

JAERI-M

5773

低サイクル疲労試験キャプセルの開発  
(炉外試験キャプセルの試作と試験)

1974年7月

田中 勲・武山 友憲

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

低サイクル疲労試験キャプセルの開発  
(炉外試験キャプセルの試作と試験)

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

田中 勲・武山友憲

(1974年6月20日受理)

照射中に原子炉構造材の低サイクル疲労破壊試験を行うことを目的としたキャプセルの第一段階として、炉外試験用キャプセル、伸び計測部および定荷重制御部よりなる付属装置を試作し、炉外試験を行った。試験方式は定荷重制御による片振引張り方式とした。試料への荷重印加はベローズによるものとし、試料の伸びは差動トランスの出力を直接測定するオープンループ方式と、差動トランスのコアとコイルをサーボモータによりヌルバランスさせ、これと直結するポテンショメータ出力を測定するクローズループ方式の2種類とした。試験した結果、最大300Kgの荷重を得ることができた。試験部直径7mmφ、長さ50mmのSUS-304試料に最大300Kgの荷重を印加して、0.5mmフルスパンの差動トランスで伸びを測定した結果、オープンループ方式で1.8%、クローズループ方式で2.0%の精度で測定できることがわかった。繰り返し作動試験については、約300Kgと60Kgの繰り返し荷重を0.2c/minの繰り返し速度で、常温試験、並びに試料温度約500°Cでの昇温試験を行ったが良好な結果が得られた。これらの試験結果より、照射中に低サイクル疲労破壊試験を行える見通しがついた。

The Development of a Low-Cycle Fatigue Test Capsule  
(Trial Construction of the Out-of-pile Capsule and its Test)

Isao TANAKA and Tomonori TAKEYAMA<sup>†</sup>

Division of JMTR Project, Oarai, JAERI

( Received June 20, 1974 )

The capsule being developed is used for low-cycle fatigue tests of reactor structural materials during irradiation. An out-of-pile capsule with a specimen, bellows, etc. and the apparatus consisting of specimen elongation measurement and cyclic tensile load control systems have been constructed in trial and tested, as the first stage of development. Tensile load is applied to the specimen by a bellows-system. To measure the elongation of specimen, two methods were developed, open and closed loop systems. In the open loop system, elongation is measured by means of the output of a differential transformer. In the closed loop system, the coils and core of a differential transformer are null-balanced by a servo-motor, with elongation obtained from the output of a potentiometer which is directly coupled to a servo-motor. A maximum load of 300 kg is possible in the bellows-system. In elongation measurements with a 0.5 mm differential transformer, the errors are 1.8 and 2.0 % in 0.5 mm in the open and closed loop systems, respectively. The capsule and its apparatus have been proved to be feasible in the low-cycle fatigue tests during irradiation.

<sup>†</sup> Division of Engineering Services, Tokai, JAERI

## 目

## 次

1	まえがき	1
2	設計条件の設定と基本構想	5
2.1	設計条件の設定	5
2.2	設計条件に対する基本構想	5
3	炉外試験用キャプセルおよび付属装置	13
3.1	概要	13
3.2	ベローズの設計，製作および試験	13
3.3	炉外試験用キャプセル	16
3.4	付属装置	19
4	試験および結果	34
4.1	コンポーネント試験	34
4.2	炉外キャプセル試験	36
4.3	繰り返し作動試験	37
4.4	試験結果に対する総括	38
5	まとめ	52
6	謝辞	54
7	文献	55

## 1 ま え が き

原子炉構造材，たとえば圧力容器，一次冷却系配管，炉心構成材さらに燃料被覆材などの長期使用における経年変化は，原子炉の安全性にとって極めて重要であるが，現在のところ引張り，衝撃強さなどの短時間性質の研究が主な研究手段となっている。安全性評価や設計においては，J P D Rの圧力容器の例などで経験済みのように，クリーブ，低サイクル疲労，腐食，腐食疲労のような経年変化現象に主眼点を置くことが必要であり，またこれらの問題には不明の点が多い。最近になってインパイルクリーブ試験などがかなり行われるようになってきているが，照射中の疲労試験については，英，米において数例散見される程度<sup>(1)~(4)</sup>でその数は少ない。また試料をキャプセル内で照射したのちホットラボで疲労試験を行った例もあまり多くはないようである。<sup>(5)~(10)</sup>

J M T Rにおける照射技術の開発という観点から，インパイルクリーブキャプセルの開発に続いてインパイル低サイクル疲労試験キャプセルの開発を計画した。このキャプセルの開発の目的はいりまでもなく，照射中において，試料に塑性歪を与える程度の引張りないし圧縮の低サイクル荷重を印加し，試料が破断に至るまでの回数を調べる。また可能ならば亀裂伝播の進み具合を観察することなど，通常原子炉外で行われる試験を照射中に行なえるキャプセルを開発することである。

英，米における例についてみると，まずU.S. Naval Research Laboratoryで行った例<sup>(1)</sup>では，15枚のASTM A302-B板状試験片について，温度500°Fで繰り返し曲げ荷重を加えた例がある。このキャプセルの構造は第1.1図に示すように70~90 psiの空気圧によってピストンを動かし，荷重伝達部とカムとを組み合わせて試験片に繰り返し両振り曲げ荷重を加えている。このキャプセルはOak RidgeのLITRで照射されたもので，中性子束約 $3.2 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{sec}$  ( $>1 \text{ MeV}$ )で照射したものである。なお歪率は約0.3~0.8%の間で14点，繰り返し速度については，まず4週間について繰り返し速度を20C/day以下とし，照射量約 $8 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$  ( $>1 \text{ MeV}$ )，サイクル数465になった時点で，180/minとし，250,000サイクルで終了した。結果的には，中性子束が $10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{sec}$ オーダーのためか照射効果は効いていないようである。

次の例は，USAECのためにVallecitos Atomic Laboratoryで行った例<sup>(2)</sup>で，約30 mmφ外径，0.4mmのSUS-304，インコロイ800の管について試験している。第1.2図に示すように管の内外を独立に加圧して，予め定められた限度の歪が得られるように管とマンドレル間のギャップを設けたアセンブリを3個キャプセル内に3段積みしている。SUS-304については1200°F，インコロイ800については1300°F， $(0.4 \sim 1.4) \times 10^{14} \text{ n/cm}^2/\text{sec}$ で20日GETRで照射された。歪率は，SUS-304で約2~4%，インコロイ800では約0.3~6%の間で行われた。なお照射効果は効いている。またこの種の方法で試験した例として同様にGETRで行っている。<sup>(3)</sup>

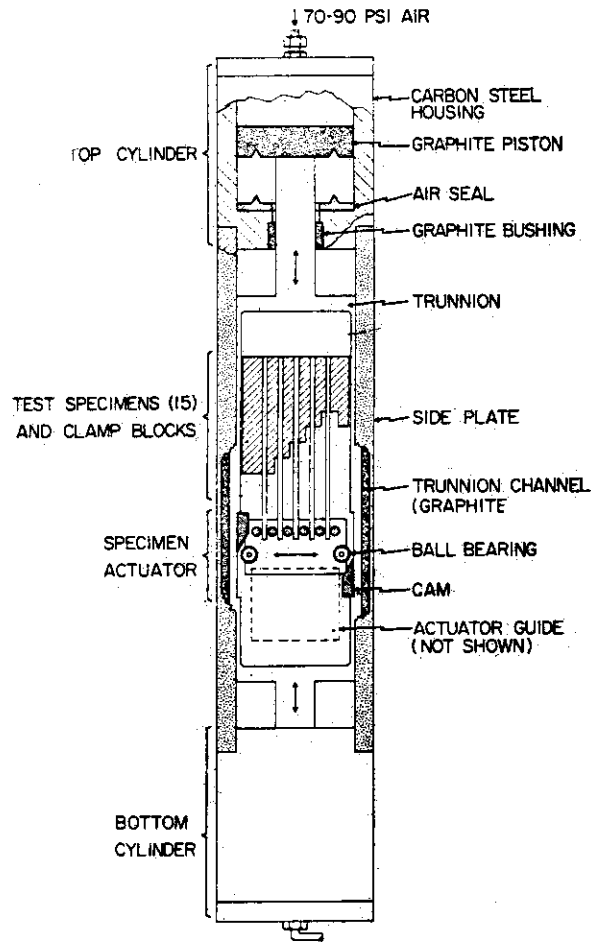
第3の例は，Idaho Nuclear Corporationで開発されたもの<sup>(4)</sup>で第1.3図に示すようにキャプセル内で試料に引張り，圧縮の歪あるいは荷重制御による繰り返し荷重の印加が可能で

ある。試料の歪の測定は2個の差動トランスによって行われ、荷重の測定は試料の下端に接続されている差動トランス式ロードセルによって測定される。なお、照射損傷による差動トランスのドリフトの補正用として空気式アクチュエータを差動トランスに直結していると説明されているが具体的にどのように補正するのか不明である。荷重は炉外に設置されている油圧シリンダーからの力を荷重伝達リンクを介して試料に加えられる。なお荷重伝達リンクの長さは全長約2mとなっている。これは油を放射線強度  $1 \times 10^{-3} \text{ W/g}$  程度の位置にもってくると同時にシールドプラグを置いて、油の放射線による劣化を防止しているためと思われる。いずれにしても油圧によって荷重をかけ、荷重を伝達リンクで試料に伝えていることに特長を有する。歪あるいは荷重制御はそれぞれ試料の伸びを測定している差動トランスあるいはロードセルの信号によって炉外のサーボアクチュエータを作動させ油圧シリンダーを操作して制御している。

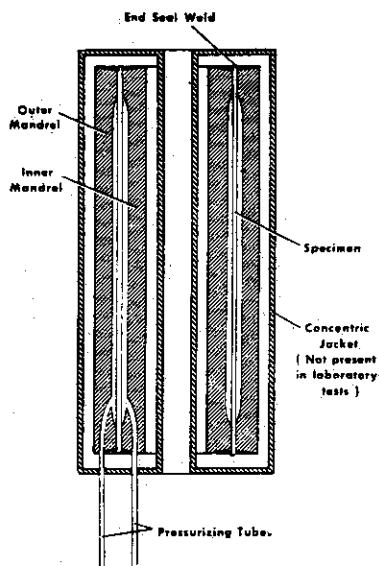
試料は圧力容器や原子炉構造材用の鉄鋼で、 $6\phi^{OD} \times 3.2\phi^{ID}$  の穴あき試料であり、200~540℃間の任意の設定温度について制御範囲6℃で温度制御できるように設計されていると説明されている。E T Rで照射することを意図した模様であるが、照射結果に対する記述はない。

以上の例にみるとおり、いずれも特長のある方法であり、その方法の優劣の判断は、試験目的や条件さらに原子炉形式の相違による照射装置に対する制限条件や安全性に対する認識の相違に至るまで様々の境界条件が存在するため、非常にむずかしい。J M T Rにあっては、利用予定者の意向を採り、試験目的や条件を設定し、多少の目的や条件の変動にも応じることが可能なような許容度を持たせるように務め、原子炉による照射装置への制限条件を考慮するとともに、亀裂伝播に関する測定は継続した開発課題とし当面疲労破壊試験に絞って設計条件を決め開発を進めることとした。

この報告書は以上のような条件のもとに低サイクル疲労試験キャプセルについて、その寸法形状や計測線の引き出し方、計測機器の耐放射線性に対する考慮などインパイルキャプセルへそのまま適用できるような炉外試験用キャプセルおよび設置の設計、製作および試験を行ったので、その結果を報告するものである。

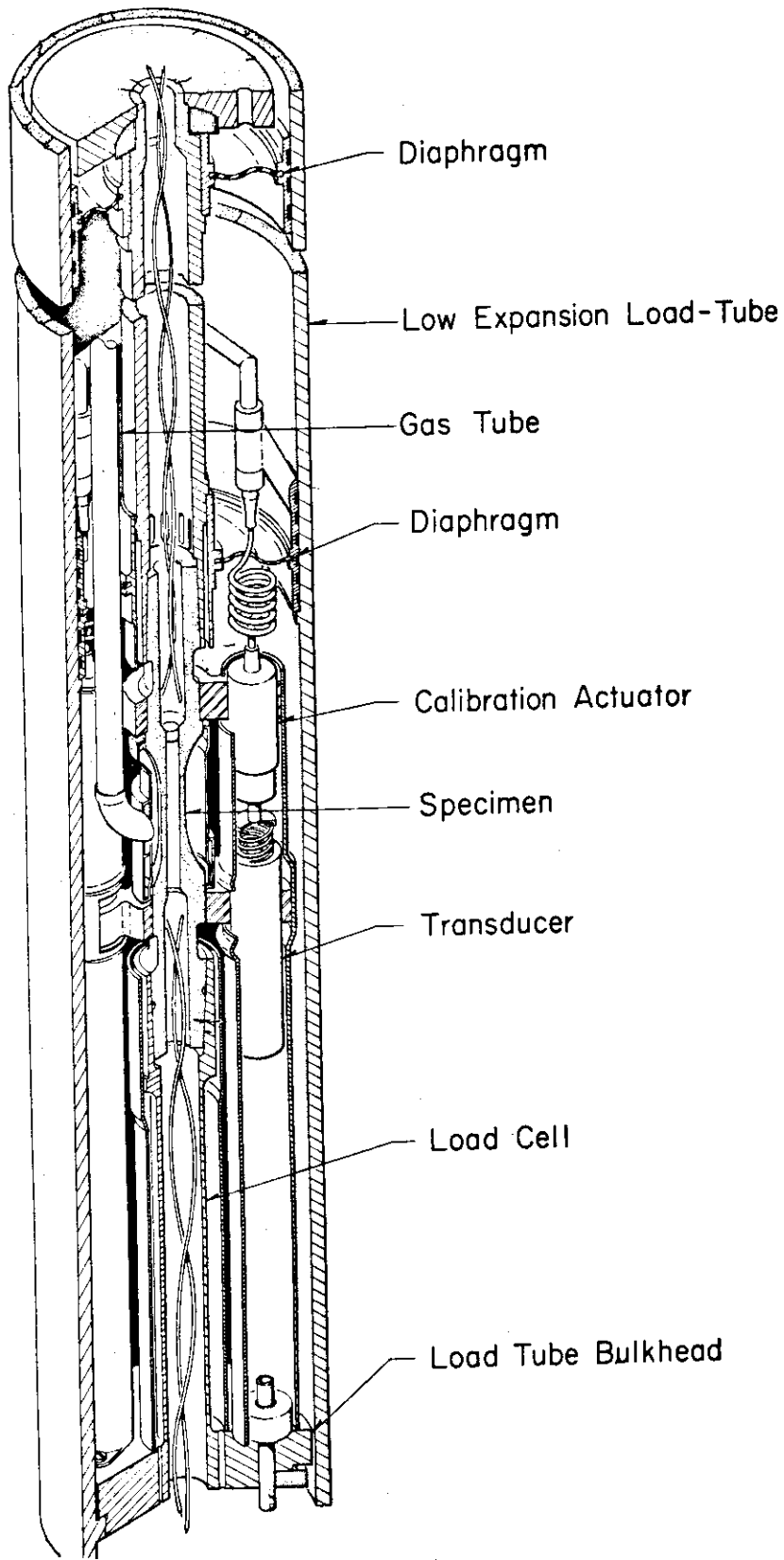


第 1.1 図 インパイル疲労試験キャプセル(1)  
( U. S. Naval Research Lab. )



第 1.2 図 インパイル疲労試験キャプセルの例(2)  
( Vallecitos Atomic Lab. )





第1.3図 インパイル疲労試験キャプセルの例(3)  
( Idaho Nuclear Corp. )

## 2 設計条件の設定と基本構想

低サイクル疲労試験キャプセルの炉外試験装置の設計にあたっての設計条件としては、実際のキャプセルを製作するにあたって支障のないような寸法および形状を有することを前提に、試料に加える荷重のかけ方および荷重の大きさと測定法、試料に生ずる歪の測定法、試料チャック部の形状と固定方法、試料破断検出法、定荷重ないしは定歪繰り返し制御方法、繰り返し速度の選定、試料の温度制御方法、試料破断時の繰り返し作動の緊急停止法、炉外試験特有の問題としてキャプセルの昇温方法を考える必要がある。以下基本的な設計条件とこれを実現するための具体的な構想について述べる。

### 2.1 設計条件の設定

まず目標とする設計条件を下記のように設定した。

- (1) 試料の照射温度は最高800℃までとする。
- (2) 試料の雰囲気はHeガスとする。
- (3) 制御方式は定荷重繰り返し方式とする。
- (4) 所要荷重はできる限り大きくとることを目標とし、300kg以上をねらう。
- (5) 定荷重繰り返し方式としては、0-引張りおよび引張り-引張り方式とし、時間軸に対し矩形波状のみの波形とする。
- (6) 繰り返し速度は1c/min以下とし、下限は一応 $10^{-2}$  c/minオーダーとする（ただし下限値は使用するタイマーの時間によるので余り重要ではない）。
- (7) 1キャプセルあたりの試料数は1本とする（注；直列に試料を結合させれば1本以上同時に荷重を印加できるが、伸び測定は、各試料の伸びの和を測定することとなり、また1本の試料が破断すれば試験は終りとなるので、複数本直結方式は、今回採用しない。）
- (8) インパイルキャプセル炉心挿入部外径は40φとする。

### 2.2 設計条件に対する基本構想

以上の設計条件を実現するにあたっての構想の内、主要部分について下記に示す。

#### 2.2.1 荷重印加方法と荷重測定方法

荷重印加方法として、ピストンによる方法ないしペローズによる方法がまず考えられる。ピストンによる方法は第1章に述べたごとく、Naval Research Lab. では70~90psi（約4.9~6.3 kg/cm<sup>2</sup>）の空気圧で黒鉛製ピストンを作動させている。ピストンとシリンダ間の空気漏れは、エアシール（第1.1図参照）で防止している。この方式を今考えているキャプセルに適用してみた場合、10 kg/cm<sup>2</sup>以上の空圧ではガス漏れはかなり大きくなりシールが不可能となると予想される。JMTRにおいて規定の反射体要素を使用するという条件で、さき述べたようにインパイルキャプセルの炉心挿入部外径を40φとすると、ピストンを使用した場合の有効面積は、せいぜい6 cm<sup>2</sup> ぐらいしか取れない。従って10 kg/cm<sup>2</sup> 程度のガス圧では、高々60kgの荷重しか期待できない。同じピストンを使用するにしても、これを原子

炉外に置き油圧で作動させ、その荷重を荷重伝達棒で伝達し試料に加える方法（第1章の Idaho Nuclear Corporation の例）について考えてみると、制限なく大きい荷重を得られる利点はあるが、第2・1図に示すごとくキャプセルと炉外付属装置間との距離は15m以上にも及び、しかも計測線や配管類を含め荷重伝達機構も図のように彎曲した保護管（外径25mm $\phi$ ）、案内管内を通す必要があるため、炉外部で発生させた荷重をキャプセルに直接伝達するのは事実上不可能である。これに対する修正案としては、Idahoの例のように油圧を使用し、油を保護管が直管になる部分まで入れ、この先を荷重伝達棒とし、荷重を伝達する方法も考えられるが、そうすると油がかなり炉心に近づくので油が放射線損傷を受けるといふ問題がある。さらに照射後キャプセルを解体する場合の1ステップとして保護管をカナル水中で切断しなければならないので、その際油でカナル水を汚染させるおそれがある。このような欠点があるのでこの方法もJMTRに適用するためにはかなりの難しさがある。

つぎにベローズによる方法を考える。この方式は照射キャプセル内にベローズを置き、液圧ないし空圧によりベローズを加圧しこれによる荷重を試料に伝達することが可能であり、ベローズの破損の無い限り、液もしくはガスの漏洩はない。液圧による方法はベローズやその他の加圧システムの破損時における安全性はガス圧による方法より高いと考えられるが、さきに油の場合に触れたような問題がある。問題の少ない液材として例えば水が考えられるが、これについても $\gamma$ 線による自己発熱によってキャプセルを無用に加熱するおそれがあり、またベローズが破損した際、水と試料が接触する。これによってその時点まで照射してきた試料を駄目にしてしまうなどの問題がある。一方ガス圧（とくに不活性ガス圧）を使用するときは、ベローズ破損のとき、液圧使用に比べて多少不安全であるが上記の如き問題はなく、たとえベローズが破損しても、破損検出を確実にし、緊急に加圧を停止する機構を設けたり、キャプセル内が異常に高圧になった際これを検出しガス圧を抜くなどの安全対策を取りうる。ガス圧（Heガス使用）—ベローズ式はすでにインパイルクリープキャプセルで炉内使用実績がある。ベローズ材質としてSUS-316を使用した二重ベローズ方式で、400 $^{\circ}$ Cにおいて最大200kg前後の荷重を得ている。ガス圧—ベローズ方式では、保護管が曲がっても、カナル水中でキャプセルを切断しても問題はない。

以上のような考察からシリンダー方式の採用案は放棄し、ガス圧—ベローズ方式で設計を進めることにした。つぎに問題になるのはベローズの仕様である。試料を高い速中性子束レベルで照射するには、必然的にガンマ発熱率の高い照射孔にキャプセルを挿入しなければならない。一方最大800 $^{\circ}$ Cの試料照射を目指しているので、逆に試料を容易に目標値まで昇温させるためある程度高いガンマ発熱率が望まれる。従って高温で使用可能なベローズを開発しなければならない。一方高温で使用可能なベローズを開発しておけば、压力容器鋼などの場合のように比較的低い温度で照射する場合においてとくに技術的考慮を施さなくともそのまま適用できることを勘案して、高温用ベローズの開発を目指した。さらにまた、目標荷重300kgを得るためには、ベローズの有効面積を大きくとるかガス圧を高くする必要がある。最大ガス圧については、配管系などの安全性を考慮すると、あまり高い圧とするのは望ましくない。ガス圧使用実績としてFPガス圧力測定装置において70kg/cm $^2$  Gを使用したことがある。この実績を踏まえて使用ガス圧を70kg/cm $^2$  G以下に押えたい。このような事情からキャプセルの長

さ制限を考慮して、加圧用ベローズをシールベローズを介して、2個直列に結合する構造とし、ベローズの有効断面積を増やす方針とした。またベローズの最大設計温度としては、試料の最大温度が800℃であること、試料のまわりにマイクロヒータを巻いて加熱できる構造とするなどを考慮し、700℃と定めた。

荷重の測定方法については、既述のIdahoの例のようにロードセルを使用した経験もあるが、ロードセル自体の放射線損傷による誤差を考慮しなければならないという別の問題があるため、この方式は採用せず照射前にベローズに印加される圧力と荷重との較正を行っておき、照射中はガス圧から荷重をこの較正曲線より求めるという方式とした。なおベローズの寿命を検討するためにベローズ試験装置を製作し試験することにした。(3.2項参照)

### 2.2.2 伸び測定方法と目標測定精度

試料の伸びを測定する方法としては、機械的方法と電気的な方法に大別される。前者の代表例は空気マイクロメータ法でこの方式はインパイルクリーブキャプセルにおいてヘリウムマイクロメータ法としてJMTRですでに採用されている。電気的方法としては差動トランスによる方法、渦電流を利用した非接触型変位検出器<sup>(注1)</sup>による方法などが考えられる。空気マイクロメータ方式では、定荷重繰り返し制御時において、その繰り返し速度が比較的速い場合、伸び測定において、その追従性に疑問がある。また空気マイクロメータ法はすでにJMTRで開発済みであるので、あらためてここで使用するよりはJMTRで未開発の電気的方法を採用したいという考えがあり、電気的方法によることにした。渦電流利用の非接触型変位検出器は、検出器の周囲にある金属により影響を受けるのでこれを使用するにあたって磁気シールドなどの特別な配慮が必要である、直線性もカタログ値で±2%であり余りよくない、放射線損傷のその精度に及ぼす効果が明らかでないなどの理由で今回はその使用を見送ることにした。結果的には差動トランスを使用することにしたわけであるが、この構成材は磁性材、通電用コイルなどであるので放射線損傷を受ける恐れのあることには変りはない。しかしJMTRにおけるリラクタンクス式圧力センサー<sup>(注2)</sup>の照射実績を考慮にして差動トランスの照射特性を推定すると、零ドリフトについては温度効果の方が照射効果より大きいので、照射前に温度特性を把握しておけば誤差は少ないと考えられる。また一定温度においては零ドリフトは少ないと考えられる。感度特性については照射による影響は無視しえないと推定される。以上のことから測定方式としては、差動トランスのコアとコイルボインをヌルバランスさせて伸びの測定を行えば、照射による感度の変化による影響を無視しうるのでこの方式を採用する。また、差動トランスを炉心より遠ざけ照射による影響を少くすれば、さらに効果的である。また、そうすることによって差動トランス出力の直接測定法も使用の可能性<sup>(注2)</sup>がある。

差動トランスとして、はじめフランス製品の購入使用も考慮したが、リラクタンクス式圧力センサーをすでに開発した実績があるので技術開発上の問題点は少いと判断し国産を試みることにした。磁性材料としてリラクタンクス式圧力センサーでは78パーマロイを使用したか、照射効果をより少くするためにステンレス鋼SUS-410を使用することにし、コイル材としてはリ

(注1) KAMAN NUCLEAR社製の、AERO-VIT SYSTEMがその一例である。

(注2) IMEX-FRANCE社製、品名；NUCLETRAN、測定範囲；±1mm、最高使用温度；400℃

ラクタンズ式圧力センサーの場合と同様に0.1mm $\phi$ のセラミック線(商品名CERAMATEMP)<sup>(注)</sup>を使用することにし、コイルボビンも同様に焼結アルミナを使用することにした。試作はフルスパン0.5mmおよび5mmの2個について行い、ともにキャプセル内に入れることにした。

(注) 差動トランスとして、0.5mmおよび5mmフルスパンの2種を選定した根拠について簡単に触れておく。低サイクル疲労試験において通常歪は1~4%程度を考えればよいとされているが、試料がクリープして伸びたときの伸び、破断に至るまでの伸びも測定できることが望ましい。さらに今回の低サイクル疲労試験以外の伸び測定に適用することを考慮し、このように2種類とした。試料試験部を50mmとすると、0.5mmは1%、5mmは10%の歪に相当する。

いずれの方式にしても差動トランスの照射効果によって生ずる誤差をできるだけ小さくするために、そのキャプセル内位置を炉心反射体要素上面より上の位置に持ってくることをインバイルでは考慮した方がよく炉外試験キャプセルでもこれを模擬することにする。

オープンループ方式ではさきに述べたように通常の使用方法であるので差動トランス自体の特性自体で精度が決まる。測定精度に影響する主要因は、照射効果による感度変化(変位に対する出力の勾配の変化)と、主として温度効果による零点シフトである。零シフトは温度が定常になれば、零ドリフトは一般に少いから定常値になると思われるので、誤差に関係するのは主として感度変化である。

クローズループ方式では差動トランスのコアの移動に応じてコイル部を動かす、いわゆるヌルバランス方式であるため、感度変化による誤差は除かれる。しかしその代わりにコイル部を機械的に変位させ、その変位を電気的に測定するという、さらに2段の機構が付加されるので、これが誤差の原因となるおそれがある。

以上述べたように、両方式とも誤差の混入する要因を含んでいるので、オープンループ、クローズループ方式のうち、どちらの方式が実用に適するか炉外試験および照射試験を行なってみないとわからない。なおクローズループ方式では、差動トランスの移動ストロークを大きくすれば、差動トランスのフルスパンに無関係に大きい伸びの測定ができるよう設計できることを付言しておく。

ただしオープンループ方式を使用するにしても、コイルを動かさうということとは差動トランスの零点調整には非常に有用である。というのは、実際のキャプセル照射においては試料を含めたキャプセル構成部材の熱膨張によって差動トランスの零点がシフトする。一方差動トランスは零点付近で使用すれば一般に直線性は良好であるが零点をはずれてくるとこれがわるくなる。電気的に零点調整を行うには限度がある。従って原子炉出力が定常に達し、キャプセル内の温度分布が均一となってコアの位置が決まった時点で、コイルを動かして機械的に零点調節することは有用なことと考えられる。

以上述べたようにコイルを動かすということだけでもその有用性が期待できるので、今回の開発では、オープンループ、クローズループ両方式の開発を行なうことにした。

つぎに差動トランスの精度および感度について簡単に触れておく。差動トランス自体でも、

(注) セラミック材をオーバーコートした耐熱線である。AMETEK/Instruments & Controls社製(U. S. A.)

直性線，主として温度効果による零点シフト，零ドリフトなどを入れると較正しても一般的にいて  $\pm 0.5\%$  前後の誤差となる。試作する差動トランスはさきに述べたように， $0.1\text{mm}\phi$  のセラミック線を使用すること，<sup>(注1)</sup>透磁率についても純鉄より劣る SUS-410 を使用することなどから， $\pm 1\%$  程度の誤差は当然見込まれる。従って設計目標精度を  $\pm 1.0\%$  とすることとした。なお感度については， $\pm 0.1\%$  程度を目標とすることとした。これによると，測定誤差は  $0.5\text{mm}$  フルスパンの差動トランスに対して  $\pm 5\mu$  程度， $5\text{mm}$  フルスパンのそれに対して  $\pm 50\mu$  程度，感度は，それぞれ  $\pm 0.5\mu$  および  $\pm 5\mu$  程度となる。

なおこの差動トランスを使用した場合における伸びの目標測定精度について触れる。オープンループ方式の場合には，レコーダないしデジタルポルトメータなどの精度が加算されるが，これらの精度は大體  $\pm 0.5\%$  である。従って目標測定精度は  $\pm 1.5\%$  程度となる。一方クローズループの場合にはさらに，送りねじのバックラッシュなどを含めた機械的な誤差，電気的にはサーボ系，ポテンショメータの誤差も加算しなければならない。これらを  $\pm 0.5\%$  と見積ると全体の目標測定精度は  $\pm 2.0\%$  程度となる。

さらに差動トランスの使用方法についてつぎの点に留意した。一般に差動トランスは，その2つの二次コイルの誘起電圧  $E_1$  および  $E_2$  の差 ( $E_1 - E_2$ ) と変位との関係で使用される。しかるに， $E_1$  と  $E_2$  の和 ( $E_1 + E_2$ ) を作り出し，その比  $(E_1 - E_2) / (E_1 + E_2)$  と変位との関係で使用すると ( $E_1$ ， $E_2$  などについては第 3.10 図参照)，一次コイル (励磁コイル) の電流および周波数の変動，磁性材の透磁率の変化 (温度効果や照射効果による)，差動トランス自体の温度変動などの効果が相殺されると報告されている<sup>(13)</sup>。従って，この方法の適用を試みた。普通差動トランスからは4本の芯線 (大抵は2芯のMIケーブル2本) を出すが，<sup>(注2)</sup>ここではリード線の本数が増えても (リード線の本数が増えることはインパイル用としては好ましくないが) 特性向上を期待して，一次コイルより2本，二次コイル (2個) より4本，合計6本の芯線を出すこととした。さきに述べたフランス製差動トランスを使用しなかった理由の一つは，その製品が芯線4本であるためである。

### 2.2.3 定荷重制御装置

さきに掲げた目標設計条件に示したように，0-引張り，引張り-引張りの2種の繰り返し定荷重制御が，約  $10^{-2} \sim 0.5\text{c}/\text{min}$  の間で，矩形波状に行なえるような定荷重制御装置を設計するにあたって考慮した点について略述する。

(1) 圧力源は約  $7\text{m}^3$ ， $150\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$  のHeガスボンベを使用し，減圧弁で必要な一定圧に設定できるようにする。

(2) キャプセル内のベローズ加圧室を加圧するための配管系には，すでにFPガス圧力測定装置で経験済の電磁弁，ニードル弁およびストップ弁を使用する。

(3) 引張り (上限) - 引張り (下限) の繰り返しにおいて荷重の波形を矩形状にするためには，上限圧から下限圧，下限圧から上限圧へ到達する時間をできるだけ短くする必要がある。

(注1) 輸入在庫品を使用したための制限である。

(注2) 2個の2次コイルを差動トランス内部で接続して，うので外に出るのが結局4本となるが，内部で接続せず外に出して零調整をした方が一般に特性はよくなる。

そのためには、キャプセル内のベローズ加圧部の体積に比して2桁程度大きい容積を持つ上限圧および下限圧用アキュムレータを用意すれば十分である。アキュムレータの圧を設定圧（試験条件によって決まるもので任意の圧に設定できる）に保つために、コンパレータからの制御信号により電磁弁（加圧用と排圧用の2種がある）を作動させる。この際も上記のニードル弁を使用する。アキュムレータは圧力容器となるので約7 m<sup>3</sup> ポンプを使用する。

(4) キャプセル内ベローズ加圧室への配管は1本として、上限圧を印加すべき際は上限用アキュムレータのガス圧が加圧部へ流入するように上限用の電磁弁を開き（このとき下限用電磁弁は閉）、下限圧を印加すべき際も同様に下限用の電磁弁を開く（このとき上限用電磁弁は閉）。これらの電磁弁を開閉させる信号は、繰り返し速度を設定するためのサイクル設定器より発せられる。上、下限圧の保持時間はタイマーで設定する。

(5) 繰り返し速度設定用タイマーとしては、上、下限用とも1～35分（50 Hz 電源にて）を使用する。従って約0.014～0.5 c/min間の設定ができるようにする。

(6) サイクルカウンターをつける。

(7) 試料破断検出機構（キャプセル内に装着させる）により、試料が破断した際は緊急に繰り返しサイクルを停止する必要があるので緊急サイクル停止機構を設ける。

#### 2.2.4 試料の寸法形状

実際の低サイクル疲労試験においては、試験機の印加荷重制限値に応じて、目標の塑性歪が得られるように試料の試験部寸法を定めることになる。しかし本炉外試験キャプセルでは、歪（現象としては伸び）の測定精度を検討することが一つの重要な課題であるので、最大荷重時（目標最大荷重300 kg以上）において試料の試験部の応力を降伏応力以下にし、応力-歪の関係に再現性を持たせるようにすることが望ましい。

試料の試験部の断面積を $A_1$ 、チャック部のそれを $A_2$ とすると、 $A_1 \ll A_2$ が望ましいが、 $A_1 < A_2 / 3$ が満足されていればあまり大きな誤差を生じないと考えられているが実際の設計においては関連部品との寸法関連からチャック部の断面積をできるだけ大きくすることとした（結果的には14 mm $\phi$ となった）。

試料の形状として一応棒状を考え、歪測定精度検討用として試験部7 mm $\phi$ 、平行部50 mm材質SUS-304の試料を選んだ。これによると $A_1 / A_2 = 0.25 < 1/3$ であり、300 kgの荷重に対し、 $\sigma \approx 6.1 \text{ kg}/\text{mm}^2$ であるので充分降伏点（SUS-304では降伏点は大体21 kg/ $\text{mm}^2$ 程度）以下と考えられる。

#### 2.2.5 試料破断検出法

試料が破断に至る回数 $N_f$ を求めることが主目的の一つであるから、試料の破断を検出することは極めて重要なことである。試料が破断すればその伸びが急激に増大するのでこれによっても破断を判別することはできる。しかし $N_f$ を求める手段として、試料の破断を検出し緊急にサイクル動作を停止し、全サイクル数を計数して $N_f$ を求めるわけであるから、緊急停止が実行されなければ正確な $N_f$ の計数が不可能になる。従って試料伸びの急増によって破断を判定するほかに、破断検出器を設けて破断を検出すると同時に、サイクル動作を緊急に停止させる信号を必要とする。

破断検出方法としては、電気的方法、機械的方法がある。電気的方法は試料が破断すると引

張りによって試料の上半分が移動する。従ってその試料の断片の上部（移動接点に相当する）と試料上部に固接接点を設けてスイッチを構成させ、そのスイッチの閉をもって試料の破断を検出するのが最も単純で確実な方法であるのでこれを採用することとした。しかしこの電気的方法は照射中にリード線の絶縁低下などにより、その機能が不良となるおそれがあるので、必ずしも完全な方法とはいえない。機械的な方法としては電気式スイッチと同時に機械式スイッチを用いられれば便利である。最近フルイディックスの開発が急速に進められてきているので、機械式スイッチにフルイディックスを用いて、電気式スイッチと併用して試験してみることにした。

### 2.2.6 ベローズ寿命試験装置

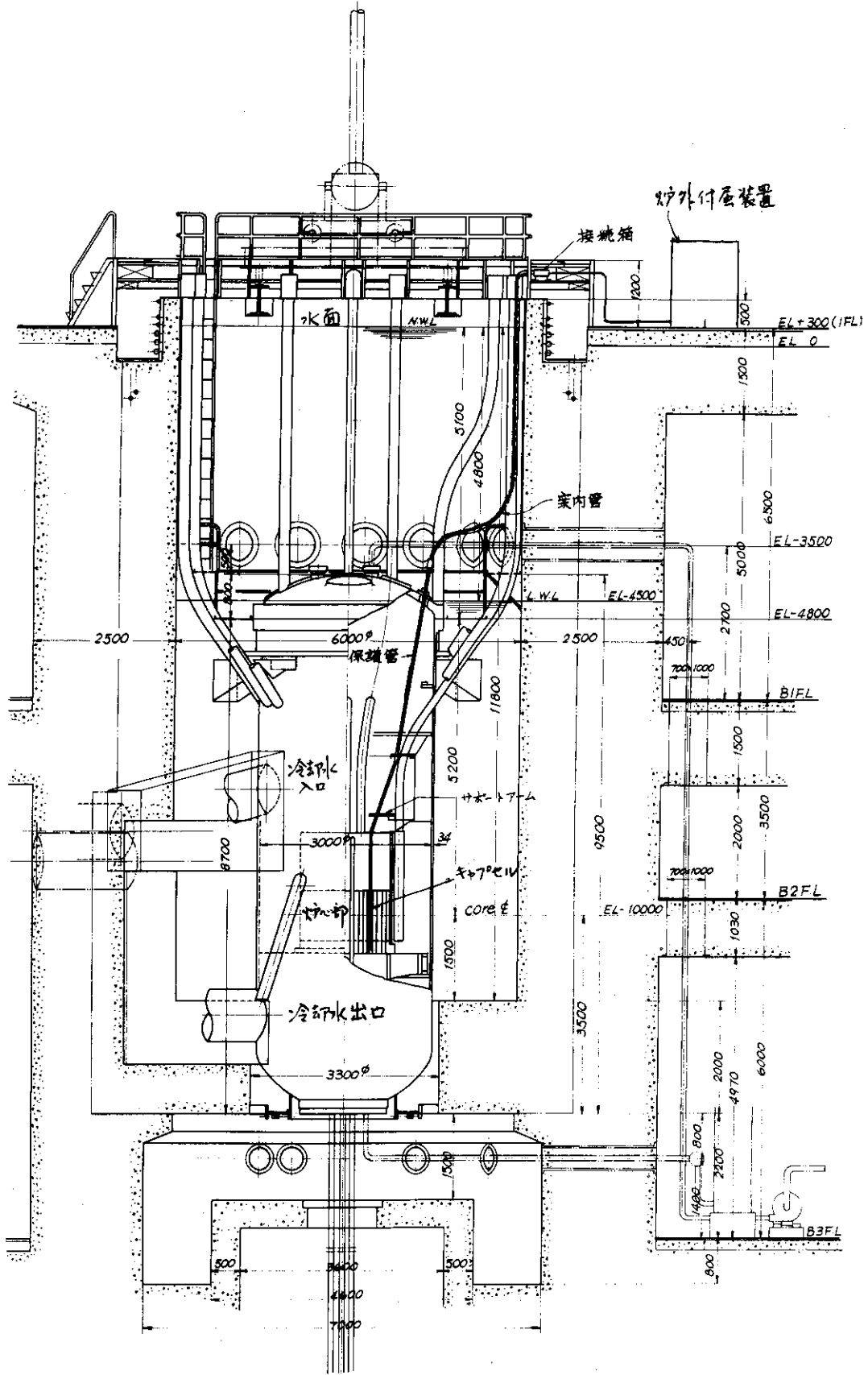
すでに第2.2.1頃の末尾に触れたように、ベローズ寿命試験用装置を製作しベローズの寿命を検討することとした。ベローズの寿命がキャプセルの寿命を決めてしまうといっても過言ではないので、寿命試験の方法については、その試験装置をできるだけキャプセルと同様の構造にして試験した方が実状に適している。従ってベローズ自体の仕様は炉外試験キャプセル用と全く同一としその構造も同様としたが、ただ寿命試験後ベローズをとり出してその状態観察や、その他の試験を実施するために、この試験装置の構造を分解可能な構造とすることとした。試験条件については最大設計温度700℃付近までの試験ができることが望ましいが、しかし実際には、試験装置外筒にヒータを巻いてベローズを昇温するためベローズを700℃にするには、外筒を700℃以上にしなければならない。外筒の材質として、SUS-304を考えているので、700℃以上の昇温は、外筒に70 kg/cm<sup>2</sup>G（実際には後述のように50 kg/cm<sup>2</sup>G程度となった）程度の内圧がかかることを考えると試験の安全性に問題がある。従って、ベローズ最高温度が600℃前後に到達できればよいこととした。

### 2.2.7 その他の事項

その他の事項として、(1)炉外試験用キャプセルの昇温と測温方法、(2)試料の温度制御方法、などがある。(1)については試料部、ベローズ部、差動トランス部を昇温させるために、試料まわりおよびキャプセルの周囲にマイクロヒータを巻き、その上を断熱材で覆い保温する、(2)については試料部のヒータの電流値を変えて行えばよい。今回は便宜上手動で行うことを考えるが、インパイルキャプセルにおいては、従来技術である自動温度制御方法を適用すればよいので、今回とくに技術開発を要しない。

測温は試料部、ベローズ部、差動トランス部、ポテンシオメータ部について1.6φC-A熱電対で行うことにした。





第 2.1 図 キャプセルの炉内装着図

### 3 炉外試験用キャプセルおよび付属装置

#### 3.1 概要

第2章で述べた設計条件と基本構想に従って炉外試験用キャプセルおよび定荷重制御と伸びの計測を行う付属装置の設計および製作を行った。全体の構成を第3.1図のフローシートに示す。全体的にみると、炉外試験用キャプセル部、伸び計測部および定荷重制御部に分けられる。

炉外試験用キャプセルは、大きく分けて荷重アクチュエータ部および歪検出機構部に分けられる。行われる動作をこのフローシートによって説明する。定荷重制御部より印加されるガス圧でベローズを圧縮して圧力を荷重に変換し、この荷重を、ベローズに固定されベローズの中心に位置する荷重伝達ヨークに伝達して、下端を固定された試料の上端を引張る。試料の伸びは歪伝達棒を介して差動トランスのコアを移動させ試料の伸びを測定する。

試料の伸びの測定は、歪検出機構および付属装置によって行われるが、測定はオープンループ方式およびクローズループ方式によって行われる。前者についてはすでに第2章で述べたように差動トランス出力を整流増巾した出力電圧を割り算器を介して直接測定するものであり、後者は整流増巾した出力電圧をさらにサーボアンプ部を通してサーボモータを回転させ、その回転をギアボックス、回転一往復運動変換器（送りねじ部）および差動トランス駆動軸を介して、差動トランスのコイルを動かし、コアとヌルバランスさせる。伸びの測定は、サーボモータと直結したポテンシオメータの出力電圧を測定して行われる。

つぎに定荷重制御装置について述べる。まず上限圧および下限圧設定用コンパレータによって、上限および下限のアクチュエータ圧を希望する圧（実際は荷重）に自動的に設定しておき、上限および下限用タイマーで上限および下限圧の保持時間を設定する（これにより希望する繰り返し速度が設定される）。以上の条件のもとで自動的に片張り定荷重の繰り返し動作が行われる。この模様についても第3.1図に示してある。

炉外キャプセルを製作するにあたって、ベローズの性能はキャプセルの性能を支配するキーポイントのひとつである。従ってベローズの設計、製作と並行してその寿命試験用装置を製作し、ベローズの寿命試験を行った。以下ベローズの設計、製作およびその寿命試験結果を含め、炉外試験用キャプセルの内容、伸び計測部および定荷重制御部の内容について記述する。

#### 3.2 ベローズの設計・製作および試験

本キャプセルの炉外試験装置を設計、製作するにあたって、ベローズによって得られる荷重、使用条件に対するその寿命がキーポイントのひとつであることは前にも述べたとおりである。とくにベローズの寿命はキャプセルの寿命そのものであるためとくに重要である。このためベローズを、その使用状態を模擬した装置に組み込み、想定している使用条件で寿命試験を行うことを計画した。以下ベローズ試験装置の概要、ベローズ試験の方法および結果について述べる。

##### 3.2.1 ベローズ

まず目標荷重300kgを得るためには加圧用ベローズを2段とし各ベローズの間にシール用

ベローズを置く必要があると考えられた。ベローズの形式として一般に、成形ベローズおよび溶接ベローズの2種があるが、前者は後者に比較すると耐圧が弱く、しかもバネ定数が大きいので、目標荷重が得にくいのではないかと考え溶接ベローズの使用を試みた。つきに寿命について見積ってみる。使用期間を1年とし、JMTRの運転サイクルを年間6サイクルとし、1サイクルを28日(実質は25日程度であるがおお目に見積る)、繰り返し速度を設計における最大値  $0.5 \text{ c/min}$  とすると、必要寿命は1年で約  $1.2 \times 10^5$  回となる。しかし  $700^\circ\text{C}$  という設計条件ではこの寿命を得ることはむずかしいこと、一般に繰り返し速度はもっと小さいと考えられるので、ベローズ製作者と協議し  $10^4$  回を目標値とした。<sup>(注1)</sup>

ベローズの仕様を下記に示す。

- (1)耐 圧;  $50 \text{ kg/cm}^2 \text{G}$  以上
- (2)寿 命; 加圧力  $50 \text{ kg/cm}^2 \text{G}$  で  $10^4$  回以上(目標値)
- (3)寸 法;  $30^{\phi 0.D.} \times 17^{\phi 1.D.}$ ; 肉厚  $0.25 \text{ mm}$ , 50山(加圧ベローズ)  
 $23^{\phi 0.D.} \times 12^{\phi 1.D.}$ , 肉厚  $0.2 \text{ mm}$ , 62山(シールベローズ)
- (4)自 由 長;  $50 \text{ mm}$  (加圧ベローズ)  
 $48 \text{ mm}$  (シールベローズ)
- (5)常用伸縮量;  $\pm 5 \text{ mm}$
- (6)全有効面積;  $6.28 \text{ cm}^2$
- (7)使用温度;  $700^\circ\text{C}$  (最大) <sup>(注2)</sup>
- (8)材 質; ニューハステロイC

この仕様に基づいて2体のベローズを製作した。その図面を第3.2図、その外観写真を写真3.1に、溶接部のマイクロ写真を写真3.2に示す。

### 3.2.2 ベローズ試験装置

ベローズは製作した2体の内1体を使用した。試験装置は、できるだけ想定しているインパイルキャプセル、従ってそれを模擬する炉外試験用キャプセルと同様にしよう設計した。その構造および外観写真をそれぞれを第3.3図および写真3.3に示す。なおこの図には荷重測定用のロードセルなども記入されている。この試験装置は試験目的上炉外試験用キャプセルと同様な構造としたため、結果的には炉外試験用キャプセルの試作品となり、その設計の参考になった。炉外試験用キャプセルではベローズの加熱用マイクロヒータを加圧室ハウジング内に設けることができればハウジング温度をかなり低くすることが可能であるが、想定しているインパイルキャプセルの外径を  $40 \text{ mm}$  としてキャプセル構造を決めてゆくと、大きい荷重を得るためにできるだけ外径の大きいベローズを使用する必要があるが、結局ベローズの加熱はハウジングの外側にマイクロヒータを巻いて行わざるを得なくなる。そうするとハウジングを高温にし、加圧室の圧力を  $50 \text{ kg/cm}^2 \text{G}$  程度に高くした場合、ハウジングの強度が問題になる。このベローズ試験装置では加圧室の最小肉厚を  $2.5 \text{ mm}$  としたため、安全性の見地から2重ハウジ

(注1) (株)バルカ・ベローズ工業

(注2) 三菱金属鋳業(株)製; ニューハステロイC-276; Cr 15%, Mo 4%, Fe 5.5%, Bal. Ni

ング構造とし、内側のハウジングを加熱し、外側のハウジングを室温（むしろ冷却水温—後述）とし、内側と外側のハウジング間にバックアップガス圧を加えられるようにした。ただし、本試験装置、炉外試験用キャプセルともハウジングの内径はインパイルキャプセルを模擬し同一寸法とした。なお、炉外試験用キャプセルでは、2重構造の煩雑さをさけるため、熱電対のとりつけ方を変えたり、ハウジングとの関連部品の構造を変えたりして、厚肉の1重ハウジングとした（詳細は後述）。このペローズ試験装置の外側ハウジング外面は冷却水で冷され、ガスケット部が過熱してリークすることのないようにした。ガスケットシールとした理由は、試験後ペローズを取り出して検査するためである。ガスケットとしてウズ巻きガスケットを、フープ材としてSUS-304を、フィラー材として石綿テープを使用した。

ペローズへの繰り返し加圧は加圧ラインで行った。そのフローシートを第3.4図に示す。図に示すように、減圧弁、電磁弁などによりなる配管部、加圧時間、排圧時間を設定するサイクル設定器、圧力計、荷重測定用のロードセルなどの計器類、圧力、荷重を記録する2ペンレコーダ、温度を記録する12打点レコーダなどよりなっている。この模様を写真3.4に示す。

### 3.2.3 試験条件

試験開始に先立って設定した試験条件は下記のとおりである。

- (1) 試験温度；500℃、600℃、さらに可能なら650℃程度に昇温。
- (2) 加圧力；0-50 kg/cm<sup>2</sup>Gの繰り返し。
- (3) 繰り返し数；500℃にて5000回試験し、ペローズが健全であれば、600℃にて3000回、同様に健全であれば、さらに昇温して2000回行い、ペローズが健全であれば、この温度で破損まで試験する。
- (4) 繰り返し速度；約0.75 c/min（～80 sec/cycle）
- (5) その他の条件；試験装置の構造上の制約のため、ペローズ内面は大気に接し、加圧ガスは99.99%純度のN<sub>2</sub>ガスとする。

### 3.2.4 試験結果

試験は1日に約500サイクルの繰り返し加圧を行うことを目標とした。毎日のスケジュールは、昇温時間約2時間、試験時間約8～9時間、その他は休止時間（夜間）であった。装置に取りつけた熱電対番号と位置は第3.2図に示すとおりである。T/C #1は約500℃、#2は約520℃、#3は約480℃、#4は約400℃、#5は約290℃であった。これらの結果をみるとペローズ上部は温度がかなり低下しているの、これらの温度データからペローズの平均温度を正確に見積るのはむずかしいが、平均して450℃程度と考えられる。なおペローズ上部の温度が低下した理由は、この装置では上部を冷却する構造になっているため、熱が上方に逃げやすくなったためと思われる。以上の状態で行ったペローズ寿命試験の内、圧力と荷重を記録したチャート紙の一部を第3.5図に示す。

ペローズは試験開始後6日目に、3,070回で破損した。試験温度はさきに述べたように約450℃であった。従って、予定していた600℃、およびそれ以上の温度での試験はできなかった。ペローズの寿命は、設計値10,000回の約1/3であったということになる。この事実、500℃程度で50 kg/cm<sup>2</sup>Gの外圧の繰り返し下での作動はペローズにとって予想以上に過酷な条件であったと考えられるが、この試験においてペローズ内側が大気にさらされていたことおよ

びこの種のベローズの使用経験に関する基礎的資料が不足していることに、設計寿命と実際の寿命とにかなりの喰い違いを生じた原因があるように思われる。

ベローズの破損状況を観察するために、試験装置からベローズを取り出し、外観検査、マイクロ組織調査および硬度試験を実施した。まず外観については写真3.5にみられるように部分的にピッチの間隔が大きくなっている。試験前後のベローズの外観を比較してみると、試験前ベローズの小さなピッチ誤差が、試験によって拡大されたように思える。また破損部を拡大した写真を写真3.6に示す。ベローズの表面はやや青味があった褐色に変化しているため、この変化は酸化によるものと考えられる。つぎにマイクロ組織調査については、素材のマイクロ組織と供試ベローズのそれと比較して差がないことから、素材そのものはとくに割れ発生と関係はないものと思われる。つぎに外観から判断したベローズ破損部、準破損部および健全部についてそれらの断面を比較したところ、破損部については、亀裂の先端が溶接部に伸びているのが観察された。準破損部についてもやはり、溶接部へ亀裂先端が伸びていた。また健全部についても全体の約5割位割れ始めが観察された。なお以上の観察箇所は、このベローズが外圧使用のため内径の溶接部のみについてみたが、さらに外側の溶接部を観察した結果、上記の健全部の割れと同様の割れが生じていることがわかった。

つぎに硬度(HvM500g)については、ニューハステロイド素材の平均値が200、ベローズ母材部の平均値が204であり、あまり変化していない。ベローズ溶接部の平均値は225であった。クラックの発生した近傍の硬度については、溶接部の平均値は、239、クラック部で226、溶接部付近の母材の平均値が228であった。このように硬度は幾分か増加している。温度の昇降、ベローズの伸縮、圧力などの外部応力が繰り返し作用した場合、剛性の異なる部分ほど溶接部へ応力集中は大きく、従って硬度の高い箇所は割れの発生または伝播がしやすいので、多少硬度が影響しているかも知れない。

以上のような観察結果からベローズ破損の原因を断定するのは難かしいが、多分苛酷な使用条件による疲労破壊とみるのが妥当と思われる。母材と母材の重ね部がノッチの役割をし、母材面に働く外圧による力によって母材と母材がノッチを中心として開閉し、その結果ノッチ先端より割れが進行していったものと思われる。なおベローズ破断部が酸化していたらしいことを考え、使用するガスの純度を上げることもベローズ寿命を延ばすひとつの対策となるかも知れない。

### 3.3 炉外試験用キャプセル

炉外試験用キャプセルは、試料および試料への荷重印加用ベローズなどよりなる荷重アクチュエータ部、並びに試料の伸びを測定する歪検出機構部よりなる。両部は歪伝達棒によって結合されている。以下両部について記述する。

#### 3.3.1 荷重アクチュエータ部

この部分の構造図を第3.6図に、構造部品およびその外観写真(マイクロヒータ巻きつけ作業中④)をそれぞれ写真3.7, 写真3.8に示す。この部分は大きく分けて、ベローズ外側とハウジング内側より構成される加圧部、試料への荷重伝達部および試料部より構成されている。まず加圧部については、加圧ベローズ2個をシールベローズで結合した合成ベローズとハウジングとが溶接により固定、

シールされている。加圧室の中にキャプセル外部（定荷重制御部）より加圧管を通してガス圧が導入されベローズを圧縮し荷重を発生させる。この荷重はベローズ中心部に位置する10mmφニューハステロイC製の荷重伝達棒、それと結合するフランジおよび荷重伝達用パイプを介して試料の上部に伝達され試料を引張るようになっている。試料の下端は、ハウジングに固定されているチャックに、ねじ結合により固定されている。試料の上端は、17-4 PH製のスライドベアリングと直径で約0.1mmのクリアランスで摺動するようになっている。なお、ベローズ中心部の荷重伝達棒とベアリングとの嵌合も同程度である。試験終了後試料を取り出す際、試験が高温で行われた場合試料とチャック部が焼付きによって固着し試料のとりはずしが不可能にならないように、試料下端ねじ部、チャックねじ部表面を窒化処理して硬度を大にした。

ハウジングの寸法については、すでに述べたように、内径を想定されるインパイルキャプセルの内径に合せてあるが、ハウジングの外側にマイクロヒータを巻いてベローズを加熱する構造に設計したためハウジングも同様に加熱されてしまう。その際加圧室の内圧を上昇させた場合ハウジングが破損することのないよう、その外径を大にし肉厚を増した設計とした。

このキャプセルをフランジ構造としねじ止めにより固定しているのは試料の交換を可能にするためである。

試料の破断を検出する機構として、電気式スイッチを利用する方法とフルイディックスを用いた空気式スイッチを用いる方法の2種を考え、試料が破断してその上端部がキャプセル上部に衝突した時点を検出できるようにした。この試料破断検出によってサイクル動作を停止させ破断回数を計測する。

試料の試験部周辺にはマイクロヒータを巻き、試料をベローズより高温にできるようにしている。キャプセル全体はすでに述べたようにハウジングの周囲にヒータを巻きその上を断熱材で覆っている。

測温は、C-A熱電対によって行い、試料部、ベローズ部およびハウジング下部の測温ができるようになっている。

### 3.3.2 歪検出機構

この部分は荷重アクチュエータ部の試料上端に取りつけられた歪伝達棒によって伝達される試料の伸びを測定する部分である。全体の構造を第3.7図に、その外観写真を写真3.9に、構成部品の写真を写真3.10に示す。

この部分は大きく分けて、差動トランス部、そのコイルボbinを軸方向に往復移動させるためのサーボモータ（ギアボックス付）および回転-往復運動変換部（送りねじ部）およびサーボモータの回転を電気出力に変換するポテンシオメータなどに分けられる。

差動トランスは、0.5mmおよび5mmフルスパンの2種が直結されている。2つの差動トランスはハウジングに収納されこのハウジングを動かすことによってコイルボbinを移動させる。この差動トランス用ハウジングと回転-往復運動変換部を結ぶ伝達棒とにそれぞれスライドベアリングを設けてある。回転-往復運動変換部は、サーボモータによる回転運動をマイクロメータ用の送りねじによって往復運動に変換している。送りねじのピッチは0.5mm/1回転である。このキャプセルでは試料破断に至るまで伸びを5mmと決め、この長さを測定するように決めたので、この長さに対応する送りねじの必要回転は10回転である。送りねじとギアを介

して結合されているポテンシヨメータは5mm/8回転となっている。5mm/10回転としなかった理由はポテンシヨメータの両端の各1回転はリニアリティに問題があるおそれがあるので使用を避けたためである。従って送りねじとポテンシヨメータ間の回転数をギヤ比で調節している。実際にインパイルキャプセルを設計するにあたって試料が破断に至るまでの伸びをクローズループ方式で測定する場合、しかも破断に至るまでの長さが長い場合にはこれに応じて送りねじの送り長さを長くし、ポテンシヨメータの有効回転数を大きくするかあるいはポテンシヨメータの回転数を現設計と同様にするとすれば、送りねじとポテンシヨメータを結合するギヤのギヤ比を大きくするかする必要はある。この炉外試験用キャプセルでは、クローズループの性能をみることを主眼とし、試料が破断に至るまでの伸びを測定することを意図しなかったため、第2.2.2項に述べたように、5mmのフルスパンとした。機構上も最大フルストローク5mmとしているので、この炉外キャプセルで破断に至るまでの伸びが5mm以上の試料については、破断に至るまでの試験ができない。ただし本質的な問題ではないので、このキャプセルでも多少の改造を加えれば可能となる。インパイルキャプセルにおいては、この点に留意し、試料が破断に至るまでの長さを想定してストロークを定める必要がある。

その他、ポテンシヨメータ部、差動トランス部に熱電対を設置した。また荷重アクチュエータ部から引き出されてくる熱電対、ヒータ、破断検出器などのリード線、加圧用配管およびフルイディックス使用破断検出器配管などを含め、差動トランスからのリード線をこの歪検出機構部に通し、インパイルキャプセル製作時と同等の設計的考慮を払った。また差動トランス部に対応する外筒外周部にマイクロヒータを巻き加熱できるようにした。

以下主要部分の内容、設計製作にあたって注意した事項などについて略述する。

### (1) 差動トランス

この低サイクル疲労試験キャプセルの開発の中には、一般的な伸びの測定方法として電気式測定方法の1つであるインパイル用差動トランスの開発がその主要な開発内容として含まれる。さらにまたインパイル用差動トランスが開発されれば、低サイクル疲労試験キャプセルへの適用以外の一般的な伸びの測定に適用できるという意味で主要な開発項目であることはすでに第2.2.2項に触れた。これらの一般的な使用も考慮に入れて、0.5mmおよび5mmフルスパンのインパイル用差動トランスを製作した。製作した2種の差動トランスの構造図を第3.8図、第3.9図に示す。使用材としては、コアがSUS-410、コイルが、0.1mm $\phi$ のCERAMATEMPワイヤ、コイルボビン焼結アルミナである。ハウジングはSUS-304である。

### (2) サーボモータおよびポテンシヨメータ

サーボモータはタコジェネレータ付400Hz 2相サーボモータであり、最大出力2.5W、定格回転数3000rpm、トルク100gr-cmのものを使用した。

ポテンシヨメータは、有効電気角3600 $\circ$ (すなわち10回転)、定格電力2W、全抵抗1K $\Omega$ のサーボ用多回転形ポテンシヨメータを使用した。

### (3) 機械部分

機械部分で問題となる箇所は少くないが、ここではとくにクローズループ方式で測定する場合にその誤差の原因となる機械的なクリアランスについてのみ述べる。クリアランスが大きければ、試料が伸び、差動トランスのコアが移動し、偏差信号が発生し、それに応じてサーボ

モータが回転しても、この回転が差動トランスのコイルボビンまで伝達される間に途中で幾分か吸収され、コイルボビンに完全に伝達されない。すなわち不感帯を生じ、誤差の原因となる。発生するクリアランスの原因としては、送りねじと結合するナット間のクリアランス、ギアのバックラッシュ、ボールベアリングのボールの遊びまでも含めた種々の機械的嵌合部のクリアランスなどが考えられる。送りねじについては0.5mmピッチ精度1級のマイクロメータを使用し、ギアについてはバックラッシュをほとんど零にするような設計を施した。機械的嵌合部については、ボールベアリング内部の遊びは別として、ボールベアリングとシャフトの嵌合部間のクリアランスを零にするように組み立てることによってできるだけ機械的クリアランスを無くすように設計、製作した。

### 3.4 付属装置

付属装置は伸び計測部および定荷重制御部よりなるが、概略構成については、第3.1項の概要に述べたので、ここでは具体的な機器の構成について述べる。

#### 3.4.1 伸び計測部

この部分の簡略化したフローシートを第3.1.0図および第3.1.1図に示す。第3.1.0図はオープンループ方式による伸びの計測の場合を示す。差動トランス(DTF)の二次側コイルを整流および増巾し、出力電圧 $E_1$ 、 $E_2$ を発生させ、さらに $(E_1 - E_2)$ 、 $(E_1 + E_2)$ を作り、割り算器により $(E_1 - E_2) / (E_1 + E_2)$ を作りこれを出力とし、デジタルボルトメータおよびレコーダに指示、記録させ伸びを測定する。通常の差動トランスの使い方では、 $(E_1 - E_2)$ を出力としているが、電源変動、周波数変動、温度変動などが相殺されると報告されているのでこの方法を使用した。第3.1.1図はクローズループ方式による伸びを計測する場合のフローシートを示す。この方式は差動トランスの出力をバランス回路を経て交流増巾し、これを2KHzの電源で同期整流し、この出力を直流増巾する(以上を整流増巾部と称する)。整流増巾した出力をチョッパーにより交流に変換し、この出力を交流増巾し(以上をサーボアンプ部と称する)、この出力をサーボモータの制御巻線側に入力する。一方チョッパー出力をインバータで400Hzに変換し、サーボモータの励磁巻線側に入力する。サーボモータの回転はギアを介して、サーボモータのロータ軸と直結しているポテンシオメータに伝達され、その出力をデジタルボルトメータ、レコーダに指示、記録し伸びを測定する。次項に述べる定荷重制御装置配管部を含めた外観写真を写真3.1.1に示す。この写真の左側の機器の内、一番上がデジタルボルトメータ、一番下がレコーダ、その上が伸び計測系である。

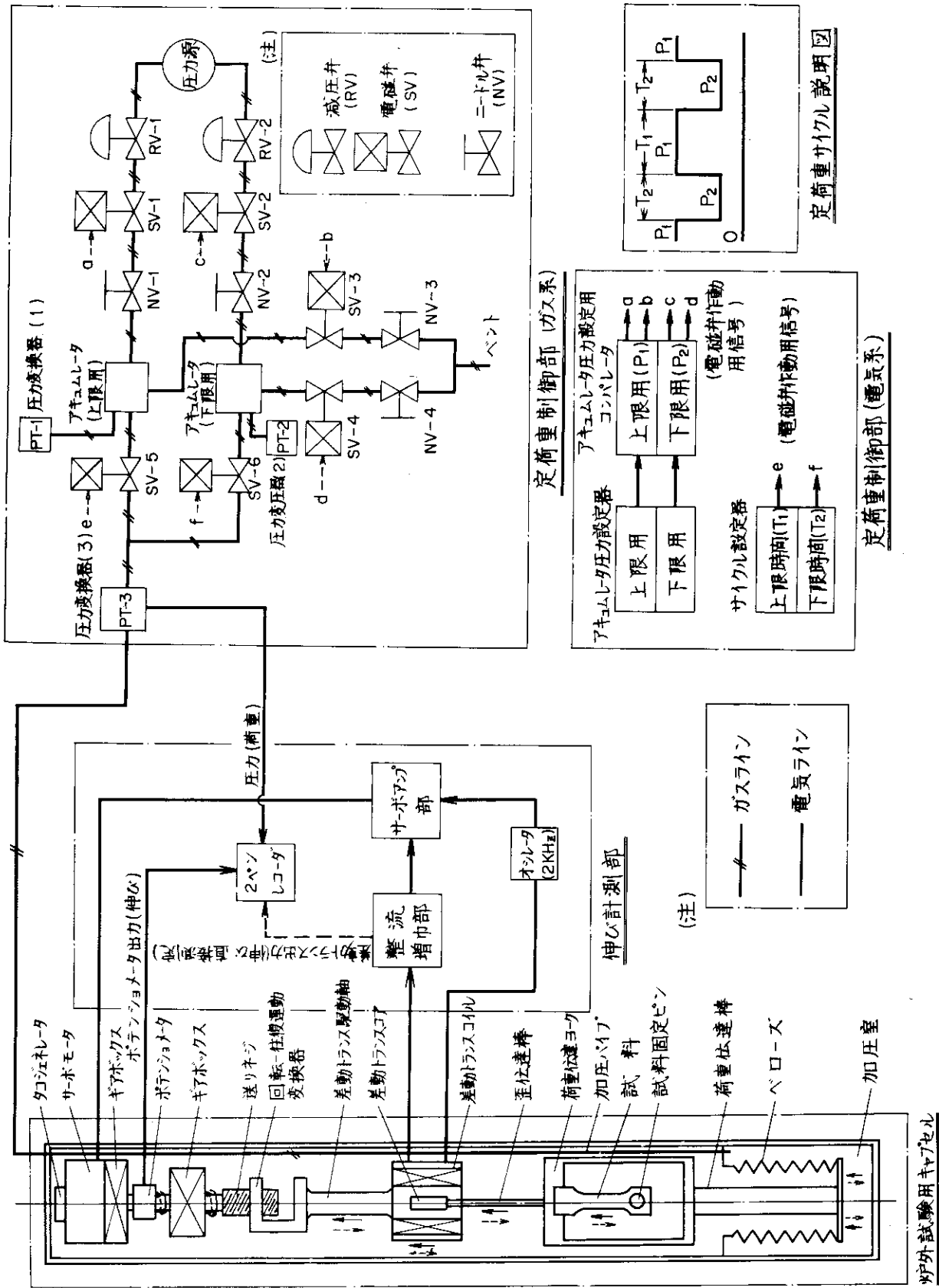
#### 3.4.2 定荷重制御部

この部分のフローシートを第3.1.2図に示す。定荷重制御部は、試料に対し、設定された引張り一引張り、あるいはC一引張りの定荷重をサイクリックに、矩形波状に印加できること、上限荷重と下限荷重をそれぞれ任意時間、一定荷重(制御上は一定圧力)に保持できること、試料が破断した際、この破断回数が測定できることが必要条件である。

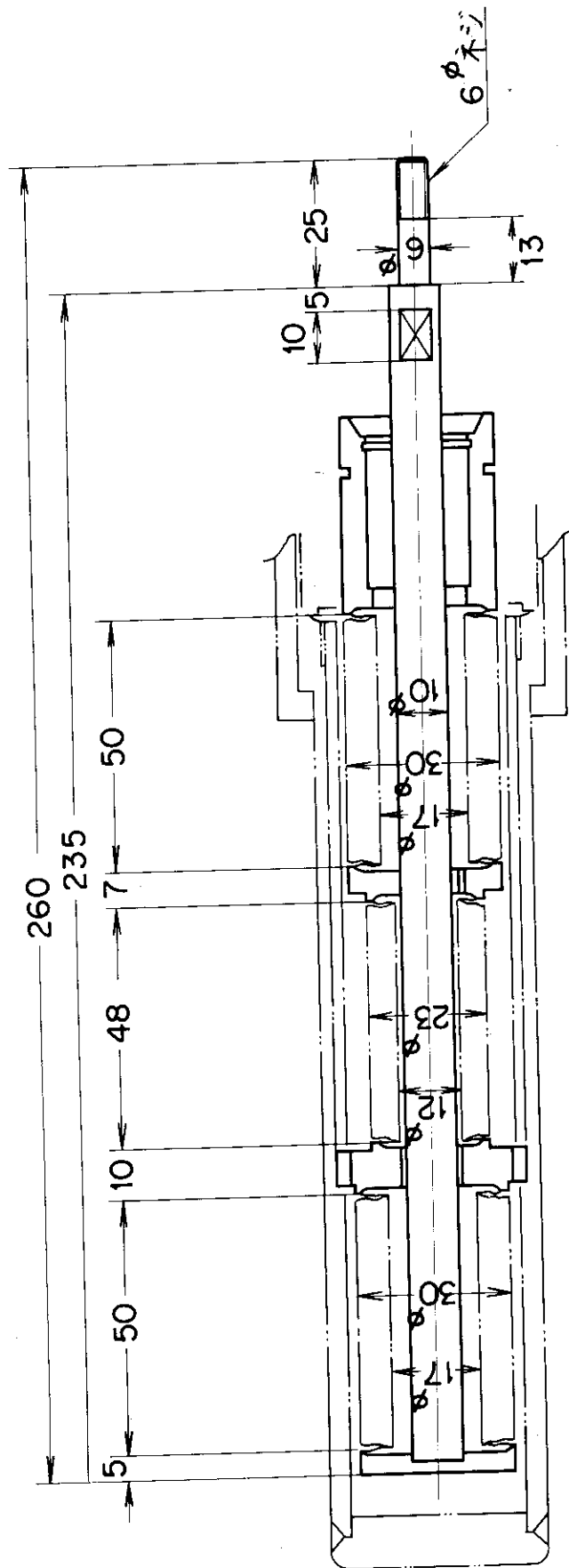
以上の条件を満たすために第3.1.2図に示すような配管系および制御系とした。その機能をこの図に従って説明する。まず要求される設定荷重に対応するガス圧になるように上限および下限のアクチュエータ圧を設定する必要がある。波形を矩形波状とするためには、キャプセル



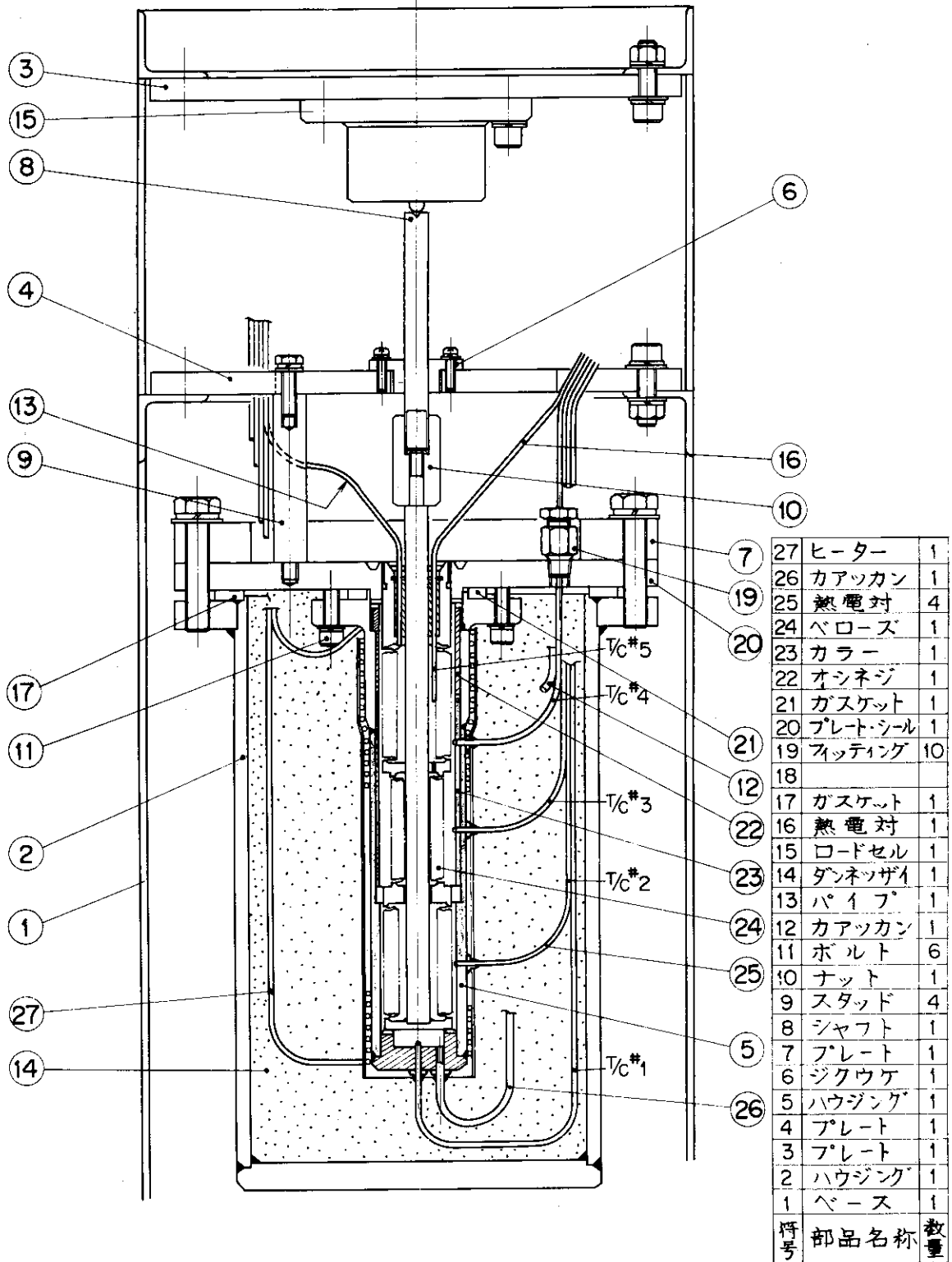
内加圧容積，炉外部の定荷重制御装置からそれに至るまでの配管および装置自体の配管系の容積に比べて，アキュムレータの容積を十分大きくする必要がある。大きい容積の圧力容器としては市販の約7m<sup>3</sup> ガス入りのボンベ（容積約47ℓ）が適当と考えアキュムレータとしてこれを使用することとした。アキュムレータ内圧を試験条件に従い一定に保つために，アキュムレータ圧力設定器によって上，下限圧を設定し，コンプレータによって電磁弁を作動させる。上限圧用および下限圧用アキュムレータは，それぞれ，電磁弁SV-1，SV-3，およびSV-2，SV-4を開にさせて設定される。また流量はニードル弁，NV-1，VN-3，およびNV-2，NV-4によってそれぞれ調節される。定荷重を試料にサイクリックに印加するために上限時間設定用タイマー（タイマー（A））および下限時間設定用タイマー（タイマー（B））によって上，下限荷重の保持時間が設定される。試料への上限および下限荷重の印加は，それぞれ電磁弁SV-5およびSV-6によって行われる。なおこの図には表示されていないが，サイクル数はタイマーに連動しているサイクルカウンターによって計数される。一方試料の破断の際は，破断検出器として電気式およびフルイディックスを使用した空気式の2種類を製作した。破断した試料の上端部をフルイディックスに衝突させると，フルイディックスの差圧が変化する。この差圧変化を空電変換器によって電気信号に変換しサイクル停止用リレーを作動させてサイクル動作を停止させる。それによってサイクルカウンターの計数も停止され，試料が破断に至った回数が計数される。また電気式検出器に関しては，同様に破断した試料の上端を電気接点に衝突させこれによって生ずる電気信号でサイクル停止用リレーを作動させるものである。なお細かくなるが，サイクル停止に関しては2種の停止方法がある。上記のようにサイクルの完全停止のほか，サイクルを一時停止させることもできる。すなわち何らかの必要性により試料破断前に，保持時間を変えずにサイクルを停止させたい場合は，サイクル一時停止用スイッチを押せば現在行っているサイクルを終了した時点で繰り返し動作は停止する。再始動は上限時間設定用タイマー（タイマー（A））から開始される。従って保持時間を変えずに試験できる。



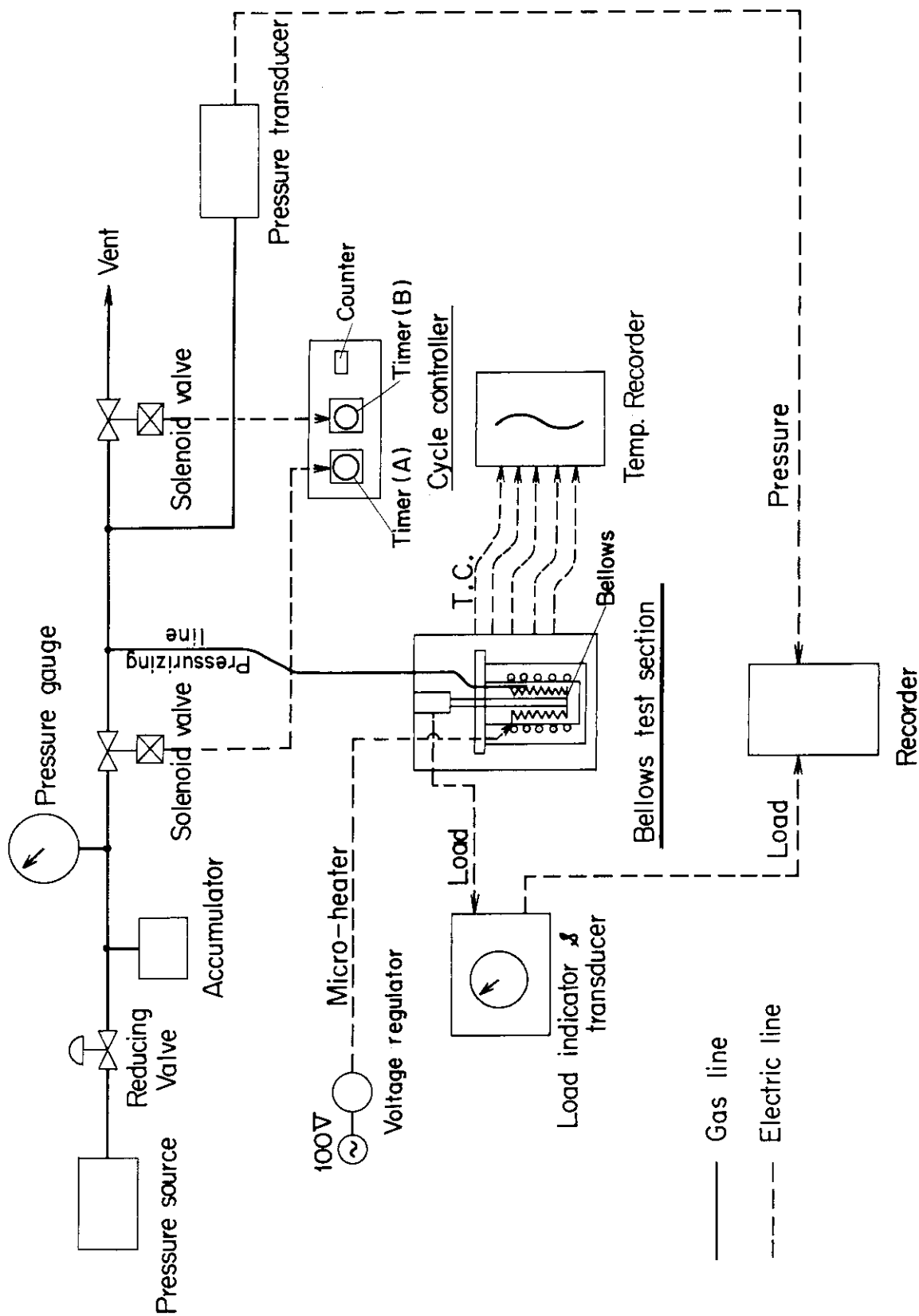
第 3.1 図 低サイクル疲労試験キャブセル炉外試験装置フローシート



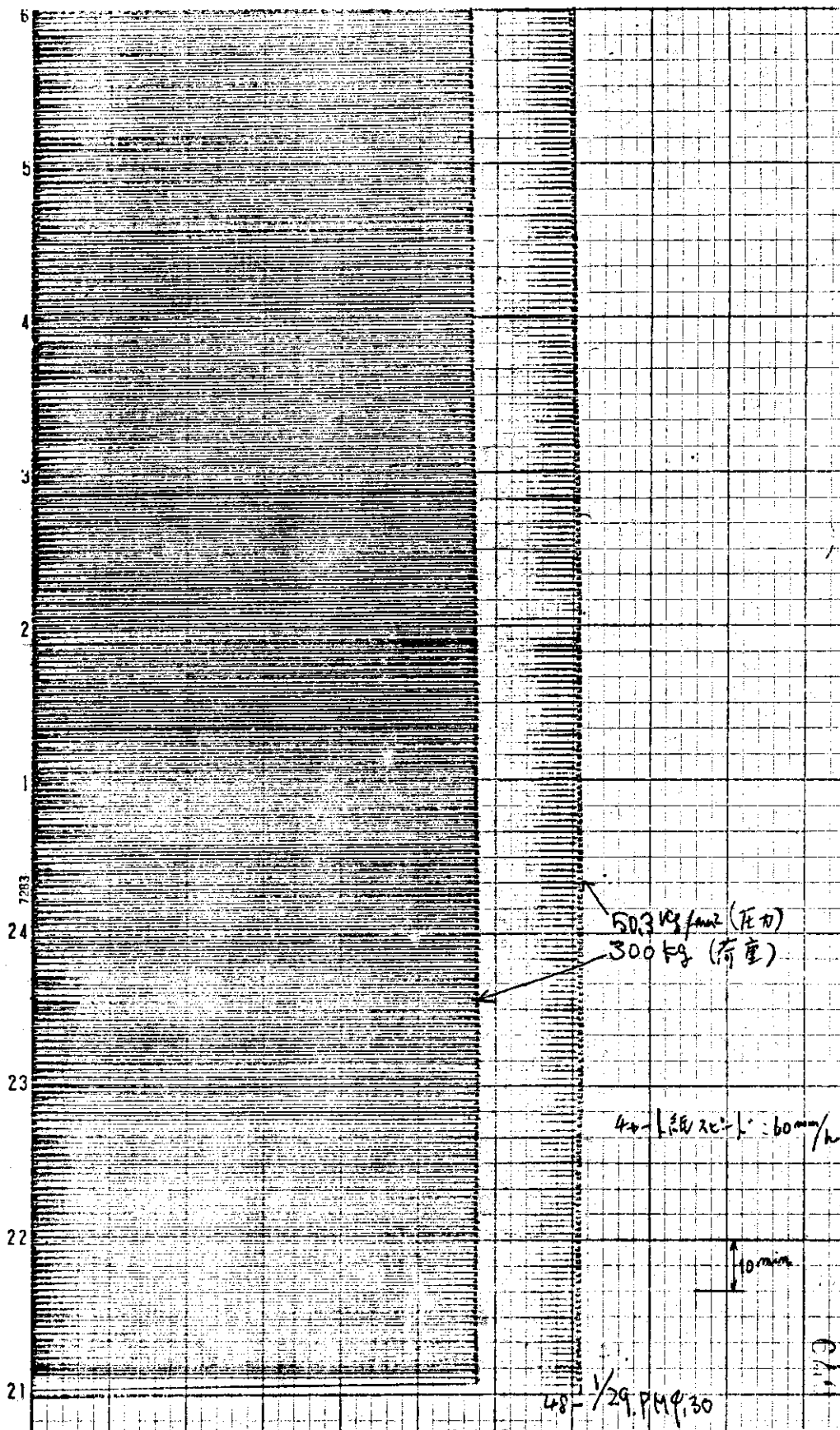
第3.2図 ベロースの寸法・形状



第 3.3 図 ベロローズ試験装置の形状

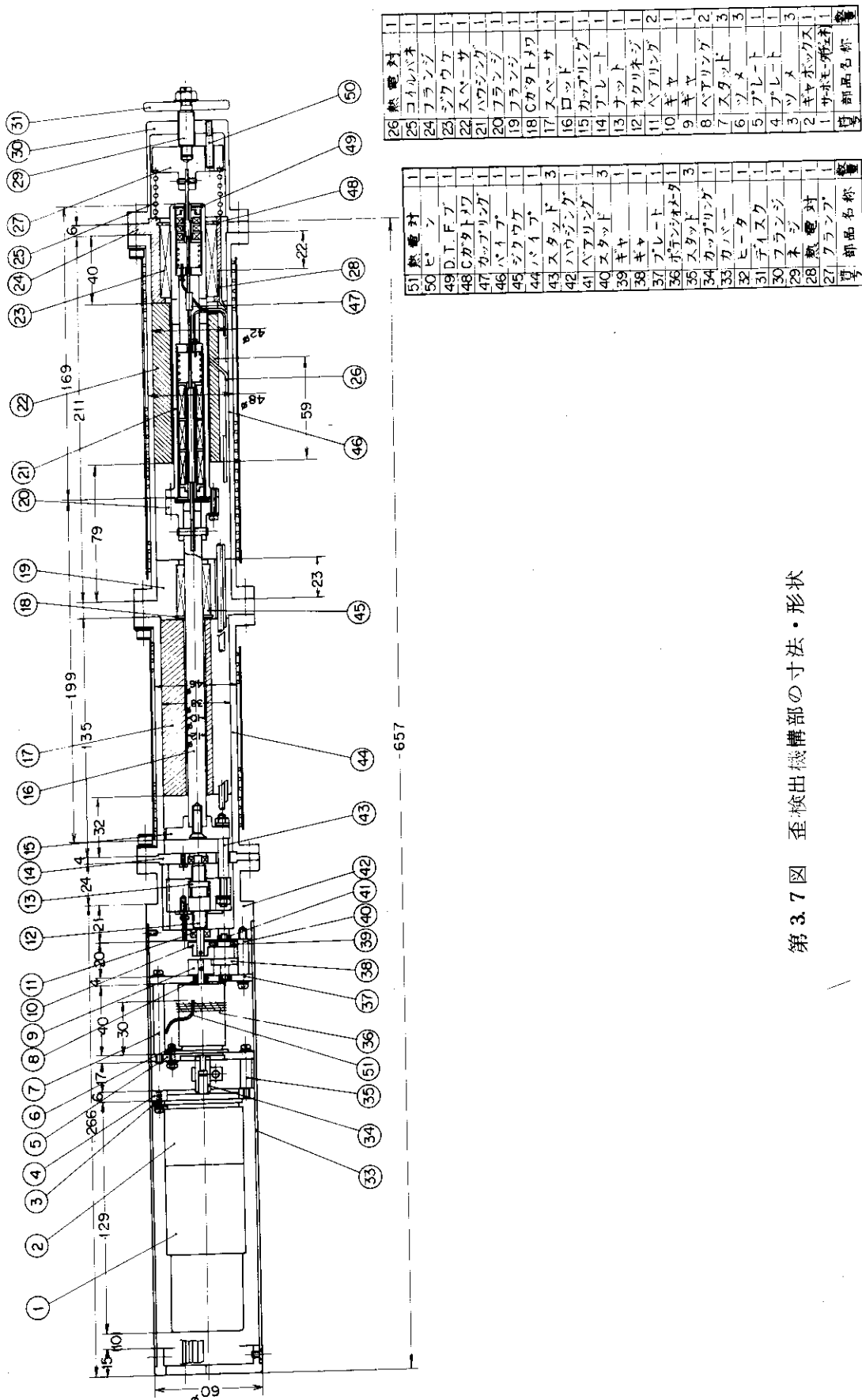


第 3.4 図 ベローズ試験フローシート



第 3.5 図 ベローズ試験結果 (チャート紙の一部)



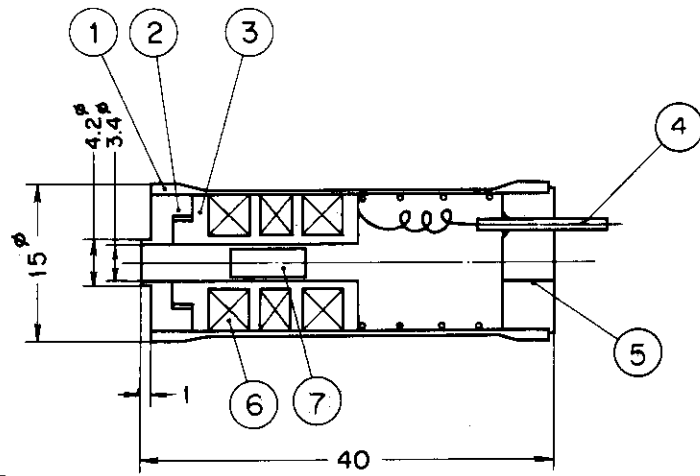


26	熱電対	1
25	コイルバネ	1
24	フランジ	1
23	シフト	1
22	スベ-サ	1
21	ハウジング	1
20	フランジ	1
19	フランジ	1
18	カクタマワ	1
17	スベ-サ	1
16	ロッド	1
15	ハウジング	1
14	プレート	1
13	ナット	1
12	オクリネジ	1
11	ハウジング	2
10	キヤ	1
9	キヤ	1
8	ハウジング	2
7	スタット	3
6	ヒ-タ	3
5	プレート	1
4	プレート	1
3	ソム	3
2	ギヤボックス	1
1	サホモ増圧機	1
	部品名称	

51	熱電対	1
50	ピ-ン	1
49	D.T.F.フ	1
48	カクタマワ	1
47	ハウジング	1
46	パイプ	1
45	シフト	1
44	パイプ	1
43	スタット	3
42	ハウジング	1
41	ハウジング	1
40	スタット	3
39	キヤ	1
38	キヤ	1
37	プレート	1
36	ボクシンホセ	1
35	スタット	3
34	ハウジング	1
33	カバ-	1
32	ヒ-タ	1
31	チイスク	1
30	フランジ	1
29	ネジ	1
28	熱電対	1
27	フランジ	1
	部品名称	

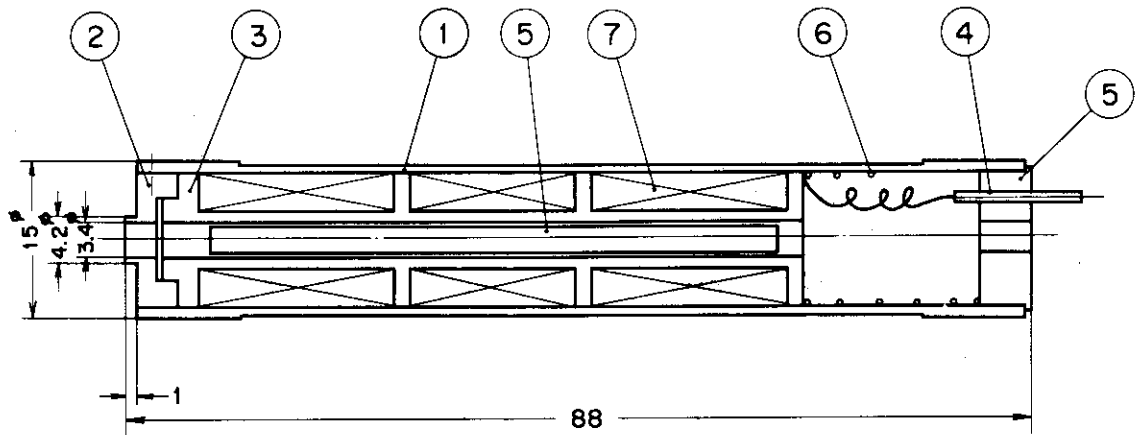
第 3.7 図 歪検出機構部の寸法・形状





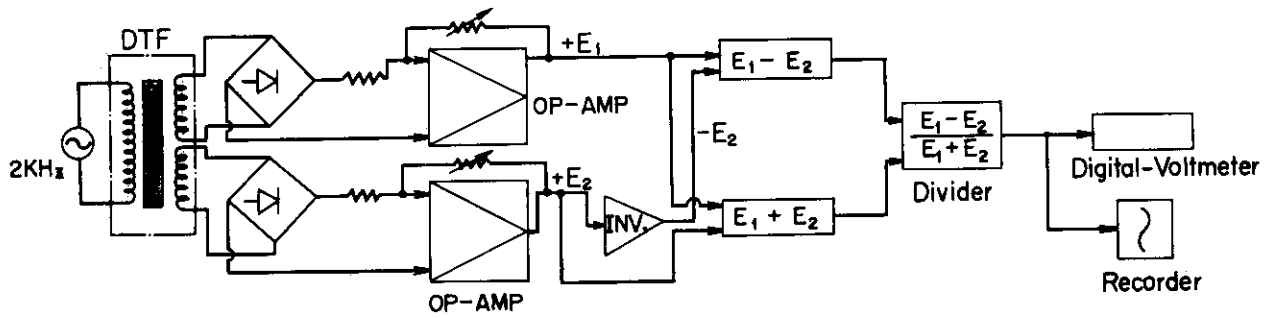
NO.	品名
1	ケース
2	ハウジング
3	ボビン
4	端子
5	ハウジング
6	コイル
7	コア

第 3.8 図 0.5mm 差動トランスの寸法・形状

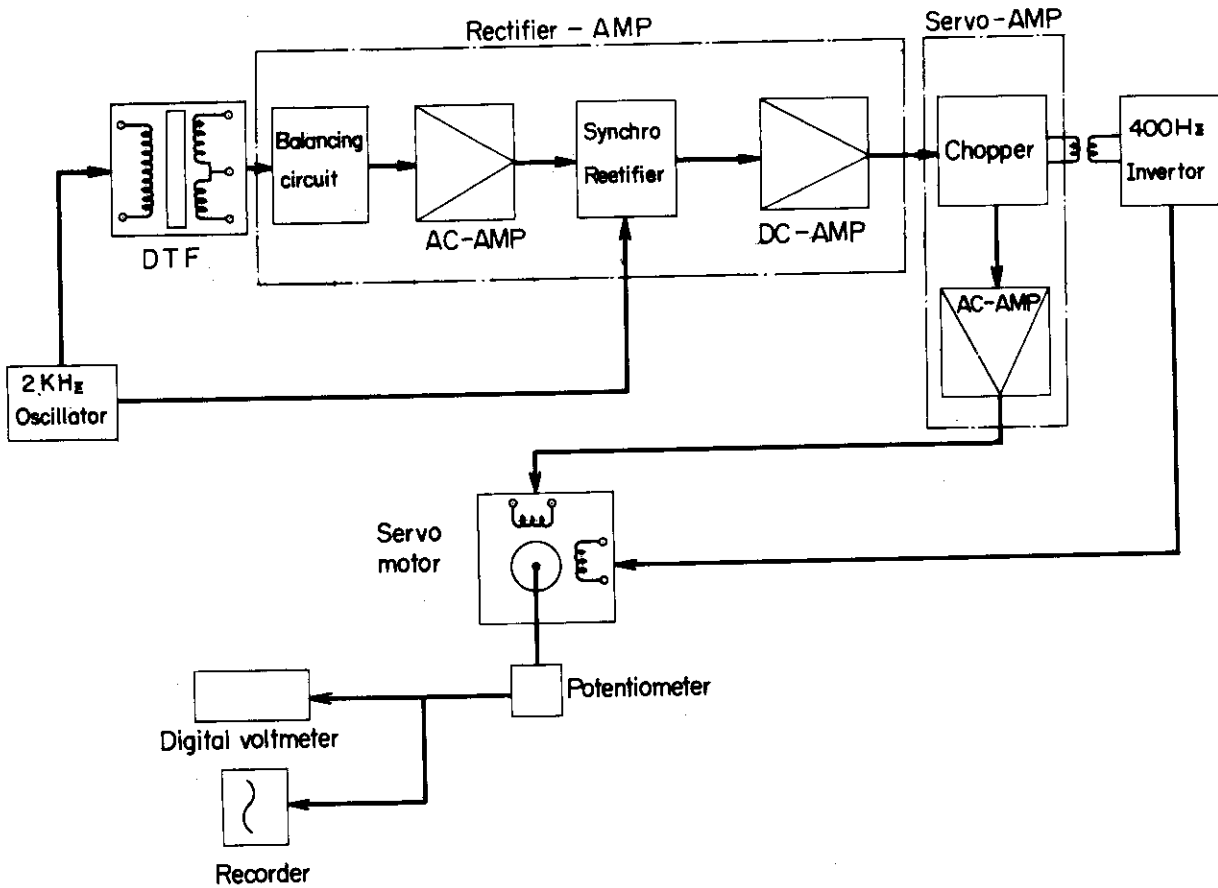


NO.	品名
1	ケース
2	ハウジング
3	ボビン
4	端子
5	ブッシュ
6	スプリング
7	コイル
8	コア

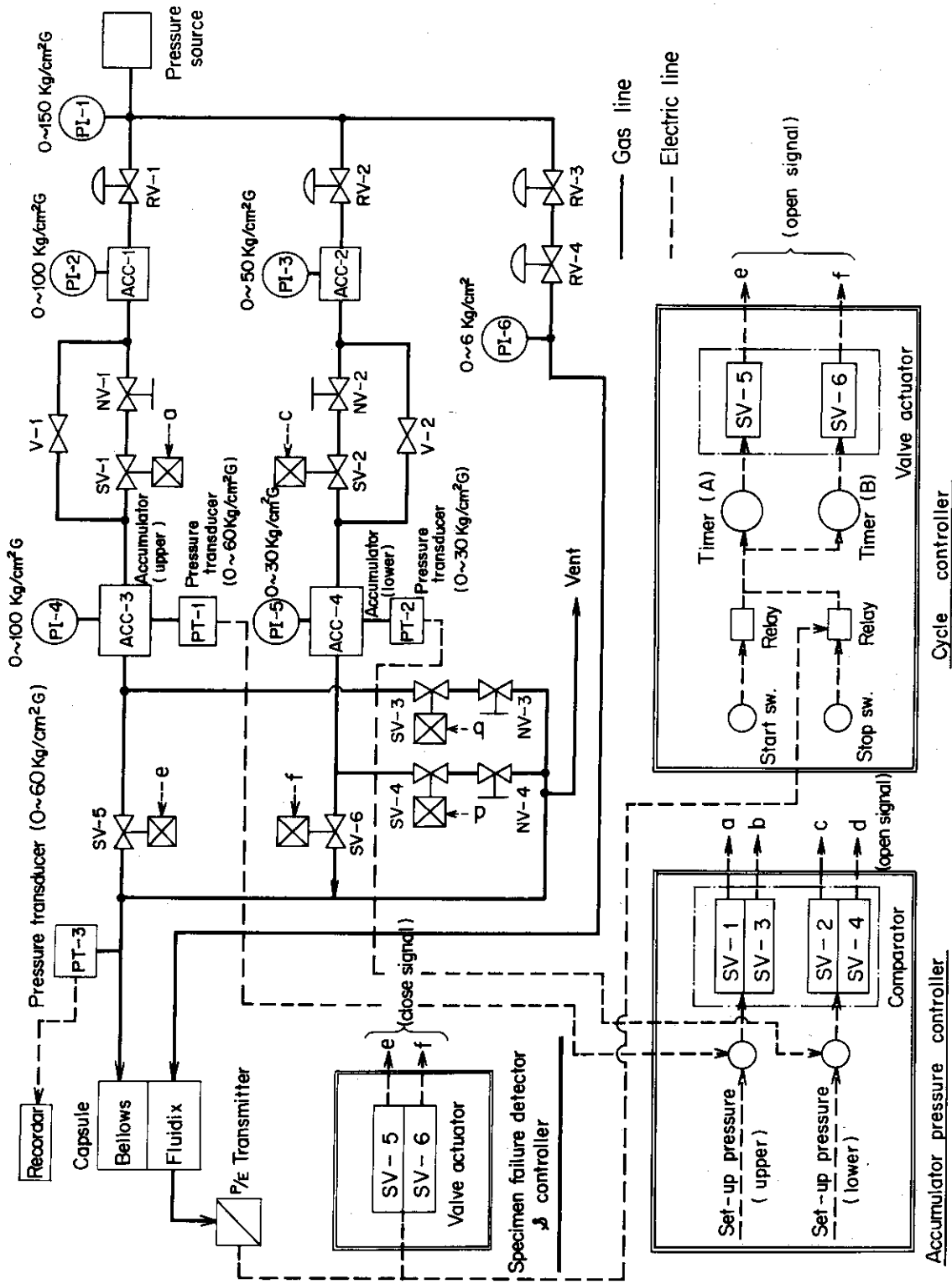
第 3.9 図 5mm 差動トランスの寸法・形状



第 3.1 0 図 伸び計測部フローシート (オープンループ)



第 3.1 1 図 伸び計測部フローシート (クローズループ)



第 3.1 2 図 定荷重制御装置フローシート

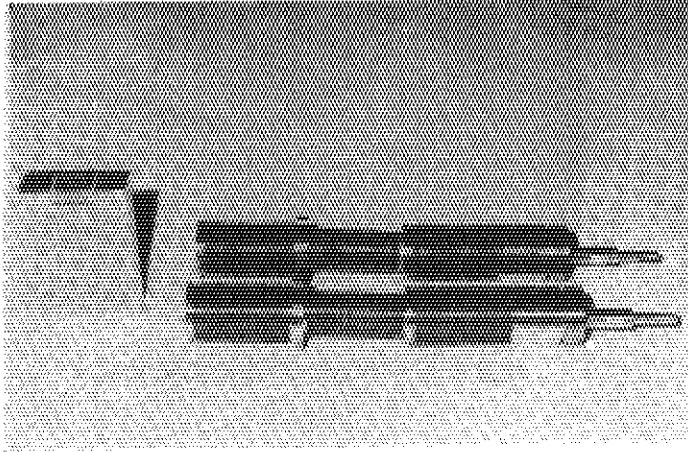


写真 3.1 試験前ペローズの外観写真

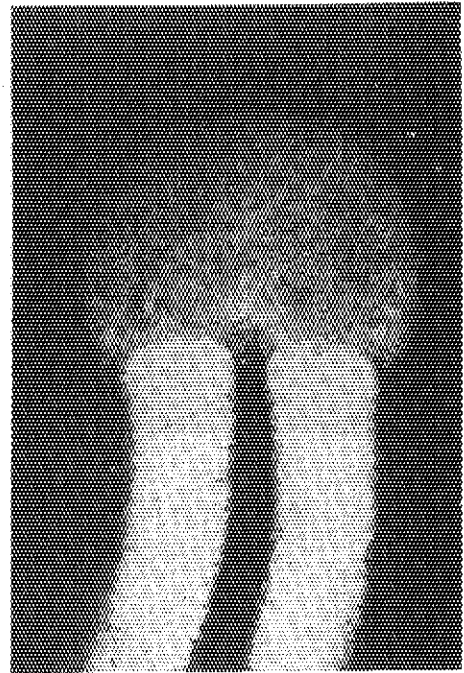


写真 3.2 ペローズ溶接部マイクロ写真

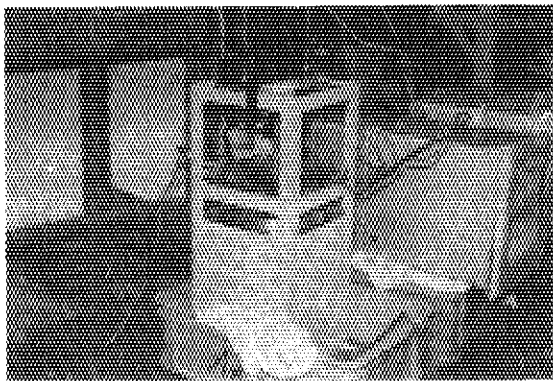


写真 3.3 ペローズ試験装置の外観写真

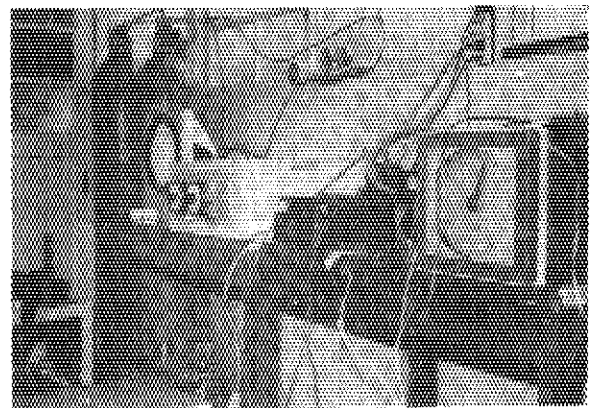


写真 3.4 加圧ラインの模様

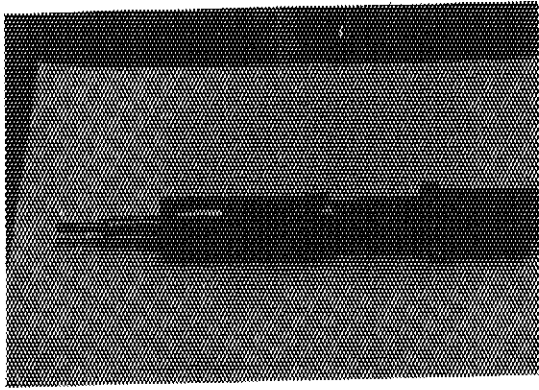


写真3.5 破損したベローズの外観写真

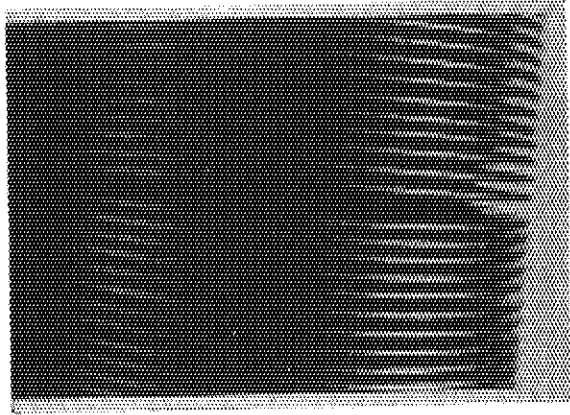


写真3.6 ベローズ破損部拡大写真

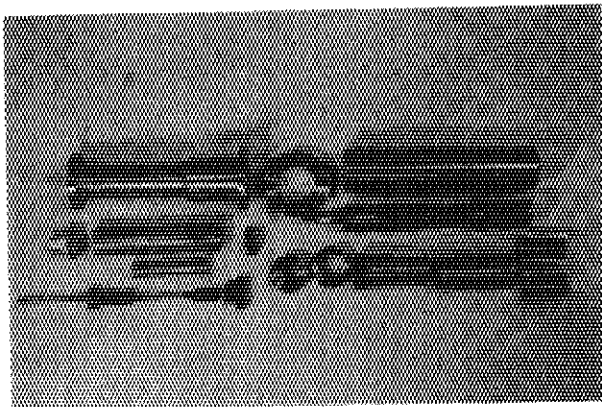


写真3.7 荷重アクチュエータ構成部品

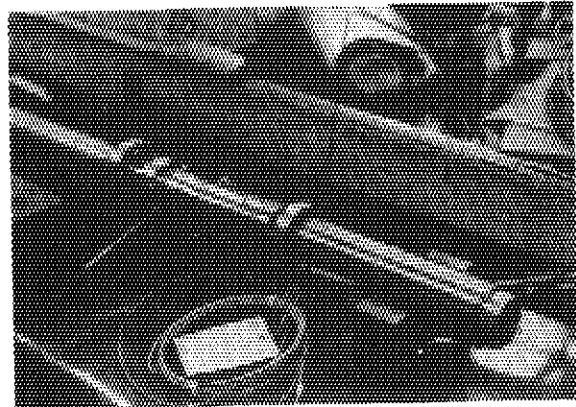


写真3.8 荷重アクチュエータ外観写真  
(マイクロヒータ着付け作業中)

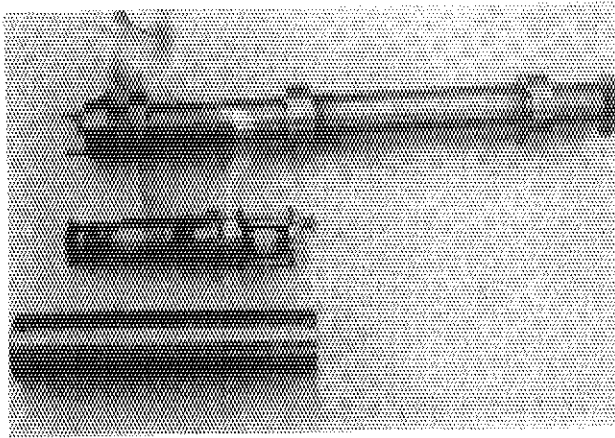


写真 3.9 歪検出機構外觀写真

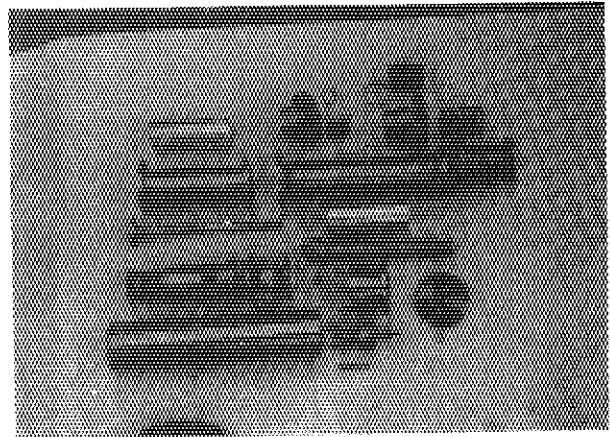


写真 3.10 歪検出機構構成部品

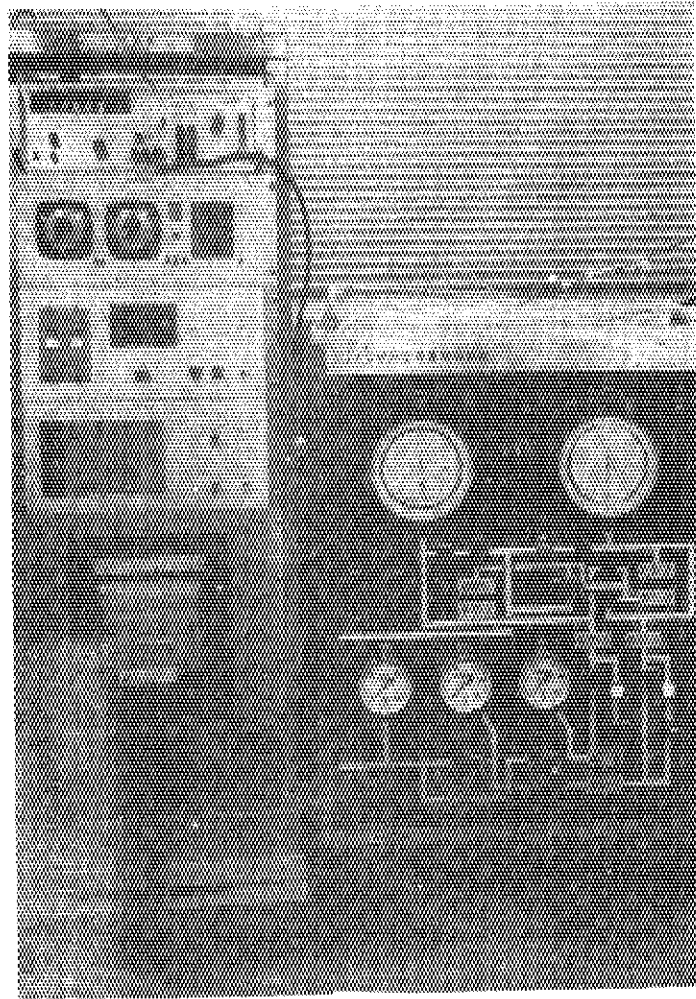


写真 3.11 試料の伸び計測部および定荷重制御部外觀写真

## 4 試験および結果

ここで記述する内容は、炉外試験用キャプセルを構成している各コンポーネントの試験結果、完成した状態での炉外試験キャプセルの試験結果、付属装置との組み合わせ試験結果、それらの結果に対する考察などについてである。

### 4.1 コンポーネント試験

#### 4.1.1 荷重アクチュエータ試験

この試験には、(1)ガス圧-荷重特性、(2)ガス圧-伸び特性に関する試験が含まれる。

##### (1) ガス圧-荷重特性

ガス圧と荷重の関係を常温(25℃)時と300℃時と並べて第4.1図に示す。図に示すように50kg/cm<sup>2</sup>Gで約300kgの荷重が得られており、常温時と300℃のときの関係はほとんど同様である。ガス圧を上昇した場合と下降した場合についてガス圧と荷重との関係が異なるが、これはペローズのヒステリシスによるものと考えられる。

荷重の測定はペローズに結合している荷重伝達棒に直結したロードセルによって行った。ロードセルは、ストレインゲージ式歪検出器を用いた自動平衡式で、500kg、フルスケールに対し精度±0.5%のものを使用した。ガス圧は精度0.2%のアンブゲージで測定した。測定の様相を写真4.1に示す。

##### (2) ガス圧-伸び特性および荷重-伸び特性

荷重アクチュエータに連結パイプを接続した状態で、歪伝達棒の先端にL字形のロッドをパイプ状のコネクタにより取り付けて、L字形ロッドの上部にダイヤルゲージをあて、ガス圧に対する試料の伸びを測定した。測定の様相を写真4.2に示す。試料は、第2、3章に触れたとおり、十分弾性限界内で試験をするために、平行部長さ50mm、直径7mmφ、SUS-304試料を使用した。試料の写真を写真4.3に示す。

測定結果を第4.2~4.5図に示す。第4.2図は試料を常温にしたもの、第4.3~4.5図は試料およびペローズを昇温した場合についての特性である。第4.2図の関係を、第4.1図によって伸びと荷重との関係で表示すると第4.6図のようになる。第4.3~4.5図において破線で示した曲線は試料の伸びをその温度に対応するヤング率を用いて $\sigma = \epsilon E$ ( $\sigma$ :応力、 $E$ :ヤング率、 $\epsilon$ :歪)なる関係式により、常温時の伸びに補正したものである。これらの関係は、第4.2図の常温時のガス圧-伸び特性とはほぼ一致している。このことは、逆にペローズのガス圧-荷重特性が常温時と昇温時と比較してあまり変化しないという第4.1図の関係を裏づけるものである。なお第4.6図においては、荷重に対する伸びの関係は多少非直線的になっている。一方300kgで47μ伸びているので、試料平行部50mmに対して0.094%すなわち約0.1%伸びていることになる。SUS-304については、いうまでもなく、0.2%歪に対応する応力値をその降伏点としているので、降伏値の約半分の歪を生じたこととなる。一方、300kgに対し7mmφの試料断面に生ずる応力は、 $\sigma = 6.1 \text{ kg/mm}^2$ である。しかるに仮りにSUS-304

(注)

の降伏点を  $21.0 \text{ kg/mm}^2$  とし、上記  $0.094\%$  の歪に対する応力を逆算すると  $\sigma = 9.87 \text{ kg/mm}^2$  となり、これは  $6.1 \text{ kg/mm}^2$  より大きいことになる。このことは  $47\mu$  の伸びが平行部だけの伸びでないことを示している。伸びとしては試料チャック部、荷重伝達棒の伸びなどが考えられる。試料チャック部については、 $A_1/A_2 = 0.25$  (第2.2.4項参照)であり、この比はあまり小さいとはいえないので、この影響も出ているかも知れない。また第4.6図において比較的荷重時に最大  $3\mu$  のヒステリシスがみられるが荷重を零にしたとき伸びは零に戻っているので試料を含めた材料のヒステリシスと考えるよりも、測定上の誤差に起因するものと考えた方がよいかも知れない。いずれにしても小さいヒステリシスなので無視して差しつかえない。

#### 4.1.2 伸び計測部試験

伸びの計測は、オープンループ方式(変位-差動トランス出力)とクローズループ方式(変位-ポテンショメータ出力)の2方式で行ったのでこれらの結果について述べる。

##### (1) オープンループ方式

この方式は変位を直接差動トランス出力で読むもので、変位に対する差動トランス出力の関係を第4.7図に示す。試験の方法はマイクロメータによって差動トランスのコアに変位を与え、差動トランス出力を整流増巾し、第2, 3章に述べたごとく、 $(E_1 - E_2) / (E_1 + E_2)$  なる出力をデジタルボルトメータで読みとったものである。出力のフルスパンは任意値である。なお差動トランスの周囲をマイクロヒータで加熱し昇温特性も調べた。25°C, 50°C, 100°C および 140°C の特性を示した。昇温するに従って見掛け上出力はプラス側にシフトしている。25°Cにおいてマイクロメータの軸とコアとを接触させこれを基準点として固定し、140°Cに昇温すると、マイクロメータの軸とコアとの間に0.35mmのすき間を生じた。すなわち昇温によって見掛け上コアが移動したことになる。これは差動トランスのコイル部を加熱しているため外側が伸びたためであり、差動トランス全体が均一に加熱されていないために起った現象と考えられる。このような多少不十分な加熱方式によって不正確さを大まかに補正して差動トランスの温度特性を検討してみる。コイル部は片側で140°Cにおいて0.35mm伸びたわけであるから両側で0.7mm(=700 $\mu$ )伸びたことになる。これは  $700\mu / 140^\circ\text{C} = 5\mu / ^\circ\text{C}$  に相当する。この値を使用して、50°C, 100°C, 140°Cにおける特性を25°Cの特性に補正してみた。これらの結果を第4.7図に破線で示す。各温度に対する値は25°Cの特性とほぼ一致している。このことは、この差動トランスの特性があまり温度に依存しないことを示しており、良好な結果であると考えられる。この結果は差動トランス出力として  $(E_1 - E_2)$  を用いず、これをさらに  $(E_1 + E_2)$  で割った値を出力としたこともその一因ではないかと考えられる。また温度のスパンに対する影響をみると25°Cを1.000とすると、50°C, 100°C, 140°Cについてそれぞれ、1.022, 1.021, 1.000であり、ばらつきは2%程度であるので問題ないと考えられる。なお感度は $\pm 0.01 \text{ mV}$ 以下なので、フルスパン10mVに対し $\pm 0.1\%$ 以下、伸びに換算して $\pm 0.5\mu$ 以下である。

0.5mm差動トランスについて0~50 $\mu$ の範囲の特性を示したのが第4.8図である。ミクロ的

(注) Reactor Handbook, Vol. 1, Materials, PP. 568, Table 236, Interscience Publishers, INC., (1960).



にみると多少のヒステリシスがある。全体のバラツキをみると最大 $\pm 0.5\text{mV}$ 程度であり、外挿によるフルスパン $71.5\text{mV}$  ( $50\mu$ の出力の10倍の値)に対し $\pm 0.7\%$ であり、かなり良好な値である。

5mm差動トランスの特性を第4.9図に示す。スパンの温度依存性をみると、 $25^\circ\text{C}$ を1.000とすると、 $50^\circ\text{C}$ 、 $100^\circ\text{C}$ 、 $150^\circ\text{C}$ について、それぞれ1.016、1.055、1.118とスパンは増大しており、余り良好な温度特性とはいえないが、リニアリティには問題ないので温度較正を行えば十分実用性が期待できる。なお5mm差動トランスについては、7mm $\phi$ の試料を使用したため試料の伸びが小さく事実上使用しなかったので詳細な検討を省いた。

#### (2) クローズループ方式

この方式は差動トランスのコア変位に追従してコイル部を動かしてヌルバランスさせ、コイル部の移動をポテンシオメータの出力で読むものである。測定方法はポテンシオメータを手動で回転させ、差動トランスのコイル部の移動をマイクロメータにより測定し、回転によって生ずるポテンシオメータ出力を読みとる。0~5mmの変位に対する出力を第4.10図に示す。出力は変位に対してリニアである。なおフルスパンは任意の値である。またバラツキについては $\pm 5\text{mV}$ 以内であり、約 $350\text{mV}$ のフルスパンに対し約 $\pm 1.4\%$ である。第4.11図は0~100 $\mu$ の変位に対する出力を示す。100 $\mu$ を100mVにスパン調整してある。バラツキをみると、 $\pm 7.5\mu$ の範囲に入っており、この値は500 $\mu$ に対応する500mVの約 $\pm 1.5\%$ に相当し第4.10図におけるバラツキと一致している。オープンループ方式の場合のバラツキに較べ約2倍となっている。

## 4.2 炉外キャプセル試験

荷重アクチュエータおよび歪検出機構を連結パイプを介して組み立て上げた炉外キャプセルの試験結果について述べる。炉外キャプセル試験の様相を写真4.4に示す。

#### (1) オープンループ方式

ガス圧に対する伸び出力について、ガス圧を順次上昇させた場合について第4.12図、ガス圧を順次下降させた場合について第4.13図に示す。フルスパンは、 $0.5\text{mm}$  ( $=500\mu$ )を $10\text{mV}$ に調整してあるので、伸び/伸び出力 $=5\mu/0.1\text{mV}$ となり、この関係を用いて図の縦軸に伸びも併せて表示した。同様に荷重に対して表示すると第4.14図のようになる。荷重300kgに対応する伸び出力(平均値)と零点を結んだ直線を基準線とし測定点をみると、荷重を順次上昇させたとき60kg付近で基準点より $3\mu$ 程度低下している。この値を第4.6図の対応荷重点の伸びと比べて多少大きくなっている。この原因は、多分、炉外キャプセルでは連結パイプをねじ止めにより固定しているのでこの辺のわずかの機械的な遊びが影響しているものと思われる。

ダイヤルゲージで測定した結果である第4.6図を基準として、差動トランスで測定した第4.14図を比較すると、第4.6図ではまず荷重に対する伸びがリニアではない、つぎに荷重300kgにおける伸びが約 $47\mu$ であるのに対して第4.14図では、荷重に対する伸びはリニアと考えることができ、荷重300kgにおける伸びは約 $38\mu$ である。荷重に対する伸びの直線性については、第4.6図の測定が第4.14図の測定に先行していること、およびすでに述べ

たように第4.6図において試料の伸びのほか試料チャック部、荷重伝達棒の伸びなどを含めると約0.1%の歪を生じていることおよび試料を500℃まで加熱して若干の繰り返し試験も実施しているので試料にわずかな残留歪を生じ、それ以後の挙動がリニアになったと考えられる。一方、荷重300kgに対する伸びの違いは、荷重アクチュエータ単体と連結パイプを接続して組み上げた炉外キャプセルと構造に若干の相違があること、および差動トランスによる測定精度が関連していると思われる。両者の差は約9 $\mu$ である。第4.6図と第4.14図について0~300kgの範囲でその差をみてみると、測定値のバラツキが最大9 $\mu$ であり、ダイヤルゲージによる測定値より小さくでている。この値はフルスパン500 $\mu$ に対して1.8%の誤差に相当する。

#### (2) クローズループ方式

ガス圧に対する伸び出力および伸びについて、オープンループ方式の場合と同様に、ガス圧を順次上昇させた場合と下降させた場合についてそれぞれ第4.15図および第4.16図に示す。荷重に対する伸び出力と伸びについては第4.17図に示す。基準線もオープンループ方式の場合と同様に荷重300kgに対応する伸び出力(平均値)と零点と結んだ。荷重を順次上昇させたとき60kg付近で測定点が基準線より比較的大きくはずれるのはオープンループ方式の場合と同様である。

オープンループの場合と同様に第4.6図を基準にして第4.17図を比較すると荷重0~300kgの範囲で測定値のバラツキが最大10 $\mu$ 小さくでている。この値はフルスパン500 $\mu$ に対して2.0%の誤差に相当する。

また第4.17図をオープンループの場合の第4.14図と比較すると各測定点のバラツキは前者の方が後者より大きい。荷重300kgにおける出力(平均値)はむしろオープンループの場合より大きくなっており、ダイヤルゲージによる測定値に近づいている。

### 4.3 繰り返し作動試験

定荷重での引張り-引張り繰り返し作動が行なえるかどうかを確認するために、常温および昇温時において、10kg/cm<sup>2</sup>G(約60kg)と50kg/cm<sup>2</sup>G(約300kg)で繰り返し試験を行った。繰り返しサイクルを0.2c/minとし(すなわち、保持時間を、上、下限とも2.5分とした)、オープンループ方式およびクローズループ方式で試験した。試験の様相を写真4.4に示す。

第4.18図および第4.19図はそれぞれ常温における、オープンループ方式、クローズループ方式による試験結果を示す。差動トランス出力はデジタルボルトメータでも測定したが、その数値と、それを5 $\mu$ /0.1mVで換算した数値を同時に図に記入してある。差動トランス出力に多少ドリフトがみられるが、これはアンプ系とくに $(E_1 - E_2) / (E_1 + E_2)$ を作るための割り算器が十分安定していない時点で試験したためである。割り算器を含めたエレクトロニクス部と差動トランスとを数時間予備加熱してから使用すればこのようなドリフトは生じないことを確認している。

第4.18図についてはオープンループ方式とクローズループ方式による測定された伸びを比較してみるとその差は最大6 $\mu$ 程度であり、これは500 $\mu$ フルスパンに対して約1.2%であり、

かなりよい結果と考えられる。

第4.1.9図は、試料500℃、ペローズ400℃に加熱したときのオープンとクローズループ方式によって測定された結果を示している。両方式による伸びの測定結果を比較してみると常温の場合と大差ないので、これもかなりよい結果である。なお、両方式とも、繰り返し数を増すにつれて伸びはわずかに増大している。これは試料を高温にしたためであろう。

また定荷重の引張り-引張り繰り返し制御についても図示されている。同様に良好な結果が得られたと考えられる。

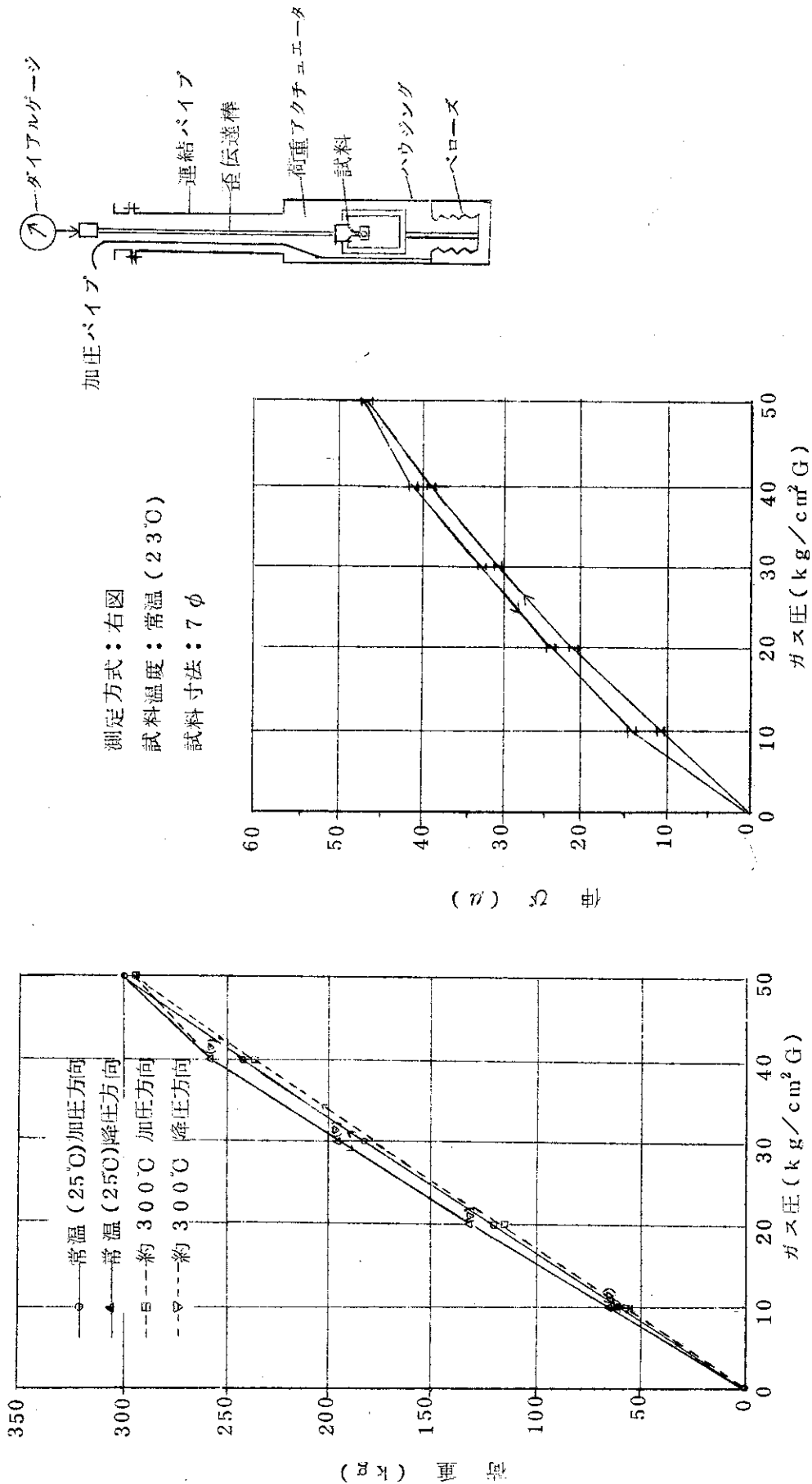
#### 4.4 試験結果に対する総括

以上述べてきたようにオープンループ方式、クローズループ方式とも10 $\mu$ 程度の絶対誤差、2.0%程度の相対誤差で伸びが測定できることがわかった。この値は第2.2.2項に触れた目標誤差に近い結果となっている。

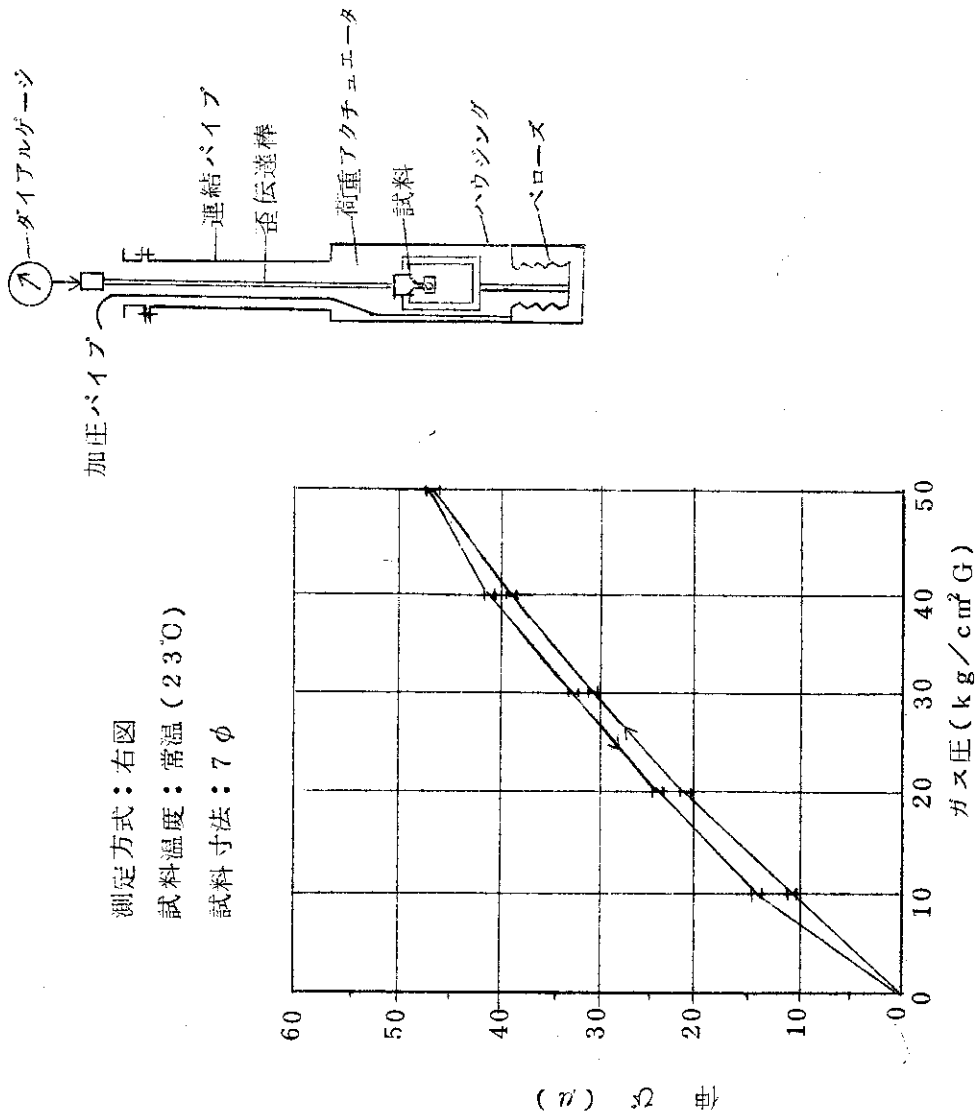
さらに、常温、高温における繰り返し試験の結果をみても上記の誤差以内で伸びの測定が可能であることがわかったと同時に、定荷重の引張り-引張り繰り返し試験ができることがわかった。

このように本炉外キャプセルを試験した結果、設定した設計条件がほぼ満足されたと考えられる。

なお以上の試験において、試料破断検出法の性能について記述しなかったが、電気式、空気式とも問題なく作動したことを付記しておく。



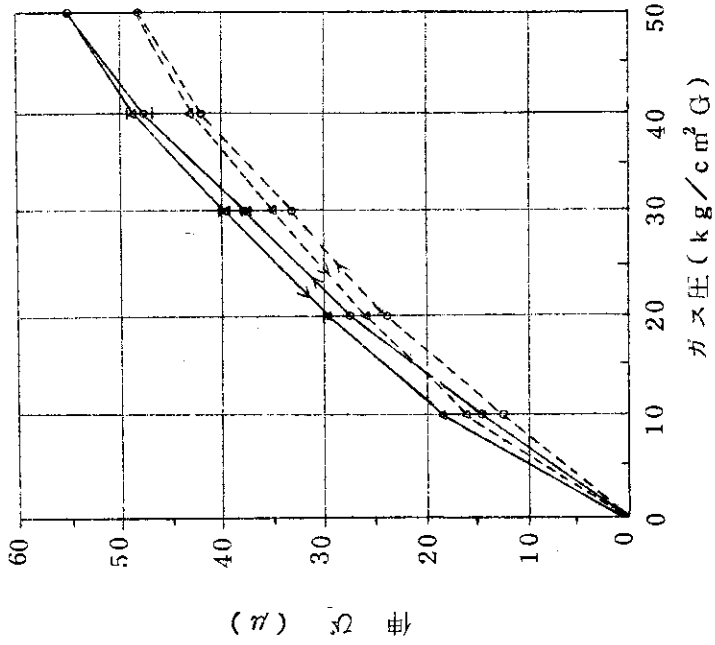
第 4.1 図 荷重アクチュエータのガス圧—荷重特性



第 4.2 図 ガス圧—伸び特性 (ダイヤルゲージによる測定)

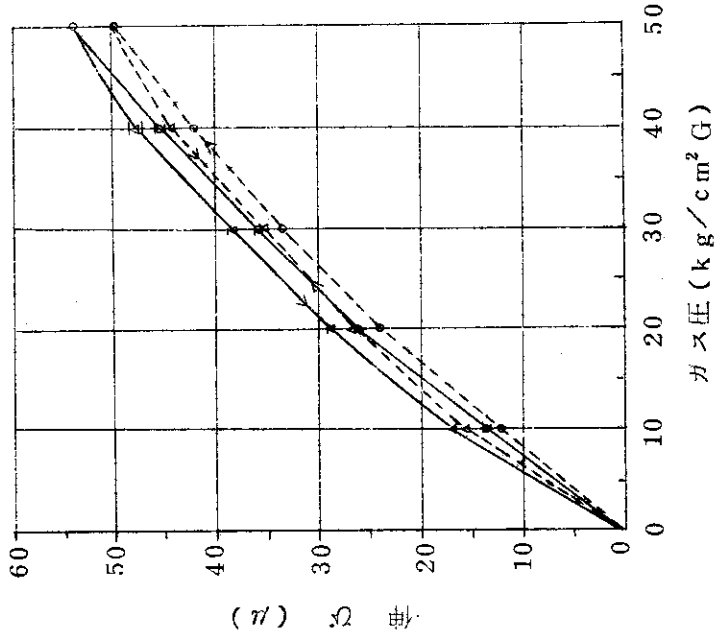
試料温度：290°C  
 ペロース温度：400°C  
 校正係数： $1.72 \times 10^4$  ( $\text{kg/mm}^2$ ) at 400°C  
 $1.95 \times 10^4$  ( $\text{kg/mm}^2$ ) at R.T.

— 実測値を結んだ線  
 - - - 補正値を結んだ線  
 ○ 加圧方向  
 △ 降圧方向



試料温度：300°C  
 ペロース温度：350°C  
 校正係数： $1.80 \times 10^4$  ( $\text{kg/mm}^2$ ) at 300°C  
 $1.95 \times 10^4$  ( $\text{kg/mm}^2$ ) at R.T.

— 実測値を結んだ線  
 - - - 補正値を結んだ線  
 ○ 加圧方向  
 △ 降圧方向

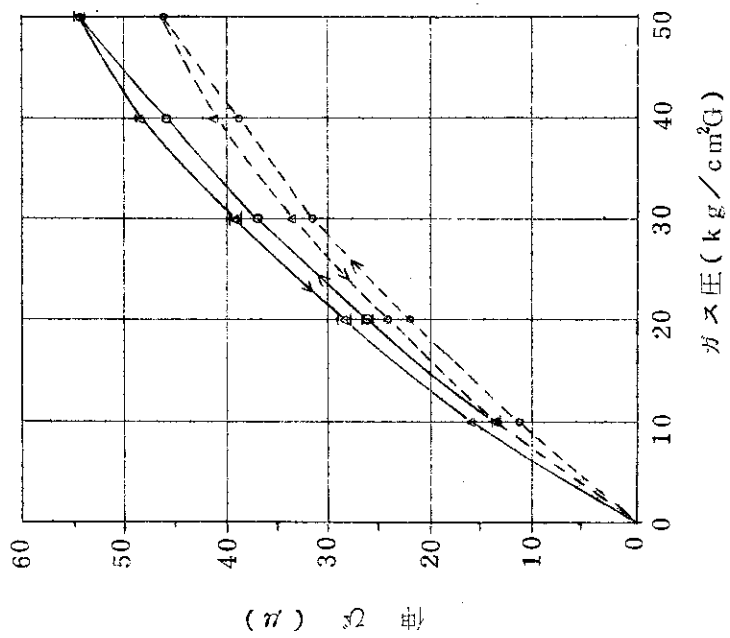


第4.4図 ガス圧——伸び特性(ダイヤルゲージによる測定)

第4.3図 ガス圧——伸び特性(ダイヤルゲージによる測定)

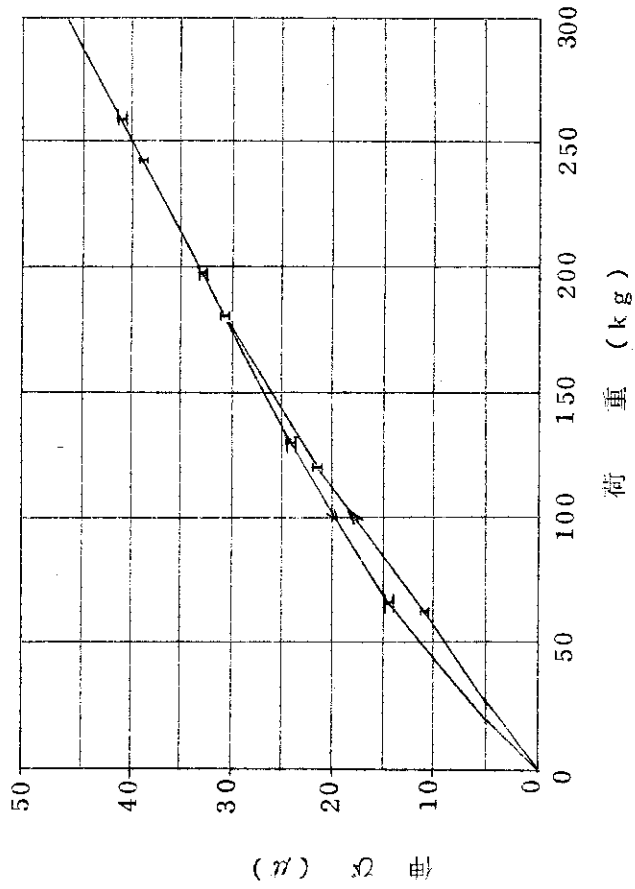
試料温度：500°C  
 ベロース温度：430°C  
 校正係数： $1.65 \times 10^4$  (kg/mm<sup>2</sup>) at 500°C  
 $1.95 \times 10^4$  (kg/mm<sup>2</sup>) at R.T.

— 実測値を結んだ線  
 - - - 補正値を結んだ線  
 ○ 加圧方向  
 △ 降圧方向

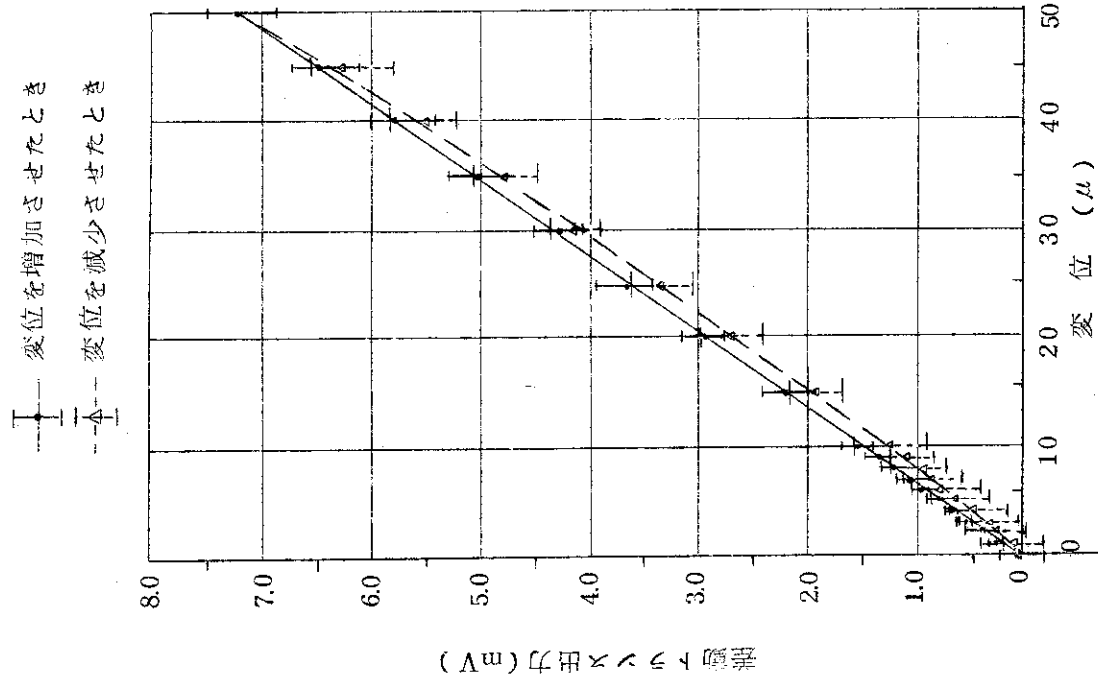


第 4.5 図 ガス圧——伸び特性  
 (ダイアルゲージによる測定)

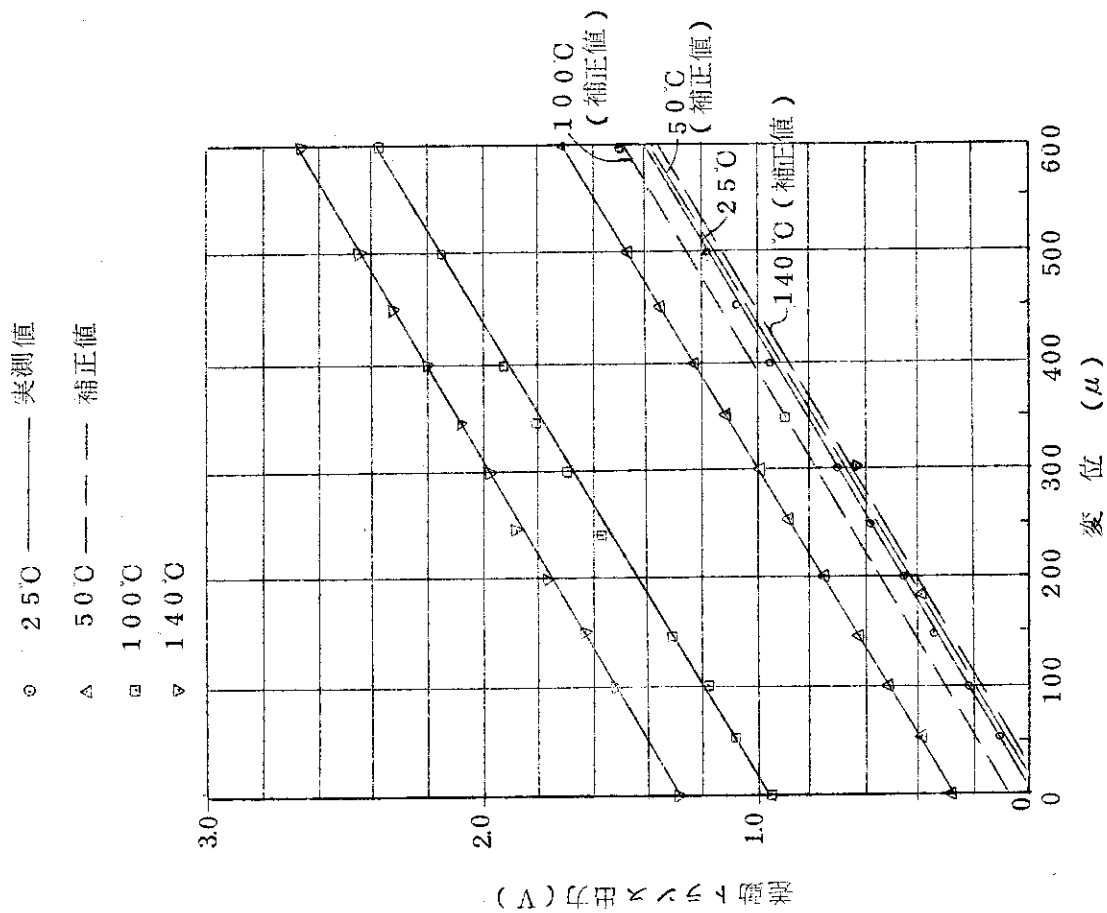
I : 加圧方向  
 II : 降圧方向  
 温度条件：常温



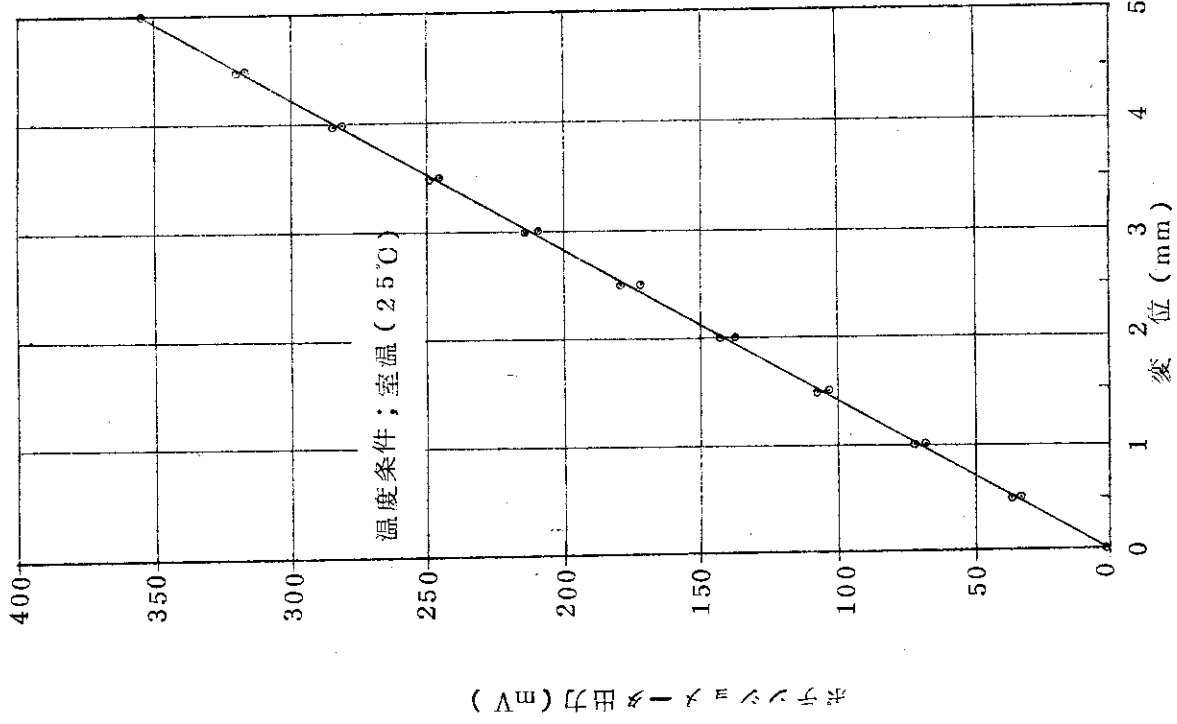
第 4.6 図 荷重——伸び特性 (ダイアルゲージによる測定)  
 (荷重アキュエータのガス圧——荷重特性 (常温時) で校正)



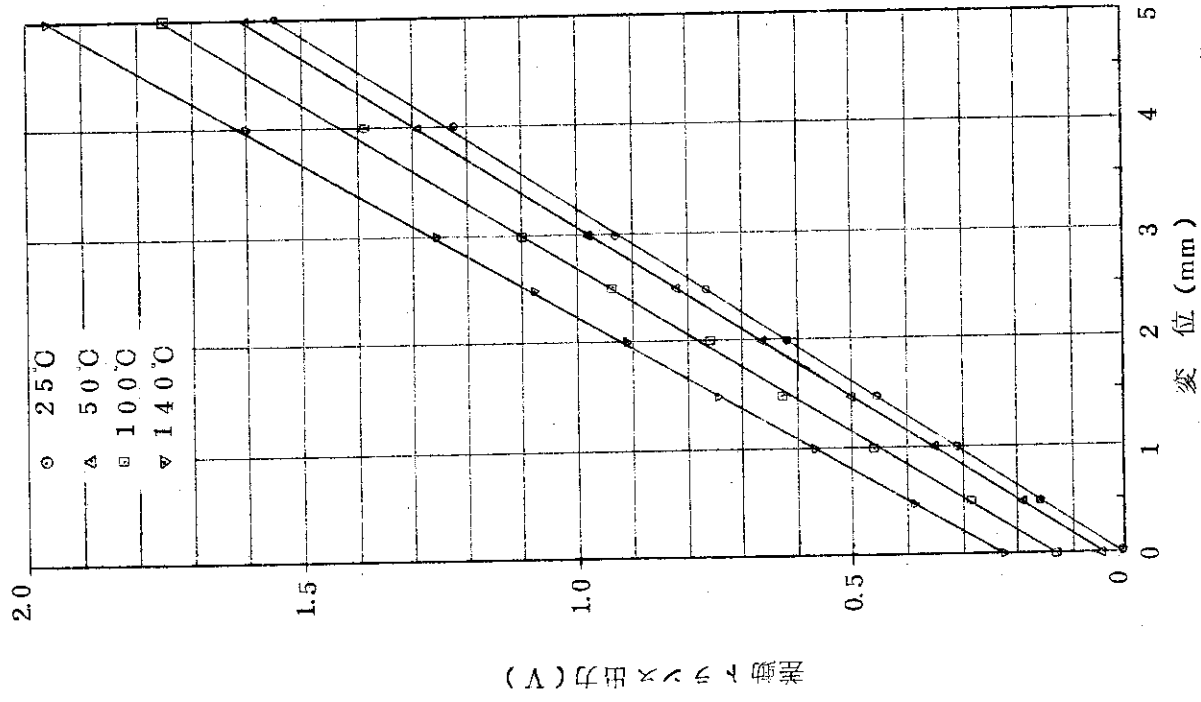
第4.8図 0.5mm 差動トランス感度特性  
(0~50μ の範囲における特性)



第4.7図 変位 0.5mm 差動トランス出力特性

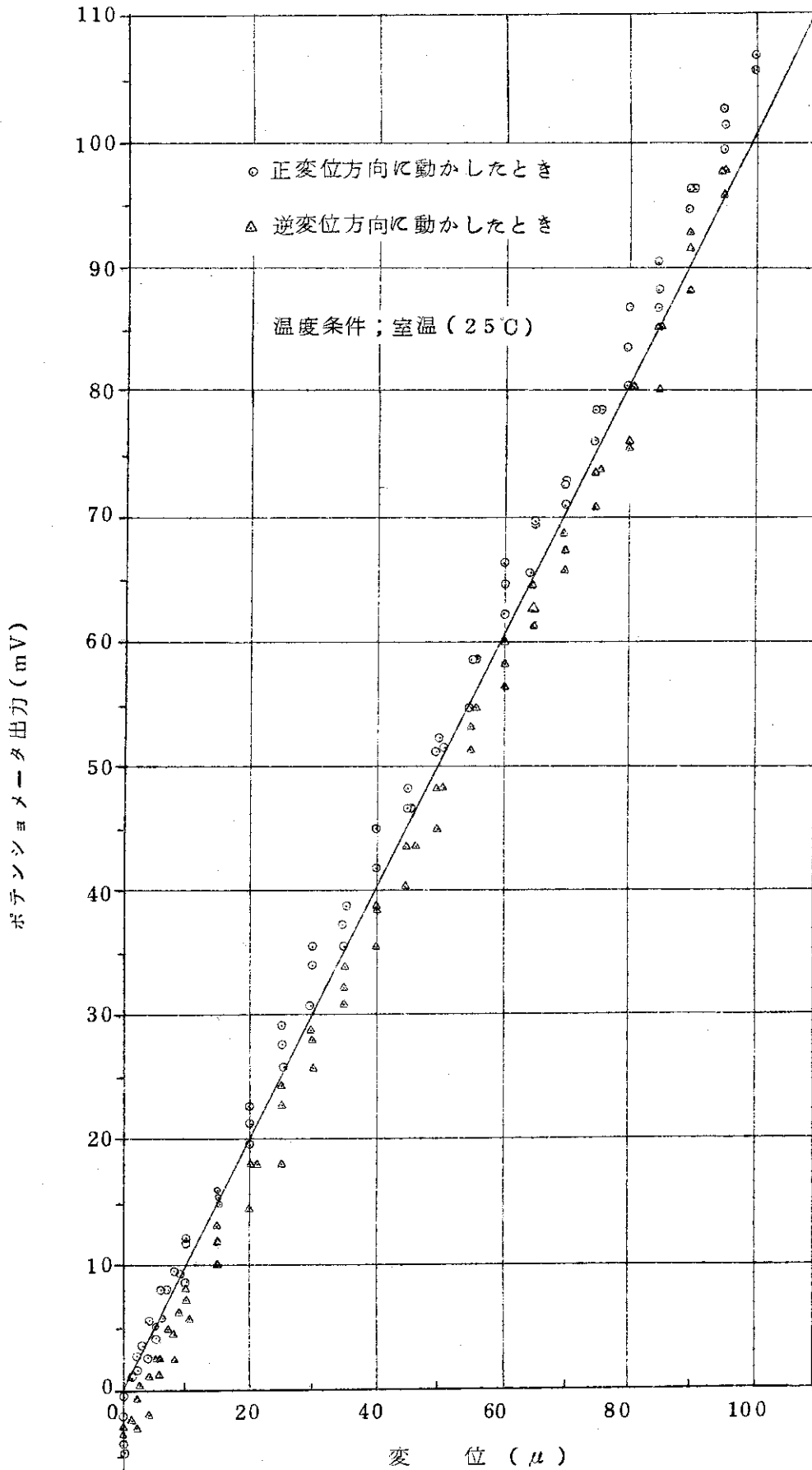


第4.10図 変位——ポテンシオメータ出力特性 (0~5 mm)



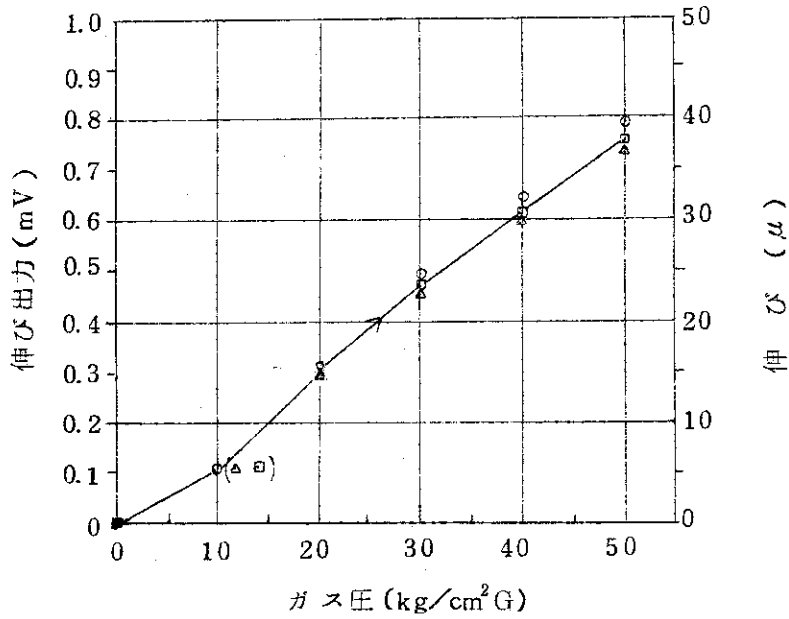
第4.9図 変位——5mm 差動トランス出力特性





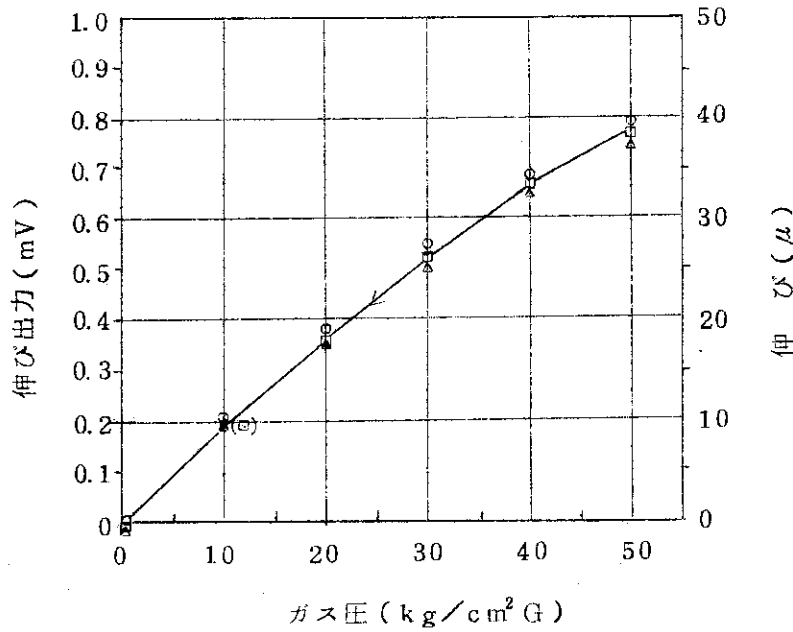
第4.1.1図 変位—ポテンシオメータ出力特性 (0~100μ)

温度条件：室温（30～33℃）  
 伸び／伸び出力：5μ／0.1mV  
 フルスパン：10mV（500μ）



第4.1.2図 ガス圧——伸び出力特性（オープンループ）（ガス圧を順次上昇させた場合）

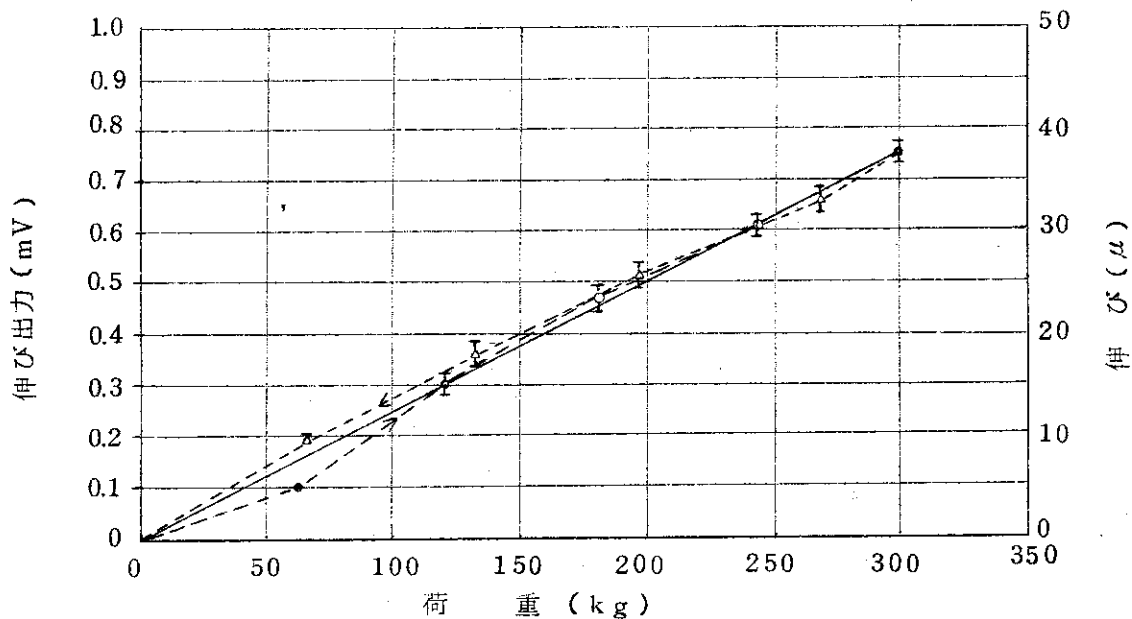
温度条件：室温（30～33℃）  
 伸び／伸び出力：5μ／0.1mV  
 フルスパン：10mV（500μ）



第4.1.3図 ガス圧——伸び出力特性（オープンループ）  
 （ガス圧を順次下降させた場合）

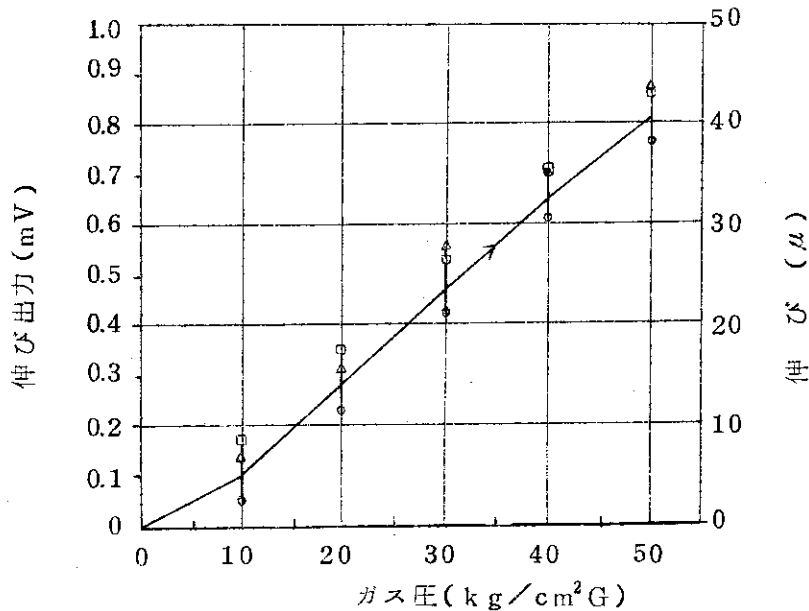
—— 基準線 (荷重 300kg に対応する伸び出力と零点を結んだ線)  
 - - - - 測定点を結んだ線

温度条件：室温 (30~33℃)  
 伸び/伸び出力：5 $\mu$ /0.1mV  
 フルスパン：10mV (500 $\mu$ )



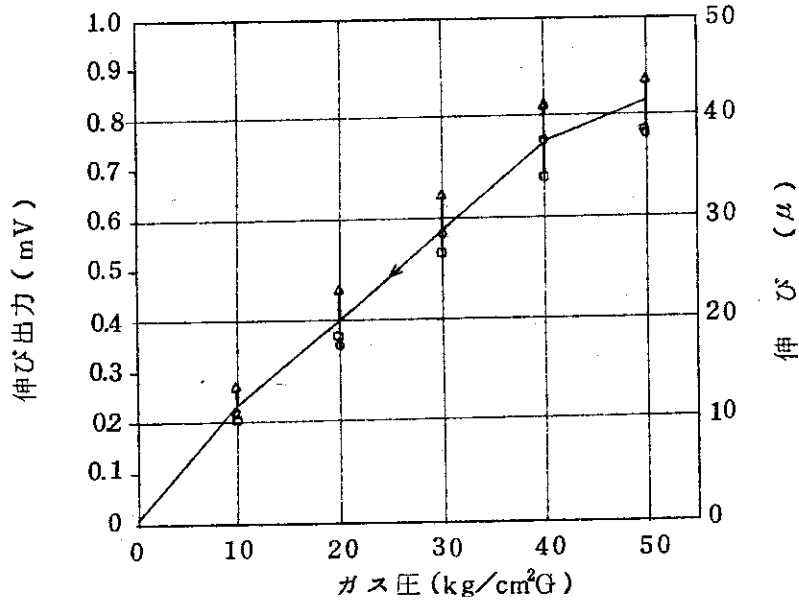
第4.14図 荷重—伸び出力特性 (オープンループ) (荷重アクチュエータのガス圧 荷重特性で校正)

温度条件：室温 (30~33℃)  
 伸び/伸び出力：5 $\mu$ /0.1mV  
 フルスパン：10mV (500 $\mu$ )



第4.15図 ガス圧—伸び出力特性 (クローズループ)  
 (ガス圧を順次上昇させた場合)

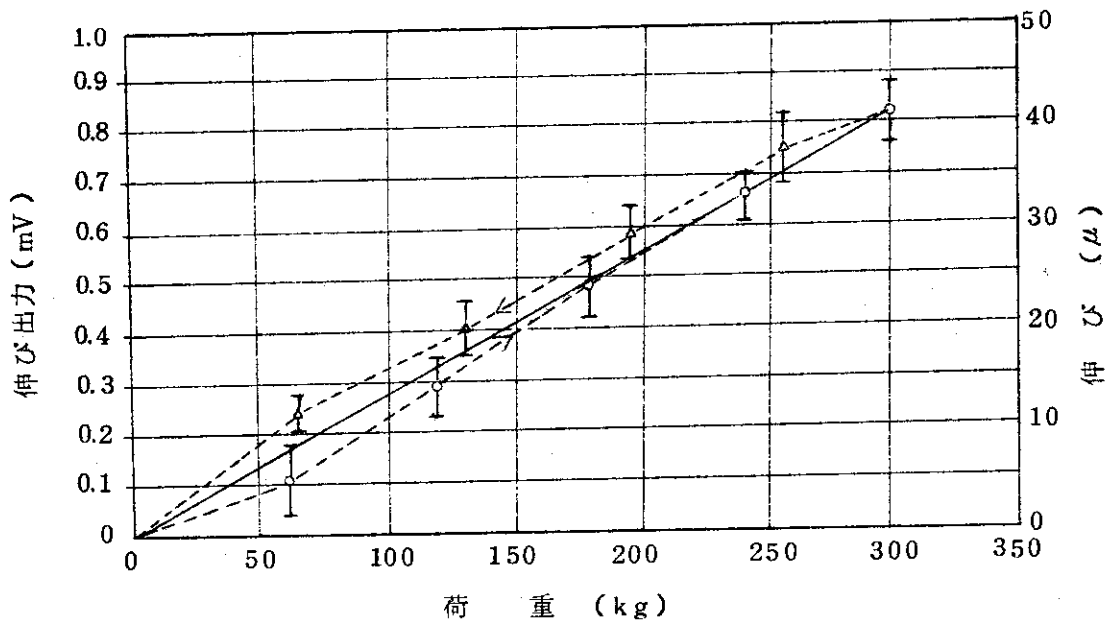
温度条件：室温（30～33℃）  
 伸び／伸び出力：5μ／0.1mV  
 フルスパン：10mV（500μ）



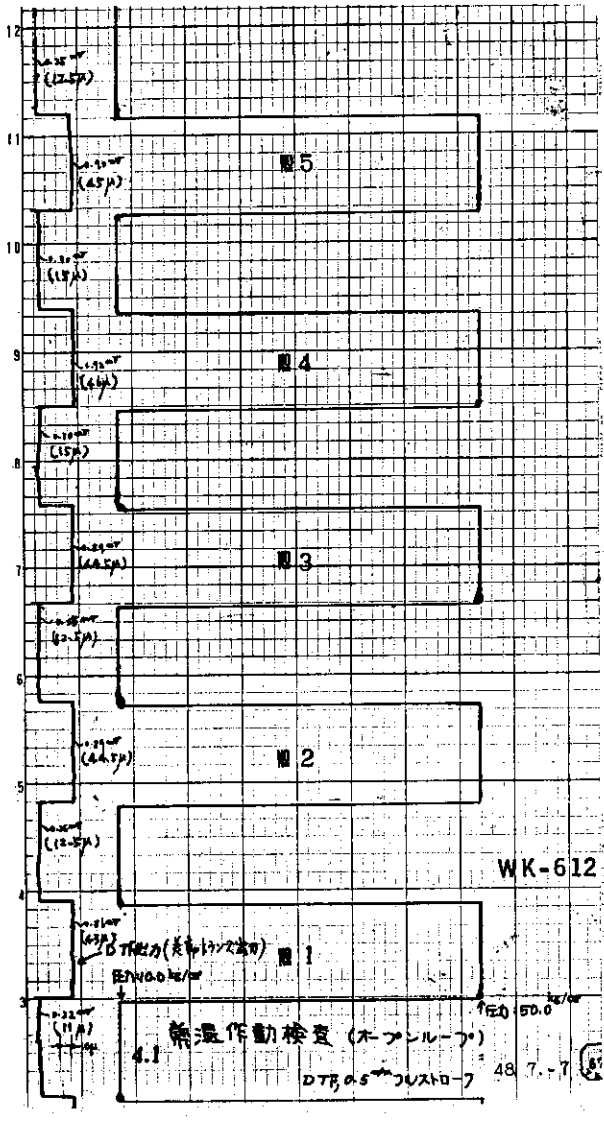
第4.16図 ガス圧——伸び出力特性（クローズループ）（ガス圧を順次下降させた場合）

—— 基準線（荷重300kgに対応する伸び出力と零点を結んだ線）  
 ---- 測定点を結んだ線

温度条件：室温（30～33℃）  
 伸び／伸び出力：5μ／0.1mV  
 フルスパン：10mV（500μ）

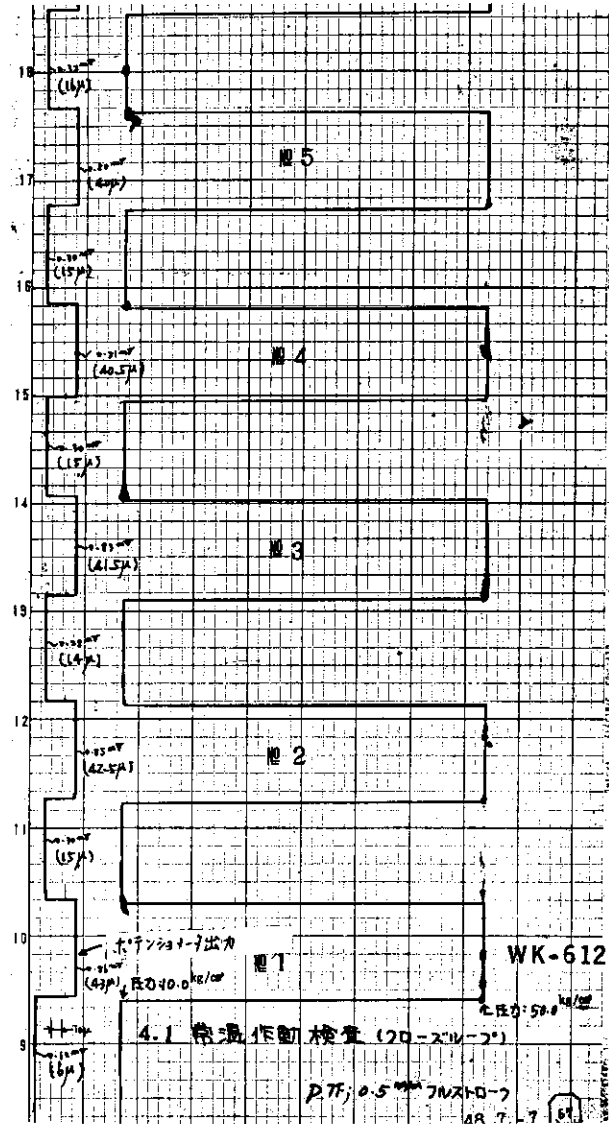


第4.17図 荷重——伸び出力特性（クローズループ）  
 （荷重アクチュエータのガス圧——荷重特性で較正）



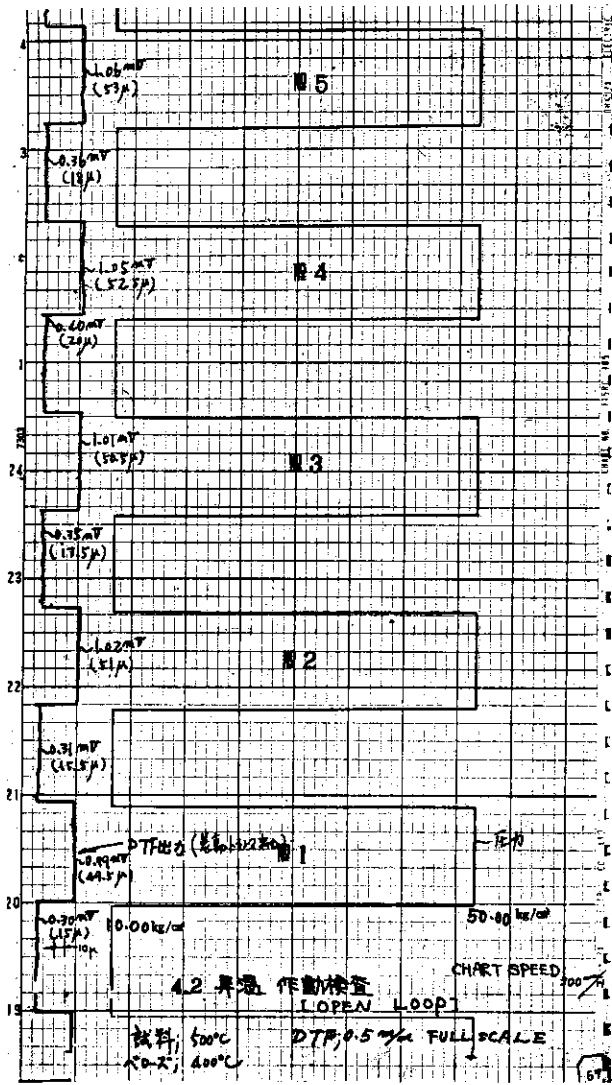
第 4.1 8 図 (a)

常温におけるオープンループ方式による繰り返し作動試験結果の例



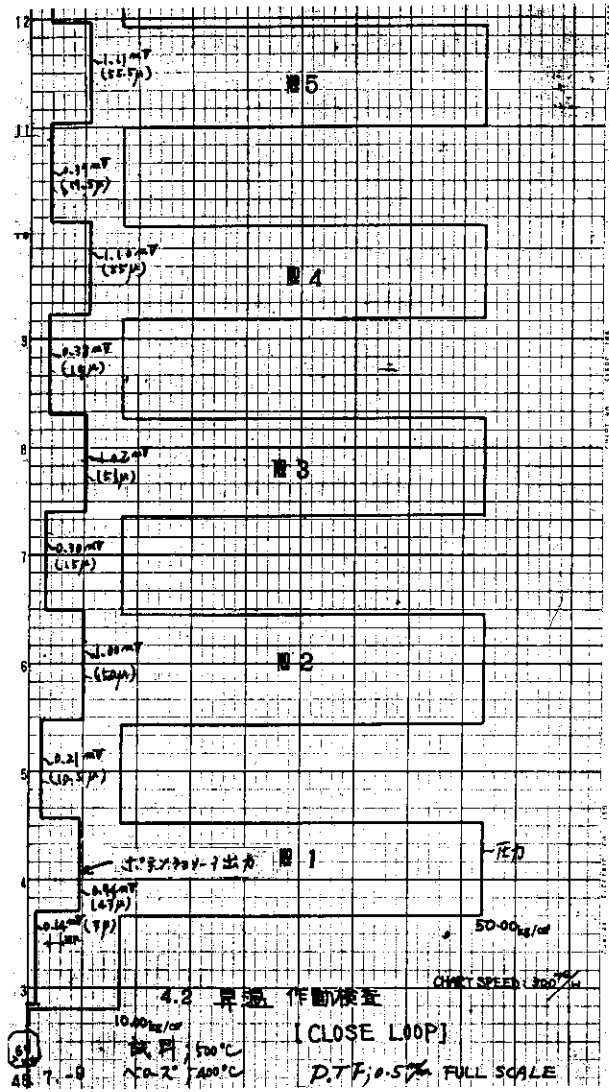
第 4.1 8 図 (b)

常温におけるクローズループ方式による繰り返し作動試験結果の例



第 4.19 図 (a)

昇温時におけるオープンループ方式による繰り返し作動試験結果の例



第 4.19 図 (b)

昇温時におけるクローズループ方式による繰り返し作動試験結果の例

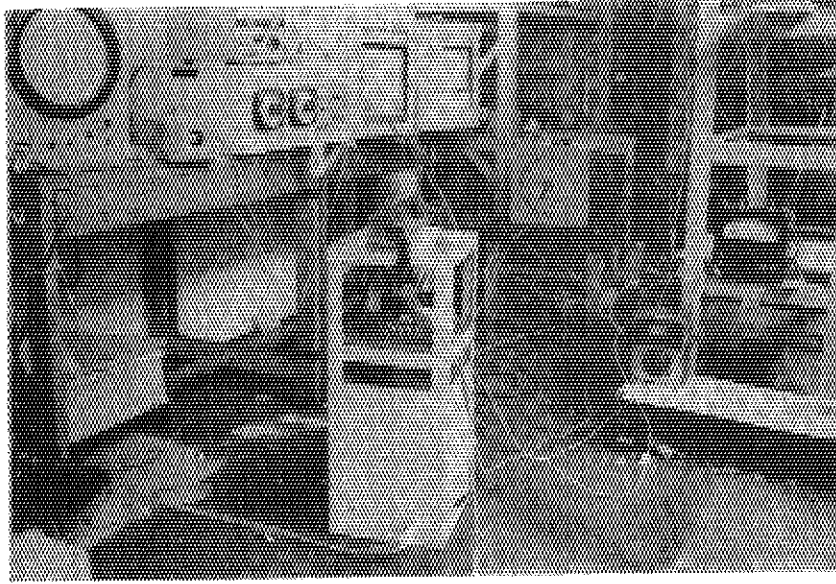


写真 4.1 ガス圧—荷重特性測定の様相

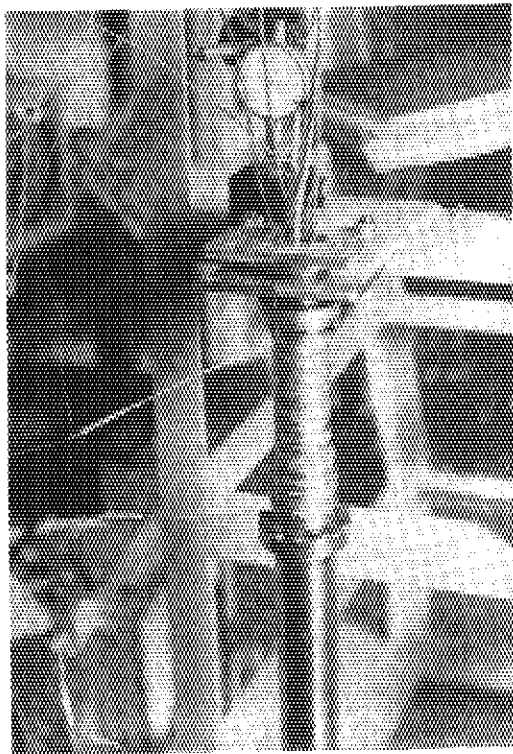


写真 4.2 ダイアルゲージによる伸び測定の様相

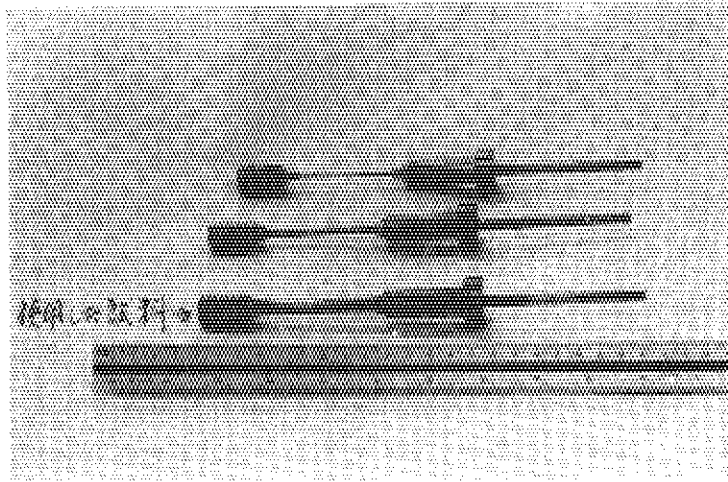


写真 4.3 試料外観写真

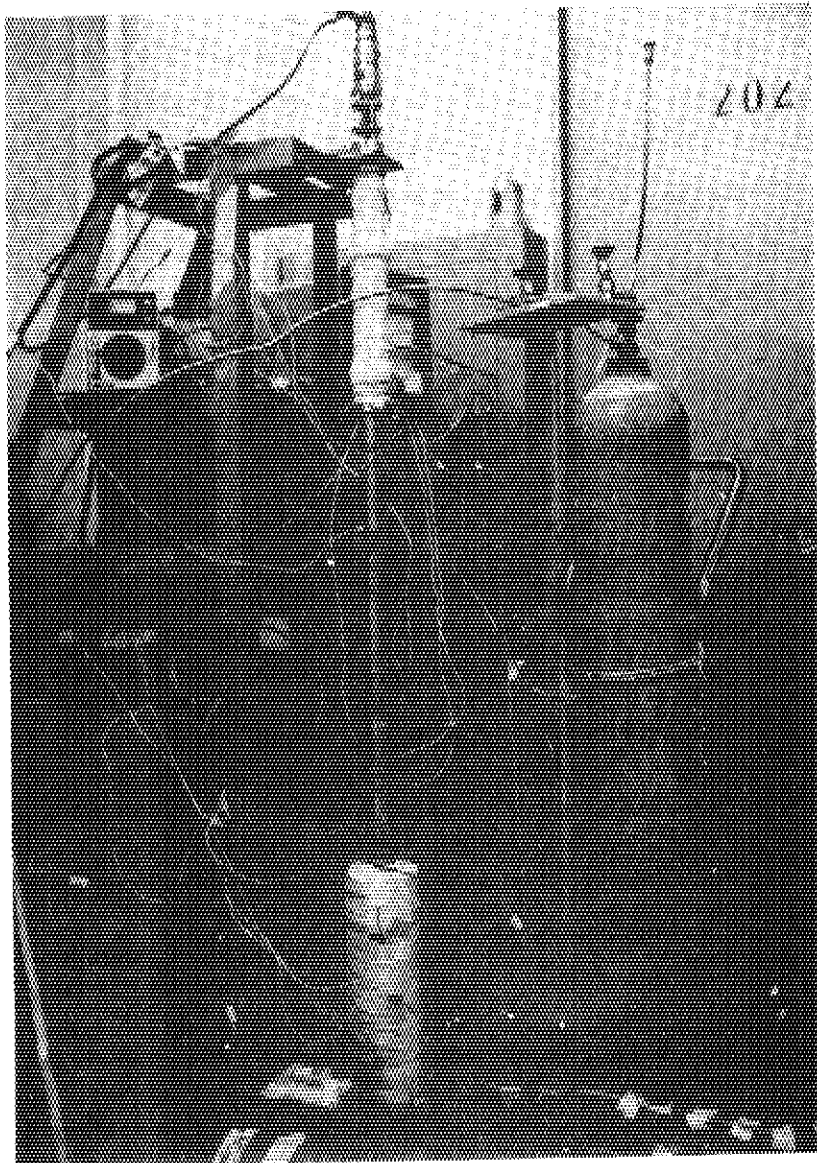


写真 4.4 炉外キャプセル総合試験の様相



## 5 ま と め

原子炉構造材の低サイクル疲労破壊試験を照射中に行うためのキャプセルの開発の第一段階として、その炉外試験用キャプセルおよび伸び計測部並びに定荷重制御部からなる付属装置を試作し試験を行った。荷重印加用ベローズについては、寿命試験を約450℃で行なった結果3070回でベローズは破損し、当初の設計目標温度700℃、寿命 $10^4$ 回の実現はできなかったが、450℃程度で3,000回強の寿命であることがまず確認された。使用したベローズ材と類似の材料であるハステロイXの高温炉外試験結果によると、使用温度を下げるとその寿命が延びると報告されている<sup>(14)</sup>ので、このベローズを450℃以下で使用する場合には3000回以上の寿命が期待できる。従ってベローズの温度をできるだけ低くするようにキャプセルを設計すれば、通常のインパイル疲労破壊試験をカバーすることが可能であると判断される。一方設計目標荷重300kgが得られたことは一応満足すべき結果と考えられる。

試料の伸びの測定方法については、0.5mmフルスパンの差動トランスと試験部7φ×50mmのSUS-304試料を用いて試験した結果、0.5mmフルスパンに対し、オープンループ方式では1.8%、クローズループ方式では2.0%の誤差であり、両方式とも同程度の精度で伸びの測定ができることがわかった。さらに試料の試験部寸法を考慮すれば、より精度のよい伸びの測定が期待できると思われる。すなわち、まずオープンループ方式においては、0.5mmフルスパンと5mmフルスパンの差動トランスを併用するよう設計されており、また測定誤差の絶対値は測定方式によって決まってしまうので、想定される初期伸びが0.5mm差動トランスのフルスパン0.5mmに対して小さ過ぎることのないように試料の試験部の直径を印加荷重と関連させて定めればそれだけ精度のよい測定ができることになる。なお伸びが0.5mmを越えれば5mmフルスパンの差動トランスに切り換えて測定すればよい。クローズループ方式においては0.5mm差動トランスのみを使用し、ヌルバランスによる差動トランスの移動範囲が5mmであるように設計されている。従ってオープンループ方式の場合のように差動トランスを切り換えるということはできないので、読み取り精度を上げる方向で測定する方がよいであろう。すなわちオープンループ方式と同様に考えれば、たとえば0~0.5mmと0~5mmのレンジ切り換えを行い、オープンループ方式の場合と同様に初期伸びが0.5mmより小さすぎないように試料の試験部直径を選べばよいであろう。なお5mm以上の伸びの測定については、オープンループ方式の場合は、5mm差動トランスの直線性に問題はあるが、校正しておけば、5mm以上の伸びの測定が可能である。一方クローズループの場合は現設計では差動トランスのストロークを5mmに制限したが、これを広げることは設計上可能であり、読み取りレンジの切換えによっていくらかでも大きい伸びの測定が可能である。そういう意味ではクローズループ方式はヌルバランス式であるので、この方式の方がそれ自身が有する放射線下での測定の有利性のほかに同一の絶対値誤差で広範囲の測定が可能でもあるので、オープンループ方式より望ましい測定方式であるといえる。ただしさきに触れたようにサーボシステムが付加されるのでそれによる誤差をできるだけ小さくするよう設計、製作に関して注意を払うことが必要である。

つぎに歪(無次元)測定誤差について触れると、さきに述べたように測定誤差の絶対値は測

定方式によって決まってしまうので、試料の試験部長さ寸法を大きくしておけば、相対値である歪の測定誤差は小さくなる。

片張り引張りの繰り返し作動試験については、オープン、クローズループ両方式とも設計条件に対し満足すべき結果が得られたものと考えられる。

以上述べたように、本炉外試験によって、照射中の低サイクル疲労破壊試験の見通しが一応得られたと考えられるが、さきに触れたベローズの問題が残された課題である。また伸びの測定において差動トランスのフルスパンと最小検出感度については寸法や材質上の制約があるので、試料そのものの伸びを機械的に増巾して差動トランスに伝達する機構などが考案されればさらに精度のよい測定が期待できよう。

この報告を終るにあたって、第2.1項に掲げたような低サイクル疲労試験キャプセルの設計条件を設定した理由などについて付記しておく。低サイクル疲労試験方法および研究の方向はいりまでもなく多種多様である。たとえば、試験方式としては定荷重制御方式、定歪制御方式があるし、荷重ないし歪の印加方法として引張り—圧縮、引張り—引張り、曲げの繰り返しなどがある。荷重あるいは歪の印加波形にしても、矩形波、台形波、正弦波、三角波など多種にわたる。試験温度についても試料によって異なる。たとえば高速炉用燃料被覆材としてのステンレス鋼の照射では、最高800℃程度の温度で照射できることが望ましいであろうし、軽水炉用圧力容器鋼では300℃前後が試験温度となる。高温ガス炉用材となると1,000℃前後の試験も必要である。また研究の方向にしても、疲労破壊回数 $N_f$ を求めるとか、亀裂伝播の様態を研究するとか種々の方向があろう。従って、インパイル疲労試験キャプセルの開発においてどのような設計条件を設定したらよいかということはかなりむずかしい問題である。JMTRで照射するキャプセルという境界条件を考えてみると、ある程度の制約がある。照射用のホルダーとして標準の反射体要素を使用することを前提とすると、照射試料を1本として、片張り試験方式とすることは、技術的に比較的容易であるため開発の第一段階としては望ましい。複数本の試料を照射するとか、両張り試験方式を採用する場合には、技術的困難性に加えて標準反射体要素の使用は多分不可能になるので、別な視点を定めて開発を行わなければならないと考えられ開発の第一段階としては好ましくない。また1,000℃程度の照射に至っては、原子炉構造材として、その炉外試験データも少なく、むしろ現在炉外試験研究の段階であるので、炉内試験を考慮するにはその技術的困難性に加えて、まだ時期尚早の感がある。また亀裂伝播の進展を研究するには、亀裂伝播状態の検出方法など、技術的にかなりむずかしいと思われるので、第一段階の開発からはずしたい。

以上述べたように試験方法および条件、ならびにJMTR用キャプセルという境界条件などを整理して、第2.1項に述べたような設計条件を設定した。この条件に従って技術開発を行うにあたってのキーポイント部は、たとえば、既述したように、荷重印加方法とその測定方法、試料の伸びの測定方法およびキャプセル内においてガンマ発熱によって高温になるキャプセル構成材が機械的に移動したり、摺動したりするような機構を有するというような照射効果と温度効果が混在する純然としたインパイル照射技術の開発などであり、その項目はそれ程多くはない。これらの技術開発がこの炉外試験キャプセルの主眼点であるから、これらが開発されれば試験条件の変更は比較的容易である。たとえば、(1)定歪制御方式で試験する場合には、試料

の伸び(すなわち歪)は計測可能であるから、炉外部の付属制御装置のエレクトロニクス部を変更すればよい。(2)波形については、たとえば定荷重制御方式の場合を考えると、現設計では矩形波を与えるような設計としたが、上限荷重と下限荷重間の切り換え時に、試料に衝撃荷重を与えるおそれをなくすため、緩やかに荷重を変動させたい場合(この場合は台形波に近くなる)、アキュムレータの容積を小さくしたり、供給および排出のガス流量をニードル弁で絞るなどして応答時間を遅らせればよい。むしろこの方が技術的に容易である。さらに、正弦波、三角波などを与えたい場合には、定荷重、定歪制御に拘わりなく、多少の波形のゆがみなどは除けないにしても、たとえば流量調節弁と自動制御装置の組み合わせで実現可能であろう。(3)定歪、定荷重の保持時間の変更は単にタイマーの変更でよい。(4)照射温度については構造設計、照射孔の選定、温度制御などを考慮すれば解決がつくであろう。高温ベローズを開発しておけば、それより低い温度での照射における問題はない。(5)試料の形状については、チャック部分の形状を不変にしておくだけでよく、試験部の形状は任意でよい。以上のような試験条件の変更に対しては、改めて開発を要しないと思われる。従って、第2.1項に述べた設計条件で設計した炉外試験キャプセルに関して、その設計条件の選定についての矛盾はないと考えられる。

## 6 謝 辞

この開発に対し、参考文献の紹介をはじめ、キャプセルの設計条件などについての種々のコメントおよび御指導を頂いた、材料工学研究室長の近藤達男氏並びに同研究室の菊山紀彦氏に差動トランスの使用方法について新しい方法を紹介して頂いた炉計測研究室の荒見之氏に、および炉外キャプセル、付属装置の設計、製作および試験に御協力頂いた、東京航空計器(株)の近藤俊雄氏、青木邦雄氏並びに池田文造氏に、厚く感謝する次第です。

の伸び(すなわち歪)は計測可能であるから、炉外部の付属制御装置のエレクトロニクス部を変更すればよい。(2)波形については、たとえば定荷重制御方式の場合を考えると、現設計では矩形波を与えるような設計としたが、上限荷重と下限荷重間の切り換え時に、試料に衝撃荷重を与えるおそれをなくすため、緩やかに荷重を変動させたい場合(この場合は台形波に近くなる)、アキュムレータの容積を小さくしたり、供給および排出のガス流量をニードル弁で絞るなどして応答時間を遅らせればよい。むしろこの方が技術的に容易である。さらに、正弦波、三角波などを与えたい場合には、定荷重、定歪制御に拘わりなく、多少の波形のゆがみなどは除けないにしても、たとえば流量調節弁と自動制御装置の組み合わせで実現可能であろう。(3)定歪、定荷重の保持時間の変更は単にタイマーの変更でよい。(4)照射温度については構造設計、照射孔の選定、温度制御などを考慮すれば解決がつくであろう。高温ペローズを開発しておけば、それより低い温度での照射における問題はない。(5)試料の形状については、チャック部分の形状を不変にしておくだけでよく、試験部の形状は任意でよい。以上のような試験条件の変更に対しては、改めて開発を要しないと思われる。従って、第2.1項に述べた設計条件で設計した炉外試験キャプセルに関して、その設計条件の選定についての矛盾はないと考えられる。

## 6 謝 辞

この開発に対し、参考文献の紹介をはじめ、キャプセルの設計条件などについての種々のコメントおよび御指導を頂いた、材料工学研究室長の近藤達男氏並びに同研究室の菊山紀彦氏に差動トランスの使用方法について新しい方法を紹介して頂いた炉計測研究室の荒見之氏に、および炉外キャプセル、付属装置の設計、製作および試験に御協力頂いた、東京航空計器(株)の近藤俊雄氏、青木邦雄氏並びに池田文造氏に、厚く感謝する次第です。

## 7 文 献

- (1) J. R. Hawthorne and L. E. Steel; In-Reactor Studies of Low-Cycle Fatigue Properties of a Nuclear Pressure Vessel Steel, ASTM STP 380, pp.350, (1965).
- (2) M. B. Reynolds; Strain-Cycle Phenomina in Thin-Wall Tubing, ASTM STP 380, pp. 323, (1965)  
M. B. Reynolds; In-Reactor Fatigue Testing (Strain Cycle Test), TID-7697, pp. 2.20.1, (1963).
- (3) R. P. Morisette and S. Y. Ogawa; Unique Problems and Solutions on GETR Materials Irradiation Capsules - Strain Cycle #10 & 11, CONF-660511, pp.1.3.2, (1966).
- (4) F. O. Haroldsen; Limited Temperature and Fatigue Test Capsule Experiments, CONF-660511, pp. 1.5.1, (1966).
- (5) D. S. Wood and E. R. Jonson; Effect of Irradiation on the High-Strain Fatigue Behaviour of a Low-Carbon High-Manganese and a Low-Alloy Steel, TRG Report 1277(C), (1966).
- (6) M. Kangilaski, J. S. Perrin and R. A. Wullaert; Stress Rupture and Fatigue Properties of Irradiated Type-347 Stainless Steel at 650°C, Trans. Am. Nucl. Soci., Vol. 12, No. 2, pp. 574 ~ 575, (1969).
- (7) J. Moteff, J. P. Smith and W. J. Stapp; Effects of Neutron Irradiation on the Plastic Fatigue Properties of Stainless Steel, Trans. Am. Nucl. Soci., Vol. 12, No. 2, pp. 585, (1969).
- (8) J. B. Conway, J. T. Berling and Stentz; New Correlations Involving the Low-Cycle Fatigue and Short-Term Tensile Behavior of Irradiated and Unirradiated 304 and 316 Stainless Steel, GEMP-726, (1969).
- (9) C. R. Brinkman, G. E. Korth and R. R. Hobbins; Estimates of Creep-Fatigue Interaction in Irradiated and Unirradiated Austenitic Stainless Steels, Nucl. Technol., Vol. 16, Oct. pp. 297 ~ 307, (1972).
- (10) J. M. Beeston and C. R. Brinkman; Axial Fatigue of Irradiated Stainless Steels Tested at Elevated Temperature, ASTM STP 484, pp. 419 ~ 450, (1970).
- (11) I. Tanaka and K. Onodera; Development of Fission Gas Pressure Measurement Technique in the JMTR, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 10, No. 5, pp. 309 ~ 319, (1973).
- (12) I. Tanaka and K. Onodera; Irradiation Test of Reluctance Type Pressure Sensor for Measuring Fission Gas Pressure, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 11, No. 3, pp. 104 ~ 109, (1974).
- (13) K. Ara; A Differential Transformer with Temperature - and Excitation - Independent Output, IEEE Trans. Instrum. & Measur. Vol. IM-21, No. 3,

pp. 249 ~ 255, (1972).

- (14) L. E. Carden and T. B. Slade; High-Temperature Low-Cycle Fatigue Experiments on Hastelloy X, ASTM STP 459, pp. 120, Fig. 7, (1969).