

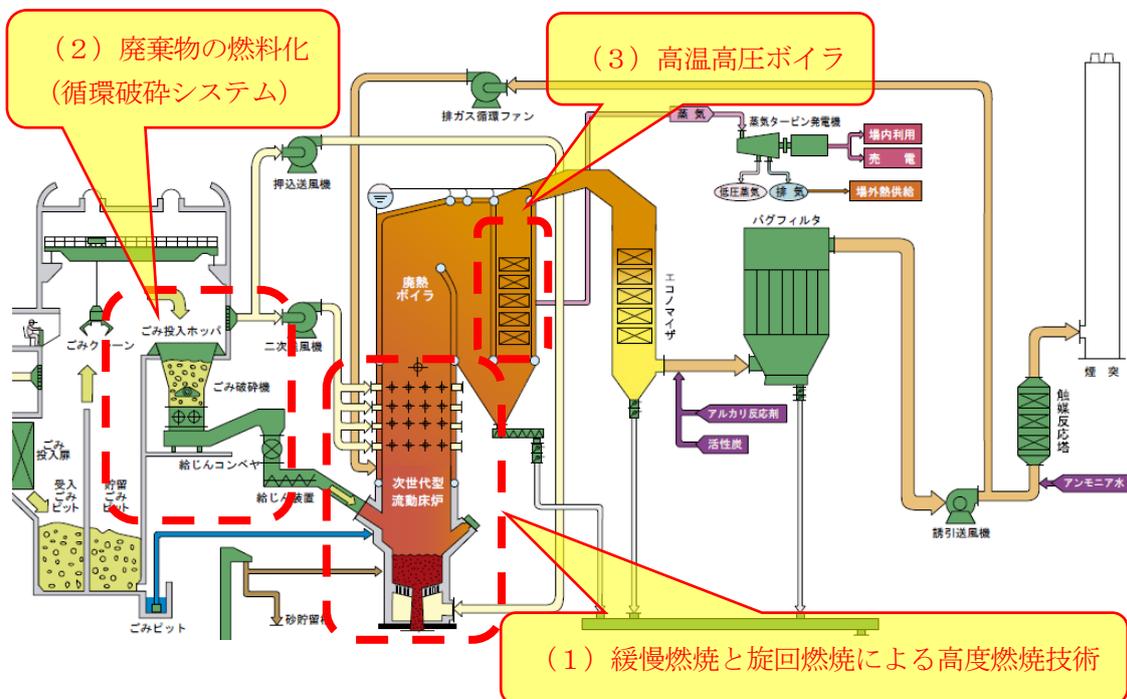
日本産業機械工業会会長賞
「次世代型流動床式ガス化燃焼炉」
株式会社神鋼環境ソリューション

1. 装置の詳細説明

廃棄物処理施設の役割は、元来減容・減量化と安定化・無害化することであるが、近年は廃棄物焼却余熱を用いた「発電所」としても位置付けられており、廃棄物処理施設においても発電高効率化のニーズが高まっている。当社が開発した流動床式ガス化燃焼炉のフローシートを図表1に示す。この装置は当社がこれまで培ってきた技術と新規開発技術の融合などにより、高効率発電に加えて、省エネ化に関する技術も備えたものであり、大きく以下の3点の主な特徴がある。

- (1) 緩慢燃焼と巡回燃焼による高度燃焼技術（ガス化燃焼）
- (2) 廃棄物の燃料化（循環破碎システム）
- (3) 高温高压ボイラ（6MPa×450℃）

これら詳細について、以下に示す。

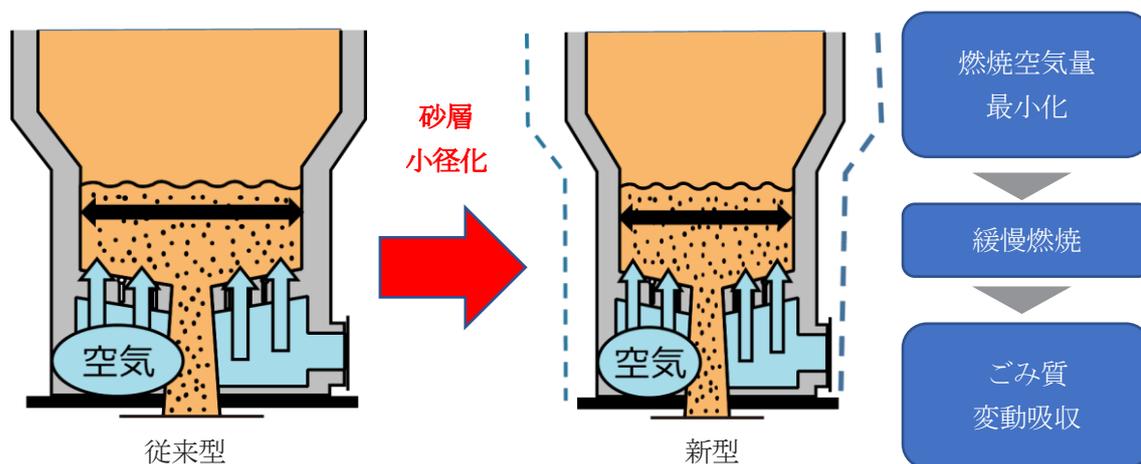


図表1 流動床式ガス化燃焼炉フローシート

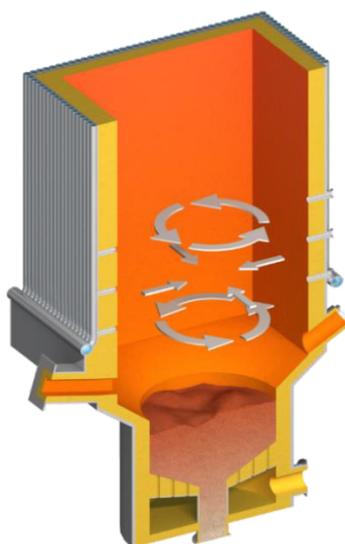
(1) 緩慢燃焼と旋回燃焼による高度燃焼技術（ガス化燃焼）

流動床式ガス化溶融施設におけるガス化炉では、かつて構造指針記載の流動床式焼却炉の $450\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ の倍以上の炉床負荷を採用している。本技術を採用することで、流動化空気量（燃焼空気量）を最小化することができ、ろ液注水等を用いることなく砂層温度を $500\sim 600^\circ\text{C}$ の低温で緩慢燃焼することができる（図表2）。すなわち、ろ液注水による熱損失を抑制しつつ、緩慢燃焼運転をおこなうことにより、エネルギー回収向上と安定燃焼の両立が実現できる。また、流動化空気量の低減により、送風機の機器コストの低減、消費電力削減に繋がり、省エネ化にも寄与する技術である。

二次空気に関しては、従来の流動床式焼却炉で用いている旋回方式の吹込みを行っている（図表3）。これにより、効果的な攪拌・混合が行え、生成ガスの完全燃焼が可能となる。また、流動化空気量の低減による緩慢燃焼と合わせることで、低空気比燃焼が可能となり、ボイラ効率向上（発電端効率向上）、送風機の消費電力削減等に繋がる。さらに、低空気比による炉内温度高温化抑制のために、収熱を考慮した水冷壁構成と排ガス循環システムを採用しており、炉内温度の高温化は抑制されクリンカ付着も無い。



図表2 新型流動床による緩慢燃焼



図表3 旋回方式の二次空気吹込み

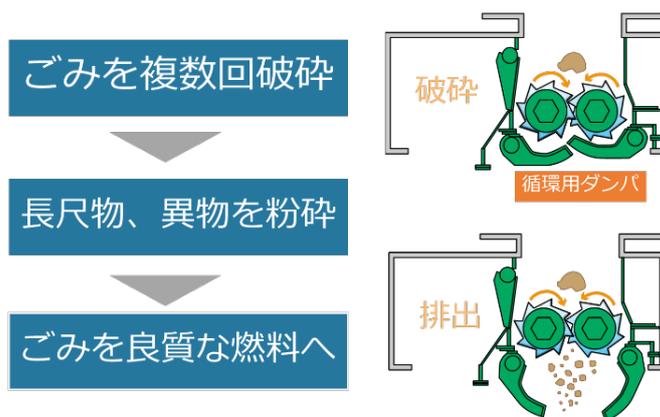
制御方式に関しては、レーザ式 O₂ 濃度計という従来のジルコニア式 O₂ 濃度計と比べてより早く検知することができ、かつメンテナンス性に優れているものを使い、二次空気量の制御に用いることで燃焼制御の高度化を図っている。

(2) 廃棄物の燃料化（循環破碎システム）

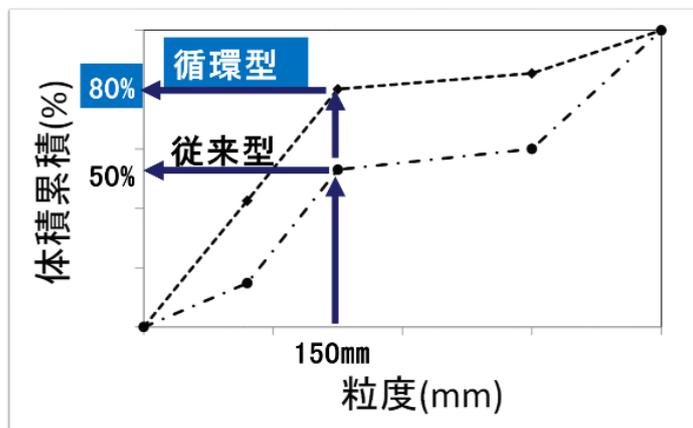
流動床炉は、その炉形式の特性上燃焼速度が速い。そのため、発電量制御に優れている等の利点がある一方、給じん（ごみの投入量、ごみ質）の変動が燃焼変動に大きな影響を与える。炉規模（処理規模）が大きくなるにつれ、その給じんの変動の影響は小さくなるものの、中小型炉では破碎システムを導入した方が、発電量制御、低空気比燃焼などを実現しやすい。

廃棄物処理施設を廃棄物発電所と位置づけ、これまでの破碎システムよりもさらに“燃料化”するため、「循環破碎システム」を開発した（図表 4）。循環破碎システムは、通常の一軸破碎機の排出側に可動式の閉止板（循環ダンパ）を設けた構造である。循環ダンパを閉止した状態のまま廃棄物を投入することで、従来 1 回破碎だったものが、ダンパを開放するまでは繰り返し循環破碎することができる。これにより、より良質な“燃料”を生成することができる。一例だが、体積累積で見ると、従来型では細かく破碎されるものが約 50%に留まるのに対し、循環型破碎機では約 80%と大きく改善されていることがわかる（図表 5）。

なお、破碎機の摩耗に対して容易に肉盛補修できる構造とし、LCC を考慮したシステムとしている。



図表 4 循環破碎システム



図表 5 循環破碎機の性能

(3) 高温高压ボイラ (6MPa×450℃)

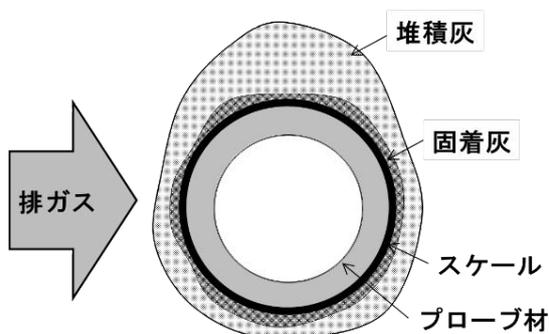
廃棄物発電の高効率化にはボイラ蒸気条件の高温高压化が効果的であるが、排ガス中の腐食成分による過熱器管の腐食が問題となる。日本国内においては4MPa×400℃クラスの蒸気条件が標準となっており、当社においても同様の蒸気条件(4MPa×400℃)を採用した発電施設を複数納入している。その高温高压による腐食状況を確認したところ、5年以上経過後も過熱器管にほとんど減肉がないことを確認しており、長期にわたって大規模な補修や更新を必要としない目途を得ている。

当社流動床炉では、過熱器管材質と配置の最適化により過熱器の腐食を抑えられる特長を有しており、蒸気条件の更なる高温高压化が可能であると考え、蒸気条件450℃を想定した2年間に渡る暴露試験を実施した。試験概要を図表6に示す。プローブ材を実稼働焼却炉内に挿入し、加熱空気を内部に通すことで表面温度を調整し、蒸気温度450℃を想定した条件を作った。暴露試験の結果、過熱器管を最適化な排ガス温度下に配置することで、過熱器管表面の付着灰を溶融させず、腐食減肉を低減することが可能であることがわかった(図表7)。

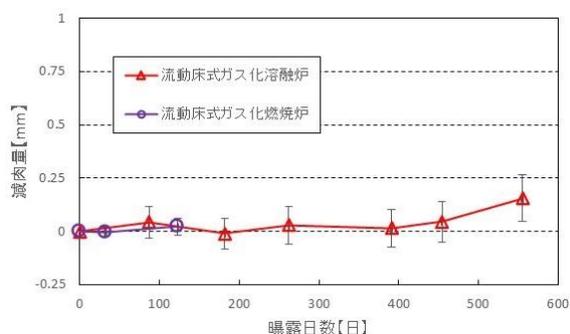
一方、2019年3月竣工した第1号機である「はつかいちエネルギーセンター」における3次過熱器管(蒸気温度450℃部)の減肉量は、1号系、2号系ともに平均減肉速度は0.1mm/年程度であり、過去の暴露試験と同様の減肉挙動であることを確認している。

本蒸気条件の高温高压化の効果として、一つの試算結果ではあるが、蒸気条件4MPa×400℃と比べて、発電量が10%以上増加する試算を得ており、高効率発電化には有効な手段である。

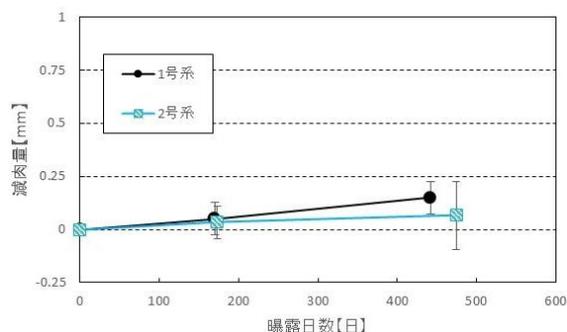
また、流動床炉はその特性上、炉内脱塩・脱硫の特長を有しており、焼却炉出口において排ガス中のHCl濃度、SOx濃度が低い。流動床式ガス化燃焼炉では、バグフィルタ入口のHCl濃度、SOx濃度がそれぞれ85~110ppm、1.5~4ppmであった。



図表6 プローブ材断面の模式図



図表7 暴露試験における模擬管減肉挙動



図表8 実稼働中炉における3次過熱器管の減肉挙動

2. 開発経緯

(1) 開発背景

当社は、1974年に米・コーブランド社から下水汚泥焼却炉を技術導入し流動層による焼却市場に参入した。1978年の第1号機納入以降、下水汚泥、都市ごみ、バイオマスと様々な対象物向けプラントを納入し、独自の流動・焼却技術の開発を行っている。

都市ごみに関しては、流動床式焼却炉の開発からスタートし、最終処分場の逼迫やダイオキシン等の環境問題を背景に、1990年代から流動床式ガス化溶融炉を独自開発し、建設中を含め国内外に22件の実績を持つ当社の主力商品となった。その後、溶融ニーズの落ち着きから、これまで取り組んできた流動床式ガス化溶融炉で培った安定処理技術を基に、流動床独特の燃焼特性を最大限に発揮する次世代型流動床式焼却炉、「流動床式ガス化燃焼炉」の開発に取り組むこととなった。本申請装置である「流動床式ガス化燃焼炉」は、ますます地産地消型の再生可能エネルギー供給施設として位置付けられている都市ごみ処理施設に対応すべく、廃棄物からのエネルギー回収の最大化を開発コンセプトとした。

具体的には、ボイラ効率向上による発電効率向上と各種送風機動力の削減によって送電量の最大化が可能となる低空気比燃焼化（空気比 1.5~1.6⇒1.3）と、蒸気タービン効率の向上によって発電効率のさらなる向上が可能となる高温高压ボイラの採用（400℃×4MPa⇒450℃×6MPa：100t/日×2炉で発電端効率約2%上昇）を目標とした。

(2) 開発経緯

2013年～2016年度	高温高压ボイラを想定した条件下での腐食性評価試験
2015年～2017年度	循環破碎システム、緩慢燃焼と旋回燃焼による高度燃焼技術を盛り込んだ実証試験
2016年7月	次世代型「流動床式ガス化燃焼炉」導入した案件、初受注
2019年3月	第1号機納入

(3) 共同開発

無し

(4) 技術導入

無し

3. 独創性

(1) 緩慢燃焼と旋回燃焼による高度燃焼技術

低空気比燃焼は、省エネに貢献しつつ環境負荷軽減にもつながる。しかし一般的に低空気比燃焼を行うと、燃焼室温度の過度な上昇により一部の飛灰が溶融し、それが炉内壁へ附着してクリンカが生成されることや、燃焼空気混合性低下による不完全燃焼等の恐れがある。これらを解決するためには、①燃焼室の温度上昇を抑制する、②燃焼室への燃焼空気吹込みを確実にを行い完全燃焼させることが重要である。本申請装置である「流動床式ガス化燃焼炉」では、これら課題を解決するために、以下の工夫を行い、安定燃焼を実現することができた。

1) 燃焼室温度上昇の抑制及びクリンカ付着防止

- ・収熱を考慮した水冷壁構成とすることで、炉壁表面温度上昇を抑制する。
- ・排ガス循環システムを採用することで、燃焼排ガスに低空気循環排ガスを混合し、排ガス温度上昇を抑制する。

2) 燃焼室への燃焼空気の確実な吹込み

- ・炉床負荷を上昇させ、流動化空気を最小化することで緩慢燃焼を実現し、二次燃焼空気量をこれまでと同様に確保する。これに伴い、低空気比且つ確実な燃焼空気吹込みが実現できる。

(2) 廃棄物の燃料化 (循環破碎システム)

従来の二軸剪断式の破碎機は、被破碎物は、カッターとカッターの間に引き込んで切断されるため、1回のみの破碎で排出される。カッターのクリアランス以下の被破碎物やカッター間で圧縮される被破碎物は細かく破碎されない。一方循環破碎システムは、複数回破碎することが可能であり、被破碎物の細粒化が可能である。それにより、破碎しきれず機器に巻き付いたり堆積したりするリスクは大幅に低減し、かつごみの定量供給性が向上することで、燃焼状態の安定化が可能となった。

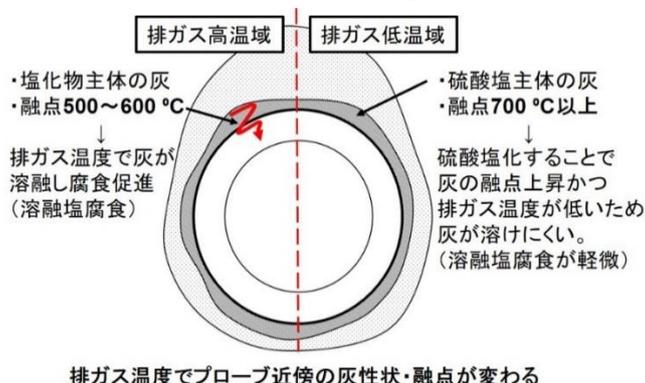
(3) 高温高压ボイラ (6MPa×450℃)

上述したとおり、一般廃棄物処理施設における高効率発電において、蒸気条件 4MPa×400℃が一般化し、さらなる高温高压化を進めることができず、低温エコノマイザや低温触媒の採用など総合的な高効率発電化を中心としてきた。進めることができない理由として、過熱器管の腐食減肉挙動に関する知見が不足しており、さらなる高温高压化ボイラの導入まで至らなかったことが考えられる。

このような背景のもと、当装置の開発にあたり、蒸気条件 450℃を想定した3年間に渡る暴露試験を実施し、過熱器管の腐食減肉挙動について調査した。その暴露試験から当装置の流動床炉で過熱器管に付着する灰の特性が排ガス温度により異なることが分かった。(図表9)

- ・排ガス温度 600℃程度 of 高温排ガス雰囲気下では 500~600℃で溶ける塩化物中心の灰が存在しやすい。
- ・排ガス温度 500℃程度の低温排ガス雰囲気下では、熔融温度が 700℃程度 of 高い硫酸塩の状態で存在しやすい。
- ・硫酸塩の場合、過熱器管表面で溶けにくいいため、熔融塩による腐食が軽微である。

このように、腐食減肉メカニズムを解明することができ、蒸気条件 450℃を導入可能となった。



図表9 排ガス温度による付着灰特性への影響

4. 特許の有無

次のとおり、特許2件を取得済み。

特許番号：第5974126号 / 名称：エネルギー回収装置および廃棄物焼却設備

特許番号：第6391605号 / 名称：二軸剪断式破砕機

5. 性能

2019年3月竣工した第1号機である「はつかいちエネルギークリーンセンター」の性能を説明する。当施設は、6MPa×450℃の高温高压ボイラの他に、低温エコノマイザ、低温触媒の採用など高効率発電に取り組んでいる。

加えて、従来の廃棄物発電施設では利用が難しいとされていた「タービン排熱」の有効活用を行っている。これまで大気放出されていたタービン廃熱から温水を間接的に熱回収し、隣接する広島ガス廿日市工場への熱供給事業を行っており、エネルギー回収が非常に優れた施設である。当施設の操業状況について、(1) 焼却運転、(2) 発電・熱供給状況に分けて説明する。

(1) 焼却運転

焼却運転結果として、図表10に引渡性能試験時の排ガス測定結果を示す。空気比約1.3の低空気比運転で安定した排ガス性状を確認することができた。

(2) 発電・熱供給

熱供給システム概要を図表11に示す。広島ガス廿日市工場では、LNGを気化させるために温水ボイラとコージェネレーション(CGS)の排熱を熱源として利用していたが、タービン排熱からの温水も利用することで、既存の温水ボイラの稼働率を下げることができる。

本施設では全炉停止期間以外はほぼ熱供給を行っているが、発電と熱供給はトレードオフの関係にあるため、発電効率の向上のみを追求するのではなく、発電と熱供給の最適なバランスを考慮しながら運転を行っている。一般的に発電効率を高めるためには、タービン排気圧をできるだけ下げた運転が有効であるが、本施設では温水利用先に供給する温水温度を要求レベルに維持するために、タービン排気圧を上げて調整し、発電と低温排熱をあわせたエネルギー利用率を最大化するよう運転を行っている。

図表10 各排ガス測定結果

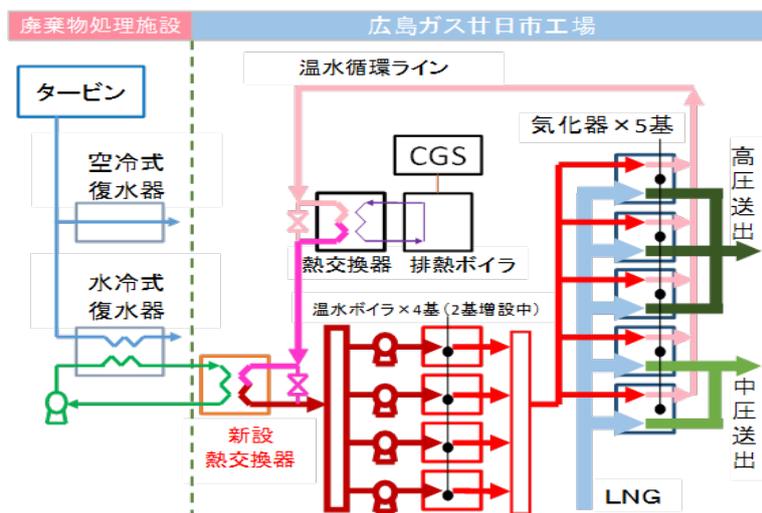
項目	基準値	1号系	2号系
煙突ばいじん濃度(g/m ³ N)	0.005以下	0.001未満	0.001未満
煙突SO _x 濃度(ppm)	10以下	0.7未満	0.7未満
煙突HCl濃度(ppm)	10以下	4	3
煙突NO _x 濃度(ppm)	20以下	9	9
煙突CO濃度(ppm)	30以下	4	4未満
煙突DXNs濃度(ng-TEQ/m ³ N)	0.01以下	0.00012	0.00065
煙突Hg濃度(μg/m ³ N)	—	0.71	0.6
炉出口空気比	—	1.26	1.29

上記のとおりタービン排気圧を上げた運転を行っているが、6MPa×450℃の高温高压ボイラの採用により 2020 年度平均で 19.2%と高い発電効率（1 炉運転時）を実現した。また 2020 年度の発電効率は 16.1%（2 炉運転時）、熱利用効率は 25.6%、合わせたエネルギー効率は 41.7%と非常に高いエネルギー利用を実現できている（図表 12）。この売電及び熱供給による年間 CO₂削減量は、6,924t-CO₂及び7,235 t-CO₂で合計 14,159 t-CO₂となり、計画値の 9,700 t-CO₂の約 1.5 倍となっている。なお、本施設では、送電制限のため 2 炉運転時は発電量を抑えた運転を行っているが、制限がない場合は、さらにエネルギー効率を高めることが可能である。

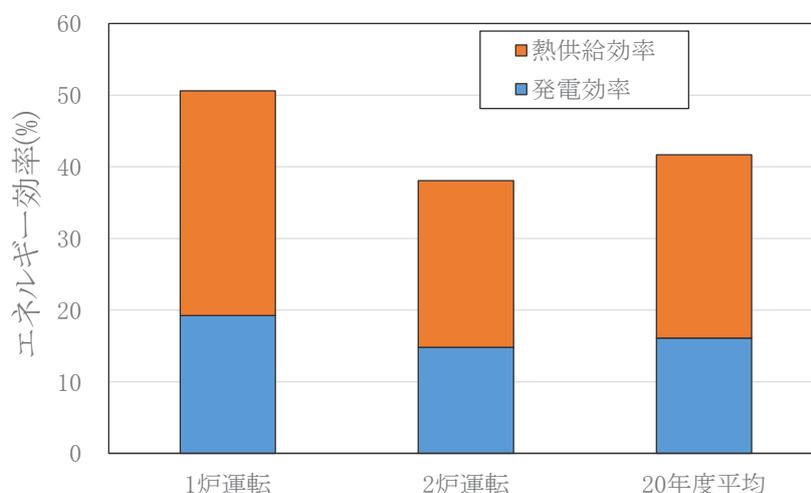
（3）耐久性・安全性

耐久性に関して、ガス化燃焼炉、高温高压ボイラについては従来と同等の耐久性を有している。循環破砕システムについては、破砕時間が多くなる分破砕刃の摩耗は増えるものの、容易に肉盛り補修できる構造であり、LCC を考慮した設計としている。

また、流動床炉はストーカ炉と比べて炉内にごみの滞留がないため、非常時も安全かつ速やかに停止及び再稼働が可能である。



図表 11 熱供給システム概要



図表 12 エネルギー効率実績

(4) 運転・操作性

従来装置では、給じんの変動、燃焼の変動が大きく、燃焼の安定化を図るために運転員による手動介入を行うことがあったが、本申請装置である「流動床式ガス化燃焼炉」では安定燃焼が可能となり、また自動燃焼制御システムを採用しているため、ほぼ手動介入を行う必要がなく運転・操作性は大きく向上している。

(5) 維持管理性

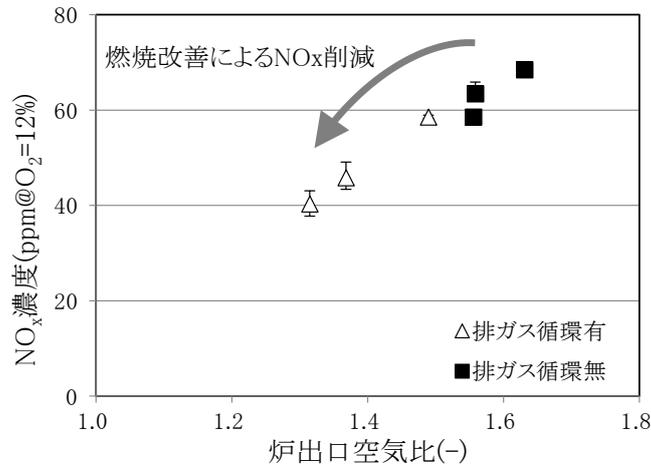
循環破碎システムは従来の二軸破碎機と比べて破碎刃の摩耗が増えるため、肉盛り補修が必要だが、定期的に行うだけで維持管理性は大きく変わらない。その他に関しては、従来装置と変わらない維持管理性を有する。

6. 経済性

図表 13 に従来装置と申請装置のとの経済性比較表を示す。従来型装置と比べて、循環破碎システム、高温高压ボイラ (6MPa×450℃)、排ガス循環システムなどの採用により、設備費、点検補修費が増加するが、発生 NOx の低減による脱硝薬剤使用量の削減 (図表 14) や高効率発電による売電収益の増加が可能となるため、それらコスト増加分を上回る収益増加を見込むことができる。本申請装置を導入することで 20 年間の LCC で比較した場合、従来型装置よりも 1.3 倍の経済性メリットが得られる。

図表 13 従来装置と申請装置のとの経済性比較表

	従来装置	本装置	備考
○設備費			
燃焼設備 (給じん装置分)	100	105	循環破碎システムを採用した分、設備費増加
発電に関する設備 (廃熱ボイラ等)	100	110	6MPa×450℃の高温高压ボイラを採用した分、設備費増加
排ガス循環追加	0	100	排ガス循環システムの設備費増加
○点検補修費			
燃焼設備 (給じん装置分)	100	105	循環破碎システムの点検補修費が増加
発電に関する設備 (廃熱ボイラ等)	100	100	
排ガス循環ファン	0	100	新設排ガス循環ファンの点検補修費が増加
○薬剤費用			
脱硝剤費用	100	0	NO 規制値：50ppm、低空気比等により発生 NOx 濃度低減
○電力			
売電収益	100	120	各種送風機消費電力減、高効率発電要素技術により発電電力増
○総合評価 (収益)	100	130	設備費、点検補修費、売電収益を総合的に評価



図表 14 発生 NO_x 抑制結果

7. 将来性

都市ごみ処理施設は、ますます地産地消型の再生可能エネルギー供給施設として位置付けられ、なお一層省エネルギー技術、高効率発電技術が求められる。当社の流動床式ガス化燃焼炉においても、プロセス・機器の簡素化やさらなる蒸気条件の高温高压化等によりそれらを実現できると考える。

今後日本では人口減少により、自治体の財政はますます厳しくなり、また 2050 年に向けて脱炭素社会、カーボンニュートラルを目指す中、一般ごみ、下水汚泥、産業廃棄物等の垣根を越えた合理的・効率的な廃棄物処理システムの検討が進むものと考えられる。一方、流動床炉は、汚泥等の低カロリー物からプラスチック等の高カロリー物まで幅広い対象物を処理可能である特長を持ち、様々な雑多なものを同時に処理できる。今後、流動床焼却技術はその特徴を活かし、合理的・効率的な廃棄物処理システムの一員として役割を担っていくものと確信する。