

プラズマ電極型プラズマジェット発生器

大崎 堅*・生田昌輝**・多田直文*・福政 修*

Study on the Plasma Electrode Type Plasma Jet Generator

Katashi OSAKI, Masateru IKUTA, Naofumi TADA and Osamu FUKUMASA

Abstract

This report described the general characteristics of a newly designed plasma electrode type plasma jet generator. This generator consisted of a nozzle constrictor, a rod anode and cathode which were put in each electrode arc chamber installed perpendicularly in the nozzle constrictor. A constrictor ring was set up at outlet of each electrode arc chamber. So the electrode spots were separated from the nozzle constrictor section and a U-shaped arc was ignited.

The stability of the U-shaped arc was influenced by the constriction conditions of the cathode side arc column and the U-shaped arc was operated stably by selecting the experimental conditions, i.e. the improvement of the nozzle structure and the working gas flow form. The arc voltage-current characteristics was a rising characteristics and the arc input power was increased effectively. The jet power was up to 9kW at the arc current 110A and the thermal efficiency of the generator was much the same as the conventional type.

1. まえがき

プラズマジェットの高温、高速、高活性という特徴を活用して様々な工業的応用がなされている。特に、近年ではこれを熱源としたプロセシング装置により高融点材料の溶射や微粒子化、超伝導厚膜の作製やC₆₀フラーレンの生成が行われている^{1)~4)}。

このようなプロセシングにおいては、一般に非移行式の通常型プラズマジェット発生器が用いられている。この発生器は棒状陰極とこれに対向するノズル型陽極間に点弧したアークを作動ガスとノズル壁によってノズル軸線上に拘束安定化し、熱ピンチ効果に基づく軸

方向圧力とアーク加熱による作動ガスの膨張を利用してプラズマジェットをノズルから噴射する方式を採用している。それゆえ、アーク電流、作動ガスの種類や流量、作動する雰囲気や圧力等の作動条件によっては発生器熱効率が低下したり、電極損傷やジェットのゆらぎの増大をきたすなどの傾向がみられる。

このため、筆者等はアーク及びジェットを器壁やガス流により効率よく拘束安定化しうる強制伸長アーク型⁵⁾、局所アーク圧縮型^{6),7)}、交差電極型⁸⁾等の各種プラズマジェット発生器を開発し、良好な動作特性の結果を得ると共に、それらを用いて高融点材料の微粒子化や溶射膜の作製を行い、プロセシングへの適応性についても検討を加えてきた。その中でも交差電極型プラズマジェット発生器は、ノズル集束部に絶縁された棒状陽極を軸線に垂直に挿入すると共にその前面に集束リングを設けノズル内アーク柱即ち、プラズマジェッ

*電気電子工学科

**電気電子工学専攻

トを生成する主プラズマ流生成域から陽極点を隔離する構造としてある故、広い圧力範囲において高出力、低汚染のプラズマジェットを長時間安定に生成できると共に、高温のアーク柱の一部を各種材料プロセスに利用できることが判明⁹⁾した。

本研究では、プロセッシングに際して更なるアーク柱の有効利用を計るため、交差電極型プラズマジェット発生器の陰極側も陽極側と同様な構造及び配置とし、陰極点をも主プラズマ流生成域から隔離する方式のプラズマ電極型プラズマジェット発生器¹⁰⁾を試作し、現在その動作特性を調べており以下にその一部を述べる。特に、本発生器のノズル内に点弧する U 字状アークの電気的、熱的特性や点弧状態について述べる。

2. 実験装置及び実験方法

試作したプラズマ電極型プラズマジェット発生器は、Fig. 1 に示すように従来のプラズマジェット装置の電極構成とは全く異なり、2本の棒状電極をノズル中心軸線に対し垂直にしかも電極は互いに平行になるようにノズル集束部側面に挿入し、更にそれらの先端に集束リングをセットし、電極点を主プラズマ流生成域から完全に隔離する構造となっている。従って本発生器でのアークは、Fig. 2 に示すように棒陰極先端の陰極点から発し集束リングを通して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しノズル軸線上に拘束安定化されたアーク柱（主アーク柱）及び径方向に向かい集束リングを通して棒陽極端面上の陽極点に達する陽極側アーク柱から成るいわゆる U 字状アークを呈している。これより、主アーク柱部（U の字の底部に対応するアーク柱）への荷電粒子のソースとシンクの役割はそれぞれ陰極側アーク柱及び陽極側アーク柱が担っていると見なすことが出来る。

陽極は直径 5 mm の銅棒で、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あり、各電極は銅製ノズルの先端及び後端から 9 mm 内部の位置に設けてある集束リング付き陽極室及び陰極室に収められている。集束リングの軸長は 1.5 mm であり、陽極室出口のその内径は 3 mm、陰極室出口のその内径は 3 又は 4 mm である。

ノズルは陽極室を持つ陽極支持部（軸長 22 mm）、軸長 3、5 又は 7.5、3 mm の 3 枚のディスク及び陰極室を持つ陰極支持部（軸長 22 mm）に分割されており、各部分は厚さ 0.5 mm の窒化ほう素板及びテフロンにより絶縁されている。従って電極ギャップは 39 又は 41.5 mm となる。又、軸長 3 mm の 2 個のディスクの電位を測定

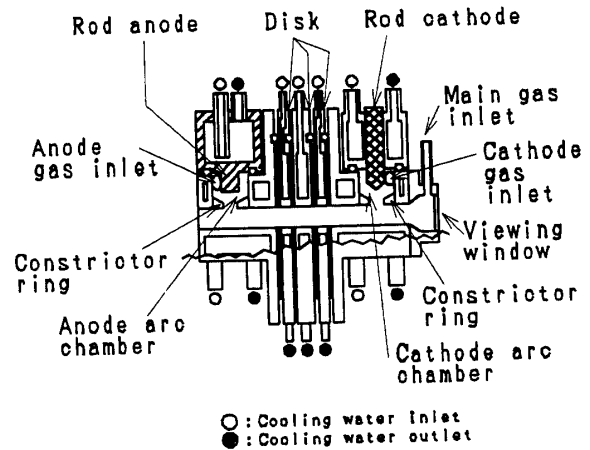


Fig. 1 Sectional view of plasma electrode type plasma jet generator.

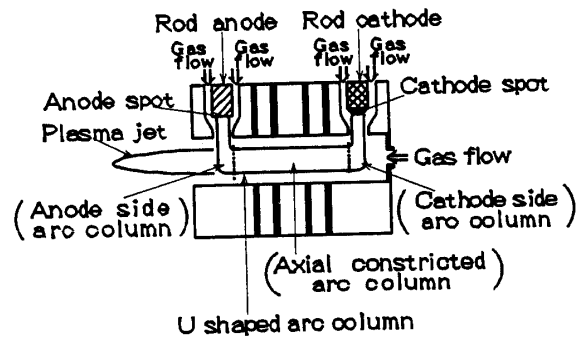


Fig. 2 Sketch of U-shaped constricted arc.

することにより、主アーク柱部の平均電界強度を求めうる。なお、電極室には電極シース兼電極側アーク柱集束用ガス流入口が、陰極支持部後部には作動ガス流入口及びアーク柱観測用窓が設けてある。

なお、陽極、陽極支持部、各ディスク、陰極支持部及び陰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 190 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 40 ~ 110 A を供給した。作動ガスは流量 10 ~ 40 l/min を渦流又は軸流として流入させる。陽極シース兼陽極側アーク柱集束用ガスは流量 10 l/min を、陰極シース兼陰極側アーク柱集束用ガスは流量 10 又は 15 l/min を渦流として送給する。ノズル内径は 5 又は 6 mm である。なお、ガスはアルゴンであり、ジェット発生雰囲気は大気中である。又、アークに対し、シャッター速度 1/60 秒でスチル撮影を行い、アーク点弧状態及び形状を求めた。

3. 実験結果と考察

3.1 U字状アークの安定化

Fig. 3はU字状アークの電圧電流特性のガス流入形式及びノズル形状依存性を示す。ノズル内径5 mmにおいて、陰極シース兼陰極側アーク柱集束用ガス流量15l/minとし、作動ガス流入形式が渦流、陰極室出口集束リング内径が3 mmの場合、アーク電流70A以下においてはアークは安定に維持されているが、その電流を越えると陰極側アーク柱が不安定となり、集束リングに対向したノズル集束部側壁や陰極支持部出口付近に損傷を生じ、定常アークの維持は困難となる。

一方、陰極室出口集束リング内径を4 mmに拡大した場合、安定動作電流上限は90Aにアップする。これは、ノズル内に流入する陰極側アーク柱の速度と作動ガス流速とのバランスが保たれるようになり、陰極側アーク柱の安定度が向上したためと考えられる。

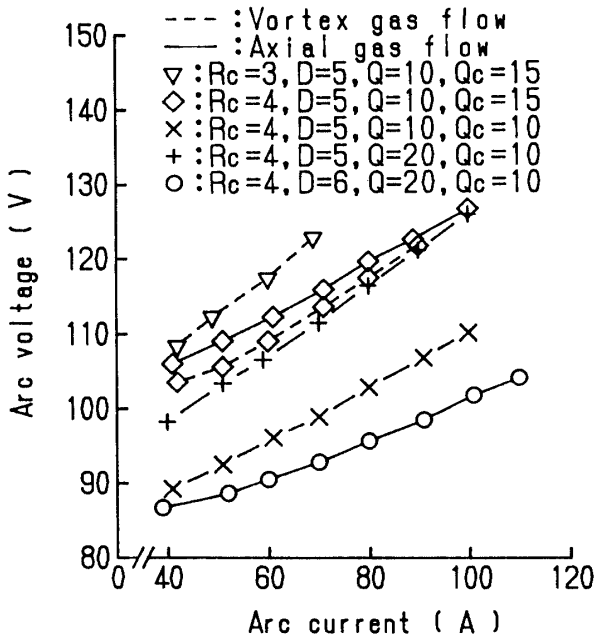


Fig. 3 Dependences of arc voltage-arc current characteristics on working gas flow form and nozzle structure.

Rc: Constrictor ring diameter of cathode arc chamber (mm),

D: Nozzle diameter (mm),

Q: Working gas flow rate (l/min),

Qc: Cathode sheath gas flow rate (l/min).

更に、集束リング内径4 mmで作動ガス流入形式を軸流とすると、作動ガスによる陰極側アーク柱のノズル断面内での円周方向への空間的、熱的ゆらぎが小となるために安定動作電流上限は100Aにアップする。しかし、この場合も安定動作電流上限を越えると前記即ち作動ガス流入形式が渦流、集束リング内径3 mmの場合と同様な現象が生じる。

又、陰極シース兼陰極側アーク柱集束用ガス流量を15l/minから10l/minに減じて、安定動作電流上限の上昇はみられない。

これに対し、作動ガス流入形式が軸流、陰極シース兼陰極側アーク柱集束用ガス流量10l/min、陰極室出口集束リング内径4 mmでノズル内径を6 mmに拡大すると安定動作電流上限が110Aにアップする。これらのことより、U字状アークの安定性は主として陰極側アーク柱から主アーク柱に移行する湾曲アーク柱の熱的、機械的ふるまいに依存していることがわかった。従って、これ以後の報告では、安定動作範囲の広いノズル内径が6 mm、陰極室出口集束リング内径が4 mm、作動ガス流入形式が軸流、陰極シース兼陰極側アーク柱集束用ガス流量が10l/minの場合について述べる。

3.2 U字状アークの電気的特性

U字状アークの電圧対電流の関係を Fig. 4に示す。

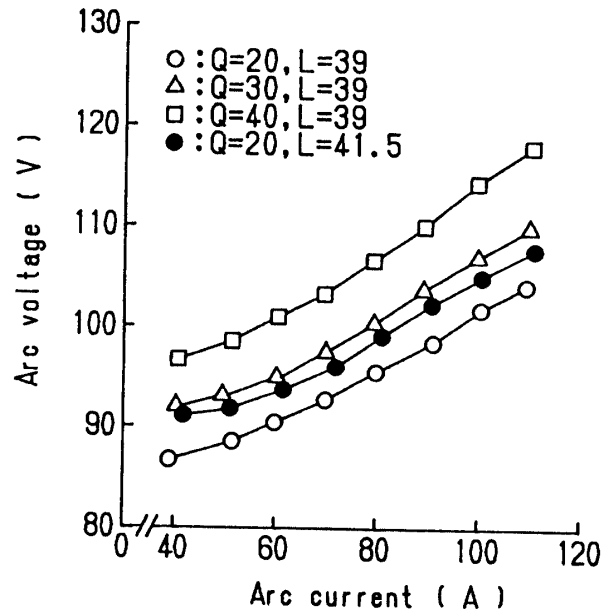


Fig. 4 Arc voltage-arc current characteristics.

Q: Working gas flow rate (l/min),

L: Electrode gap (mm).

アーク電圧対電流の関係はアーク電流の増加に伴い上昇する、いわゆる上昇特性を持つ。このような小電流領域において顕著な上昇特性を示すのは電極点が固定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器壁及びガス流により効果的に抑えられているためであると考えられる。電圧上昇率はアーク電流70Aを境として異なり、70A以上の領域ではそれ以下の場合の45~57%増加している。例えば作動ガス流量20l/min、電極ギャップ39mmでは、70A以下の領域においては上昇率は0.20V/Aであり、それ以上の領域では0.29V/Aである。このような違いは、後述するように電極側アーク柱がアーク電流70Aまでは延伸し、70A以上では主アーク柱の移動がノズル壁により抑えられ、ノズル軸線付近に効果的に拘束安定化されていることより生じるものと推察しうる。

作動ガス流量を増加すると主アーク柱に対する熱ピンチ作用が増しアーク電圧は5.6V/(10l/min)の割合で直線的に上昇する。又、作動ガス流量20l/minにおいて電極ギャップを39mmから41.5mmに伸ばした場合、アーク電圧電流特性は電極ギャップ39mmの特性を維持したまま電圧のみ約3.5V上昇する。

主アーク柱部における平均電界強度はFig. 5に示すようにアーク電圧電流特性と同様の傾向を示すことから、主アーク柱の集束状態がアーク電圧に大きく影響していることがわかる。電極ギャップを39mmから41.5mmに増加した場合、平均電界強度はほぼ同じ値を持ち、又、前述したようにアーク電圧電流特性も同様な

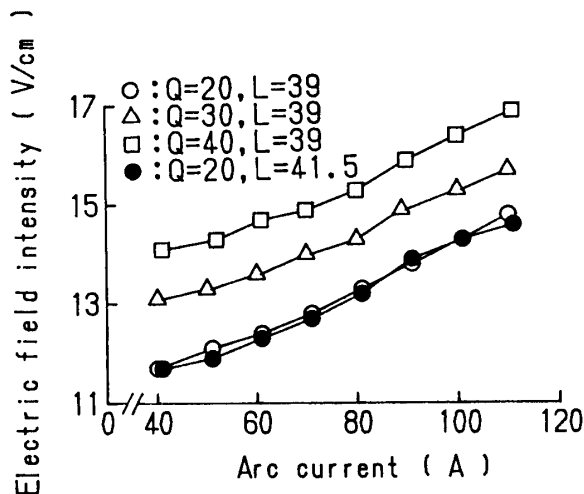


Fig. 5 Mean electric field intensity of the main arc column vs. arc current.

Q: Working gas flow rate (l/min),

L: Electrode gap (mm).

特性を維持していることから、軸長の増加は同質の主アーク柱部の延伸を意味するものと考えられる。

アークモードはFig. 6に示すように常にランダム振動モードを呈し、その振動周波数は6~9 kHzである。本発生器では陽極点及び陰極点は固定されている故、アーク電圧波形に現れる振動は主にノズル内アーク柱のふるまいによると見なせる。Fig. 7に電圧振動振幅

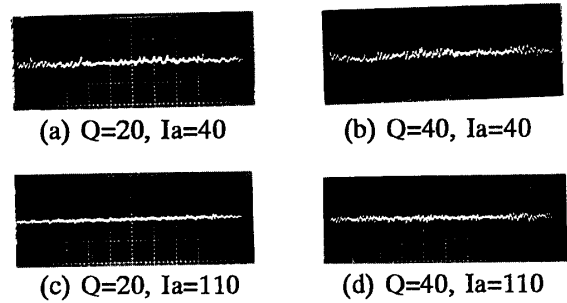


Fig. 6 Oscillograms of arc voltage wave form.

Sweep velocity: 1ms/div, Gain: 2V/div.

Q: Working gas flow rate (l/min),

Ia: Arc current (A).

Electrode gap: 39mm.

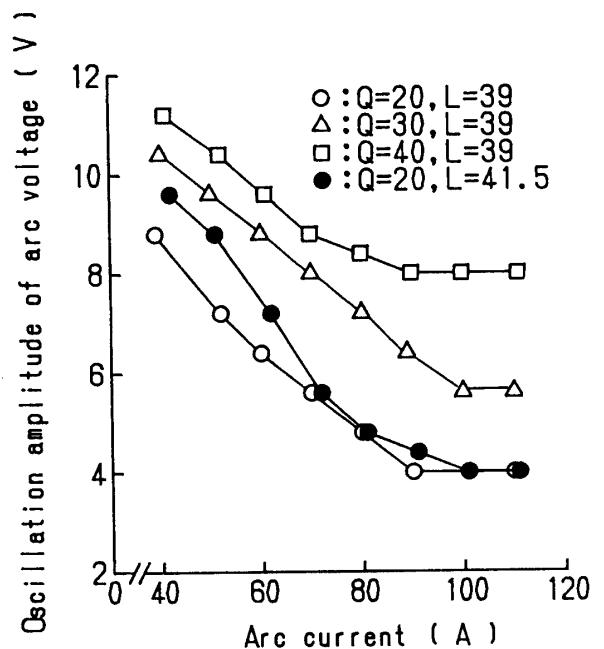


Fig. 7 Oscillation amplitude of arc voltage vs. arc current.

Q: Working gas flow rate (l/min),

L: Electrode gap (mm).

のアーク電流依存性を示す。電圧振動振幅は電流増加にともない減少する。又、作動ガス流量を増加すると振動振幅は増加する。これは、作動ガスによる電極側アーク柱の空間的、熱的ゆらぎが主アーク柱に波及するためであると考えられ、過大な作動ガスはアークの安定性を阻害するものである。電圧振動振幅は対応するアーク電圧の3.2~11.6%であり、巨視的にはアークは安定に維持されていると見なされる。

3.3 エネルギー収支

本発生器の陽極熱損失及び陰極熱損失を Fig. 8 に、陽極支持部、絶縁集束部及び陰極支持部における熱損失を Fig. 9 に示す。各部熱損失は電流の増加に伴ってほぼ直線的に増す。ここで、絶縁集束部とは陽極支持部、陰極支持部間に設置した3枚のディスクの部分の指し、絶縁集束部熱損失は各々のディスクの熱損失の和である。

陽極及び陰極における熱損失は各々380~860W, 120~270W の範囲にあり、電流に依存する項のみから算出した計算値¹¹⁾と比較すると、アーク電流40A ではほぼ一致するが、電流の増加に伴って陽極、陰極熱損失共に計算値より小となり、その差は電流110A ではそれぞれ約160, 130W に達する。これより、電極シース兼電極側アーク柱集束用ガスが電極側アーク柱からのエンタルピー対流による熱伝達を効率よく遮断すると共

に、電極をも効果的に冷却していることがわかる。又、本発生器では電極点はノズル集束部から隔離されているため、電極熱損失への作動ガス流量の影響は認められない。

陽極支持部には陽極側アーク柱、陽極支持部内主アーク柱及びプラズマ流からのエンタルピー対流と放射による熱エネルギーが伝達され、その量は500~1500W と全電気入力¹²⁾の10~16%に相当する。電流を増加するとアーク柱及びプラズマ流の温度が上昇するため陽極支持部熱損失も増す。特に、作動ガス流量20l/minの場合、電流80A以上の領域では熱損失が急増しており、作動ガスによる主アーク柱及びプラズマ流に対する閉じ込め能力が低下していることが伺える。又、作動ガス流量を増加すると陽極支持部熱損失は減少する。

絶縁集束部における熱損失は350~830W であり、作動ガス流量を増加すると Fig. 5 に示すように主アーク柱部における平均電界強度が上昇するにも関わらず、絶縁集束部熱損失への影響はほとんどない。これより、絶縁集束部内においては主アーク柱はノズル中心軸付

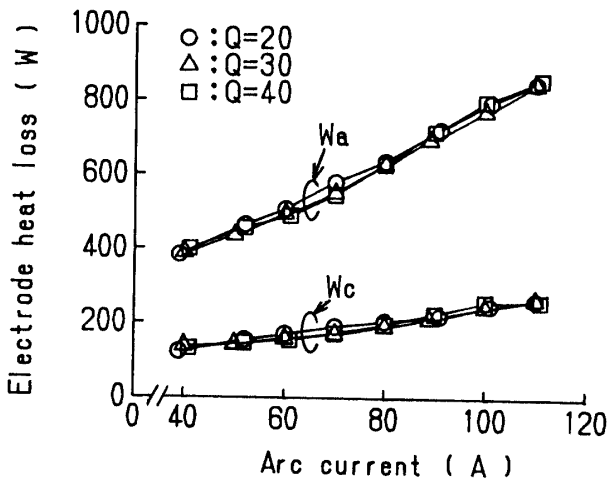


Fig. 8 Electrode heat loss vs. arc current.

Wa: Anode heat loss,
Wc: Cathode heat loss,
Q: Working gas flow rate (l/min).
Electrode gap: 39mm.

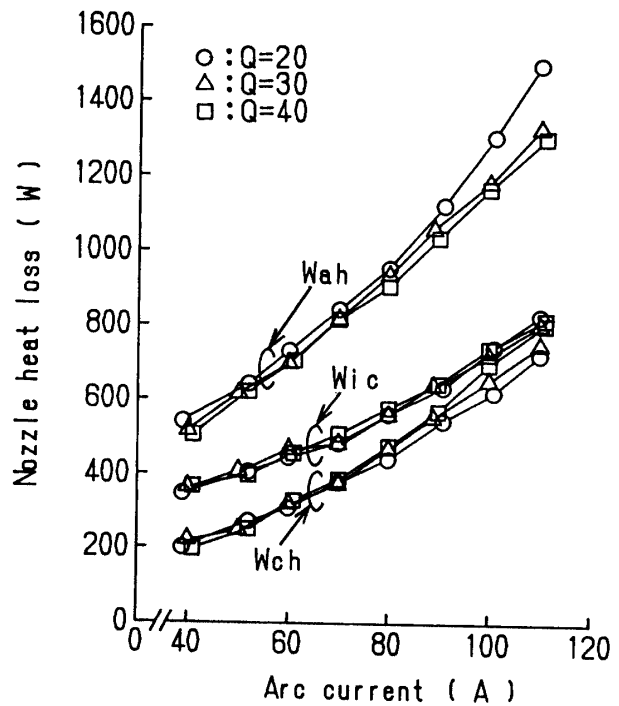


Fig. 9 Nozzle heat loss vs. arc current.

Wah: Anode holder heat loss,
Wic: Insulated constrictor heat loss,
Wch: Cathode holder heat loss,
Q: Working gas flow rate (l/min).
Electrode gap: 39mm.

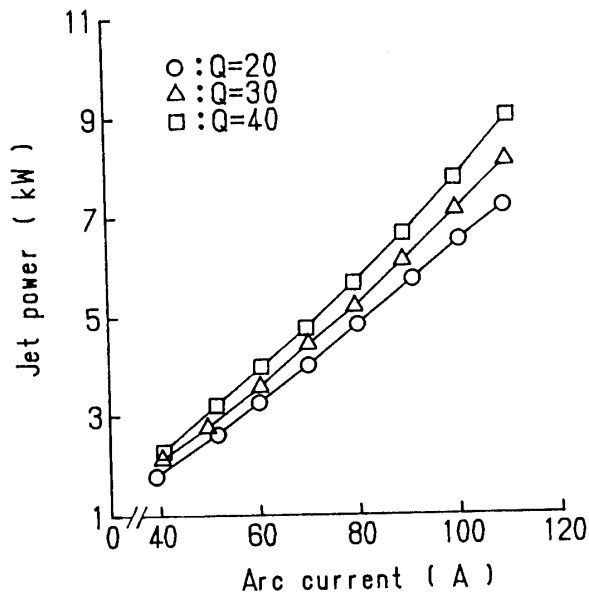


Fig.10 Jet power vs. arc current.

Q: Working gas flow rate (l/min).

Electrode gap: 39mm.

近に効果的に拘束安定化されているものと考えられる。

又、陰極支持部熱損失は200~810W と陽極支持部熱損失の40~54%と小さい、作動ガス流量の影響は陽極支持部熱損失とは逆の傾向を示し、例えばアーク電流110A では作動ガス流量20, 30, 40l/min に対し各々720, 750, 810W と作動ガスの増加に伴いわずかに増加する。これは、後述するような主アーク柱の空間的位置変化に起因するものと考えられる。

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ジェット熱出力のアーク電流依存性をFig.10に示す。ジェット熱出力は低電流域であるにも関わらず1.8~9 kW と大きく、電流の増加と共に直線的に上昇する。これより、ジェット熱出力をアーク電流によって効率よく制御できることがわかる。

3.4 アーク点弧像

陰極支持部後部の観測窓から撮影したアーク点弧像をFig.11に示す。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、これに直交しノズル軸線上に拘束安定化されている主アーク柱が示されている。ノズル内アーク柱はアークモードに現れるような振動を含むがほぼ安定に維持されている。主アーク柱の拘束される位置は、電流の増加に伴い陰極及び陽極側アーク柱が伸長するためノズル中心軸線上方から中心軸に

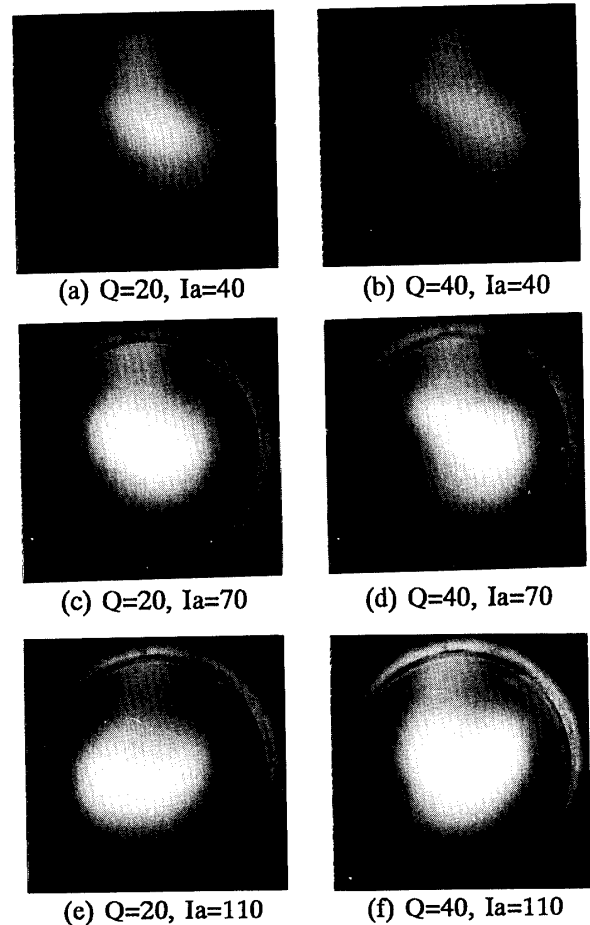


Fig.11 Photographs of arc in nozzle cross section.

Q: Working gas flow rate (l/min),

Ia: Arc current (A).

Electrode gap: 39mm.

向かって移動し、その移動距離(ノズル中心軸からの距離)は作動ガス流量20l/min では電流40, 70, 110A に対し1.14, 0.41, 0.1mm と減少し、70A 以上の領域ではほぼノズル中心軸付近に拘束されている。又、作動ガス流量を20l/min から40l/min に増加すると前述の各々の電流値における移動距離に対し約0.5mm 増加する。なお、主アーク柱の直径は2.4~3.6mm の範囲にあり電流の増加に伴い直線的に増加しており、主アーク柱の電流密度を求めると、860~1260A/cm²である。

4. あとがき

本研究では、プラズマ電極型プラズマジェット発生器に点弧するU字状アークの電氣的、熱的特性及び点弧状態を調べた。その結果、本発生器に点弧するU字

状アークの安定度には陰極側アーク柱の集束状態が大きく影響し、適正条件を選定することにより安定動作領域を拡大できた。電圧電流特性は上昇特性となり電流増加によりアーク入力を効率よく増強できること、ジェット熱出力は110A以下の小電流域であるにも関わらず最大9 kWと高出力を保持していること、発生器熱効率率は通常型プラズマジェット発生器のそれと同等以上を維持していること等が明らかになった。

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・佐々木眞：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) 佐伯節夫・大崎 堅・阿部格郎：昭和47年度電気四学会九州支部連合大会論文集, **47** (1972)
- 6) S. Saeki, K. Osaki, O. Fukumasa and K. Yamada: Proc. 10th Symp. on ISIA T'86 Tokyo, 149 (1986)
- 7) 大崎 堅 他：プラズマ応用科学, **2**, 58 (1994)
- 8) 大崎 堅・福政 修・佐伯節夫：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)
- 9) 大崎 堅 他：第5回粒子線の先端的应用技術に関するシンポジウム, 77 (1994)
- 10) 大崎 堅 他：平成6年電気学会全国大会講演論文集, 2-132 (1994)
- 11) K. T. Shih et al.: AIAA Paper, No.67-673, 1 (1967)

(平成7年4月14日受理)