

JAERI-M  
84-097

JT-60圧電素子弁の流量較正方法に関する検討  
(臨界プラズマ試験装置設計報告・131)

1984年5月

堀江 知義・川崎 幸三・平塚 一・安光 直樹\*

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。  
入手の間合わせは、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 Section, Division  
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,  
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 山田軽印刷所

JT-60 圧電素子弁の流量較正方法に関する検討  
(臨界プラズマ試験装置設計報告・131)

日本原子力研究所東海研究所大型トカマク開発部  
堀江知義・川崎幸三・平塚 一・安光直樹\*

(1984年5月4日受理)

本報告書では、ガス注入予備電離装置用圧電素子弁を、JT-60実機に取付けた状態で実施する弁流量の較正方法について、試験及び解析の両面から検討した結果を述べる。以下の点が明らかになった。

- (1) 圧電素子弁の流量較正方法として、ゲート弁を開けた状態で、ポートマニホールド枝管圧力を測定して求めるダイナミック法を適用できる見通しを得た。
- (2) 小容量圧電素子弁が取付けられる枝管の圧力は、大容量圧電素子弁の動作によりポートマニホールド圧力が上昇して影響を受けるため、そのままでは、ガス注入量が正確に求まらず、圧力上昇に対する補正が必要である。
- (3) 大容量圧電素子弁のガス注入量測定に、MKS バラトロン真空計の1 Torr センサを使用すると、ガス注入時の圧力変化によって、センサのダイヤフラムが振動するため、その手前にオリフィスを設けるなど、改善の必要がある。

---

\* 住友重機械工業(株)

Throughput calibration methods for  
piezoelectric valves of JT-60

Tomoyoshi HORIE, Kouzou KAWASAKI, Hajime HIRATSUKA  
and Naoki YASUMITSU\*

Department of Large Tokamak Development  
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received May 4, 1984)

In this report, we show the results concerning throughput calibration methods for piezoelectric valves (PEV) attached to the JT-60 vacuum vessel. We examine the methods by both experimental and numerical procedure. Main results are as follows.

- (1) We get the prospect for applying dynamic throughput calibration method for piezoelectric valves by measuring the branch pipe pressure while let the gate valves be open to the vacuum vessel.
- (2) Throughputs from the smaller throughput type piezoelectric valves (PEV-H) can not be obtained exactly by the influence of the branch pipe pressure rise caused by the operation of the larger throughput type ones (PEV-L). Compensation for the pressure rise have to be required.
- (3) Improvements are needed for throughput measurement for the larger throughput type piezoelectric valves because 1-torr sensors of MKS-Baratron type vacuum gauge are vibrating with pressure rises.

Keywords: Piezoelectric Valve, Throughput Calibration, JT-60,  
Gas-injection System, Vacuum System Transient Analysis

---

\* Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 圧力応答の解析方法 .....	3
2.1 解析の基礎式 .....	3
2.2 コンダクタンスの計算式 .....	4
2.3 ポンプモデル .....	5
2.4 解析に使用したモデル .....	6
3. 実験装置と実験結果 .....	10
3.1 実験装置の概要 .....	10
3.2 実験項目 .....	10
3.3 実験結果 .....	11
4. 検 討 .....	25
4.1 PEV弁の流量較正 .....	25
4.2 近接枝管の圧力上昇 .....	27
4.3 数値解析と実験との比較 .....	27
5. 結 論 .....	31
参考文献 .....	31

## CONTENTS

1.	Introduction .....	1
2.	Analysis method of pressure response .....	3
2.1	Basic equations .....	3
2.2	Gas flow conductances .....	4
2.3	Pumping speed .....	5
2.4	Nodal idealization of the system .....	6
3.	Tests of throughput calibration .....	10
3.1	Experimental apparatus .....	10
3.2	Items of the test .....	10
3.3	Test results .....	11
4.	Discussions .....	25
4.1	Throughput calibration of piezoelectric valve .....	25
4.2	Pressure rise in the branch pipe .....	27
4.3	Comparison between numerical and experimental results .....	27
5.	Conclusion .....	31
	References .....	31

## 1. はじめに

臨界プラズマ試験装置 (JT-60) のガス注入・予備電離装置に用いる圧電素子弁 (Piezo Electric Valve, 以下PEVと呼ぶ) から注入するガス注入量による系内の圧力応答を, 数値解析と基礎実験で比較し, 実機に取りつけた状態でのPEV流量較正方法について検討を行った。

現在, 原研で建設中のJT-60鳥瞰図を Fig. 1.1 に示す。真空容器内にプラズマ生成の放電ガスを注入するPEVは地上から約10 mの高さに取りつけられるが, 流量が4~40 Torr·ℓ/sの小容量タイプ (PEV-L) と40~400 Torr·ℓ/sの大容量タイプ (PEV-H) の2種類がある。プラズマ電流は, PEVに印加する電圧を変えてガス注入量を制御しながら, 所定の値に立ち上げる。従ってPEVの流量特性を, 実機に取りつけた状態で測定できることは装置の稼働率, PEVの交換保守及び装置へのアクセス, 実験の再現性から極めて重要になる。

PEVの流量較正方法としては, JT-60真空容器とガス注入装置との隔離弁であるゲート弁の開閉状態によって, 「ビルド・アップ法」と「ダイナミック法」を較正方法に考えることができる。ビルドアップ法とは, ゲート弁を「閉」状態にして, ガス注入装置マニホールドの圧力変化からPEV弁の注入量を求める方法である。ダイナミック法とは, ゲート弁を「開」状態にしてJT-60真空排気設備を定常運転に保って真空容量を排気しながらガス注入装置マニホールドに接続する枝管の圧力変化で, PEVの注入量を求める方法である。前者のビルドアップ法ではゲート弁の開閉回数から流量較正の頻度に制限を受ける。後者のダイナミック法では, 枝管に取りつくダイヤフラム真空計 (MKSバラトロン真空計) の圧力値で, 容易にPEVの流量較正が出来るものと, 期待される。

本報告では, 第2章で圧力解析の基礎式及び解析したモデルについて述べる。第3章で実験装置及び実験結果について述べ第4章でPEVの流量較正方法について具体的に提案を行った。

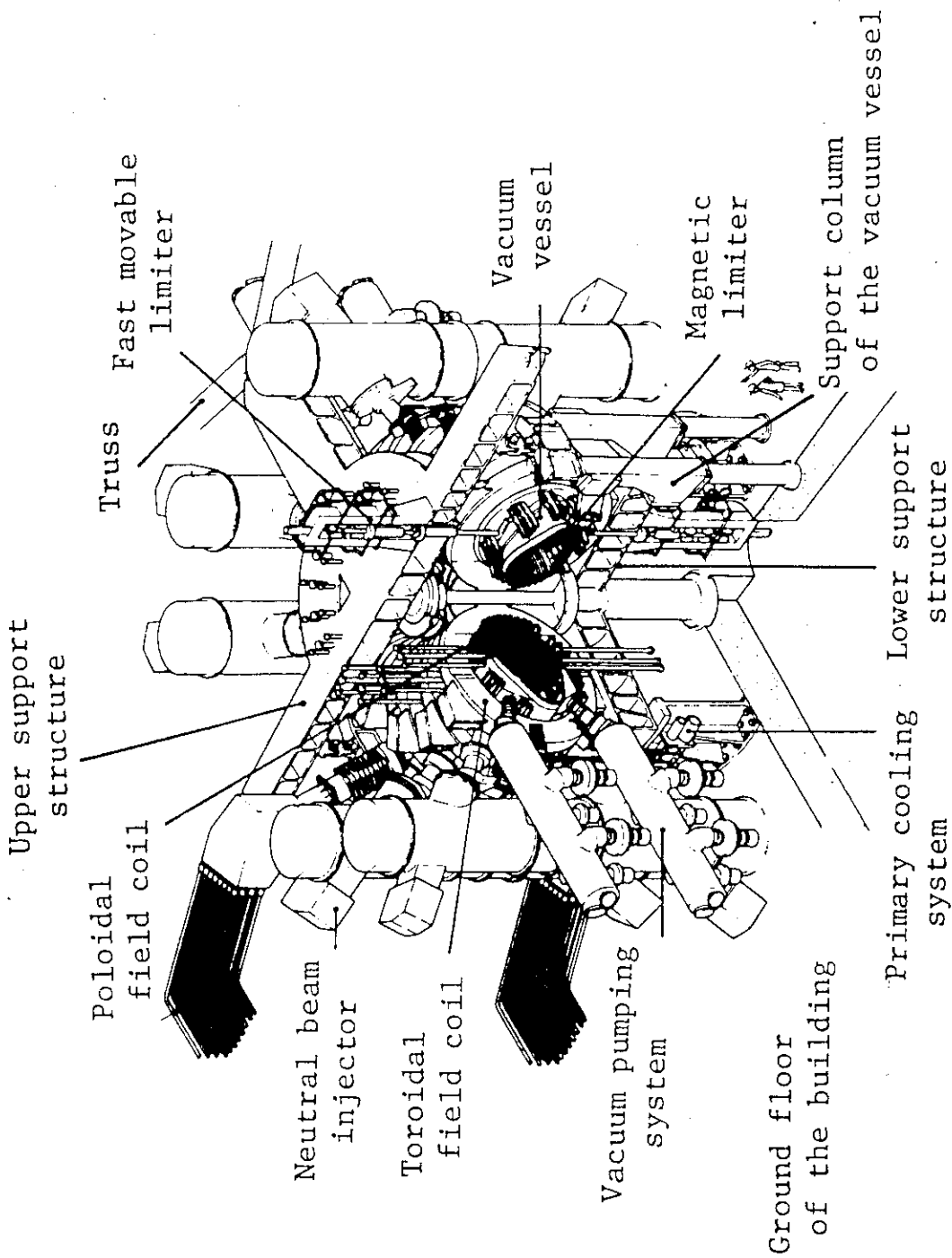


Fig. 1.1 Bird's-eye view of JT-60 tokamak machine.



## 2. 圧力応答の解析方法

### 2.1 解析の基礎式<sup>(1)</sup>

容積 $V$ 、表面積 $A$ の容器内の圧力変化は、流出量 $Q$ と放出ガス量によって決まる。すなわち、

$$V \frac{dp}{dt} = -Q + qA \quad (1)$$

ここに、 $P$ は圧力、 $t$ は時間、 $q$ は容器表面から単位時間、単位面積当りに発生する放出ガス量であり、この(1)式を解くことにより、真空系の動特性が求まる。

一般に、真空系は数多くの構成機器すなわち、ダクト、ポンプ、ゲートバルブ、トラップ、ガスパフなどから成っており、その簡単な例をFig. 2.1に示す。各構成機器の両端に節点を

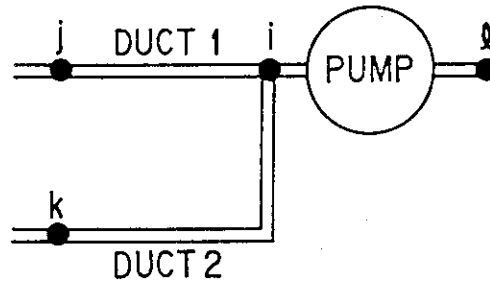


Fig. 2.1 Nodal basic model.

考え、この点上で圧力値を評価することにする。節点 $i$ はDUCT 1、DUCT 2、PUMPの3つの構成機器で共有しているため、節点 $i$ に(1)式を適用すると以下の様になる。

$$V_i \frac{dp_i}{dt} = -Q_i + qA_i \quad (2)$$

ここで、 $V_i$ 、 $A_i$ は、それぞれDUCT 1、DUCT 2、PUMPの体積、および表面積の半分を足し合わせたもので、点 $i$ の体積および、表面積である。一方、 $Q_i$ はDUCT 1の流量 $Q_{ij}$ 、DUCT 2の流量 $Q_{ik}$ 、PUMPの排気量 $Q_{il}$ の和である。すなわち

$$Q_i = \sum_n Q_{in} = Q_{ij} + Q_{ik} + Q_{il} \quad (3)$$

である。

ダクトの流量 $Q_{ij}$ 、 $Q_{ik}$ は、それぞれのコンダクタンスを $C_{ij}$ 、 $C_{ik}$ として

$$Q_{ij} = C_{ij} (p_i - p_j) \quad (4)$$

$$Q_{ik} = C_{ik} (p_i - p_k) \quad (5)$$

ポンプの排気量 $Q_{il}$ は、排気速度を $S_{ij}$ として、

$$Q_{ii} = S_{ij} P_i \quad (6)$$

と書き表わせる。

以上の(2)~(6)式は節点  $i$  における関係式であったが、真空系の全節点に対して同様の式が成り立ち、マトリックス表示すれば、

$$\{\dot{p}\} = [K] \{p\} + \{F\} \quad (7)$$

の形の一階連立常微分方程式系が得られる。ここに  $\dot{\phantom{x}}$  は時間微分を、 $\{ \}$  はベクトルを、 $[ \ ]$  はマトリックスを表わすものとする。マトリックス  $[K]$  は、コンダクタンスを表わすマトリックスであり、圧力  $p$  に依存するため、(7)式は非線形方程式となる。

(7)式は微分方程式の初期値問題であり、Crank - Nicolson の公式によって解ける。すなわち、

$$\{\dot{p}\} \simeq \frac{\{p\}_{n+1} - \{p\}_n}{\Delta t} \quad (8)$$

$$[K] \{p\} \simeq [K] \{ (1-\theta)\{p\}_n + \theta\{p\}_{n+1} \} \quad (9)$$

$$\{F\} \simeq (1-\theta)\{F\}_n + \theta\{F\}_{n+1} \quad (10)$$

とする。ここに、 $\Delta t$  は時間増分幅、 $n$  は時間ステップ、 $\theta$  は0から1までの定数である。(8)~(10)式を(7)式に代入すると、最終的に

$$\left[ \frac{[E]}{\Delta t} - \theta [K]_n \right] \{p\}_{n+1} = \left[ \frac{[E]}{\Delta t} + (1-\theta) [K]_n \right] \{p\}_n + (1-\theta)\{F\}_n + \theta\{F\}_{n+1} \quad (11)$$

が得られ、この式を step by step に繰り返し計算することにより、 $\{p\}_{n+1}$  を求める。なお、 $E$  は単位行列である。

(11)式で  $\theta = 0$  とすると前進差分 (Euler 法) となり、

$$\{p\}_{n+1} = \{p\}_n + \Delta t ([K]_n \{p\}_n + \{F\}_n) \quad (12)$$

の形の explicit な形 (陽公式) となり、容易に解ける。なお、コンダクタンスの非線形性を考慮するための繰り返し計算は、時間増分幅が細かいことを考慮して、特に行なわず、時間増分計算を何回か繰り返す毎に、コンダクタンスの値を計算し直すにとどめる。

## 2.2 コンダクタンスの計算式

### (1) 粘性流のコンダクタンス

円管の直径を  $D$ 、長さ  $L$ 、粘性係数を  $\eta$  とすると、Poiseuille の式より、コンダクタンス  $C_v$  は

$$C_v = \frac{\pi}{128 \eta} \cdot \frac{D^4}{L} \bar{p} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (13)$$

で表わされる。ここに  $\bar{p}$  は管内の平均圧力であり

$$\bar{p} = (p_i + p_j) / 2 \quad (14)$$

である。

## (2) 分子流のコンダクタンス

分子流のコンダクタンス  $C_m$  は、圧力には依存せず、

$$C_m = 36.4 \left( \frac{T}{M} \right)^{1/2} A_0 W \quad (15)$$

によって計算される。ここに、 $T$  は温度、 $M$  は分子量、 $A_0$  は管の入口断面積、 $W$  は管の形状によって決まる粒子の伝達確率であり、この値は文献<sup>(1)</sup>のものを使用する。

## (3) 計算に使用するコンダクタンス

気体分子の平均自由行程  $\lambda$  と管直径  $d$  の比である。Knudsen 数  $K = \lambda / d$  の値が小さい時は粘性流、大きい時は分子流、中間のときは遷移流として表わされるが、ここでは、それらを合成したコンダクタンスとして

$$C = Z C_m + C_v \quad (16)$$

で表わす。ここで、 $Z$  の値は

$$Z = \frac{1 + 2.507 (d/\lambda)}{1 + 3.095 (d/\lambda)} \quad (17)$$

で与えられる。<sup>(2)</sup>

## 2.3 ポンプモデル

### (1) 各ガス種ごとの流量

各ガス種ごとに、ポンプ入口における分圧と排気速度の関係を与え

$$Q_{il}^{(g)} = S_{il}^{(g)} p_i^{(g)} \quad (18)$$

から、各ガス種  $g$  ごとの流量を求める。

### (2) ターボモレキュラーポンプの排気速度

ターボモレキュラーポンプの場合は、ロータリーポンプなどの場合と異なり、排気速度は圧縮比の影響を受ける。従って、入口圧力と最大排気速度  $S_{max}$  の関係以外に、背圧と最大圧縮比  $H_{max}$  の関係を用いて、入口圧力から  $S_{max}$  を、背圧から  $H_{max}$  を求める。ところが、 $S_{max}$  は  $H = 1$  のときのものであり、また、 $H_{max}$  は  $S = 0$  のときのものである。従って、背圧と入口圧力の比から求まる実際の圧縮比  $H$  に対する排気速度  $S$  は線形に補間して

$$S_{il}^{(g)} = S_{max}^{(g)} \times \frac{H_{max}^{(g)} - H^{(g)}}{H_{max}^{(g)} - 1} \quad (19)$$

ただし、

$$H^{(g)} = p_1^{(g)} / p_i^{(g)} \quad (20)$$

である。<sup>(3)</sup>

## 2.4 解析に使用したモデル

第3章で述べる実験装置を、Fig. 2.2に示すような構成機器と節点にモデル化した。構成機器の形状はTable 2.1に示す。PEVは節点20に取りつけられる。ガス注入時の圧力は、ポートマニホールドの節点5とPEVの節点20の間にある、枝管中央部の節点3の値で代表した。排気ポンプとの間に置かれるゲート弁は、構成機器⑦で代表した。また排気ポンプの排気特性をFig. 2.3, Fig. 2.4に示す。<sup>(4)</sup>

初期条件としては、 $1 \times 10^{-3}$  Torr の値を大気以外の全節点に与え、初期値が到達圧力値に十分収束したのち、ガスパフを行う形で解析した。

Table 2.1 Dimensions of the system

Component number	Nodal points		Component	Dimension (cm)	
				Length	Diameter
1	2	20	PEV	2	3.9
2	2	3	Duct	8	2.9
3	3	5	Duct	8	2.9
4	4	5	Duct	66	13.4
5	5	6	Duct	20	13.4
6	7	6	Duct	8	2.9
7	8	7	Duct	8	2.9
8	6	9	Duct	129	13.4
9	10	9	Duct	20	15.0
10	9	11	Duct	80	15.0
11	12	11	Duct	113	9.8
12	11	13	Duct	80	15.0
13	14	13	Duct	215	13.4
14	13	15	Duct	80	15.0
15	16	15	Duct	113	9.8
16	15	17	Duct	151	9.8
17	17	18	Gate valve	5	9.8
18	18	19	PUMP 1	25	9.8
19	19	20	PUMP 2	25	9.8

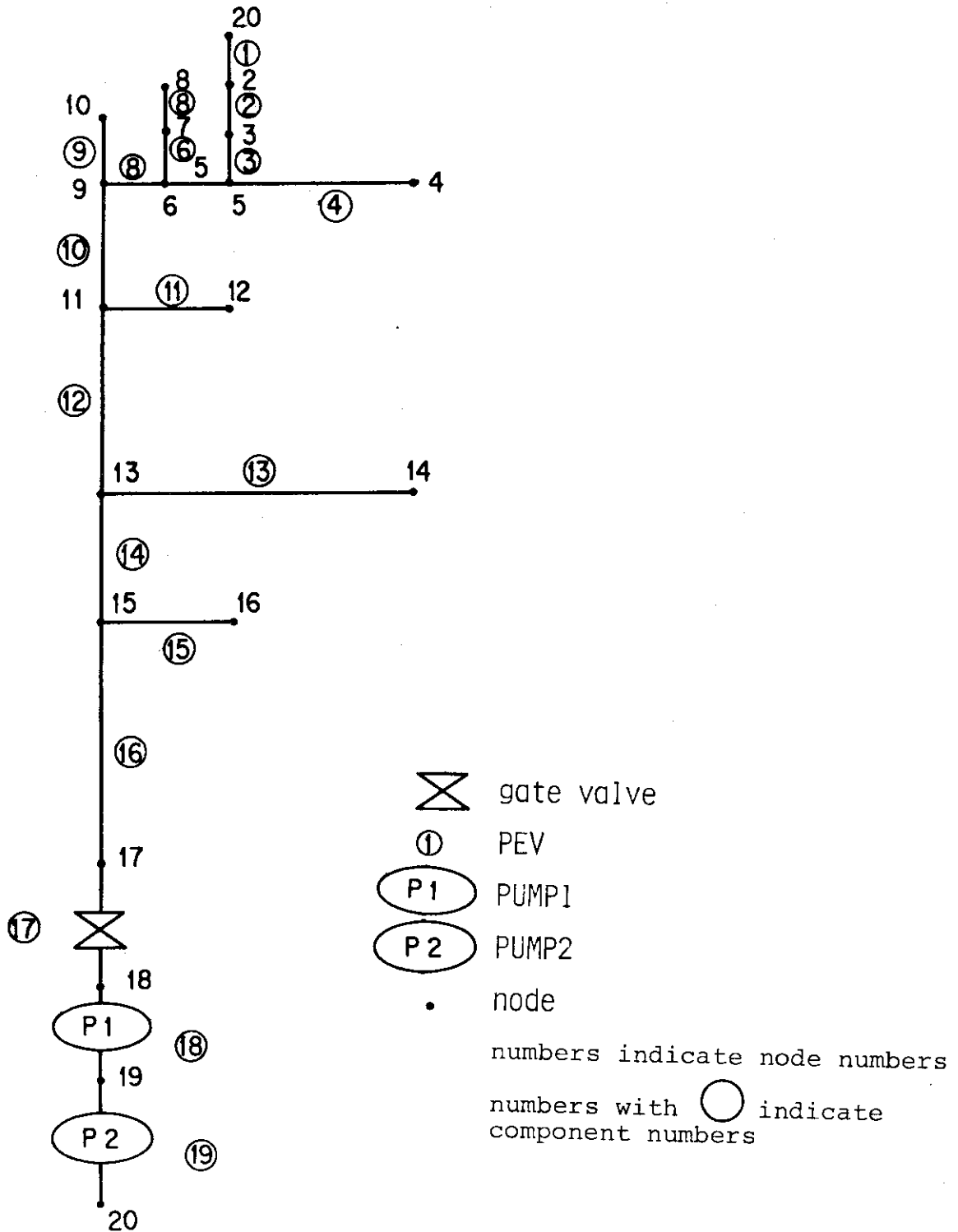


Fig. 2.2 Nodal idealization model of the system.

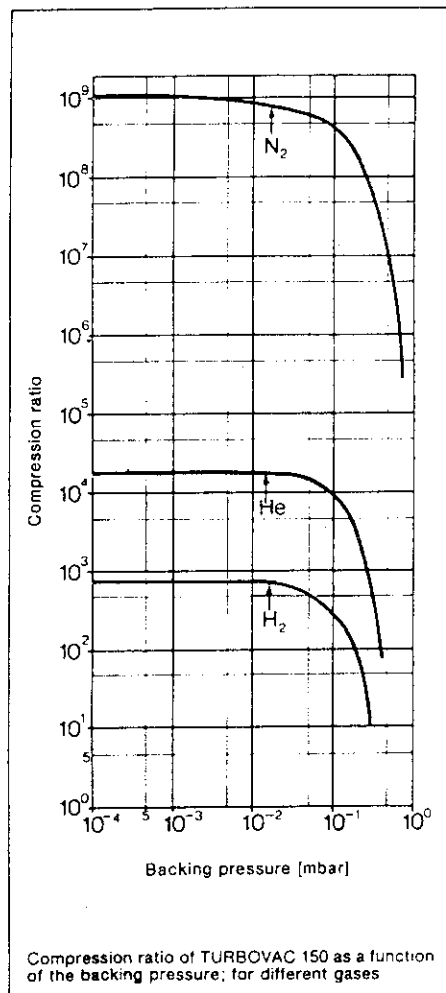
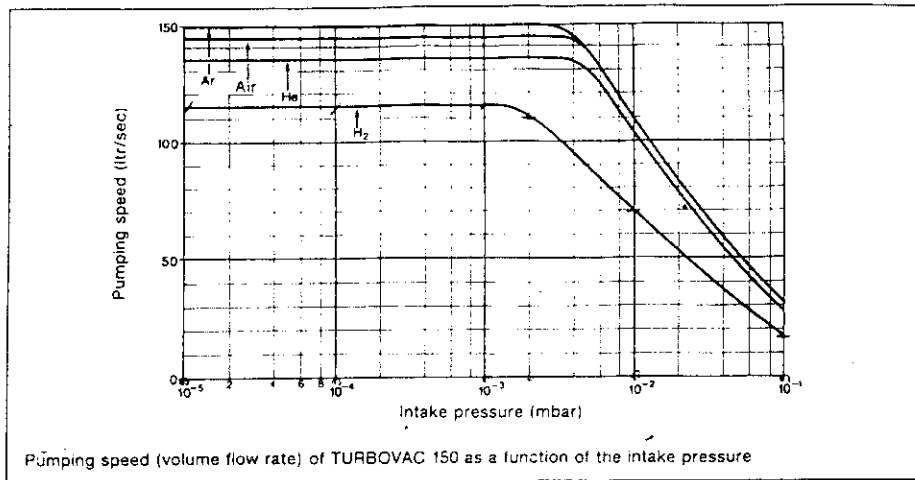


Fig. 2.3 Specification of the PUMPl (cited from reference(4)).

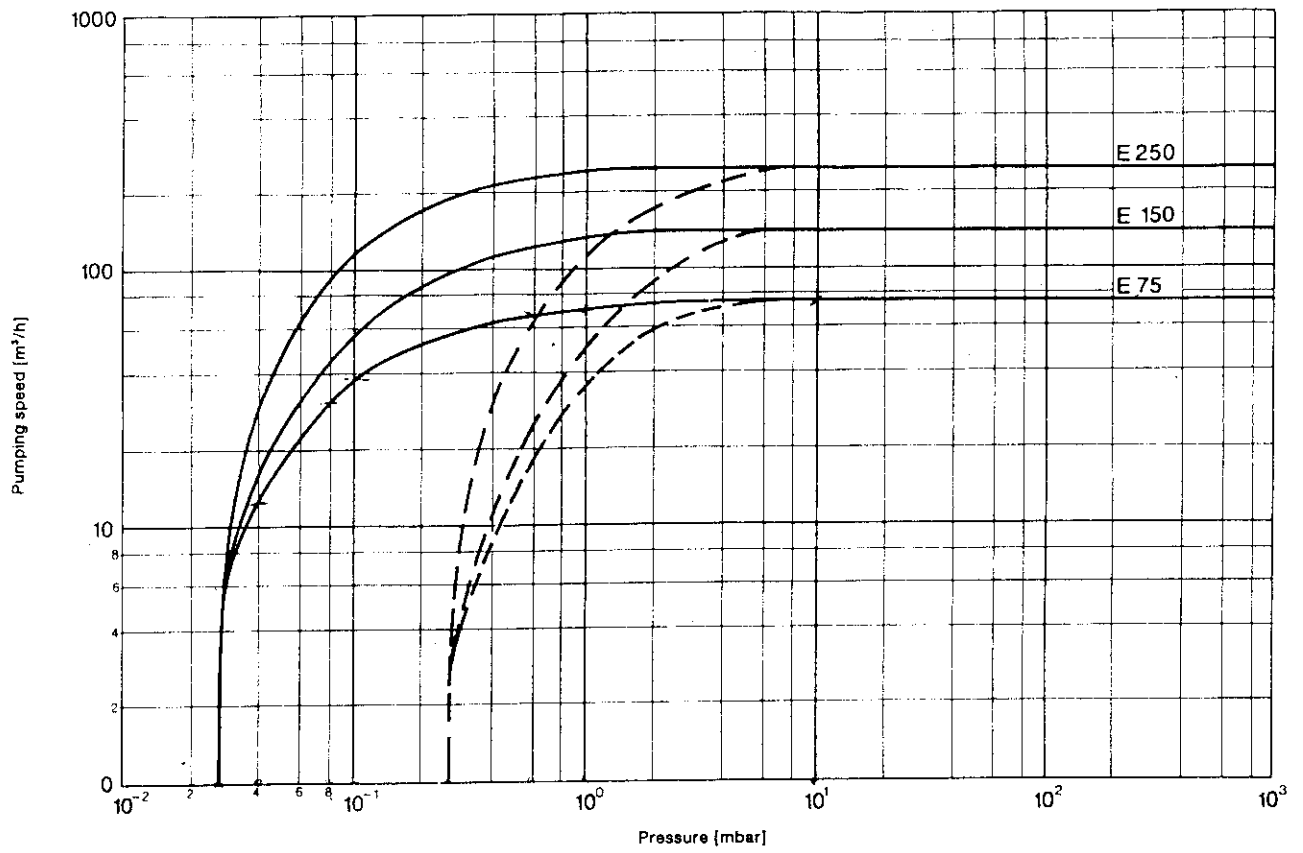


Fig. 2.4 Specification of the PUMP2 (cited from reference (4)).

### 3. 実験装置と実験結果

#### 3.1 実験装置の概要

PEVが取りつくポートと等容積のダミーポート（P 6 セクション上部，P 15 セクション下部），実機のP 11 セクションポート及びP 18 セクションポートを仮設のマニホールドに取りつけ，ゲート弁を介して排気ポンプに接続する。Fig. 3.1 に装置外観を示す。

PEVが取りつくポート枝管と仮設マニホールドにMKS バラトロン真空計を取りつけPEVから水素ガス注入した時の圧力変化を計測した。Fig. 3.2 に計測回路のブロック図を示す。

#### 3.2 実験項目

##### (1) 系内初期圧力の影響確認

仮設マニホールドの圧力を変化させ，PEVから一定量のガスを注入させた場合について，節点3に位置する枝管圧力を測定して，系内初期圧力の影響について調べる。排気ポンプ入口のゲート弁を「閉」状態にして，PEV-Lから流量43 Torr  $\ell/s$  で，100 msec 間ガス注入を行った。

##### (2) 枝管の圧力とガス注入量

排気ポンプ入口のゲート弁を「閉」状態にして，PEVから流量10～40 Torr  $\ell/s$  及び流量100～400 Torr  $\ell/s$  のガスを100 msec 間注入し，節点3に位置する枝管圧力を測定し，ガス注入量と枝管の圧力上昇との関係を調べた。

##### (3) 近接枝管の圧力上昇

ダミーポートには，複数のPEVが取りつく。枝管に取りつけたPEVを動作しガス注入を行った場合，近接の枝管におよぼす圧力上昇について確認を行った。本実験は節点3に位置する枝管からガス注入を行ない，約200 mm離れた節点7の枝管で圧力を測定する。目的は各枝管に取りつくMKS バラトロン真空計で，PEVからのガス注入量を解析する際に，当該PEV以外の圧力を計測し，自身のPEV注入量を評価できるか調べることである。

##### (4) 仮設マニホールドの到達圧力

排気ポンプ入口のゲート弁を「閉」状態にして，PEVから一定量のガスを注入させた場合について，仮設マニホールドの到達圧力と系内容積及びガス注入量とから求められる到達圧力の計算値について比較を行った。本実験は，PEVの流量較正をビルドアップ法で実施できるか否か確認することである。

##### (5) 排気速度の影響

排気ポンプ動作中のゲート弁を「開」状態にして，PEVから一定量のガスを注入させた場合と，ゲート弁を「閉」状態にした場合とについて，節点3に位置する枝管の圧力上昇を比較した。本実験は，PEVの流量較正方法にダイナミック法が適用できるか否か知見を得るこ



とを目的としている。

### 3.3 実験結果

#### (1) 系内初期圧力の影響

系内初期圧力を  $3 \times 10^{-3}$  Torr,  $6 \times 10^{-2}$  Torr にして, PEV から流量 43 Torr  $\ell/s$  で 100 msec 間ガス注入を行った場合の枝管の圧力応答を Fig. 3.3 及び Fig. 3.4 に示す。解析と実験との比較を Fig. 3.5 に示す。系内の初期圧力が高くなるとコンダクタンスが増加し, その結果枝管からマニホールドに流れるガス量が増加するので枝管の圧力上昇は低下する。系内初期圧力が  $3 \times 10^{-3} \sim 6 \times 10^{-2}$  Torr では, 枝管圧力上昇率が実験で約 1.79 倍, 解析では 1.09 倍である。解析的には系内初期圧力が  $10^{-3}$  Torr 以下で, ガス注入をしても枝管の圧力に影響を及ぼさない傾向を示している。

#### (2) 枝管の圧力とガス注入量

排気ポンプ入口のゲート弁を「閉」状態にして, PEV 弁から注入するガス量を変化させて得られる枝管の圧力応答を調べた。PEV-L を用いガス注入速度 10 ~ 40 Torr  $\ell/s$  で注入した場合の圧力応答を Fig. 3.6 に PEV-H を用いガス注入速度 100 ~ 400 Torr  $\ell/s$  で注入した場合の圧力応答を Fig. 3.7 ~ Fig. 3.10 に示す。

PEV-L を, パルス幅 100 msec で動作させた時の枝管圧力と解析との比較を Fig. 3.11 に示す。注入量が増加するに従い, 枝管の圧力指示は注入量に比例した圧力値を示している。解析では, 注入量が増加するに従い枝管の圧力値が平衡する傾向を示す。これは, 圧力値が低いときは, 分子流の状態にあってコンダクタンスが一定であるのに対し, 圧力値が高くなると粘性流領域にはいって, コンダクタンスが圧力とともに上昇していくことに対応している。

PEV-H を, パルス幅 100 msec で動作させた時の枝管圧力と解析との比較を Fig. 3.12 に示す。ガス注入量 100 Torr  $\ell/s$  以下の場合, 枝管圧力は解析値に比べ実験値の方が高く, ガス注入量 100 Torr  $\ell/s$  以上だと, 解析値より低くなった。これは, ガスの流れが粘性領域にはいってコンダクタンスが上昇したことに対応する。

#### (3) 近接枝管の圧力上昇

ここでは, PEV-H を使用し, 流量 374 Torr  $\ell/s$  で 100 msec 間ガスを注入した場合, 200 mm 離れた別な枝管の圧力応答を調べた。Fig. 3.13 にまず PEV-H が取り付けられた枝管の PEV 動作時の圧力応答を示す。MKS バラトロン真空計のセンサヘッドが最高使用圧力 1 Torr 用であるため, ガス注入時, バラトロン真空計のダイヤフラムが振動しながら圧力が立上がり, 最大 0.6 Torr に達している。200 mm 離れた別な枝管の圧力応答を, Fig. 3.14 に示す。MKS バラトロン真空計のセンサヘッドは 1 Torr であり, ガス注入が終了した時間で最大 0.25 Torr に達している。この圧力は, ガス注入した枝管の到達圧力に対し約 40% に相当する。解析と実験との比較を Fig. 3.15 に示す。解析では, 流量 400 Torr  $\ell/s$  で, 100 msec 間のガス注入を考えたが実験では, 流量 374 Torr  $\ell/s$  で 100 msec 間のガス注入なので, ガス注入比率は 0.94 倍となる。このガス注入比率を考慮すると, 解析で得られた注入枝管と近接枝管の到達圧力比は約 32% である。系内の到達圧力に注目すると, 解析と実験では, その到達圧力比が 0.75 倍なので, ガス注入比率で補正をすると, 到達圧力比は約 0.8

倍となる。

PEV-Lが最大流量 40 Torr  $\ell/s$  のガス注入を行った場合、その枝管の到達圧力は、約 0.17 Torr なので、PEV-Hで 80 Torr  $\ell/s$  程度のガス注入を隣の別な枝管から行なうと、同程度の枝管圧力がPEV-L側に生じ、見かけ上PEV-Lから、ガス注入が行なわれたことを意味する。

#### (4) 仮設マニ－ホールド到達圧力

PEV-Lで流量 10 ~ 43 Torr  $\ell/s$  で 100 msec 間のガス量を注入させた場合、仮設マニ－ホールドの到達圧力と解析との比較を Fig. 3.16 に示す。流量 22.5 Torr  $\ell/s$  で 100 msec 間のガス注入を行った場合の実験と解析との比率は約 1.16 倍となる。実験の容積と解析モデルとの容積を補正すると、その比率は約 1.12 倍と、実験と解析からのマニ－ホールド到達圧力は一致する。これは、ビルドアップ法でPEVの流量校正を行なえることを意味する。

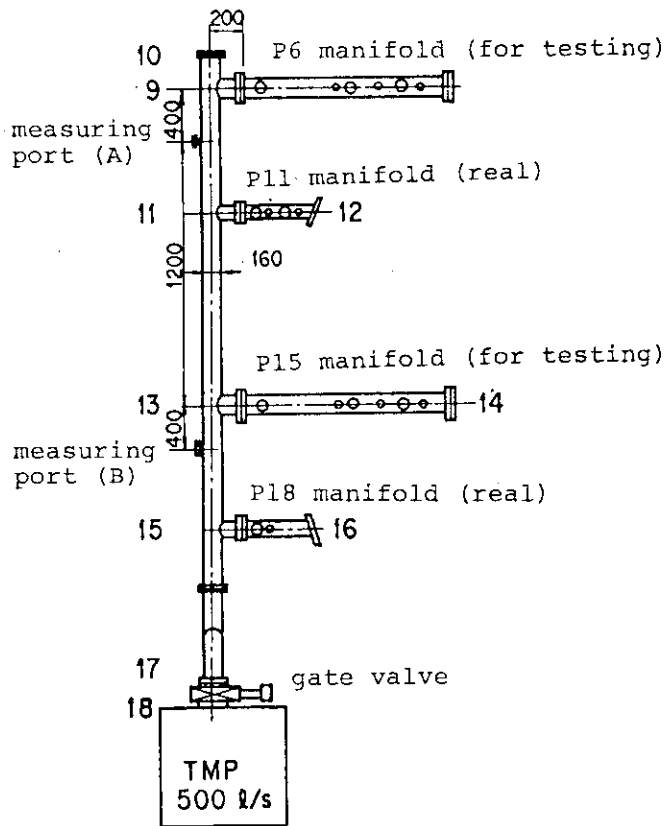
#### (5) 排気速度の影響

排気ポンプ入口ゲート弁を「開」状態にした場合と、「閉」状態にした場合の枝管圧力について排気速度の影響があるか否か確認を行った。PEV-Lで流量 23 Torr  $\ell/s$  で 50 msec 間ガスを注入させた場合の枝管圧力を Fig. 3.17, Fig. 3.18 に示す。ゲート弁を「閉」状態にした場合枝管の圧力は 0.12 Torr に達する。またゲート弁を「開」状態にした場合の枝管圧力は 0.12 Torr とこの実験で使用した排気ポンプの排気速度約 115  $\ell/s$  程度では、何ら枝管の圧力に差異は見受けられない。

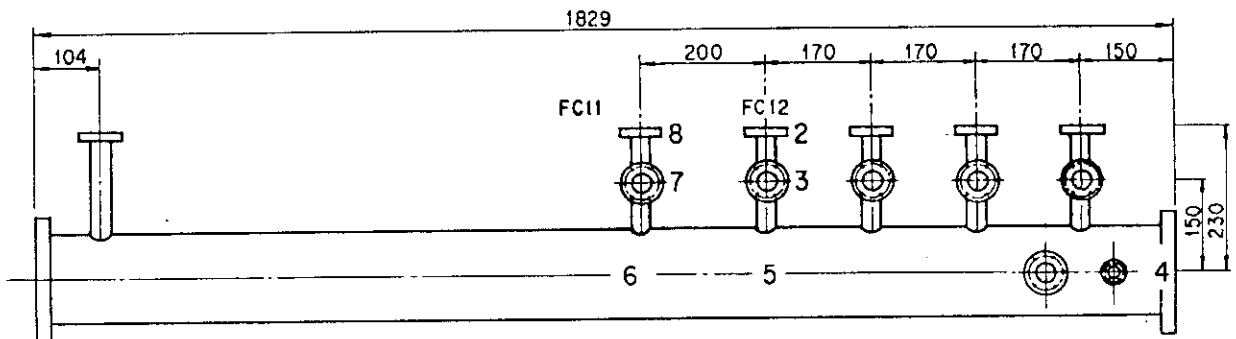
解析では流量 40 Torr  $\ell/s$  で 100 msec 間ガスを注入させた場合について、ゲート弁「開」状態、「閉」状態の枝管圧力を、Fig. 3.19 と Fig. 3.20 に示す。解析結果からも、枝管圧力には、排気速度の影響がないことがわかる。Fig. 3.21 に排気速度を変化させた場合の枝管圧力と、ガス注入終了から約 80 msec 経過時の枝管圧力を示す。排気速度を増加しても、枝管圧力には、その影響をおよぼさないが、マニ－ホールドの到達圧力（この場合は枝管の圧力）は、排気速度を 1150.0  $\ell/s$  によると約 77 %程度に圧力が低下している。PEVの取り付け位置は排気ポンプより遠方のため配管、バルブなど排気系全体のコンダクタンス C と排気ポンプの排気速度を S。とすれば、有効な排気速度 S。は次式から定まる。

$$\frac{1}{S_e} = \frac{1}{S_o} + \frac{1}{C}$$

本解析形状の場合、排気速度を 1150.0  $\ell/s$  以上としても、系内のコンダクタンスで有効排気速度が定まる。このため枝管の圧力及び仮設マニ－ホールドの圧力に影響があらわれないものと考えられる。



(A) Test apparatus



(B) P6 manifold for testing

Fig. 3.1 Test apparatus of the gas feed system.

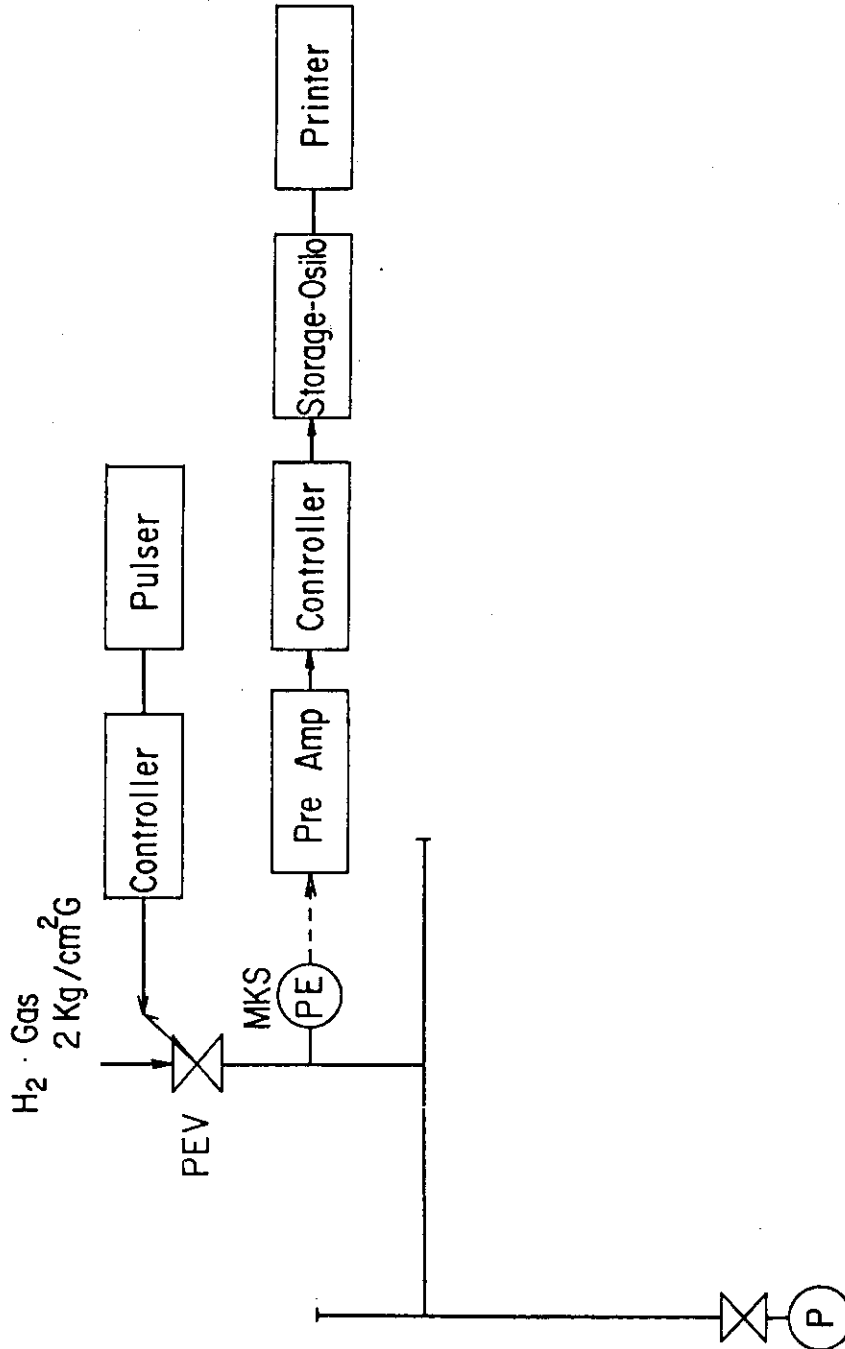


Fig. 3.2 Measurement system.

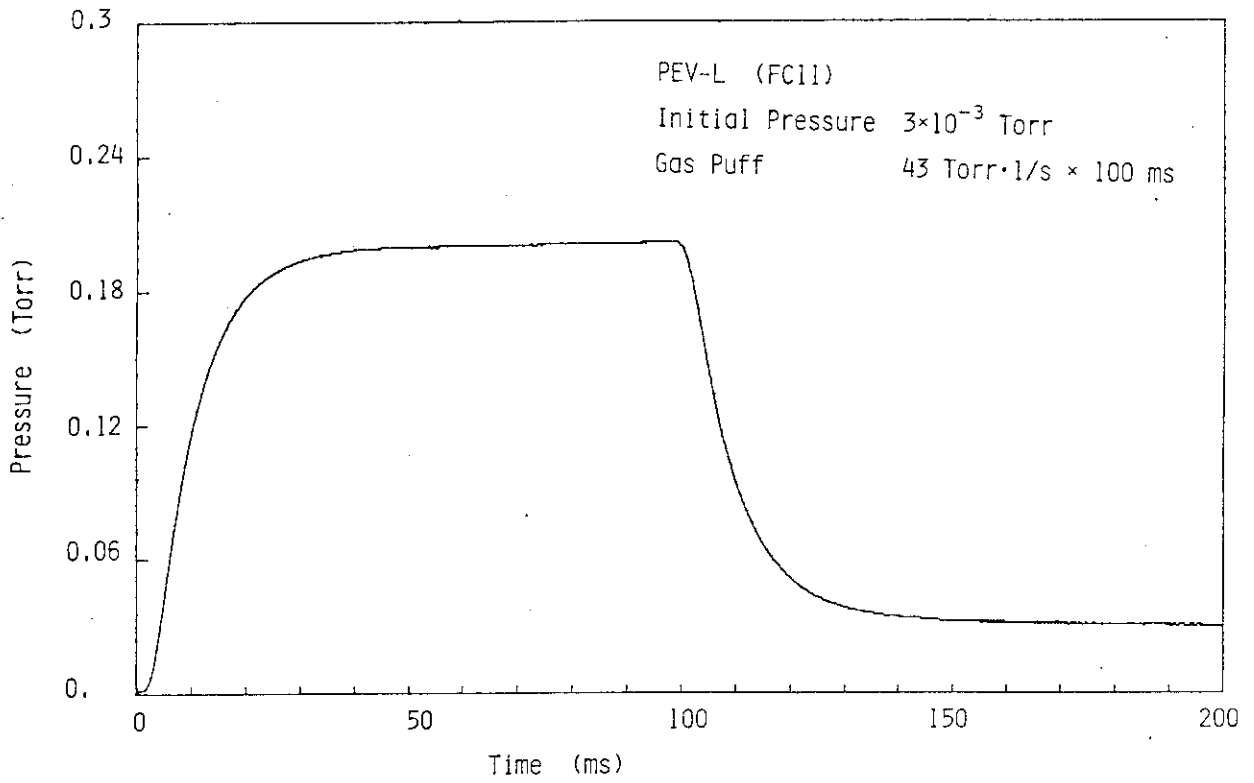


Fig. 3.3 Pressure response with initial manifold pressure of  $3 \times 10^{-3}$  Torr.

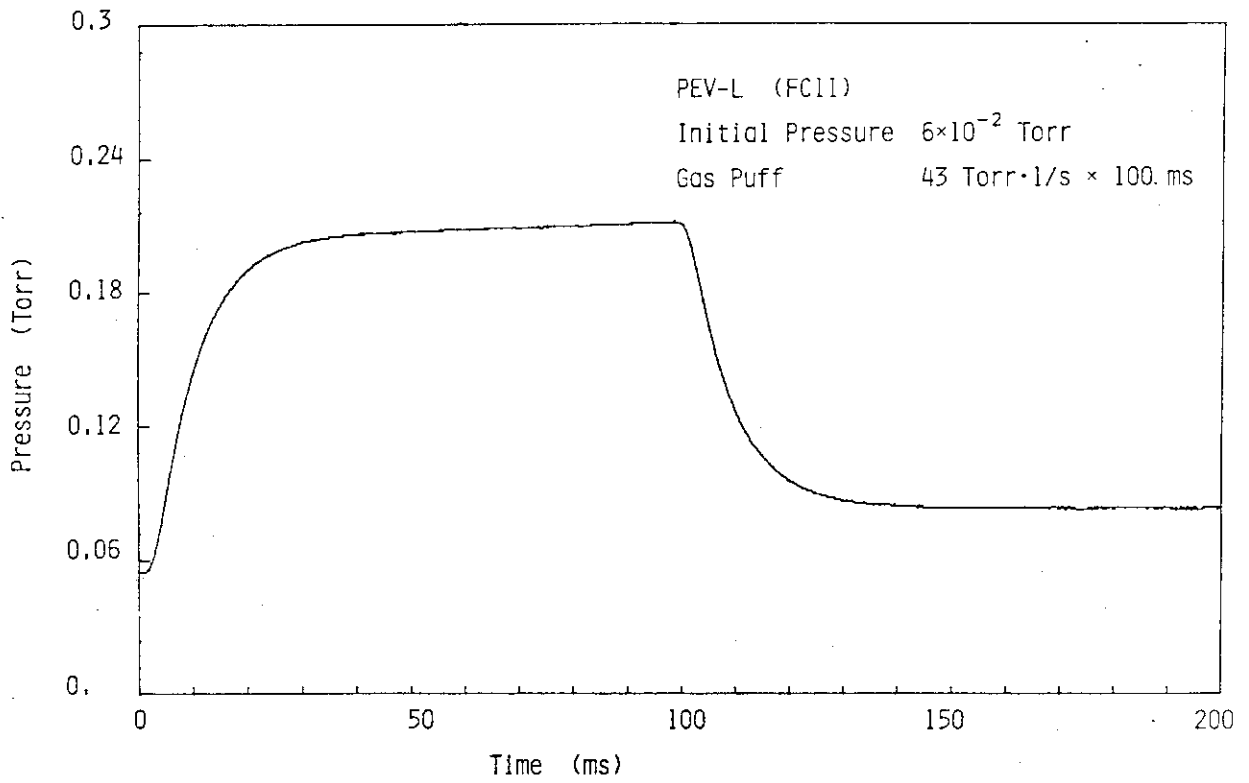


Fig. 3.4 Pressure response with initial manifold pressure of  $6 \times 10^{-2}$  Torr.

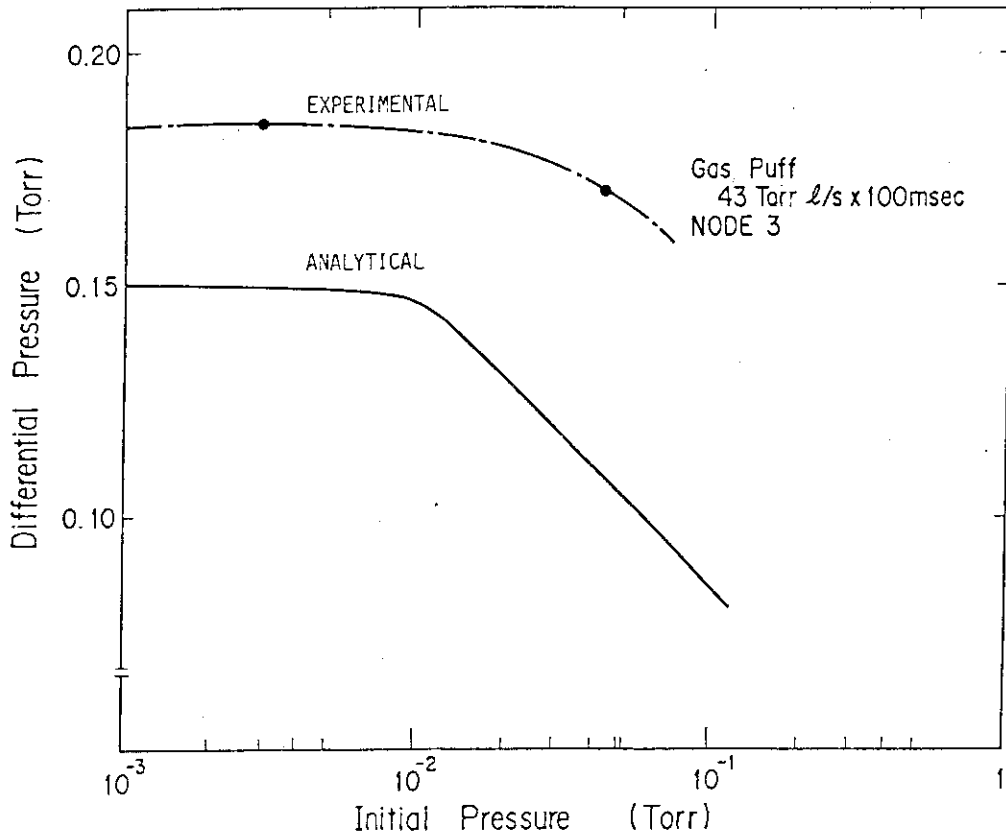


Fig. 3.5 Influence of the initial manifold pressure upon pressure response.

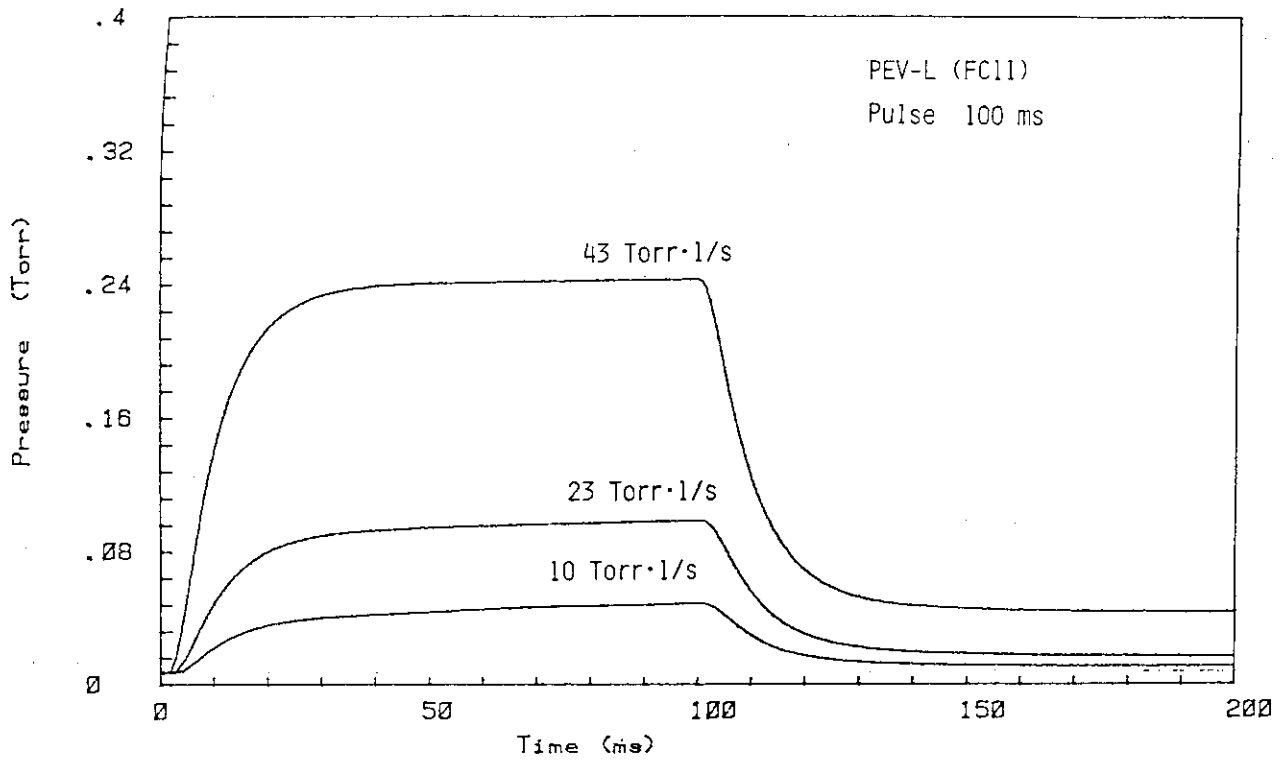


Fig. 3.6 Pressure response in the branch pipe (PEV-L).

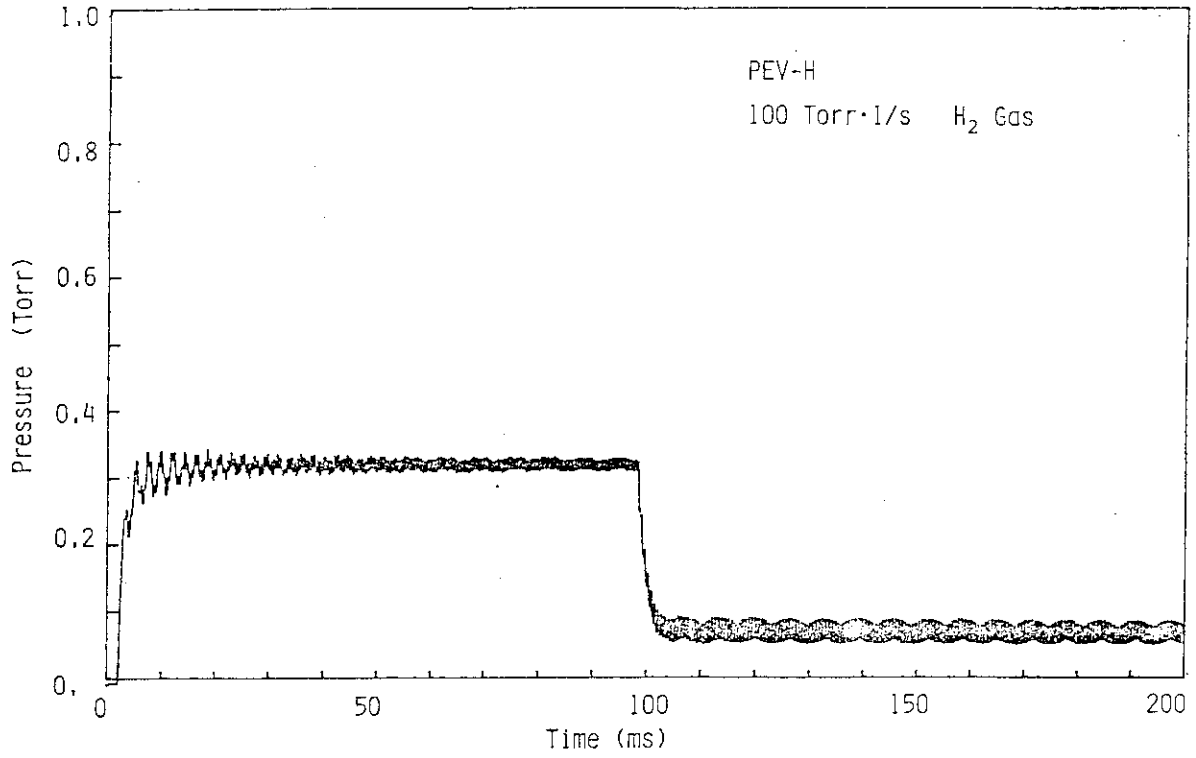


Fig. 3.7 Pressure response in the branch pipe (PEV-H, 100 Torr l/s).

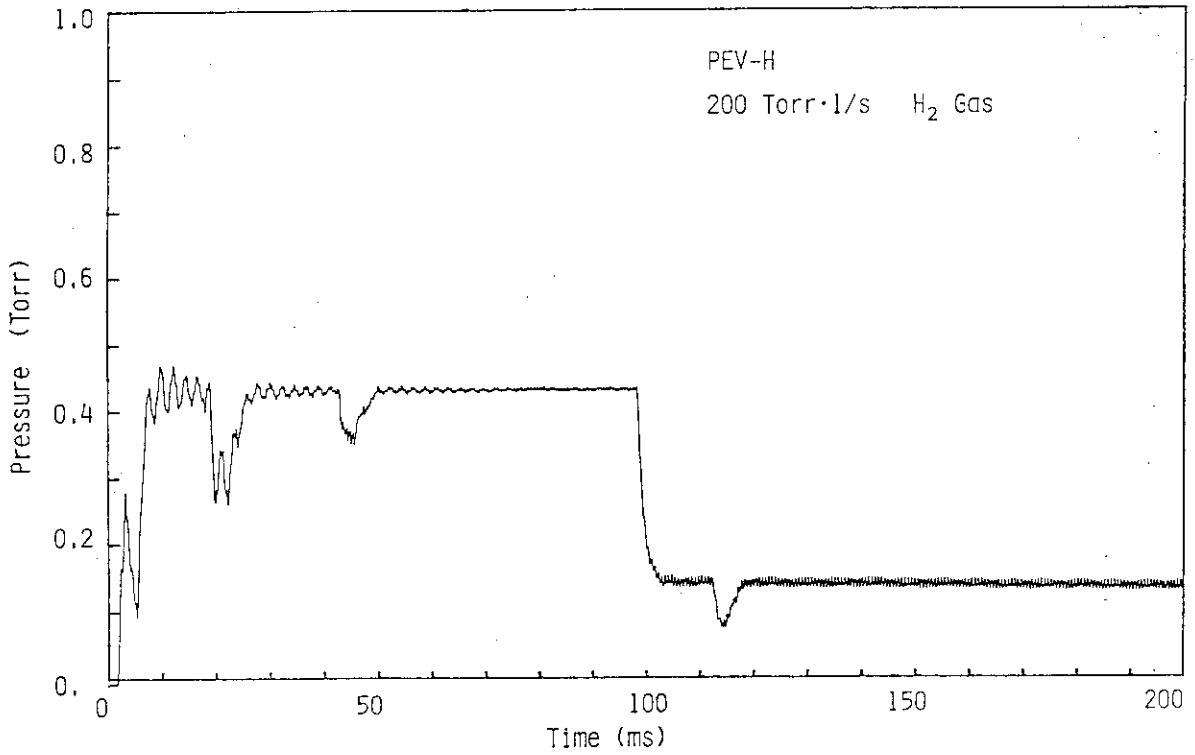


Fig. 3.8 Pressure response in the branch pipe (PEV-H, 200 Torr l/s).

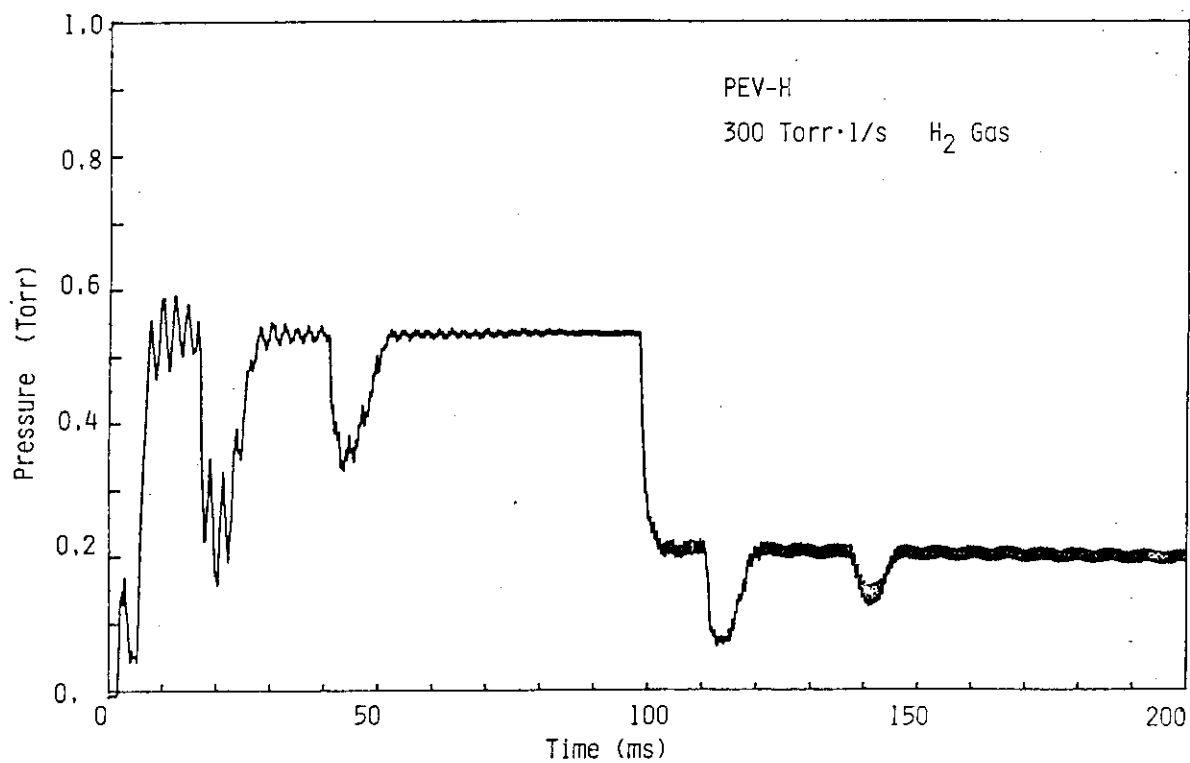


Fig. 3.9 Pressure response in the branch pipe (PEV-H, 300 Torr l/s).

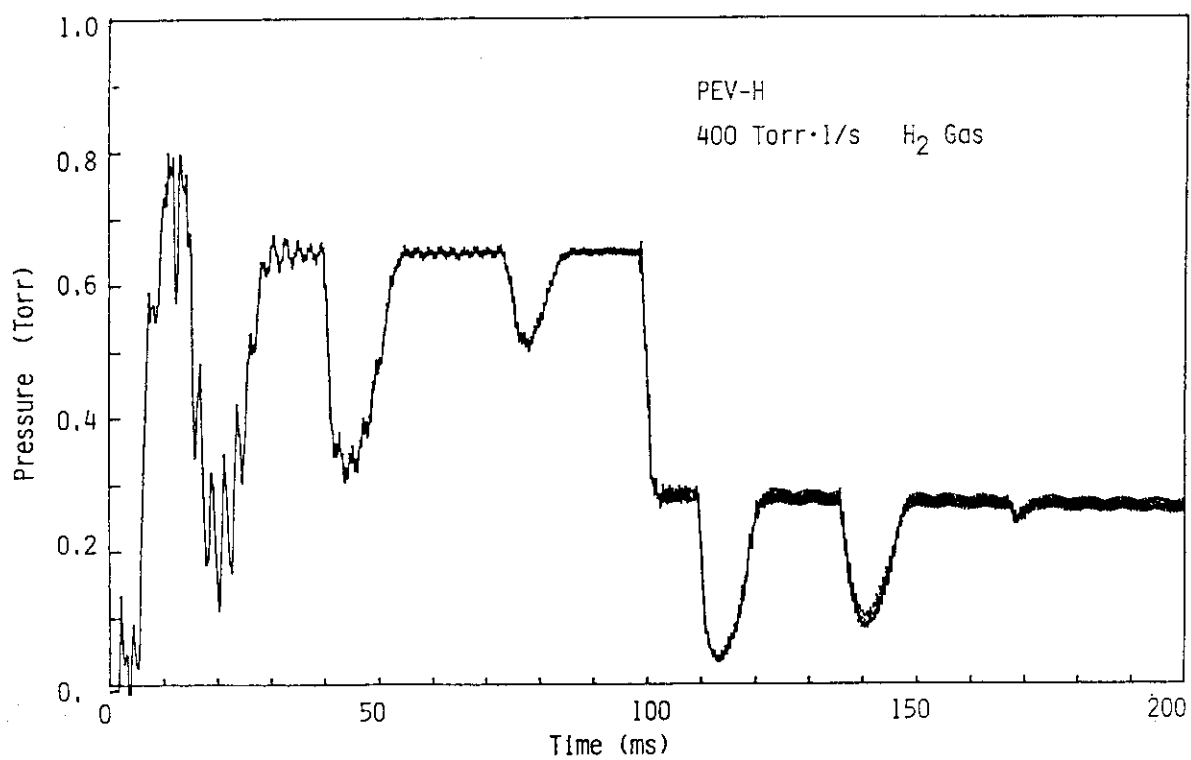


Fig. 3.10 Pressure response in the branch pipe (PEV-H, 400 Torr l/s).



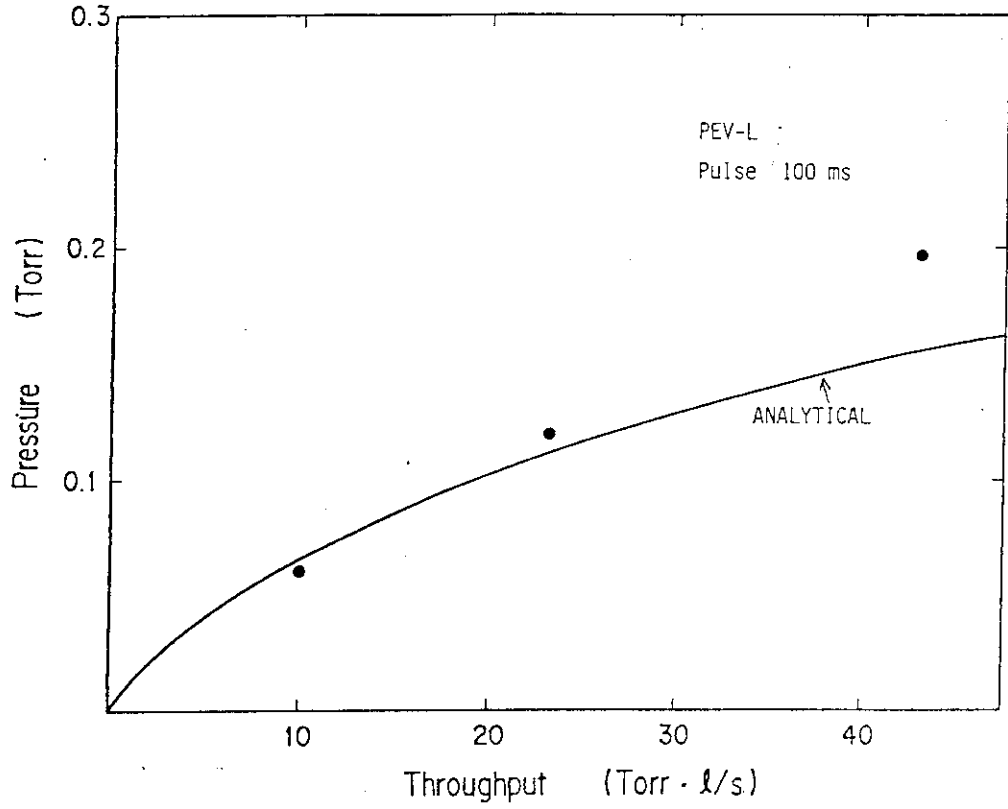


Fig. 3.11 Dependency of pressure rise on the throughput (PEV-L).

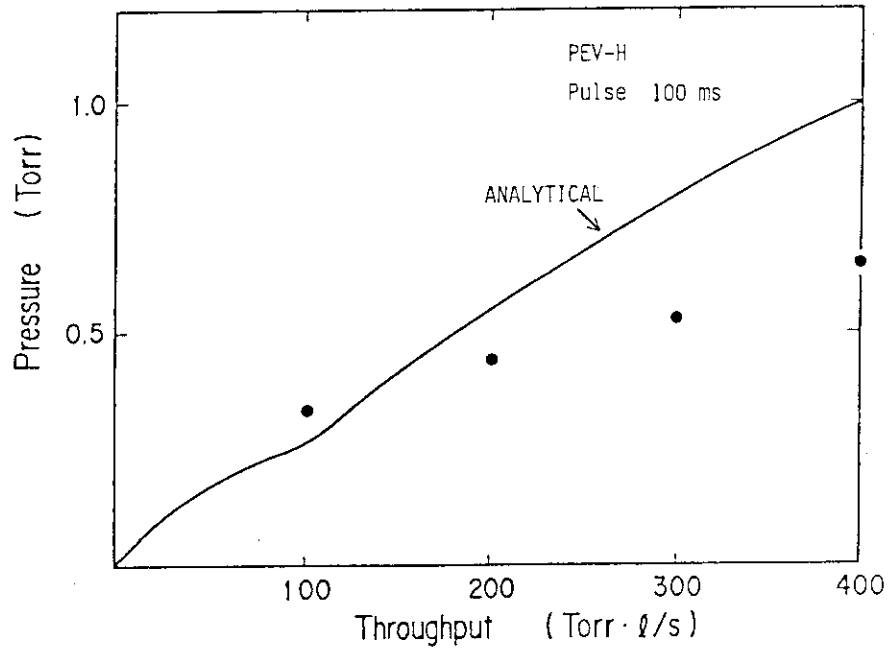


Fig. 3.12 Dependency of pressure rise on the throughput (PEV-H).

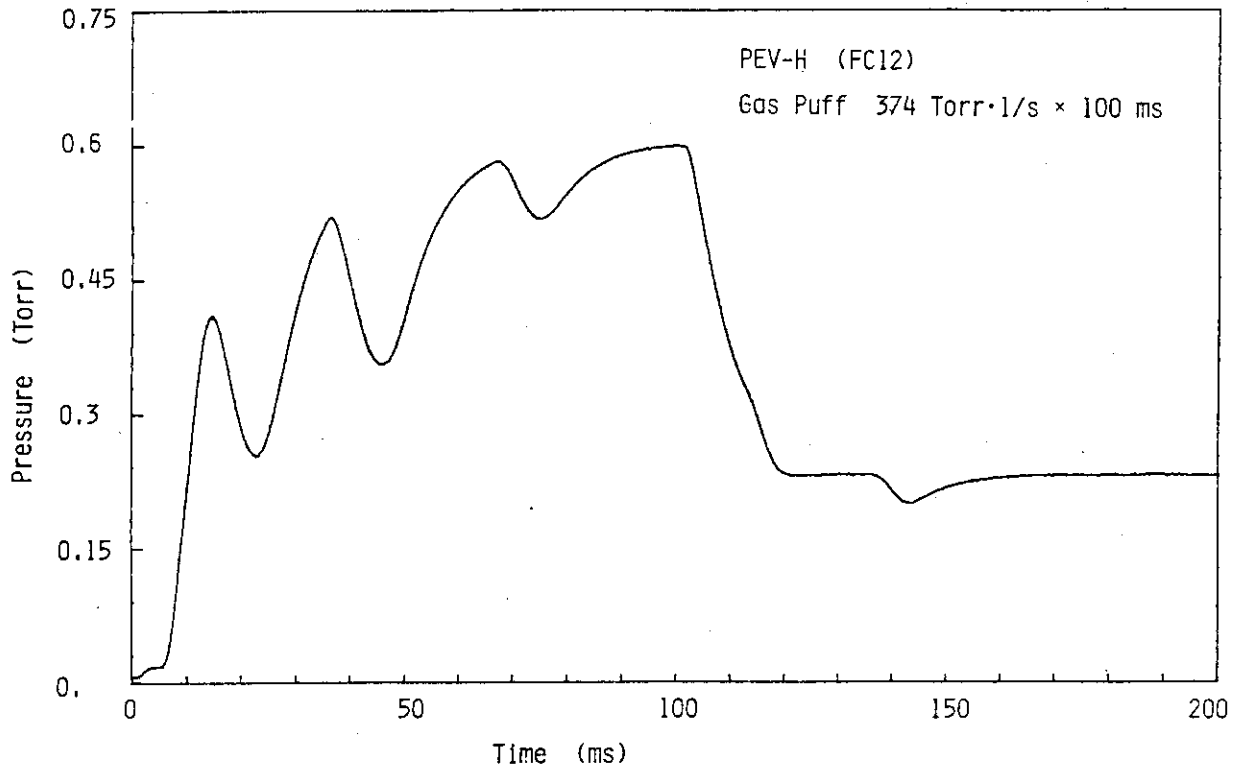


Fig. 3.13 Pressure response in the same branch pipe as PEV-H's.

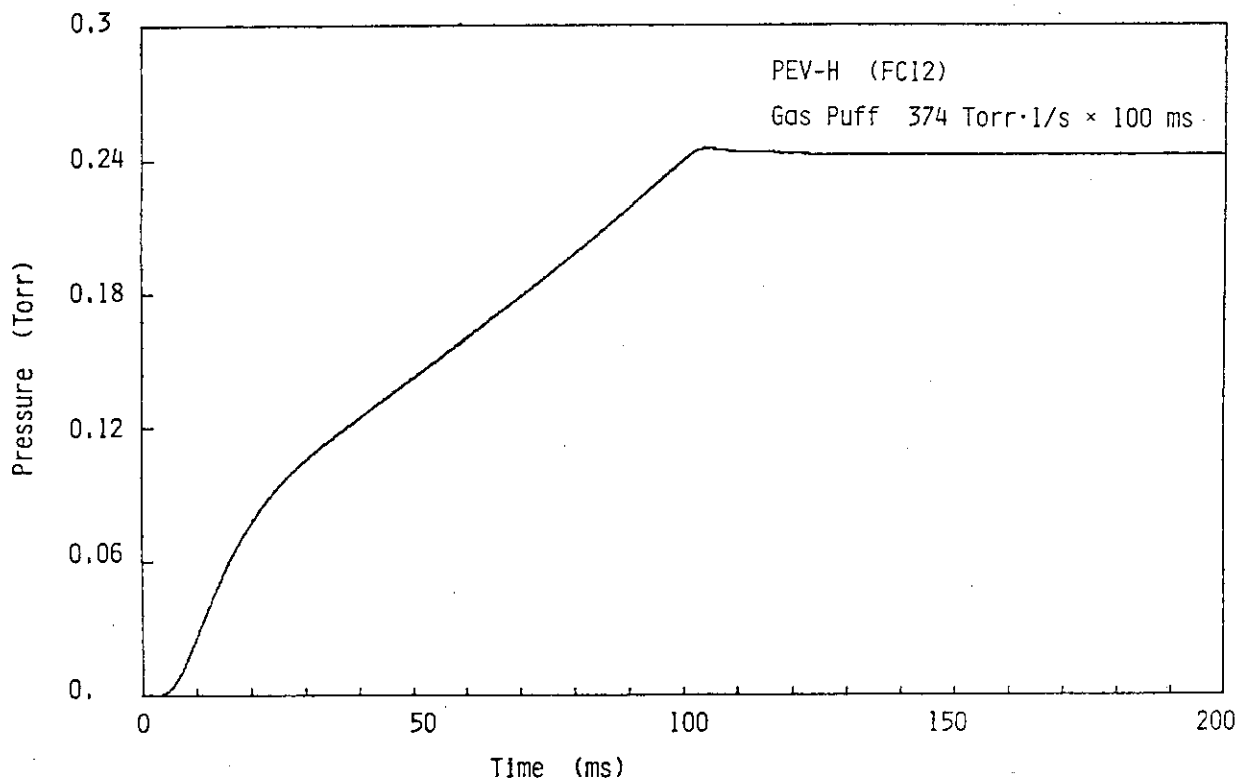


Fig. 3.14 Pressure response in the different branch pipe 200 mm far from PEV-H.

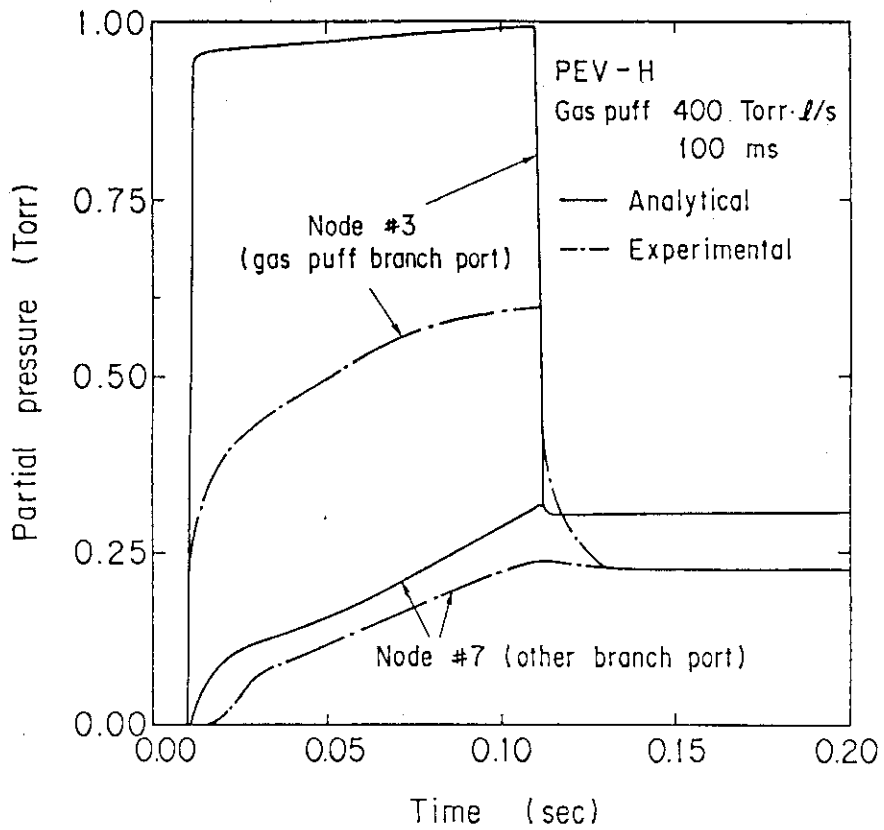


Fig. 3.15 Comparison of pressure responses between analytical and experimental results.

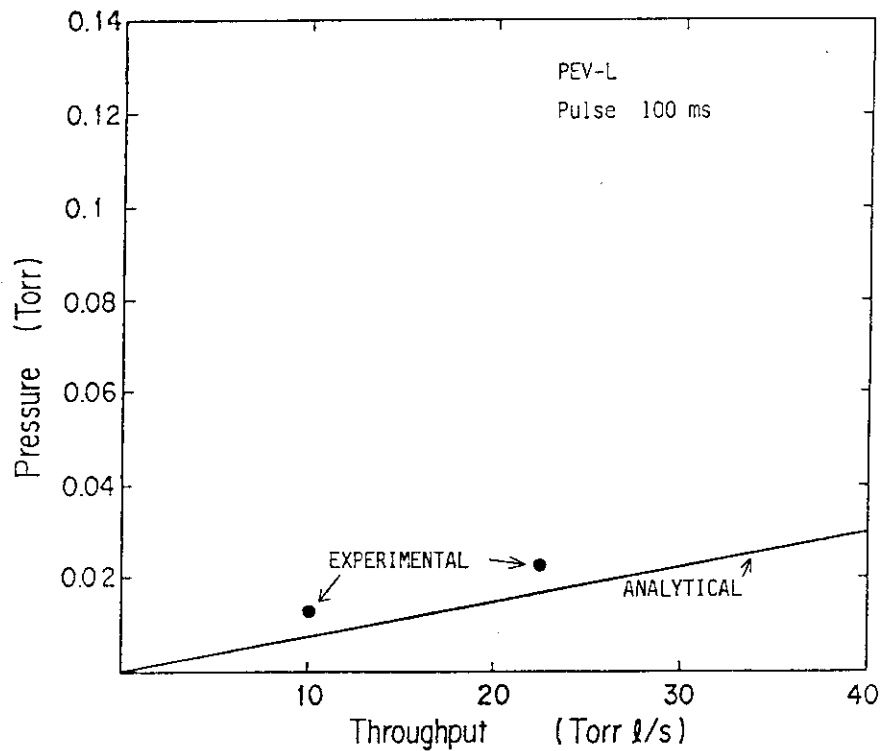


Fig. 3.16 Relation between injected flow and ultimate pressure in the manifold.

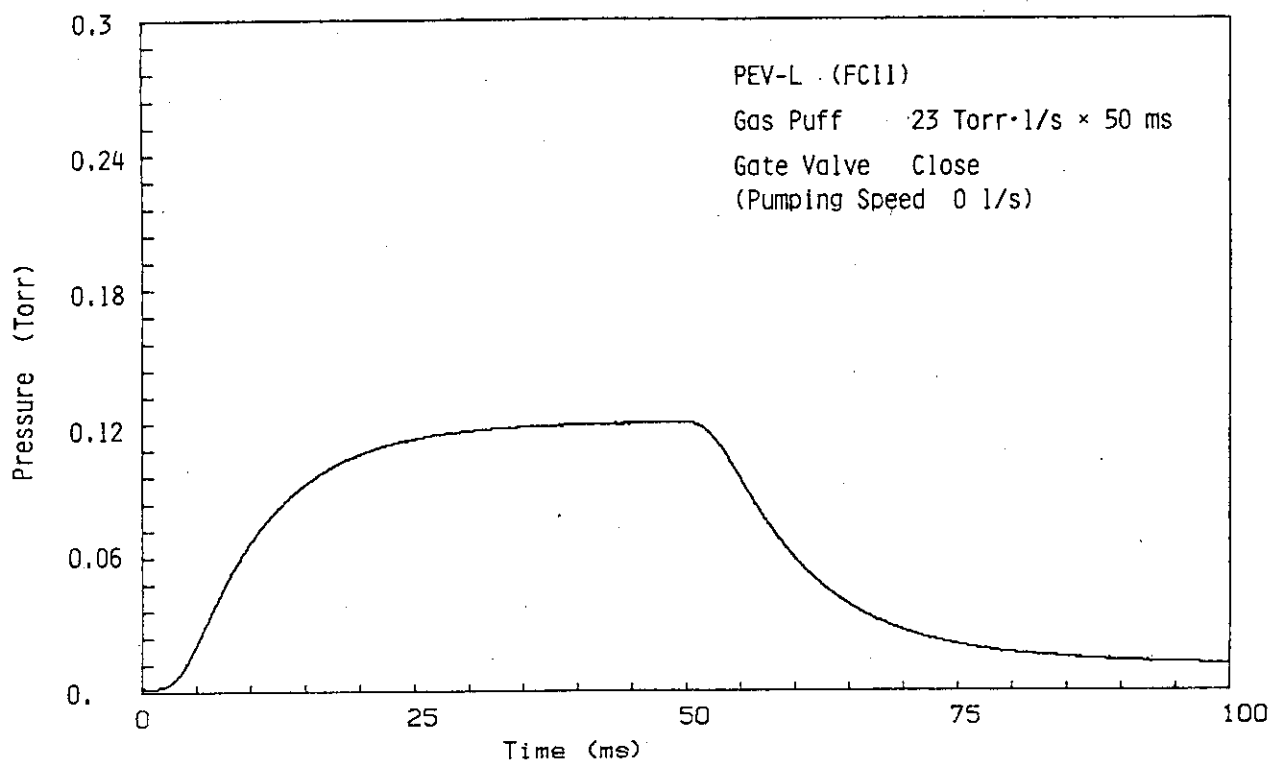


Fig. 3.17 Influence of pumping speed upon pressure response when pumping speed is zero (experimental).

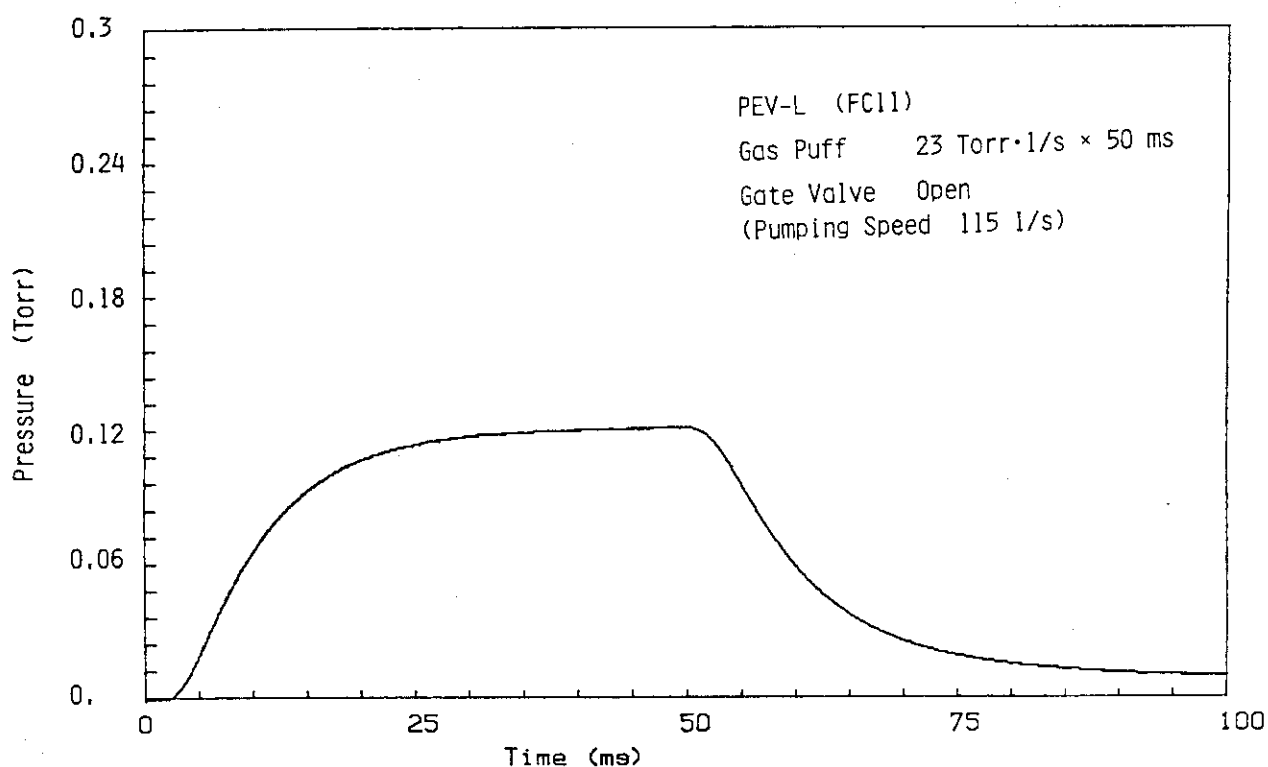


Fig. 3.18 Influence of pumping speed upon pressure response when pumping speed is 115 l/s (experimental).

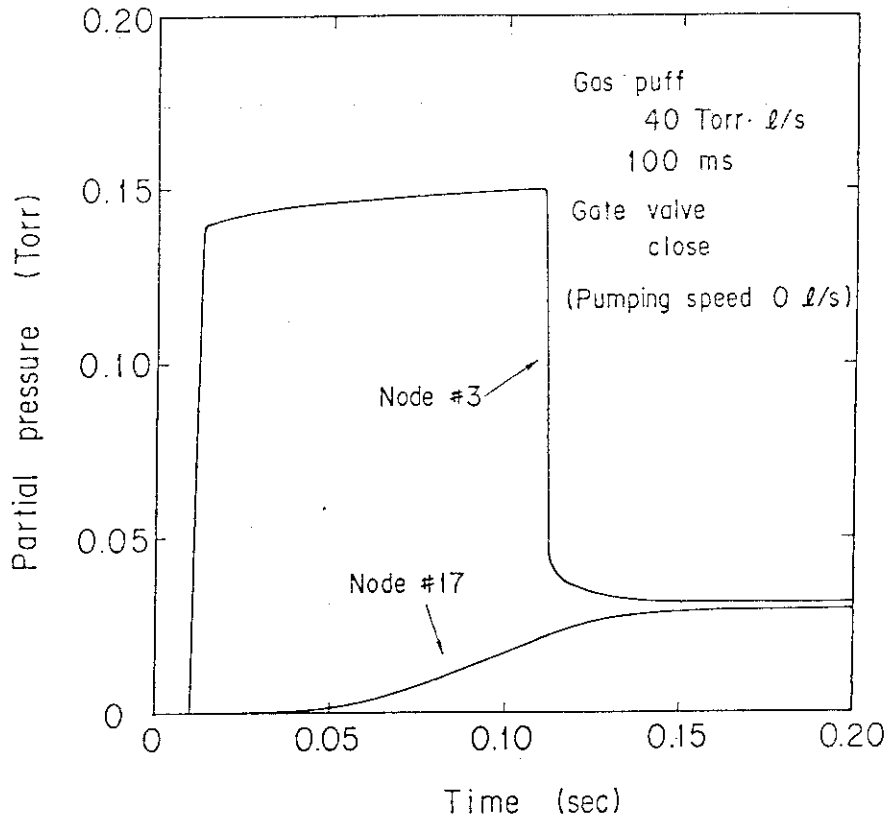


Fig. 3.19 Influence of pumping speed upon pressure response when pumping speed is zero (analytical).

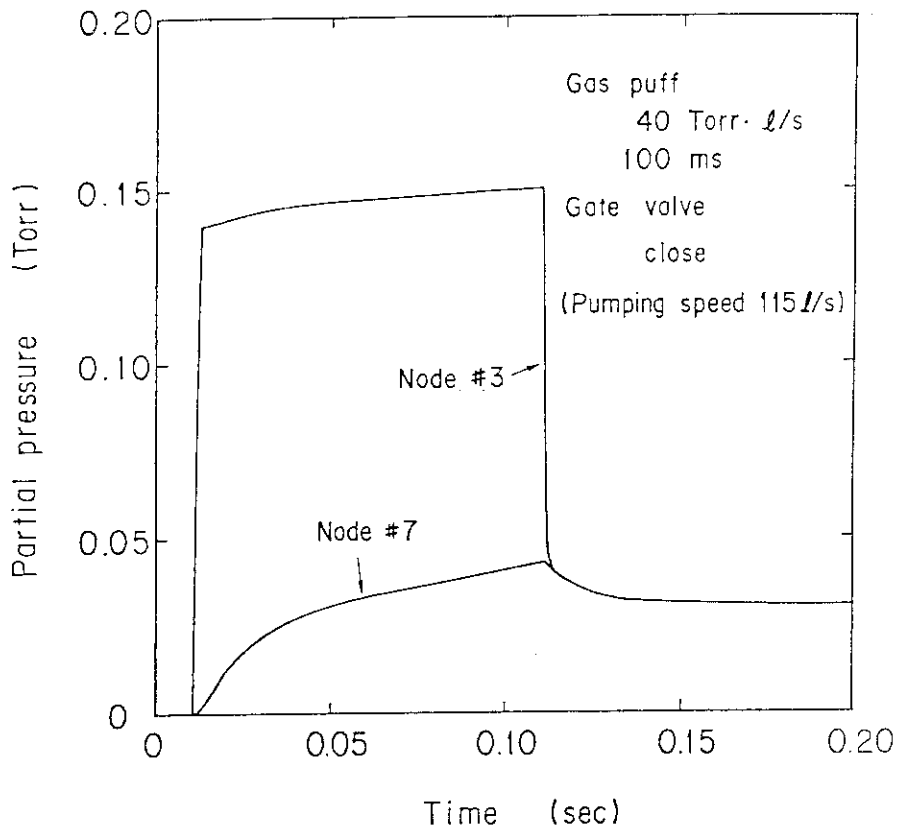


Fig. 3.20 Influence of pumping speed upon pressure response when pumping speed is 115 l/s (analytical).

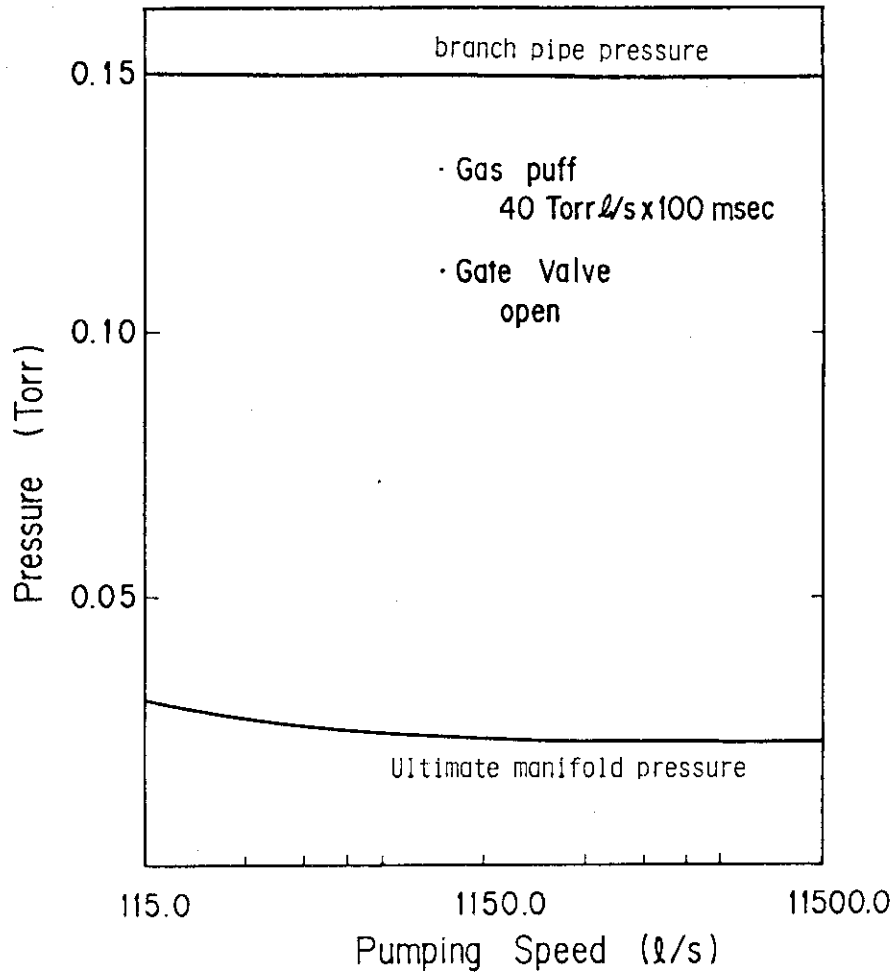


Fig. 3.21 Influence of pumping speed upon branch pipe pressure and ultimate manifold pressure.

## 4. 検 討

### 4.1 PEVの流量較正

PEVの流量較正方法として、「ビルドアップ法」と「ダイナミック法」の適用について検討を行なう。実験に取りつけるPEVとMKSバラトロン真空計の員数を各ポートセクション毎に示す。

ポート名称	ポート容積(ℓ)	PEV弁数	MKSバラトロン真空計台数
P 6 - GM 1	28.0	5	5
P 11 - GD 1	8.0	3	1
P 15 - GM 2	28.0	5	5
P 18 - GD 1	8.0	3	1

#### (1) ビルドアップ法

ゲート弁を「閉」状態にして、枝管に取りつくMKSバラトロン真空計の計測可能圧力(センサヘッドが1 Torr用)1 Torrまでガス注入できるPEVの動作時間は、次の表に示される。

ポート名称	PEV - H		PEV - L	
	注入量 Torr ℓ/s	注入時間 msec	注入量 Torr ℓ/s	注入時間 msec
P 6 - GM 1 P 15 - GM 2	400	70	40	700
P 11 - GD 1 P 18 - GD 1	400	20	40	200

PEVの流量特性と注入時間との関係は、すでに報告<sup>(5)</sup>しているが、要約するとPEVに印加する電圧の印加時間(パルス幅)を、10, 100, 1000 msecに変えた場合の流量特性については、パルス幅、100 msecと、1000 msecの間には流量特性に差は見られない。しかし、パルス幅を10 msecにした場合、ガスの流れ初める注入開始電圧は、幾分増加する。表に示すように、ポートマニホールド容積の小さい、P 11 - GD 1とP 18 - GD 1に取りつくPEVの流量較正の場合には、PEV-Hで約20 msec、PEV-Lで約200 msecがガス注入可能時間であり、しかも、PEVに印加する電圧は175 Vと高いので、注入開始電圧の変化を懸念することなく流量較正を行なえる。自設備の排気装置で得られるポートマニホールドの到達圧力は約 $10^{-3}$  Torrである。この圧力は、流量較正を行なう初期圧力として十分であるが、ガス注

入後初期圧力 ( $10^{-3}$  Torr) まで排気するのに用する時間は約 60 分と長いので、ポートマニ-ホルドに取りつく PEV 5 個を校正するには、約 15 時間程度必要となる。

また、JT-60 真空容器とポートマニ-ホルドに取りつくゲート弁の開閉回数は仕様で 100 回と定められているので、ビルドアップ法による PEV の流量校正は、長期的 (6 カ月あるいは定期保守) な時間スケールで実施した方がよい。

## (2) ダイナミック法

ゲート弁を「開」状態にして、ポートマニ-ホルドの枝管圧力を計測することで、PEV の流量校正を行なえる見通しは、第 3 章の実験結果から得ることができた。

P 6-GM 1, P 15-GM 2 に取りつく PEV は、枝管→ポートマニ-ホルド→真空容器の 3 個の真空槽に連絡したモデルに考えられる。(Fig. 4.1(a) 参照)

枝管 A に、PEV を取りつけ、一定量のガス Q を放出させた場合、各真空槽の定常状態では次の式が成り立つ。

$$Q = C_{AB} (P_A - P_B) = C_{BC} (P_B - P_C) = S p_C \quad (21)$$

但し、 $P_A$ ,  $P_B$ ,  $P_C$  は圧力、 $C_{AB}$ ,  $C_{BC}$  はコンダクタンス、 $S$  は排気速度である。添字 A, B, C は枝管、ポートマニ-ホルド、真空容器をそれぞれ意味する。

(21)式から

$$\frac{P_A}{P_B} = \frac{C_{AB} + C_{BC}}{C_{AB}} - \frac{C_{BC}}{C_{AB}} \frac{P_C}{P_B} \quad (22)$$

ポンプの排気速度  $S$  を、 $C_{BC}$  に比べて十分大きくとると (21)式より

$$\frac{C_{BC}}{S} = \frac{P_C}{P_B - P_C} = \frac{\frac{P_C}{P_B}}{1 - \frac{P_C}{P_B}} \ll 1 \quad (23)$$

が得られる。従って枝管の圧力  $P_A$  とガス注入量  $Q$  との関係は

$$P_A = \frac{C_{AB} + C_{BC}}{C_{AB} \times C_{BC}} Q \quad (24)$$

で求まる。 $C_{AB}$ ,  $C_{BC}$  のコンダクタンスは形状から定まるので、枝管圧力は、ガス注入量に比例した圧力値となる。

P 11-GD 1, P 18-GD 1 に取りつく PEV の校正は MKS バラトロン真空計がマニ-ホルドに 1 台で、しかもマニ-ホルドが約  $700 \text{ mmL} \times 100 \text{ mm}\phi$  の短管なので P 6-GM 1 あるいは P 15-GM 2 と同様に校正できるか実験で確認していない。いま P 11-GD 1 と P 18-GD 1 をポートマニ-ホルドと真空容器を連結した 2 個の真空槽として考えてみる。(Fig. 4.1 (b) 参照)

ポートマニ-ホルド A から、一定量のガス Q を放出させて、排気速度  $S$  で排気している場合各真空槽の定常圧力は、次の関係で表わされる。



$$\frac{P_A}{P_B} = \frac{S + C}{C} \quad (25)$$

$$Q = \sum S P_B \quad (26)$$

但し、 $P_A$ 、 $P_B$  は圧力、 $C$ はコンダクタンス

これより、ポートマニホールドの圧力とガス注入との関係は以下となる。

$$P_A = \frac{Q}{S} \cdot \frac{S + C}{C} \quad (27)$$

(27)式のように、ポンプの排気速度 $S$ によってポートマニホールドの圧力が影響される。

ダイナミック法によるPEVの流量校正については、実験結果からもわかるように、P6-GM1とP15-GM2に取りつくPEVの流量校正は、ダイナミック法で十分校正できると思われるが、P11-GD1とP18-GD1のPEVの流量校正については、排気速度の影響を受けそうである。

ダイナミック法によるPEVの流量校正は、実験開始別に注入ガスを連続注入して得られたMKSバトロロン真空計の圧力結果をCRT画面上に表示できるので、容易に、短時間で校正できる簡便な方法として、実験サイクル毎に活用できると思われる。

#### 4.2 近接枝管の圧力上昇

ポートマニホールドには、最大5個のPEVが取りつく。Fig. 4.2はP6-GM1の取付状態を示している。PEVは、ポートマニホールドに200mm間隔に設けられた枝管に取りつく。PEV-Hが、流量374 Torr  $\ell/s$ で100 msec間動作した場合、200mm離れた枝管の圧力は、PED-Lが最大定格流量の40 Torr  $\ell/s$ で100 msec間ガス注入して得られる枝管圧力よりも大きな圧力上昇になるので、PEV-HとPEV-Lが動作する場合には、PEV-Lからのガス注入量を計測することは不可能と言える。PEV-Lの注入量に関しては、ポートマニホールドの圧力と枝管圧力との差信号を用いてデータ処理を行った方がよいと考えられる。この件は、運転経験をふまえて改良したい項目である。

#### 4.3 数値解析と実験との比較

ゲート弁を「閉」状態にしてガス注入量を種々に変化させたときの節点3枝管圧力の実験値と解析値をFig. 4.3に示す。解析値に比べ実験値の方が、枝管圧力0.3 Torr以下では約1.17倍大きく、枝管圧力0.3 Torr以上だと逆に約0.65倍小さい。

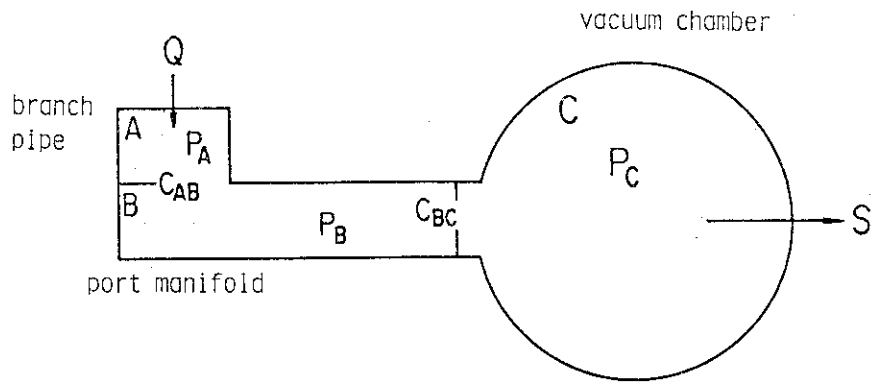
本解析では導管のコンダクタンスを求めるに際し、

- (1) 導管断面積変化時のオリフィス補正を考慮していない。
- (2) 導管と導管の取り付け条件を考慮していない。
- (3) 解析に用いたコンダクタンスの非線形性のモデル化（構成関係式）が、実際の試験時の

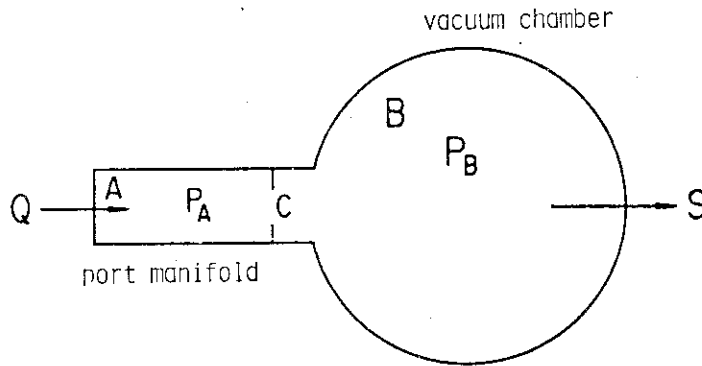
気体の挙動と正確に対応していなかった可能性がある。とくに、試験圧力が約0.1 Torr程度と、分子流領域と粘性流領域の境目に近かったため、わずかな圧力の違いで、実測結果は分子流なのに、解析では粘性流で扱ってしまった可能性がある。このことは第3-8図で、実測結果が圧力に対して線形なのに、解析結果では非線形を示していることから裏付けられる。

- (4) 解析に使用した試験装置のモデル化において、各構成機器の体積が正確なものではなかった可能性がある。

などの点があり、これらを改良すれば、実験と計算のより良い一致が見られるものと思われる。枝管からガス注入を行った際の枝管圧力、ポートマニホールド圧力等の各部の圧力応答、ダイナミック法によるPEVの流量校正の可能性等の検討には、十分役立つ解析データを提供できたと思う。本解析コードについては別途報告したいと考えている。



a. Model of P15-GM2 or P6-GM1



b. Model of P11-GD1 or P18-GD1

Fig. 4.1 Dynamic calibration method applied to vacuum chamber model.

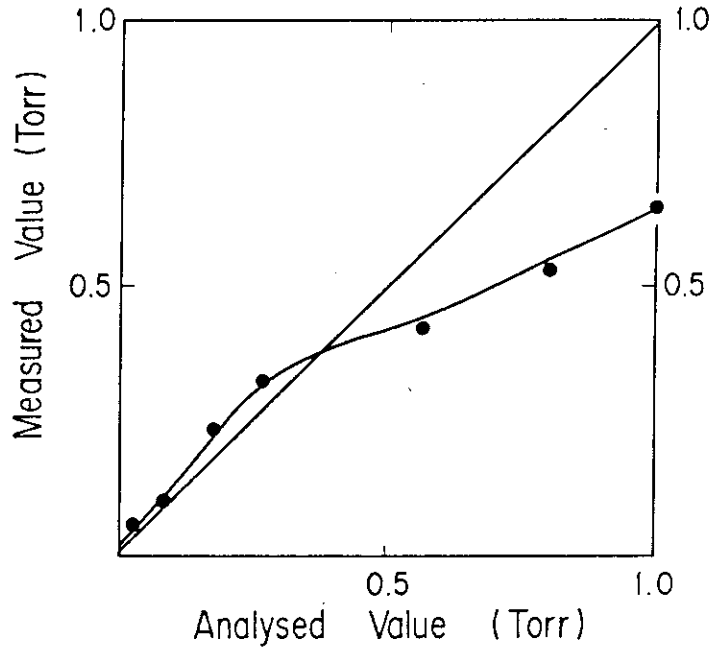


Fig. 4.3 Comparison between analytical and experimental pressure for various gas puffing rates.

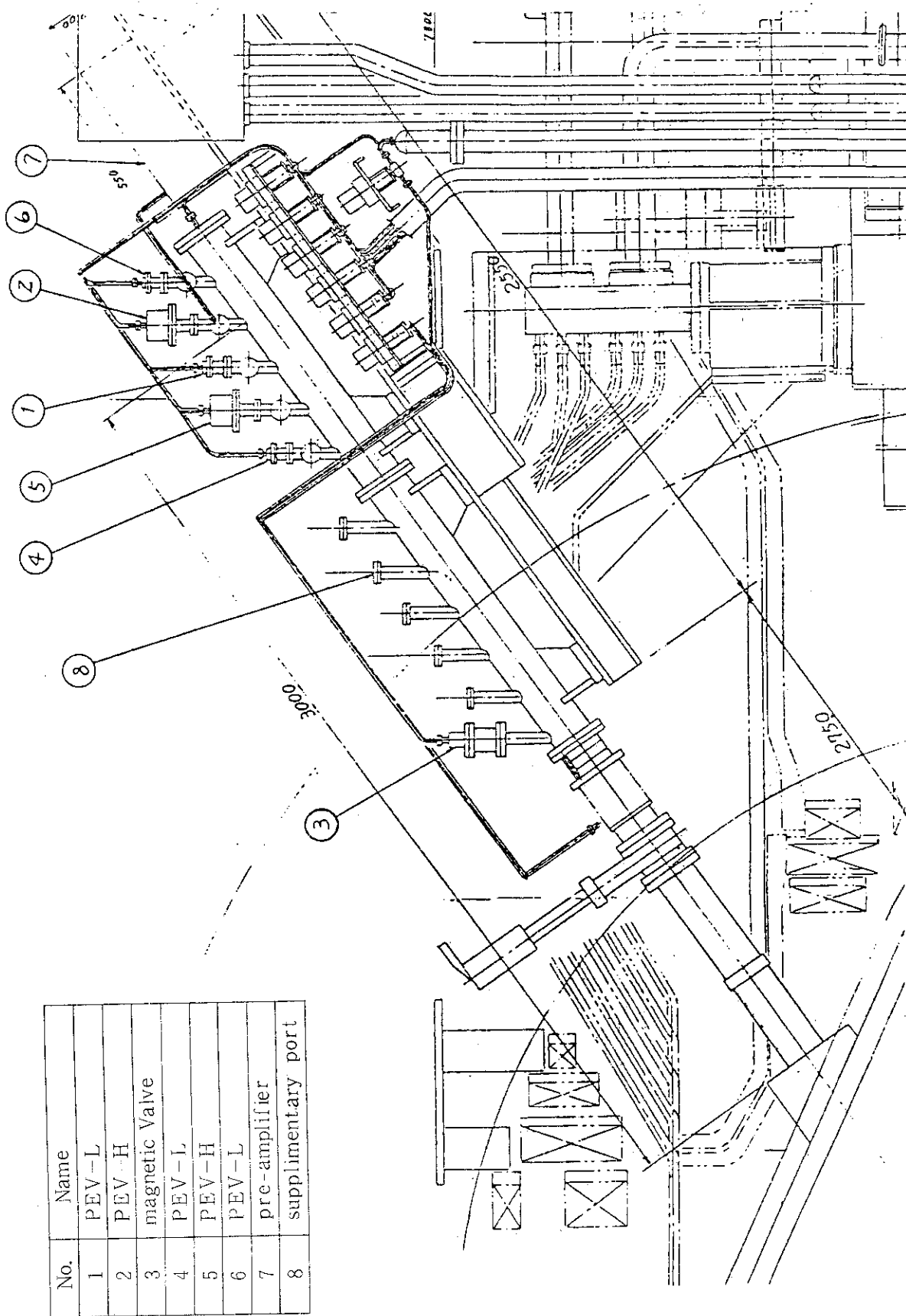


Fig. 4.2 Cross sectional view of the port section #6 showing P6-GM1 port and gas puffing manifold.

## 5. 結 論

本実験結果から下記のことが明らかになった。

- (1) PEVの流量較正方法として、ゲート弁を「開」状態にして枝管の圧力を計測するダイナミック法を適用できる見通しを得た。
- (2) PEV-Lのガス注入量は、PEV-H動作時にポートマニホールドの圧力上昇に伴って、枝管圧力が影響を受け、正確にガス注入量を解析できない。PEV-Lのガス注入量の較正時には、PEV-Hの注入を中止する必要がある。また、実際のガス注入時にはPEV-Hによる圧力上昇分を補正する必要がある。
- (3) PEV-Hのガス注入量は、MKSバラトロン真空計のセンサヘッドに最高使用圧力1 Torr センサを使用すると、ガス注入時、センサのダイヤフラムが圧力の過度変化による振動を受けるので、ダイヤフラムの手前にオリフィスを設けるなどの改善が望まれる。
- (4) PEVの較正に際して初期圧力が約  $10^{-2}$  Torr 以下でないと枝管からポートマニホールドへ流れるガス配管のコンダクタンス評価が異なり、枝管の圧力上昇に差異を生ずる。

PEVからガス注入を行った場合、各部の圧力変化を解析と、実験で比較し、PEVの流量較正方法を明らかにすることができた。また不十分ではあるが、解析に使用した計算モデルもJT-60ガス注入装置と同様な排気システム及びガスシステムを組んだシステムの圧力応答を解析するに有益なデータ及び計算モデルを提供できたものと思われる。

本試験は、住友重機械工業(株)が実験を行ない、原研で解析を行なった。実験検討にあたって、終始有益な御指導を頂いた、田村早苗JT-60計画室長、太田充第1開発室長をはじめJT-60第1開発室の各位に深く感謝致します。

## 参 考 文 献

- (1) L. Holland, et al., "Vacuum Manual", E. & F.N. SPON, London, chap.1 (1974).
- (2) S. Dushman, "Scientific Foundation of Vacuum Technique", Wiley and Sons, New York, chap.2 (1962).
- (3) J. Sredniawski, "The Vacuum System Transient Simulator and Its Application to TFTR", 7th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research, Knoxville, p.1806, (Oct. 25-28, 1977).
- (4) Leybold-Heraeus, "Vacuum Components Standard Systems", Catalogue HV250.
- (5) 川崎, 平塚, 私信

## 5. 結 論

本実験結果から下記のこと明らかになった。

- (1) PEVの流量較正方法として、ゲート弁を「開」状態にして枝管の圧力を計測するダイナミック法を適用できる見通しを得た。
- (2) PEV-Lのガス注入量は、PEV-H動作時にポートマニホールドの圧力上昇に伴って、枝管圧力が影響を受け、正確にガス注入量を解析できない。PEV-Lのガス注入量の較正時には、PEV-Hの注入を中止する必要がある。また、実際のガス注入時にはPEV-Hによる圧力上昇分を補正する必要がある。
- (3) PEV-Hのガス注入量は、MKS バラトロン真空計のセンサヘッドに最高使用圧力1 Torr センサを使用すると、ガス注入時、センサのダイヤフラムが圧力の過度変化による振動を受けるので、ダイヤフラムの手前にオリフィスを設けるなどの改善が望まれる。
- (4) PEVの較正に際して初期圧力が約  $10^{-2}$  Torr 以下でないと枝管からポートマニホールドへ流れるガス配管のコンダクタンス評価が異なり、枝管の圧力上昇に差異を生ずる。

PEVからガス注入を行った場合、各部の圧力変化を解析と、実験と比較し、PEVの流量較正方法を明らかにすることができた。また不十分ではあるが、解析に使用した計算モデルもJT-60ガス注入装置と同様な排気システム及びガスシステムを組んだシステムの圧力応答を解析するに有益なデータ及び計算モデルを提供できたものと思われる。

本試験は、住友重機械工業(株)が実験を行ない、原研で解析を行なった。実験検討にあたって、終始有益な御指導を頂いた、田村早苗JT-60計画室長、太田充第1開発室長をはじめJT-60第1開発室の各位に深く感謝致します。

## 参 考 文 献

- (1) L. Holland, et al., "Vacuum Manual", E. & F.N. SPON, London, chap.1 (1974).
- (2) S. Dushman, "Scientific Foundation of Vacuum Technique", Wiley and Sons, New York, chap.2 (1962).
- (3) J. Sredniawski, "The Vacuum System Transient Simulator and Its Application to TFTR", 7th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research, Knoxville, p.1806, (Oct. 25-28, 1977).
- (4) Leybold-Heraeus, "Vacuum Components Standard Systems", Catalogue HV250.
- (5) 川崎, 平塚, 私信