

プラズマ・ジェットの研究報告

佐伯節夫

1. 緒言

プラズマ・ジェットの研究はすでに1923年ドイツにおいてGerdienとLotzによって発表され、その後Peters, Maecker, Wiess, Gageなどにより研究されたが、最近の宇宙工学の発達とともに改めて注目を集めている。最初Gerdienなどによって試みられた高温プラズマ・ジェット発生装置はアークの周囲に水を渦状に回転させ低速の中心部にアーク柱を集束せしめ周辺部の高速の渦流により冷却して熱ピンチ効果を与え約50,000°Kの高温をうるものである。しかしこの水流型は極めて不安定で実用化するのに多大の困難があったが、第二次世界大戦初期に米国において不活性ガスタングステン電極の溶接法が出現し、プラズマ・ジェットを安定化し連続的使用を可能にした。そして電気的入力とガス流量を制御することにより通常の化学反応によってはえられない数万度の高温を発生し、又最高マッハ20の高速ガス流を創り出した。このことによりプラズマ・ジェットは有効な応用分野を開拓した。すなわち

- a) 高温での耐酸化, 耐蝕, 耐摩耗, 耐熱衝撃性材料の処理加工用 (例えばロケットノズル, ノーズコーン, ターボジェットなどの燃焼室, アフターバーナー, 石油化学工業用反応装置材料, 原子炉構造材料)
- b) 切断 (従来の方法で切断困難な金属非金属の高速切断, たとえば鋳鉄, ステンレス鋼, 非鉄金属)
- c) 被覆 (溶融し難い金属非金属を溶射して被覆を行なう。たとえばセラミック, タングステン, モリブデン, クロム, 珪素, 硼素)
- d) 溶解・溶接 (高融点物質の溶解および溶接)
- e) 超音速高熱電磁流体力学の研究 (たとえばイオンロケット, MHD発電)

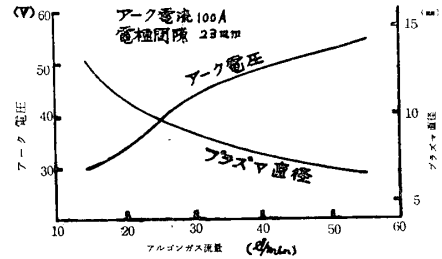
このような応用面においても十分その特性が活かされるためには、目的とする温度、エネルギー、流速を満し、電極消耗を軽減して連続使用ができ、ジェット焰の制御が適時行なえる発生装置が必要である。古来アークに関する研究は多いが、未だアークの機構について理論的に明らかにされていない点もあり、又実験的にはその高温の故に直接測定に困難が伴うので、これまた満足な解明がなされたとはいえない。それ故プラズマジェットの本質並に応用面に関しても未解決の問題が多い。わが国でも数年前よりプラズマ・ジェットの基礎および応用研究に着手され成果をあげているが、今後の開拓にまたれる領域も多い。本報は今回15KW程度の小型プラズマ・ジェット発生装置の試作研究を進めるに当たって既存の発生装置についてその原理、構造並びに基本的諸特性を調査した結果をまとめたものである。

2. プラズマ・ジェットの原理 1) 2) 3) 5) 6) 9) 10) 12) 13) 14) 16)

プラズマは物質の第四状態とも称される電離したガスの集団であり導電性をもった流体であるが、ガス全体としては電氣的に中性であるのがその特長である。ふつうのアークにおいてはアーク電流をある程度以上に増加してもアーク柱の電流密度はさして大とならない。すなわちアーク

柱の直径が大となるだけでその温度も10,000°C を超すことはほとんどない。いま何かの方法を用いてアーク柱の電流密度を増し、自由電子と中性ガス分子、原子との衝突頻度を上げることができればアーク柱への入力が増大するわけである。この目的のためにアークの周囲を水流またはガス流によって強制冷却する。アーク外周部は温度が下り周辺の自由電子と陽イオンの再結合を増大させ導電度は低下する。この結果放電電流はプラズマの中心部にとち定められ電流密度、電位傾度が高まってプラズマの温度は上昇する。この現象は熱ピンチ効果と称される。第1図は熱ピンチ効果によるプラズマの収縮の顕著な一例である。なおアーク電圧が上昇している理由は冷却作用によって生ずる熱伝導損失と放射損失を補うエネルギーを発生してアークを維持するためである。プラズマに電流が流れるとその周囲に磁場が発生し、プラズマを円筒と仮定すれば、軸から距離 r の点の磁場の強さ $H(r)$ は

$$H(r) = \frac{2I}{r} \quad (I; \text{アーク電流})$$



第1図 6)

したがって電流と磁場によるローレンツ力が作用し、プラズマに対する圧力は、運動量保存を示す運動方程式より $\frac{\{H(a)\}^2}{8\pi} = \frac{I^2}{2\pi a^2}$ となる。 a はプラズマの半径である。一方プラズマの圧力 p は次式で与えられる。

$p = (Ni + Ne)KT$ Ni ; イオンの数, Ne ; 電子数, K ; ボルツマン定数, T ; 絶対温度。この p が磁場による圧力と釣り合う所まで電流通路は収縮する。この現象は磁気ピンチ効果とよばれるものでこれによりさらに温度は上昇する。この収縮によりアーク柱の軸上に $\text{grad}p$ が軸方向に発生し、プラズマの運動速度 v は $\bar{p}v^2/Z = p_m$ で与えられる。ただし \bar{p} は p の平均値 (p ; 単位体積当りの質量), p_m は軸上での過剰圧力とする。 p_m は次式で与えられる。

$$p(r) = \frac{ij}{c^2} \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2}\right) \quad i; \text{電流}, r_0; \text{電流が運搬される領域の半径。}$$

かくして発生したプラズマフレームはその中心部は高温であるが周辺部には急峻な温度勾配をもった冷却ガスの層が生じて容器壁を保護する。もし冷却ガスの流速が低いと、熱絶縁が失われて容器壁が損傷をうける。またガス原子のイオン化が進みすぎるとアーク柱の収縮が行なわれず、かえって増大し、ノズルの破壊を来す場合もあるので、プラズマのイオン化の程度を制御することも必要となろう。適切な条件の下では細く集束したプラズマ・ジェットが噴出し比較的小さいガス流量においても、すぐれた方向安定性を有し、切断、被覆などにすぐれた結果を与える。

3. プラズマ・ジェット発生装置

プラズマ・ジェット発生装置は、電源、プラズマ・ジェット発生器、ガス流系よりなり、発生器の構造や冷却剤の種類などにより種々の形式がある。

a) 発生器の形式

(1) 水流型 ^{2) 3) 12)}

プラズマの冷却に水流を使用するもので第2図にその構造を示す。最初陽極を陰極に接近せしめ、電流が流れはじめたら陽極を急激に後退させてアークをスタートさせる。内部円筒の底部より入った水は陽極およびアーク柱の周囲を旋回しながら内部円筒上面の小孔より外部円筒内に噴出し、[外部円筒底部の排水孔より排水される。その間水流は電極棒の発熱により加熱され、

更にアーク柱によって加熱され一部蒸発して高温の水蒸気となり円筒内の圧力を上昇させプラズマ・ジェットを形成し外部に噴出する。この型式は棒電極, 平板有孔電極ともに消耗激しく(数分間以上連続使用困難といわれる), 水蒸気の発生にもより安定した高温熱源とはいえない。このように直流アークに水を媒体として使用した型式はドイツで開発されて後, 米国の G. E., NACA, などで使用され, あるものは入力100KW, プラズマ温度10,000°C, 速度2マツハをえている。

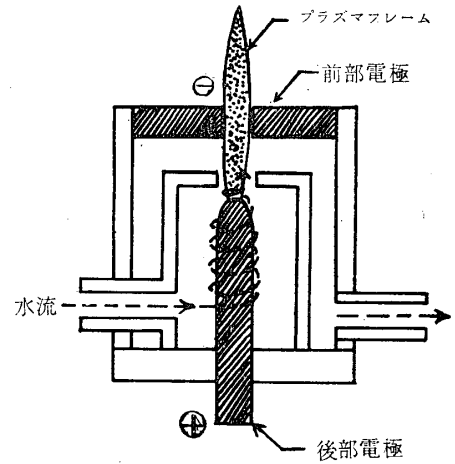
(2) ガス渦流型 1) 2) 3) 11) 12)

この型式はプラズマの冷却剤としてアルゴン, ヘリウム, 窒素などのガスを使用し第3図に示すように円筒タンク壁の切線方向に噴出させ, 棒電極およびアーク柱をとりまくガス渦流を形成せしめる。この渦流はアークの安定とタンク壁の熱絶縁を行なう。アークは最初棒電極の先端と平板有孔電極の内側との間に生ずるが, ガス流量を適当にし, 電極間隙, アーク電流などの外部条件を適当に選べば, アークはノズルを通過して有孔電極の外側に移り高温プラズマ・ジェットが外部に噴出する。

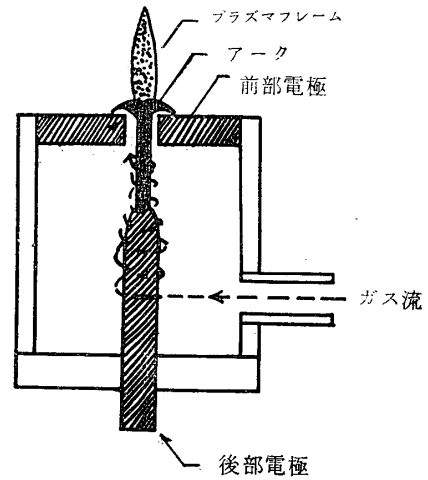
(3) ガス鞘型 2) 3) 4) 5) 8) 11)

この型式ではガス流は渦流とならないで鞘状にプラズマを包むような形で流れる。棒電極にはタングステンまたはトリウムタングステン, ノズル電極には水冷した銅又は銅合金を用いる。この型式では最初に始動用高周波発振器で棒電極と最も近いノズル電極上の点の間の通路をイオン化する。ついで電圧の上昇により主アークがこの通路に沿うて確立し, ガス流量の増加によってこの初期アークは外側に伸長され陽極点はノズル内壁に移動してジェットが噴出する。この型は電極の消耗少く現在最も広く利用され, 入力の範囲も数KWから1,000KWにおよぶ。ガス鞘による熱ピンチ効果を一層有効にするため陰極陽極間に絶縁ノズルを設けてガス鞘流およびプラズマがこの小径のノズルを通過するようにした型式もある。これによればアークが狭いノズル内に集束されることが電位勾配の増加を起し, その結果アークは益々圧縮され, アーク柱の抵抗は増し, この高抵抗を通して電流が流れるので高電圧と電力消費を伴い, さらにアーク温度を上げる。

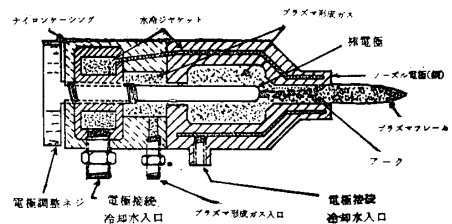
冷却水 7) 12) 13) はノズル電極, 棒電極支持部, タンク壁などの冷却を主とするが, プラズマ・ジェットに



第2図 2)



第3図 2)



第4図 4)

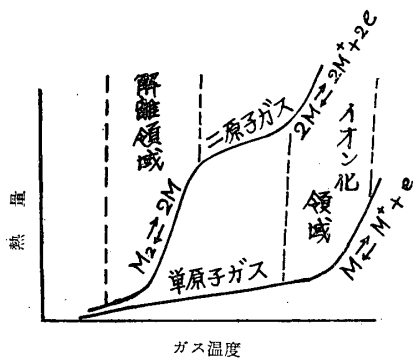
においては電極冷却に用いられるエネルギーは入力のおよび20~40%に及び能率の上から重要な意味をもつ。

b) 電 源 ^{6) 7) 11)}

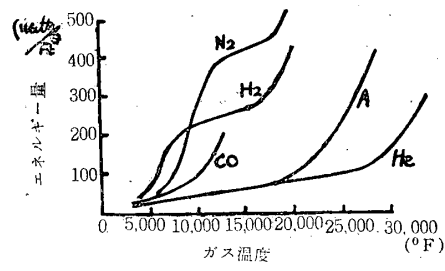
ほとんどのプラズマ・ジェットは直流電源を使用している。本報もまた直流アークを使用した場合について述べる。直流電源としては電動発電機を使用する場合と整流器を使用する場合とあるが、いずれにしてもプラズマ・ジェットはアークの一種と考えられるので、その電気的特性はアークの一般特性と同様である。すなわち動作電圧より高い開路電圧を有し垂下特性を備えていて、その安定動作領域にプラズマ・ジェットの動作点が入るようにする必要がある。

c) . ガス流系 ^{4) 5) 6) 8) 9) 14)}

ガス流はガスポンプより減圧弁により減圧して後流量計を経て容器内に噴出せしめる。ガス流量はガスの種類とともにプラズマ・ジェットの特性に影響を与えるので重要である。一般にガス流量の増加はアーク電圧の増大を起すとされているが、詳しくはガスの種類、混合比および他の要因により異って来る。ガスの選定はその特性に及ぼす作用を考慮し、プラズマ・ジェットの使用目的によって決定されるべきであるが、アルゴン、ヘリウムなどの単原子ガス、窒素、水素などの二原子ガス、またはその混合ガスあるいは多原子ガスのいずれを使用するかによってプラズマ・ジェットの特性は大きい変化をうける。第5図は単原子ガスと二原子ガスの温度と全熱量との関係を示したもので単原子ガスは全熱量と温度とはイオン化が起るまで直線的に増加するが二原子ガスはイオン化される前に解離されなければならないので全熱量は始めの部分で急峻な立上りを示しついでイオン化を起す。したがって単位温度上昇当り吸収される熱量は単原子ガスに比して数倍となる。たとえば第6図に示すように窒素ガスを使用して10,000° F をうる時の全熱



第5図 ⁴⁾



第6図 ⁴⁾

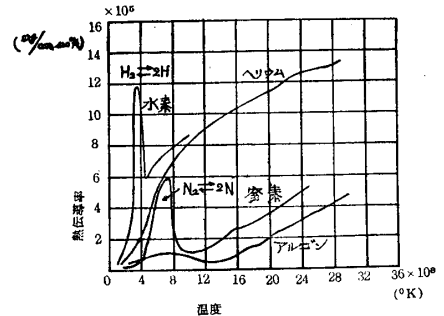
量は、アルゴンを使用するときの25,000° Fに相当する。したがってこの解離熱により含有熱量大なプラズマを生じ、冷却に際しては小なる温度降下で多量の熱を発生しうることになる。第1表はガス加熱に対する電気的エネルギーの効率を示しHe, Aなどの単原子ガスは加熱率に対す

第1表 ^{4) 8)} 各種プラズマ・ガス加熱効率と電力

ガ ス	装置の入力 (KW)	プラズマ濃度 (°F)	プラズマ エンタルピ (BTU/lb)	アーク電圧 (V)	ガス加熱率に対する電力 (%)
H ₂	60	13,200	17,900	65	60
H ₂	62	9,200	138,000	120	80
He	50	36,000	92,000	47	48
A	48	26,000	8,400	40	40

第2表 4) 最高熱伝達速度

の 種 類 炎	最高温度 (°F)	最高熱伝達速度 (BTU/in ² /sec)
空気-プロパン, プンゼン炎	3,300	1
空気-プロパン, ロケット炎	3,300	5
酸素-プロパン, プンゼン炎	5,300	5
酸素-プロパン, ロケット炎	5,300	12
プラズマ (非移行型)	30,000	42
プラズマ (移行型)	60,000(推定)	150(推定)



第7図 9)

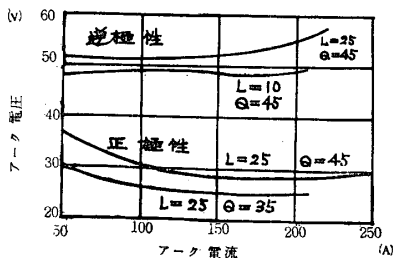
る電力は40%程度であるが、プラズマ温度高くプラズマ・エンタルピーおよびアーク電圧も一般に低い。熱伝達速度については第2表に示したように一般化学焰の約10倍に達する。第7図に示すようにプラズマ構成ガスの熱伝導率は温度により変化するが、これはアーク柱の外周の温度勾配とアークの圧縮に影響を与え、低い熱伝導率をもつガスを使用した場合は低電流で磁気的な圧縮の方が顕著になる。プラズマ・ジェットトーチを使用する被覆においては、使用ガスは被覆物質と基材の両方から選定されることになる。

4. プラズマ・ジェットの基本的特性

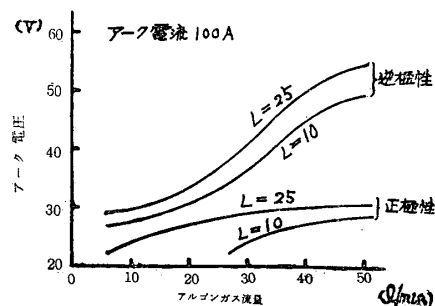
a) 電気的特性 2) 3) 6) 14) r5)

プラズマ・ジェットはアーク放電を利用したもの故その電気的特性もアーク放電の場合と略同様と考えられる。しかしプラズマ・ジェットにおいてはその特性に影響を与える要因としてガスの種類と流量、電極間隙、電極構造、電極材質、極性などがあり、これらが一定の時アーク電圧-電流特性は負特性となり、したがってこの場合回路に直列安定抵抗を挿入したプラズマ・ジェットの安定条件は一般のアーク放電の時と同じである。つぎにガス渦流型プラズマ・ジェットの特性の一例を示す。

(1) 第8図はアルゴンを使用した場合のプラズマ・ジェットの電圧-電流特性である。極性によりアーク電圧が変化し正極性（ノズル電極：陽極）に対して逆極性（ノズル電極：陰極）の時前者と同じ電流値において相当の電圧上昇が見られる。これはノズル電極に陽極点が発生したときはその面積が広く分布してガス流による位置の変化が少いが、陰極点が発生しているときは電流通路はこの一点に集中し、冷却ガス流による移動が前に比較して容易で、そのため電流通路の伸長、ノズルによる集束とによってプラズマ柱の電位傾度を大にするからと考えられる。



第8図 14) L: 電極間隙(mm) Q: ガス流量(l/min)

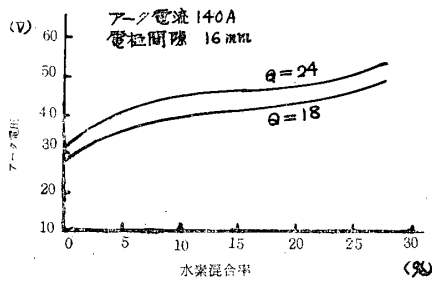


第9図 14) L: 電極間隙(mm)

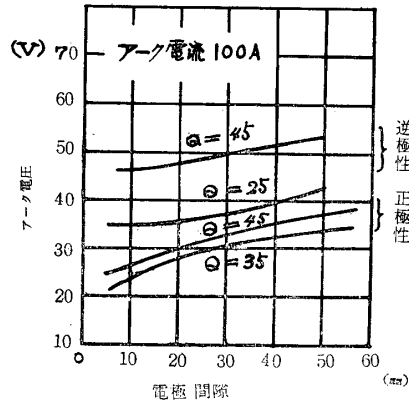
(2) 第9図は電極間隙一定の時アルゴンガス流量の増加がアーク電圧の増大を来すことを示している。これはガス流量の増加によりガスの電離度が下りプラズマ柱外周のガスの導電度が低下

しアーク柱が収縮する。その結果冷却損失を補うようにアーク電圧が上昇する。

(3) 第10図はアルゴン-水素混合ガスを使用した場合に特性がその混合比により影響されることを示している。アルゴンに比して水素は熱伝導率大で、かつ二原子ガスのため冷却効果大であり、したがって水素含有率の増加に伴いアーク電圧の上昇を招来する。



第10図¹⁴⁾ Q: ガス流量(ℓ/min)



第11図¹⁵⁾ Q: アルゴンガス流量(ℓ/min)

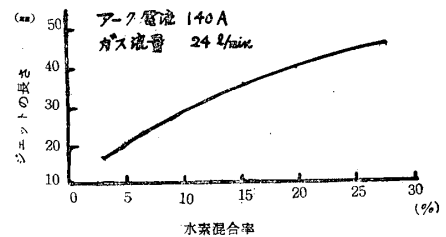
(4) 第11図は電極間隙の増加とともにアーク電圧の上昇が起ることを示している。

b) プラズマ・ジェット^{3) 4) 7) 11) 14) 15)}

(1) ガス流量、電極間隙を一定としアーク電流の増加をはかるとアーク柱は拡大¹⁴⁾することがわかっている。したがってこれを収縮させてアーク柱の電流密度を増加せしめるにはアーク電流の増加とともにガス流量を増せばよいはずである。その場合はピンチ効果が作用してジェットの噴出距離も増加すると考えられる。

(2) 電極間隙が過大となると陰極点または陽極点はノズル入口附近に附着し易くなる。したがってアーク柱の集束度低下し、温度も上らずジェットは弱くなる。

(3) ガス流量が低いときは陰極点または陽極点がノズルの内側にでき、ガス加熱少く噴出は弱い。ガス流量が高いときは陰極点または陽極点がノズル孔内面か外側に附着してプラズマの集束が良好でジェットは長くなる。混合ガスの場合たとえばアルゴン-水素の混合ガスにおいてはプラズマ・フレームは水素の含有量の増加とともに伸長することが認められる。第12図に一例を示す。



第12図¹⁴⁾

(4) ノズル電極はその噴出口の径を適当に選定しな

ればジェットの噴出に支障を来す。すなわちノズル径が小に過ぎると、アーク柱がノズル入口周辺に附着し、過大のときはアーク柱の収縮不十分となることが予想される。形状もまたノズル入口はアーク柱の流入を容易にし、出口はジェットの噴出に便利なように先細状^{3) 4) 8)}および末広状が適当である。

(5) 電極の材質としては陰極は融点高く、消耗が少く、熱電子放射良好なことがジェットの安定に必要である。ノズル電極はガス流によってアーク柱から熱絶縁されるとはいえ、相当の高温に曝されるから融点高く、また熱伝導率良好な材質を使用し、多くは水冷を行ない、十分アーク柱の収縮に耐えうることがプラズマ・ジェットを安定に持続する条件となる。

c) 熱 効 率 ^{6) 15)}

プラズマ・ジェットは定常状態に達して後の冷却水の温度上昇と流量より推定される。すなわち正極性の場合を考えると棒電極（陰極）、タンク壁、ノズル電極（陽極）各部分の熱損失を冷却水より求め、他の損失は無視すると次式より求められる。

$$\eta = \frac{W_p}{W_{in}} = 1 - \frac{W_e}{W_{in}} = 1 - \frac{4.184M(T_o - T_i)}{V_a I_a t}$$

ただし η : 熱効率,

W_p : プラズマ・ジェット出力 (watt),

W_{in} : 供給全電力 (watt),

W_e : 全 損 失 (watt),

M : 各部分を t 秒間冷却するに要した水量 (gr),

T_o : 冷却水の出口の温度 (°C)

T_i : 冷却水の入口の温度 (°C),

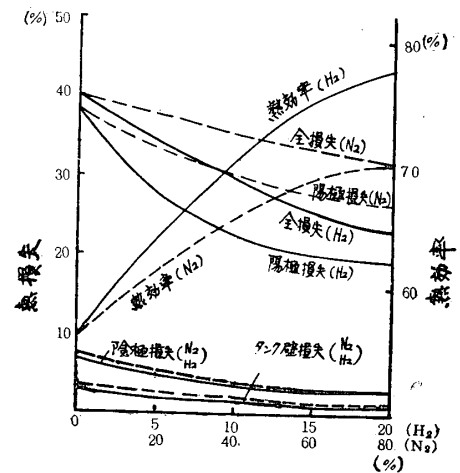
V_a : アーク電圧 (V),

I_a : アーク電流 (A),

t : 測 定 時 間 (sec),

4.184 : 熱の仕事当量 (J/cal)。

第13図は混合ガスを使用し混合率を変化した時の熱損失および熱効率を示す。陽極における損失が最大であり二原子ガスの成分増加に伴い効率は増大する。これは二原子ガスの増加による冷却効果の上昇に伴い、アーク電圧も増大し、プラズマ・ジェットのエネルギーは強化され、さらにまたノズルにおける熱損失はほぼ電流に比例するからアーク電圧の上昇により熱損失を防ぐことになる。逆極性の場合には陰極とタンク壁よりの損失が大でガス流量の増加とともに減少する。



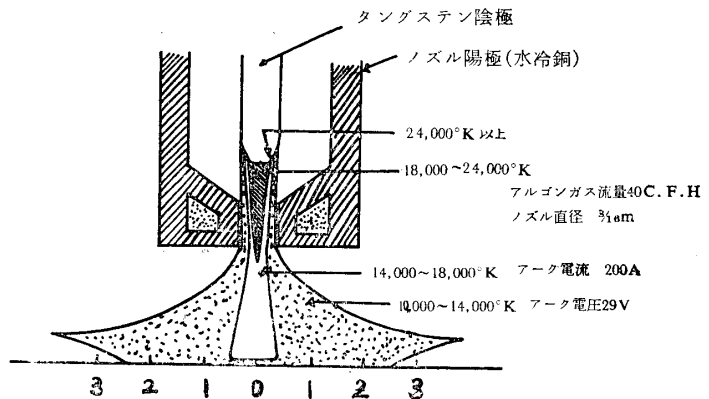
第13図 ⁶⁾ ガス組成 $\begin{pmatrix} A-H_2 \\ A-N_2 \end{pmatrix}$

d) プラズマ・ジェットの温度 ^{3) 6) 9) 10) 12) 13)}

プラズマ・ジェットの到達温度は最も重要な特性の一つである。第14図は集束したプラズマ・ジェットの温度分布の一例であるが、その他アーク柱の温度分布については King ¹⁰⁾, Burhorn ¹⁰⁾, Ludwig⁹⁾ などによっても示されている。測定方法としては次のとおりである。

(1) X線, α 線, 音波, 衝撃波を用いてプラズマ中の吸収係数, 伝播速度を測り算出する。

(2) スペクトル線の測定により分



第14図 ³⁾

光学的に求める。

- (3) 放射性同位元素を用いて原子密度を推定して求める。
- (4) 入力，熱損失，ガス流速よりガスに伝達された熱量を測定し平衡式より算出する。

5. プラズマ・ジェット的应用^{5) 6) 7) 14) 15)}

プラズマ・ジェットは全く新しい特長を有するからその応用分野も広く，人工衛星やミサイルの大気圏再突入時の熱衝撃の再現，ロケット・エンジンなどの高耐熱材料の開発，あるいは切断，溶接，溶融，被覆，材料試験など基礎，応用部門ともに進展の途上にある。つぎに代表的な数例について述べる。

a) 切断¹⁾

プラズマジェットの高温と高速のジェットを利用するもので，集束されたプラズマ・フレームにより溶融切断された溶融物質はジェットにより吹きとばされ平滑美しい切断面を構成する。アルミニウム，銅，ステンレス，コンクリートなどの切断には水素混合ガスを使用し水素濃度を高めると有効で切断速度を増す。工業的に使用するプラズマ・トーチとして陰極をアルゴンガスで遮蔽することによりプラズマ冷却ガスに空気を使用した空気プラズマ・トーチ¹⁵⁾も考案されている。

b) 溶射^{1) 3) 8)}

材料の耐熱性，耐蝕性などの面より基材の表面に各種材料の被覆を行なうことは極めて効果的である。プラズマ・ジェットはその高温のため材料の融点による制限がなく，また高速ジェットにより溶射に適している。また使用ガスの選定により雰囲気制御が意のままである。したがって溶射材料に制約されることなく行なえる。溶射後の各種テストによる結果もほぼ完全である。

c) 溶接・溶解^{4) 10) 11)}

溶接，溶解に際してはプラズマ・ジェットの流速を低下させて行なう。ノズル周辺に多数の小孔を設けて流速を緩和させることも有効である。プラズマ・ジェットの熱伝達速度の高いことはこのような用途に対してすぐれた特長を与える。溶解を行なう場合はプラズマ・ジェット・トーチを求心的に配置して流速を相殺したり，処理室に対する流入ガス圧の調節により平衡をとらせる。

d) アーク・メイジング炉⁵⁾

凹面反射鏡を用いてプラズマ・ジェットフレームの熱放射エネルギーを焦点に集中して超高温をえる。到達温度は $2,400^{\circ}\text{K}$ ～ $4,000^{\circ}\text{K}$ である。これはまた放射エネルギーのみを利用するため不純物の混入を防ぎうる特長がある。工学のみならず理学，医学の上にも多くの応用面が期待できる。

その他プラズマ・ジェットを使用して高温高速電磁流風洞の試作，プラズマ・ジェットの電磁流による直接発電の研究など今後の進展がまたれる問題が多い。プラズマ・ジェットに関しては各国ともその研究開発に力を注ぎ，Linde's Plasma Arc Torch, Giannini's Plasmatron, ADL—Strong Arc Imaging Furnace など実用化され市販されているものも多い。

6. 結 言

以上プラズマ・ジェットの発生およびその基本的特性について調査してまとめたものであるが，その結果プラズマ・ジェットは各種のすぐれた特長を有し，既存の熱源に比較して十分な将来性をもつものと考えられる。プラズマ・ジェットの必要な条件は

- a) アーク放電の安定および持続が可能なこと
- b) フレームが高温で集束度大、かつ熱エネルギー大なること
- c) 熱効率の上昇

であり、そのためには発生器の型式、ガス流系などをつぎのように選定すればよいことがわかった。

(1) 発生器の型式はガス渦流型、ガス鞘型のいずれでもよく、適当な条件の下では集束した安定なプラズマ・ジェットを発生する。

(2) 電極間隙一定のときアーク電流のみの増加をはかるとアーク電圧は低下するので、ガス流量もともに増せばピンチ効果がよく作用してアーク電圧は低下しない。すなわちジェットは強力になる。

(3) 電極間隙一定にしガス流量を増せばアーク電圧は上昇する。

(4) 使用ガスが単原子ガスのときは高温がえられ、二原子ガスのときは含有熱量が大となる。したがって高温でかつ含有熱量大なプラズマ・ジェットの発生には混合ガスを使用したらよく、その場合には例えばアルゴン-水素混合ガスを用いたとき水素含有率の増加とともにアーク電圧は上昇する。

(5) 電極間隙過大となるとアーク柱の集束悪く、熱効率低下する。

(6) ノズル電極はプラズマの収縮、噴出を容易にするため先細状入口、末広状出口を設ける。また水冷された銅などを用いて耐熱性に留意する。棒電極を陽極にすれば損傷大となり電極消耗により装置の寿命を失う。ノズル電極を陽極にすれば陽極点の位置、分布面積を適当にとるとき電極の消耗を最小限にできる。

化学焰はその温度の制限と化学作用のために役割を果せないことも多く、これに代る新しい熱源として長時間安定な使用のできるプラズマ・ジェット発生装置の製作が望まれる。しかしプラズマ・ジェット・フレームの形状、温度などを目的に適合させるように制御するには電極、使用ガスなどの面より見て未だ研究の余地が多いと思われる。これらの点については基礎的な小型プラズマ・ジェット発生装置を試作し、プラズマの安定条件をさらに検討し、ジェット・フレームの温度測定をも試みる予定である。

最後に御指導頂いた牧元助教授に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) *Journal of Metals*, 11, 40~42 (1959)
- 2) 阪口忠雄；電気評論, 49, 1, 45~48 (1961)
- 3) R. M. Gage ; *Welding Journal*, Oct., 959~962 (1959)
- 4) J. A. Browning ; *Welding Journal*, Sep., 870~875 (1959)
- 5) 河嶋千尋；窯業協会誌 69, 781, C12~C20 (1961)
- 6) 岡田 実；溶接技術 9, 2, 88~97 (1961)
- 7) 中村武三；溶接技術 9, 3, 169~176 (1961)
- 8) M. A. Levinstein, A. Eisenlohr and B. E. Kramer ;
Welding Journal, Jan., 8-S~13-S (1961)
- 9) H. C. Ludwig ; *Welding Journal*, July, 296-S~300-S (1959)
- 10) H. Edels ; *Proceedings I. E. E.*, Paper No. 3498, Feb., 55~69 (1961)
- 11) 館野晴雄；真空, 4, 1, 7~12 (1961)
- 12) 野口哲男；金属, 30, 17, 11~14 (1960)
- 13) 館野晴雄；電子科学, 7, 28~31 (1961)
- 14) M. Okada ; *Technol. Repts. Osaka., Univ.* No. 384, 209~219 (1960)
- 15) M. Okada ; *Technol. Repts. Osaka Univ.*, No. 417, 579~591 (1961)
- 16) 宮島, 山本；電気学会雑誌, 78, 7, 982~990 (1958)