

<特集>

プラズマ溶融制御システムと有効性について

About a plasma melting furnace regulating system and validity

福間義人*, 続木 毅

(株) タクマ装置設計部溶融設計課

Yoshihito Fukuma* and Tsuyoshi Tsuzuki
Melthing design section mechanical design and engineering dept.

Abstract

A direct-current-plasma melting furnace has simple and compact equipment, and since there are also few amounts of exhaust gases, it has the feature said that equipment capacity is small. In this report, it introduces about the validity of a plasma melting furnace system based on a track record.

Key Words : direct-current-plasma melting furnace, simple and compact, the validity of a plasma melting furnace system

1. はじめに

(株) タクマでは以下の理由で、直流アークプラズマ溶融炉を選択した。

- ①設備がシンプルかつコンパクトである。
- ②黒鉛電極を使用することで電極の冷却が不要となり、高効率である。
- ③還元雰囲気で操業するため、NO_xの発生量が少ない。
- ④製造されるスラグ中の重金属類含有量が少ない。

現在では5施設が稼動し、1施設を建設中であり、その実績³⁾⁵⁾に基づく制御システムの概要と有効性について報告する。

2. プラズマ溶融システムについて

2.1 プラズマ溶融設備の概要

(1) 概要

プラズマ溶融炉は、天井から炉内に挿入した1本の黒鉛電極と炉底に設けた炉底電極間に直流電圧を印加し、黒鉛電極先端から炉底に向かって発生するアークに、黒鉛電極に設けられた気道から窒素を噴出させてプラズマアークを得る。このプラズマアークによる輻射熱、対流

伝熱、電子による伝熱等によって、連続して供給される被溶融物を溶融するものであり、さらに溶融したスラグは導電体であることから、スラグ中を電流が流れる際に発生する電気抵抗熱(ジュール熱)も溶融に利用することができる¹⁾。

電圧を一定に保つために、電極先端から溶融面までの電極高さ(距離)を調整することで、安定したプラズマが得られ、連続して供給される被溶融物は短時間でかつ均一に溶融し、スラグは出滓口よりオーバーフローで連続排出されるため出滓量制御が不要である。溶融炉内の被溶融物中のメタル(鉄、銅が主成分)は炉内でスラグと比重差によって分離し、側壁下部を開孔機によりタップ開孔して排出している¹⁾。

(2) 溶融炉の構造

溶融炉は耐火材内張り構造で、炉蓋及び炉体上部(ガス層部分)は水冷ジャケット構造としている。また、炉下部に水が入って発生する水蒸気爆発を防止する目的で、炉体下部(スラグ層部分)と炉底は、冷却効果を高めた空冷ボックスによる強制空冷方式を採用している。溶融炉本体の冷却水には主にプラント水を使用し、荷電部分(電極昇降装置把持機、電極シール部分)には純水を使用している。

(3) プラズマ溶融炉の特長

主電極が1本であり炉廻りの構造がシンプルで、電圧

* 〒660-0806 兵庫県尼崎市金楽寺町2丁目2番33号タクマビル
TEL: 06-6483-2658 FAX: 06-6483-2756
E-mail: fukuma@takuma.co.jp

Table 1 被熔融物の受入れ基準

熔融炉入口基準		前処理方法	前処理の目的
項目	基準		
粒径	50 mm 以下	破碎篩い分け	①灰供給の安定 ②アークの安定：電極付近に塊が投入されると温度が急激に下がりアークが不安定になる。 ③完全熔融：塊が熔融スラグ面に浮いたままであれば、完全熔融せずに排出される可能性がある。
磁性分	2%以下	磁選	①メタルレベルの上昇抑制：スラグ層が薄くなるとアークが不安定になる。 ②耐火物の損耗抑制：被熔融物中の金属類は酸化しており、耐火物に含まれるCやC-SiC系耐火物が酸化消耗する。 ③スラグとメタルの有効利用：スラグとメタルの分離排出。
水分	5%以下	乾燥	①被熔融物搬送系での付着、閉塞防止 ②熔融原単位、電極原単位の低減：水蒸気の水蒸気ガス化反応によるC系耐火物および黒鉛電極消耗抑制。 ③炉内圧力の変動抑制

の制御が容易に行える。プラズマはエネルギー密度が高いため炉のコンパクト化が可能であり、さらに、メタル排出方式が炉体傾動方式ではなくトップ開孔方式であるため、炉全体の構造がシンプルである。

炉内は酸素濃度 1%未満の還元雰囲気であり、以下の特長¹⁾がある。

- ①高温域でも NOx の発生がほとんどない。
- ②被熔融物中の重金属類はそのほとんどがガス側に移行し、スラグの重金属類含有量が少ない。
- ③電気を熱源としているため排ガス量が少ない。

(4) 安全対策

①感電対策

荷電部と炉体ケーシングを絶縁し、さらに炉殻を接地することで、万一、絶縁が破壊されても感電が発生しないようにしている。また、荷電部は立入禁止区画としている。

②水蒸気爆発防止対策

水が溶湯と接触すると水蒸気爆発が発生する危険性があるため、スラグまたはメタル下部に水が侵入しないように、スラグラインより下部の耐火物は空冷構造としている。

③停電対策

停電が発生するとスラグ出滓中またはメタル出湯中は、水砕水ポンプからの水砕水の供給が一時的に停止して水蒸気爆発発生²⁾の危険性が生じるため、スラグ出滓中、メタル出湯中の停電に関しては、非常用発電機の自動運転により水砕水ポンプが自動で起動する。さらに、停電後非常用発電機が起動して復電し、ポンプから必要水砕水量が供給されるまでの1分間分の緊急水を保有している。メタル出湯中にメタル排出装置駆動源の油圧ポンプが停止しても、油圧アキュムレータの蓄圧によりマッド

ガンを作動させメタル出湯孔の閉塞を可能としている。さらに、万一の場合に備えて空気圧駆動のメタル遮断装置を作動させることで、停電時のメタル出湯停止対策を二重化している。

2.2 プラズマ熔融設備フロー

(1) 前処理設備

被熔融物の受入れ基準と前処理方法を、Table 1に示す。前処理された被熔融物は灰供給装置のホップに貯留され、スクリーフィーダで熔融炉に定量供給される。また、スクリーフィーダの回転数を変更することで、被熔融物の供給量を調整する。

(2) 熔融炉

熔融炉廻りのフローを Fig. 1 に示す。熔融炉の導電部は主電極（黒鉛電極）と炉底電極で構成され、主電極と炉底電極間に直流電源装置で電圧を印加することによって発生する高温のプラズマアークからの伝熱により被熔融物を熔融する。

処理量に見合った電力量を処理量毎に設定し、その電力量に対して予め設定した電圧を一定に保つために、電極先端とスラグ層との間隔を主電極昇降装置により自動調整する。

出滓した熔融スラグは、水砕されて粒状の水砕スラグとして取出される。また、出滓口部分に加熱した窒素ガスを吹き込むことで、熔融炉内で発生するヒュームの出滓口への廻り込みを防止し、出滓口廻りでの熔融ダストの付着防止及び内部の視認性を確保している。

熔融炉内は還元雰囲気であり熔融炉から排出されるガス（以下、熔融排ガス）は、高濃度の可燃ガス（CO, H₂）を含むため、燃焼室で完全燃焼させている。

(3) 燃焼室、減温塔

熔融排ガス中の飛灰は高温域で熔融し、その後、冷却

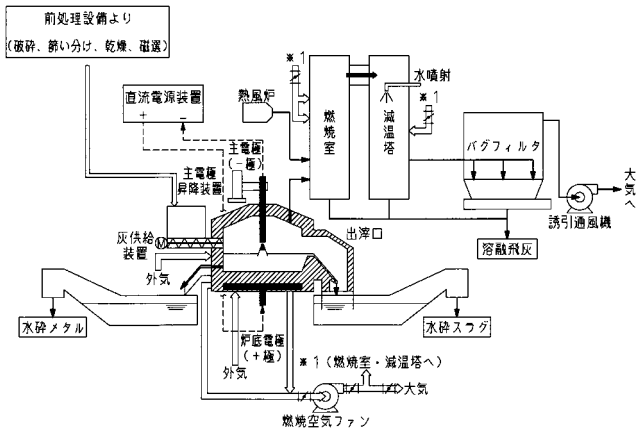


Fig. 1 溶融炉廻りフロー

されると固化して付着するため、燃焼室下部を水冷構造として溶融排ガスを冷却することで飛灰の溶融を防止している。溶融排ガスを冷却した後、可燃ガスを燃焼させる着火源として、バーナ火炎を直接使用すると飛灰が溶融するため、熱風炉を設置して着火源としている。燃焼室内は可燃ガス着火後も局所的な高温域が発生しないよう燃焼用空気を多段で吹込み、緩慢燃焼させる方式としている。

燃焼室より排出された高温ガスは減温塔で水噴射により急冷してダイオキシンの生成を抑制し、後段の排ガス処理設備でばいじんと有害ガスなどを除去して大気放出している。

3. プラズマ溶融設備制御システム

3.1 溶融炉制御システム

(1) プラズマ制御システム

プラズマ溶融炉は、直流電源装置により直流に変換した電気エネルギーで被溶融物を溶融するシステムで、直流電源装置から供給される電流は給電体を通り、集電板を介して炉底電極へ流れる。次いで溶融物を通りプラズマアークを介して黒鉛電極へ流れ、給電体を通り直流電源装置へ戻ってくる。概要を Fig. 2 と、Fig. 3 に示す。

ここで、

V_p : 直流電圧

I_p : 直流電流

R_m : 溶融物の電気抵抗値

R_a : プラズマアークの電気抵抗値

直流電流 (I_p) は、設定された値となるように直流電源装置で自動制御される。従って、直流電圧 (V_p) は次式のように、溶融物及びプラズマアークの電気抵抗値 (R_m) と (R_a) で表すことができる。

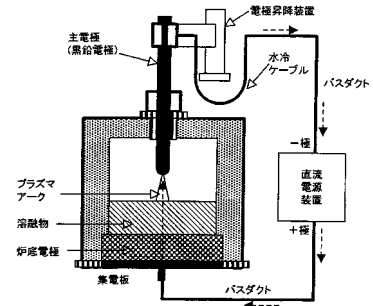


Fig. 2 溶融炉廻りの電気回路概念図

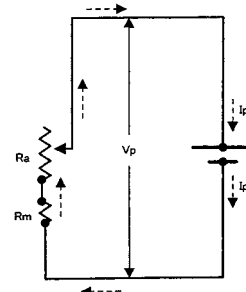


Fig. 3 等価回路図

$$V_p = I_p \times (R_m + R_a)$$

溶融物の電気抵抗値 (R_m) は溶融物の状態 (組成、温度、表面の状態) により変化する。また、プラズマアークの電気抵抗値 (R_a) は主にプラズマアークの長さにより決定されるため、直流電圧 (V_p) は電極昇降装置で黒鉛電極とスラグ面の間隔を調整することにより制御できる。直流電圧が設定値と比べて高い場合には黒鉛電極を下降させてプラズマアーク長さを短く (R_a を小さく) し、反対に低い場合には黒鉛電極を上昇させてプラズマアーク長さを長く (R_a を大きく) することにより調整を行う。

(2) 投入電力

溶融炉昇温工程では耐火物の熱スプールを抑制するために徐々に炉投入電力を増加し、急激な耐火物温度の上昇を抑えながら昇温する。溶融炉耐火物は炉蓋耐火物の温度上昇が速く、これを昇温監視の対象として許容昇温速度以下としている。炉蓋耐火物の昇温が完了した後、被溶融物の供給を開始するが、他の耐火物がまだ昇温中であるため、定格量の被溶融物の供給を行うと安定した溶融が行われない。溶融炉運転初期には低負荷で被溶融物と投入電力の供給を行い、徐々に供給量と投入電力量を増加させて計画の供給量とし、溶融炉の昇温を完了する。

溶融炉へ供給された被溶融物を溶融するためには、被溶融物を常温から溶融温度まで昇温する熱量 (溶融熱量) と、溶融炉からの放熱量および炉内供給窒素の昇温熱量

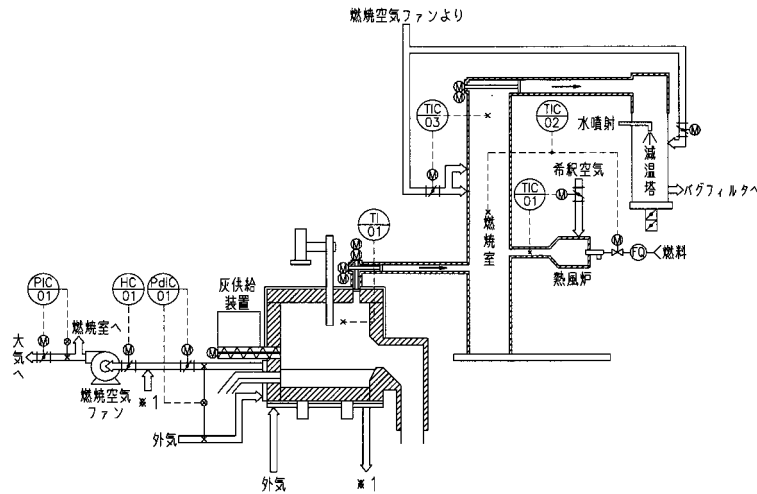


Fig. 4 溶融炉廻り制御システムフロー

の合計を溶融炉へ供給する必要がある。溶融炉放熱量および窒素昇温熱量は供給量にかかわらず一定であるが、被溶融物を昇温するための熱量は供給量に比例するため、溶融炉運転時の投入電力は供給量に応じて調整する。

$$\begin{aligned} \text{投入電力} = & \{ (\text{単位被溶融物溶融熱量}) \\ & \times (\text{被溶融物供給量}) \\ & + (\text{炉放熱量} + \text{窒素昇温熱量}) \end{aligned}$$

また、投入電力に上限がある場合には、

$$\begin{aligned} \text{被溶融物供給量} = & \{ (\text{投入可能電力}) \\ & - (\text{炉放熱量} + \text{窒素昇温熱量}) \} \\ & \div (\text{単位被溶融物溶融熱量}) \end{aligned}$$

溶融熱量は被溶融物の性状（組成、水分等）により変化するため、適時スラグ温度の測定を行い、単位被溶融物量当たりの溶融熱量を補正する。また、炉放熱量は耐火物の損耗量により変化するため、炉放熱量を随時計算しており、定常運転時の炉放熱量が設定値と異なる場合には差分の補正電力補正を行っている。

被溶融物の供給を一時的に停止し溶融炉の温度を維持する場合は、保持運転を行っている。保持運転時には被溶融物の供給が行われていないため、被溶融物から発生するヒュームがなく、プラズマアークや溶融物からの放射熱が大きくなり、炉内雰囲気温度が上昇する傾向となることから、保持運転時の炉投入電力は炉内温度を検出量として調整する。

3.2 溶融炉廻り制御システム

溶融炉廻り制御システムを Fig. 4 に示す。

(1) 炉内ガス温度 (TI01)

プラズマ溶融炉では、炉内温度を連続測定している。炉内温度が高いとサイドアークの発生や耐火物の損傷が発生する可能性があり、プラズマアーク長さを短くする

ために電圧補正値を小さくし、電流を大きくして一定電力を投入する。また、炉内温度が低い状態で被溶融物の供給を行うと炉内に被溶融物の山ができて、山が崩れた時に被溶融物がアークの下に入り込んで一気にガスが発生し、炉圧制御が乱れて炉外にガスが吹き出す可能性があるため、電圧補正値を大きくすることで炉内温度を上昇させる。

(2) 炉体側壁下部冷却空気量 (PdIC01)

炉体側壁下部（スラグ層部分）空冷部分は、耐火物の長寿命化のために、銅スタッドを密に配列した空冷ボックスに冷却空気を流している。空冷ボックスは円周方向に6～8分割されており、冷却空気量を空冷ボックス毎に管理する必要がある。各冷却空気ダクトでは直管部を確保できる配置が困難であり、冷却空気量を直接検出することができないため、炉体冷却部の圧損を検出量とし冷却空気量を制御する方式としている。圧損は外気吸込み口と流量調整ダンパの一次側で測定し、冷却空気差圧を監視して圧力損失が一定となるように冷却空気流量調節ダンパを制御している。

(3) 被溶融物供給量

被溶融物供給量は灰供給装置の回転数から計算し、灰供給装置ホッパにバッチ投入される被溶融物重量を計測して補正している。供給量と炉投入電力のバランスが適正でないと、耐火物の溶損量が大きくなったり、未溶融物の排出などが発生するため、被溶融物の供給量は常時監視している。また、混合溶融運転時には焼却灰と飛灰の混合比率を一定にするため、各々の系統に計量器を設けている。

(4) スラグ温度、メタルレベル

溶融炉運転時は、定期的にスラグ温度を測定する。適

Table 2 スラグの用途先

項目	用途
道路用骨材 コンクリート用骨材 コンクリート2次製品 盛土材, 埋め戻し材等 その他窯業原料等	路床材, 下層路盤材, 上層路盤材, アスファルト混合物骨材等 コンクリート用砕砂, コンクリート用砕石等 インターロッキングブロック, 空洞ブロック, 透水性ブロック, 舗装用コンクリート平板, 汚水桝等 盛土材, 埋め戻し材, 覆土材等 タイル, レンガ, 軽量骨材, 陶管等

正温度は1500°C程度であり、スラグ温度が高い場合は耐火物の溶損量が大きくなり、低い場合は未溶融物の排出やスラグの間欠出滓が発生する。スラグ温度を適正温度に調整するため、投入電力補正を行い電力量を変更する。

メタルレベルは定期的に測定し、メタル抜き時期の判断を行っている。メタルレベルが高くなると、電圧変動が大きくなりアークが不安定になってアーク切れが発生する。また、メタルレベルが上昇すると炉底でメタル固化層が発生し、円滑なメタル抜き作業が困難になる。さらに、メタルレベルがオーバーフローレベル以上になると、スラグとメタルの同時出滓が発生する。

3.3 溶融炉燃焼室制御システム

燃焼室入口水冷ジャケット部では、ダストを固化して沈降排出する目的で溶融排ガスを冷却している。その後、冷却した溶融排ガス中の可燃ガスを燃焼させるため、着火源として熱風を吹込み、さらに、燃焼空気を吹込んでいる。

燃焼室入口温度 (TIC02) は熱風炉燃焼量を制御量とし、熱風炉出口温度 (TIC01) は熱風炉への希釈空気量を制御量としている。また、燃焼室出口ガス温度 (TIC03) は燃焼室供給二次空気量を制御量として、可燃ガスの完全燃焼を行っている。

3.4 溶融炉排ガス処理制御システム

燃焼室より排出された高温ガスを減温塔で水噴射して急冷し、バッグフィルタに通ガスしている。

プラズマ溶融炉は発生する溶融排ガス量が少ないことから、被溶融物の質と処理量の変動が溶融排ガス量に大きく影響する。バッグフィルタでの放熱量はほぼ一定であることから、溶融排ガス量が少ないとバッグフィルタ出口ガス温度の低下が大きいため、減温塔の水噴射直後に希釈空気を供給して、バッグフィルタ出口ガス量が一定となるよう制御している。

4. スラグ・メタルの有効利用

(1) スラグ

直流アークプラズマ溶融炉で製造されるスラグは重金属含有量が低く、スラグとメタルを分離排出している

Table 3 プラズマ溶融システムの特長

評価項目	プラズマ溶融システムの特長
イニシャルコスト	・設備がシンプルかつコンパクトで、排ガス量も少ないため付帯機器の設備容量が小さい。
ランニングコスト	・高温、高密度化したプラズマアークを熱源に使用できるため、炉自体が小さく、放熱量が少ない。 ・排ガス量が少ないため投入エネルギーが小さい。
環境負荷	・スラグとメタルは分離排出されるため、全量が利用できる。

ため製品の純度が高いという特長がある。Table 2 に、有効利用可能な用途先を示す。

Table 2 の用途に対して、これまでの調査²⁾の結果から、各々の用途での有効利用が可能なが確認されている。

(2) メタル

メタルは、Fe (60～70%)、Cu (10～20%)、Ag (約500 mg/kg)、Au (約100 mg/kg) を成分とし、現在有価物として非鉄金属精錬業者に売却している。

5. おわりに

プラズマ溶融システムの特長を、Table 3 に示す。

プラズマ溶融システムは、経済性、環境負荷という観点から有効な廃棄物処理システムであり、今後、複雑化する廃棄物に対しても有効な処理手段であると考えられる。

[参考文献]

- 1) 西垣正秀：タクマ技報, Vol. 5, No. 1, 16-35 (1997)
- 2) 吉井隆裕, 蓑田哲生, 金子正利, 山田優：第15回廃棄物学会研究発表会講演論文集, I, 775-777 (2004)
- 3) 加藤考太郎, 梶谷健：第26回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集, II-3-16, 176-178 (2005)
- 4) 武部尚志, 熊本正, 柴田清, 加藤考太郎：第25回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集, II-3-23, 179-181 (2004)
- 5) 阿久根文博, 井上清一, 加藤考太郎, 樋口直樹：第25回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集, II-3-24, 182-184 (2004)