

# 絶縁集束ノズル内のアークの特性

佐伯節夫\*・内山格郎\*\*

The Arc Characteristics in an Insulated Constrictor Nozzle.

Setsuo SAEKI and Kakuro UCHIYAMA

## Abstract

The magnetic body force and the gasdynamic drag force act on the arc column of the plasma jet generator. For a stable operation, the magnetic body force must be balanced by the drag force. When an increase of the magnetic body force occurs, the anode arc terminus goes back into the nozzle inlet and the effective arc gap is decreased.

The insulated constrictor nozzle is used to prevent the retreat of an anode spot and the arc column is forced to elongate until the anode arc terminus locates at the nozzle exit region.

The voltage-current characteristics of the elongated arc is a rising characteristics and the net input power supplied to the arc is increased effectively.

The heat loss of the insulated constrictor is 20% of the anode loss and the efficiency of the insulated constrictor section is 80~95%.

## 1. ま え が き

一般の非移行式プラズマジェット発生器は、棒状陰極とこれに対抗するノズル形陽極間に点弧したアークの外周部をガス流によって冷却し、熱ピンチ効果によって集束高温化したアークプラズマをシース状ガス流とともにノズルから噴射する方式をとっている。従って、プラズマジェットの温度<sup>1)</sup>、荷電粒子密度<sup>2)</sup>、噴出速度<sup>3)</sup>、安定度<sup>4)</sup>などの重要な諸特性は、すべて発生器内のアークの電氣的、熱的特性と、その放電モードに依存している。

プラズマ発生器内のアーク放電、特にノズル電極部に閉じ込められた集束アーク柱の電界強度、導電率、温度分布、アーク柱からノズル壁に向かう熱流束などの諸量<sup>5),6)</sup>や、アーク電流による自己誘導磁界または外部磁界の作用下のアーク柱および電極点のふるまい<sup>7),8)</sup>については、通常の円筒形ノズルのほかに平行平板形陽極<sup>9)</sup>やカスケードノズル<sup>10)</sup>を用いて解析が行なわれて来た。

筆者らは、アーク入力の効果的増加をはかるため、絶縁集束部を有するノズルを使用して、アーク陽極点をノズル先端部に拘束し、ノズル内アーク柱の強制伸長を行なったので、以下このような強制伸長拘束アークの特性について述べる。

## 2. 実 験 装 置

### 2.1 絶縁集束ノズル

プラズマジェット発生器の棒陰極先端の陰極点から発達膨張したアークは、ノズル軸線上に伸び、ノズル内に流入して強く集束を受けながらノズル内壁の陽極点に到達する。ノズル軸線からノズル壁に向かう径方向アーク柱は、側面から吹きつけられるガス流による空気力学的抗力と、アーク電流およびその自己誘導磁界に基づくローレンツ力の作用下におかれる。

ノズル軸線上に保持されているアーク柱の外周部とノズル壁との透き間を流れるガス流は、ノズル壁面近傍に速度境界層を有し、アーク柱外周部に近づくとつれてガス流速が上昇するため、径方向アーク柱の受ける空力的抗力は、ノズル壁よりアーク柱外周部に向かって徐々に増大し、そのためにアーク柱のわん曲が生じる。このように径方向アーク柱に働く電磁力と空力

\* 電気工学教室

\*\* 東洋曹達工業株式会社

の抗力の平衡条件は(1)<sup>9)</sup>式のように表わされる。

$$C_D r_0 \rho v^2 dl = (3\mu_0 I^2 / 16\pi R) [1 - (7r_0^2 / 18R^2)] dl \quad (1)$$

ただし、 $C_D$ : 抗力係数、 $r_0$ : 径方向アーク柱半径、  
 $\rho$ : ガス密度、 $v$ : ガス速度、 $dl$ : 径方向アーク柱長、  
 $\mu_0$ : 透磁率、 $I$ : アーク電流、 $R$ : わん曲アーク柱の曲率半径

アークはこの平衡条件を満たすようにふるまうため、陽極点はノズル軸方向および円周方向への運動を強制される。

アーク電流が小さく、電磁力に対して空力的抗力が大きい場合、アークは再点弧を伴う再点弧モードをとり、陽極点の消滅と発生が繰り返される。その結果、陽極点の動きは活発で、運動領域も大となり、陽極入力は分散されるが、噴出するプラズマジェットには再点弧に対応するゆらぎを含むことになる。

アーク入力を大にするため、アーク電流を増加すると電磁力が強くなり、陽極点は消滅することなく陰極側に引き戻されるので、再点弧は止んでアークモードは継続形を示し、陽極点の動きは緩慢になってその運動領域も減少する。

さらに電流が増加すると、アークモードは定常形に移行し、陽極点の運動はほぼ停止し、アークの動揺は認められなくなるが、陽極入力の集中が起る。

また、ノズル内での陽極点の平均的な位置は、電磁力と空力的抗力に関係するアーク電流とガス流量によって定まる。アーク電流が小さい場合、陽極点はガス流によってノズル出口方向に流され、アーク柱は伸ばされるが、電流を増加するにつれて陽極点は電磁力に

よって次第にノズル内部すなわちノズル入口側に向かって後退し、アーク柱は短縮されて効果的なアーク入力増加がはばまれる。

陽極点がノズル出口から遠ざかることは、ノズル内におけるプラズマジェットの損失が増大し、噴出するジェットのエネルギーが低下することを意味する。

このように動作条件によって生じる陽極点の後退を防ぐため、絶縁集束ノズルを用いて陽極点をノズル先端部に拘束すると、常に有効なアーク入力が確保でき、アーク特性が改善できる。

本実験で使用した絶縁集束ノズルは内径 5mm の銅製で、先端部に長さ 5mm の陽極部を有し、これに続いて絶縁集束部が接続される。陽極部と絶縁集束部は厚さ 0.5mm のテトロンシートで絶縁する。絶縁集束部の長さは、ノズル C-1 が 8.5mm、ノズル C-2 が 4.5mm である。

### 2.2 プラズマジェット発生器

プラズマジェット発生器は Fig. 1 に示すように、ノズル部以外は一般に用いられるプラズマ発生器の構造をそのまま踏襲している。陰極は先端を90度に削った直径 5mm の1.75%トリウム入りタングステン棒で、ノズル集束部入口から棒陰極先端までの距離は 2mm 一定に保持する。陽極部、絶縁集束部、陰極ホルダに対しては、それぞれ個別に水冷を行ない、各部熱損失を求めている。

アーク電流は無負荷電圧 145V のシリコン整流器から 40~160A を供給し、電流調整は安定用直列抵抗 (0.35~2.73 Ω) により行なっている。

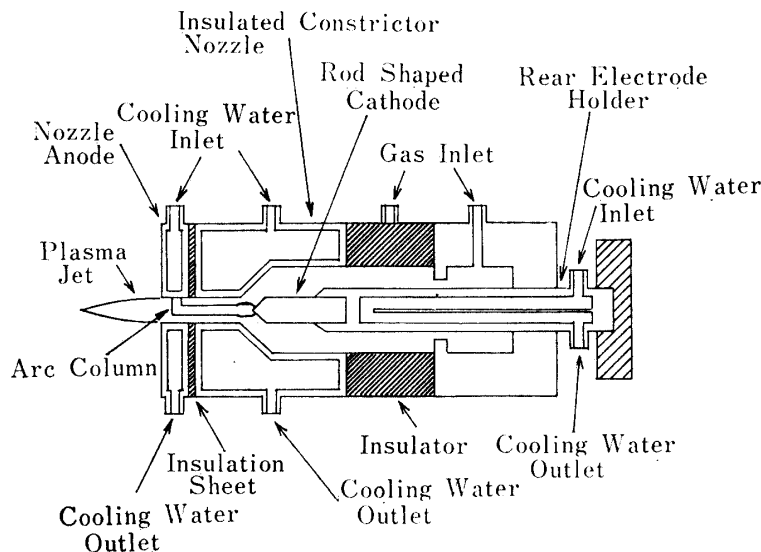


Fig. 1 The Forced Constricted Type Plasma Jet Generator

作動ガスは純度 99.99% のアルゴンを、流入圧力  $5\text{kg/cm}^2$ 、流量  $20\sim 40\text{l/min}$  で使用する。実験は、電極ギャップ長を一定に保ったまま、短絡法によりアークを点弧し、アーク電流とガス流量を変化しつつアーク特性の測定を行なった。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 強制伸長拘束アークの特性

絶縁集束ノズルによる強制伸長拘束アークの電圧対電流の関係は、Fig. 2 のように電流  $60\text{A}$  以上では正特性が現われ、平均電圧上昇率はノズル C-1 では  $0.06\text{V/A}$ 、C-2 では  $0.04\text{V/A}$  となる。絶縁集束ノズルと同形の通常形ノズルによるアーク特性は、この電流範囲では負特性を示す。絶縁集束ノズルを用いるとこのような顕著な正特性を生じる理由は、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、アーク柱の膨張および導電率の増加が押えられているゆえと考えられる。従って、電流の増加によってアーク入力が増大する割合は、通常の垂下特性領域に比べて高くなる。

ノズル C-1、C-2 によるアーク電圧を比較し、絶縁集束部におけるアーク柱電界強度を求めると、Fig. 3 に示すように、電流の増加とともにほぼ直線的に上昇する。ガス流量が多いほど集束効果も強いので電界強度も大となるが、流量効果は  $30\text{l/min}$  から  $40\text{l/min}$  への変化においては低下する。

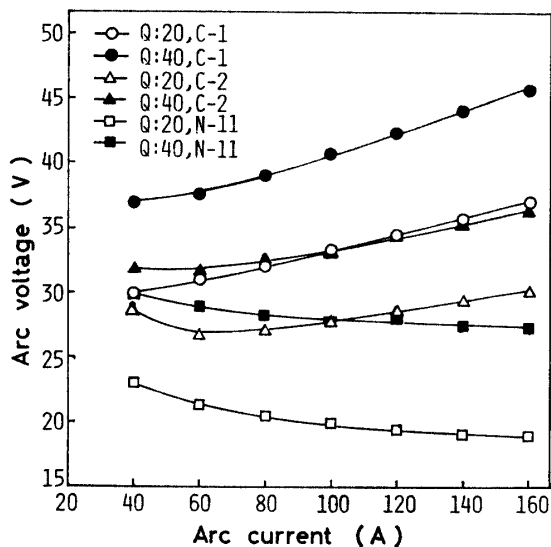


Fig. 2 The Voltage-Current Characteristics for Various Nozzles

Q: Argon gas flow rate (l/min)

C-1, C-2: Insulated Constrictor Nozzle

N-11: Normal Nozzle

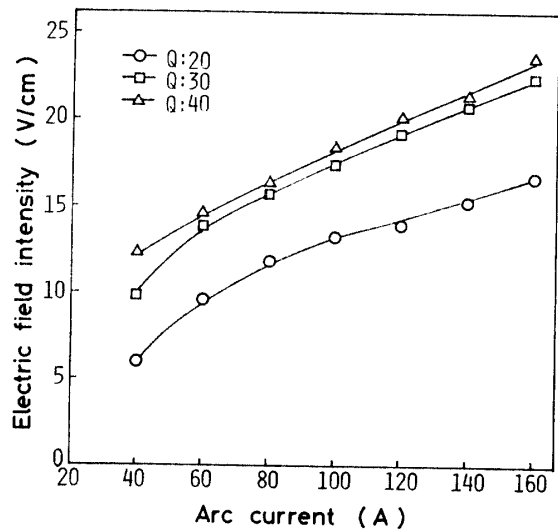


Fig. 3 The Electric Field Intensity of Constricted Arc Column

Q: Argon gas flow rate (l/min)

#### 3.2 絶縁集束ノズル内のアークのエネルギー収支

プラズマジェット発生器の熱損失は、一般にノズル陽極部に集束して発生し、発生器全損失の約<sup>11)</sup>90%がノズルに流入し、陰極部およびアーク室そのほかの損失は軽微である。

絶縁集束ノズルは陽極部と絶縁集束部に分かれ、アークからの熱伝達機構もそれぞれ異なっている。

陽極部においては、陽極降下領域を通過する電子の熱および運動エネルギー、陽極材料の仕事関数相当のエネルギーが伝達されるほかに、電流を伴わないエンタルピ対流および放射による熱伝達が付加される。

すなわち、陽極損失は(2)式で表わされる。

$$Q_{an} = (V_{an} + \phi + 3kT_e/2)I + q_c + q_r \quad (2)$$

ただし、 $Q_{an}$ : 陽極部熱損失、 $V_{an}$ : 陽極降下、 $\phi$ : 陽極材料の仕事関数、 $k$ : ボルツマン定数、 $T_e$ : 電子温度、 $I$ : アーク電流、 $q_c$ : エンタルピ対流による熱伝達量、 $q_r$ : 放射による熱伝達量

また、絶縁集束部に対する熱伝達はエンタルピ対流と放射だけに依存するゆえ(3)式のようなになる。

$$Q_{ac} = q_{cc} + q_{rc} \quad (3)$$

ただし、 $Q_{ac}$ : 絶縁集束部熱損失、 $q_{cc}$ : 絶縁集束部に対するエンタルピ対流による熱伝達量、 $q_{rc}$ : 絶縁集束部に対する放射熱伝達量

陽極部および絶縁集束部の熱損失を Fig. 4 に示す。電流を伴う陽極部損失は、電流の増加につれてほぼ直線的に上昇する。通常形ノズルのノズル部損失に比べると、ノズル C-1 および C-2 の陽極部損失はそれぞ

れ約120%増, 70%増となる。また C-2 の陽極部損失は C-1 の損失に対して  $70 \pm 10\%$  である。

絶縁集束部損失はノズル C-1, C-2 と、それぞれの陽極部損失の約20%であり、電流の増加につれて陽極部損失の変化ほど顕著ではないが、徐々に上昇する。

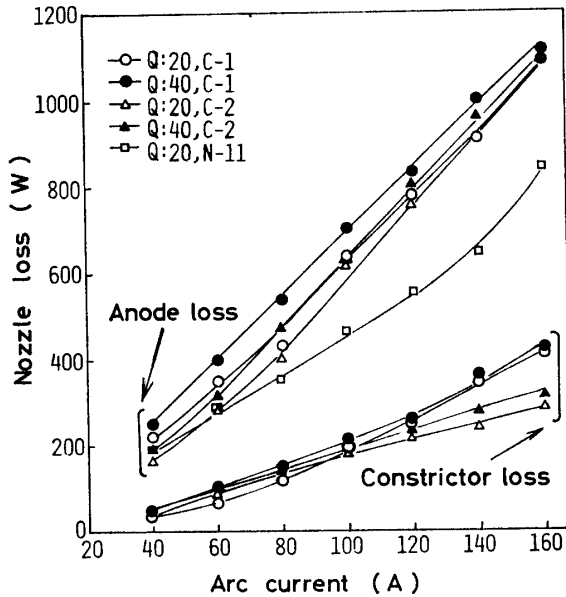


Fig. 4 The Nozzle Loss for Various Nozzles  
 Q: Argon gas flow rate (l/min)  
 C-1, C-2: Insulated constrictor nozzle  
 N-11: Normal nozzle

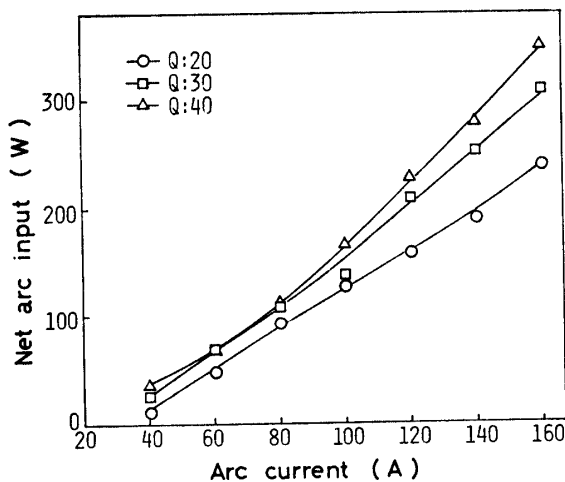


Fig. 5 The Net Arc Input of Constricted Arc Column  
 Q: Argon gas flow rate (l/min)

C-1, C-2 による絶縁集束部損失を比較し、さらに陽極部損失の増加分を見かけの損失増加分として絶縁集束部損失に付け加え、絶縁集束部 1mm 当りの熱損失を求めると、電流 80A までは約 20 W/mm 以下で、

電流に対する変化量も少ないが、100A 以上になると、電流 10A 当り約 4 W/mm の割合で損失の増加が生じる。

Fig. 5 は絶縁集束部 1mm 当りの正味アーク入力を示し、アーク電流の増加とともに増大し、ガス流量 40l/min の場合に最も大となる。絶縁集束部アーク柱の熱効率、電流 40A の場合を除いて 80~95% となり、発生器の熱効率を上回っている。

絶縁集束部長を伸ばして強集束アーク柱の長さを増加することにより、正味アーク入力を効率よく増大させることができ、プラマジェットの平均温度を通常形ノズルによるジェットに比べて 25~60% 上昇させることが可能である。

#### 4. む す び

絶縁集束ノズルによって陽極点をノズル先端部に拘束し、アークを強制伸長すると、電圧電流特性は正特性となり、電流増加によるアーク入力増加の割合は高くなる。絶縁集束部における強集束アーク柱の電界強度は最高 23.8V/cm を示し、この部分のアークの熱効率は 80~95% となり、発生器の熱効率を上回っている。従って、絶縁集束部を伸長することにより、プラマジェットに効率よく入力を与えることが明らかとなった。

常に御指導を賜わる九州大学 赤崎教授に厚く謝意を表わす。

#### 文 献

- 1) R. W. Porter and T. P. Anderson: J. Quant Spectrosc. Radiat. Transfer., **3**, 279 (1963)
- 2) R. Holmes and L. L. Freeston: J. Phys. D. Appl. Phys., **4**, (1971)
- 3) J. Burlock, P. Brockman, R. V. Hess and D. R. Brooks: AIAA J., **5**, 558 (1967)
- 4) E. Pfender and C. J. Cremers: AIAA J., **3**, 1345 (1965)
- 5) K. T. Shih and E. Pfender: AIAA J., **8**, 211 (1970)
- 6) G. R. Knowles and J. V. R. Heberlein: IEEE Trans. Plasma Science, PS-1, 15 (1973)
- 7) H. Hügel, G. Kruelle and T. Peters: AIAA J., **5**, 551 (1967)
- 8) J. Lawton: J. Phys. D. Appl. Phys., **4**, 1946 (1971)
- 9) S. A. Wutzke, E. Pfender and E. R. G. Eckert: AIAA J., **6**, 1474 (1968)
- 10) F. P. Incropera: IEEE Trans. Plasma Science, PS-1, 3 (1973)
- 11) 佐伯節夫: 電学誌, **87-3**, 109 (1967)