

第6章

応用技術の展開を支える 基礎・基盤的研究成果

6-1	アークプラズマの数値解析	44
6-1-1	アークプラズマの物性	
6-1-2	アークプラズマの数値解析技術	
6-2	アークプラズマの発生・制御技術	49
6-2-1	直流プラズマトーチにおける発生・制御技術	
6-2-2	交流プラズマトーチにおける発生・制御技術	
6-3	アークプラズマの計測診断技術	60
6-3-1	輝線スペクトルの自己吸収を考慮した温度計測技術	
6-3-2	プラズマの流速計測技術	

6-1 アークプラズマの数値解析

本節では、アークプラズマの数値解析に必要な物性の計算結果と、アークプラズマから被加熱物への伝熱現象を数値解析によって解明した成果をまとめる。

6-1-1 アークプラズマの物性

アークプラズマの電磁流体解析には、アークプラズマの比熱、エンタルピーなどの熱力学特性、粘性率、導電率、熱伝導率などの輸送特性、さらにアークプラズマからの放射特性など、アークプラズマの物性が必要になる。ここで、熱力学特性とは、物質を巨視的に捉えた物理量で、質量密度、エンタルピー、比熱などを指す。また、輸送特性とは、分子衝突によってある物理量が運ばれる現象を総称したものである。質量、運動量、エネルギー、電荷が、粒子の衝突によって移動する場合、それぞれの物理量の移動のしやすさを、拡散係数、粘性率、熱伝導率、導電率で表す。

局所的な熱平衡状態にあるアークプラズマを対象として、これらの物性を求めた研究成果の概要を以下に示す。

(1) 熱力学特性

熱力学特性の一例として、アルミナの混入したアルゴンの比熱を図6-1-1に示す⁽¹⁾⁽²⁾。計算は、圧力 10^5Pa 、温度 $4,000\sim 20,000\text{K}$ の範囲で、アルミナの混入率を $0\sim 100\%$ として計算している。純粋なアルゴンの場合（アルミナ混入率 0% ）には、 $14,000\text{K}$ 付近に比熱の極大が存在する。これは、この温度領域でアルゴン原子の電離が進行するためである。一方、アルミナの混入率が

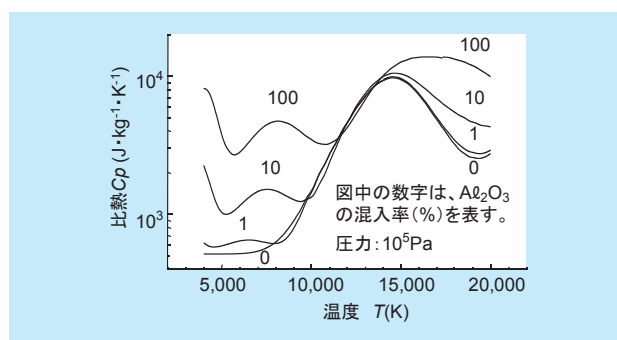


図6-1-1 アルミナの混入したアルゴンの比熱

増加していくと、 $4,000\text{K}$ 、 $8,000\text{K}$ 、 $16,000\text{K}$ 付近に極大が出現する。これらの極大は、それぞれ、 AlO の解離、 Al 原子の電離、 O 原子の電離に対応している。

(2) 輸送特性

輸送特性の一例として、鉄蒸気が混入したアルゴンの導電率を図6-1-2に示す⁽³⁾⁽⁴⁾。同図から、 $15,000\text{K}$ 以下の温度領域では、わずかな鉄蒸気の混入により導電率が著しく増加すること、それ以上の温度領域では、鉄蒸気の混入により導電率が低下することが分かる。これは、次のように説明できる。すなわち、導電率は電子密度に比例し、電子が衝突する粒子の密度と衝突断面積との積の総和にほぼ反比例する。 $15,000\text{K}$ 以下の温度領域では、鉄の電離エネルギー（ 7.90eV ）がアルゴンの電離エネルギー（ 15.755eV ）に比べて小さいため、鉄の混入により電子密度が著しく増加するため導電率が増加する。一方、 $15,000\text{K}$ 以上の温度領域では、大きなクーロン衝突断面積を持つ Fe^{2+} が出現するため導電率は低下する。

当研究所は、上述のアルミナが混入したアルゴンガス⁽¹⁾⁽²⁾、鉄蒸気が混入したアルゴンガス⁽³⁾⁽⁴⁾の他に、鉄、銅、アルミニウムが混入した空気⁽⁵⁾について、熱力学特性や輸送特性を計算するプログラムを開発している。

(3) 放射特性

大気圧以上の気体において、数A以上の電流によって生成されるアークプラズマは、温度が $10,000\sim$

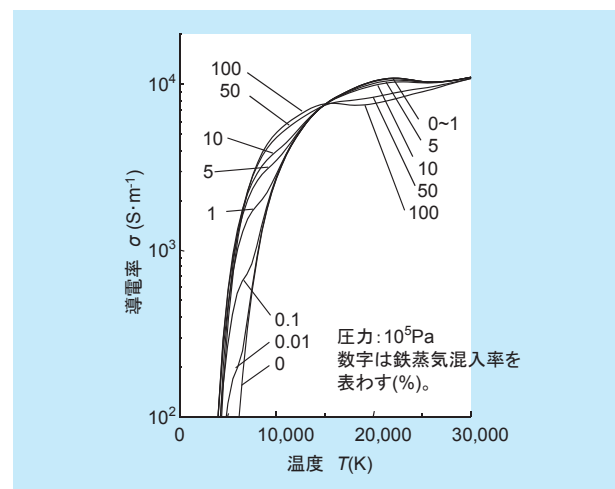


図6-1-2 鉄蒸気が混入したアルゴンの導電率

30,000Kに達し、強い光が放射される。この放射光は、主としてアークプラズマ中の電子が関与しており、アークプラズマを構成する元素に固有の波長を示す線スペクトルや、広い波長範囲で連続的な強度分布をもつ連続スペクトルからなる。

一般に、原子やイオン、分子の周りに束縛されている電子には、安定に存在できる離散的なエネルギー準位が存在する。線スペクトルは、安定なエネルギー準位からより高いエネルギー準位へ励起された電子が、安定なエネルギー準位へ再び遷移する際に、これらの準位のエネルギー差に応じた波長の光を放射することによって発生する。一方、アークプラズマ中の自由電子が、原子やイオンなどと衝突しエネルギーを失う場合や、自由電子がイオンと再結合する場合には、自由電子が持つエネルギーが一意に決まらないので、放出されるエネルギーは連続的なものとなり、波長に対し連続的な分布を持つ光が放射される。

アークプラズマから放射される光のスペクトル分布やその強度が放射特性と呼ばれる。放射特性は、アークプラズマの（電子）温度や（電子）密度などの非接触な計測診断に利用されている。また、放射輝度（アークプラズマの放射エネルギーの出力密度）、放射効率（エネルギー変換効率）、分光分布（放射エネルギーの波長分布）に代表される光源の特性評価に重要である。

当研究所では、アークプラズマからの放射光がアークプラズマ自身に吸収されるプロセスを考慮して、基幹送電線の故障電流を想定した50kA級アークの温度⁽⁶⁾（6章3節）などの特性を解明している。また、アークプラズマからの放射光を利用し、金属表面の非晶質化による耐摩耗性、耐食性、耐熱性を向上させることを目指した研究⁽⁷⁾を推進した。これらの研究の中で、分光放射輝度を計算するプログラムを開発している⁽⁸⁾。

ここでは、アークプラズマの放射輝度などの放射特性に与える電流などの影響を基礎的な実験を通して解明した研究成果⁽⁹⁾と、開発した分光放射輝度を計算するプログラムを用いた解析結果の一例を紹介する。

①電流などがアークプラズマの放射輝度に与える影響

局所熱平衡状態が成立するアークプラズマの放射光を連続スペクトルとみなし、アークプラズマの半径で規格化した電界-電流特性を用いて、アークプラズマの放射

輝度、アークプラズマの半径、および電流との関係を解析的検討から導出した。この関係から、放射輝度はアークプラズマの半径に反比例し、アークプラズマの電界と半径が一定の場合の放射輝度は電流の2乗に比例することが示唆された。そこで、水冷した石英管（内径15mm）内に、電流が直流20～60A、電極間隔が15～44mmの範囲でアルゴンのアークプラズマを発生させ、放射輝度はガス流量や電極間隔にはほとんど依存せず、電流の2乗に比例することを確認した。この結果から、適用範囲を考慮すれば、アークプラズマの放射輝度は便宜上、電流および半径から予測できることがわかった。

②自己吸収を考慮した分光放射輝度計算プログラムの開発

局所熱平衡状態が成立するアークプラズマにおいて、幅広い温度域や圧力域で計算できる分光放射輝度計算プログラムを開発した。このプログラムでは、アークプラズマの線スペクトル放射、再結合放射、および制動放射の放射機構ならびに光学的厚さ（粒子による光の吸収）を考慮した三次元でのシミュレーションが可能である。図6-1-3に計算結果の一例を示す。アークプラズマの直径を1cmとし、高压高温のアルゴンのアークプラズマについて、圧力、および温度の空間分布の依存性を考察した結果、アークプラズマによる光の吸収を考慮しない場合の放射輝度は、考慮する場合と比べて最大で約10倍も過大評価することが示された。

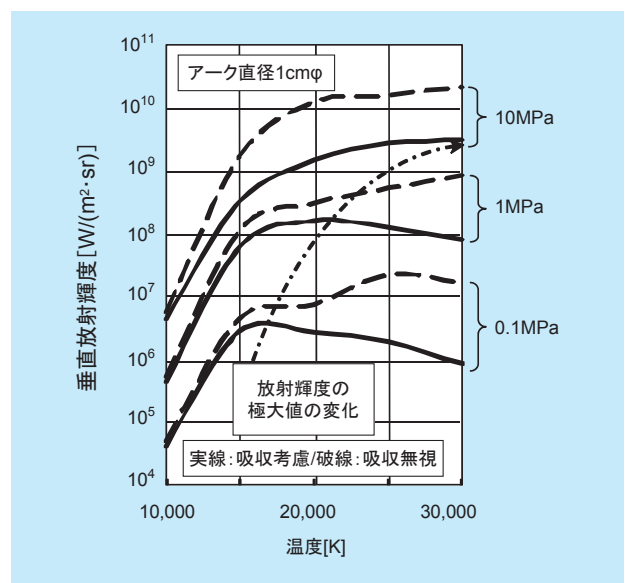


図6-1-3 アルゴンのアークプラズマの放射輝度

6-1-2 アークプラズマの数値解析技術

アークプラズマを用いた廃棄物の溶融処理などにおいて、アークプラズマから被加熱物への伝熱に関する知見は、溶融処理工程の加熱シーケンスの確立や、高効率・安定な加熱といった観点から重要である。アークプラズマから被加熱物への伝熱に影響を及ぼす因子としては、熱伝導率などのアークプラズマの物性を始め、ガス流量などのプラズマトーチの運転条件、また溶湯が形成される場合は溶湯蒸気の混入状況、溶湯の形状やアークプラズマを構成している元素と溶湯との化学反応などが挙げられる。このため、当研究所では、これらの影響因子が及ぼす影響に関して、電磁流体解析技術を用い解明してきた。

本節では、電磁流体解析の概要を纏めた後、当研究所が行ってきた数値解析のうち、陽極点現象に関する研究成果とアークプラズマから被加熱物への伝熱現象に関して述べる。

(1) アークプラズマの数値解析手法（電磁流体解析）

流体解析では、質量、運動量、エネルギーの各保存則を解くことによって、場の圧力、速度、温度を決定する。これらの保存則は一般形では次式のように表される^{(10)~(12)}。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho\mathbf{u}\phi) = \text{div}(\Gamma\text{grad}\phi) + S \quad (6-1-1)$$

t : 時間、 ρ : 密度、 ϕ : 単位体積当たりのある物理量（質量、運動量、エネルギー）、 \mathbf{u} : 速度場、 Γ : 輸送係数、 S : 生成項、である。ただし、輸送特性と生成項は、着目している物理量によって決まる。例えば、エネルギーに着目した場合、 ϕ は温度（エンタルピー）、 Γ は熱伝導率、 S は単位体積当たりの発熱量になる。

この式の物理的な意味は、ある微小な領域内で着目している物理量 ϕ の時間変化（左辺第1項）は、物理量 ϕ の領域の境界を通じた出入り（左辺第2項と右辺第1項）とその領域内部での発生（右辺第2項）に等しいというものである。左辺の第2項は対流項で、物理量 ϕ が流れ場によって運び出される量を表している。また、右辺の第1項は拡散項で、物理量 ϕ の勾配によって領域に移動してくる量を表している。

アークプラズマの数値解析では、流体解析に加え電荷の保存則を解き、電荷の移動として電流を、さらに、マクスウェル方程式により電流を規定する電界や電位が求められる。また、電流が作る磁界から、磁場とアークプラズマの相互作用なども考慮できる。

さらに、アークプラズマの数値解析では、着目する現象に応じて保存則を分離・追加して解くことも行われている。例えば、アークプラズマの周辺や電極領域などでは、電子と重粒子（分子、原子、イオン）の温度が異なっている。このような場合には、電子と重粒子について、それぞれのエネルギー保存則を解くことが報告されている^{(13)~(14)}。また、アークプラズマに注入された粒子とアークプラズマの相互作用を解析的に検討する場合など、化学種の生成や消滅に着目する場合には、アークプラズマを構成している化学種の保存則を解くことが報告されている⁽¹⁵⁾。

(2) 陽極点現象の数値解析

大気圧の熱プラズマの陽極点には、2つの異なった形態があることが知られている⁽¹⁶⁾。すなわち、拡散モードと呼ばれるベル形に広がった形態および収縮モードと呼ばれる収縮した形態である。アルゴン（Ar）中での電流 50A のアークプラズマの拡散モードと収縮モードの一例を図 6-1-4 に示す。プラズマガスの流量以外は全て同一の条件である。同図(a)に示す拡散モードは、陽極に向かうガス流の影響を強く受けた場合に存在する。陽極へ向かうガス流は、プラズマトーチのように陰極周囲に流すガスなどによって生じる。同図(b)に示す収縮モードは、熱的な効果とアークプラズマの電流による自己磁場のピンチ力によって誘起される形態である。すなわち、

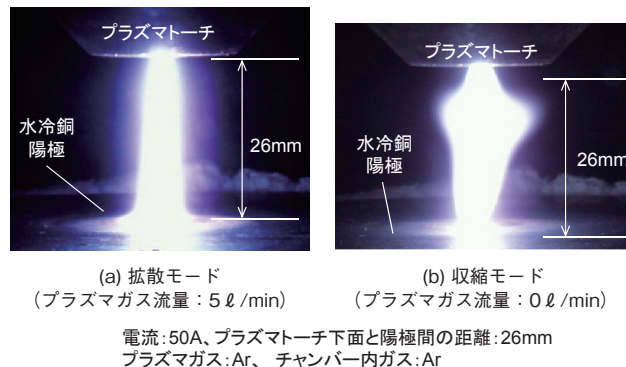


図6-1-4 拡散モードと収縮モードの一例

陽極の近くのアークプラズマの周辺は陽極によって冷やされるため、アークプラズマの断面積は、陽極に近づくほど小さくなる。このため、電流の流線は陽極から離れるにしたがって広がり、自己磁場と電流によってコラムの外側から中心方向へ作用するピンチ力は、陽極から遠ざかるにつれて弱くなる。この結果、コラム内部の軸方向への圧力勾配が発生し、陽極ジェットが観察される。器壁安定化装置の出口から陽極までの200Aのアークプラズマを対象として、プラズマガス流量を変え、これら2つのモードを解析した⁽¹⁷⁾。

拡散モードの解析結果として、プラズマガス流量を0.2、0.6、1.0g/sと変えた場合の電子温度12,000Kと7,000Kの等温線を図6-1-5に示す。同図から、器壁安定化装置の出口の下領域では、プラズマガス流量が増加するにつれアークプラズマの高温部分が下方に伸びることが分かる。これは、対流の寄与が大きくなるためである。一方、周辺の領域では、プラズマガス流量の増加とともに等温線は中心へ向かって移動していることが分か

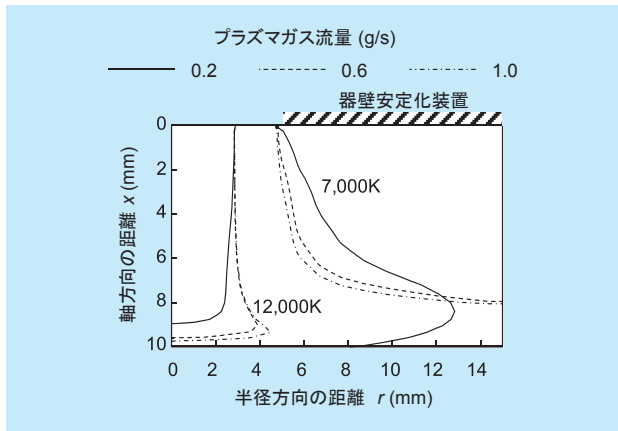


図6-1-5 プラズマガス流量を変えた場合の電子温度の等温線

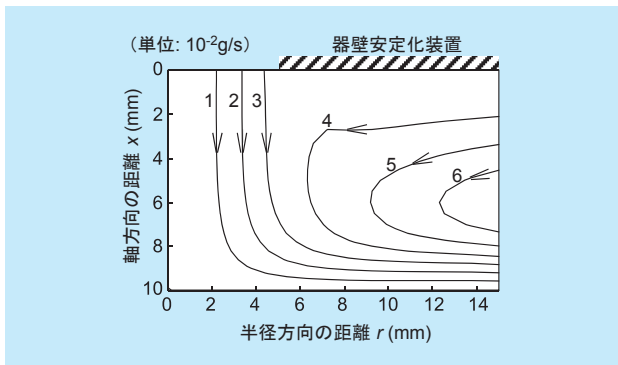


図6-1-6 プラズマガス流量が0.2g/sの場合の流線

る。これは、器壁安定化装置の下部においてアークプラズマに流れ込む冷たいガスの流量が増加するためである。プラズマガス流量が0.2g/sの場合の流れ場を図6-1-6に示す。同図から、器壁安定化装置から吹き出し陽極に衝突し外側へ吹き出すガスの流れと、器壁安定化装置の下部で、計算領域の外側から流入しアークプラズマに流れ込むガスの流れが観察できる。

次に収縮モードでの計算結果を示す。まず、プラズマガス流量を0.001～0.05g/sの範囲で変えた場合の電子温度の等温線を実験結果⁽¹⁸⁾とともに図6-1-7に示す。文献⁽¹⁸⁾では、プラズマガス流量が計測されていないが、今回の計算結果は、プラズマガス流量が0.02g/s以下で良い一致を示している。次に、図6-1-8に、プラズマガス流量が0.01g/sの場合の流線を示す。同図から、器壁安定化装置の出口から吹き出すプラズマの流れと陽極

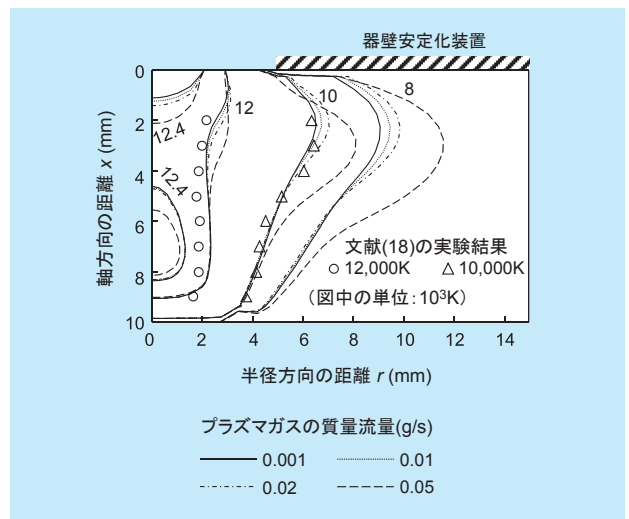


図6-1-7 収縮モードの電子温度の等温線

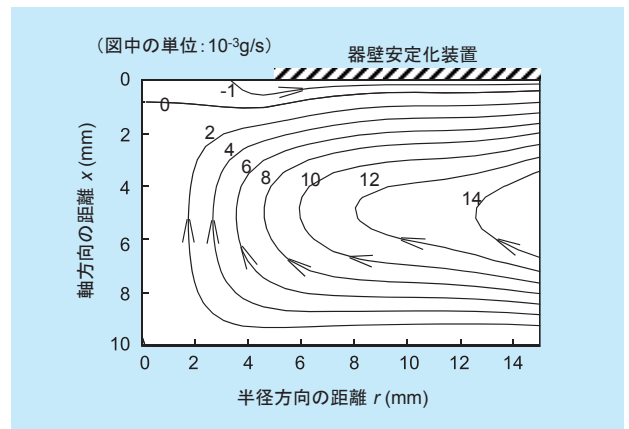


図6-1-8 プラズマガス流量が0.01g/sの時の流線

ジェットが衝突し、その結果、淀み層が器壁安定化装置の下約0.4～1mmの範囲に存在すること、器壁安定化装置の下面に沿って外側への流れが存在すること、さらに、陽極ジェットの発生により陽極前面では外側の境界からプラズマへ向かう流れが存在することが分かる。拡散モードの流れ場（図6-1-6）と様相が全く異なっている。

以上のように、拡散モードと収縮モードについて、陽極点現象を解析できるツールを開発した。

(3) 固体陽極への伝熱現象の数値解析

アークプラズマの物性値が、伝熱機構や伝熱に及ぼす影響を解明した⁽¹⁹⁾。

陽極は、溶湯からの蒸気の影響を受けないように固体水冷銅陽極とした。ガス種は、プラズマ溶融処理において用いられる代表的なガスであり、また、互いに特長的な物性値を持つアルゴン (Ar) および窒素 (N₂) とした。対象とするアークプラズマは2次元円筒座標で扱った。また、水冷銅陽極に隣接した微小体積を以ってシース領域を考慮した⁽²⁰⁾⁽²¹⁾。支配方程式として、質量、軸・径方向の運動量、エネルギー、電荷の各保存則を解いた。アークプラズマ⁽²²⁾ および銅⁽²³⁾ の物性値は温度依存性を考慮した。

移行形アークプラズマから固体水冷銅陽極への伝熱機構としては、放射は小さいため考慮せず、荷電粒子によ

る熱輸送としてアークプラズマから陽極への電子のエンタルピー輸送および電子のコンデンセーション、および熱伝導の合計3種の伝熱機構を考慮した⁽²⁴⁾。

図6-1-9に(1) Ar プラズマ、(2) N₂ プラズマの温度分布を示す。5,000～13,000Kの範囲の等温線を比較すると、Ar プラズマの方が太く、N₂ プラズマの方が細い。また、中心部における13,000Kを超えると等温線はN₂ が太い。

また、図6-1-9の温度分布の計算結果を基に得た水冷銅陽極への伝熱量の計算結果を、実験結果⁽²⁵⁾と比較し、図6-1-10(1)、(2)に示す。また、同図(3)は、水冷銅陽極への伝熱に強く影響するプラズマの物性を明らかにする

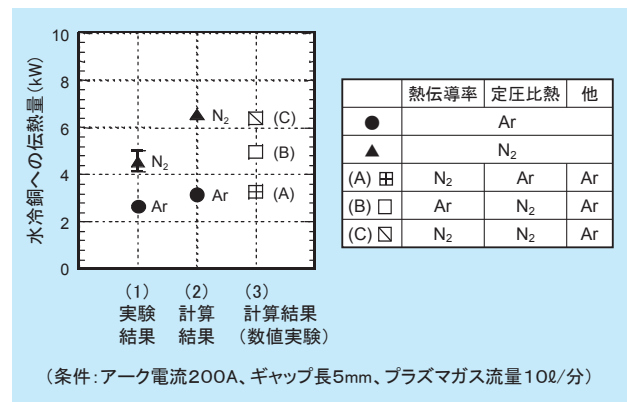


図6-1-10 水冷銅陽極への伝熱量に関する(1)実験結果と(2)計算結果との比較および(3)計算に用いた熱伝導率比熱をN₂プラズマの物性とした計算結果

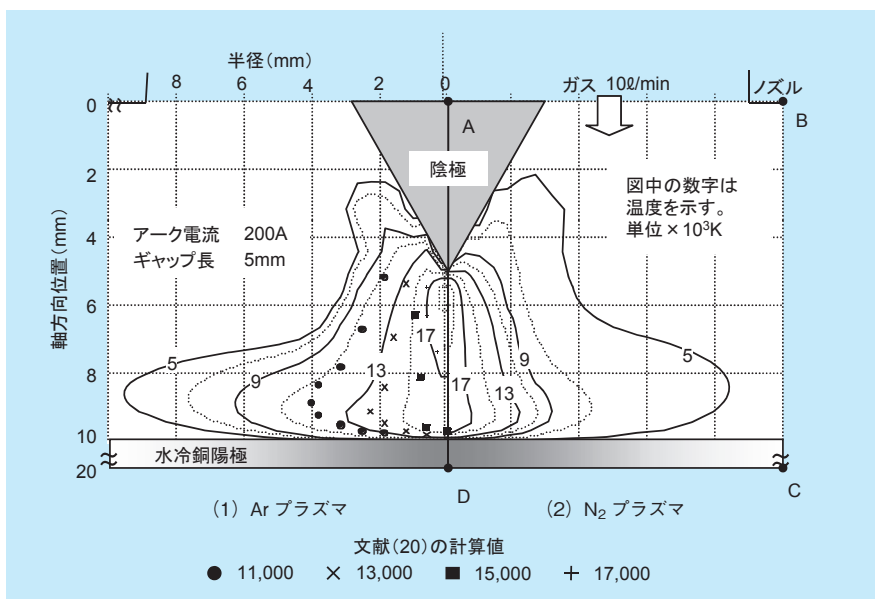


図6-1-9 (1) Ar、(2) N₂ プラズマの温度分布計算結果

ため、Ar プラズマの物性値の一部を N₂ プラズマの物性値に置き換えて伝熱量を計算した結果である。すなわち、(A)では熱伝導率のみを、(B)では定圧比熱のみを、(C)熱伝導率と定圧比熱の双方を N₂ プラズマの物性値とし、導電率などの他の物性値は Ar プラズマとした。このような手法は、実験では実施することができないため、数値解析の長所を活かしたアプローチである。図 6-1-10(1)(2)から、今回解析した水冷銅陽極への伝熱量は、定量的には N₂ プラズマの場合に差異が見られるものの、定性的には実験結果と同様の傾向を示している。また、同図(2)(3)から、(C)の熱伝導率と定圧比熱の双方を N₂ プラズマの物性値とした場合の水冷銅陽極への伝熱量の計算結果が、N₂ プラズマの値に近いことが分かる。この理由は、これらの物性値を N₂ プラズマの値とすることで、Ar プラズマの場合に比べて、水冷銅陽極との境界における温度が比較的高く、かつ熱伝導率も高くなるためである。

以上より結論を纏める。アークプラズマから水冷銅陽極への伝熱機構は、熱伝導機構による寄与が高い。また、水冷銅陽極への伝熱に影響を及ぼしている支配的な物性は熱伝導率と定圧比熱の両者であった。N₂ を用いた場合、窒素分子の解離反応に伴う熱伝導率と定圧比熱の値が共に高いことが効率良い伝熱を実現させている。これより、アークプラズマの被加熱物への伝熱量増大には、熱伝導率と定圧比熱が共に高いガスの選択が有効である。

(4) 溶湯陽極への伝熱現象の数値解析

本節では、陽極を溶湯陽極とし、溶湯からプラズマに混入する銅蒸気が伝熱量に及ぼす影響を数値解析手法により評価した結果⁽²⁶⁾に関して述べる。

N₂ プラズマの導電率は、銅蒸気濃度が 10⁻¹% 未満の領域で、なおかつ温度が 7,000K 以下でのみ銅蒸気濃度に依存する。一方、熱伝導率や比熱といった他の物性値は、ほとんど変わらない⁽²⁷⁾。そこで、銅蒸気の混入による導電率の影響を数値解析手法により調べた。

窒素プラズマの導電率は、文献⁽⁴⁾⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾から求めた。数値解析では、導電率の値のみをこれらの銅蒸気濃度の値に対応した値を入力し温度場などを計算した。

図 6-1-11 に銅蒸気が混入した場合のプラズマの温度分布の計算結果を示す。銅蒸気濃度は 10⁻¹%、10⁻⁵% で全領域に一定濃度で分布しているとした。これらの銅蒸

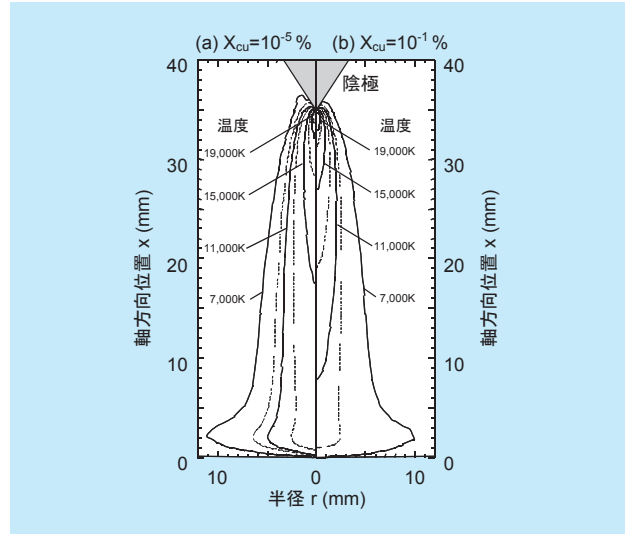


図6-1-11 それぞれの銅蒸気濃度下におけるアークプラズマの等温線の数値解析結果

気濃度はそれぞれ銅の溶湯陽極と水冷銅陽極を形成した場合において分光計測により測定した結果⁽²⁶⁾を用いた。銅蒸気の混入に伴う導電率の上昇の結果、固体水冷銅陽極の場合に比較して中心軸周りの温度が低くなった。さらに、5,000K から 10,000K への温度領域においては、窒素プラズマの熱伝導率がプラズマの温度に強く依存するため、温度のわずかな低下が熱伝導率の顕著な低下を引き起こした。熱伝導率の低下は、陽極への伝熱量をさらに低下させる。

以上より、アークプラズマから溶湯陽極への伝熱量に関して、銅蒸気の混入に起因する導電率の上昇は、プラズマの温度の低下をもたらし、最終的に熱伝導率の低下をもたらすことが明らかとなった。したがって、金属蒸気のアークプラズマへの混入は、この被加熱物への加熱効率の低下を引き起こすことが明らかとなった。これらは、プラズマから被加熱物への伝熱現象の解明の一助となるだけでなく、実際の処理時における有効な知見である。

6-2 アークプラズマの発生・制御技術

6-2-1 直流プラズマトーチにおける発生・制御技術

(1) 直流プラズマトーチにおける電極損耗現象

アークプラズマ加熱技術は、その優れた特長から、金属の溶解や精練、廃棄物の減容、有害物質の熱分解・溶

融による無害化などへの応用が展開している。これらの応用技術の実用化やその高度化にあたっては、プラズマトーチの長寿命化と大容量化、運転コストの低減などを克服する必要がある。このため、当研究所は、まず、タングステン（W）系の合金を陰極とする直流のプラズマトーチについて、電極寿命を決定する電極損耗量に及ぼす添加材の種類の影響などを解明した⁽³⁰⁾。次に、新日本製鐵株式会社（以下、新日鉄）との共同研究により、新日鉄が開発したプラズマトーチと当研究所の大容量電力短絡試験設備を用いて、世界トップレベルの10kA級のアークプラズマの発生に成功した⁽³¹⁾。さらに、プラズマガスをアルゴン（Ar）から安価な窒素（N₂）に変えると、電極損耗量は増加するものの、運転コストを低減できることを明らかにした⁽³²⁾。

① タングステン電極のアークプラズマによる損耗

W電極へ添加する材料の種類が、電極の損耗に及ぼす影響を、実験用のプラズマトーチを用い明らかにした⁽³⁰⁾。添加材としては、当時研究が行われていて⁽³³⁾⁽³⁴⁾ 比較的入手の容易な酸化ランタン（La₂O₃）、酸化セリウム（CeO₂）、酸化トリウム（ThO₂）、酸化イットリウム（Y₂O₃）を選んだ。アークプラズマを10時間以上発生させた結果、La₂O₃を添加した電極は、その損耗量と直径の減少量が少ないことから、電極材料として有望であることが分かった。

次に、プラズマトーチの運転条件として、電極損耗量の電流依存性やプラズマガス中の酸素濃度の影響を実験的に調査した。その結果、単位通過電気量あたりの損耗量（損耗率）は、電流の増加とともに急激に増加した。これは、電極の冷却能力は冷却構造や冷却水の流量などで決定されるため電流に関わらずほぼ一定と考えられるが、アークプラズマから電極への入力エネルギーは電流の増加により増加するためと考えられる。プラズマトーチの電極損耗量を低減し、その寿命を延ばすためには、電極の冷却が重要な要素となる。また、プラズマガス中に酸素がわずかでも存在すると、電極は酸化反応により著しく損耗する。電極周辺に酸素が混入しない構造にすることが重要である。

② 加熱用プラズマトーチの大電流化

大規模な産業加熱へアークプラズマ加熱を応用するた

めには、プラズマトーチの大容量化が重要である。ロッド形プラズマトーチでは、アークプラズマの電圧はアークプラズマの長さでほぼ決定される。このため、電圧で出力を大きくするためには、アークプラズマを長くする必要がある。しかし、アークプラズマを長くすると、放射エネルギーが大きくなり耐火物の寿命が短くなること、アークプラズマが不安定になりやすいこと、また、炉の大きさの制約を受けること、などが懸念されるため現実的ではない。このため、ロッド形プラズマトーチの大容量化のためには、大電流化が重要になる。

当研究所は、1988年度から1990年度にかけて、世界トップレベルの10kA級プラズマトーチの開発を目指し、新日鉄と共同研究を実施し、図6-2-1に示すリング形のタングステンを陰極に使用したプラズマトーチが、10kA級の大電流に対し必要な陰極面積を有し、その時に発生する熱応力に耐えることを明らかにした⁽³¹⁾。

プラズマトーチの電極材料には、電極損耗の実験結果を踏まえ、La₂O₃、または、ThO₂を添加した2種類のW陰極を準備した。実験では、0.1～11kAの直流電流を、60～300秒間通電しアークプラズマを発生させ、これを反復した。その結果、La₂O₃陰極の場合には5.1kAで積算34分、11.4kAで積算3分のアークプラズマを、ThO₂陰極の場合には5.7kAで積算10分のアークプラズマを安定に発生できた。この結果から、陰極は10kA級のアークプラズマの発生中に生じる定常的な熱応力や、陰極の温度分布が平衡に達する時間に比べ短い時間での5kA程度の電流の昇降により発生する過渡的な熱応力に耐えると判断した。

また、実験時には通電が終了する毎に、陰極の型を取ることで陰極の損耗量を計測した。その結果、La₂O₃を添加したタングステン陰極の損耗率は、電流6kAで $(2\sim 3)\times 10^{-6}$ (g/(A・s))、10kAで 21×10^{-6} (g/(A・s))と、アーク電流の増加に対し急増した。損耗率の電流依存性は、小電流域で得られた結果と定性的に同じ傾向である。

さらに、実験時には望遠接写が可能な光学計測系を構築し、約10mほど離れた2か所の地点から陰極点の状況を高速ビデオ（400コマ/秒）などで観察した。その結果、陰極点は、電流3kA以下では1か所に安定に、3kAを超えると2～4箇所に分散して形成された。その状況を図6-2-2に示す。また、これらの画像から、陰

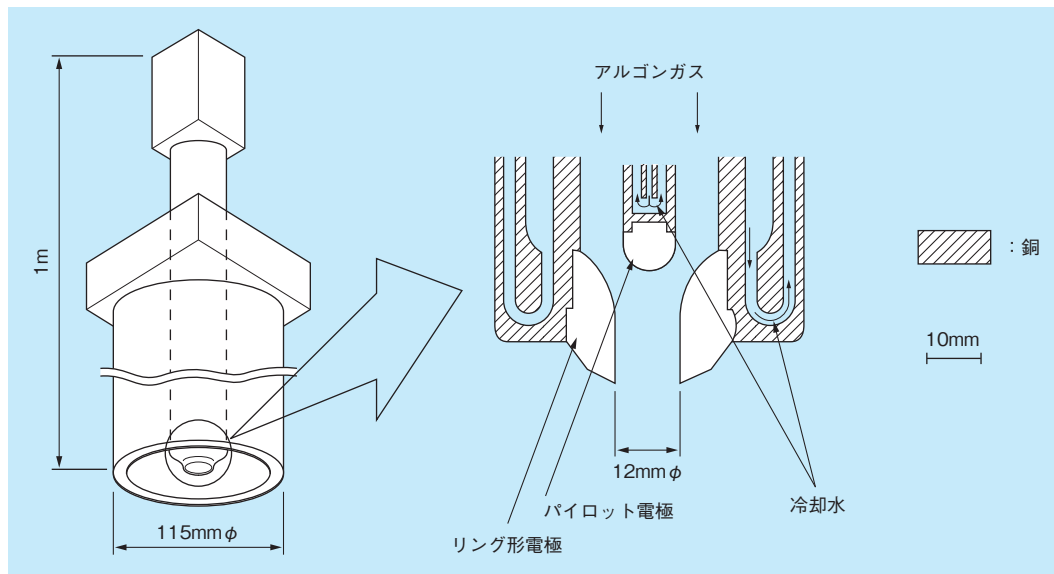


図6-2-1 プラズマトーチとその電極形状

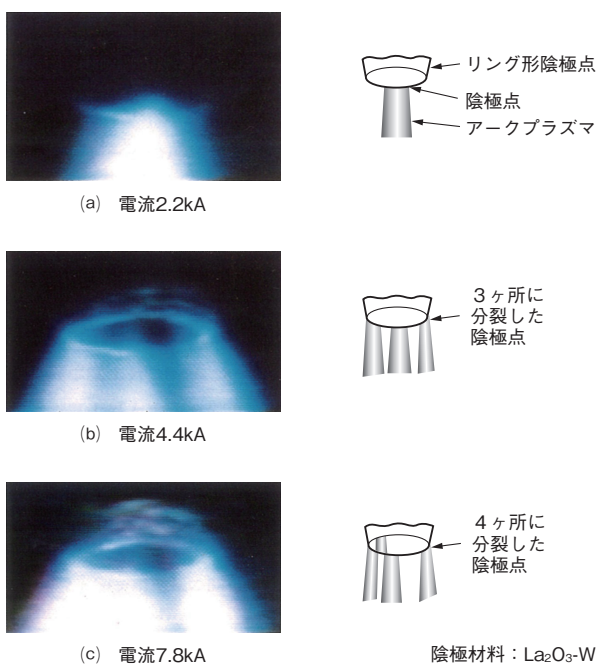


図6-2-2 高速度ビデオで観察したプラズマトーチ陰極におけるアークの発生状況

極点の面積はアーク電流に比例して増加し、陰極点での平均電流密度は $6 \sim 9 \text{ kA/cm}^2$ の範囲にあった。

以上のように、大容量プラズマトーチの設計に資するデータを取得することができた。

③プラズマトーチの運転コストの低減

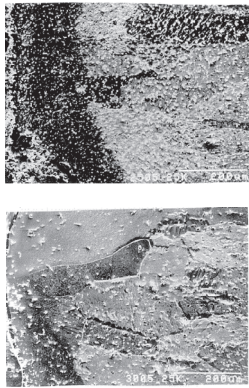
タングステン系の合金を陰極とするプラズマトーチで

は、通常プラズマガスとして Ar が用いられる。運転コストを低減するため、Ar に代えて安価な窒素 (N_2) にすることが考えられる。しかし、この場合には、電極の損耗量が増加することが懸念される。そこで、プラズマガスを Ar から N_2 に代えた場合の電極損耗現象を実験的に明らかにし、電極の損耗に伴うコストとガスのコストを比較評価した⁽³²⁾。

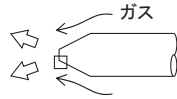
実験では、 La_2O_3 を添加した W を陰極とし、直流 400A の移行形のアークプラズマを積算で 100 時間まで安定に発生させ、電極損耗現象に関し以下を明らかにした。

まず、Ar に代え N_2 を使用した場合、電極損耗量は、25 ~ 50 倍に増加する。これは、アークプラズマから電極に伝わる熱が増加し、損耗を防ぐ添加材 La_2O_3 が図 6-2-3 に示すように電極の先端で減少するためと考えられる。ここで、電極の冷却の効果を確認するため、電極の直径を 6mm から 7mm へと 2 割ほど太くすると（断面積で 1.4 倍）、電極損耗量を 0.3 ~ 0.6 倍に低減できた。電極の冷却能力は、電極の寿命に重要な因子であることが明らかになった。

次に、Ar と N_2 を用いた場合について運転コストの比較を行った。運転コストには、ガス、電極と電力を考慮した。その結果、 N_2 を用いれば約 2 割のコストダウンが可能であることが明らかになった。



(1) Arガスの場合
先端の0.2mm程度の領域で
添加物(白い点)が減少している。



(2) N₂ガスの場合
Arガスの場合に比べ添加物
(白い点)が著しく減少している。

200µm

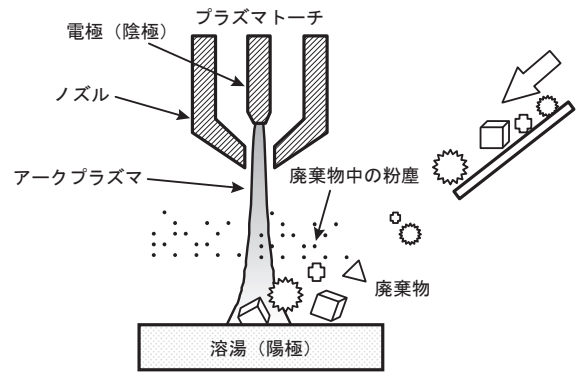


図6-2-3 電極先端部断面の組織の電子顕微鏡による拡大写真

(2) 熔融処理時のアークプラズマの安定性

① アークプラズマの安定性を損なうメカニズム

移行形アークプラズマによる加熱は、非移行形アークプラズマによる加熱に比較して、ガス流量（排ガス量）が少ないという特長がある。しかし、低レベル放射性雑固体廃棄物などの廃棄物の処理では、保温材などの不燃物を金属と同時に処理する必要があるため、プラズマ熔融炉に不燃物などが投入されたとき、アークプラズマが不安定になり、消弧したり、加熱パワーが変化したりすることがある。このため、廃棄物が投入されたときのアークプラズマの変化について理解しておくことは重要である。

アーク電圧は、アークプラズマを形成している電極間の電圧であり、加熱対象が一方の電極となる移行形アークプラズマにおいては、プラズマトーチの電極と加熱対象間の電圧である。アーク電圧は、アークプラズマの安定性や加熱能力と密接に関わる重要なパラメータであり、計測が容易である。このため、アーク電圧は、アークプラズマの安定性の指標となり得る。

移行形アークプラズマで廃棄物を熔融中にアーク電圧が変化する機構は、概ね図6-2-4に示すとおり、4つである⁽³⁵⁾。

まず、「1. プラズマの冷却による導電性の低下」について述べる。6-1-1項で述べたように、アークプラズマの導電率は温度に強く依存する。廃棄物の投入により、アークプラズマが冷却されるとアークプラズマの導電率は急速に低下し、アーク電圧は上昇する。正確にはアークプラズマは、周囲条件により形態や性質が変化するため、局所的な導電率の低下が常にアークプラズマ全体の

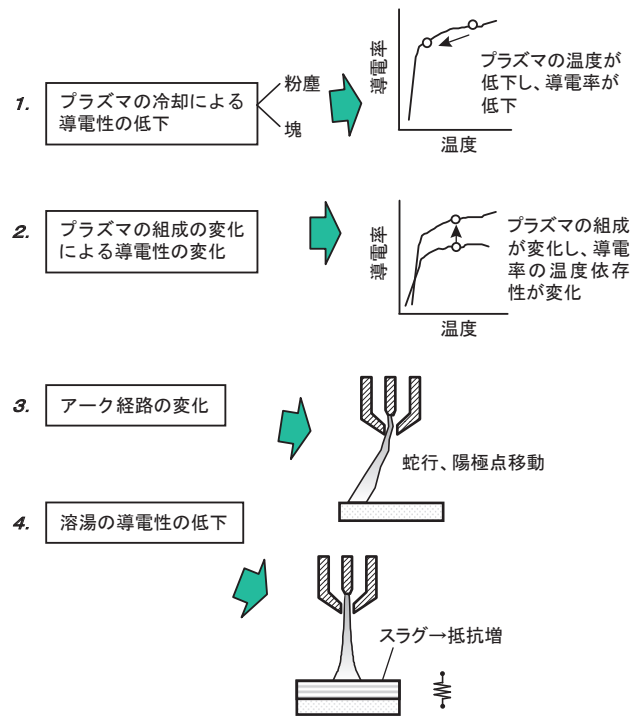


図6-2-4 廃棄物投入時のアーク電圧の変化の機構

抵抗を増加させるとは限らない。しかし、廃棄物がアークプラズマに接したときにアークプラズマ内で起こる現象は、上記のように単純には説明できないが、大筋では、このように理解しておいて差し支えない。

次に、「2. プラズマの組成の変化による導電性の変化」について述べる。投入された廃棄物は、アークプラズマから熱を奪いながら、急速に熔融・気化する。このとき、ガス化した廃棄物は、アークプラズマの内部に混入し、アークプラズマの組成を変化させる。この結果、アークプラズマを構成する高温気体の輸送特性が変化し、アーク電圧も変化する。ただし、廃棄物投入に伴うガス組成の変化が、アーク電圧を上昇させる方向に作用するのか、あるいは低下させる方向に作用するのかは、廃棄

物の成分により異なることに注意が必要である。一般的には、金属を多く含む廃棄物の場合、金属蒸気が混入することになり、6-1-1項に示したように、アークプラズマの導電性を向上させ、電圧を低下させる方向に作用し、後述のように、可燃物を多く含む場合、解離エネルギーの高い多原子分子の混入に伴う温度低下により、導電性が低下し電圧を上昇させる方向に作用する。

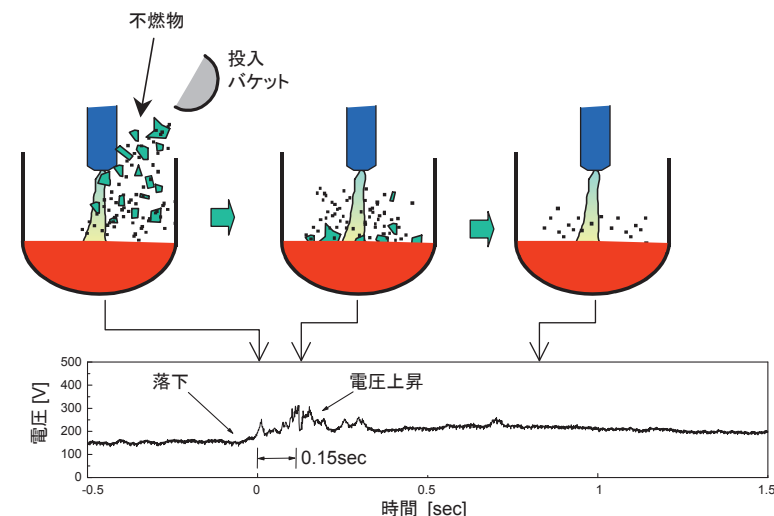
次の「3. アーク経路の変化」とは、特に低ガス流量で金属に比較して導電性の低いスラグを加熱している場合に起こりやすい現象で、炉内への廃棄物の投入に伴い、加熱対象表面の陽極点が移動し、アークプラズマが斜めになったり蛇行したりすることを指す。実質的にアークが長くなるため、電圧は上昇する。陽極点は急激に移動する場合があります、アークプラズマの消弧に至りやすいため注意が必要である。

最後に「4. 溶湯の導電性の低下」について述べる。

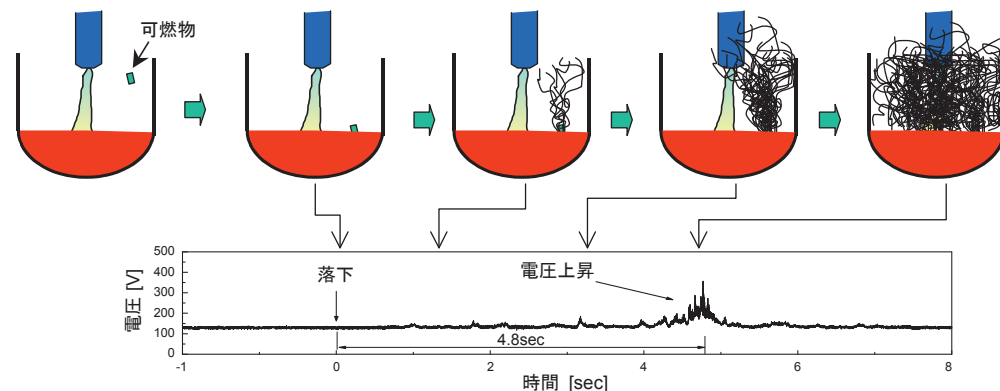
本来、アーク電圧に電極内の抵抗分に相当する電圧は含まれていない。また、通常の電極系ではこの抵抗は十分に小さいので無視できる。しかし、廃棄物溶融炉では、一方の電極となるスラグの抵抗が無視できない程度に大きくなることもあり、この場合、電極間電圧は真のアーク電圧とは言えない。しかし、この抵抗はスラグの組成、温度、体積などにより時々刻々変化し、その値を特定することは困難であるため、筆者らは、便宜的に、スラグの電圧降下を含む電極間電圧をアーク電圧と呼んでいる。当然ながら、スラグの抵抗分が増えるとアーク電圧も上昇する。

②可燃物や不燃物投入時のアーク電圧に生じる現象

投入する廃棄物の種類により、アーク電圧の上昇の様相が異なる例として、図6-2-5に(a)不燃物としてケイ酸カルシウム系保温材、(b)可燃物としてゴム手袋を炉内に



(a) 不燃物投入時のるつぼ内状況と電圧波形の例 (ケイ酸カルシウム系保温材 200g)



(b) 可燃物投入時のるつぼ内状況と電圧波形の例 (ゴム 2.5g)

図6-2-5 廃棄物投入時の電圧波形例

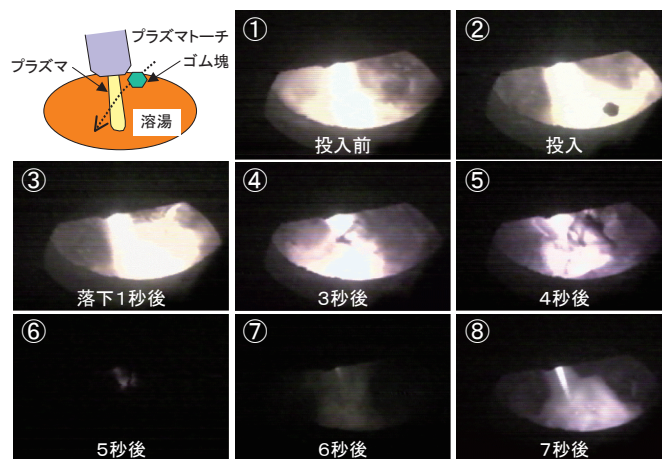


図6-2-6 ゴム塊投入時の炉内の様相

投入したときの電圧波形を、それぞれ示す⁽³⁶⁾。同図(a)の場合、投入直後に急峻な電圧上昇が見られ、その後は緩やかな上昇が見られる。これは、主に前述の機構1、4が対応しているものと考えられる⁽³⁷⁾。一方、同図(b)の場合、廃棄物が溶湯に落下してから、約4秒後から急激な電圧上昇が見られ、短時間に電圧上昇が収まっている。また、わずか2.5gの廃棄物で大きな電圧上昇をもたらしていることが分かる。図6-2-6は、図6-2-5(b)の電圧波形に対応する炉内の様相である。電圧上昇に対応する投入から4～5秒後に、炉内に熱分解生成物(すす)が大量に発生していることが分かる。このことから、図6-2-5(b)の電圧上昇の主要因が、熱分解生成物のプラズマへの混入によるものと考えられる。炉内での可燃物の熱分解の様相は、可燃物の種類により異なる。ゴムやプラスチックは急速に熱分解が進むため、少量でも電圧を上昇させる効果が高いが、熱分解しにくい木片の場合、熱分解が比較的ゆっくりと進行するため、電圧への影響が小さい。

- ③ 運転パラメータが可燃物の投入時のアーク電圧に及ぼす影響
電圧上昇を抑制し安定な加熱を継続できる方策を検討

するため、表6-2-1に示すようにプラズマ炉の運転条件を変えて電圧上昇を調べた。まず、炉内へ注入する空気量を増加させると、すすの濃度が低下し、さらに、るつぽからすすの排出が促進されることがビデオで観察された。この結果から炉内の分解生成物の濃度が低下するため、電圧上昇は抑制される。また、一般的にプラズマガス流量を増加させるとアーク電圧は上昇する。これに加え、アークプラズマの流速が増し周辺の雰囲気のアークプラズマ内に巻き込む効果が強くなり⁽³⁸⁾、分解生成物を内部に取り込みやすくなることにより、アーク電圧が上昇すると考えられる。さらに、アーク電流を増加させるとアークプラズマの保有熱量の増加により、分解生成物の混入による温度低下が抑制される効果、あるいは電流の増加に伴ってアークプラズマの粘性が高まり分解生成物のプラズマ内への混入が抑制される効果により、アーク電圧の上昇が抑制されたと推定される。

実用炉では、アーク電流は、炉の処理能力などで決定されるものと想定される。しかし、プラズマガス流量はプラズマトーチの仕様の範囲内なら、また、炉内へ注入する空気量は排ガス処理装置の処理能力の範囲内なら制御しやすい運転条件であるので、これらを制御することは、可燃物を処理する際にはアーク電圧の上昇を抑制

表6-2-1 可燃物投入時のアーク電圧上昇とプラズマ炉運転条件の関係

プラズマ炉の運転条件	増加させた時のアーク電圧の増減	原因
炉内注入空気量	電圧上昇が低減	炉内の分解生成物の濃度が低下するため。
プラズマガス流量	電圧上昇が増加	アークプラズマ内への分解生成物の混入量が増加するため。
アーク電流	電圧上昇が低減	アークプラズマの保有熱量が増加し、分解生成物による冷却が低減するため。

する有効な方法と考えられる。

6-2-2 交流プラズマトーチにおける発生・制御技術

(1) 交流プラズマの特長および課題

6-2-1 項では直流プラズマに関する特性を述べた。この直流プラズマは主に導電性物質を加熱する際に利用される。直流プラズマを用いて非導電性物質のみを加熱する場合は、非移行形プラズマを利用するかもしくは複数本のプラズマトーチ間に発生させた移行形プラズマを利用することが考えられる。しかし、非移行形プラズマでは加熱効率が低い、移行形プラズマではトーチ内電極（陽極）の損耗が著しい、という課題がある。

一方、複数本のプラズマトーチ間に発生させた移行形の交流プラズマを利用する場合、それらのトーチ内電極の損耗量は直流プラズマトーチの陽極の損耗量より少ない。このため、交流プラズマは非導電性物質を加熱する際に利用されることが多い。例えば、廃棄物の焼却施設から排出される焼却飛灰の溶融・無害化⁽³⁹⁾、ガラス屑の溶融・リサイクル⁽⁴⁰⁾に利用されている。また、プラズマにガス（メタン、エチレン）を吹き込みカーボンブラックのナノ粒子を合成している例⁽⁴¹⁾もある。

また、上記のように複数本のトーチ間で発生させて利用できる交流プラズマには、直流プラズマ利用時に必要な炉底電極は不要となる。このため、大幅な改造を行わずに既存プロセスに取り付けやすく、現行加熱技術の代替技術として利用される場合もある。例えば、製鋼プロセスの一つのレードルまたはタンディッシュという装置に複数本のトーチを取り付け、そのトーチ間に形成された交流プラズマを用いて溶鋼加熱を行っている⁽⁴²⁾⁽⁴³⁾。

しかし、この交流プラズマを利用する際には次の二つの課題がある。

①交流プラズマトーチ内の電極が損耗しやすい

直流プラズマトーチ内の陽極に比べれば損耗量が少ないものの、陰極に比べれば損耗量が多い。

②直流プラズマに比べてプラズマが不安定になりやすい

交流プラズマの電流は正極性と負極性が交互に流れるので、その切り替わる瞬間は電流が零になる。この時点でプラズマの導電性が低くなり不安定になりやすい。

本項では、これらの課題を解決するための具体的な方策について述べる。

(2) 電極損耗現象と電極設計手法

交流トーチの電極損耗については、2,000～8,000Aの大電流領域における検討⁽⁴⁴⁾～⁽⁴⁶⁾が行なわれているものの、これらは実験的検討に終始している。このため、電極損耗現象を解明し、さらに、プロセスで要求される電流などの運転条件に応じ、電極損耗を低減できる設計手法を開発した。

①電極損耗現象

電極損耗の低減化方策を明らかにするためには、電極材料および電極形状をパラメータとすることが考えられる。電極材料については、直流トーチにおいて電極損耗が少ないと報告されているタングステン合金を選定し、電極の直径や長さなどの形状をパラメータとして検討を行った⁽⁴⁷⁾⁽⁴⁸⁾。

50Hzの移行形交流プラズマを大気中で1～3時間連続で発生させ、アーク電流および電極サイズをパラメータとした場合のトーチ電極の損耗量を図6-2-7に示す。いずれの電極サイズの場合も、アーク電流の増加とともに損耗量は増加した。また、電極径が8mmや10mmの場合は450～550Aで損耗量は急増したが、電極径が13mmの場合は550Aでも損耗量の急増は見られなかった。実プロセスを考慮すると、損耗量が急増しない範囲を把握する必要がある。以下、今回の実験条件において損耗量が急増しない範囲（5mg/h以下）について、電極先端温度に着目し考察する。

冷却水によるトーチ電極からの抜熱量（実測値）などを用いて電極における熱バランスを計算した。また、そ

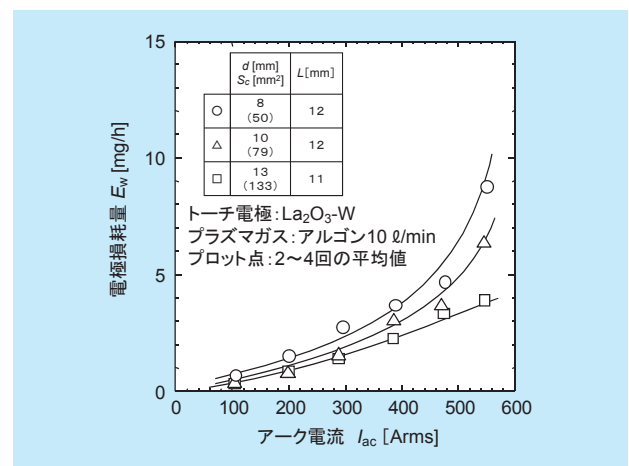


図6-2-7 電極損耗量のアーク電流依存性

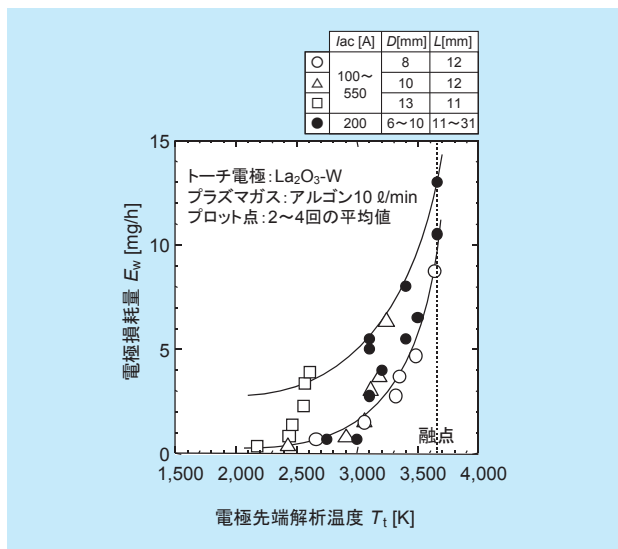


図6-2-8 電極損耗量の電極先端温度依存性

これらの結果と実験後の電極先端のアーキ痕跡面積を用いて電極内部の定常熱伝導解析を行い、電極先端温度を計算した。この電極先端解析温度と電極損耗量との関係を図6-2-8に示す。ばらつきはあるものの、電極先端温度が低いほど損耗量が低く抑えられている。また、損耗量の急増しない範囲を上述の5mg/h以下と仮定すれば、その範囲に抑えるためには電極先端解析温度を3,000K程度以下（融点：3,660K）に低減すればよいことが分かる。なお、電極損耗現象が電極蒸発現象である⁽⁴⁹⁾と仮定して、タングステンの蒸発速度から電極損耗量を試算したところ、上記と同程度の3,000Kを超えるあたりから損耗量が急増した。

②電極設計手法

上述の結果から得られた知見を基にして、電極損耗量を低減できる適正な電極サイズを設計する手法を考案し、さらに大電流領域2,000Aの電極サイズの設計を試みた^{(48) (50)}。

まず、電極サイズ設計手法について述べる。上述の電極における熱バランスの計算結果から、平均電極降下電圧（陰極降下電圧と陽極降下電圧の相加平均）の電極先端温度への依存性が図6-2-9のように求められる。この平均電極降下電圧と電極先端温度との関係と、前述の電極損耗量と電極先端温度との関係などを用いて電極サイズを設計する。そのフロー図を図6-2-10に示す。概略次の通りである。まず、図中の右上(a)の電極損耗特性

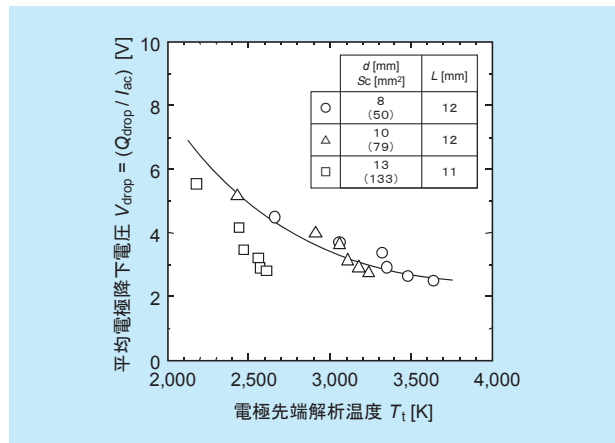


図6-2-9 平均電極降下電圧の電極先端温度依存性

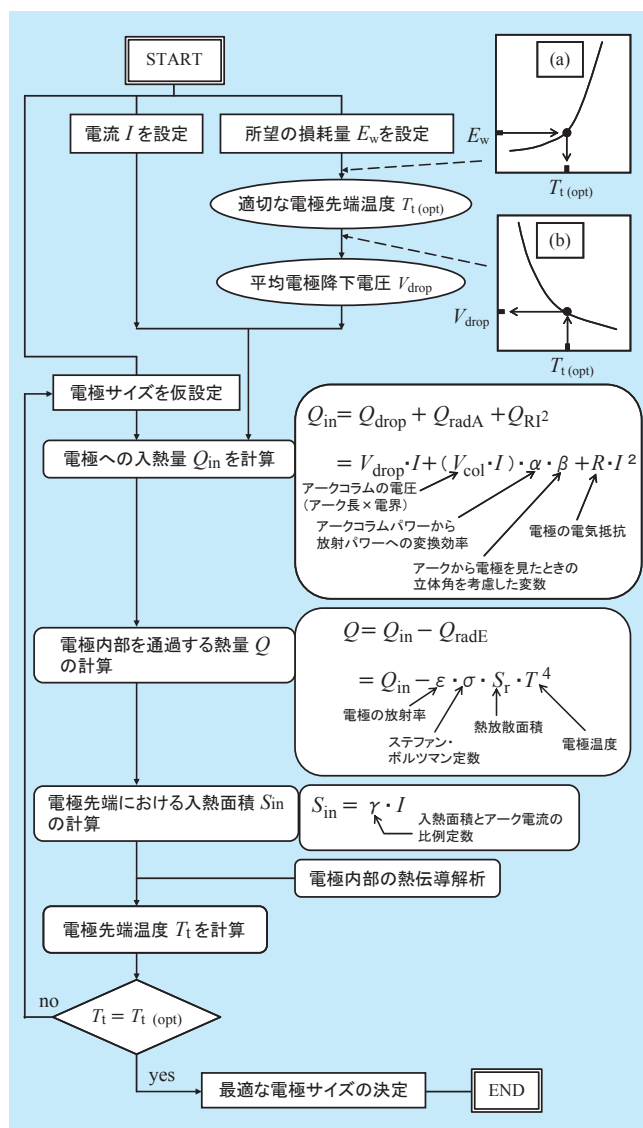


図6-2-10 トーチ電極サイズの設計手法フロー図

(例えば、図 6-2-8) を用いて、所望の損耗量にするための適切な電極先端温度 $T_{i(opt)}$ を選定する。次に、図中の右上(b)の特性 (例えば、図 6-2-9) を用いて、電極先端温度が $T_{i(opt)}$ のときの平均電極降下電圧 V_{drop} を算出する。また、あらかじめプロセスに必要なアーク電流値を設定しておき、また、電極サイズ (直径、長さなど) を仮に設定しておく。上記検討で得られた諸量を用いて電極への入熱量 Q_{in} を求める。次に、電極先端から電極内部に入る熱量 $Q (= Q_{in} - Q_{radE})$ を求めるために、電極先端での出熱量として Q_{radE} を求める。ここで、 Q_{radE} は、電極から放射によって失われる熱量である。熱量 Q の電極先端における入熱面積 S_{in} は、アーク電流値と比例定数の積として求める。これらの結果を用いて電極内部の熱伝導解析を行い、このときの電極先端温度 T_i を計算する。この計算された電極先端温度 T_i と最初に選定した電極先端温度 $T_{i(opt)}$ とが等しくなるまで、電極サイズをパラメータとした計算を続ける。以上により、プロセスに必要なアーク電流に対し、所望の電極損耗量以下とする電極サイズを決定できる。

次に、この考案した手法を用いて、大電流領域 2,000A の電極サイズの設計を試みた。ここでは所望の損耗量を 5mg/h とするが、この電極寿命は約 1,000 時間であり実用レベルと考えられる。仮の電極サイズとして電極径を 23mm ϕ および電極長を 6mm とし、電極先端は平坦状と設定した。この仮の設定値は、文献⁽⁵¹⁾ でアーク電流が 2,000A の場合に用いられている電極サイズである。これらの諸量などを用いて、電極先端から電極内部に入る熱量 Q は 8.5kW と算出された。なお、この熱量 Q は電極内部を通過して冷却水により抜熱される。この冷却水による電極からの抜熱量は実測することができ文献⁽⁵¹⁾ の結果は 9.7kW 程度であり、今回の算出結果 8.5kW とは 1 割程度の差異が認められるものの、概略同レベルの値と考えられる。これらの値を用いて、電極内部の熱伝導解析を行い、このときの電極先端温度 T_i を計算し、この温度と今回選定した 3,000K とが等しくなるまで、電極サイズをパラメータとした計算を続けた。なお、パラメータである電極径 (電極断面積) および電極長の範囲はそれぞれ 15 ~ 35mm ϕ (177 ~ 962mm²) および 5 ~ 15mm とした。ここで、電極径および電極長を変化させると、前述の諸熱量が変化するため電極先端からの入熱量 Q も変化するが、このことも考慮して

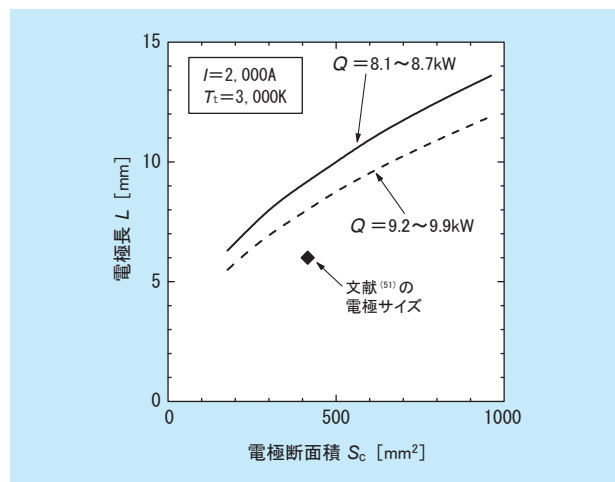


図6-2-11 電極サイズの設計例

計算を行った。なお、今回の計算の範囲では電極先端からの入熱量 Q は 8.1 ~ 8.7kW であり、前述の 8.5kW から最大 5% 程度変化した。

以上のような解析を行い電極先端温度が 3,000K となるように電極サイズ (電極長 L 、電極断面積 S_c の組み合わせ) を求めたものを図 6-2-11 に実線で示す。この実線上の電極サイズを「最適な電極サイズ」と呼ぶことにする。この図の実線より下の部分の電極サイズ領域が、電極損耗の低減化という観点からは「安全領域」と考えられる。また、文献⁽⁵¹⁾ での Q の実測値は前述の通り 9.7kW であるので、先程と同様に電極径および電極長の変化による熱量 Q の変化 (9.2 ~ 9.9kW) も考慮に入れて、電極先端温度が 3,000K となるように電極サイズを求めたものを図 6-2-11 に破線で示す。この破線は実線よりも下方にあるので前述の安全領域が狭くなっていることが分かる。なお、比較のために文献⁽⁵¹⁾ の電極サイズを同図中に◆印で示す。この◆印は同図の実線および破線よりも下方にあるので文献⁽⁵¹⁾ の電極サイズは安全領域にあると考えられる。文献⁽⁵¹⁾ では損耗量は明記されていないが、陰極として用いたときと同程度の損耗量と記述されているので、損耗量はかなり小さいと考えられ、◆印が今回求めた安全領域に存在することが理解できる。

(3) 電流零点におけるプラズマの安定化技術

① 電流零点における不安定現象

電流零点において交流プラズマを安定化させる方策と

して、電流零点における電流の時間変化率を大きくして、電流零点直前のプラズマの導電性を高く維持しつつ、電流零点直後に電極間に急峻な過渡回復電圧を発生させてプラズマの再発弧を容易にすることが考えられる。これまで実規模のプロセスで使われている具体的な安定化方策は、交流電流を整流して一旦直流に変換し、これをサイリスタ制御により矩形波交流電流に変換するものである⁽⁴⁶⁾。この場合、確かにプラズマは安定化するが高価な整流器などを用いるため設備費が高い。また、この場合の電源構成（例えば、交流電源の電源電圧など）については特に最適化検討を行っておらず、オーバースペックな部分があれば、さらにコスト高になる。

そこで、交流プラズマの簡易な安定化方策としてパルス重畳法⁽⁵²⁾を提案し、その有効性を明らかにした。この方法は、**図6-2-12**に示すように、電流零点だけにパルス電流を重畳し、電流零点付近だけの電流の時間変化率を高くする方法である。また、運転開始時の炉内は、常温（300K）であるが、運転時間の経過に伴い炉内はプラズマからの発生熱により1,300K程度⁽⁵³⁾の高温雰囲気になる。このような場合のプラズマ安定化方策の最適化（例えば、設定電源電圧の最適化）を行うためには、プラズマの安定性に及ぼす雰囲気温度の影響の解明が必要である。ここでは、実プロセスで利用されることが多い移行形プラズマを対象として、雰囲気温度がプラズマ

の安定性に及ぼす影響について検討するとともに、その際のパルス重畳法の適用効果を明らかにした⁽⁵⁴⁾。

雰囲気温度を制御できるチャンバー中でプラズマトーチと対向電極の間に電流100～500A（実効値）、周波数50Hzの移行形のアークプラズマを発生させた場合の、電流零点近傍のアーク電流・電圧波形の一例を**図6-2-13**に示す。ここで、電流が零値から増えて図中の○印で再発弧して電流が急増しアーク電圧が急に低下するときの電圧を「再発弧電圧 v_b 」とした。アーク電流の増大とともに再発弧電圧 v_b が減少し、低い電源電圧でも安定に交流プラズマを発生できた。

また、アーク電流を500A一定とし、雰囲気温度が異なる場合の交流プラズマの安定性を**図6-2-14**に示す。

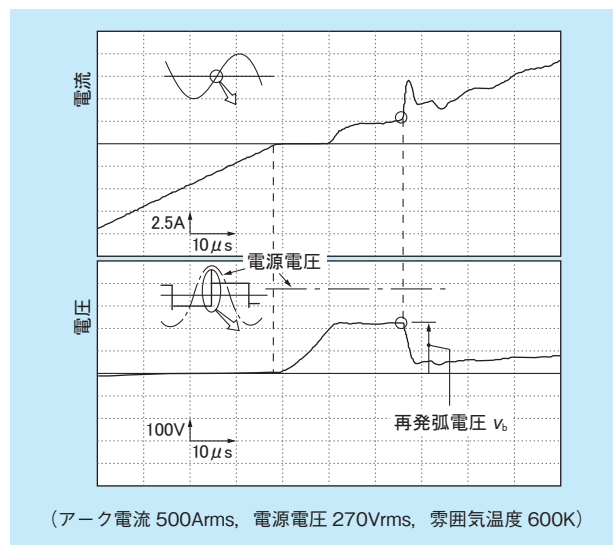


図6-2-13 アーク電流・電圧の波形例

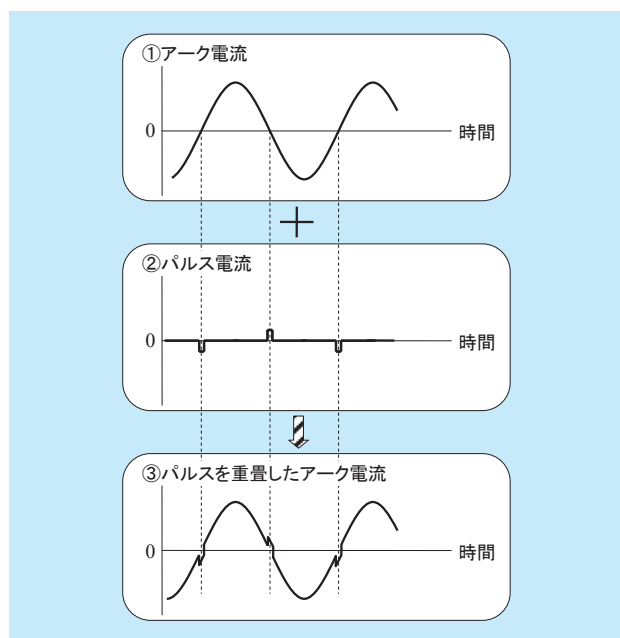


図6-2-12 パルス重畳法の模式図

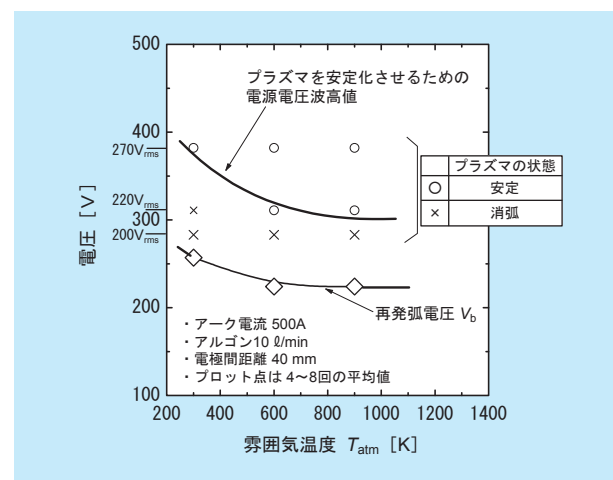


図6-2-14 移行形プラズマの安定性の雰囲気温度依存性

ここで、5分以上プラズマが継続した場合を安定とみなし、この時間未満で消弧したものを不安定とみなした。不安定と評価したほとんどのケースは数～数十秒で消弧した。雰囲気温度を600K程度まで上昇させるとプラズマ安定化に必要な電源電圧が8割程度に低下するが、それ以上の雰囲気温度では変化せず、実プラズマ炉内相当の1,300K程度でも同程度と推測される。このとき、再発弧電圧 v_b も同様の傾向を示している。ここで、流れ始めているアーク電流 I とアーク電圧 V との積の時間積分値と損失 N の時間積分値との差分がプラズマのアークコラムに注入され、アークコラムに蓄積されるエネルギーが増加して、あるレベルに達すると再発弧が起きると考えられる。このため、電流が流れ始めてから再発弧が発生するまでの電流・電圧実測値およびMayrアークモデル⁽⁵⁵⁾を用いて、プラズマのアークコラムにおけるエネルギーバランスを求めた。その結果、雰囲気温度の上昇とともに蓄積エネルギーの増分 Q （再発弧に必要なエネルギー）が減少することが明らかになった。これは、プラズマガスとして用いているアルゴンのエネルギー密度（単位体積当たりのエンタルピー）の温度依存特性に起因すると考えられる。

さらに、雰囲気温度の差がプラズマのアークコラムの蓄積エネルギーに与える影響を調べるため、Ha-Stark幅法⁽⁵⁶⁾を用いて電子密度を算出した。電流零点近傍の電子密度はアークプラズマの安定性（消弧/再発弧）に多大な影響を与える物理パラメータである⁽⁵⁷⁾。その結果、雰囲気温度が300Kの場合に比べて600Kの方が電子密度が若干高くなることが分かった。このことから、雰囲気温度が高くなると、電流零点におけるプラズマのアークコラムの蓄積エネルギーが高くなることが推測される。

②パルス重畳法の適用効果

パルス重畳法を適用した場合（パルス電流：5～15A）のプラズマの安定性について調べたところ、パルス重畳法を適用しない場合に比べて7～8割程度の低い電源電圧で安定化できた。例えば、アーク電流が500Aの場合、プラズマ安定化に必要な電源容量を110kVAから90kVAへと20kVA低減できた。これらのことから、パルス重畳法を適用することによって、パルス電源容量

（1～2kW）を考慮してもプラズマ安定化に必要な電源容量を低減できる。また、再発弧電圧、安定化に必要な電源電圧ともに雰囲気温度の影響はほとんど受けなかった。つまり、パルス重畳法を適用した場合、実プラズマ炉内相当の1,300K程度におけるプラズマ安定化に必要な電源電圧は、雰囲気温度が300Kの場合と同程度と推測される。このことから、実プロセスにパルス重畳法を適用すると、炉内温度が300K程度である運転開始時から、炉内温度が1,300K程度に高くなる運転定常期まで、常に低い電源電圧における運転が可能であり操業を簡易にできることが期待できる。

また、電流零点後再び電流が流れ始めてから再発弧が発生するまでのアークコラムの蓄積エネルギー増分を求めたところ、パルス重畳法を適用することにより、パルスなしに比べてアークコラムの蓄積エネルギー増分が減少し、また雰囲気温度の影響は受けなかった。これは、パルス重畳により電流零点におけるアークコラムの温度が高くアークコラムの蓄積エネルギーが高いためと考えられる。また、パルスを重畳すると、電流零点直前（～5 μ s程度）まで、電子密度が高い値を維持していることが分かった。

③材料創製への応用を想定した交流プラズマの安定性

交流プラズマは、上述のような高温の炉内で利用することに加え、非導電性のセラミックス粉の熔融や加熱への応用も期待される。当研究所でも5章で述べたように、アークプラズマの高温場での熔融蒸発などの熱的な現象と蒸発した原子の凝縮の過程での化学反応を制御した材料創製に関わる研究開発を推進している。そこで、物性値が既知のセラミックスであるアルミナ（平均粒径：15 μ m）を、70Aの交流プラズマに11～84g/minと比較的大きな注入速度で注入した時の安定性を調べた⁽⁵⁸⁾。その結果、アルミナを注入すると電流零点直前でアークプラズマのエネルギー密度が高くなること、さらに、Al原子の電離により電子密度が高くなることにより、交流プラズマは、アルミナを注入しない場合より安定化することを明らかにした。

以上のように、高温場での利用や材料創製などへの応用においても、交流プラズマの安定性が確保できることを明らかにした。

6-3 アークプラズマの計測診断技術

6-3-1 輝線スペクトルの自己吸収を考慮した温度計測技術

(1) アークプラズマの温度計測技術

アーク放電の温度計測手法の中で、比較的多く利用される方法として二線強度比法⁽⁵⁹⁾が挙げられる。これは、アークを分光観測して得られる原子などの異なる二本の輝線スペクトルの強度比から温度を計測する比較的簡易な手法である。しかし、アークが光学的に厚い場合には、観測する輝線スペクトルに自己吸収が生じるので、この現象を考慮する必要がある。例えば、数十kA級の超大電流領域のアークを対象とする際には注意を払う必要がある。超大電流であるため、アークの直径が太く、また、観測するスペクトル線の原子なども多く含んでいるためである。この自己吸収が無いと仮定して二線強度比法を用いて計測された温度（以下、見かけの温度と記す）は実際の温度とはかなり異なることが懸念される。本項では、当研究所が開発した輝線スペクトルの自己吸収を考慮したアークの温度計測技術⁽⁶⁰⁾を紹介するとともに、

この手法を50kA級超大電流アークに適用した結果^{(60)~(62)}についても述べる。

(2) 自己吸収を考慮したアークの温度計測技術および50kA級アークジェットへの適用結果

計測手法の原理図を図6-3-1に示す。「(a)自己吸収特性計算と見かけの温度の実測」と「(b)粒子組成の計算と電子密度の実測」を行うことにより、実温度と電極蒸気混入率を同時計測する。つまり、自己吸収がある時の見かけの温度は、真の温度と金属蒸気混入率の関数となるので、二線強度比法で見かけの温度が得られれば、これを与える真の温度と金属蒸気混入率の組合せ((a))が決まる。また、電子密度は真の温度と金属蒸気混入率の関数となるため、電子密度が実測できればこれを与える真の温度と金属蒸気混入率の組合せ((b))が決まる。これらの両者を満たすところが、真の温度と金属蒸気混入率となる。

次に、これを50kA級アークジェットに適用した結果について述べる。ここで、アークジェットとは、アークが点弧している電極表面から噴出する高速流の電磁流体である。アークジェットは、その周辺に存在する碍子装

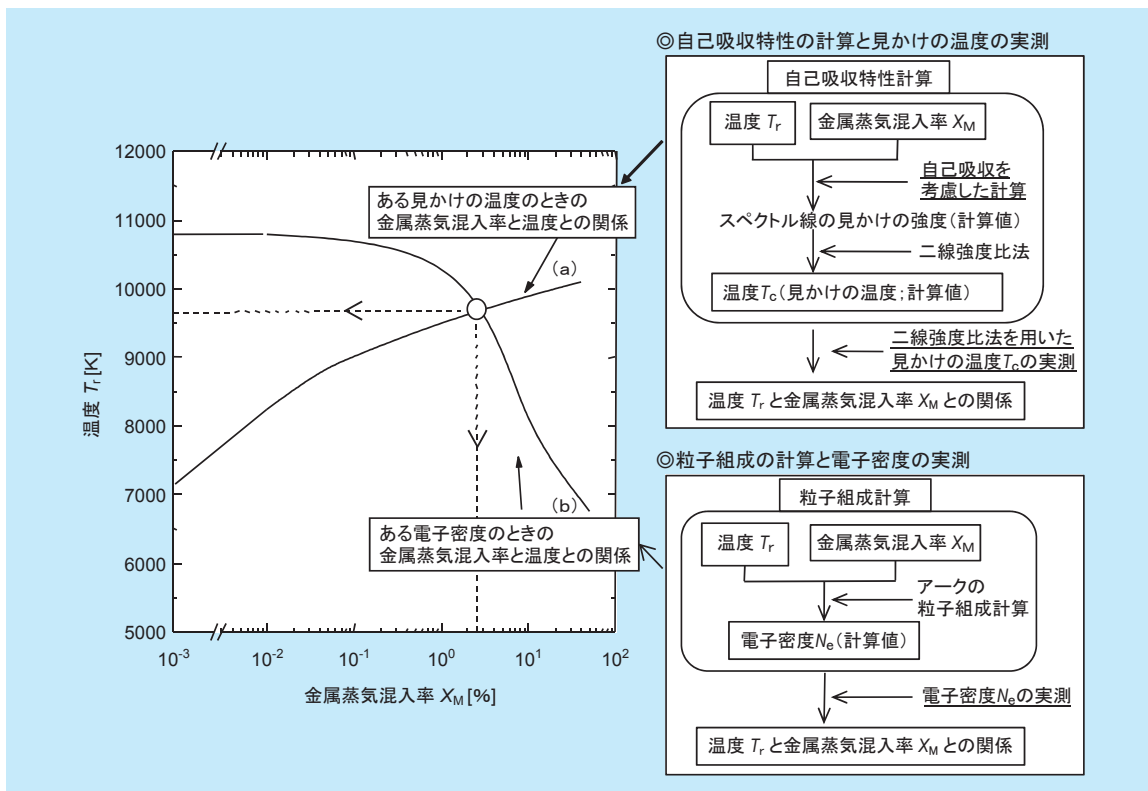


図6-3-1 計測手法の原理図

置などの電力機器に熱的ストレスを与えるため、大電流アークジェットの温度、流速、挙動などの基礎特性を解明することが望まれている。上述の計測手法を用いて、電力流通設備で使用されている鉄、銅およびアルミニウムの電極から噴出する50kA級アークジェット部（電極から10cmの位置）の温度測定を行った。アークジェットの温度および鉄電極蒸気混入率の測定結果を図6-3-2および図6-3-3に示す。アーク電流が10～20kAでは

温度は13,000～14,000Kであり、電流の増大とともに低下し50kAでは10,000～12,000Kである。また、これらの温度と見かけの温度との差は3,000～5,000Kであった。また、アーク電流が10kAでは鉄蒸気混入率は1%程度であり、電流の増大とともに急増し、50kAでは50%程度となった。

以上のように、大電流アーク放電にまで適用できる温度と電極蒸気の混入率を測定できる技術を確立した。この測定結果を用いれば、碍子装置などへの熱的ストレスを推定するために必要なアークのエネルギー密度も推定できる。

6-3-2 プラズマの流速計測技術

アークプラズマを加熱源として用いた高融点廃棄物の溶融処理や、超微粒子などの材料の製造において、アークプラズマ中の廃棄物や材料の溶融・蒸発挙動を把握することは重要である。溶融・蒸発挙動を検討する際に必要となるパラメータとしては、アークプラズマの温度分布の他、アークプラズマの流速と廃棄物や材料の飛行速度が挙げられる。

アークプラズマの流速や、注入された材料などの飛行速度の測定については、様々な手法が提案されているが、当研究所では、材料の蒸発挙動の観察も同時に行うことが可能な高速度ビデオカメラを用いた流速測定法を確立した。

画像を用いた流速分布の測定は、大きく、流れの可視化と画像からの流速の算出の2段階に分かれる。流れの可視化のためには、ガス流中にガス流への追従性の高い微粒子をトレーサーとして注入し、レーザー光などの強力な光を照射して、微粒子の反射光を記録するというものが一般的である。検討を開始した当時、既に燃焼炎程度までの温度のガス流の流速分布の画像を用いた測定法はほぼ確立されていた。このような方法をアークプラズマなどの熱プラズマの流速測定に適用するためには、トレーサーが蒸発・拡散してしまう、熱プラズマ自身の強い発光を上回る光源が必要であるなど、課題が多かった。そこで、高温の熱プラズマに適した流速測定法として、トレーサーの蒸発を前提とし、その発光を狭帯域のバンドパスフィルターを装着した高速度CCDカメラで撮影する方法を採用し、器壁安定化アークに注入したフライ

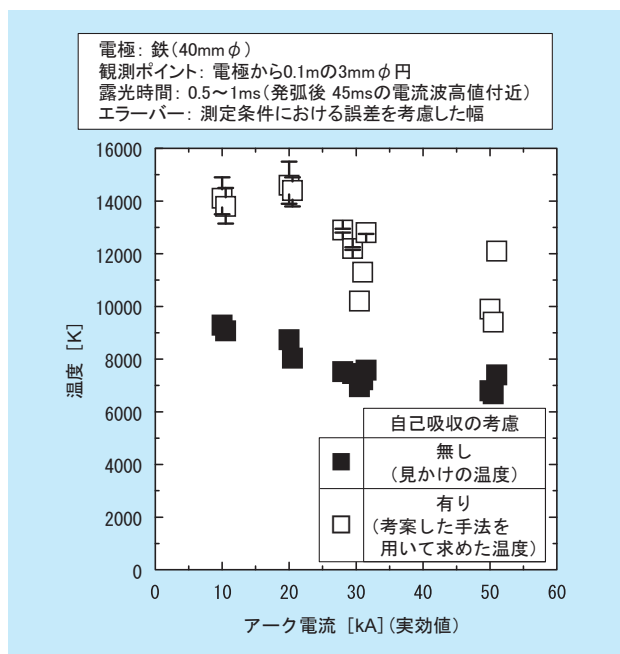


図6-3-2 温度のアーク電流依存性

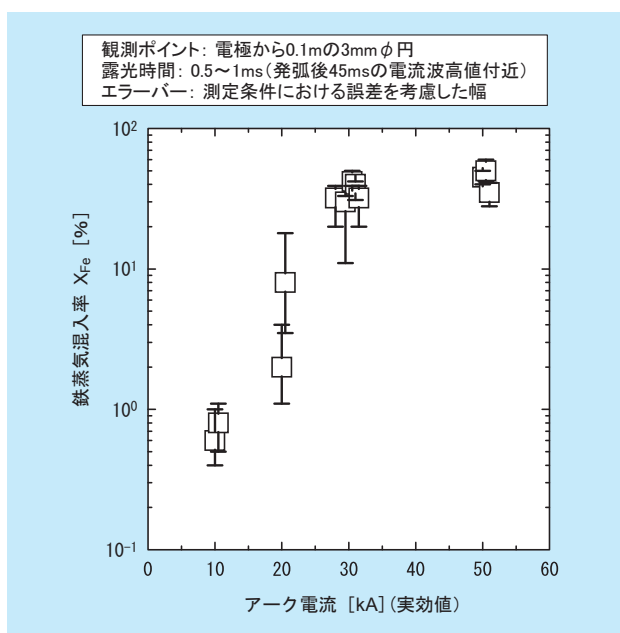


図6-3-3 鉄蒸気混入率のアーク電流依存性

アッシュ粒子の飛行挙動などを解明した⁽⁶³⁾。

トレーサーは、大きく2種類を用いた。すなわち、フライアッシュ粒子などの固体微粒子と、水素などのガスである。前述の器壁安定化アーク中にこれらのトレーサーを微量注入し、可視化を行った。トレーサーに求められる要件としては、目印としての役割を果たすことに加えて、測定場を乱さないことが必須である。このため、極微量を単発的に注入する必要がある、固体粒子の注入のために、単発型微量粉体供給装置を製作した⁽⁶⁴⁾。

この装置を用い、微量の微粒子として平均粒径 10 μm のフライアッシュを単発的にプラズマガス中に注入し、その発光を、狭帯域バンドパスフィルターを装着した高速度 CCD カメラで捉えた画像を図 6-3-4 に示す。得られた画像より、発光部分の重心などの移動速度を算出することにより、微粒子の飛行速度を算出することが可能となる。ただし、微粒子の飛行速度は周囲のプラズマ流の速度より低いため、微粒子をプラズマ流の流速測定トレーサーとして用いる場合は速度差を仮定するなどの注意が必要である。

一方、固体粒子の代わりに微量のガスを使用することができれば、プラズマ流に対する追従性が高いため、優れたトレーサーとなる可能性がある。このため、Ar アークプラズマ流の中に微量の水素ガス (0.1cc/回) を注入し、その進展を観測した⁽⁶⁵⁾。得られた画像を図 6-3-5 に示す。プラズマの流速に対し注入継続時間が長い場合、発光が带状に伸びた形になっているが、先端部

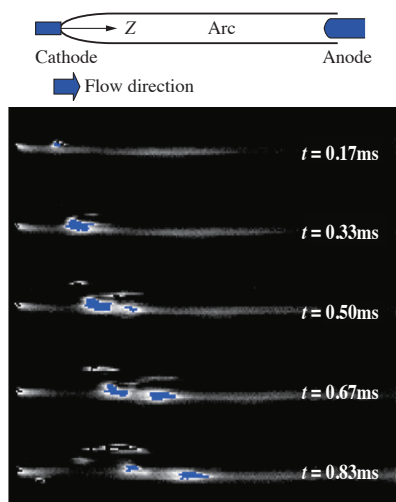


図6-3-4 Arプラズマ中のフライアッシュ粒子からの発光 (青い部分は強調のため着色)

が徐々に伸びている様子が確認できる。この先端部を適切な輝度値で定義し、その進展速度を求めることにより、プラズマの流速を推定できる。

気体をトレーサーとして用いる場合、いくつか注意する点がある。その代表的なものが、拡散である。すなわちトレーサーの物質移動には拡散と流れの両方が関与しているため、トレーサーの移動速度は、測定対象の流速にトレーサーの拡散速度が重畳されたものとなる。一般に流れが速いほど、拡散の寄与は相対的に低下する。筆者らは、高温アルゴン中の水素の拡散係数の温度依存性を用いて両者の寄与を比較し、今回の実験条件においては、拡散の影響をほぼ無視できることを確認した。

図 6-3-6 に同一条件下での微粒子を単発注入したときの微粒子飛行速度と、水素を微量注入したときの発光の進展速度を示す。水素の発光の進展の方が速く、両者ともプラズマガス流量の増加に、ほぼ比例して速度が増加していることが分かる。

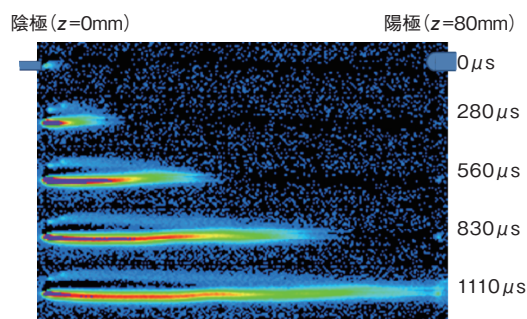


図6-3-5 Arプラズマに注入した水素の発光 (強調のため着色)

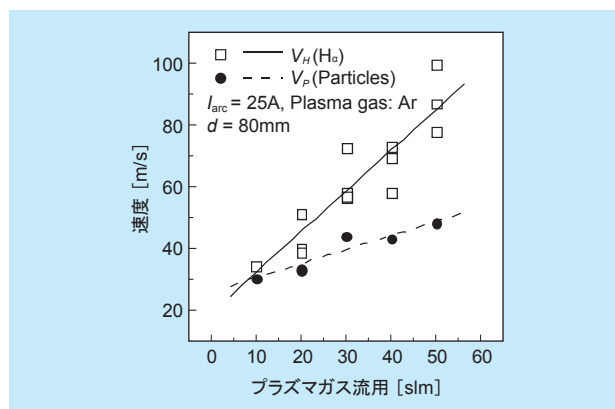


図6-3-6 プラズマガス流量と微粒子飛行速度および水素発光の進展速度の関係 (slm は標準状態でのガス流量 (ℓ/m) を表す。)

以上は、微量のトレーサーを用いた流速測定の検討であるが、実際に廃棄物や材料を熱プラズマ中で処理する場合、大量の物質が注入され、その蒸気がプラズマ全体に拡がるため、注入した物質そのものを同様の手法で目印とすることはできない。そこで、PIV (Particle Image Velocimetry) の手法のうち、画像の濃淡の移動から流速分布を測定可能な、相互相関法を用い、多量の微粒子が注入されたときのアークプラズマの画像から、流速分布の測定を試みた⁽⁶⁶⁾。この手法で算出したフライアッシュ粒子多量混入時の流速は他の方法で測定した場合と同程度である。

本手法を適用するためには、画像に濃淡、すなわちプラズマの発光のむらが必要であること、また、濃淡の移動が物質移動によるものであると仮定できる必要があるため、常に適用できるものではないが、簡便に流速分布まで計測できるため、材料合成の際の材料注入条件の検討などに有用であり、筆者らは、第5章で述べた超微粒子、複合ナノ粒子の合成に際し、ツールとして活用した。

以上、当研究所におけるプラズマの流速計測技術の概要を述べた。熱プラズマは高温であるため、通常のガス流に用いられるトレーサーをそのまま適用することが困難であり、熱プラズマに適した流れの可視化手法を、計測場の制約や計測目的に応じ、取捨選択することが重要である。

参考文献

- (1) 岩田幹正、足立和郎、天川正士：セラミックス粉注入時の移行形交流プラズマの安定性とその機構、電力中央研究所研究報告、W00025 (2001)
- (2) 天川正士、岩田幹正、足立和郎：アルミナの混入したアルゴンの熱力学特性と輸送特性、電気学会論文誌 A、Vol. 122-A、pp. 288-294 (2002)
- (3) K. Adachi, T. Amakawa and T. Inaba, Voltage Transition of Low Current Argon Arcs by Mixing of Iron Powder, CRIEPI Report, EW91014 (1991)
- (4) 天川正士、足立和郎、渋谷正豊、稲葉次紀：鉄蒸気が混入したアルゴンの輸送特性、電気学会論文誌 A、Vol.113-A、pp. 321-329 (1993)
- (5) 天川正士：金属蒸気の混入した高温空気の輸送特性、電力中央研究所研究報告、W86009 (1986)
- (6) 岩田幹正、田中慎一、池田弘一、合田豊：50kA 級長ギャップ交流大電流アークにおけるアークジェット部の温度特性 - 分光計測時の機先スペクトルの自己吸収を考慮した温度測定手法の開発 -、電力中央研究所研究報告、W99027 (2000)
- (7) 池田弘一：金属表面の非晶質化条件の解析とそのための高輝度アーク光生成手法の提案、電力中央研究所研究報告、W98001 (1998)
- (8) 池田弘一、天川正士、渋谷正豊：高圧高温アルゴンアークの放射輝度の解析、電気学会論文誌 A、Vol. 120-A、No.4、pp. 414-419 (2000)
- (9) 池田弘一、足立和郎、稲葉次紀：光加熱に向けたアークの放射特性の検討、電力中央研究所研究報告、W93034 (1994)
- (10) 例えば、数値流体力学編集委員会編、「非圧縮性流体解析 数値流体力学シリーズ 1」、東京大学出版会 (1995年)
- (11) S. V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Taylor & Francis (1980)、水谷幸夫、香月正司、「コンピューターによる熱移動と流れの数値解析」、森北出版株式会社 (1988年) (邦訳)
- (12) S. V. Patankar, "Heat and mass transfer in boundary layers, 2nd ed.", Hemisphere Publishing Corporation (1970)
- (13) K. C. Hsu and E. Pfender: Two-temperature modeling of the free-burning, high-intensity arc, J. Appl. Phys., Vol. 54, No. 8, pp. 4359-4366 (1983)
- (14) D. M. Chen, K. C. Hsu and E. Pfender: Two-temperature modeling of arc plasma, J. Chemistry and Plasma Processing, Vol. 1, No. 3, pp. 295-314 (1981)
- (15) 渡辺隆行、田中康規：4. 熱プラズマによるナノ粒子の合成、プラズマ核融合学会誌、Vol. 82、No. 8、pp. 484-487 (2006)
- (16) N. A. Sanders: The effect of anode evaporation on the behavior of a high intensity arc, MS Thesis, University of Minnesota (1979)
- (17) T. Amakawa, J. Jenista, J. V. R. Heberlein and E. Pfender: Anode boundary layer behavior in a transferred, high intensity arc, J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 31, p2826 (1998)
- (18) K. Etemadi: Investigation of high-current arcs by computer-controlled plasma spectroscopy, Ph.D. Thesis, University of Minnesota (1982)
- (19) 古川静枝、天川正士、足立和郎：移行形アークプラズマから水冷銅陽極への伝熱量に関する数値解析、電気学会論文誌 A、Vol. 120-A、No. 6、pp701-707 (2000)
- (20) P. Zhu, J. J. Lowke, R. Morrow, J. Haider: Prediction of anode temperatures of free burning arcs, J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 28, p1369 (1995)
- (21) R. Morrow, J. J. Lowke: A one-dimensional theory for the electrode sheaths of electric arcs, J. Phys. D : Appl. Phys., vol. 26, p634 (1993)
- (22) M. I. Boulos, P. Fauchais, E. Phender, "Thermal Plasmas 1", Plenum Publishing Corporation (1994)
- (23) 日本機化学会、「伝熱工学資料 改訂第4版」、丸善 (1986)
- (24) H. A. Dinulescu, E Pfender: Analysis of the anode boundary layer of high intensity arcs, J. Appl. Phys.

- vol. 51, p3149 (1980)
- (25) 古川静枝、足立和郎、天川正士：アークプラズマ加熱における水冷銅への伝熱機構に関する実験的検討、電気学会論文誌 A、Vol.119-A、No.9、pp1209-1214 (1999)
- (26) S. Furukawa, T. Amakawa and K. Adachi: Effects of Copper Vapor on Heat Transfer from Atmospheric Nitrogen Plasma to the Molten Metal Anode, Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol.22, pp85-104 (2002)
- (27) H. Abdelhakim, J. P. Dinguirard and S. Vacquie: The influence of copper vapor on the transport coefficients in a nitrogen arc plasma, J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 13, p1427 (1980)
- (28) J. M. Yos: Revised transport properties for high temperature air and its components, AVCO Corporation, Space System Division Report Z220, Wilmington, MA 1 (1967)
- (29) P. J. Shayler and M. T. C. Fang: The transport and thermodynamic properties of a copper-nitrogen mixture, J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 10, p1659 (1977)
- (30) 天川正士、足立和郎、渋谷正豊、稲葉次紀：プラズマトーチ用タングステン電極の損耗、電気中央研究所研究報告、W88042 (1989)
- (31) 天川正士、足立和郎、安井晋示、渋谷正豊、廣津信義、篠田強志、田島伸夫：加熱用プラズマトーチの大電流化、電気中央研究所研究報告、W90012 (1991)
- (32) 天川正士、足立和郎、渋谷正豊、稲葉次紀：プラズマトーチ用電極の損耗現象－窒素ガスとアルゴンガスによる違い－、電気中央研究所研究報告、W90037 (1991)
- (33) 松田福久、牛尾誠夫、熊谷達也：アーク放電電極の研究 II、溶接学会全国大会講演概要、No.37、66 (1985)
- (34) 田中和士：大出力プラズマトーチ用熱陰極材料の開発とその特性についての基礎的研究、大阪大学学位論文 (1996)
- (35) 足立和郎、天川正士、安井晋示：プラズマ溶融処理時のアーク電圧の上昇－ケイ酸カルシウム系保温材を投入した場合－、電力中央研究所研究報告、W95028 (1996)
- (36) 足立和郎、天川正士、安井晋示、古川静枝：ゴムを含む雑固体廃棄物のプラズマ溶融処理－アークプラズマの電圧に及ぼす可・難燃物の影響－、電力中央研究所研究報告、W97034 (1998)
- (37) 足立和郎、天川正士：不燃性粉体の注入による安定化アルゴンアークの電圧変化とその機構、電力中央研究所研究報告、W99036 (2000)
- (38) E. Pfender, J. Fincke and R. Spores: Entrainment of cold gas into thermal plasma jets, Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol.11, No.4, pp.529-543 (1991)
- (39) H. Klein and H. J. Bebbler : Thermal processing of flue and filter dusts by AC plasma technology, Proc. of Int. Conf. of Recycling of Metalliferous Materials, pp.125-131 (1990)
- (40) UIE WG on plasma process : Plasma technology for a better environment, pp.97-98, UIE (1992)
- (41) F. Fabry, G. Flamant, B. Ravary and L. Fulcheri : Progress in the analysis of the 3-phase AC plasma reactor for carbon black production, Proc. of 13th Int. Symposium of Plasma Chemistry, pp.1925-1930 (1997)
- (42) D. Neuschütz, K. H. Schubert and H. J. Bebbler : Metallurgical results from a 30T AC plasma ladle furnace, Proc. of 6th Int. Iron and Steel Congress, pp.543-550 (1990)
- (43) H. Fujimoto, H. Tokunaga and H. Iritani : A High-Powered AC Plasma Torch for the Arc Heating of Molten Steel in the Tundish, Plasma Chem. Plasma Processing, Vol.14, No.3, pp.361-382 (1994)
- (44) D. Neuschütz, H. Rossner, H. J. Bebbler and J. Hartwig : Development of 3-phase AC plasma furnaces at Krupp, Iron and Steel Engineer, pp.27-33 (1985)
- (45) D. Neuschütz, H. J. Bebbler and K. Heinen : Heating molten steel in an inert-gas atmosphere using 3-phase AC plasma torches, Proc. of Japan - German Seminar on Fundamental Iron Steel Making, pp.151-66 (1987)
- (46) H. J. Bebbler : AC torches, Proc. of 1st Int. EPRI Plasma Symposium (EPRI CMP Report No.90-9) Palo Alto U.S.A., No.23 (1990)
- (47) 岩田幹正、安井晋示、渋谷正豊：交流プラズマトーチにおける電極の損耗現象－電極のサイズおよび先端面積の影響－、電力中央研究所研究報告、W91024 (1992)
- (48) 岩田幹正、渋谷正豊：交流プラズマトーチにおける電極の損耗現象（その2）－アーク電流の影響－、電力中央研究所研究報告、W94037 (1995)
- (49) H. Hackmann and H. J. Bebbler : Electrode erosion in high power thermal arcs, Pure & Appl. Chem., Vol.64, No.5, pp.653-656 (1992)
- (50) 岩田幹正、渋谷正豊：交流プラズマトーチ用タングステン電極の電極サイズ設計手法の検討、電気学会論文誌 A、Vol. 118-A、No. 9、pp. 965-970 (1998)
- (51) D. Neuschütz, A. Hauck and Y. Zhai : Effect of arc polarity on heat transfer and electrode wear during plasma-heating of steel melts, VDI Berichte Nr., pp.471-478 (1995)
- (52) 稲葉次紀：アークプラズマの利用、電中研レビュー No.18、pp.50-54 (1988) または、岩田幹正、安井晋示、渋谷正豊：交流プラズマの安定化手法－パルス重畳法に関する基礎的検討、電力中央研究所研究報告、W92016 (1993)
- (53) 渋谷正豊、天川正士、足立和郎、安井晋示、岩田幹正、山崎建利、木下勝雄、飯田久米男：不燃性廃棄物の溶融用プラズマ炉の開発－都市廃棄物の焼却灰溶融用 100kW 級プラズマトーチの開発－、電力中央研究所研究報告、W90038 (1991)
- (54) 岩田幹正、渋谷正豊：高温雰囲気場における移行形交流プラズマの安定化、電力中央研究所研究報告、W97026 (1998)
- (55) O. Mayr : Beitrage zur Theorie des statischen und des dynamischen Lichtbogen, Archiv fur Electrotechnik, Vol.37, pp.588-608 (1943)
- (56) H. R. Greim : "Spectral Line Broadning by Plasmas", Academic Press, New York and London, pp.236-257

- (1974)
- (57) Y. Yokomizu, T. Sakuta and Y. Kito : A novel approach to AC air arc interruption phenomena viewed from the electron density at current zero, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol.22, pp.129-135 (1989)
- (58) 岩田幹正、足立和郎、天川正士：セラミックス粉注入時の移行形交流プラズマの安定性とその機構、電力中央研究所研究報告、W00025 (2001)
- (59) 例えば、宮地巖、鬼頭幸生、岡田勝男：電力アークにおける温度および電極蒸気密度分布のアークスペクトル線強度による決定、電気学会論文誌、Vol. 87、p235 (1967)
- (60) 岩田幹正、田中慎一、池田弘一、合田豊：50kA 級長ギャップ交流大電流アークにおけるアークジェット部の温度特性－分光計測時の輝線スペクトルの自己吸収を考慮した温度測定手法の開発－、電力中央研究所研究報告、W99027 (2000)
- (61) 岩田幹正、田中慎一、池田弘一、合田豊：50kA 級長ギャップ交流大電流アークにおけるアークジェット部の温度特性（その2）－鉄電極から噴出するアークジェット部の温度とエネルギー密度－、電力中央研究所研究報告、W00026 (2001)
- (62) 岩田幹正、田中慎一、池田弘一、合田豊：50kA 級長ギャップ交流大電流アークにおけるアークジェット部の温度特性（その3）－温度およびエネルギー密度の軸方向分布－、電力中央研究所研究報告、W01010 (2002)
- (63) 足立和郎、天川正士、古川静枝、岩田幹正：不燃性粉体の注入による安定化アルゴンアークの電圧変化とその機構、電力中央研究所研究報告、W99036 (2000)
- (64) K. Adachi, M. Iwata and S. Furukawa: Observations of hydrogen vapor propagation in wall stabilized argon arcs using high-speed CCS cameras, 14th International symposium on plasma chemistry, Czech Rep. (1999)
- (65) 足立和郎、岩田幹正：器壁安定化アルゴンアークに添加された水素の流速測定、電気学会論文誌 A、120、p.18 (2000)
- (66) 足立和郎：PIV によるアークプラズマ内金属蒸気の流速測定、平成 12 年電気学会全国大会、1-122 (2000)