

JAERI-M

6778

J  
A  
E  
R  
I  
M  
6  
7  
7  
8

イオン源へのパルス状ガス導入

1976年11月

田中 茂・柴田猛順

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

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

イオン源へのパルス状ガス導入

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

田中 茂 ・ 柴田 猛 順

( 1976 年 10 月 14 日 受理 )

JFT-2用中性粒子入射加熱装置イオン源への水素ガス供給を、リザーバー、電磁弁と可変リーク弁を用いてパルス化した。初期のオーバーシュートを除き、流量はほぼ一定である。電磁弁と可変リーク弁の代りに圧電素子弁を用いて同様の事を行ない、流量の立上り及び立下り時間を改良した。

Pulsed Gas Feed to the Ion Source

Shigeru TANAKA and Takemasa SHIBATA

Division of Thermonuclear Fusion Research, Tokai, JAERI

(Received October 14, 1976)

Hydrogen gas feed to the ion source of a neutral beam injector for the JFT-2 tokamak has been pulsed by a set of gas reservoir, solenoid valve and variable leak. During the pulse width the flow rate is constant except for its initial overshoot. After detailed study of the temporal behaviour, the solenoid valve and variable leak were replaced with a piezo-electric valve, resulting in improvement of the rise and decay.

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. 電磁弁使用パルスガス導入系 .....	1
2.1 実験系 .....	1
2.2 実験結果 .....	2
3. 圧電素子弁使用パルスガス導入系 .....	3
4. 実用化に際しての検討 .....	3
謝 辞 .....	5
参考文献 .....	5
付 録 .....	6

## 1. ま え が き

高温プラズマへの中性粒子入射加熱に使用するイオン源へのガス供給をパルス化する事は、定常的に流す場合と比べて、次の二点で有利である。

(1) 中性粒子入射用ビームラインを通してトカマク真空容器内に流入する冷たい中性ガスの量を減少できる。

(2) 必要時だけガスを供給する事により、ビームラインの排気系への流量を軽減できる。

この報告は、JFT-2の中性粒子入射加熱実験に使用するデュオ・ピガトロン型イオン源へのパルス状ガス供給実験の結果をまとめたものである。その場合に要請されているパルスガス供給は、次の通りである。

(1) 100 msecの間、1~3 Torr· $\ell$ /secの水素ガスを流す。

(2) 流量変動は20%以下。

(3) 流量の立上り時間は10 msec以下、立上り時間も同程度。

これらの条件を満たすよう、電磁弁と可変リーク、或いは圧電素子弁を使用して、パルスガス導入系を試作し実験した。

## 2. 電磁弁使用パルスガス導入系

### 2.1 実験系

Fig.1の実験系に示すように、水素ガスは高圧ボンベより、減圧弁、第一可変リークバルブ、リザーバー、電磁弁、第二可変リークバルブを通してイオン源に入る。イオン源及び真空容器は、ITS-1<sup>1)</sup>のものを用いている。

第二可変リークバルブ (Edwards High Vacuum, D123-09-000, コンダクタンス = 50 cc/sec以下) は、電磁弁が開いている時に、リザーバーよりイオン源に流れ込む流量を調整する為のものである。電磁弁 (Skinner, V52DB2022) は、AC100Vで使用し、全開全閉に各々4~8 msecを要す。そのパルス駆動は、1~10秒の周期で、100 msecの間だけ交流を流す事により行なう。リザーバーは、供給すべきガス量が不足しないよう常にガスをイオン源近くでプールしておく為のもので、シリンダー構造により内部容積を130 ccから770 ccまで変えられる。リザーバー内のガス圧力は、水銀マンオメーターで測定する。第一可変リークバルブは、リザーバーに流れ込むガス流量を調整する為のもので、電磁弁が開いている時リザーバーより流出したガス量を残りの時間で補充するように絞りを選ぶ。真空容器 (容積 = 870  $\ell$ ) に取付けられたヌード・ゲージは、応答時間を短くする為に、市販の電離真空計のガラス管球部を取り除いただけのもので、真空容器内の圧力時間変化を測定する。電子電流制御は行なわず、電子電流はイオン電流と共に、オシロスコープで観測する。

次に、イオン源部を流れるガス流量の測定方法を説明する。イオン源のガス流入口よりガスがアーク室 (容積  $V_1 = 0.16 \ell$ , PIG室へのコンダクタンス  $C_1 = 60 \ell/\text{sec}$ ) に流入すると、アーク室内の圧力は、

$$\tau_1 = V_1 / C_1 = 27 \text{ msec}$$

の時定数で平衡値に達すると考えられる。それに引続いて、PIG室（容積  $V_2 = 1 \text{ l}$ ，真空容器へのコンダクタンス  $C_2 \approx 800 \text{ l/sec}$ ）の圧力も、

$$\tau_2 = V_2 / C_2 = 1.3 \text{ msec}$$

の時定数で平衡となる。このため、イオン源部を流れる流量は、数 msec で平衡に達する。それに対し、真空容器（容積  $V_3 = 870 \text{ l}$ ，ポンプ排気速度  $S \approx 2000 \text{ l/sec}$ ）の圧力は

$$\tau_3 = V_3 / S = 0.44 \text{ sec}$$

という長い時間でしか平衡に達しないので、平衡に達するまでの真空容器内の圧力の増加は、そのままイオン源部からの流量の積分値となっている。従って、真空容器内の圧力の時間変化を測定しこれを微分すれば、イオン源部内を流れる流量の時間変化が求まるわけである。ただし、真空容器内の圧力が増加している時も、その圧力に比例した流量がポンプにより排気されているので、実際の流量はこのポンプによる排気流量を補正した値に求まる。

## 2.2 実験結果

前節で説明したように、真空容器内の圧力の時間変化をヌード・ゲージで測定し、それから流量の時間変化を求めた。

Fig. 2 に、オシロスコープで観測したヌード・ゲージのイオン電流、電子電流の時間変化の一例を示す。電磁弁が開いている 100 msec の間、圧力は上昇を続け、電磁弁が閉じると圧力が降下する。その圧力の減衰の時定数から、真空容器を排気しているポンプの排気速度を実測する事も出来る。Fig. 3 に流量の時間変化の一例を示す。これはリザーバー容積  $V_{r..} = 700 \text{ cc}$  リザーバー内圧力（電磁弁が開く直前の値） $P_{r..} = 40 \text{ Torr}$ ，第二可変リーク全開の時のものである。流量の立上り時間（ピーク値の 90% に達する時間）は 15 msec，立下り時間（ピーク値の 10% に減ずる時間）は 40 msec 程度となっており、ガスが出始めてから 100 msec 後の流量値を基準とした流量変動率は 16% となっている。

流量変動率を小さくおさえるには、リザーバー内圧力を高くして第二可変リークを絞るか、リザーバーの容積を大きくするかを行えばよい事が、計算（付録 1 参照）でも簡単に確かめられたし、ここでの実験でわかった。しかし、第一の方法では、電磁弁が閉じた後の流量の立下り時間が 100~200 msec と非常に長くなる。これは、電磁弁が閉じた後も、電磁弁と第二可変リークバルブの間の空間にたまっていたガスが、絞られた第二可変リークバルブの細いノズルから少しずつ出続けるためである。従って、立下り時間が短く、しかも流量変動率を小さくするためには、リザーバー容積をある程度大きくして、その内部のガス圧力を低くし、第二可変リークを全開とする必要がある。Fig. 3 はそのような条件を満たす例である。

流量の時間変化が、Fig. 3 のようになる事は、次のように解釈できる（定量的な根拠付けは、付録 2 を参照）。まず、流量の立上り時間は、電磁弁が開くに要する時間とアーク室の時定数の和程度であり、15 msec となる。ピークに達した直後の流量の急激な減少は、電磁弁が開き切った後、リザーバーと第二可変リークの間で圧力勾配が発生するまでの過渡状態を表わしている。即ち、電磁弁が開いた直後では、第二可変リークの直前の圧力はリザーバー内圧力と同程度となり、それに対応した大きい流量が流れる。引続く短い時間内に流れは平衡状態

に近いものとなり、リザーバーと第二可変リークの間コンダクタンスに対応した圧力勾配がそこに生じ、第二可変リークの直前の圧力は、リザーバー内圧力よりも低くなる。そして、その圧力に対応した小さい流量がイオン源に流れていくことになる。

上記のような初期のオーバーシュートを経た後の流量の緩慢な減少は時間とともにリザーバー内のガスが消費される為に出てくるものである。

最後の流量の立上り時間は、電磁弁が閉じてしまうまでに要する時間と電磁弁が閉じ切った後に電磁弁と第二可変リークの間空間のガスが抜けてしまうまでの時間の和程度となり、40 msecである。

### 3. 圧電素子弁使用パルスガス導入系

第2章で述べた電磁弁使用パルスガス導入系で、ほぼ満足すべき結果を得たが、唯一の欠点として、流量の立下り時間が40 msec以上と長い事が挙げられる。これは、電磁弁使用パルスガス導入系では、ガスを流したり切ったりする機能(電磁弁)と、流量を調整する機能(第二可変リーク)が空間的に分離している為であると考えられる。

それに対して、圧電素子弁ではその二つの機能が一箇所で行なえるという利点があり、当然流量の立下り時間が短くなる事が期待できる。即ち、圧電素子弁というのは、圧電素子結晶に電圧を加えると機械的歪みが発生するという現象を利用した弁で、歪みによって生じたすきまからガスが漏れ出るようにしたものである。又、加える電圧により歪みの程度が変化するので、電圧の制御で流量を調整する事が出来る。

ことでの実験で用いる圧電素子弁(Veeco, PV-10)は印加電圧をDC100V以下とし、開閉時間が2 msec以下である。圧電素子弁使用パルスガス導入系では、この弁をパルスの駆動する。

Fig. 1に電磁弁使用パルスガス導入系と並置して圧電素子弁使用パルスガス導入系の実験系を示す。この実験では、リザーバー容積を200 cc一定としてあり、リザーバー内圧力をダイヤフラム真空計(測定可能圧力範囲: 1~760 Torr)で測定する。

パルスモードでの実験は、全て周期1秒、パルス巾100 msecで行ない、リザーバー内圧力、パルス波高値を変化させてその時の流量の時間変化を測定する。

Fig. 4に流量の時間変化を3例示す。いずれのリザーバー内圧力に対しても、流量の立下り時間が20~30 msecとなっており、電磁弁使用パルスガス導入系の場合の立下り時間よりも短くなっている。立上り時間も同様に短くなっている。

### 4 実用化に際しての検討

電磁弁と可変リーク弁、又は圧電素子弁を使用して、目的とするパルスのガスの流れを実現する事が出来た。実際にそれらをJFT-2用粒子入射加熱装置のイオン源に適用する場合に



は、そのパルスのなガスの流れの再現性が問題となる。

第2章及び第3章の実験で、リザーバー内の圧力を変えようとする場合、第一可変リーク弁を調整しなければならないが、ある一定の圧力に落ち着くまでに、パルスの周期にも関係して、数分から十数分の時間を必要とした。また、その落ち着いた後の圧力も、はじめ希望したとおりの値となるのはまれであった。

電磁弁使用パルスガス導入系では第二可変リークの開きを一定とすれば、また圧電素子弁使用パルスガス導入系では印加電圧パルス波高値を一定としておけば、リザーバー内圧力が決まれば流量値も決まるが、上に述べたようにリザーバー内の圧力を希望通りに変化させるには時間がかかる。従って、リザーバー内圧力を一定にして、電磁弁使用パルスガス導入系では第二可変リークの開きを、圧電素子弁使用パルスガス導入系では印加電圧パルス波高値を変えた方が、流量調整が容易となり、再現性も増す。

JFT-2用粒子入射加熱装置のイオン源へのパルスガス導入系はこの考えにより設計した。リザーバー内圧力をダイヤフラム真空計で測定し、その値がある設定値以上になった場合には、真空計用コントローラーに付属しているリレスイッチにより、リザーバーの上流側にあるもう一つの電磁弁が閉じられ、リザーバーへのガスの流入を遮断する。その電磁弁が閉じられている間にも、パルスのなガスがリザーバーから流出しているため、リザーバー内圧力が降下し、その設定値より低くなると再びリレーが働いて、いまの電磁弁が開けられる。このような単純なフィードバックにより、リザーバー内の圧力はその設定値付近ではほぼ一定に保たれる。従って、第一可変リークは全開のままが良い。

JFT-2用粒子入射加熱装置では、電磁弁使用パルスガス導入系と圧電素子弁使用パルスガス導入系を並置する。すなわち、一方を使用している時には、他方は閉じられたままとする。圧電素子弁は電氣的な遠隔操作が可能であるので、30kVの高電位に浮かしたまま使用するには便利であり、主にこちらの方が使用されると思われる。しかしながら、JFT-2用のコンデンサーバンクを放電する際、<sup>2)</sup>圧電素子弁印加電圧に変動が見られるという事、又、自作のパルサーを使用した第3章の実験でも、ガス流量が不足したり、イオン源の磁場を強くし過ぎる等してイオン源のアーク放電にノイズが多くなった時には、圧電素子印加電圧パルス波形に異常（パルス波高値付近での小振、スパイク状の電圧降下）が観察された事、1Vの印加電圧変動が8%程度の流動変動を引起す事、等を考慮すると、圧電素子弁はまだ十分な信頼性を持っているとは言えない。圧電素子弁はイオン源の近くに位置し、JFT-2、JFT-2用電源、イオン源用の電源がその付近にある事を考えると、圧電素子弁の使用される位置はノイズ過密地帯と言えるであろう。圧電素子弁のノイズに対する保護策は十分に行なわなければならない。

## 謝 辞

実験を遂行していくに当り，加熱工学研究室長白形弘文氏より不断の激励を頂いた。JFT-2への適用については菅原亨氏に，回路については松田慎三郎，伊藤孝雄両氏に御教示願うとともに，研究室の各氏との議論により示唆される処が多かった。パルスガス導入の基本的な考え方は，装置技術管理室の松崎諠氏に負う処大であり，謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 松田他；JAERI-M 6431
- 2) 児玉；私信

## 付 録 1

Fig. 3の流量の時間変化で、初期のオーバーシュートを経た後の流量の緩慢な減少は、リザーバー中のガス消費によるものである。その変動率がどういった要素で決まってくるかを以下に示す。

Fig. 5に示す単純化した配管系を考える。ガスの流れは粘性流である。この時、リザーバー内の圧力の時間変化は、次式で表わされる。

$$V_{res} P_{res}^{\cdot} = \alpha_0 (P_0^2 - P_{res}^2) - \alpha_1 (P_{res}^2 - P_1^2) \quad (1)$$

ここで、 $V_{res}$ 、 $P_{res}$ は各々リザーバーの容積、リザーバー内圧力であり、 $P_0$ は減圧弁内の圧力で一定と仮定する。 $P_1$ はイオン源のアーク室の圧力である。 $\alpha_0$ 、 $\alpha_1$ は第一及び第二可変リークの開きの程度を表わす定数である。

ところで、実際に使用する圧力は、 $P_{res} = 10 \sim 200 \text{ Torr}$ 、 $P_1 = 0.01 \sim 0.1 \text{ Torr}$ であるから

$$P_{res}^2 \gg P_1^2$$

が成り立ち、(1)式は、次の形となる。

$$V_{res} P_{res}^{\cdot} = \alpha_0 (P_0^2 - P_{res}^2) - \alpha_1 P_{res}^2 \quad (2)$$

又、リザーバーからイオン源へ0.1秒の間に消費されるガス量を残りの1秒で減圧弁からリザーバーへ補給してやるものとする。

$$\alpha_0 (P_0^2 - P_{res}^2) \times 1 = \alpha_1 P_{res}^2 \times 0.1$$

が成り立つ。従って

$$\alpha_1 P_{res}^2 \gg \alpha_0 (P_0^2 - P_{res}^2)$$

であり、(2)式は更に簡単化される。

$$V_{res} P_{res}^{\cdot} = -\alpha_1 P_{res}^2 \quad (3)$$

この式は、容積 $V_{res}$ をもつ容器からガスが抜けていくだけの様子を表わしており、その解は次の通りである。

$$P_{res}(t) = P_{res}(0) \frac{1}{\left(1 + \frac{\alpha_1 P_{res}(0)t}{V_{res}}\right)}$$

ここで $P_{res}(0)$ は、初期のリザーバー内圧力である。

結局、リザーバーからイオン源に流れ出す流量の時間変化は、次式で表わされる。

$$\begin{aligned} Q(t) &= \alpha_1 P_{res}^2(t) \\ &= \alpha_1 P_{res}^2(0) \frac{1}{\left(1 + \frac{\alpha_1 P_{res}(0)t}{V_{res}}\right)^2} \end{aligned} \quad (4)$$

(4)式より、 $t$ 秒後の流量を基準とした流量の変動率は、

$$\frac{\Delta Q}{Q(t)} \equiv \frac{Q(0) - Q(t)}{Q(t)} = 2 \frac{\alpha_1 P_{res}(0)t}{V_{res}} + \left(\frac{\alpha_1 P_{res}(0)t}{V_{res}}\right)^2 \quad (5)$$

で表わされる。 $Q(0) \equiv \alpha_1 P_{res}^2(0)$ 程度の流量を $t = 0.1$ 秒まで流そうとした時、(5)式は次のようになる。

$$\frac{\Delta Q}{Q(0.1)} \approx 2 \frac{Q(0) \times 0.1}{P_{res}(0) V_{res}} + \frac{Q(0) \times 0.1^2}{P_{res}(0) V_{res}}$$

この式の意味するところは、ほぼ一定の流量  $Q(0)$  を流量変動率を小さくおさえて流そうとするならば、リザーバー内圧力  $P_{res}(0)$  を大きくして第二可変リーク ( $\alpha_1$ ) を絞るか、リザーバー容積  $V_{res}$  を大きくするかしかないという事である。

## 付 録 2

流量の時間変化が Fig. 3 のようになる事を定量的な側面から根拠付ける。

まず、初期のオーバーシュートの機構を Fig. 6 を使って説明する。

① 電磁弁が閉じている時、電磁弁の一次側までリザーバー内圧力と同じとなっている。

( Fig. 6 の①状態 )

② 電磁弁が開いた直後には、Fig. 6 の②で示されるように、第二可変リークの一次側は①の時とほぼ同じ圧力となっており、その圧力に対応した大きい流量が当初流れる。( Fig. 3 のピークに対応 )

③ ある短い時間が経つと平衡状態に近いものとなり、リザーバーと第二可変リークの間コンダクタンスに対応した圧力勾配はリザーバー内の圧力よりも低くなっており、それに対応した小さい流量が流れる。( Fig. 6 の③状態 )

④ ③の状態になった後に、リザーバーのガス消費による流量変動(5)式が適用できるような時間変化を示す。

②から③に移るに要す時間は短いと思われ、②と③での流量の差がピークに達した後の流量の急激な減衰となっている。即ち、オーバーシュートの原因は、リザーバーと第二可変リーク間の小さいコンダクタンスにより、わずかな時間内にその間に圧力勾配が生じる為であると考えられる。実際、その部分のパイプは、

$$\text{内径 } 2a = 0.2 \text{ (cm)}$$

$$\text{長さ } L = 11 \text{ (cm)}$$

となっており、そのパイプを Fig. 3 の値である。

$$Q = 2.1 \times 10^3 \text{ (Torr} \cdot \text{cm}^3 / \text{sec)}$$

の流量が流れる時、リザーバー内圧力  $P_{res} = 40 \text{ (Torr)}$  として、第二可変リークの一次側圧力  $P_{v,L}$  は、次の式

$$QL = \frac{\pi a^4}{8 \eta} \cdot \frac{P_{res}^2 - P_{v,L}^2}{2}$$

$$\eta = 6.53 \times 10^{-8} \text{ (Torr} \cdot \text{sec)} \text{ (H}_2 \text{ の粘性係数)}$$

より、

$$P_{v,L} = 39.0 \text{ (Torr)}$$

となり、当初  $P_{v,L} = 40 \text{ (Torr)}$  であった事を考えると、上記の②と③での状態での流量比は、

$$\frac{\alpha_1 \times (39.0)^2}{\alpha_1 \times (40)^2} = 0.952$$

となる。即ち、短い時間にピーク流量値の 5% 程度が減少してしまう事となる。

Fig. 6 での②と③でのガス量の差は、リザーバーから第二可変リークまでの容積が 21 cc 程度ある事から、およそ

$$\frac{(40 - 39) \text{ (Torr)} \times 21 \times 10^{-3} \text{ (l)}}{2} = 1.1 \times 10^{-3} \text{ (Torr} \cdot \text{l)}$$

となる。一方、Fig. 3 でのオーバーシュート部のガス量も、およそ

$$\frac{0.14 (\text{Torr} \cdot \ell / \text{sec}) \times 2 \times 10^{-2} (\text{sec})}{2} = 1.4 \times 10^{-3} (\text{Torr} \cdot \ell)$$

となり、ガス量の面からもオーバーシュートの機構が説明できる。

オーバーシュート後の緩慢な流量減少は、付録 i で説明してあるので、次に立下りの過程を説明する。電磁弁が閉じた後、電磁弁の二次側から第二可変リークの一次側までのおよそ 1.5 cc の容積には、約 39 Torr のガスが残留している。そのガス量は、

$$39 (\text{Torr}) \times 1.5 \times 10^{-3} (\ell) = 5.9 \times 10^{-2} (\text{Torr} \cdot \ell)$$

である。一方、Fig. 3 の立下り部分のガス量は、

$$\frac{2 (\text{Torr} \cdot \ell / \text{sec}) \times 40 \times 10^{-3} (\text{sec})}{2} = 4 \times 10^{-2} (\text{Torr} \cdot \ell)$$

となる。又、第二可変リーク全開の時、そのコンダクタンスは、

$$\alpha_1 P_{res} \approx 1.4 \times 10^{-3} \times 39 = 0.055 (\ell / \text{sec})$$

であり、容積が 1.5 cc ある事を考えると排気時定数は

$$\frac{1.5 \times 10^{-3} (\ell)}{5.5 \times 10^{-2} (\ell / \text{sec})} = 27 \text{ msec}$$

となる。圧力の減少とともにコンダクタンスが減少することも考慮すると上の時定数はもっと長くなり、これに電磁弁の閉じる時間 5 msec 程度を加えると、約 40 msec となり、Fig. 3 の立下り時間とはほぼ一致する。

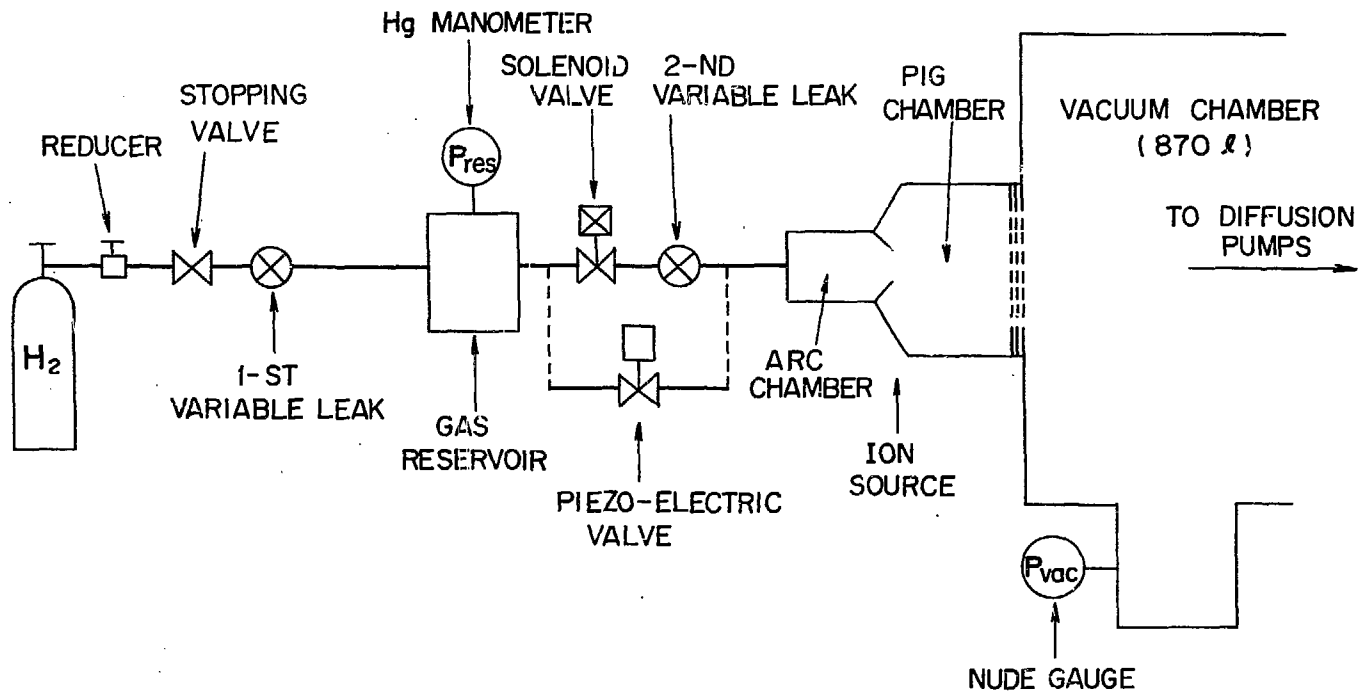


Fig. 1 Experimental arrangement of the pulsed gas feed system.

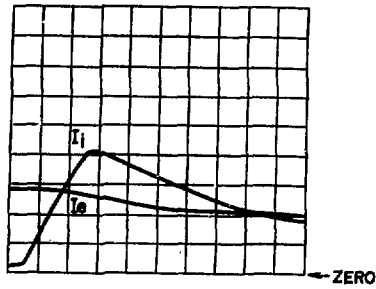


Fig. 2 sweep speed : 50ms/div  
 scale  $I_i$  : 0.05 $\mu$ A/div  
 $I_e$  : 39.7 $\mu$ A/div

Fig. 2 Typical oscillogram of ion current  $I_i$  and electron current  $I_e$  of the nude gauge.

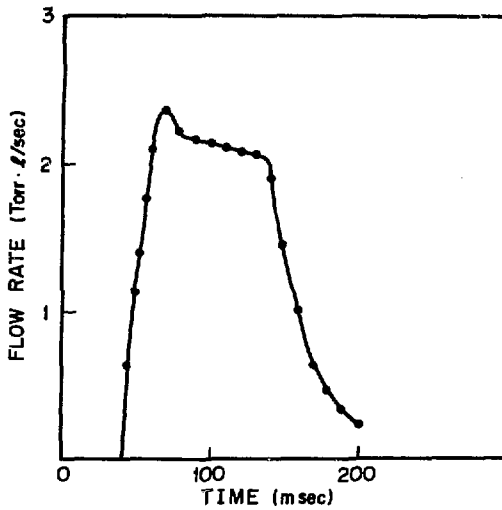


Fig. 3 Typical measured flow rate vs. time with  $V_{res}=700$ cc,  
 $P_{res}=40$  Torr and the 2-nd variable leak fully open.



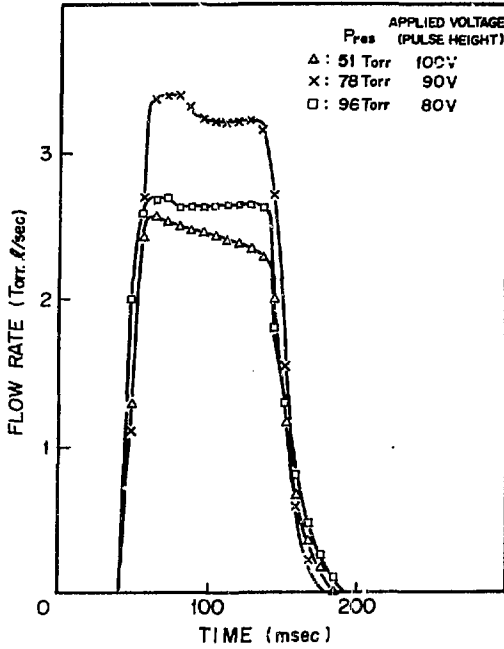


Fig. 4 Three examples of measured flow rate vs. time in the case of employing a piezo-electric valve.

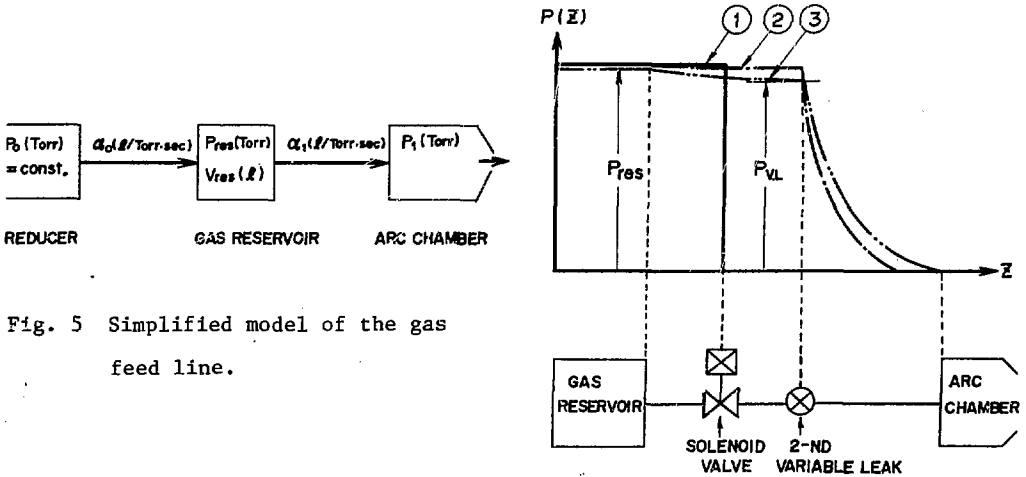


Fig. 5 Simplified model of the gas feed line.

Fig. 6 Transient pressure distributions along the gas feed line.