



目	次	CONTENTS
1	<巻頭言> 技術と事業	
2	湖南中部浄化センター 循環式高効率二段燃焼炉の運転実績報告	Operation Results and Introduction Effects of Advanced Circulating-fluidized-bed Two-stage Incinerator at Konan-Chubu Water Reclamation Plant
8	準好気性埋立処分場の機能検査と評価事例	Performance Inspection and Evaluation on Semi Aerobic Landfill
12	流動床式ガス化溶融炉における廃熱ボイラ過熱器の耐用状況	The Condition for Waste Heat Boiler in Fluidized Bed Gasification and Melting Furnace
20	廃棄物ガス化改質発電プロセスの開発	Development of Gasification and Reforming Process of Waste for Electricity Generation
31	次世代型流動床式焼却炉「流動床式ガス化燃焼炉」を用いた環境負荷低減の取組み	Approach for Environmental Load Reduction in Next-generation Fluidized-bed Incinerator
36	微量 PCB 汚染変圧器の現地洗浄処理実績 —川崎重工業㈱での処理事例—	Commercial Operation Results of Onsite Washing for the Transformers Contaminated by Very Low Concentration of PCBs
41	製品・技術紹介	
42	TOPICS	

技術と事業



取締役社長 粕谷 強

Tsuyoshi Kasuya

数年前、技術に強い日本が事業で勝てないのは何故かといった議論をよく耳にした。主に技術優位の日本が海外企業との競争に勝てないのは事業企画や経営戦略の面で劣っているからだという論調であった。昨今は、本当に日本の技術力は優れているのかといった声を時折耳にする。安倍政権の後押しも手伝って、事業組成面での改善が進む一方で、技術力における日本の優位性に疑問符が付くことが増えている。未曾有の天災による原子力発電所の事故が厳しい見方に繋がっているとも言えるが、コストを含めた技術パフォーマンスの改善、ガラパゴス的商品の規格改訂など解決を要する課題が多いのも事実である。

ここで言う技術力とは、事業競争力に直結する、言い換えると顧客の課題解決に直結する『プロセス技術』を指しており、供給するものは単一の機械や材料でなく、特定の機能である。昨今の日本の技術力に問題があるとすれば、それは個々の小単位の技術もさる事ながら、それらがブツ切りになっていて機能としてパフォーマンスが発揮できていない事であり、個から面へ持っていくプロセス化の所に、或いは逆にプロセス構想から個にブレークダウンする所に、何らかの改善課題を抱えているのではないかと思う。

企業における研究開発は、上記を待たずとも、事業課題解決と研究開発テーマの関係が明確でなければならない。そこでは二つの事が重要だと考えている。

一つ目はテーマを設定する手順である。経営課題が開発課題に落とし込まれ、開発課題が更にテーマに展開されるが、テーマは上司から部下に手段系も含めたような考える余地のない形で指示されてはならず、出来る限り自由度を持たせる必要がある。テーマを取り巻く当該技術や競合他社の動向、事業課題との関係などをよく説明し、開発の目的・狙いを十分に理解させた上で、開発計画を具体化させるのが望ましい姿であり、それでこそ、人が育ち、開発の内容に拡がりや深みが出てくるものと考えている。

二つ目は開発課題達成に向けた職場の雰囲気作りである。開発課題を TOP に置き、それを頂点とした全体テーマの展開図・相関図を可視化させるなど、開発目標完遂へのモチベーションを持続させたり、チーム間の補完的連携を呼び起こしたりするための R&D マネジメント上の仕掛けや工夫も大切ではないかと思う。

日本国内各地のエコタウン作りや新興国の環境系インフラ作りへのサポートを使命とする当社において、研究開発に携わる人達が、生き生きと働き、事業の成長を通じて社会の発展に貢献している喜びを感じられるよう、R&D 体制の整備にも注力していきたい。

湖南中部浄化センター

循環式高効率二段燃焼炉の運転実績報告

Operation Results and Introduction Effects of Advanced Circulating-fluidized-bed Two-stage Incinerator at Konan-Chubu Water Reclamation Plant



村上義則*
Yoshinori Murakami



田中 克*
Masaru Tanaka



奥 友晃*
Tomoaki Oku

当社は、温室効果ガス低減と省エネルギーを両立しながら、安定操業ができる次世代型汚泥焼却炉として循環式高効率二段燃焼炉を開発し、湖南中部浄化センターの更新炉として導入、2014年11月より操業を開始している。本炉の導入を含め全体システムの改善により、既設炉に対し温室効果ガス（ N_2O および CO_2 ）の排出量低減、および省エネルギーを実現し、信頼性の高い機器構成により安定操業を継続している。ここでは循環式高効率二段燃焼炉の運転実績について紹介する。

Kobelco Eco-Solutions developed an Advanced Circulating-fluidized-bed Two-stage Incinerator (ACTI) as a next generation sludge incinerator that stably reduces both greenhouse gas emissions and energy consumption. We introduced it to the Konan-Chubu Water Reclamation Plant as part of an upgrade project and started operation in November 2014. Improvements to the whole system that came with the ACTI resulted in lower emissions of greenhouse gases (N_2O , CO_2) and greater energy-savings than the previous system. The refurbished facilities have been stably operating owing to the highly reliable equipment. This paper reports the operating results of the ACTI.

Key Words :

下 水 汚 泥
循 環 流 動 炉
二 段 燃 焼
省 エ ネ ル ギ
温 室 効 果 ガ ス
一酸化二窒素 (N_2O)

Sewage Sludge
Circulating-fluidized-bed Incinerator
Two-stage Combustion
Energy Saving
Greenhouse Gas
Nitrous Oxide

【セールスポイント】

- ・循環式高効率二段燃焼炉は、熱分解ゾーンでの抑制燃焼、および完全燃焼ゾーンでの高温燃焼（二段燃焼）により、温室効果ガス（ N_2O ）の発生量を低減できる。
- ・熱分解ゾーンに循環流動方式を採用し低空気比燃焼を可能とし、高温流動砂の循環による炉内温度安定維持が図れる。
- ・完全燃焼ゾーンでは900℃程度の高温部を作り N_2O を削減するとともに、炉内全域を高温化する方式に比べ燃料使用量を削減できる。

まえがき

湖南中部浄化センターの既設炉の更新工事において、循環式高効率二段燃焼炉を導入した。本システムは、循環式高効率二段燃焼炉の採用や、排ガスから熱回収する燃焼空気予熱温度の高温化、耐火物仕様見直し等により、補助燃料消費量を既設炉より約30%低減する仕様となっている。

湖南中部浄化センターの汚泥焼却（溶融）設備は、1号炉（処理量40 t/d。1990年竣工。現在休止中。）、2号炉（処理量120 t/d。1996年竣工。）、3号炉（処理量120 t/d。2005年竣工。2014年度に溶融炉を休止し、現在は焼却処理のみ。）があり、本工事は2号炉の老朽化に伴う設備更新（ケーキピットの一部更新含む。）となる。敷地は既設2号炉の西側で、補機棟（ケーキ・し渣受入供給設備等の臭気発生機器、ブロワ・空気圧縮機等の騒音・振動発生機器、灰搬出設備等の粉塵発生機器を集約。）、焼却ヤード（焼却・熱回収・排煙処理・集塵設備等を配



写真1 設備全景

置。）にて構成される。

新設炉は、2014年11月から商用運転を開始して現在に至るまで排ガス性状や用役使用量を含めて順調に稼働している。

以下に新設炉の設備概要、運転実績について紹介する。

1. 設備概要

1.1 処理プロセス

本焼却設備の全景を写真1に、概要を表1に、処理フローを図1に示す。本設備は要求水準書において、①エネルギー消費量、②ライフサイクルコスト、③温室効果ガス排出量の低減が求められていること、既設3号炉での循環流動炉のし渣・沈砂・脱水ケーキ混焼の安定運転実績を踏まえて、温室効果ガスとランニングコスト低減が両立できる循環式高効率二段燃焼炉を採用した。以下に各設備の特長と既設焼却設備から改善した内容について紹介する。

1.1.1 ケーキ・し渣・沈砂受入供給設備

脱水設備で脱水されたケーキ（下水汚泥）は定量フィーダに受入れられた後、ケーキ投入ポンプでケーキ投入機に定量供給される。水処理設備で発生したし渣・沈砂は、それぞれのホッパに受入れられた後、沈砂・し渣搬送コンベヤでケーキ投入機に定量供給される。これらをケーキ投入機で均一混合しながら熱分解炉に投入する。

1.1.2 焼却・熱回収設備

焼却設備は熱分解炉（循環流動炉）と二次燃焼室、およびこれらの付帯機器から、また熱回収設備は高温の排ガスから熱回収するための空気予熱器と送風機から構成される。

供給された脱水ケーキは、熱分解炉にて0.9~1.0程度の低空気比で燃焼された後、二次燃焼室にて900℃にて完全燃焼される。燃焼用空気は、熱回収

表1 設備概要

処理量	120 t-wet/d（し渣・沈砂含む）	
処理方式	循環式高効率二段燃焼炉	
熱回収設備	熱交換器（輻射+多管式）	
排ガス処理設備	バグフィルタによるダスト集塵+洗煙処理	
排ガス性状の技術 提案値 (O ₂ 12%換算値)	ばいじん	: 0.002 g/Nm ³
	硫黄酸化物 (K 値)	: 0.078
	窒素酸化物	: 20 ppm
	塩化水素	: 5 mg/Nm ³
	一酸化二窒素排出係数	: 0.1 kg-N ₂ O/t- ケーキ
	ダイオキシン	: 0.01 ng-TEQ/Nm ³
操業開始日	2014年11月4日	

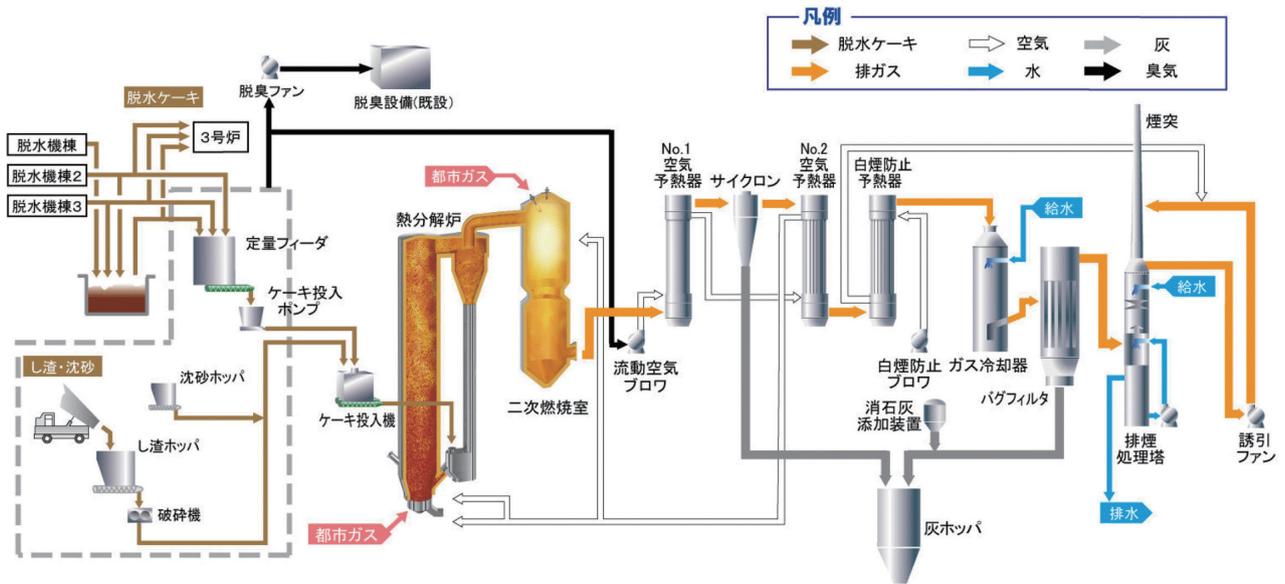


図1 処理フロー

設備で排ガスから約700℃まで熱回収して高温で供給することで燃料消費量を低減する。

1.1.3 排煙処理・集塵設備

焼却後の排ガスは、バグフィルタにて焼却灰を去除し、排煙処理塔で脱硫・冷却することで無害化・減湿化され、誘引ファンによって煙突から排出する。焼却灰は灰コンベヤを経て、灰ホッパで貯留後、灰加湿機にて加湿後に場外処分される。

1.2 既設焼却設備からの改善内容

省エネルギー・長寿命化等考慮して、既設焼却設備から次に示す改善を行った。

- ① 焼却システムを一般的な高温焼却から循環式高効率二段燃焼に変更した。
- ② 炉の耐火物全体厚みを350→400 mmへ増加するとともに、断熱仕様を見直すことにより放熱量の低減を図った。また耐火物構成を3層構造とすることで排ガスの断熱層・鉄皮への回込み防止を図った。
- ③ 流動ブロウ、誘引ファン等の大容量電動機だけでなく、白煙防止ブロウ、空気圧縮機もインバータ方式を採用した（消費電力低減）。
- ④ 空気予熱器仕様を見直し、燃焼空気温度を既設650℃から700℃へUPした（燃料消費量低減）。

1.3 循環式高効率二段燃焼炉の概要

これまで、窒素酸化物（NO_x）の排出抑制を目的として、二段燃焼を採用した事例があった。また焼却炉内に900℃程度の高温度領域を作ることが、N₂O

の抑制に効果的であることがわかってきた。このメカニズムを効率的に実現するために、一段目の燃焼領域の空気比を1以下に下げ、二段目の燃焼で高温領域を作ることにより、低NO_x、低N₂Oの焼却を行うのが高効率二段燃焼炉である。

本システムでは一段目の燃焼領域（熱分解ゾーン）を循環炉にて、二段目の燃焼領域（完全燃焼ゾーン）を二次燃焼室にて行う。

循環炉は、炉内のガス流速が速く（4～6 m/s）、高温の流動砂を炉内で循環させることで、炉頂の燃焼熱を炉底に戻す。そのため炉内温度差が生じにくく、より低温・低空気比の運転においても安定燃焼を維持できる。熱分解ゾーンでは燃焼空気の割合（空気比）を1.0程度で運転することで、750～800℃程度の低温で、熱分解ガスを発生させる。熱分解ガスは完全燃焼ゾーン（二次燃焼室）に導いて、燃焼空気を吹き込んで攪拌することで、瞬時に熱分解ガスを燃焼させ900℃程度の局所高温領域を作った上で、完全燃焼させる。

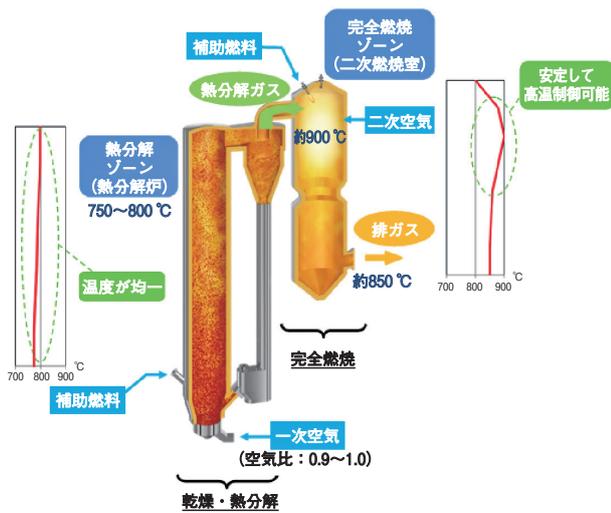
図2に高効率二段燃焼炉の概要を示す。

2. 運転実績

2.1 汚泥処理量および稼働率

2014年11月より操業開始した本設備の約1年間の処理実績（処理量、稼働率）を図3に示す。汚泥投入時間を計画汚泥投入時間で除した設備稼働率は99.7%となる。また立上げ、点検等を除けば、ほぼ定格処理量（120 t/d）付近で運転継続しており、初

乾燥・熱分解ゾーンと完全燃焼ゾーンを分割し、熱分解ガスを発生させることで燃料を増加することなく高温化が可能



トータル空気比: 1.3
排ガス滞留時間: 熱分解ゾーン+完全燃焼ゾーンにて7sec以上

図2 循環式高効率二段燃焼炉の概要

期トラブルが少なく安定操業ができています。

2.2 排ガス性状

試運転時に実施した引渡性能試験および、竣工後の操業での煙突出口排ガス性状を表2に示す。試運転および供用開始してからの運転においても、全ての項目で基準値および技術提案値を満足していることが確認された。

2.3 燃料および電力消費量

既設炉（3号炉 循環炉）と新設炉（新2号炉 循環式高効率二段燃焼炉）における補助燃料消費量の原単位（脱水ケーキ1t処理するための必要量。昇温時に必要な量を除く。）を図4に示す。運転負荷（効率の良い新2号炉主体で処理）、ケーキ含水率等によるばらつきがあるものの、既設炉と新設炉の原単位を比較すると、補助燃料消費量は約40%低減していることが確認された。同様に、既設炉と新設炉の電力消費量の原単位を図5に示す。既設炉が焼却+灰熔融システムとして設計されており、機器点数が多い等の違いがあるものの、新設炉は既設炉に比べて約50%低減できている。

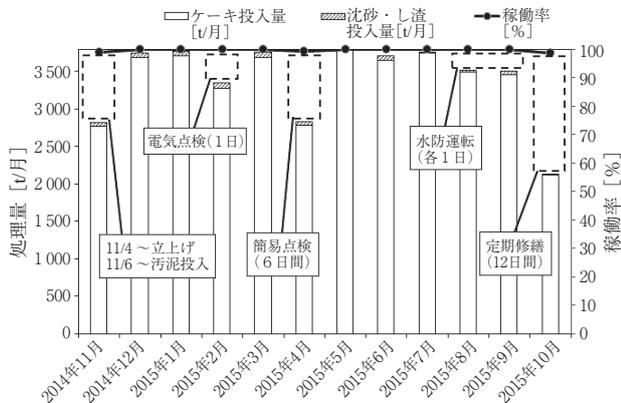


図3 月間汚泥処理量と稼働率

補助燃料消費量原単位、電力消費量原単位低減の要因の一つに低空気比運転が挙げられる。脱水ケーキおよび都市ガスの燃焼に必要な理論空気量に対する比率を空気比と呼び、下水汚泥に関しては一般的に1.3~1.4を見込む。本設備では図6に示すとおり、ケーキ性状、運転状況により1.3を超えている時もあるが、おおむね安定して1.2~1.3で効率的に処理できており、熱分解炉と二次燃焼室に燃焼用空気を吹込む流動ブロワの動力低減が図られている。また、熱分解炉で還元雰囲気を作り出し汚泥中のN分の酸化を抑えることでN₂O生成を抑制している。

図7に二次燃焼室上部（最高温度部）の温度推移を示す。年間を通じて900℃以上を安定維持できており、熱分解ガスを高温で完全燃焼していることがわかる。

表2 試運転引渡性能試験および供用開始後の排ガス性状

		基準値	技術提案値	試運転	供用開始後			
				引渡性能試験	2014年8月7日	2015年1月	2015年5月	2015年9月
ばいじん	g/Nm ³ (O ₂ -12%換算)	0.04	0.002	<0.001	<0.002	<0.002	0.001	
いおう酸化物	(K値)	8.76	0.078	<0.018	<0.003	<0.003	<0.003	
窒素酸化物	ppm (O ₂ -12%換算)	250	20	3	4	5	3	
塩化水素	mg/Nm ³ (O ₂ -12%換算)	700	5	<2	<2	<2	<2	
ダイオキシン類	ng-TEQ/Nm ³ (O ₂ -12%換算)	0.1	0.01	0.0000032	—	—	0.0023	

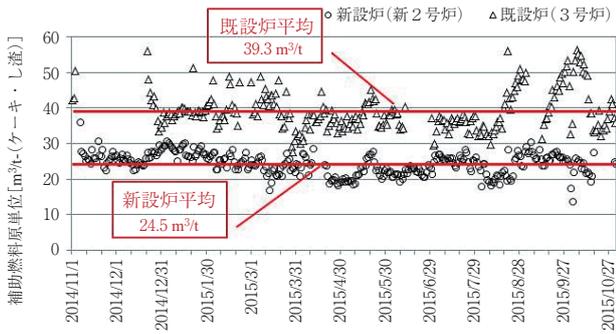


図4 補助燃料消費量原単位比較

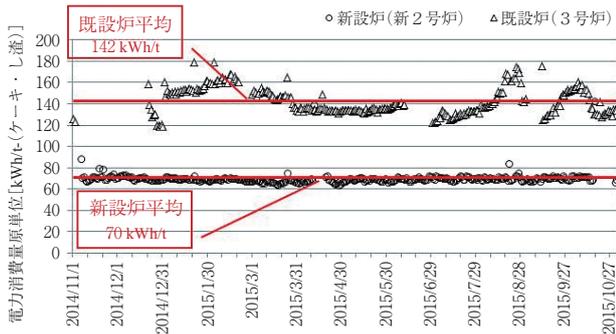


図5 電力消費量原単位比較

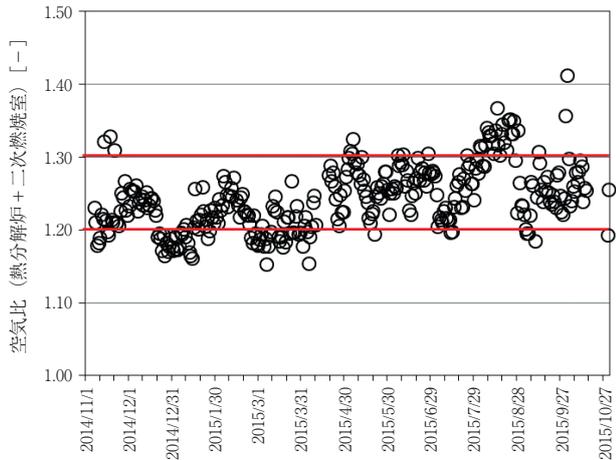


図6 空気比の年間推移

2.4 N₂O および CO₂ 排出量

新設炉の煙突出口 N₂O 排出係数を図 8 に示す。立上げ等の非定常時を除き、1年間安定して 0.1 kg-N₂O/t- ケーキで推移しており、従来の下水汚泥焼却炉の排出量（算定省令：0.645 kg-N₂O/t- ケーキ）と比べ、約 80 % 削減可能な設備となっている。

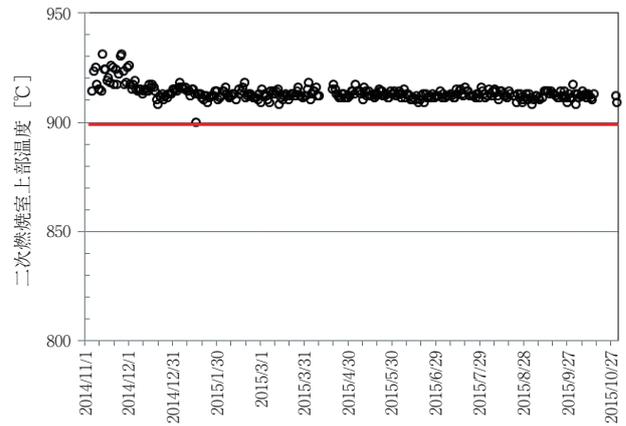


図7 二次燃焼室上部温度の年間推移

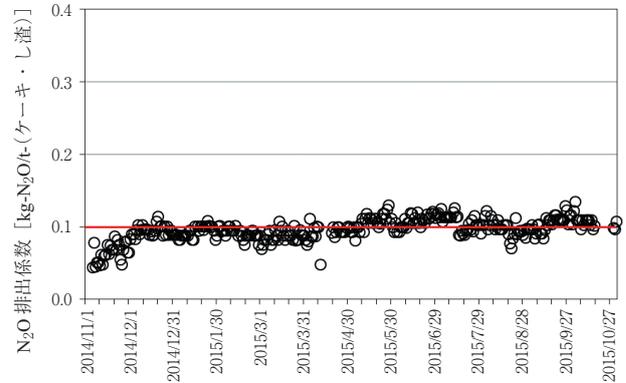


図8 新設炉の煙突出口 N₂O 排出係数の年間推移

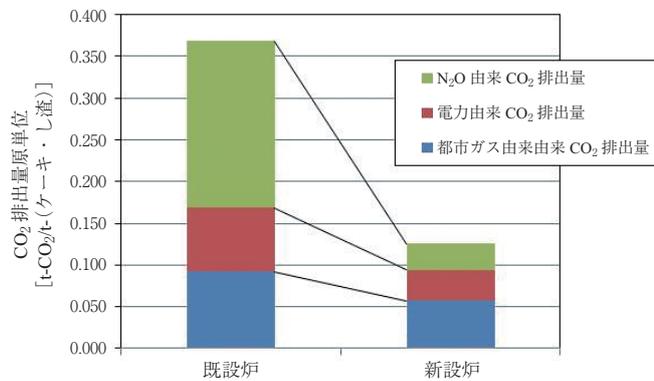


図9 CO₂ 排出量原単位 (2014年11月1日～2015年10月31日)

- ※ 1 : 45 MJ/m³, 0.0509 t-CO₂/GJ (大阪ガス株)の排出係数
- ※ 2 : 0.523 kg-CO₂/kWh (関西電力株) 2014年度の排出係数
- ※ 3 : 既設炉 0.645 kg-N₂O/t- ケーキと設定 (算定省令)
新設炉 0.1 kg-N₂O/t- ケーキ

表3 CO₂排出量原単位 (2014年11月1日~2015年10月31日)

項 目		既設炉	新設炉
ケーキ焼却量	[t-ケーキ/年]	26 588	40 772
都市ガス使用量	[m ³ /年]	1 070 131	1 015 446
電力使用量	[kWh/年]	3 879 032	2 909 050
都市ガス由来 CO ₂ 排出量	[t-CO ₂ /t-ケーキ]	0.092	0.057
電力由来 CO ₂ 排出量	[t-CO ₂ /t-ケーキ]	0.076	0.037
N ₂ O 由来 CO ₂ 排出量	[t-CO ₂ /t-ケーキ]	0.200	0.031
CO ₂ 排出量合計	[t-CO ₂ /t-ケーキ]	0.368	0.125

運転実績を基に試算した都市ガス、電力、N₂O 由来の各 CO₂ 排出量の、既設との比較結果を図9、表3に示す。新設炉では既設炉に比べ CO₂ 総排出量で約70%削減可能となることが確認できた。

む す び

新2号炉は2014年11月から操業開始して以降、温室効果ガスの排出量低減、および省エネルギーを実現し、環境負荷を低減する設備として、安定的な操業

を継続している。今後は、これまでに得られた知見や運転実績に基づき、高効率二段燃焼炉の拡販に努めていきたい。

最後に、本工事を遂行するにあたり、多大なご助言、ご協力をいただきました滋賀県琵琶湖環境部下水道課、南部流域下水道事務所の関係各位には深く感謝の意を表す。

準好気性埋立処分場の機能検査と評価事例

Performance Inspection and Evaluation on Semi Aerobic Landfill



豊久志朗*
Shiro Toyohisa



室井 治*
Osamu Muroi



二見公之*
Hiroyuki Futami



後藤勝郎*
Katsuro Goto

株式会社神鋼環境ソリューションの子会社である株式会社イー・アール・シー高城は管理型最終処分場を運営し、2015年12月で開業満10年を迎え、この間、無事故無災害を継続している。本設備において、浸出水集水管から埋立地に流入する空気量を測定した結果、この流入空気により埋立地が準好気状態に維持されていることを明らかにした。また、浸出水集水管からの空気量を確保するために重要な集水管の管内洗浄の状況についても写真により紹介する¹⁾。

As of December 2015, ERC Takajo Co., Ltd. has been operating a controlled landfill site as a subsidiary company of Kobelco Eco-Solutions Co., Ltd. for 10 years, and operated it without any accidents and disasters since the start of business. In this study, we measured the quantity of air that flowed into the landfill site from the leachate pipes, and clarified that it keeps the landfill at the semi-aerobic condition. This paper reports that work and additionally shows photographs of leachate pipe cleaning that is important towards ensuring airflow through the pipes.

Key Words :

管理型最終処分場
浸 出 水
浸 出 水 集 水 管
準 好 気 性 埋 立

Controlled type of landfill site
Leachate
Leachate collection pipe
Semi aerobic landfill

【セールスポイント】

我が国の最終処分場は、バイオリアクタ型の準好気性埋立構造であるが、その機能を検証した事例は少なく、株式会社イー・アール・シー高城では日々埋立管理を実践することで豊富なデータを有している。

まえがき

我が国の最終処分場は自然の浄化機能とその分解メカニズムを利用する、バイオリアクタ型の準好気性埋立構造を基本としている。しかし焼却残渣を中心に埋立処分する一般廃棄物最終処分場においては高アルカリ、高塩類環境下で埋立初期から中期にはバイオリアクタは十分に機能しない。一方、管理型最終処分場においては埋立廃棄物の種類にもよるが

バイオリアクタは機能することが多い。我が国の多くの最終処分場は準好気性埋立構造を謳っているものの、その効果を検証した事例は少ない。今回、埋立を開始して10年、現在も稼働中の管理型最終処分場を対象に、機能検査を行った¹⁾。その中で準好気性埋立構造の中心的役割を果たす集水管検査および空気量測定を行い通気、通水効果の確認を行ったので報告する。

1. (株)イー・アール・シー高城の概要

調査対象処分場は宮崎県都城市に建設された管理型最終処分場で計画埋立容量93万 m^3 （1期拡張分を含む）、2015年9月末現在約40万 m^3 が埋立処分されている。埋立期間は20年、埋立対象廃棄物は燃え殻、汚泥、廃プラ、紙屑、木くず、鋳さい、ばいじん、13号廃棄物等15種類で準好気性埋立構造を採用している。現有の浸出水処理施設能力は140 m^3/d （Ca除去+生物処理+凝集沈殿+逆浸透膜法）、浸出水調整設備容量は17 600 m^3 で、2016年度にはそれぞれ180 m^3/d および28 100 m^3 に拡張する予定である。本処分場の特色として年間降水量が多く直近20年間の年平均降水量は2 460 mm、開業後の2012年には、3 535 mm/年を記録している。このため水管理を工夫しており、埋立完了部や埋立法面表面にはシートキャッピングを施し、表流水の排除による浸



写真1 キャッピングによる雨水排除



写真2 浸出水調整設備への屋根設置

出水量制御を行っている（写真1）。さらに埋立浸出水調整設備への屋根設置も実施している（写真2）。このシートキャッピングの効果を踏まえ、流入空気量データを考察することで、埋立地の準好気性機能の確認を実施した。

2. 準好気埋立の調査方法

準好気性埋立構造とは、浸出水集水管排出口が調整槽流入ピット水位よりも上部に位置しており、この部分から埋立地に向けて空気が供給される構造である。空気が供給されるためには、埋立地が好気状態を維持し、その反応熱で外気よりも埋立地の温度が高い状態を維持する必要がある。

そこで、浸出水集水管から流入する空気量を、集水管排出口の調整槽流入ピット部で図1に示す管内の9カ所について風速計を用いて測定した。測定は2011年8月から開始し、2014年12月までに10回実施した。また管内状況を確認するために集水管内にカメラを入れ、目視確認を行った。

3. 結果および考察

(1) 管内風速および風量

集水管入口の風速、および風量を表1に示す。表1から管内風速は0.1~2.4 m/sで管中心部より上部の風速が早く、管底部がやや遅い傾向がうかがえる。(0.5~1.7 m/s) 風量は平均風速に管断面積を乗じて求め、8.6~28.4 m^3/min であった。この1年間は風速1.5 m/s以上、風量25 m^3/min を保っている。

花嶋が生ごみを用いて実施した実験では準好気性埋立の空気流入量の最大値は廃棄物1 m^3 あたり1.5 l/min であった²⁾。本埋立地には生ごみは埋立処分されていないが2014年時点の埋立廃棄物量で空気量を除してみると0.07 $\text{l}/\text{min}/\text{m}^3$ となる。これは実験値

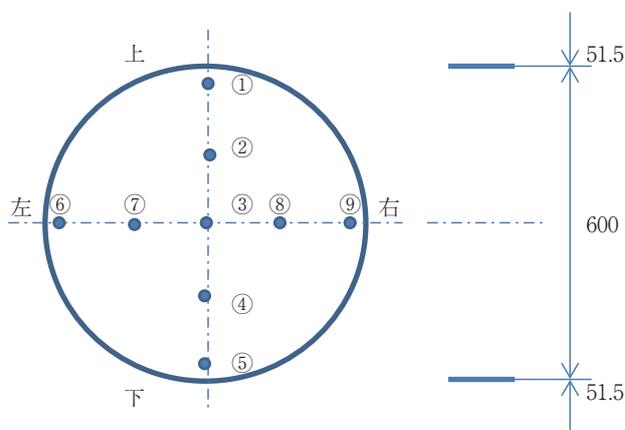


図1 集水管風量測定位置

表1 集水管風量測定結果

(単位：m/s)

位置 測定回数	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	平均	風量	
											m ³ /min	m ³ /h
2011年8月	1.15	0.85	0.61	1.05	0.59	0.71	0.70	0.70	0.65	0.78	13.2	792
2011年12月①	1.05	0.40	0.60	0.20	0.30	0.20	0.80	0.40	0.60	0.51	8.6	514
2011年12月②	0.60	0.70	0.70	0.60	0.10	0.40	0.70	0.60	0.40	0.53	9.0	543
2011年12月③	0.80	0.90	0.90	0.90	0.30	0.50	0.90	0.80	0.80	0.76	12.8	769
2012年3月①	1.25	1.40	1.55	1.10	1.65	1.05	1.20	1.45	1.10	1.31	22.1	1328
2012年3月②	1.40	1.51	1.32	0.95	0.63	0.78	1.47	1.20	0.80	1.12	19.0	1137
2012年11月	1.30	1.45	1.75	1.20	0.60	1.25	1.40	1.70	1.25	1.32	22.4	1345
2014年2月	1.30	1.20	1.50	1.10	0.90	1.20	1.40	1.30	1.00	1.21	20.5	1232
2014年12月①	1.82	2.40	1.90	1.60	0.90	1.25	2.10	2.30	0.80	1.67	28.4	1704
2014年12月②	1.60	1.80	1.80	1.50	1.20	1.55	1.80	1.70	1.30	1.58	26.8	1611
平均	1.23	1.26	1.26	1.02	0.72	0.89	1.25	1.22	0.87	1.08	18.3	1098



写真3 集水管清掃前



写真4 集水管土砂排除後

の約5%であるが、埋立廃棄物の質（熱灼減量）から考えて準好気性埋立構造は十分に機能しているものと推察される。

(2) 管内観察および土砂清掃

準好気性埋立構造を維持する心臓部である集水管の目詰まりや通気状況を確認するため集水管内にカメラを入れ、観察した。

その結果、管内の通水、通気断面は確保されていたが一部底部には土砂が堆積したり、カルシウムスケールの付着および集水管有孔管の閉塞が確認された（写真3）。このため高圧水を用いて管内洗浄を行った。洗浄は事前に高圧水による実験を行い、ポリエチレン管を破壊しない圧力として20 MPa、洗浄ノズルについては幹線φ600 mmの洗浄にはφ100 mmとφ60 mmを枝線φ150 mmについてはφ30 mm

を用いた。写真4に管内洗浄後の写真を示した。

管内洗浄により集水管底部に堆積していた土砂、管壁に付着していたスケール状物質をほぼ除去することができた。

有孔部を塞いでいた土砂、スケールも除去でき、通気、通水断面を確保することができた。なお洗浄した土砂およびスケールはサンドポンプにより排除、埋立処分した。

4. むすびと今後の課題

今回、シートキャッピングを行った最終処分場の準好気性機能評価を行った。その結果、時間換算で約1500 m³の空気が集水管から供給されていることが判った。この数値の評価は今後の課題であるが少なくとも本処分場はシートキャッピングにより埋立表面の雨水が排除され通気、通水機能は良好に機能

していると判断できる。また準好気性を機能させるための心臓部でもある集水管は徐々に土砂等が堆積し、通気機能を阻害していくことが明らかになった。このため定期的な管内清掃は、準好気性機能を正常に保つために必要な要件である。そのためには設計時に集水管のモニタリングならびに清掃が可能になるような配慮も必要である。

さらにシートキャッピングによる埋立層の嫌気化が懸念されたが、好気状態による浸出水集水管の通気機能と埋立ガス排除のためのガス抜き管によりキャッピング部分の嫌気化は回避されていた。降水量の多い、本地域においてはむしろキャッピングをしない区域から硫化水素の発生が認められた。これ

は、降水により、埋立層表面が飽和状態となり、嫌気化し、硫化水素ガスが発生したものと推察される。これについても別途データを集積している。

今後、集水管から吸気された空気の拡散状況を確認するため煙による拡散状況確認およびガス抜き管出口のガス量測定によりガス抜き管制御による層内空気量コントロールの可能性についても調査、検討を進める。

[参考文献]

- 1) 樋口壯太郎ほか：準好気性埋立処分場の機能検査と評価事例，第26回廃棄物資源循環学会研究発表会講演原稿2015，P465-466
- 2) 花嶋正孝：廃棄物の好気性埋立に関する研究，九州大学学位論文，P90（1985）

流動床式ガス化溶融炉における廃熱ボイラ過熱器の耐用状況

The Condition for Waste Heat Boiler in Fluidized Bed Gasification and Melting Furnace



道田直貴*
Naoki Michida



浅井亮一*
Ryoichi Asai
技術士（機械部門）



樋口 豪*
Go Higuchi



山形成生*
Naruo Yamagata
技術士（衛生工学）

ごみ発電の高効率化が推進されており、廃熱ボイラの蒸気条件として4 MPa×400℃が標準的になりつつある。一方で、ライフサイクルコスト（LCC）の低減には、過熱器（SH）管の長寿命化が必要不可欠である。当社では、蒸気温度400℃クラスの流動床式ガス化溶融炉においてSH管の減肉状況を5年間にわたって調査し、ほとんど減肉が見られない結果が得られた。

With Power generation by waste trending towards, 4 MPa×400℃ is becoming the standard in steam conditions of waste heat boilers. However, parallel to this, it is necessary to extend the life time of superheater tubes in the interest of reducing life cycle costs. We have investigated thickness reduction in 400℃ class superheater tubes of a fluidized bed gasification and melting furnace for five years, and observed hardly any reduction. This paper reports that work.

Key Words :

ごみ発電
流動床式ガス化溶融炉
廃熱ボイラ
過熱器管
高温腐食

Waste to Energy
Fluidized Bed Gasification and Melting Furnace
Waste Heat Boiler
Superheater Tube
High Temperature Corrosion

【セールスポイント】

- ・ 4 MPa×400℃クラスにおいて、5年以上経過後もSH管にほとんど減肉がないことが確認できた。
- ・ この結果から、流動床式ガス化溶融炉は、高効率ごみ発電とLCC削減が両立できる環境性と経済性に優れた設備と言える。

まえがき

ごみ発電用ボイラの蒸気条件は、高温腐食による過熱器管の激しい減肉を避けるため、長期にわたり蒸気温度300℃以下が採用されていた。高温腐食は、燃焼ガスに含まれる酸性ガスや塩類によるものであることが知られており、とくに管壁温度320℃以上で炭素鋼の腐食が急激に増加するとされている¹⁾。

これは、付着灰に起因する溶融塩腐食が原因であると考えられ、ごみ焼却灰は特有の塩化物共晶系化合物を含み、それらが低融点であることから、低温領域でも深刻な溶融塩腐食に繋がる²⁾。

しかしながら、循環型社会形成推進基本法（平成12年）において、有用な廃棄物は循環資源と定義されたこと、また、CO₂排出量削減の観点から、ごみ

発電の高効率化に対する社会的ニーズが高まり、蒸気条件の高温高压化に係る種々の研究・開発が推進され、現在では4 MPa × 400 °Cが標準的に採用されるようになった。

当社はこれまで、蒸気温度400 °Cの流動床式ガス化溶融炉を2施設（川越市資源化センター（以下、川越と記す）、相模原市南清掃工場（以下、相模原と記す））納入した。これら2施設においてSH管（材質：ステンレス鋼）の耐用状況を調査した結果、5年間以上にわたる運転後においても、ほとんど減肉が見られないことが確認できた。

また、平成26年に竣工した同炉形式施設（芳賀地区エコステーション（以下、芳賀と記す））において、発電効率の向上とLCCの低減を両立すべく、蒸気温度350 °CにおいてSH管の炭素鋼採用に踏み切った。竣工後1年以上が経過するが、減肉は認められていない。

本論文においては、これらの施設における耐用状況について報告する。

1. 調査施設の概要

プラントの施設仕様について表1に示す。川越向け、および相模原向けボイラの計画においては、燃焼ガス温度650 °C以下の腐食環境が緩和された位置にSHを配置した上で、エロージョン・コロージョンのリスク低減のため、ガス流速は5 m/sec以下に抑える設計とした。芳賀向けボイラでは炭素鋼を採用するにあたり、川越や相模原と比較し、燃焼ガス温度がより低い環境にSHを配置する計画とした。

実機に本設されている計測器より、燃焼ガス温度、蒸気温度のトレンドデータ（SH関連部分を抜粋）と、そのデータから推算されるボイラ運転状況（代表的な運転状態における燃焼ガスおよび蒸気の温度バランス）を示す。なお、運転状況推算に際し

ては、信頼性が高い蒸気側の運転データに基づく算出結果を優先した。故に、燃焼ガス側では、運転データと運転状況推算値に差異があることに注意されたい。これは熱電対測定値の不確かさによるものと思われ、運転状況推算値の方が実際温度に近い値であると考えている³⁾。

加えて、ボイラ全体外形とSH管の肉厚測定位置を表したボイラ設備の概要図をそれぞれ施設毎に示す。

1) 川越市資源化センター

実機の燃焼ガス温度、蒸気温度のトレンドデータを図1に示す。1SH出口燃焼ガス温度は、±15 °C程度の変動が見られるものの、3SH出口蒸気温度（ボイラ主蒸気温度）は、400 °Cで安定していることが分かる。このトレンドデータより推定したボイラ運転状況を図2に示す。燃焼ガス温度、蒸気温度は比較的設計に近い運転である。ボイラ設備の概要図を図3に示す。測定点は前面、後面各4点で、それぞれ周方向に4点測定しており、合計で32点である。

2) 相模原市南清掃工場

実機の燃焼ガス温度、蒸気温度のトレンドデータを図4に示す。3SH入口燃焼ガス温度に±50 °C程度の変動が見られるが、3SH出口蒸気温度（ボイラ主蒸気温度）は、400 °Cで安定していることが分かる。なお、上述の燃焼ガス温度の変動周期は、スートブロワの灰落とし周期と一致しているため、スートブロワに伴い第1蒸発器の蒸発管の汚れが除去され、蒸発管での熱回収量が増加したためと考えられる。このトレンドデータより推定したボイラ運転状況を図5に示す。設計と比べ、燃焼ガス温度は低め、蒸気温度は同等の運転である。ボイラ設備の概要図を図6に示す。測定点は上面、下面各9点で、それぞれ周方向に4点測定しており、合計で72点である。

表1 施設仕様

		川越市資源化センター	相模原市南清掃工場	芳賀地区エコステーション
施設概要	処理能力	132.5 t/d × 2 炉	175 t/d × 3 炉	71.5 t/d × 2 炉
	発電能力（定格）	4 000 kW	10 000 kW	1 970 kW
	竣工年 炉形式	平成22年3月 流動床式ガス化溶融炉	平成22年3月 流動床式ガス化溶融炉	平成26年3月 流動床式ガス化溶融炉
ボイラ仕様	ボイラ煙道形式	水平煙道型	垂直煙道型	水平煙道型
	蒸気条件	4 MPa × 400 °C	3.92 MPa × 400 °C	4 MPa × 350 °C
	最大蒸発量	18.65 t/h	30.0 t/h	8.9 t/h
	過熱器材質	SUS310STB/STB340	SUS310STB/STB340	SA192（STB340相当）
	過熱器管寸法 灰落とし装置	φ42.7 × t4.5 ラッピング	φ42.7 × t4.5 スートブロワ	φ38.1 × t5.5 ラッピング

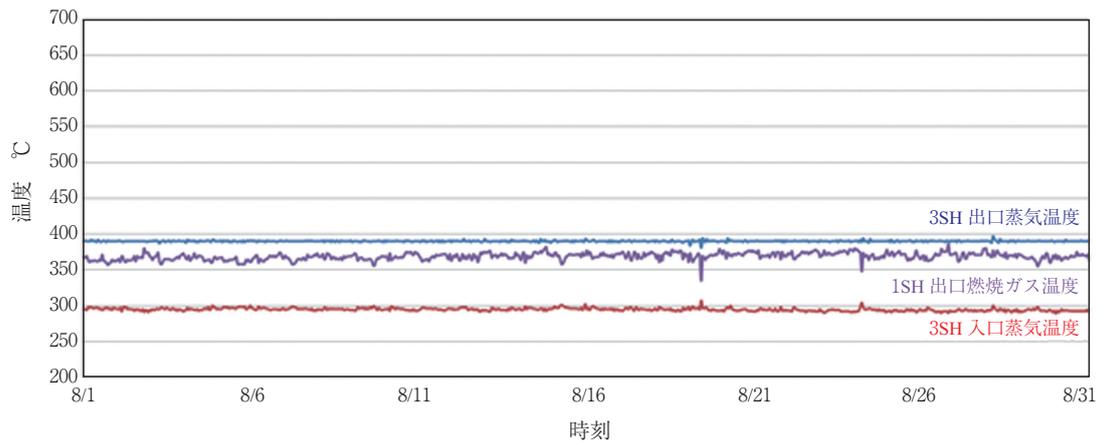


図1 燃焼ガス温度, 蒸気温度のトレンドデータ (川越)

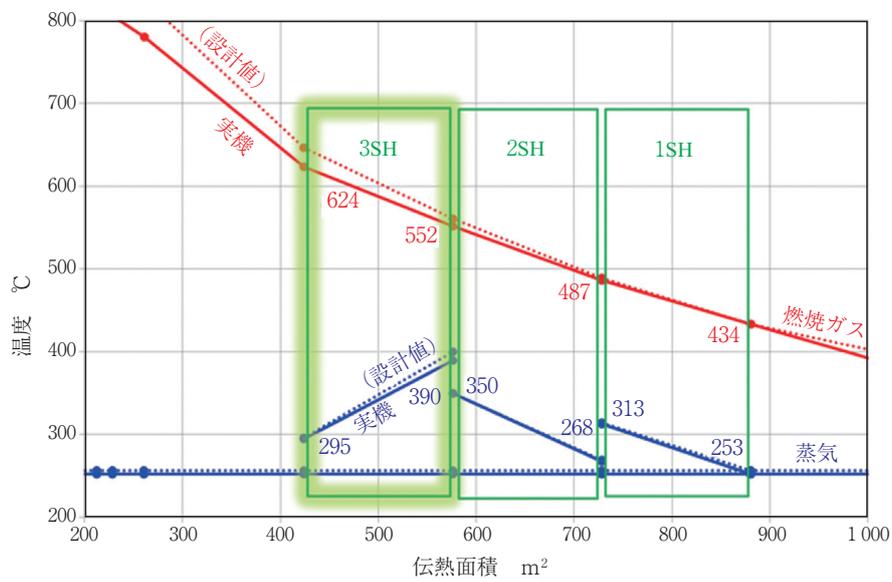


図2 ボイラ運転状況 (川越)

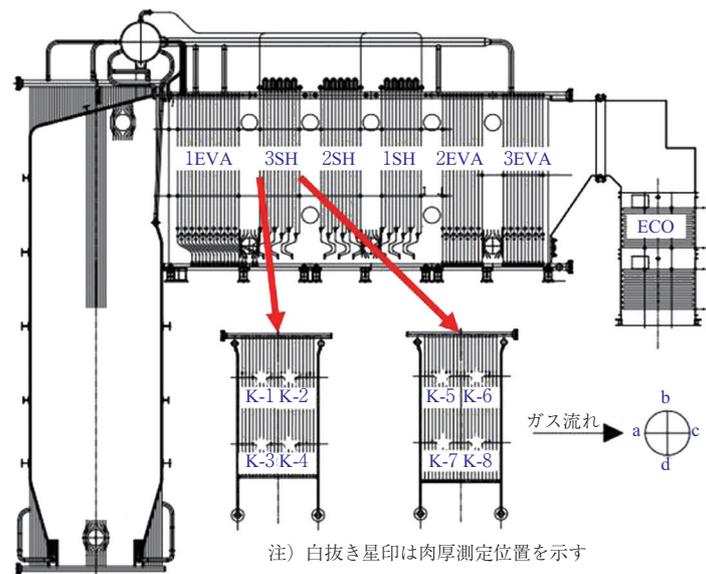


図3 ボイラ設備の概要図 (川越)

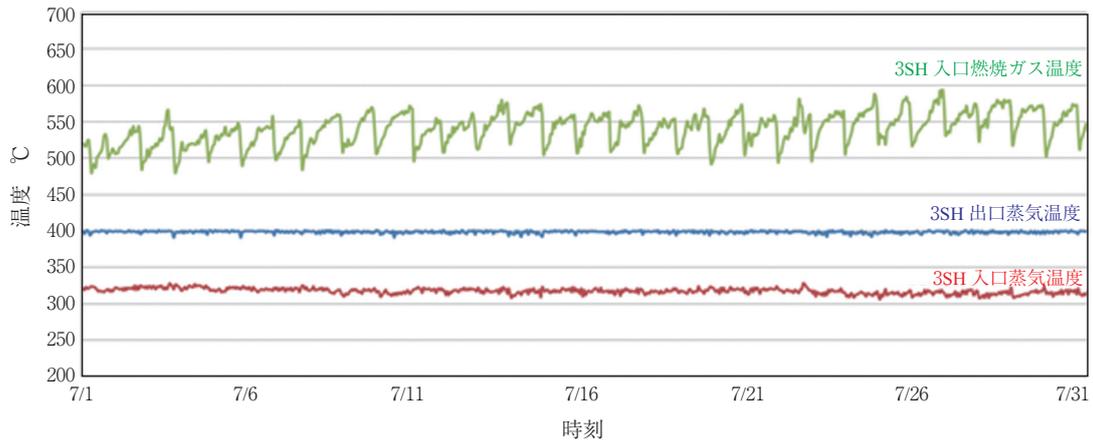


図4 燃焼ガス温度、蒸気温度のトレンドデータ (相模原)

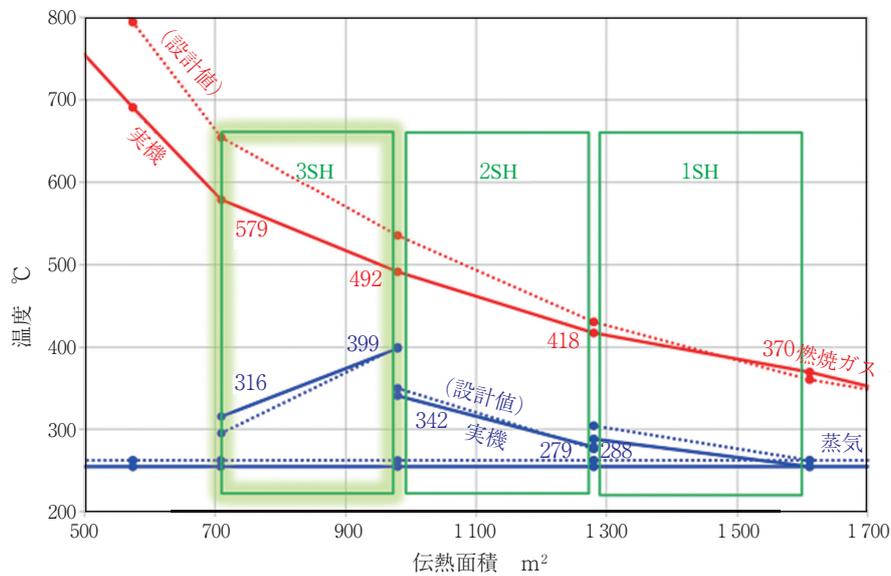


図5 ボイラ運転状況 (相模原)

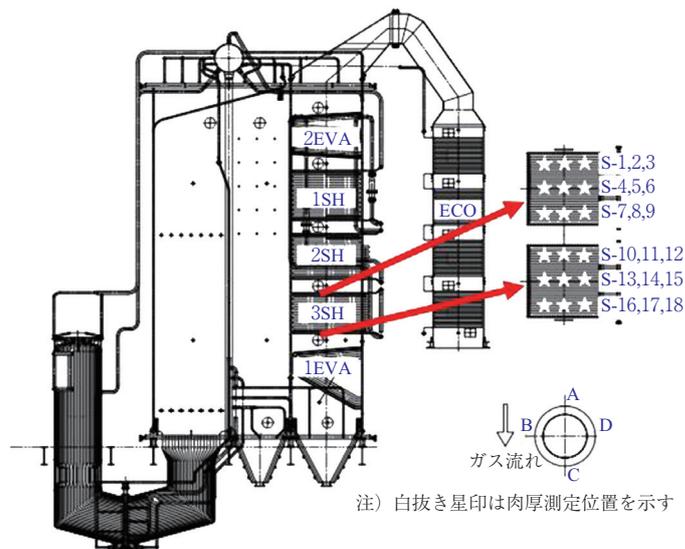


図6 ボイラ設備の概要図 (相模原)

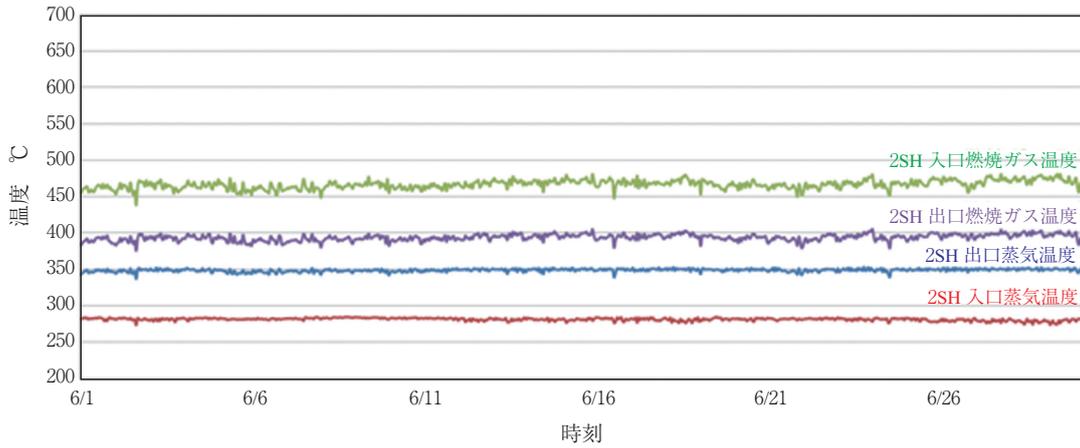


図7 燃焼ガス温度, 蒸気温度のトレンドデータ (芳賀)

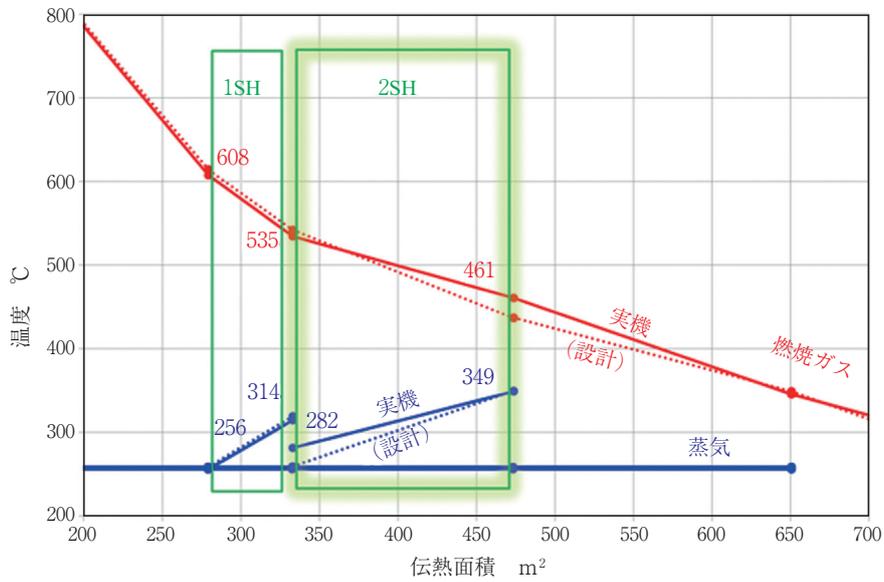


図8 ボイラ運転状況 (芳賀)

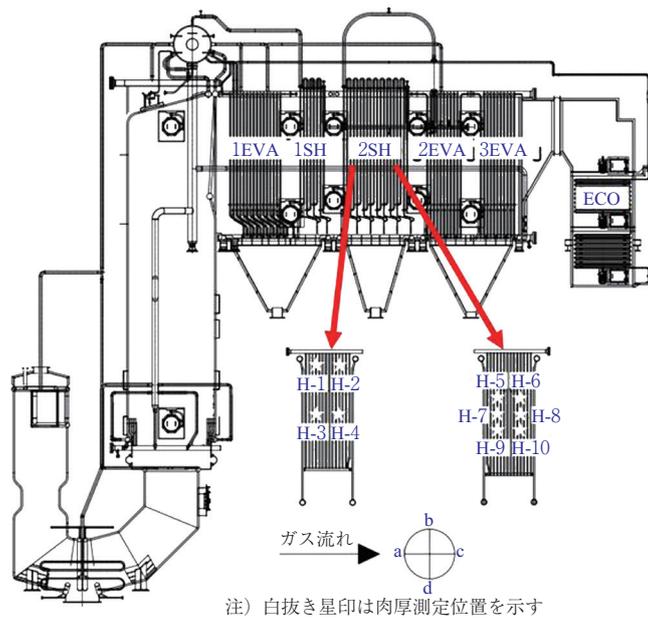


図9 ボイラ設備の概要図 (芳賀)

3) 芳賀地区エコステーション

実機の燃焼ガス温度、蒸気温度のトレンドデータを図7に示す。2SH入口および出口燃焼ガス温度は、±15℃程度の変動が見られるものの、2SH出口蒸気温度（ボイラ主蒸気温度）は、350℃で安定していることが分かる。このトレンドデータより推定したボイラ運転状況を図8に示す。燃焼ガス温度・蒸気温度共に設計同等の運転である。ボイラ設備の概要図を図9に示す。測定点は前面4点、後面6点、それぞれ周方向に3点測定（ガス流れ裏側は測定していない）しているため、合計で30点である。

4) まとめ

3施設の最終段のSH入口、出口の燃焼ガスおよび管表面温度を腐食線図にプロットしたものが、図10である。温度変動も加味すると、川越、相模原ではSH入口側で腐食進行領域に差掛かる部分があり、過酷な環境下におかれていることが分かる。一方、芳賀は当該領域から離れており、腐食環境が緩和された状況下であると考えられる。

2. 調査結果

以下に各施設の最終段のSHにおける肉厚測定データを示す。川越、相模原については各測定点の周方向の中で最も減肉が大きい部位を抽出した。芳賀は竣工後1年目のデータのためのため、測定値を表

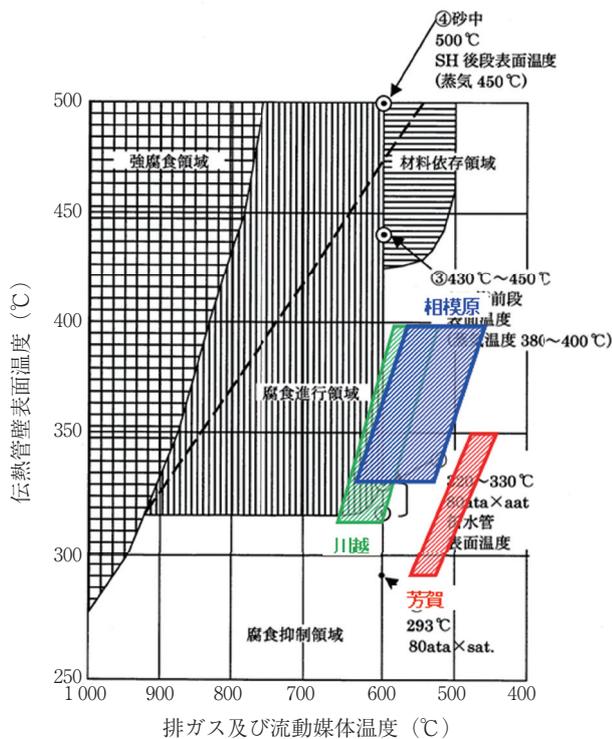


図10 腐食温度域表

出典：新エネルギー・産業技術総合開発機構：廃棄物発電導入マニュアル（改訂版）から図内に重ね合わせた

にまとめた。

1) 川越市資源化センター

3SH 前面、後面の肉厚の経年変化を図11、図12に示す。各測定点での肉厚の変化量（最大減肉量）は0.1 mm/年程度であり、減肉は見られない。写真1に3SHの写真を示す。

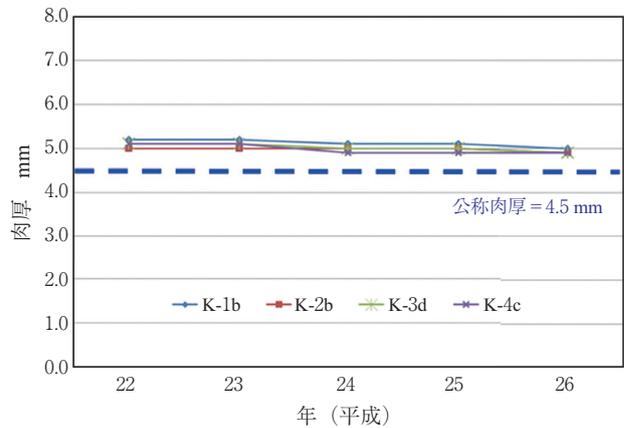


図11 3SH 前面の肉厚の経年変化（川越）

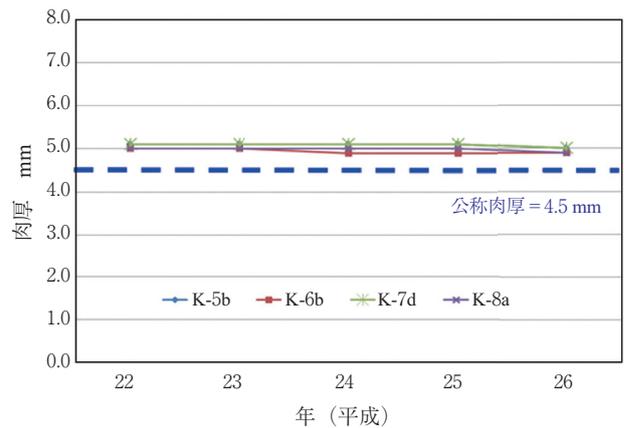


図12 3SH 後面の肉厚の経年変化（川越）

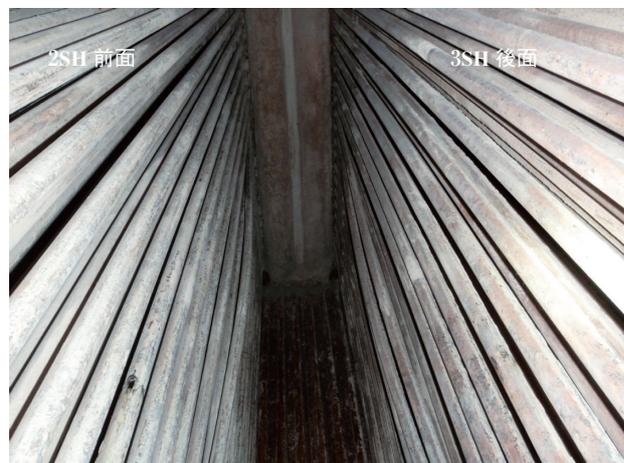


写真1 3SH の状況（川越）

2) 相模原市南清掃工場

3SH 上面, 下面の肉厚の経年変化を図13, 図14に示す。ほとんど減肉していない部位が見られる一方, 減肉量0.4~1.0 mm/年程度と大きく減肉している部位がある。減肉が大きい部位は, S-2C, S-5C, S-8C, S-17A の4点で全てSH 上面中央または下面中央に限定される。これら以外の方向では減肉があまり見られないことから, この4点の減肉はSH の

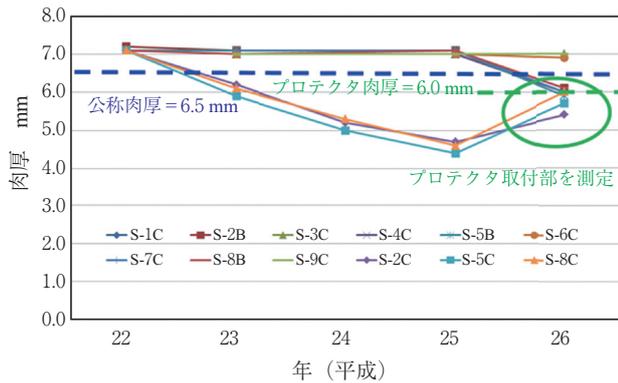


図13 3SH 上面の肉厚の経年変化 (相模原)

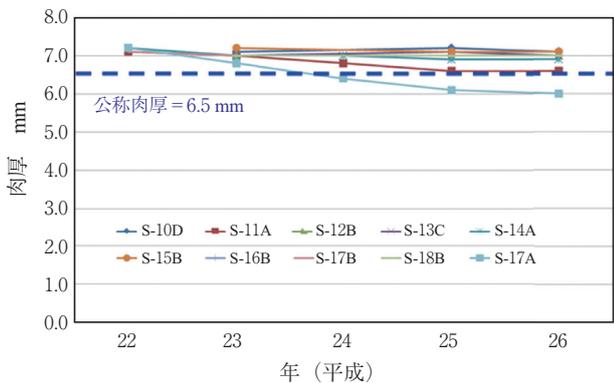


図14 3SH 下面の肉厚の経年変化 (相模原)

中央直上, 直下にあるスートブロワのドレンカットによる影響と考えられる。スートブロワに起因する減肉は当初から想定しており, 6.5 mm の厚肉管を採用していたが, 3SH 上面については減肉速度が当初予想を上回っていることから, プロテクタによる保護がLCC の低減の面から有利と判断し, 平成25年にプロテクタを設置した。以降はプロテクタの肉厚を経過観察中である。写真2に3SH 写真を示す。

3) 芳賀地区エコステーション

表2に竣工後1年経過の肉厚測定結果を示す。公称肉厚5.5 mm に対して, 最小肉厚部でも5.9 mm の残厚があり, 減肉は認められていない。また, 写真3に2SH の写真を示す。

4) まとめ

- (1) 4 MPa × 400 °C ボイラ (川越, 相模原) のSH 管 (材質: ステンレス鋼) は5年経過時, ほぼ減肉が見られていない。図10において, 川越,



写真2 3SH の状況 (相模原)

表2 2SH 前面および2SH 後面の肉厚測定結果 (芳賀)

	H-1			H-2			H-3			H-4		
	a	b	d	a	b	d	a	b	d	a	b	d
1系	6.0	6.1	6.1	6.1	6.1	6.2	6.2	6.4	6.1	6.2	6.2	6.2
2系	6.5	6.1	6.2	6.4	6.4	6.4	6.3	6.1	6.2	6.3	6.1	6.1

	H-5			H-6			H-7			H-8			H-9			H-10		
	b	c	d	b	c	d	b	c	d	b	c	d	b	c	d	b	c	d
1系	6.2	6.2	6.2	6.0	6.1	6.2	6.2	6.4	6.4	6.1	6.1	6.2	6.4	6.4	6.4	5.9	5.9	6.0
2系	6.2	6.5	6.4	6.7	6.6	6.6	6.1	6.5	6.4	6.7	6.6	6.7	6.1	6.4	6.3	6.6	6.6	6.5



写真3 2SHの状況（芳賀）

相模原ともSH入口側で腐食進行領域に差掛かる部分があり、過酷な環境下におかれているにもかかわらず、SH管にほとんど減肉が見られていないことから、流動床式ガス化溶融炉は高温腐食に強く、さらなる高温高圧化に有利であると思われる。

(2) 4 MPa × 350 °CボイラのSH管（材質：炭素鋼）は1年経過時、大きな減肉は認められていない。350 °Cクラスであれば、SH管配置の最適化により炭素鋼においても、大きな補修は必要ないものと思われる。

むすび

今回の結果から、4 MPa × 400 °Cクラスの蒸気条件においてSH管材質と配置の最適化により、長期にわたって大規模な補修や更新を必要としない目処が得られた。また、流動床式ガス化溶融炉は高温高圧化による発電効率の向上とSH管の長寿命化を両立でき、LCCの低減に貢献できると考えられる。これを礎に、当社は既に高温高圧化への取組みをスタートしており、さらなる発電の高効率化が期待できる。

[参考文献]

- 1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：廃棄物発電導入マニュアル（改訂版）【資料編】 pp.105-124
- 2) 吉葉正行：高温学会誌 第28巻 第5号（2002年9月） pp.188-201
- 3) 持田武信：廃棄物処理における熱利用②（ボイラー）フォーラム環境塾（2001年5月） pp.38

廃棄物ガス化改質発電プロセスの開発

Development of Gasification and Reforming Process of Waste for Electricity Generation



早川 諒*
Ryo Hayakawa



皆川公司*
Koji Minakawa



細田博之*
Hiroyuki Hosoda

小規模でも高い発電効率を確保できるガスエンジンを利用した高効率な廃棄物ガス化発電プロセスの実証を目的とし、まずは比較的発熱量が高い廃棄物を対象に、100 t/d ~200 t/d 規模で送電端効率27%を目標とするプロセスの検討を行った。技術検討の結果、酸素・水蒸気および空気を適切に利用したガス化プロセスにおいて、ガスエンジンの安定稼働とプロセス全体の送電端効率27%が両立する目途を得た。

Kobelco Eco-Solutions has developed a new and innovative gasification process to produce energy from waste. Based on our test results, we designed a gasification and reforming process that uses a mixture of O₂, steam and air. It was suitable to satisfy gas engine requirements and obtain a high net electrical efficiency. A feasibility study was carried out on an industrial scale (100 ton/day), and the net electrical efficiency was estimated to be 27%.

Key Words :

廃棄物発電
流動層
ガス化
改質
ガスエンジン

Waste to energy
Fluidized bed
Gasification
Reforming
Gas engine

【セールスポイント】

欧州および国内でニーズが高まっているバイオマスおよび廃棄物の高効率ガス化発電プロセスを提供する。

まえがき

地球温暖化対策としての二酸化炭素削減、ならびにエネルギー源の多様化の要請により、廃棄物等からのエネルギー回収が求められており、とくに高効率な発電技術が重要となっている。しかしながら、日本国内においては、たとえば一般廃棄物は年間約34百万トンが熱回収処理（焼却処理）の対象になっているが、20%を超える発電効率の施設は主に300 t/d以上の規模であり、大都市のみにしか立地して

いない。

廃棄物は地域で集積し地域で処理する方が収集運搬費用が少なく効率的であり、小型・分散型でも高い発電効率を得られるプロセスの開発・実用化が望まれている。一方で、廃棄物処理施設における発電プロセスの多くは、廃棄物を焼却した際に発生する熱で蒸気を発生させ、その蒸気を蒸気タービンに供給して発電する方法が採用されている。蒸気タービンは規模が小さくなるにつれて発電効率が低下する

という特性を持ち合わせており、小規模で高い発電効率を達成することは難しい。

蒸気タービン以外の発電方式にガスタービンやガスエンジンがある。ガスエンジンは、小型でも比較的発電効率が低下しにくいという特性をもつため、ガスエンジンが適用できれば小規模施設での発電効率の向上に寄与できるものである。施設規模が大きい場合はガスタービンの選択肢もあるが、規模が小さい場合はガスエンジンの方が高い発電効率を得られる。よって、ごみ処理量100~200 t/d 規模を想定した場合は複数台のガスエンジン併設が発電効率の面で優位であると判断できる。

以上を踏まえ、本開発では、まずは発熱量が比較的高い(4000~5000 kcal/kg) 廃棄物をガス化改質して得た合成ガス(Synthesis gas, 以下、単にSYNGASとする)を利用して、小規模でも高い発電効率を確保できるガスエンジンを利用した高効率発電プロセスを実証することを目的とし、発電効率は、100 t/d ~ 200 t/d 規模で、送電端効率27%を目標とした。

1. ガス化改質によるガスエンジン発電について

本開発が想定している廃棄物ガス化発電プロセスのフローを図1に示す。廃棄物もしくはバイオマスを送入し流動床式ガス化炉へ供給しガス化した後、後段の改質炉にて生成ガス中のタールを改質する。その後ボイラによる熱回収、ガス処理を行い、ガスエンジンに適したSYNGASをガスエンジンに供給し発電を行うことで、従来のボイラタービン発電プロセスより高効率な発電を実現するものである。

本プロセスのキーポイントは、いかにガスエンジンを安定稼働させるかである。ガスエンジンを安定稼働させるためには、求められるSYNGASの性状に以下の大きな制約がある。

- ① ガスエンジンを稼働させるために最低限必要なガス発熱量以上である必要がある。
- ② ガスエンジンの前処理部でのトラブルを避けるために、許容されるタール濃度がある。

③ エンジンオイルの汚染や機器の腐食を避けるための制限値がある。

これらの制約条件をクリアするために、プロセス側で必要な対策を取る必要がある。

ガスエンジン稼働に必要なガス発熱量については、ガスエンジンメーカー数社から得られた情報をもとに、4.6 MJ/m³_N以上を目標値とし、それを満足するための改質方法およびガス処理プロセスを選定することとした。

タール低減のための主な方法としては、高温改質と触媒等を活用した低温改質が挙げられる。今回は、処理対象物として廃棄物を想定しているため、触媒等を活用した低温触媒の採用においては、様々な微量物質による触媒被毒の懸念があること、また、ガス中に含まれるダストが多いため触媒前でダストを除去する必要があるが、タールやチャーを含んだガスを高温でろ過することに高いハードルがあること、などから低温改質についてはまだ研究が必要な段階であると判断し、高温改質を選択した。

高温改質においても幾つか方法が考えられるが、今回は表1に示すプラズマ改質と酸素・水蒸気改質の2つの方法を検討し、その性能を確認した。

2. 試験結果

本開発では大きくわけて下記3つの事項を確認するために、試験およびプロセスの検討を行った。

① ガス化改質試験

ガス化改質プロセスの最適化のために、プラズマ改質、および酸素・水蒸気改質の2通りの改質方法を検討した。プラズマ改質はフランスの実証設備において、空気ガス化とプラズマ改質の組合せによるガスエンジン発電の適用性について検討した。酸素・水蒸気改質は当社の試験設備において、酸素・水蒸気および空気を組合せたガス化改質によるガスエンジン発電の適用性について検討した。

② ガスエンジンの動作確認試験

ガス化改質試験の結果に基づいて模擬したSYNGAS(以下、模擬ガス)により、実際にガスエ

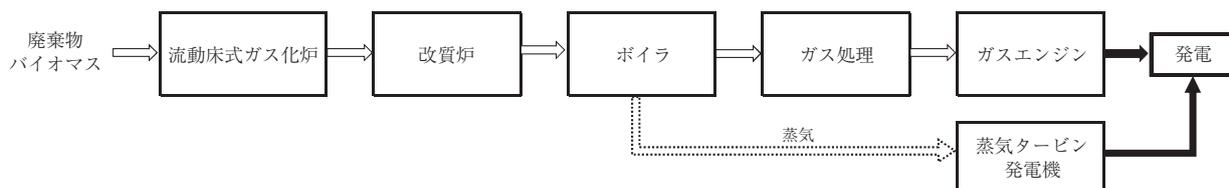


図1 想定フロー

表1 各改質方法の概要

改質方法	プラズマ改質	酸素・水蒸気改質
原理	・発電した電力でプラズマを発生させ改質炉の温度を上げる。	・酸素ガスによる燃焼熱で改質炉の温度を上げる。
メリット	・燃焼熱によらずプラズマの熱で温度を上げるため、ガス発熱量の低下が抑制される。	・酸素と水蒸気のバランスを変えてガスの発熱量を調整できる。 ・水蒸気によるチャーの改質も期待できる。
デメリット	・発電した電力を使用する。	・酸素および水蒸気を発生するためにエネルギーを使う。

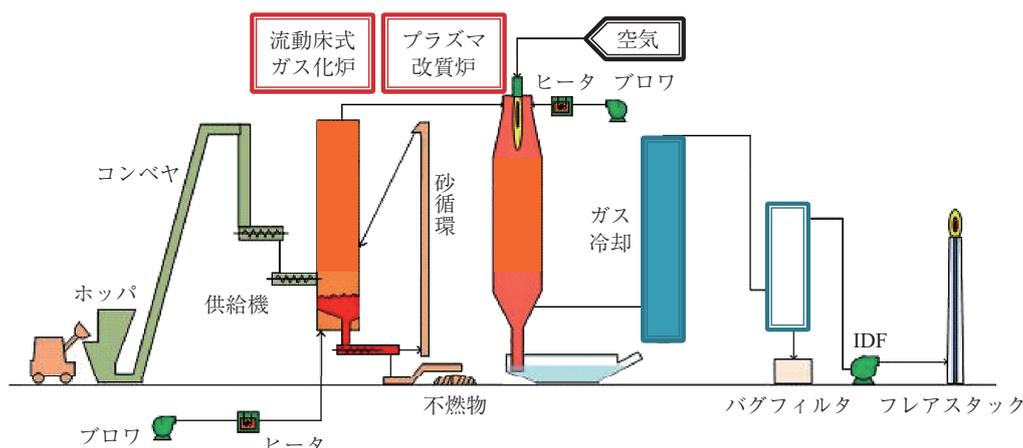


図2 実証設備プロセスフロー図

ンジンが稼働すること、および所定の性能が発揮されることを確認するための試験を行った。

③ ガス処理プロセスの最適化

ガスエンジンで安定して発電するためには、ガス中に含まれる各種微量成分を除去する必要がある。ガスエンジンメーカーからの情報をもとに、ガス処理プロセスにて対応すべき項目として抽出し、最適なガス処理プロセスを検討した。

2.1 ガス化改質試験

2.1.1 設備概要

1) プラズマ改質試験設備

実証設備のプロセスフローを図2に、設備の概要を表2、外観を写真1に示す。設備は、前処理された試料を重機で供給し、ガス化改質するものである。ガス処理としてはバグフィルタが設置されており、そこで灰や生成されたすすなどを除去後、SYNGASを燃焼処理する方式となっている。試験用の試料としては木質チップおよびRDF（木質、紙、プラのフラフ）を対象とした。

実証試験で使用した試料の組成および外観を表3に示す。

表2 実証設備の概要

定格能力	800 kg/hr
対象物 (試料)	・木質チップ ・RDF
ガス化方式	流動床式ガス化炉
改質方式	空気プラズマ方式
ガス冷却方式	間接熱交換方式
ガス処理方式	バグフィルタ



写真1 実証設備の外観

表3 木質チップ, RDF 分析結果

			木質チップ	RDF
三成分	可燃分	wet%	75.4~85.5	64.9~90.1
	水分	wet%	14.3~24.1	5.2~6.4
	灰分	wet%	0.2~0.5	3.5~29.9
元素組成	C	dry%	50.8~53.9	38.9~44.2
	H	dry%	5.7~7.1	5.5~6.1
	N	dry%	0.04~0.3未満	1.5~2.5
	S	mg/kg dry	72~822	1 376~7 500
	Cl	mg/kg dry	74~1 109	2 183~13 100
	O	dry%	37.9~43.0	21.6~42.6
低位発熱量	MJ/kg	wet base	13.0~16.1	16.3~17.0
	kcal/kg	wet base	3 100~3 850	3 900~4 060
物理組成	紙	wet%	—	8.5~14.5
	プラスチック	wet%	—	5.3~9.0
	木	wet%	—	77.3~81.5
	金属	wet%	—	0.1未満~2.2
	不燃物他	wet%	—	0.1未満~0.5
外観				

※ RDF：破碎，磁選，非鉄選別，風力選別処理されたもの

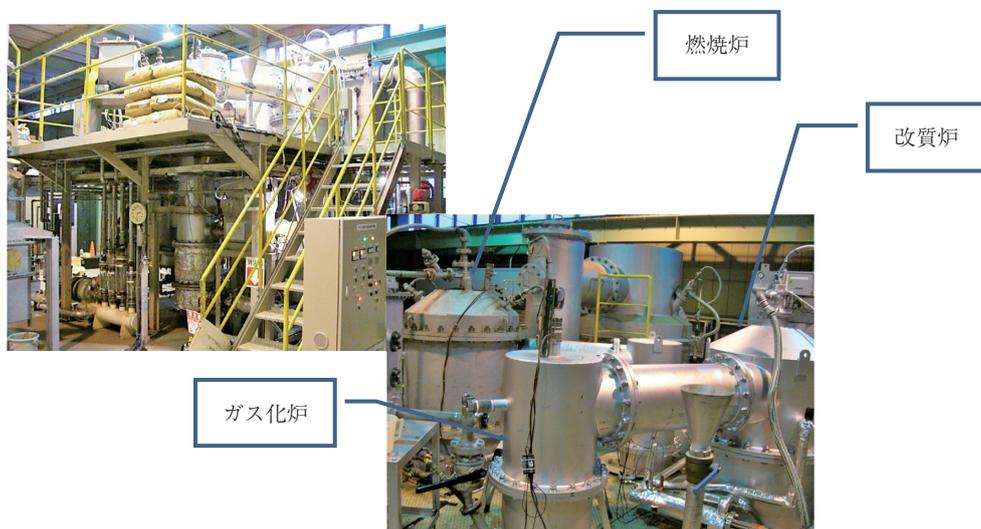


写真2 設備外観

2) 酸素・水蒸気ガス化改質試験設備

設備の外観を写真2に，設備フローを図3に示す。ガス化炉および改質炉に空気，酸素，水蒸気を供給できる構造となっている。ガス化剤である空気，酸素，水蒸気の供給は，酸素と不活性ガス（窒

素および水蒸気）の構成比率を一定として，①100%空気によるガス化，②空気と酸素・水蒸気を50%：50%（体積比）供給によるガス化，③酸素・水蒸気のみによるガス化，の3条件の試験を行った（図4）。空気でガス化すると空気に含まれる窒素に

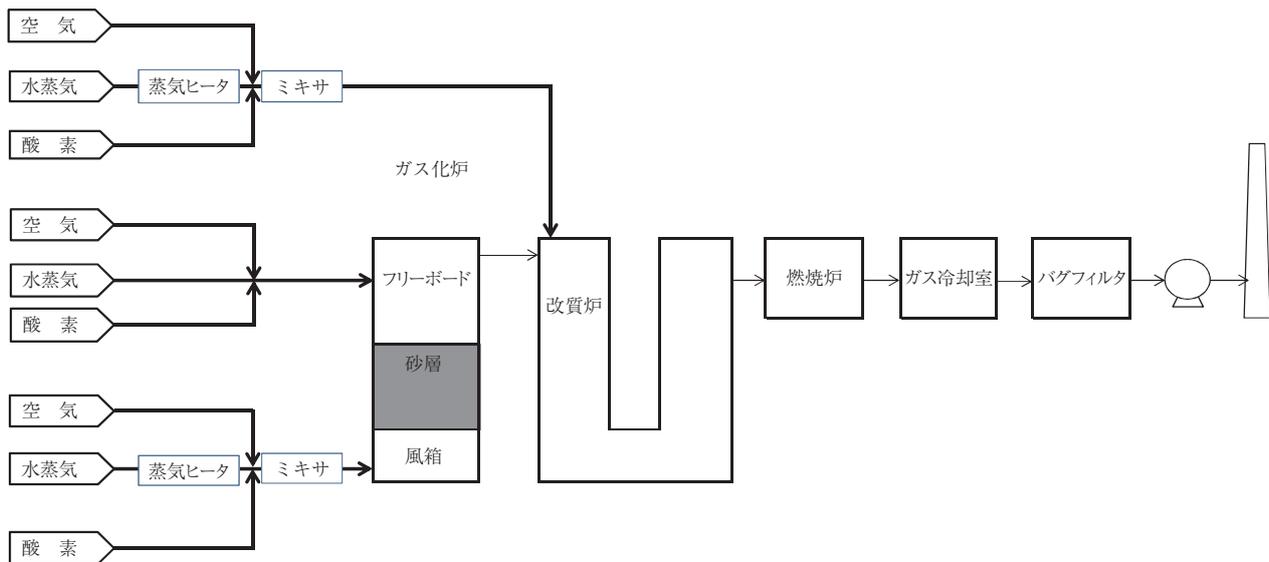


図3 設備フロー

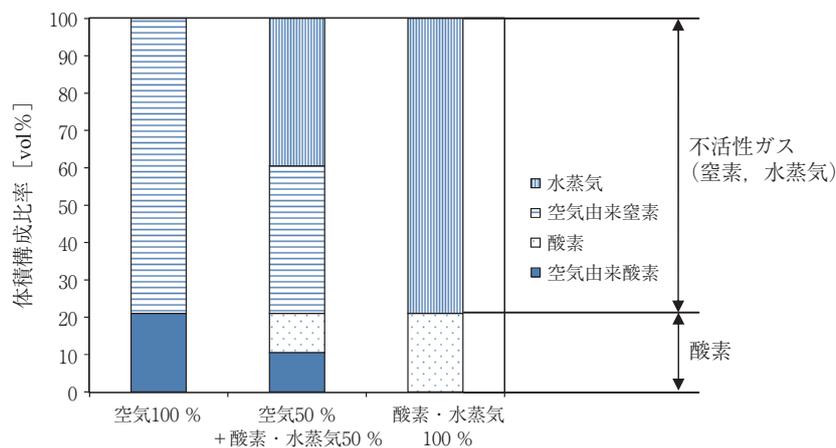


図4 空気ガス化と酸素・水蒸気ガス化におけるガス化剤の比較

よりガスの発熱量は低下する。酸素・水蒸気でガス化すると、SYNGAS中の窒素を減らせることからDryベースでのSYNGASの発熱量を高く維持でき、ガスエンジンへの適用性が高まる。

本試験においては、実ごみの発熱量や組成を踏まえて模擬ごみを作成し、試験を実施するものとした。今回の試験に使用した模擬ごみの組成を表4に示す。プラズマ改質試験で使用したRDF（フラフ）や建廃の発熱量はおおむね4 000～5 000 kcal/kgの範囲にあるため、模擬ごみの低位発熱量は4 400 kcal/kgとした。

2.1.2 試験結果

ガス分析で得られたSYNGAS組成および各成分の発熱量¹⁾から、単位流量あたりの発熱量を算出し

表4 使用した模擬ごみの組成

名称			模擬ごみ
三成分	可燃分	wet%	94.4
	水分	wet%	5.0
	灰分	wet%	0.6
元素組成	C	dry%	52.4
	H	dry%	6.2
	N	dry%	0.2
	S	dry%	0.1
	Cl	dry%	0.0
	O	dry%	40.7
低位発熱量	MJ/kg	wet base	18
	kcal/kg	wet base	4 400

た。タール（分析時に凝縮した成分、ベンゼン、トルエンを含む）濃度はガスサンプリングによる分析実測値²⁾から算出した。また、チャー濃度は、ガス化炉出口での等速吸引によるダストサンプリングが難しかったため、バランス計算から求めた値を使用している。

1) SYNGAS 発熱量

① 空気ガス化プラズマ改質試験

空気ガス化+プラズマ改質により得られた SYNGAS の発熱量の結果を図 5 に示す。ここで運転酸素比とは原料の完全燃焼に必要な酸素量に対して、どの程度の比率の酸素を供給したかを示す指標であり、ガス化剤に空気を使用した場合は空気比と同義である。

本結果より、運転酸素比を低くすることで SYNGAS 発熱量は増加することが確認できた。しかしながら、ガス化剤に空気のみを用いた運転では、ガスエンジンの要求下限値である $4.6 \text{ MJ/m}^3_{\text{N}}$ 以上の発熱量を得ることが難しいことが分かった。

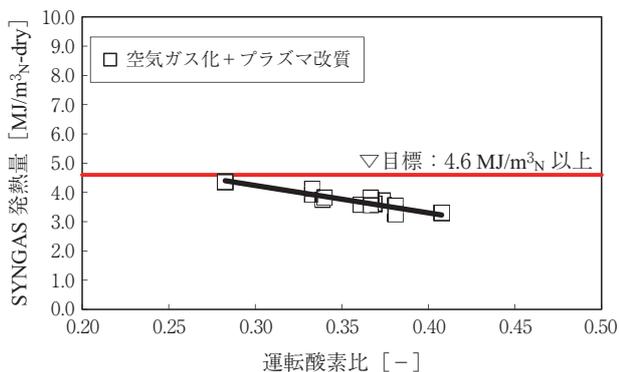


図 5 運転酸素比と SYNGAS 発熱量 (空気ガス化+プラズマ改質)

② 酸素・水蒸気、空気による流動ガス化改質試験
次に、SYNGAS の発熱量を高めることを目的に、酸素・水蒸気を用いたガス化改質を実施した。結果を図 6 に示す。ガス化剤に酸素と水蒸気を使用して生成ガス中の窒素濃度を低下させることで、Dry ベースでの生成ガスの発熱量を向上させることが可能であることが確認された。

しかし酸素と水蒸気の製造にはコストがかかるため、できる限りガス化剤に空気を使用し、補助的に酸素と水蒸気を使用することが望ましい。今回の試験より、ガス化剤中の空気の割合を 50 % 程度にすることでガスエンジンの要求下限値を満たすことが可能であることが分かった。

2) SYNGAS 中タール、チャー濃度

SYNGAS 中のタール濃度の結果を図 7 に示す。運転酸素比が高いほどタール濃度は低くなることが確認できた。

SYNGAS 中のチャー濃度の結果を図 8 に示す。チャー濃度も運転酸素比が高いほど低くなることが確認できた。

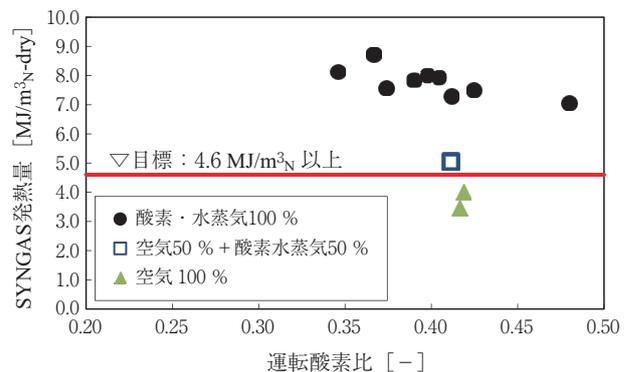


図 6 運転酸素比と SYNGAS 発熱量 (酸素・水蒸気、空気ガス化改質)

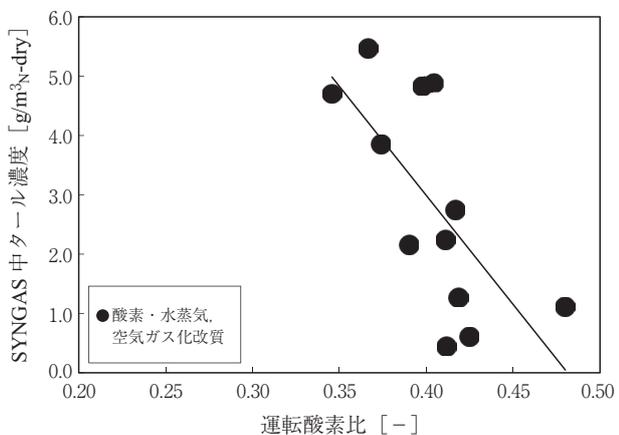


図 7 SYNGAS 中のタール濃度

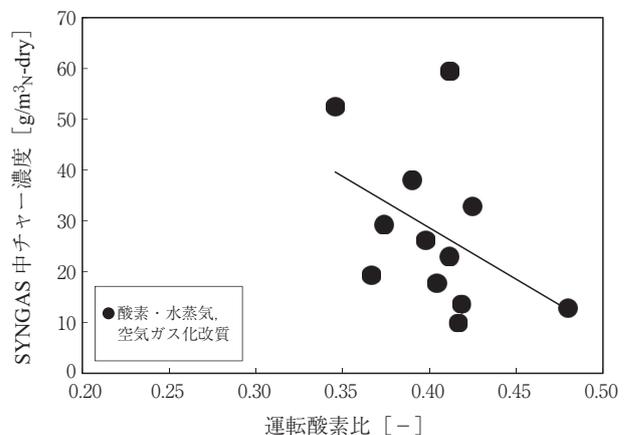


図 8 SYNGAS 中のチャー濃度

表5 模擬ガスの組成

	模擬ガス①	模擬ガス②	模擬ガス③	実証試験で得られたSYNGAS 組成範囲
CO	35 vol%	28 vol%	21 vol%	14~20 vol%
H ₂	35 vol%	28 vol%	21 vol%	17~31 vol%
CH ₄	5 vol%	4 vol%	3 vol%	3~8 vol%
不活性ガス	25 vol%	40 vol%	55 vol%	41~47 vol%
低位発熱量	10 MJ/m ³ _N	8 MJ/m ³ _N	6 MJ/m ³ _N	5~9 MJ/m ³ _N

表6 ガス処理プロセスにて対応する項目とガスエンジン要求値

	ガスエンジン要求値
チャー／ダスト	5 μm 以上の粒子は許容できない
タール	ベンゼン環 2rings < 1 000 mg/m ³ _N 3rings < 10 mg/m ³ _N > 3rings 許容できない
HCl	< 10 ppm
H ₂ S	< 300 ppm
NH ₃	< 10 ppm
Si	< 1.0 mg/m ³ _N
相対湿度	< 60 %

表7 実証試験 タール組成

合計タール濃度	mg/m ³ _{N-dry}	1 443	3 519	4 356
ベンゼン環 1ring	mg/m ³ _{N-dry}	1 439	2 859	3 588
2rings	mg/m ³ _{N-dry}	4	457	609
3rings	mg/m ³ _{N-dry}	0	118	113
4rings	mg/m ³ _{N-dry}	0	85	45
5rings	mg/m ³ _{N-dry}	0	1	0

2.2 ガスエンジンの動作確認試験

2.2.1 試験概要

模擬ガスによるガスエンジンの稼働および性能を確認するために、ガスエンジン試験を実施した。ガスエンジンは、MAN社の天然ガス用E0826E（1500 rpm，排熱6.9 L，定格75 kW）を使用した。模擬ガスは水素を多く含むため、燃焼室の形状を変えてテストした。

2.2.2 試験結果

所定の低位発熱量となるようCO，H₂，CH₄，CO₂，N₂を混合した模擬ガスを作成し，ガスエンジンが起動すること，およびその性能を確認した。検討に使

用した模擬ガスの組成を表5に示す。模擬ガスの組成は，ガスエンジンの性能・運転に大きな影響を与える水素濃度を実証試験の結果と同レベルにあわせ，その上でCOやCH₄等の可燃成分と不活性ガスの比率を調整することでガス発熱量をあわせた。

試験の結果，すべての模擬ガスにおいて安定した運転ができることを確認した。模擬ガスの発熱量によって発電効率に大きな差は生じなかった。なお，今回は模擬ガスによる小型エンジン（定格75 kW）での試験であったためガスエンジン自体の発電効率は27~31 %程度と低めの結果となった。実機規模のエンジン（~1 000 kWクラス）ではメーカーでの検討により，34.8 %程度の効率が得られる見込みである。

2.3 ガス処理プロセス

2.3.1 ガスエンジンからの要求値

ガスエンジンで安定して発電するためには，ガス中に含まれる各種微量成分を除去する必要がある。ガスエンジンメーカーからの情報をもとに，ガス処理プロセスにて対応すべき項目として表6の項目を抽出した。

2.3.2 ガス処理プロセスに導入するガス組成と処理プロセス検討

次に，実証試験の結果に基づき，ガス処理プロセスの設計条件を検討した。

1) チャー／ダスト

実証試験と同様に，バグフィルタによる除去を採用するものとした。

2) タール

実証試験におけるタール組成分析結果を表7に示す。タール濃度が低い場合はベンゼン環1 ringがほとんどであるが，タール濃度が3 000 mg/m³_{N-dry}程度になるとベンゼン環2 rings以上が増加している。よって，とくに2 rings以上を確実に除去するためにオイルスクラバを設けることとした。オイルスクラバ設置により，とくに2 rings以上のタールを除

去することで、ガスエンジン仕様を確実に満足することが可能となる。

3) HCl/H₂S/NH₃

実証試験におけるガス中 HCl, H₂S, NH₃ の分析結果を表 8 に示す。今回の分析において HCl, H₂S の発生量は少ないが、処理対象の RDF 組成によりこれらの値は変化すると想定されるため、ガス処理プロセスでは最大 200 ppm を見込むものとした。NH₃ は分析結果の差異が大きいが、測定結果の平均を考慮してこちらは 300 ppm 程度が発生するものとした。

これら 3 成分がともに水溶性の成分であるため、水スクラバで除去するものとした。

4) Si

発生濃度が低く、かつバグフィルタでダストとともに除去されるため、特段の対応は不要と判断した。

5) 相対湿度

ガスエンジンからの要求値は相対湿度 60 % 以下である。よって、ガスエンジンに導入する前にガス処理の過程で減温して水分を凝縮／除去し、再加熱を行って相対湿度を 60 % 以下にする必要がある。ここでは、40 °C 程度に減温した後に 50 °C 程度に再加熱することで、相対湿度を 60 % 程度とするようにした。

2.3.3 まとめ

これまでの検討に基づき設計したガス処理プロセスを図 9 に示す。まずバグフィルタにてダストの除去を行い、その後オイルスクラバにてタール成分の除去を行う。次に、水スクラバにて減温による排ガス中の水分除去と、HCl/H₂S/NH₃ の除去を行う。最後に相対湿度 60 % 程度となるように加温した後に、ガスエンジンにガスを導入する。これらのプロセスにより、ガスエンジンによる安定した発電が可能に

表 8 実証試験 ガス分析結果

		RDF					
		バグフィルタ前		バグフィルタ後			
		1回目	2回目	1回目	2回目	3回目	
タール (タール露点)	g/m ³ _{N-dry} (°C)	—	—	5.2 (102 °C)	—	2.8 (85 °C)	
微量有害成分	HCl	mg/m ³ _{N-dry}	<0.3	9.1	<0.2	<0.2	17.1
	NH ₃	mg/m ³ _{N-dry}	38	16	42	25	491
	H ₂ S	mg/m ³ _{N-dry}	12	0	13	12	32
	Si	mg/m ³ _{N-dry}	5.0	0.9	0.3	0.2	0.5

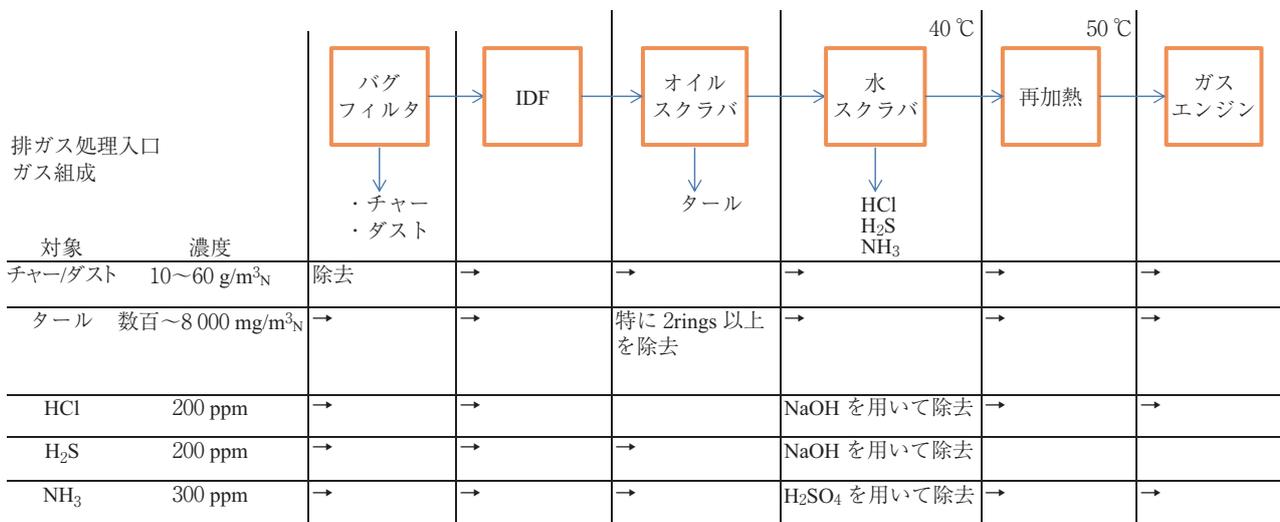


図 9 ガス処理プロセス

なるものとする。

3. 開発した技術がもたらす効果

3.1 プロセス計算前提条件

これまでの検討結果に基づき、廃棄物ガス化発電プロセスの経済性を評価するためにプロセス計算を実施した。計算に使用した廃棄物組成を表9に示す。

想定する実機プロセスフローを図10に示す。廃棄物をガス化炉に投入し、改質炉、No.1ボイラ、ガス洗浄を経てSYNGASとした後に、ガスエンジンに導入して発電する（No.1ガス化発電ライン）。バグフィルタで捕集されたチャー（未反応炭素）は後段の燃焼炉にて焼却し、ガスエンジン排気とともにNo.2ボイラにて顕熱を回収する。No.1ボイラとNo.2ボイラで発生した蒸気により蒸気タービンで発

表9 想定廃棄物組成

名称			廃棄物
三成分	可燃分	wet%	83.0
	水分	wet%	8.6
	灰分	wet%	8.4
元素組成	C	dry%	52.2
	H	dry%	6.1
	N	dry%	1.4
	S	dry%	0.1
	Cl	dry%	0.1
	O	dry%	30.9
低位発熱量	MJ/kg	wet base	18.4
	kcal/kg	wet base	4 400

電する（No.2 焼却発電ライン）。

計算に使用した前提を表10に示す。ガス化剤に水蒸気を使用する場合は、発生した蒸気タービンの抽気蒸気を用いることとした。目標炉内温度は実証設備や当社ガス化実験設備における温度と同等に設定した。ガス化剤も実証設備や当社ガス化実験設備における結果を鑑み、①空気100%、②空気50%+酸素・水蒸気50%、③酸素・水蒸気100%とした。

3.2 発電効率、送電効率の試算条件

ガスエンジンの発電効率は、34.8%とした。蒸気タービンでの発電量は、蒸気条件450℃×6MPaの条件で試算した。なお、蒸気タービンは抽気タービンとし、ガス化炉に供給する蒸気は蒸気タービンからの抽気により得るものとして計算した。

また、ガスエンジンからは90℃の温水が回収できる。この熱量を有効に活用するために、回収した温水にて①ボイラ給水加熱を行う、②ボイラ給水加熱で取りきれなかったガスエンジン温水廃熱を活用して低温熱源でも発電可能なORC（Organic Rankin

表10 プロセス計算 前提条件

処理規模	t/d 炉		100
温度	砂層	℃	750
	ガス化炉出口	℃	900
	改質炉出口	℃	1 000
使用ガス化剤	①空気100% ②空気50%+酸素・水蒸気50% ③酸素・水蒸気100%		

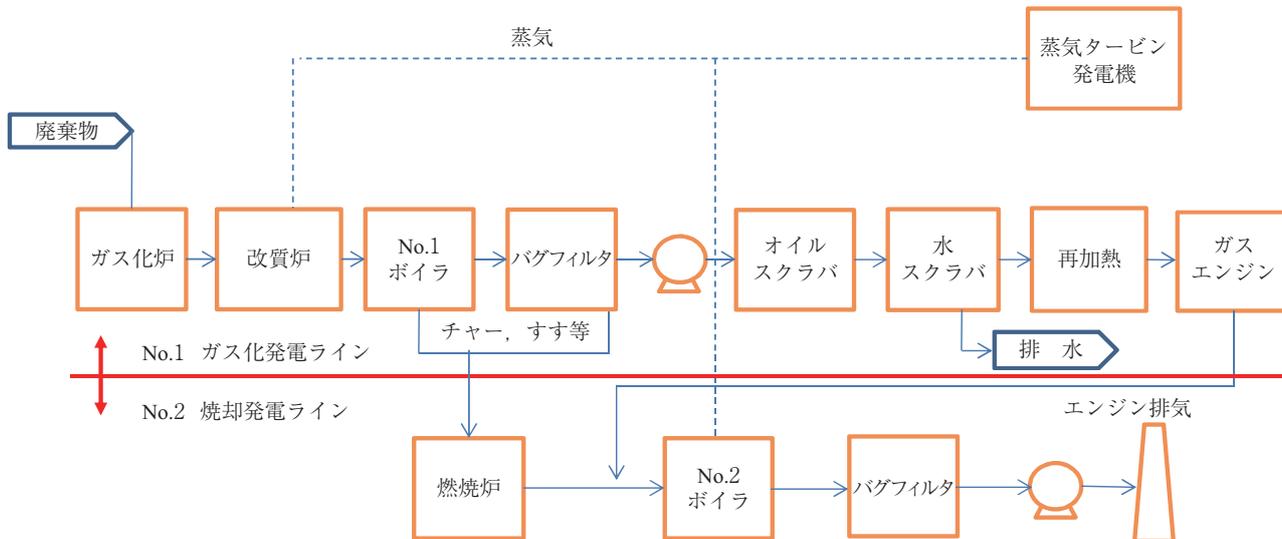


図10 ガス化発電 実機プロセスフロー

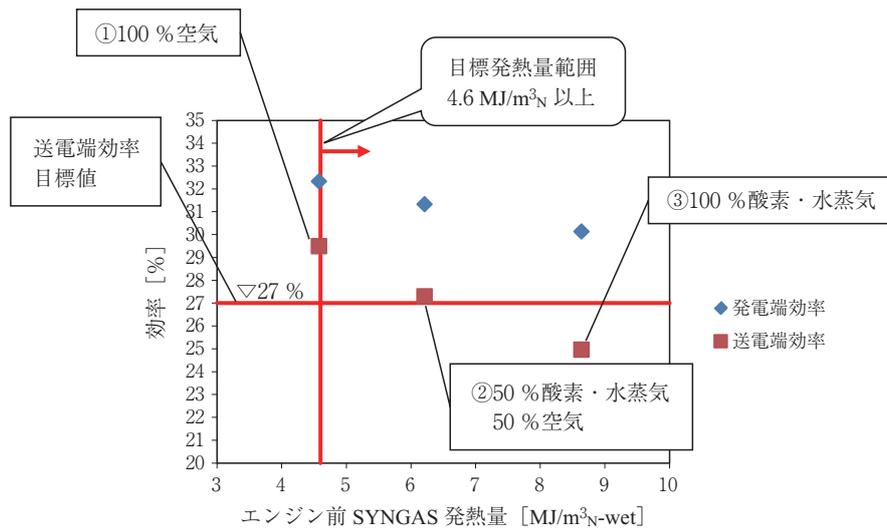


図11 発電端/送電端効率 試算結果

表11 発電端効率, 送電端効率の試算結果

項目		単位	①100% 空気	②50% 酸素・水蒸気 50% 空気	③100% 酸素・水蒸気
ガスエンジン前 ガス発熱量		MJ/m ³ _{N-wet} base	4.6	6.2	8.6
発電	ガスエンジン	kW	4 345	4 291	4 188
	蒸気タービン	kW	2 410	2 250	2 100
	ORC	kW	123	123	123
	合計	kW	6 878	6 664	6 411
	発電端効率	%	32.3	31.3	30.1
場内消費	ファン	kW	305	273	248
	PSA	kW	0	286	553
	汎用機器	kW	300	300	300
	合計	kW	605	859	1 101
送電	送電量	kW	6 273	5 805	5 310
	送電端効率	%	29.5	27.3	25.0

Cycle) ユニットを用いて発電する, こととした。ORC ユニットは神戸製鋼製 MB-70³⁾とした。その他場内消費電力量は当社検討により下記にて試算した。

- ・ファン消費電力を風量, 設計圧力より計算
- ・PSA 酸素発生装置を前提とし, 0.4 kWh/m³_{N-O₂}の消費電力が必要として試算
- ・その他汎用機器の消費電力として72 kWh/ごみ t を計上

3.3 発電端効率, 送電端効率の試算結果

前述の前提に基づいて行った計算結果の要約を図11および表11に示す。空気ガス化に対し, 酸素・水蒸気ガス化を実施した場合,

- ・酸素製造のため所内消費電力が増加する
- ・水蒸気を炉内に供給するため抽気蒸気量が増加して蒸気タービンの発電量が減少する
- ・冷ガス効率が上昇せずガスエンジンでの発電量が増加しない

ために, 発電端および送電端効率は低下した。一方で, 空気ガス化の場合のガス発熱量はガスエンジンの目標値を下回るため, 安定した運転が難しいと考えられる。50%程度酸素・水蒸気を炉内に投入するプロセスが, ガスエンジンの安定稼働および送電端効率向上の観点から適切であると考えられる。

表11に示すとおり, ②の条件では5 805 kWの送電量が見込まれる。今回開発したプロセスは, 流動

ガス化炉と高温改質を組み合わせガスエンジンで発電するものである。送電端効率は従来の20 %未満から27 %を超えるレベルまで改善できることが示唆された。

む す び

廃棄物をガス化して得た SYNGAS を利用して、高効率で安定的に発電できることを実証することを目標とした。検討の結果、以下のことを確認した。

- 空気+プラズマ改質ではガスエンジンが安定して稼働するためのガス発熱量の確保が難しい。酸素と水蒸気を使用した場合、生成ガスの発熱量を向上させることが可能であるが、酸素と水蒸気の製造にはコストがかかるため、できる限りガス化剤に空気を使用し、補助的に水蒸気と酸素を使用することが望ましい。
- 今回の試験より、ガス化剤中の空気の割合を50 %程度にすることでガスエンジンの要求下限値を満たすことが可能であることが分かった。
- 実証試験結果に基づいた模擬ガスによる小型ガスエンジン試験を行い、問題なくガスエンジンが動作することを確認した。
- 排ガス処理プロセスを含む実機プロセスフローを構築した。
- 上記プロセスにおいて送電端効率を試算した結

果、ガス化剤中の空気の割合を50 %程度にすることで、送電端効率27 %が得られた。

日本では、たとえば一般廃棄物においては、発熱量の高いごみも発熱量の低い厨芥類などと混合されて処理されることが多いが、ごみの発熱量に応じた最適な処理プロセスを選択することでより効率的な廃棄物処理ができると考える。とくに発熱量の高いごみに対しては、今回提案したような高効率発電プロセスを適用することが可能であると考えられる。

謝辞

本開発は、環境省平成25年度、26年度環境研究総合推進費補助金次世代事業「廃棄物ガス化発電技術の高効率化の実証」(3J132001)の補助を受けて実施しているものであり、関係各位に感謝申し上げます。

[参考文献]

- 1) 燃焼工学 第3版, 水谷幸夫, 森北出版, p.41
- 2) CEN/TS 15439:2006 "Biomass Gasification -Tar and Particle in Product Gases- Sampling and Analysis"
- 3) 神戸製鋼所 HP
<http://www.kobelco.co.jp/machinery/products/rotation/microbinary/index.html>
- 4) 平成26年度 環境研究総合推進費補助金 次世代事業 総合技術開発報告書 「廃棄物ガス化発電技術の高効率化の実証」

次世代型流動床式焼却炉「流動床式ガス化燃焼炉」を用いた 環境負荷低減の取組み

Approach for Environmental Load Reduction in Next-generation Fluidized-bed Incinerator



砂田浩志*
Hiroshi Sunada



木下民法*
Taminori Kinoshita



伊藤 正*
Tadashi Ito



中澤秀一*
Hidekazu Nakazawa

これまで取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、次世代型流動床式焼却炉を開発し、実炉での実証試験を行った。給じんシステムの改良によるごみの定量供給や、排ガス再循環による炉内高温化抑制、レーザ式O₂計を用いた燃焼制御性の向上などを図り、安定した低空気比運転を実現することができた。また、多段燃焼空気の配分の最適化と低空気比運転により、NO_x濃度を40 ppm程度まで抑制できるとともに、無触媒脱硝を併用することで、NO_x濃度20 ppmも十分達成可能であることを確認した。

We developed a next-generation fluidized-bed incinerator on stable treatment technologies fostered with fluidized bed gasification and melting furnaces, and conducted demonstration tests on an actual furnace. The incinerator operated stably at a low air ratio owing to an improved refuse feeder that supplies waste stably, an exhaust gas recirculation system that controls temperature spikes in the furnace and improved combustion control using a laser gas analyzer. NO_x concentration was reduced to 40 ppm by optimizing multi-stage combustion and operating at a low air ratio. Furthermore, an NO_x concentration of 20 ppm was confirmed attainable by adding selective noncatalytic reduction. This paper reports that work.

Key Words :

次世代型流動床式焼却炉
低空気比運転
無触媒脱硝

Next-generation Fluidized-Bed Incinerator
Low Excess Air Ratio Operation
Selective Noncatalytic Reduction (SNCR)

【セールスポイント】

次世代型の流動床式焼却炉を開発し、低空気比運転が可能となった。また、低NO_x燃焼に加え無触媒脱硝を併用することで、NO_x濃度20 ppmも十分達成可能であることを確認した。

まえがき

当社主力機器である「流動床式ガス化溶融炉」は、国内外に建設中も含め19件の実績を持ち安定操業を継続中である。「流動床式ガス化溶融炉」は、ごみの持つ自己熱のみで飛灰を溶融させるためCO₂削減に貢献するばかりでなく経済的にも優れた処理

システムである。安定操業を実現するため、前処理・給じん設備として二軸破砕機を設置し、ごみの全量破砕を行うとともに高炉床負荷による押込空気比の抑制と砂層温度の低温化を取入れている。

一方、流動床式焼却炉も、平成12年の「構造指針」撤廃を受け高炉床負荷に取組み、砂層温度の低温化

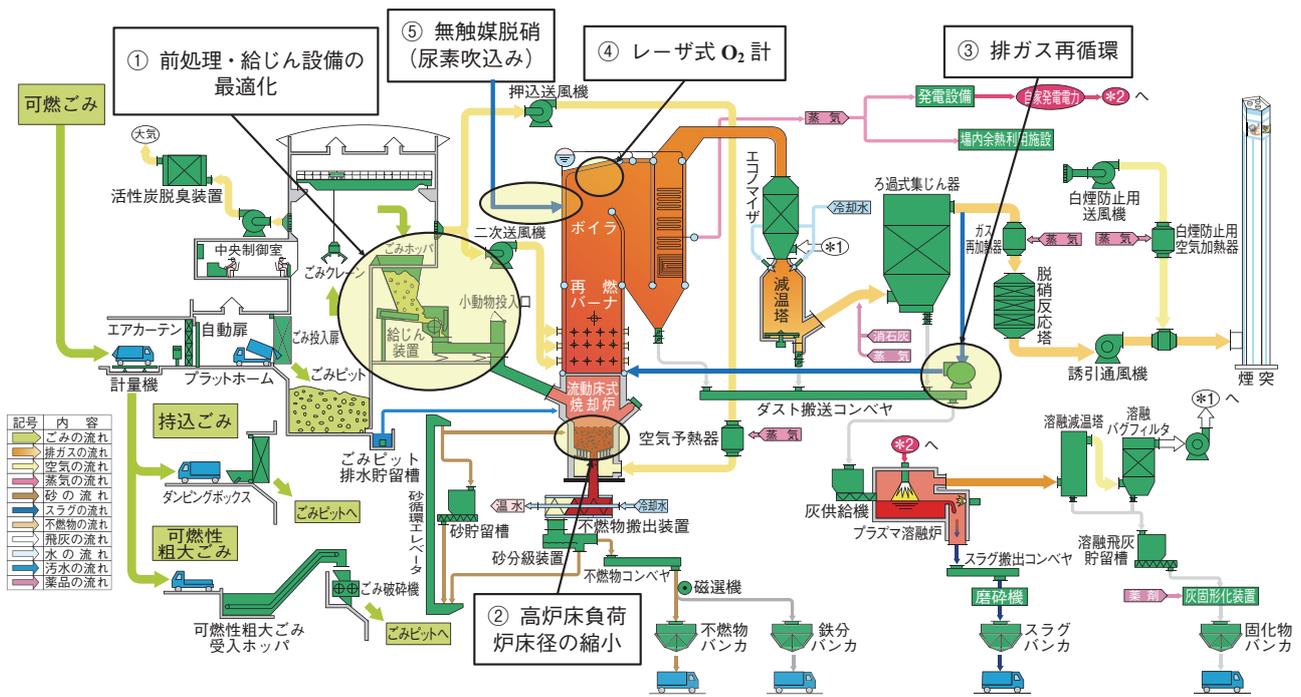


図1 処理フローおよび改造内容

表1 施設概要

炉形式	流動床式焼却炉, 46 t/d × 3炉
排ガス冷却方式	廃熱ボイラ, 水噴霧式減温塔
排ガス処理方式	乾式脱塩・脱硫, 脱硝用触媒反応塔
余熱利用	蒸気タービン 1470 kW

等とあわせて安定燃焼を実現してきた¹⁾。最近では、飛灰溶融処理の必要性が緩和され、再度焼却単独のごみ処理が見直されつつある。そこで、これまで取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、流動床独自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」の開発に取組み、実証試験を通してその安定性能、環境負荷の低減を確認したので以下に報告する。

1. 実証試験概要

実証試験は既設の流動床式焼却施設を改造して実施した。実証試験を行った施設の概要を表1に示す。既設は3系列あるが、そのうちの1系列のみ改造した。

図1に実証試験を行った施設の処理フローと図中に改造内容を示す。詳細は以下に列記する。

① 前処理・給じん設備の最適化

従来の粗破碎式の給じん設備を撤去し、破碎粒度を調整できる改良型二軸破碎機を用いた給じんシステムへと更新した。図2に新型給じんシステムの概

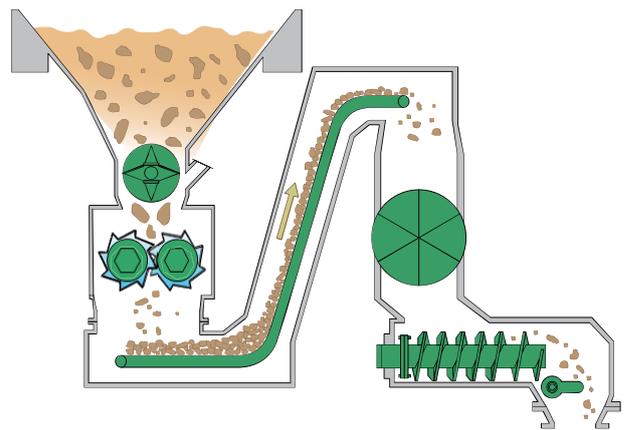


図2 新型給じんシステムの概略図

略図を示す。機器構成は、二軸破碎機、パンコンベヤ、ロータリーバルブ、スクリーユ式給じん機となっている。

② 高炉床負荷

流動床式ガス化溶融施設におけるガス化炉については、かつて構造指針記載の450 kg/m²hの倍以上の炉床負荷を採用している。本実証試験では、ガス化炉と同様の炉床負荷を基準とし、耐火物の打増しによる砂層径の縮小と、散気ノズルの一部閉塞により炉床負荷を調整した。

③ 排ガス再循環 (EGR)

低空気比運転時、炉内温度が必要以上に上昇し長

期運転が困難となることがある。炉内高温化抑制方法として EGR を採用した。EGR 設備は、バグフィルタ出口の燃焼排ガスの一部を分岐し、排ガス再循環送風機により燃焼室内のフリーボード部へ吹込むシステムとなっている。吹込み箇所は、最高温度を抑制すべく、数値シミュレーションで決定した²⁾。

④ レーザ式 O₂ 計

燃焼室における完全燃焼を実現するため、二次空気量の制御用 O₂ 計として、従来のジルコニア式からより応答性に優れたレーザ式³⁾へ変更した。

二次空気に関しては、従来の流動床式焼却炉と同様の吹込み方法 (図3) を用いている⁴⁾。砂層から上昇してきた未燃ガスに対し一段目の二次空気を水平面で偏心させて吹込むことで未燃ガス全体を旋回させ、二段目では炉中心部にできた静圧低下領域に向けて直進的に吹きこみ、さらに三段目では一段目とは逆方向に旋回させることで十分な攪拌により完全燃焼を実現するものである。

⑤ 無触媒脱硝

低空気比燃焼と押込空気比、二次空気比の最適化により、多段燃焼のみで発生 NO_x 濃度を抑制できることは確認済みである²⁾。さらなる NO_x 濃度低減を目指し、炉内に尿素水を吹込む無触媒脱硝を

行った。バグフィルタ出口に NO_x 濃度計を設置し、測定値が設定濃度になるように尿素水の噴霧量をフィードバック制御した。

2. 実証試験結果

2.1 低空気比運転

低空気比運転 (空気比=1.32) を行った際の燃焼状況として燃焼室出口 O₂ および CO 濃度の変動および炉内温度の変動を図4、5に示す。燃焼室出口

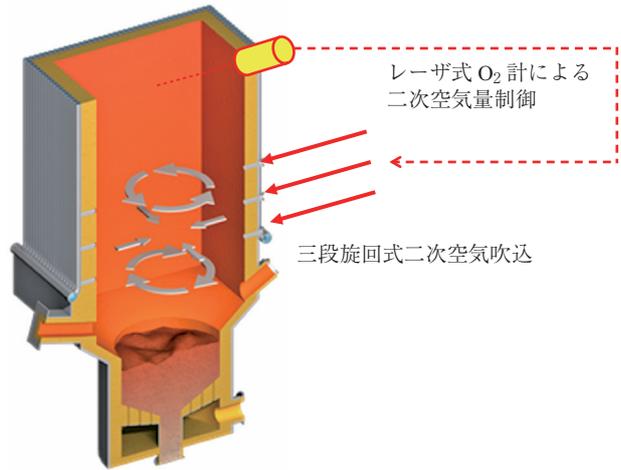


図3 二次空気吹込方法

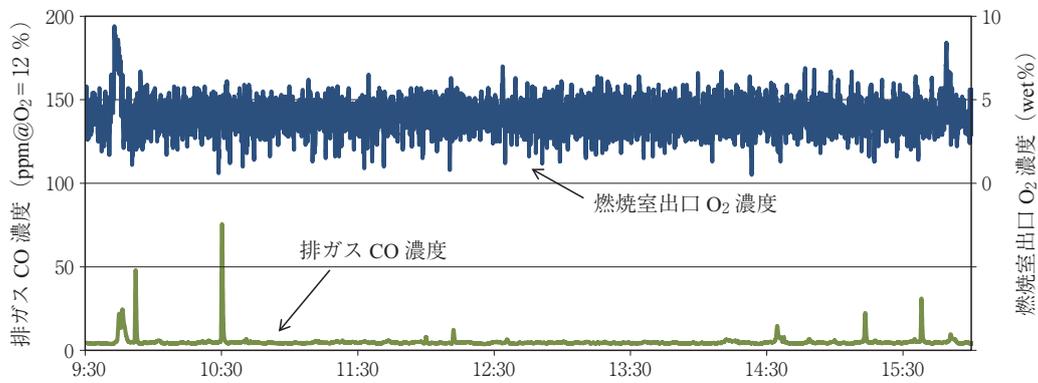


図4 低空気比運転時 (空気比=1.32) の燃焼室出口 O₂ および CO 濃度

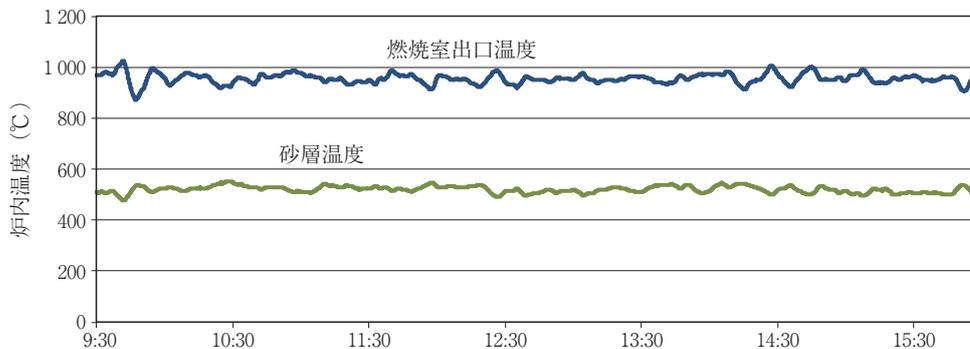


図5 低空気比運転時 (空気比=1.32) の炉内温度

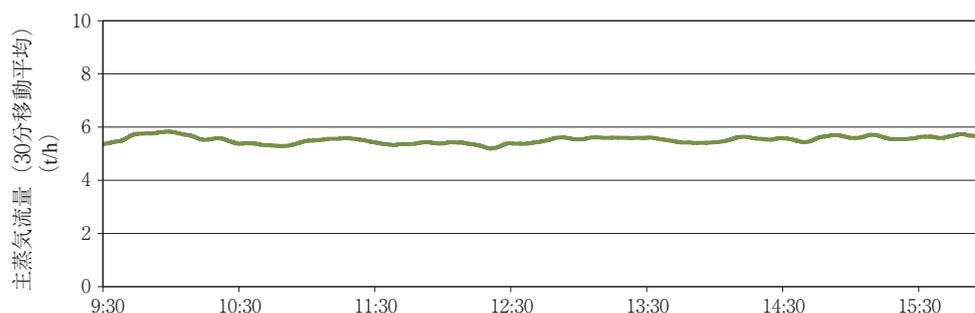


図6 低空気比運転時（空気比=1.32）の主蒸気流量

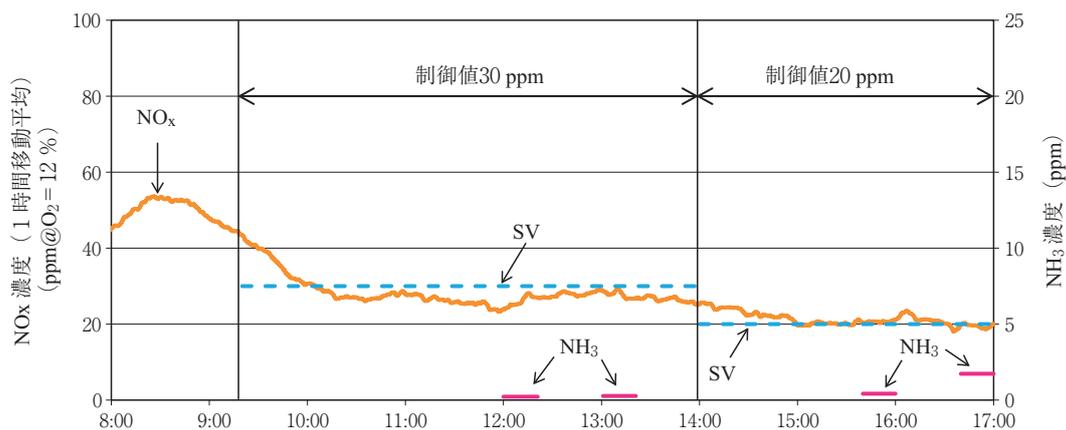


図7 無触媒脱硝によるバグフィルタ出口 NO_x 濃度削減効果

O₂濃度はレーザ式 O₂計で測定しているため、変動幅が大きいが、目標値である 4 wet% で制御しており、CO 濃度のピークはほぼ発生することなく安定した燃焼状態であることが示される。

また EGR を最適位置に吹込むことで炉内最高温度を抑制するとともに、燃焼室出口を 950 °C 程度に維持することができた。

2.2 主蒸気流量制御

給じん量は、燃焼室出口温度および主蒸気流量が設定値になるよう制御している。図6には給じん量による主蒸気流量制御を行った状態での主蒸気流量の30分移動平均トレンドを示す。小型炉ではあるが、主蒸気流量の移動平均値の変動係数（=標準偏差/平均値）は3%に収まっている。流動床炉自体が有する優れた負荷追随性に加え、改良型二軸破碎機を用いた定量性の高い給じんシステムを採用したことにより安定運転を実現することができた。

2.3 無触媒脱硝

図7は無触媒脱硝を行った際のバグフィルタ出口における NO_x 濃度（1時間移動平均値）とリークアンモニア濃度を示す。低空気比運転（空気比 =

1.36）を行っているため、燃焼制御のみで NO_x 濃度は 40～50 ppm である。NO_x 濃度の制御目標を 30 および 20 ppm に設定し尿素水吹込み制御を実施したところ、適切に追従している様子が示される。また、制御中のリークアンモニア濃度の測定値は最大で 1.7 ppm であり、塩化アンモニウムによる白煙が可視できる濃度（≒ 10 ppm）からははるかに低いことも確認できた。

2.4 用役・ランニングコスト

新たに設置した破碎機および排ガス再循環用送風機の消費電力は改造前より増加するものの、図8に示すように空気比の低減により各送風機の動力削減が確認できた。

また、排ガス量の低減による廃熱ボイラからの持ち去り熱量削減および砂層部への注水量の削減により、蒸気発生量に関しては表2に示すように約10%の増加が認められた。

本施設では NO_x 濃度の排出基準が 50 ppm と厳しく、触媒脱硝プロセスを採用している。その触媒脱硝プロセスで用いるアンモニア水使用量について評価した。通常では尿素吹込みによる無触媒脱硝は実

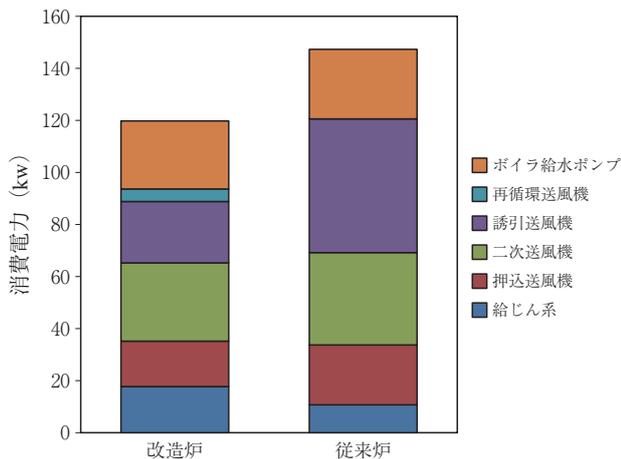


図8 主要機器の消費電力

表2 蒸気発生量の比較

単位：t/ごみt	改造炉	従来炉
蒸気発生量	3.1	2.7~2.9

表3 アンモニア水使用量の比較

単位：L/ごみt	改造炉	従来炉
アンモニア水	0.84	1.51~1.59

施していないが、低空気比運転による低NO_x燃焼が可能となったことから、アンモニア水はほぼ半減することができた(表3)。

むすび

既設の流動床式焼却炉を用い、前処理・給じん設備の改造、砂層部壁面耐火物と散気管ノズル閉止に

よる高炉床負荷化など各種改造を行った。さらに、押込空気量の削減や砂層温度の最適化などの運転調整により、46 t/dといった小型炉においても空気比1.3程度の低空気比運転を実現した。

今回の実証試験は既設の改造のため、燃焼室内部の耐火物は建設時のままであり、燃焼室温度の急激な上昇を避けるために排ガス再循環を併用している。ただし、流動床式焼却炉の場合、低空気比運転実現のためには高炉床負荷を採用し、押込空気量を削減するため、二次空気量が大きく削減されることがない。このことから、未燃ガスの攪拌に対して必ずしも排ガス再循環を用いる必要がない。今後、燃焼室におけるボイラからの抜熱等を組み合わせ、壁面へのクリンカ付着抑制に取組み、EGR量削減による消費電力の低減を図りたいと考えている。

また、多段燃焼空気の配分の最適化と低空気比運転により、燃焼制御のみでNO_x濃度を40 ppm程度まで抑制できることを確認した。無触媒脱硝を併用することで、NO_x濃度20 ppmも十分達成可能であることを確認したため、脱硝効率の向上により、さらなる低NO_x運転にも取組みたいと考える。

最後に、本実証試験を行うにあたり、現地操業に携わる運転員をはじめとする関係各位に深く感謝の意を表す。

[参考文献]

- 1) 小倉賢藏ほか：機械学会環境工学総合シンポジウム講演論文集, Vol.13 (2003), pp.121-124
- 2) 砂田浩志ほか：廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集, Vol.26 (2015), pp.319-320
- 3) 砂田浩志ほか：神鋼環境ソリューション技報, Vol.8, No.2 (2012), pp.23-30
- 4) 須鎗 護ほか：機械学会環境工学総合シンポジウム講演論文集, Vol.3 (1993), pp.130-133

微量 PCB 汚染変圧器の現地洗浄処理実績

Commercial Operation Results of Onsite Washing for the Transformers Contaminated by Very Low Concentration of PCBs

—川崎重工業(株)での処理事例—



西村裕太*
Yuta Nishimura



奥村敬典**
Takanori Okumura



浮氣英明*
Hideaki Uki



清水由章*
Yoshiaki Shimizu
技術士(衛生工学部門)

微量 PCB に汚染された移動困難な大型変圧器を無害化処理するため、加熱強制循環洗浄法を用いて現地洗浄を実施した。本法は、洗浄装置により加熱した洗浄油を装置と変圧器との間で循環させながら洗浄する技術である。今回、初期 PCB 濃度が2.7 mg/kg および0.92 mg/kg の2台の変圧器を洗浄温度70℃で40時間洗浄した。その結果、洗浄油中の PCB 濃度は0.3 mg/kg 以下となり、変圧器は無害化処理された。さらに1台については変圧器内部の部材についても PCB 濃度を測定し基準値以下であることを確認した。また、洗浄処理時の騒音・振動と排気・環境大気・作業環境に含まれる PCB およびダイオキシン類濃度を測定し、基準値以下であることを確認した。

Two large scale PCB contaminated transformers were washed by using heated oil circulation washing. The process applies heated insulation oil as washing solvent and consists of pump, heater and control unit. Transformers were connected to the system in order to make forced circulation flow and washed for 40 hours at 70 °C respectively. Contaminated oil concentration before drainage for one transformer was 2.7 mg-PCBs/kg and another was 0.92 mg-PCBs/kg. As a result, PCBs concentration in the insulating oil, transformer inner material, and exhaust gas became less than Japanese PCBs regulation limit. In addition, analysis results for noise, vibration, PCBs and dioxins concentration around the system were below the regulation limit.

Key Words :

微量 PCB	Very Low Concentration of PCBs
現地洗浄	Onsite Washing
加熱強制循環洗浄	Heated Oil Circulation Washing

【セールスポイント】

- 1) 微量 PCB 汚染大型変圧器を保管場所で処理可能
- 2) 比較的低温(70℃以下)で洗浄可能で燃焼ガスや排水の発生無し
- 3) 環境省の技術評価を受けた信頼性の高い技術

まえがき

PCB（ポリ塩化ビフェニル）は薄黄色の粘ちょう液体である¹⁾。絶縁性、耐熱性に優れ、金属腐食性がほとんどないことから、電気機器の絶縁油や熱媒油として幅広く使用されてきた。しかし、1968年のカネミ油症事件をきっかけにその毒性が明らかとなり、1972年には製造が中止された。現在、PCB油およびPCB汚染物は政府が全額出資している処理会社（中間貯蔵・環境安全事業株式会社、以下JESCO）での処理が進められている。

一方、2002年7月、日本電気工業会の調査で本来PCBを使用していないはずの電気機器等に数mg/kgから数十mg/kg程度の微量なPCBに汚染された絶縁油を含む機器が多数存在することが新たに判明した²⁾。その数量は変圧器等が約120万台、柱上変圧器が約40万台、OFケーブルが約1400kmと膨大な量にのぼると推計された³⁾。このような微量のPCBに汚染された電気機器等はJESCOでの処理対象になっておらず、その性状等を踏まえた安全・確実な処理が求められていた。そこで環境省は2009年に「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」施行規則の一部を改正⁴⁾し、環境省による個別の処理施設認定制度（無害化処理認定制度）の対象に微量PCB廃電機器等を追加した。その結果、微量PCBの処理は無害化処理認定施設での処理が進められている。

当社は2015年3月、兵庫県神戸市の川崎重工業(株)において、一般財団法人電力中央研究所が開発した洗浄法「加熱強制循環洗浄法」⁵⁾による無害化処理認定を取得し、川崎重工業(株)が保管していた微量PCB汚染変圧器を現地にて無害化処理した。本報ではその処理結果について報告する。

1. 加熱強制循環洗浄法の概要

1.1 加熱強制循環洗浄法の基本原理⁶⁾

本法の基本原理は、汚染変圧器から微量PCBに汚染された油を抽出し、洗浄油としてPCBを含まない油を充填した後、洗浄油を70℃程度に加熱しながら装置と変圧器の間で循環させて変圧器の内壁や内部部材に付着したり浸込んでいるPCBを洗出し、無害化する処理技術である。

PCBの洗出し状況はPCB濃度によるが、洗浄の進行に伴う洗浄油のPCB濃度の上昇として捉えられる。洗浄油中のPCB濃度を測定し、洗出し完了後、洗浄油を抽出することで変圧器からPCBを除去する。

1.2 加熱強制循環洗浄法の特長

加熱強制循環洗浄法の主な特長は以下のとおりで

ある。

1.2.1 処理性能

- 1) 保管場所においてPCB汚染変圧器を無害化する技術として環境省から技術評価を取得
- 2) 機器を解体することなく内部部材に付着したPCBを洗浄することが可能
- 3) 焼却施設の受入基準より大きい機器を処理可能
- 4) 大きさ、重量等の制限で運搬困難な機器を処理可能
- 5) 屋内等で使用していた機器や保管場所から搬出できない機器を処理可能

1.2.2 安全性

- 1) 低い温度（洗浄油の引火点以下）での洗浄
- 2) 化学反応や燃焼が無い為、ダイオキシン類等の有機塩素化合物の副生成がない
- 3) 保管場所で洗浄処理が完結するため、PCBに汚染された機器の輸送が不要

1.2.3 経済性

- 1) 洗浄後の筐体や部材等は非PCB汚染物としてリサイクル（スクラップ処分）可能（ただし、木くず、紙くず等の含浸性部材は焼却処理）

2. 洗浄装置の概要および安全対策

2.1 洗浄装置の概要

洗浄処理プロセスのフローを図1、洗浄装置の外観を写真1に示す。洗浄装置はNo.1ユニットとNo.2ユニットから構成される。No.1ユニットには、洗浄油加熱用のヒータ、循環用のポンプ、加熱による洗浄油の体積膨張を緩衝する膨張槽などが設置されている。そして、No.2ユニットには各機器を制御する制御盤と排気処理装置が設置されている。

洗浄処理は、微量PCB汚染変圧器から汚染油を抽出した後、変圧器と洗浄装置の間をステンレス製のフレキシブルホースで接続して洗浄油を充填する。次に、洗浄油加熱ヒータで加熱した洗浄油を循環ポンプで強制的に循環させながら洗浄を行う。所定の温度で一定時間（40時間以上）循環し、32時間、40時間後の洗浄油中のPCB濃度が安定して規定値（0.3mg/kg）以下であれば洗浄完了とする。

2.2 安全対策

2.2.1 安全運転

洗浄処理を安全に行うため、No.2ユニットの制御盤で洗浄油の温度や圧力等の状況を常時監視している。異常時には警報を発信して異常を早期に発見するとともに、設定値を超えた場合にはインターロックにより洗浄装置が自動停止するシステムとしている。また、非常停止ボタンを設置し、万が一の時は

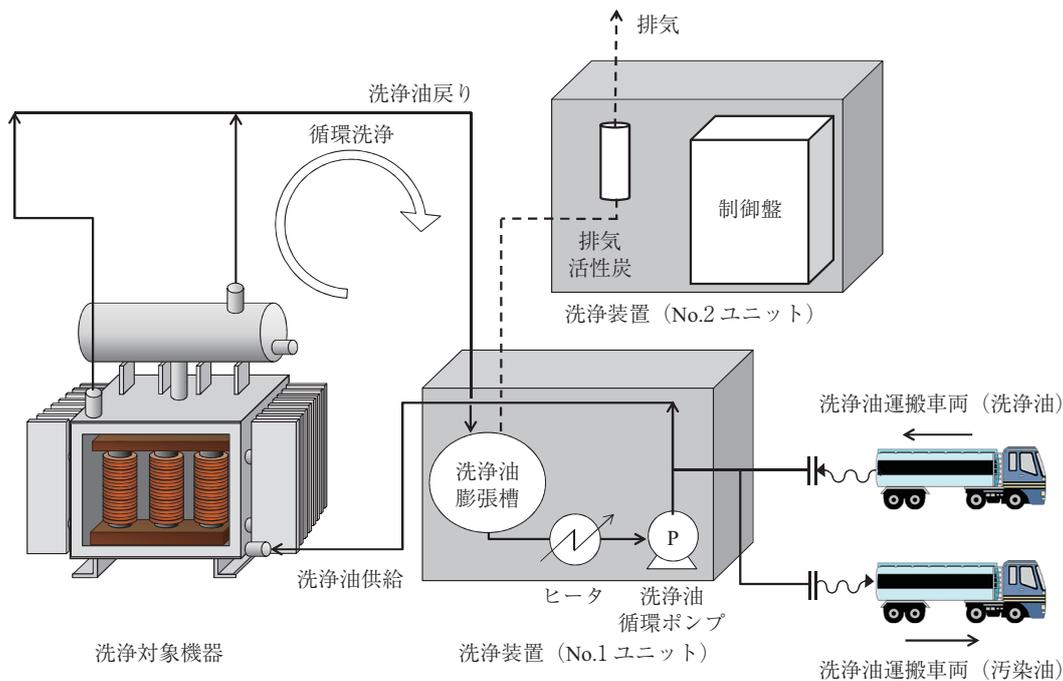


図1 処理プロセスフロー



写真1 洗浄装置外観

手動で洗浄装置を安全に停止することが可能である。

2.2.2 漏洩・拡散防止

洗浄装置内の配管接続は気密性が高い溶接接続もしくはフランジ接続としている。洗浄装置下部には洗浄装置が保有する洗浄油の全量を受止める容積の防油堤を設けている。さらに、防油堤内には漏洩検知器を設置し、万が一の洗浄油漏洩時には洗浄装置が非常停止するシステムとしている。

2.2.3 環境への影響

加熱強制循環洗浄法は前述のとおり、洗浄油を循

環させるだけで化学反応等も起こらないため、排ガスの発生はない。しかしながら、洗浄油を変圧器へ充填する際に変圧器内の空間部に滞留し、微量PCB汚染油と接触していた空気等（PCB濃度は基準値以下）が洗浄油膨張槽空間部を通じて大気へ放出される。この排気をより安全に排出するため、排気処理装置を設置し、環境への影響を最小限にしている。

また、本プロセスは水を使用しないため、プロセス排水の排出はない。

3. 加熱強制循環洗浄処理

3.1 処理対象機器

今回の処理対象となった2台の変圧器の仕様を表1に示す。いずれも10 000 kVAの大型変圧器で使用後もそのまま使用場所に保管されていた機器である。

3.2 処理方法

洗浄処理は1台ずつ実施し、それぞれ1日8時間の洗浄を5日間繰返し合計40時間洗浄した。洗浄温度は70℃程度に設定し、洗浄装置付属の温度計で監視および記録を行った。2号変圧器、3号変圧器の洗浄温度の経時変化を図2および図3に示す。いずれも昼間の洗浄時は70℃程度で洗浄されており、夜間は放熱により温度が25℃程度まで下降した。毎日の洗浄後（8時間毎）に洗浄油中のPCB濃度を測定し4日目、5日目のPCB濃度が安定して0.3

表1 処理対象機器

名称	2号変圧器	3号変圧器
製造者	川崎電機	富士電機
製造年	1964年	1969年
容量	10 000 kVA	10 000 kVA
油量	9 000 L	7 400 L
総重量	26.5 t	24.7 t
PCB濃度	0.92 mg/kg	2.7 mg/kg
外観写真		

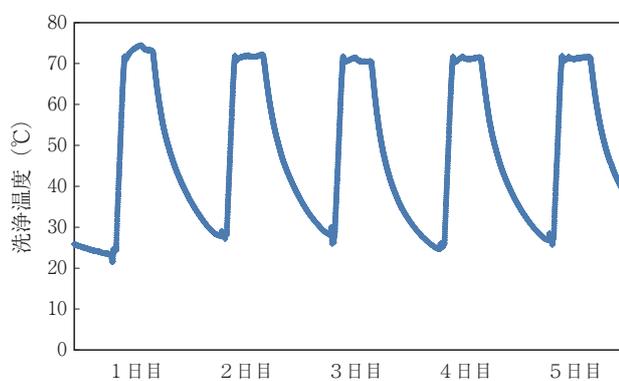


図2 2号変圧器の洗浄温度経時変化

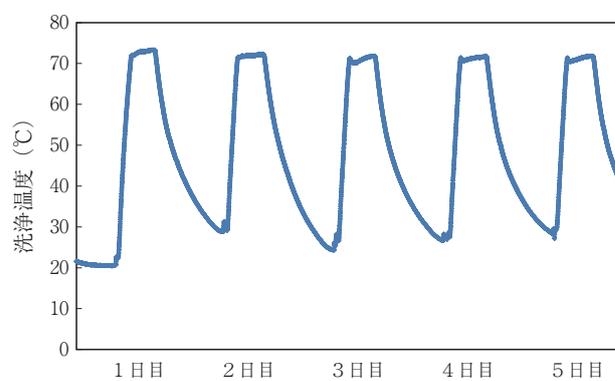


図3 3号変圧器の洗浄温度経時変化

表2 洗浄油中 PCB の濃度変化及び内部部材測定結果

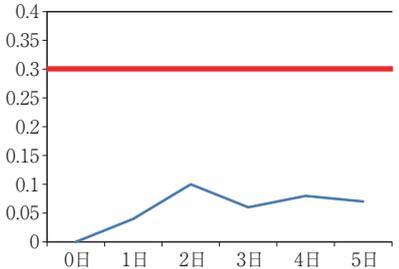
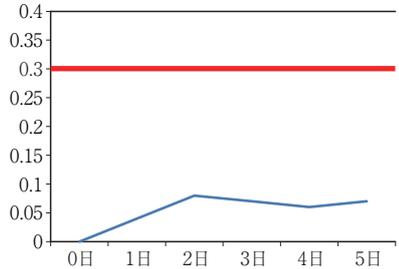
No.	2号変圧器	3号変圧器
対象機器	PCB濃度：0.92 mg/kg 油量：9 000リットル	PCB濃度：2.7 mg/kg 油量：7 400リットル
洗浄油 PCB 濃度管理 管理基準値：0.3 mg/kg ※分析値はいずれも検出下限値以下で推移したため参考値		
内部部材測定結果		(基準値) 容器内面 <math><0.1 \mu\text{g}/100 \text{cm}^2</math> (0.1 $\mu\text{g}/100 \text{cm}^2$) 鉄心 <math><0.1 \mu\text{g}/100 \text{cm}^2</math> (0.1 $\mu\text{g}/100 \text{cm}^2$) プッシング外面 <math><0.1 \mu\text{g}/100 \text{cm}^2</math> (0.1 $\mu\text{g}/100 \text{cm}^2$) 絶縁紙 <math><0.0005 \text{mg/L}</math> (0.003 mg/L) 木材 <math><0.0005 \text{mg/L}</math> (0.003 mg/L) 銅線 <math><0.01 \text{mg/kg}</math> (0.01mg/kg)

表3 騒音・振動と排気・大気環境・作業環境測定結果

項目	単位	測定結果	基準値	備考
騒音 振動				
	dB	<61	<70	
	dB	<50	<70	
排気	PCB	mg/m ³	0.00000062	≦0.1
	ダイオキシン類	ng-TEQ/m ³ _N	0.0000053	≦0.1
環境大気	PCB	μg/m ³	0.00094	≦0.5
	ダイオキシン類	pg-TEQ/m ³	0.037	≦0.6
作業環境	PCB	mg/m ³	<0.001	0.01
	ダイオキシン類	pg-TEQ/m ³	0.05	2.5
				第1管理区分（適切） 第1管理区分（適切）

mg/kg 以下であることを確認し、洗浄完了とした。また、PCB 濃度が高い3号変圧器については、変圧器内部が洗浄されていることを確認するため、変圧器内部部材の測定を併せて実施した。

3.3 処理結果

洗浄油中 PCB の濃度変化および内部部材の測定結果を表2に示す。洗浄油中 PCB 濃度については、洗浄初期は内部部材等から PCB が移行されるために上昇し、徐々に飽和に達し4日目、5日目には0.3 mg/kg 以下で変化しなくなった。3号変圧器の内部部材の測定は全ての項目で基準値未満となっており、微量 PCB 汚染変圧器を適正に処理できたことを確認した。

3.4 環境への影響

環境への影響を確認するため、処理実施時に騒音・振動と排気・敷地境界での環境大気・作業環境に含まれる PCB およびダイオキシン類濃度の測定を実施した。測定結果を表3に示す。いずれも基準値に対して十分に低い数値となり、適正であることを確認した。

むすび

本報では神戸市の川崎重工業(株)で実施した微量 PCB 汚染変圧器の現地洗浄処理について紹介した。2台の大型変圧器を加熱強制循環洗浄法により洗浄処理し、現地で無害化できることを確認した。また、この時、騒音・振動と排気・環境大気・作業環境の

PCB およびダイオキシン類濃度がいずれも適正であり、安全に処理できることを確認した。

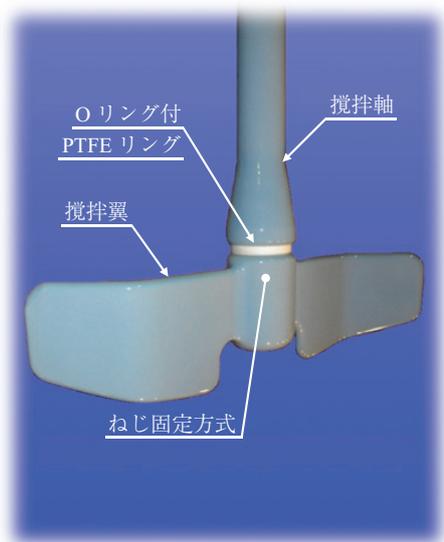
変圧器等の微量 PCB 汚染廃電気機器は「ポリ塩化ビフェニル廃棄物の適正な処理の推進に関する特別措置法」により2027年3月31日までに処理することが義務付けられている。微量 PCB 汚染廃電気機器の処理は始まったばかりであり、これからも本法を活用し、処理期限までの PCB 全廃に貢献していきたい。

最後に、本事業を実施するにあたり、多大なるご協力をいただいた川崎重工業(株)および技術的助言をいただいた一般財団法人電力中央研究所に謝意を表す。

[参考文献]

- 1) 厚生労働省：職場の安全サイト
<http://anzeninfo.mhlw.go.jp/anzen/gmsds/0199.html>
- 2) 中央環境審議会廃棄物・リサイクル部会 微量 PCB 混入廃重電機器の処理に関する専門委員会：微量 PCB 混入廃電気機器等の処理方策について、平成21年3月
- 3) 環境省：第1回 PCB 廃棄物適正処理推進に関する検討委員会議事次第・資料、平成23年10月
- 4) 環境省：報道発表資料、廃棄物の処理及び清掃に関する法律施行規則の一部を改正する省令等の公布について、平成21年11月10日
<https://www.env.go.jp/press/11755.html>
- 5) 特許：第4889557号
- 6) 大村直也：DEN-CHU-KEN TOPICS, VOL19, 平成27年3月, p.8

グラスライニング製 組立式攪拌翼「スマートロック」



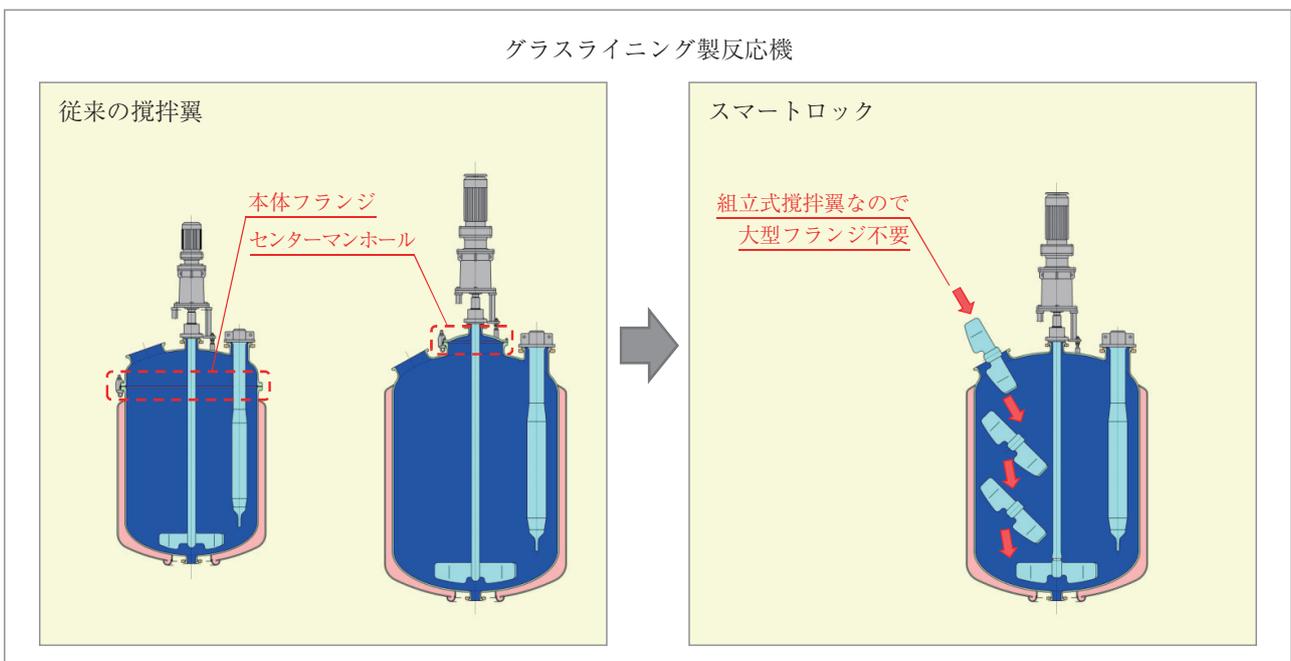
グラスライニング（GL）製機器は耐食性が求められる石油化学、食品、医薬品等の生産プロセスで長年にわたり多数使用されています。近年、とくにファインケミカル、電子材料、医薬品等の分野において、耐食性に加え、製品の高付加価値化、少量多品種生産の増加により、機器の洗浄性向上とコンタミ低減が求められています。

このような洗浄性向上とコンタミ低減の要求に応え、当社ではGL製組立式攪拌翼「スマートロック」を開発しました。

「スマートロック」の主な特長は以下のとおりです。

- ① 洗浄性が向上
組立式攪拌翼により本体フランジやセンターマンホール等の大口径のフランジが不要で、洗浄性が大幅に向上します。
- ② クロスコンタミを低減
接続部液溜りの最小化によりクロスコンタミを低減します。
- ③ 攪拌翼の組立が容易
ねじ固定方式の採用により短時間で簡単に組立できます。

このような特長を備えたGL製組立式攪拌翼「スマートロック」をご使用いただくことにより、洗浄性向上とコンタミ低減を実現し、生産性を向上させることができます。



展示会だより

■ INCHEM TOKYO 2015 プラントショー & 水イノベーション

2015年11月25日～27日 東京ビックサイト国際展示場にて、公益社団法人化学工学会／一般社団法人日本能率協会が主催する INCHEM TOKYO 2015が開催され、当社は、プラントショーにプロセス機器事業部が水イノベーションに水環境事業部が出展を行いました。

水素エネルギー技術展も同時開催され神戸製鋼所が出展を行っています。

今回、両事業部一つのブースで共同出展を行いました。当社ブースに3日間で合計約1,000名弱来訪頂きました。

プロセス機器事業部は、「機能性と洗浄性改善を探求していく SKS 製品」をコンセプトに、高伝熱性ガラス #9000HT、新型組立翼スマートロック、洗浄機能付 CFV 等新製品の他に GL1、5m³スイングスター反応機や N-CDB、H₂ BOX の実物展示等を行いました。

また、出展セミナーにて「グラスライニング反応機の CIP 洗浄技術」「当社の機能性ガラス～高伝熱性 GL9000HT を中心に～」と題し、2テーマの発表を行い、産官学マッチングフォーラムにおいて「攪拌槽型反応機の攪拌技術（ポリマー重合機を中心に）」の発表も行いました。

当社の技術力を PR し、今後の営業活動に繋げていきます。

水環境事業部は、「省エネ、省廃棄物に向けた設備・薬剤提案から、メンテナンスまでトータルソリューションを提供」をテーマに PABIOMOVER-LS（汚泥削減型流動床式好気処理装置）や PANBIC-EC（高効率嫌気性排水処理装置）といった装置を、テスト機を交え展示を行いました。御来場者の方から「排水の処理に困っているから対策を考えたい」や、「排水処理設備の老朽化更新を検討している」と言った今後の営業活動に繋がる貴重なご意見を多数頂く事ができ、非常に有意義な展示会となりました。



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
〒651-0086 神戸市中央区磯上通2丁目2番21号(三宮ランドビル) ☎ (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
〒141-0001 東京都品川区北品川5丁目9-11(大崎MT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(結露ライオンビルタワー) ☎ (052)581-9876 FAX(052)563-2313
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
室 蘭 SD 製 造 所 / 〒050-0055 室蘭市崎守町387-25 ☎ (0143)50-3036 FAX(0143)50-3066
テックカレッジ専研 / 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 2015年度 Vol.12 No.2 通巻24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/高橋正光 委員/小倉賢藏・高橋円・田頭成能・松本雅彦・下梨孝・丸山智裕・斉藤彰・木下民法・菊池雅彦・渡辺昌造

《発行》2016年3月15日印刷 2016年3月22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



 神鋼環境ソリューション

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。