

大気圧アルゴン・プラズマからの放射について

佐伯 節夫*・伊藤 敏明**

On the Radiation from an Argon Plasma at One Atmospheric Pressure

Setsuo SAEKI and Toshiaki ITO

Abstract

The argon plasma jet at one atmospheric pressure has strongly emitted radiations from ultraviolet to infra-red zone.

The measurements with spectrometer were performed to obtain the spectrum energy distribution for D. C. argon jet. The thermoelectric radiation probe was developed and radiant power from the jet was measured. Experiments were made at arc currents from 40 up to 160 A in argon gas flow rate of 10 l/min or 20 l/min.

Radiation intensity mainly depended on arc currents and the strong radiation lay in the wavelength above 4200 Å. Especially, the concentration of line spectrum was in the wavelength from 4200 Å to 4400 Å or 7900 Å to 8100 Å.

As power input was increased, the wavelength to maximum intensity was moved to the shorter.

Intensity depended on the distance (L) from nozzle exit: for $L < 4$ mm, the intensity decreased rapidly; for $4 \text{ mm} < L < 8$ mm, it maintained nearly constant; for $L > 8$ mm, it decreased gradually. This result coincided with the spectroscopic measurements.

The ratio of total radiant power to net power input increased monotonously and was about 10 % above 1600 watt. From this result, therefore, the effective jet enthalpy was to be reduced.

1. ま え が き

大気圧下のアルゴン・プラズマ・ジェットは、紫外域より赤外域に至る広範な領域にわたって強烈な放射を発生する¹⁾。この放射の強度は、プラズマ・ジェットの巨視的および微視的特性に大きく依存している²⁾。プラズマからの放射は、しばしばその温度測定などの非接触診断に利用されてきた³⁾。一方このようなプラズマからの放射はジェットのエネルギー損失に関係し⁴⁾、その実用性に重要な影響を与えることとなる。具体的には、ガスのプラズマ化のために投入された電力エネルギーの中ノズル噴出後熱伝達に寄与しない量が生ずることを意味する。このような観点に立ったプラズマの計測は多くはアーク柱部分を対象とするもので、ジェットからの放射については近似的な測定結果を示している⁵⁾にすぎない。プラズマ・ジェットからの放射計測を妨げる主要因として、ジェットのエン

タルビ流によって絶対測定の手法が複雑化することや、電磁流体としてのジェットの中を伝播するゆらぎ現象、さらに放射スペクトル分布の特異性による光電変換の困難性などがあげられる。

筆者らは、大気圧下のプラズマ・ジェットの放射強度を測定するため、レーザ・エネルギー測定に使用される熱電計測装置⁶⁾とほぼ同様な構造を持つ熱電対型放射測定器を試作した。以下では、本測定器によるアルゴン・プラズマ・ジェットの放射特性について述べる。

2. 実 験

2.1 放射測定器

放射強度の計測法として現在実用されている方式は、光電的測定法と熱的測定法に大別される⁷⁾。筆者らは放射エネルギーの絶対値の測定を目標とするため、熱的測定法を採用した。すなわち、放射を受熱板に吸

* 電気工学科

** 大学院電気工学専攻

取させ、その温度上昇より入射エネルギーを測定する。吸収体については、(1) 波長に対する吸収率スペクトラム、(2) 熱平衡の遅れ時間と誤差、(3) 再放射や熱伝達による損失に関連する構造上の問題、(4) 熱容量と接続トランスジューサの出力信号との関係を考慮すべきである。本測定器の吸収体は銅板を使用し、通常の黒化法を用いて黒化を行なった。金属板は *Bohm・Pines* 理論³⁾ によって吸収帯域の短波長側の境界が、そのプラズマ振動数で定めうる。この場合のプラズマ振動数は、 1150\AA となる。

温度検出器は、測定回路の簡素化、吸収体の形状との適合性および安定度の点と出力の線型性より見て、熱電対を使用した。熱電対としては、吸収プレートの温度が低いと予想されるので、低温部における線型性にすぐれ、熱起電力の大きい銅-コンスタンタンを選定した。なお、直流置換法により直流電力を供給して出力信号を校正する。

測定器の構造は Fig. 1 に、その代表的特性値は Table 1 に示す。ジェット任意点からの放射を求めため、測定器先端にガイド探針を付した。

Table 1 The Specification for thermoelectric radiation probe

開口角	約 10.8°	探針径	$1.8\phi \times 20\text{mm}$
熱電対仕様	1.625 joule/mV		
プレート大きさ	$5 \times 5 \times 0.5 \text{ mm}$		
熱容量	$1.02 \times 10^{-2} \text{ cal}/^\circ\text{K}$		
熱電対	C-C	0.32ϕ	mm

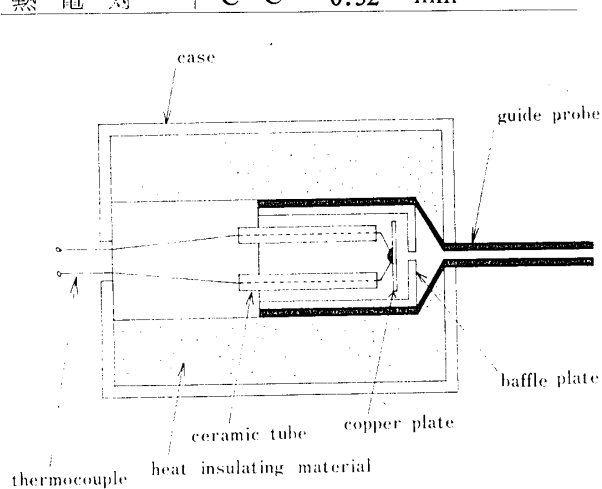


Fig. 1 Schematic view of thermoelectric radiation probe

2.2 プラズマ発生器

プラズマ・ジェット発生器は、層状ガス流入口を有

する直流ガス渦流集束形を使用し、実験中の発生器の動作条件は、アーク電流 40A 、 100A 、 160A 、アルゴン・ガス流量 $10\text{l}/\text{min}$ 、 $20\text{l}/\text{min}$ である。ノズル電極は仮称 N-26型を用いた。本ノズルは、オリフィス径 5 mm 、集束部アスペクト比 1.4 、ノズル出口テーパ 1.8 、のテーパ形である。陰極は直径 5 mm の 1.75% トリウム入りタンゲステン棒で、先端角は 90° である。電極ギャップは 2 mm 一定とする。

ガスは、純度 99.99% のアルゴン・ガスをを用い、ガス室流入圧力は $5 \text{ kg}/\text{cm}^2$ を標準とし、流入口面積は $1 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ である。

2.3 実験方法

まず、プラズマ・ジェットから発する放射に対し分光測定を行ない、そのパワー・スペクトラムを求めた。測定位置はジェット軸線上 $2, 4, 6, 8, 10\text{mm}$ の各点、および各測定点において軸線に垂直な方向 $\pm 0.8\text{mm}$ 、 $\pm 1.6\text{mm}$ の各点である。いずれも測定対象の受光板に対する開口角を限定するために、プローブ($0.8\text{mm}\phi$)を用いる。さらにジェット全像を分光器スリット上に投影し、その分光特性を測定した。

ジェット全放射束の測定は、試作した放射測定器を前述の各測定点に対して指向して行なった。ガイド探針はジェット軸線に垂直に配置し、軸線から探針先端まで 100mm (検出面まで 120mm)とした。この位置において、ガイド探針および測定器本体に対するプラズマ流による加熱その他の擾乱は無視できることを確認した。

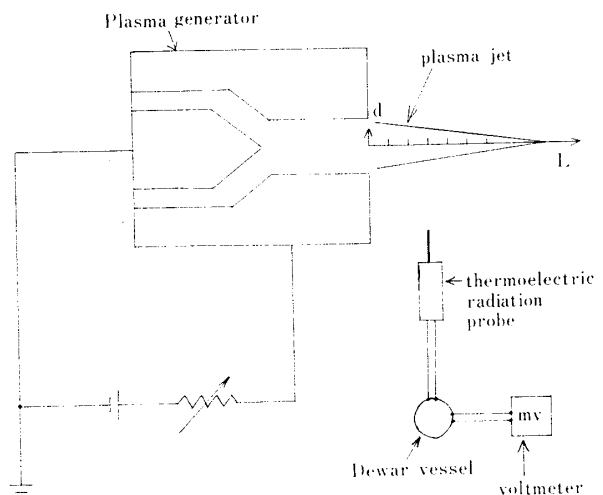


Fig. 2 Measuring circuit

アーク電圧測定には、デジタル型 TR 電圧計を使用して電極間電圧の測定精度をあげ、同時に、ジェットのモードを四現象シンクロ・スコープ DS5305B に

よってモニタした。

3. 結果と検討

3.1 プラズマジェットの特性

実験条件下におけるプラズマ・ジェットのアーケ電圧対アーケ電流の関係は、Fig. 3 に示すようになり、本ノズル固有の電圧対電流特性に、ほぼ一致する。

Fig. 4 にジェットの発生状態の一例を示す。Fig. 5 は、各動作条件に対応するアーケ・モードであるが、それぞれ、再点孤形、継続振動形、定常形を示している。実験中の発生器の熱効率、54~80%である。

測定期間中のジェットの一般特性、アーケ・モード、形状ゆらぎ、などを検出すると、その平均的特性はほぼ不変と見なしうる。また、再現性も良好である。

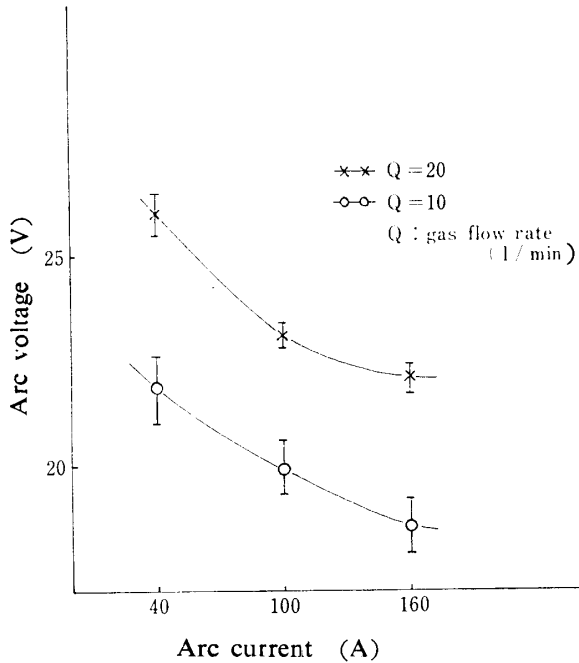


Fig. 3 Voltage-current characteristics of argon plasma jet
nozzle number ; N-26
electrode gap ; 2 mm

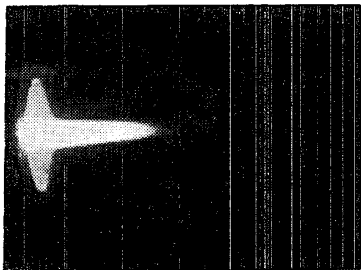
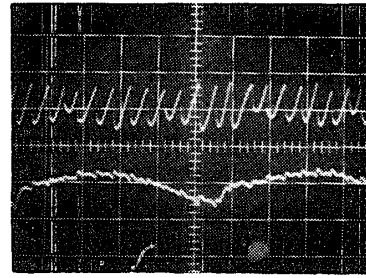
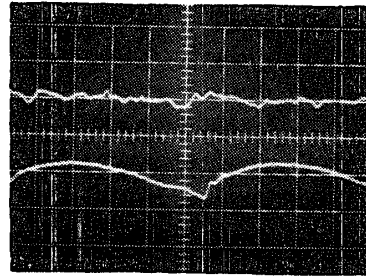


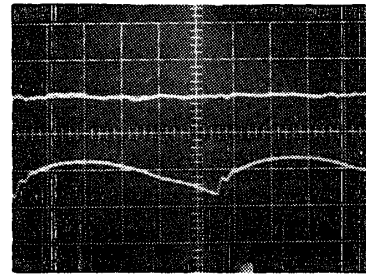
Fig. 4 Argon plasma jet
arc current ; 160A
gas flow rate ; 10 l/min vortex flow



(a) $I_a = 40A$



(b) $I_a = 100A$



(c) $I_a = 160A$

Fig. 5 Oscillogram of arc mode
gas flow rate ; 10 l/min

I_a ; arc current

upper trace ; arc voltage wave form
lower trace ; arc current wave form

(a) restrike mode (b) takeover mode
(c) steady mode

sweep velocity ; 500 μs/div.

gain ; upper ; 5 V/div.

lower ; 20V/div.

3.2 連続放射スペクトラム

線放射スペクトラムは連続放射スペクトラムに比して、その値が極めて小さいので無視すると、プラズマ・ジェットの分光エネルギー分布は Fig. 6 のように示される。一般に、アーケ冷却ガスを電気入力に適合した値の範囲内で増加してゆくと、アーケ柱の集束度が強まって、その中心温度が上昇し、それに伴ってプラズマ・ジェットはより高温になると考えられているが、本実験の結果によると、アーケ冷却ガス流量増加に伴う放射強度の増大は微弱で、ガス流量増加による

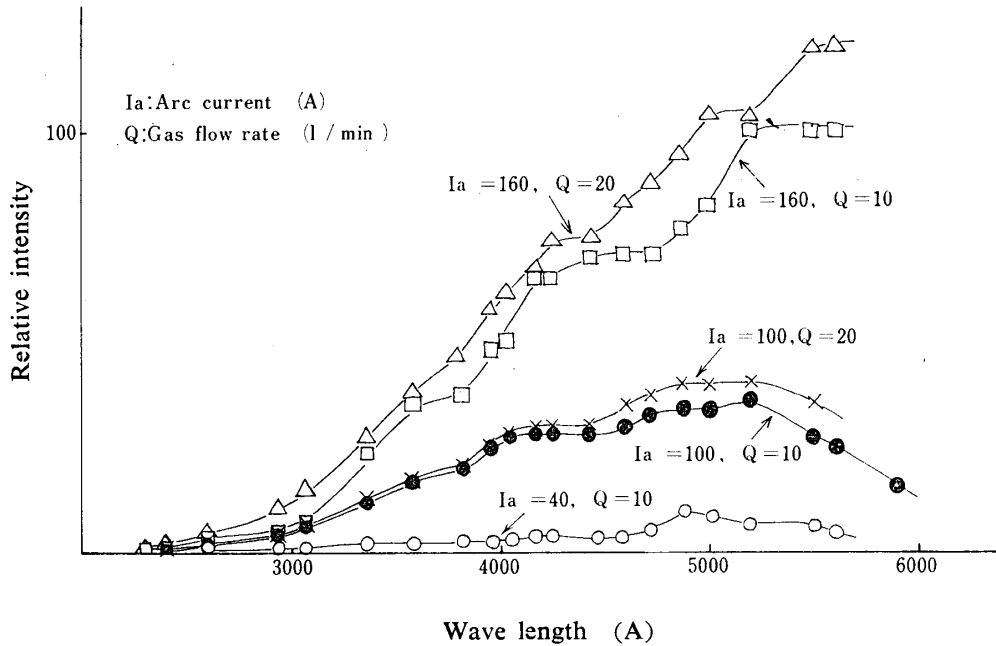


Fig. 6 Spectrum for the continuum radiation

アーク柱閉じ込め効果はあまり期待できない。一方、アーク電流を増大すると、放射強度の急増が顕著である。本実験の結果より、放射束の依存する度合はアーク電流の方が著しいと考えられる。Fig. 6に見られるように放射強度の大きい波長領域は、 4200\AA 以上に属し、ほぼ平坦なエネルギー分布を示す。 4200\AA の放射は 2.96eV のエネルギーに匹敵し、波長の逆数に比例して放射エネルギーは増減するので、アーク電流が 100A までは、このエネルギー値に相当する粒子の分布が多いと推定される。

アーク電流 160A 、ガス流量 10l/min のジェットに対する各測定点における放射の分光エネルギー分布を

Fig. 7に示す。エネルギー分布は 2mm 、 6mm 、 8mm の各測定点では、ほぼ同様の傾向を示し、長波長領域で強い放射が記録されているが、 4mm の測定点では、 $4600\text{\AA}\sim 5200\text{\AA}$ にピーク値が存在する。このピーク値に対応する放射は、 $2.40\sim 2.71\text{eV}$ のエネルギーに相当する。大気圧下のプラズマ・ジェットでは再結合放射が優勢であるので、このエネルギーに相当する粒子の捕捉が盛んであると考えられる。一方、軸線上ノズル出口から 4mm の点までは放射強度の減少が著しく、 $6\sim 8\text{mm}$ の点では、ほぼ一定値を維持する。写真測定によるジェット形状とも比較して、 $6\sim 8\text{mm}$ 区間のプラズマはほぼ等質であることが推定される。

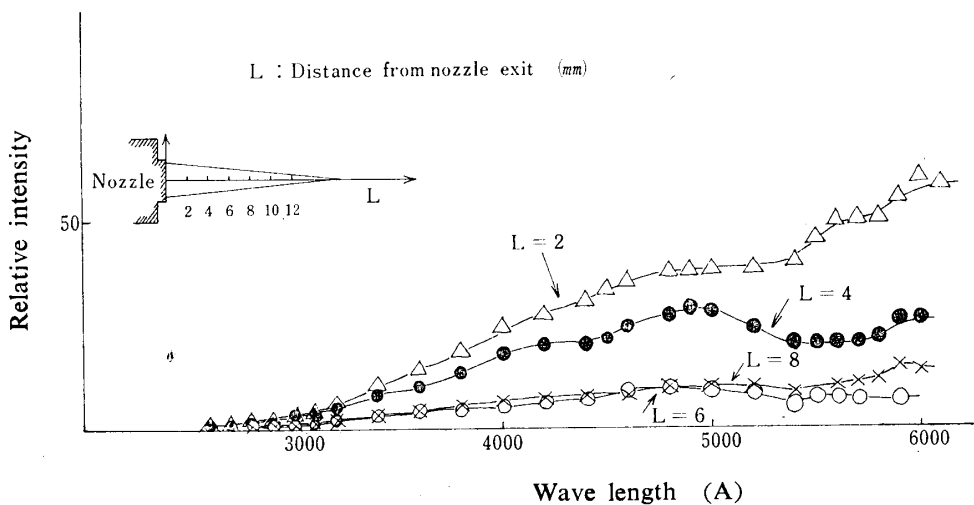


Fig. 7 Spectrum for the continuum radiation on the pointwise measurement

3.3 線スペクトル強度

ジェットの線スペクトル強度変化の一例をFig. 8に(×10³)示す。電流の増加に対し最大強度を示す波長は短波長側に移行する。指示値は、平均温度7500°Kでは4259Å, 7900°Kでは4200Å, 10900°Kでは4158Åである。一方, RCA 1P 28光電子増倍管およびPBSで検出したジェットの線スペクトル分布を調べると, 分布に偏りのあることが判明する。すなわち, アーク電流の小さい領域では, 主として4200Å~4400Åの波長帯に集中し, 特に赤外部では7900Å~8100Åに比較的集中した形を示す。大電流になると紫外域における特性励起放射が促進され, 3500Å~3700Åにおいて線スペクトルの集中が観測される。あわせて, 小電流の場合に比して, より強力な放射レベルを有する4200Å~4400Å帯および7900Å~8100Å帯の線スペクトルの集中が見られる。この現象は, おおむね, アルゴンの原子構造に起因するものと考えられ, 特に前記波長域の選択的な励起放射が生ずると解釈される。

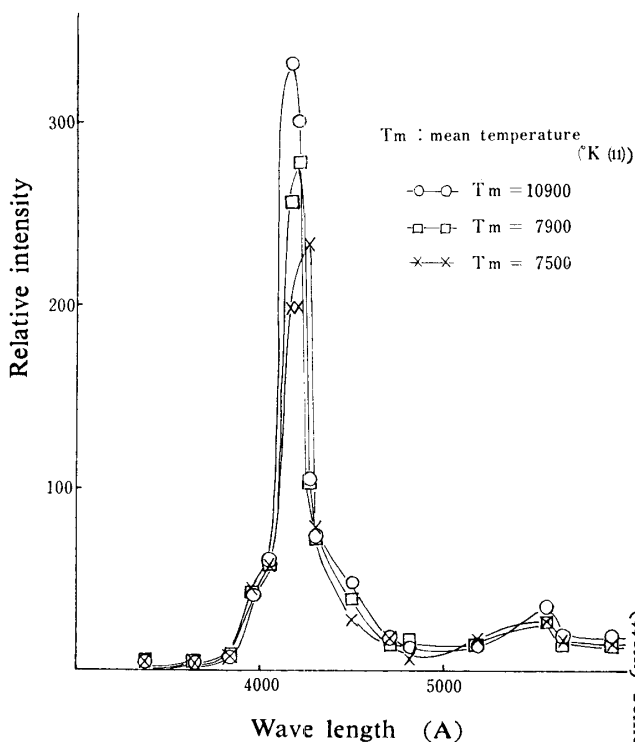


Fig. 8 Distribution of the line spectra

3.4 放射パワー

ジェット軸線上の各測定点における放射強度をアーク電流に対して示すとFig. 9となる。ジェット軸線上2mmの点では電流増加による放射強度の増大が顕著であるが, 4~10mmでは, 電流増加の影響はほぼ同様であり, その増加率も2mmの点に比較して少ない。

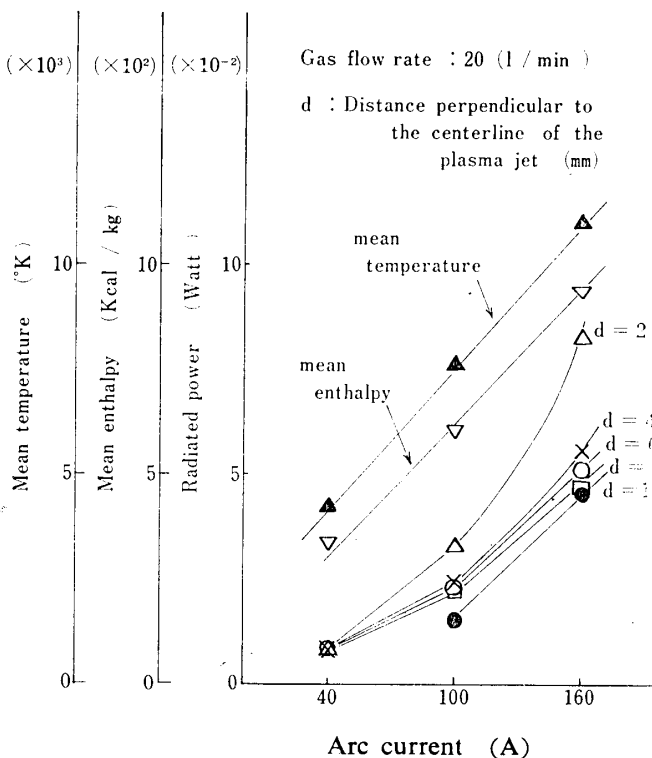


Fig. 9 Dependence on arc currents for radiation power

安定動作領域内でアーク電流を増加して, ジェットに対する電気入力を増大させると, 一般に, 平均エンタルピーも上昇することになるが, これに伴って, より高温のプラズマがノズル出口に新たに形成され, ジェットを伸ばさせていると考えうる。

Fig. 10に, ガス流量10l/minにおける, 軸線上の各点に対する放射パワーの変化を示す。軸線距離が2~4mmの区間では, 放射パワーの急激な減少が観測され, 4~8mmの区間では, ほぼ一定値を維持する。8mmより下流側へ移行するとジェットの劣化が

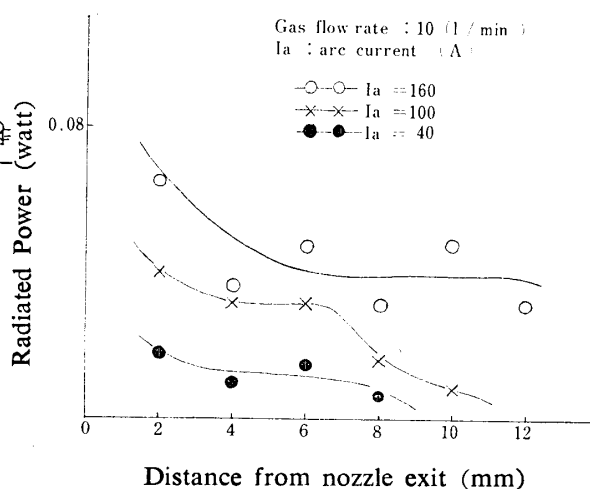


Fig. 10 Dependence on the distance from nozzle exit for radiation power

生じ、対応して放射も減少する。一方、写真測定によると、4～8 mm 区間において、ジェット側面像は軸線に平行なコア外周部を有し、この区間における放射パワーの値と対比できる。

測定点におけるエネルギー密度を求め、ジェットの軸対称を仮定して、軸線方向へ、ノズル出口から 3 mm、以後 2 mm ごとにジェットを区分し、その区間内での放射密度を一様として、全放射パワーを算出した。

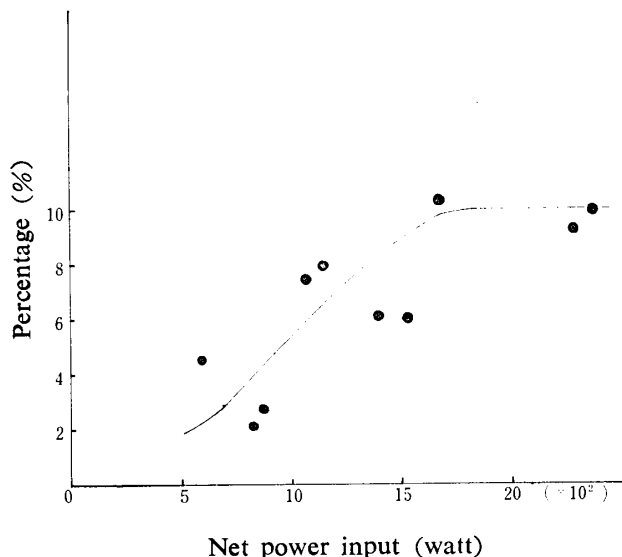


Fig.11 Ratio of total radiant power to net power input

全放射パワーがプラズマ入力 600 watt～2300 watt に占める比率を Fig. 11に示す。低入力では放射により失われるパワーの割合は低く、入力増大に伴って、ほぼ直線的増大を示す。入力が約1600 watt 以上では、比率はほぼ一定値に達し、約10%の値を示す。

プラズマ・ジェットにおける放射パワーは、その入力を増大することによって増大するが、入力に対する比率は飽和してくる。正味のプラズマ入力のうち、放射により失われる量だけ利用可能なエンタルピが低下する事実は、ジェット実用上、きわめて重要な問題を与える。また、入力、特にアーク電流を増加するに伴って、その放射束スペクトラムが短波長領域に拡張されることは、種々の点より、注意を要する。

4. あとがき

大気圧アルゴン・プラズマ・ジェットに対して、その分光エネルギー分布を測定し、さらに、試作した熱電対型放射測定器により放射エネルギー測定を行なった。その結果は以下のとおりである。

(1) 放射束の依存度はアーク電流が著しく、放射強度の大きい波長帯域は、おおむね、4200Å 以上に属す。ジェット軸線上の各点での放射束の分光エネルギー分布は、位置により異なることがあるが、これは特定エネルギー粒子の捕捉再結合が優勢となることを示している。

(2) ジェットの線スペクトル強度は、短波長側では、4200Å～4400Å 帯に集中し、長波長側では、7900Å～8100Å 帯に集中する。また、ジェットの入力増加に対し、最大強度を示す波長は短波長側にずれる。

(3) ジェット軸線上の放射パワーの分布は、ノズル出口より 2 mm までが入力に対応して変化し、4～8 mm 区間は、おおむね、一様となる。これは写真測定結果と対照的である。

(4) 全放射パワーの正味プラズマ入力に対する比率は、入力・約1600Watt 以上で、約10%に達し、利用可能なジェット・エンタルピの低下を招く。

本実験に使用した熱的放射測定器は、蒸着薄膜、およびサーモ・パイルを用いることにより、さらに特性改善ができるものと考えられる。

参考文献

- 1) B. D. Adcock & W. E. G. Plumtree: A. R. C.24, 689 (1963)
- 2) 佐伯節夫, 大崎堅: 昭42電気四学会九州支連論文集, 152 (1967)
- 3) H. N. Olsen: The Phys. of Fluids, 2, 614 (1959)
- 4) R. S. Tankin & J. M. Berry: The Phys. of Fluids, 7, 1620 (1964)
- 5) H. W. Emmons: The Phys. of Fluids, 10, 1125 (1967)
- 6) D. A. Jennings & E. D. West: R. S. I., 41, 565 (1970)
- 7) 三橋慶喜: 応物, 39, 891 (1970)
- 8) 永宮健夫, 久保亮五: 固体物理学, 岩波 (1961) P.114

(昭和47年12月15日受理)