

研究論文

プロセス用デュアルノズル陽極型 プラズマジェット発生器の作動特性

山口大学工学部	大崎 堅
山口大学工学部	藤本 聡
山口大学工学部	福政 修
大阪大学接合科学研究所	小林 明

Operating Characteristics of Dual Nozzle Anode Type Plasma Jet Generator for Processing

Katashi OSAKI, Satoru FUJIMOTO, Osamu FUKUMASA
and Akira KOBAYASHI*

Faculty of Engineering, Yamaguchi University

*Joining and Welding Research Institute, Osaka University

Abstract

A newly designed dual nozzle anode, which is to increase a jet power and an operating duration time of the forced constricted type plasma jet generator was developed. This nozzle anode was composed of the mutually insulated two anodes. The effects of the operating parameters(arc current, working gas flow rate, material injection, operating times) on the performance characteristics of the dual nozzle anode type plasma jet generator were studied experimentally. The most suitable allotment ratio of arc current, which was the ratio of the inlet side anode current to the outlet side anode current was under 1. A stable and high power plasma jet was maintained above 90 hours at 200-260A in arc current.

Keywords: High power plasma jet, Arc discharge, Plasma jet generator, Nozzle anode, Plasma heating.

1. はじめに

高温、高速の熱プラズマ流すなわち、プラズマジェットは棒状の陰極と小孔を持つノズル陽極との間に点弧したアークをノズル壁及びガス流で熱ピンチを加えることによって容易に生成できる。このため、プラズマジェットはこれまでに材料の加工や表面処理、新材料の創成等の材料プロセス¹⁾の熱源として応用されている。しかし、材料プロセスの高効率化、高精度化のためには安定かつクリーンで高度に制御された高性能なプラズマジェットが必要となる。

このため、これまでにノズル内のアークを高速渦ガス流によって収束安定化するガストンネル型²⁾、ノズル陽極と3分割された陰極間のアークを冷却したリングで収束するTRIPLEX型^{3,4)}、直流プラズマジェットと高周波誘導プラズマを組み合わせたハイブリッド型⁵⁾等の熱プラズマ源が開発され高融点金属やセラミックの溶射、セラミックス粉末の合成に用いられている。また、筆者らはアークの閉じ込め方法、電極の形状や配置を改良した強制伸長アーク型(絶縁集束型)、交差電極型、プラズマ電極型、ダイバージェンスノズル陽極型等のプラズ

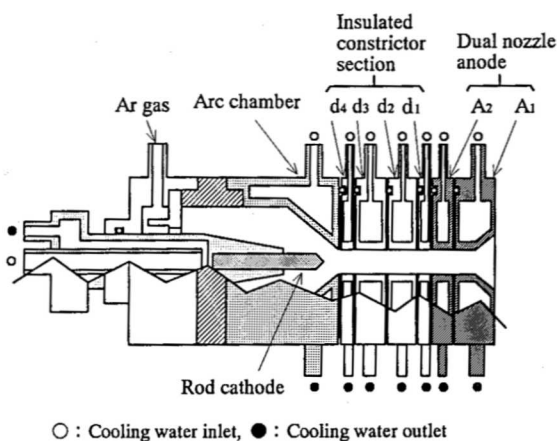
マジェット発生器を開発し、それらの諸特性を明らかにするとともに材料プロセスへの適応性について明らかにしてきた^{6~13)}。特に、絶縁集束型プラズマジェット発生器はシンプルな構造でありながら高出力でクリーンなプラズマジェットを安定に生成するが、アーク電流が150Aを越えると陽極点付着面が熔融・損傷し、発生器の安定作動時間が短縮し、ジェットもクリーン性に欠けることが明らかになった。

そこで、本研究では、ノズル陽極を軸方向に2分割し、陽極点を複数化したデュアルノズル陽極を持つ絶縁集束型プラズマジェット発生器（以降、デュアルノズル陽極型プラズマジェット発生器と称す）を試作したので、以下にこの発生器の作動特性について述べる。

2. 実験装置及び方法

本研究で試作したデュアルノズル陽極型プラズマジェット発生器はデュアルノズル陽極、絶縁集束部、アーク室、陰極から成っており、その概略図をFig.1に示す。

デュアルノズル陽極は内径6mm、軸長15.5mmの銅製であり、ノズル出口に末広状テーパ（テーパ1.8、軸長5mm）を有する軸長10mmの第1段陽極A₁、軸長5mmの第2段陽極A₂を厚み0.5mmのBN絶縁板をはさんで直列に組み合わせた構造である。



○ : Cooling water inlet, ● : Cooling water outlet
Fig.1 Sectional view of the dual nozzle anode type plasma jet generator.

絶縁集束部は内径6mmであり、4個の銅製ディスク（陽極側から軸長3、7、7.5、3mm）を厚み0.5mmのBN絶縁板をはさんで直列に接続して構成されている。また、デュアルノズル陽極、絶縁集束部、アーク室相互は厚み0.5mmのBN板で絶縁されている。従って、各ディスクの電位を測定することにより、絶縁集束部アーク柱の見掛けの電位分布を求めることができる。

陰極は先端を90度に削った直径5mmの2%トリウム入りタングステン棒であり、先端から絶縁集束部入口までの距離は2mm一定である。

なお、本発生器は前記ノズル陽極及び絶縁集束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。デュアルノズル陽極、各ディスク、アーク室、陰極に対しそれぞれ個別に水冷し、各部熱損失を求める。

アーク電流は、無負荷電圧190V、容量50kVAの直流定電圧電源の+側を2系統に分割し、それぞれに挿入された可変型安定抵抗を通して第1段陽極A₁及び第2段陽極A₂に供給される。ここで、A₁に流入する電流を第1陽極アーク電流I_{a1}、A₂に流入するそれを第2陽極アーク電流I_{a2}とし、それらの合計を全アーク電流I_{at}とする。また、I_{a1}に対するI_{a2}の比をアーク電流分担比R_fとする。実験はI_{at}=80~260A、R_f=0~2で行った。作動ガスは純度99.9%のアルゴンを使用し、流量Q=7、40、50l/minを軸流として流入した。

3. 実験結果と考察

3.1 アーク特性

絶縁集束部出口におけるアーク柱の見掛けの電位すなわち、ディスクd₁の電位V_{pd1}と全アーク電流I_{at}との関係の一例をFig.2に示す。V_{pd1}はI_{at}の増加とともに直線的に上昇し、その上昇率及びV_{pd1}値はアーク電流分担比R_fに関係なく同等である。これより、陰極点から発したアーク

クは $R_f=0.5, 1, 2$ では I_{at} で生成された絶縁集束部アーク柱とこれに直結した R_f に対応するアーク電流で生成された A_1 の陽極点と A_2 の陽極点に向かう2本のアーク柱(陽極部アーク柱)で構成されていると推察され、その模式図とアークの見掛けの電位分布の一例を Fig.3 に示す。

通常、陽極点は陽極部アーク柱に働く電磁力とガス流による気体力学的抗力とが平衡するように振る舞う。しかし、アークを強制的に伸長するための絶縁集束部がある場合には陽極点は陽極入口付近に形成される。本ノズル陽極

における陽極点付着位置は、壁面上に残された陽極点の痕跡から A_1 では入口付近、 A_2 では出口付近と推定される。このように、両陽極点が近接している主たる要因は A_1 における陽極部アーク柱と A_2 におけるそれとの間で生じる吸引電磁力によるものと考えられる。従って、絶縁集束部アーク柱の見掛けの電位が直線的に上昇すなわち一定の電界強度を維持していることより、 A_2 部における軸上のアーク柱は陽極点直下までこの電界強度と同じであると仮定して見掛けの電位をプロットしてある。

以上より、本発生器におけるアーク電圧は一義的に表示できないゆえ、ここでは、各アークの電流と電圧 V_{aA1}, V_{aA2} から求まる各アークに投入される電気入力 $I_{a1}V_{aA1}+I_{a2}V_{aA2}$ を I_{at} で除した値を等価アーク電圧 V_{ac} とする。

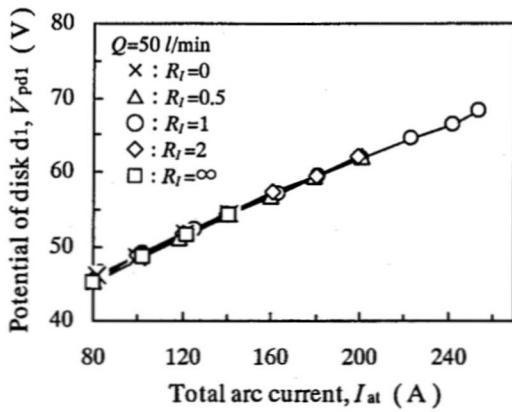


Fig.2 Potential of disk vs. total arc current, where Q is working gas flow rate and R_f is allotment ratio of arc current.

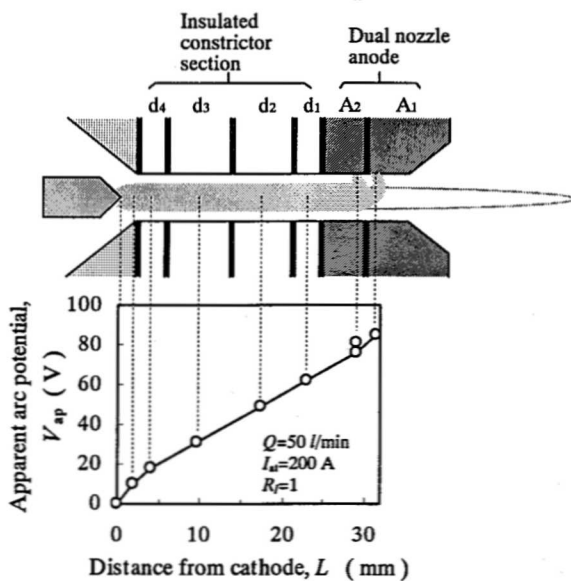


Fig.3 Sketch and apparent arc potential of constricted arc, where Q is working gas flow rate, I_{at} is total arc current and R_f is allotment ratio of arc current.

3.2 アーク電圧及びエネルギー収支のアーク電流分担比依存性

Fig.4 は作動ガス流量 $Q=50l/min$ 、全アーク電流 $I_{at}=200A$ での各陽極のアーク電圧 V_a 、等価アーク電圧 V_{ac} 、各部熱損失 W_i 、熱効率 η とアーク電流分担比 R_f との関係を示している。第

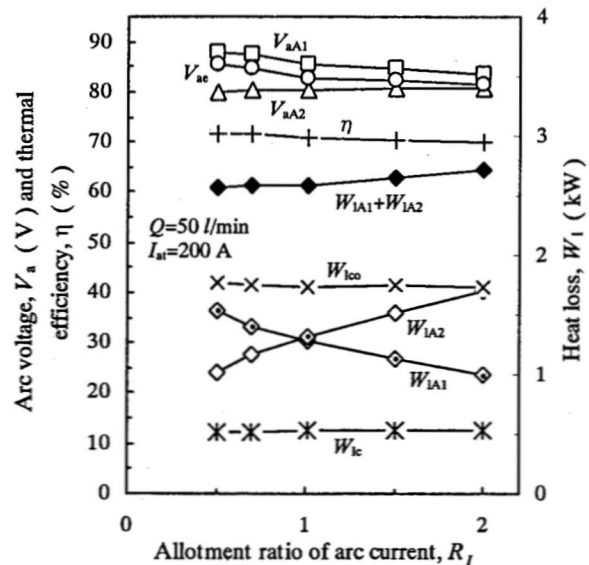


Fig.4 Dependencies of arc voltage, thermal efficiency and heat loss on allotment ratio of arc current, where Q is working gas flow rate and I_{at} is total arc current.

1 陽極及び第2陽極でのアーク電圧 V_{aA1} 及び V_{aA2} は分担電流が増すといずれも上昇する。この電圧上昇率はアーク電流分担比 $R_f=1$ を境にして異なり、前者が大であるが、両者の電圧差は10V以下である。これは陽極部アーク柱の長ささとそれに作用する熱ピンチの違いによって生じたものと考えられる。なお、 V_{ac} は、前述のような計算によって求めたものであるゆえ、電圧上昇率の大きい V_{aA1} と同様な傾向を有している。

絶縁集束部熱損失 W_{ico} 及び陰極部熱損失 W_c は R_f に関係なく一定である。これに対し、陽極熱損失は流入する電流に大きく依存するゆえ、Fig.4のように A_1 及び A_2 における熱損失 W_{IA1} 及び W_{IA2} は R_f が増すと前者は減少、後者は増大する。この減少率及び増大率は $R_f=1$ を境にして異なっており、 $R_f < 1$ の範囲では両比率はほぼ等しいが、 $R_f > 1$ の範囲では増大率が減少率の1.4倍と大きく上回っている。従って、陽極部全熱損失 $W_{IA1} + W_{IA2}$ は $R_f > 1$ の範囲で急激に上昇するとともに熱効率も72→70%に低下する。なお、その他の動作条件においても同様な傾向を有している。

以上より、本発生器はアーク電流分担比が1以下において効率良く高出力プラズマジェット

トを安定に生成することが明らかになった。従って、以下ではアーク電流分担比 $R_f=1$ での諸特性について述べる。

3.3 等価アーク電圧及びエネルギー収支の全アーク電流依存性

Fig.5は作動ガス流量 Q をパラメータとした等価アーク電圧 V_{ac} と全アーク電流 I_{at} との関係を示している。 V_{ac} は I_{at} の増加とともにほぼ直線的に上昇し、その上昇率は、 $Q=40, 50$ l/min では0.14V/Aと Q に依存せず同じ値であるが、 $Q=7$ l/min では0.06V/Aと高作動ガス流量の1/2以下となる。これより、 A_1 及び A_2 壁面上に形成されている陽極点は前述のように近接しているにも関わらず、いずれの Q においても I_{at} の増加に基づくアーク同士の相互作用による悪影響、ノズル陽極の損傷も無く、安定したアークが維持されているものと見なしうる。

なお、本発生器で発生するプラズマジェットは $Q > 15$ l/min の範囲では乱流ジェットを、 $Q < 10$ l/min の範囲では層流ジェットを呈する。

ジェット熱出力 W_j および発生器の熱効率 η と I_{at} の関係をFig.6に示す。 W_j とは、発生器に投入される全電気入力から各部熱損失を差し引いて求めた正味アーク入力のことである。 W_j

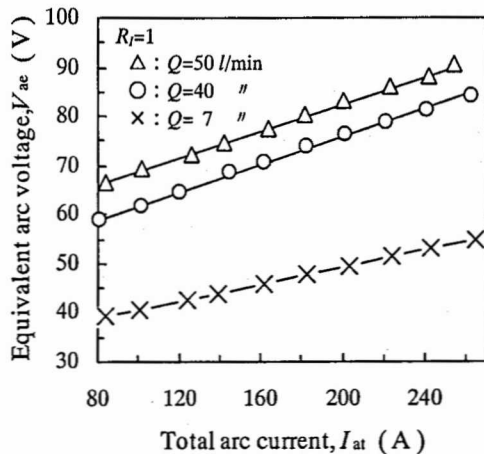


Fig.5 Equivalent arc voltage vs. total arc current, where R_f is allotment ratio of arc current and Q is working gas flow rate.

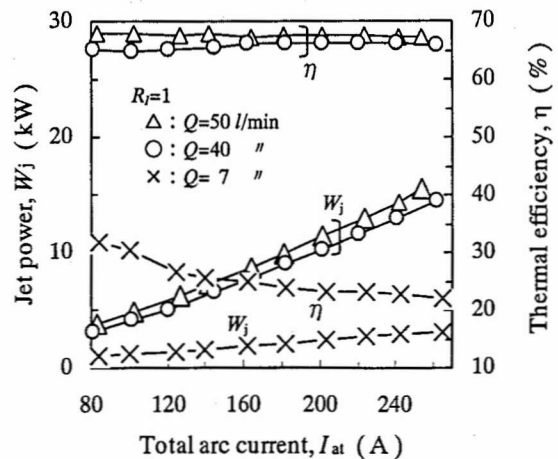


Fig.6 Jet power and thermal efficiency vs. total arc current. R_f is allotment ratio of arc current and Q is working gas flow rate.

は $Q=50, 40, 7\text{ l/min}$ ではそれぞれ $3.8\sim 15.5, 3.1\sim 14.6, 1\sim 3.2\text{ kW}$ の範囲にあり、 I_{at} の増加と共にほぼ直線的に増加している。また、 η は $Q=50, 40\text{ l/min}$ では $64\sim 68\%$ を維持しているが、 $Q=7\text{ l/min}$ では $22\sim 32\%$ に低下する。これらより、本発生器は I_{at} の制御により低出力から高出力の乱流ジェット或いは層流ジェットを安定にかつ効果的に発生することが分かった。

3.4 プロセスへの適用性

プロセス用熱源としての本発生器の実用性を確かめるために、ノズル陽極出口にフィードパイプ（ステンレス、内径 1.8 mm ）を設置して溶射ガンとし、Ti 粉末を送給した場合の諸特性を調べた。なお、Ti 粉末（粒径分布 $53\sim 75\mu\text{m}$ ）の送給量 M_f は 2 g/min 、搬送ガス（アルゴン）流量 Q_f は $2\sim 3\text{ l/min}$ である。

溶射中のジェット熱出力 W_j 及び熱効率 η と全アーク電流 I_{at} との関係を Fig.7 に示す。溶射時の W_j 並びに I_{at} 増による W_j の増加率は Q に関係なく非溶射時のそれらと同等である。一方、 $Q=7\text{ l/min}$ での溶射時の η は非溶射時のそれより $1\sim 3\%$ 低下しているが、概ね溶射時において

も特性劣化は無いと見なしうる。

これらより、溶射時においても I_{at} により W_j を安定にかつ効果的に制御しうる事が判明した。

Ti 粉末溶射状況の一例を Fig.8 に示す。この撮影像は、ジェットの発生及び飛行溶射粒子の状況を同時観測するために、ノズル出口から 7 cm 付近までは ND フィルターにより減光したものである。ジェットは Ti 粉末注入時においても安定に維持されている。飛行溶射粒子はジェット中で加熱を受け、その加熱度に応じた熱放射に基づく発光をしながら、 $Q=40\text{ l/min}$ すなわち乱流ジェットの場合はジェット軸線に対しほぼ対称に飛行しているが、 $Q=7\text{ l/min}$ すなわち層流ジェットでは、軸線からわずかに下方にずれて飛行している。しかし、いずれのジェットにおいてもジェット先端から 20 cm 離れた位置までの軸線付近では可視全域の発光が、それ以外では可視長波長側の発光が認められることより、Ti 粒子が高温状態を維持したまま高速度で飛行しているものと推測される。

捕集した Ti 粒子は球状を呈しており、その粒径は乱流ジェットでは $1.1\sim 26.0\mu\text{m}$ 、層流ジ

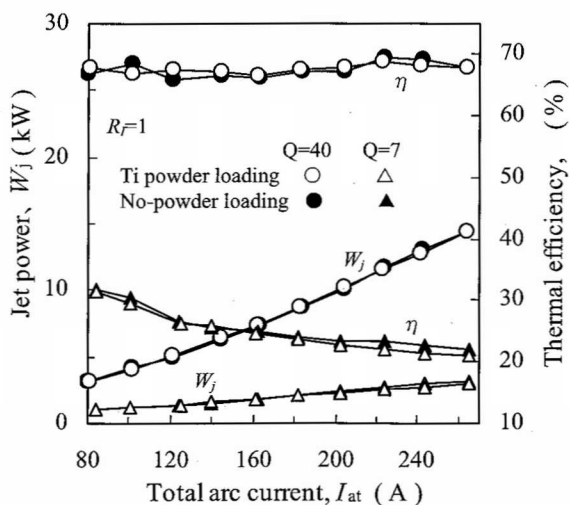


Fig.7 Jet power and thermal efficiency vs. total arc current during Ti powder loading, where R_f is allotment ratio of arc current and Q is working gas flow rate(l/min).

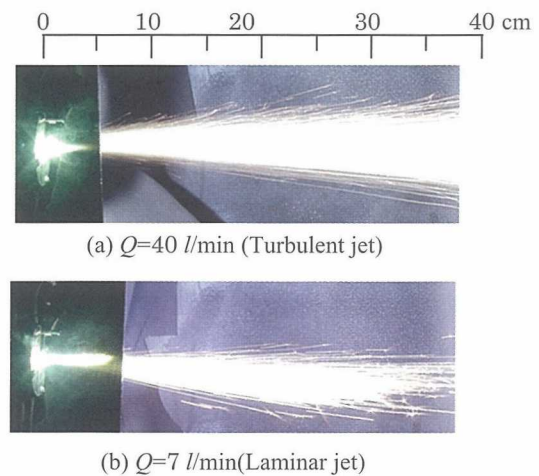


Fig.8 Photographs of plasma jet with Ti powder loading, where Q is working gas flow rate. Experimental conditions were as follows: total arc current is 200 A , allotment ratio of arc current is 1 , Ti feed rate is 2 g/min and feed gas flow rate is 2 l/min .

ジェットでは1.4~14.5 μm と原料粉末の1/3以下であった。これより、 Q により粒径制御ができて、また低作動ガス流量において小サイズかつ分布域の狭い粒子が得られることが明らかになった。

なお、本発生器は、これまでにその特性試験のために約2時間の連続運転を15回、溶射用熱プラズマ源 ($I_{\text{at}}=200\sim 260\text{A}$ 、 $W_j=10\sim 15\text{kW}$) とし約30分運転を120回、延べ約90時間メンテナンスフリーで特性の劣化もなく作動しており、現在も運転時間を延伸中である。

4. まとめ

ノズル陽極を軸方向に2分割し、陽極点を複数化したデュアルノズル陽極型プラズマジェット発生器の作動性能を調べた。結果を要約すると、次の通りである。

- 1) 分岐した2本のアーク同士の相互作用による悪影響もなく、安定したアークが維持されている。
- 2) 陰極、陽極の損傷もなく、安定なジェットが生成され、特に、アーク電流分担比が1以下で高効率で高出力ジェットが得られる。
- 3) プロセス時においても特性の劣化は無い。
- 4) 作動ガス流量により生成粒子のサイズ分布を制御できる。
- 5) メンテナンスフリーで約90時間作動しており、特性の劣化もなく、現在も運転時間を延伸中である。

デュアルノズル陽極型プラズマジェット発生器はプロセス用熱源として有用であることが示唆され、今後は層流ジェットにおける熱効

率の改善、溶射粒子パラメータ（温度、粒径、速度）の計測を行う予定である。

謝辞

本研究の一部は大阪大学接合科学研究所において共同研究員として行ったものであり、ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) K.Takeda, *Trans. IEE Japan*, **114** (1994) pp.572-578.(in Japanese)
- 2) A.Kobayashi, S.Kurihara, Y.Hbara and Y.Arata, *J. Weld. Soc. Japan*, **8**(1990) pp.457-463.(in Japanese)
- 3) G.Brabezat and K.Landes, *Therm. Spray Surf. Appl. Res.*, (2000)881.
- 4) M.Sasaki, *J. High Temperature*, **28-Supplement** (2002)pp.253-257.(in Japanese)
- 5) T.Yoshida, *Material Trans. JIM (Japan Inst. Met.)*, **31**(1990)pp.1-11.
- 6) K.Osaki, O.Fukumasa, A.Kobayashi and N.Tada, *Appl. Plasma Sci.*, **4**(1966)pp.28-33.(in Japanese)
- 7) K.Osaki, O.Fukumasa, and A. Kobayashi, *Appl. Plasma Sci.*, **6**(1998)pp.78-83.(in Japanese)
- 8) K.Osaki, O.Fukumasa and A. Kobayashi, *Vacuum*, **59**(2000)pp.47-54.
- 9) K.Osaki, S.Fujimoto, O.Fukumasa and A. Kobayashi, *Vacuum*, **73**(2004)pp.365-371.
- 10) O.Fukumasa, *Thin Solid Films*, **390**(2001)pp. 51-56.
- 11) K.Osaki, T.Iiboshi, S. Fujimoto, O.Fukumasa and A.Kobayashi, *J. High Temperature*, **29-Supplement**(2003)pp.235-240.(in Japanese)
- 12) K.Osaki, O.Fukumasa, S.Fujimoto and A.Kobayashi, *Vacuum*, **65**(2002)pp.305-309.
- 13) K.Osaki, S.Fujimoto and O.Fukumasa, *Thin Solid Films*, **435**(2003)pp.56-61.