

プラズマジェットとその応用

大阪大学工学部 溶接工学教室 丸 尾 大

現在われわれが定常的に数千度の高温を発生させようとするとき、放電現象を利用する方法が、おそらく唯一のものと思われる。溶接技術の分野では、近時、電子ビーム溶接とか超音波溶接などの多くの新しい溶接法が開発、実施されるようになって来たが、溶接技術全般について見て見るとアーク溶接法がやはり大きい比重を占めている。アーク溶接法はその名の示すとおり、アーク放電を利用して金属を溶融し部材を接合する方法である。ふつうアークの温度は 6000°C 内外とされていて熱源の中では最高温のものと考えられている。

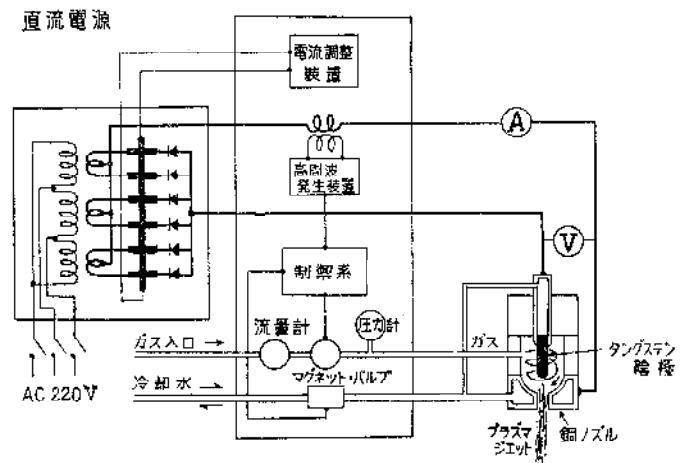
ところでアーク放電の実体はどのようなものであろうか。アーク放電の起こっている部分は非常に高温で、サハ¹⁾が示した如く熱電離によつて電子およびイオンが作られ導電性が維持されている。電極間の電位分布を調べると、極く短い電極降下領域とアークの大部分をしめる陽光柱に分けることが出来る。陽光柱の部分では、電位傾度が、ほぼ一定であることが確かめられている。ポアソンの法則から分るように、電位傾度が一定であるということは、その部分では、巨視的に見て空間電荷が存在していないことを示している。換言すれば電子とイオンの正負の電荷密度が等しいということである。電子あるいはイオンはそれぞれが単一の粒子として、その温度に相当した運動エネルギーをもつて激しく運動している。また電場によつてこれらの荷重粒子はエネルギーを獲得し、衝突によつてエネルギーの授受を行なっている。陽光柱の一部分に電子またイオンが偏在することはガウスの定理からも予期されるようにまず不可能で、デバイのシールド半径²⁾程度はなれた位置では空間電荷が反符号の電荷によつてシールドされてしまっている。僅かの電荷密度の揺動がプラズマ振動として認められるにすぎないのである。このような状態をわれわれはプラズマと呼んでいる。極く身近にある蛍光灯の放電現象とか太陽コロナなどプラズマ状態をしているものは非常に多いのである。

アーク放電が安定に点じられているとき、プラズマ柱に供給される電気エネルギーは、アーク柱から失われていく熱エネルギー、放射エネルギーと平衡している。プラズマの半径、温度、電位傾度などはアークプラズマを維持するために最もエネルギーが少くすむようにアークプラズマ自身が規制しているのでは

ある。これはステンベック³⁾の原理と云われている。ところで、たとえば強力な軸方向の気流をアークに吹付けたり、細い金属管中でアークを点じたりすると、アークプラズマは強い冷却効果をうける。したがつて元の状態に比べて損失熱量が多くなり平衡状態を満足しなくなるのであるから元の状態に保たれることは不可能になる。このようなときアークプラズマは細くなつて、電流密度が上昇し、アークプラズマの温度を上昇して持続しようとする。そして外的な冷却条件エネルギー的に平衡するようになる。このためには電位傾度も増大しなければならない。このような現象はアークプラズマを熱的な手段で収縮させる意味からサーマルピンチ（熱ピンチ効果）と呼んでいる。もちろん非常に大電流を流したアーク放電では、電流自体の作る磁場によつて磁氣的に収縮するマグネティックピンチ効果も同時に表われ、更に細く収縮することになる。

Gerdien⁴⁾は高輝度の光源に利用するためアークプラズマの周囲を水流で取り囲み、アークを冷却するとアークの輝度が非常に高まること、電位傾度が上昇することなどを見出したが、これは熱的ピンチ効果を実現した最初の実験と思われる。彼によつて示された着想は、現在のプラズマジェットに生かされている。

第1図は溶接工学教室岡田研究室で用いているプラズマジェット装置⁵⁾の回路図である。電源は200KVAのセン整流直流電源*で無負荷電圧200/400V、定格二

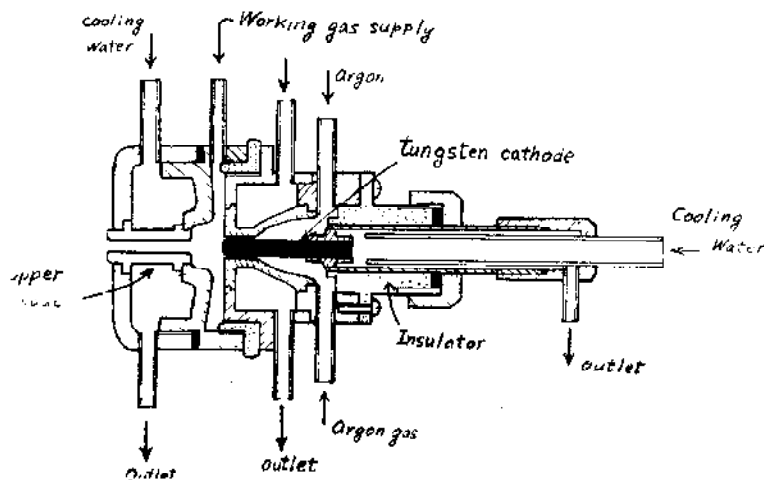


第1図 プラズマジェット発生装置

* 電源は2台に分割され、必要に応じて直、並列接続するようになっている。

次電圧 100/200 V, 定格二次電流 1000/500 A の垂下特性を有している。

プラズマジェット発生トーチは銅製のノズル(陽極)とそれに対抗してタングステン陰極を設け、両電極の間に点じたアーク柱の周囲を旋回するように、チャンパー壁に対し接線方向にガスを導入する。使用するガスは、通常アルゴンとかアルゴン・水素、アルゴン・窒素などの混合ガスを用いている。また活性ガスたとえば空気を用いる場合には、電極の酸化を防止するため少量の不活性ガスを併用し、特殊な構造のトーチを使用すれば可能である。第2図は、われわれが試作した空気プラズマジェット・トーチである。



第2図 空気のプラズマジェット装置

両極間に点じたアークプラズマは旋回気流によつて、熱ピンチ効果のため細く絞られ、温度が上昇する。そしてノズルから強力な指向性をもつたフレームとして噴出する。アークプラズマをなるべく細い管中で点じて、その直径を細めることも、熱ピンチ効果を有効に働かせる有力な方法の一つである。

このように熱ピンチ効果の結果アークプラズマの電流密度が上昇するとプラズマ自体の温度が高くなり、同時にプラズマに供給する電気エネルギーも大きくなる。これは高温に加熱されたガスはつきつきとノズルからプラズマ・ジェットとして噴出されるのであるから、結局アークに対して非常に大きい冷却効果を与えたことである。

また、熱伝導度の大きいガスたとえば水素などを用いると更にこの冷却効果は大きい。そして水素とか窒素などの二原子分子ガスを用いると、この種のガスは電離に先立つて解離し、その時解離熱を吸収するから、アークに対する冷却効果は一段と高くなるのである。

アルゴンを用いた場合どの程度の温度が発生している

かといえば、分光学的な方法で求めるとアーク電流 600 A, アルゴンガス流量 100 l/min, アーク電圧 55 V の場合には中心軸上で 21 000 °K 程度である。この値はもちろん電流値を上げ、ガス流量を高めると上昇するが、通常のアーク放電の温度よりも数倍高温であるといえよう。

プラズマジェットがノズルから噴出するときの流速は、トーチ内部の圧力、ノズル部の静圧を実験によつて測定し、計算して見ると、ほとんど音速に近い 3000 m/sec 程度になつている。事実ノズルを出たジェットのフレームに衝撃波が発生していることは音速以上になつていることを示している。写真1は大気中に噴出したプラズマジェットの衝撃波を撮影した一例である。

一方、プラズマジェットとして噴出する高温ガスの保持している熱エネルギー、運動エネルギーは供給した電気エネルギーのうち何パーセントであるかを調べると、アルゴンを用いた場合 40~60%, アルゴン水素混合ガスを用いると 60~80%, 空気の場合 60~80% 程度であつた。この値がプラズマジェット・トーチの熱効率であるが、熱効率はガス流量を増加する程高まり、また二原子分子を混合する場合、二原子分子ガスの混合率を高める程熱効率が上昇することが分つた。もとより、トーチの構造によつて多少変り、またアーク自体の特性とか電源の特性によつても制約されるが、一般的にいつて二原子分子ガスを併用することが経済的にも効果的であると云えよう。

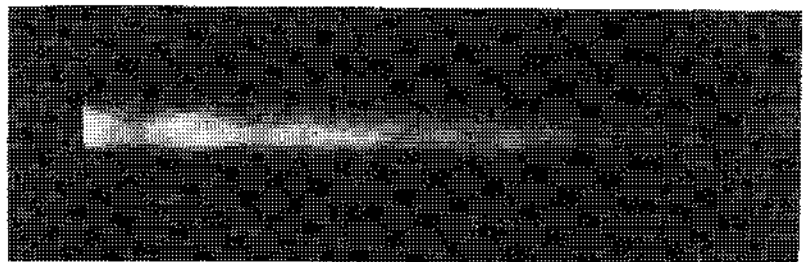
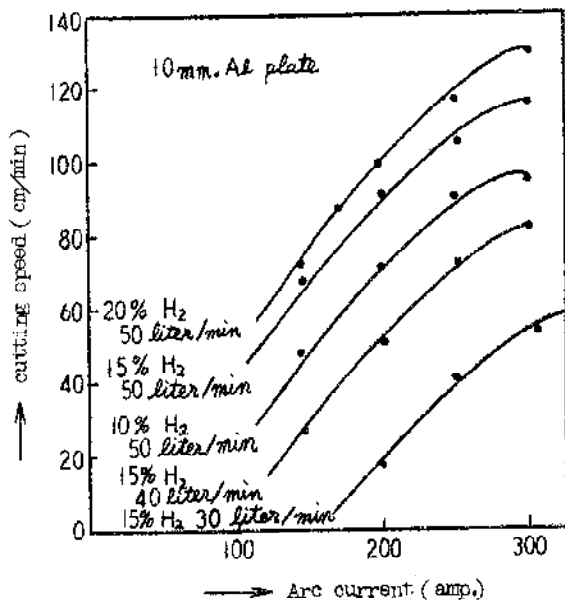


写真1 プラズマジェット衝撃波

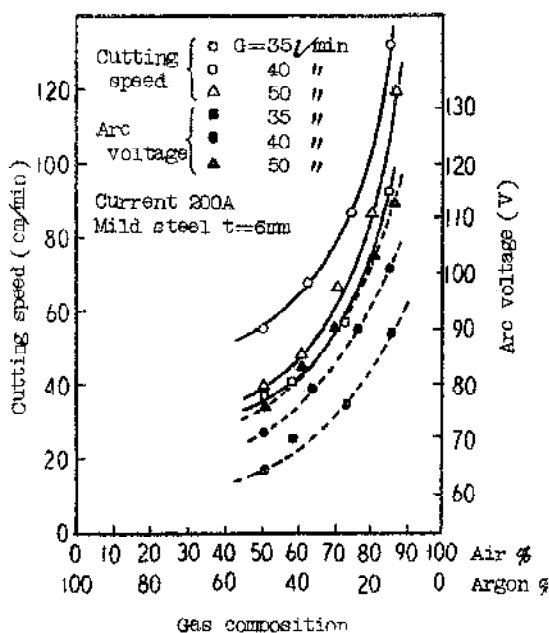
このようにプラズマジェットは容易に高温度を発生することができ、その流速が非常に大きいことなどいろいろな特徴があるが、これらの特質を生かした種々の応用が考えられる。先ず金属加工の分野で切断に應用した結果を述べると、温度は 20000 °K 程度であるから、金属非金属を問わず、溶融しないものはまづ考えられない。溶融した部分を吹きとばすに十分な流速をもつているのであるから切断は簡単に実施できる。われわれの研究案で



第3図 アルミニウムのプラズマ切断速度

は銅，ステンレス，アルミニウム，軟鋼などの切漸実験を行なつたが，第3図は板厚 10 mm のアルミニウム板をアルゴン水素の混合ガスを用いて切断したときの結果の一例である。これは比較的小型の装置を用いて得た結果でトーチの電氣的容量は 20KW 程度のもので使用した。切断した面は非常に光沢あり，平滑である。この図からも分る如くガス流量を高め，また水素混合パーセントを大きくする程切断速度が上昇し，同時に切断面の状態はより良好になつて来る事が確かめられている。

軟鋼を空気プラズマジェットによつて切断した結果の一例は第4図に示すごとくで，従来の酸素切断法に匹敵した切断速度を示している。加うるに空気を使用するの



第4図 軟鋼の空気プラズマ切断

であるから，ガスのコストはほとんど要らないことになり，所要コストを酸素切断と比較すると空気プラズマジェットでは酸素切断の約1/2程度になつている。

金属材料の表面に種々の材料を被覆して耐熱性，耐蝕性，耐磨耗性などの諸性能を改善する目的で，溶射法が実用されているが，プラズマジェットを用いると，殆んどどの材料を溶射することができる。雰囲気を中性，還元性の何れにも扱ふことができることも有利な一つの理由として挙げられるが，従来の化学焔では十分溶融出来なかつた材料も，プラズマジェットを用いれば溶融することが出来る。またプラズマの流速が大分大きいので表面に溶着する場合，より強固な，より緻密な表面被覆を形成することができる。これが大きい利点と云えよう。ジルコニア，アルミナなどを軟鋼板上にコーティングした例では引張り試験，曲げ，試験衝撃試験などによつて非常に良好な溶着が完成していることが認められた。溶着層は熱的な衝撃を与えてもほとんど剝離しないし，同時に耐酸化性の改善も大きい結果を得ている。

この外熔接とか材料試験，成形加工など金属加工の分野における応用も数多く考えられている。外に宇宙工学，電磁流体発電などの新しい研究分野でもプラズマジェットは大きい役割りを果している。

深くプラズマジェットを理解するためには放電現象全般にわたる知識が必要であり，その応用においてはすぐれた着想が要求されているのであるが，われわれの得た結果の一つでも工業技術に貢献することが出来れば望外の幸せと考えて研究している次第である。

文 献

- 1) M.N. Saha : Phil. Mag. 40. 472 (1920), z. f. Physik 6. 40 (1921)
- 2) L. Spitzer : Physics of fully ionized gases (Inter-science Publishers Inc N.Y.) (1956)
- 3) M. Steenbeck : Eine Prüfung des Minimumprinzips für thermische Bogensanlen an Hand neuer Messergebnisse, Wiss Veröff Siemenswerk., 19, I (1940) 59
- 4) H. Gerdien and A. Lotz : Z. f. techn Physik, 4. 157 (1923)
- 5) 岡田実ほか：超高温研究資料 vol. 4, No. 1 (1960)