

当社の廃棄物処理技術

KOBELCO ECO-SOLUTIONS' Waste Treatment Technology



藤田 淳*
Jun Fujita



細田博之**
Hiroyuki Hosoda

当社は、廃棄物処理メニューとして回転ストーカ式ごみ焼却炉、流動床式ごみ焼却炉（ガス化溶融、ガス化燃焼）など豊富なコア技術を保有しており、処理対象物および地域のニーズにあわせた処理技術の提案をしてきた。世界的な脱炭素（カーボンニュートラル）や循環型経済（サーキュラーエコノミー）の潮流の加速を受けて、廃棄物・資源循環分野においても、従来の廃棄物処理に加え、廃棄物エネルギーを含めた資源循環がますます重要になっている。また、日本国内においては、労働人口の減少、熟練技術者不足が深刻になりつつあり、廃棄物・資源循環分野においても同様の問題を抱えており、遠隔コミュニケーションや自動化などの操業支援技術が不可欠な状況となりつつある。当社では、これらの社会的要請に応えるため、コア技術の改良や応用展開による製品開発に取り組んでいる。

Kobelco Eco-Solutions has a variety of core technologies for waste treatment, including rotary combustors and fluidized bed incinerators (gasification and melting, gasification and combustion), and has long proposed solutions to meet a variety of waste treatment targets and regional needs. Yet, with carbon neutrality and circular economies rapidly trending around the world, it is becoming increasingly important to explore resource recycling, including applications of energy generation from waste, in addition to conventional waste treatment. Moreover, the waste treatment field in Japan is facing the same issues of a shrinking workforce and growing shortage of skilled engineers that the rest of the country is, making operation support technologies such as remote communication and automation that much more indispensable. In response to these social needs, we are working to improve our core technologies and develop products with new applications.

Key Words :

回転ストーカ式ごみ焼却炉

Rotary combustor

流動床式焼却炉

Fluidized bed incinerator

ガス化溶融

Gasification and melting

ガス化燃焼

Gasification and combustion

脱炭素

Carbon neutrality, Decarbonization

資源循環

Resource recycling

自動化

Automation

【セールスポイント】

- ・様々な廃棄物、地域ニーズにあわせた提案
- ・脱炭素と循環型経済に貢献する技術
- ・自動化、操業支援の強化

*環境エンジニアリング事業本部 環境プラント事業部 プラント技術部 機能開発室

**技術開発センター 技術開発部

まえがき

脱炭素（カーボンニュートラル）や資源循環経済（サーキュラーエコノミー）の潮流の高まりを受けて、国内の廃棄物・資源循環分野においても、従来の廃棄物処理に加え、廃棄物のエネルギーも含めた循環利活用に対するニーズが急速に高まっている。

環境省においても、2021年度に、廃棄物・資源循環分野の2050年温室効果ガス排出実質ゼロ達成に向けて、対象とする温室効果ガス排出の範囲や削減対策の実施にあたっての基本的な考え方を整理し、今後取り組むべき方向性を明示するために「廃棄物・資源循環分野における2050年温室効果ガス排出実質ゼロに向けた中長期シナリオ(案)」を取りまとめた。その中においては、廃プラスチックや廃油の資源循環の高度化、廃棄物エネルギー利活用高度化、CCUS（CO₂の回収・貯留・有効利用）などが重点対策領域として示されている。

また、日本国内では、労働人口の減少に伴い熟練運転員の確保が困難な環境に直面しており、この状況は今後ますます加速するものと考えられ、熟練技術者の技能伝承や自動化による省力化・省人化による操業支援技術の開発が不可欠な状況となっている。

当社は、廃棄物処理メニューとして回転ストーカ式ごみ焼却炉、流動床式焼却炉（ガス化溶解、ガス化燃焼）など、豊富なコア技術を中心に、様々な処理対象物および地域ニーズにあわせた提案をしてきたが、これらのコアとなる技術を改良し応用展開することで、先に示した脱炭素、資源循環のニーズに応える製品を開発している。また、データ解析やAI、制御技術を活用した操業支援・自動化技術の開発にも取り組んでいる。

本稿では、これらの社会的要請に応える廃棄物処理技術と資源循環技術、操業支援技術の一例を紹介する。

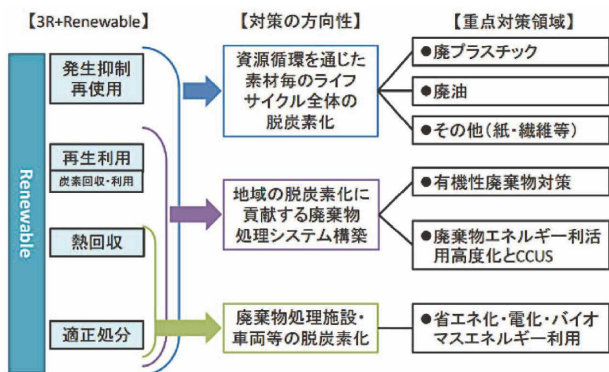


図1 中長期シナリオ重点対策領域¹⁾

1. 廃棄物処理，資源循環技術

1.1 ストーカ炉燃焼技術²⁾

当社の回転ストーカ式ごみ焼却炉（以下、回転ストーカ炉）は、その特徴的な構造により、多種多様な廃棄物に対応できる燃焼性能と極めて高い耐久性を有している。

本章では、回転ストーカ炉の特長を述べるとともに、2022年5月末に竣工した兵庫県高砂市向け回転ストーカ施設「エコクリーンピアはりま」にて実施している低空気比運転や発電効率の実績についても併せて説明する。

1) 回転ストーカ炉の特長

図1にプロセスフローの概要を示す。図2に回転ストーカ炉の断面図および火格子の構造図を示す。回転ストーカ炉は炉外にある駆動装置によって回転し、炉内に可動部を持たずに三次元的なごみ送りと攪拌が行われる。炉内へ供給されたごみは、1時間に1～2回程程度のゆっくりとした炉体の回転と傾斜によって下流へ送られ、給じん装置側の上流から乾燥、熱分解、一次燃焼が順次進行するマス燃焼が行われる。炉壁全体が火格子であり、火格子はボイラ

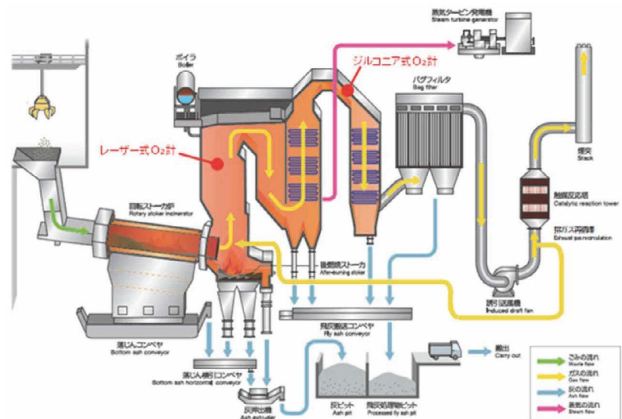


図1 プロセスフローの概要図

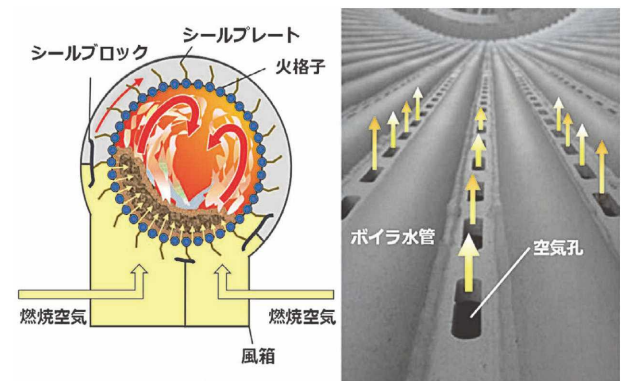


図2 回転ストーカ炉断面図（左）
火格子構造図（右）

水管とフィンで構成されている。フィンには空気孔が設けられており、焼却炉下部の風箱から空気孔を介して炉内のごみ層底部より燃焼空気が供給され、ストーカ燃焼を形成している。

高温の一次燃焼領域と火炎渦を円筒炉内の下流側に形成することで、上流の乾燥、熱分解領域から排出される水分、熱分解ガス、余剰空気が火炎渦により効率よく混合され、安定した燃焼場が形成される。また、一般的に火格子を通過する空気量が低下すると火格子の温度が上昇し、腐食・減肉が大きくなるが、回転ストーカ炉は炉体を構成する水管内をボイラ水が循環することで、水管表面が一定温度に維持されるため、空気量低減による腐食の影響を受けない。これらの特性により、回転ストーカ炉は低空気比燃焼に適した炉であると言える。また、炉体の回転によるごみ送りは、ごみの反転と左右方向への移動を伴うことで火格子上でのごみ分布を均等に維持し、さらにゾーン毎の高度な空気量制御により安定燃焼を実現している。

2) 低空気比運転

本施設では図3のように運転条件を模擬した燃焼シミュレーションを実施し、低空気比運転時 ($\lambda=1.3$) における最適な燃焼条件を検討した結果、回転ストーカ炉直後に排ガス再循環を吹込み、そのすぐ下流側に二次空気を旋回状に吹き込む形式を採用した。これにより、回転ストーカ炉内での攪拌 (I)、炉出口の循環排ガスによる混合・攪拌 (II)、旋回状の二次空気による攪拌 (III) の三段階の混合攪拌による二次燃焼室内での完全燃焼を実現している。

二次空気量の制御は、試運転時に従来型のボイラ出口に設置しているジルコニア式 O_2 計による酸素濃度制御とし、空気比1.3を確立した。

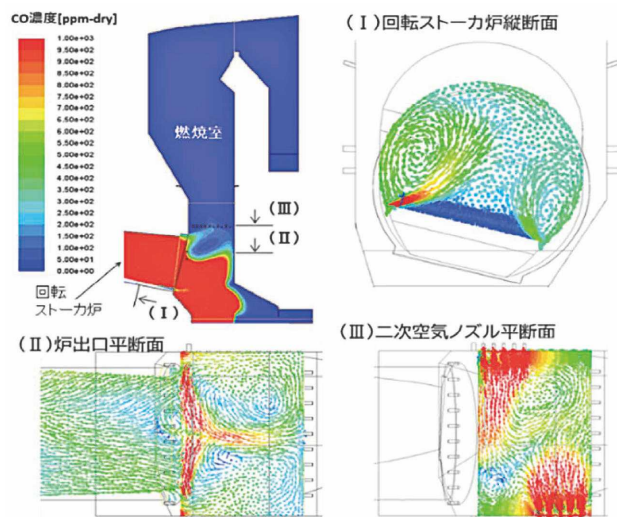


図3 燃焼シミュレーション

さらなる空気比の低減を図るためレーザー式 O_2 計による燃焼制御を導入した。図4に燃焼室出口レーザー O_2 計による空気比1.2を制御目標値とした運転データを示す。この期間、CO ピーク (50 ppm 以上) は一度も発生せず、さらに触媒反応塔入口 (バグフィルタ出口) における排ガス NO_x 濃度の平均値は40 ppm を下回る結果を得た。また、レーザー O_2 計の制御では酸素濃度の変動の幅が縮小し、より安定した燃焼が維持できた。

3) 発電効率の状況

本施設は操業計画で2炉運転を基本としている。立上げ、立下げがなかった2022年9月1日～9月30日の期間の2炉運転の実績として、表1に平均発電効率実績、図5に発電効率推移を示す。この焼却量規模において最高レベルの発電効率 (平均22.1%) を、安定して維持していることが分かる。なお対象期間

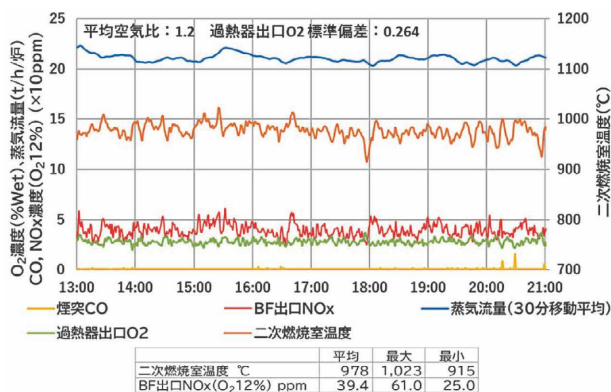


図4 低空気比運転トレンド ($\lambda=1.2$)

表1 対象30日間の平均発電効率実績

	計画値	実績値
平均焼却量 (ton/日)	286	271
平均低位発熱量 (kJ/kg)	9 800	10 790
平均発電量* (kW)	6 900	7 502
平均発電効率 (%)	21.3	22.1

*1時間平均値を示す

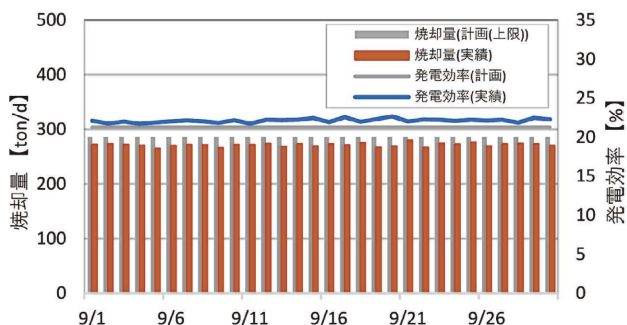


図5 対象30日間の発電効率推移

中、2炉のうち1炉は空気比1.2（レーザー O₂計による制御）、1炉は空気比1.25（ジルコニア O₂計による制御）で運転している。設計値の空気比1.3よりも低空気比で運転することにより、発電効率の向上効果が確認できた。

今後も脱炭素に貢献するため、回転ストーカ炉において蒸気量予測による燃焼安定化や自動運転による安定燃焼性能の向上に努めていく。

1.2 流動床技術を活用した資源循環技術

当社は、1974年以来、下水汚泥焼却炉、都市ごみ焼却炉およびガス化溶融炉／燃焼炉、木質バイオマス発電に流動床炉を適用し、その技術力を高めてきた。

流動床炉は、ストーカ炉のような機械炉では実現が難しいガス化ができること、砂による分級機能を有することから、脱炭素および資源循環のニーズに応えることができる重要なキーハードとなっている。

本章では、現在開発中である廃プラスチックガス化メタノール化プロセスの開発事例と、流動床の分級機能を活用した都市ごみガス化溶融炉での貴金属回収の事例について紹介する。

1.2.1 廃プラスチックのガス化及びメタノール化事業³⁾

世界では海洋プラスチック問題が社会問題化するなど環境保護等の観点から、廃プラスチック（以下、廃プラ）のリサイクル方法確立の必要性が急速に高まっている。現在、実用化されている廃プラのリサイクル技術では、リサイクル品の品質を確保するため、原料に一定の純度・清浄度が求められているが、純度・清浄度が低いリサイクル困難な雑多なプラスチック（以下、雑多な廃プラ）は、単純焼却・熱利用焼却・埋立てにより処理されているのが現状である。廃プラ全体の7割以上を占めるこの雑多な廃プラをいかにリサイクルし、CO₂排出量を抑制しつつ動脈産業に還流していくかが今もって大きな課題となっている。

この課題に対し、流動床式ガス化技術を有する神鋼環境ソリューション、廃プラのケミカルリサイクルを推進する大栄環境及びDINS 関西、水素製造・合成ガス製造技術を有する三菱化工機及び環境循環型メタノール構想を推進する三菱ガス化学は、廃プラスチックの有効資源化を進めたいという共通の思いのもと、雑多な廃プラであっても処理可能な流動床式ガス化技術をベースに、雑多な廃プラをガス化して得られた合成ガスからメタノールを合成する、国内初のケミカルリサイクル技術の構築を目指し共

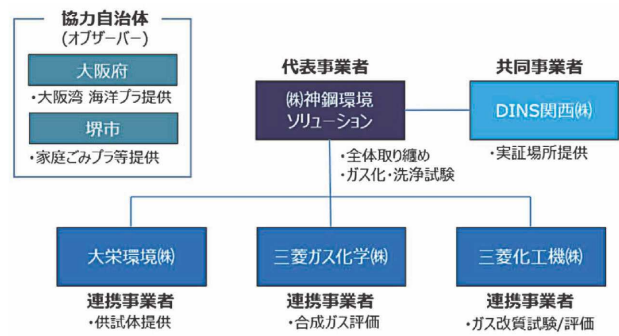


図6 実証事業体制

同実証事業を開始した（図6）。

なお、本実証事業は環境省「二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金 脱炭素社会を支えるプラスチック等資源循環システム構築実証事業」の補助金を得て行うものである。

1) 目標

以下を可能とするプロセス構築を目標とする。

- ① 雑多な廃プラが処理できること
- ② 出口製品の品質がバージン材同等かつ市場に受け入れられる価格を実現すること
- ③ 炭素を循環利用し CO₂ 排出量を削減すること

2) プロセスの概要

本実証事業では、当社が保有する流動床式ガス化技術と、ガス洗浄技術、ガス改質技術からなる4.7 t/日規模の実証設備を導入し、安定的かつ経済的な稼働について実証する。

まず、廃プラをガス化炉で分子レベルまで分解し、ガス洗浄設備で不純物を除去する。この粗合成ガスを三菱化工機（連携事業者）の保有技術を応用することで改質し、合成ガスとした後、三菱ガス化学（連携事業者）の実用化技術でメタノールを安定的に合成できるかを評価する（図7）。

3) 流動床式ガス化炉の特長

ガス化部分には国内17か所で稼働中の当社都市ごみ処理向け流動床式ガス化技術を応用する。その特長は以下の通り（図8）。

- ① 流動床式ガス化炉で雑多な廃プラを効率よく分子レベルまで分解

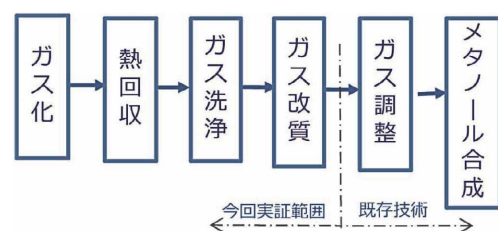


図7 プロセス概要

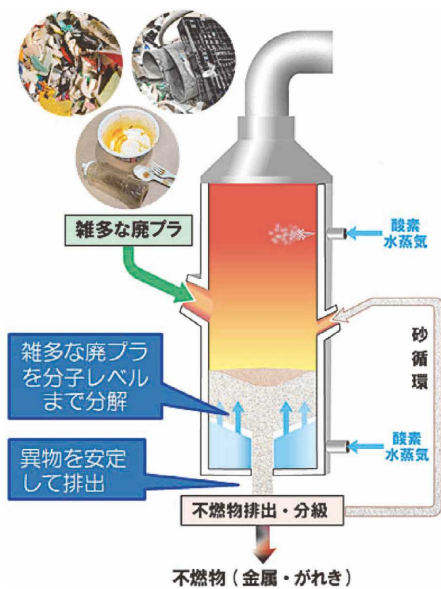


図8 流動床式ガス化炉の特長

- ②簡易な前処理を施すだけで雑多な廃プラを炉内に受け入れることが可能
- ③炉下部に設けた不燃物（金属・がれき等）の排出機構により、雑多な廃プラに含まれる異物を安定して排出することが可能
- ④性状が多岐にわたる雑多な廃プラであっても安定した運転が可能

4) 実証技術の活用・展開

本実証事業により確立された技術を環境循環型メタノール製造プラントとして活用・展開，社会実装することにより，基幹化学品であるメタノールの国産化，地産地消を推進し，安全保障，地政学的リスクの回避に寄与することを目指す。

また，これまで多くのCO₂を排出してきた雑多な廃プラを基幹化学品（メタノール，図9）として動脈産業に還流することで循環型社会構築に寄与し，従来のメタノール原料である天然ガス使用量（海外）を削減する。

1.2.2 都市ごみからの貴金属回収⁴⁾

環境省が2022年9月に策定した循環経済工程表に

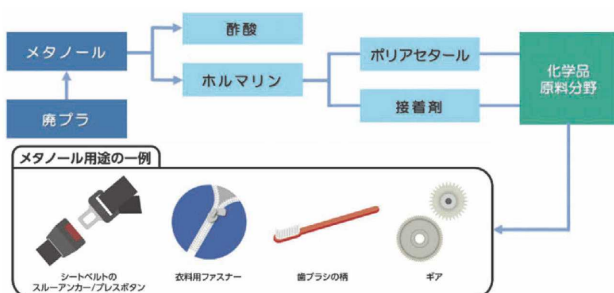


図9 メタノール用途の一例

において、「都市鉱山」である使用済電子機器からの金属回収量倍増の目標が明記され，廃棄物分野における貴金属回収は大きな課題となっている。

このような背景から，都市ごみからの有価貴金属の回収・再利用が期待されているものの，これまでは焼却炉から排出される残留物灰に含まれる貴金属を資源として回収する方法がなかった。上記目標にも寄与する技術として，当社は2018年から流動床式焼却炉での貴金属のリサイクルについて検討を進めており，ここではその成果について紹介する。

1) 流動床炉における貴金属の存在箇所

流動床式ガス化炉と流動床式焼却炉の2つの形式の焼却炉において様々な熱処理残渣の貴金属を分析したところ，流動床炉の炉底に堆積している砂（炉底砂（ろていすな）と呼ぶ）に高濃度に有価金属が濃縮されていることを見出した。流動床式焼却炉（施設a）の各残渣の金濃度を分析したところ，排ガス側のボイラ灰，ガス冷灰，集じん灰など炉底砂以外の残渣に含まれる金の濃度は1 mg/kg未満であり，有価物として回収できる濃度ではなかった。一方，炉底砂の金濃度は154 mg/kgと突出して高いことが分かった。

2) 炉底砂の回収

当社の流動床炉の炉底部分には空気分散板が設置されている。図10に空気分散板の拡大図を示す。空気分散板下部の風箱に押込空気が送風され，分散板に取り付けられた空気ノズルから空気が噴出し，分散板上部の砂を流動させる。ここで空気は砂より軽く，ノズルの上方に吹き上がるため，空気ノズルより下にある砂は流動しない。流動状態の砂は空気が含まれていることから，見掛け比重が小さく，このためごみ中に含まれている比重の大きな貴金属は次第に流動床炉の底部へ沈降し，空気ノズルより下部に徐々に濃縮したと考えられる。

3) 炉底砂における有価金属の濃度

表2に炉底砂の貴金属の分析結果を示す。対象施設は，流動床炉を備える流動床式ガス化炉と流動床

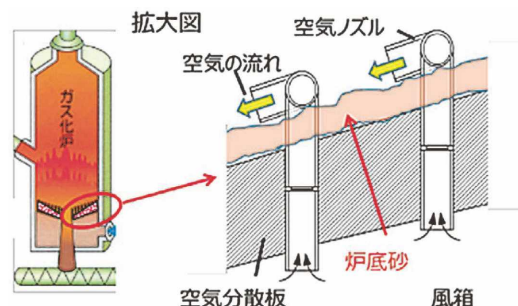


図10 空気分散板

表2 炉底砂中の貴金属濃度分析結果

施設	Au	Ag	Cu	炉形式	一般廃棄物以外の処理対象
	mg/kg	mg/kg	mg/kg		
施設A	1,330~6,300	1,650~9,120	77,400~142,000	ガス化溶融炉	他所灰
施設B	64	139	36,100		リサイクル残渣
施設C	23~3,320	28~2,040	33,200~90,900		リサイクル残渣
施設D	14~1,030	125~1,200	24,400~65,000		リサイクル残渣
施設E	79~148	176~239	48,500~55,300		リサイクル残渣
施設F	5~615	16~1,050	9,300~58,600		掘り起こしごみ、リサイクル残渣
施設a	64~154	350~515	15,300~31,800	流動焼却炉	
施設b	8~70	50~190	37,600~58,600		リサイクル残渣
施設c	62	64	15,700		リサイクル残渣

式焼却炉とした。各施設では、通常のごみの他に、他所灰や掘り起こしごみ、リサイクル残渣が焼却されている。表2から分かるように、炉底砂には数十～数千 mg/kg の金、銀が含まれていた。特に他所灰を受け入れている施設Aにおいて貴金属の濃度が高かった。

4) 炉底砂中の貴金属の存在形態

図11に炉底砂断面のSEM（走査電子顕微鏡）画像および金のEPMA（電子線プローブマイクロアナライザ）画像を示す。本画像から、約1 mmの砂を構成する粒子の内部に直径約20 μmの粒子として金が存在していることが確認された。金は安定な物質であり、他の物質と反応せず、金そのままの状態ですべて炉底砂中に含まれていることが確認された。

5) 炉底砂の取り扱い

表2に示す炉底砂中の貴金属の含有量は、天然の鉱石の品位を大きく上回っているものが大半を占める。そこで、製錬会社と協力し炉底砂からの貴金属回収が出来ないか検討を続けてきた結果、一定以上の金が含まれる施設については有価で精錬会社にて引取る流通ルートを確立することが出来た。回収、輸送、製錬し、廃棄物中の貴金属を再資源化するスキームを、経済的に成立させたサーキュラーエコノミー型の取組み事例と言える。

現在、この取り組みを更に加速させるために、金銀以外の貴金属の回収や、炉底砂の回収施設の拡大に取り組んでいる。

1.3 廃棄物エネルギー利活用促進技術⁵⁾

当社は、2019年に、廃棄物エネルギーの利活用促進を目的として、はつかいちエネルギーセンターのエネルギー回収型廃棄物処理施設（75 t/日 × 2 炉）に高温高压ボイラ・タービン（6 MPa × 450℃）を提案し採用された。また、本施設は、この高効率発電に加え、従来未利用であったタービン排熱を、隣接するガス会社様に熱供給を行うことで、高効率なエネルギー利用を実現しており、今後の脱

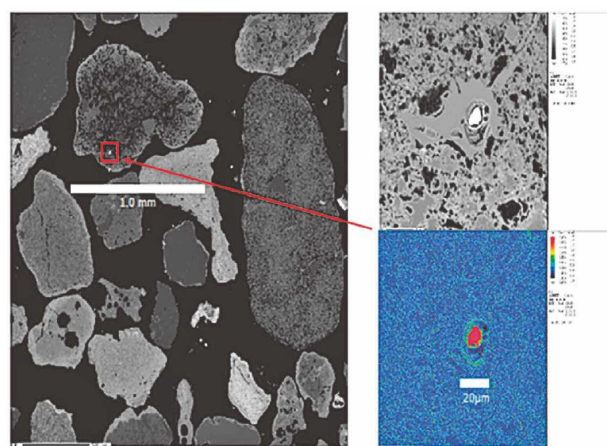


図11 炉底砂断面のSEMおよびEPMA画像

炭素社会の実現に向けての先導的事例となっている。

高効率発電の実現のため、従来4 MPa × 400℃であった蒸気条件を、6 MPa × 450℃まで高めているが、高効率発電をより広く適用していくためには、ボイラの過熱器管の寿命が所定の目標通りとなっているかどうかの技術検証が重要であるため、当社では、過熱器管の減肉挙動を定期的に確認している。

本章では、施設のエネギー効率やCO₂削減実績を報告するとともに操業開始から約3年経過した高温高压ボイラの過熱器管の減肉挙動の調査結果を紹介する。

1) エネルギー効率とCO₂排出量

熱供給によるエネルギー回収も含めたエネルギー効率を図12に示す。熱利用効率は2021年度平均で27.8%であり、発電効率と合わせたエネルギー効率は45.5%と非常に高いエネルギー利用を行っている。

次にこの売電及び熱供給による年間CO₂削減効果について図13に示す。比較として、従来のボイラ蒸気条件4 MPa × 400℃を想定した試算結果と比べた。CO₂排出項目として①立ち上げ等に用いる助燃

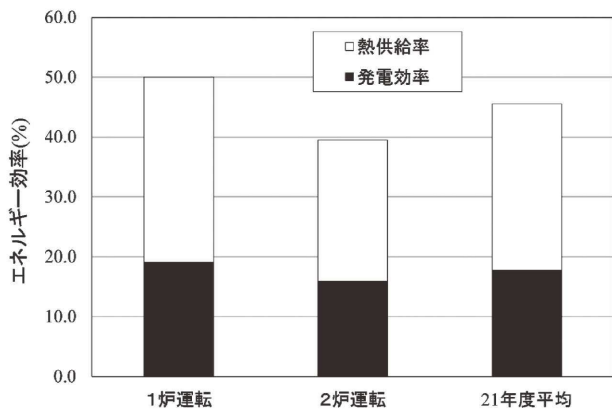


図12 エネルギー効率

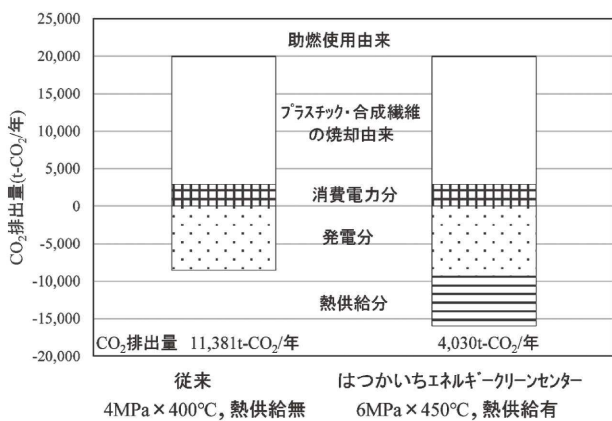


図13 CO₂排出量

使用由来、②プラスチック・合成繊維の焼却由来、③消費電力分、④発電電力分(削減)、⑤熱利用分(削減)とした。発電量の増加と熱供給利用によりCO₂排出削減量は増加し、従来のCO₂排出量と比べて約65%削減できる試算を得た。

2) 高温高圧ボイラの過熱器管の減肉挙動

ボイラ蒸気条件の高温高圧化を実現するにあたり、排ガス中の酸性ガスや塩類に起因する過熱器管の高温腐食が問題となる。当社では、流動床式ガス化熔融炉および流動床式ガス化燃焼炉にて蒸気条件450°Cを模擬した環境下で、最長19か月に及ぶ過熱器管材料の耐食性評価試験を実施してきた。その結果、減肉量が軽微となる設計条件を見出し、本施設の設計に適用している。

本施設では定期的に過熱器管の肉厚を測定している。肉厚測定結果から求めた過熱器管の減肉量の経時変化を図14に示す。なお、図に示した減肉量は三次過熱器入口6か所の平均値である。(エラーバーは標準偏差)。1号系、2号系ともに平均減肉速度は0.1 mm/年以下であり、過去の実機腐食試験と同様の減肉挙動であり、目標通りの性能が発揮されていることを確認している。

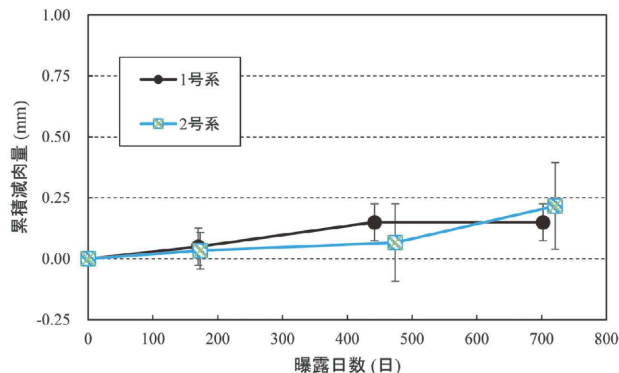


図14 減肉量の経時変化

1.4 CO₂利活用技術³⁾

我が国の2050年カーボンニュートラル宣言を受け、CO₂の排出量と吸収量をイコールにするための様々な取組が進められている。CO₂削減技術としてCO₂の固定化(CCS)や利用(CCU)が注目されており、廃棄物分野でもCCUSに関する技術開発が必要となっている。

当社では、飛灰がCO₂を吸収/固定化する炭酸化反応において、重金属類が飛灰に吸着/固定化されて不溶化する性質に着目し、都市ごみ焼却施設で発生した飛灰に、焼却排ガスに含まれるCO₂を吸収/固定化させる実機スケールでの炭酸化実証試験を実施した。実証試験では炭酸化による①CO₂の有効利用促進と、②有機キレート剤使用量の削減効果について検証を行った。また、炉形式・灰組成が炭酸化に与える影響を明らかにするため、複数の施設の灰を使ったラボスケールでの炭酸化試験も実施した。これら異なるスケールでの試験結果について報告する。実証を通じて得られた成果を踏まえ、本技術を上市したので紹介する。

1) 試験内容

実証試験はA市焼却施設(以降、A施設)にて実施した。炭酸化フローを図15に示す。A施設はガス化燃焼炉であり、通常発生した飛灰は有機キレート剤で不溶化処理されている。実証試験ではこの実機飛灰を炭酸化装置へ搬送し、CO₂および水、薬剤をミキサーに投入し、炭酸化処理を行った。

実証試験はあらかじめ検討した条件を基に、A施設の実際の焼却排ガス(CO₂: 8-10%-wet)を用いて炭酸化効果の確認を行った。また、炭酸化後の処理灰については環境省告示第13号試験(以下、環告13号試験)に基づいてpH、Pb、Cr⁶⁺を分析し、最終処分場での埋立て基準を満たしていることを確認した。

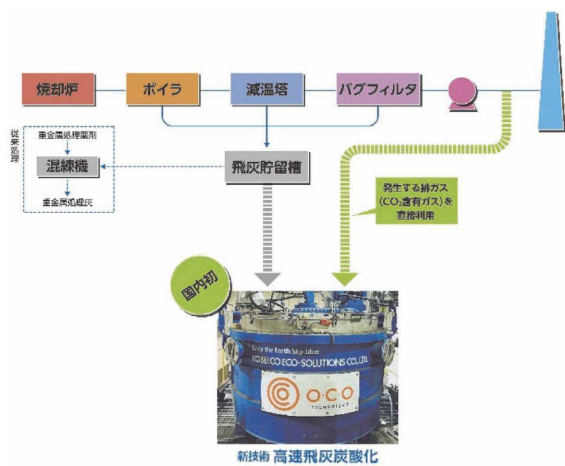


図15 炭酸化フロー図

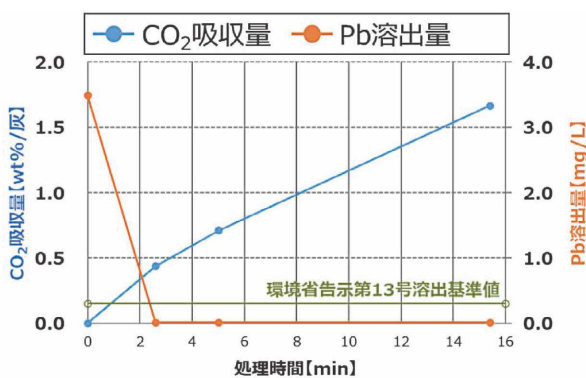


図16 CO₂吸収量とpH, Pb溶出

2) CO₂添加量と重金属溶出抑制効果

あらかじめ実験・検討した適切な水添加率15 wt%/飛灰で、炭酸化処理時間 (CO₂添加量) を変化させ、炭酸化効果の確認を行った。炭酸化処理時間とCO₂吸収量、重金属溶出量の関係を図16 (Pb) に示す。図16はPb溶出濃度について示しており、炭酸化処理前の飛灰のpHは11.9と高く、Pbの溶出量も3.49 mg/Lと基準値より多かったが、炭酸化処理によりPb溶出量を環告13号基準値 (0.3 mg/L) 以下に抑制できることを確認した、本稿では割愛し

たがCr⁶⁺溶出量についても、Pbの溶出同様、炭酸化処理により環告13号基準値 (1.5 mg/L) 以下に抑制できることを確認している。

また、異なる焼却炉形式 (ガス化燃焼炉, ガス化溶融炉, 回転ストーカ炉) においてサンプリングした飛灰を用いた炭酸化試験を実施した結果、一部の施設ではCr⁶⁺溶出抑制に無機系薬剤の添加が必要であったが、炭酸化処理と少量の無機系薬剤の併用によってPb, Cr⁶⁺ともに埋立基準値を満たすことを確認している。

以上の結果から、実際の処理においては従来の混練+有機キレート薬剤に代わり、炭酸化+少量の無機系薬剤での飛灰処理が可能であることを確認した。なお、無機系薬剤量はおよそ0.3 w%/飛灰であり、ランニングコストとしては約1/20に削減できるものである。

3) CO₂削減効果

従来の混練機による有機キレート処理と炭酸化処理で、飛灰処理におけるCO₂発生量の比較を行った。(表3) 従来の有機キレート処理では、有機キレートの薬剤製造や混練機の動力でCO₂が発生していた。一方で炭酸化処理はミキサーの動力でCO₂が発生しているが、薬品使用量削減、飛灰のCO₂吸収により従来よりもCO₂発生量が減少、飛灰処理単体ではCO₂が削減できる試算となった。

2. 操業支援技術

国内のごみ焼却施設では、建設と運転保守の包括受注方式 (Design Build and Operate (DBO) 方式) が主流になっていることや国内労働人口の減少に伴い熟練運転員の確保が困難な環境に直面していることから、熟練技術者の技能を自動化に落とし込み省力化・省人化を進めるとともに、熟練技術者が遠隔地からでも指導できるAR技術の活用を進めている。本章では、ごみクレーン自動化とAR技術を活用した操業支援の事例について紹介する。

表3 CO₂削減効果試算

	項目	従来 (連続式 混練機)	炭酸化 (バッチ式 混練機)	備考
CO ₂ 削減 要因	灰が吸収するCO ₂	0.00	-1.06	飛灰に対し、CO ₂ 吸収量2%と仮定
	キレート剤 (従来:4.0%添加⇒炭酸化:0%)	5.61	0.00	CO ₂ 排出量原単位: 2.6583 kg-CO ₂ /キレートkg
CO ₂ 増加 要因	灰処理に要する消費電力由来	0.24	0.38	CO ₂ 排出量原単位: 0.497 kg-CO ₂ /kWh
	無機系薬剤 (従来:0%添加⇒炭酸化:0.3%)	0.00	0.05	CO ₂ 排出量原単位: 0.3282 kg-CO ₂ /無機系薬剤kg
合計		5.85	-0.62	
削減量 kg-CO ₂ /焼却ごみトン		6.47		

2.1 ごみクレーン自動化⁶⁾

ごみ焼却施設では、ごみ質のばらつきが焼却炉の燃焼状態に直結するため、袋ごみや草ごみ等の様々なごみを焼却炉に投入する前段階に、ごみ質が均質になるようクレーンを用いた攪拌作業をおこなう。クレーン作業としてはこの他に、ホッパへの投入作業、翌日のごみ受入対応のための積替作業など多くの複雑な作業が必要となるが、ごみ搬入時等の繁忙時間帯では、ごみピット内の貯留状況の高度な認識、適切な判断、及びクレーン操作スキルを保有した運転員の操作が必要になる。本章では、(株)神戸製鋼所と共同で開発を進めている、ごみクレーン自動化システム全体概要を紹介するとともに、本技術の有効性について報告する。

1) システム概要

図17に本システムの実施概略を示す(ダブルピット形式の場合)。本技術は、①ごみピット3D計測技術：ごみピットの高さを計測、②ごみ種判別技術：カメラ画像からごみ種類を判別し攪拌度認識に活用、③動作計画自動化技術：ごみ高さや攪拌度情報等をもとにクレーンの動かし方を決める、④クレーン制御技術：動作計画の指示に基づきクレーンを無駄のない経路で動作、の4つの技術で構成される。これらの4つの要素技術の組み合わせにより、クレーン運転員の認知/判断/操作スキルを代替するものである。

2) 実機検証運転

3D計測で得られたごみピット内のごみ高さ情報は、図18のような点群で表現される。ごみ高さを精度よく計測できるため、クレーンは、ごみから過剰な距離を確保しての動作が必要なくなるため、最短での動作が可能となる。

図19に、ごみ種判別ならびにクレーン自動運転

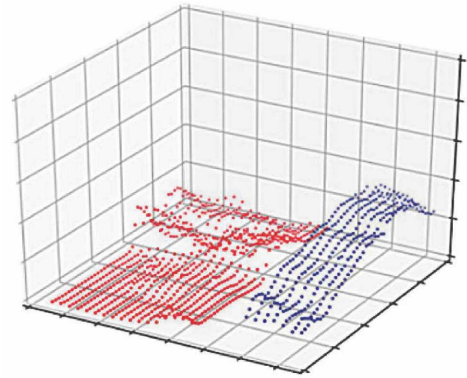
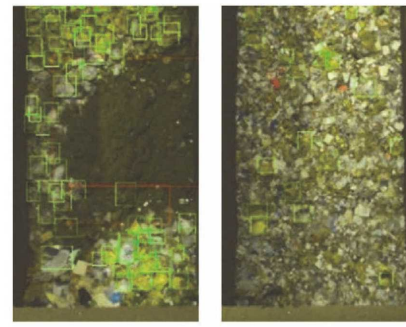


図18 ごみピット3D計測結果の一例



攪拌前 攪拌後 (5時間後)

図19 ごみ種判別結果
(図内矩形枠：未攪拌ごみ検出箇所)

による攪拌効果の一例を示す。図中矩形で囲われた箇所はごみ種の判別が出来ており、攪拌が出来ないことを表している。図19(a)では、破袋・攪拌処理が行われておらず、未破袋の袋ごみや剪定枝が検出されているが、図19(b)では、自動運転による破袋・攪拌操作により未攪拌ごみの検出領域が減少しており、攪拌・破袋処理が有効に機能していることを確認している。

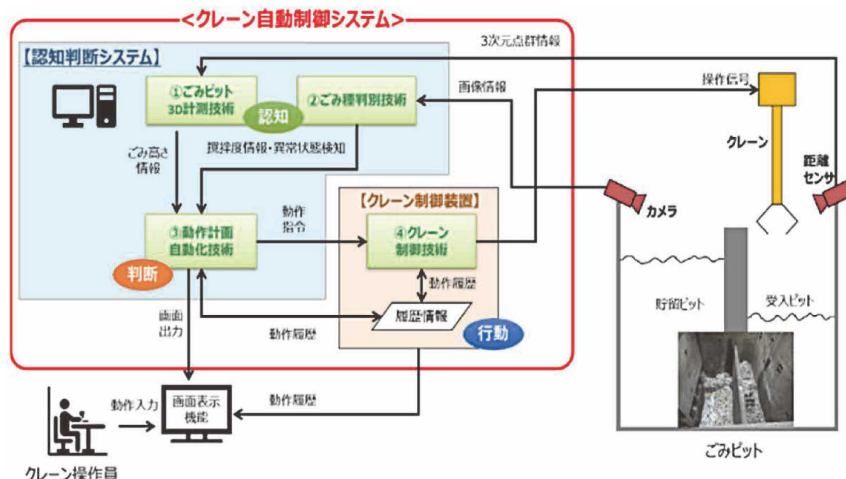


図17 ごみクレーン自動制御システム

焼却炉内へ供給されたごみの攪拌が不十分な場合、炉内燃焼状態は不安定となることが考えられる。試験期間中の「炉内温度」「砂層温度」「主蒸気流量」の標準偏差の相対値を表4に示す。ここでは、試験日と同じ曜日と運転炉数、同等のごみ搬入量で、オペレータによるクレーン手動操作が行われた日の各指標の標準偏差を1として算出した。自動運転時の各指標における標準偏差値は、手動操作時と比較して小さい値であり、安定燃焼を実現できていることを確認した。

2.2 操業支援 AR技術の活用⁷⁾

廃棄物処理施設では、メンテナンス業務におけるベテラン技術者の高齢化が進んでいるため、効率的なノウハウの伝承が喫緊の課題となっている。当社はAR (Augmented Reality) 技術を導入し、ベテラン技術者による遠隔支援だけでなく、現場作業の映像を記録しQRコードとして作業現場に表示するアプリケーションを開発した。本章では、当社にて導入したARデバイスの活用事例について紹介する。

1) システム概要

AR技術を活用した、現場作業映像記録および検索システムを図20に示す。画像撮影・通信機能を備えたARデバイスを装着したプラント運転員を現場に配置し、インターネットを経由して中央制御室や遠隔地のパソコンと通信を行い、双方向の通話や現場映像を共有する。ハンズフリーで撮影・録画し

表4 クレーン自動運転時の燃焼状態
(標準偏差の相対値)

	1号系	2号系
炉内温度	0.73	0.65
砂層温度	0.86	0.58
主蒸気流量	0.83	1

たデータはクラウドへ自動アップロードし、QRコードを自動作成する。このQRコードを現場に設置することで、別の運転員が現場で読み取り録画データを参照することができる。

当社にて選定したARデバイスAの外観を図21に示す。

2) 活用事例

①デバイスA

日常循環点検や定常作業を行う作業員がデバイスAをヘルメットに装着し、中央制御室のPCとの通信を行った。デバイスAは軽量であったため、通常のヘルメットに装着しても違和感がなかった。

②デバイスB

デバイスB向けに下記機能を備えたアプリを開発し、当社の廃棄物処理施設であるH施設およびK施設にてARデバイスの実証試験および初期導入を行った。

- ・映像/画像の撮影とクラウドへの自動的なアップロード機能
- ・QRコードの自動作成と読み取りによる現場からのファイル参照

初期導入においては、まずデバイスBを装着したベテランのプラント運転員が点検・清掃業務を行い、その作業内容を動画にて記録した。次に、点検・清掃業務の経験が浅いプラント運転員がデバイスBを装着し、ベテラン運転員の作業動画を確認しながら点検・清掃業務を実施した。この時、運転員視点での作業風景は、デバイスBを通じて離れた場所に配置したパソコンのモニタに表示され、遠隔地にてプラント運転員視点での作業内容をリアルタイムで目視できることを確認した。点検・清掃業務の経験が浅いプラント運転員によるテスト作業時、標準と異なる内容の作業を行う場面が複数回確認されたが、遠隔地からの音声指示によって標準でない作業



図20 現場作業映像記録および検索システム



図21 デバイスAの外観



図22 デバイスからのQRコード表示状況

の実施を回避することができた。また、ベテラン作業員の動画をQRコードとして生成し、点検・清掃業務の経験が浅いプラント運転員が作業時に動画を参照できることを確認した。作業中の装着者がデバイス越しに見ている風景については図22を参照のこと。

このように、2種類のARデバイスを廃棄物処理施設にて試験的に導入することで効率的な技術伝承および作業負荷低減できる目途がついた。Wi-Fiネットワーク整備によりARデバイスだけでなくカメラやセンサー、ロボット等の情報も一元化し活用することで、メンテナンス現場業務を更に高度化する計画である。

また、ますますニーズが高まっている省人化への対応として、回転ストーカ炉における自動運転の高度化や遠隔支援、現場作業や点検作業の削減に向け、設計、開発、操業など関連部門全体で取組を開始している。

む す び

当社の廃棄物処理のコア技術である回転ストーカ炉の性能アップ、流動床炉を活用した貴金属回収ならびに廃プラガス化メタノール化によるケミカルリサイクルプロセスの開発を紹介するとともに、排ガスに含まれるCO₂を活用した灰炭酸化処理という新たな技術と廃棄物処理施設のエネルギー利活用最大化の先導的事例など、脱炭素や循環型経済の進展に寄与する技術ならびに取組み事例を紹介した。

また、操業支援技術については、ごみクレーン自動化やAR技術を活用した熟練技術者による遠隔指導等の事例を示し、今後の操業技術者不足に対する開発事例を示した。

廃棄物・資源循環分野は、今後の脱炭素・循環型経済の推進において、これまで静脈産業で処分されていた資源を動脈産業に戻す重要な役割を担う必要がある。当社も、これまで培った技術、ノウハウを活かし、持続的社会的の実現に貢献していく所存である。

[参考文献]

- 1) 環境省、廃棄物・資源循環分野における2050年温室効果ガス排出実質ゼロに向けた中長期シナリオ(案)、令和3年8月5日
- 2) 奥住ら：第44回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集、p.98-100(2023)
- 3) 笹山ら：京都大学環境衛生工学研究会機関誌「環境工学研究」、Vol.37, No.3, p.172-174(2023)
- 4) 谷田ら：第32回廃棄物資源循環学会研究発表会講演原稿、p.237-238(2021)
- 5) 玉置ら：第44回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集、p.104-106(2023)
- 6) 渡邊ら：環境浄化技術、Vol.21, No.4, p.52-56(2022)
- 7) 木下ら：神鋼環境ソリューション技報、Vol.18, No2, p.30-33(2022)