

JAERI-M

84-034

JT-60真空容器のポートに用いられる
溶接ベローズの形式試験

(臨界プラズマ試験装置設計報告・124)

1984年3月

高津 英幸・山本 正弘・清水 正亜
鈴木 和夫*・園部 正*・林 雄造**
水野 源一郎**

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

JAERI-M 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。

入手の問合せは、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、お申しこしください。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。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 山田軽印刷所

J T - 60 真空容器のポートに用いられる
溶接ベローズの形式試験
(臨界プラズマ試験装置設計報告・124)

日本原子力研究所東海研究所大型トカマク開発部

高津 英幸・山本 正弘・清水 正亜
鈴木 和夫*・園部 正*・林 雄造**
水野 源一郎**

(1984年1月31日受理)

J T - 60 真空容器のポートに用いられる 3 種類の溶接ベローズには機械的、真空および熱的に非常に厳しい性能が要求されているため、これらに関して 7 項目にわたる形式試験を実施し、実機への適用性を検討した。

形式試験の結果、主に下記 3 項目の結論が得られた。

- (1) ばね定数測定試験および応力測定試験では、実測値と計算値が良い一致を示し、評価式の妥当性が示された。
- (2) ヘリウム・リーク試験および放出ガス速度測定試験では、いずれも保証値を下回る良好な結果が得られ、十分な真空性能を有することが示された。
- (3) 熱サイクル試験、寿命試験および耐圧試験の結果はいずれも異常がなく、十分な熱的および機械的性能を有していることが示された。

* (株)日立製作所

** 入江工研(株)

Type Tests of the Welded Bellows for the
Ports of the JT-60 Vacuum Vessel

Hideyuki TAKATSU, Masahiro YAMAMOTO, Masatsugu SHIMIZU,
Kazuo SUZUKI^{*}, Tadashi SONOBE^{*}, Yuzo HAYASHI^{**} and Gen-ichiro MIZUNO^{**}

Department of Large Tokamak Development
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received January 31, 1984)

Type tests of three kinds of the welded bellows were carried out to examine their applicability to the ports of the JT-60 vacuum vessel, because strict specifications on the mechanical, vacuum and thermal properties were required for them.

The following conclusions were obtained after seven kinds of type tests.

- (1) Spring constant and stress measurement tests showed a good agreement between the measured values and the calculated ones and confirmed the validity of the spring constant and stress evaluation formula.
- (2) The results of the Helium leak and outgassing rate measurement tests were found to be below the specifications and showed the good vacuum property of the welded bellows.
- (3) The welded bellows kept up the structural integrity after the thermal cycle, life and pressure tests and sufficient thermal and mechanical property of the welded bellows was confirmed.

Keywords; Welded Bellows, JT-60 Tokamak, Type Test, Spring Constant, Stress Measurement, Helium Leak, Outgassing Rate, Thermal Cycle, Life Test, Pressure Test

* Hitachi, Ltd.

** Irie Koken Co., Ltd.

目 次

1.はじめに.....	1
2.形式試験項目.....	5
2.1 溶接ペローズに要求される性能.....	5
2.2 形式試験項目.....	7
3.形式試験方法.....	15
3.1 機械的性能試験.....	15
3.1.1 ばね定数測定試験.....	15
3.1.2 応力測定試験.....	16
3.1.3 寿命試験.....	16
3.1.4 耐圧試験.....	17
3.2 真空性能試験.....	17
3.2.1 ヘリウム・リーク試験.....	17
3.2.2 放出ガス速度測定試験.....	18
3.3 熱的性能試験.....	19
3.3.1 熱サイクル試験.....	19
4.形式試験結果および検討.....	33
4.1 機械的性能試験.....	33
4.1.1 ばね定数測定試験.....	33
4.1.2 応力測定試験.....	33
4.1.3 寿命試験.....	36
4.1.4 耐圧試験.....	36
4.2 真空性能試験.....	36
4.2.1 ヘリウム・リーク試験.....	36
4.2.2 放出ガス速度測定試験.....	37
4.3 熱的性能試験.....	37
4.3.1 熱サイクル試験.....	37
5.おわりに.....	53
参考文献.....	54

Contents

1. Introduction.....	1
2. Type test items	5
2.1 Specifications for the welded bellows	5
2.2 Type test items	7
3. Procedure of the type tests	15
3.1 Mechanical property	15
3.1.1 Spring constant measurement test	15
3.1.2 Stress measurement test	16
3.1.3 Life test	16
3.1.4 Pressure test	17
3.2 Vacuum property	17
3.2.1 Helium leak test	17
3.2.2 Outgassing rate measurement test	18
3.3 Thermal Property	19
3.3.1 Thermal cycle test	19
4. Results of the type tests and discussion	33
4.1 Mechanical property	33
4.1.1 Spring constant measurement test	33
4.1.2 Stress measurement test	33
4.1.3 Life test	36
4.1.4 Pressure test	36
4.2 Vacuum property	36
4.2.1 Helium leak test	36
4.2.2 Outgassing rate measurement test	37
4.3 Thermal Property	37
4.3.1 Thermal cycle test	37
5. Conclusions	53
References	54

1. はじめに

溶接ベローズは配管系に広く用いられているコンポーネントであり、比較的剛性の高い2つのコンポーネント間の相対変位を吸収できる他、機械的な振動を絶縁する役割を果たす。ベント管、エルボおよび成形ベローズも配管系の相対変位を吸収するのによく用いられるコンポーネントであるが、これらに比べて溶接ベローズは一般的に柔軟性に優れ、限られたスペースで大きな相対変位を吸収することができる。

トカマク型核融合装置においても溶接ベローズは広く用いられてきている。その使用ヶ所は主に真空容器へのアクセスを目的とした様々なポート部である。ポート部に溶接ベローズを用いる目的としては

- ① ポートを介して真空容器に連結される計測設備、加熱設備等と真空容器の間の相対変位の吸収（相対変位の原因としては熱膨張、電磁力や地震力による変位等がある）。
- ② 真空容器の機械的な振動の絶縁。
- ③ 真空容器内に設置されるコンポーネントを、真空を破ることなく駆動させるための真空駆動機構（一例として可動リミタが挙げられる⁽¹⁾）。
- ④ 真空容器からポートへの熱伝導の障壁

がある。

臨界プラズマ試験装置（以下 JT-60）本体の設計においては、大部分のポートは上記①項に記した相対変位をポート自身のたわみで吸収させ、大口径ポートである中性粒子入射加熱用（NBI）ポート、真空排気用（V）ポートおよび真空駆動機構である半固定リミタ挿入（SL）ポートにおいてのみ溶接ベローズ（以下、NBIベローズ、VベローズおよびSLベローズ）で相対変位を吸収する構造を採用している。Fig. 1はJT-60本体の断面図であり、Vベローズの使用ヶ所を示している。また、Table 1には各ベローズの主要諸元をまとめた。

本設計において溶接ベローズの使用を可能な限り避けたのは、設計当初の段階において溶接ベローズに以下の潜在的な不具合要因が危惧されたからである。すなわち、溶接ベローズには大きな強制変位が作用する他、従来経験の乏しい捩り負荷が作用するため强度的な信頼性が低い。また、表面積が大きく溶接線が長いため放出ガスの増加やリーク等により真空容器の真空性能の低下を招くおそれがある。さらに、板厚が薄いため渦電流誘起時にアークの生じる可能性があり、プラズマからの入熱による溶損のおそれもある上に、装置組立後は溶接ベローズ部位への接近が難しい場合が多く、溶損もしくは真空漏れが生じると装置全体を分解しない限り修復は不可能である場合が多いと思われる⁽⁴⁾。以上より本設計では、溶接ベローズを用いないと構造解がないSLポートおよびポートの剛性が非常に高く相対変位の吸収をポート自身のたわみで吸収させる構造を採ることができない大口径のNBIおよびVポートにのみ溶接ベローズを使用するものとした。

本設計で用いられる3種類の溶接ベローズには、上述の如く大きな強制変位が作用する他、電磁力による捩り荷重という従来経験の乏しい形態の荷重が作用するため高い機械的強度が要

求されている。また、Table 1 に示す如く高い運転温度で使用されることがあるため、その熱サイクルに耐える必要がある。さらに、真空容器の真空境界を形成しているため厳しい真空性能が要求されている。一方、本溶接ベローズはいずれも非常に大型であり、かつ NBI ベローズの様に非円形断面を有する特殊なベローズも含まれるうえに、いずれも製作経験の少い耐熱金属製であるため製作上の困難も予想される。溶接ベローズの強度評価に関する報告は非常に少く⁽⁵⁾⁽⁶⁾、また、捩り荷重に対する強度評価についても著者の知る限り報告例はない。また、耐熱金属による大形非円形断面溶接ベローズについても、JT-4 の真空容器への適用を目的として試作された報告例はあるが、一般にベローズ・メーカーにおいても製作経験が乏しい。

以上より、実機用と全く同一の溶接ベローズを試作し、実機溶接ベローズに要求されている機械的性能、真空性能および熱的性能に関する各試験に供し、要求されている仕様を満たすか否かの確認を行う形式試験を行った。Table 2 に形式試験項目をまとめる。本報告書はこの形式試験の結果を報告するものである。以下、第 2 章には溶接ベローズに要求される仕様と形式試験項目の概要をまとめる。第 3 章では形式試験方法の詳細を述べ、第 4 章で試験結果をまとめる。

Table 1 Major specifications of the welded bellows for the ports of the JT-60 vacuum vessel.

Port	V	SL	NBI
Inner diameter (mm)	590	370	653.1×723.8
Outer diameter (mm)	690	430	733.1×803.8
Free length (mm)	520	393	464
Thickness (mm)	0.5	0.35	0.48
Pitch (mm)	8.0	4.79	8.0
Cross section	Circular	Circular	Rectangular
Number of corrugation	65	82	58
Offset length (mm)	+ 30	+ 17	+ 16
Designed temperature (°C)	R.T. & 250	R.T. & 520	R.T. & 250
Material	Inconel 625		
Designed pressure (kg/mm ²)	0.01		

Table 2 List of type test items.

1. Mechanical property
 - 1.1 Spring constant measurement test
 - 1.2 Stress measurement test
 - 1.3 Life test
 - 1.4 Pressure test
2. Vacuum property
 - 2.1 Helium leak test
 - 2.2 Outgassing rate measurement test
3. Thermal property
 - 3.1 Thermal cycle test

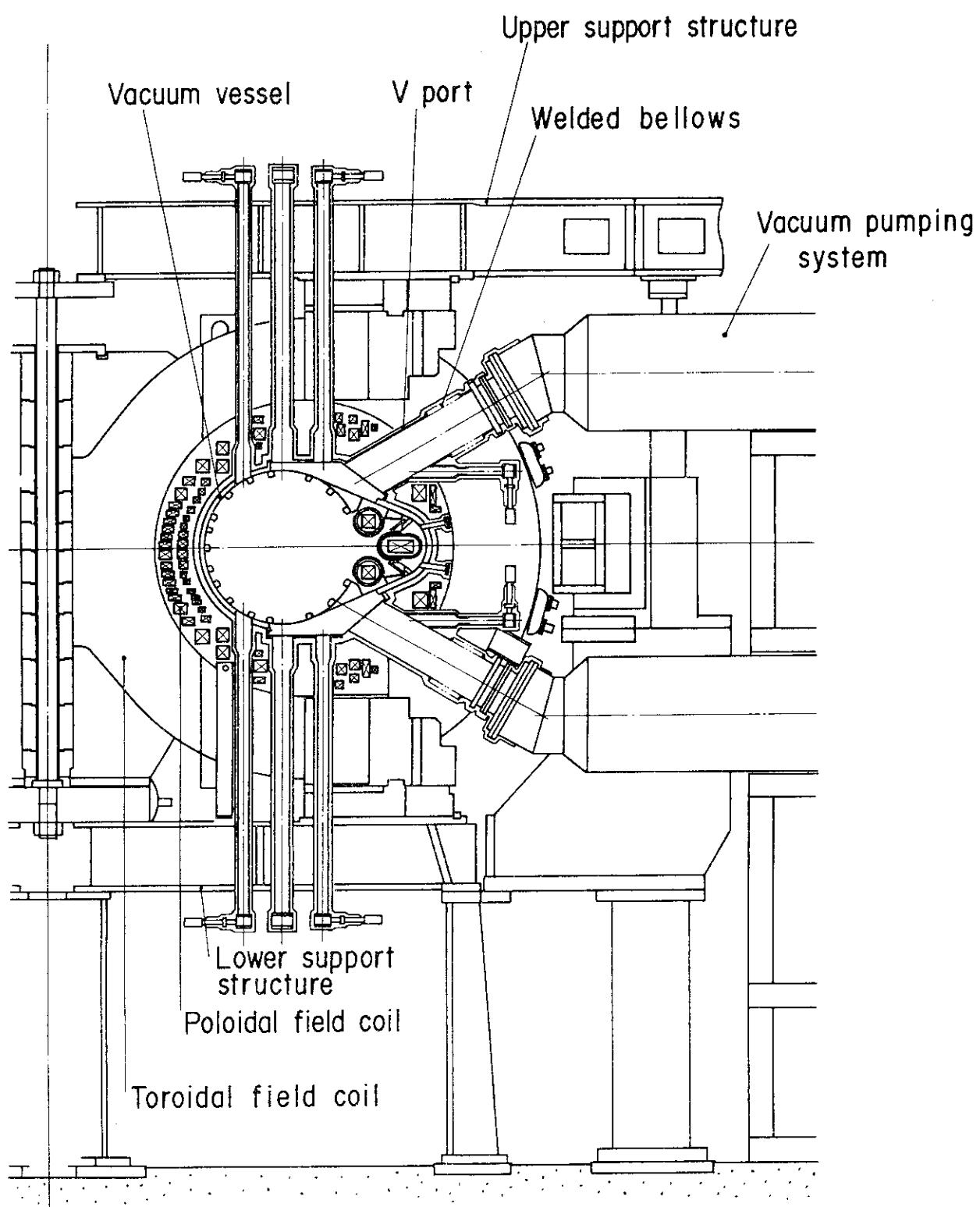


Fig. 1 Cross sectional view of the JT-60 tokamak machine showing a typical application of the welded bellows to a fusion device.

2. 形式試験項目

2.1 溶接ベローズに要求される性能

(1) 外観・寸法仕様

JT-60 真空容器のポートに用いられる 3 種類の溶接ベローズ V, SL および NBI は、Table 1 の主要諸元に示す如く板厚が各々 0.5 mm, 0.35 mm および 0.48 mm と薄肉であるため、機械的強度は板厚の減小に非常に敏感である。従って、打疵等の損傷を受ける場合は言うに及ばず、製造過程で生じる局部的な減肉も強度的に好ましくなく素材から完成品の段階まで、厳しく管理する必要がある。

また、各溶接ベローズは山数が、各々 65, 82 および 58 山と多いため表面積も各々 1 ケの溶接ベローズで 10 m^2 程度もあり、JT-60 真空容器のポートに用いられる溶接ベローズ全体では 200 m^2 以上にもなり、JT-60 真空容器全内表面積の 2 割にも達する。従って、これらからの放出ガスを可能な限り低く抑えて真空容器の真空性能の低下を避ける必要があり、ベローズ素材の表面は可能な限り滑らかにし、摺疵やまくれ等表面積を増す原因となる不具合を取り除く必要がある。

溶接ベローズの性能は溶接ビードの形状に大きく依存しているが、この不揃いも強度上好ましくないため厳しく管理する必要がある。

以上をまとめると、溶接ベローズの外観に関しては下記 3 項の仕様が課せられる。

- ① ベローズの内・外表面に打疵や摺疵等の有害な欠陥がないこと。
- ② ベローズの内・外表面に異物等の付着がないこと。
- ③ ベローズの溶接ビードに著しい不揃いがないこと。

上記①, ② 項は、素材段階からプレス打ち抜きおよび完成品の全ての段階において管理する必要がある。

溶接ベローズの各部寸法は主に強度設計により定められている。これらの公称寸法と公差を、V, SL および NBI ベローズについて、各々 Table 3, 4 および 5 にまとめる。なお、板厚の公差は公称板厚の $\pm 10\%$ とする。

(2) 機械強度仕様

溶接ベローズに作用する荷重は、真空容器と外部固定系との相対変位等による軸方向および軸直角方向の強制変位、内部真空による真空力および電磁力によるポートの捩れ変形に伴う捩り負荷がある。V, SL および NBI ベローズに作用する設計荷重を Table 6 にまとめる。

相対変位の生じる主な要因としては、

ベーキング時 (520°C) と高温運転時 (400°C) における真空容器およびポート自身の熱膨張

真空力と電磁力による真空容器およびポート自身の変形

地震時における真空容器の変位

があげられる。Table 6 には、これらを全て合成した相対変位値が示されている。ここで、Aはベローズの軸方向、Tは軸直角方向、Eは矩形断面ベローズ（NBI）のエッジ方向、Fはフラット方向を指す。また高温運転時の温度も安全側に 520 °C としている。

電磁力による真空容器の変形は JT-60 本体の仕様に定める下記 4 つのプラズマ挙動とともに求められている。作用回数も併せて示すと、

プラズマ立ち上げ（着火）	運転回数の 95 %
プラズマ立ち上げ（不着火）	運転回数の 5 %
プラズマ消滅（時定数 50 msec）	運転回数の 20 %
プラズマ消滅（時定数 1 msec）	1000 回

である。ここで、前二者の中ではプラズマ立ち上げ（不着火）が最も厳しい条件であるため、前二者を代表させるものとする。従って、これらの総繰返し数は運転回数の 120 % となり、Table 6 のケース A に示す高温運転（最大定格の運転回数 5000 回）では作用回数は 6000 回となり、ケース C に示す常温運転（最大定格の運転回数 45000 回に 50% 定格運転の運転回数 150000 回を安全側に加えて 195000 回とする）では作用回数は 234000 回となる。

プラズマ消滅（時定数 1 msec）の場合、荷重の時定数が真空容器の固有周期に比較的近く動的応答が顕著であるため、⁽⁸⁾ 繰返し数を運転回数だけとするのではなく安全側の疲労評価とならない。ここでは、1 回のパルス荷重による応答として 1 回のパルス応答とその応答振幅に換算して 9 回の自由減衰振動を考慮し、計 10 回の動的応答を受けるものとする。従って、ケース D の作用回数は 10000 回とする。

JT-60 本体の仕様に定める運転時地震の地震力は下記の通りである。10 年の寿命中の発生回数も併せて示すと、

90 gal	2 回 / 年 × 10 年
70 gal	3 回 / 年 × 10 年
50 gal	5 回 / 年 × 10 年
30 gal	10 回 / 年 × 10 年

である。1 回の地震動によって真空容器の受ける振動回数は、地震動に対する真空容器系の固有振動数 8 Hz と地震動継続時間 10 秒より 80 回とし、これを各々の発生回数に乘じることによりベローズの疲労サイクルに組み込む。Table 6 の B 1, B 2, B 3, B 4 は、各々上記地震力に対応している。ここで、地震力は運転時荷重と重畠されており、また、安全側に高温運転時に発生するものとする。

ポートには、上記 4 つのプラズマ条件に伴い渦電流が誘起され、これとトロイダル磁場との相互作用により捩り電磁力が作用し、捩り変形が生じる。これよりポートに溶接されている溶接ベローズにも強制捩り角が負荷されることになる。各ベローズに作用する強制捩り角を Table 6 にまとめる。ここでプラズマ消滅（1 msec）以外のプラズマ条件では捩り角が非常に小さいので零とした。

以上により、機械的性能に関する仕様をまとめると下記の通りである。すなわち、溶接ベローズは

① 外圧…… 1 kg/cm²

- ② 強制変位 { 軸方向……± 11 mm (最大)
 軸直角方向……± 24 mm (最大)
- ③ 振り角……0.2° (最大)
- ④ 繰り返し数 { 定格……5万回
 50%定格……15万回

の荷重サイクルに耐える必要がある。

(3) 真空仕様

前記(1)項に記した通り、溶接ベローズの表面積は真空容器の全内表面積の2割にも達するため、放出ガス量を低く抑えて真空容器の真空性能の劣化を避ける必要がある。そのために、各溶接ベローズは十分な表面処理を行い放出ガス速度を 1×10^{-11} Torr · ℓ/sec · cm² 以下に抑えることが要求される。

また、溶接ベローズは溶接長さが非常に長く、V, SLおよびNBIベローズの各々1個で500 m程度である。従って、JT-60真空容器に用いられる溶接ベローズ全体では溶接線長さは10 kmにも達する。溶接ベローズの溶接ビード部は形状の制約から非破壊検査が難しく、他の一般溶接部に比して溶接信頼性は低い。以上より、溶接ベローズの完成品に対してはリーク検査を実施してそのリーク量を低く管理し、JT-60真空容器の真空性能の劣化を避ける必要がある。

以上より、真空性能に関する仕様をまとめると下記の通りである。

- ① 溶接ベローズ単品の許容リーク量は、ヘリウム・リーク・ディテクタにして 1×10^{-9} Torr · ℓ/sec を保証値とし、ディテクタの検出感度が良好な場合には 5×10^{-10} Torr · ℓ/sec を目標値とする。
- ② 溶接ベローズおよびフランジ内面は、放出ガス量を極力低くする様に表面処理を施し、油脂等で汚染してはならない。
- ③ 溶接ベローズ単品の許容放出ガス速度は 1×10^{-11} Torr · ℓ/sec · cm² とする。

(4) 熱的仕様

JT-60真空容器の運転モードには、ベーキング運転が含まれており、真空容器およびポートは各々 520 °C, 250 °C にまで加熱される。従って、真空容器に近接する SL ポート用溶接ベローズは最高 520 °C に、真空容器から比較的離れている V および NBI ポート用溶接ベローズは 250 °C 以上に加熱される。溶接ベローズは想定されるベーキング回数に応じた熱サイクルに耐える必要がある。

熱的仕様をまとめると下記の通りである。

- ① 温度範囲は R.T. から 250 °C (V および NBI ベローズ), R.T. から 520 °C (SL ベローズ) とする。
- ② サイクル数は 200 回とする。

2.2 形式試験項目

2.1節でみた様に、JT-60真空容器のポート用溶接ベローズには、大きな強制変形や從来

ほとんど経験のない振り電磁力が作用するため十分な強度が必要であり、また高温運転にも耐え、かつ厳しい真空仕様を満たす必要がある。また、これらは外径 700 mm にも達する大口径ベローズである上に NBI ベローズの様に非円形断面を有する特殊なベローズもあり、さらに製作経験の少い耐熱金属性であるので製作上非常に高度な技術を必要とする。

そこで、実機用と全く同一の溶接ベローズを同一の製作条件で製作し、各種の性能試験に供し、設計上意図した外観、寸法、各種性能に関する仕様を満たしているか否かの確認をする形式試験を行う必要がある。以下に形式試験項目とその概要を示す。

(1) 機械的性能試験

① ばね定数測定試験

溶接ベローズの軸方向および軸直角方向のばね定数を測定し、その剛性を知るとともに、計算値との比較を行って計算式の妥当性を確認する試験である。

② 応力測定試験

軸方向および軸直角方向変位による応力、真空力による応力を測定し、計算値との比較を行うことにより計算式の妥当性を確認する試験である。これにより実機溶接ベローズの強度評価に用いられる応力評価式およびその寿命評価結果の妥当性が示される。

③ 寿命試験

上述の応力測定試験で示された実機溶接ベローズ強度評価の妥当性をさらに明確に示すため、実機溶接ベローズが寿命中に受ける全荷重（実働荷重）を実機と同一の供試ベローズに与えることによりその寿命を確認する試験である。

④ 耐圧試験

溶接ベローズに設計荷重を上回る外荷重を与えることによりその強度裕度を確認する試験である。

(2) 真空性能試験

① ヘリウム・リーク試験

溶接ベローズに要求されている真空性能のうち、ヘリウム・リーク量が許容値以下であることを確認する試験である。

② 放出ガス速度測定試験

溶接ベローズに要求されている真空性能のうち、放出ガス速度が許容値以下であることを確認する試験である。

(3) 熱的性能試験

① 熱サイクル試験

実機溶接ベローズの受ける熱サイクルを供試ベローズに与え、その耐久性を確認する試験である。

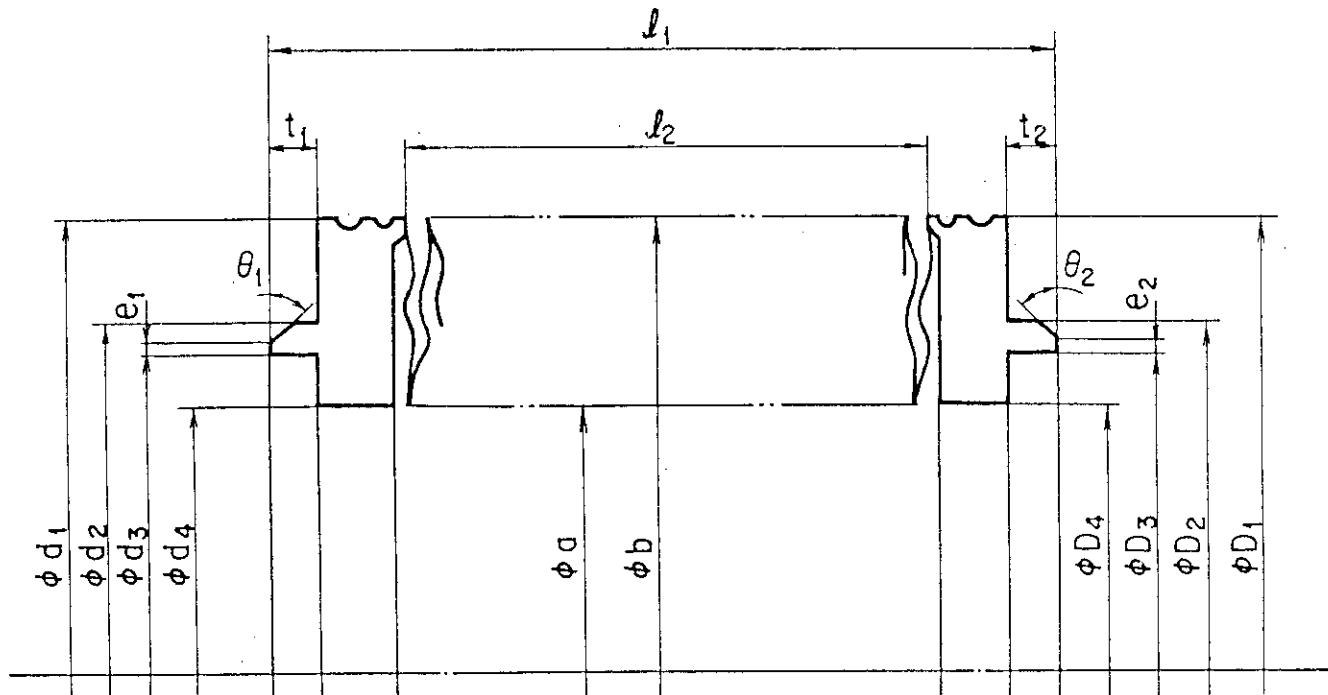
なお、ヘリウム・リーク試験は、形式試験供試品のみならず実機使用品全てに対しても行うため厳密な意味の形式試験項目ではないが、寿命試験、耐圧試験および熱サイクル試験終了後の健全性の確認のため実施するため本報の内容に含める。また、振り荷重に対する溶接ベローズの強度評価に関しては、振り疲労強度の確認試験結果として別途報告しているため、本報では省略する。

V, SLおよびNBIベローズはTable 7にまとめる様に、形式試験用に各1個製作される他、実機用として各々4個、2個および14個製作される。全ての溶接ベローズはその製作完成時に外観・寸法検査およびヘリウム・リーク試験を実施し、各々の使用目的に適用可か否かの判定を行っている。全てのV, SL, NBIベローズの完成品寸法記録が公称寸法と合わせてTable 3, 4および5に、またヘリウム・リーク試験の結果がTable 8にまとめられている。ここで、Vベローズについては、V-03において完成後の試験検査時にビードの一部がヒーターのスパークにより溶損するという事故が生じたが、補修溶接を行ったところ外観・寸法検査およびヘリウム・リーク試験にも合格し、疲労試験の結果強度の劣化もないことが明らかになつたため⁽¹¹⁾ V-03は実機用として用いるものとし、他と比較して溶接ビードが不揃いであるV-05を形式試験用とする。SLベローズについては、SL-03において誤作により角度θが公差外れとなつたが形式試験用としては支障ないためこれを形式試験用に供するものとする。NBIベローズについては15個全ての寸法が公差内に入っているが、他と比較して溶接ビードが不揃いであるNBI-15を形式試験に供する。

なお、ヘリウム・リーク試験の結果は、Table 8から明らかな様に全てのベローズのヘリウム・リーク量は保証値を下回っており、いずれも実機使用および形式試験用に供し得ることが明らかである。

Table 3 Dimensional specification and the measurement results for V bellows.

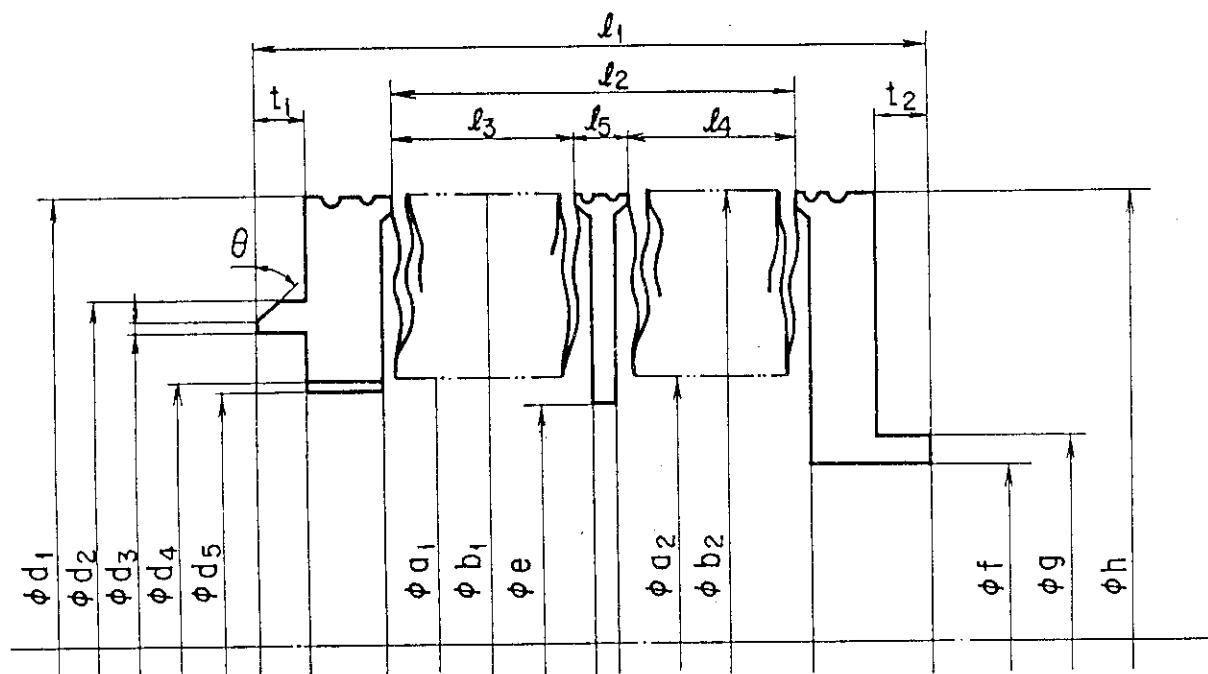
n: number of corrugation



Symbol	Unit	Nominal dimension	V-01	V-02	V-03	V-04	V-05
d_1	mm	690 ± 0.5	690.1	690.1	690.1	689.9	690.0
d_2	mm	626 ± 0.5	626.1	625.9	626.2	626.0	626.1
d_3	mm	614 ± 0.3	613.8	613.8	613.8	613.8	613.9
d_4	mm	590 ± 0.8	589.8	589.7	589.9	589.9	590.1
e_1	mm	1.5 ± 0.3	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
θ_1	degree	52.5 ± 2.5	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0
t_1	mm	10 ± 0.2	10.1	10.2	10.0	10.0	10.2
D_1	mm	690 ± 0.5	689.0	690.0	690.0	690.0	690.0
D_2	mm	626 ± 0.5	626.1	626.0	626.1	626.0	626.0
D_3	mm	614 ± 0.3	613.9	613.8	613.8	613.7	613.5
D_4	mm	590 ± 0.8	589.7	589.7	589.9	589.7	589.8
e_2	mm	1.5 ± 0.3	1.8	1.8	1.8	1.8	1.7
θ_2	degree	52.5 ± 2.5	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0
t_2	mm	10 ± 0.2	10.1	10.0	10.0	10.1	10.1
a	mm	590 ± 2	588.2	588.1	588.1	588.1	588.1
b	mm	690 ± 2	691.1	691.0	691.1	691.1	691.1
l_1	mm	570	590.0	574.0	580.0	590.0	580.0
l_2	mm	520 ± 52	540	524	530	540	530
n	-	65	65	65	65	65	65

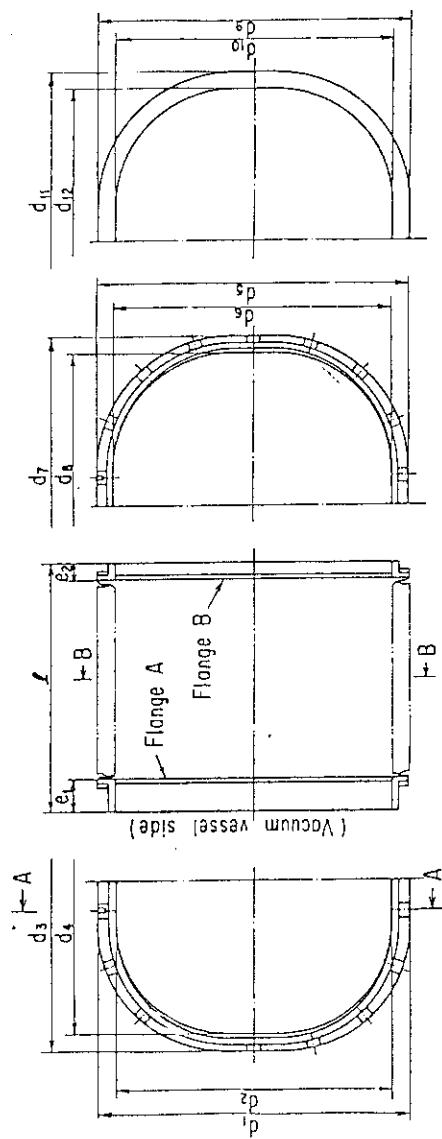
Table 4 Dimensional specification and the measurement results for SL bellows.

n : number of corrugation



Symbol	Unit	Nominal dimension	SL-01	SL-02	SL-03
d_1	mm	430 ± 0.5	430.1	430.1	430.1
d_2	mm	410 ± 0.5	409.9	410.1	410.2
d_3	mm	399 ± 0.3	399.1	399.1	398.9
d_4	mm	365 ± 0.8	365.0	365.2	365.4
d_5	mm	360 ± 0.8	360.0	360.0	359.9
s	mm	$1.5^{+0.2}_0$	1.7	1.7	1.7
θ	degree	37.5 ± 2.5	37.0	37.0	52.0
t_1	mm	10 ± 0.2	10.0	10.1	10.0
a_1	mm	370 ± 2	368.4	368.5	368.5
b_1	mm	430 ± 2	430.9	431.0	430.9
e	mm	360 ± 0.8	360.1	368.5	368.5
a_2	mm	370 ± 2	368.5	368.5	368.5
b_2	mm	430 ± 2	430.9	430.9	430.9
t_2	mm	10 ± 0.2	10.1	10.0	10.0
f	mm	$314.5^{+0.2}_{+0.1}$	314.7	314.7	314.7
g	mm	327 ± 0.5	327.0	327.0	327.0
h	mm	430 ± 0.5	430.0	430.0	430.0
l_1	mm	443 ± 44.3	460	466	440
l_2	mm	393 ± 39.3	395	412	395
l_3	mm	192.5	194	203	193
l_4	mm	192.5	193	201	194
l_5	mm	8	8.1	8.1	8.1
n	-	82	82	82	82

Table 5 Dimensional specification and the measurement results for NBI bellows.

 n : number of corrugationFlange A
A-A cross sectionFlange B
B-B cross section

Symbol	Unit	Nominal dimension	NBI-01	NBI-02	NBI-03	NBI-04	NBI-05	NBI-06	NBI-07	NBI-08	NBI-09	NBI-10	NBI-11	NBI-12	NBI-13	NBI-14	NBI-15
d ₁	mm	733.1	733.3	733.1	733.1	733.2	733.3	733.1	733.2	733.0	733.3	733.2	733.1	733.0	733.1	733.1	733.6
d ₂	mm	653.1 +2.0 -1.0	653.9	653.4	653.1	653.3	653.4	654.1	653.6	653.5	653.4	653.5	653.5	653.8	653.3	654.0	653.1
d ₃	mm	803.8	804.1	806.1	803.8	804.0	803.9	803.6	804.0	803.9	803.0	803.8	804.3	803.7	804.3	803.5	803.8
d ₄	mm	723.8 +2.0 -1.0	723.8	724.8	723.8	723.9	724.1	723.7	724.0	724.1	724.1	724.0	724.0	724.7	724.2	724.3	723.8
d ₅	mm	733.1	733.2	733.1	733.1	733.2	733.1	733.6	733.3	733.3	732.9	733.3	733.1	732.7	733.0	732.7	733.3
d ₆	mm	653.1 +2.0 -1.0	654.0	653.3	653.6	654.0	653.5	654.1	653.6	653.6	653.8	653.7	653.7	653.5	653.5	653.5	653.9
d ₇	mm	803.8	804.0	803.8	803.8	803.9	803.8	803.7	804.0	803.9	803.7	803.8	803.8	803.7	804.0	803.6	804.0
d ₈	mm	723.8 +2.0 -1.0	723.9	723.8	723.8	723.7	723.9	724.1	724.0	724.2	724.6	724.0	724.0	724.7	724.8	724.6	724.3
d ₉	mm	733.1 +1.0 -3.0	732.8	732.5	732.3	732.6	732.1	732.5	732.5	732.5	733.5	732.8	732.4	732.8	732.8	732.6	732.6
d ₁₀	mm	653.1 +3.0 -1.0	653.0	653.5	654.1	654.0	654.1	653.5	654.2	654.1	653.7	654.0	653.5	653.6	654.0	654.1	653.9
d ₁₁	mm	803.8 +1.0 -3.0	803.6	803.8	802.8	802.8	802.7	802.9	803.1	803.1	803.2	803.2	803.2	803.4	803.2	803.3	802.6
d ₁₂	mm	723.8 +3.0 -1.0	724.0	724.3	723.9	724.1	724.1	724.2	724.4	724.4	724.4	724.3	724.1	724.0	723.6	723.7	724.3
e ₁	mm	587.0	550.1	577.2	576.6	584.4	574.4	783.6	579.8	578.8	584.3	581.3	571.1	576.6	593.9	547.5	
e ₂	mm	38	38.6	38.5	37.9	38.6	38.9	38.5	38.5	38.5	37.8	38.5	38.1	38.0	36.0	36.5	
n	-	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	

Table 6 Design load conditions for the welded bellows used in the ports of the JT-60 vacuum vessel, where A, T, E and F stand for axial, transverse, edge-wise and flat-wise, respectively.

Case	Conditions	Designed number of repetition	Deflection (mm)						Torsional angle (degree)		
			V		SL		NBI		A	T	E
			A	T	A	T	A	T			
A	Start-up & disruption (50 msec) 520°C	6039	± 6	± 12	± 6	± 17	± 3	± 16	± 12	0	0
B1	Start-up & disruption (50 msec) 520°C Earthquake (90 gal)	1600	± 11	± 19	± 11	± 24	± 8	± 23	± 19	0	0
B2	Start-up & disruption (50 msec) 520°C Earthquake (70 gal)	2400	± 9	± 15	± 9	± 19	± 7	± 18	± 15	0	0
B3	Start-up & disruption (50 msec) 520°C Earthquake (50 gal)	4000	± 7	± 11	± 7	± 14	± 5	± 13	± 11	0	0
B4	Start-up & disruption (50 msec) 520°C Earthquake (30 gal)	8000	± 4	± 7	± 4	± 8	± 3	± 8	± 7	0	0
C	Start-up & disruption (50 msec) R.T.	235000	± 3	± 7	± 3	± 6	± 3	± 9	± 7	0	0
D	Disruption (1 msec) R.T.	10000	± 7	± 8	± 5	± 6	± 5	± 6	± 9	0.20	0.19

Comments
 A ; Axial
 T ; Transverse
 E ; Edge-wise
 F ; Flat-wise

Table 7 Number of the welded bellows fabricated for the type test and the actual use.

Welded bellows	For actual use	For type test
V	4	1
SL	2	1
NBI	14	1

Table 8 Result of the Helium leak test of the welded bellows both for the type test and for the actual use after baking.

Number of welded bellows	Sensitivity of detector (Torr·l/sec)	Leak rate (Torr·l/sec)	Judgement	Comment
SL-01	3.99×10^{-10}	$< 3.99 \times 10^{-10}$	Acceptable	
SL-02	1.14×10^{-10}	$< 1.14 \times 10^{-10}$	Acceptable	
SL-03	8.61×10^{-11}	$< 8.61 \times 10^{-11}$	Acceptable	For type test
V-01	5.32×10^{-11}	$< 5.32 \times 10^{-11}$	Acceptable	
V-02	6.65×10^{-11}	$< 6.65 \times 10^{-11}$	Acceptable	
V-03	1.40×10^{-10}	$< 1.40 \times 10^{-10}$	Acceptable	
V-04	7.98×10^{-11}	$< 7.98 \times 10^{-11}$	Acceptable	
V-05	7.95×10^{-11}	$< 7.95 \times 10^{-11}$	Acceptable	For type test
NBI-01	2.20×10^{-10}	$< 2.20 \times 10^{-10}$	Acceptable	
NBI-02	3.17×10^{-10}	$< 3.17 \times 10^{-10}$	Acceptable	
NBI-03	3.05×10^{-10}	$< 3.05 \times 10^{-10}$	Acceptable	
NBI-04	2.64×10^{-10}	$< 2.64 \times 10^{-10}$	Acceptable	
NBI-05	4.70×10^{-10}	$< 4.70 \times 10^{-10}$	Acceptable	
NBI-06	3.55×10^{-10}	$< 3.55 \times 10^{-10}$	Acceptable	
NBI-07	3.55×10^{-10}	$< 3.55 \times 10^{-10}$	Acceptable	
NBI-08	2.71×10^{-10}	$< 2.71 \times 10^{-10}$	Acceptable	
NBI-09	4.31×10^{-10}	$< 4.31 \times 10^{-10}$	Acceptable	
NBI-10	4.46×10^{-10}	$< 4.46 \times 10^{-10}$	Acceptable	
NBI-11	4.27×10^{-10}	$< 4.27 \times 10^{-10}$	Acceptable	
NBI-12	3.52×10^{-10}	$< 3.52 \times 10^{-10}$	Acceptable	
NBI-13	3.79×10^{-10}	$< 3.79 \times 10^{-10}$	Acceptable	
NBI-14	4.42×10^{-10}	$< 4.42 \times 10^{-10}$	Acceptable	
NBI-15	7.68×10^{-10}	$< 7.68 \times 10^{-10}$	Acceptable	For type test

3. 形式試験方法

3.1 機械的性能試験

3.1.1 ばね定数測定試験

(1) 目的

本試験は、溶接ベローズの軸方向および軸直角方向のばね定数を測定し、その剛性を知るとともに、計算値との比較を行い計算式の妥当性を確認することが目的である。

溶接ビードの不揃い等の不具合は端的にばね定数の変化に反映されるものと考えられ、実機用溶接ベローズの不具合の有無もばね定数の測定により容易に判定が可能であろうという判断に基づいて本試験は行われる。

(2) 試験方法

軸方向および軸直角方向ばね定数測定要領図をFig. 2 の(a)および(b)に示す。

軸方向ばね定数測定の場合、形式試験供試用溶接ベローズをFig. 2 (a)に示す如くアムスラー万能試験機にセットし、引張りおよび圧縮の各方向に対して荷重-変位曲線を求め、次式により軸方向ばね定数 K_{\parallel} を求める。

$$K_{\parallel} = \frac{dF}{dz} \quad (1)$$

ここで、 F および z は荷重および変位を表わす。

軸直角方向ばね定数の場合、同一に設計・製作された溶接ベローズ 2 個をFig. 2(b)の如くアムスラー万能試験機にセットし、軸方向ばね定数測定と同様にして引張荷重を与えることにより荷重-変位曲線をとり、次式により軸直角方向ばね定数 K_{\perp} を求める。

$$K_{\perp} = \frac{1}{2} \frac{dF}{dx} \quad (2)$$

試験供試用の 2 個のベローズとしては、形式試験用 1 個と実機用 1 個を用いるものとする。

いずれのばね定数測定試験においても、変位量としてはポテンショ・メーターの電圧値を、荷重としてはロード・セルの荷重計の出力を X-Y レコーダにて記録する。また、各ベローズの取付長さは実機取付長さとする。測定は再現性を確認するため 3 回実施する。さらに、NBI ベローズについては矩形断面を有しているため、実働負荷変位方向(断面長径と短形の合成方向)についても 1 ケース測定するものとする。

Photo. 1 および Photo. 2 には V ベローズの軸方向および軸直角方向ばね定数の測定状況を代表例として示す。

(3) 判定基準

参考値とする。

3.1.2 応力測定試験

(1) 目的

本試験は3.1.1のばね定数測定試験を補足するものであり、具体的には、ばね定数測定時に各山の応力分布を測定し計算値との比較を行い計算式の妥当性を確認する。さらに本試験により、実機用溶接ベローズの強度評価の妥当性の確認を行うものとする。

(2) 試験方法

本試験は3.1.1のばね定数測定試験を補足するものであり、ばね定数測定試験と同時に進行し、試験方法も全く同一である。

ベローズの所定位置に歪ゲージを貼付し、所定変位量での歪みを静歪み計にて測定する。V, SLおよびNBIベローズの歪ゲージ貼付位置の詳細をFig. 3, 4および5に示す。ここで表の各数値は図中のh(外周からの長さ)を表わす。

(3) 判定基準

参考値とする。

3.1.3 寿命試験

(1) 目的

本試験の目的は、JT-60真空容器の設計から定まる溶接ベローズの疲労評価プログラムに従い、実機用溶接ベローズが寿命中に受ける全荷重(強制変位、捩り負荷変位、真空力)を与えることによりベローズの耐久性を確認するとともに、実機ベローズの疲労評価の妥当性を確認することにある。

本試験は、内部真空、常温の条件の下で実施し、完了後にヘリウム・リーク試験を実施し健全性の確認を行うものとする。

(2) 試験方法

寿命試験装置の概要をFig. 6に示す。軸方向の駆動は油圧により、軸直角方向および捩りの駆動は空気圧により行う。変位は振幅中心位置にプリ・セットし、その位置を基準に振幅量を定める。振幅の設定は、軸方向の場合にはFig. 6に示すリミット・スイッチLS₁, LS₂の位置調整により行い、軸直角方向の場合にはFig. 6に示すストップアンドリミット・スイッチLS₃, LS₄により行う。また、捩り角度の設定は、オフセット位置に固定後ストップアンドリミット・スイッチLS₅, LS₆の位置調整により行う。溶接ベローズの内部は、同図中HLDで示すヘリウム・リーク・ディテクタの排気系および同図中RPで示す粗引用油回転ポンプにより真空排気される。

寿命試験の荷重条件および疲労評価プログラムをTable 6およびFig. 7にまとめる。

シリンダの移動量はダイヤル・ゲージにて常時確認し、繰返し数はカウンタにより計数される。また、真空圧力はピラニ真空ゲージVGにより監視され、10⁻²Torrを下限値として圧力がこの値を上回る場合にはベローズが破断に至ったと判断し疲労サイクルを停止するようシーケンスが組まれている。

Photo. 3には寿命試験機の全景を、Photo. 4, 5および6にはV, SLおよびNBIベローズの寿命試験状況を示す。

(3) 判定条件

寿命試験完了後外観に異常がなく、かつ3.2.1に示すヘリウム・リーク試験を行いその判定基準に合格すること。

3.1.4 耐圧試験

(1) 目的

本試験の目的は、ベローズに外圧 (1.0 kg/cm^2 および 1.5 kg/cm^2) を加えても、ベローズに大変形損傷がなく、ベローズが十分な強度裕度を有していることを確認することである。

本試験は3.1.1～3.1.3、3.2.1～3.2.2および3.3.1の6項目の試験終了後に行い、本試験完了後にヘリウム・リーク試験を実施し健全性の確認を行うものとする。

(2) 試験方法

Fig. 8に耐圧試験の概要を示す。補強ビームにより支持された供試ベローズを圧力容器内に設置し、圧力容器内へ窒素ガスを導入する事により溶接ベローズに外圧を与える。

外圧 1.0 kg/cm^2 の場合は、3.1.2の応力測定試験および3.1.3の寿命試験において内部真空状態における試験を実施しその健全性が確認されるため省略し、外圧 1.5 kg/cm^2 の場合についてのみ実施する。大気圧中でベローズをセット長に設定し、圧力容器内へ窒素ガスを $1.5 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ まで封入しながら、監視ポートから溶接ベローズの挙動を観察する。外圧 $1.5 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ の状態で30分間放置後圧力容器から取り出し試験後検査に供する。

耐圧試験の外観をPhoto. 7に示す。

(3) 判定条件

耐圧試験終了後外観に異常がなく、かつ3.2.1に示すヘリウム・リーク試験を行いその判定基準に合格すること。

3.2 真空性能試験

3.2.1 ヘリウム・リーク試験

(1) 目的

本試験は、溶接ベローズが真空容器の真空性能を劣化させることがないことを確認するために行う試験のうちヘリウム・リーク試験に関するものであり、供試溶接ベローズのヘリウム・リーク量が許容値以下であることを確認することが目的である。

さらに、3.1.3、3.1.4および3.3.1に記す寿命試験、耐圧試験および熱サイクル試験後の溶接ベローズの健全性を確認する目的でも本試験を実施する。

(2) 試験方法

本試験のダイヤグラムをFig. 9に示す。供試ベローズをFig. 9に示す如く真空系にセットし、到達真空圧力を真空ゲージ (Fig. 9中VGで示す) によりモニタしながら被検査品を 250°C 以上の温度条件でベーキングする。 10^{-5} Torr 以下の到達真空圧力が確認されれば、真空を破らずに被検査品を室温状態に戻し標準リーク (同図中SLで示す) にてリーク・ディテクタ (同図中HLDで示す) の検出可能リーク量を求める。検出可能リーク量Qは

$$Q = \frac{q}{DM} \quad (3)$$

で示される。ここで、 q 、 M および D は、標準リークのもれ量、倍率器の倍率およびリーク・レート・メータの読み値を示す。被検査品のヘリウム・リーク量 Q' は、これにフードを被せ、フード内にヘリウム・ガスを充満させた状態におけるリーク・レート・メータの振れ D' および倍率器の倍率 M' を読むことにより

$$Q' = Q M' D' \quad (4)$$

で与えられる。

試験条件をまとめると下記の通りである。

到達真空力	10^{-5} Torr 以下
検査方法	フード法
検出感度	ディテクタの最高検出感度は 1×10^{-9} Torr · ℓ/sec (保証), 5×10^{-10} Torr · ℓ/sec (目標) とする
検査温度	常温
ベーキング	250 °C 以上

(3) 判定基準

ヘリウム・リーク量が 1×10^{-9} Torr · ℓ/sec 以下 (保証), 5×10^{-10} Torr · ℓ/sec 以下 (目標) であること。

3.2.2 放出ガス速度測定試験

(1) 目的

本試験は、溶接ベローズが真空容器の真空性能を劣化させることがないことを確認するために行う試験のうち放出ガス速度に関するものである。すなわち、溶接ベローズに熱サイクルを加え、熱サイクル後における放出ガス速度を測定し仕様を満たすことを確認することが本試験の目的である。

(2) 試験方法

本試験のダイヤグラムを Fig. 10 に示す。供試用溶接ベローズはアセトンにより十分洗浄された後の両端に盲板および真空バルブ付の板（いずれも材質は SUS 304）を溶接し、再度アセトンで洗浄された後架台にセットし、真空排気系、ヒータおよび温度制御系を取り付け。真空排気にはターボ分子ポンプ（Fig. 10 中 TMP で示す。排気速度は V 用 $520 \ell/\text{sec}$, SL 用 $270 \ell/\text{sec}$, NBI 用 $100 \ell/\text{sec}$ ）を使用し、真空圧力 10^{-6} Torr 程度まで排気して熱サイクルを与える前の放出ガス速度を測定する。放出ガス速度の測定はバルブ（同図中 V で示す）を閉じることによりビルトアップ法で行う。次いで、一定温度に保ったヒーターをベローズの上端に被せ、規定の温度に上昇、保持を行い、引き続いて強制空冷により規定温度まで冷却するという熱サイクルを規定回数繰り返す。その後本真空系全体を 250°C 以上にベーキングし、次いで常温に冷却して熱サイクル後の放出ガス速度の測定を行う。

放出ガス速度 q は真空圧力と時間との関係を示す測定チャートより

$$q = \frac{V}{s} \cdot \frac{dP}{dt} \quad (5)$$

で求める。ここで、 V 、 s および dP/dt は、 内容積、 内表面積およびビルドアップ時の単位時間当たりの圧力上昇を示す。

熱サイクルの条件（最高温度、 最低温度およびサイクル数）と表面処理方法を Table 9 にまとめる。なお、本熱サイクルは、 ベローズの一端が常に常温で他端に温度サイクルを与えるという温度勾配が最も苛酷な条件で与えられるが、 それ以外にもベローズ全体をほぼ均一な温度になる様にして規定の温度サイクルを与えるという試験を各ベローズについて 3 サイクル追加する。これは、 ベローズの各山が全て数回以上の熱サイクルを受けるようにとの配慮から行われるものである。

放出ガス速度測定時には参考値として四重極管質量分析計（同図中 QMA で示す）により残留ガスの組成分析も行うものとする。

Photo. 8 および 9 には、 SL ベローズの放出ガス速度測定試験状況および V ベローズのベーキング時の状況を示す。

(3) 判定条件

放出ガス速度は 1×10^{-11} Torr · $\ell/\text{sec} \cdot \text{cm}^2$ 以下であること。

3.3 熱的性能試験

3.3.1 热サイクル試験

(1) 目的

本試験の目的は、 実機溶接ベローズの熱的仕様に基づき供試用溶接ベローズに熱サイクルを与え、 その耐久性を確認することにある。本試験は 3.2.2 の放出ガス速度測定試験と同時にを行うものとする。

(2) 試験方法

本試験は、 3.2.2 で示す放出ガス速度測定試験において溶接ベローズに与えられる熱サイクルに対するその耐久性を確認するのが目的であるので、 試験方法は 3.2.2 と全く同様である。すなわち、 Table 9 でまとめる熱サイクルを溶接ベローズに与えた後、 外観検査およびヘリウム・リーク試験を行い溶接ベローズの耐久性を確認する。

(3) 判定基準

熱サイクルによる著しい変形等がなく、 かつ 3.2.1 に示すヘリウム・リーク試験を行いその判定基準に合格すること。

Table 9 Specifications of the thermal cycle and the surface treatment for the welded bellows.

		NBI	SL	V
Baking	Max. temperature (°C)	250 ± 20	520 ± 20	250 ± 20
	Min. temperature (°C)	R.T.	R.T.	R.T.
	Cycle	200	200	200
Surface treatment		Aceton rinse		

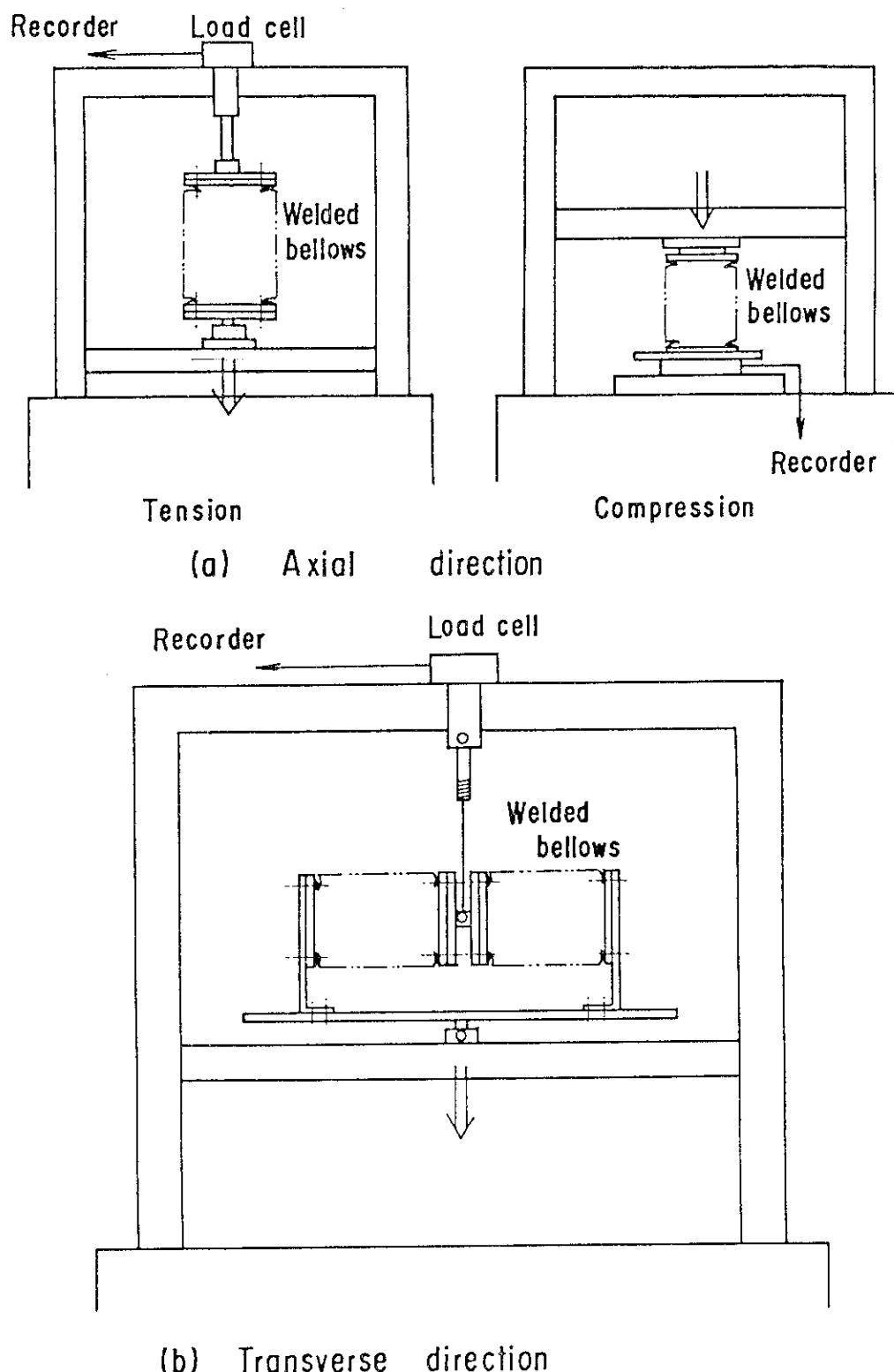


Fig. 2 Outline of the spring constant measurement in the (a) axial and (b) transverse directions.

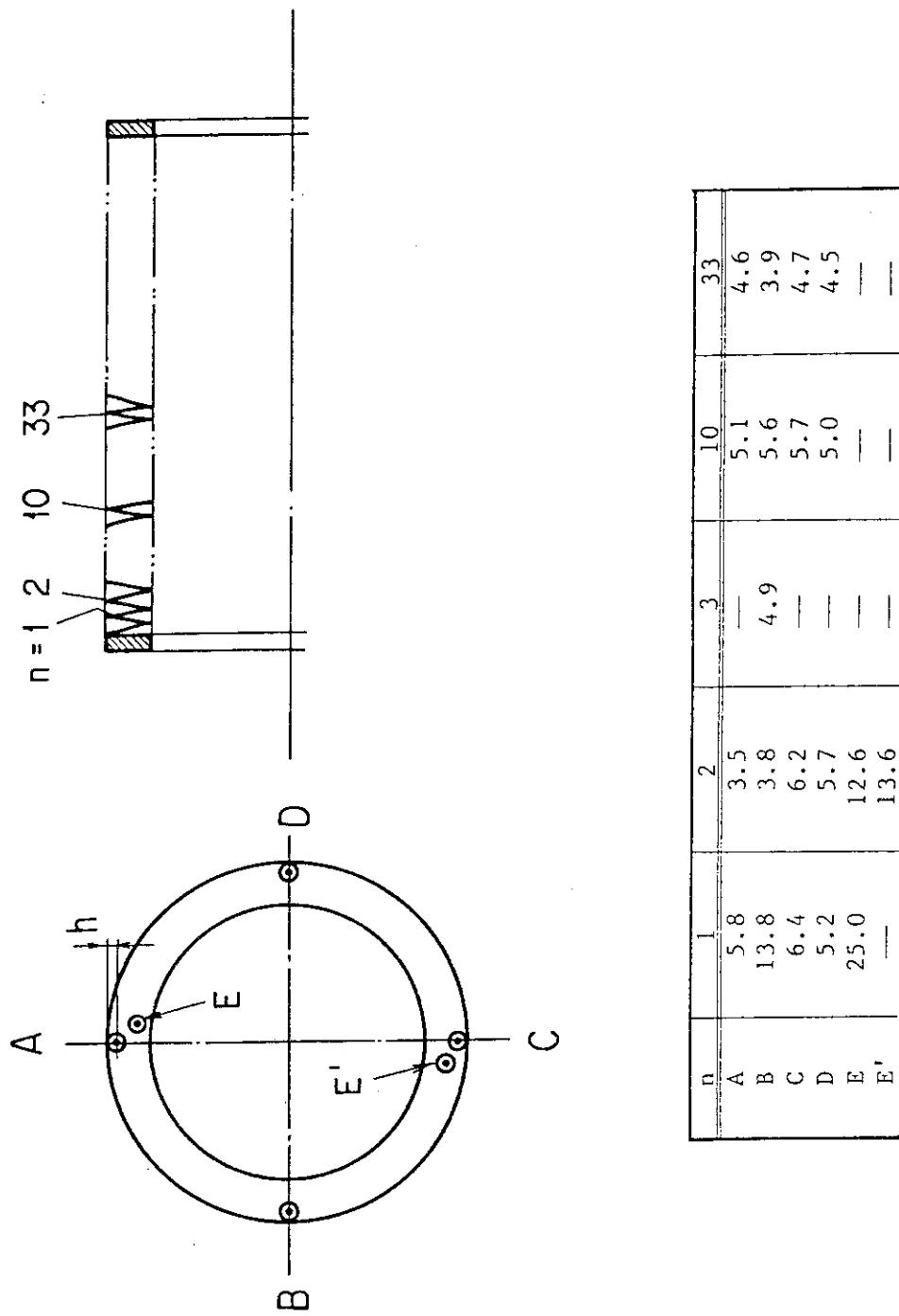
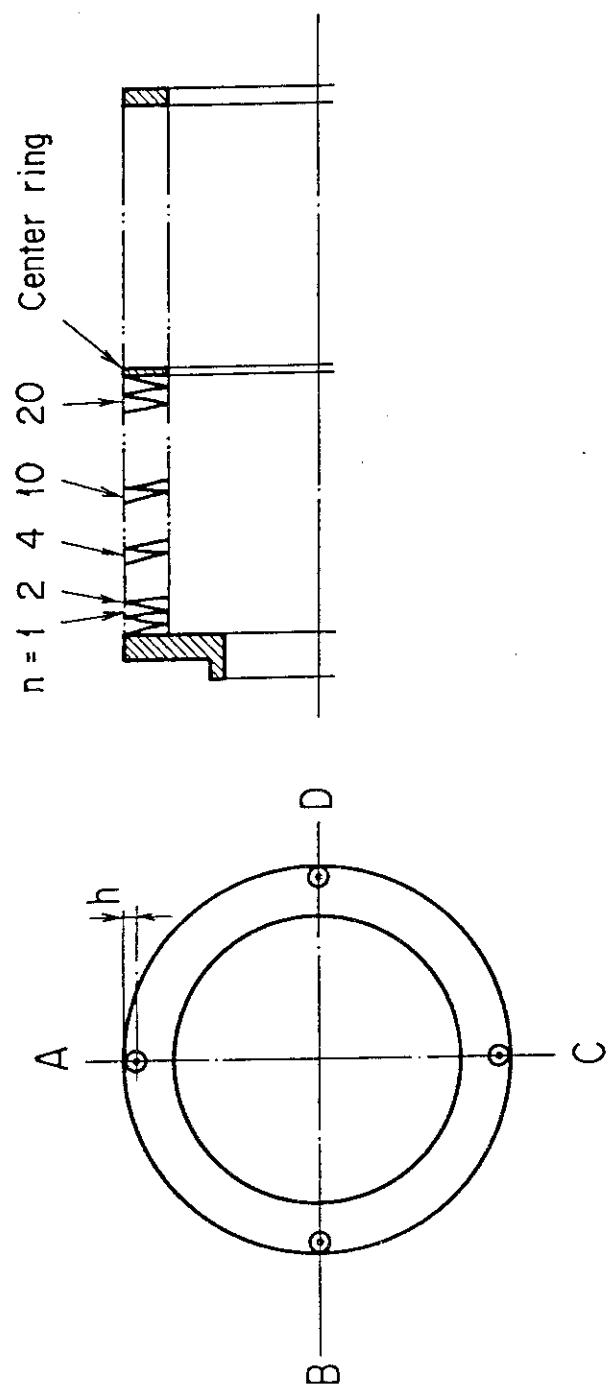
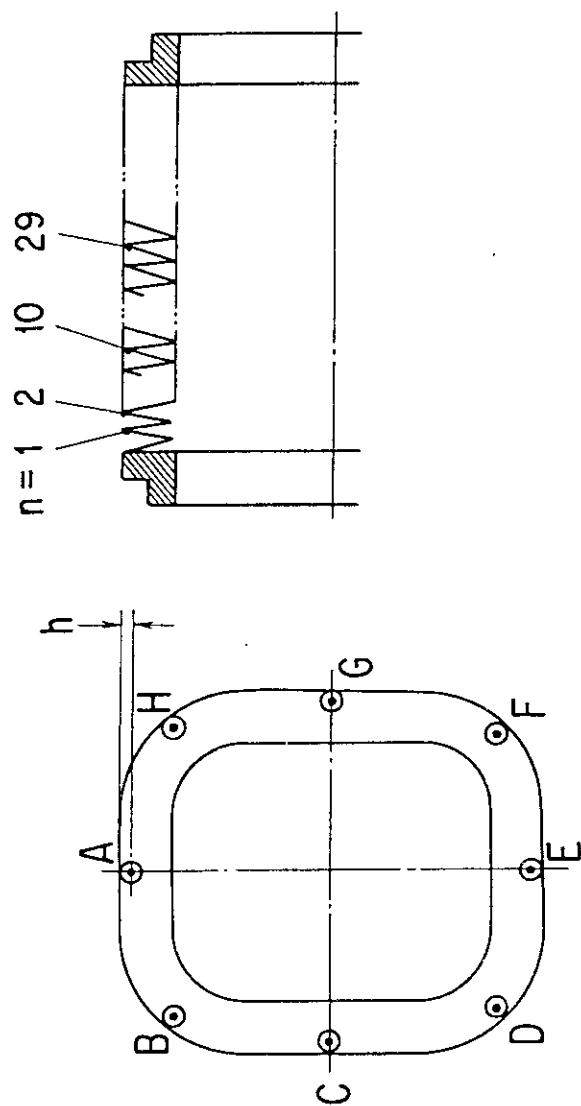


Fig. 3 Location of the strain gauge attachment for V bellows.



n	1	2	4	10	20
A	5.0 (5.1)	4.8	5.1	3.6	3.5
B	4.1	4.0	6.5	4.1 (3.5)	5.4 (2.4)
C	5.1	2.0	—	3.2 (3.5)	4.8
D	6.9	3.7 (3.2)	—	4.0	6.3

Fig. 4 Location of the strain gauge attachment for SL bellows.



n	1	2	10	29
A	2.5	3.0	3.0	2.5
B	3.0	3.0	3.0	3.0
C	3.0	2.5	2.5	3.0
D	2.5	3.0	3.0	2.0
E	2.5	3.0	3.0	3.0
F	2.0	2.5	2.0	2.0
G	2.0	2.5	2.5	2.0
H	2.0	3.0	2.0	2.0

Fig. 5 Location of the strain gauge attachment for NBI bellows.

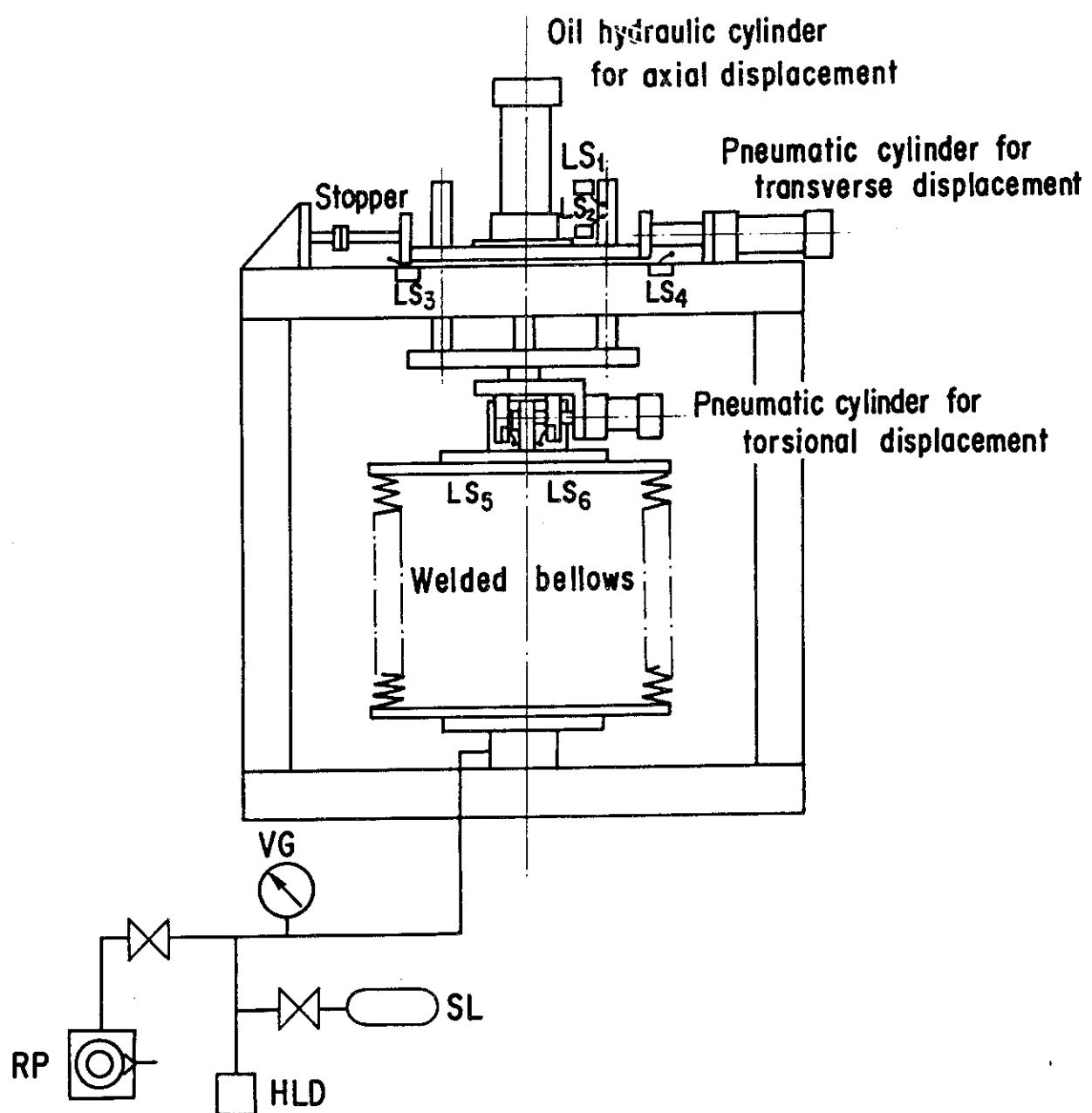


Fig. 6 Block diagram for the life test.

Deflection

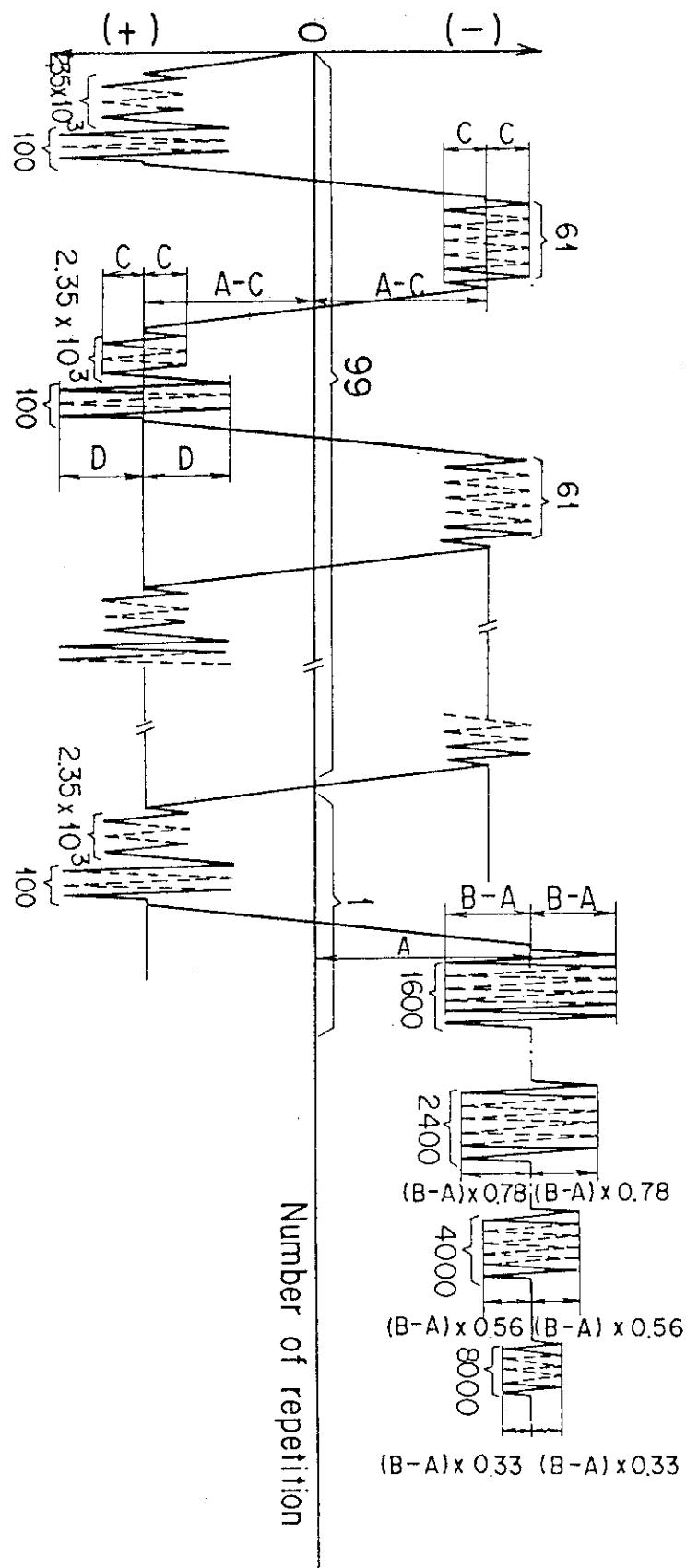


Fig. 7 Fatigue cycle program for the life test.

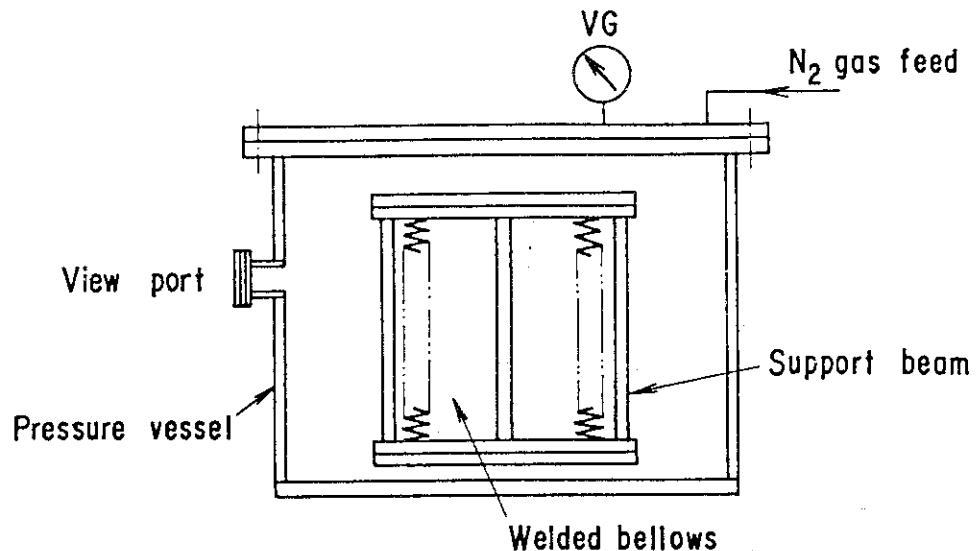


Fig. 8 Outline of the pressure test.

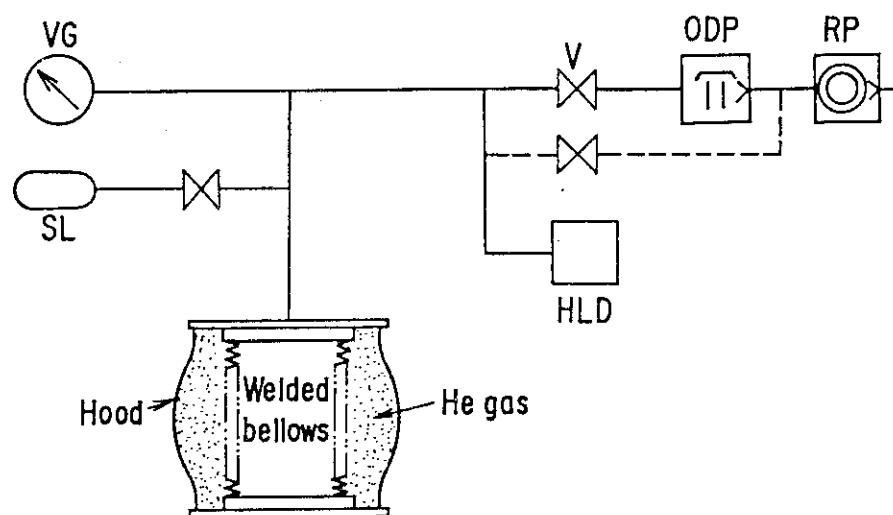


Fig. 9 Block diagram for the Helium leak detection.

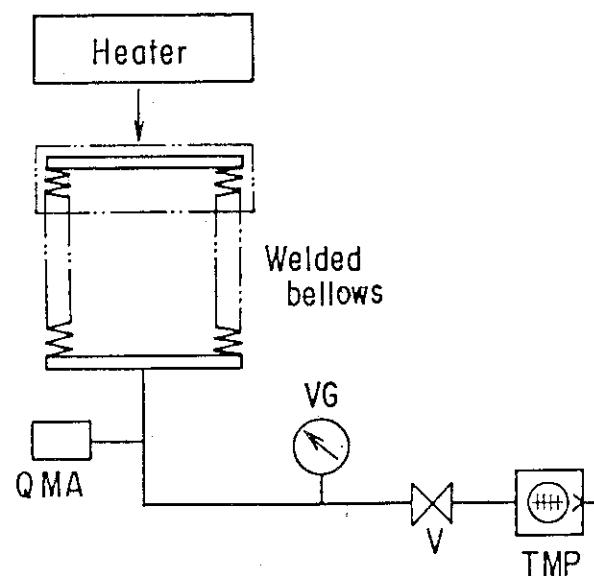


Fig. 10 Block diagram for the outgassing rate measurement test.

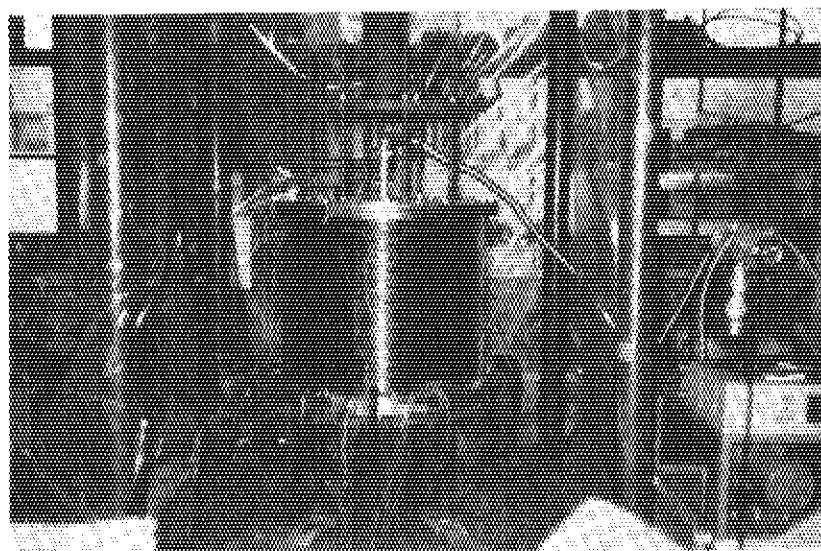


Photo. 1 View of the experimental setup for the axial spring constant measurement of V bellows.

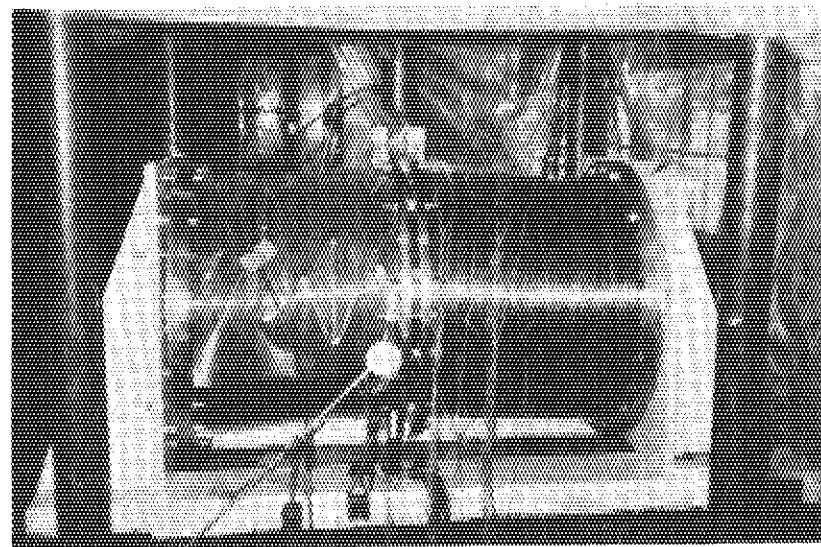


Photo. 2 View of the experimental setup for the transverse spring constant measurement of V bellows.

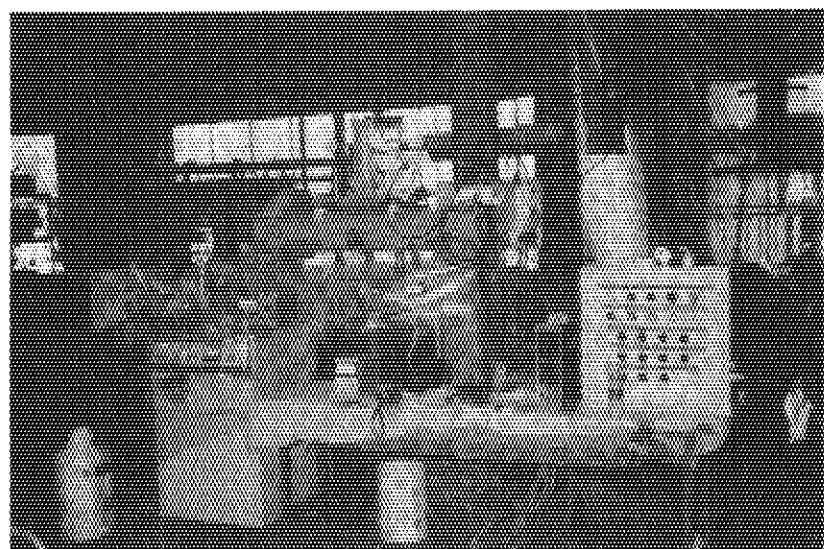


Photo. 3 View of the experimental setup for the life test.

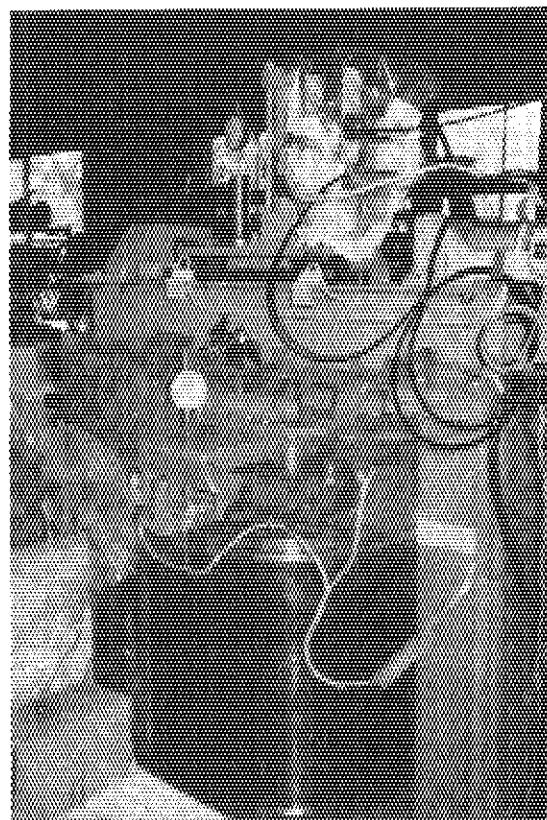


Photo. 4 V bellows under the life test.

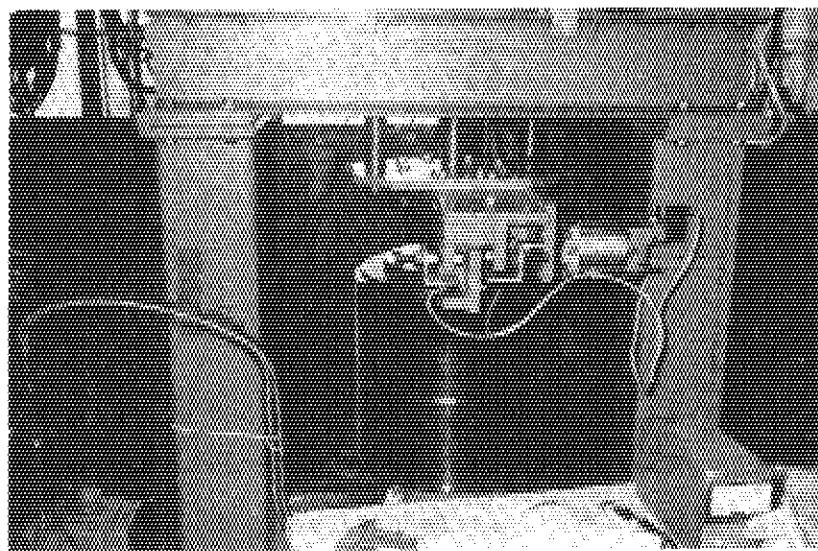


Photo. 5 SL bellows under the life test.

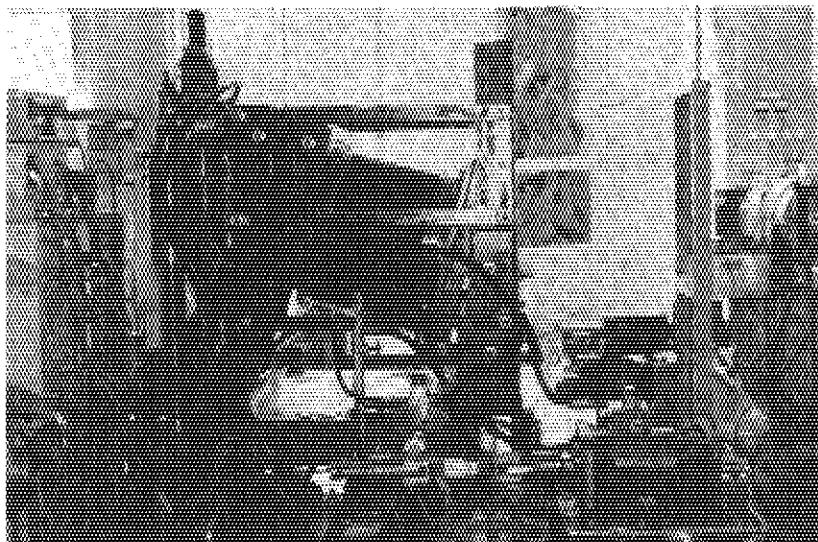


Photo. 6 NBI bellows under the life test.

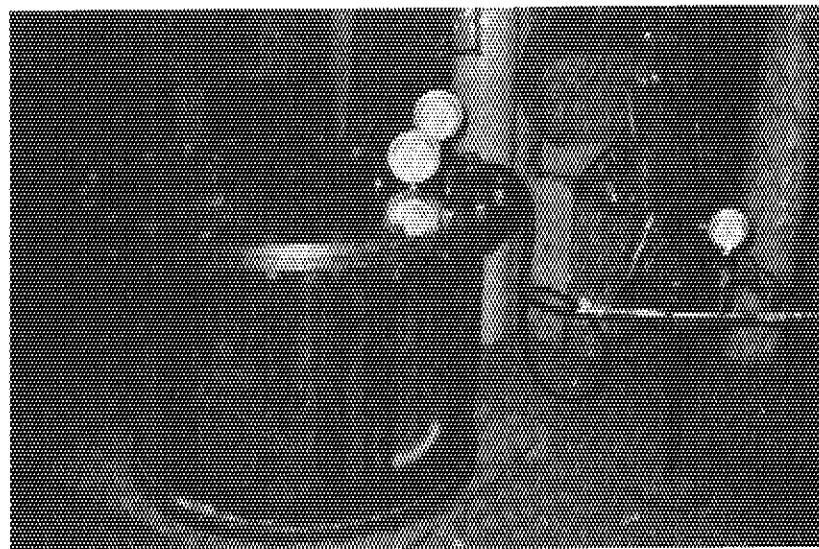


Photo. 7 View of the experimental setup for the pressure test.

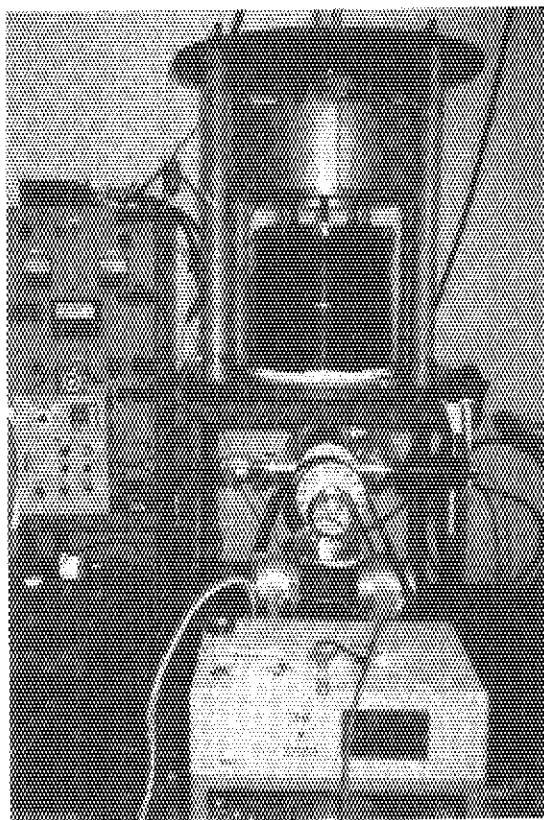


Photo. 8 View of the experimental setup for the outgassing rate measurement of SL bellows.

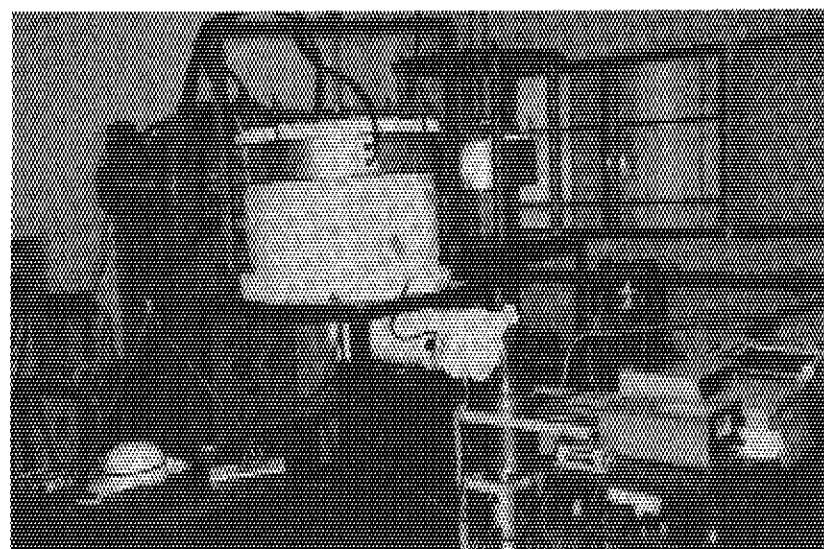


Photo. 9 V bellows under baking at the temperature over 250°C.

4. 形式試験結果および検討

4.1 機械的性能試験

4.1.1 ばね定数測定試験

測定された軸方向および軸直角方向ばね定数をTable 10 にまとめる。また、Fig. 11およびFig. 12には代表例としてNBI ベローズの軸方向および軸直角方向ばね定数の測定結果を図示する。Table 10 には次式から算出される計算値もあわせて示す。

$$K_{\parallel} = \frac{\pi E}{2n} \left(\frac{t}{h_o} \right)^3 \frac{R_o}{R_i} (R_o + R_i) \alpha \quad (6)$$

$$K_{\perp} = \frac{3 D_m^2}{2 L^2} K_{\parallel} \quad (7)$$

ここで、

t : 板厚 (mm) L : 軸方向全長 (mm)

h_o : 山高さ (mm) E : ヤング率 (kg/mm^2)

R_o : 外半径 (mm) n : 山数

R_i : 内半径 (mm) α : 形状係数

D_m : 平均直径 = $R_o + R_i$ (mm)

である。また、 α は材料等により定まる経験的な係数であり、本ベローズに対しては 1.15 である。

Table 10 からわかる様に計算値は実測値より大きい目の値を示すが、その誤差は高々 30% 程度であり、計算式は妥当であると判断される。

4.1.2 応力測定試験

本試験において、歪ゲージはFig. 3, 4 および 5 に示す通り外周から数 mm 内周側へ入った位置に添付されているのに対し、ビーム理論から算出される計算値は外周部における最大値で整理されるため、測定値を外周部ビード端における値に換算する必要がある。

Fig. 13, 14 および 15 はベローズ内部が大気圧の状態における軸方向変位に対する歪み ε と測定点 (ベローズ外周からの距離 h) の関係を、軸方向変位量 δ_z をパラメータに示したものである。この場合、ビーム理論より ε は h の一次関数であり、最小 2 乗法による最適直線を求め、それを外挿することにより外周側ビード端における歪みを求め、ヤング率を乗じることにより当該部の応力値の推定を行っている。なお、同図中には繁雑さを避けるために実測データの一部が省略してあり、V ベローズでは $\delta_z = 50, 20, -20$ および -50 mm の場合、SL ベローズでは $\delta_z = 40, 20, -20$ および -40 mm の場合、NBI ベローズでは $\delta_z = 50, 30, 10,$

- 10, - 30 および - 50 mm の場合についてのみ示されている。

同様に、ベローズ内部が真空の状態における軸方向変位に対する歪み ϵ と測定点 h の関係を軸方向変位量 δ_z をパラメータに示したのが Fig. 16, 17 および 18 である。この場合、ビーム理論により ϵ は h の二次関数であり、最小2乗法による最適曲線を求め、それを外挿することにより外周部ビード端における歪みおよび応力値を推定している。ここでも、Fig. 13 等と同様に実測データの一部が省略されている。

以上より求められた外周部ビード端における応力（軸方向曲げ応力 σ_r ）と軸方向変位 δ_z の関係を示したのが Fig. 19 および 20 であり、前者はベローズ内部大気圧の状態であり後者はベローズ内部真空の状態である。図中の各プロット点は測定値であり、直線はビーム理論から求まる理論式である。すなわち、軸方向変位 δ_z による軸方向曲げ応力 σ_r は

$$\sigma_r = \frac{3Et}{2h_e^2} \cdot \frac{\delta_z}{n} \quad (8)$$

で求められ、また真空力 P による軸方向曲げ応力 σ_{rp} は、円形断面を有する V および SL ベローズについては

$$\sigma_{rp} = \frac{Ph_e^2}{2t^2} \quad (9)$$

で非円形断面を有する NBI ベローズについては

$$\sigma_{rp} = \frac{6M}{t h_e^2} \quad (10)$$

$$M = \frac{\frac{\ell_x^2}{2} \left(\frac{\ell_x}{12} + \frac{\pi r_m}{4} + \frac{\ell_y}{4} + \frac{\ell_y r_m}{l_x} \right) + r_m^2 \left(\ell_x + \ell_y - \frac{\pi}{2} \ell_y \right) - \frac{\ell_y^2}{2} \left(r_m + \frac{\ell_y}{6} \right)}{\ell_x + \ell_y + \pi r_m}$$

で求められる。ここで、 h_e は山高さ h からビード端部を除いた有効山高さであり、 ℓ_x , ℓ_y , r_m は Fig. 21 に示す部位長である。

軸方向変位のみによる応力実測値は Fig. 19 からわかる通り計算値と良い一致を示しており、その誤差は高々 20 % 程度である。これらの誤差の原因としては、素材の板厚のばらつき（素材の購入仕様で定められている板厚公差は ±10 % であり、実績は ±8 % 以下）や有効山高さのばらつき（実績で ±5 % 以下）が考えられるが、(8)式を設計に用いる点に関しては全く問題がないものと思われる。

また、内部真空の状態における軸方向変位と応力値の関係を示す Fig. 20 においても、計算値と実測値の誤差は高々 20 % 程度であり良い一致を示している。この図から真空力のみによる発生応力をとり出すと（ $\delta_z = 0$ の応力），計算値と実測値は 20 % 程度の誤差で良く一致しており、(9)式および(10)式も十分な精度を有している。

軸直角方向変位については、ビーム理論による測定歪み ϵ が測定点 h に逆比例することから、測定歪み ϵ から外周部ビード端における歪み ϵ' を算出し、これから応力値を求めた。

$$\varepsilon' = \varepsilon \left(\frac{h_o}{2} - W \right) / \left(\frac{h_o}{2} - h \right) \quad (11)$$

ここで、Wは外周部のビード幅を示す。上式に従って求められた1山目の軸方向曲げ応力 σ_r と軸直角方向変位量 δ_r の関係を示したのがFig. 22である。ここで、各プロット点は実測データを示し、直線は下式により求められる計算値を示す。

$$\sigma_r = \frac{3E t}{2h_e^2} \cdot \frac{3D_m}{L} \cdot \frac{\delta_r}{n} \quad (12)$$

ここで、 D_m は前出の平均直径であるが、非円形断面を有するNBIベローズについては

$$D_m = 2r_m + \ell_x \cos \theta + \ell_y \sin \theta \quad (13)$$

で算出される有効径を用いる。ここで、 r_m 、 ℓ_x 、 ℓ_y および θ はFig. 21に示す寸法を表わす。ここではx、y軸方向の応力値を表わすから、各々の有効径は

$$D_{mx} = 2r_m + \ell_x \quad (14)$$

$$D_{my} = 2r_m + \ell_y \quad (15)$$

で求められる。

Fig. 22から明らかな様に、軸直角方向変位とベローズ第1山目に生じる軸方向曲げ応力の最大値についても、計算値と実測値は良い一致を示し、その誤差は高々20%程度である。

Fig. 23には、軸直角方向変位 δ_r が+30 mmの状態における軸方向曲げ歪 ε と山数nの関係を示したものであるが、いずれも最大歪は第1山目に生じており、山数が増すに従って発生歪はほぼ n^{-1} に比例して減少している。これからも、軸直角方向変位による軸方向曲げ応力の評価式が妥当である事が示される。

以上の応力測定試験の結果より、軸方向変位、軸直角方向変位および真空力に対する最大発生応力（軸方向曲げ応力）の評価式は、いずれも実測値と20%程度の誤差で良く一致しており、十分な精度で設計に用い得る事が示された。

なお、捩り荷重に対する発生応力の評価に関しては、別途実施した捩り疲労強度確認試験において詳細な検討が為されており、下記の結論を得ている。⁽¹⁰⁾

- ① 溶接ベローズは微少な捩り角を与えただけで容易に弾性座屈を起こしスパイラル状の大変形を呈する。
- ② 座屈限界捩り角の正確な値は実験精度の関係から求められなかったが、概ね0.1°以下の微少角である。
- ③ 従来溶接ベローズに捩り荷重を与えると容易に破壊に至ると信じられてきたが、捩り角が過度にならない限り捩り荷重が容易に溶接ベローズの破断に至らしめることはなく、溶接ベローズは十分長い捩り疲労寿命を有していることがわかった。
- ④ 捘り荷重が作用する場合に溶接ベローズに生じる応力を評価するため2つの応力評価式

を作成した。すなわち、座屈しない場合の剪断応力 τ 評価式

$$\tau = \frac{G \theta}{2 n K (1 - K)} \quad (16)$$

と座屈する場合の軸方向曲げ応力 σ_b 評価式

$$\sigma_b = \frac{12 E t D_m}{n h_o^2} \xi \theta^{0.5} \quad (17)$$

である。ここで各記号は下記を表わす。

G ; 横弾性係数 (kg/mm²)

K ; 内・外径比 $K \equiv R_i / R_o$

θ ; 摆り角 (rad)

ξ ; 補正係数

- ⑤ 摆り角が座屈限界揃り角よりはるかに大きい低サイクル疲労領域（典型的には～5°）では、軸方向曲げ応力評価式が剪断応力評価式よりベローズの実際の挙動をより適切に模擬しており、一方、揃り角が座屈限界揃り角の近傍である高サイクル疲労領域（典型的には～2°）では逆の傾向を示す。
- ⑥ 従って、構造強度設計の立場からは低サイクル疲労領域では軸方向曲げ応力評価式が、また逆に高サイクル疲労評価領域では剪断応力評価式が合理的な範囲で安全側の評価となっている。

4.1.3 寿命試験

寿命試験の結果、3種類の溶接ベローズにはいずれも外観上の異常は見い出されず、また寿命試験終了後のヘリウム・リーク試験の結果もTable 11に示す如くいずれも保証値を下回っていることから、設計荷重に対する本溶接ベローズの耐久性が示された。

なお、強度設計からも、Table 12に示す如く設計荷重に対する3種類のベローズの耐久性が確認されている。⁽¹²⁾ここで、(a)は揃り荷重に対する応力評価を(17)式の軸方向曲げ応力評価式に依った場合であり(b)は(16)式の剪断応力評価式に依った場合である。

4.1.4 耐圧試験

耐圧試験の結果、3種類の溶接ベローズには変形や座屈などの異常は見い出されず、また耐圧試験終了後のヘリウム・リーク試験の結果もTable 11に示す如くいずれも保証値を下回っており、設計外圧に対する本溶接ベローズの十分な安全裕度が確認された。

4.2 真空性能試験

4.2.1 ヘリウム・リーク試験

形式試験用溶接ベローズの製作完成後、寿命試験後および耐圧試験後において実施したヘリ

ウム・リーク試験の結果をTable 12にまとめる。また、Fig. 24および25には本形式試験の最終試験項目である耐圧試験終了後に実施したヘリウム・リーク試験の測定チャートの一例を示す。最も大型であるNBIベローズがSL, Vベローズに比して検出感度がやや悪いが、いずれも保証値より高い検出感度が得られ、リークは検出されなかった。

Table 8には、参考として実機用および形式試験用の全てのベローズのベーキング後のリーク試験の結果をまとめてあり、全てのベローズが保証値を上回っている。

4.2.2 放出ガス速度測定試験

放出ガス速度測定前に供試ベローズに与えた熱サイクルの温度履歴とそれに伴う真空度の変化の一例を、SLおよびVベローズについてFig. 26および27に示す。

Table 13には熱サイクル前後で測定された放出ガス速度の結果をまとめる。各供試ベローズは湯洗およびフレオノン蒸気洗浄にて清浄されて本試験に供されてはいるが、Table 13中のベーキング前の放出ガス速度の測定結果を見ると洗浄が不十分であったことがわかる。しかし、200回の熱サイクルおよび最終ベーキングにより系は十分清浄にされたものと思われ、最終的な測定結果は保証値を十分下回る良好なものであった。参考のため、ベーキング後の放出ガス速度測定時のチャートの例をSLおよびVベローズについてFig. 28および29に示す。

放出ガス速度測定の対象は、厳密には溶接ベローズのみでなく盲ブタや配管系も含まれている。Table 14には測定系の表面積および容積に対する溶接ベローズとそれ以外の系の寄与を示すが、盲ブタや配管系が全表面積に占める割合は高々10%であり、本放出ガス速度測定結果はこの程度安全側の評価になっている。

Fig. 30からFig. 33には熱サイクル前後における残留ガス分析の結果の例を各ベローズについて示す。これからも、熱サイクル前には水が圧倒的であり、炭化水素系も顕著であり、系の内面の洗浄が不十分であることがわかる。ベーキング中の残留ガス分析の結果では、これらが放出されている状態が確認されている。熱サイクル後の残留ガス分析の結果からは、ガスの組成は大部分の水素と少量の水であり、ターボ分子ポンプ排気状態における一般的なガス組成となっており十分清浄な表面が達成されたものと思われる。

ちなみに、インコネル625の小サンプル($\phi 200 \times 300 \ell$)による放出ガス速度の実験室データでは、湯洗、フレオノン蒸気洗浄およびベーキング(500°C, 200時間)後で 8×10^{-13} Torr · ℓ / sec · cm²⁽¹³⁾が得られているが、本試験において得られた値はこの実験室データに匹敵する良好なものである。

4.3 热的性能試験

4.3.1 热サイクル試験

本試験の結果、3種類の溶接ベローズにはいずれも外観上の異常は見い出されず、また試験後に実施したヘリウム・リーク試験の結果(熱サイクル試験の次に実施した寿命試験後のヘリウム・リーク試験で代替)もTable 11に示す如くいずれも保証値を下回っており、設計熱サイクルに対する本溶接ベローズの耐久性が示された。

Table 10 Result of the spring constant measurement test.
(kg/mm)

Bellows	Direction	Cal.	Meas.
SL	Axial	0.34	0.36
	Transverse	0.49	0.57
V	Axial	0.44	0.56
	Transverse	0.89	1.20
NBI	Axial	1.03	1.33
	Transverse	x*	4.19
		y*	3.45
			4.39

* x and y directions are shown in Fig. 22.

Table 11 Result of the Helium leak test of the type-test welded bellows before type test, after life test and after pressure test.

		Sensitivity of detector (Torr·l/sec)	Leak rate (Torr·l/sec)	Judgement*
NBI	Before type test	7.60×10^{-10}	$< 7.60 \times 10^{-10}$	Acceptable
	After life test	6.50×10^{-10}	$< 6.50 \times 10^{-10}$	Acceptable
	After pressure test	4.98×10^{-10}	$< 4.98 \times 10^{-10}$	Acceptable
SL	Before type test	1.42×10^{-10}	$< 1.42 \times 10^{-10}$	Acceptable
	After life test	8.39×10^{-11}	$< 8.39 \times 10^{-11}$	Acceptable
	After pressure test	8.61×10^{-11}	$< 8.61 \times 10^{-11}$	Acceptable
V	Before type test	1.47×10^{-10}	$< 1.47 \times 10^{-10}$	Acceptable
	After life test	1.37×10^{-10}	$< 1.37 \times 10^{-10}$	Acceptable
	After pressure test	7.95×10^{-11}	$< 7.95 \times 10^{-11}$	Acceptable

* Specification; 1×10^{-9} Torr·l/sec (guaranteed)

5×10^{-10} Torr·l/sec (as target)

Table 12 Result of the fatigue evaluation.

	Load condition	Equivalent stress amplitude σ_{eq} (kg/mm ²)	Designed number of cycles n_i applied at σ_{eq}	Number of stress cycles to failure N_i at stress σ_{eq}	Usage factor $U_i = n_i/N_i$	Cumulative usage factor $U = \sum U_i$	
V	(a)	Thermal cycle	3.42	9.900E 01	1.000E 07	9.88E-06	
		A	4.54	6.039E 03	1.000E 07	6.03E-04	
		B1	4.92	1.600E 03	1.000E 07	1.60E-04	
		B2	3.90	2.400E 03	1.000E 07	2.40E-04	
		B3	2.84	4.000E 03	1.000E 07	3.99E-04	
		B4	1.75	8.000E 03	1.000E 07	7.98E-04	
		C	5.81	2.350E 05	1.000E 07	2.35E-02	
		D	13.60	1.000E 04	1.000E 07	1.00E-03	
	(b)	Thermal cycle	3.42	9.900E 01	1.000E 07	9.88E-06	
		A	4.54	6.039E 03	1.000E 07	6.03E-04	
SL	(a)	Thermal cycle	8.32	9.900E 01	1.000E 07	9.88E-06	
		A	5.20	6.039E 03	1.000E 07	6.03E-04	
		B1	6.45	1.600E 03	1.000E 07	1.60E-04	
		B2	5.14	2.400E 03	1.000E 07	2.40E-04	
		B3	3.77	4.000E 03	1.000E 07	3.99E-04	
		B4	2.34	8.000E 03	1.000E 07	7.98E-04	
		C	5.89	2.350E 05	1.000E 07	2.35E-02	
		D	12.64	1.000E 04	1.000E 07	1.00E-03	
	(b)	Thermal cycle	8.32	9.900E 01	1.000E 07	9.88E-06	
		A	5.20	6.039E 03	1.000E 07	6.03E-04	
NBI	(a)	Thermal cycle	10.85	9.900E 01	1.000E 07	9.88E-06	
		A	14.26	6.039E 03	1.000E 07	6.03E-04	
		B1	12.66	1.600E 03	1.000E 07	1.60E-04	
		B2	10.28	2.400E 03	1.000E 07	2.40E-04	
		B3	7.70	4.000E 03	1.000E 07	3.99E-04	
		B4	4.88	8.000E 03	1.000E 07	7.98E-04	
		C	18.50	2.350E 05	6.606E 06	3.56E-02	
		D	22.45	1.000E 04	1.400E 06	7.14E-03	
	(b)	Thermal cycle	10.85	9.900E 01	1.000E 07	9.88E-06	
		A	14.26	6.039E 03	1.000E 07	6.03E-04	
		B1	12.66	1.600E 03	1.000E 07	1.60E-04	
		B2	10.28	2.400E 03	1.000E 07	2.40E-04	
		B3	7.70	4.000E 03	1.000E 07	3.99E-04	
		B4	4.88	8.000E 03	1.000E 07	7.98E-04	
		C	18.50	2.350E 05	6.606E 06	3.56E-02	
		D	18.00	1.000E 04	8.000E 06	1.25E-03	

Table 13 Result of the outgassing rate measurement before and after baking.

(Torr·l/sec·cm²)

	NBI	SL	V
Before baking	8.6×10^{-10}	7.9×10^{-10}	1.5×10^{-10}
After baking	1.2×10^{-12}	1.5×10^{-12}	5.9×10^{-12}
Judgement*	Acceptable	Acceptable	Acceptable

* Specification; 1×10^{-11} Torr·l/sec·cm²

Table 14 Inner surface area and volume of the outgassing rate measurement system.

		NBI	SL	V
Inner surface area (cm ²)	Bellows	1.1×10^5	6.1×10^4	1.3×10^5
	Piping etc.	5.0×10^3	6.8×10^3	9.9×10^3
	Total	1.2×10^5	6.8×10^4	1.4×10^5
Volume (l)	Bellows	254.4	52.2	177.0
	Piping etc.	13.6	6.5	6.5
	Total	268.0	58.7	183.5

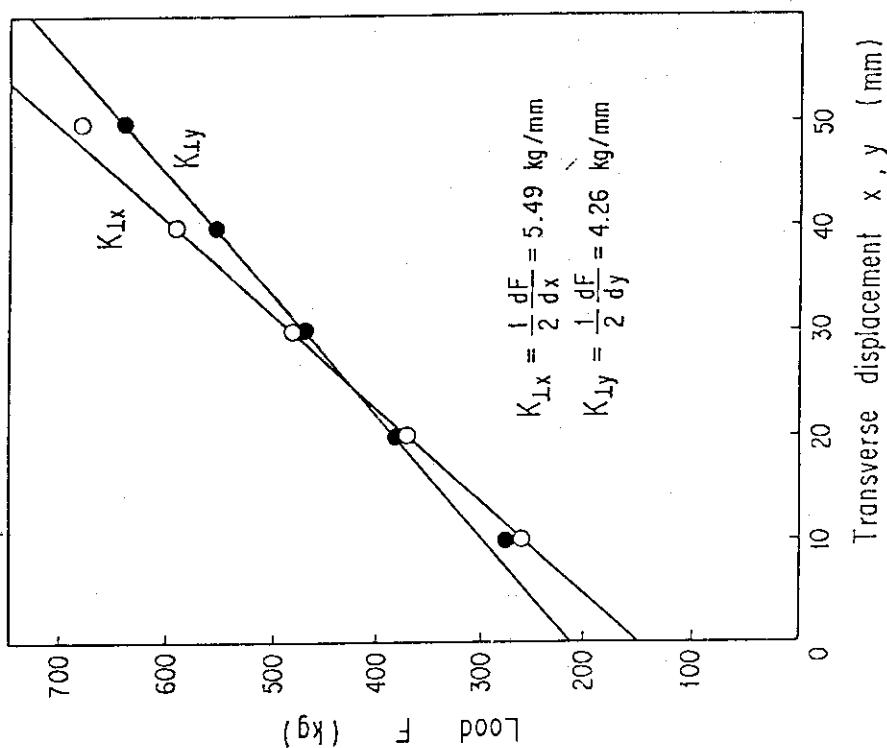


Fig. 11 Result of the spring constant measurement of NBI bellows in the axial direction

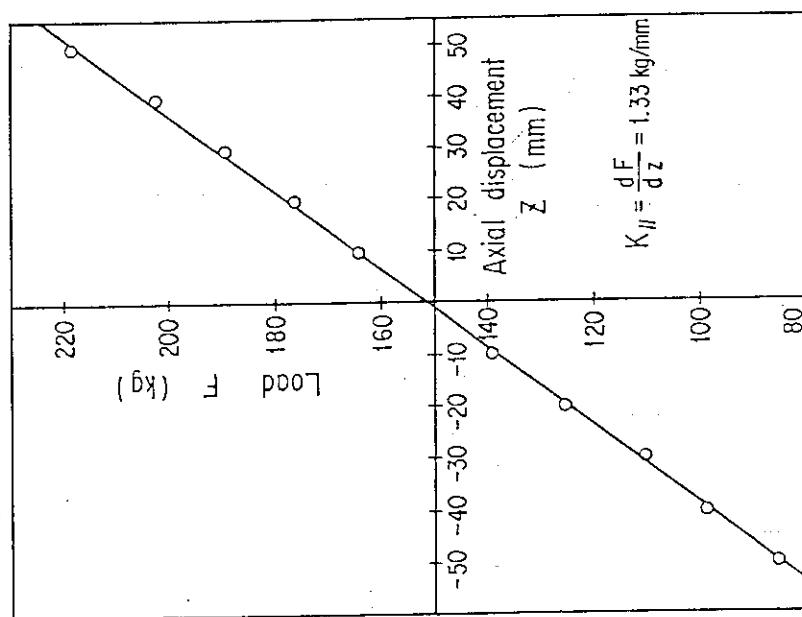


Fig. 12 Result of the spring constant measurement of NBI bellows in the transverse direction, where x and y directions are shown in Fig. 22.

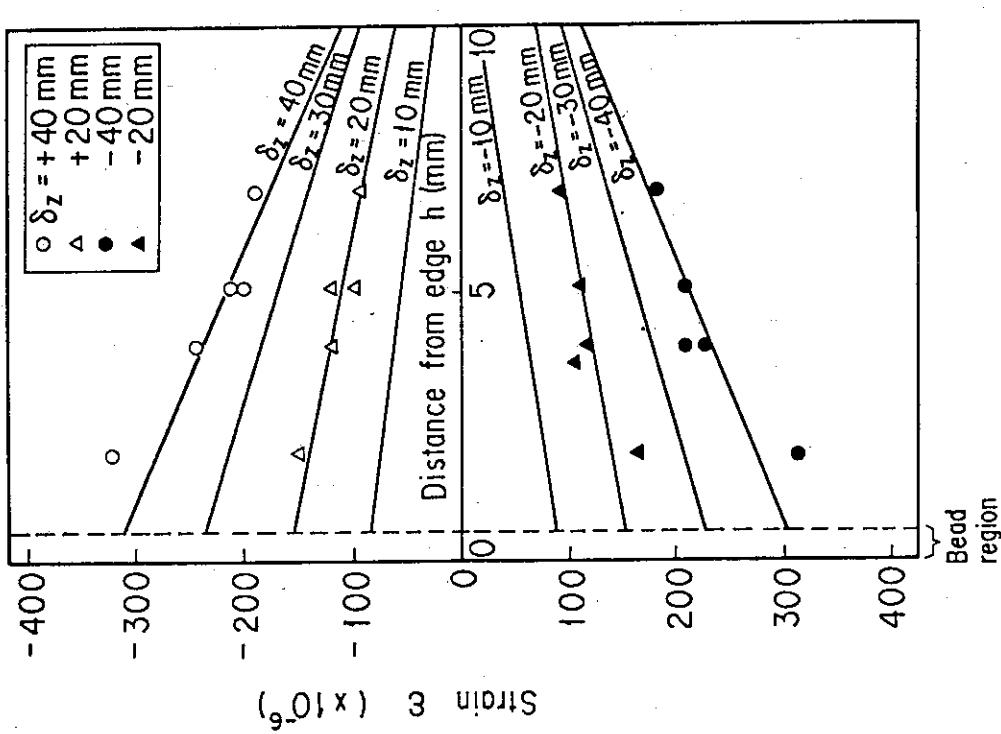


Fig. 13 Strain distribution in the axial direction of the V bellows plate without atmospheric pressure.

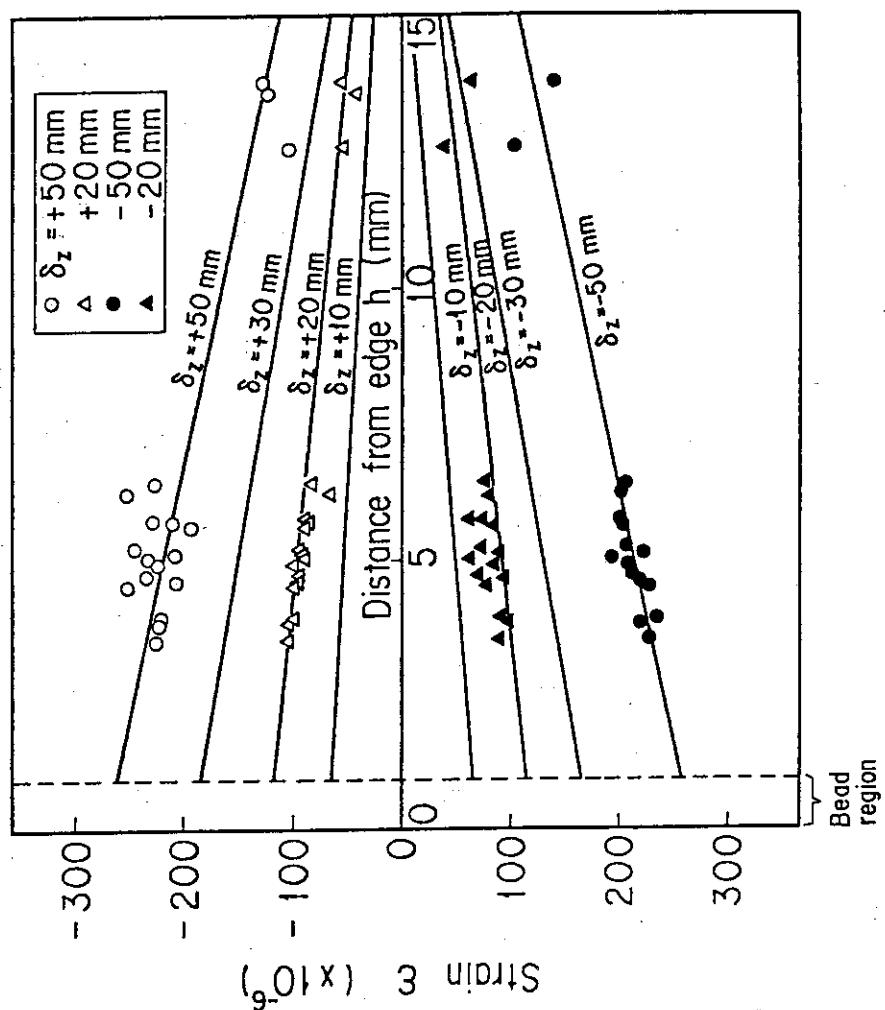


Fig. 14 Strain distribution in the axial direction of the SL bellows plate without atmospheric pressure.

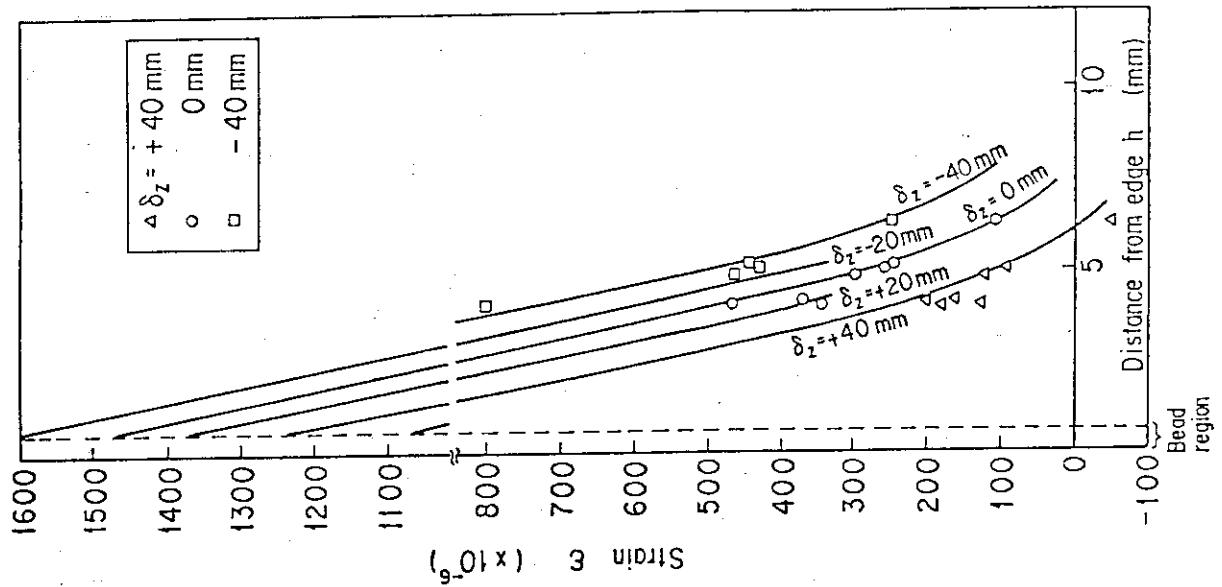
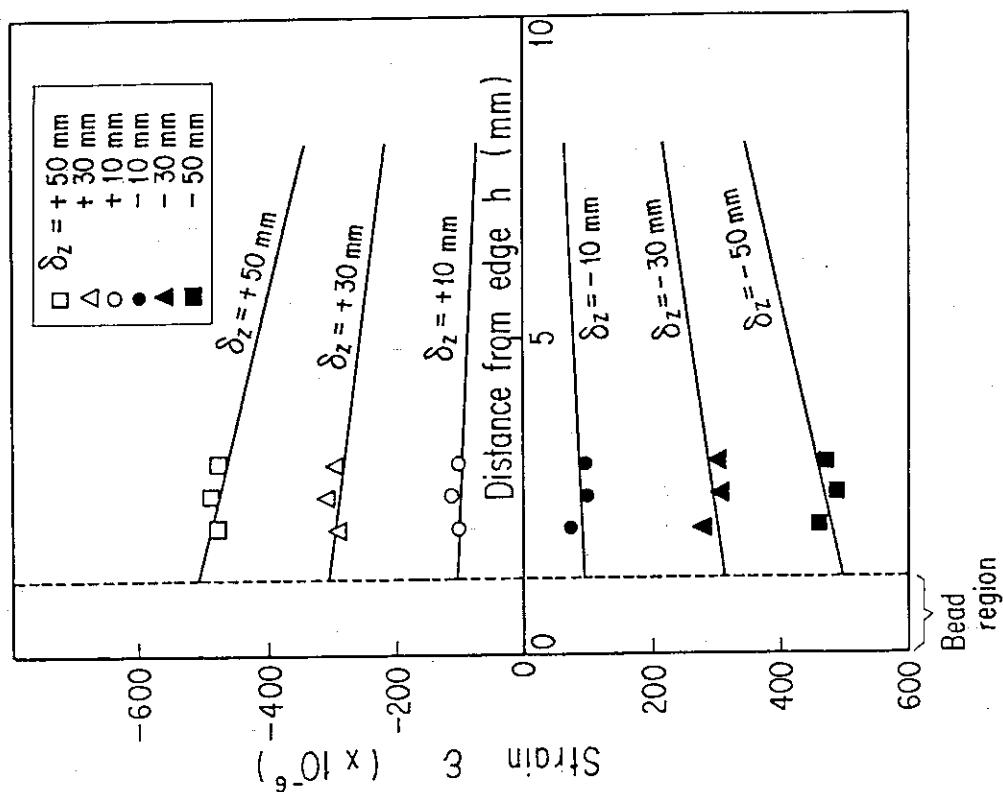


Fig. 15 Strain distribution in the axial direction of the NBI bellows plate without atmospheric pressure



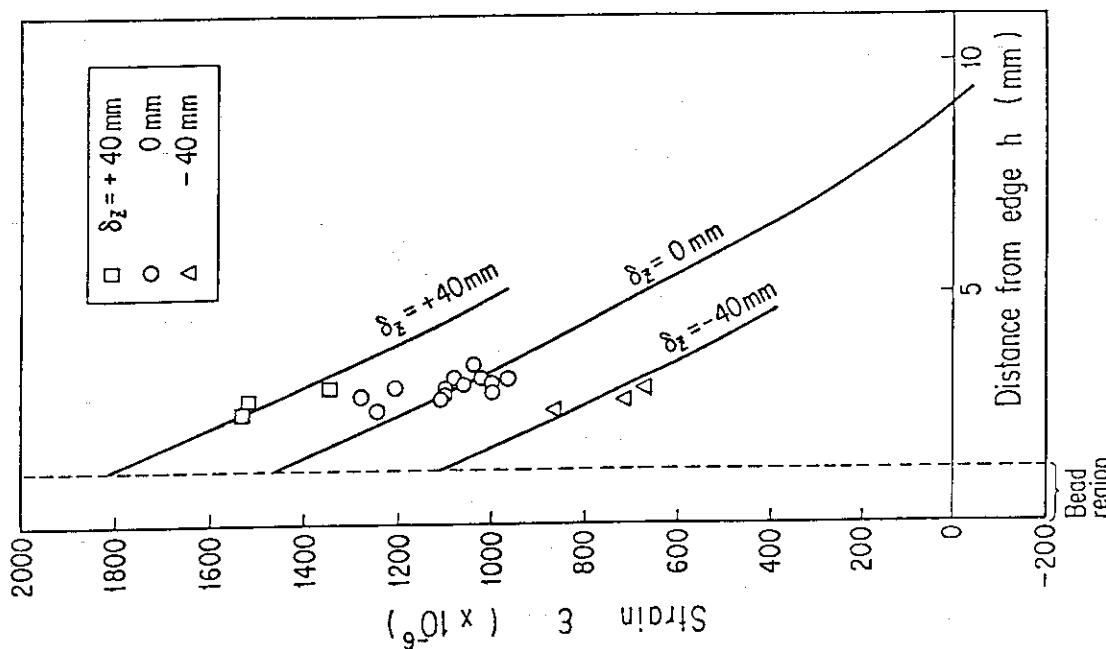


Fig. 18 Strain distribution in the axial direction of the NBI bellows plate with atmospheric pressure.

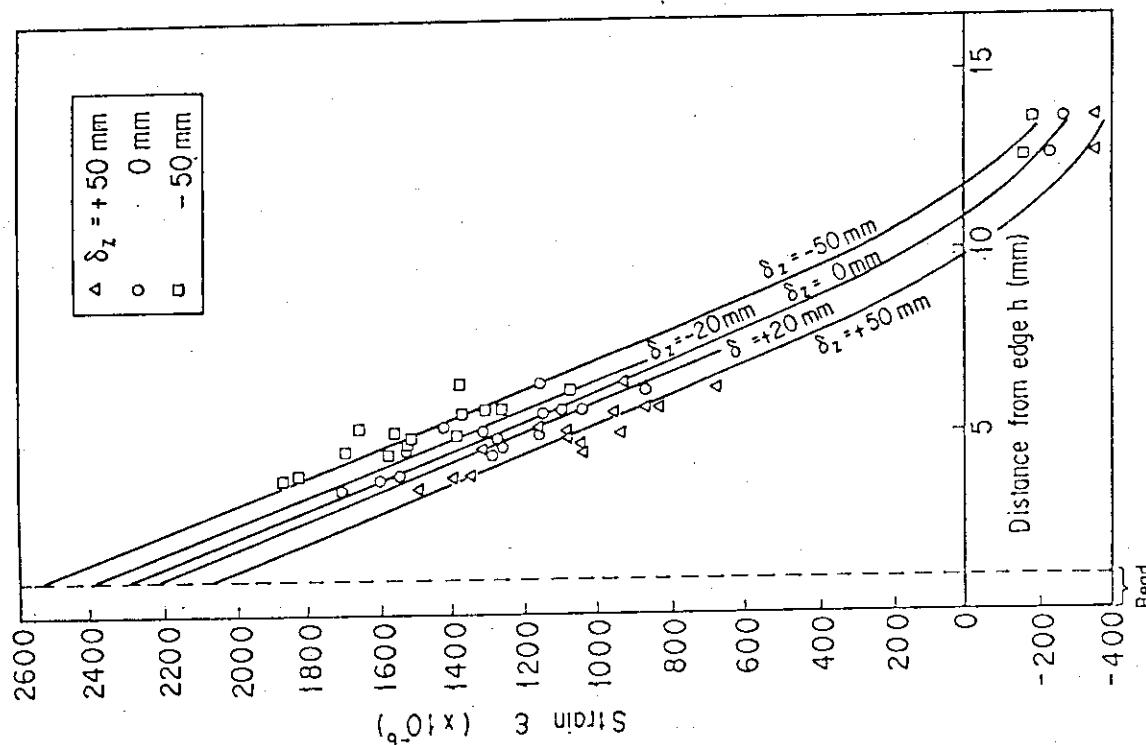


Fig. 17 Strain distribution in the axial direction of the SL bellows plate with atmospheric pressure.

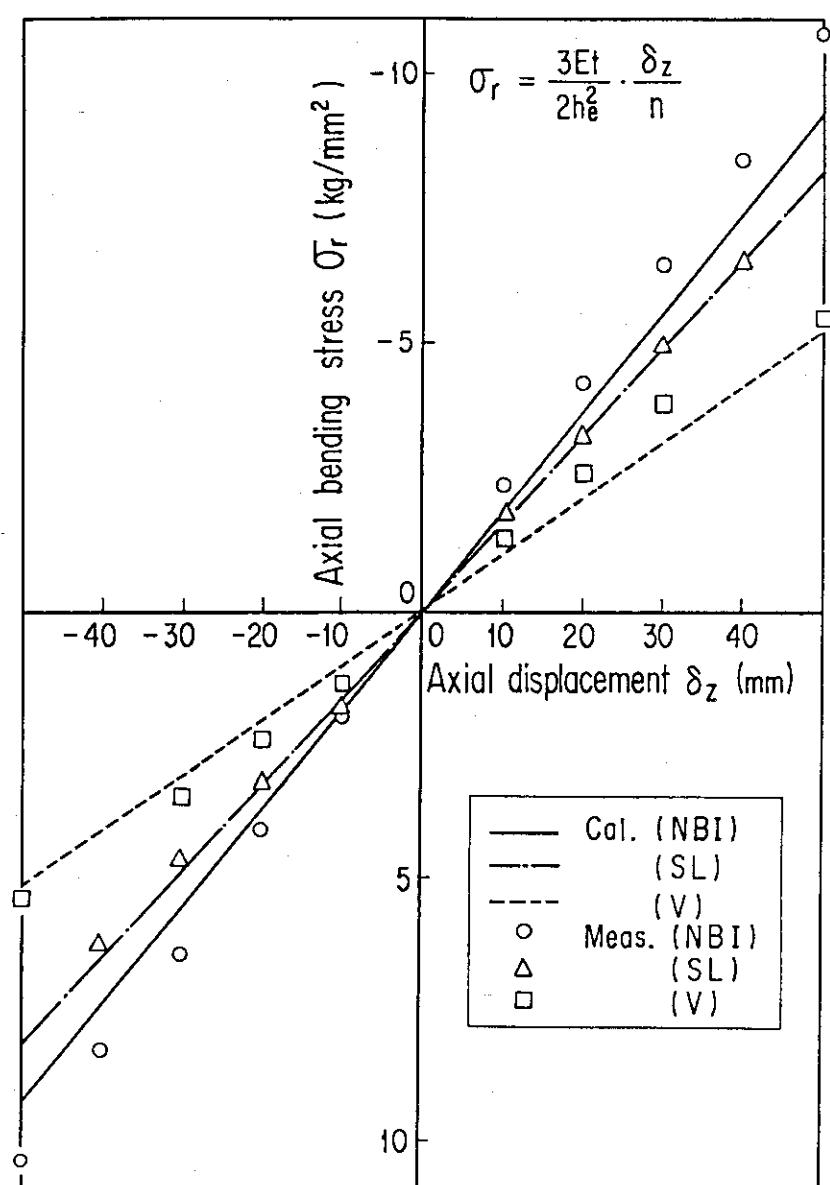


Fig. 19 Relation between the axial displacement and the axial bending stress without atmospheric pressure.

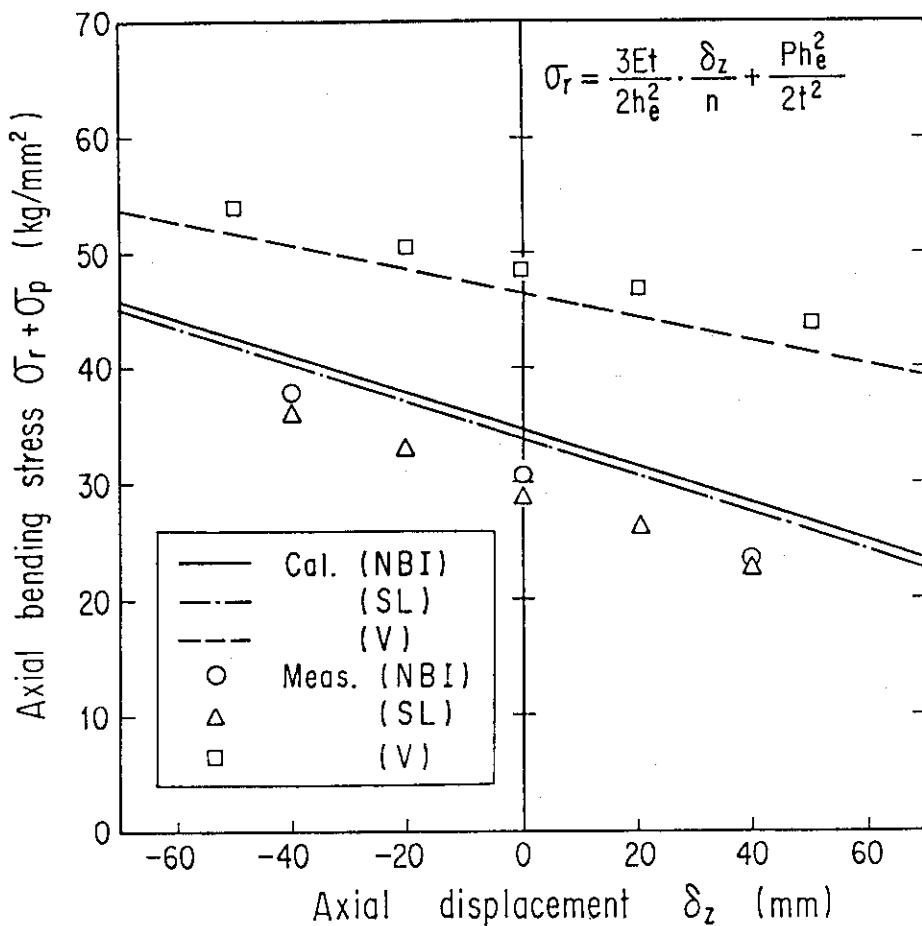


Fig. 20 Relation between the axial displacement and the axial bending stress with atmospheric pressure.

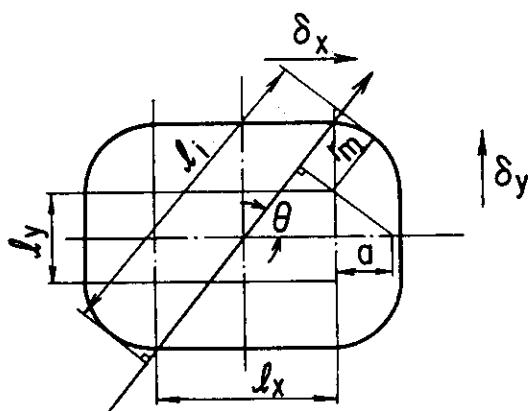


Fig. 21 Symbols of shape parameter for NBI bellows.

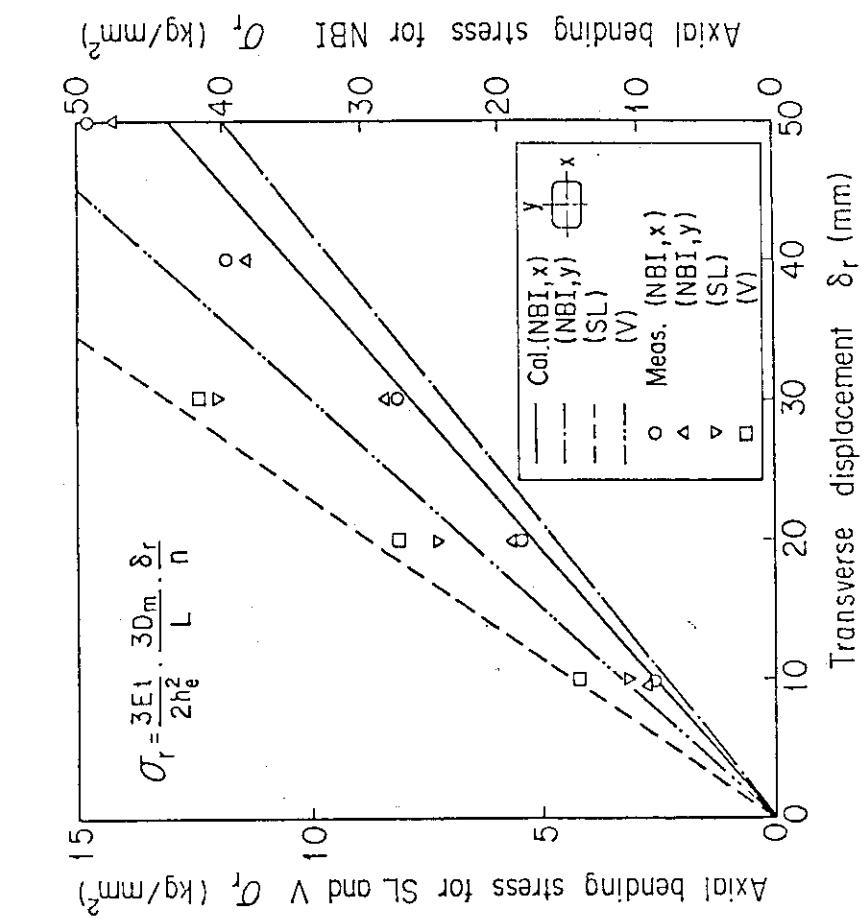


Fig. 23 Relation between the number of corrugation and the axial strain in the case of that the transverse displacement is 30 mm.

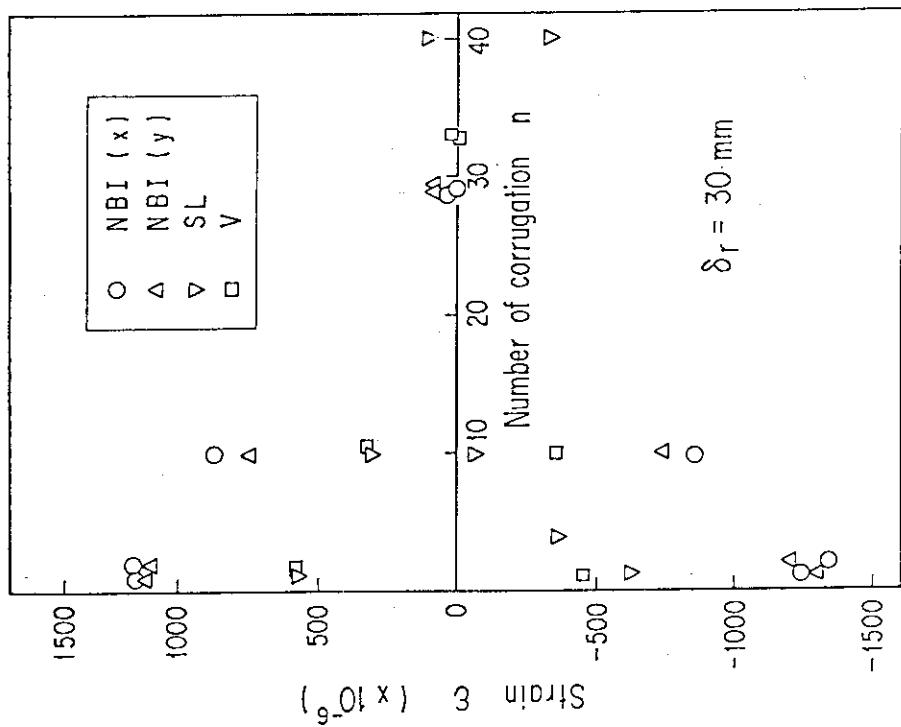


Fig. 22 Relation between the transverse displacement and the axial bending stress without atmospheric pressure.

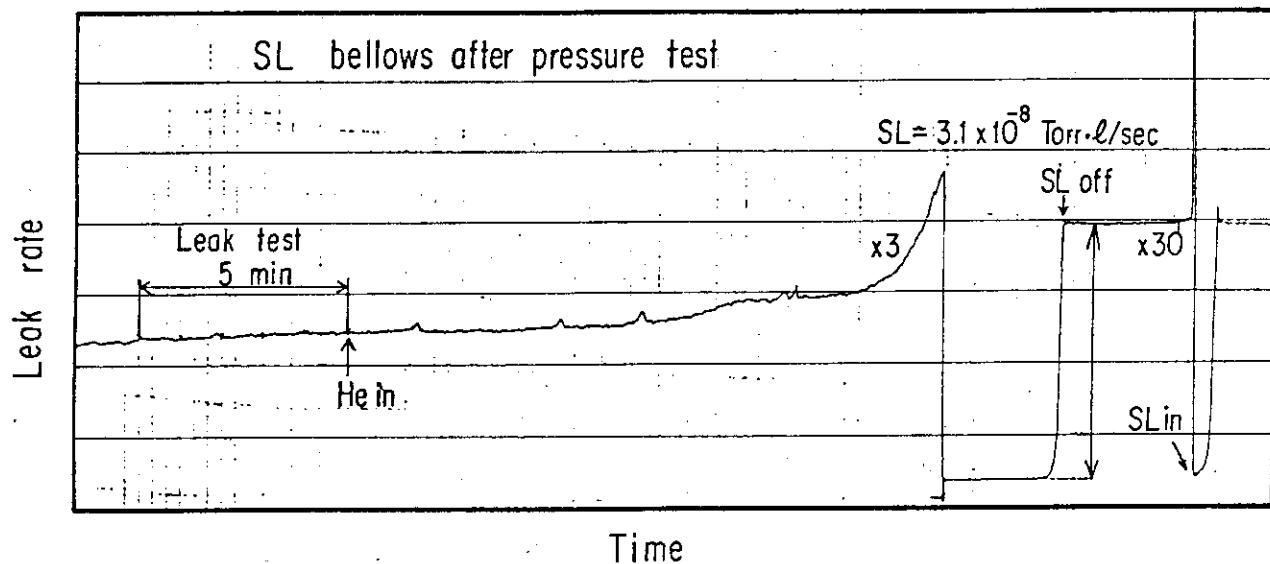


Fig. 24 Chart of the Helium leak detection for the SL bellows after pressure test.

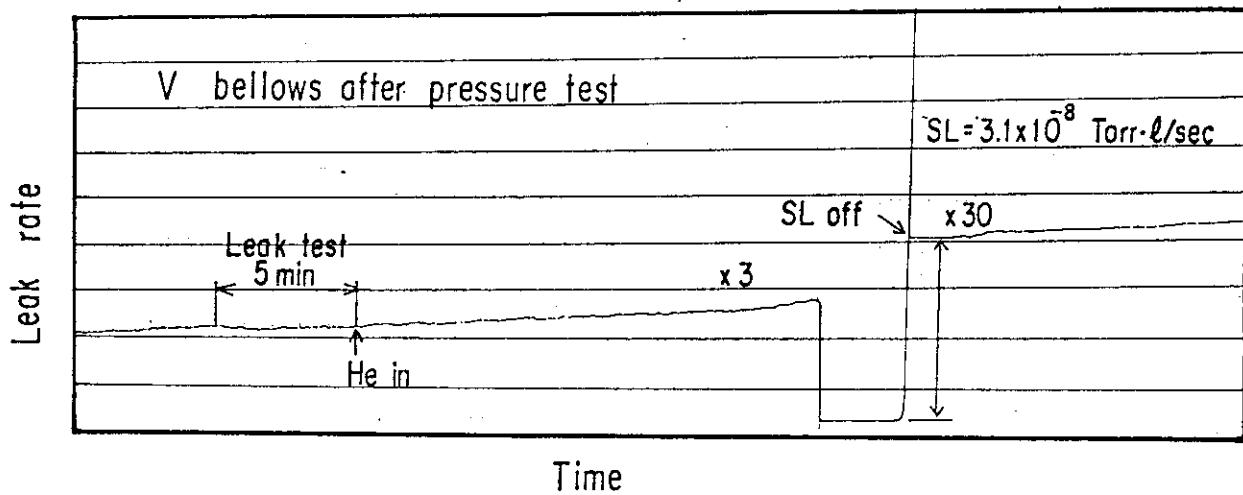


Fig. 25 Chart of the Helium leak detection for the V bellows after pressure test.

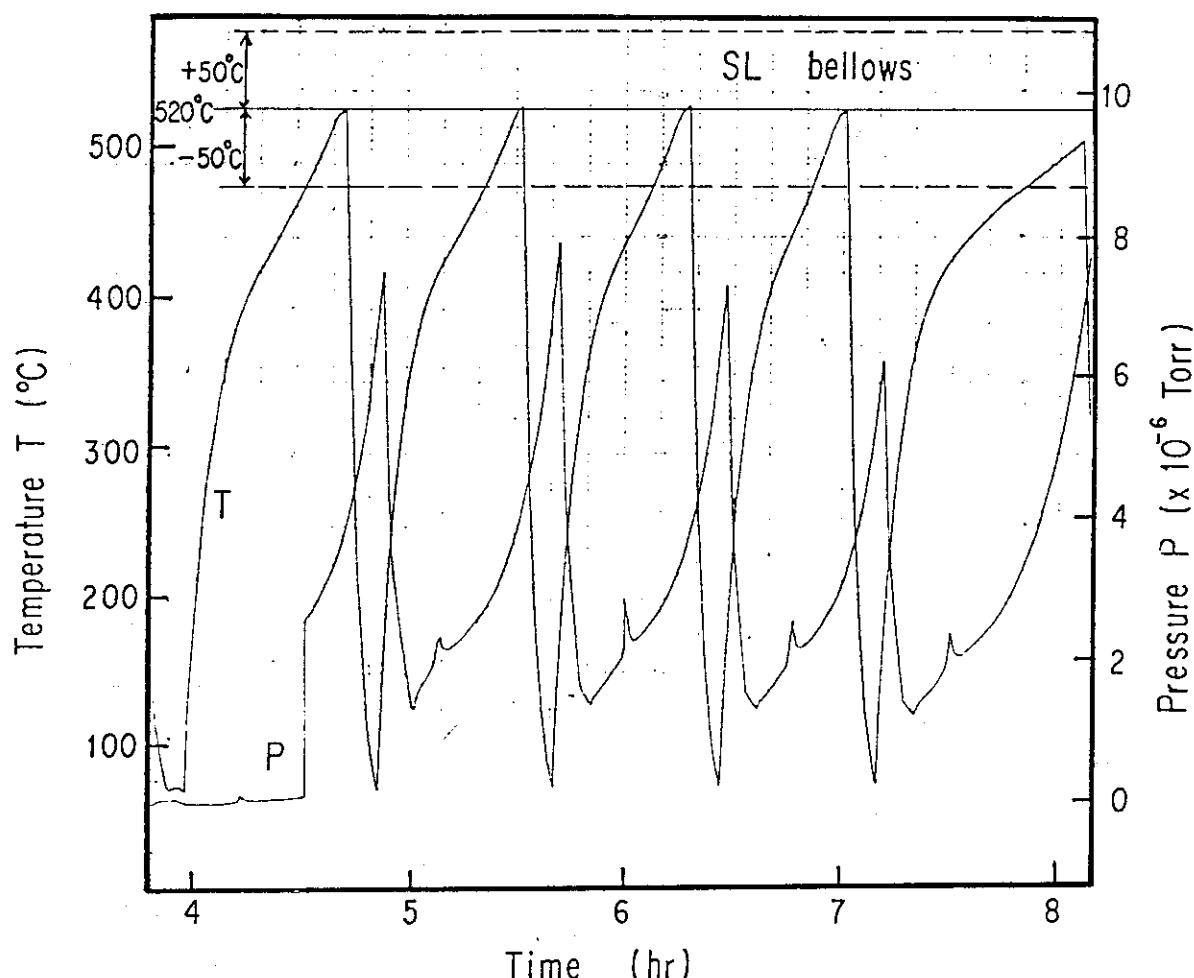


Fig. 26 Example of the time histories of the temperature and the pressure of SL bellows under the thermal cycle test.

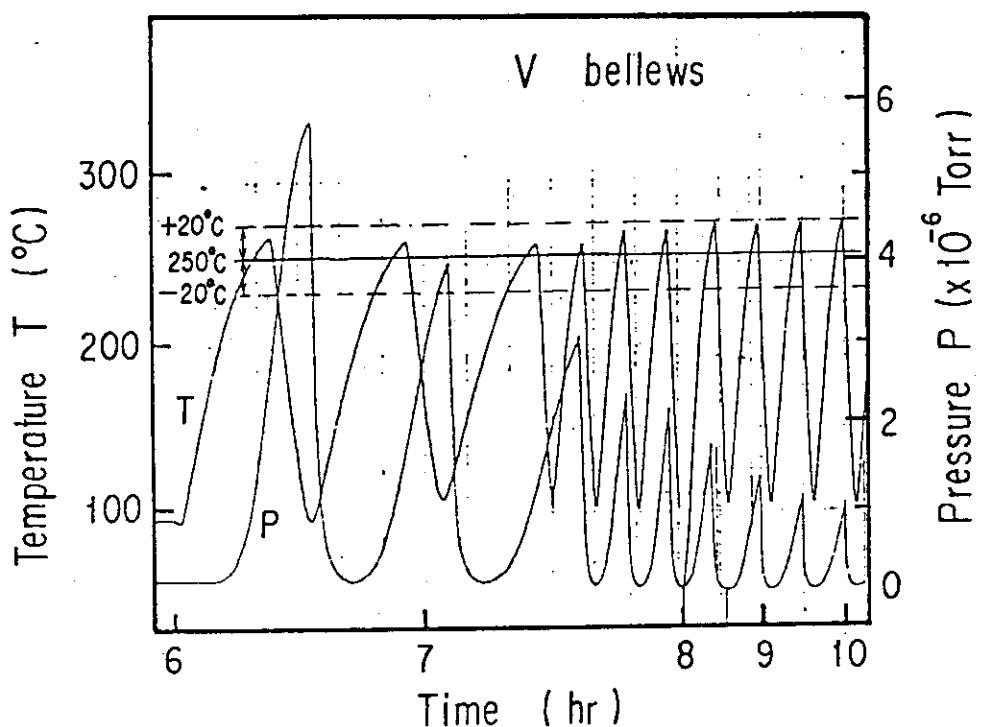


Fig. 27 Example of the time histories of the temperature and the pressure of V bellows under the thermal cycle test.

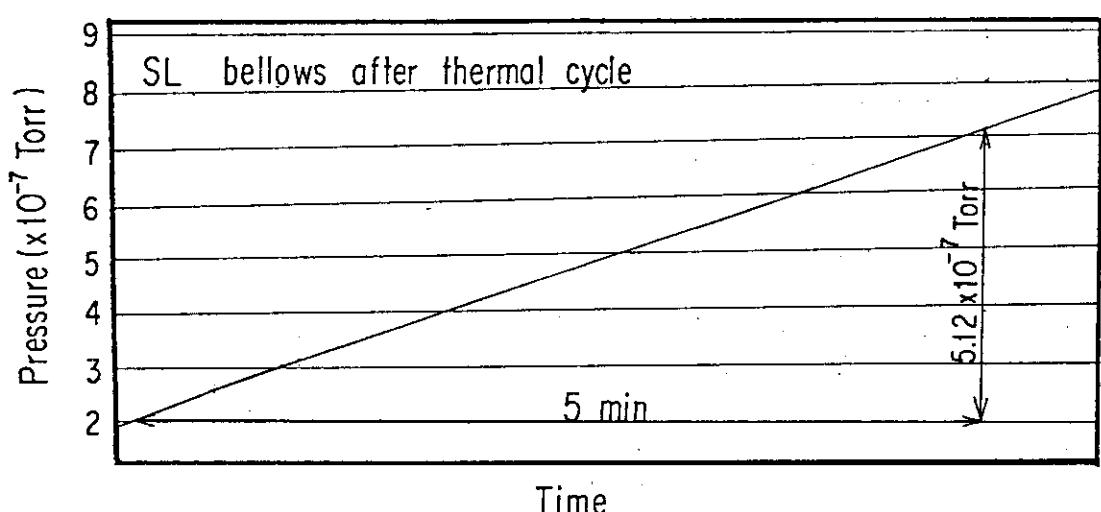


Fig. 28 Chart of the outgassing rate measurement for SL bellows after the thermal cycle.

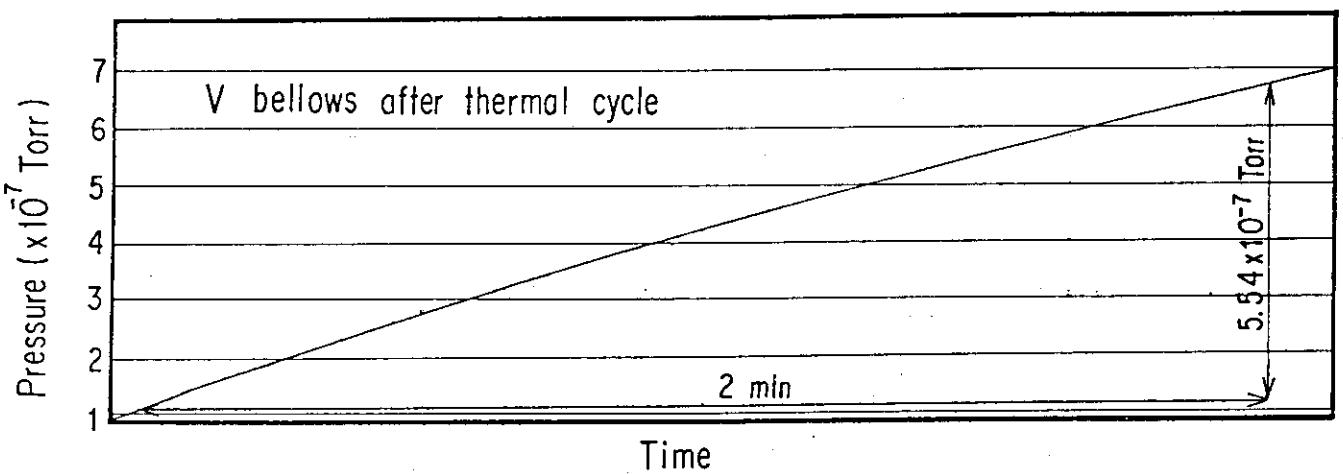


Fig. 29 Chart of the outgassing rate measurement for V bellows after the thermal cycle.

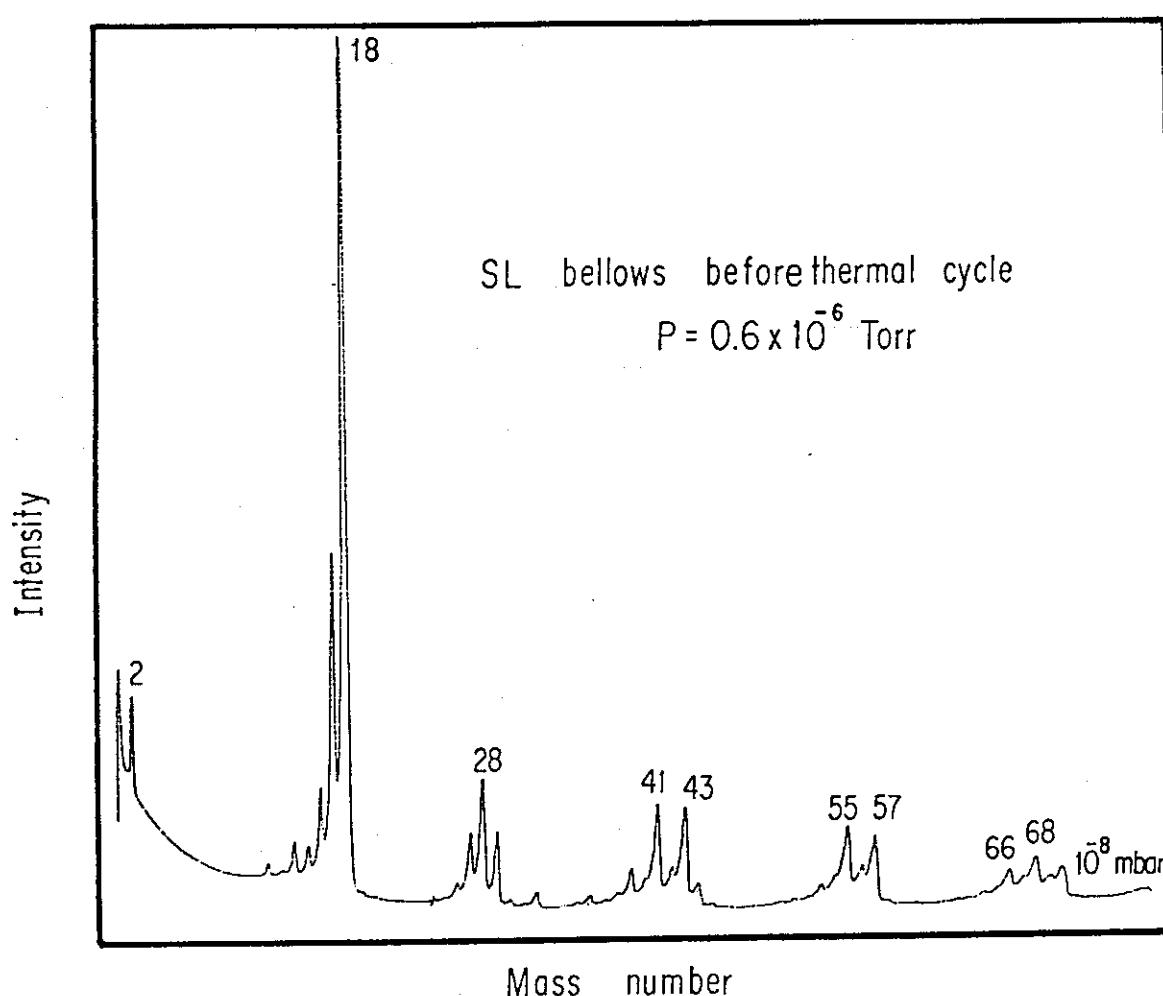


Fig. 30 Mass spectrum of SL bellows before thermal cycle.

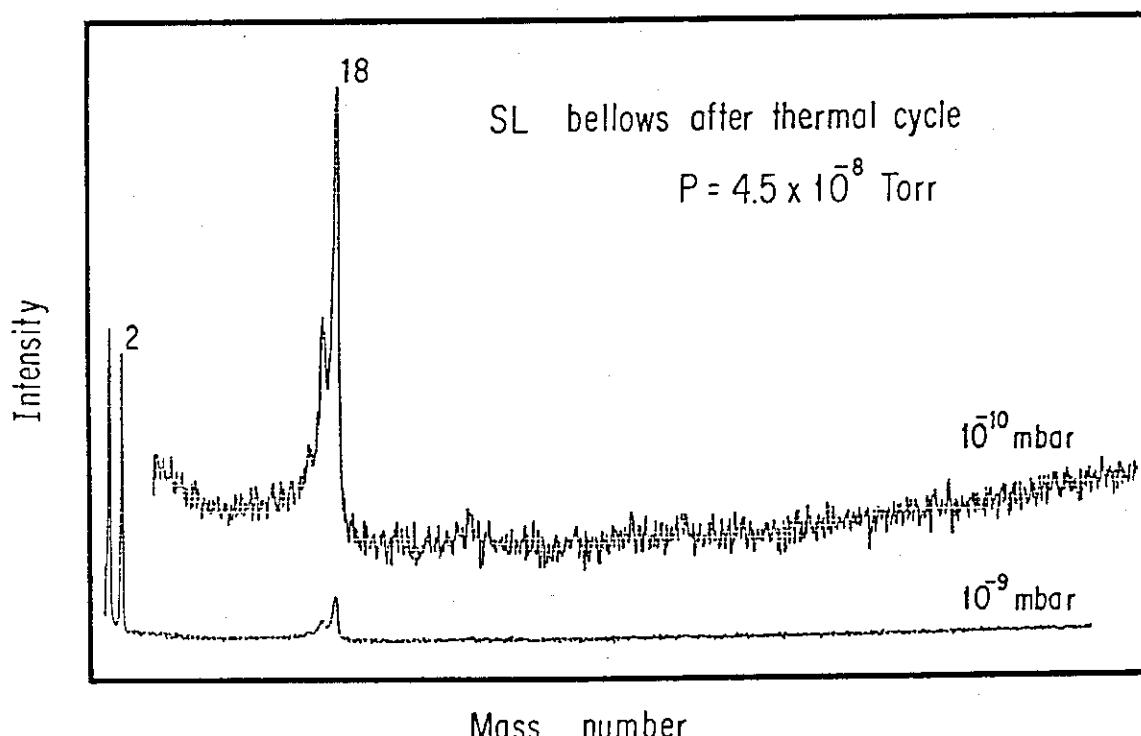


Fig. 31 Mass spectrum of SL bellows after thermal cycle.

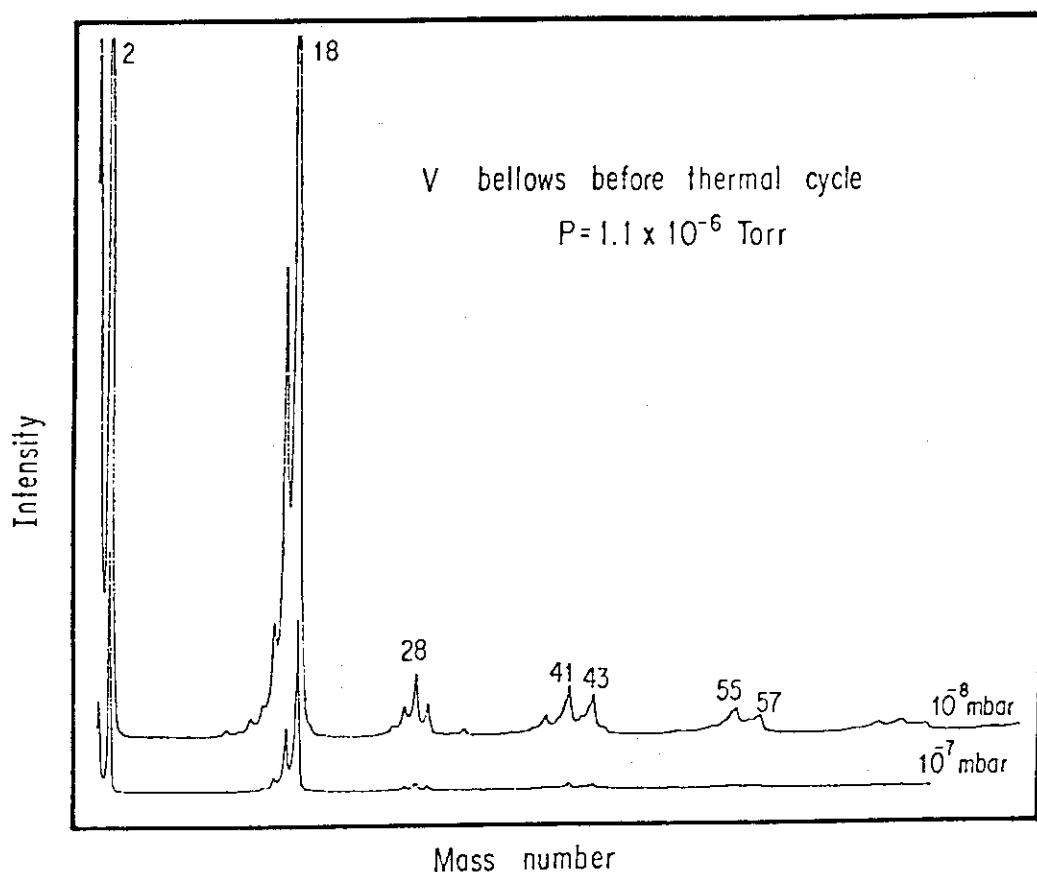


Fig. 32 Mass spectrum of V bellows before thermal cycle.

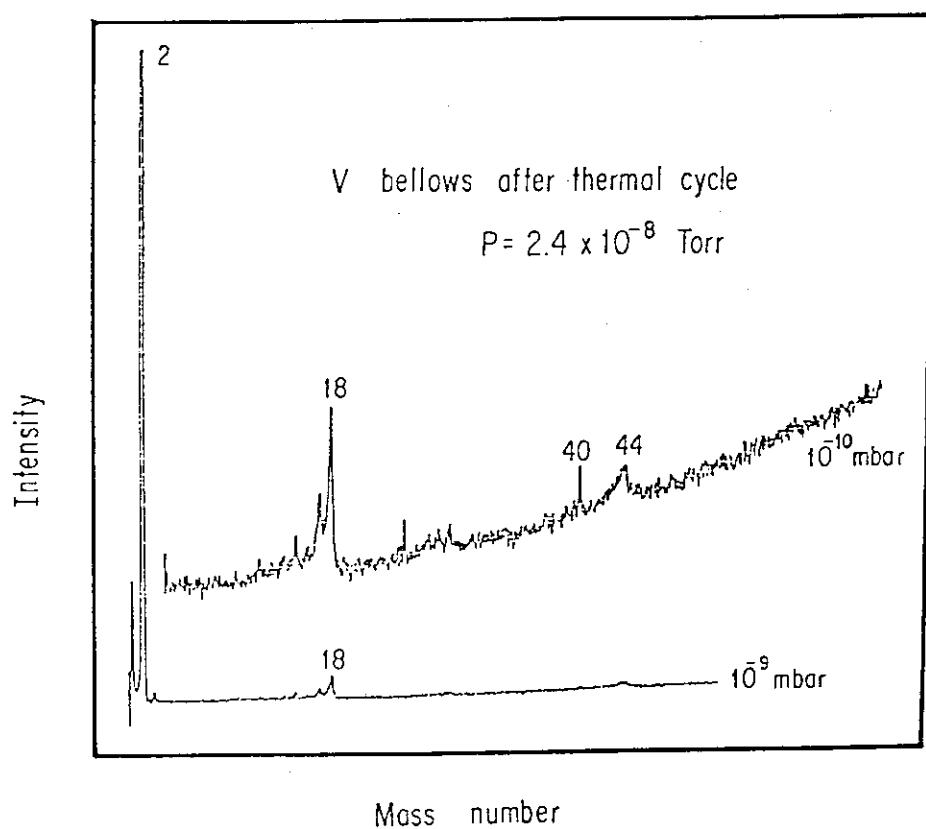


Fig. 33 Mass spectrum of V bellows after thermal cycle.

5. おわりに

JT-60 真空容器のポートには3種類の溶接ベローズが用いられるが、これらのベローズには大きな強制変位が作用する他、電磁力による捩り荷重という従来経験の乏しい形態の荷重が作用するため高い機械的強度が要求される。また、ベーキング運転等により最高520°C迄の高い運転温度条件下で使用されることがあるため、その熱サイクルに耐える必要がある。さらに、真空容器の真空境界を形成しているため厳しい真空性能が要求されている。

一方、本溶接ベローズは非常に大型であり、かつ非円形断面を有する特殊なベローズも含まれるうえ、いずれも製作経験の少い耐熱金属製であるため製作上の困難も予想される。そこで、実機用と全く同一の溶接ベローズを試作し、ベローズに要求されている機械的、真空および熱的性能に関する各種試験に供し、要求されている仕様を満たすか否かの確認を行う形式試験を行った。

形式試験は、機械的性能試験としてばね定数測定試験、応力測定試験、寿命試験、耐圧試験、真空性能試験としてヘリウム・リーク試験、放出ガス速度測定試験、熱的性能試験として熱サイクル試験に分けられ、以下に記す結論が得られた。

ばね定数測定試験の結果、計算値と実測値の差は30%程度でありばね定数計算式は十分適用可であることが示された。

応力測定試験の結果より、軸方向変位、軸直角方向変位および真空力に対する最大発生応力の評価式は、いずれも実測値と20%程度の誤差で良く一致しており、十分設計に用い得ることが示された。また、捩り荷重に対する応力評価式が確立された。

さらに、寿命試験、耐圧試験、熱サイクル試験後もベローズには異常がなく、十分な機械的、熱的性能を有していることが示された。

ヘリウム・リーク試験、放出ガス速度測定試験の結果はいずれも保証値を下回り、溶接ベローズが真空容器の真空性能の劣化を引き起こすことはないことが示された。

以上より、本溶接ベローズは、機械的、真空および熱的性能の全てに関して要求されている仕様を上回る性能を有しており、十分実機に適用可能であることが明らかとなった。

最後に、本溶接ベローズの形式試験に御協力戴いた㈱日立製作所および入江工研株式会社の関係者各位、有益な御意見、御協力を戴いた太田 充 JT-60 第1開発室長代理および JT-60 第1開発室の諸氏に深く感謝致します。また、形式試験を進めるに当たり終始御指導、御鞭撻戴いた皆米地 頸大型トカマク開発部長、吉川 允二同次長、飯島 勉 JT-60 計画室長、田村 早苗 JT-60 第1開発室長に深く感謝致します。

参考文献

- (1) 高嶋 哲夫, 山本 正弘, 中村 博雄, 大久保 実, 太田 充 前田 日出人, 水口 忠良, 森 弘之, 岡村 裕之, 内田 年雄, 山田 俊活; JAERI-M 6592 (1976).
- (2) Iso, Y., OHTA, M.; Trans. of the 6 th SMIRT, N, (1981) N 1/4 *.
- (3) 高津 英幸, 山本 正弘, 清水 正亜, 鈴木 和夫, 園部 正, 林 雄造, 水野 源一郎; JAERI-M 82-205 (1982).
- (4) 高津 英幸, 山本 正弘, 清水 正亜, 君島 富夫, 梶浦 宗次, 大和田 公郎; JAERI-M 83-077 (1983).
- (5) The M. W. Kellogg Company ; Design of Piping System, John Wiley & Sons Inc., New York (1964).
- (6) 松田 俊明, 狐崎 晶雄, 関 省吾, 橫溝 英明, 斎藤 龍太; 非公開資料.
- (7) 臨界プラズマ試験装置本体契約書 (1978).
- (8) TAKATSU, H., SHIMIZU, M., OHTA, M., IMAI, K., ONO, S., MINAMI, M.; J.Nucl. Engng. Des., 71, 161 (1982).
- (9) TAKATSU, H., SHIMIZU, M., OHTA, M., NAKAMURA, Y., SAKAI, K., UCHINO, K.; J.Nucl. Engng. Des., 74, 325 (1982).
- (10) TAKATSU, H., YAMAMOTO, M., SHIMIZU, M., SUZUKI, K., SONOBE, T., HAYASHI, Y., MIZUNO, G.; submitted to J.Nucl. Sci. Technol.
- (11) 高津 英幸, 山本 正弘, 清水 正亜, 鈴木 和夫, 園部 正, 林 雄造, 水野 源一郎; 非公開資料.
- (12) TAKATSU, H., YAMAMOTO, M., SHIMIZU, M., SUZUKI, K., SONOBE, T., HAYASHI, Y., MIZUNO, G.; to be Published in Proc. 10 th Symp. on Fusion Engineering, Philadelphia, Dec. 5 ~ 9, 1983.
- (13) YOSHIKAWA, H., GOMAY, Y., SUGIYAMA, Y., MIZUNO, M., KOMIYA, S., TAZIMA, T.; Proc. 7 th Int. Congr. & 3 rd Int. Conf. Solid Surfaces, Vienna (1977).