KOBELCO
KOBE STEEL GROUP

神鋼環境ソリューション技報 Vol.11 No.1 (通巻21号)

神鋼環境ソリューション 技報

Vol.11 No.1 (通巻21号)

KOBELCO ECO-SOLUTIONS ENGINEERING REPORTS

神鋼環境ソリューション

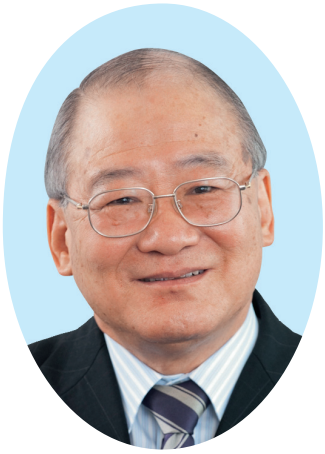
神鋼環境ソリューション技報
2014年度・Vol.11・No.1
21
KOBELCO ECO-SOLUTIONS
ENGINEERING REPORTS

目　次　CONTENTS

1	＜巻頭言＞ 安全・安心な社会を目指して	
2	神戸市東灘処理場　再生可能エネルギ生産・ 革新的技術実証研究（B-DASH プロジェクト） ―第3報―	Demonstration Research on Renewable Energy Production and Innovative Technologies at Higashinada Treatment Plant in Kobe City（B-DASH Project），third report
7	稲美町向け遠方監視システムの更新 ―農業集落排水処理場へのウォーターアイ導入―	Replace of Remote Monitoring System in Inami-cho
13	燕・弥彦総合事務組合環境センターにおける 基幹的改良工事	Improvement Work at Tsubame-Yahiko MSW Incineration Plant
17	中規模高効率発電の流動床式ガス化溶融施設の 完成（芳賀地区エコステーション）	Introduction of the Latest MSW Gasification and Melting Plant
24	西秋川衛生組合ごみ処理施設 掘り起こしごみ処理による最終処分場再生と 高効率発電への取組み	Nishiakigawa MSW to Energy Plant Final Disposal Site Reproduction by Digging-up Refuse Disposal and the Action for High Efficiency Power Generation
33	EI 統合新型 DCS の実用化実績	Application Result of New Style DCS in which E&I Functions are Integrated
38	機器設計における熱流体解析の活用事例	CFD Simulation Analysis of Equipment Design
43	スイングスター® の撹拌性能向上	Improvement in Agitation Performance of SWINGSTIR®
49	反応槽のスケールアップにおける生産性向上と 省エネ技術	Productivity Improvement and Energy-saving Technology on Reactor Scale-up
56	施設・技術紹介	
57	TOPICS	

＜巻頭言＞

安全・安心な社会を目指して



淑徳大学　人文学部
教　授　**北　野　　大**
Masaru Kitano

20世紀は安全を求めた世紀であったが，21世紀は安全・安心の世紀にすることが，第２期科学技術基本計画にも謳われている。安全はその時点，時点の自然科学に裏づけられた客観的事実，安心は自らの理解と納得に基づく主観的事実といえる。ちなみに安全の英訳は safety であるが安心に対しては適切な単語がなく，sense of security と訳している。安全を安心につなげるためには，信頼があり，安全×信頼＝安心と表される。いくら安全を主張しても信頼がなければ安心に繋がらない。信頼性確保の一つの手段がリスクコミュニケーションである。

明治大学の向殿政男名誉教授の推進する学問に「安全学」がある。「安全学」であって「安全科学」，「安全工学」でないことに注意をされたい。「安全学」とは安全にかかわる技術的側面，人間的側面及び環境的側面を統合的に学問化するものであり，その前提として「機械は故障する」，「人は過ちを犯す」という考え方を持つ。

機械の故障に対してはそもそも安全を目標とするフェールセーフの考え方がある。一方，信頼性を高めるフォールトトレランスという考え方もある。現在，世界の原子力発電所は後者の考え方で設計されているが，３年前の福島第一原子力発電所の大事故を考えると，当然ながらフォールトトレランスの限界が見える。

「人は過ちを犯す」という考え方の対策には，本質的安全設計という考え方が大切である。まず，第１段階として危険源を可能な限りなくすこと，それでも残るリスクには第２段階として防御措置を講ずること，そして最後の第３段階が人間による注意である。

それではどこまで安全にすればよいのか？私は経営者の皆さんに次のような質問をしている。「現在，社員の皆さんにお願いしている仕事を，同じ条件（勤務時間，待遇，安全対策など）で，あなたの息子さんや娘さんにやらせますか？」
自信を持ってイエスと答える経営者がほとんどあってほしいが，現実はいかがであろうか。

良い会社とは，顧客から愛され，社員から愛され，ステークホルダーから愛され，そして地域社会から愛される会社であるという。社員から愛されるために何が必要か。経営者の判断に任せるが，大学人の端くれとして，私は淑徳大学の学生を常に自分の息子，娘と思って教育・指導している。経営者にあっては社員を自分の家族の一員のように遇することもその一つの要素になろう。

地域社会から愛される会社になるために，環境対策，特に排水管理も同様である。「その排水を下流で取水し，水道水として自分の家族が飲むとしたら，安心してその排水を流せますか？」という問いに対し，たとえば WET（全排水毒性）のデータにより，多くの経営者から Yes! という返事が返ってくることを期待している。

神戸市東灘処理場　再生可能エネルギ生産・革新的技術実証研究（B-DASH プロジェクト）―第３報―

Demonstration Research on Renewable Energy Production and Innovative Technologies at Higashinada Treatment Plant in Kobe City（B-DASH Project), third report

川嶋　淳*
Jun Kawashima

宮本博司*
Hiroshi Miyamoto

豊久志朗**
Shiro Toyohisa

B-DASH（Breakthrough by Dynamic Approach in Sewage High technology）プロジェクトとは，国土交通省が主導する下水道革新的技術実証事業であり，下水道事業におけるコスト縮減や再生可能エネルギ創出等を実現し，併せて，本邦企業による水ビジネスの海外展開を支援するための革新的技術について，実規模レベルのプラントを設置して実証を行うことを目的とした研究である。

2011年度および2012年度は国土技術政策総合研究所の委託研究として実証研究を行い，革新的技術により下水汚泥のエネルギ利用の高効率化を図るとともに，建設・維持管理コストおよび温室効果ガス排出量の削減が可能であることを実証した。本稿では，2013年度に実施した継続研究において得られた実証研究結果について報告する。

B-DASH Project led by MLIT is the research, using commercial-scale sewage treatment plant, aiming to demonstrate the innovative technologies which can substantially reduce sewage service costs, create renewable energy and support Japanese enterprises' overseas water business expansion.
The research in FY 2011 and FY 2012 was conducted as contract research from NILIM, and the result which can increase energy recovery rate from sewage sludge and can reduce the capital and operating cost and greenhouse gas emission by innovative technology, was obtained.
This paper reports the demonstration study results obtained in the continuous research carried out in FY 2013.

***Key Words*：**

汚泥消化	Sludge digestion
メタン発酵	Methane fermentation
バイオマス	Biomass
バイオガス	Biogas
精製	Upgrading

【セールスポイント】

・下水道への受入れに好適な地域バイオマスの受入れ：
　食品製造系バイオマス，木質系バイオマスと下水汚泥との共処理消化によるバイオガス発生量増大

・高機能鋼板製消化槽：
内部可視化により消化性能維持が可能で，インペラ式かくはん機の採用により低動力化と堆積物排出促進運転を実現
・高効率ヒートポンプ：
下水処理水からの回収熱による消化槽加温によりバイオガス有効利用率アップ
・新型バイオガス精製・貯留・圧送システム：
従来型よりコンパクト化・低動力化された新型バイオガス精製・貯留・圧送システムで，高効率な脱硫装置として適用可能

ま え が き

神鋼環境ソリューション・神戸市共同研究体が提案し，下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト）に採択された神戸市東灘処理場を実証フィールドとする題記実証研究を，2011年度および2012度は国土技術政策総合研究所の委託研究として実施した。地域バイオマス受入・混合調整設備，高機能鋼板製消化槽，高効率ヒートポンプおよび新型バイオガス精製・貯留・圧送システムからなる革新的技術は，従来技術に対して建設コスト，維持管理コストおよびライフサイクルコストの縮減が可能であり，温室効果ガス排出量を大幅に削減できることを実証した[1,2]。

2013年度は神鋼環境ソリューション・神戸市共同研究体の自主研究として継続研究を行った。既設卵形消化槽へのバイオマス投入，鋼板製消化槽のインペラ式かくはん機低動力運転等について検証した。当該研究結果を報告する。

1. 実証技術の概要

今回実証を行ったシステムの全体構成図を図１に示す。

① 地域バイオマス受入・混合調整設備

下水道への受入れの好適性が確認できた地域バイオマスを受入れ，必要に応じて前処理を行った後に下水汚泥と混合調整する設備であり，後段の消化槽からのバイオガス発生量を増加させることができる。

② 高機能鋼板製消化槽（220 m^3）

消化槽を鋼板製にすることによって，従来のコンクリート製消化槽と比較して建設コストの縮減・建設工期の短縮が可能である。実証試験では，バイオマス投入による消化への影響調査，インペラ式かくはん機低動力運転，堆積物可視化と排出促進運転について検証した。

③ 高効率ヒートポンプ

下水処理場内の未利用熱を回収し，消化槽等を加温するための温水を供給できるため，バイオガスの

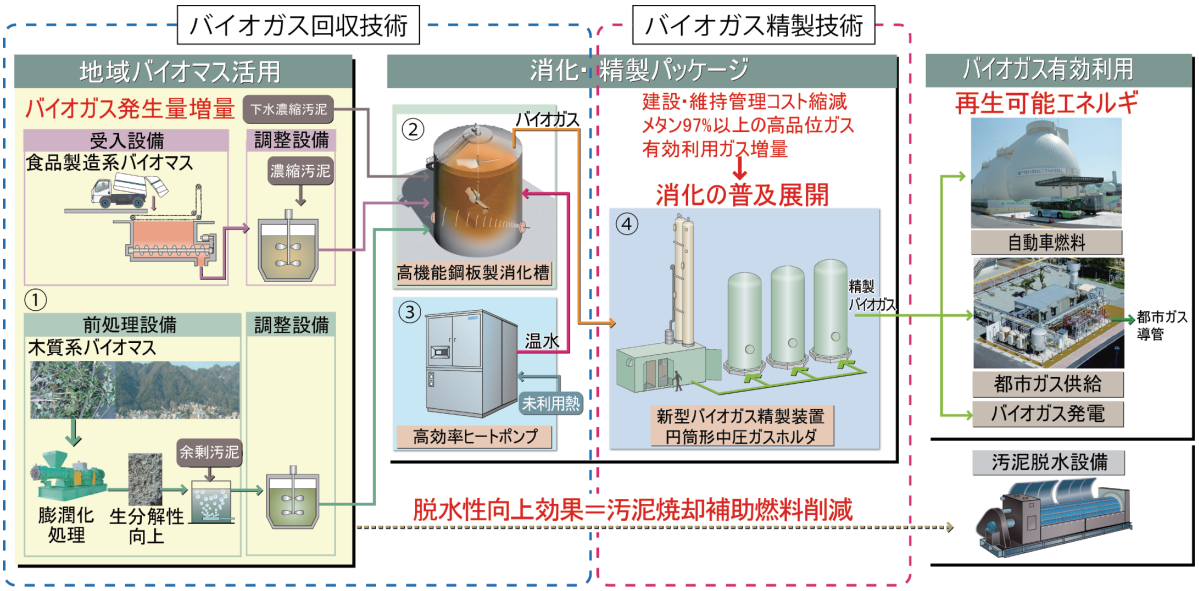


図１　システム全体構成図

有効利用量を増加させるとともに，エネルギ使用量を削減することができる。

④　新型バイオガス精製・貯留・圧送システム

バイオガスからメタン濃度97 %以上の高品位ガスを取出すことができる新型バイオガス精製装置と，円筒形中圧ガスホルダからなるシステムである。

表1　実証施設主仕様

①地域バイオマス受入・混合調整設備		
	食品製造系バイオマス受入能力	鋼板製消化槽　0.7 t-wet/d 既設消化槽　11 t-wet/d
	木質系バイオマス受入能力	鋼板製消化槽　0.25 t-wet/d 既設消化槽　4 t-wet/d
②高機能鋼板製消化槽		鋼板製全溶接円筒形 有効容量　220 m^3 × 1 基
③高効率ヒートポンプ		電動スクリューチラー 加熱能力　266.4 kW × 1 基
④新型バイオガス精製・貯留・圧送システム		
	新型バイオガス精製装置	高圧水吸収法 処理能力　300 m^3_N/h × 1 基
	中圧ガスホルダ	円筒形 貯蔵能力　約500 m^3_N × 3 基

2.　実証研究結果

2.1　実証施設概要

神戸市東灘処理場内に設置している実証施設の主仕様を**表1**に示す。下水への好適性が確認された地域バイオマスは，既設卵形消化槽（有効容量10 000 m^3）にも投入している。

2.2　実証結果

2.2.1　下水道への受入れに好適な地域バイオマスの選定

地域バイオマスの下水道への好適性は，発生量，ハンドリング，排出元へのヒアリング・目視による異物等の確認，組成分析，ガス発生量を総合して判断する。ラボスケールのメタン発酵実験に基づくガス発生予測値と，鋼板製消化槽および既設卵形消化槽でのガス発生量には大きな差は認められず，地域バイオマスの組成が判明すれば，精度の良いガス発生量予測が可能であると考えられた。既設卵形消化槽におけるガス発生量測定値と推定値を**表2**に示す。測定値／推定値の誤差は10 %以内であった。

2.2.2　既設消化槽への地域バイオマス投入

好適性が確認された地域バイオマス（食品製造系および木質系）を下水汚泥と混合調整後，既設卵形

表2　地域バイオマス投入によるバイオガス増量効果（鋼板製消化槽）

			下水汚泥のみ（既設1・2号）	食品製造系＋木質系バイオマス混合（既設3号）
期間			2013年度	
			4/1～3/31	4/1～3/31
VS 混合比（%）	食品製造系		0	3.1
	木質系（主として広葉樹間伐材）		0	1.7
	下水汚泥	初沈汚泥	59.7	53.5
		余剰汚泥	0	0.1
		濃縮余剰汚泥	40.3	41.7
		下水汚泥中の初沈／余剰割合	—	▲3.6 %※
VS 投入負荷（kg-VS/m^3/d）			0.80	0.83
投入 VS 当たりガス発生量［m^3_N/t-VS］	ラボ実験による推定値		537	543
	測定値		492	493
	測定値／推定値		0.92	0.91
ガス発生倍率［m^3_N/m^3］	測定値		12.37	12.93
	増加割合		—	5 %

※　下水汚泥中の初沈汚泥割合：53.5／(53.5＋0.1＋41.7) ×100＝56.1 %
59.7 %（下水汚泥のみの初沈汚泥割合）－56.1 %＝3.6 %

消化槽（10 000 m^3）に投入し，滞留日数約30日，約41 ℃で中温消化を行った。東灘処理場の３基の卵形消化槽のうち，１基（３号）に地域バイオマスを投入し，他の２基（１，２号）との消化状況を比較した。

2013年度の地域バイオマス投入実績（4/1～3/31）は，食品製造系581 t（投入原料中の VS 混合比3.1 %），木質系86 t（同1.7 %）であった。地域バイオマスを投入した３号では，投入下水汚泥中の初沈汚泥の VS 比率が56.1 %と１，２号より3.6 %低いにもかかわらず，ガス発生倍率に５%程度の増加が認められ，また，既設の下水処理に支障を与えないことも確認できた（**表２**）。

2. 2. 3　鋼板製消化槽インペラ式かくはん機低動力運転

鋼板製消化槽に設置したインペラ式かくはん機は，従来の消化槽かくはん機（ドラフトチューブ式スクリューかくはん機等）と比較して，低動力の運転が可能である。2013年度は，当初の運転条件である動力投入密度3.05 W/m^3（かくはん機回転数21 min^{-1}）から動力を抑えた運転条件に変更し，動力投入密度0.49 W/m^3（かくはん機回転数３ min^{-1}）による長期運転で消化に与える影響を検証した。

2013年11月から投入汚泥を下水汚泥のみ（初沈汚泥および濃縮余剰汚泥）に変更し，約４カ月間の低動力運転を行った結果，運転期間中の投入 VS 当たりのガス発生量は平均555 m^3_N/t-VS であった（**図２**）。下水汚泥単独の投入 VS 当たりのガス発生量一般値は500～600 m^3_N/t-VS であり[3]，消化運転状況は良好と判断した。

2. 2. 4　鋼板製消化槽堆積物排出運転

鋼板製消化槽内の堆積物排出手段として，インペラ式かくはん機の逆転運転とポンプ引抜きを組合わせた方法の効果が確認されており[4]，今回の実証試験において再検証した。堆積物量の測定は，槽壁面からは超音波による高さ測定を行い，その他測定点（槽半径方向に２点）では槽上部フランジから探触子を用いて堆積物高さを測定した。鋼板製消化槽内堆積物量の推移を**図３**に示す。2012年11月から堆積物ポンプ引抜きなしの運転を継続したところ，槽内堆積物は増加傾向を示し，2014年２月に堆積物／槽容量は1.46 %に達した（堆積物許容上限は５%）。この時点でかくはん機逆転運転とポンプ引抜きを組合わせた運転を行ったところ，堆積物の排出促進効果が確認できた（**図４**）。堆積物量の可視化技術と排出促進運転を組合わせることで，堆積物を蓄積させない運転が可能になると考えられる。

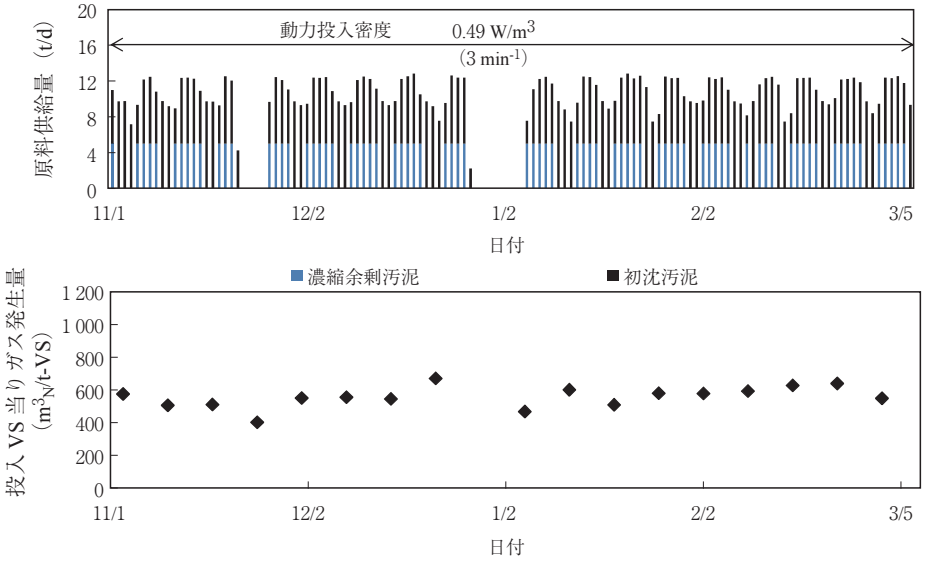


図２　鋼板製消化槽運転状況

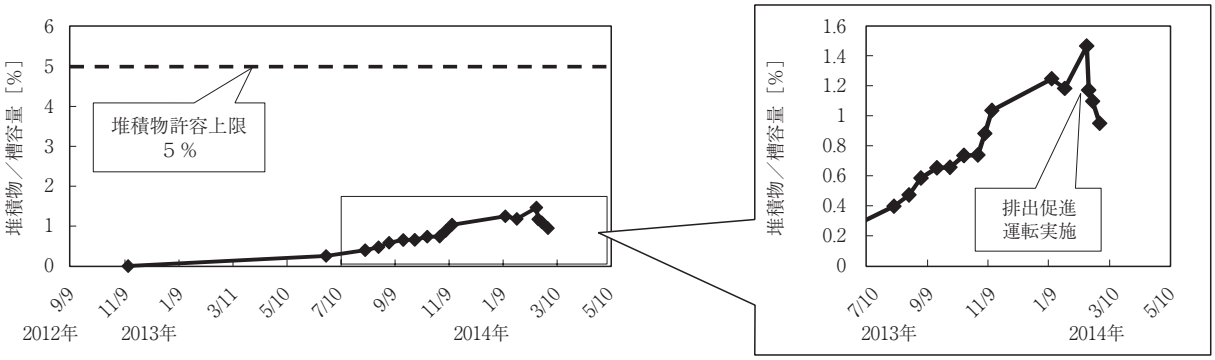


図３　鋼板製消化槽堆積物量の推移

図４　堆積物排出促進運転結果

2. 2. 5　新型バイオガス精製装置連続運転における性能検証

新型バイオガス精製装置の連続運転の結果，精製バイオガス組成は管理基準値を満たす安定運転が確認された（CH_4：97 vol％以上，O_2：4 vol％未満，H_2S：0.1 ppm 以下）。精製ガス流量当りの消費電力を**図５**に示す。精製ガス流量が60 m^3_N/h の低負荷運転において，連続運転（2013年度）は間欠運転（2012年度）に比べ，消費電力を19％低減できた。

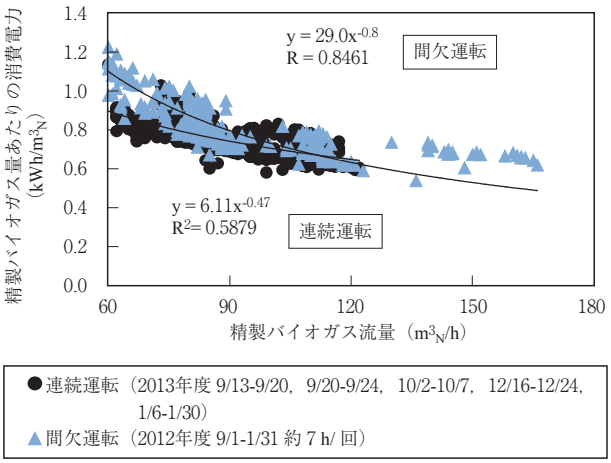


図５　新型バイオガス精製装置
間欠・連続運転時の精製ガス流量あたりの消費電力

む　す　び

① 地域バイオマス組成が判明すれば，消化ガス発生量が精度良く予測できることが確認できた。

② 既設10 000 m^3 卵形消化槽への2013年度地域バイオマス投入実績は，食品製造系581 t，木質系86 t で，下水汚泥のみを投入した消化槽より初沈汚泥の VS 投入比率が3.6 ％低いにもかかわらず，ガス発生倍率で５％の増加が確認できた。

③ 鋼板製消化槽のインペラ式かくはん機低動力運転（0.49 W/m^3）で良好な消化が確認できた。

④ インペラ式かくはん機の逆転運転＋ポンプ引抜きによる堆積物排出促進効果が確認できた。

⑤ 新型バイオガス精製装置連続運転の結果，間欠運転より低動力での運転が可能であり，精製バイオガス流量60 m^3_N/h の低負荷では消費電力を19 ％低減できた。

[参考文献]

1）豊久・宮本・川嶋，第49回下水道研究発表会講演集，pp.160-162，(2012).

2）瀧村・豊久・宮本・藤井，第50回下水道研究発表会講演集，pp.250-252，(2013).

3）社団法人日本下水道協会，下水道施設計画・設計指針と解説　後編　2009年版

4）財団法人下水道新技術推進機構，鋼板製消化タンク技術マニュアル，―2013年３月―

*技術開発センター　水・汚泥技術開発部　汚泥処理室　**技術開発センター　水・汚泥技術開発部

稲美町向け遠方監視システムの更新

Replace of Remote Monitoring System in Inami-cho
―農業集落排水処理場へのウォーターアイ導入―

松本直隆*
Naotaka Matsumoto

田中秀和**
Hidekazu Tanaka

櫻井　聡*
Satoshi Sakurai

2013年度，当社は，稲美町向け農業集落排水事業遠方監視システム更新案件を受注，施工完了した。更新後の監視システムとして，ウォーターアイ（WaterEye®）を導入した。本稿では，ウォーターアイのシステム概要と受注に向けた取組み，施工状況について，紹介する。

Fiscal 2013, we received an order as renovate of remote monitoring system in Inami-cho（Hyogo prefect.）, we completed construction. WaterEye® was introduced as an renovate system. This report introduces the overview of "WaterEye" system and the efforts to order, construction situation.

***Key Words*：**

遠隔監視システム	Remote Monitoring System
クラウドサービス	Cloud Service
ウォーターアイ	WaterEye

【セールスポイント】

ウォーターアイは，インターネットを活用することで，いつでもどこでも設備の状況を確認することができ，維持管理業務を効率化することが可能なシステムである。データは，セキュリティ対策が施されたデータセンターにて保管される。データセンターは西日本，東日本の２箇所に設けられ，万一の災害時にもデータが消失すること無く，安心して使用頂ける。

ま え が き

従来の監視装置では，処理場等の現場，又は，庁舎に設置され，設備に異常が発生した場合は，電話にて通知が行われる。この場合，現場，又は庁舎の監視装置がある場所に行かなければ，設備の状況が分からない。そのため，軽微な警報であっても，維持管理担当者が現場に急行し，対応することとなり，維持管理業務に手間がかかる。また，現場の監視装置が故障すると，蓄積していたデータが消失し，復旧にも時間がかかる。更新の際は，個別にシステム構築を行うため，費用が掛かる。

近年，注目を集めているクラウド型のシステムでは，前述の問題を解決できる。設備のデータは，データセンターに設置されたサーバに送信され，蓄積，管理される。ユーザは，インターネットを介してサーバにアクセスすることで，設備の状況をいつでもどこでも確認することができる。設備異常が発生した場合は，現場に行く前に設備の状況を確認，対応の判断ができ，維持管理業務の負荷を軽減できる。また，データは，サーバにて保管されるため，ユーザがデータの消失を懸念する必要がなくなる。そして，現場機器の故障や更新の際は，データをサーバに送る機器を交換するのみで済むため，復旧までの時間を短縮，更新費用の低減が可能である。

上記のことから，クラウド型のシステムが採用される案件が増えている。ウォーターアイは，クラウド型のシステムであり，提案活動を行ってきた。

1. ウォーターアイの概要

1.1 システム概要

ウォーターアイは，インターネットを活用した遠隔監視システムである。監視対象設備の情報は，ネットワークを介してサーバに送信され，蓄積，管理される。ユーザは，インターネット経由でサーバにアクセスすることで，場所と時間を選ばず，設備の状況を確認できる。構成図を図１に示す。

1.2 機能紹介

ウォーターアイの機能を表１に示す。

ユーザは，専用ソフトをインストールすることなく，標準の Web ブラウザにて各画面を参照することが可能。図２に画面の一例を示す。

2. 案 件 概 要

稲美町における監視装置更新案件の概要を記す。

本案件は，農業集落排水処理設備８カ所と付随する中継ポンプ場36カ所について，遠方監視装置の更新を行うものであった。特記仕様書には，処理施設の監視を Web にて行うことが記載されていた。ま

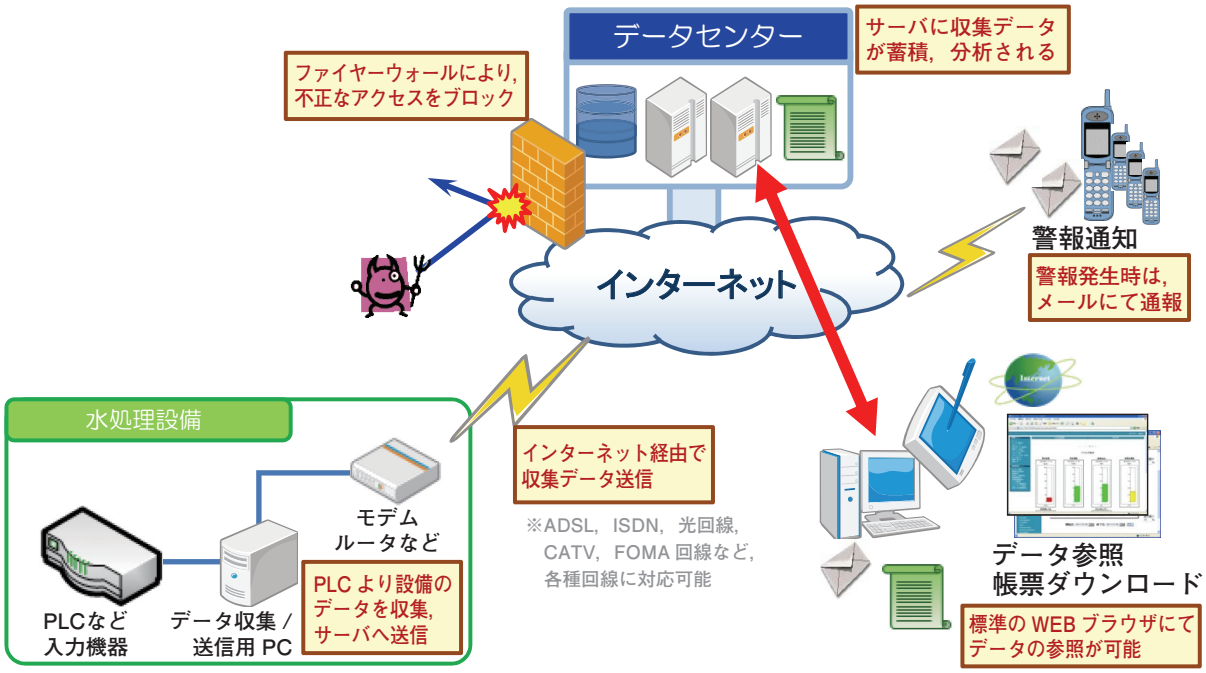


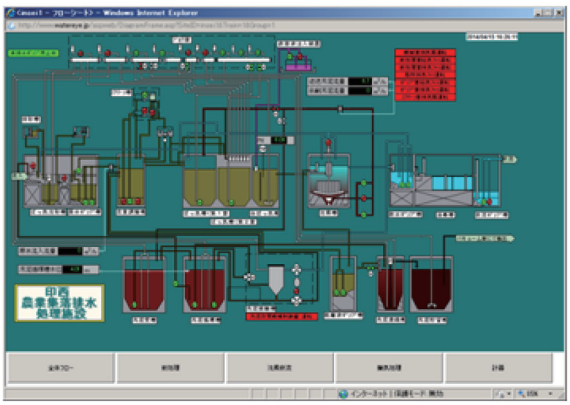
図１　ウォーターアイ構成図

表１　ウォーターアイ機能

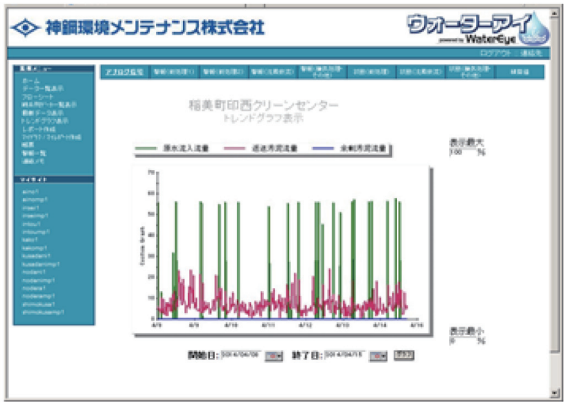
項　　目	機　能　概　要
ホーム	オプションで地図の表示，発生中の警報情報を表示することが可能。
データ一覧表示	各センサーの値を一覧表示する。
フローシート	設備の簡易フロー画面を表示する。
時系列データ一覧表示	指定期間のセンサーの値をリスト表示する。
トレンドグラフ表示	指定したセンサー，期間のグラフを表示する。
カメラ監視	設備に設置したカメラの画像を表示する。
レポート作成	指定したセンサー，期間のレポートファイルをダウンロードする。
マイグラフ／マイレポート作成	あらかじめ登録した設定にてグラフ，レポート作成する。
帳票	日報，月報，年報を作成，ダウンロードする。
タイムチャート機能	運転状況をタイムチャートで表示する。
警報一覧	警報の発生と復旧状況を一覧する。
手入力機能	設備の目視確認値などを手入力する。
各種解析機能	蓄積したデータを解析し，ユーザにフィードバックする。
連絡メモ	連絡メモを登録，確認する。

ホーム画面（地図）

フローシート画面



トレンドグラフ



帳票（日報，月報，年報）

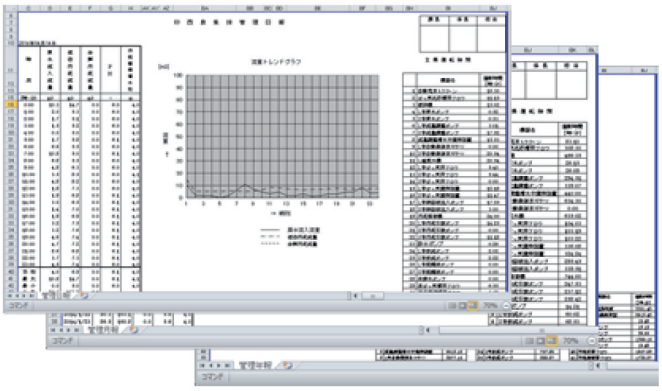


図２　ウォーターアイ画面例

た，データ送信方式は携帯パケット方式，データ保存として２拠点サーバ方式が指定されていた。

携帯パケット方式とは，NTT ドコモの提供する FOMA 回線など，携帯電話通信網によって，設備のデータをサーバに送信するというものである。携帯電話通信網を利用するためには通信圏内である必要があるが，電話回線や光回線などの有線通信と比較して，断線などの障害発生からの復旧時間が短いという特徴がある。

２拠点サーバ方式とは，データを蓄積，管理するサーバを２拠点に設けるものである。２つのサーバは，データを同期することで，万一，災害などで１拠点が損壊した場合も，他方に切替えることで，早期サービス再開の実現とデータ消失を防止する。

ウォーターアイは，上記に対応可能なシステムであり，2013年９月に入札にて受注，2014年３月に施工を完了した。

3.　受注への取組み

案件受注への取組みとして，提案活動，および，機能改善などを行ってきた。以下に主なものを記す。

3.1　提案活動

稲美町には，電話回線を介した遠方監視装置が導入されていたが，老朽化に伴い，故障や不調が発生するようになっていた。それを受け，2011年ごろより，更新の提案などを行ってきた。提案活動を始めた当時は，クラウド型システムについて，あまり浸透しておらず，データを外部機関で保管することに抵抗を受けることが多くあり，従来方式を要望されるユーザも多く見受けられた。

そのような中，ウォーターアイの使用感を知って頂く目的で，2011年に草谷クリーンセンター，2012年に相野クリーンセンターにおいて，ウォーターアイのデモ機を設置した。デモ機使用時に要望を受けた内容については，対応を検討し，機能改善を図ってきた。

2013年２月には，兵庫県土地改良連合会が主催で，農業集落排水事業における監視システム説明会が開かれた。兵庫県内の多数の自治体が参加される中，当社ウォーターアイもプレゼンテーションに参加した。

3.2　サーバ２拠点化

ウォーターアイは，関西地域のデータセンターにサーバを設置し，サービスの提供を行っていた。しかし，2011年に発生した東日本大震災を受け，サーバを複数の拠点に設けることが望まれるようになった。サーバが１拠点のみに設置の場合，災害などで設備が損壊すると，蓄積されたデータが全て失われ，監視サービスの復旧にも多くの時間がかかるからである。

そのため，2013年，東日本地域に新しくサーバを設置し，関西地域に設置のサーバと VPN で通信する仕組みを構築した。図３にサーバ２拠点のシステム構成を示す。一方のサーバが運用系となり，設備からのデータ受信，管理，ユーザからのアクセス要求に応答する。他方は，待機系となり，運用系のデータを同期する。このようにすることで，万一，運用系が使用不能になった場合も，データの消失を最小限に抑え，短時間にサービスを再開する事が可能となる。また，拠点間は，VPN によって，安全に通信を行うことが可能。

3.3　中継ポンプ場監視システムの構築

従来のウォーターアイでは，水処理設備にパソコンを設置し，インターネット経由でデータをサーバに送信していた。中継ポンプ場は，路上に設置されているため，夏場の気温上昇を考慮すると，パソコンでは，耐久性が懸念された。そのため，中継ポンプ場向けの監視通報装置として，愛知時計電機株式会社製の情報通信端末装置「MPT800」（以下MPT800と記載）を採用した。MPT800の採用に当たっては，主に以下の２点について対応を行った。

①専用ネットワークの導入

MPT800は，サーバと双方向に接続可能である必要がある。インターネットを介して他の機器に接続するには，IP アドレスを指定して接続する。IP アドレスとは，インターネット上の住所のようなものである。

従来のウォーターアイでは，現場に設置された機器の IP アドレスは不定であるため，サーバから現場機器にアクセスすることができない。現場機器の IP アドレスを特定できるようにするには，月額費用が追加で必要となり，運用費用が高くなる。

そのため，エヌ・ティ・ティ・コミュニケーションズ株式会社が提供する VPN サービスを導入した。このサービスを利用することで，独自のネットワークが構築でき，現場機器の IP アドレスが特定可能になるため，MPT800とサーバが相互に接続可能になる。月額費用についても，パケット使用量が少なければ，費用を抑えて利用が可能。また，ネットワークは，インターネットに接続されていないため，外部からのアクセスを防ぐことができ，安全な通信を行うことができる。

②専用プロトコル対応通信ソフトの開発

MPT800との通信は，専用のプロトコルによって行われる。そのため，MPT800と専用プロトコルに

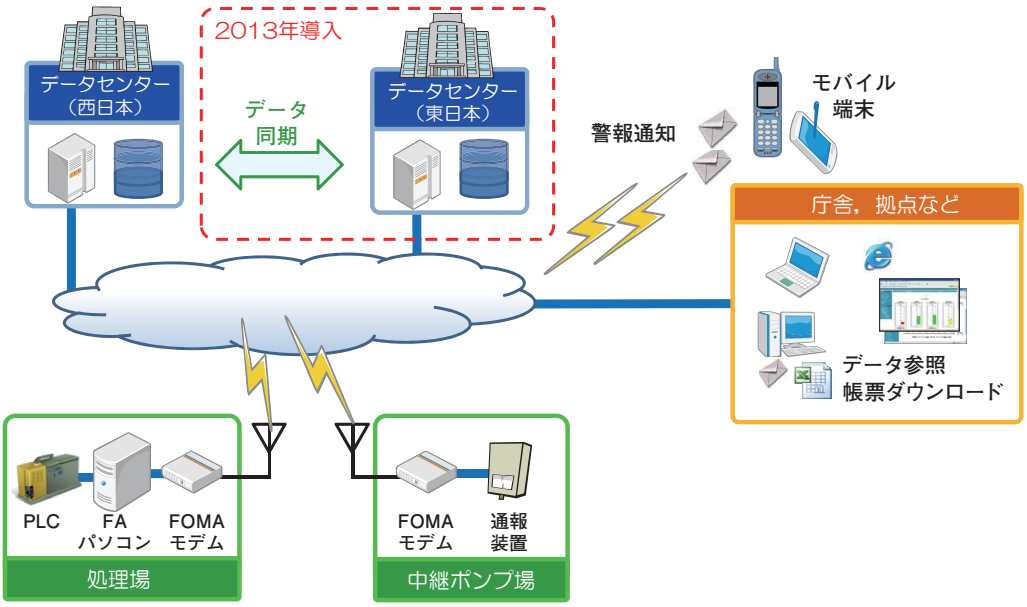


図３　サーバ２拠点システム構成

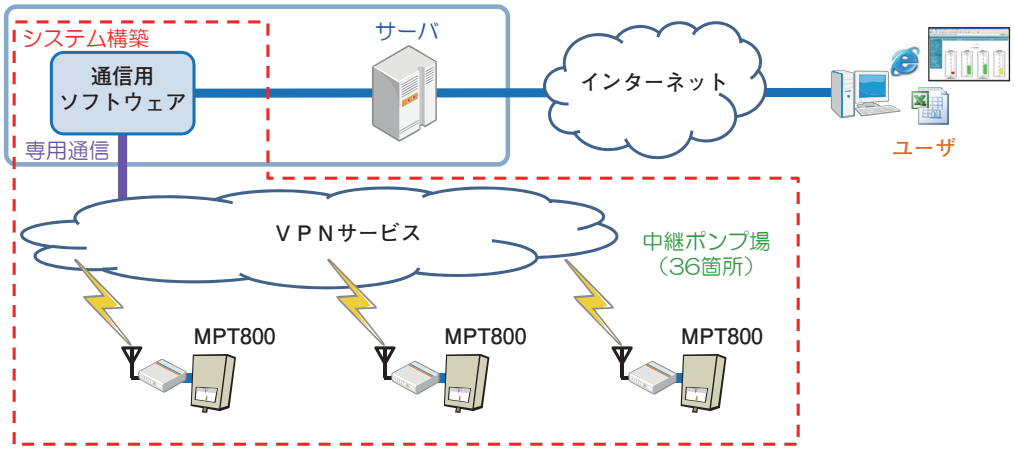


図４　中継ポンプ場監視システム構成図

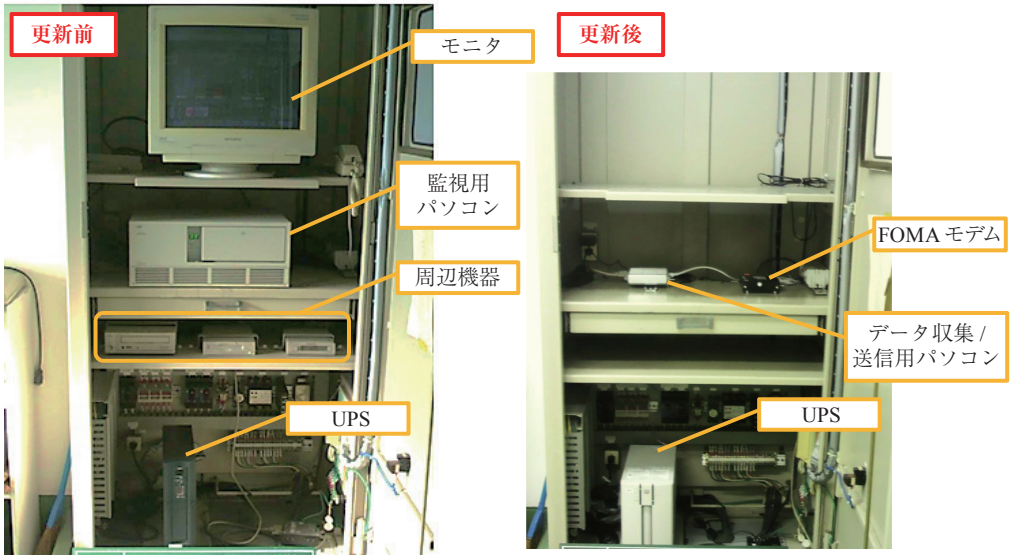


図５　施工写真（処理場）

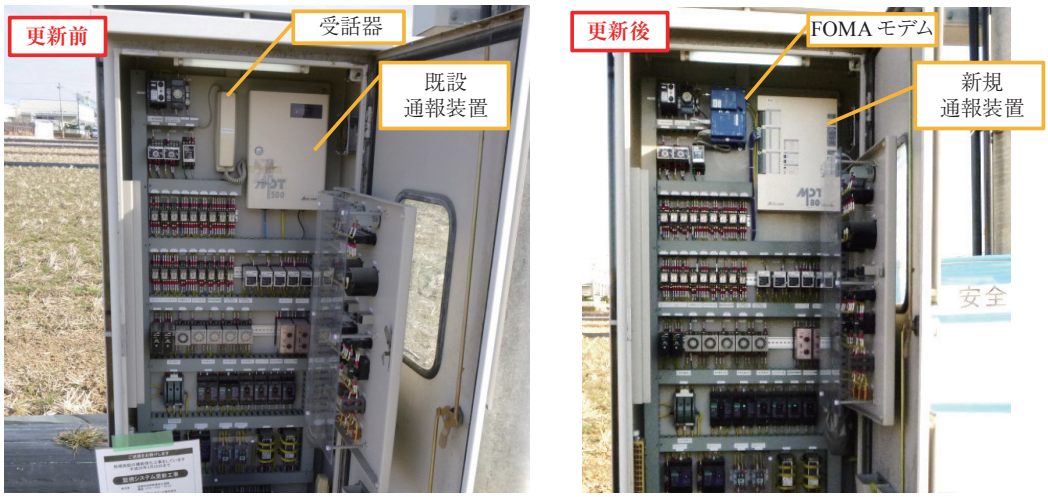


図６　施工写真（中継ポンプ場）

て通信し，情報を取得するためのソフトウェアを開発し，導入した。従来のパソコンを現場に設置する場合では汎用的な通信方式を使用しているため，パケット使用量が多くなる傾向があった。専用プロトコルにて通信を行うことで，従来の方式と比較してパケット使用量を低減することが可能となった。

上記の対応により，現場に設置する機器の耐久性を改善し，通信費を低減させた監視システムを実現した。図４に中継ポンプ場監視システムの構成図を示す。

通信費が低減されたことにより，低価格で定額制の監視サービスを提供することが可能となった。稲美町の既設監視装置は，電話回線を介したものであり，毎月の通信料金が変動していたため，運用費用について見通しが悪かった。稲美町からは，「ウォーターアイ導入により，中継ポンプ場の監視において，運用費用を低減できた上，予算化しやすくなった。」とコメントを頂いている。

4. 施 工 状 況

4.1 処理場

処理場では，既設監視用パソコン，および周辺機器の撤去，ウォーターアイ用機器の設置・試運転を行った。既設の監視装置と比較して，非常に省スペースで設置が可能。図５に施工前後の状況を示す。

4.2 中継ポンプ場

中継ポンプ場では，既設通報装置の撤去，ウォーターアイ用機器の設置・試運転を行った。図６に施工前後の状況を示す。

む す び

処理場８カ所，中継ポンプ場36カ所の監視装置更新を完了した。稲美町と2014年４月よりウォーターアイ監視サービス利用契約約款に基づいて正式にサービス提供の契約を行い，運用中である。最後に，本稿の作成に当たり，ご協力を頂いた稲美町の関係者の方々に深く感謝の意を表する。

*神鋼環境メンテナンス㈱ 水処理本部 技術部 電気計装グループ　**神鋼環境メンテナンス㈱ 水処理本部 第一営業部 第一営業室

燕・弥彦総合事務組合環境センターにおける基幹的改良工事

Improvement Work at Tsubame-Yahiko MSW Incineration Plant

砂田浩志*
Hiroshi Sunada

松本忠雄**
Tadao Matsumoto

土井健太郎***
Kentaro Doi

曲健太郎****
Kentaro Magari

岩本益幸*****
Masuyuki Iwamoto

燕・弥彦総合事務組合環境センターは稼働後15年以上経過しており，施設の延命化と CO_2 排出量削減を目的として，基幹的改良工事を行った。本施設では，各設備のインバータ化や炉床負荷増加による押込空気量の削減などを行うことで，消費電力の削減を図り，CO_2 排出量を7.8 %削減することができた。また性能改善を目的に，給じんシステムの改良によるごみの定量供給や，レーザ式 O_2 計を用いた燃焼制御性の向上を図り，安定した操業を継続している。

Improvement work was completed at Tsubame-Yahiko MSW fluidized-bed incinerator. The work was designed to improve the aged facility after 15 years of operation period and to reduce CO_2 emissions. The power consumption was reduced through shifting facility equipments to inverter type and reducing primary air by improved furnace bed load. As a result, CO_2 emission was reduced by 7.8 % . By improved refuse feeder which supplies waste stably and combustion air system using laser gas analyzer, it keeps stable operation.

Key Words :

流動床焼却炉	Fluidized-Bed Incinerator
基幹的改良工事	Improvement Work
CO_2 削減	CO_2 Reduction

【セールスポイント】

基幹的改良工事によって，施設の延命化，CO_2 削減に加え，排ガス性状などさらなる性能改善が可能となる。

まえがき

2010年度から「循環型社会形成推進交付金」の交付対象事業に基幹的設備改良事業が加わったことで，老朽化したごみ処理施設の延命化工事の需要が増加している。

燕・弥彦総合事務組合環境センターは，1996年３月に竣工した准連式流動床式都市ごみ処理施設である。定期的に点検，補修整備を実施しているものの，竣工後15年以上が経過しており，各設備機器の経年劣化が進んでいる状況であった。今後長期にわたり施設を安定かつ経済的に稼働させるため，施設の基幹的改良を伴う延命化対策を行う必要があった。

そこで，構造指針撤廃後の新たな基準に基づいて建設した流動床式焼却炉[1)]や，最新の流動床式ガス化溶融炉で採用した技術[2)]を適用した基幹的改良工事を実施し，施設の延命化，CO_2 排出量削減に加えて，さらなる性能改善を図った。本工事は，「循環型社会形成推進交付金」を活用して実施し，交付対象外の延命化工事も含め，同組合が所有する他施設の延命化工事と工事期間を調整しながら2010年度から５カ年事業として実施してきた。２系列の

うち１系列を稼働させた状態で片系列ずつ改修工事を行った。共通系設備の改修には，工事期間中のごみ処理に支障がないよう，他施設とごみ処理計画を調整した。

1. 施 設 概 要

燕・弥彦総合事務組合環境センターの施設概要を**表１**に，改良後のプロセスフローの概略を**図１**に示す。給じん装置で供給されたごみは，流動床式焼却炉で完全燃焼する。焼却炉から発生する排ガスは，ガス冷却室にて水噴霧により冷却された後，白煙防止用空気加熱器，および空気予熱器にて熱回収される。バグフィルタ入口から活性炭を混合した消石灰を投入することにより，脱塩・脱硫するとともに，排ガス中のダイオキシンを除去し，バグフィルタで排ガスに随伴されるダストを除塵する。

建設時は准連炉であったが，延命化にあたり安定運転を実現するため全連炉へ変更している。図中に丸数字で示した番号は次項改良項目に対応している。

写真１　設備全体写真

2. 改良内容の特徴

各設備のインバータ化や炉床負荷増加による押込空気量の削減などを行うことで，消費電力の削減を図り，CO_2削減の最大化を推し進めた。また給じんの安定化や燃焼制御の高度化による安定燃焼を図り，排ガス性状の改善を行った。主要な改良工事は以下のとおりである。

①　受入供給設備

ごみクレーンを回生機能付インバータ制御とすることで，巻下げ時の回生エネルギーを活用できるようにした。

表１　施設概要

処理方式	流動床式焼却炉
処理規模	58.5 ton/24 h × 2 炉
排ガス冷却方式	水噴射式
排ガス処理方式	消石灰，活性炭吹込＋バグフィルタ

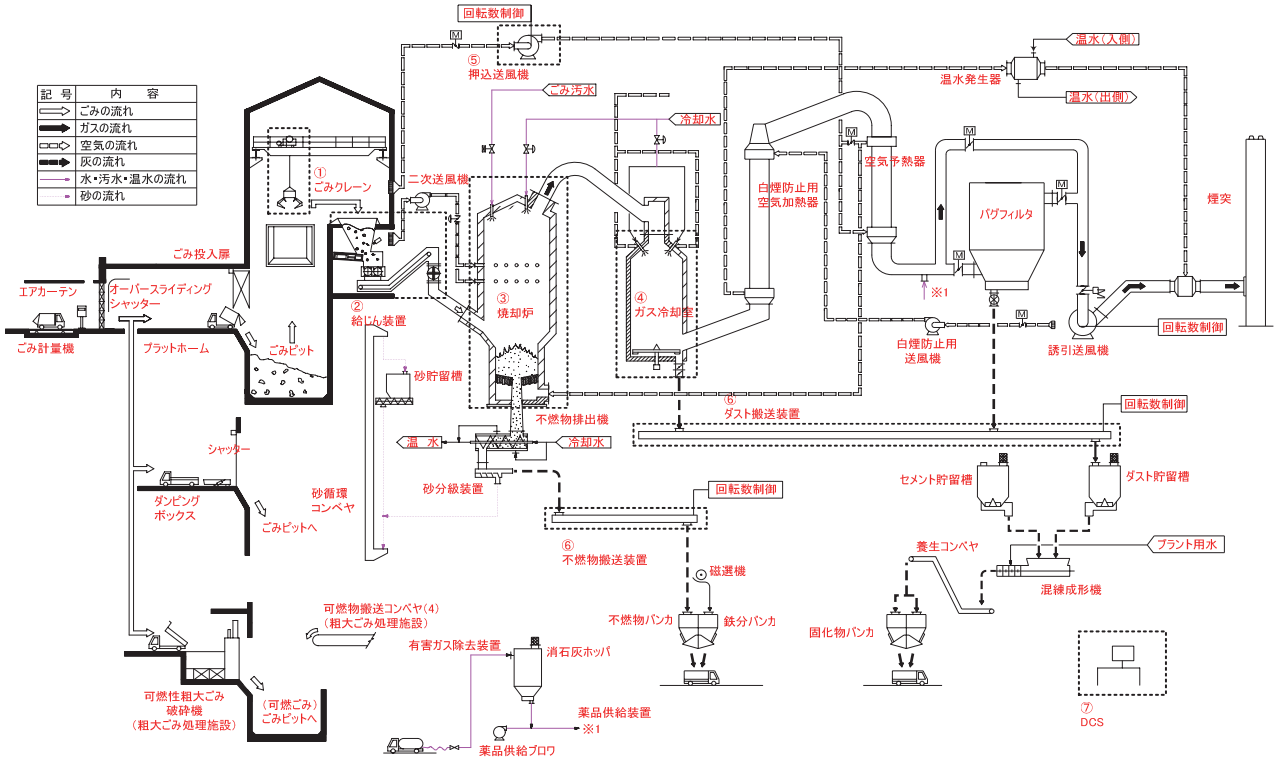


図１　プロセスフロー

② 給じん設備

ごみの定量供給性のさらなる向上による安定燃焼実現と排ガス量変動の低減により消費電力を抑制するため，従来の粗破砕式給じん設備から，流動床式ガス化溶融炉で採用している給じんシステムに準じて，二軸破砕機＋エプロン型給じんコンベヤ＋ロータリーバルブに変更した。

③ 燃焼設備

燃焼空気量制御に用いている O_2 濃度計を従来のジルコニア式から応答性の速いレーザ式に変更することで，低空気比運転を可能とした。

炉は構造指針に基づき炉床負荷450 kg/m^{2}h で設計していたが，炉床面積を縮小し炉床負荷を600 kg/m^{2}h まで増加させることで，砂層の流動に必要な空塔速度を維持しながら押込空気量を削減することができた。押込空気比の削減と砂層の低温化により，砂層部での緩慢燃焼が行えるため，給じん量やごみ質の変動を受けにくくなり，さらに安定した燃焼状態を実現した。

④ 燃焼ガス冷却設備

ガス冷却室の蒸発効率を向上させ運転を安定化させるため，ガス冷却室の噴霧ノズルを二流体式に変更し，ガス冷却室入口に整流チャンバを設置した。

⑤ 通風設備

上述した押込空気量の削減に加えて，押込送風機をインバータ化することで，消費電力を削減した。

⑥ 灰出し設備

不燃物搬送装置，およびダスト搬送装置をインバータ化し，稼働系列数に応じた速度制御を行った。これにより消費電力の削減に加え，摩耗速度も抑制できるため機器の長寿命化が期待できる。

⑦ 計装設備

DCS の老朽化に加えて，給じん設備などの機器類の追加・改良により運転方案・制御方法の変更が生じるため，EI 統合新型 DCS を用いた制御システム[3]に更新した。

3. 性 能 試 験

性能試験は２炉同時運転で２日間行った。炉内温度を**図２**に示す。砂層温度は600 ℃程度，焼却炉出口温度は870 ℃程度と安定して運転することができた。

焼却炉出口 O_2 濃度，煙突 CO 濃度を**図３**に示す。焼却炉出口 O_2 濃度を7.0 wet％（総空気比約1.8）になるよう制御したものである。煙突 CO 濃度（O_2 12 ％換算，４時間平均値）は最大で 4 ppm と低く，安定した燃焼状態が維持できることが分かった。

改良工事による CO_2 削減効果を**表２**に示す。改良前の運転データから算出した年間の CO_2 排出量が1 417 t-CO_2/年に対し，改良後の CO_2 排出量は1 306 t-CO_2/年と CO_2 削減率は7.8 ％であり，交付要件の３％を満たすことが確認できた。

改良前で特に削減効果の大きい押込空気量，および押込送風機使用電力を**図４**に示す。炉床負荷を増加させたことにより，炉床面積を縮小し押込空気量を27 ％削減することができた。この押込空気量の削減，および押込送風機のインバータ化によって押込送風機の動力は59 ％削減でき，CO_2 排出量削減の主要因の一つである。

4. 低空気比運転

給じん設備，および燃焼管理方法の改良を実施し，安定燃焼を実現することができたため，通常運転よりも低空気比での運転を行った。

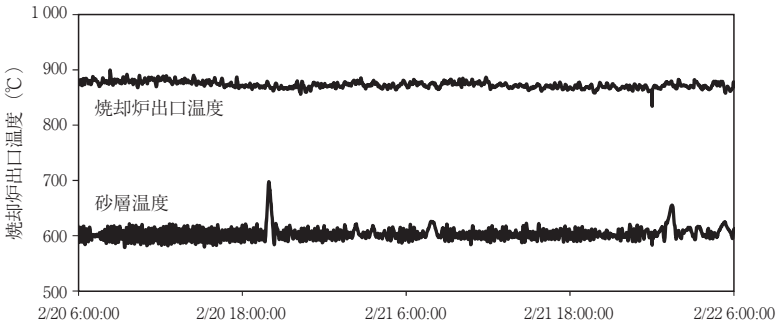


図２ 焼却炉炉内温度

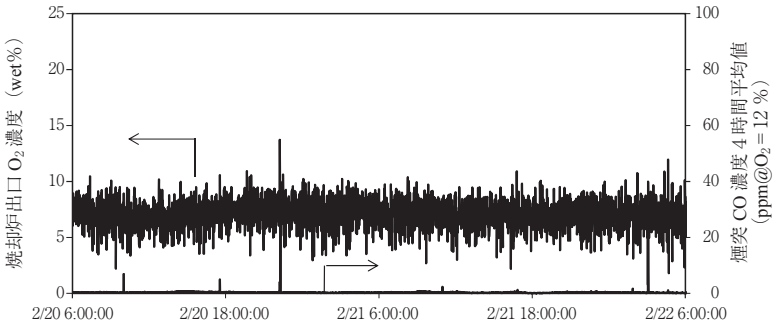


図３ 炉内 O_2 濃度，煙突 CO 濃度

表２ CO_2 削減効果

	改良前（2010年２月）	改良後（2014年２月）
年間 CO_2 排出量（t-CO_2/年）	1 417	1 306
CO_2 削減率（％）	7.8	

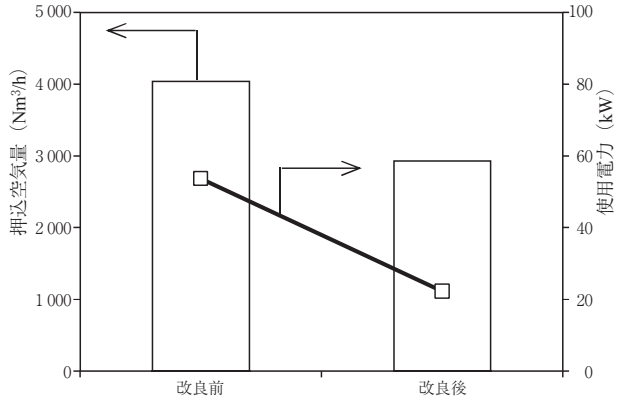


図４　押込送風機の動力削減効果

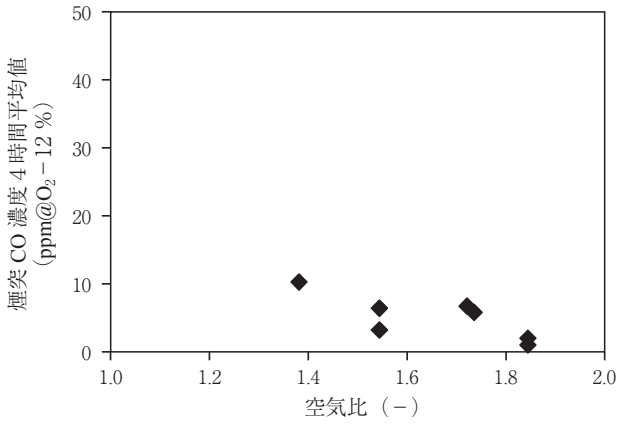


図５　炉内 O_2 濃度，煙突 CO 濃度

空気比と煙突 CO 濃度との関係を**図５**に示す。給じんシステムの改良によるごみの定量供給性の向上，およびレーザ式 O_2 計を用いた燃焼制御性の向上により，空気比1.4程度の運転時でも CO を抑制した運転が安定して行えることが分かった。

また空気比1.5で運転した際の排ガスおよび焼却飛灰のダイオキシン類濃度を**表３**に示す。安定燃焼，およびバグフィルタ入口温度の安定化が寄与しているものと思われる。

押込送風機の動力削減に加え，低空気比運転による二次空気量および排ガス量の削減に伴い，二次送風機，誘引送風機の消費電力は低減される。空気比を1.8から1.4とすることで，二次送風機は９％，誘引送風機は４％電力量を削減できることがわかった。

表３　ダイオキシン類濃度測定結果

排ガス DXNs 濃度	0.10 ng-TEQ/m^3_N
焼却飛灰 DXNs 濃度	0.15 ng-TEQ/g

む　す　び

燕・弥彦総合事務組合環境センターでは，基幹的改良工事として給じん設備や焼却設備などの改良，補修を行うことで，CO_2 排出量を7.8％削減することが確認できた。また良好な燃焼状態，排ガス性状も確認することができ，安定した操業を継続している。

類似の施設においてもニーズに応じた改良，補修メニューをとりそろえ，老朽化したごみ処理施設のライフサイクルコストの低減や CO_2 排出量の削減の実現に貢献していく所存である。

最後に，基幹的改良工事にあたり多大なご協力をいただきました燕・弥彦総合事務組合の方々に深く感謝申し上げるとともに，現地操業に携わる運転員各位にも謝意を表します。

[参考文献]

１）小倉賢蔵ほか：高炉床負荷型流動床式焼却炉の運転実績，日本機械学会第13回環境工学総合シンポジウム2003講演論文集，pp.121-124（2003）
２）砂田浩志ほか：ガス化溶融炉におけるレーザ式ガス分析計を用いた燃焼制御の高度化，学会誌「EICA」，Vol.16，No.2-3，pp.6-11（2011）
３）下梨孝ほか：本格稼働を始めた EI 統合新型 DCS，月間計装，Vol.56，No.10，pp.7-12（2013）

*環境プラント事業部 技術統括部　**環境プラント事業部 操業技術部 第二技術室　***環境プラント事業部 操業技術部 第一技術室
****土建・計電装技術センター 計電装技術部　*****環境プラント事業部 監理部 監理室

中規模高効率発電の流動床式ガス化溶融施設の完成（芳賀地区エコステーション）

Introduction of the Latest MSW Gasification and Melting Plant

上古閑久欣*
Hisayoshi Kamikoga

岡村宏志**
Hiroshi Okamura

西野　直*
Tadashi Nishino

芳賀地区エコステーションは2014年３月に竣工した。熱回収施設は都市ごみに加え，し尿・下水汚泥，および併設するリサイクル施設から発生する残渣といった多様な種類のごみを受入れている。ごみ質の低下による助燃量の増加を抑制するため汚泥乾燥設備や酸素富化装置を採用している。また，排水膜処理設備をはじめ，高温高圧ボイラ，溶融炉ボイラ化といった技術を採用することで高効率発電システムを確立している。本施設は当社の技術力を総合した最新の施設である。

Haga Area Eco-Station has been established in March 2014. This plant deals with various kind of waste such as the debris of resources processed in the recycle facility and sludge of human waste and sewage in addition to municipal solid waste. In this plant the sludge dryer and the oxygen enricher are utilized in order to reduce auxiliary fuel consumption in accordance with reduction of waste calorie. In addition to these, with the techniques which are the membrane filtration system for facility drainage, the high temperature and high pressure boiler, the melting furnace which has partially heat recovery function like a boiler and so on, this plant has achieved high resource recovery ratio, and is the latest facility that Kobelco-eco Solution Ltd has accumulated its technologies.

***Key Words*：**

都　市　ご　み	Municipal solid waste（MSW）
ガ ス 化 溶 融 炉	Gasification and melting furnace final landfill site
高　効　率　発　電	High resource recovery ratio
多様な種類のごみ	Various kind of waste

【セールスポイント】

都市ごみを処理する中規模のガス化溶融施設において，汚泥，リサイクル残渣等の多様な種類のごみを受入れている。ごみ質の低下に対応するために汚泥乾燥設備や酸素富化装置を採用し助燃量を削減している。生活排水を含めた完全クローズドシステムを採用していながら，排水膜処理設備等の導入により循環型社会形成推進交付金における高効率ごみ発電施設の1/2交付金要件である発電効率14 %に対して15.3 %まで発電効率を高めている。

ま え が き

芳賀地区エコステーションは，真岡市，益子町，茂木町，市貝町および芳賀町の１市４町（栃木県）から発生する一般廃棄物を処理する広域ごみ処理施設として，2014年３月に竣工して以来，順調な運転を継続している。本施設の熱回収施設では，都市ごみに加えて，併設するリサイクル施設から発生する不燃残渣，可燃残渣の全量およびし尿汚泥，下水汚泥といった多様な種類のごみを受入れている。生活排水も含めた完全排水クローズドシステムや白煙防止装置を採用しながら，設備の工夫により循環型社会形成推進交付金における高効率ごみ発電施設の1/2交付金要件である発電効率14 %以上を達成している。本稿では，熱回収施設で採用した特長的な設備，施設の稼働状況および汚泥・リサイクル残渣の混焼状況について報告する。

1. 芳賀地区エコステーションの施設概要

本施設は熱回収施設（143 t/d：71.5 t/24 h × ２炉）とリサイクル施設（19 t/5 h：もえないごみ・粗大ごみ14 t/5 h，缶類3 t/5 h，ペットボトル2 t/5 h）からなる広域ごみ処理施設である。熱回収施設概要を**表１**に，熱回収施設フローを**図１**に示す。

熱回収施設では可燃ごみ，し尿汚泥および下水汚泥に加え，併設するリサイクル施設で発生する可燃残渣，不燃残渣を全量受入れている。このような多様な種類のごみを処理するにあたり，汚泥を混焼し

表１　熱回収施設概要

施 設 名 称	芳賀地区エコステーション　熱回収施設
処 理 能 力	143 t/d（71.5 t/d × ２炉）
処理対象物	可燃ごみ，リサイクル施設からの可燃残渣・不燃残渣，し尿汚泥，下水汚泥，し渣
受入供給設備	ピットアンドクレーン方式（ダブルピット）
ガス化溶融設備	流動床式ガス化炉＋旋回流溶融炉方式
燃焼ガス冷却設備	廃熱ボイラ＋水噴霧方式
排ガス処理設備	無触媒脱硝＋バグフィルタ＋触媒反応塔
排水処理設備	凝集沈殿・砂ろ過＋膜処理設備（排水クローズド）
発　電　量	1 970 kW

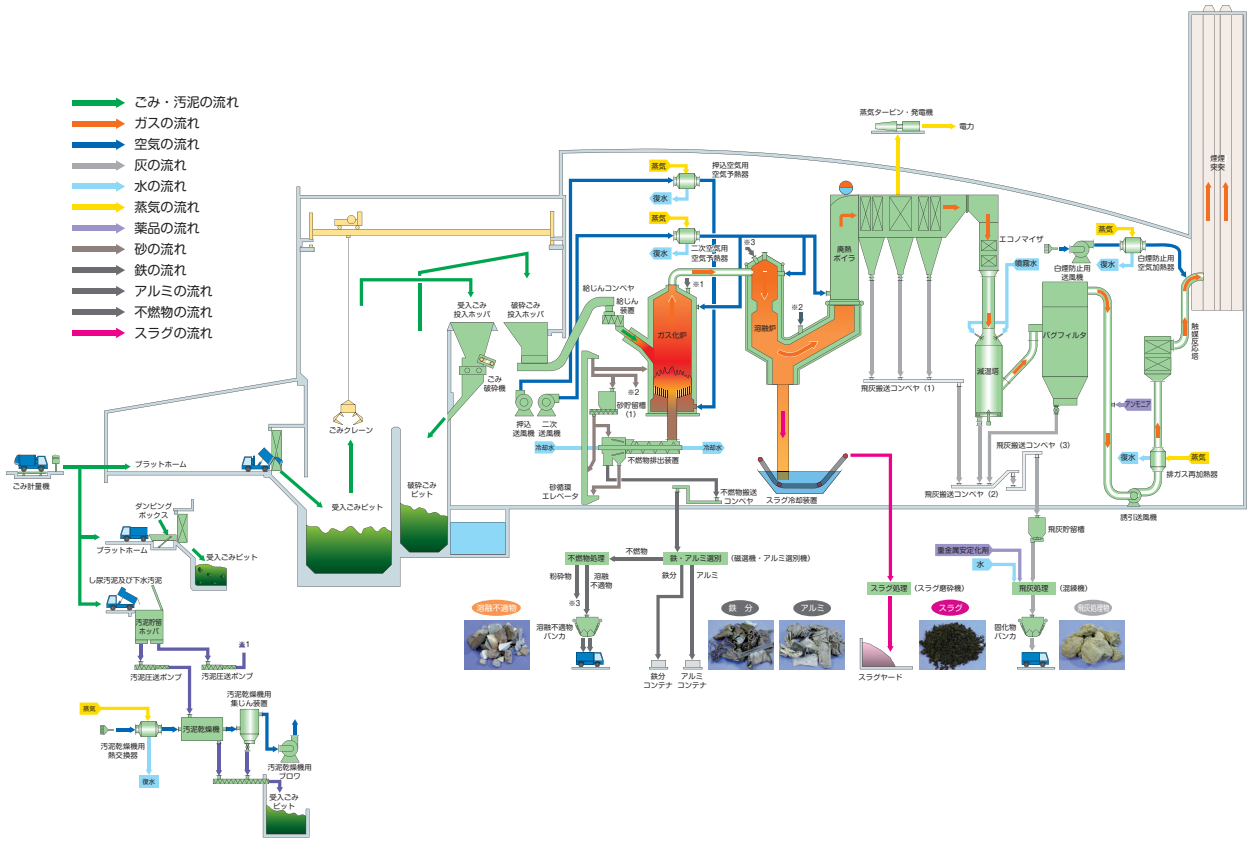


図１　熱回収施設フロー

表２　リサイクル施設概要

施 設 名 称	芳賀地区エコステーション　リサイクル施設
処 理 能 力	19 t/5 h（もえないごみ・粗大ごみ14 t/5 h，缶類3 t/5 h，ペットボトル2 t/5 h）
処理対象物	可燃性粗大ごみ，不燃性粗大ごみ，不燃ごみ，スチール缶，アルミ缶，ペットボトル
受入供給設備	ヤード受入方式
破 砕 設 備	低速回転破砕機＋高速回転破砕機（不燃・粗大ごみ），切断式破砕機（可燃粗大ごみ）
選 別 設 備	破砕物用鉄精選機，缶磁選機，アルミ選別機，ペットボトル手選別コンベヤ

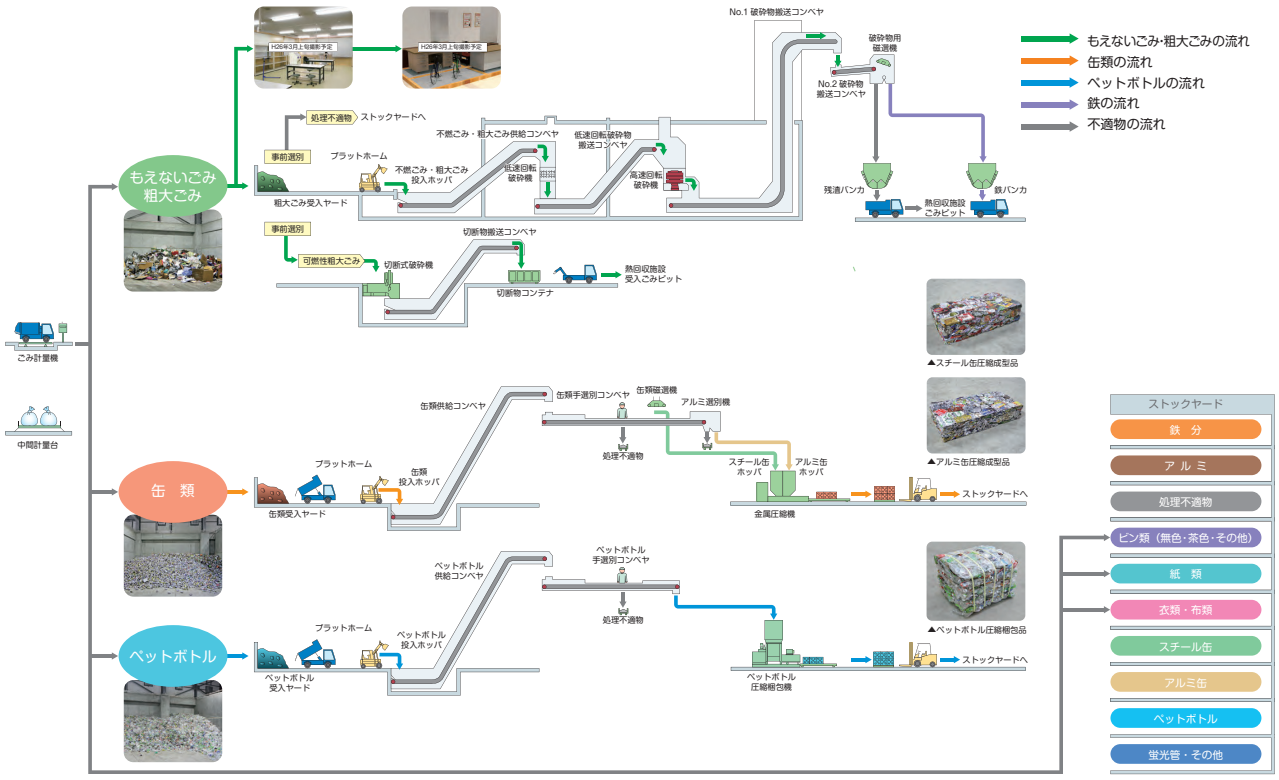


図２　リサイクル施設フロー

てもごみ質が低下しないように汚泥乾燥設備を設置しており，仮にごみ質が低下しても助燃が必要ないように，酸素富化装置を設けている。排ガス処理設備では，無触媒脱硝と触媒反応塔を併用することで，触媒の容量を約25 %削減するとともに，操業後の触媒交換量を低減し，ライフサイクルコストのミニマム化を図っている。また，発電量の最大化のため，溶融炉のボイラ化および高度排水処理（膜処理）等を採用し，発電効率を定格15.3 %まで高めている。また，ガス化炉から排出される不燃物・がれき類は鉄類・アルミ類を選別した後，粉砕して溶融することにより最終処分量の低減を図っている。

次にリサイクル施設概要を表２にリサイクル施設フローを図２に示す。

リサイクル施設では，不燃性粗大ごみ・不燃ごみ，可燃性粗大ごみ，缶類およびペットボトルを受入れている。不燃ごみ・粗大ごみは２種類の破砕機で細かく破砕された後，磁選機で鉄のみ回収し，残渣は熱回収施設でガス化・溶融処理される。

2.　特長的な設備の説明

2.1　汚泥乾燥設備概要

表３に各汚泥と可燃ごみの組成分析結果を示す。汚泥は80 %以上が水分のため非常に発熱量が低く，そのまま可燃ごみと混合した場合，ごみ質を低下させ助燃量が増加する恐れがある。本施設では，汚泥混焼によるごみ質の低下を防ぐため，汚泥乾燥設備（定格10 t/d）を設置している。図３に汚泥乾燥設備の概略フローを示す。搬入されたし尿汚泥，下水汚泥は，汚泥貯留ホッパに受入れ，汚泥乾燥機へ圧送された後，乾燥処理され受入ごみピットへ投入され

表３　各汚泥と可燃ごみの組成分析結果

			し尿汚泥	下水汚泥	乾燥汚泥	可燃ごみ
三成分	水分	［%］	82.2	85.0	7.4	39.5
	灰分	［%］	5.2	3.8	25.4	6.8
	可燃分	［%］	12.7	11.2	67.3	53.7
見掛け比重		［t/m^3］	0.7	0.8	0.8	0.1
低位発熱量（湿ベース）		［kJ/kg］	324	50	12 500	9 118
可燃分中元素組成	炭素 C	［%］	52.60	52.15	−	56.39
	水素 H	［%］	8.44	8.57	−	9.69
	窒素 N	［%］	7.71	8.26	−	0.86
	酸素 O	［%］	29.92	29.37	−	32.44
	硫黄 S	［%］	1.42	1.72	−	0.08
	塩素 Cl	［%］	0.16	0.09	−	0.55

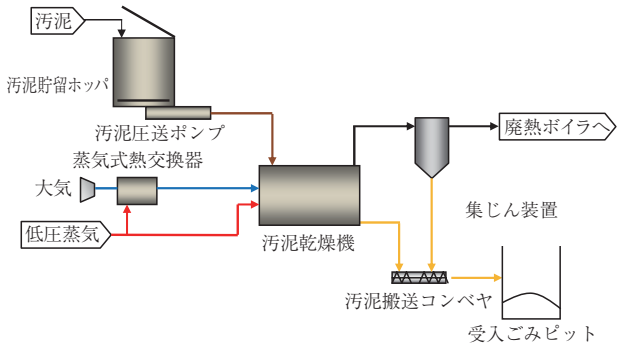


図３　汚泥乾燥設備概略フロー

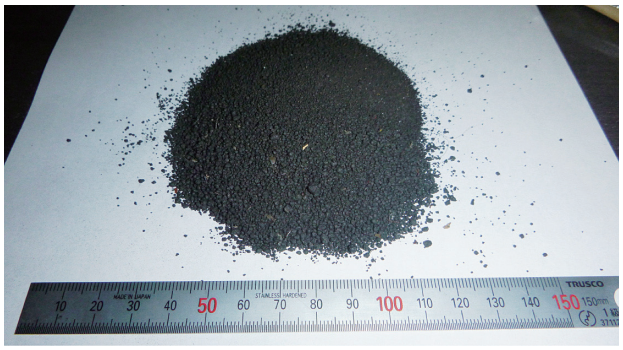


写真１　乾燥汚泥

表４　膜処理による排水処理の実績

			2014年４月	2014年５月	2014年６月
①	RO 膜透過水量（プラント用水受水槽へ）	［m^3］	513.4	508.9	665.6
		［%］	67.5	68.3	68.8
②	RO 膜濃縮水量（再利用水槽へ）	［m^3］	247.5	236.2	301.7
		［%］	32.5	31.7	31.2
③	排水発生量（①＋②）	［m^3］	760.9	745.1	967.4
		［%］	100	100	100
—	減温塔噴霧水流量（再利用水）	［m^3］	613.5	407.9	479.3

る。汚泥乾燥機は低圧蒸気を利用した間接式乾燥機を採用しており，乾燥排ガス（キャリアガス＋蒸発水分）は廃熱ボイラへ吹込み燃焼脱臭している。汚泥の含水率を約６％まで乾燥することで湿ベースの発熱量が可燃ごみよりも高くなる。また，乾燥することで約６分の１まで減容化され，乾燥前は粘土状であった汚泥が数 mm の粒状（**写真１**）となり，ハンドリングもしやすくなり，ピット内でのごみとの混合撹拌も容易となる。

2.2　排水膜処理設備

本施設では，従来の凝集沈殿＋砂ろ過装置に加え，マイクロフィルタ（MF 膜）と逆浸透膜（RO 膜）で構成される排水膜処理設備を導入している。**図４**に排水膜処理設備のフローと水バランスを示す。**表４**に示すように，完全排水クローズドシステムのもと，排水を高度処理することで，排水の約７割をプラント用水として再利用している。その結果，減温塔で処理する排水を減らすことができるため，減温塔入口，すなわちエコノマイザ出口排ガス

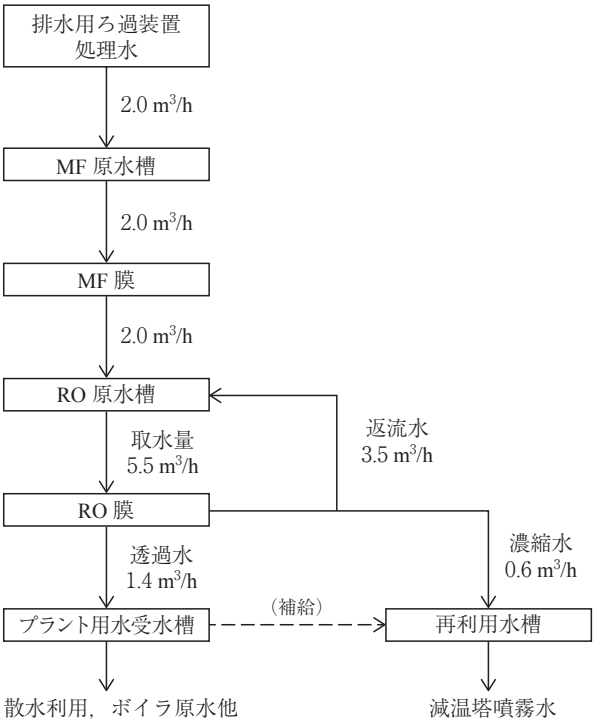


図４　排水膜処理設備フローと水バランス

温度を下げることができ，ボイラでの収熱を増やしている。

3.　運転実績

3.1　熱回収施設処理実績

図５に４月以降の熱回収施設の処理実績を示す。2014年４月以降，ごみの搬入量に応じた操業計画をたて，ピット残量を管理しており，焼却負荷率がほぼ定格となるように１炉運転，２炉運転を実施している。

3.2　汚泥処理実績

４月～６月の汚泥の処理実績として，表５に汚泥混焼状況，表６にごみ種別搬入実績を示す。本施設にひと月に受け入れる汚泥は200 t 程度で，１系列運転のときの汚泥混焼率は約10 %程度となるが，この混焼率においても汚泥を乾燥させることにより助燃量を削減し，安定した自己熱溶融での運転が可能となっている。

図６に汚泥乾燥設備の処理実績を示す。汚泥の受入は平日のみのため週末は汚泥乾燥設備を停止する

表５　汚泥混焼率

		2014年４月	2014年５月	2014年６月
焼却量	１号系 [t]	1 481	2 002	1 055
	２号系 [t]	1 585	0	1 523
	合計 [t]	3 066	2 002	2 578
汚泥処理量	[t]	208	191	218
乾燥汚泥発生量	[t]	34	31	35
乾燥汚泥含水率	[%]	5.7～9.0（平均7.4）	5.2～7.8（平均6.3）	4.3～6.7（平均5.7）
汚泥混焼率	[%]	6.8	9.7	8.6

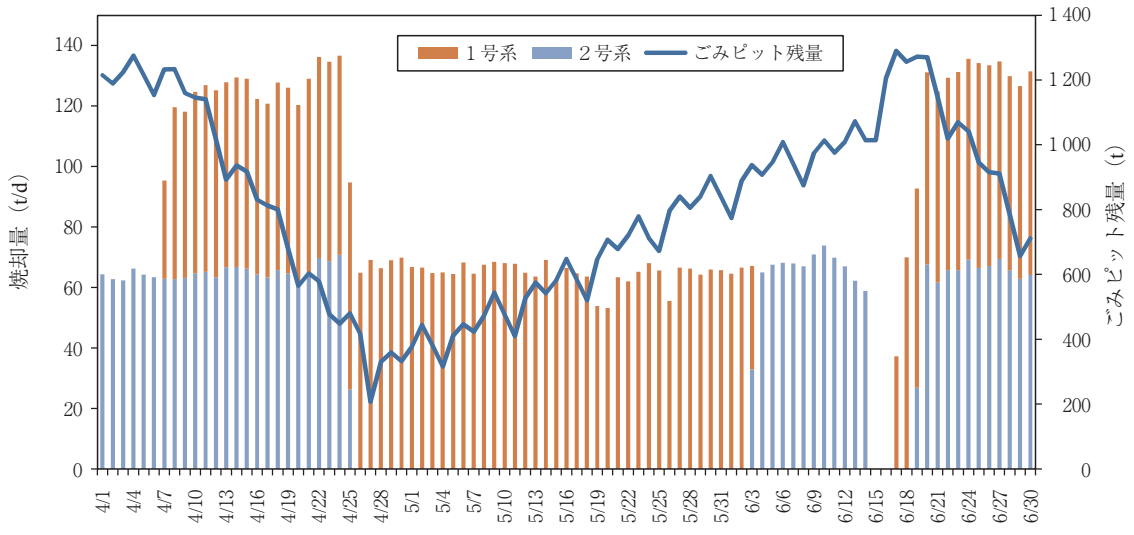


図５　熱回収施設の処理実績

ことが多くなるが，安定して処理ができていることがわかる。

3.3　熱回収施設の性能評価

表７に煙突の排ガス測定結果を示す。全項目について排ガス基準値を十分下回っていることがわかる。**表８**にスラグの各種試験測定結果を示す。スラグは重金属の溶出と含有量，各種物理性状ともすべてJIS A 5032に適合し，現在アスファルト舗装用の混合材として有効利用されている。

む　す　び

芳賀地区エコステーションは，可燃ごみの他，し尿汚泥，下水汚泥およびリサイクル残渣といった多様な種類のごみを受入れ，安定した操業を継続している。また，高度排水処理（膜処理）の採用などで

表６　ごみ種別搬入実績

			2014年４月	2014年５月	2014年６月
可燃ごみ		[t]	2 045.4	2 241.0	2 210.2
汚　泥	し尿汚泥	[t]	119.8	110.1	116.7
	下水汚泥	[t]	97.0	80.1	96.8
	農集汚泥	[t]	0.6	3.4	1.0
	合　計	[t]	217.3	193.6	214.4
し　渣		[t]	—※	10.4	8.5
可燃残渣（リサイクル）		[t]	82.6	61.2	58.3
不燃残渣（リサイクル）		[t]	161.7	163.9	140.4
合　計		[t]	2 507.0	2 670.2	2 631.7

※４月搬入のし渣は可燃ごみに含む

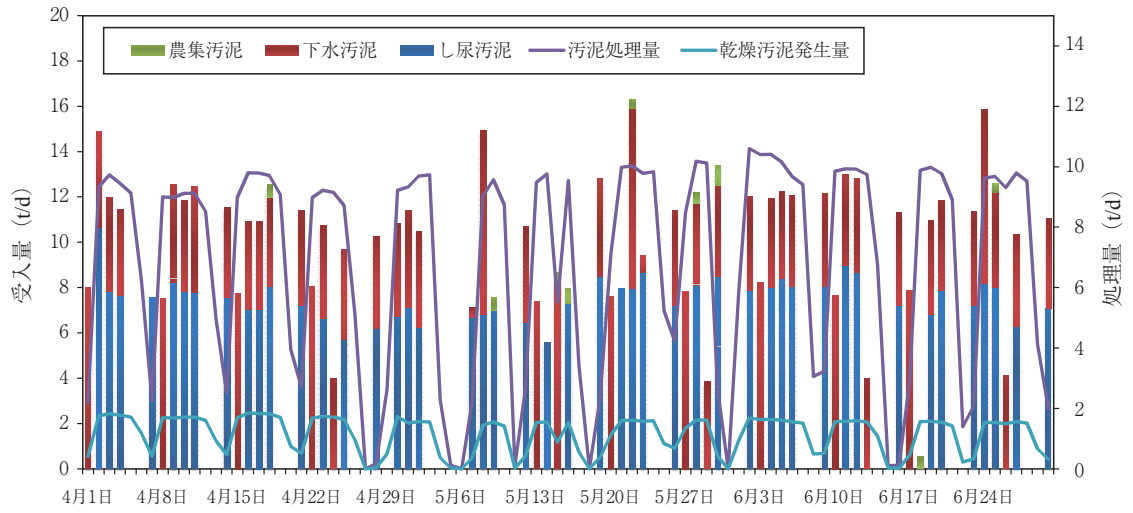


図６　汚泥処理の実績

表７　煙突の排ガス測定結果

		１号系（１回目）	１号系（２回目）	２号系（１回目）	２号系（２回目）	基準値
ばいじん	[g/m^3_N]	＜0.0008	＜0.0008	＜0.0008	＜0.0008	0.02
NOx	[ppm]	50	52	32	41	70
HCl	[ppm]	44	36	40	43	50
SOx	[ppm]	＜5	＜4	＜4	＜4	30
CO（4 hr 平均）	[ppm]	2	2	1	2	30
DXNs	[ng-TEQ/m^3_N]	0.00019	0.0036	0.0016	0.0014	0.1

表８　溶融スラグの各種試験測定結果

項目			基準値	測定結果
溶出試験	カドミウム	mg/L	0.01以下	＜0.001
	鉛	mg/L	0.01以下	＜0.001
	六価クロム	mg/L	0.05以下	＜0.005
	ひ素	mg/L	0.01以下	＜0.001
	総水銀	mg/L	0.0005以下	＜0.0005
	セレン	mg/L	0.01以下	＜0.001
	ふっ素	mg/L	0.8以下	＜0.08
	ほう素	mg/L	1以下	＜0.1
含有量試験	カドミウム	mg/kg	150以下	＜5
	鉛	mg/kg	150以下	22
	六価クロム	mg/kg	250以下	＜5
	ひ素	mg/kg	150以下	＜5
	総水銀	mg/kg	15以下	＜0.05
	セレン	mg/kg	150以下	＜5
	ふっ素	mg/kg	4000以下	＜100
	ほう素	mg/kg	4000以下	129
ダイオキシン類		ng-TEQ/g	—	0.000226
JIS A 5032	外観（目視観察）		※1	良
	粒度（FM-2.5）（ふるいを通る物の質量百分率）	4.75 mm	100	100
		2.36 mm	85～100	99
		75 μm	0～10	3
	表乾密度	g/cm^3	2.45以上	2.96
	吸水率	%	3.0以下	0.3
JIS A 5031	酸化カルシウム（CaOとして）	%	45.0以下	26.5
	全硫黄（Sとして）	%	2.0以下	＜0.1
	三酸化硫黄（SO_3として）	%	0.5以下	＜0.1
	金属鉄（Feとして）	%	1.0以下	0.5
	塩化物量（NaClとして）	%	0.04以下	＜0.01
	膨張率	%	2以下	0
	絶乾密度	g/cm^3	2.5以上	2.95
	吸水率		3.0以下	0.3275
	安定性		10以下	0.475
	粒形判定実積率		53以上	56.825
	微粒分率		7.0以下	1.875
	アルカリシリカ反応		無害であること	無害
	粒度（MS2.5）（ふるいを通る物の質量百分率）	10 mm	100	100
		5 mm	95～100	100
		2.5 mm	85～100	99
		1.2 mm	60～95	77
		0.6 mm	30～70	40
		0.3 mm	10～45	17
		0.15 mm	5～20	7
		粗粒率	※2	2.6

※1　溶融スラグは堅硬で，かつ，異物，針状固化物，扁平又は鋭利な破片などを使用上有害な量を含まないこと。
※2　購入契約時に定められた粗粒率と比べ，±0.20以上変化してはならない。

発電効率15.3％を達成している。今後も本事業の目的である自然環境・地域社会と共生する安全・安心で経済的なごみの再生の実現に向け，流動床式ガス化溶融施設の安定した運転を継続していきたい。

最後に，本発表にあたりご協力を頂きました芳賀地区エコステーションの方々および関係各位に深く感謝の意を表します。

*環境プラント事業部 操業技術部 第一技術室　**株式会社 芳賀環境サービス

西秋川衛生組合ごみ処理施設　掘り起こしごみ処理による最終処分場再生と高効率発電への取組み

Nishiakigawa MSW to Energy Plant Final Disposal Site Reproduction by Digging-up Refuse Disposal and the Action for High Efficiency Power Generation

黒瀬卓治*
Takuji Kurose

藤田　淳**
Jun Fujita
技術士（衛生工学部門）

水岡　翔**
Sho Mizuoka

山本芳宏***
Yoshihiro Yamamoto
技術士（衛生工学部門）

大久保順二****
Junji Okubo

西秋川衛生組合ごみ処理施設は2014年３月に竣工し，当社として初めてとなる最終処分場の掘り起こしごみ処理を開始した。また，排水膜処理設備をはじめ当社の技術力を総合し高効率発電システムを確立した。

Nishiakigawa MSW to energy plant was completed in March 2014, and started treatment digging-up refuse from the final disposal site. This is our first plant to contribute the extension of longevity for final disposal site. Incorporating all the technical skills and capabilities of our company, such as membrane filtration process equipment, were combined, and the high-efficiency-power-generation system was established.

Key Words :

都　市　ご　み	Municipal solid waste（MSW）
ガ ス 化 溶 融 炉	Gasification and melting furnace
最　終　処　分　場	Final disposal site
掘り起こしごみ処理	Digging-up refuse disposal
高　効　率　発　電	High efficiency power generation
膜　　処　　理	Membrane filtration

【セールスポイント】

都市ごみを処理するガス化溶融施設に，最終処分場から掘り起こしたごみを搬入し，都市ごみと混合わせて処理を行い，最終処分場の延命化を進めている。

排水膜処理設備を導入した高効率発電システムを確立した。

ま え が き

当社は2000年10月に国内初の都市ごみ向け流動床式ガス化溶融施設を竣工させて以来，現在までに計13施設を納入し，安定稼働を継続している。西秋川衛生組合は，東京都西部に位置する，あきる野市，日の出町，檜原村，奥多摩町の４市町村から発生するごみ処理を担っており，その収集面積は東京都の約２割を占める。組合では既設ごみ焼却施設（昭和53年竣工）の老朽化が進んだことから，安全・安定した適性処理を継続し，資源化率と熱回収率の向上を実現するごみ焼却施設を新設する必要があった。また，最終処分場の残余容量がひっ迫していることから，新施設には，掘り起こしごみ処理による処分場延命化が要求された。発注形態は施設の建設およ

び20年間の運営を一括して発注するDBO方式（Design-Build-Operate）であり，総合評価一般競争入札の結果，当社を含むグループが落札することとなった。本稿では，平成26年３月に竣工した本施設の稼働状況と最終処分場再生状況および高効率発電への取組みについて報告する。

1. 西秋川衛生組合ごみ処理施設の施設概要

1.1 プロセス概要

西秋川衛生組合ごみ処理施設の施設概要を**表１**に，施設フローを**図１**に示す。

本施設は，可燃ごみのほか，不燃粗大ごみ処理設備から発生する破砕ごみ，最終処分場の掘り起こしごみ等を受入れている。最終処分場から掘り起こされたごみは，全ごみ量に対して約10 %であり，ごみピット内で撹拌する。ごみは破砕した後，流動床式ガス化炉に投入し，発生した熱分解ガスおよび未燃炭素を旋回流溶融炉により約1 250 ℃の高温で完全燃焼させるとともに，同伴された飛灰は溶融しスラグとして回収する。一方，排ガスは，テールエンド型ボイラにて4MPaG ×350 ℃の蒸気として廃熱を回収したのち，バグフィルタ，触媒反応塔を経て煙突から排出する。この回収した蒸気により定格1 900 kWの蒸気タービン発電機にて発電を行っている。また，ガス化炉から抜出した鉄とアルミは，未酸化状態で有価資源として回収している。

本施設では，平成21年公布の高効率ごみ発電施設整備マニュアルに示されたいくつかの技術を組合わせ，発電効率を高めている。さらに膜処理技術を用いて場内で発生する排水を適正処理・再利用することで排ガス系内で蒸発処理する排水の量を大幅に削減でき，ボイラでの蒸気発生量を最大として，交付金条件の発電効率14 %に対し，15.7 %の発電効率

表１　施設概要

施設名称	西秋川衛生組合ごみ処理施設
処理能力	117 t/d（58.5 t/d × 2炉）
処理対象物	可燃ごみ，不燃ごみ，粗大ごみ，リサイクルセンターからの残渣，最終処分場の掘起こしごみ
受入供給設備	ピットアンドクレーン方式（ダブルピット）
ガス化溶融設備	流動床式ガス化炉＋旋回流溶融炉方式
燃焼ガス冷却設備	廃熱ボイラ＋水噴霧方式
排ガス処理設備	バグフィルタ＋触媒反応塔
排水処理設備	凝集沈殿＋膜処理設備（排水クローズド）
発電量	1 900 kW

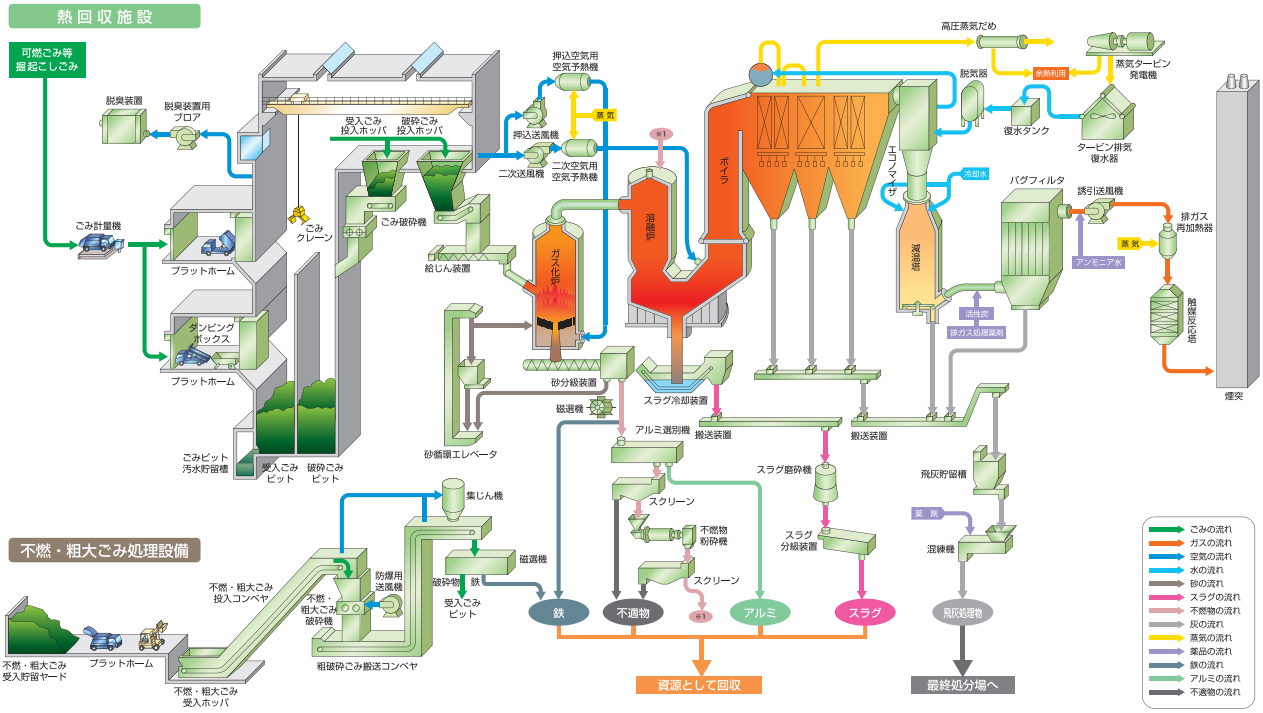


図１　西秋川衛生組合ごみ処理施設の施設フロー

を達成している。

1.2　運転体制

本施設の運営は，当社および神鋼環境メンテナンス㈱と，建設工事におけるJVパートナーの出資により設立した特別目的会社「㈱たかお環境サービス」が行っている。運転体制を計画するにあたり，過去の納入施設の運転状況を調査し，運転における作業負荷が高い作業項目を重点的に設備改善・自動化を行うことで，最少人数での運転を達成している。

2.　最終処分場延命化

2.1　最終処分場再生事業概要

西秋川衛生組合が管理する最終処分場は遮水シート施工工法による管理型処分場であり，埋立て面積10 100 m^2，埋立て容量87 000 m^3である。浸出水は生物学的脱窒素法＋低負荷活性汚泥法＋凝集沈殿法＋急速濾過＋活性炭吸着法にて処理されている。

最終処分場再生事業は，既に埋立てられたごみを掘り起こし，新しく整備した熱回収施設で処理し，最終処分場の延命化を図る事業である。なお，本事業は西秋川衛生組合から委託された神鋼環境メンテナンス㈱が運営している。

2.1.1　再生事業の全体像

図2に再生事業の全体像を示す。掘起したごみは分級・選別設備に投入し，振動スクリーン（目開き50 mm）を用いて「灰土砂類」（ふるい下）を選別する。また，ふるい上は手選別にて大型異物（金属・レンガ等）を除去した後ビニール・プラスチックを主成分とする「可燃物」として，いずれも熱回収施設へ搬送する。**写真1**に最終処分場前処理設備の外観を示す。熱回収施設では，別々に搬入された「可燃物」と「灰土砂類」を，他のごみと十分に混合した後，炉へ投入する。掘り起こしごみの外観を**写真2**に示す。

2.1.2　年間掘り起こし処理量

最終処分場から熱回収施設に搬入する掘り起こしごみは，熱回収施設での年間ごみ処理量の10%として計画しており，その容積は次のとおりとなる。

熱回収施設のごみ処理計画　31 513 t/年

掘り起こしごみかさ比重1.18 t/m^3

31 513 t/年×10 %÷1.18≒2 700 m^3/年

2.1.3　年間埋立量

年間埋立て量は熱回収施設で新たに発生する溶融飛灰量に約10 %の覆土を見込み，次のとおりとなる。

溶融飛灰の発生量1 411 t/年

溶融飛灰かさ比重1.00 t/m^3

1 411 t/年×1.00×110 %≒1 650 m^3/年

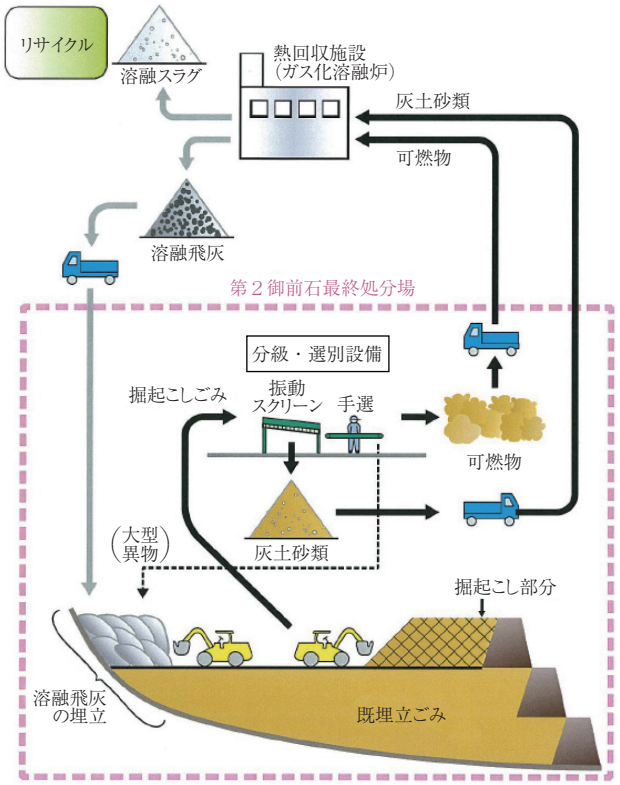


図2　再生事業の全体像

写真1　最終処分場前処理設備の外観

写真2　掘り起こしごみ

2.1.4　埋立容積の増加量

上記の年間掘り起こし処理量および年間埋立量より最終処分場容量の増加量は次のとおりとなる。

2 700 m^3/年 − 1 650 m^3/年 = 1 050 m^3/年

したがって今回の再生事業において，掘り起こしを行っている間は，この1 050 m^3/年が新たに埋立容量として確保され，最終処分場の延命化が図れることになる。**図３**に再生事業のマテリアルバランスを示す。

旧炉によるごみ処理方法のままで埋立てを行った場合，最終処分場が平成29年度中に満杯となってしまう状況が，この再生事業を行うことで平成55年度まで埋立てを継続でき，約26年延命される計画となる。

2.1.5　掘り起こしと埋立計画

最終処分場は**図４**のようにＡ～Ｅの５エリアに作業区域を分割している。最終処分場は谷間に設置され，階段状に埋立てられているため，掘り起こしおよび埋立計画を策定するに当たっては，遮水シートの位置・レベルと土質的安定性を十分に考慮して計画する必要があった。

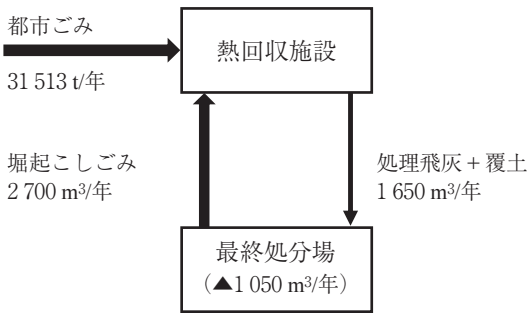


図３　再生事業のマテリアルバランス

掘り起こし計画の概略としては，選別・分級ヤードをＥエリアに設置し，Ｂ→Ｃ→Ｄエリアの順に掘り起こしていく。一方，埋立て計画は，当初は未埋立エリアであるＡエリアに埋立て，その後，掘起された後を追うように，Ｂ→Ｃ→Ｄエリアの順に溶融飛灰を埋立てる計画としている。再生事業全体期間の最終処分場の容量変化を**図５**に示す。埋立て総容積87 000 m^3 の内，37 000 m^3 は，構造上残置し，残りの50 000 m^3 の内，2013年現在で25 900 m^3 までは埋立てが完了している。この25 900 m^3 の埋立てごみを年間2 700 m^3 ずつ掘り起こし，9.6年で処理を完了する。溶融飛灰と覆土は年間1 650 m^3 発生し，確保した50 000 m^3 のエリアに31年間かけて埋立て，平成55年に満杯になる計画である。

2.2　掘り起こしごみの処理実績

2.2.1　掘り起こしごみの組成

最終処分場に埋立てられているものは，旧炉のストーカ炉から排出された焼却灰（飛灰処理物を含む）ならびに旧粗大ごみ処理施設および不燃処理・資源化施設の不燃系残渣である。掘り起こしごみの

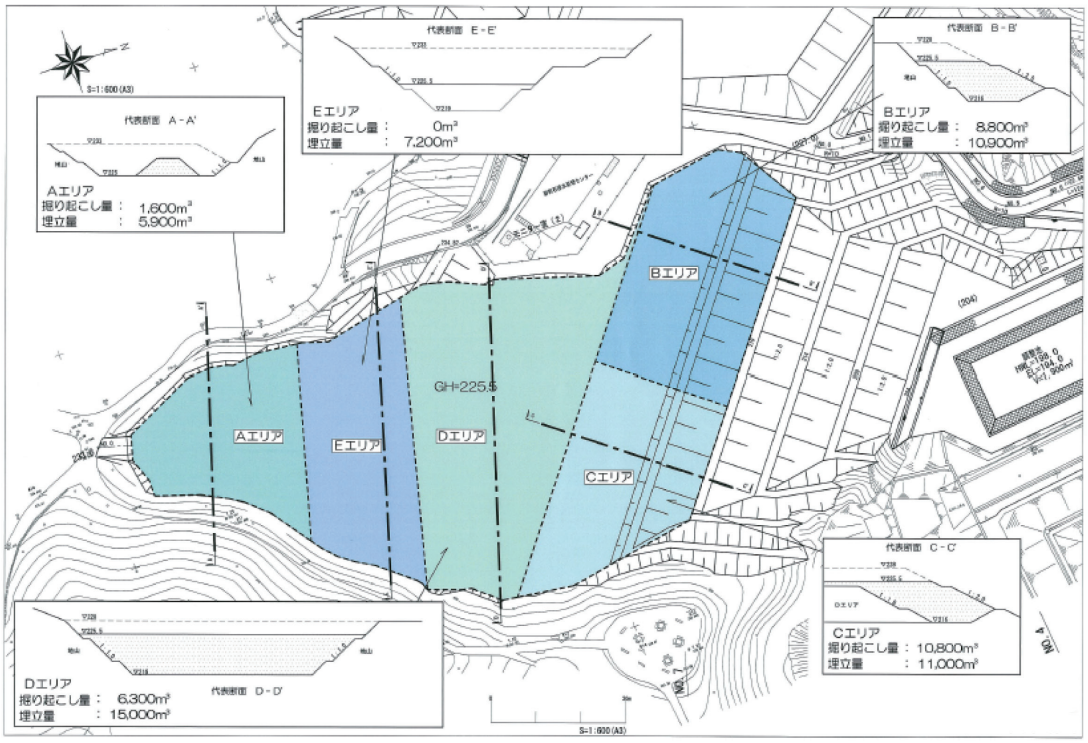


図４　最終処分場平面エリア分け計画図

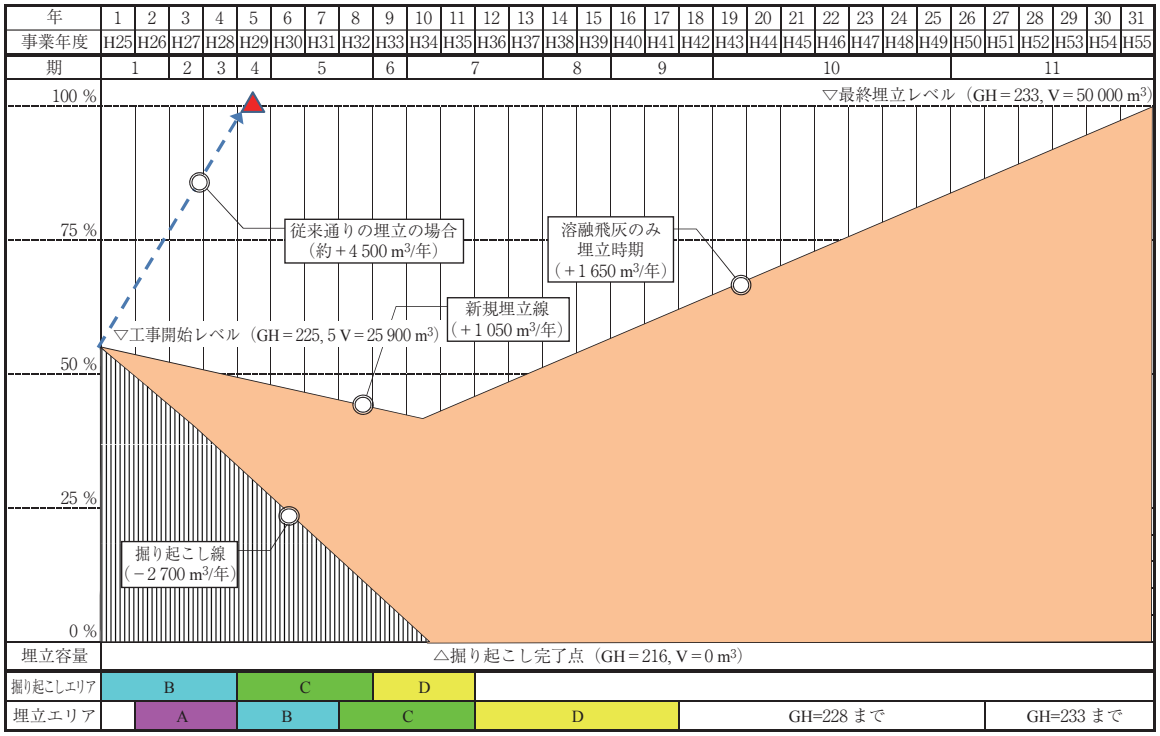


図５　再生事業全体期間の最終処分場の容量変化

表２　掘り起しごみの性状

項　　目	測定日時	粒　　度	重量比率	水　　分	灰　　分	可 燃 分	低位発熱量
単　　位	—	—	%	%	%	%	kJ/kg
平成20年度報告書	サンプル１	—	—	28.2	63.0	8.8	—
	サンプル２	—	—	27.7	64.8	7.5	—
	サンプル３	—	—	25.9	65.0	9.1	—
	平　　均	—	—	27.3	64.3	8.5	—
平成24年度測定結果	８月20日 10：45	50 mm 以下	95.7	24.8	65.3	9.9	920
		50～100 mm	2.2	18.7	60.6	20.7	5 600
		100 mm 以上	2.1	—	—	—	—
		合　　計	100.0	—	—	—	—
		平均（*1）	—	24.7	65.2	10.1	1 025
	８月20日 11：20	50 mm 以下	90.6	24.6	60.8	14.6	2 840
		50～100 mm	8.8	22.7	48.1	29.2	5 620
		100 mm 以上	0.6	—	—	—	—
		合　　計	100.0	—	—	—	—
		平均（*1）	—	24.4	59.7	15.9	3 086
	８月20日 11：50	50 mm 以下	94.5	30.0	59.6	10.4	600
		50～100 mm	4.1	26.5	56.0	17.5	3 960
		100 mm 以上	1.4	—	—	—	—
		合　　計	100.0	—	—	—	—
		平均（*1）	—	29.9	59.4	10.7	740
	平　　均	—	—	26.3	61.4	12.2	1 617

（*1：100 mm 以上を除く）

性状を**表２**に示す。掘り起こしごみの３成分の平均は，平成20年度では水分27.3 %・灰分64.3 %・可燃分8.5 %であった。平成24年度に実施設計にあたりサンプリングした結果，水分26.3 %・灰分61.4 %・可燃分12.2 %となり，平成20年度とほぼ類似した測定結果となった。

また，粒度ごとの性状としては，50 mm 以上のごみが全体の５―10 %程度あり，不燃残渣由来のビニール類が含まれているため掘り起こしごみながら3 960―5 620 kJ/kg の発熱量がある。一方50 mm

以下のごみは灰土砂類が主成分であるため発熱量が600―2 840 kJ/kg と低い。前処理設備としては，大塊物など処理不適物の手選除去が必要であるため50 mm のふるい設備を設け，ふるい上は処理不適物を手選除去した後可燃コンテナへ，ふるい下は灰土砂コンテナへ貯留し，ともに熱回収施設に搬入することとしている。

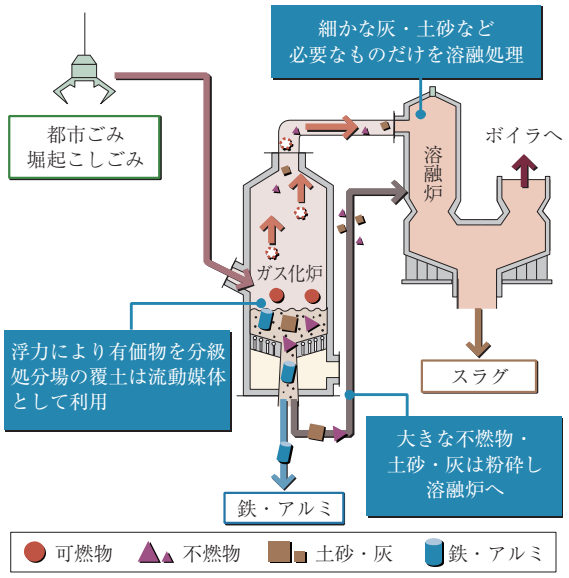


図６　ガス化溶融炉での分級フロー

2.2.2　ガス化溶融炉での挙動

ガス化炉に投入された灰分は，図６に示すフローで回収されマテリアルリサイクルされる。ガス化炉へ投入された細かな灰分は排ガスに同伴され溶融炉にてスラグとなる。大きな灰分は流動砂とともに炉下から抜出され，砂を分級したのち鉄とアルミを回収し，残った不燃物は粉砕機にて細かくし溶融炉へ供給しスラグとなる。鉄，アルミ，スラグはそれぞれ有価物としてリサイクルされる。

表３　掘り起こしごみの処理実績（2014年４―８月）

項　　目		単位	2014年 4－8月	備　　考
ごみ処理量		t	12 041	
（A）掘り起しごみ受入量				
	（可 燃 物）	t	27	50 mm オーバ
	（灰土砂類）	t	1 448	50 mm 以下
	計	t	1 475	
		m^3	1 250	比重1.18 t/m^3
（B）溶融飛灰搬出量		t	777	
		m^3	777	比重1.00 t/m^3
（C）最終処分場減量（A－B）		m^3	473	

表４　スラグの測定結果

項　　目			基 準 値	測定結果
溶 出 試 験	カドミウム	mg/L	0.01以下	＜0.001
	鉛	mg/L	0.01以下	＜0.001
	六価クロム	mg/L	0.05以下	＜0.005
	ひ　　素	mg/L	0.01以下	＜0.001
	総 水 銀	mg/L	0.0005以下	＜0.0005
	セ レ ン	mg/L	0.01以下	＜0.001
	ふ っ 素	mg/L	0.8以下	＜0.08
	ほ う 素	mg/L	1以下	＜0.1
含有量試験	カドミウム	mg/kg	150以下	＜1.0
	鉛	mg/kg	150以下	44
	六価クロム	mg/kg	250以下	＜10
	ひ　　素	mg/kg	150以下	＜10
	総 水 銀	mg/kg	15以下	＜1.0
	セ レ ン	mg/kg	150以下	＜1.0
	ふ っ 素	mg/kg	4000以下	＜100
	ほ う 素	mg/kg	4000以下	87
ダイオキシン類		ng-TEQ/g	1 以下	1 回目 0.000022 2 回目 0（ゼロ）
JIS A 5032	外　観（目視観察）		※１	－
	粒度（FM-2.5） （ふるいを通る物の質量百率）	4.75 mm	100	100
		2.36 mm	85～100	99
		75 μm	0～10	4
	表 乾 密 度	g/cm^3	2.45以上	2.8
	吸　水　率	%	3.0以下	0.36

※１　溶融スラグは堅硬で，かつ，異物，針状固化物，扁平又は鋭利な破片などを使用上有害な量を含まないこと。

2. 2. 3　処理実績

表３に2014年４―８月の処理実績を示す。最終処分場からは1 250 m^3の掘り起こしごみが搬出され，処理飛灰の搬入量は777 m^3であり，その差473 m^3の埋立容積が確保できたことになる。

2. 2. 4　スラグおよび処理飛灰の性状

掘り起こしごみを処理することによるスラグ中重金属類の含有量や，処理飛灰からの重金属類の溶出への影響を確認した。**表４**にスラグの分析結果を示す。重金属類の含有量試験，溶出量試験を含んだJIS A 5032「一般廃棄物，下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化した道路用溶融スラグ」およびJIS A 5031「一般廃棄物，下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材」に示される基準を全て満たすことを確認した。

写真３にスラグの出滓状況を示す。最終処分場の掘り起こしごみを混焼した状態でも，スラグの出滓は良好な状態を保っている。

表５に処理飛灰の性状を示す。こちらも全ての基準値を下回っており，安定して掘り起こしごみを処理できることが確認できた。

3.　高効率発電への取組み

3. 1　高効率発電マニュアルへの対応

本施設では，平成21年３月に環境省から公布された高効率ごみ発電施設整備マニュアルに示されている「低空気比燃焼」，「低温触媒脱硝」，「高効率乾式排ガス処理」，「白防条件の設定なし」，「高温高圧ボイラ」および「抽気復水タービン」を組合わせ発電効率を高めている。さらに当社水環境事業部の膜処理技術を採用し，排水を適正処理・再利用することで排ガス系内での排水噴霧量を大幅に削減できた。[2)] これにより，ボイラでの蒸気発生量を増加させることで，交付金条件の発電効率14 %に対し，15.7 %の発電効率を達成している。**表６**にマニュアル記載の技術との対応表を示す。施設設計条件であるプラント排水クローズド（場外へプラント排水を排水することができない）のため採用できない，低温エコノマイザ，水冷式復水器を除き全ての要素技術を採用し高効率発電を達成している。さらに「高効率乾式排ガス処理」および「排水膜処理設備」を独自の技術として採用し，最大限発電することができる施設としている。

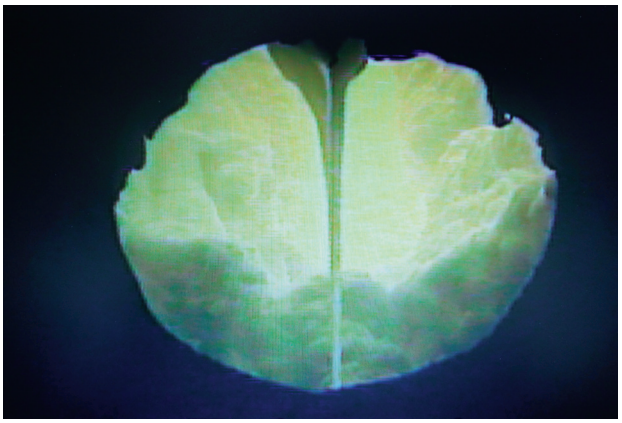


写真３　スラグの出滓状況

表５　処理飛灰の測定結果

項　目			基準値	測定結果
溶出試験	アルキル水銀化合物	mg/L	検出されないこと	不検出
	総水銀	mg/L	0.005以下	0.001
	カドミウム	mg/L	0.3以下	0.04
	鉛	mg/L	0.3以下	＜0.01
	六価クロム	mg/L	1.5以下	0.14
	砒素	mg/L	0.3以下	＜0.01
	セレン	mg/L	0.3以下	0.03
ダイオキシン類		ng-TEQ/g	3以下	0.53 ※

※４回分析の平均値

表６　高効率ごみ発電施設整備マニュアルへの対応状況

発電効率向上に係る技術的要素・施策			採用状況
熱回収能力の強化	低温エコノマイザ	―	不採用※１
	低空気比燃焼	○	採用
蒸気の効率的利用	低温触媒脱硝	○	採用
	高効率乾式排ガス処理	○	採用（乾式重曹噴霧）
	白煙防止条件の設定なし，あるいは，白煙防止装置の運用停止	○	採用（白煙防止条件の設定なし）
	排水クローズドシステムの導入なし	―	不採用※１
蒸気タービンシステムの効率向上	高温高圧ボイラ	○	採用（350 ℃，4MPa）
	抽気復水タービン	○	採用
	水冷式復水器	―	不採用※１

※施設建設条件が排水クローズドシステムのため採用できない。

表７　排ガス基準値と測定結果（O_2—12 %換算値）

		1号系		2号系		基準値
		（1回目）	（2回目）	（1回目）	（2回目）	
ばいじん	[g/m^3_N]	＜0.002	＜0.002	＜0.002	＜0.002	＜0.005
NOx	[ppm]	18	19	15	16	＜40
HCl	[ppm]	4.8	4.0	9.0	7.5	＜10
SOx	[ppm]	＜0.5	＜0.5	0.79	＜0.5	＜5
CO（4h 平均）	[ppm]	1	1	2	3	＜30
DXNs	[ng-TEQ/m^3_N]	0.00039	0.00005	0.00004	0.000041	＜0.01

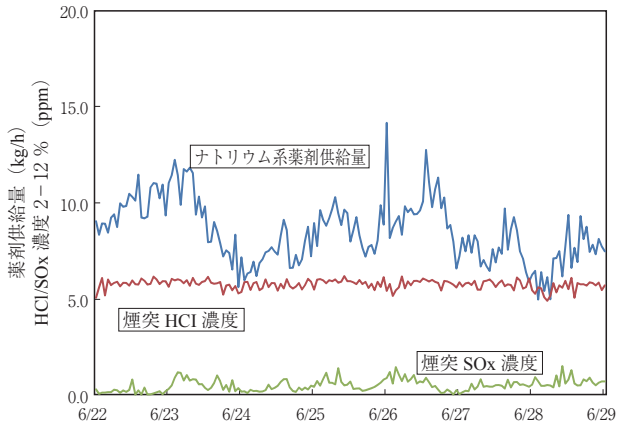


図７　重曹の供給量および煙突の HCl/SOx の連続チャート

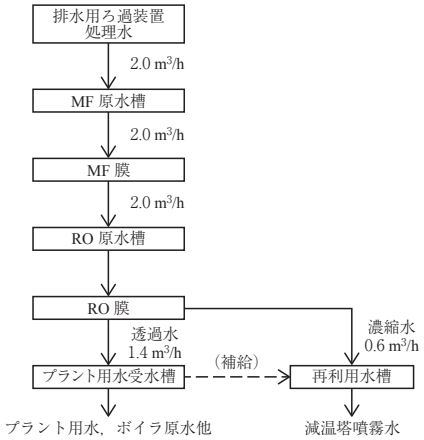


図８　排水処理設備フローと水バランス

3.1.1　高効率乾式排ガス処理

高効率乾式排ガス処理は，塩化水素の公害防止基準値が，例えば20 ppm 以下など厳しい場合，従来は苛性ソーダによる湿式排ガス処理が用いられることが一般的であった。これに対し，高反応性消石灰やナトリウム系薬剤等の高効率脱塩薬剤を採用する乾式排ガス処理は，排ガス再加熱用蒸気使用量を削減し，発電用に供することができるため発電効率の向上を図る技術である[1)]。本施設ではナトリウム系薬剤の重曹を用いた高効率乾式排ガス処理により，排ガス再加熱蒸気を削減し，塩化水素規制値10 ppm，硫黄酸化物規制値５ppm を達成している。

図７にバグフィルタにおける重曹の供給量，煙突の塩化水素および硫黄酸化物濃度の連続チャートを示す。塩化水素，硫黄酸化物とも常時規制値を下回っており，安定して処理できていることがわかる。重曹の供給量は煙突における塩化水素濃度によりフィードバック制御され，当量比に換算して1.4程度噴霧されている。

表７に排ガス基準値と測定結果を示す。HCl については従来，湿式排ガス処理でしかクリアできなかった10 ppm 以下を，重曹を用いた高効率乾式排ガス処理でクリアしている。その他の項目についても排ガス基準値を安定してクリアできている。

3.1.2　排水膜処理設備

本施設では，従来の凝集沈殿＋砂ろ過装置に加え，マイクロフィルタ（MF 膜）と逆浸透膜（RO 膜）で構成される膜処理設備を導入し，排水を高度処理するため，排水の約７割をプラント用水として再利用している。その結果，減温塔で噴霧し処理する排水を減らし，エコノマイザ出口排ガス温度を下げることで，ボイラでの収熱を増やすことができる。図８に排水処理設備フローと水バランスを示す。膜処理設備にて2.0 m^3/h 処理し，そのうち70 %

写真４　排水膜処理設備外観図

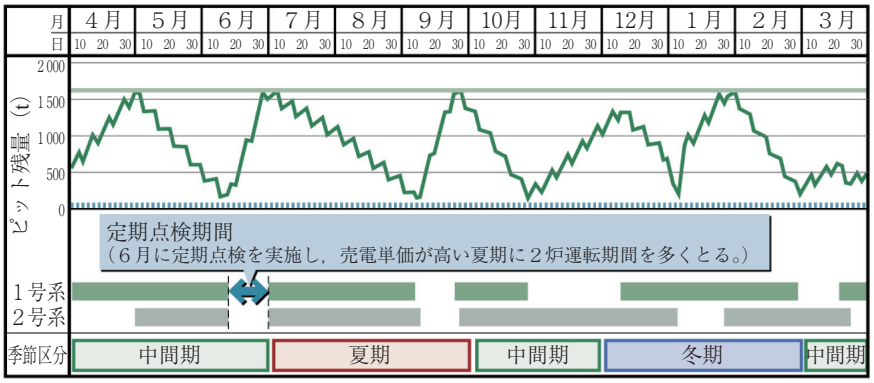


図９　操業計画の一例

の1.4 m^3/h はプラント用水として再利用され，残りの0.6 m^3/h が減温塔で排ガス中に噴霧される。また，プラント用水として再利用されるため上水の使用量も削減することが出来る。**写真４**に排水膜処理設備の外観を示す。

3.2　売電収入増加に向けた取組み

運営事業においては，売電収入の2/3は運営会社である㈱たかお環境サービス，1/3は西秋川衛生組合の収入になる契約形態となっている。売電収入を増やすには，3.1で述べたように高効率発電の技術により最適な発電システムを採用することの他，次のような取組みを行っている。

3.2.1　省エネ対策

本施設では消費電力を低減させるため，大型ファン（押込送風機，二次送風機，誘引送風機）や空気圧縮機などのインバータ対象機器を拡大し，換気設備の操業炉数による発停システムを取入れている。運営においてはこれらの設備の省エネ効果等を確認すると同時に，無駄な電力の削減に取組んでいる。

3.2.2　売電量の最大化

売電量最大化の結果，本施設の売電電力は，１炉運転では0―200 kW，２炉運転では800―1 000 kWであり，運転炉数に限らずおおむね売電が可能である。今後は売電単価が高い日中に売電量を増やすような運転方法の確立にも取組んでいきたい。

3.2.3　売電単価の最大化

売電量を増加させることに加え次のような売電単価の最大化に取組んでいる。

一つめに，売却先は年間および時間帯別の買電・発電計画をたて，数社の特定規模電気事業者（Power Producer and Supplier）に提示し，最大の売電収入を得られるPPSと売買契約を結んでいる。

二つめに，売電単価の高い夏季に売電量を増やすために，**図９**の一年間の操業計画の一例に示すように，６月に２炉停止を伴う定期点検を行い，７月から２炉運転を行う運転計画としている。

最後に，再生可能エネルギによる発電の固定価格買取制度（FIT）に申請し，さらなる売電単価の上昇を見込んでいる。また地域の製材業から発生する，木材チップや製材端材を木質バイオマス燃料として積極的に受入れることで，ごみ発電よりもさらに高い単価での売却を目指してスキームを構築中である。

むすび

当社として初めてとなる，最終処分場再生事業を開始した。掘り起こしごみを都市ごみと混合し，ガス化溶融炉にて，安全に処理するとともに，鉄，アルミ，スラグとしてマテリアルリサイクルするシステムが順調に稼動を開始した。処理に伴う環境基準は満足し，最終処分場の残余年数も計画通り延長している。また，排水膜処理設備をはじめ，当社の技術力を結集し，高効率発電システムを確立した。今後は20年間の運営事業期間中も安全・安定運転を継続し，さらなるガス化溶融技術のブラッシュアップを目指していきたい。

[参考文献]

1）環境省：高効率ごみ発電施設整備マニュアル，平成22年３月改訂，P19
2）平井友希子ほか：神鋼環境ソリューション技報，Vol.7，No.1，2010

*環境プラント事業部 監理部　**環境プラント事業部 操業技術部 第一技術室　***環境プラント事業部 プラント技術部
****神鋼環境メンテナンス㈱ 運転管理センター 第二操業技術部 操業管理室 事業所所長

EI 統合新型 DCS の実用化実績

Application Result of New Style DCS in which E&I Functions are Integrated

下梨　孝*
Takashi Shimonashi
技術士（電気電子部門）

曲健太郎*
Kentaro Magari

芦田直行*
Naoyuki Ashida

浦上和也*
Kazuya Uragami

シーケンス制御と計装制御が同一のプラットフォームに載った新型 DCS を計装ループ数が300～600の中規模プラントに適用できるように開発し，2013年度に３件のプラントに適用した。試運転期間中にさまざまな問題が発生したが，ひとつひとつ解決し，計装メーカの提供する従来型 DCS に匹敵する操作性を具備したシステムとして無事引渡しを完了した。

We customized a New style DCS, which is equipped with sequence control and instrument control on the same platform, so that it could be adopted to medium scale plant with 300－600 instrument loops. We adopted it for three plants during the 2013 fiscal year.Although we encountered various problems during commissioning stage, we solved them one by one and have successfully taken over it as the system which has got the same operability as a conventional style DCS does.

***Key Words*：**

DCS	DCS
SCADA	SCADA
計装ループ	Instrument loop
中規模プラント	Medium scale plant

【セールスポイント】

EI 統合新型 DCS を中規模プラントに適用し，さまざまな問題を解決して計装メーカの従来型 DCS に匹敵するコストパフォーマンスの高いシステムであることを実証した。

ま え が き

近年，プラントの計装制御システムにおいては計装メーカの提供する従来型 DCS（Distributed Control System）に代わって計装制御用 CPU をシーケンス制御用システムに組込んだ新型 DCS が数多く採用されるようになってきた。当社においてもこの潮流に注目し，計装制御システムのコストパフォーマンスを高めるために，これらの形態を計装ループ数が300～600の中規模プラントに適用できるように2012年度に開発を実施した。

そして2013年度，３件のプラントに適用し，試運転，引渡しまで無事完了した。

本稿ではその適用結果について報告する。

1.　EI 統合新型 DCS とは

図１に示すように電気メーカが提供するシーケンス制御用の電気 CPU と計装制御を専用で処理できる計装 CPU が同じ制御 LAN に接続され，これらの CPU と汎用のイーサネット通信でデータの授受を

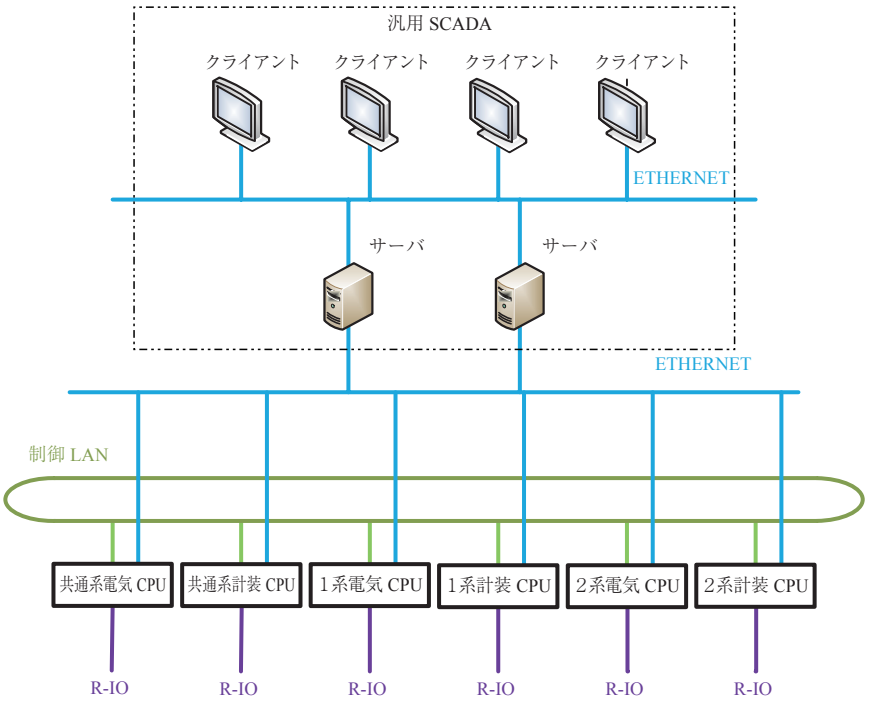


図１　EI 統合新型 DCS システム構成図

行う SCADA システム（Supervisory Control And Data Acquisition）（ユーザインターフェース開発ツール，以下 SCADA と呼ぶ）から構成される。これを計装メーカが提供する従来型 DCS と区別して「EI（電気計装）統合新型 DCS」と呼ぶ。[1)]

2.　適用プラントの規模

2012年度上期までに計装ループ数が600以下の中規模プラントをターゲットに開発を完了した「EI 統合新型 DCS」を2013年度３件のごみ焼却設備に実機適用した。

その内，１件はループ数が約300程度，他の２件はボイラ・タービン付でループ数が600に迫り，当社の EI 統合新型 DCS としては最大クラスのシステムとなっている。[2)]

3.　実運転実績

3. 1　高い操作性

納入した画面の操作性に関する機能は従来型 DCS に匹敵するレベルであるとの評価を得た。図２に画面例を示す。

画面上の数値データを右クリックするとリストボックスにフェースプレート，チューニング，８ループ，トレンドの選択肢がリストアップされ，それらから選択することで該当するタグの画面を小ウィンドウで表示することができる。

チューニング画面も指示計や調節計だけでなく折線グラフや手動操作器，プログラム設定器等も網羅されており，定数設定画面をわざわざ開かなくてもパラメータの調整が可能となっている。

3. 2　CPU －サーバ間通信性能

CPU ＋ SCADA の組合わせである新型 DCS の最大の短所は CPU とサーバ間の通信プロトコルが汎用の UDP/IP であり，従来型 DCS で採用されているトークンパッシングに比べて，１秒周期のデータ収集が保障されていない点である。特に計装ループ数の多い中規模プラントでは通信データ量が多く，システム構成によっては１秒周期で収集することが難しくなる。

では１秒周期で収集できないと何が問題か。

例えば，機器がインターロックで停止したとする。そのときこの原因となる事象が１秒以内に復帰したとするとサーバは原因事象を捉えられず，アラームも履歴に残らないので何故止まったのかわからなくなる。

CPU―サーバ間の通信については開発段階で社内のテスト環境において１秒周期のデータ収集が実現できていた。現地においても通信時間測定ツールを用いて毎周期１秒以内に通信できていることを確認した。（図３参照）

3. 3　試運転時に発生した問題と対策

試運転時，開発段階では想定しなかった現場特有の問題が発生した。それらの内，主要な項目についてその内容と対策について以下に紹介する。

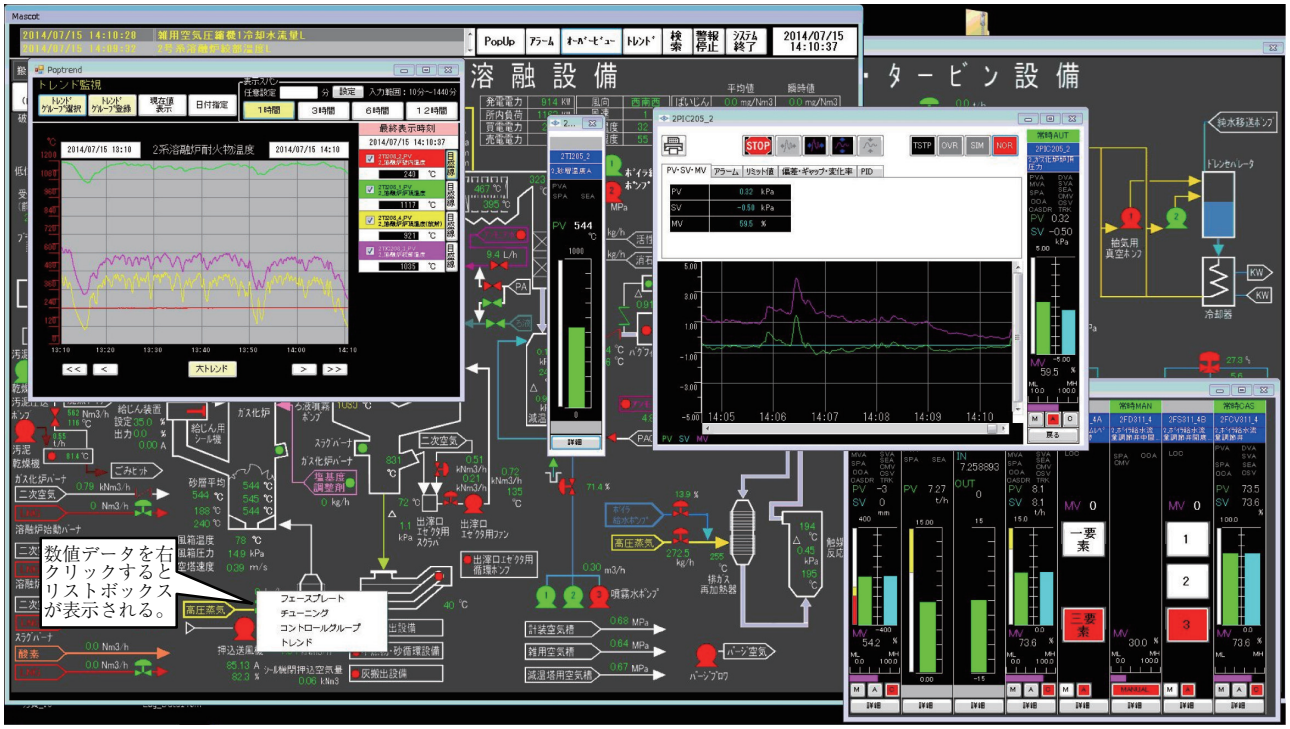


図２　グラフィック画面からの展開

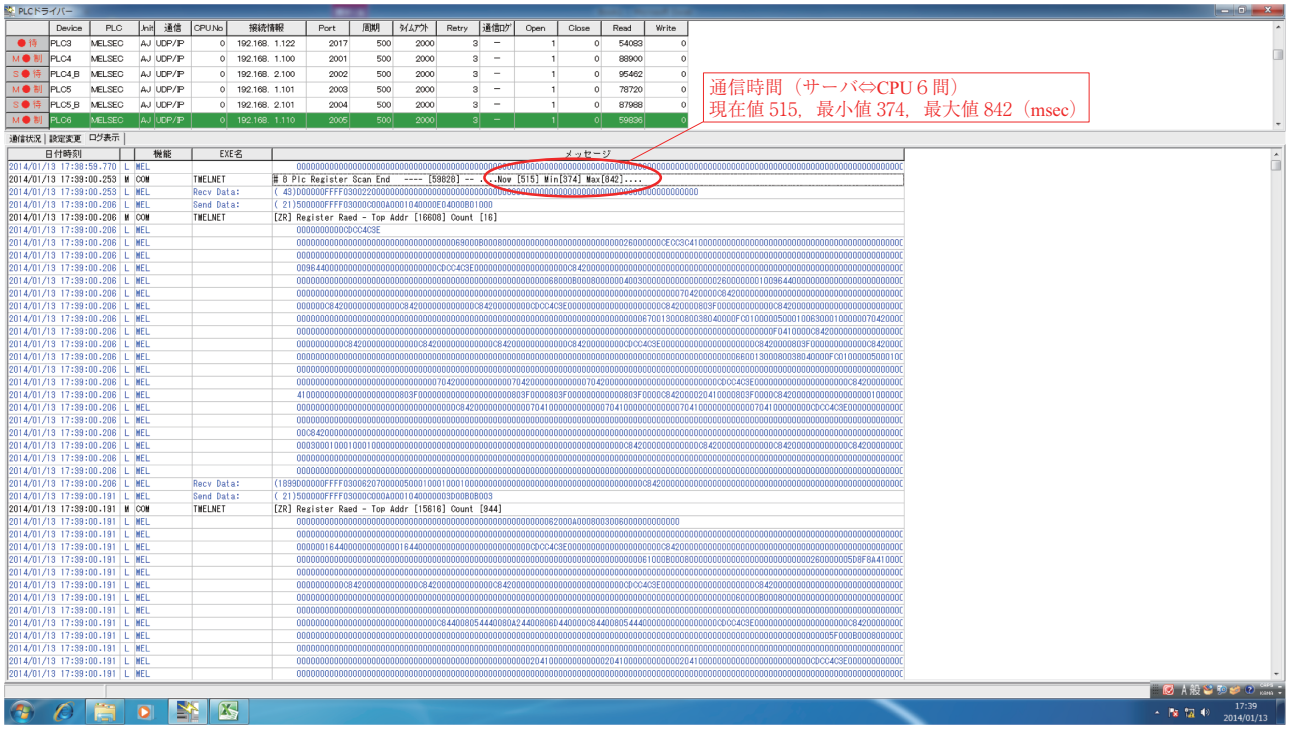


図３　測定ツールによる通信時間結果

3.3.1　画面応答速度

DCS 画面に表示される情報量が多いと操作したときの応答速度が遅くなる。情報量が多くなる原因は，①ポップアップウィンドウの数が多い。②同時に発生するアラーム件数が多い。③トレンド画面を複数表示している。等があるが，特に影響が大きかったのはアラーム処理であった。

開発段階ではアラーム履歴を30 000件表示できるように設計していた。実運転でアラーム件数が増えてくると画面の左上に表示している２件のアラーム

サマリウィンドウ（図４）を更新するために定周期で最大30 000件のアラームを見に行く処理が走る。試運転中は機器調整中のため，複数のアラームが同時に発生することがあり，この処理が重くなって画面の応答速度が極端に遅くなることがあった。

対策としてアラーム履歴表示件数を5 000件に減らした。その代わりログ検索機能で5 000件より過去のアラームを検索できるように，その日発生したアラームを毎日 CSV ファイルに保存するように仕組みを変更した。これにより画面応答速度は十分に速くなった。

3. 3. 2　クライアント―サーバ間の通信障害

試運転中にクライアント―サーバ間の通信が途絶えてクライアントのデータが更新されなくなるという現象が時々発生した。しかも深夜０時過ぎに決まって発生した。調査の結果，トレンドデータ収集の仕組みとして深夜０時にその日のトレンドデータを保存するファイルをあらかじめ作成する処理が走っており，この処理に15～20秒かかっていること，また同時刻に行う帳票の締め処理が重なり負荷が重くなって通信断となっていることが判明した。クライアントがサーバからの応答を待っているときにこの処理が走り，受信すべきデータがどんどん蓄積して，処理終了後に一度にデータを受信するため，受信バッファオーバーフローにより通信断となっていた。

このトレンドデータ保存の仕組みはもともとファイルの断片化を防ぐために構築した。しかし，中規模プラントではループ数が多いため，トレンドデータ保存領域が大きくなり過ぎてしまった。対策として，あらかじめトレンドデータ保存ファイルを作成するのではなく，データを１秒ごとに順次アペンド（継足し）する方法へ変更した。これによりクライアント―サーバ間の通信断は発生しなくなった。

4.　今後の課題

試運転時に判明し，現場で簡単に対策できる内容ではない課題がいくつか発生した。これらについては実機適用する前に充分な検証を必要とするため，2014年度の研究開発で対応中である。

4. 1　アラーム処理

アラーム処理で問題となっているのがクライアント毎に履歴に残るアラームと残らないアラームがあることである。クライアントはサーバのアラームフラグを見に行くが，このフラグが一瞬 ON して OFF する場合，クライアントがサーバにアクセスするタイミングによってはアラームとして捉えられる場合とそうでない場合とが発生する。この現象は変動の多いプロセスデータのアラームがチャタリングしている場合に多く発生する。

この問題についてはサーバのデータベースエンジンにおいて，アラームフラグに処理を施す改造を行う案で開発を進めている。

4. 2　データ精度

新型 DCS で扱う数値データは単精度の実数型であり，その精度は７桁しかない。現在値の表示や四則演算を行う上では全く問題ないが，ボイラ保安日誌等に表示される運転時間の累積データはすぐに７桁を超え，精度を保てなくなる。

対策として新型 DCS では倍精度の整数型を扱っているため，一旦リアルデータを100倍して倍精度整数に変換し，帳票に印字する際に100で除算する処理に変更することにした。これにより有効数字15桁まで精度を確保できるようになる。2014年度このような累積データに対し，この処置を施す予定である。

4. 3　操作性の向上

試運転期間中に現場で要望の多かった操作性に関する項目のうち，下記の項目を開発予定である。

①　ログ検索機能

現在計器のタグ No. による検索しかできないが，これをタグ No. の一部または機器名称の一部を入力するだけで曖昧検索できるようにする。

②　トレンドペンの登録

トレンドシステムにはユーザで新たにトレンドペンを登録する機能があるが，現在はタグリストから選ぶ仕組みになっている。中規模プラントにおいてタグの数が多いと探すのに時間を要する。これをタグ No. の一部または機器名称の一部を入力するだけで曖昧検索し，選択できるようにする。

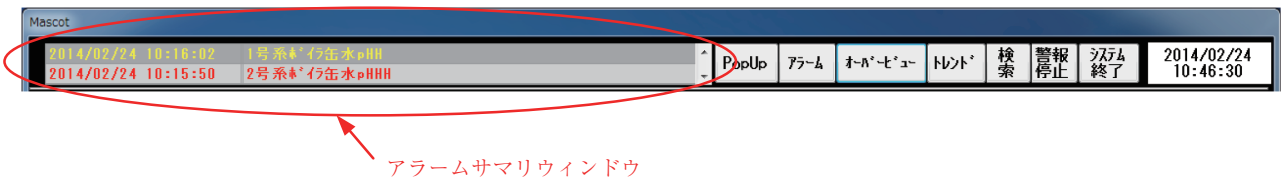


図４　アラームサマリウィンドウ

図５　８ループ画面

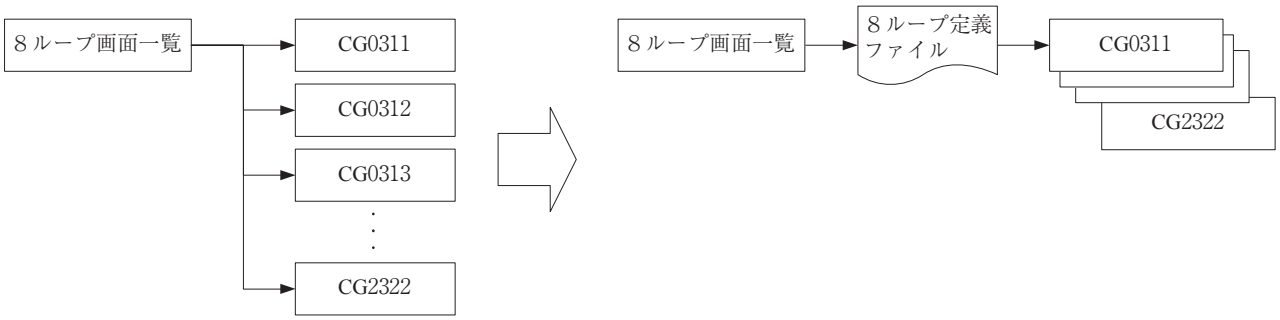


図６　８ループ画面の作成方法

4. 4　画面作成の生産性向上

SCADA による画面作成の生産性を向上するべく開発を計画しているが，その内の一つである８ループ画面の作成方法について紹介する。

８ループ画面とは計器のフェースプレートを８つ並べた画面で現在は１枚ずつのグラフィック画面として作成している。（図５）

これをベース画面は１枚とし，８ループのタグ No. リストである８ループ定義ファイルを参照してリストアップされたフェースプレートを呼び出すような仕組みとする。これにより，８ループ定義ファイル（CSV ファイル）を変更することで８ループ画面を自動作成できるようになる。（図６参照）

む　す　び

今回３つのプラントで採用した電気メーカ提供の計装 CPU は，ボイラ・タービン付ごみ焼却プラントの計装制御を行う上で計装メーカの従来型 DCS と比べて性能的に遜色はなかった。また，電気 CPU と同一の高速制御 LAN に接続され，I/O の共有化が図れるため，コストパフォーマンスの高いシステムが構築できる。

世界的に見ても，中小規模プラントにおいては計装機能を具備した電気 CPU ＋ SCADA の構成がもはや主流となっており，今後国内においても「EI 統合新型 DCS」がますます普及していくと予想される。

今後は現システムの機能向上を図りつつ，海外も視野に入れた機種および SCADA システムの検証が必要であると考えている。

［参考文献］

1）下梨他：神鋼環境ソリューション技報 Vol.9 No.1（2012），P.16-21
2）下梨・永冨：計装「本格稼働を始めた EI 統合新型 DCS」，Vol.56 No.10，P.7-12

*土建・計電装技術センター 計電装技術部

機器設計における熱流体解析の活用事例

CFD Simulation Analysis of Equipment Design

井上尚子*
Naoko Inoue

多田俊哉*
Toshiya Tada

当社では汎用熱流体解析ソフトウェア（ANSYS Fluent）を活用して，各種機器設計を行っている。本報では，①ガス冷却塔の入口ダクトの適正な接続方法，②シックナーのセンターウェル長さの影響，③ボイラ火炉への適正な燃焼空気供給方法について検討した事例について紹介する。

Some equipment is designed by using commercial general-purpose CFD code (ANSYS Fluent).In this report, three case studies are described as follows; 1) Design of gas inlet duct of gas cooling system, 2)Effect of centerwell length for thickener performance, 3) Design of air supplying system for waste heat boiler.

***Key Words*：**

数値流体力学	Computational Fluid Dynamics
シミュレーション	Simulation

【セールスポイント】

汎用熱流体解析ソフトウェアを活用することで適正な機器設計が可能となる。

ま え が き

当社は水処理，廃棄物処理，化学・食品機器の分野で様々なプラントや機器を社会に提供している。これらの製品は物質と熱の流れを伴うものであり，それらを適正に制御することが製品の性能を確保するうえで重要な課題である。また，新しい製品の開発においては，熱や流体の挙動を正確に予測することで開発のスピードアップとコストダウンが可能となる。このように設計や開発において重要な因子である熱流体の挙動を予測する上で，CFD（Computational Fluid Dynamics）を利用した解析は有効な手段であり，これまでも多くの成果を上げている。本報では，汎用熱流体解析ソフトウェア（ANSYS Fluent）を用いて，①ガス冷却塔の入口ダクトの適正な接続方法，②シックナーのセンターウェル長さの影響，③ボイラ火炉への適正な燃焼空気供給方法について検討した事例について紹介する。

1. 廃棄物処理プラント）ガス冷却塔の流れ解析

都市ごみ処理施設では都市ごみを焼却した排ガスから排熱ボイラで熱回収をした後，排ガスに水を噴霧して所定の温度まで冷却するためにガス冷却塔が必要となる場合がある。ここで，噴霧した水の蒸発が完了する前に冷却塔の壁面に到達すると，排ガスが所定の温度まで低下しないだけでなく，濡れた壁面に飛灰が付着・成長することによって操業に支障をきたすことがある。それゆえ，噴霧水の軌跡に乱れが生じないように，ガス冷却塔内のガス流れは整流された状態になるように塔本体の形状が設計されている。しかし，ガスの整流状態は本体のみならず入口ダクトの接続の仕方によっても大きく影響を受ける。そのため，配置などの制限のもとで問題が生じないようにCFD解析を用いて適正なダクト接続方法を検討している。

ガス冷却塔のシミュレーションにおいて，噴霧水の挙動は分散相モデル（Discrete Phase Model）を用いて解析している。分散相モデルでは，排ガスは連続体として扱われ，噴霧水はこの流れ場を通過する多数の液滴（分散相）として軌跡を追跡することで解析される。当然であるが，噴霧された液滴は排ガス中を流れるだけでなく，排ガスから熱を受けて蒸発し，排ガス中に水蒸気として移行する挙動が再現されている。

ガス冷却塔とダクトの接続方法を検討した解析例を**図１**に示す。各ケースはダクトの接続部面積，ダクト形状が異なっており，形状３はガス冷却塔上部のチャンバー形状も異なっている。**図１**はシミュレーションを行った４ケースの接続方法での流れのベクトル図である。

これらの結果から適正な接続方法を判定するため排ガスの流れと噴霧水の挙動を定量的に評価する指標を独自に設定した。設定した３つの定量評価指標

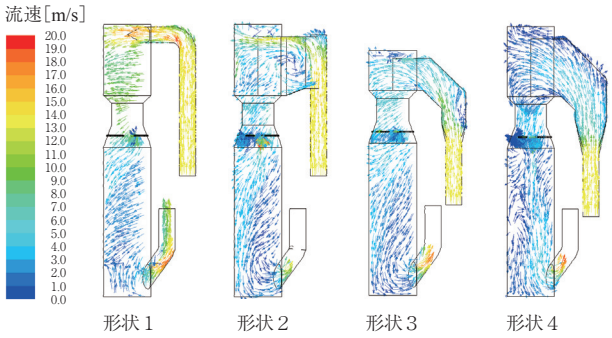


図１　ガス冷却塔の解析例（速度ベクトル図）

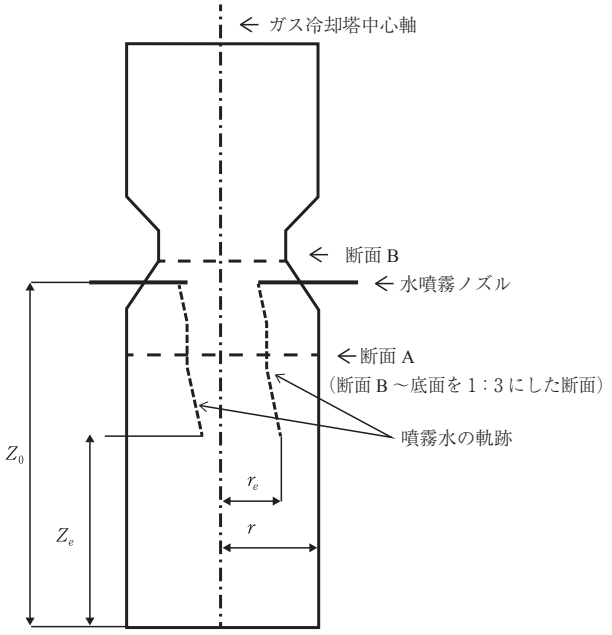


図２　ガス冷却塔における各種定量評価指標

はそれぞれ以下のように定義されるものである（**図２**参照）。

①　排ガスの整流状態に関する指標：C［-］

図２に示す断面 A（平面 x-y で表現）において，排ガスの鉛直下向き運動量で評価した重心がガス冷却塔中心軸からどれだけ離れているかで，排ガスの整流状態を評価する。この値が小さいほど，排ガス流れがチャンバーで整流されていると考えられる。

$$C = (G_x^2 + G_y^2)^{1/2} / r$$

ここに，$G_x = \Sigma px / \Sigma p$：重心位置［m］
$G_y = \Sigma py / \Sigma p$：重心位置［m］
r　：減温塔半径［m］
$p = \rho V w$：運動量［kg･m/s］
x　:塔中心を原点とした場合の x 座標［m］
y　:塔中心を原点とした場合の y 座標［m］
ρ　：排ガス密度［kg/m^3］
V　：セル体積［m^3］
w　：鉛直下向き速度［m/s］

②　噴霧水の水平蒸発距離に関する指標：H［-］

噴霧水粒子がもっとも壁面近くで蒸発した位置とガス冷却塔中心軸からの距離の比で評価する。この値が小さいほど，噴霧水粒子は壁面から離れた位置を通過しながら蒸発するため，噴霧水が壁面近傍を局所的に冷やすことによる灰付着の発生を抑制できると考えられる。

$$H = r_e / r$$

ここに，r_e：半径方向最大蒸発距離［m］
r：減温塔半径［m］

③　噴霧水の垂直蒸発距離に関する指標：Z［-］

噴霧水粒子が全て蒸発する高さで評価する。

この値が小さいほど噴霧水粒子は早く蒸発しており，排ガスを効率よく冷却していると考えられる。

$$Z = (Z_0 - Z_e) / Z_0$$

ここに，Z_0：噴霧高さ［m］
Z_e：噴霧水蒸発高さ［m］

①によって排ガスの流れを評価し，さらに，②，③によって噴霧水の状態を評価できる。また，評価指標は無次元化することで異なる大きさのガス冷却塔を評価できるようになっている。

各形状における定量評価指標を**表１**に示す。形状

表１　ガス冷却塔解析結果の各種定量評価の結果

項　　目	形状１	形状２	形状３	形状４
排ガス整流状態 C［-］	0.254	0.227	0.142	0.096
噴霧水の水平蒸発状態 H［-］	0.766	0.713	0.730	0.535
噴霧水の垂直蒸発状態 Z［-］	0.203	0.266	0.255	0.340
評　　価	×	×	△	○

１のようにダクト接続部面積が小さくガス冷却塔入口流速が速いと排ガスの整流状態が良くなく，噴霧水の水平蒸発距離に関する指標も悪くなった。形状２ではダクト接続部面積を大きくしたが接続部で偏流が生じてガス冷却塔入口流速が速くなったため，評価指標での評価は形状１に比べて改善されなかった。形状３の接続方法だとガスの整流状態は良くなるが，噴霧水の水平蒸発距離に関する指標は改善されず，これはガス冷却塔入口での流速が影響しているものと予想される。最終的には形状４のように徐々にダクトを拡張し入口流速を抑えることで，ガスの整流状態と噴霧水の水平蒸発距離に関する指標を適正な数値にすることができた。形状４では噴霧水の垂直蒸発距離に関する指標が他の形状に比べて大きいが，それでも噴霧ノズルから底面までの距離の0.34倍のところで蒸発が完了しており，問題のない状態であるといえる。以上，シミュレーションによる検討の結果，形状４の評価がもっとも良くなり，配置による制限のある場合でも適正なダクト接続方法を提案することができた。

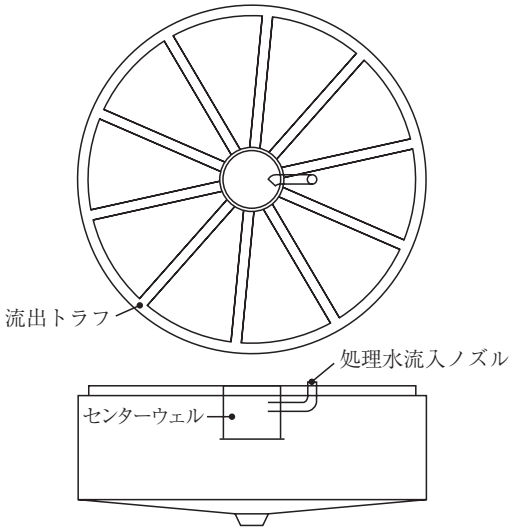


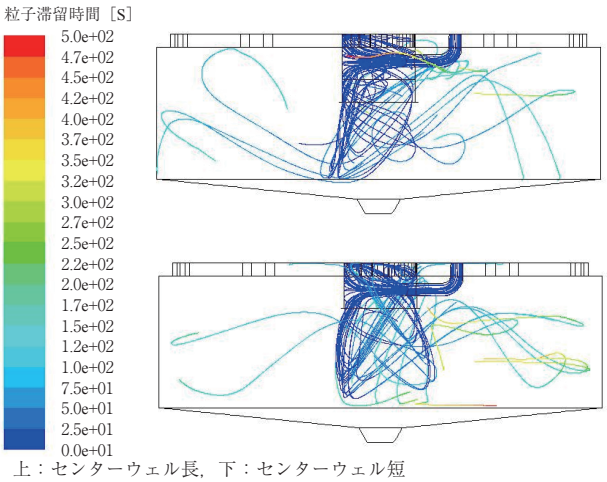
図３　シックナー概略図

2.　水処理プラント）シックナーの流れ解析

シックナーとは，原水中の固体粒子（フロック）を重力により沈降濃縮させ，固液を分離する連続式の水処理装置である。本報で取上げるシックナーでは，センターウェルと呼ばれる筒状の箇所へ原水を流入させることで整流し，固液分離した処理水は上部の円周および放射状に設置したトラフから流出していく。シックナーの底に沈殿したフロックは，高濃度の汚泥としてポンプにより引抜かれる。通常，廃水処理用のシックナーは常温で使用されるが，今回は原水温度約98 ℃と特殊な条件下での使用を求められた。この場合，比重や温度勾配が常温と異なることが予想されるため，より安全な機器形状を検討することとなった。本報では，センターウェル長さがフロック沈降性能にどのような影響を与えるかシミュレーションにより確認した例について紹介する。

シミュレーションに使用したシックナーの形状を図３に示す。シックナー内の水が溢れて，円周および放射状に設置されたトラフより流出することを再現するため，トラフの上部に薄い流出領域を設定している。今回はシックナー底部の汚泥の堆積および汚泥の引抜きは考慮せず，センターウェルの長さがシックナー内の流れ場にどのような影響を与えるのかを確認した。シックナー性能は，分散相モデル（Discrete Phase Model）を用いて再現したフロックを流入させ，トラフからどれだけ流出するかで評価することとした。ここで，フロックの密度はフロック凝集性および沈降性を求めるためのビーカー試験で得た情報をもとに，以下に示す Stokes の式より求めた。

$$\nu_s = \frac{D_p^2(\rho_p - \rho_f)g}{18\eta}$$



上：センターウェル長，下：センターウェル短

図４　0.25 mm 粒子の軌跡

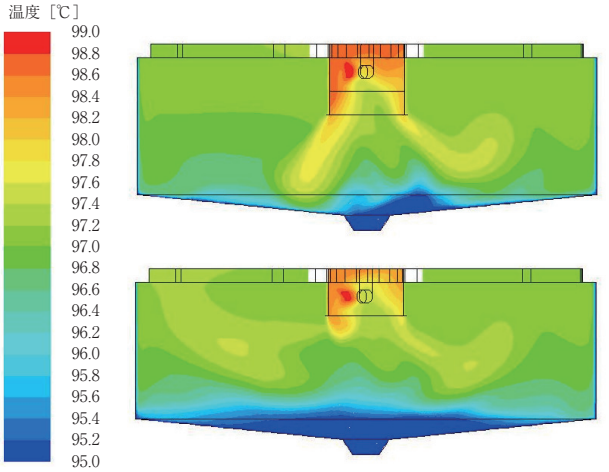
ここに，ν_s：終末速度［m/s］
D_p：粒子径［m］
ρ_p：粒子の密度［kg/m^3］
ρ_f：流体の密度［kg/m^3］
η　：流体の粘度［Pa･s］

図４および**表２**に，粒子の軌跡および流出数を示す。沈降試験で得られたフロック径2.5 mm ではセンターウェル高さによる違いが判断できなかったため，1/10の径（0.25 mm）および中間の径（0.79 mm：体積比が同じになるよう設定）でも検討を行った。その結果，センターウェルが長い形状ではどの径のフロックもトラフからの流出は認められなかったが，センターウェルが短い形状では，粒子径が小さくなるとフロックが浮上しトラフから流出する結果が得られた。

図５の温度コンター図を見ると，センターウェルが短い形状では，シックナー内で温度境界層が生じていることが確認できる。この温度境界層により流れが温度境界層部分で抑えられ，結果としてシックナーが浅い場合と同様の状態となっていることが，フロックの流出，すなわち性能悪化の原因であると考えられた。このことは，**図４**に示す粒子軌跡において，センターウェルが短い形状ではフロックがシックナーの底まで到達していないことからも確認できる。

表２　フロック流出数（全48個中）

粒子径	センターウェル長	センターウェル短
2.50 mm	0	0
0.79 mm	0	1
0.25 mm	0	7



上：センターウェル長，下：センターウェル短

図５　温度コンター図

以上のシミュレーション結果より，２種類のセンターウェル高さを比較した場合，長い形状の方が好ましいと推察され，設計に反映されることとなった。

3.　廃棄物処理プラント）ボイラ火炉の燃焼解析

図６に示す流動層ボイラは，砂を流動媒体とした高温の流動層（砂層）で木質チップなどの燃料を熱分解し，可燃性ガス，未燃分および灰に分解したのち，ボイラに設置した二次空気によって可燃性ガスを完全燃焼させる。燃焼により発生する高温の排ガスはボイラにより熱回収し，発電に利用する。流動層ボイラは燃え残りが少なく熱回収率が高いことから，高い発電効率が得られると期待される。ただし，ボイラ入口付近が高温化すると耐火物ゾーンでクリンカが生成する恐れがある。また，ボイラ火炉に灰溶融点以上の高温域がある場合にも，クリンカがボイラ壁や管群に付着することで，熱回収が阻害されることが懸念される。

そこで，①耐火物構造であるボイラ入口が800 ℃以下，②ボイラ火炉が灰溶融点である1 100 ℃以下，かつ均一な温度となる二次空気の吹込み方法を検討した。

計算範囲は砂層面からボイラ出口までとし，砂層表面から熱分解されたガスが発生すると仮定している。ここで，熱分解されたガスの成分および発熱量の設定が重要となるため，流動する砂層上のガス性状を把握する必要がある。そこで，当社ではベンチスケール実験炉によるガス化実験を行ってデータを

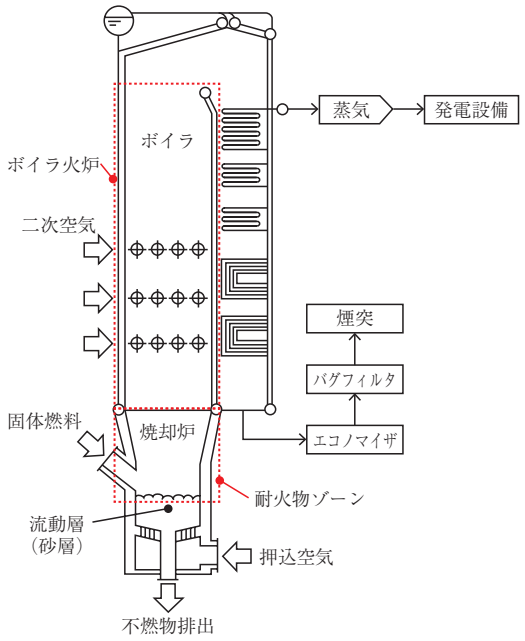


図６　流動層ボイラ略図

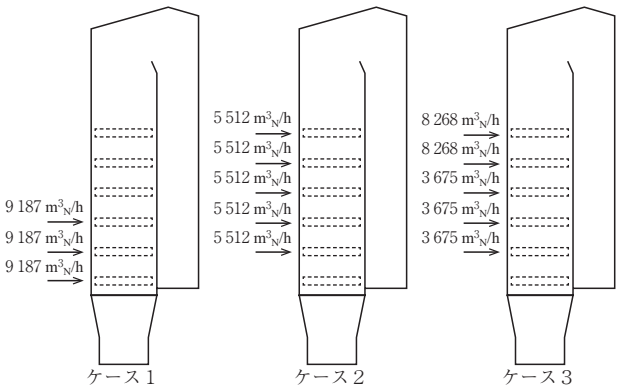


図７　二次空気吹込み条件

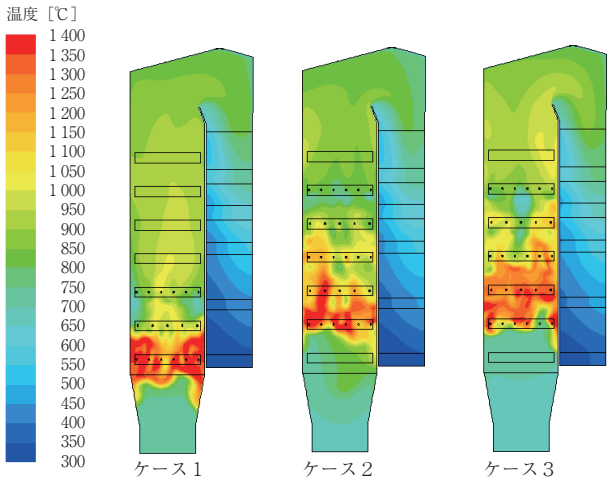


図８　温度コンター図

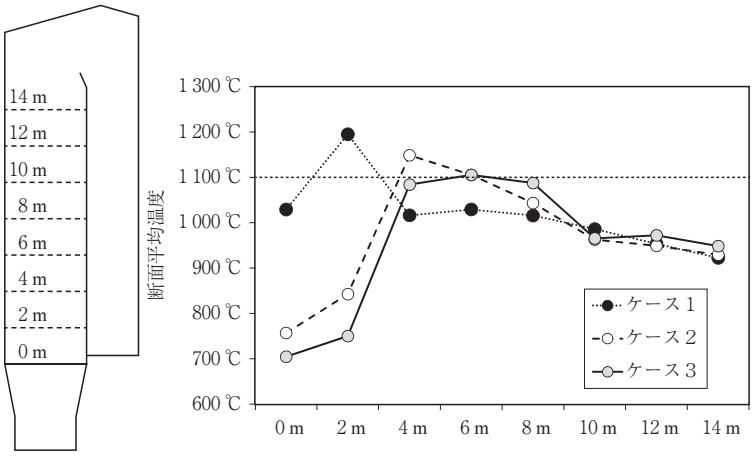


図９　断面平均温度グラフ

取得し，燃料の性状とガス化条件から砂層で発生するガス組成を予測するツールを作成した。本シミュレーションでも上記のツールを用いてガス組成を予測し，インプット条件としている。ガス成分は CO，H_2，CH_4，C_2H_6，H_2O，N_2，CO_2 およびガス状の C の８種類とした。チャーおよびタールとして出てくる成分はガス状の C とすることで物質，熱収支を合わせている。

図７に本シミュレーションで検討した二次空気吹込み条件を示す。ケース１は下三段のノズルに均等に二次空気を配分した条件，ケース２は図７に示す五段のノズルに均等に二次空気を配分した条件，ケース３はケース２と同様のノズルを使用し，下流（上側）の二段に空気を多く分配した条件である。

図８に，計算結果の一例として温度コンター図を，図９にボイラ内温度の断面平均温度のグラフを示す。図８，９より，ケース１はボイラ入口部（0 m）が1 000 ℃以上となっていることが確認でき，耐火物ゾーンでのクリンカ発生が懸念される。一方，一段目のノズルを使用しないケース２，３ではボイラ入口の温度が750 ℃程度に抑えられていることが分かる。

また，ケース１，２はボイラ火炉にて灰の溶融点1 100 ℃を超えており，その後は急激に温度が減少する傾向がある。それに対しケース３は，６m 地点で1 105 ℃と若干1 100 ℃を超えるものの，局所的な高温域は見られず，かつ均一な温度場が生成されている。

以上の結果より，最下段のノズル高さを高くし，下流の二段に空気を多く配分したケース３の空気分配方法をベースとして，二次空気のノズル配置や吹込み条件を検討していくこととした。

む　す　び

以上，機器設計に熱流体解析を活用した３つの事例について紹介した。

①ガス冷却塔では，配置による制限がある場合でも整流状態を維持できるダクト接続方法を提示することができた。

②シックナーでは，センターウェル長さの違いによる性能の違いを確認し，設計に反映させることができた。

③ボイラ火炉では，二次空気吹込み方法のケーススタディを行い，適切な温度の燃焼場となる空気分配方法について検討することができた。

このように熱流体解析を用いることは適正な機器設計を行う上で有効な方法であると考えられる。今後，これら解析による予測結果を実機で検証することで解析精度を向上させていく予定である。

*技術開発センター　プロセス技術開発部　廃棄物処理室

スイングスター® の撹拌性能向上

Improvement in Agitation Performance of SWINGSTIR®

小川智宏*
Tomohiro Ogawa

半田裕利*
Hirotoshi Handa

山本昌史**
Masafumi Yamamoto

スイングスターは独自の旋回撹拌方式により，無摺動フレキシブルシールを採用したクリーン撹拌機である。このたびユーザの撹拌性能向上のニーズに応えるため，新型の３枚テーパ翼を開発した。本稿では，３枚テーパ翼の撹拌性能，およびフレキシブルシールの洗浄性について紹介する。

Using an original swing-based mixing system, SWINGSTIR is a clean reactor which has a frictionless flexible seal. This time, a new type impeller “3-blades taper impeller” has been developed in response to user needs of improvement in agitation performance. This paper shows its agitation performance and cleanability of the flexible seal.

***Key Words*：**

撹　拌　性　能	Agitation performance
コ ン タ ミ レ ス	Contamination-free
無　　摺　　動	Frictionless
洗　　浄　　性	Cleanability

【セールスポイント】
・撹拌性能を大幅に向上させた旋回式撹拌翼
・無摺動フレキシブルシールによるクリーン撹拌機

ま え が き

スイングスターは非回転の旋回方式撹拌を行うことで，回転摺動部のない独自のフレキシブルシールを採用した撹拌機であり，既報[1)]においてその構造，特長について詳述した。2012年６月に販売を開始して以来，とくに医薬，電子材料，ファインケミカル分野で好評を頂いている。

シンプルな扁平断面のビーバーテイル翼はマイルドな撹拌が可能で，洗浄性に優れた形状であるが，さらに撹拌性能向上のニーズに応えるため，新型の３枚テーパ翼を開発し，2013年10月に開催されたINCHEM TOKYO 2013に出展した。本稿ではこの３枚テーパ翼の撹拌性能，フレキシブルシールの洗浄性を中心に紹介する。

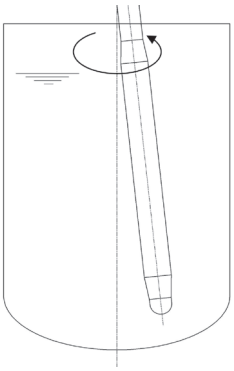
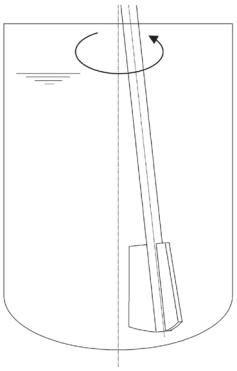
1.　スイングスターの形状

1.1　基本構造

まず旋回撹拌方式を採用したスイングスターの基本構造について説明する。スイングスター反応機の断面図を**図１**に示す。

動力は，減速機出力軸に取付けられた偏芯伝動軸から軸受を介して撹拌軸に伝達され，この偏芯伝動軸で回転運動から旋回運動へ変換される。さらに撹拌軸は，旋回運動の支点となる球面軸受で支持され，フレキシブルシールにて缶内外を隔てている。フレキシブルシールの断面形状を**図２**に示す。フレキシブルシールの内面は，耐食性に優れたPTFEで

表１　スイングスター　ビーバーテイル翼と３枚テーパ翼との比較

	ビーバーテイル翼	３枚テーパ翼
形　　状		
	パイプを扁平させた形状	上側の翼幅を小さくした テーパ形状の３枚翼
標準撹拌動力 （水ベース）	0.05 kW/m^3	0.3 kW/m^3
翼　材　質	グラスライニング，ステンレス鋼，その他特殊金属	

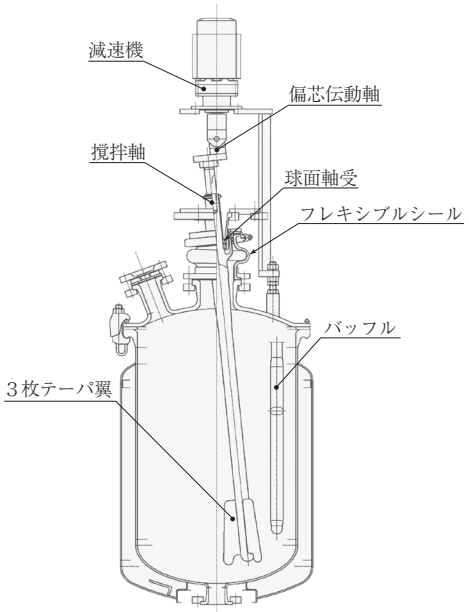


図１　スイングスター反応機

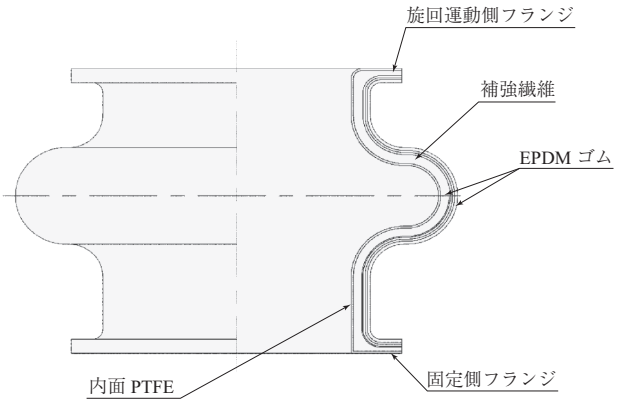


図２　フレキシブルシール

あり，その外面側には耐圧性を持たせるための補強繊維，およびそれらの層間を EPDM ゴムで充填し，可とう性をもたせた構造である。[1)]

1.2　３枚テーパ翼

スイングスターの撹拌翼についてビーバーテイル翼と新型の３枚テーパ翼との比較を**表１**に示す。

ビーバーテイル翼はパイプを扁平させたシンプルな形状であったが，新型の３枚テーパ翼は，軸にテーパ形状の板翼を３枚取付けた形状とし，撹拌性能を大幅に向上させた。また３枚テーパ翼はビーバーテイル翼と同様にグラスライニングの施工も可能である。

2.　３枚テーパ翼の撹拌性能

2.1　混合性能

撹拌性能を評価するため既報[1)]と同形状の槽内径 D ＝400 mm のアクリル製可視槽を使用し，混合試験を実施した。実験は，ヨード澱粉の呈色をチオ硫酸ナトリウムで還元脱色する脱色法を使用し，各装置の撹拌動力を同一にして混合時間を測定し比較した。ヨード溶液およびチオ硫酸ナトリウム溶液は，内容液と同じ粘度に調整したものを用い，混合時間は，脱色過程の連続写真から決定した。

３枚テーパ翼の混合性能をオーバル３枚後退翼，および当社 GL 撹拌翼であるツインスターと比較し

た結果を**写真１**に示す。実験では液粘度0.001 *Pa*･*s*，液深 *H* は *H*/*D* =1.25の条件にて脱色の速さを比較した。３枚テーパ翼は，オーバル３枚後退翼に比べ混合速度が1.5～２倍速く，ツインスターと同等である。

また様々な液粘度にて同様に混合試験を実施し，混合時間を *n*･*θm*－*Re* 線図で整理し，各撹拌翼のそれと比較した結果を**図３**に示す。３枚テーパ翼はビーバーテイル翼よりも混合性能が大幅に向上し，ツインスターよりもさらに優れた特性を有している。

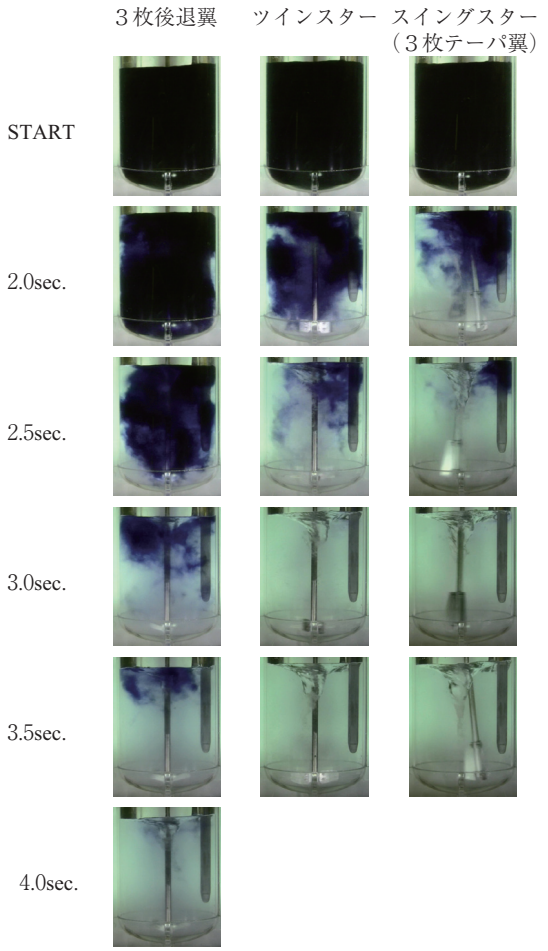


写真１　混合経過の比較
μ =0.001 *Pa*･*s*　P_V =0.3 kW/m^3　H/D =1.25

2. 2　異相系撹拌特性

異相系撹拌特性の評価のため固液系，液液系２種類の撹拌実験を実施した。

固液系撹拌特性は水に粒子濃度をかさ体積23 %のイオン交換樹脂を投入し，それぞれの撹拌翼について回転数を段階的に変化させて液表面近傍で粒子濃度を測定し，粒子の浮遊状態を比較した。

液液系撹拌特性は20vol %のケロシン（密度790 kg/m^3）と水を撹拌槽に満たし，固液撹拌試験と同様にそれぞれの撹拌翼について回転数を変化させ，撹拌槽，鏡部 T.L. 近傍でケロシン濃度を測定して，液滴の分散状態を観察比較した。

固液系，液液系それぞれの撹拌特性について，単位容積当たりの動力に対し，粒子濃度およびケロシン濃度をプロットした結果を**図４，５**に示す。

３枚テーパ翼とビーバーテイル翼を比較すると，固液系撹拌，液液系撹拌ともに，翼の大型化により吐出が強化された３枚テーパ翼の方が低回転数で均一浮遊および均一分散が可能な結果であるが，**図**

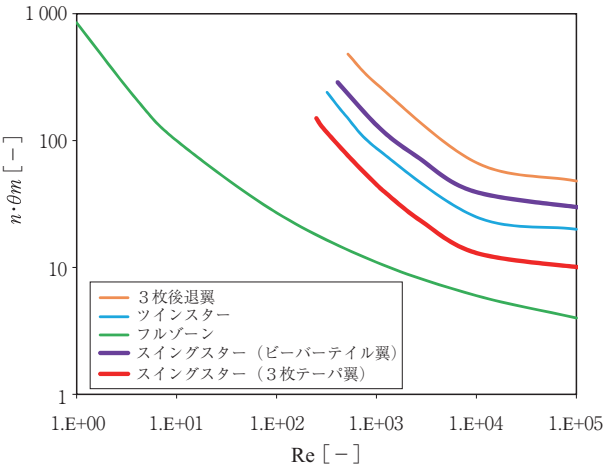


図３　*n*･*θm*－Re 曲線

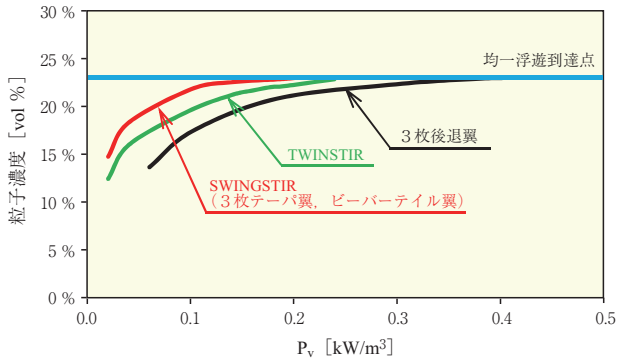


図４　粒子均一浮遊に要する動力の比較

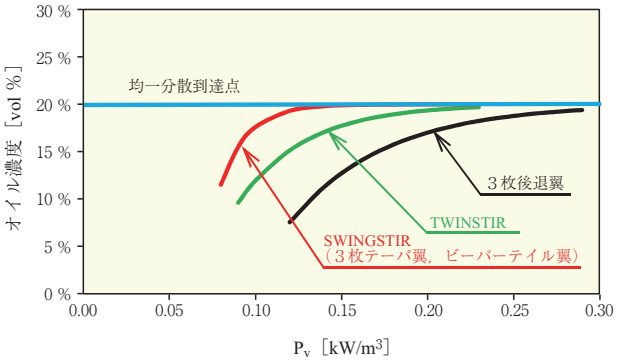


図５　液滴均一分散に要する動力の比較

4，5の様に横軸を単位容積当たりの動力とすると，同じ特性となる結果であった。またツインスターとオーバル３枚後退翼と比較すると，３枚テーパ翼，ビーバーテイル翼ともに低動力で均一粒子浮遊，均一液滴分散が可能である。

2.3　撹拌動力

2.3.1　撹拌動力理論

既報[1]ではビーバーテイル翼について旋回撹拌方式が通常の回転撹拌と同様に，動力数 Np を用いて，動力を表すことができることを紹介したが，今回開発した３枚テーパ翼についても，同様に考えることができる。

図６に示す３枚テーパ翼の撹拌動力について考える。

まず１枚の翼に着目し，斜線部に発生する抗力 df[2]は，抗力係数を C_D，液密度を ρ［kg/m^3］とすると

$$df = C_D A \frac{\rho u^2}{2}$$

ここで，断面積 A［m^2］，速度 u［m/s］は，回転数 n［s^{-1}］とすると，

$$A = \frac{w}{2} dl \cdot |\sin\theta|$$

$$u = 2\pi n \cdot l \sin\phi$$

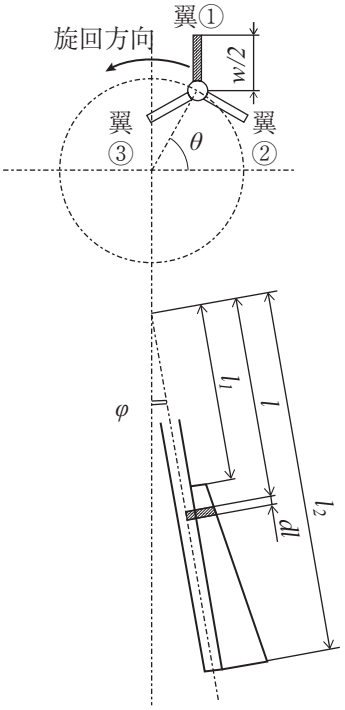


図６　旋回撹拌の動力

であるから，

$$df = C_D\left(\frac{w}{2} dl \cdot |\sin\theta|\right)\frac{\rho(2\pi n \cdot l\sin\phi)^2}{2}$$

この抗力 df により発生するトルク dT は，$dT = (l\sin\phi)\cdot df$ で求められ，撹拌動力 dP は $dP = 2\pi n \cdot dT$ であるから，

$$dP = \frac{C_D}{2}\rho(2\pi n)^3 \cdot \sin^3\phi \cdot \frac{w}{2}|\sin\theta| \cdot l^3 dl$$

となる。上式は翼が１枚の場合であるが、上式の翼投影幅 $\frac{w}{2}|\sin\theta|$ の部分が，翼が３枚の場合には図７に示すように旋回方位位置 θ によって変化する。この３枚翼の投影幅を仮に $w(\theta)$ とおくと，

$$dP = \frac{C_D}{2}\rho(2\pi n)^3 \cdot \sin^3\phi \cdot w(\theta) \cdot l^3 dl$$

となり，撹拌翼全体での撹拌動力 P は，

$$P = \int dP$$

$$= \frac{C_D}{2}\rho(2\pi n)^3 \cdot \sin^3\phi \cdot w(\theta) \cdot \int_{l_1}^{l_2} l^3 dl$$

$$= \frac{C_D}{2}\rho(2\pi n)^3 \cdot \sin^3\phi \cdot w(\theta) \cdot \frac{1}{4}(l_2^4 - l_1^4)$$

ここで $w(\theta) = \zeta(\theta)\cdot d$，$l_1 = \eta_1 d$，$l_2 = \eta_2 d$ とすると

$$P = \left\{\frac{C_D}{2}(2\pi)^3 \cdot \sin^3\phi \cdot \zeta(\theta) \cdot \frac{1}{4}(\eta_2^4 - \eta_1^4)\right\} \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5$$

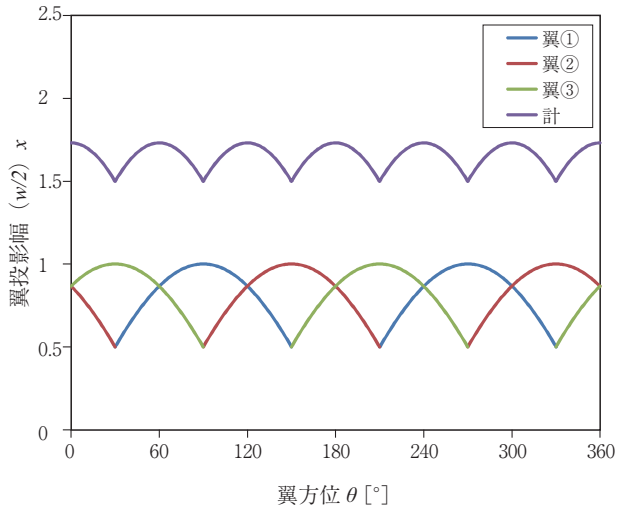


図７　３枚翼の投影幅

となる。

通常の回転撹拌による撹拌動力 P[W]は，代表径（翼スパン）を d[m]とすると

$$P = N_p \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5$$

と動力数 N_p をもちいて表され，動力 P は，ρ，n^3，d^5 に比例する。

３枚テーパ翼についても回転撹拌と同様に動力数 N_p を

$$N_p = \frac{C_D}{2}(2\pi)^3 \cdot \sin^3\phi \cdot \zeta(\theta) \cdot \frac{1}{4}(\eta_2^4 - \eta_1^4)$$

とすることで，動力推算が可能である。

2.3.2　撹拌動力理論

槽内径 D＝400 mm，２：１半楕円下鏡形状の円筒槽を用いて３枚テーパ翼の撹拌動力を測定した。測定結果をN_p－Re 線図として**図８**に示す。ここで，スイングスターの撹拌翼代表径 d は，旋回径と翼幅（翼スパン）の両方を考慮に入れるため，翼旋回投影直径の最大値とした。従来の回転型撹拌翼では Re ＜10^2の層流域において N_p・Re が一定となるが，３枚テーパ翼についても同じ傾向が確認された。

3.　フレキシブルシールの洗浄性

シール部の洗浄性を評価するため，洗浄試験を実施した。実験は模擬の汚れとしてリボフラビン試薬をエタノール水溶液に溶かし，シール部分に吹き付けた後，シール部の洗浄を実施し，ブラックライトにてその残存状況を観察した。洗浄方法としては，焚上げ洗浄とスプレー洗浄の２種類の方法で実施した。焚上げ洗浄は缶内の洗浄液を加熱し発生させた蒸気で１hr 洗浄，またスプレー洗浄は缶内側撹拌口下部よりスプレーノズルにて洗浄液を吹き付ける洗浄方法である。洗浄試験はスイングスターのフレキシブルシールと，比較のため代表的な回転型軸封であるドライシールについても実施した。

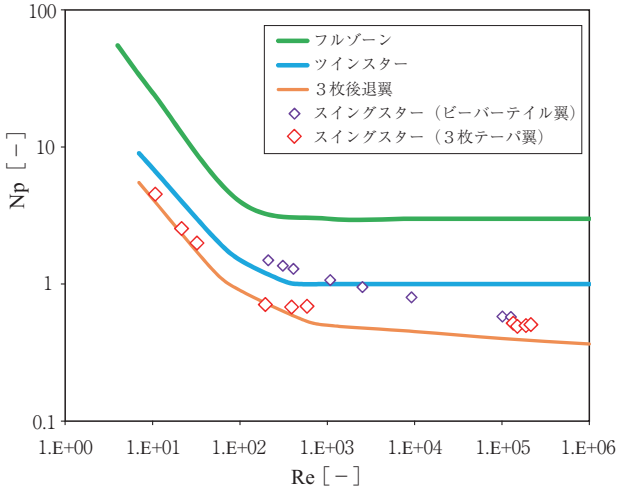


図８　撹拌動力線図（N_p－Re 線図）

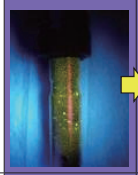
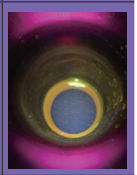
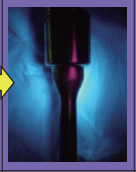
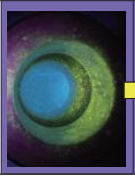
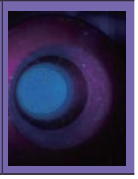
試験結果を**表２**に示す。ブラックライトによる写真において黄色に発色しているのが模擬汚れのリボフラビン試薬で，表の各シールの上段が撹拌軸，下段が撹拌口ノズルおよびフレキシブルシールを缶内側から撮影した写真である。

回転型シールでは，焚上げ洗浄後ノズル内面と撹拌軸部の汚れはほとんど洗浄されておらず，スプレー洗浄後もノズルと撹拌軸の隙間が狭いため，洗浄液がシール部まで届かず，汚れが十分に落としきれていない。このことから回転型シールではバッチ間の洗浄不良によるクロスコンタミが懸念される。

対してフレキシブルシールはシール内径と撹拌軸との隙間が広く，滞留部の無いシンプルな形状であるため，焚上げ洗浄でほとんどの汚れが落ちており，さらにスプレー洗浄を行うことで，より効果的な洗浄が可能で，非常に優れた洗浄性を有している。

またフレキシブルシールは**図９**のようにモータおよび減速機を取外すことなく，簡単に取付け・取外

表２　　各シールの洗浄性

シール	部位	洗浄前	ブラックライト写真		
			洗浄前	焚上げ洗浄後	スプレー洗浄後
回転型シール（ドライシール）	撹拌軸				
	ノズル内面				
フレキシブルシール	撹拌軸				
	シール内面				

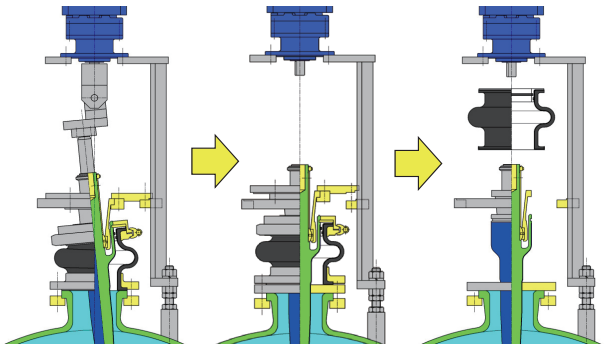


図９　フレキシブルシールの分解方法

表３　スイングスターの標準仕様（本体）

設計圧力	F.V./0.10 MPa（圧送）
設計温度	－20 － ＋130 ℃
適用法規	消防法
材　　質	グラスライニング，ステンレス鋼，その他特殊金属（フレキシブルシール接ガス部は PTFE）

表４　スイングスター反応機の標準寸法

呼称容量［L］	100	200	300	500
本体内径 D1［mm］	500	600	700	800
外套内径 D2［mm］	600	700	800	900
全高 h［mm］	1 900	2 100	2 300	3 000
最高回転数［rpm］	135	135	117	103
モータ定格出力［kW］	0.4	0.4	0.75	0.75

しが可能で，バッチ毎の洗浄確認や分解洗浄も容易な構造となっている。

4.　３枚テーパ翼スイングスターの特長と適用分野

【形状】

・旋回運動による撹拌で摺動部のないシール

・撹拌性能を大幅に向上させた３枚テーパ形状撹拌翼

【特長】

・３枚テーパ翼は，ツインスター，３枚後退翼よりも優れた撹拌性能を有する。

・無摺動シールによりコンタミの心配が不要。

・フレキシブルシールは洗浄性が良好でクロスコンタミのリスクを大幅に低減することができる。

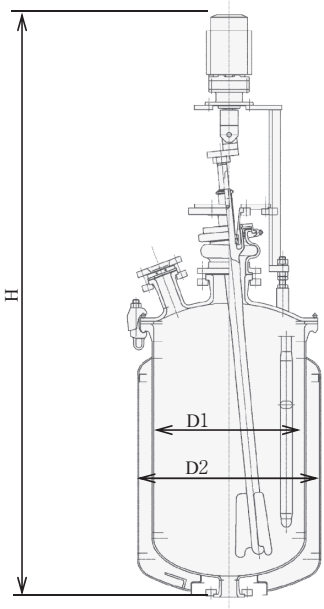


図10　スイングスター反応機の標準寸法

【適用分野】

・コンタミレス，洗浄性が重視される医薬・電子材料などのファインケミカル分野

【標準仕様および参考寸法】

・スイングスターの標準仕様および参考寸法を表３，４，図10に示す。

む　す　び

本稿ではスイングスターの新型翼である３枚テーパ翼の撹拌性能，フレキシブルシールの洗浄性等について紹介した。スイングスターは，医薬，電子材料などの撹拌性能と同時にコンタミが問題となる分野に採用実績が増えてきており，今後，ユーザ製品のさらなる高付加価値化に対する問題解決につながれば幸いである。

今後もユーザのニーズに応じた製品の開発，改良を行い，ユーザ各位の製品品質の向上，生産性の向上に役立ちたいと考える。

［参考文献］

1）小川智宏ほか：神鋼環境ソリューション技報　vol.9, No.2（2013），p.34

2）SHINJI NAGATA：MIXING Principles and applications（1975），p.8

*プロセス機器事業部 技術部 開発グループ　**プロセス機器事業部 技術部 GL 設計グループ

反応槽のスケールアップにおける生産性向上と省エネ技術

Productivity Improvement and Energy-saving Technology on Reactor Scale-up

山部　芳*
Kaoru Yamabe

南　俊充*
Toshimitsu Minami

攪拌槽型反応機のスケールアップは，一般的に「幾何学的相似」「Pv 値一定」で行われる。しかし，複雑な反応や高い製品品質を維持するためにはこれだけでは困難なケースもあり，敢えて幾何学的相似を崩す等，一工夫したスケールアップを行う必要が出てくる。このようなスケールアップが，混合性能，伝熱性能の増強を通じて生産性を向上させ，化学プロセスの省エネルギー化に寄与することが期待される。

Mixing reactors are generally scaled up by the principles of geometric similarity and of constant power per volume, i.e., constant Pv. However, complicated chemical operations and higher quality demands sometimes make the scale-up very difficult. In such cases, the reactor designs are required to intentionally break the geometric similarity restriction. Challenges to these reactor designs have shown that proper mixing intensification brings improved productivity to the process, as well as such challenges are expected to support energy saving activities in chemical process industry.

***Key Words*：**

反応槽スケールアップ	Scale up
省　　エ　　ネ	Energy-saving
乳　化　重　合	Emulsion polymerization
溶　液　重　合	Solution polymerization
懸　濁　重　合	Suspension polymerization
ガ　ス　吸　収	Gas absorption

【セールスポイント】

・代表的なプロセスでの攪拌槽型反応機のスケールアップについて，実例を挙げて説明した。

ま え が き

反応機における省エネ技術とは，反応時間の短縮，後処理時間の短縮，収率向上，低動力化などが挙げられるが，これらを一言でまとめると，「生産性の向上」と言うことにほかならない。すなわち，「生産性の向上」を追求すれば，それはおのずと省エネ技術につながるものである。

一般には需要の増加に伴い，生産量の向上を目指し，反応機をスケールアップし，大型化していく。一般的なスケールアップでは，撹拌槽や翼の形状は幾何学的相似を保ちながらサイズアップし，単位体積当たりの動力（Pv 値）をスケールアップ前後で同じとすることで，基本的な撹拌の諸特性は保たれると言われている。ところが，この Pv 値一定でのスケールアップでは変化してしまうパラメータ，例えばせん断速度や，単位体積当たりの伝熱面積等に

よって，所望のスケールまでスケールアップできず，限界に至るケースが発生する。

このように，一般的な手法ではスケールアップ限界に至ったとき，当社がどのような方法で解決してきたかを以下に紹介する。

1. 乳化重合機のスケールアップ

乳化重合では，界面活性剤を使用し，水連続相にモノマ油相を分散する。その分散時に，動力を下げ過ぎるとモノマ油相が水の上に分離し，その界面にポリマが捕捉され，凝集し続ける。反対に動力を上げ過ぎると，形成されたミセルが物理的にせん断を受け，ミセル同士が凝集する，せん断凝集が発生する。したがい，一定以上の動力を与え，良好な分散状況を維持しながらも，せん断力を掛過ぎない撹拌が安定したエマルションを形成する上で重要となる。

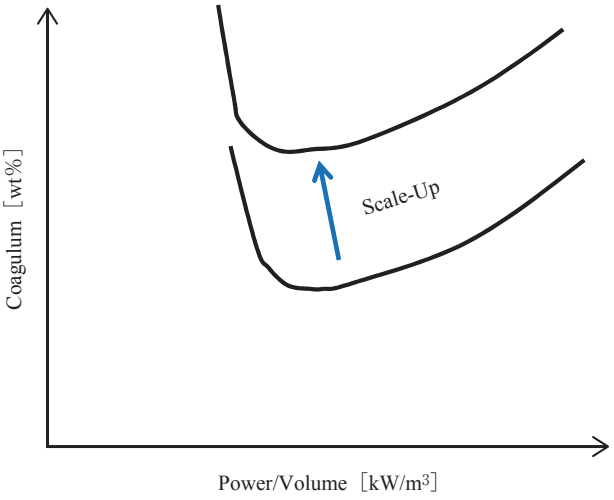


図１　スケールアップ時のコアギュラム発生量の変化

1.1 SB ラテックス

ラテックスの重合においても，一般には Pv 値一定でスケールアップするが，Pv 値一定でスケールアップすると，翼周端速度はスケールが大きくなるほど，高くなる。したがい，コアギュラム（凝集物）の発生量は図１に示すように，スケールアップすると増加する傾向となるため，ある一定のスケール以上にはスケールアップできなくなる。

従来はこのようなラテックスの製造は３枚後退翼で行われていたが，これと比較してフルゾーンでは，図２に示すように，混合性能が著しく向上することで，より低い動力（Pv 値）でモノマ油相の分散が可能であるため，凝集物が急増する下限の動力が著しく低下した。また，低い回転数で高い動力を得られることから，動力を上げても，３枚後退翼と比較して翼周端速度は低いため，コアギュラムの発生を抑えることができた。

この特性を生かし，45 m^3 重合機の撹拌翼をフルゾーンに変更することで，付着改善に成功した事例もある。

1.2 アクリル樹脂

アクリル樹脂重合機では，スケールアップ時に槽底部への付着が見られた。これは，スケールアップ時にせん断速度が上がったことによるせん断凝集が発生したものと考え，翼下部と，槽との隙間でのせん断速度をスケールアップ前後で同じとすべく，πnd/b（n：回転数，d：翼スパン，b：翼下部と下鏡の隙間）の比を一定になるよう，図３のように幾何学的相似を崩し，翼を改造したところ，付着が解消された。このように，同じ翼でも幾何学的相似条件を僅かに変化させることで解消した事例もある。

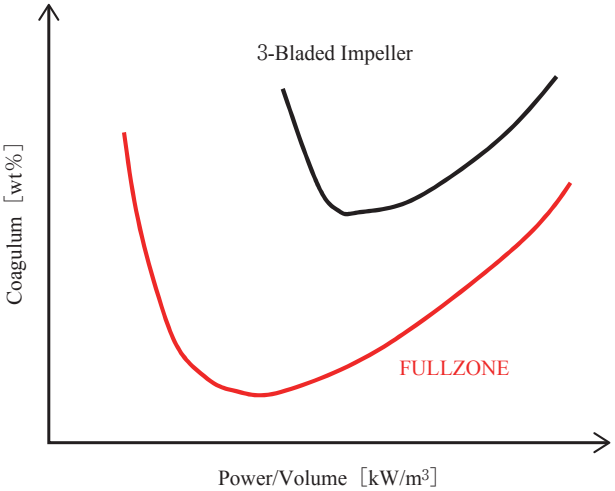


図２　翼の形状によるコアギュラム発生量の変化

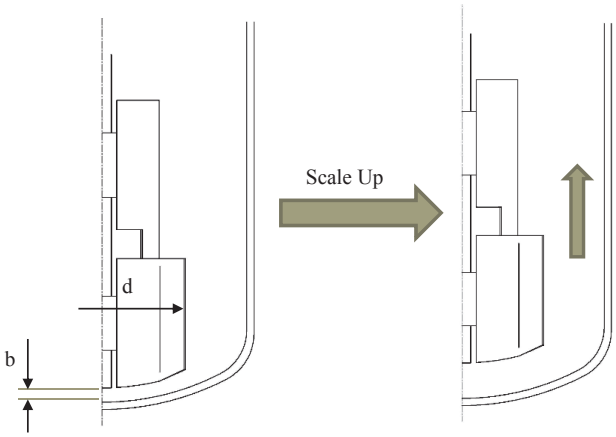


図３　アクリル樹脂重合機のスケールアップ

表１　スケールアップファクタ

（a）幾何学的相似；Pv ＝一定

Vr	槽 径	冷却面積	翼スパン	回転数	翼先端速度	吐出量	Qv	He
	$Vr^{1/3}$	$Vr^{2/3}$	$Vr^{1/3}$	$Vr^{-2/9}$	$Vr^{1/9}$	$Vr^{7/9}$	$Vr^{-2/9}$	$Vr^{2/9}$
5	1.71	2.92	1.71	0.70	1.20	3.50	0.70	1.43
10	2.15	4.64	2.15	0.60	1.29	5.99	0.60	1.67
100	4.64	21.54	4.64	0.36	1.67	35.94	0.36	2.78

（b）幾何学的相似；Qv ＝一定

Vr	槽 径	翼スパン	回転数	翼先端速度	Pv	吐出量	Qv	He
	$Vr^{1/3}$	$Vr^{1/3}$	Vr^{0}	$Vr^{1/3}$	$Vr^{2/3}$	Vr	Vr^{0}	$Vr^{2/3}$
5	1.71	1.71	1.00	1.71	2.92	5.00	1.00	2.92
10	2.15	2.15	1.00	2.15	4.64	10.00	1.00	4.64
100	4.64	4.64	1.00	4.64	21.54	100.00	1.00	21.54

（c）Pv，Qv 一定

Vr	槽 径	翼スパン	回転数	翼先端速度	Pv	d/D	Qv	He
	$Vr^{1/3}$	$Vr^{1/2}$	$Vr^{-1/2}$	Vr^{0}	Vr^{0}	$Vr^{1/6}$	Vr^{0}	Vr^{0}
5	1.71	2.24	0.45	1.00	1.00	1.31	1.00	1.00
10	2.15	3.16	0.32	1.00	1.00	1.47	1.00	1.00
100	4.64	10.00	0.10	1.00	1.00	2.15	1.00	1.00

2.　懸濁重合機（ポリ塩化ビニル）のスケールアップ

懸濁重合重合機の代表でもある PVC 重合機のスケールアップは，当社スケールアップ技術の歴史でもある。3 700 gal（14 m^3）の GL 製重合機から始まった当社製 PVC 重合機は現在，ステンレスクラッド製150 m^3 クラスまで大型化に成功している。

このスケールアップの際に問題となった事象を，撹拌面と，ハード面とを分類して，以下に紹介する。

2.1　撹拌面の課題

PVC 重合機の中で行われる反応工程としては，

初期：VCM 混合液中に分散剤を加え，撹拌による適正な液滴の形成を促進しながら反応開始温度まで加熱昇温を行う

中期：VCM の重合が進行する過程であり，重合熱が発生する

後期：生成した PVC スラリを適度に造粒しながら重合反応を終了させる

であり，PVC 重合機，すなわち懸濁重合法における撹拌の主たる目的は，次の３点と考える。

①　水相中のモノマを微小な液滴に均一分散・懸濁（液液撹拌）

②　重合反応缶内で温度ムラが生じない十分な撹拌（液液撹拌）

③　高濃度スラリの混合と造粒（固液撹拌）

撹拌槽における基本的な諸特性が Pv 値によって決められることが多いため，幾何学的相似，Pv 値一定というスケールアップ法が多く採用される。しかしこのスケールアップ法には種々の課題がある。

表１に，低粘度乱流撹拌槽におけるスケールアップにおいて，幾何学的相似条件，Pv 値一定条件，Qv（単位体積当たりの吐出循環流量）値一定の３条件から，２つの条件を選択した場合の手法を示した。懸濁重合法に必要な幾何学的相似，Pv 値一定によるスケールアップでは**表１**に示すように，循環頻度の減少，翼周端速度の増大，単位容積当たりの伝熱面積の低下がある。PVC 樹脂の粒度分布は，分散剤，翼周速，循環頻度の影響を受ける。スケールアップで周速が上がり，循環頻度が下がると分散剤を増して平均粒度を保持すると言われている。周速を抑制し，循環頻度を保つスケールアップを行えば粒度分布の保持が容易になる。

PVC 重合機で特に重要な管理ポイントとなるのが重合熱の除去である。上述のとおり，PVC 重合機のスケールアップでは伝熱面積が減少する。これ

を補うために，重合槽上部にリフラックスコンデンサを設置することが多く，この凝縮還流されたモノマを速やかに引込む必要があり，引込み不足であれば品質の低下が懸念される。軽液の引込みについては，スケールアップ前後で自由表面形状を維持する撹拌フルード数 Fr を一定にする必要があるが，Pv 値一定ではこの Fr 数も低下する。一方，還流モノマの分散を重視し，Fr 数を一定にするスケールアップを行えば，翼周速がさらに増大し，分散剤を増量しても粒子性状を維持することがさらに難しくなる。

PVC 重合機の種々の要求事項は，幾何学的相似，Pv 一定のスケールアップで満たすことができない。スケールアップ比の増大と並行して，この認識が業界に広まり，従来と異なるスケールアップへと展開するに至った。こうして槽径に対する翼スパンや翼巾，また翼枚数を調整することで，低下する Qv，Fr 数を改善していくスケールアップ法が試みられ，当社は PVC 重合機として150 m^3 クラスまで，10倍以上のスケールアップの実績を作り出している。

2.2　ハード面の課題

2.2.1　材質および表面仕上げ

PVC 重合槽の抱える大きな問題点として，「付着」が挙げられる。懸濁重合は付着との戦いと言っても過言ではない。

これはスケールアップする上でも大きな障害となった。グラスライニング製であれば，付着は大きな問題では無かったが，缶体の大型化に伴い，グラスライニング製重合槽の製作限界となった。ステンレスクラッド鋼を使用すればさらなる大型化は物理的には可能であり，伝熱性能もグラスライニング製と比して向上するが，付着の問題が残る。したがい，この問題の解決は大型化のためには不可避であった。そこで，ステンレスクラッド鋼の表面仕上げを一般的なバフ研磨（物理的研磨）ではなく，浸漬法による電解研磨を施工したところ，PVC ポリマの付着のしにくさ，また，付着したポリマの除去が容易となるなどの効果が顕著に現れた。**図４**に示すようにこれは，バフ研磨時にできる無数の凹凸が非常に鋭利なものであったものが，それを電解研磨することで凹凸の深さは大きくは変わらないが，エッジが取れて滑らかになることが付着低減につながったものである。

また，時代を同じくして，付着防止剤の性能が著しく向上したこともステンレスクラッド鋼の採用への追い風となった。

こうしてステンレスクラッド鋼を採用したことで，前述のスケールアップに伴う伝熱面積の不足の問題も hw（伝熱壁伝熱係数）の向上により改善され，さらなる大型化に成功した。

2.2.2　下部撹拌

1963年頃，アメリカの PVC メーカが下部撹拌方式を開発中であるとの情報を得て，当社は客先とともにこの方式の開発を進めた。下部撹拌ゆえ，軸封も下部にあるため，軸封部の間隙に異常な重合物が発生するなどの問題点を，試行錯誤を繰り返し一つ一つ克服した結果，1965年に実用化させた。

一般的な撹拌機付反応機は，構造の単純化のため，缶体の上部に伝動装置を設置して使用されるが，下部撹拌はこれを缶体の下側に持ってくる，というものである。下部撹拌によるメリットは，

① 軸径が小さく経済的（上部撹拌と異なり，荷重点までの距離が短いため）
② 撹拌軸への付着防止（液面部に軸が無く，重合物の付着が減少）
③ 缶体上部にモータ・減速機等重量物を搭載する必要がなくなり，リフラックスコンデンサの設置が容易
④ 高圧洗浄機の設置が容易

が挙げられる。

大型化に伴い，上部撹拌では軸径が大きくなり，メカニカルシールの製作限界に近づいていたため，①のメリットは有効な救済となった。重合熱除去性能の改善にも寄与している。③のメリットに加え，④のメリットにより，缶内付着物に対する洗浄効率の向上により his（プロセス流体側汚れ係数）を改善することができ，各バッチ時間が短縮され，生産性がさらに向上した。また，②のメリットによるフィッシュアイの低減で PVC の品質向上にも役立つ等，下部撹拌は PVC 重合機に最適なレイアウトとなった。

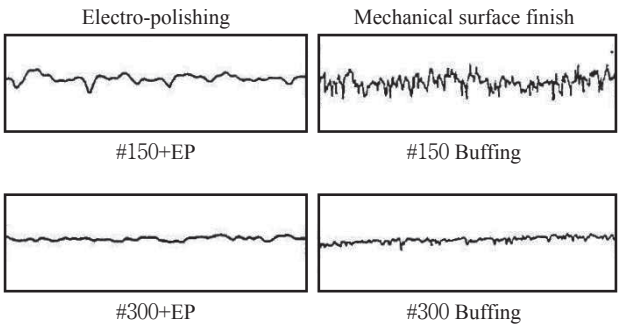


図４　表面仕上の種類による表面粗さの違い

2.2.3　内部ジャケット

大型化に伴う伝熱の問題はリフラックスコンデンサの大型化で解決されるが，リフラックスコンデンサから凝縮して落下するモノマの引き込みが激しい撹拌を必要とするレベルに達すると，PVC 粒子の性状を所定の範囲内に維持することが困難になる。粒子性状の制御の観点からは，ジャケットでの顕熱除熱量を増やすことが望ましいと考えられている。

ジャケットでの除熱量を高めるには以下の２つの課題がある。

重合機には，スパイラル邪魔板付ジャケットの採用が一般的であるが，製作工程上，本体またはジャケットのどちらかに邪魔板を取付け，他端は溶接されないため，若干の隙間が残る。この隙間から冷却水がショートパスして伝熱性能を低下させるため，隙間が小さいほど伝熱係数は向上する**図５**が，現実にはその隙間を小さく製作するのは難しく，構造上，０になることはありえない。これがジャケット構造における第１の課題である。

第２の課題として，スケールアップに伴う板厚の増加が挙げられる。PVC 重合槽は，設計圧力１MPa を超える高圧の容器であり，伝熱面となる缶壁の板厚は槽径に比例して増える。スケールアップに伴い，A/V 比の低下だけでなく，缶壁の伝熱抵抗が増大し，総括伝熱係数は低下する。このため，高張力鋼を使用し，板厚を薄くするのが一般的であるが，それだけではスケールアップに伴う A/V 比低下を補うほどの改善は難しい。

この２つの課題を同時に解決したのが内部ジャケット構造である。**図６**に内部ジャケット構造の模式図を示す。

ジャケットは通常，圧力容器の外側に付くが，内部ジャケットは本体胴の内面にスパイラル状の仕切りを有する冷却水用の流路を設けたものである。

重合機の内圧は本体胴で保持し，かつスパイラル邪魔板による支持効果のため，伝熱面としての内部ジャケット胴の板厚を薄くできる。また，流路を一般的なスパイラル邪魔板より狭くすることで流速を高め，さらに，完全に独立した流路とすることで「隙間０」を達成した。これらにより，総括伝熱係数は著しく向上し，**表２**に示すように，100 m^3 の缶体における総括伝熱係数で，1 000 kcal/m^2・h・℃を

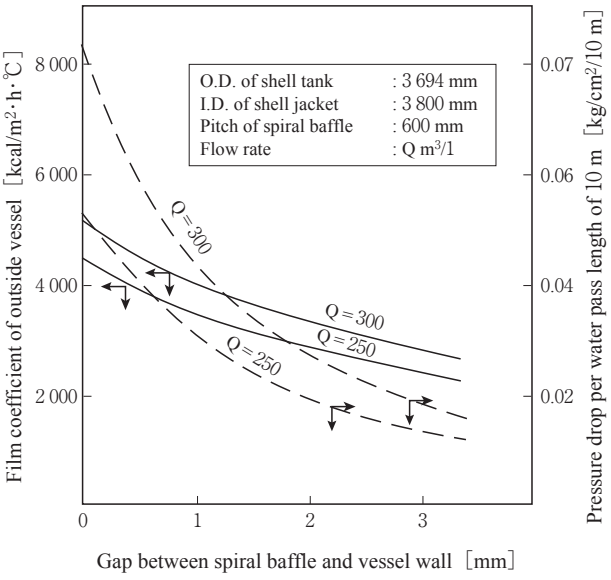


図５　スパイラル邪魔板隙間の伝熱性能におよぼす影響

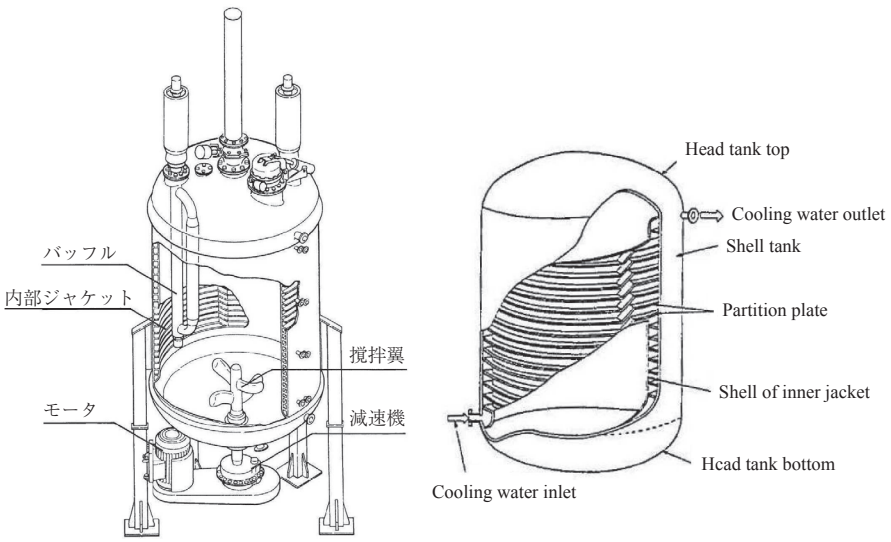


図６　内部ジャケット構造概略図

表２　ジャケットの形式と伝熱係数

	Conventional type	Improved type （A）	Improved type （B）
Description	Shell tank with spiral baffle jacket	Shell tank of high tensile strength steel and thin cladding	Inner jacket with Ni-plating
Shell tank Material	（SUS＋SPV355） Clat steel	（SUS＋SPV490＋SUS） 3 layer clad steel	（SUS＋SPV355） Clad steel
Thickness ［mm］	25（3＋22）	19（1.5＋17＋0.5）	9（2＋7）
Corrosion allowance［mm］	1.0	0	0
Fouling resistence on inside of shell: his ［kcal/m^2・h・℃］	∞	∞	∞
Film coefficient of fluid inside shell: hi ［kcal/m^2・h・℃］	2 900	2 900	2 900
Resistence of shell wall: hw ［kcal/m^2・h・℃］	1 400	1 800	3 310
Film coefficient of fluid outside shell: ho ［kcal/m^2・h・℃］	4 000	4 000	4 000
Fouling resistence on outside of shell: hos ［kcal/m^2・h・℃］	2 500	10 000	10 000
Overall heat transfer coefficient: U ［kcal/m^2・h・℃］	585	799	1 003

達成した。このように内部ジャケット化は，PVC重合槽の大型化において，有効な手段となった。

3.　溶液重合機のスケールアップ

溶液重合での希少なスケールアップ例として，「混合時間一定」のケースがある。

通常，幾何学的相似，混合時間一定でスケールアップするには，回転数一定となるため，Pv が過大となり，コスト面での実現性が著しく低い。

この実現のためには，同等の撹拌動力で，混合時間が短くなる高効率な撹拌翼が必要となる。

たとえば，10 m^{3}から50 m^{3}へのスケールアップを考えたとき，傾斜パドル翼での混合時間は，スケールアップ前で7.0秒とすると，これを幾何学的相似，Pv 一定で50 m^{3}にスケールアップすると，9.4秒となる。なお，幾何学的相似を維持して7.0秒を実現するには，約2.4倍の動力が必要となる。これを，フルゾーン翼に変更してスケールアップすれば，同じ Pv で6.7秒となり，傾斜パドル翼の10 m^{3}反応機における混合時間以下での混合が可能となる。

このように，撹拌翼をフルゾーンに変える（幾何学的相似を大きく崩す）ことで，混合時間は著しく改善され，スケールアップ後もスケールアップ前の混合時間を維持することができた。

4.　ガス吸収反応機のスケールアップ

ガス吸収反応には，Rushton 型ディスクタービン翼の使用が一般的である。この撹拌翼は，ディスクでガスをホールドし，小さなスパンで６枚のブレードのついた翼を高回転で回転させるため，気泡の微細化能力が高く，ガス吸収に適した翼である。しかしながら，近年のファイン化に伴い，以下の問題が指摘されている。

①　通気量依存性の高い物質移動速度係数（kLa）
②　全体混合性能の低さ
③　スパージャリング内への固着に起因するコンタミ
④　せん断による培養時の菌体・触媒の活性低下

これらを，撹拌翼をフルゾーンに変更することで大きく改善した例を挙げる。

4.1　通気量依存性

タービン翼はスパージャリング等により，相当量のガスを槽底から吹込むことで良好なガス吸収性能を発揮する。水素ガス等の循環困難なガスの吸収では，反応で消費された分しか槽底から供給できない。バッチ反応の初期で反応速度が大きな場合は良好なガス吸収速度を期待できるが，バッチの後期で反応速度が低下し，通気量が減少してガス吸収速度が低下すると，悪循環に陥ることがある。この種の

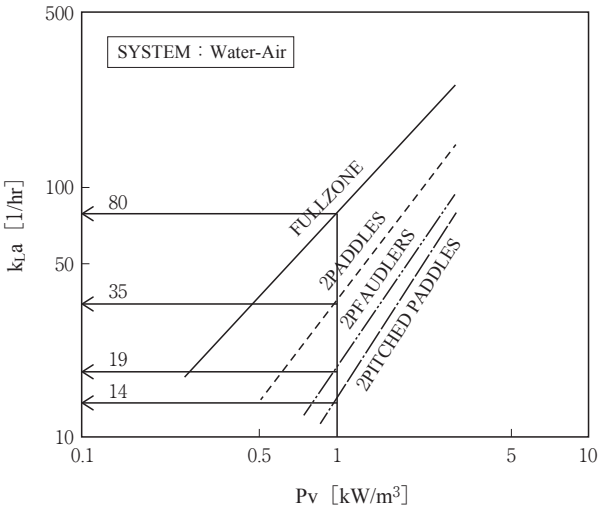


図7　無通気での各翼の k_La

適用では，液表面からの巻込みを考慮した設計とすべきであり，液レベルにより翼の高さを調整する手間が必要になる。

また，スケールアップの際，通気量は単位体積当たりの通気量（VVM: volume per volume per minute）一定で行われることが多いが，Pv はスケールアップの際，空塔線速一定で維持されるため，VVM 一定では通気量が大きくなり，撹拌動力が低下し，Pv 不足に陥るケースもある。

上記のような不具合がフルゾーンで改善される。まず，フルゾーンでは，**図7**に示すように，表面ガス吸収性能が高いため，必ずしも通気が必要とならない。終始反応速度にのみ依存したガス吸収性能を得ることができる。また，通気時の動力低下も少ないため，動力不足にも陥りにくい。

4.2　混合性能

タービン翼では混合性能の低さも問題となる。一般にガス吸収反応機では，ガスの滞留時間保持のため，縦長のプロポーションとなるケースが多い。この場合，撹拌翼は多段に設置される。このため，翼間に混合不良部ができやすく，また，少しでも粘度が高くなると，ドーナツリング状に停滞する混合不良部もできやすい。

4.3　スパージャーリング由来のコンタミ

タービン翼でのガス吸収反応は前述のように，通気を前提とするため，スパージャリング等の缶内部品が必要となる。排出時，リング内に液が残留し，固着してコンタミの原因となる。フルゾーンであれば，通気無の対応で防止できる。

4.4　せん断力

タービン翼は，小スパンの翼を高速回転させ，強いせん断力を与えることでガス分散を行う。しかしながら，このせん断力によって，触媒の活性が低下したり，培養槽であれば，菌体の活性が低下する等の不具合が発生するケースもある。

フルゾーンであれば，同じ動力で，タービン翼よりもかなり低回転であることや，後退翼であることなどから，低いせん断力で，同等以上の k_La が得られるため，このようなケースの改善も可能である。

む　す　び

当社の取扱う反応機の場合，「生産性の向上」を追求することで，省エネに貢献する。

当社の取組みとしては，より高い生産性を見込める反応機をめざし，顧客のニーズや反応にマッチしたスケールアップファクタを見出し，提案して行くことがもっとも省エネにつながるものとして，今後も事業活動を展開して行く。

[参考文献]
1）東海化学工業会セミナー「撹拌槽のスケールアップと省エネ化への工夫」要旨集（2013）
2）橋本健二：工業反応装置，培風館，（1984）
3）神鋼パンテツク技報 vol.41 No.2（1998/3）
4）神鋼ファウドラー技報 vol.32 No.3（1988/12）

*プロセス機器事業部 技術部 装置設計グループ

豊かな自然に囲まれた国内最高水準の高効率ごみ発電施設
甲府・峡東地域ごみ処理施設整備事業および運営事業

甲府・峡東地域ごみ処理施設事務組合は，甲府市，笛吹市，山梨市，甲州市で構成され，澄みきった空気と美しい清流，緑に包まれた甲府盆地に位置し，日本一の生産量を誇る果樹地帯を有する都市と自然がバランス良く共存する地域です。本事業は同地域で排出される一般廃棄物を処理対象とする高効率ごみ発電施設とリサイクルセンターを整備し，20年におよぶ運営・維持管理を行うものです。

今回採用された当社の「流動床式ガス化溶融炉」は安全・安定・経済性に優れ，同規模の高効率ごみ発電施設交付金交付要件（発電効率：18.5 %以上）を大きく上回る国内最高水準の発電効率22.5 %を実現する施設です。

2014年７月に安全祈願祭を執り行い，2017年３月竣工に向け現在工事を進めています。

事業の概要

○事 業 者：【設 計 建 設】株式会社神鋼環境ソリューション
【運営維持管理】株式会社甲府・峡東環境サービス
（当社，神鋼環境メンテナンス株式会社２社共同出資による特別目的会社）
○事業方式：DBO 方式（Design：設計　Build：建設　Operate：運営）
○事業期間：【設 計 建 設 期 間】2012年６月から2017年３月までの５年間
【運営維持管理期間】2017年４月から2037年３月までの20年間

施設の概要

○高効率ごみ発電施設　可燃ごみ処理能力：369 t/d（123 t/d × ３系列）
定格発電量：7 700 kW
発電効率：22.5%
○リサイクルセンター　破砕設備：36 t/d，選別設備：31 t/d，保管設備：22 t/d

TOPICS

展示会だより

例年，夏の一大イベントとして開催されている下水道展は，７月22日～７月25日の４日間インテックス大阪にて「日本発！くらしを支える底力　下水道展　’14大阪」として行われました。

大阪での開催は2006年以来となりました。

下水道展は下水道に関する最新技術の紹介として下水道研究発表会のほか，国際展開に向けた海外への発信，および一般の方に理解を深めて頂くことを目的としています。

今年は85 720人の来場者数となりました。（2013年東京では88 645人）

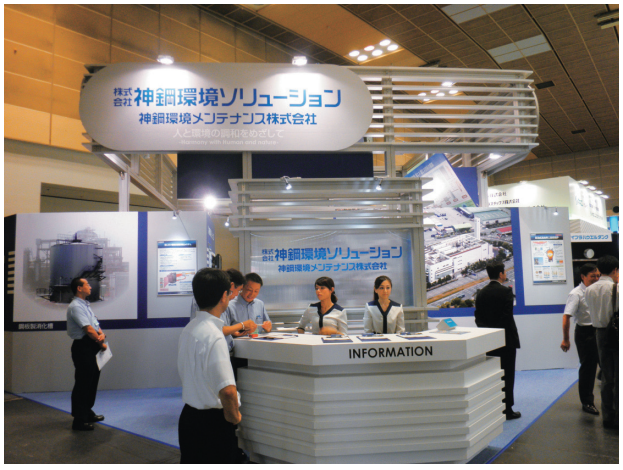
当社ブースでは下水処理場を地域バイオマス利活用の拠点と位置付け，省エネ・創エネ機器およびシステムをパネル中心に紹介しました。

中でも，今年６月に日本下水道事業団において新技術（Ⅱ類）登録された「気泡式高効率二段燃焼炉」，「パッケージ型鋼板製消化タンク」をブース前面に展示し，その他バビオミックス（双曲面形撹拌機），バイオガス精製装置，沈砂し渣洗浄機などの商品パネルと，国交省下水道革新的技術実証事業 B-DASH プロジェクト（KOBE グリーン・スイーツプロジェクト），小型バイナリー発電による排熱利用，放射性物質を含む下水汚泥減容化の取組みなどのパネルを展示しました。

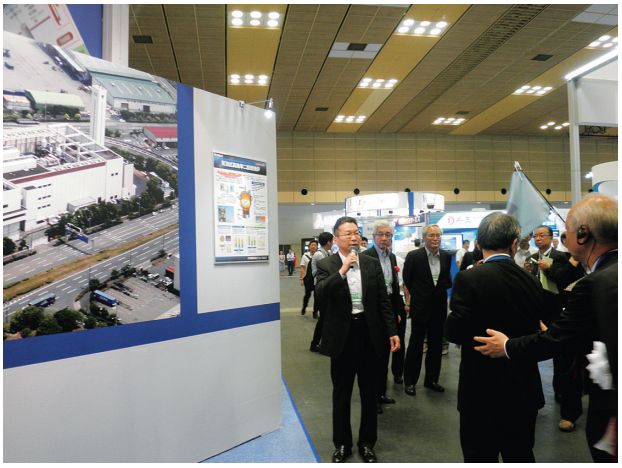
当社グループブースへは，４日間で1 600人を超える御客様にご来場を頂くことができました。関係者一同御礼申し上げます。

来年は東京での開催が予定されております。

今後も新たな当社技術の創出に尽力し，次回下水道展を紹介の場として活かしていきたいと思います。



当社グループの展示


出展パネルの前で来場者へ説明する様子

TOPICS

展示会だより

■ IFAT 2014

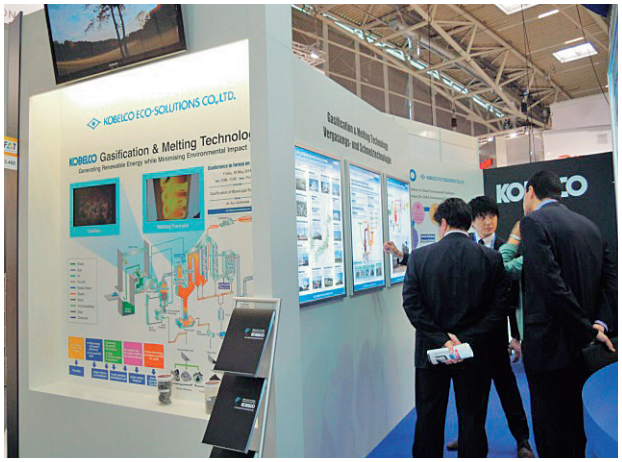
ドイツ・ミュンヘンの Munich Trade Fair Center にて，2014年５月５日から９日までの５日間，廃棄物処理，廃棄物発電，リサイクル，上下水処理，土壌改質，エネルギ関連などの製品や技術が一堂に会した IFAT 2014が開催されました。

同展はヨーロッパで開催される環境技術専門の展示会の中でも最大で，今回も出展社数は59カ国から3 081社，来場者数は170カ国から約135 000人となりました。

当社は，ヨーロッパ向けガス化溶融炉システムのパネル展示やプレゼン発表のほか，海水淡水化システムなどの水処理技術のパネル展示を行い，ヨーロッパの環境分野において当社および保有技術の認知度を向上させる事を目的に，IFAT となってからは今回で３度目の出展となりました。

開催地のドイツ・ミュンヘンは，毎年10月に開催されるオクトーバフェストと称するビール祭りが有名ですが，５月もミニオクトーバフェストを開催しており，夜になると民族衣装を着た地元の人たちが会場へ向かう姿が多く見られました。

↑当社ブース全景



↑来場者に説明している様子

プレゼン発表の様子⇒

本　　社／〒651-0072 神戸市中央区脇浜町1丁目4-78　☎(078)232-8018　FAX(078)232-8051
技術研究所／〒651-2241 神戸市西区室谷1丁目1-4　☎(078)992-6500　FAX(078)997-0550
東京支社／〒141-8688 東京都品川区北品川5丁目9-12(ONビル)　☎(03)5739-5800　FAX(03)5739-5821
大阪支社／〒541-8536 大阪市中央区備後町4丁目1-3(御堂筋三井ビル)　☎(06)6206-6751　FAX(06)6206-6760
九州支社／〒812-0012 福岡市博多区博多駅中央街1-1(新幹線博多ビル)　☎(092)474-6565　FAX(092)441-4440
北海道支店／〒060-0004 札幌市中央区北四条西5丁目1-3(日本生命北門館ビル)　☎(011)241-4647　FAX(011)241-5759
東北支店／〒980-0811 仙台市青葉区一番町1丁目2-25(仙台NSビル)　☎(022)716-6651　FAX(022)263-2049
名古屋支店／〒451-0045 名古屋市西区名駅2丁目27-8 (名古屋プライムセントラルタワー)　☎(052)581-9876　FAX(052)563-2313
中国支店／〒730-0013 広島市中区八丁堀16-11(日本生命広島第二ビル)　☎(082)511-3210　FAX(082)211-2451
播磨製作所／〒675-0155 兵庫県加古郡播磨町新島19　☎(079)436-2500　FAX(079)436-2506
デュッセルドルフ事務所／Berliner Allee 55, 40212 Düsseldorf Germany　☎+49-211-7792-0430　FAX+49-211-7792-0450

神鋼環境ソリューション技報　2014年度　Vol.11 No.1　通巻21号
《本社》株式会社神鋼環境ソリューション　〒651-0072　神戸市中央区脇浜町1丁目4−78
《編集発行》〒651-2241　神戸市西区室谷1丁目1−4　株式会社神鋼環境ソリューション 技術開発センター（神鋼環境ソリューション技報編集委員会事務局）
☎(078) 992-6527　FAX (078) 992-6504　http://www.kobelco-eco.co.jp
《編集委員》編集委員長/髙橋正光　委員/小倉賢藏・豊久志朗・田頭成能・松本雅彦・下梨孝・水口弘幸・斉藤彰・木下民法・菊池雅彦・大朝　功
《発行》2014年9月5日印刷　2014年9月20日発行　年2回発行《禁無断転載》《発行人》横山英樹《印刷所》中村印刷株式会社

この用紙は、パルプを漂白するときに塩素ガスを使わない
「無塩素漂白（ECF）」という方法で作られています。