JAERI-Tech
94-037

積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁の開発

1995年1月

平塚　一・三代康彦・小池常之・清水正亜・小室健一*

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。
入手の問合わせは，日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて，お申し越しください。なお，このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

編集兼発行　日本原子力研究所
印　　刷　㈱高野高速印刷

JAERI-Tech 94-037

積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁の開発

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部
平塚　一・三代　康彦・小池　常之・清水　正亜・小室　健一*

（1994年11月30日受理）

積層圧電アクチュエータを用い，てこタイプの積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁の開発を行った。積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁の特徴は以下のとおりである。

(1) 弁寸法は，ＪＴ－60Ｕに適合するように既設の圧電素子弁とほぼ同形とした。
(2) 駆動用圧電素子に積層圧電アクチュエータを用いている。
(3) 流量は，～30.7 Pam^3/s（水素，0.2 MPa，150Ｖ印加時）である。
(4) ヘリウムガスのシートリーク量は，1.33×10^{-8} Pam^3/s以下である。
(5) 動作電圧は，ＤＣ０～150Ｖである。

以上のことから，本開発品はＪＴ－60Ｕの環境下で使用が可能である。

那珂研究所：〒311-01　茨城県那珂郡那珂町大字向山801-1
*　出向職員　日本アドバンストテクノロジー株式会社

Development of Piezoelectric Actuator Gas Injection Valve for JT−60U

Hajime HIRATSUKA, Yasuhiko MIYO, Tsuneyuki KOIKE, Masatsugu SHIMIZU
and Ken-ichi KOMURO*

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

(Received November 30, 1994)

Piezoelectric actuator gas injection valve by lever for JT−60U have been developed using piezoelectric actuator(laminated piezoelectric elements).
Specifications of the valve are summarized as follows :

(1) The piezoelectric actuator gas injection valve by lever(LE-PEV) is the same configuration as the low flow rate piezoelectric valve (PEV-L),
(2) The laminated piezoelectric element is used as actuator,
(3) The massflow rate is up to 30.7 Pam^3/s for hydrogen, 0.2 MPa back pressure, 150 V,
(4) The sheet leak rate using helium as a probing gas is smaller than 1.33×10^{-8} Pam^3/s,
(5) The operating voltage is 0 ~150 V.

Judging from these results prformancs of LE-PEV for the actual operation condition of JT−60U is good.

Keywords : Piezoelectric Actuator, Nozzle, Gas Injection Rate, Helium Leak Rate, Laminated Piezoelectric Element, Gas Injection system, JT−60U

---

* on loan to NAT(NIHON ADVANCED TECHNOLOGY CO., LTD.)

目　　次

1．はじめに …… 1
2．設　　計 …… 2
2.1　開発の経緯 …… 2
2.2　設計仕様 …… 3
2.3　基本流量 …… 4
2.4　弁座設計 …… 5
2.5　圧電素子の選定 …… 7
2.6　構　　造 …… 8
3．特性試験 …… 21
3.1　試験方法 …… 21
3.2　試験結果 …… 22
4．検　　討 …… 28
4.1　設計流量との比較 …… 28
4.2　近似流量 …… 29
4.3　寿　　命 …… 29
4.4　動作速度 …… 32
4.5　注入ガス …… 32
4.6　弁　　座 …… 33
4.7　問題とその対策 …… 34
5．おわりに …… 42
謝　　辞 …… 42
参考文献 …… 43

Contents

1. Introduction 1
2. Design 2
2.1 Aims of Development 2
2.2 Specification of Design 3
2.3 Gas Injection Rate 4
2.4 Design of Nozzle 5
2.5 Choice of Piezoelectric Element 7
2.6 Configuration 8
3. Results of Performance Test 21
3.1 Test Procedure 21
3.2 Results 22
4. Discussions 28
4.1 Comparison between Designed and Measured Gas Injection Rate 28
4.2 Approximate Formula for Gas Injection Rate 29
4.3 Life Time 29
4.4 Response Time 32
4.5 Injection Gas 32
4.6 Nozzle 33
4.7 Remarks 34
5. Conclusions 42
Acknowledgements 42
Reference 43

1. はじめに

臨界プラズマ試験装置（ＪＴ－６０）では、プラズマ原料ガスの供給を行うガス注入装置のガス注入弁に圧電素子（バイモルフ型圧電素子、積層型圧電素子）の圧電効果を利用した圧電素子弁（PEV : Piezoelectric valve）を使用している。

バイモルフ型圧電素子を用いた圧電素子弁は、１９８１年度(昭和５６年度)から開発を進め、大容量圧電素子弁（PEV-H ; 5.33～53.3 Pam^3/s）と 小容量圧電素子弁（PEV-L ; 0.53～5.33 Pam^3/s）の２種類の圧電素子弁で 0.53～53.3 Pam^3/s（背圧 H_2 ; 0.2 MPa＝約2.0 kg/cm^2）の範囲の流量が得られるように開発してきた。
さらに、実験上の必要性から、0.53 Pam^3/s 以下の微小流量が得られる微小容量圧電素子弁（PEV-LL ; 0.05～0.53 Pam^3/s）を１９８６年度（昭和６２年度）に開発してきた。これらの圧電素子弁は、すでに、実機に取り付けられて正常に作動し、プラズマ実験運転に寄与してきた。

しかし、これらの圧電素子弁は、バイモルフ型圧電素子[注1]単体やゴムシート材の経年劣化等により、流量の増減やシートリーク等の欠点があり、定期的（～３ヵ月）な流量校正試験が必要であった。そこで、実験運転に使用頻度の大きい小容量圧電素子弁に経年劣化が小さく、発生力の大きい積層型圧電素子[注1]を採用して積層型圧電素子弁（0.53～5.33 Pam^3/s）を１９８７年度（昭和６２年度）に開発し、実機に取り付け、それ以降正常に作動してきた。また、１９８８年（昭和６３年度）に積層型圧電素子弁を改良してオリフィス内圧力を一定制御できる流量制御型圧電素子弁（0.53～5.33 Pam^3/s）を開発し、連続注入用として実機に取り付け、正常に作動してきた。

その後、１９９１年度（平成３年度）には、ＪＴ－６０の大電流化改造(JT-60U)を実施し、大容量圧電素子弁と小容量圧電素子弁及び積層型圧電素子弁により、0.53～53.3 Pam^3/sの流量範囲を制御して、プラズマ原料ガスを供給してきた。
だが、圧電素子の経年劣化等によるシートリークの発生や流量の増減が現れ、流量制御特性に影響がでてきたとともに、大容量圧電素子弁と小容量圧電素子弁の２種類による流量範囲（0.53～53.3 Pam^3/s）を直線的、かつ、連続的にカバーできなくなった。
そのため、圧電素子の経年劣化等よる影響を考慮し、0.53～53.3 Pam^3/s の流量範囲を直線的に制御できる一種類（１個）の圧電素子弁が要求された。

そこで、新タイプの圧電素子[注1]（積層圧電アクチュエータ；金属封入タイプ）を用いて圧電素子の圧電縦効果を応用し、てこの原理を利用したタイプの圧電素子弁を試作開発した。試験の結果、満足する結果が得られた。

注1：圧電素子は、メーカにより呼び名が異なる場合がある。

2. 設計

2.1 開発の経緯

すでに、ＪＴ－６０では、バイモルフ型圧電素子を用いた大容量圧電素子弁[1]、小容量圧電素子弁[1]及び微小容量圧電素子弁[2]の流量範囲による圧電素子弁の開発を行ってきた。また、小容量圧電素子弁と同じ流量範囲で、シートリークを防止するため、発生力の大きい積層型圧電素子を用いた積層型圧電素子弁[3]及び弁座出口部に圧力計を組み込み、圧力モニタにより流量制御が行える流量制御型圧電素子弁を開発し、実機に適用してきた。

これまでに開発した各圧電素子弁の構造図をFig. 2.1～2.5 に示す。圧電素子弁の構造等は、流量範囲により決定されている。圧電素子弁の機構を以下に簡単に述べる。
各バイモルフ型圧電素子弁は、通常、スプリングによりシールゴムと弁座が押しつけられており、バイモルフ型圧電素子に直流電圧を印加すると、スプリングを押し上げる方向に変位（圧電効果）が生じる。すると、シールゴムと弁座部に隙間ができてガスが流入する。積層型圧電素子弁は、通常、てこ（連結アーム）を介してスプリングによりシールゴムと弁座が押しつけられており、積層型圧電素子に直流電圧を印加すると、伸びる方向に変位（圧電縦効果）が生じる。すると、てこ（連結アーム）を介してスプリングを押し上げ、シールゴムと弁座部に隙間ができてガスが流入する。流量制御型圧電素子弁は、弁座内部に圧力センサを組み込み、弁座内部圧力を測定して圧電素子への印加電圧を制御し、シールゴムと弁座部の隙間を調整してガス流入する。

これまでに開発した各圧電素子弁の主な仕様は以下のとおりである。

1）大容量圧電素子弁（PEV-H）
- 流量：5.33～53.3 Pam^3/s
- 背圧：水素ガス 0.2 MPa（H_2 約 2.0 kg/cm^2）
- シートリーク量：ヘリウムガス $<1.33\times10^{-8}$ Pam^3/s（$He<1.0\times10^{-7}$ Torrl/s）
- 動作時間：＜5 ms
- 使用素子：大口径バイモルフ型圧電素子
- 弁座の径：外径 ϕ2 mm 内径 ϕ1 mm

2）小容量圧電素子弁（PEV-L）
- 流量：0.53～5.33 Pam^3/s
- 背圧：水素ガス 0.2 MPa（H_2 約2.0 kg/cm^2）
- シートリーク量：ヘリウムガス $<1.33\times10^{-8}$ Pam^3/s（$He<1.0\times10^{-7}$ Torrl/s）
- 動作時間：＜5 ms

・使用素子：小口径バイモルフ型圧電素子
・弁座の径：外径$^{\phi}$1.5 mm　内径$^{\phi}$0.4 mm

3）微小容量圧電素子弁（PEV-LL）
・流量：0.05～0.53 Pam^3/s
・背圧：水素ガス 0.2 MPa（H_2　約2.0 kg/cm^2）
・シートリーク量：ヘリウムガス $<1.33\times10^{-8}$ Pam^3/s（$He<1.0\times10^{-7}$ Torr l/s）
・動作時間：＜5 ms
・使用素子：小口径バイモルフ型圧電素子
・弁座の径：外径$^{\phi}$1.5 mm　内径$^{\phi}$0.06 mm

4）積層型圧電素子弁
・流量：0.53～5.33 Pam^3/s
・背圧：水素ガス 0.2 MPa（H_2　約2.0 kg/cm^2）
・シートリーク量：ヘリウムガス $<1.33\times10^{-8}$ Pam^3/s（$He<1.0\times10^{-7}$ Torr l/s）
・動作時間：＜5 ms
・使用素子：積層型圧電素子
・弁座の径：外径$^{\phi}$1.5 mm　内径$^{\phi}$0.4 mm

5）流量制御型圧電素子弁
・流量：0.53～5.33 Pam^3/s
・背圧：水素ガス 0.2 MPa（H_2　約2.0 kg/cm^2）
・シートリーク量：ヘリウムガス $<1.33\times10^{-8}$ Pam^3/s（$He<1.0\times10^{-7}$ Torr l/s）
・動作時間：＜5 ms
・使用素子：積層型圧電素子
・弁座の径：外径$^{\phi}$1.5 mm　内径$^{\phi}$0.4 mm
・圧力変換器：ハーフブリッチ方式

これらの圧電素子弁は、背圧 0.2 MPaの水素ガスを用いた時に 0.05～53.3 Pam^3/sの流量範囲内の必要量を注入できる能力を有している。しかし、圧電素子の経年劣化等による流量の増減が現れると、 0.05～53.3 Pam^3/sの流量制御範囲が欠けることになり、プラズマ実験運転に支障を与えることになる。また、積層型圧電素子弁においては、圧電素子が座屈して動作不良となるトラブルを発生した。

新しい圧電素子弁の開発にあたっては、以上のような問題点を考慮し、保守、寿命上の観点から、設計、試作等を進めた。

2.2 設計仕様

ＪＴ－６０Ｕのプラズマ実験運転には、小容量圧電素子弁の全流量範囲と大容量圧電素子弁の下域流量範囲（30.0 Pam^3/s 以下）が主に使用されていることから、開発する圧電素子弁の流量範囲は、水素ガス 0.2 MPaにおいて、最大流量を大容量圧電素子弁の半分（0～26.6 Pam^3/s）までの流量範囲を目標として設計した。
Fig. 2.6 に圧電素子弁の基準特性を示す。印加電圧は、既設電源仕様（～175 V）として、PEV-H は大容量圧電素子弁、PEV-L は小容量圧電素子弁を示し、PEV-M は開発する圧電素子弁の基準特性を示している。

また、開発する圧電素子弁の形状は、ＪＴ－６０Ｕとの取合い上の互換性を持たせるために、出側フランジ、入側フランジ、弁座、圧電素子等で構成し、形状は、すでに開発してきた圧電素子弁と同じに設計した。Table 2.1 に開発する圧電素子弁の開発設計仕様を示す。

2.3 基本流量[1)2)3)]

圧縮性を考慮したオリフィスやノズルの気体流量は断熱変化と考えられ、圧電素子弁の流量Ｑは、次式より算出できる。

$$Q = 31.62\ C\ A\ P\sqrt{\frac{RT}{M}}\sqrt{k\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \qquad (1)$$

Ｑ	：流量	Pam^3/s
Ｃ	：圧損（流体）係数	
Ａ	：ガス通過面積	m^2
Ｐ	：背圧	Pa
Ｔ	：温度	K
Ｍ	：分子量	g/mol
k	：比熱比（定圧比熱と定量比熱との比）	Cp/Cv
Ｒ	：ガス定数	$Pam^3/Kmol$

ここで、ガス通過面積Ａは、次式より算出できる。

$$A = \pi\left(\frac{d_1+d_2}{2}\right)\left(\delta-\delta_0\right) \qquad (2)$$

d_1	：弁座ノズル内径	m
d_2	：弁座ノズル外形	m
δ	：変位量	m
δ_0	：ゴムシート押さえ量	m

バイモルフ型圧電素子の場合、式(2)の変位量δは次式で算出できる。

$$\delta = \frac{3}{4} d_{31} \left(\frac{D}{t}\right)^2 V \tag{3}$$

δ	：変位量	m
d_{31}	：圧電定数	m/V
D	：素子外径	m
t	：素子の厚さ	m
V	：印加電圧	DC V

積層型圧電素子の場合、式(2)の変位量δは次式で算出できる。

$$\delta = l\, d_{33}\, V = n\, t\, d_{33}\, V \tag{4}$$

δ	：変位量	m
d_{33}	：圧電定数	m/V
l	：素子の高さ	m
n	：素子の枚数	枚
t	：素子の厚さ	m
V	：印加電圧	DC V

圧電素子[4)5)]には、大きく分けて圧電横効果を利用したユニモルフ型、バイモルフ型と、圧電縦効果を利用した積層型がある。前者は、低電圧で比較的大きな変位が得られる反面、発生力が小さい、応答速度が遅い、クリープが大きい等の欠点を持っている。後者は、発生力が大きく、応答速度が速いが、駆動電圧が高いという欠点を持っている。

しかし、開発してきた圧電素子弁は、これらの利点を応用し、バイモルフ型圧電素子や小型の積層型圧電素子（樹脂外装タイプ）を用いてきた。

2.4 弁座設計

圧電素子弁の流量は、式(1)から解るようにバイモルフ型圧電素子の場合、d_1（弁座

ノズル内径）と t（素子の厚さ）に依存し、積層型の場合、d_1（弁座ノズル内径）と l（素子の高さ）に依存している。Fig. 2.7にガス流路のモデルを示す。ガス流量は、ゴムシートと弁座面（A部）及び弁座オリフィス部（B部）により決定されるが、A部はB部に比べて小さい値となることから、B部のガス流量を求める。
ここで、平面に丸孔を開けた部分は、内側に鋭い角があって長さの短いオリフィス状[6]になる。ガス温度を一定として、平面に丸孔を開けたときの水素ガス流量は、次式より算出できる。

$$Q_v = \alpha \ \varepsilon \ A_0 \sqrt{\frac{2 \ \Delta p}{\rho}} \tag{5}$$

Q_v：オリフィスにおける水素ガス流量
α ：流量係数（オリフィスの場合；0.6）
ε ：気体の膨張補正係数（1）
A_0：オリフィスの必要面積
Δp：差圧
ρ ：水素ガスの流体密度

水素ガス 0.2 MPa時における最大流量を 26.6 Pam^3/sとして計算すると、B部の必要面積は、約 0.094 mm^2となる。
最大流量を得るためのオリフィス径は次式より求められる。

$$d = A_0 \times \frac{1}{\pi \ \delta_r} \tag{6}$$

d ：オリフィス径
δ_r ：ストローク

A部の最大流量時のストローク（ゴムシートと弁座面の距離）は、大容量圧電素子弁等から 40 μm 程度必要となることから、オリフィス径を算出すると、約 ϕ0.75 mm となる。
よって、弁座のノズル内径は加工上、ϕ1 mm とし、弁座のノズル外径は大容量圧電素子弁等から真空シール性を考慮してϕ2 mm とした。弁座のオリフィス部形状をFig. 2.8に示す。

2.5 圧電素子の選定

弁座部の最大変位量は、ゴムシートと弁座面の距離（ストローク）が40 μm及び真空シールを維持するための弁座とゴムシートの初期縮み代が大容量圧電素子弁等から 25 μm 程度必要となることから、その和の 65 μm 以上必要となる。つまり、圧電素子単体、又は、小さい変位量を拡大してその変位量を確保することが必要になる。

圧電素子には複数の種類があるが、バイモルフ型や積層型（スタック型）の圧電素子は、電気的エネルギーを機械的エネルギーに効率よく変換することができる。そのため、前者は大容量圧電素子弁、小容量圧電素子弁及び微小容量圧電素子弁に利用され、後者は積層型圧電素子弁及び流量制御型圧電素子弁に利用されている。
これらの圧電素子弁に利用されている圧電素子の特性をTable 2.2 と Table 2.3に示す。大口径バイモルフ型圧電素子の場合は弁匡体が大型化し、積層型圧電素子はてこに用いられる比率が6倍になることから弁匡体が大型化するなどの問題があり、どの圧電素子とも仕様を満足しない。

そこで、積層型圧電素子に比べて、変位量が約3倍、発生力が約4倍と大きく、超高真空環境 （$\sim 10^{-6}$ Pa） 下で微細駆動ができ、高速応答 （$\sim$400 μs） の特徴をもっている積層圧電アクチュエータの採用を検討した。積層圧電アクチュエータは、積層型圧電素子と同様に圧電素子の圧電縦効果を持ち、ベローズ状の金属ケースの中に積層型圧電素子（積層圧電アクチュエータ）を窒素ガスで封入したもので、小型、低電圧駆動、高速微細駆動等の利点を有しているとともに、可燃性ガスを使用する場合、非接触である等の利点があるが、積層型圧電素子と同様に単体では必要変位量を満足しないことから、てこの原理を応用する。その比率は、弁匡体を小容量圧電素子弁と同程度と考えると、2．4倍程度が有効であり、積層圧電アクチュエータの特性から十分な変位量が得られる。積層圧電アクチュエータの特性をTable 2.4 に、積層圧電アクチュエータの外観をFig. 2.9に示す。積層圧電アクチュエータは、円柱状の形状をしており、一方を固定することにより、変位が安定にアームに伝達できるように円錐溝と接触する構造になっている。圧電素子の発生力の大きいことは、真空シール性能を増す意味で非常に有利である。
積層型圧電素子の発生力は、次式で求められる。

$$F = \frac{S}{t} d_{33} V Y^{E}_{33} \tag{7}$$

F	：発生力	N
d_{33}	：圧電定数	m/V
V	：印加電圧	DC/V
Y^{E}_{33}	：ヤング率	N/m^2
S	：面積	m^2

t　：素子の厚さ　　m

2.6 構造

仕様流量を得るためには弁座とゴムシート（弁体）間に～40 μmの変位量が必要である。つまり、2.5 項で述べたように、その部分の実変位量は 65 μm 以上必要ということになる。そのため、積層型圧電素子の変位量より大きい変位量を有する積層圧電アクチュエータを縦置きに配置し、てこの原理により、平型のアームを介してその変位量を2．4倍に拡大できる構造にした。また、積層圧電アクチュエータの変位が確実にてこ（アーム）に伝えられるように点接触の構造とした。積層圧電アクチュエータの最小変位量は 28 μm （公称変位量 34 μm ）である。弁座は、従来、出側フランジの中心に配置していたが、各部品の配置から出側フランジの側面によった四角形のものとなった。

また、ゴムシート押さえ用の調整バネ等も出側フランジの側面によった形となった。積層圧電アクチュエータを用いて試作した圧電素子弁の構造をFig. 2.10 に、積層圧電アクチュエータを用いて試作した圧電素子弁の外観をPhoto. 2.1に示す。以下、てこの原理を利用し、積層圧電アクチュエータを用いた圧電素子弁を積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁（LE-PEV: Piezoelectric actuator gas injection valve by lever ）と称し、LE-PEVを略号とする。

積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁は、電流導入端子より積層圧電アクチュエータに直流電圧を印加すると、積層圧電アクチュエータは伸びる方向に変位が生じ、その変位はピン（支点）を介して弁座面とゴムシート間に変位が生じてガスが流れる構造になっている。

また、従来の圧電素子弁は、ゴムシートを圧電素子、または、アームにシリコン系の接着剤で固定していた。それらは、動作により芯ずれや剥離の問題に現れたり、ゴムシートと接着剤の厚みがシール力に影響を及ぼしていた。そのため、アームにゴムシート用溝を造り、ゴムシートをはめ込み、シート押さえにより固定する構造に改良したことによって、それらの問題を解決した。

Table 2.1 圧電素子弁の開発設計仕様

流量 (Pam³/s)	0～26.6 *1
シートリーク量 (Pam³/s)	$<1.33\times10^{-8}$ *2
背圧 (MPa)	0.2
使用電圧 (DC V)	～175
動作速度 (ms)	5.0 以下
環境温度 (℃)	60 以下
電源 (DC V)	～175 (既設電源)
外観寸法 (mm)	φ92～φ152×157

*1 水素ガス流量
*2 ヘリウムガス

Table 2.2 バイモルフ型圧電素子の特性

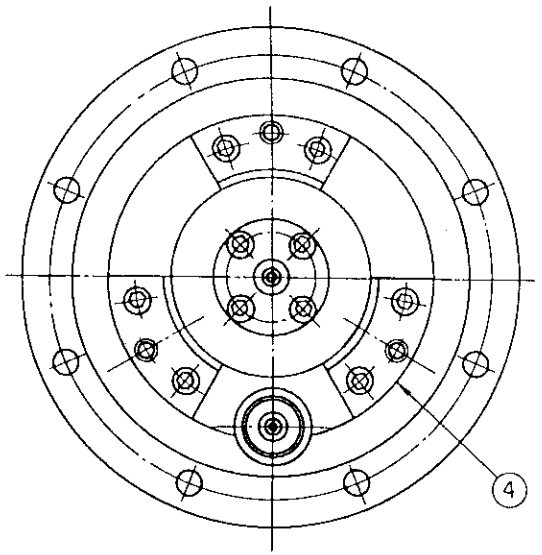
弁タイプ	大容量	小容量
外観	円板状	
素子口径 (φmm)	75.0	35.0
素子の厚さ (mm)	1.1	1.1
変位量 (μm)	140±10	30±3
静電容量 (nF)	255±50	53±10
比誘電率 ε_3	1800	
圧電定数 d_{31} (m/V)	180×10^{-12}	152×10^{-12}
キュウリー点 Tc (℃)	350	320
最大印加電圧 (DC V)	200	

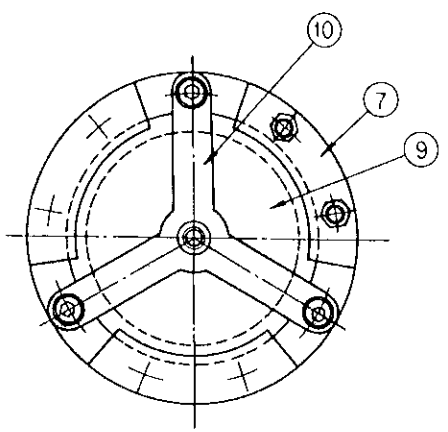
Table 2.3 積層型圧電素子の特性

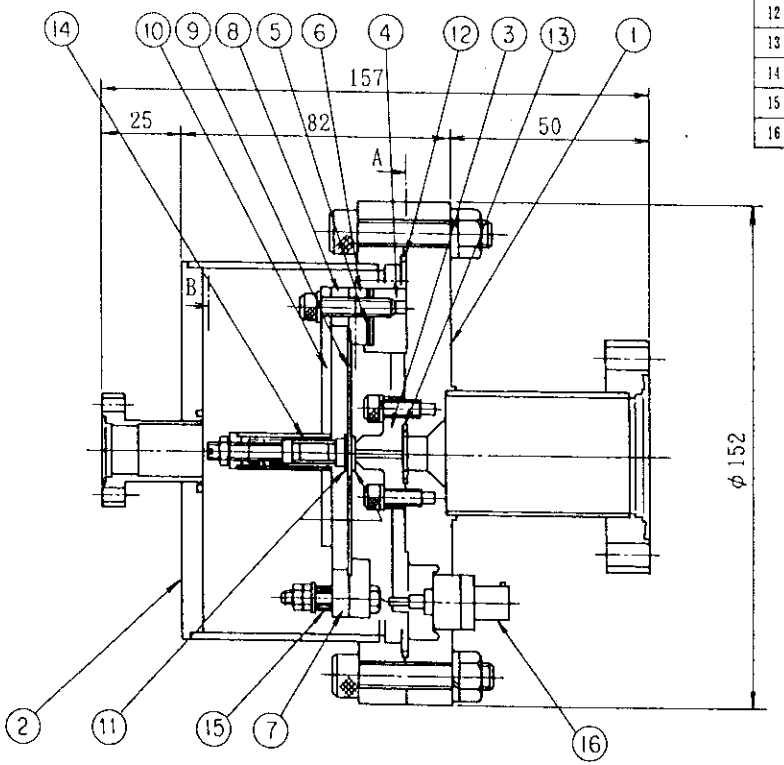
外観	樹脂外装型
素子形状 (mm)	2×3×9
公称変位量 (μm)	9.0±1.0
共振周波数 (kHz)	138
静電容量 (μF)	0.18±20%
最大発生力 (N)	200 (20kg)
最大印加電圧 (DC V)	150
圧電定数 d_{33} (m/V)	635×10^{-12}
積層数 (枚)	62
セラミック厚 (μm)	108
ヤング率 Y^{E}_{33} (N/m^2)	6.0×10^{10}
キュウリー点 Tc (℃)	145
比誘電率 $\varepsilon^{T}_{33}/\varepsilon_0$	5440
電気機械結合係数 k_{33}	0.68
絶縁抵抗 (MΩ)	100 以上

Table 2.4 積層圧電アクチュエータの特性

外観	金属ケース封入型
内部素子形状 (mm)	5×5×40
公称変位量 (μm)	34±6
共振周波数 (kHz)	12±3
静電容量 (μF)	3.0±20%
最大発生力 (N)	800 (80kg)
最大印加電圧 (DC V)	150
圧電定数 d_{33} (m/V)	635×10^{-12}
積層数 (枚)	260
セラミック厚 (μm)	108
ヤング率 Y^{E}_{33} (N/m^2)	6.0×10^{10}
キュウリー点 Tc (℃)	145
比誘電率 $\varepsilon^{T}_{33}/\varepsilon_0$	5440
電気機械結合係数 k_{33}	0.68
絶縁抵抗 (MΩ)	15 以上
気密性	1×10^{-9} Pam^3/s



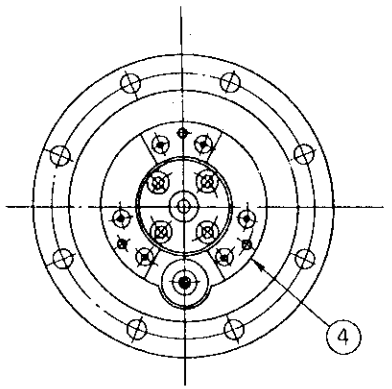




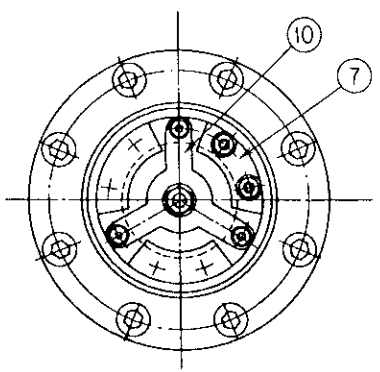
品番	部品名	個数	材質	備考
1	出側フランジ	1	SUS304	
2	入側フランジ	1	〃	
3	弁座	1	〃	
4	調整座	3	SUS304	
5	調整板	6	黄銅	
6	絶縁板	1	アルミナ	
7	押工板	3	〃	
8	絶縁リング	3	〃	
9	圧電素子	1		
10	スプリングホルダ	1	SUS304	
11	ゴムシート	2	バイトン	
12	Oリング	1	SUS321	
13	Oリング	1	SUS321	
14	スプリング	1	SUS304	
15	スプリング	6	SUS304	
16	電流導入端子	1	——	

Fig 2.1 大容量圧電素子弁

品番	部品名	個数	材質	備考
1	出側フランジ	1	SUS304	
2	入側フランジ	1	〃	
3	弁座	1	〃	
4	調整座	3	SUS304	
5	調整板	6	黄銅	
6	絶縁板	1	アルミナ	
7	押工板	3	〃	
8	絶縁リング	3	〃	
9	圧電素子	1		
10	スプリングホルダ	1	SUS304	
11	ゴムシート	2	バイトン	
12	Oリング	1	SUS321	
13	Oリング	1	SUS321	
14	スプリング	1	SUS304	
15	スプリング	6	SUS304	
16	電流導入端子	1	——	



AA' ～



B ～

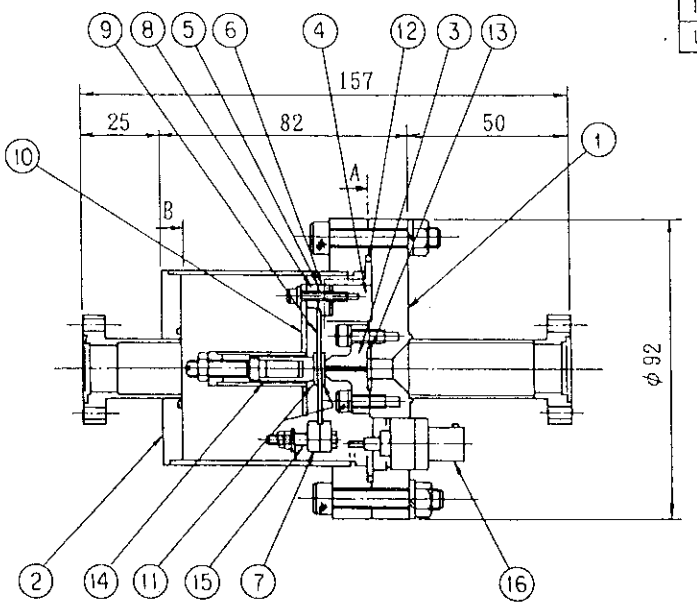
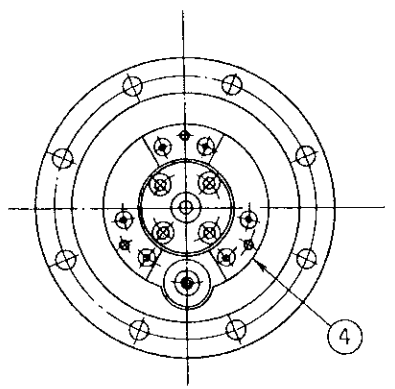
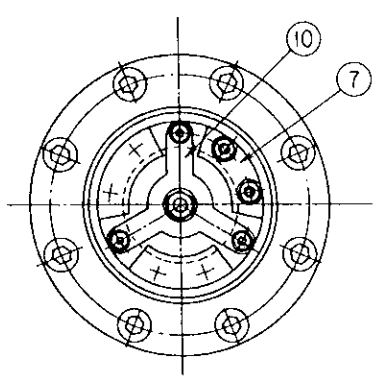


Fig 2.2　小容量圧電素子弁

品番	部品名	個数	材質	備考
1	出側フランジ	1	SUS304	
2	入側フランジ	1	〃	
3	弁座	1	〃	
4	調整座	3	SUS304	
5	調整板	6	黄銅	
6	絶縁板	1	アルミナ	
7	押工板	3	〃	
8	絶縁リング	3	〃	
9	圧電素子	1		
10	スプリングホルダ	1	SUS304	
11	ゴムシート	2	バイトン	
12	Oリング	1	SUS321	
13	Oリング	1	SUS321	
14	スプリング	1	SUS304	
15	スプリング	6	SUS304	
16	電波導入端子	1	——	



AA' ～



B ～

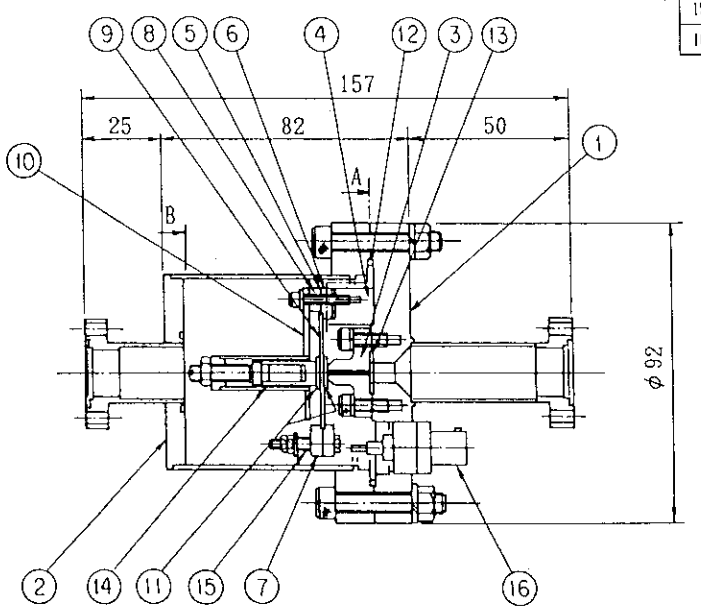
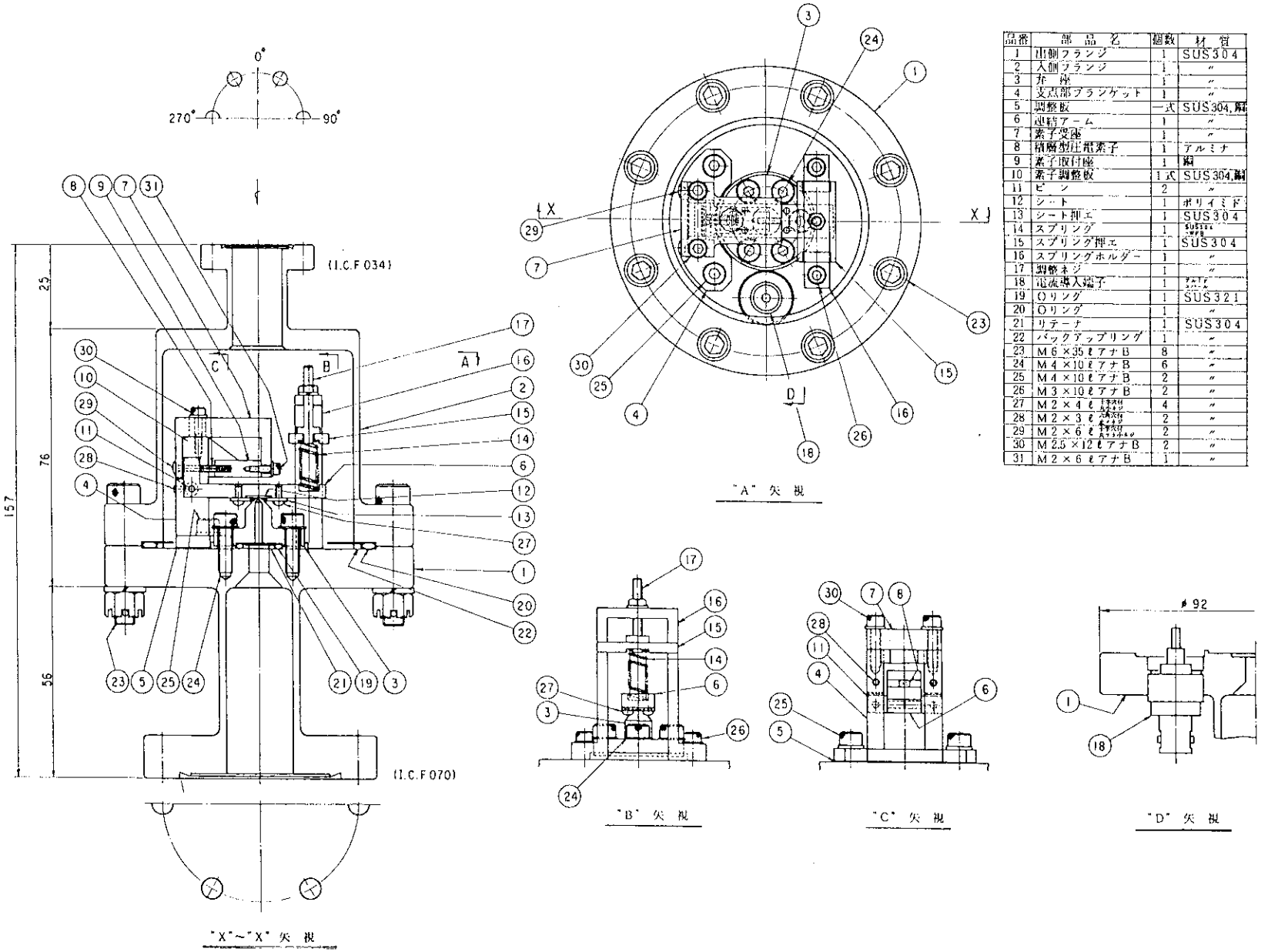
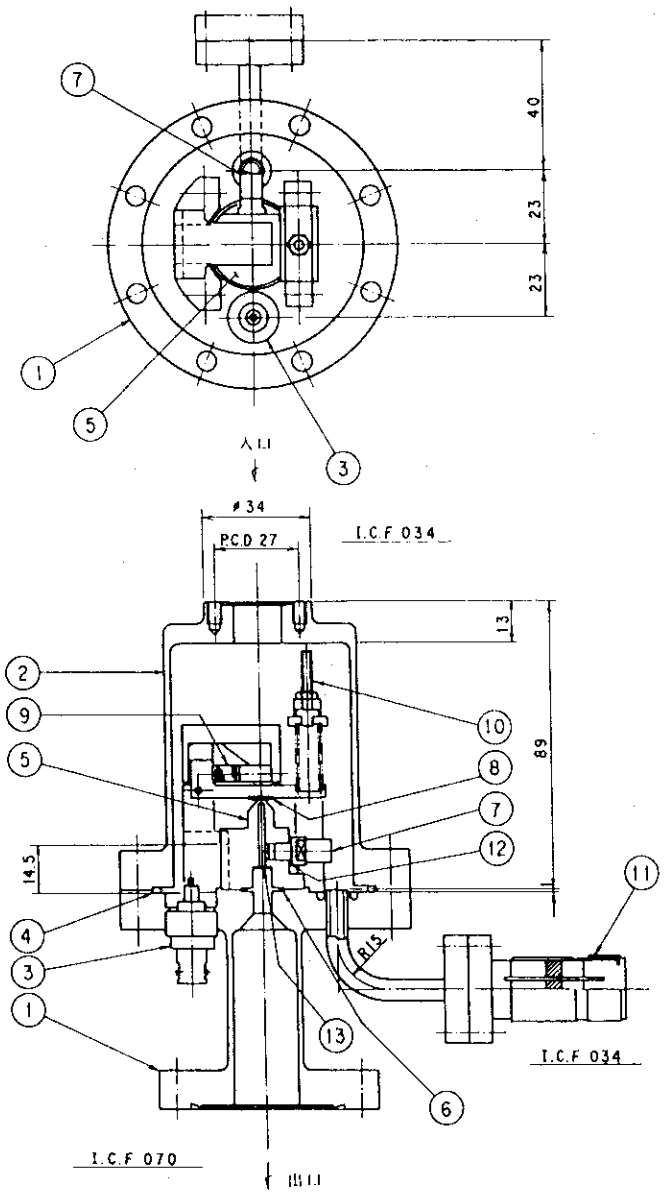


Fig 2.3 微小容量圧電素子弁



品番	部 品 名	個数	材 質
1	出側フランジ	1	SUS304
2	入側フランジ	1	〃
3	弁 座	1	〃
4	支点部ブランケット	1	〃
5	調整板	一式	SUS304,銅
6	連結アーム	1	〃
7	素子受座	1	〃
8	積層型圧電素子	1	アルミナ
9	素子取付座	1	銅
10	素子調整板	1式	SUS304,銅
11	ピ ン	2	〃
12	シート	1	ポリイミド
13	シート押エ	1	SUS304
14	スプリング	1	SUS304 WPB
15	スプリング押エ	1	SUS304
16	スプリングホルダー	1	〃
17	調整ネジ	1	〃
18	電流導入端子	1	[illegible]
19	Oリング	1	SUS321
20	Oリング	1	〃
21	リテーナ	1	SUS304
22	バックアップリング	1	〃
23	M6×35ℓアナB	8	〃
24	M4×10ℓアナB	6	〃
25	M4×10ℓアナB	2	〃
26	M3×10ℓアナB	2	〃
27	M2×4ℓ [illegible]	4	〃
28	M2×3ℓ [illegible]	2	〃
29	M2×6ℓ [illegible]	2	〃
30	M2.5×12ℓアナB	2	〃
31	M2×6ℓアナB	1	〃

Fig 2.4 積層型圧電素子弁



品番	部品名	材質
1	出側フランジ	SUS304
2	入側フランジ	〃
3	電流導入端子	アルミナコバール
4	Oリング	フッ素ゴム G65
5	弁座	SUS304
6	Oリング	フッ素ゴム
7	圧力変換器	SUS304
8	シート	NBR
9	積層型圧電素子	—
10	調整ネジ	SUS304
11	電流端子	アルミナコバール
12	Oリング	フッ素ゴム
13	オリフィス	銅

圧力変換器仕様

形式：PMS－5－1H
測定範囲：－1～1 kgf／cm²
感度：118mV／kgf／cm²
印加電圧：9 VDC
ブリッジ方式：ハーフブリッジ方式

Fig 2.5 流量制御型圧電素子弁

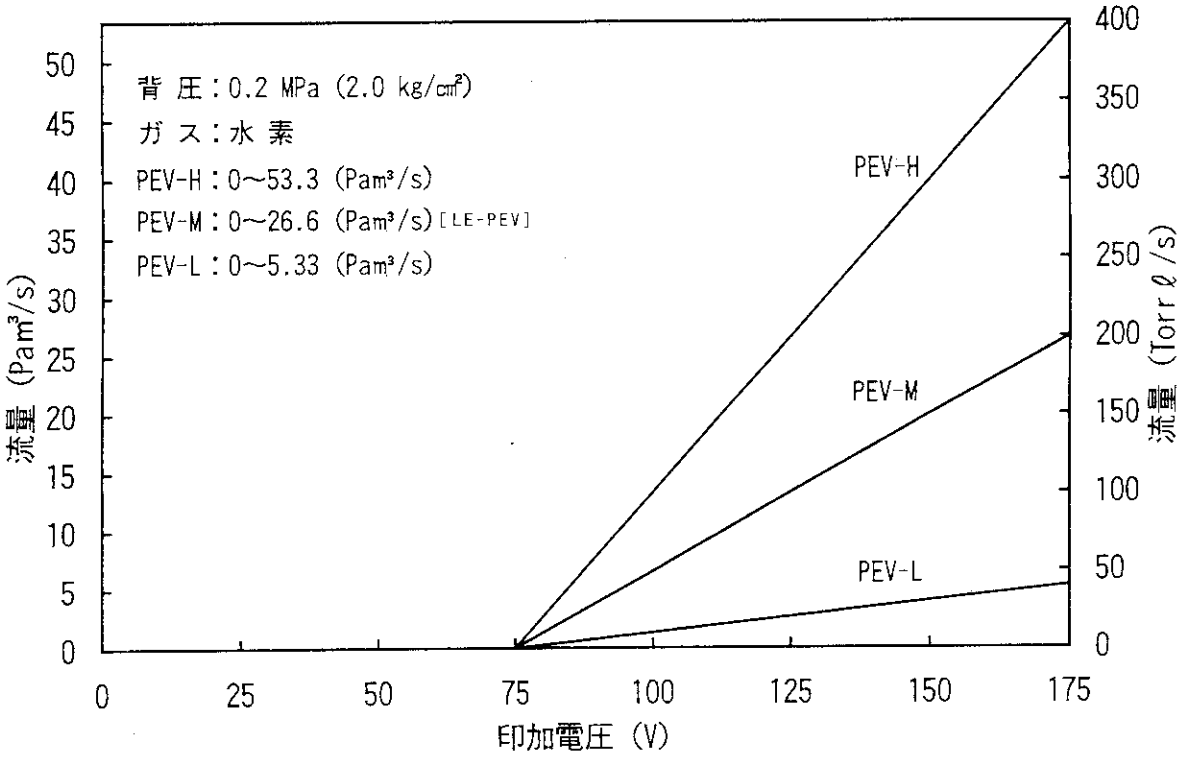


Fig 2.6　圧電素子弁の基準特性

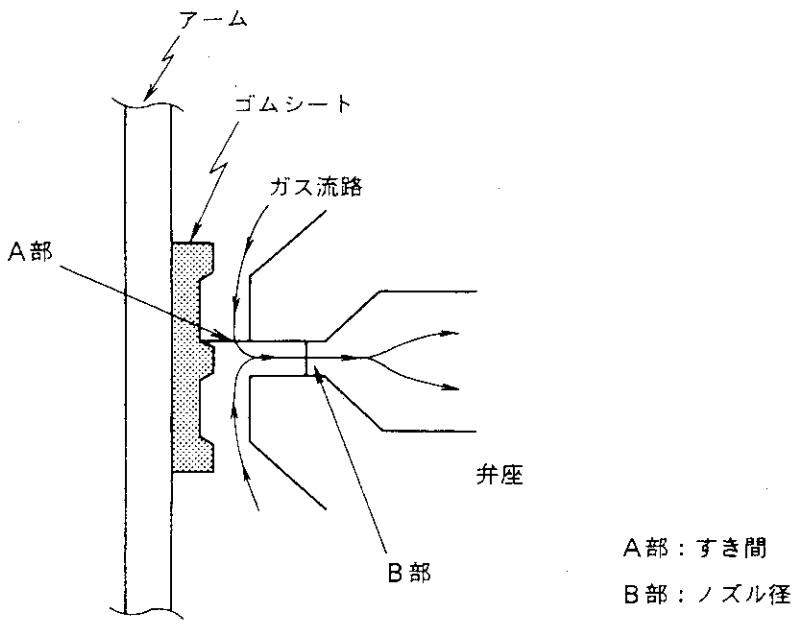


Fig 2.7　ガスの流路

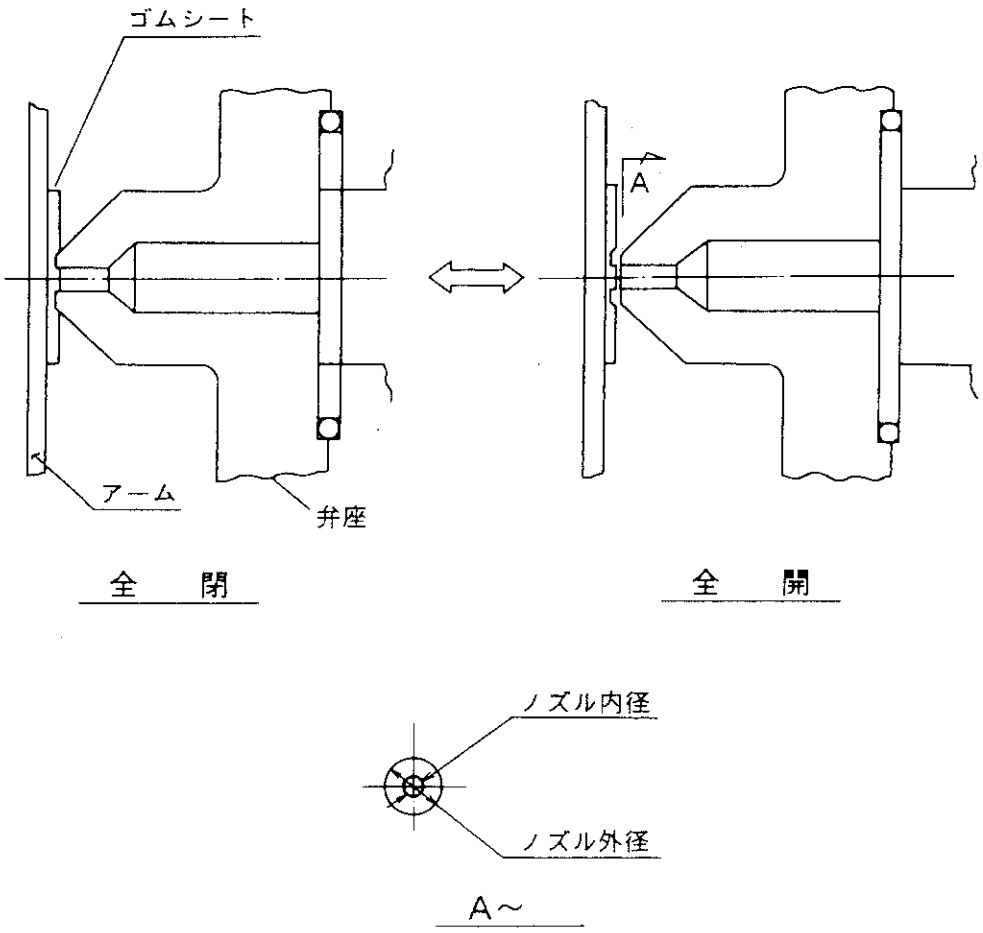


Fig 2.8　弁座のオリフィス部形状

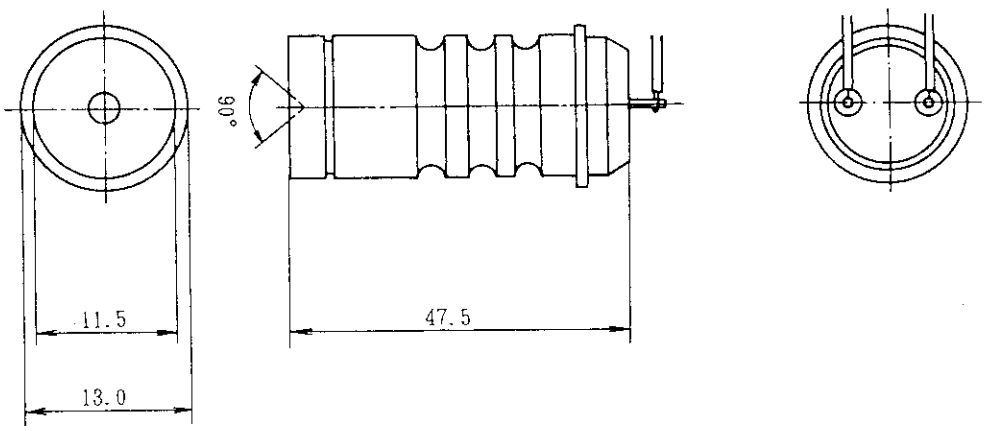
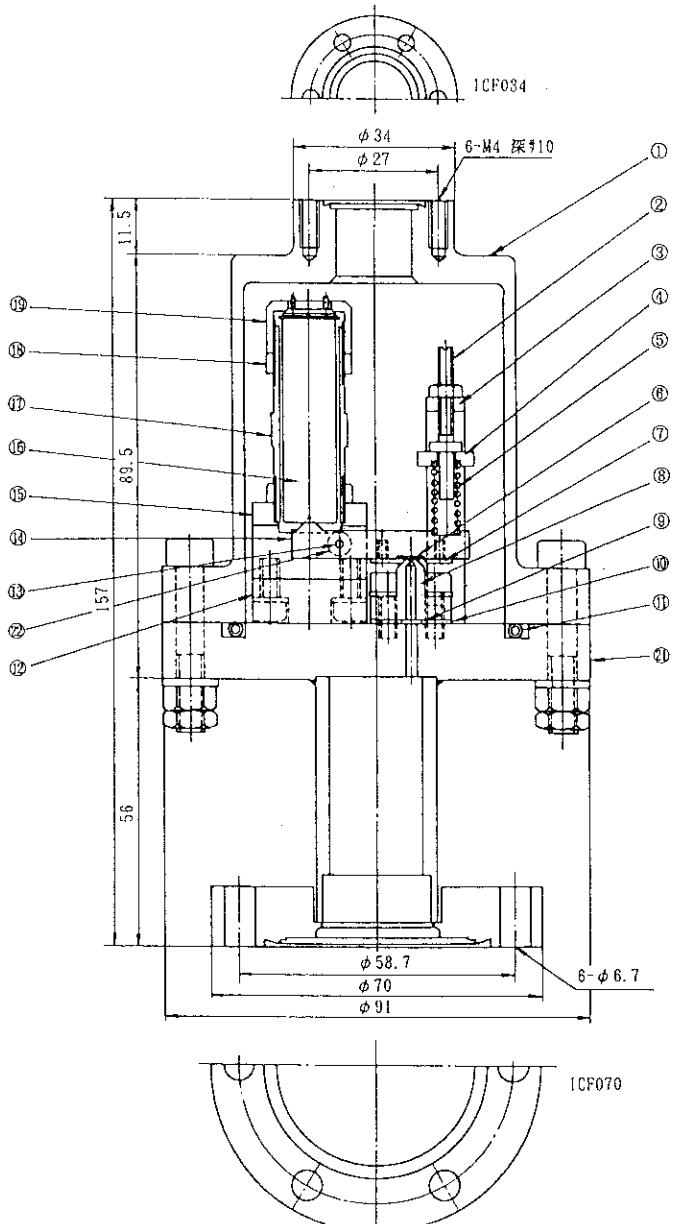
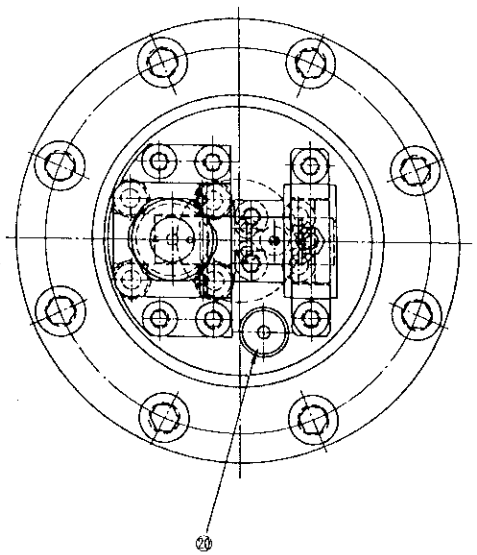


Fig 2.9　積層圧電アクチュエータの外観





品番	部品名
22	ワッシャ
21	デフランジ
20	電流導入端子
19	チョウセイナット
18	コテイナット
17	カバー
16	ピエゾスタック
15	ブロック
14	アーム
13	ピ　ン
12	シジブ
11	ガスケット
10	リテーナ
9	Oリング
8	ベンザ
7	シートオサエ
6	シート
5	バ　ネ
4	バネオサエ
3	バネホルダ
2	ネ　ジ
1	イリフランジ

Fig 2.10　積層圧電アクチュエータを用いた圧電素子弁

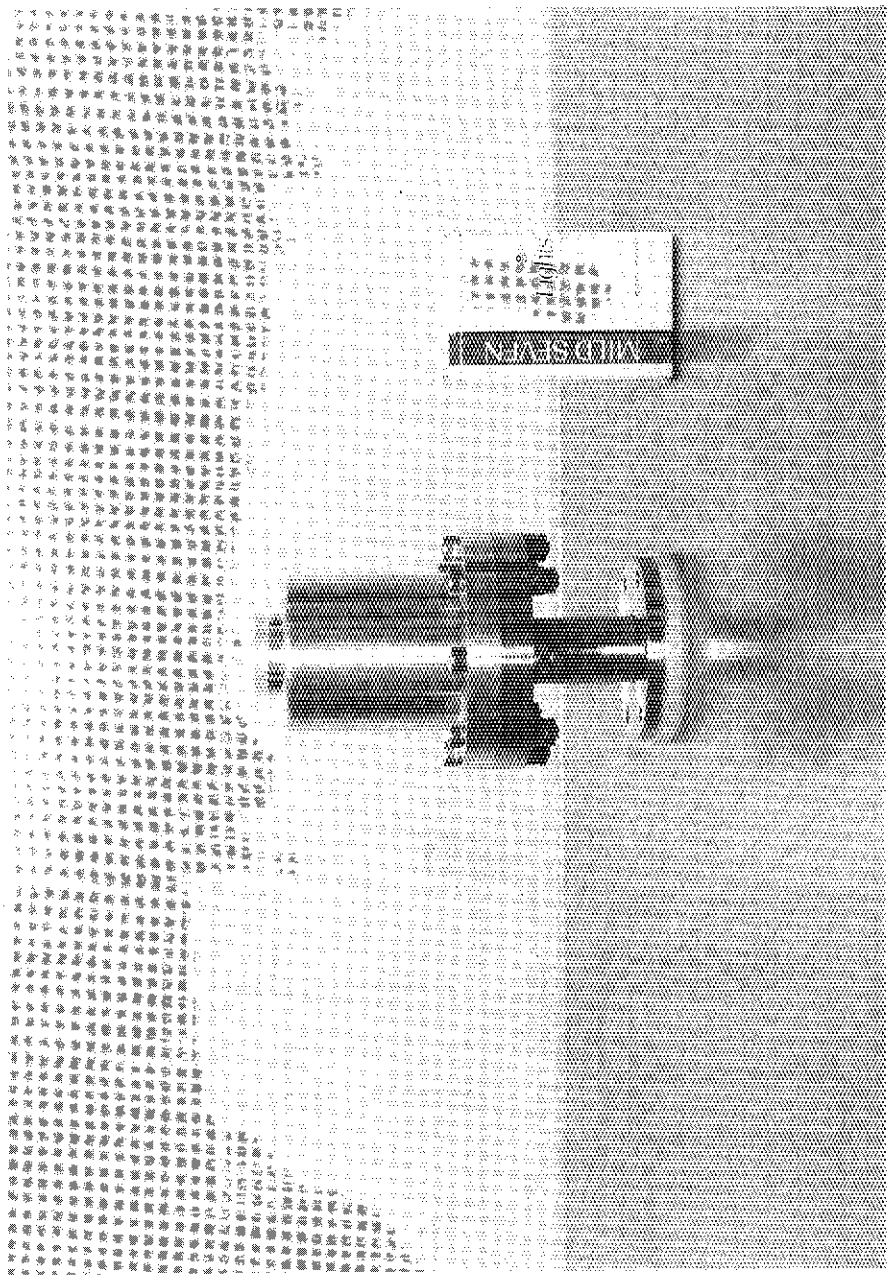


Photo 2.1　積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁の外観

3. 特性試験

設計仕様に基づき試作した積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁の性能を評価するために特性試験を行った。

3.1 試験方法

試験の方法は、真空容器をあらかじめターボ分子ポンプ（TMP）等の真空ポンプにより、排気しておき、ゲートバルブ（TMPの上流弁）を「閉」し、てこタイプ積層型圧電素子弁を動作させて圧力変化により流量を測定するビルドアップ法を用いた。Fig. 3.1 に流量測定試験系統図を示す。

各種の特性試験は、仕様値のシートリーク量 (1.33×10^{-8} Pm^3/s) を満足していることをヘリウムリークディテクターにより確認した後に流量特性試験を実施した。圧力の測定には、高感度圧力検出器（バラトロン真空計）を用いた。

1）ループ流量特性試験(1)

水素ガスを用いて、背圧 0.1 MPa で、立ち上がり及び印加電圧 0～150～0 V、電圧印加時間（パルス幅）1000 ms 時で連続動作を行い、ループ流量を測定し、積層圧電アクチュエータのヒステリシスによる流量への影響を確認した。また、動作開始電圧を確認した。

2）ループ流量特性試験(2)

水素ガスを用いて、背圧 0.2 MPaで、立ち上がり及び印加電圧 0～150～0 V、電圧印加時間（パルス幅）1000 ms 時で連続動作を行い、ループ流量を測定し、積層圧電アクチュエータのヒステリシスによる流量の確認及び背圧による流量の確認した。また、動作開始電圧を確認した。

3）流量特性試験(1)

水素ガスを用いて、背圧 0.1 MPa で、印加電圧 0～150 V、電圧印加時間（単パルス幅）1000 ms 時の流量を確認した。

4）流量特性試験(2)

水素ガスを用いて、背圧 0.2 MPa で、印加電圧 0～150 V、電圧印加時間（単パルス幅）1000 ms 時の背圧による流量を確認した。

5）流量特性試験(3)

水素ガスを用いて、背圧 0.2 MPa で、印加電圧 0～150 V、電圧印加時間（単パルス幅）100 ms時のパルス幅による流量を確認した。

3.2 試験結果

1）ループ流量特性(1)

Fig. 3.2にループ流量特性(1) の結果を示す。流量の開始電圧は、約50 Vで付近で動作しているが、上昇時と下降時にはわずかな差が見られる。ループ流量特性は、印加電圧に流量が比例した特性を示し、ほぼ直線的な流量が得られた。印加電圧 150 V では約 21.0 Pam^3/s の水素ガス流量が得られている。開始電圧及び中間領域には、電圧印加の上昇と下降に流量差が生じている。これは、積層圧電アクチュエータに最大電圧を印加して、往復動作により生じる変位ヒステリシスによる。このヒステリシスは、電圧印加停止後、短絡処理をすることにより、コンデンサーと同様に解除することができ、再度、ループ流量特性を確認すると再現性よくヒステリシスループが現れる。

また、定常的に印加すると、積層圧電アクチュエータの寿命を短くしてしまうが、試験的に既設電源仕様の175 V について確認すると、新たなヒステリシスループが現れた。

2）ループ流量特性(2)

Fig. 3.3にループ流量特性(2) の結果を示す。流量の開始電圧は、約50 Vで付近で動作しているが、上昇時と下降時にはわずかな差が見られる。ループ流量特性は、印加電圧に流量が比例した特性を示し、ほぼ直線的な流量が得られた。印加電圧 150 V では約 31.0 Pam^3/s の水素ガス流量が得られている。開始電圧及び中間領域には、ループ流量特性(1) と同様にヒステリシスが現れている。また、その量も大きい。これは、背圧差によるものである。

3）流量特性試験(1)

Fig. 3.4に流量特性(1) の結果を示す。動作は印加電圧 54 V 付近より開始し、印加電圧 150 Vでは約 20.4 Pam^3/s の水素ガス流量が得られている。この値はループ流量特性値ともほぼ一致する。試験的に既設電源での最高仕様電圧を考慮し、印加電圧 175 V で動作させると、その流量は約 25.4 Pam^3/s であった。

4）流量特性試験(2)

Fig. 3.5に流量特性(2) の結果を示す。動作は印加電圧 54 V 付近より開始し、印加電圧 150 Vでは約 30.7 Pam^3/s の水素ガス流量が得られている。この値はループ流量特性値ともほぼ一致する。試験的に既設電源での最高仕様電圧を考慮し、印加電圧

175 V で動作させると、その流量は約 38.3 Pam^3/sであった。

5) 流量特性試験(3)

Fig. 3.6に流量特性(3) の結果を示す。動作は印加電圧 56 V 付近より開始し、印加電圧 150 Vでは約 30.3 Pam^3/sの水素ガス流量が得られている。この値はループ流量特性値ともほぼ一致する。試験的に既設電源での最高仕様電圧を考慮し、印加電圧175 V で動作させると、その流量は約 37.8 Pam^3/sであった。本試験は、電圧印加時間を可変した場合の流量特性を確認したものであるが、パルス幅1000 ms 時の流量特性とほぼ合致する結果を得た。

流量特性試験において、動作開始電圧は 55 V 付近と早く、低流量領域部においても、直線的な流量が得られた。背圧一定の場合、積層圧電アクチュエータへの印加電圧と流量は比例関係にあると言える。電圧一定の場合、背圧の絶対圧力に比例して安定な流量が得られるとともに、電圧の印加時間（パルス幅）による流量特性への影響は、印加電圧1000 ms 及び100 msにおいてはほとんど依存しない結果を得た。

また、定常的に仕様外の電圧を印加すると積層圧電アクチュエータの寿命を短くすることになるが既設電源仕様から、175 V を印加することによる流量を各々確認してほぼ正常な流量を得た。しかし、～150 V までの流量特性とは少し異なった傾向が見られることから、積層圧電アクチュエータの仕様内での使用が好ましいと思われる。

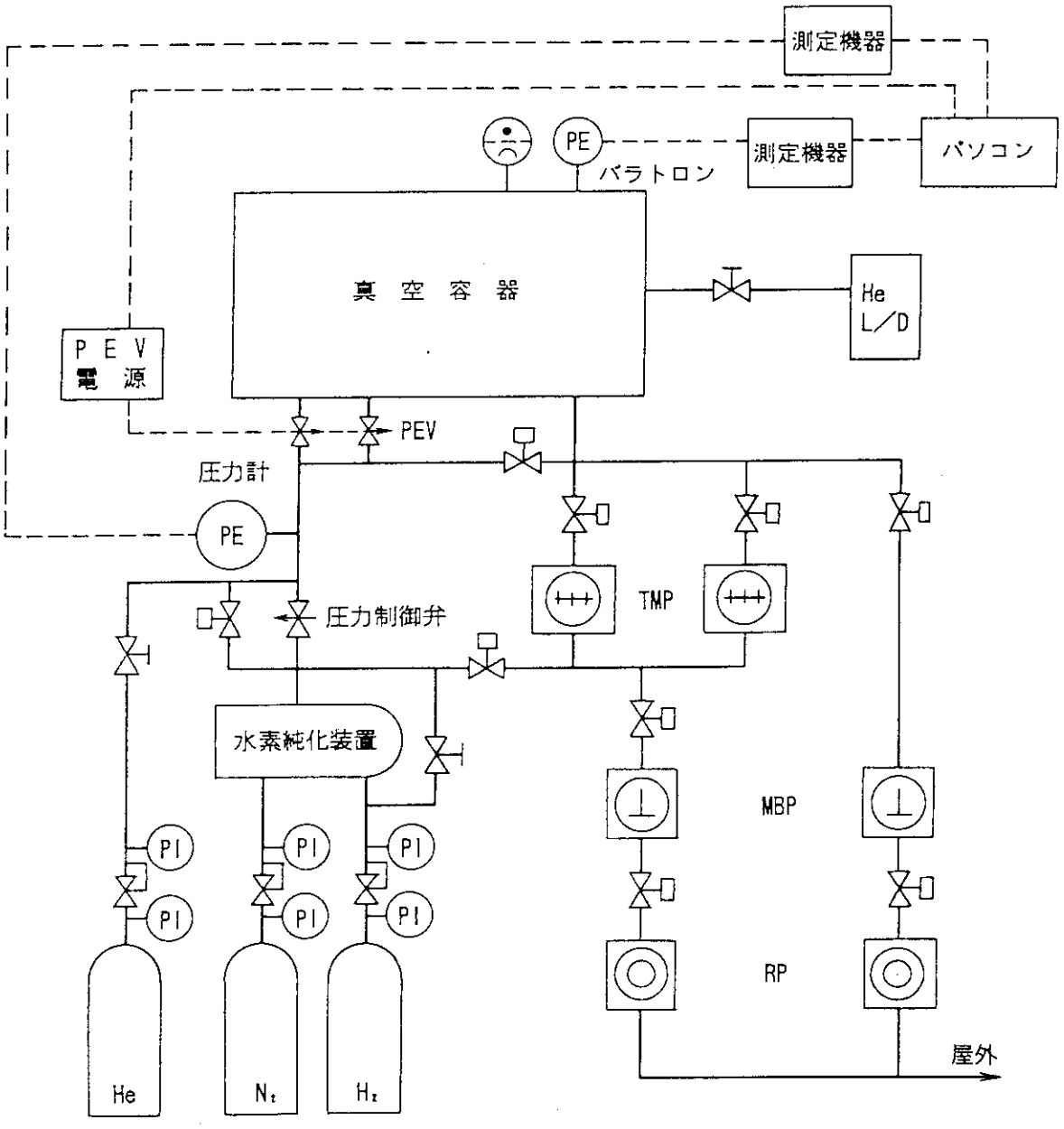


Fig 3.1　流量測定試験系統図

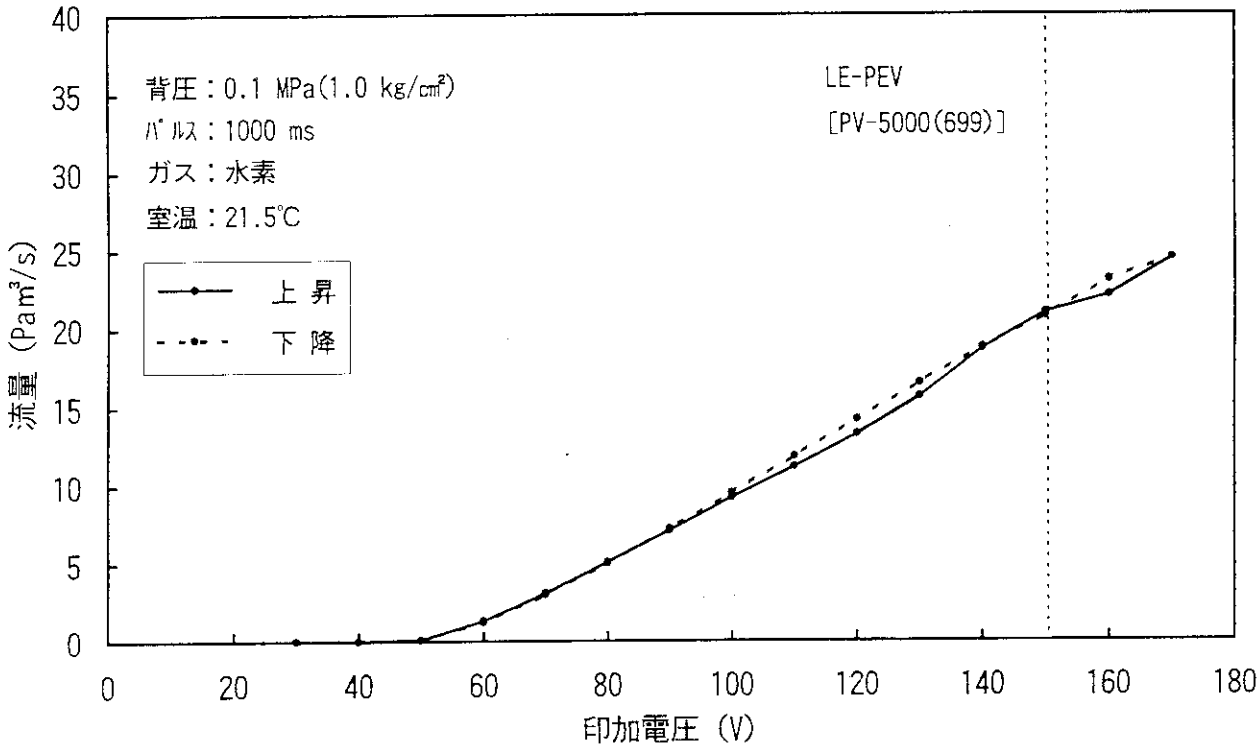


Fig 3.2 ループ流量特性(1)

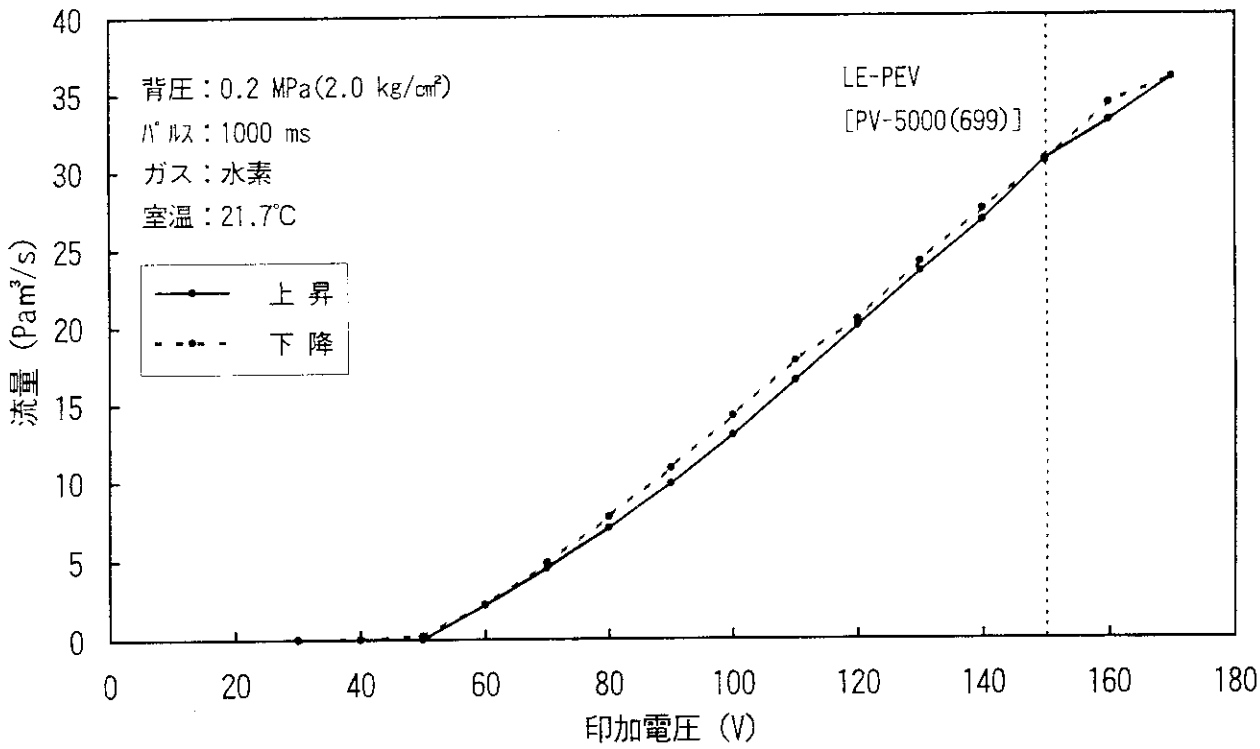


Fig 3.3 ループ流量特性(2)

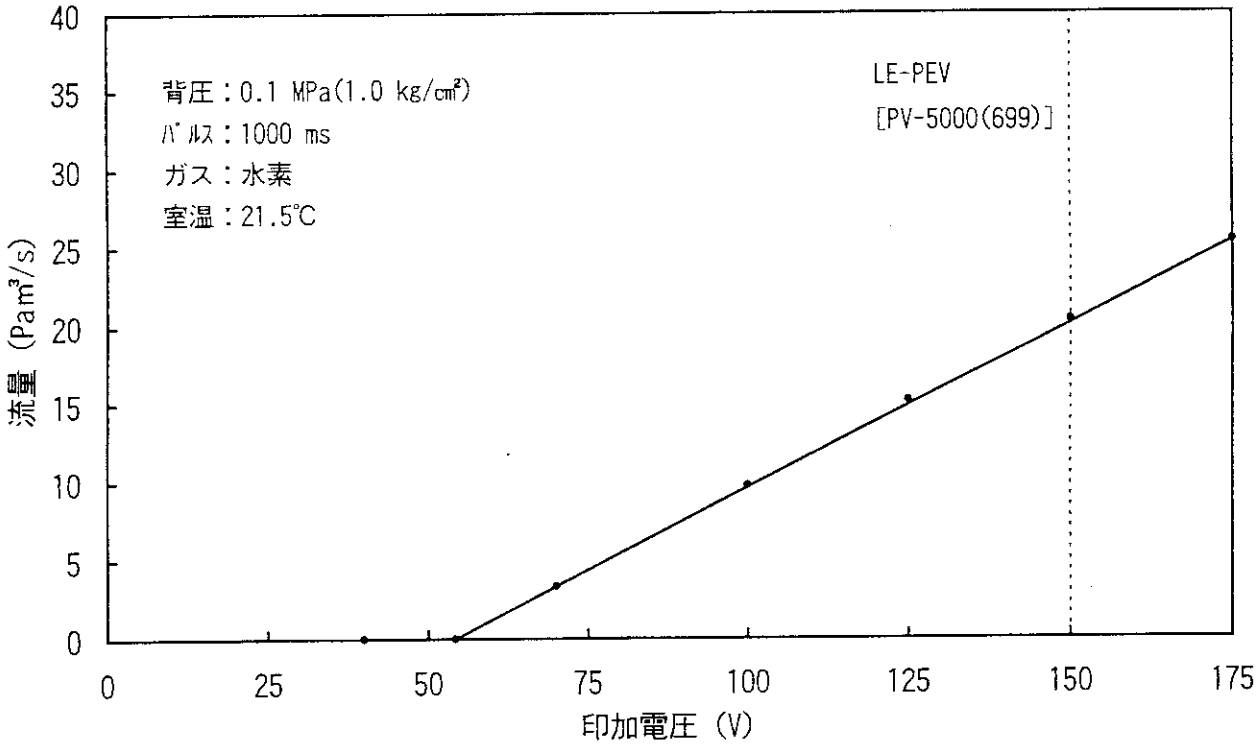


Fig 3.4　流量特性(1)

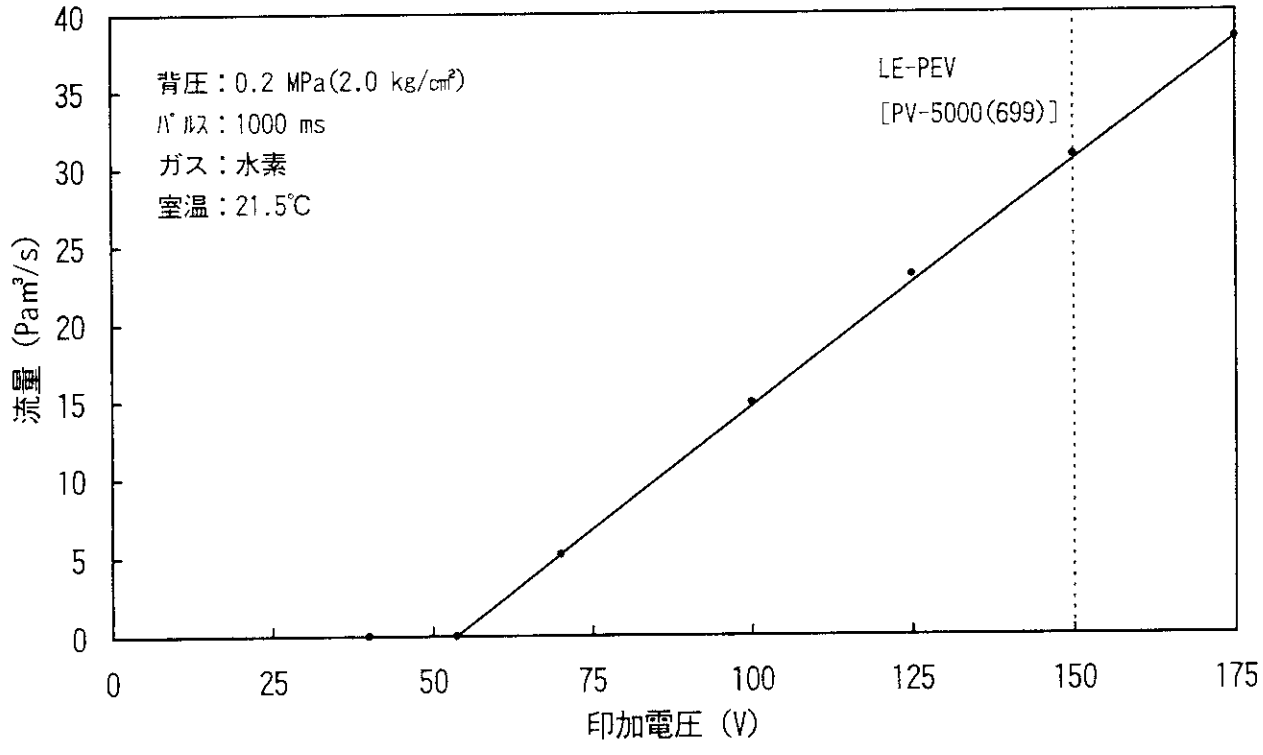


Fig 3.5　流量特性(2)

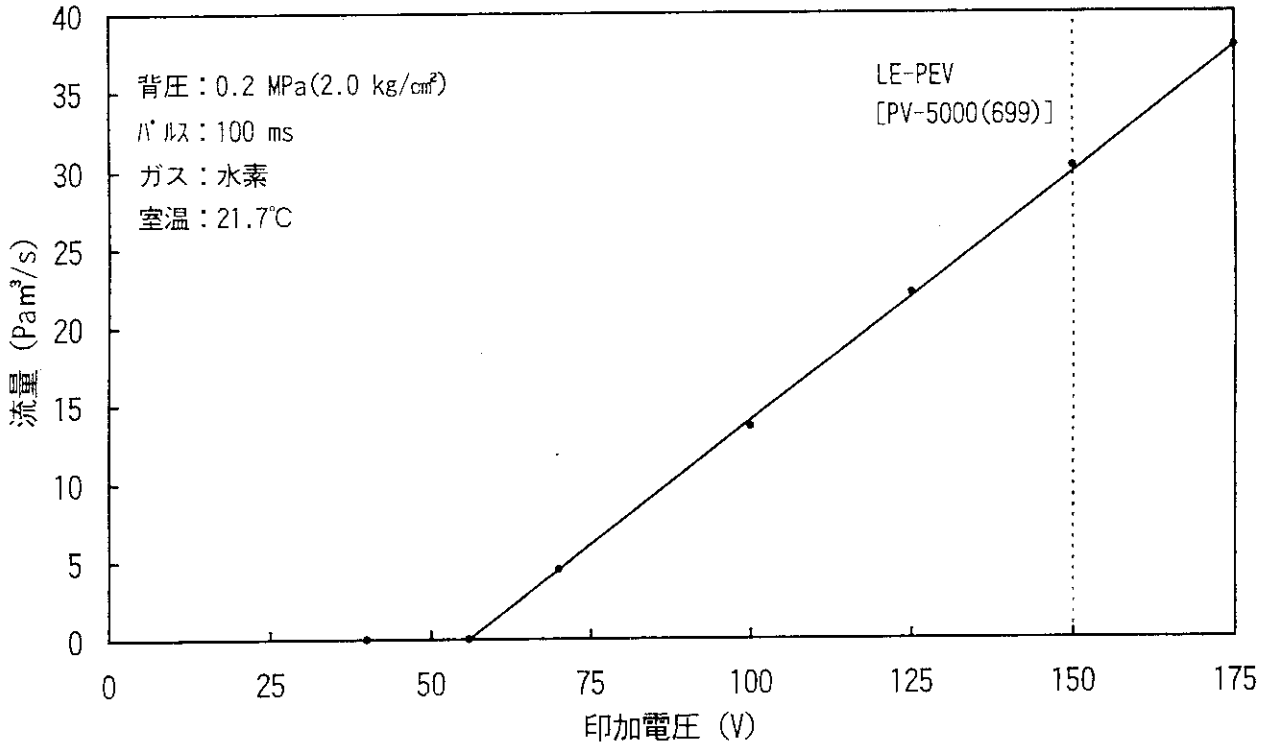

背圧：0.2 MPa(2.0 kg/cm²)
パルス：100 ms
ガス：水素
室温：21.7℃
LE-PEV
[PV-5000(699)]
流量 (Pa m³/s)
印加電圧 (V)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
0
25
50
75
100
125
150
175

Fig 3.6　流量特性(3)

4. 検討

試験結果から設計値との比較検討をする。

4.1 設計流量との比較

1) 流量

積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁の試験により得られた最大流量 30.7 Pam^3/s (H_2 0.2 MPa 150 V 印加時) を設計流量と比較する。設計では、水素ガスで、背圧 0.2 MPa時、最大流量 26.6 Pam^3/sが得られるように、弁座部に生じる変位量を65 μm(内 25 μmは初期縮み代)とした。この変位量は、積層圧電アクチュエータの変位量を 25 μm 程度として、てこの原理により、拡大変位量(2.5 倍)が得られるようにしていた。ところが、選定した積層圧電アクチュエータの変位量は公称最低変位量 28 μm(公称変位量 34 μm)と大きいため弁座部に生じる最低変位量も67.2 μm(81.6 μm)程度と大きいことと、φ1mmのオリフィス弁座を用いたことによりガス流量断面積が大きくなったことが流量増加の原因になったと考えられる。

積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁の動作開始電圧は約 55 V 程度で、それ以上の電圧で流量が得られている。動作開始電圧の値は、積層圧電アクチュエータの諸特性値を式(4)に代入して算出すると、約 14.0 μmの変位量が得られ、弁座部に 33.6 μmの隙間を与えたことになる。その値は、初期状態である設計値の 25 μm(初期縮み代)をわずかに超え、弁座部が開放された状態を意味している。

また、バイモルフ型圧電素子を用いた圧電素子弁に比べて、直線的な流量特性になっている。これは、積層圧電アクチュエータのヒステリシス(残留歪)が小さいことと、てこの原理を利用したこと及びゴムシートをシート押さえにより弁体側に固定したことから、積層圧電アクチュエータの変位がアーム(てこ)を介して、弁座面とゴムシートの中心に隙間が全周に均一に動作し、ガス流路が安定(ガス流量断面積が一定)になっていることが考えられる。

2) シール力

積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁のヘリウムリーク量は、 1.33×10^{-8} Pam^3/s (検出感度)以下であったが、動作開始電圧は約 55 V からシール力を算出すると、その時の積層圧電アクチュエータの発生力は、約 293 N(29.3 kg) となる。弁座部におけるシール力は、積層圧電アクチュエータの発生力がてこの原理により拡大され、約 122 N(12.2 kg) となって、押さえバネとバランスが保たれ、真空シールされている。

積層圧電アクチュエータの最大変位(150 V 印加時)時における弁座部のシール力は

特性から約 333 N (33.3 kg) であり、その力で押さえバネを押し上げ、必要隙間を形成して流量を得ている。

4.2 近似流量

積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁の流量特性は、既設圧電素子弁と同様に直線近似できることから、次式で算出できる。

$$Q = a(V - b)(P + c) \tag{8}$$

Q : 流量　Pam^3/s
V : 印加電圧　DC V
P : 背圧　MPa
(ゲージ圧力)
a : 流量定数
b : 電圧定数
(オフセット電圧)
c : 背圧定数
(絶対圧力 ; 0.101 MPa (1.033 kg/cm^2))

Table 4.1 に近似流量特性(1) として水素ガス、背圧 0.1 MPa、印加電圧のパルス幅を 1000 msとした時の近似流量式、計算流量値及び測定流量値を示す。Table 4.2近似流量特性(2)として水素ガス、背圧 0.2 MPa、印加電圧のパルス幅 1000 ms 時の近似流量式、計算流量値及び測定流量値を示す。Table 4.3に近似流量特性(3)として水素ガス、背圧 0.2 MPa、印加電圧のパルス幅 100 ms 時の近似流量式、計算流量値及び測定流量値を示す。どの条件においてもほぼ同等の値が得られている。この近似流量式による計算流量値と測定流量値は、約 2 %の誤差である。尚、この誤差には、背圧の変動等も含まれている。

4.3 寿命

圧電素子弁は、プラズマ実験条件により、パルス的、又は、連続的に使用される。圧電素子弁の寿命は、弁座、ゴムシート、圧電素子が大きな要因になる。主な動作不良としては、弁座、ゴムシートによるシートリーク及び圧電素子による流量増減、動作不可等がある。そのため、積層圧電アクチュエータの寿命について検討する。

1）圧電素子[4),5)]

圧電素子の基本型をFig. 4.1に示す。圧電素子には単板、積層型、管状型等の単純型圧電素子と、弾性板と組合わせたユニモルフ型、バイモルフ型、切りかき型、変位蓄積型等の複合型圧電素子に分類できる。一般に、従来の圧電素子弁等には複合型圧電素子が用いられる。Fig. 4.2に圧電素子弁に用いられる圧電素子を示す。これらの圧電素子には、ユニモルフ型、バイモルフ型、積層型、圧電アクチュエータ、積層圧電アクチュエータ等がある。圧電素子は、分極の仕方により(a)(b)のような縦の効果と横の効果の変位や(c)(d)のような縦の効果と横の効果の変位を得ることができる。ユニモルフ型やバイモルフ型圧電素子は、低電圧で変位が得られるが、発生力が小さく、エネルギー変換効率が小さい。積層型圧電素子は、低電圧で変位が得られ、発生力も大きく、エネルギー変換効率もよいが、使用環境の影響を受けることや無負荷での電圧印加により破壊する等の欠点がある。圧電アクチュエータは、積層コンデンサ構造になっているため、(e) のように素子内に伸縮する部分としない部分が存在し、繰り返し動作により破損する。積層圧電アクチュエータは、圧電素子材料にチタン酸ジルコン酸鉛 ($PbZrO_3$-$PbTiO_3$) を主成分としたものを(f) のように全面電極構造にして素子内に伸縮する部分としない部分が存在しないものを金属ケース内に窒素ガス封入して機器組み込みを容易にし、使用環境の影響を受けにくく、小型で、低電圧駆動で、発生力の大きい等の特性を持っている（積層型や圧電アクチュエータ圧電素子の利点を改良）。また、用途によっては、大型タイプもある。

以上のような点から、積層圧電アクチュエータを採用して、新たな圧電素子弁の開発を行った。

2）圧電素子の応答

圧電素子（積層圧電アクチュエータ）の駆動は、コンデンサに電荷を注入する場合に似ており、高速応答には大電流が必要となる。駆動電流は、コンデンサと同じように次式にて概算できる。

$$Q = CV$$

$$Q = It$$

$$I = \frac{CV}{t} \qquad (9)$$

Q：電気量
C：静電容量
V：駆動電圧
I：駆動電流
t：立ち上がり時間

既設圧電素子弁の仕様動作時間は 5 ms 以下であるが、既設電源より、考察すると、電源の立ち上がり時間が 200 μs（時定数：τ＝CR）であることから2 A 程度の駆動電流（150 V 印加時）が流れる。電源の立ち上がり時間は、静電容量が大きくなると遅くなる。そのため、既設電源の最大定格を超えて、積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁への電圧印加は、好ましくないと言える。しかし、その時間は、弁仕様動作時間の範囲以内である。
また、圧電素子の急激な立ち上げは、発生変位にリンギング* を起こす原因になる。リンギングが激しいと機械的破損を生じることがあるので、共振周波数の 1/3以下での使用が好ましい。

3）信頼性

圧電素子の信頼性は、不具合を生じるまでの時間が長いことが好ましい。そこで、不具合を生じる（故障）までの平均時間 （MTTF：Mean Time To Failure） について推定する。

一般に、積層型圧電素子等は、駆動電圧、周囲温度、相対湿度の基準条件に対して使用環境条件を加味して求められるが、積層圧電アクチュエータの場合は、金属ケース内に封入されていることから、相対湿度の条件がなくなり、次式にて推算できる。

$$MTTFr = MTTFs \times Av \times At \qquad (10)$$

$$= MTTFs \times (100/Vr)^2 \times 1.5^{(120-Tr)/10}$$

MTTFr	：推定するMTTF	時間
MTTFs	：基準となるMTTF	時間
Av	：駆動電圧による加速係数	
At	：周囲温度による加速係数	
Vr	：実使用駆動電圧	V
Tr	：実使用周囲温度	℃

積層圧電アクチュエータの不具合を生じるまでの基準平均時間(MTTFs)は、約20,000時間と積層型圧電素子の 360 倍もの長寿命タイプであるが、印加電圧を150 V、加熱温度（ベーキング温度）100 ℃の条件から推算すると、不具合を生じるまでの推定平均時間(MTTFr)は約19,980 時間となる。これは、通常使用温度（～60℃） を考慮すると、十分な信頼性があると言える。

---

* 急激に電圧を印加し、立ち上げ（立ち下げ）をした場合、変位量は一時的にオーバーシュートを起こして振動し、そして、収束する現象をいう。

もし、印加電圧を175 Vとした場合、MTTFr は MTTFs より3割程度短寿命となるが、ＪＴ－６０Ｕの運転時間を考慮すると信頼性は高いと言える。

4）金属ケース

積層圧電アクチュエータに使用している金属ケースは、ステンレス製のベローズ構造で、その部分の板厚は0.15 mm と薄く、駆動部形状は円錐溝タイプになっている。その中に積層圧電アクチュエータ素子を封入すると同時に窒素ガスを封入（大気圧）している。そのリーク量は、約 1.0×10^{-9} Pam^3/s 以下であり、ＪＴ－６０の真空管理基準を十分満足する。

4.4 動作速度

積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁の動作速度の仕様値は 5 ms 以下としたが、試験装置の構成や高感度圧力検出器の配置等の問題から、正確な動作速度が計測できなかった。しかし、積層圧電アクチュエータの動作速度や電源の立ち上がり速度及び高感度圧力検出器の圧力検知時間を考慮した試験時間が～5 ms以内であることから仕様を満足していると考えられる。

4.5 注入ガス

ＪＴ－６０Ｕにおける注入ガスには、重水素ガス、水素ガス、ヘリウムガス、ネオンガス、アルゴンガス等が使用されている。本設計の基準ガスとして水素ガスを用いているが、注入ガス種が変ると流量も変化する。その流量は、既設圧電素子弁と同様に次式で概算できる。

$$Q_f = \frac{Q_{H_2}}{f_M} \qquad (11)$$

$$f_M = \sqrt{\frac{M_{f_2}}{M_{H_2}}}$$

Q_f ：使用ガス流量

Q_{H_2} ：水素ガス流量

f_M ：流量比
M_{H_2} ：水素の分子量
M_{f_2} ：使用ガスの分子量

換算流量を確認するため、重水素ガスを用いた試験結果をFig. 4.3に、重水素ガスを用いた近似流量特性をTable 4.4 に示す。試験は、背圧 0.2 MPa、パルス幅 1000 msの条件で水素ガスを使用した時と同様に行った。結果から、重水素ガスにおける最大流量（150 V 印加）は、21.5 Pam^3/s で式(11)とほぼ合致することが解る。

注入ガスが同一の場合は、背圧の絶対圧力に比例することから、基準背圧を可変することにより、流量範囲が設定できる。その流量は、既設圧電素子弁と同様に次式で概算できる。

$$Q_P = Q_0 \times \frac{P_1 + P_0}{P + P_0} \tag{12}$$

Q_P ：使用背圧流量
Q_0 ：基準背圧流量
P ：基準背圧
P_1 ：使用背圧
P_0 ：絶対圧力

4.6 弁座

積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁の弁座は、設計流量値 26.6 Pam^3/sを得るために弁座内径を φ1.0 mm として、実水素ガス最大流量 30.7 Pam^3/sを得たが、今後、ＪＴ－６０Ｕに設置されている圧電素子弁が、経年劣化等により交換する必要が生じた場合の対応や流量範囲について検討する。

ＪＴ－６０Ｕでは、現在、大容量圧電素子弁６台、小容量圧電素子弁８台及びガス連続注入弁２台（内、流量制御型圧電素子弁１台）が稼働している。これらの圧電素子弁は、弁座やシールゴム及び圧電素子の経年変化によるシートリークや流量の増減変化により実験運転に影響するため交換が必要になる。今後、ＪＴ－６０Ｕの実験運転から、今回開発した積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁に置き換えられると考えられるが、微量ガス制御が行える小容量圧電素子弁の流量範囲が注目される。
そこで、積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁の弁座の交換、つまり、ガス流量断面積を変更することにより、0～5.33 Pam^3/sの流量範囲を有する弁が可能となる。以上のことから、小容量圧電素子弁の流量範囲における積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁に

ついて考察する。

式(5)に積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁と同条件で、5.33 Pam^3/s の水素ガス流量を得られるように計算すると、必要面積は0.02 mm^2となる。この値からオリフィス径を求める式(6)に代入すると、ϕ0.16 mmの弁座オリフィス径になる。弁座加工（穴開け）は、均一のものが好ましく、加工法によっては、オリフィス面や内面が不均一となり、流量に影響を与えることになる。均一なオリフィス面や内面を得るには、ドリル加工機械や特殊機械加工技術等が選択される。一般的には ϕ0.5 mmのオリフィス加工が容易と思われる。

そこで、オリフィス径 ϕ0.5 mmの弁座を積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁の匡体に組込むことにより、小容量圧電素子弁と同程度の流量範囲を有する積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁（LE-PEV-L）を提供できると考えられる。

Fig. 4.4にオリフィス径 ϕ0.5 mmの弁座に示す。Fig. 4.5に ϕ0.5 mmの弁座、水素ガス、背圧 0.2 MPa、パルス幅 1000 ms時の流量特性を示す。動作開始は、65 V付近であり、最大 9.4 Pam^3/s （150 V印加時）の水素ガス流量が得られている。この流量は、オリフィス径の流量断面積によるものと考えられ、小容量圧電素子弁の流量範囲より大きめに現れたと考えられる。この弁座を使用して小容量圧電素子弁の流量範囲を得る場合は、変位量の小さい積層圧電アクチュエータ（公称 17 μm ）に変えるか、てこの比率を変更することが有効である思われる。しかし、ＪＴ－６０Ｕにおける条件を鑑みれば、十分使用できる流量範囲と考えられる。また、Fig. 4.6に ϕ0.5 mmの弁座、重水素ガス、背圧 0.2 MPa、パルス幅 1000 ms時の流量特性を示す。動作開始は、65 V付近であり、最大 6.7 Pam^3/s （150 V印加時）の重水素ガス流量が得られている。この流量は、「4.5 注入ガス」で述べたように分子量比の平方根に比例した値である。

4.7 問題とその対策

開発（試作）した積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁は、出側フランジと入側フランジの合体部をセンター振り分けして、積層圧電アクチュエータ、アーム、弁座等を配置したために、電流導入端子（ＢＮＣコネクタ）と電源接続コネクタに干渉を生じた。また、電流導入端子を出側フランジにアース構造としたため、実機ではループ電流の形成等により積層圧電アクチュエータの不具合を生じることが懸念される。以上の問題を解決するためには、電流導入端子（ＢＮＣコネクタ）にアルミコバールを採用し、それを出側フランジと入側フランジの合体部にセンター振り分けした形で配置し、問題を解決する。Fig.4.7 に問題を解決した積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁の構造を示す。

また、圧電素子弁のようなステンレス材料を用いているものは、長時間ＪＴ－６０Ｕの環境下にさらされると放射化を生じる。そのため、故障等を生じた場合、放射線管理区域以外でのメンテナンスできない。その解決策としては、非放射化材料を使用することが考えられるが、性能や構造上の問題がある。開発した積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁では、性能に影響を与えない部品である入側フランジ部と接合パッキンにアルミニュームを採用して、放射化の低減を試みた。

Table 4.1　近似流量特性(1)

測定条件	背圧：0.1 MPa(1.0 kg/cm²) ﾊﾟﾙｽ：1000 ms		ガス：水素 室温：21.7℃
計算式	Q=a(V-b)(P+c)		a=1.046 b=54.22 c=0.101
試験弁No. LE-PEV	電　圧 (V)	測定流量 (Pa m³/s)	計算流量 (Pa m³/s)
PV-5000 [699]	40	0.00	0.00
	70	3.32	3.32
	100	9.76	9.63
	125	15.20	14.89
	150	20.40	20.14
	175	25.40	25.40

Table 4.2　近似流量特性(2)

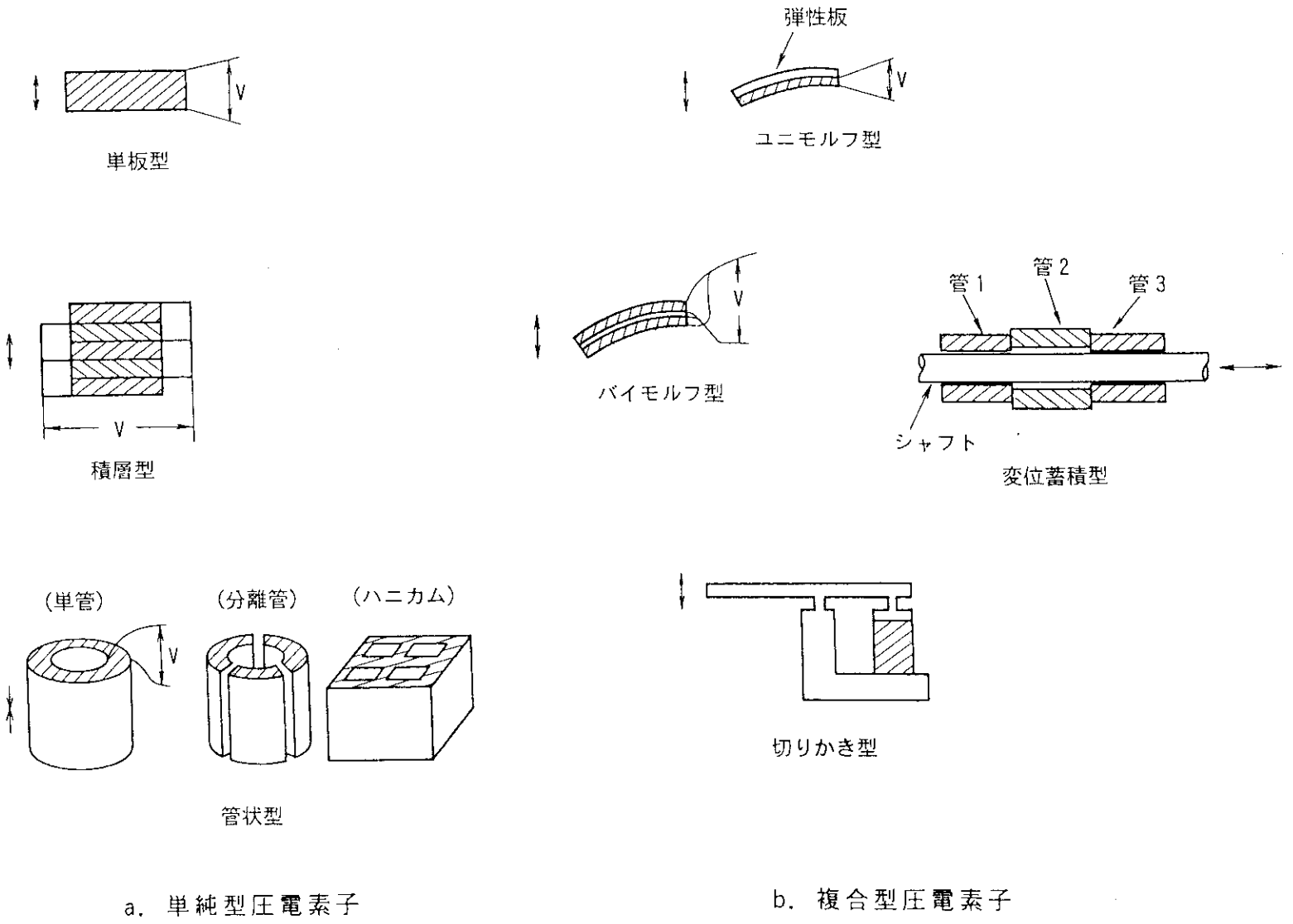
測定条件	背圧：0.2 MPa(2.0 kg/cm²) ﾊﾟﾙｽ：1000 ms		ガス：水素 室温：21.5℃
計算式	Q=a(V-b)(P+c)		a=1.049 b=53.67 c=0.101
試験弁No. LE-PEV	電　圧 (V)	測定流量 (Pa m³/s)	計算流量 (Pa m³/s)
PV-5000 [699]	40	0.00	0.00
	70	5.61	5.61
	100	14.85	14.63
	125	23.05	22.52
	150	30.72	30.41
	175	38.31	38.31

Table 4.3 近似流量特性(3)

測定条件	背圧：0.2 MPa(2.0 kg/cm²) ﾊﾟﾙｽ：100 ms		ガス：水素 室温：21.7℃
計算式	Q=a(V-b)(P+c)		a=1.054 b=55.91 c=0.101
試験弁No. LE-PEV	電　圧 (V)	測定流量 (Pa m³/s)	計算流量 (Pa m³/s)
PV-5000 [699]	40	0.01	0.00
	70	4.47	4.47
	100	13.56	13.99
	125	22.14	21.93
	150	30.26	29.87
	175	37.80	37.80

Table 4.4 近似流量特性

測定条件	背圧：0.2 MPa(2.0 kg/cm²) ﾊﾟﾙｽ：1000 ms		ガス：重水素 室温：22.8℃
計算式	Q=a(V-b)(P+c)		a=0.7965 b=55.64 c=0.101
試験弁No. LE-PEV	電　圧 (V)	測定流量 (Pa m³/s)	計算流量 (Pa m³/s)
PV-5000 [699]	40	0.00	0.00
	70	3.44	3.44
	100	10.03	10.63
	125	15.82	16.63
	150	21.53	22.62
	175	28.62	28.61



a. 単純型圧電素子　　b. 複合型圧電素子

Fig 4.1 圧電素子の基本型

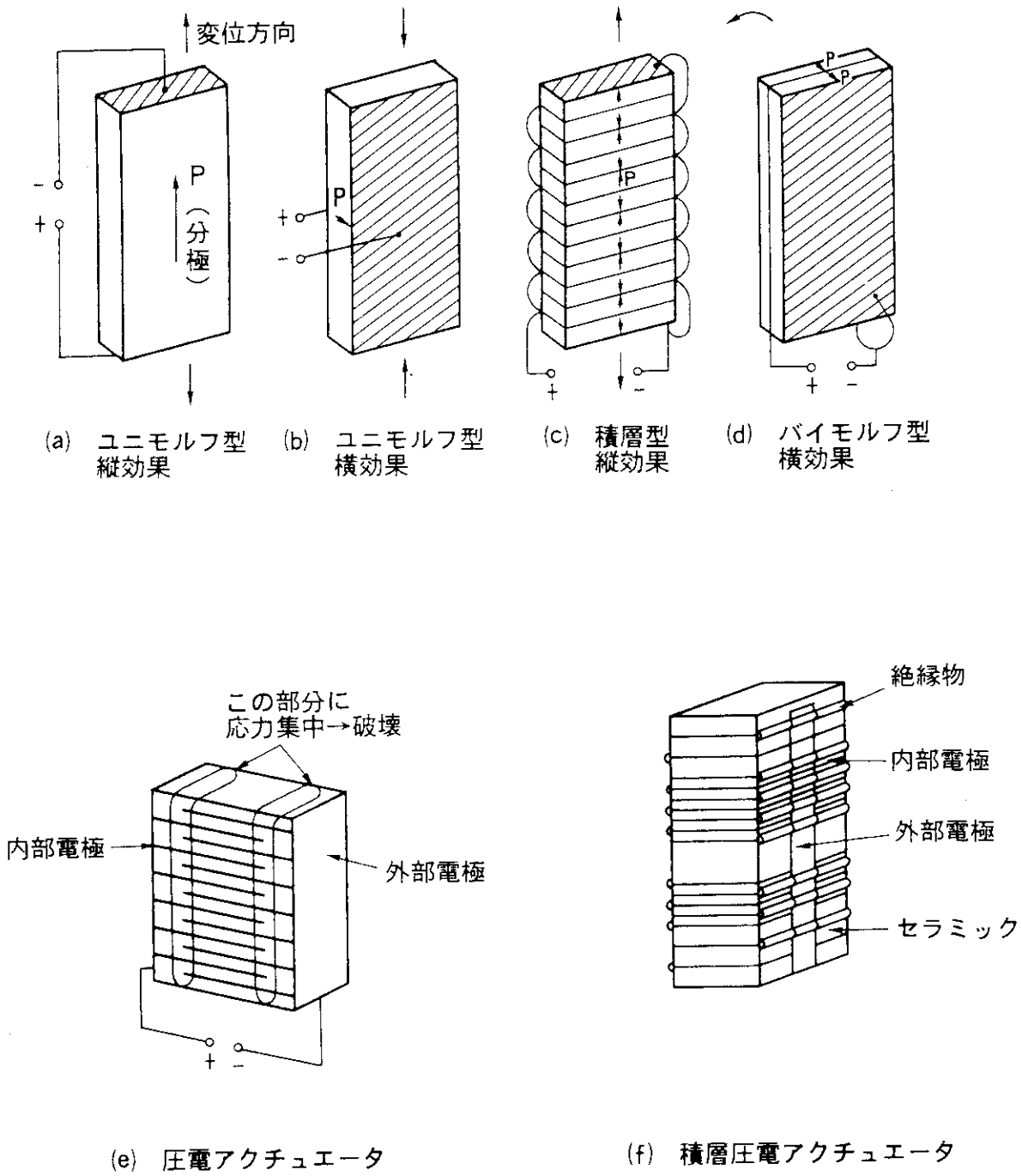


Fig 4.2 圧電素子弁に用いられる圧電素子

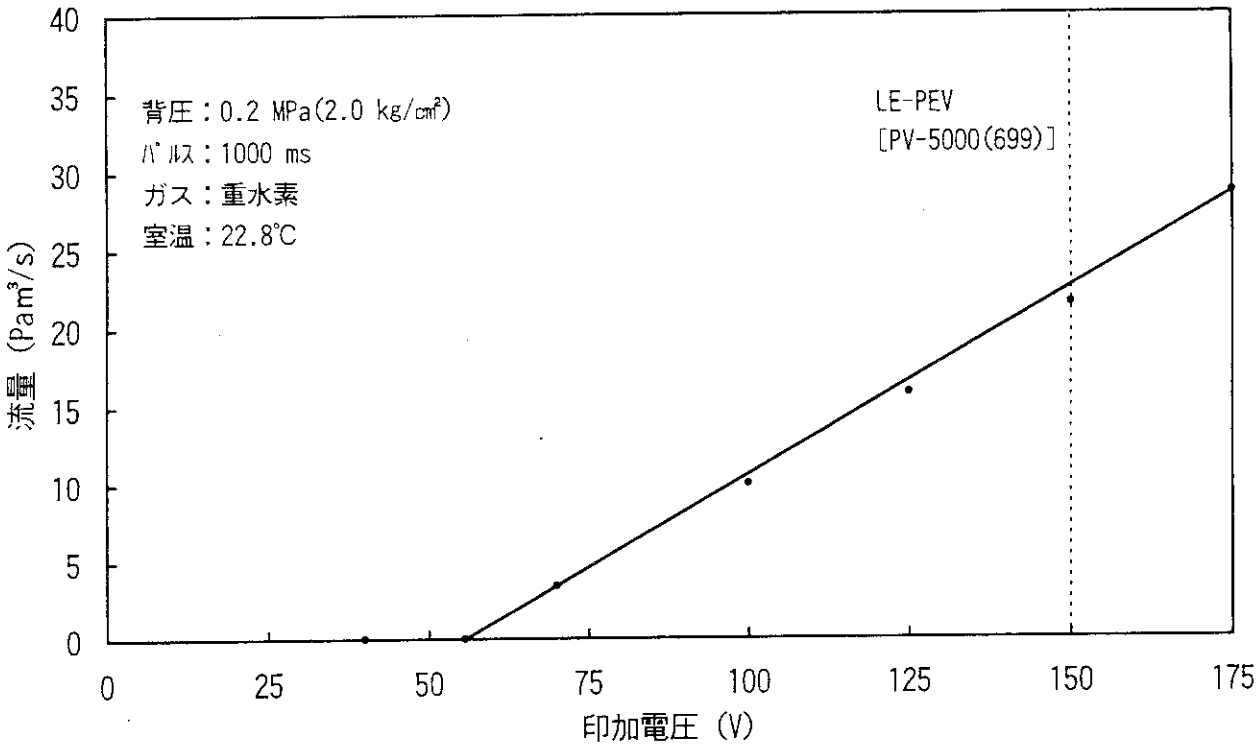


Fig 4.3　重水素の流量特性

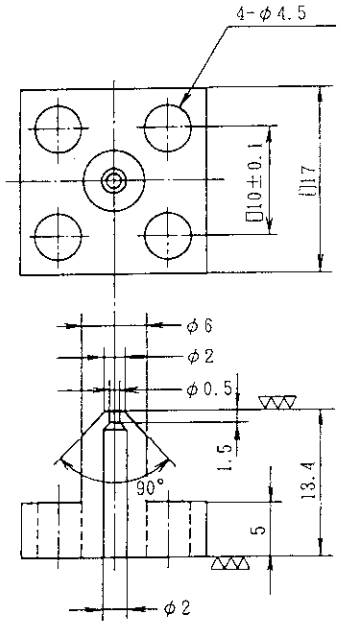


Fig 4.4　オリフィス径0.5mmの弁座

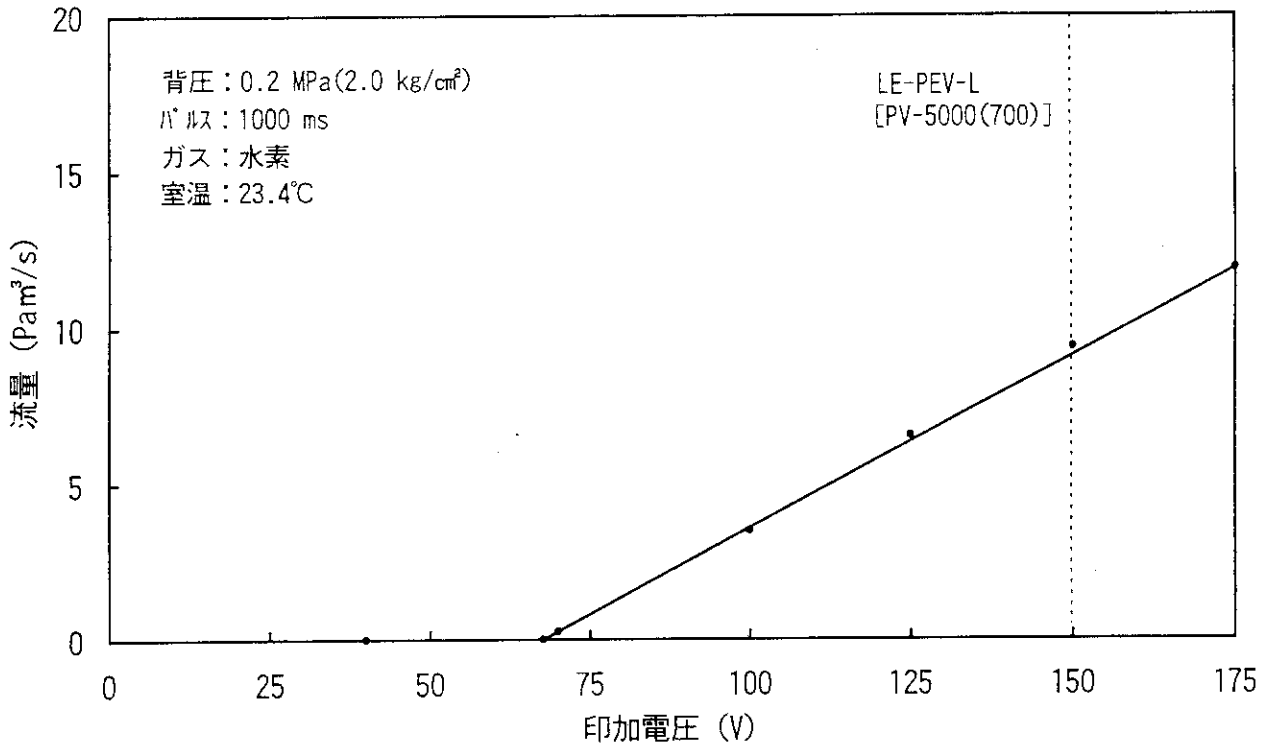


Fig 4.5　φ0.5弁座水素ガス特流量性

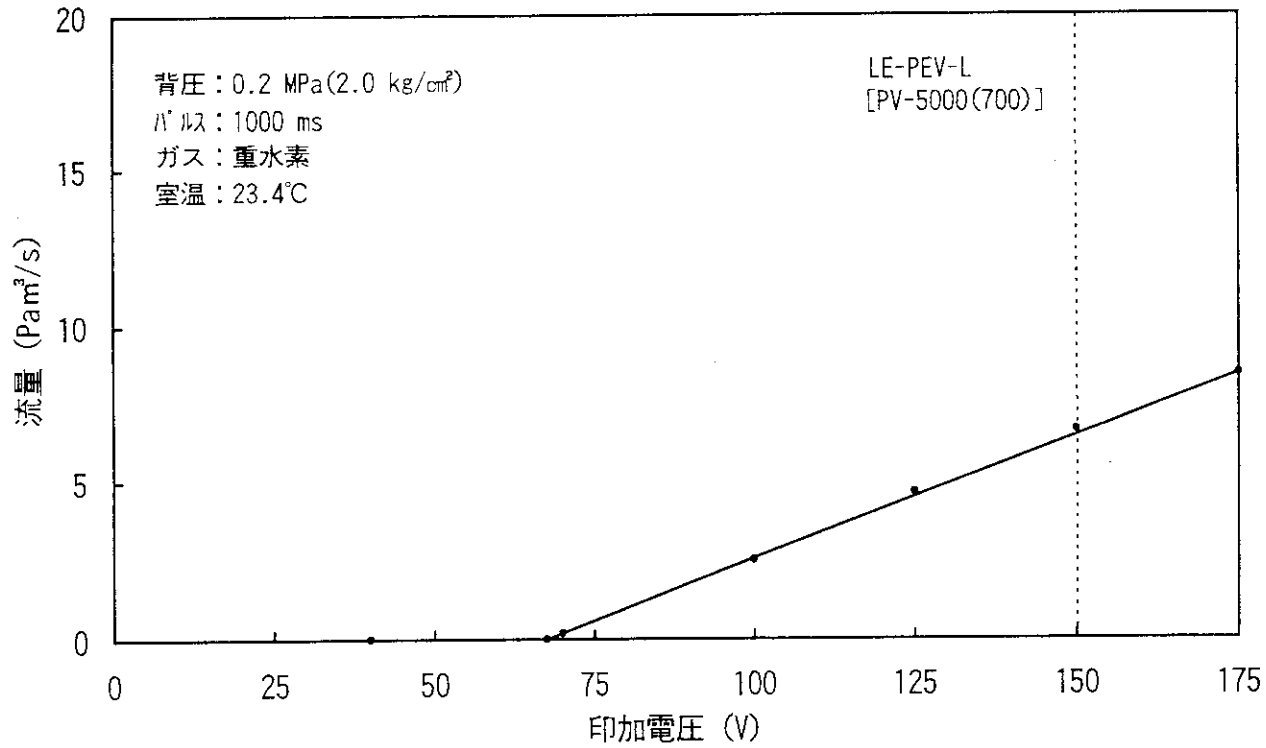
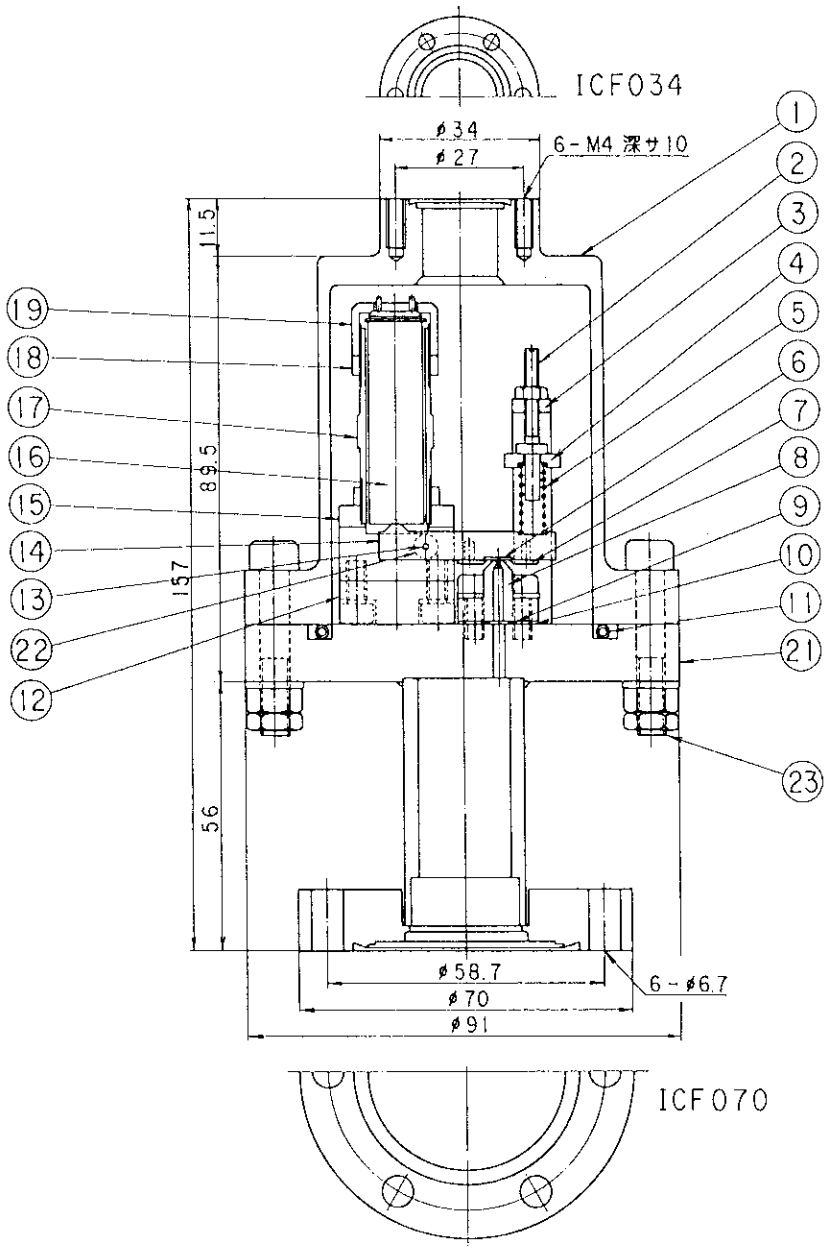
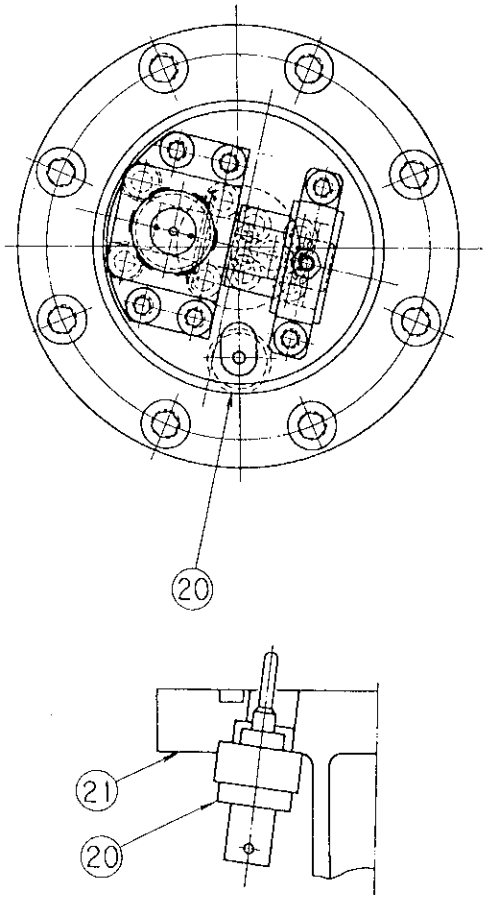


Fig 4.6　φ0.5弁座重水素ガス流量特性





品番	部品名	備考
23	コテイビス	8-M6x35L ナット ワッシャー付
22	ワッシャ	
21	デフランジ	
20	電流導入端子	BNC用
19	チョウセイナット	
18	コテイナット	
17	カバー	
16	積層圧電アクチュエータ	NEC 5x5x40
15	ブロック	
14	アーム	
13	ピン	平行ピンmbA2x25SUS
12	シジブ	
11	ガスケット	トライパックV-55
10	リテーナ	
9	Oリング	G00250AA
8	ベンザ	
7	シートオサエ	
6	シート	
5	バネ	
4	バネオサエ	
3	バネホルダ	
2	ネジ	
1	イリフランジ	

Fig 4.7　積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁

5. おわりに

開発した積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁は、従来の圧電素子弁と同様にヘリウムリーク量を満足し、従来型圧電素子弁の中間領域流量範囲を再現性よく、安定に供給が可能な結果が得られ、実機に十分対応が可能であると考えられる。その流量範囲は、0～30.7 Pam^3/s（H_2、0.2 MPa）と従来型の小容量圧電素子弁の流量範囲と大容量圧電素子弁の約半分の流量範囲をカバーするものである。従来と同じように流量範囲により、弁を区分するとすれば、LE-PEV-Mと名付けられる。その形状は、バイモルフ型圧電素子の変位量と口径の関係から縦方向に依存することにより、従来の小容量圧電素子弁とほぼ同形状のものを実現でき、取合いスペース等の問題を解決できた。それにより、流量範囲を弁座、てこの比率の変更、または、積層圧電アクチュエータ（公称変位量による選定）の変更等によりＪＴ－６０Ｕの実験運転における流量をカバーできるような弁匡体の統一化が図れたと考えられる。

今後、積層圧電アクチュエータの変位量や発生力の関係から、ヘリウムの透過を防止できるシール材や耐放射化材料を利用した圧電素子弁への適用が有効と思われる。

謝辞

本報告書をまとめるにあたって終始ご支援頂いた那珂研究所　田中　裕二　所長、核融合装置試験部　船橋　昭昌　次長に深く感謝します。本弁の設計、試験に活発なコメントを頂いたＪＴ－６０第２試験室の各位に深く感謝します。また、本積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁の試作に協力頂いた（株）エステックの関係各位並びに積層圧電アクチェータの技術指導を頂いた日本電気（株）の関係各位に感謝します。

5. おわりに

開発した積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁は、従来の圧電素子弁と同様にヘリウムリーク量を満足し、従来型圧電素子弁の中間領域流量範囲を再現性よく、安定に供給が可能な結果が得られ、実機に十分対応が可能であると考えられる。その流量範囲は、0～30.7 Pam^3/s（H_2、0.2 MPa）と従来型の小容量圧電素子弁の流量範囲と大容量圧電素子弁の約半分の流量範囲をカバーするものである。従来と同じように流量範囲により、弁を区分するとすれば、LE-PEV-Mと名付けられる。その形状は、バイモルフ型圧電素子の変位量と口径の関係から縦方向に依存することにより、従来の小容量圧電素子弁とほぼ同形状のものを実現でき、取合いスペース等の問題を解決できた。それにより、流量範囲を弁座、てこの比率の変更、または、積層圧電アクチュエータ（公称変位量による選定）の変更等によりＪＴ－６０Ｕの実験運転における流量をカバーできるような弁匡体の統一化が図れたと考えられる。

今後、積層圧電アクチュエータの変位量や発生力の関係から、ヘリウムの透過を防止できるシール材や耐放射化材料を利用した圧電素子弁への適用が有効と思われる。

謝辞

本報告書をまとめるにあたって終始ご支援頂いた那珂研究所　田中　裕二　所長、核融合装置試験部　船橋　昭昌　次長に深く感謝します。本弁の設計、試験に活発なコメントを頂いたＪＴ－６０第２試験室の各位に深く感謝します。また、本積層圧電アクチュエータ型圧電素子弁の試作に協力頂いた（株）エステックの関係各位並びに積層圧電アクチェータの技術指導を頂いた日本電気（株）の関係各位に感謝します。

参考文献

1） 川崎　幸三　他；ＪＴ－６０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） 岡崎　清；電子セラミックスへの招待　［森北出版(株)］（1986）

5） 内野　研二；圧電／電歪アクチュエータ　［森北出版(株)］（1986）
基礎から応用まで

6） 古屋　善正　他；流体工学　［(株)朝倉書店］（1982）

7） 平塚　一　他；プラズマ・核融合学会　［第11回秋季講演会］（1994）