プラズマトーチ用タングステン電極の窒素ガス流中での 損耗現象と寿命の評価

正員 天 川 正 士 (電力中央研究所)

正員 足 立 和 郎 (電力中央研究所)

正員 渋谷 正 豊 (超電導発電関連機器・材料技術研究組合)

正員 稲 葉 次 紀 (中 央 大 学)

Erosion Phenomena and Evaluation of Life-Time of Tungsten Electrode for Plasma Torch in Nitrogen Gas Flow
Tadashi Amakawa, Member, Kazuo Adachi, Member(CRIEPI), Masatoyo Shibuya, Member(Super-GM),
Tsuginori Inaba, Member(Chuo University)

Arc-cathode erosion has been studied for tungsten cathode with 2wt% of lanthanum oxide at the current level of 400A in DC. Main results are obtained in case of changing plasma gas from mainly used argon(Ar) to cheaper nitrogen(N₂):

- (1) Erosion weight increased by 25 to 50 times and the quantity of oxide additives decreased in the tip region. These results suggest that the amount of heat transferred to the cathode increased.
- (2) Through 100 hours operation using N₂, the electrode eroded with repeating formation and dissipation of a columnar projection at the tip. Even the shape changed in such complicated manner, the erosion weight was almost proportional to the operating time. Referring to the results, we made short electrodes simulating after long operation and estimated the lifetime would be 150 to 300 hours.
- (3) Finally, the operation of the plasma torch using N₂ was demonstrated in a pilot plant. The erosion weight could be decreased to about 1/3 compared with the results of basic experiments by increasing electrode-cooling capacity.

We conclude that it is possible to choose cheaper N₂ instead of more expensive Ar as plasma gas to reduce total operating cost in some application fields such as wide area heating.

キーワード: タングステン陰極, 電極損耗, プラズマトーチ, 窒素ガス, アルゴンガス

1. はじめに

アークプラズマ加熱は, 超高温を容易に発生でき, その加熱エネルギーが被加熱物の物理・化学的性質に左右されにくいという特長を持つ。このため, 金属の溶解や精錬, 廃棄物の溶融・分解処理への適用が拡大してきている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。アークプラズマを発生するプラズマトーチの電極材料は, タングステン系合金, 銅, 黒鉛等が用いられている。この中でタングステン系の合金を陰極としたロッド形のプラズマトーチ⁽³⁾は, 金属の切断や溶接等に広く利用されている。プラズマガスとして, 主にアルゴン(Ar)が用いられている。また, 切断面の品質や切断速度を向上するために, Arと窒素(N₂), 水素(H₂)等との混合ガスも用いられている。ロッド形プラズマトーチを, 例えば焼却灰の溶融処理等の広域な面の加熱に適用する場合, 適用先によってはプラズマガスを高価なArガスに代え安価なN₂ガスとすることにより, ガスのコストを低減できる。しかし, 同一電極を用いてN₂ガスを使用した場合, 電極の損耗が激しくなることが定性

的に知られており, 電極のコストや電極交換にかかわるコストが増加する。

ここでガスによるコストの低減分と電極損耗によるコストの増加分のみを比較し, 今回の実験条件や実験に要した費用等から, 両者を相殺できるN₂ガス中での電極寿命を求めると約20時間⁽⁴⁾である。この寿命を達成できる可能性は十分にある。また, N₂ガス中での電極寿命がさらに長くなれば, これらのコストの合計を一層低減できる。

実機への適用を考えた場合, メンテナンスの周期等の観点から, 窒素ガスを用いた場合の電極寿命を明らかにする必要がある。しかし, Arガス中でのタングステン電極の損耗については報告⁽⁵⁾⁽⁶⁾があるものの, N₂ガス中での定量的な報告が見あたらない。そこで本報告では, まず, N₂ガスとArガスでの電極損耗の差異を実験的に検討し, 次に, N₂ガスを用いて累積で100時間までの損耗実験を行い, 長時間にわたる電極損耗現象を明らかにした。さらに, この結果から電極寿命を推定し⁽⁴⁾, パイロットプラントを用いてN₂ガスを用いたプラズマトーチの実用性を確認した⁽⁷⁾。

2・1> 実験方法 図1に実験装置の構成を示す。プラズマトーチと鉄塊陽極を水冷のチャンパー内に設置し、プラズマトーチの電極を陰極として、直流420～430Aのアークプラズマを空気中で発生させた。その手順は、まず、高周波電圧を電極とノズルの間に印加しアークプラズマを発生させ（以下、パイロットアークと呼ぶ）、次に、直流電圧を鉄塊陽極とプラズマトーチの陰極間に印加しアークプラズマを発生させた（以下メインアークと呼ぶ）。その後、メインアークの発生を確認し、パイロットアークを遮断した。プラズマトーチと陽極の距離は、アークプラズマの発生前に15cmに設定したが、実験終了時には陽極の溶融等により15～20cmの範囲となった。また、アークプラズマの電圧は、プラズマトーチと陽極間の距離が変化したため150～80V（出力：60～70kW）となり、プラズマガスの種類の影響を受けなかった。これは、空気中でアークプラズマを発生したため、アークプラズマの大部分ではその構成気体が空気となったためと考えられる。

最初に、プラズマガスの種類が電極損耗に及ぼす影響を調べることを目的とし、プラズマガスを N_2 ガス、Arガス、それらの混合ガス ($N_2:Ar=4:1$ (体積比))とした実験、次に、 N_2 ガス流中での長時間(積算で100時間)にわたる損耗現象を調べるための実験を行った。

2・2・1>プラズマガスの種類の影響 アークの発生時間に対する電極損耗量の変化と電極直径の減少量をそれぞれ図3, 4に示す。電極直径は図2に示した(A)の箇所にて計測した結果である。Arガス中で約8時間のアークを発生させた後

次に、 N_2 とArの混合ガス中とArガスの中で約8時間アークを発生させた後の電極の外観と電極表面上のランタン（La）のEDX（Energy Dispersive X-ray spectrometer）線分析結果を図5に、これらの電極の縦断面の組織をSEM（走査型電子顕微鏡）を用いて観察した結果を図6に示す。図5、6では、 N_2 ガス中でArガス中と同じ時間だけアークを発生した試料が無いいため、 N_2 に添加したArの影響は無視できると考え、 N_2 ガス中の代用として混合ガス中で使用した電極の結果を示した。

右側の写真の白い曲線は、電極表面におけるLaの白線上でのEDX分析結果を表わす。

図5 8時間のアーク発生後の電極形状
Fig.5. Shape of electrode after arcing for 8 hours.

図5から、アーク発生後の電極の形状や表面状態は、Arガス中と混合ガス中では著しく異なることが分かる。混合ガス中で使用した電極では、電極先端から約1mmに渡って比較的大きな結晶の析出が観察され、特に先端部ではその結晶が溶融したと考えられる滑らかな痕跡が観察される。また、先端から2～3mmの電極表面ではLaが観察されない。一方、Arガス中で使用した電極では、これまでに報告されているように、電極先端部に添加剤が蒸発して形成されたと考えられるでこぼこした組織⁽⁵⁾やそれより根元側にくびれ⁽⁸⁾が観察される。また、電極表面でLaがほとんど観察されない領域は先端から約1.5mmまでで、混合ガスの場合に比べ狭くなっている。ここで、GTA(Gas Tungsten Arc)溶接のタングステン電極を対象とした研究によれば、電極の表面温度は、先端部分より根元側で極大を示す場合があることが報告されている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。また、Arガス中で使用した電極の先端部にくびれが生じている機構として、①プラズマガス中の酸素(O_2)とタングステンの反応、②酸化タングステンの蒸発・分解、③タングステンの堆積が報告されている⁽¹³⁾。この報告では、Arガスに混入させる O_2 濃度を0～1%の範囲で変えて1分間のアークを発生させる実験を行っている。この時間に比べて今回の実験でのアーク発生時間は数百倍以上長いので、実験に用いたプラズマガスに不純物として混入している O_2 によって同様の現象が生じたと考えられる。混合ガス中でも同様の現象が生じ、気相へ移行するタングステンの量がさらに多くなり、比較的大きな結晶が多量に析出したものと考えられる。

次に図6の白い点は、 La_2O_3 を示す。混合ガス中では、電極の先端部において La_2O_3 がほとんど存在しないこと、タングステンの再結晶化が進んでいることが分かる。一方、Ar

ガス中では、 La_2O_3 の濃度が低下しているのは電極先端から200 μm 程度の深さのところまでに留まっている。 N_2 ガス中での電極損耗がArガス中に比べ増加した原因の一つに、損耗を低減するために添加した酸化物が消失し、その効果が減少することが考えられる。

図6 8時間のアークを発生後の電極先端部の縦断面組織のSEMによる観察結果
Fig.6. SEM microstructure of vertical cross section of electrodes after arcing for 8 hours.

Arガス中で酸化物添加剤の振る舞いと電極損耗の関係を検討した報告⁽¹⁴⁾によれば、酸化物添加剤の振る舞いに影響を与える要因として、①電極の温度勾配に起因する添加剤の拡散速度、②酸化物添加剤の融点、③タングステンと酸化物の粒界形状が指摘されている。今回の実験では、同一工程から製造された電極材料を用いているため電極材料に依存する②③の要因は考えにくく、電極の温度勾配が変化したと考えられる。また、ArあるいはArと H_2 (50vol.%)の混合ガス中でアークを発生している時のタングステン陰極表面の温度分布の計測結果⁽⁸⁾によれば、混合ガスの場合の方が、プラズマの熱伝導率が高いため、陰極点が収縮し電流密度が増加することにより陰極の温度が上昇することが指摘されている。また、電極の平均的な温度が高くなれば、電極の損耗量が増加することが報告されている⁽¹⁵⁾。今回の実験の場合、 N_2 プラズマの熱伝導率がArプラズマに比べ高いことから、 N_2 ガス中での電極の温度がArガス中に比べ高くなり、電極の損耗が増加したと考えられる。

以上から、混合ガス、または、 N_2 ガスを使った場合、電極の温度が高くなると同時に添加剤が抜けやすくなり、損耗量が増加したと考えられる。

＜2・2・2＞窒素ガス中での長時間運転による電極損耗 N_2 ガス中で長時間の運転による電極の損耗量と直径、長さ、先端部の角度の形状の変化を図7に示す。電極の直径は図2に示した位置(A)(B)で計測した。電極の先端部の角度は電極の写真から読み取った。また、同図で①～④の印をつけ

た運転時間での電極の形状を図8に示す。

これらの図から、電極の形状変化に関して次のことが分かった。まず、 N_2 ガスでアークプラズマを発生させると、電極の先端部周辺に比較的大きな結晶が析出する(図5-(a))。この結晶が析出した領域はアーク発生時間とともに円柱形となり、最大で直径約3mm、高さ約2mmであった(図8-②)。同時に電極の直径も減少した。また、円柱形の突起の付け根付近のタングステンが消失するため電極先端の角度は次第に大きくなった(図7)。その後、突起が次第に小さくなり(図8③)、電極の長さが急激に低下する(図7)。さらに、アークを発生させると電極直径の減少量が大きくなり、再び円柱形の突起が観察される(図8④)。この時の突起の外観はアーク発生時間が25時間のそれとよく似ている。100時間のアーク発生では、電極の先端部の角度は $90\sim 100^\circ$ の範囲に落ち着き、電極のやせは、先端の円錐形の付け根から約3mm後方までの領域で発生していることが分かる。以上から、電極形状の変化としては、電極のやせが発生する時に先端に円柱形の突起が形成され、その後、この突起が小さくなりながら電極の長さが短くなるという過程を繰り返して損耗していくと考えられる。また、以上のような複雑な形状変化にもかかわらず、電極の損耗量はほぼアークの発生時間に比例して増加することが分かった。

次に、アークプラズマを100時間発生した後の電極断面のSEM写真を図9に示す。突起の部分では La_2O_3 が非常に少なく、特に周辺部では純タングステン層が形成されている。また、

突起の根元の組織に不連続なところが観察される。

なお、 N_2 ガス中でアークプラズマを長時間発生させた場合、以上のような電極先端部の形状変化が生じて、アークプラズマを安定に発生できた。

図8 長時間のアーク発生による電極の外観の変化(N_2 ガス中)

Fig.8. The change of aspects of the electrode tip during long operation in N_2 .

図9 100時間のアーク発生後の電極縦断面組織のSEMによる観察結果(N_2 ガス流中)

Fig.9 SEM microstructure of vertical cross section of the electrode after arcing for 100hours in N_2 .

図7 長時間のアーク発生による損耗量と電極の形状変化(N_2 ガス流中)

Fig.7. Time dependence of erosion weight and the shape of electrode under the long operation in N_2 .

3. 電極寿命の推定

3・1>実験方法 電極は、長時間の使用によりその形状や先端部の組織が変化する。この場合、電極の長さが短くなると、プラズマ Torch 内のアークプラズマが長くなりノズルへの熱負荷が増大しノズルが損傷することや、ノズルと電極の間隔が広がりパイロットアークが発生しにくくなる懸念される。また、電極先端の角度が大きくなると、着火性能の低下に加え、陰極点が電極の先端以外に形成され、アークプラズマが電極の中心軸から外れて、電流経路が陰極-ノズル-陽極となるダブルアークが発生しノズルを損傷することが懸念される。そこで、 N_2 ガス中において積算で100時間の運転を行った際の電極の形状と電極重量の変化の実験結果から、さらに長時間の運転を想定した電極を作製し電極の寿命を推定した。長時間の使用を想定した電極の形状を図10に示す。同図において先端の角度を 110° とした。これは、100時間のアーク発生後の電極先端の角度

は90°～100°の範囲にあり、先端の角度が大きいくほど陰極点が電極の先端から外れやすいと考えたためである。ここで、電極先端部に形成される円柱形の突起は、発生・成長・消失を繰り返すために模擬電極の形状に考慮しなかった。また、電極先端部の組織の変化としては、図6(a)に示したように8時間のアーク発生後で既に La_2O_3 の消失が観察されることから、電極損耗量は、純タングステンの結果に近いと考え、図7の実験結果からアーク発生時間に比例すると想定した。また、電極直径の減少は電極加工の都合上無視した。

次に、図7の結果から、100時間のアークを発生させた時の平均的な損耗率と長さの減少率を求め(それぞれ、 3.83ng/C 、 $1.18 \times 10^{-4}\text{mm/C}$)、模擬電極で想定される使用時間を推定した。ここで、電極直径の減少を考慮しなかったことは、損耗率から寿命を推定する場合、模擬電極の長さがより短くなるため、アークの着火性能と安定性からは厳しい条件と考えられる。電流を400Aとして推定した模擬電極の使用時間を表1に示す。

これらの模擬電極を用いて、アークプラズマの着火性能と安定性の観点から電極の寿命を判定した。具体的には、模擬電極を図2に示したプラズマトーチにセットし、電極とノズル間に高周波電圧を十数回印加し、パイロットアークの発生状況を観察し着火性能を評価した。また、プラズマガスを N_2 とし約5時間のアークを発生させ、電極等の損傷状況を観察しアークプラズマの安定性を評価した。電極材料は加工の容易な酸化トリウム(ThO_2)を添加(約2wt%)したタングステン合金を用いた。

〈3・2〉電極寿命の推定結果

〈3・2・1〉着火性能 模擬電極①では高周波電圧を印加した全ての場合について、パイロットアークを発生することができた。また、ノズル先端から輝度の高いパイロットアークの吹き出しが観察された。この結果から、模擬電極①は十分な着火性能を有すると判断した。

模擬電極②でも高周波電圧を印加した全ての場合につい

(A)使用前 (B)模擬電極-① (C)模擬電極-②

図10 N_2 ガス中での長時間の使用を模擬した電極の形状

Fig.10. Electrode shapes simulating erosion after a long arcing time.

表1 模擬電極の等価使用時間

Table1. Estimated operation time of simulated electrode. (単位:時間)

模擬電極 (図10参照)	①	②
電極の長さの減少量からの推定	290	440
電極損耗量からの推定	360	600

てパイロットアークを発生することができた。しかし、10数回のパイロットアークの発生の内、約半数のケースでは、ノズルの先端から輝度の高いパイロットアークの吹き出しが観察されなかった。この結果から、模擬電極②は十分な着火性能を有していないと判断した。

〈3・2・2〉アークプラズマの安定性 模擬電極①を用いてメインアークを約5時間安定に発生できた。模擬電極②は十分な着火性能を有していないと判断したので、アークプラズマの安定性を確認する実験を行わなかった。模擬電極①を用いた実験では、図2に示したノズルの先端部が傷んだ。しかし、本プラズマトーチでは、ノズルの先端部分は交換を容易にするため間接的に水冷される構造であることから、直接的に水冷すること等によって冷却構造を改善すればこの損傷は防止できると考えられる。

〈3・2・3〉電極寿命の推定 アークプラズマの着火性能と安定性から、模擬電極①と②の間に電極の寿命が存在すると考えられ、表1から電極寿命は約300時間以上と予想できる。さらに、電極の損耗量は、図3に示したように2倍近くばらついていることを勘案すると、実用的な電極寿命は150～300時間と推定される。この値は、今回の実験条件等から求めたガスのコストの低減分が電極のコストの増加分を上回る電極寿命(20時間)より長い。

4. N_2 ガスを用いたプラズマトーチのパイロットプラントでの実証運転

電極の損耗量がArガスに比べて増加する N_2 ガスをプラズマガスとして用いても、前章の実験結果から少なくとも1週間程度の連続運転は十分可能であると判断し、パイロットプラント規模での運転が可能であることを実証した⁽⁷⁾。300kW級のパイロットプラントを用い、アーク電流400A、出力100～150kWの範囲で都市ゴミの焼却炉から発生する焼却灰を熔融し、電極の損耗量を計測した。プラズマガスは N_2 とし、その流量は10Nℓ/minとした。プラズマトーチの電極は、 La_2O_3 を添加(約2wt%)したタングステン合金を用い、電極の電気抵抗と熱抵抗を低減させるため直径を6.4mmとこれまでの実験条件より太くした。さらに、ノズルを直接水冷する構造とした。アーク発生時間は累積で91時間である。

累積で91時間のアークを発生しても電極の異常な損耗は認められず、アークを安定に発生でき焼却灰を熔融することができた。この時の電極損耗量を図11に示す。電極直径が6mmの場合の損耗率が3.8～8.2ng/Cであるのに対し、電極直径を6.4mmと僅か7%太くすることにより、損耗率を0.9ng/Cと1/4以下に低減できた。

図11 アーク発生時間に対する電極損耗量
Fig.11. Electrode erosion weight versus arc operating time.

5. まとめ

酸化ランタンを添加(2wt%)したタングステン陰極としたプラズマトーチを用い、プラズマガスを N_2 として直流400Aの移行形アークプラズマを安定に発生させ、電極の消耗について以下の点を実験的に明らかにした。

- (1) N_2 ガスを用いた場合、Arガスに比べて消耗量が25~50倍と増加した。また、電極先端部での添加剤の消失が著しかった。これらの結果は、電極への入熱量が増加したことを示唆している。
- (2) 積算で100時間のアークを発生し、電極の形状や消耗量の変化を調べた。この結果、電極先端部において、円柱形の突起の生成と消滅を繰り返して消耗すること、複雑な形状変化にもかかわらず消耗量はアーク発生時間にほぼ比例することが分かった。この結果を参考にして、長時間の使用を模擬した電極を作製し、実験に用いた電極の寿命を実用上十分な150~300時間と推定した。
- (3) 電極の電気抵抗と熱抵抗を低減させるために電極直径を7%ほど太くし、300kW級のパイロットプラント規模での N_2 ガスを用いたプラズマトーチの運転を実証した。消耗量は基礎実験結果の1/4程度に小さくでき、 N_2 ガスをプラズマガスとして使用しても実用性があると判断した。

以上の結果から、 N_2 ガスの使用により、Arガスに比べ電極の寿命は短くなるため電極のコストが増加するものの、ガスコストが大幅に下がり、両者のコストの合計を減らせる見通しを得た。

最後に、電極の消耗現象の考察に関し、貴重なご意見を頂いたMinnesota大学教授Dr. J. V. R. Heberlein, 電力中央研究所名誉顧問 深川裕正博士, 電力中央研究所 安井晋示, 岩田幹正の諸氏に謝意を表します。

(平成10年 1月26日受付, 平成10年 4月 1日再受付)

文 献

- (1) 鬼頭・横水, 電学論誌B, 113, 845(平5-8)
- (2) UIE WG: "Waste Treatment and clean process" (1996)
- (3) UIE Plasma Process WG: "Arc plasma process UIE Arc plasma review" (1988)
- (4) 天川・足立・渋谷・稲葉, 電中研研報W90037(平3年)
- (5) 田中, 大阪大学学位論文(1996)
- (6) 天川・足立・渋谷・稲葉, 電中研研報W88042(平元年)
- (7) 渋谷・天川・足立・安井・岩田・山崎・木下・飯田, 電中研研報W90038(平3年)
- (8) X. Zhou, D. Berns and J. Heberlein, Proc. 30th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, pl Indianapolis, IN U.S.A (1994)
- (9) 足立・天川・渋谷・稲葉, 平成元年電気学会全国大会, No. 1758
- (10) J. J. Lowke, R. Morrow and J. Haidar, J. Appl. Phys., 30, 2033 (1997)
- (11) S. Kou and M. C. Tsai, Welding J., 64, 266-s (1985)

- (12) W. F. Savage, S. S. Strunck and Y. Ishikawa, Welding J., 44, 489-s (1965)
- (13) F. Matsuda, M. Ushio and T. Kumagai, Trans. of JWRI, 15, 13(1986)
- (14) M. Ushio, A. Sadek and F. Matsuda, Proc. "Plasma for Industry and Environment", p6-3 BNCE, Oxford, U.K. (1990)
- (15) 岩田・渋谷, 電学論誌B, 117, 1276(平9-9)

天川 正士

(正員) 1960年1月9日生まれ。84年3月早稲田大学理工学部電気工学科修士課程修了。同年4月(財)電力中央研究所入所。以来、大電流アーク放電および廃棄物の溶融処理等のアークプラズマの応用技術に関する研究に従事。95年電気学会論文賞受賞。原子力学会、廃棄物学会会員。

足立 和郎

(正員) 1962年2月26日生まれ。86年3月九州大学大学院工学研究科電気工学専攻終了。同年4月(財)電力中央研究所入所。以来、大電流アーク放電および廃棄物の溶融処理等のアークプラズマの応用技術に関する研究に従事。95年電気学会論文賞受賞。可視化情報学会会員。

渋谷 正豊

(正員) 1945年6月26日生まれ。68年関東学院大学工学部二部電気工学科卒業。64年(財)超高圧電力研究所入所, 77年(財)電力中央研究所入所。83~84年名古屋大学工学部受託研究員。97年~超電導発電関連機器・材料技術研究組合。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、有害物処理および超電導機器・材料に関する研究に従事。95年電気学会論文賞受賞。廃棄物学会会員。

稲葉 次紀

(正員) 1941年2月18日生まれ。66年名古屋工業大学第二部, 68年同修士課程, 71年名古屋大学博士課程, いずれも電気工学満了。59年三菱電機, 65年アデカ・アーガス化学, 71年(財)電力中央研究所, 94年中央大学教授。78~79年西ドイツBraunschweig工科大学客員教授。主として、アークプラズマ現象に関する研究に従事。71年工学博士。88年電気学会評議委員。現在, 同大電流エネルギー応用技術(専), IEC SC32A(高圧ヒューズ)(国)委員長。76, 88, 95年同論文賞。94年同著作賞受賞。低温工学会, IEEE会員。