

JAERI-Tech

JP0150824

2001-067



多重Oリング装着による ヘリウムガスの透過漏洩抑制

2001年10月

大場 敏弘・菊地 泰二・高 勇・磯崎 太*・千葉 雅昭
石川 和義・井上 広巳・照沼 眞*・沢辺 正樹*
津田 和美・武山 友憲

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, Nakagun,
Ibarakiken 319-1195, Japan.

多重Oリング装着によるヘリウムガスの透過漏洩抑制

日本原子力研究所東海研究所技術部

大場 敏弘・菊地 泰二・高 勇・磯崎 太*・千葉 雅昭・石川 和義
井上 広己・照沼 眞*・沢辺 正樹*・津田 和美・武山 友憲

(2001年 9月12日受理)

原子力関連機器である容器等においては厳重な気密性が要求されることから、該容器に対して極めて精度の高い漏洩検査が実施され健全性の確認が行われている。

この精度の高い漏洩検査方法として、原子量が小さく、透過性の高いヘリウムガスを用いたヘリウム漏洩検査が広く行われている。

一方、この透過性の高いヘリウムガスを用いるために、容器等の漏洩検査時に使用するシールガスケットからのヘリウムガスの透過漏洩が検査を妨害する要因として問題となる。

この問題を回避するために、シールガスケットとして一般的に使用されているクロロブレンゴム（ネオブレンゴム）やフッ素ゴム等のゴム製Oリングを2重に装着する方法を考案し、この方法のヘリウムガス透過漏洩抑制効果について試験を行い得られた結果について解析を行った。

この結果、フランジに2重に装着したOリング間の空間の存在が、これらのOリングを透過して漏洩するヘリウムガスを抑制する上で極めて有効であることが確認された。

The Method for Decrease of Helium Gas Leak with Double O-ring Rubber Gasket

Toshihiro OHBA, Taiji KIKUCHI, Isamu TAKA, Futoshi ISOZAKI*, Masaaki CHIBA
Kazuyoshi ISHIKAWA, Hiromi INOUE, Isao TERUNUMA*, Masaki SAWABE*
Kazumi TUDA and Tomonori TAKEYAMA

Department of Engineering Services
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 12, 2001)

Nuclear components are required to be highly airtight. To get satisfactory airtightness, helium leak detection had been used.

However helium gas atom is smaller than other gas atom except hydrogen and so has very high permeability.

Therefore, leak of helium gas atom from O-ring rubber gasket was detected by helium leak detector in airtight test.

It is very difficult to distinguish permeation from leakage.

To solve the problem, we made double O-ring rubber gasket and tested its ability of decreasing permeation, examined its effect.

As a result of the test and the examination, we found the gap between outer ring and inner ring of double O-ring rubber gasket was very important for decrease permeation helium gas.

Keywords : Helium Gas, Helium Leak Detector, O-ring Gasket, Double O-ring Gasket, Air Tight Test, Atom, Permeation.

* Nuclear Engineering Co.Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. 2重Oリングを透過するヘリウムガスの漏洩試験	1
3. 2重Oリング間充填物質の影響	3
4. 2重Oリング間ヘリウムガス圧力の評価	5
5. 実験式の適用範囲の検討	9
6. 多重OリングのOリング間圧力の時間変化の考察	12
7. 考 察	13
謝 辞	14
参考文献	15

Contents

1 . Introduction	1
2 . Detection of Permeation Helium Gas From Double O-ring Gasket	1
3 . Effect of Materials Charged Double O-ring Gasket Gap	3
4 . Examination of Helium Gas Pressure Trend Charged Double O-ring Gasket Gap	5
5 . Examinations of Applicability of Empirical Formula	9
6 . Examination of Helium Gas Pressure Trend Charged Multi Mounted O-ring Gasket Gap	1 2
7 . Summary	1 3
Acknowledgements	1 4
References	1 5

1. はじめに

原子力用機器等特に原子炉で照射する照射キャップセル等の機器には、放射能閉じ込めおよびキャップセル内照射環境維持の目的で溶接部等の気密性が厳重に要求される。

この気密性の確認は一般的には対象物の漏洩検査を行うことによって実施している。

この漏洩検査の最も精度と信頼性の高い方法として、原子量が小さく、透過性の高いヘリウムガスとヘリウムガス検出器を用いた漏洩検査が工業的に広く用いられている。

ヘリウム漏洩検査の方法は、検査対象箇所の一方の環境を真空にし、他方にヘリウムガスを充満させ、材料中の欠陥を通過して漏洩検出器に到達するヘリウムガスを測定するものである。

この検査にあたって、検査対象箇所の一方を真空にするためには、この部分をガスケットを用いて気密に囲閉し内部の大気を排気する必要がある。

このガスケットとして一般的にOリングが用いられ、材料にはクロロプレンゴム（ネオプレンゴム）やフッ素ゴムが多く用いられている。

一方、ヘリウムは原子量が小さいため物質を透過する性質も強く、ヘリウム漏洩検査においてはOリングを透過するヘリウムガスが漏洩検出器に検出され検査に影響を与える問題がある。

この影響を排除する目的でOリングを2重に装着する方法を考案し、この方法の透過漏洩抑制効果について試験を行った。また、この方法をOリングを多重に装着した場合に拡張し解析した。

この結果、2重に装着されたOリング間にヘリウムガストラップ用の間隙を設けることがヘリウムガス透過漏洩の時間遅れを作り出す上で極めて有効であることが判明した。

この方法によれば、通常のヘリウム漏洩検査に要する時間内ではヘリウムガスの透過漏洩の影響を全く無視できることが解った。以下に本試験の内容と試験結果及び解析結果について報告する。

2. 2重Oリングを透過するヘリウムガスの漏洩試験

この試験は、フランジに2重に装着したOリングを透過して漏洩するヘリウムガス量の時間的変化を明らかにし、1重Oリングの場合と比較することによって、2重Oリング装着によるヘリウムガスの透過漏洩量抑制の効果を量的に明らかにするのが目的である。

①. 試験の開始にあたって、この試験によって評価しようとする項目について検討を行った。

(1) 透過漏洩量の推定

Oリングを2重にすることによって、見かけ上のヘリウムガス透過漏洩量（透過漏洩流量）である。以下透過漏洩量という）は $1/2$ になることが推定される。これは、ヘリウムガスの透過漏洩量を表す式においてOリングの厚さの項が2倍となり、透過漏洩量が $1/2$ と算出されることから推定される。

(2) 透過漏洩ヘリウム検出開始時間

1重Oリングの透過漏洩試験において、透過漏洩量はヘリウムガス圧力に比例して増大し、透過漏洩ヘリウムガス検出開始時間が短くなることがこれまで報告されている^{[1][2]}。このこ

とから、2重のOリングを透過漏洩したヘリウムガスの量が検出器の検出限界濃度に到達する時間は、1重Oリングの場合より遅くなることが推測できるが大きな差があるとは考えられない。

(3) 透過漏洩量の時間的変化

透過漏洩量の時間的変化は、1重Oリングの場合に比較して増加量の時間変化の様子が緩慢になると考えられるが、類似の傾向であると考えられる。

以上の項目の試験評価によって、2重Oリング装着方法の効果が明確になると考え方透過漏洩試験を行った。

②. 以上の試験評価項目の確認試験。

図1は本試験に使用したヘリウムガスのOリング透過漏洩試験治具、図2はヘリウムの2重Oリング透過漏洩試験要領図である。

ヘリウムガスは0.1 MPa(大気圧)で外側Oリング外側に充填した状態である。

Oリングを2重に装着した場合と1重に装着した場合のヘリウムの透過漏洩量の試験結果を図3に示す。この場合、2重Oリング間の気体は大気(0.1 MPa)である。

本試験においては、太さの比較的細い固定用Oリング(JIS B 2401)を使用することによって透過漏洩が比較的早く観測され現象も顕著に現れるように工夫し、1重Oリング装着の場合と2重Oリング装着の場合との透過漏洩の現象の違いが明確に観測できるようにした。

試験条件は以下のとおりである。

2重 Oリング間雰囲気	: 大気
" 圧 力	: 0.1 MPa
外側 Oリング外雰囲気	: ヘリウムガス (0.1 MPa)
内側 Oリング内雰囲気	: 真空 (0 MPa)
外側 Oリング呼び径	: G 8 5
内側 Oリング呼び径	: G 5 5
内外 Oリング材質	: フッ素ゴム

試験方法は、内側Oリング内雰囲気を真空にし、これを漏洩検出器の検出部に接続した後外側Oリング外雰囲気である大気をヘリウムガスで置換し、フランジに装着した2重Oリングを透過漏洩するヘリウムガスの漏洩量を測定した。

図3に示すこの試験結果で明らかのように、2重Oリング外側に充填したヘリウムガスがこれらのOリングを透過して漏洩し、検出器の検出感度限界の濃度に達するまでの時間は約4.5時間である。Oリング1本を透過して漏洩し、検出器の検出限界感度に達するのに要するヘリウムの透過漏洩時間が約3分であることから、これは十分に遅い時間と考えられる。

従って、この結果によると、工業上及び実験上行われているヘリウム漏洩検査の一般的な方法での実施時間中においては、Oリングからの透過漏洩による検査への影響を全く無視できることになり、容器等のヘリウム漏洩検査における漏洩量判定の精度を各段に向上させるものである。

一方、以上の試験結果は試験開始にあたって推定した値を遙かに越えるものであったので、他の種類のOリングを用いても同様の結果が得られるか再現性の確認試験を行った。

③. 2重Oリング透過漏洩再現性確認試験

再現性確認試験にあたっては、実用化した場合の実際の使用状況を模擬して試験することを考え、試験用Oリングに同呼び径では固定用Oリングより径の太い真空用Oリングを使用した。

また、この試験にあたっては2重Oリングの組み合わせ寸法を変更し、Oリングの太さおよび互いの寸法関係とは無関係のOリングを2重に装着したことによる特有の現象であるのか、このような条件の下でも同様の現象について再現性があるのか再現性確認試験を行った。

試験にあたってはOリング相互間の位置関係および実際に使用する場合の状況を考慮し、互いに寸法の近い2種類のOリングを組み合わせて自立型2重Oリング（I型）を製作し、これを用いて再現性確認試験を行った。この自立型2重Oリング（I型）の構造は、写真1に示すように外側Oリングと内側Oリングとは同材質のOリングの切片で作られた連結部によって4点で支持された構造である。図4はこの再現性確認試験に用いたヘリウムガスのOリング透過漏洩試験治具、図5はOリング透過漏洩試験治具に自立型2重Oリングを装着した状態を示した図である。

図6は試験結果で、2重Oリングを透過漏洩したヘリウム量の時間変化を表したものである。

ヘリウム漏洩試験要領については先に述べた要領と同様で、試験条件は以下のとおりである。

自立型2重Oリングの寸法

外側 Oリング呼び径	: V70
内側 Oリング呼び径	: V55

試験条件

2重 Oリング間雰囲気	: 大気
" 壓 力	: 0.1 MPa
外側 Oリング外雰囲気	: 大気
内側 Oリング内雰囲気	: 真空 (0 MPa)
内外 Oリング材質	: フッ素ゴム

試験の結果は以下の通りである。

- (1) 透過漏洩量の時間変化の平衡値はこの試験時間の範囲では確認できない。試験時間内における2重Oリングからのヘリウム透過漏洩量はOリング1本の場合に比べて相当小さい。
- (2) ヘリウム透過漏洩量の時間的変化もOリング1本を透過漏洩する場合に比較して相当遅く、漏洩量の時間的変化は平衡状態の値を漸近線として曲線を描いて増加する傾向である。
- (3) 2重Oリングを通してヘリウムの透過漏洩が開始してから、検出器の検出感度限界濃度に達するまでの時間は約5.5時間である。

この結果は先に行った試験の結果と同様である。

のことから、2重Oリングの寸法関係に依存することなく同様の結果が得られることは、Oリングを2重に装着したこと自体の効果であると考えられた。

3. 2重Oリング間充填物質の影響

この再現性確認試験の結果は、Oリングを2重に装着したことによって単にOリングを2個重

ねた効果以上の効果が発生したことを意味するものであった。このため、この効果を発生させた原因について究明するための試験を行った。

この効果の原因としてOリング間に存在する大気がヘリウムガスの透過を阻害している可能性が考えられた。このことは通路に存在する物質によってヘリウムガスの移動が妨害される現象である。この現象を解明する目的で2重Oリング間に各種の物質を充填し、また圧力を変化させて2重Oリングを透過するヘリウムガスの漏洩量をヘリウム漏洩検出器によって測定して値を比較した。

この試験に使用したヘリウムガスのOリング透過漏洩試験治具を図7に、試験要領を図8に、試験結果を図9に示す。また、自立型2重Oリング(I型)を用いて行った試験結果を図10に示す。表2はこれらの試験条件及び結果を整理した値である。

この表に示すヘリウムガス漏洩量の値は、漏洩量の時間変化がほぼ平衡に達した時間において測定した値である。

表2

	Oリング外 雰囲気	Oリング間 雰囲気	Oリング内 雰囲気	リーク量	平衡到達 時間
1	He 0.1 MPa	真空	真空	2×10^{-10}	9 hr
2	He 0.1 MPa	大気	真空	1.7×10^{-10}	21 hr
3	He 0.1 MPa	N ₂ 1.1 MPa	真空	2×10^{-10}	21 hr
4	He 0.1 MPa	真空グリース	真空	* 1×10^{-10}	* 21 hr

* 時間変化曲線の外挿の値である。

これらの測定結果をみると、図9からは、2重Oリング間にガスが充填された場合には、漏洩検出器が透過漏洩ヘリウムガスを検出開始する時間が遅れるが、平衡状態に達したとみなされる状態になってからの透過漏洩量については顕著な差は認められないことが解る。これは、図10との比較においても同様である。この傾向は、2重Oリング外側のヘリウムガス圧力を加圧した場合においても現れるが透過漏洩量の平衡状態到達時間が遅れる。

これまで、同一条件下では、ヘリウムガスの加圧力に比例してOリングを透過するヘリウムガスの透過漏洩量が増加し、透過漏洩検出開始時間も透過漏洩量の平衡状態到達時間も早まることが報告されているので、これとの比較による違いが2重Oリング間のガスの影響と考えることができる。

一方、図10において、2重Oリング間の充填物質が真空グリースの場合は、同物質が大気0.1 MPaの場合に比較して透過漏洩量が少なく、漏洩ガス検出時間も遅れている。

図9と図10におけるヘリウムガスのバックグラウンドの違いについては、漏洩試験治具の特

性の違いによるものと考えられる。

この結果から、試験に使用したOリング間に充填した物質がガスの場合には、Oリング間の試験圧力の違いによって2重Oリングを透過するヘリウムガス漏洩量には有意な差が認められないが、透過漏洩ヘリウムガスの検出開始時間については、ガスの場合でも真空グリースの場合でも明らかに有意な差があることが解る。

従って、この試験からは、明らかに2重Oリング間に存在するこれらの物質の性質及び圧力によってヘリウムガスがその通過を阻害されていることが解る。

しかし、真空グリースの場合を除いては平衡状態と見なされる状態における透過漏洩量の値が大体同じであり、2重Oリング間雰囲気が真空の場合においてもOリング1重シールの場合の結果とは大きく差があることから、この2重Oリング間に存在するガスが2重Oリングを透過して漏洩するヘリウムガスの抑制効果の主たる原因とは考えられない。

この結果を評価すると、2重Oリングの外側Oリングを透過漏洩するヘリウムガスの量は、透過漏洩の式から明らかなようにOリング外側のヘリウムガス圧力の影響を受け、同様に、内側Oリングを透過漏洩するヘリウムガスの量も2重Oリング間に蓄積されるヘリウムガス圧力の影響を受ける。2重Oリング間に存在する物質によるヘリウムガスの通過妨害の効果は、検出開始までの時間の差を除いて透過漏洩量に著しい差が認められず、透過漏洩量への影響が大きくないとすれば、内側Oリングから透過漏洩するヘリウムガスはこの空間に存在するヘリウムガスの分圧のみを原動力として2重Oリングの内側Oリングを透過することは明らかである。

従って、Oリングを2重に装着したことによるOリングからのヘリウムガス透過の著しい減少は、Oリング間に存在する物質の影響による効果よりも、2重Oリング間に存在する間隙がガストラップとして作用する構造による効果であると考えられる。

4. 2重Oリング間ヘリウムガス圧力の評価

以上の結果から、2重Oリング間に蓄積されるヘリウムガス圧力の状態を知ることが必要であると考えこの時間変化について解析を行った。

2重Oリング間の間隙には、外側Oリングから透過漏洩して蓄積されるヘリウムガスと内側Oリングから透過漏洩するヘリウムガスの差のヘリウムガスの量が蓄積されることになる。

一方この2重Oリング間の圧力によって、外側Oリングを透過漏洩して2重Oリング間に蓄積されるヘリウムガスの量及び内側Oリングから透過漏洩するヘリウムガスの量が影響を受ける。

これらの関係を数式で整理し解析した。

Oリングを透過し漏洩するヘリウムガスの量は、ガスケットからの透過漏洩量の算出式から下記の式

$$Q = K \frac{P}{d} A$$

で表される。

ここで、 Q : 透過流量 (Pa·m³/sec)
K : 透過係数 (m²/sec)

P :	外圧	(Pa)
d :	Oリングの厚さ (直径)	(m)
A :	Oリング断面積	(m ²)

従って2重Oリングの内側Oリングを透過して漏洩するヘリウムガスの量は

$$Q = K \frac{p}{d} A \quad \text{ただし, } p \text{ は2重Oリング間圧力である。}$$

外側Oリングから2重Oリング間に透過漏洩する気体の量は、透過漏洩量の算出式

$$Q = K \frac{P}{d} A \quad \text{を2重Oリング間に適用して}$$

$$Q = K \frac{P - p}{d} A \quad \text{で表される。}$$

透過漏洩量の算出式のPはOリング内外の圧力差を表しており、2重Oリング装着時の外側Oリングの内外の圧力差は P - p である。

ここで、 K :	透過係数	(m ² /sec)
P :	外圧	(Pa)
p :	2重Oリング間圧力	(Pa)
A :	外側Oリング断面積	(m ²)
d :	外側Oリングの厚さ (直径)	(m)
Q :	透過流量	(Pa · m ³ /sec)

である。

一方、外側Oリングから透過漏洩してOリング間に蓄積されるヘリウムガス圧力は

$$p = \frac{t}{V} K \frac{P - p}{d} A \quad \text{である。}$$

ここで、 V : 外、内Oリング及びフランジに囲まれた空間の体積 (m³)

t : 透過開始からの経過時間 (sec)

(厳密には外側Oリングの外側の環境をヘリウムガスで満たしてから
の時間)

従って、2重Oリング間圧力の時間変化は

$$\frac{dp}{dt} = \frac{1}{V} (K \frac{P - p}{d} A - K \frac{p}{d} A')$$

と表すことが出来る。

ここで、2重Oリング装着の場合では同様の寸法のOリングを用いるので、A ≈ A' と近似すると上式は下記のように変形される。

$$\frac{dp}{dt} = \frac{KA}{Vd} (P - 2p)$$

ここで $\frac{KA}{Vd} = C$ とおくと

$$\frac{dp}{dt} = C (P - 2p) \text{ 整理して } \frac{dp}{dt} + 2Cp = CP$$

を得る。

この式を解いてOリング間の圧力pは次式で表される。

$$p = \frac{P}{2} (1 - e^{-2ct})$$

この解に試験に使用した数値を代入して定数Cを決定した。

図5に本試験に使用した自立型2重Oリング(I型)を装着したフランジの断面図を示す。

また、写真1は、本試験に使用した自立型2重Oリング(I型)である。

寸法は及び材質は下記のとおりである。。

Oリングの寸法は下記のとおり。

外側 Oリング呼び径	:	V 7 0
太さ (d)	:	φ 4
内側 Oリング呼び径	:	V 5 5
太さ (d)	:	φ 4
材 質	:	フッ素ゴム

また、試験に使用したOリング V 7 0 の透過係数Kは、透過量を測定し、透過量の式によって決定した。材質が同じであるので、この係数を V 5 5 Oリングの透過係数にも採用した。

以下、各項目の数値を下記に示す。

ここで、 K : 透過係数

V : 2重Oリング間の空間 (この場合内側Oリング溝のOリング装着後の空間)

d : Oリングの太さ

A : Oリングの円周上の縦断面積

であり計算に使用した数値は下記のとおりである。

$$K = 5.18 \times 10^{-12} (\text{m}^2/\text{sec})$$

$$V = 2.55 \times 10^{-6} (\text{m}^3)$$

$$d = 4 \times 10^{-3} (\text{m})$$

$$A = 4 \times 7.4 \pi \times 10^{-6} (\text{m}^2)$$

$$\text{故に } C = \frac{KA}{Vd} = 4.71 \times 10^{-7}$$

いま、tを時間(h r)で表すと $2ct = 2 \times 4.71 \times 10^{-7} \times 3600 t$

$$= 0.00339 t$$

よって

$$p = \frac{P}{2} (1 - e^{-0.00339 t}) \quad t : \text{時間 (hr)}$$

従って、2重Oリングの内側Oリングからのヘリウムガスの漏洩量は

$$Q = K \frac{p}{d} A = K \frac{A}{d} \cdot \frac{P}{2} (1 - e^{-0.00339 t})$$

によって表される。

この場合、計算に用いられる数値は内側Oリングについての値であるが、内側Oリングと外側OリングについてK、dは同じ値、 $A = A'$ であるので、同じ数値を使用している。

一方、図6は試験による内側Oリングからのヘリウムガスの漏洩量をグラフに表したものである。また、図11は計算値と試験値とをグラフにして比較したものである。

図11から明らかなように、実際の透過漏洩量は計算で求めたpの値によって計算した値とは大きくずれていて計算による結果の方が漏洩量が多くなっている。

この計算による値と試験による値の差の原因について考察した。

- (1) 2重Oリング間圧力の計算に特別な要因は付加されない。
- (2) 内側Oリングの透過漏洩量は2重Oリング間の圧力pの影響を受ける。従って、漏洩量を表す曲線は算出式の形から、pを表す曲線と類似していると考えられる。
- (3) 計算式によるグラフと試験値によるグラフの形が類似しているので、時間経過に対する透過漏洩量の変化のメカニズムは類似していると考えられる。
- (4) 内側Oリングからの透過漏洩の様子は、2重Oリング間に蓄積されるヘリウムガスの圧力が漏洩開始直後のpの値が小さいことによって、内側Oリングの透過開始後、検出開始までの時間が大きく遅れていると考えられる。透過開始後の検出開始時間は圧力に関係することはこれまで報告されているところである。
- (5) 実際の透過漏洩量と計算による透過漏洩量との比較において差があるのは、モデル化された計算式による透過漏洩量の計算値に対して、実際には、ヘリウムガスの透過漏洩を妨げる各種の要因がはたらいているものと判断される。

これは、さきに報告した、2重Oリング間充填物質の種類によって透過漏洩量に差が生ずる現象によっても推測できる。

以上の検討の結果、試験による数値を計算によって表す実験式は、計算式に適当な補正を加えて得られると判断し、式中の定数の検討を行った。

実験値にあわせて各定数の値を変更し数値計算を行った結果、指数項の値に $2c t = 0.0017 t$ とする近似計算式を得た。これは試験値と良い一致を示している。

一方、この実験式を評価すると、これは2重Oリング間の圧力を表す微分方程式において、指数項の $2c t$ の値を $1/2$ としたもので

$$\frac{1}{2} \cdot 0.00339 t = \frac{1}{2} 2c t = c t$$

と計算したものである。

従つて、この指數項を持つ微分方程式の解は

$$p = \frac{P}{2} (1 - e^{-c t})$$

となり、この場合のOリング間圧力の実験式は

$$p = \frac{P}{2} (1 - e^{-0.0017 t}) \quad t : \text{時間 (h r)}$$

となる。

よつて、透過漏洩量を表す実験式は

$$Q = K \frac{p}{d} A = K \frac{A}{d} \cdot \frac{P}{2} (1 - e^{-0.0017 t})$$

となる。

この実験式によって算出した内側Oリングからの透過漏洩量の値と試験値及び計算値との比較を図12に示す。

以上の結果から、透過漏洩量を表す実験式は

$$Q = K \frac{p}{d} A = K \frac{A}{d} \cdot \frac{P}{2} (1 - e^{-c t})$$

と表すことができる。ただし、この式中の時間を表す項tに適用する時間は、検出器がヘリウムガスを検出した時刻を0とした時間である。

これ以前の時間におけるヘリウムガス透過漏洩の様子は、これまでの報告と曲線の外挿によって確認されているとおり、透過係数Kが急速に変化するため簡単な形の実験式とはならない。

ここで指數項cは先に述べたとおり、2重Oリングを構成するOリングの材質、寸法、Oリング間体積等によって決まる固有の値である。

5. 実験式の適用範囲の検討

実験式が得られたので、これをはじめの試験モードであるG85、G55の2重Oリング組み合わせに適用し定数cを決定してこの式の汎用性についての検証を行つた。

試験値と実験式による値を比較した結果、試験値においては初期の段階における透過漏洩量が時間変化に対して急速に増加しており、一定の時間経過後に実験式で表す値に収斂している。

このため、先に得た実験式ではこの場合の透過漏洩量の時間変化を表せないことが判明した。

この理由について解析を行つた。

これまでの試験および解析結果から、透過係数Kは透過漏洩が開始してから漏洩量が一定値に収斂するまでの時間には急速に変化することが知られていたが、2重Oリングを透過漏洩したヘリウムガスが検出されるまでの時間においては一定値に収斂しているとの見解を持っていた。

従って、透過漏洩量の時間変化の大体の傾向については実験式で表せるとの予測をし、実験式が正しいものとして透過漏洩量の測定値をもとに、使用している定数を時間の関数である変数と見なして数値の計算を行った。

実験式に使用している定数は、K、A、d、V、cであり、cは次の式で表される。

$$c = \frac{KA}{dV}$$

ここで、A、d、VはOリングおよび試験装置の寸法によって決まる固有の値である。

従って、時間の関数となる項はKであると考えられる。Kについては、内側Oリング及び外側Oリングについての値があるが、実験式の導入にあたっては厳密に区分していない。

しかし、式の意味から、eの指數項cに現れるKについては外側Oリングについての値であり、式中に現れるKは内側Oリングに対する値である。

これから内側Oリングの透過係数Kが $K = K_0 K(t)$ で表されると仮定し、cの値を固定してKの値についての時間変化をグラフに表した。図13にこれを示す。

このグラフの近似式は

$$K(t) = 5 \times 10^{-14} t^{1.1693}$$

である。ここでtは時間を表す。

外側Oリングを透過するヘリウムガスの透過係数については、透過漏洩量が平衡状態に達した状態において測定した値より算出しており一定の値を得ている。

1重Oリングについて、ヘリウムガス透過漏洩量の平衡状態までの到達時間は検出開始時刻から約3時間後であり、透過漏洩量の算出式及び1重Oリングの透過漏洩を表すグラフから判断して、この間における透過係数Kは時間の関数であると考えられる。

一方、内側Oリングからの透過係数Kについては、時間の経過とともに2重Oリング間の圧力が変化しており、しかもこの圧力の上昇が遅いために2重Oリング間の圧力の変化に引き込まれるかたちでKが緩慢に変化していると考えられる。

この場合の実験式は

$$Q = K \frac{P}{d} A = K_0 K(t) \frac{A}{d} \cdot \frac{P}{2} (1 - e^{-ct}) \quad \text{より}$$

$$Q = 5 \times 10^{-14} t^{1.1693} \times 1.29 \times 10^4 (1 - e^{-0.00317t})$$

である。

先に示した実験式と同様、式中の時間を表す項tに適用する時間は、検出器がヘリウムガスを検出した時刻を0とした時間である。

本実験式と試験による測定値を図14に示す。

使用した数値は下記のとおりである。

透過漏洩量 $Q = 1.85 \times 10^{-7}$ (Pa・m³/sec)

Oリング呼び径 G 8 5

G 5 5

潰し代 0.2×10^{-3} (m)

フランジ間ギャップ $(2.9 - 2.4) \times 10^{-3} = 0.5 \times 10^{-3}$ (m)

この部分の体積 $0.5 \times \pi / 4 (85^2 - 63.2^2) \times 10^{-9} = 1268 \times 10^{-9}$ (m³)

内側Oリングの溝部のギャップ体積

$$2.9 \{ \pi / 4 (63.2^2 - 55^2) \} - \pi / 4 \times 3.1^2 \times 58.1\pi \times 10^{-9} = 830 \times 10^{-9}$$

(m³)

ギャップ体積 $V = (1268 + 830) \times 10^{-9}$ (m³)

G 85 断面積 $A = 802 \times 10^{-6}$ (m²)

K の算出

$$Q = K \cdot P / d \cdot A = 1.85 \times 10^{-7}$$
 より

透過係数 $K = 7.15 \times 10^{-12}$ (m² / s)

よって

$$K = 7.15 \times 10^{-12}$$
 (m² / s)

$$V = 2.1 \times 10^{-6}$$
 (m³)

$$A = 8.02 \times 10^{-4}$$
 (m²)

$$d = 3.1 \times 10^{-3}$$
 (m)

ここで透過漏洩量 Q の値は、図 14 に示すように個体差によって 2 種類の値を得ているが、確からしい値として 1.85×10^{-7} Pa · m³ / sec を採用した。

一方、これら適用すべき実験式が異なることの原因について検討を行った。

V 70、V 55 および G 85、G 55 O リングセットとの比較は次のようにある。

O リングセット	O リング太さ	O リング間体積	検出開始時間	K の値
V 70、V 55	4	2.55×10^{-6}	5.5	5.18×10^{-12}
G 85、G 55	3.1	2.1×10^{-6}	4.5	3.87×10^{-12} 7.15×10^{-12}

これらの値を比較すると、G 85、G 55 2 重 O リングセットについて測定した透過係数 K は、G 85 について測定したものであるが、個体差によって 2 種類の値を得ている。

これらの値と V 70、V 55 2 重 O リングセットで得た K の値を比較するに大きな差はない。

一方、O リング太さの比は 1.29、検出開始時間の比は 1.22 である。O リング間体積の比は 1.21 で、しかも G 85、G 55 2 重 O リングセットの O リング間体積はフランジ間の 0.5 のギャップと O リングが装着された O リング溝との和であり、形状において特殊であるがヘリウムガスの拡散の問題からは、距離の短いこともあり大きな差はないと考えられる。

従って、両 O リングセットの性能の差は O リングの太さに原因があるものと考えられ、この差が透過漏洩ヘリウムガス量の差になっていると判断される。

以上の理由から、O リングの太さによって 2 重 O リングを透過漏洩するヘリウムガス量を表す

実験式が異なることが理解できる。

これは、Oリングからの透過漏洩が開始してから透過漏洩量の値が一定となるまでの過渡状態において、透過係数 K の時間依存傾向がOリングの太さによって異なり、この透過係数の時間変化と2重Oリング間の圧力上昇の時間変化によって実験式の形が決まるためであると考えられる。

Oリングの太さ 3 mm以下と 4 mm以上では適用する式が分けられるべきである。

6. 多重OリングのOリング間圧力の時間変化の考察

以上の計算及び考察から、2重装着Oリングを透過漏洩するヘリウムガス量の時間依存のメカニズムが明らかになった。ここで得られた結果を2個以上重ねて装着した多重Oリング間の圧力の計算に拡張して考察を行った。

これまで報告してきた結果は、Oリングを2重に装着した場合の実験結果である。これを3重Oリング装着の場合に拡張して考察する。

2重OリングのOリング間圧力の計算式から、外側隙間の圧力計算は圧力を p_1 とすると

$$p = \frac{P}{2} (1 - e^{-ct})$$

の式を適用して

$$p_1 = \frac{p}{2} (1 - e^{-ct})$$

である。

よって内側隙間の圧力の計算式は圧力を p_2 とすると

$$p_2 = \frac{P}{4} (1 - e^{-ct})^2$$

となる。この考え方を拡張していくと

n 個のOリングを使用した場合の最内側の隙間間の圧力については

$$p_{n-1} = \frac{P}{2(n-1)} (1 - e^{-ct})^{n-1}$$

である。この圧力が最内側Oリングからヘリウムガスを透過漏洩させる原動力となる。

従って、多重Oリングを透過して漏洩するヘリウムガスの透過漏洩量は

$$Q = K \frac{p}{d} A = K \frac{A}{d} \cdot \frac{P}{2(n-1)} (1 - e^{-ct})^{n-1}$$

で表される。

これが、 n 個のOリングを透過して漏洩するヘリウムガスの量を表す式である。

7. 考 察

以上の試験の結果、ガスケットであるOリング中にガストラップを設けることによって、2重Oリングを透過漏洩するヘリウムガスの時間依存の透過漏洩量が平衡状態に達するのを相当遅くすることができ、短時間のヘリウム漏洩検査等においてはガスケットを透過漏洩するヘリウムガスの影響を無視することができる。また、一定の時間におけるヘリウムガスの透過漏洩積算量を少なくすることができる。

従って、本2重Oリングを用いることによって、容器等のヘリウム漏洩検査において漏洩判定の精度を各段に向上させることができ、作業を正確、かつ、効率的に行うことができる。

ガストラップの存在がヘリウムガスの透過漏洩抑制に決定的に重要である。

このガストラップの存在が2重Oリング装着法の特徴であり、単にOリングの太さを2倍にした以上の効果を発揮している。

2重Oリング間に充填した物質の影響については、真空、大気 0.1 MPa、窒素 1.1 MPa、真空グリースの4種類の状態および物質についてヘリウムガス透過漏洩量の比較、検出開始時間の比較を行った。

この結果、真空の場合に比較して大気 0.1 MPa、真空グリース、窒素 1.1 MPa の順に検出時間が遅くなる傾向が確認できた。また、真空グリースの場合は透過漏洩量も少ない。

従って、2重Oリング間に真空グリースを充填した場合は、真空グリース自身によってヘリウムガスの透過漏洩が阻害されていると考えられる。

一方、2重Oリング間に、大気および窒素を圧力を変化させて充填した場合、漏洩検出開始時間は異なるが、透過漏洩検出後の漏洩量の時間変化傾向と漏洩量は同様な傾向を示す。

この現象は、2重Oリング間に充填されたガス自身によってヘリウムガスの通過が阻害されるのではなく、ガスの圧力によって弾性体であるOリング自身が圧縮されてヘリウムガスの透過が阻害されるものと考えられる。

2重Oリングを装着したことによる透過漏洩抑制の効果は、通常のOリングに比較して2倍の太さを有するOリング中に溶け込んだヘリウムガスがOリング媒質中を拡散して他の面から放出される速度と、Oリング中に溶け込んだヘリウムガスがOリング媒質中を拡散して他の面から放出されてOリング間の隙間に蓄積され、圧力の上昇に伴い他のOリング中に溶け込み、このOリング中を拡散して他の面から放出される速度との差として確認できる

ヘリウムガストラップにおけるヘリウムガス圧力の上昇速度は極めて小さいことから、2重Oリングを装着した場合の有効性が確認できる。

この一連の試験の結果、試験当初の、Oリングを2重にした場合の透過漏洩量の値は1/2であるとの推定については、時間遅れが相当あるものの最終的な平衡値の値は1/2となることが説明できた。

また、本試験の結果を解析整理して、2重装着Oリングから透過漏洩したヘリウムガスを検出

した後の透過漏洩量を表す実験式を提案した。本式によれば、Oリングの材質、大きさ、2重Oリング間の空間を知ることによって容易に2重Oリングを透過漏洩するヘリウムガス量の時間依存傾向を知ることができる。

また、使用するOリングの太さによって、下記のとおり、適用される実験式が異なることを確認した。

Oリング太さ 3 mmについては式

$$Q = K_0 K(t) \cdot \frac{P}{d} \cdot A = 5 \times 10^{-14} t^{1.1693} \times \frac{A}{d} \cdot \frac{P}{2} (1 - e^{-c t})$$

Oリング太さ 4 mmについては式

$$Q = K \cdot \frac{P}{d} \cdot A = 5.18 \times 10^{-12} \times \frac{A}{d} \cdot \frac{P}{2} (1 - e^{-c t})$$

を適用することによって、ヘリウムガス漏洩検出後の透過漏洩量の時間変化を計算によって求めることができる。

しかし、本試験で明らかなように、Oリングは製造番号による違い等個体によって差があると考えられる。従って、実験式の適用にあたっては使用するOリングの固有値を確認する必要がある。また、透過の現象は試験環境の温度によって強い影響を受けるので、正確なデータを得るために試験環境を一定に保持することが必要である。

以上の試験および解析から2重Oリングの有効性が確認できたので、より実際の使用条件を考慮して、市販の寸法のOリングを組み合わせたコンパクトな寸法の自立型2重Oリング（II型）を製作した。写真 2にこれを示す。

また、図15は我々が提案する内部にガストラップを有するOリングの構造図である。

本報告では、ヘリウムガスを使用して2重Oリングからの透過漏洩の試験を行い、試験結果の解析を行うとともに多重装着Oリングからのヘリウム透過漏洩の解析を行った。

この計算によれば、多重Oリング装着の場合は2重Oリング装着の場合に比べ透過漏洩ヘリウムガスの検出開始時間が大きく遅れ、透過漏洩量の時間依存についても増加の傾向が緩慢になり、平衡状態における透過漏洩量はOリング1本を透過漏洩する場合の1/nとなる。

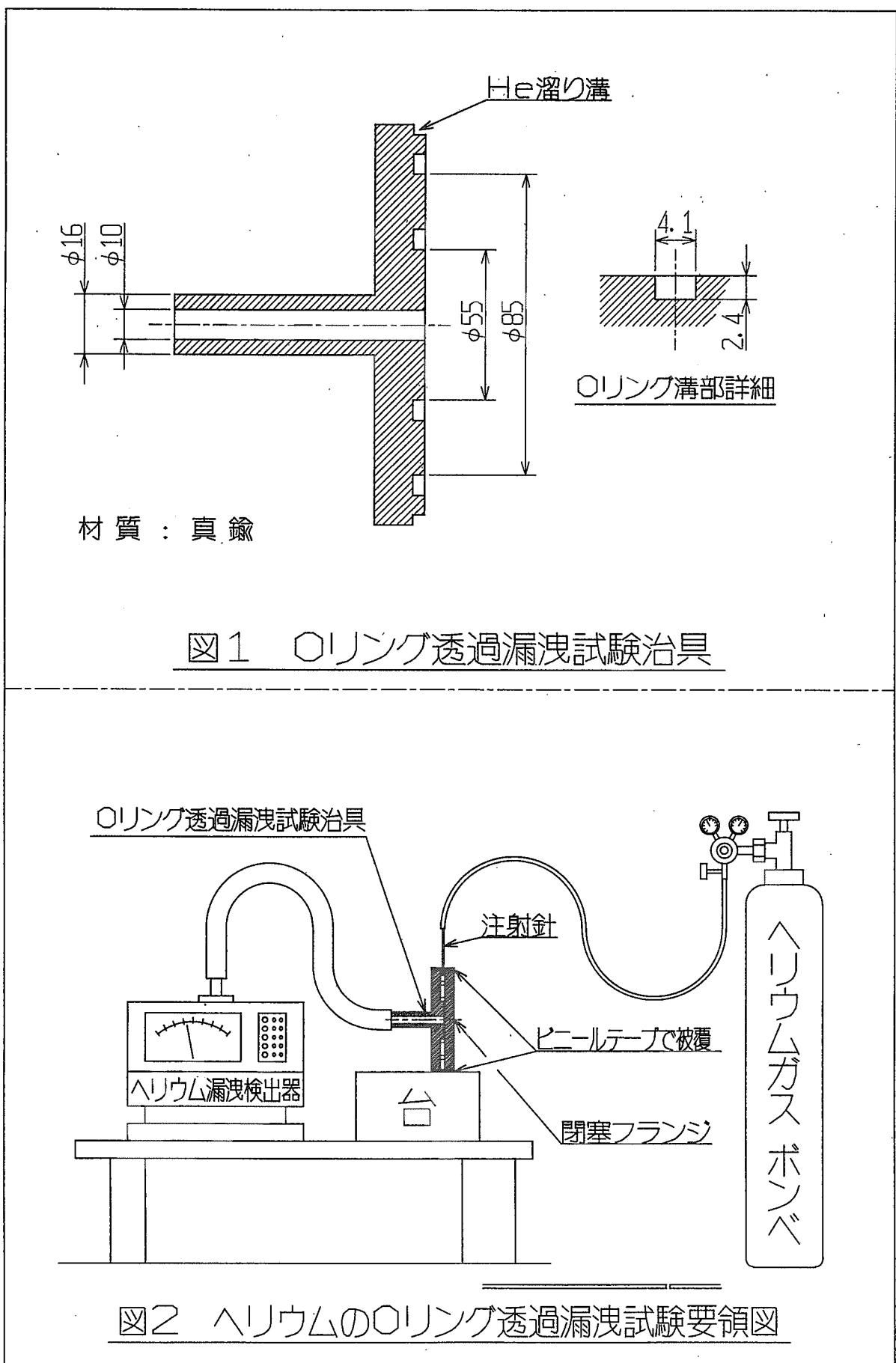
謝 辞

本報告書の作成にあたり、大洗研究所照射第1課 板橋行夫課長代理には試験方法について貴重な示唆を頂いた。また、小森芳廣照射第1課長には、全体にわたり貴重な助言を頂いた。

松崎誼技術部長には終始ご協力と励ましをいただき、本報告を纏める大きな力となった。
ここに、謹んで謝意を表します。

参考文献

- | | | | |
|-------------------------------------|-----------------------------|------|---------------|
| [1] 熊谷 寛夫、富永 五郎、辻 泰、堀越 源一 | 真空の物理と応用 | 第1版 | 1970年 4月 |
| [2] ジョンF. オハンロン | 真空技術マニュアル | 第1版 | 1988年 6月 |
| [3] 日本真空技術株式会社 | 真空ハンドブック | 第1版 | 2000年12月 |
| [4] 中側 洋 | 漏洩防止の理論と実際 | 第1版 | 1987年 1月 |
| [5] 国立天文台 | 理科年表 | 第63冊 | 1990年版 |
| [6] 日本機械学会 | 機械工学便覧 | 新版4刷 | 1990年 5月 |
| [7] 日本機械学会 | 機械設計便覧 | 第3版 | 1992年 4月 |
| [8] 久保 亮五、長倉 三郎、井口 洋夫、江沢 洋 | 理化学事典 | 第4版 | 1994年 7月 |
| [9] Oリング技術研究会 | Oリング | 第1版 | 1969年10月 |
| [10] 三菱電線工業株式会社 | ハンドブック（シール、ゴム、プラスチック製品） | | |
| | | | 1997年 1月 |
| [11] 山口 将男、秋野 昇、他 バイトンOリングのヘリウム透過試験 | | | 平成11年度技術研究会 |
| [12] 武山友憲、大場敏広 | 特許申請書「ガスケットからの気体の透過を抑制する方法」 | | 特願2001-049691 |



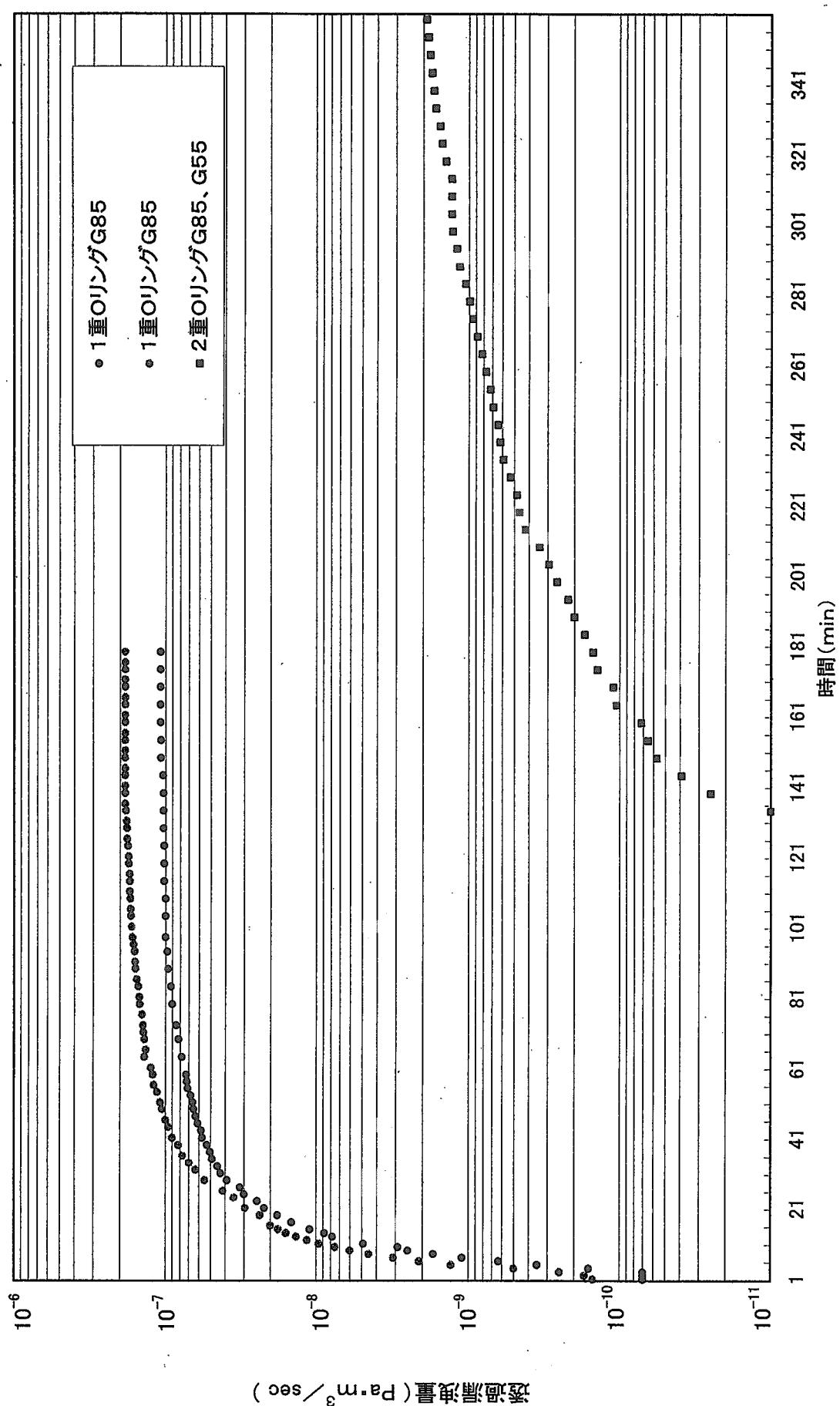


図 3 G85及びG85, G55 2重Oリング透過漏洩ヘリウム量

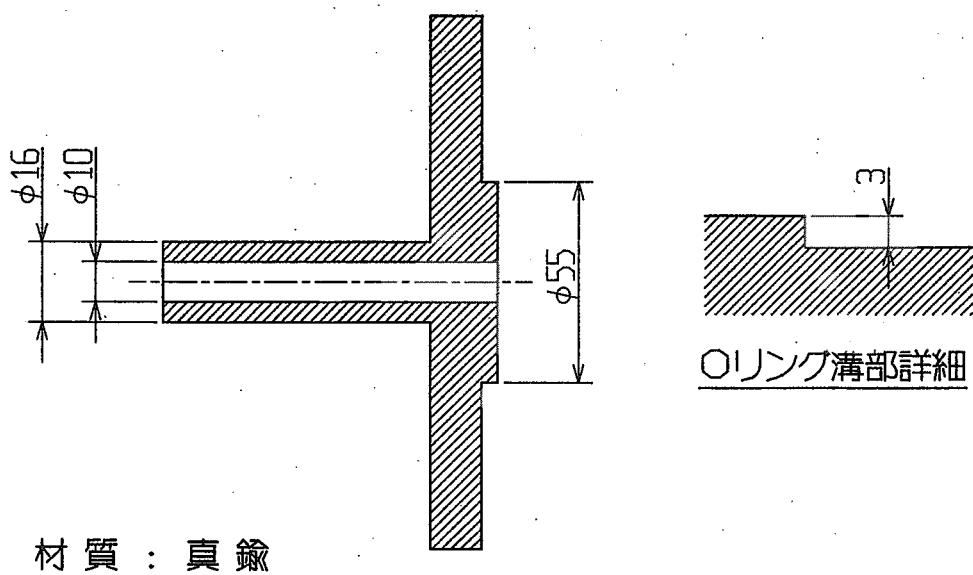


図4 Oリング透過漏洩試験治具

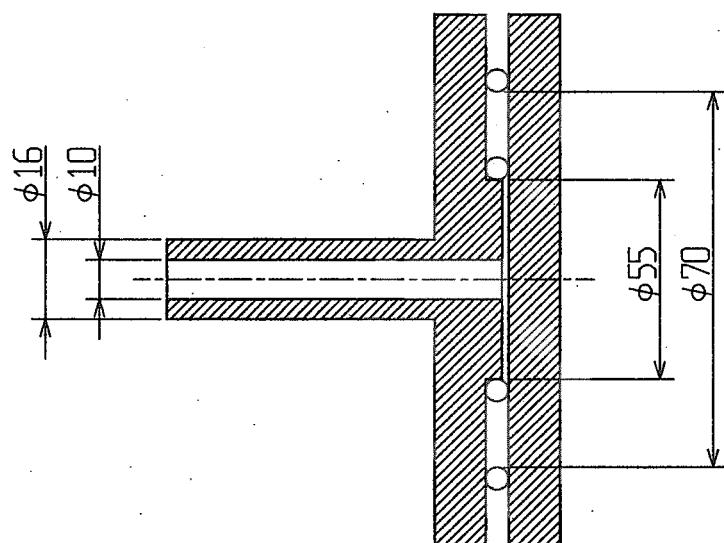


図5 自立型2重Oリング(V70,V50)装着図

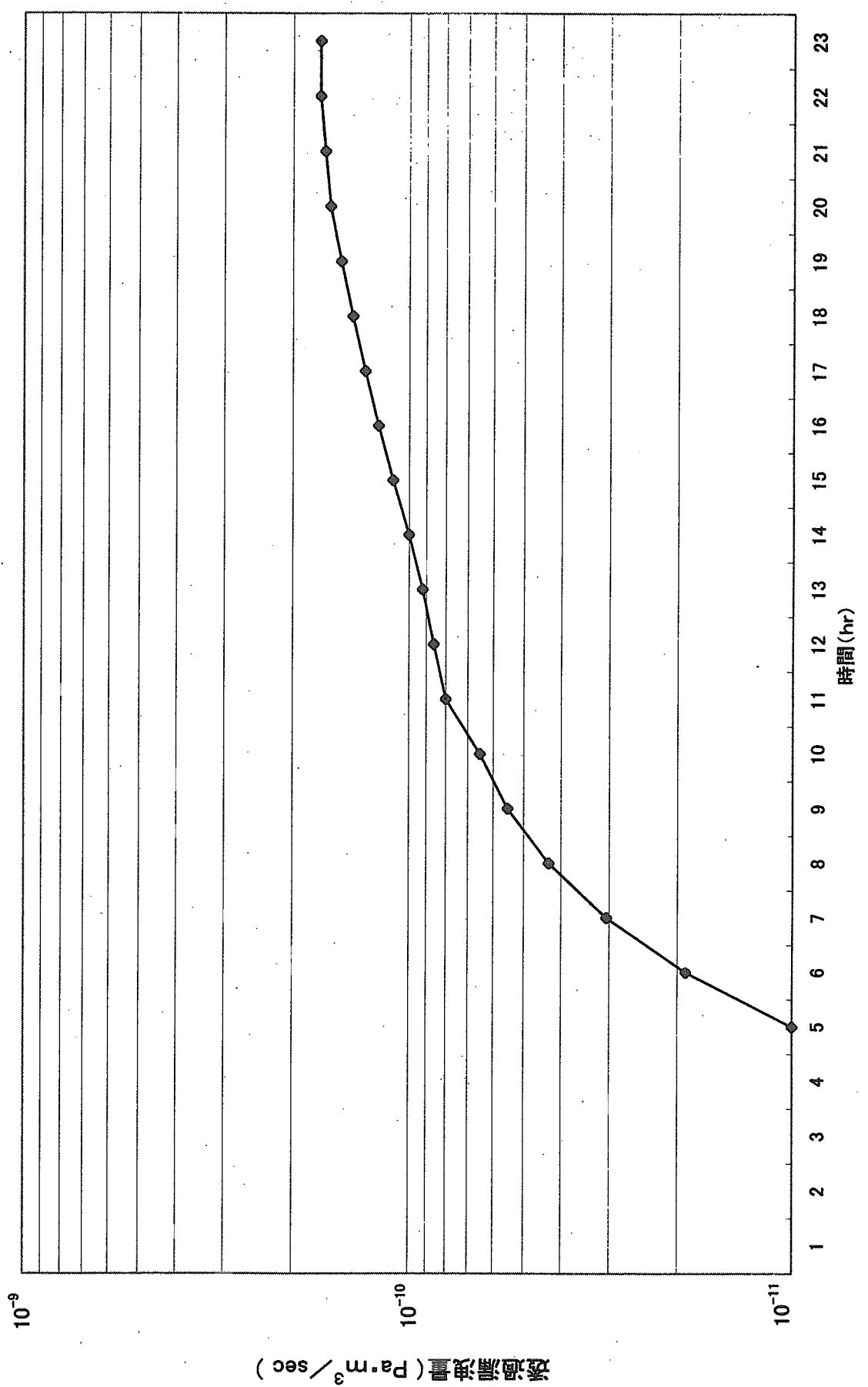
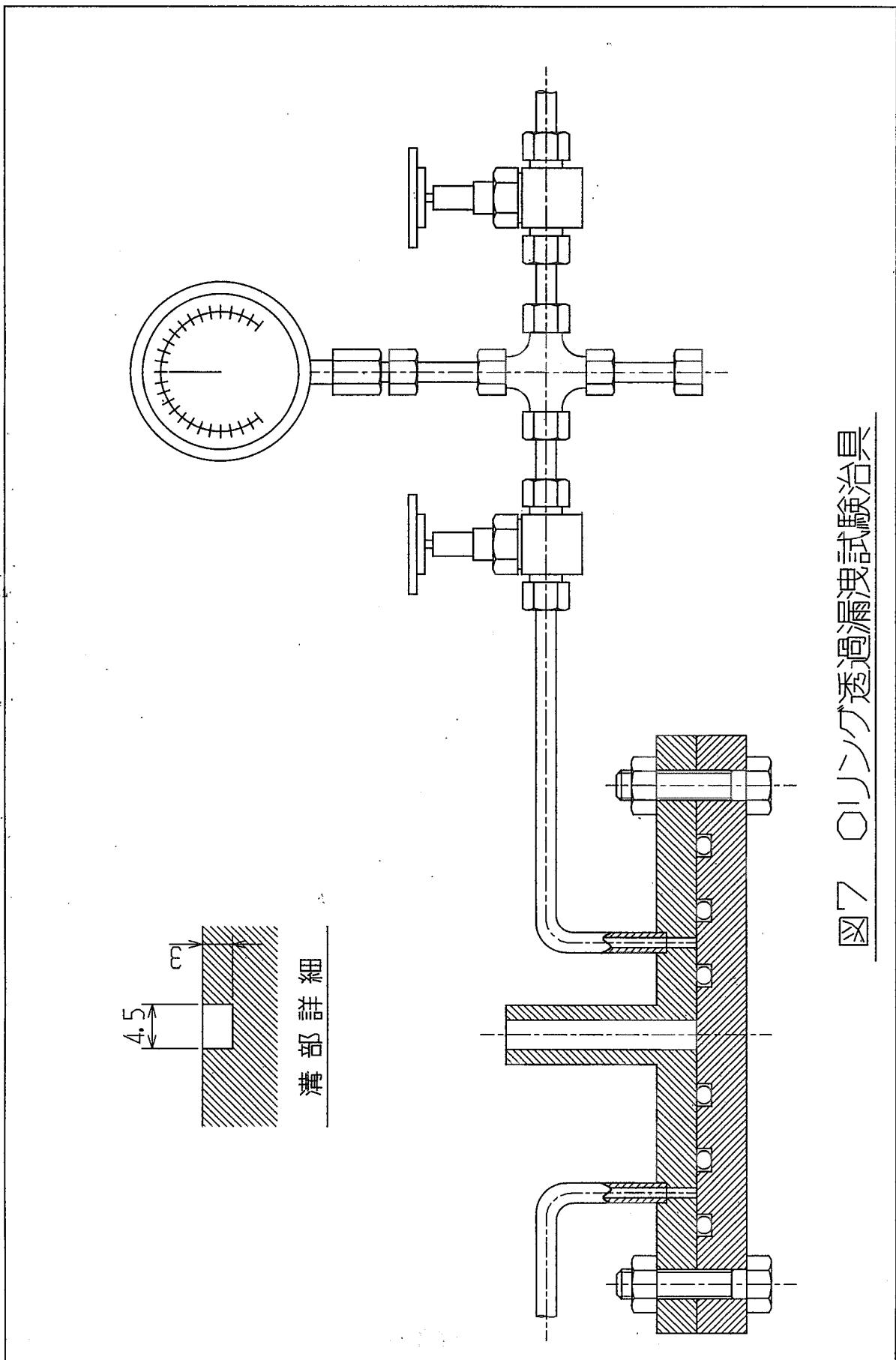


図 6 V70,V55 2重Oリング透過漏漏ヘリウム量



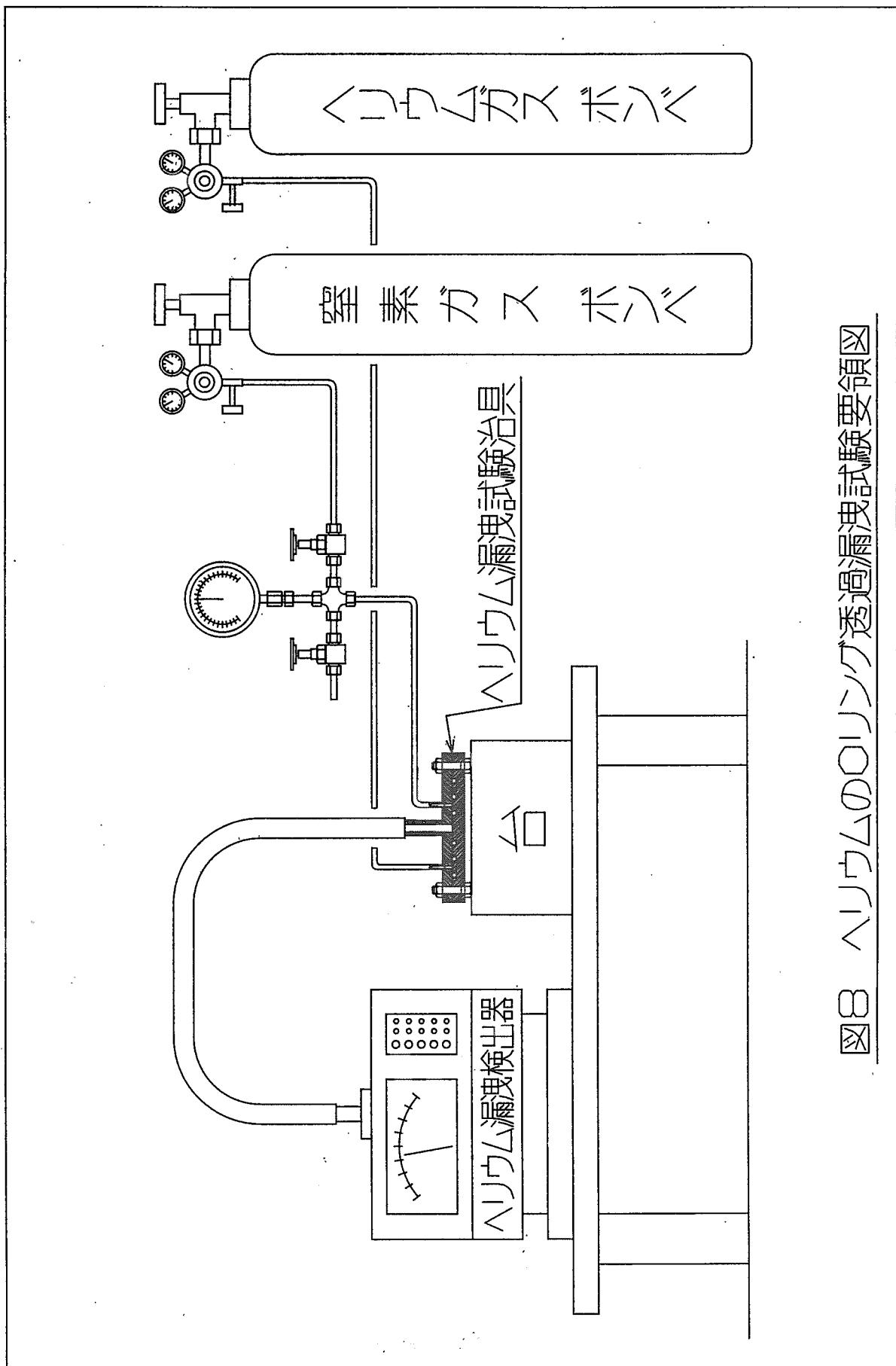


図8 ヘリウムのリークング透過漏洩試験要領図

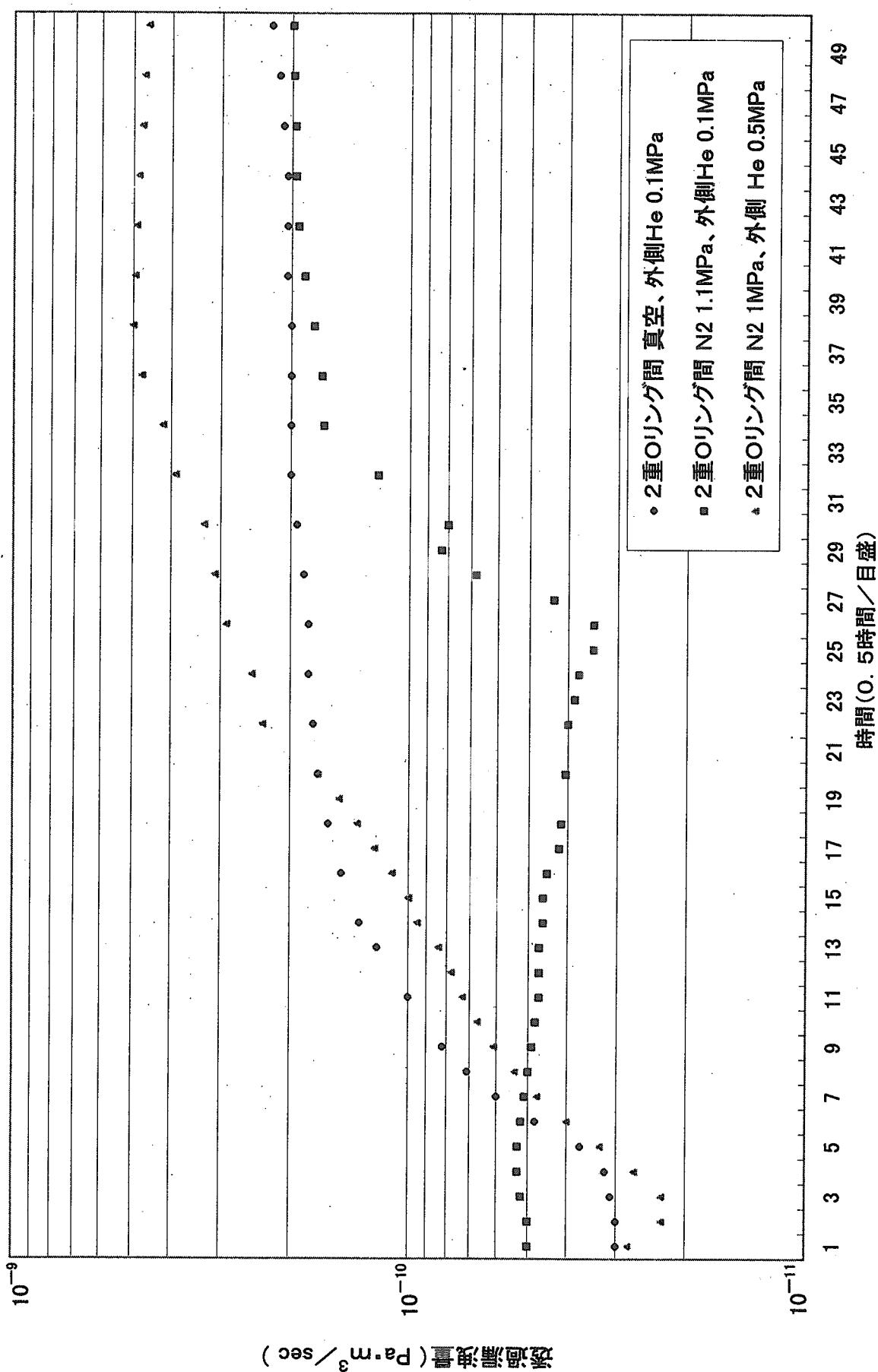


図 9 試験圧力及び2重Oリング間充填物質圧力に対する透過漏洩ヘリウム量の比較

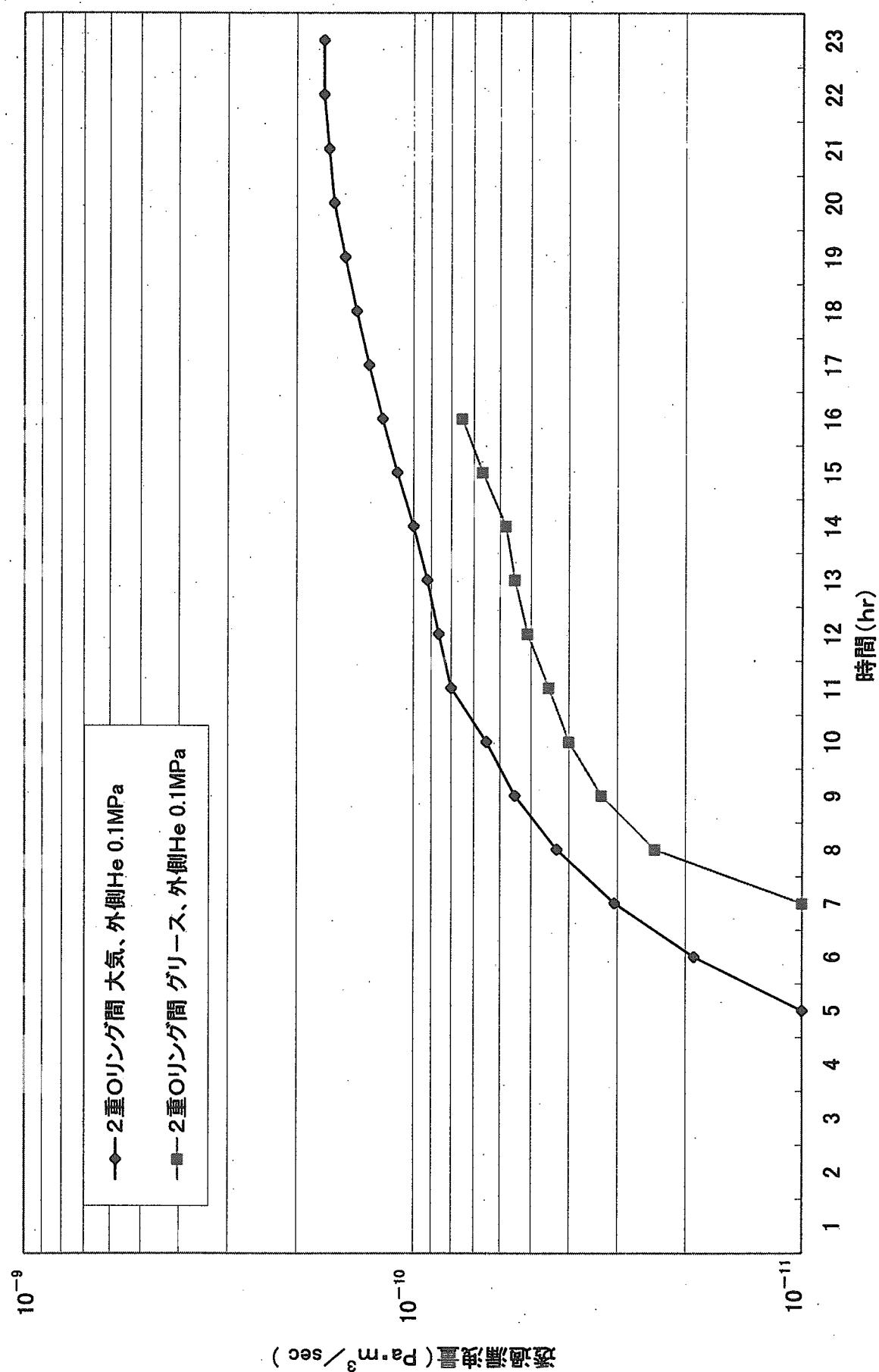
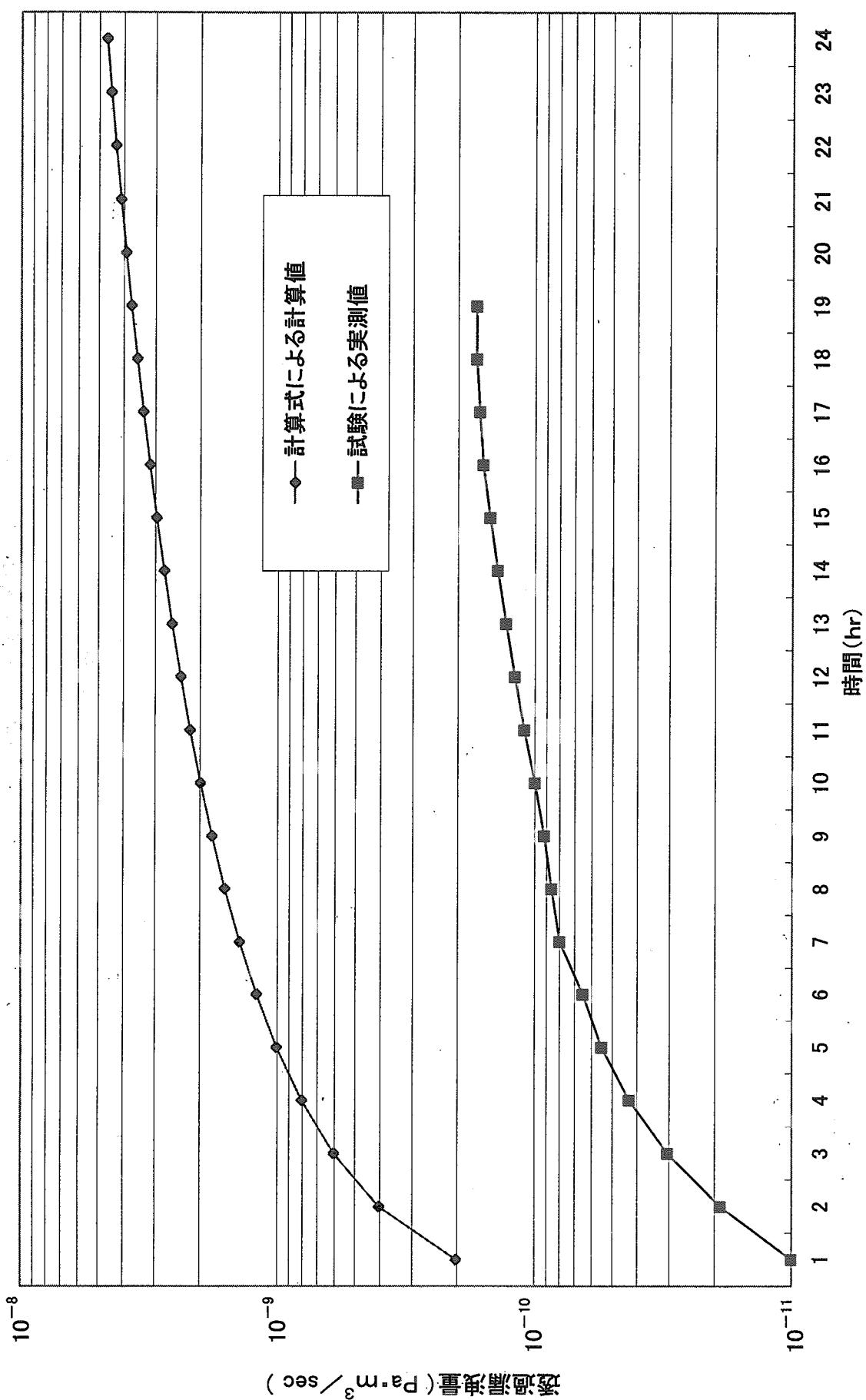


図10 2重Oリング間充填物質による透過漏洩ヘリウム量比較



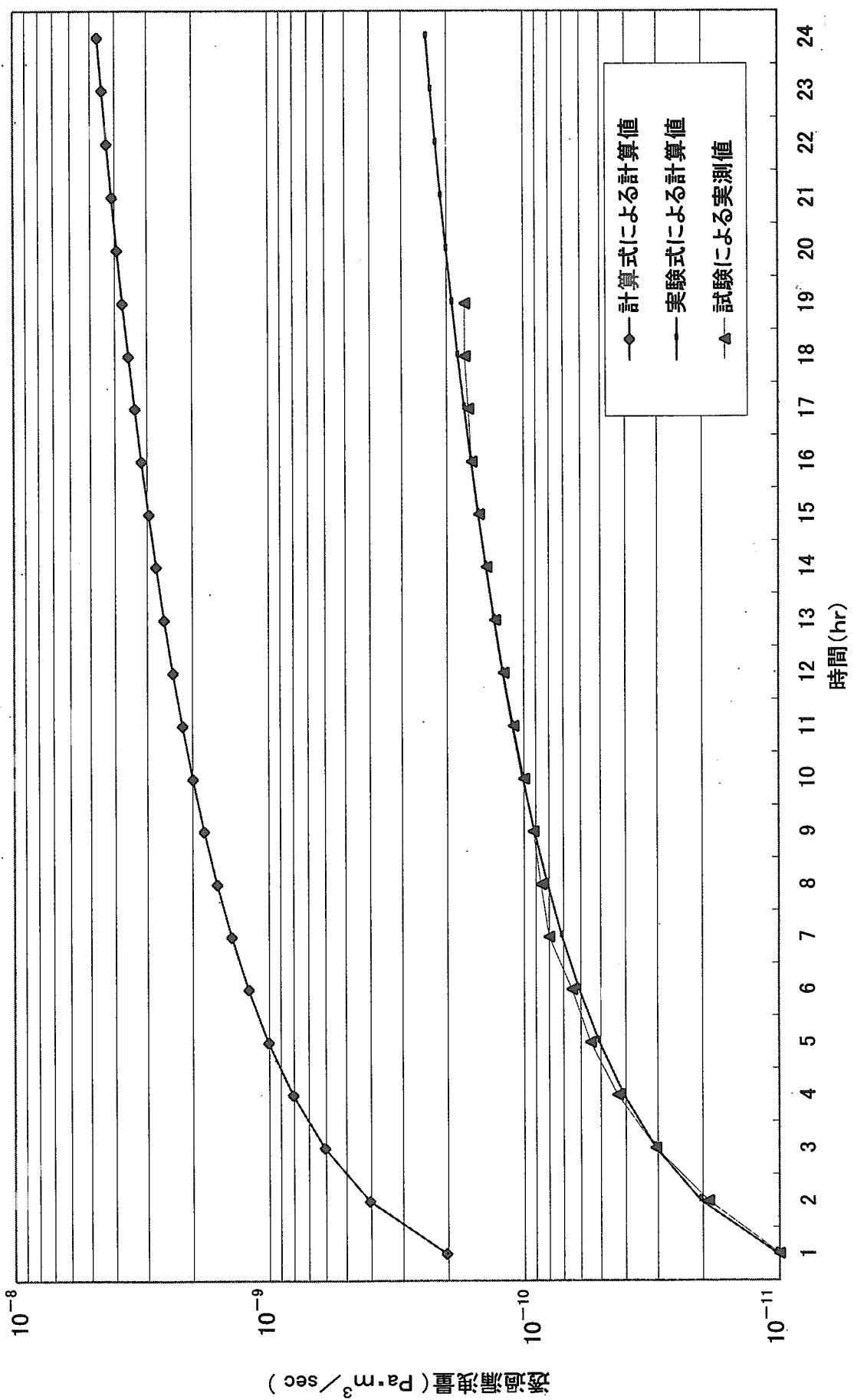
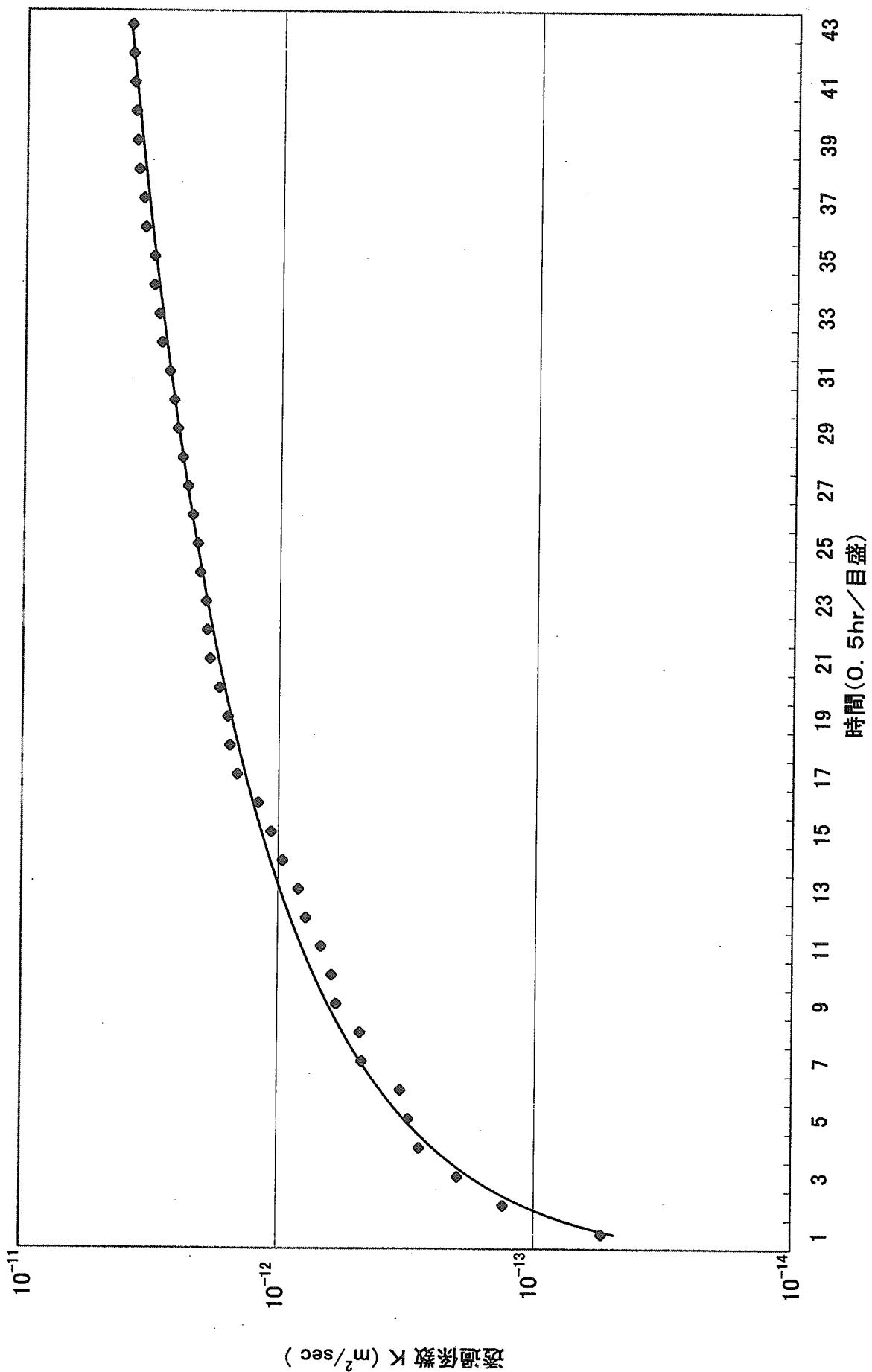


図12 V70, V55 2重リング透過漏洩ヘリウム量の計算値、近似値、実測値の比較

図13 透過係数 K の時間依存

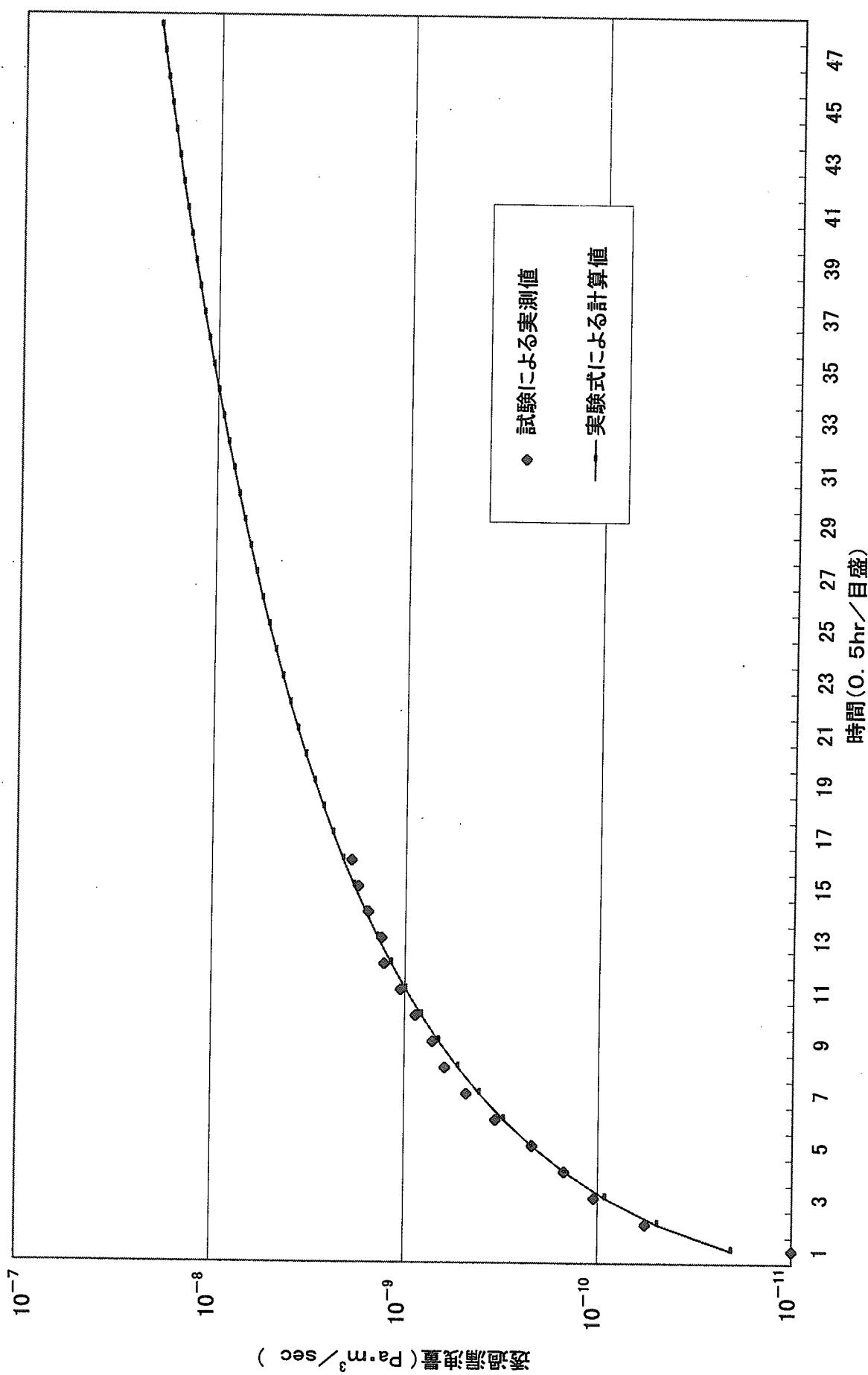
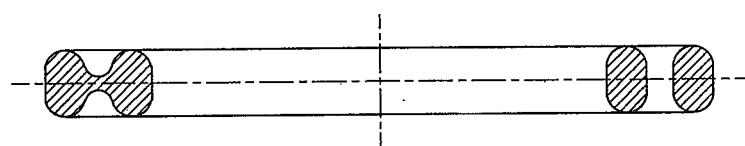
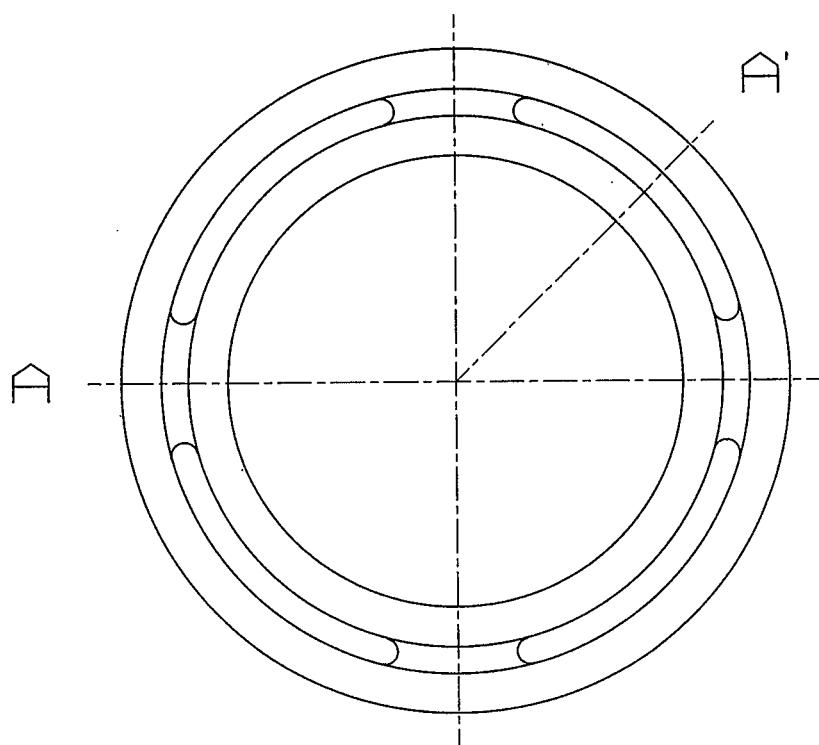


図14 G85, G55 2重Oリング透過漏漏量の実測値と透過係数Kを変数とした実験式の比較



△-△' 断面図

図15 ガストラップ付Oリング

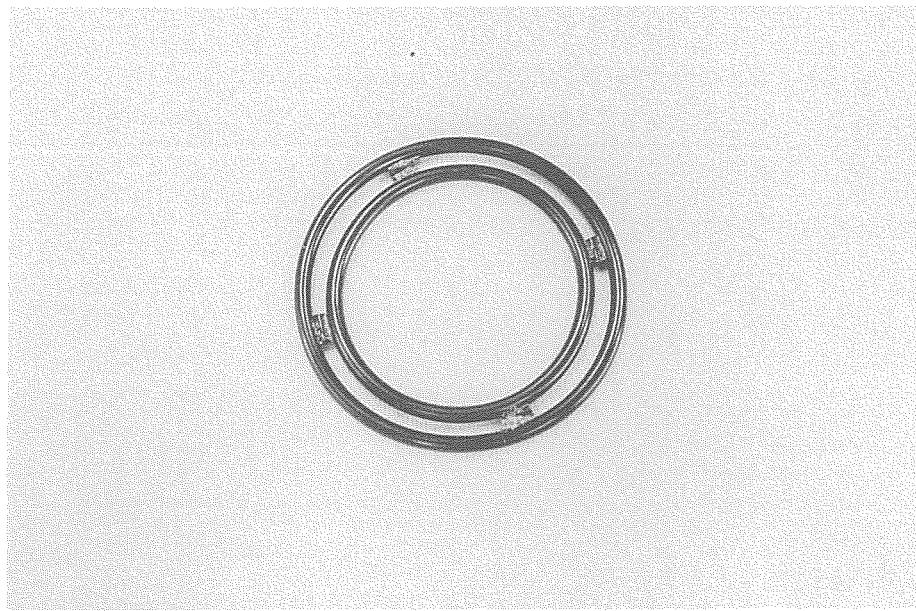


写真1 自立型2重Oリング（I型）

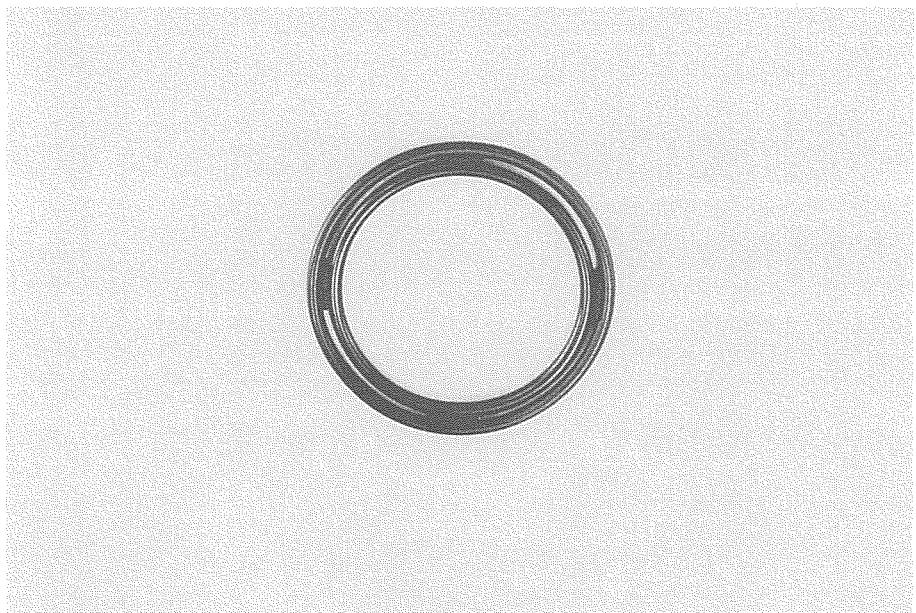


写真2 自立型2重Oリング（II型）

This is a blank page.

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
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)

1. 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。

2. 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。

3. 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。

4. 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

圧	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

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

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

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 ⁵	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
1	3876	
2.58 × 10 ⁻⁴	1	

線量当量	Sv	rem
1	100	
0.01	1	

(86年12月26日現在)

アリミー ハイブリッド紙のノベルティウムガスの透過抑制

R100

古紙配合率100%
白色度70%高生紙を使用しています。