

JAERI-Tech
2001-070

JP0150889



積層圧電アクチュエータバルブの開発

2001年11月

三代 康彦・平塚 一・増井 浩史・細金 延幸・宮 直之

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）で複写による実費領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, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

積層圧電アクチュエータバルブの開発

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部
三代 康彦・平塚 一・増井 浩史・細金 延幸・宮 直之

(2001年10月1日受理)

臨界プラズマ試験装置 JT-60で使用するガス注入弁を更新するため、新規にバルブ（積層圧電アクチュエータバルブ）の開発を行った。1985年4月の実験運転開始から使用してきたガス注入弁（バイモルフ型圧電素子弁）は、バルブの駆動源である圧電素子の老朽化によって、注入弁としての性能を維持することが出来なくなっている。JT-60では、これまでの運転経験を生かし、(1) シートリリークを起こしにくい構造であること、(2) 大気側に調整機構を持ち、系内を大気開放せずに調整・修復が可能であること、(3) 従来のものと比較し、小型、軽量であること、(4) 市販品の圧電アクチュエータと駆動電源を用いて保守性を向上させることを目的として、新たに積層圧電アクチュエータを用いたガス注入弁の開発を行った。

開発されたガス注入弁について、流量特性、磁場中における影響、周囲温度による影響、ガス注入量の経時的変化に対する試験を実施した。その結果、JT-60の使用環境に適合できることを確認した。

Development of Multilayer Piezoelectric Actuator Valve for JT-60

Yasuhiko MIYO, Hajime HIRATSUKA, Hiroshi MASUI, Nobuyuki HOSOGANE
and Naoyuki MIYA

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

(Received October 1, 2001)

In order to improve the gas injection valve used for the operation of JT-60, a new type of valve (multilayer piezoelectric actuator valve) was developed. The conventional valve (bimorph piezoelectric valve) has been used for 15 years since the beginning of experimental operation in April, 1985. However, it came to be hard to keep the performance of the valve because of the deterioration of the driving source, i.e. piezoelectric element.

Developments of the new valve were carried out based on experiences through experimental operations in JT-60. Requirements for the design are:

- (1) to be hard structure for making a sheet leak,
- (2) to allow a repair work at atmosphere side without an air vent of the vacuum vessel,
- (3) to be more smaller and lighter compared with the conventional one, and
- (4) to have a high maintenance efficiency by utilizing of the commercial piezoelectric elements and power supplies.

The newly developed valve was examined with various tests such as gas flow characteristic test, high magnetic field proof test, high temperature proof test and gas flow rate test for aged deterioration. Results, confirm that the performance of the valve is applicable for JT-60 operations.

Keywords : Gas Injection Valve, Piezoelectric Element, Multilayer Piezoelectric Actuator, Diaphragm Valve

目次

1. はじめに	1
2. 設計検討	1
2. 1 駆動源の選択について	1
2. 2 仕様	2
2. 3 構造	3
2. 4 設計流量	4
3. 特性試験の結果	6
3. 1 流量特性試験	6
3. 2 磁場特性試験	6
3. 3 温度特性試験	7
3. 4 経年変化試験	8
4. おわりに	9
謝辞	9
参考文献	10

Contents

1. Introduction	1
2. Design Study	1
2.1 Selection of the Driving Source	1
2.2 Specification	2
2.3 Structure	3
2.4 Design of Gas Flow Rate	4
3. Characteristic Examination	6
3.1 Gas Flow Characteristics	6
3.2 High Magnetic Field Proof Test	6
3.3 High Temperature Proof Test	7
3.4 Secular Change Confirmation Test for Gas Flow Rate	8
4. Conclusion	9
Acknowledgement	9
References	10

This is a blank page.

1. はじめに

JT-60では、圧電素子の圧電効果を応用したガス注入弁（圧電素子弁：P E V）を使用して、プラズマへ粒子補給を行っている。JT-60では、主にバイモルフ型圧電素子弁[1]を使用してきた。バイモルフ型圧電素子弁は、1981年から開発され、1985年4月のJT-60運転開始から2000年に至るまで使用されている。

十数年にわたり使用してきたバイモルフ型圧電素子弁では、流量制御範囲の減少とシートリークが目立ちはじめてきており、これに対し、シール材・圧電素子の交換を実施している。しかし、圧電素子は、JT-60のガス注入弁用に特別に開発・製作されたもので、再購入は経済的に困難であり、予備品の在庫については、当初の運転計画（10年）に基づき予備品の確保を行ったため、JT-60の運転計画延長に対して十分な量ではなかった。このため、新たにガス注入弁を開発することが必要であった。

これを受け、1985年以降バイモルフ型の稼働中に並行して、微小容量圧電素子弁[2]、積層型圧電素子弁[3]、積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁[4] 等の試作・開発を実施し、JT-60に取付けた試験も行ってきた。

以上の理由により、素子の老朽化により性能を保つことが難しくなってきていたバイモルフ型圧電素子弁を交換するため、これまでの運転と弁の開発の経験を生かし新規にガス注入弁の製作を実施した。新規ガス注入弁については、

- ①シートリークを起こしにくいこと。
 - ②接続状態にて大気側より調整出来ること。
 - ③従来のものと比較して、小型化、軽量化を図る。
 - ④市販品の圧電アクチュエータ、素子用電源を採用し、予備品を容易に確保できること。
- 等を課題として開発した。

1999年11月の定期点検時にバイモルフ型圧電素子弁16台全数を積層圧電アクチュエータバルブへの交換を行い、2000年2月から実験運転に使用している。

2. 設計検討

新型ガス注入弁については、バイモルフ型圧電素子弁の性能と同等以上と設定し、駆動源の選択、流量範囲および構造の設計検討を実施した。

2. 1 駆動源の選択について

(1) 駆動源の種類

駆動源としては、空気、モーター、電磁コイル、圧電素子が考えられる。

これら駆動源の特徴を以下に示す。

- | | |
|-------|---|
| ・モーター | : 数秒～数分、磁場中での使用に難点がある |
| ・空気 | : 数百 msec |
| ・電磁力 | : ~10msec 但し、シール性、流量制御、連続運転、磁場中の使用に難点がある。 |
| ・圧電素子 | : ~10msec JT-60で使用していた実績あり |

磁場中の使用、駆動速度および開発・運転実績を考慮した検討の結果、駆動源として圧電素子を採用する。

(2) 圧電素子の選択

現行の圧電素子弁および試作開発弁には、バイモルフ型、積層樹脂モールド型、積層圧電アクチュエータの圧電素子を使用している。各々の素子の特徴を以下に述べる。

a) バイモルフ型圧電素子

バイモルフ型圧電素子は、2枚の圧電素子を重ねたものである。変位量を大きくとれるが、発生力は小さい。発生力が小さいため、ガス流量範囲の調整とシートリークを止めるための調整に熟練を要する。また、市場性の悪さにより殆ど生産されておらず、現在においてバルブ用のバイモルフ型圧電素子入手することが困難である。

b) 積層樹脂モールド型圧電素子

積層樹脂モールド型は、素子を積み重ねたものを樹脂で固めたものである。バイモルフ型に比べて、発生力は大きいが変位量は小さい。予圧が必要なため単体で電圧を印加すると素子が剥離し、破損してしまう。試験中にも素子が破損するという事例があり、耐久性に問題がある。

c) 積層圧電アクチュエータ

積層圧電アクチュエータ型は、素子を積み重ねたものを金属ケースに封入したものである。発生力、変位量共に大きく、予圧を必要としないため取扱が容易である（金属ケースにより予圧されているため、単体で電圧を印加しても、素子の剥離等による破損がおきない）。

各圧電素子の主な仕様を Table 2-1 に示す。

各圧電素子の特徴と今までの実績等をふまえて検討した結果、変位量が大きく流量範囲が確保できること、発生力が大きく十分にシート面を抑えることができること及び堅牢であることから積層圧電アクチュエータ型を用いることとする。

さらに、容易に予備品を確保できるなどの保守性を考慮し、市販品の圧電素子と駆動電源を採用することとした。

2. 2 仕様

バイモルフ型圧電素子弁の仕様と積層圧電アクチュエータバルブの要求仕様を Table 2-2 に示す。

積層圧電アクチュエータバルブは、バイモルフ型圧電素子弁と同様に小容量型弁（L弁）と大容量型弁（H弁）があり、これら流量範囲の異なる弁をシーケンシャルに組み合わせて使用する。流量範囲の異なる弁を組み合わせることにより、低い流量域での注入量の精度を保ちつつ、大きな流量範囲まで連続した注入量の制御範囲を実現する。

また、これまでの実験運転の経験からL弁とH弁の連続性を改善するため、L弁の最大流量を $5.33\text{Pa m}^3/\text{s}$ から $5.8\text{Pa m}^3/\text{s}$ 、H弁の最小流量を $5.33\text{Pa m}^3/\text{s}$ から $4.5\text{Pa m}^3/\text{s}$ とし、切替ポイントにL弁とH弁の流量範囲の重なりを持たせるようにした。流量制御範囲を Fig. 2-2 に示す。

ここで、H弁の最大流量が $53.3\text{Pa m}^3/\text{s}$ [1] から $45\text{Pa m}^3/\text{s}$ となり装置性能として流量が減少している。このことについては、注入弁の配置を最適化することにより実験運転に必要なガス

量が確保されている。

2. 3 構造

積層圧電アクチュエータバルブの構造について以下に述べる。H弁とL弁の構造を Fig. 2-3-1、Fig. 2-3-2 に示す。組立図を Fig. 2-3-3 に示す。また、バイモルフ型圧電素子弁との比較のため、新旧バルブの構造図を Fig. 2-3-4 に示す。

2. 3. 1 構造における特徴

- 1) 弁シート部にダイアフラム（金属シール板）を用いて、真空側（ガス流路）と大気側を切り離すことにより、素子を大気側に設定することが出来たため、バルブを JT-60 へ取り付けた状態でバルブの調整および圧電素子の交換作業が出来る。
- 2) 変位量の大きい素子を用いるため、てこ等の力を增幅する複雑な機械部品を必要としないことと、素子を大気側に設置しているため構造物全体をバルブ筐体で囲む必要が無いことにより、従来の圧電素子弁と比較して小型・軽量となっている。
- 3) 発生力の大きい素子を用いることにより、面圧を増やすことができ、バルブ閉時におけるシートリーク発生の低減に効果が期待できる。

2. 3. 2 構造と動作原理

- 1) スプリングカバーとカバープレートはボンネットによりバルブボンネットへ固定されている。システムにはカバープレートが貫通するための長穴があいている。
- 2) システムの下端部には、スプリングカバーとスプリング（サラバネ：数枚）が組み込まれ、スプリングホルダーにより固定されている。
- 3) 自己復元力を持つ金属シール板がバルブボディとバルブボンネットに挟まれている。金属シール板とスプリングホルダーの間には、ジョイントポール及びプッシュプレートが設置されている。
- 4) システム内に積層圧電アクチュエータが組み込まれ、アクチュエータの下端部はカバープレートに固定され、上端部はアジャストナットによりシステム上端部に固定される。
- 5) スプリングの反力は、バルブボンネットに固定されているスプリングカバーを固定点とし、プッシュプレートを下に押し下げる方向に作用する。これにより、金属シール板がバルブノズル面に密着し流れを閉ざす。金属シール板のノズル側の面には、ゴム系のシール材が接着しており、このゴムでシールする。
- 6) 通電により積層圧電アクチュエータは、縦方向に伸びる。下端部はカバープレートで固定されているため、上方向に伸びる。上方向の伸びは、アジャストナットへ伝えられシステムを引き上げる。システム下端のスプリングホルダーは上方向にスプリングを収縮させ、

金属シール板を押さえる力を減少させる。金属シール板は、自らの復元力により、プッシュプレートとジョイントボールを押し上げ、ノズル面との隙間を作ることが出来る。

2. 3. 3 その他使用部材に対する工夫

- 1) ダイアフラムへのシール材の接着には、ゴム成形加硫蒸着を採用している。従来の手作業によるシール材の切り取り、接着剤の塗布、貼り付けの接着行程と比較して施工精度が向上している。
- 2) 金属シール板を押さえ込むプッシュプレートとステムの間に、ジョイントボールを設置し、ノズルに対する弁シートの力が均一かつ垂直に掛かるようにしている。ジョイントボールには、十分な硬度を得るため人工サファイアを使用している。
- 3) バルブの主構造材(sus)と圧電素子との熱膨張係数が異なるため、温度変化により流量特性が変動してしまう。この問題に対しては、ステムとアジャストナットの材質をチタンに変えることにより解決している。

2. 4 設計流量

L弁での最大流量 5.8Pa m³/s、H弁での最大流量 45Pa m³/s を得るために、バルブの基本構造を決定する。ガス流量は、オリフィス径と弁座の隙間により決定される。

(1) バルブのオリフィス径の算出方法

一般的に、オリフィスタイプの流量は、以下の式で流量を求めることができる。

$$Q_1 = 1.1547 \times Cd \times Af \times Pt \times ((Rt \times T) / M)^{1/2} \times (K(2/(K+1))^{(K+1)/(K-1)})^{1/2}$$

$$Q_2 = 0.1333 \times Q_1$$

Q1 : 流量 (Torr l/s)

Q2 : 流量 (Pa m³/s)

Cd : 流量係数 (0.6)

Af : 流路の最小断面積 (cm²)

Pt : 背圧 (Torr) (2231 Torr)

Rt : 気体定数 (62.364 Torr l/K mol)

M : 分子量 (2.016 : H₂)

T : 温度 (K) (293 K)

K : 比熱比 (1.405 : H₂)

流路の断面積(Af)よりオリフィス径を求める。

$$d = Af / \pi \cdot \delta \cdot 10^5$$

d : オリフィス径 (mm)

δ : オリフィスと弁座との隙間 (μm)

(2) シートとノズル間の距離および補正係数の検討

予め試作弁を製作し、最大流量、弁の開きはじめの電圧、補正係数を求め、仕様に合致するバルブのノズル径を算出する。

補正係数については、これまでのバイモルフ型と積層型のガス注入弁の製作で、流路断面積の計算値と実際の断面積とに開きがあり、積層型圧電素子弁では、断面積に補正係数 2.1 を掛けている。今回の開発では、弁座の構造が異なり補正係数も変わることから、積層型のガス注入弁の補正係数 2.1 を使用する。実測の流量からこの弁に対する補正係数を求める。

a) シートとノズル間の距離

試作弁の特性曲線からシートの開きはじめの電圧を読みとり、積層圧電アクチュエータの電圧に対する変位量を求める。この変位量からシートとノズル間の最大距離を求める。H型試作弁の流量特性を Fig. 2-4-1 に、L型試作弁の流量特性を Fig. 2-4-2 に示す。積層圧電アクチュエータの電圧に対する変位量を Fig. 2-4-3 に示す。

Fig. 2-4-3 から判るように圧電素子のヒステリシスにより伸び側と縮み側の変位量が異なる。ヒステリシスについては、バルブ組込み時スプリングで圧電素子を押さえ、強制的に残留歪みを戻している[1]。このため、シートとノズル間の距離を求める際は伸び側のデータを用いる。

H弁の開きはじめの電圧は、Fig. 2-4-1 より約 60V である。L弁の開きはじめの電圧は、Fig. 2-4-2 より約 70V である。このときの変位量は、Fig. 2-4-3 の伸び側のデータよりそれぞれ $12\mu\text{m}$ と $15\mu\text{m}$ となる。Table 2-1 から積層圧電アクチュエータの最大変位量は $34\mu\text{m}$ であるので、最大変位量との差によりシートとノズル間の距離はH弁で $22\mu\text{m}$ 、L弁で $19\mu\text{m}$ となる。

b) 補正係数

仮の補正係数 2.1 を用いた試作弁の流量特性試験結果から積層圧電アクチュエータバルブの補正係数を求めた。

試作弁のノズル径は仮の補正係数により 2.31 と 0.36 となる。このノズル径を用いたH弁、L弁の実流量データから補正係数を求めるとH弁で 2.55、L弁で 2.15 となる。

(3) ノズル径の算出

前述のバルブのオリフィス径の算出方法を用いて、シートとノズル間の距離、補正係数から必要なノズル径を求める。

L弁 $0.5\text{Pa m}^3/\text{s}$ から $5.8\text{Pa m}^3/\text{s}$ 、H弁 $4.5\text{Pa m}^3/\text{s}$ から $45\text{Pa m}^3/\text{s}$ の流量範囲を得るためのH/L各弁のノズル径は、 $1.9\text{mm}/0.35\text{mm}$ となり、これを採用する。

3. 特性試験の結果

製作した積層圧電アクチュエータバルブの特性及び性能を評価するため、以下の試験を行う。

- ・流量特性試験 制御値に対するガス流量の変化を測定。
- ・磁場特性試験 磁場に対するガス流量の変化を測定。
- ・温度特性試験 使用環境温度に対するガス流量の変化を測定。
- ・経年変化試験 時間に対するガス流量の変化を測定。

3. 1 流量特性試験

ガス注入装置として注入量を制御するにあたり、制御値（電圧）に対する積層圧電アクチュエータバルブの流量特性の確認試験を実施して、積層圧電アクチュエータバルブの制御性を調べる。

(1) 試験方法

流量特性を測定する試験装置の構成を Fig. 3-1-1 に示す。試験用真空容器 (0.1 m^3) のダイアフラム型真空計を用いて、バルブ動作前とバルブ動作後の試験用真空容器の圧力を測定し、その変化量（ビルドアップ値）と容器容積及びバルブの動作時間（パルス幅）から容器内へのガス注入量を求める。

測定は、印加電圧 50V から 150V まで 10V 刻みで行い、容器圧力変化のビルドアップ量を取得する。印加電圧のパルス幅は、注入量と真空容器容量との関係から H弁で 100ms 、L弁で 1000ms とする。試験ガスには、水素ガスを使用し、背圧を 0.2MPa とする。

(2) 試験結果と考察

積層圧電アクチュエータバルブ H弁、L弁の流量特性を Fig. 3-1-2、Fig. 3-1-3 に示す。

最大印加電圧 150V での流量は、H弁 $43.3\text{Pam}^3/\text{s}$ 、L弁 $5.62\text{Pam}^3/\text{s}$ である。仕様値の H弁 $45\text{Pam}^3/\text{s}$ 、L弁 $5.8\text{Pam}^3/\text{s}$ に対し満足できる結果 ($\text{FS} \pm 10\%$) を得ることができている。最小流量についても、ガスの流れ始まりが H弁 $4.5\text{Pam}^3/\text{s}$ 以下、L弁 $0.5\text{Pam}^3/\text{s}$ 以下であり十分に仕様値を満足している。

また、図より電圧に対する流量はほぼ比例関係にあることが判る。バイモルフ型圧電素子弁も電圧に比例した同様な流量特性であるので、同様な制御方法で注入量を制御することが出来、さらに、既設制御システムを用いたガス注入が可能である。

3. 2 磁場特性試験

強磁場中においても積層圧電アクチュエータバルブが制御可能であることを確認するため、磁場発生装置を用いて磁場に対する注入量の変化についての試験を実施する。

(1) 試験方法

磁場中において積層圧電アクチュエータバルブの流量変化を測定する装置を Fig. 3-2-1 に示す。バルブは磁場発生装置中央の最も磁場の強い位置へ設置する。磁場の影響を受けない場所へマスフローメーターを設置し、流量を測定する。発生磁場は、装置定格の

600Gauss 以下とする。磁場の方向は、圧電素子に対し、水平方向と垂直方向の 2 方向とする。

バルブ出口を大気開放とするため、流体としてヘリウムガスを使用する。背圧は 0.2MPa とする。

(2) 試験結果と考察

水平方向の磁場をかけた時の流量の変化を Fig. 3-2-2、垂直方向の磁場をかけた時の流量の変化を Fig. 3-2-3 に示す。

図から判るように磁場による流量の変化は無く、積層圧電アクチュエータバルブは 600gauss の磁場により影響を受けない。

また、ガスを一定の流量で流し続けた状態において、手動にて磁場を変動させてみたが (0~600 gauss : 約 0.5Hz) 流量の変化は無かった。

J T - 6 0において現在の注入弁設置位置の磁場は、<600 gauss と評価されているので、J T - 6 0での使用について磁場の影響に対する問題は無い。

3. 3 温度特性試験

2. 3. 3 の項で、述べている様に、積層圧電アクチュエータバルブでは、バルブの主構造材 (sus) と圧電素子との熱膨張係数が異なるため、周囲温度の変化により流量特性が変動してしまう。その対策として、主構造材と圧電素子の熱膨張係数の差を相殺するため、チタンを構造部材の一部 (ステム等) に使用している。

本試験は、バルブ温度を変化させ、温度に対する流量特性に変動のないことを確認する。

(1) 試験方法

積層圧電アクチュエータバルブの温度依存性を調べるための装置を Fig. 3-3-1 に示す。

ここでは Fig. 3-1-1 に示した装置を恒温槽内に設置し、温度制御を行う。バルブの温度を 15°C、25°C、30°C と設定し、流量特性試験と同様に印加電圧 50V から 150V まで 10V 刻みで圧力のビルドアップ値を取得する。真空容器の温度は 25°C 一定に保持する。

試験に用いるバルブは、実際に JT-60 へ取り付けるため製作した H 弁 10 台、L 弁 10 台を使用する。

(2) 試験結果と考察

温度に対する流量特性試験の結果の一部を Fig. 3-3-2、Fig. 3-3-3 に示す。H 弁については、バルブ温度に対する流量の変化はほとんど観られない。L 弁については、バルブ温度の上昇に伴い若干の流量の低下を観ることができる。

H 弁 10 台、L 弁 10 台について、印加電圧 150V、バルブ温度 15°C と 30°C の流量差を比較したものを Fig. 3-3-4 に示す。図より H 弁では、15°C の温度差に対する流量のバラツキを 3% 以内に、L 弁では、7% 以内に抑えることができている。

実際の使用環境における温度は、真空容器の 300°C ベーキングの有無により変化するが、

20°C～35°Cの範囲である。通常においては、ベーキング温度が一定のため、雰囲気温度の変化は数°C程度であり、流量の変化は殆ど無いと言える。室温（ベーキング停止時）とベーキング中の温度差が15°Cであるので、流量の変化は7%程度である。このため、JT-60における積層圧電アクチュエータバルブの使用に関して、雰囲気温度の変化は問題とならない。

参考のため、本来チタンを使用すべきシステムとアジャストナットの材質をsusのままとしたバルブ（熱対策未実施弁）の温度に対する流量特性をFig. 3-3-5に示す。この場合の流量特性に著しい変化が見られるのは、積層圧電アクチュエータに対しsusの温度膨張率が大きいため起きる(sus: $1.73 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, アクチュエータ: $8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)。温度の上昇に対しシステム(sus)の熱伸びが大きい一方でアクチュエータの熱伸びが小さいので、システム上端のアジャストナットがアクチュエータを押さえる力が緩められ離れる方向に動くことによる。バルブを開くためには、温度上昇前より大きなストロークが必要となり、電圧を熱伸びのストローク分高い電圧を加えなければならない。

3. 4 経年変化試験

圧電素子弁には、経年変化があり、経時にガス注入量が変化する。積層圧電アクチュエータバルブにおいても今までの圧電素子を用いたガス注入弁と同様にガス注入量が変化するものと思われる。JT-60におけるガス注入量の制御は、バルブ特性より求めた近似式を用いて指令値であるガス注入量から印加電圧を計算・出力し、ガス注入弁を動作させる。このため、経時にガス注入量が変化することは、長期的に精度の高いガス注入を行うことが出来ない。これまでの圧電素子弁では、比較的に変化が緩やかであったため、以下に示す対策を講じて対処している。

- ・半年毎に全バルブについて特性試験を実施し、バルブ毎の近似式を更新する。
- ・実験前にJT-60真空容器に一定量のガスを注入し、バルブ特性の履歴を確認する。
- ・シール材の劣化に対して、交換を実施する。

積層圧電アクチュエータバルブについてもバイモルフ型圧電素子弁と同様な対策で十分かどうかを確認するため、経年変化について調査を実施する。

(1) 試験方法

流量特性試験を長期間にわたり実施し、流量の経時的变化について調査する。

(2) 試験結果と考察

積層圧電アクチュエータバルブの11ヶ月間(2000年5月～2001年3月)における経年変化をFig. 3-4-1とFig. 3-4-2に示す。

両図とも時間の経過とともに流量が増加していくことから、経年変化していることが判る。約1年間での流量の変化は、H弁で約9%、L弁で約8%増加している。バイモルフ型と同様に1年で9%以下であることから、従来の経年変化対策を行うことにより4.5%

内に収めることが出来る。

また、低い電圧(70V、80V)における流量の変化が著しいことが分かる。これは、シール材(ゴム:NBR)の弾性変形によることが主な要因と思われる。すなわち高い電圧の時はリフト量が大きいので弁座とシールとの間に十分な間隙があるが、低い電圧では、少ないリフト量に対してシール材の変形(へこみ)により、弁座とシールに十分な間隙が得られないためである。特にL弁については、低い流量域のバルブであるためこの影響が顕著に現れたものと考えられる。

経年変化については、今後も引き続き検討を進め、より長期間での変化の調査が必要である。

4. おわりに

今回開発を行った積層圧電アクチュエータバルブは従来型の圧電素子弁と比較して構造的に特徴をもつ注入弁である。弁座のシール部にダイアフラムを用いた効果により、圧電素子並びに駆動機構を大気側に配置することが出来た。これにより、調整および圧電素子交換時のメンテナンス性の向上、さらに小型・軽量化が図れた。発生力の大きな圧電素子を用いたことでシートを押さえる力を大きくできたため、バルブ閉時のシートリーク発生の低減が期待できる。

流量特性試験、磁場特性試験、温度特性試験、経年変化試験の結果から、JT-60における使用環境における動作、既設制御計算機による制御性等、今後の実験運転に使用できることを確認した。

市販品の圧電素子と駆動電源が利用できるため、部品調達可能が容易になると共に、コスト面においても大変有利となった。

今後の課題として、シール材の馴染み等による低い電圧での流量変化と、より長期間での経年変化について、引き続き調査を実施するとともに、ガス注入量制御の精度向上を図っていく予定である。

全てのガス注入弁を旧型から積層圧電アクチュエータバルブへ交換し、2000年2月よりJT-60の実験運転に使用している。使用開始から1年以上経過しているが、素子の破損またはシートリーク等で使用出来なくなったバルブは皆無であり、順調に稼働している。

謝辞

本報告書をまとめるにあたり、終始ご支援いただいた清水正彌核融合装置試験部部長、栗山正明同次長に深く感謝します。また、磁場発生装置の使用において協力して頂いた炉心プラズマ第1実験室千葉真一氏に感謝します。最後に本積層圧電アクチュエータバルブの試作・製造に協力頂いた住友重機械工業(株)の関係各位並びにフィッシャー・ローズマウント ジャパン(株)の関係各位に感謝します。

参考文献

- [1] 川崎 幸三 他, JT-60用圧電素子弁の開発 JAERI-M 85-215 (1986)
- [2] 平塚 一 他, 微小容量圧電素子弁の開発 JAERI-M 87-030 (1987)
- [3] 平塚 一 他, 積層型圧電素子弁の開発 JAERI-M 88-009 (1988)
- [4] 平塚 一 他, 積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁の開発 JAERI-M 94-037 (1995)

Table 2-1 各圧電素子の主な仕様

圧電素子の種類	バイモルフ型	積層型	積層圧電アクチュエータ
外観	円板状	樹脂外装	金属ケース完全密封
形状 (mm)	$\phi 75 \times 1.1t$, $\phi 35 \times 1.1t$	$2 \times 3 \times 9$	6×6
最大変位量 (μm)	140 ± 10 , 30 ± 3	9.0 ± 1.0	34
発生力 (N)	8, 6	200	800
静電容量 (μF)	0.255 ± 0.05 , 0.053 ± 0.01	$0.18 \pm 20\%$	$3.6 \pm 20\%$
積層枚数	2	62	520
比誘電率 ϵ_s	1800	5440	1950
圧電定数 d_{31} (m/V)	180×10^{12} , 152×10^{12}	635×10^{12}	370×10^{12}
キューリー点 T_c (°C)	350, 320	145	315
最大印加電圧 (DC V)	200	150	150

Table 2-2 バイモルフ型圧電素子弁の仕様と積層圧電アクチュエータバルブの要求仕様

バルブの種類	バイモルフ型圧電素子弁	積層圧電アクチュエータバルブ
圧電素子の種類	バイモルフ型	積層圧電アクチュエータ
ガス種	D ₂ , H ₂ , He, Ne等	D ₂ , H ₂ , He, Ne等
流量範囲 (H ₂ , 0.2MPa)	H弁 : 5.33~53.3Pam ³ /s L弁 : 0.53~5.33Pam ³ /s	H弁 : 4.5~45Pam ³ /s L弁 : 0.5~5.8Pam ³ /s
供給ガス圧力	0.2 MPa (0.1~0.4 MPa)	0.2 MPa (0.1~0.4 MPa)
シートリーケ量 (He)	1.33Pam ⁻⁸ /s	1.33Pam ⁻⁸ /s
筐体内リーケ量 (He)	1.33Pam ⁻⁹ /s	1.33Pam ⁻⁹ /s
動作速度	<10ms	<10ms
動作電圧	DC 0~175V	DC 0~150V

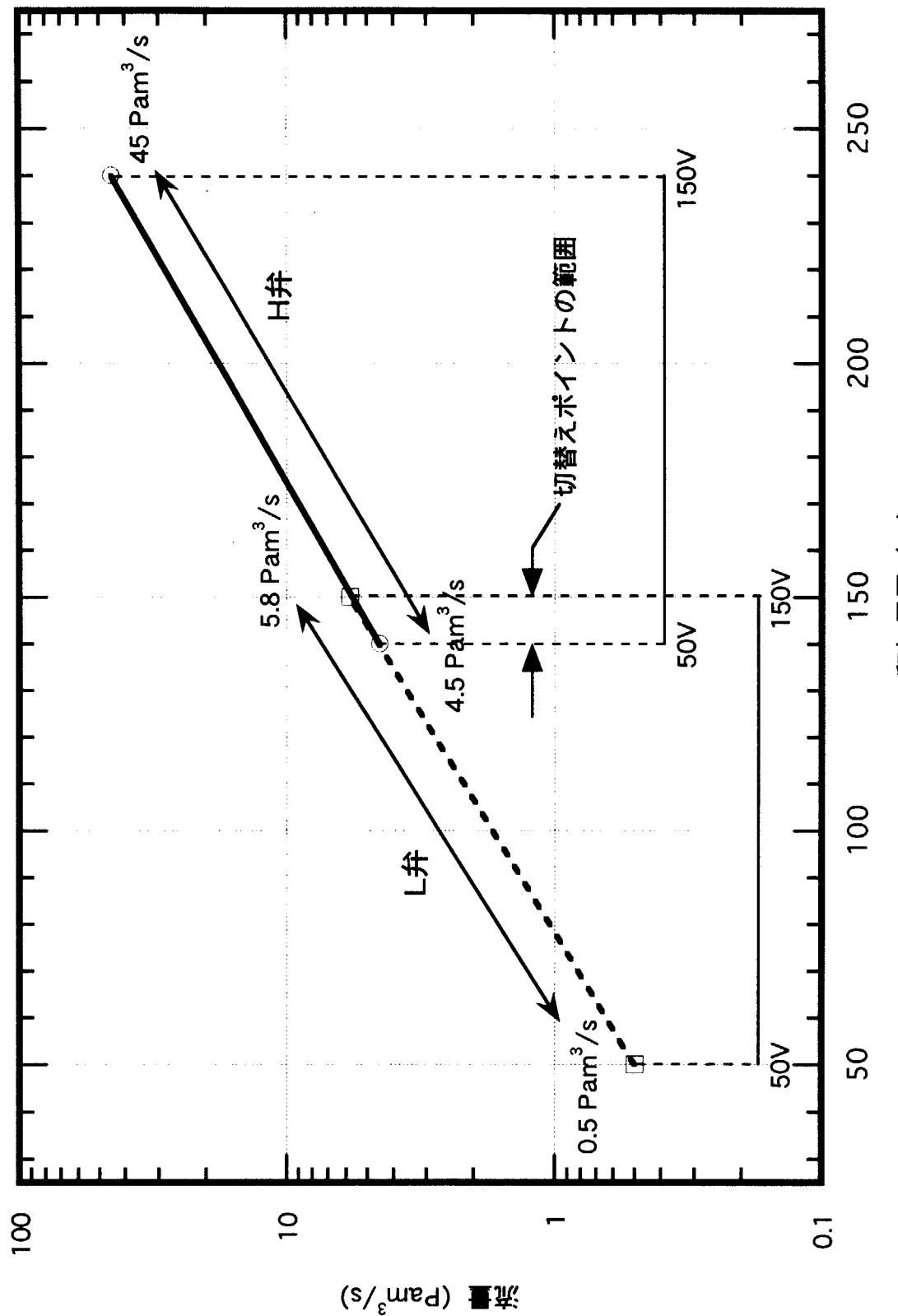


Fig. 2-2 流量制御範囲

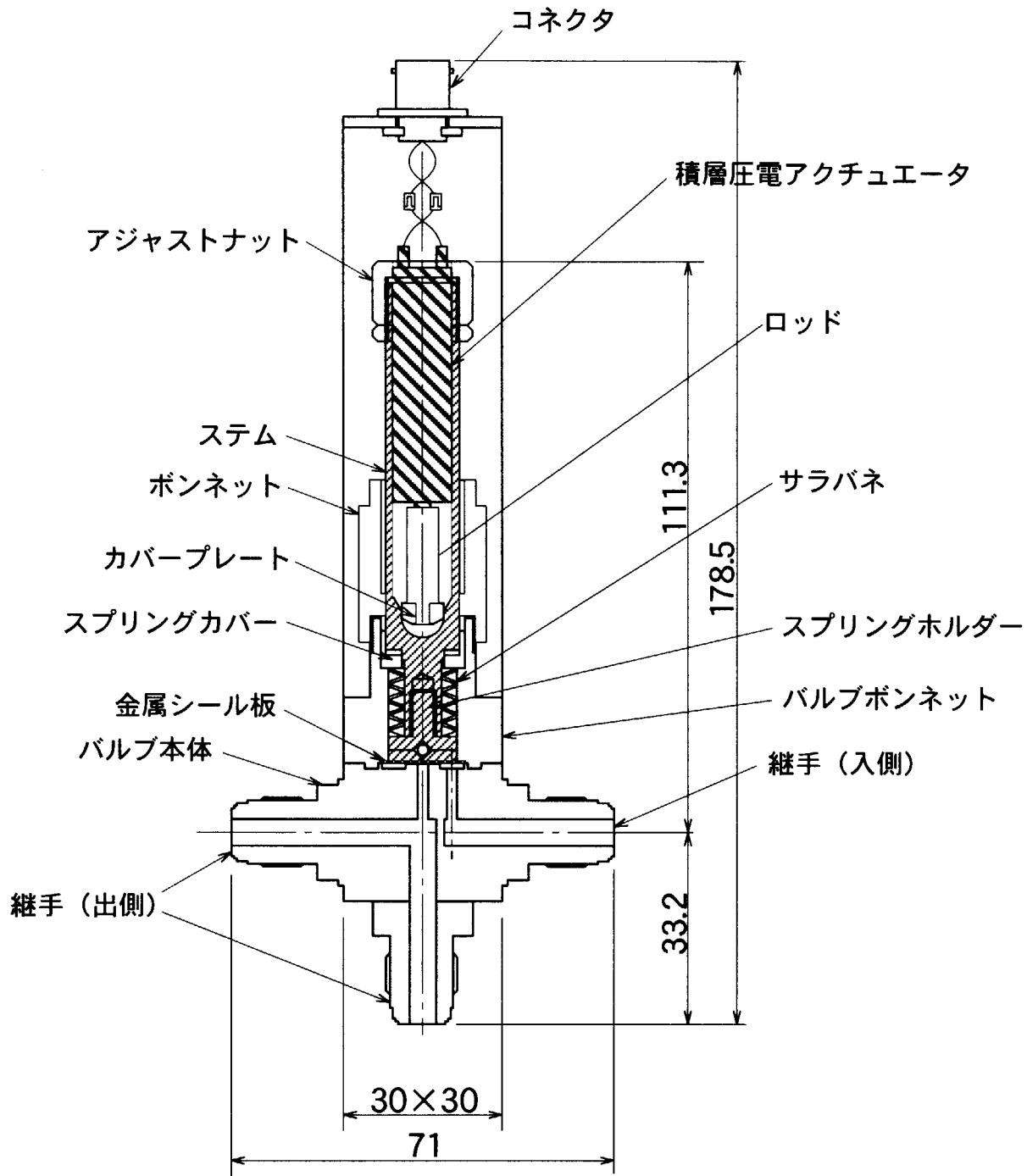


Fig. 2-3-1 積層圧電アクチュエータバルブ (H弁) 構造図

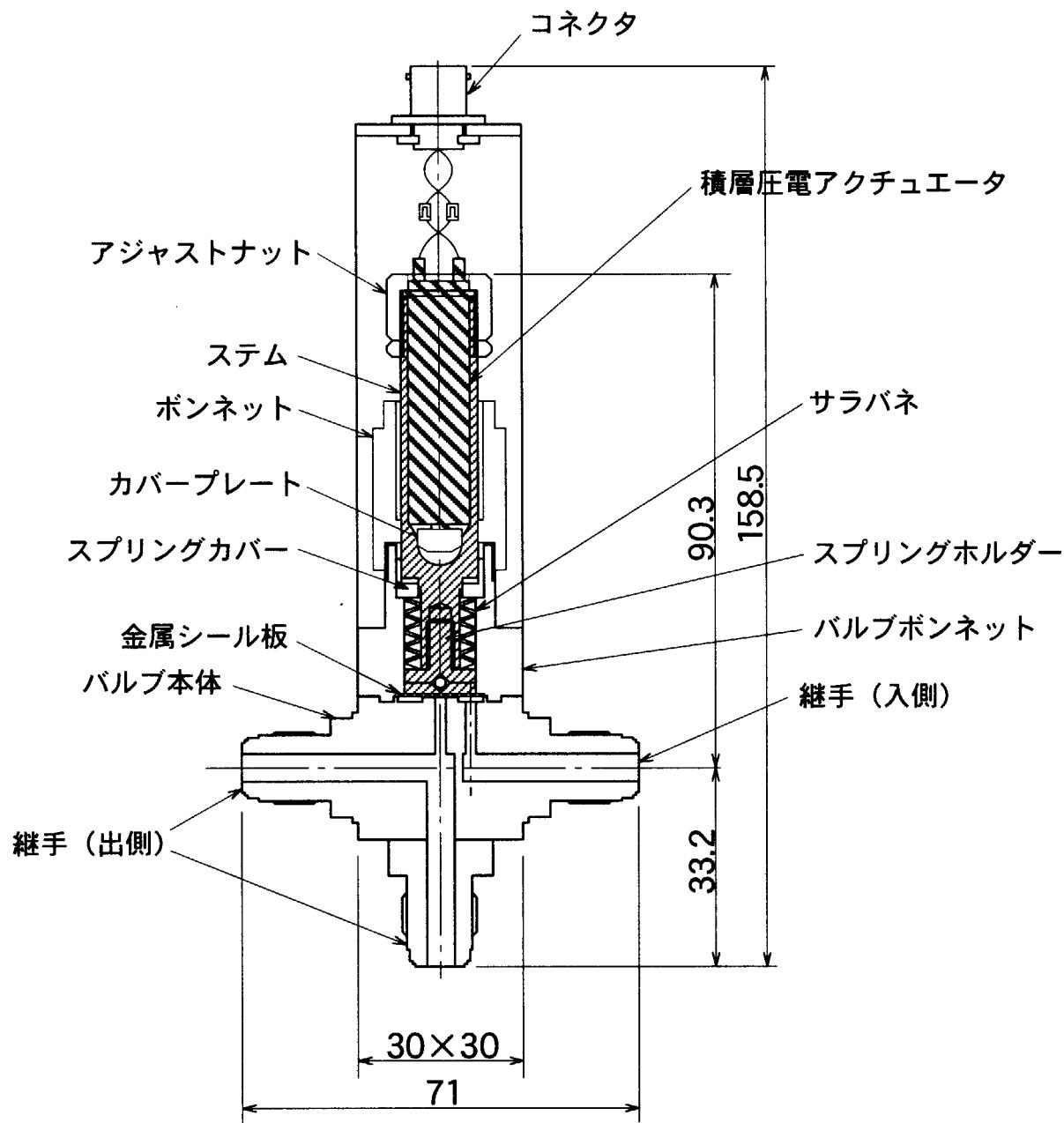


Fig. 2-3-2 積層圧電アクチュエータバルブ（L弁）構造図

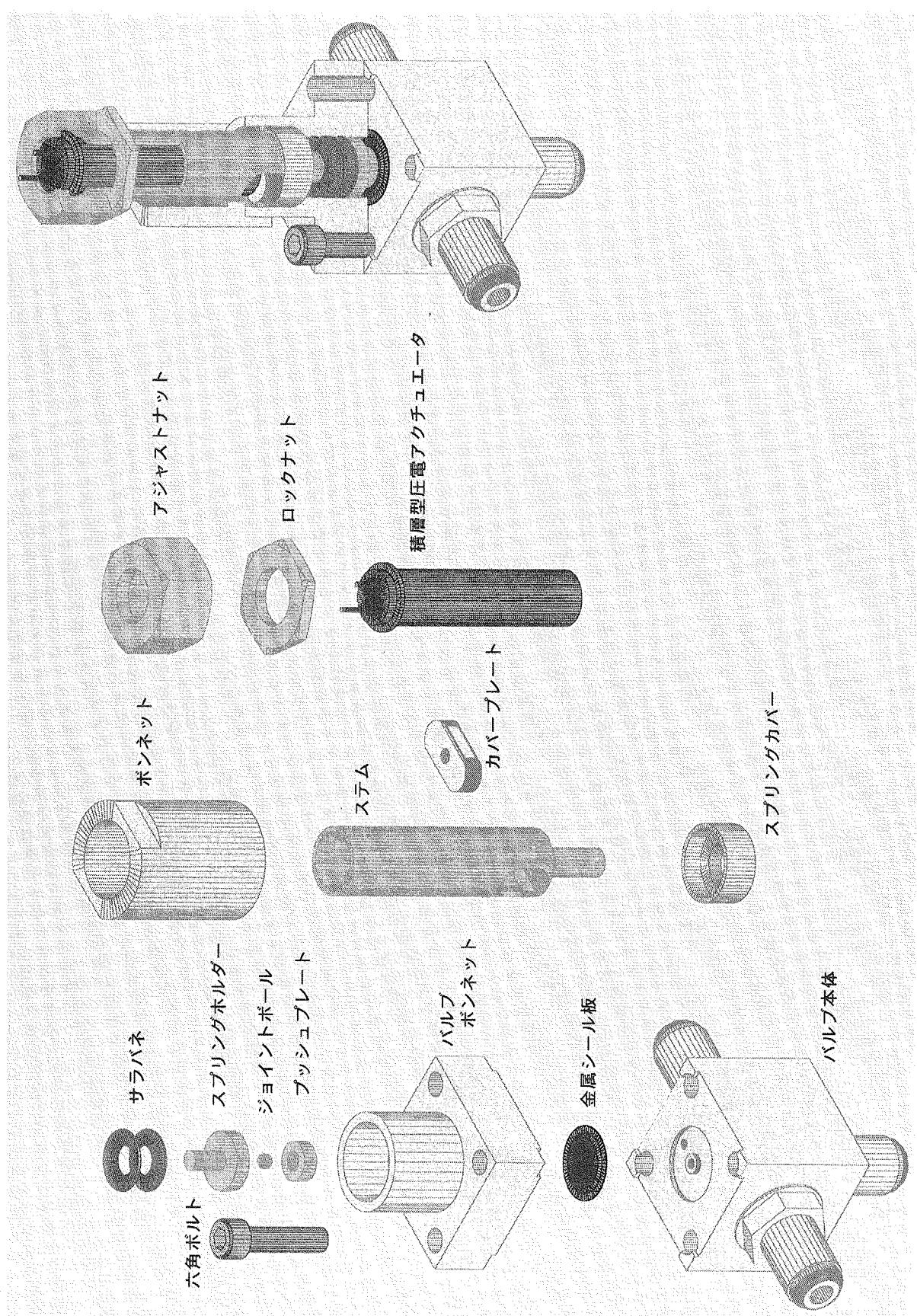


Fig. 2-3-3 積層型電アクチュエータバルブ部品組立図

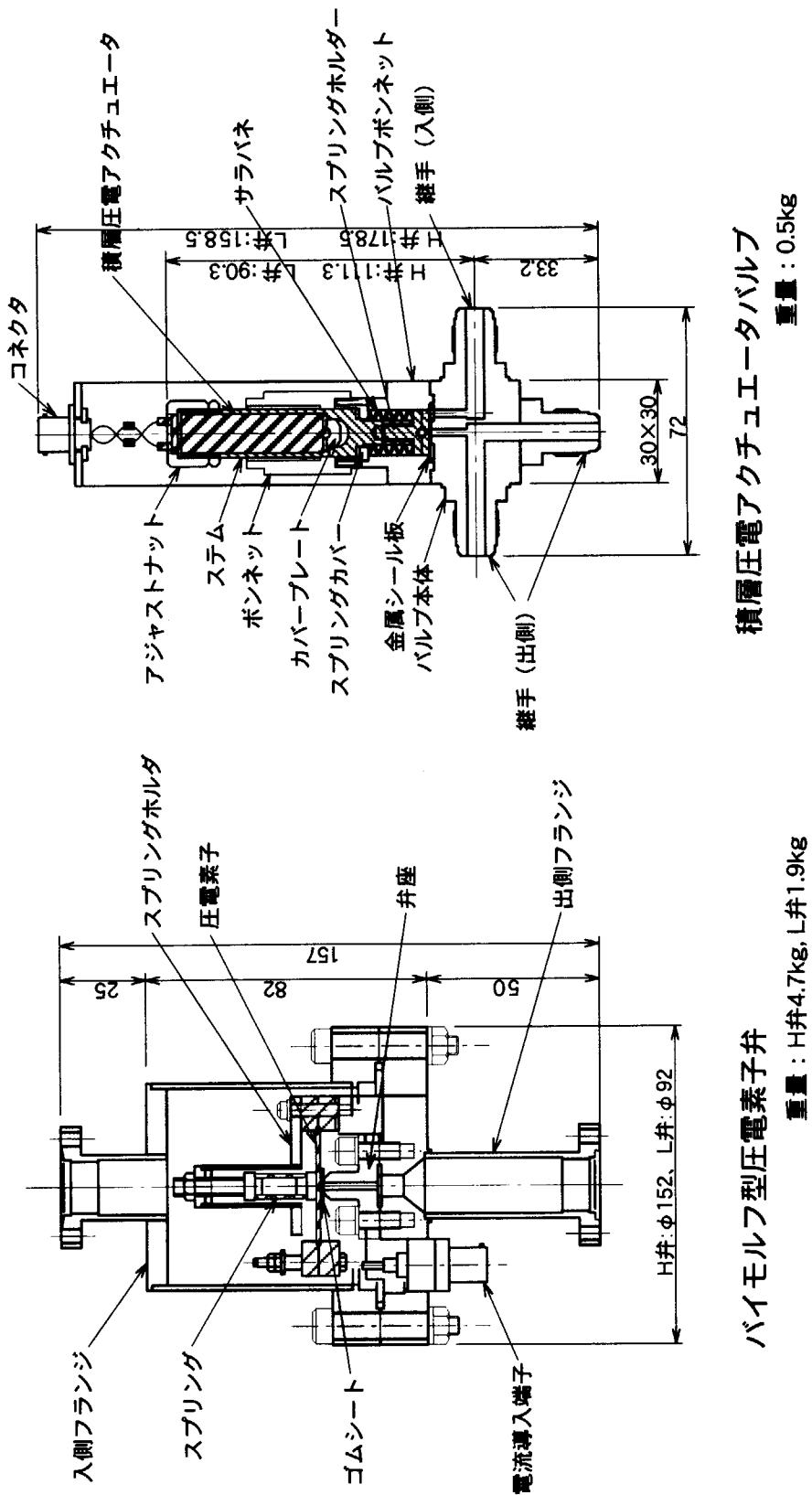


Fig. 2-3-4 新日本バルブ構造図

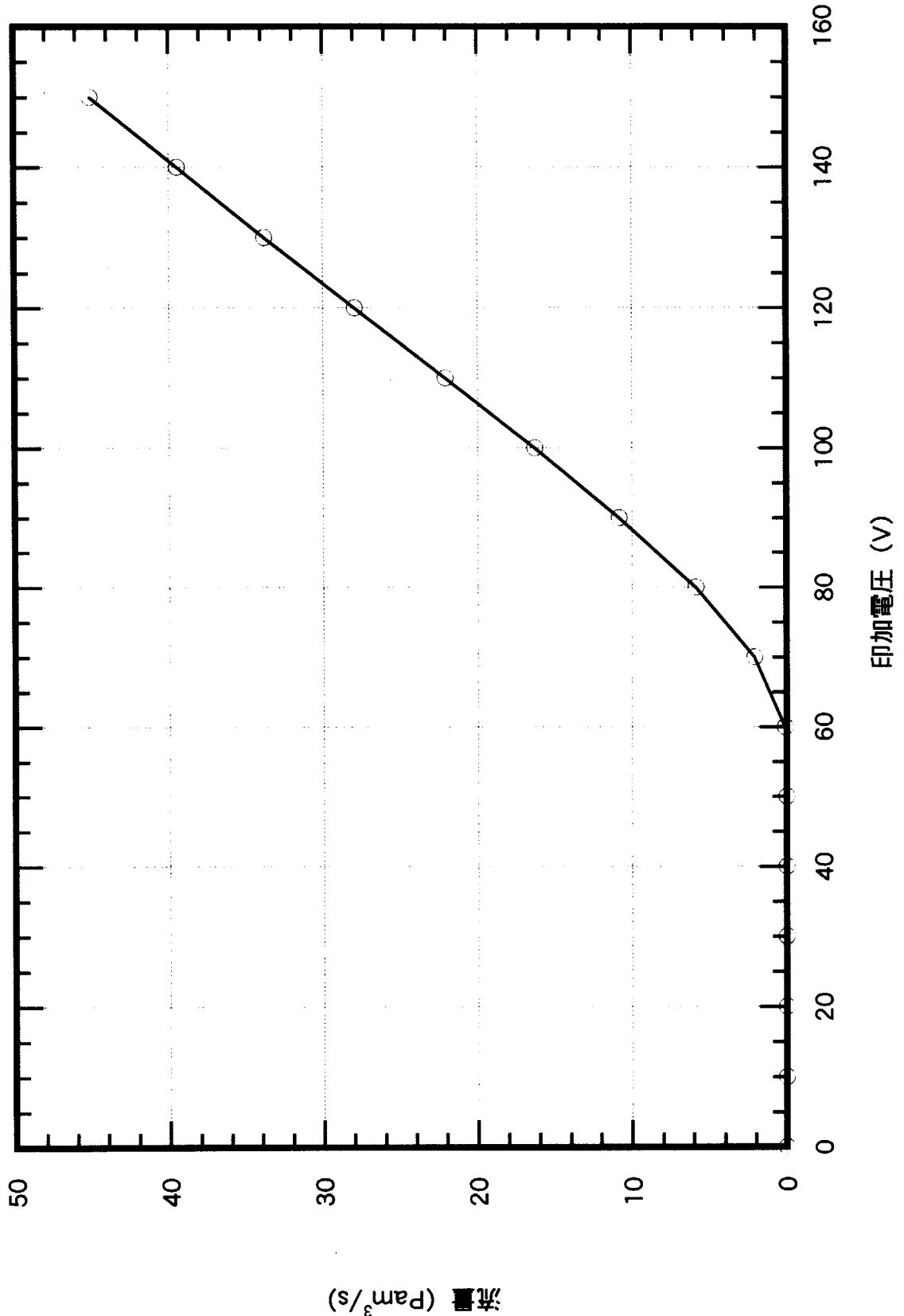


Fig. 2-4-1 H型試作弁の流量特性

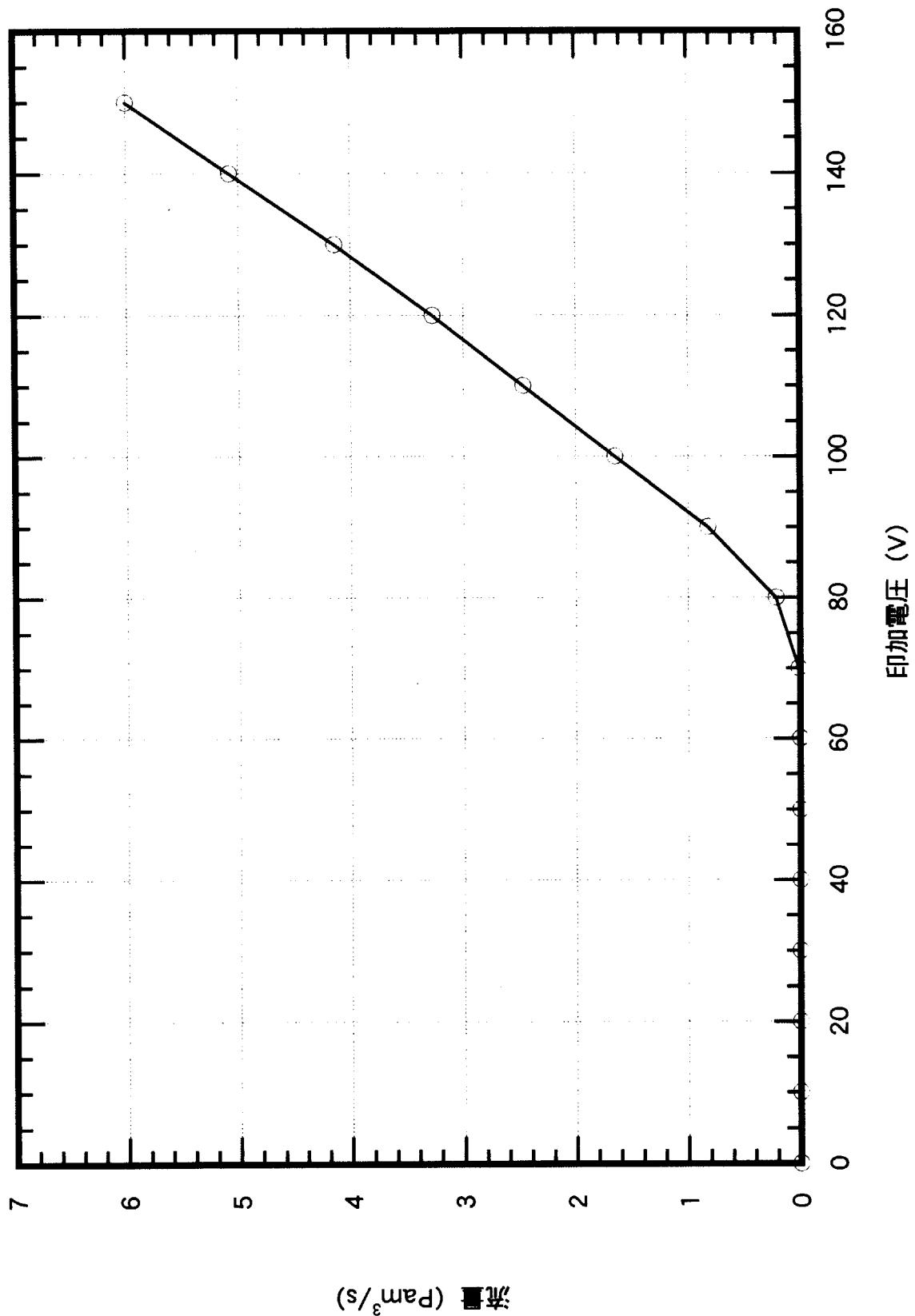


Fig. 2-4-2 L型試作弁の流量特性

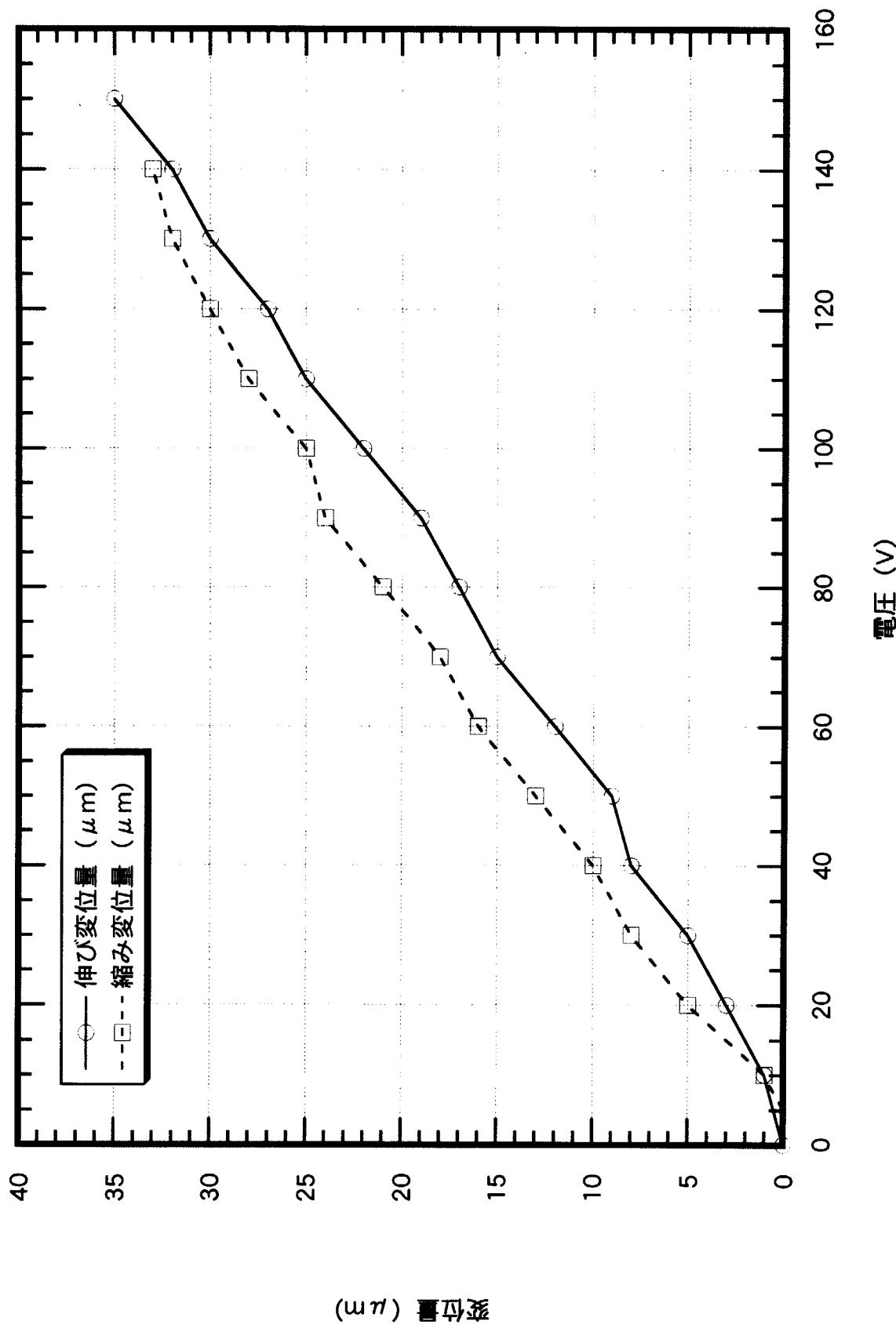


Fig. 2-4-3 積層圧電アクチュエータの電圧に対する変位量

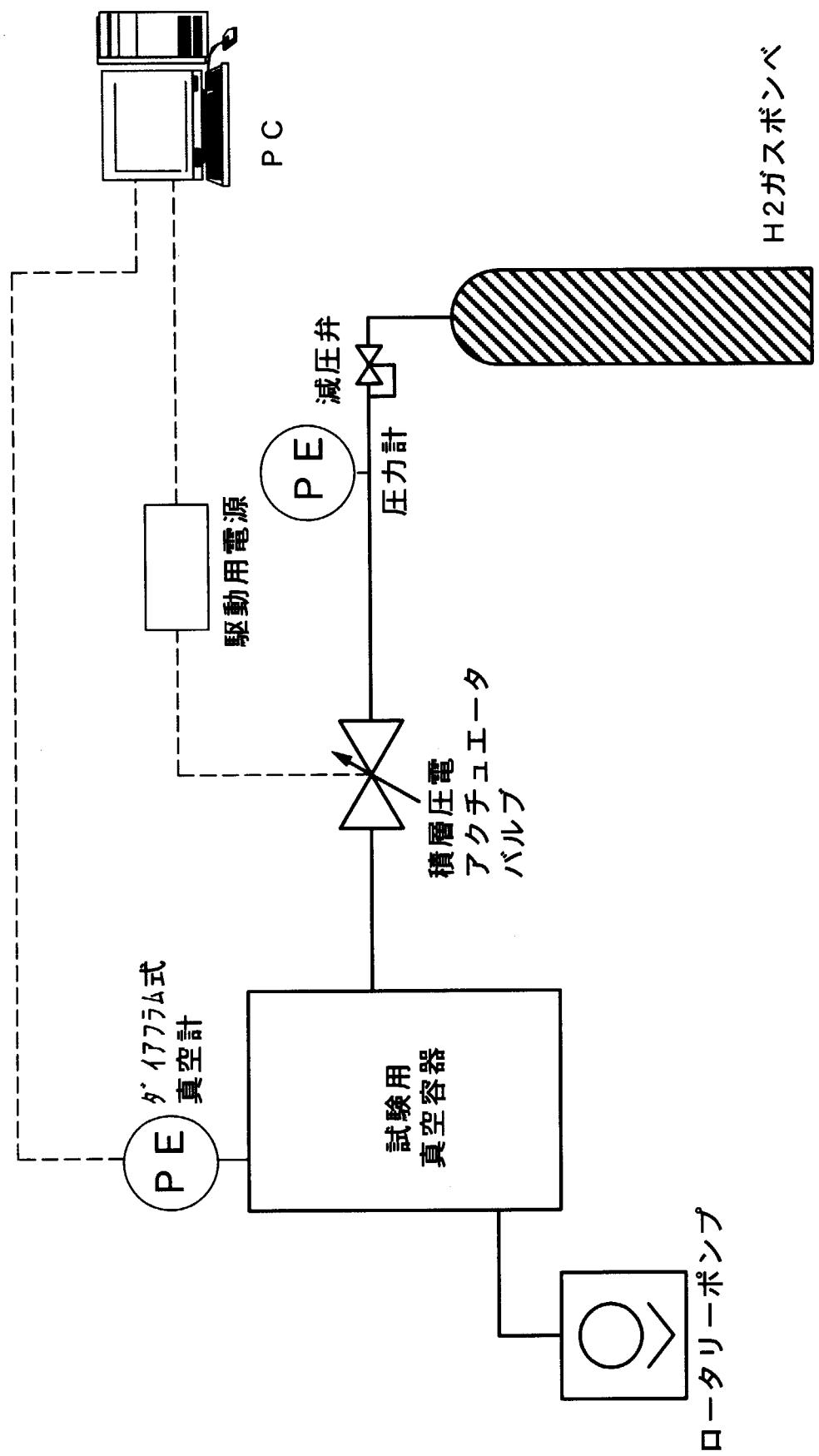


Fig. 3-1-1 特性試験装置構成図

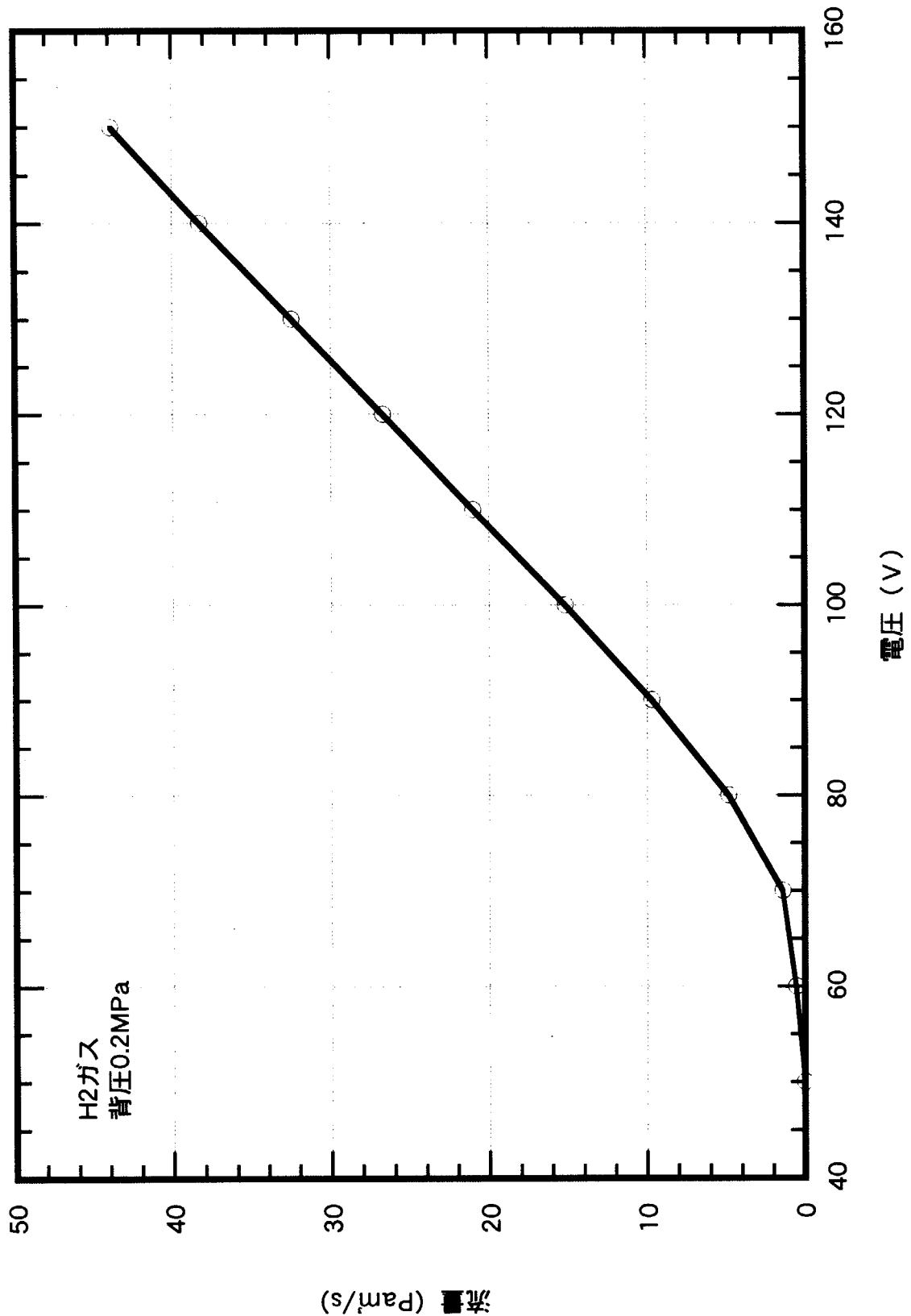


Fig. 3-1-2 積層圧電アクチュエータバルブH弁の特性

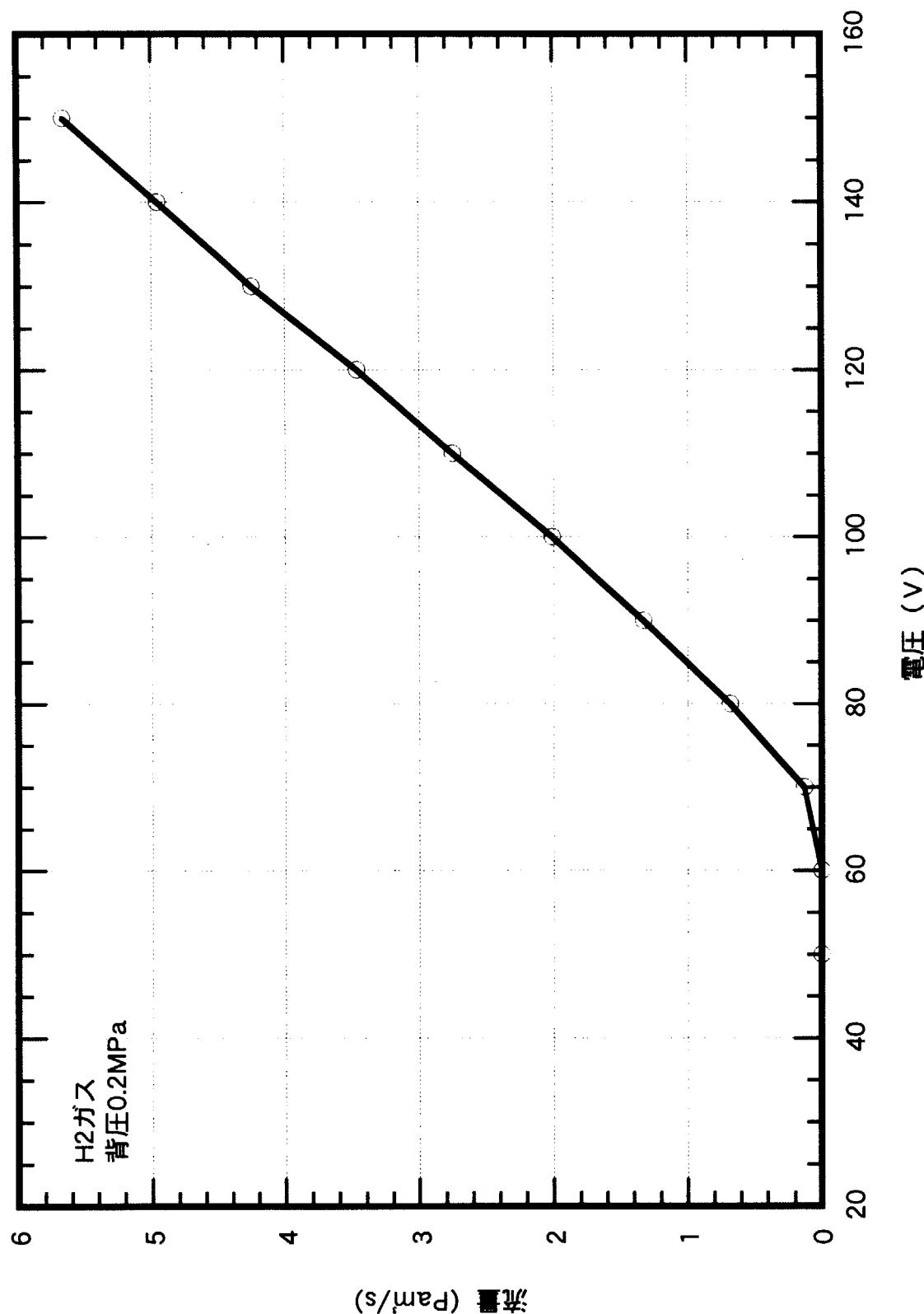


Fig. 3-1-3 積層圧電アクチュエータバルブ L 犁の特性

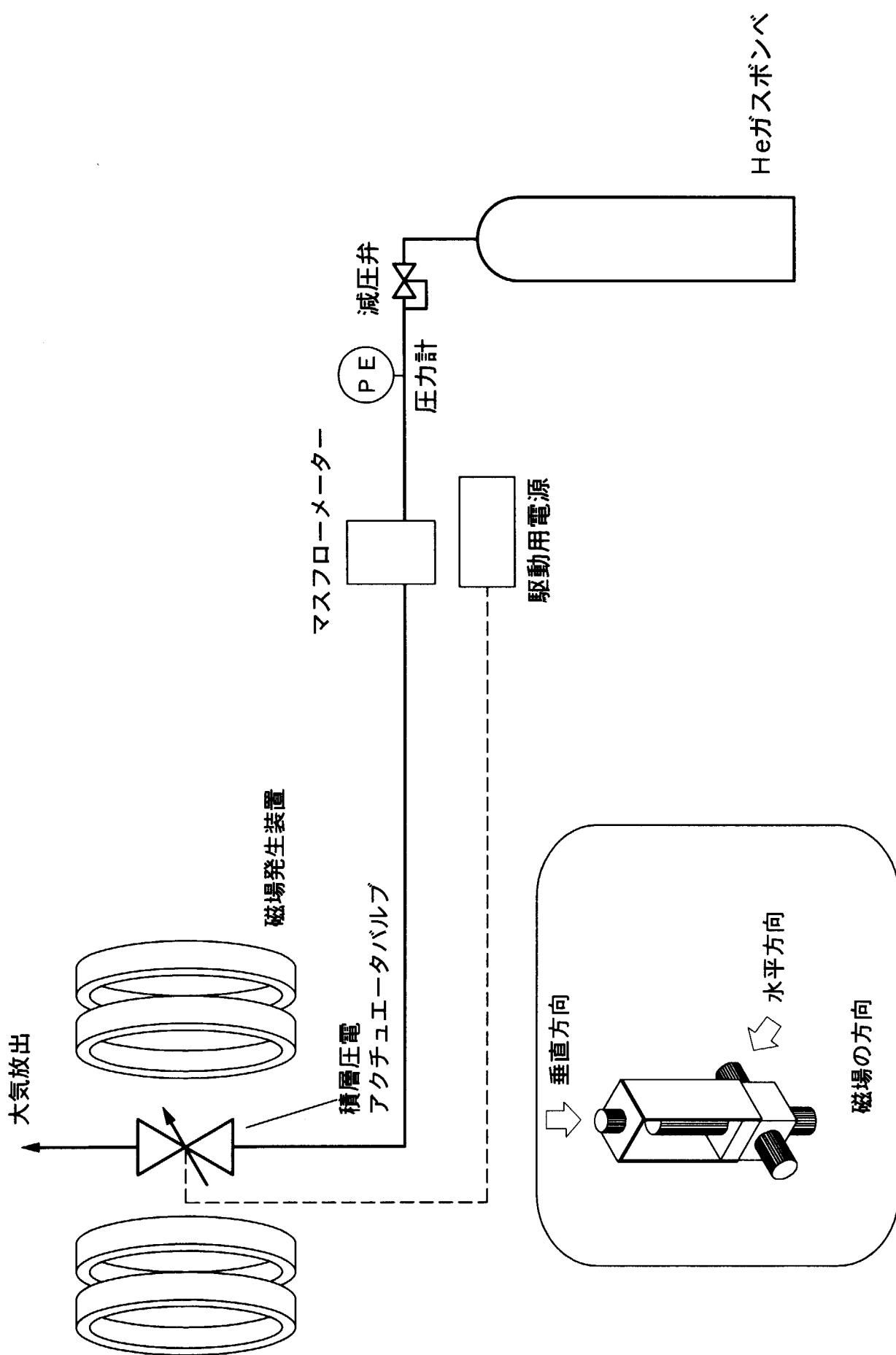


Fig. 3-2-1 磁場特性試験装置構成図

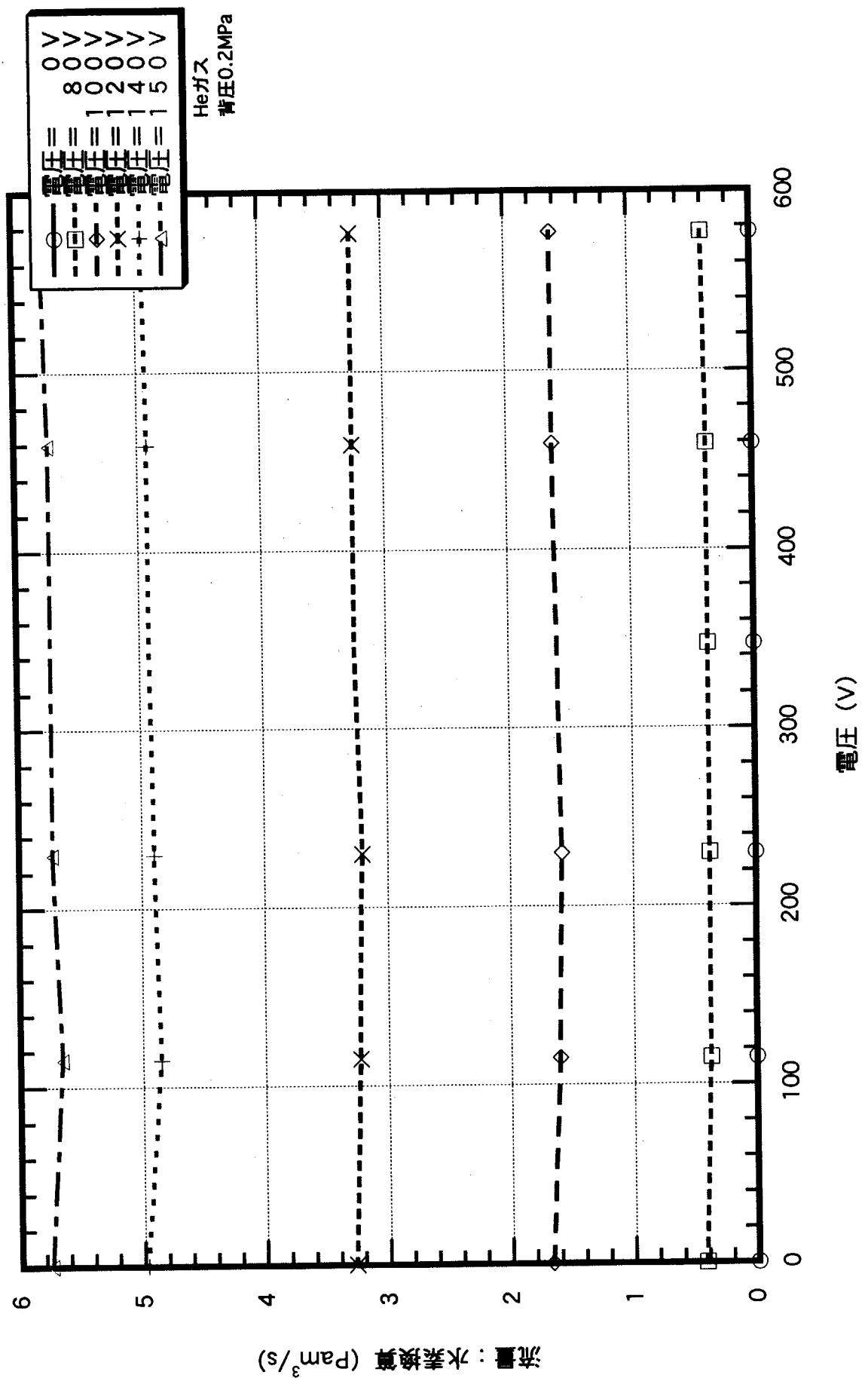


Fig. 3-2-2 水平方向の磁場に対する流量の変化

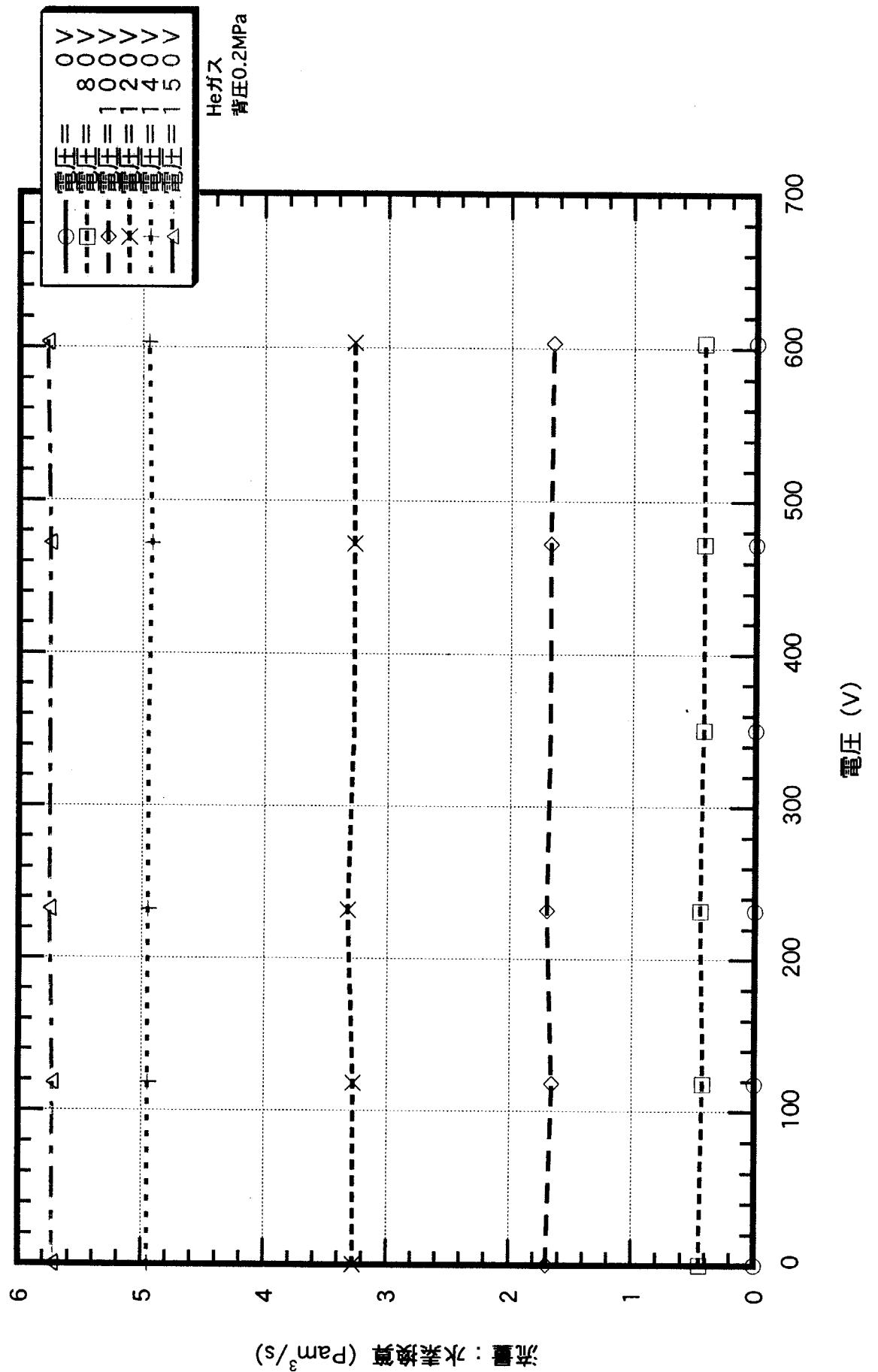


Fig. 3-2-3 垂直方向の磁場に対する流量の変化

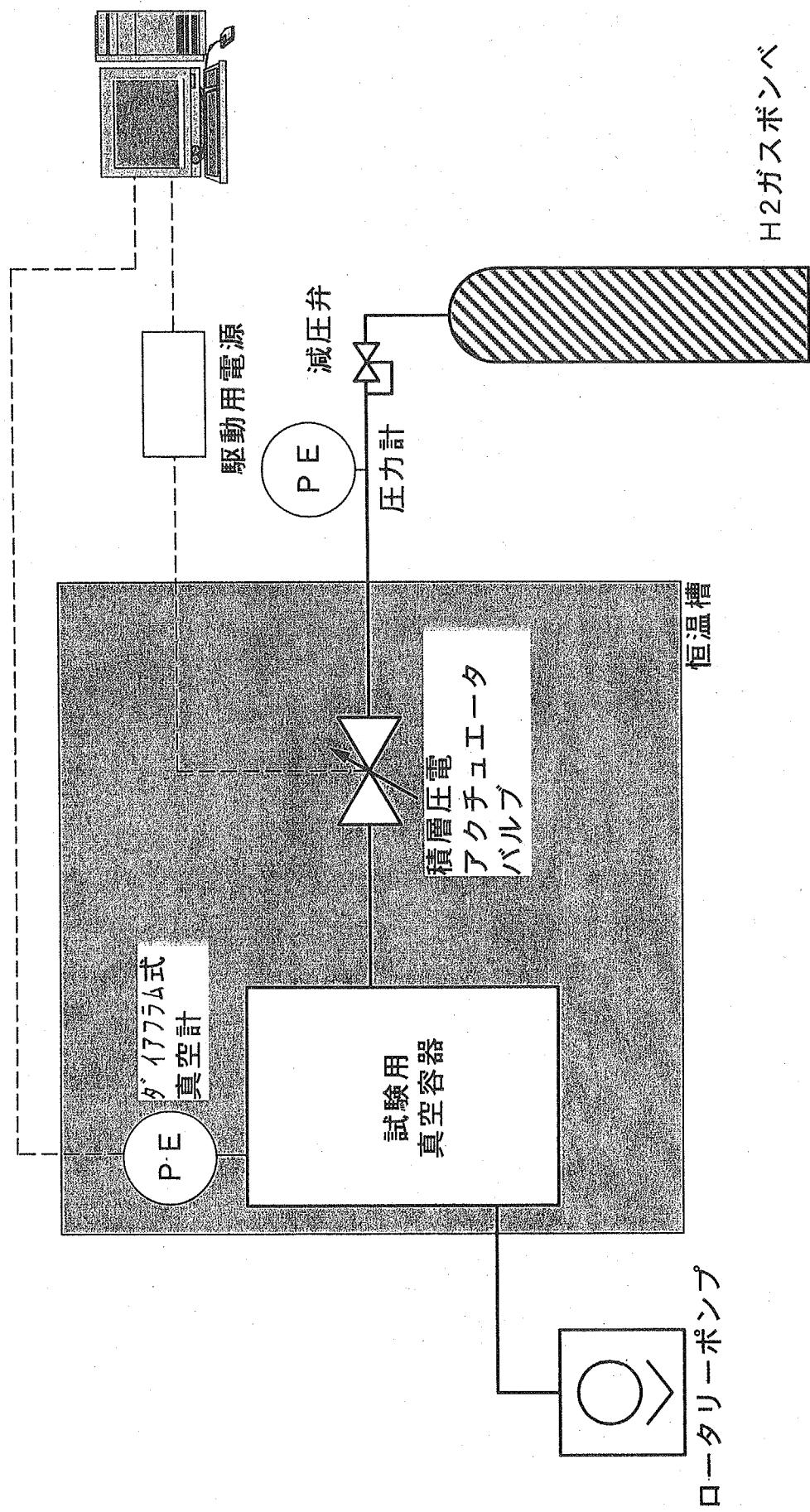


Fig. 3-3-1 溫度特性試験用装置構成図

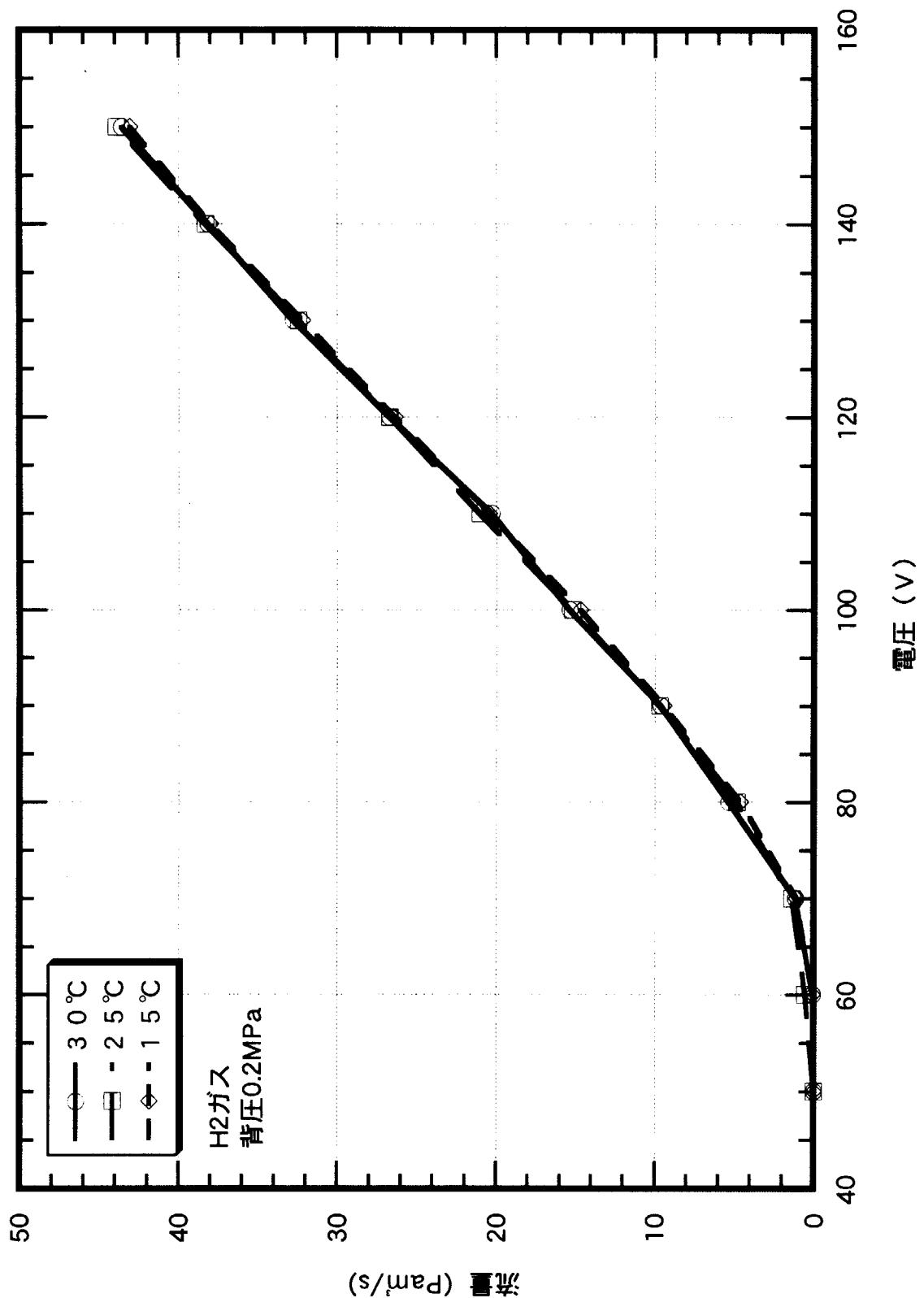


Fig. 3-3-2 H弁温度特性試験結果

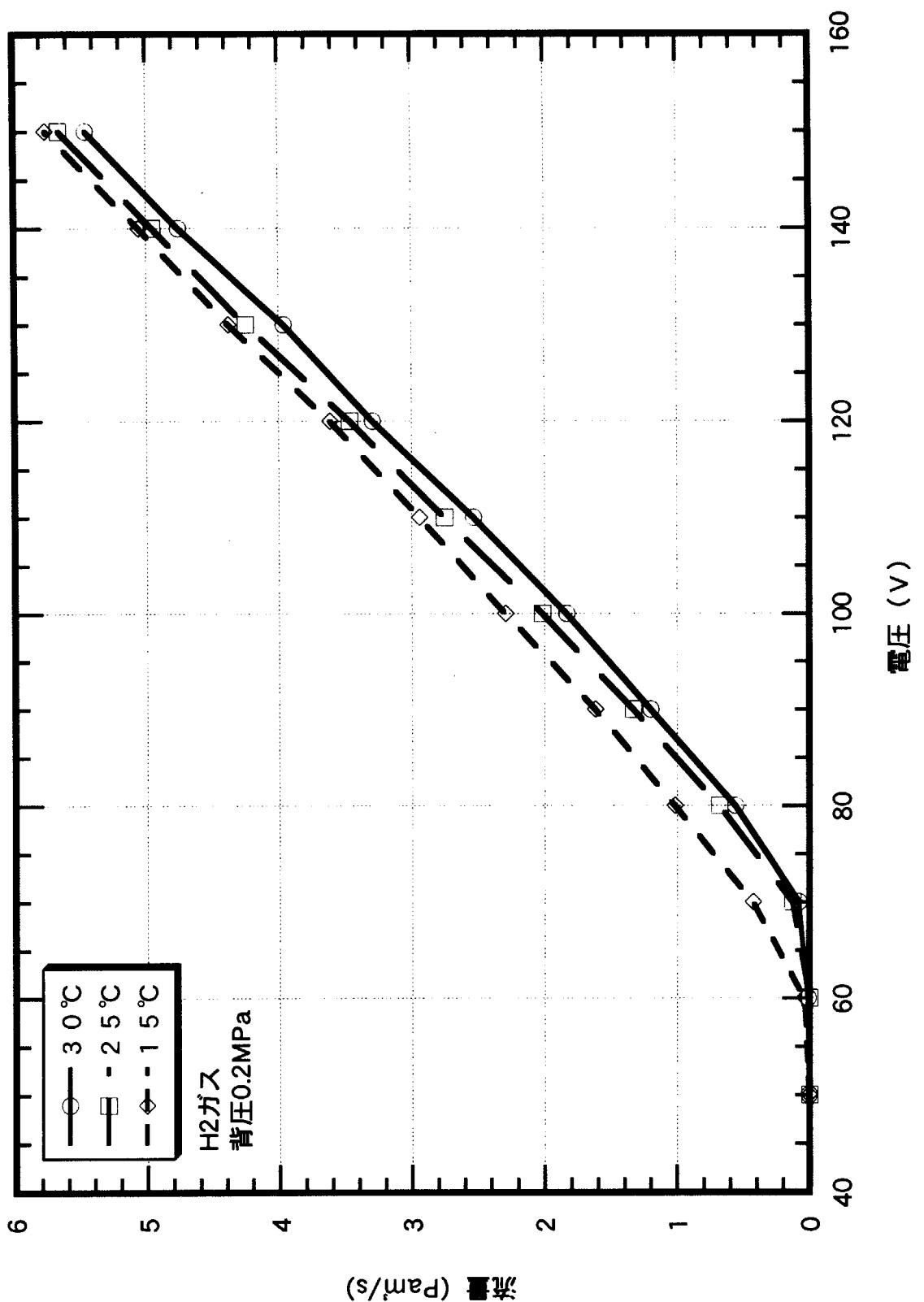
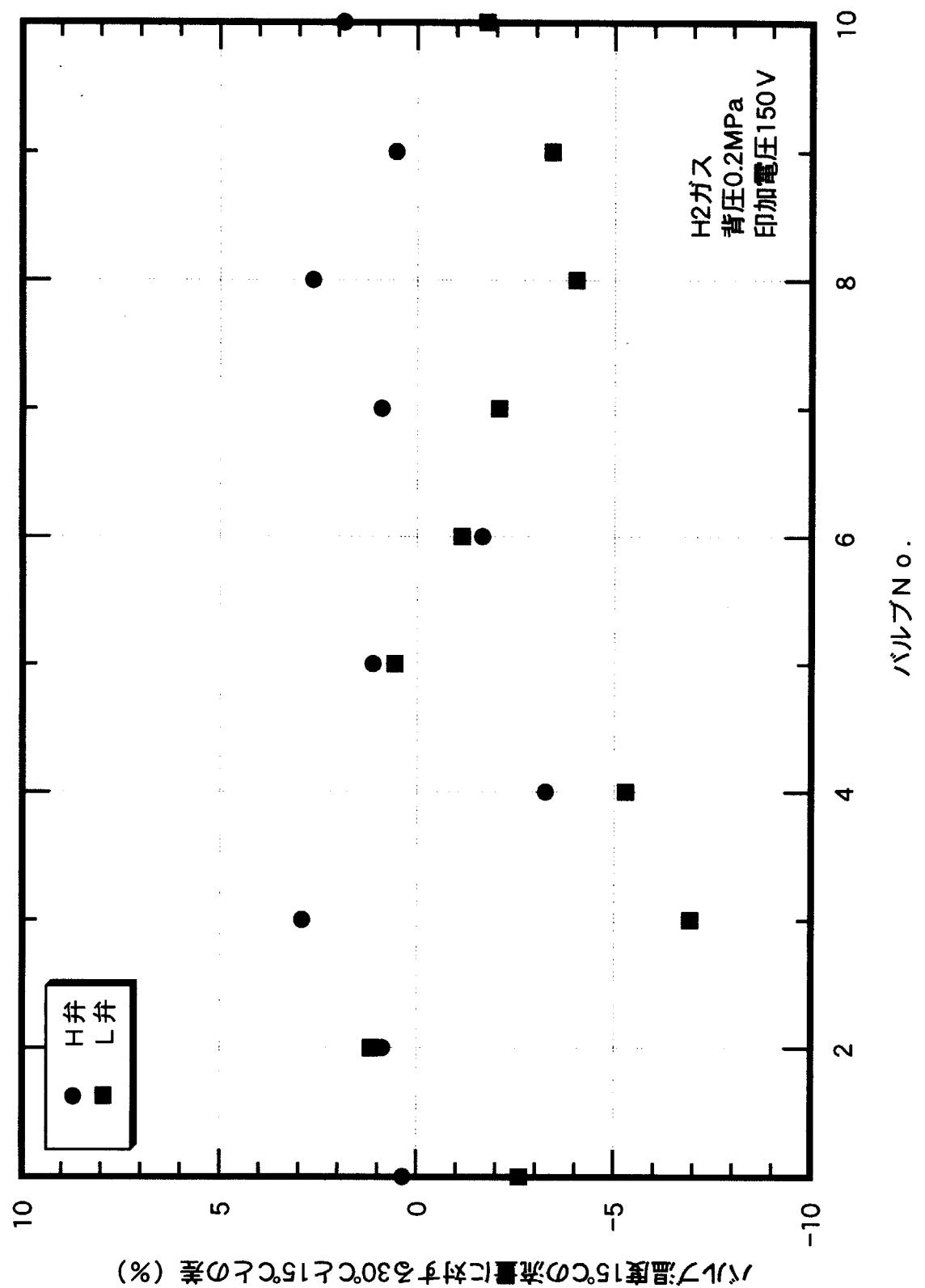


Fig. 3-3-3 L弁温度特性試験結果



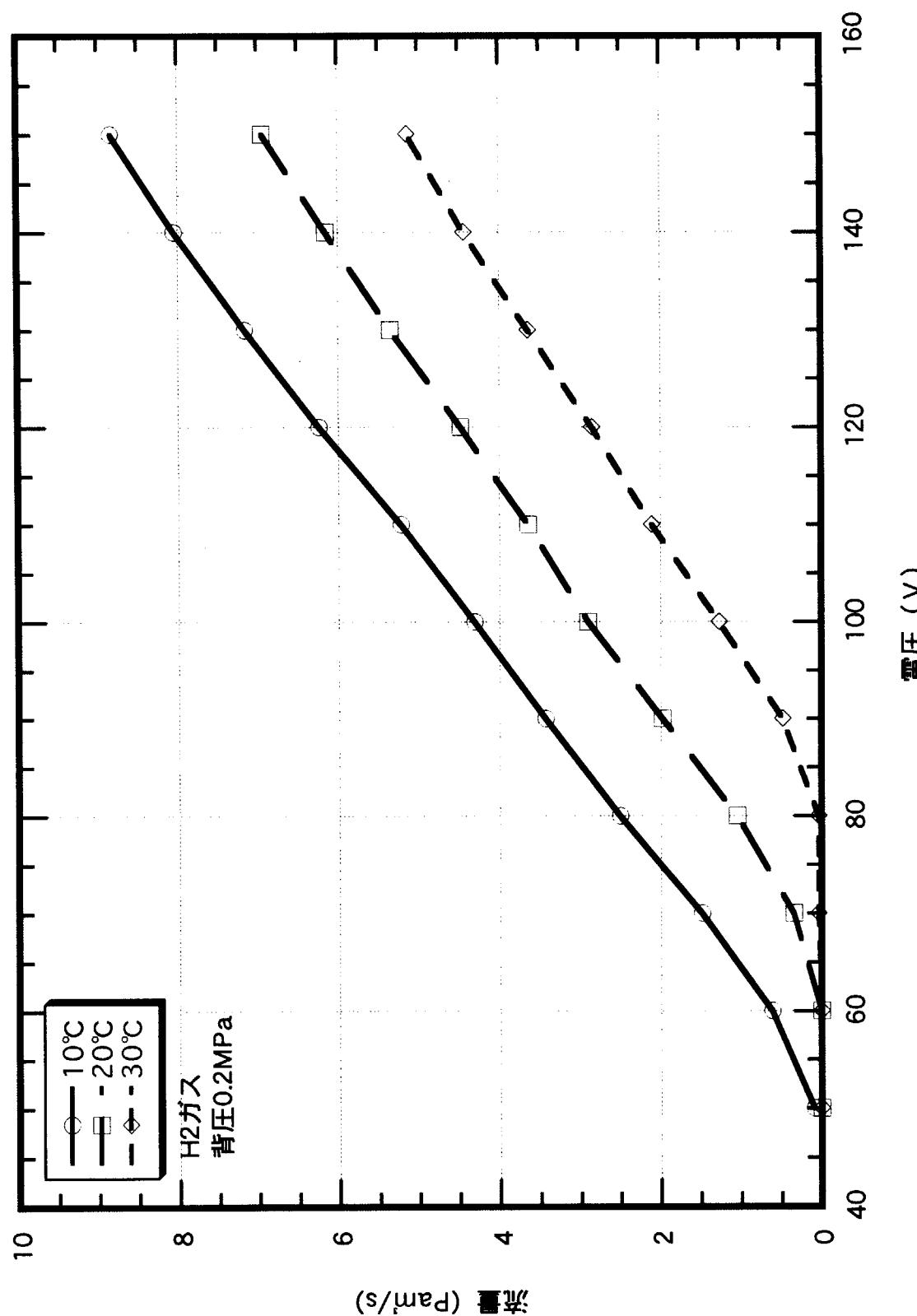


Fig. 3-3-5 热对策未実施并

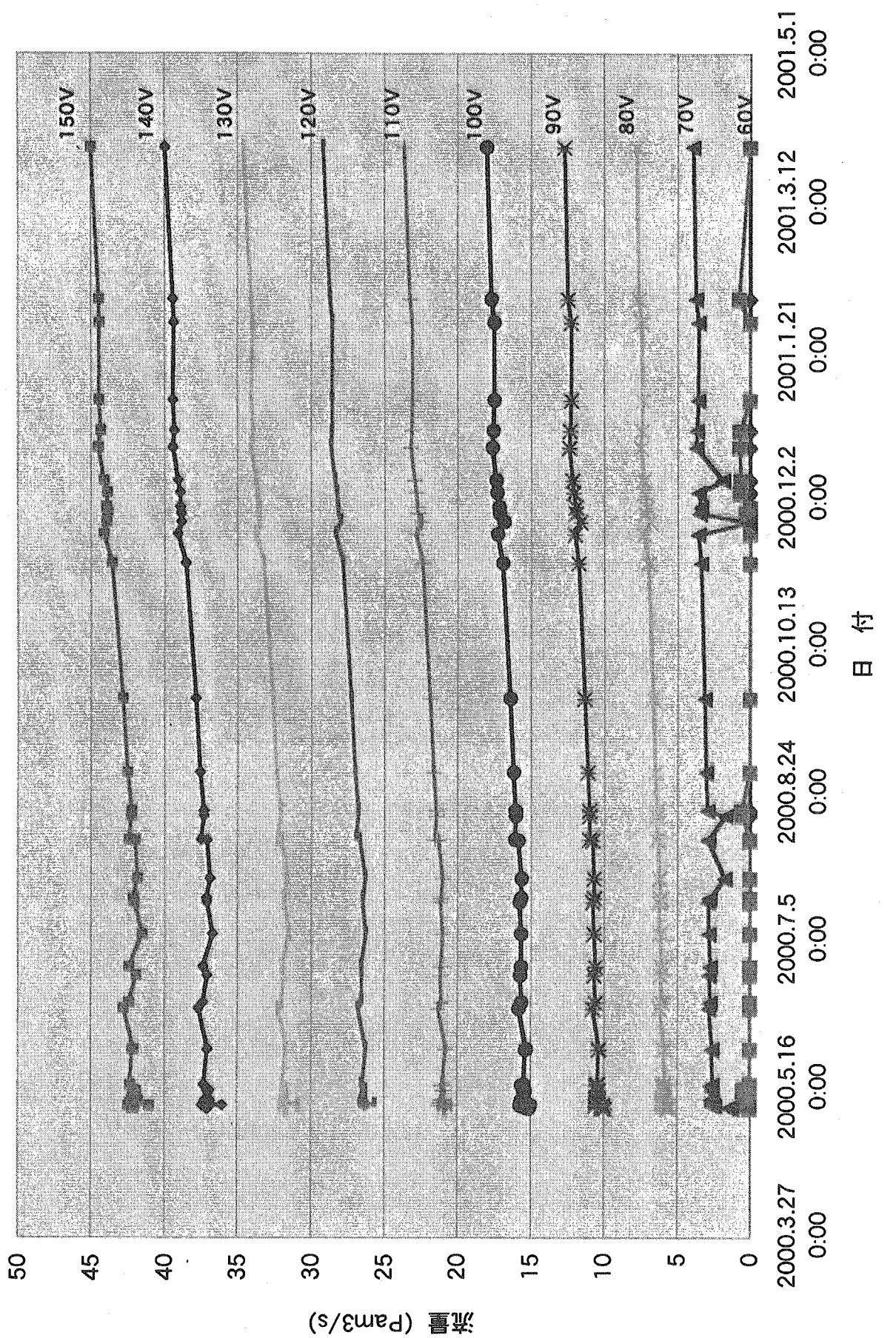


Fig. 3-4-1 H弁経年変化

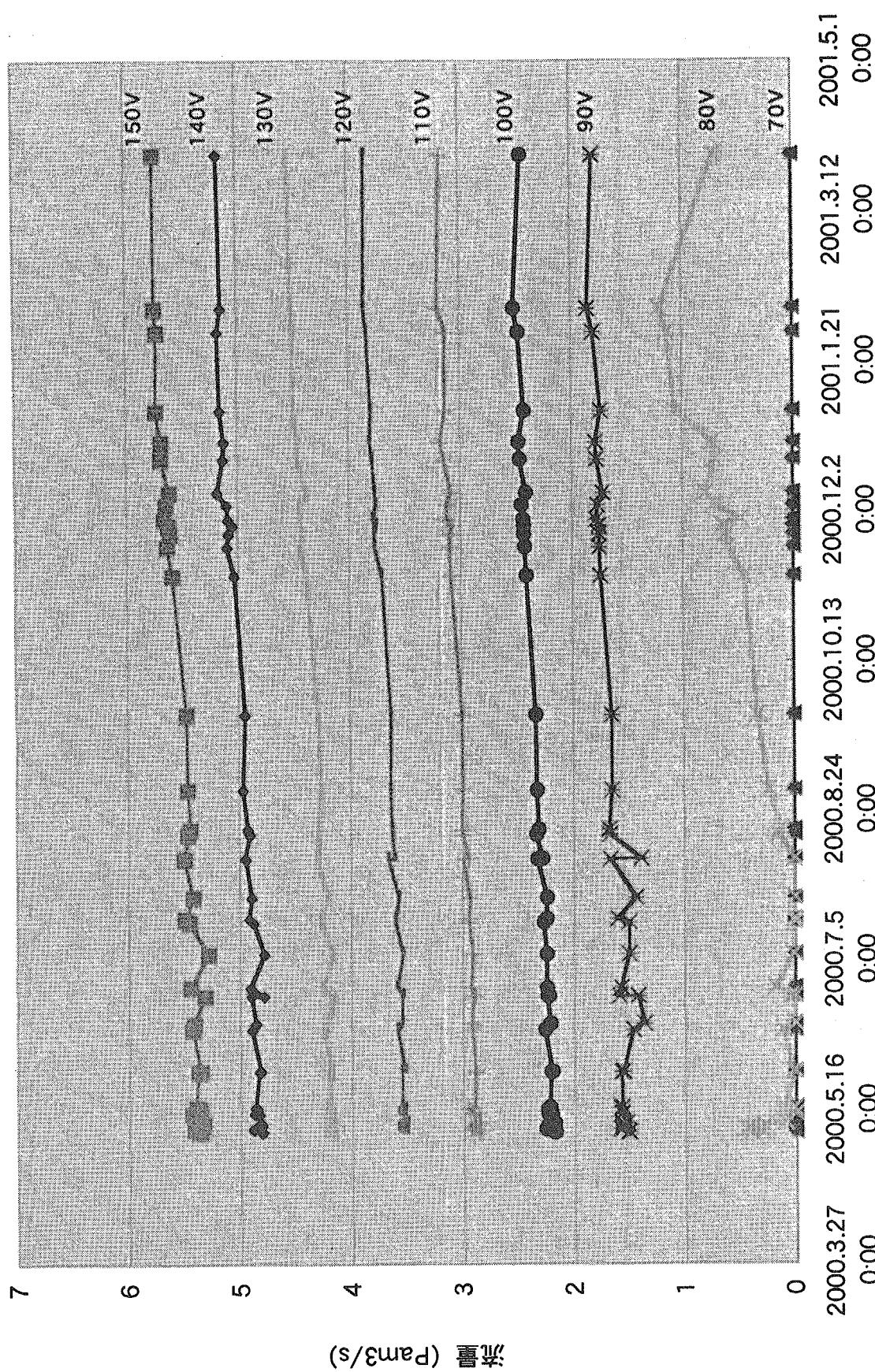


Fig. 3-4-2 L弁経年変化

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
光强度	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
磁束密度	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	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。

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
ガル	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

換算表

力	N(=10 ⁶ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.4822	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 = 10⁴St(ストークス)(cm²/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 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(仮馬力)
	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)

積層圧電アクチュエータバルブの開発

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています。