

JAERI-M

87-030

微小容量圧電素子弁の開発

(臨界プラズマ試験装置設計報告・192)

1987年2月

平塚 一・川崎 幸三

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

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）で複写による実費領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, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1987

編集兼発行 日本原子力研究所

印 刷 日青工業株式会社

微小容量圧電素子弁の開発

(臨界プラズマ試験装置設計報告・192)

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

(1987年1月30日受理)

微小容量圧電素子弁（PEV-LL）の開発を行った。

開発した圧電素子弁の特徴は、次のように要約できる。

- (1) 筐体は既設小容量圧電素子弁（PEV-L）と同形状である。
- (2) 注入量、シートリーケ量及び動作速度は、設計仕様内（ $0.02 \sim 0.51 \text{ Pa m}^3/\text{s}$, $1.33 \times 10^{-8} \text{ Pa m}^3/\text{s}$ 以下, 5 msec 以下）である。
- (3) 本圧電素子弁は、JT-60 の動作環境下で十分使用で可能である。

Development of a Micro-flow Piezoelectric Valve for JT-60

Hajime HIRATSUKA and Kouzou KAWASAKI

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

(Received January 30, 1987)

A micro-flow piezoelectric gas valve (PEV-LL) for JT-60 has been developed.

Remarkables of the valve are summarized as follows:

- (1) PEV-LL is the same form an appearance small-flow piezoelectric valve (PEV-L);
- (2) The maximum throughput rate, responce time and helium leakage rate satisfy the designed specifications,
- (3) Throughput equation for the valve is clarified by comparison with experiment;
- (4) Reliabilities of PEV-LL under the actual condition during coil power test become clear.

Keywords: Micro-flow Piezoelectric Valve, Gas Injection Rate, Nozzle, Response Time, Helium Leakage Rate, Appearance, Micro-flow, Control Way, Movement Voltage

目 次

1. はじめに	1
2. 設 計	1
2.1 設計仕様	1
2.2 注入速度	2
3. 特性試験及び結果	7
3.1 性能確認試験	7
3.2 注入量測定試験	8
4. 検 討	17
4.1 注入特性	17
4.2 近似流量	17
4.3 ノズル製作	17
5. おわりに	21
参考文献	21

Contents

1. Introduction	1
2. Design	1
2.1 Specification	1
2.2 Gas injection rate	2
3. Characteristic test and results	7
3.1 Performance test	7
3.2 Gas injection test	8
4. Discussion	17
4.1 Injection characteristics	17
4.2 Approximation of gas injection rate	17
4.3 Fabrication of nozzle	17
5. Conclusions	21
References	21

1. はじめに

臨界プラズマ試験装置（JT-60）では、ガス注入弁に圧電素子弁（Piezoelectric valve）を用いている。圧電素子弁は圧電素子の圧電効果を応用したものであり、その原理は圧電素子とシール部とのギャップから作動ガスを導入するというものである。

JT-60用圧電素子弁の開発を昭和56年から進め、ガス注入速度 $0.533 \sim 53.3 \text{ Pa m}^3/\text{s}$ の圧電素子弁を開発した。この圧電素子弁は、JT-60コイル通電試験、OH実験及び加熱装置の実験期間中、磁場の影響や高周波電源の電波障害を受けることなく正常に動作し、実用に供し得るものである。

JT-60のプラズマ実験が進むにしたがってガス注入速度 $0.533 \text{ Pa m}^3/\text{s}$ 以下の圧電素子弁が必要とされてきた。JT-60の目標は、ダイバータ配位でHモード（第2段加熱下でも閉じ込め時間が低下しない高効率加熱モード）を得て臨界プラズマ条件を達成することにあり、高加熱の際ダイバータ板への熱負荷が問題になる。これを解決するため、微小流量のガスをプラズマ周囲に流すことによって熱負荷を減少させる。いわゆるリモートクーリングを考えている。すでに開発されている圧電素子弁の最小ガス注入速度は、 $0.533 \text{ Pa m}^3/\text{s}$ であるため、新規に微小流量の圧電素子弁を開発することが必要である。昭和60年度に微小容量圧電素子弁（PEV-LL）の試作を行い、満足できる結果が得られた。

本報告では、試作したPEV-LLの設計及び試験結果を述べた。第2章で試作したPEV-LLの設計、第3章で特性試験及び結果を述べ、第4章で試験結果について検討を行った。

2. 設 計

2.1 設計仕様

すでに開発した圧電素子弁のガス注入速度は、大容量圧電素子弁で $5.33 \sim 53.3 \text{ Pa m}^3/\text{s}$ 小容量圧電素子弁で $0.533 \sim 5.33 \text{ Pa m}^3/\text{s}$ である¹⁾。新しく開発するPEV-LLの注入速度は、既設小容量圧電素子弁の注入速度以下（ $< 0.533 \text{ Pa m}^3/\text{s}$ ）で動作できるようにしたものである。主要な設計仕様をTable. 2.1に示す。すなわち、主な仕様はガス注入速度が背圧 0.2 MPa の水素ガスを用いた時に $0.053 \sim 0.533 \text{ Pa m}^3/\text{s}$ であること、シートリーク量及び動作速度がそれぞれ $1.33 \times 10^{-8} \text{ Pa m}^3/\text{s}$ 及び 5 ms 以下であること、シートリーク量及び動作速度が既設圧電素子弁のそれと同じ値であること等である。設計にあたっては、PEV-LLの外形寸法を既設小容量圧電素子弁のそれと同じ値にし、ノズル形状のみを変更することで目標の注入速度が得られるよう作業を進めた。

1. はじめに

臨界プラズマ試験装置（JT-60）では、ガス注入弁に圧電素子弁（Piezoelectric valve）を用いている。圧電素子弁は圧電素子の圧電効果を応用したものであり、その原理は圧電素子とシール部とのギャップから作動ガスを導入するというものである。

JT-60用圧電素子弁の開発を昭和56年から進め、ガス注入速度 $0.533 \sim 53.3 \text{ Pa m}^3/\text{s}$ の圧電素子弁を開発した。この圧電素子弁は、JT-60コイル通電試験、OH実験及び加熱装置の実験期間中、磁場の影響や高周波電源の電波障害を受けることなく正常に動作し、実用に供し得るものである。

JT-60のプラズマ実験が進むにしたがってガス注入速度 $0.533 \text{ Pa m}^3/\text{s}$ 以下の圧電素子弁が必要とされてきた。JT-60の目標は、ダイバータ配位でHモード（第2段加熱下でも閉じ込め時間が低下しない高効率加熱モード）を得て臨界プラズマ条件を達成することにあり、高加熱の際ダイバータ板への熱負荷が問題になる。これを解決するため、微小流量のガスをプラズマ周囲に流すことによって熱負荷を減少させる。いわゆるリモートクーリングを考えている。すでに開発されている圧電素子弁の最小ガス注入速度は、 $0.533 \text{ Pa m}^3/\text{s}$ であるため、新規に微小流量の圧電素子弁を開発することが必要である。昭和60年度に微小容量圧電素子弁（PEV-LL）の試作を行い、満足できる結果が得られた。

本報告では、試作したPEV-LLの設計及び試験結果を述べた。第2章で試作したPEV-LLの設計、第3章で特性試験及び結果を述べ、第4章で試験結果について検討を行った。

2. 設 計

2.1 設計仕様

すでに開発した圧電素子弁のガス注入速度は、大容量圧電素子弁で $5.33 \sim 53.3 \text{ Pa m}^3/\text{s}$ 小容量圧電素子弁で $0.533 \sim 5.33 \text{ Pa m}^3/\text{s}$ である¹⁾。新しく開発するPEV-LLの注入速度は、既設小容量圧電素子弁の注入速度以下（ $< 0.533 \text{ Pa m}^3/\text{s}$ ）で動作できるようにしたものである。主要な設計仕様をTable. 2.1に示す。すなわち、主な仕様はガス注入速度が背圧 0.2 MPa の水素ガスを用いた時に $0.053 \sim 0.533 \text{ Pa m}^3/\text{s}$ であること、シートリーク量及び動作速度がそれぞれ $1.33 \times 10^{-8} \text{ Pa m}^3/\text{s}$ 及び 5 ms 以下であること、シートリーク量及び動作速度が既設圧電素子弁のそれと同じ値であること等である。設計にあたっては、PEV-LLの外形寸法を既設小容量圧電素子弁のそれと同じ値にし、ノズル形状のみを変更することで目標の注入速度が得られるよう作業を進めた。

2.2 注入速度

圧電素子弁の注入速度Qは、次の式から求まる¹⁾。

$$Q = 31.62 C \cdot A \cdot P \sqrt{\frac{RT}{M}} \sqrt{k} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \quad (\text{式2.1})$$

ここで、

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

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

C ; 圧損係数 (0.6)

A ; ガス通過面積 m²

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 Pa m³/°Kmol

V ; 印加電圧 V

d₃₁ ; 圧電歪定数

d₁ ; ノズル内径

d₂ ; ノズル外径

D ; 圧電素子径

t ; 圧電素子の厚さ

δ ; 圧電素子の変位量

δ₀ ; 圧電素子押え代

式2.1から明らかなようにQは、Dとd₁に依存するので、Qを小さくするためにはDとd₁を小さくすることが必要である。圧電素子弁の真空シール性能は、シール材（ゴムシート）の初期縮み代δ₁で確保される。従って必要とするδ_rは、初期縮み代とガス注入速度を確保するに足りる圧電素子変位の和になる。δは、D/t比の2乗とd₃₁の積から求まる。PEV-LLのシール性能を確保するために既設と同じδが得られるようDを選ぶ必要がある。これはd₁を約0.04 mmにすると設計注入速度が得られることになる。一方、Aは非常に小さいため、Cを無視するわけにはゆかない。ガスの流路断面をFig. 2.1に示すモデルで表わすと各部のガス流量は、次のようになる。

A部を流れるガス流量Q_Aは

$$Q_A = C_A (P - P_A) \quad (\text{式2.2})$$

で与えられる。ここで、

$$C_A = f \cdot \delta \cdot \pi \cdot d_A$$

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

C_A ; A部のコンダクタンス

d_A ; A部の径

P_A ; A部の圧力

B部を流れるガス流量 Q_B は

$$Q_B = C (P_A - P_B) \quad (\text{式 2.3})$$

で与えられる。ここで、

$$C_B = f \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_B^2$$

C_B ; B部のコンダクタンス

d_B ; B部の径

P_B ; B部の圧力

式 2.2 と 2.3 から Q は、次のように表わせる。

$$Q = C_T (P - P_B) \simeq \frac{C_A}{1 + \frac{C_A}{C_B}} P \quad (\text{式 2.4})$$

つまり、A部のコンダクタンスに比べてB部のコンダクタンスが大きい場合には、既設の圧電素子弁と同じように式 2.1 で求まる。試作した PEV-LL の筐体とノズル外観を Fig. 2.2 に示す。PEV-LL のノズルは、穴開けドリルの径及び製作技術の制限からノズル内径を約 0.06mm とした。 d_1 は既設小容量圧電素子弁 (PEV-L) に比べて、約 3 / 20, d_2 も 7 / 12 と非常に小さく、表面は鏡面加工を施している。

Table 2.1 微小容量圧電素子弁の設計仕様

項 目	仕 様 値	備 考
注入速度(流量)	$5.33 \times 10^{-2} \sim 5.33 \times 10^{-1} \text{ Pa m}^3/\text{sec}$	* 1
シートリーク量	$1.33 \times 10^{-8} \text{ Pa m}^3/\text{sec}$ 以上	* 2
動作速度	5 msec 以下	* 3
背压	0.05 ~ 0.4 MPa	
使用温度	常温	* 4
運転回数	5,000回	
使用ガス	H ₂ , O ₂ , その他	* 5

* 1 ; 水素ガスに於いて背圧 0.2 MPa 時の値 (0.4 ~ 4 Torr l/s)

* 2 ; ヘリウムガスに於いて背圧 0.2 MPa 時の値

* 3 ; 全閉→全開又は全開→全閉までの時間

* 4 ; 耐熱温度は60°C (ベーキング不可)

* 5 ; 全閉→全開→全閉を1回とする。

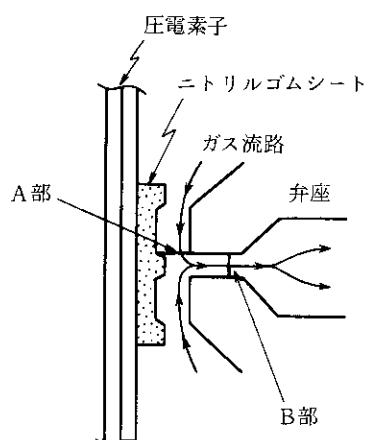


Fig. 2.1 ガス流路

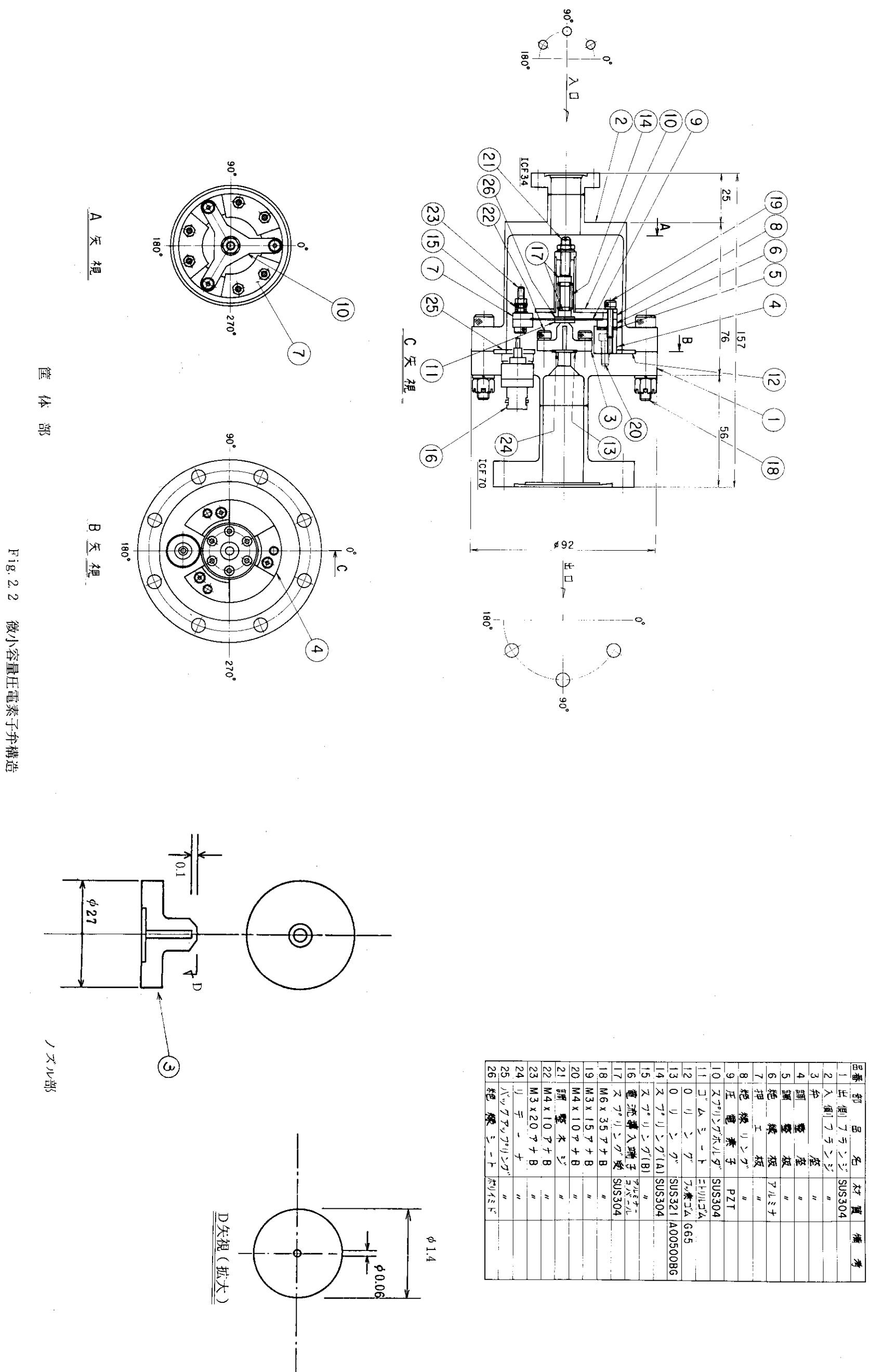


Fig. 2.2 微小容量圧電素子弁構造

A 天板

筐体部

B 天板

ノズル部

3. 特性試験及び結果

PEV-LL の特性試験は、組立て調整時に行った「性能確認試験」と組立て調整から約1週間経過後（初期の経年変化時期）に行った「注入量測定試験」からなる。試験対象弁は、2個の圧電素子弁で、取付けを正規に行うものを「弁No.A」、取付けを逆向きに行うものを「弁No.B」と名付けた。

圧電素子弁は、JT-60 の実験により複数のガスを注入する。また、注入量はガスの物性値で定まる一定の比率により求まる¹⁾ため性能確認試験及び注入量測定試験に於いては、基準注入ガスにそれぞれ「窒素ガス：N₂」及び「水素ガス：H₂」を用いた。

3.1 性能確認試験

3.1.1 試験方法

本試験の目的は、PEV-LL の窒素ガスによる流量特性を確認することにある。性能確認試験系統図を Fig. 3.1 に示す。注入量は、真空容器を排気ポンプで予め排気しておき、その後ポンプ上流弁を閉めて圧電素子弁を動作させ、真空容器の圧力上昇を測定するビルドアップ法から求めた。圧電素子弁の動作時間は、出口フランジの枝管に取りつけた高速圧力検出器（バラトロン真空計）の圧力波形から求めた。

3.1.2 試験結果

(1) 注入速度

得られた弁No.A 及び弁No.B の各背圧特性を Fig. 3.2 と Fig. 3.3 に示す。試作した2台の弁は印加電圧 80 ~ 175 V で正常に動作し、Q は、P = 0.2 MPa (約 2.0 kgf/cm² · G) で最大 0.135 Pa m³/s (約 1.01 Torr l/s) 最小 1.73×10^{-3} Pa m³/s (約 0.013 Torr l/s) である。水素ガスに換算するとそれぞれ 5.04 Pa m³/s (約 3.78 Torr l/s) 及び 6.53×10^{-3} Pa m³/s (約 0.049 Torr l/s) となる。また、Q は、P に比例して増加することが確認できた。背圧 0.2 MPa と 0.4 MPa (約 4.0 kgf/cm² · G) の場合の注入量を比較すると計算値 1.66 に対し、約 1.67 が得られた。同じように背圧 0.2 MPa と 0.05 MPa (約 0.5 kgf/cm² · G) を比較すると計算値約 1.98 に対し、約 2.1 が得られた。P を高くすると Q が大きいので、真空容器内の圧力上昇が高まり、バラトロン真空計の計測精度が良く、逆に P が低いと Q が小さいので圧力上昇も小さくなるためバラトロン真空計の計測精度が悪い。後者の場合得られた値は、計算値より約 5 ~ 7 倍大きい結果となっている。

(2) 動作速度

動作速度の測定は、弁No.A について行った。動作速度は、圧電素子弁に電圧を印加してから高速圧力検出器が動作するまでの時間をとったものである。測定条件は、P = 0.2 MPa の窒素ガスを用いて注入時間を 10ms と 100ms について印加電圧を 120 V と 175 V に変えて測定した。Fig. 3.

4に測定波形(175V印加の場合)を示す。上図は10msの場合を、下図は100msの場合を示す。バラトロン真空計の圧力上昇は、ガスの通過する配管の容積によって緩和される。注入時間10msでは最大圧力4.67Pa(約0.035Torr)が測定されている。何れの条件においても設計仕様値(5ms)を満足している。バラトロン真空計は、圧電素子弁の出口フランジに枝ポートを取り付けて設置している。このため圧電素子弁自身の応答速度は、もっと速いものと考えられる。

(3) リークテスト

ヘリウムガスをP=0.2MPaでガス供給側より充填してから約15分後にシートリーク量を測定した。結果、その値は、 $1.33 \times 10^{-8} \text{ Pa m}^3/\text{s}$ 以下であった。この量は、設計仕様値を満足するシートリーク量である。フランジリーク量は、プローブ法で測定した。試験箇所は、入口側フランジ、出口側フランジ、筐体、O-リングシール部及び電流導入端子部である。測定結果は、約 $5.06 \times 10^{-10} \text{ Pa m}^3/\text{s}$ 以下で仕様値を十分満足できる値であった。

(4) 変位測定

PEV-LL筐体に圧電素子を据えて中心から約9.5mm離れた位置の圧電素子変位を接触型変位計を用いて測定した。測定結果をFig. 3.5に示す。筐体に取りついている圧電素子は、シートリークを防止するために約10μmの縮み代をゴムシートに与えている。圧電素子中心から約9.5mm離れた位置での変位は、175V印加した時約16μmであり、また、ガスが流れ始まる印加電圧80Vでは、約5μmである。圧電素子単体の変位は175V印加で約34μmである。筐体に取りつけた場合、圧電素子の中央部をバネで押さえているので、測定値を中心に外挿しても約25μmと小さい。これは、圧電素子単体では圧電素子周囲を自由端にして測定したのに対し、筐体に組み込んだ場合には、圧電素子の周囲をセラミックで3箇所押さえているため小さい値が得られたものと考えている。

3.2 注入量測定試験

3.2.1 試験方法

本試験の目的は、実作動ガスの水素ガスを用いてPEV-LLの特性を確認することにある。注入量測定試験系統図をFig. 3.6に示す。注入量測定試験も性能確認試験と同様に真空容器を予め真空ポンプで排気しておいてからビルドアップ法で行った。試験装置は、JT-60ガス注入装置の「測定装置」を用いた。

3.2.2 試験結果

(1) 注入特性

PEV-LLへの印加電圧が、約80~175Vで目標の注入速度範囲の値で正常に動作することが確認できた。弁No.Aで印加電圧パルス巾1,000msの場合の注入特性及び印加電圧パルス巾5,000msの場合の注入特性をFig. 3.7とFig. 3.8に示す。弁No.Bで印加電圧パルス巾1,000msの場合の注入特性及び印加電圧パルス巾5,000msの場合の注入特性をFig. 3.9とFig. 3.10に示す。No.A及び弁No.Bの最大注入速度は、それぞれ0.512Pa m³/s(約3.824Torr l/s)及び0.51Pa m³/s(約3.824Torr l/s)である。圧電素子の印加電圧パルス巾を1,000msと5,000

ms に変えても注入特性は一定である。図から分るように、約 130~140 V で注入速度が飽和するような傾向を示し、ガスが流れ始まる注入開始電圧 V 以上では、V に比例して注入速度が増加している。背圧 0.05 MPa 及び 0.2 MPa でも、ガスが流れ始まる開始電圧は、約 80 V である。Fig. 3.8 に示した弁 No.B の注入特性から電圧の低い範囲に於いても注入が可能と考えられる。

(2) 背圧特性

PEV-LL 背圧を 0.2 MPa と 0.05 MPa にした場合について特性を比較する。背圧 0.2 MPa と 0.05 MPa の流量比は弁 No.A 及び弁 No.B でそれぞれ約 2.12 及び 2.15 であり、計算値 1.98 に対し高い値を示している。この理由は性能確認試験の項でも述べたように、P を高くすると Q が大きいので、真空容器内の圧力上昇が高まり、バラトロン真空計の計測精度が良く、逆に P が低いと Q が小さいので圧力上昇も小さくなるためバラトロン真空計の計測精度が悪くなるためと考えられる。この値は、性能確認試験で得られた値と同じである。

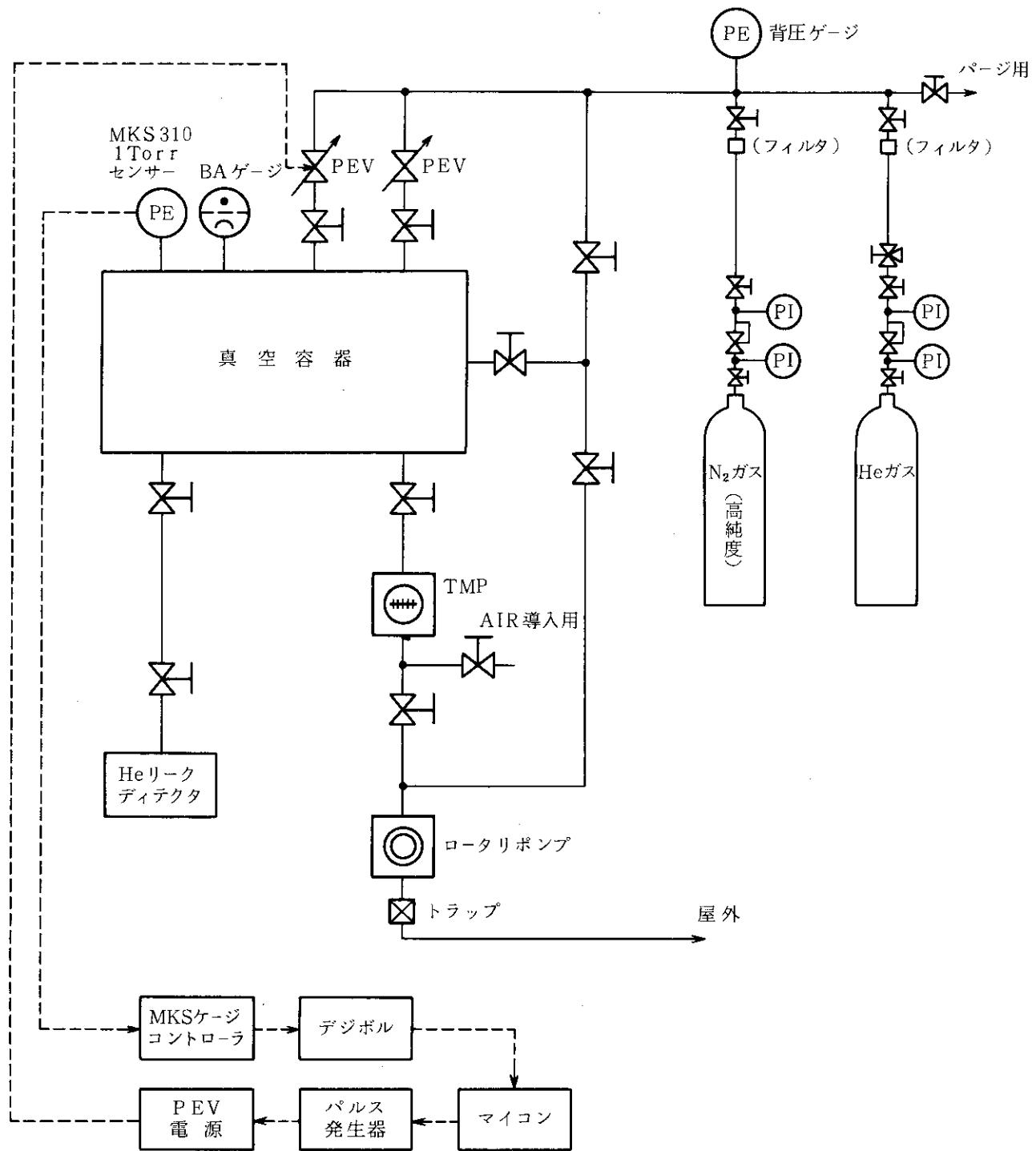


Fig. 3.1 性能確認試験系統図

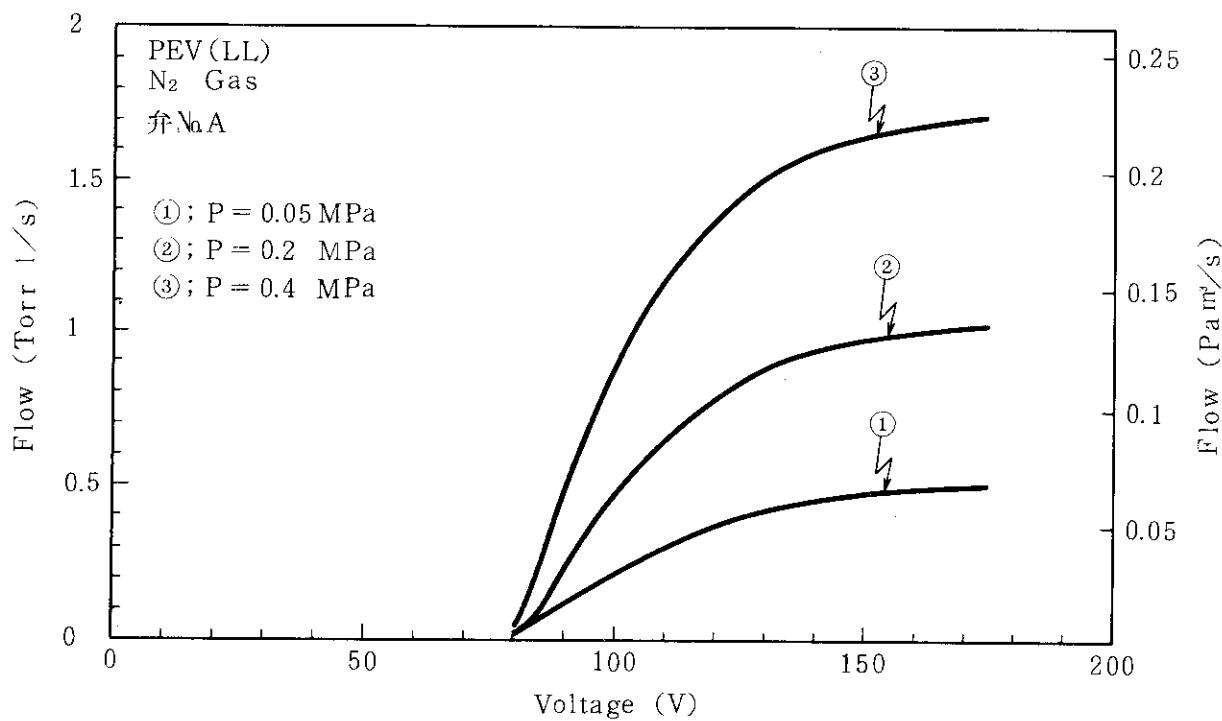


Fig. 3.2 弁No.Aの各背圧に於ける流量特性

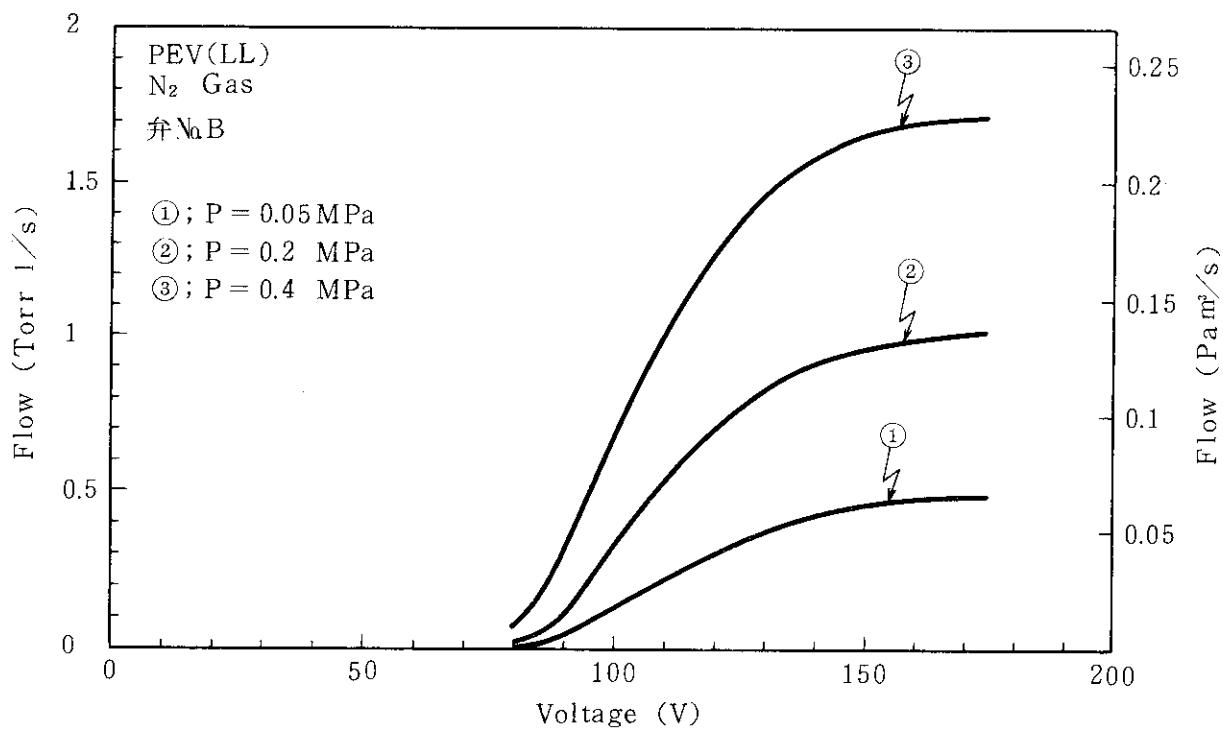


Fig. 3.3 弁No.Bの各背圧に於ける流量特性

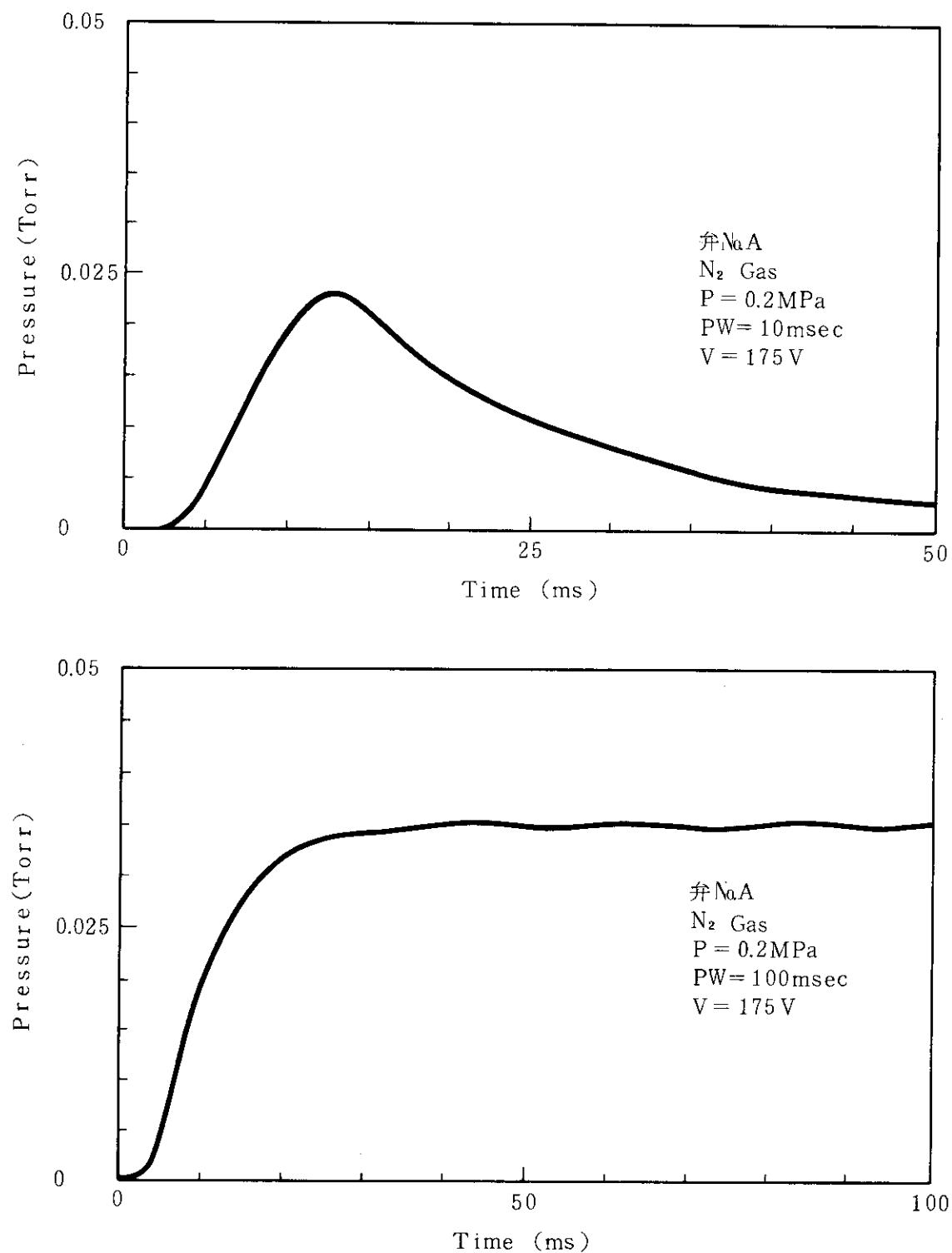


Fig. 3.4 弁No.Aの動作速度

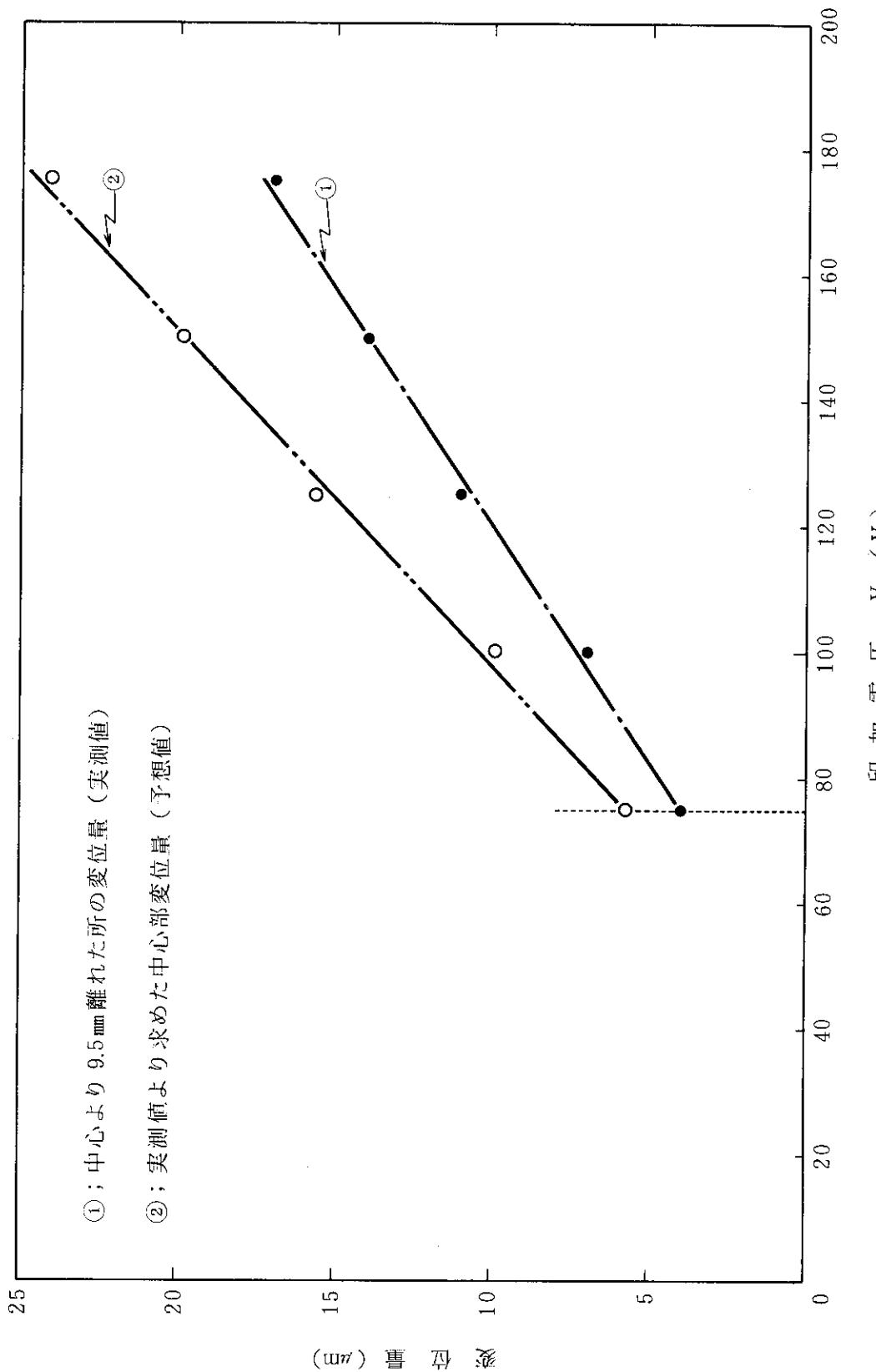


Fig. 3.5 扉電磁子の変位量

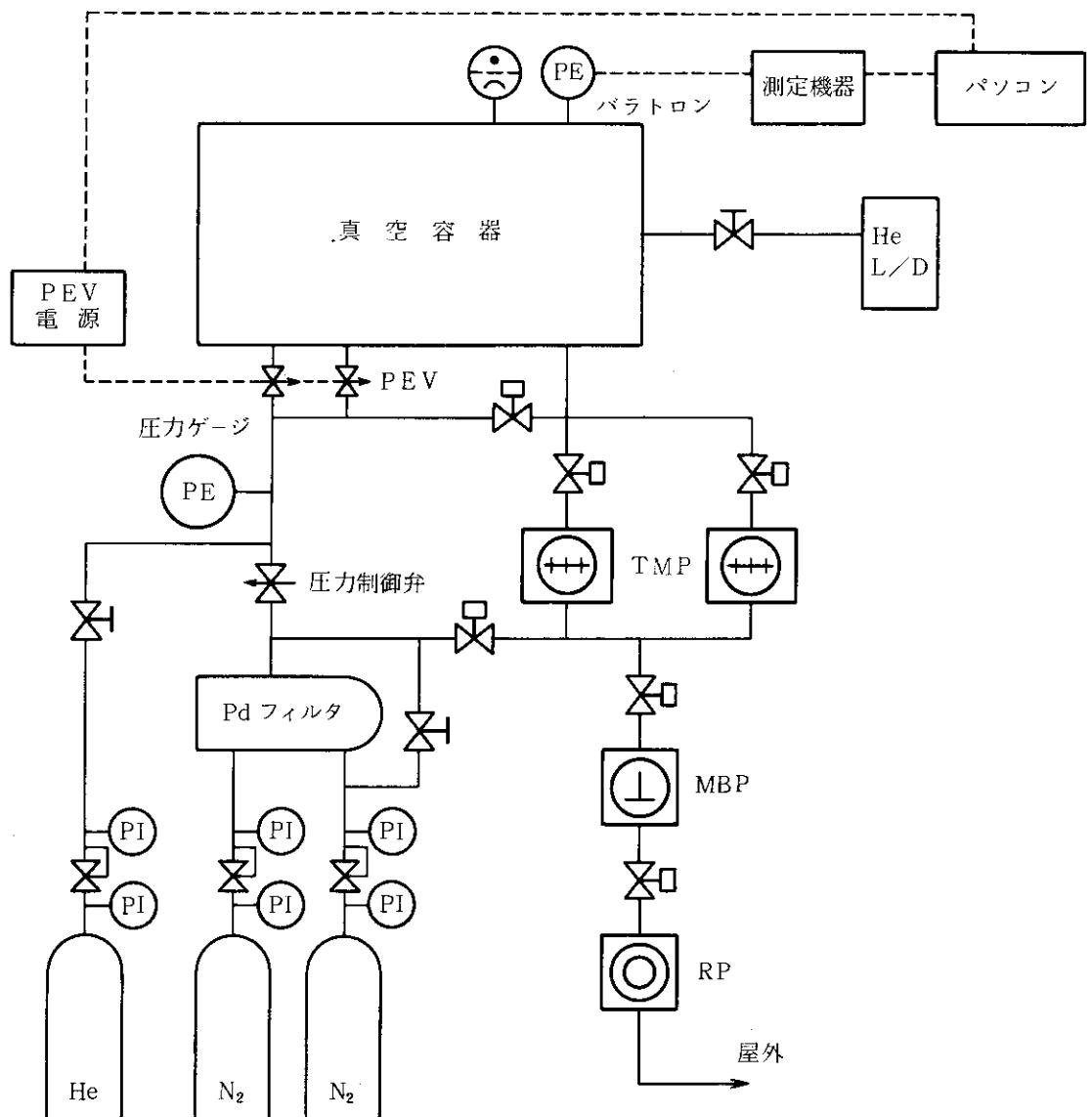


Fig. 3.6 注入量測定試験系統図

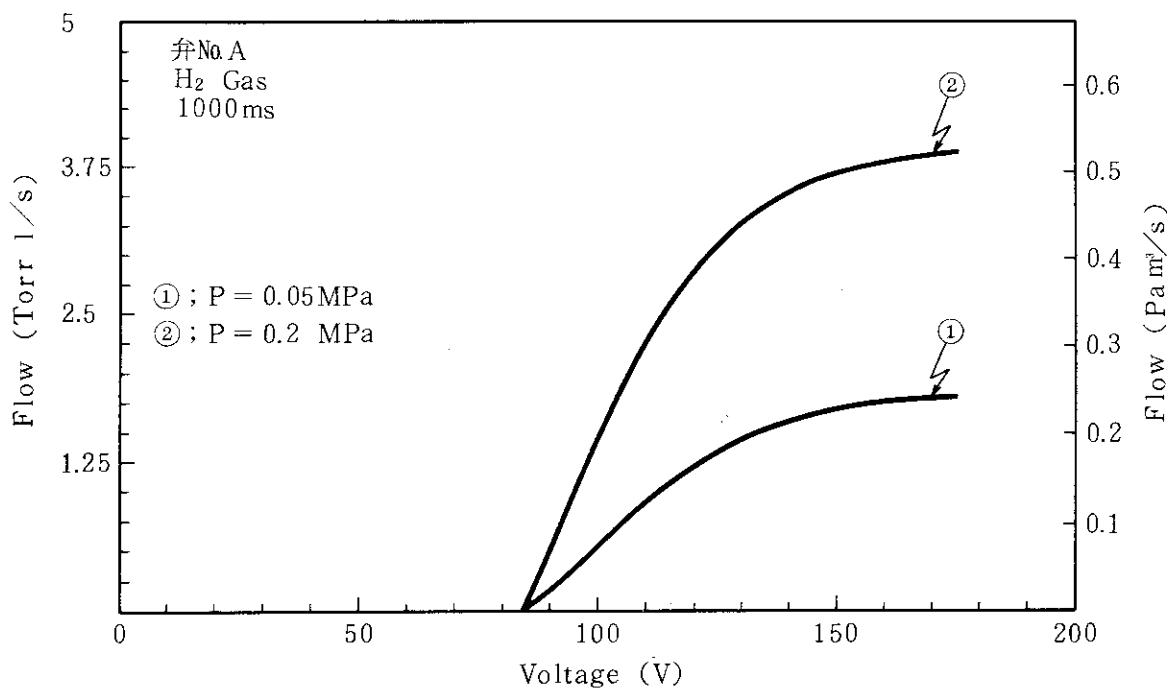


Fig. 3.7 弁No.Aの注入量特性(1,000msの場合)

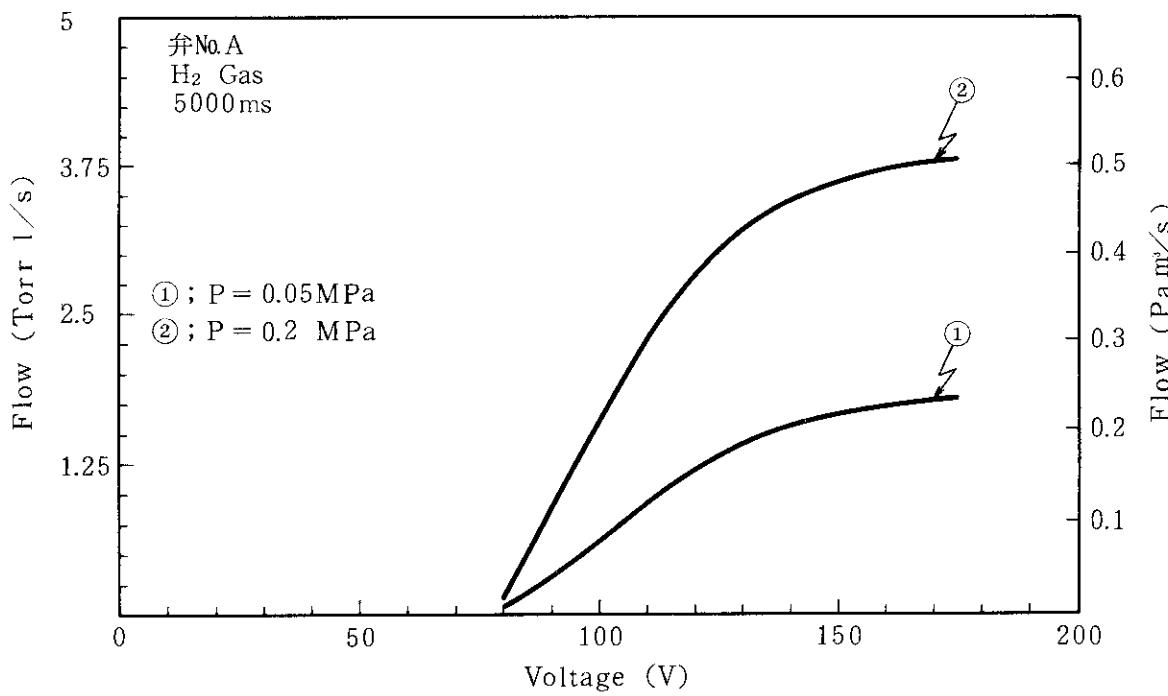


Fig. 3.8 弁No.Aの注入量特性(5,000msの場合)

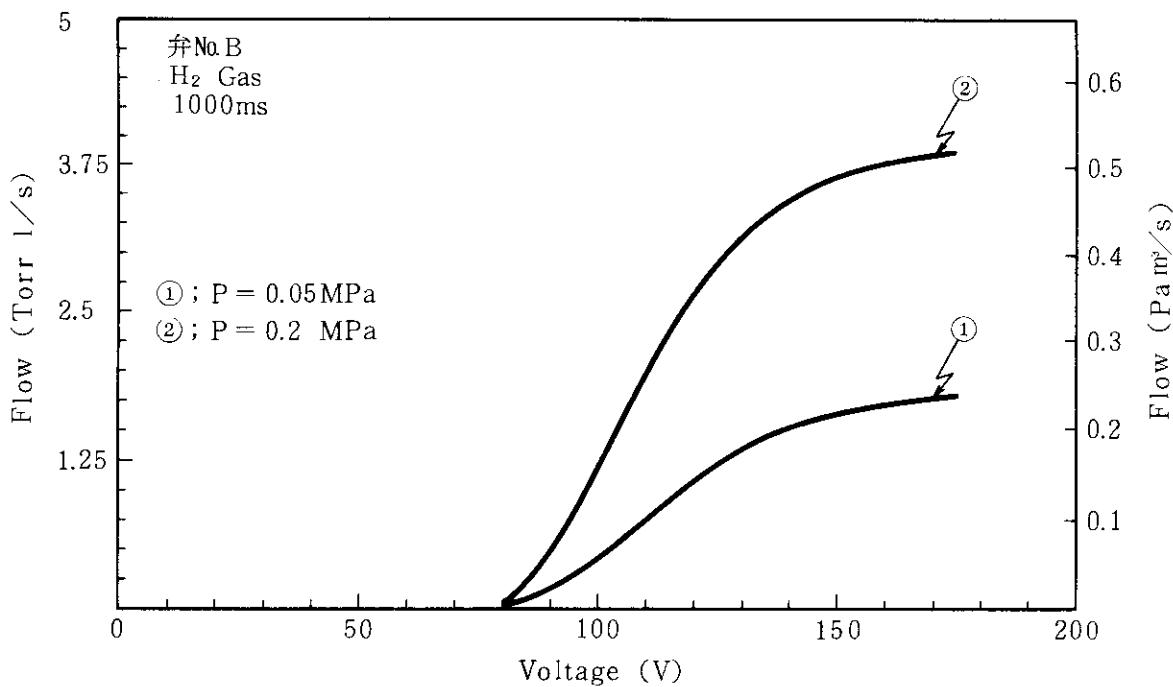


Fig. 3.9 弁NaBの注入量特性 (1,000ms の場合)

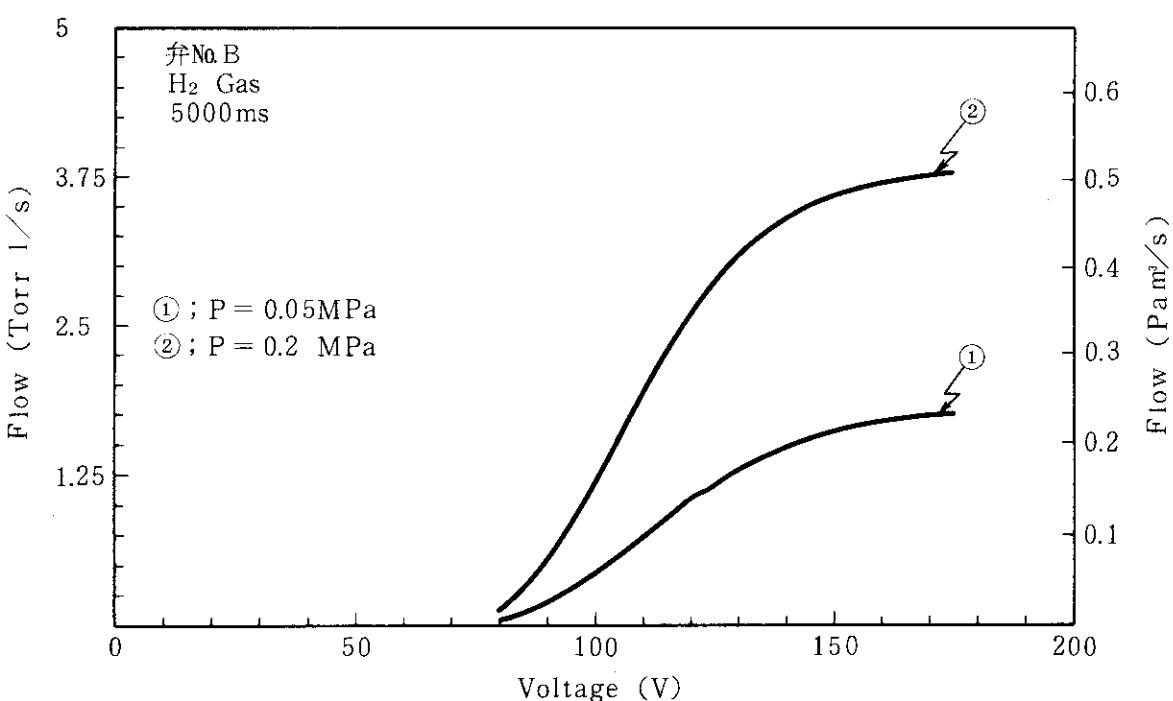


Fig. 3.10 弁NaBの注入量特性 (5,000ms の場合)

4. 檢討

4.1 注入特性

流量の計算値と実測値の V 依存性を Fig. 4.1 に示す。この図から弁No.A 及び弁No.B の注入特性はほぼ同じであることがわかる。 V 150 V 以上での注入速度は、計算値に比べ飽和した値になっている。 V 100 V 以下では、計算値より幾分低い値が得られている。この流量差はガスの通過面積を評価する位置をノズル入口と考えたのに対し、測定値から流路の上流側にあるものと考えられる。試作した PEV-LL の Q は、 V 120 V 以上では設計値にはほぼ等しいことがわかる。

4.2 近似流量

PEV-LL の注入特性を既設の圧電素子弁と同じように直線近似することは困難であるため、流量誤差を少なくするように 3 点の折り線で近似することを考案した。Fig. 4.2 に近似曲線と測定値（弁No.A の場合）を比較して示す。この図に於いて Q が V に飽和する領域と V に依存する領域にわけ、流量特性式 { $Q = a \times (V - b) \times (P + c)$ } の係数を算出した。Fig. 4.2 に示す特性では、電圧範囲を 120~175 V と 80~120 V にわけて特性定数を求めた。

電圧範囲 120~175 V では

$$Q = 0.001 \times (V + 9.86) \times (P + 1.033) \quad \text{Pa m}^3/\text{s}$$

電圧範囲 80~120 V では

$$Q = 0.0028 \times (V - 75.29) \times (P + 1.033) \quad \text{Pa m}^3/\text{s}$$

この特性式を用いた計算値と測定値の誤差は、制御電圧範囲 120~175 V で約 6 %、制御電圧範囲 80~120 V で約 10 % であり（但し、ガスが流れ始まる点を除く）、この値は既設のそれと同程度である。

4.3 ノズル製作

ノズルの径は、極めて細いため、穴あけ加工に十分注意を払った。ノズル径の拡大図を Photo. 4.1 に示す。図からノズル径の誤差は、0.001 mm の精度で加工されていることが分かる。

試作した 2 個のノズルは 5 個の中から選んでいることから、効率の良いノズル加工技術の開発あるいは同じ設計流量値を得るため D を小さくし d_1 を大きくすることも必要である。

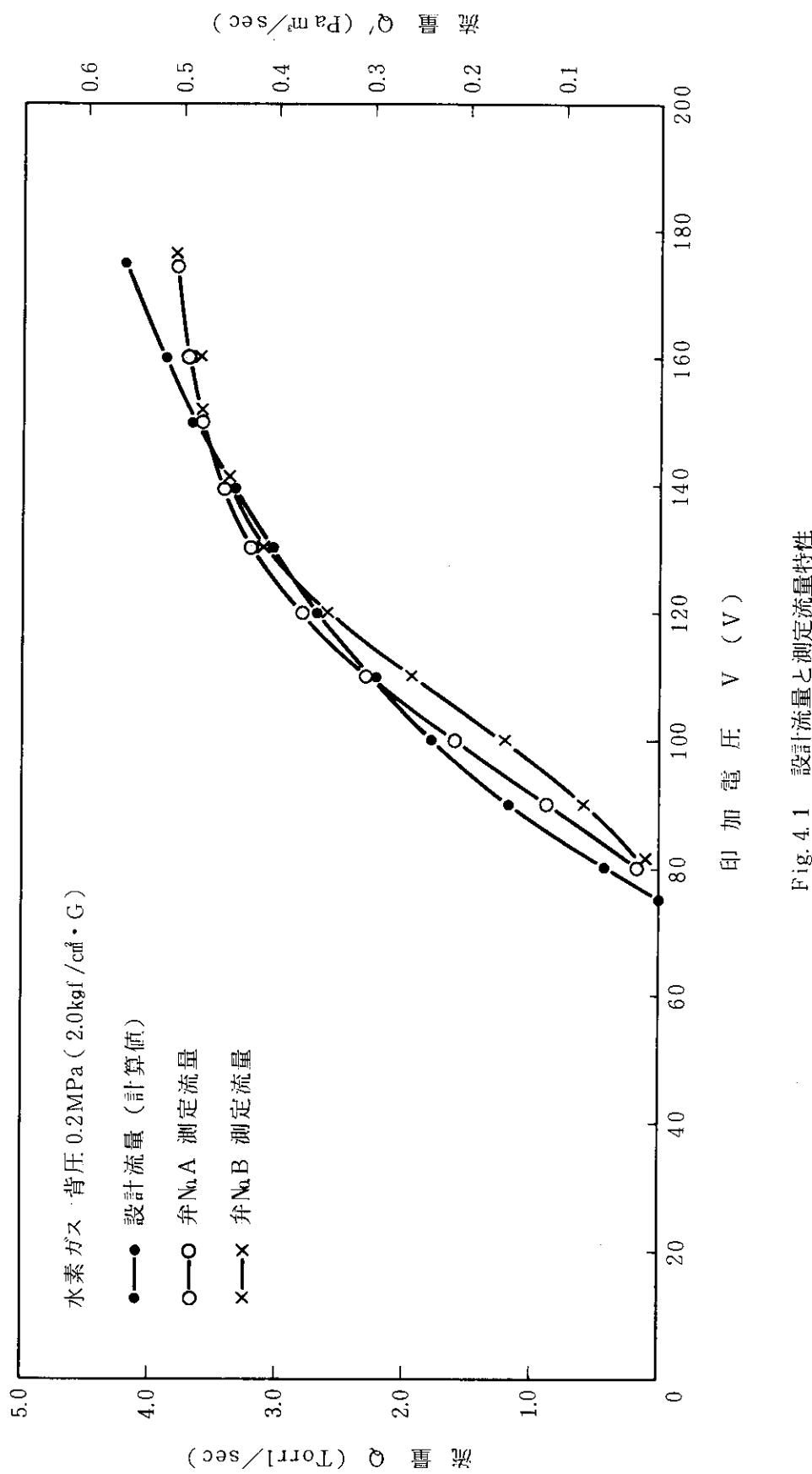


Fig. 4.1 設計流量と測定流量特性

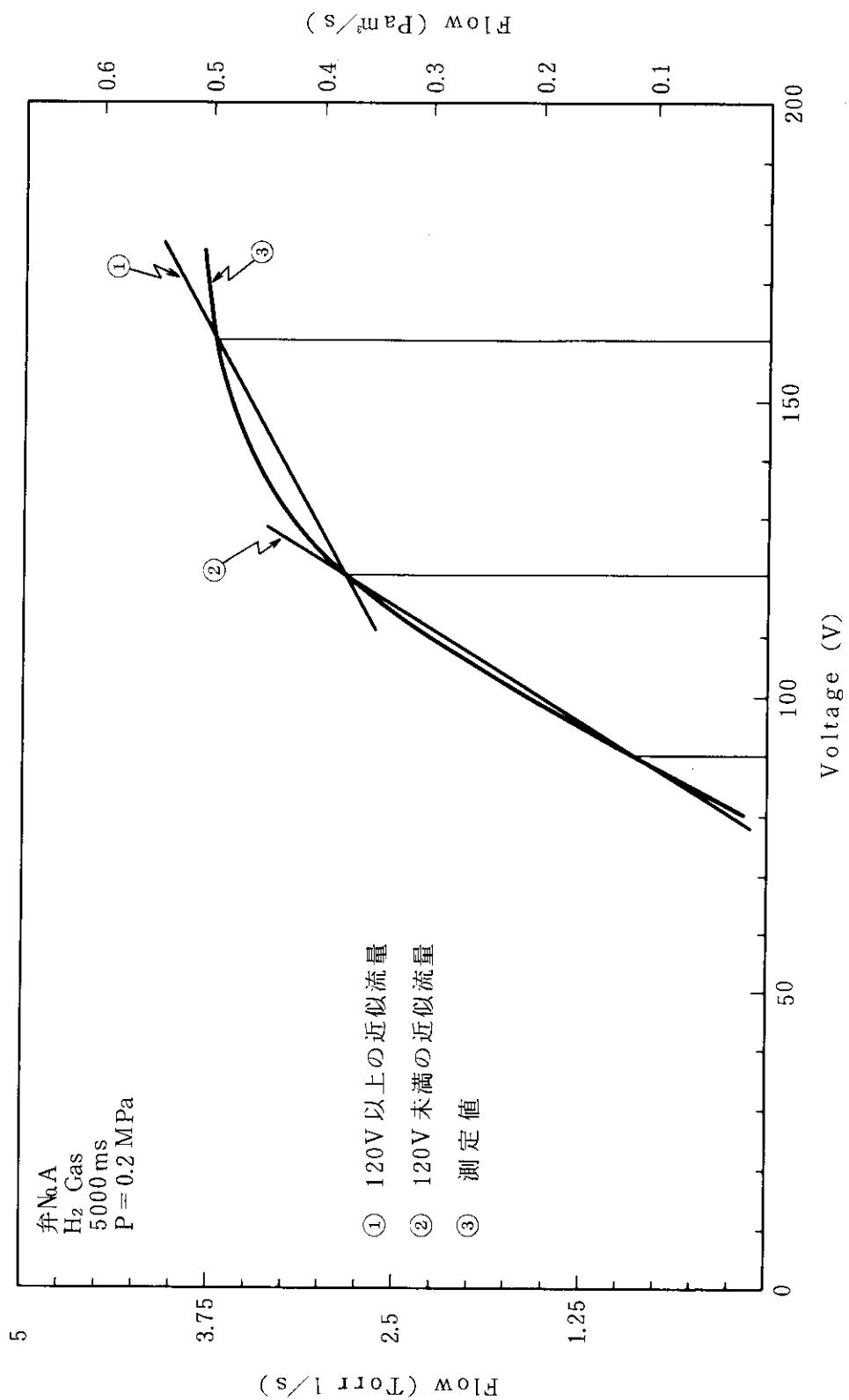
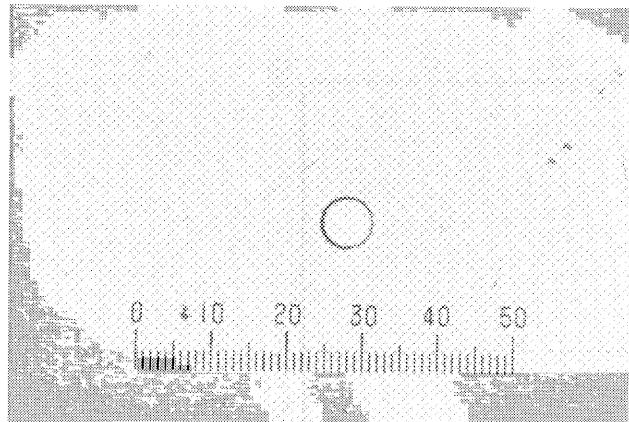
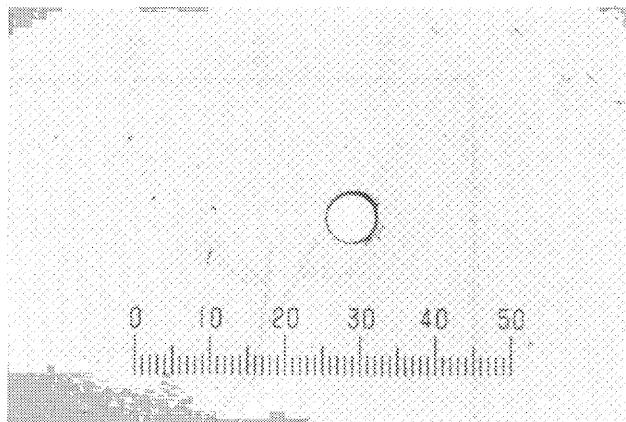


Fig. 4.2 近似流量



弁No. A の弁座
(ノズルNo. 1)



弁No. B の弁座
(ノズルNo. 6)
倍率× 100 倍

Photo. 4.1 弁座(ノズル)の顕微鏡写真

5. おわりに

試作した微小容量圧電素子弁のガス注入速度は設計値にはば等しい約 $0.02 \sim 0.51 \text{ Pa m}^3/\text{s}$ であり、応答速度およびシートリーグ量とも既設の仕様と同じ値である。これらの結果から本圧電素子弁は、充分実機に使用できると考えられる。今後経年変化を定期的に測定し、長期的な圧電素子弁の注入特性を把握する必要がある。

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、御指導を頂いた太田 充 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きました清水 正亜 JT-60 第2試験室試験グループリーダー及び JT-60 第2試験室の各位、本試験の遂行に協力頂いた住友重機機械工業㈱の関係各位に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 川崎, 平塚 ; JAERI-M 85-215 (1985年)

5. おわりに

試作した微小容量圧電素子弁のガス注入速度は設計値にはほぼ等しい約 $0.02 \sim 0.51 \text{ Pa m}^3/\text{s}$ であり、応答速度およびシートリーク量とも既設の仕様と同じ値である。これらの結果から本圧電素子弁は、充分実機に使用できると考えられる。今後経年変化を定期的に測定し、長期的な圧電素子弁の注入特性を把握する必要がある。

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、御指導を頂いた太田 充 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きました清水 正亜 JT-60 第2試験室試験グループリーダー及び JT-60 第2試験室の各位、本試験の遂行に協力頂いた住友重機機械工業㈱の関係各位に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 川崎、平塚 ; JAERI-M 85-215 (1985年)