

シャフト炉式ガス化溶融炉の改善の経緯と今後の展望

～ The improving history of the shaft-furnace type
direct melting system and future prospects ～

長田 守弘 * 環境ソリューション事業部
ゼネラルマネジャー
Morihiko OSADA

星沢 康介 環境ソリューション事業部
計画技術部 技術室長
Yasusuke HOSHIZAWA

高田 純一 環境ソリューション事業部
計画技術部 マネジャー
Junichi TAKADA

吉本 雄一 環境ソリューション事業部
計画技術部 マネジャー
Yuichi YOSHIMOTO

柏原 友 環境ソリューション事業部
計画技術部 技術室
Tomo KASHIWABARA

西 猛 環境ソリューション事業部
事業企画室 マネジャー
Takeshi NISHI

抄録

都市ごみのガス化溶融技術の一つであるシャフト炉式ガス化溶融プロセスは、最終処分場延命やダイオキシン類などの有害物質抑制に有効である。昨今、処理対象物の拡大、コークス使用量の低減を含めたランニングコスト低減、高度排ガス処理など顧客のニーズは多様・高度化する中で、当社は、その顧客ニーズにこたえるべく開発を続けてきた。その結果、資源循環型社会の形成、地球温暖化抑制などに対して一定の成果を達成した。本稿では、シャフト炉式ガス化溶融炉の改善の経緯と、今後の展望について述べる。

Abstract

The shaft-furnace type direct melting system, which is one of the gasification and melting technologies for municipal solid waste treatment, is effective in prolonging the life of final landfill site and reducing harmful substances such as Dioxins. Nowadays, customer needs such as reduction of running cost including reduction of coke consumption or advanced exhaust gas processing, diversity of waste to be treated were becoming diverse and more complex. Therefore, we keep on developing our technologies in order to meet those needs. As a result, we could achieve some positive results in recycling-based society and the prevention of global warming. In this paper, we report the improving history of the shaft-furnace type direct melting system and future prospects.

1. 緒言

日本の一般廃棄物発生量は年間約 5000 万 t であり、従来その大部分を焼却し、発生した焼却残渣を最終処分場に埋め立ててきた。しかし、国土の狭い日本では最終処分できる場所も限られているため、最終処分量を極小化することが求められてきた。図 1 に最終処分場の残余容量と残余年数の推移を示す。最終処分場の残余年数については、近年のリサイクル工場の整備による回収率向上により微増傾向ではあるものの、依然 15 年程度と逼迫しており、残余容量は確実に減少している。

ごみ処理方式の一つであるガス化溶融方式は、廃棄物を熱分解・ガス化させた後高温燃焼させ、廃棄物中の灰分を溶融・再資源化する方式であり、ガス燃焼からの熱エネルギー回収率を向上させるとともに、従来

焼却残渣として最終処分していたごみ中の灰分をスラグ・メタルとして回収し、再資源化できる可能性がある。歴史的には、1970 年代の石油危機により、廃棄物の資源化（燃料化）のニーズが高まり、1970～80 年代にかけて、数種類のガス化溶融方式が開発・実機

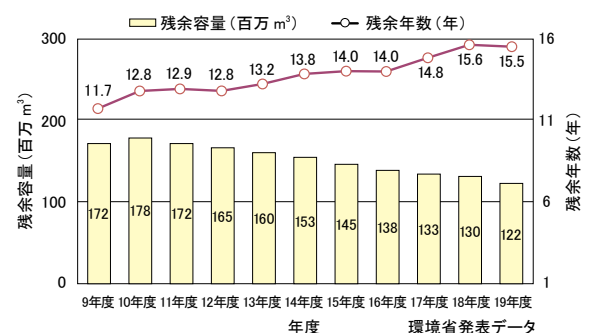


図1 日本の一般廃棄物最終処分場残余容量と残余年数
Fig.1 Changes to residual volume and remaining years of final landfill site in Japan

化された。当社シャフト炉式ガス化溶融炉の一号機、二号機の設置も1979～80年である。しかし、その大半がトラブルの多さやランニングコストの問題を抱え、普及には至らなかった。

一方、ごみ焼却に伴う公害防止対策、特に近年はダイオキシン類排出抑制が叫ばれており、1997年に厚生省（現：環境省）より、「ごみ処理に係るダイオキシン類発生防止等ガイドライン」（新ガイドライン）が示され、さらには2002年にダイオキシン類特別措置法が施行された。これに伴い、廃棄物処理施設におけるダイオキシン類発生抑制対策が急務となった。

この動きに対し、ガス化溶融方式の高温燃焼がダイオキシン類生成抑制に効果的であることや、最終処分

場枯渇による溶融ニーズの高まりにより再び注目され、2000年頃より新しいガス化溶融方式の実機化が相次いでいる。

ガス化溶融プロセスは、その熱分解方法の違いなどにより、図2のように分類される。この中で、当社の直接溶融・資源化システムは、シャフト炉式ガス化溶融炉に位置づけられ、熱分解・ガス化と溶融を単一の炉で達成することが特徴である。

本稿では、当社のシャフト炉式ガス化溶融炉（直接溶融・資源化システム）について、30年の稼働実績を積み重ねる中で行ってきた改善・改良と今後の展望について述べる。

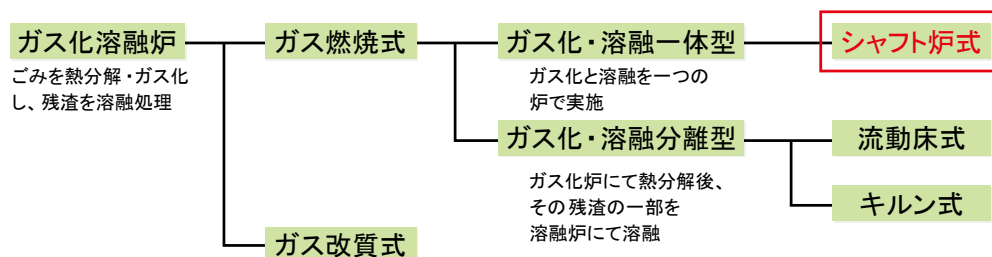


図2 ガス化溶融炉の分類

Fig.2 Classification of the gasification and melting furnaces

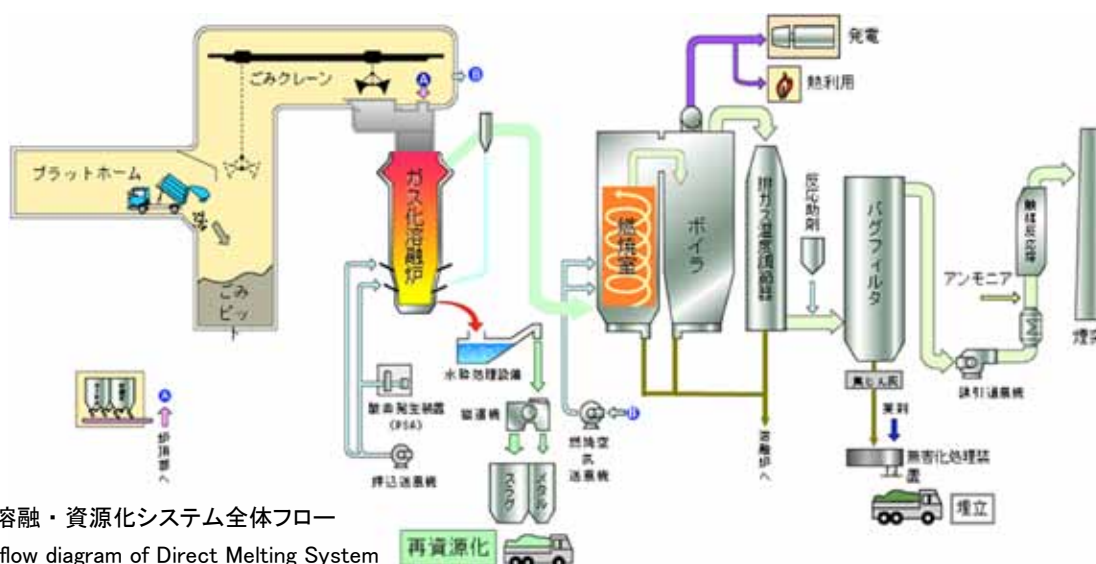


図3 直接溶融・資源化システム全体フロー

Fig.3 The flow diagram of Direct Melting System

2. シャフト炉式ガス化溶融炉（直接溶融・資源化システム）の特徴と改善課題

図3に直接溶融・資源化システムの全体フローを示す。システムの中核をなすシャフト炉式ガス化溶融炉は、溶融熱源および還元剤としてのコークスとスラグの塩基度調整剤として石灰石を使用し、溶融炉の炉上

部より廃棄物とともに装入する。シャフト炉内は上部から乾燥・予熱帯（約300℃）、熱分解・ガス化帯（300～1000℃）、燃焼帯（1000℃～1700℃）、溶融帯（1700℃～1800℃）に区分される（図4参照）。乾燥・予熱帯では廃棄物が熱せられ、通常の都市ごみではごみ中に約50%含まれる水分が炉底部より供給される燃焼分

解ガスにより乾燥・蒸発される。乾燥した廃棄物は次第に降下し、熱分解・ガス化帯において可燃分がガス化される。この熱分解ガスは、炉上部から排出される。廃棄物と共に装入されたコークスは、炉下部に数段設置した羽口と呼ばれる送風ノズルより吹き込まれた酸素富化空気により高温燃焼し、炉下部に高温火格子を形成することにより、還元雰囲気での形成と廃棄物中灰分の安定溶融を実現している。廃棄物の灰分の溶融により生成したスラグ・メタルは炉下部の出湯口から定期的に排出する。ガス化溶融炉から発生した熱分解ガスは、後段の燃焼室で高温燃焼することで、可燃性ガス、タール、ダスト分を完全分解させ、ダイオキシン類の発生を抑制させる。燃焼ガスは、廃熱ボイラで熱回収（一般的蒸気仕様：3～4MPa, 300～400℃）し、発生した蒸気は蒸気タービン発電機にて発電し、場内の電力供給および、余剰電力を外部に売電している。一方、廃熱回収後の排ガスは、排ガス処理設備により塩化水素（HCl）、窒素酸化物（NOx）などを除去（一般的な乾式排ガス処理：HCl 30ppm, NOx 50ppm 以下）し、クリーンな排ガスとしたのち大気放散される。

当社では、シャフト炉式ガス化溶融炉の特長を活かしつつ、以下の客先ニーズ課題を中心に改善を進めてきた。次節以降、その改善の具体的なポイントについて述べる。

- (1) 処理対象物の拡大：従来焼却処理できなかった対象物の溶融処理
- (2) 溶融物（スラグ・メタル）の有効利用
- (3) 最終処分量削減
- (4) コークス使用量削減
- (5) 高効率エネルギー回収：本項目については本誌掲載の別論文にて詳細に述べる。

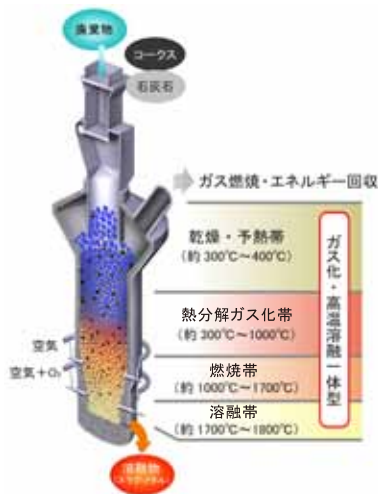


図4 シャフト炉式ガス化溶融炉
Fig.4 The overview of Shaft-furnace type gasification and melting furnace

3. シャフト炉式ガス化溶融炉の改善

3-1. 処理対象物適用拡大

シャフト炉式ガス化溶融炉は、コークスを使用することにより、幅広いごみ質に対して安定溶融処理が可能である。この特長を活かして、従来埋め立てしていた廃棄物等をスラグ・メタルとして再資源化することで、廃棄物のリサイクル率向上に努めてきた。表1、図5にこれまで溶融処理した都市ごみ以外の処理対象物と、その性状の一例を示す。

図5に示すような掘り起こしごみ、焼却残渣、汚泥などの廃棄物の性状は、低位発熱量、灰分とも広範囲にわたり、都市ごみとは大きく異なっている。

これら性状の異なる廃棄物に対し、直接溶融・資源化システムでは、対象物に応じて単独処理あるいは都市ごみとの混合処理を行い、広範囲な性状の廃棄物に対応している。

図6に、最終処分場に埋め立てた廃棄物を掘削し、都市ごみと共に溶融処理することで、最終処分場の延命化を図る取り組みについて、その処理フローを示す。この取り組みにより、低コストで効率よく最終処分場延命化が図れるため、新たな最終処分場を確保できない自治体にとって、有効な手段となっている。

表1 都市ごみ以外の廃棄物の例
Table1 An example of the waste other than Municipal Solid Waste

名称	発生過程	特徴
焼却残渣	廃棄物を焼却した結果発生した残渣	高灰分
汚泥	下水・し尿処理場の処理過程などで生じる、有機質の最終生成物が凝集したもの	高水分
掘り起こしごみ	最終処分場に埋め立てられていたごみを掘り起こしたもの。飛散防止のために使用した覆土や不燃物およびプラスチックなどの混合物	高灰分
シュレッダーダスト	自動車などを破砕し、有機物を取り出した残渣	高灰分、高発熱量

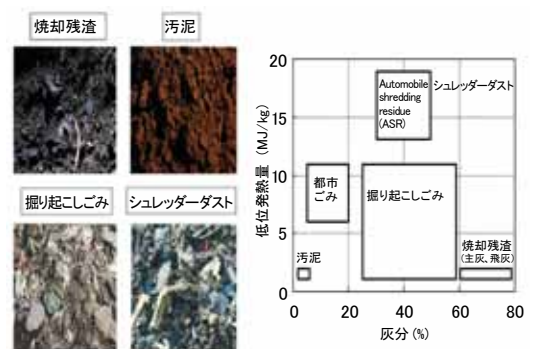


図5 種々の廃棄物の性状
Fig.5 The property of various kinds of waste

次に、焼却残渣の溶融処理による最終処分場延命化の事例を示す。この例では、市内の他焼却施設から発生する焼却残渣と、破碎残渣（可燃・不燃）を、直接溶融・資源化システムにて都市ごみと混合溶融することで、従来最終処分していた焼却残渣をスラグ・メタルとして再資源化し、最終処分量の削減が可能となった。図7にこの例におけるごみ処理のフローを示す。この場合、直接溶融・資源化システムの導入により、最終処分量が大幅に削減する可能性がある。

近年、アスベストによる健康被害がクローズアップされる中、その安全な処理方法が求められている。吹き付け材などの飛散性アスベスト廃棄物については従

来より高温溶融処理にて無害化できることが示されていたが、今後、大量に発生が見込まれる非飛散性アスベスト廃棄物についても高温溶融処理が有効であることを確認するため、環境省の要請を受けて2006年にシャフト炉式ガス化溶融炉の試験設備（北九州市戸畑区）を用いて、10t／日規模の実証試験を実施した。

その結果、シートパッキン材やスレートを一般ごみやASRと混合処理することで、完全溶融により周辺環境に影響を与えることなく無害化できることを検証した。¹⁾ 引き続き2007年には北九州エコエナジー（株）の実機施設を用いて良好な結果を得たため、2009年中には本格営業に入る予定である。

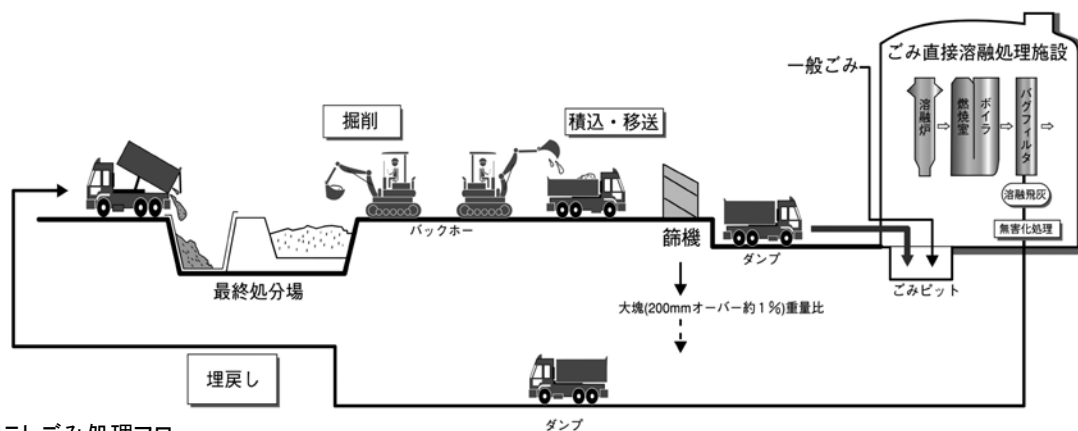


図6 掘り起こしごみ処理フロー
Fig.6 The treatment flow of sorted waste

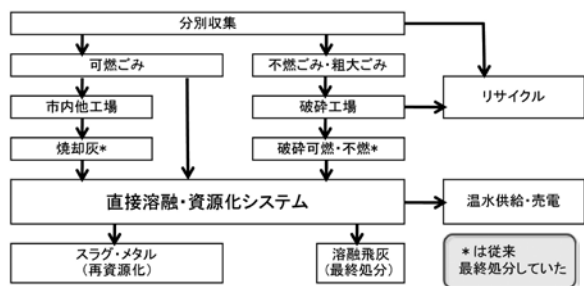


図7 A市における一般廃棄物処理フロー
Fig.7 The waste treatment flow in A City

3-2. 処理対象物適用拡大

溶融物の品質を確保するためにシャフト炉式ガス化溶融炉では、溶融温度の維持と塩基度調整（CaO/SiO₂ = 0.8～1.0）により流動性を高めており、水砕時に溶融スラグとメタルが独立して凝固する。これを独自開発の磁選機を用いることで溶融スラグにメタルが混入しないよう分離回収し、さらに軽破碎することで粒

度調整している。

シャフト炉式ガス化溶融炉では、溶融炉下部にコークスによる高温還元雰囲気を形成することから、ごみ中の低沸点重金属（鉛など）は、スラグより揮発し、溶融飛灰へ移行する。そのため、スラグ中の重金属類含有量が小さいというメリットを持つ。当社では、2006年のJIS制定に先駆け、公共工事での道路やコンクリートへの利用など用途開発を行って来た。納入施設から排出されるすべての溶融スラグの品質データを取り続けてきており、その利用先とも協力関係を維持し使用状況を確実にフォローしてきた。プロセス改善や処理対象物の拡大研究においても、常にこの溶融スラグ品質確保を指標としている。

溶融メタルについてはその性状に応じた用途開発により、建設用機械のカウンターウェイト材や製鉄原料、非鉄原料などとして有効利用している。²⁾

3-3. 最終処分量削減 飛灰の山元還元

溶融炉から揮発した鉛 (Pb)、亜鉛 (Zn) などの低沸点重金属類はガス冷却過程 (ボイラ及び排ガス温度調節器) で凝縮し、バグフィルター (150 ~ 170℃) で溶融飛灰として分離濃縮される (図 8 参照)。従来、この溶融飛灰はキレート薬剤で重金属の固定化・無害化処理され埋め立て処分されて、ガス化溶融では唯一の埋め立て対象であった。しかし、飛灰の湿式洗浄技術により飛灰中塩化物を除去し、重金属濃度を向上させ、非鉄精錬プロセスに戻す、いわゆる山元還元を実用施設で検証し、直接溶融・資源化システムは最終処分を無くすことを可能とした。今後、レアメタル資源再生を鑑み、非鉄精錬会社への山元還元を積極的に実施していく予定である。

3-4 コークス使用量の削減

シャフト炉式ガス化溶融炉は、炉下部にて高温火格子を形成させるために、石炭を原料としたコークスを使用するが、地球温暖化の観点のみならず、LCC(Life Cycle Cost) の面からもその使用量削減が必要である。そのため、長年にわたりコークス使用量削減技術開発に取り組んできた。図 9 にこれまでのコークス使用量削減の経緯を示す。

溶融炉開発初期では、120kg/t であったものが、羽口多段化、可燃物羽口吹き込みにより 40kg/t レベルまで低減し、稼働開始時に比べて 1/3 のレベルとなった。さらに、下段羽口からの送風を予熱することにより、

羽口から吹き込まれたダストの燃焼促進を図り、コークス代替効率を向上させるコークス比低減技術を開発中である。

以下、これまでの開発の概略を示す。

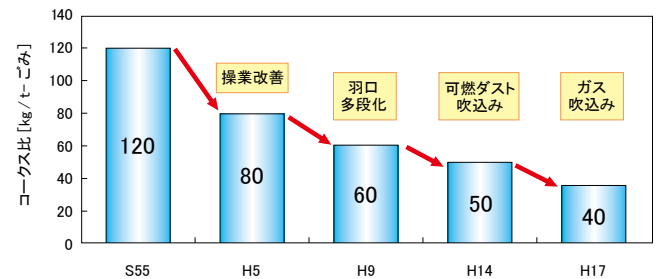


図9 コークス使用量削減に向けた開発の経緯
Fig.9 Approach in reducing the amount of coke used

(1) 羽口の多段化技術開発

従来、シャフト炉式ガス化溶融炉は、酸素富化した空気を溶融炉下部から単段で送風し、コークスを高温燃焼させて不燃物や灰分の溶融熱源に供するとともに、炉上部でのごみの乾燥や熱分解に必要な熱も賄っていた。羽口 (送風ノズル) の多段化により、上部に設けられた羽口でのごみの一部を燃やし、ごみの乾燥・熱分解のためにこれまで無駄に燃えていたコークスの代替を図ろうとするものである。(図 10 参照) この結果、コークスの使用量はごみ燃焼量を約 2 倍に向上させることで、コークス比を 50 ~ 60kg/t に削減でき、必要富化酸素量も比例して削減できた。

(2) 可燃物羽口吹き込み技術開発

羽口多段化のもとでそのままコークス使用量を削減

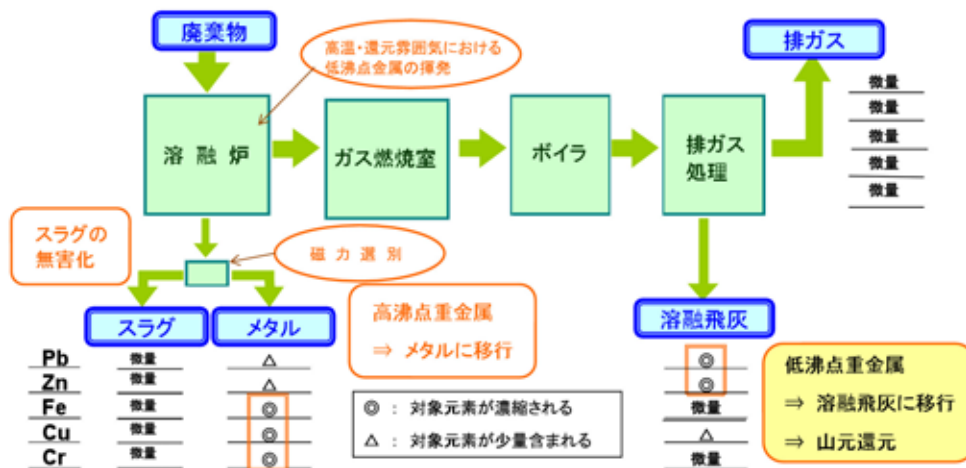


図8 シャフト炉式ガス化溶融炉における重金属類の分離・回収
Fig.8 The separation and recovery of heavy metals in Direct Melting System

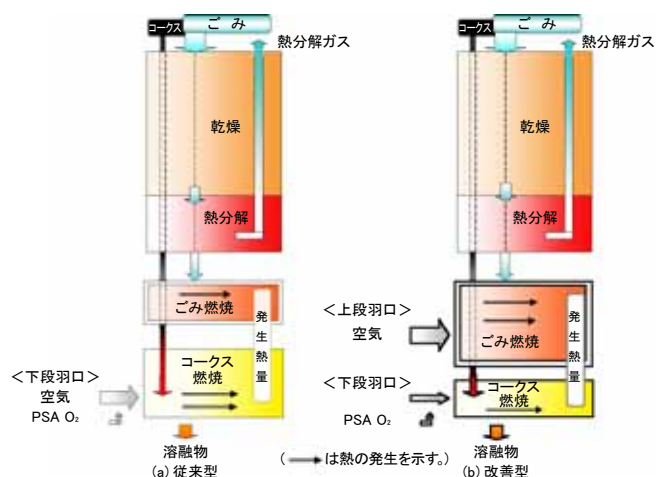


図10 羽口多段化の効果
Fig.10 The effect of multistage tuyeres

していくと溶融物温度が低下したり溶融スラグ中のPbの含有量が上昇する傾向が見られる。これは、溶融処理において低沸点重金属類の挙動に及ぼす炉内雰囲気の影響をシミュレーションした結果(図11)³⁾から、コークス使用量削減により、炉内の還元雰囲気が弱まった(=O₂分圧 高)ためだと考えられる。そのため、下段羽口からの酸素送风量削減と共に、炉下部の高温還元雰囲気を維持しつつコークス使用量を低減するため、可燃物を下段羽口から吹き込むこととした。可燃物としては廃プラスチックと溶融炉上部から飛散した可燃ダスト(チャー)を検討した。⁴⁾

炭素含有30%の可燃ダスト50kg/tを炉底下段羽口より供給することで、5~10kg/t程度のコークス比低減を可能とした。プラスチックについては、30kg/t吹き込むことで、約10kg/tのコークス使用量を削減できた。

廃プラスチックは炉上部から投入すれば熱分解ガス化後、燃焼室で熱回収されるサーマルリサイクルのみであるが、熱分解残さ(固定炭素)発生量が少なく、また、粒子化するため、ほとんどが炉上部より飛散し、炉底まで到達しない。一方、羽口から直接吹き込めばコークスの還元剤としての代替によるケミカルリサイクルを併せて実現できる。一方、可燃ダストは溶融炉上部より飛散した熱分解残渣を燃焼室の前でサイクロンにより回収し、羽口から吹き込むことでコークス代替を図るものである。燃焼室における燃焼性向上によりダイオキシン低減や溶融飛灰低減にも寄与する。この技術は、さまざまな可燃物へ応用可能であり、また、ガス燃料との組み合わせも可能であり⁵⁾、ガス吹込についても実機化を達成している。

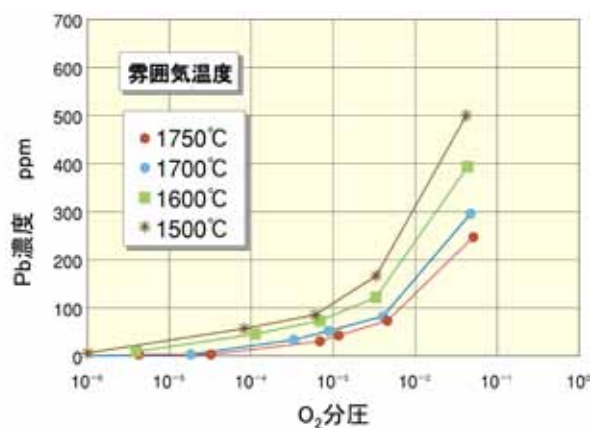


図11 溶融スラグ中Pb濃度と炉内雰囲気の関係
Fig.11 The relationship between the Pb concentration and the atmosphere in melting furnace

(3) 下段送風予熱技術の開発

可燃物の羽口吹き込み技術は、羽口から吹き込んだ可燃物をコークスより先に燃焼させ、その結果コークスの使用量を削減する技術である。そのため、吹き込んだ可燃物を、羽口近傍でいかに急速燃焼させるかがポイントとなる。そこで、現在、下段羽口から吹き込む酸素富化空気の予熱(送風予熱)による可燃ダストの燃焼率向上実証に取り組んでいる。本技術は、送風予熱(200~300°C)を実施することで下段羽口より供給している可燃ダストの羽口近傍での燃焼を促進させ、更なる炉底熱源の有効利用を考えたものであり、試験プラントにおける実証試験において、コークス使用量約10kg/tの削減効果を確認しており、予熱により、羽口から吹き込まれた可燃ダストの燃焼率が向上したためと考えられる。図12に、これまでの実験で得られた、予熱による燃焼率向上効果を示す。ここで、図中の「ダスト中C置換率」とは、吹き込んだ可燃ダスト中の炭素(C)が、羽口先で急速燃焼し、コークスの代替となった率を示し、その値が大きいほど、コークス使用量削減効果が大きいといえる。図からわかるように、予熱を加えることで、ダスト中Cの置換率が大幅に向上しており、その結果コークス使用量が削減できているのが分かる。

本技術については、さらなる実証研究を続け、最適予熱温度の見極めや、コークス使用量削減効果について検証する予定である。

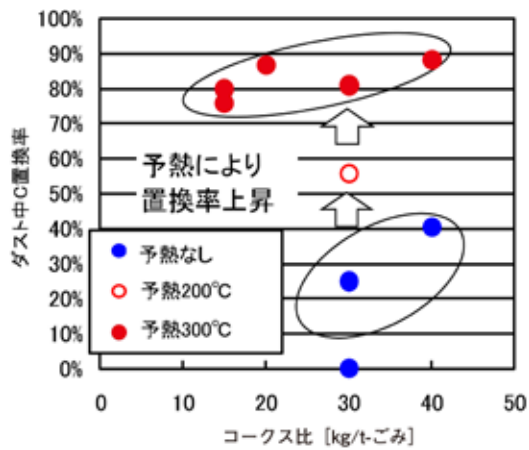


図12 送風予熱による可燃ダストの燃焼効率改善
Fig.12 Improvement of combustion efficiency of dust by preheating



図13 バイオマスコークス
Fig.13 Biomass coke

表2 バイオマスコークスの性状

Table2 The property of biomass coke

		バイオマス コークス	高炉 コークス
水分	wt%	4.6	0.8
灰分	dry wt%	3.0	10.4
固定炭素	dry wt%	92.6	89.0
低位発熱量	kJ/kg	29,570	29,456

4. 地球温暖化対策 ～バイオマスコークスの利用～

シャフト炉式ガス化溶融炉は、これまで還元剤として化石燃料を原料としたコークスを使用するため、エネルギー起因CO₂発生抑制が課題となる。その課題に対し、前節で述べてきたプロセス改善によるコークス使用量を削減し、その結果としてCO₂排出量削減を図るとともに、カーボンニュートラルなバイオマス为原料とした、バイオマスコークスの適用技術開発に取り組んでいる。バイオマスコークス技術は、実機実証試験を完了し、コークスと遜色なく使用可能であることを確認できたため、実機適用への準備を進めているところである。

4-1. バイオマスコークスの性状

シャフト炉式ガス化溶融炉用のバイオマスコークスとして、製材工場廃棄物であるオガ屑に着目し、これを成型後に乾留して製造したものを用いた(図13)。表2にバイオマスコークスの分析値の一例を示す。シャフト炉式ガス化溶融炉に従来使用されてきた高炉コークスと比較して、水分、灰分が少し異なるものの、固定炭素、低位発熱量は概ね同程度である。

4-2. バイオマスコークス適用結果

溶融炉実用施設にて、100%バイオマスコークスに置換して約10日間の長期運転確認を実施した。

その試験において、試験期間中、安定処理を継続することができ、バイオマスコークスがシャフト炉式ガス化溶融炉に適用可能であることを確認した(表3)。コークス使用量はコークス比50kg/tから開始し、最終的に32kg/tまで低減したが、処理量が落ち込むことはなく、定格処理が継続可能であった。また、燃焼室で使用する重油の原単位や主蒸気流量変動割合もベースデータ(①:コークス50kg/t使用時)と比べて遜色なく、運転安定性が低下することはなかった。

前述のように、コークス使用量低減時に懸念されるスラグ品質についても、安全性に問題がないことを確認した。

本試験では、シャフト炉式ガス化溶融炉に従来使用されてきた高炉コークスをバイオマスコークスに全量切り替えて運転を行うことにより、ごみ処理によって排出されるCO₂をごみ1トンあたり165kg-CO₂削減することができた⁶⁾。

なお、シャフト炉式ガス化溶融炉におけるコークスからバイオマスコークスへの切り替えによる温室効果ガスの排出削減方法論については経済産業省より承認されており⁷⁾、本実証試験によって問題なく適用可能であることを確認できたことを受けて、バイオマスコークスの常用化、商流化、および他所への展開を図っていく予定である。

表3 バイオマスコークス適用試験データ

Talbe3 Operating data in biomass coke applied

	データ No. コークス比 データ期間	コークス	バイオマスコークス			
		①	②	③	④	
		5.0%	5.0%	4.0%	3.5%	
		3/31-4/1	4/2-3	4/4-7	4/8-9	
一般ごみ処理量	t	52.1	59.7	62.6	57.5	
コークス比	kg/t-ごみ	51	49	37	32	
溶融物温度低下(※)	°C	-	▲6	▲49	▲23	
溶融物比	kg/t-ごみ	79	77	71	116	
ごみカロリー	kJ/kg	9591	9536	9365	10316	
重油原単位	L/t-ごみ	4.5	2.9	2.8	3.0	
主蒸気流量変動率(※)	-	1.00	0.58	0.78	0.69	

※データ①を基準とした相対値

5. 結言

当社のシャフト炉式ガス化溶融炉（直接溶融・資源化システム）は、ガス化溶融における先駆けとして長年の運転実績と様々な経験を蓄積してきた。本論文では、処理対象物の拡大、溶融物（スラグ・メタル）の有効利用、最終処分量削減、コークス使用量削減などの改善の経緯とバイオマスコークス適用による地球温暖化抑制策について述べた。

廃棄物処理に対しては、従来の課題であった、「衛生問題の解決」に加え、土壌、大気、水質の公害抑制、さらに近年では、高効率エネルギー回収及び溶融物資源化回収による資源循環型社会への構築及び貢献としても注目されている。

当社は、今後ともシャフト炉式ガス化溶融炉の特徴を活かし、さらなる高機能化および弱点の克服に努めることにより、時代の要請にこたえていく所存である。

参考文献

- 1) 梶山博久ほか：シャフト炉式ガス化溶融炉による非飛散性アスベストの無害化処理、第17回廃棄物学会研究発表会講演論文集、p.1146-1148 (2006)
- 2) 西原信義ほか：溶融スラグ・メタル再利用技術、新日鉄技報第376号、p.51-56(2002)
- 3) 長田昭一ほか：溶融処理過程における低沸点重金属類の挙動に関する熱力学的考察、廃棄物学会論文集、Vol. 15, No. 5, p. 353-362 (2004)
- 4) 芝池秀治ほか：直接溶融炉における廃プラスチック羽口吹込み技術の開発、第11回廃棄物学会研究発表会講演論文集、p.460-462 (2000)
- 5) 西猛ほか：直接溶融炉におけるガス羽口吹込み技術開発、第15回廃棄物学会研究発表会講演論文集、p.975-977(2004)
- 6) 西猛ほか：シャフト炉式ガス化溶融炉におけるバイオマスコークスの適用、第20回廃棄物学会研究発表会講演論文集、C3-1 (2009)
- 7) 環境省、経済産業省：温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル Ver2.3、p. II -22 (2008)