

JAERI - M
88-009

積層型圧電素子弁の開発

1988年2月

平塚 一・川崎 幸三・三代 康彦・黒田 猛
太田 和也・清水 正亜・浅原 政治*・小西 一正*

JAERI-M 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、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 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。

JAERI-M reports are 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, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 山田軽印刷所

積層型圧電素子弁の開発

日本原子力研究所那珂研究所 JT-60 試験部

平塚 一・川崎 幸三・三代 康彦・黒田 猛
太田 和也・清水 正亜・浅原 政治^{*}・小西 一正^{*}

(1988年1月11日受理)

積層型圧電素子を用いて、リフトタイプと、てこタイプの JT-60 用ガス注入弁 (LIL-PEV, LEL-PEV) の開発を行った。

開発したリフトタイプ積層型圧電素子弁と、てこタイプの積層型圧電素子弁の特性は、次のように要約できる。

- 1) シートリーク量, 動作速度は, 設計仕様 ($< 1.0 \times 10^{-8} \text{ Pam}^3/\text{s}$, 5 ms) 内である。
- 2) リフトタイプ積層型圧電素子弁の流量は, 0.15 ~ 5.65 Pam^3/s (背圧 0.2 MPa, H_2), てこタイプ積層型圧電素子弁の流量は, 0.02 ~ 5.87 Pam^3/s (背圧 0.2 MPa, H_2) である。
- 3) 積層型圧電素子弁は, JT-60 の動作環境下で十分使用可能である。

Development of Laminated Piezoelectric Gas Injection
Valve for JT-60

Hajime HIRATSUKA, Kozo KAWASAKI, Yasuhiko MIYO
Takeshi KURODA, Kazuya OHTA, Masatsugu SHIMIZU
Masaji ASAHARA* and Kazumasa KONISHI*

Department of JT-60 Facility
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 11, 1988)

Gas injection valves of "lift" and "lever" types for JT-60 have been developed with laminated piezoelectric elements. The valves of the two types are remarked as follows:

- (1) The respective response time and helium leakage rate satisfy the designed specifications,
- (2) The throughput rates of "lift" and "lever" types are $0.15 \sim 5.65 \text{ Pam}^3/\text{s}$ and $0.02 \sim 5.87 \text{ Pam}^3/\text{s}$ respectively,
- (3) Both types of the valves have been proved to be able to put into actual use in the experimental atmosphere.

Keywords: Laminated Piezoelectric Element, Gas Injection System,
Piezoelectric Valve, Plasma Control

* Sumitomo Heavy Ind., Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. 仕様・設計	1
2.1 仕様	1
2.2 設計	2
2.3 構造	3
3. 特性試験及び結果	13
3.1 リフトタイプ積層型圧電素子弁の特性試験	13
3.2 てこタイプ積層型圧電素子弁の特性試験	14
4. 検 討	21
4.1 設計流量との比較	21
4.2 近似流量	21
4.3 部品の製作	22
5. おわりに	25
謝 辞	26
参考文献	26

Contents

1. Introduction	1
2. Specification and design	1
2.1 Specification	1
2.2 Design	2
2.3 Configuration	3
3. Performance test and result	13
3.1 Performance test of LIL-PEV	13
3.2 Performance test of LEL-PEV	14
4. Discussion	21
4.1 Comparison between design and measured gas injection rate	21
4.2 Approximate formula for gas injection rate	21
4.3 Make of component	22
5. Conclusions	25
Acknowledgement	26
References	26

1. はじめに

臨界プラズマ試験装置（JT-60）では、ガス注入弁に圧電効果を応用したバイモルフ型の圧電素子を用いた圧電素子弁（Piezoelectric valve；PEV）が使用されている。

バイモルフ型圧電素子弁は、昭和56年度から開発を進め、 $0.053 \sim 53.3 \text{ Pam}^3/\text{s}$ の範囲のガス注入量が得られる圧電素子弁を開発できた。この圧電素子弁は、すでに実機に取付けられ、正常に動作している。しかし、この圧電素子弁は、従来の圧電素子弁と同様にバイモルフ型圧電素子単体、ゴムシートの経年劣化等によりシートリーク、ガス注入量の増減等の欠点を有する。そのため、定期的（～3ヶ月毎）に圧電素子弁の流量校正試験を行う必要がある。

JT-60 本体に取付けた状態での圧電素子弁流量校正試験は、多大な時間を要する。

いっぽう、JT-60のプラズマ実験が進むに従って、圧電素子弁のシートリーク発生の防止、ガス注入量精度の向上及び定期流量校正試験の時間短縮等が要求されてきた。そのため、面圧を高くし、シール部の圧電素子を押し上げる発生力の大きい積層型（ラミネートタイプ）圧電素子を用いたリフトタイプ積層型圧電素子弁と、てこタイプ積層型圧電素子弁の2機種の圧電素子弁を試作して満足できる結果が得られた。

2. 仕様・設計

2.1 仕様

すでに、開発されたバイモルフ型圧電素子弁のガス注入量は、 $0.053 \sim 53.3 \text{ Pam}^3/\text{s}$ と広範囲であるため、3種の圧電素子弁にて分担されている。3種の圧電素子弁は、微小容量圧電素子弁（PEV-LL； $0.053 \sim 0.53 \text{ Pam}^3/\text{s}$ ）、小容量圧電素子弁（PEV-L； $0.53 \sim 5.33 \text{ Pam}^3/\text{s}$ ）、大容量圧電素子弁（PEV-H； $5.33 \sim 53.3 \text{ Pam}^3/\text{s}$ ）である。

JT-60の実験には、主にPEV-Lが使用されていることから、積層型圧電素子弁のガス注入量をPEV-Lの範囲（ $0.53 \sim 5.33 \text{ Pam}^3/\text{s}$ ）を目標として設計、製作をした。

Table 2.1に積層型圧電素子の仕様を示す。積層型圧電素子とバイモルフ型圧電素子との相違は、(1)最大電圧印加時の変位量は、約1/2であること。(2)発生力が約90倍であること。(3)角柱状をしていること。(4)最大印加電圧がDC 150Vであること。等が上げられる。また、積層型圧電素子の外装は、エポキシ系樹脂により極性部を絶縁をしている。Fig. 2.1に積層型圧電素子の外形を、Fig. 2.2に積層型圧電素子の変位量特性を示す。積層型圧電素子の変位量は、次式より算出できる。

$$\delta = 1 d_{33} V$$

1. はじめに

臨界プラズマ試験装置 (JT-60) では、ガス注入弁に圧電効果を応用したバイモルフ型の圧電素子を用いた圧電素子弁 (Piezoelectric valve ; PEV) が使用されている。

バイモルフ型圧電素子弁は、昭和 56 年度から開発を進め、 $0.053 \sim 53.3 \text{ Pam}^3/\text{s}$ の範囲のガス注入量が得られる圧電素子弁を開発できた。この圧電素子弁は、すでに実機に取付けられ、正常に動作している。しかし、この圧電素子弁は、従来の圧電素子弁と同様にバイモルフ型圧電素子単体、ゴムシートの経年劣化等によりシートリーク、ガス注入量の増減等の欠点を有する。そのため、定期的 (~ 3 ヶ月毎) に圧電素子弁の流量校正試験を行う必要がある。

JT-60 本体に取付けた状態での圧電素子弁流量校正試験は、多大な時間を要する。

いっぽう、JT-60 のプラズマ実験が進むに従って、圧電素子弁のシートリーク発生の防止、ガス注入量精度の向上及び定期流量校正試験の時間短縮等が要求されてきた。そのため、面圧を高くし、シール部の圧電素子を押し上げる発生力の大きい積層型 (ラミネートタイプ) 圧電素子を用いたリフトタイプ積層型圧電素子弁と、てこタイプ積層型圧電素子弁の 2 機種の圧電素子弁を試作して満足できる結果が得られた。

2. 仕様・設計

2.1 仕様

すでに、開発されたバイモルフ型圧電素子弁のガス注入量は、 $0.053 \sim 53.3 \text{ Pam}^3/\text{s}$ と広範囲であるため、3 種の圧電素子弁にて分担されている。3 種の圧電素子弁は、微小容量圧電素子弁 (PEV-LL ; $0.053 \sim 0.53 \text{ Pam}^3/\text{s}$)、小容量圧電素子弁 (PEV-L ; $0.53 \sim 5.33 \text{ Pam}^3/\text{s}$)、大容量圧電素子弁 (PEV-H ; $5.33 \sim 53.3 \text{ Pam}^3/\text{s}$) である。

JT-60 の実験には、主に PEV-L が使用されていることから、積層型圧電素子弁のガス注入量を PEV-L の範囲 ($0.53 \sim 5.33 \text{ Pam}^3/\text{s}$) を目標として設計、製作をした。

Table 2.1 に積層型圧電素子の仕様を示す。積層型圧電素子とバイモルフ型圧電素子との相違は、(1)最大電圧印加時の変位量は、約 $1/2$ であること。(2)発生力が約 90 倍であること。(3)角柱状をしていること。(4)最大印加電圧が DC 150 V であること。等が上げられる。また、積層型圧電素子の外装は、エポキシ系樹脂により極性部を絶縁をしている。Fig. 2.1 に積層型圧電素子の外形を、Fig. 2.2 に積層型圧電素子の変位量特性を示す。積層型圧電素子の変位量は、次式より算出できる。

$$\delta = 1 d_{33} V$$

δ	変位量	m
d_{33}	圧電歪定数	m / v
V	印加電圧	v DC
l	素子の長さ	m

Fig. 2.3 に最大電圧を印加した場合の変位量-発生力特性を示す。積層型圧電素子の発生力は、次式より算出できる。

$$F = \frac{S}{t} d_{33} V Y_{33}^E$$

F	発生力	kg
d_{33}	圧電歪定数	m / v
V	印加電圧	v DC
Y_{33}^E	ヤング率	N / m ²
S	面積	m ²
t	厚み	m

積層型圧電素子弁の主な仕様を Table 2.2 に示す。バイモルフ型圧電素子弁の最大印加電圧は DC 175 V であったが、積層型圧電素子弁の最大印加電圧は、圧電素子の特性上の問題から DC 150 V である。それ以外の仕様は、PEV-L と同仕様である。

2.2 設 計

(1) 注入量

積層型圧電素子弁の注入量 Q は、次式より算出できる^{1) 2)}。

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

$$\text{ここで, } A = \pi \left(\frac{d_1 + d_2}{2} \right) (\delta - \delta_0)$$

Q	注入量	Pam ³ / s
C	圧損係数	0.6
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	Cp / Cv
R	ガス定数	Pam ³ / Kmol

d_1	ノズル内径	m
d_2	ノズル外径	m
δ	変位置	m
δ_0	押さえ代	m

(2) 変位置

積層型圧電素子の変位置 δ は、次式より算出できる。

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

δ	変位置	m
d_{33}	圧電歪定数	m / v
l	素子の全長（高さ方向）	m
n	素子の枚数	枚
t	素子の厚さ	m
V	印加電圧	v DC

積層型圧電素子弁の設計最大注入量（5.33 Pam³ / s）は、背圧 0.2 MPa（ゲージ圧約 2.0 kgf / cm² G）で、最大電圧を圧電素子に印加した時に得られるように基本設計諸量を定めた。Table 2.3 に設計諸量を示す。

2.3 構造

仕様流量を得るには、弁座と弁体間に～30 μ mの変位置が必要である。この変位置を確保するため、(1) 16 μ mの変位置を有する積層型圧電素子を2段に積み重ねた構造の『リフトタイプ積層型圧電素子弁（Laminate type Piezoelectric gas injection Valve by Lift ; LIL-PEV）』、(2) 16 μ mの変位置を有する1個の積層型圧電素子を用いてこの原理を利用して2倍の変位置が得られる構造にした『てこタイプ積層型圧電素子弁（Laminate type Piezoelectric gas injection Valve by Lever ; LEL-PEV）』の2種を試作した。

弁座（ノズル）形状は、どちらのタイプも同じとし、さらに既設PEVとの互換性を持たせた。Fig. 2.4 に弁座外形を示す。

既設PEVと構造について比較をすると、長て方向に長い角柱状（20 mm）の積層型圧電素子を用いた分縦方向は大きく、積層型圧電素子自身が電気絶縁されていることからセラミックス絶縁板が不要になるなどの利点がある。

2.3.1 リフトタイプ積層型圧電素子弁

リフトタイプ積層型圧電素子弁の構造図をFig. 2.5 に示す。LIL-PEVは、積層型圧電素子に電圧が印加されると圧電素子が伸びる方向に変位（上方向）を生じるのでブラケットを介して弁体に変位が伝わり、その結果、弁座と弁体間にすきまができてガスが流れる構造になっている。

スプリングは、プリセット荷重を積層型圧電素子に加え、シートリークの防止を確保する。シール材には、ニトリルゴム（NBR）を用いている。Photo. 2.1にLIL-PEVの内面及び外観写真を示す。

2.3.2 てこタイプ積層型圧電素子弁

てこタイプ積層型圧電素子弁の構造をFig 2.6に示す。LEL-PEVは、積層型圧電素子に電圧が印加されると、圧電素子は伸びる方向に変位（下方向）を生じるので連結アームに変位が伝わり（A）を支点として弁体と弁座間にすきまができる。その結果、ガスが流れる構造になっている。積層型圧電素子とピン（A）までの距離とピン（A）から弁体の中心までの距離との比は1：2になっており、弁座と弁体間のすきまを積層型圧電素子変位の2倍になるようになっている。オフセット荷重は、スプリングによって加え、シール材は、NBRを使用している。Photo. 2.2にLEL-PEVの内面及び外観写真を示す。

Table 2.1 積層型圧電素子の特性

特性項目	
素子形状 (mm)	5 × 5 × 20
最大変位量 (μm)	$16.5 \pm \begin{matrix} 4.0 \\ 2.0 \end{matrix}$ * 1
共振周波数 (KHz)	100
静電容量 (μF)	6.0 ± 20%
最大発生応力 (kg)	85.0 * 1
最大印加電圧 (DC V)	150
圧電歪定数 d_{33} (m/v)	635×10^{-12}
積層数 (枚)	124
セラミック厚 (μm)	108
ヤング率 Y_{33}^E (N/m)	3.855×10^9

* 1 最大電圧印加時

Table 2.2 積層型圧電素子弁の仕様

項 目	仕 様
ガス注入量 (Pam^3/s)	0.53 ~ 5.33 * 1
使用電圧 (DC V)	~ 150
シートリーク量 (Pam^3/s)	$< 1.33 \times 10^{-8}$ * 2
背 圧 (MPa)	0.05 ~ 0.4 * 3
使用温度 ($^{\circ}\text{C}$)	10 ~ 60
動作速度 (msce)	< 5.0
素子型式	積層型
電 源	既設 ~ 175 V
寸 法	既設スペース

* 1 背圧 0.2 MPa (約 2.0 kgf/cm^2 G) 時の値

* 2 約 1.0×10^{-7} Torr/s 以下

* 3 約 0.5 ~ 4.0 kgf/cm^2 G

Table 2.3 基本諸量

圧電素子の変位量 (弁座と弁体間)	30 μm
最大印加電圧	150 V DC
背 圧	0.2 MPa
ノズル内径	0.4 mm
流体ガス	H_2 , N_2 , He 等

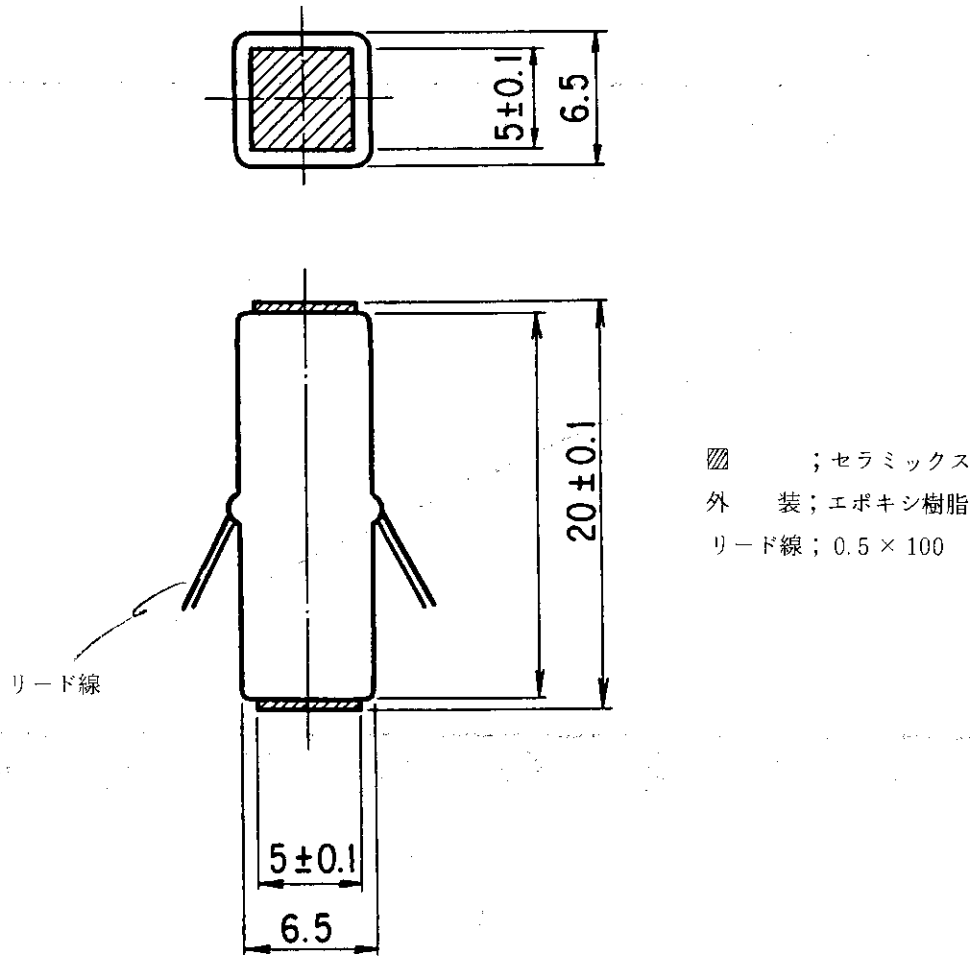


Fig. 2.1 積層型圧電素子の外形

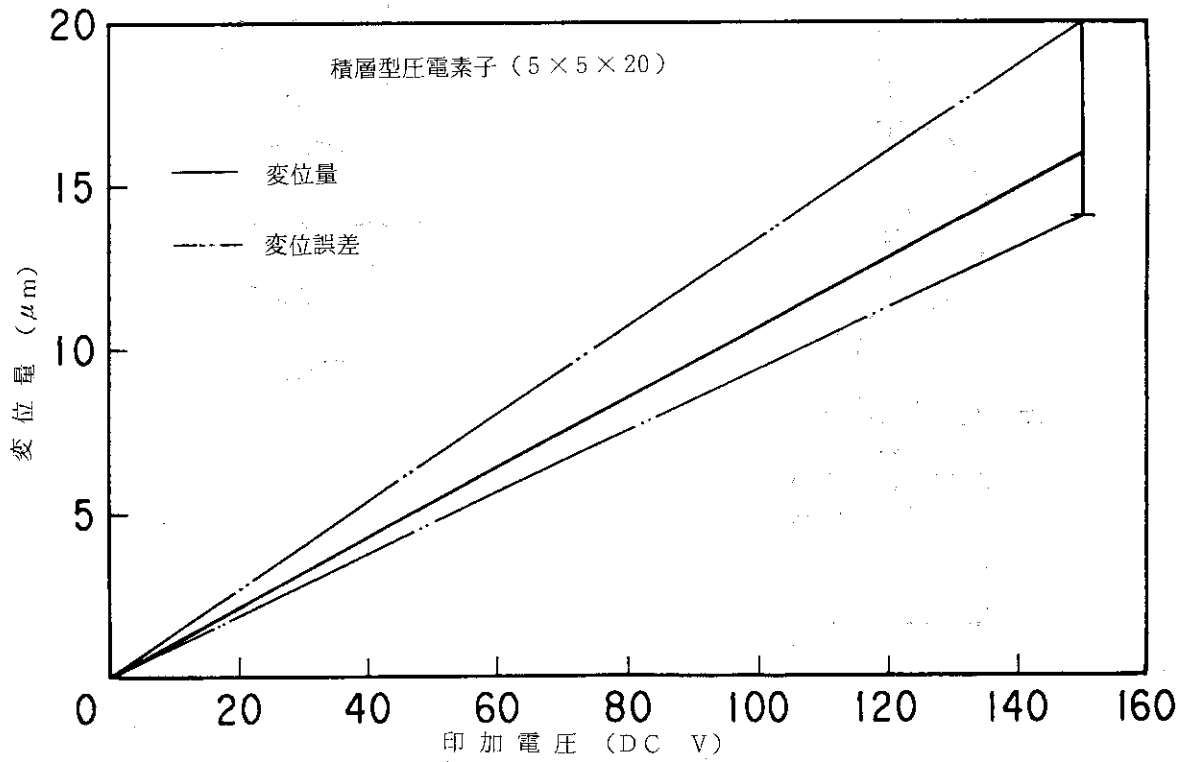


Fig. 2.2 変位量特性

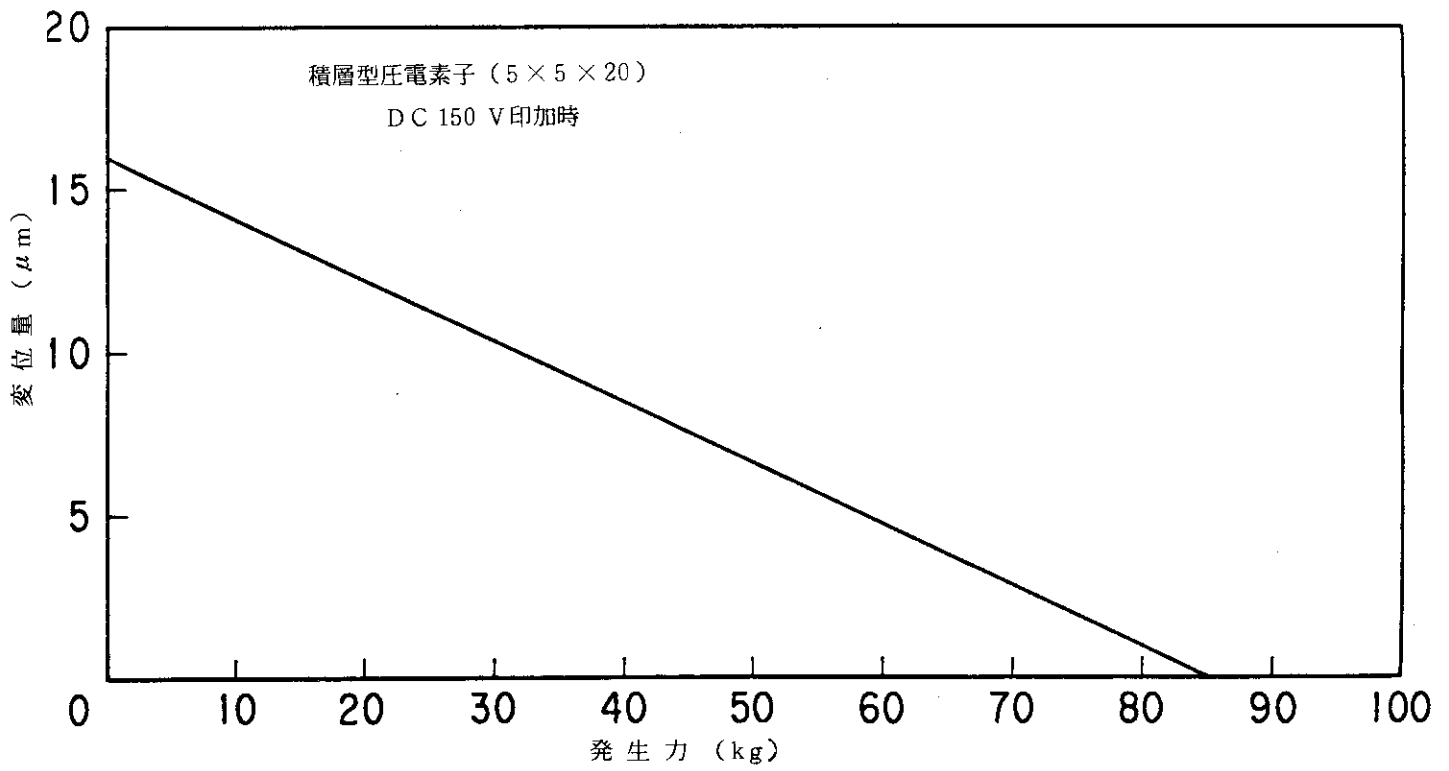


Fig. 2.3 変位量-発生力特性

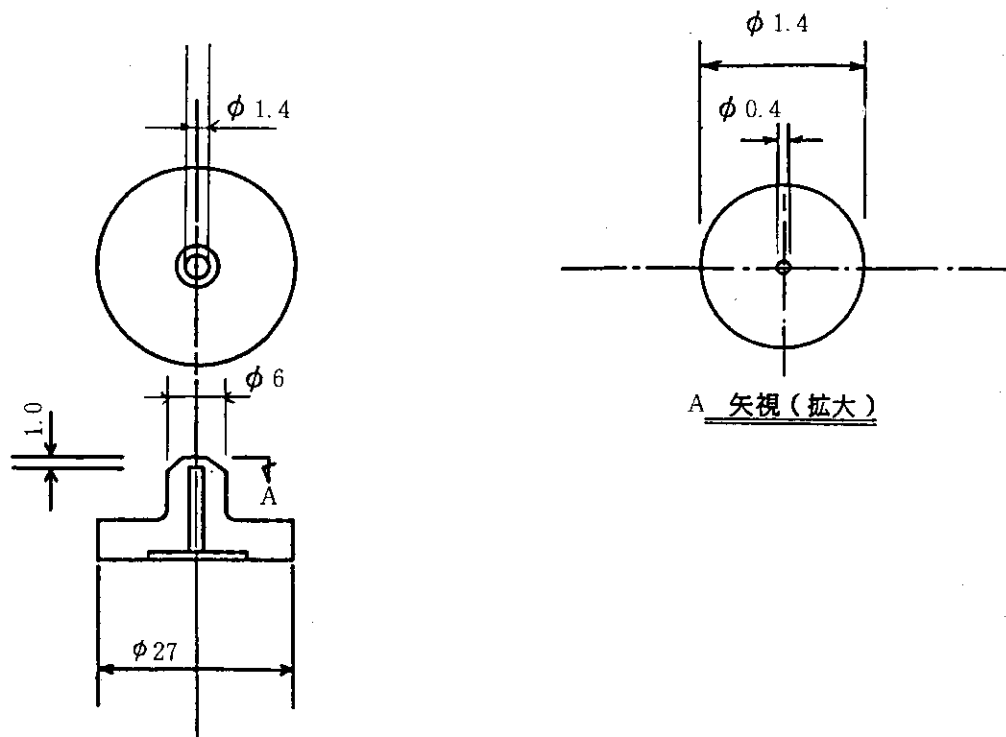


Fig. 2.4 弁座形状

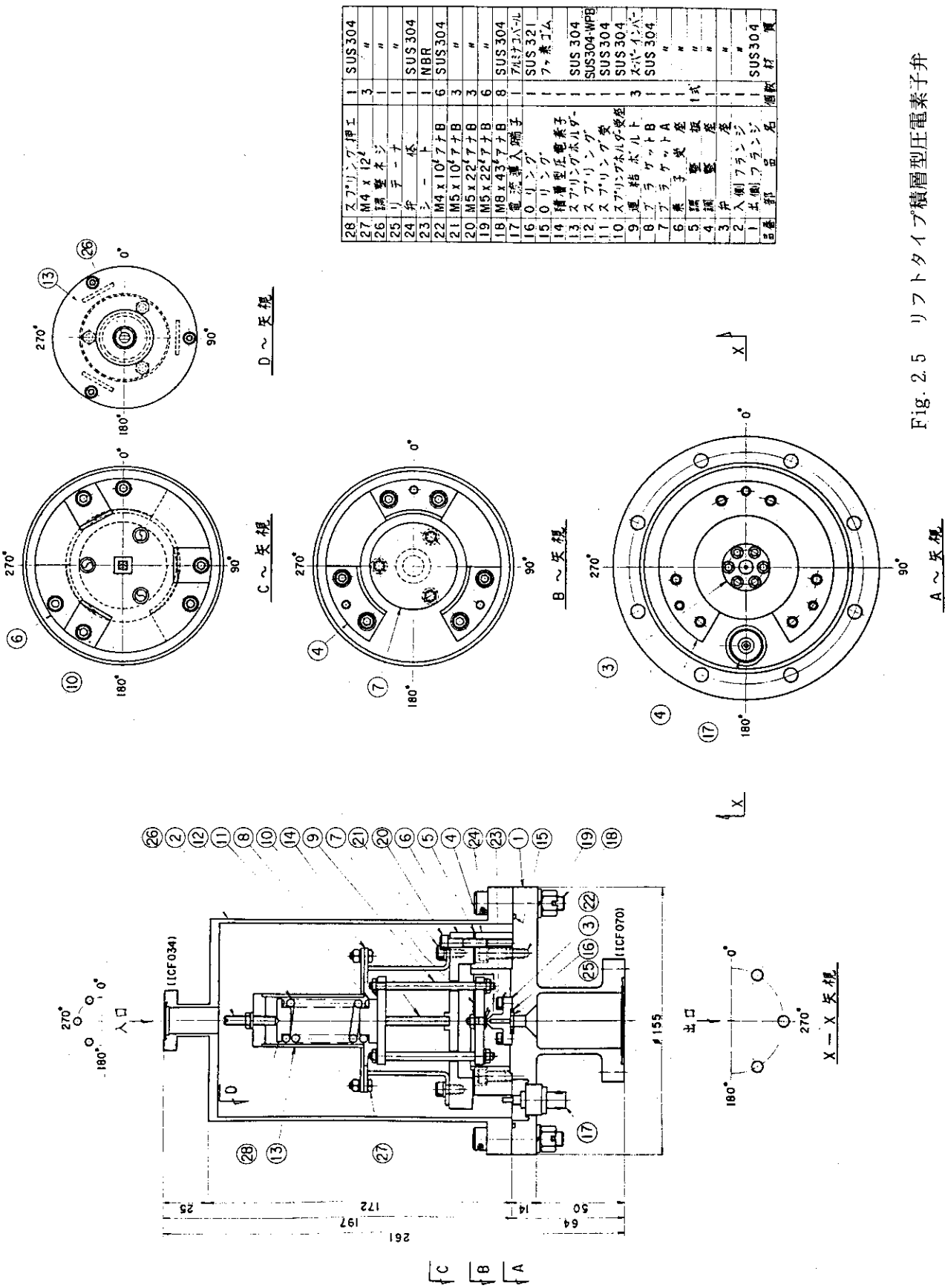


Fig. 2.5 リフトタイプ横層型圧電素子弁

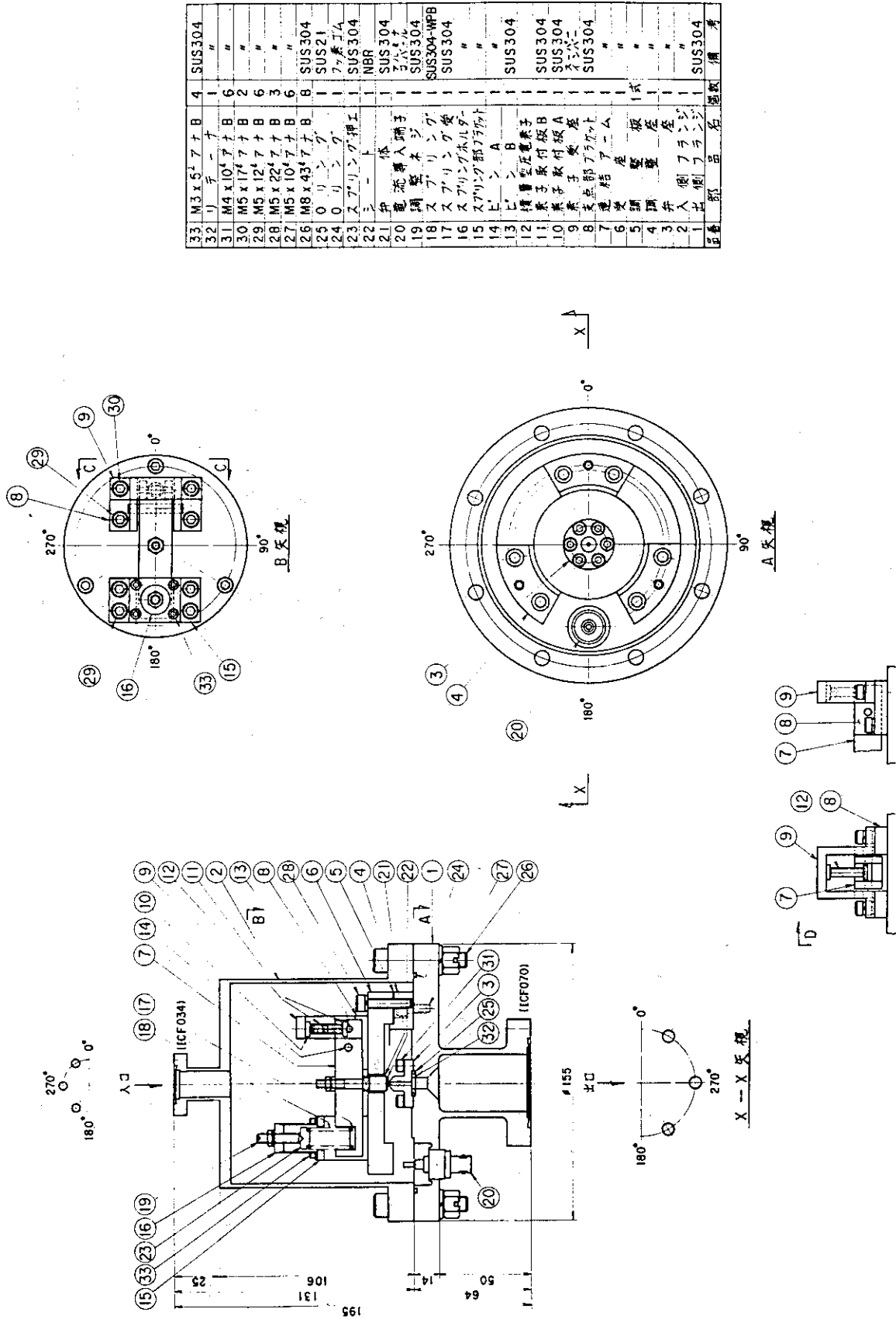


Fig. 2.6 てこタイプ積層型圧電素子弁

D 矢視

C-C 矢視

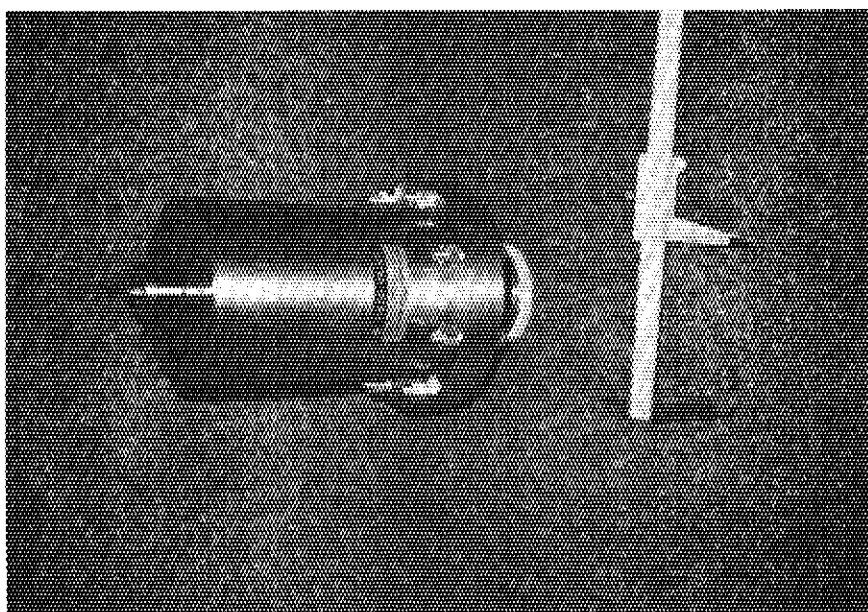
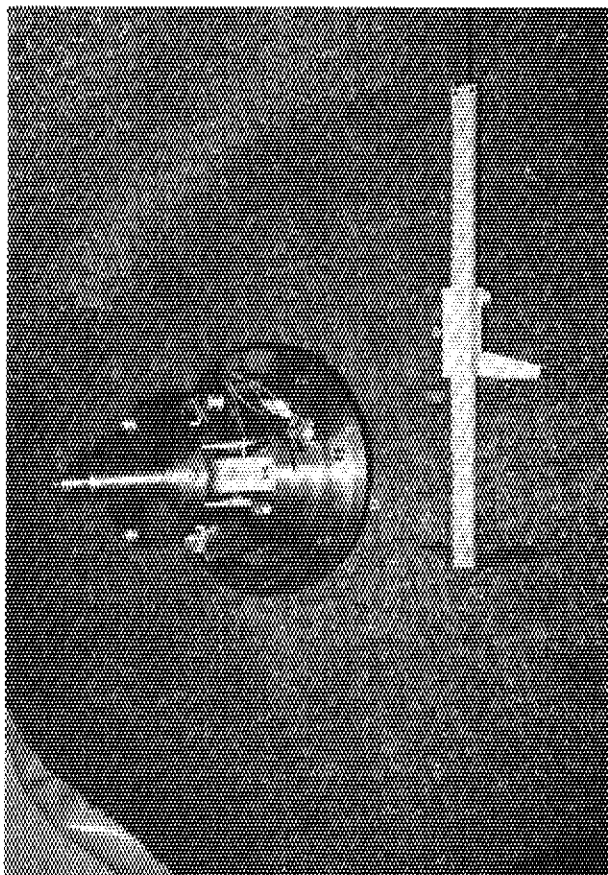


Photo. 2.1 LIL-PEV

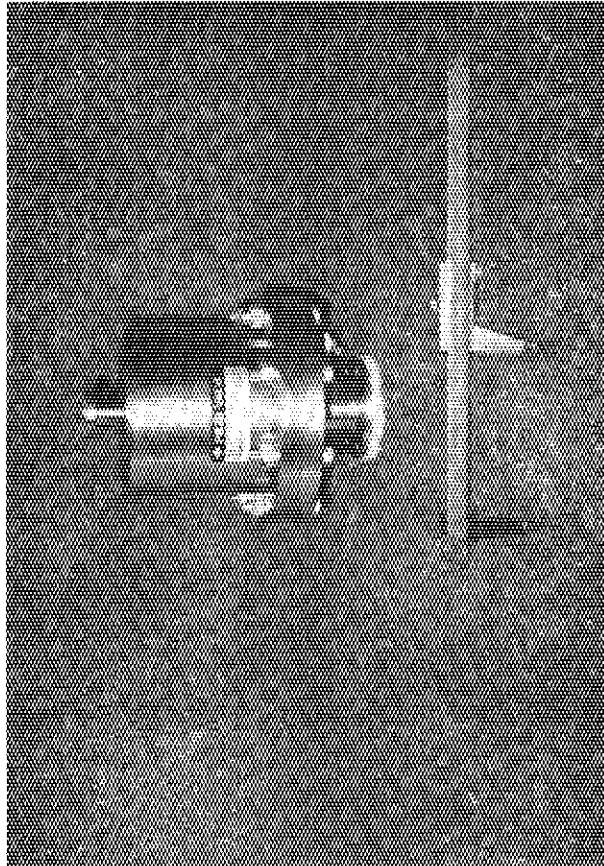
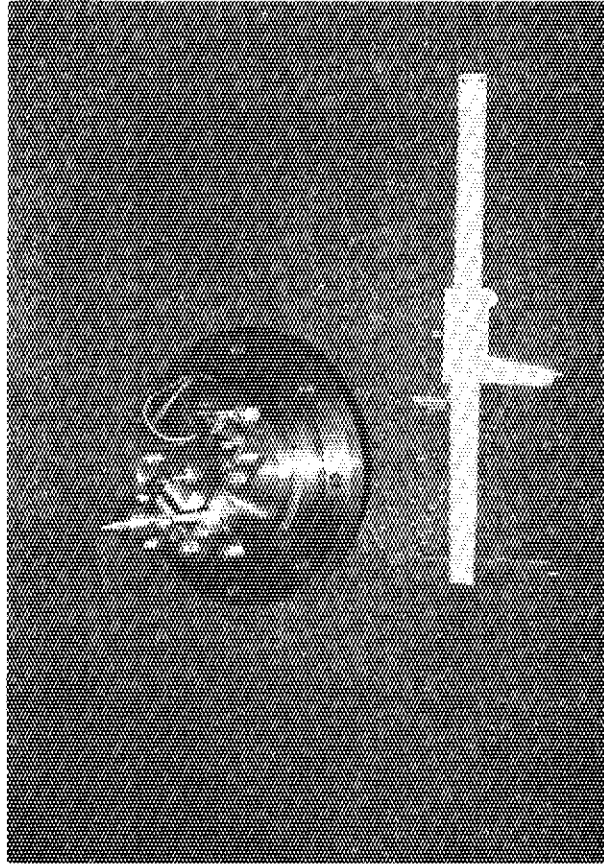


Photo. 2.2 LEL-PEV

3. 特性試験及び結果

積層型圧電素子弁の試験としては、仕様シートリーク量 ($1.33 \times 10^{-8} \text{ Pam}^3/\text{s}$) を満足していることを確認した後に、注入量（流量）特性、背圧特性及び経時変化特性について行った。流量特性試験は、背圧 0.2 MPa の窒素ガス (N_2) を用い、印加電圧と流量の関係を確認した。背圧特性試験は、窒素ガスを用いて、各背圧時の流量を確認した。経時変化特性試験は、背圧 0.2 MPa の窒素ガスを用いて、約 50 日間の流量の変化を確認した。

試験装置の系統図を Fig. 3.1 に示す。試験は、真空容器をあらかじめ真空ポンプにて排気しておきポンプ上流弁を「閉」とし、積層型圧電素子弁を動作させた後の真空容器内圧力上昇により流量測定（ビルドアップ法）を行った。圧力の測定には、高感度圧力検出器（MKS バラトロン真空計）を用いた。

JT-60 におけるガス注入弁は、実機の取付け環境上の制限から上向きあるいは、下向きに取付けられることから積層型圧電素子弁についても上向きを『正方向』、下向きを『逆方向』とした取付け方で試験を行った。

3.1 リフトタイプ積層型圧電素子弁の特性試験

3.1.1 流量試験特性

(1) 試験方法

LIL-PEV の流量特性試験は、背圧 0.2 MPa（約 2.0 kgf / $\text{cm}^2 \text{G}$ ）の N_2 、印加電圧のパルス巾 1.000 ms とした時、印加電圧を（0 ~ 150 V）変化させて流量の測定を行った。

(2) 試験結果

LIL-PEV の流量特性を Fig. 3.2 に示す。○印が正方向、△印が逆方向の N_2 ガス流量特性である。流量は、70 ~ 150 V において電圧に比例する直線的な特性が得られている。正方向においては、0.04 ~ 1.51 Pam^3/s （約 0.27 ~ 11.35 Torrl/s ）、逆方向においては、0.04 ~ 1.52 Pam^3/s （約 0.28 ~ 11.41 Torrl/s ）が得られた。

積層型圧電素子単体では 70 V 以下でも動作するが、シートリークを押さえるためスプリングを用いオフセットを与えていることから素子の変位量とスプリング力が打ち消しあって流量には現れていない。

N_2 ガス流量を水素ガス (H_2) 流量に換算すると、●、▲印の特性になる。 H_2 ガス換算流量は、ガスの物性値比を用い次式により算出した。

$$\text{H}_2 \text{ 流量} = \text{N}_2 \text{ 流量} \times \sqrt{\frac{M_{\text{N}_2}}{M_{\text{H}_2}}}$$

 M_{N_2}

窒素ガスの分子量

 M_{H_2}

水素ガスの分子量

H₂ガス流量は、正方向において0.15～5.65 Pam³/s、逆方向において0.15～5.68 Pam³/s 得られた。

3.1.2 背圧特性試験

(1) 試験方法

圧電素子弁の背圧（ガス供給圧力）は、0.05～0.4 MPa（約0.5～4.0 kgf/cm²G）の範囲を可変できることから、最大電圧印加時に、背圧を0.4、0.2、0.04 MPaと変化させて流量の測定を行った。試験ガスには、N₂ガスを用いた。

(2) 試験結果

LIL-PEVの背圧特性をFig. 3.3に示す。○印が正方向、△印が逆方向の特性を示す。正方向における流量は、0.4 MPa時2.53 Pam³/s（約19.0 Torr/s）、0.2 MPa時1.51 Pam³/s（約11.35 Torr/s）、0.04 MPa時0.7 Pam³/s（約5.27 Torr/s）が得られた。これを、H₂ガスに換算すると各々9.46 Pam³/s、5.65 Pam³/s、2.62 Pam³/sの流量が得られたことになる。逆方向における流量は、0.4 MPa時2.59 Pam³/s（約19.5 Torr/s）、0.2 MPa時1.52 Pam³/s（約11.4 Torr/s）、0.04 MPa時0.69 Pam³/s（約5.21 Torr/s）の流量が得られた。これを、H₂に換算すると各々9.69 Pam³/s、5.69 Pam³/s、2.58 Pam³/sとなる。流量は、絶対圧力に比例した値が得られている。

3.1.3 経時変化特性試験

(1) 試験方法

LIL-PEVの経時変化特性試験は、背圧0.2 MPa N₂ガスで、圧電素子に最大電圧を印加し、初日（基準日）から50日間（0日目、5日目、10日目、26日目、50日目）の流量バラツキの測定を行った。

経時変化特性の基準流量には、初日の流量を用いた。

(2) 試験結果

LIL-PEVの経時変化特性をFig. 3.4に示す。○印が正方向、●印が逆方向の特性を示す。正方向の流量バラツキは、基準流量に対して最大7.9%（5日目）、逆方向は最大9.1%（26日目）であった。

H₂ガスにおける流量バラツキは、正方向で約0.4 Pam³/s、逆方向で約0.45 Pam³/sになった。

3.2 てこタイプ積層型圧電素子弁の特性試験

3.2.1 流量特性試験

(1) 試験方法

LEL-PEVの流量特性試験は、背圧0.2 MPa N₂ガスを用い、印加電圧のパルス巾1,000 msで印加電圧（0～150 V）を変化させて流量の測定を行った。

(2) 試験結果

LEL-PEVの特性試験結果をFig. 3.5に示す。○印が正方向、△印が逆方向の特性を示

す。流量は、60～150 Vにおいて電圧に比例しており、正方向で $6.65 \times 10^{-3} \sim 1.57 \text{ Pam}^3/\text{s}$ (約0.05～11.82 Torr l/s)、逆方向で $0.02 \sim 1.61 \text{ Pam}^3/\text{s}$ (約0.15～12.07 Torr l/s)であった。

N_2 ガス流量を H_2 ガス流量に換算すると、●、▲印の特性になる。 H_2 ガス換算流量は、正方向で $0.02 \sim 5.87 \text{ Pam}^3/\text{s}$ 、逆方向で $0.075 \sim 6.02 \text{ Pam}^3/\text{s}$ であった。

3.2.2 背圧特性試験

(1) 試験方法

背圧特性試験は、背圧を0.4, 0.2, 0.04 MPaと変化して最大電圧を印加した時の流量を測定した。試験には、 N_2 ガスを用いた。

(2) 試験結果

LEL-PEVの背圧特性をFig. 3.6に示す。○印が N_2 ガス正方向特性、△印が逆方向特性を示す。正方向における流量は、0.4 MPa時 $2.86 \text{ Pam}^3/\text{s}$ (約21.49 Torr l/s)、0.2 MPa時 $1.68 \text{ Pam}^3/\text{s}$ (約12.63 Torr l/s)、0.04 MPa時 $0.76 \text{ Pam}^3/\text{s}$ (約5.74 Torr l/s)の流量が得られた。これを、 H_2 ガスに換算すると各々 $10.7 \text{ Pam}^3/\text{s}$ 、 $6.28 \text{ Pam}^3/\text{s}$ 、 $2.84 \text{ Pam}^3/\text{s}$ となる。逆方向における流量は、0.4 MPa時 $3.08 \text{ Pam}^3/\text{s}$ (約23.14 Torr l/s)、0.2 MPa時 $1.85 \text{ Pam}^3/\text{s}$ (約13.92 Torr l/s)、0.04 MPa時 $0.82 \text{ Pam}^3/\text{s}$ (約6.17 Torr l/s)の流量が得られた。これを、 H_2 ガスに換算すると各々 $11.52 \text{ Pam}^3/\text{s}$ 、 $6.92 \text{ Pam}^3/\text{s}$ 、 $3.07 \text{ Pam}^3/\text{s}$ となる。流量は、絶対圧に比例した特性を示している。

3.2.3 経時変化特性試験

(1) 試験方法

LEL-PEVの経時変化特性試験は、背圧0.2 MPa N_2 ガスで最大電圧を印加し、初日(基準日)から41日間(0日目, 26日目, 41日目)の流量のパラツキを測定した。

基準流量は、初日の流量を用いた。

(2) 試験結果

LEL-PEVの経時変化特性をFig. 3.7に示す。○印が正方向、●印が逆方向特性を示す。正方向の流量のパラツキは、基準流量に対して最大11% (41日目)、逆方向では最大14% (41日目)であった。 H_2 ガスにおける流量パラツキは、正方向で $0.61 \text{ Pam}^3/\text{s}$ 、逆方向で $0.85 \text{ Pam}^3/\text{s}$ になる。

3.3 積層型圧電素子弁の動作速度

LIL-PEV及びLEL-PEVの動作速度は5 ms以下としたが、各試験において流量精度を上げるために高感度圧力検出器を用いたことと、弁のガス出口から離れた位置に圧力検出器を設置したことから正確な動作速度が計れていない。しかし、各試験において弁に電圧を印加して高感度圧力検出器が動作するまでの時間が5 ms程度であることから、LIL-PEV及びLEL-PEVの動作速度は5 ms以下と考えられる。既設PEVの動作速度は、弁のガス出口に高速圧力検出器を取り付けて測定を行っている。

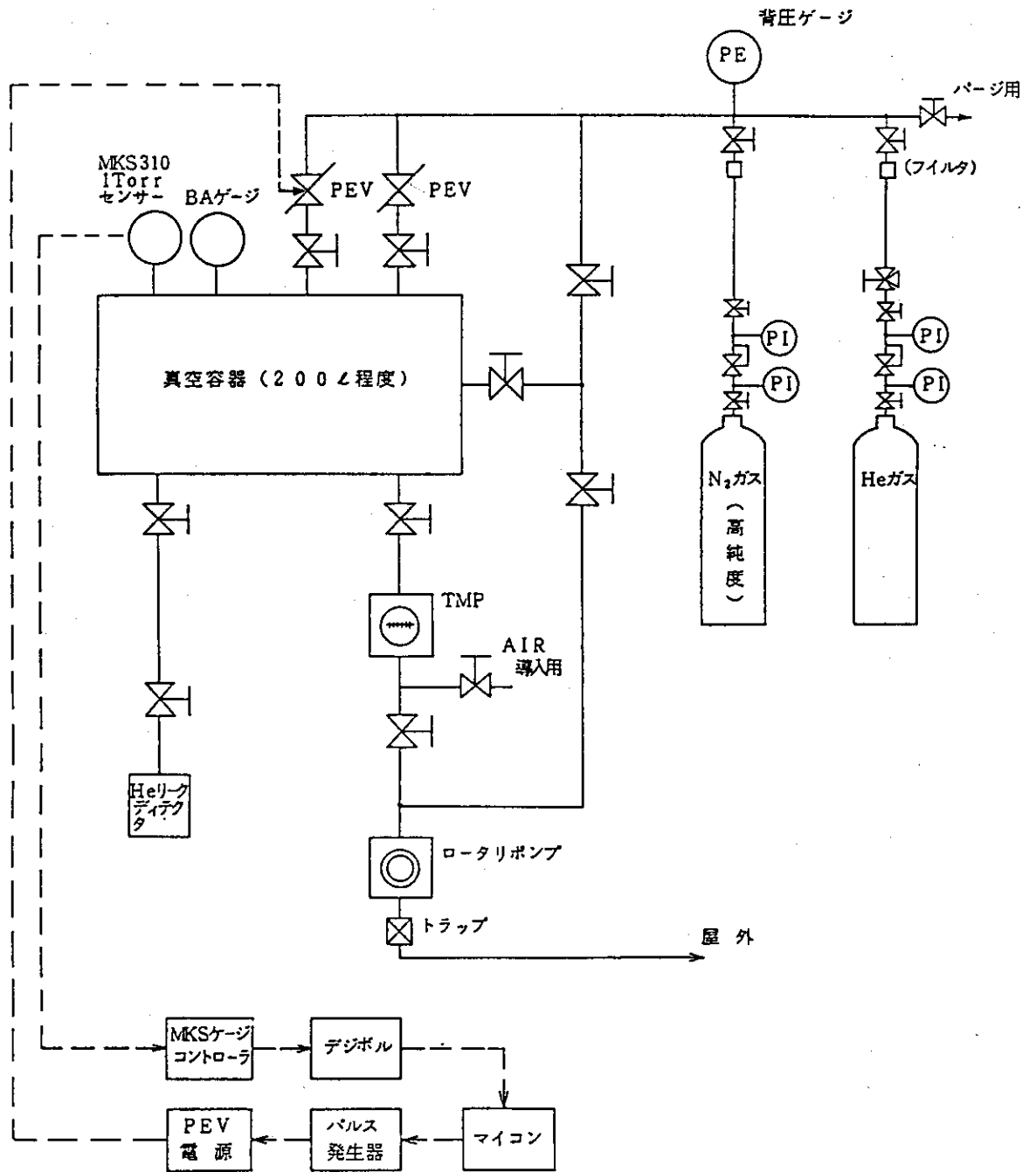


Fig. 3.1 特性試験装置の系統図

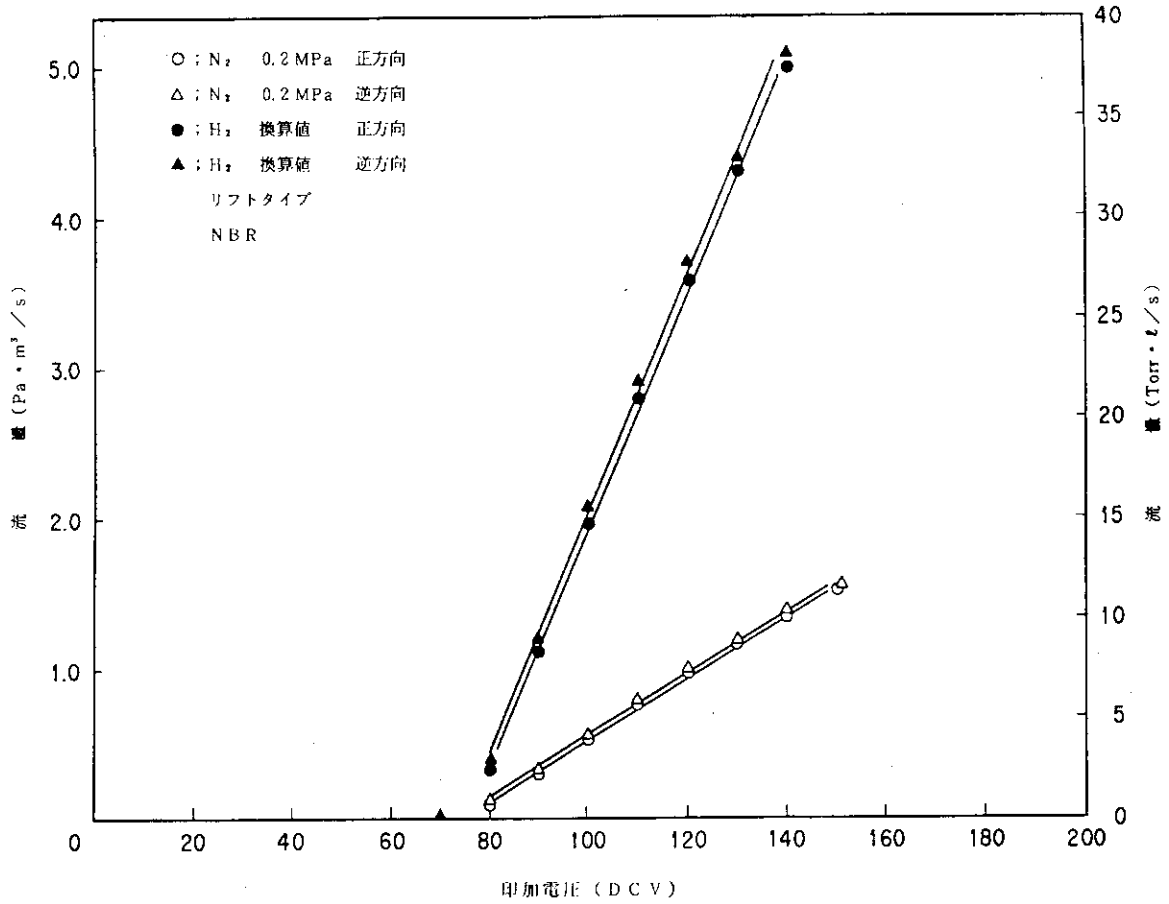


Fig. 3.2 リフトタイプ積層型圧電素子弁流量特性 (NBR)

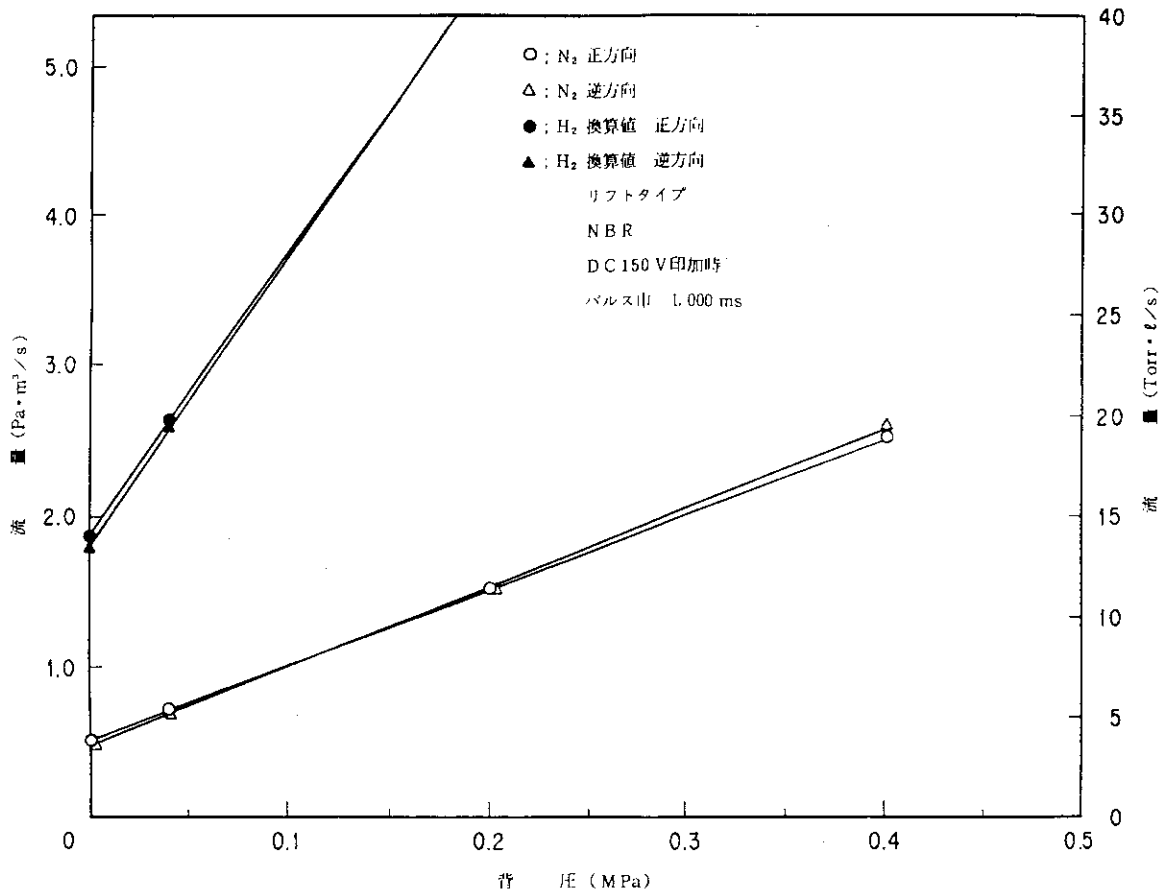


Fig. 3.3 リフトタイプ積層型圧電素子弁背圧特性 (NBR)

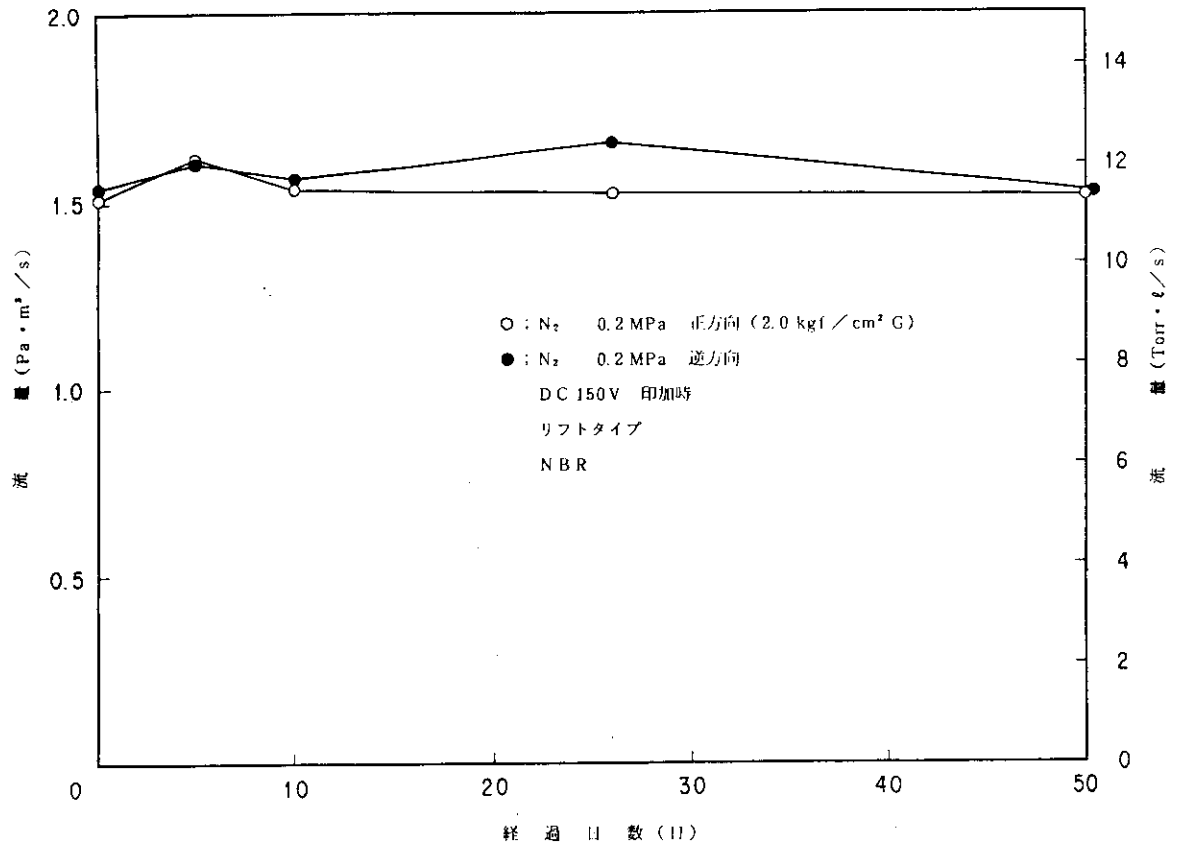


Fig. 3.4 リフトタイプ積層型圧電素子弁の経時変化 (NBR)

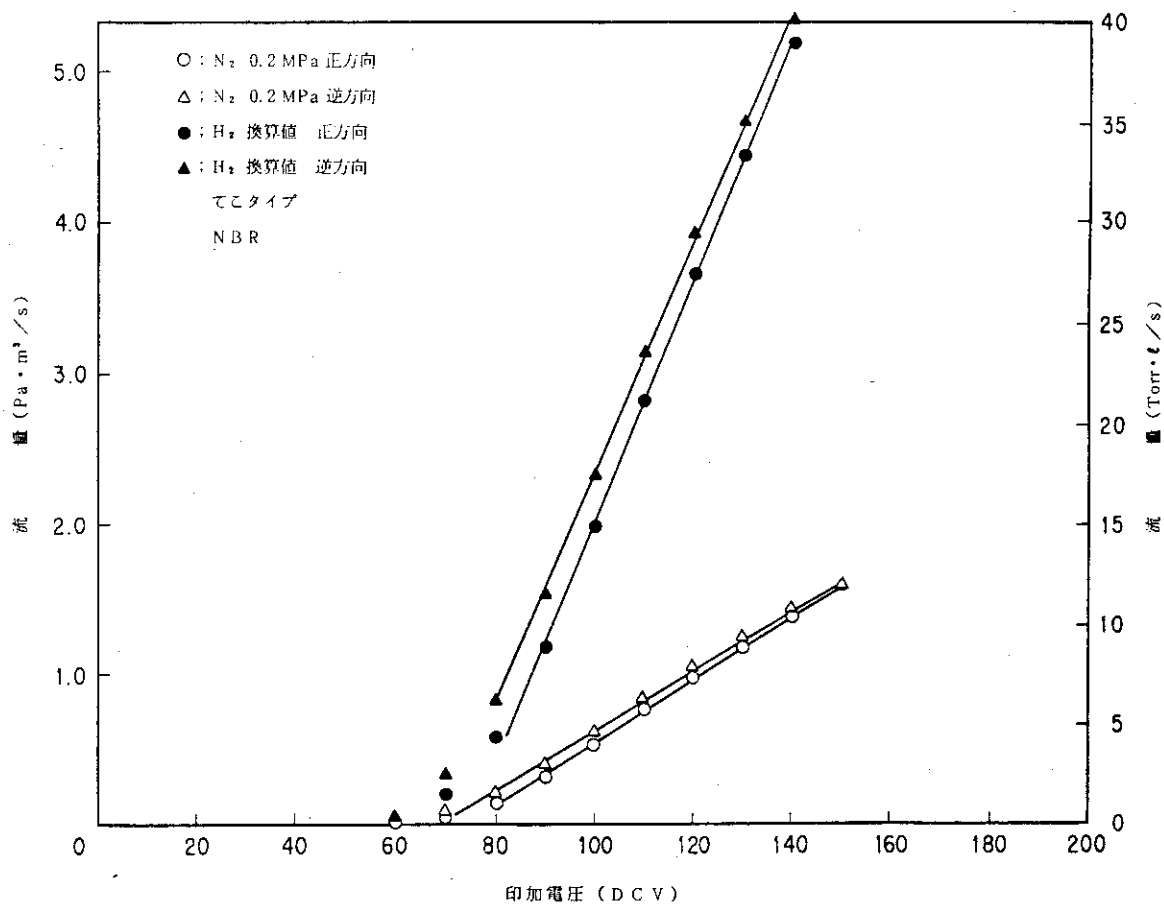


Fig. 3.5 てこタイプ積層型圧電素子弁流量特性 (NBR)

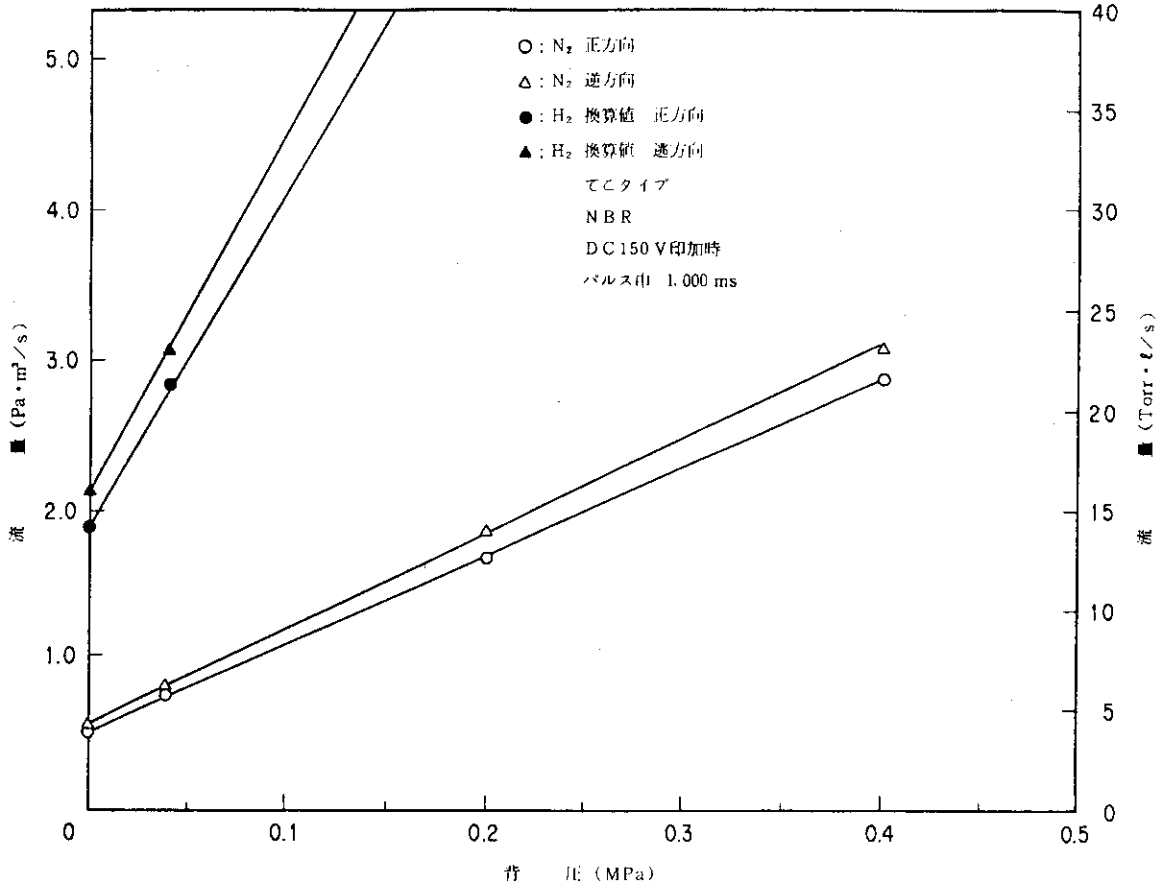


Fig. 3.6 てこタイプ積層型圧電素子弁背圧特性 (NBR)

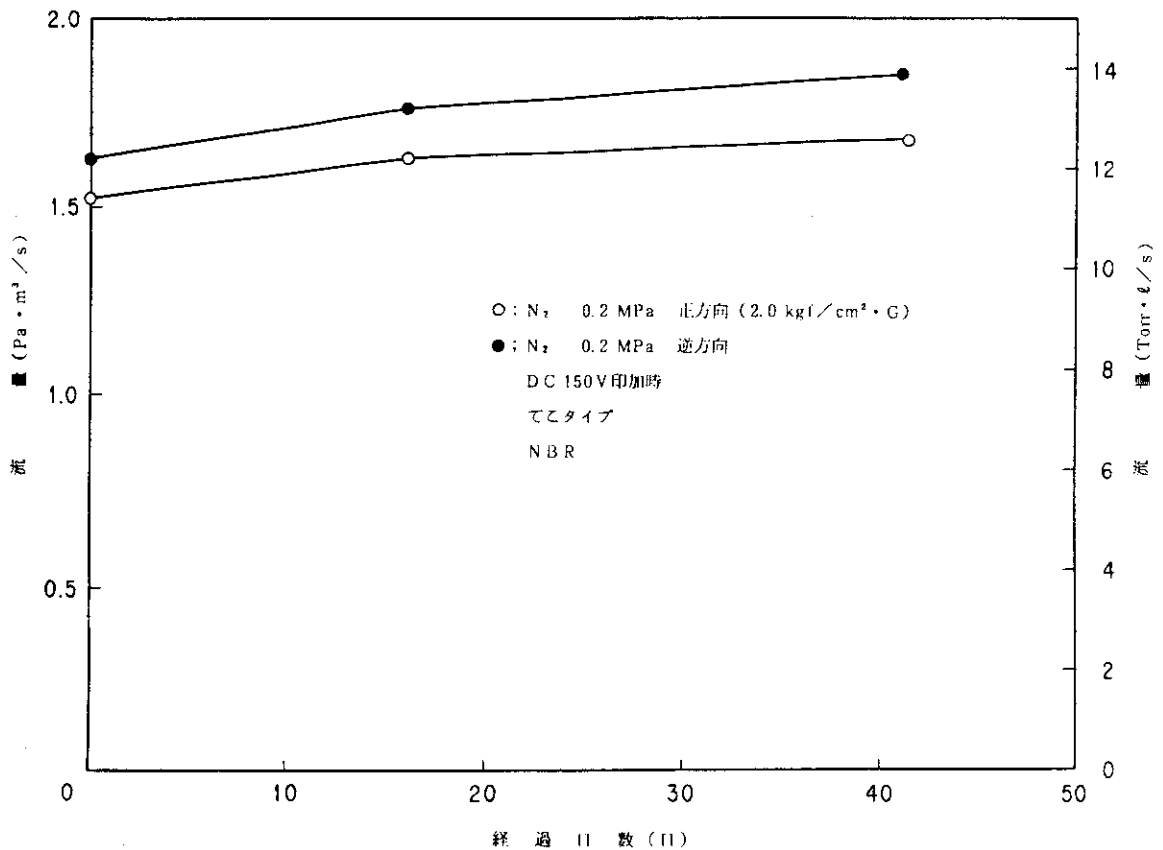


Fig. 3.7 てこタイプ積層型圧電素子弁の経時変化 (NBR)

4. 検 討

4.1 設計流量との比較

4.1.1 リフトタイプ積層型圧電素子弁の比較

設計流量特性とLIL-PEVの比較をFig. 4.1に示す。比較は、H₂ガス換算流量特性で示す。LIL-PEVの流量は、取付け方向に係わらず設計流量より約+5%のシフトした特性を示しているが、ほぼ合致した流量特性と言える。

4.1.2 てこタイプ積層型圧電素子弁の比較

設計流量特性とLEL-PEVの比較をFig. 4.2に示す。比較は、H₂ガス換算流量特性で示す。LEL-PEVの流量は、正方向取付けで設計流量より約+9%、逆方向取付けで設計流量より約13%シフトした特性を示している。この流量は、積層型圧電素子の変位置量に換算すると各々~4 μm、~7 μmになる。正方向取付けの積層型圧電素子の変位置量は、単体の誤差変位置量内にあるが、逆方向については、それ以上の変位置量になっている。LEL-PEVは、てこを応用していることから支点等のガタ分が変位置量の誤差に加算されたものと考えられる。

4.2 近似流量

LIL-PEV及びLEL-PEVの流量特性を、既設圧電素子弁(PEV-L)と同様に直線近似できることから、流量特性式 $Q = a(V - b)(P + c)$ の係数を算出した。Fig. 4.3にLIL-PEVの近似流量と実測流量特性を、Fig. 4.4にLEL-PEVの近似流量と実測流量特性を示す。得られた近似流量の特性式は、次の如く書き表せる。

LIL-PEVの特性式

$$Q = 2.14 \times 10^{-2} (V - 62.6) (P + 1.033)$$

LEL-PEVの特性式

$$Q = 2.52 \times 10^{-2} (V - 73.0) (P + 1.033)$$

P	背 圧	kgf/cm ² G
V	印加電圧	V DC

この特性式を用いた計算値と測定値の誤差は、LIL-PEVが約2%、LEL-PEVが約2~5% (流量開始時は除く)である。

4.3 部品の製作

弁座ノズル径穴加工，真空シールを行うための弁座面の鏡面加工に十分注意した。真空シール性能から高精度で加工されていると思われる。

LIL-PEVの連結ボルト，LEL-PEVの連結アーム，ピン等の駆動部品の製作，加工についても十分注意を払った。しかし，LEL-PEVにおいては，部品等の製作精度が流量誤差になって現れている。駆動部品等の製作については，製作，加工精度の向上が要求される。

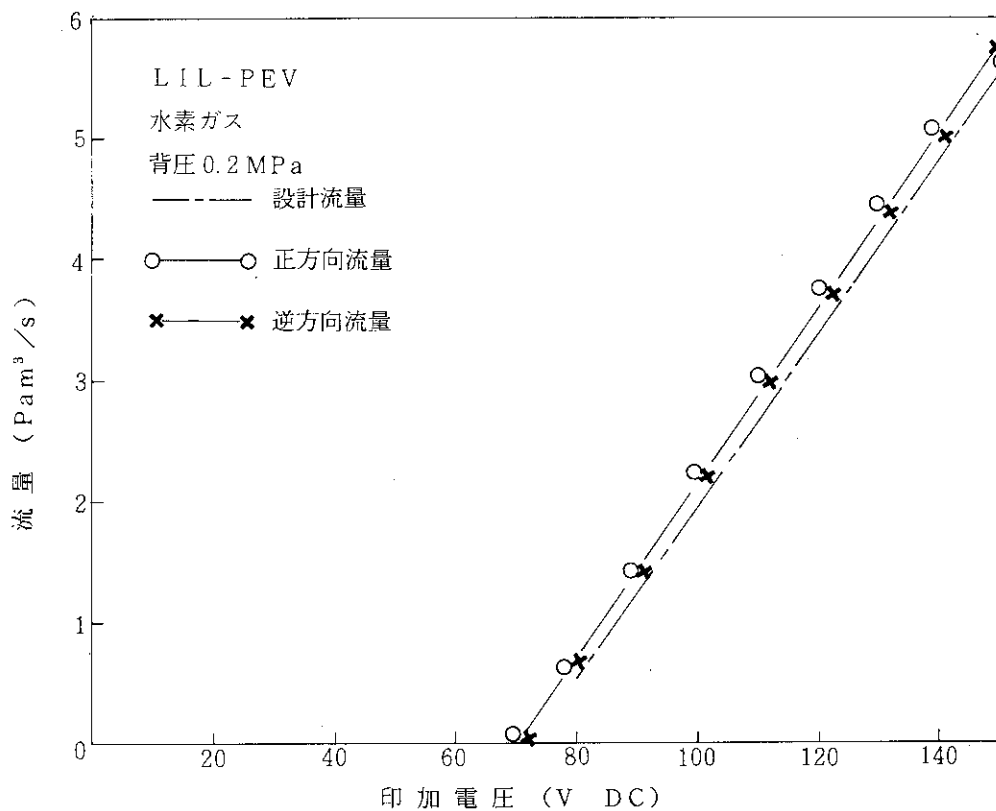


Fig. 4.1 リフトタイプ積層型圧電素子弁の比較特性

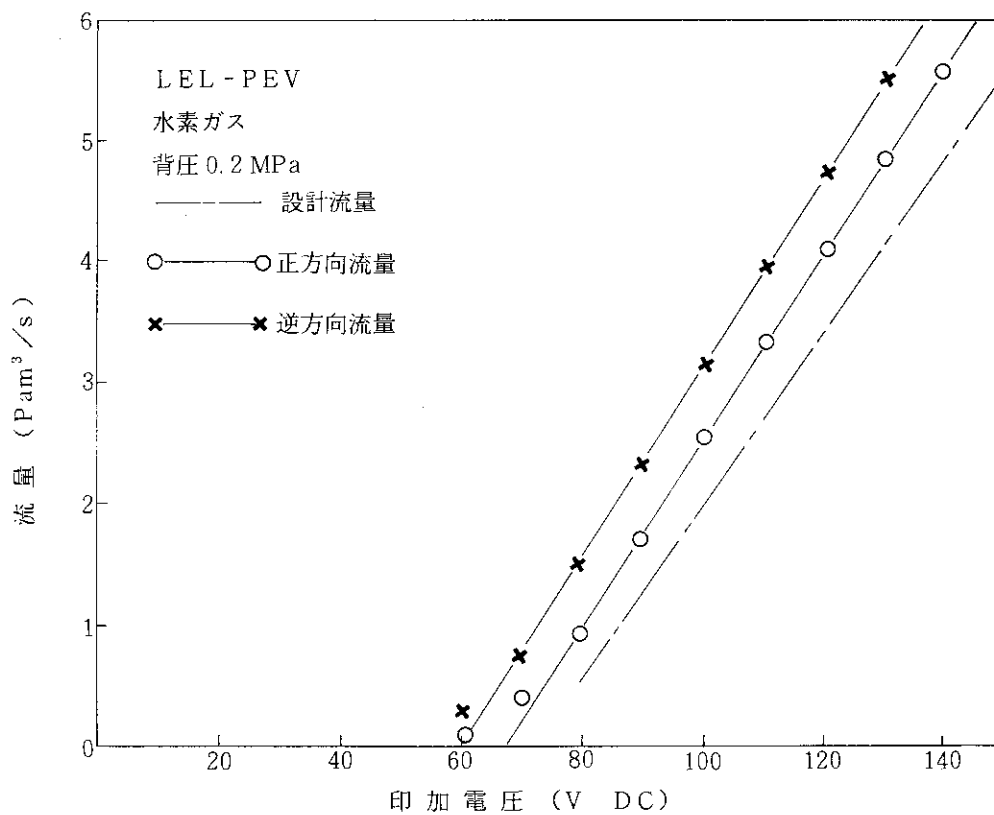


Fig. 4.2 てこタイプ積層型圧電素子弁の比較特性

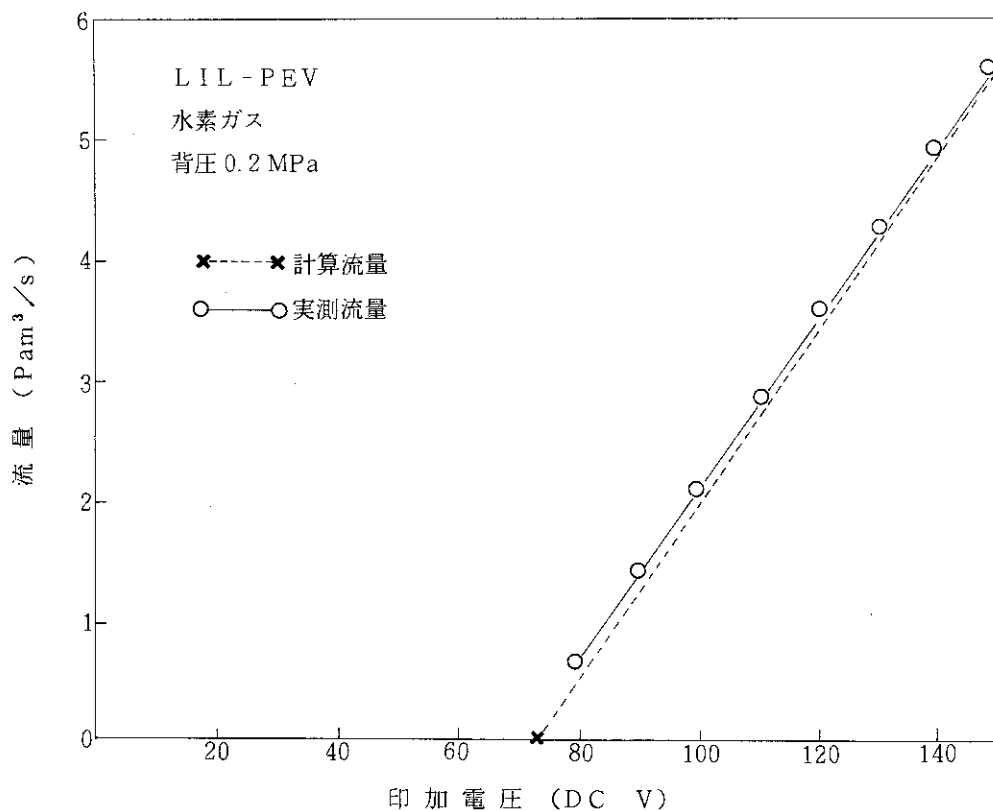


Fig. 4.3 リフトタイプ積層型圧電素子弁の制御流量

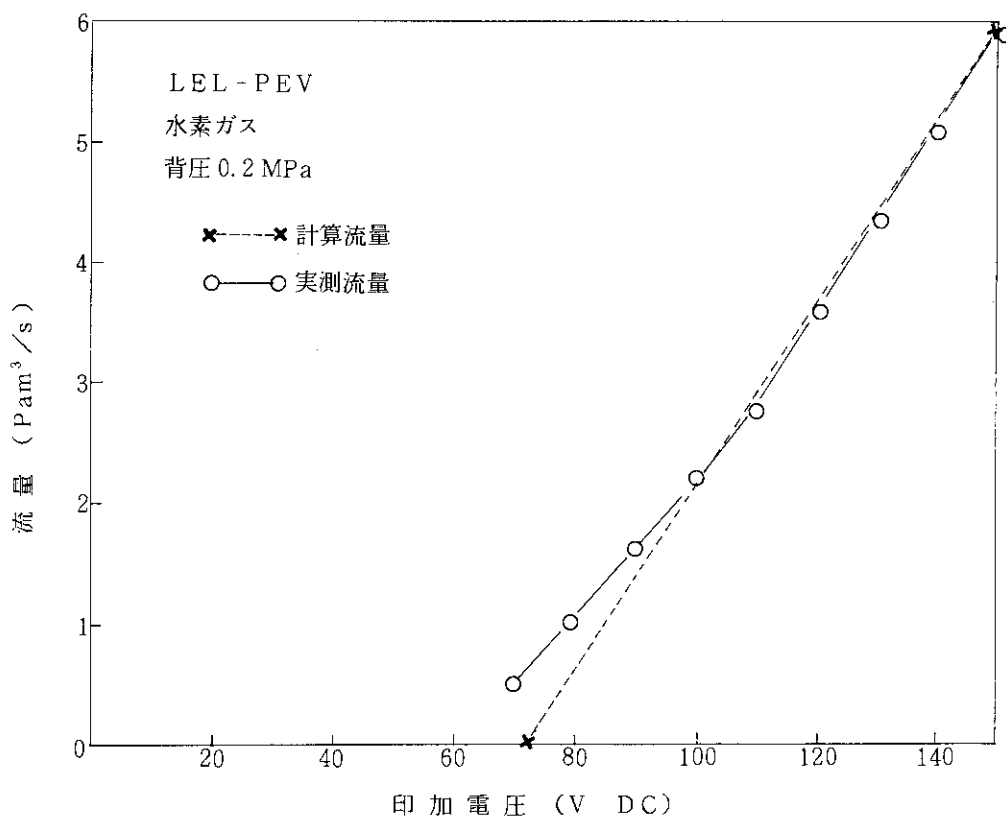


Fig. 4.4 てこタイプ積層型圧電素子弁の制御流量

5. お わ り に

開発した積層圧電素子弁は、背圧0.2 MPa H₂ガスの条件でLIL-PEVが～5.65 Pam³/s、LEL-PEVが～5.87 Pam³/sであり、動作速度、シートリーク量とも既設PEVとはほぼ同じ値であった。これらの結果から積層型圧電素子弁は、実機に十分使用できる性能を持っていると考えられる。しかし、積層型圧電素子弁は、実機PEVの形状高さに比べてLIL-PEVが1.66倍、LEL-PEVが1.24倍と大きい。そのため、既設ガスマニホールドへの取付けは、ガス供給配管を変更することにより可能になると考える。

今後、経年的な特性を定期的に測定し、長期的な積層型圧電素子弁の流量の特性を把握する必要がある。本積層型圧電素子弁の発生力が大きいので耐放射線特性を考慮してNBRシート部をポリイミドシートに変えたポリイミドシート積層型圧電素子弁への適用が有望と考える。

謝 辞

本報告書をまとめるにあたって、終始ご支援頂いた飯島勉JT-60試験部部长、御意見御指導を頂いた近藤育朗JT-60第2試験室室長に深く感謝します。また、活発なコメントを頂いたJT-60第2試験室の各位及び本試験の遂行に御協力頂いた住友重機械工業(株)の関係各位に深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 川崎, 平塚 ; JAERI-M 85 - 215 (1985年)
- 2) 平塚, 川崎 ; JAERI-M 87 - 030 (1987年)

謝 辞

本報告書をまとめるにあたって、終始ご支援頂いた飯島勉 JT-60 試験部部長、御意見御指導を頂いた近藤育朗 JT-60 第2試験室室長に深く感謝します。また、活発なコメントを頂いた JT-60 第2試験室の各位及び本試験の遂行に御協力頂いた住友重機械工業(株)の関係各位に深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 川崎, 平塚 ; JAERI-M 85 - 215 (1985年)
- 2) 平塚, 川崎 ; JAERI-M 87 - 030 (1987年)