

交流プラズマジェットの動特性の解析

佐伯 節夫*・大崎 堅*・豊田 英次**

Analysis of the Dynamic Characteristics of AC Plasma Jet

Setsuo SAEKI, Katashi ŌSAKI and Eiji TOYODA

Abstract

This report described the dynamic characteristics of the AC plasma jet, which was generated by the cross electrode type plasma jet generator, that had the resistance ballast (R-ballast) or reactance ballast (RL-ballast).

The measurements of the restriking voltage and the dead time of arc current after extinction at each half cycle indicated that the polarity of arc, the ballast and the arc operating parameters (arc current, gas flow rate, electrode gap) had a marked influence on the restriking characteristics. Using the R-ballast, the restriking characteristics were very influenced by the polarity of arc and the arc operating parameters, but using the RL-ballast, they were not influenced by that, and so the dead time of arc current was always under 25 μ sec.

The thermal efficiency was 56~79%, and, when the RL-ballast was used, the overall thermal efficiency of the generator was 7~22%.

The dynamic behavior of AC plasma jet was shown by high speed photography. Using the RL-ballast, the duration time of a half cycle of an efficient jet was found to be 7.6 msec at arc current; 100 A and the elongation speed of jet was 10.7 m/sec.

The temperature of AC plasma jet was obtain by spectroscopic method. When the RL-ballast was used and arc current was 100 A, the maximum temperature was found to be 15,000 K at 4.3 msec after reverse ignition.

1. ま え が き

プラズマジェットはその高温度と高速度を利用して溶接¹⁾, 溶射²⁾, 溶断³⁾などの加工をはじめプラズマ化学⁴⁾, プラズマ風胴⁵⁾など広く理工学分野に応用されている。

一般にプラズマジェット発生器はアーク発生用直流電源を必要とし, さらに抵抗形安定器の使用によって生じる電力損失も大となる。発生器の電源として交流を用いると直流専用設備を省略できる上, アークの動作条件に応じた電圧調整が可能となり, さらにリアクトル形安定器の使用が許されるため電力損失が減少し総合熱効率が向上するなど実用面において多くの利点

がえられる。しかし, 交流アークは極性反転時の再点弧のため不安定となりやすく, とくにガス流によるアーク集束を行う場合, 一層荷酷な再点弧条件をしられることになる。交流アークを集束安定化するために, 商用周波交流に高周波を重ねて再点弧を円滑にする方式^{6)~8)}や, 多相交流を用いて位相差のあるアークを発生させる方式⁹⁾¹⁰⁾などが試みられているが, これらは電源設備及び回路構成が簡単でなく, 発生器の構造も複雑となり実用に供するには種々の難点を有している。

交差電極形ノズル¹¹⁾は前述の再点弧の困難性を解決し商用周波単相交流プラズマジェットを発生できる手法の一つである。著者らは交流プラズマジェット発生器の電源回路安定器が放電モードに与える影響を調べるとともに発生ジェットの伸長量, 挙動, 温度分布とその時間的動揺を求め, 交流ジェットの動特性について解析を行ったので以下にその一部を報告する。

* 電気工学科

** 九州電力(株)

2. 実験装置及び実験方法

本実験に使用した交流プラズマジェット発生器の構造及び実験回路, 実験方法について述べる.

2.1 交流プラズマジェット発生器

本発生器は Fig. 1 に示すように円筒形アーク室の軸線上に保持したセンタ電極とノズル集束部側面から軸線に垂直に挿入した交差電極を有し, 両電極間に点弧した交流アークを軸方向シースガス流によって集束安定化する方式をとっており, 正極性及び負極性ジェットが交互にノズルから噴射される.

電極はともに直径 3 mm の 2% Th-W 棒を使用し, センタ電極先端部は頂角90度の円錐形に削り, 交差電極はその円板状先端部がノズル出口から 3.5 mm 内側で, 軸線から 1.5 mm 径方向に離れた点に位置するように配置した.

交差電極が挿入される黄銅製ノズルは内径 5 mm で, 集束部長がそれぞれ 7.5 mm, 9.5 mm, 11.5 mm, 13.5 mm の 4 種類を用いた.

電極部の絶縁は主としてテフロンを用いたが, ノズルと交差電極間の絶縁はマイカ及び耐熱セラミックによって行った. 両電極, ノズル及びアーク室に対してそれぞれ 1~1.5 l/min の冷却水を供給して水冷し, 熱損傷を防止するとともに各部熱損失を求めた.

2.2 実験回路及び安定器

交流プラズマジェット発生器の電源回路安定器とし

て抵抗を用いると, 再点弧時の電流休止期間が長いいため半サイクルのジェット持続時間が短縮されアーク人力も低下する. 一方, リアクトル形安定器を使用すると発生アークの位相差によって再点弧時の電極間印加電圧の確立が容易になり, 再点弧特性が改善される. その結果電流休止期間は著しく短縮され, ジェット持続時間, アーク人力ともに抵抗形安定器のそれに比べて大となる. また安定器電力損失も軽減されるので総合熱効率も向上する.

本実験では 0.8~3.3 Ω の無誘導抵抗からなる抵抗形安定器 (R 形) とこの抵抗素子に 2 mH のリアクトルを組み合わせたりアクトル形安定器 (RL 形) を使用し, それぞれに対する発生ジェットの諸特性を比較した.

Fig. 2 に実験回路を示す.

交流電源は単相 60Hz, 容量 30KVA, 無負荷電圧154 V で, R 形及び RL 形安定器によって垂下特性を与え, アーク電流 40~100 A を供給した. 電極ギャップ長の可変範囲は 2~8 mm で, 作動ガスとしては純度

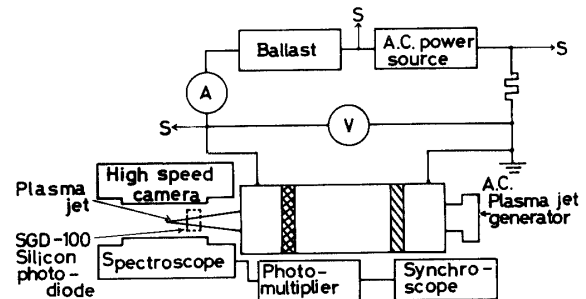


Fig. 2 Experimental arrangement of the AC plasma jet device.

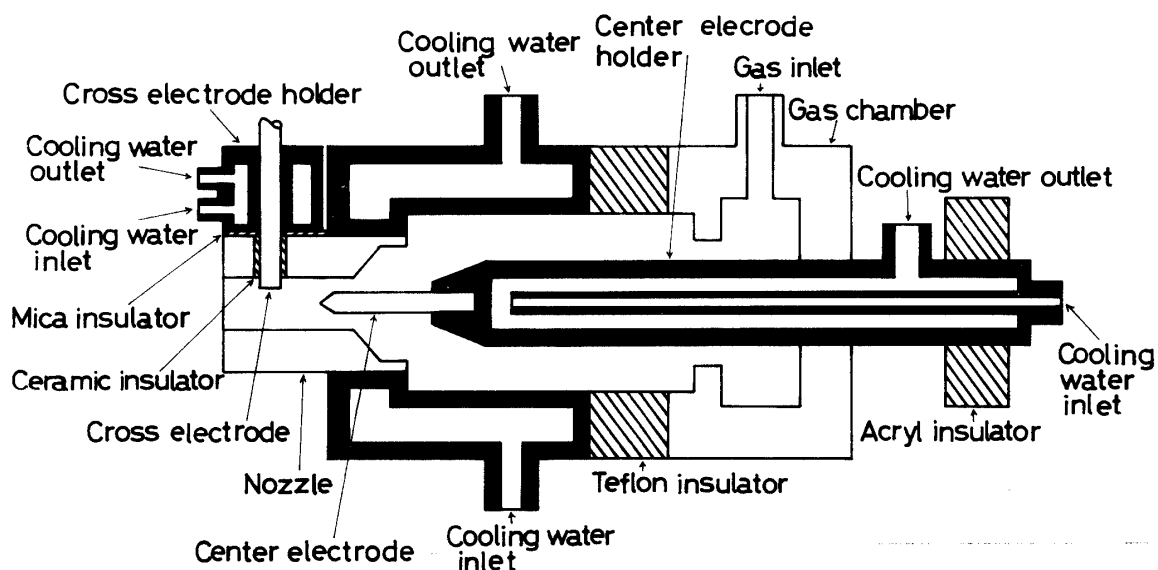


Fig. 1 Sectional view of the AC plasma jet generator.

99.99%のアルゴンを用い、圧力 5 kg/cm², 流量 15~40 l/min でアーク室後方から軸方向に流入させた。

2.3 実験方法

両電極間の短絡によって点弧したアークは電源の極性反転によって消滅するが、電極の熱的再点弧条件が満たされると引き続いて再点弧が生じ、間欠的ではあるが持続した交流ジェットが発生する。

Fig. 2 に示すようにアーク電流測定には可動鉄片形計器、アーク電圧測定には熱電形計器を使用し、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たアーク電流、電圧波形の解析結果と比較するとほぼ±4%以内に収まる。本実験では計器指示値と波形解析結果を対照し、読み取り精度をあげた。交流集束アークに供給されるアーク入力はアーク電圧波形がほぼく形波と見なしうることより次のように表わしうる¹²⁾。

$$W_i = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} V_a \cdot \sqrt{2} I_a \sin \omega t dt = 0.9 V_a \cdot I_a$$

ただし W_i : アーク入力 (W)
 V_a : アーク電圧 (V)
 I_a : アーク電流 (A)

ω : 角周波数 (rad/sec)
 T : 周期 (sec)
 t : 時間 (sec)

ノズル出口より 2mm 離れた軸線上における交流プラズマジェットからの放射光を検出器に導き、その出力を電源電圧、アーク電圧及び電流とともにシンクロスコープによって記録し、アークモードとジェットパワーの変化を求めた。また、交流ジェットの側面からスチル撮影及び高速度撮影 (16,000 P.P.S.) を行い、半サイクルごとに噴射するジェットの挙動を調べた。

さらに、交流ジェット各点からの放射光を特殊集光系及び高速度回転鏡を通して分光器スリット上に投影し、スペクトル線強度及び分光学的温度の時間的变化、軸方向及び径方向温度分布を求めた。

アーク発生中の電極点温度はノズル側面に設けた直径 2mm の石英ガラス製観測窓を通してマイクロピロメーターによって直読した。

3. 実験結果と考察

3.1 再点弧特性

交流プラズマジェットのアークモードは Fig. 3 に示すように半サイクルごとの再点弧モードとなり、消

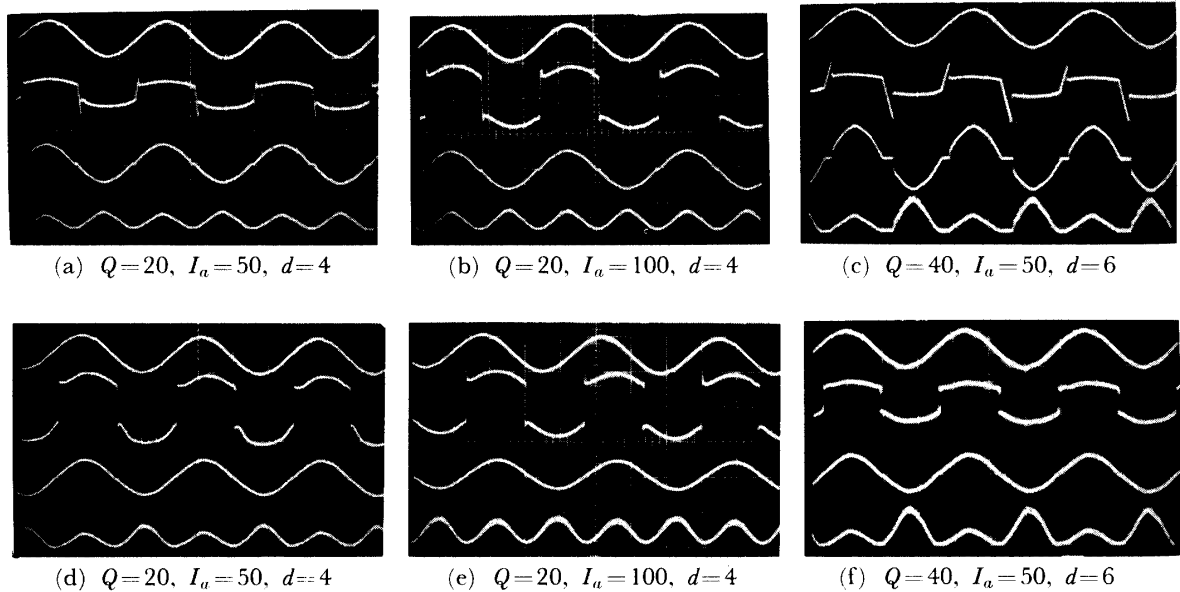


Fig. 3 Oscillograms of the arc behavior in AC operation.

(a)~(c): R-lballast, (d)~(f): RL-ballast

Q : Argon gas flow rate (l/min), I_a : Arc current (A), d : Electrode gap (mm), Sweep velocity: 5 msec/div
 1st trace: Supply voltage; (a)~(f): 400 v/div

2nd trace: Arc voltage; (a)~(f): 50 v/div, (b)(d)(e): 20 v/div, (c): 100 v/div

3rd trace: Arc current; (a): 125 A/div, (b): 250 A/div, (c): 78 A/div, (d): 140 A/div, (e): 320 A/div, (f): 118 A/div

4th trace: Light intensity; (a)(c)(f): 0.02 v/div, (b): 0.05 v/div, (d)(e): 0.01 v/div

弧から再点弧に至る時間は放電が停止するため電流休止期間となる。以下ではセンタ電極に対して交差電極側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，交差電極側が負電位となる負極性アークの点弧を負点弧とする。

Fig. 4, Fig. 5 は回路安定器の種類及び動作条件が再点弧特性に与える影響を示している。R 形の再点弧電圧，電流休止期間は負点弧時が正点弧時に比べてお

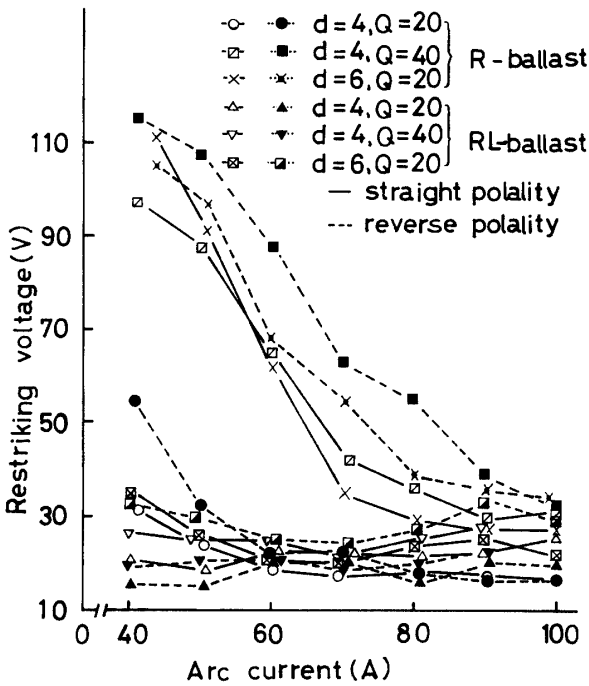


Fig. 4 Restriking voltage vs. arc current.
d: Electrode gap (mm), Q: Argon gas flow rate (l/min)

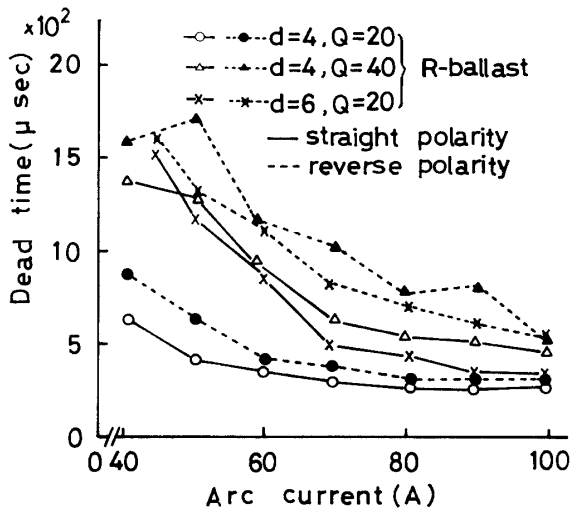


Fig. 5 Dead time vs. arc current.
d: Electrode gap (mm), Q: Argon gas flow rate (l/min)

おむね大となる。電流を増加すると電極部への熱入力が増加するためセンタ電極，交差電極上のアーク電極点温度は Fig. 6 に示すように上昇する。その結果再点弧は容易となり，再点弧電圧が低下する。とくに電流 80 A 以上では交差電極側の電極点温度が 3,300°C 以上に上昇してセンタ電極上の電極点温度に接近する。このとき再点弧電圧における正点弧，負点弧の違いはほとんど認められなくなるとともにその値は RL 形における再点弧電圧と同程度になるまで低下する。このようにアーク電流が 80 A に達するまでは再点弧特性は電流によって著しい影響をうけるが，80 A 以上の電流においてはアークの熱的再点弧条件はほぼ確立されたものと考えられる。

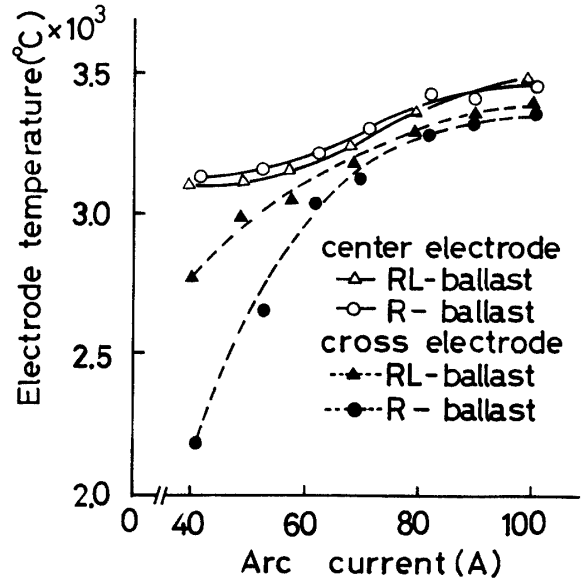


Fig. 6 Electrode temperature vs. arc current.
Argon gas flow rate: 20 (l/min)
Electrode gap: 6 mm

ガス流量，電極ギャップ長を増加すると放電条件が変化するため再点弧電圧，電流休止期間ともに著しく大となり，極性による違いも顕著に表われる。R 形による電流休止期間は最小 250 μ sec から最大 1,740 μ sec に達しており，動作条件の選定がアークの安定に強い影響を与えることがわかる。

一方 RL 形においてはアーク電流，ガス流量，電極ギャップ長などの動作条件が再点弧特性に与える影響は R 形の場合に比較すると著しく軽微である。Fig. 6 に示すように RL 形においては両電極点温度は常に 2,700°C 以上を継続し，かつアークの位相差のため消弧時の電極間電圧確立の遅れが少なく再点弧電圧は 15 ~ 35 V に低下し，正，負極性による差は 15 V 以下となる。対応する電流休止期間は 25 μ sec 以下で R 形

の場合に比較すると10%以下にすぎない。

3.2 電圧電流特性

アーク電圧対電流の関係は Fig. 7 に示すように垂下特性から上昇特性に移行する領域である。垂下特性を示す領域の電圧垂下率は電流 70 A を境界として異なり、RL 形では 70 A 以下で 0.1~0.24 V/A と大きく、それ以上で 0.02 V/A に低下する。一方 R 形では同じく 0.1 V/A, 0.02 V/A である。またアーク電圧は RL 形が R 形に比べて約 0.8~4.4 V 高い。これは再点弧特性の相違によって生ずるアーク持続時間が異なるゆえと考えられる。

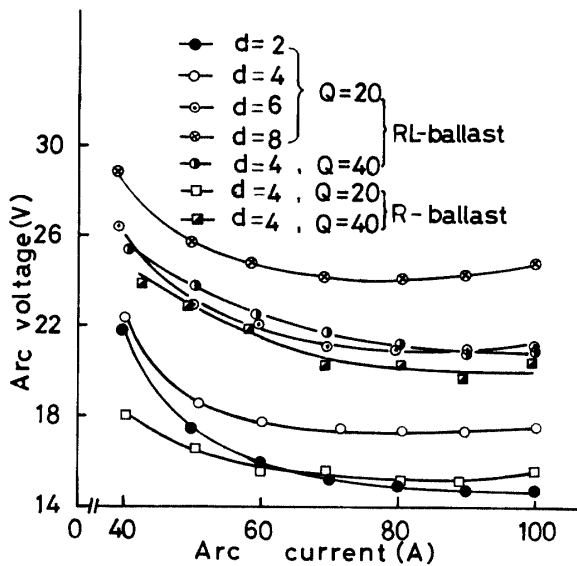


Fig. 7 Arc voltage vs. arc current.

d : Electrode gap (mm), Q : Argon gas flow rate (l/min)

ガス流量を 40 l/min に増加すると 20 l/min の場合の特性を保持したまま電圧のみ上昇し、RL 形、R 形のアーク電圧はそれぞれ 4.2 V, 4.4 V 高くなる。

電極ギャップ長を 2 mm 増すとアーク電圧は電流 70 A 付近では RL 形、R 形ともに約 3 V 上昇し、電極点が固定されているゆえ平均的な電界強度は約 15 V/cm となる。この値は、絶縁集束ノズルを用いた直流アークの同一動作条件で得られる電界強度¹³⁾ 10 V/cm より 50% 大である。このように交流アークは再点弧後の放電路の確立のため強い電界強度を必要とする。

3.3 エネルギー収支

交差電極部、センタ電極部及びノズル部における熱損失は Fig. 8 に示すように、いずれも電流の増加とともにほぼ直線的に増加する。ノズル部熱損失が発生

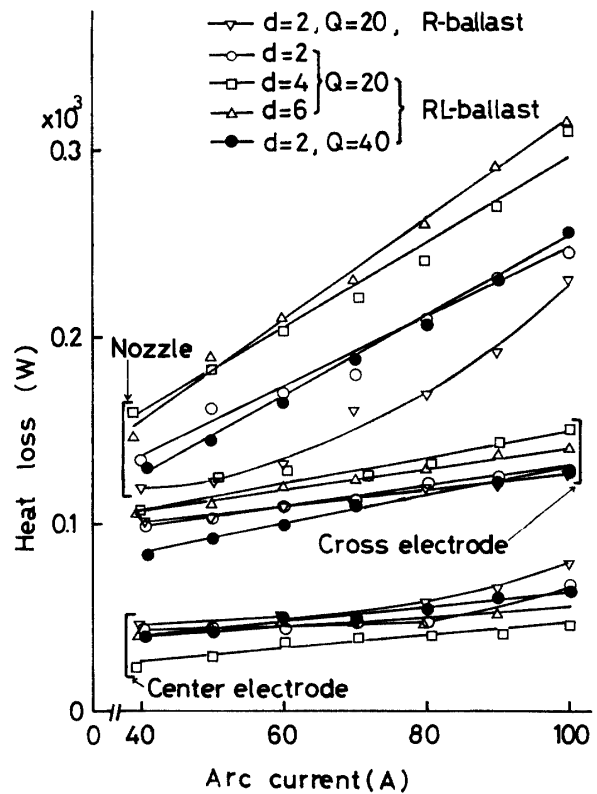


Fig. 8 Heat loss of center electrode, nozzle and cross electrode.

d : Electrode gap (mm), Q : Argon gas flow rate (l/min)

器全熱損失に占める割合は電流の増加とともに著しく大となり、電流 40 A では 49% であるが、電流 100 A では 57% に上昇する。一方交差電極部及びセンタ電極部は発生器全熱損失に対してそれぞれ 30~36%, 13~15% を占めノズル部熱損失に比較すると低い。交差電極部とセンタ電極部の示す違いは点弧したアークの極性及び電極間の構造による。

電極ギャップ長 2 mm における発生器各部の熱損失を R 形、RL 形について比較すると、対応する電極部熱損失はほぼ等しいが、ノズル部熱損失はアーク持続時間の長い RL 形の方が 10~14 W 大である。

電極ギャップ長を増加しアークを引き伸ばすとノズル部及び交差電極部熱損失は増大し、とくに電流が大となるほどこの傾向が著しい。すなわち電流 100 A において電極ギャップ長 6 mm の伸長に対する熱損失の増加はノズル部で 180 W, 交差電極部で 30 W となる。これに対しセンタ電極部熱損失では 20 W 低下する。

ガス流量を増加すると発生器各部の熱損失が減少するが、とくにノズル部に対する影響が著しい。ガス流量を 15 l/min から 40 l/min に増加すると、ノズル部熱損失のアーク入力に占める割合は 20% から 15% に低

下し、発生器熱効率が向上する。

アーク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 P_{net} は Fig. 9 に示すように電流 50 A 以上では電流の増加とともにほぼ直線的に上昇するが、電極ギャップ長及びガス流量がその特性に著しい影響を与える。すなわちガス流量 20 l/min, 電極ギャップ長 2 mm において電流 100 A に対する正味アーク入力は 900 W で電流 40 A の場合の 1.8 倍であるが、ガス流量を 40 l/min に、電極ギャップ長を 8 mm にすると同じく 2150 W, 2.3 倍となる。

発生器の熱効率は 56~79% となり、RL 形は R 形に比べておおむね大である。総合熱効率を比較すると R 形は 5~13%, RL 形は 7~22% となり顕著な違いを生じる。

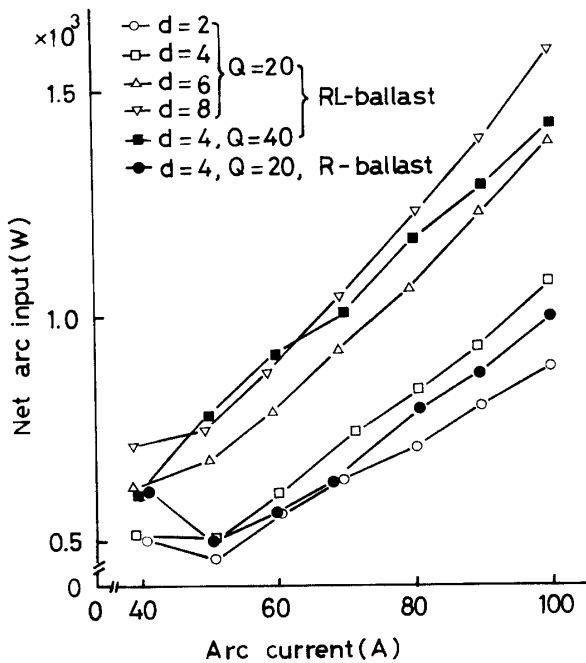


Fig. 9 Net arc input vs. arc current.

d : Electrode gap (mm), Q : Argon gas flow rate (l/min)

3.4 交流プラズマジェット

Fig. 10 に示すように交流プラズマジェットは放電休止に伴うジェットの消滅を含むがその形状は直流ジェットと同様に安定に維持される。Fig. 11 は安定器の種類と動作条件がジェットに与える影響を示す。RL 形においては電流の増加にほぼ比例してジェットが伸長するが、R 形では再点弧特性が改善される電流 70 A 以上においてジェットの急激な伸長が見られる。40 A から 100 A への電流増加に対するジェット伸長量を比較すると RL 形 2~4 mm, R 形 2.1~6 mm となる。

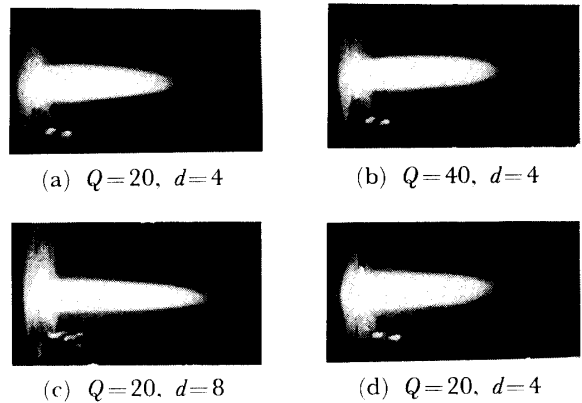


Fig. 10 Photographs of AC plasma jet.

(a)~(c): RL-ballast, (d): R-ballast
 Q : Argon gas flow rate (l/min)
 d : Electrode gap (mm)
 Arc current: 100 A

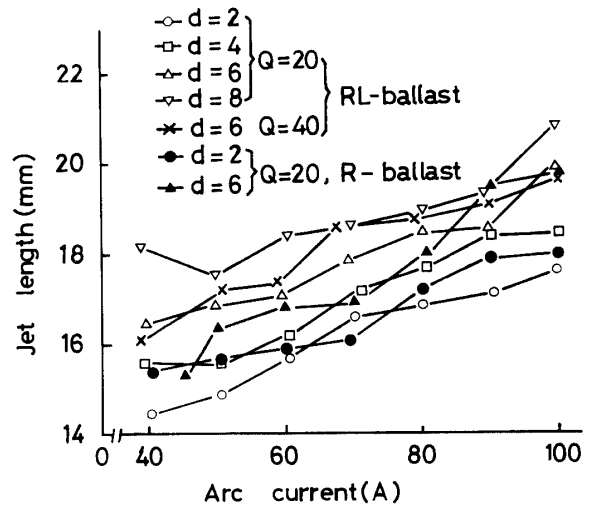


Fig. 11 Jet length vs. arc current.

d : Electrode gap (mm), Q : Argon gas flow rate (l/min)

ガス流量を増すと正味アーク入力が増え、ジェットの噴出圧力が上昇するためジェットは伸長し、20 l/min から 40 l/min にガス流量を増加するとジェット伸長量は RL 形, R 形ともに 0.5~2 mm となる。

RL 形において電極ギャップ長を増加するとジェットが伸長するが、R 形における電極ギャップ長を 6 mm から 8 mm に伸ばすと却ってジェットの短縮を生じることもある。

Fig. 12 に示すような交流ジェットの高速度撮影像をフィルムデータ解析装置によって処理し、Fig. 13 のようにジェットの伸長量及び挙動を求めた。

交流ジェットは安定器によるアーク特性の違いによりその形状やふるまいを異にする。ここでは電流 100 A, ガス流量 20 l/min, 電極ギャップ長 6 mm における

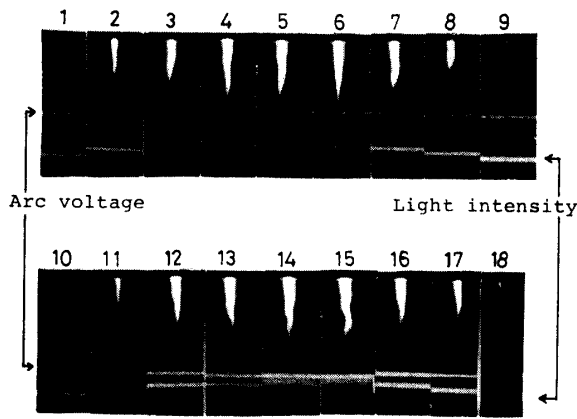


Fig. 12 Photographs from high speed movies of AC plasma jet.

1~9: Straight polarity
 10~18: Reverse polarity
 Flaming rate: 16,000 p.p.s, RL-ballast
 Arc current: 100 A, Argon gas flow rate: 20 l/min, Electrode gap: 6 mm

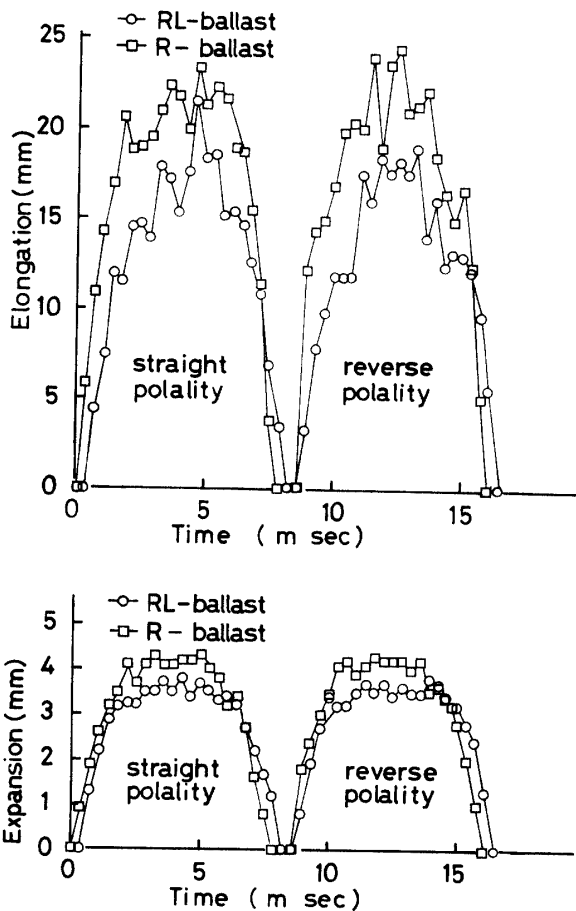


Fig. 13 Profiles of elongation and expansion of AC plasma jet.

Arc current: 100 A, Argon gas flow rate: 20 l/min, Electrode gap: 6 mm

R形及びRL形による正極性ジェットの特徴を比較して述べる。

再点弧後ジェットの噴出はRL形 0.6 m sec, R形 0.36 m secの遅れがあり, 両者のアーク入力はそれぞれ 480 W 及び 360 W である. 噴出後ジェットはアーク入力の増加に伴い軸方向に伸長するとともに径方向にも膨張する. しかしアーク入力が増大するにつれて近づくにつれてジェットの膨張は止まり軸方向にだけ伸長するようになる. 膨張停止時のアーク入力は最大値に対してRL形で50%以下, R形で60%になる. 以下ではジェットの膨張が停止した時のジェット長を有効長とする. また消弧に近づくためのジェットの短縮後退のため有効長以上のジェット長が維持できなくなるまでの有効長以上のジェット存在時間を有効時間とする. ジェットが有効長に達した以後アーク入力の増加は主としてジェットの伸長に役立つものと考えうる. ジェット有効長はRL形 12.8 mm, R形が 18.8 mm であり, 点弧後ジェットが有効長に達するまでの経過時間はRL形, R形ともに 1.8 m sec となる. ジェットの初期伸長速度はRL形が 10.7 m/sec, R形では 13.1 m/sec となる. R形は再点弧電圧が高く点弧後のアーク入力の増加率の立ち上りもRL形より25%大となることが原因である.

ジェット有効時間はRL形で 5.1 m sec, R形では 4.6 m sec である. 有効時間内のジェットのふるまいはR形とRL形では相違がありR形におけるジェットはおおむね最大長至近の長さを維持しているが, RL形の場合は伸長が著しい. ジェットが最大長に達する時期はRL形, R形ともアーク入力が増大した時から 300~500 μ sec の遅れ時間が存在する.

ジェットの後退, 収縮はアーク入力が増大するにつれて著しくなり, RL形では最大値の43%, R形では同じく50%のアーク入力に低下するとジェット径の収縮が始まり同時にジェットの後退速度も急増し約 1.1 m sec 以内にジェットは消滅する. ジェットの後退速度はジェット有効長の大きいR形の方が大となる. 負極性ジェットの特徴も正極性の場合とほぼ同様であるが, ジェット持続時間の極性による違いはR形のように正極性 7.1 m sec, 負極性 6.9 m sec となる場合とRL形のように正, 負とも 7.6 m sec と等しくなる場合とある. 一般にRL形ジェットの持続時間はR形に比べ長い.

交流ジェットは軸方向ゆらぎが大であるばかりでなく径方向ゆらぎも直流ジェットに比べて大であり, 径方向の偏向ゆらぎ量はRL形, R形に対してそれぞれ電流 100 A では 2.7 mm, 2.8 mm, 40 A では 4.0 mm,

4.4 mm となる。これより径方向に対する安定度は RL 形がまさっていることがわかる。

3.5 分光学的温度

交流アルゴンプラズマジェット の放射スペクトルは $3,950 \text{ \AA}$ から $4,500 \text{ \AA}$ に渡って分布している。本来ジェットは拡散及び再結合により荷電粒子損失の著しい領域であるため、この範囲でのスペクトル線は中性粒子線 (Ar I) が優勢である。

ジェットは完全に軸対称で、局所熱平衡状態であるものと仮定し、アーベル変換及び相対強度比法を用いて温度を求めると Fig. 14~Fig. 16 となる。なお動作条件は RL 形、ガス流量 20 l/min 、アーク電流 100 A 、電極ギャップ長 6 mm であり、温度測定に用いたスペクトル線は Ar I の $4,159 \text{ \AA}$ と Ar I $4,259 \text{ \AA}$ である。

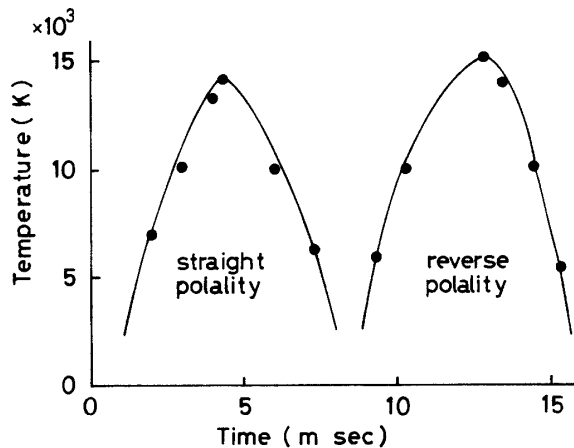


Fig. 14 Profiles of temperature in AC plasma jet with nozzle center axis.

RL-ballast, Arc current: 100 A , Argon gas flow rate: 20 l/min , Electrode gap: 6 mm , Distance from nozzle exit: 2 mm

Fig. 14 に示すようにノズル出口より 2 mm 離れた位置のジェット軸上の温度はアーク入力の時期的変化とほぼ同様に推移する。半サイクルにおけるジェット温度はアーク入力最大値を示した後 $100 \sim 200 \mu \text{ sec}$ 遅れて最大となり、最高温度は負点弧後 4.3 m sec 経過したジェットによって得られ、約 $15,000 \text{ K}$ となる。またジェットが有効長に達した時の温度は正極性、負極性ともに $6,000 \sim 8,000 \text{ K}$ となり、ジェット有効時間内における温度は $6,000 \text{ K}$ 以上を維持していることが明らかとなった。

負極性ジェットは正極性ジェットに比べ温度が一般に高いが、これは負極性アーク入力の瞬時値が正極性に比べて大となるためと考えられる。

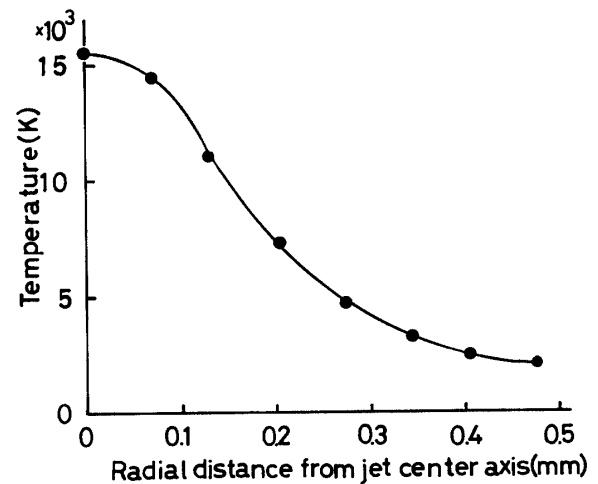


Fig. 15 Radial distribution of temperature at 4.3 m sec after reverse ignition.

RL-ballast, Arc current: 100 A , Argon gas flow rate: 20 l/min , Electrode gap: 6 mm , Distance from nozzle exit: 2 mm

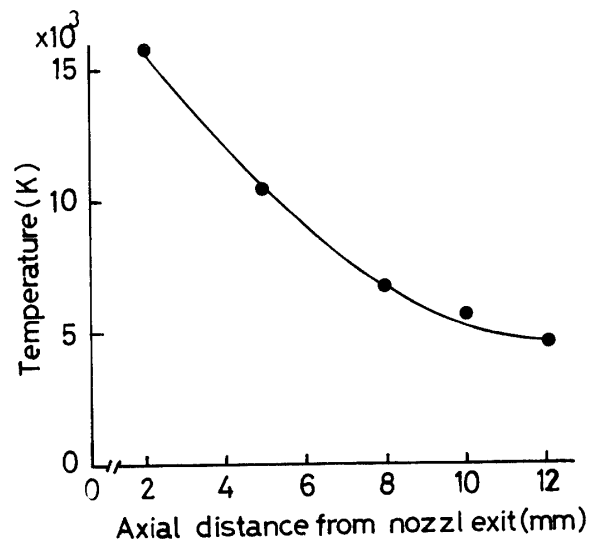


Fig. 16 Axial distribution of temperature at 4.3 m sec after reverse ignition.

RL-ballast, Arc current: 100 A , Argon gas flow rate: 20 l/min , Electrode gap: 6 mm

Fig. 15, Fig. 16は負点弧後 4.3 m sec 経過したジェットの径方向及び軸方向温度分布をそれぞれ示している。ジェット径方向の温度は外周部に向って減少し、とくに半径 0.1 mm より外部では急激な温度低下を生じ、軸線から 0.3 mm 離れた位置では軸上温度の約 27% に低下し $4,000 \text{ K}$ となる。またジェット軸上の温度はノズルからの距離が大となるにつれて低下するが、径方向に対する温度低下に比べると低下の割合は小さく、ノズル出口より 5 mm 離れた位置では $10,000 \text{ K}$ 、 12 mm の位置では $4,000 \text{ K}$ を維持している。

一方R形の温度分布はRL形と相似であるが、アーク入力の瞬時値がRL形より大であるため温度はやや高くなる。しかし有効時間の減少のため6,000K以上の温度を維持する時間は却って15%短縮される。

4. むすび

交流プラズマジェット発生器の電源回路安定器として抵抗形及びリアクトル形を選定し、それぞれに対する交流ジェットの動特性について解析を行った。その結果リアクトル形安定器は再点弧特性の改善によるアーク安定度の増加、安定器電力損失の軽減による総合熱効率の上昇、ジェット持続時間の拡大と熱出力変化量の緩和など交流ジェットの実用性の向上にきわめて有効な役割を果しうることが明らかになった。

本研究に協力いただいた本学山中麗子氏、昭和53年度卒業研究学生諸氏に感謝する。なお本研究は文部省科学研究費の援助を受けたことを付記して感謝の意を表わす。

参 考 文 献

- 1) J.A. Browning: *Weld. J.*, **38**, 870 (1959)
- 2) N.N. Rykaiin & V.V. Kudinov: *Pure. Appl. Chem.*, **48**, 229 (1976)
- 3) 岡田実, 荒田吉明: プラズマ工学, 日刊工業新聞社(1965) p. 396
- 4) I.G. Sayce: *Pure. Appl. Chem.*, **48**, 215 (1976)
- 5) 岡田実, 荒田吉明: プラズマ工学, 日刊工業新聞社 (1965) p. 457
- 6) J.L. Murgratroyd: *Meas. Conf.* **7**, 77 (1974)
- 7) J.E. Harry: *IEEE Trans.*, **IGA-6**, 36 (1970)
- 8) K. Root & H. Kadhim: *IEEE Trans.*, **IM-18**, 150 (1969)
- 9) D.E. Geister: *AIAA Paper*, **69-348**, 6 (1969)
- 10) 逸見文彦他: 電学誌, **86**, 395 (1966)
- 11) 佐伯節夫・大崎堅: 応用物理, **45**, 747 (1976)
- 12) 安藤弘平, 西口公之: アーク溶接機器, 産報 (1970) p. 178
- 13) 佐伯節夫, 内山格郎: 山口大学工学部研究報告, **27**, 113 (1976)

(昭和54年4月16日 受理)