移行形アークプラズマ加熱における 可燃性廃棄物投入時の電圧上昇の機構と対策

正員 足立和郎 (電力中研)

正員 天川正士 (電力中研)

Mechanism and Countermeasures for Voltage Increase of Transferred Arc Plasma after Feeding Burnable Waste

Kazuo Adachi, Member, Tadashi Amakawa, Member

(Central Research Institute of Electric Power Industry)

Miscellaneous solid waste contains burnable and/or non-burnable materials besides metallic waste. When non-metallic waste is treated by transferred arc plasma, plasma stability may be decreased by the low electrical conductivity of the materials. This paper describes the result of an experiment in which rubber and wood chips as typical burnable wastes were fed into the crucible of an operating experimental plasma furnace. The average power of the plasma was 20 to 50kW, however it fluctuated at waste feeding. The base materials of the simulated waste were 10kg of steel and 3kg of fly-ash. Up to 8g of burnable waste was fed after the base materials had melted. The voltage of the arc plasma increased just after the feed, and the increase was almost proportional to the weight of the fed waste. The intrusion of thermally decomposed products of the waste into the plasma dominated the voltage increase. The voltage increase was investigated for several operating conditions of the furnace. The increase of air injection into the furnace and that of arc current controlled the voltage increase during feeding, but the increase of plasma working gas aggravated it.

キーワード: アークプラズマ, 加熱, 熔融, 可燃物, 電圧

1. はじめに

大容量の移行形プラズマトーチを用いた加熱・熔融技術は、従来製鋼プロセスにおける溶鋼の温度調整など、加熱対象の導電性が常に確保されたものに用いられてきた。現在、加熱対象は低レベル放射性雑固体廃棄物⁽¹⁾や都市ゴミ焼却残渣⁽²⁾等、未熔融時の導電性が低い非金属廃棄物に拡大しているが、分別コスト低減のため、廃棄物処理分野における加熱対象の更なる拡大が期待されている。運転中のプラズマ熔融炉に非金属が投入されたとき、移行形アークプラズマの電圧は変動することがある。この現象は、廃棄物やその分解生成物がプラズマ中に異物として混入しプラズマを冷却したり、組成を変化させることによると考えられるが、詳細は明らかにされていない。電圧変動が加熱に及ぼす影響としては変動

が長時間に及ぶ場合の熔融炉の総加熱エネルギーの変化と、急激な電圧上昇によるアークプラズマの不安定化の2つが挙げられる。十分に容量の大きい電源を用いれば、仮にこのような電圧変動が発生しても、少なくとも後者の問題は起こり得ないが、廃棄物の投入がアークプラズマの電圧に与える影響を明らかにすることにより、電源設計や熔融炉の運転条件の更なる最適化のための基礎的知見を得ることができる。移行形アークプラズマへの異物の混入について筆者らは、安定化アークに鉄が混入した場合⁽³⁾と不燃物の一種である珪酸カルシウム系保温材料がプラズマ熔融炉に投入されたときの電圧変動について既に報告した⁽⁴⁾。しかし少量でも影響が大きい可燃物の影響は明らかにされていない。今回、可燃物として、

未分別の雑固体廃棄物に含まれることがあるゴムや木片を小型プラズマ溶融炉に投入したときの炉内状況および移行形アークプラズマの電圧変動を測定し、その機構とその抑制方策を検討した結果を報告する。

2. 実験装置と実験方法

実験には図1に示す小型プラズマ溶融炉を用いた。この装置は、直径1.5mの円筒形の水冷容器の内部に耐火物製のるつぽとプラズマトーチを設置したものである。容器内の雰囲気は自由に設定できるが、今回は可燃物を含む廃棄物进行处理する場合の代表的な雰囲気である大気圧空気とした。実験手順は以下の通りである。

- (1) るつぽ内に普通鋼ブロック(5cm角, 1cm角の組み合わせ) 10kgとフライアッシュ 3kgをあらかじめ設置する。
- (2) アークプラズマを着火し、プラズマトーチを回転させながら、電流 200A(約 30kW)で 30分、更に電流 300A(約 40kW)で 30分模擬廃棄物を加熱し、溶湯を形成させる。
- (3) プラズマトーチを固定し、所定のアーク電流値に設定する。アーク電流は主として 300A(約 40kW)とし、電流をパラメーターとした実験では 200~500A(30~70kW)の範囲とした。図2に示す試料投入用のパイプを通して、水冷容器の外からるつぽ内に、1個ずつ可燃物試料を投入し、このときの電源端子電圧(ここではアーク電圧と呼ぶ。)、電流、排ガス中の O_2 、 CO_2 、 SO_x の濃度を測定する。

試料の投入は、同一条件に対して 3~6 回行った。投入の間隔は、電圧やガス組成に直前の投入の影響が認められなくなるよう、条件に応じて 1~5 分とした。

図1 プラズマ溶融炉と計測系

Fig.1. Plasma melting furnace and measurement system.

また、投入時のるつぽ内の状況は、水冷容器上部からビデオカメラを用いて観察した。プラズマ炉の標準的な運転条件を表1に示す。次章の実験では本運転条件を用い廃棄物の種類と投入量をパラメーターとし、それ以降の実験では、廃棄物の条件を一定として運転条件をパラメーターとした。模擬廃棄物の組成と投入量を表2にそれぞれ示す。図3に示すように、ゴムはシート状のものを丸め、細銅線で縛ったものである。また木片は直径1cmの丸棒を切断したもので、3g以上の試料の場合は1gと2gの試料を組み合わせで細銅線で縛ったものである。不燃物として投入したケイ酸カルシウム系保温材は、10g以下の場合、板状に成型されたものから削りだしたボール状のものを、一度に多量に投入する場合は、シュレッダーで粉砕し、最大5cm角のランダムな形状の欠片と粉の混合物としたものを用いた。

図2 るつぽとプラズマトーチ

Fig.2. Crucible and plasma torch.

表1 標準的な実験条件

Table 1. Standard experimental condition.

アーク電流	プラズマガス流量	炉内への注入空気量
300A	10ℓ/min	2Nm ³ /h

表2 模擬廃棄物

Table 2. Simulated waste.

材料	主な組成または規格	備考
普通鋼	JIS SS400	溶湯形成用 10kg
フライアッシュ	SiO ₂ 44.6%, Al ₂ O ₃ 23.4%, CaO 10.9%, Fe ₂ O ₃ 5.5%, MgO 2.2%, Na ₂ O 2.0%	溶湯形成用 3kg
ゴム	ラテックス 96%, ホルムアルデヒド樹脂 2.0%, 硫黄 1.2%, 亜鉛華 0.8%	可燃物 1~7g
木	セルロース	可燃物 1~8g
ケイ酸カルシウム系保温材	SiO ₂ 50%, CaO 50%	不燃物 1~6g, 200g

図3 投入した可燃物
Fig.3. Burnable materials fed into the crucible.

3. 溶融の状況と電圧波形

〈3・1〉 試料投入時のるつぼ内の状況 可燃物がるつぼ内に落下すると、高温の溶湯に接触するため熱分解が起こり、すすなどの分解生成物が発生し、一時的にるつぼ内の空間を浮遊した。特にゴムの場合は熱分解が急速に進み、浮遊する分解生成物の濃度が高くなり、図4に示すようにアークプラズマの光学的観察が不可能となることがあった。このため、正確な時間は測定できなかったが、落下後1分後の溶湯上にゴムは認められなかった。木片の場合はゴムに比較して熱分解に時間を要し、落下後2分を経過した後も溶湯上に形状を留めていることが確認された。また木片の場合、すすの発生も少なかった。可燃物の場合、投入後に排ガス中の酸素濃度の低下と、これに対応する CO_2 濃度の上昇が見られた。すすなどの分解生成物は、るつぼ内から排ガスダクトに至る経路で燃焼し、ガスのサンプリング箇所では、含まれる炭素分の大半が CO_2 となっていたと考えられる。

図4 廃棄物投入時のアークプラズマの状況
Fig.4. Situation in the crucible at feeding rubber.

〈3・2〉 電圧波形 不燃物を多量に投入した場合の代表的な電圧波形を図5に、ゴムを投入したときの代表的な電圧及び電流波形を図6にそれぞれ示す。

図5 不燃物投入時の電圧波形例
Fig.5. Example of voltage wave form at feeding noncombustible waste.

図6 ゴム投入時の電圧及び電流波形例
Fig.6. Example of voltage and current wave form at feeding rubber.

不燃物の場合、落下直後に最大の電圧上昇が観測された後、緩やかに電圧が定常値に近づいていく傾向が見られる。これは不燃物の電圧上昇機構が、主に不燃物のアークプラズマへの侵入・擾乱であることと、投入量が多いため、投入の開始から終了までに数秒を要することによる⁽⁴⁾。一方、可燃物の場合、落下して数秒後に電圧が上昇する傾向が見られた。本例では落下の約1秒後に最初のピークが観測され、約5秒後に最大のピークが現れているが、落下後、電圧上昇が始まるまでの時間や、波形は同一種類の試料の場合でも若干異なった。しかし落下後数秒の時間を経てから最大の電圧上昇が観測される傾向は、実験条件や落下状況によらず一致していた。

なお、本例では、電圧上昇時に電流の低下が見られる。このような電流の低下は電源が理想的な電流源でないことにより発生したものである。電流の低下はプラズマの温度を低下させ、更に電圧を上昇させる作用があるため、ある程度電圧上昇が大きくなると、電流低下の作用が加わり、更に電圧上昇が大きくなる。従って今回観測された電圧上昇の絶対値は、本実験装置に固有のものであることに注意する必要がある。

〈3・3〉 可燃物投入時の電圧上昇機構の推定 図4に見られるように落下後数秒を経て分解生成物が燃焼槽内を満たし、プラズマを覆い隠す状況を考慮すると、可燃物投入時の電圧上昇のプロセスは概ね次の通りであると考えられる。すなわち、

- I. 溶湯上に落下した可燃物が熱分解する。
- II. 熱分解生成物（可燃性ガス、すす等）が、ある時間をかけて燃焼槽内を浮遊あるいは拡散してアークプラズマに到達し、内部に侵入する。
- III. 分解生成物がプラズマ内部で急速に加熱され、更に熱分解や解離・電離する過程でプラズマを冷却する。
- IV. プラズマの温度低下に伴い、導電率が低下する。

であり、投入廃棄物が直接アークに擾乱を与える不燃物の場合と異なる。実際には吸熱反応によるプラズマの温度低下以外にプラズマの組成変化に伴う輸送特性、熱力学特性の変化も原因であると考えられる。現時点では炉内の熱分解生成物の組成が不明であるが、可燃物に含まれる水素がプラズマの熱力学特性に影響を与えていることも予想される。

プラズマの安定性を検討するためには、電圧上昇の最大値が問題となり、加熱パワーの変化を検討するためには、平均的な電圧上昇が問題となる。そこで表3に示す電圧と電圧上昇率を定義し、次章以降の検討に用いた。

表3 電圧上昇率の定義

Table 3. Definition of voltage increasing ratios.

投入前電圧 V_i	試料を投入する前の10秒前後の電圧の平均値
ピーク電圧 V_p	1個の廃棄物を投入した後、アーク電圧への影響が発生してから収束するまでの間に計測された最大のアーク電圧値
平均電圧 V_{ave}	1個の廃棄物を投入した後、アーク電圧への影響が発生してから収束するまでの間に計測されたアーク電圧の時間平均値
ピーク電圧上昇率 η_{vp}	$(V_p - \text{投入前電圧}) / \text{投入前電圧} \times 100$ [%]
平均電圧上昇率 η_{vave}	$(V_{ave} - \text{投入前電圧}) / \text{投入前電圧} \times 100$ [%]

4. 廃棄物投入量と電圧上昇

〈4・1〉 廃棄物種類とアーク電圧上昇率 図7に標準

的な運転条件における各廃棄物の投入重量とピーク電圧上昇率 η_{vp} の関係を示す。プロットはいずれも同一条件下での投入回数 $n=3\sim6$ の平均値である。ゴムの場合に著しく電圧上昇が高く、木がこれに続き、不燃物の場合、数g程度の重量では電圧上昇がほとんど認められない。これは下記のように廃棄物の熱分解速度の違いにより、分解生成物の濃度が異なったためと考えられる。すなわち、①分解速度が早いゴムの場合、短時間に多量の分解生成物が発生するため、炉内の分解生成物の濃度が上昇し、電圧上昇が著しい。②ゴムよりも熱分解速度が遅い木の場合、分解生成物は発生するが、濃度が低いため、電圧上昇が小さい。③不燃物の場合は、炉内を浮遊する分解生成物がないため、電圧上昇がほとんど無い。前章で述べたとおり、電圧上昇の大きいゴムの電圧上昇は、理想的な電流源を用いた場合に比較して、強調されている可能性があるが、熱分解速度が速い可燃物ほど、電圧上昇が著しい傾向は同様であると考えられる。

図7 ピーク電圧上昇率

Fig.7. Peak voltage increasing ratios.

〈4・2〉 廃棄物投入重量とアーク電圧上昇率 いずれの試料においても、1回あたりの投入重量の増加に連れて、ピーク電圧上昇率が増加している。図8にゴムについて最初の発煙が観測されてから、すすが全く見られなくまでの時間をビデオ画像から計測して求めたすすの炉内存在時間を示す。図のように試料の重量が増加すると、すすの炉内存在時間も増加している。熱分解に要する時間がすすの炉内存在時間に比較して十分に短いため、すすの炉内存在時間は、炉内空間のすすの濃度と相関があると考えられる。このため投入量が増加することによる電圧上昇率の増加は、燃焼槽内の分解生成物の濃度が高まるためと考えられる。

図8 ゴムの投入量とすすの炉内存在時間
Fig.8. Life of soot vs. mass of the rubber.

図10 注入空気量とすすの炉内存在時間
Fig.10. Life of soot vs. flow rate of the injected air.

5. プラズマ炉運転条件と電圧上昇

可燃性廃棄物が投入されたときのアーク電圧の上昇を抑制する手法を検討するために、電圧上昇への影響が大きいゴムについて、プラズマ溶融炉の運転条件と電圧上昇の関係を調べた。

〈5・1〉 注入空気量とアーク電圧 炉内への注入空気量を2, 5, 10Nm³/hとしたときの投入前電圧、ピーク電圧、平均電圧の平均値を図9にすすの炉内存在時間を図10にそれぞれ示す。

図9 注入空気量を変化させたときのアーク電圧
Fig.9. Arc voltages vs. flow rate of the injected air.

ゴムの重量は2.5g、プラズマガス流量は10l/min、投入前電流は300Aである。注入空気量の増加に連れて、投入前電圧が若干増加するが、ピーク電圧が大きく低下していることがわかる。投入時のビデオ画像から、注入空気量が増加すると、すすの濃度が低下し、炉内からのすすの排出が促進されていることが確認できた。図10に示すようにすすの炉内存在時間も低下しており、分解生成物の濃度が高く、電圧上昇を抑制する必要がある場合には、炉内への空気注入・排出を促進し、分解生成物の濃度を低下させることが有効であることがわかる。

〈5・2〉 プラズマガス流量とアーク電圧 プラズマガス（アルゴン）の流量を10, 30, 50l/minにしたときの投入前電圧、ピーク電圧、平均電圧を図11に示す。炉内への注入空気量は2Nm³/h、ゴムの重量は2.5g、アーク電流は300Aである。プラズマガス流量が増加するに連れて、すべての電圧が上昇していることがわかる。プラズマガス流量と周辺雰囲気とのプラズマ内部への取り込みの関係については、大気圧空気中のアルゴンプラズマジェットについて、Pfenderら⁽⁵⁾が、プラズマガス流量が増加すると、周辺の雰囲気をアークプラズマ内に巻き込む効果が強くなることを報告している。今回も同様の機構で、るつぼ内雰囲気中の分解生成物をプラズマ内部に取り込みやすくなることが電圧上昇量増加の主な原因であると考えられる。プラズマガス流量の増加は、加熱の面からは溶湯への熱伝達を向上させるメリットがあり、また安定性の面からはアークの指向性を高める効果があるが、可・難燃物投入時におけるアークプラズマの電圧上昇抑制の観点からは、好ましくないと考えられる。

図 11 プラズマガス流量とピーク電圧上昇率
Fig.11. Arc voltages vs. flow rate of the plasma gas.

〈5・3〉 アーク電流とアーク電圧 投入前のアーク電流を 200, 300, 500A としたときの投入前電圧, ピーク電圧, 平均電圧の平均値を図 1 2 に示す。炉内への注入空気量は $2\text{Nm}^3/\text{h}$, ゴムの重量は 2.5g, プラズマガス流量は $10\text{l}/\text{min}$ である。

図 1 2 アーク電流とアーク電圧
Fig.12. Arc voltages vs. arc current.

電流が増加するに連れて, ピーク電圧, 平均電圧ともに低下していることがわかる。すすの炉内存在時間の低下は僅かであった。電流が増加すると, 試料の熱分解も促進され, 分解生成物の濃度が上昇することが予想されたが, 今回の実験では, 熱分解がプラズマによる試料の直接加熱ではなく, 主に溶湯からの伝熱により起こって

いたため, 電流の増加に伴う分解生成物の濃度上昇の効果は小さかったものと考えられる。一方, ビデオ観察より, 300A から 500A への電流増加に伴い, アーク視直径の増大や陽極点揺動の減少が認められた。このため電流増加に伴い試料投入時の電圧上昇が低下した原因は, 保有熱量の増加により, 分解生成物の混入によるアークプラズマの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弧心周辺の粘性⁽⁶⁾が高まり, 弧心部への分解生成物の進入が抑制される効果など, 廃棄物投入前のアークの特性が変化したことであると推定される。

6. まとめ

移行形アークプラズマを用いて溶融した模擬廃棄物を加熱中に, ゴムなどの可燃物をるつぽに投入したときのアーク電圧の変化を調べ, 以下の結果を得た。

- (1) 可燃物がるつぽ内に落下したとき, 一時的にアーク電圧が上昇した。電圧上昇の主な原因は, プラズマへの直接の擾乱よりも, 熱分解により発生するすすやガスなどの分解生成物がプラズマ内に混入し, プラズマの導電性を低下させることであると考えられる。
- (2) 電圧上昇は, 投入重量に比例した。これは試料の重量増加に伴い, るつぽ内の分解生成物の濃度が上昇するためであると考えられる。ゴムは単位重量あたりの電圧上昇が特に大きい, これはゴムの熱分解速度が高いため分解生成物濃度も高くなるためである。
- (3) 可燃物投入時の電圧上昇を抑制するためのプラズマ炉の運転条件としては, 投入量の制限以外に注入空気およびアーク電流の増加, プラズマガス流量の低減が挙げられる。

今後の課題として, 可燃物投入によるアーク電圧上昇の機構の解明に関しては, 電圧に最も影響を与えている熱分解生成物の特定, アークプラズマ内への周辺雰囲気巻込みの詳細の検討などが, またプラズマ溶融炉の運転条件最適化を検討するためには, 他の可燃物に関するデータの収集がそれぞれ挙げられる。

最後に, 研究課題の遂行にあたり多大な便宜をはかるとともに適切な指導をいただいた電力中央研究所横須賀研究所 吉田幸雄所長, 今城尚久研究コーディネーター, 高須和彦電力部長, 岡本達希首席研究員, 有益な議論をいただいた中央大学 稲葉次紀教授に感謝いたします。また実験に協力いただいた同所電力部古川静枝研究員, 安井晋示主任研究員はじめ同部各位に謝意を表します。

(平成 10 年 12 月 15 日受付, 平成 11 年 3 月 30 日再受付)

文献

- (1) 天川正士・足立和郎・安井晋示・稲葉次紀：「低レベル放射性雑固体廃棄物のプラズマ熔融処理技術の基礎検討」，電学論 A, 114, 597-602 (平 6-9)
- (2) 例えば, H. Jimbo, T. Amemiya and T. Kikuchi: "Plasma Melting of Municipal Waste Incineration Ash", *Proc. 10th SPSM*, B1-1, 21 (1997)
- (3) 足立和郎・天川正士・稲葉次紀：「鉄蒸気混入安定化アルゴンアークの電界-電流特性」，電学論 A, 114, 591-596 (平 6-9)
- (4) K. Adachi, S. Yasui and T. Amakawa: "Influence of the Atmospheric Gases on the Voltage of Thermal Plasma at the Melting Miscellaneous Solid Waste", *Proc. 3rd APCPST*, B6-1, 409 (1996)
- (5) E. Pfender, J. Fincke and R. Spores: "Entrainment of Cold Gas into Thermal Plasma Jets", *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 11, No. 4, (1991)
- (6) 天川正士・足立和郎・大木義路・稲葉次紀：「鉄蒸気の混入した高温アルゴンの熱力学特性と粘性率」，電学論 A, 119, 75-79 (平 11-1)

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熔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。

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。99年3月同博士課程修了。84年4月(財)電力中央研究所入所。以来、廃棄物の熔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。