

局所集束ノズルによるプラズマ電極型プラズマジェット発生器内のU字状アークの拘束安定化

大崎 堅¹・芦田英樹²・多田直文¹・福政 修¹

¹電気電子工学科

²大学院電気電子工学専攻

プラズマ電極型プラズマジェット発生器内のU字状アークに、集束リング型および渦流集束型の二種類のノズルを用いて局所集束を加え、U字状アークに対する拘束効果を調べた。

集束リング型ノズルを用いると、安定動作範囲が拡大し、正味アーク入力も効率よく増加したことより、U字状アークは効果的に拘束安定化できることがわかった。一方、渦流集束型ノズルでは、アークの拘束安定化は作動ガス流量や渦ガス流量対基底ガス流量の比に大きく依存することがわかった。

Key Word : Plasma jet generator, Arc discharge, Arc stabilization, Vortex gas flow

1. まえがき

近年では、傾斜機能材料、超伝導膜、ダイヤモンド膜等の作製が、高温、高速、高活性という特徴を持つプラズマジェットを熱源としたプラズマ溶射法を用いて行われ、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^{1)~3)}。このような溶射用熱プラズマ源としては、溶射条件に応じてプラズマ基礎量を精度良く制御できること、クリーンなプラズマ流を長時間安定に維持しうること等が要求される。しかし、現在多用されている溶射装置の熱プラズマ源は非移行式の通常型プラズマジェット発生器であり、また溶射処理材料は陽極点より下流のプラズマジェット中に注入される方式が主であるため、高温のアーク柱は溶射材料加熱に有効に活用されていない。したがって、所望の熱出力と体積を有するプラズマジェットを生成するためには大電流アークが必要となり、生成ジェットは電極材料により汚染されている可能性が大である。

このため筆者等は、アーク柱の一部を溶射材料加熱に使用可能な交差電極型プラズマジェット発生器⁴⁾を熱源とした溶射ガンを開発し、高融点材料処理時においても良好な動作特性の結果⁵⁾を得るとともに、Bi系酸化物超伝導膜⁶⁾の作製を行い、溶射や他の材料プロセスへの適応性についても検討を加えてきた。さらにノズル集束部に拘束安定化されたアーク柱全域をプロセスに活用することを目的とし、交差電極型プラズマジェット発生器の陰極をもノズル中心軸に対し垂直に配置し、両電極先端を結んだU字状アークを

点弧するプラズマ電極型プラズマジェット発生器⁷⁾を開発し、ノズル形状や作動ガス流入方式、プロセス材料送給がアーク特性に及ぼす影響を明らかにした^{8,9)}。

本研究では、この発生器内のU字状アークのさらなる特性改善を図るために、集束リング型¹⁰⁾と渦流集束型の二種類のノズルを用いてノズル内アークの一部に局所集束を加え、U字状アークの拘束安定化を試みたので以下にその一部を述べる。

2. 実験装置

2.1 局所集束ノズル

プラズマ電極型プラズマジェット発生器内のアークは、棒陰極先端の陰極点から発しノズル集束部に垂直に流入する陰極側アーク柱、そのアーク柱に直交するアーク柱（主アーク柱）および径方向に向かい棒陽極端面の陽極点に達する陽極側アーク柱から成る、いわゆるU字状を呈している。したがって、U字状アークによって生成されるプラズマジェットの諸特性は、主アーク柱部の電氣的、熱的、機械的特性に主として依存することとなるが、この主アーク柱部への荷電粒子のソースとシンクの役割を担う陰極側アーク柱および陽極側アーク柱のふるまいにも依存する。

そこでU字状アークの諸特性をさらに改善するため、主アーク柱の一部に局所集束を加えた。本実験では、二種類のノズルすなわち器壁による集束効果を増強した集束リング型ノズルおよび渦ガス流による熱ピンチ効果を強めた渦流集束型ノズルを用いた。

これらのノズルの原型は、軸長 22mm の陽極支持部、

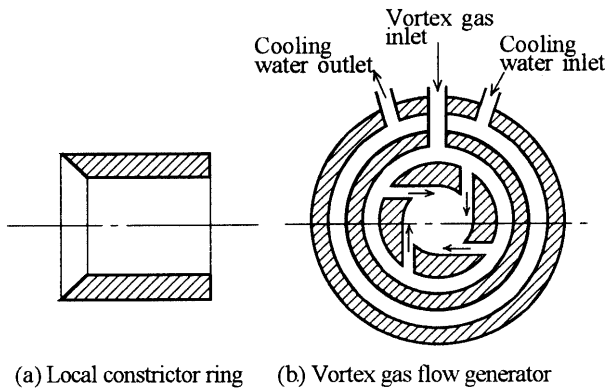


Fig. 1 Schematic view of constrictor devices.

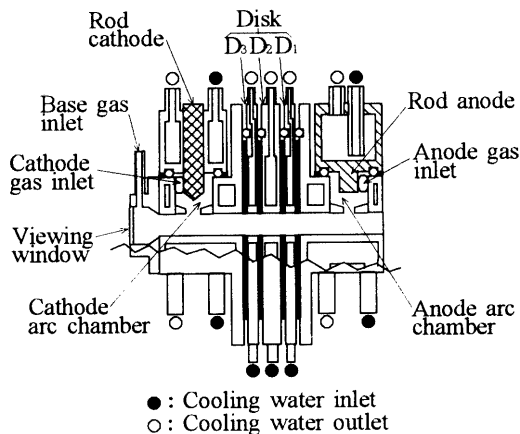


Fig. 2 Sectional view of plasma electrode type plasma jet generator.

軸長 3mm, 5mm または 7.5mm, 3mm の 3 枚のディスクから成るディスク部および軸長 22mm の陰極支持部で構成された, 内径 6mm の P-6 ノズル及び 8mm の P-8 ノズルである。なお, 各部相互間は厚さ 0.5mm の窒化ほう素およびテフロンにより絶縁されている。

2.1.1 集束リング型ノズル

集束リング型ノズルは, Fig.1(a)に示すように, 入口に 2/1 の先細状テーパを有した, 内径 6mm, 集束部長 5mm の銅製リングを P-8 ノズルの陰極支持部出口に挿入して構成する。以後, このノズルを R ノズルと称す。

2.1.2 渦流集束型ノズル

渦流集束型ノズルは, P-6 ノズルの中央ディスク位置 (Fig.2 のディスク 2) に渦ガス流発生器を設けたものである。渦ガス流発生器は Fig.1(b)に示すように, 内径 6mm, 軸長 7.5mm で内壁面上には 0.5mm × 4.5mm の矩形断面を持つガス噴射口 4 個が対称的に配置されている。したがって, ノズル集束部には軸対称性の良い高速渦流が形成される。以後, このノズルを V ノズルと称す。

2.2 プラズマ電極形プラズマジェット発生器と動作条件

プラズマ電極形プラズマジェット発生器の基本構造を Fig.2 に示す。陰極は直径 5mm の 2% トリウム入りタングステン棒で, 陽極は直径 5mm の銅棒であり, それぞれ陰極支持部および陽極支持部に配置されている電極室に収められている。したがって, 電極点はノズル集束部すなわち主プラズマ流生成域から完全に隔離されている。陰極, 陰極支持部, 各ディスク, 陽極支持部および陽極は個別に水冷されており, 各部熱損失を求めうる。

アーク電流は無負荷電圧 190V, 容量 50kVA の直流電源より安定抵抗を通して 60~140A を供給する。

作動ガスは純度 99.99% のアルゴンを使用し, R および P-8 ノズルに対しては流量 (Q) 20 および 50 l/min を, P-6 ノズルに対しては流量 30 および 40 l/min をそれぞれ軸流として流入する。V ノズルの場合, 陰極支持部に流入する基底ガス流 (Q_b) は 10 および 20 l/min の軸流であり, 渦ガス流 (Q_v) として 0~40 l/min を付加する。

陽極および陰極シーガスは, アルゴン流量 10 l/min を両電極室内に渦流としてそれぞれ送給する。

また陰極支持部後方に設けた観測窓よりアークを, 側面よりプラズマジェットをそれぞれシャッター速度 1/60 秒でスチル撮影し, アークの点弧状態およびプラズマジェットの形状を求める。

3. 実験結果と考察

3.1 U字状アークの電氣的特性

R および V ノズルにより局所集束を加えた U 字状アークの電圧対電流の関係をそれぞれ Fig.3, Fig.4 に示す。R ノズル, V ノズルとも上昇特性を持つ。

R ノズルにおける平均電圧上昇率は, 0.20V/A と P-8 ノズルのそれと同等である。同一動作条件下における R ノズルの電圧は, P-8 ノズルに比べて 5.9~9.9V 高く, また R ノズルの動作範囲は P-8 ノズルより 20A 拡大し 140A となる。これは, 局所集束リングの器壁による主アーク柱に対する集束効果が強まり, 後述するように主アーク柱のノズル断面内の空間的拘束位置が改善されたためと推測され, 作動ガス流が増すほどその効果は大である。

一方, V ノズルにおける平均電圧上昇率は 0.23 V/A と P-6 ノズルのその 78% に低下している。V ノズルのアーク電圧は, Q_b の減少により陰極支持部内主アーク柱に対する冷却作用が低下するため同一作動ガス流量の P-6 ノズルのそれより 3.4~9.4V 低下する。 $Q_v=20$ l/min 一定とし, $Q_b=10$ l/min にすると動作範囲

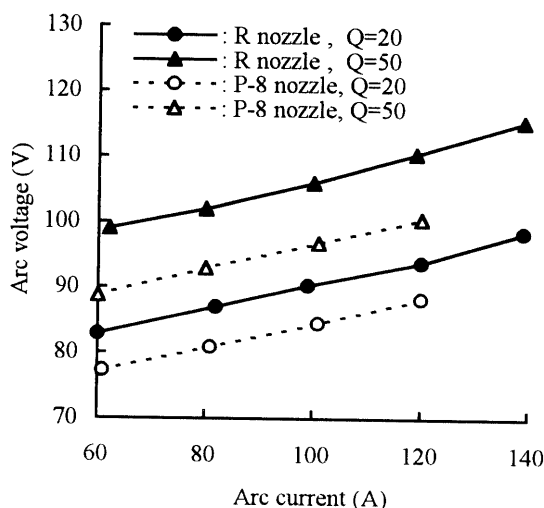


Fig.3 Arc voltage-current characteristics for ring constriction type nozzle.

Q : Working gas flow rate (ℓ/min).

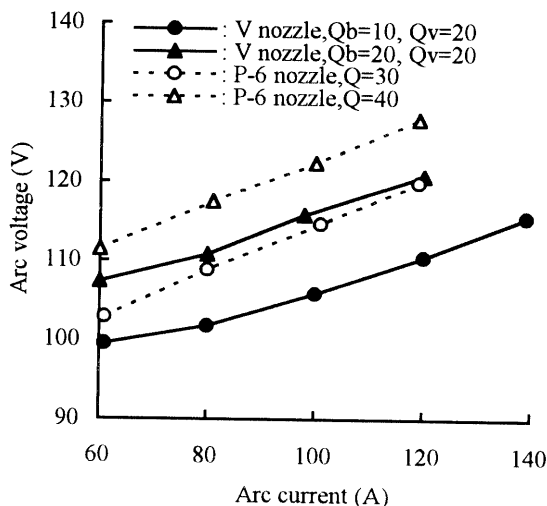


Fig.4 Arc voltage-current characteristics for vortex gas constriction type nozzle.

Q : Working gas flow rate (ℓ/min),
 Q_b : Base gas flow rate (ℓ/min),
 Q_v : Vortex gas flow rate (ℓ/min).

は120A から140A に拡大するが、Q_b を20 ℓ/min に増すと動作範囲は狭まり、P-6 ノズルと同一になる。このように作動ガス流量中の Q_b の占める割合が増すと動作範囲が狭まるのは、渦ガス流発生器より下流域の主アーク柱に対する渦ガス流による拘束力の低下と、陰極側アーク柱側面に作用するノズル軸線方向の気体力学的な力の増大とに基づくU字状アークのゆらぎの増大によるためと推測される。

3.2 エネルギー収支

陰極および陽極熱損失はノズルの種類あるいは作動ガス流量に関係なく、前者が0.17~0.40kW、後者が0.60~1.13kW の範囲にあり、電流の増加とともに直線

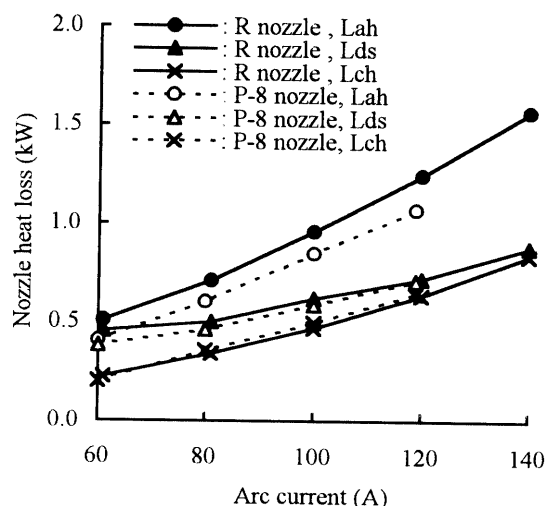


Fig.5 Nozzle heat loss for ring constriction type nozzle.

L_{ah} : Anode holder heat loss,

L_{ds} : Disk section heat loss,

L_{ch} : Cathode holder heat loss.

Working gas flow rate : 50 ℓ/min.

的に上昇する。

Rノズルにおける Q=50 ℓ/min でのノズル各部熱損失のアーク電流依存性を Fig.5 に示す。陽極支持部熱損失は各部熱損失中で最も大きく、0.38~1.57kW と全電気入力 of 8.3~9.8% に相当し、P-8 ノズルと比較すると0.4~1.4%増加している。一方、ディスク部および陰極支持部熱損失はP-8 ノズルのそれと大差なく、最大0.08kW 増に留まっている。

Vノズルにおいて Q_b=10 ℓ/min, Q_v=20 ℓ/min での陽極支持部および陰極支持部熱損失はそれぞれ 0.68~1.55kW, 0.37~1.02kW であり、同一作動ガス流量を与えたP-6 ノズルのそれより最大0.10kW 増すが、渦ガス流発生器を含めたディスク部の熱損失はほぼ等しい。

Vノズルにおけるアーク電流100A, Q_b=10 ℓ/min でのノズル各部熱損失と Q_v の関係を Fig.6 に示す。陽極支持部およびディスク部の熱損失は、Q_v を10 ℓ/min 付加すると急激に低下するが、以後 Q_v を増すと、陽極支持部熱損失は Q_v の増加とともに僅かに低下し、ディスク部のそれは Q_v に関係なくほぼ一定となる。また Q_b=20 ℓ/min の場合も同様な傾向が見られる。これらより、ディスク部内壁への主アーク柱からの、そして陽極支持部内壁への主アーク柱およびプラズマ流からの放射とエンタルピー対流に基づく熱伝達が、渦ガス流により効果的に遮断されているものと考えられる。これに対し陰極支持部熱損失は、Q_v が30 ℓ/min を越えると0.05kW/(10 ℓ/min) の割合で増加し、渦ガス流を付加しない場合より大となる。これは、渦ガス流のチョーク作用に基づく陰極支持部内の高温ガス

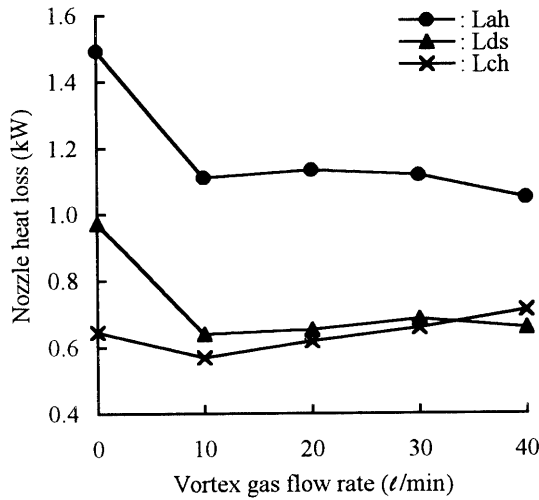


Fig.6 Nozzle heat loss for vortex gas constriction type nozzle.

L_{ah} : Anode holder heat loss,
 L_{ds} : Disk section heat loss,
 L_{ch} : Cathode holder heat loss.
 Arc current : 100A,
 Base gas flow rate : 10 l/min.

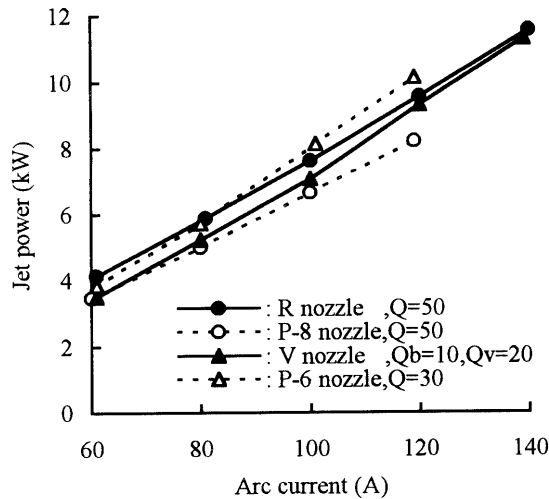


Fig.7 Jet power vs. arc current.

Q : Working gas flow rate (l/min),
 Q_b : Base gas flow rate (l/min),
 Q_v : Vortex gas flow rate (l/min).

流の速度低下によるものと考えられる。

電気入力から発生器各部熱損失を差し引いて求めた正味アーク入力すなわちジェット熱出力のアーク電流依存性を Fig.7 に示す。熱出力はアーク電流の増加に伴い直線的に上昇し、R および V ノズルとも最大 11.4kW に達する。

R ノズルにおいて、熱出力は P-8 ノズルのそれより 0.68~1.35kW 大であり、熱効率も 67.9~70.8% と 2.4~2.7% 上昇する。これは、局所集束リングによる主アーク柱の平均電界強度の増大が、熱損失の増加を上回ったことによるものである。

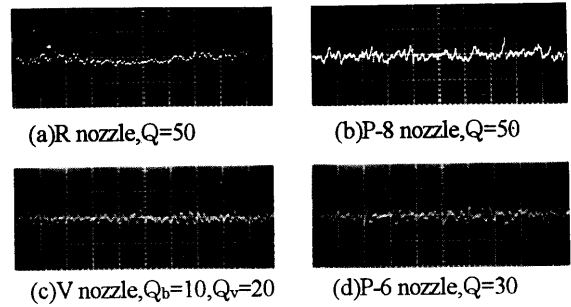


Fig.8 Oscillograms of arc voltage wave form.

Sweep velocity : 0.5ms/div, Gain : 10V/div.
 Q : Working gas flow rate (l/min),
 Q_b : Base gas flow rate (l/min),
 Q_v : Vortex gas flow rate (l/min).
 Arc current : 100A.

V ノズルの熱出力は、同一作動ガス流量における P-6 ノズルのそれより 0.34~1.08kW 減少するが、熱効率は 1.5~3.7% の低下と小さく、57.8~69.9% を維持している。

3.3 アークモード

各ノズルにおけるアーク電圧波形の代表例を Fig.8 に示す。アーク電圧は常にランダム振動モードを呈しており、アーク電流を増加すると振動振幅は減少し、振動周波数は逆に増加する。本発生器では陽極点および陰極点は固定されているため、アーク電圧波形に現れる振動は主にノズル内アークのふるまいによると見なせる。

R ノズルにおいてアーク電流 100A, $Q=50$ l/min での電圧振動の振幅および周波数は、それぞれ 7V, 13kHz であり、P-8 ノズルのそれらに比較してそれぞれ 1V, 1kHz 小である。これは、局所集束リングにより陰極支持部内アーク柱の空間的ゆらぎが抑えられたためと考えられる。

V ノズルにおける振動周波数は、アーク電流 100A, $Q_v=20$ l/min で、 $Q_b=10$ l/min の場合 11.8kHz, $Q_b=20$ l/min の場合 12.2kHz と、P-6 ノズルの同一作動ガス流量の場合よりそれぞれ 1.6kHz, 1.0kHz 大である。しかし電圧振動振幅は、P-6 ノズルと比べ Q_b が 30 および 40 l/min でそれぞれ 1.1 および 2.1V 減少する。これは、渦ガス流により渦ガス流発生器より下流域の主アーク柱および陽極側アーク柱の空間的ゆらぎが抑制されたためと考えられる。

Fig.9 は V ノズルにおける電圧変動割合の Q_v 依存性を示している。ここで電圧変動割合とは、対応するアーク電圧と電圧振動振幅の比である。 $Q_b=10$ l/min での電圧変動割合は、 Q_v が 20 l/min 付近で 4.8% と最小

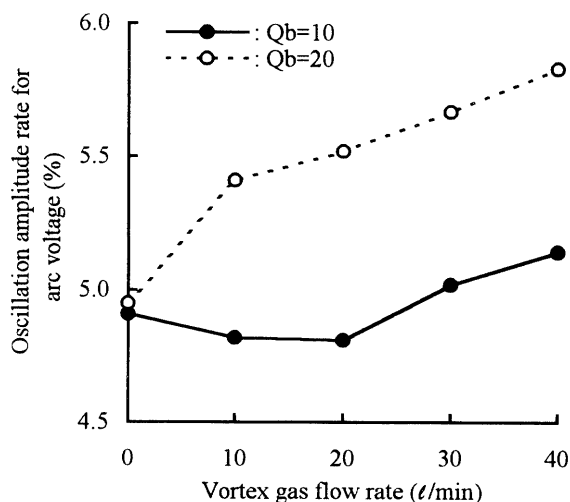


Fig.9 Oscillation amplitude rate for arc voltage in vortex gas constriction type nozzle.
 Q_b : Base gas flow rate (l/min).
 Arc current : 100A.

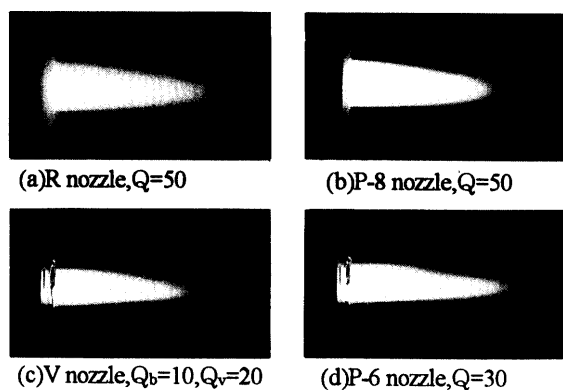


Fig.11 Photographs of plasma jet.
 Q : Working gas flow rate (l/min),
 Q_b : Base gas flow rate (l/min),
 Q_v : Vortex gas flow rate (l/min).
 Arc current : 100A.

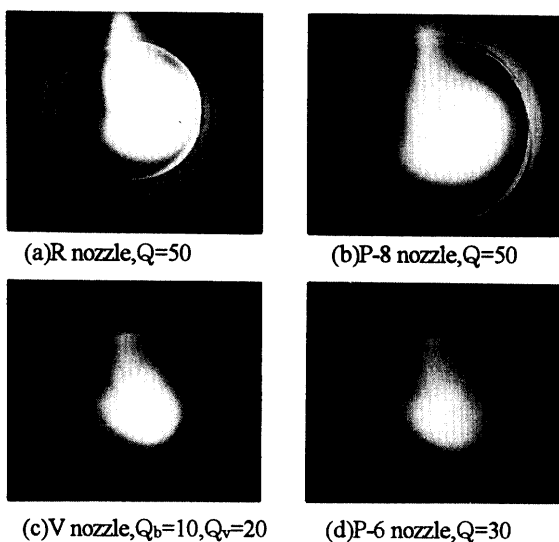


Fig.10 Photographs of arc in nozzle cross section.
 Q : Working gas flow rate (l/min),
 Q_b : Base gas flow rate (l/min),
 Q_v : Vortex gas flow rate (l/min).
 Arc current : 100A.

の値を示し、さらに Q_v を増すとその割合は増加する。一方、Q_b=20 l/min での電圧変動割合は Q_v の増加に伴いほぼ直線的に増加しており、渦ガス流によるU字状アークの拘束効果は認められない。これらは、作動ガス流量中の Q_v の占める割合が大になると、陽極側アーク柱の方位角方向への駆動を強制し、その空間的ゆらぎが増加したためと考えられる。

以上より、Rノズルでは Q=50 l/min で、Vノズルでは Q_b=10 l/min、Q_v=20 l/min でU字状アークのゆら

ぎが最も効果的に抑えられることが明らかとなった。したがって、これ以降はこの条件下でのアークおよびジェットの形状とふるまいについて述べる。

3.4 アーク点弧像

Fig.10 に陰極支持部後部の観測窓から撮影したアーク点弧像の代表例を示す。ノズル壁上方から集束部に垂直に流入する陰極側アーク柱と、これに直交した主アーク柱が示されている。

Rノズルにおける主アーク柱直径は、P-8 ノズルより 0.4~1.0mm 縮小し、主アーク柱の空間的拘束位置のノズル中心軸からのズレも P-8 ノズルより 0.5~0.7mm 少ない。したがって、主アーク柱は局所集束リングによりノズル中心軸近傍に拘束されていることがわかる。

Vノズルにおいて、アーク電流 100A での主アーク柱の空間的拘束位置は、P-6 ノズルのそれより 0.2mm ノズル中心軸に接近するが、陰極支持部内アーク柱の Q_b による拘束が弱くなるため主アーク柱直径は 5mm 拡大する。一方、Q_b=10 および 20 l/min 一定とし Q_v=10 l/min を付加すると、主アーク柱に対する熱ピンチ効果が強まるため主アーク柱直径は 0.4mm 程度縮小し、さらに Q_v を増しても主アーク柱直径はほぼ一定である。主アーク柱の空間的拘束位置のノズル中心軸からのズレは、P-6 ノズルにおいて 1.8mm であるが、Vノズルでは Q_v に関係なく 0.7mm 以下である。したがって主アーク柱は渦ガス流により効果的にノズル中心軸付近に拘束されているといえる。

3.5 プラズマジェットの形状

Fig.11 にプラズマジェットの形状を示す。ジェット

は Fig.8 に示すようなアーク電圧振動を含むが、ほぼ安定に維持されており、ノズル噴出後のジェット基底部は軸線に平行な側面を持つ円柱状を呈している。

Rノズルにおいて、ノズル出口から1mmの位置でのジェット直径は、ほぼ7.5mm一定であるが、ジェット長はP-8ノズルと比べ2.1~7.0mm伸張し、最大31.5mmに達する。これは、前述したようにRノズルにおいて電気入力が増加していること、局所集束リングによるプラズマ流の噴出速度が増したことによるものと推測される。

Vノズルにおいても、ノズル出口から1mmの位置でのジェット直径は、ほぼ5.5mm一定である。ジェット長は23.0mmであり、P-6ノズルと比べ4.0mm程度縮小する。またジェット基底部長は10.0mmとなり、ジェット長の38%を占めている。これは、渦ガス流によりノズル噴出後のジェットの膨張、拡散が抑えられるとともに、ジェット周辺の空気層の混入が防止されたためと推測される。

4. あとがき

プラズマ電極型プラズマジェット発生器内のU字状アークに対し、集束リング形ノズルおよび渦流集束形ノズルを用いて局所集束を加え、アーク特性に及ぼす影響を調べた。

その結果、集束リング型ノズルを用いると、安定動作範囲が拡大し、正味アーク入力も効率よく増加していることより、U字状アークを効果的に拘束安定化しうることがわかった。一方、渦流集束型ノズルでは、アークの拘束安定化は作動ガス流量や渦ガス流量対基底ガス流量の比に大きく依存しており、今後これらとノズル径や渦ガス流指向位置との関係を解明する必要がある。

参考文献

- 1) 北口三郎 他: 傾斜機能材料製造への減圧プラズマ溶射の適用, 粉体及び粉末冶金, 37, 918(1990)
- 2) L.S.Wen et al.: Characterization of a Plasma-Sprayed YBaCuO Superconductor, *Thin Solid Films*, 168, 231(1989)
- 3) Z.P.Lu, J.Heberlein and E.Pfender: Process Study of Thermal Plasma Chemical Vapor Deposition of Diamond, Part I: Substrate Material, Temperature, and Methane Concentration, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 12, 35(1992)
- 4) 大崎 堅 他: プロセッシング用高出力・低汚染アークプラズマ発生器, 第3回粒子線の先端的应用技術に関するシンポジウム, 171(1992)
- 5) 大崎 堅 他: プロセッシング用高出力・低汚染アークプラズマ発生器—粉末供給時のアークプラズマの特性—, 第4回粒子線の先端的应用技術に関するシンポジウム, 11(1993)
- 6) 大崎 堅 他: 交差電極型プラズマ溶射ガンによるBi₂Sr₂CaCu₂O_x超伝導膜の作製, 山口大学工学部研究報告, 47, 109(1996)
- 7) 大崎 堅 他: プロセッシング用プラズマ電極型プラズマジェット発生器, 平成6年電気学会全国大会講演論文集, 2-132(1994)
- 8) 大崎 堅 他: プラズマ電極型プラズマジェット発生器, 山口大学工学部研究報告, 46, 111(1995)
- 9) 大崎 堅 他: 粉末供給時のプラズマ電極型プラズマ溶射ガンの作動特性, 第7回粒子線の先端的应用技術に関するシンポジウム, 111(1996)
- 10) 芦田英樹 他: プラズマ電極型プラズマジェット発生器内のU字状アークの拘束安定化, 平成8年度電気情報関連学会中国支部第48回連合大会講演論文集, 46(1996)

(1997. 4. 15 受理)

CONSTRICTED STABILIZATION OF THE U-SHAPED ARC IN PLASMA ELECTRODE TYPE PLASMA JET GENERATOR BY LOCAL CONSTRICTION NOZZLES

Katashi OSAKI, Hideki ASHIDA, Naofumi TADA and Osamu FUKUMASA

The local constriction effect on the U-shaped arc in the plasma electrode type plasma jet generator is investigated in two kinds of nozzles, which are the ring constriction type nozzle and the vortex gas constriction type one.

By using the ring constriction type nozzle, the U-shaped arc is maintained stably over a wide range of operating conditions and the net input power supplied to the arc is increased efficiently. From these results, it is clarified that the U-shaped arc can be constricted and stabilized effectively by this nozzle. On the other hand, for the vortex gas constriction type nozzle, it is found that the constricted stabilization of the U-shaped arc depends on the working gas flow rate and the ratio of the vortex gas flow rate to the base gas flow rate.