交流プラズマトーチにおける電極損耗に与える アーク電流および電極形状の影響

正員 岩田 幹 正 (電力中央研究所)

正員 渋谷 正 豊 (電力中央研究所)

Effects of Arc Current and Electrode Size on Electrode Erosion in AC Plasma Torches
Mikimasa Iwata, Member, Masatoyo Shibuya, Member
(Central Research Institute of Electric Power Industry)

Heavy erosion of the electrode is a problem in using AC plasma torches. In a series of our studies, the effects of electrode stem size (diameter and length) and tip shape on the electrode erosion were clarified at a low current of 200A. In this paper, on the basis of the 200A-data, in order to reduce the electrode erosion with the current increased, the effects of current and electrode size on electrode erosion were clarified experimentally and analytically at 100-550A. The electrode used was of solid type and the material was tungsten containing 2 wt% of lanthanum oxide. The plasma gas was argon. Main results are as follows.

- (1) As the current increased, the electrode erosion increased linearly. In case of thin electrode (8mm ϕ), at 450-550A, the electrode tip was molten partially and the electrode erosion increased rapidly over 5mg/h. However, in case of thick electrode (13mm ϕ), the electrode erosion did not increase rapidly.
- (2) The temperature distribution along the electrode axis was calculated. As a result, a good correlation was obtained between the calculated temperature of electrode tip and the measured electrode erosion. As the tip temperature decreased to 3,000K (c.f. tungsten melting point: 3,660K), the electrode erosion decreased below 5mg/h of the linearly increasing range.

キーワード：交流プラズマトーチ，タングステン電極損耗，アーク電流，電極先端温度

1. まえがき

アークプラズマ（以下、プラズマと略記）は、温度やエネルギー密度が高く制御性に優れているなどの特長を持ち合わせている。このため、金属の溶解や精練、製鉄などの金属産業分野、廃棄物や有害物質の処理などの環境保全分野における電気の有効利用技術として利用されている(1)(2)。プラズマは、その供給電源の違いから直流プラズマと交流プラズマとに分けられる。現在は、プラズマトーチ（以下、トーチと略記）内の電極の損耗性やプラズマの安定性の観点から、主に直流プラズマが利用されている。一方、交流プラズマには、複数のトーチ間に簡易にプラズマを形成できるという特長があるため、導電性を持たない物質でも加熱でき、また炉底電極も不要となり運転の簡易化が期待できる。このような特長に着目して、最近、金属鋳造プロセス中のタンディッシュにおける溶鋼加熱(3)や焼却フライアッシュ廃棄物の処理(4)などに利用されている。

しかし、プラズマ発生部分関連の課題として、直流トーチに比べてトーチ内の電極が損耗しやすいこと、電流零点でプラズマが不安定になりやすいことなどが挙げられ(5)、これらを解決することが望まれている。

これまで、直流トーチの電極の損耗については、材料学的な検討など広く行なわれてきた(6)(7)が、交流トーチの電極損耗についてはそれほど検討されていない。筆者らは交流トーチの電極の損耗について、小電流 200A における基礎検討を電極形状の視点から行なった(8)。本論文では、前報で得られた知見に基づいて、主にアーク電流が電極損耗に与える影響に関して実験的および解析的検討を行ない、低損耗化対策を明らかにする。

2. 実験方法

実験回路を図 1 に示す。トーチ電極先端部と対向電極上端部に銅細線を張り、そこに電流を流して溶断・発弧させ、

100～550A（実効値）の移行形の交流プラズマを大気中で発生させ、1～3 時間連続で安定に点弧させた。この際、プラズマガスはアルゴンとした。実験前後のトーチ電極重量の減少分を損耗量とした。また、トーチ電極の冷却水入口と出口に測温抵抗体（Pt100，JIS）を装着して、その両箇所の水の温度差を温度差変換器（精度：±0.06℃）を用いて測定した。その温度差と冷却水流量とから、冷却水が高温のトーチ電極から奪う熱量（抜熱量；今回の実験条件における精度は±38W）を算出した。なお、トーチの外面を通して熱が出入りしないようにトーチ全体を断熱材で覆った。

主な実験条件を表 1 に示す。一つの実験条件につき 2～4 回ずつ実験を行なった。アーク電流およびトーチ電極の電極形状（主に電極径）をパラメータとした。また、前報⁽⁸⁾で得られた知見に基づいて、電極先端を平坦にして電極先端面積を大きくすることにより先端部分の熱抵抗を小さくした。なお、トーチの電極材料は酸化ランタン入りタングステンを用いた。

図 1 実験回路

Fig.1. Experimental circuit and vertical-section diagram of a plasma torch in test.

表 1 主な実験条件

Table 1. Experimental conditions.

パラメータ	設定条件
アーク形態	移行形
アーク電流	交流 100～550A _{rms}
通電時間	1～3 時間
プラズマガス	アルゴン，10 ℓ/min（45° 旋回流）
トーチ電極冷却水	9 ℓ/min，5℃（電極入口水温）
交流電源	600V _{rms} ，50Hz
トーチ電極	酸化ランタン入りタングステン [La ₂ O ₃ (3%wt.)-W] 丸棒
ノズル	銅製で孔径 10mm φ
対向電極	銅製で孔径 10mm φ（二重円筒）
電極間距離	L=30mm

3. 実験結果

<3.1>冷却水によるトーチ電極からの抜熱量 図 2 に、アーク電流および電極形状をパラメータとした場合の、冷却水によるトーチ電極からの抜熱量を示す。いずれの電極形状の場合も、アーク電流の増加とともに抜熱量は増加した。また、電極径が大きい方が抜熱量は大きいことが分かる。例えば、550A で比較すると、電極径が 8mm（電極断面積：50mm²）の場合、抜熱量は 1,400W 程度であるが、13mm（電極断面積：133mm²）の場合、抜熱量は 1,800W 程度と前者に比べ約 3 割大きい。なお、これらのデータは第 4 章の考察で利用する。

図 2 冷却水による抜熱量のアーク電流依存性

Fig.2. Dependence of electrode coolant loss on arc current.

<3.2>トーチ電極の損耗量 図 3 に、アーク電流および電極形状をパラメータとした場合のトーチ電極の損耗量を示す。いずれの電極形状の場合も、アーク電流の増加とともに損耗量は増加した。このような損耗量の増加は、電極表面の溶融・蒸発現象がアーク電流の増大によって活発化するためと考えられる。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。このような、ある電流値以上での損耗量の急増現象は、前述の溶融・蒸発現象がより一層顕著になるためと考えられる。実システムを考慮すると、損耗量が急増しない範囲を把握する必要があると思われる。そこで、次節以降、今回の実験条件において損耗量が急増しない範囲について検討を進めることにする。具体的には、図 3 から 5mg/h 以下では急増していないと見なし、主にその範囲の条件についての検討を行なう。

図3 電極損耗量のアーク電流依存性

Fig.3. Dependence of electrode erosion weight on arc current.

<3.3>実験後の電極先端部分の状況観察 図4に、アーク電流 550A で 1h 通電後の電極先端部分の状況の一例を示す。図(a)は電極径が 13mm の場合で損耗量が 4mg/h のケースである。この場合、電極先端は溶融がほとんど認められず、電極先端部分の平均的な温度が融点より低いと推測される。一方、図(b)は電極径が 8mm の場合で損耗量が 9mg/h のケースである。この場合、電極先端は部分的な溶融が認められ、電極先端部分の平均的な温度は融点に達していると推測される。以上のことから、電極損耗量の急増現象は電極先端温度と相関関係があると考えられる。

図4 実験後のトーチ電極先端部分の状況
 (交流 550A_{rms}, 1h, La₂O₃-W)

Fig.4. Photographs of electrodes after experiment.

4. 電極損耗量と電極先端温度の相関関係に関する考察

本章では、トーチ電極の損耗に影響を及ぼす因子の一つと考えられる電極の先端温度に着目し、その先端温度と損耗量との間の関係を検討した。まず、トーチ電極における入・出熱量の試算を行ない、次に、この結果を用いて電極軸方向の温度分布を計算し、電極先端の温度を算出した。

<4.1>トーチ電極における入・出熱量の試算 トーチ電極において出入りする代表的な熱量⁽⁸⁾を今回の実験条件の場合について試算を行なった。代表的な諸熱量は以下の通りである。

[I]電極に入ってくる熱量 Q_{in} (入熱量)

- ①電極降下電圧に起因する入熱量 Q_{drop}
- ②プラズマからの放射光による入熱量 Q_{rada}
- ③電極内部でのジュール発熱量 Q_{RI}^2

[II]電極の極性が「正」のときに電極に入ってきて、「負」のときに出ていく熱量

- ④電子が出入りする際に発生する熱量 Q_{ele}

[III]電極から出ていく熱量 Q_{out} (出熱量、抜熱量)

- ⑤冷却水による抜熱量 Q_{water}
- ⑥ガスによる抜熱量 Q_{gas}
- ⑦高温の電極先端面から周囲空間への輻射伝熱量

Q_{radE}

- ⑧電極先端の一部が溶融する際に使われる熱量 Q_{melt}
- ⑨電極先端の一部が蒸発する際に使われる熱量 Q_{vapor}

これら諸熱量の試算方法は前報⁽⁸⁾と同様であるが、ここでも簡単に述べる。 Q_{rada} は、アーク電圧から電極降下電圧(今回の条件では約 15V⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾)を差し引いた電圧にアーク電流を乗じたアークコラムパワーの約 3 割⁽¹¹⁾が電極先端に入射するとして求めた。 Q_{RI}^2 は、電極の電気抵抗の温度依存性⁽¹²⁾を考慮したものと電流の 2 乗との積として求めた。 Q_{gas} は、熱伝達係数を 100W/(K・mm²)⁽¹³⁾、熱伝達面を電極側面、電極と電極周辺との温度差を 1,000K として求めた。ここで、後述する解析方法で求めた電極の平均温度は 1,000~1,500K であり、これと周辺温度(300K と仮定)との差を約 1,000K と見積もった。 Q_{radE} は、シュテファン・ボルツマンの放射法則の式により求めた。タングステン電極の放射率を 0.35⁽¹⁴⁾、電極先端温度を 3,000K、熱放散面積を電極先端面積として求めた。ここで、後述する解析方法で求めた電極先端温度は 3,000K 前後であり、この温度を用いた。 Q_{melt} および Q_{vapor} は、今回の実験結果(損耗量)から試算すると、それぞれ数 mW および数十 mW であった。 Q_{ele} は、交流電流を対象としているので 0 とした。また、 Q_{drop} (①) 以外の熱量 (②~⑨) の試算を行なったうえで、 $Q_{in}=Q_{out}$ と仮定して Q_{drop} を求めた。なお、上記の試算熱量の中には電極温度をもとにして求めているものがあるが、後述する電極温度の解析方法における電極通過熱量は実測値の Q_{water} が大部分を占めているために、試算熱量の誤差による電極温度

への影響はほとんどないと考えられる。

試算熱量の代表的な例として電極径が 13mm の場合の結果を図 5 に示す。図(a)がトーチ電極における入熱量 Q_{in} であり、図(b)がトーチ電極における出熱量 Q_{out} である。この図から次のことが分かる。

- (1) アーク電流の増加とともに熱量 Q_{in} (Q_{out}) も増加する。
- (2) 全入熱量 Q_{in} のうち Q_{drop} が大部分 (7~8 割) を占めている。
- (3) アーク電流が増加すると、主に Q_{drop} が増加するために Q_{in} が増加する。
- (4) 全抜熱量 Q_{out} のうち Q_{water} (実測値) が大部分 (8~9 割) を占めている。

図 5 トーチ電極における入・出熱量のアーク電流依存性 (d = 13mmφ, l = 11mm)
Fig.5. Dependence of heat balance in the electrode on arc current.

なお、これらのことに関しては他の電極径の場合も同様の傾向を示した。

<4.2> 電極先端温度の計算

(1) 計算手法 前節の結果を用いて、図 6 に示すような方法で前報⁽⁸⁾とほぼ同様に分割メッシュ数 n を 500 とし電極内部の軸方向の一次元定常熱伝導の解析を行ない、電極先端の温度を算出した。なお、熱量 Q_{gas} は電極側面から徐々に分割メッシュごとに周囲ガスに奪われていくと考えられるが、今回は、最も冷却水側の分割メッシュ (図中の 1-2 間) で Q_{gas} 全量が奪われるとし、その他の分割メッシュでは電極内部を通過する熱量 Q を一定値 ($Q_{in} - Q_{radE}$) とした。これは、電極のサイズや形状などの設計を行う際には、<3.3>節で推定したことからも分かるように、電極先端温度を高く見積もった方が電極損耗量の低減化という観点からは安全サイドと考えられるからである。なお、最も電極先端側の分割メッシュ (図中の $n-(n-1)$ 間) で Q_{gas} 全量が奪われるとして電極先端温度を算出したところ 100K 程度の違いがあるものの大きな差異はないと思われる。

図 6 トーチ電極の温度分布計算手法
Fig.6. Calculation method of temperature distribution along electrode axis.

なお、前報と異なる点を以下に述べる。前報では、電極径が細く、また、電極先端が円錐台状であったために、プラズマは電極先端全面に点弧していた。一方、今回は、図 4(a)の実験後の電極先端状況 (アーク痕跡) から分かるように、電極径が太くて電極先端が平坦状であるため、プラズマは電極先端全面には点弧せずに一部分に点弧している。このため、熱通過部分が電極全体ではないと考え、図 6 に示すように電極先端のアーク痕跡から電極端冷却水と接しているところに向けて、電極先端からの距離の 2 次関数として熱通過面積が増加していくと仮定して解析を行

なった。なお、今回の条件でのアーク痕跡面積は、いずれの電極形状の場合もアーク電流の増加とともにほぼ比例して増加しており、その比例係数は $0.09\text{mm}^2/\text{A}$ であった。このような電極上のアーク痕跡に関しては大電流領域 ($4,000\sim9,000\text{A}$) でも調べられており⁽⁵⁾、アーク電流が増加してもその比例係数はほぼ一定で $0.08\sim0.1\text{mm}^2/\text{A}$ であり、今回の結果とほぼ一致していることが分かる。

(2) 計算結果および検討 アーク電流および電極形状が異なる場合に電極先端温度 T_t を算出したものを図7に示す。この図から次のことが分かる。

- (i) いずれの電極形状の場合も、アーク電流の増加とともに電極先端温度は上昇する。
- (ii) 電極径が小さいほど電極先端温度が高くなり、電極径が 8mm で電流が 550A の場合には融点近くまで上昇している。この結果は、3.3 節で電極先端部分の状況から推測したこととほぼ合致している。

なお、電極径が 13mm の場合、電流が 550A の場合でも電極先端温度は $2,600\text{K}$ 程度と算出されている。この温度は、電極が電子放出する温度領域の下限値付近であり、実際の温度よりも若干低く算出されていると思われる。これについては次のように考えている。電極径が太い場合は電極先端面積も大きく、先端面でアークスポットが動き回る範囲が広がる。このため、アーク痕跡を入熱面積とみなした今回、実際の入熱面積よりも大きく見積もり、電極先端温度を低く算出したと考えられる。入熱面積の正確な同定は今後の課題と考えている。

図7 電極先端温度のアーク電流依存性

Fig.7. Dependence of calculated temperature of electrode tip on arc current.

<4.3> 電極先端解析温度と電極損耗量 前節で求めた電極先端解析温度と電極損耗量(実測値)との関係を図

8に◆印で示す。なお、前報⁽⁸⁾のデータも同図に▽印で併せて示す。この図から、電極先端温度が低いほど損耗量が低く抑えられていることが分かり、簡易な計算手法で解析した電極先端温度を用いても概略の傾向を把握できた。また、前述したように損耗量の急増しない範囲を 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 $3,000\text{K}$ 程度以下(融点: $3,660\text{K}$) に低減すればよいことが分かる。

図8 電極損耗量の電極先端温度依存性

Fig.8. Relation between measured electrode erosion weight and calculated temperature of the electrode tip.

5. まとめ

主にアーク電流が交流トーチの電極損耗に与える影響について実験的および解析的検討を行なった。まず、実験用のプラズマトーチを用いて移行形の交流プラズマを1~3時間連続で安定に点弧させ、アーク電流が $100\sim550\text{A}$ の場合の電極損耗実験を行なった。次に、今回の実験結果などを基にして、電極における入・出熱量の試算、電極軸方向の温度分布計算を行ない電極の先端温度を算出し、その温度と電極損耗量(実測値)との関係を明らかにした。その結果、電流を増加させたとき損耗量が急増しない範囲 (5mg/h 以下) にするには電極先端の温度を $3,000\text{K}$ 程度以下(融点: $3,660\text{K}$) に低減することが必要であることを明らかにした。

最後に、本研究を行なうにあたり、当研究所 今城尚久電力部長を始めとする電力部の各位、特に、アークプラズマ研究関係各位には終始、御指導ならびに御助言を賜った。ここに、銘記し深く感謝いたします。

(平成9年1月23日受付)(平成9年5月15日再受付)

文献

- (1) 稲葉・渋谷:「プラズマトーチの適用例と今後の展望」, 電学誌, 107, 1019 (昭 62-10)
- (2) 鬼頭・横水:「最近のアーク物理と大電流遮断・アーク応用技術」, 電学論B, 113, 845 (平 5-8)
- (3) 藤本・斎藤・清水・清川・入谷・西:「タンディッシュ内溶鋼加熱用交流プラズマトーチの電力特性と溶鋼加熱特性」鉄と鋼, 77, No.10, 1649 (1991)
- (4) M.J.Copsey: "Commercial Applications of Plasma Technology in Western Europe", 2nd Int. Plasma Symposium Conf.(1992-3)
- (5) H.J.Bebber: "AC TORCHES", 1st Int. Plasma Symposium Conf.(1990-3)
- (6) M.Ushio, A.A.Sadek, K.Tanaka, G.Adachi & F.Matsuda: "Effect of Grain Morphology on Consumption of GTA Electrode", *JWRI, Trans.*, 20, No.2 (1991)
- (7) 田中・牛尾:「大容量プラズマトーチ用タングステン陰極材料の開発」, 電気学会開閉保護研資, SP-96-17 (平 8-6)
- (8) 岩田・安井・渋谷:「交流プラズマトーチにおける電極の損耗現象に与える電極形状の影響」, 電学論A, 114, 628 (平 6-9)
- (9) 電気学会編:改定新版 放電ハンドブック, 154, オーム社 (昭 49)
- (10) 岩田・渋谷・稲葉:「プラズマトーチ用電極における熱バランスーアーク電流および電極形状の影響」, 平 5 電気学会全大論, No.123 (平 5)
- (11) 二俣・横水・松村・鬼頭:「10kA 級アルゴンガス吹付けアークにおける全放射パワー」, 平 5 電気学会全大論, No.112 (平 5)
- (12) タングステンモリブデン工業会編:タングステン・モリブデン技術資料, 10 (昭 63)
- (13) 甲藤:伝熱概論, 23, 養賢堂 (平 2)
- (14) 真鍋:Emmissivity, 赤外線技術, 9, 68 (昭 59)

岩 田 幹 正

(正員) 1964 年 5 月 14 日生。1990 年 3 月名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程修了。同年 4 月(財)電力中央研究所入所。現在,横須賀研究所電力部所属。主として,プラズマトーチにおける電極・プラズマ現象に関する研究に従事。

渋谷 正 豊

(正員) 1945 年 6 月 26 日生。1968 年 3 月関東学院大学工学部二部電気工学科卒業。1964 年 4 月(財)超高圧電力研究所入所, 1977 年 7 月(財)電力中央研究所入所。現在,横須賀研究所電力部所属。主として,電力機器における大電流アーク現象,アークプラズマ応用技術および有害物の無害化処理技術に関する研究に従事。