

JAERI-Tech

98-004



大口径真空容器内観測窓用Oリング変形
測定試験報告

1998年1月

塚原美光・閨谷 譲・砂押秀則・蒜 守正・長島 章

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、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, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

大口径真空容器内観測窓用Oリング変形測定試験報告

日本原子力研究所那珂研究所炉心プラズマ研究部

塙原 美光・閨谷 譲・砂押 秀則

蔀 守正・長島 章

(1998年1月5日受理)

本試験は大口径観測ガラス窓における新たな真空シールの構造基準をバイトンOリングの潰し代の大気圧による変形量、並びにJT-60Uと同等のベーキングにおけるバイトンOリングの塑性変形量のふたつの点で評価検討し、この構造基準の妥当性を確認すると併に最適なバイトンOリングの断面形状を選定することを目的とした。この構造基準において大気圧による面圧では現在ある全ての真空窓においてギャップが確保できることを確認し、ベーキングにおけるバイトンOリングの塑性変形にも異常の無いことを確認した。

Test of the O-ring Deformation
for a Large Sized Vacuum Optical Window

Yoshimitu TSUKAHARA, Yuzuru NEYATANI, Hidenori SUNAOSHI,
Morimasa SHITOMI and Akira NAGASHIMA

Department of Fusion Plasma Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 5, 1998)

Test of the viton O-ring deformation has been performed for a new type of large sized vacuum window having a diameter of more than 80 mm. To prevent a vacuum leak mainly caused by the crack of optical window, a new standard for the viton O-ring has been proposed. The size of the O-ring was determined by the requirement to keep the finite gap between the optical window and the supported metal flange at any time. The validity of this new standard was confirmed by the deformation test for the O-ring under the condition of vacuum pumping and the baking.

Keywords:Large Sized Vacuum Window, Viton O-ring, Optical Window, Baking

目 次

1.はじめに	1
2.新たなバイトンシール真空ガラス窓の構造基準の検討	2
3.0リングの試験目的と結果	3
3.1 真空排気時の0リング変形測定	3
3.2 ベーキング時の0リングの変形測定	4
3.3 考察	4
4.まとめ	6
謝 辞	6
参考文献	6
付録1 ボルトの締付けトルクによる軸荷重	19
付録2 真空容器の振動による追加荷重	20

Contents

1. Introduction	1
2. Structure of a New Type of Large Sized Vacuum Window Sealed by Viton O-ring	2
3. Deformation Test for the O-ring	3
3.1 Deformation by Vacuum Pumping	3
3.2 Deformation by the Baking	4
3.3 Discussion	4
4. Summary	6
Acknowledgement	6
Reference	6
Appendix1 Axis Load by the Torgue of Clamping Bolts	19
Appendix2 Additional Load due to the Vibration of the Vacuum Vessel	20

This is a blank page.

1. はじめに

プラズマからの広範囲の波長にわたる電磁波はプラズマ内部の情報を得るために重要なものであり、これらの電磁波の測定装置とプラズマの間に窓を置く場合には、測定波長帯の電磁波が透過できる窓でなければならない。このため、可視光～ミリ波帯の計測には石英やサファイヤ等のガラス窓が使用される。JT-60Uにおけるこれらの観測窓は、トーラス全周に渡って多くの場所に設置され、各計測器の特性や使用目的により据え付け場所や窓自体の大きさ等が多岐に渡っている。

真空タイトな窓としては、コバルト等の金属をガラスに融着させるものが使用されている。しかしながら、この方式は金属を融点付近まで加熱して接合するため、加熱時に温度むらが生じるとガラスに熱歪みが生じ破損する恐れがある。この傾向は大口径の窓ほど大きい。この製作上の制約から、これまでにJT-60Uで使用した金属融着型の窓は、120mmΦが最大であった。加えて、この120mmΦの窓は実験放電中のプラズマからの輻射熱によるガラスの温度の不均一が原因と思われるクラックが発生した経験がある。これはガラスの周辺部がコバルトで固定されているので、ガラスの膨張によって周辺の接合部に歪みが発生したためと考えられる。このため、現在は金属融着型の窓の大きさは80mmΦ以下に限って使用している。

しかし、プラズマ諸量の空間分布計測や測定光量を充分に確保する必要のある場合には大口径の窓が不可欠である。そこで、大口径の窓では、ガラスの膨張による歪みの発生をさけるためにバイトンOリングを使用して半径方向の歪みを逃がす方式をとっている。一般に、Oリングによる真空シールには、使用するOリングとフランジ溝の関係から次の2種類の方式がある。¹⁾

(1) Oリングを挟み込む両側のフランジが面接触した状態でOリングの弾性で真空保持する方式。面接触した状態で、真空シール性能が確保されるように溝の深さを決めている。この場合、溝の断面より小さな断面積のOリングを使用することにより、面接触した状態以上にOリングはつぶれないで締め付けトルクを厳密に管理する必要がない。

(2) Oリングが溝の断面より大きく、溝からはみ出した状態で真空保持する方式。この場合、フランジの両面は接触しない。但し、ガラスに過大な力が加わらないようにOリングに加わる力を制限する必要がある。このため別途力が過大に加わらない構造を設けるか、ボルト締めのトルク管理を行う必要がある。

金属フランジのシールでは(1)の使用方法が一般的であるが、ガラス窓を固定する場合(1)の方式ではガラスとフランジの金属が接触することになる。この時ガラスは、大気圧(100Kgのオーダ)以上の力で押し付けられることになり、面の仕上げ具合や圧力によるたわみ等によっては、局所的に過大な応力が発生しガラス窓の破損に至ることが考えられる。

そこで、(2)の方式でガラスとフランジの金属が接触しないような大口径窓用のシールの構造基準を新たに検討し、その基準の妥当性を確認するためにOリングの変形量の確認試験を行った。以下に検討及び試験の内容を示す。

2. 新たなバイトンシール真空ガラス窓の構造基準の検討

窓がフランジと直接接触しないように、フランジ溝より断面積が若干大きなOリングを使用し、面圧の支持はOリングで持たせる第1図のような構造を採用する。そして、以下の用件を全て満たすように構造を決める。

- 1) 大気側フランジが取付けられた時、振動等で大気側フランジがずれ落ちないようにフランジにインロー構造を設ける。
- 2) Oリング溝の断面積をOリングの断面積より小さくし、真空排気で大気圧が加わっても、ガラス窓とフランジが接触しない構造にする。溝が完全にOリングで埋った状態でOリングは0.5 mm以上はみ出す様にして ($a \geq 0.5 \text{ mm}$)、フランジとガラス窓の接触を防ぐ。

$$\text{[条件式 (1)] } a = \frac{S_0 - S_F}{W} \quad a \geq 0.5 \text{ mm}$$

- 3) Oリングの真空シール性能が確保されるように、大気側フランジとポート側フランジがインロー部で面接觸した状態でのOリングのつぶし代を、Oリングの径の20%以上とし、さらにフランジとガラス窓の接觸を防ぐように窓を設置する部分の深さを決定する。
具体的には、

- 3-1) Oリングが溝を完全に塞いだ状態で、最も溝が浅く且つOリングが太い場合のOリングのはみだし量 (a) の2倍程度の余裕がガラス窓とフランジの間に出来るよう窓をはさむフランジ間のギャップを決める。

$$\text{[条件式 (2)] } D_1 - d \geq 2 \times a$$

- 3-2) Oリングが溝を完全に塞いだ状態で、制作公差を考慮して最も溝が深く且つOリングが小さい場合でも、0.5 mm以上溝の外にはみだし [条件式 (1)] 、且つつぶし代をOリングの径の20%以上確保する様に [条件式 (3)] 、溝及びOリングの断面積を選定する。

$$\text{[条件式 (3)] } D_2 - d \leq 2 \times 0.8 \Phi_0$$

- 4) インローの最大公差だけフランジ面に平行にずれてもフランジの加重が窓の側面に加わらないように充分なスペースを確保する。
また、フランジが窓と接觸しても良いように窓の周囲にテフロン、カプトン等のシートを巻き、緩衝材とする。

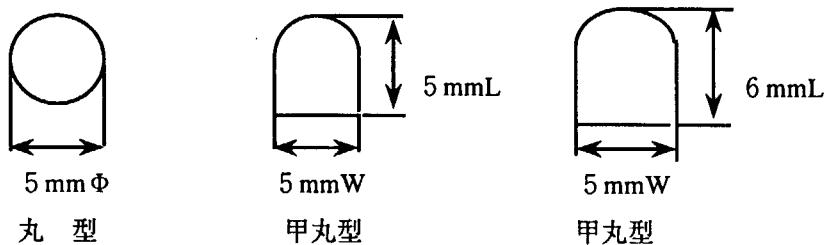
$$\text{[条件式 (4)] } \Phi_F - \Phi_W \geq 4 \text{ mm}$$

3.Oリングの試験目的と結果

本試験の目的は、この真空窓のフランジ構造変更に対応して、Oリングの潰し代の確認試験を行って大気圧による変形量を評価し、最適なOリングの断面形状を選定すること、併せてJT-60UのベーキングにおいてOリングの塑性変形量を評価することである。今回は、既存のフランジに採用されているものの内から1種類（幅5mmW×深さ3mmL）のフランジ溝について5mmΦ丸型、5mmW×5mmL甲丸型、5mmW×6mmL甲丸型の3種類のOリングの試験を行った。

今回採用する構造基準を確保するには、フランジ溝寸法またはOリング径のどちらかを変更することで可能になるが、今回の試験ではJT-60Uのポートに溶接されている既存のフランジでもガラス窓を押さえるフランジ溝の寸法変更のみで対応できるように、Oリングの寸法を変更することで対処することとした。この方針により既存のフランジ溝の寸法を変えることなく、使用するOリングの径とフランジ間距離（第1図内のD1）の調整を行うことにより、窓とフランジが接触しないようにできることを確認することとした。

以下に3種類のOリングの断面図を示す。



3-1. 真空排気時のOリング変形測定

1) 測定手順

- イ) 第2図に真空フランジ試験用装置を示す。この装置のOリング用フランジ溝の寸法はV150の標準（5mmW×3mmL）のものを使用した。
 - ロ) 真空フランジ試験用装置の溝に試験用Oリングをセットし、ガラス窓を模擬したSUS製のダミー用窓をダミー窓固定用の回転フランジで固定する。この際フランジを固定するためのボルトには極力トルクを加えず、ダミーの窓が動かない程度とした。
 - ハ) SUS製のダミー用窓中心及び窓周辺部の1ヶ所を測定位置と定め、ノギスにてSUS製ダミー用窓の位置の真空排気時並びにボルトの締め付け時の変化を測定する。第2図に測定位置を示す。
 - ニ) ロータリーポンプにより、真空排気を行いピラニー真空計を見ながら1Pa及び0.1Paの真空度でのOリングの変形量を測定する。実際にはノギスの読みをもとに、下記に示す式にて窓とフランジ間のギャップを求めた。第3図に各測定部の位置を示す。また、式中のd2、d3、d4は実験での測定値であり、d1、d5、Dは製作品の実測値である。
- 式 ギャップ = $(d_1 + d_2 + d_3 - d_4 - d_5) - D$
- ホ) 次にP≤0.1Paの真空度でボルト（M10×8本）を150Kgf.cm及び200Kgf.cmのトルクで締め付けその時のギャップの変化量を測定する。

この様な方法で前述した3種類のOリングについて試験を行った。

2) 測定結果

測定の結果は表1に示すとおりである。この結果から得られた3種類の断面形状のOリングの面圧とギャップとの関係を第4図に示す。図中の縦軸のエラーバーはノギスの測定誤差によるものである。左端の点は真空排気しない状態でフランジを固定した状態でのギャップを示す。また、図の下側の矢印はJT-60Uで現在使用されているOリング使用窓の面圧（表4参照）の範囲を示す。5mmW×6mmL甲丸型（■）はOリングの断面の高さが他の2種類のOリングより1mm高いので、ギャップも同一面圧で大きくなっている。また、この時の面圧の増加分は付録1²⁾に示すボルトの締め付けトルクと附加荷重の関係を基に算出した。

3-2. ベーキング時のOリング変形測定

1) 測定方法

実際の真空容器のベーキングの条件を模擬するため、真空フランジ試験用装置（第2図）の真空容器を模擬した部分のみをJT-60Uのベーキング温度である300℃に加熱して4日間この状態を維持し、その時の取り付けフランジの温度を測定すると同時に窓とフランジのギャップの変化を調べた。この4日間連続ベーキングを3週間に渡り実施した。また、フランジ部の温度は第2図内に示すA点、B点、C点、D点、の4ヵ所で測定した。さらに常温から約3時間で300℃に加熱することを含め、昇温開始から24時間経過するまで300℃の温度を維持し、その後6時間で常温に戻すと言うヒートサイクル試験を3回繰り返し、Oリングの変形状態を確認した（断続ベーキング）。また、この試験はP≤0.1Paの真空度で行い、ボルトの締め付けトルクは加えていない。この様な方法で前述した3種類のOリングについて試験を行った。

2) 測定結果

断続ベーキング時のフランジ等各部の温度の測定結果は表2-1～表2-3に示すとおりである。また、300℃加熱期間中の窓とフランジのギャップの変化を表2-1～表2-3に示す。さらに、ヒートサイクル試験（連続ベーキング）時に測定した常温及び300℃加熱時の窓とフランジのギャップの変化を表3-1～表3-3に示す。測定箇所d2部、d3部、d4部は、第3図と同様である。今回の加熱試験の結果は、いずれの場合も常温での試験結果と有意な差は見られず3種類のOリングとも、熱による伸びや変形は見られなかった。

3-3. 考察

1) 使用Oリングの選定

第4図の結果から、いずれのOリングでもギャップが確保できている。但し、Oリングや溝の寸法公差による誤差を考慮すると、5mmΦ丸型のタイプではその裕度が小さ

いものと予想されるし、 $5\text{ mmW} \times 6\text{ mmL}$ 甲丸型のタイプではギャップが大きくなるため、大気側フランジの再加工が必要になると懸念される。このため、今回は測定結果を基に V 1 5 0 の標準フランジ（溝寸法 $5\text{ mmW} \times 3\text{ mmL}$ ）に、 $5\text{ mmW} \times 5\text{ mmL}$ 甲丸型のOリングを付けた場合を基準として採用することとした。

今回の試験結果を他の径のOリングに適応するための評価検討の考え方を以下に述べる。第4図は、前述したように3種類の断面形状のOリングの面圧とギャップとの関係を示したものであるが、横軸をログスケールで取るとほぼリニアな関係にある。

これを全体の断面高さに対する変形量と面圧との関係で見ると、幅5mmの甲丸型では

$$\frac{dD_0}{D_0} = 0.199 + 0.055 \times \log(P)$$

の関係が成り立つ。ここで、PはOリングに加わる面圧 (kg/mm^2) である。これを第5図に示す。第5図内の◇は円形断面のため、甲丸型のものより変形量が大きくなっている。上式は今回実測した $5 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2 < P < 6 \text{ kg/mm}^2$ の範囲で使用することが妥当である。今回の試験では最終的に窓ガラス自体を、 $5\text{ mmW} \times 5\text{ mmL}$ の甲丸型 Oリングで押さえ 150kgf.cm のトルクを加えることも試みたが、窓ガラスに破損等の異常は見られずこの設計基準が適切であることを確認している。

歪み及び応力は単位面積当たりに加わる面圧に比例するので、この関係は他のサイズの断面が相似のOリングにも成り立つと考えられる。そこで、他のサイズのOリングの変形量を評価し、ギャップを予想する。

表4の現在使用している窓に対して評価した結果を第6図に示す。第6図は、各種Oリングサイズでの面圧と予想ギャップの関係を示したもので、図のシンボルは大気圧が加わった時の面圧を示す。大気圧による面圧では全ての窓においてギャップが確保できることを確認した。▲印5.5mmのOリングでギャップが小さくなっているのは、この窓のフランジ溝の深さが4.7mmと通常のJIS規格品（溝幅5mm、6mmのものは深さ3mm）と比べて深くなっているためである。フランジの窓取付け部分の削り込みの寸法は、ギャップを考慮して、以下の様に寸法を決める。

溝幅 : $W=5\text{mm}$ でボルトの締め付けトルク 150kgf.cm の場合、表1の測定結果よりギャップは $1.17 \pm 0.5\text{mm}$ となるので最終的なギャップを 1.2mm とする。このギャップを決定することにより

$$D_1 = d(\text{窓の厚み}) + 1.2 \times 2\text{mm}$$

となるように選定する。他の径のOリングの場合にも同じ面圧が加わるように溝幅に比例してギャップを決める。例えば溝幅 $W=8\text{mm}$ の場合は $1.2 \times 8/5 = 1.9\text{mm}$ となるので

$$D_1 = d(\text{窓の厚み}) + 1.9 \times 2\text{mm}$$

とする。

2) 振動による影響

JT-60Uに取り付けられる真空窓には運転時のディスラプションによって加速度が加わる。このため窓をずらす方向に力が加わる。この力によって窓がずれると真空リークや

窓ガラスの角がフランジに接触してクラックが生じることが考えられる。このため、真空容器の振動による追加重によってOリングがつぶれて窓ガラスが金属フランジと接触するか または、窓ガラスがポート軸直角方向にずれて金属フランジの角に接触するかの二点について評価した。付録2に示すように、真空容器のディスラプション時の振動による追加重で窓ガラスが金属フランジと接触したり、ずれることはないと考えられる。

4.まとめ

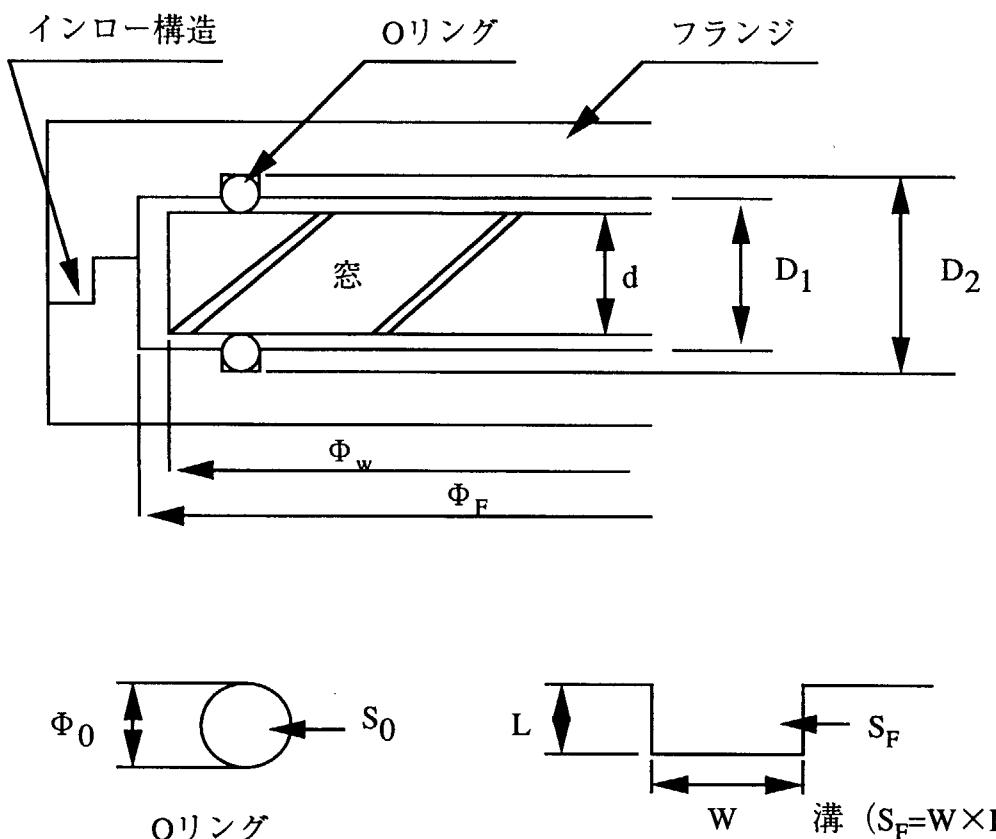
大口径のOリング真空窓の新しい構造基準を決めるため、Oリングのトルクによる潰し代の確認試験を行って大気圧による変形量を評価した。さらに真空容器ベーキング模擬試験を実施し、Oリング取り付け部を40～60℃に加熱した時の試験結果を確認した。この結果ガラス窓が金属フランジに接触しないOリングの形状を決定し、第1図に示すバイトンシール大口径真空ガラス窓のOリングフランジ及びフランジ溝の構造基準が妥当であることを確認した。

謝辞

本報告書をまとめるに当たり、ご指導 ご支援を頂いた森雅博炉心プラズマ第1実験室長並びに芳野隆治炉心プラズマ第2実験室長に感謝いたします。また、Oリングの各種試験に際してご協力を頂いた日本アドバンストテクノロジー株式会社の皆様に感謝いたします。

参考文献

- 1) 実験物理学講座「真空技術」 林 主税 編集 共立出版社 p.513-516
- 2) 機械設計便覧 新版 P.167 (昭和52年) 日刊工業新聞



D_1 : 面接触した時のOリング溝の底辺間の距離

D_2 : 面接触した時の法兰間の距離

d : 窓の厚み Φ_0 : Oリングの外径

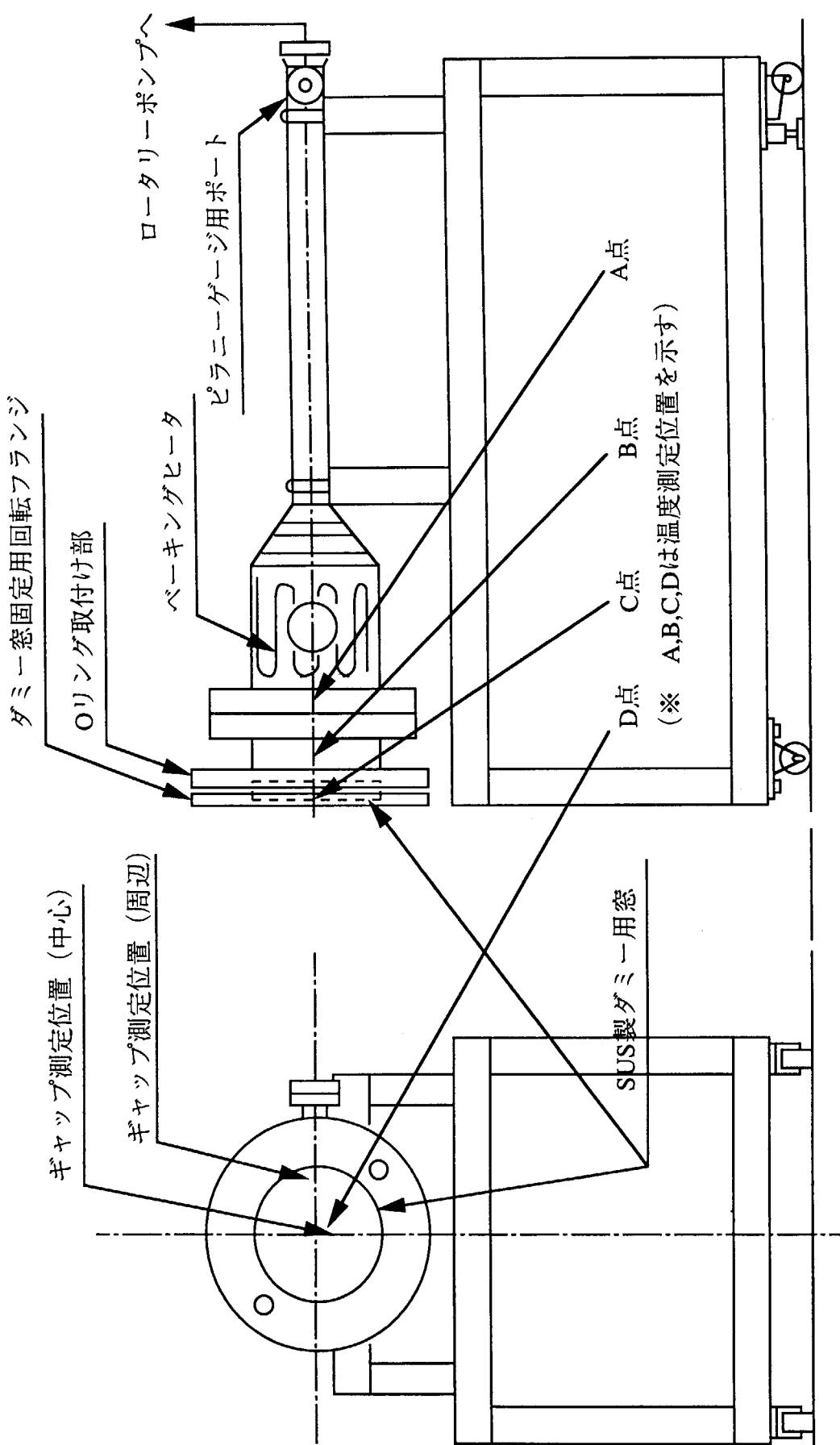
Φ_F : フランジの窓取り付け部の内径

Φ_W : 窓の外径

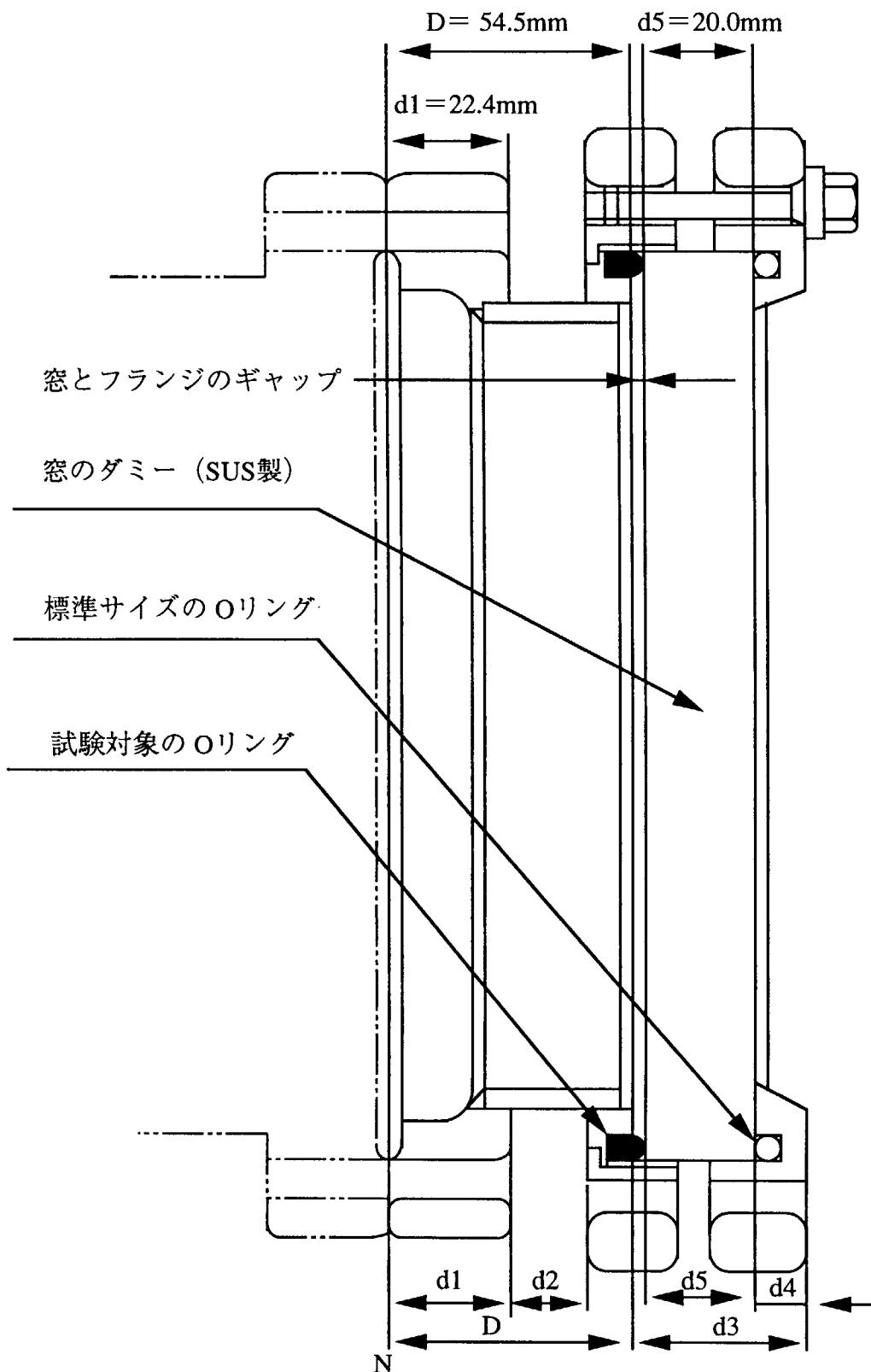
S_0 : Oリングの断面積、 S_F : Oリング溝の断面積

W : 溝の幅 L : 溝の深さ

第1図 Oリング法兰・溝の基準

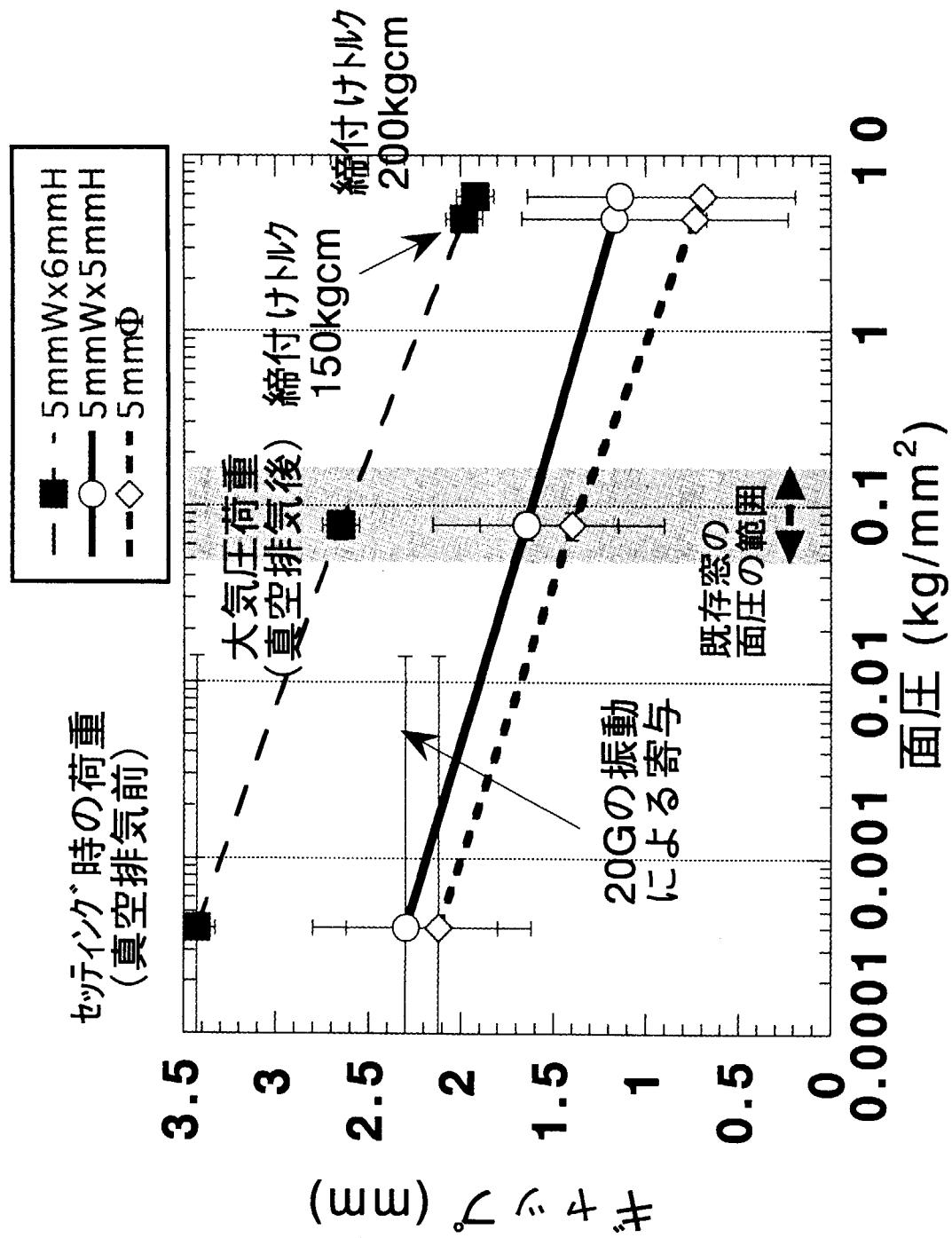


第2図 真空フランジ試験用装置

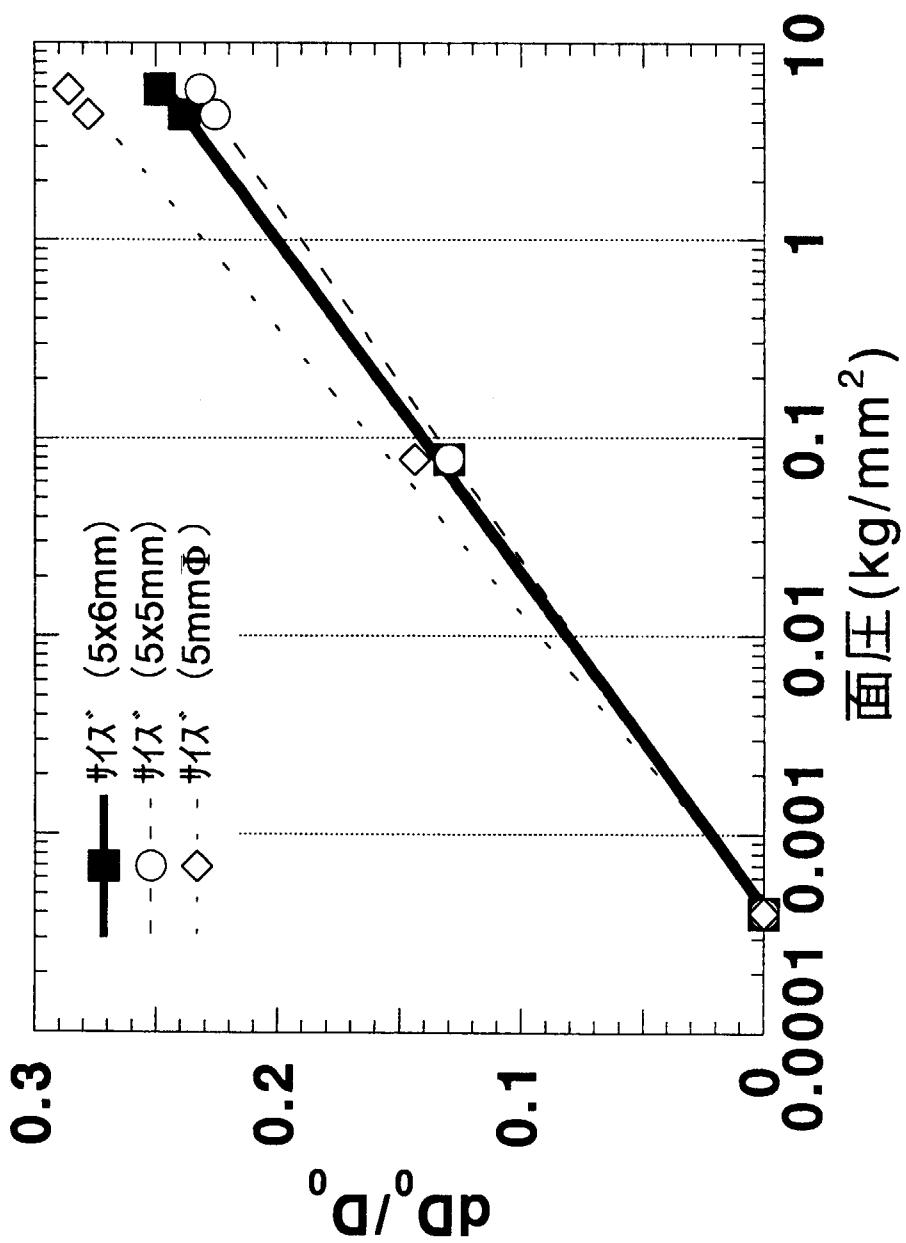


$$\text{ギャップ} = (d_1 + d_2 + d_3 - d_4 - d_5) - D \quad * \quad d_2, d_3, d_4 \text{ は実験中の測定値} \\ d_1, d_5, D \text{ は製作品の実測値}$$

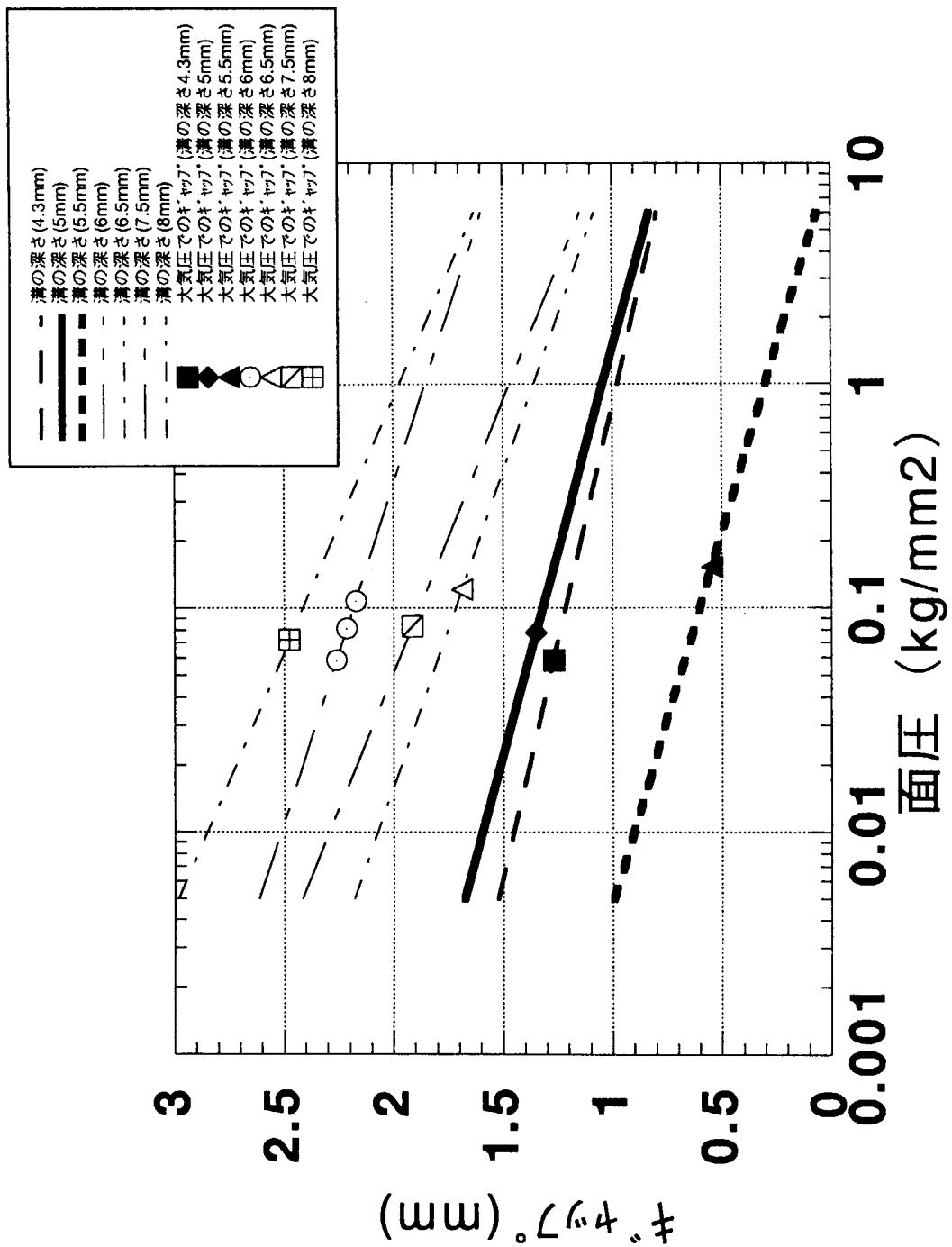
第3図 ギャップ測定方法



第4図 面圧とフランジギャップの関係



第5図 面圧に対するO'リングの変形の割合



第6図 既存フランジ溝形状におけるギャップの評価

表 1

Oリング試験記録

Oリング 型式	Oリング サイズ	フランジ溝サイズ		真空度 (pa) 及びボルト締付けトルク (Kgf.cm)							
				1Pa 0kgf.cm		0.1Pa 0kgf.cm		0.1Pa 150kgf.cm		0.1Pa 200kgf.cm	
			測定位置	中心	周囲	中心	周囲	中心	周囲	中心	周囲
V150	5.0mm (丸型)	W5.0×L3.0mm	ギャップ (変化量 mm)	1.40 (0.72)		1.38 (0.74)		0.73 (1.39)		0.69 (1.43)	
V150	W5.0 × L5.0mm (甲丸型)	W5.0×L3.0mm	ギャップ (変化量 mm)	1.65 (0.65)		1.63 (0.71)		1.17 (1.13)		1.14 (1.16)	
V150	W5.0 × L6.0mm (甲丸型)	W5.0×L3.0mm	ギャップ (変化量 mm)	2.65 (0.78)		2.63 (0.85)		1.98 (1.43)		1.92 (1.49)	

※ 注、()内の数値は真空排気前を基準(0)とした時の、ノギスでの測定値を示す。

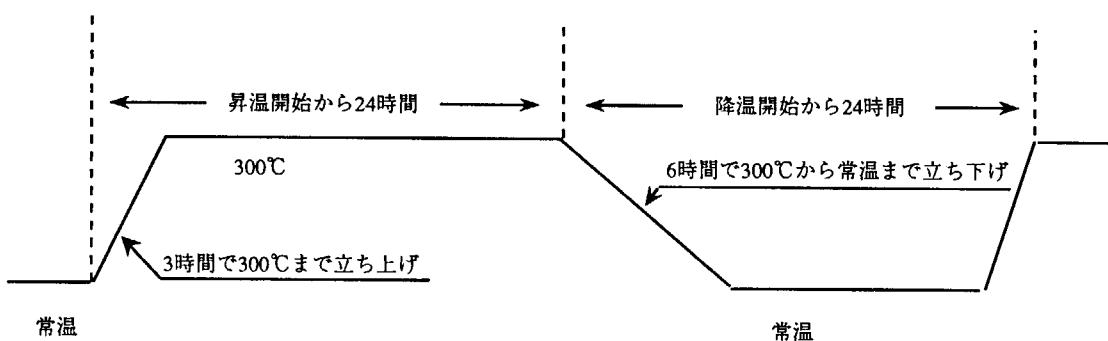
表 2-1

断続ベーキング時のギャップ測定記録 [W5.0×L5.0mm (甲丸型)]

測定日時	2/24 18時	2/25 18時	2/26 18時	2/27 18時	3/3 18時	3/4 18時	3/5 18時	3/6 18時
ギャップ値 測定箇所	1.45mm	1.60mm	1.50mm	1.50mm	1.45mm	1.60mm	1.60mm	1.50mm
d2部 (※1) 測定値	20.45mm	20.55mm	20.50mm	20.50mm	20.45mm	20.55mm	20.60mm	20.50mm
d3部 (※1) 測定値	41.85mm	41.90mm	41.85mm	41.85mm	41.85mm	41.90mm	41.85mm	41.85mm
d4部 (※1) 測定値	8.75mm	8.75mm	8.75mm	8.75mm	8.75mm	8.75mm	8.75mm	8.75mm
測定温度 温度測定箇所								
A点 (※2)	20℃	122℃	21℃	123℃	20℃	122℃	21℃	123℃
B点 (※2)	20℃	63℃	21℃	63℃	20℃	63℃	21℃	62℃
C点 (※2)	20℃	42℃	20℃	43℃	20℃	42℃	20℃	43℃
D点 (※2)	20℃	58℃	20℃	58℃	20℃	58℃	20℃	58℃

※1 ギャップ測定箇所は第2図のギャップ測定図内、同一記号部を参照のこと

※2 温度測定箇所は第1図の真空フランジ試験用装置図内、同一記号部を参照のこと



断続ベーキング時の運転サイクル

表 2-2

断続ベーキング時のギャップ測定記録 [5.0mmΦ (丸型)]

測定日時	3/10 18時	3/11 18時	3/12 18時	3/13 18時	3/14 18時	3/15 18時	3/17 18時	3/18 18時
ギャップ値 ギャップ 測定箇所	1.40mm	1.40mm	1.35mm	1.40mm	1.40mm	1.40mm	1.35mm	1.40mm
d2部 (※1) 測定値	20.45mm	20.50mm	20.50mm	20.50mm	20.45mm	20.50mm	20.45mm	20.50mm
d3部 (※1) 測定値	41.85mm	41.90mm	41.85mm	41.85mm	41.85mm	41.90mm	41.85mm	41.85mm
d4部 (※1) 測定値	8.80mm	8.90mm	8.90mm	8.85mm	8.85mm	8.85mm	8.85mm	8.85mm
測定温度 温度測定箇所								
A点 (※2)	21℃	122℃	21℃	123℃	22℃	122℃	21℃	123℃
B点 (※2)	21℃	62℃	21℃	63℃	22℃	63℃	21℃	62℃
C点 (※2)	21℃	43℃	20℃	43℃	22℃	42℃	20℃	43℃
D点 (※2)	21℃	58℃	20℃	58℃	22℃	58℃	20℃	58℃

※1 ギャップ測定箇所は第2図のギャップ測定図内、同一記号部を参照のこと

※2 温度測定箇所は第1図の真空フランジ試験用装置図内、同一記号部を参照のこと

表 2-3

断続ベーキング時のギャップ測定記録 [W5.0×L6.0mm (甲丸型)]

測定日時	3/24 18時	3/25 18時	3/26 18時	3/27 18時	3/31 18時	4/1 18時	4/2 18時	4/3 18時
ギャップ値 ギャップ 測定箇所	2.65mm	2.75mm	2.70mm	2.70mm	2.65mm	2.80mm	2.75mm	2.70mm
d2部 (※1) 測定値	20.45mm	20.50mm	20.50mm	20.50mm	20.45mm	20.55mm	20.60mm	20.50mm
d3部 (※1) 測定値	41.85mm	41.90mm	41.85mm	41.85mm	41.85mm	41.90mm	41.85mm	41.85mm
d4部 (※1) 測定値	7.55mm	7.55mm	7.55mm	7.55mm	7.55mm	7.55mm	7.60mm	7.55mm
測定温度 温度測定箇所								
A点 (※2)	20℃	121℃	20℃	122℃	21℃	122℃	21℃	123℃
B点 (※2)	20℃	63℃	20℃	63℃	21℃	63℃	21℃	62℃
C点 (※2)	20℃	43℃	20℃	43℃	21℃	42℃	21℃	43℃
D点 (※2)	20℃	57℃	20℃	58℃	21℃	58℃	21℃	58℃

※1 ギャップ測定箇所は第2図のギャップ測定図内、同一記号部を参照のこと

※2 温度測定箇所は第1図の真空フランジ試験用装置図内、同一記号部を参照のこと

表 3-1

連続ペーリング時のギャップ測定記録 [W5.0×L5.0mm (甲丸型)]

測定日時	4/7 10時	4/11 18時	4/14 10時	4/18 18時	4/21 10時	4/25 18時	4/28 10時	5/2 18時
ギャップ 測定箇所	1.50mm	1.60mm	1.55mm	1.55mm	1.55mm	1.60mm	1.50mm	1.55mm
d2部 (※1) 測定値	20.45mm	20.55mm	20.55mm	20.50mm	20.55mm	20.55mm	20.50mm	20.55mm
d3部 (※1) 測定値	41.85mm	41.90mm	41.85mm	41.85mm	41.85mm	41.90mm	41.85mm	41.85mm
d4部 (※1) 測定値	8.70mm	8.75mm	8.75mm	8.70mm	8.75mm	8.75mm	8.75mm	8.75mm
測定温度 温度測定箇所								
A点 (※2)	21℃	122℃	23℃	123℃	22℃	122℃	23℃	123℃
B点 (※2)	21℃	63℃	23℃	64℃	22℃	63℃	23℃	62℃
C点 (※2)	21℃	42℃	23℃	43℃	22℃	42℃	23℃	43℃
D点 (※2)	21℃	58℃	23℃	59℃	22℃	58℃	23℃	58℃

※1 ギャップ測定箇所は第2図のギャップ測定図内、同一記号部を参照のこと

※2 温度測定箇所は第1図の真空フランジ試験用装置図内、同一記号部を参照のこと

表 3-2

連続ペーリング時のギャップ測定記録 [5.0mmΦ (丸型)]

測定日時	5/12 10時	5/16 18時	5/19 10時	5/23 18時	5/26 10時	5/30 18時	6/2 10時	6/6 18時
ギャップ 測定箇所	1.40mm	1.45mm	1.40mm	1.40mm	1.40mm	1.45mm	1.35mm	1.35mm
d2部 (※1) 測定値	20.45mm	20.50mm	20.50mm	20.50mm	20.55mm	20.55mm	20.50mm	20.50mm
d3部 (※1) 測定値	41.85mm	41.90mm	41.85mm	41.85mm	41.85mm	41.90mm	41.85mm	41.85mm
d4部 (※1) 測定値	8.80mm	8.85mm	8.85mm	8.85mm	8.90mm	8.90mm	8.90mm	8.90mm
測定温度 温度測定箇所								
A点 (※2)	22℃	123℃	23℃	123℃	23℃	123℃	23℃	122℃
B点 (※2)	22℃	62℃	23℃	63℃	23℃	63℃	23℃	62℃
C点 (※2)	22℃	43℃	23℃	43℃	23℃	43℃	23℃	42℃
D点 (※2)	22℃	57℃	23℃	58℃	23℃	59℃	23℃	58℃

※1 ギャップ測定箇所は第2図のギャップ測定図内、同一記号部を参照のこと

※2 温度測定箇所は第1図の真空フランジ試験用装置図内、同一記号部を参照のこと

表 3-3

連続ベーキング時のギャップ測定記録 [W5.0×L6.0mm (甲丸型)]

測定日時	6/9 10時	6/13 18時	6/16 10時	6/20 18時	6/23 10時	6/27 18時	6/30 10時	7/4 18時
ギャップ 測定箇所	2.70mm	2.75mm	2.75mm	2.75mm	2.75mm	2.80mm	2.75mm	2.75mm
d2部 (※1) 測定値	20.45mm	20.50mm	20.55mm	20.50mm	20.55mm	20.55mm	20.50mm	20.55mm
d3部 (※1) 測定値	41.85mm	41.90mm	41.85mm	41.85mm	41.85mm	41.90mm	41.90mm	41.85mm
d4部 (※1) 測定値	7.50mm	7.55mm	7.55mm	7.50mm	7.55mm	7.55mm	7.55mm	7.55mm
測定温度 温度測定箇所								
A点 (※2)	21℃	122℃	23℃	123℃	23℃	122℃	23℃	123℃
B点 (※2)	21℃	62℃	23℃	63℃	23℃	63℃	23℃	62℃
C点 (※2)	21℃	42℃	23℃	43℃	22℃	42℃	23℃	43℃
D点 (※2)	21℃	57℃	23℃	58℃	22℃	58℃	23℃	58℃

※1 ギャップ測定箇所は第2図のギャップ測定図内、同一記号部を参照のこと

※2 温度測定箇所は第1図の真空フランジ試験用装置図内、同一記号部を参照のこと

表 4 JT-60 既設フランジのOリングの面圧表

計測器名称	窓サイズ (mm)	窓面積 (mm ²)	溝の直径 (mm)	溝の深さ (mm)	溝の全長 (mm)	溝の面積 (mm ²)	面圧 (kg/mm ²)
赤外TV	250	42638.48	233.00	8.00	731.99	5855.90	0.07281
リップルロス IRTV	250	41547.56	230.00	8.00	722.57	5780.50	0.07188
トムソン散乱 (Ruby,IN1)	260	42638.48	233.00	8.00	731.99	5855.90	0.07281
トムソン散乱 (Ruby,R)	260	48110.55	247.50	7.50	777.54	5831.60	0.08250
トムソン散乱 (YAG,IN2)	330	76699.04	312.50	6.50	981.75	6381.40	0.12019
ミリ波反射計	240	51471.85	256.00	6.00	804.25	4825.50	0.10667
CO ₂ 反射計	110	7901.18	100.30	4.30	315.10	1354.90	0.05831
FIR干渉計	160	15393.80	140.00	6.00	439.82	2638.90	0.05833
電磁波散乱		116260.78	225.00	5.50	1386.90	7627.70	0.15242
レーザー不純物	160	18869.19	155.00	5.00	486.95	2434.70	0.07750
ECE		51945.65	67.00	6.00	1064.50	6386.90	0.08133

付録1 ボルトの締付けトルクによる軸荷重²⁾

ネジ面を図1に示す様にモデル化する。軸方向にかかる力（軸荷重）をQ、締付けの回転力をF、ネジ面の摩擦係数をμとすると、

$$\text{垂直力} = Q\cos\alpha + F\sin\alpha$$

$$\text{水平力} = F\cos\alpha - Q\sin\alpha$$

となる。ここで、αは図2に示すリード角を表す。締付け時には垂直力により摩擦が発生し、これが平行力と釣り合うので、

$$F\cos\alpha - Q\sin\alpha = \mu(Q\cos\alpha + F\sin\alpha)$$

となる。この式をQについて変形すると、

$$Q = F \cdot \frac{\cos\alpha - \mu\sin\alpha}{\mu\cos\alpha + \sin\alpha}$$

となり、締付けトルクをT、ネジの有効径をdとすると $T = F \cdot d/2$ であるので、

$$Q = \frac{2T}{d} \cdot \frac{\cos\alpha - \mu\sin\alpha}{\mu\cos\alpha + \sin\alpha} \quad (1)$$

実際のステンレスのメートルネジでは $\alpha \sim 2.5^\circ$ 、 $\mu \sim 0.15-0.2$ であるので $\mu=0.2$ として、

$$Q = 8.14T/d \quad (2)$$

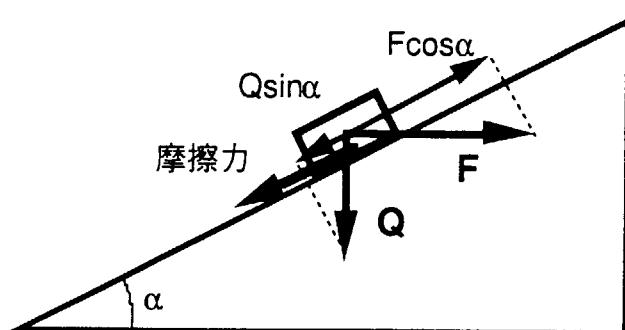
となる。

(2) 式から、試験で使用したM10のネジの場合（8本）は、 $d \sim 0.92\text{cm}$ であるので、

$$T=150\text{kgcm} \text{ の場合 } : Q=1327\text{kg/本} \Rightarrow Qt=1327 \times 8=10616\text{kg}$$

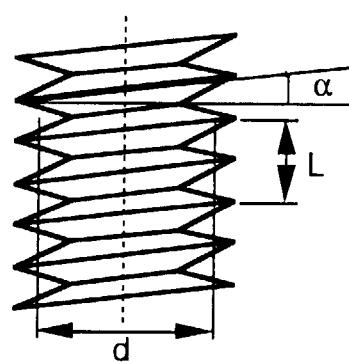
$$T=200\text{kgcm} \text{ の場合 } : Q=1770\text{kg/本} \Rightarrow Qt=1770 \times 8=14160\text{kg}$$

となる。



Q：軸力
F：回転力
T：回転トルク
α：リード角 (2.5°)

図1



$\tan\alpha = L/\pi d$
2条ねじの場合
α：リード角 (2.5°)
d：有効径
L：リード

図2

2) 機械設計便覧 新版 P.167 (昭和52年) 日刊工業新聞

付録2 真空容器の振動による追加荷重

ディスラプション時の振動による以下の影響について検討した。

- (1) Oリングがつぶれてガラスが金属と接触するか？
- (2) 窓がポート軸直角方向にずれてフランジの角に接触するか？

1。窓の重量

窓の寸法： 20cmΦ x 2cm t

窓の材質： 石英

窓の重量： $\pi \times 10(cm) \times 10(cm) \times 2(cm) \times 2.65(g/cc) = 1.66 (kg)$

2。ポート軸方向荷重

ダイバータ改造後の最大加速度20Gが加わった場合の追加荷重は、

$$1.66 (kg) \times 20 (G) = 33.3 (kg)$$

この値は大気圧と比較して小さく、この荷重によってOリングがつぶれてガラスが金属と接触することはない。

3。ポート軸直角方向荷重

前項と同様に33.3kgの荷重が加わった場合を想定する。

大気圧による軸方向の荷重は～189kgで、この荷重による摩擦力はOリングとガラスの摩擦係数を0.3（安全サイド）としても、 $0.3 \times 189 = 57\text{kg}$ である。よって、振動による荷重によって、ガラスがずれることはない。

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
功率, 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	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	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	
光束度	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
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

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、1eVおよび1u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閣僚理事会指令では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	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ボアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
	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)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	= 4.184 J(熱化学)
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.1855 J(15 °C)
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁶	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	= 4.1868 J(国際蒸気表)
	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	吸収線量	Gy	rad
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹		1	100
	3.7 × 10 ¹⁰	1	0.01	1	

照 射 線 量	C/kg	R	線 量 當 量	Sv	rem
	1	3876		1	100
	2.58 × 10 ⁻⁴	1		0.01	1

(86年12月26日現在)

大口径真空容器内観測窓用Oリング変形測定試験報告