

## 研究論文

## 渦流集束型ノズルを持つプラズマジェット発生器の動作特性

山口大学工学部 大崎 堅、福政 修  
 大阪大学溶接工学研究所 小林 明  
 山口大学名誉教授 佐伯節夫

## Operating Characteristics of a Plasma Jet Generator with a Vortex Gas Constriction Type Nozzle

Katashi OSAKI, Osamu FUKUMASA, Akira KOBAYASHI\* and Setsuo SAEKI\*\*

Faculty of Engineering, Yamaguchi University

\* Welding Research Institute, Osaka University

\*\* Emeritus Professor of Yamaguchi University

A newly designed plasma jet generator with a vortex gas constriction type nozzle, in which the forced-elongated arc was constricted locally by a vortex gas flow, has been developed. The effects of a vortex gas flow rate on electric field intensity of the arc column, the thermal efficiency of this generator and the temperature of the plasma jet were studied experimentally. It was found that the thermal efficiency was improved effectively with increasing the vortex gas flow rate and the temperature distributions in the plasma jet were controlled easily by varying ones.

## 1. まえがき

プラズマジェットは大気圧から低圧力にわたる広い圧力範囲で10,000K以上の高温と高速、高活性を持ち、最近ではこれを熱源としたプラズマスプレイ法による傾斜機能材料、超電導膜、ダイヤモンド膜の作製やC<sub>60</sub>フラレンの生成等が行われ、これらの生成メカニズムの実験的、理論的解析がなされている<sup>1)~4)</sup>。このようなプロセッシングにおいては、生成プラズマの量的、質的(温度、密度、組成等)条件を精度良く制御でき、しかも安定なプラズマ流を長時間維持しうるプラズマ源が必要であり、これまでに大出力、大容積化を指向した空洞電極型プラズマ源<sup>5)</sup>、ガストネル型プラズマ源<sup>6)</sup>、ハイブリッド型プラズマ源<sup>7)</sup>(直流プラズマトーチと高周波誘導プラズマトーチとの組合せ)等のプラズマ源が開発され、プロセッシングに応用した場合の諸特性についての報告がされている。

筆者らは、低電流域(アーク電流 300A以下)において高出力・高安定・高制御化を目指し、アークの閉じ込め方法、電極形状や配置などを改良した強制伸長アーク型<sup>8)</sup>や局所アーク圧縮型<sup>9)</sup>、直流ジェットを外周部からトロイダル状交流アークによって追加熱を行うハイブリッド型<sup>10)</sup>等のプラズマ源を開発し、それらの諸特性を明らかにすると共にプロセッシングへの適応性についても検討を加えてきた。特に、絶縁集束ノズルを用いる強制伸長アーク型プラズマ源は、コンパクトであるにもかかわらず高出力で安定性の優れたジェット発生が可能であるが、更に絶縁集束部出口側のアーク柱を効率よく閉込めると生成プラズマ流の質的改善を計りうる事が判明した<sup>11)</sup>。

このため、本研究では絶縁集束ノズルの出口側に高速回転ガス流(渦ガス流)発生器を設けアーク柱の一部に局所集束を加える方式の渦流集束型ノズルを持つプラズマジェット発生器を試作したので、以下にこの発生器の動作特性、特に渦ガス流量がアークの電氣的、熱的特性やジェットの形状及び温度分布プロフィールに及ぼす影響について述べる。

## 2. 実験装置及び実験方法

本研究で試作した渦流集束型ノズルを持つプラズマジェット発生器の構造の概略図をFig. 1に示す。渦流集束型ノズルは銅製で、先端に内径5 mm、軸長7 mmの陽極部を有し、これに続いて渦ガス流発生器を含む軸長26.5 mmの絶縁集束部が接続されている。渦ガス流発生器は内径6 mm、軸長7.5 mmで、内壁面上には矩形断面(0.5 mm×4.5 mm)のガス噴射口4個が対称に配置してあり、内部に軸対称性の良い高速渦流を形成する。絶縁集束部は陽極側から軸長3 mmのディスク、渦ガス流発生器、3個のディスク(軸長3、7、3 mm)をカスケード接続して構成されている。なお、ディスクの内径は5 mmであり、陽極部、渦ガス流発生器及び各ディスクは厚さ0.5 mmの窒化ほう素板で絶縁されている。従って、絶縁集束部内アーク柱の出口、中央、入口に位置する軸長3 mmのディスクの電位を測定することにより、絶縁集束部の出口側及び入口側アーク柱の平均電界強度を求めうる。

陰極は先端を90度に削った直径5 mmの2%トリウム入りタングステン棒で、絶縁集束部入口から棒陰極先端までの距離は2 mm一定とする。従って、電極間距離は28.5 mmである。なお、本発生器は前記ノズル部以外は一般に用いられるプラズマジェット発生器の構造を踏襲している。陽極部、渦ガス流発生器、各ディスク、テーパ部、アーク室部及び陰極支持部に対してはそれぞれ個別に水冷し、各部熱損失を求めらる。

アーク発生用電源は無負荷電圧160 V、容量50 kVAの直流電源より安定抵抗を通してアーク電流60~160 Aを供給した。作動ガスは純度99.99%のアルゴンをを用い、流入圧力5 kg/cm<sup>2</sup>、流量20 l/minでアーク室後方のガス流入室に渦流として流入させる。また、渦ガス流発生器には作動ガスと同種、同圧で0~60 l/minを送給する。

ジェット側面からスチル撮影を行うと共に、ノズル出口から6 mm離れた位置のジェット断面に対し分光測定を行い、アルゴン中性粒子線415.9 nm及び696.5 nmの強度比から温度を求めた。なお、ジェットは光学的に薄く、軸対称であり、局所熱平衡状態にあるものと仮定した。

## 3. 実験結果と考察

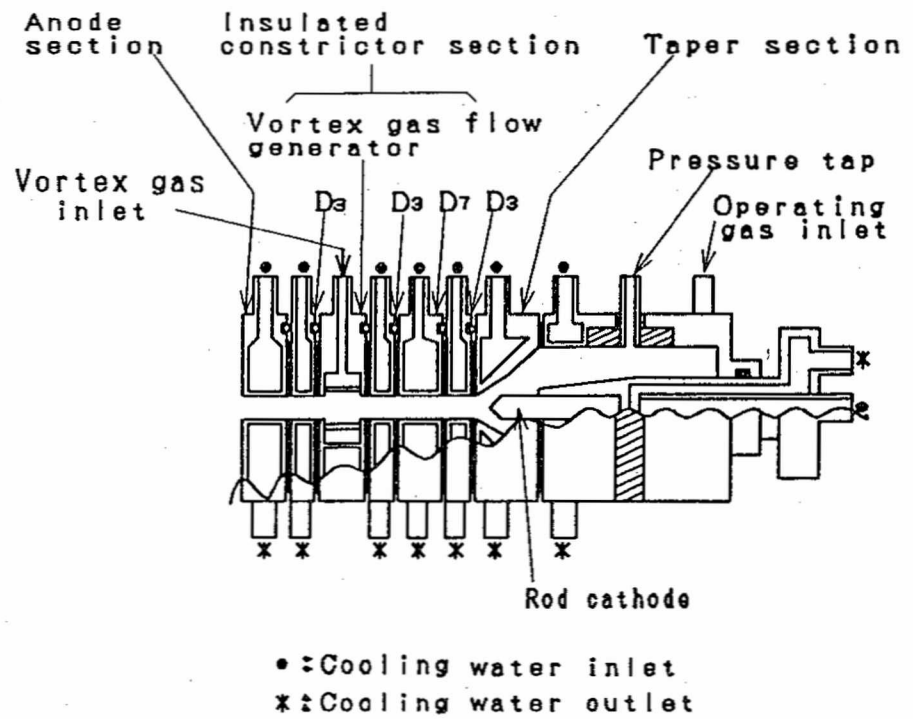


Fig.1 Schematic view of a plasma jet generator with a vortex constriction type nozzle.

3. 1 電気的特性

渦流集束型ノズルによる局部集束アークの電圧対電流の関係はFig. 2のように上昇特性を示す。電圧上昇率は、渦ガス流量20、40 l/minに対し作動ガス流量20 l/minではそれぞれ0.22、0.24V/Aと渦ガス流を付加しない場合の20~30%増となる。また、アーク電圧値も渦ガス流量の増大に伴い上昇する。このような顕著な上昇特性を示すのは、電極点が固定されておりアーク長が一定に保持されていること並びに局部集束されていることを考慮すると、アーク柱の膨張及び導電率の増加が抑えられているゆえと考えられる。なお、本ノズルと同形の通常型ノズルによるアーク特性は、この電流範囲では垂下特性を示す。

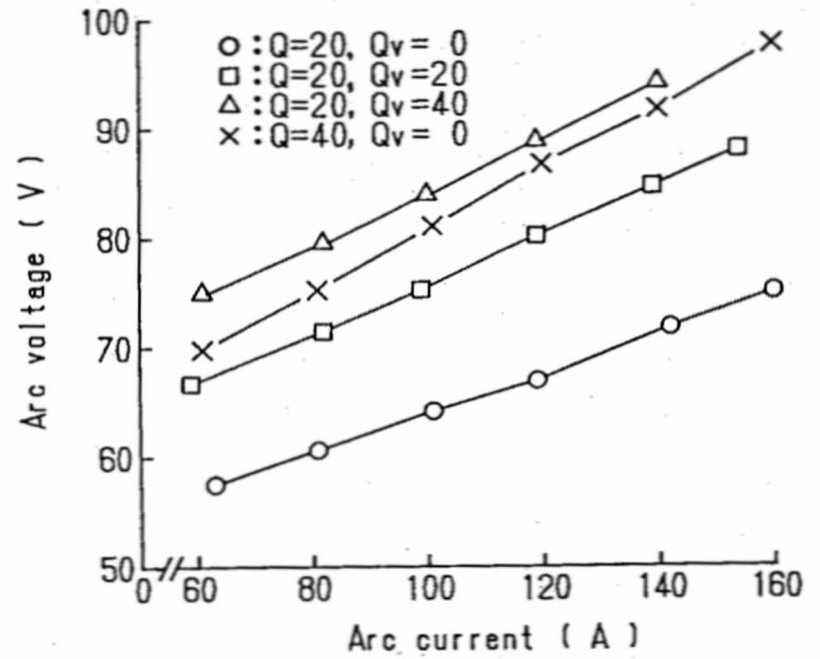


Fig.2 Arc voltage-arc current characteristics. Q: working gas flow rate (l/min), Qv: vortex gas flow rate (l/min).

作動ガス流量が増加した場合のアーク電圧電流特性は作動ガス流量20 l/minにおける特徴を維持したまま電圧が上昇し、この傾向は渦ガス流付加時も同様である。従って、本論文ではアーク発生条件として作動ガス流量20 l/min、アーク電流 100 Aとし、渦ガス流量がアーク柱及びジェットの諸特性に及ぼす影響について述べる。

絶縁集束部出口側及び入口側におけるアーク柱の平均電界強度が渦ガス流量によって受ける影響をFig. 3に示す。出口側アーク柱の平均電界強度は渦ガス流量が零では14.3V/cmと入口側のその76.9%の値であるが、渦ガス流量が増し30 l/minを越えると 3.7V/cm/(10 l/min) とそれ以下の領域のほぼ2倍の割合で上昇し、最大29.7V/cmに達すると共に入口側の電界強度を上回っている。一方、入口側アーク柱の平均電界強度は18.6~21.2V/cmの範囲にあり、渦ガス流量の増加により微増する。これらより渦ガス流を付加すると、作動ガス流によって絶縁集束部内に集束安定化されているアーク柱を乱すことなくアーク集束能力が増強でき、しかも出口側アーク柱の

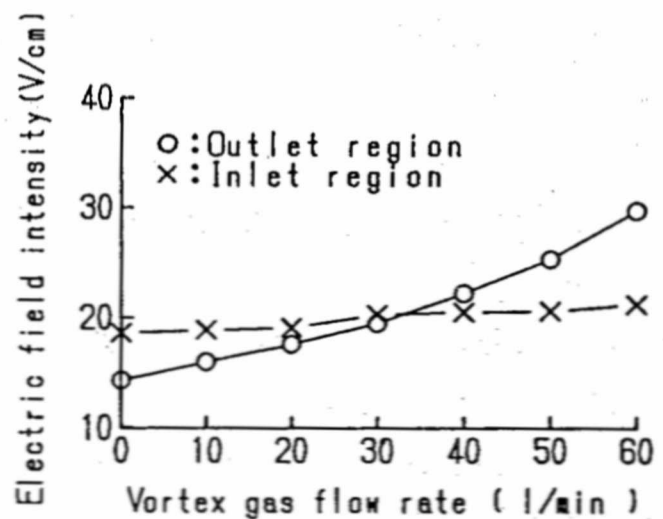


Fig.3 Electric field intensity of the constricted arc column vs. vortex gas flow rate. Conditions are as follows; arc current is 100 A and working gas flow rate 20 l/min.

平均電界強度を改善でき、低電流域においてアーク入力が増大を有効に行うことが明らかとなった。

アーク電圧と渦ガス流量の関係は上記平均電界強度の特性と同様な傾向を示し、アーク電圧は渦ガス流量が30 l/minを越えると急増し、60 l/minでは零の場合の1.6倍の103.5 Vを維持している。

### 3. 2 熱的特性

渦流集束型ノズルの陽極部、絶縁集束部に対するアークからの熱伝達機構は異なる。陽極部においては、電流により流入する熱エネルギーとエンタルピ対流及び放射による熱エネルギーが伝達され、絶縁集束部にはエンタルピ対流及び放射だけによる熱エネルギーが伝達される。本稿では前者を陽極部熱損失、後者を絶縁集束部熱損失と称す。これら両者熱損失の合計即ちノズル部熱損失はプラズマジェット発生器の全熱損失の約90%を占め、陰極部熱損失及びアーク室熱損失は微弱である。

電流の流入を伴う陽極部熱損失は950~1100Wの範囲にあり、渦ガス流量の増加につれて徐々に減少する。

一方、絶縁集束部熱損失は800~1130Wと渦ガス流付加による変化幅が大きく、渦ガス流量増加に対しては陽極部熱損失の傾向とは逆の傾向を持つ。渦ガス流発生器及び軸長7 mmのディスクの熱損失から求めた単位長さ当たりの熱損失をそれぞれ絶縁集束部出口側及び同入口側の熱損失とし、それらの渦ガス流量依存性をFig. 4に示す。出口側熱損失は渦ガス流量40 l/minで33.3 W/mmと最小の値を示し、以後流量の増加と共に増すが、60 l/minにおいて36.6 W/mmと流量が零の場合の95%となる。渦ガス流を付加すると、前述のように平均電界強度が増大するにも関わらず熱損失が低下する理由は、渦ガス流により出口側アーク柱に対する閉込め及び器壁に対する熱遮断が有効に行われているゆえと推測しうる。これに対し、入口側熱損失は渦ガス流量30 l/minまでは約1.2 W/mm/(10 l/min)と流量に対する変化量も小さいが、40 l/minを越えると5.9 W/mm/(10 l/min)の割合で増加すると共に出口側熱損失を上回り、最終的には出口側熱損失の130%となる。

出口側及び入口側のアーク柱の熱効率も渦ガス流量20、40、60 l/minに対し、前者ではそれぞれ80%、86%、88%と向上し、後者でのそれらは88%、85%、80%と逆に低下する傾向を示すが、いずれの場合においても渦ガス流を付加しない場合の熱効率を上回っている。

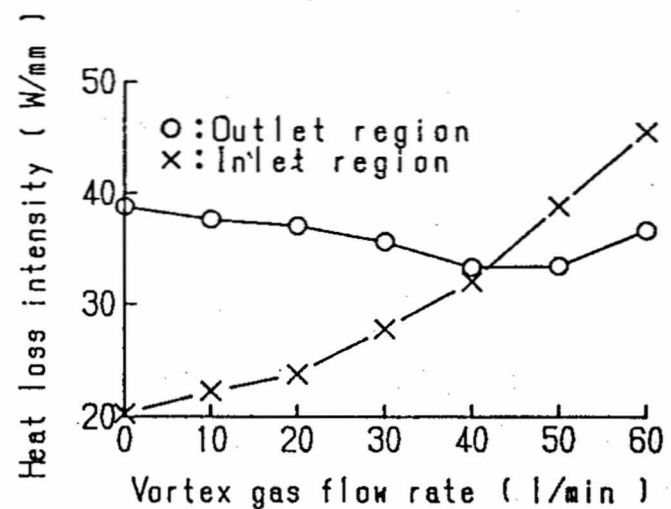


Fig.4 Heat loss intensity of the insulated constrictor section vs. vortex gas flow rate. Conditions are the same as ones in Fig.3.

る。また、電気入力から全熱損失を差し引いた正味アーク入力即ちジェット熱出力は渦ガス流量60 l/minで 7.9kWと流量が零の場合の約 1.9倍に増強されており、渦流集束型ノズルにより高熱出力プラズマジェットを効率良く生成させることが可能である。

3.3 ジェットの形状と分光学的温度

渦ガス流量がジェットの形状に及ぼす影響の一例をFig. 5に示す。ここで $d_2$ 及び $d_{10}$ をノズル出口からの距離がそれぞれ2mm及び10mmの位置におけるジェット直径とする。ジェットは渦ガス流量が零ではその基底部が軸線に平行な側面を持つ円柱状となるが、40 l/minに増すとジェット長が13%減の24mm、 $d_2$ が5.5%増の4.6mm、 $d_{10}$ が11%増の4.4mmの先細円錐状の基底部を持つジェットとなる。更に60 l/minに増すとジェットは伸長して零の場合のそれとほぼ等しい27.4mmとなり、 $d_2$ が3.8mm、 $d_{10}$ が4.9mmの基底部を持つ末広円錐状となり、大体積のジェットを形成する。このような相違は渦ガス流に基づくノズル噴出時のプラズマ流の閉込め効果と噴射速度の違いにより生じるものと考えられる。

Fig. 6はジェットの径方向温度分布の渦ガス流量依存性を示したものである。温度は軸線上で最大値を取り、軸線から離れるにつれて低下する分布形状即ちaxis peak 特性を示す。渦ガス流量が零の場合、軸線上の温度は13,000Kを維持しているが、軸線からの距離( $r$ )が1mmの位置では5,000Kと急激に低下している。これに対し、流量を40 l/minに増加すると軸線上の温度は9,100Kと低いが、 $r = 1.3$ mmの位置において5,000Kを持ち、更に60 l/minに増すと軸線上の温度は14,500Kに上昇すると共に5,000

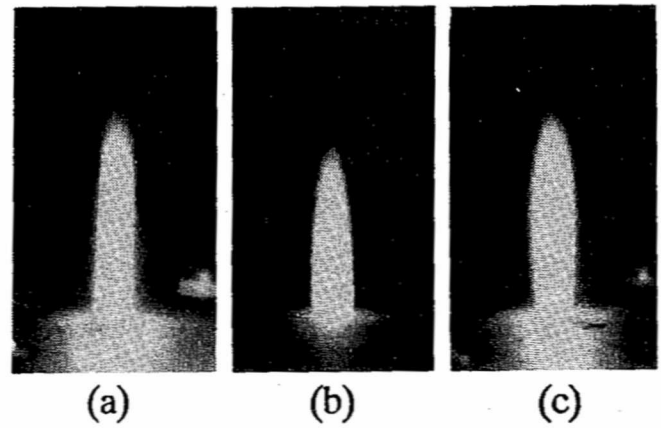


Fig.5 Photographs of the plasma jet for three different conditions: (a)vortex gas flow rate  $Q_v=0$  l/min, (b) $Q_v=40$  l/min and (c) $Q_v=60$  l/min. Other conditions are the same as ones in Fig.3.

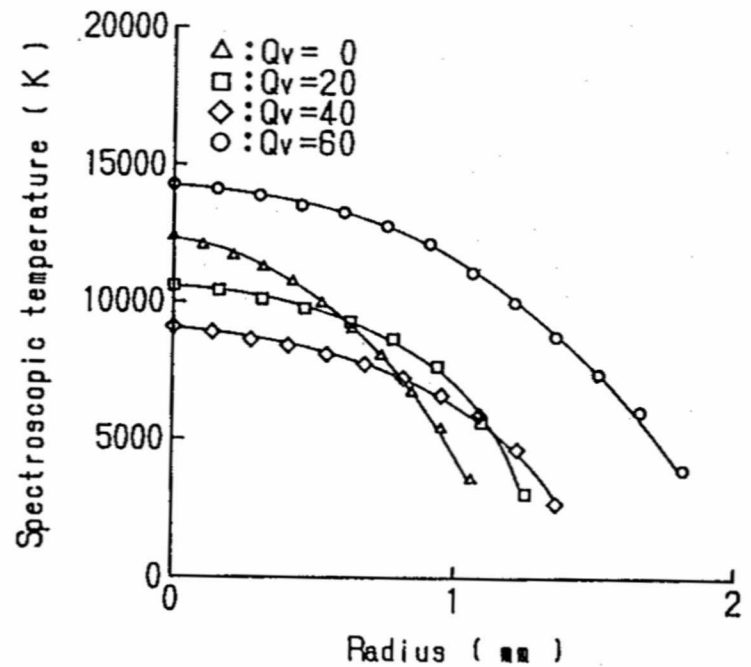


Fig.6 Radial distribution of the spectroscopic temperature in the plasma jet. Conditions are the same as ones in Fig.3. Measurement was made at 6 mm apart from the nozzle exit.

Kを維持する範囲も  $r = 1.7\text{mm}$ と流量が零の場合の 1.7倍に拡大する。これはノズル噴出後のプラズマ流の拡散膨張が渦ガス流により抑えられるゆえと考えられる。

#### 4. あとがき

本研究では、渦流集束型ノズルを持つプラズマジェット発生器の動作特性が渦ガス流付加によって受ける影響について調べた。その結果、ノズル出口側のアークに対し局部集束を加えると、電圧電流特性は顕著な上昇特性となり、電流増加によりアーク入力を効率良く増強できることがわかった。出口側アーク柱の電界強度は最大29.7V/cmと約2倍に上昇し、入口側アーク柱のそれを上回っており、また、出口側アーク柱の熱効率は80%以上と高効率が維持されおり、しかもジェット熱出力が約2倍に増強されていることより、アーク特性が改善されていると推測される。更に、ジェットの温度と温度分布やジェット体積を変化させることが判明した。これらより、本ノズルを持つプラズマジェット発生器はプラズマプロセッシング用熱源として有効なプラズマ源であると結論づけられる。

終わりに、本研究は大阪大学溶接工学研究所において共同研究員として行った中の一部であり、関係各位の方々に厚く謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) Z. P. Lu, J. Heberlein and E. Pfender: Plasma Chemistry and Plasma Processing, 12, 35(1992)
- 2) 新野正之・熊川影長・佐々木真: 電学誌, 110, 35(1990)
- 3) H. Zhu, Y. C. Lau and E. Pfender: J. Appl. Phys., 69, 3404(1991)
- 4) T. Sone, H. Akatsuka and M. Suzuki: Plasma Sources Sci. Technol., 2, 46(1993)
- 5) S. L. Camacho: Proc. 8th Int. Symp. on Plasma Chemistry, 1, 87(1987)
- 6) 荒田吉明・小林 明: 高温学会誌, 11, 124(1985)
- 7) 明石和夫: 溶融塩, 28, 234 (1985)
- 8) 佐伯節夫・内山格郎: 山口大学工学部研究報告, 27, 113(1976)
- 9) S. Saeki, K. Osaki and O. Fukumasa and K. Yamada: Proc. 10th Int. Symp. on ISIAT' 86 Tokyo, 149(1986)
- 10) S. Saeki, K. Osaki and O. Fukumasa: Proc. 8th Int. Symp. on Plasma Chemistry, 4, 2259(1987)
- 11) 大崎 堅・福政 修・佐伯節夫: 平成3年電気学会全国大会講演論文集, 2-45(1991)