

第48回 優秀環境装置

2022年7月

主 催 一般社団法人 日本産業機械工業会
後 援 経 済 産 業 省

序

本書は経済産業省の後援のもと、一般社団法人日本産業機械工業会が実施した2021年度「第48回優秀環境装置の表彰事業」において受賞した優秀な環境装置の概要をまとめたものである。

本事業は優秀な環境装置・システムを表彰し公表することで、環境保全技術及び装置の研究・開発を一段と促し、これを普及させることにより、地球環境の保全に資することを目的としている。

感染症の世界的なまん延が今なお収束したとは言えない状況であるが、様々なコロナ対策が功を奏し、経済復活の兆しが見えてきた。しかしながらロシアのウクライナ侵攻でエネルギーの調達不安が現実になってきている。島国である日本は、欧州や米国と違い、電力を融通するネットワークやガスのパイプラインを持たない。エネルギー安全保障の観点から、ロシア以外の代替調達を確保することが喫緊の課題であるが、世界の潮流から早急な脱炭素化とエネルギーの安定供給という二つの課題に同時に取り組まなければならない。

一方、視点を変えると、世界的なエネルギー危機は、液体合成燃料や水素、アンモニアなどの日本が得意とする技術を発信するチャンスでもある。自然由来の水素と二酸化炭素から合成される液体燃料は脱炭素燃料であり、2050年カーボンニュートラルに向けたトランジション技術として大変有望な技術である。これを実現するために、大気中や排出源から二酸化炭素を回収・貯留する技術も重要であり、これらは環境装置産業が積極的に推進していくべき分野であると考えらる。

古くは公害防止に端を発した環境装置産業は、長年にわたり環境負荷低減に貢献してきた。上記に示すように、温室効果ガス削減など持続可能な社会実現に環境装置産業の果たす役割はますます重要なものになってきている。環境装置関連企業並びに工業団体などの、不断の努力による更なる技術革新が、より良い社会の構築に今後とも貢献することを確信するものである。

本事業の実施にあたり格別のご支援を賜りました経済産業省、環境省、中小企業庁、優秀環境装置審査委員会委員、優秀環境装置審査WG委員、並びに関係各位に厚く御礼を申し上げる次第である。

2022年7月

一般社団法人 日本産業機械工業会
会 長 齋 藤 保

第 48 回優秀環境装置

— 目 次 —

・ 第 48 回優秀環境装置審査報告	1
・ 第 48 回優秀環境装置審査委員会名簿	2
・ 表彰装置及び応募数・受賞数	3
・ 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」	5
・ 経済産業省産業技術環境局長賞 「下水高濃度返流水の省エネ型窒素除去装置」	15
・ 中小企業庁長官賞（応募申請書受付順） 「大気圧ロングアークプラズマ式排ガス処理装置」	29
「多種廃棄物対応焼却炉（AIS 型焼却炉）」	39
・ 日本産業機械工業会会長賞（応募申請書受付順） 「尿素分解装置を用いた無触媒脱硝システム」	49
「使用薬品（次亜塩素酸）を電解自家生成で賄う脱臭装置（ISEC 式）」	63
「騒音対策用遮音ルーバー装置（しずかルーバー）」	79
「新型汚泥焼却設備（OdySSEA（オデッセア）」	93
「次世代型流動床式ガス化燃焼炉」	105
「廃モーターからの銅線回収システム」	115

一般社団法人日本産業機械工業会のウェブサイトでは、
カラーにて受賞装置の概要をご覧いただけます。

<https://www.jsim.or.jp/commendation/>

（右の QR コードからもアクセスいただけます。）



第 48 回 優秀環境装置審査報告

優秀環境装置審査委員会
委員長 指宿 堯嗣

優秀環境装置の表彰事業は一般社団法人日本産業機械工業会が経済産業省のご後援のもとに 1974 年度から実施しているもので、優秀な環境装置やシステムを表彰することにより、「持続可能な社会の形成」を実現するための環境保全技術の研究・開発及び優秀な環境装置の普及を促進し、我が国環境装置産業の振興を図ることを目的としている。

本年度の表彰事業は、2021 年 9 月 27 日から 2021 年 11 月 5 日までの約 1 ヶ月にわたって公募した。

その結果、全国から大気汚染防止装置〔3 件〕、水質汚濁防止装置〔5 件〕、廃棄物処理装置〔5 件〕、騒音・振動防止装置〔1 件〕、再資源化装置〔2 件〕、その他環境負荷低減に資する装置〔2 件〕の応募があった。複数の分野にわたる応募もあったことから、件数としては、合計 15 件であった。審査は、優秀環境装置表彰実施要綱及び優秀環境装置審査要綱の規定に基づいて次のような手順で慎重かつ厳正に行った。

まず、優秀環境装置審査 WG において、応募のあった環境装置に関し、その獨創性、性能、経済性及び将来性の各指標について一次評価を行った上で、実地調査を行い、評価報告を取りまとめた。

次いで、優秀環境装置審査委員会において、審査 WG から上程のあった評価報告を総合的に勘案し審査を行い、第 48 回優秀環境装置の経済産業大臣賞 1 件、経済産業省産業技術環境局長賞 1 件、中小企業庁長官賞 2 件、日本産業機械工業会会長賞 6 件を選定した。

以上の受賞各装置は、いずれも地球環境の保全に極めて有効な環境装置として高く評価されたものであり、今後の普及を期待するとともに開発にあたられた各社のご努力に心から敬意を表したい。

第48回 優秀環境装置審査委員会名簿

審査委員会

(委員長)

指宿 堯嗣 一般社団法人産業環境管理協会 顧問
(元、独立行政法人産業技術総合研究所 環境管理研究部門長)

(委員)

藤木 俊光 経済産業省 製造産業局長
奈須野 太 経済産業省 産業技術環境局長
角野 然生 経済産業省 中小企業庁長官
白石 隆夫 環境省 大臣官房審議官
小林 憲明 一般財団法人日本品質保証機構 理事長
久貝 卓 日本商工会議所 常務理事
釜 和明 一般財団法人機械振興協会 会長
東原 敏昭 一般社団法人日本機械工業連合会 会長
黒岩 進 一般社団法人産業環境管理協会 専務理事
大和田秀二 早稲田大学 理工学術院 創造理工学部 環境資源工学科 教授
斎藤 保 一般社団法人日本産業機械工業会 会長
秋庭 英人 一般社団法人日本産業機械工業会 専務理事

審査WG

(主査)

竹内 浩士 一般社団法人産業環境管理協会 執行理事 環境管理部門長

(委員)

田中 幹也 国立研究開発法人産業技術総合研究所 招聘研究員
辰巳 憲司 国立研究開発法人産業技術総合研究所 環境創生研究部門 客員研究員
加茂 徹 早稲田大学 ナノ・ライフ創新研究機構 ナノプロセス研究所
上級研究員 (研究院教授)
林 直人 国立研究開発法人産業技術総合研究所 環境創生研究部門
資源価値創生研究グループ 研究グループ長
遠藤小太郎 一般社団法人産業環境管理協会 人材育成・出版センター 所長
栗山 一郎 一般財団法人日本環境衛生センター 技術顧問
藤本 裕之 公益財団法人日本下水道新技術機構 資源循環研究部 部長
佐野 亨 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 環境部 主任研究員
星野 岳穂 東京大学大学院 工学系研究科 マテリアル工学専攻 特任教授
石井 伸治 一般社団法人日本産業機械工業会 常務理事

(最終委員会 2022年6月現在)

第 48 回 優秀環境装置 表彰装置及び応募数・受賞数

<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)

<経済産業省産業技術環境局長賞>

「下水高濃度返流水の省エネ型窒素除去装置」 大阪市
メタウォーター(株)

<中小企業庁長官賞> (応募申請書受付順)

「大気圧ロングアークプラズマ式排ガス処理装置」 クリーン・テクノロジー(株)
「多種廃棄物対応焼却炉 (AIS 型焼却炉)」 (株)アクトリー

<日本産業機械工業会会長賞> (応募申請書受付順)

「尿素分解装置を用いた無触媒脱硝システム」 (株)タクマ
「使用薬品 (次亜塩素酸) を電解自家生成で賄う脱臭装置 (ISEC 式)」 (株)一芯
「騒音対策用遮音ルーバー装置 (しずかルーバー)」 清水建設(株)
「新型汚泥焼却設備 (OdySSEA (オデッセア))」 J F E エンジニアリング(株)
日本下水道事業団
川崎市上下水道局
「次世代型流動床式ガス化燃焼炉」 (株)神鋼環境ソリューション
「廃モータからの銅線回収システム」 三菱長崎機工(株)

応募数と受賞数

分 野	応募件数	受賞件数
大気汚染防止装置	3	3
水質汚濁防止装置	5	1
廃棄物処理装置	5	4
騒音・振動防止装置	1	1
土壌・地下水汚染修復装置	0	0
再資源化装置	2	1
その他環境負荷低減に資する装置	2	0
合 計	15 [*]	10

※複数の分野にわたる応募申請が含まれるため合計値は合いません

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の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

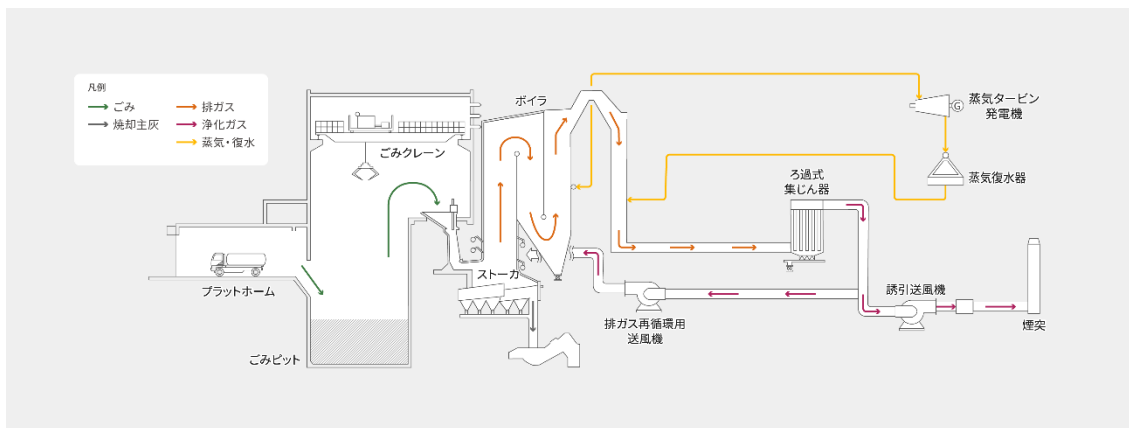
図表1にごみ焼却施設の主要処理フローを示す。ごみクレーンにより投入されたごみを高温焼却する装置がストーカ式燃焼装置(以下、ストーカ)である。ごみを完全燃焼させるには、ストーカ上でのごみの適度な攪拌、ごみ層温度の維持、十分な滞留時間の確保が重要となる。

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。

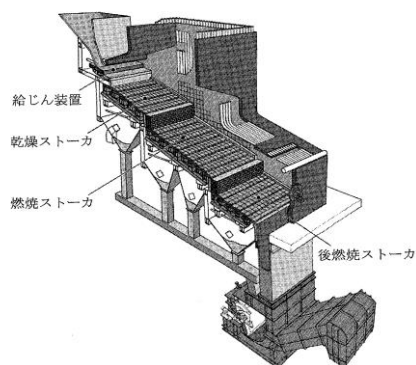
ごみの流れ方向に対して水平若しくは下り傾斜とする一般的なストーカに対して、当社は図表3に示すようにごみの流れ方向に対して火格子を上り傾斜状に配置した独自の機構を持つF

型ストーカ(以下、従来型装置)を採用している。

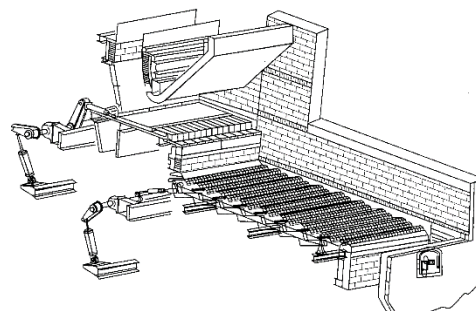
従来型装置では、ごみの送りを上り傾斜とすることで下り傾斜や水平のストーカに比べて滞留時間を確保しやすくしている。また図表4に示すように、火格子によるごみの突き上げと重力によるごみの戻りの相乗効果により、ごみの攪拌性が高いという特徴がある。



図表1 ごみ焼却施設フロー

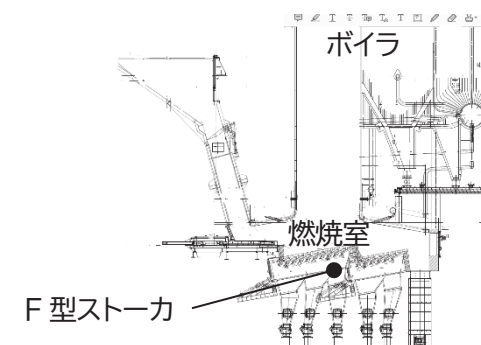


階段式 (下り傾斜)

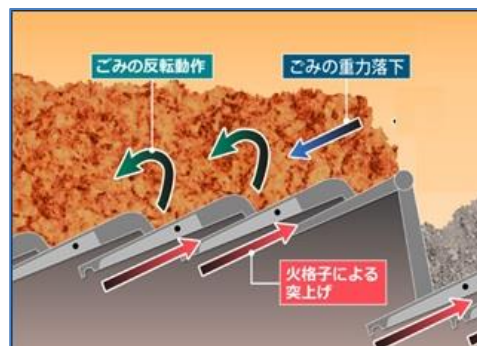


並行揺動式 (水平)

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

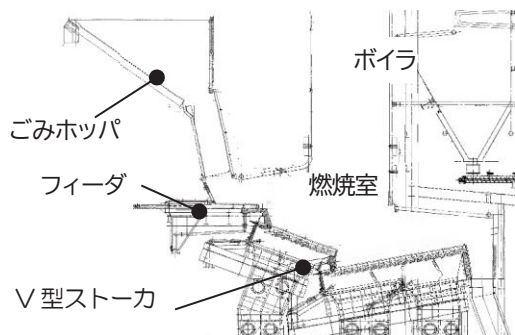
従来型装置ではごみ滞留時間確保、ごみ攪拌性の点で優れているが、ごみの搬送能力では下り傾斜には劣るため、ストーカの幅を増やしてごみ搬送能力を上げる必要があった。特に大型炉に採用する場合、幅が広くなるとでボイラを含めた焼却炉部分が大きくなり、建屋を大きくしなければならないという課題があった。

(3) 本装置の構成

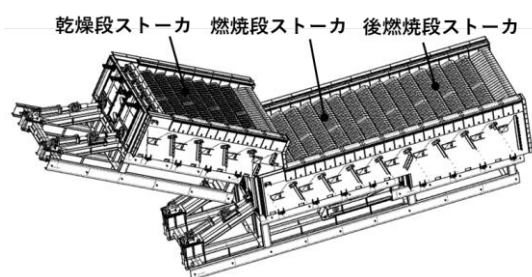
この課題に対し、炉内に投入されたごみは乾燥が進むことで次第に重量・体積が減少するという特性を踏まえ、従来型装置の前段にごみの乾燥を促進させる機能を付加することで、従来型装置の特徴を維持したままコンパクト化が可能なV型ストーカ式焼却炉を開発した（以後本装置）。

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。

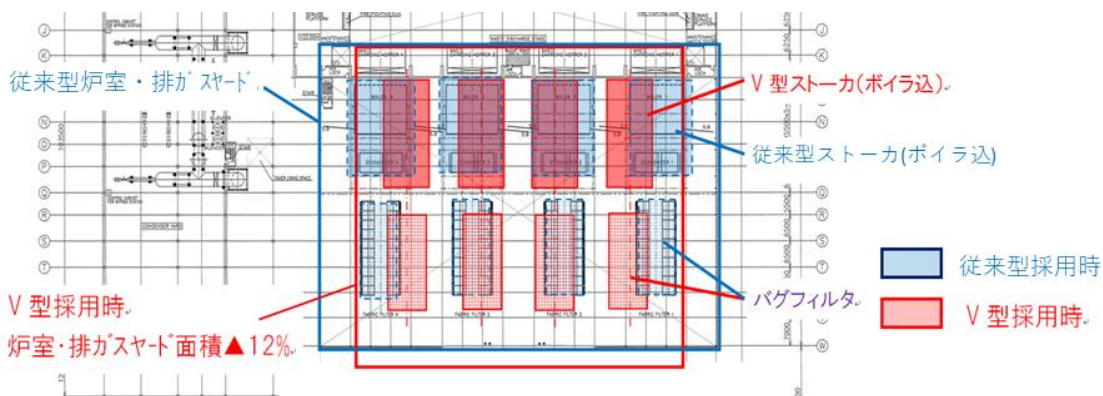
本装置は下り傾斜ストーカを追加することでストーカ全長は約1.5倍に伸びることになるが、ストーカはボイラ下部空間に配置されているため、ボイラを含めた設置面積で考えれば影響はほとんど無い。それに対しストーカ幅を小さくすることができれば、ストーカと一体構造となるボイラの幅も小さくすることができる。ごみ焼却炉建屋のなかでも空間を占める割合の大きい、ストーカ・ボイラが収納される炉室を小さくすることができれば、その分建屋コストを小さくできるメリットもある。



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)。

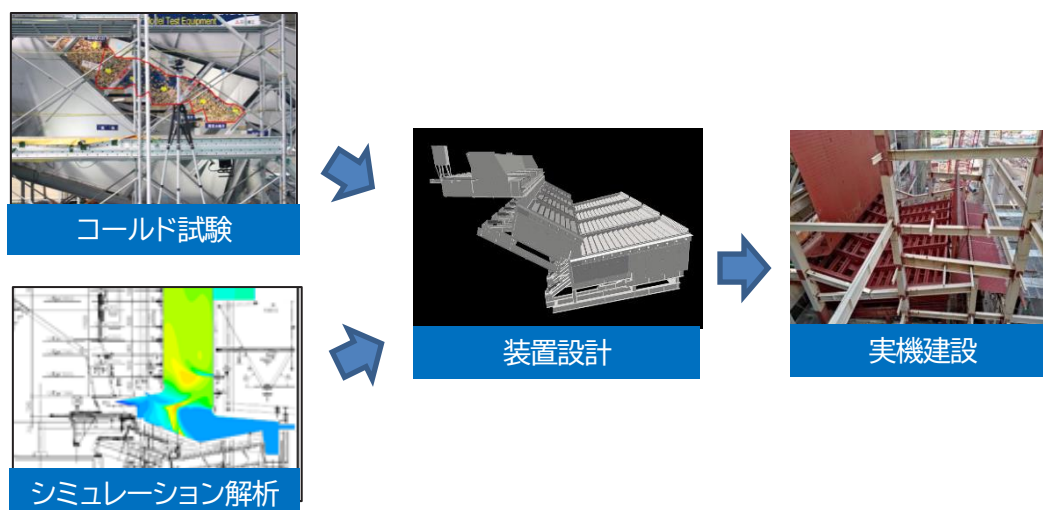
2016 年～2017 年	小型コールド試験機による搬送性・攪拌性評価 シミュレーション解析による性能評価
2018 年	検証試験に基づき実機規模の装置設計・第 1 号機受注
2020 年	第 1 号機試運転開始

(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。

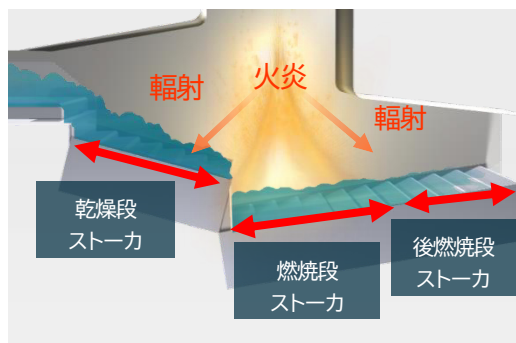
輻射熱以外の点でも、下り傾斜と上り傾斜を組み合わせたV字形状は安定的に低熱灼減量を維持する効果があることを以下に述べる。

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)。

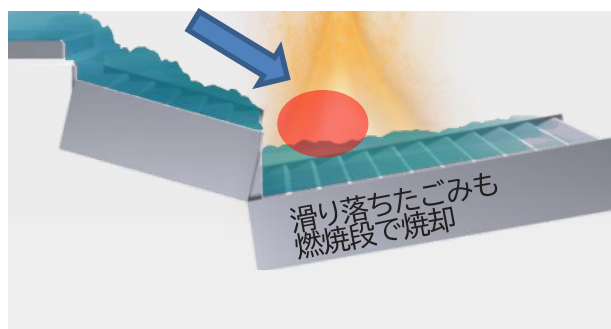
(2) 乾燥段、燃焼段、後燃焼段各ストーカで独立した火格子駆動機構を採用

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

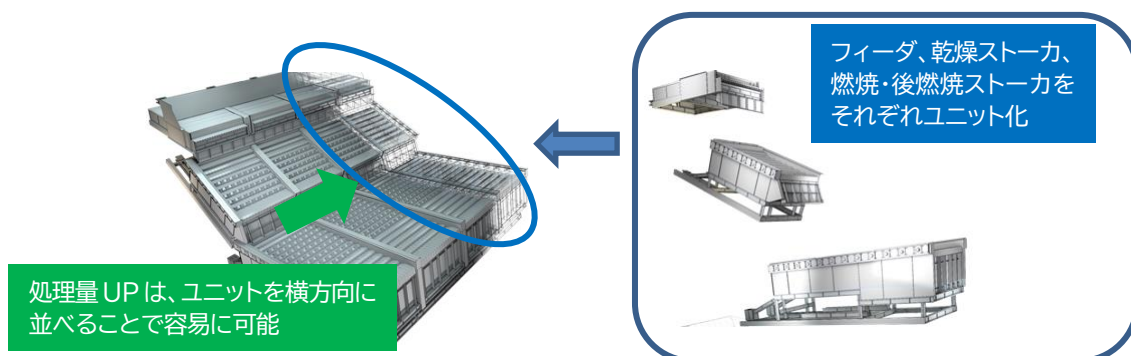
中国湖北省孝感市のごみ焼却施設に納めたため商用第 1 号機の試運転における運転データを用いて本装置の性能を示す。

(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

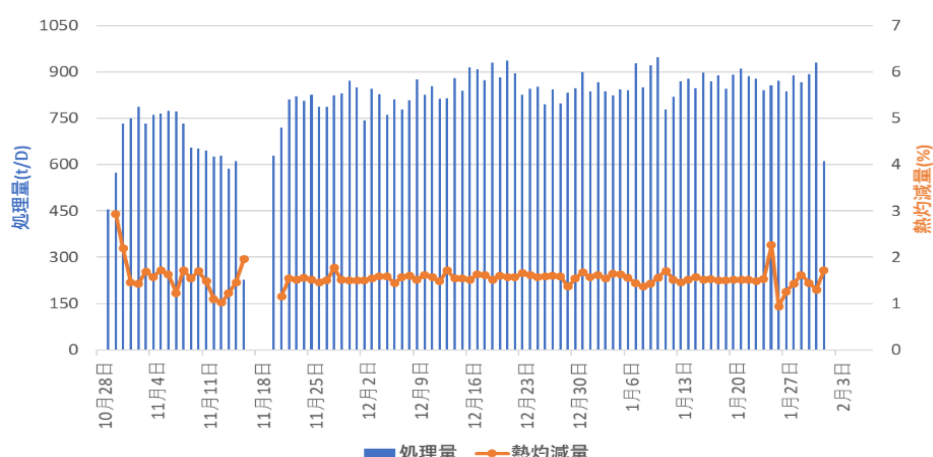
第1号機試運転時の処理量・熱灼減量のデータを図表12に示す。

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。

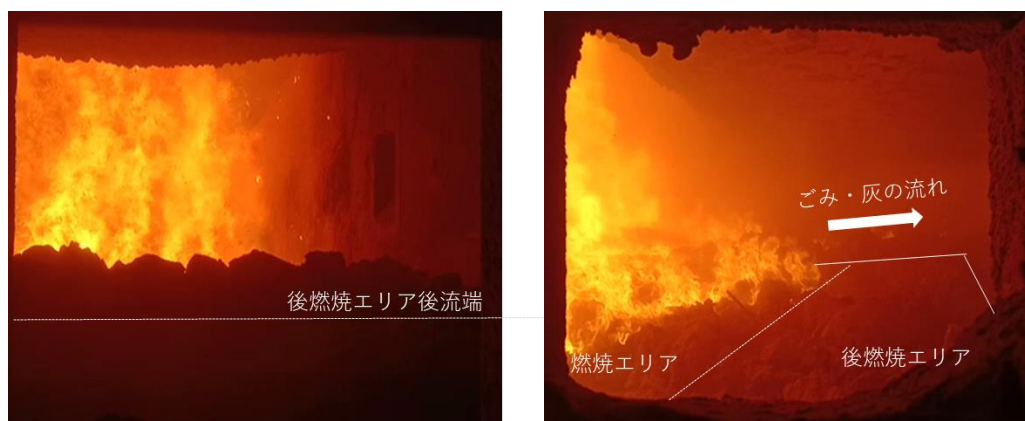
図表12より要求処理能力900t/日以上処理を含め連続安定運転が出来ていることが分かる。図表13に900t/日以上処理している日の炉内燃焼状況を示す写真を示すが、燃え切り位置はストーカ全体長さの6~7割程度の位置となっており、焼却能力としては900t/日処理時でもまだ余力のあることが確認された。

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

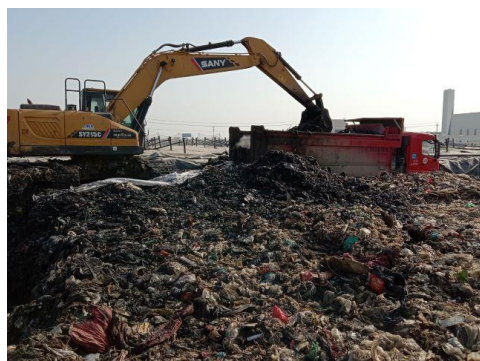
1) 耐久性

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。

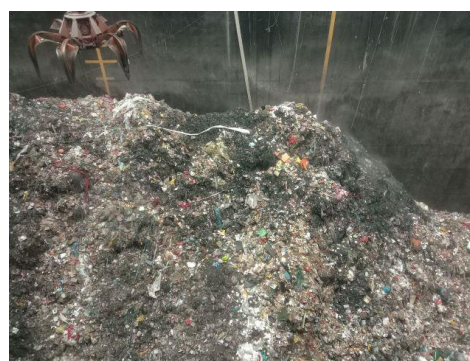
2) 安定性

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

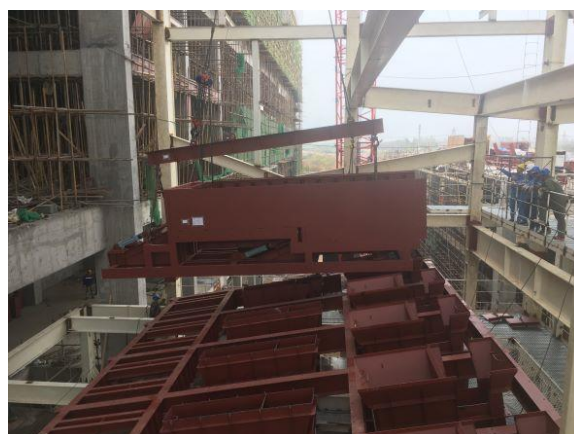
経済性については、他社製品の情報がいないため当社従来型装置と本装置の比較で示す。

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。

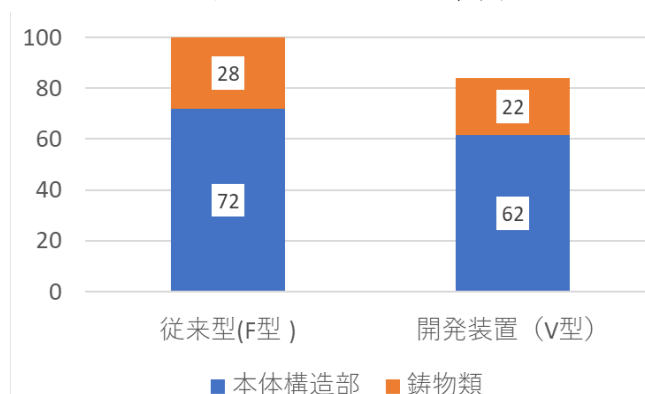
また、メンテナンスは、定期的な火格子交換の費用が主となるが、火格子面積が小さくなる分交換対象となる火格子が少なくて済むが、単位面積あたりの燃焼負荷が上がる分、交換頻度が若干早くなることも予想されるためメンテナンスコスト削減は 0~20%削減となる。

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

経済産業省 産業技術環境局長賞

「下水高濃度返流水の省エネ型窒素除去装置」

大阪市/メタウォーター株式会社

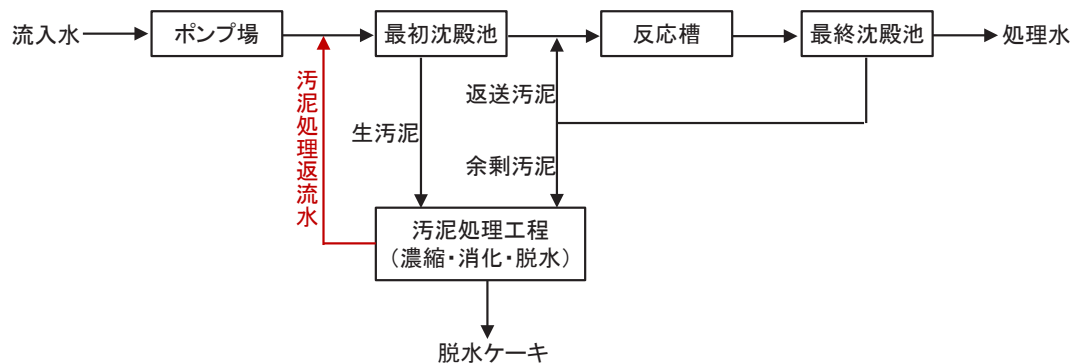
1. 装置の詳細説明

(1) はじめに

近年、下水処理には、低炭素化の推進の一環としてのエネルギー回収が求められるようになってきている。そのため、嫌気性汚泥消化プロセスが、エネルギー回収を図れる点で改めて注目され、その目的での活用が進みつつある。例えば、嫌気性汚泥消化プロセスで得られた消化ガスによる発電を行うことにより、処理場全体におけるエネルギー消費量の1.9倍のエネルギー生産量が得られるようになった事例¹⁾もある。

一方で、下水処理プロセスにおいては、閉鎖性水域の富栄養化防止を目的として、下水中の有機物除去に加えて、窒素・りんをも除去する高度処理が求められている。有機物除去のみでも曝気に多大なエネルギーを要するが、有機物に加えて窒素をも除去する生物学的窒素除去プロセスの採用は、エネルギー消費量を倍増させるものである。

ここで、反応槽に流入する窒素・りんは、処理場への流入水に含まれるのみならず、汚泥処理返流水(図表1参照)にも含まれる。水処理系から取り除かれた生汚泥や余剰汚泥に含まれる窒素やりんが、汚泥処理の工程を経るに際しアンモニア態窒素・りん酸態りんとして溶出し、再び水処理系に戻ってくる。特に、汚泥処理工程に前述の嫌気性汚泥消化プロセスが含まれる場合には、返流水由来の窒素負荷量及びりん負荷量は極めて高くなる。嫌気性汚泥消化プロセス採用時の返流水由来の窒素負荷量と流入水由来の窒素負荷量は同等レベルといわれている。りん負荷量も流入水由来のりん負荷量と概ね同等²⁾と報告されている。このように嫌気性汚泥消化プロセスを含む汚泥処理系返流水は窒素・りん負荷が高く、これが水処理における消費エネルギー増加の主要因になっている。



図表1 下水処理フローにおける汚泥処理返流水

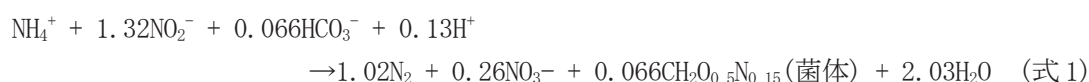
そこで、嫌気性汚泥消化プロセスを有する汚泥処理工程からの返流水中の窒素及びりんを水処理に混合する前に除去する低炭素型返流水処理プロセスの実用化が望まれていた。

以下に説明する「下水高濃度返流水の省エネ型窒素除去装置」(以下、本装置と呼ぶ)は、嫌気性汚泥消化プロセスを有する汚泥処理工程からの返流水中のアンモニアを、従来の硝化脱窒とは異なる原理(本原理はアナモックスプロセスという)により大幅に省エネ脱窒処理でき、リンについても除去が行える一連のシステム技術である。

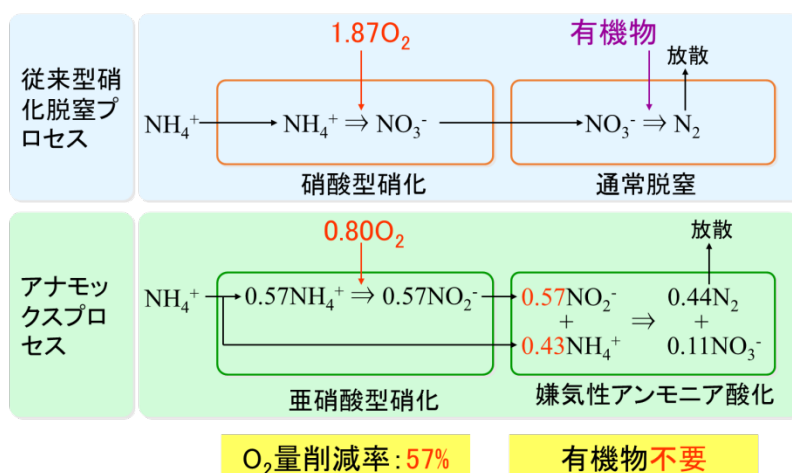
本装置は、下水処理分野において国内で初めて実用化に成功し、現在、順調に稼働している。

(2) アナモックスプロセスについて

アナモックスプロセスは、アンモニア酸化細菌によるアンモニアの亜硝酸化反応と、アナモックス細菌によるアナモックス脱窒の2種類の反応からなる。アナモックス脱窒の反応式を式1に示す。アナモックス細菌は嫌気性独立栄養細菌であり、脱窒のための電子供与体にアンモニアを、電子受容体に亜硝酸を用いる。 $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_2\text{-N}$ は1:1.32の比率で反応し、1.02の N_2 ガスとして放出される。



図表2に、アナモックスプロセスと従来型硝化脱窒プロセスの酸素消費量を比較する。従来型硝化脱窒プロセスは、全てのアンモニア態窒素を酸素と反応させて硝酸態窒素まで酸化(硝化)し、次いで、従属栄養脱窒細菌により脱窒し窒素ガス化するものである。これに対し、アナモックスプロセスは、アンモニア態窒素の一部(57%)を、中間体である亜硝酸態窒素まで酸化(亜硝化)し、生成した亜硝酸態窒素と未反応のアンモニア態窒素(43%)を式1の反応により窒素ガスにできるものである。これは、硝化のために必要な酸素量が従来型硝化脱窒プロセスの57%減となることに起因する。これにより、硝化のために必要な酸素量は従来型硝化脱窒プロセスの57%減となる。



図表2 アナモックスプロセスと従来型硝化脱窒プロセスの比較

アナモックスプロセスを省エネ型窒素除去プロセスとして実用化する試みは、最初期の研究³⁾が発表された1995年以来、世界中で活発に行われてきた。ここで、アナモックスプロセスは、高温でありかつ、アンモニアを高濃度に含有し、有機物を含有しない排水への適用に適している。それは第一に、高温かつ高濃度アンモニアという条件が、アンモニアの亜硝酸化反応の速度と、亜硝酸の硝酸化反応の速度との差を大きくする方向にはたらき、アナモックス脱窒に必要な亜硝酸を蓄積させるのに有利なためである。また、アナモックス細菌も比較的高温(30℃以上)で活性が高くなる特性を有するからである。さらには、アナモックス反応は通常脱窒と異なり、電子供与体として用いるのはアンモニアであり、有機物は不要なためである。それゆえ、アナモックス反応の排水処理への適用の試みは、工業で発生する高濃度アンモニア含有排水の処理や、下水処理場関連では嫌気性消化脱離液、脱水ろ液等を対象としてなされてきた。

(3) 本装置のフロー

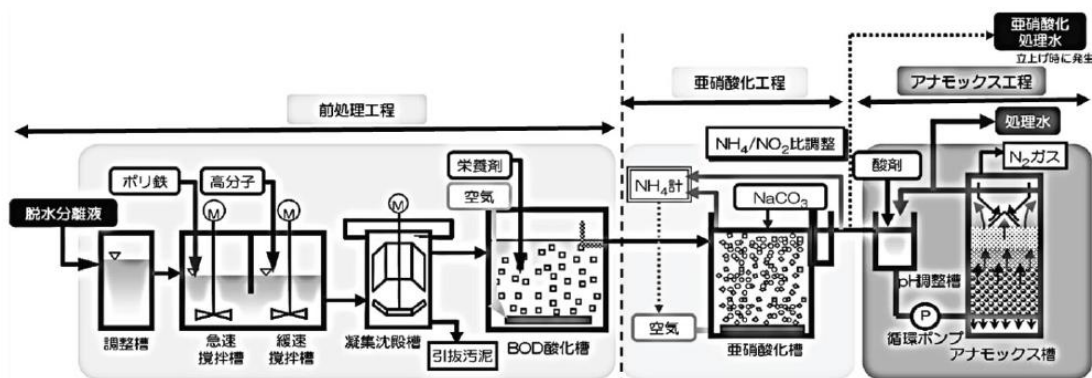
本装置のフローを図表3に示す。本装置は以下の3つの工程で構成される。うち前処理工程は具体的には、凝集沈殿と有機物酸化を行うものである。

- 1) 前処理工程
- 2) 亜硝酸化工程
- 3) アナモックス工程

1) 前処理工程

前処理工程は、急速・緩速攪拌槽、凝集沈殿槽、BOD酸化槽よりなる。前者二つでりん(SS (Suspended Solids の略称:水中に懸濁している不溶性物質))を除去し、BOD酸化槽でBOD (Biochemical Oxygen Demand[生物学的酸素要求量]の略称:有機物による水質汚濁の指標)を除去する。

りんを除去する目的は第一に、返流水由来のりん負荷量を削減することで、水処理系への負担を軽減することである。第二に、後段のBOD酸化槽でMAP(りん酸マグネシウムアンモニウム)が生成してスケールを形成し、配管の閉塞や、散気装置への付着による発泡不良を引き起こすことを抑止することである。MAPはりん酸・マグネシウム・アンモニウムの3種イオンが結合し生じるものであるため、その一つであるりん酸イオンを除去することで、MAPの生成を抑制できる。



図表3 本装置のフロー

SS を除去する目的は、高濃度 SS の流入が、アナモックス槽でのアナモックス細菌のウォッシュアウトを引き起こすおそれを解消することである。

BOD を除去する目的は、アンモニアと同じく被酸化物である BOD を、亜硝酸化槽へ流入させないことで、亜硝酸化槽における曝気風量制御を安定的に行わせるためである。すなわち、アナモックス反応は前述のとおり、 $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_2\text{-N}$ が一定の比率で反応するため、亜硝酸化槽における亜硝酸化率をその比率に見合ったものに安定化するためである。

①調整槽

流入水を一定時間貯留することで、水量と水質の時間変動幅を緩和する。

②急速・緩速攪拌槽

急速攪拌槽にて、無機凝集剤であるポリ硫酸第二鉄を添加し混合させることで、りんと SS を凝結反応によって微細フロックとして析出させる。次いで、緩速攪拌槽にて高分子凝集剤を添加し、微細フロックを粗大フロック化し、沈殿しやすくする。

③凝集沈殿槽

凝集フロックを沈殿させ分離する。

④BOD 酸化槽

BOD 酸化槽では、活性汚泥を用いることなく、結合固定化担体を投入し、その表面に付着した生物膜により BOD を除去する。すなわち、槽内を曝気することにより、生物膜中の BOD 酸化細菌のはたらきにより、BOD を酸化分解する。

なお、本槽では、生物反応に必要な微量金属を補給するために栄養剤を添加する。

2) 亜硝酸化工程

亜硝酸化槽は、BOD 酸化槽と同様に、活性汚泥を用いることなく、結合固定化担体を投入し、その表面に付着した生物膜によりアンモニアを亜硝酸化する。

亜硝酸化に必要な酸素供給と担体流動のための散気装置としては、下水処理場の反応槽での稼働実績が豊富で、酸素供給能力の高いセラミックス製散気装置を用いている。

後段のアナモックス槽では、 $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_2\text{-N}$ が 1:1.32 の比率で反応するため、アンモニアの 57%を亜硝酸化し、43%は未反応のままアナモックス槽に供給すべく、曝気風量を制御する。風量制御は、連続測定される亜硝酸化槽流入 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度と流出 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度に基づいて行う。

亜硝酸化槽では、生成した亜硝酸がさらに硝酸化されることを抑止せねばならないが、まず前述のとおり、原水性状自体が高温かつ高濃度アンモニアという点で、硝酸生成抑止に有効にはたらく。さらには、亜硝酸生成により低下する pH を回復させるためにアルカリ剤を注入する

3) アナモックス工程

アナモックス槽では、亜硝酸化槽から送られるアンモニア態窒素と亜硝酸態窒素が、式 1 に示した反応により窒素ガス化され、大気放散される。計算上、アナモックス槽に流入するアンモニア態窒素と亜硝酸態窒素を合わせた窒素分の 87%が窒素ガス化され、11%が硝酸態窒素として処理水中に残留する。

アナモックス細菌は、無数の細胞が集結し凝塊(グラニュール)化(図表 7 参照)する習性を有する。そこで、アナモックス槽としては、アナモックス細菌をグラニュールとして高密度に保持できる UASB(上向流式嫌気性汚泥床)法を採用している。アナモックス槽底部より、亜硝酸化

槽流出水に加えて、アナモックス槽自身の流出水(処理水)の一部をも流入させて、適切な上向流速を与えることで、沈降性に優れるグラニュールを上方向に展開させ、反応効率を高める。なお、アナモックス槽内の亜硝酸濃度が一定レベルを超えると、アナモックス細菌の活性が損なわれるが、処理水の循環は亜硝酸濃度を適正レベルに希釈する役割も担っている。

アナモックスグラニュールは沈降速度が速いため、槽上部の気固液分離装置にて容易に処理水から分離されるため、固液分離槽を別途設ける必要がない。

アナモックス反応は pH を上げるため、pH 調整槽にて酸剤を注入し、pH を調整する。

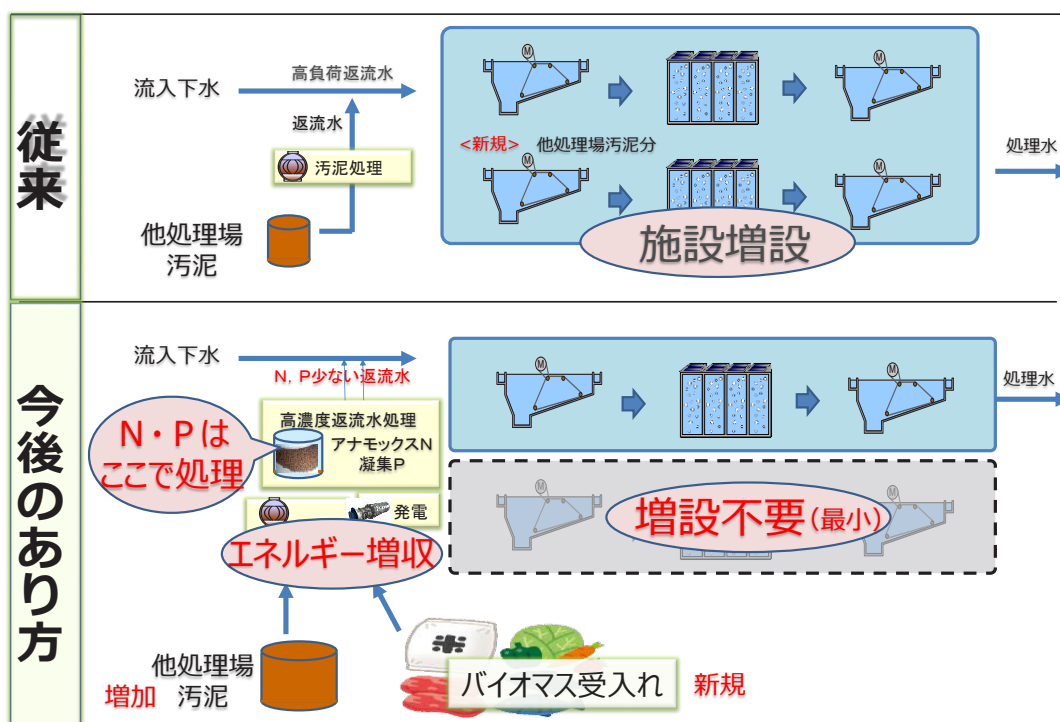
(4) 本装置導入による水処理施設系列削減効果

近年、複数処理場から排出される汚泥を一処理場で集中処理することがなされることが多い。汚泥の集中処理を行う処理場で問題となるのは、水処理施設への窒素・りん負荷の増大にともない、水処理施設を増設せねばならないことである。そこで、汚泥処理返流水の窒素・りん処理装置として本装置を導入すれば、図表 4 に示すように、水処理施設への窒素・りん負荷が軽減されるため、増設が不要となる。

2. 開発経緯

(1) 開発経緯

開発経緯の概要を以下に示す。



図表 4 本装置導入による水処理施設系列削減のイメージ

2007年6月～2008年3月	<p>ベンチスケール開発研究</p> <p>研究名称：高温高濃度消化汚泥の脱水分離液から窒素を除去する技術に関する共同研究</p> <p>実験場所：中浜下水処理場</p> <p>実験規模：原水量 74 L/日</p> <p>高温高濃度消化汚泥の脱水分離液(平均 NH₄-N 930mg/L、平均 SS 220mg/L、平均 S-BOD 310mg/L)を原水として、アナモックスプロセスのベンチスケール実証実験を行った。</p>
2014年3月～2014年10月	<p>実施設計</p> <p>施設納所：平野下水処理場</p> <p>施設規模：原水量 1350m³/日</p> <p>性能安定性維持のために必要な機器の選定、低ランニングコスト実現のための制御方法、短期間で建設可能となるようなコンパクトな設備配置の検討等を行った。</p>
2014年11月～2017年3月	<p>実施建設</p>
2017年4月	<p>第1号機納入</p>
2017年4月～2019年3月	<p>運転技術の確立と性能評価</p>
2019年4月～	<p>実運転稼働中</p>

1) ベンチスケール開発研究

高温高濃度消化汚泥の脱水分離液(平均 NH₄-N930mg/L, 平均 SS220mg/L, 平均 S-BOD310mg/L)を原水として、アナモックスプロセスのベンチスケール実証実験を行った。実証実験により、以下の成果が得られた。

- ①初期立上げ運転方法を確立し、2ヶ月程度で立上げが完了できることが確認された。
- ②立上げ完了後には、十分な窒素除去性能を有することが確認された。
- ③安定的な窒素除去性能を維持するには、下記前処理が不可欠であることが確認された。(これらについては、「3. 独創性」の章で詳述する。)
 - ・溶解性 BOD の分解
 - ・SS の沈殿除去
 - ・りん酸の凝集除去

2) 実施設計～建設

ベンチスケール開発研究の成果に基づき、実施設計に必要となる各種検討を重ねた。具体的には、性能安定性維持のために必要な機器の選定、低ランニングコスト実現のための制御方法、短期間で建設可能となるようなコンパクトな設備配置の検討等を行った。以降、実施設計した本装置を「本施設」と呼ぶ。

本施設は、アナモックスプロセスを用いた汚泥処理返流水処理施設として下水処理場に建設した国内初の施設である。図表 5 に施設全景写真を示す。また、図表 6 に用いた担体等の写真を示す。

3) 運転技術の確立と性能評価

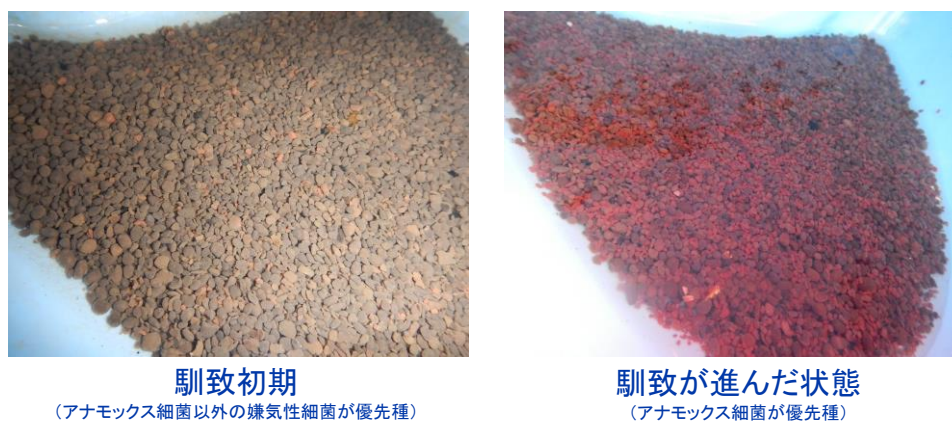
2年間の運転管理を実施し、性能評価を行うとともに、運転管理マニュアルを作成した。
図表7にアナモックスグラニュールの馴致開始時と馴致完了後の写真を示す。



図表5 施設全景写真



図表6 担体・グラニュール写真



図表7 グラニュール馴致前後の写真

(2) 共同開発

本装置は、大阪市、メタウォーター株式会社が共同で開発を行った。それぞれが担当した開発の内容は、次のとおりである。

- ・大阪市：
実証実験による消化汚泥脱水分離液（返流水）でのアナモックスプロセス技術の確立、及び実施設の性能評価
- ・メタウォーター株式会社：
実証実験による消化汚泥脱水分離液（返流水）でのアナモックスプロセス技術の確立及び実施設の設計・建設・運転管理（運転技術の確立）

(3) 技術導入

2007年、メタウォーター株式会社（当時：株式会社 NGK 水環境システムズ）が Paques Technology B.V. と栗田工業株式会社から、アナモックスプロセスに関する技術導入を行った。本技術は導入段階において工場排水処理における実績はあるものの、生活排水を含む下水分野における処理実績はなかった。

申請者（大阪市、メタウォーター株式会社）は、新たに下水分野において消化汚泥脱水分離液からの窒素除去に同技術を適用し、独自のりん、有機物除去技術と組み合わせて、国内初の返流水処理一体システムとして実用化し、実施設として稼働させるに至った。

3. 独創性

(1) 好気槽を BOD 酸化槽と亜硝酸化槽に完全分離

BOD 酸化とアンモニアの亜硝酸化は別々の槽で順次行うこととした。

高温高濃度消化汚泥の脱水分離液は BOD を含む。そして、BOD 酸化とアンモニアの亜硝酸化を同一槽で行うことも可能ではあるが、まずは BOD のみを酸化した後、亜硝酸化反応を行う方が、亜硝酸化率を目標値（アナモックス反応式より決まる 1.32/2.32）により近い値に安定的に保つことが容易となることがわかり、その方式を採用した。

また、ベンチスケール開発研究において、亜硝酸化槽で亜硝酸が通常脱窒反応をうけることが一酸化二窒素生成を誘引している可能性が示唆された。そこで、亜硝酸化槽の前段に BOD 酸化槽を設けることで、BOD と亜硝酸を共存させないようにすることが、一酸化二窒素生成の抑止に寄与すると考えられた。

(2) 前処理としてのりん酸除去

ベンチスケール開発研究において、特に BOD 酸化槽において MAP スケールが生成され、散気装置の目詰まりを引き起こす（図表 8 参照）等のトラブルが頻発した。本問題への対応策として、BOD 酸化槽前段で鉄系凝集剤による凝集沈殿を施し、 $PO_4\text{-P}$ 低減による MAP 生成抑制を図った。MAP 生成抑制効果は確認され、凝集剤注入量として $Fe/PO_4\text{-P}$ モル比を 1.5 以上とすればよいことがわかった。

なお、本プロセスにおけるりん除去は、返流水処理として水処理系への流入負荷を減らすためにも重要である。



図表 8 MAP スケールによる散気装置目詰まり状況

(3) 二槽式のアナモックスプロセスの採用

アンモニアの亜硝酸化とアナモックス脱窒よりなるアナモックスプロセスは、両反応を一槽で同時進行させる一槽式プロセスが、世界での主流となっている。一槽式プロセスには、滞留時間が短い、アルカリ剤・酸剤の薬品費が少なく済む、などの利点があるからである。しかし、消化汚泥の脱水分離液を処理対象とする場合には、アンモニアの亜硝酸化とアナモックス脱窒を各々別の槽で順次行う二槽式プロセスを採用するのがより良いと考える。それはまず、流入水が停止したときへの対応が容易だからである。また、流入水質変動や阻害物質混入の影響を比較的受けやすいアナモックス槽を、最後段に配置することで、影響を緩和できるからである。

4. 特許の有無

次のとおり、特許 3 件を取得済み。

- 特許番号：第 5100529 号 / 名称：スケール防止を織り込んだ有機性原水の脱窒方法
/ 特許権者：大阪市、メタウォーター株式会社
- 特許番号：第 5006845 号 / 名称：一酸化二窒素の発生抑制方法
/ 特許権者：大阪市、メタウォーター株式会社
- 特許番号：第 5006849 号 / 名称：亜硝酸型硝化の制御による有機性原水の脱窒方法
/ 特許権者：メタウォーター株式会社

5. 性能

本施設稼働開始から 2 年経過後である 2019 年 4 月以降の 1 年間の運転データを基に、本施設の性能を評価する。

(1) 実施設化した本装置の仕様

大阪市平野下水処理場内に実施設として建設した本施設の仕様を図表 9 に示す。

(2) 本施設の稼働により実証した性能

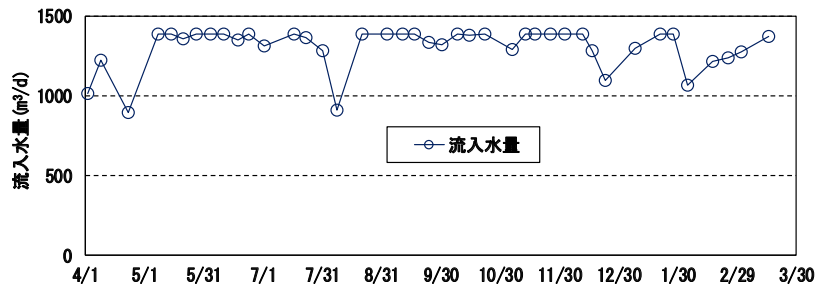
1) 窒素除去性能

図表 10～12 に、T-N 濃度と T-N 除去率の経日変化を、流入水量及び水温とともに示す。流入水量、水温、流入 T-N 濃度は大きく時間変動したが、T-N 除去率は目標どおり、ほぼ安定的に 80%以上が得られている。

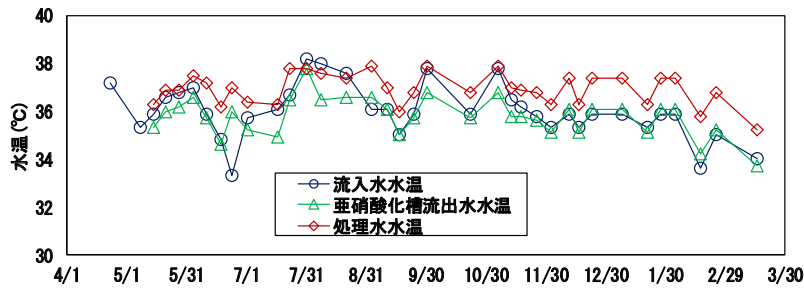
なお、アナモックス細菌は 40℃程度より高い水温にさらされると、不可逆的に失活する。そこで、本施設では、流入水温が高すぎる時に、処理場内再利用水と熱交換することで、流入水を冷却している。(冷却に必要な費用は再利用水の送水ポンプ動力費のみで、それは図表 17 に示す電力費のうち 6%程度を占める。)

図表 9 本施設の仕様

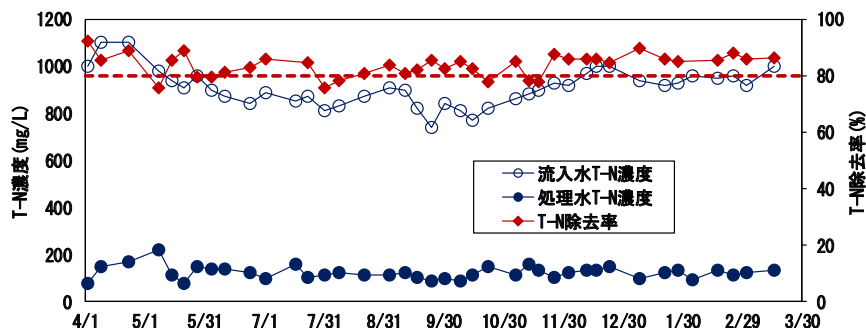
処理能力	1350m ³ /日
対象水	高温高濃度消化汚泥の脱水分離液
設置スペース	605m ² (27.5m×22.0m)
凝集沈殿槽仕様	高速傾斜板式沈殿装置 φ2000 処理水量675m ³ /日×2基
BOD酸化槽仕様	準全面曝気式散気装置 槽容量68.4m ³ ×2槽
亜硝化槽仕様	全面曝気式散気装置 槽容量162m ³ ×4槽
アナモックス槽仕様	上向流式嫌気性汚泥床 槽容量98.4m ³ ×4槽



図表 10 流入水量の経日変化 (2019年度)



図表 11 水温の経日変化 (2019年度)



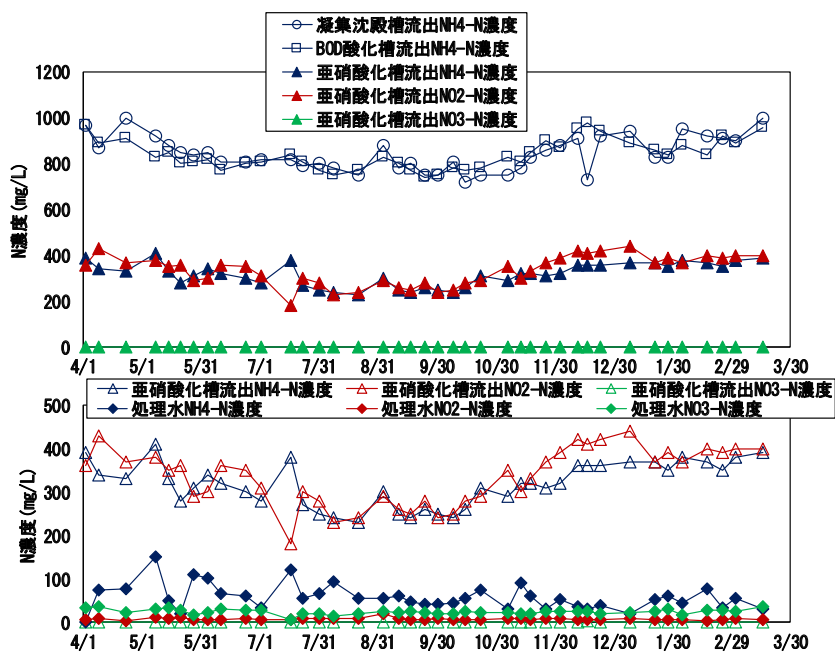
図表 12 T-N濃度とT-N除去率の経日変化 (2019年度)

2) 各態窒素の挙動

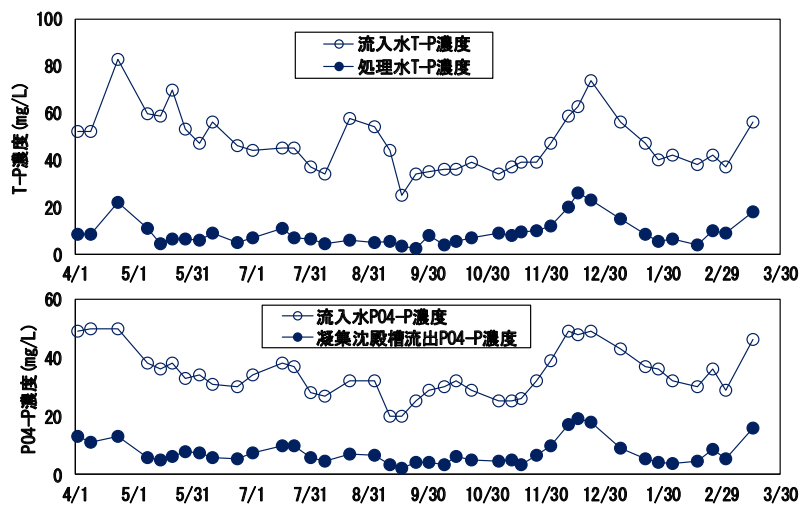
図表 13 に各態窒素の挙動を示す。NH₄-N は BOD 酸化槽では酸化されず、専ら亜硝酸化槽で酸化されている。亜硝酸化槽では、曝気風量制御が順調に機能しており、生成した NO₂-N と酸化されずに残留した NH₄-N がみられる。亜硝酸化槽ではまた、NO₃-N 生成の抑制がなされていることがみてとれる。

3) りん除去性能

図表 14 にりん濃度の経日変化を示す。本施設が凝集沈殿槽を有することにより、水処理系への T-P 負荷が大きく低減されているといえる。



図表 13 各態窒素の挙動 (2019 年度)



図表 14 りん濃度の経日変化 (2019 年度)

4) SS 除去性能

図表 15 に SS 濃度の経日変化を示す。SS は凝集沈殿槽でほぼ完全に除去され、後段の生物処理への SS 流入が抑えられている。

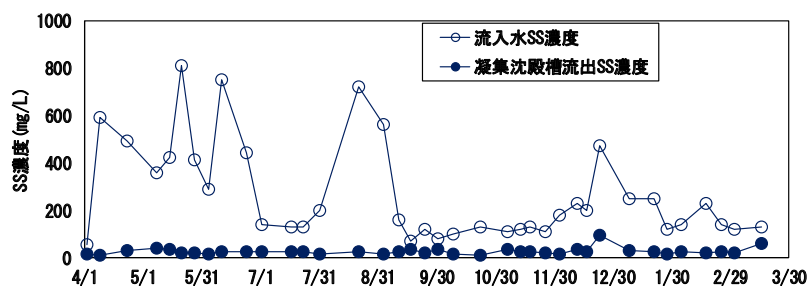
5) BOD 除去性能

図表 16 に S-BOD 濃度の経日変化を示す。BOD 酸化槽により、後段の生物処理への S-BOD 負荷が大きく低減されている。

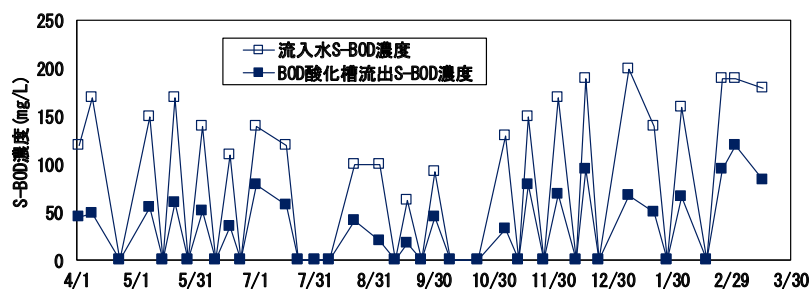
6. 経済性

高温高濃度消化汚泥の脱水分離液を水処理系に返流し水処理系で処理する場合、並びに、本施設で処理する場合それぞれのランニングコストを試算した。その結果を図表 17 に示す。本施設で処理する場合は薬品費がかさむものの、電力費が非常に安価であるため、トータルランニングコストとしては、水処理系で処理する場合の 4 割程度に抑えられることがわかった。

また、高温高濃度消化汚泥の脱水分離液を、既設水処理施設に返流し窒素除去を行う場合に、増設せねばならない水処理施設の面積を試算した。既設水処理施設としては、流入水量が 30000m³/日であり、反応槽流入 T-N 濃度 30mg/L を 10mg/L に減じて放流する施設を想定した。本施設に流入している消化汚泥脱水分離液をその施設に流入させて、放流 T-N 濃度 10mg/L を維持せねばならない場合の反応槽増設分の面積を、単純な比例計算で算出した結果を図表 18 に示す。本施設の設置面積はそれの 1/13 程度に相当し非常にコンパクトであることがわかる。



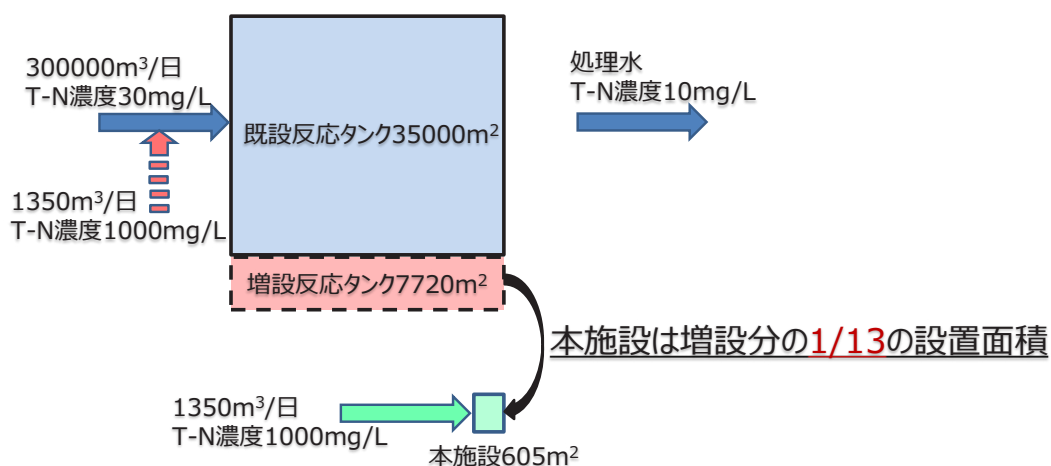
図表 15 SS 濃度の経日変化 (2019 年度)



図表 16 S-BOD の経日変化 (2019 年度)

図表 17 ランニングコスト比較表

	返流水を水処理系で処理する場合	本施設で処理する場合
電力費(円/kgN)	300	44
薬品費(円/kgN)	26	95
計(円/kgN)	326	139



図表 18 本施設がなかった場合の水処理施設の規模イメージ

7. 将来性

国際社会においては、「産業革命後の気温上昇を2℃以内に抑える」という目標を掲げた「パリ協定」が採択され、平成28年に発効した。その実現のためには、CO₂など温室効果ガスの排出量をできるだけ減らす「低炭素化」の取り組みが必要である。

下水道事業では多くのエネルギーを使用するとともに多量の温室効果ガスを排出しており、下水汚泥をエネルギー資源として捉えた取り組みが必要となっている。下水道統計要覧によれば、下水汚泥の発生量は下水道の普及の成熟化とともに、2000年度に年間4.0億m³を越え、その後は4.2億m³前後で横ばいとなっている。下水汚泥よりエネルギーを回収する有効な手段として、汚泥の嫌気性消化プロセスを導入し消化ガスを製造することがあげられる。しかし、嫌気性消化プロセスを導入すると、汚泥処理系から水処理系への返流水中の窒素やりんが高濃度となり、水処理系への影響が大きいため、その導入が見送られるケースも多い。

下水道事業において低炭素化を大きく推進するには、高濃度返流水を低エネルギーにて処理ができる装置の実用化が不可欠である。本装置の実用化は、下水道分野での初めての実現であり、非常に意義深い。今後、本装置の普及とともに、嫌気性消化プロセス導入による下水汚泥からのエネルギー回収量の増加、つまり低炭素化やカーボンニュートラルが進展していくことが期待される。

参考文献

- 1) <https://www.thesourcemagazine.org/the-case-of-vcs-denmark-progress-beyond-net-energy-production/>
- 2) 村上孝雄、小池秀三、谷口尚弘、江角比出郎、岡田光正、1987、実施設による生物学的脱リンプロセスのリン収支の検討、衛生工学研究論文集、23、p.301-313
- 3) A. Mulder, A. A. van de Graaf, L. A. Robertson, J. G. Kuenen, 1995; Anaerobic ammonium oxidation discovered in a denitrifying fluidized bed reactor, FEMS Microbiology Ecology, 16 (3), p.177-183

中小企業庁長官賞

「大気圧ロングアークプラズマ式排ガス処理装置」

クリーン・テクノロジー株式会社

1. 装置の詳細説明

(1) はじめに

近年、人間の活動が活発になることで放出される「温室効果ガス」による地球温暖化が大きな社会問題となってきている。良く知られている温室効果ガスは二酸化炭素であるが、フロンガスも温室効果ガスの1つであり、二酸化炭素の数百倍から数万倍の地球温暖化係数(GWP)があるとされており、地球温暖化の防止には排出量の抑制と共に削減にも積極的に取り組む必要がある。

半導体業界においてもフロンガスである PFC (パーフルオロ化合物の略) が多く使用されており、代表的な PFC ガスとして CF_4 、 C_2F_6 、 C_3F_8 、 $c-C_4F_8$ の4種がある。現在の京都議定書(2021年改正)ではこの4種の他に CHF_3 、 SF_6 、 NF_3 を温室効果物質として指定しているため、半導体業界ではこれらの7種を PFC 等ガスと呼んでいる。PFC 等ガスの地球温暖化係数(GWP)は極めて大きく、最も小さい CF_4 で二酸化炭素の7,000倍以上、最も大きい SF_6 ガスでは二酸化炭素の22,000倍以上あり、半導体業界においてはこれら PFC 等ガスの排出量抑制としての排ガス処理装置が重要な役割を担っている。またこの排ガス処理装置は二酸化炭素の排出が少ない省エネルギー化が望まれる。

(2) 本装置の構成と原理

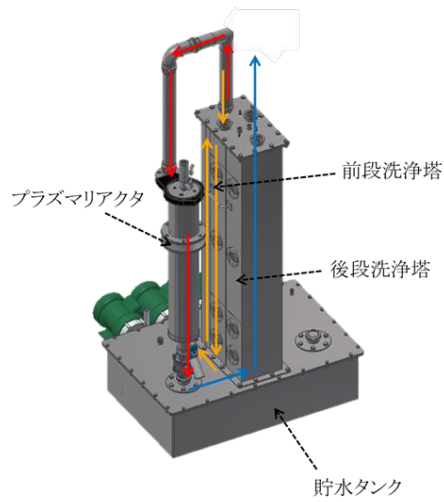
本装置は主に半導体製造工程で排出される有害なガス (Cl_2 、 HBr 、 HF など) と PFC 等ガスを無害化する排ガス処理装置である (図表 1)。PFC 等ガスは分子の結合が強く難分解性ガスであるため、分解には高いエネルギーを必要とすることから、本装置は大気圧下でプラズマ放電を行うプラズマリアクタを備える。プラズマは装置に搭載される DC 電源により発生させる。

本装置は前段洗浄塔、プラズマリアクタ及び後段洗浄塔から構成されており、ガスは前段洗浄塔からプラズマリアクタを通り、後段洗浄塔を抜けて排出される (図表 2)。PFC 等ガスを含む有害ガスが本装置に流入すると、まず前段洗浄塔で水溶性ガスは浄化される。その後、プラズマリアクタにて難分解性ガスを分解し水溶性ガスに変化させ、最後に後段洗浄塔にて浄化する。

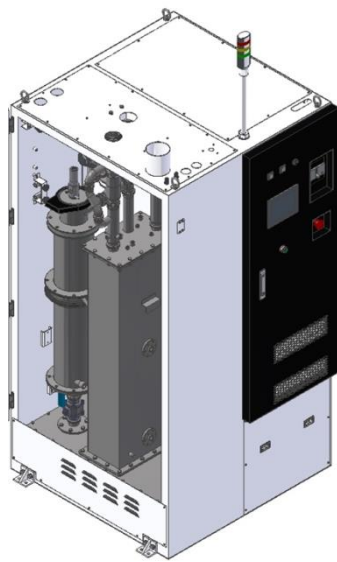
本装置のラインナップはプラズマリアクタ1基を搭載したシングルタイプと、装置内のバックアップや受け入れガス量の増大に対応するためにプラズマリアクタを2基搭載したデュアルタイプがある (図表 3)。



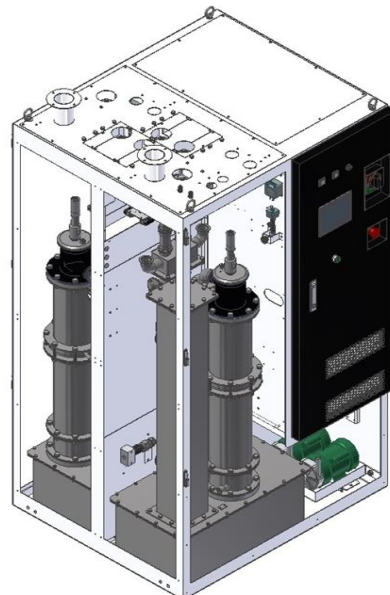
図表 1 国内最新半導体工場稼働中の装置



図表 2 装置内構成



サンダー (シングルタイプ)



デュアルサンダー (デュアルタイプ)

図表 3 シングルタイプとデュアルタイプ

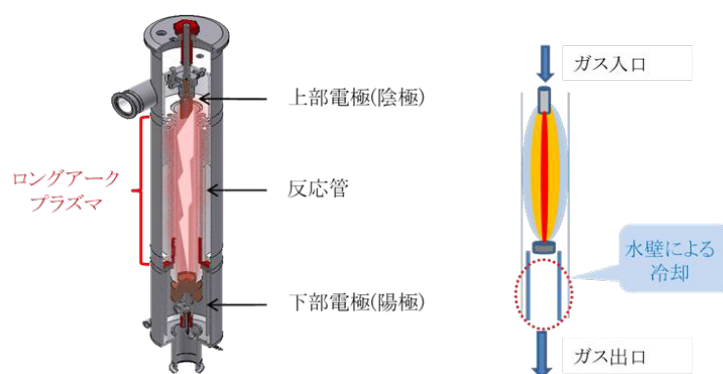
(3) プラズマリアクタの特徴

初期型のプラズマリアクタはセラミック製反応管の上下に陰極と陽極を配置し、この電極間にプラズマを放電させる (図表 4)。電極間距離は約 400mm となっており、この電極間に大気圧下でプラズマを放電させることでロングアークプラズマを発生させる。

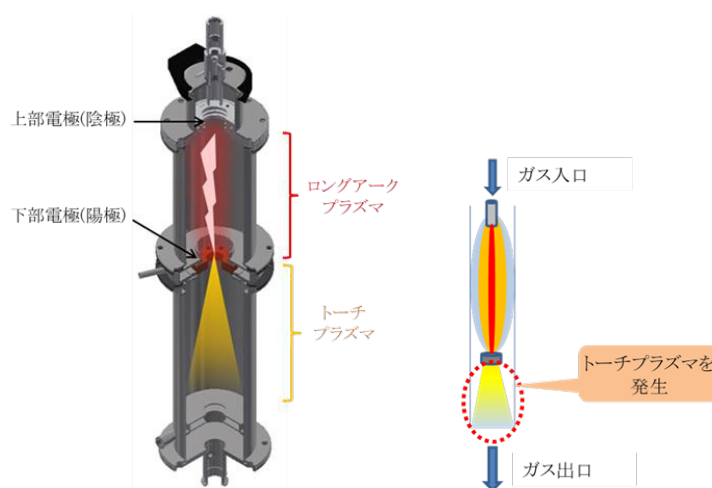
プラズマが放電している下流 (下部電極の下側) のプラズマリアクタ内部は水壁によってガスが冷却される構造である。この初期型プラズマリアクタでは電極間を放電するロングアークプラズマでガスを分解処理する機構であった。この大気圧下で約 400mm の電極間にプラズマを放電させるためには高度な技術が要求され、これを実現することで処理対象ガスに直接プラズマを放電させ高効率の排ガス処理が可能となった。しかし一方で、放電している下流の電極に

において、プラズマが急冷される構造にはエネルギーロスをガスの分解処理に有効活用できる可能性を残していた。

新型プラズマリアクタでは電極間を約 350mm と僅かに短くした上で下部電極（陽極）の形状を円柱型からリング型に変更することで、従来の電極間におけるロングアークプラズマに加えて、下部電極の下流でトーチプラズマ（プラズマジェット）を発生させることを可能にした（図表 5）。これにより処理対象ガスはロングアークプラズマのエリアを通過した後、トーチプラズマのエリアを通過することになり、この 2 段階の分解処理を経ることで高効率の処理が可能となった。



図表 4 初期型リアクタ



図表 5 新型リアクタ

2. 開発経緯

(1) 開発の背景

従来、半導体業界において PFC 等ガスが含まれるガスに対する排ガス処理装置は燃料を使って燃やす燃焼式かヒータによる加熱式が主流であった。燃焼式を使用するためには工場内に燃料を供給するため高額なガスラインの設置工事が必要であるだけでなく安全性の懸念がある。また加熱式ではヒータにより加温できる温度に限界があり、分解処理が可能なガスの種類に限られるという課題があった。他の排ガス処理方式として、減圧下で使用する減圧プラズマ式や一部の大気圧プラズマ式もあるが、減圧プラズマ式は装置のトラブル時に半導体製造装置へ悪影響を及ぼす懸念があり、大気圧プラズマ式は排ガス処理の能力（受け入れガス量、分解率）に課題があった。

このような中、当社では燃料ガスを必要とせず、電気で稼働が可能であり且つ、全ての PFC 等ガスを分解処理できるポテンシャルがある大気圧プラズマ式に着目し、多くの受け入れガス量を高い分解率で処理することを目標に開発を進めた。またプラズマによる効果的な排ガス処理が実現できると、加熱式と異なり予備加熱が不要となり、排ガス処理が必要な時だけプラズマを放電させるという省エネルギーな稼働が可能になるという点も本方式に着目した理由の一つである。

その後、誰もが挑戦しなかった大気圧下で数十 cm の電極間を安定的にプラズマ放電させるというロングアークプラズマ式の初期型プラズマリアクタを開発し、このプラズマリアクタを搭載した装置の市場展開を進めた。市場導入が進むにつれて顧客から能力（受け入れガス量、分解率）の向上に向けた要望が寄せられるようになり、従来装置では能力向上に向けた施策として投入電力を増やしてパワーアップさせるという方法を採用する事例が多いが、ほぼ同じ投入電力の中で能力向上を実現することを目的として新型プラズマリアクタの開発に至った。

(2) 開発の経緯

2005 年～2006 年	初期型装置の開発
2007 年～	国内半導体工場に初期型評価機を納入
2008 年～	初期型装置の量産機納入開始
2013 年～2017 年	新型プラズマリアクタの開発
2018 年 3 月	第 1 号機納入

(3) 共同開発

共同開発無し。

(4) 技術導入

他者からの技術導入、特許買取・譲渡無し。

3. 独創性

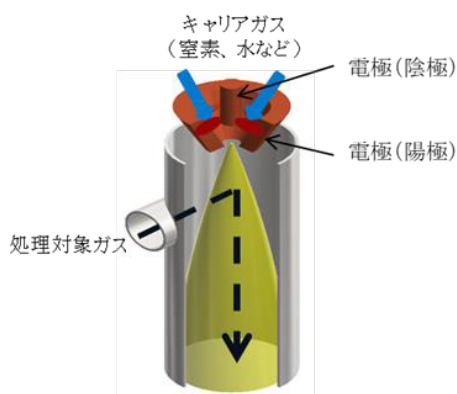
従来の排ガス処理に使用されている大気圧プラズマはほとんどがトーチ式である（図表 6）。トーチ式プラズマは数 mm 程度の短い電極間距離にプラズマを放電させ、そのプラズマを窒素や水蒸気などのキャリアガスで引き伸ばす方式である。多くの場合、このキャリアガスによって引き伸ばされたプラズマジェットを処理対象ガスに当てて分解処理を行うことになるが、高速で噴射されたプラズマジェットは流速が速く、また噴射部（電極部）からの距離と共にプラズマ温度は急激に低下する。そのためプラズマによって形成された高温部分における処理対象ガスの滞留時間は極めて短い。またこの方式では処理対象ガスだけでなくキャリアガスにもプラズマエネルギーが加えられることになりエネルギーロスも大きい。

一方、ロングアーク式（図表 7）は窒素や水蒸気のようなキャリアガスを必要としないため、プラズマエネルギーは処理対象ガスにのみ加えられるためにエネルギーロスが少ない。また処理対象ガスの流路に直にプラズマ放電させることができるため、トーチ式と比べて遥かに流速が遅く（滞留時間が長く）、且つ高温で分解処理を行うことができる。

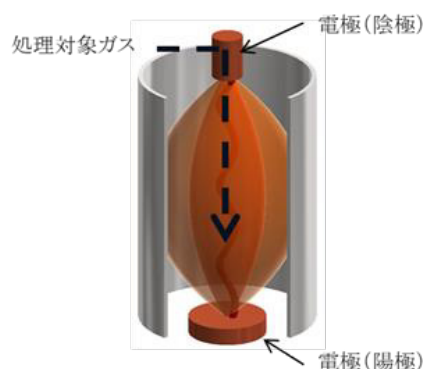
但し、大気圧下で長い距離の電極間にプラズマを放電させるロングアークプラズマを実現させることは容易でなく、特に重要となるのがプラズマの着火（放電）方法であった。通常、数十 cm の電極間にプラズマを放電させようとする、莫大な電力を加えて放電させることになるが、そうすると非常に大型で高出力のプラズマ用電源が必要になる。また異常放電など安全上の懸念もある。そのため高出力の電源でなくてもプラズマを着火させる方法として、着火用ワイヤーを用いる方法を考案した。これによって高出力のプラズマ電源を必要とせずスムーズなプラズマの着火が可能となった。

さらに新型のプラズマリアクタにおいてはロングアークプラズマの下流で同時にトーチプラズマ（プラズマジェット）を発生させることに成功し、処理対象ガスの 2 段階での分解処理を実現した。しかもこのトーチプラズマは処理対象ガスにより発生させるためキャリアガスは不要である。

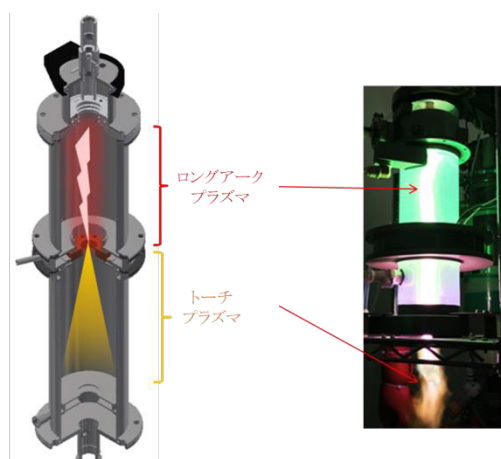
本来、プラズマリアクタはセラミック製の反応管と金属製の容器に覆われており内部のプラズマ放電は見えないが、内部状況を可視化するために反応管を石英管、容器を透明 PVC にて製作したプラズマリアクタが図表 8 の写真である。ロングアークプラズマの下流にトーチプラズマ（プラズマジェット）が発生している状況を見ることができる。



図表 6 トーチ式プラズマ



図表 7 ロングアーク式プラズマ



図表 8 新型プラズマリアクタ内部のロングアークプラズマとトーチプラズマ

4. 特許の有無

次のとおり、特許 3 件を取得済み。

特許番号：第 4588726 号 / 名称：排ガス処理装置

特許番号：第 5236357 号 / 名称：プラズマ処理装置

特許番号：第 5844124 号 / 名称：排ガス処理装置の起動方法

5. 性能

(1) エネルギー効率

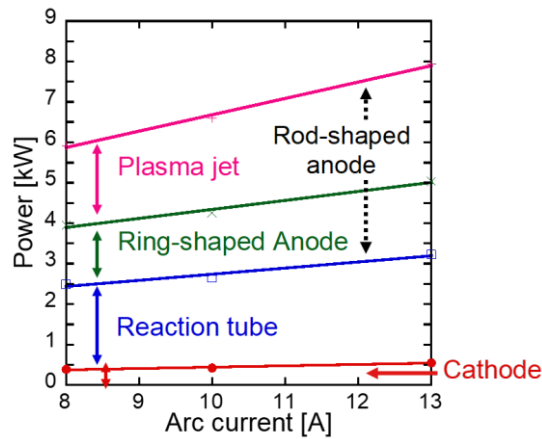
初期型プラズマリアクタと比較して新型プラズマリアクタのエネルギー効率がどれほど改善されているかを計測するため、九州大学 大学院 工学研究院 化学工学部門 渡辺研究室において熱収支の計測を行った。

プラズマ放電に伴い各部の冷却後の冷却水温度が上昇し、投入した電力の一部が冷却水によって熱損失となる。そこで各部での冷却水の冷却前後の温度差から、各部で生じた熱損失量を算出した。図表 9 は上限（ピンク色の線）が投入した電力を示しており、図中の下部から、陰極で生じた熱損失量、反応管で生じた熱損失量、陽極で生じた熱損失量を示している。また、投入した電力から各部での熱損失を差し引いたエネルギーがプラズマジェットの有するエネルギー量を示している。新型プラズマリアクタで採用したリング型陽極では陽極下流でプラズマジェットが生成し、初期型プラズマリアクタの円柱型陽極で損失していたエネルギーの約 60% をプラズマジェットとして噴出していることが分かった。

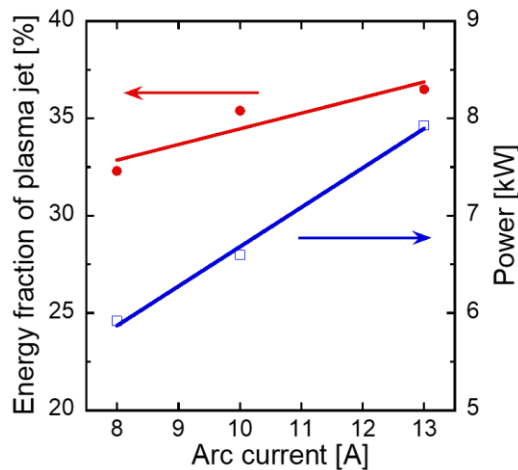
また各部での熱損失量を用いて下式から投入電力に対するプラズマジェットが有するエネルギーの割合を算出した。

$$\eta = \frac{P - \varepsilon_{cathode} - \varepsilon_{anode} - \varepsilon_{tube}}{P}$$

ここで、 η はプラズマジェットが有するエネルギーの割合、 P は電力[kW]、 ε は熱損失[kW]を示し、下付きは各部位を示す。図表 10 が投入電力に対するプラズマジェットが有するエネルギーの割合である。



図表 9 陰極、反応管、陽極で生じる熱損失



図表 10 投入電力に対するプラズマジェットの有するエネルギー割合

初期型プラズマリアクタでは熱損失として活用できていなかった投入電力の 30~40%のエネルギーを新型プラズマリアクタでは陽極下流にプラズマジェットとして活用できている。なお、この熱収支の計測は日本機械学会学術誌 (Bulletin of JSME) Vol. 13, No. 4, 2018 にも発行された。

(2) 処理性能

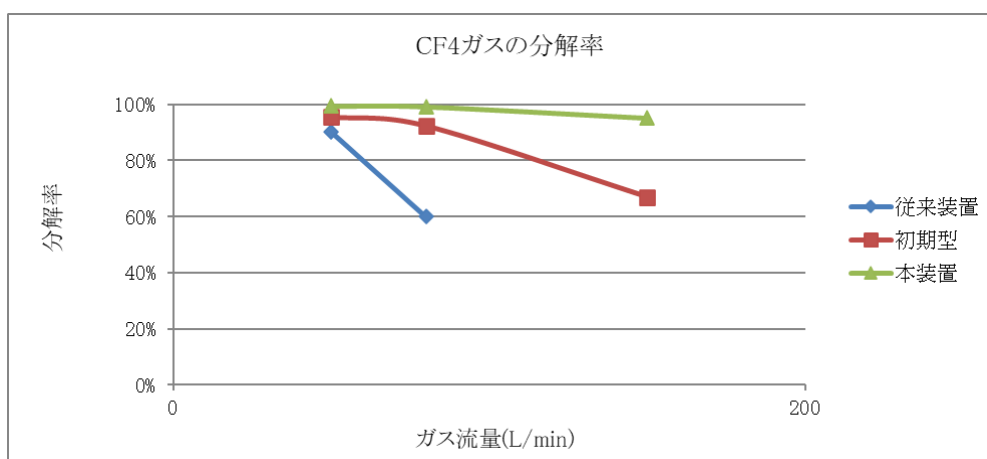
従来のプラズマを使用した排ガス処理装置では消費電力が 10kW クラスの装置において、CF₄ ガスを 90%以上分解できるガス流量は総流量として 50L/min 程度である。装置によってはプラズマリアクタの後段にファンを搭載し、ファンの吸引力で大気を引き込み装置内で希釈した上でガスを排出する装置もある。このような装置では装置の入口ガス濃度と装置の出口ガス濃度の比較を装置での分解率として掲げていることもあるが、それでも CF₄ ガスを含む総流量 100L/min 程度のガスで CF₄ ガスの分解率は 90%程度の装置が多く、プラズマリアクタでの純然たる分解率としてはこれよりかなり低い分解率に留まっている。窒素で 1%(10,000ppm)に希釈した CF₄ ガスを装置に流入させ、希釈されない後段洗浄塔直後の濃度を計測して初期型プラズ

マリアクタと新型プラズマリアクタの分解率比較では初期型プラズマリアクタにおいても従来装置と比較すると高い分解率となっているが、新型プラズマリアクタでは更に高い分解率となっている。また受け入れガス量での比較では、同程度の分解率を基準とすると2倍以上の向上が見られる。図表 11 に分解率のデータ比較を示す。

また本装置の主要ターゲットとする半導体製造装置からの排気ガスに対する処理能力として、本装置に流入するガスの総流量がおおよそ 200L/min の条件において、半導体製造装置（ドライエッチャー）から排出される CF_4 、 SF_6 、 CHF_3 、 CH_2F_2 、 Cl_2 、 HBr が本装置に流入した時の分解率のデータを採取している。最も難分解性である CF_4 においては現地で装置の条件振りの中で分解率(DRE)98%を超える状況も見られ、その他のガスでも 99%近辺の分解率であることが確認された。

(3) 耐久性・安全性

初期型プラズマリアクタを搭載した装置の量産機からは装置内に圧力計や温度計などの各種センサー類を備えており、装置内で異常が無いが常時監視しているとともに、プラズマ放電時の電流値や電圧値も監視しており、異常を検出すると自動で停止する。装置の正面にはタッチパネルが設置されており、装置の状態や各種センサー類の値を容易に確認できる。また顧客である大手半導体工場では EES (Equipment Engineering System) が採用されていることが多く、本装置もこれに対応して装置の稼働状況やセンサー類の数値データなどを工場側に出力して傾向管理などが行える。



図表 11 CF_4 ガスの分解率比較

(4) 運転・操作性

本装置の稼働は運転ボタンを押すだけで装置内に異常が無いことを条件に自動運転が開始されるシステムになっている。そのため、装置の使用者に高い技術や知識、経験を要求しない。

(5) 維持管理性

主な消耗部品はプラズマリアクタ内の電極であるが、その消耗具合はプラズマ放電中の電圧値で把握することができる。電極の消耗が進むと最終的には電極を交換する必要があるが、その際にはプラズマリアクタ自体を交換し、取り外したプラズマリアクタは当社でオーバーホールを行う運用となっている。そのため短時間で容易に装置の再稼働が可能である。

6. 経済性

図表 12 に経済性の比較を示す。新型プラズマリアクタを導入した本装置の用力は初期型から変更は無い。装置構成上、インシヤルコストは定価ベースで 20%ほど高い設定とせざるを得ないが、処理能力の向上に伴い受け入れガス量が初期型と比べて 2 倍ほどになっている。

受け入れガス量の増大に伴い、顧客の設備導入台数を減らすことができるため大きな経済性が見込める。単純計算では導入台数を半減させることができ、インシヤルコストの上昇を考慮しても 40%ほどの設備導入費用削減に繋がる。

7. 将来性

半導体業界では最先端のプロセスで更なる微細化やウエハサイズの大口径化などで従来と比べより多くのガスが排出されることも想定される。排ガスを処理する設備の導入台数を最小化できることは顧客の設備導入費用の削減だけでなく消費電力の低減など環境負荷の低減に大きく寄与する。また国の違いや各顧客によって排ガス処理装置に要求される PFC 等ガスの分解率基準は異なる。国内では CF₄ ガスの分解率基準は 90%以上、その他ガスで 95%以上という事例が多いが、分解率が 99%近くを達成する装置が広く普及すると温室効果ガスの排出抑制に大きな効果が期待できる。これらの観点からも本装置の更なる市場展開が期待される。

図表 12 経済性の比較表

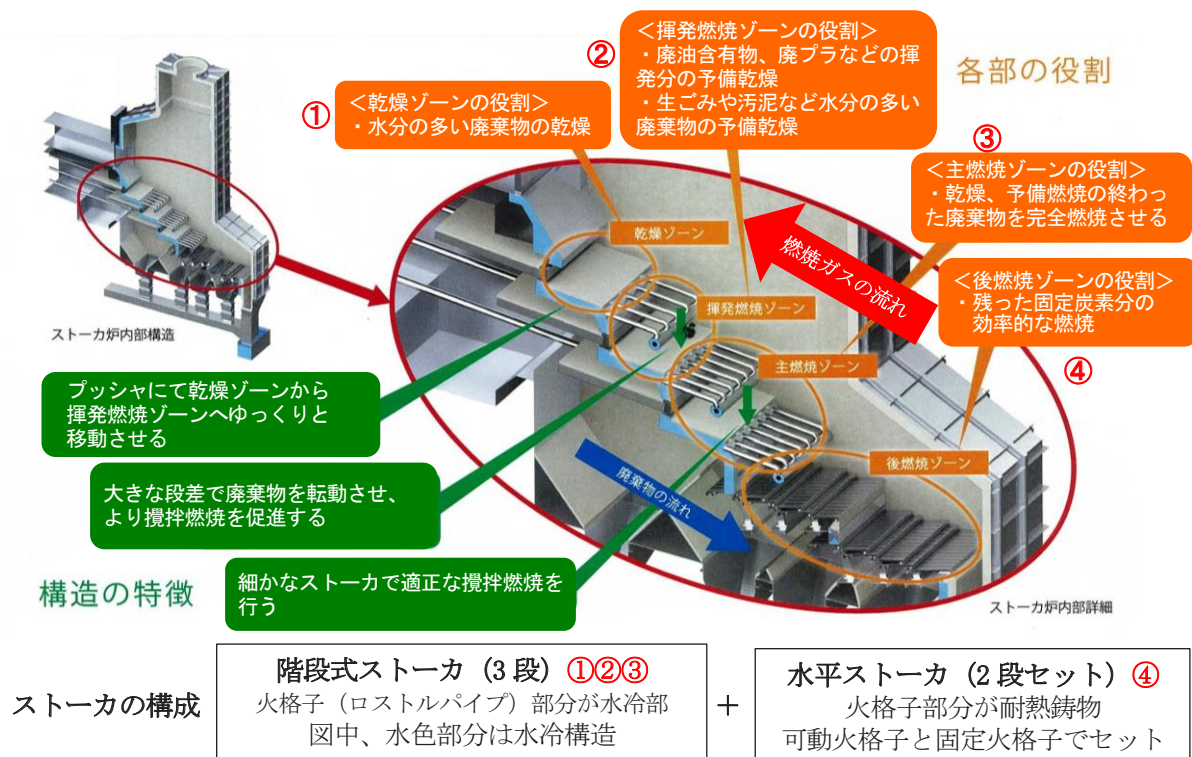
項目		初期型(シングルタイプ)	本装置(シングルタイプ)	従来比
インシヤルコスト(初期型を100として)		100	120	120%
用力	消費電力	10~12kW	10~12kW	同等
	使用水量	8~16L/min	8~16L/min	同等
	DC電源用冷却水量	8~10L/min	8~10L/min	同等
	窒素量	20~30L/min	20~30L/min	同等
受け入れガス量		50~100L/min	50~200L/min	200%

中小企業庁長官賞 「多種廃棄物対応焼却炉 (AIS 型焼却炉)」 株式会社アクトリー

1. 装置の詳細説明

本装置は、階段式ストーカと水平ストーカを組み合わせることにより、熱量・性状の異なる多種多様な産業廃棄物及び一般廃棄物について、発電に適した安定燃焼焼却処理を可能とした焼却炉、アクトリー(A)インテリジェント(I)ストーカ(S)炉である。

前段の階段式ストーカでは、まず含水率の高い廃棄物の乾燥を行い（乾燥ゾーン）、次にプラスチック等の高負荷燃焼を行った（揮発燃焼ゾーン）後、安定燃焼を行う（主燃焼ゾーン）。なお、階段式ストーカは水冷ロストル構造の採用によりクリンカの発生を抑制し、且つストーカ部の長寿命化を図っている。また、後段の水平ストーカでは、独自に開発した「アクセラブレス」により最適な燃焼空気を供給し、固定炭素の効率的な燃焼を行う（図表 1）。



図表 1 本装置の特徴

産業廃棄物は発熱量変化が大きく形状等が様々であるため、従来、廃棄物の種類等によりストーカ式のほか、キルン式や流動床式などそれぞれの焼却物に効果的な方式を採用し焼却処理する必要があった。

本装置は、前記のとおり 2 種類のストーカを組み合わせることで、発熱量変化の大きい産業廃棄物処理においても燃焼室の負荷変動を低減することが可能となり、発電効率を改善している。その結果、階段式ストーカ単体の処理と比較して、売電収入 30%増加、燃料費（助燃油）40%削減が期待できる。また、多種多様な廃棄物を一括処理できるため、ランニングコストは 30%程度の削減が見込まれる。なお、各種排ガスはいずれも規制基準値を大きく下回り、熱灼減量は 5 分の 1 の約 2%まで低減している。1 基で多種の産業廃棄物処理可能な事業性重視のシステムである。図表 2 に本装置の特記事項を記載する。

（1）装置の構成

1) 乾燥ゾーン：階段式ストーカ

投入プッシャ（給じん装置）により投入された混合廃棄物は、乾燥ゾーンに投入される。水分の多い廃棄物はこのゾーンで乾燥される。階段式ストーカは水冷ロストル構造のため、液体がストーカ設備の内部に流れ出すことはない。また投入後、瞬間的に熱で融け出す廃プラスチックや繊維くず等がストーカの動きに障害を与えることもないという特徴がある。

2) 揮発燃焼ゾーン：階段式ストーカ

乾燥ゾーンからプッシャにより押し出された廃棄物は、下段に落下する際に攪拌される。乾燥した廃棄物は揮発燃焼ゾーンで燃焼速度の速いものは爆発的に燃焼する。酸素濃度が低くなりやすいので、強制的に燃焼空気を送り込む機構を持つ。水冷ロストル構造により過度の温度上昇を抑制し、クリンカの発生を抑制する。

3) 主燃焼ゾーン：階段式ストーカ

乾燥・予備燃焼が終了した焼却物を安定燃焼させる。燃焼速度が平均的な廃棄物は、このゾーンで燃焼する。

4) 後燃焼ゾーン：水平ストーカ（2 段）

一般廃棄物焼却炉で用いられる水平ストーカ方式を採用している。燃焼速度の遅い固定炭素分等は、このゾーンで燃焼する。上部には、耐火キャスタブルが配置されており、反射炉の原理により蓄熱された反射熱によってストーカ上の焼却物は高温に維持されている。後燃焼ゾーンはクリンカが発生しやすいため、適宜燃焼空気を送風し、適切な酸素濃度を維持し、クリンカの発生を防止している。

5) インテリジェントストーカ

階段式ストーカ及び水平ストーカに採用している。プッシャの押し出し速度、押し出し幅、動作時間等は、自動燃焼制御システム（ACC：Automatic Combustion Control）が適用され、人的労力を極力減らすことを考慮し、経験の少ない運転員でも熟練の運転が可能となるシステムである。

図表 2 本装置の特記事項

本装置特記事項		備考
■	中間処理業者様のニーズをフィードバック	納入実績国内トップ
	少量多品種に対応（低発熱量～高発熱量）	高利益率の焼却事業
	設備の取扱いが簡単	少人数対応
	最低限の前処理（前処理コスト削減）	1.5 m×1.5 m の投入口
	少ない助燃油使用量	立上げ立下げ時以外は不要
	安定燃焼による高い発電効率	売電による収入確保
	低メンテナンスコスト	稼働日数最大 330 日を確保 （一般廃棄物炉 280 日）
	無事故、高安全性の確保	遠隔操作可能
	低濃度 PCB 処理設備許可	全国 3 箇所に許可施設設置
■	産廃・一廃対応の炉構造	長年の技術蓄積
	水冷ロストル+耐熱鋳物ストーカ	
	多くの処理困難物と言われるものにも対応	受入品目 30～50 %UP
	雑缶処理室・ドラム缶処理室併設可能	追加オプション
	水冷構造+耐火キャスターのハイブリット	クリンカ付着防止・蓄熱 連続運転時間 120%UP

2. 開発経緯

(1) 開発経緯

2013 年 4 月	顧客より、産業廃棄物・一般廃棄物両方が同時に処理可能で、且つ発電に適した安定燃焼を確保できる過去にない焼却炉の開発要望が高まる
2013 年 10 月	自社所有試験用焼却設備にて、試験用ストーカ設置 炉内温度分布、酸素濃度他測定実施・流体シミュレーション解析実施
2014 年 4 月	燃焼空気供給ノズル（自社開発）の口径・吹出し方向・圧の改良
2014 年 6 月	燃焼空気均一化のための他社に例のない「アクセラブレス」の設計開発（鋳物設計製作）
2015 年 1 月	自社試験用焼却炉にて、耐久性、炉内温度分布、酸素濃度他測定実施 第 1 号機設計開始。その後、据付工事開始 本システムに適合した、自動燃焼制御システム（ACC）開発
2016 年 3 月	第 1 号機納入
2016 年 4 月	ACC プログラム改善

(2) 共同開発

無し

(3) 技術導入

無し

3. 独創性

本装置は長年の経験を持つ産業廃棄物焼却処理設備メーカーが試験を重ね生み出した「アクセラブレス」を搭載した、類似の形式が見受けられないストーカ炉である。

水平ストーカは、一般廃棄物焼却炉に広く用いられている歴史のある技術である。しかし、廃プラスチック等の高発熱量の産業廃棄物に対しては、前処理を行ってもストーカ部の寿命が短いというリスクがあった。当初、階段ストーカ（水冷ロストル方式）と水平耐熱鋳物ストーカをそのまま組み合わせて多種の廃棄物で試験したが、特に水平耐熱鋳物ストーカ部分で、大きなクリンカが発生し、両方式のストーカの動きを阻害した（図表3）。

そこで、各種の測定機器を用い、各部位の炉内温度、酸素濃度測定、更に流体シミュレーションを行い、試験炉内を測定・観測したほか、階段ストーカ部分の燃焼空気吹き込み用ノズルの口径、吹き込み方向をシミュレーション（シミュレーションソフト使用）し、それらの均一化を図った。

水平耐熱鋳物ストーカ部分には、燃焼空気を従来のストーカ間の隙間のみならず、前方へも噴き出すようにした「アクセラブレス」（図表4）を搭載し、燃焼空気との攪拌効果を高め燃焼を促進している。

当社ではこの「アクセラブレス」を用い、酸素濃度の偏りが30%以内になるような燃焼空気供給方法について研究開発を進めた。燃焼空気の供給にあたり、炉内に燃焼空気を入れすぎると炉内温度が低下するため、吹き出し量を考慮しているほか、水平耐熱鋳物ストーカ部分上部の炉体構造は、反射炉の原理を取り入れ、炉体耐火物の反射熱を利用して温度低下を防いだ。また、耐熱鋳物内部に燃焼空気を通すため、構成する部品部材への熱負担が少なくなり、従来製品より概ね30%以上高い耐久性、消耗部品の減少を実現している。なお、燃え殻の耐熱鋳物ストーカ間への侵入を防ぐため、燃え残りの量を30%程度削減する効果があることも分かった。

後段に水平ストーカを配置しても、前段の階段式ストーカ（水冷ロストル採用）により高発熱量の廃棄物の熱負荷は低減されているので、高発熱量に弱いというリスクは低減され、耐熱鋳鋼製「アクセラブレス」の採用が可能となった。また、クリンカ障害による運転停止も無くなり、年330日以上運転日数確保も可能となった。

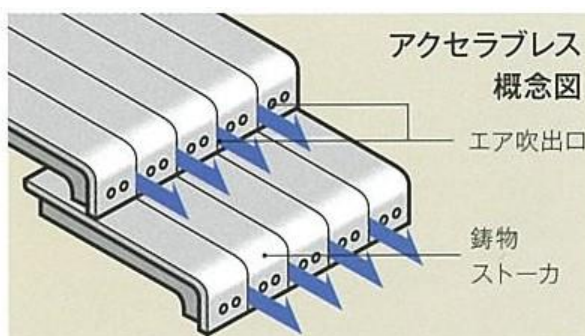
4. 特許の有無

次のとおり、特許1件を出願中。

公開番号：特開2019-086248 / 名称：焼却炉



図表3 クリンカ



図表4 アクセラブレス概念図

5. 性能

従来の産業廃棄物焼却炉の欠点である負荷変動を減少させ、混合産業廃棄物の一定負荷運転を実現すると同時に、余裕を持った排ガス規制値のクリアを実現した。

(1) 排ガスに係る性能

排ガス分析結果を図表 5 に示すとおり、法規制値を大幅にクリアしている。なお、窒素酸化物低減目的の特別な脱硝設備は設けておらず、ダイオキシン類は、炉内及び排ガス処理装置内のガスの流れをシミュレーションし、ショートパスを抑制し、分解及び再合成を防止している。

(2) 熱灼減量（燃え残り）に係る性能

燃え殻の分析結果を図表 6 に示す。設備完成直後の性能試験時は耐火キャスターの乾燥状況により変動するが、法規制値は十分クリアしている。近年の測定値（図表 7）は耐火キャスターが十分に乾燥しているため、さらに良好な値である。

図表 5 排ガス分析結果

測定項目	計量の結果	単位	法規制値	備考
ばいじん	0.001 未満	g/Nm ³	0.08 以下	O ₂ 12%換算値
硫黄酸化物	0.8	K 値	1.75 以下	1号機設置場所
窒素酸化物	66	ppm	250 以下	O ₂ 12%換算値
塩化水素	110	mg/Nm ³	700 以下	O ₂ 12%換算値
ダイオキシン類	0.0031	ng-TEQ/Nm ³	1 以下	O ₂ 12%換算値
一酸化炭素	25	ppm	100 以下	O ₂ 12%換算値

図表 6 燃え殻の分析結果（2016年性能試験時）

計量対象	単位	分析結果	法規制値	判定
熱灼減量	%	4.8	10	OK
ダイオキシン類	ng-TEQ/g	0.061	3	OK
アルキル水銀化合物	mg/L	0.0005 未満	検出されない	OK
水銀又はその化合物	mg/L	0.0005 未満	0.005 以下	OK
カドミウム又はその化合物	mg/L	0.001 未満	0.3 以下	OK
鉛又はその化合物	mg/L	0.007	0.3 以下	OK
六価クロム化合物	mg/L	0.01 未満	1.5 以下	OK
ひ素又はその化合物	mg/L	0.005 未満	0.3 以下	OK
セレン又はその化合物	mg/L	0.002 未満	0.3 以下	OK
1,4-ジオキサン	mg/L	0.05 未満	0.5 以下	OK

図表 7 燃え殻の灼熱減量（2021年）

計量対象	単位	分析結果	法規制値	判定
熱灼減量	%	2.2	10	OK

(3) 発電効率

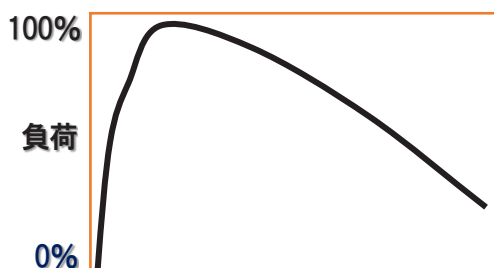
発電効率を大きく低下させる負荷変動を少なくすることで高い発電効率を実現した。

一般廃棄物と異なり、産業廃棄物は多業種の排出事業者から搬入されるため、廃棄物の熱量の違いにより、燃焼室負荷が時間により変化する。負荷変動は、発電効率に大きく影響するため、一定の負荷で運転することが必要となる。なお、負荷が半分になると発電量がゼロになる場合もある(図表8)。一部の産業廃棄物焼却炉に採用されているバッチ式等は、負荷変動が大きく、発電効率が悪い(図表9)。そのため、補助燃料(化石燃料)による追い炊き、コントロールの難しい複数基の並列運転などが必要だった。

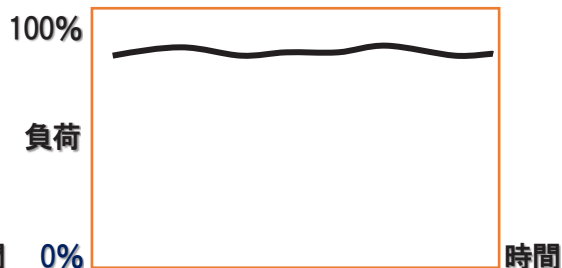
本装置は、それぞれの廃棄物の熱量に対応したストーカで燃焼させるため、負荷変動が少なく、この問題を解決した(図表10)。したがって、定常運転では補助燃料(化石燃料)の使用を伴わず、1基の設備で高効率な熱回収が可能である(図表11)。図表12に発電量測定値を示す。



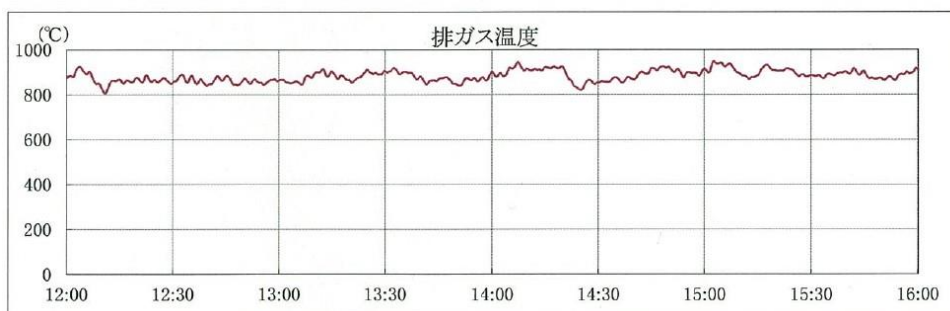
図表8 焼却負荷と発電量の関係



図表9 バッチ炉の負荷変動(概念図)



図表10 本装置の負荷変動(概念図)



図表11 第1号機性能試験時の負荷変動データ(補助燃料(化石燃料)未使用)

図表12 発電量測定値

測定項目	測定地点	単位	設計値	測定値	判定
最大発電量	発電機出口	kWh	1,950	1,950(平均1,932)	OK

(4) その他環境負荷に係る性能

図表 13 にばいじんの分析結果、図表 14 及び 15 に騒音・振動の測定値を示す。いずれも良好な数値が得られている。

(5) 耐久性・安全性

投入装置により乾燥ゾーンに投入される廃棄物は、強度が十分に保たれた水冷ロストル（火格子）上に落下するため、最も損傷の激しい部位の高耐久性が保たれている。燃焼が激しい部位には水冷壁を配置し、クリンカの発生防止や耐火キャストの長寿命化を図っている。

取扱いに注意が必要な危険廃棄物は、「多目的燃焼室」、「医療系廃棄物投入装置」、「ドラム缶燃焼室及び搬入装置」（いずれもオプション仕様）を併設することにより、最大限自動化し遠隔操作することで、作業者の安全を確保している。

(6) 運転操作性

自動燃焼制御システム（ACC：Automatic Combustion Control）の採用で、ごみクレーン操作者 1 名で全装置の操作ができる（図表 16）。

全ての運転データは PC 内に蓄積しており、特にストーカの作動情報を蓄積することで、より安定燃焼を実現するための学習機能を保持している。

また、ばい煙の自動測定装置が完備されており、これまで半年毎のばい煙測定で管理していたばいじん、硫黄酸化物、窒素酸化物、塩化水素、一酸化炭素、酸素、排出ガス量の濃度を、逐次グラフィックパネルに表示し、各濃度をリアルタイムで確認することができる。

図表 13 ばいじん分析結果

計量対象	単位	分析結果	法規制値	判定
ダイオキシン類	ng-TEQ/g	2.2	3	OK
アルキル水銀化合物	mg/L	0.0005 未満	検出されない	OK
水銀又はその化合物	mg/L	0.0005 未満	0.005 以下	OK
カドミウム又はその化合物	mg/L	0.001 未満	0.3 以下	OK
鉛又はその化合物	mg/L	0.007	0.3 以下	OK
六価クロム化合物	mg/L	0.01 未満	1.5 以下	OK
ひ素又はその化合物	mg/L	0.005 未満	0.3 以下	OK
セレン又はその化合物	mg/L	0.002 未満	0.3 以下	OK
1,4-ジオキサン	mg/L	0.05 未満	0.5 以下	OK

図表 14 騒音測定値（工業専用地域）

測定項目	測定地点 (南側敷地境界)	単位	第 4 種 区域	測定値	判定
				施設稼働時	
騒音	昼間(8:00~18:00)	dB(A)	70	58	OK
	朝夕(6:00~8:00, 18:00~22:00)			58	
	夜間(22:00~6:00)			57	

図表 15 振動測定値（工業専用地域）

測定項目	測定地点 (南側敷地境界)	単位	第2種 区域	測定値	判定
				施設稼働時	
振動	昼間(8:00~19:00)	dB(A)	65	38	OK
	夜間(19:00~6:00)	dB(A)	60	>30	OK



図表 16 ごみクレーン操作室

(7) 維持管理性等

PC内に蓄積されたユーティリティの使用量を集計することで、ランニングコストの解析を容易に行うことができるほか、エラー情報も蓄積することで解析により予防保全の基本データとして利用している。

維持管理・設備長寿命化について、先ず本装置の当社発行のマニュアルを順守することにより、定期点検や部品の定期交換時期等を決定する。過剰なメンテナンスを防止するため、フィードバックされた運転データとの比較検討を行い、逐次、最適なメンテナンス間隔を決定する。

6. 経済性

図表 17 に従来装置（水平ストーカ（後燃焼）の無い階段式ストーカ炉）との経済性比較を示す。

本装置は従来装置と比べインシヤルコストが増加するが、ランニングコストの優位性により総合的に経済性が優れている。具体的には 20%程度装置価格が増加するが、負荷量が増えるために収益は増すと考えられ、安定運転が発電効率の増加に寄与するため、約 4 年程度で回収が可能である。

なお、本経済性比較には表れないが、インシヤルコストの低減に繋がるものとして、1 基で多種の廃棄物が処理できる特長が挙げられる。本装置を導入すること異なる処理方式の焼却炉を複数導入する必要が無く、トータルでのインシヤルコストの大幅な節約ができる。また、営業面においては、売上金額には表れないが、受入品目が増えることにより外注費用が抑制可能で粗利が向上する。

図表 17 従来装置と本装置の経済性比較表

	従来装置	本装置	
イニシャルコスト	100	110	
装置費用	100	120	
設置費用	100	100	パッケージ化にて費用削減
ランニングコスト	100	70	
電気代			
消費電力	100	70	自己発電により設備運転可能
売電収入	100	130	安定運転が可能
人件費	100	80	ACC 採用
燃料費	100	60	助燃油として
薬品代	100	100	
メンテナンス費用	100	70	鋳物他長寿命化
省エネルギー	100	120	発電能力に起因
省資源	100	120	発電能力に起因
省スペース	100	105	

7. 将来性

将来性については、本装置単独ではなく、施設周辺に至るシステムで考える必要があり、以下のような展開が可能である。

(1) 脱炭素社会への提案

自然条件に影響を受ける太陽光発電や風力発電とは異なり、安定したエネルギーを 24 時間発生させることができる廃棄物発電は、エネルギー（熱・電気）を供給することができる。マルチベネフィットが注目されている現在、一定の負荷で多種の廃棄物を 1 基の焼却炉で処理できる本装置はエネルギー供給源として最適である。協働するシステムを構築することによりオープンイノベーションを展開し広く社会に貢献できる。

(2) 地域貢献（災害時の対応）

本装置は SDGs の 17 項目中、6 項目に貢献することが可能である。特に目標 11「住み続けられるまちづくりを」においては、本装置をはじめとした廃棄物処理施設が単独で水や温水、電力、トイレ（廃水処理）といったユーティリティを保持しているため、災害時に避難場所を提供することが可能であり、地域住民支援に大きく貢献する。

また、周辺環境に配慮した設備設計を志向している。具体的には地域（産業）に調和したデザインを採用し、環境教育や啓発活動を行うレイアウトとしたほか、見学者コースを設定したり、親しみやすいデザインにして近隣住民に広く開放したりしている。また、建設例としては臨海地区における津波待避所として、展望台も設置している。

(3) 海外展開について

取扱いが容易で発電効率も高い本装置は、海外にも展開可能であると考えられる。

日本産業機械工業会会長賞

「尿素分解装置を用いた無触媒脱硝システム」

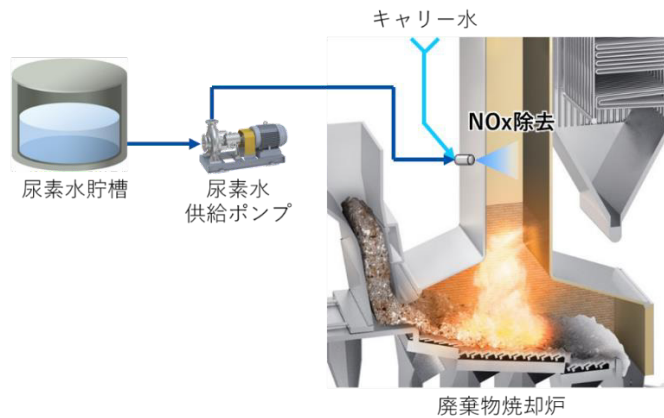
株式会社タクマ

1. 装置の詳細説明

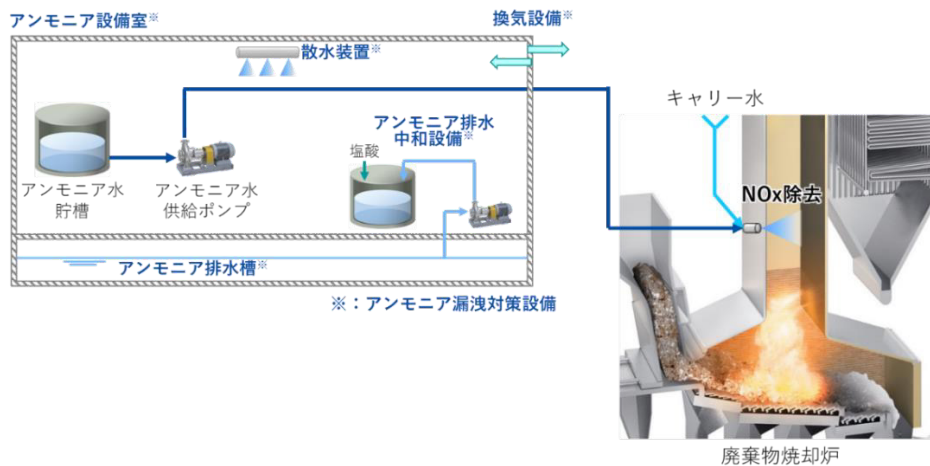
(1) 従来の無触媒脱硝システムの概要

無触媒脱硝システムは、廃棄物焼却炉で発生する窒素酸化物 (NOx) の低減方法として、一般的に知られている技術のひとつであり、脱硝剤 (尿素やアンモニア) を炉内に吹き込み、NOx を低減する技術である。

従来から採用されている無触媒脱硝システムである尿素水噴霧方式のフローを図表 1 に、アンモニア噴霧方式のフローを図表 2 に示す。



図表 1 従来の無触媒脱硝システム（尿素水噴霧方式）のフロー



図表 2 従来の無触媒脱硝システム（アンモニア噴霧方式）のフロー

脱硝剤に尿素を用いる「尿素水噴霧方式」は、安全で安価な尿素水を使用し、構成機器が少なくシンプルなシステムで、従来から一般的に使用されてきた。本方式は、尿素水供給ポンプにより尿素水を供給し、炉内に直接噴霧することでNOxを除去するが、アンモニアを直接噴霧した場合に比べると低い脱硝効率となる。

一方で、脱硝剤にアンモニアを用いる「アンモニア噴霧方式」は、尿素水噴霧方式よりも脱硝性能が高いため、近年の厳しいNOx排出規制を満足するよう採用されるケースが増加している。本方式は、アンモニア水供給ポンプによりアンモニア水を供給し、炉内に直接噴霧することでNOxを除去する。しかし、アンモニアは尿素に比べ高価であり、かつ劇物に指定され、取扱いに注意を要する物質であるため、アンモニアの貯留・供給設備を設置する際は漏洩対策設備も併せて設置する必要があり、設備費が増加する。

このように、アンモニア噴霧方式は、アンモニアによる高い脱硝性能を得ることができるというメリットがある反面、アンモニア漏洩対策設備が必要で設備費用が高価であること、および薬品単価が尿素に比べると高価であるというデメリットがあった。

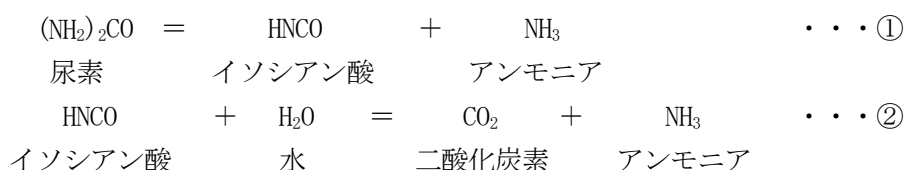
以上のように従来システムは使用する脱硝剤（尿素、アンモニア）に応じてメリット、デメリットがあったが、これらデメリットを克服し、尿素やアンモニアそれぞれのメリットを活かした、尿素からアンモニアガスを生成する尿素分解装置を開発した。本装置によって、安全性が高く低コストであるという尿素のメリットと、脱硝性能が高いというアンモニアのメリットをあわせもった画期的なシステムを実現した。

(2) 尿素分解装置を用いた無触媒脱硝システム

1) 装置概要

尿素分解装置は、触媒を用いて尿素からアンモニアガスを生成するものであり、本装置を用いた無触媒脱硝システムは、このアンモニアガスを脱硝剤として炉内へ噴霧することにより、廃棄物焼却炉から発生するNOxを除去するシステムである。

尿素的加水分解反応は下記の2式で表される。



①および②式の尿素分解反応が完全に進行すれば、尿素 1mol からアンモニア 2mol が生成する。炉内に直接尿素を噴霧した場合、②式の反応速度が遅く炉内で尿素分解反応が十分進行しないため、アンモニアを直接炉内に吹き込むよりも脱硝効率が低くなる。

図表3に尿素分解装置における尿素からアンモニアガスへの加水分解機構を示す。尿素分解装置は、装置内の気層で①式の反応を進行させた後、尿素分解触媒を用いて所定の温度のもとで②式の反応を促進するため、尿素はアンモニアに完全に分解する。



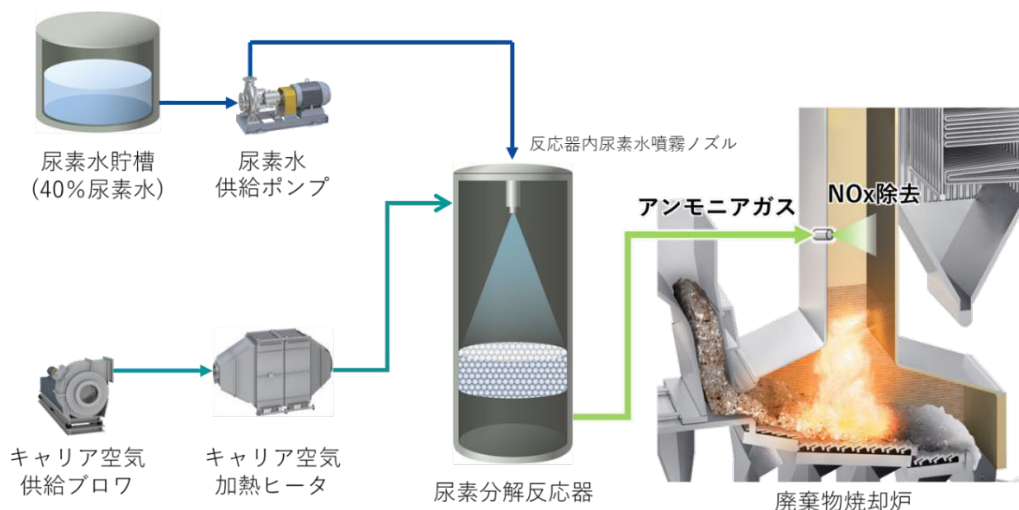
図表 3 尿素分解装置における尿素からアンモニアへの加水分解反応

図表 4 に尿素分解装置を用いた無触媒脱硝システムのフローを、図表 5 に尿素分解反応器（以下、反応器と記す）の外観を示す。

本装置は、キャリア空気供給ブロワと、キャリア空気加熱ヒータ、尿素水貯槽、尿素水供給ポンプ、反応器内尿素水噴霧ノズル、および尿素分解触媒を充填した反応器から構成される。

キャリア空気は、ヒータで加熱された後、尿素分解触媒(粒状)を充填した反応器に供給される。尿素水は、尿素水供給ポンプにより反応器内に供給され、尿素分解触媒によりアンモニアへ分解される。生成したアンモニアは、脱硝剤としてキャリア空気とともに炉内へ吹き込まれる。なお、キャリア空気を加熱する理由は、反応器に供給された尿素水を気化し、触媒温度を約 250℃とすることで、尿素からアンモニアへの高い分解率を発揮するためである。

触媒温度が約 200℃以下に低下するとシアヌル酸(C₃H₃N₃O₃)が触媒表面に析出し、尿素の分解反応を阻害する。そのため、本装置は尿素分解触媒にシアヌル酸が析出してきた際に、触媒温度を上昇させ、シアヌル酸を分解することで触媒の再生を行う「再生工程」を備えている。性能劣化の兆候が見られた際に炉内にアンモニアを供給しながら触媒を再生することによって性能を維持し、尿素分解装置の長期安定運転を可能とした。



図表 4 尿素分解装置を用いた無触媒脱硝システムのフロー



図表 5 尿素分解反応器外観 (約 2m×2m)

図表 6 に従来システムと尿素分解装置を用いた本システムの特徴をまとめる。従来システムである尿素水噴霧方式は、尿素を用いるため、薬品単価、設備費用が安価であり、安全性も高いが、脱硝性能はアンモニアより低かった。もう一つの従来システムであるアンモニア噴霧方式は、アンモニアを用いるため、薬品単価が高価であり、アンモニア漏洩対策設備が必要となるため設備費用も高価で、かつアンモニアの取り扱いに注意が必要となるが、脱硝性能は尿素よりも高い。これらの従来システムに対し、本システムは、尿素分解装置により、尿素を用いるため薬品単価、設備費用は安価であり、安全性も高く、かつアンモニアガスを炉内に噴霧できるため高い脱硝性能が得られる。

	【従来システム】		▶	【新システム】
	尿素水噴霧方式	アンモニア噴霧方式		尿素分解装置
薬品単価	○安価	△高価		○安価
設備費用	○安価	△高価		○安価
安全性	○安全	△取扱注意		○安全
脱硝性能	△低い	○高い		○高い

図表 6 従来の無触媒脱硝システムと尿素分解装置を用いた無触媒脱硝システムの特徴

2. 開発経緯

(1) 開発経緯

1) 開発の趣旨

従来の無触媒脱硝システムは、尿素水噴霧方式とアンモニア噴霧方式が用いられている。一般的に脱硝剤としては尿素が使用されてきたが、近年は厳しい NOx 排出規制を満足するため、尿素より脱硝効率が高いアンモニアを使用するケースが増加している。しかし、アンモニアは尿素に比べ高価であり、かつ劇物に指定され、取扱いに注意を要する物質であるため、アンモニアの貯留・供給設備を設置する際は漏洩対策設備も併せて設置する必要があり、設備費が増加していた。

そこで当社は、触媒を用いて尿素からアンモニアガスを生成する尿素分解装置を開発した。本装置を無触媒脱硝システムに用いることで、安全性が高く低コストであるという尿素のメリットと脱硝性能が高いというアンモニアのメリットをあわせもった画期的なシステムを実現した。

2) 開発の目標

- ①尿素をアンモニアに完全に分解する。
- ②長期安定運転ができるよう触媒が劣化しても性能を回復する機能を持つ。

3) 開発の経緯 (性能に関する具体的な内容は「5. 性能」の項で示す。)

- 2014 年～
 - ①基本性能試験：アンモニア転換率ほぼ 100%の尿素分解装置の開発。
 - ②実施設における無触媒脱硝試験 (脱硝性能試験)：
 - アンモニア噴霧方式と同等の高い NOx 除去性能の確認。
 - 触媒におけるシアヌル酸分解除去及び繰り返し再生機能の確認。
- 2015 年～
 - ③実施設における無触媒脱硝試験 (長期間安定運転)：
 - 尿素分解と触媒再生が同時に可能な装置として改善。
- 2021 年 第 1 号機納入

①基本性能試験 (2014 年)

実機スケールの試験装置を製作し、尿素からアンモニアへの転換率(以下、アンモニア転換率)と触媒温度や触媒 SV(空間速度)の関係等を調査し、アンモニア転換率をほぼ 100%にできる尿素分解装置を開発した。

②実施設における無触媒脱硝試験 (脱硝性能試験、2014 年)

①で製作した試験装置を実施設(ストーカ式 200t/日/炉)に設置して約 10 日間の無触媒脱硝試験を行った。既設の尿素水噴霧方式に比べ、本システムの方が尿素水の使用量を削減できることを確認し、アンモニア噴霧方式と同等の高い NOx 除去性能が得られることを確認した。

また同時に、約 10 日間の連続運転試験においては尿素分解性能を維持していることを確認したが、試験的に触媒温度を低下させてシアヌル酸を析出させた状態で触媒の再生を行い、シアヌル酸の分解除去と初期性能への復帰および繰り返し再生が可能であることをあわせて確認した。

ただし、本試験の再生工程は、触媒の再生と尿素の分解を同時に実施できるものとしていなかったため、触媒の再生中は尿素からアンモニアを生成できないという装置の連続運転性に課題が残った。また、試験期間が短く、長期安定運転の確認が十分にできなかった。

③実施設における無触媒脱硝試験（長期間安定運転、2015年）

②とは別の実施設（ストーカ式 270t/日/炉）において、①で製作した試験装置を設置して約4ヶ月間の無触媒脱硝試験を行った。この施設においても既設の尿素水噴霧方式に比べ、本システムのほうが尿素水の使用量を削減できることを確認し、アンモニア噴霧方式と同等の高いNOx除去性能が得られることを確認した。

再生工程については、装置を尿素の分解と触媒の再生を同時に行えるよう改善した結果、再生中も尿素からアンモニアを生成できるようになり、炉内の脱硝効率も落ちることなく運転できることを確認した。さらに、試験終了後の触媒表面にシアヌル酸の析出はなく、触媒が長期にわたって尿素分解性能を維持できることを確認した。

④実機導入（2021年）

最新の一般廃棄物処理施設である太田市外三町広域清掃組合クリーンプラザ（2021年竣工、施設規模：ストーカ式 165t/日/炉×2炉）に本システムの1号機（2系列）を納入した。本施設の無触媒脱硝システムにおけるNOx除去性能は、アンモニア当量比0.4～0.6でNOx除去率20～40%であり、他施設のアンモニア噴霧方式と同等のNOx除去性能であることを確認した。また、竣工後約6ヶ月の長期運転において、尿素分解性能を維持し、安定運転できることを確認している。

（2）共同開発

無し

（3）技術導入

無し

3. 独創性

本システムを実現するにあたって、重要な技術的ポイントは以下のとおりである。

（1）尿素からアンモニアへの転換率の最大化

アンモニア転換率を100%としなければ、薬品使用量の増加を招き、また転換しなかった尿素や中間生成物のシアヌル酸が触媒に析出して触媒活性を低下させるため、100%の転換率とする必要があった。

そのために重要なポイントは、触媒温度と触媒量（空間速度）を適切に見極めることであった。

そこで「2. 開発経緯」①基本性能試験（2014年）の試験装置において、触媒温度および触媒量を変えた運転を実施し、アンモニア転換率を100%とできる条件を把握した。この結果をもとに、実施設における脱硝試験および実機においては、適正な触媒量で装置を設計し、かつ適

正な触媒温度で運転することで、尿素からアンモニアへの転換率を 100%となることを確認した。

(2) 連続運転性

一般廃棄物処理施設は地域の公衆衛生を担う施設であり、容易に停止することができない。特に無触媒脱硝システムはNOxの公害防止基準値を遵守するために必要不可欠なシステムであるため、システムを構成する装置は長期間にわたって連続的に運転できるものとする必要があった。

そのために重要なポイントは、長期間にわたって性能を維持し、万が一性能が低下した際には運転を継続しながらも性能復帰できる機能を備えることであった。

そこで、長期間にわたって性能を維持するため、尿素水の供給量の変動しても触媒温度を所定の温度に維持し、触媒へのシアヌル酸の析出を抑制する温度制御を構築した。また、万が一シアヌル酸が触媒に析出し触媒活性が低下しても、触媒温度を上昇させることでシアヌル酸を分解し、触媒活性を再生する機能を装備した。

特にこの再生を行う機能については、試験当初の「2. 開発経緯」②実施設における無触媒脱硝試験（脱硝性能試験、2014年）では、再生中はアンモニアを生成できないという課題があったが、同③実施設における無触媒脱硝試験（長期間安定運転、2015年）では、設備容量を見直し、再生中でも尿素からアンモニアを生成できるシステムを構築することで、連続運転性能を確保した。

4. 特許の有無

次のとおり、4件の特許を取得済み。

特許番号：第 6381124 号 / 尿素加水分解装置

特許番号：第 5885811 号 / 尿素加水分解装置及びその制御方法

特許番号：第 5859101 号 / 尿素加水分解装置及び尿素加水分解装置の触媒再生方法

特許番号：第 6504613 号 / 尿素加水分解装置

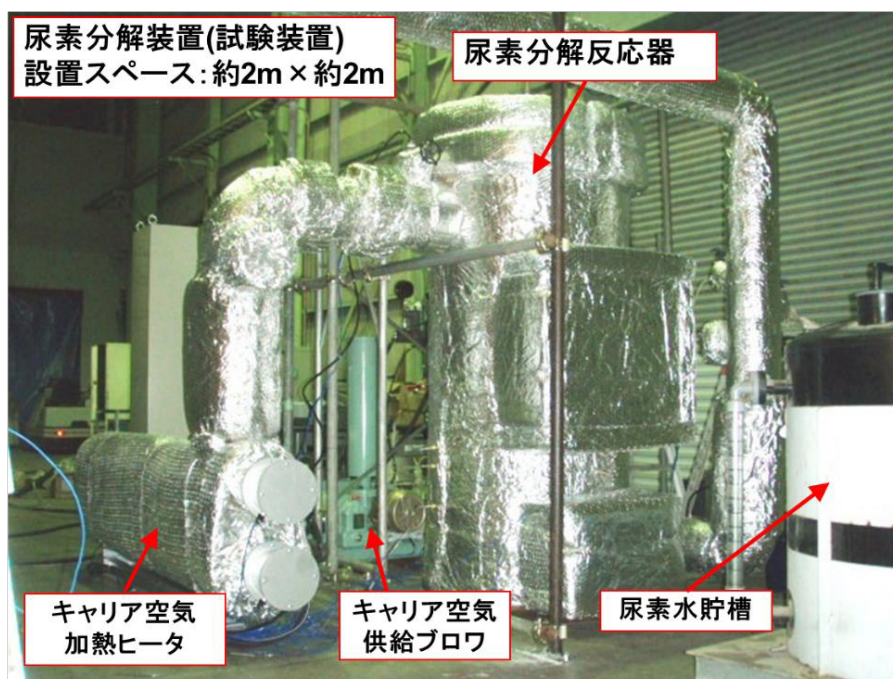
5. 性能

(1) アンモニア転換率

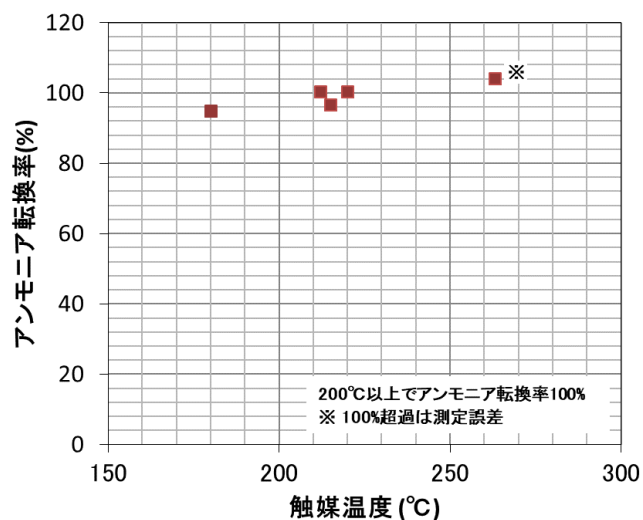
①基本性能試験 (2014年)

実機スケールの試験装置を図表7に示す。この装置を用いて調査したアンモニア転換率と触媒温度の関係を図表8に示す。

図表8に示すとおり、触媒温度が約200℃以上の条件でほぼ100%のアンモニア転換率が得られることを確認した。



図表7 尿素分解装置外観 (試験装置)



図表8 触媒温度とアンモニア転換率

(2) NO_x 除去性能

②実施設における無触媒脱硝試験（脱硝性能試験、2014年）

①で製作した試験装置を実施設(ストーカ式 200t/日/炉)に設置し、無触媒脱硝試験を行った結果を図表 9 に示す。本試験では、尿素水供給量比と NO_x 除去率の関係から、既設の尿素水噴霧方式と本システムの NO_x 除去性能を比較した。尿素水供給量比とは、尿素水噴霧時(ブランク)に 30%の NO_x 除去率が得られる尿素水供給量を 1.0 とした値である。

本試験においては、同じ NO_x 除去率 30%となる尿素水供給量比は約 0.5 であったことから、尿素水噴霧方式に比べて尿素水使用量を 50%程度削減できた。

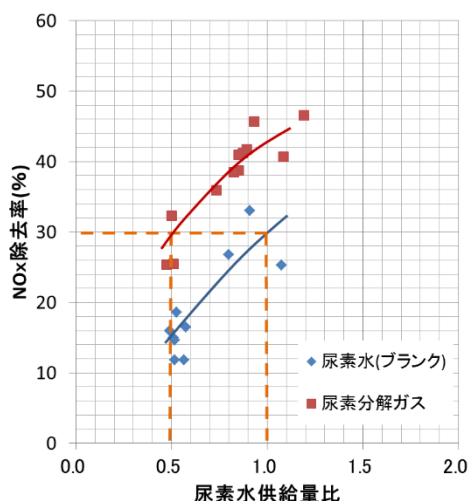
また、アンモニア噴霧方式では、尿素供給量比 1.0 のとき NO_x 除去率が 45%程度となることがわかっている。本試験でも尿素供給量比 1.0 のとき NO_x 除去率が 40~45%程度であり、アンモニア噴霧方式と同等の高い NO_x 除去性能が得られることを確認した。

③実施設における無触媒脱硝試験（長期間安定運転、2015年）

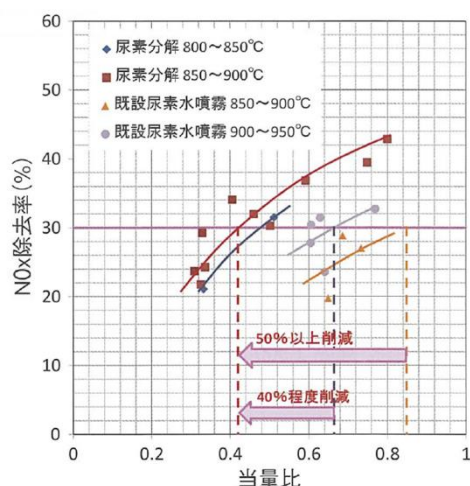
①で製作した試験装置を、②とは別の実施設(ストーカ式 270t/日/炉)に設置し、無触媒脱硝試験を行った結果を図表 10 に示す。本試験では、脱硝剤の当量比と NO_x 除去率の関係から、既設の尿素水噴霧方式と本システムの NO_x 除去性能を比較した。また、噴霧点の燃焼室ガス温度別に NO_x 除去性能を確認した。

図表 10 より、例えば当量比 0.8 のとき本システムの NO_x 除去率は約 40%が得られたが、これはアンモニア噴霧方式の除去率とほぼ同程度であり、本システムで高い NO_x 除去率を実現できることを確認した。

また、NO_x 除去率 30%の条件で、同じ燃焼室ガス温度(850~900℃)で比較すると、尿素水噴霧方式に対し、本システムの方が尿素水使用量を 50%以上削減できた。また、尿素水噴霧方式の反応効率が低い燃焼室ガス温度(900~950℃)と比較しても 40%程度削減できた。



図表 9 NO_x 除去性能(無触媒脱硝試験 STEP2)



図表 10 NO_x 除去性能(無触媒脱硝試験 STEP3)

④実機導入（2021年）

最新の一般廃棄物処理施設である太田市外三町広域清掃組合クリーンプラザ(2021年竣工、施設規模：ストーカ式 165t/日/炉×2 炉)に尿素分解装置を用いた無触媒脱硝システムの1号機を納入し、実機において本システムのNOx除去性能を確認した結果を図表11に示す。図中には他施設のアムモニア噴霧式無触媒脱硝システムにおけるNOx除去性能を併せて示す。

発生NOx濃度50～60ppm、尿素分解ガスの噴霧温度850～900℃において、本施設の無触媒脱硝システムにおけるNOx除去性能は、アンモニア当量比0.4～0.6でNOx除去率20～40%であり、他施設のアムモニア噴霧式無触媒脱硝システムにおけるNOx除去性能と同等であることを確認した。

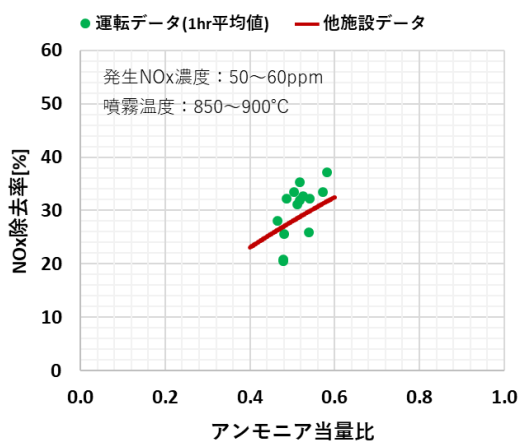
(3) 再生工程による尿素分解性能維持

②実施設における無触媒脱硝試験（脱硝性能試験、2014年）

③実施設における無触媒脱硝試験（長期間安定運転、2015年）

連続運転試験において通常運転では触媒が劣化しないことを確認したが、試験的に触媒表面温度を低下させて白色固形物を析出させ、強制的に触媒の活性を低下させた後に触媒再生試験を実施した。尿素分解触媒の再生は、反応器への尿素水の供給を停止した後に反応器内部を昇温し、触媒表面に析出したシアヌル酸を分解除去することにより行った。

触媒表面には白色固形物(シアヌル酸)が付着していたが、このシアヌル酸を30分程度の昇温による触媒再生運転で分解除去できることを確認した。また、触媒再生運転により触媒の活性が初期性能まで復帰し、繰り返し再生が可能なことも併せて確認した。



図表11 NOx除去性能（実機）

④実機導入 (2021年)

約6ヶ月の運転期間において触媒性能は維持していたが、尿素分解触媒の再生が正常に機能するか確認するため、尿素分解触媒の再生を行った。図表12に尿素分解装置の再生工程前後におけるトレンドデータの一例を示す。尿素水は触媒中心に向けて噴霧しているが、運転にともないシアヌル酸が触媒表面に析出すると、触媒表面の中央部と外周部に温度差が生じる。この温度差を触媒表面温度差とし、熱電対で検出した。

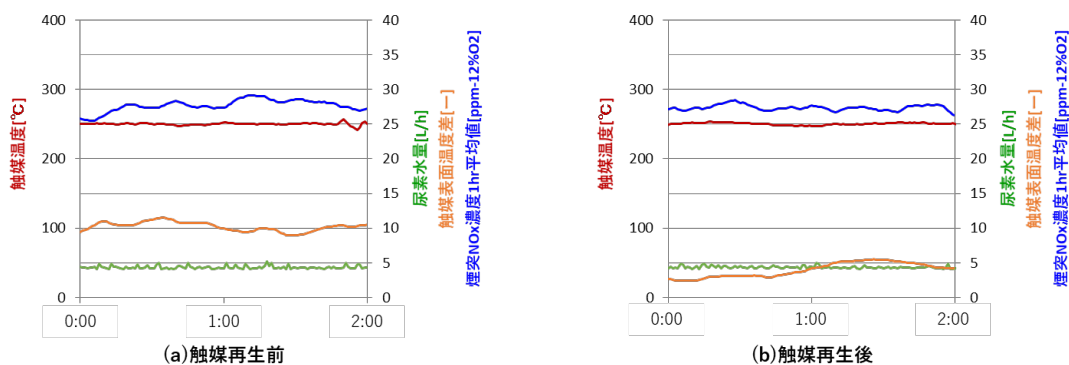
触媒再生前の触媒表面温度差の平均値を10とすると、触媒再生後の触媒表面温度差は約4となった。触媒再生前後で煙突NO_x濃度や尿素水量はほとんど変わっていないことから、触媒表面温度差は再生工程によって少なくなったと考えられる。

再生工程で反応器内温度を上昇させることにより、触媒表面温度差が少なくなったことから、再生工程によって、触媒表面に析出したシアヌル酸を分解できていると考えられ、本工程が正常に機能していることを確認した。また、触媒再生中も反応器への尿素水の供給は継続したが、煙突NO_x濃度は大きく上昇することなく、安定して炉内の脱硝ができた。

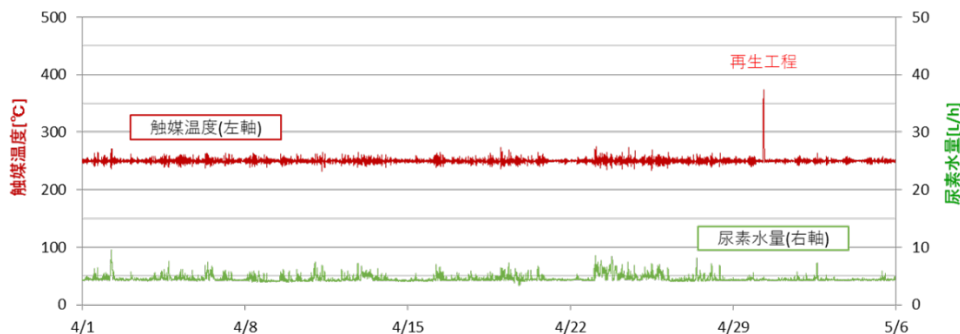
(4) 長期安定運転

④実機導入 (2021年)

図表13に尿素分解装置の約1か月の連続運転における触媒温度および尿素水量のトレンドデータの一例を示す。触媒温度は制御設定温度250℃とした。発生NO_x濃度の変動に伴い、反応器に供給される尿素水量が変動するが、触媒温度は250℃±20℃の範囲で安定している。図表13に示した期間以降も順調に運転し、4/1から6か月以上が経過しても安定運転を継続しており、尿素分解装置を長期間安定して運転できることを確認した。



図表12 再生工程前後のトレンドデータ(例)



図表13 尿素分解装置のトレンドデータ(例)

(5) 従来方式との比較

耐久性・安全性、運転・操作性、維持管理等の性能について、従来方式と新方式との比較表を図表 14 に示す。

図表 14 性能比較表

項目	【従来方式】 アンモニア噴霧による 無触媒脱硝システム	【新方式】 尿素分解装置を用いた 無触媒脱硝システム
耐久性	同等 (装置上、耐久性は高い)	同等 (装置上、耐久性は高い)
安全性	アンモニアは劇物に指定され、取扱いに注意を要する。 また、アンモニア漏洩対策設備の設置が必要。	安全な尿素を使用するため、取扱いは容易。 また、アンモニア漏洩対策設備の設置が不要
運転・操作性	同等 (NOx 濃度に応じて、アンモニア供給ポンプの周波数を自動制御)	同等 (NOx 濃度に応じて、尿素水供給ポンプの周波数を自動制御)
維持管理性	無触媒脱硝システムの維持管理だけでなく、アンモニア漏洩対策設備のメンテナンスが必要	無触媒脱硝システムの維持管理のみ
届出	必要 (アンモニアの使用に対し、消防署や労働基準監督署へ届出が必要)	不要

6. 経済性

尿素分解装置を用いた無触媒脱硝システム(新方式)について、経済性を試算した結果を図表15および図表16に示す。

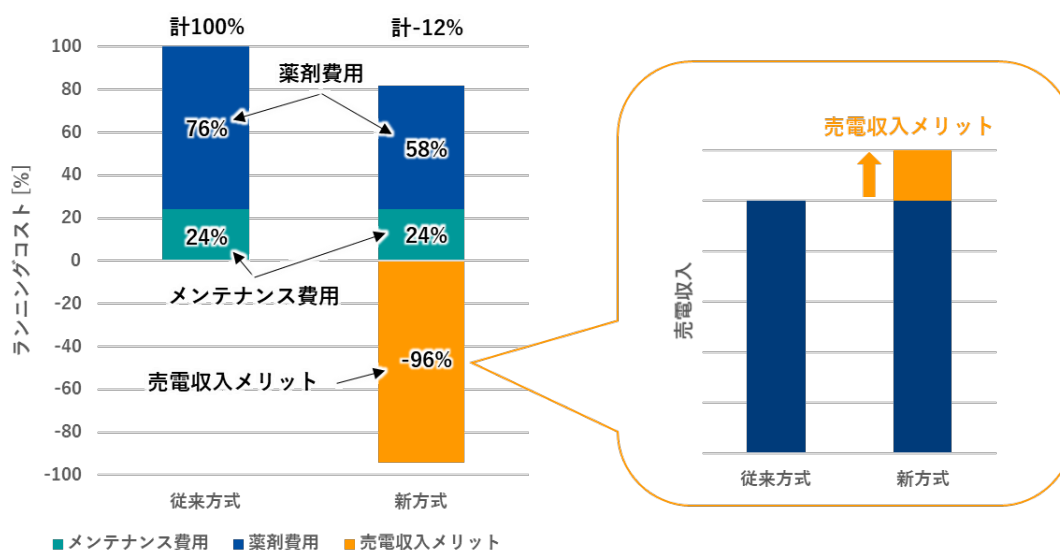
本試算における施設規模は100t/日/炉×2炉のストーカ式焼却炉を想定し、NOx除去率は33%程度(発生NOx濃度60ppmに対して煙突NOx濃度40ppm)とした。試算対象は、近年の厳しいNOx排出規制にも対応できるアンモニア水噴霧方式(従来方式)と新方式を比較した。また比較を容易にするため、イニシャルコストは従来方式を100%として、またランニングコストは、従来方式のランニングコストの合計を100%とした。

(1) イニシャルコスト(従来方式を100%とした)

新方式は尿素分解装置の設備費用が増加するが、アンモニア漏洩対策設備費用が不要になるため、従来方式と比較して設備費用は32%安価となる。

図表15 経済性試算

項目	従来方式	新方式
イニシャルコスト		
設備費用	100%	68%
		32%削減
ランニングコスト		
薬剤費用	76%	58%
		24%削減
メンテナンス費用	24%	24%
売電収入メリット*	—	-94%
合計	100%	-12%



図表16 ランニングコスト試算

(2) ランニングコスト(従来方式のランニングコスト合計を100%とした)

薬剤費用は、新方式はアンモニア水よりも安い尿素水を使用するため、従来方式と比較して薬剤費用が24%程度削減できる。

メンテナンス費用は、従来方式はアンモニア漏洩対策設備のメンテナンスが必要となるが、新方式では尿素分解装置のブロワやヒータのメンテナンスが必要となるため、従来方式と同程度となる。

次に売電収入メリットに関しては、従来方式では炉内へアンモニア水を噴霧するため、キャリア水が必要となるが、新方式ではこのキャリア水が不要となりボイラ蒸発量が増加するため、発電量が増加する。一方で、新方式は尿素分解装置のブロワやヒータにより消費電力は増加するが、発電量が増加する効果が大きく、結果として売電収入は大幅に増加する。この売電収入メリットをランニングコストとして評価すると、薬剤費用やメンテナンス費用を上回り、ランニングコストがマイナス(収益側)に転ずることとなり、大幅な売電収入メリットが得られることが分かる。

このように尿素分解装置を用いた無触媒脱硝システムは、従来のアンモニア水噴霧方式よりイニシャルコストを大幅に削減し、ランニングコストを上回る大幅な売電収入メリットが得られるため、経済性においても非常に優れたシステムであると言える。

7. 将来性

本システムは、一般廃棄物焼却施設を中心として3件の受注実績(内1件が納入済み、2件は設計中)を有している。尿素分解装置は無触媒脱硝法だけでなく、触媒脱硝法にも適応可能であり、厳しいNOx排出規制に対応しつつ高効率発電に寄与できる点を訴求することにより、今後新規の一般廃棄物焼却施設において採用拡大が期待される。

加えて、本システムは、既存施設でも容易に導入が可能であり、さらには一般廃棄物焼却施設に限らずアンモニアを使用している産業廃棄物焼却施設や、ボイラ・発電施設に対しても導入可能であるため、より一層の普及が見込まれる。

日本産業機械工業会会長賞
「使用薬品（次亜塩素酸）を電解自家生成で
賄う脱臭装置（ISEC 式）」
株式会社一芯

1. 装置の詳細説明

本申請装置は、主にし尿処理場、下水処理場、ゴミ処理場で利用される脱臭装置である。

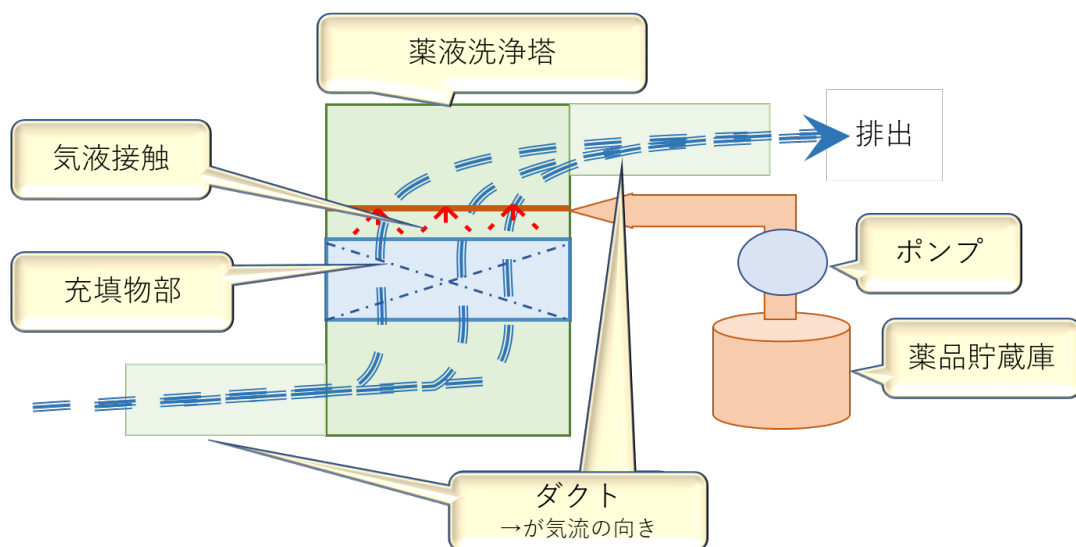
上記のような施設では一般的に、生物脱臭法・薬液洗浄法・活性炭吸着法をそれぞれ適宜組み合わせた複合装置が利用される。本方式は、この中の薬液洗浄法について、従来購入・保管していた次亜塩素酸ナトリウム（以下、次亜塩と呼ぶ）を反応副成物である食塩を電気分解して自家生成する、資源循環プロセスを内包したシステムである。

本装置の詳細説明に入る前に、薬液洗浄法の基本的な方式と考え方を説明しておく。

(1) 薬液洗浄法の基本構造

薬液洗浄法とは、主に以下のような特徴を持つ方式である。

- ・臭気ガスを、塔内（薬液洗浄塔と呼ぶ：図表 1）にて化学薬品と反応させ無臭化する。
- ・臭気ガスは気相・薬品は液相であるが、気液接触効率を高めるために、内部に充填物を充填する。充填物はプラスチック製であったり、セラミック製であったりと、各社により異なる。
- ・上記のような施設では、主にアンモニア・硫化水素・トリメチルアミン・メチルメルカプタン・硫化メチル・二硫化メチルを対象としている装置がほとんどである。



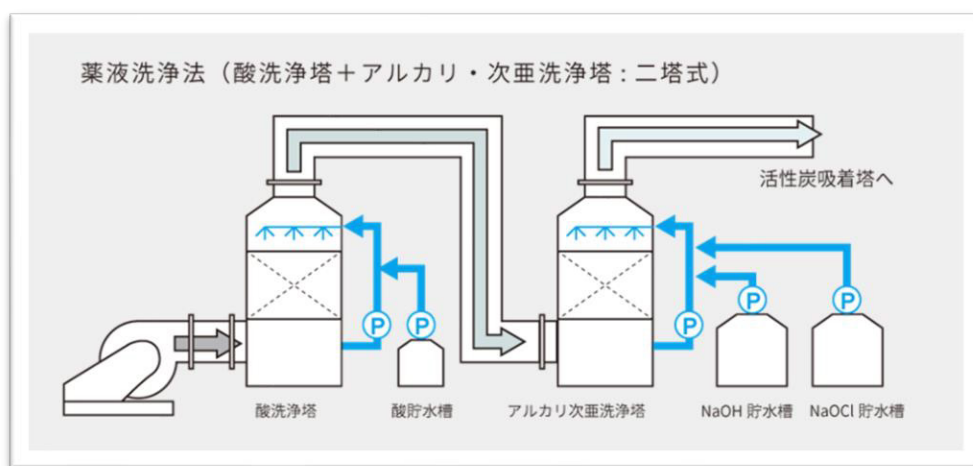
図表 1 薬液洗浄塔の基本構造

(2) 現在主流の方式の特徴

現在主流である、酸洗浄塔とアルカリ・次亜洗浄塔からなる二塔式の基本構造を図表 2 に示す。この方式では、アンモニア及びトリメチルアミンは酸洗浄塔にて硫酸で除去し、硫化水素・メチルメルカプタン・硫化メチル・二硫化メチルはアルカリ・次亜洗浄塔にて次亜塩にて除去している。

運転時の pH 値は概ね酸洗浄塔において pH2.0 前後、アルカリ・次亜洗浄塔において pH9.5～11.0 程度である。

この場合、塔内では化学反応は、図表 3 のような反応がそれぞれ起こっている。



図表 2 現在主流である、酸洗浄塔＋アルカリ・次亜洗浄塔：二塔式の基本構造

図表 3 二塔式薬液洗浄法での塔内での反応

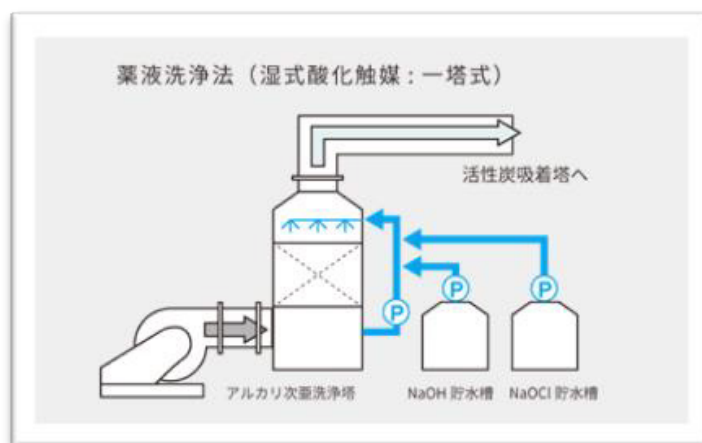
酸洗浄塔内	
アンモニア	$2\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
トリメチルアミン	$2(\text{CH}_3)_3\text{N} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow ((\text{CH}_3)_3\text{NH})_2\text{SO}_4$
アルカリ・次亜洗浄塔内	
硫化水素	$\text{① } \text{H}_2\text{S} + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{S} + 2\text{H}_2\text{O}$ $\text{② } \text{Na}_2\text{S} + \text{NaOCl} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{S} + \text{NaCl} + 2\text{NaOH}$ $\text{③ } \text{Na}_2\text{S} + 4\text{NaOCl} \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 + 4\text{NaCl}$ ※ 弱酸性物質である H_2S は、先に式①により Na_2S を生成する。 次に式②、③に従って次亜塩素酸ソーダと反応し、イオウと硫酸ナトリウムと生成する
メチルメルカプタン	$\text{CH}_3\text{SH} + 3\text{NaOCl} + \text{NaOH} \rightarrow \text{CH}_3\text{SO}_3\text{Na} + 3\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$
硫化メチル	$(\text{CH}_3)_2\text{S} + 2\text{NaOCl} \rightarrow (\text{CH}_3)_2\text{SO}_2 + 2\text{NaCl}$
二硫化メチル	$(\text{CH}_3)_2\text{S}_2 + 5\text{NaOCl} + 2\text{NaOH} \rightarrow 2\text{CH}_3\text{SO}_3\text{Na} + 5\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$

(3) 当社標準の薬液洗浄法

当社の一塔式薬液洗浄塔の模式図を図表4に示す。当社では、充填物をセラミック製湿式酸化触媒とし、反応効率を飛躍的に向上させることでアルカリ・次亜洗浄塔においてアンモニア・トリメチルアミンも除去可能とし、既に酸洗浄塔を不要とする一塔式を標準化している。

運転時のpH値は概ねアルカリ・次亜洗浄塔内でpH8.5～9.0程度である。

この方式では、塔内で図表5のような反応が起こっている。



図表4 当社標準の一塔式薬液洗浄塔 模式図

図表5 当社標準の一塔式薬液洗浄塔内での反応

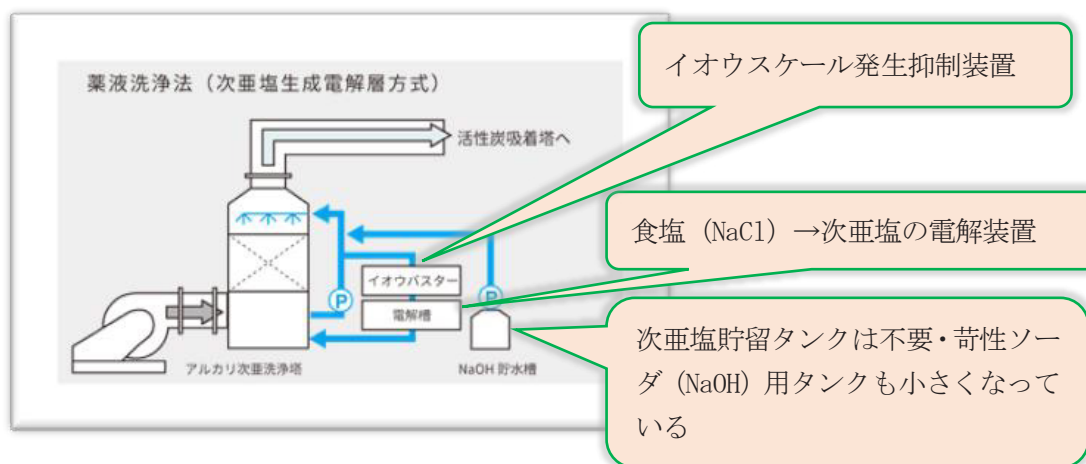
アルカリ・次亜洗浄塔内（一塔式）		
硫化水素		$\text{H}_2\text{S} + 4\text{NaOCl} + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 + 4\text{NaCl} + 2\text{H}_2\text{O} \quad (4/5)$ $\text{H}_2\text{S} + \text{NaOCl} \rightarrow \text{S} + \text{NaCl} + 2\text{H}_2\text{O} \quad (1/5)$
メチルメルカプタン		$\text{CH}_3\text{SH} + 3\text{NaOCl} + \text{NaOH} \rightarrow \text{CH}_3\text{SO}_3\text{Na} + 3\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$
硫化メチル		$(\text{CH}_3)_2\text{S} + 2\text{NaOCl} \rightarrow (\text{CH}_3)_2\text{SO}_2 + 2\text{NaCl}$
二硫化メチル		$(\text{CH}_3)_2\text{S}_2 + 5\text{NaOCl} + 2\text{NaOH} \rightarrow 2\text{CH}_3\text{SO}_3\text{Na} + 5\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$
アンモニア		$2\text{NH}_3 + 3\text{NaOCl} \rightarrow \text{N}_2 + 3\text{NaCl} + 3\text{H}_2\text{O}$
トリメチルアミン		$2(\text{CH}_3)_3\text{N} + 21\text{NaOCl} \rightarrow \text{N}_2 + 6\text{CO}_2 + 21\text{NaCl} + 9\text{H}_2\text{O}$
炭酸ガス（※）		$\text{CO}_2 + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$
		<p>（※）し尿・下水処理場の臭気は概して大気中の10から30倍程度の炭酸ガス濃度となる。このため、苛性ソーダの消費ロスが大きくなる。これは薬品使用コストに大きく効いてくるため、あえて記載した</p>

(4) ISEC 式脱臭装置

本装置 (ISEC 式脱臭装置) の模式図を図表 6 に示す。本装置では、図表 7 の NaCl に着目した。

海水の電気分解による次亜塩生成は離島などで広汎に使われているシステムである。

本装置ではこの海水電解法を応用し、臭気ガスと次亜塩素酸の反応副成物である食塩 (NaCl) を電気分解することで次亜塩 (NaOCl) を再生成し、これを主反応に用いるという資源循環プロセスを脱臭装置に組み込んだ。運転時の pH 設定値は任意である。



図表 6 ISEC 式脱臭装置 模式図

図表 7 ISEC 式脱臭装置内での反応

アルカリ・次亜洗浄塔内 (ISEC式)		
アルカリ・次亜洗浄塔内 (ISEC式)	硫化水素	$H_2S + 4NaOCl + 2NaOH \rightarrow Na_2SO_4 + 4NaCl + 2H_2O$ (4/5) $H_2S + NaOCl \rightarrow S + NaCl + 2H_2O$ (1/5)
	メチルメルカプタン	$CH_3SH + 3NaOCl + NaOH \rightarrow CH_3SO_3Na + 3NaCl + H_2O$
	硫化メチル	$(CH_3)_2S + 2NaOCl \rightarrow (CH_3)_2SO_2 + 2NaCl$
	二硫化メチル	$(CH_3)_2S_2 + 5NaOCl + 2NaOH \rightarrow 2CH_3SO_3Na + 5NaCl + H_2O$
	アンモニア	$2NH_3 + 3NaOCl \rightarrow N_2 + 3NaCl + 3H_2O$
	トリメチルアミン	$2(CH_3)_3N + 21NaOCl \rightarrow N_2 + 6CO_2 + 21NaCl + 9H_2O$
	炭酸ガス (※)	$CO_2 + 2NaOH \rightarrow Na_2CO_3 + H_2O$
電解槽内		
次亜塩の生成	$NaCl + H_2O \xrightarrow{\text{電気分解}} NaOCl + H_2$	電解槽内で、洗浄塔内で副生成された NaCl を次亜塩 (NaOCl) へと再生成する。

2. 開発経緯

(1) 開発経緯（本装置開発開始～実稼働）

処理場の運営体職員や実際の運転員と対話を重ねる中で、現在の彼らの悩みは脱臭性能が担保されていることを前提として、コストダウンと省スペース化にあることを知った。また、複数の離島の現場に行った際、特に上水などで多量の次亜塩素酸を使う場合には薬品輸送に課題があるため海水の電気分解による次亜塩素酸生成が広く行われていることを知った。

これらにヒントを得て、食塩の電気分解による次亜塩素酸自家生成を脱臭装置内にインライン化し循環的にすることで、コストダウン・省スペース化両方の課題に応えることができるのではないかというアイデアに至った。本装置は以下のようなスケジュールで実機稼働にまで至った。

2014年4月～	「海水電解法」の脱臭装置への組込み検討開始
2015年2月～	電解装置の電極形状による次亜塩素酸発生量評価及びコスト比較
2015年10月～2016年1月	テスト機・テスト用電解装置製作
2016年2月～2017年2月	自社試験・テスト機改良
2017年5月～2017年9月	関東地方 某バイオマスセンターにおける実証試験
2017年3月～2018年3月	長崎市 三重下水処理場における実証試験
2019年12月～2020年2月	長崎市 西部下水処理場における実証試験（環境省 ETV 事業）
2020年3月	西条市 ひうちクリーンセンターへ第1号機納入

(2) 共同開発

無し

(3) 技術導入

無し

3. 独創性

本方式の独創性は、次の二点である。この二つの必要性を、下記に説明する。

- ・薬液洗浄塔が1塔式であること
 - ・次亜塩素酸をインラインで食塩電解により自家生成する資源循環装置であること
- また、これにより薬品貯留槽がほぼ不要となること

(1) 課題の整理

上述したとおり、本方式は課題解決型アプローチによって産み出されたものである。過去から現在までの脱臭装置が抱える課題を重要度順に整理すると、下記のとおりとなる。

- 1) 性能担保の信頼性
- 2) 運転コスト
- 3) 省スペース化
- 4) 更新コスト

(2) 課題1及び2についての説明

一般に、臭気ガスは常時同レベルの濃度で排出されると誤解されがちだが、実際にはそうではない。例えばし尿処理場ならばバキュームカーが入場し、し尿受入槽にし尿を投入した直後、下水処理場では特定の時間帯（人々や企業などが水道を多く使う時間）にピークを迎える。図表8は実際の某所での日中時系列の硫化水素濃度変化のデータ例であるが、硫化水素濃度が一定ではないことが明らかである。

なお、図表8では、下の線を当初設計時の運転条件設定濃度とし、上の線を実際に運転した場合での最大濃度での運転条件設定濃度として示している。

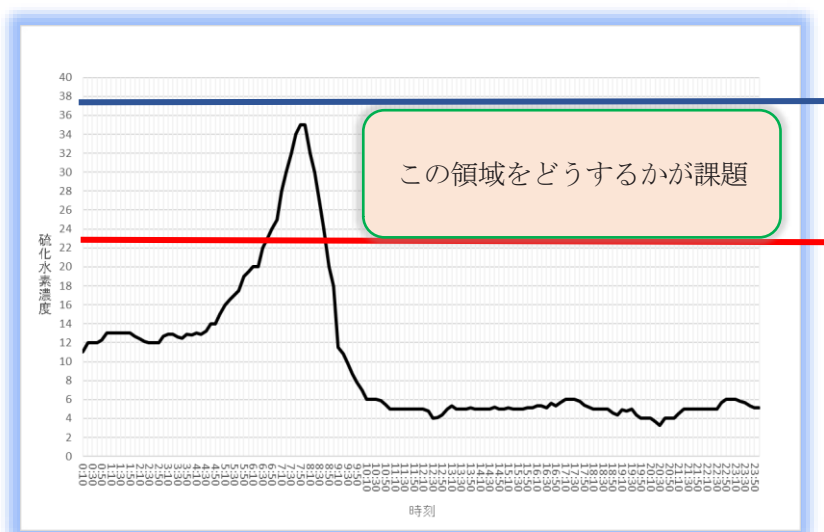
当初設計時より何らかの要因（人口の増減や対象地域の産業構造の変化・気候変動など）により臭気ガス濃度が上がった場合、当初設計時の設定濃度での運転では赤線より上の部分は薬液洗浄塔では処理できず（課題1）、後段の活性炭塔に過負荷をかけることになる。（その結果、当初の設定よりも活性炭の交換頻度が増えるという現象も発生している（課題2）。）

一方で、最高濃度で運転した場合、図表8の二線間の部分が当初の設定より薬品を多く使うことになる（課題2）。

(3) 課題3及び4についての説明

脱臭装置に関する技術的対策がほぼ確立され、いわゆる Not In My Back Yard (NIMBY：ニンビー、施設の必要性は認めるが、我が家の近くにあると忌避感をおぼえる施設) といわれる施設からの悪臭苦情が少なくなった 1990 年代ごろには、既に脱臭装置の省スペース化は今後業界が乗り越えるべき課題として挙げられてきた。脱臭設備は何かを生産するわけではなく、一般的にはその施設の本質的な機能ではなく付帯機能であり、付帯機能に係る資源配分は少ない方がいい（課題3）、という考え方からである。

また、脱臭設備は概ね 15 年～20 年程度の耐用年数を想定して当初設計されている。しかし、国庫財源の問題から、内閣府はじめ各中央官庁はインフラ長寿命化計画を運用している。これによれば、脱臭装置は、重要度中程度の付帯設備に分類され、出来るだけ補修により長く使うが比較的優先的に更新することとなっている。



図表8 臭気ガス濃度の経時変化

この際問題となるのが、スペースの問題である。当然、当該施設に悪臭公害防止機能は必要であり、脱臭設備更新中には既設・暫定・更新各設備をうまくスペース的に取り廻さないと更新そのものが出来かねるという状況になる（課題3）。また、財源的にも設置コストの負担が少ない方が望ましい（課題4）。

（4）各課題への対応（湿式酸化触媒の開発）

かつては薬液洗浄塔の充填物にはプラスチック製のものが汎用的に採用されていた。しかし、プラスチックには保水性がないため、本来機能である気液接触効率を上げるといった機能を果たすだけに留まっていた。そこで充填物そのものを多孔質とし、保水性を持たせることで、薬液を充填物に保持でき、一時的な高濃度臭気にある程度対応できるのではないかとこの着想を得た。

さらに、金属酸化触媒を含有すれば従来のプラスチック充填物よりも飛躍的に反応効率が良くなるのではないかと考えた。充填物には耐薬品性が要求されるため、木材・綿花などの天然素材は使用できない。このことから、耐薬品性・機械的強度を有する素材としてセラミック素材を選定した。こうして多孔質で保水性を有するセラミック製の湿式酸化触媒を薬液洗浄塔の充填物として開発するという目標を持つに至った。

多孔質のセラミックということは技術的に非常に難しい。一般に高温焼成するとセラミック素材はガラス化し、滑らかになってしまうためである。これを回避するために、活性炭やポリエチレン、スチロール、おが粉、でんぷん、軽石などを混ぜ合わせた材料にて焼成試験を繰り返した結果、一定の材料を高温（1,000～1,200℃）で焼成することで、保水性と耐薬品性を持つセラミック製酸化触媒を完成させた。

（5）各課題への対応（1塔式洗浄塔の開発）

その後の環境変化により、また配合比率の変更による触媒効率の向上や形状変更による気液接触効率向上などの試行錯誤を経て、1塔式薬液洗浄塔を開発、以後弊社標準として現在に至っている（1塔式洗浄塔）。

（6）各課題への対応（電解次亜生成法（ISEC式）の開発）

上述までのアプローチで、ある程度までは課題1～4に対する解決を一旦導き出したものの、その後の気候変動や国のインフラ長寿命化計画により、更なる省スペース化及び各段階でのコストダウンが求められるようになった。

現在主流となっている薬液洗浄方式では、薬品を購入・保管することが前提となっており、弊社標準の湿式酸化触媒方式もこれを踏襲している。更なる省スペース化を図るためには、機器類やダクト・配管類の極小化が効果的である。脱臭設備のうち、薬品貯留槽及びその配管類は大きな割合を占めており、また運転コストの多くは薬品購入量であるため、次亜塩を自家生成することで課題1を担保しつつ課題2～4に更に強烈的な解決案を示すことができると考えた。

（7）本装置の開発にあたっての諸課題

薬液洗浄塔に、インライン循環にて次亜塩自家生成用電解槽を組み込むために、主な課題となったのは下記のとおりである。

- ・電極選定、使用する向き（縦型・横型）

- ・ハウジング形状・構造及び漏水防止対策シール部に使用するパッキンの材質・形状
- ・循環水の流入・流出方法及び本体脱臭装置との接続方法
- ・使用する処理場の規模により次亜塩の必要量が大幅に異なるため、次亜塩必要量クラスを8段階に分け、それぞれに対応できるハウジングの製作可否
- ・食塩の電気分解に伴い発生する水素が、電解槽ハウジングに滞留しないようにするための排气方法
- ・電解槽ハウジング内で電極に対して均一に循環水を流す方法

いずれも、複数回にわたり且つ地理的にも離れた条件でテストすることによってクリアし、2020年3月に第1号機を納入することができた。すなわち、課題1を担保しつつ課題2~4に対応するという当初の目的を達成した。

(8) 新たな価値の創出

本装置にて電解次亜塩が購入次亜塩と遜色ない作用があることをテストで確かめていくうちに、従来薬液洗浄法では除去できないとされてきたアルデヒド類臭気の除去が本方式ではできることが分かった。

これは、購入次亜塩と電解次亜塩の状態の差に起因するものである。図表9に購入次亜塩と電解次亜塩の比較の比較を簡単にまとめる。

購入次亜塩素酸ナトリウムは、そもそも不安定な物質であるため、逆反応による分解反応を起こしやすい。そのため、販売・貯蔵する際には分解抑制剤として通常苛性ソーダを添加している。このためアルカリ域にある。したがって、従来の購入次亜塩素酸ナトリウムを使用する薬液洗浄塔内も、当然アルカリ域にあり、通常pH9.5~11付近で運転される。

ところが、本装置にて用いる電解次亜塩は、作った分を貯蔵することなくその場で利用するいわば取って出しのような利用方法になる。このため、逆反応の心配をする必要がなく、当然苛性ソーダも添加する必要がない。

なお、ここまでの論では、「次亜塩素酸ナトリウム」を「次亜塩」として表記してきたが、厳密に言えば電解次亜塩は次亜塩素酸水（酸性）と次亜塩素酸ナトリウム（アルカリ性）の混成状態であり、pH7~8前後をうろうろしていると推定している。

このことはすなわち、本装置では次亜塩素酸ナトリウムのみならず次亜塩素酸水も、臭気成分除去に利用される場合があるということだが、一般に「次亜塩素酸水」の殺菌力は「次亜塩素酸ナトリウム」の80倍とされ、非常に酸化力が強い物質である。この酸化力の強さと、前述の湿式酸化触媒の触媒力を相乗させ、更に中性付近での運転を行うことによって従来の洗浄塔では除去できなかった安定性の高いアルデヒド類の除去が可能という新しい価値を創出することとなった。

図表9 購入次亜塩と電解次亜塩の比較

	電解次亜塩	購入次亜塩
薬液洗浄塔内での次亜塩の状態	次亜塩素酸と次亜塩素酸ナトリウムの混成状態	次亜塩素酸ナトリウム＋苛性ソーダ（安定剤として）
pH域	中性域付近	アルカリ域

(9) まとめ

ここまでをまとめると、従来は「利用薬品を自家生成で賄い、購入・保管しない」という発想そのものが全くなく、脱臭システムとしてインライン化したことは極めて独創的であり、それにもなつて従来除去できなかったアルデヒド類の除去を可能とした点は大きな価値があると考えている。

4. 特許の有無

次のとおり、特許3件を取得済み、1件を出願中。

特許番号：第6430451号 / 名称：湿式脱臭装置および脱臭方法

特許番号：第5756307号 / 名称：触媒塔及びこれを用いた湿式脱臭装置

特許番号：第5824569号 / 名称：湿式脱臭装置のメンテナンス方法

公開番号：特開2019-058655 / 名称：湿式脱臭装置及び脱臭方法

5. 性能

一般に、脱臭装置とは悪臭公害防止のための仕組みである。こうした観点から見た場合、本方式がターゲットとしているし尿・下水・ごみ処理場における従来方式の性能満足率は図表10のとおり非常に高く、実数で二桁、割合も悪臭苦情全体の0.3%程度と非常に低い。

ただし、従来の薬液洗浄法では運転pH域の問題から、アルデヒド類が除去できないという課題があった。上述したとおり、本方式では運転pH域を任意で設定できる。中性域で運転すればアルデヒド類の除去が可能であることが試験中に実証された（図表11）。

あわせて、中性域で運転することで、従来起こっていた臭気中の炭酸ガスと苛性ソーダとの反応が大幅に削減され、苛性ソーダの消費ロスがほぼなくなる。

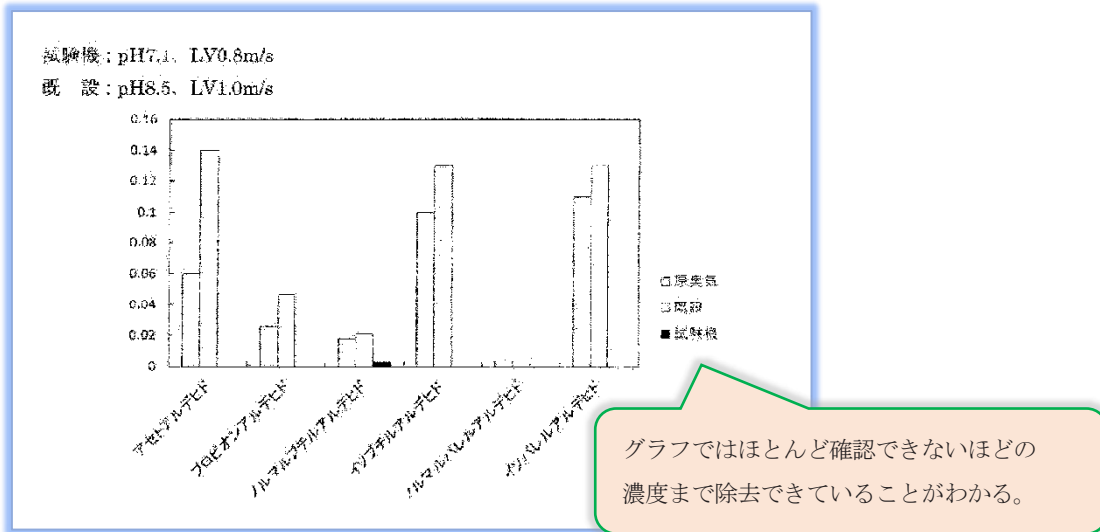
また、中性域で運転した場合でも従来ターゲットとしていた臭気ガスに対しても、弊社標準である一塔式の薬液洗浄法と同等もしくはそれ以上の結果が試験によって実証された（図表12）。

つまり、性能面を総合的に見て、本方式は従来の薬液洗浄方式や当社標準方式の1塔式薬液洗浄塔よりも優れた装置であると言える。

図表10 業種別悪臭苦情処理状況（規制区域内・規制区域外合計）

業 種	行政対応	苦 情 数	立 入 検 査
サービス業・その他	廃棄物最終処分場	14	2
	ごみ焼却場	25	1
	下水処理場	5	0
	し尿処理場	6	1
	飲食店	669	185
	その他	1,123	169
	野 外 焼 却	3,593	361
	そ の 他	3,713	234
	合 計	12,020	1,496

（出典）環境省：令和元年度悪臭防止法施行調査



図表 11 関東地方 某バイオマスセンターでの実証試験結果抜粋
 アルデヒド類の除去について

図表 12 ETV 実証試験結果

3. 実証結果

3.1 実証結果の概要

実証結果の概要は、ISEC 式の脱臭装置と湿式酸化触媒洗浄方式の脱臭装置の入口と出口の悪臭物質の除去率を比較したところ、メチルメルカプタン、硫化水素、硫化メチル、二硫化メチルの除去率はいずれも湿式酸化触媒洗浄方式の脱臭装置の除去率と同等もしくはそれ以上の結果が得られた。

(出典：環境技術実証事業 実施報告書概要版 p. 3：実証番号 150-1901)

5. 試験結果

5.1 悪臭物質の除去率

試験は経時変化をみるため、12月から2月の間に3回実施した。悪臭物質の測定結果を表5-1及び表5-2に示す。

表 5-1 ISEC 式脱臭装置の測定結果

臭気成分	1回目		2回目		3回目	
	入口濃度 (ppm)	出口濃度 (ppm)	入口濃度 (ppm)	出口濃度 (ppm)	入口濃度 (ppm)	出口濃度 (ppm)
アンモニア	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
メチルメルカプタン	0.090	<0.0001	0.13	<0.0001	0.16	<0.0001
硫化水素	1.1	<0.0001	0.33	<0.0001	1.6	<0.0001
硫化メチル	0.016	<0.0001	0.011	<0.0001	0.015	<0.0001
二硫化メチル	0.022	<0.0001	0.014	<0.0001	0.0009	<0.0001
トリメチルアミン	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005

表 5-2 湿式酸化触媒洗浄塔方式脱臭装置の測定結果

臭気成分	1回目		2回目		3回目	
	入口濃度 (ppm)	出口濃度 (ppm)	入口濃度 (ppm)	出口濃度 (ppm)	入口濃度 (ppm)	出口濃度 (ppm)
アンモニア	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
メチルメルカプタン	0.090	0.0001	0.13	<0.0001	0.16	<0.0001
硫化水素	1.1	0.0010	0.33	0.0002	1.6	0.0061
硫化メチル	0.016	<0.0001	0.011	<0.0001	0.015	0.0005
二硫化メチル	0.022	0.0001	0.014	<0.0001	0.0009	0.0007
トリメチルアミン	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005

(出典：環境技術実証事業 実施報告書概要版 p. 22：実証番号 150-1901)

6. 経済性

経済性については、省スペース化、設置・運転コストの低下を下記に示す。

(1) 省スペース化

図表 13 (再掲) を見ると分かるように、本方式では現在主流の薬液洗浄法に比べて、その構成機器が格段に少ない。これは、個別機器の設置場所そのものが小さくなることとともに、装置周りの配管やダクト類に割かれていたスペースが丸々不要となることを意味している。設置面積がどれほど小さくなるかは、その装置や処理場の規模によって大きく違うが、装置全体としての設置面積は概ね 1/2~1/3 程度になる。

(2) 設置コストの削減

稼働中の九州地区某し尿処理場で実際に使われている装置について、従来型と本方式・ISEC 式の両方について設計・設置・運転について試算した。(図表 14~18)

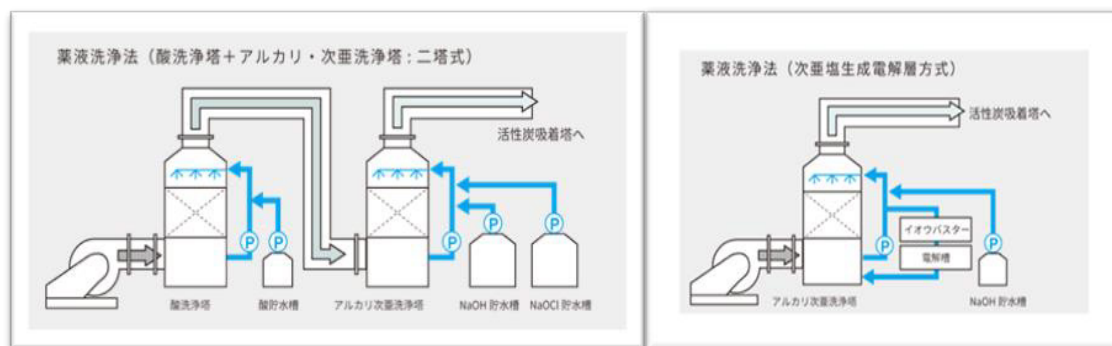
物件の大きさによって大幅に異なるが、上記の試算によると、イニシャルコストは 34.2% の削減となる(図表 17)。ほとんどの物件において、少なくともこの程度の数値を見込めると考えている。また、例えばし尿処理施設やバイオマスセンターのように、建物ごと新設する場合には、この省スペース化により建物の建設コストが削減される可能性が高い。

(3) 運転コストの削減

これも物件の処理風量によって大幅に異なるが、上記の試算によると、使用薬品減少によるコスト削減は、電解槽電気代使用量及び購入食塩代の増分を含めても 72.5% 減となる(図表 18)。

(4) 総コストの削減

耐用年数を 20 年と想定した場合、上記の試算によると設置コスト+運転コスト合計で年間 50.8% の減少となる。ただし、現状では、20 年を超えて利用されている脱臭装置が非常に多く、その場合には設置コストが低減したレベルで平準化されるため、更なるコスト削減効果が期待できる。



(従来式)

(ISEC 式)

図表 13 従来式と ISEC 式の設置スペースの比較

図表 14 試算前提とした仕様

単位：ppm

脱臭風量		60 m ³ /min		
臭質		し尿処理場 中濃度系臭気		
臭気 の 条 件		脱臭装置入口濃度	脱臭装置出口濃度	
		アンモニア	3.0	1.0 以下
		硫化水素	4.0	0.02 以下
		メチルメルカプタン	0.1	0.002 以下
		硫化メチル	0.1	0.01 以下
		二硫化メチル	0.1	0.009 以下
		備考	—	臭気強度 2.5以下

図表 15 構成機器の一覧 (1)

		一般洗浄塔方式	ISEC方式
脱臭ファン		脱臭ファン 一基	
酸洗浄塔	酸洗浄塔本体	1200φ × 3000H 1基	不要
	洗浄塔用循環ポンプ	180ℓ × 1.5Kw 2台	
	酸洗浄塔充填剤	(PP製) 1130ℓ	
	硫酸貯留タンク	0.5m ³ 1基	
	硫酸注入用ポンプ	10cc/min 2台	
	酸洗浄塔計装品	1式	
アルカリ・次亜 塩洗浄塔	アルカリ・次亜塩洗浄塔本体	1200φ × 3800H 1基	1200φ × 3800H 1基
	洗浄塔用循環ポンプ	180ℓ × 1.5Kw 2台	180ℓ × 1.5Kw 2台
	アルカリ・次亜塩洗浄塔充填剤	(PP製) 1800ℓ	(触媒) 1800ℓ
	苛性ソーダ貯留タンク	3.0m ³ 1基	0.5m ³ 1基
	苛性ソーダ注入用ポンプ	120cc/min 2台	10cc/min 2台
	アルカリ・次亜塩洗浄塔計装品	1式	1式
	次亜塩貯留タンク	1.0m ³ 1基	不要
	次亜塩注入用ポンプ	40cc/min 2台	
	次亜塩生成電解槽	—	2型 × 1基
	イオウ・パスター	—	3型 × 1基

図表 16 構成機器の一覧（2）及び運転条件

		一般洗浄塔方式	ISEC方式
脱臭ファン		脱臭ファン 一基	
酸洗浄塔	充填剤	プラスチック充填剤	不要
	酸洗浄塔 pH	2.5～3.5	
アルカリ・次亜塩素酸洗浄塔	充填剤	プラスチック充填剤	湿式酸化触媒（セラミック製）
	洗浄塔 pH	10.0～10.5	7.0～8.0
	次亜塩素酸ソーダ濃度	400～500 ppm	400～500 ppm

図表 17 設置コスト比較表

件名：九州地区某し尿処理場 中濃度系臭気用脱臭方式比較表 インシヤル・コスト比較

株式会社 一芯

		一般洗浄脱臭方式			ISEC式脱臭方式			
		数量、単位	単価	金額	数量、単位	単価	金額	
建設費	酸洗浄塔	酸洗浄塔本体	1 基	5,000,000	5,000,000	不要		
		洗浄塔充填剤	1130 ℓ	150	169,500			
		循環ポンプ	2 台	1,200,000	2,400,000			
		循環配管用各種バルブ類	1 式	2,400,000	2,400,000			
		硫酸貯留タンク（PE製）	1 基	1,600,000	1,600,000			
		硫酸注入ポンプ	2 台	900,000	1,800,000			
		計装品（PH計他）	1 式	500,000	500,000			
		合計金額	—	—	13,869,500			—
建設費	アルカリ・次亜塩素酸洗浄塔	アルカリ・次亜塩素酸洗浄塔本体	1 基	5,800,000	5,800,000	1 基	5,800,000	5,800,000
		洗浄塔充填剤	1800 ℓ	150	270,000	1800 ℓ	1,800	3,240,000
		循環ポンプ	2 台	1,200,000	2,400,000	2 台	1,200,000	2,400,000
		循環配管用各種バルブ類	1 式	2,600,000	2,600,000	1 式	2,600,000	2,600,000
		苛性ソーダ貯留タンク	1 基	2,900,000	2,900,000	1 基	1,400,000	1,400,000
		苛性ソーダ注入ポンプ	2 台	900,000	1,800,000	2 台	750,000	1,500,000
		次亜塩素酸貯留タンク	1 基	1,700,000	1,700,000	— 基	—	—
		次亜塩素酸注入ポンプ	2 台	900,000	1,800,000	— 台	—	—
		計装品（次亜塩素酸濃度計、PH計他）	1 式	3,000,000	3,000,000	1 式	3,000,000	3,000,000
		ISEC式電解装置（2型）	— 基	—	—	1 基	5,800,000	5,800,000
イオウ・バスター（3型）	— 基	—	—	1 基	3,100,000	3,100,000		
合計金額	—	—	16,200,000	—	—	19,800,000		
建設費合計		—	—	30,069,500	建設費削減率 34.2%		19,800,000	

※コスト試算に関しては、令和元年頃の価格をベースとしているため、今後の情勢に応じて金額が変動する可能性がある。

※脱臭風量等仕様の相違によっても金額が変動する可能性がある。

図表 18 運転コスト比較表

件名 : 九州地区某し尿処理場 中濃度系臭気用脱臭方式比較表 ランニング・コスト比較

		一般洗浄脱臭方式			ISEC 式脱臭方式			
		数量、単位	単価	金額	数量、単位	単価	金額	
建設費	建設費合計	-			19,800,000			
	建設費/20年	-			990,000			
ランニングコスト	充填剤 交換代	酸洗浄塔(4年毎)	1130 ℓ	150	42,375	- ℓ	-	
		7alkali・次亜塩素酸洗浄塔(4年毎)	1800 ℓ	150	67,500	- ℓ	-	
		7alkali・次亜塩素酸洗浄塔(15年毎)	- ℓ	-	-	1800 ℓ	1,800	216,000
	年間薬品 消費代	硫酸	420 ℓ	50	21,000	- ℓ	-	
		苛性ソーダ	31221 ℓ	20.7	646,275	2213 ℓ	20.7	45,809
		次亜塩素酸ソーダ	8567 ℓ	44.4	380,375	- ℓ	-	
		電解槽電気代	-	-	-	3285 KWh	15.00	49,275
		電解槽 補充用食塩	-	-	-	48 Kg	150	7,200
		ランニングコスト	-			1,157,525	薬品代削減率 72.5%	318,284
	比較	建設費/20年	-			990,000		
ランニングコスト		-			318,284			
年間コスト		-			2,661,000	年間コスト削減率 50.8%	1,308,284	

*電気代 : 15円/Kwh

*薬品単価 : 硫酸 50円/ℓ、苛性ソーダ 20.7円/ℓ、次亜塩素酸ソーダ 44.4円/ℓ

※コスト試算に関しては、令和元年頃の価格をベースとしているため、今後の情勢に応じて金額が変動する可能性がある。

※脱臭風量等仕様の相違によっても金額が変動する可能性がある。

7. 将来性

(1) 国内需要

脱臭装置はその性質上、し尿・下水・ごみ処理場などの付帯設備と位置付けられる。

図表 19 は全国の上り処理施設の供用開始時期をグラフ化したものであるが、一般に 20~30 年と想定されている耐用年数を大幅に超過して稼働している施設が数多く占めることがわかる。

一方で、財源の制約を受け、内閣府はインフラ長寿命化計画を提案している。インフラ長寿命化計画とは、基幹設備をできるだけ補修等で大規模改修や更新時期を延ばすことを目指し、一方で付帯設備をランク付けし、そのうちリスク程度が大きな付帯設備については優先的に更新することで性能を満たしながら全体的な維持管理費用を低減することを目指している。これを受けた国土交通省の下水道ストックマネジメントガイドラインでは、悪臭防止設備(=脱臭装置)は中間程度のリスク評価となっており、比較的優先的な更新・補修などが求められている。(参考:下水道事業のストックマネジメント実施に関するガイドライン-2015年版)

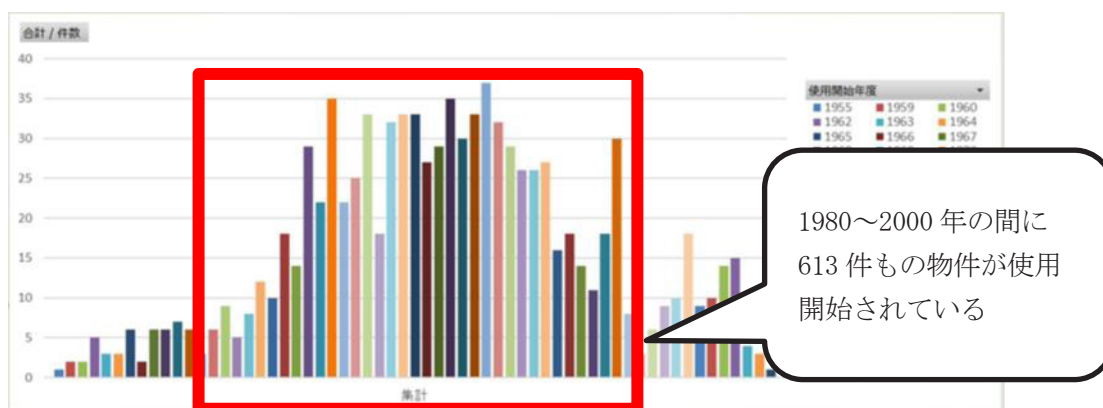
このことから、今後の更新需要に対してコスト面や後述する温室効果ガス削減効果から、ニーズにまさにマッチした方式であると考えている。

さらに、引き続き注目されているバイオマス施設においても、薬液洗浄法でアルデヒド類の除去が可能であることから、課題に対して本方式はクリティカルに対応できる方式である。

(2) 国際展開

データの掲載は省略するが、世界的にみて日本の脱臭技術は、既存の方式でも十分他国を圧倒するレベルにある。近年、欧州・中東・アジア各国において水処理の重要性が再認識されて

おり、国内プラントメーカーが相当数進出・施設受注を勝ち取っている。上述した地域にあっては、悪臭そのものは公害として捉えられていないため脱臭装置の引き合いはこれまでのところないが、仮にあったとすればプラントメーカーに技術供与するなどして日本の高い環境技術によって国際貢献することはコスト面や資源循環プロセスとして十分に競争力のある技術であると考えている。



図表 19 全国のし尿処理施設の供用開始時期（環境省：し尿処理施設一覧より独自作成）

日本産業機械工業会会長賞

「騒音対策用遮音ルーバー装置（しずかルーバー）」

清水建設株式会社

1. 装置の詳細説明

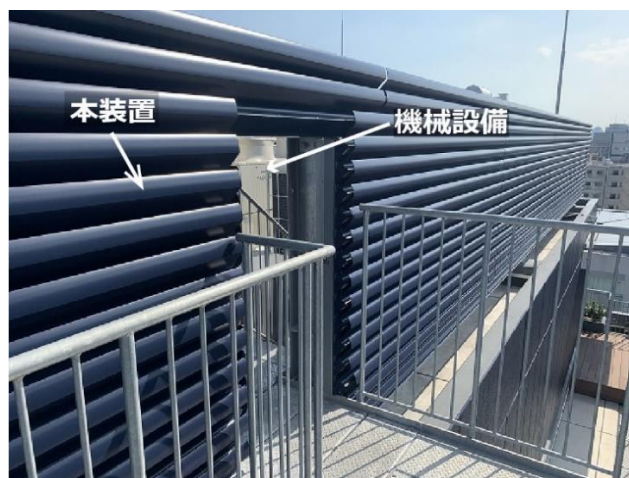
本装置「しずかルーバー」は、建物屋上や地上に設置される機械設備を囲い、機械の稼働上必要な通気性を確保した上で、周辺へ伝わる機械騒音を低減させる建築用ルーバー装置である。図表1に建物屋上の機械設備を囲う本装置の設置状況を示し、詳細を次に説明する。

(1) 装置の形状と騒音低減の原理

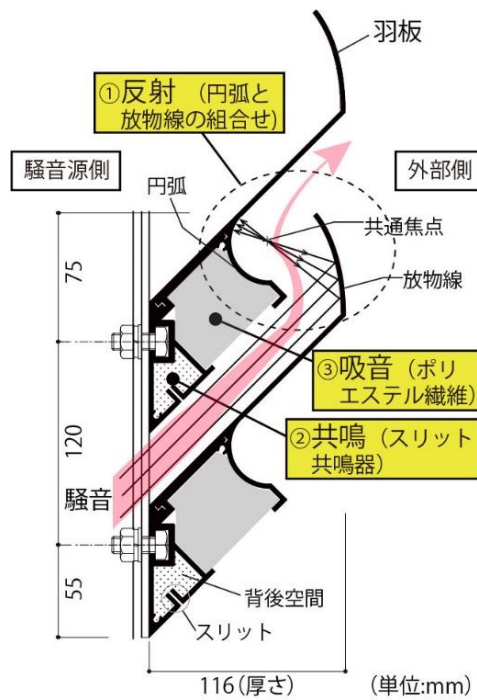
本装置の断面形状を図表2に、写真を図表3に示す。図表2により騒音低減のメカニズムを説明する。本装置は、基本的な音響現象である「反射」、「共鳴」、「吸音」の全てを実現する機能を羽板に組み込むことで、コンパクトなサイズ（装置の厚さ：図表2中116mm）の中で高音域から低音域までの広い周波数範囲に対する騒音低減効果を実現した。図の左側から入射した騒音は、以下に示すメカニズムで低減される。

1) 「反射」（高音域）

羽板の中間部に円弧状、先端部に放物線（パラボラ）状の断面を持たせ、その組合せで主に高音域の騒音を騒音源側へ戻す反射板として機能させる。円弧の中心点と放物線の焦点が、図表2中に示す共通焦点と呼ぶ一点で一致するように羽板が配置される。通気経路に入ってきた騒音は、放物線で反射した後、共通焦点を経由して円弧へ入射する。円弧に入射した騒音は、再び共通焦点へ向けて反射し、その後元の経路をたどり騒音源側に戻る仕組みとなっている。



図表1 建物屋上機械設備を囲う本装置の設置状況



図表2 本装置の断面形状と騒音低減の仕組み



図表3 しずかルーバー (右写真は塗装前のカットモデル)

2) 「共振」(中音域)

羽板の騒音源側には通気経路に面してスリット状の開口が設けられ、その背後の空間との組み合わせにより共振器として機能する。共振現象によって共振周波数に近い周波数の騒音は、通気経路のスリット部から先へ伝搬することができず、騒音源側に戻ることがこれまでの実験及びコンピュータシミュレーションにより明らかにされている。共振周波数は背後空間の大きさ、スリットの幅及び深さによって調整可能である。本装置では遮音性能の全体バランスから中音域を低減するように共振器の設計を行っている。

3) 「吸音」(低～高音域)

羽板の中間部には、吸音材が組み込まれ、低音域から高音域の幅広い周波数の騒音を低減する。吸音材は、耐候性に優れたポリエステル繊維材を使用し、雨水の侵入を防ぐ不織布によっ

て表面がカバーされている製品を採用した。ポリエステル繊維による吸音材は、グラスウールのようなガラス繊維の吸音材と異なり接着剤を使用しておらず、屋外での使用においても交換等のメンテナンスが長期間不要である。

(2) 取付施工方法

図表 4 に取付作業状況を示す。ストリンガーと呼ばれる取付用部材にボルト・ナットにより取付ける。取付は全て内側（設備設置側）から行えるので、外部足場や施工上の安全措置の必要が無い。また、軽量であるため製品の最長サイズである 4m 長さの羽板でも、2 名の人力で容易に施工可能である。

2. 開発経緯

(1) 開発の背景、目標と開発進捗

1) 開発の背景

オフィスビルや商業施設、工場等において、空調設備や生産のための機械設備は、建物屋上設備置場や地上設備置場に設置されることが多い。これらの機器が騒音規制法や自治体の条例において規制対象となっている場合、敷地境界における騒音規制値を遵守するための対策を行わなければならない。対策方法の一つとして、通気性を確保しつつ周辺へ伝わる騒音を低減する建築材「遮音ルーバー」装置の設置がある。

開発着手時から現在に至るまで、市場投入されている遮音ルーバー装置は、複雑な形状や二次加工の必要性から高コストとなっている製品が多く、建設工事収支の関係から採用が難しいことが多い。その場合には、成形セメント板や ALC 板などによる通気性の無い防音壁が設置されることになる。しかし、その防音壁が機械設備の稼働に必要な通気を確保するためとして、騒音対策上必要な高さにできなかつたり、機器を囲う四面に設置する必要があるのに通気のためとして一～二面は設置しなかつたりするような場合があった。また、意匠上、景観上の観点からも成型セメント板等の防音壁は好まれないことが多い。



図表 4 取付作業状況

このような状況を鑑みて、既存製品の問題を解決して騒音対策の必要性がある多くの建物へ遮音ルーバー装置が設置されることで、快適な都市環境・住環境の実現に寄与することを目指し、独自のアイデアの導入と製造方法等の工夫による低コストの遮音ルーバー装置の開発に着手することとした。

2) 開発の目標

定量目標として①～②、定性目標として③～⑤を設定し、開発を進めた。

- ①大手メーカー既存製品と同等以上の遮音性能（オクターブ 500Hz 帯域音響透過損失：5dB 以上、同 2kHz 帯域：11dB 以上）
- ②アルミ押出し成型により一体成型し、二次加工を極力減らしてコスト（材工価格）を既存製品の 50%（大手メーカー品比）～75%（国外生産廉価品比）に抑える
- ③吸音機能だけに依存せずに騒音を低減する形状を考案する
- ④通気性確保のために高流量係数（低圧損）を目指す
- ⑤部材による風切り音を発生させない

3) 開発経緯

2015 年度	予備検討
2016 年度	形状考案（主にシミュレーションによる）、吸音材料選定、製造方法検討
2017 年度	試作品による性能検証（遮音、通気性、強度、風切り音、耐久性）、製造方法検討
2018 年度	製造方法検討、販売用ツール、販売網整備
2019 年度	第 1 号機納入

(2) 共同開発

無し。なお、製造面の検討及び試作に関しては、株式会社成和（京都府宇治市）の協力を得て実施した。

(3) 技術導入

無し

3. 独創性

機械設備などの騒音低減を目的として設置されるルーバー装置は、「遮音ルーバー」あるいは「防音ルーバー」という名称で市場投入されている。その多くは、グラスウールを多用しており、音響現象の一つである「吸音」に大きく依存している。「吸音」に依存するという事は、高い遮音性能を実現するためには吸音材の使用量を増加させる必要があるため、装置のサイズが大きくなる。その結果、装置自体の価格が上がり、また設置作業のためのコスト増大、設置に必要な占有面積の増大と、派生的に問題が拡大していく。我々の開発では、「吸音」だけに依存せず、同じく音響現象である「反射」、「共鳴」と「吸音」を利用して製品を構成することを目標とした。その結果、図表 2 に示すように、①「反射」円弧と放物線の組み合わせによって、

入射してきた騒音を入射してきた方向へ反射する機能、②「共鳴」スリットと背後の空間によって構成される共鳴器を配置し、共鳴周波数付近の騒音をその部分より先へ伝搬させない機能、③「吸音」長期的に高い耐候性を維持できるポリエステル吸音材による吸音の機能、を組み合わせることにより、コンパクトなサイズ（厚さ 116mm）で既存製品と同等以上の遮音性能を確保したところに独創性がある。加えて、既存製品に対して、圧倒的に高い通気性能と低コストを実現している。

4. 特許の有無

次のとおり、特許 4 件を取得済み、1 件（関連含む）を出願中。

特許番号：第 6936904 号 / 名称：遮音ルーバー
 特許番号：第 6979760 号 / 名称：遮音ルーバー
 特許番号：第 7042579 号 / 名称：遮音ルーバー
 特許番号：第 7042629 号 / 名称：ダブルスキン構造
 公開番号：特開 2021-051124 / 名称：遮音ルーバーの設定方法

また、次のとおり、意匠登録 1 件、商標登録 1 件を取得済み。

意匠登録番号：第 1602910 号 / 名称：建築用目隠しルーバー材
 商標登録番号：第 6083513 号 / 商標：しずかルーバー

5. 性能

本装置の性能について項目毎に説明する。図表 5 に定量評価が可能な装置の厚さ、遮音性能（音響透過損失）、通気性能（有効開口率比）、材工コストについて、既存製品との比較を示す。

比較対象とした既存製品は、いずれもグラスウール等の吸音材 50～100mm 厚さを様々な形に整形し、その表面をパンチングメタルやフラットメッシュによって保護することでルーバー羽板を構成している。その羽板を各社で定めたピッチで配置して製品としており、どの製品も吸音にのみ依存して音を低減する考え方である。

図表 5 既存製品との性能比較

メーカー・製品	厚さ (mm)	遮音性能比較 (本装置を基準とする)		有効開口率比 (本装置を1.0とする)		材工コスト比 (本装置を1.0とする)	
本装置	116	◎	基準(0dB)	○	1.0	◎	1.0
A社	製品 1 製品 2	◎	-2~-3dB	△	0.43	×	1.6~1.9
				△	0.37	×	
B社	製品 1 製品 2	△	同等	○	0.59	△	2.9
		△		○	0.37	×	
C社	製品 1 製品 2 製品 3	○	+1~+2dB	◎	0.17	×	2.0~2.1
		○	同等	○	0.21	×	1.8~1.9
		○		○	0.24	×	1.6~1.7

※厚さ、材工コスト比は、当社製品比2倍以上×、1.5~2倍△、1~1.5倍○、同等程度◎とした

遮音性能比較は、同じく-3dB以下×、-3~-1dB△、同等程度○、+1~3dB◎とした

流量係数比は、同じく0.5倍以下×、0.5~0.75倍△、0.75~1倍○、同等以上◎とした

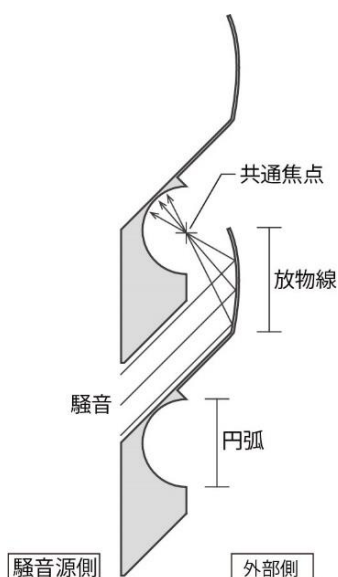
- ・A社製品は50mm厚程度の吸音材を断面形状として平行四辺形に構成し、表面をフラットメッシュ（金網）で保護している。製品1と2は羽板の傾斜が上向き、下向きの違いがある。
- ・B社製品は吸音材を断面形状としてラグビーボール（最厚部100mm程度）のような形状に構成して、表面をパンチングメタルで保護している。製品1～2の順に羽板の間隔が狭くなっている。なお、同社には230mmよりさらに厚さのある300mmの製品があるが、本装置の厚さの約3倍であり正当な比較とならないため対象とはしていない。
- ・C社製品は50mm厚程度の吸音材を断面形状としてV字形に構成して、表面をパンチングメタルで保護している。製品1～3の順に羽板の間隔が広がっている。

図表5の比較結果を纏めると次のとおりである。

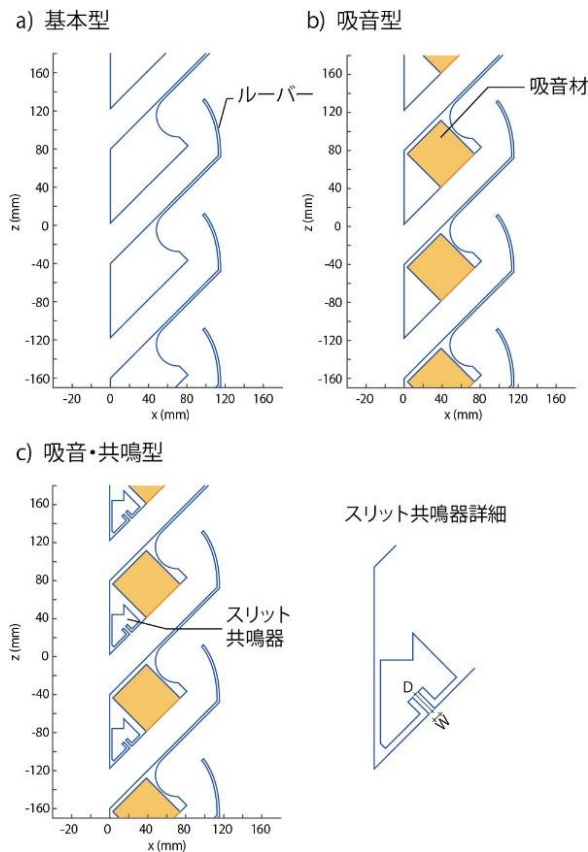
- ・本装置の遮音性能は既存製品同等以上である。なお、C社製品1は、本装置の遮音性能をやや上回るが、次に述べる通気性能（有効開口率比）が本装置の0.17倍と著しく低い。
- ・通気性能（有効開口率比）は、本装置を1.0とすると、既存製品はその0.17～0.59倍と低くなっている。
- ・材工コスト比は、本装置を1.0とすると、既存製品はその1.6～2.9倍と大幅に高くなっている（コストに関する詳細は「6. 経済性」に記載）。

（1）波動音響シミュレーションによる遮音性能の予測

開発の初期段階では、考案した複数の形状や条件に対して、波動音響シミュレーションによって遮音性能を予測し、試作形状の絞り込みを行った。これにより、開発期間の短縮と試作コストを削減することができた。図表6に初期段階での形状の原案を示し、図表7に波動音響シミュレーションを行った主要な形状を示す。シミュレーションの結果、図表7(c)の形状によって目標とした性能が確保できる見込みが得られたため、工業製品としての製造の実現性を考慮して試作品の形状を決定し、次に述べる遮音性能試験を実施した。



図表6 放物線と円弧を組み合わせた本装置の原案



図表 7 波動音響シミュレーションモデル

(2) 遮音性能試験（音響透過損失試験）

遮音性能の評価は、当社技術研究所内の残響室にて JIS A1416:2000「実験室における建築部材の空気音遮断性能の測定法」に準拠して音響透過損失試験を実施した。その結果、本装置の音響透過損失は既存製品同等以上（一部の低通気性能の製品を除く）であることを確認した。音響透過損失試験の方法と結果を以下に記載する。

1) 第1次試験

波動音響シミュレーションによって得られた知見から、まず図表 8 に示す A-0～A-4 の 5 種類の試験体に対して第 1 次の音響透過損失試験を実施した。第 1 次試験の目的は、波動音響シミュレーションで予測された遮音性能が実現できるかの見通しを得ることと、スリット共鳴器の仕様と騒音低減効果の定性的関係を明らかにすることであった。第 1 次試験の結果、目標とした音響透過損失値を確保できる目途が得られた。また、スリット共鳴器のスリット幅と深さ、及び背後空間の容積の組合せによる共鳴周波数の関係が、シミュレーションにより予測された値と概ね同様であることが確認された。

この結果を基に、現実的な工業製品として製造・加工可能なスリット幅・深さを検討した結果、スリット幅 1.4mm、深さ 5mm に決定した。また、各所の強度を再検討してアルミ肉厚の見直しを行い、最終製品を想定した試験体を製作し第 2 次試験を行った。

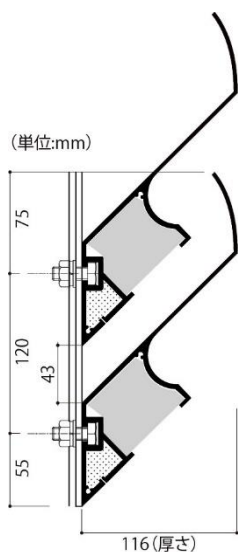
2) 第2次試験

第2次試験に供した試験体の断面図を図表9に示す。試験体条件は図表8に示した試験体A-5とA-6である。この試験では目標としている遮音性能が実現できることの最終確認と、スリット共鳴器の効果を確認することを目的とした。試験の状況を図表10に示す。

音響透過損失測定結果を図表11に示す。グラフに示すとおりA-6(オクターブ)の測定値が、設定した目標性能(✕)を満足することを確認した。また、スリット共鳴器によって、1kHz帯域から1.6kHz帯域で音響透過損失が最大3dB程度向上することを確認した。

図表8 試験体条件

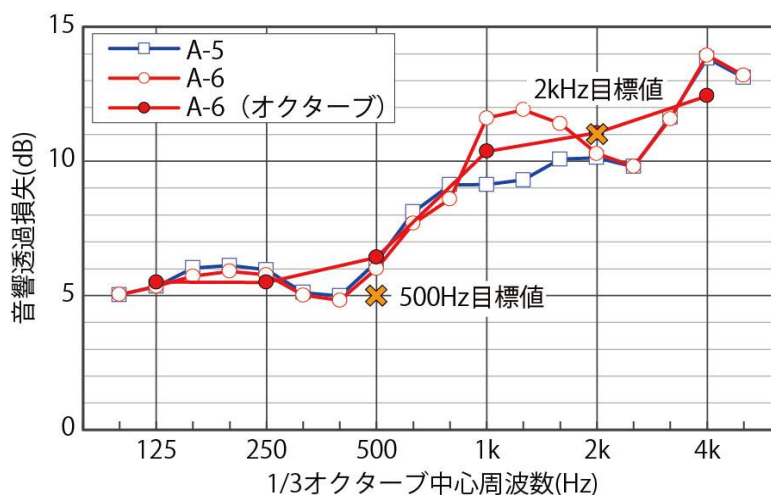
試験番号	スリット寸法実測値		吸音材
	幅(mm)	深さ(mm)	
A-0	スリット無し		無し(合板t9塞ぎ板)
A-1	スリット無し		
A-2	0.94	5	ポリエステル繊維 吸音材
A-3	3.63	5	
A-4	0.85	9	
A-5	スリット無し		ポリエステル繊維 吸音材
A-6	1.43	5	



図表9 第2次試験の試験体断面形状



図表10 音響透過損失試験の状況



図表 11 音響透過損失測定結果

(3) 通気性能

通気性能は、(一社)日本建築総合試験所に依頼し、開口部分の空気の流れ易さを表す流量係数 (0~1 の間の数値) を求めることで評価を行った。その結果、流量係数は 0.50 を超える数値を示し、既存製品を大幅に上回ることを確認した。試験方法と結果を以下に記載する。本項では併せて、当社技術研究所で実施した流れの可視化についても記載する。

1) 試験方法

通気性能試験は、試験体を圧力箱に設置し、圧力箱内外の圧力差と通気量を測定する方法で行い、最終的に空気の流れやすさを示す流量係数を求めることを目的とした。

2) 試験結果

図表 12 に試験の状況を示す。試験の結果得られた圧力差と流量の関係を図表 13 に示す。

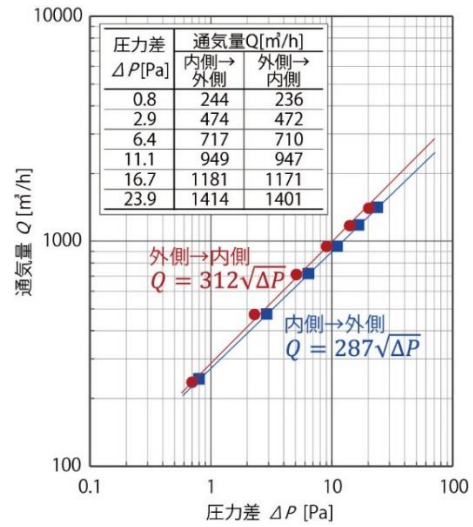
この結果より計算される流量係数は、騒音源側から外部側へ流れる方向の場合 0.51、逆方向が 0.55 となり、既存製品の数値を大きく上回っていることが確認できた。流量係数と通気経路の寸法より計算される有効開口率は、当社製品を 1 とすると、既存製品は 0.17~0.59 である。高い流量係数が実現できた要因としては、空気が流れる通気経路の形状の滑らかさや、表面にパンチングメタルのような空気の流れを乱す部材を使用していないことが考えられる。

3) 流れの可視化

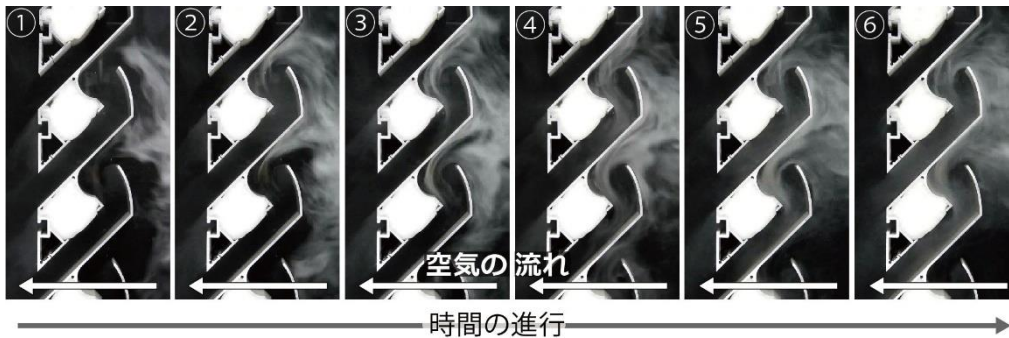
本装置を通過する空気の流れの可視化を当社技術研究所で実施した。その結果を図表 14 に示す。これらの図では、各図の右側から風が流れ込み、本装置を通過して左側へ流れ出す様子を示している。滑らかに空気が流れていることや、次に述べる風切り音発生原因となる端部での顕著な渦も発生していないことが観測される。なお、建物屋上等での本装置の設置状況では、外側 (騒音源の逆側) からの風に、より強く曝されると考えられるため、本装置の右側から風が当たる状況で流れの可視化を行った。



図表 12 通気性能試験の状況



図表 13 通気性能試験結果



図表 14 空気の流れの可視化

※空気の流れを①から⑥に時間を追って示している。

空気は各図中で右側から左に流れている。

(4) 風切り音防止性能

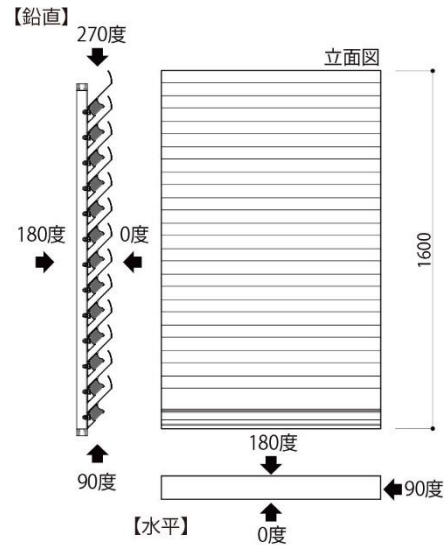
本装置によって風切り音を発生させないことは必達目標である。そのため、当社技術研究所内の風洞実験装置を用いて、あらゆる方向から最大風速 24m/s の一様流の強風を当てて風切り音の発生状況を調べた。その結果、実際に建物へ取り付けられた状況の中では、問題となる風切り音は発生しないことを確認した。実験方法と結果を以下に記載する。

1) 実験方法

風切り音の発生の有無を調べる実験は、当社技術研究所内の風洞実験装置を用いて行った。風洞測定部 (ターンテーブル) に試験体を固定して、乱れがほとんどない一様流 (試験風速の範囲内で試験体中央部において乱れ強さ 1%) の強風を当て、風切り音発生の有無を観測した。試験の状況を図表 15 に、試験における風向の定義を図表 16 に示す。風向は、試験体に対して水平方向 0~180 度、鉛直方向 0~360 度を 10 度ピッチで、風速は 6~24m/s を 2m/s ピッチで実験を行った。



図表 15 風切り音実験の状況



図表 16 試験体形状と風向角度の定義

2) 実験結果

実験の結果、水平方向の風では風切り音は発生しなかった。鉛直方向の風では 100～150 度方向、風速が 10m/s 以上の風で取り付け用のボルト溝から風切り音が発生した。しかし、この風向は、本装置の騒音源側でかつ床方向から一様流の強い風が当たることを意味しており、現実には生じることはほぼ無いと考えられる。したがって、実用上は問題が生じることは無いと判断される。

(5) 耐風強度性能 (安全性)

2018 年 9 月台風 21 号による関西地方や、2019 年 9 月台風 15 号による千葉県での風による被害は記憶に新しい。毎年台風に襲われる我が国の場合、屋外に設置する装置の風に対する強度性能は、安全性の面で極めて重要である。

本装置の耐風強度性能の確認は、本装置が受け得る耐風圧を確認する単純梁等分布荷重試験 (試験 1) とボルト接合部の強度確認を行う単純梁集中荷重試験 (試験 2) を当社技術研究所にて実施した。その結果、支持スパン 4m の単純梁支持条件における許容耐風圧荷重は 4kN/m^2 、中間支持した支持スパン 2m の単純梁支持条件では 16.1kN/m^2 であり、国の告示¹⁾や学会マニュアル²⁾に基づく安全性の要求に対しても十分対応可能であることを確認した。高い耐風強度を実現したことで、強い風が吹く高層・超高層建物への適用が可能となっている。また、コストダウンのために目標とした二次加工を極力減らすことが部材点数の削減につながり、結果的に風圧等の繰返し外力によるビス等の緩みの発生と、それに伴う脱落や破損のリスクを低減している。

1) 建設省告示 1458 号, 屋根ふき材及び屋外に面する帳壁の風圧に対する構造耐力上の安全性を確かめるための構造計算の基準を定める件, 2000 年 5 月 31 日

2) 日本建築学会編, 実務者のための建築物外装材耐風設計マニュアル, 2013. 4

(6) 耐久性能

本装置で使用する材料は、アルミニウムとポリエステル繊維である。前者の耐候性は議論の余地はないと考えられる。後者は、メーカーにより JIS K7350-3:2008「プラスチック―実験室光源による暴露試験方法―第3部：紫外線蛍光ランプ」により 70℃±3℃で8時間照射、50℃±3℃、水分凝縮状態で4時間を繰り返し、総暴露時間 2,000 時間で外観・吸音性能に変化が無いことは確認されている。また、当社技術研究所内において 2017 年 6 月より本装置を設置して耐候試験を継続中である。試験体の設置状況を図表 17 に示す。試験体設置後 5 年（2022 年 6 月現在）が経過しており、夏冬の温度変化、降雨、降雪、台風、ゲリラ豪雨等の気象現象に対して、今現在顕著な変化は見られず、また吸音材の雨水による湿潤も生じていないことを確認している。今後も引き続き観測を続ける。

6. 経済性

図表 18 に、既存製品との材工コスト比（開発実施時 2017 年における比較）を再掲する。「材工コスト」とは、材料費（本装置の値段）と施工費用の合計金額である。ここで示すコスト比の基となる各製品のコストは、一般商品の定価にあたる「設計単価」で算出している。比較対象とした既存製品は「5. 性能」で記載したとおりである。既存製品は本装置と比較して、少なくとも 1.6 倍、最大 2.9 倍のコスト（すなわち本装置は、既存製品の 34～63%コスト削減）と大幅に高くなっており、本装置の優位性を示している。

コストの低減は、材工一体で計画した。まず製造工程では、アルミ押し製法により一体成型し、二次加工を極力削減したことで、既存製品に対して大きくコストダウンすることができた。また、設置は図表 4 で示すように、内側（設備設置側：騒音源側）からの作業のみで施工が可能な構造となっている。外側からの作業が不要ということは、足場や取付時の安全措置が不要となりコスト低減につながる、また、施工は支持部材と羽板をボルト・ナットで緊結するだけの容易な作業内容であり、専門工の必要は無くコスト低減に貢献している。

7. 将来性

本装置はコスト面で既存製品に対して圧倒的に有利であるため、今後の新築工事案件への適用、またこれまではコスト面、あるいは排熱不良等の理由により諦めざるを得なかったような案件についても、導入の可能性が高まると考えられる。また、全国的な販売チャンネルを有する建築材料メーカーへの製品供給契約も締結済みのため、今後多くの案件への導入が期待される。

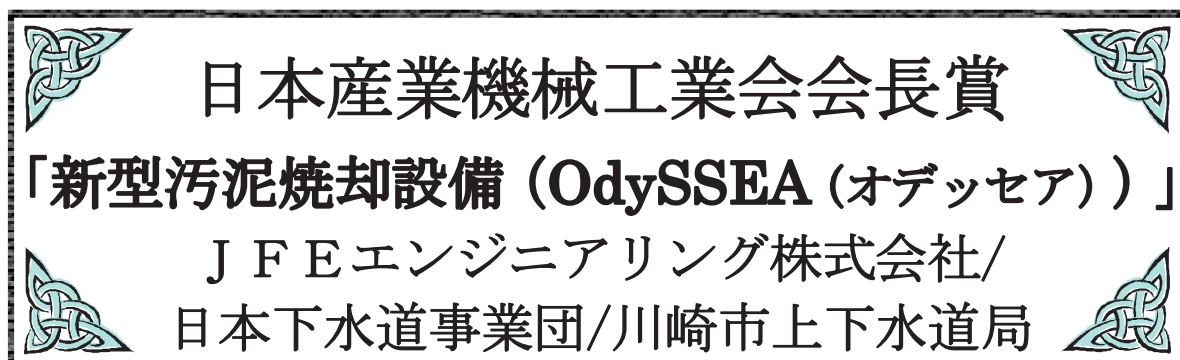


図表 17 耐候試験 試験体設置状況

図表 18 既存製品との材工コスト比較

メーカー・製品		厚さ (mm)	材工コスト比 (*当社を1とする)
当社製品		116	1.0
A社	製品1	95	1.6~1.9
	製品2		
B社	製品1	230	2.9前後
	製品2		
C社	製品1	150	2.0~2.1
	製品2		1.8~1.9
	製品3		1.6~1.7

※材工コスト比は、数値が小さいほど優位である。



1. 装置の詳細説明

我が国の地球温暖化対策は、2016年5月に「地球温暖化対策計画」が策定され、中期目標の達成に向けて取り組むことが基本方針として示された。2021年3月には「地球温暖化対策の推進に関する法律」が改正され、2050年カーボンニュートラルを基本理念として法に位置づけることが定められた。下水道事業においては、脱炭素社会への貢献のあり方検討小委員会にて、下水道が有するポテンシャルの最大活用、温室効果ガスの積極的な削減、地域内外・分野連携の拡大・徹底が方針として示されている。

下水汚泥焼却設備は消費エネルギーが大きく、排ガス中には温室効果ガスである一酸化二窒素 (N_2O と記載) 及び大気汚染物質である窒素酸化物 (NO_x と記載) が多く含まれるため、温室効果ガス削減とともに、大気保全の観点から NO_x の削減も求められている。

これらの背景より、下水汚泥焼却設備における未利用廃熱の有効活用と温室効果ガス (N_2O 、二酸化炭素 (CO_2 と記載))、大気汚染物質 (NO_x) の同時削減は大きな課題であり、その解決のために、JFE エンジニアリング株式会社、日本下水道事業団、川崎市上下水道局は、国土交通省が実施する下水道革新的技術実証事業(B-DASH プロジェクト^{※1})の採択を受け、2017、2018年度に、焼却廃熱の回収による①高効率発電技術、及び N_2O と NO_x を同時削減する②局所攪拌空気吹込み (二段燃焼) 技術についての性能確認と技術確立を行った。

本設備の概略フローを図表1に示す。既設の下水汚泥焼却設備に廃熱ボイラと蒸気タービン発電機を設置して発電を行うもので、既設の従来型焼却設備の排ガスを廃熱ボイラに引き込み、廃熱を回収した後に既設の排ガス処理設備に戻すフローとなっている。蒸気タービン発電機には復水式蒸気タービンを採用し、さらに、下水処理水の冷熱を活用した復水器を採用することで、高い発電効率を有する設備となっている。

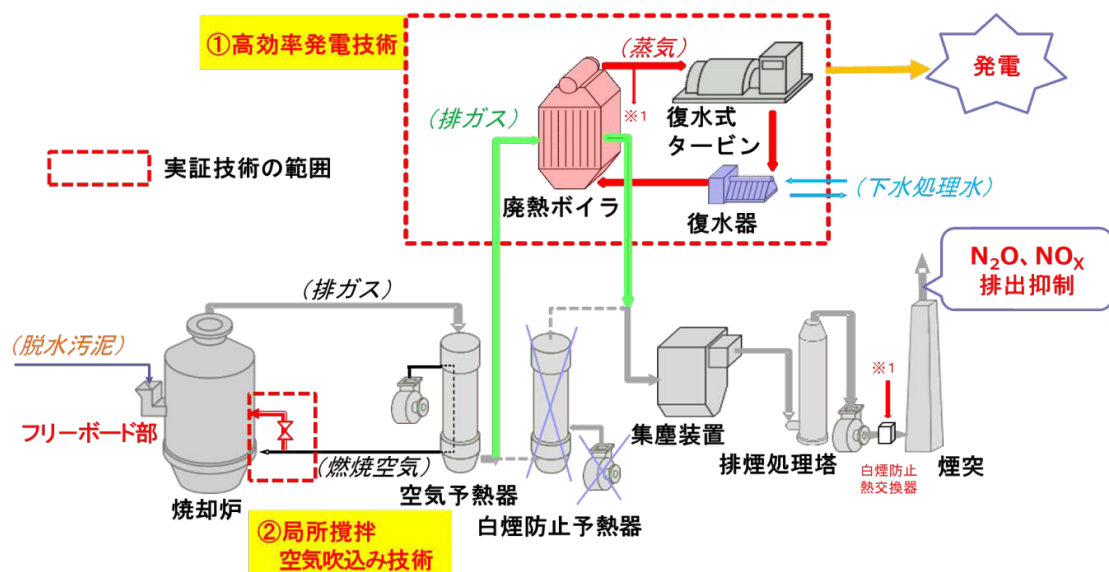
また、焼却炉本体には、燃焼空気の一部を分岐してフリーボード (FB と記載) 部に吹き込むことのできる、局所攪拌空気吹込み設備を設置して N_2O 、 NO_x を同時に削減する。

蒸気タービンの原理概要を図表2に示す。タービンは固定翼ノズルから噴射された蒸気をタービン翼で回転エネルギーに変換し発電機を回すエネルギーとしている。固定翼とタービン翼は多段に設置され、各段で蒸気エネルギーを効率的に回収できるように、翼の大きさやノズルの大きさ・間隔が設計されている。

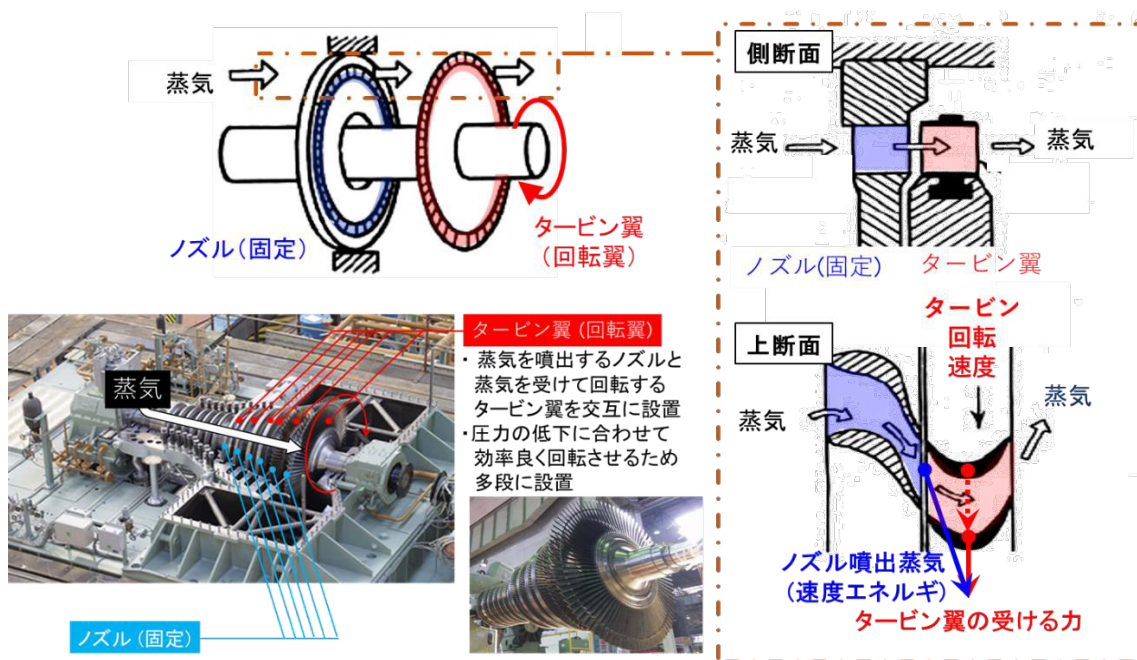
一般的に N_2O は燃焼温度を上昇させると分解が促進され、削減が可能であるが、燃焼温度を上げるにより NO_x が増加するトレードオフの関係にある。局所攪拌空気吹込みによる N_2O と NO_x の削減メカニズムを図表3に示す。砂層では流動空気 (1次空気) を減少させて燃焼を

抑制し還元物質であるシアン (HCN と記載) やアンモニア (NH₃ と記載) を多く発生させる (図中①)。FB 下部では HCN や NH₃ により NO_x を分解・抑制する (図中②)。FB 上部では局所攪拌空気での燃焼により高温場が発生することで N₂O を分解する (図中③)。これらの作用で N₂O と NO_x の同時削減を行う。

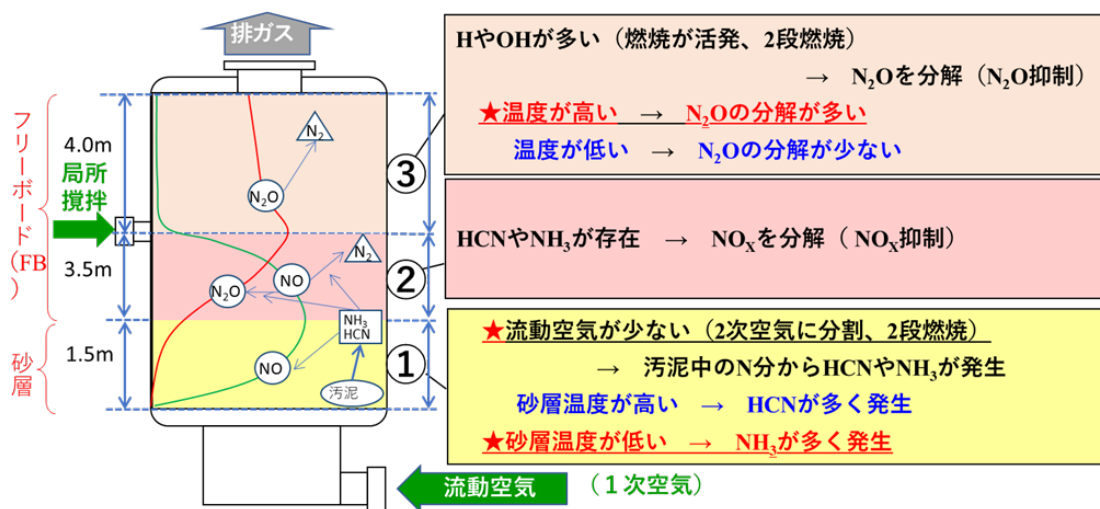
※1: 国土交通省が実施する下水道革新的技術実証事業 (Breakthrough by Dynamic Approach in Sewage High Technology Project) であり、国土技術政策総合研究所の委託研究として実施



図表 1 本設備の概略フロー



図表 2 蒸気タービン原理概要



図表3 N₂O と NO_x 削減メカニズム

2. 開発経緯

(1) 開発の趣旨及び目標

世界的な温室効果ガス削減とエネルギー削減ニーズの急激な高まりにより、下水道においてバイオマスの有効活用と CO₂ の約 300 倍の温室効果がある N₂O の削減が大きく求められるようになった。

下水汚泥焼却設備は消費エネルギーが大きく、排ガス中には温室効果ガスである N₂O 及び大気汚染物質である NO_x が多く含まれるため、温室効果ガス削減とともに、大気保全の観点から NO_x の削減も求められている。

下水汚泥焼却炉での発電については、得られる余剰熱量が少なく、発電効率の高いタービンの導入は焼却汚泥量 200wet-t/日以上の大規模焼却炉に限られるという課題があった。また、N₂O 削減を目的とした技術については、燃焼空気の一部を焼却炉 FB に吹込む二段燃焼技術があるが、焼却炉 FB 全周に吹込み配管を設置しているため、コストが高く、空きスペースが少ない炉周りへの追加設置が困難であるという課題があった。

これらの課題を解決し広く国内外への普及を図ることを目的に、以下を目標として本設備を開発した。

- ・脱水汚泥 60～300wet-t/日の中大規模焼却炉に適用できる高効率発電技術を開発すること
- ・局所攪拌空気吹込み技術は局所攪拌空気吹込みがない場合に比べ N₂O と NO_x を同時に 50%以上削減でき、N₂O は他の多段吹込燃焼式流動床炉等以下に削減できること
- ・高効率発電技術及び局所攪拌空気吹込み技術ともに既設焼却設備への追加設置が容易であること

(2) 開発経緯

2010 年度	局所攪拌空気吹込み技術の実験室規模の基礎研究開始
2013 年度	高効率発電技術の実験室規模の基礎研究開始
2013～2016 年度	JFE エンジニアリング株式会社と川崎市上下水道局による局所攪拌空気吹込みに関する共同研究を実施し技術を構築

2015～2016 年度	日本下水道事業団と JFE エンジニアリング株式会社の共同研究「焼却発電設備の導入促進に向けた技術開発」としてフィージビリティスタディーを実施し、技術を構築
2017～2018 年度	国土交通省が実施する下水道革新的技術実証事業(B-DASH プロジェクト)に採択。川崎市入江崎総合スラッジセンター(3系)に高効率発電技術及び局所攪拌空気吹込み技術を適用した実施設(150 wet-t/日)を設置し運転
2019 年度～	B-DASH プロジェクト実証研究完了後、自主研究を実施し、現在まで継続中(第1号機)

(3) 共同開発

JFE エンジニアリング株式会社、日本下水道事業団、川崎市上下水道局の役割を以下に記す。

- ・ JFE エンジニアリング株式会社 :
基礎原理の構築、N₂O 削減及び発電技術の構築と設計手法確立、実施建設
- ・ 日本下水道事業団 :
発電技術の構築、実証計画の立案と N₂O 削減及び発電技術の評価
- ・ 川崎市上下水道局 :
N₂O 削減技術の構築、実証設備の運転管理性、省エネ性の確認と改善

(4) 技術導入

無し

3. 独創性

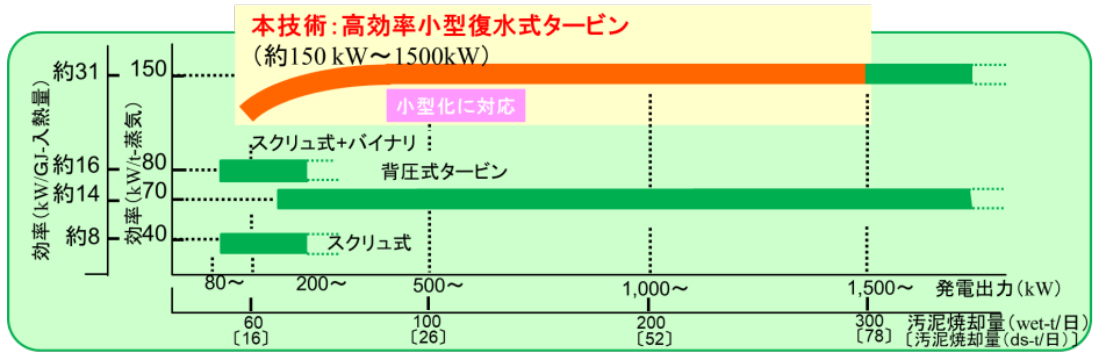
(1) 高効率発電技術

図表 4 に下水汚泥焼却における発電技術の比較を示す。これまで、国内下水汚泥焼却炉の大半を占める約 200wet-t/日(約 52DS-t/日)以下の焼却炉では、得られる余剰熱量が少なく、発電効率の高いタービンの導入が困難であるという課題があった。この課題解決のため、JFE エンジニアリング株式会社は、脱水汚泥約 60～300wet-t/日(約 12.6～78DS-t/日)においても、高効率発電を可能とする小型復水式蒸気タービンを新たに設計・開発した(図表 5)。

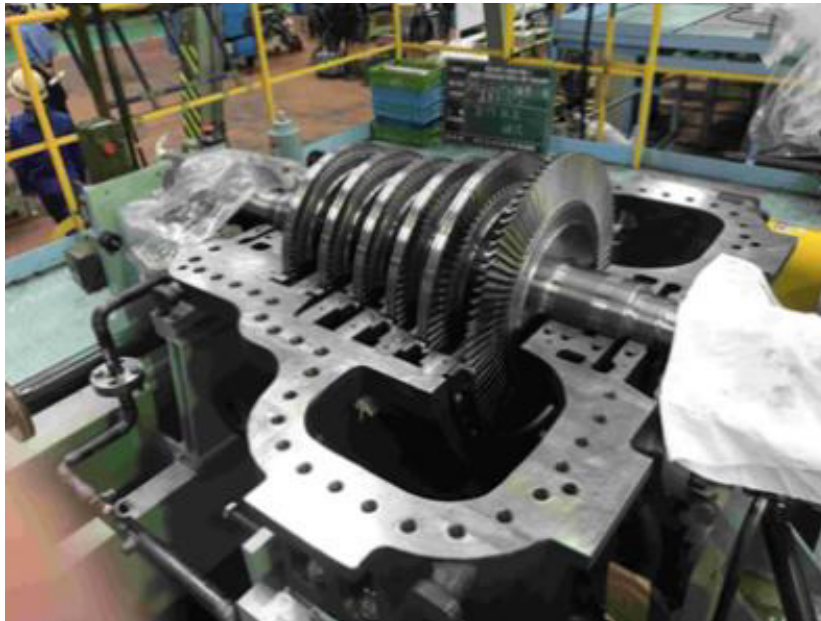
機械的な強度等の制約によりタービン本体は小さくできる限界がある。そのため、前述図表 2 に記載した固定翼側とタービン翼側のノズルをこれまでと同様の考えで設計すると蒸気の噴出速度が低下しタービン翼で受けるエネルギー効率が低下し高効率発電が不可能となる。JFE エンジニアリング株式会社は、これまで培ってきたタービン技術を基に、ノズルの間隔、大きさなどを最適化し高効率発電が可能な小型タービンを開発した。

さらに、豊富な下水処理水を冷却水として活用し発電効率の最大化を図った。空冷式と水冷式の発電効率の比較を図表 6 に示す。タービン効率は蒸気の入口と出口のエネルギー差(温度差、圧力差)が大きいほど増加する。同図に見られるとおり、下水処理場の豊富に存在する処理水を冷熱として活用することで出口蒸気を冷却・凝集させ、タービン背圧を真空近くまで低下させた。その結果、空冷式に比べ蒸気の入口と出口のエネルギー差が拡大し発電効率を 1.2 倍に増加させることを可能とした。

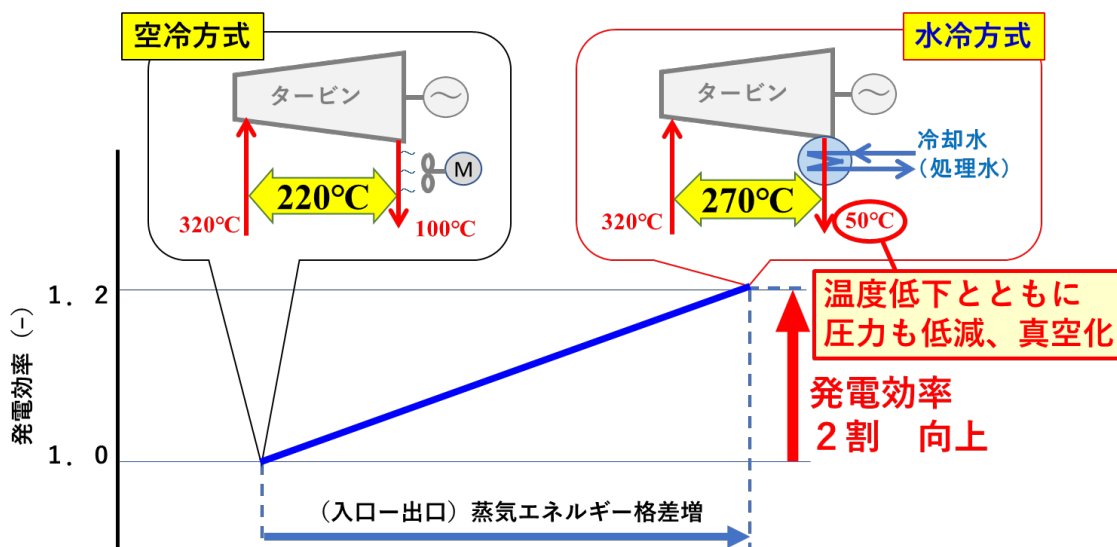
これらの独自性を組合せ 150~1,500kW の高効率発電を可能とした。なお、発電設備はダクトを切り回すことで設置可能であるため、新設のみならず既設焼却炉への追加設置が可能である。



図表 4 発電技術の比較



図表 5 小型復水式蒸気タービン



図表 6 下水冷熱活用による発電効率の増加

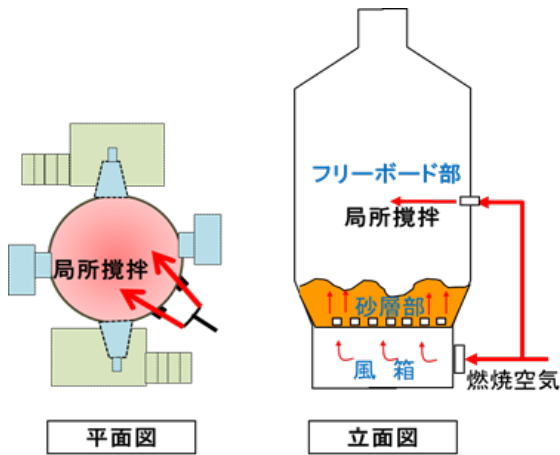
(2) 局所攪拌空気吹込み技術

N₂O 削減技術として、燃焼空気の一部を分岐して FB 部に効率的に吹き込む、局所攪拌空気吹込み技術を導入して N₂O、NO_x 排出量同時削減を実現した。局所攪拌空気吹込み技術の概略図を図表 7、図表 8 に示す。

局所攪拌空気吹込み技術では、数少ない空気吹込みノズルで FB 内に十分な高温場を発生させて N₂O を分解除去することが必要となる。そのため、JFE エンジニアリング株式会社が蓄積してきた燃焼シミュレーション技術を活用し、ノズルの位置、吹込み角度、吹込み流速などを検討し設計に繋げた。シミュレーションの一例を図表 9 に示す。

図表 10 に従来の多段吹込燃焼式流動床炉等の一例との比較を示す。従来技術では焼却炉 FB 全周に吹込み配管を設置しているため、空きスペースが少ない炉周りへの追加設置が困難である。本技術は炉付近の限られたスペース (2.5×2.0m 程度) に設置可能であるため、低コストであるとともに、既設焼却炉付帯機器との干渉が少なく追加設置が容易である。

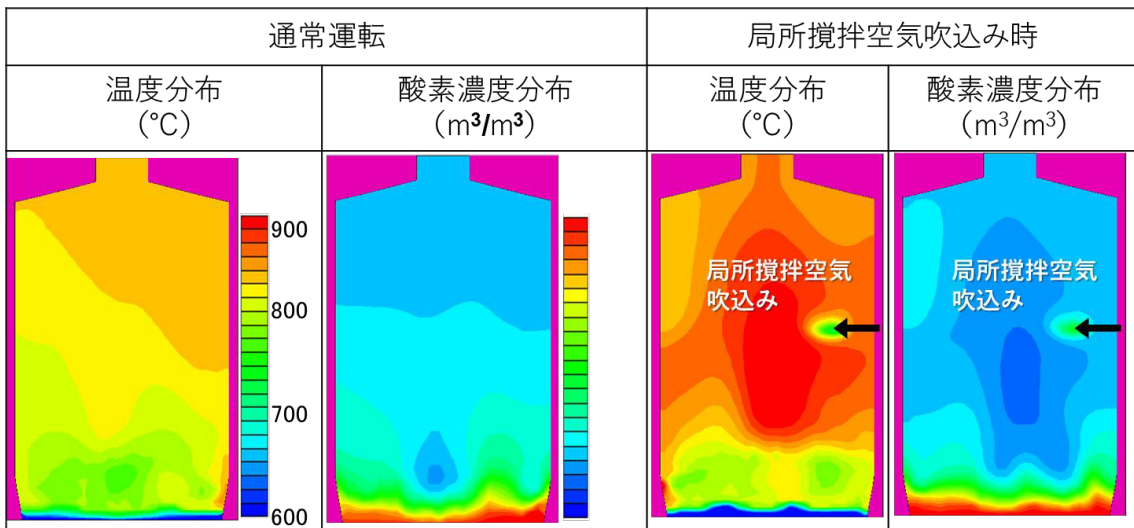
これらの独自性を有する本技術を適用することで、CO₂ の約 300 倍の影響力を持つ温室効果ガスである N₂O は開発目標とした従来技術と同等の削減が可能である。



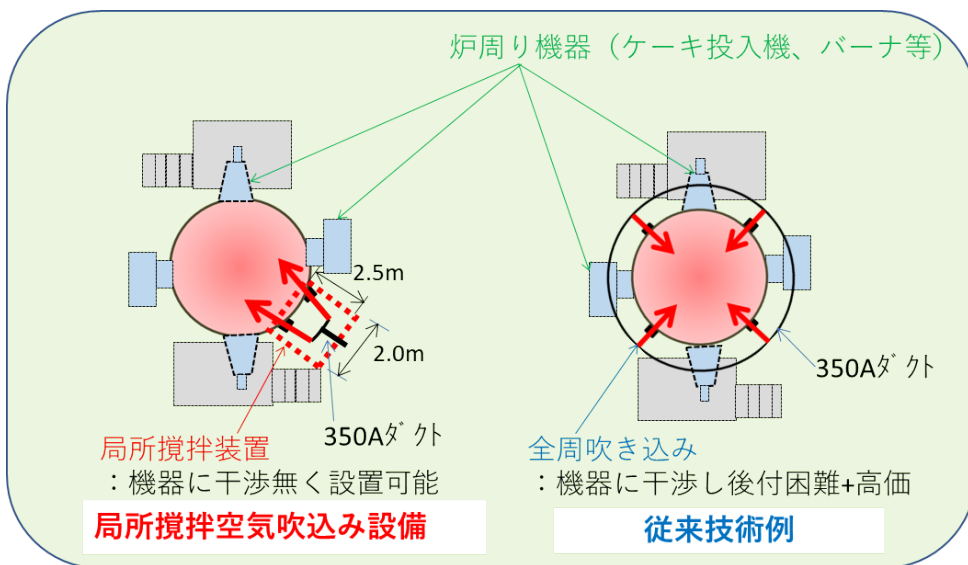
図表 7 局所攪拌空気吹込み技術概要



図表 8 局所攪拌空気吹込み技術設置状況



図表 9 シミュレーション解析結果



図表 10 従来技術との比較

4. 特許の有無

次のとおり、特許 3 件を取得済み、1 件を出願中。

特許番号：第 6466286 号

／ 名称：流動床式汚泥焼却炉における汚泥燃焼方法、流動床式汚泥焼却炉

特許番号：第 6701577 号 / 名称：廃棄物焼却システム

特許番号：第 6766772 号

／ 名称：下水汚泥焼却設備における廃熱を利用した発電システム及び発電システムの運転方法

公開番号：特開 2021-162192

／ 名称：流動床式汚泥焼却炉及び流動床式汚泥焼却炉の自動燃焼制御方法

5. 性能

(1) 新開発した小型復水式蒸気タービン性能確認結果

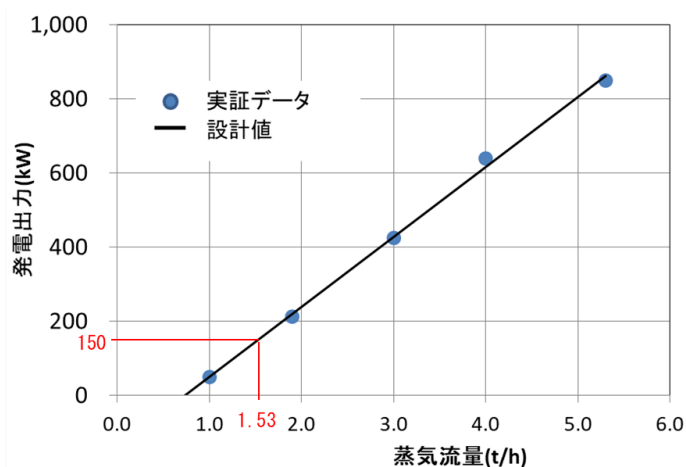
蒸気量を変化させ、タービンの運転可能範囲を確認した結果を図表 11 に示す。グラフ上の直線は実証設備で設置した蒸気タービン発電機の設計値を示しており、実証運転結果がこの直線上にプロットされることから設計どおりの能力を発揮していることが確認できる。また、適用範囲の下限である焼却設備 60wet-t/日 (16ds-t/日) 程度から得られる蒸気発生量 1.53t/h において発電出力 150kW の発電運転が可能であることを確認した。

(2) 高効率発電技術の季節変動に対する安定性評価

各季節の定格負荷 (150wet-t/日) における高効率発電技術運転結果を図表 12 に示す。

冬季は焼却炉の安定運転ができず、炉内温度上昇にエネルギーを要したため、低い発電量となっている。なお、焼却炉の安定運転ができなかった冬季を除き、春季、夏季、秋季は低含水汚泥での運転結果を併記した。

焼却炉の安定運転ができなかった冬季を除き、季節ごとの含水率等の汚泥性状の変化に伴い、焼却炉への投入熱量が変化し、投入熱量に応じた発電量が得られ、安定した発電運転が可能であることを確認した。なお、低含水汚泥での試験を実施した期間において、焼却設備消費電力と発電設備消費電力の合計値を発電出力が上回る電力自立を確認した。



図表 11 高効率復水式蒸気タービン性能

図表 12 季節ごとの高効率発電技術運転結果(太字下線部は電力自立)

	春季		夏季		秋季		冬季
	定格	低含水	定格	低含水	定格	低含水	定格
焼却量(wet-t/日)	150	138	150	136	151	140	154
含水率(%)	74.7	71.6	72.9	72.2	75.6	73.1	75.0
投入熱量 (GJ/h)	14.9	17.8	16.6	18.8	14.8	15.8	15.4
発電出力(kW)	420	<u>690</u>	<u>605</u>	<u>730</u>	448	<u>683</u>	385*
消費電力(kW)	529	559	552	563	567	569	560

※焼却炉の安定運転ができず、炉内温度上昇にエネルギーを要したために、低い発電量となっている。

(3) 高効率発電技術の負荷変動運転結果

汚泥処理の負荷変動による高効率発電技術への影響を評価するため、汚泥処理量を増加または減少させた運転を行った。図表 13 に汚泥焼却量を 5.0wet-t/h (120wet-t/日) から 7.0wet-t/h (168wet-t/日) に約 40%増加させた場合の運転結果を示す。焼却炉への投入熱量の増加に伴い、蒸発発生量の増加とそれに伴う発電出力の増加が見られ、高効率発電技術は負荷変動においても安定した運転が可能であることが確認された。

(4) 局所攪拌空気吹込み技術運転結果

図表 14 に焼却炉定格運転条件下における局所攪拌空気吹込み技術の運転結果の一例を示す。ここで、局所攪拌空気吹込み実施、停止ともに約 9 時間運転した結果である。

N₂O 削減効果については、実証運転において測定した N₂O 排出濃度及び脱水汚泥当たりの排出係数で評価を行った。比較対象は、同一実証期間で局所攪拌空気吹込み技術停止中の平均値を用いた。NO_x 削減効果については、実証運転における排出濃度を用いて評価を行った。比較対象は、局所攪拌空気吹込み技術設置以前の 3 系焼却炉の NO_x 平均排出濃度を用いた。

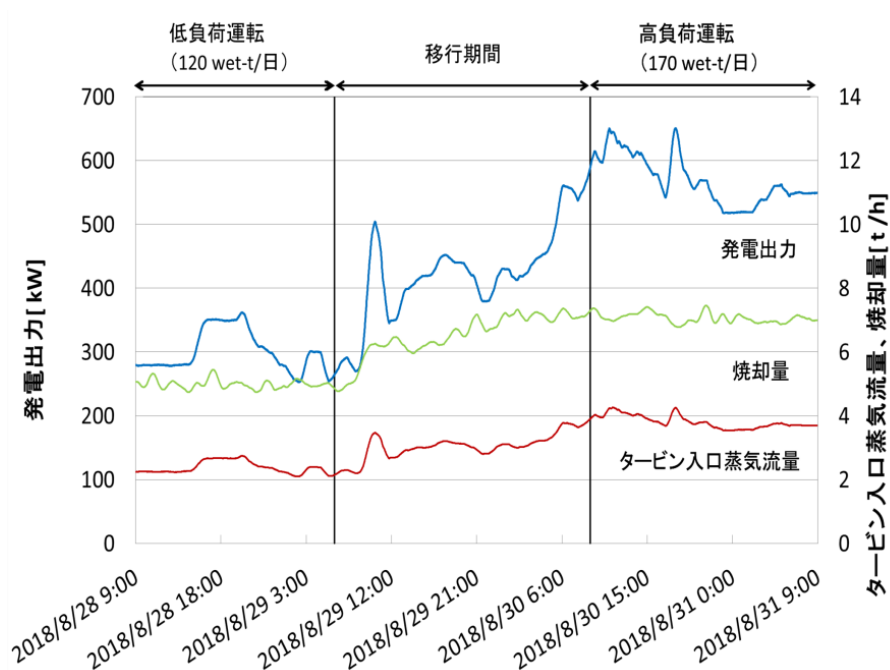
局所攪拌空気吹込みを実施することにより、実証フィールドにおいて N₂O 排出係数及び NO_x 排出濃度を同時に 50%以上低減させることが可能であること、N₂O 排出係数は、多段吹込燃焼式流動床炉等の N₂O 削減技術と同程度 (0.263 kg-N₂O/wet-t) ^{※2}以下に低減できることを確認した。

※2：下水道における地球温暖化対策マニュアル～下水道部門における温室効果ガス排出抑制等の指針～ 2016 年 3 月 環境省・国土交通省

(5) 耐久性、安全性、運転・操作性

高効率発電技術である復水式蒸気タービンは、従来ごみ焼却設備やバイオマス発電設備で実績があり、耐久性、安全性は高いと考えられる。ボイラも、下水汚泥焼却設備では乾燥設備の熱回収用等に広く用いられてきており、耐久性、安全性に問題はない。また、運転、操作も発電技術の長い運用の中で確立されており、本設備でも運転の自動化が可能である。

局所攪拌空気吹込み技術は、下水汚泥焼却炉と同様の設計をしており、タービンやボイラ設備のように高速回転機器や稼働設備がないため、耐久性や安全性は高いと考えられる。また、自動化も確認済みであり、容易な運転・操作性を有している。



図表 13 負荷変動に対する高効率発電技術運転結果

図表 14 局所攪拌空気吹込み技術運転結果

			局所攪拌空気		削減率 [%]
			なし	あり	
N ₂ O	濃度	ppm-12%O ₂	88	41	53
	排出係数	kg-N ₂ O/wet-t	0.494	0.232	
NO _x	濃度	ppm-12%O ₂	52	13	75

6. 経済性

本設備を焼却炉に追加設置した場合の費用回収年試算結果を図表 15 に示す。ここで、建設費は補助金を考慮していない。また、表中の導入効果は、発電による電力創出効果と、高効率発電技術導入により休止する白煙防止設備の動力、整備、交換等が不要となる効果である。150wet-t/日の焼却炉に追加設置した場合の費用回収年は 12 年となり、耐用年数 15 年^{※3}を下回った。

本設備を導入した場合の温室効果ガス排出量削減効果の試算条件を図表 16 に、従来の流動床式焼却設備を従来技術として比較した結果を図表 17 に示す。ここで、従来技術は高温焼却（850℃）対応焼却炉の N₂O 排出係数 0.645 kg-N₂O/wet-t^{※2}を用いた。

本設備を導入することで、温室効果ガス排出量は局所攪拌により 52%、高効率発電により 18%、合計 70%の削減が期待できることが示された。

※2：下水道における地球温暖化対策マニュアル～下水道部門における温室効果ガス排出抑制等の指針～ 2016 年 3 月 環境省・国土交通省（再掲）

※3：「バイオソリッド利活用基本計画(下水污泥処理総合計画)策定マニュアル(案)

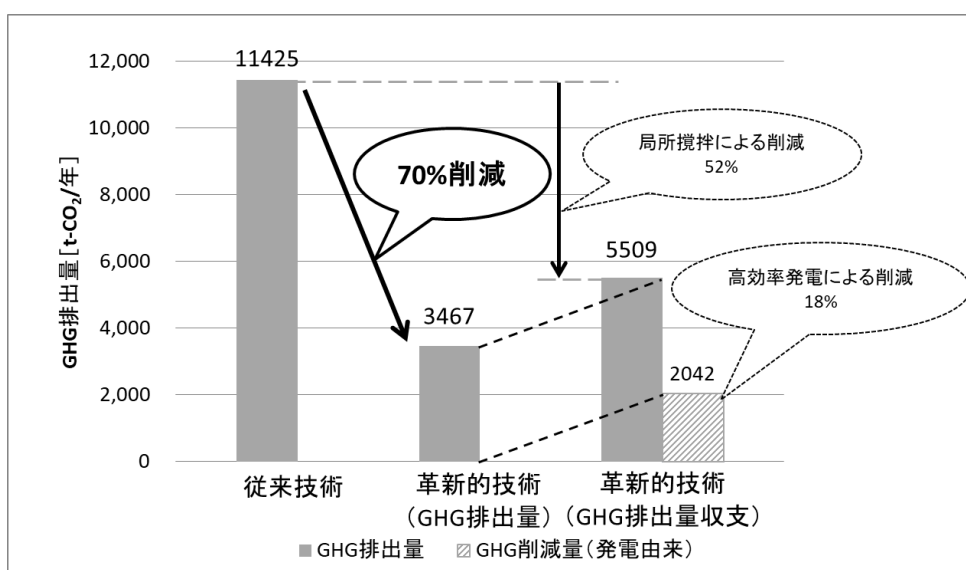
図表 15 費用回収年試算結果

処理規模 [wet-t/日]	150
(固形物量) [ds-t/日]	(39)
投入熱量 [GJ/h]	17.0
工事費 [百万円/年]	65.1
維持管理費 [百万円/年]	18.8
導入効果 [百万円/年]	-88.1
費用回収年 [年]	12.0

図表 16 試算条件

項目		内容
含水率 [※]	%	74.0
有機分 [※]	%	86.4
高位発熱量 [※]	kJ/kg-DS	19,890
処理規模	wet-t/日	150
炉形式	-	流動床式焼却炉

※数値は実証フィールドにおける分析結果の平均値



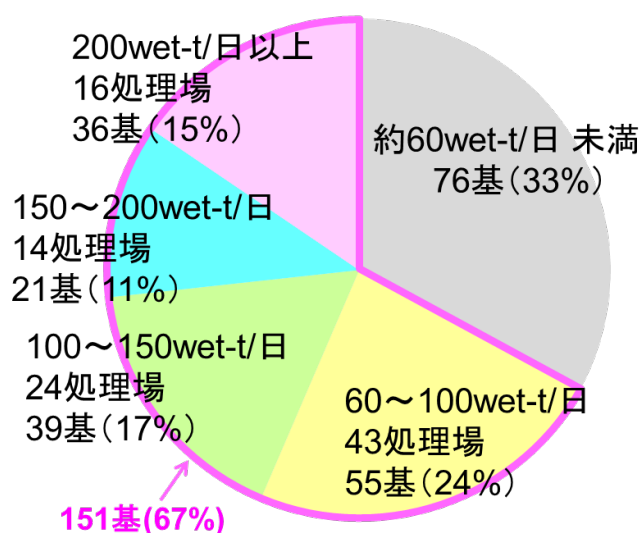
図表 17 温室効果ガス削減効果

7. 将来性

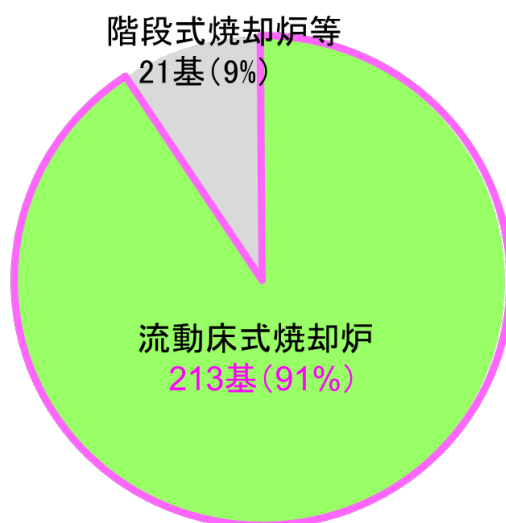
カーボンニュートラルに向け温室効果ガス削減の必要性は高く、汚泥焼却炉での廃熱利用技術の適用は重点施策（「下水道事業におけるエネルギー効率に優れた技術の導入について」国水事第38号通知（通知年度：2017年））となっている。国内既設焼却炉の内、高効率発電技術は67%（151基）に、局所攪拌空気吹込み技術は91%（213基）に適用可能である（図表18及び図表19）。

よって、適用範囲が広く、かつ環境課題、施策に合致した本設備導入の可能性は高く普及が期待される。

また、カーボンニュートラルは国内のみならず世界において重要な課題であり、海外への展開も期待される。



図表18 高効率発電技術 適用可能焼却炉



図表19 局所攪拌空気吹込み技術適用可能焼却炉

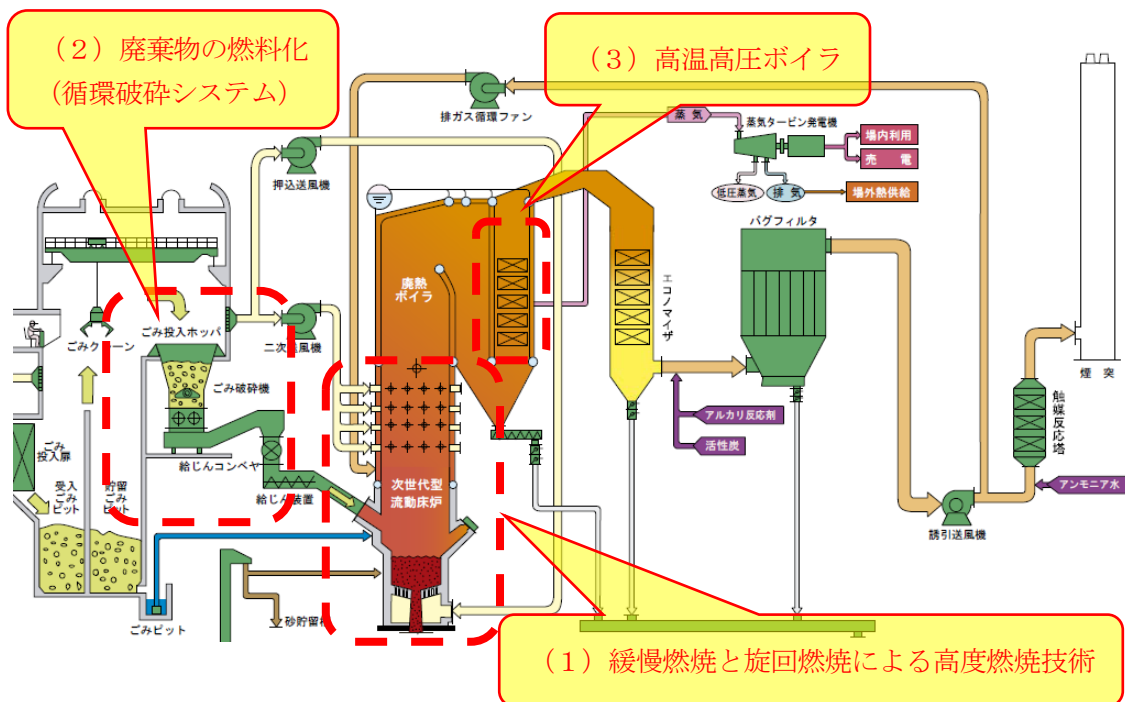
日本産業機械工業会会長賞
「次世代型流動床式ガス化燃焼炉」
株式会社神鋼環境ソリューション

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。

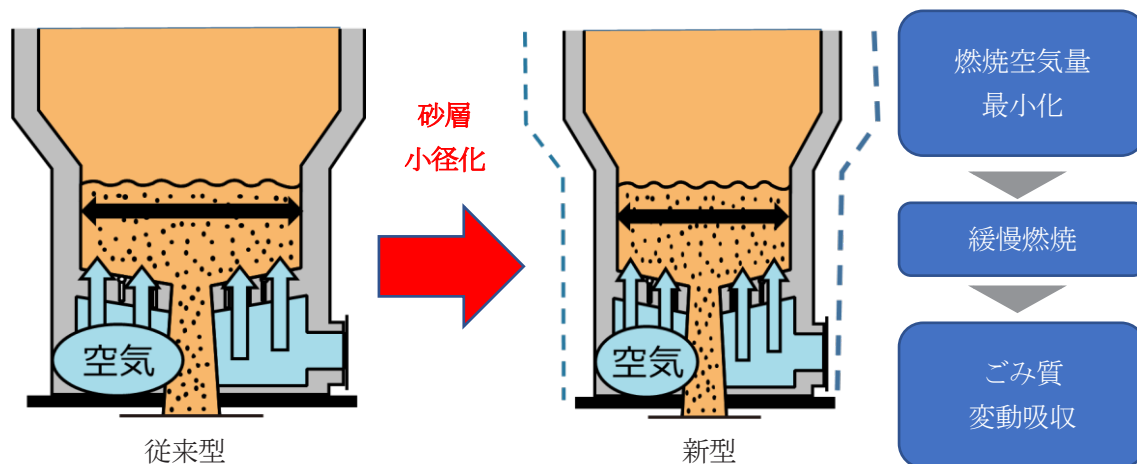


図表1 流動床式ガス化燃焼炉フローシート

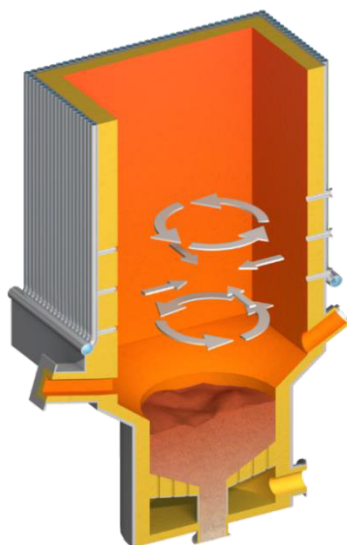
(1) 緩慢燃焼と旋回燃焼による高度燃焼技術（ガス化燃焼）

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

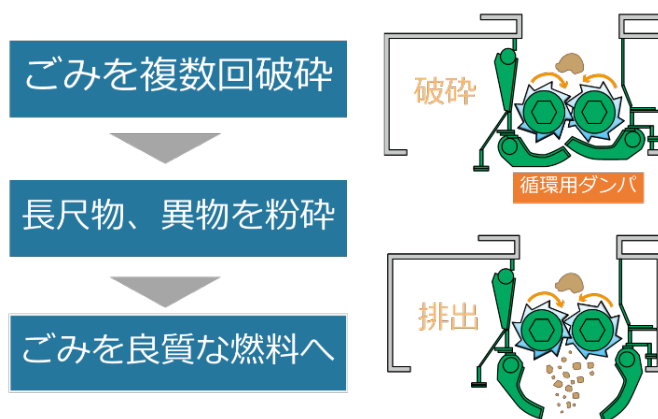
制御方式に関しては、レーザ式 O₂ 濃度計という従来のジルコニア式 O₂ 濃度計と比べてより早く検知することができ、かつメンテナンス性に優れているものを使い、二次空気量の制御に用いることで燃焼制御の高度化を図っている。

(2) 廃棄物の燃料化（循環破碎システム）

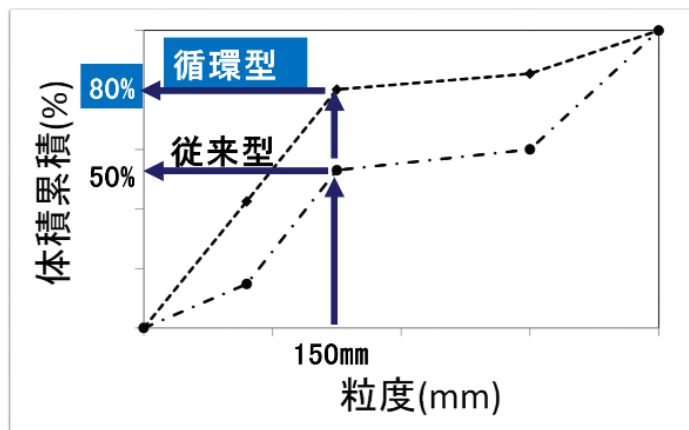
流動床炉は、その炉形式の特性上燃焼速度が速い。そのため、発電量制御に優れている等の利点がある一方、給じん（ごみの投入量、ごみ質）の変動が燃焼変動に大きな影響を与える。炉規模（処理規模）が大きくなるにつれ、その給じんの変動の影響は小さくなるものの、中小型炉では破碎システムを導入した方が、発電量制御、低空気比燃焼などを実現しやすい。

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℃)

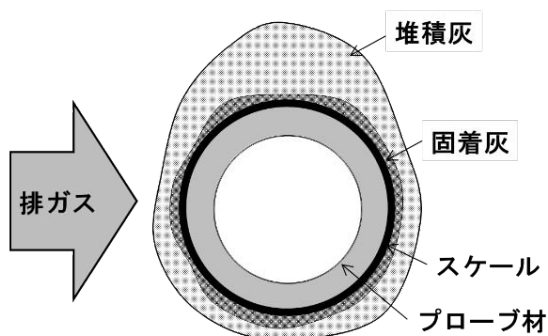
廃棄物発電の高効率化にはボイラ蒸気条件の高温高压化が効果的であるが、排ガス中の腐食成分による過熱器管の腐食が問題となる。日本国内においては4MPa×400℃クラスの蒸気条件が標準となっており、当社においても同様の蒸気条件(4MPa×400℃)を採用した発電施設を複数納入している。その高温高压による腐食状況を確認したところ、5年以上経過後も過熱器管にほとんど減肉がないことを確認しており、長期にわたって大規模な補修や更新を必要としない目途を得ている。

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)。

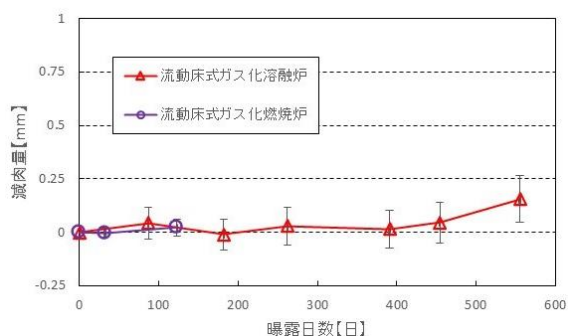
一方、2019年3月竣工した第1号機である「はつかいちエネルギーセンター」における3次過熱器管(蒸気温度450℃部)の減肉量は、1号系、2号系ともに平均減肉速度は0.1mm/年程度であり、過去の暴露試験と同様の減肉挙動であることを確認している。

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。

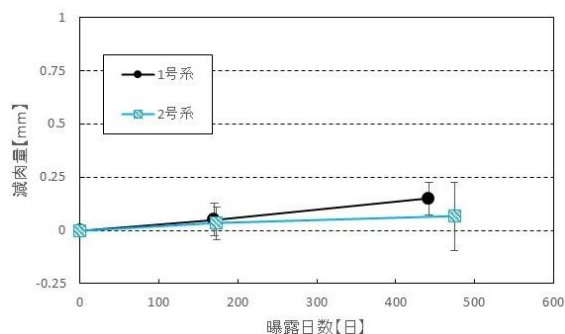
また、流動床炉はその特性上、炉内脱塩・脱硫の特長を有しており、焼却炉出口において排ガス中のHCl濃度、SOx濃度が低い。流動床式ガス化燃焼炉では、バグフィルタ入口のHCl濃度、SOx濃度がそれぞれ85~110ppm、1.5~4ppmであった。



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。

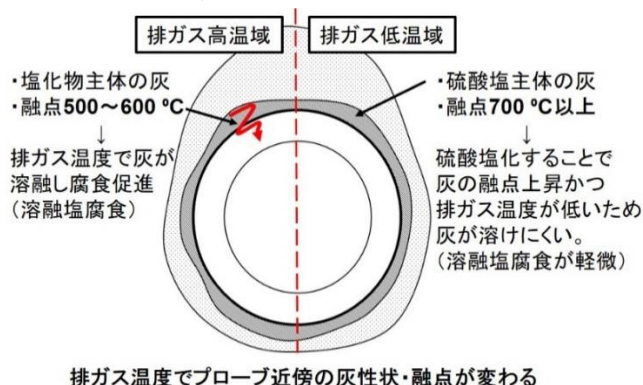
(3) 高温高压ボイラ (6MPa×450℃)

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℃程度の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

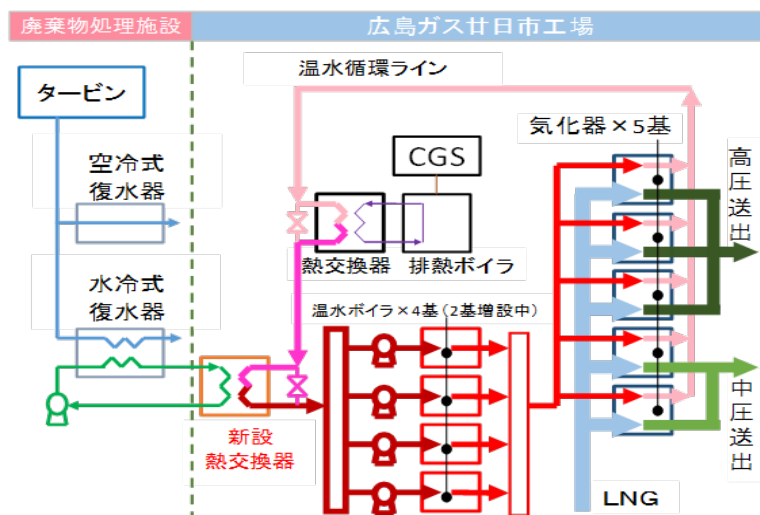
項目	基準値	1号系	2号系
煙突ばいじん濃度(g/m ³ N)	0.005以下	0.001未満	0.001未満
煙突SO _x 濃度(ppm)	10以下	0.7未満	0.7未満
煙突HCl濃度(ppm)	10以下	4	3
煙突NO _x 濃度(ppm)	20以下	9	9
煙突CO濃度(ppm)	30以下	4	4未満
煙突DXNs濃度(ng-TEQ/m ³ N)	0.01以下	0.00012	0.00065
煙突Hg濃度(μg/m ³ N)	—	0.71	0.6
炉出口空気比	—	1.26	1.29

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。

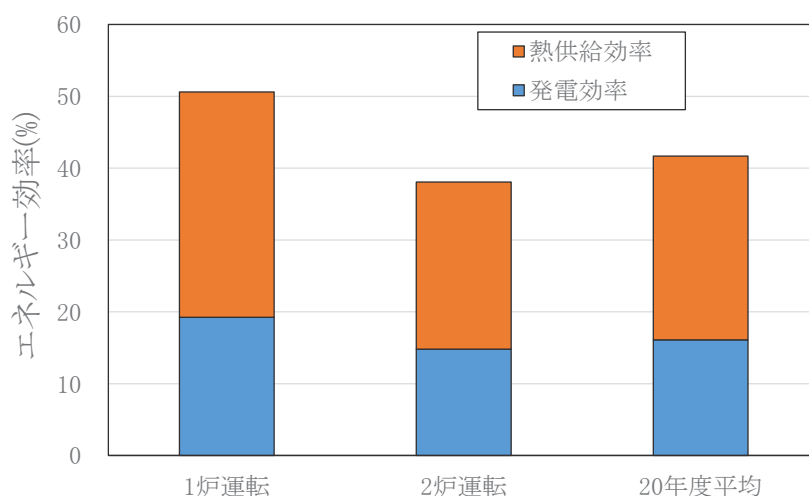
（3）耐久性・安全性

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

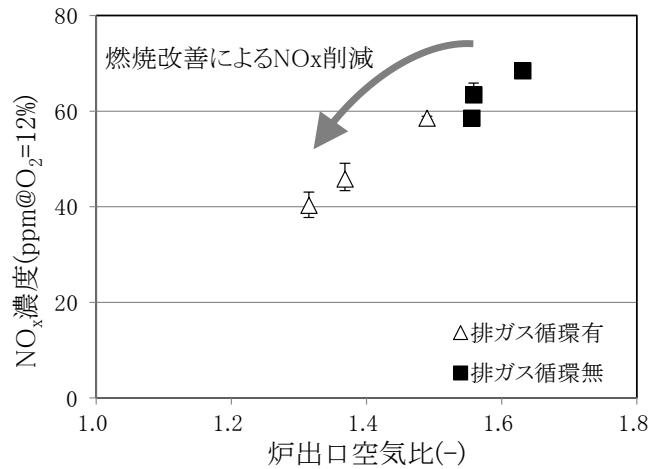
循環破碎システムは従来の二軸破碎機と比べて破碎刃の摩耗が増えるため、肉盛り補修が必要だが、定期的に行うだけで維持管理性は大きく変わらない。その他に関しては、従来装置と変わらない維持管理性を有する。

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 NOx 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。

日本産業機械工業会会長賞

「廃モータからの銅線回収システム」

三菱長崎機工株式会社

1. 装置の詳細説明

本システムは、廃家電品や廃自動車に含まれるモータから、銅線を高精度に選別回収するシステムである。

機器構成は、主に磁力選別機、渦電流式選別機と色彩光学選別機で構成される。破碎した処理対象品から磁力選別機で鉄類、渦電流式選別機で非鉄金属類を選別回収した後、発生する銅線及びプラスチック片等の非金属混合品を色彩光学選別機に投入する。色彩光学選別機で銅線と非金属・プラスチック片等を高精度に選別回収する。

(1) 本システムの構成

これまでの金属選別回収プラントでは、磁力選別機での鉄類回収、渦電流選別機での非鉄金属回収が主であったが、色彩光学選別機を導入することにより、製品付加価値の高い銅線を高精度回収できるようになったことが、本システムの特徴である。

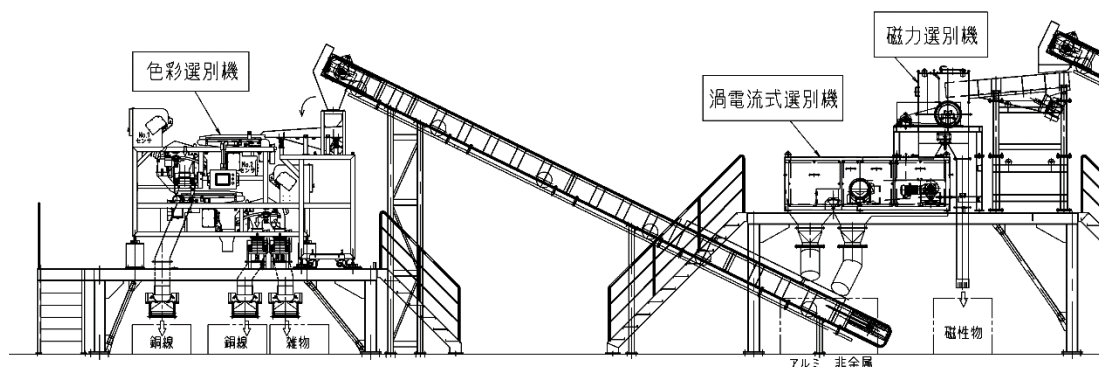
一般的な銅線回収システムの構成例を図表 1 に示す。

(2) 主要装置の説明

本システムの主要な装置について説明する。

1) 磁力選別機

本システムでは、省スペース・高磁力の性能を有する永久磁石式高磁力ドラム磁選機を採用した(図表 2)。



図表 1 銅線回収システム構成例

破砕されたモータ破砕品を、ドラム内部に内蔵した強力な永久磁石によって、ドラム表面に鉄などの強磁性物を吸着させ、常時回転しているドラムシェルにより、磁界範囲外へ移動させ、分離分別を行う。

本装置は、ドラムシェル円周方向に連続配置した磁石で鉄製の磁極板を挟み込む構造で磁気を集中させ、ドラムシェル上で最大約 0.8T 以上の高磁力を達成している（図表 3）。そのため従来のドラム幅方向磁極タイプ（最大磁力約 0.3T）と比較し、大幅に磁力アップしており処理物の回収率が向上している。また、磁極間においても約 0.4T の高磁力を有するため、ドラムシェル表面を流れ落ちる微粒鉄分を確実に捕獲し、分離分別を可能としている。

2) 渦電流式選別機

ドラム磁選機で選別された非鉄金属類を渦電流式選別機に投入し、アルミニウムと銅線、プラスチック片などの非金属に分離分別を行う。本システムでは、高性能型非鉄選別機を採用した（図表 4）。

高性能型非鉄選別機は、弊社独自の磁気設計と偏芯ロータ構造により、細粒径 5mm の非鉄金属を選別回収できる。永久磁石を円周上に配置した磁気ロータを高速回転させ、ドラム表面に発生する強力な交番磁界によって、コンベア上を送られてくる処理物中のアルミニウム等の非鉄金属に渦電流を生じさせ、発生する推進力により分離分別する（図表 5）。

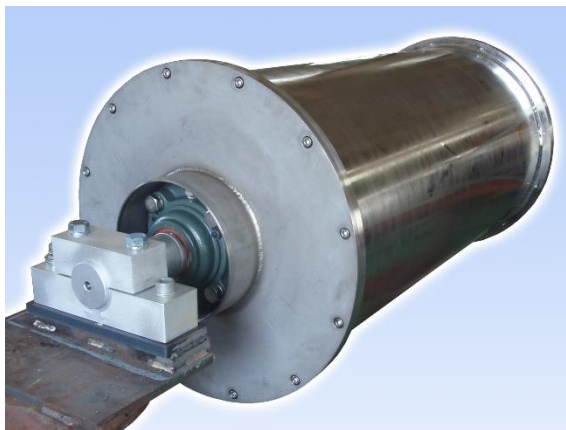
当社磁気ロータは、偏芯構造となっているため、ドラムとベルト間への処理物の巻き込みが少ない。また、従来の同芯型と比較し、磁気ロータの交番磁界の磁気勾配が大きく、細粒径 5mm を分離分別できる能力を有している。

3) 色彩選別機

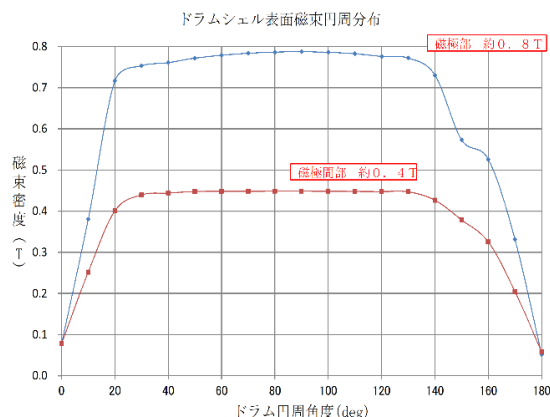
渦電流式選別機で選別された銅線、プラスチック片などの非金属を色彩選別機に投入し、銅線とプラスチック片などの非金属に分離分別を行う（図表 6）。

色彩選別機は対面設置の CCD カメラによる処理物の高精度認識と上下 2 段式の選別部による省スペース型で 3 種選別や精選などユーザの目的に応じて様々な選別設定が可能である。

投入された処理物を、2 方向からの CCD カメラで色を判別・検知し、エア噴出により、分離分別を行う。また、処理物の色を判別するため、非鉄金属だけでなく基盤、ゴムなどの多彩な用途に使用可能である（図表 7）。



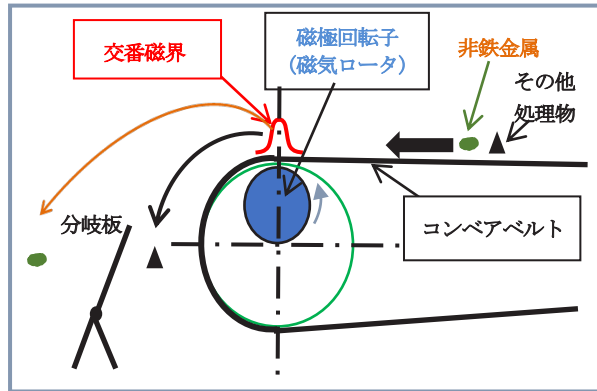
図表 2 永久磁石式高磁力ドラム磁選機



図表 3 ドラムシェル表面磁束円周分布



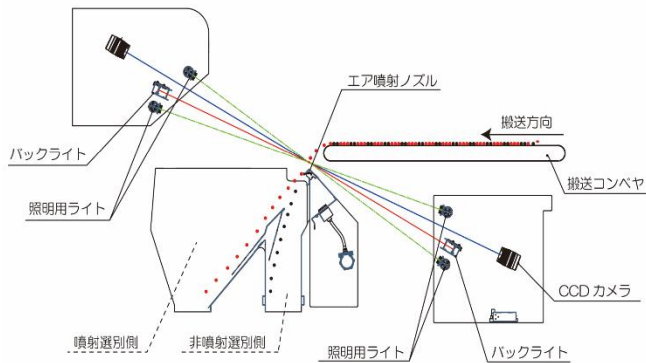
図表4 高性能型非鉄選別機



図表5 非鉄選別機構造図



図表6 色彩選別機



図表7 色彩選別機構造図

2. 開発経緯

(1) 開発目標

廃家電品や廃自動車に含まれるモータから、銅線を高精度に選別回収するシステムを開発する。

(2) 背景

近年の中国をはじめとする海外への金属スクラップ、廃プラスチックの輸入制限・禁止措置により、これまで通り、破碎未処理品又は選別未処理品の状態で輸出出来なくなっており、日本国内で単一金属へ選別処理を行う需要が高まっている。

廃家電品や廃自動車に含まれるモータについても、鉄類、アルミ・銅などの非鉄金属類、プラスチック類といった単一金属へ選別する必要があるが、従来、湿式選別または手選別などで行われていた。しかしながら、設備導入コスト、費用対効果の問題があり、安価で高性能な乾式選別、自動化の必要があった。

上記より、弊社選別機と色彩選別機を組合せ、鉄類、アルミ・銅などの非鉄金属類、プラスチック類を高精度に選別回収するシステムを開発した。

(3) 目標

鉄類、アルミ、銅の純度・回収率を各々90%以上の選別システムを提供する。

(4) 開発経緯

2014年10月	高性能型非鉄選別機（渦電流式選別機）の設計・製作開始
2017年3月	永久磁石式高磁力ドラム磁選機の設計・製作開始
2019年4月	色彩選別機の導入・実証試験開始
2019年7月	銅線回収システムの計画・開発開始
2019年10月	銅線回収システムの実証試験開始
2020年6月	第1号機納入

(5) 共同開発

無し

(6) 技術導入

2019年、TAIHO社(中国)より2段式色彩光学選別機を導入し、日本向け当社仕様として操作インターフェイス改良及び銅線や金属スクラップを対象とした選別プログラムの改良を行った。また、搬送部（シュート）において金属スクラップ特有の摩耗や堆積物による詰まりが生じる可能性があるため、形状変更や部品追加等の改良を行った。

3. 独創性

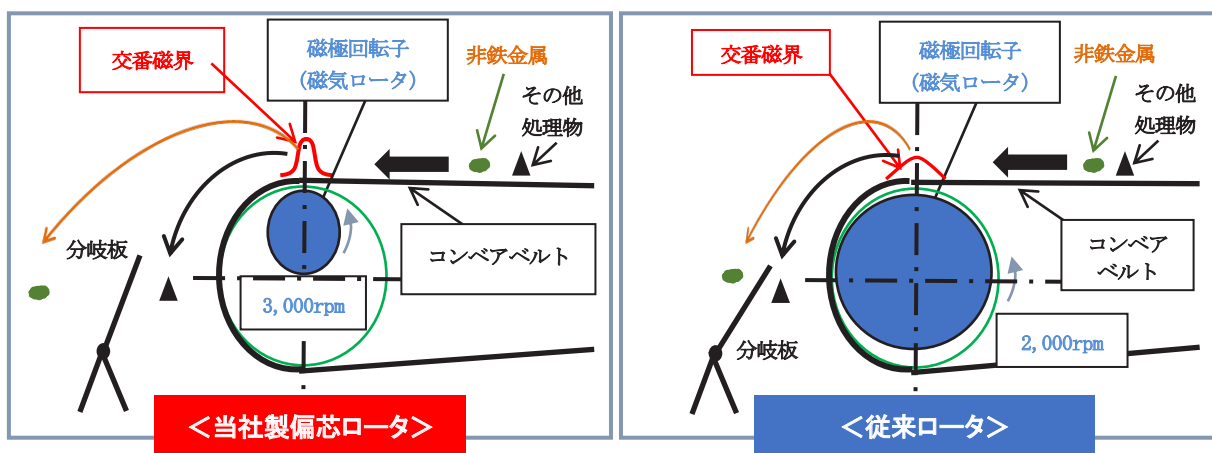
(1) 偏芯ロータ

渦電流式選別機において、弊社は偏芯型磁気ロータを採用している。磁極配置の工夫により高性能な磁極回転子をコンパクトに設計し、偏芯量を大きくすることを実現した。これにより、従来の同芯型及び小偏芯型と比べ、ヘッドプリー頂部に交番磁界が集中し、磁気勾配が大きくなる（図表8）。また、従来、2,000rpm程度のロータ回転数を3,000rpmの高速回転を実現。これらにより、非鉄金属の反発力、加速力が一気に増幅し、アルミニウムなどの非鉄金属の選別精度が大幅に向上する。

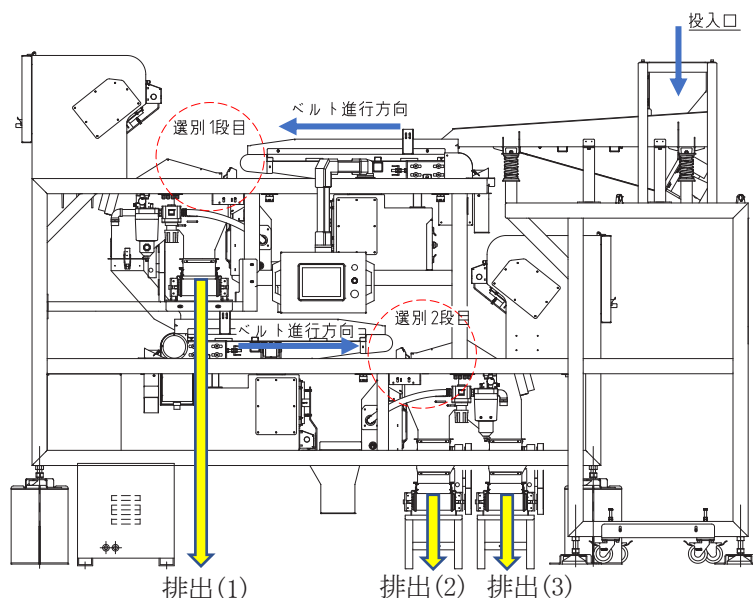
(2) 2段式色彩選別機の採用

本システムの色彩選別機は、2段式を採用している（図表9）。他メーカーの同等機種は1段式が主流で、スペースを広く必要とする。

当社が採用した2段式色彩選別機は1段目と2段目が対向したレイアウトで1段式と同程度の設置面積であり、省スペース（約10m²）を達成した。また、1台で対象物を2回選別するため、高精度選別が可能である。さらに、2段式では選別アウトプットが3カ所となるため、対象物を3種類に選別するなど、各ユーザのニーズに幅広く対応できる。



図表 8 偏芯ロータと従来ロータの比較



図表 9 2 段式色彩選別機レイアウト

4. 特許の有無

無し

5. 性能

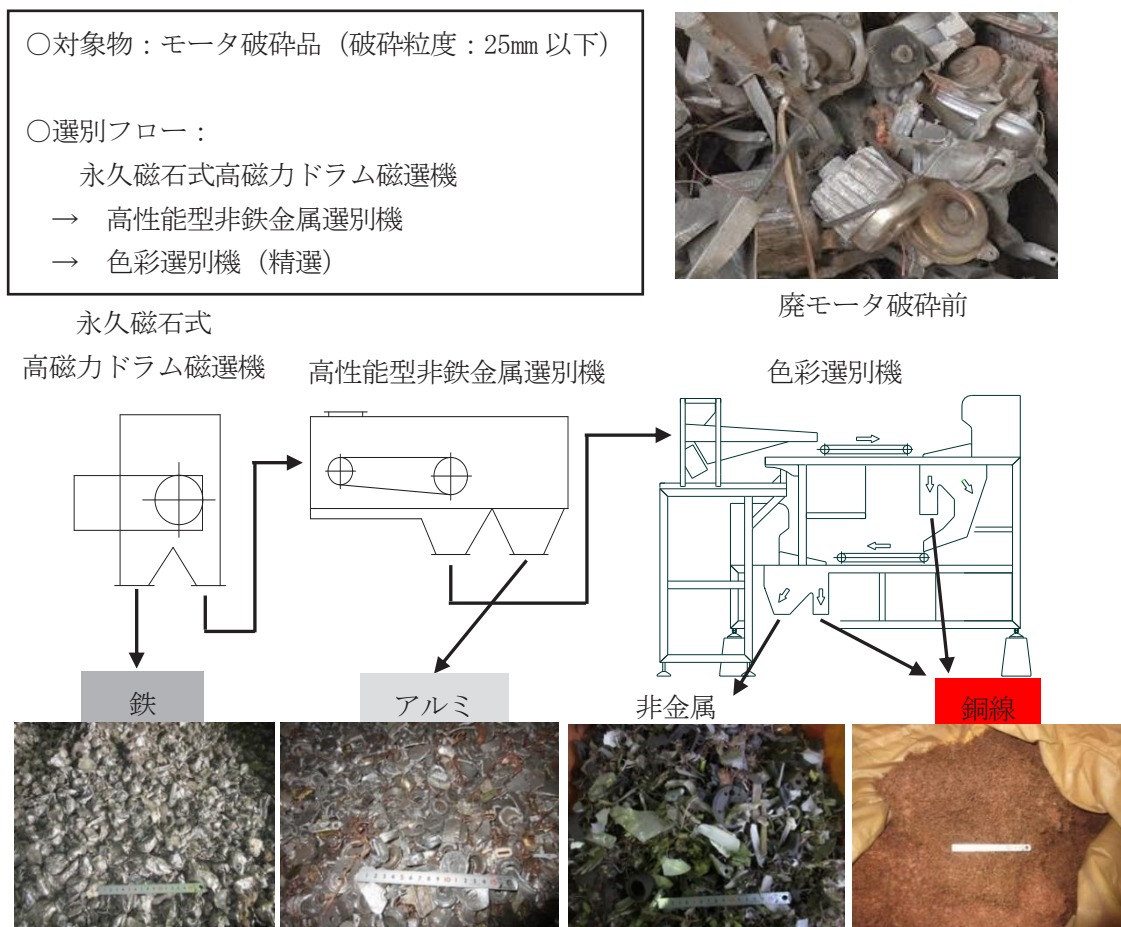
本システムの第1号機の納入先において、廃モータから、鉄、アルミニウム、銅線の選別実証テストを行った。投入量は、0.6ton/hr。図表 10 に選別フロー及び選別状況を示す。

破碎された廃モータはドラム磁選機に投入され、鉄を選別回収する。非鉄類は高性能型非鉄選別機に投入され、アルミニウムを主とした非鉄金属を選別回収する。銅は非鉄金属であるが、銅線は線径が数 mm 程度と細かいため磁気影響を受けにくく、非金属と共に選別される。銅線及びプラスチック等の非金属は色彩選別機に投入され、銅線を選別回収する。

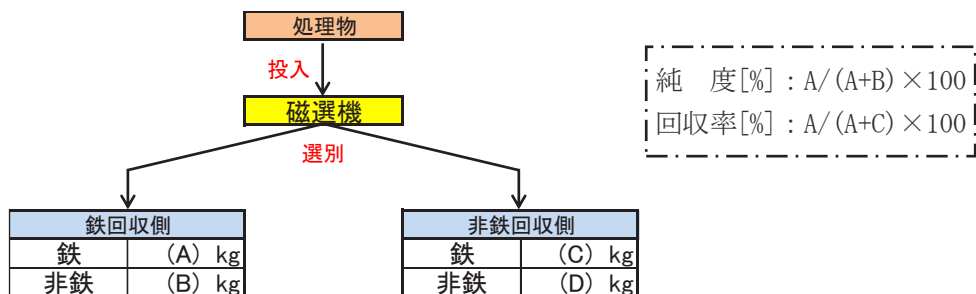
実証テストの結果、鉄、アルミニウム、銅線とも、純度・回収率 95%以上を達成した。選別テストの評価指標として、純度・回収率を用いた。本指標算出について、磁選機で鉄回収を評価

する場合を例に図表 11 に示す。鉄回収側の鉄の割合を純度、処理物全体に含まれる鉄のうち、鉄回収側に選別できた鉄の割合を回収率として評価する。いずれも重量ベースでの評価である。

また、これまでの銅線回収はナゲット機で電線を粉砕し、比重選別により分別回収するナゲット処理が主流であった。比重選別には乾式と湿式があるが、どちらも選別用媒体の維持管理や付帯設備が必要となる。さらに、投入前に手作業による解体・切断等が必要であり、処理対象も主に電線に限られることが多かった。一方、本システムは比重選別に必要な媒体・付帯設備がないため作業環境を改善できるほか、処理対象の前処理も不要である。さらに選別対象も廃モータや小型家電等、電線以外も幅広く処理することができる。



図表 10 廃モータ選別フロー及び選別状況



図表 11 純度・回収率の算出

6. 経済性

本システムの第1号機での導入実績、有価物回収量から、投資回収の試算を行った。

本試算より、本システム導入後、約3年で投資回収が可能となる。特に銅スクラップ価格は、上昇傾向にあり、投資回収期間の短縮が見込める。

第1号機納入先では、廃モータ以外の処理物も扱っており、いずれの処理物も分離分別の結果に高い評価を頂いている。また、破碎から色彩選別機まで、自動化処理できることから、人員の削減が可能であり、必要経費の圧縮にも繋がっている。

図表 12 廃モータ選別システム設備投資費用

	金額(千円)
破碎機関連	35,000
磁選機・色彩選別機関連	50,000
搬送関係	25,000
基礎工事他	10,000
設備投資合計	120,000

図表 13 月間原料購入費 (モータコア)

原料投入量	0.6ton/hr
稼働時間	7hr/日
稼働日数	21日
原料購入単価	80円/kg
原料購入費	7,056千円/月

図表 14 廃モータの各物質回収量

	回収量 (ton/月)
鉄	66.2
アルミ	4.4
銅線	8.8
残渣・非金属	8.8

図表 15 月間必要経費

		金額 (千円/月)	備考
原料購入費		7,056	図表 13 より
人件費	1名	400	400千円/月
パート費	1.5名	265	1,200円/hr
光熱費	60kW	265	30円/kWh
メンテ費	12ヶ月	167	2,000千円/年
月間必要経費		8,152	

図表 16 有価物回収価格 (モータコア)

	金額 (千円/月)	単価 (円/kg)
鉄	2,977	45
アルミ	441	100
銅線	8,820	1,000
残渣・非金属	-882	-100
回収価格	11,356	

図表 17 月間利益及び償却期間 (モータコア)

	金額 (千円/月)
月間収入	11,356
月間支出	8,152
月間利益	3,204
年間利益	38,447千円/年
償却期間	3.1年

7. 将来性

地球環境の環境保全、長期的かつ安定的に金属・非金属素材を供給していく上で、リサイクル活動は今後も推進されると考える。

また、海外の金属スクラップ、廃プラスチックの輸入動向は常に変動しており、この情勢変化に対応すべく、日本国内で金属選別処理需要はますます高まりを見せると推測される。

本システムは、上記ニーズに応えるべく、「高性能」、「高精度」、「低コスト」なシステムを提案でき、今後、国内金属リサイクル業界のあらゆるニーズに役立つシステムになると考える。

— 非 売 品 —
禁無断転載

第 48 回
優秀環境装置

発 行 2022 年 7 月

発行者 一般社団法人 日本産業機械工業会
〒105-0011
東京都港区芝公園三丁目 5 番 8 号
電話 03-3434-6820

