

経済産業大臣賞

「低熱灼減量対応V型ストーカ式廃棄物焼却炉」

三菱重工環境・化学エンジニアリング株式会社

1. 装置の詳細説明

(1) 背景

近年、社会経済の発展によるごみ排出量増加、埋立処分地逼迫により、発展途上国を含め世界中でごみ焼却施設の建設が進められている。特に中国や東南アジアは経済発展が目覚ましく、ごみ発電による電源確保・地球温暖化防止への注目と相まって、多くのごみ焼却施設が建設されている。

中国や東南アジアのごみは厨芥類が多く水分を多く含んでいるという特徴があり、雨の多い時期にはごみピットの貯留されるごみから20～30%のごみ汚水が発生することもある。このように水分を多く含んだごみであっても安定的に焼却処理できる焼却炉が求められる。

また、海外では日本のように市町村単位でごみ焼却施設が建設されるのではなく、一つの焼却施設に広いエリアのごみを集めて集中処理を行うことが多い。そのため、1炉あたりの処理量が300～1,000t/日という大型施設が建設される。ごみ焼却施設において最も重要となる燃焼装置部分については様々な方式があるが、このような大型ごみ焼却施設では大型炉実績、運転安定性からストーカ式焼却炉が採用されることが多い。

今回、水分の多いごみでも焼却後の焼却灰の熱灼減量(乾燥状態の焼却灰中に残る未燃分の重量比を表す値)を低く抑えた安定処理ができ、かつ大型化した際でもコンパクト化できるストーカ式焼却炉、すなわちストーカ単位面積あたりの焼却量(火格子燃焼率)を上げることができるとして、ストーカ式焼却炉の開発を行った。

日本国内においても、ごみ中の水分量は中国や東南アジアに比べて少ないものの、建設用地確保の問題からコンパクト化されたストーカ式焼却炉のニーズは大きい。

(2) 当社従来型装置と課題

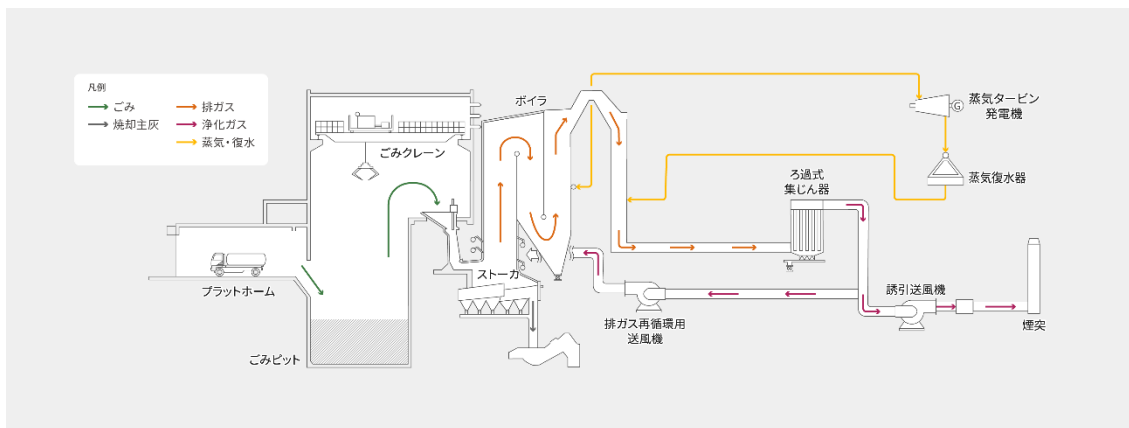
図表1にごみ焼却施設の主要処理フローを示す。ごみクレーンにより投入されたごみを高温焼却する装置がストーカ式燃焼装置(以下、ストーカ)である。ごみを完全燃焼させるには、ストーカ上でのごみの適度な攪拌、ごみ層温度の維持、十分な滞留時間の確保が重要となる。

ストーカはごみ燃焼域に配置する火格子を摺動させることで火格子上のごみを移動させ、火格子下部から送り込まれる燃焼用空気でごみを燃焼させる装置である。図表2に一般的なストーカの形状を示す。ごみの流れ方向に対して、水平若しくは下り傾斜が多く採用されている。

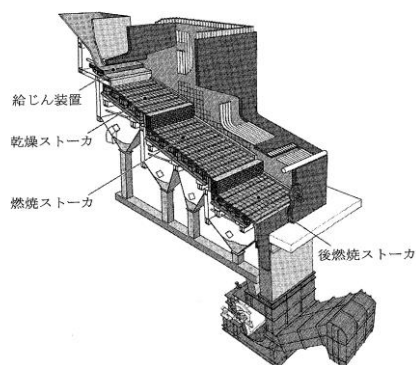
ごみの流れ方向に対して水平若しくは下り傾斜とする一般的なストーカに対して、当社は図表3に示すようにごみの流れ方向に対して火格子を上り傾斜状に配置した独自の機構を持つF

型ストーカ(以下、従来型装置)を採用している。

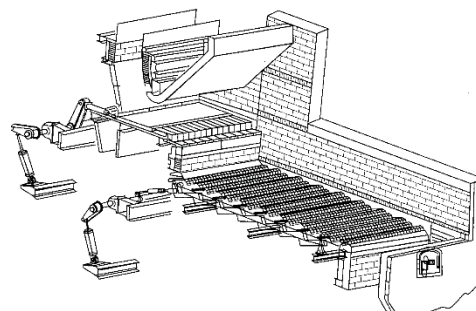
従来型装置では、ごみの送りを上り傾斜とすることで下り傾斜や水平のストーカに比べて滞留時間を確保しやすくしている。また図表4に示すように、火格子によるごみの突き上げと重力によるごみの戻りの相乗効果により、ごみの攪拌性が高いという特徴がある。



図表1 ごみ焼却施設フロー

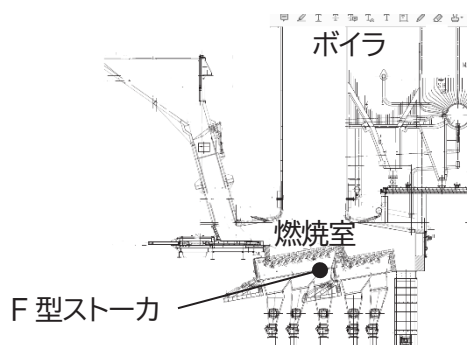


階段式 (下り傾斜)

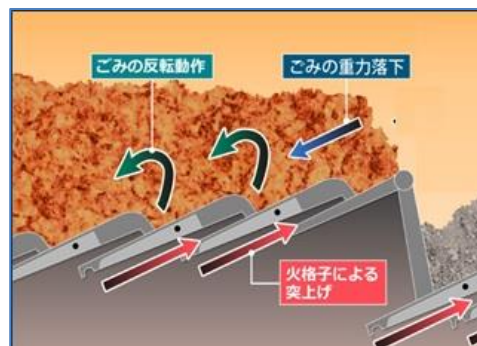


並行揺動式 (水平)

図表2 一般的なストーカ形式 (出典: ごみ処理施設設備の計画・設計要領 2017 改訂版)



図表3 当社F型ストーカ (従来型: 上り傾斜)



図表4 F型ストーカのごみ攪拌原理

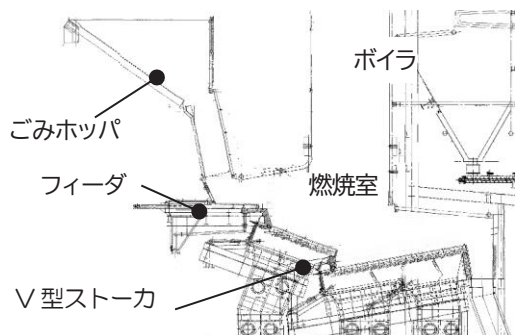
従来型装置ではごみ滞留時間確保、ごみ攪拌性の点で優れているが、ごみの搬送能力では下り傾斜には劣るため、ストーカの幅を増やしてごみ搬送能力を上げる必要があった。特に大型炉に採用する場合、幅が広くなるとでボイラを含めた焼却炉部分が大きくなり、建屋を大きくしなければならないという課題があった。

(3) 本装置の構成

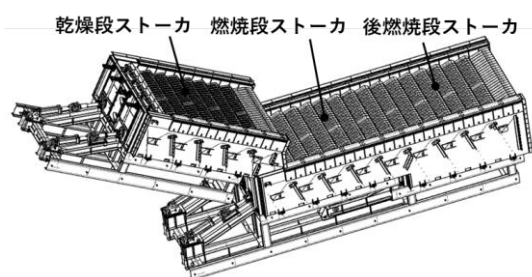
この課題に対し、炉内に投入されたごみは乾燥が進むことで次第に重量・体積が減少するという特性を踏まえ、従来型装置の前段にごみの乾燥を促進させる機能を付加することで、従来型装置の特徴を維持したままコンパクト化が可能なV型ストーカ式焼却炉を開発した（以後本装置）。

本装置の主要機器構成を図表5、主要装置となるストーカ部分の構造を図表6に示す。乾燥促進設備として下り傾斜のストーカを採用している。下り傾斜のストーカは炉内主燃焼部に重量・体積のあるごみも円滑に送ることができるとともに、火炎からの放射を効率的に受けることができるため乾燥促進には適している。この点については「3. 独創性」で詳細に述べる。

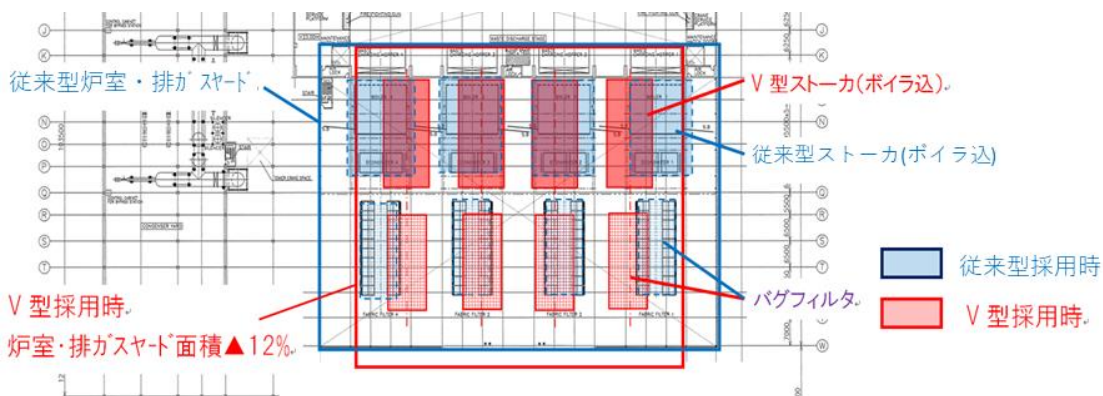
本装置は下り傾斜ストーカを追加することでストーカ全長は約1.5倍に伸びることになるが、ストーカはボイラ下部空間に配置されているため、ボイラを含めた設置面積で考えれば影響はほとんど無い。それに対しストーカ幅を小さくすることができれば、ストーカと一体構造となるボイラの幅も小さくすることができる。ごみ焼却炉建屋のなかでも空間を占める割合の大きい、ストーカ・ボイラが収納される炉室を小さくすることができれば、その分建屋コストを小さくできるメリットもある。



図表5 本装置の主要機器構成



図表6 主要部構造(ストーカ本体部)



図表7 本装置(V型)採用時の炉室・排ガスヤード面積削減効果

2. 開発経緯

(1) 開発目標

低位発熱量 6MJ/kg 程度の水分の多いごみでも焼却後の焼却灰の熱灼減量を低く抑えた安定処理ができ、かつ大型化した際でもコンパクト化（火格子面積：従来型比 20%削減）できるストーカ式焼却炉を目指して開発に着手した。

(2) 開発経緯

当社グループ研究所内に木材チップでごみの挙動を模擬する小型コールド試験機を設置し、ストーカ傾斜角度、火格子形状等と火格子上の搬送物の動きに関する相関性データの取得から着手した。小型コールド装置試験に引き続き、ストーカ上のごみ粒子挙動の個別要素法解析 (DEM) を用いたシミュレーションや炉内燃焼の熱流体力学シミュレーション解析 (CFD) による検証を行うことで実機規模の設計を行った (図表 8)。

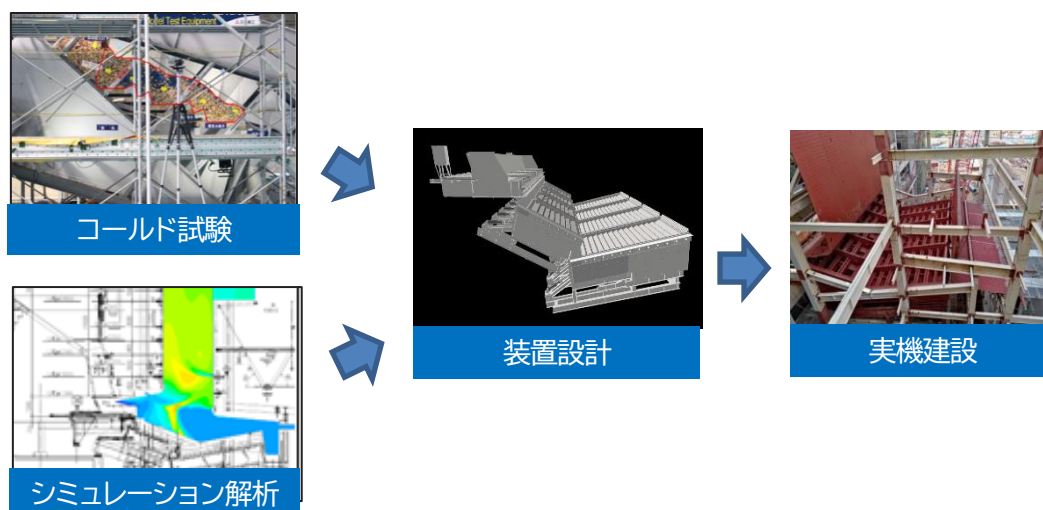
2016 年～2017 年	小型コールド試験機による搬送性・攪拌性評価 シミュレーション解析による性能評価
2018 年	検証試験に基づき実機規模の装置設計・第 1 号機受注
2020 年	第 1 号機試運転開始

(3) 共同開発

無し

(4) 技術導入

無し



図表 8 本装置の開発経緯

3. 独創性

(1) 下り傾斜の乾燥ストーカと上り傾斜の燃焼・後燃焼ストーカの組み合わせ

本装置では、乾燥ストーカを下り傾斜とすることで、水分の多い比重の大きなごみでも、滞留することなく主燃焼部へ送ることができる。またストーカ傾斜面を火炎方向に向けることで、火炎からの輻射を受けやすくなり、ごみ中の水分の乾燥が促進されごみの重量は乾燥ストーカ上で3~4割減少する。ごみ重量・体積を減少させることにより、上り傾斜の燃焼ストーカで必要とされる搬送負荷を低く抑えることが出来るようになり、ストーカ幅を従来型装置よりも狭くすることが可能となる。

また、燃焼ストーカ及び後燃焼ストーカを上り傾斜とすることにより、ごみの攪拌促進及び滞留時間を確保するとともに、燃焼ストーカ及び後燃焼ストーカにおいてもストーカ傾斜面を火炎方向に向けることで、火炎からの輻射によりごみ・灰層温度を維持し未燃焼分を完全燃焼させることができる(図表9)。

本装置は、乾燥・燃焼・後燃焼全ての工程でストーカ面が火炎中心方向を向いているため、輻射熱を効率的に受けながらごみが焼却されるというのが最大の特徴である。

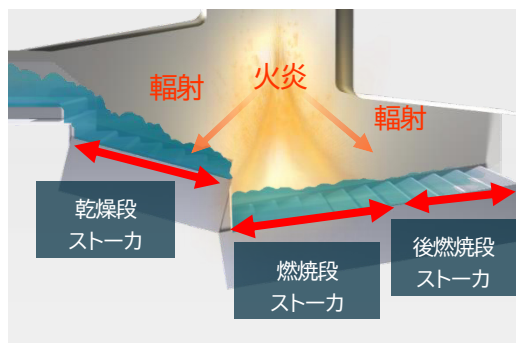
輻射熱以外の点でも、下り傾斜と上り傾斜を組み合わせたV字形状は安定的に低熱灼減量を維持する効果があることを以下に述べる。

海外のごみ焼却場ではごみがごみピットで十分に攪拌されることなく炉内に投入されることも多く、斜面を滑りやすい重たいごみや塊状のごみが炉内に投入されてしまうことが良くある。下り傾斜が主体で構成されるストーカ式焼却炉の場合、傾斜部をこのようなごみが滑り落ち、十分な燃焼が行われることなく未燃状態で排出されることがある。これに対し、本装置では下り傾斜部分を滑り落ちた場合でも、上り傾斜の燃焼ストーカが受け止め焼却するため、未燃状態でごみが焼却炉から排出されることを防ぐことができる(図表10)。

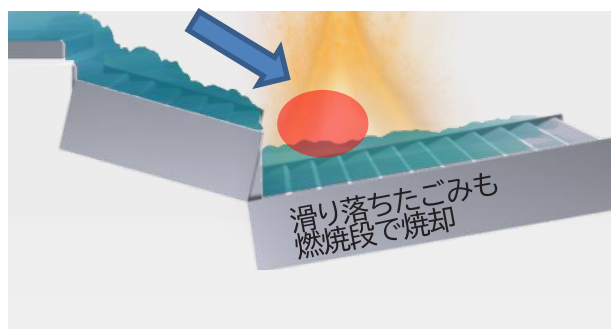
(2) 乾燥段、燃焼段、後燃焼段各ストーカで独立した火格子駆動機構を採用

従来型装置でも上り傾斜とすることで下り傾斜や水平のストーカに比べて滞留時間が確保しやすいという特徴はあった。本装置では、燃焼ストーカと後燃焼ストーカを連続させ、かつ独立で動作させる機構を採用した。

後燃焼ストーカの灰搬送速度を下げることで後燃焼ストーカ上での滞留時間を確保できるうえ、後燃焼ストーカの灰層の高さが上がることによる堰き止め効果で、燃焼ストーカ部分のごみ・灰層高さも上昇させることができる。すなわち燃焼ストーカでの滞留時間も増やすことができる。



図表9 火炎の輻射を活かした構造の説明図



図表10 滑り対策説明図

(1) 及び(2)に示す独自構造により、乾燥・燃焼・後燃焼ストーカ全てにおける火炎輻射熱の効率的な利用、燃焼・後燃焼ストーカでのごみの攪拌及び滞留時間の確保により未燃焼分の完全燃焼、すなわち熱灼減量を極小化できる。

(3) ユニット構造の採用

本装置は開発の経緯で述べたように大型化の容易性を考慮している。具体的にはフィーダ、乾燥ストーカ、燃焼・後燃焼ストーカをそれぞれユニット化し、処理量を増やす場合は、幅方向に並べるユニット数を増やすことで大型化が可能な構造としている(図表 11)。

4. 特許の有無

次のとおり、特許 4 件を取得済み。

特許番号：第 6397107 号 / 名称：ごみ等の被焼却物燃焼用ストーカ炉

特許番号：第 6393822 号 / 名称：ストーカ炉用シール装置及びストーカ炉

特許番号：第 6484874 号 / 名称：ストーカ炉

特許番号：第 6450987 号 / 名称：ストーカ炉

5. 性能

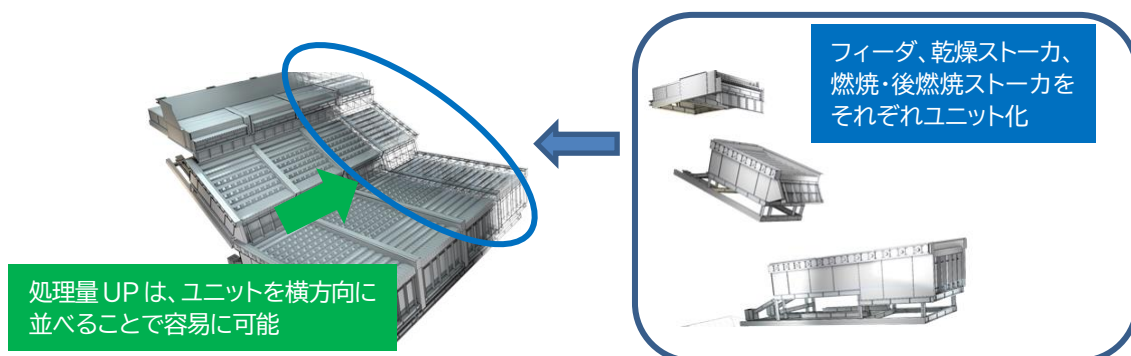
中国湖北省孝感市のごみ焼却施設に納めたため商用第 1 号機の試運転における運転データを用いて本装置の性能を示す。

(1) 第 1 号機仕様

商用第 1 号機の主要仕様を以下に示す。本施設の公称処理量は 750t/日・炉であるが、オーバーロード(120%負荷)での連続運転を要求されているため、焼却装置処理能力は 900t/日・炉以上として設計されている。なお、第 1 号機ということもあり火格子面積としては約 25%の余裕を見込んだ設計とした。

【主要仕様】

焼却能力	公称	750t/日・炉(31.25t/h)
	オーバーロード	900t/日・炉(37.5t/h)
炉数		2 炉
火格子面積		約 133m ²



図表 11 ユニット化による容易な処理能力 UP

(2) 焼却処理能力及び熱灼減量

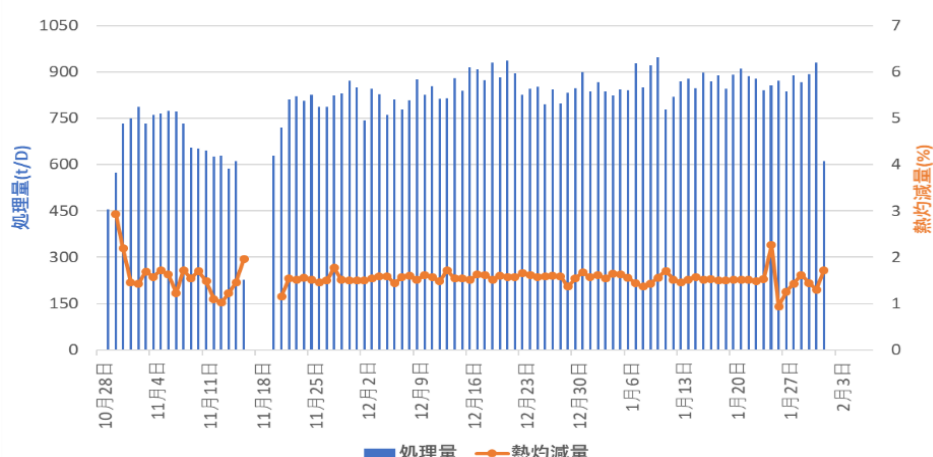
第1号機試運転時の処理量・熱灼減量のデータを図表12に示す。

期間中のごみの低位発熱量はボイラ蒸発量とごみ投入量からの類推値で概ね6.0~7.0MJ/kgであった。日本国内では低質ごみとして指定される、もしくはそれ以下の水分の多く含まれるごみであった。

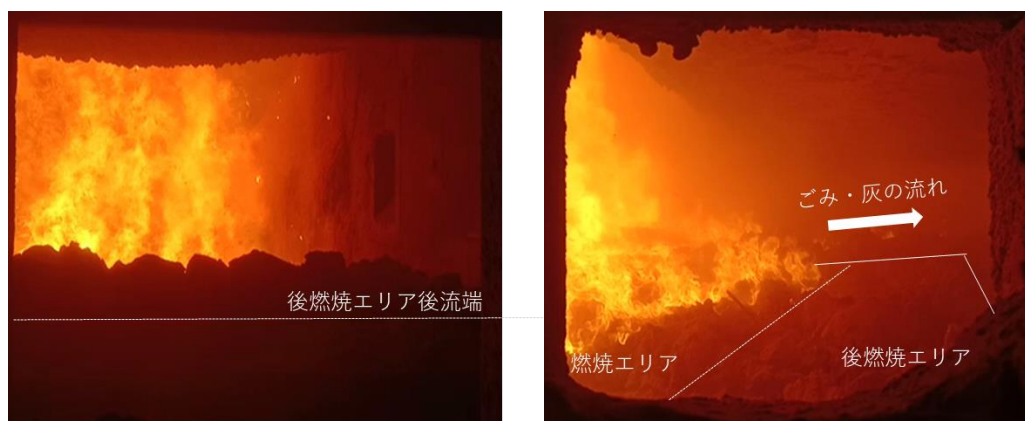
図表12より要求処理能力900t/日以上処理を含め連続安定運転が出来ていることが分かる。図表13に900t/日以上処理している日の炉内燃焼状況を示す写真を示すが、燃え切り位置はストーカ全体長さの6~7割程度の位置となっており、焼却能力としては900t/日処理時でもまだ余力のあることが確認された。

完全燃焼の指標となる焼却灰(湿灰サンプリング)中の熱灼減量も、図表13に示すように運転開始当初の調整期間の数日を除き、連日1%台で推移し全期間の平均値も1.6%と非常に低いものであった。

中国内では日本製を含む輸入ストーカ及び中国国産ストーカが数多く稼動しているが、他施設における熱灼減量は2~3%の範囲であることが多く、第1号機を納入した客先(瀚藍環境グループ)からは安定的に1%台で推移する本装置について高評価をいただいている。



図表12 焼却量と熱灼減量(1号炉)



(a) 炉後側点検的からの目視
(ごみの流れ: 奥から手前)

(b) 後燃焼ストーカ側部からの目視
(ごみの流れ: 左から右)

図表13 炉内燃焼状況

なお、焼却灰の熱灼減量は灰押出装置で加湿された後の湿灰を灰ピットにてサンプリングしたものを中国の公定分析方法(HJ/ 1024-2019)に準じて実施している。HJ/ 1024-2019 は分析時の試料の乾燥・加熱温度、加熱時間等の条件は日本の公定分析方法である環整 95 号と同じであるが、大型不燃物補正を行わないという点で HJ/ 1024-2019 の方が数値的には厳しい側の評価となる。

(3) 低質ごみへの対応性（掘り起こしごみとの混焼）

本施設では、埋め立て処分場の掘り起こしごみとの混焼も行われていて、ごみ搬入量に対して 3 割以上が掘り起こしごみということもあった。図表 12 に示したデータはこのような状態での運転データであり、掘り起こしごみこのような泥状の滑りやすい且つ発熱量の低いごみがそのまま焼却炉に投入されることも多くあったが、このようなごみに対しても低熱灼減量を達成できた。

参考までに図表 14 で処分場での掘り起こし作業の様子を、図表 15 でごみピット内の掘り起こしごみの写真を示す。

(4) 耐久性・安全性、運転・操作性、維持管理性等

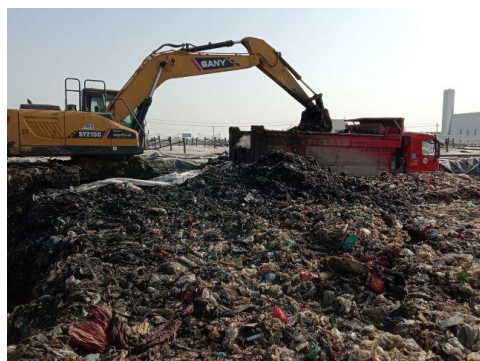
1) 耐久性

耐久性については、基本的構造は当社従来装置を踏襲しており従来装置と変わらない。

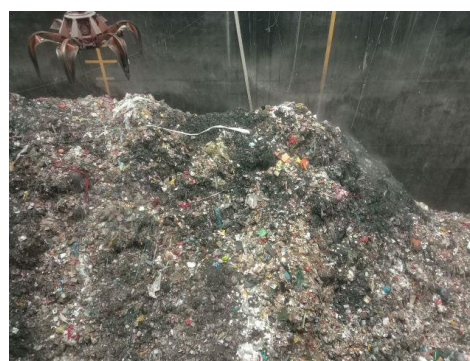
2) 安定性

第 1 号機は 2021 年 1 月より商用運転に入っているが、2021 年 1 月 1 日から 10 月までの実績で 1 号炉：228 日間（稼働率：75%）、2 号炉：238 日間（稼働率：78%）となっている。この期間の停炉は、ごみ搬入量に応じた操炉調整が理由であり装置の安定性が十分であることが示されている。また、この間に 125 日連続運転も行っており、性能指針の 90 日以上を十分に満足している。

燃焼の安定性に関して、焼却灰の熱灼減量が安定していることは 5(2) 項で述べたが、燃焼安定性を判断するもうひとつの指標として、排ガス中の CO 濃度のデータを図表 16 に示す。平均で 900t/日以上以上の処理を行っていた 5 日間の排ガス中 CO 濃度を整理したデータであるが、1 日の平均値で 1~3ppm であり、100ppm を超える CO 濃度のピークもなく、燃焼が安定していることがわかる。



図表 14 処分場での掘り起こし作業



図表 15 掘り起こしごみ(ごみピット)

3) 運転・操作性

運転・操作性については従来装置と同様に ACC (Auto Combustion Control) が組み込まれており、燃焼状況に応じて、フィーダ・ストーカ速度、燃焼空気量等が自動調整される。

4) 維持管理性

基本的構造は当社従来装置を踏襲しており従来と変わらない。

5) 据付容易性

大型炉の据付容易性の向上を目的として、本装置ではユニット構造を採用した。図表 17 に現地据付状況を示すが、クレーンにより取り込むことで、1 炉分のストーカ装置の取り込みは 5 日で完了した。従来装置のように部材別で搬入される場合は、敷地内での仮組を行ってからの取り込みが必要であり 1 ヶ月程度必要であったことから、現地工数は大幅に低減することができた。

6. 経済性

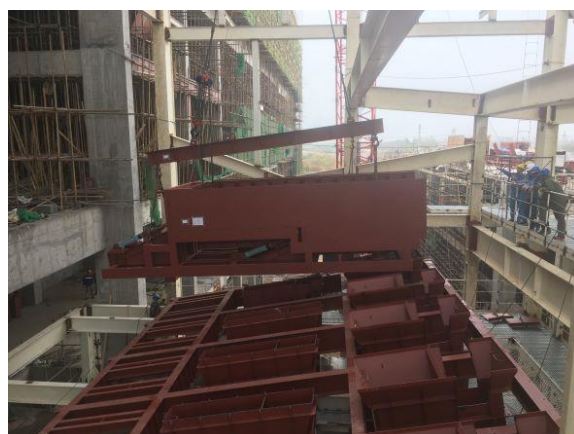
経済性については、他社製品の情報がいないため当社従来型装置と本装置の比較で示す。

本装置は従来型装置に比べてストーカ面積を 20%削減することが可能である。

特に、ストーカは耐熱性材料を使用した鋳物で造られている火格子のコストが全体製造コストに占める割合が高く、ストーカ面積（火格子面積）を小さくできるということは装置の製造コストを抑えることに直結する。図表 18 及び図表 19 に当社従来型装置と本装置のインシヤルコストを比較した図及び表を示す。

図表 16 排ガス中の CO 濃度

日付	処理量	CO 濃度	
		24h 平均	100ppm 超過回数
12/19	909 t/日	1.78 ppm	0 回
12/20	873 t/日	2.10 ppm	0 回
12/21	930 t/日	1.89 ppm	0 回
12/22	881 t/日	2.28 ppm	0 回
12/23	937 t/日	1.83 ppm	0 回



図表 17 現地据付状況

火格子駆動動力源となる油圧ユニット消費電力も火格子面積削減に伴い削減される。また、焼却灰中の熱灼減量を低く抑えるということは、灰中の残留未燃分をより多く燃やすことであり、その分の熱量がボイラで回収され発電量を増加させることができる。仮定での計算となるが、焼却灰の熱灼減量を 1%下げることができれば、750t/日×2 炉の焼却施設では 1 日あたり約 2,100kWh(注)の発電電力量を増やすことができる。これは 750t/日×2 炉の焼却施設で発電可能な電力の約 0.5%にあたる。

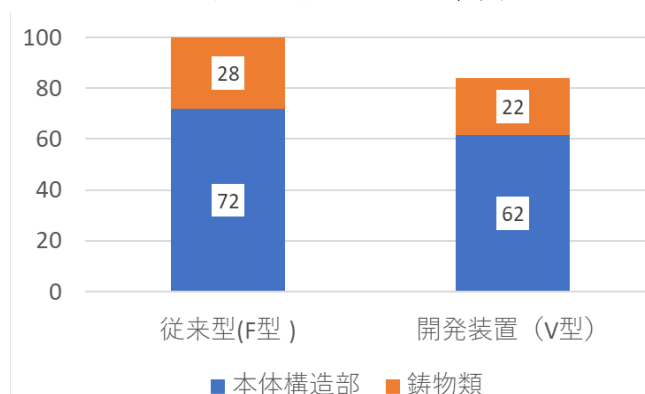
また、メンテナンスは、定期的な火格子交換の費用が主となるが、火格子面積が小さくなる分交換対象となる火格子が少なくて済むが、単位面積あたりの燃焼負荷が上がる分、交換頻度が若干早くなることも予想されるためメンテナンスコスト削減は 0~20%削減となる。

省スペース効果については、1 (3) 項本装置の構成に示したとおりである。

注：ごみ中の低位発熱量 6MJ/kg、灰分 15%、未燃分中の炭素割合 50%、タービン発電効率 20%で計算。

7. 将来性

EGR(排ガス再循環設備)と組み合わせた低空気比・低 NOx 燃焼が可能であることも CFD 解析で確認済みであり、EGR を用いた低空気比燃焼による高効率発電が主流となっている国内向けプラントにも、配置コンパクトのメリットを活かして適用範囲を広げていく。



図表 18 イニシャルコスト比較 (従来型コストを 100 とした)

図表 19 当社従来装置との経済性比較

	従来装置	本装置	備考
① イニシャルコスト			
装置費用	100	84	
② ランニングコスト			
消費電力(燃焼装置部分)	100	90	油圧駆動装置電力
発電可能電力	100	100.5	
③ メンテナンスコスト			
火格子交換費用	100	80~100	
④ 設置スペース			
焼却炉・排ガス処理スペース	100	88	図表 7 参照