

多相交流アーク加熱器

佐伯 節夫*・大崎 堅**・福政 修*
山下 浩***・崎山 智司***

Study on the Poly-Phase AC Arc Heater

Setsuo SAEKI, Katashi ŌSAKI, Osamu FUKUMASA,
Hirosi YAMASHITA and Satoshi SAKIYAMA

Abstract

This report described the electrical characteristics, dynamic behavior of the arc in the nozzle cross section and the plasma jet of the AC arc heater which used six phase AC power source.

This arc heater had six radial electrodes in the constrictor section of a nozzle and constricted and stabilized the arc which ignited between electrodes with argon gas flow.

Experiments were made at the arc maintained current 30~80 A, the total gas flow rate (Q) 20~30 l/min, the ratio (D) of the center gas flow rate to total gas flow rate 0~0.5 and electrode gap 7 mm.

Always eight arcs (two opposite arcs, four delta arcs and two adjacent arcs) existed in the nozzle cross section and each arc ignited according to the phase rotation of the six phase AC power source.

The duration time of the opposite arc, delta arc and adjacent arc were respectively 1/180 sec, 1/180 sec and 1/360 sec at each half cycle (1/120 sec).

The arc in the nozzle cross section was most effectively constricted toward the nozzle axis at $D=0.3\sim0.4$ when the arc maintained current was large.

The arc voltage-arc maintained current characteristics were drooping characteristics.

The thermal efficiency of this AC arc heater was 60~70% and the highest at $D=0.3\sim0.4$.

The mean temperature of the plasma jet was 3,600~9,600 K and the longest length of the plasma jet was 19.3 mm.

1. ま え が き

直流アークあるいは商用周波交流アークによりガス加熱を行うプラズマ発生器は、プラズマ流を長時間安定に供給し得るため各種の電気加工¹⁾、化学反応²⁾をはじめ多くの工業分野³⁾⁴⁾においてその特性を活かして実用されている。

このようなアーク加熱型プラズマ発生器の電源として交流を用いる場合は、アークの動的特性が集束アーク及び発生ジェットに直接影響を与える。電源の極性反転によりアークが消弧、つづいて再点弧を行うため

に放電の休止を強いられることになり、ジェットには大きいゆらぎが生じる。放電空間における交流アークの不安定性を改善するために多相交流電源を用いてアークの持続をはかる方式が考案され、四電極式⁵⁾⁶⁾及び三電極式⁷⁾の三相交流プラズマ発生器が報告されている。

特に3本の電極を放射状に配置した三電極式三相交流プラズマ発生器においては常時二相間にアークが存在し、ノズル断面内を相回転に応じて円滑に回転するために効果的なガス加熱が行われ、発生ジェットも軸対称性良く伸長し、直流アークを用いる場合に比べて多量のプラズマを供給できる。放射状電極配置⁸⁾は隣接あるいは対向電極間のアークの移行を容易にするとともにアークの回転及びアーク柱長の増加によってガス流とアークの接触面積を大にし、発生プラズマ量を

* 電気工学科

** 工業短期大学部電気工学科

*** 大学院電気工学専攻

増加することができるので極めて有効な手段である。

本研究では、6本の放射状電極を有する六相交流アーク加熱器を試作し、六相交流アークの電気的特性やふるまい、発生ジェット形状やふるまいについて調べた。また、ガス流入方式とアーク特性、安定動作条件などについても明らかにした。

2. 実験装置

2.1 多相交流アーク加熱器

実験に使用した多相交流アーク加熱器は、Fig. 1に示すようにノズル出口から内部に8mm後退した位置で軸線に垂直な断面内に中心角60度を保って6本の棒電極を放射状に挿入し、その先端部を結ぶ形で点弧したアークを電極に沿って流れるシースガス流とノズル後方から軸方向に流れるセンタガス流によって集束安定化する。

電極はいずれも直径3mmの2%トリウム入タンクステン棒で内径4mmのセラミック絶縁管に収めた上、その先端はノズル軸線を中心とする直径7mmの円周上に位置している。

使用したノズルは内径5mm、入口テーパ1.2、同テーパ部長5.5mmの黄銅製でガス流60l/minまで使用出来る。

従来のプラズマ発生器はアーク柱を集束安定化し比較的高温のプラズマジェットを発生する機構を持っているが、本加熱器はノズル断面内に多数個のアーク柱を掃引させることによってガス加熱を行うものであり、アークとガス流との熱交換面を拡大し多量のプラズマを得ることを目的としている。

作動ガスには純度99.99%のアルゴンを用い、流入圧力4kg/cm²としてシースガス流及びセンタガス流を構成し、両者の配分比は任意に調整できる。

各棒電極及びノズル部に対して、それぞれ1.5l/min、2.5l/minの冷却水を供給し熱損傷を防ぐとともにその温度上昇から熱損失を算出した。

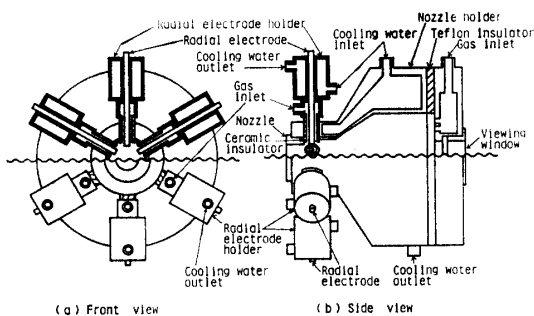


Fig. 1 Sectional view of the poly-phase AC arc heater.

2.2 実験回路

Fig. 2に実験回路を示す。多相交流電源としては三相60Hz、容量30KVAの変圧器を使用し、その二次側を対角六相接続することにより無負荷電圧113Vの六相交流を得るようにしている。各相には直列に安定用無誘導抵抗(0.64~12.7Ω)を挿入し垂下特性を与えている。アーク電圧測定には各電極間に挿入した熱電形計器を、線電流測定には各相に挿入した可動鉄片形計器を使用し、それぞれ実効値を求めた。これらの値はシンクロスコープ上にトレースされるアーク電圧、線電流波形の解析結果と比較すると±6%以内に収まる。

六相交流アーク放電のモードを調べるため Fig. 2に示すように各電極間アーク電圧を10台の計器用変圧器及び各線電流を6台の変流器を用いてアーク放電回路より絶縁の上、3台の4現象シンクロスコープ、3台の2現象シンクロスコープ上に記録した。なお、計器用変圧器及び変流器における入出力信号間の位相差、歪率を調べた結果、本実験においては無視しうることを確認した。

また、ノズル出口から2mm離れた軸線上におけるプラズマジェットからの放射光を検出器(SGD-100シリコンフォトダイオード)に導き、その出力をアーク電圧及び線電流とともにシンクロスコープによって記録し、ジェットパワーの変化を求めた。

ノズル断面内のアークのふるまいをガス流入室後部断面に設置した観測窓より高速度撮影(撮影速度8,000

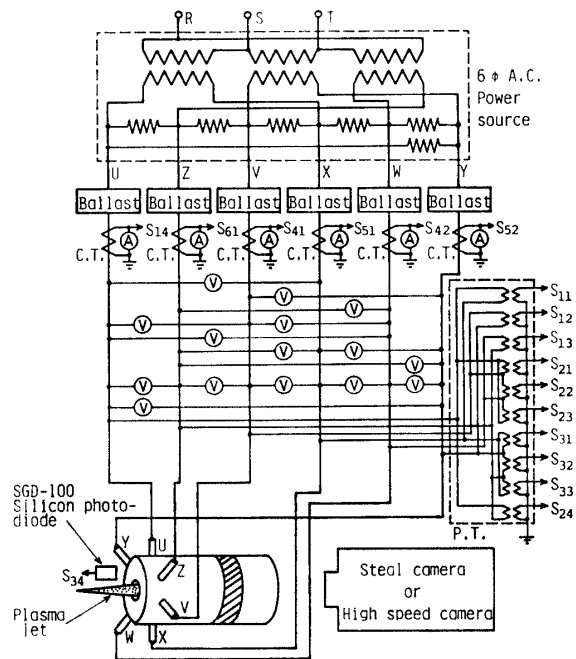


Fig. 2 Experimental circuit.

p. p. s.) 及びスチル撮影によって調べた。また、発生ジェットの側面から同じく高速度撮影及びスチル撮影を行った。

実験条件はセンタガス流 (Qc) 0~12 l/min, シースガス流 (Qr) 10~30 l/min の範囲に選り、全ガス流量 (Q) 20~30 l/min となるように設定した。以下では Q に対する Qc の割合を配分比 D とする。また、安定な六相交流アークを維持するための線電流は 32~80 A とした。

3. 実験結果と考察

3.1 六相回転アークのモード及びふるまい

六相交流アークのモードは Fig. 3 に示すように各電極間においては単相交流の場合と同様に半サイクル毎の再点弧モードとなり、消弧から再点弧に至る電流休止期間が存在する。しかし、各電極間のアークは電源の相回転に応じて消弧、再点弧を繰り返すためノズル断面内には常時 8 本のアークが存在する。なお、本論文では Fig. 2 に示す放射状電極 U-X 間に点弧する

アークについて、電極 X に対して電極 U が正電位となる半サイクルにおける正極性アークの点弧を正点弧、電極 U が負電位となる負極性アークの点弧を負点弧とし、他の電極間についても同様に定義する。また、対向する電極間 (U-X, V-Y, W-Z) に点弧するアークを対向アーク、隣接する電極を隔てたデルタ状電極間 (U-V, V-W, W-U, X-Y, Y-Z, Z-X) に点弧するアークをデルタアーク、隣接する電極間 (U-Z, Z-V, V-X, X-W, W-Y, Y-U) に点弧するアークを隣接アークとする。なお、後述するように一棒電極が 2~3 種類のアークの電極として動作しているため一棒電極当りに流れる電流、即ち線電流をアーク維持電流とする。

本動作条件内における各アークの再点弧電圧は電流の増加とともに減少し対向アークでは 16.5~11.0 V, デルタアークでは 14.6~7.3 V, 隣接アークでは 10.7~7.1 V の範囲にある。正極性アークの再点弧電圧は負極性アークのそれより 1~2 V 高い値を示す。また、

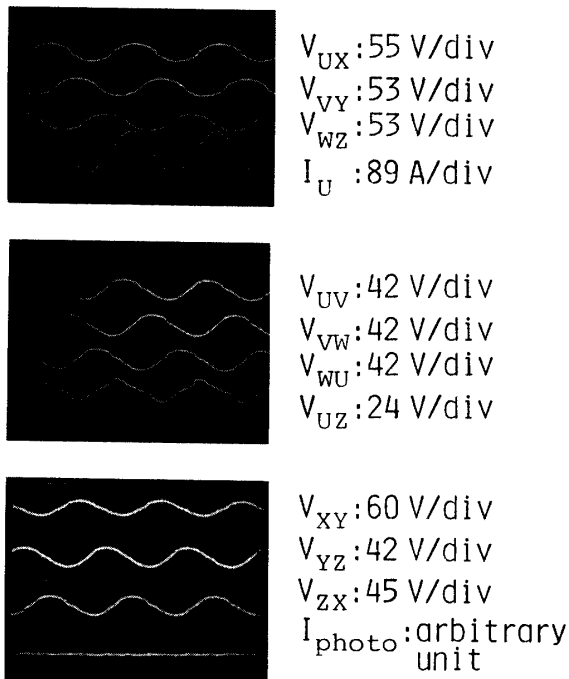


Fig. 3 Oscillograms of the arc behavior in the poly-phase AC operation.

$V_{ux}, V_{vy}, V_{wz}, V_{uv}, V_{vw}, V_{wu}, V_{uz}, V_{xy}, V_{yz}, V_{zx}$: Arc voltage, I_u : Arc maintained current, I_{photo} : Light intensity, 5 msec/div velocity: 5 msec/div, Arc maintained current: 48A, Ratio of center gas flow rate to total gas flow rate: 0.3, Total gas flow rate: 20 l/min.

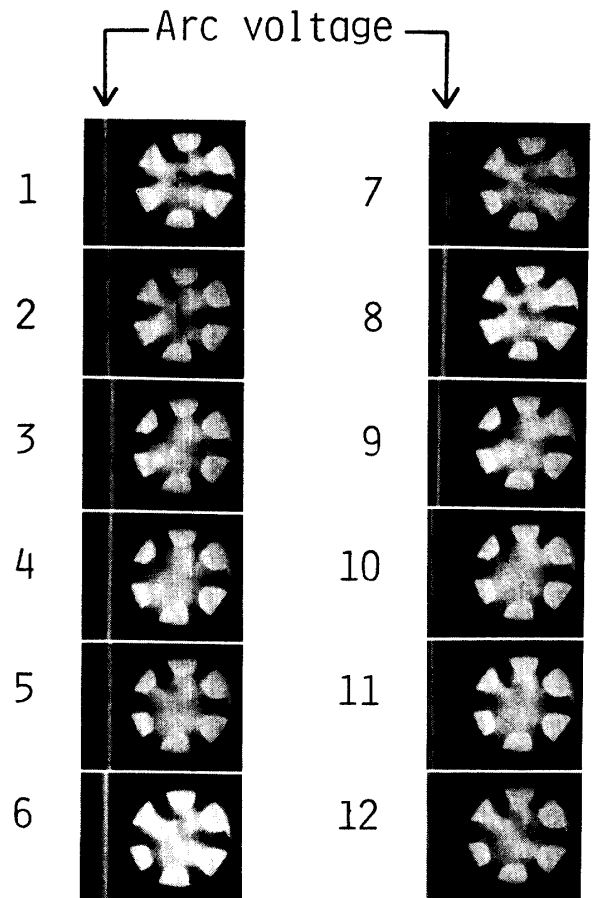


Fig. 4 Frames from high speed movies of the poly-phase AC arc in nozzle cross section.

Arc maintained current: 80 A, Ratio of center gas flow rate to total gas flow rate: 0.2, Total gas flow rate: 20 l/min.

同一条件下での三相交流アークの再点弧電圧と六相交流アークのそれとを比較すると後者が前者の1/2以下の値である。これより六相交流アークでは再点弧条件が改善され電源の相回転によるアークの移行が、より円滑に行なわれていることがわかる。

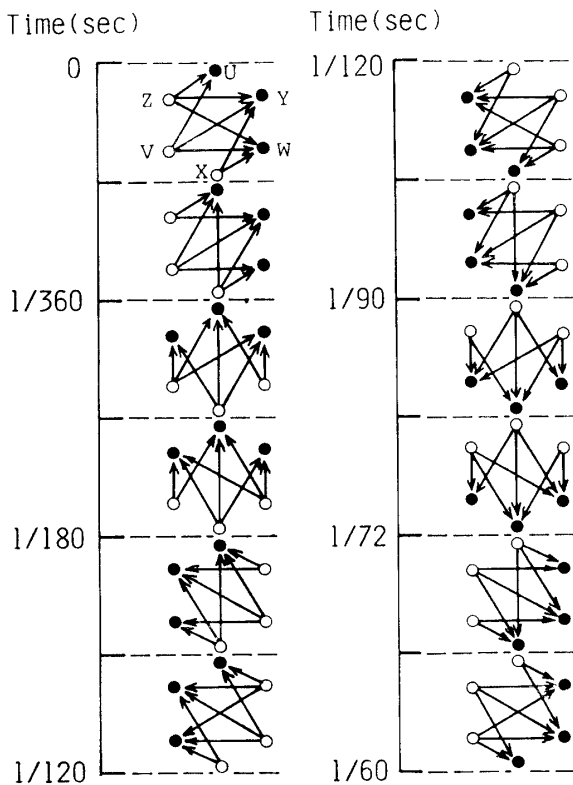
Fig. 4 にノズル断面内に点弧した六相交流アークの高速撮影画像を示す。アークは相回転に応じて回転し各電極間で消弧，再点弧を繰り返している。

Fig. 5 は Fig. 3 に示したアークモード及び Fig. 4 に示したアークの高速撮影画像より，1 サイクル中における各電極間の正極性アーク持続期間，負極性アーク持続期間及びそれらの極性アークに対応して動作する電極を模倣的に表した図である。電源の相回転に応じてアークの消弧，再点弧が1/720秒毎に起こり，陰極または陽極としての責務を果たす電極は1/360秒毎に順次変わるとともに一電極に2~3本のアークが点弧していることがわかる。アークの持続期間は半サイクル中(1/120秒)において対向アーク，デルタアークでは1/180秒，隣接アークでは1/360秒である。また，ノズル断面内には対向アーク2本，デルタアーク4本，隣接アーク2本の合計8本のアークが常にいずれかの電極間に存在し，ノズル断面内を回転している。このように六相交流アーク加熱器ではノズル断面直径

の位置に対向アークが，周辺部分にはデルタアーク及び隣接アークが点弧しているためアークと作動ガスとの接触する面積が大きく効果的なガス加熱が可能となり多量のプラズマが得られる。

Fig. 6 に六相交流アークのスチル撮影画像を示す。アークは各電極間にほぼ平衡して点弧しているが，アークの形状及びアークの存在する位置はアーク維持電流及びDによって異なり，特にDによる影響が大である。Dが0.2以下ではアークはノズル中央部に集束されず常に偏って点弧しているが，センタガス流を増加したD=0.5ではノズル出口方向の圧力が増加するためアーク維持電流に関係なく常にノズル中央部に空洞が生じる。一方，D=0.3~0.4では大電流領域におけるアークはノズル中央部に集束安定化されるが，低電流領域でのアークはD=0.5の場合と同様にノズル中央部に空洞を生じる。このようにアークがノズル中央部に存在するのは対向アーク，デルタアーク及び隣接アークがセンタガス流によってノズル先端部の中心軸上に向って集束安定化されながら吹き流されるためと考えられる。

以上より，アークがノズル中央部に集束され空洞を



(● : Cathode, ○ : Anode)
Fig. 5 Diagram of the current direction.

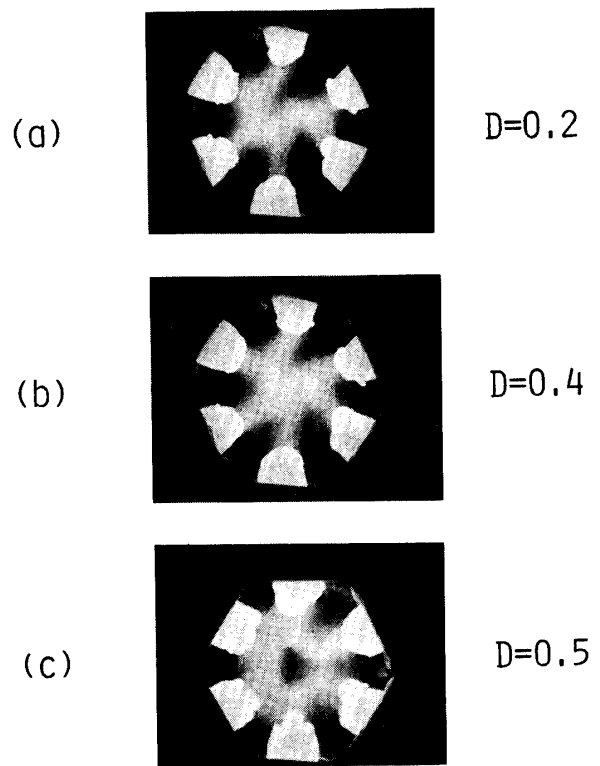


Fig. 6 Photographs of the poly-phase AC arc in nozzle cross section.
D: Ratio of center gas flow rate to total gas flow rate, Arc maintained current: 80 A, Total gas flow rate: 20 l/min.

生じない動作条件は、 $D=0.3$ ではアーク維持電流 48 A 以上、 $D=0.4$ では同じく 64 A 以上となる。

3.2 電気的特性

アーク電圧対アーク維持電流の関係は Fig. 7 のように垂下特性を示し、電流 56 A を超えると一般に垂下率は減少する。 $Q=20\text{ l/min}$ において電流 56 A 以下の電圧垂下率は対向アーク及びデルタアークでは $0.15\sim 0.2\text{ V/A}$ 、隣接アークでは 0.08 V/A となるが、56 A 以上ではそれぞれ 0.04 V/A 、 0.03 V/A と 56 A 以下のその $1/2\sim 1/5$ に低下している。

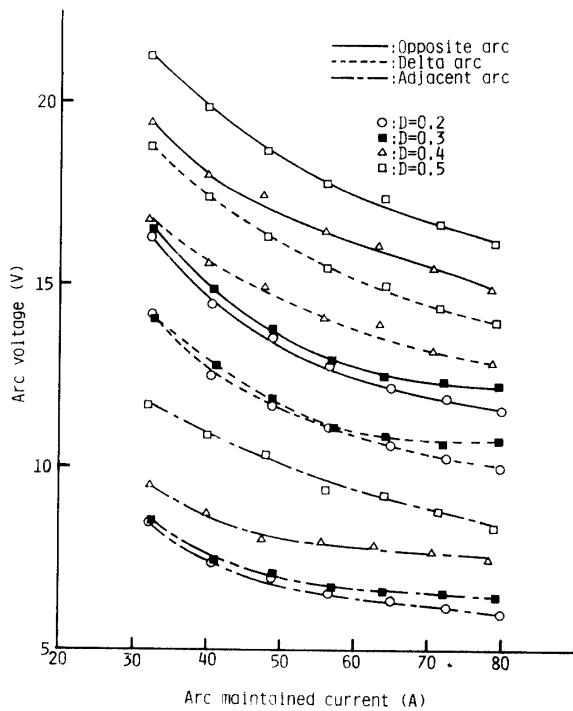


Fig. 7 Arc voltage vs. arc maintained current.

D: Ratio of center gas flow rate to total gas flow rate, Total gas flow rate: 20 l/min.

アーク電圧は対向アーク、デルタアーク、隣接アークの順に低下し、それぞれの電圧値は 2:1.7:1 の割合となり、この割合は対応するアークの電極ギャップ長のそれと同等である。また、アーク電圧は D の値によって異なり、 $D=0.2$ と $D=0.3$ とのアーク電圧の差は最大 0.6 V であるが、 $D=0.3$ 以上ではその差は最大 3.5 V に達する。これはセンタガス流の増加によりアークの形状やアークの集束状態に基づくプラズマ基本量が重なるためと考えられる。一方、 Q を 30 l/min に増加するとアーク電圧は垂下特性を保持したまま上昇するが、電圧垂下率は電流 56 A 以上では $Q=20\text{ l/min}$ の場合とほぼ同等であるのに対し、56 A 以

下では $Q=20\text{ l/min}$ の場合の約 2 倍となる。

3.3 エネルギー収支

放射状電極部、ノズル部における熱損失は Fig. 8 に示すようにアーク維持電流の増加とともにほぼ直線的に上昇する。電極部熱損失は電流を 32 A から 80 A に増すと 250 W から 420 W に増大するが、D が電極部熱損失に与える影響は軽微であり、 $D=0.2\sim 0.5$ の場合の変動幅は $25\sim 65\text{ W}$ と小である。一方、ノズル部熱損失は $440\sim 980\text{ W}$ の範囲にあり、電流及び D による影響が大である。ノズル部熱損失はアークからの熱伝達によって生じるため、アークがノズル中央部に集束安定化される $D=0.3$ の場合が最小となり、ノズル中央部に空洞が生じ、アークが周辺部に拡がる $D=0.5$ の場合が最も大となる。特に D が 0.4 から 0.5 に変化した場合ノズル部熱損失は著しく増大し、その増加分は約 170 W となっている。

アークに投入される電気入力から各部熱損失を差し引いて求められる正味アーク入力 Fig. 8 に示すように $1,000\sim 3,000\text{ W}$ の範囲にあり、電流の増加とともに増大する。また正味アーク入力はアーク電圧が高く、ノズル部熱損失の小さい $D=0.4$ の場合が最大となる。

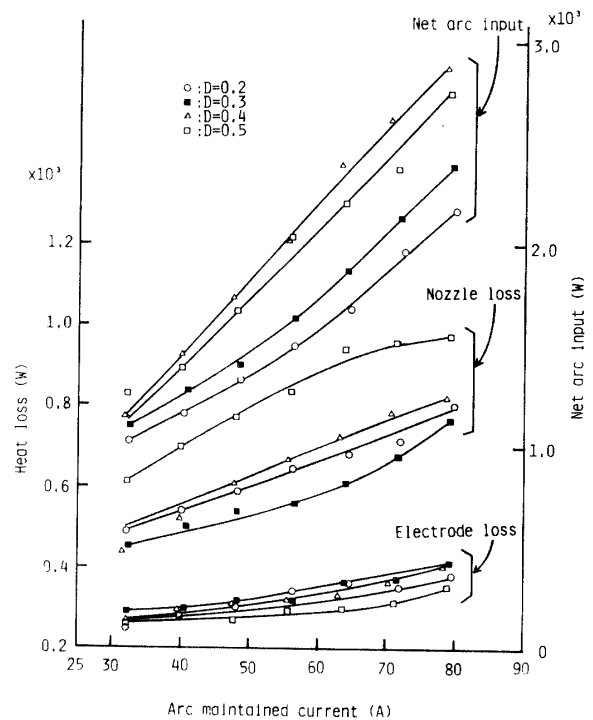


Fig. 8 Heat loss and net arc input vs. arc maintained current.

D: Ratio of center gas flow rate to total gas flow rate, Total gas flow rate: 20 l/min.

本加熱器の熱効率は $Q=20\text{ l/min}$ で $60\sim70\%$ であり、 $D=0.3\sim0.4$ で最大となる。この熱効率は三相交流ジェット発生器のそれとほぼ同等である。なお、ジェット平均温度は $3,600\sim9,600\text{ K}$ で電流の増加とともに直線的に上昇し、三相交流ジェットのそれの約2倍である。

3.4 六相交流プラズマジェット

Fig. 9 に本加熱器によって得られるプラズマジェットのステル撮影像を示す。ジェットの形状は $1/720$ 秒毎の消弧、再点弧を含むが、常時8本のアークが点弧しているため、安定に維持されている。また、Fig. 10 に示すように、ジェットは電流増加に伴って伸長し、 $12.5\sim19.3\text{ mm}$ の範囲にあり、正味アーク人力が最大となる $D=0.4$ の場合に最長となる。ノズル出口から 2 mm の位置のジェット径は $D=0.3\sim0.4$ ではアークがノズル中央部に効果的に集束される高電流領域で小さくなる。一方、ノズル中央部に空洞を生じる $D=0.5$ の場合はほぼ 4 mm 一定であり、 $D=0.2$ では電流を増すとジェット径が大となる。これはノズル断面内のアークの偏りから生じるゆらぎに基づくものと考えられる。

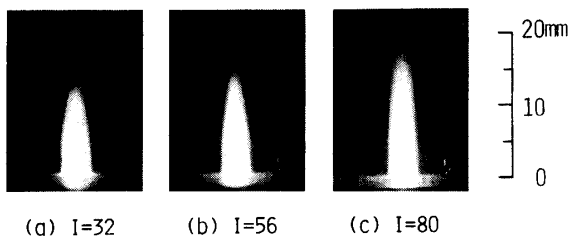


Fig. 9 Photographs of the poly-phase AC plasma jet.

I: Arc maintained current (A), Ratio of center gas flow rate to total gas flow rate: 0.3, Total gas flow rate: 20 l/min .

このプラズマジェットに対して側面から高速撮影を行うと、ジェットにはノズル断面内アークの回転及び消弧、再点弧によるゆらぎが生じていることがわかる。Fig. 11 に示すようにジェットの軸方向のゆらぎ

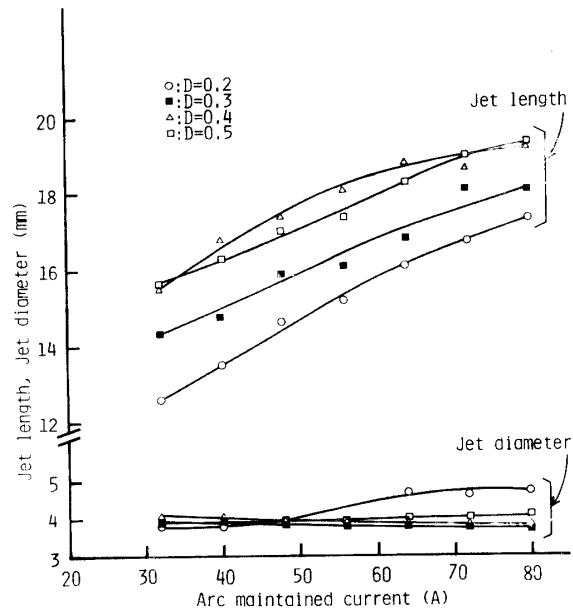


Fig. 10 Jet length and jet diameter vs. arc maintained current.

D: Ratio of center gas flow rate to total gas flow rate, Total gas flow rate: 20 l/min .

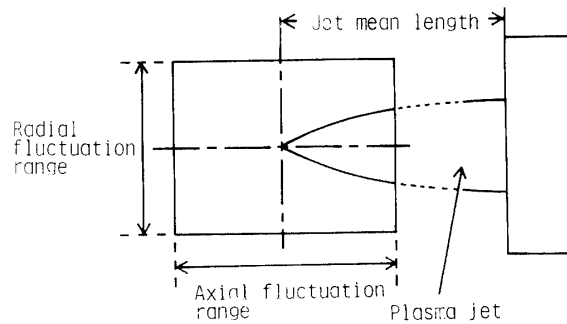


Fig. 11 Classification of fluctuation range.

Table 1 Fluctuation of plasma jet

Power source	D	Arc maintained current (A)	Jet mean length (mm)	Jet mean diameter (mm)	Fluctuation (mm)	
					Axial range	Radial range
Six phase	0.2	32	12.6	4.1	7.1	2.2
	0.2	80	13.7	3.9	6.6	2.3
	0.5	32	12.7	4.1	7.0	2.2
	0.5	80	15.7	4.0	6.1	2.3
Three phase	0.7	40	11.6	4.1	10.3	2.0

[Note] D: Ratio of center gas flow rate to total gas flow rate, Total gas flow: 20 l/min

を伸縮ゆらぎ、径方向のゆらぎを偏向ゆらぎとして、それぞれのゆらぎ幅を求め、同時に平均ジェット長、平均ジェット径を求めた結果を Table. 1 に示す。平均ジェット長はジェットスチル撮影像から求めたジェット長と同様な特徴を有している。これに対し、平均ジェット径は $D=0.2$ の場合電流を増すと小さくなっており、スチル撮影像ではジェットのゆらぎのためにジェット径が大きく観測されたと考えられる。伸縮ゆらぎ幅、偏向ゆらぎ幅はともに D を大きくしても変化は小さく、電流を増すとノズル断面内アークの集束により伸縮ゆらぎ幅が小さくなる。これらの結果を本加熱器におけるアーク維持電流 32 A の場合とほぼ同等のアーク入力を有する三相交流ジェットと比較すると、本加熱器によって得られるジェットが平均ジェット長では 1 mm 程度長く、伸縮ゆらぎ幅では 3 mm 程度小さい。また、プラズマジェットからの放射光強度の変化は Fig. 3 に示したようにたいへん小さく、ジェットは安定している。

以上より、多相交流アーク加熱器により発生したジェットは、ノズル断面内アークの効果的な集束と円滑な回転により一定のジェット長を維持し、かつ軸対称性及び安定度も良好であることがわかった。

4. む す び

以上述べたように、ノズル集束部に 6 本の棒電極を

放射状に配置した多相交流アーク加熱器を用いると、3 種類のアークがノズル断面内に発生し、かつ、それらが規則的な変化と相回転を繰り返しているため多量の安定なプラズマ流が得られることが明らかとなった。

なお、多相交流によるアークをノズル断面内に集束安定化するためには、アーク発生条件に対する作動ガス流入方式及び作動ガス流量の選定をさらに検討する必要がある。

本研究に御協力いただいた大学院三浦憲介氏、昭和 56 年度卒業研究学生諸氏、本学山中麗子氏に感謝する。

参 考 文 献

- 1) D.R. Milner, G. R. Salter, & J. B. Wilkinson: Brit. Weld. J., **7**, 73 (1960)
- 2) I.G. Sayce: Pure., Appl. Chem., **48**, 215 (1976)
- 3) S.A. Wutzke, E. Pfender & E. R. G. Eckert: AIAA J., **6**, 1474 (1968)
- 4) T. C. Wang & S. J. Duzinsky: AIAA J., **5**, 2059 (1976)
- 5) I.D. Tredup: Technik, **25**, 270 (1970)
- 6) 逸見文彦, 山岡唯男, 加藤洋明: 電学誌, **86**, 395(1966)
- 7) 佐伯節夫, 大崎堅, 山中麗子: 山口大学工学部研究報告, **32**, 213 (1981)
- 8) J.E. Harry & L. Hobson: IEEE Trans. Plasma Sci., **PS-7**, 157 (1979)

(昭和 57 年 4 月 20 日 受理)