

交差電極形プラズマ発生器

佐伯節夫*・大崎 堅*

Study on the Cross Electrode Type Plasma Generator

Setsuo SAEKI and Katashi ŌSAKI

Abstract

This report described the characteristics of the cross electrode type plasma jet generator, which has been consisted of the cross electrode to lay in the nozzle constrictor and of center electrode.

Experiments were made at the arc current range from 20 to 60A for straight polarity jet and 10 to 30 A for reverse polarity jet in Argon gas flow rate from 15 to 40 l/min.

The results of this experimental investigation were as follows :

The arc voltage versus arc current characteristics for straight polarity jet were drooping characteristics, until the arc current was 40 A, but for over 40 A, it was positive characteristics. On the other hand, for reverse polarity jet, it was always drooping one. As the gas flow rate increased, the arc voltage of both jets was increased. The arc voltage of reverse polarity jet was higher than straight polarity jet.

For straight polarity jet, the ratio of the sum of the cross electrode loss and the nozzle loss to the total loss was rang from 70 to 80%, and the ratio of the cross electrode loss to the former was rang from 70 to 84%. But for reverse polarity jet, the cross electrode loss was down fifth value of straight polarity jet.

The thermal efficiency of this generator was rang from 65 to 85% as the general plasma jet generator, and increasing the gas flow rate, it was increase.

The mean temperature was below 3015°K.

The arc mode of straight polarity jet was indicated the quasisteady mode or steady mode, but for reverse polarity jet, it was always indicated the oscillation mode.

At the same power input, the plasme flame length of reverse polarity jet was longer than that of straight polarity jet and so the form of reverse polarity jet was more sharp. Increasing the arc current and the gas flow rate, the core section and the outer flame of straight polarity jet was expanded, but the reverse polarity jet, the core section was only expanded.

1. ま え が き

一般の直流プラズマ発生器は、棒状陰極とノズル形陽極間に点弧したアークに冷却ガスを吹きつけてピンチを与えプラズマジェットを形成させる正極性アーク方式¹⁾をとっている。この場合、ガス流の作用によってアーク柱にねじれ^{2),3)}を生じ易く、陽極点もまたノズル電極面上で高速度の運動^{4),5)}を強制されるため、アークモードはゆらぎ⁶⁾を含むことが多いが、ジェットの巨視的安定度⁷⁾はほぼ満足される。これに対し

て、ノズル電極部を陰極として動作させる負極性アーク方式⁸⁾においては、陰極点の定着のため放電の安定に難点⁹⁾があり、電極損傷の発生率も高い。

いま、円筒形アーク室の中心線上に棒状のセンタ電極を保持し、これに対向してノズル集束側面から軸線に垂直に直交棒電極を挿入し、両電極チップ間にアークを発生させ、ガス流で集束安定化をはかると、高温プラズマジェットは直交電極先端を通過してノズルから噴出する。このような交差形電極¹⁰⁾配置によると、陰極点、陽極点とも固定化された状態でそれぞれ

* 電気工学科

の責務を果たすので、ゆらぎはアーク柱部に限定され、アークの極性によらず良質のプラズマジェットが得られる。本発生器は交流アークの再点弧条件^{11),12)}を満足し、交直両用に使用可能¹³⁾であるが、本報告では直流正極性および負極性における特性について述べる。

2. 実験装置

各種の標準形ノズル陽極(内径5mm)を有するアルゴンプラズマ発生器のノズル内面上の陽極点直径を高速撮影画像から解析すると、アーク電流100Aに対して1.2~2.0mmと認められる。従ってアーク電流100Aを基準とする交差電極直径は1.6~3.0mmに選定した。

ノズルは内径5mm、集束部長7mmの前面フラット形で、その前端より3mm後退した位置にセラミック絶縁管に収めた交差電極を固定し、その先端部をノズル軸線にそろえた。なお交差電極は2%トリウム入タンタム棒を、またセンタ電極は3mmφ、1.75

%トリウム入タンタム棒を用い、正極性および負極性アークに対して放電極機能を保つようにした。

センタ電極部、アーク室部、ノズル部相互の絶縁はテフロンを用い、交差電極とノズル間の絶縁はマイカシートおよび耐熱性セラミック管によった。センタ電極、アーク室、ノズル、交差電極はそれぞれ水冷を行ない、冷却水量とその温度上昇より、各部熱損失を算出した。発生器の構造はFig. 1に示す通りである。

作動ガスは純度99.99%アルゴンを使用し、アーク室接線方向に流入してアーク柱に直交した渦流を構成する渦流集束と、後方よりセンタ電極に沿って流れ、アーク柱をシース状に包囲する軸流集束の両方式とも適用可能とした。

アーク電流供給は無負荷電圧148Vの直流電源より安定抵抗を通して行ない、電流範囲は10~60Aで、ガス流量は15~40 l/minとした。電極間隙は2.5mmである。

ジェットコア部のパワーを調べるため、ノズル中心軸上で出口より2mm前方のジェット放射光を光電管7215Aにより検出記録した。

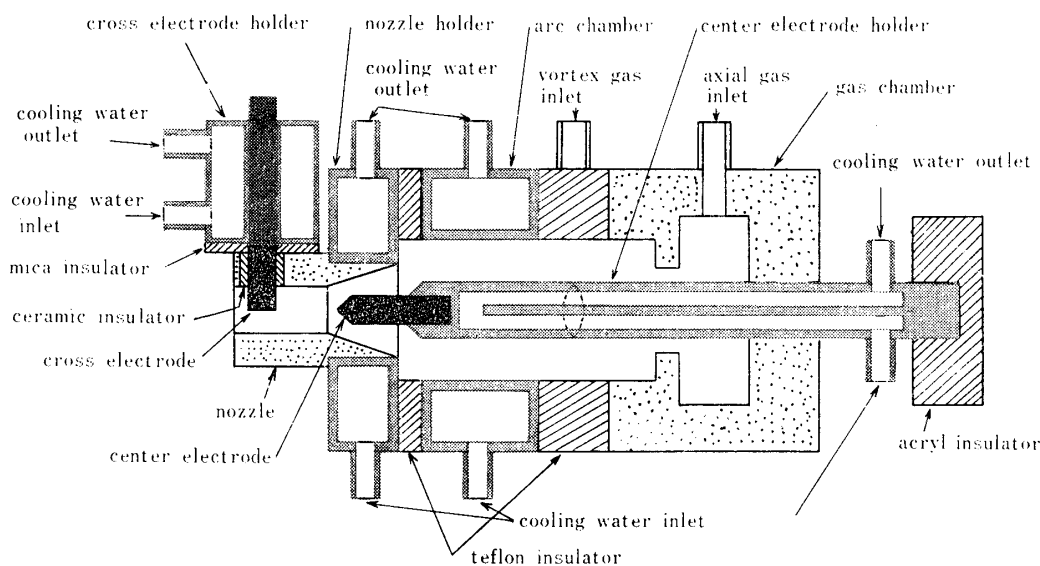


Fig. 1 Sectional view of the cross electrode type plasma jet generator

3. 実験結果と考察

3.1 アーク電圧特性

正極性および負極性ジェットに対するアーク電圧対電流の関係をFig. 2に示す。正極性ジェットは電流40Aを境として垂下特性から正特性に転ずる。電圧垂下率、上昇率は渦流集束に対してそれぞれ0.2V/A、0.06 V/Aとなり、軸流集束に対しては同じく0.15~0.22 V/Aおよび0.2 V/Aと与えられる。電圧垂下率

は渦流軸流ともほぼ等しいが、特性転移後の上昇率は軸流が渦流の約2倍となる。またアーク電圧値は渦流集束の方が高いが、電流が増加するにつれてその差はやや減少する。渦流はアーク柱と直角な流れの成分を持ちアーク柱周辺を接線方向に旋回しながら冷却するため、アーク柱をシース状に包んで流れる軸流に比してアーク集束能力が大きくアーク電圧が高く示される。

通常のノズル形陽極を有する正極性ジェットの電圧電流特性と比較すると交差電極配置の場合のマーク電圧は、ガス流量20 l/minにおいて15~30%、30 l/minにおいて約15%、それぞれ低下する。通常の発生器ではこの電流領域において垂下特性を維持するが、交差電極形正極性ジェットは比較的小電流の範囲に電圧垂下から上昇への転移を生じることは、アークに対するガス流の集束が、既に飽和に達したことを意味する。交差電極においてこの現象が比較的小電流において生ずる原因は、ノズル側面から挿入された交差電極によるガス流の乱れに起因するアーク集束度の不足と、ノズル側の交差電極上のスポットが固定化されているため、ノズル陽極を用いた場合のようにスポットの運動にともなうアークの伸びが生じない故と考えられる。

負極性ジェットにおける電圧垂下率はガス流量20 l/minに対して約0.26V/A、30 l/minに対して約0.11 V/Aであり、その値は正極性より最大1.3V程度高い。正負両極性によるアーク放電路の成立条件はほぼ等しいと考えられるので、アーク電圧の差はアーク柱内の電位傾度の相異に起因する。

負極性ジェットのアーク電圧をノズル陽極形ジェットと比較すると、ガス流量20 l/minにおいて10%程度低く、30 l/minではほぼ等しくなる。なお正極性ジェットに比較して負極性の電流上限が低いのは交差電極側の損傷によるためである。

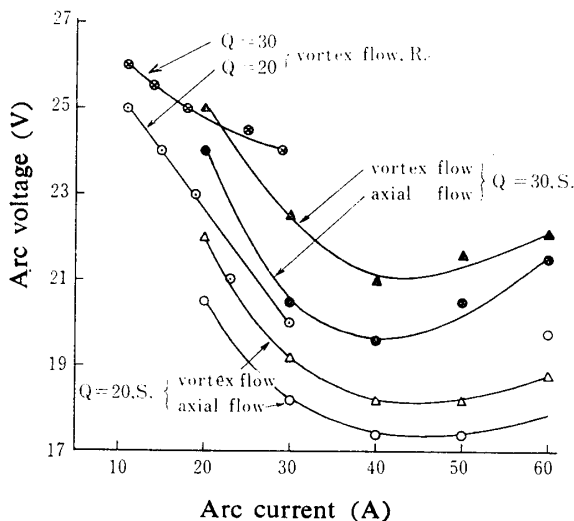


Fig. 2 The arc voltage-current characteristics
 Q : Argon gas flow rate (l/min)
 S : Straight polarity jet, R. : Reverse polarity jet

アーク電流40Aに対する正極性ジェットと、同じく23Aに対する負極性ジェットのアーク電圧とガス流

量の関係を Fig. 3 に示す。アーク電圧に与えるガス流量の効果はほぼ直線的で、その上昇率は正極性ジェットに対して渦流および軸流集束ともほぼ等しく約0.17V/l、負極性に対して0.2V/lとなる。この値はフラット形ノズル陽極を用いた渦流ジェットの電圧上昇率0.4V/lより低く、テーパ付ノズル陽極による値とほぼ等しい。

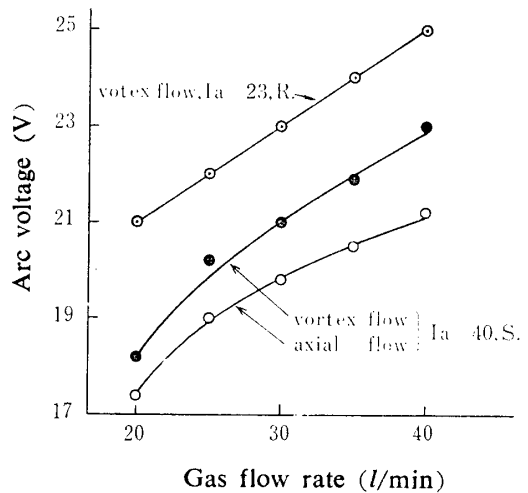


Fig. 3 The arc voltage-gas flow rate characteristics

- I_a : Arc current (A)
- S. : Straight polarity jet
- R. : Reverse polarity jet

3.2 エネルギーバランス

一般にプラズマ生成に消費される正味のアーク入力、供給される全電気入力より電極部、アーク室部など各部の冷却損失を差し引いて求められる。効率は全電気入力の中でプラズマ発生に直接に役立つ正味のアーク入力占める比率であり、平均エンタルピはガスの質量当りの投入エネルギーより、平均温度は平均エンタルピとガスの比熱より求められる。以下にこれらの関係式を示す。

正味のアーク入力 W [W] は

$$W_p^* = V_a I_a - \frac{JC}{\Delta t} \{ q_{cr}(t_{cr} - t_0) + q_n(t_n - t_0) + q_a(t_a - t_0) + q_{ce}(t_{ce} - t_0) \} \quad (1)$$

但し V_a : アーク電圧 [V], I_a : アーク電流 [A], J : 熱の仕事当量 [4.18 J/cal], C : 冷却水の比熱 [1 cal/g°C], Δt : 測定時間 [60 sec], q_{cr} , q_n , q_a , q_{ce} : それぞれ交差電極部、ノズル部、アーク室部、センタ電極部の冷却水量 [g], t_{cr} , t_n , t_a , t_{ce} : 同上各部の冷却水出口温度 [°C],

t_0 : 冷却水入口温度 [°C]

発生器の熱効率 η [%] は

$$\eta = \frac{W_p}{V_a I_a} \times 100 \quad (2)$$

プラズマジェットのアーク平均エンタルピ H_m [kcal/kg] は

$$H_m = \frac{W}{m} \quad (3)$$

但し m : ガスの質量流量 [g/sec]

プラズマジェットのアーク平均温度 T_m [°K] は

$$T_m = \frac{H_m}{C_g} + 273 \quad (4)$$

但し C_g : ガスの比熱 [kcal/kg°C]

である。

これらの関係を用いて軸流集束に対する各特性値を示すと Fig. 4~Fig. 7となる。

正極性ジェットの交差電極部損失およびノズル損失

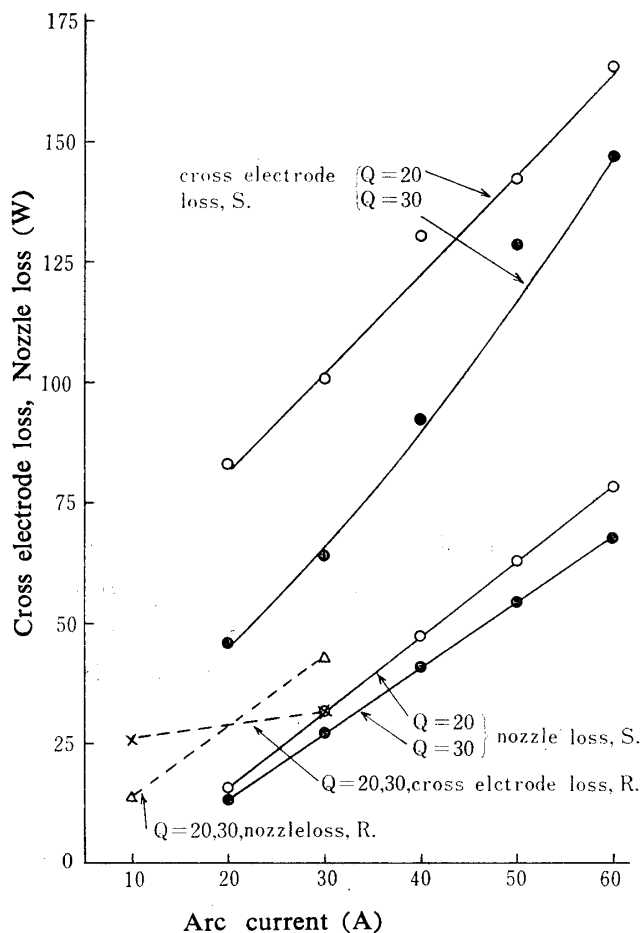


Fig. 4 The cross electrode loss and the nozzle loss - arc current characteristics for axial flow

Q : Argon gas flow rate (l/min)

S. : Straight polarity jet

R. : Reverse polarity jet

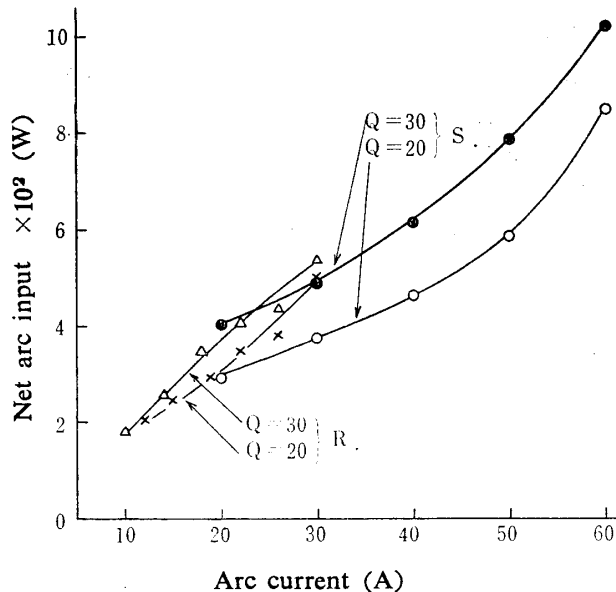


Fig. 5 The net arc input-arc current characteristics for axial flow

Q : Argon gas flow rate (l/min)

S. : Straight polarity jet

R. : Reverse polarity jet

は Fig. 4 に示すように電流増加とともにほぼ直線的に上昇し、電極部に対する上昇率はガス流量20 l/min で約20.8 w/A, 30l/min で24.8 w/A となり、ノズル部に対しては前者の30~85%と低下する。交差電極部にはアーク陽極端が付着するため、電極部損失はノズル部損失の約2~4倍の値を示し、両者を合わせた前部電極部損失は発生器全損失の71~84%を占める。これはまた通常のノズル形陽極における同条件下の損失に較べて74~84%と低下している。また電流流入を伴う交差電極部損失は、前部電極部に伝達される熱エネルギーの70~84%を占めていることはノズル形陽極の特性¹⁵⁾と一致する。

Fig. 5に明らかなようにガス流量を増大すると、正味アーク入力が約35%増大するにもかかわらず、冷却効果のため交差電極部損失、ノズル部損失はともに低下する。

一方負性ジェットにおいては、交差電極はアーク陰極端として動作するため損失は極めて小さく、25~31W の範囲内に収まり、正極性の損失の1/5以下となり、セントアーク部損失とほぼ等しくなる。この場合前部電極部損失は正極性の場合の20~60%に収まる。

発生器の熱効率は Fig. 6 に示すように65~85%の範囲内にあり、正極性ジェットは電流増加とともにやや低下し、再び上昇に転ずる。一般にプラズマ発生器の熱効率はガス流量の増加につれて上昇するが、本発

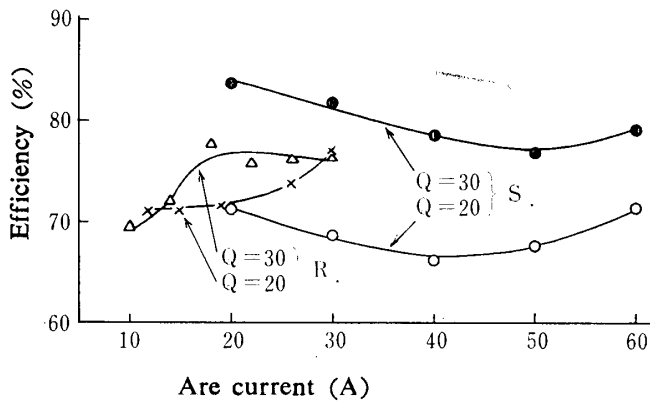


Fig. 6 The efficiency-arc current characteristics for axial flow

Q : Argon flow rate (l/min)
 S. : Straight polarity jet
 R. : Reverse polarity jet

生器の場合はセンタ電極，交差電極間の極性により影響される。ガス流量20l/minでは正極性の効率60~73%に対して負極性が71~77%と高く，30l/minの流量では正極性が78~85%に上昇して負極性の70~78%を上回る。なお渦流集束ジェットは軸流集束に比

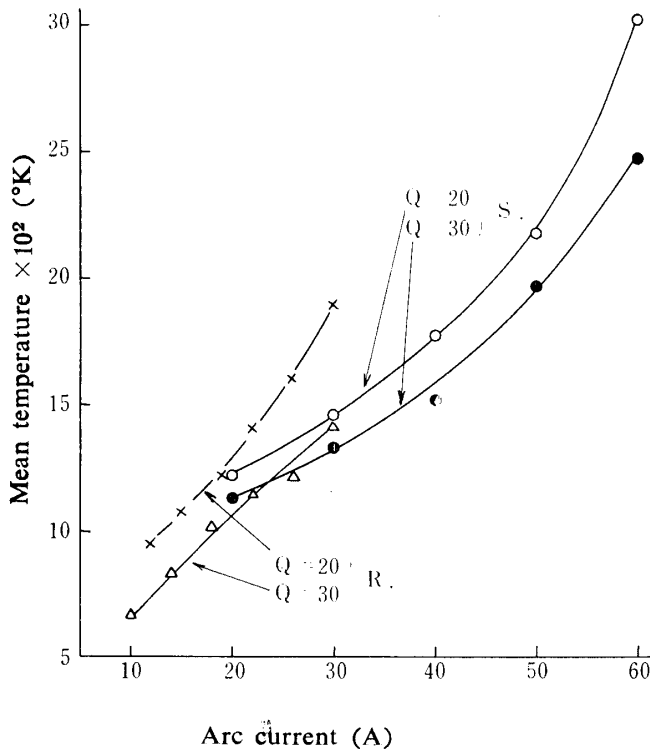


Fig. 7 The mean temperature-arc current characteristics for axial flow

Q : Argon gas flow rate (l/min)
 S. : Straight polarity jet,
 R. : Reverse polarity jet

して低い。正極性ジェットの効率はガス流量20l/minではノズル陽極を用いた場合よりやや低いが，30 l/minにおいては優れている。

ジェット平均温度は Fig. 7 に示すように正味アーク入力が増加とともに上昇する。同一電流に対する平均温度は，アーク電圧が高かつ損失の少ない負極性ジェットが高くなる。正極性ジェットの平均温度を同条件下のノズル陽極形ジェットと比較すると流量20 l/min で15~30%，30 l/min で15~25%低下しているが，電流が増加するにつれてその差は縮まる。本実験範囲内での最高温度は正極性ジェットにおけるガス流量20 l/min，電流60Aで3015°Kで，同一動作条件下の通常形ノズルによるジェットの平均温度3500°Kに接近する。

3.3 アークモード

Fig. 8 に通常のノズル陽極形ジェットと交差電極形ジェットのアークモードを示す。通常アークモードは陽極点の運動を含めたアーク柱の動きを示し，ガス流量と放電電流の関係に依存する。

図中(a)~(c)はノズル陽極形ジェットの放電モードが電流増加とともに規則的なのこぎり波状振動モード，継続振動モード，定常モードへと変化する様を示す。またガス流量を60 l/mに増大すると(d)のように振動数，振巾が増大し，20 l/minにおける振動数5 KHzの約2.4倍となる。

交差電極形ジェットにおいては，アーク両極端が固定化されているため，アークモードに特長があり，正極性に対して(e)，(g)のようにアーク電流が小さい場合，または(h)のようにガス流量が増大した場合にはランダム継続振動モードを示し，電流が増大すると(f)のように振動数，振巾が減少し準定常または定常モードとなる。一方負極性では，振動現象が正極性より著しいが，電流を増大すると(i)，(j)のように正極性と同様に振動現象が減少する。しかし流量増加による影響は軽微であり，振巾はほぼ0.15 V一定で，振動数もほとんど変化しない。これらの現象は，交差電極がアーク陽極端となった場合と陰極端となった時に応じて働く電極の機能上の差が主にアークモードに表われる故と考えられる。

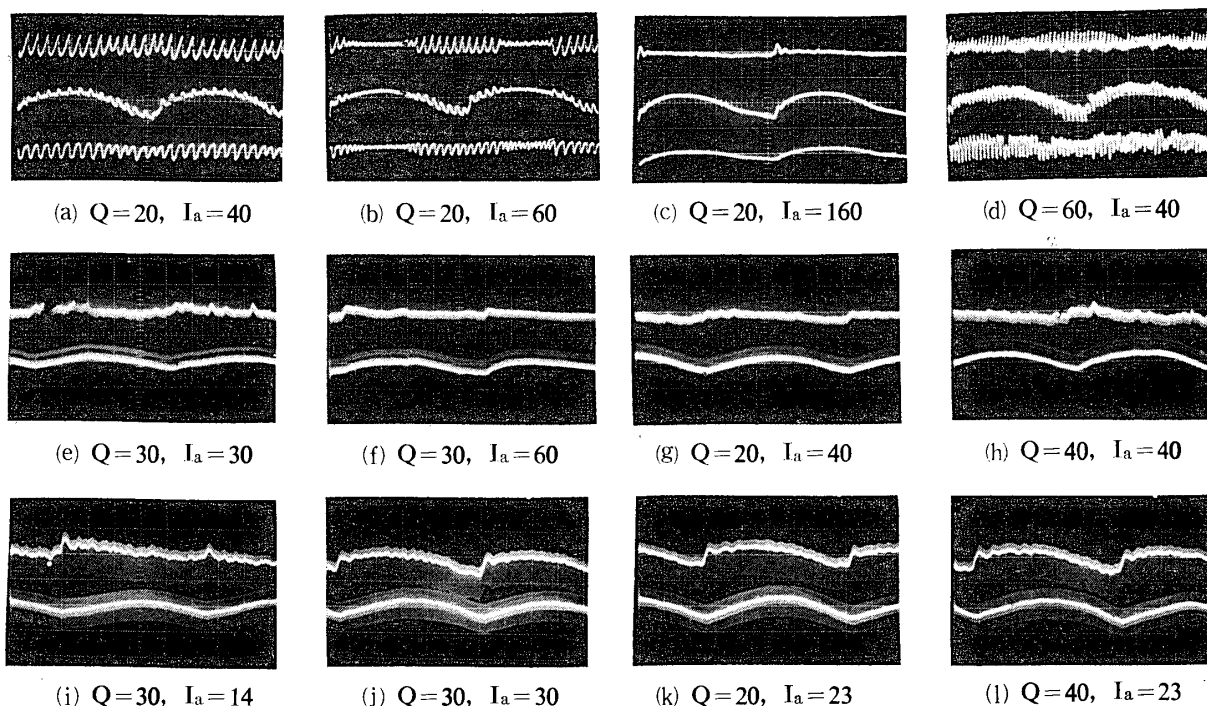


Fig. 8 The oscillogram of arc mode for axial flow

(a)~(d) : N-11 Nozzle electrode type, (e)~(h) : Straight polarity jet

(i)~(l) : Reverse polarity jet, Q : Argon gas flow rate (l/min)

I_a : Arc current (A), Sweep velocity : 500 μs/div.

Upper trace : Arc voltage wave form ; (a)(b)(d) : 10v/div.

(c)(i)~(l) : 1 v/div., (e)~(h) : 2 v/div.

Middle trace : Arc current wave form ; (a)~(d) : 20v/div.

Lower trace : Light intensity wave form of jet ;

(a)~(e)(g)(h)(k)(l) : 0.1 v/div., (f)(i) : 0.05v/div.

(j) : 0.2 v/div.

3・4 プラズマジェット

交差電極形ジェットは一般に負極性の場合が集束度良好で鋭く伸長するとともに、ジェットからの放射光強度も大である。ガス流量 20 l/min, アーク電流 30 Aにおけるジェット全長, コア部長は, 正極性の場合 12mm, 7.6mmで, 負極性では 18.3mm, 11.1mmとなり, 負極性ジェットの放射光強度は正極性ジェットの約4倍となる。

電流増加によるジェットの伸長は正極性ジェットに対してはコア部とともに外炎部の伸びとなって表われるが, 負極性ジェットでは主にコア部に変化が表われる。

ガス流量の増加は電流40Aの正極性ジェットを膨脹させ, ゆらぎが大きくなるが, 電流23Aの負極性ジェットは流量15 l/minより40 l/minへの増加により

ジェット径が約20%減少し, 集束効果が強められる。ジェット全長の伸びは正負両極性ともガス流量変化に大きくは依存しないが, コア部長は正極性ジェットに対しては減少し, 負極性ジェットに対しては伸長する傾向がある。

同一入力 of ジェットにおいて, 負極性の場合のジェット全長は正極性より16~30%大で, ジェット径は正極性より10%以上圧縮され鋭さを増す。一方正極性ジェットは比較的ゆらぎも少なく, 交差電極損傷も少ないので, 電流許容範囲が広く, プラズマジェットが安定である。プラズマジェットの発生状態をFig. 9に示す。

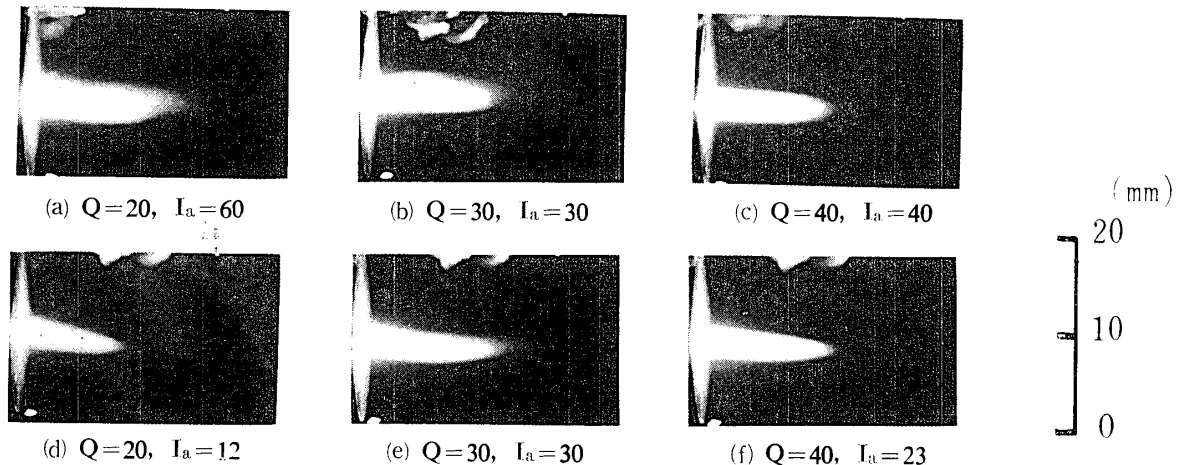


Fig. 9 The photograph of plasma jet for axial flow

(a)~(c): Straight polarity jet, (d)~(f): Reverse polarity jet

Q: Argon gas flow rate (l/min)

Ia: Arc current (A)

4. まとめ

以上交差電極形プラズマ発生器による直流正極性および負極性ジェットの特性を求めた。

結果を要約すると次の通りである。

- (1) 交差形電極配置のためアークスポットが固定化され放電形態が通常形に比して異なるため、特性に変化が生ずる。

電流30A以下の負極性ジェットおよび電流40A以下の正極性ジェットの電圧電流特性は垂下特性を示し、正極性ジェットは電流、40A以上で正特性に転じる。また負極性ジェットの電圧が正極性より高くなる。

一般に渦流集束が軸流集束よりアーク電圧が高いが、電流の増加につれてその値は接近する。ノズル陽極形ジェットの有する電圧に比して正極性ジェットは15~30%低下する。

ガス流量増加によるアーク電圧上昇率は正極性ジェットで0.17V/l、負極性ジェットで0.2V/lとなり、ほぼ直線的に上昇する。

- (2) 交差電極部およびノズル部における損失は正極性ジェットの場合、発生器全損失の71~84%を占め、さらにその70~80%が電流流入を伴う交差電極部に伝達される。一方負極性ジェットにおける交差電極部損失は正極性の場合の1/5以下となり、ノズル部損失を加えた場合も対応する正極性の値の20~60%となる。

- (3) 発生器の熱効率は65~85%の範囲内にあり、通常のノズル陽極を用いた場合と同等であり、低流

量では負極性が良く、流量を増すと正極性が優る。

- (4) ジェット平均温度は、同一動作条件下においてはアーク電圧が高く、熱損失の少ない負極性ジェットが高い。正極性ジェットの平均温度は同一動作条件下のノズル陽極形ジェットに比較すると15~30%低いが、電流を増加するとその値は接近する。本実験条件内での最高温度はガス流量20 l/min、電流60Aの正極性ジェットの示す3015°Kである。

- (5) 正極性ジェットにおけるアークモードは低ガス流量では、常に準定常あるいは定常モードを示し、高流量ではランダム継続振動モードを呈する。

一方負極性ジェットは、正極性に比して振動現象が著しいが、ガス流量、アーク電流による影響は軽微と見なせる。

- (6) プラズマジェットは一般に負極性ジェットが集束度良好で鋭く伸長する。

電流を増加する場合負極性ジェットではコア部の伸びが著しいが、正極性ジェットではコア部と外突部がともに伸長する。

一方正極性ジェットはゆらぎが小で、交差電極損傷も少なく、電流許容範囲が広いため安定したプラズマジェットの発生が可能となる。

本実験は電極損傷防止のため小電流アークについて行なったが、交差電極の形状、材料、冷却法を改善することにより所要の入力増加をはかりうると考えられ

る。

常に御指導を賜わる九州大学、赤崎正則教授に厚く謝意を表わす。

参 考 文 献

- 1) B. Gross, B. Grycz & K. Miklossy: "Plasma Technology" ILIFFE Books, (1968), P. 257
- 2) G.R. Jordan & L.A. King: Brit. J. Appl. Phys., **16**, 431 (1965)
- 3) J. Lawton: Brit. J. Appl. Phys., **18**, 1095 (1967)
- 4) S.A. Wutzke, E. Pfender & E.R.G. Eckert: AIAA J., **6**, 1474 (1968)
- 5) H.C. Ludwig: Instrumentis & Control Systems, **41**, 81, (1968)
- 6) J.K. Harvey, P.G. Simpkins æ B.D. Adcock: AIAA J., **1**, 714 (1963)
- 7) G. Krülle: Phenomena in Ionized Gases, **II**, 355, (1966)
- 8) 岡田 実, 荒田吉明: プラズマ工学, (1965), P. 348
- 9) 岡田 実, 他: 超高温研究資料, **4**, 8 (1960)
- 10) 佐伯節夫, 大崎 堅: 昭45電気四学会九州支部大会講演論文集, 303 (1970)
- 11) 佐伯節夫: 昭45電気四学会九州支部大会講演論文集, 302 (1970)
- 12) 佐伯節夫, 大崎 堅, 牧 元: 昭46電気四学会九州支部大会講演論文集, 204 (1971)
- 13) 佐伯節夫, 大崎 堅: 昭45電気四学会中国支部大会講演論文集, 20213 (1970)
- 14) 佐伯節夫, 牧 元: 昭43電気四学会連合大会講演論文集, 173 (1968)
- 15) K.T. Shih & E. Pfender: AIAA J. **8**, 211, (1970)

(昭和48年9月17日受理)