

アーク放電とその利用



牛尾 誠 夫*

Arc Discharge and Its Application

Masao USHIO

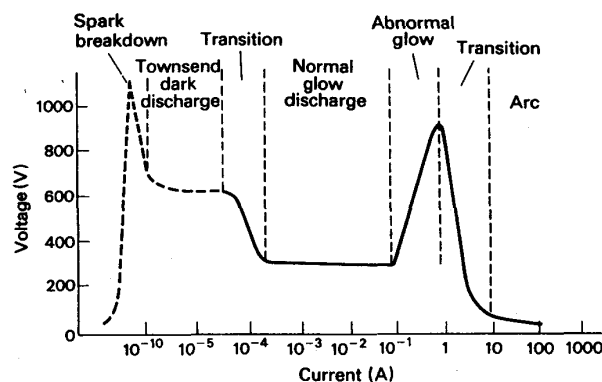
1. 緒 言

近年、アーク放電やグロー放電、あるいは高周波放電を、物質の合成、材料表面の被覆や改質等に應用しようとする工業技術が急激に広がりつつある。これらは、主としてプラズマ物質の高温化学反応や、その保有エネルギーの比較的高いことを利用しており、それらの技術分野では、十分に制御された、安定、かつ多様な物理的、化学的特性を有するプラズマの形成が望まれている。

アーク放電やグロー放電は、最も簡単にプラズマを発生させることのできる方法であり、なかでも、アーク放電は溶接熱源や放電燈光源として古くから利用されている。アークプラズマは、その発生の簡便なこと、保有エネルギーの高いこと、熱力学的状態の多様なこと、制御しやすいこと、装置の安価なこと等、興味ある特徴を有するが、本質的に有極放電であり、電極やその近傍の現象が放電の形成現象やその安定性に基本的な役割を演じる。ここでは、これらのアーク放電とそのプラズマ、および、溶接以外のいくつかの応用について述べる。

2. アーク放電

アーク放電の定義は必ずしも明確とはいえないが、最も広く支持されているのは、「気体あるいは電極物質蒸気の最低電離電圧もしくは最低励起電圧程度の陰極降下電圧を有する、気体あるいは蒸気中の電極間放電で、さらに、放電は持続されていて、その電流によつて陰極の電子放出の機構が支えられている」¹⁾、というものである。電極材料によつて多少の差異が存在するが、約 100 mA から 1 A 程度を最小値とし、ほとんど際限なくあらゆる値の電流を流すことのできる放電であり、この最小値以下の電流では約 300~500 V の陰極降下電圧を有するグロー放電となる。Fig. 1 に比較のため圧力 100 Pa での放電の電流電圧特性を示す。そのアーク放電の電位



$p: 100 \text{ N/m}^2$, showing order of magnitude

Fig. 1. Steady state voltage-current characteristic of discharge.

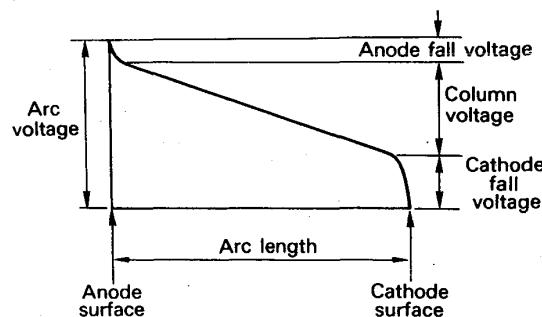


Fig. 2. Voltage distribution along arc.

分布を模式的に示したものが Fig. 2 であり、陰極、陽極、ともにその近傍にそれぞれ陰極降下、陽極降下と呼ぶ、非常に狭い、電界強度の比較的大きな領域が存在している。このようにアーク放電を電極領域とアーク柱領域に分けて考えると理解しやすい。

アーク柱領域では、特に強制的にアーク柱を冷却しな

昭和 61 年 11 月 19 日受付 (Received Nov. 19, 1986) (依頼解説)

* 大阪大学溶接工学研究所助教授 工博 (Welding Research Institute, Osaka University, 11-1 Mihogaoka Ibaraki, 567)

Key words : arc discharge ; application ; welding ; arc plasma ; thermal arc ; thermo-electrode ; vapour deposition ; melt deposition ; anodic phenomena.

い限り、その平均電界強度は $\sim 10^3$ V/m の程度であり、電流密度は $10^6 \sim 10^7$ A/m² である。アーク柱ではそこを流れる電流によるプラズマ生成と消滅とがつり合つて定常状態が保たれており、エネルギー的には、電流によるジュール熱の発生と、外縁方向への熱伝導損失および輻射損失とがほぼつりあっている。アーク柱の中心部の温度は Fig. 3 の例に示すように $\sim 10^4$ K に達しており、温度の低い境界部へ向かつて温度勾配が存在する。この中心部のプラズマは熱力学的には局所熱平衡 (Local Thermal Equilibrium, LTE) にあるといわれ、電子と

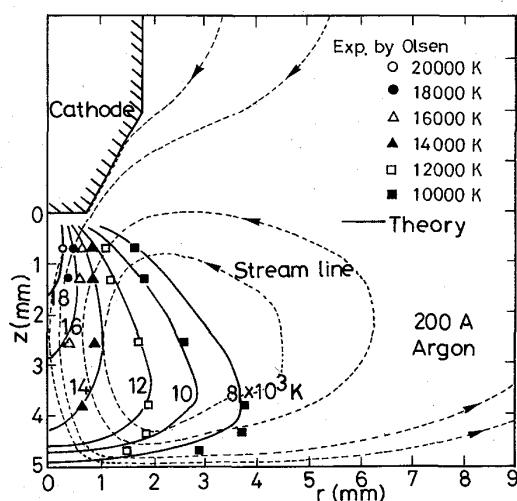


Fig. 3. Temperature field of gas-tungsten-arc in Ar.

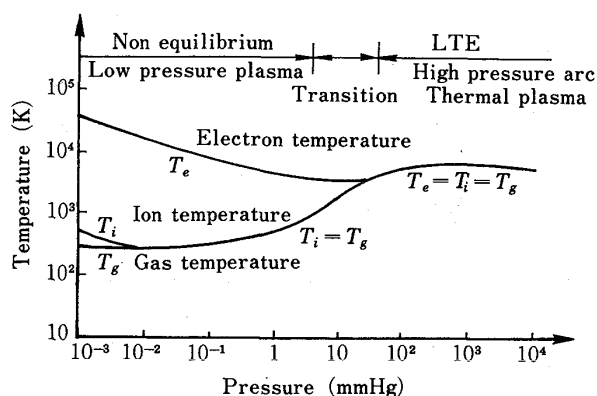


Fig. 4. Separation of electron temperature and heavy particle temperature in low pressure plasma.

イオンや原子、分子のような重い粒子のそれぞれの運動論的温度 (平均の運動エネルギー $(mv^2/2) = (3kT/2)$ で定義する) が等しい。Fig. 4 に示すように放電の圧力を下げて、グロー放電の状態になると、これらの温度は一致しなくなり、重い粒子の温度は低くなり、低温プラズマが実現される²⁾。これらは、プラズマを構成する粒子間で衝突によるエネルギー輸送がいかに頻繁に行われるかということに基づく現象であり、アーク柱中心部のプラズマ密度もこれを支えるに足るだけ高い (Table 1)³⁾。

陽極降下部での平均電界強度は $10^5 \sim 10^7$ V/m で、その厚みは $10^{-4} \sim 10^{-6}$ m くらいになる。一方、陰極降下部の厚みの測定や電界強度は電子放出の機構にも関連すると考えられ、まだ十分に精度よく測定されていないが、 10^9 V/m を越える電界強度を示す場合もある⁴⁾。また、電流密度は、アーク柱部に比して高く (Table 2)、電極領域では電流路が収縮している。このように、アーク放電の電極領域を特徴づけるのは、高い電界強度、高電流密度、および高い温度勾配である。電極の表面温度は、高くとも電極金属の沸点程度であると考えられるが、表面から数平均自由行程の狭い電極降下部を隔てて、それと接するプラズマの温度は 6000 K かそれ以上の温度になっており、非常に大きな温度勾配が電極近傍には存在する。

また、電極近傍では電流路の収縮が生じるため、電磁

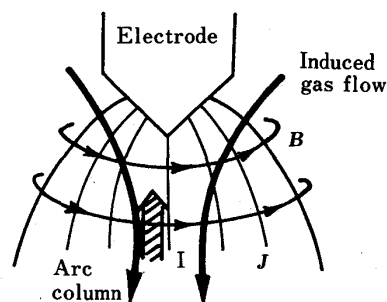


Fig. 5. Induced gas flow due to expansion of current path.

Table 2. Characteristics of electrode current density.

Nonthermionic arc cathode	$>10^{10}$ A/m ²
Thermionic arc cathode	$\sim 10^6 \sim 8$ A/m ²
Glow discharge cathode	$\sim 10^6 \sim 7$ A/m ² (1 atm)
Arc anode	$\sim 10^6 \sim 9$ A/m ²

Table 1. Physical parameters of plasma state.

	Type	Electron density (cm ⁻³)	Electric field (V/cm)	Pressure (Torr)	Electron temperature (T _e) (K)	Gas temperature (T _g) (K)
Thermal plasma	Arc	$>10^{14}$	<20	>100	$\sim 10^4$	$\sim 10^4$
Low temperature plasma	Glow	$10^9 \sim 10^{12}$	$50 \sim 1000$	<100	$\sim 10^4$	$\sim 7 \times 10^2$
	Corona	$<10^{16}$	$>2 \times 10^4$	>100	$\sim 10^4$	

力によるポンプ作用が生じ、その周囲のガスや電極蒸気の、アーク柱方向へ向かう気流を誘起する (Fig. 5). 陰極では、この電流の流入点は、一般に陰極点と呼ばれその挙動が陰極領域の巨視的な性質を支配する. この陰極点は、炭素やタングステン電極では固定して動かず、その境界もばやけている (無輝点定在型) が、鉄や銅では静止せずに動きまわり、それと同時に表面の酸化膜の除去や電極物質の激しい蒸発を伴って、局所的に強く輝く (輝点非定在型). その動きは不連続であるが、一点での滞在時間は $10^{-6} \sim 10^{-9}$ s で極めて短い. 炭素やタングステンのような場合を熱陰極、鉄や銅のような場合を冷陰極と呼び、その動作モードを区別する.

さて、アーク柱部は有限の大きさをもつ熱容量の比較的大きなプラズマであるが、電極材料、電極形状、作動ガス組成、雰囲気圧力、電気入力を変化させることによって、その大きさや温度分布を制御することができる. たとえば、熱伝導度の大きなガスを混入させれば、アーク柱の外縁部への熱伝導輸送量が増加するので、プラズマ柱は絞られて収縮する (サーマルピンチ効果).

3. 電極現象

3.1 陰極

陰極では、イオンがその表面に衝突し、一方、表面からは電子が放出される. 電子放出の機構で熱電子放出が支配的である場合を熱陰極と呼ぶ. 熱電子放出電流密度 j_e は次の式によつて陰極表面の温度 T_c と仕事関数 Φ_0 に関係づけられている.

$$j_e = A T_c^2 \exp(-\Phi_0 / k T_c)$$

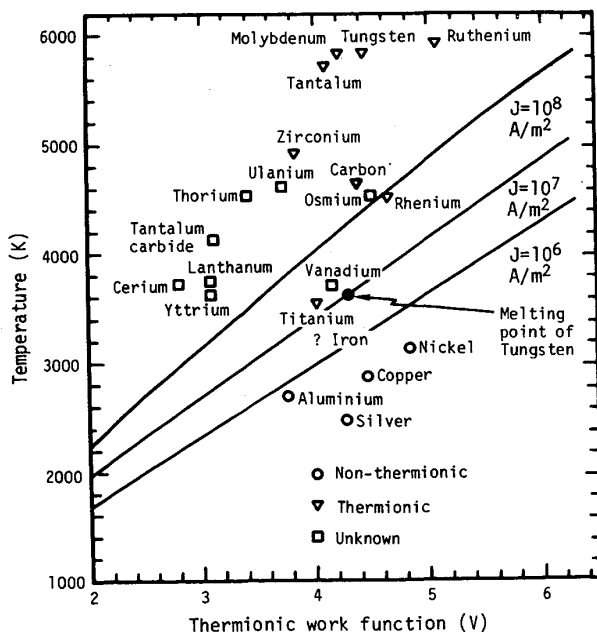


Fig. 6. Temperature for thermionic emission at various current density levels.

(A : 定数, k : ボルツマン定数, T_c : 陰極温度)

この式は Table 2 に示したような電流密度を得るためには陰極が十分に高温でなければならないことを示している. そこで、種々の金属について、仕事関数と沸点をしらべ、上式と同一図面上にプロットして示したものが Fig. 6 である⁴⁾. タングステンのような高沸点物質では 10^8 A/m² 以上の電流密度を熱電子放出によつてまかなうことが可能である一方、ニッケルや銅では 10^6 A/m² の電流密度でさえも、熱電子放出で供給することが不可能であることを示している. ただし、このことはタングステン陰極が常に熱電子放出のみによる放電を行うことを意味しているわけではない. 何らかの理由で、陰極面を高温に保つことが困難な場合には微少な強い輝きを発する輝点が多数形成され、それが激しく動き回る冷陰極型の陰極点となる. 一般に、熱陰極では、陰極表面の電流密度は比較的小さく、電子放出が熱的状态によつて支配されてしまうので安定したアークを得ることができる.

一方、低沸点金属では、上述したような熱陰極モードでの放電は生じず、陰極点での電子放出の機構は別に考えられなければならない. 冷陰極モードで生じる陰極点の形成、挙動は実験条件によつても大きく左右され、統一のとれた理解は得られていない. しかし、放電電流の大部分は陰極点に集中しており、それらが動き回るためにアークが不安定になるのは、溶接のミグアーク等でもよくみられる⁵⁾. この陰極点を特徴づけるのは、エネルギーの集中性と、その動きの速いことである. 陰極点は、多くの小孔から成っているが、数ミクロンの大きさの小孔に極めて高い電流密度を有する電流が流入し陰極物質の蒸発やスパッタリングが生じる. このような冷陰極の挙動を示すモデルも多く作られているが、その一例を Fig. 7 に示す⁶⁾.

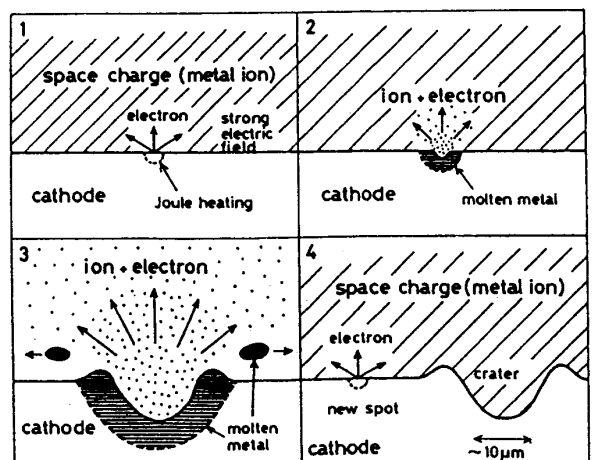


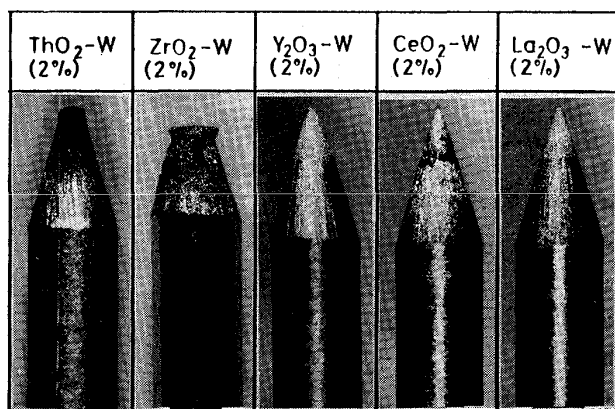
Fig. 7. Schematic model of vacuum arc cathode erosion.

3.2 新しい熱陰極の開発⁷⁾

安定なアーク放電の維持のためには一般的に熱陰極が用いられる。現在最も広く用いられる熱陰極はトリア (ThO_2) 入りタングステン電極であるが、その耐久性や安定性は、必ずしも十分ではなく、放電中にその形状や特性に変化のない電極の開発が望まれている。Photo. 1 は著者の研究室で新しく放電用電極として開発したタングステン電極でランタン (La) の酸化物、イットリウム (Y) の酸化物をそれぞれ 2% 含むタングステン電極と、従来用いられていたトリア入りタングステン、ジルコニア入りタングステン電極、との比較を示したものである。同図には、これも新しく開発されたセリア (CeO_2) 入りタングステン電極も示してあるが、これら三種の新しい電極が、放電後も元の形をとどめているのに比し、従来の電極の消耗、変形の著しいことが示されている。

3.3 真空アーク蒸着

圧力の高い大気中アーク放電のような場合には、プラズマ密度も高く、そこから陰極面へ向かつて入射するイオンによる陰極面の衝撃加熱も十分で熱陰極アークが実現されるが、 $10^{-2} \sim 10$ Pa のような低圧下では、陰極蒸気の発生供給が放電維持のために必要不可欠な機構となり、タングステンやチタンのような熱陰極材料でも、陰極物質の激しい蒸発を伴う陰極点を形成し、冷陰極の陰極点のようにそれが動き回る⁸⁾。この現象を用いれば、陰極物質を陽極や真空室に設置した試料上に蒸着することが可能である。陰極点からは、熔融金属粒子や金属蒸気、あるいは、電離した金属イオンなどが飛来し被膜を形成する。これは、アーク放電を利用したイオンプレーティングとも称すべきものであるが従来の電子ビームを利用するものに比べると、蒸着速度はやや劣るものの制御の容易さと簡便さは格段に優れている⁹⁾。



Arc current: 180 A Electrode diameter: 1.6 mm
Operating time: 3 600 s (1 h) Tip angle: 30°
Shielding gas: Ar (15 l/min) Arc gap: 3 mm

Photo. 1. Consumption of tip of various tungsten cathode.

わずかに窒素や炭化水素のガスを導入することで、反応性イオンプレーティングとなり、TiN や WC など、種々の金属炭化物、窒化物蒸着が試みられている。

超高真空環境下で高純度試料間放電により、タングステンやニオブウムの単結晶薄膜の作成例も報告されている¹⁰⁾。

3.4 陽極現象とその利用

陽極降下領域の厚さは 0.5 mm あるいはそれ以下の程度である。この間に数千度の温度差がある。アーク柱中では、全電流の約 1% 程度の陽イオン流が流れており陰極へ向かつてわずかに移動している。しかし、陽極ではイオンは放出されないから、陽極の極近傍では陽イオンが不足し電子による負の空間電荷が生じ、陽極降下が形成されている。この陽極降下電圧は 0 ~ 数 V である。プラズマ柱からの電子はこの電圧で加速されて、陽極に突入するが、その途中で中性粒子に衝突してこれを電離し不足のイオン数を補う。このような基本的な機構がこの狭い領域で生じていると考えられており、したがって、陽極の極近傍にも比較的高エネルギーの中性原子や分子が、電子との衝突の結果、存在していると考えられている¹¹⁾。プラズマガスに水素や窒素が含まれると陽極の溶解した金属中にこれらのガス成分が著しく溶解し、過飽和状態になる¹²⁾。

陽極への局所エネルギー入力、次のように表される。

$$Q_{in} = Q_{con} + Q_r + j \{ (5/2) k T_e + V_a + \Phi_a \}$$

Q_{con} : 熱伝導によるもの

Q_r : 輻射によるもの

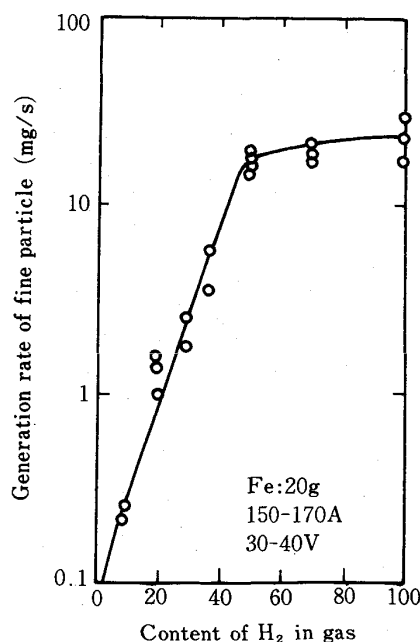


Fig. 8. Generation rate of fine particle of iron by arc discharge.

V_a : 陽極降下電圧

T_e : 電極に入射する電子の温度

j : 陽極電流密度

さらに、ガスの種類によつては陽極へ衝突する励起原子の放出エネルギーや解離原子の再結合により放出されるエネルギーが含まれる¹¹⁾。

低圧では、放電電流を増加させると、陽極にも陽極スポットが形成され、陽極物質の溶融、蒸発が著しい。宇田らは、水素を含んだガスでアーク放電を行うと、溶融した陽極からの金属蒸発が著しく促進されることを見だし、それを用いて超微粉を製造する方法を開発している¹³⁾。水素とアルゴンをそれぞれ 50% 含む混合ガスを用い、0.1 MPa (1 気圧) で純鉄を陽極としてアーク放電 (150 A) を行うと、超微粒子の発生速度は 15 mg/s で、この値は通常の純鉄の蒸発に比べて極めて大きい (Fig. 8)。たとえば、純鉄の温度 1600°C における真空中での蒸発速度に比して約 15 倍であり、同じ圧力下 (0.1 MPa) では約 6000 倍である。宇田は、この蒸発速度の著しい増加は、過飽和に溶解した水素原子が水素分子となつて放出される際の再結合反応による局所的昇温の効果や、ガス放出の際に生じる極微細な表面の凹凸による表面積の増加など、いくつかの要因が重なつて生じると考えている。微粒子の生成については、宇田自身の解説や¹⁴⁾、それ以外にも多くの文献があり、ここではこれ以上触れない。

4. アークプラズマ利用

前節では電極現象とその利用の例を述べたが、ここではアーク柱プラズマの利用として、高温プラズマ反応の利用とプラズマ溶射について簡単にふれる。

さて、アークプラズマを実際に利用する場合には、通常、Fig. 9 に示すような、プラズマジェット型 (非移行型)、プラズマアーク型 (移行型)、あるいは、その中間の発生方法を用いる。非移行型はプラズマがノズルから噴出する自由プラズマであるが、移行型の場合には、陽極が外部にあり、プラズマは陽極まで伸びている。

アークを安定に保持するためには、ガス流に回転モメントを与える渦流安定化法、ガス流れを層流にする層流安定化法、器壁をできるだけプラズマに接近させて拘束する器壁安定化法などが採用されている。

ガス組成、流入方向、流入量、ノズルの形状やノズルの層数、雰囲気圧力や組成、外部電磁界、電気入力などが条件を設定するパラメーターであり、これらの組合せを種々変化させることによつて、プラズマの温度や密度分布、形状、流速分布などを制御することができ、したがつて、化学反応性や熱輸送特性をも適当に設定することができる。

4.1 高温プラズマ化学反応への利用

この領域での応用としては次のものが挙げられる。

(1) 金属精錬

鉄鉱石のプラズマ還元、低品位あるいは難処理鉱の前処理、プラズマ精錬・溶解、高融点セラミックス粉あるいは金属粉の球状化、

(2) プラズマ合成

微粒子生成 (プラズマ-溶融金属間反応)、プラズマ窒化・浸炭 (プラズマ-固体金属) 無機化合物の合成

(3) 結晶育成

(4) 高温熱分解

石炭のガス化、プラスチックや廃棄物の分解

ここに挙げた各項目では、それぞれの専門の解説も多く、ここでは簡単にその動向にふれる¹⁵⁾。

鉄鉱石のプラズマ還元のように、プラズマの高温と高活性を利用して金属を抽出しようとする試みは、かなり大規模に実験されている。重要なものに PICKELS らの実験がある¹⁶⁾。熱効率を向上させる目的で 3 本の中空炭素電極を用いた 3 相交流プラズマ反応炉 (25 kW) をつくり、クロマイト鉱石粉と粉炭の混合物から 90% 以上の回収率で高炭素フェロクロムを得ている。この分野では他に Ti, Mg, W などのプラズマ還元について種々の成果が得られている。

プラズマアークを用いる高級鋼の溶解精錬については既に実用化段階に入つており、全体で 20 MW を越える規模で運転されている。プラズマアーク溶解は、真空アーク溶解や電子ビーム溶解と比べると、スラグ精錬や各種雰囲気での溶解が可能であり成分元素の蒸発も低く抑えられるなどの利点が多い。

これらはすべて、移送型のプラズマトーチを用いるが、問題点は、トーチ当たりの許容電力が現在のところ約 5MW くらいに限界があること、および、電力コスト低減のために、熱効率の増大が望ましいことである。この

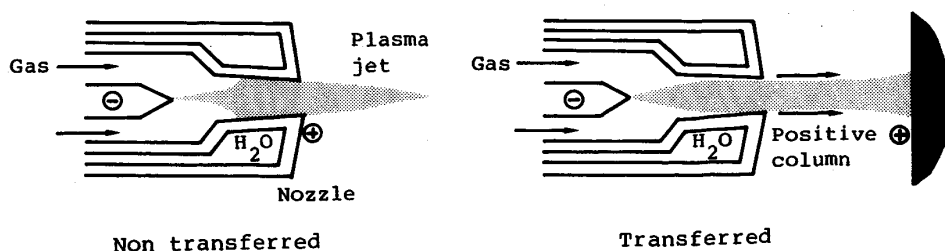


Fig. 9. Transferred arc and non-transferred arc (plasma jet).

両方の面で、電極構造をも含めた大電力用プラズマトーチの開発が必要である。

アークプラズマの気相反応を利用して無機化合物を合成する試みは古くからあり、Al, Ti, Zr, Ta, Mo, W 等の金属の窒化物や炭化物が合成されている。注目すべき材料として、SiC, Si₃N₄ の合成がある¹⁷⁾。プラズマ合成では、高温反応生成物のクエンチングが最も重要な技術であると考えられるが、ガスによる冷却が最も速いとされており、 $10^5 \sim 10^8$ K/s に達している¹⁸⁾。なお、最近吉田らは、反応性ガスによるクエンチングを試み、Si₃N₄ の超微粉を高収率で得ている¹⁹⁾。

アークプラズマを単結晶の育成に利用する分野では、金属棒をプラズマ中に挿入・熔融させ、その液滴を種結晶上に定常的に送給して W, Mo, Re, Nb, 等の単結晶を得ている例がある²⁰⁾。同様に TiC, NbC, HfC, TaC などの炭化物の単結晶も得られている。

さて、プラズマの高温化学反応性を利用する種々の分野の研究は、華々しい成果を挙げつつあるが、プラズマを構成する粒子や、その中に滞在するやや大きな粒子などの間の反応を動力学的に記述する方法論的なモデルの確立が期待される。

4.2 プラズマ溶射

プラズマ溶射とは、金属やセラミックス粒子をプラズマ中に導入し、熔融状態にした後、基材表面に衝突・積層させることにより、耐食性、耐摩耗性、あるいは熱絶縁性といった新しい機能を付与する表面被覆法である。

従来、溶射は大気中で行うため、粒子や基材表面の酸化が避けられず、皮膜-基材界面での密着性が不十分になったり、気孔率が高く (5~20%)、緻密な組織が得られないため耐食性が十分でない、あるいは、厚い膜の形成が困難、などの欠点があった。しかし、最近、LPPS²⁰⁾、すなわち、Low Pressure Plasma Spray と呼ばれる減圧プラズマ溶射法が開発されるに及んで、これらの欠点が克服されつつある。LPPS は、大きな真空容器内で雰囲気制御しながら溶射する方法で、プラズマはトーチから容器内に噴出される。トーチと容器の圧力差を大きくとることが可能であり、プラズマ流速は超音速 ($\leq$ マッハ数 4) 流となり、溶射粒子速度も高い (≤ 1 km/s)。

現在、明らかにされつつある LPPS の被膜の特徴は

(1) 微細粒子が急速凝固しながら積層形成されるので偏析の少ない、微細結晶組織になる。

(2) 均質、緻密で気孔がなく、また、密着性も良い。

(3) 高合金材料や、反応性材料の被膜が可能である。に集約されるが、これらは、このプロセスが酸素の少ない雰囲気、基材の予熱や清浄化が移行性アークにすることで可能、プラズマの温度分布や流速分布を広範囲に変化させることが可能、などと、従来法に比較して、溶射条件の組合せを多種多様に選択することを可能にしたためであると考えられる。

減圧下では、プラズマ炎は径方向にも軸方向にも広がる。常圧下の細く短いプラズマでは、溶射粒子の中、中心部を飛行したものと外周部を飛行したものとでは、基材への衝突時の状態に大きな差を生じるが、LPPS ではそれが著しく改善されることになる。

LPPS は、現在既に実用段階に入っており、種々の材料、M-Cr-Al-Y (M=Ni, Co, Fe, Ni-Co), Ni 基超合金, Co 基合金, 等種々の合金、および、Ti, Ta, W, Mo などの金属の良好な溶射被膜が得られている。その機械的性質は十分に良好であり、鋳造された同一材と比較して優れている場合が多い²⁰⁾。

さて、溶射過程において溶射粒子に要求される条件は、すべての粒子が基材に達するときに熔融状態にあり、かつ、十分な運動量を持つこと、および、飛行中に過度の蒸発やガス吸収、選択的蒸発を受けないことであろう。このような条件を正確に把握、設定することが基本的に重要であり、そのためには、プラズマと溶射粒子の相互作用を正確に測定、解析することが必要である。しかし、プラズマを含む高温超音速流の測定は種々の困難を伴い、まだ精度よく測定されておらず、プラズマと粒子の間の輸送現象は明確ではない。

プラズマジェットの温度場、速度場を計算機による数値解析によつて推定し、溶射過程の数値解析モデルをつくる試みがある。溶射粒子の大きさは数十ミクロンのものが多く用いられるが、減圧プラズマ中の粒子と、プラズマ分子の平均自由行程の比は十分に大きくはなく、したがって、プラズマと粒子の間の熱・運動量輸送は通常の流体近似でのものとは異なる²¹⁾。このような高温超音速流のモデル化は、仮定と近似の集積といった面がないではないが、溶射のプロセスを理解し、推定するための手段としては有用である。

溶射のプロセスを制御するパラメーターは非常に多く、それらを Fig. 10 に掲げる。

プラズマガスを化学活性なものにしたり、多種の粒子を混合したりして、反応生成物を含む被膜を形成する試みも行われている。フェロチタン、チタン、ボロンの混合した粉を用いて、鉄のマトリックス中に TiB₂ の結晶粒を分散させた膜の形成や²²⁾、N₂-H₂ プラズマで Ti 粒子を導入し、TiN と Ti の混合組織の形成²³⁾ などの例が報告されている。

プラズマ溶射は LPPS の開発によつて、強度を要する部材への機能性被膜の形成という分野が開かれつつあり、工業的価値の高い技術になるだろうと思われる。

5. 結 言

アーク放電は、最も簡便にプラズマ状態をつくり出せる方法である。しかし、物理的には、電極という極めて取扱いのやつかいなるものを有している。この理解し難い電極現象も、応用の方が先に進み、それと共に、理解が

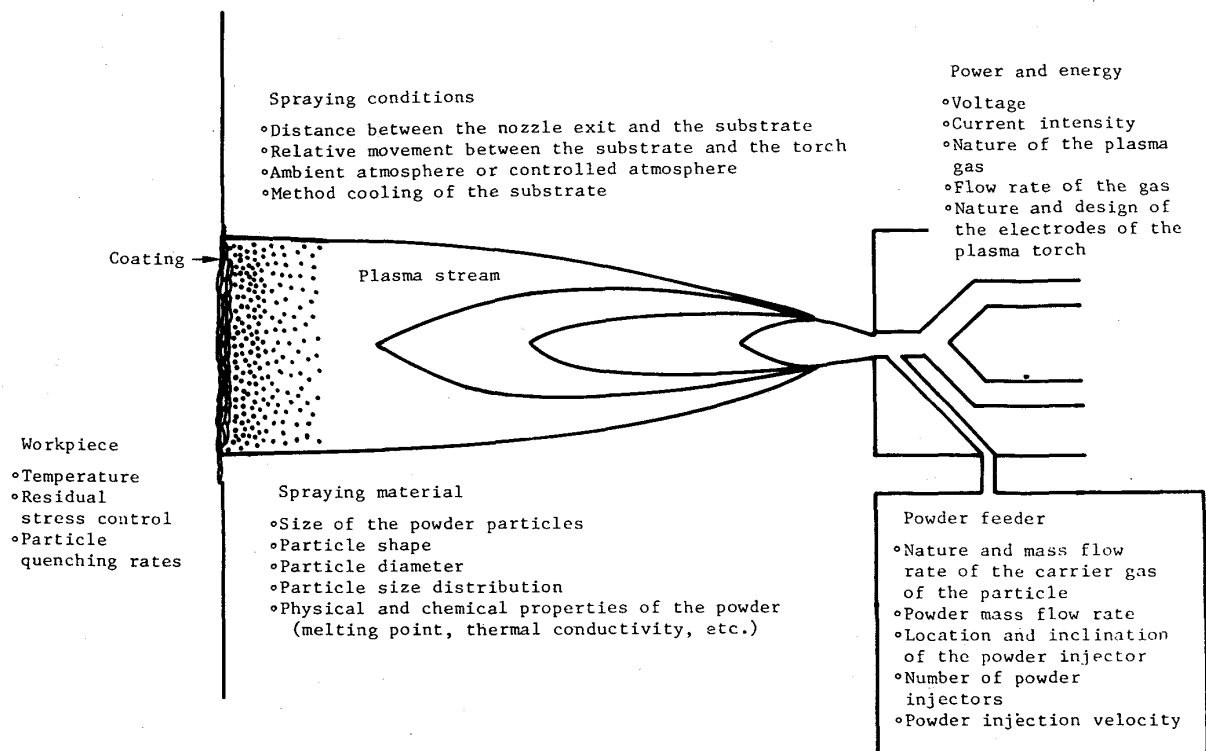


Fig. 10. Controlling factors of plasma spraying.

深まるというような様相を呈しつつある。また、プラズマ柱も、減圧化することによってその構造を制御するという方法で工業的適用範囲が大幅に拡大しつつある。ここで述べた例は、現在、急激に進みつつある、それらの研究の一端であるが、最も望まれるのは、確かな計測である。プラズマを制御する因子は非常に多くそれらと生成されているプラズマとの間の関係を把握することが基本的に重要な問題だからである。

文 献

- 1) M. A. KETTANI and M. F. HOYAUX: PLASMA ENGINEERING (1973), p. 200 [Butterworth]
- 2) K. C. HSU, K. ETAMADI and E. PFENDER: J. Appl. Phys., **54** (1983), p. 1293
- 3) E. PFENDER: Measurement in Heat Transfer, ed. by E. PFENDER and R. GOLDSTEIN (1976), p. 295 [Hemisphere Publishing Corp.]
- 4) A. E. GUILLE: Proc. IEE, IEE Reviews, **118** (1971), p. 1132
- 5) 牛尾誠夫: 高温学会誌, **8** (1982), p. 14
- 6) 新野 仁, 福富勝夫: 溶接学会誌, **54** (1985), p. 352
- 7) F. MATSUDA, M. USHIO and T. KUMAGAI: Trans. JWRI, **15** (1986), p. 13
- 8) J. D. COBINE: Vacuum Arcs, ed. by J. M. LAFFERTY (1980), p. 1
- 9) H. SHINNO, M. FUKUTOMI, M. FUJITSUKA and M. OKADA: J. Nuclear Materials, **133 & 134** (1985), p. 749
- 10) Y. IGARASHI and M. KANAYAMA: J. Appl. Phys., **57** (1985), p. 849
- 11) A. E. GUILLE: Physics of Welding, ed. by J. LANCASTER (1984), p. 109 [Pergamon Press]
- 12) 武田絃一: 日本金属学会会報, **24** (1985), p. 822
- 13) 宇田雅広: 日本金属学会会報, **22** (1983), p. 412
- 14) 宇田雅広: 溶接学会誌, **54** (1985), p. 318
- 15) 三村耕司, 南條道夫: 高温学会誌, **9** (1983), p. 88
- 16) C. A. PICKELS, S. S. WANG, A. McLEAN, C. B. ALCOCK and R. S. SEGORTH: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., **18** (1978), p. 369
- 17) J. SZEKELY: Plasma Processing and Synthesis of Materials, ed. by J. SZEKELY and D. APELIAN (1984), p. 1 [Elsevier Science Pub. Co., Inc.]
- 18) R. M. YOUNG and E. PFENDER: Plasma Chemistry and Plasma Processing, **5** (1985), p. 1
- 19) T. YOSHIDA, T. TANI, H. NISHIMURA and K. AKASHI: J. Appl. Phys., **54** (1983), p. 640
- 20) D. APELIAN, M. PALIWAL, R. W. SMITH and W. F. SCHILLING: Int. Metals Reviews, **28** (1983), p. 271
- 21) D. APELIAN, D. WEI and M. PALIWAL: Thin Solid Films, **118** (1984), p. 395
- 22) B. CHAMPAGNE and S. DALLAIRE: J. Vac. Sci. Technol., **A3** (1985), p. 2373
- 23) 朝日直達, 児島慶享: 高温学会誌, **10** (1984), p. 249