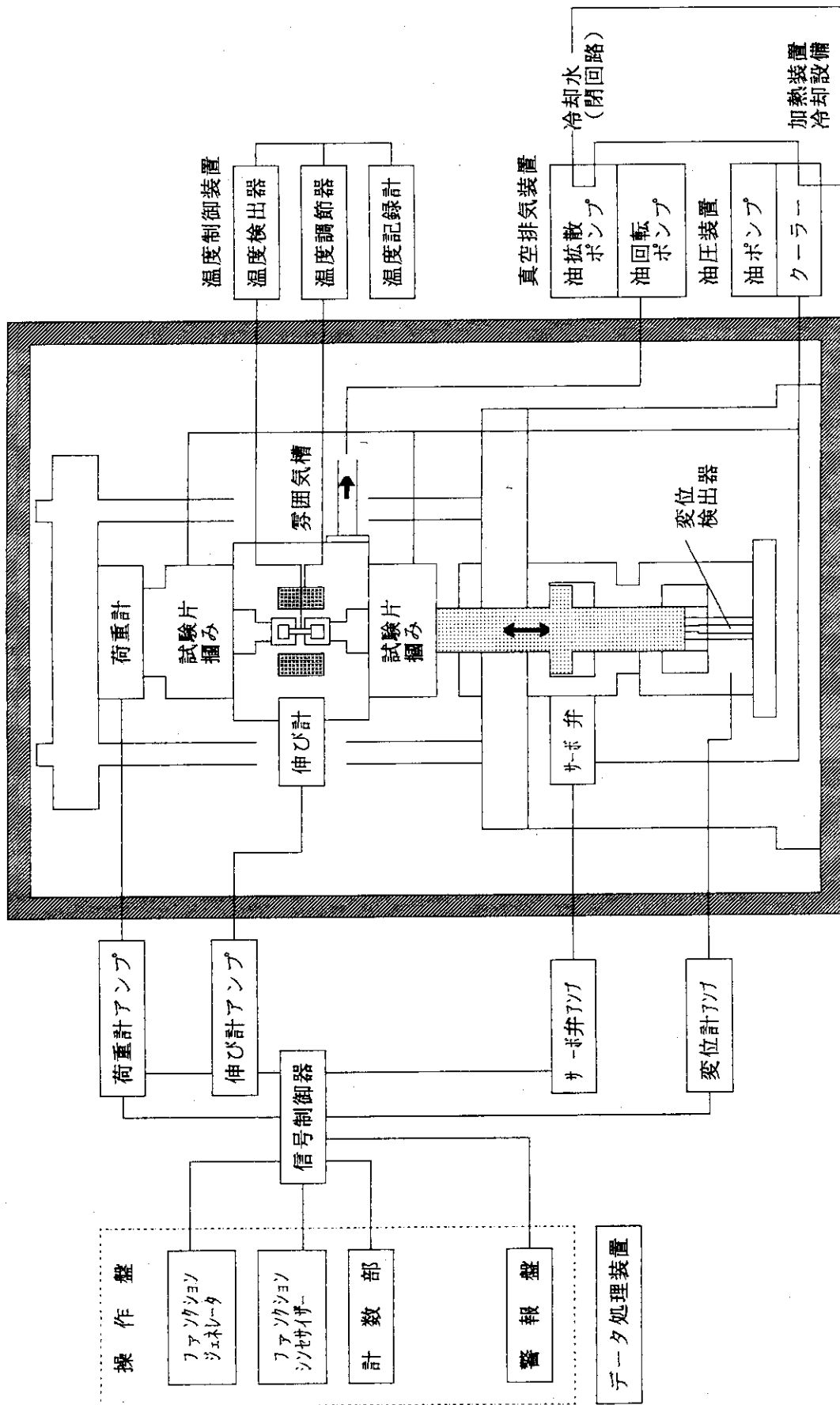


Fig. 7 疲労試験機ダイアグラム

移動クロスヘッド

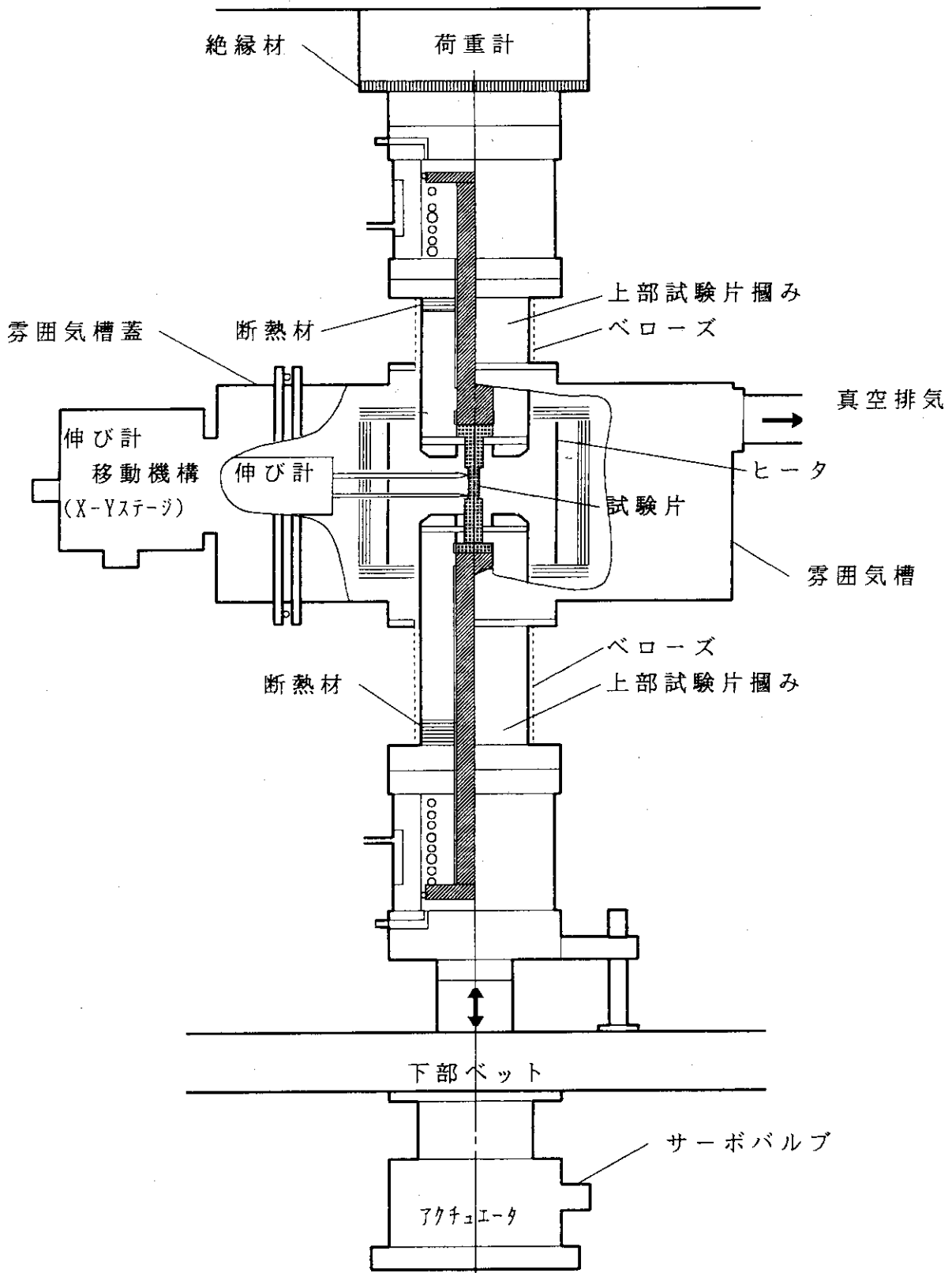
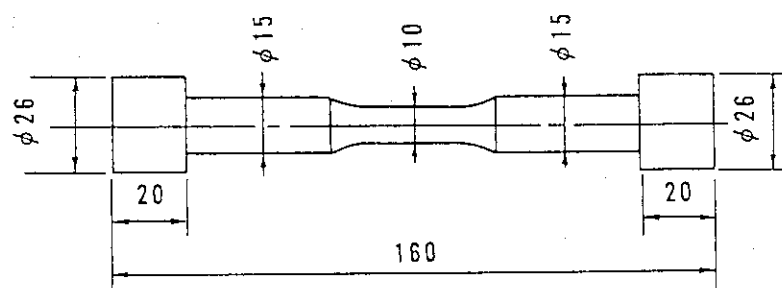
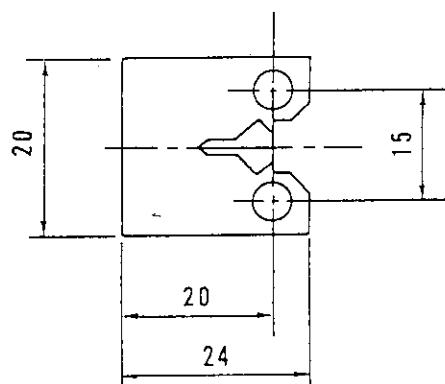


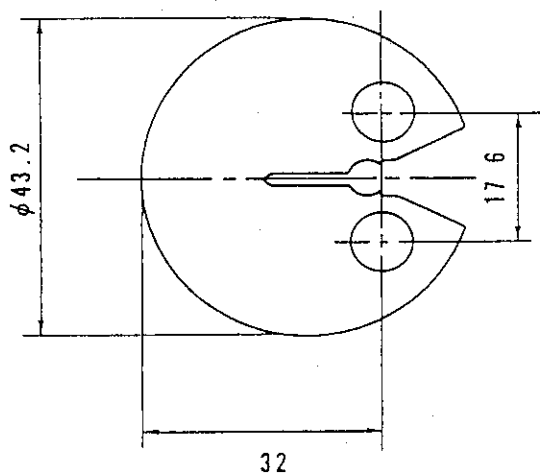
Fig. 8 疲労試験部詳細



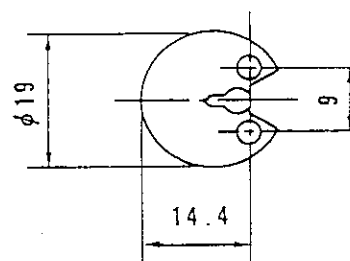
疲労試験片



0.4TCT試験片 $t=10$



0.63RCT試験片 $t=16$



φ19RCT試験片 $t=9.6$

Fig. 9 疲労試験機で試験可能な試験片

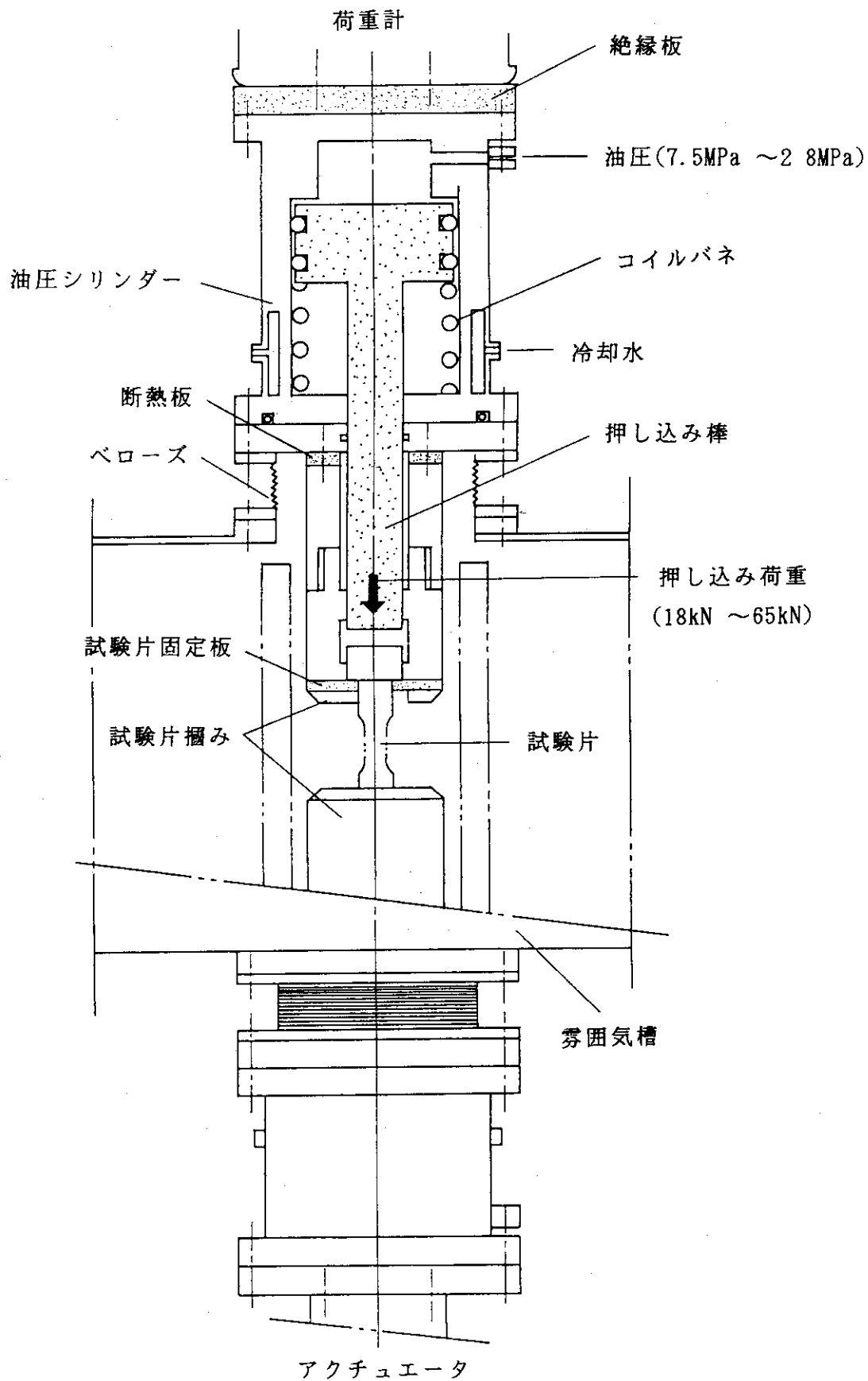


Fig. 10 試験片掴みの詳細

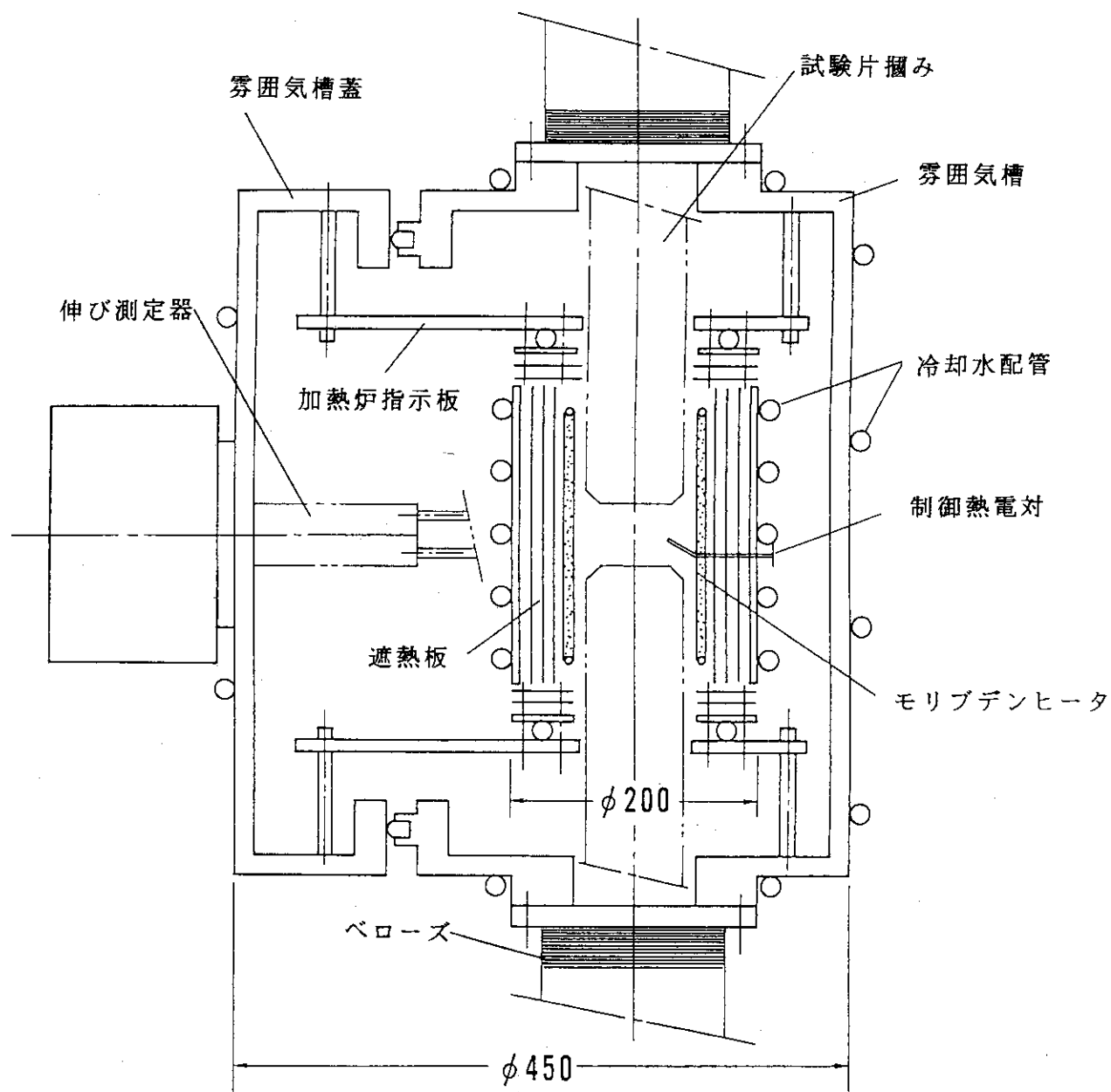


Fig. 11 加熱炉の概要

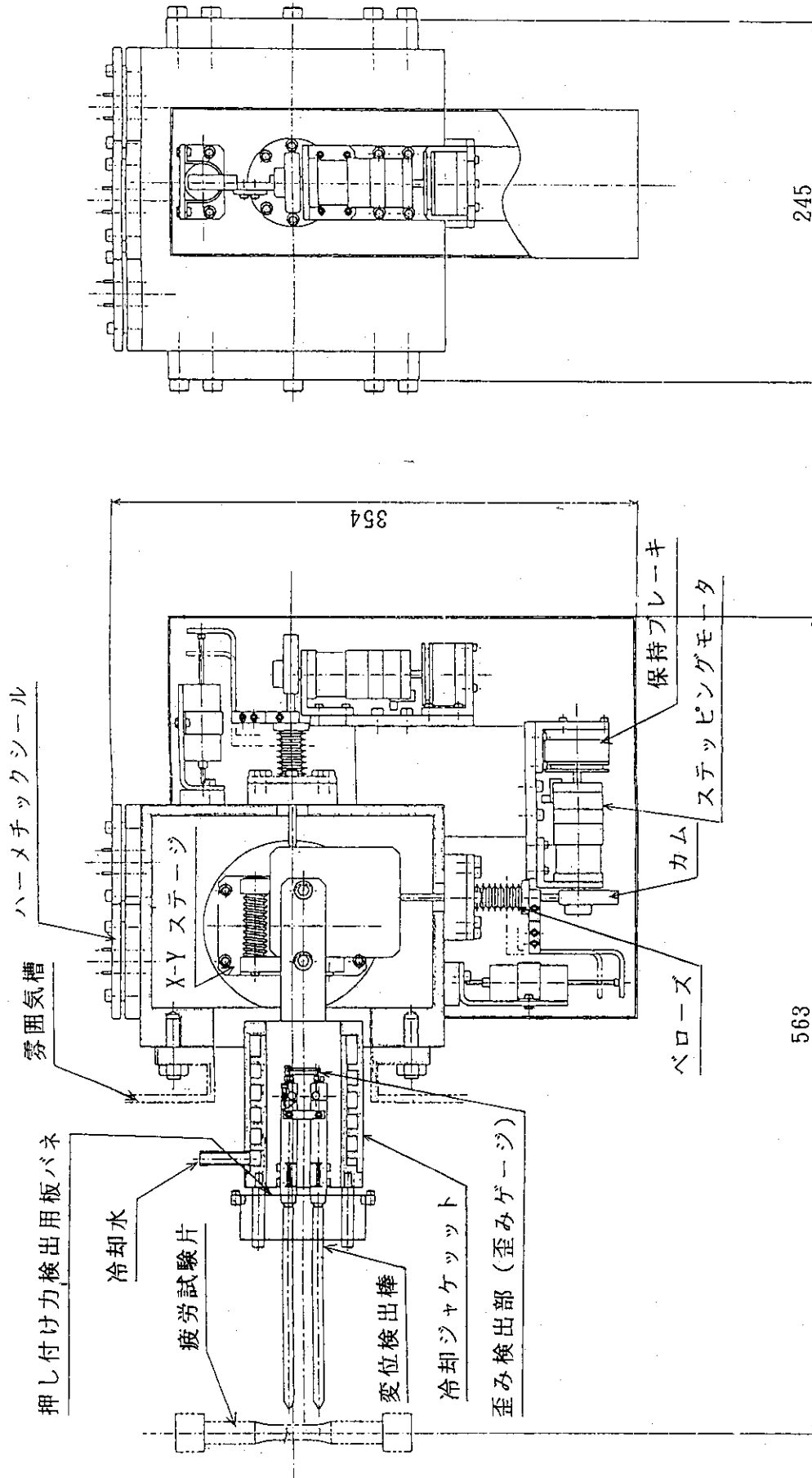


Fig. 12 接触型伸び測定器 (歪みゲージ)

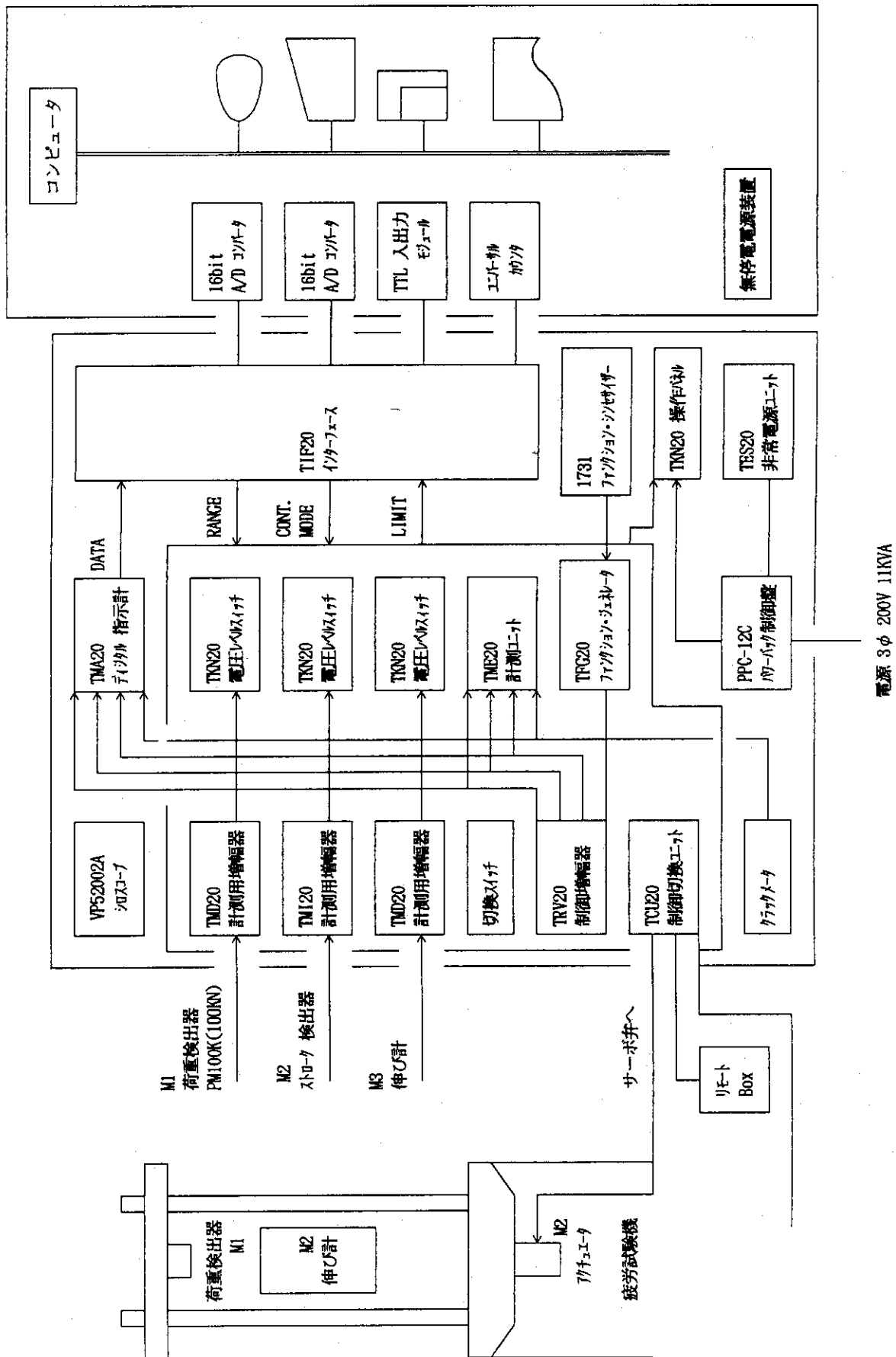


Fig. 13 疲労試験機の自動制御ダイアグラム

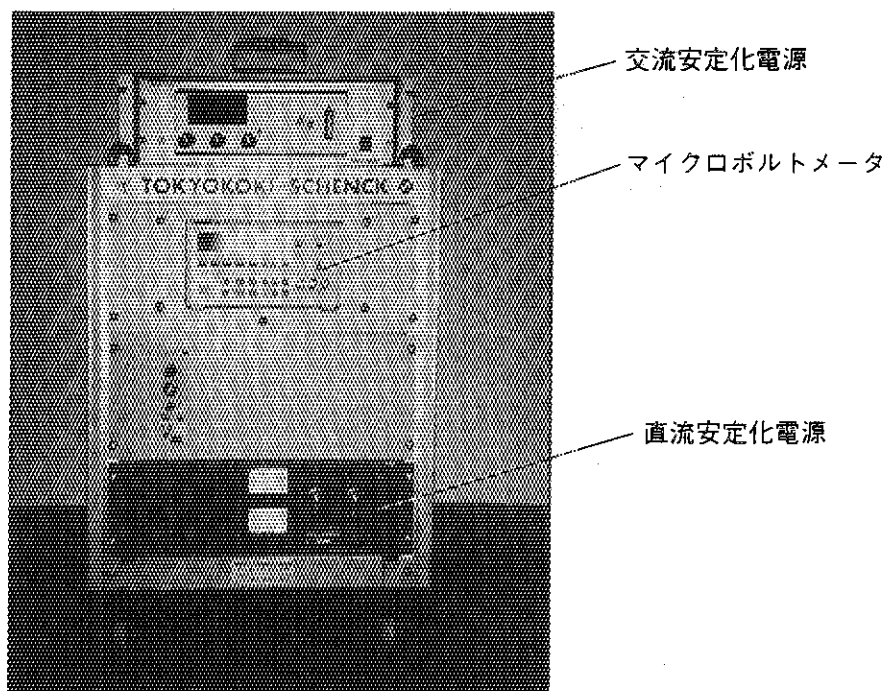


Fig. 14 交流・直流電源装置

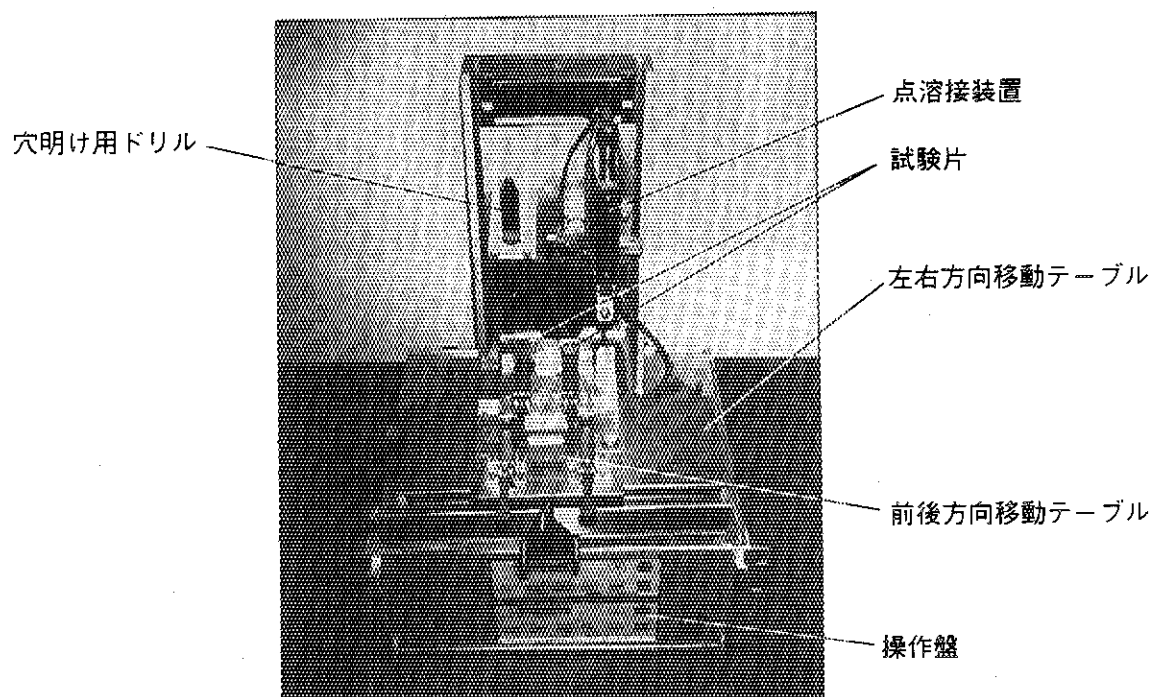


Fig. 15 点溶接及び穴明け装置

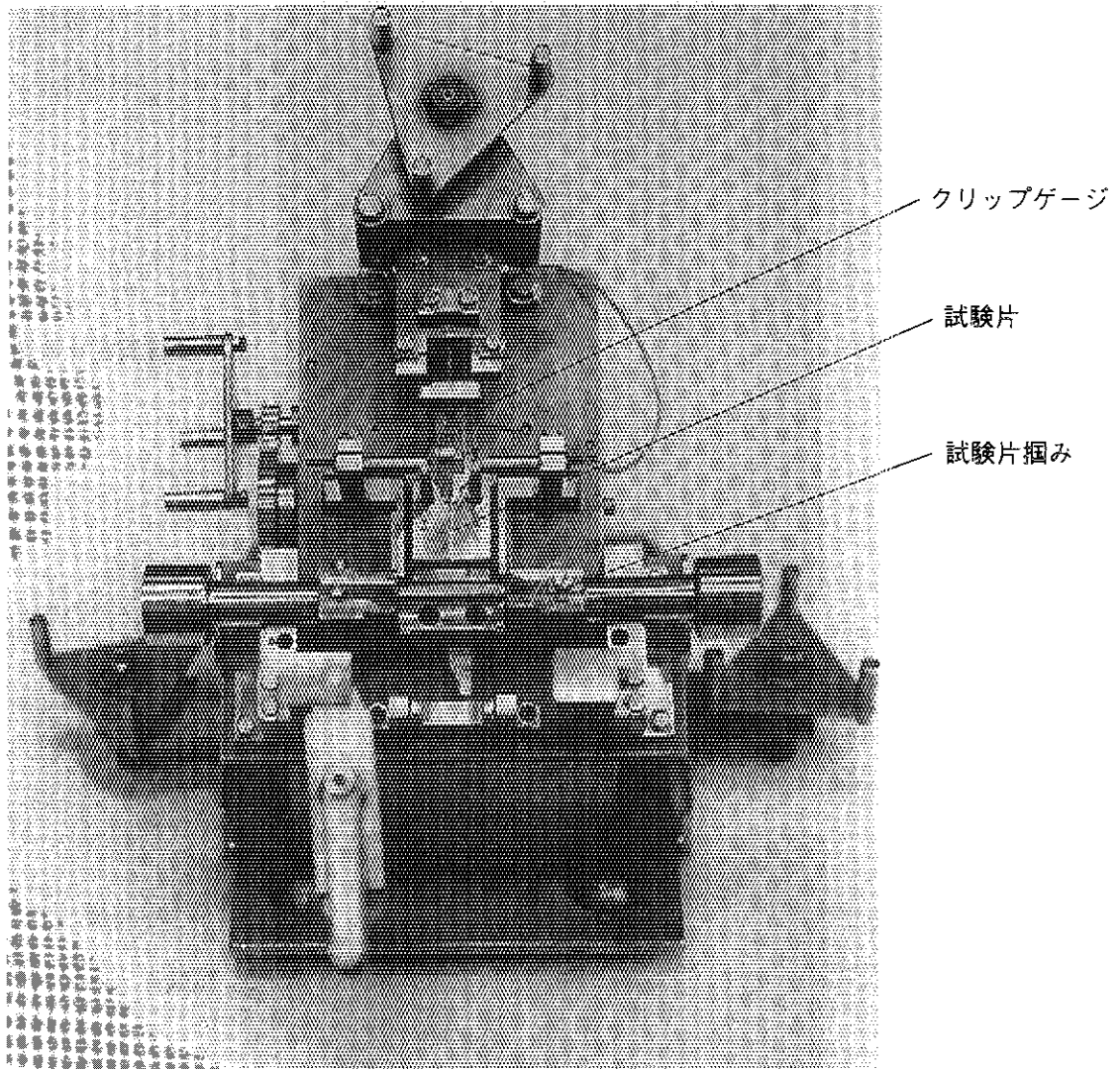


Fig. 16 変位計 (クリップゲージ) 取付装置

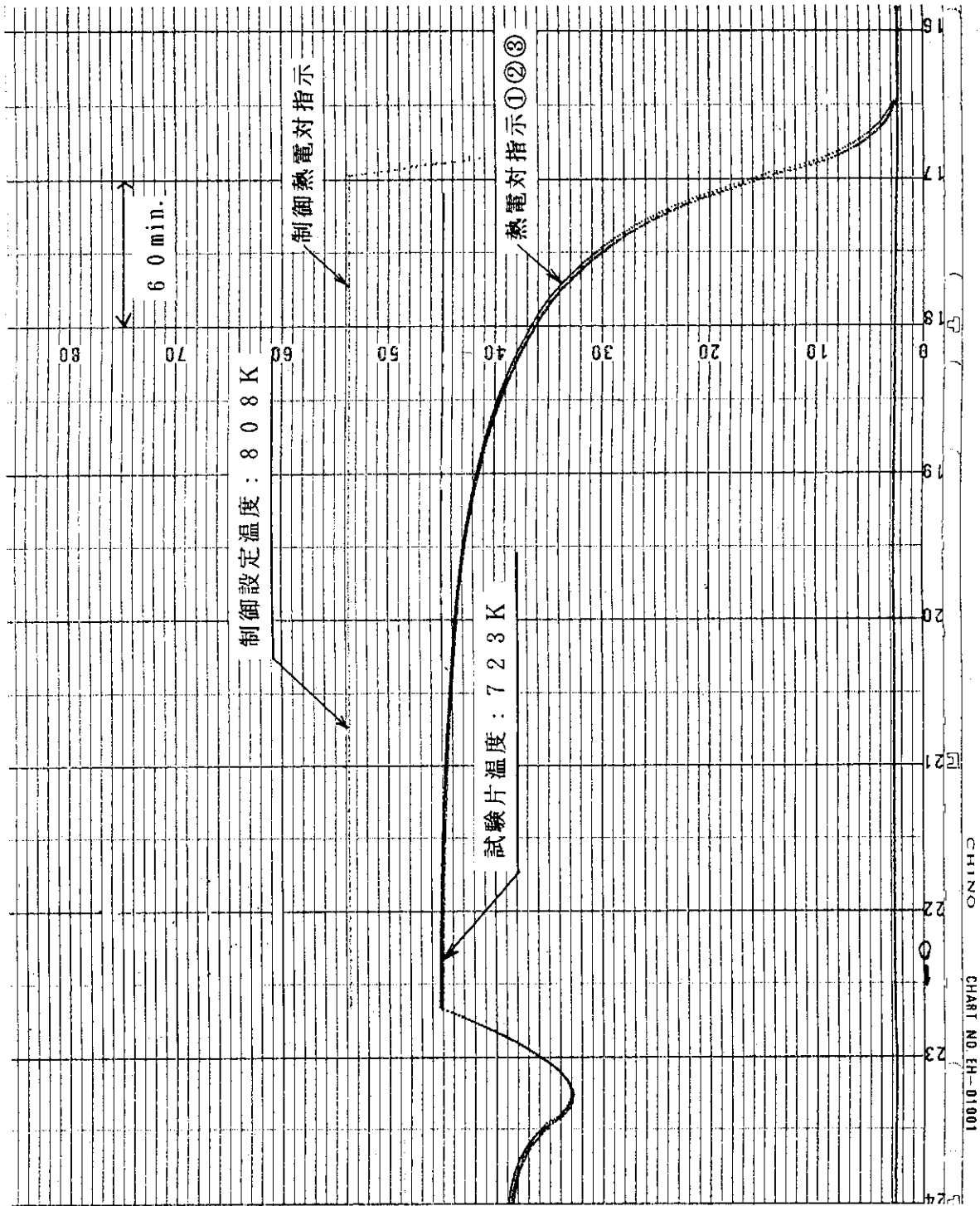
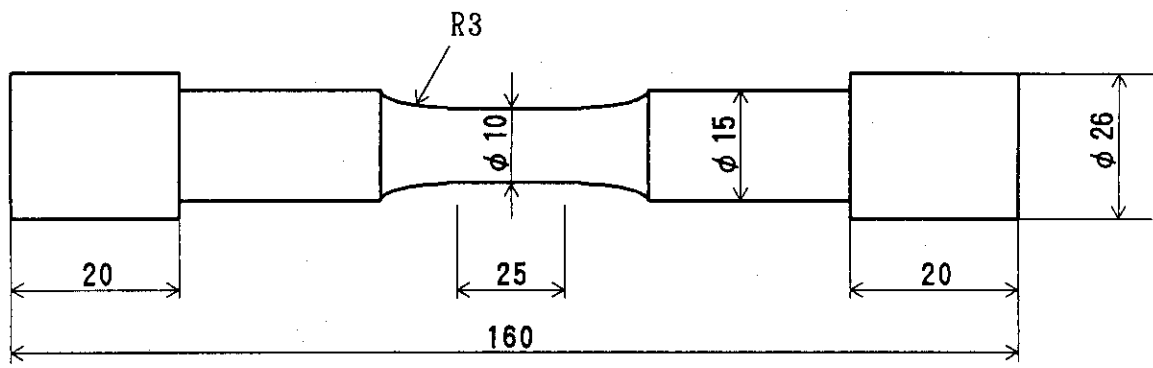
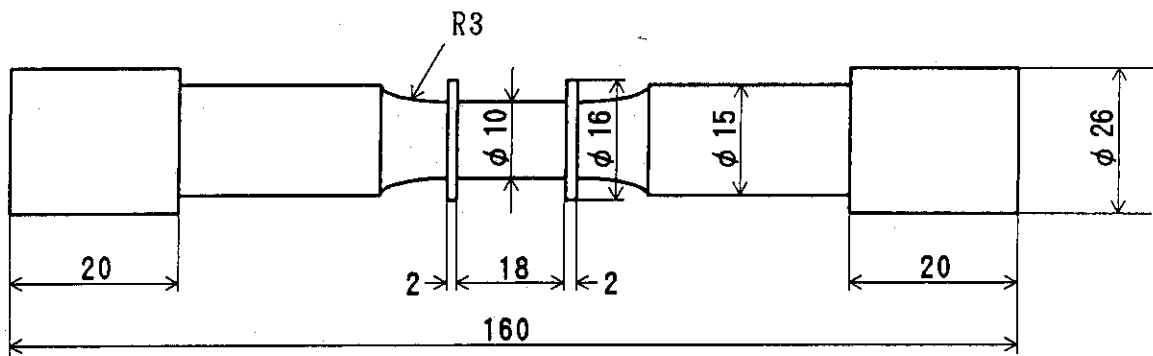


Fig. 17 試験片温度一時間チャート



Type I (銑無し型)



Type II (銑付き型)

Fig. 18 疲労試験片の寸法

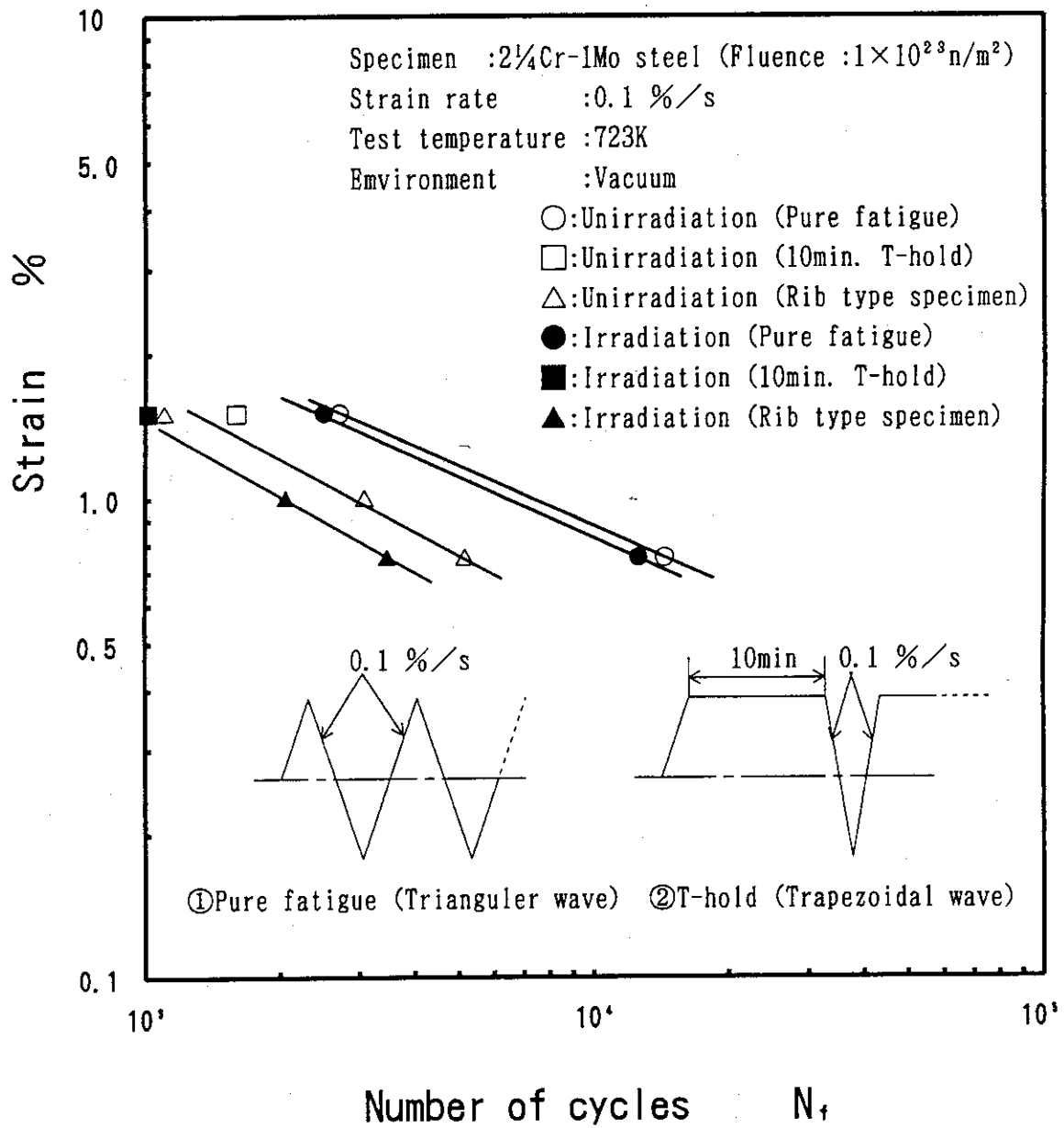


Fig. 19 2 1/4Cr-1Mo 鋼の非照射材及び照射材の低サイクル疲労試験結果

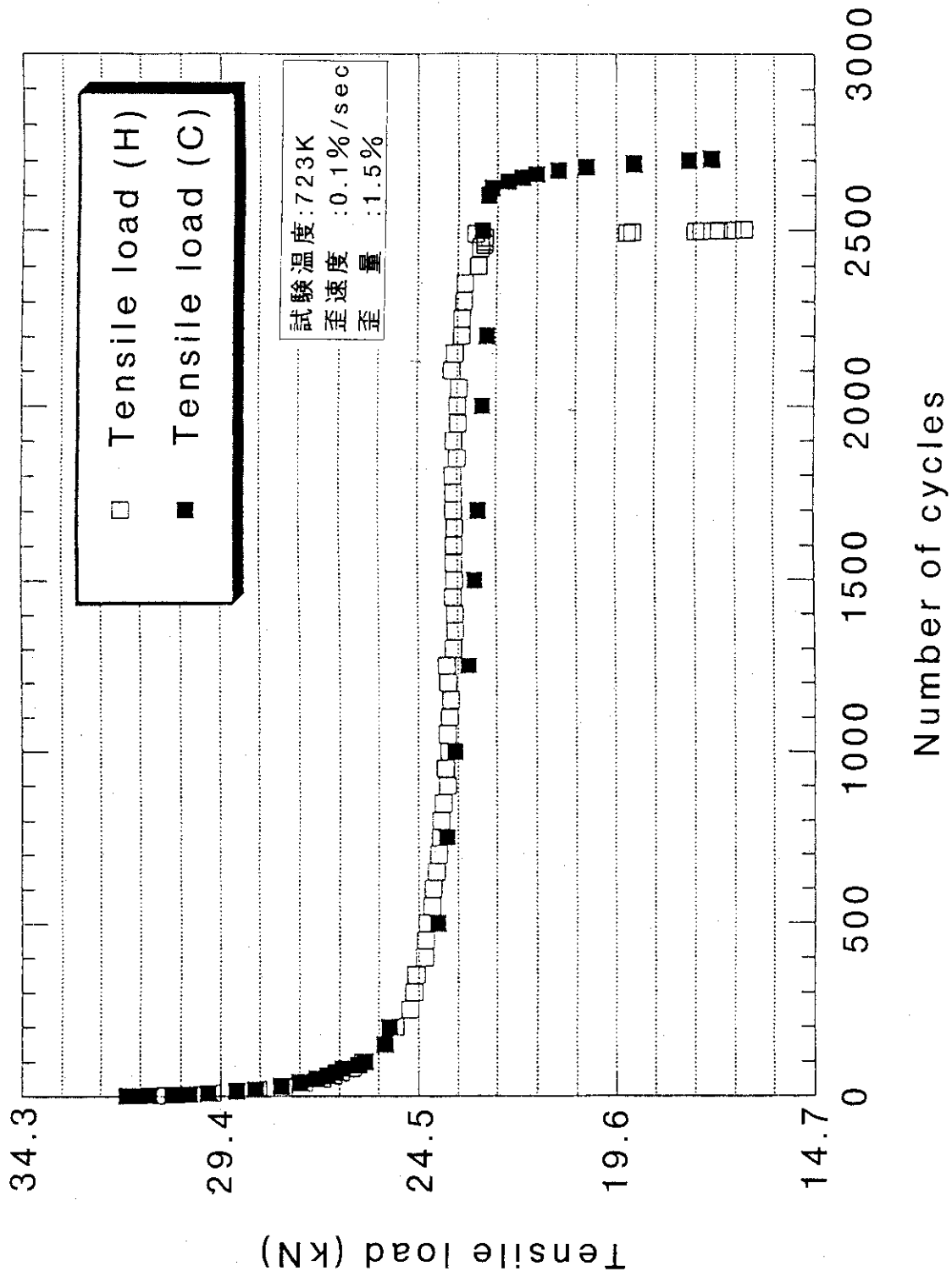
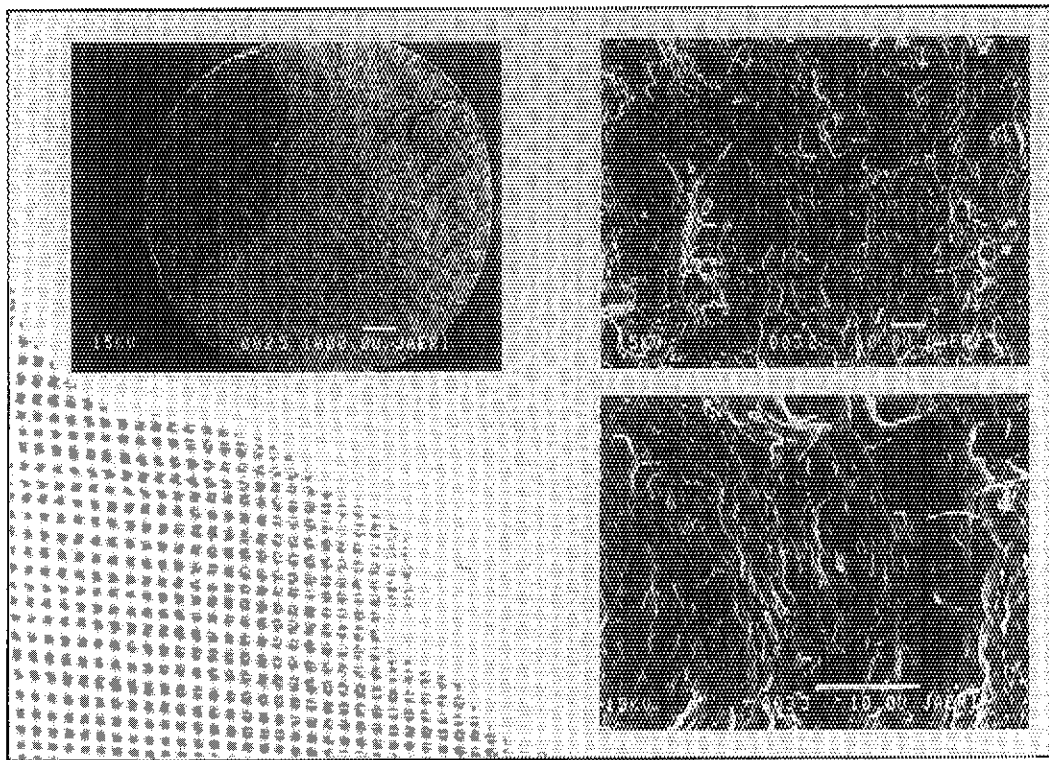


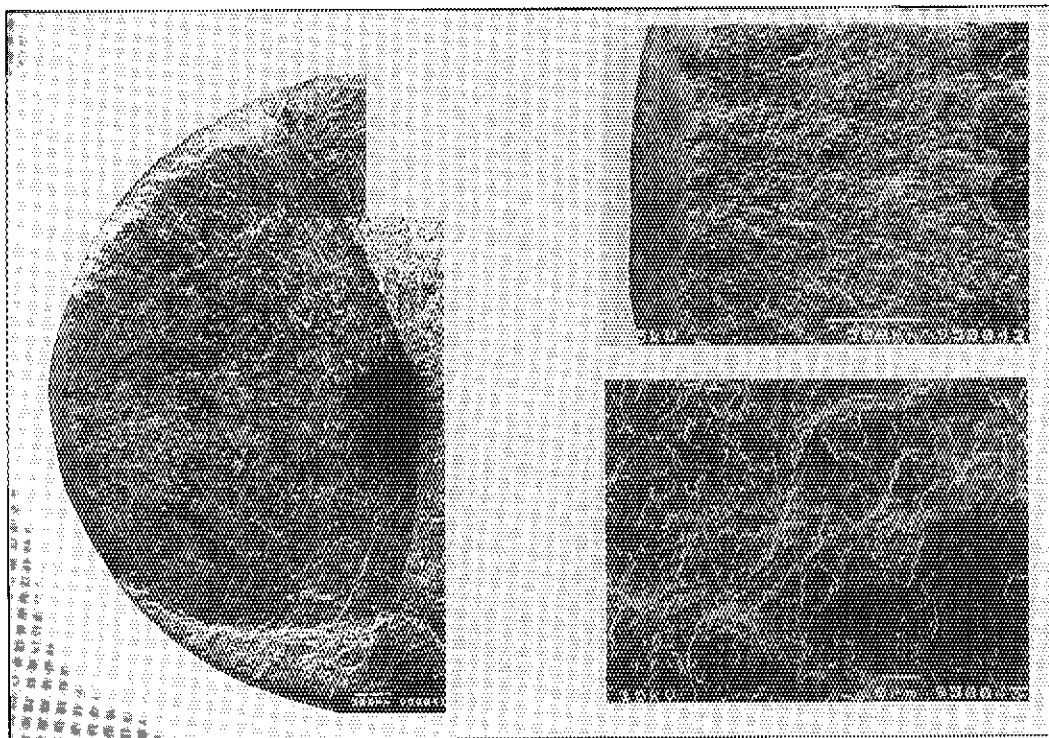
Fig. 20 非照射材 (C) 及び照射材 (H) の引張側荷重一疲労サイクルの関係



非照射材

試験条件

温度：723K
歪速度：1%/sec
歪量：1.5%



照射材

試験条件

照射量： 1×10^{23} n/m²
温度：723K
歪速度：1%/sec
歪量：1.5%

Fig. 21 代表的な疲労破面