

# プラズマ・ジェット装置の動作特性

## (第1報)

佐伯節夫\*・山口勝也\*\*

### Operating Characteristics of PLASMA JET DEVICE (Report I)

SETSUO SAEKI\* & KATSUYA YAMAGUCHI\*\*

#### ABSTRACT

There are two basic types of plasma jet devices, one which has a transferred arc and one with a non-transferred arc.

In the non-transferred mode of operation, the arc circuit is completed within the front electrode, and the plasma jet being projected through the nozzle. A constricted type, vortex stabilized 15KW plasma jet was put in operation in our laboratory in DEC. of 1962.

The arc is struck by sliding contact, then the stable plasma jet is produced from the nozzle about 20 mm long.

Operating characteristics of a plasma jet were obtained from our measurements. These experiments were carried out with different nozzle and different electrode distance. The current and the rate of gas flow were changed during the operation. SS-5102 synchroscope was used to ascertain the oscillating phenomena of the arc voltage and current.

The results of these experiments are mentioned as follows.

- (1) Performance of a plasma jet is affected by electrode distance, kinds and flow rate of gas.
- (2) Arc voltage rise is occurred by increasing of gas flow rate.
- (3) Flame length of plasma jet is mainly affected by arc current.
- (4) The oscillating phenomena of arc voltage and current are concerned with anode spot motion.

#### 1. 緒言

アークを狭くするために、その外周を水流またはガス流によって、強制冷却すると、アークは集束しその温度は著しく上昇して、プラズマ・ジェット・フレームを形成して噴出する。1922年 Gerdien と Lotz は、水流型プラズマ・ジェットを開発し、 $50,000^{\circ}\text{K}$  の高温を得た。その後1955年 R. M. Gage によって発表された集束アーク型プラズマ・アーク・トーチは、アークの狭くきにガス流を用い、今日の新しいプラズマ・ジェットの原形となった。現在、 $8,000\sim 50,000^{\circ}\text{K}$  のプラズマを、長時間にわたり安定に保持できる装置は、プラズマ・ジェットのみであり、そのため本装置は基礎的なプラズマ物性の研究に使用されるとともに、切断、溶射、溶接、化学反応、宇宙工学など多彩の応用分野にわたって、実用化されつつある。これらプラズマ・ジェットの応用面

については、既にかなり詳細な発表が見うけられるが、プラズマ・ジェット発生装置自体の設計や、ジェット・フレームの制御などについてはほとんど述べられていない。これはその特有なアーク現象と、発生する高温高速プラズマ流が、直接測定を困難ならしめる故と考えられる。プラズマ・ジェット発生装置は、原理的には極めて簡単であるが、電極現象、動作限界、アーク柱挙動、汚染などに結びついて、複雑な特性を呈する。筆者等はプラズマ・ジェットに関する基礎資料をうる目的をもって、入力約15KWのプラズマ・ジェット発生装置を試作し、比較的良好な動作特性をえたので、以下これについて述べる。

#### 2. プラズマ・ジェット発生装置

##### 2.1 プラズマ形成ガス

プラズマ・ジェット発生装置に使用する作動ガスの種類によって、その動作特性やフレームは大きく影響される。プラズマ・ジェットに対する設計要素については、別の機会に述べることにするが、此処でプラズマ形成ガ

\* 電気工学教室

\*\* 応用物理学教室

スの特性について簡単に考察を加える。筆者らは試作プラズマ・ジェット装置に対する作動ガスとして、単原子ガス(A), 二原子ガス(N<sub>2</sub>), 混合ガス(A+N<sub>2</sub>)を選定した。

プラズマは多数の電子, イオンなどの荷電粒子群となり, 電氣的にほぼ中性を保ちながら, 良好な導電性を有する。低温領域でのプラズマは中性原子, 分子を含むが, 温度の上昇に伴って電離度が増し, ついには中性粒子のない完全電離プラズマとなる。プラズマのような電子, イオン, 原子(分子)などの集合の状態においては, 各粒子は Maxwell 分布則をもったランダム熱運動を行ない, その平均熱運動速度を  $c$ , 粒子質量を  $m$  とすると, 粒子の平均熱エネルギー;  $W$  は次式で表わされる。

$$W = mc^2/2 = (3/2)kT \quad (2.1)$$

$k$ ; Boltzmann 定数,  $T$ ; 温度(°K)

いま電界  $E$  中における荷電粒子についてみれば, 粒子の質量を  $m$ , 電荷を  $Z_e$ , 力を  $f$  とすれば

$$f = Z_e E \quad (2.2)$$

単位時間当たり平均して

$$m \left( \frac{dv_d}{dt} \right)_E = Z_e E \quad (2.3)$$

ただし  $v_d$ ; 粒子の平均速度

なるドリフト運動量の変化をうける。定常状態では, 電界により粒子に加えられたエネルギーは, 他の粒子との衝突により失なわれると考えると, 運動量の変化は, 衝突時間を  $\tau_c$  として

$$m \left( \frac{dv_d}{dt} \right)_{\text{coll}} = m v_d / \tau_c \quad (2.4)$$

$$Z_e E = m v_d / \tau_c \quad (2.5)$$

$$v_d = Z_e \tau_c E / m \quad (2.6)$$

移動度を  $\mu$  とすれば

$$v_d = \mu E \quad (2.7)$$

$$\tau_c = \lambda / \bar{v} \quad (2.8)$$

ただし  $\lambda$ ; 粒子の平均自由行程

$\bar{v}$ ; 粒子の熱運動速度

$$\mu = Z_e \tau_c / m = (Z_e / m) (\lambda / \bar{v}) \quad (2.9)$$

一般にプラズマ中では  $\mu_e \gg \mu_i$  であるから, 電子密度を  $n_e$  とすると, プラズマの電流密度  $i$  は

$$i \approx en_e \mu_e E = \sigma E \quad (2.10)$$

ただし  $\sigma$ ; プラズマの電気伝導度

$$\sigma = en_e \mu_e = (n_e e^2 / m) (\lambda / \bar{v}) \quad (2.11)$$

熱平衡の成立する等温プラズマにおいては, プラズマの電離度  $X = n_e / N$  は, (2.12) で与えられる。

$$(X^2 / 1 - X^2) P = (2.4 \times 10^{-4}) T^{5/2} e^{-V_i / kT} \quad (2.12)$$

ただし, プラズマの密度, 圧力, 温度をそれぞれ  $N$ ,

$P, T$  とし,  $V_i$  を原子のイオン化エネルギーとする。

(2.12) は Saha の式として知られている。

低温におけるプラズマの電気伝導度は電離度に比例し, 電子温度とともに指数関数的に上昇する。Fig. 1 は A および N<sub>2</sub> に対する電気伝導度の温度変化を示すもので, ほぼ 15,000°K までの温度領域での電気伝導度の変化は大であるが, それ以上では変化が小である。プラズマ形成ガスに A, N<sub>2</sub> を選んだ場合, アーク柱温度が 15,000°K 以上においては, ピンチ効果によって電流密度の増大をはかることは, 期待できないことが表わされている。筆者らはこれによりアーク電流 200A 以下, ジェット・フレーム温度 10,000~15,000°K を目標として設計を行なった。

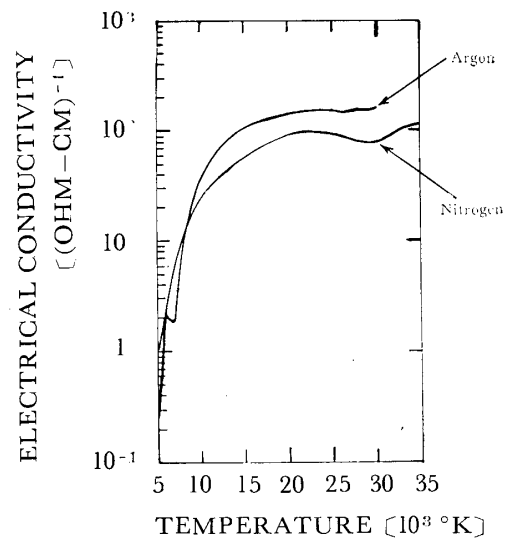


Fig. 1 Electrical conductivity of argon and nitrogen

プラズマ形成ガスの熱伝達量, 冷却能力の相異なるなどの諸特性については周知のとおりである。

## 2.2 プラズマ・ジェット発生装置の構造

プラズマ・ジェット発生装置は, 移行式と非移行式に大別され, 後者はさらにアーク柱安定化の方式により, 円筒型, トロイダル型, 集束型に分たれる。前者はアーク柱の長さを大きくとり, 入力エネルギーを増加できるが, 対向物を一方の電極に使用するという特異性を有するので, 利用度が極限される。

筆者等の試作したプラズマ・ジェット発生装置は非移行式ガス混流型で Fig. 2 にその略図を示す。Fig. 3 は装置前面の写真である。装置は前方より, ノズル電極および取付部(いずれも銅, 水冷), アーク室(銅, 水冷), ガス狭窄用隔壁, 絶縁層(6mm厚ゴム), ガス流入室兼後部電極支持部(砲金, 水冷), 後部電極取付棒および絶

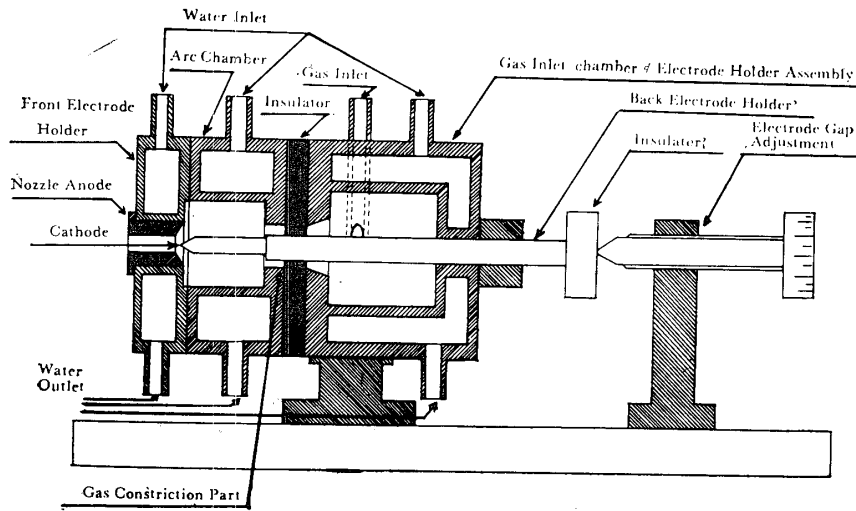


Fig. 2 Schematic diagram of plasma jet device

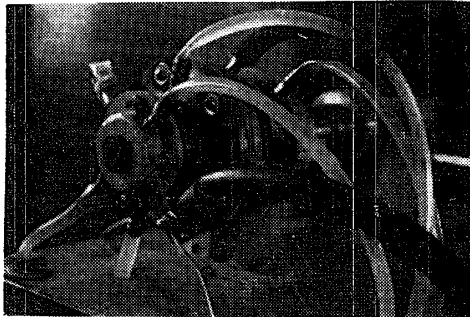


Fig. 3 Photograph of plasma jet device

縁壁(真鍮および10mm厚ベークライト), 電極間隙調整ネジ(鋳鉄)の各部よりなる。ノズル電極はオリフィス径3~5mm, 全長16~24mmの各種を使用し正極性を与える。後部電極は直径5mmのTh-W陰極(W; 98.23%, ThO<sub>2</sub>; 1.75%)を用い, 消耗を防いだ。電極間隙調整ネジはピッチ1mmとし, 微調整可能である。後部電極棒

の軸線と, 前部ノズル電極のオリフィス中心線を一致させ, さらにガス渦流の旋回中心をこれに合わせる事が, ジェット・フレームの安定条件の一つであるが, 本装置においては電極支持部の長さが85mmで電極取付棒は軸方向に安定であり, 工作精度も精密仕上を行なって正しく中心を出しうる。アーク室はアーク柱よりの熱放射を吸収冷却しやすくするため熱伝導率良好な銅を使用し十分に水冷する。ガス洩れ防止のためOリングを用い且仕上程度を向上することに努めた。作動ガスは流入室の円筒形ケーシングに対して接線方向に流入せしめ, さらに狭排用隔壁を設けて軸方向速度成分の増加をはかっている。これは棒陰極に発生する陰極点の変動を抑制するとともに, ノズル陽極面上の陽極点の分散移動を行ない, アークの安定に資する。

### 2.3 制御系の構成

制御系統の構成を Fig. 4 に示す。

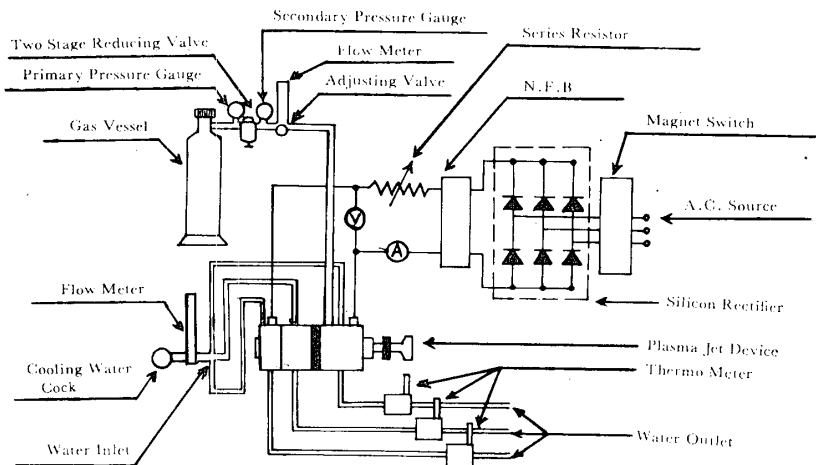


Fig. 4 Control system of plasma jet

電源は定格直流出力130/180/220V, 200Aのシリコン整流器を使用し, 電流調整用安定抵抗を回路に直列に接続する. 電源電圧は始動に際して十分な無負荷電圧を与え, 動作中はアークの安定度を妨げない限り低い値が望ましく, その限界はそれぞれの装置の特性により異なる. 本実験においてはAに対して130V, N<sub>2</sub>に対しては220Vで十分と認められた.

プラズマ・ジェット装置に対する入力 $20\sim 60\%$ は, 熱損失として失われるため, これを速やかに放散しないと装置の損傷を招く. 本装置の冷却水は上水道を使用し, ノズル電極 $1\sim 3\text{ l/min}$ . アーク室 $2\sim 6\text{ l/min}$ . 後部電極支持部 $2\sim 6\text{ l/min}$ . を供給している. 不純な水の使用は沈積物を生じ, 実効冷却率を低下させるので注意を要する.

作動ガスは純度99.999%のA, またはN<sub>2</sub>を用い, 二段式減圧弁によって二次圧力 $1.5\sim 5\text{ kg/cm}^2$ に下げて流量 $5\sim 60\text{ l/min}$ . でガス流入室内に噴出せしめる. アーク室内にアークが発生した場合は, 発生前に比較して圧力は著しく上昇し, 内部圧力分布も一様に近づくが, ガス二次圧力はこれを予想して定める必要がある.

### 3. 動作特性

#### 3.1 始動および動作中の安定性

プラズマ・ジェットの操作は装置個々の特性により多少の相異はあるが, 装置の損傷を防ぎ, フレームの安定を第一とすることはいうまでもない. 本装置の始動は引き離し始動を行なう. すなわち陰極先端をノズル陽極壁内面に接触せしめ, 次の瞬間急速に後退せしめることによりアークを発生する. もちろん冷却水を供給し, 作動ガスの流量を選定し, 始動電流を適当な範囲に設定しておくことが必要である. 始動に際して後部電極は冷却状態にあるので点弧し難く, 作動ガスの流入により発生した陰極点が吹き消されて, 連続放電に移行し難い. この過渡状態においてはノズル電極の異常消耗も発生しやすい. したがって始動に際しては入力, ガス流量の最適範囲が存在し, とくにN<sub>2</sub>に対してはその一方が少しでもその値から外れると, アークは一瞬で消滅する. 本装置に対する最適始動条件は作動ガスにAを使用した場合, 流量 $16\sim 20\text{ l/min}$ . 電極間隙 $2\text{ mm}$ , アーク電流 $30\sim 40\text{ A}$ , ノズル電極オリフィス径 $3\sim 5\text{ mm}$ , ガス純度99.999%, 二次圧力 $1.5\sim 3.5\text{ kg/cm}^2$ , 電源無負荷電圧130Vである. これに対してN<sub>2</sub>は, 放電が不安定になりやすく過渡特性を不良にする. N<sub>2</sub>においては前記の値はそれぞれ $14\sim 15\text{ l/min}$ .,  $2\text{ mm}$ ,  $60\text{ A}$ , ノズル電極オリフィス径 $3\text{ mm}$ , 全長 $24\text{ mm}$ , ガス純度99.999%,  $5$

$\text{kg/cm}^2$ , 220Vとなる.

Fig. 5にガス流量対アーク電流により示されたAおよびN<sub>2</sub>プラズマ・ジェットの安定動作領域を与える. 動作中の安定性も一般にN<sub>2</sub>は劣るが, ノズル電極のオリフィス径をできる限り小さくとり全長を増すことにより, フレームの集束が可能となり安定性を向上しえた. アーク柱の安定のためには陰極点の安定化をはかることが重要であるが, 陰極棒の直径を小にし且先端を削ってノズル電極入口内面の傾斜に等しいかあるいは多少小さい程度の角度にするとともに, 冷却ガス流を活用して, 陰極点の位置を電極棒先端に定着させる.

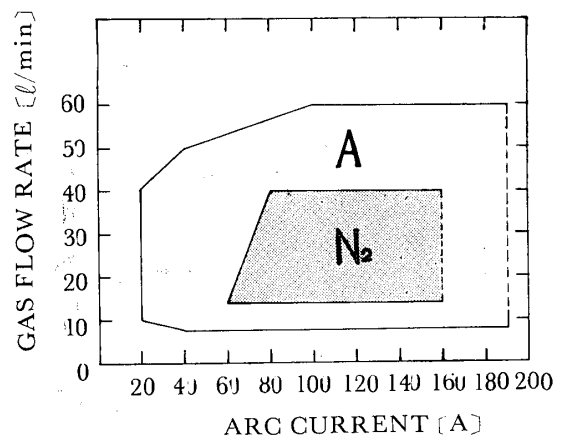


Fig. 5 Operating limit of plasma jet

#### 3.2 動作特性

Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8はそれぞれAおよびN<sub>2</sub>プラズマ・ジェットのアーク電圧—アーク電流, アーク電圧—ガス流量, アーク電圧—電極間隙の関係を示す. これらのプラズマ・ジェット装置の構造的(両電極の材質, 形状, アーク室の形状), 電氣的(電源, 系統制御装置, アーク電流, アーク柱挙動, 電極現象), 熱的(作動ガスの種類, 流量, 狭さく機構, 放射熱損失)などの要因によって影響をうける.

プラズマ・ジェット・フレームの全長は, ノズル壁内面に達する間に, プラズマ形成ガスの得るエンタルピと, ノズル出口以降のフレームの温度傾斜によって決まる. Fig. 9はAおよびN<sub>2</sub>ジェットによるフレームを示す.

プラズマ・ジェットのアーク電圧およびアーク電流の波形は周期的な振動現象を呈しているが, その平均の周波数は装置の構造, 作動ガスの種類などの条件によって異なる. Fig. 10にこれを示す.

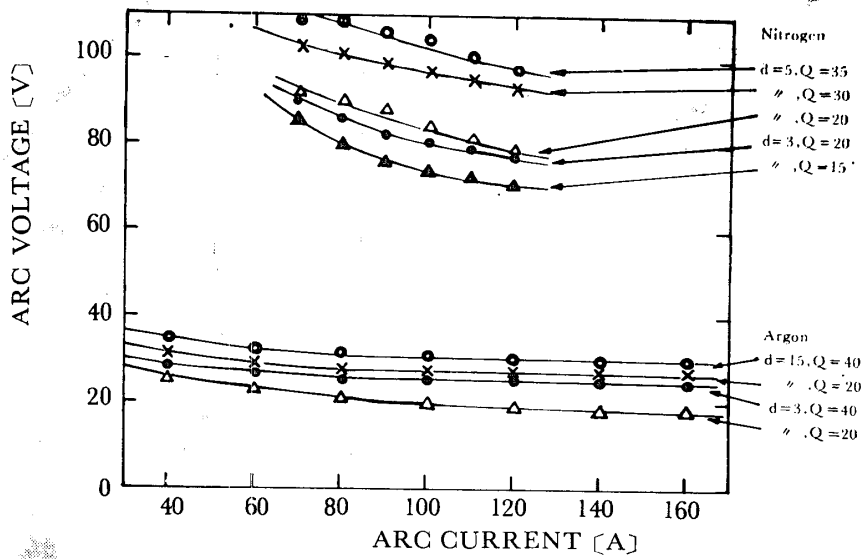


Fig. 6 Voltage-current characteristics of plasma jet  
 $d$  ; electrode distance [mm] ,  $Q$  ; gas flow rate [l/min.]

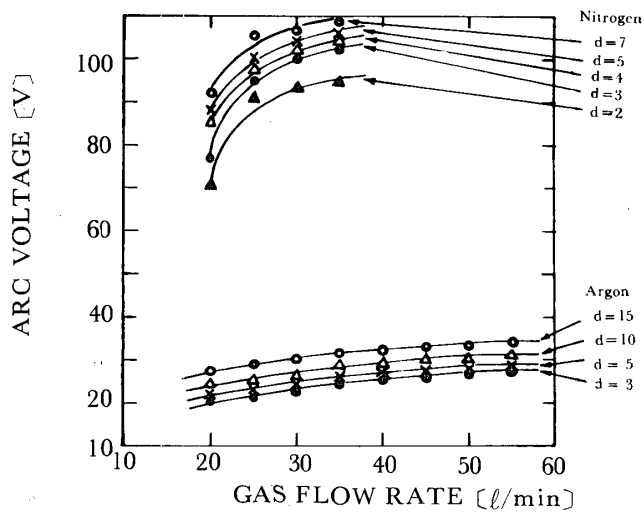


Fig. 7 Voltage-gas flow rate characteristics of plasma jet  
 $d$  ; electrode distance [mm] , arc current; 100 [A]

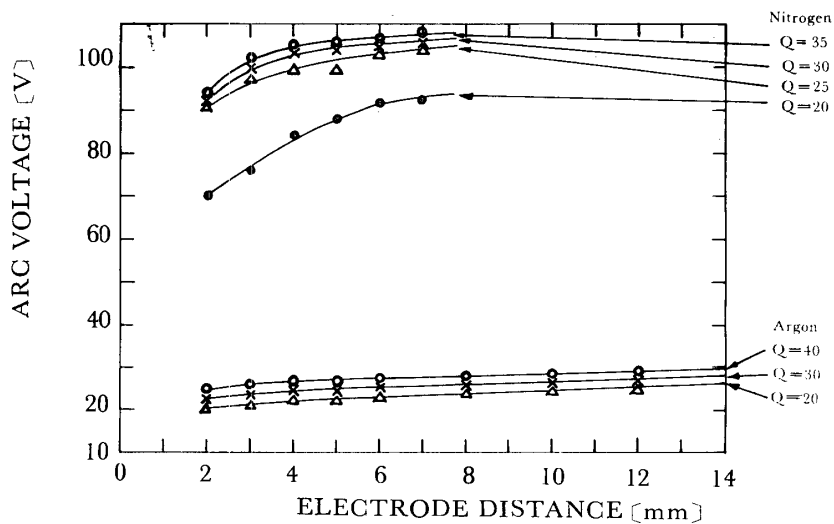
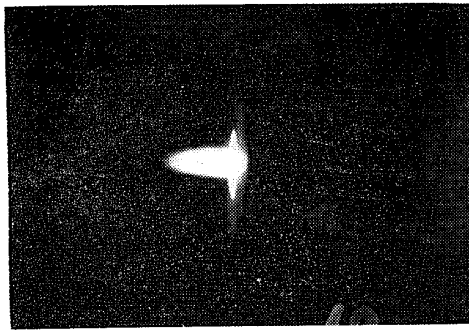
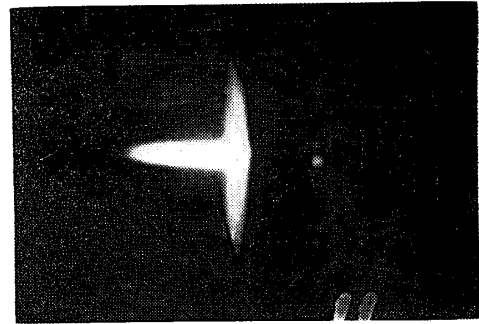


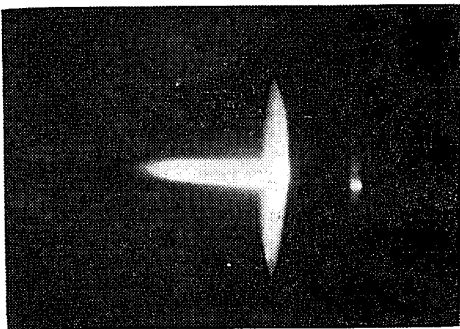
Fig. 8 Voltage-electrode distance characteristics of plasma jet  
 $Q$  ; gas flow rate [l/min.] , arc current ; 100 [A]



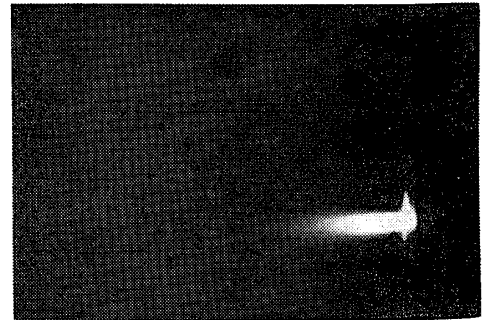
(a) arc current 40 [A], arc voltage 32 [V]



(b) arc current 100 [A], arc voltage 27 [V]



(c) arc current 160 [A], arc voltage 25.5 [V]



(d) arc current 100 [A], arc voltage 96 [V]

Fig. 9 Plasma jet flame (a)~(c) ; Argon  
 electrode distance 5 [mm], gas flow rate 40 [ℓ/min]  
 nozzle electrode  $3\phi \times 18$  [mm]  
 (d) ; Nitrogen  
 electrode distance 5 [mm], gas flow rate 30 [ℓ/min]  
 nozzle electrode  $3\phi \times 24$  [mm]

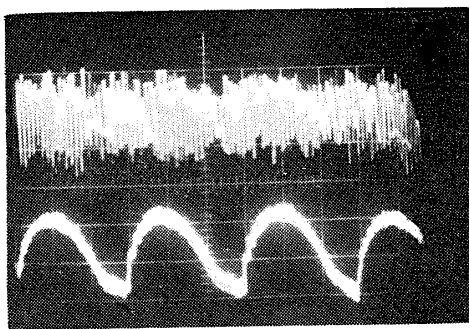


Fig. 10 (a) Arc voltage &amp; arc current wave form of argon plasma jet

electrode distance 5 [mm]  
 gas flow rate 25 [ℓ/min]  
 arc current 100 [A]  
 nozzle electrode  $5\phi \times 18$  [mm]  
 TIME/CM 1m sec/CM  
 VOLTS/CM

Upper trace (arc voltage)  $0.2\text{V}/\text{CM} \times 10$   
 lower trace (arc current)  $1\text{V}/\text{CM} \times 10$

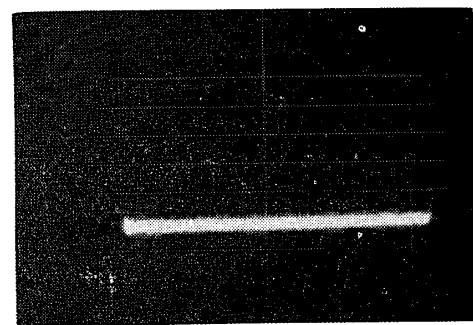


Fig. 10 (b) Arc voltage wave form of nitrogen plasma jet

electrode distance 2 [mm]  
 gas flow rate 15 [ℓ/min]  
 arc current 80 [A]  
 nozzle electrode  $3\phi \times 24$  [mm]  
 TIME/cm 3 msec/CM  
 VOLTS/CM  $1.5\text{V}/\text{CM} \times 10$

#### 4. 実験結果の検討

「プラズマ・ジェットのアーキ電圧対電流は、電極間隙およびガス流量一定の下では、自然アーキと異なって上昇特性を示すものである」との説があるが、これは適切とはいえない。個々の装置に対する特性の相異は、その構造と動作条件によって左右される。筆者らの実験によれば、Fig. 6に明らかなように、一定の電極間隙、ガス流量に対してAの場合は軽度の、N<sub>2</sub>の場合は顕著な垂下特性を示す。Aに対しては、アーキ電流120A以上の領域では、ほとんど電圧が一定となって来るが、これはアーキ柱における電流密度が一定のままその断面積が増加していることを示す。この状態でさらに電流を増加して行くと、アーキ柱が膨脹することになるが、此处でノズル壁並びにガス流による狭さくが効果的に作用する範囲が存在するならば、アーキ電圧は上昇に転じ、存在しない時には電極面の損傷を招く。N<sub>2</sub>はAに比較して、同条件ではほぼ3~4倍のアーキ電圧を示すが、これは同時に装置に対する入力比をも示すことになる。この相異は単原子ガスであるAと、二原子ガスN<sub>2</sub>の、アーキ柱冷却能力に基づくものと思われる。N<sub>2</sub>は電離に先立って解離しなければならぬため、単位温度上昇当り吸収熱量はAに比して著しく大である上、原子量が小で熱伝導率が良いため熱ピンチ作用は効果的である。

Fig. 7に見られるように、ガス流量を増加すればアーキ電圧はこれにつれて上昇する。これは流量増加に伴って、熱ピンチ効果が増し、アーキ柱外周のガス導電度が低下し、アーキの閉ぢ込めが行なわれていることを示している。流量増加に対するアーキ電圧上昇率は、N<sub>2</sub>の場合はAのそれに対して3~4倍となるが、これは先に述べた冷却能力の違いにより説明できる。

電極間隙を増加すれば、当然アーキ柱の長さが増加し、したがってアーキ電圧が上昇する。この様子を示すのがFig. 8である。図においてAに対しては電極間隙6mm以上、N<sub>2</sub>の場合は同じく4mm以上の領域で、アーキ電圧の上昇率は概ね直線的となる。すなわち、アーキ電圧を $V_a$ 、電極間隙を $d$ とすると、電位傾度は

$$\frac{\partial V_a}{\partial d} = \text{const.} \quad (4.1)$$

となる。電極間隙に対するアーキ電圧の上昇率は、電極間隙が小さいほど大となる。これは、アーキ柱両端において大きい電圧降下を生ぜしめる陰極降下および陽極降下による影響が、アーキ柱の長さが短いほど、アーキ電圧上昇率に対して効果的に作用するためと思われる。この事実はプラズマ・ジェットに対する入力増加をはかる際考慮しなければならない。

プラズマ・ジェット・フレームを安定且強力にするためには、作動ガス流によるピンチ効果を増しながら、アーキ柱に対する入力を上げて行けばよい。入力の増加は、アーキ電流の増大による方法と、ガス流量若しくは電極間隙の増加によってアーキ電圧を上昇せしめる方法、およびこれらを適宜組み合わせる使用することによって達成される。

アーキ電流を増加すると、ほぼこれに比例して陽極入力が増大するので、陽極面の損傷を生じやすい。これを防ぐためには、ガス流量を増して、ノズル電極内面における陽極点の分散移動をはからねばならない。陽極入力の限度は5~10 KW/cm<sup>2</sup>である。また電流を増加することにより、アーキ柱の膨脹を来すので冷却ガス流によるピンチ効果を強化するため、ガス流量を増す必要がある。この際ガス流の渦流成分、軸流成分の配分は装置によって選定さるべきである。

アーキ電流を一定に保ってガス流量を増せば、熱ピンチ効果の限界点までは、アーキ柱の集束が可能であるが、それ以上はアーキ柱電流密度は飽和する。さらにガス流量を上げると、冷却ガス流がプラズマ・ジェット・フレームに混入して、かえってフレームの温度を下げる。また渦流に乱れを生じアーキ柱を振らせる。

電極間隙がある値以上になると、これによるアーキ電圧上昇率は小となり、その上アーキ柱はノズル電極入口に終わり、その集束度が低下して温度が下がり、ジェット・フレームは逆に弱くなる。

したがって装置に許されれば入力限界内で、主としてアーキ電流の増加によって、入力増大をはかることが望ましいと考えられる。

これについては、プラズマ・ジェットの陽極現象をさらに明確にする必要があるが、それはまた汚染の問題に関連を有する。Fig. 10に示されたアーキ電圧、電流の振動現象は陰極点および陽極点の形成に関係すると思われるが、陰極点の変動はできる限り避けるべきである。これに対して陽極点は分散移動を必要とし、これに基づく振動は停止せしめてはならない。本装置に対する平均の振動数は、Aの場合6~8KC/sec、N<sub>2</sub>に対しては1~3KC/secを示した。装置の損傷を防ぎ、汚染を生じない安定したジェット・フレームを与えるには、動作条件に対してその電極現象を、さらに詳細に検討する必要があると考えられる。

#### 5. 結 言

小型の非移行式ガス過流型プラズマ・ジェット発生装置について、アルゴンおよび窒素ガスを使用した場合の

動作特性を示した。まず試作した装置に対する安定動作条件を定め、続いて動作特性を測定しこれに検討を加えた。それによると

- (1) プラズマ・ジェットの電圧—電流特性は 200A 以下では、ほぼ負特性もしくは水平特性を示す。
- (2) 二原子ガスを使用すると単原子ガスに比してアーク電圧が高くなり、ガス流量の増加や電極間隙の増大もまた、アーク電圧を上昇させる。
- (3) プラズマ・ジェットを強力にするには、アーク電流の増加によって入力増大をはかることが望ましい。
- (4) プラズマ・ジェットの電圧、電流の波形は周期的な振動現象を呈し、これは陽極点の移動に関係すると思われる。
- (5) 窒素はアーク柱冷却能力はすぐれているが、フレームの集束が悪いので、オリフィス径の小さく、全長の長いノズル電極が適する。

なお現在引続き各種の測定を行なっているが、その結果は次回に報告する予定である。

最後に本研究に対し御指導頂いた牧教授、終始御援助頂いた加賀美教授、日立研究所木村部長、実験に対して有益な御教示を頂いた溝口助教授、神谷助教授に厚く感謝する。また実験に御協力下さった山脇氏、卒業研究学生山田氏、河野氏、前大道氏に深く謝意を表わす。

## 参考文献

- 1) H. C. Ludwig ; Weld. J., **38**, 296s (1959)
- 2) R. M. Gage ; Weld. J., **38**, 959 (1959)
- 3) J. A. Browning ; Weld. J., **38**, 870 (1959)
- 4) R. J. Richard and L. B. William ; ARSJ., **31**, 4, (1961)
- 5) W. S. Brzozowski and Z. Celinski ; Nuclear Eng. ; **10**, 293 (1962)
- 6) A. B. Osborn ; J. Sci. Instr. ; **36**, 317 (1959)
- 7) L. E. Owen ; Appl. Spectrosc. ; **15**, 150 (1961)
- 8) C. F. Knopp, C. F. Gottschlich and A. B. Cambel ; J. Quant. Spectrosc. Radiant. Transfer, **2**, 297 (1962)
- 9) R. H. Tourin ; J. Heat Transfer, 61—WA—170, 164, (1962)
- 10) L. I. Grechikhin and V. D. Shimanovich ; Optics and Spectrosc. **13**, 358, (1961)
- 11) F. Wendler ; E.T.Z., A **83**, 773, (1962)
- 12) F. Wendler ; E.L.Z., B **15**, 6, (1963)
- 13) D. E. Rosner ; Trans. ASME, 61—WA—160, 386, (1962)
- 14) J. B. Wilkinson and D. R. Milner ; Brit. Weld. J., Z, 115, (1960)
- 15) E. C. Rollason ; Brit. Weld. J. ; Z, 71, (1960)
- 16) D. R. Milner, G. R. Salter, J. B. Wilkinson ; Brit. Weld. J., Z, 73 (1960)
- 17) J. A. Browning and G. A. Klasson ; Mech. Eng., **83**, (1961)
- 18) H. Edels ; P.I.E.E. **108**, 55, (1961)
- 19) 坂部昭, 秋山修, 佐藤博 ; 日立評論, **44**, 854, (1962)
- 20) 寺沢義雄 ; 日立評論, **44**, 1677, (1962)
- 21) 坂部昭, 佐藤博, 秋山修 ; 日立評論, **45**, 1379 (1963)
- 22) 館野晴雄, 齊藤健 ; 応用物理, **32**, 65 (1963)
- 23) 中村武三, 日本機械学会誌, **64**, 1328, (1961)