

研究論文

絶縁集束型プラズマジェット発生器におけるノズルアークの特性

山口大学工学部 大崎 堅, 福政 修
大阪大学接合科学研究所 小林 明
山口大学工学部 多田直文

Characteristics of Nozzle Arc on Insulated Constrictor Type Plasma Jet Generator

Katashi OSAKI, Osamu FUKUMASA, Akira KOBAYASHI* and Naofumi TADA

Faculty of Engineering, Yamaguchi University

*Joining and Welding Research Institute, Osaka University

A newly designed insulated constrictor nozzle, which was equipped the insulated constrictor section composed of the mutually insulated several water-cooled disks, was used to examine the constriction effect on the forced elongated arc.

The arc voltage-current characteristics of the elongated arc was a rising characteristics.

When the length of the insulated constrictor section was increased, the electric field intensity of the elongated arc was decreased at the outlet region of the insulated constrictor section and the heat loss of the insulated constrictor was increased with increasing distance from the insulated constrictor inlet.

The thermal efficiency of the insulated constrictor section was 74 ~ 94% and was higher than that of the plasma jet generator.

1. まえがき

アークプラズマ発生器は高温、高速、高活性のプラズマ流を容易に生成でき、しかも構造が簡単であるため、すでにプラズマプロセッシング用の熱源として広く利用され、高融点材料の超微粒子製造¹⁾、ダイヤモンド膜²⁾、傾斜機能皮膜³⁾や超伝導膜の作製⁴⁾、C₆₀フラーレンの生成⁵⁾等が行われている。

これらに用いられているプラズマ源としては、一般に非移行式の通常形直流プラズマジェット発生器が主である。この発生器のノズル壁面上に形成される陽極点はアーク電流を増加するとノズル内部に後退し、アーク柱が短縮されるためアーク入力の効果的な増大が妨げられる。従って、所望の熱出力と体積を有する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、プラズマ源は大型化^{6, 7)}するとともに生成ジェットは電極材料により汚染される可能性が大となる。

これに対し、筆者らが開発した絶縁集束型プラズマジェット発生器⁸⁾は、絶縁集束ノズルを用いて陽極点をノズル出口に拘束し、アークを強制伸長する方式を採っているため、動作条件に関わらずほぼ一定のアーク長を保持でき、低電流域（アーク電流300A以下）において高出力のプラズマジェットを生成⁹⁾できる。しかし、この発生器においても、生成されるジェットの基礎量（温度、密度、速度等）や安定度は絶縁集束ノズル内のアークの電氣的、熱的、機械的特性に依存し、ノズル構造や動作条件がこれらの特性に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

本研究では、絶縁集束部長の異なる数種類の絶縁集束ノズルを用いて、ノズルアークに対する拘束長を変化し、拘束長がアークの電氣的・熱的特性に及ぼす影響を調べ、ノズルアークの集束効果について検討する。

2. 実験装置及び実験方法

本研究で試作した絶縁集束ノズルは、内径5mmの銅製で、先端に軸長5mmの陽極部有し、これに続いて分割水冷ディスク数個をカスケード接続した絶縁集束部が接続されている。このノズルを持つ絶縁集束型プラズマジェット発生器の構造をFig. 1に示す。また、絶縁集束部を構成しているディスクをFig. 1のようにノズル入口から出口に向かって順にD₁, D₂, … D₅とする。

水冷ディスクの軸長は、ディスク間の電位差に基づく絶縁破壊及び水冷の

ための構造等を考慮し、最小長を3mm、最大長を9mmとし、軸長3mmを4個、7mm、7.5mm及び9mmを各1個作製した。本研究に用いた絶縁集束ノズルは、これらのディスクをTable 1に示すような組み合わせとした絶縁集束部長が7.5mm、11mm、15mm、24mm及び26.5mmの5種類である。ここで、これらの絶縁集束部長に対応するノズルをそれぞれC-075、C-110、C-150、C-240及びC-265ノズルと称す。軸長3mmのディスクの電位を測定することにより、各ノズルにおける絶縁集束部アーク柱の軸方向電位分布が明らかとなり、これより平均電界強度を求めうる。なお、各ディスク及び陽極は厚さ0.5mmの窒化硼素板で絶縁されている。

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、それと絶縁集束部入口とのギャップが2mm一定に保持されている。

なお、ノズル部以外は通常用いられるプラズマジェット発生器の構造をそのまま踏襲している。本発生器の陽極部、各ディスク、アーク室部、陰極ホルダに対して、それぞれ個別に水冷を行い、各部熱損失を求めらる。

アーク電流は無負荷電圧160V、容量50kVAの直流電源より安定抵抗を通して60~160Aを供給する。作動ガスは純度99.99%のアルゴンを用い、流入圧力5kg/cm²、流量20~40l/minでアーク室後方のガス流入室に渦流として流入する。

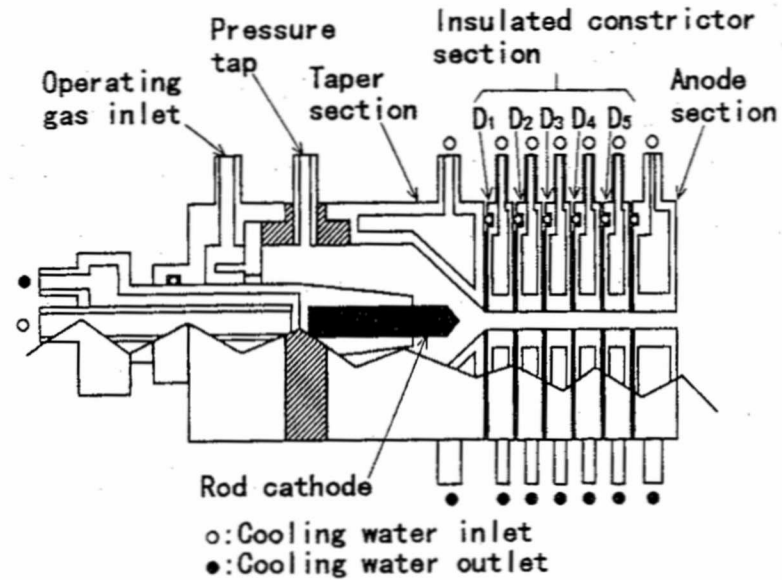


Fig.1 Schematic view of a insulated constrictor type plasma jet generator.

Table 1 Specification of various insulated constrictor nozzles.

Nozzle name	Axial length of disk(mm)					Axial length of insulated constrictor section (mm)
	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	
C-075	3	3	-	-	-	7.5
C-110	3	3	3	-	-	11.0
C-150	3	7	3	-	-	15.0
C-240	9	3	3	3	3	24.0
C-265	3	7	3	7.5	3	26.5

[note] Nozzle diameter:5 mm, Axial length of anode section:5 mm, Depth of insulated spacers:0.5 mm.

3. 実験結果と考察

3. 1 電気的特性

絶縁集束ノズルによる強制伸長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C-075ノズルで0.06~0.08V/A, C-150ノズルで0.124~0.169V/A, C-265ノズルで0.203~0.274V/Aとなり、絶縁集束部長及びガス流量の増加につれて増大する。一方、絶縁集束ノズルと同形の通常形ノズルの場合この電流範囲では垂下特性を示す。絶縁集束ノズルにおいてこのように小電流領域で顕著な上昇特性を示すのは、電流の増大にかかわらずアーク長が一定に保持されていることを考慮すると、絶縁集束部アーク柱の膨張及び導電率の増加が抑えられている故と考えられる。

アーク電圧は絶縁集束部の伸長とともに上昇するが、絶縁集束部長15mmを越えると上昇率は減少する。一例を示すと、ガス流量20l/min, アーク電流100Aの場合、電圧上昇率は絶縁集束部長15mm以下で17.5V/cm, 15mm以上で14.2V/cmと20%程度低下する。これは絶縁集束部長が長くなると、後述するように絶縁集束部出口側のアーク柱電界強度が低下することと、軸線から陽極点に向かう径方向アーク柱に対するガス流の熱ピンチ効果が弱くなることによるためと考えられる。

絶縁集束部を構成している軸長3mmディスクの電位とそのディスク位置との関係、すなわち絶縁集束部アーク柱の電位の軸方向分布をFig. 3に示す。この場合の電位は、測定した軸長3mmディスクの電位がディスクの中央におけるものと仮定した。各ノズルにおける電位分布のパターンはほぼ相似であり、絶縁集束部入口からの距離(L)が増すにつれて電位のみ上昇する。しかし、その上昇の割合すなわち絶縁集束部アーク柱の電界強度は、絶縁集束部長が15mm以上のC-240及びC-265ノズルではアーク電流が増大するとL \geq 15mmの領域において低下する。この転移が起こる位置は、ガス流量20 l/minの場合アーク

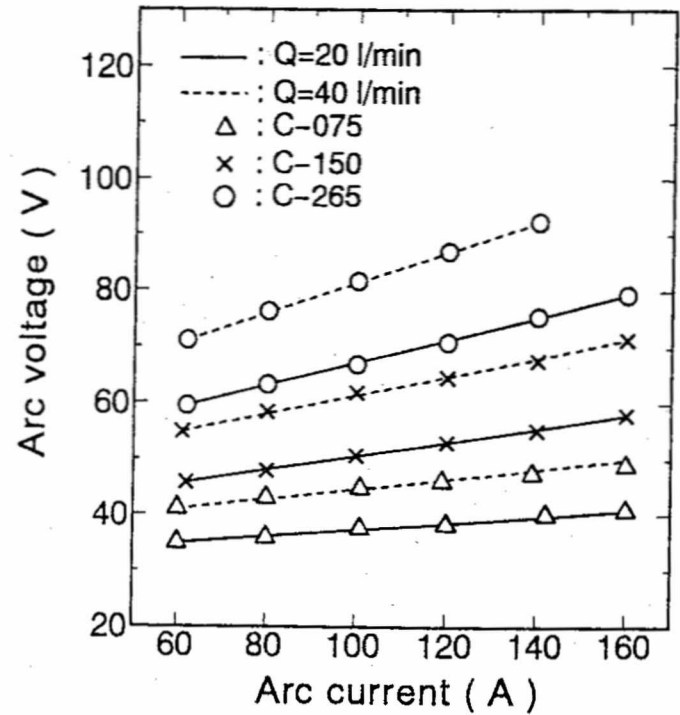


Fig.2 Arc voltage-arc current characteristics. Q: working gas flow rate.

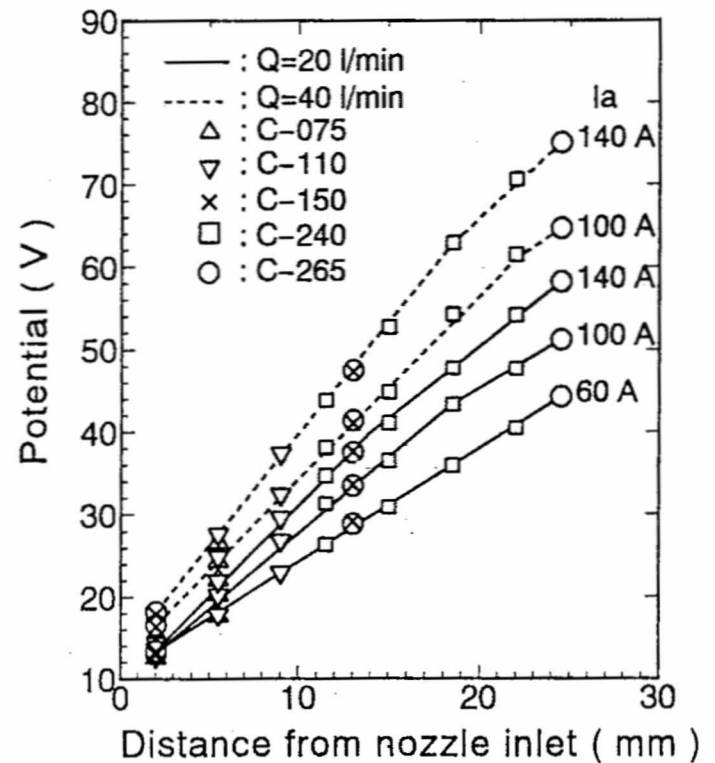


Fig.3 Axial distributions of arc column potential. Q: working gas flow rate.

電流100, 140 Aではそれぞれ $L = 18.5\text{mm}$, $L = 14\text{mm}$ であり, 40 l/minの場合それぞれ $L = 22\text{mm}$, $L = 18.5\text{mm}$ となり, 電流の増加あるいは流量の減少により絶縁集束部入口側へ移行する。これより絶縁集束部が長くなると, 作動ガス流によるアーク柱に対する集束能力が入口側に比べて出口側では低下しているものと推測される。また, $L = 2\text{mm}$ における電位は各ノズルとも等しいことより, 絶縁集束部長に関係なく同質のアーク室アーク柱が維持されていると見なしうる。これらより, 絶縁集束部を伸長した場合, 低電流域では同質のアーク柱が, 高電流域になると15mm以上のノズルでは入口領域のアーク柱とは質的に異なるアーク柱が延伸していることが分かった。

Fig. 4は, アーク電流100 AにおけるC-265ノズルでのディスク D_1 と D_3 , D_3 と D_5 の電位を比較して求めた, 絶縁集束部入口側及び出口側のアーク柱電界強度のガス流量依存性を示している。入口側及び出口側のアーク柱電界強度はそれぞれ18.4~24.5V/cm, 15.3~24V/cmの範囲にあり, ガス流量を増すと集束効果が強くなるためいずれも上昇するが, 流量効果は後者のアーク柱に対して大であり, 流量60 l/minでは両者の電界強度の差は僅少である。なお, アーク電流を増加した場合もこの特徴を維持したまま電界強度のみ上昇する。

3. 2 熱的特性

陽極部及び絶縁集束部における熱損失を

Fig. 5に示す。アーク電流を伴う陽極部熱損失は, 電流の増加につれほぼ直線的に上昇する。C-265ノズルにおける陽極部熱損失は, 680~2200Wの範囲にあり, 電流により流入する熱エネルギーすなわち陽極入力理論値¹⁰⁾と比較すると, 電流80 A以下では25%増にすぎないが, 80 Aを越えると理論値からのずれが増大し, 160 Aでは50%増となる。これに対し, C-075ノズルにおける陽極部熱損失は, 電流100 A以下では理論値とほぼ一致し, 100 A以上の領域においても理論値の15%程度の増加である。また, ガス流量を20から40

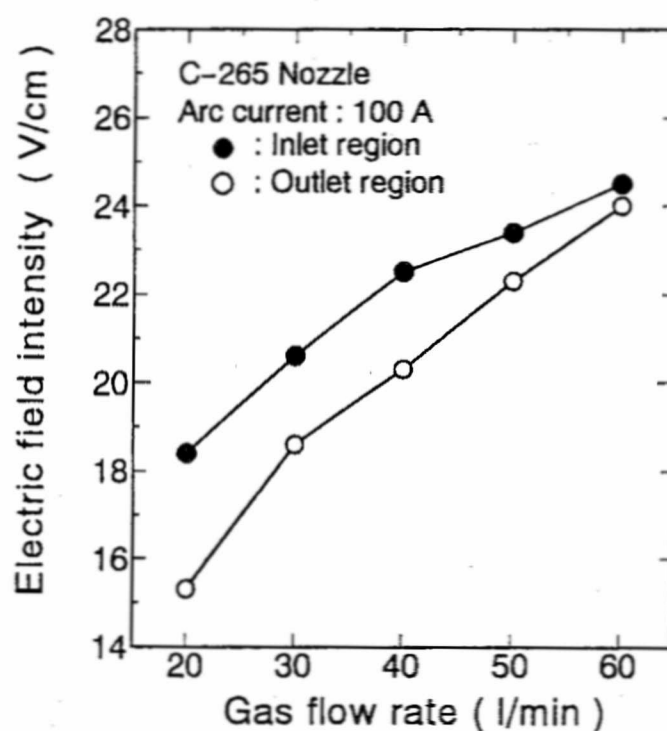


Fig.4 Electric field intensity vs. gas flow rate.

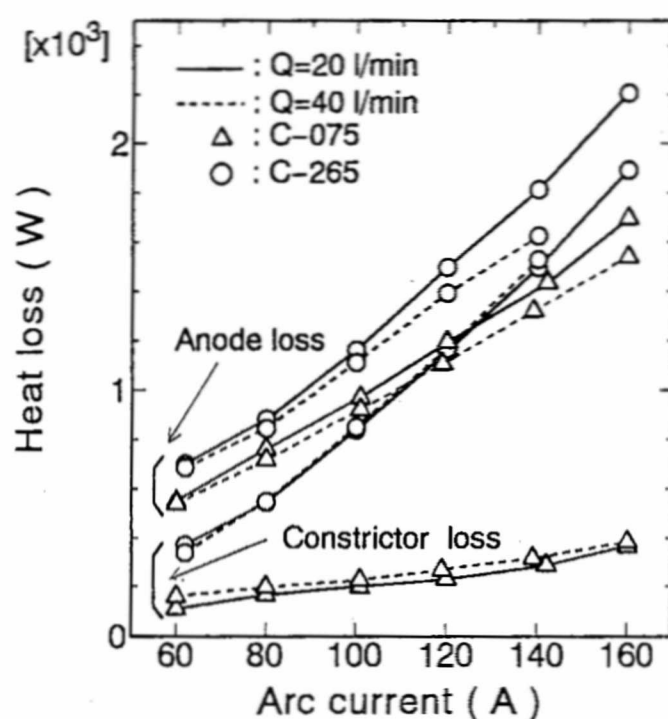


Fig.5 Heat loss of the anode section and the insulated constrictor section vs. arc current. Q: working gas flow rate.

1/minに増すと、陽極部熱損失は5~12%と僅かに減少するが、依然として理論値より大である。これらより、絶縁集束部が長くなると、陽極部におけるアーク柱及びプラズマ流からのエンタルピ対流によって伝達される熱エネルギーが増加することが分かる。

一方、絶縁集束部熱損失は、C-267及びC-075ノズルではそれぞれの陽極部熱損失の48~94%、20~25%であり、電流の増加につれてほぼ直線的に上昇するが、ガス流量の影響は軽微である。絶縁集束部熱損失が集束部長の増加によって変化する様子を調べると、C-265ノズルにおける損失は、電流80A以下ではC-075ノズルの損失の約3.5倍であり、両ノズルの絶縁集束部長の比と一致しているが、80A以上になるとほぼ5倍となる。電流80A以上でC-265ノズルにおいて、このような損失の増加は後述するように、絶縁集束部出口側における損失の急増によるものである。

Fig. 6は、C-265ノズルの絶縁集束部を構成する各ディスクの熱損失から求めた各ディスク部における1mm当たりの損失を示している。D₃~D₅ディスクの損失は、電流80Aを越えると電流10A当たり平均34W/mmの割合で急増し、電流160AでD1ディスクの90~130%増の82~98W/mmに達する。さらに、D₅ディスクの損失は、D₃ディスクのその20~45%増である。また、ガス流量を20から40 l/minに増すと、前述のように電界強度が増加するにもかかわらず、D₄及びD₅ディスクの損失は6~

20%減少する。従って、集束部出口側での損失増加は、作動ガス流による出口側アーク柱に対する閉じ込め効果の低下によって生じると推測される。なお、ガス流量を増すとD₁~D₃ディスクでの損失は増加するが、D₄及びD₅ディスクでは逆に減少することより、絶縁集束部への熱伝達は入口側では放射が、出口側ではエンタルピ対流が主であると推察される。

電界強度とアーク電流の積からFig. 6に示した各ディスクにおける1mm当たりの熱損失を差し引いて求めた各ディスク部における1mm当たりの正味アーク入力、Fig. 7に示すよう

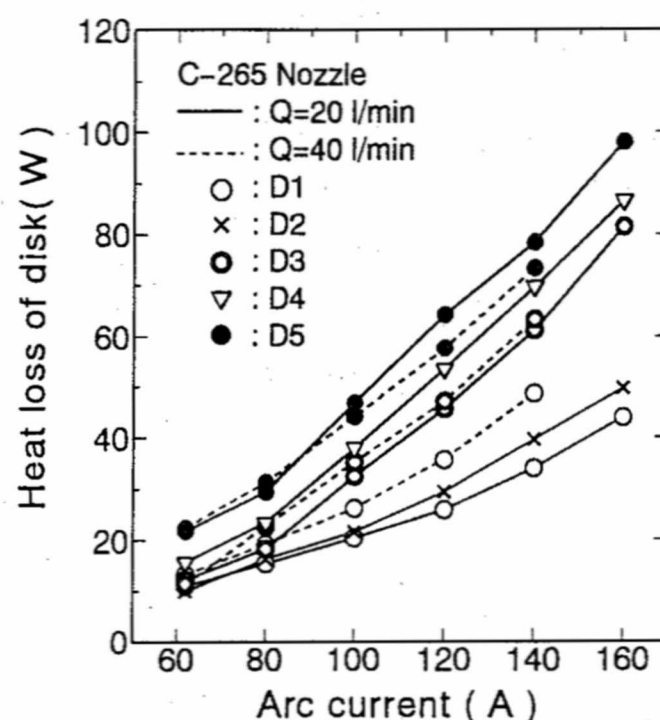


Fig.6 Heat loss of disk vs. arc current. Q: working gas flow rate.

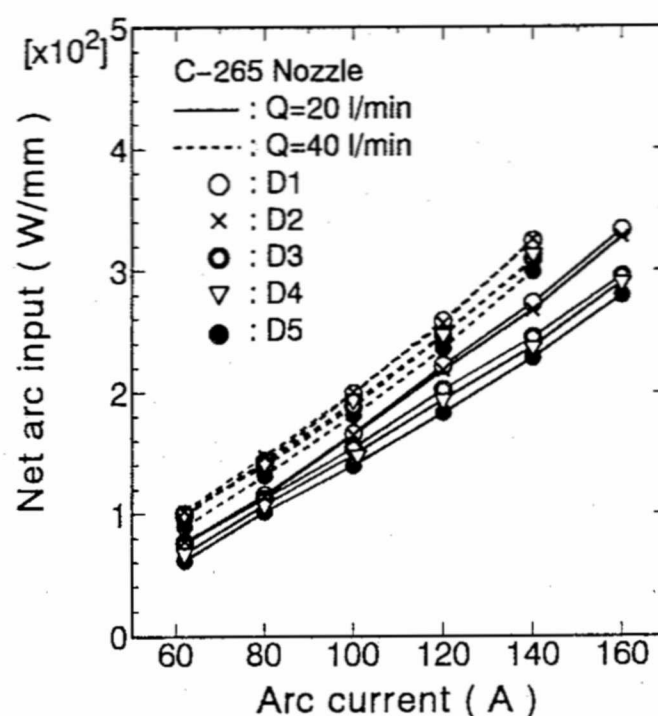


Fig.7 Net arc input of constricted arc column vs. arc current. Q: working gas flow rate.

に、アーク電流と共に増大し、 D_1 及び D_2 ディスク部ではほぼ同じ入力80~330Wを維持しており、出口側に近づくにつれて低下する。また、ガス流量を増加すると、入力も増す。 D_1 ~ D_5 ディスク部におけるアーク柱の熱効率、ガス流量20 l/minではそれぞれ87~90%、87~89%、78~86%、77~82%、74~77%、40 l/minではそれぞれ86~89%、87~92%、83~90%、83~90%、80~81%であり、ガス流量を増すと D_3 ~ D_5 ディスク部の効率が上昇する。しかし、いずれのディスク部においても発生器の熱効率64~74%を上回っている。

なお、C-075ノズルを持つ発生器の電気入力及び熱効率と比較すると、C-267ノズルを持つ発生器のそれらは70~95%増、2~4%増であり、絶縁集束部を増加することにより高熱出力の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。

4. あとがき

絶縁集束ノズル内の強制伸長アークに対して絶縁集束部の長さを段階的に変化させて、ノズルアークの集束効果を調べた。その結果を要約すると、次の通りである。

- (1) アーク電圧対電流の関係は常に上昇特性を示し、その上昇率は集束部長の増加とともに大となる。
- (2) 絶縁集束部が長くなると、出口側アーク柱の電界強度及び熱効率は低下する。
- (3) 絶縁集束部が長くなると、陽極部への熱伝達はエンタルピー対流及び放射による比率が増す。
- (4) 絶縁集束部への熱伝達は入口側ではアーク柱からの放射が、出口側ではアーク柱からのエンタルピー対流が主である。
- (5) 絶縁集束部アーク柱の熱効率は74~92%であり、発生器の熱効率を上回っている。

以上、絶縁集束ノズル内に閉じ込められた強制伸長アークの電氣的、熱的特性のみについて述べたが、発生ジェット及び強制伸長アークの動的ふるまいや温度、密度等の基礎量がノズル構造によって受ける影響については別に稿を改めて述べる。

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る。

参考文献

- 1) S. V. Joshi et al: Plasma Chemistry and Plasma Processing, 10, 339(1990)
- 2) Z. P. Lu et al: Plasma Chemistry and Plasma Processing, 11, 387(1991)
- 3) 新野正之・熊川影長・佐々木眞: 電学誌, 110, 35(1990)
- 4) H. Zhu, Y. C. Lau and E. Pfender: J. Appl. Phys., 69, 3404(1991)
- 5) T. Sone, H. Akatsuka and M. Suzuki: Plasma Sources Sci. Technol., 2, 46(1993)
- 6) S. L. Camacho: Proc. 8th Int. Symp. on Plasma Chemistry, 1, 87(1987)
- 7) 荒田吉明・小林 明: 高温学会誌, 11, 124(1985)
- 8) 佐伯節夫・大崎 堅・内山格郎: 昭和47年度電気四学会九州支部連合大会論文集, 47, (1972)
- 9) 佐伯節夫・内山格郎: 山口大学工学部研究報告, 27, 113(1976)
- 10) K. T. Shih et al: AIAA Paper, No. 67-673, 1(1967)