

JAERI-M  
85-215

JT-60用圧電素子弁の開発  
(臨界プラズマ試験装置設計報告・159)

1986年1月

川崎 幸三・平塚 一

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, 1986

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 日立高速印刷株式会社

J T - 60用圧電素子弁の開発  
(臨界プラズマ試験装置設計報告・159)

日本原子力研究所那珂研究所 J T - 60試験部  
川崎 幸三・平塚 一

(1985年12月6日受理)

圧電素子を用いた、J T - 60用圧電素子弁の試作開発を行った。試作開発した圧電素子弁の流量特性、シートリーコンピュータ量及び経年劣化特性を、実環境条件で確認し満足できる特性結果が得られた。開発したJ T - 60圧電素子弁の特徴は、次のように要約される。

- (1) 圧電素子弁の流量値、シートリーコンピュータ量及び応答時間は、設計仕様値を満足できた。
- (2) 圧電素子弁の流量基本式を導出し、実験にて基本式の適用性を確認した。流量基本式は、十分圧電素子弁の設計に役立つことが確認できた。
- (3) 試作開発した圧電素子弁は、J T - 60の実動作環境下で十分信頼できる流量特性を有する。

Development of the piezoelectric gas injection  
valve for JT-60

Kazuo KAWASAKI and Hajime HIRATUKA

Department of JT-60 Facility

Naka Fusion Research Establishment, JAERI

(Received December 6, 1985)

Piezoelectric gas injection valve (PEV) for JT-60 have been developed which was a piezo-electric element.

The raliability of the PEV under the actual condition of high magnetic fields and high temperatures are veryfied, and it became clear that the PEV had enough throughput range and sufficient repeatability for long life throughput characteristics. Remarkables of the developed PEV are summarized as follows,

- (1) The maximum throughput rate, responce time and helium leakage rate satisfy the desiged specifications.
- (2) Throughput equation for PEV is clarified by comparison with experiment.
- (3) Reliabilities of PEV under the actual condition during coil power test become clear.

Keywords: Tokamak, JT-60, Piezoelement, Gas Injection, MKS Baratoron, Vacuum, Plasma, Gas Fuel Throughput.

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 設 計 .....	1
2.1 JT-60ガス注入装置の概要 .....	1
2.2 圧電素子弁の仕様 .....	2
2.3 基 础 式 .....	3
2.4 構 造 .....	6
3. 製作・据付け .....	10
3.1 製 作 .....	10
3.2 据 付 .....	11
4. 流量特性試験 .....	14
4.1 単体試験 .....	14
4.1.1 試験目的 .....	14
4.1.2 試験方法 .....	14
4.1.3 試験結果 .....	15
4.1.4 検 討 .....	18
4.2 経年劣化特性改良試験 .....	39
4.2.1 原因推定 .....	39
4.2.2 試験用供試体 .....	40
4.2.3 試験項目 .....	41
4.2.4 弁性能確認試験結果 .....	42
4.3 性能確認試験 .....	67
4.3.1 目 的 .....	67
4.3.2 試験方法 .....	67
4.3.3 試験結果 .....	68
5. おわりに .....	81
謝 辞 .....	81
参考文献 .....	81
付 錄 .....	82

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Design .....	1
2.1 Description of the gas injection system JT-60 .....	1
2.2 Specification of the piezoelectric gas injection valve .....	2
2.3 Basic throughput equation .....	3
2.4 Configuration of PEV .....	6
3. Fabrication and Installation .....	10
3.1 Fabrication .....	10
3.2 Installation .....	11
4. Test results and Discussions .....	14
4.1 Fundamental test .....	14
4.1.1 Test purpose .....	14
4.1.2 Test procedure .....	14
4.1.3 Test results .....	15
4.1.4 Discussions .....	18
4.2 Improvement test for the long life performance .....	39
4.2.1 Estimate of the causation .....	39
4.2.2 Candidate of the test .....	40
4.2.3 Test term .....	41
4.2.4 Test results .....	42
4.3 Performance test .....	67
4.3.1 Test purpose .....	67
4.3.2 Test procedure .....	67
4.3.3 Test results .....	68
5. Conclusions .....	81
Acknowledgements .....	81
Reference .....	81
Appendix .....	82

## 1. はじめに

ガス注入装置は、高真空になっている真空容器に、プラズマ粒子となる中性ガスを注入する装置である。プラズマ放電用ガスを注入するガス注入弁には、プラズマ実験のうえからガス注入弁の速応性及びガス流量の再現性を要求する。圧電素子弁は、圧電素子の圧電効果を応用したガス注入弁である。JT-60で必要とする、圧電素子弁の流量は、市販の圧電素子弁流量と比較して約40倍と大きい。本報告書は、圧電素子弁の試作開発結果及び試作開発した圧電素子弁を、JT-60真空容器に取りつけた状態で行った性能確認試験結果を述べる。第2章でガス注入装置及び圧電素子弁の設計について述べ、第3章で圧電素子弁の製作・据付について述べた。第4章で圧電素子弁の試験結果について述べる。

## 2. 設 計

### 2.1 JT-60ガス注入装置の概要

ガス注入装置は、JT-60本体真空容器にプラズマ放電用ガスを注入する装置である。放電用ガスには、水素、酸素、ヘリウム、ネオン、アルゴンを用いる。ガス注入装置は、Fig. 2.1 に示すように「注入部」「供給部」、「排気部」及び「制御装置」で構成される。注入部は、真空容器に注入する放電用ガスの注入量を直接制御する機能を有し、供給部は、放電用ガスを注入部に供給する機能を有する。排気部は、注入部及び供給部で不用になった放電用ガスを大気中に放出する機能を有する。

ガス注入装置の注入部は、4系統に分かれる。注入系-1は、放電用ガスに「水素ガス」のみを用いるものでガスの初期注入、プラズマ密度制御及びプラズマ電流遮断の目的に使用する。注入系-2は、放電用ガスに「酸素ガス」及び「不活性ガス」のみを用いるものでガスの初期注入、プラズマ密度制御、プラズマ電流遮断及び不純物注入の目的に使用する、注入系-3及び注入系-4は、プラズマ中に不純物ガスを注入するために使用する。ガス注入装置の系統図をFig. 2.2に示し、注入系に対応した放電ガス量及びガス流量を、Table.1にまとめて示す。

放電用ガスを、JT-60の実験・運転に対応して次のように真空容器内に注入する。

実験・最大長パルス放電洗浄時；

  プラズマ電流励起開始前からプラズマ電流停止の間に予め定めた注入波形のガス流量で真空容器内に放電用ガスを注入する。

最大短パルス放電洗浄、弱電流放電洗浄時；

  放電用ガスを、放電洗浄開始前から放電洗浄停止まで、連続して真空容器内に注入する。

注入弁の注入量は、マイクロ・コンピュータを内蔵したCAMACシステムの制御指令で制御する。

## 1. はじめに

ガス注入装置は、高真空になっている真空容器に、プラズマ粒子となる中性ガスを注入する装置である。プラズマ放電用ガスを注入するガス注入弁には、プラズマ実験のうえからガス注入弁の速応性及びガス流量の再現性を要求する。圧電素子弁は、圧電素子の圧電効果を応用したガス注入弁である。JT-60で必要とする、圧電素子弁の流量は、市販の圧電素子弁流量と比較して約40倍と大きい。本報告書は、圧電素子弁の試作開発結果及び試作開発した圧電素子弁を、JT-60真空容器に取りつけた状態で行った性能確認試験結果を述べる。第2章でガス注入装置及び圧電素子弁の設計について述べ、第3章で圧電素子弁の製作・据付について述べた。第4章で圧電素子弁の試験結果について述べる。

## 2. 設 計

### 2.1 JT-60ガス注入装置の概要

ガス注入装置は、JT-60本体真空容器にプラズマ放電用ガスを注入する装置である。放電用ガスには、水素、酸素、ヘリウム、ネオン、アルゴンを用いる。ガス注入装置は、Fig. 2.1 に示すように「注入部」「供給部」、「排気部」及び「制御装置」で構成される。注入部は、真空容器に注入する放電用ガスの注入量を直接制御する機能を有し、供給部は、放電用ガスを注入部に供給する機能を有する。排気部は、注入部及び供給部で不用になった放電用ガスを大気中に放出する機能を有する。

ガス注入装置の注入部は、4系統に分かれる。注入系-1は、放電用ガスに「水素ガス」のみを用いるものでガスの初期注入、プラズマ密度制御及びプラズマ電流遮断の目的に使用する。注入系-2は、放電用ガスに「酸素ガス」及び「不活性ガス」のみを用いるものでガスの初期注入、プラズマ密度制御、プラズマ電流遮断及び不純物注入の目的に使用する、注入系-3及び注入系-4は、プラズマ中に不純物ガスを注入するために使用する。ガス注入装置の系統図をFig. 2.2に示し、注入系に対応した放電ガス量及びガス流量を、Table.1にまとめて示す。

放電用ガスを、JT-60の実験・運転に対応して次のように真空容器内に注入する。

実験・最大長パルス放電洗浄時；

  プラズマ電流励起開始前からプラズマ電流停止の間に予め定めた注入波形のガス流量で真空容器内に放電用ガスを注入する。

最大短パルス放電洗浄、弱電流放電洗浄時；

  放電用ガスを、放電洗浄開始前から放電洗浄停止まで、連続して真空容器内に注入する。

注入弁の注入量は、マイクロ・コンピュータを内蔵したCAMACシステムの制御指令で制御する。

## 2.2 圧電素子弁の仕様

プラズマ実験で必要とするガス流量は、次のように要約される。(1)

### (1) 酸水素処理時の注入量

酸化処理 :  $1.4 \times 10^3 \text{ atm} \cdot \text{l}/\text{hr}$

水素環元 :  $3.9 \times 10^3 \text{ atm} \cdot \text{l}/\text{hr}$

### (2) 放電洗浄時の注入量

グロー放電 :  $0.28 \times 10^3 \text{ atm} \cdot \text{l}/\text{hr}$

パルス放電 :  $14.0 \text{ atm} \cdot \text{l}/\text{hr}$

### (3) 実験時の注入量

密度制御量 :  $93.1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{shot}$

電流遮断量 :  $46.6 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{shot}$

初期注入量 :  $47.9 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{shot}$

圧電素子弁の最大流量は、酸水素処理時の注入量から定まる。水素環元時の本体圧力は  $366.6 \text{ Pa}$  に到達する。本体排気速度を約  $600 \text{ l/s}$  に仮定すると、水素ガスの注入流量は、約  $220.0 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  となる。放電洗浄時の本体圧力は、約  $1.33 \text{ Pa}$  であるので本体排気速度を約  $6000 \text{ l/s}$  に仮定すると、放電洗浄時に必要なガス流量は、約  $8.0 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  となる。実験時の本体圧力を約  $6.7 \times 10^{-2} \text{ Pa}$  にすると本体排気速度約  $12000 \text{ l/s}$  から注入量約  $0.8 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  を必要とする。放電用ガスは、4箇所に配置したガス注入ポートから真空容器内に注入する。水素還元処理時、4箇所のガス注入ポートから真空容器内にガスを注入すると考えるなら、圧電素子弁の流量は、1台当たり  $53.3 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  となる。実験時及び放電洗浄時には、ガス注入ポートの2箇所から真空容器内に放電ガスを注入すると考えれば、圧電素子弁の流量は、1台当たり約  $0.4 \sim 4 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  となる。圧電素子弁の使用実験目的及び流量を考え、流量範囲の異なる圧電素子弁を2種類設計製作した。また、流量範囲の異なる圧電素子弁を組合せ、注入するガス流量範囲を広くとれるよう次のように流量範囲を定めた。

#### 大容量圧電素子弁(PEV-H)の流量

$$5.33 \sim 53.3 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$$

#### 小容量圧電素子弁(PEV-L)の流量

$$0.533 \sim 5.33 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$$

放電ガスの初期注入は、プラズマ励起直前に真空容器圧力を高めるために行なう。実験目的によっては、ガス注入を開始する時間とプラズマが励起される時間の時間差を短くする必要がある。この時間差は、JFT-2aで約  $2.0 \text{ msec}$  , JFT-2で約  $10 \sim 15 \text{ msec}$  である。(2) 時間差の値は、ガスを注入するポート容積、真空容器の容積及び排気速度によって異なる。JT-60に於いては、ガス注入を開始してから真空容器の圧力が所定の値に達するまでの時間差約  $10 \text{ msec}$  を要求している。時間差の要因には、ポート容積に起因する遅れと、圧電素子弁の開閉動作に起因する遅れがある。容積に起因する遅れは、約  $5 \text{ msec}$  以下になるようにガスマニホールドを設けた。

ールドの形状を定め、また圧電素子弁の開閉動作に起因する遅れを約 5.0 msec 以下になるよう圧電素子弁の設計を進めた。

注入する放電用ガスの純度は、水素ガスで 99.99999 %以上、水素ガス以外の純度 99.9 %以上である。放電用ガスの純度低下を防ぐため、配管には放出ガス量の少い材料を、また配管に付着している不純物を積極的に除去するため約 250°C 以上の温度でベーキングを行なうように設計を進めた。圧電素子弁のシートリーク量は、弁座シールに使用するバイトンゴムのガス透過率及びバイトンゴムの使用量から約  $1.33 \times 10^{-8}$  Pa · m<sup>3</sup>/s と定めた。これらをまとめると圧電素子弁の基本仕様は以下の如くなる。

	大 容 量	小 容 量
ガス流量 Pa · m <sup>3</sup> /s	5.33 ~ 53.3	0.533 ~ 5.33
動作時間 msec	< 5	< 5
シートリーク量 Pa · m <sup>3</sup> /s	< $1.33 \times 10^{-8}$	< $1.33 \times 10^{-8}$
温度 °C	120	120

### 2.3 基礎式

圧縮性を考慮したオリフィスやノズルから流出する気体の状態変化は、断熱変化として考えられるので、ベルヌイの式は、以下となる。(3)

$$P / r^k = \text{一定} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

$$z + \frac{k}{k-1} \frac{P}{r} + \frac{v^2}{2g} = \text{一定} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

$$r v A = \text{一定} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

式(1)は断熱変化、式(2)はベルヌイの定理、式(3)は重量の連続を表わす。

P ; 圧力

r ; 比重量

k ; 定圧比熱 C<sub>p</sub> と定格比熱 P<sub>v</sub>との比

v ; 流速

A ; 断面積

z ; 位置

孔の上流側断面と下流側断面に対して添字 1, 2 を用いて、単位時間に孔から流れるガス重量 G を求めると、式(4)となる。

$$G = r_2 v_2 A_2 \\ = A_2 \sqrt{2g r_1 P_1} \frac{\frac{k}{k-1}}{\sqrt{\frac{(\frac{P_2}{P_1})^{\frac{2}{k}} - (\frac{P_2}{P_1})^{\frac{k-1}{k}}}{1 - (\frac{A_2}{A_1})^2 (\frac{P_2}{P_1})^{\frac{2}{k}}}}} \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

上流側圧力  $P_1$  を一定に保持しながら、下流側圧力  $P_2$  をさげていくと、ガス重量  $G$  は、次第に増大する。しかし  $P_2 / P_1$  がある一定値に達すると、これ以下に  $P_2$  をさげても、ガス重量は増加しなくなる。このときガス重量は、上流側圧力  $P_1$  と  $r_1$  のみで決まる。 $P_1$  を一定に保ちながら、 $P_2$  を減少させ、式(4)の重量を最大にする関係を求める。式(4)の  $P_1 / P_2$  を示す関係を  $\phi$  で示すと(5)の如く表わせる。

$$\phi = \frac{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{2}{k}}} \quad \dots \quad (5)$$

ここで、 $P_2 / P_1 = x$ 、 $A_2 / A_1 = m$  と於いて  $\frac{d\phi}{dx} = 0$  から

$$x^{\frac{1-k}{k}} + \frac{k-1}{k} m^2 x^{\frac{2}{k}} - \frac{k+1}{2} = 0 \quad \dots \quad (6)$$

この式(6)を満足する  $x$  の値が臨界圧力比である。圧電素子弁のガス導入孔は、上流側断面に對して非常に小さいので、 $m \approx 0$  とおける。式(6)より  $x = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$  の時、ガス重量

$G$  は最大となる。

$x$  の値を、式(4)に代入すると、ガス重量  $G$  は、以下の式で表わせる。

$$G = A_2 \cdot \sqrt{P_1 \cdot r_1 \cdot g \cdot k \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad \dots \quad (7)$$

ガス重量  $G$  からガス流量  $Q$  の変換を考える。状態方程式より

$$r = \frac{W}{V} = \frac{P_1 \cdot M}{R T \times 10^3} \quad \dots \quad (8)$$

式(8)を用いて、式(7)のガス重量  $G$  は次式に改められる。

$$Q = G \cdot \frac{R T}{M} \times 10^3 \\ = 31.62 A_2 P_1 \times \sqrt{K \cdot \frac{R T}{M} \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+2}{k-1}}} \quad \dots \quad (9)$$

式(9)は、ガス導入孔の圧損係数  $C_d$  を用いて再度ガス流量  $Q$  を求めると次式となる。

$$Q = 31.62 A_2 P_1 C_d \cdot \sqrt{k \cdot \frac{RT}{M} \cdot \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad \dots \dots \dots \quad (10)$$

圧電素子の変位式は、下記で表わせる。( Appendix-1 )

$$\delta \simeq \frac{3}{4} d_{31} \left( \frac{D}{t} \right)^2 \cdot V \times 10^6 \quad \dots \dots \dots \quad (11)$$

ガス通過面積  $A_2$  は、次の如く仮定する。

$$A_2 = \pi \cdot \left( \frac{d_1 + d_2}{2} \right) \cdot (\delta - \delta_0) \times 10^{-8} \quad \dots \dots \dots \quad (12)$$

ここに

$Q$	注入速度	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$
$C_d$	圧損係数	0.6
$A_f$	ガス通過面積	$\text{m}^2$
$P$	背压	$\text{Pa} (\text{abs})$
$R$	ガス定数	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{K mol}$
$M$	分子量	$\text{g/mol}$
$T$	温度	$\text{K}$
$K$	注入ガスの比熱比 ( $C_p/C_u$ )	
$d_1$	ノズル内径	$\text{cm}$
$d_2$	ノズル外径	$\text{cm}$
$\delta$	圧電素子変位	$\mu\text{m}$
$\delta_0$	圧電素子初期縮量	$\mu\text{m}$
$D$	圧電素子外径	$\text{mm}$
$V$	印加電圧	$\text{V}$
$d_{31}$	圧電歪定数	$\text{m/V}$

圧電素子弁の設計最大流量は、入口圧力 0.2 MPa (gauge)，最大印加電圧 175V のとき得られるように圧電素子弁の基本構造諸量を定めた。ノズルの孔形状は、鋭敏に加工製作することでガス通過部の圧損係数  $C_d$  を約 0.6 に、また圧電素子初期縮量  $\delta_0$  を、約 30  $\mu\text{m}$  に仮定した。圧電素子は、国内メーカーより入手する方向で設計を進めた。圧電素子弁の設計諸量を以下に示す。

	大 容 量	小 容 量
圧電素子(4)		
圧電定数 $d_{31} \times 10^{-12} \text{ m/v}$	150	180
比誘電率	1800	1800
キュウリ温度°C	320	350
印加電圧 $V_{dc}$	200	200
入口圧力 MPa [gauge]	0.196	0.196
素子径 mm $\phi$	75	35
素子厚さ mm	1.00	1.00
素子形成	バイモルフ	バイモルフ
ノズル径 mm	1.0	1.0

## 2.4 構 造

圧電素子弁の構造を Fig.2.3 に示す。圧電素子弁は、筐体、弁座、シール材、圧電素子及び絶縁セラミックから構成される。圧電素子は、円板で厚さ方向に電極を有する。圧電素子の電極に電圧を印加すると、印加電圧に比例した歪を生ずるので、ガス導入孔よりガスが流れる。圧電素子弁の真空シールは、ガス導入孔と圧電素子中央部のバイトンゴムで確保する。スプリングは、ヒステリシスによって生ずる圧電素子の残留歪を強制的に初期位置へもどすために取りつけている。圧電素子弁の外観を Photo.1 に示す。

Table 2.1 Specification of gas feed line of gas injection system

Feed line	Function	Valve x Number	Max. supply amount by one shot Pa m <sup>3</sup>
Main Feed line (H <sub>2</sub> only)	① Quick initial gas filling ② Slow initial gas filling ③ Density control ④ Plasma termination	FMV- H x 2 PEV- H x 4 PEV- L x 2	8 467 13.3
Auxiliary feed line (O <sub>2</sub> , He, Ne, etc)	① Slow initial gas filling ② Density control ③ Plasma termination ④ Quick impurity injection ⑤ Slow impurity injection	FMV- L x 2 PEV- H x 4 PEV- L x 2	1.9 467 13.3
Impurity feed line - I , - II (He, Ne, Ar, etc)	① Slow impurity injection	PEV- L x 4	13.3

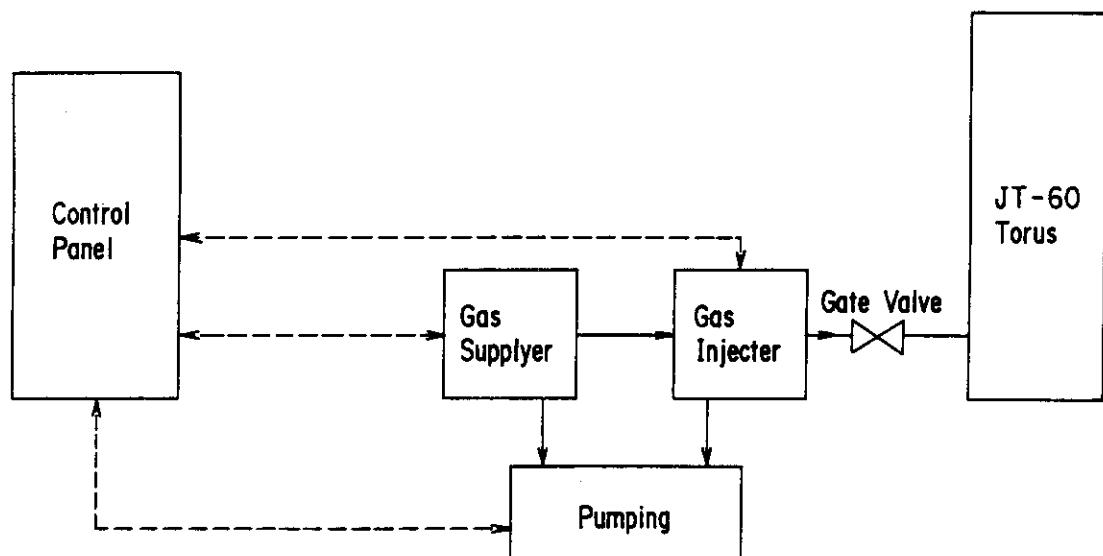


Fig. 2.1 Schematic diagram of gas injection system

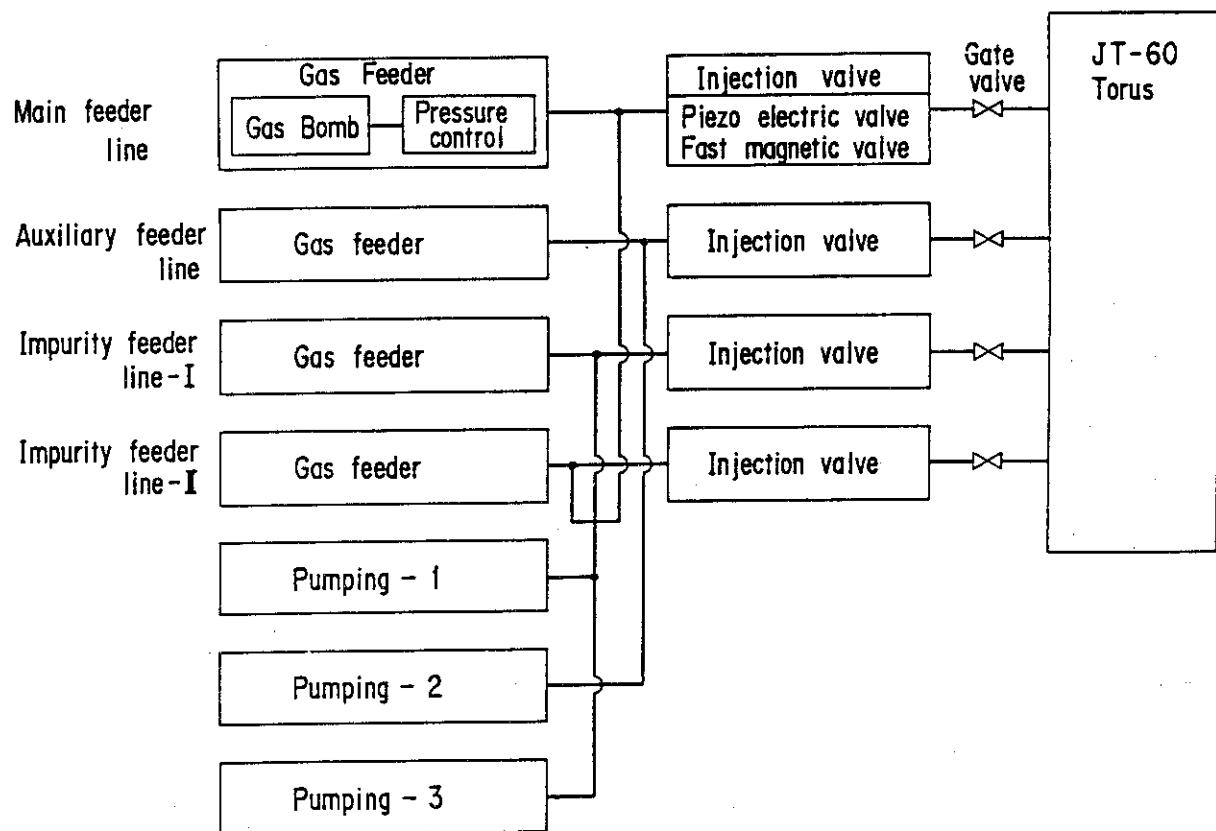


Fig. 2.2 Structure of gas injection system

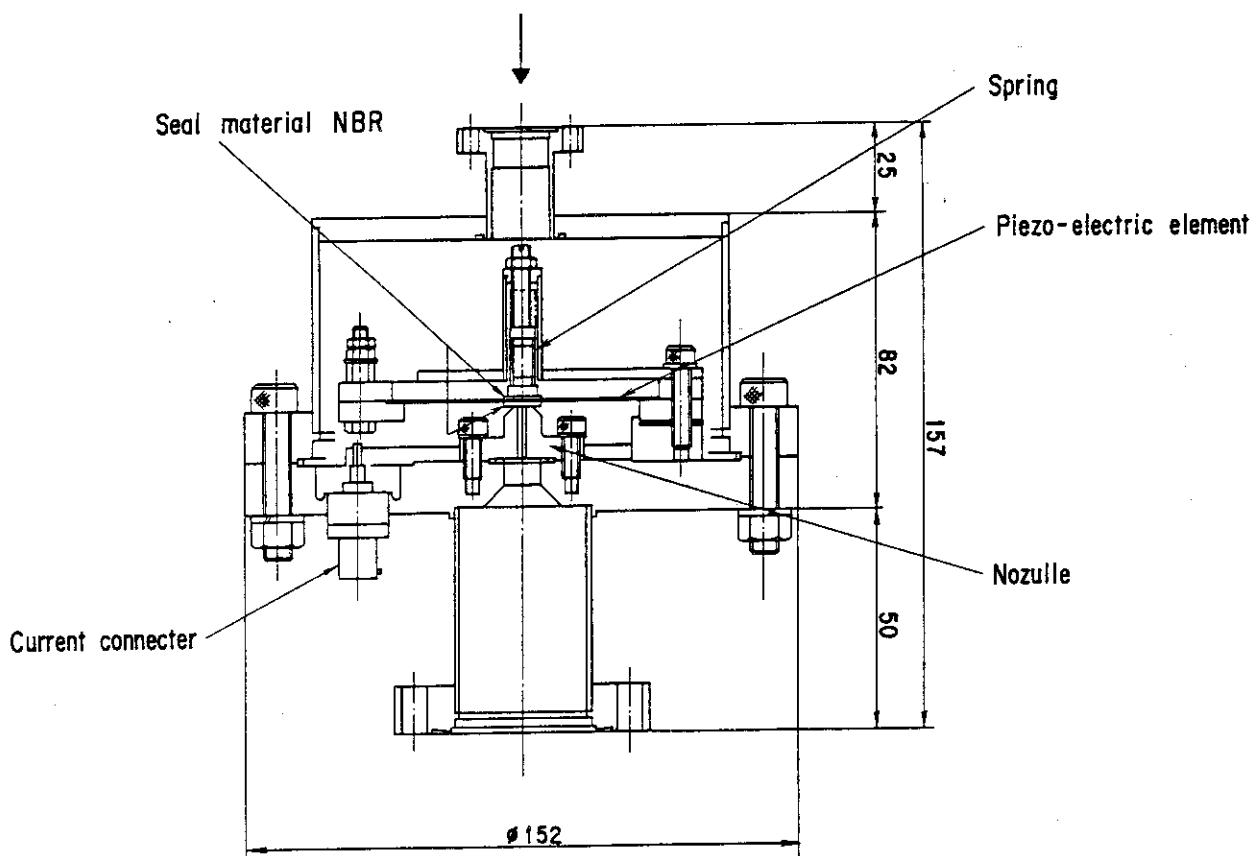


Fig. 2.3 Cross-sectional view of the large sized PEV

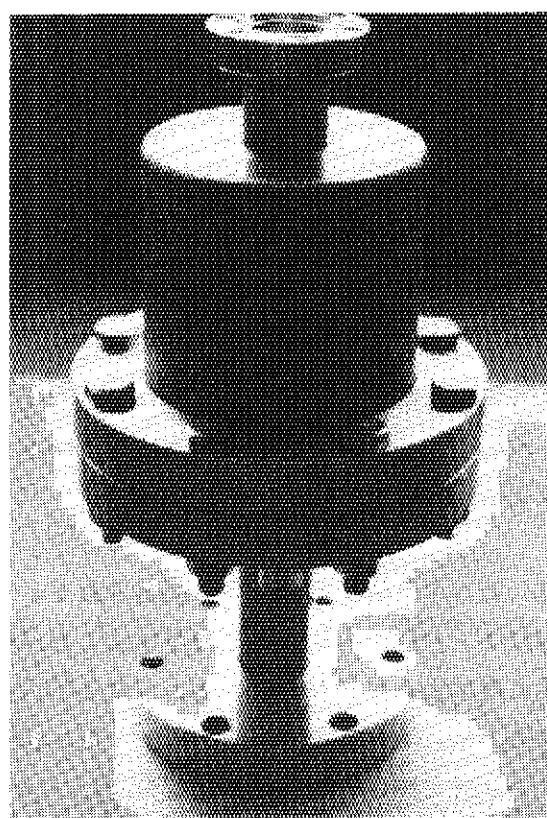
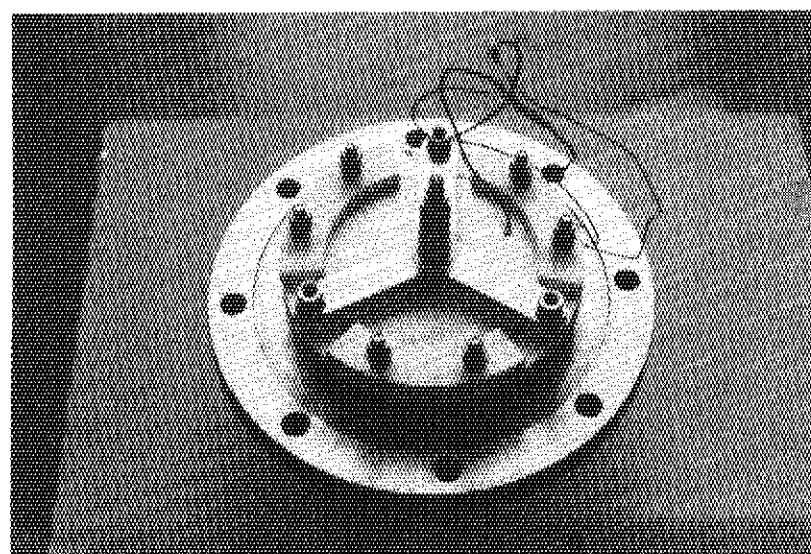


Photo. 1 Appearance of PEV-H

### 3. 製作・据付け

#### 3.1 製作

##### (1) 圧電素子の選定

圧電歪定数は、電極に印加した電圧によって生ずる歪量を示す。ガス流量は、同一のガス導入孔断面積に対して、圧電歪定数の大きいものはほど大きくとれる。キュウリ温度は、圧電素子の残留分極が消滅する温度を示すので、圧電素子の使用温度が高いと性能を劣化させる。JT-60では、シール材にゴム材を使用することから圧電素子は、ゴム材の使用温度を考え、圧電歪定数の大きい素子を選定した。圧電素子は市販されている圧電素子に比べ、約1.5倍の75 mm $\phi$ バイモルフ型圧電素子を必要とする。バイモルフ型の圧電素子は、2枚の圧電素子を薄い導電性の金属板に接着している。

2枚の圧電素子には、同一電圧が、印加されるので順方向の電界と逆方向の電界が与えられる。圧電素子に逆電界が加わると、圧電効果は弱まる。また、導電性の電極との絶縁確保から、圧電素子には、最大175Vまで印加できるように、圧電素子の選定を行った。選定した圧電素子の特性を、Table 3.1に示す。これらの圧電素子は、国内にて入手可能である。

##### (2) シール材の選定

圧電素子の真空性能は、シール材料とノズル構造で決まる。圧電素子弁のシートリークは、スプリングを用いてシール材を押しつけ防止する。スプリングの押付によるシール材の初期縮み量は、荷重除去後の復元時間及びシール材の圧縮永久歪に影響される。

一般に、長時間シール材を押しつけるとシール材の復元力は低下する。これは、圧電素子の変位増加に結びつき、ガス流量がその変位に相当する量だけ増加する。シール材の残留変位を一定にするため、予めシール材を加圧ベーキング(約150×4時間)で硬化させて、残留変位の一定化を計った。詳細は4.2経年劣化特性改良試験で述べる。

##### (3) 弁座面

圧電素子弁の流量特性は、ガスの通過する断面積に影響される。シール材を弁座に押しつけて、真空シールを確保するので、シール材が弁座に接着することが懸念される。この接着事象は、圧電素子弁の流量特性に次のように表われる。本来ガスが注入を開始する開始電圧より高い電圧値でガスの注入が行なわれ、それ以上の電圧では、本来の印加電圧に対応したガス流量と同じ流量が得られる。シール材と弁座の粘着防止は、弁座にテフロン・コーティングを施すことで解決できた。弁座の形状はFig.3.1に示すように、スプリングの押付力で得られるシール材の面圧を高めシール材と弁座の接着面積が少なくなる形状に設計してある。各種試験にもとづいてガスの通過口径は、大容量で、約1.0mm $\phi$ 、小容量では、0.3mm $\phi$ から0.4mm $\phi$ に設計変更された。詳細は、4.2経年劣化特性改良試験で述べる。

### 3.2 据付け

圧電素子弁は、ガス注入マニホールドの枝管に高速圧力検出器と一緒に取りつけられる。圧電素子弁の取付員数をTable 3.2に示す。

圧電素子弁は、取付け場所によって上向き、下向きに取りつく。圧電素子弁のガス流量特性は、圧電素子弁の取付方向に影響される。例えば、下向きに取りつく圧電素子弁では、圧電素子、スプリング等の重量が、電圧印加時に生ずる圧電素子の押揚げ力と同じ方向になるのでガス流量が増加する。圧電素子弁の流量較正は、圧電素子弁の取付方向を考慮して行った。ガス注入マニホールドには、脱ガス用のベーキングヒータが取りつけられ、250°Cの高温ベーキングが実施されている。圧電素子弁の取付外観をPhoto.2に示す。写真はポートセクションP-6上部のガスマニホールドである。P-6ガスマニホールドには、圧電素子弁が4台取りついている。

Table 3.1 Characteristic of Piezoelectric Element

	PEV-L	PEV-H
Permittivity $\epsilon_s$	1800	1800
Charge coefficient $d_{31} \times 10^{-12}$ m/v	180	152
Density gr/cm <sup>3</sup>	7.7	7.4
Curie temperature °C	350	320

Table 3.2 Installation of PEV and MKS baratron gauge

Port section	PEV number	MKS baratron gauges
P6-GM1	5	5
P11-GD1	3	1
P15-GM2	5	5
P18-GD1	3	1

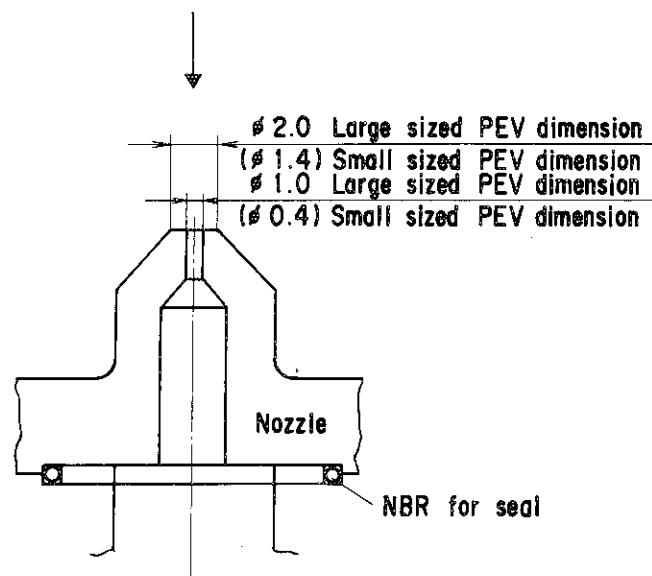


Fig. 3.1 Nozzle configuration of PEV

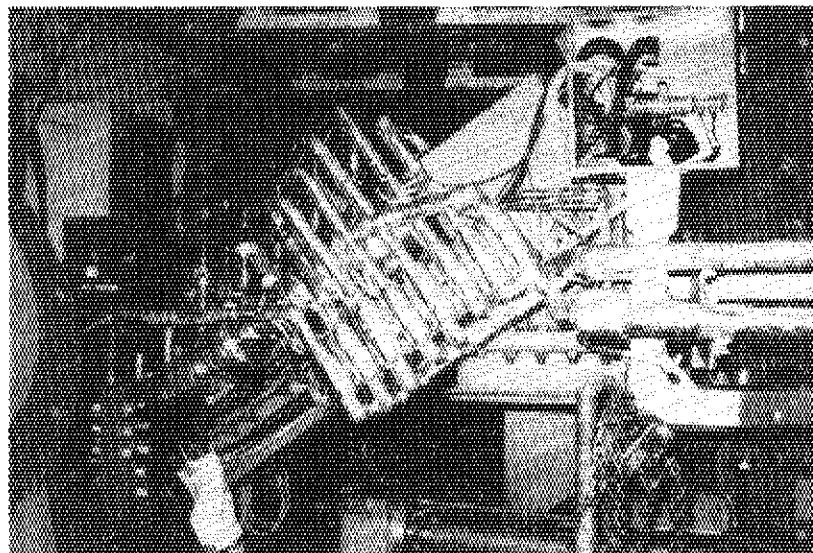


Photo. 2 View of the port section 6 showing  
P-6 GML port

## 4. 流量特性試験

### 4.1 単体試験

流量特性式の適用範囲を検討する。JT-60では放電ガスとして水素( $H_2$ )、酸素( $O_2$ )、ネオン( $N_e$ )、アルゴン( $A_r$ )が用いられる。放電ガスが異なっても、目標とするガス流量を正確に真空容器内に注入する必要がある。単体試験では、圧電素子弁の背圧、注入するガス種別を変えて実施した実験結果と解析結果から流量特性式の適用範囲について検討を行った。また、圧電素子弁の各種基礎特性についても実験を行ないその特性を確認した。単体試験で製作した圧電素子弁のノズル口径は、大容量で  $1.0 \text{ mm}^\phi$  小容量で  $0.3 \text{ mm}^\phi$  である。

#### 4.1.1 試験目的

圧電素子弁の印加電圧、背圧、注入ガスの種類を変えながら、ガス流量を測定し、流量式の妥当性、圧電素子弁の基礎特性(動作時間、パルス幅との関係)、寿命特性及び温度特性を明らかにする。

#### 4.1.2 試験方法

圧電素子弁は、Fig.4.1に示す測定装置の容器本体に取りつけられる。容器本体の容積は約  $1.0 \text{ m}^3$  である。容器は、排気ポンプで排気され約  $1.33 \times 10^{-8} \text{ Pa}$  の到達圧力が得られる。試験手順は以下のとおりである。排気ポンプで容器内の圧力を約  $1.33 \times 10^{-6} \text{ Pa}$  まで排気し、その後排気ポンプ入口弁を閉じる。次に圧電素子弁から、ガスを注入する。圧電素子弁の流量は容器内圧力上昇値( $\Delta P$ )、ガスの注入時間( $\Delta T$ )及び容器容積( $V$ )から次式で求めた。

$$Q = V \times \Delta P / \Delta T$$

$\Delta P$  : 圧力上昇 (Pa)

$V$  : 容器容積 ( $\text{m}^3$ )

$\Delta T$  : ガス注入時間 (sec)

$Q$  : 注入速度 ( $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$ )

#### (1) 流量特性試験

圧電素子弁のシートリリーク量が  $1.33 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$  以下になるようスプリングを調整し、次の項目を確認する。

##### a. 流量特性

圧電素子弁の印加電圧を変えながら、ガス流量を測定する。

##### b. 動作時間

圧電素子弁の出口フランジに取付けられる高速圧力検出器の圧力波形から圧電素子弁の全閉-全開の動作時間を求める。

## (2) 寿命特性

圧電素子弁に背圧値 0.2 MPa (gauge) の窒素ガス ( $N_2$ ) を供給し、高速圧力検出器で注入量を計測しながら寿命特性試験を実施した。圧電素子弁には繰り返し時間 2.0 sec, 印加電圧 175 V, パルス幅 100 msec の電圧を繰り返し印加した。

## (3) 溫度特性試験

圧電素子及びシール部に使用するバイトンゴムの耐熱性確認、さらに圧電素子弁の高温寿命試験を行ない圧電素子弁流量、シートリーク量の測定を行なった。

## a. 耐熱性確認

圧電素子弁の温度を  $110 \pm 40^\circ\text{C}$  で 4 時間保持させた後、室温まで降温し、室温にて圧電素子弁のシートリーク及び流量の測定を行った。

## b. 高温寿命試験

圧電素子弁の温度を  $110 \pm 10^\circ\text{C}$  に保ちながら圧電素子弁に電圧を繰り返し印加し、5000 回印加した後室温まで降温し圧電素子弁のシートリーク量及び流量の測定を行なった。

## (4) 振動試験

圧電素子弁を疲労試験機に取り付け、加速度 8.5 G で振動試験を行なった。試験の後、圧電素子弁のシートリーク量の測定を行なう。

## 4.1.3 試験結果

## (1) 流量特性試験

## a. 最大流量と最小流量

注入ガスに水素 ( $H_2$ ) を用い、背圧を変化させた場合の流量特性を Fig.4.2 に示す。

PEV-H 及び PEV-L の最大流量及び最小流量は次の値になった。

背圧	P E V - H		P E V - L	
	流量 $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	動作電圧 V	流量 $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	動作電圧 V
0.392	2.5 ~ 96.0	60	0.08 ~ 6.7	75
0.196	1.6 ~ 61.3	60	0.07 ~ 4.3	75
0.049	1.1 ~ 32.0	60	0.037 ~ 2.0	75

動作電圧とは、圧電素子弁からガスが流れ初まる最小印加電圧を意味する。

## b. 注入ガスとの関係

注入ガスを変えるとガス流量は、ガスの物性値で定まる一定の比率で変化する。Fig.4.3 に試験結果を示す。注入ガスとして水素 ( $H_2$ )、窒素 ( $N_2$ ) を使用した場合の流量比は、PEV-H で流量比  $Q(H_2)/Q(N_2)$  は、約  $3.55 \sim 3.68$  PEV-L で流量比  $Q(H_2)/Q(N_2)$  は、約  $3.08 \sim 3.52$  である。

## c. 背圧との関係

背圧が変わればガス流量はその背圧の絶対圧力に比例して変化する。Fig.4.4 ~ Fig.4.5 は、注入ガスとして水素 ( $H_2$ )、窒素 ( $N_2$ ) を用いて背圧を変えた場合の流量を示す。背

圧 0.196 MPa [ gauge ] のガス流量と背圧 0.392 MPa [ gauge ], 0.049 MPa [ gauge ] に変えた場合の流量比は、以下のようなになる。

背 圧 ( P ) MPa [ gauge ]	流量比 Q ( P ) / Q ( 0.2 MPa )	
	P E V - H	P E V - L
0.392	1.46 ~ 1.57	1.56 ~ 1.6
0.049	0.482 ~ 0.516	0.418 ~ 0.483

#### d. パルス幅との関係

圧電素子に印加する電圧の印加時間(パルス幅) 10, 100, 1000 msec に変えた場合の流量特性を、Fig.4.6 に示す。P E V - H, P E V - L とも流量特性に類似の傾向を示す。パルス幅を、100, 1000 msec に変えても流量特性に変化はみられない。パルス幅を 10 msec にするとガスの流れ初まる注入開始電圧は幾分増加する。児玉の実験(5)によると、パルス幅を 10 msec にするとそのガス流量は、パルス幅 100 msec に比較し約 30 % 増加することが報告されている。本実験では、パルス幅を変えても流量には影響を与えない結果が得られた。

#### e. 動作時間

圧電素子弁からガスを注入した時の MKS バラトロン真空計の圧力応答を Fig.4.7 に示す。波形は圧電素子に電圧を印加する信号を基点にして、ストレージオシロで観察した。圧力波形の立上り、立下り時間は、約 2.5 msec である。この値は、圧電素子弁の仕様応答時間 5.0 msec に比べ十分満足できる値である。

#### (2) 寿命試験

試験結果を Fig.4.8 に示す。P E V - H の寿命試験では印加電圧 80 V 以下の低流量に於いて約  $0.27 \sim 0.07 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  ( $\text{N}_2$ ) の差は見られるものの 5000 回の繰り返し試験結果では、流量特性に差はないと言える。P E V - L の寿命試験結果では約  $0.133 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  ( $\text{N}_2$ ) 程度流量が増加している。

寿命試験前後の圧電素子変位量を Fig.4.9 に示す。P E V - H の変位量は寿命試験で約 3 ~ 4  $\mu\text{m}$  増加している。P E V - H の最大変位量に比較してこの値は 1 ~ 3 % に相当なるので圧電素子弁のガス流量としても小さな変化値にする。P E V - L の変位量は寿命試験後で、圧電素子に印加する電圧に関係なく約  $1.0 \mu\text{m}$  程度増加している。この変位量は最大変位の約 5 ~ 6 % に相当するので、ガス流量として約  $0.133 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  ( $\text{N}_2$ ) の流量変化になった。

圧電素子変位の増加する原因には、圧電素子抑えバネのゆるみシート部に使用するバイトンの永久歪(圧縮に対する復元力低下)の増加及びバイトンの硬化が考えられる。

#### (3) 温度特性

耐熱性確認試験の結果を、Fig.4.10 に示す。弁シートリーク量は Table 4.1 に示すよう試験後にリークが発生している。ベーキング前後の圧電素子変位量を比較すると、P E V - H 及び P E V - L ともベーキング試験後の大きい変位量を示す。P E V - H の圧電素子変位は、圧電素子に印加する電圧が小さいと圧電素子変位が極端に小さくある電圧以上から試験前の値まで飛びはねている。この現象は、シート部のバイトンが弁座に密着したものと想像される。圧電

素子変位量は、圧電素子に印加する電圧に比例と言えるものの、PEV-Hの方がPEV-Lより直線性に優れている。ベーキング後の圧電素子変位は、PEV-H, PEV-Lとも圧電素子に印加する電圧とは無関係に一定の変位量だけ移動している。この値はPEV-Hで約7~14 μm, PEV-Iでは約1~2 μmである。

高温寿命試験の結果をFig.4.11に示す。圧電素子変位量は、耐熱性確認試験と同様に試験後の変位量が大きく、その値は約20 μmである。変位量は圧電素子に印加する電圧とは無関係に一定量だけ増加している。この増加量は静的に実施した耐熱性確認試験の変位量に比べ、約43%大きい。この原因としては、耐熱性確認試験と同じようにバイトンの永久歪や硬化、繰り返し動作による圧電素子押さえバネのゆるみ等が考えられる。

#### (4) 振動試験

振動試験は、PEV-Hの圧電素子弁を用いて行った。疲労試験機で最大8.5 Gの加速度を加えた結果圧電素子を押さえているセラミックの一部が破損した。原因是、圧電素子の押さえ板（セラミック）を固定するネジのナットが外れたためである。設計ではダブルナット方式でゆるみ防止を計った。圧電素子の押さえネジは、割りピンを使用して振動によるネジのゆるみを防止するように改善する必要がある。

#### (5) 追加試験

##### a. TFTR用圧電素子との比較

TFTRの圧電素子弁に使用予定の圧電素子を、試作したPEV-H用の弁体に取りつけて、JT-60用大容量圧電素子弁と特性比較を行った。流量特性及び、圧電素子の変位量測定結果をFig.4.12に示す。Table 4.2は圧電素子の特性比較である。

流量特性を比較すると、JT-60用圧電素子弁のガス流量は、圧電素子に印加する電圧と比例したガス流量が得られたが、TFTR用圧電素子を用いると、圧電素子に印加する電圧70Vを境に、異なる流量傾度の特性を示す。ガスの注入が開始する開始電圧は、TFTR用圧電素子の場合で約55V, JT-60用電圧素子で約60Vである。ガス制御弁としては、ガス流量と圧電素子の印加電圧に直線関係があり、しかも、圧電素子の印加電圧を広範囲にとれる圧電素子弁が望ましい。JT-60用圧電素子弁は、圧電素子の印加電圧範囲をTFTRの圧電素子に比べて大きくとれるので幾分優れていると言える。

圧電素子変位は下式で求まる。

$$\delta = \frac{3}{4} \left( \frac{D}{t} \right)^2 d_{31} V \times 10^6 \text{ } \mu\text{m}$$

ここに D ; 圧電素子径

t ; 圧電素子厚さ

$d_{31}$  ; 圧電歪定数

従って圧電素子を変えた場合の変位比は次のようになる。

$$\frac{\text{JT-60圧電素子変位}}{\text{TFTR圧電素子変位}} = \left( \frac{t^T}{t^J} \right)^2 \cdot \frac{d_{31J}}{d_{31T}}$$

ここで、 $t$  は素子の厚さ、 $d$  は圧電歪定数を添字 J を J T - 60用圧電素子は、T は TFTR 用圧電素子を示す。計算では 0.76 であるが、実測した圧電素子変位を比較すると TFTR 用圧電素子変位は、J T - 60用圧電素子変位より小さい結果となった。

### b. P V - 10の流量特性

現在市販の P V - 10について、流量特性及び圧電素子の変位測定を行った。試験結果を、Fig.4.13に示す。P E V - Lでは、圧電素子の印加電圧が P V - 10より広範囲で、変位量も電圧に比例した値である。ガスが注入される圧電素子動作電圧は、P E V - Lで約 50 V、P V - 10で約 60 V である。流量特性を比較すると、P V - 10のノズル口径は、P E V - Lのノズル口径より大きいのでガス流量が大きい。背圧 0.196 MPa [gauge] で窒素ガス ( $N_2$ ) を使用した場合のガス流量は以下となつた。

$$P V - 10 \quad 0 \sim 2.7 \text{ Pa} \cdot m^3/s \quad (50 \sim 100 \text{ V})$$

$$P E V - L \quad 0 \sim 1.2 \text{ Pa} \cdot m^3/s \quad (75 \sim 175 \text{ V})$$

ガスの注入を開始する動作電圧は、P E V - L 約 75 V で、P V - 10 約 55 V である。P E V - L は、ノズル部の真空シールを得るためにバイトンを、約  $15 \mu m$  つぶしていることや、圧電素子押さえバネを設けているため P V - 10 の動作電圧に比べ高い値となつた。

#### 4.1.4 検討

##### (1) 圧電素子の流量式について

圧電素子弁の流量特性について、その適用範囲を検討する。再度流量式を以下に記す。

$$Q = 31.62 \cdot C_d \cdot A_f \cdot P \cdot \sqrt{\frac{RT}{M}} \cdot \sqrt{K \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$$

$$A_f = \pi \cdot \left(\frac{d_1 + d_2}{2}\right) \cdot (\delta - \delta_0) \times 10^{-4}$$

$$\delta = \frac{3}{4} \cdot \left(\frac{D}{t}\right)^2 \cdot d_{31} \cdot V \times 10^6$$

但し

$Q$ ; 注入速度	$\text{Pa} \cdot m^3/s$
$C$ ; 圧係數	0.6
$A_f$ ; ガス通過最小断面積	$m^2$
$P$ ; 背圧	$\text{Pa}$
$R$ ; ガス定数	$\text{Pa} \cdot m^3/K \text{ mol}$
$M$ ; 分子量	$\text{g/mol}$
$T$ ; 温度	$K$
$K$ ; 定圧比熱 $C_p$ と定容比熱 $C_v$ の比 ( $C_p/C_v$ )	
$d_1$ ; ノズル内径	$cm$
$d_2$ ; ノズル外径	$cm$

$\delta$	圧電素子変位	$\mu\text{m}$
$\delta_0$	素子押さえ代 約15~30	$\mu\text{m}$
D	圧電素子外径	mm
t	圧電素子厚さ	mm
V	印加電圧	V
$d_{31}$	圧電歪定数	$\text{m/V}$

### a. 簡易式

上記の流量式について考えるとKの値は注入ガス物性値である。注入ガスの種類が変われば値も変わるが、同一ガスの場合定性的に圧力変化あるいは温度変化に対しほぼ一定の値となる。注入ガスの温度が一定の場合上記の流量式は下記の如く表わせる。

$$Q = a (V - b) (P + c)$$

ここに

V	； 印加電圧	
P	； 背圧(ゲージ圧力)	MPa [gauge]
a,b,c	； 定数 但し，cは 0.101 MPa	
Q	； ガス流量	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$

ガス流量は、背圧一定の場合圧電素子の印加電圧に比例し、電圧一定の場合、背圧の絶対圧力に比例する。

### b. 流量式の適用

#### (i) 注入ガスとの関係

注入ガスとして水素( $H_2$ )と窒素( $N_2$ )の場合の流量比は以下となる。

$$f = \frac{Q(H_2)}{Q(N_2)} \cdot \sqrt{\frac{M(N_2)}{M(H_2)}} \cdot \frac{\left\{ K \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right\}_{H_2}}{\left\{ K \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right\}_{N_2}} = 3.731$$

実験結果を示すとFig.4.14の如くPEV-Hで約3.55~3.68, PEV-Lでは約2.98~3.52である。実験値は圧電素子の印加電圧が大きくなるに従い計算値に近い値を示す。圧電素子の印加電圧が100V以上の場合PEV-Hの流量比は計算値の約98%, PEV-Lでは約83~94%である。

#### (ii) 背圧との関係

ガス流量は背圧の絶対圧力に比例する。背圧0.196 MPa [gauge]の場合のガス流量と背圧0.392 MPa [gauge], 0.049 MPa [gauge]のガス流量比は下記となる。

$$f_p = \frac{Q(4)}{Q(2)} = 1.659$$

$$f'_p = \frac{Q(0.5)}{Q(2)} = 0.505$$

実験結果を Fig.4.15 に示す。PEV-H では,  $f_p = 1.46 \sim 1.57$ ,  $f_p = 0.482 \sim 0.516$  また PEV-L では  $f_p = 1.56 \sim 1.60$ ,  $f_p = 0.418 \sim 0.483$  となった。全体的に背圧を高くした場合, PEV-L の流量比が計算値に近づく傾向を示す。この原因は次のように想像される。背圧の増加は、圧電素子押え力の増加となる。背圧を高くすると、ノズル径の大きいので流量比が低くなる。これに背圧を低くすると、圧電素子に印加する電圧よりも径の大きい圧電素子の変位量が大きくなるので、PEV-L に比べ PEV-H の流量比計算値に近い値を示す。

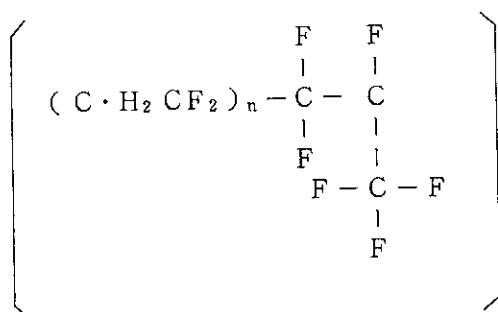
### (iii) 流量式と実験誤差について

実験結果と解析結果の比較を Fig.4.16 に示す。ガス流量及び圧電素子変位の解析では、圧電素子の厚さ、圧電歪定数などは実測した値を用いた。シール材の初期縮み量  $\delta_0$  は、ガスの注入が開始する電圧（実験値）を用いて評価した。ガスの注入を開始する電圧は、小容量圧電素子弁で約 85 V, 大容量圧電素子弁で約 62 V である。大容量圧電素子弁の圧電素子変位及びガス流量の解析値は実験値と良く一致している。小容量圧電素子弁の圧電素子変位の実測値は計算値より幾分低い値を示した。小容量圧電素子弁の印加電圧が、150 V 以下で測定されるガス流量は、幾分、計算値より大きい。実験結果から流量式は圧電素子弁の流量設計に十分適用できると判断される。

### (2) シートリークについて

温度特性試験で得られた(1)シート部からのリーク発生、(2)試験後の圧電素子変位増加について考えてみる。

圧電素子のキュウリ温度は PEV-H で 320°C, PEV-L で 350°C と試験温度 110°C に比べ、2 倍以上の値であるので、圧電効果が試験温度で低下するとは考えにくい。温度特性試験前後の圧電素子変位増加は、圧電素子に印加する電圧に依存せず、ほぼ一定の量だけ移動している。圧電素子の変位が一定量だけ移動する原因是、シートリークを防止するバイトンの初期縮み量が変化したものと想像される。この増加した圧電素子変位量は、PEV-H で約 15 μm, PEV-L で約 1 ~ 2 μm である。試験温度にさらしたバイトンを未使用のバイトンと比較してみた。外観的に使用中のバイトンは、(1)バイトンの断面が円形状でなくノズル部との接触面が平坦状になっている。(2)柔軟性はなく固かった。(3)接触面は光沢している。等が観察された。バイトンは、ふつ化ビニリデンと六ふつ化プロピレン共重合体でその構造は次に示される。



性質としては従来のゴム材質に比較し、耐熱性、耐薬品性に優れていること、加えて、真空シール材としてのガス不透性が良いことである。小林(6)らの報告結果からバイトンの圧縮特性のうち次の 2 点に注意する必要がある。第 1 点は、バイトンを常温で、20 ~ 30% 圧縮し、70 時

間後に荷重を除去して、元の厚みに復元するまでの時間である。試験結果によると荷重除去後、約2分で約92%まで又、60分で約94%まで復元することを示している。第2点は圧縮永久歪である。100°F以下の温度では、圧縮永久歪は生じないが、それ以上の温度で使用する場合には、圧縮永久歪が生ずることである。以上の点から試験温度にさらされたバイトンの収縮性がそこなわれ、圧電素子押さえバネ等の圧縮力及びシールを確保するために行っている初期のバイトンつぶし力に対し、圧電素子に電圧を印加してもバイトンが復元せず、初期のバイトンつぶし代約20~30 μmを確保できないものと考えられる。PEV-HとPEV-Lの圧電素子変位の増加量の差は、外部から加える圧縮量が異なることに基づくものと想像される。

### (3) 実機圧電素子弁の製作について

予備試験の結果から実機の圧電素子弁製作に際し次の技術改善が必要になった。

#### a. ガス流量特性

PEV-H及びPEV-Lのガス流量は設計仕様に比べ30%大きな流量が得られた。ガス流量は圧電素子に印加する電圧とは比例関係があるものの、実験値から求められる簡易流量式(1次の直線近似)で注入するガス量を±10%以内に制御すると考えるなら圧電素子弁の流量分担は次のように変更する必要がある。

$$\text{PEV-H} \quad 5.33 \sim 53.3 \text{ pa m}^3/\text{s}$$

$$\text{PEV-L} \quad 0.53 \sim 5.33 \text{ pa m}^3/\text{s}$$

背圧0.196 MPa [gauge]の場合PEV-Hでは、65V以上から±6%の精度で圧電素子弁の制御ができる、PEV-Lでは90V以上から±8%の精度で圧電素子弁の制御ができる。本実験に於いてはPEV-H及びPEV-Lの体をそれぞれ1台のみ製作した。実機あっては、体数16台と多いため体のノズル径加工によって生ずる誤差が圧電素子の特性や変位等のバラツキに加算されるので品質管理及び検査には十分な注意が要求される。

#### b. ベーキング温度

PEVではシート部にバイトンを使用し、真空シールを確保させながら弁の開閉を行なう。圧電素子の印加電圧は10 msec毎に変更されるので圧電素子弁は、そのたびに動作することになる。そのためバイトンの復元及び圧縮特性は、シート部のリーク性能及びガス注入を開始する開始電圧等に影響を与える。ベーキング温度110°Cではガス吸着除去の点で配管内の水分除去程度の効果しか期待できないため、圧電素子弁の一部に約110°Cの高温部がなくても、真空容器内に放出される不純物量は、ガス供給配管系全体の放出ガスから見て無視できる。

#### c. 締めつけボルト

振動試験に於いて圧電素子が破損した。この原因は、すでに述べたように振動によってボルトナットがゆるんだためである。実機ではダブルナットに割りピンを取りつけ振動によってナットが外れないように改善する必要がある。

#### d. 圧電素子

市販されている圧電素子の外径は約45 mmφである。PEV-Hでは約75 mmφの外径を有するバイモルフ型の圧電素子を必要とする。圧電素子は国内2メーカより入手し圧電素子の電圧-歪特性及び流量特性を測定した結果、TFTRで使用予定の圧電素子及び現在市販の

P V - 10 とほぼ同一の性能を得ることを明らかにした。P E V - H の圧電素子は、圧電素子に印加する電圧を除去しても生ずる残留歪が少ないM社の圧電素子を、P E V - L の圧電素子としては圧電素子変位の大きなN社の圧電素子を選択することに決めた。

Table 4.1 Measured seat leakage rate at various test

		Seat leakage rate (Pam <sup>3</sup> /s)	
		Before	After
PEV throughput test	PEV-H M-1	4.3 E-9	
	M-4	9.2 E-9	
	M-3	6.8 E-9	
	PEV-L N-2	2.5 E-9	
	N-3	8.4 E-9	
PEV fatigue test	PEV-H M-2	2.7 E-9	1.7 E-9
	PEV-L N-3	8.4 E-9	5.6 E-9
PEV baking test	PEV-H M-9	8.4 E-9	Leak
	M-4	5.1 E-9	6.5 E-9
	PEV-L N-3	2.0 E-9	Leak

Table 4.2 Comparison of characteristic for piezo-element  
between TFTR element and JT-60 ones

	TFTR piezo-element	JT-60 piezo-element
Permittivity s	3400	1800
Charge coefficient $d_{31} \times 10^{-10}$ m/v	280	152
Curie temperature °C	195	320
Outer diameter mmφ	75	75
Thickness mm	1.2	1.1

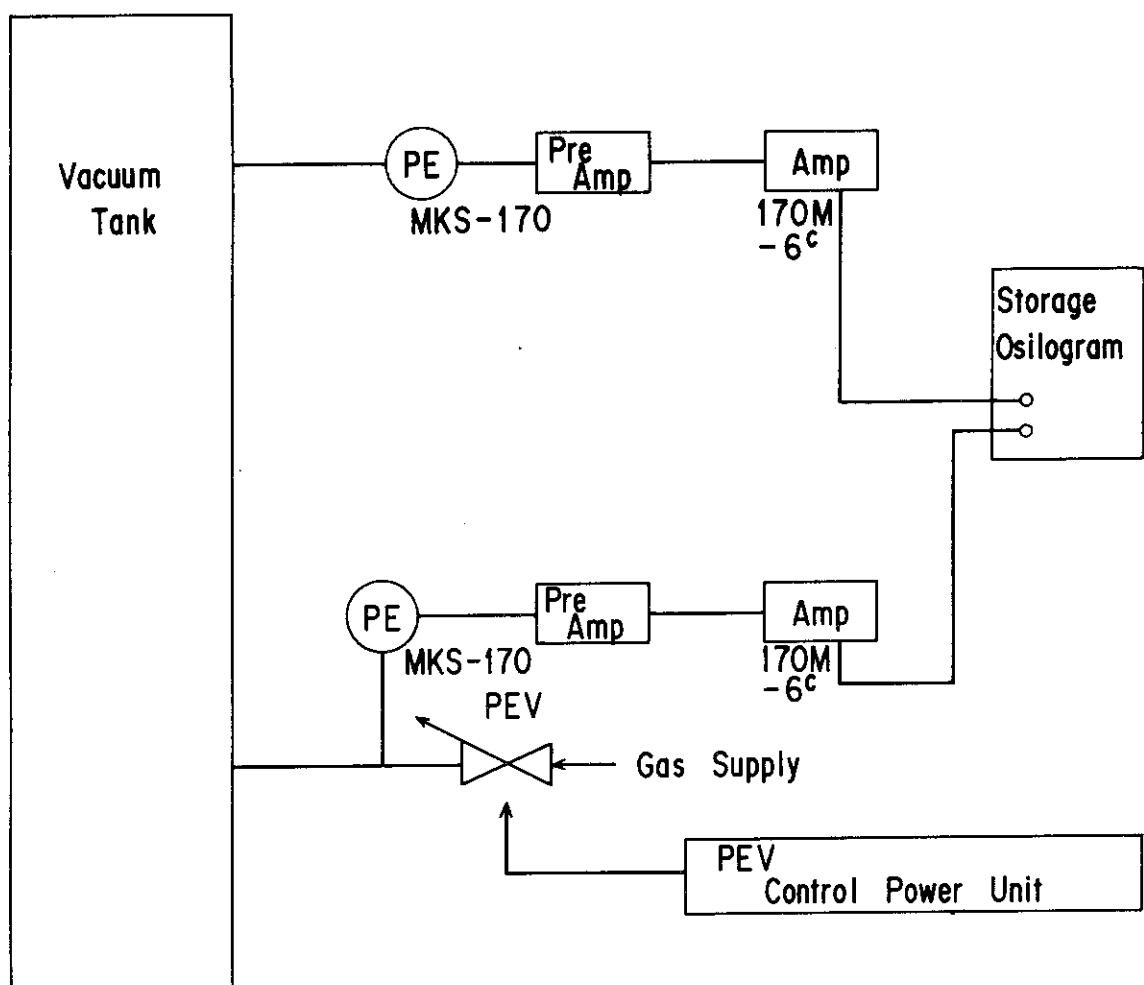


Fig. 4.1 Schematic diagram of test set

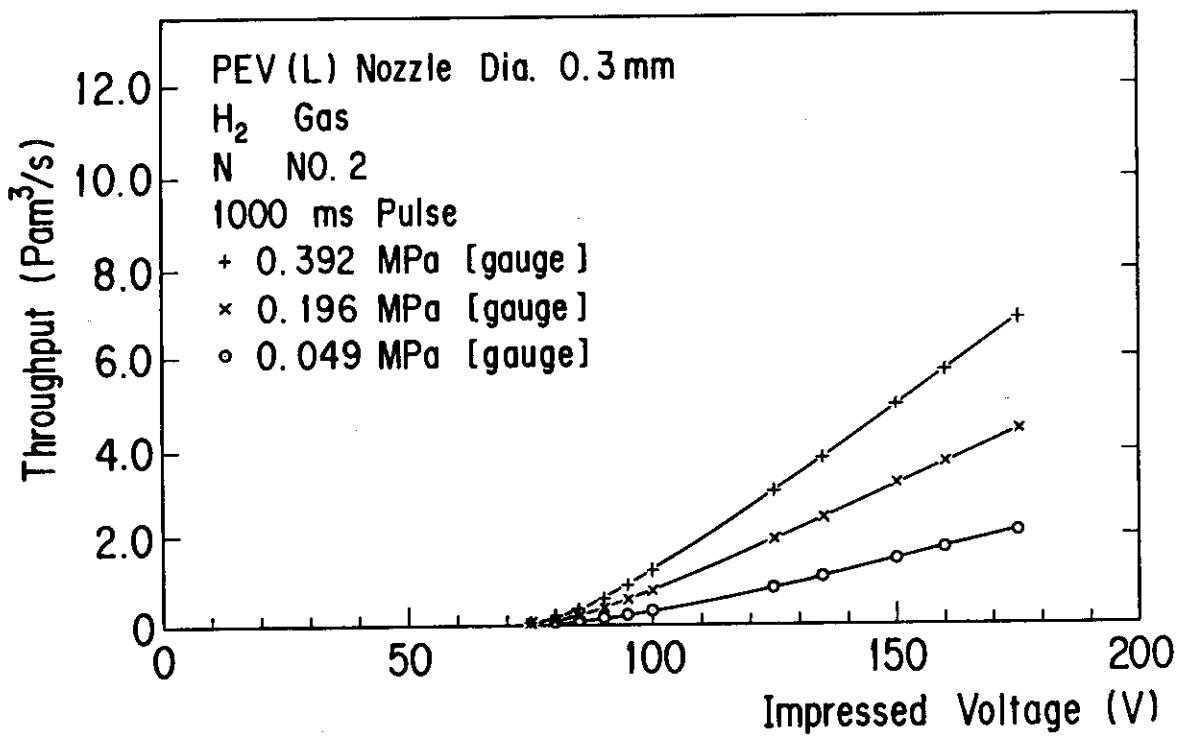
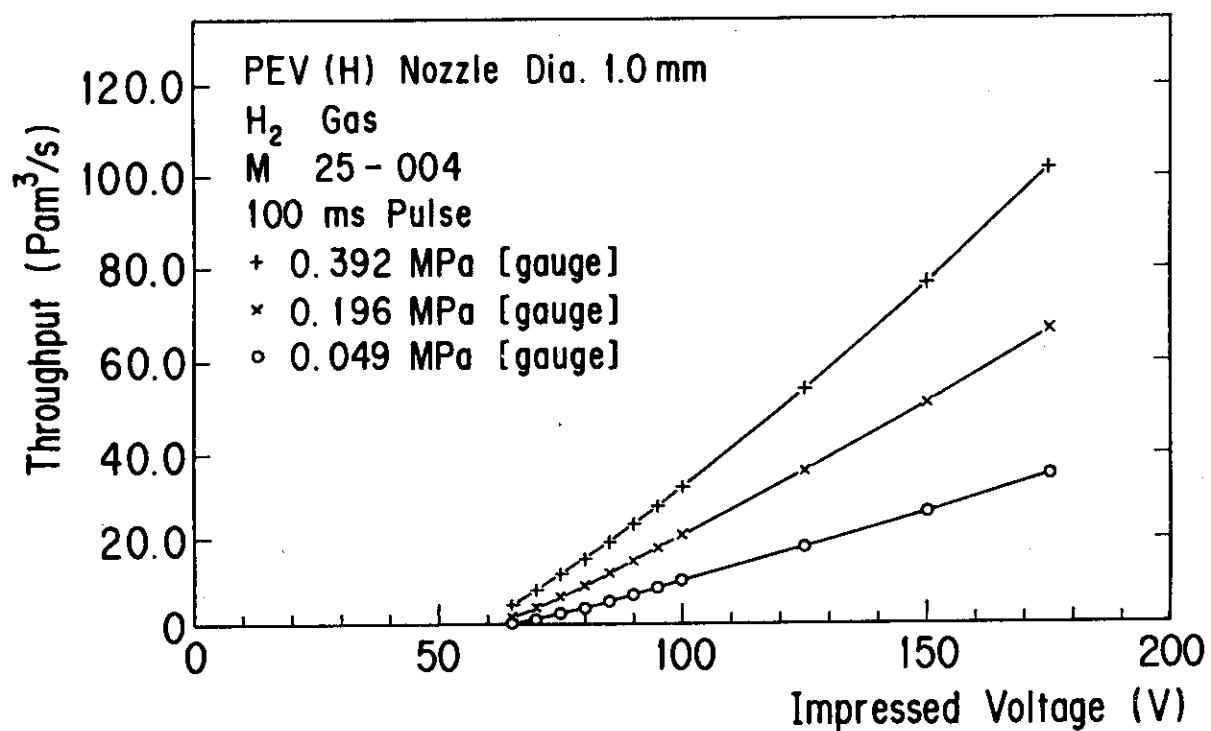


Fig. 4.2 Characteristic of throughput for PEV

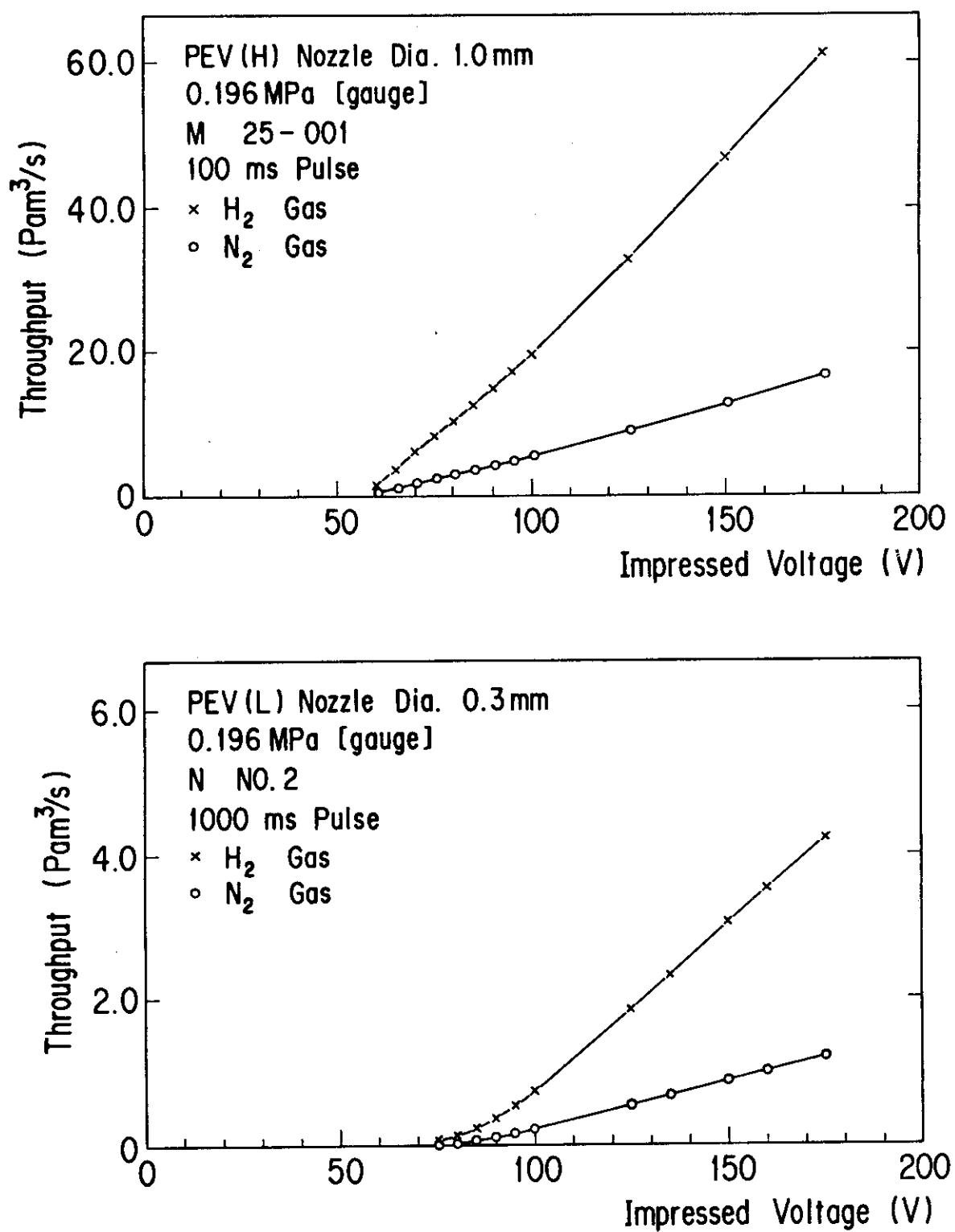


Fig. 4.3 Relation between throughput and gases

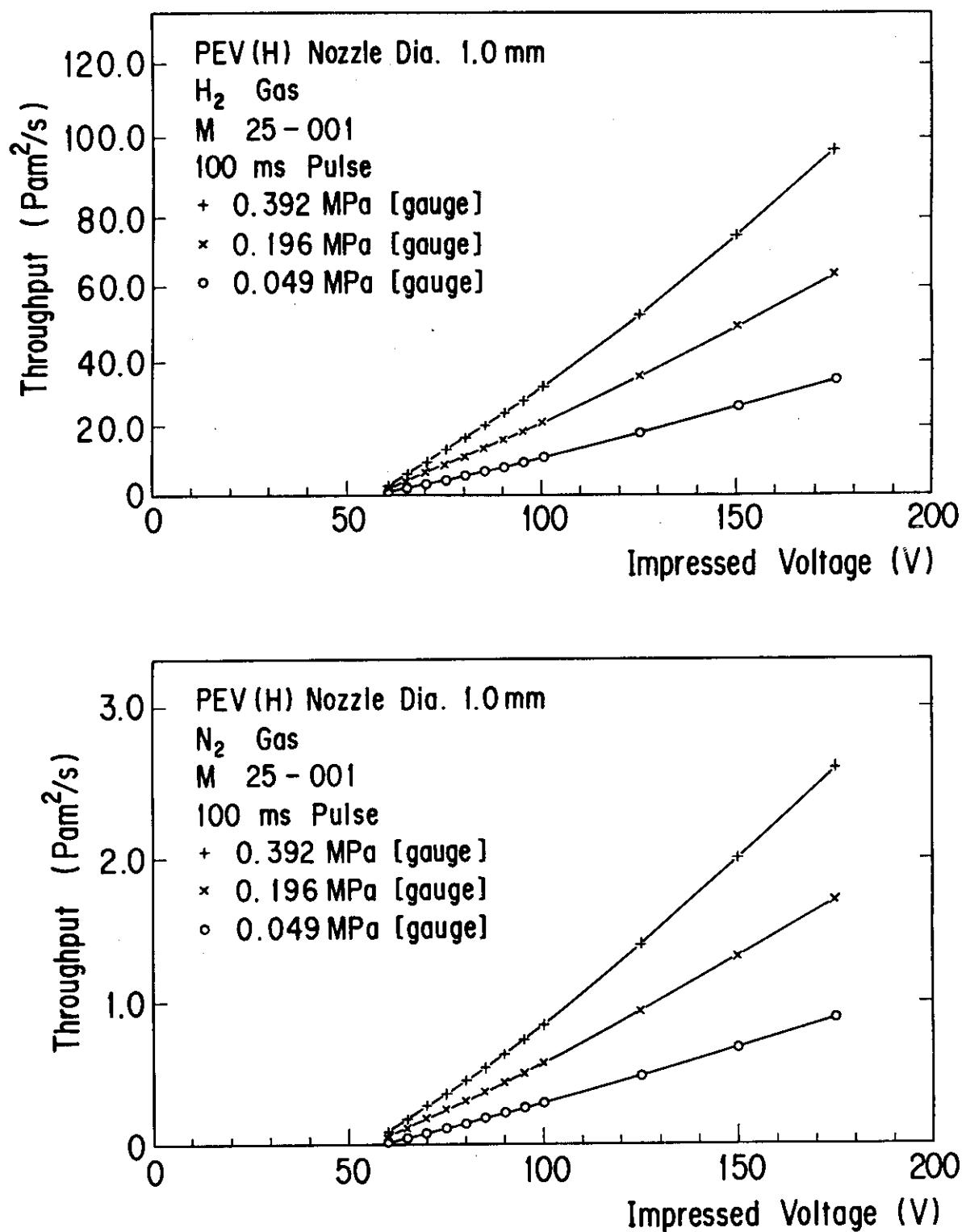


Fig. 4.4 Relation between throughput and back pressure for PEV-H

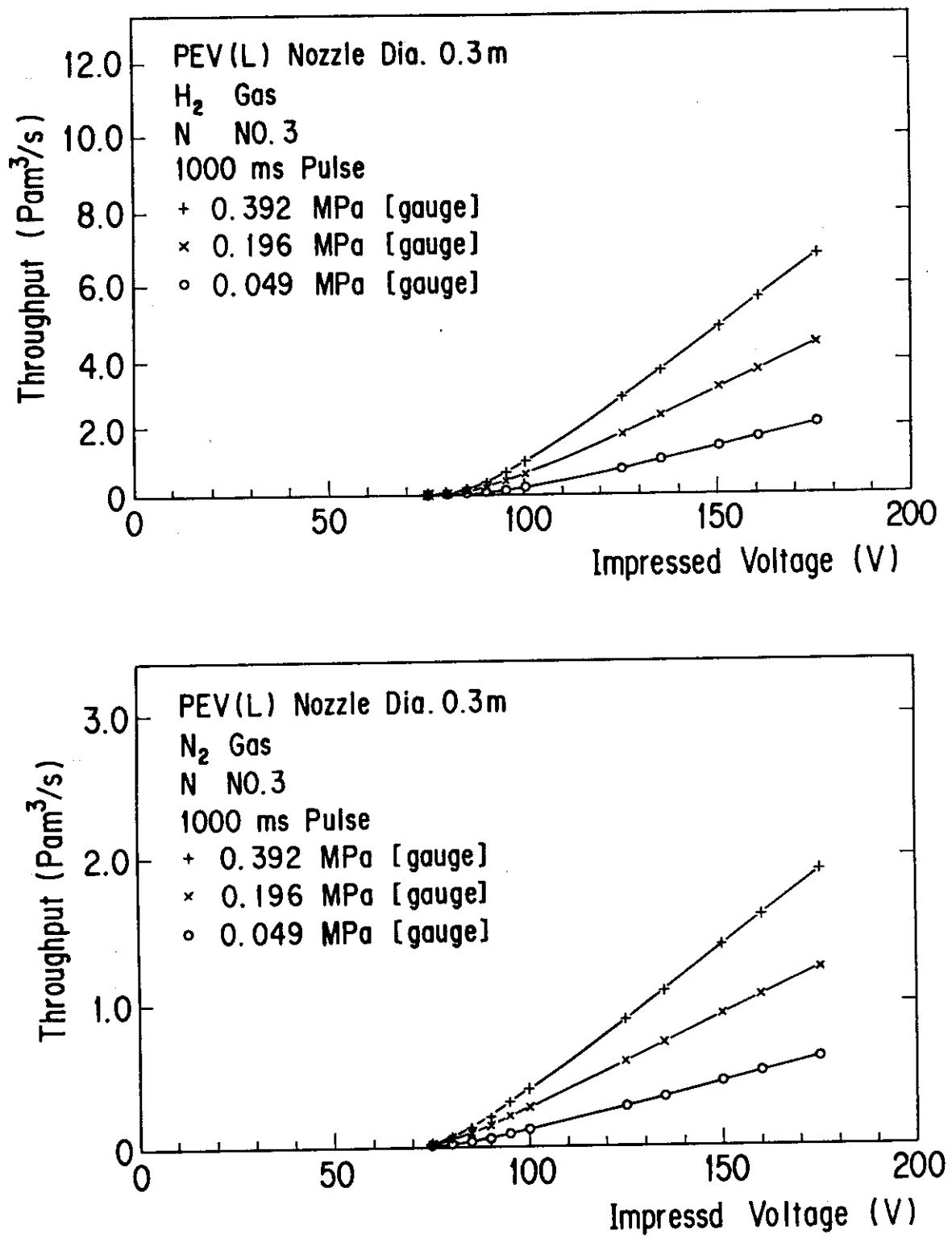


Fig. 4.5 Relation between throughput and back pressure for PEV-L

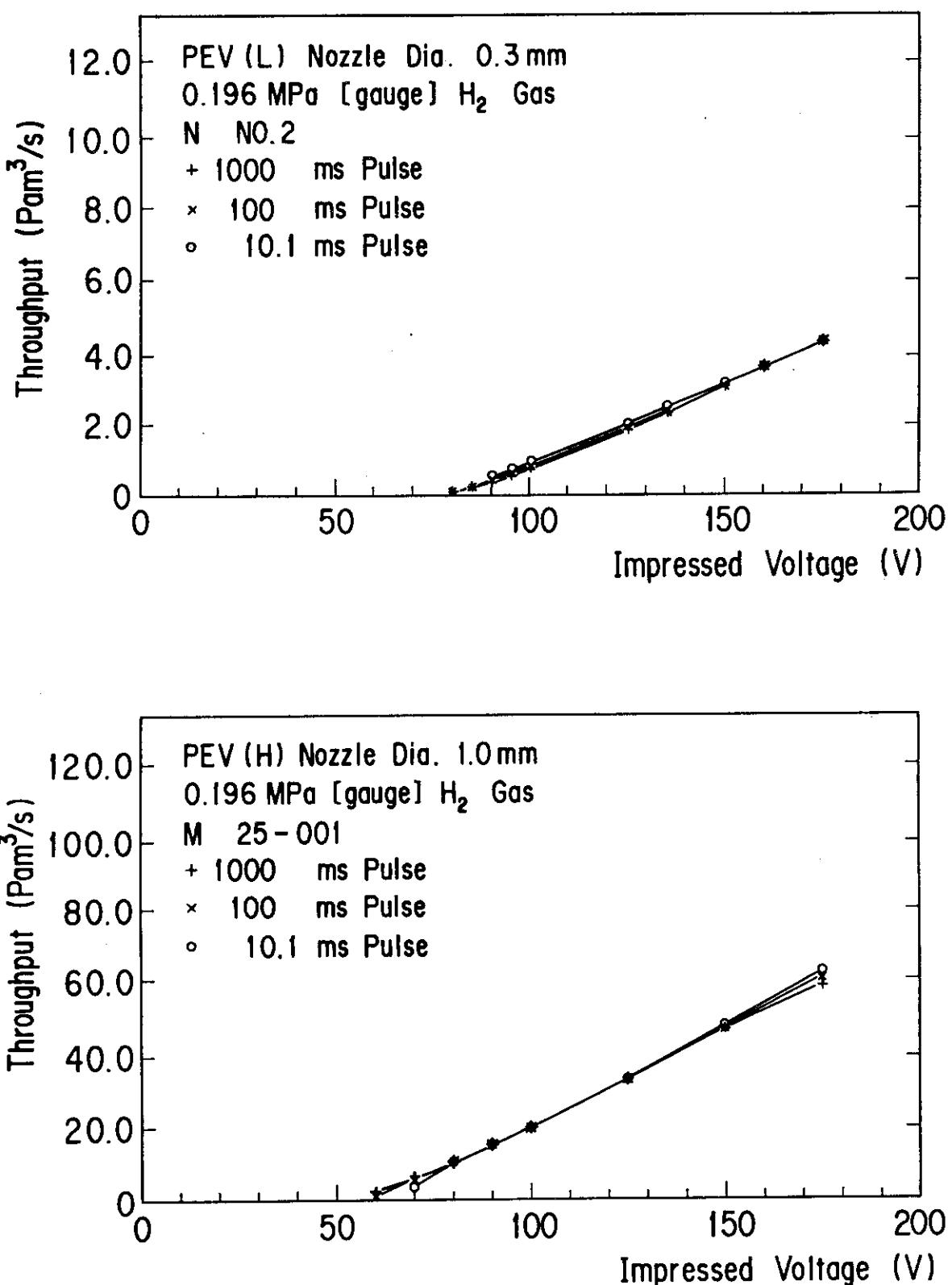


Fig. 4.6 Relation between throughput and pulse time of impressed voltage for PEV

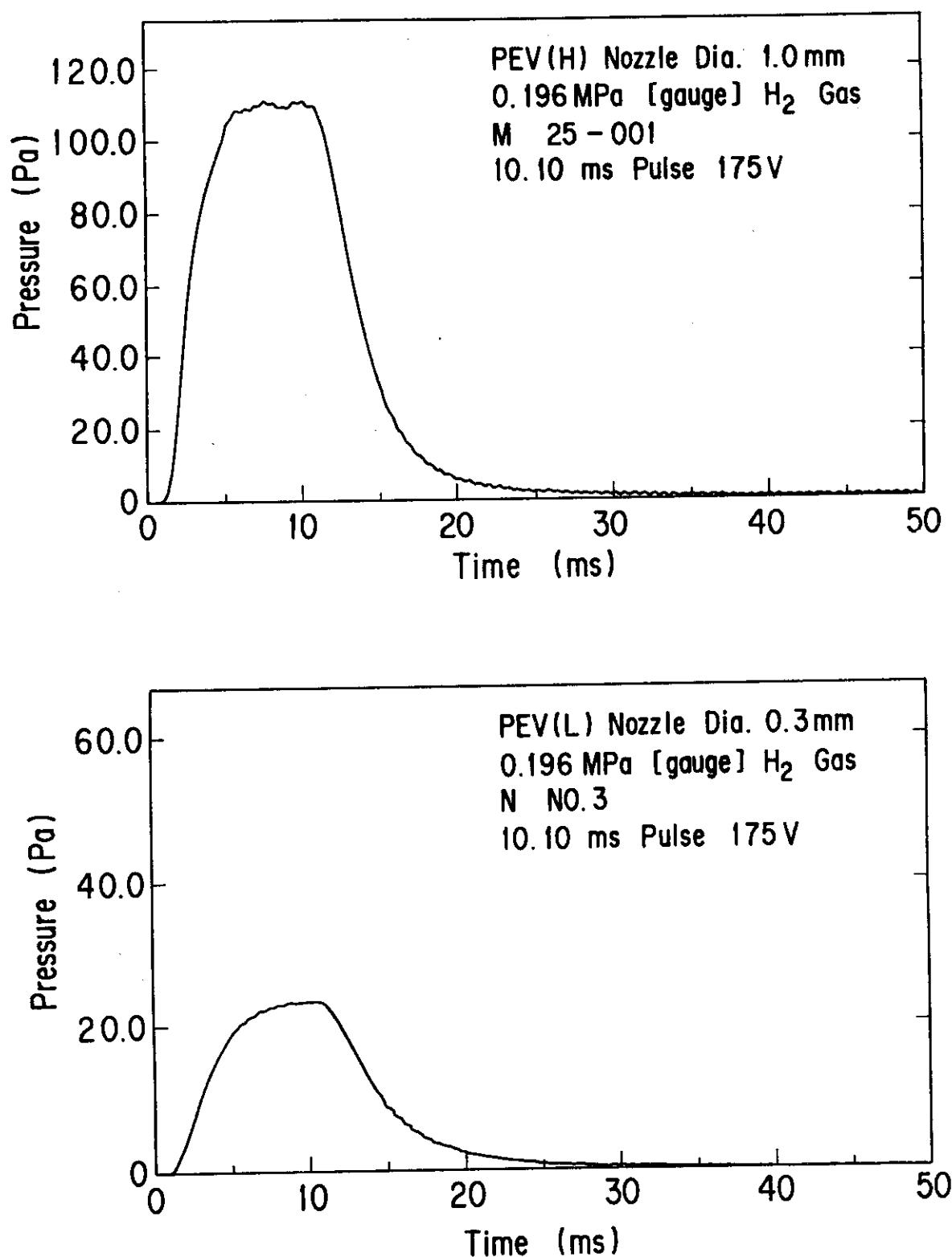


Fig. 4.7 Pressure response in the outlet pipe

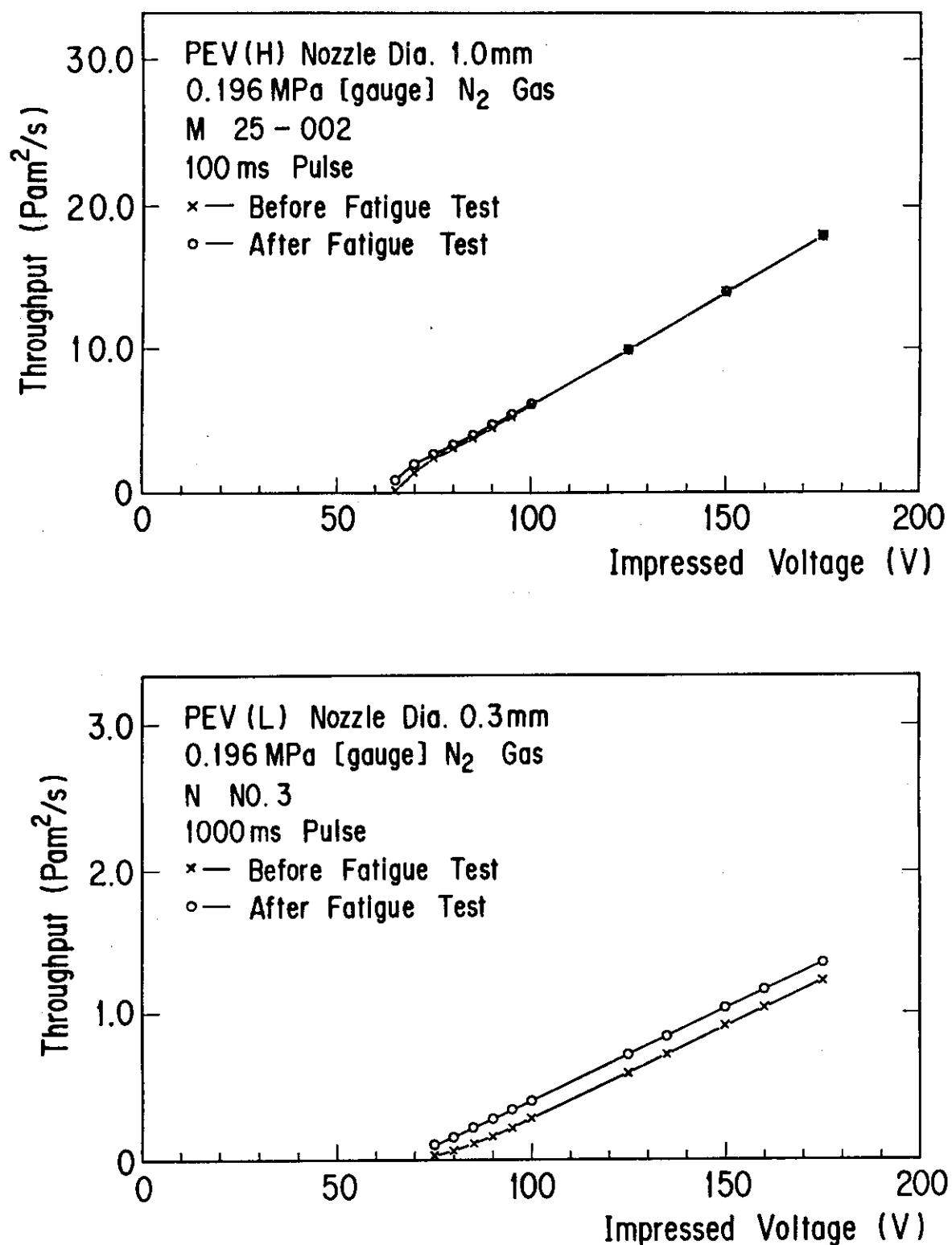


Fig. 4.8 Comparison of throughput between Before and After of Fatigue Test for PEV

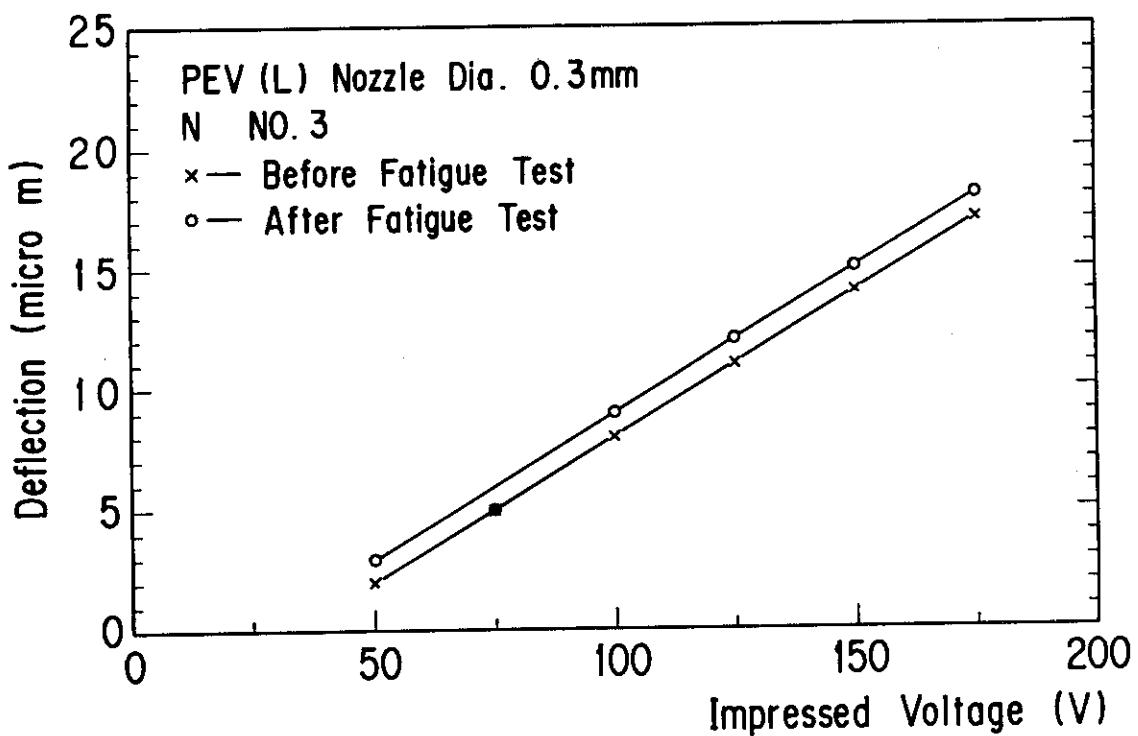
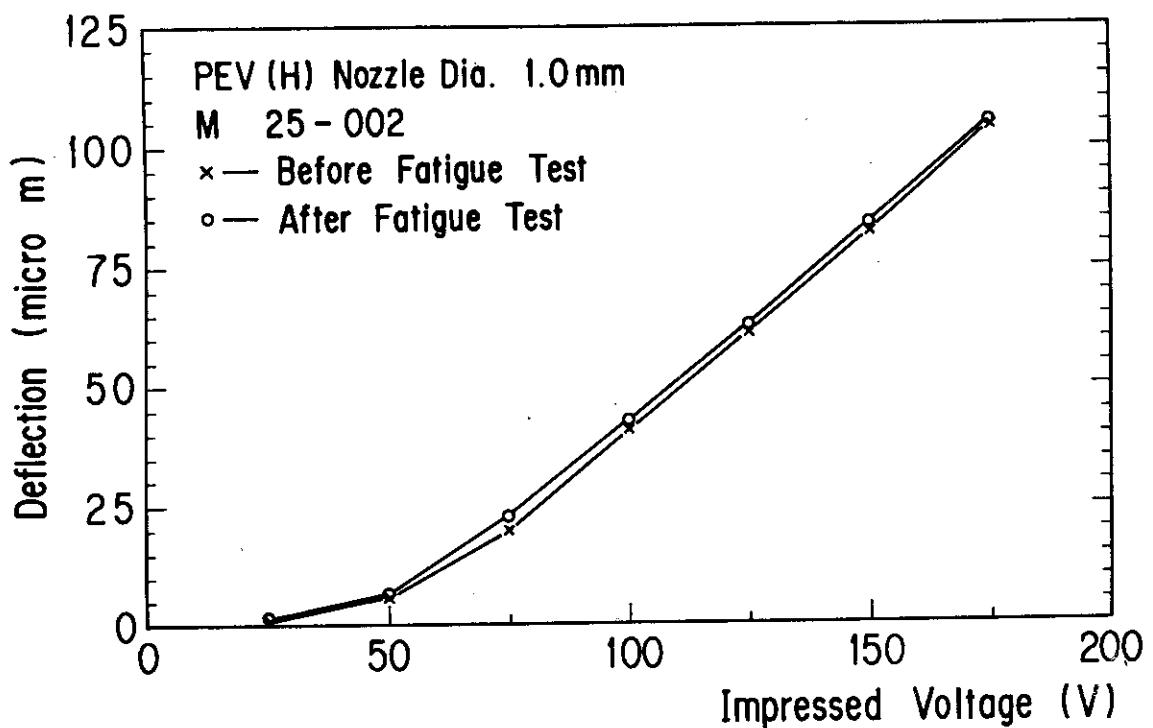


Fig. 4.9 Comparison of deflection between Before and After of Fatigue Test for PEV

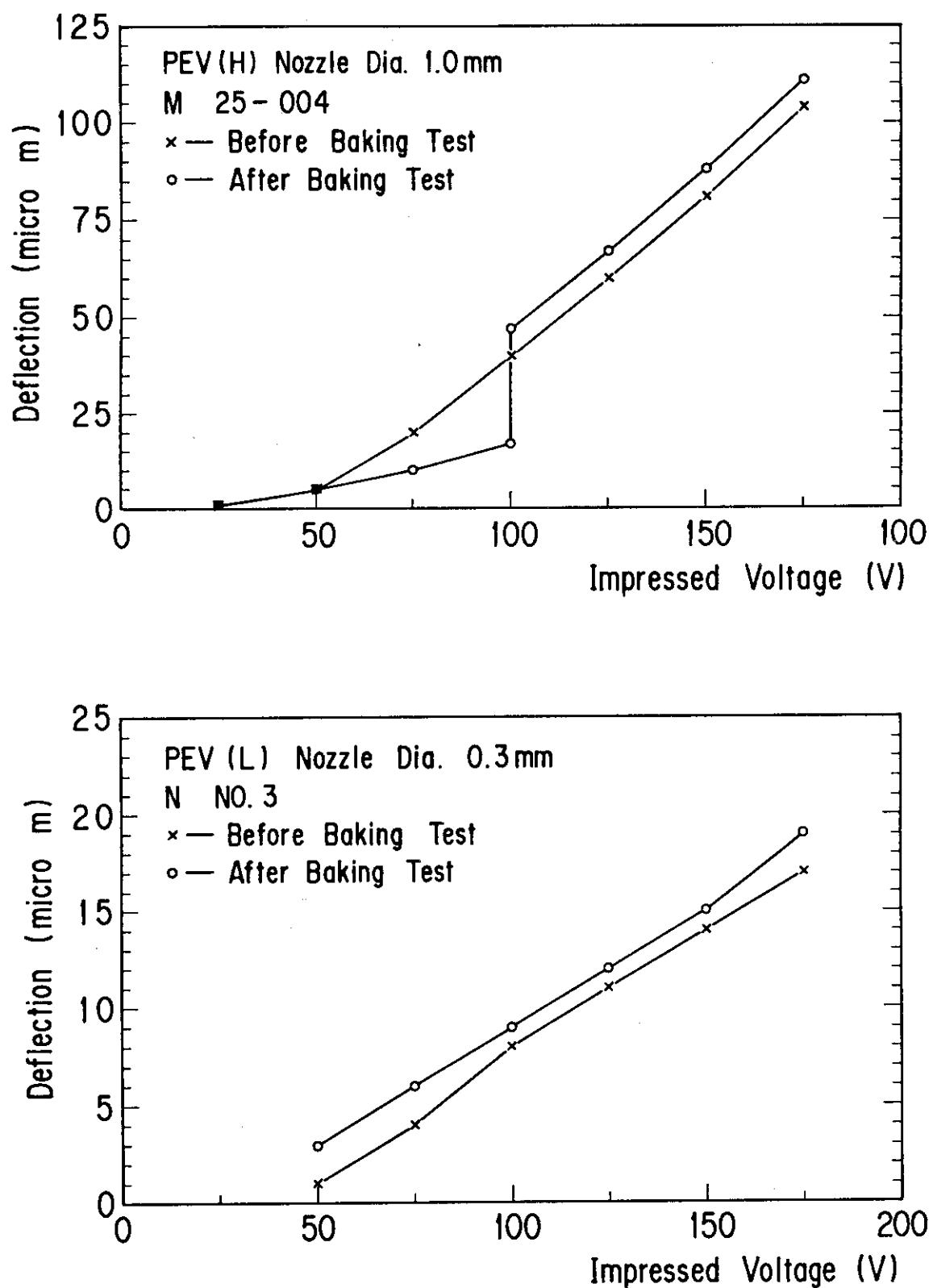


Fig. 4.10 Comparison of deflection between Before and After of baking test for PEV

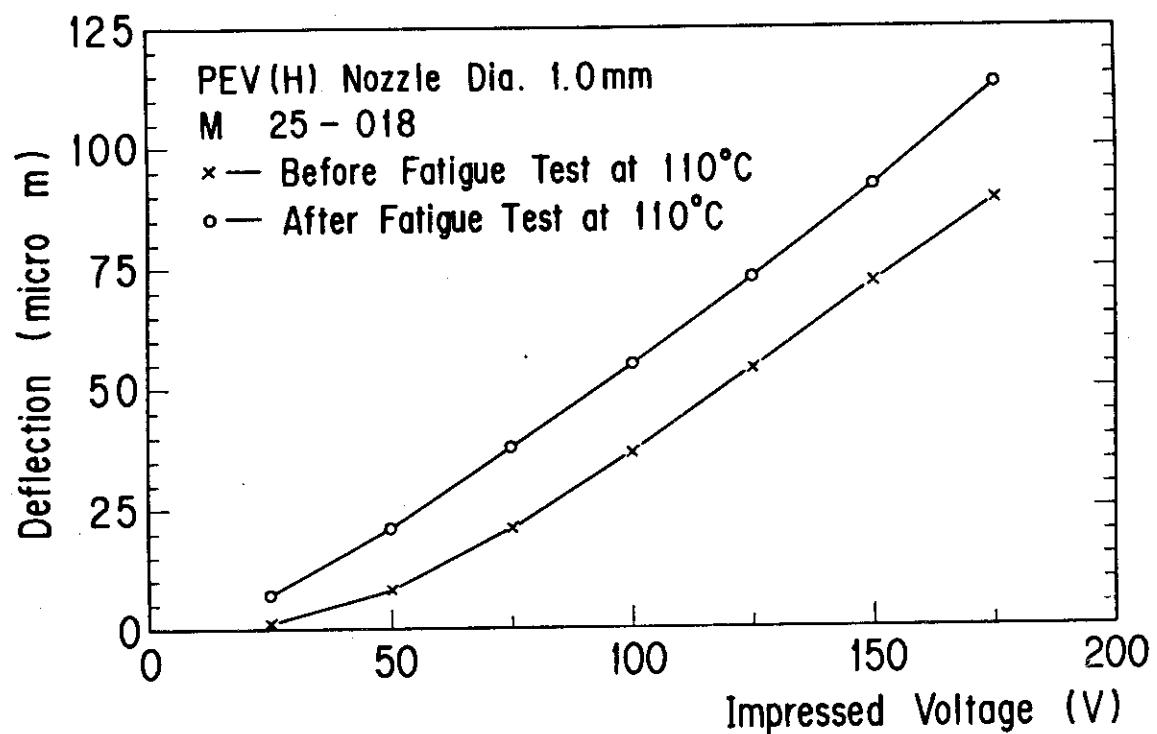


Fig. 4.11 Comparison of deflection between Before and After of Fatigue Test under 100°C for PEV

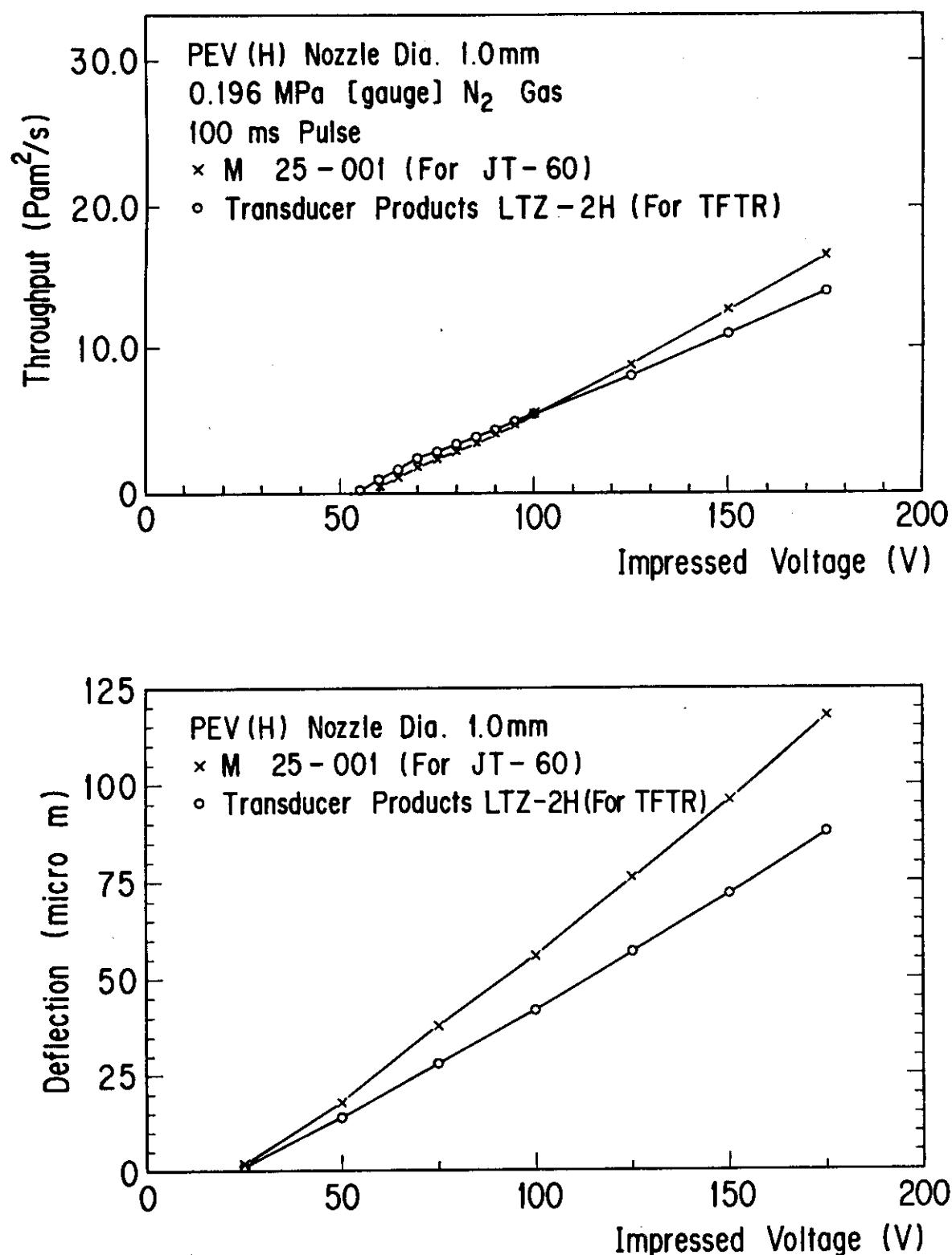


Fig. 4.12 Comparison of deflection and throughput between TFTR piezo cristal and JT-60 ones.

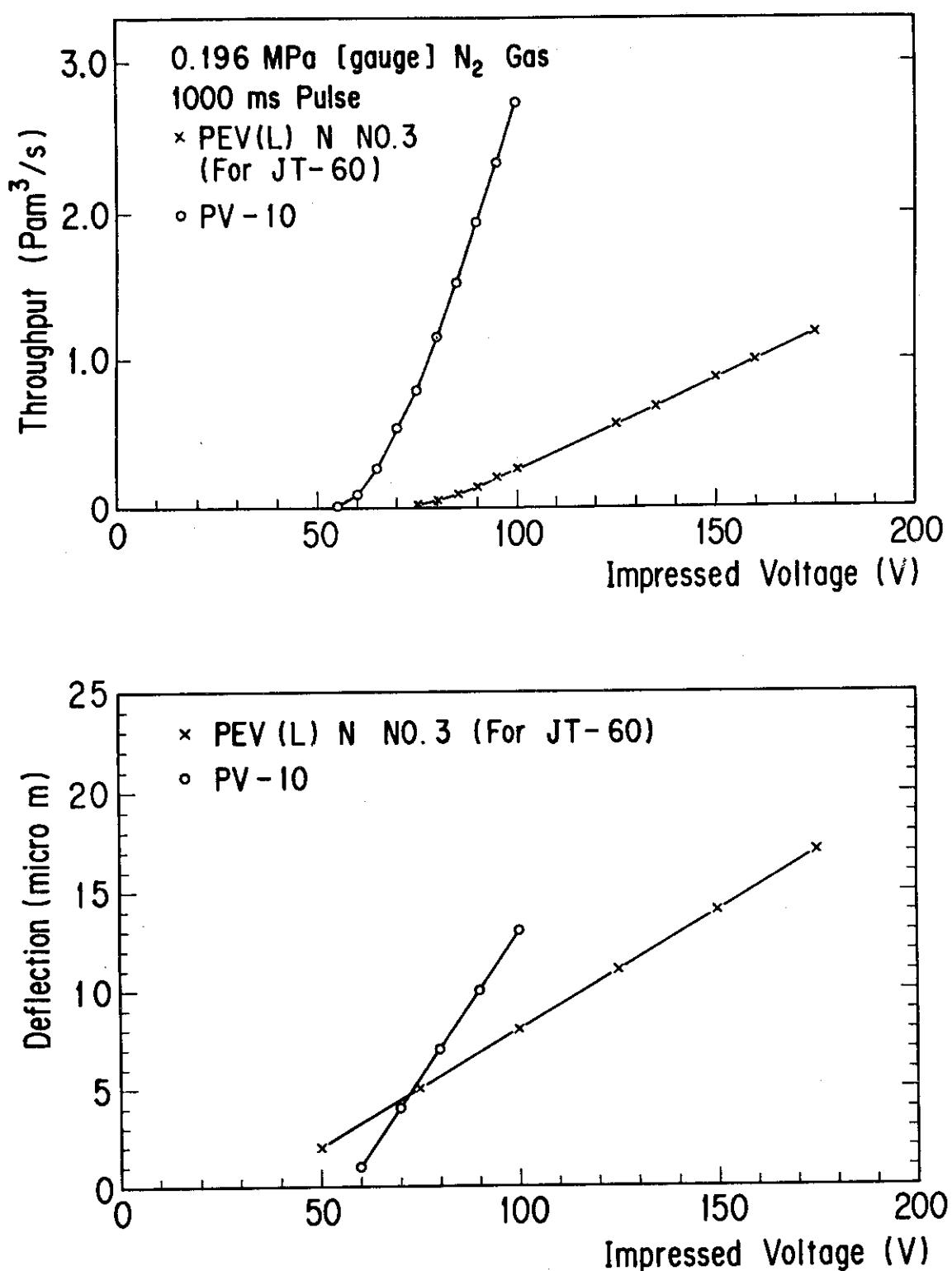


Fig. 4.13 Comparison of throughput and deflection between PV-10 piezo crystal and JT-60 ones

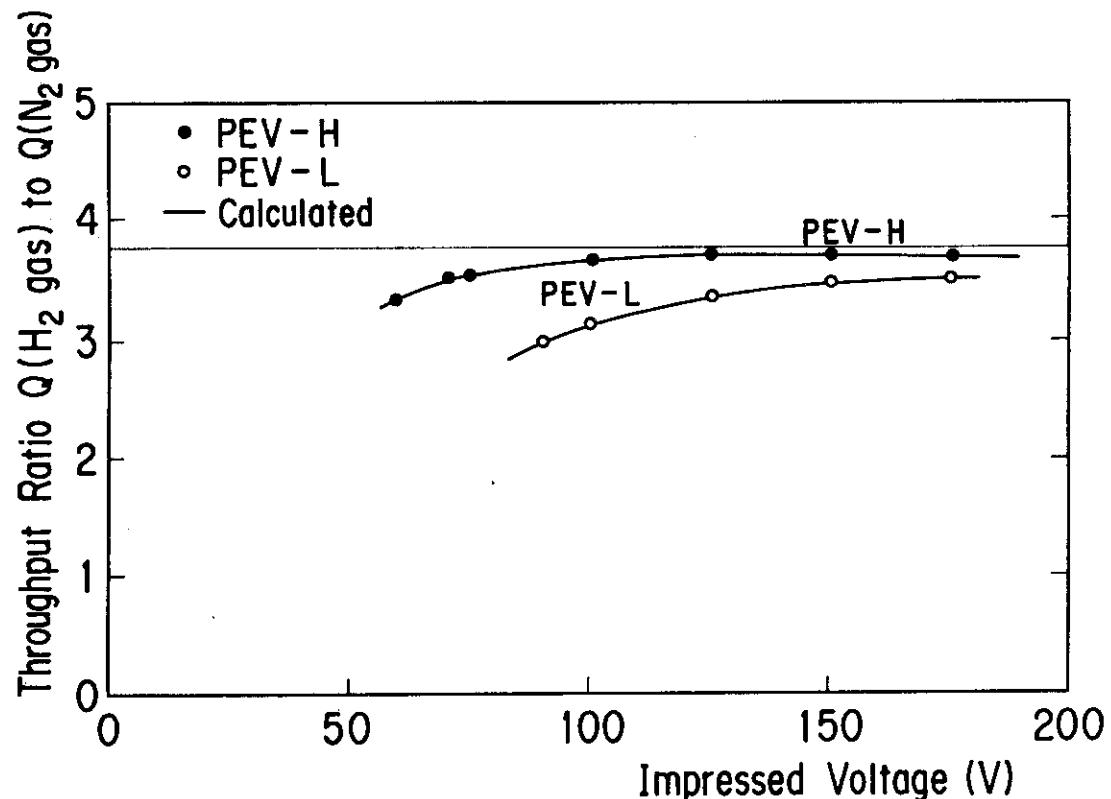


Fig. 4.14 Relation between throughput ratio and injected gases

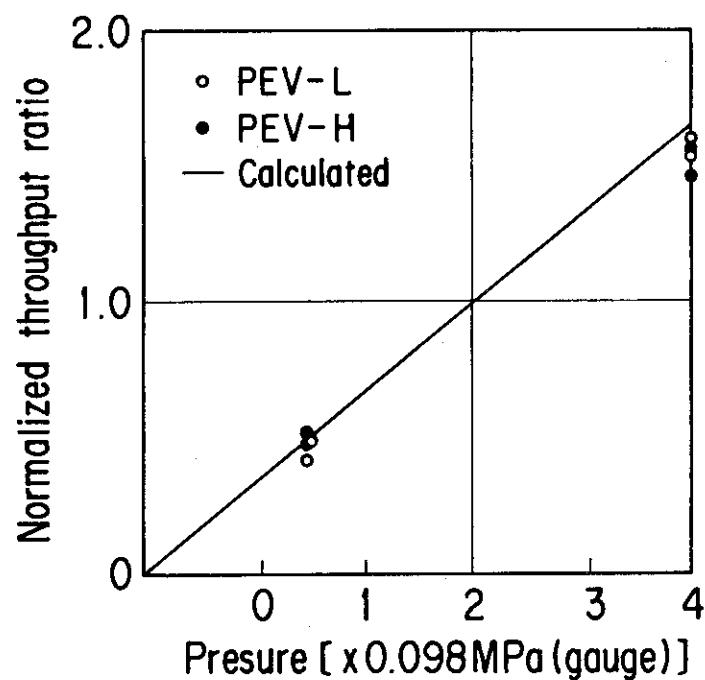


Fig. 4.15 Relation between throughput ratio and back pressure

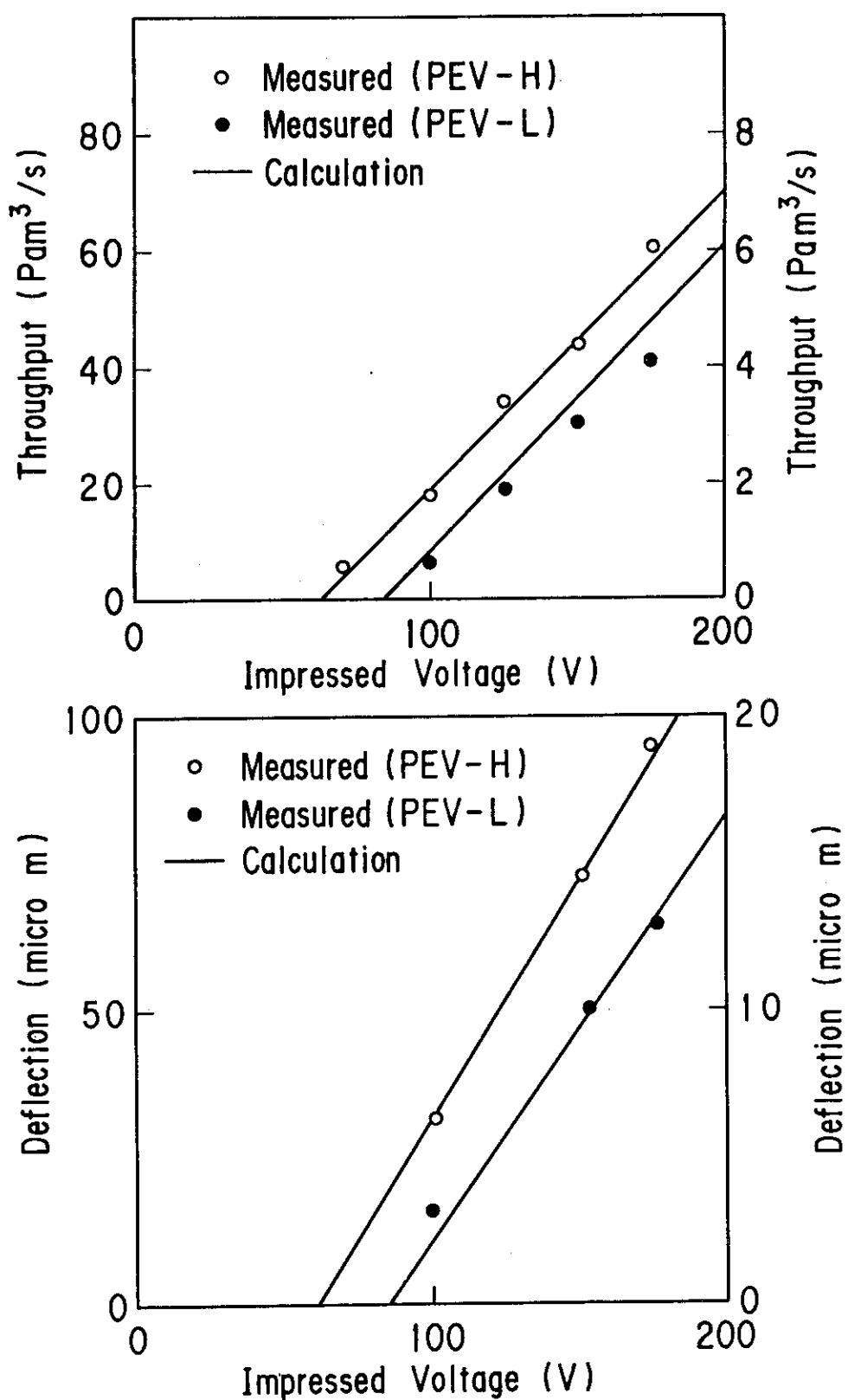


Fig. 4.16 Comparison of throughput and deflection between measured values and calculated ones

## 4.2 経年劣化特性改良試験

圧電素子弁の流量を定期的に測定した。約1週間の経過で、小容量圧電素子弁のガス流量は、約 $0.8 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 、大流量圧電素子弁のガス流量は、約 $8.0 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 変化した。この変化ガス流量を、圧電素子の変位量に換算するなら、小容量圧電素子で約 $1.0 \mu\text{m}$ 、大容量圧電素子で $3.8 \mu\text{m}$ に相当する。また、約100日の経過で大容量圧電素子弁のガス流量は約 $5.32 \sim 6.67 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 増加し、小容量圧電素子弁では、大幅に減少していることが判明した。小容量圧電素子弁の経年的な流量特性をFig.4.17に、大容量圧電素子弁の経時的な流量特性をFig.4.18に示す。圧電素子弁の経年的な流量特性を改良するため、(1)シール材の変更、(2)弁座の構造変更、(3)シール材及び弁座の粘着防止処理に着目して試験を行なった。本試験ではシール材、弁座の構造、粘着防止処理等の最適な組合せ方法を選択し、経時的流量特性に優れた圧電素子弁の特性変化を明らかにする。

### 4.2.1 性能劣化の原因推定

圧電素子弁の経時的な流量特性変化は、短時間的要因と長時間的要因に分けられる。

短時間的要因(約1週間)；すでに報告してある圧電素子弁単体の流量特性(7)と、経時変化確認試験に用いた圧電素子弁の構造上の違いは次の点である。筐体(出口側フランジと入口側フランジ)のシールをゴムO-リング(NBR:ニトリルゴム)に変更したことである。金属中空O-リングを使用して、圧電素子弁のシートリーク量を制限値に保持するため筐体周囲のボルトを強く締め付けた。そのため、弁座と圧電素子との接触に間隙が生じたためと考えられる。

長時間的要因(約3週間)；すでに報告してある圧電素子弁単体の流量特性と、経時変化確認試験に用いた圧電素子弁の構造上の違いは、筐体のシール材に用いるゴムO-リングに変更したことである。ガス流量特性の変化に推定される原因是、圧電素子単体の性能変化、弁座と圧電素子のシール材(バイトンゴム)の特性変化が考えられる。

本試験の目的は、長時間に於ける圧電素子弁の流量特性の改良である。

圧電素子弁は、小容量圧電素子弁及び大容量圧電素子弁とも同様な構造をしている。圧電素子弁は、弁筐体、絶縁板、スプリング、シールゴム、圧電素子等で構成され、圧電素子弁の真空シールは、圧電素子に接着しているシールゴムと弁座の密着で行なわれている。

性能劣化の原因を圧電素子弁の流量式から考えてみる。流量式は次式の如く表わされる。

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

$$A_f = \pi \left(\frac{d_1 + d_2}{2}\right) \cdot (\delta - \delta_0) \times 10^{-4}$$

$$\delta = \frac{3}{4} \left(\frac{D}{t}\right)^2 d_{31} V \times 10^{-6}$$

但し, Q : ガス流量	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$
C : 圧損係数	0.6
$A_f$ : ガス通過断面積	$\text{m}^2$
P : 背 壓	$\text{Pa}$
R : ガス定数	$\text{Pa} \cdot \text{m} / \text{K mol}$
M : 分子量	$\text{gr} / \text{mol}$
T : 絶対温度	$\text{K}$
k : 定圧比熱と定容比熱との比 ( $C_p / C_v$ )	
$d_1$ : 弁座ノズル内径	$\text{cm}$
$d_2$ : 弁座ノズル外径	$\text{cm}$
$\delta$ : 圧電素子の変位量	$\mu\text{m}$

設計で選択できる要因を用いて流量式を再度書き表わすと下記となる。

$$Q \propto C_d \cdot \left( \frac{d_1 + d_2}{2} \right) \cdot (d_{31} - \delta_0) \cdot P$$

従って、圧電素子弁の改良試験は、以下の要因に着目して検討を行った。

#### (1) 圧電素子単体の経時変化 $d_{31}$

圧電素子単体の経時変化に関する報告例は少ない。JT-60で使用する圧電素子に関してもメーカーから圧電素子単体の経時変化に関する情報を入手することが出来なかった。

#### (2) シール材の特性劣化 $\delta_0$

弁座の真空シールを確保するためにシール材につぶし代 ( $\delta_0$ ) を与えている。シール材にバイトンゴムを使用しているが、面圧と荷重印加期間によってバイトンゴムの残留変位が変化し、流量特性に影響を与えることが推定される。

#### (3) 背圧の変化 P

背圧は、設定値に対して±2%の精度で制御しているので直接の原因とは考えられない。

#### (4) 弁座の構造 $\frac{d_1 + d_2}{2}$

ガス通過断面積は、弁座ノズルの内径、外径の平均等価径と圧電素子変位をもちいて定義している。弁座とシールゴムの接触面積の増減、あるいは、面圧が増加した場合にはシール材と弁座面との密着が通過断面積に影響を与える。

### 4.2.2 試験用供試体

#### (1) 構造及び構成品の変更点

##### a. 弁座の改良

小容量圧電素子弁及び大容量圧電素子弁の弁座形状をFig.4.19に示す。圧電歪定数の経時的变化の少ないことが実験で確認された。従って、圧電素子弁の経時的流量変化は、等価径の変化に基因すると推定できる。弁座形状は、シール材と弁座の接触面積を少なくする方向に改良を行なった。Fig.4.19に示すように現在の弁座（以下ノズルAと呼ぶ），ノズル外径

変更弁座（ノズルBと呼ぶ）及びエッジ付き弁座（以下ノズルCと呼ぶ）の3種類を考えた。

b. シール材の変更

バイトンゴム（フッ素ゴム：FPM）は、硬さが74Hsで耐熱、耐油、耐薬品が優れ一般に真空シール用として使用されている。シール材に硬さ90HsのNBR（ニトリルゴム）、バイトンゴム及びポリイミド樹脂を用いて試験を行った。

c. 粘着防止処理

シール材の残留圧縮ひずみによる再現性劣化を防止するためNBR及びバイトンゴムには前もって圧縮ひずみを与えたもの（圧縮処理）と圧縮処理をしないものを用いて流量特性の確認を行った。シール材の熱圧縮処理は、圧縮量を20%としてNBRで100°Cで1週間、バイトンゴムを150°Cで2週間放置して行った。ここで圧縮率は、次のように定義した。

$$\text{圧縮率} = (\text{初期厚さ} - \text{処理後の厚さ}) / \text{初期厚さ}$$

また、ノズルAとノズルBについては、シール材と弁座の粘着を防止するよう弁座に表面処理（テフロンコーティング）をした弁座と表面処理をしない弁座について流量特性を確認した。

(2) 試験供試体一覧

試験供試体をTable 4.3に示す。試験は弁座、シール材、弁座表面処理の有無、シール材圧縮処理の有無を組み合せた13種について行った。

ノズルAについては、NBR、バイトンゴムのシール材、弁座表面処理、ゴム圧縮処理の有無を組み合せて6種類、ノズルBについてもノズルAと同様な組み合せて6種類の供試体を用いた。ポリイミド樹脂をシール材に選択した供試体は、シール面圧を増加する目的でノズルCのエッジ付き弁座と組み合せて試験を行った。ノズルBの特長は、シール材の接触面積が現在の接触面積より約30~40%と少ない。これは、シール面圧の増加によってシール材の圧縮率が大きくとれることにある。また、ガス流路が短かいため応答性も良く、シール材との接触面積が小さいので弁座とシールの粘着を少なくする等が利点として上げられる。短所は、シートからのリーク防止と調整に注意しなければならないことである。

#### 4.2.3 試験項目

弁性能改良試験は、経時的な圧電素子弁の流量試験と流量の再現性確認試験について行った。

(1) 流量調整試験

流量調整試験は、圧電素子弁を調整した後に次の項目を確認した。

a. 流量特性測定

試験では注入するガスを水素ガス(H<sub>2</sub>)、背圧0.196 MPa [gauge] パルス幅100 msec、印加電圧5点{175V, 150V, 100V, 80V, (PEV-L)又は75V(PEV-H)}で流量を測定した。

b. シートリーク量測定

0.2 MPa [gauge] のHeガスを圧電素子弁に充填して、シートリーク量を測定した。

## c. 耐熱性試験

圧電素子弁の筐体温度が40～60℃になるように圧電素子弁近傍をベーキングする。ベーキング時間は、2時間程度とし、圧電素子弁に異常のないことを確認した。

## d. 耐熱性試験後の流量特性測定

耐熱性試験後、常温において、a. 流量の測定、b. シートリーク量の測定、を行なった。

## e. 駆動試験

圧電素子弁を真空状態に保持したままで、印加電圧DC 175V、パルス幅100msecの条件で1000回駆動させ異常のないことを確認した。

## f. 駆動試験後の流量特性測定

駆動試験終了後、a. 流量の測定、b. シートリーク量の測定、を行なった。

## (2) 再現性確認試験-(1)

再現性確認試験は、流量調整試験終了後継続して行なった。

## a. 流量特性の確認試験

流量調整試験の流量特性測定と同一条件で流量特性、シートリーク量の測定を行った。

## b. 放置後の流量特性確認試験

圧電素子弁に窒素ガス( $N_2$ )を封入して2週間放置する。その後、流量特性確認試験と同一条件で流量特性、シートリーク量の測定を行ない、圧電素子弁の流量特性について再現性を確認した。

## (3) 再現性確認試験-(2)

再現性確認試験-(2)では、再現性確認試験-(1)で選択した経年劣化の少ない組み合わせの圧電素子弁について、継続して流量特性の確認を行なった。

## 4.2.4 弁性能確認試験結果

## (1) 流量調整試験結果

圧電素子弁のシートリーク量測定結果をTable 4.4に示す。Table 4.4の測定結果は、耐熱性試験の前後、駆動試験後及び圧電素子弁放置後の第1週目と第2週目のシートリーク量を示す。

小容量圧電素子弁及び大容量圧電素子弁とともにノズルCとポリイミド樹脂を組み合せた組合No.13の圧電素子弁は、 $2.7 \times 10^{-9} Pa \cdot m^3/s \sim 0.133 Pa \cdot m^3/s$ と大きな値を示した。組合No.13の圧電素子弁は、構造上、圧電素子の残留歪を押さえるため押えバネを用いてシール部に200g程度の荷重を加えている。

組み合せNo.13の圧電素子弁からのシートリークを防止するには、この抑力では不可能である。(真空シールの実験によるとポリイミド樹脂で弁座をシールするのには、約9.8 MPaの荷重が必要であると述べられている。)ノズルCとポリイミド樹脂を組み合せた組み合せNo.13の弁は、抑力の値から判断して現圧電素子弁の構造では不適性と判断される。組合No.13の圧電素子弁については、以後の試験を打ち切ることに決めた。その他の試験用圧電素子弁は、約 $2.6 \times 10^{-9} Pa \cdot m^3/s$ 以下のシートリーク量であった。小容量圧電素子弁の組み合せNo.2, No.5, No.8と大容量圧電素子弁の組み合せNo.2, No.5については、シートリーク量の仕様値

( $1.33 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  以下)を満足することが出来なかつたが、流量特性測定はこの状態で行つた。

圧電素子弁の流量誤差( $\delta$ )は次式で定義する平均流量特性式から求められる計算流量値( $Q_C$ )と測定値( $Q_M$ )の流量差( $\Delta Q$ )と計算流量値の比で表わす。

$$Q_{M1} = a_1 (V_1 - b_1) (P + c)$$

$$Q_{M2} = a_2 (V_2 - b_2) (P + c)$$

$$Q_C = \frac{a_1 + a_2}{2} \left\{ V - \frac{a_1 b_1 + a_2 b_2}{a_1 + a_2} \right\} (P + c)$$

$$\delta = \frac{Q_C - Q_M}{Q_C}$$

$Q_M$  : 流量  $\text{Pa m}^3/\text{s}$

$V$  : 印加電圧  $V$

$P$  : 背圧  $\text{MPa}$

$a, b, c$  : 補正係数

$\delta$  : 流量誤差

#### a. ノズルAの場合

組合せNo.1 (NBR+ゴム圧縮処理有+弁座表面処理有)と組合せNo.4 (バイトンゴム+ゴム圧縮処理有+弁座表面処理有)について、印加電圧175Vの実測流量と計算流量値を比べてみる。Table 4.5に示すように、PEV-Lでは流量誤差約0.53%，PEV-Hでは流量誤差2.38%がみられた。流量誤差は組み合わせNo.1よりも大きい値をしめしている。この組合せに於いては、シール材にバイトンゴムを使用すると流量誤差がやや大きくなることを明らかにしている。組合せNo.2と組合せNo.5では、PEV-L及びPEV-Hのシートリーフ値は仕様値を、満足できなかった。組合せNo.3 (NBR+弁座表面処理無+ゴム圧縮処理有)と組合せNo.6 (バイトンゴム+弁座表面処理無+ゴム圧縮処理有)の場合は、Table 4.6に示すように組合せNo.6の方がPEV-Lで約0.84%，PEV-Hで約2.27%流量誤差が大きい。

#### b. ノズルBの場合

組合せNo.7 (NBR+ゴム圧縮処理有+弁座表面処理有)とNo.10 (バイトンゴム+ゴム圧縮処理有+弁座表面処理有)を比べる。Table 4.7に示すようにPEV-Lでは組合せNo.10の方が約0.59%流量誤差が大きい。PEV-Hでは組合せNo.7の方が0.51%流量誤差が大きい結果となった。組合せNo.8とNo.11 (弁座表面処理有+ゴム圧縮処理無)の比較をTable 4.8に示す。PEV-Lでは、組合せNo.8の流量誤差約5.77%，PEV-Hでは、組合せNo.8の流量誤差約1.56%と大きい結果となった。

組合せNo.9 (NBR+弁座表面処理無+ゴム圧縮処理有)とNo.12 (バイトンゴム+弁座表面処理無+ゴム圧縮処理有)の比較をTable 4.9に示す。PEV-Lでは、組合せNo.12の方

が約 25.56% 流量誤差が大きく、組合せ No. 9 の P E V - H は、約 1.56% 流量誤差が大きい結果となった。

### (2) 再現性確認試験結果(1)

P E V - L 及び P E V - H について印加電圧 175 V, 100 V の場合、基準流量と測定流量との流量誤差を Table 4.10 に示す。P E V - L 及び P E V - H の流量特性に於いて低流量域に直線性が得られない圧電素子弁が見受けられる。この圧電素子弁の組合せは、P E V - L 及び P E V - H とも同じで、組合せ No. 3, No. 5, No. 6, No. 8, No. 10, No. 11, No. 12 であった。圧電素子弁を J T - 60 運転サイクルと等価な 2 週間放置して実測した流量特性から圧電素子弁の経時的な流量特性は次のようにまとめられる。

- a. シール材にバイトンゴムを使用した大容量圧電素子弁 ( P E V - H ) の流量は、低流量域の流量特性に直線性が得られない。
- b. ノズルに B タイプ、シール材にバイトンゴムを使用した小容量圧電素子弁 ( P E V - L ) では、低流量域の流量特性に直線性が得られない。
- c. 大容量圧電素子弁では、シール材の圧縮処理無とノズル表面処理有の A タイプを組み合わせるとシートリークを発生する。
- d. 小容量圧電素子弁では、シール材の圧縮処理無とノズル表面処理有の A タイプあるいはノズル表面処理有の B タイプとシール材 ( N B R ) を組み合せるとシートリークを発生する。約 2 週間の経時変化試験から、経時変化特性に影響を与える原因としては次のことが言える。

- 1) シール材に使用したバイトンゴムは圧縮による残留変位が増大した。
- 2) 弁座面とシール材は粘着する。

これらの対策には以下のことが適当と言える。

- 1) 圧縮による残留変位を少なくするためシール材には、バイトンゴムより固い N B R を選択する。
- 2) 粘着防止処理として、弁座面にテフロンコーティングをほどこす。また、シール材に予め経時変化を与えるため熱圧縮する。
- 3) ガス通過面積を一定にするためノズルシール部の接触面積を少なくする。

小容量圧電素子弁の流量仕様 ( 0.53 ~ 5.33 Pa・m<sup>3</sup>/s ) 及び大容量圧電素子弁の流量仕様 ( 5.33 ~ 53.3 Pa・m<sup>3</sup>/s ) を満足する圧電素子弁の組み合せとして次の 3 種類を選択する。

- 1) 組み合せ No. 7 ( 弁 No. 9, ノズル B でノズル表面処理有, N B R でゴム圧縮処理有 )
- 2) 組み合せ No. 1 ( 弁 No. 1, ノズル A でノズル表面処理有, N B R でゴム圧縮処理有 )
- 3) 組み合せ No. 9 ( 弁 No. 11, ノズル B でノズル表面処理有, N B R でゴム圧縮処理有 )

上記組み合せ No. 7, No. 1, No. 9 の圧電素子弁を各 2 個ずつ試験供試体として製作し、継続して再現性確認試験を行なった。

### (3) 再現性確認試験結果-(2)

再現性確認試験結果-(1)で選択した 3 種類の組み合せと同じ試験供試体をそれぞれ 2 個ずつ製作し、継続して試験を行った。約 3 週間経過したとの流量特性変化量は以下のようになつた。

大容量圧電素子弁 P E V - H

弁No.	流量変化量 Pa・m <sup>3</sup> /s		直線性 %	
	175 V	75 V		
①	-1.42~-0.3	-0.77~-0.52	±10	組合No.1 ノズルA ノズル表面処理有 NBRゴム圧縮処理有
2	-2.45~-0.86	-0.82~-0.12	±5	
3	-2.98~-1.54	-1.32~-0.67	±5	
⑨	-0.64~-0.28	-0.29~-0.20	±5	組合No.7 ノズルB ノズル表面処理有 NBRゴム圧縮処理有
10	-3.38~-2.14	-2.21~-1.28	±5	
13	-1.05~-0.49	-0.44~-0.28	±5	
⑪	-0.78~-0.39	0.01~0.80	±10	組合No.9 ノズルB ノズル表面処理無 NBRゴム圧縮処理有
4	-0.68~-0.37	0.93~1.41	±5	
8	-0.67~-0.07	1.17~1.54	±5	

弁No.①, ⑨, ⑪は、再現性確認試験-(1)から継続して用いている。弁No.1のガス流量は、75 V以下で得られなくなった。他の圧電素子弁No.9, No.11では特性に変化はみられない。この試験結果では、弁No.9で代表される組合せが良い。

#### 小容量圧電素子弁 P E V - L

弁No.	流量変化量 Pa・m <sup>3</sup> /s		直線性 %	
	175 V	80 V		
①	-0.15~-0.01	-0.21~-0.11	±10	組合No.1 ノズルA ノズル表面処理有 NBRゴム圧縮処理有
2	-0.01~-0.08	0.013~0.04	±10	
3	-0.43~-0.33	-0.32~-0.27	±20	
⑨	-0.41~0.05	-0.35~0.12	±10	組合No.7 ノズルB ノズル表面処理有 NBRゴム圧縮処理有
10	-0.97~-0.79	-0.33~-0.31	±20	
13	-0.16~-0.08	-0.09~-0.07	±10	
⑪	-0.56~-0.07	-0.11~0.11	±20	組合No.9 ノズルB ノズル表面処理無 NBRゴム圧縮処理有
14	-0.05~0.07	-0.26~-0.21	±10	
15	0.17~0.28	0.12~0.19	±10	

試験結果からは、弁No.1, No.11で代表される組合せがよいと判断される。

以上の結果、大容量圧電素子弁では、組合せNo.1, No.9の組合せ、小容量圧電素子弁では、組合せNo.1, No.9の組合せで代表される圧電素子弁を用いて、引続いて経年劣化特性を調べた。

大容量圧電素子弁の経年劣化特性をFig.4.20に示す。組合せNo.1に代表される圧電素子弁では、組合せNo.7に比べて流量変化量が大きい。小容量圧電素子弁の経年劣化特性をFig.4.21に

示す。この経時的流量変化では、組合せNo.1に代表される圧電素子弁が組合せNo.7より圧電素子弁間の流量変化が少なく優れていると言える。

弁動作時の圧力応答波形を比較する。組合せNo.1に代表される大容量圧電素子弁及び小容量圧電素子弁では、最小流量（PEV-Hでは、 $5.33 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ，PEV-Lでは $0.533 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ）のガスを注入して得られる圧力応答波形の立上り時間が長い。これは、圧電素子弁の動作時間遅れが大きいことを意味する。大容量圧電素子弁についての圧力応答波形をFig.4.22に示す。最小流量 $5.33 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ で注入した時の遅れ時間は、組合せNo.1で約18 msec、組合せNo.7では約4 msecとなった。小容量圧電素子弁の圧力応答波形をFig.4.23に示す。 $0.53 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 注入時の遅れ時間は、弁組合せNo.1では40 msecと長い。

従って、経年劣化特性及び弁動作時間より、弁組合せNo.7に代表される圧電素子弁を最終形状に決めた。

Table 4.3 Summarized screening candidate nozzle configuration  
and surface coating for long aging throughput

**Candidate types of PEV for long life performance,  
varying nozzle type, seal material, surface treatment  
of nozzle and compressive treatment of rubber.**

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Nozzle type	A	○	○	○	○	○								
	B						○	○	○	○	○	○	○	
	C											○		
Seal material	NBR	○	○	○		○	○	○						
	Viton			○	○			○	○	○	○			
	Porlimid											○		
Surface treatment of nozzle	With	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
	Without			○		○		○		○		○		
Compressive treatment of rubber	With	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○		
	Without	○		○			○		○		○		○	
No of PEV-H	1	2	3	5	6	7	9	10	11	13	4	8	12	
No of PEV-L	1	2	3	5	6	7	9	10	11	13	14	15	19	

Table 4.4 Measured seat leakage rate for 2 weeks

## PEV-L

Candidate type-No		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Initial	Before baking test	2	x	2	2	x	2	2	x	-	-	-	-	-
	After baking test	2	x	2	2	x	2	2	x	-	-	-	-	-
	After fatigue test	2	x	2	2	x	2	2	x	-	-	-	-	-
After 1 week		2	x	2	2	x	2	2	x	2	2	2	2	-
After 2 weeks		2	x	2	2	x	2	2	x	2	2	2	2	-

## PEV-H

Candidate type-No		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Initial	Before baking test	2	x	2	2	x	2	2	2	2	2	2	2	2
	After baking test	2	x	2	2	x	2	2	2	2	2	2	2	2
	After fatigue test	2	x	2	2	x	2	2	2	2	2	2	2	2
After 1 week		2	x	2	2	x	2	2	2	2	2	2	2	2
After 2 weeks		2	x	2	2	x	2	2	2	2	2	2	2	2

Unit :  $\times 1.33 \times 10^{-9} \text{ Pa m}^3/\text{s}$ 

Pressure: 0.2 MPa (Me gas)

$\times$  : Seat leakage rate was larger than the permissible ones  
 $(1.33 \times 10^{-8} \text{ Pa m}^3/\text{s})$ .

Table 4.5 Comparison of throughput between candidate type No1 and No4 for PEV

Small sized PEV						
Impressed Voltage (V)	Candidate type No1			Candidate type No4		
	Measured (Pam <sup>3</sup> /s)	Calculated (Pam <sup>3</sup> /s)	Error (%)	Measured (Pam <sup>3</sup> /s)	Calculated (Pam <sup>3</sup> /s)	Error (%)
<b>Throughput-test</b>						
175	6.03	5.97	1.0	5.31	5.30	0.19
150	4.56	4.56	0.0	3.95	3.95	0.0
125	3.04	3.15	-3.49	2.41	2.60	-7.31
100	1.56	1.74	-10.34	1.01	1.25	-19.2
80	0.61	0.61	0.0	0.17	0.16	6.25
<b>After Baking-test</b>						
175	5.70	5.83	-2.23	5.23	5.17	1.16
150	4.45	4.45	0.0	3.85	3.85	0.0
125	2.97	3.08	-3.57	2.39	2.52	-5.16
100	1.52	1.70	-10.59	1.00	1.20	-16.67
80	0.60	0.60	0.0	0.14	0.14	0.0
<b>After Fatigue-test</b>						
175	6.23	6.30	-1.11	5.47	5.38	1.67
150	4.85	4.86	-0.21	4.08	4.08	0.0
125	3.34	3.41	-2.05	2.65	2.79	-5.02
100	1.84	1.97	-6.60	1.31	1.49	-12.08
80	0.81	0.81	0.0	0.45	0.45	0.0

Table 4.5 (continued)

Small sized PEV						
	Impressed Voltage (V)	Candidate type No1			Candidate type No4	
		Measured (Pam <sup>3</sup> /s)	Calculated (Pam <sup>3</sup> /s)	Error (%)	Measured (Pam <sup>3</sup> /s)	Calculated (Pam <sup>3</sup> /s)
Throughput-test	175	55.09	54.4	1.28	58.53	58.83
	150	42.02	42.61	0.02	44.72	44.72
	125	29.18	29.63	-1.53	31.44	30.61
	100	16.66	17.25	-3.43	19.21	16.50
	75	4.87	4.87	0.0	2.39	2.39
						0.0
After Baking-test	175	54.73	54.21	0.95	57.67	58.26
	150	41.89	41.87	0.05	44.25	44.26
	125	28.97	29.53	-1.89	31.25	30.26
	100	16.63	17.10	-3.23	18.66	16.26
	75	4.85	4.85	0.0	2.26	2.26
						0.0
After Fatigue-test	175	55.95	55.38	1.03	55.18	57.13
	150	42.66	42.65	0.02	42.85	42.85
	125	29.45	29.92	-1.57	29.82	28.57
	100	16.43	17.20	-4.48	15.84	14.29
	75	4.47	4.47	0.0	0.004	0.005
						-20.0

Table 4.6 Comparison of throughput between candidate type No3 and No6 for PEV

Small sized PEV						
	Candidate type No3			Candidate type No6		
Impressed Voltage (V)	Measured (Pam <sup>3</sup> /s)	Calculated (Pam <sup>3</sup> /s)	Error (%)	Measured (Pam <sup>3</sup> /s)	Calculated (Pam <sup>3</sup> /s)	Error (%)
Throughput-test	175	5.68	5.55	2.34	6.27	6.12
	150	4.13	4.13	0.0	4.73	4.73
	125	2.52	2.71	-7.01	3.18	3.33
	100	1.07	1.29	-17.05	1.78	1.93
	80	0.16	0.16	0.0	0.81	0.81
After Baking-test	175	5.28	5.21	1.34	6.08	5.93
	150	3.88	3.89	-0.26	4.58	4.57
	125	2.42	2.56	-5.47	3.08	3.22
	100	1.05	1.23	-14.63	1.70	1.86
	80	0.17	0.17	0.06	0.77	0.77
After Fatigue-test	175	5.42	5.38	0.74	6.40	6.30
	150	4.02	4.02	0.0	4.89	4.88
	125	2.54	2.66	-4.51	3.35	3.47
	100	1.16	1.30	-10.77	1.92	2.05
	80	0.21	0.21	0.0	0.92	0.92

Table 4.6 (continued)

Impressed Voltage (V)	Large sized PEV			Candidate type No3			Candidate type No6		
	Measured (Pam <sup>3</sup> /s)	Calculated (Pam <sup>3</sup> /s)	Error (%)	Measured (Pam <sup>3</sup> /s)	Calculated (Pam <sup>3</sup> /s)	Error (%)	Measured (Pam <sup>3</sup> /s)	Calculated (Pam <sup>3</sup> /s)	Error (%)
<b>Throughput-test</b>									
175	60.49	61.11	1.01	57.42	59.83	-4.03			
150	46.10	46.10	0.0	45.43	45.44	-0.02			
125	31.96	31.09	2.8	33.46	31.05	7.76			
100	17.82	16.08	10.82	21.91	16.66	31.51			
75	1.08	1.08	0.28	2.26	2.26	0.0			
<b>After Baking-test</b>									
175	62.47	63.10	-1.14	56.98	59.88	-4.84			
150	48.08	48.09	-0.02	45.42	45.42	0.0			
125	33.43	33.99	1.33	33.72	30.97	8.88			
100	19.09	17.89	6.71	22.17	16.52	34.2			
75	2.79	2.79	0.0	2.06	2.06	0.0			
<b>After Fatigue-test</b>									
175	60.87	62.41	-2.47	57.75	60.62	-4.73			
150	47.65	47.66	-0.02	46.70	46.69	0.02			
125	33.19	32.91	0.85	34.92	32.77	6.56			
100	19.13	18.17	5.28	23.30	18.84	23.67			
75	3.42	3.42	0.0	4.91	4.91	0.0			

Table 4.7 Comparison of throughput between candidate type No7 and No10 for PEV

## Small sized PEV

	Impressed Voltage (V)	Candidate type No7			Candidate type No10		
		Measured (Pam <sup>3</sup> /s)	Calculated (Pam <sup>3</sup> /s)	Error (%)	Measured (Pam <sup>3</sup> /s)	Calculated (Pam <sup>3</sup> /s)	Error (%)
<b>Throughput-test</b>							
175	6.82	6.67	2.25	6.24	6.15	1.46	
150	5.05	5.05	0.0	4.64	4.64	0.0	
125	3.32	3.43	-3.21	3.0	3.12	-3.85	
100	1.62	1.81	-10.50	1.41	1.61	-12.42	
80	0.52	0.52	0.0	0.4	0.4	0.0	
<b>After Baking-test</b>							
175	6.76	6.66	1.5	6.24	6.11	2.13	
150	5.98	5.08	0.0	4.61	4.61	0.0	
125	3.39	3.49	-2.87	2.97	3.10	-4.19	
100	1.75	1.91	-8.38	1.41	1.60	-11.89	
80	0.65	0.65	0.0	0.40	0.40	0.0	
<b>After Fatigue-test</b>							
175	6.79	6.70	1.34	6.19	6.27	-1.75	
150	5.12	5.12	0.0	4.77	4.79	0.0	
125	3.44	3.54	-2.82	3.22	3.26	-1.23	
100	1.80	1.95	-7.69	1.67	1.77	-5.65	
80	0.69	0.69	0.0	0.55	0.55	0.0	

Table 4.7 (continued)

Large sized PEV					
	Impressed Voltage (V)	Candidate type No7			Candidate type No10
		Measured (Pam <sup>3</sup> /s)	Calculated (Pam <sup>3</sup> /s)	Error (%)	Measured (Pam <sup>3</sup> /s)
Throughput-test	175	56.04	55.82	0.39	59.57
	150	43.30	43.29	0.02	46.10
	125	30.40	30.76	-1.17	32.68
	100	17.81	18.22	-2.25	19.97
	75	5.69	5.69	0.0	3.32
					3.33
After Baking-test	175	51.22	52.24	-1.95	59.95
	150	40.64	40.66	-0.05	46.10
	125	28.81	29.07	-0.89	32.43
	100	17.14	17.49	-2.0	19.77
	75	5.91	5.91	0.0	2.83
					2.83
After Fatigue-test	175	58.64	58.19	0.77	59.39
	150	45.60	45.60	0.0	46.07
	125	32.77	33.02	-0.76	32.60
	100	20.08	20.44	-1.81	19.88
	75	7.85	7.85	0.0	6.59
					6.59

Table 4.8 Comparison of throughput between candidate type No.8 and No.11 for PEV

## Small sized PEV

	Impressed Voltage (V)	Candidate type No.8			Candidate type No.11		
		Measured (Pam <sup>3</sup> /s)	Calculated (Pam <sup>3</sup> /s)	Error (%)	Measured (Pam <sup>3</sup> /s)	Calculated (Pam <sup>3</sup> /s)	Error (%)
<b>Throughput-test</b>							
175	6.84	6.77	1.03	6.86	6.90	-0.87	
150	5.23	5.23	0.00	5.09	5.09	0.0	
125	3.60	3.68	-2.17	3.34	3.26	2.14	
100	2.02	2.14	-5.61	1.60	1.45	10.34	
80	0.9	0.91	0.0	0.0	0.0	0.0	
<b>After Baking-test</b>							
175	6.70	6.61	1.36	6.62	6.81	-2.79	
150	5.12	5.12	0.0	5.02	5.02	0.0	
125	3.54	3.63	-2.48	3.26	3.23	0.93	
100	2.02	2.14	-5.61	0.72	1.43	-49.65	
80	0.95	0.95	0.0	0.0	0.0	0.0	
<b>After Fatigue-test</b>							
175	6.97	6.94	0.43	6.68	7.12	-6.18	
150	5.41	5.41	0.0	5.27	5.27	0.0	
125	3.82	3.87	-1.29	3.64	3.43	6.12	
100	2.25	2.33	-3.43	1.91	1.58	20.89	
80	1.11	1.11	0.0	0.11	0.11	0.0	

Table 4.8 (continued)

		Large sized PEV			Candidate type No.8			Candidate type No.11		
	Impressed Voltage (V)	Measured (Pam <sup>3</sup> /s)	Calculated (Pam <sup>3</sup> /s)	Error (%)	Measured (Pam <sup>3</sup> /s)	Calculated (Pam <sup>3</sup> /s)	Error (%)	Measured (Pam <sup>3</sup> /s)	Calculated (Pam <sup>3</sup> /s)	Error (%)
Throughput-test	175	57.60	57.21	0.68	57.49	58.90	-2.39			
	150	43.57	43.57	0.00	44.66	44.65	0.02			
	125	29.61	29.94	-1.10	31.87	30.40	4.84			
	100	16.20	16.30	-0.37	20.04	16.14	24.16			
	75	2.66	2.67	-0.37	1.89	1.89	0.00			
After Baking-test	175	52.48	52.80	-0.61	55.99	59.37	-5.69			
	150	40.00	40.01	-0.02	44.72	44.71	0.02			
	125	27.31	27.21	0.37	31.78	30.04	5.79			
	100	15.12	14.41	4.93	19.54	15.38	27.05			
	75	1.62	1.62	0.0	0.71	0.71	0.00			
After Fatigue-test	175	57.99	59.04	1.78	56.08	58.02	-3.34			
	150	44.29	44.28	0.02	43.79	43.79	0.00			
	125	39.30	29.53	2.61	31.26	29.56	5.75			
	100	16.70	14.77	13.07	19.08	15.32	24.54			
	75	0.01	0.01	0.0	1.09	1.09	0.0			

Table 4.9 Comparison of throughput between candidate type No.9 and No.12 for PEV

## Small sized PEV

	Impressed Voltage (V)	Candidate type No.9			Candidate type No.12		
		Measured ( $\text{Pam}^3/\text{s}$ )	Calculated ( $\text{Pam}^3/\text{s}$ )	Error (%)	Measured ( $\text{Pam}^3/\text{s}$ )	Calculated ( $\text{Pam}^3/\text{s}$ )	Error (%)
<b>Throughput-test</b>							
175	5.88	5.71	2.98	4.02	3.03	32.67	
150	4.28	4.28	0.0	2.24	2.24	0.0	
125	2.61	2.86	-8.74	1.04	1.44	-27.78	
100	1.11	1.43	-22.38	-0.23	0.64	-64.06	
80	0.20	0.29	0.0	0.0	0.0	0.0	
<b>After Baking-test</b>							
175	5.85	5.72	2.27	3.79	2.93	29.35	
150	4.29	4.29	0.0	2.16	2.16	0.0	
125	2.66	2.87	-7.32	0.98	1.39	-29.50	
100	1.15	1.44	-20.14	0.20	0.62	-67.74	
80	0.30	0.30	0.0	0.0	0.0	0.0	
<b>After Fatigue-test</b>							
175	5.57	5.58	-0.18	3.91	3.11	25.72	
150	4.20	4.20	0.0	2.29	2.29	0.0	
125	2.69	2.82	-4.61	1.00	1.47	-31.97	
100	1.23	1.45	-15.17	0.28	0.65	-56.92	
80	0.35	0.35	0.0	0.0	0.0	0.0	

Table 4.9 (continued)

		Large sized PEV			Candidate type No.9			Candidate type No.12		
	Impressed Voltage (V)	Measured (Pam <sup>3</sup> /s)	Calculated (Pam <sup>3</sup> /s)	Error (%)	Measured (Pam <sup>3</sup> /s)	Calculated (Pam <sup>3</sup> /s)	Error (%)			
Throughput-test	175	56.95	56.57	0.67	66.60	69.53	-4.16			
	150	43.26	43.25	0.02	53.36	53.38	0.04			
	125	29.42	29.93	-1.70	40.06	37.23	7.60			
	100	16.18	16.60	-2.53	27.21	21.08	29.14			
	75	3.28	3.28	0.0	4.92	4.92	0.0			
After Baking-test	175	51.68	51.80	-0.23	65.63	69.23	-5.20			
	150	39.67	39.66	0.03	52.97	52.98	-0.02			
	125	27.23	27.52	-1.05	39.46	36.74	7.40			
	100	15.17	15.38	-1.37	26.65	20.50	30.0			
	75	3.24	3.24	0.0	4.26	4.25	0.24			
After Fatigue-test	175	58.16	59.08	-1.56	67.41	67.41	0.0			
	150	45.27	45.27	0.0	54.41	54.41	0.0			
	125	32.25	31.46	2.51	40.94	41.41	-1.13			
	100	18.33	17.67	3.74	28.01	28.41	-1.41			
	75	3.85	3.85	0.0	15.41	15.42	0.06			

Table 4.10 Deviation throughput vs calculated one

Candidate Type	After time (week)	PEV-L		PEV-H	
		175 (V)	100 (V)	175 (V)	100 (V)
No.1	1	+0.1%	-14.5%	-4.9%	-10.0%
	2	-1.3	-20.0	-3.6	- 8.4
No.2	1	+3.2	-12.1	-1.1	- 4.4
	2	+1.3	-14.6	-1.6	- 5.6
No.3	1	+0.5	-31.2	-2.0	- 5.3
	2	-1.6	-36.6	-0.7	- 7.9
No.4	1	-3.1	-50.2	-1.7	-13.7
	2	-5.9	-59.7	+0.2	- 8.1
No.5	1	+2.2	- 4.9	-1.5	- 6.2
	2	+0.5	-24.3	-2.1	- 9.4
No.6	1	0.0	- 9.4	+1.7	- 4.7
	2	+0.3	- 7.6	+0.5	- 7.9
No.7	1	+1.2	- 3.0	+1.5	- 1.4
	2	+1.5	- 8.9	+0.1	- 3.7
No.8	1	-5.6	-25.4	+1.4	- 8.1
	2	-2.7	-16.3	+0.2	-11.3
No.9	1	+9.5	+ 1.6	+2.1	-10.5
	2	+5.0	-26.6	+2.6	- 8.9
No.10	1	+2.1	-22.1	+0.2	- 6.0
	2	+0.5	-30.5	-1.5	- 7.4
No.11	1	+6.9	- 5.3	-2.1	-11.2
	2	+2.1	-47.5	-3.1	-13.1
No.12	1	-3.2	-53.6	-1.2	- 6.2
	2	-9.0	-64.5	-1.7	- 8.1

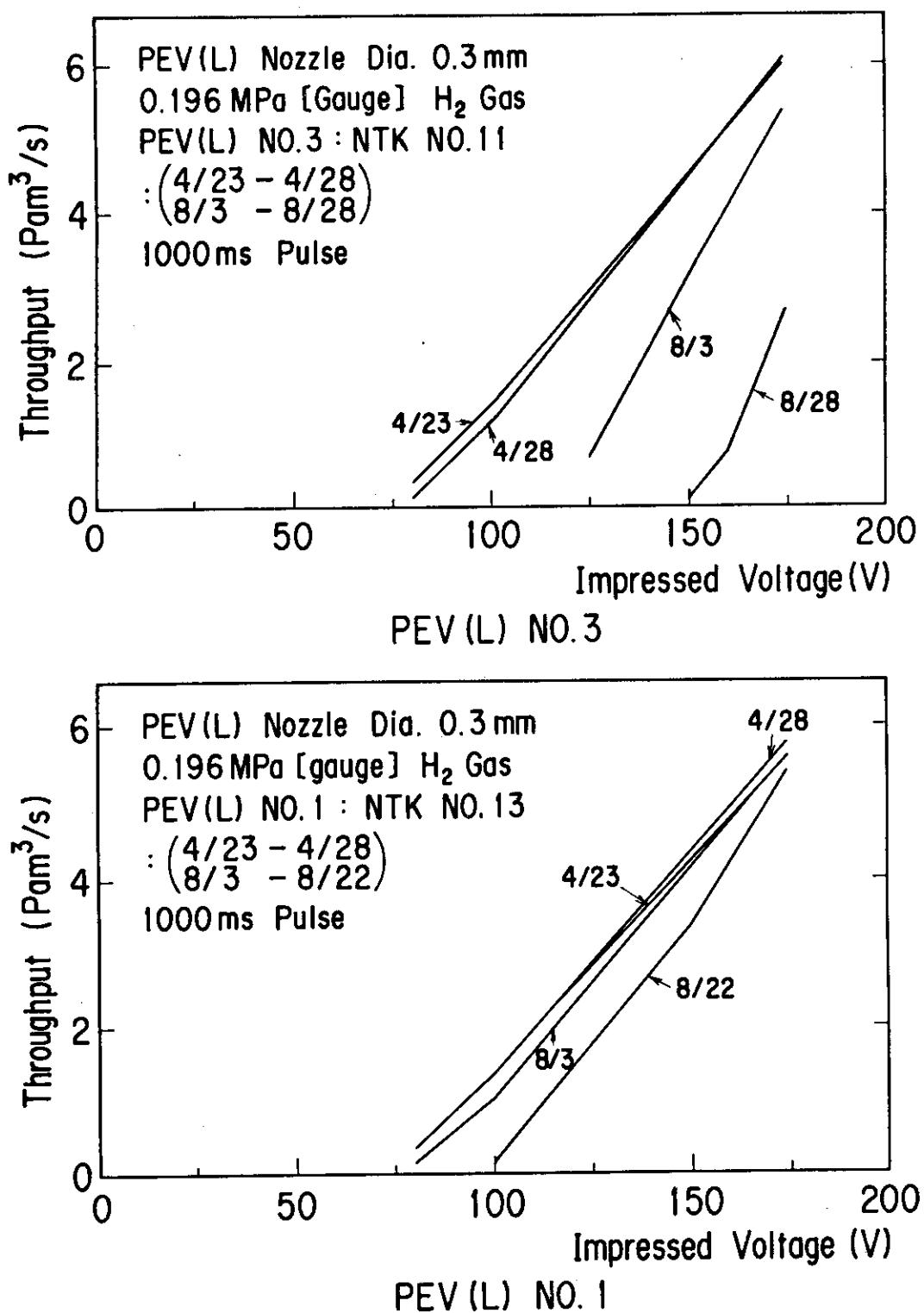


Fig. 4.17 Long life performance of PEV-L

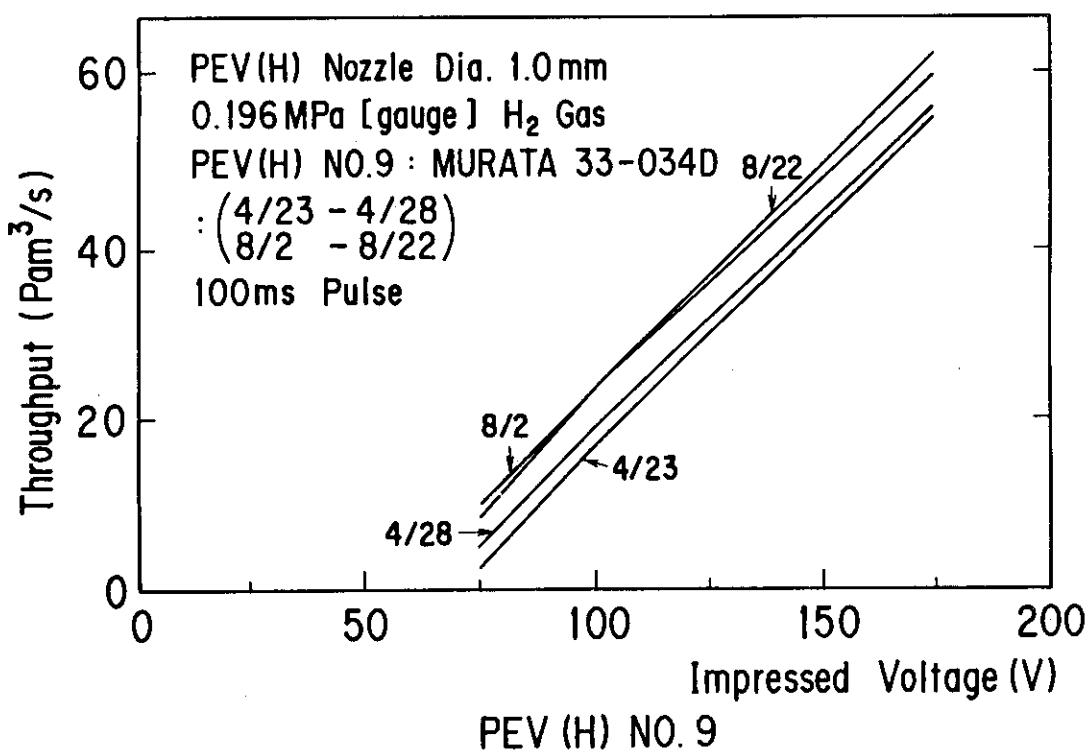
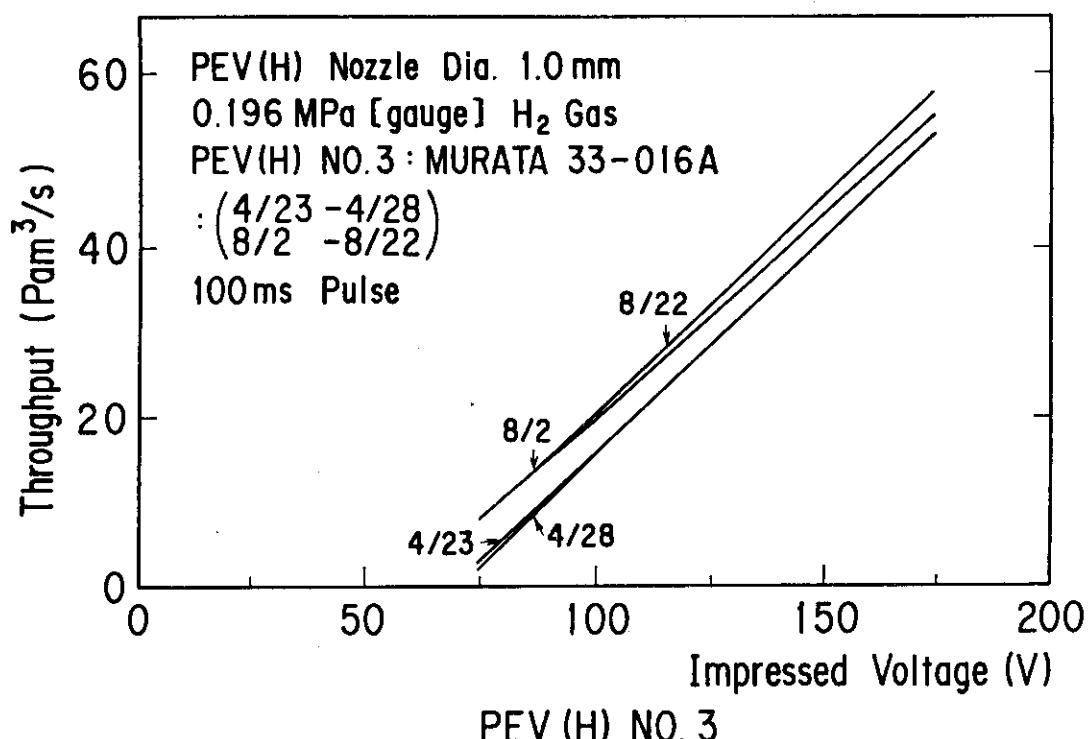


Fig. 4.18 Long life performance of PEV-H

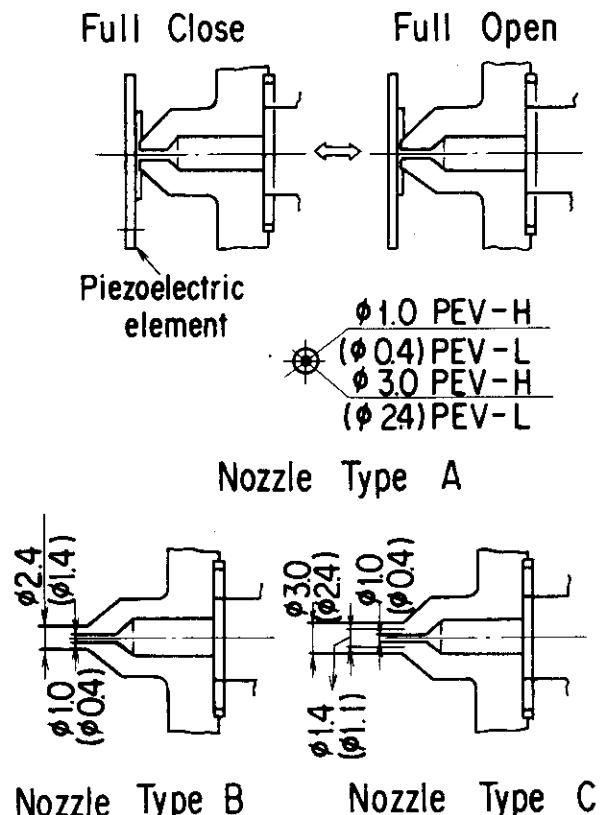


Fig. 4.19 Nozzle types which were to use the improved long life performance of PEV

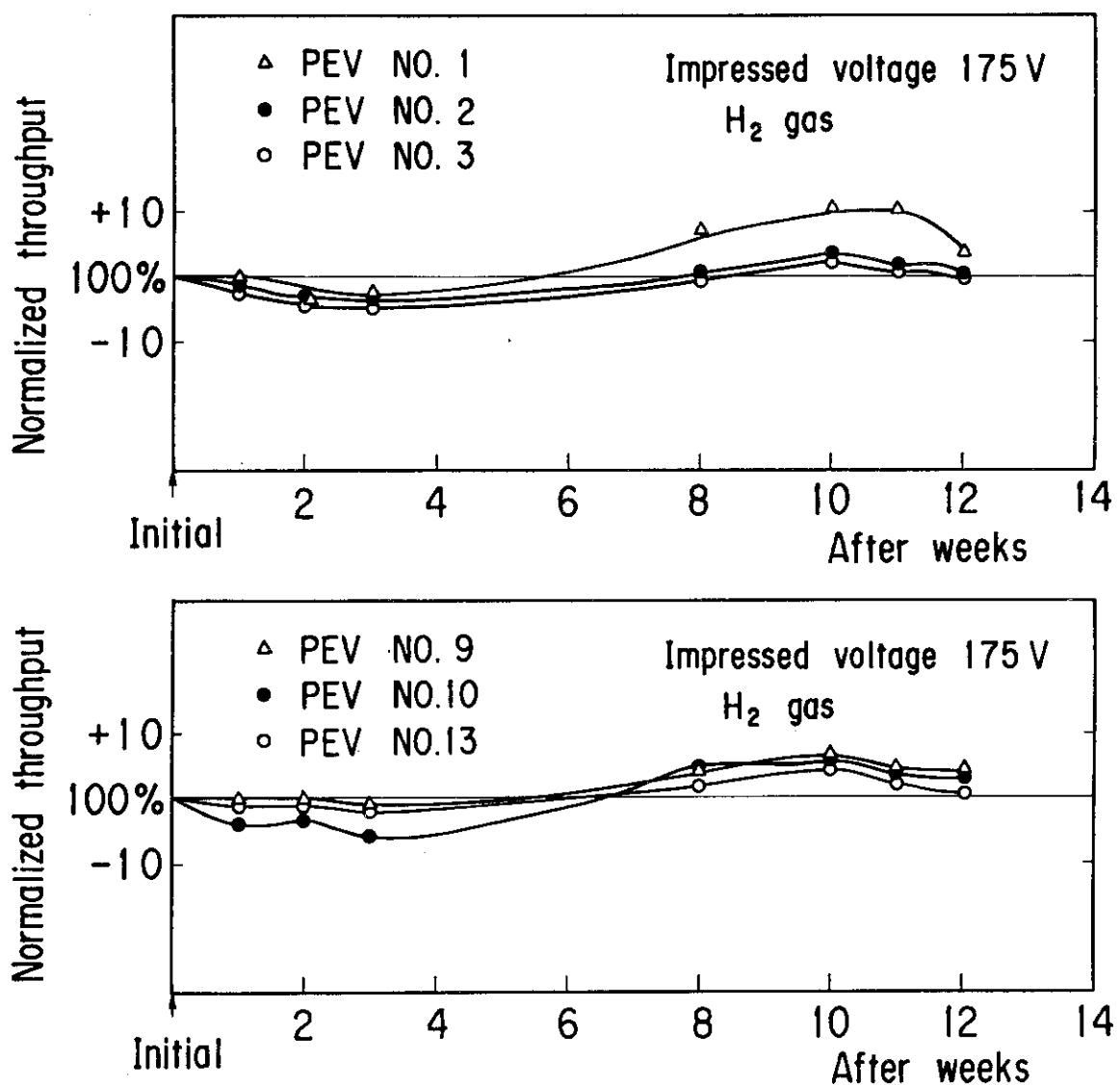


Fig. 4.20 Relation between throughput and time (week)  
of improved PEV-H

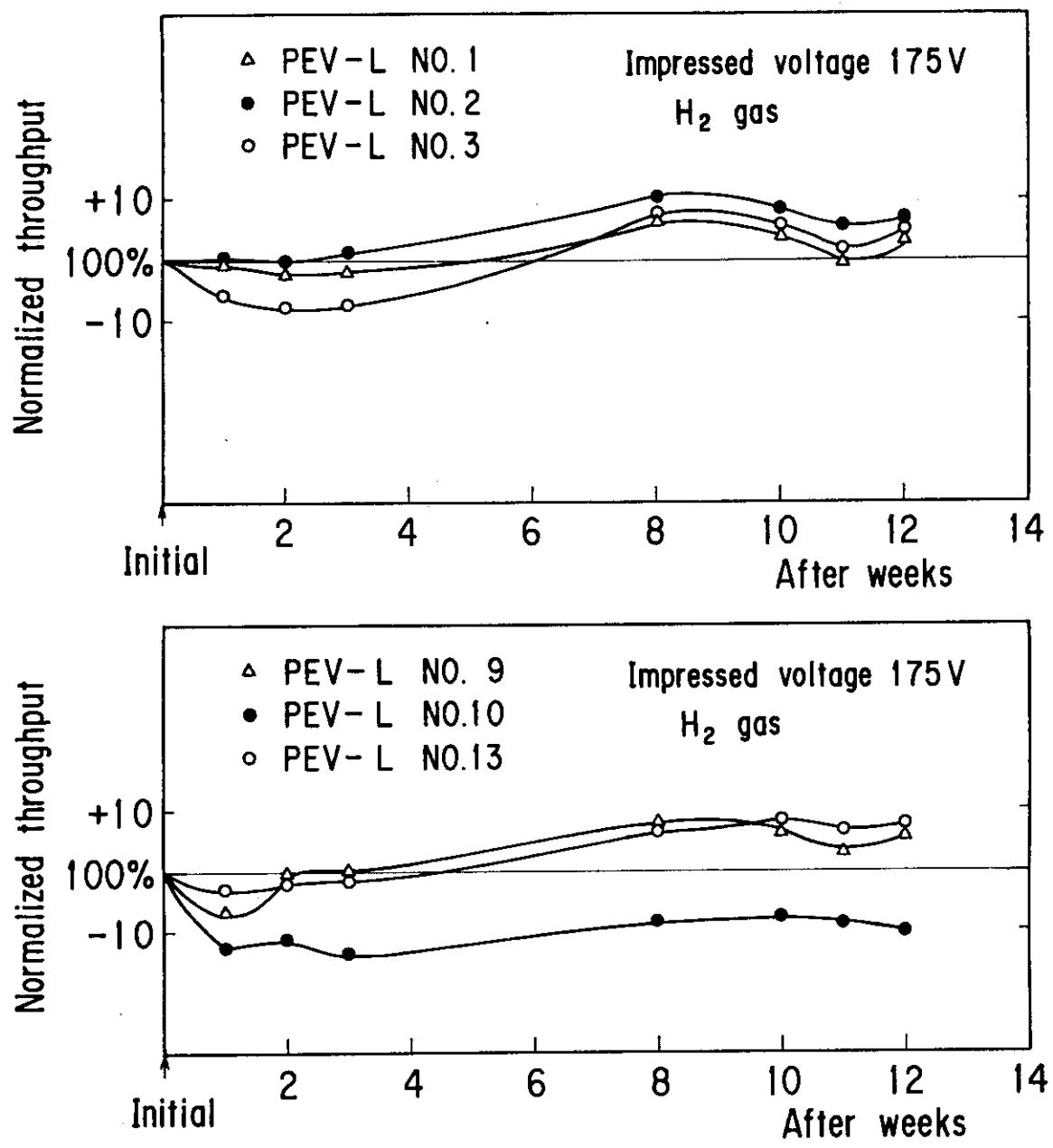


Fig. 4.21 Relation between throughput and time (week) of improved PEV-L

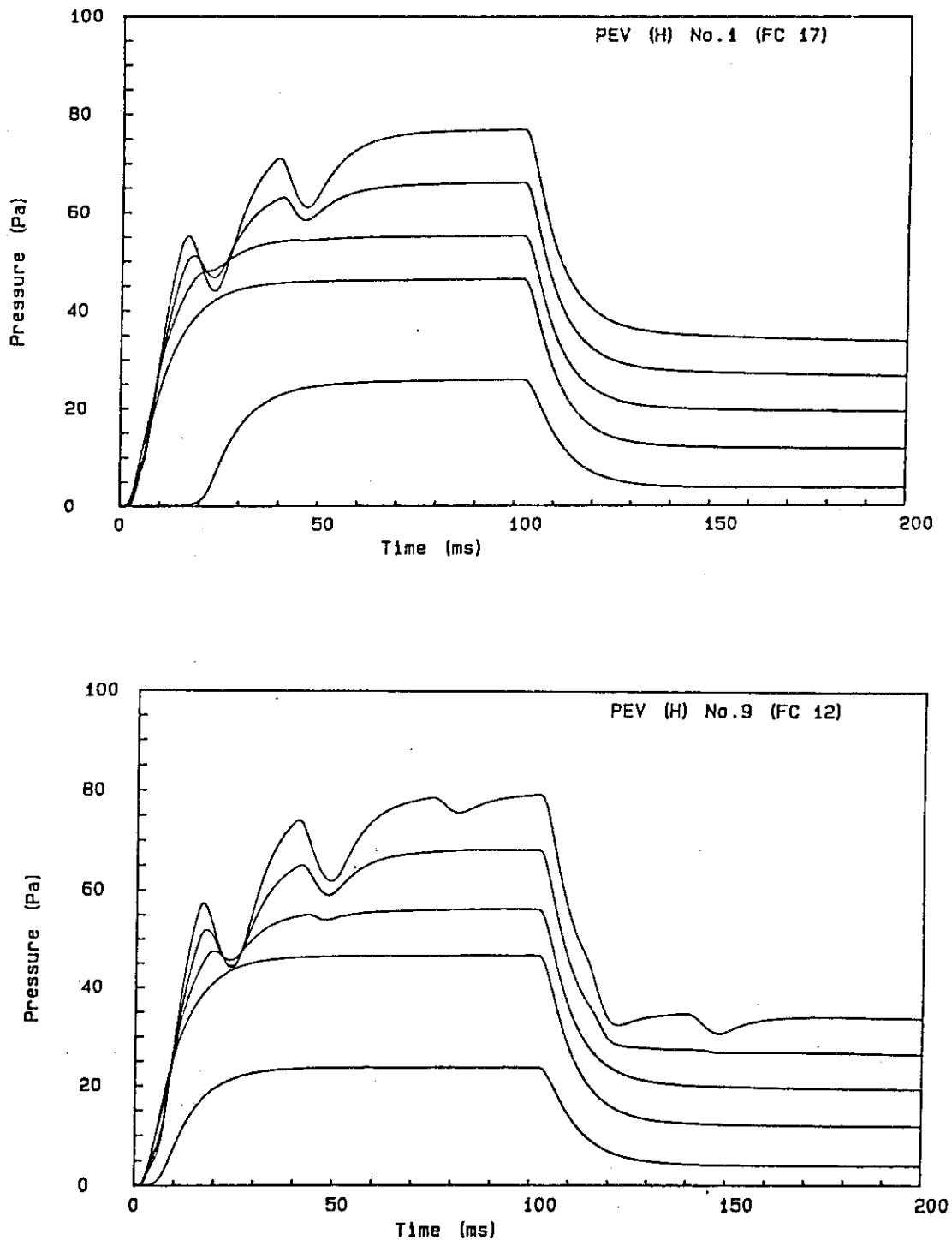


Fig. 4.22 Influence of throughput upon the pressure response using improved PEV-H

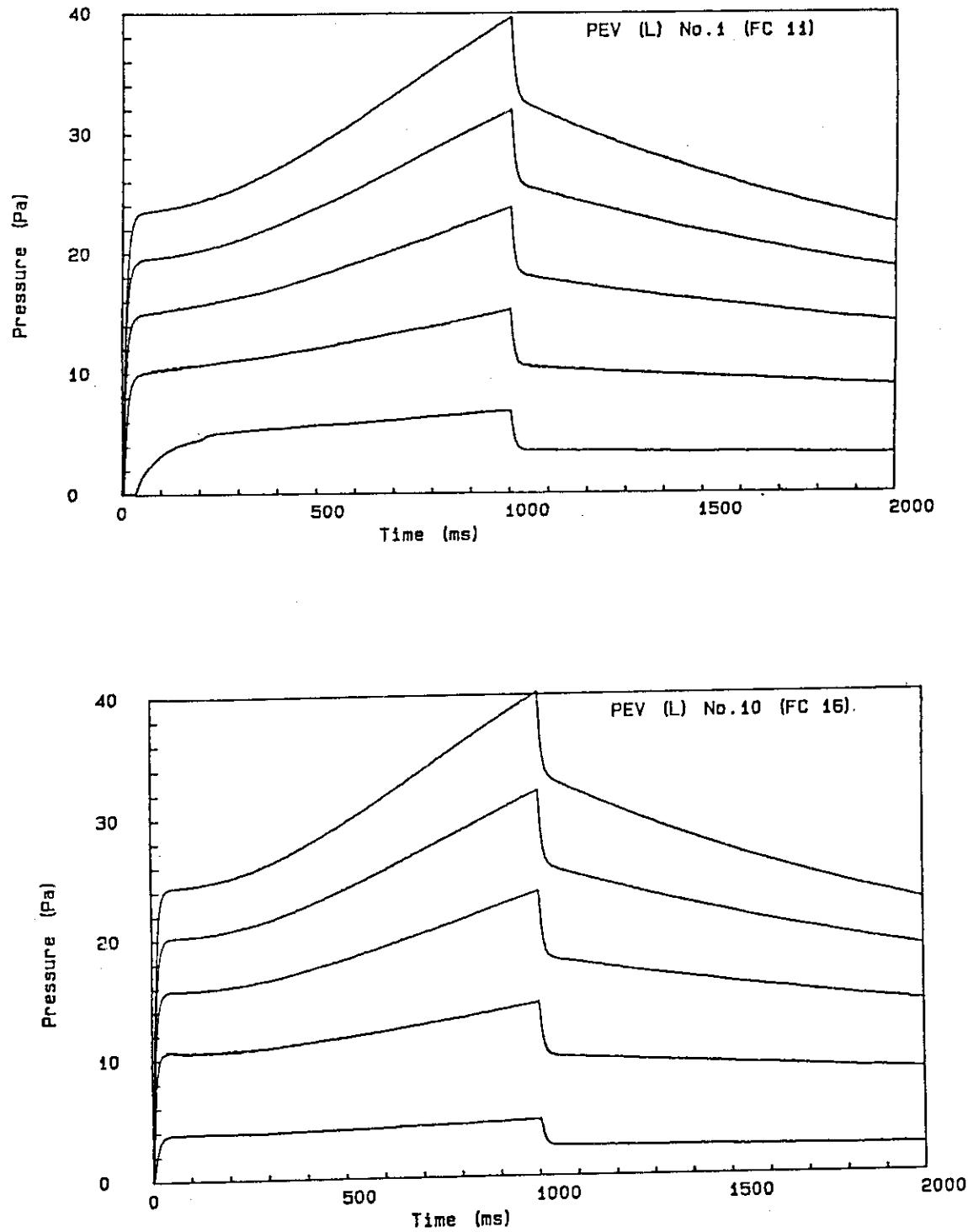


Fig. 4.23 Influence of throughput upon the pressure response using improved PEV-L

### 4.3 性能確認試験

圧電素子弁の設計変更は、単体試験及び経年劣化改良試験の結果に基づいて次のように行った。

- (1) ノズル形状は、タイプAよりタイプBとする。
- (2) ノズル表面には、シール材との接着を防止するためテフロンコーティング処理を行なう。
- (3) シール材料は、バイトンゴムよりNBRに変更し、NBRを予めベーキング圧縮処理する。
- (4) 締めつけボルト等には、ダブルナットに割りピンを取りつけボルトナットが振動等により外れないようとする。

以上の改良を行って製作した圧電素子弁をガス注入用マニホールドに取りつけ実環境下で圧電素子弁の性能確認を行った。

JT-60本体コイルの通電試験は、昭和59年12月から昭和60年3月の約4カ月間に渡って実施された。圧電素子弁の性能確認試験は、本体コイル試験中に実施し、圧電素子弁の各種特性、性能を確認することができた。

#### 4.3.1 目的

圧電素子弁の実動作環境は、真空容器を排気する装置の排気速度が  $12000 \text{ l/s}$  ( $\text{N}_2$ ) と大きく、空心変流器コイルの電流遮断による真空容器の振動等、これまでの動作条件と異なる。性能確認試験は、(1)圧電素子弁の流量較正方法の確立、(2)磁場中に於ける圧電素子弁の特性確認、に重点を於いて実施し、圧電素子弁の実動作環境条件での信頼性を明らかにする。

#### 4.3.2 試験方法

##### (1) シートリーク量の測定

圧電素子弁の背圧を  $0.196 \text{ MPa}$  [gauge] に加圧し、圧電素子弁のシートリーク量を測定する。

##### (2) 流量の測定

圧電素子弁の流量は、次のように求めた。

##### ゲート弁「閉」の場合

ビルドアップ法で流量較正を行なう。測定装置で得られる圧電素子弁の定格電圧に於ける流量値と、実機に取付けた圧電素子弁の流量値に差はないと言う条件で、マニホールドの容量を求めた。予め配管寸法から計算した。マニホールドの容量と、圧力上昇から得られるマニホールドの容量を比較すると、約  $2 \sim 3\%$  の範囲で一致する。圧電素子弁の流量は、従来の方法と同じように注入前後のバラトロン真空計の圧力上昇値、マニホールド容積及び注入時間から求めた。

##### ゲート弁「開」の場合

ダイナミック法による圧電素子弁の流量較正方法である。ガス流量を連續注入して得られるバラトロン真空計の圧力は、真空容器、マニホールド及び注入枝管のコンダクタンスによって定まる。ガス流量とバラトロン真空計の圧力値を求め圧電素子弁の注入量換算曲線を得ることを目的としている。

### (3) 磁場中の流量特性

トロイダル磁場及び垂直磁場中の圧電素子弁の流量変化を調べる。バラトロン真空計の圧力波形を比較して圧電素子弁が受ける磁場の影響を調べた。

性能確認試験では、注入系-1, -3, -4に水素ガスを注入系-2に窒素ガスを充填させて圧電素子弁を動作させた。Table 4.11に注入系と圧電素子弁Noとの関係を示す。

### 4.3.3 試験結果

#### (1) シートリーク量

圧電素子弁のシートリーク量は、約  $0.6 \times 10^{-8} \sim 8.0 \times 10^{-10}$  Pa・m<sup>3</sup>/s で仕様値  $1.33 \times 10^{-8}$  Pa・m<sup>3</sup>/s を満足した。JT-60真空容器及びガス注入・予備電離装置を所定の温度でベーキングした後、再度常温において圧電素子弁のシートリーク測定を行った。その結果、シートリークの仕様値を超える圧電素子弁が3ヶ発見された。圧電素子弁が取りついている枝管のベーキング温度は、他の枝管の温度と同じ約50~60°Cである。シートリークを生じた圧電素子弁は、小容量型で、シートリークの値も仕様値の約10倍程度である。原因是、コイル通電時の電磁衝撃に基因すると判断される。Fig.4.24にシートリーク量の時間的な測定波形を示す。He充填後約20~30分まで圧電素子弁のシートリーク量は増加し、次第に飽和する。これは、シール材に使用したNBRのヘリウム透過によるものである。

#### (2) 流量特性

ゲート弁を“閉”にして得られた圧電素子弁の流量特性の試験結果をFig.4.25に示す。Fig.4.25に大容量圧電素子弁(FC-17)の流量特性を示す。FC-17の流量は、約150V印加で、47.9 Pa・m<sup>3</sup>/s, 75V印加で約6.65 Pa・m<sup>3</sup>/sの流量が得られる。小容量圧電素子弁(FC-16)の流量特性をFig.4.25に示す。FC-16の流量は、約150V印加で5.187 Pa・m<sup>3</sup>/s, 75V印加で約0.8 Pa・m<sup>3</sup>/sが得られる。CAMACシステムからの流量設定値と測定した流量の比をTable.4.12に示す。大容量素子弁では、設定値に対し約1~5%増加した流量、小容量圧電素子弁では設定値に対し約1~3%増加した流量が得られている。ガスの種類を変えても目標の設定流量に制御していることがわかる。

ゲート弁を“開”にしたダイナミック法での圧電素子弁の試験結果をFig.4.26に示す。大容量圧電素子弁(FC-17)の場合定格流量53.3 Pa・m<sup>3</sup>/sでガスを注入したときの枝管圧力は、約91.1 Paに上昇する。FC-17が取りつく枝ポートでは、ガス流量と、圧力上昇との換算式が、Table 4.13に示すように表わされる。それによると流量(Q)は、枝管圧力上昇値(P)の2次関数の形で近似される。表中の係数a, b, cを用いて計算される流量と注入したガス流量との誤差は、小容量圧電素子弁の場合約1%以下、大容量圧電素子弁では、最小流量5.33Pa・m<sup>3</sup>/sで約9%，定格流量53.3 Pa・m<sup>3</sup>/sでは、約1.0%となった。

各圧電素子弁について注入量と枝管の圧力上昇値を測定し、流量換算式を求めた。圧電素子

弁の経年的な流量変化は、ゲート弁を「開」にした状態で得られる枝管の圧力上昇値を用いて流量換算式から流量が算出され、圧電素子弁の流量特性が評価できる。圧電素子の流量定数を変更しても所定の精度で圧電素子弁の流量制御をすることができる。

### (3) 磁場中の流量特性

トロイダル磁場及び垂直磁場中で圧電素子弁を動作させた。注入するガスのプレプロ波形は、Fig.4.27に示すように定格流量の約 55%, 100%, 77%, 55%, 32.5%, 10% の各注入設定値を 100 msec 注入し、枝管の圧力波形を比較した。

#### a. トロイダル磁場の影響

トロイダル磁場コイルの通電電流を変えて得られた、枝管圧力値を Table 4.14 に示す。表中の上段は、プレプロ注入が開始し、約 210 msec 後の枝管圧力値で、下段は、磁場無しの場合に得られた圧力値との比である。大容量圧電素子弁及び小容量圧電素子弁とも、トロイダル磁場強度が定格の場合約 3 ~ 11% 程度増加した圧力値を示す。

#### b. 垂直磁場の影響

垂直磁場コイルの通電電流を変えて得られる枝管の圧力上昇を Table 4.15 に示す。表中の上段は、プレプロ注入が開始し、約 210 msec 後の枝管圧力値で、下段は、磁場無しの場合の圧力比である。大容量圧電素子弁及び小容量圧電素子弁とも垂直磁場コイルが、定格磁場強度のとき約 2 ~ 7% 増加した圧力上昇を示す。大容量圧電素子弁 (FC-17) と小容量圧電素子弁 (FC-16) についてトロイダル磁場中に於ける圧力変化を Fig.4.28 に示す。図に示すガス流量は、予め流量と枝管圧力との関係を測定した結果で較正した値である。圧電素子弁に放電用ガスを供給する背圧の圧力制御は、約 ± 0.0196 MPa の制御範囲で制御維持されるため設定値 0.196 MPa [gauge] の背圧値の場合、この制御範囲の圧力変化は、約 6.5 % の流量変化に相当する。又、圧電素子弁のコイル通電試験終了後の約 4 カ月に於ける流量変化は、大容量圧電素子弁で約 5.0 Pa・m³/s, 小容量圧電素子弁で約 1.0 Pa・m³/s 増加した例から考えて、磁場中に於ける圧電素子弁の流量特性は、磁場の影響を受けずに動作していると判断される。

### (4) コイル通電試験前後の流量特性

コイル通電試験開始からコイル通電試験終了までの約 4.0 カ月に於ける圧電素子弁の流量変化を Table 4.16 に示す。

大容量圧電素子弁は、定格流量 53.33 Pa・m³/s (H<sub>2</sub>) 及び 14.25 Pa・m³/s (N<sub>2</sub>) に対して約 7 ~ 4 Pa・m³/s (H<sub>2</sub>) 増加し小容量圧電素子弁では、定格流量 5.33 Pa・m³/s (H<sub>2</sub>) 及び 1.425 Pa・m³/s (N<sub>2</sub>) に対し 0.9 ~ 0.3 Pa・m³/s (H<sub>2</sub>) 増加している。この増加流量を圧電素子弁の変位量に換算すると大容量圧電素子弁で約 3.0 μm, 小容量圧電素子弁が約 1.0 μm に相当する。実測した 12 週間に於ける圧電素子弁の経年劣化流量に比べ実機取付状態の圧電素子弁については経年劣化流量が大きい。この原因是、コイル通電試験時に生ずる F コイル遮断時の電磁衝撃によるマニホールドの機械振動に起因するものと想像される。コイル試験後圧電素子弁の流量特性は、圧電素子弁を実機マニホールドに取りつけた状態でダイナミック法を用い簡易に行なった。圧電素子弁の流量定数を変更することにより Table 4.17 に示すよう設定流量に対し約 99 ~ 97% の範囲に再度調整されていることがわかる。

Table 4.11 Relation between PEV and the feed line

Feed	PEV Type	P-6 UPPER Section	P-11 UPPER Section	P-15 LOWER Section	P-18 LOWER Section
I	PEV-H	FC12	FC13	FC17	FC18
	PEV-L	FC11		FC16	
II	PEV-H	FC22	FC23	FC27	FC28
	PEV-L	FC21		FC26	
III	PEV-L	FC31		FC36	
IV	PEV-L		FC43		FC48

Table 4.12 Relation between throughput and  
CAMAC command

PEV-NO	CAMAC command Pam <sup>3</sup> /s	Injected gas throughput Pam <sup>3</sup> /s	Accuracy
FC 12	53.33	53.411	1.00
11	5.33	5.285	0.99
22	14.25	15.01	1.05
21	1.43	1.414	0.99
31	5.33	5.475	1.03
17	53.33	53.556	1.00
16	5.33	5.344	1.00
27	14.25	14.609	1.03
26	1.43	1.463	1.02
36	5.33	5.281	0.99
13	53.33	53.334	1.00
23	14.25	14.347	1.01
43	5.33	5.432	1.02
18	53.33	53.274	1.00
28	14.25	14.16	0.99
48	5.33	5.464	1.03

Table 4.13 Calibration of the throughput from the measured pressure at branch pipe

PEV-L	MKS No. PE 16 (PEV No. FC 16)			
	H2			
	$Q = a * P^2 + b * P + c$			
	a = 15.000D-04	b = 0.1678	c = -0.4443	
Command (Pa)	test (Pa*m^3/s)	cal. (Pa*m^3/s)	Diff-Q (Pa*m^3/s)	Error (%)
5.53	0.53	0.53	0.00	0.07
11.73	1.73	1.73	-0.00	-0.04
17.40	2.93	2.93	-0.00	-0.00
22.66	4.13	4.13	0.00	0.02
27.60	5.33	5.33	-0.00	-0.01
PEV-H	MKS No. -PE 17 (PEV No. -FC 17)			
	H2			
	$Q = a * P^2 + b * P + c$			
	a = 43.884D-04	b = 0.3165	c = -11.4397	
Command (Pa)	test (Pa*m^3/s)	Cal. (Pa*m^3/s)	Diff-Q (Pa*m^3/s)	Error (%)
34.8	5.33	4.89	0.44	8.99
54.7	17.33	18.97	-1.64	-8.66
65.7	29.33	28.26	1.07	3.77
78.7	41.33	40.68	0.65	1.59
91.1	53.33	53.84	-0.51	-0.95

Table 4.14 Dependency of throughput for PEV  
on toroidal field

PEV-NO	Toroidal field strength			
	0 %	30 %	50 %	100 %
FC 17	86.26 (1.00)	87.32 (1.01)	88.26 (1.02)	91.59 (1.06)
13	48.66 (1.00)	48.86 (1.00)	49.4 (1.02)	
18	47.53 (1.00)	48.06 (1.01)	47.86 (1.01)	52.13 (1.09)
28	43.33 (1.00)	42.13 (0.97)	43.93 (1.01)	45.00 (1.04)
11	23.73 (1.00)	23.66 (1.00)	24.26 (1.02)	26.40 (1.11)
16	24.13 (1.00)	24.2 (1.00)	24.73 (1.02)	26.93 (1.12)
21	20.66 (1.00)	20.66 (1.00)	21.33 (1.03)	22.06 (1.07)
26	20.46 (1.00)	20.53 (1.00)	21.40 (1.05)	22.60 (1.10)
31	26.93 (1.00)	26.60 (0.99)	26.93 (1.00)	27.60 (1.02)
36	35.26 (1.00)	35.33 (1.00)	33.86 (0.96)	36.26 (1.03)
43	28.00 (1.00)	28.06 (1.00)	28.06 (1.00)	30.46 (1.09)
48	27.33 (1.00)		27.80 (1.02)	29.53 (1.08)

Upper value means the pressure rise (Pa)

( ) value means the normalized pressure ratio

Table 4.15 Dependency of throughput for PEV  
on vertical field

PEV-NO	Vertical field strength			
	0 %	30 %	50 %	100 %
FC 17	86.26 (1.00)	89.39 (1.04)	89.39 (1.04)	89.86 (1.04)
12			91.66	91.06
18	47.53 (1.00)	50.26 (1.06)	50.53 (1.06)	49.8 (1.05)
28	43.33 (1.00)	45.53 (1.05)	45.53 (1.05)	44.00 (1.02)
11	23.73 (1.00)	25.40 (1.07)	25.40 (1.07)	24.46 (1.03)
16	24.13 (1.00)	26.2 (1.09)	26.13 (1.08)	25.20 (1.04)
21	20.66 (1.00)	21.93 (1.06)	21.86 (1.06)	21.40 (1.04)
26	20.46 (1.00)	22.33 (1.09)		21.93 (1.07)
31	26.93 (1.00)	27.80 (1.03)	27.86 (1.03)	27.06 (1.00)
36	35.26 (1.00)	36.73 (1.04)	36.33 (1.03)	35.86 (1.02)
48	27.33 (1.00)	29.00 (1.06)	28.20 (1.03)	28.46 (1.04)

Upper value means the pressure rise (Pa)

( ) value means the normalized pressure ratio

Table 4.16 Comparison of throughput for PEV during coil pow test

PEV-NO	Throughput (Pam <sup>3</sup> /s)		Differential throughput (Pam <sup>3</sup> /s)
	Before power test '84.11.18	After power test '85.3.29	
FC 12	53.411	58.47	5.06
11	5.285	6.06	0.78
22	15.01	15.62	0.61
21	1.414	1.62	0.21
31	5.475	6.27	0.80
17	53.556	57.37	3.81
16	5.344	5.67	0.33
27	14.609	15.33	0.72
26	1.463	1.62	0.16
36	5.281	5.97	0.69
13	53.334	60.5	7.17
23	4.347	15.01	0.66
43	5.432	6.36	0.93
18	53.274	57.54	4.27
28	14.16	15.50	1.34
48	5.464	6.05	0.59

Table 4.17 Comparison of throughput between at after  
coil power test and recalibrated of the  
same PEV

PEV-NO	CAMAC command Pam <sup>3</sup> /s	Measured throughput at after power test Pam <sup>3</sup> /s	Recalibrated throughput Pam <sup>3</sup> /s
FC 12	53.33	58.47	52.48
11	5.33	6.06	5.20
22	14.25	15.62	14.18
21	1.43	1.62	1.39
31	5.33	6.27	5.13
17	53.33	57.37	52.67
16	5.33	5.67	5.39
27	14.25	15.38	14.18
26	1.43	1.62	1.43
36	5.33	5.97	5.28
13	53.33	60.5	52.98
23	14.25	15.01	14.20
43	5.33	6.36	5.18
18	53.33	57.54	53.24
28	14.25	15.50	14.15
48	5.33	6.05	5.16

Date : February 3 , 1985

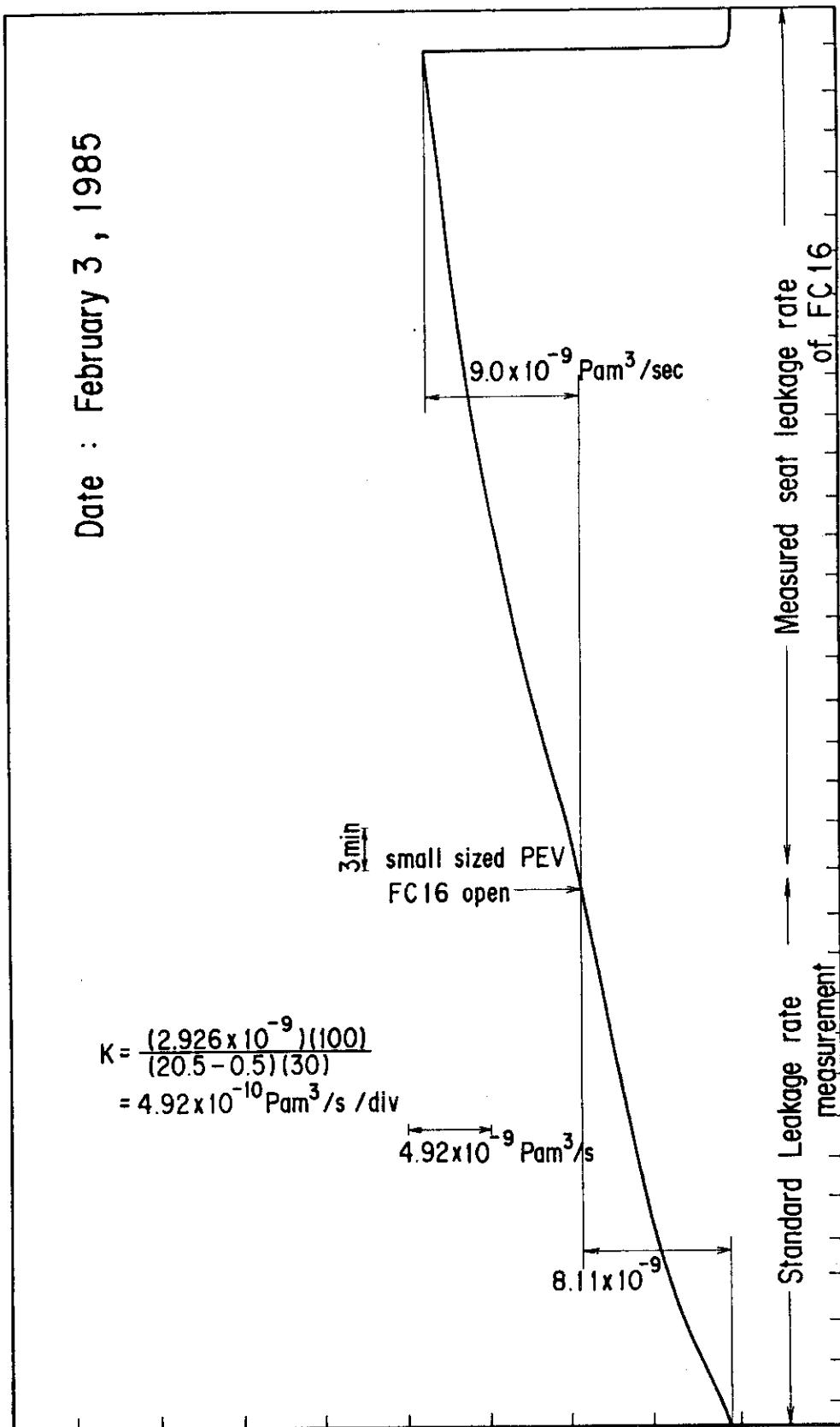


Fig. 4.24 Time history of seat leakage during test for PEV FC No 16

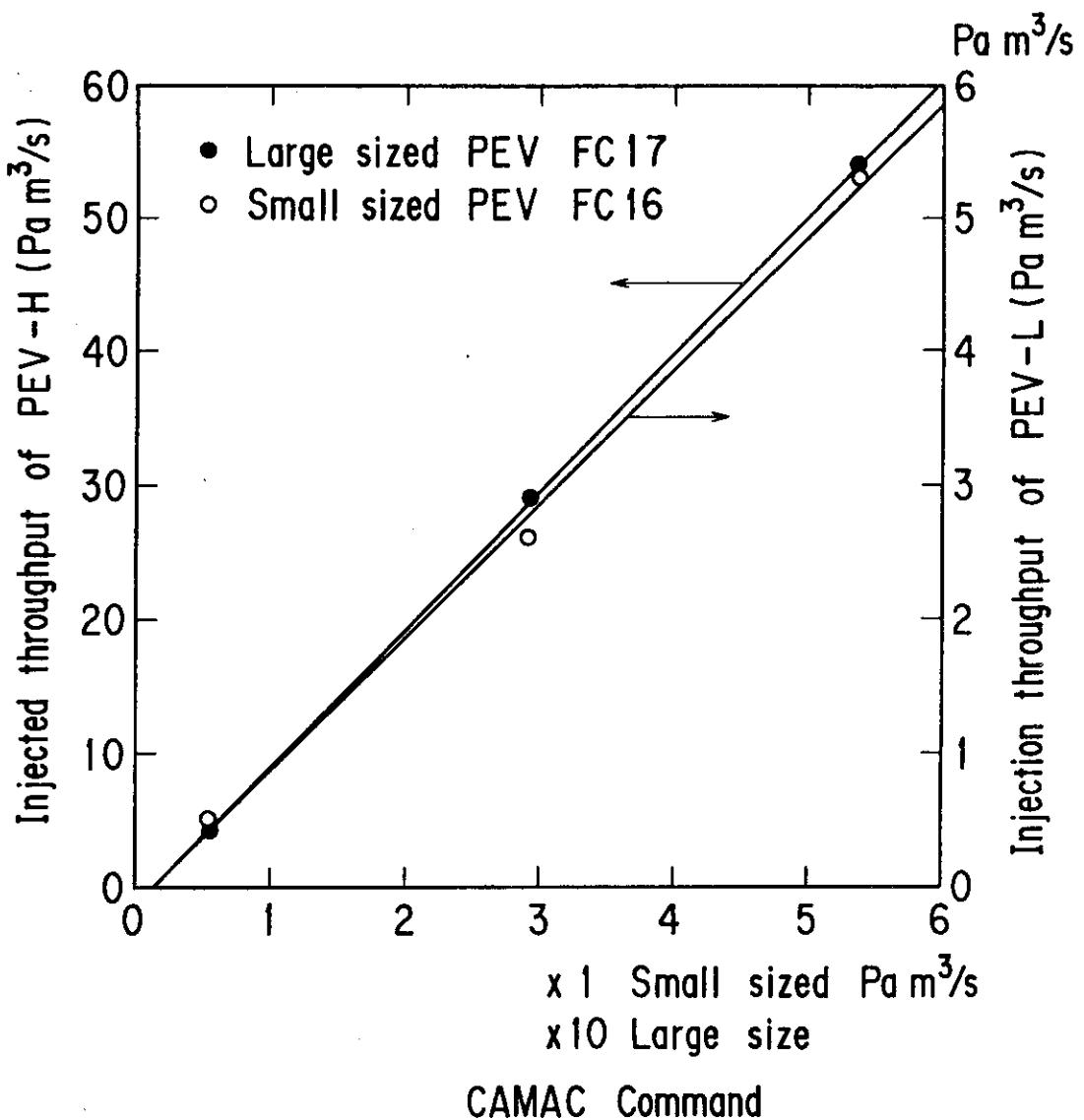


Fig. 4.25 Relation between throughput and CAMAC command from CAMAC control system

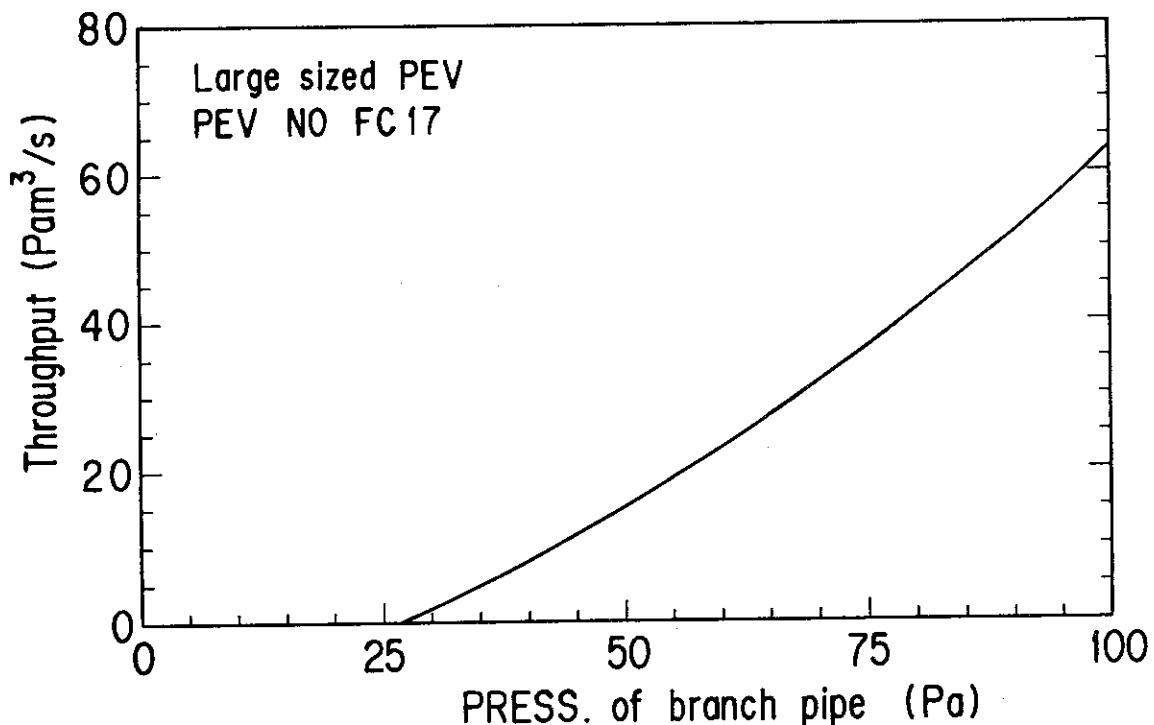
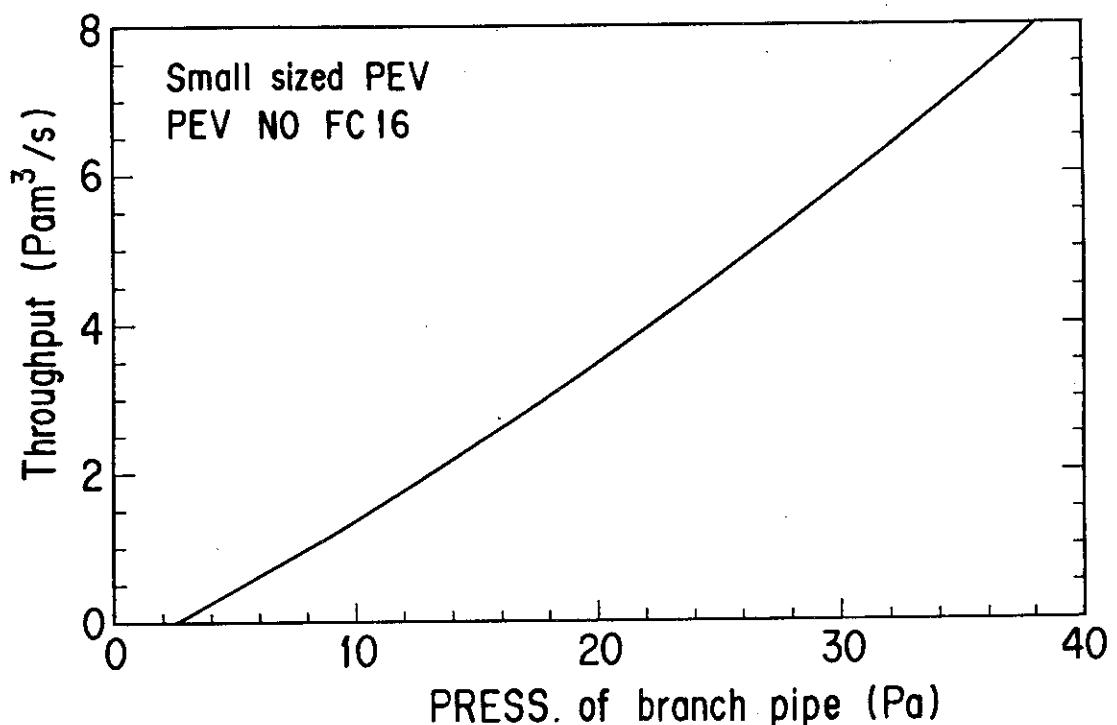


Fig. 4.26 Dependency of pressure at branch pipe upon throughput

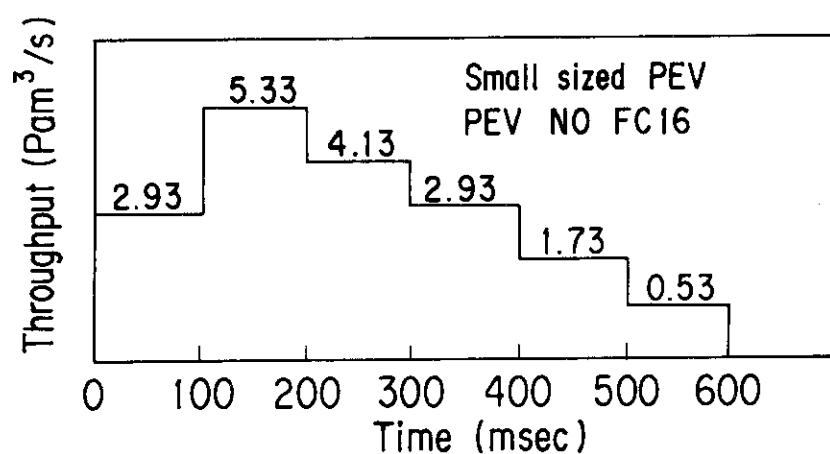
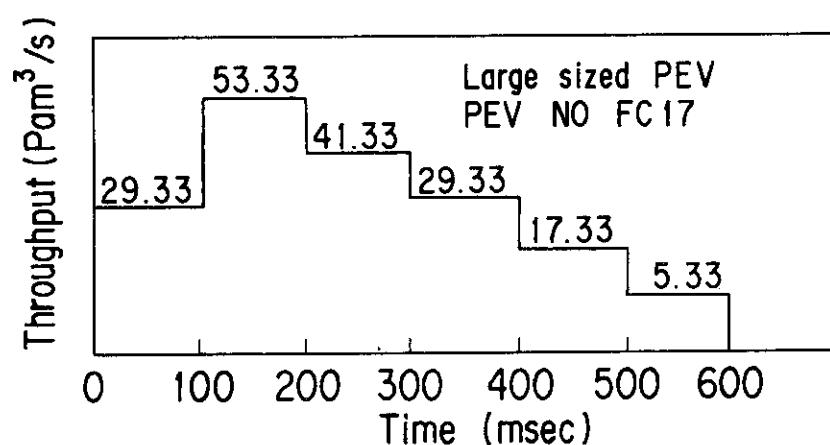


Fig. 4.27 Pre-determined injection pattern for PEV

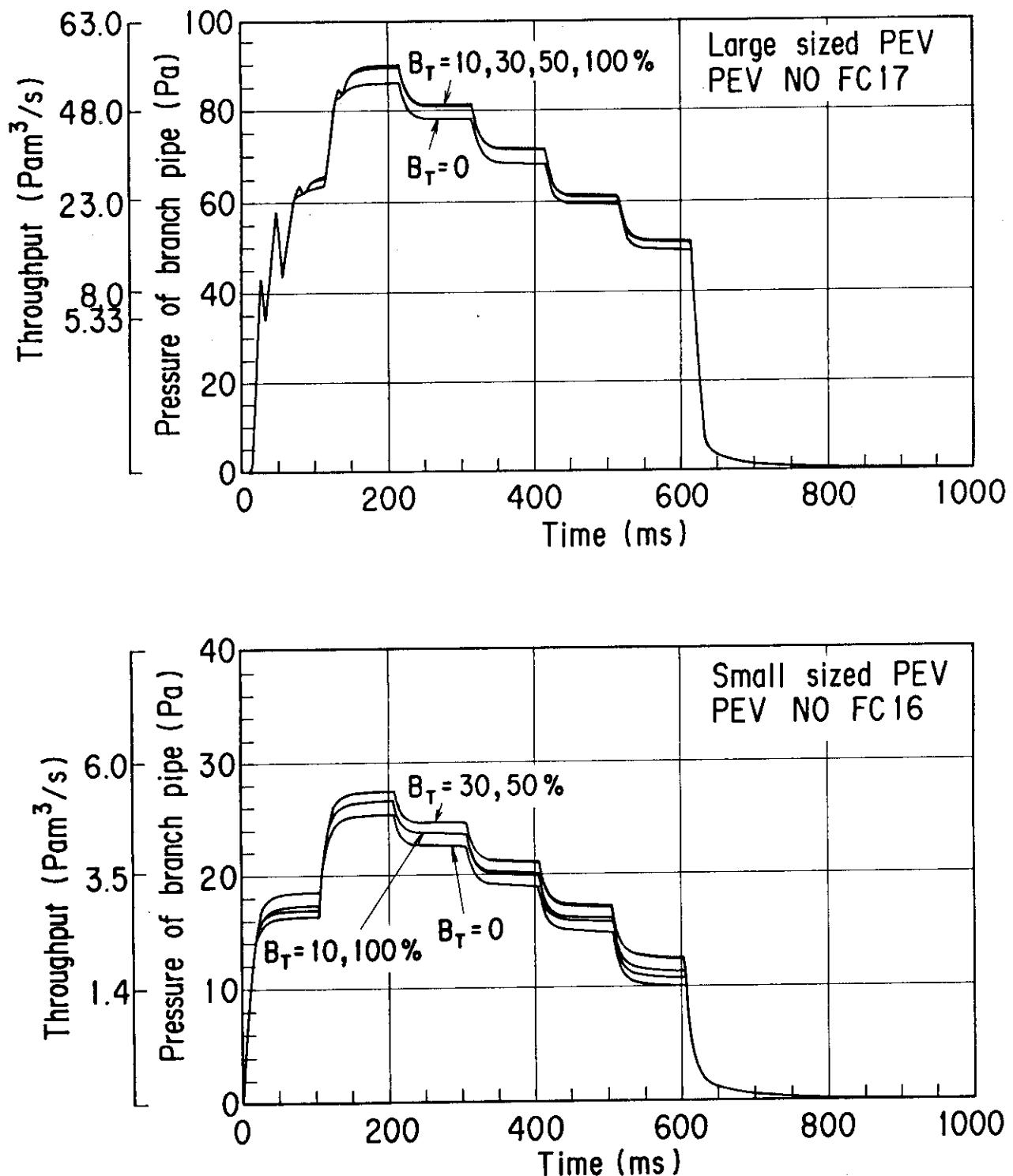


Fig. 4.28 Influence of Toroidal field strength upon throughput and pressure of branch pipe

## 5. おわりに

J T - 60圧電素子弁の試作開発を行った。試作開発の結果大口径圧電素子の国産化、圧電素子弁の設計、製作技術を確立することができた。試作開発した圧電素子弁は、次のように要約される。

- (1) 流量、シートリーク量及び応答時間は、大容量圧電素子弁及び小容量圧電素子弁共に設計仕様値を満足する値が得られた。
- (2) 圧電素子弁のガス流量の経年変化は、各圧電素子弁の定格流量値で比較すると約4%／3ヶ月である。
- (3) 磁場中に於ける圧電素子弁のガス流量特性は、磁場強度の影響を受けずに動作されることを確認できた。

### 謝 辞

本開発の設計を進めるにあたって有益な御討論を頂いた日本原子力研究所 J T - 60試験部第2試験室の各位に感謝します。また終始激励を頂いた太田充 J T - 60第2試験室長に深く感謝します。また、本圧電素子弁の製作・試験には、住友重機械工業株の多大な御協力を頂いたことに、感謝いたします。

### 参考文献

- (1) 児玉；私言
- (2) 平塚，児玉；私言
- (3) 古屋喜正；“流体工学”，朝倉書店 昭和46年
- (4) 例えば“NTKニューセラミック；日本特性陶業 昭和56年
- (5) 児玉；私言
- (6) R. Rossmassler et al ; "Gas Injection Assembly for TFTR" Proc 7th Symposium on Engineering Problems on Fusion Research , P1308
- (7) Catalog "Lead Titonate-Eirconate piezo Ceremics" Products
- (8) 小林；“バイトンについて”，真空第8，第4号（昭和40年）
- (9) 平塚；私言

## 5. おわりに

J T - 60 压電素子弁の試作開発を行った。試作開発の結果大口径压電素子の国産化、压電素子弁の設計、製作技術を確立することができた。試作開発した压電素子弁は、次のように要約される。

- (1) 流量、シートリーアク量及び応答時間は、大容量压電素子弁及び小容量压電素子弁共に設計仕様値を満足する値が得られた。
- (2) 压電素子弁のガス流量の経年的変化は、各压電素子弁の定格流量値で比較すると約 4 % / 3 カ月である。
- (3) 磁場中に於ける压電素子弁のガス流量特性は、磁場強度の影響を受けずに動作されることを確認できた。

### 謝 辞

本開発の設計を進めるにあたって有益な御討論を頂いた日本原子力研究所 J T - 60 試験部第 2 試験室の各位に感謝します。また終始激励を頂いた太田充 J T - 60 第 2 試験室長に深く感謝します。また、本压電素子弁の製作・試験には、住友重機械工業株の多大な御協力を頂いたことに、感謝いたします。

### 参考文献

- (1) 児玉；私言
- (2) 平塚，児玉；私言
- (3) 古屋喜正；“流体工学”，朝倉書店 昭和46年
- (4) 例えは “N T K ニューセラミック”；日本特性陶業 昭和56年
- (5) 児玉；私言
- (6) R. Rossmassler et al ; "Gas Injection Assembly for TFTR" Proc 7 th Symposium on Engineering Problems on Fusion Research , P1308
- (7) Catalog "Lead Titonate-Eirconate piezo Ceramics" Products
- (8) 小林；“バイトンについて”，真空第 8 , 第 4 号(昭和40年)
- (9) 平塚；私言

## 5. おわりに

J T - 60圧電素子弁の試作開発を行った。試作開発の結果大口径圧電素子の国産化、圧電素子弁の設計、製作技術を確立することができた。試作開発した圧電素子弁は、次のように要約される。

- (1) 流量、シートリーグ量及び応答時間は、大容量圧電素子弁及び小容量圧電素子弁共に設計仕様値を満足する値が得られた。
- (2) 圧電素子弁のガス流量の経年的変化は、各圧電素子弁の定格流量値で比較すると約 4% / 3カ月である。
- (3) 磁場中に於ける圧電素子弁のガス流量特性は、磁場強度の影響を受けずに動作されることを確認できた。

### 謝 辞

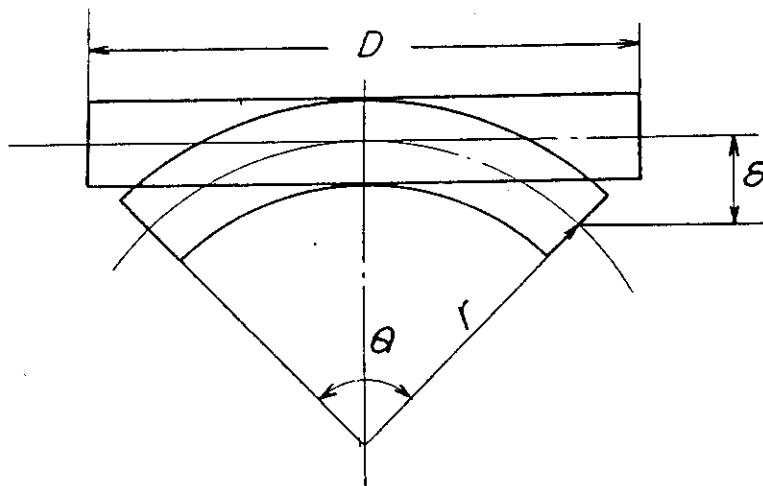
本開発の設計を進めるにあたって有益な御討論を頂いた日本原子力研究所 J T - 60試験部第2試験室の各位に感謝します。また終始激励を頂いた太田充 J T - 60第2試験室長に深く感謝します。また、本圧電素子弁の製作・試験には、住友重機械工業株の多大な御協力を頂いたことに、感謝いたします。

### 参考文献

- (1) 児玉；私言
- (2) 平塚，児玉；私言
- (3) 古屋喜正；“流体工学”，朝倉書店 昭和46年
- (4) 例えば “N T K ニューセラミック”；日本特性陶業 昭和56年
- (5) 児玉；私言
- (6) R. Rossmassler et al ; "Gas Injection Assembly for TFTR" Proc 7 th Symposium on Engineering Problems on Fusion Research , P1308
- (7) Catalog "Lead Titonate-Eirconate piezo Ceramics" Products
- (8) 小林；“バイトンについて”，真空第8，第4号（昭和40年）
- (9) 平塚；私言

## Appendix 1 圧電素子の み量(両端支持)

バイモルフの圧電素子について、その変位量を求める。ここでは圧電素子を平板として扱かう。



$$r \theta = D$$

$$\begin{aligned} \delta &= r - r \cos \frac{\theta}{2} \\ &\doteq \frac{r \theta^2}{8} = \frac{D^2}{8r} \end{aligned} \quad (a)$$

よって み量は曲率半径  $r$  を求めれば与えられる。中立線から  $y$  の位置にある歪分布は

$$\varepsilon_y = y \frac{d\theta}{dr} = \frac{y}{r} \quad \left( \frac{d\theta}{dr} = \frac{1}{r} \right) \quad (b)$$

中立線  $y$  の位置の応力は

$$\begin{aligned} \sigma_y &= Y_{11} ( S_1 - \varepsilon_y ) \\ &= Y_{11} \left( d_{31} E - \frac{y}{r} \right) \end{aligned} \quad (c)$$

ここに

$Y_{11}$  ; ヤング率

$S_1$  ; 電界による歪

$\varepsilon_y$  ; 曲率による歪

$d_{31}$  ; 圧電定数

平衡点では、断面応力によるモーメントは零である。

$$\begin{aligned}
 M &= \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} y \cdot \sigma_y \cdot W dy \\
 &= W \cdot Y_{11} \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \left( d_{31} E y - \frac{y^2}{r} \right) dy \quad (d)
 \end{aligned}$$

ここでWは平板の幅を示す。

$$\begin{aligned}
 \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} d_{31} E y dy - \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \frac{y^2}{r} dy &= 0 \\
 r &= \frac{t}{3 d_{31} E} = \frac{t}{3 d_{31} \frac{v}{t/2}} = \frac{t^2}{6 d_{31} \cdot V} \quad (e)
 \end{aligned}$$

(e)を(a)に代入すると，撓み量は以下となる。

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