

ごみ焼却灰溶融プラズマーク炉の実用化

Application of MSW (Municipal Solid Waste) Incinerator Residue Melting Furnace by Electric Arc Plasma

技術本部 西川 進^{*1} 仙波 範明^{*2}
野間 彰^{*3}
横浜製作所 保田 静生^{*4} 川見 佳正^{*5}

ごみ焼却灰溶融炉は、焼却灰・飛灰の最終処分地への負荷低減技術として近年ニーズが高まっている。当社はプラズマーク炉で飛灰と焼却主灰との混合溶融特性を把握するため、横浜市ほかとの共同実験で連続運転 60 日を達成し、その有効性を確認した。混合溶融では、重金属は溶融飛灰に濃縮されるためスラグの有効利用が可能となり、ダイオキシン類は炉出口で 99 % 以上分解できるためダイオキシン対策としても有効であった。スケールアップについては、スラグ池温度計測などからシミュレーションによる炉内状況計測が可能となり、耐久性については各種耐火材を比較し実機材を決定した。現在、平成 11 年度末納入予定のいわき市向け初号機を設計・製作中である。

The need for ash melting furnaces has grown in effective ash disposal from MSW incinerator. We took part in joint research with Yokohama City to determine the melting characteristics of mixed fly and bottom ash in plasma arc furnaces. Our system was found practicable in 60 days of continuous operation. Development showed that our furnace could make slag usable heavy metals by condensing into secondary fly ash and decomposing more than 99% of dioxins at the furnace outlet. Analysis was developed for the design to simulate the flow and thermal field in the furnace by measuring slag temperature. Many refractories were tested to evaluate the durability of material, and a suitable practical refractory was chosen. The first plasma arc furnace with a capacity of 40t/d is now under construction in Iwaki City.

1. 緒言

都市ごみ (MSW : Municipal Solid Waste) 焼却炉から排出されるストーカ灰 (焼却主灰) や集じん機捕集灰 (飛灰) はこれまで埋立処分されることが多かった。しかし、飛灰が特別管理一般廃棄物に指定され、その処理法に 4 方式が規定され、灰溶融がその内の 1 方法となった。当社は焼却主灰溶融炉として黒鉛電極方式プラズマーク炉を 1992 年に開発しているが、飛灰との混合溶融での特性、特に重金属挙動、ダイオキシン類 (以下、DXN と称す) 分解特性等について横浜市、東京都との共同実験でその有効性を確認したので報告する。さらに、これら結果を反映した受注初号機について、その基本設計方針等も本報で報告する。

2. 開発システムと特徴

2.1 開発コンセプト

ごみ焼却灰溶融に対する当社の基本コンセプトとして、加熱熱源には電気及び補助燃料燃焼の 2 方式を用いて開発し、主に発電設備の有無により方式を選択する。

電気加熱では種々の方式があるが、当社は既報⁽¹⁾のとおり、熱効率の良さや操作性等から、黒鉛電極式プラズマーク炉とし、補助燃料燃焼方式はバーナ式表面溶融炉とした。両者は加熱機能は異なるが、基本構成は同一である。

2.2 システムの特徴

当社のごみ焼却灰溶融炉、特にプラズマーク炉でのシステムの特徴は表 1 に示すとおりである。

主灰は乾灰受入れとし、前処理では、磁選や大形物のふるい分けで溶融不適物を除去し、溶融炉に投入する。溶融炉は極力還元雰囲気として灰中塩化物・重金属の揮散を促進して、スラグ中の

表 1 プラズマ溶融システムの特徴
Characteristics of plasma arc melting system

システム	特 徴	備 考
前処理	受入灰 大形物 鉄分	乾灰直接受入れ ふるい分け除去 磁選選別
溶融炉	電極 炉内雰囲気 スラグ排出	黒鉛製 還元性 オーバフロー 作用ガス N ₂ メタルは同一出滓口より傾動排出
排ガス処理	未燃分分解 除じん 酸性ガス	二次燃焼室設置 バグフィルタ ガス吸収塔

塩素濃度を低減する。溶融炉内にたまり積る鉄、銅などのメタルは適宜溶融炉を傾動させてスラグと同一出滓 (さい) 口より排出する。溶融炉排ガスは十分に二次燃焼させ、DXN や未燃物の分解を促進し、除じん後、酸性ガスを除去する。

3. 実証試験内容

3.1 試験方針

当社ごみ焼却灰溶融プラズマーク炉の有効性を実規模ベースで実証することを目的に、横浜市鶴見工場 (鶴見炉) と東京都葛飾清掃工場 (葛飾炉) に各々実証プラントを建設した。両炉での試験目的は、① 灰種による灰溶融特性の把握、② 有害物質 (重金属、DXN) の挙動調査、③ スケールアップデータの取得、などで個別のねらいは、鶴見炉では長期連続運転性、葛飾炉では重金属ほかの低公害性の確認である。

3.2 実証プラント

実証プラントの一つである葛飾炉の装置フローを図 1 に示す。本プラントの特徴は、スラグの冷却に水砕方式を採用しているこ

*1 横浜研究所主管

*2 横浜研究所熱・化学研究室

*3 横浜研究所制御・応用物理研究室

*4 環境装置技術部設計二課主務

*5 環境装置技術部設計二課

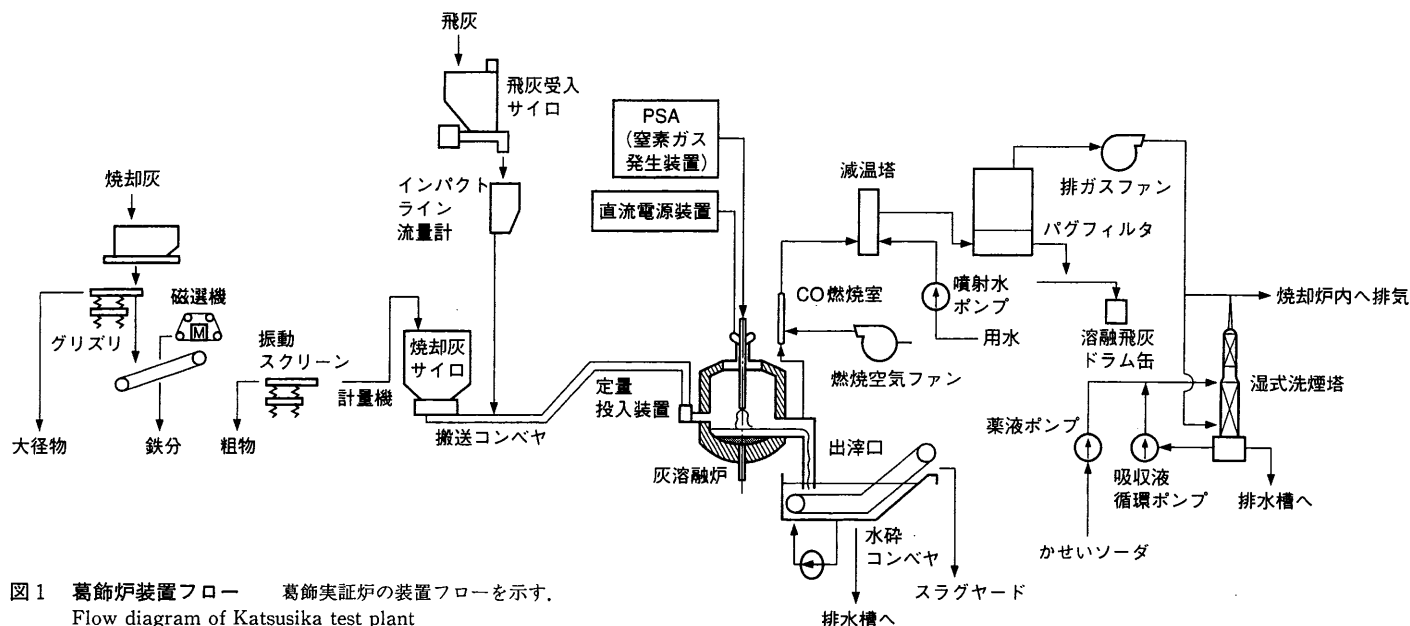


図1 葛飾炉装置フロー 葛飾実証炉の装置フローを示す。
Flow diagram of Katsusika test plant

表2 運転状況一覧
Typical conditions of ash melting test

項目	単位	葛飾炉	鶴見炉
定格処理量	t/d	15	7.8
灰供給量/炉負荷	(kg/h)/%	530/85	306/94
N ₂ 流量 (Total/電極)	Nm ³ /h	10.2/1.6	16.3/1.8
電流/電圧	A/V	2041/264	1342/231
供給電力	kW	540	310
アーク長	mm	50	45
電極消耗量	kg/t-ash	0.9	1.26
スラグ回収量/回収率	(kg/h)/%	472/89	251/82
炉内雰囲気温度	°C	1259	809
炉体冷却熱量	kW	270	148

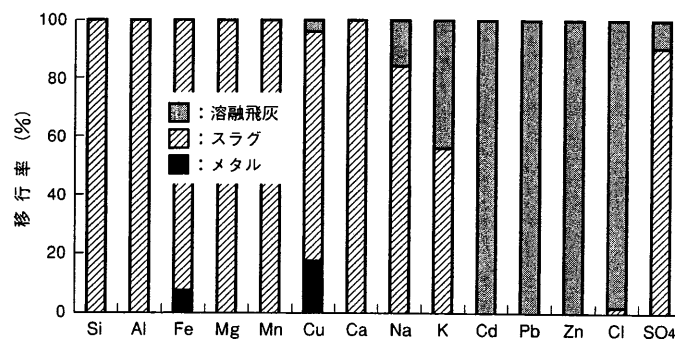


図2 各元素の挙動 (主灰/EP 灰混合溶融) Si, Al, Ca はスラグへ, Pb, Znなどは溶融飛灰へ移行する。
Typical behavior of elements in case of mixed ash melting test

とである。プラントは、前処理装置、溶融設備、排ガス処理設備等から構成されており、溶融炉からの排ガスに、燃焼室で空気を吹込み、CO等を燃焼させた後、減温塔を経てバグフィルタでダストを溶融飛灰として除去し、回収している。

他方の実証プラントである鶴見炉では、取出した湿主灰を乾燥し、磁力選別、25 mm以上の大径物除去に加えてアルミ選別を実施し、溶融に供している。これは、溶融対象の選択や既設焼却炉への対応も視野に入れたものである。

4. 実証試験結果

4.1 溶融特性

4.1.1 運転結果

表2に葛飾炉、鶴見炉の主灰・飛灰混合灰での代表的な運転状況を示す。アーク長は両炉共40~100 mmを目安に運転しているが、電流が大きいこと、スラグ層を深くしたことによって葛飾炉の電圧が高い。なお、連続運転性については鶴見炉で約60日間を確認した。

4.1.2 電力原単位と熱収支

電力原単位 η (kWh/t) は灰1 tを処理するための電力として、式(1)で表される。

$$\eta = [C_p \times (T_s - 20) + H_f] / 860 + 1000 \times Q_b / x \quad (1)$$

ここで、

x : 灰供給量 (kg/h)

C_p : 灰の比熱 (kcal/kg°C)

T_s : スラグ温度 (°C)

H_f : 灰の融解潜熱 (kcal/kg)

Q_b : ベース電力 (kW)

ベース電力は、炉径等によって異なる。両炉の電力原単位は約1000 kWh/tである。

両炉の熱収支では、入熱は葛飾炉・鶴見炉共に電力が95%程度を占めている。出熱は、炉体冷却熱量が50%程度、スラグ持出し熱量が40%程度、排ガス持出し熱量は数%であり両炉でそれほど差はない。

4.2 諸特性

4.2.1 重金属挙動

試験結果の代表例として、主灰/EP (電気集じん機) 灰混合溶融 (混合比3/1) における元素の挙動を図2に示す。主成分であるSi, Al, Caは、ほぼ100%がスラグに移行した。一方、Cd, Pb, Zn等は大部分が溶融飛灰から回収された。Na, Kはそれぞれ60%, 30%がスラグへ移行し、残りは塩化物となり、溶融飛灰の主成分として回収された。主灰単独、主灰/EP灰混合の場合も同様の傾向が得られた。この傾向は電気炉を用いたラボ試験結果⁽²⁾や溶融雰囲気での酸素濃度と重金属挙動解析とほぼ一致した。

4.2.2 DXN の分解

熔融炉排ガスの燃焼室における DXN 分解は、通常燃焼と同様に、温度と滞留時間に依存する。燃焼室出口温度と DXN 濃度の関係を図 3 に示す。燃焼室を高温化すると、特に 900℃ 以上で分解効果が大きい。燃焼室での滞留時間は約 4 秒であり、DXN の分解率は、99.0 % 以上であった。

しかし、熔融炉の排ガスは、ごみ焼却排ガスでの 300～500℃ の温度域より更に低温域の 170～200℃ においても再合成が見られた。再合成を抑制するには、排ガス温度を 160℃ 以下まで急冷することと、160℃ 以上の温度域でのダストのたい積を極力少なくすることである。

葛飾炉におけるバグフィルタでの DXN の挙動を図 4 に示す。除じん用バグフィルタでは、DXN の除去率は低く、バグフィルタ入口温度を 145℃ まで低温化しても約 80 % の除去率しか得ることができない。

これは、表 3 に示すように、熔融飛灰の比表面積が小さく、また炭素分に乏しいため、DXN の吸着能が低く、低い DXN 除去率しか得られなかったものと考えられる。

触媒 (V_2O_5/TiO_2 系) を担持したバグフィルタは、入口温度の上昇に伴い DXN の低減が見られ、200℃ 以上で 90 % 以上の低減が可能であった。活性炭を噴霧した場合、噴霧量 24 mg/Nm³ で除

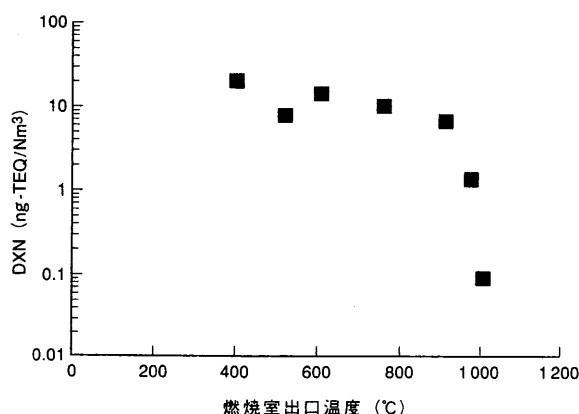


図 3 燃焼室出口温度と DXN の関係 温度 900℃ 以上で DXN 濃度が低下する。
Relationship between gas temperature and DXN contents at outlet of furnace

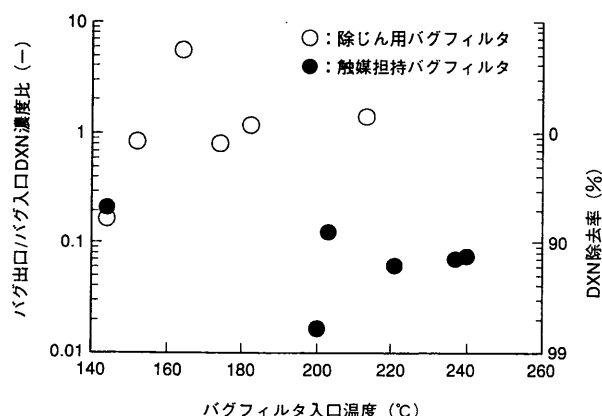


図 4 バグフィルタでの DXN 挙動 除じん用バグの 160℃ 以上では DXN が低減しない。触媒は 200℃ 以上で分解率 90 % 以上となる。
Typical behavior of DXN at bag filter system of melting furnace

表 3 各灰の比表面積の比較

Typical conditions of various ash

項 目	単 位	熔融飛灰	焼却飛灰 (バグ灰)
比表面積	m ² /g	0.65	6.5
灰中 C	%	0.1	1.1

表 4 路盤材への適用試験結果

Results of application test for road construction stone of slag

試験値	スラグ (鶴見：空冷)	道路用砕石品質目標値
表乾比重	2.736	2.45 以上
吸水量 (%)	0.17	3 以下
すりへり減量 (%)	30.2	30 以下
安定性 (%)	0.2	12 以下
軟石量 (%)	0	5 以下
細長偏平量 (%)	2.4	10 以下

去率 92.9 % を得ることができた。熔融飛灰中の DXN は、0.0042～0.001 ng-TEQ/g であった。

4.2.3 スラグ性状

スラグの重金属の溶出は、いずれも基準値以下であり、スラグの安全性を確認することができ、路盤材等に再利用することが可能となった。空冷スラグでは、粒度調整のみで路盤材への適用が可能で、表 4 に示すスラグを 50 % 混入し、横浜市内の公道に試験施工し、問題ない状況にある⁽³⁾。水砕スラグは、砂の代替物として舗装用アスファルトに再利用でき、所内で試用している。

4.2.4 その他の特性

(1) 主灰中のアルミの挙動

主灰のアルミ選別を行った場合と行わなかった場合について試験を実施したが、重金属の挙動や電圧変動に大きな違いは見られなかった。しかし、アルミ選別を行わなかった場合、溶融条件によっては金属アルミがスラグ中に混入する場合もあり、スラグの利用を考えると、アルミ選別を行うことが望ましい。

(2) 水分の影響

試験では主に乾灰での試験を実施した。しかし、実機では若干の水分混入の可能性があることや、水を添加することにより有機物質の低分子化が生じ、DXN の生成を抑制する効果が期待できることから、供試灰中に水分を添加した試験を実施した。

試験の結果、水分を約 10 % 添加することにより、燃焼室出口の DXN は 26 % 減少した。また、水分の重金属挙動に対する影響は、スラグ中の重金属濃度に差はなかった。

4.2.5 スラグ池温度

灰溶融シミュレーションによる炉内熱流動予測精度向上のために、特殊保護管付き熱電対を用いてスラグ池内部の温度を計測した。図 5 にスラグ池温度計測結果及び炉内雰囲気温度を示す。スラグ池温度は 1200～1600℃ でかなり変動しており、灰投入時にはスラグ池温度と炉内雰囲気温度の差が 400℃ 程度と大きい。保温時には両者はほぼ同程度の温度を示している。これは灰投入時にはスラグ面に灰が浮いていること、炉内にダストが充満していることからスラグ面から雰囲気へのふく射が遮られるためと考えられている。

4.2.6 スラグ池可視化

灰溶融シミュレーションの精度を向上し、スケールアップ時の炉内状況を予測するため、赤外線カメラを用いて炉内観察を実施

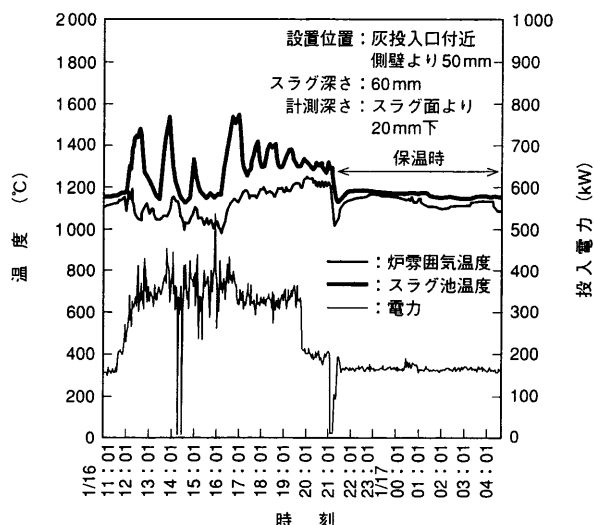


図5 スラグ池温度（鶴見炉） 鶴見実証炉におけるスラグ池温度を示す。
Molten slag temperature in Tsurumi plant

した⁽⁴⁾。

保温時の炉内状況及び灰投入時の炉内状況は、保温時にはスラグ表面全面が溶融しているが、灰投入時にはスラグ池表面が灰で覆われており、灰がスラグに浮いた状態で溶融していることが分かる。プラズマ直下からスラグのわき出しも観察された。

5. 実機の設計

5.1 スケールアップ

灰溶融プラズマアーク炉のスケールアップのため熱流動解析を用いて熱流動状態を検討した。灰の溶融モデルには灰カバリングを考慮し、伝熱モデルにはプラズマ・耐火材表面・スラグ液面の放射伝熱、アークからスラグへの対流伝熱、スラグ内ジュール発熱、灰溶融による吸熱を考慮した。

シミュレーションの結果、スラグ流動はスラグ内ジュール発熱に起因する自然対流が支配的であり、中心からわき出していることが示され、炉内可視化試験結果と同様の傾向であった。このシミュレーションによって炉内熱流動分布を予測でき、実機適用が可能と考える。

5.2 耐火材耐久性向上

灰溶融プラズマアーク炉では1300°C以上の高温で灰を溶融するため、溶融部耐火材の侵食が激しい。耐火材の寿命延長方法としては、(1)耐火材温度を低減すること、(2)壁面近傍のスラグ流速を低減すること、(3)スラグ自身の凝固層（セルフコート層）を生成すること、(4)侵食に強い材料を開発することなどが挙げられる。

上記のうち特に材料に注目し、耐火れんがの比較テストを実施した。図6にテスト結果を示す。高SiC系れんがとCr₂O₃系れんがの耐久性が良好であった。それぞれの侵食メカニズムは、SiC系れんがはSiCが酸化されSiO₂となり、スラグ中成分と反応してれんがの融点が低下して侵食する。Cr₂O₃系れんがはスラグ成分がれんがに浸透し、これとれんが成分が反応し、融点が低下して侵食することが分かった。

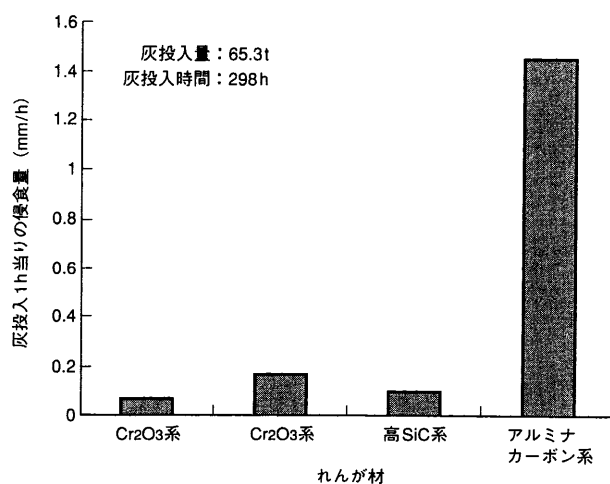


図6 耐火れんが比較テスト結果 高SiC系及びCr₂O₃系れんがの耐久性が良好であった。
Test of many kinds of refractories

現在、侵食の激しい出滓口の形状を適正化して耐久性の向上が確認でき、今後材料改善等により更なる向上を図る。

5.3 実用化への取組み

前述のとおり約3年間にわたり実証試験を実施して、技術確立ができたと考えている。しかし、実用化に当っては更に信頼性を向上させて臨む必要がある。

長期信頼性では耐火材の長寿命化のほかに、高グスト濃度排ガスでの閉そく防止がある。このほか、溶融温度の最適制御などの制御化・自動化やスラグ品質の確保、安全監視などが挙げられる。これらはいずれも他の製品では適用された技術であり、溶融炉への応用として対応していく方針である。

6. 結 言

ごみ焼却灰の溶融技術は今後のごみ処理として重要な技術であると考え、当社は黒鉛電極式プラズマアーク炉ほかで対応している。このプラズマアーク炉は約3年間にわたり、東京都と横浜市で実証試験を実施し、性能面など実用化技術のほかスラグ有効利用法なども確立することができ、関係者のご協力に感謝します。現在は、平成11年度末納入のいわき市向けプラズマアーク炉初号機に実証結果を反映して設計、製作中である。この運転結果についても改めて報告し、その有効性も明らかにする予定である。

参 考 文 献

- (1) 西川 進ほか、ごみ焼却灰溶融プラズマアーク炉の開発、三菱重工技報 Vol.29 No.4 (1992)
- (2) 仙波範明ほか、焼却灰・飛灰の溶融処理における重金属及び塩類の挙動、廃棄物学会第7回研究発表会講演論文集 Vol.1 (1996-10) p.464
- (3) 百瀬英雄ほか、ごみ焼却灰資源化技術としての飛灰混合溶融、廃棄物学会第9回研究発表会講演論文集 (1998-10) p.449
- (4) 野間 彰ほか、プラズマ灰溶融炉のスケールアップに関する予備的検討、第11回熱工学シンポジウム講演論文集 No.98-23 (1998-7) p.53