

JAERI-Tech
99-079



JP0050003



超弾性合金シールガスケットの開発

1999年11月

田口 浩・多田栄介

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

超弾性合金シールガスケットの開発

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部
田口 浩・多田 栄介

(1999年10月14日受理)

核融合実験炉(ITER)の中心部分を構成するブランケット及びダイバータ等の炉内機器は、DT燃焼により放射化する。そのため損傷した炉内機器は、放射化物の飛散を防ぐために二重シール扉を備えたキャスクを用いて遠隔操作により保守交換を行う必要がある。その際、二重シール扉には放射化ダストを含んだガス等の飛散を防止するシール性能、遠隔操作に適した取扱いの容易性及び放射線（ガンマ線）環境下に対する耐放射線性が要求される。これらの条件を考慮して、Ti-Ni系超弾性合金を利用した金属シールガスケットの適用性を検討した。超弾性合金を用いることにより、

- (1) 少ない締付け力でも信頼性の高いシールが可能である。
- (2) 優れた耐放射線性が期待できる。

このためゴム系シール材の柔軟性と金属系シール材の耐放射線性を兼ね備えたシールが可能となる。そこで、本研究では従来の金属 C リングガスケットの弾性要素であるバネ材に Ti-Ni 系超弾性合金 (Super Elastic Alloy : SEA) を適用し、シール試験を実施した。この結果、標準品金属 C リングガスケットと比較して、少ない締付け力（機器の小型化の可能性）及び繰返し使用時における気密性能を確保（容易な取扱いの可能性）できる可能性が確認された。

Development of Super Elastic Alloy Seal Gasket

Kou TAGUCHI and Eisuke TADA

Department of Fusion Engineering Research
(Tokai Site)

Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 14, 1999)

In-vessel components such as blanket and divertor are activated due to 14MeV neutrons during DT operations in ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), and hence they have to be maintained or replaced remotely. For the maintenance and replacement operations, a sealed cask with a double seal door is required to transport the activated in-vessel components without dispersion of the activated dust. Therefore, a seal gasket of the double seal door is required to provide seal tightness of activated dust, to allow easy handling compatible with remote operations and to withstand intense of gamma radiation.

In accordance with these requirements, an application of "Super Elastic Alloy"(SEA) to the seal gasket has been investigated. The SEA seal gasket can reduce the required fastening force while keeping reliable seal tightness, resulting in the provision of deformation flexibility comparable to rubber gasket. In addition, the SEA gasket can provide high radiation resistance comparing with rubber gasket.

In this research, the SEA based on Ti-Ni alloy has been applied to the coil spring which is an elastic element of the ordinary metallic C-ring gasket. As a result, the seal performance test has shown that the required fastening force is quite low comparing to the standard metal gasket: this enables the compactness of the seal mechanism. In addition, the seal tightness can be maintained for repeatable(cyclic) operations, which is appropriate for remote operations.

Keywords: ITER, Remote Handling, Cask, Double Seal Door, Seal Gasket, Super Elastic Alloy

目次

1. はじめに	1
2. SEAシールガスケット概念	1
3. 遠隔保守環境条件	2
4. 試作ガスケット仕様	2
5. 試験結果	2
5.1. A_f 点確認試験	3
5.2. 通電加熱試験	3
5.3. 絶縁抵抗測定	3
5.4. 一定温度での圧縮復元/気密試験	4
5.4.1. A_f 点以下(RT)での繰返し気密試験	5
5.4.2. 繰返し熱サイクル気密試験	5
5.5. 100サイクル試験	6
6. まとめ	7
7. 結言	8
謝辞	10
参考文献	10

Contents

1. Introduction	1
2. Sealing Concept of Super Elastic Alloy(SEA)	1
3. Environmental Condition for Remote Maintenance	2
4. Specification of SEA Gasket Developed	2
5. Test Results	2
5.1. Shape Recover Temperature(A_f) Measuring Test	3
5.2. Heating Test	3
5.3. Insulation Resistance Test	3
5.4. Seal Tightness Test	4
5.4.1. Cyclic Seal Test Under " A_f "	5
5.4.2. Cyclic Thermal Test	5
5.5. 100 Cycle Test	6
6. Summary	7
7. Conclusion	8
Acknowledgments	10
References	10

This is a blank page.

1. はじめに

核融合実験炉 (ITER) [1][2]の中心部分を構成するブランケット及びダイバータ等の炉内機器は、計画的に保守・交換を想定する機器に分類され、ガンマ線環境下で遠隔操作により保守交換を行う必要がある。その際、放射化物の飛散を防ぐため二重シール扉を備えたキャスクを用いて搬送する必要があり、二重シール扉のシールガスケットには、放射化ダストに対する気密性、ガンマ線に対する耐放射線性及び遠隔操作に適した取扱の容易性が要求される。通常のゴム製シール材については、耐放射線性が低く、信頼性に欠ける問題がある。また、金属製シール材では圧縮力が過大となり、遠隔操作しにくいと共に、大口径シール面への適用は困難である。

そこで本研究では、金属の有する高い耐放射線性とゴムの持つ柔軟性を兼ね備えた超弾性金属 (Super Elastic Alloy: SEA) に着目して、二重シール扉のシール材への適用性を検討した。

2. SEAシールガスケット概念

核融合実験炉 (Fig. 1) の遠隔保守では、二重シール扉を備えた炉外搬送装置 (キャスク) を用いて炉内機器をポート開口部から搬送する (Fig. 2)。この時、ポートとの接続面にドッキングして、放射化ダストをキャスク外に飛散させることを防止する必要があり、二重シール扉にはFig. 3及びFig. 4に示すように、接続機構と共に、シール機構が装備される。これらの機構は狭隘空間に配置する必要があり、シール面の圧縮力の低減が必須である。また、キャスクのポートへの接続頻度を考慮し、シール材には繰返し使用が可能であることが求められる。これらを考慮し、シールガスケットの基本構造として、コイルバネを弾性要素とした金属製C型リングを選定した。従来のバネ入り金属Cリングはアルミニウム等の軟質金属で被覆したガスケットであり、主な特徴として、芯材であるコイルスプリングの反発弾性によって復元量が大きく、接続面への追従性が良好であると同時に、金属ガスケットの長所である低温から高温、あるいは耐放射線性等の耐環境性に優れていることが挙げられる。

今回の試作では、通常金属では得られないSEAの機械的特性及び耐環境性[3][4][5]に着目し、これらをCリングガスケットの芯材であるコイルスプリングに適用して試作試験を実施した。SEAの機械的特性をFig. 5に示す。本特性曲線は、SEAの形状回復温度 (以下、 A_f 点とする) を 4°C に設定した例である。縦軸に応力 (kg/mm^2)、横軸に歪み量 (%) を示したものである。 A_f 点以下では応力が低く歪みは残るが、 A_f 点以上に温度をあげると応力が増加すると同時に、歪みが回復することを示している。SEAは、 A_f 点以下において通常金属にはない柔軟性 (縮付力低減の可能性) 及び A_f 点以上での圧縮復元特性 (繰返し使用の可能性) を示し、通常金属では得にくいゴムに類似したシールガスケットの提供が可能であることが考えられる。

3. 遠隔保守環境条件

・ 炉外搬送装置作業環境

雰囲気	: 不活性ガス、トリチウム、放射化塵
放射線	: γ 線 ($\sim 1\text{kGy/h}$)
温度	: $\sim 50^\circ\text{C}$
二重シール扉目標気密性能	: $\sim 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{sec}$ (ヘリウムガス換算値) 以下
ゴムOリング圧縮力	: $10 \text{ kN}\cdot\text{m}/1\text{本}$

4. 試作ガスケット仕様

- ・ 形状 : バネ入り金属Cリング
- ・ サイズ : JIS V-175、V-100
- ・ 外皮 : アルミニウム (A1050P)
- ・ 内皮 : ステンレス鋼 (SUS304)
- ・ コイルスプリング : Ti-Ni 合金 (メカ-A_f点仕様値 : 80°C)
- ・ 絶縁層 (試料e) : ポリイミドコーティング ($10 \mu\text{m}$)

Table.1に試作したガスケットの仕様を、Fig.6に外観を示す。またFig.7にCリングガスケットの弾性要素であるSEAコイルスプリングの接続及び導線接続方法を示す。なおTable.1中の試料a～dのシールガスケットは、初期設置時の圧縮力を低減し、締付け後あるいは繰返し使用時の気密性能の低下を防ぐため、芯材となるコイルバネを外部より加熱することで、圧縮復元力を得られる構造とした。また試料eについては、バネと内被間にポリイミド樹脂コーティングによる絶縁層を設け電流を通すことで加熱できる構造とした。

Table.1 Specification of SEA gasket

Sample	Diameter (mm)	Envelope	Spring diameter (mm)	Wined diameter (mm)
a	JIS-V175(ID176x ϕ 5.6)	Double	ϕ 0.65	ϕ 4.0
b	JIS-V175(ID176x ϕ 5.6)	Double	ϕ 0.60	ϕ 4.0
c	JIS-V175(ID176x ϕ 5.6)	Double	ϕ 0.55	ϕ 4.0
d	JIS-V100(ID101x ϕ 3.8)	Single	ϕ 0.45	ϕ 3.0
e	JIS-V175(ID176x ϕ 5.6)	Double (include insulation)	ϕ 0.60	ϕ 4.0

5. 試験結果

試作したSEAシールガスケットの試験項目は下記に示す通りである。ただし試料a

～dについては(3)を除く(1)から(6)の試験を、また試料eについては(2)(3)の試験を実施した。

- (1) A_f 点(形状回復温度:各試料に用いたSEAバネ固有値)確認試験
- (2) 通電加熱試験
- (3) 絶縁抵抗測定
- (4) 一定温度での圧縮復元/気密試験(A_f 点以上と以下での変形応力及び気密試験)
- (5) 熱サイクル試験(A_f 点以下と A_f 点以上時の気密開始応力とリーク量比較)
- (6) 100サイクル試験

5.1 A_f 点確認試験

コイルバネに用いたSEA固有の A_f 点温度を確認するため、 A_f 点以下で変形させた試料を水中に没し、ヒーターで水を徐々に昇温し、形状回復開始から終了までを目視で確認し、その時の温度を A_f 点とした。Fig.8に A_f 点温度測定結果及びFig.9に試験状況を示す。

5.2 通電加熱試験

試験試料a～dは、バネと被覆材間に絶縁層を持たないためバネ単体に通電し、 A_f 点までの昇温時間及び電流値を測定した。測定方法をFig.10に示す。その結果をTable.2に示す。なお試料eについては絶縁層を有しているため、ガスカート形状に成形した状態でバネに通電した。また試料eとバネ単体での昇温時間、温度の比較結果をFig.11に示す。

Table.2 Heating test results

Sample	Current(A)	Ultimate temperature (°C)	Time(min)
a : V175(ID176x φ 5.6)	1.0	87	4
b : V175(ID176x φ 5.6)	0.9	90	4
c : V175(ID176x φ 5.6)	0.8	83	4
d : V100(ID101x φ 3.8)	0.8	88	4
e : V175(ID176x φ 5.6)	1.0	88	5

5.3 絶縁抵抗測定

試料eを用いて、バネに接続された導線と内被間の絶縁性能を絶縁抵抗計を用いて測定した。その結果をTable.3に、Fig.12に試験状況を示す。試作品の絶縁方法は、導線が外被に触れないようにPTFEテープを導線に巻き付けた。実用品では製作時間短縮のため、絶縁被覆導線を用いて整形する必要があると考えられる。Fig.13に外被部分を短く(または内被部分を短く)して、絶縁の安全率を高められる改良案の断面図を示す。

Table.3 Measured results of insulation resistance

Sample	Load voltage (V)	Insulation resistance (MΩ)
e : V175(ID176x φ 5.6)	500	1000

5.4 一定温度での圧縮復元/気密試験

試験は全工程 A_f 点以下と A_f 点以上の一定温度で実施し、それぞれの変形圧縮力、気密性能を測定した。Fig.14 及び Fig. 15 に試験装置の構成及び外観を示す。

試験方法はフランジ間に試料を装着し、圧縮試験機により荷重を段階的にリテーナ縮切りまで負荷した。次に荷重を段階的に除荷し、負荷ゼロとした。但し A_f 点以上での試験では、芯材となるコイルバネと内被間に絶縁処理を施していないため、フランジ間のガスケットをヒータを用いて外部加熱し、 A_f 点以上を維持して、荷重と歪み量との関係を確認した。その結果を Table.4 に示す。また A_f 点以上での応力歪み曲線を Fig.16 及び Fig.17 に示す。なお Table.4 中において、ガスケット圧縮時にリークディテクタの検出感度以下(8.0×10^{-12} Pa·m³/s)にならなかったものは空欄としたが、気密性能は $10^{-6} \sim 10^{-8}$ Pa·m³/sec He オーダーであり、二重シール扉の目標気密性能を満足した。下記に試験条件、略語の説明及び試験フローチャートを Fig.18 に示す。

・試験条件

A_f 点以下 : 室温(RT)

A_f 点以上 : $85 \pm 3^\circ\text{C}$

リテーナ : V-175 用 (OD150x4.5t)、V-100 用 (OD70x3.0t)

フランジ : SUS304、表面粗さ 3.2S

・略語の説明

S : 規格圧縮量での圧縮力(圧縮量: V-175=1.1mm, V-100=0.8mm)

S_0 : 気密開始点 (ガスケットの圧縮量を増加していった時、リークディテクタの検出感度以下(8.0×10^{-12} Pa·m³/sec He)となる点)

S_1 : 気密限界点 (ガスケットの圧縮量を減少していった時、リークディテクタの検出感度以上 (8.0×10^{-12} Pa·m³/sec He) となる点)

F_0 : 目標気密開始点 (ガスケットの圧縮量を増加していった時、リーク量が 8.0×10^{-4} Pa·m³/sec He 以下となる点)

F_1 : 目標気密限界点 (ガスケットの圧縮量を減少していった時、リーク量が 8.0×10^{-4} Pa·m³/sec He 以上となる点)

Table.4 Compression/recovery and seal test results of constant temperature

Sample	Temperature	S(kN/m)	S ₀ (kN/m)	S ₁ (kN/m)	F ₀ (kN/m)	F ₁ (kN/m)
a :V175 (ID176xφ5.6)	Under Af	170			30	10
		170			30	10
	Over Af	210	80	40	30	5
b :V175 (ID176xφ5.6)	Under Af	130			40	20
		130			40	20
	Over Af	190	80	40	20	10
c :V175 (ID176xφ5.6)	Under Af	110			30	30
		110			30	10
	Over Af	160	120	100	20	10
d :V100 (ID101xφ3.8)	Under Af	90			40	5
		100			30	5
	Over Af	120			30	5
Normal (V-175, φ0.65xφ4.0)	RT	386	88	53	—	—

5.4.1 A_f点以下 (RT) での繰返し気密試験

5.4 項で実施した結果を基に、A_f 点以上でヘリウムリークディテクタの感度以下 (8.0x10⁻¹² Pa・m³/sec)となる圧縮力 (S₀:80kN/m) を A_f 点以下で負荷し、**Fig.18** のフローチャートに従って5サイクル実施した。その結果を **Table.5** 及び **Fig. 19** に示す。また **Fig.20** 及び **Fig.21** に A_f 点以下における応力歪み曲線を示す。なお一定の歪み量が得られるよう、リテーナの板厚を 4.67mm に設定した。

Table.5 Cyclic stress/leak rate results below A_f (RT) point

Sample	Cycle	Compression force (kN/m)	Leak rate(Pa・m ³ /sec He)
b V175 (ID176xφ5.6)	1	100	1.5x10 ⁻⁶
	2	80	1.0x10 ⁻⁴
	3	80	7.6x10 ⁻⁵
	4	80	5.7x10 ⁻⁵
	5	80	5.3x10 ⁻⁵

Retainer : OD150x t4.67mm

5.4.2 繰返し熱サイクル気密試験

試料 b で 5.4.1 項と同様のリテーナを用いて、**Fig.22** に示すフローチャートに従って繰返し熱サイクル試験を実施した。試験方法は、A_f 点以下にてガスケットをフランジ間に装着して、圧縮試験機を用いてリテーナ締切りまで荷重を負荷し、リーク量を測定した後、加熱ヒータを用いて A_f 点以上でのリーク量を測定した。その後、A_f 点以下まで除冷し荷重を 0 とした。この締切り荷重 0 の工程を 5 サイクル繰返し、A_f 点前後のリーク量及びサイクルにおけるリーク量の変化を測定した。**Table.6** 及び

Fig.23 に試験結果を示す。

Table.6 Thermal cycle seal test results

Sample	Cycle	Under A_f point (RT)		Over A_f point ($85 \pm 3^\circ\text{C}$)	
		Compression force (kN/m)	Leak rate ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{sec He}$)	Compression force (kN/m)	Leak rate ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{sec He}$)
b JIS-V175 (ID176x ϕ 5.6)	1	100	1.5×10^{-6}	140	2.9×10^{-11}
	2	70	3.7×10^{-4}	80	1.3×10^{-5}
	3	90	4.5×10^{-6}	110	5.3×10^{-7}
	4	70	1.4×10^{-4}	80	3.4×10^{-6}
	5	70	3.8×10^{-4}	80	1.8×10^{-6}

5.5 100 サイクル試験

本サイクル試験は、炉外搬送装置等に取り付けられる二重シール扉のシール材を想定し、繰返し開閉動作時におけるシール性、圧縮力等の評価を目的とした。Fig.24、Fig.25 に試験装置構成及び外観を示す。試験は Fig.26 に示すフローチャートに従って、圧縮荷重の負荷、除荷のサイクルを 100 回繰返し、10、50、100 回目にシール試験を実施した。

圧縮サイクル 1~9、11~49、51~99 回目においては、恒温層により試料温度を A_f 点以上に加熱した状態で圧縮試験機によりリテーナ締切りまで圧縮した後、荷重を除荷した。またシール試験は荷重 0 で A_f 点以下 (RT) まで放冷し、リテーナ締切りまで圧縮して漏洩量を測定した後、恒温層により A_f 点以上まで加熱して、再度リーク量を測定した後、 A_f 点以上の状態で荷重 0 とするサイクルを 100 サイクル繰返し 10、50、100 回目にシール性能を測定した。

Fig.27 にシール試験結果、Fig.28 に各サイクル毎の圧縮力測定結果を示す。なお Fig.29 に 100 サイクル試験時の圧縮復元曲線を示す。また Table.7 に 100 サイクル試験結果のまとめ及び Table.8 に試験試料の寸法測定結果を示す。

Table.7 100 cycle test results

Sample	Cycle	Under A_f point (RT)		Over A_f point (80°C)	
		Compression force (kN/m)	Leak rate ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{sec He}$)	Compression force (kN/m)	Leak rate ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{sec He}$)
JIS-V175 (ϕ 0.60x ϕ 4.0)	10	70.1	1.5×10^{-6}	131.5	1.1×10^{-6}
	50	70.1	7.1×10^{-6}	127.1	3.4×10^{-6}
	100	61.4	1.1×10^{-5}	122.7	2.0×10^{-6}

Table.8 Measured diameter of SEA samples

Sample		Outer dia. (mm)	Inner dia. (mm)	Thickness (mm)
b : JIS-V175, $\phi 0.60 \times \phi 4.0$ (Double envelope: Al/SUS/Ti-Ni alloy,)	Before test	186.99	176.15	5.68
	After test	187.70	175.02	4.75

6. まとめ

(1) Af 点確認試験

SEA (Ti-Ni 合金) バネの形状回復終了温度はバネの線径に依存せず、70~77℃であった。また、メーカーの設定仕様値 Af 点 (80℃) とほぼ一致した。これにより形状を完全に回復させるには、80℃以上の加熱が必要であることが判った。

(2) 通電加熱試験

バネ単体で通電した場合、Af 点 (80℃) 到達に必用な電流値は $0.9Ax4$ 分であり、絶縁処理をしたガスケット試料でも、 $1.0Ax5$ 分で Af 点に達する事が確認できた。以上より、ガスケットの内被に絶縁コーティングを施すことにより、バネのみに通電することができ、効率良く加熱することが可能であることが確認できた。

(3) 絶縁抵抗測定

絶縁コーティングを施した試料 e のバネと内被間の絶縁抵抗は、1000 M Ω であり、繰り返し圧縮試験後 (100 回) においても絶縁抵抗の低下は見られず、絶縁層が健全であることを確認できた。

(4) 一定温度での圧縮復元/気密試験

● Af 点以下

- ・ 二重シール扉の目標気密性能 ($\sim 10^{-4}$ Pa \cdot m³/sec He 以下) を満足する室温での圧縮力は 30~40kN/m であった。
- ・ 規格圧縮量での圧縮力は 170kN/m 以下であり、規格品の圧縮力 (380kN/m) と比較して半分以下であった。

● Af 点以上

- ・ Af 点以下の場合と比較して、規格圧縮量での圧縮力が 40~60kN/m 上昇し、リーク量はリークディテクタの検出感度以下 (8.0×10^{-12} Pa \cdot m³/sec) が得られた。また、試料 b を用いた熱サイクル試験 (5 サイクル) では、1 回目 (Af 点以下 \Rightarrow Af 点以上) のときの圧縮力は 40% 増加 (100kN/m \Rightarrow 140kN/m) し、その時のリーク量は 1.5×10^{-6} Pa \cdot m³/sec He から 2.9×10^{-11} Pa \cdot m³/sec He と大幅に減少した。しかし、2 回目以降では、圧縮力の増加率は約 10~20% と大幅な増加は見られず、リーク量においても約 1~2 桁の減少にとどまった。

但し、リーク量は $1.5 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec He}$ オーダであり、目標気密性能($\sim 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec He}$)を満足した。また、この場合フランジ解放時の復元量が A_f 点以下の場合と比べて大きく、バネの形状回復効果が見られた。

(5) 100 サイクル試験

- ・ 各サイクル毎（リテーナ締切まで）の圧縮力は、1 回目は 190kN/m 程度であるが、10 回目までに大幅に減少し、以降緩やかな減少となった。圧縮力が減少傾向にあることから、さらに長期に繰り返し使用した場合、目標リーク量以上 ($8 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec He}$) のリークが生じるものと予想される。
- ・ 10、50、100 回目のサイクルでは、 A_f 点以下で圧縮し、その後 A_f 点以上としたが、圧縮力は $120 \sim 130 \text{kN/m}$ 程度とやや低かった。
- ・ 1 回目の復元は約 50%程度であったが、100 回目では約 20%とサイクルを重ねるごとに復元力の低下がみられた。
- ・ 100 サイクル目におけるリーク量は、 A_f 点以下で $1.1 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec He}$ 、 A_f 点以上で $2.0 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec He}$ であった。また A_f 点以下におけるリーク量は、サイクルを重ねるごとに増加傾向にあったが、 A_f 点以上とした場合、 $10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec He}$ オーダ前半で安定しており、目標リーク量以下 ($8 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec He}$) であり、 A_f 点以上に加熱することにより 100 サイクル（フランジ解放を含む）の繰り返し使用でも目標気密性能 ($\sim 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec He}$) を満足した。
- ・ (4) 項の A_f 点以上でのフランジ解放時の復元量が大きいためから SEA ガスケット繰り返し使用時の手順を **Fig.30** のように見直すことによって、気密性能の向上が期待できると考えられる。

7. 結言

核融合実験炉の遠隔保守の観点から、二重シール扉を備えた炉外搬送装置等の機械式接合部の小型化（少ない締付力）及び繰り返し使用性（取扱の容易性）の要求に応えるため、従来のバネ入り金属 C リングの弾性要素である芯材のコイルバネに超弾性合金（SEA）を適用・応用することを開発の基本概念として試作試験を実施した。この結果、常温（ A_f 点以下）での規格圧縮量時の圧縮力は、通常のコイルバネ入り金属シールガスケットの約 1/3 に低減でき、気密性能はリークディテクタの検出感度以下 ($8 \times 10^{-12} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$) を満足できることが判った。また、繰り返し気密性能（100 サイクル）においても、二重シール扉の設計許容リーク量 ($\sim 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec He}$ 以下)

を満足できた。その時の SEA シールガスケットの圧縮力は、ゴム O リングの約 3 倍 (30kN/m) 程度であることが判った。

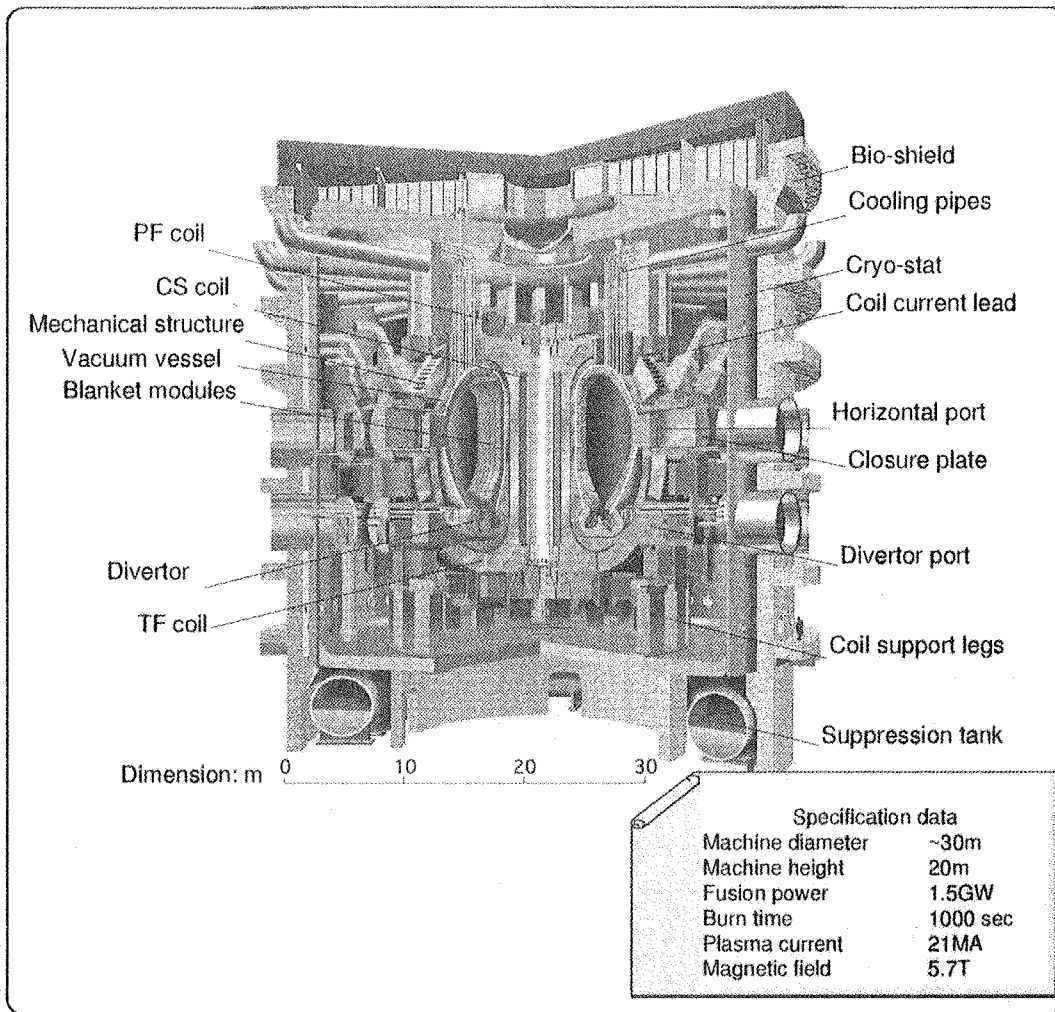
以上より、SEA シールガスケットは、高放射線下で繰返し使用される接続面に十分に適用可能であることが明らかとなった。

謝辞

本ガスキットの試作試験にあたり、那珂研究所核融合工学松田部長、炉構造研究室の方々には終始ご激励をいただいた。ここに深く感謝いたします。また、日本バルカー工業には、試験体の製作に協力していただいた。

参考文献

- [1] ITER 設計報告 プラズマ核融合学会誌 Vol.73 Supplement(1997)
- [2] ITER 設計報告 プラズマ核融合学会誌 Vol.75 Supplement(1997)
- [3] 星屋 泰二他：「Ti-Ni 形状記憶合金の変態特性及び機械的特性に及ぼす中性子照射の影響」日本金属学会誌 第 55 卷 第 10 号(1991)1054-1062
- [4] 星屋 泰二他：「Ti-Ni 系形状記憶合金の中性子照射損傷の回復」日本金属学会誌 第 56 卷 第 5 号(1992)502-508
- [5] 星屋 泰二他：「Ti-Ni 系形状記憶合金の変形挙動に及ぼす中性子照射の影響」日本金属学会誌 第 56 卷 第 7 号(1992)741-746



(from Final Design Report)

Fig.1 ITER

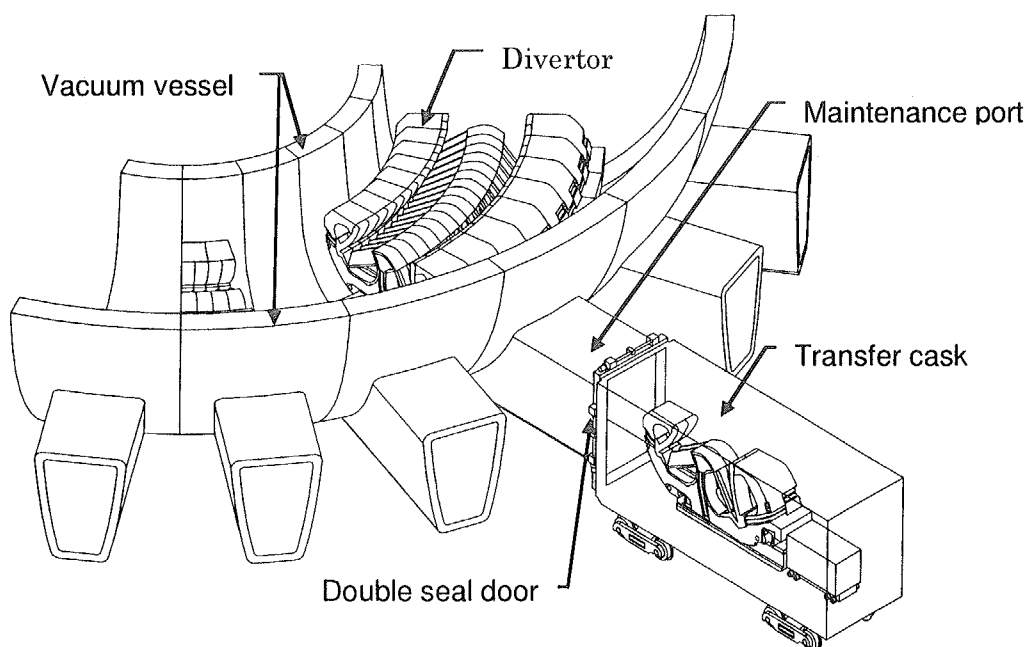


Fig.2 Concept of Divertor maintenance

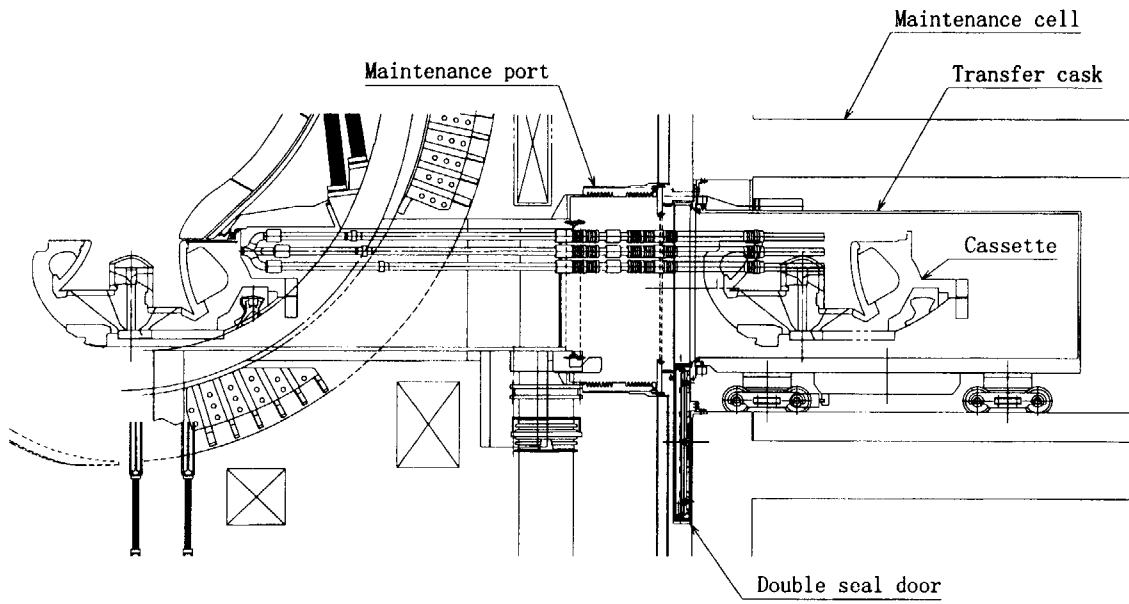


Fig.3 Section of maintenance port (Divertor level)

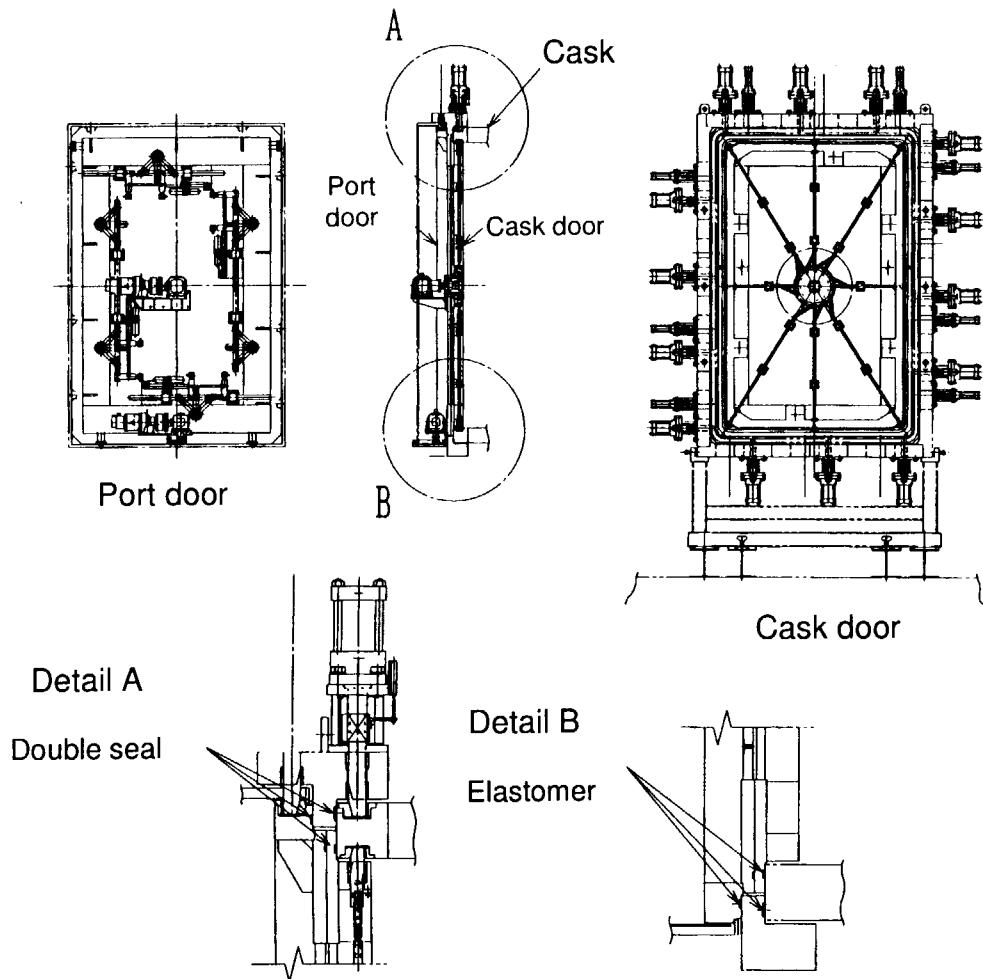


Fig.4 Detail of double seal door

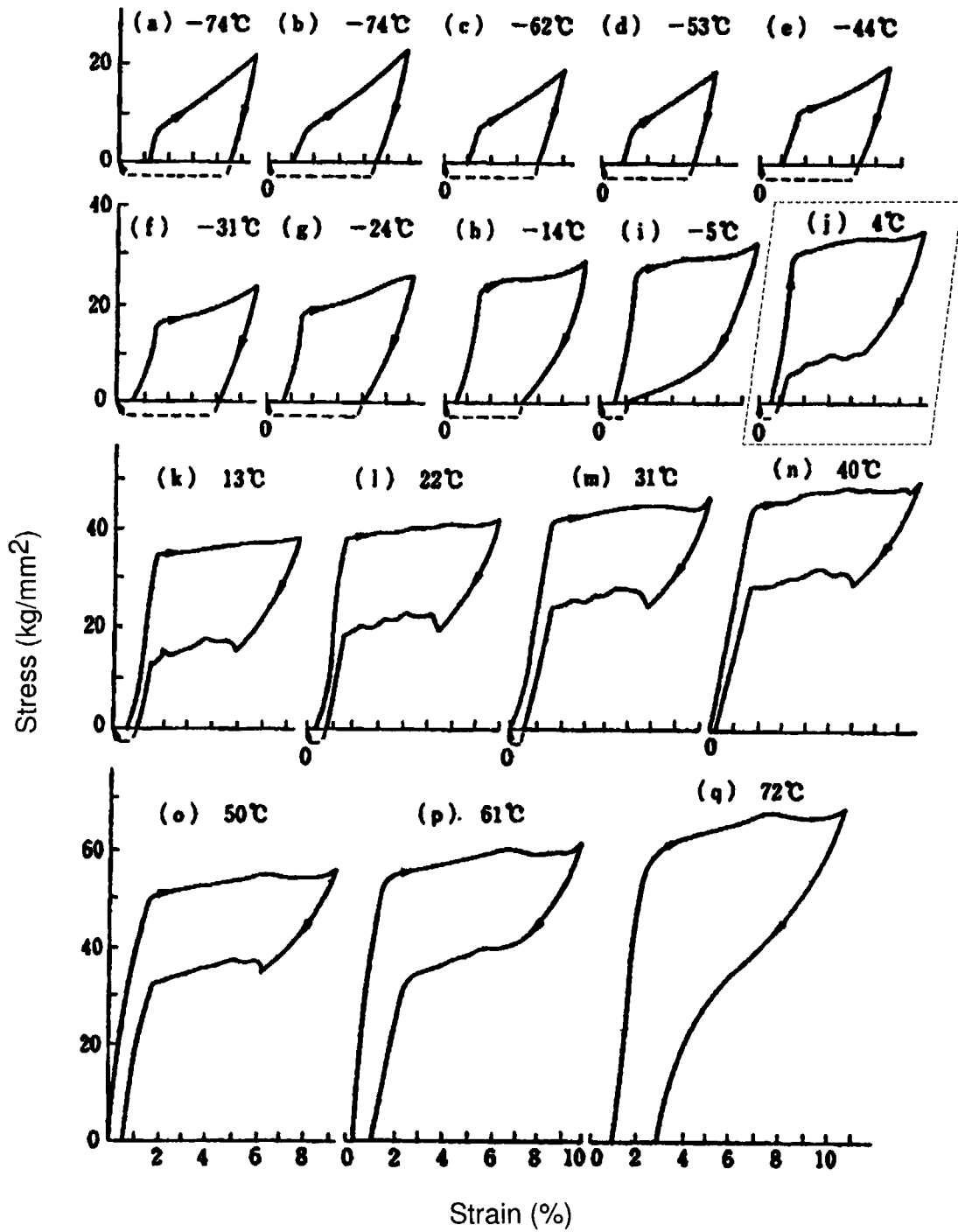


Fig.5 Mechanical characteristics of SEA material

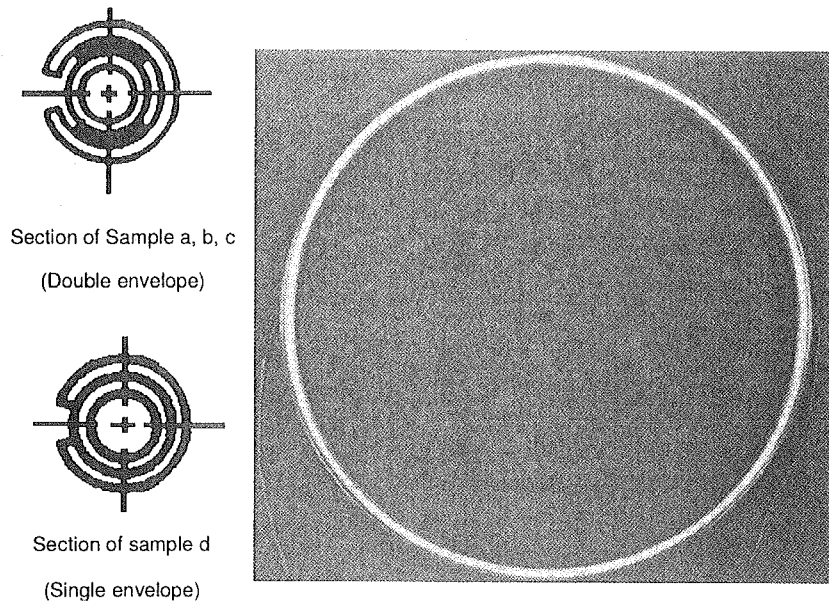
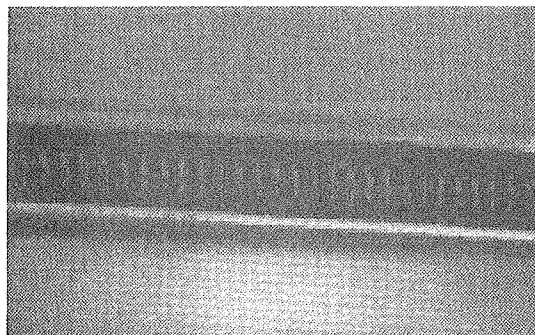
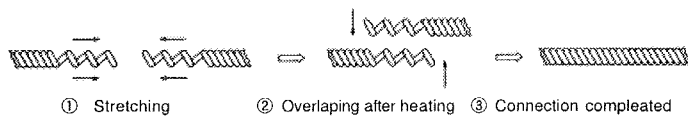


Fig.6 External view of SEA gasket fabricated

1.Connection of SEA coil spring



2. Current lead line connection of SEA coil spring

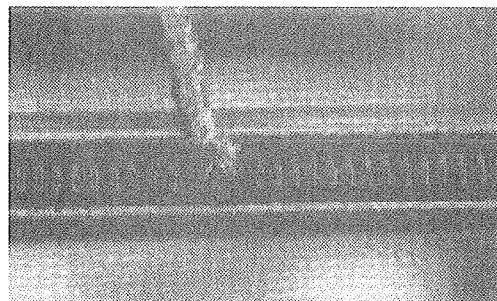
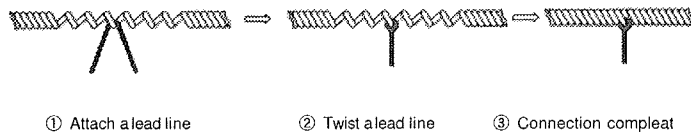


Fig.7 Fabrication method of SEA coil spring

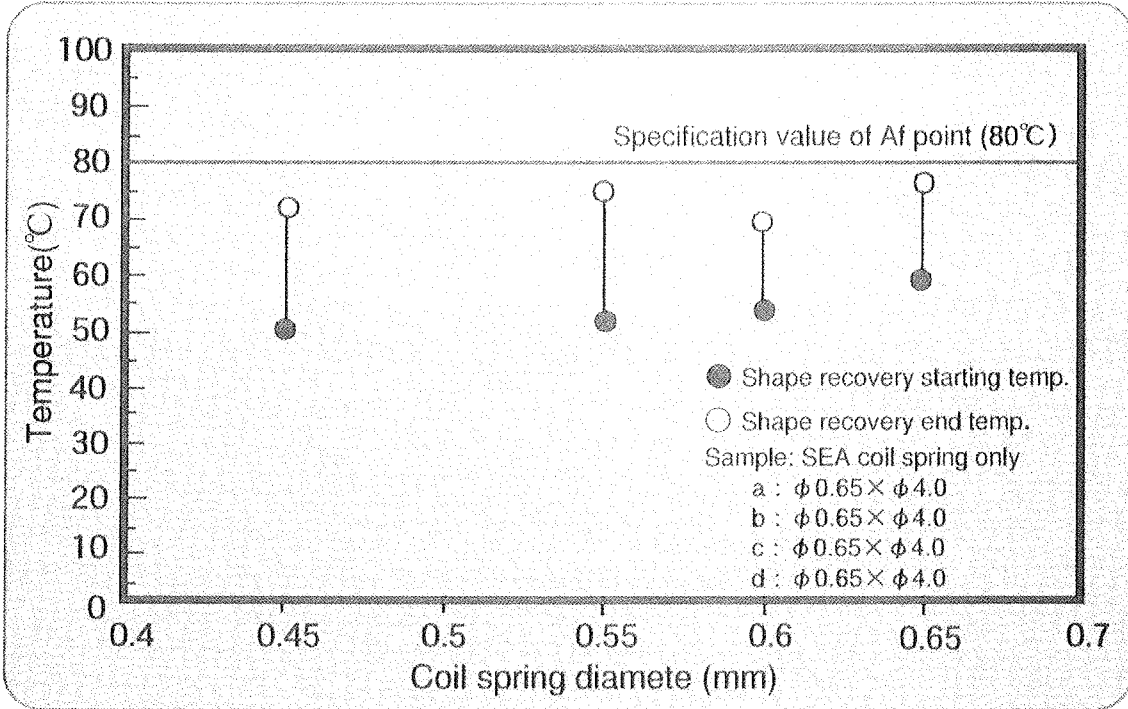


Fig. 8 A_f point measured results

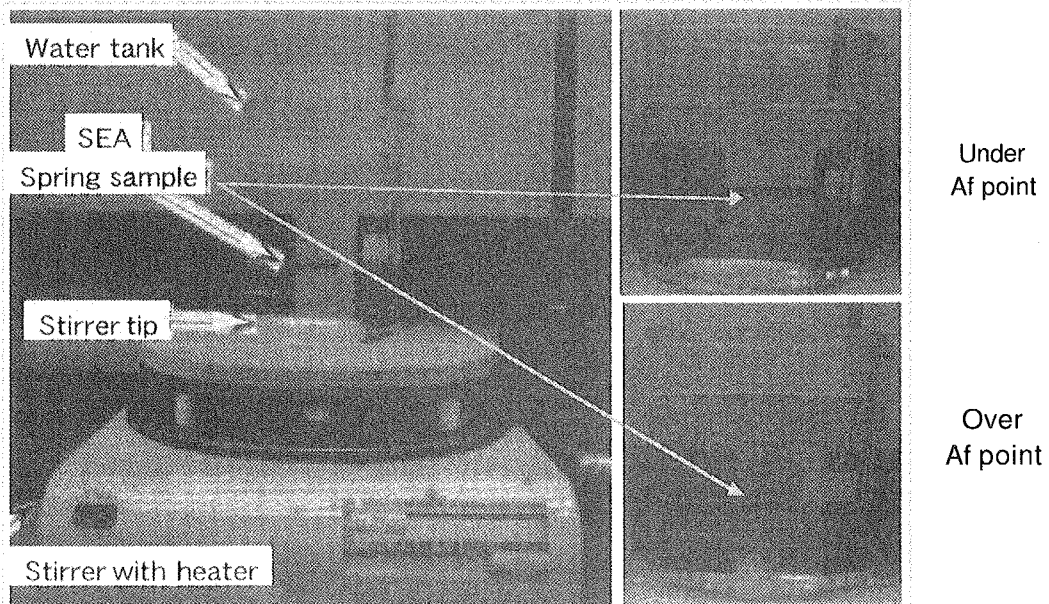


Fig.9 External view of A_f point measurement test

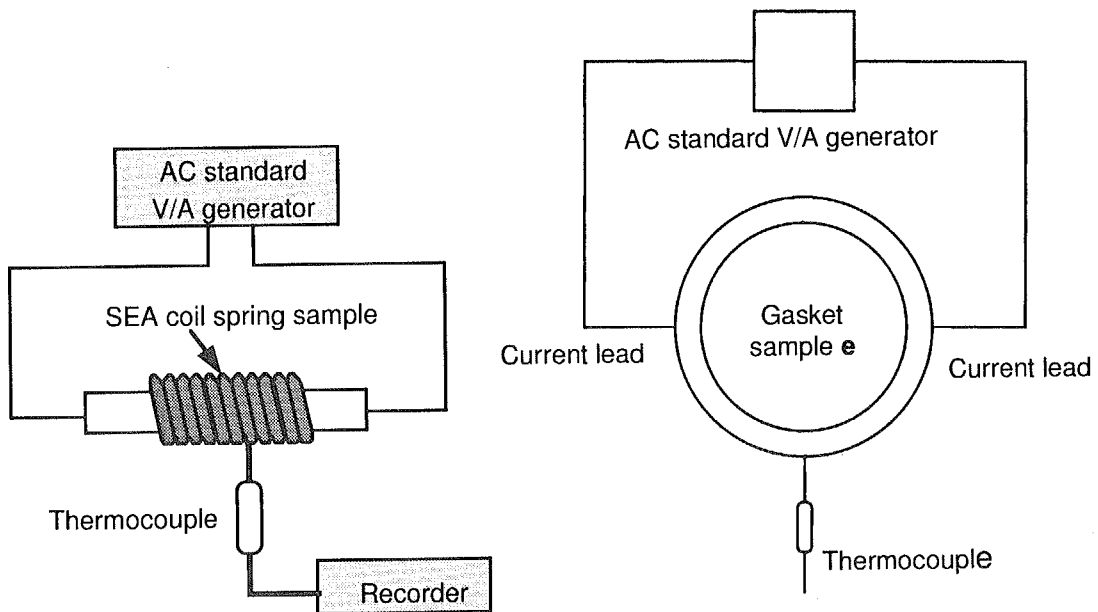


Fig.10 Current lead heating test

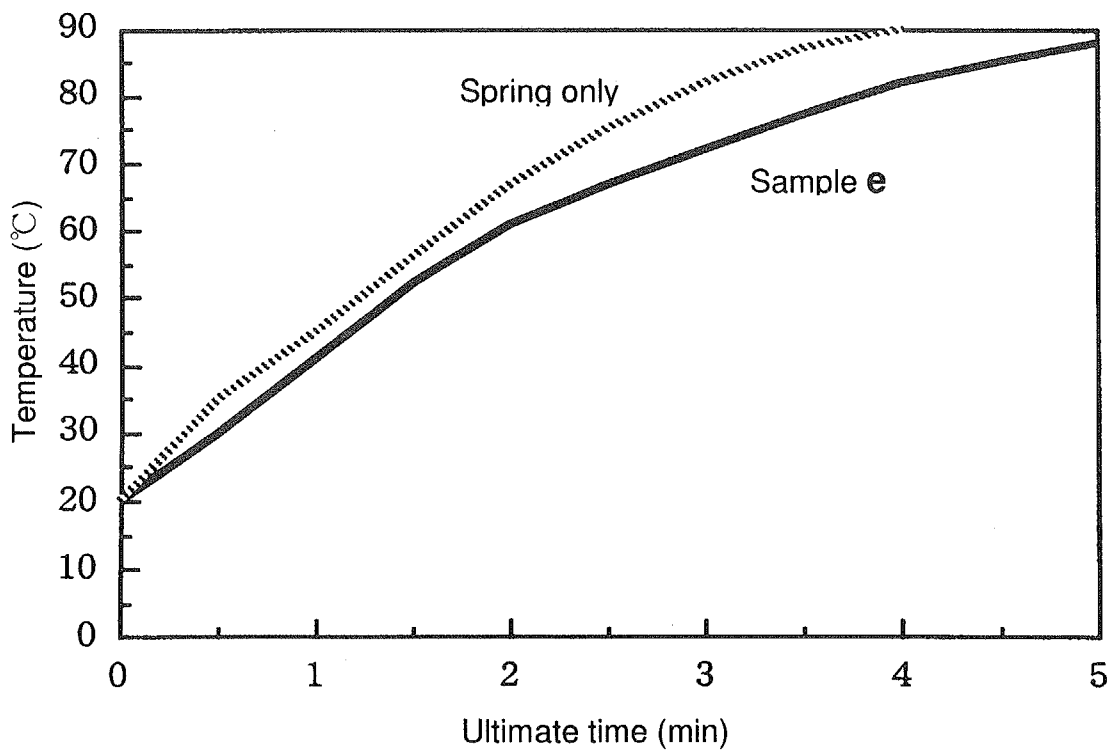


Fig.11 Comparison of heating test results

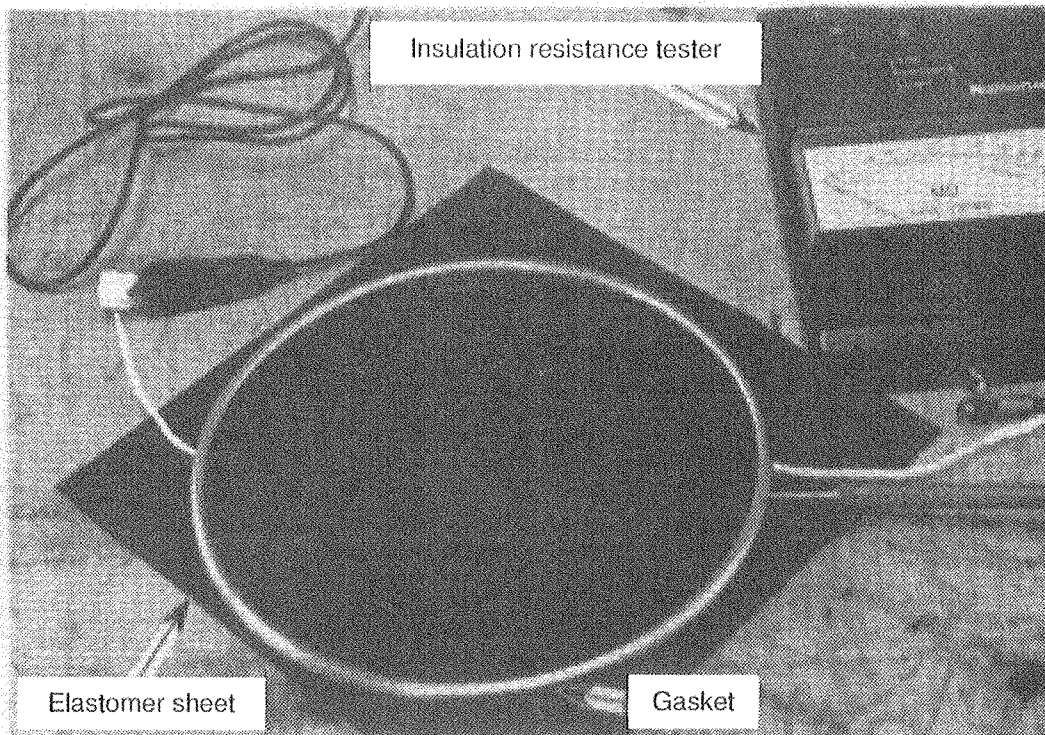


Fig.12 External view of insulation resistance test

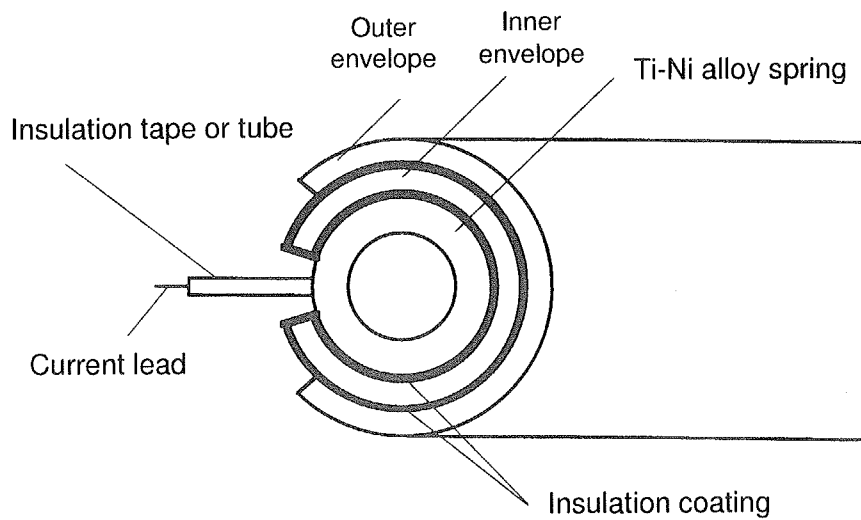


Fig.13 Improvement section of SEA seal gasket insulation

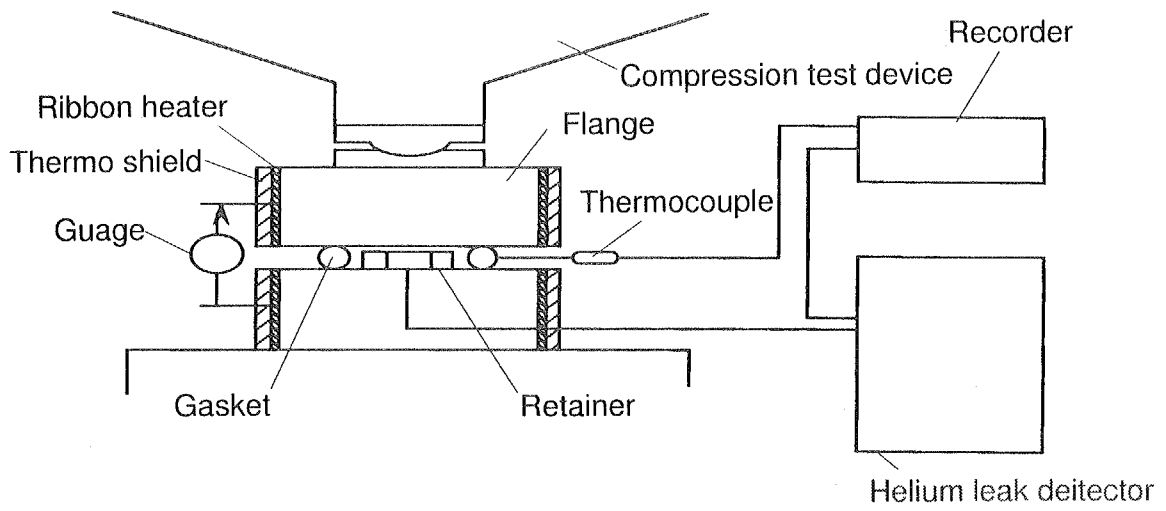


Fig.14 Compression/recovery & seal test equipment

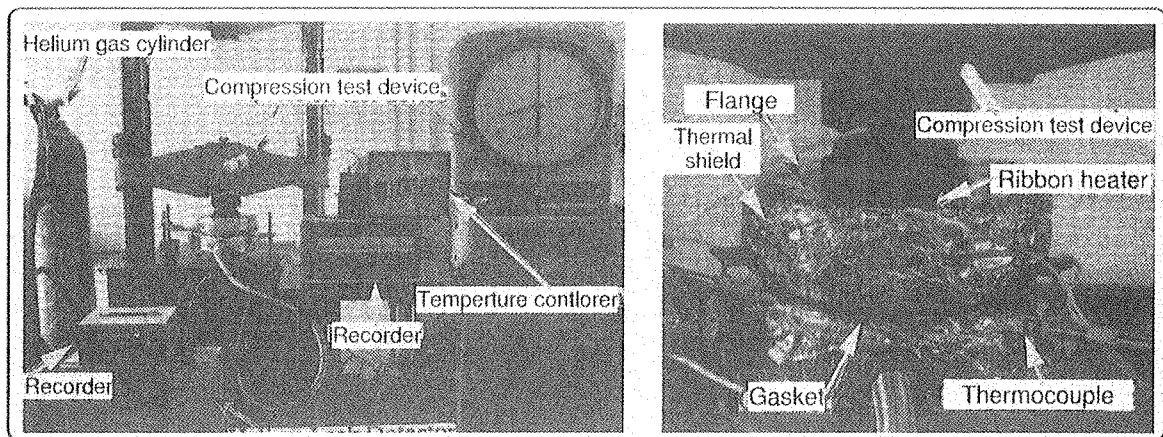


Fig.15 External view of compression/recovery & seal test

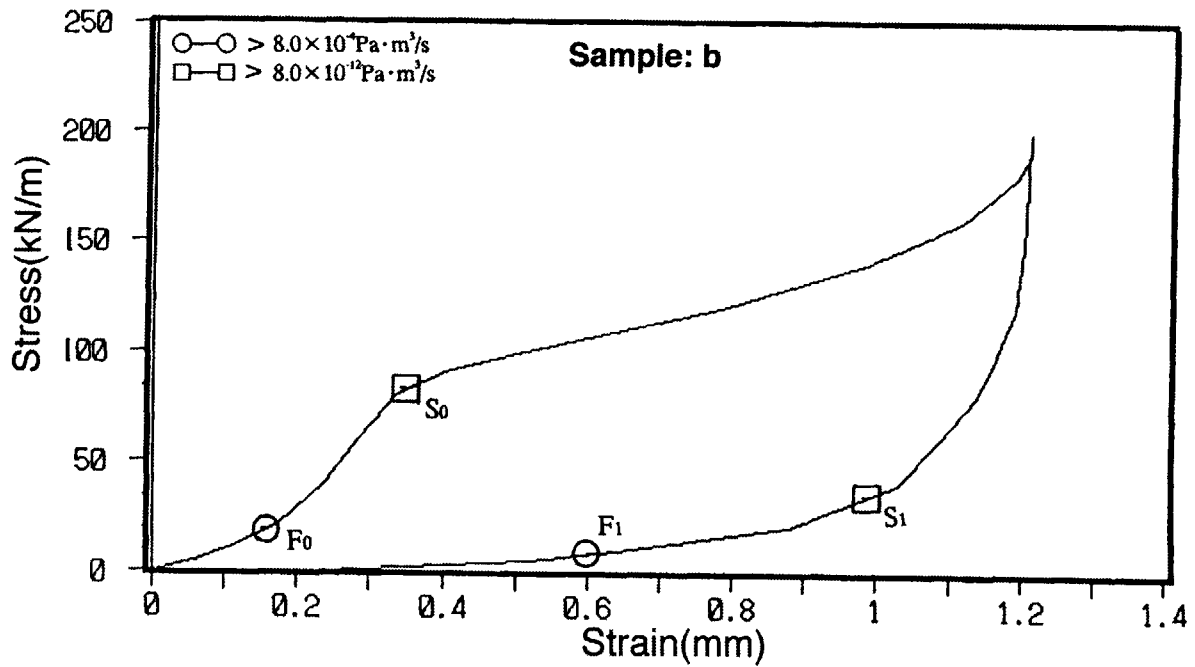
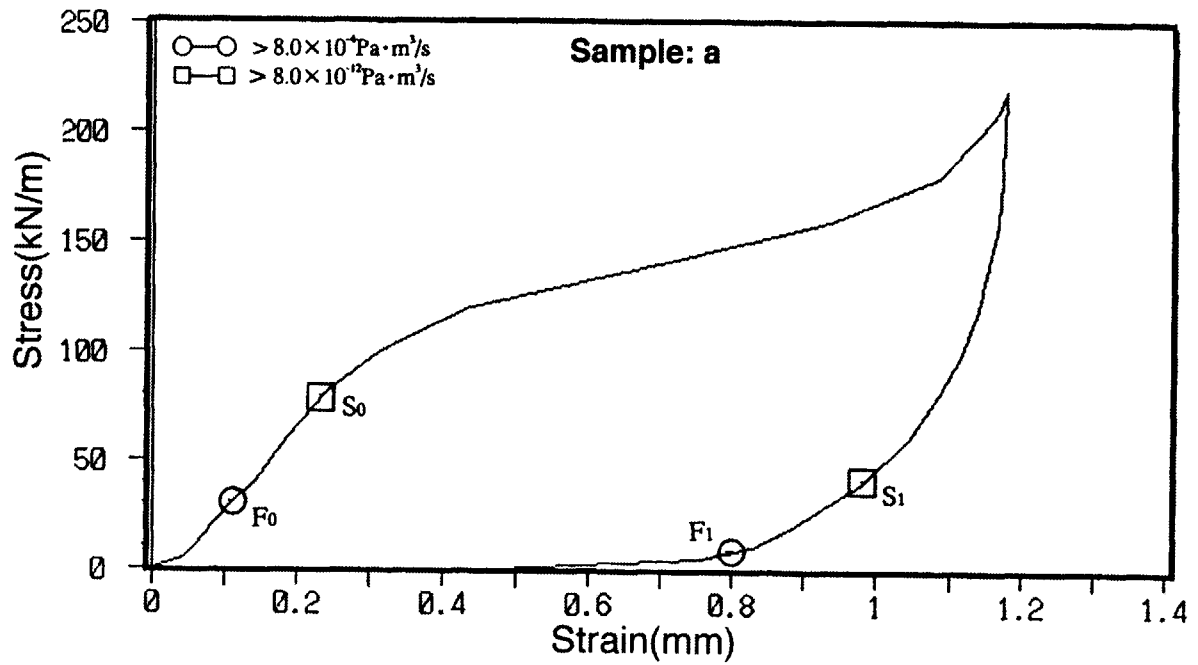


Fig.16 Stress/Strain curve at constant temperature over A_f point

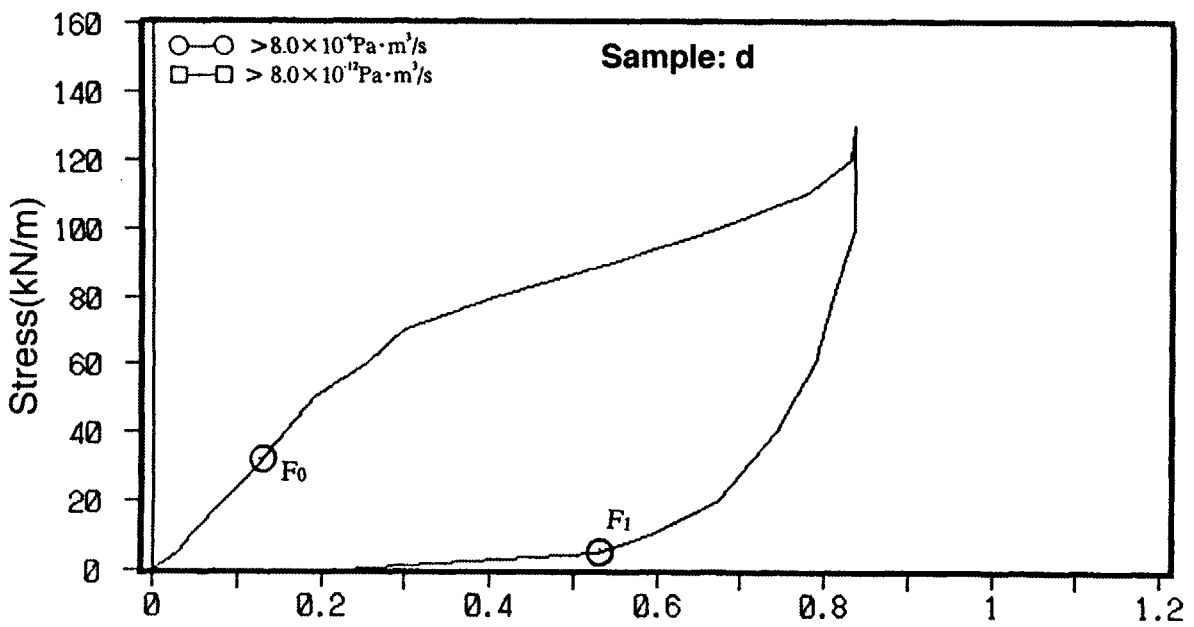
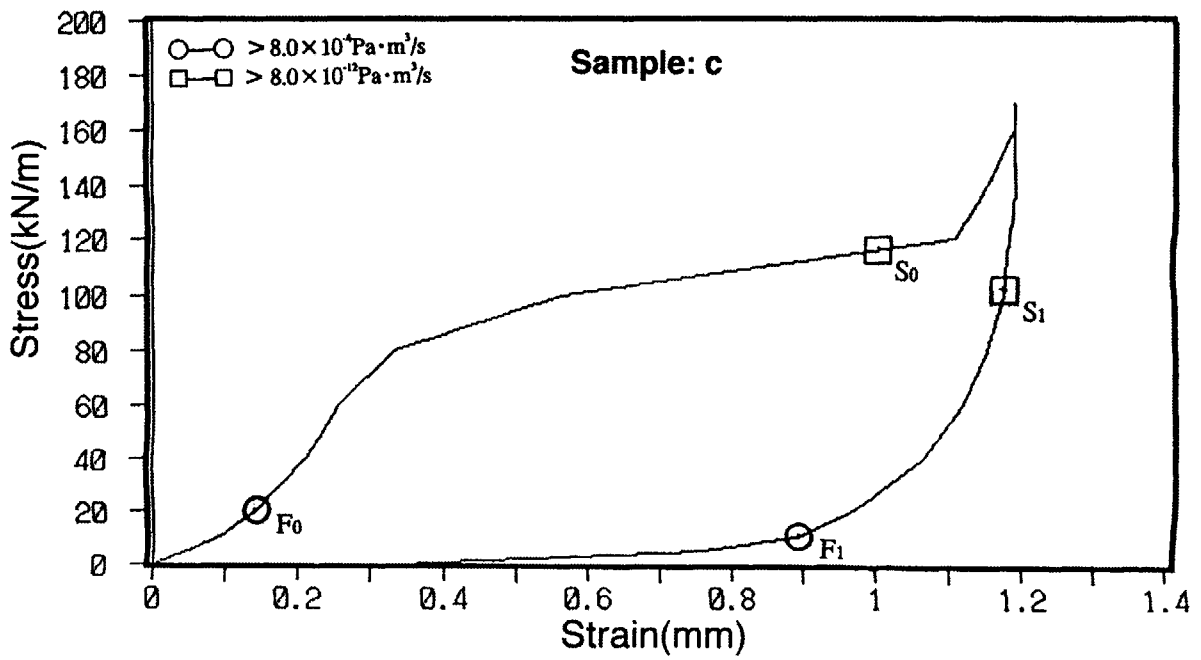


Fig.17 Stress/Strain curve at constant temperature over A_f point

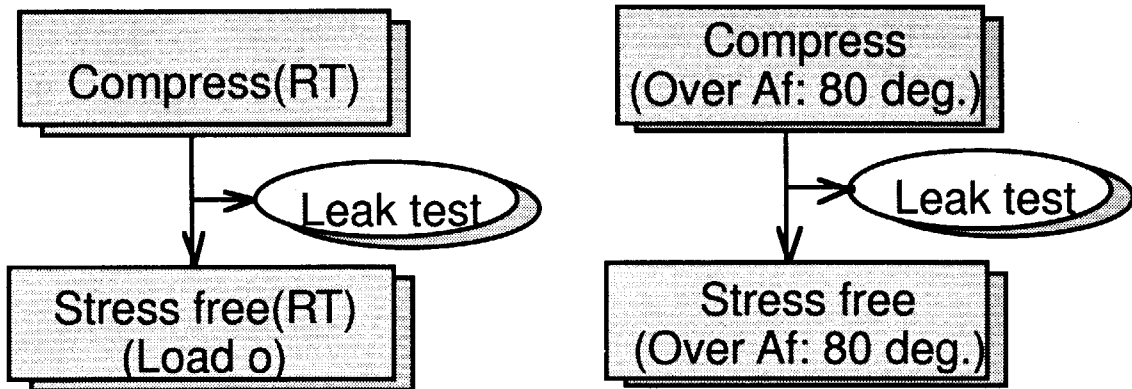


Fig.18 Flow chart of compression/recovery and seal test for constant temperature over A_f point

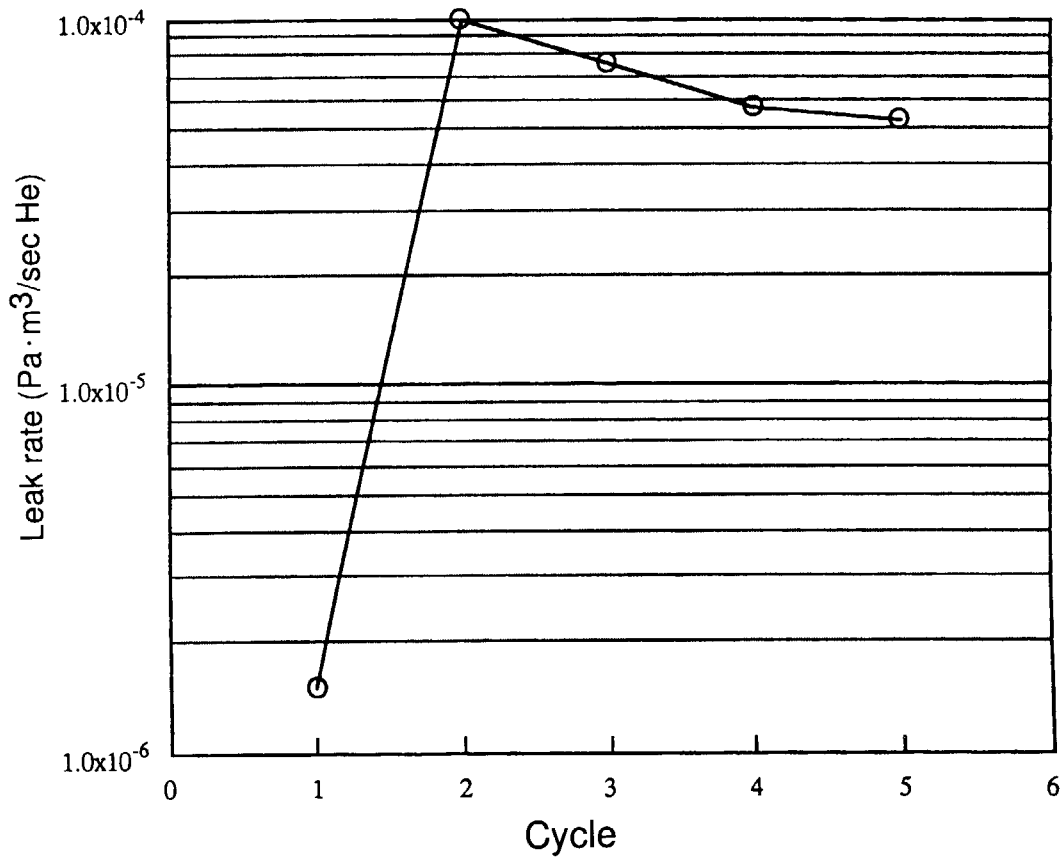


Fig.19 Cyclic seal test results below A_f point

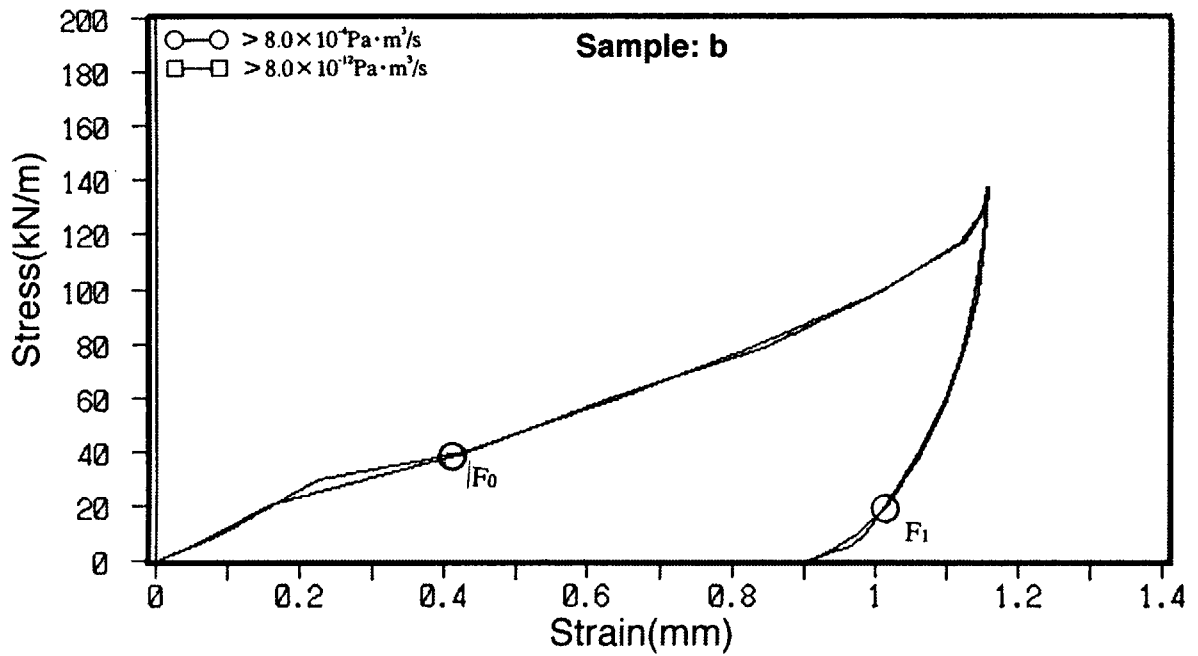
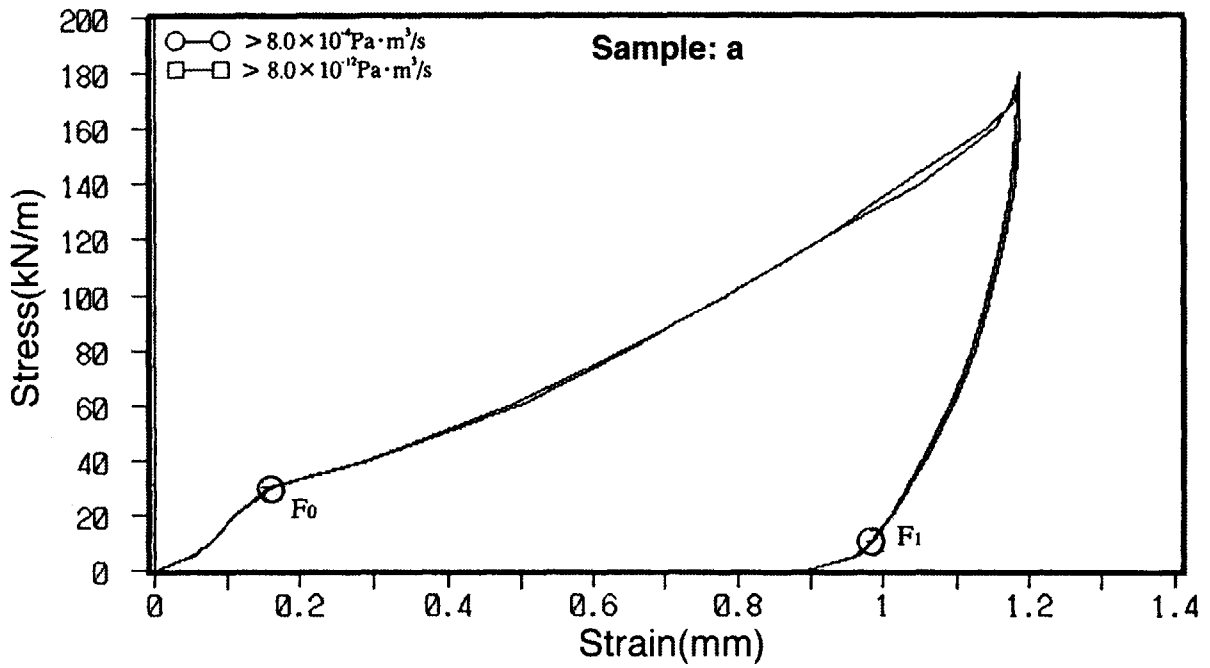


Fig.20 Stress/Strain curve at constant temperature below A_f point

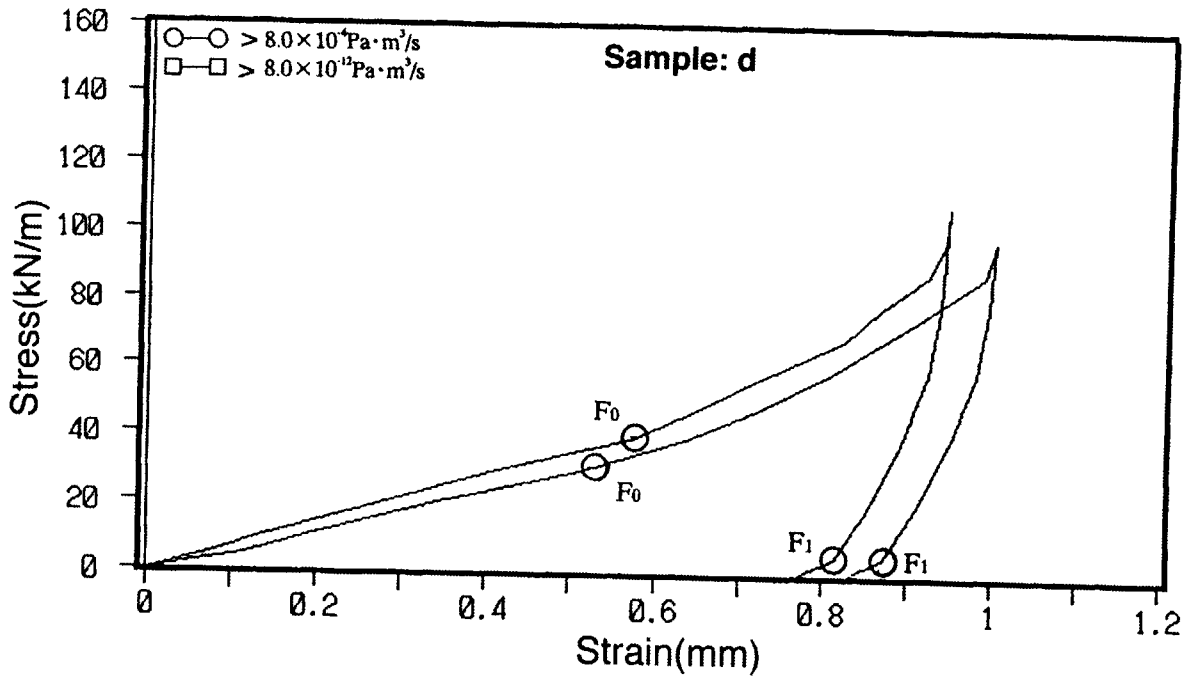
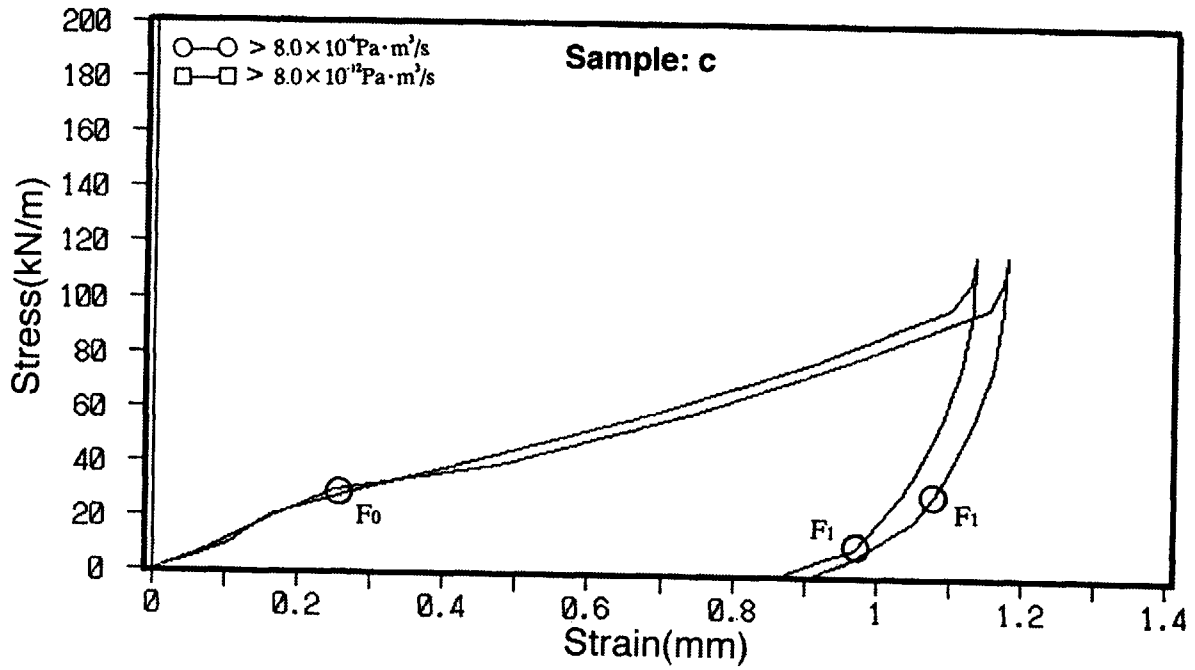


Fig.21 Stress/Strain curve at constant temperature below A_f point

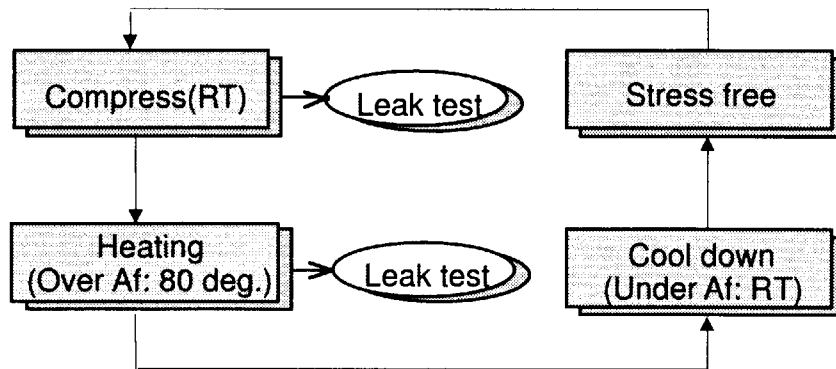


Fig.22 Flow chart of thermal cycle test

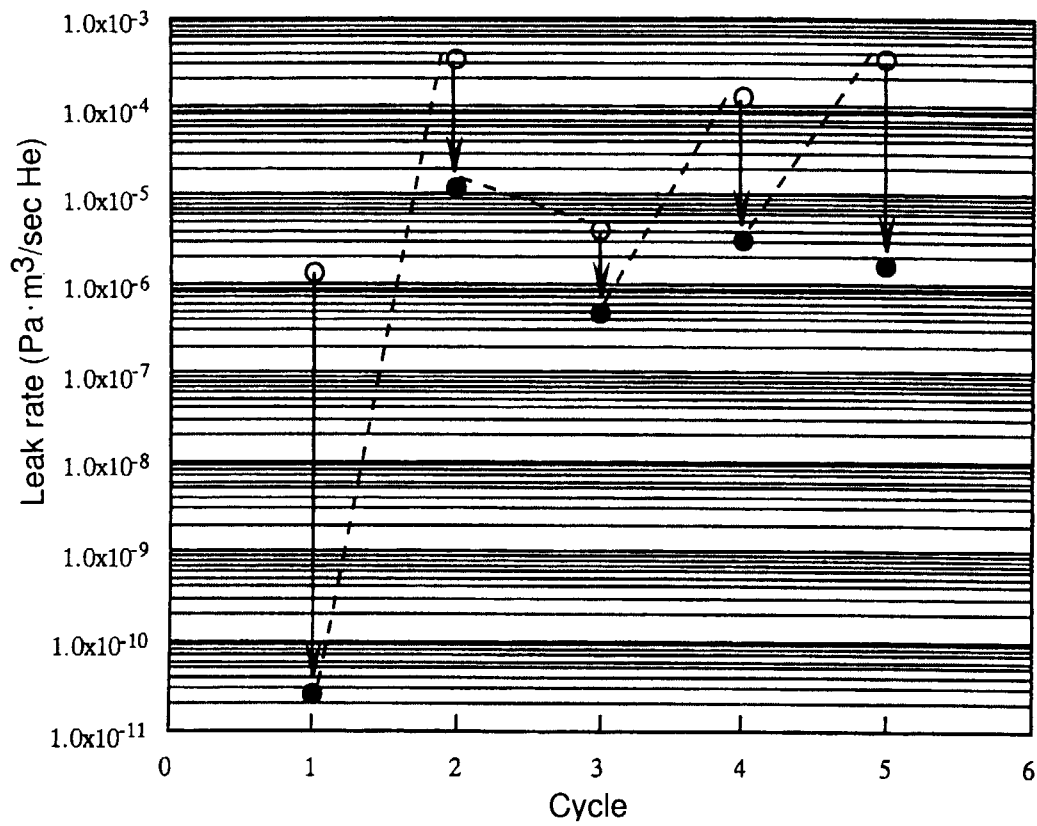


Fig.23 Thermal cycle test results

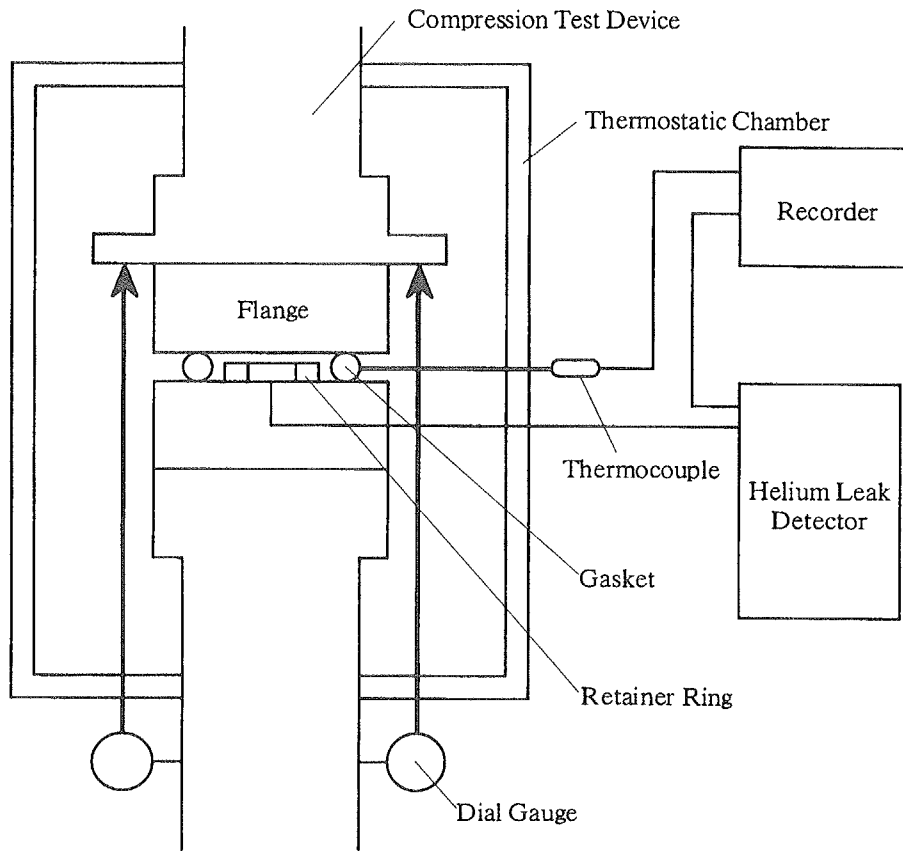


Fig.24 Construction of 100 cycles test equipment

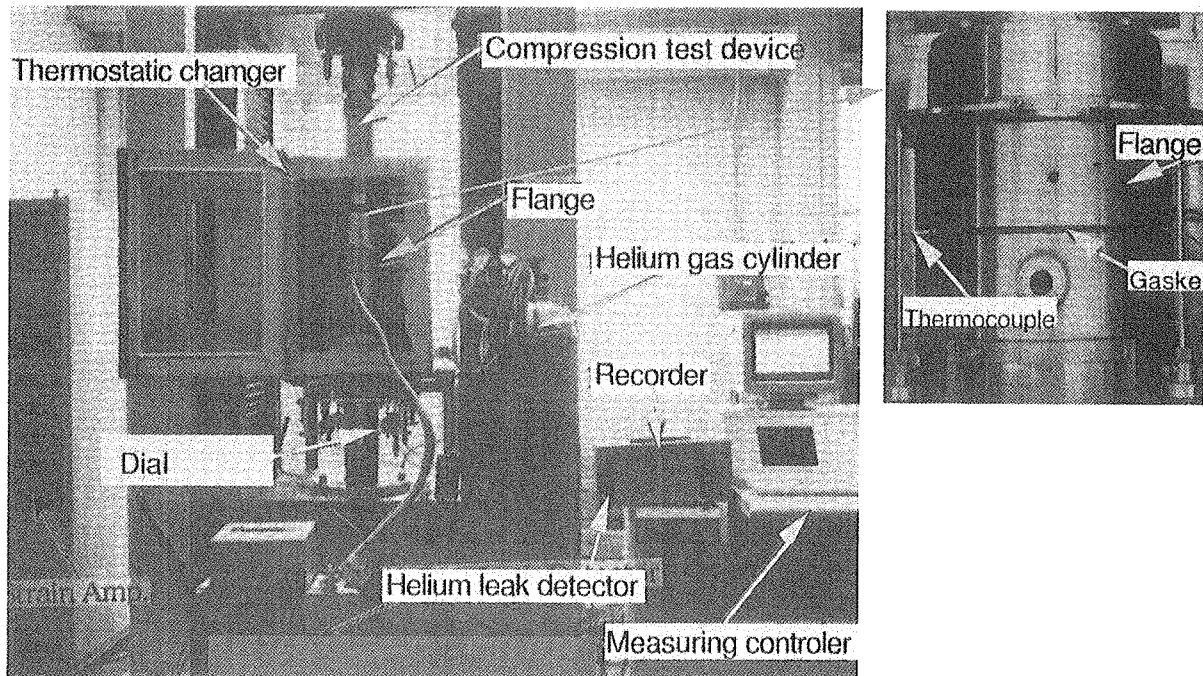


Fig.25 External view of 100 cycles test

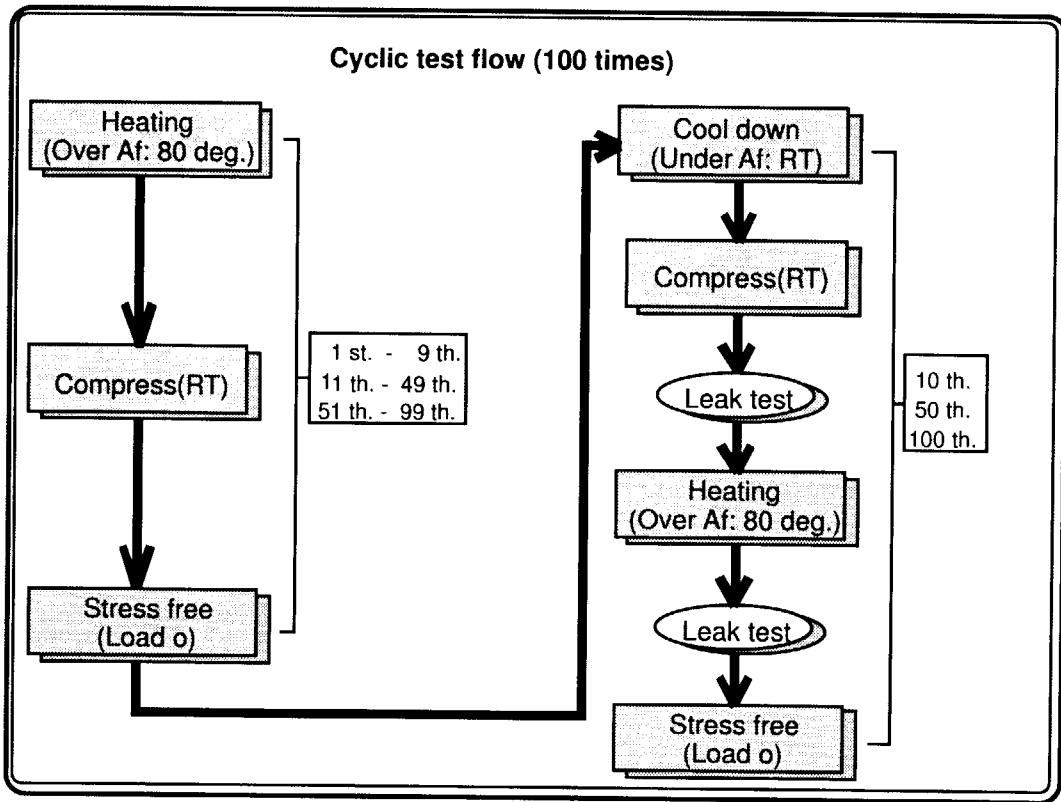


Fig.26 100 cycle test flow chart

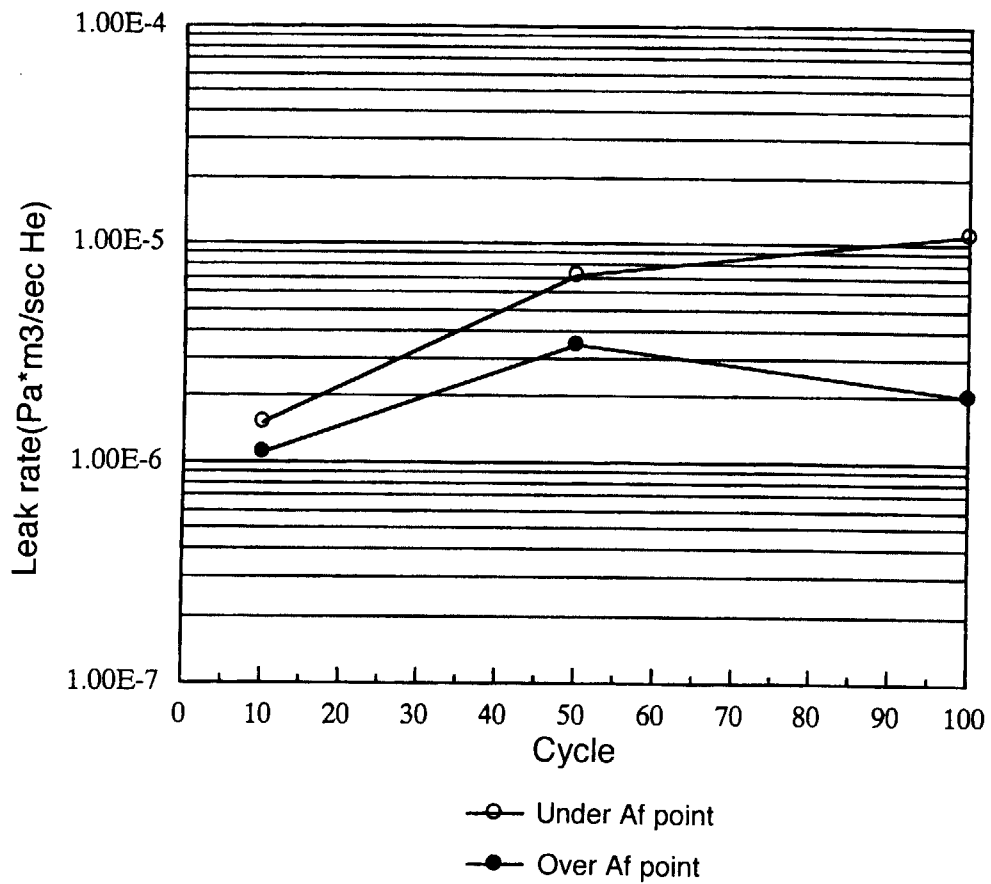


Fig.27 Cyclic seal test results

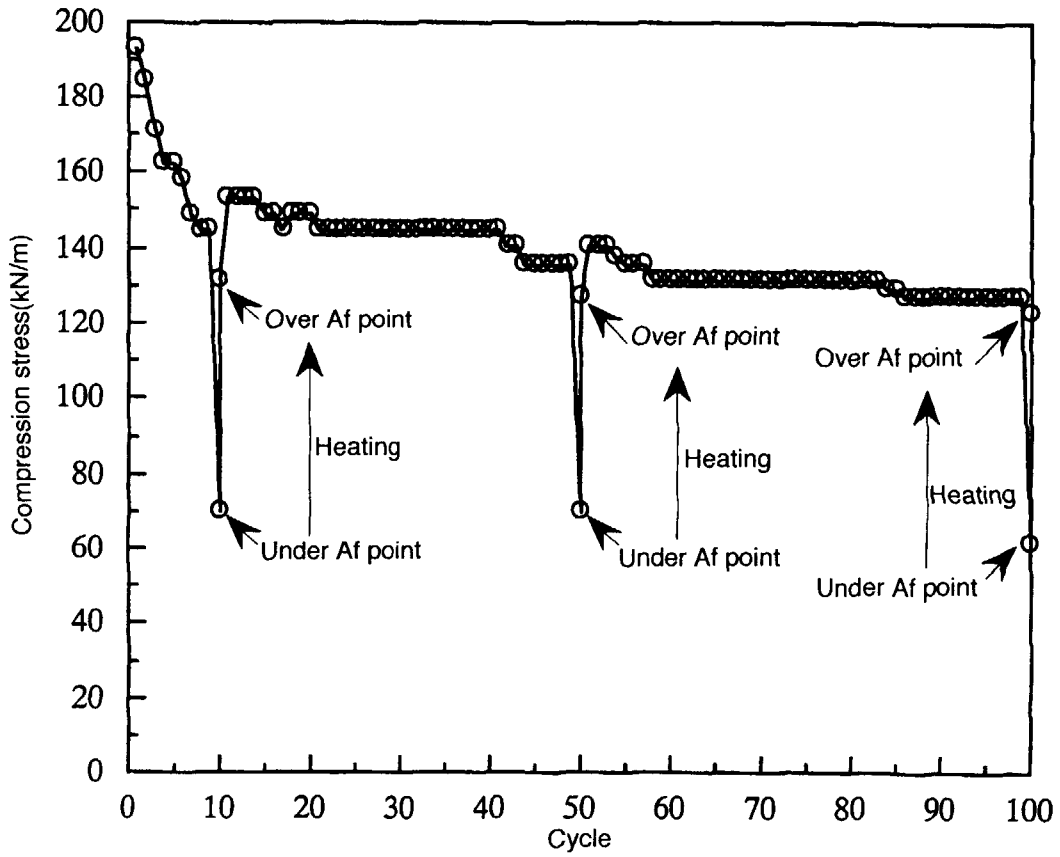


Fig.28 Cyclic compression test results

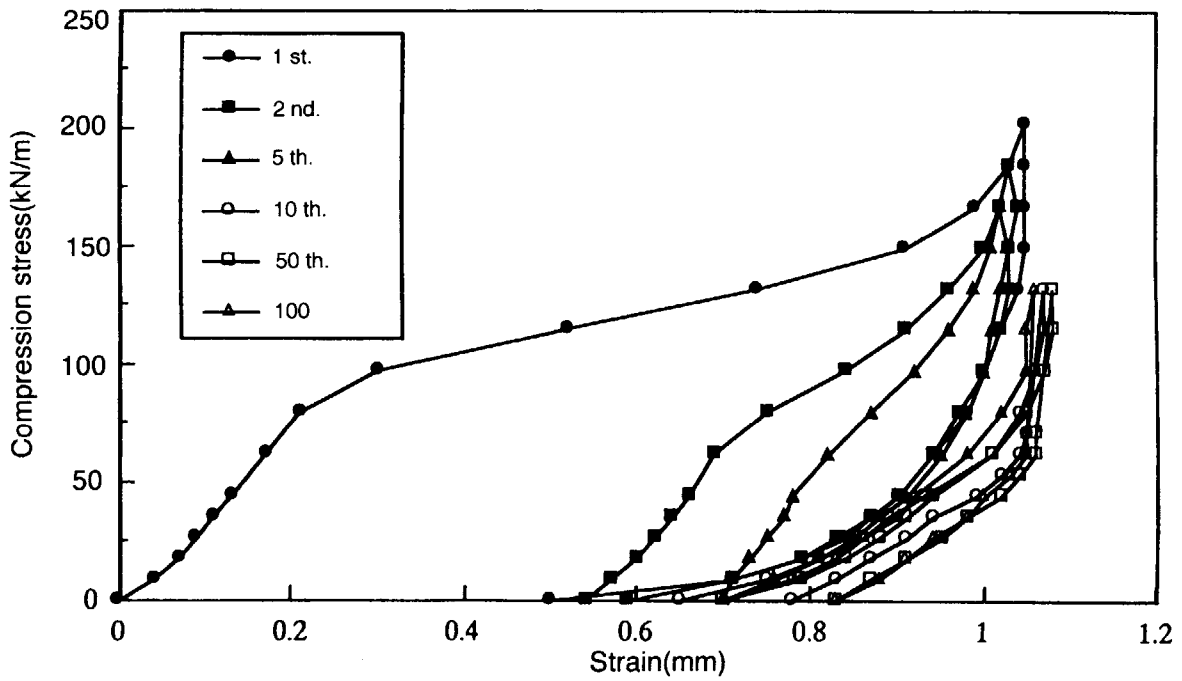


Fig.29 Stress/Strain curve during 100 cycles compression test

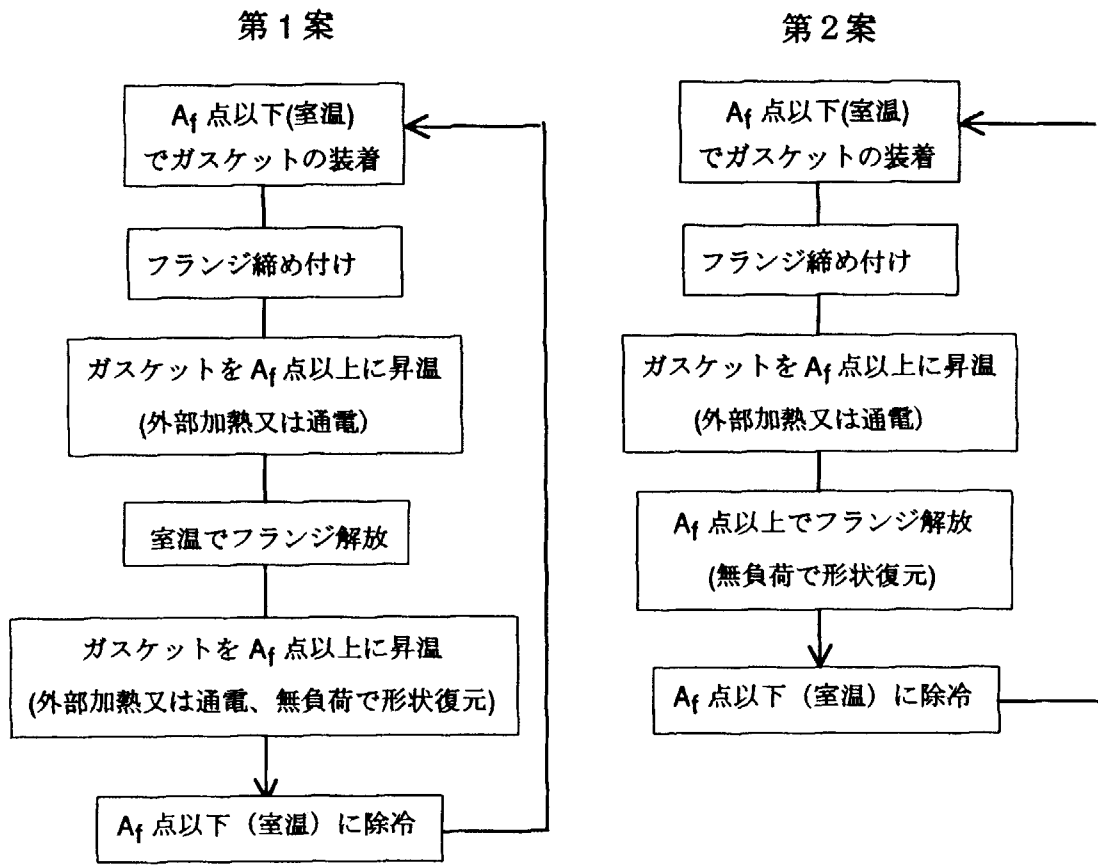


Fig.30 Improvement procedures for cyclic use of SEA seal gasket

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
 1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
 1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
 1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
 1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
 1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
 1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
 1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
 1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC関係理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (=N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605 J (計量法) = 4.184 J (熱化学) = 4.1855 J (15 °C) = 4.1868 J (国際蒸気表)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS (仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499 W
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

超弾性合金シールガスケットの開発