

プロセッシング用プラズマジェット装置

佐伯 節夫* ・大崎 堅**・福政 修*
山田一三雄***・崎山 智司*

Study on the Plasma Jet Device for Processing

Setsuo SAEKI, Katashi OSAKI, Osamu FUKUMASA,
Isao YAMADA and Satoshi SAKIYAMA

Abstract

General characteristics of the plasma jet device for processing were given for various operating conditions (ambient pressure, feed gas flow rate etc.).

Its device was consist of the forced constricted type plasma jet generator and the feed ring to inject processing materials into the plasma jet.

Experiments were made at vessel pressure 200~1,480 Torr, feed gas flow rate (Argon gas) 0~30 l/min, arc current 60~160 A, arc operating gas flow rate (Argon gas) 20 l/min.

The arc voltage-current characteristics was a rising characteristics. The arc voltage and the net input power supplied to the arc were increased with increasing the vessel pressure. The maximum jet power was 3.9 kW at the vessel pressure 1,480 Torr.

The feed gas flow rate had a marked influence on the stability of the plasma jet. The feed gas flow rate which did not disturb the plasma jet was decreased as the vessel pressure increased or the arc current decreased.

1. まえがき

近年、プラズマジェットの有する高温、高速、高活性等の特徴を有効に活用し、従来到達し得なかった高品質の各種材料処理及び生成を行うプラズマプロセッシングが注目され、そのうち、表面処理^{1),2)}、高温化学反応^{3),4),5)}、超微粒子製造⁶⁾等への応用が試みられている。

プラズマジェットをプロセッシングに応用する場合、ジェットが処理材料、処理目的及び処理雰囲気に応じた温度、エンタルピー、流速等を有し、かつ長時間安定に維持され、さらに処理材料がジェット中に効率よく供給できるプロセッシング用プラズマジェット装置が必要となる。

従来のプロセッシング用プラズマジェット装置は通常

形ノズルを有するプラズマジェット発生器を使用しており、アーク電流の増加により陽極点の後退⁷⁾を引き起こし、効果的なアーク入力の増大が防げられ、発生ジェットの熱効率も低下する。これに対し、強制伸長拘束形プラズマジェット発生器⁸⁾は、このような陽極点の後退を防ぐために絶縁集束ノズルを用いて陽極点を拘束しており、動作条件にかかわらず一定のアーク長を保持できるため常に有効なアーク入力確保でき、アークの特性が改善され、プロセッシング用のプラズマ源として有効なプラズマジェット発生器であるが、プロセッシング用プラズマジェット装置に使用した例は少ない。

また、プロセッシング用プラズマジェット装置には、処理材料としての粉粒体あるいは気体をアーク放電中に送給する方式⁹⁾とプラズマジェット中に送給する方式^{10),11)}がある。前者の方式においては、処理材料が高温度のアークと接触するためその加熱効率は良好であるが、アーク特性に悪影響を与えると共に電極損傷を引き起こしアークが不安定となり、生成物の収率が低

* 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

下するなどの欠点がある。一方、後者の方式は陽極点から下流のプラズマ流へ処理材料を送給するため放電特性への影響は微弱で、長時間安定にアークを維持できるので、プロセッシング用プラズマジェット装置において有効な方式である。

本報告では、強制伸長拘束形プラズマジェット発生器をプラズマ源とし、処理材料を送給するためのフィードリングを有するプロセッシング用プラズマジェット装置を試作し、容器の圧力変化、処理材料送給時のキャリアガスの流量が電気的特性、エネルギー収支、発生ジェットの形状に及ぼす影響を調べ、本装置のプロセッシング装置としての適応性について検討したので、その一部を報告する。

2. 実験装置及び実験方法

2.1 プロセッシング用プラズマジェット装置

本装置は、Fig. 1 に示すように強制伸長拘束形プラズマジェット発生器のノズル出口側にフィードリングを設けた構造である。また、雰囲気圧力を制御するため圧力容器を結合している。

強制伸長拘束形プラズマジェット発生器の絶縁集束ノズルは、内径 5 mm の銅製で先端に軸長 4.5 mm のフラット形陽極部を有し、厚さ 0.5 mm の BN シートをはさんで軸長 5.5 mm の絶縁集束部が接続されている。陰極は、先端を90度に削った直径 5 mm の2%トリウム入りタングステン棒で、絶縁集束部入口から棒陰極先端までの距離は 2 mm 一定に保持する。作動ガスは、アーク室後方から渦流として供給する。なお、アーク室側壁に圧力測定口を設け、アーク動作中のアーク室圧力を測定する。

フィードリングは、内径 5 mm、軸長 10 mm であり、その入口から 4 mm 下流の位置に軸線に対して垂直に直径 2 mm の処理材料送給口を設けている。また同じ位置の内壁に軸線と送給口に対して直交する直径 2 mm の放射光強度観測窓を設けている。

なお、陽極部、絶縁集束部、陰極及びフィードリングに対してそれぞれ 2 l/min、2.5 l/min、2.5 l/min、2.5 l/min の冷却水を供給し、熱損傷を防ぐと共にその温度上昇から各部熱損失を算出した。

圧力容器は、内容積 1.23 l であり、側壁及び内部にらせん状の冷却管（内径 4 mm の銅管）を配置している。また、側壁に圧力測定口及び石英ガラス製観測窓を付設し、容器圧力を測定すると共に発生ジェットを観測する。なお、観測窓はフィードリングの材料送給

口に対し垂直に設置した。

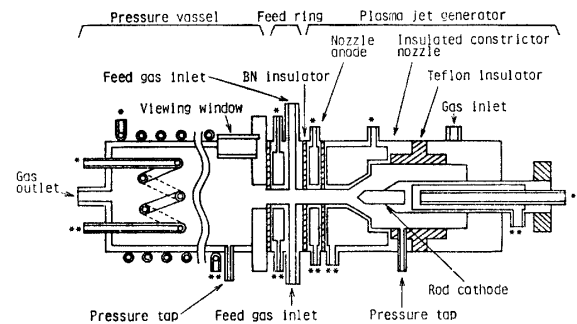


Fig. 1 Sectional view of the plasma jet device for processing.

*: Cooling water inlet,

** : Cooling water outlet

2.2 実験方法

Fig. 2 に実験回路のブロック図を示す。アーク発生用電源は無負荷電圧140V、容量 50 kVA のシリコン整流器で、安定用直列抵抗 (0.78~1.58 Ω) によって垂下特性を与え、アーク電流60A~160Aを供給した。

作動ガスは、純度 99.99% のアルゴンをうい流入圧力 4 kg/cm² で流量 20 l/min を供給した。

処理材料送給時のキャリアガスとしては、本装置の材料送給による基本的特性を得るため、プラズマ形成ガスと同じ不活性のアルゴンガス（以後フィードガスと略称）をうい流入圧力 4 kg/cm² で流量 0~30 l/min を送給した。

容器圧力は、圧力容器の排出口に排気速度 100 l/min の真空ポンプ2台を並列に接続して圧力調整バルブにより制御し、その範囲は 200~1,480 Torr とした。なお、容器圧力及びアーク室圧力は水銀マンオメータまたは半導体圧力変換素子 (PMS 5-1H, PMS 3-5H) により測定した。

アーク電圧及び電流の測定はデジタル計器を用い平均値を求めた。また、フィードリングに設けた放射光強度観測窓を通してジェットからの放射光をシリコンフォトダイオード (SGD-100) に導き、その出力をアーク電圧及び電流と共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放射光強度の変化を求めた。

ジェットのふるまいを調べるため圧力容器に設置した観測窓よりスチル撮影を行った。また、フィードリング出口から 10 mm 離れた軸線上におけるジェットからの放射光を材料送給口と同方向から集光系を通して放射光測定用プローブ（光電子増倍管R-136）の入射スリット上に投影し放射光強度を求め、フィードガ

スがジェットに及ぼす影響を調べた。

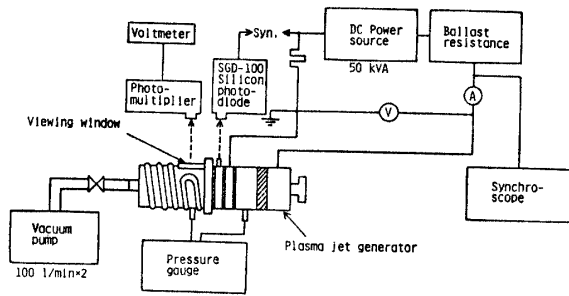


Fig. 2 Experimental arrangement of the plasma jet device for processing.

3. 実験結果と考察

3.1 フィードガス・カットオフ時の特性

3.1.1 電気的特性 本装置のアーク電圧対電流の関係は、Fig. 3 のように各容器圧力とも上昇特性を示し、電流 80A 以上の電圧上昇率は容器圧力 1,480, 760, 200 Torr に対しそれぞれ 0.042, 0.05, 0.052 V/A であり、圧力が低いほど大となる。アーク電圧は圧力の増加と共に上昇し、電流 100A で比較すると容器

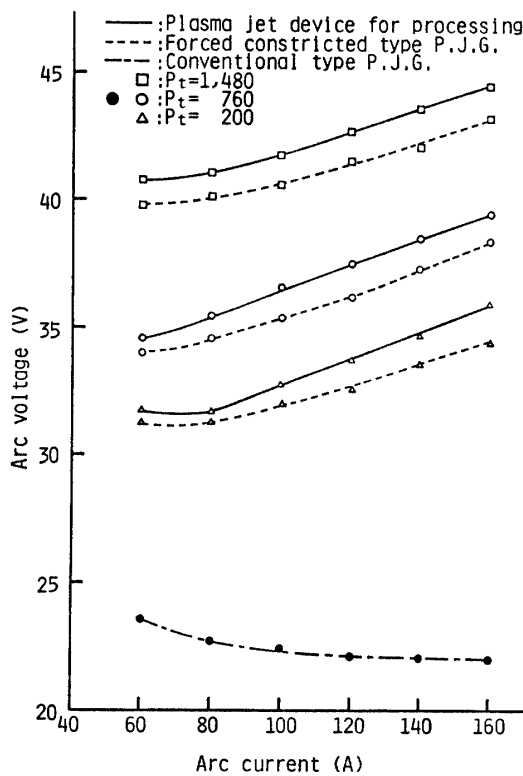


Fig. 3 Arc voltage vs arc current.
 P_t : Vessel pressure (Torr)

圧力 760 Torr に対し 1,480, 200 Torr でそれぞれ 5.3 V (14.3%) 増加, 3.7V (10%) 減少する。これに対し本装置の絶縁集束ノズルと同形の通常形ノズルでは、大気圧下においてこの電流範囲で垂下特性を示すことがわかっている。

このように本装置が上昇特性を示す理由は、陽極点を固定しているため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、強制集束作用によりアーク柱の膨張が防げられる結果、アーク柱の温度が上昇するが導電率の増加はある温度以上では緩やかになるゆえと考えられる。

フィードリングを取り除いた場合と比較すると、本装置の電圧は各容器圧力において 0.5~2.0V 大となり、電圧上昇率もわずかに大となる。また、アーク室圧力も 20~40 Torr 上昇する。すなわち、フィードリングを接続することはジェット集束部長を延長することと等価であり、その影響は主に絶縁集束部アーク柱の電界強度の増加として現われると考えられる。

3.1.2 エネルギー収支 陽極部及び絶縁集束部における熱損失を Fig. 4 に示す。電流を伴う陽極部熱損失は、220~1,080W の範囲に収まり、電流の増加につれてほぼ直線的に上昇し、その上昇率は容器圧力 1,480 Torr で 7.3 W/A と大きく、760 Torr で 5.4

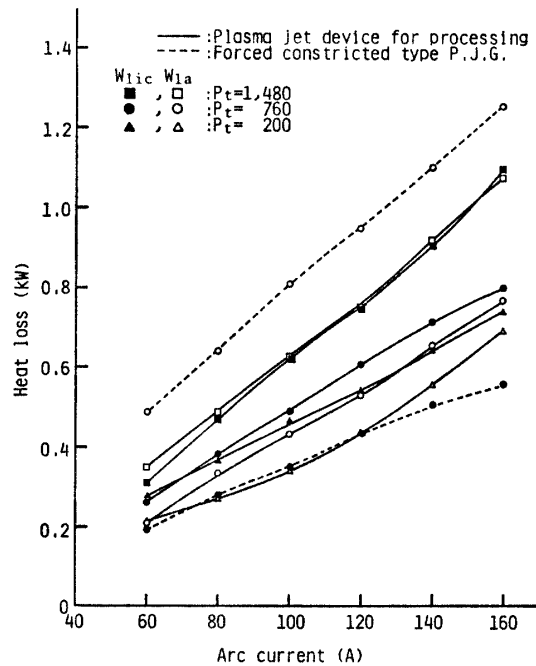


Fig. 4 Heat loss vs. arc current.
 W_{la} : Anode loss,
 W_{lic} : Insulated constrictor loss,
 P_t : Vessel pressure (Torr)

W/A, 200 Torr で 4.7 W/A と小となる。

本装置の陽極部熱損失は、フィードリングを取り除いた場合のそれに比べ低下しており、これは陽極部に流入する熱入力の一部がフィードリングに流入しているためと考えられる。例えば、容器圧力 760 Torr, アーク電流 100A において理論計算¹²⁾から算出した陽極熱損失は約 900W となり、フィードリングを取り除いた場合の損失とはほぼ一致するが、本装置での損失との間に約 400W の差が生じている。したがって、アーク電圧はフィードリングを取り除いた場合より上昇しており、その結果アーク柱の電界強度が増加し陽極入力及びアーク柱からの熱伝達量が増加することを考慮すると、本装置の陽極部熱損失はフィードリングを取り除いた場合より大となるかあるいは同程度であると考えられるのが妥当である。

絶縁集束部熱損失は、電流、容器圧力の変化に対して陽極部熱損失と同様な傾向を示す。容器圧力 760 Torr においてフィードリングを取り除いた場合と比較すると、本装置の絶縁集束部熱損失が 70~240W 大となっている。これは、絶縁集束部アーク柱の電界強度が増加し、アーク柱の温度が上昇することによりアーク柱からの熱伝達量が増加したためと考えられる。

Fig. 5 にジェットパワーとフィードリング熱損失を示す。ここで、ジェットパワーとは、発生器に投入される電気入力から陽極部熱損失、絶縁集束部熱損失、陰極熱損失及びフィードリング熱損失を差し引いて求めたジェットへの入力である。ジェットパワーは、電流の増加と共にほぼ直線的に増加し、容器圧力 1,480, 760, 200 Torr でそれぞれ 1,380~3,850, 1,210~3,700, 900~3,180W であり、容器圧力が増加すると上昇する。

本装置のジェットパワーとフィードリングを取り除いた場合の正味アーク入力を比較すると、前者が後者より 20~400W 小となる。しかし、フィードリング熱損失にはフィードリング内プラズマ流、陽極部からの熱伝達に基づく熱損失が含まれており、これらを考慮すると、本装置の正味アーク入力、フィードリングを取り除いた場合の正味アーク入力より約 1~5% 増加している。

これらのことより、本装置は各容器圧力において安定な動作が可能であり、フィードリングを接続することによりジェット発生器のアーク特性を悪化させることなく有効な入力を得られることがわかった。

3.1.3 アークモードとプラズマジェット アークモードは、Fig. 6 に示すように各容器圧力においてラ

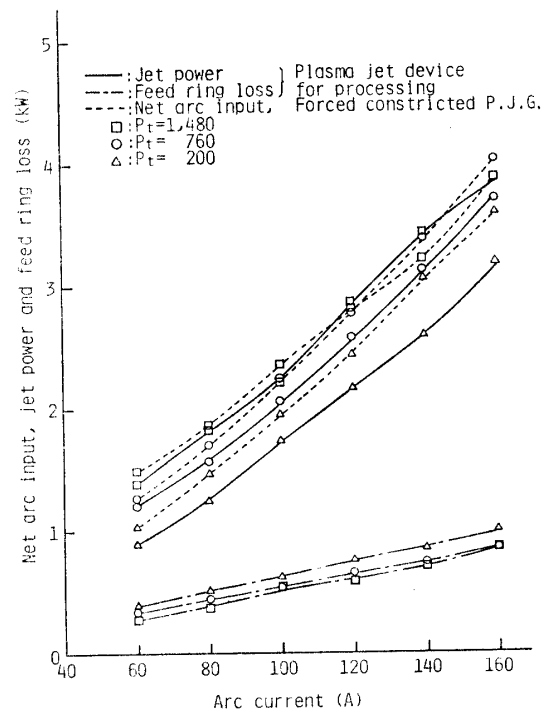


Fig. 5 Net arc input, jet power and feed ring loss vs. arc current.
 P_t : Vessel pressure (Torr)

ンダム振動モードを呈する。本装置では、陽極点を固定しているため、陽極点はほぼ定着状態と考えられ、アーク電圧波形に現われる振動は主にアーク柱のふるまいに依存すると見なせる。

アーク電圧振動振幅は、容器圧力を増すと共に増加する。容器圧力 760 Torr における電圧振動振幅が、対応するアーク電圧の平均の約 1.1~2.8% に相当するのに対し、容器圧力 1,480, 200 Torr においてはそれぞれ 1.5~5.1, 0.6~1.2% となる。また、電圧振動振幅は、一般にアーク電流を増加すると減少するが、容器圧力 200 Torr では逆に振幅が大となる。電圧振動周波数は、容器圧力の増加と共に減少する傾向がある。

ジェット放射光強度の波形には、アークモードに同期した振動が観測され、アークのふるまいとジェットの微視的な特性の関係が示されている。放射光強度の振幅は、電流、容器圧力の上昇と共に増加する。しかし、対応する放射光強度の平均値も同様に増大するため、振幅は平均値の 1% 以内に収まっている。

プラズマジェットのスチル撮影像を Fig. 7 に示す。ジェットは、容器圧力 1,480, 760 Torr ではよく集束された先細りの形状を示すのに対し、容器圧力を 200 Torr に減少すると、膨張し伸長した末広状の拡散形

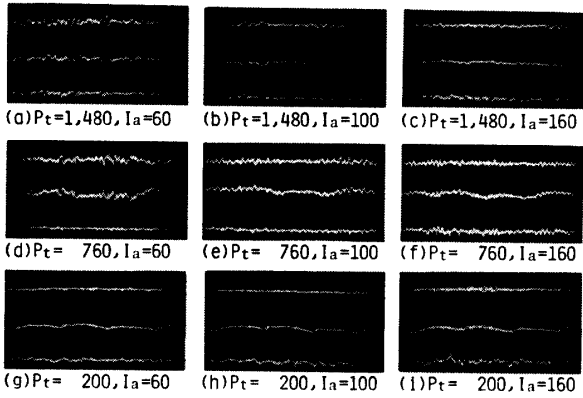


Fig. 6 Oscillograms of arc mode for various vessel pressure.

P_t : Vessel pressure (Torr), I_a : Arc current (A), Sweep velocity: 1 ms/div, Upper trace: Arc voltage; (a)~(c): 5V/div, (d)~(i): 2 V/div, Middle trace: Arc current; (a): 3.5 A/div, (b): 6 A/div, (c): 10.5 A/div, (d)(g): 1.3 A/div, (e): 2.3 A/div, (f)(g): 3.9 A/div, (h): 2.2 A/div, Lower trace: Light intensity; (a) (b): 0.1 V/div, (c): 0.092 V/div, (d)~(i): 0.005 V/div

を呈する。

Fig. 8 は、動作条件がジェット形状に与える影響を示す。ジェット長は、電流を増加しアーク入力を増すと大となり、60Aから140Aの電流範囲において容器圧力 1,480, 760, 200 Torr でそれぞれ 25.5~32.7, 29.0~38.0, 34.8~50.0 mm であり、フィードリングを取り除いた場合と比較すると、本装置によるジェ

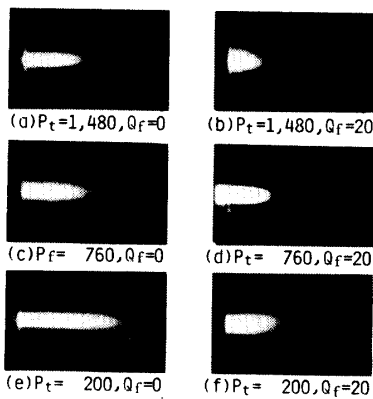


Fig. 7 Photographs of plasma jet.

P_t : Vessel pressure (Torr), Q_f : Feed gas flow rate (l/min), Arc current: 100 A

ットが約 7~9 mm 伸長している。

一方、フィードリング出口から 10 mm 離れた位置のジェット直径は、容器圧力を減少すると大となり、電流を増すと容器圧力 1,480 Torr を除く他の2つの圧力においては増大する。ジェット直径の例を示すと、電流100Aにおいて容器圧力 1,480, 760, 200 Torr ではそれぞれ 3.3, 3.8, 4.2 mm である。

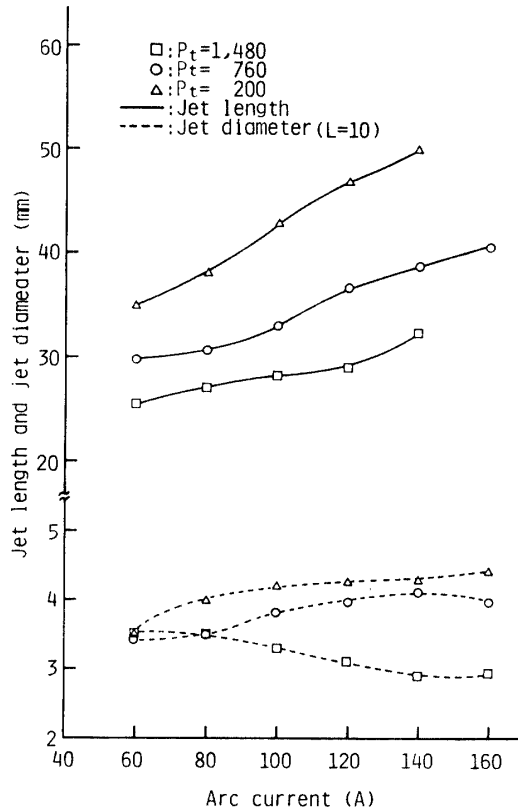


Fig. 8 Jet length and jet diameter vs. arc current.

P_t : Vessel pressure (Torr), L : The distance from the feed ring exit (mm)

3.2 フィードガス・ターンオン時の特性

3.2.1 一般特性 Fig. 9 は、アーク電圧、ジェットパワーとフィードガス流量の関係を示している。アーク電圧は、フィードガス流量の増加につれてわずかに上昇するが、0から20 l/minへフィードガス流量を増した時の電圧の増加分は、各容器圧力ともフィードガス・カットオフ時の電圧の2%以内に収まる。また、ジェットパワーもフィードガス流量によりフィードガス・カットオフ時に対しわずかに変動するが、その変動分は、各容器圧力において8%以下となる。

よって、本装置は、本実験範囲内において、フィー

ドガス・ターンオン時にジェット発生器のアーク特性に悪影響を与えることなく、所要のジェットパワーを保有していることがわかる。

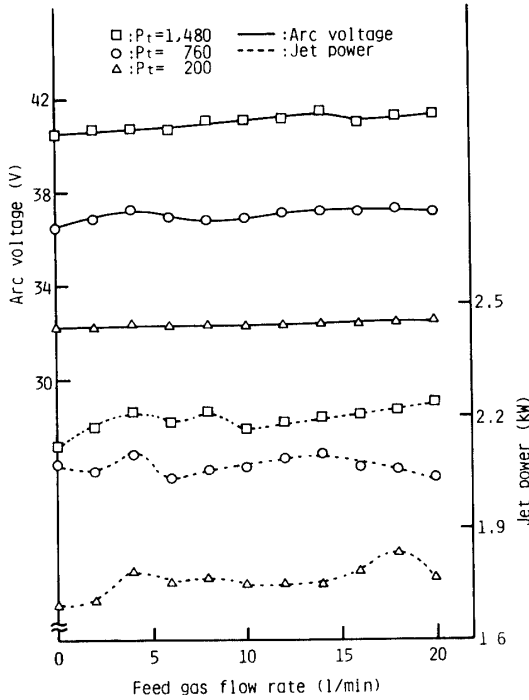


Fig. 9 Arc voltage and jet power vs. feed gas flow rate.
 P_t : Vessel pressure (Torr),
 Arc current: 100 A

3・2・2 プラズマジェットの形状 フィードガス・ターンオン時におけるジェットは、Fig. 7 の(b), (d), (f)に示すように軸方向に短縮し、径方向に拡散膨張した形状を呈し、フィードガス流量が適正範囲をはずれると中心部に分裂を生じる。

Fig. 10 は、フィードガス流量がジェット形状に与える影響を見るため、フィードガス・カットオフ時に対して規格化したジェット直径及びジェット長である。なお、ジェット直径は、フィードリング出口から10 mm離れた位置でのジェットの直径である。

ジェット長は、フィードガス流量を5 l/min以上になると、流量の増加と共にほぼ直線的に減少し、その減少の割合は各容器圧力ともほぼ等しく、フィードガス流量20 l/minにおけるジェット長は、フィードガス・カットオフ時の50~60%になる。

一方、ジェット直径は、段階的に増加し、各段階における増加の割合は、容器圧力を増すほど大となる。ジェット直径が最大の増加を示すフィードガス流量は、容器圧力1,480,760,200 Torrでそれぞれ15~16,16~17,19~20 l/minであり、この流量を超えるとジェッ

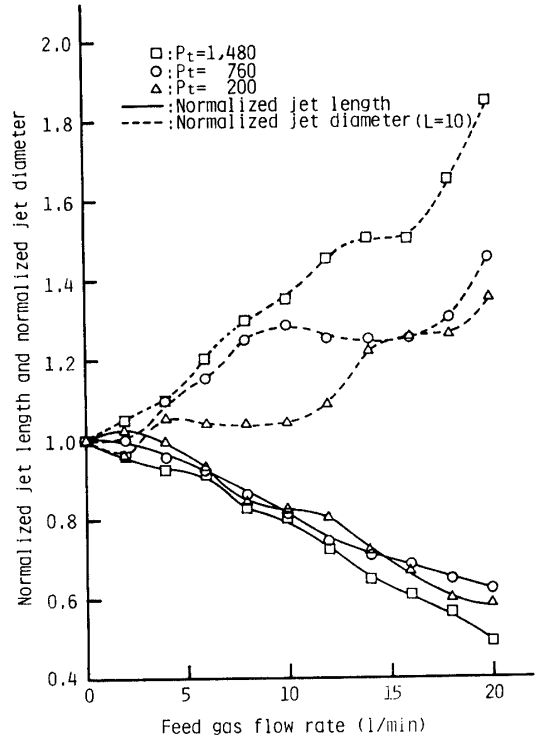


Fig. 10 Normalized jet length and normalized jet diameter vs. feed gas flow rate.
 P_t : Vessel pressure (Torr),
 L : The distance from the feed ring exit (mm)
 Arc current: 100 A,

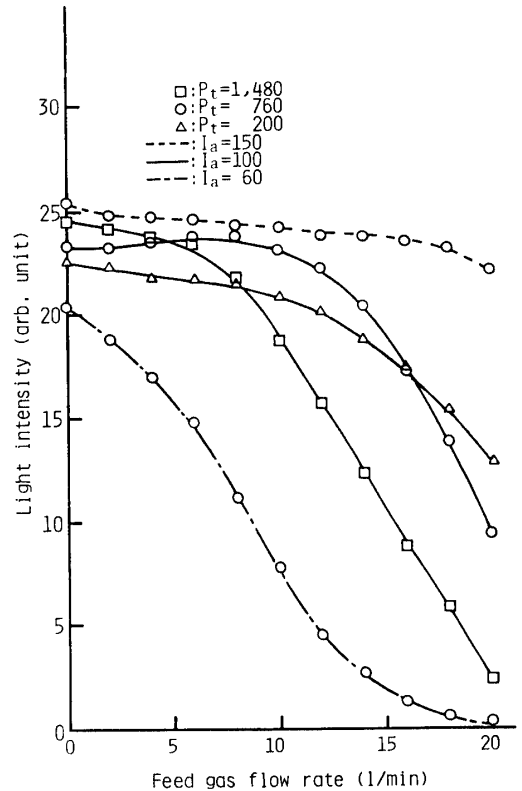


Fig. 11 Light intensity at the jet axis vs. feed gas flow rate.
 P_t : Vessel pressure (Torr),
 I_a : Arc current (A)

トに分裂が観測される。このように、フィードガスのジェットへの影響は、ジェット直径に顕著に現われ、容器圧力を増すほど大となることがわかる。

各容器圧力におけるジェット中心部からの放射光強度は、Fig. 11 のようにフィードガス流量の増加と共にゆるやかに減少し、ある流量（以後、臨界流量とする）を超えると、急激に減少する。これは、臨界流量を超えると、冷たいフィードガス粒子のジェット内部への侵入が不均一となり、その結果、ジェット内の温度分布に乱れを生じるためと考えられる。なお、臨界流量は、アーク電流が小、容器圧力が大になるほど小流量側へ移行する。以上より、臨界流量以下では、フィードガスがジェット内部に効率よく送給され、効果的に加熱されているものと考えられる。

従って、臨界流量を目安として、本装置においてジェットに劣化を生じない有効なフィードガス流量の上限を求めると、Table 1 のようになる。

Table 1 Limits of feed gas flow rate (l/min)

$I_a \backslash P_t$	1,480	760	200
60	0~2	2~4	6~8
100	6~8	10~12	11~13
150	6~8	18~20	20~22

Note; P_t : Vessel pressure (Torr)

I_a : Arc current (A)

4. むすび

以上述べたように、本プロセッシング用プラズマジェット装置は、絶縁集束ノズル及びフィードリングを用いることにより、本範囲の圧力下においてアーク特性

が悪影響を受けることなく安定に動作し、有効な入力を確保しうることが明らかになった。また、フィードガスとしてアルゴンを用いた場合に、ジェットに劣化を生じない有効な送給範囲が明らかとなった。

本研究に協力頂いた大学院三浦憲介氏、同川崎正昭氏、同磯兼誠司氏、昭和58年度卒業研究学生諸氏、本学山中麗子氏に感謝する。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) N. Iwamoto : Proc. 7th ICVM, 283 (1982)
- 2) 蓮井淳 : 金属表面技術, 33, 625 (1982)
- 3) C.S. Stokes : Reactions under Plasma Conditions II, John Wiley and Sons Inc., N.Y. (1971) p.259
- 4) F. Vursel and L. Polak : Reactions under Plasma Conditions II, John Wiley and Sons Inc., N.Y. (1971) P.299
- 5) O. Matsumoto, E. Hayami, Y. Kanzaki and M. Konuma : Proc 7th ICVM 576, (1982)
- 6) S. Veprek and M. Venugopalan : Plasma Chemistry IV, Springer-Verlag, (1983) p.143
- 7) 佐伯節夫 : 応用物理, 45, 845 (1976)
- 8) 佐伯節夫, 内山格郎 : 山口大学工学部 研究報告, 27, 113 (1976)
- 9) I.G. Sayce : Pure. Appl. Chem., 48, 215 (1976)
- 10) N.N. Rykalin and V.V. Kudinov : Pure. Appl. Chem., 48, 229 (1976)
- 11) ヴェ・イ・コステコフ, ユ・ア・シェステリン : プラズマ溶射法, 日ソ通信社, (1978) p.37
- 12) 佐伯節夫 : 電学誌, 87-3, 549 (1967)

(昭和59年4月16日 受理)