

# TSK 技報

2015  
July

No.18

月島機械株式会社

## 過給式流動焼却技術 特別号

**TSK** 月島機械株式会社  
www.tsk-g.co.jp

寄稿

過給式流動焼却技術特別号に寄せて

開発ストーリー

過給式下水汚泥焼却炉の開発

— 石炭燃焼から下水汚泥焼却炉への技術移転の一例 —

実績紹介

過給式流動焼却設備の実用運転

## 目次

4	巻頭言 水環境事業は「次なるステップ」へ	渡邊 彰彦
6	寄稿 過給式流動焼却技術特別号に寄せて	東京農工大学 名誉教授 堀尾 正毅
10	開発ストーリー 過給式下水汚泥焼却炉の開発 — 石炭燃焼から下水汚泥焼却炉への技術移転の一例 —	国立研究開発法人産業技術総合研究所 鈴木 善三
17	実績紹介 過給式流動焼却設備の実用運転	山本 隆文・浅岡 祐輝
28	コーヒーブレイク “月島茶房” 体脂肪の燃焼	
30	100年史より 月島機械の焼却技術	
40	おわりに	寺腰 和由
42	会社概要・編集後記	

# TSK 技報

No.18 2015

## CONTENTS

4	Foreword	Akihiko WATANABE
6	Contribution <i>Celebrating this special issue on the turbo-charged pressurized fluidized bed sewage sludge incinerator technology</i>	Masayuki HORIO, Tokyo University of Agriculture and Technology
10	Development Story <i>Development of turbo-charged pressurized fluidized bed sewage sludge incinerator, a technology transfer from coal combustion to sewage sludge combustion</i>	Yoshizo SUZUKI, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)
17	Installation Result <i>Practical Operation of a Pressurized, Fluidized Bed Incineration System</i>	Takafumi YAMAMOTO / Yuki ASAOKA
28	Coffee Break	
30	From the 100 years history <i>Tsukishima Kikai's Incineration Technology</i>	
40	Conclusion	Kazuyoshi TERAOKA
42	Corporate Profile / Editor's Note	

表紙の写真



2020年東京オリンピック・パラリンピック開催予定地、「東京都 お台場レインボウブリッジ」の夜景

# 水環境事業は「次なるステップ」へ



## 渡邊 彰彦

取締役常務執行役員  
水環境事業本部 本部長  
(月島テクノメンテサービス(株))  
取締役会長

本年2015年度は「現中期経営計画」の最終年であると同時に、創業110周年を迎えるという月島機械グループ節目の年になる。今回のTSK技報2015No.18は、当社の主力商品である「過給式流動燃焼システム」特別号として発刊される。巻頭言は3年前の2012年No.16において「水環境事業(技術)を未来へ繋ぐ」と題して寄稿した。今回は「次期中期経営計画」を見据えて「次なるステップへ」と題して寄稿する。

前回の寄稿において「汚泥を制するものは水環境を制する」と記した。私はこの「たかが汚泥」技術を更に大きく進化させていくことが、水環境事業の「次なるステップ」に繋がるのではないかと考えている。

「次なるステップ」に踏み出すに当たって、顧客・市場動向を俯瞰する。水環境事業の重要顧客である国や自治体の財政難は続いており、今後もこれが好転することは期待できないだろう。社会インフラである上下水道施設は財政難・人材難の二重苦により、改築・更新事業が停滞している。特に中小自治体の財政状況は、今後も好転の兆しはない。悪化の足音は小さな足音から、少しずつ大きな足音に変わりつつある。中小自治体では、改築・更新のみならず補修工事さえ、少しずつ先延ばしされる状況にある。同時に深刻な人材難から、改築・更新計画さえも自前で出来なくなりつつある。日本政府は平成25年に「インフラ長寿命化計画」を策定し、「新しく造ること」から「賢く使うこと」へと重点をおいた。それを推し進めるために「新下水道ビジョン」を策定し、「下水道事業管理計画制度」に基づく「官民一体・官民共同(協働)」の方針を示している。幸いにも我々民間企業には「人・もの・金」がある。民間企業の新たな出番が来たのである。公設EPCからDBOやPFIへと、多種多様なPPPが試されている。顧客の発注形態も、

一般競争入札は当たり前で、公募型プロポーザル、さらには高度技術提案型へと、金額だけを重視するのではなく、技術の先進性や事業の採算性などを重視する方針に変わりつつある。

水環境事業の現中期経営計画は「汚泥処理事業のパイオニア」を目指す姿とした。汚泥処理分野に「人・もの・金」を集中し、技術力と事業力で確固たるプレゼンスを確立することを目指している。「EPC+O&M+単体機器+補修工事」の基盤事業で安定収益を稼ぎ、「汚泥燃料化+FIT事業」等の拡大事業で新たな市場を拡大してきた。その結果、EPC事業からLCB事業への転換に繋がり、まだ小額ではあるが安定収益を生み出す仕組みに踏み出したのではないだろうか。

強い会社は「研究開発とコスト削減」の二つがうまく相乗効果を発揮している。「技術の先読み」「技術トレンド」をしっかり捕らえた先進的技術開発こそが、月島機械の生命線ではないだろうか。月島機械の技術者には常に高い目標に向かってチャレンジしてほしいと願う。競合他社の一歩も二歩も先を行ってほしいと願う。「汚泥処理技術・単体機器」においては、常に「ナンバーワンとオンリーワン」を目指してほしいと願う。

以下は、日本経済新聞掲載の「経営の視点」というコラム記事の抜粋である。「製造業は3段階の技術シーズを持たねばならない。第1は現在の主力商品の改良、改善に繋がる技術。第2は次の主力商品に繋がる技術。第3はモノになるか分からないが、可能性を秘めた技術」：シーズとは生産者志向(会社の實力)、その対極にあるのがニーズ(顧客志向)である。月島機械の水環境事業の今があるのは、第2までの技術開発を地道にやってきた結果である。水環境事業が「次なるステップ」に踏み出すためには、この「第3の可能性を秘めた技術」が大きな意味を持つので

はなかろうか。これによって新しい事業モデルの創出が可能となる。その結果新市場の拡大展開につながると確信している。

今後増加が予測される浄水場および下水処理場の包括委託やコンセッション事業は、競合他社との連携が最重要課題となる。重要なことは、「事業のコアが月島機械のコアである」のかどうかだ。競合他社との優位性は、圧倒する先進的技術を有しているかどうかで決まっていくであろう。水環境業界での合従連衡も避けては通れないであろう。最近、「オープンイノベーション<sup>(\*)</sup>」という言葉が使われている。自社単独に拘らず、競合他社や異業種、大学等の研究機関とパートナーシップでイノベーションを創出していくことも重要になるであろう。

「次なるステップ」と位置付ける「次期中期経営計画」の目指すべき姿をどうするかは、これからじっくりと水環境事業全体で議論を進めていく。その計画にさらなる安定収益を生み出す仕組みを盛り込んでいきたい。月島機械グループの結束力と総合力が問われる。

今回の18号は「過給式流動燃焼システム」特別号である。現在までの受注実績は、東京都葛西水再生センター、神奈川県相模川流域右岸処理場、大阪中央水みらいセンター、甲府市浄化センター、東京都みやぎ水再生センターの5箇所、稼動中は東京都葛西水再生センター、神奈川県相模川流域右岸処理場の2箇所である。当初の計画値を大幅に上回る省エネ効果も発揮している。技術陣及び関係各位の強い熱意に敬意を表すとともに厚く御礼申し上げたい。

\*1 米カリフォルニア大学パークレイ・チェスブロー准教授が提唱

# 過給式流動焼却技術 特別号に寄せて

*Celebrating this special issue on the  
turbo-charged pressurized fluidized bed  
sewage sludge incinerator technology*

堀尾 正毅

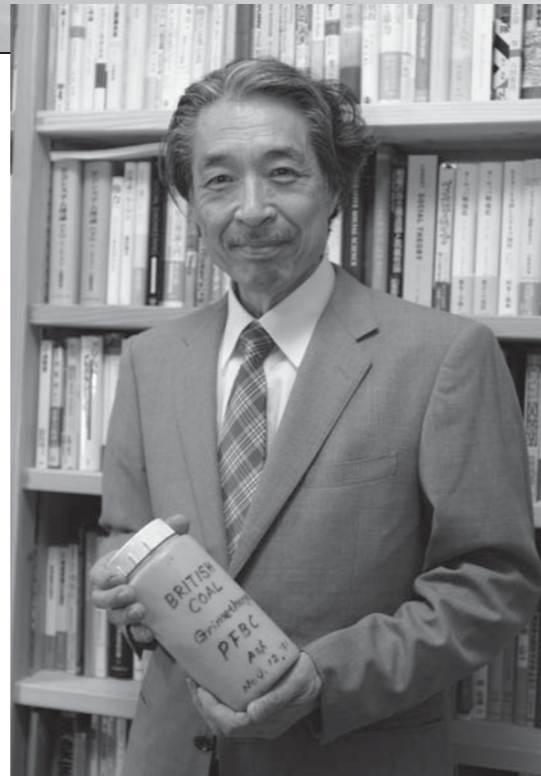
Masayuki HORIO

東京農工大学（名誉教授）

Tokyo University of Agriculture and Technology

## Abstract

Concerning the TSK group's new technology, the turbo-charged pressurized fluidized bed sewage sludge incineration, I would like to stress that it has been a significant innovation achievement of fluidization technology in Japan in terms of the following three points: 1) as a historical mile stone of sure technical innovation in contrast to those during the 1970s and the 80s, when development efforts were much intensive but many of them failed due to poor understanding on scale up and risk management; 2) as an excellent and sure application of pressurized combustion concept, where pressure level is much lower than that of coal fired PFBCs but sufficient to reduce electricity consumption for air blowing by applying turbochargers, to reduce N<sub>2</sub>O emission and as a whole to reduce GHG emissions of sewage sludge incineration by 40% from those of ordinary fluidized bed incinerators. 3) as a good example of appropriate technology practice in the modern sense with lowered plant-costs by diverting marine turbochargers for pressurization and with lowered development risks by the good team-working of TSK and other plant companies and national research institutes for their common target.



ホリオ・オフィスにて。1991年British CoalのGrimethorp PFBCテストプラントから採取したベッド材サンプル瓶を手に。

## 略歴

### <学歴・職歴>

1966年	名古屋工業大学卒業
1966-71年	名古屋大学大学院工学研究科博士課程(1974年工博)
1971-82年	名古屋大学在職
1974-76年	米国ウエストバージニア大学に出向(NASA PJ等)
1982-2008年	東京農工大学在職(1982年 助教授) 成蹊大学工学部講師(非常勤)
1990~	東京農工大学教授(1995 同大学院教授)
2008年~	同名誉教授
2008-13年	早稲田大学環境総合研究センター研究院 客員上級研究員
2008-14年	科学技術振興機構(JST)社会技術研究開発センター (RISTEX)、「地域に根ざした脱温暖化・環境共生社会」領域総括
2010-15年	龍谷大学政策学部教授 (環境エネルギー・適正技術戦略)

### <主な著書(共著)>

『流動層の反応工学』、培風館、1984  
 『流動層ハンドブック』(編著)、培風館、1999  
 『Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems』、Marcel Dekker, 2003  
 『Handbook of Combustion』、Wiley-VCH Books, 2009  
 『Fluidized-bed Technologies for Near-zero Emission Combustion and Gasification』、Woodhead Publishing, 2013  
 『地域が元気になる脱温暖化社会を！—「高炭素金縛り」を解く「共・進化」の社会技術開発—』、公人の友社、2014

## 特別号刊行を祝う

過給式流動焼却技術の開発・実用化の知見と開発経緯等についての、本特別号は、開発と実用化の長い道りを経てこれたご関係者のご苦勞を顕彰する企画であり、流動層技術の研究に携わってきた者として、両手を挙げてその刊行を慶びたい。開発段階での報告集ではなく、安定した商用運転を達成しつつあるという実績のうえに刊行される本特別号は、これからの社会への貢献を展望する、まことに時宜を得たものであるが、同時に、高い学術的価値も有している。頂戴した寄稿の機会に感謝しつつ、二三、思うところを述べたい。

## わが国の技術開発史のなかで

今回の過給式流動焼却技術の開発・実用化に、わが国の技術開発力の成熟を示す記念碑的な意義を見るのは筆者だけではあるまい。

多段炉に代わる流動層焼却炉をわが国が米国の会社等から技術導入したのは1950年代であり、流動層についての自主技術が確立するはるか以前であった。その頃は、空気分散器一つをとっても、腫れ物に触るようは一切変更はしないという状況であったのであり、いまや隔世の感がある。その後60年代には、わが国でも流動層の基礎研究が盛んに進められ、技術も人材の厚みも大きく改善されていった。第1次石油危機を経た70年代になると、石油精製や触媒反応分野だけでなく、石炭や重質油の燃焼・ガス化や廃棄物処理分野での流動層開発が、公的支援も相まって、いっせいに進むようになった。

しかし、70年代のわが国では、燃焼やガス化など複雑な化学反応群を含むプロセスについては、プロセス開発からスケールアップにいたる工業化のマネジメントやリスク回避の方法論は、官庁、企業経営者、技術者・研究者を問わず、まだ、ほとんど未経験・未確立の状態にあった。筆者も後半で関わったサンシャイン・プロジェクトの加圧流動床式石炭ガス化プロセス(夕張)を例にとれば、5t/dの炉の試験結果も待たずに40t/d炉が設計・建設

されてしまっていたという具合である。70-80年代を通じ、多様な技術開発にチャレンジした各企業においては、予想しないトラブルに巻き込まれることも多く、一時的には「あつものに懲りてなますを吹く」状態に陥ることはしばしばであった(したがって、当時苦勞された方々にとっては、本技術の実用化のような事例はまさにリベンジというにふさわしい快拳と感じられるであろう)。

そのような苦難の時期を経て、90年代以降は、技術的にはより確実な開発が進められるようになった。しかし、技術開発は常に予想を越えた自然現象とのたたかいを含んでいる。90年代以降にも、挑戦的な技術開発や新技術導入が企業経営までも危うくしかねないような事例は散発している。ある場合には、不本意な自然現象との遭遇によるものであり、ある場合には、競争的な環境の中で、経験不十分な企業が受注したことによる事例もある。また、当初予想した市場規模が実現できないといった場合もある。不確定要素と向き合わなければならない技術開発に対しては、拡大製造者責任や株主への持続的利益還元等への配慮からも、全般的に消極的な気風がただよっているのが最近の現状ではないだろうか。

だが、巨大な有機体としての社会のいとなみ、すなわち「社会的物質代謝システム」について言えば、そのイノベーションが止まることはない。問題は、未知との遭遇に満ちた「技術開発」というものの「創発的」なプロセスを、だれが、いつ、どうマネージするかである。今回の技術の実用化には、そういった面での教訓も多々含まれているはずである。そこで、いったん歴史的経緯を振り返ったのち、その点にもどって議論をすることにしたい。

## 加圧流動層開発史のなかで

過給式流動焼却技術の原理的ポイントの一つは加圧である。燃焼反応の速度はほぼ圧力に比例して増加するから、加圧することにより、同じ炉床面積で燃焼できる汚泥等の量も圧力に比例して増加していく。一方、圧力が上がると気体分子の衝突頻度は増すが、同時に、分子同士が衝突するまでに飛ぶ距離の平均、すなわち、「平均自由行程」は減少するので、両者の積に比

例する「気体粘度」はほぼ一定にとどまる。こうして、流動化の指標である「最小流動化速度」も、圧力の影響を受けなくなり、常圧と同じ線速度で加圧空気を送るだけで必要な酸素量を供給することができるのである。

加圧下で流動層燃焼を行うというアイデアは、英国中央発電委員会(CEGB)のダグラス・エリオットとレイモンド・ホイの有名な「駐車場での着想」(1967年)にさかのぼる。かれらは早速この加圧流動層燃焼(PFBC)のアイデアを検証するため、MHD発電試験用の圧力容器を転用して試験装置(MK 1:6気圧)を作り1969年から70年代中盤まで試験を行っていく。並行して、米国ウエスティングハウス社やEPA、アルゴンヌ国立研究所などとの連携も進み、その後設立されたエネルギー省のもとの多数のプロジェクトや、わが国の石炭利用総合センター(現在のJ-COAL)や電源開発(株)のプロジェクトを経て、スウェーデン、アメリカ、スペイン、日本に設置されたABB社のPFBC(16気圧)が出現するのである。わが国の九州電力荏田新1号機(IHI)はいま稼動中である。

PFBC技術の開発経緯にはこれ以上深入りせず参考文献<sup>1-4)</sup>を示すにとどめたいが、未燃炭素やアルカリ金属を含む灰粒子の扱い、すなわち、高温集塵を行うのか、それとも耐久性の高いガスタービンを用いるのかの問題、あるいは、未燃炭素の層内での沈積と固定層燃焼によるクリンカー生成の問題など、加圧下での固体燃焼に伴ういくつかの課題がクリアされていった。また、粉粒体である石炭を圧力容器の中に供給する抗圧給炭法も、加圧であるからこそその問題であった。上記PFBCにおいては石炭を水スラリーの形で抗圧供給している。さいわいなことに、もともとスラリー状である汚泥の場合には、上記の問題はない。しかし、当該技術のさらなる展開を考えるとときには、未燃炭素を含む灰の挙動制御や廃棄物等の燃料供給は、あらためて大きな課題要因となりうる。

筆者は、1974-76年ウエストバージニア大学に滞在し、米国におけるPFBC等の開発に直に接し、帰国後は、流動層内の諸現象の解明を、バブリングから循環流動層まで、また常圧から加圧流動層までをカバーして、基礎研究に励んだ。とくに層内現象の「相似則」については、粒子混合にまで相似が成り立つかどうか

について月島機械殿と「文科省・民間との共同研究」を実施し、それを見事に立証することができた<sup>5-6)</sup>。そんなこともあり、1980年代以降、流動層開発の見聞やスケールアップのツールは飛躍的に改善されたといえる。しかし、それらが結実し、画期的な新技術につながるには、時間も運も必要であった。

### 過給器付汚泥焼却技術のこれからに期待する

下水道施設から排出される温室効果ガス量は我が国全体の温室効果ガス排出量の約0.5%(2011年度)を占めており、中でも汚泥焼却での温室効果ガス排出量は施設電力によるもの(施設全体の50%を占める)に次いで2番目(同上約20%)となっている。このため汚泥焼却での消費電力、助燃燃料、N<sub>2</sub>O排出等の削減を通じてその大幅削減を行うことは、喫緊の課題であった。そのような課題に応え、1) 加圧の概念を適用しつつも、操業圧力を第二種圧力容器の規制対象とならない1.5気圧G程度にとどめて、コンパクト化と加圧による設備コスト上昇をバランスさせ、2) 汎用の船用過給器を転用して、エネルギー回収と供給空気の圧縮を低コストで行い、3) 電力消費(したがってCO<sub>2</sub>排出)とN<sub>2</sub>O生成を、それぞれ約40%も削減し、汚泥焼却技術の諸課題を一挙に総合的に解決した本技術開発のすばらしさは、何度強調しても足りないほどである。もちろん、多数の課題を同時解決してみせたイノベーション例は、技術開発の歴史のなかにちりばめられているが、今回の開発は、さらに次の二つの意味でも注目すべきものであることを付言しておきたい。

第1は、船用の過給器という汎用機を転用したこと、「適正技術」<sup>7)</sup>の性格である。わが国の技術開発が、ともすれば性能至上主義で適正技術的視点を欠落させていることを考えると、この点は十分評価するに値する。

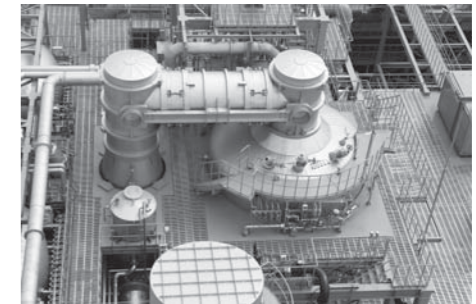
第2は、開発のプロセスが多くの主体によって担われ、「協働開発」の趣をなしていることである。本技術のような公共性の高い技術の場合には、特定の一社だけが突出し、全てのリスクを背負って推進する形ではなく、今回のような協働型のアプローチが、リス

ク低減という視点からも、また、社会へのスムーズな実装という点からも、有効であると思われる。

以上のような理解から、本技術には、これから国内外への本格的な展開を期待するものである。ただし、その展開にはなお多くの課題を想定すべきであろう。比較的低いとはいえ加圧技術であることは、システムのライフサイクルが一巡するまでは、なお未経験の事態に遭遇することを覚悟しておく必要がある。また、廃棄物処理技術は公共的なものであり、これまでの行政の縦割りを廃し、他の廃棄物との統合処理や、エネルギー効率の高いプロセスとの統合<sup>8)</sup>など、さらなる合理性の追求が求められる。さらに、制度による手厚い保護の中にあるわが国の事業環境のなかから、諸外国に向けて打って出ていくためには、過剰設計の徹底的な見直しとコンパクト化も必要であろう。これらに伴って、新たな技術課題が押し寄せることは避けられない。技術陣にも経営陣にも、また関係各社や、研究者の皆様にも、それらへの積極的対応をお願いするものである。そのような未来への一層の展開を期待しつつ、本特集号刊行へのお祝いの、筆を置くこととしたい。

### 参考文献

- 1) Ehrlich, S., History of the development of the fluidized-bed boiler, Proc. 4th Intl. Conf. on FBC, The MITRE Corp., McLean, Va., pp.15-20, 1976
- 2) Hoy, H.R., A.G. Roberts, J.E. Stantan, 1 Introduction, 'Pressurized Fluidized Bed Combustion,' ed. by M.A. Cuenca and E.J. Anthony, Blackie Academic & Professional, pp.1-37, 1995
- 3) 堀尾正毅、石炭の加圧流動層燃焼、日本機械学会誌、97、pp.203-205, 1994
- 4) Kamiya, H., K. Deguchi, J. Gotou, M. Horio, Increasing Phenomena of Pressure Drop During Dust Removal using a Rigid Ceramic Filter at High Temperatures, Powder Technology, 118, pp.160-165, 2001
- 5) Horio, M., M. Takada, M. Ishida, N. Tanaka, The Similarity Rule of Fluidization and its Application to Solid Mixing and Circulation Control, Fluidization, Engineering Foundation, pp.151-158, 1986
- 6) 堀尾正毅、石田守、高田真木、田中法親、流動層のスケールアップと粒子混合過程の相似則、化学工学論文集、14、pp.739-747, 1988
- 7) 堀尾正毅、現代技術社会においてなぜ「適正技術」思考が必要か、人間科学研究、26(2)、pp.163-179, 2013
- 8) 堀尾正毅、巻頭インタビュー・東日本大震災後の環境・エネルギー問題の考え方、環境施設、No.129(9)、pp.1-10, 2012



# 過給式下水汚泥焼却炉の開発

## — 石炭燃焼から下水汚泥焼却炉への技術移転の一例 —

### *Development of turbo-charged pressurized fluidized bed sewage sludge incinerator, a technology transfer from coal combustion to sewage sludge combustion*

#### Abstract

A new fluidized bed sewage sludge incinerator combined with a turbo-charger is recently put to practical use. Fundamental technology used in this incinerator is originated with pressurized fluidized bed combustion (PFBC) with combined cycle power generation. This new incinerator does not generate power but generates pressurized air used for combustion air. However, forced and induced fans can be omitted in this system. This leads about 40% of energy saving comparing with conventional fluidized bed incinerators. In addition, low environmental impact, such as low NOx and N<sub>2</sub>O emissions, is achieved. On the contrary, original PFBC technology for coal combustion currently cannot be used for commercial power generation system because of some weak points for commercial unit, such as low reliability and low thermal efficiency. However, PFBC technology itself has a great potential as a solid fuel combustor. The turbo-charged pressurized fluidized bed sewage sludge incinerator, we recently developed, is one of the best examples in technology transfer from coal combustion to sewage sludge combustion. This article describes the original PFBC technology including current status and development history of the turbo-charged pressurized fluidized bed sewage sludge incinerator.

下水汚泥の新規焼却炉として共同開発した過給式下水汚泥焼却炉の原型は石炭の加圧流動層複合発電技術である。ただし本技術では発電は指向せず、高温高压排ガスからの機械的エネルギーの回収(圧縮空気の製造)に留めているが、省エネルギー性は充分確保できた。この技術について、その開発過程を説明するため、基本となっている石炭の加圧流動層燃焼技術についてその現状を含めて説明した。石炭の加圧流動層複合発電技術は2000年代初頭にその限界が明らかになり、商用発電技術としては現在停滞している状況にある。しかしながら、燃焼器部分である加圧流動層燃焼自体のポテンシャルは高く、これを利用するプロセスの登場が待たれていた。今回開発した過給炉では加圧流動層燃焼のポテンシャルを活かしつつ、エネルギー回収機をガスタービンから過給機に変更することにより石炭の加圧流動層複合発電技術の弱点を克服することが出来た。今回の技術は石炭燃焼で開発された基本技術の焼却炉への転用の好例であると言える。

鈴木 善三  
Yoshizo SUZUKI  
国立研究開発法人  
産業技術総合研究所  
つくば西事業所  
創エネルギー研究部門炭素資源  
転換プロセスグループ  
上級主任研究員

#### 1 はじめに

脱水汚泥は我が国では現在そのほとんどが焼却処理されている。焼却炉の主流は流動層(床)型が現在主流となっている。この流動焼却炉の新しい形式として、高温高压の排ガスのエネルギーを回収して省エネルギー化を図る新型炉を、国立研究開発法人産業技術総合研究所(以降産総研と略称)、国立研究開発法人土木研究所(以降土木研と略称)、月島機械、三機工業の4社で実用化することができた。本稿ではこの過給式下水汚泥焼却炉(以降、本文では過給炉と呼ぶ)の基となった技術である石炭の加圧流動層燃焼技術、この技術を石炭燃焼から下水汚泥焼却に転用した開発過程とその中で解決してきた技術課題のいくつかを紹介する。本技術の詳細や実用機の状況等は本特集号の別の論文に譲り、本稿では石炭燃焼に起源をもつ加圧流動層燃焼技術の下水汚泥焼却炉への転用の経緯と開発途上での問題点のいくつかを紹介する。

#### 2 開発の経緯

本技術開発の経緯をまとめると表1の様になる。本技術開発の発端は土木研が主催した新規焼却炉に関する勉強会である。2000年に土木研で、月島機械を含む下水汚泥焼却炉メーカー数社による新規下水汚泥焼却炉の勉強会が発足した。当時土木研では、現在でも主流の流動層型下水汚泥焼却炉(以降、流動炉と呼ぶ)について次の様な認識を持っていた。

表1 過給式下水汚泥焼却炉の開発の経緯  
Table1 Development history of turbo-charged pressurized fluidized bed sewage sludge incinerator.

年	開発上のマイルストーン
2000	土木研究所で、新規汚泥焼却炉の勉強会発足
2001	加圧条件での焼却システムに絞り込み、産総研に共同開発を申し込む 共同研究を開始し、産総研で加圧条件での下水汚泥の燃焼実験開始
2003	産総研での基礎研究を終え、燃焼には問題無いことを実証
2005	バイオマス利用技術として、NEDO プロに採択される。北海道長万部町で、5t/d規模のパイロット試験機による実証試験を開始
2008	実証試験を終了し、プロセスをほぼ完成させる
2010	東京都下水道局の委託試験を実施
2011	月島機械が東京都下水道局より受注、共同開発の三機工業も受注
2013	初号機の稼働開始(三機工業)
2014	2号機の稼働開始(月島機械)

- ①汚泥処理にはガス化、熱分解等の技術もあるが、焼却プロセスは単純で今後も主流と考えられる。その中でも、流動炉は脱水汚泥の焼却プロセスとしては非常に優れている。
- ②脱水汚泥の含水率が脱水技術の進歩により年々低下し、将来自燃可能になると予想される。余剰の熱エネルギーを利用可能なプロセスが必要であるが、流動炉はこれに対応していない。
- ③現状の流動炉は、補助燃料や送風・排気動力等多量のエネルギーを消費するエネルギー多消費型のプロセスであり、②の観点からも少なくとも省エネルギー化、将来は創エネルギー型のプロセスへ転換する必要がある。

- ④流動炉は普及、稼働開始から20年を経過し、近い将来代替が必要であるが、流動炉での根本的な技術革新がない。
- ⑤地球環境問題への関心の高まりにより、下水汚泥焼却プロセスから発生する亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O)の排出量低減が強く求められているが、当時の流動炉では対応が困難である。

この様な認識から、土木研は流動炉の利点は認めるものの、将来の更新に備え、少なくとも既存の流動炉を省エネルギー型に転換する必要性を強く感じ、勉強会の発足に至ったと聞いている。

この勉強会の中で、加圧流動層による汚泥焼却と焼却により生じた高温高压の排ガスからのエネルギー回収で省エネルギー化を図る可能性が注目され、最終的に当時石炭の加圧流動層燃焼の基礎研究を行っていた産総研に共同研究の打診があり、実用化研究がスタートした。これには実は伏線があり、筆者と土木研の担当者は当時つくばで行われた省庁横断型の研究で面識があった。その研究は本技術にも関係のある、メタンと亜酸化窒素のインベントリー推定の研究である。1990代中頃、亜酸化窒素やメタンのインベントリー推定では排出係数の実測値が皆無で、農水省の各研究所、環境研究所、産総研、土木研等の各研究所の専門家が集まり、手探りで農業関連、産業関連、自動車、廃棄物関連の排出係数の測定から始めた。筆者は化石燃料利用施設からのN<sub>2</sub>Oのインベントリー推定を担当したが、この過程で下水汚泥の焼却プロセスからのN<sub>2</sub>O排出係数の測定を担当した土木研を支援した。この縁で、当時筆者が研究していた石炭の加圧流動層燃焼技術を土木研の担当者に説明する機会があり、それが本技術開発のヒントになったと、後で聞いた。この様な経緯で筆者に過給炉の共同開発の話が持ち込まれたわけであるが、次項で本技術の背景として重要な加圧流動層燃焼技術をまず説明する。

#### 3 過給炉の背景となる技術

##### 3.1 石炭の加圧流動層燃焼の歴史

高温に保った気-固流動層中で固体燃料を燃焼させる流動層燃焼(Fluidized Bed Combustion, FBC)のアイデアは第2次世界大戦前まで遡れるが、実際に本格的な開発が行われたのは第2次世界大戦後である。特に開発が本格化したのはオイルショック(1973年)後である。FBCの特徴は、(1)燃料に対する柔軟性が極めて高く、広範囲の燃料を使用できる、(2)対環境性に優れ、大気汚染物質(NOx、SOx)の排出量が従来の燃焼装置に比べ格段に低い、であるが、この特性が石油に代わる燃料として取り上げられた石炭の燃焼に最適であったからである。FBC技術の本格的な開発は1960年代にスタートしているが、加圧流動層燃焼(Pressurized Fluidized Bed Combustion, PFBC)技術の開発も意外なほど早く、1967年に英国のBCURA (British Coal Utilization Research Association)ですで行われている。その後、欧米を中心に研究開発が行われ<sup>1-3)</sup>、オイルショック後にはFBCの商用化に続いて、1991年初頭には、米国でPFBC複合発電実証機(Tidd, 74MWe)が稼働し、続いて3機の商用機がスウェーデンとスペインで運開した<sup>4)</sup>。

我が国においては、常圧FBC技術が国家プロジェクトとして取り上

げられ積極的な国の資金援助の元で開発が行われてきた経緯もあり、PFBCの開発はやや欧米に比べ遅れた。図1に我が国において、国家プロジェクトとして行われたFBC技術開発の経緯を示す。FBC開発は電源開発若松石炭利用技術試験所(北九州市)における実証プラント開発を中心に実施され、常圧FBCについては20t/d、160t/d規模のパイロットプラントを経て、その成果は最終的には電源開発竹原2号機(350MWe)の建設として結実した。本機は現在世界最大の商用発電用バブリング型FBCで順調に稼働している。常圧FBCの開発が終了した頃、既に欧米ではPFBCの開発が進んでおり実証機の段階にあったことは既に述べたとおりである。我が国においても、FBCの高度化の観点からPFBCの開発が引き続き取り上げられ同試験所において71MWe規模の実証プラントでの研究が開始された。

若松でPFBCパイロットプラントの研究が進行する一方で、国内電力各社はPFBCの潜在的能力に注目し商用機の建設を具体化し、北海道電力苫東厚真3号機(1998年、85MWe)、中国電力大崎1号機(2000年、250MWe)、九州電力荊田新1号機(2001年、360MWe)の3基が建設された。

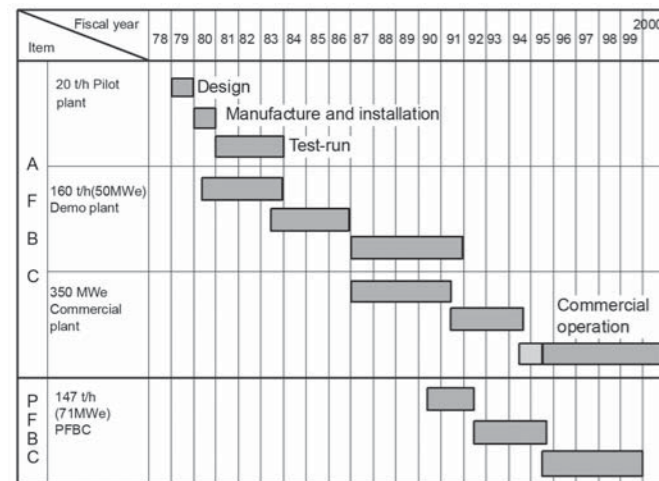


図1 日本におけるFBCとPFBC開発のスケジュール  
Fig.1 National development program of FBC and PFBC in Japan.

### 3.2 石炭の加圧流動層燃焼の原理

PFBCは常圧FBCを発展させ、1~1.5MPaの加圧条件下で高温に保たれた流動層内で石炭等の固体燃料を燃焼させる技術である。燃焼炉からは高温、高圧の排ガスが生成するので、ガスタービンに導き通常発電を行う。また、タービン排ガスの廃熱と流動層内に設けられた伝熱管で蒸気を発生させ、蒸気タービンで従来と同様な発電を行う、いわゆる複合発電システム(Combined cycle power generation)を形成するのが通常の利用法である。このようにPFBC技術は複合サイクル発電技術と密接な関係にあるが、本来両者は独

立の技術であり、石炭の加圧燃焼による複合サイクル発電の燃焼器部分が流動層燃焼形式であるものが、石炭のPFBC発電プロセスと言える。

図2に石炭を燃料とした典型的なPFBC発電システムを示す。燃焼炉本体は加圧容器に収容され、石炭と加圧空気は容器外部より連続供給される。天然ガス等の複合発電システムの場合はクリーンな排ガスが得られるので、そのままガスタービンに排ガスを導くことが可能であるが、石炭燃焼PFBCの排ガスは通常灰を多量に含むため、ガスタービン翼を摩耗から守るため何らかの脱塵システムが必要となる。流動層には脱硫剤である石灰石を石炭と共に投入し、炉内脱硫を行う点は常圧FBCと同様である。こうした複合発電システムを組むことで、石炭燃焼PFBC複合発電では、発電端効率で42%程度が達成可能である<sup>5)</sup>。従来の微粉炭火力と比べ、2~3ポイント熱効率の向上が可能で、これは石炭使用量にして7%程度の節約となり、CO<sub>2</sub>排出量も削減される。

PFBCによる複合発電の利点としては、(1)高酸素分圧下での燃焼のため、常圧FBCでは高い燃焼効率を得られなかった炭種でも高い燃焼効率を得られ、利用炭種の拡大が可能である。(2)操作圧力に比例して燃焼負荷を高められる。(3)PFBCにおいても常圧FBCの低環境負荷特性(低NO<sub>x</sub>、低SO<sub>x</sub>)が継承される。むしろ、高圧化によりさらに低環境負荷特性が向上する、等が挙げられる。PFBC発電システムでは図2に示されるとおり、重要な構成要素として(1)加圧流動層ボイラ、(2)乾式高温脱塵装置、(3)ガスタービン、があるがこれらの構成要素のほとんどは既存技術及びその延長線上にあり、PFBC発電システムの開発は技術的には容易とされていた。

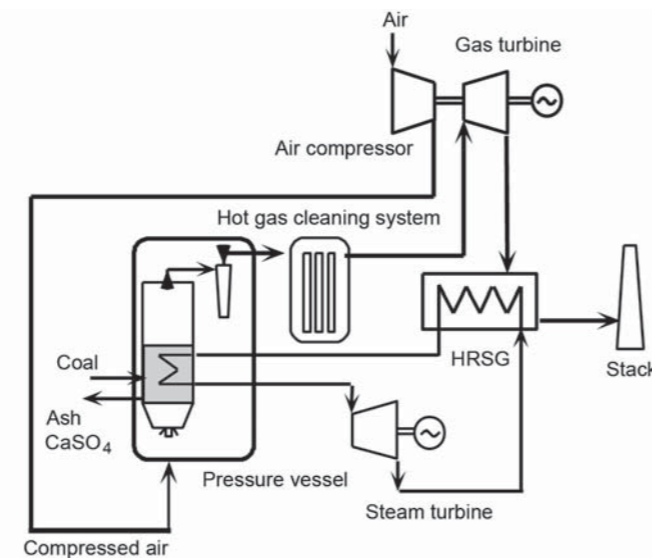


図2 石炭燃焼PFBC発電システム  
Fig.2 Typical flow sheet of coal fired pressurized fluidized bed combined cycle power generation.

### 3.3 PFBCの現状

この様に、石炭を利用する高効率発電システムとして1990年代には注目されたPFBC技術であるが、結果的には2000年代初頭にはその限界が明らかとなり、また、PFBCの競合技術である石炭ガス化複合発電技術(Integrated coal Gasification and Combined Cycle power generation, IGCC)が送電端で43~45%の熱効率を達成し、その頃実用化段階に入ったことから、世界的にPFBCの技術開発と商用運転は停滞している。我が国で建設された商用3基のうち、苫東厚真3号機は廃止、中国電力大崎1号機は休止設備となり、現在(2015年)九州電力荊田新1号機が商用運転されているのみである。石炭のPFBC複合発電の問題点は、

- ①灰の熔融を避けるためガスタービン入り口温度が850℃付近に制限され、熱効率が低い。蒸気条件の改善に伴いPFBCと遜色ない熱効率が既存の微粉炭燃焼形式でも得られる。
  - ②高温の除塵システムが必要となるが、セラミックフィルターは信頼性にやや難がある。また、サイクロンでは除塵が完全ではなく、ガスタービン翼の摩耗が激しく、メンテナンス費がかさむ。
- である。このため、稼働率が微粉炭燃焼ボイラに比べ低くなりがちで、商用発電装置としてはあまりメリットがない。筆者が参加したFBCの国際会議(19th Int. Symp. on FBC, Vienna, 2006)での基調講演で使われた、“PFBC is deeply sleeping”の表現がその象徴と言える。

## 4 過給炉の開発過程と解決が必要であった課題

### 4.1 産総研での加圧流動層燃焼研究

産総研では1990年代中頃から加圧流動層燃焼の基礎研究を開始した<sup>6,7)</sup>。研究への参加が遅かったため、研究手法としては他の研究機関にないものを目指した。図3に当所で製作したPFBCのための実験設備の概要を示す。加圧流動層燃焼装置は圧力に耐える構造が必要のため、通常実験室規模では装置そのものを耐圧構造にすることが多い。そのため、燃焼状態の観察が困難であることから実際に石炭が燃焼している状態を観察した例は少ない。そのため実際に加圧雰囲気下で燃焼中の石炭を直接観察するため、加圧容器及び同加圧容器に収容し連続燃焼を実現するための透明石英製の燃焼装置を設計製作した。図3の上段に加圧容器の写真と(ステンレス製、内径1200mm、円筒部分高さ2800mm、3分割)の概略、下段に実験室規模の流動層燃焼装置の全体構成を示す。本装置で石炭の燃焼状態等を直接観察したが、PFBCの燃焼装置としてのポテンシャルを良く表す例として、図4に石炭灰の性状を写真で示す。典型的な瀝青炭をほぼ同サイズの常圧と加圧バブリング型流動層燃焼装置で燃焼させた場合の灰の性状は、写真に示されるように常圧条件では灰中未燃分が7%と高く黒色であるが、加圧条件(0.8MPa)では灰中未燃分が0.5%程度となり、灰色となる。この様にPFBC条件では、燃焼速度の遅い固体燃料でも酸素分圧が高いため大きな燃焼速度が得られるため、結果的に灰中未燃分も低下し燃焼効率も高くなる。

図4の写真に示されるように、PFBCそのものは固体燃料の燃焼装置として非常に高いポテンシャルを有していることがわかる。石炭の商用PFBCが頓挫したのは、PFBCそのものは高いポテンシャルがあっ

たものの、それを複合発電プロセスの燃焼器として採用した場合、多くの欠点が生じるためである。PFBCを複合発電と切り離せば、活用の余地は充分あると当時筆者は判断していた。この様な状況で、産総研でもPFBC研究の是非が問われていた時期の過給炉の開発の提案は、筆者が模索していたPFBCの新しい利用法に合致するもので歓迎すべきことであった。

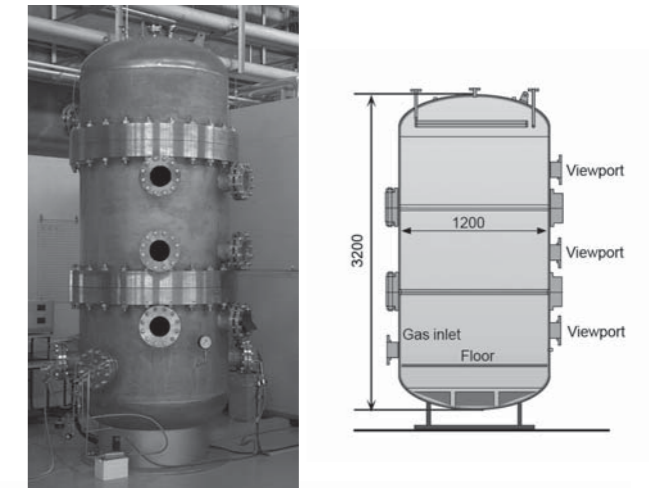


図3 PFBC実験システム、上段：加圧容器、下段：実験システム  
Fig.3 Schematic diagram of lab-scale PFBC. Upper: Photograph and schematic of pressure vessel. Lower: Whole system flow diagram of lab-scale PFBC.



図4 石炭の常圧FBCとPFBCでの灰の比較  
左：常圧、右：加圧  
Fig.4 Photograph of ash produced by FBC and PFBC. Left: Atmospheric condition. Right: Pressurized condition (0.8MPa).

4.2 過給炉と石炭PFBC複合発電の相違

燃焼装置としては高いポテンシャルを有するPFBCを利用して、複合発電の様に排ガスからのエネルギー回収を図るというアイデアを実現させるためには、石炭のPFBC複合発電で顕在化した問題点を克服する必要がある。その大きな問題点は、高温の除塵とガスタービン翼の摩耗であることは前述したとおりである。本技術開発の初期には、石炭にならってガスタービンによるエネルギー回収を模索したが、大規模石炭発電(数千t/d)と汚泥焼却(数百t/d)では規模が決定的に異なり、ガスタービンの使用はコスト的に見合わないことは早々に明らかとなった。その中で出てきた過給機による排ガスからのエネルギー回収は、コスト以外でも多くの利点を有している。

- ① 過給機駆動に要求される排ガス圧力は0.1~0.2PaGで、燃焼装置に高価な压力容器を必要としない。燃焼装置操作圧力は低くなるが、操作圧力の燃焼に与える影響は対数的なものであり、この低圧条件でも加圧の効果は充分期待できる。
- ② 過給機の駆動温度も500℃台であり、この排ガス温度では石炭で問題となったセラミックフィルターによる高温除塵も、充分信頼性が担保でき過給機の長時間運転が可能になる。
- ③ 発電をせず、単に機械的エネルギー回収(加圧空気製造)にとどまっても、送風機や排風機の省略による電力削減が大きく、充分省エネルギー性が実現できる。
- ④ 脱下水汚泥中の多量の水分は、過給機の駆動ガスとして利用できる。また、水分を含むことにより、高圧ポンプによる高圧環境下への汚泥の連続供給が容易となる。もともと汚泥と加圧流動層燃焼は相性が良い。

この他、加圧燃焼そのものに由来するメリットとして、ガス体積の圧縮による装置体積、配管類の減容化とこれに伴う放熱損失の減少、運転パラメータに操作圧力が加わることによる運転条件の柔軟化、燃焼速度の増大による局部高温化によるN<sub>2</sub>Oの削減(後述する)、等がある。



図5 石炭の場合に流動層内で生じたアグロメレーション  
Fig.5 Photograph of agglomerate produced in the fluidized bed at pressurized condition.

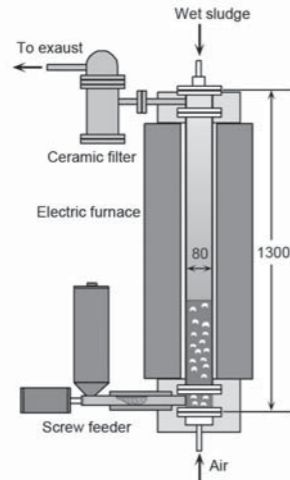


図6 脱下水汚泥燃焼装置の概略  
Fig.6 Schematic diagram of lab-scale fluidized bed combustor for wet sewage sludge.

4.3 脱下水汚泥の加圧流動層条件での燃焼特性(灰の挙動)

開発初期では、産総研は図3に示した石炭のPFBC用の実験装置を用いて脱下水汚泥の加圧条件下での燃焼特性を調べた。研究にあたって既往文献を調査したが、脱下水汚泥の加圧流動層での燃焼特性に関する研究報告は皆無であった。この段階で筆者が最も危惧したのは、加圧燃焼による燃焼速度の増大とそれに伴う流動層内部での局部高温域の形成とそれによる灰の溶融である。図5は石炭を図3の装置で1MPa、空気速度を最小化流動化速度 $u_{mf}$ 付近で操作し、層内の熱発生速度を極めて高い状態にした場合に発生したアグロメレーション(灰の溶融固化物)の写真である。これは意図的に発生させたものであるが、加圧流動層ではこうしたアグロメレーションの生成は致命的となる。下水汚泥は低融点成分であるNa、K、Ca等を大量に含んでおり、石炭の数倍から数十倍のこうした低融点成分による灰溶融の可能性は否定できなかった。

脱下水汚泥の燃焼実験には図6に示す電気炉加熱方式のステンレス製気泡流動層燃焼装置を用いた<sup>8)</sup>。加熱源としてスーパーキャナル発熱体を使用し、4回路構成、各回路の容量は6kW(200V×30A)、合計24kWの大容量となっている。このため、含水率の高い脱下水汚泥が供給された場合でも安定な燃焼が維持できる。内径は80mm、高さは1300mmで、下部には焼結ステンレス板が空気分散板として設置されている。脱下水汚泥は、装置最上部に設置された垂直投入管より高圧ポンプ(モノポンプ)により連続的に供給した。排ガスラインにはセラミックフィルターを設置し、排ガス中に同伴される灰分を分離した。操作圧力は最高0.8MPaとした。

実験の結果、全ての圧力条件で図7に示す写真の様に供給した脱下水汚泥中の灰分はほとんどがフライアッシュとして排出され、流動層内にはほとんど残留せず、危惧していた流動層内での灰の溶融は生じないことが確認された。これは、後の長万部町でのパイロット試験でも確認されている。本来なら、流動層内で灰の溶融が生じうる条件である

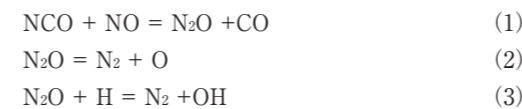


図7 セラミックフィルターで回収されたフライアッシュ  
Fig.7 Photograph of fly ash separated by ceramic filter module attached with the lab-scale fluidized bed combustor.

が、脱下水汚泥の場合には石炭と異なる燃焼状態を経ること、図7の写真にあるとおり汚泥灰が褐色(酸化鉄)を呈するほど、汚泥分離の過程で多量の凝集剤(この場合ポリ鉄系)を添加すること、等が理由と後で判った。脱下水汚泥の場合、汚泥塊が乾燥過程において流動層内で比較的細かく粉砕されること、層内で燃焼するチャーによる発熱は乾燥汚泥全体の発熱量の1/4~1/3程度であり、層内での発熱速度は石炭ほど大きくないこと、灰中の低融点アルカリ成分の溶融が添加された鉄により抑制されること、これらの理由により、石炭の様なアグロメレーションを生じにくくしている。この試験結果により、基本的に加圧流動層燃焼条件での脱下水汚泥の燃焼には特筆する問題は無く、システムとしては成立する可能性が高いことが確認され、次のパイロット規模の実証試験に進むことが出来た。加えて、脱下水汚泥の加圧流動層燃焼条件での燃焼では、NO<sub>x</sub>やN<sub>2</sub>Oの排出量が常圧条件に比べ低く、環境特性も良好となることも合わせて確認された。

4.4 長万部町での5t/dパイロットにおけるN<sub>2</sub>O低減効果の解明

研究の後期段階では長万部町での5t/dパイロット機による実証試験が主体となったが、この中で過給炉の持つ省エネルギー性と並んでもう一つの特長である低N<sub>2</sub>O排出量について、理論的に解明した。前述したとおり、次世代の下水汚泥焼却プロセスは、省エネルギー性と並んでN<sub>2</sub>Oの排出量が小さいことが必須である。これは、人為的N<sub>2</sub>O排出源に占める下水汚泥焼却プロセスの割合が無視できない大きさであるからである<sup>9)</sup>。過給炉は実証試験の結果、N<sub>2</sub>O排出量が従来機の1/3~1/2になることが確かめられた<sup>10)</sup>。N<sub>2</sub>Oの生成・分解のメカニズムは1990年代から解明が進み、現在ではその大部分が解明されており、関係する数十の素反応速度データは整備されている<sup>11)</sup>。単純な系ではN<sub>2</sub>Oの生成量を精度良く予測可能である。メカニズム的には



の反応が重要であり、特にN<sub>2</sub>Oの分解反応である反応(2)と(3)は、高温で卓越する反応であることが判っている。下水汚泥の流動焼却炉では、汚泥の乾燥、熱分解による揮発分の発生とN<sub>2</sub>O前駆体の生成、揮発分の燃焼、等複雑な過程を経るため、高精度の予測は困難である。しかしながら、経験的に反応(2)と(3)の温度に対する依存性が大きいことから、フリーボードの最高温度を指標に最終的なN<sub>2</sub>O発生量を予測する手法が有効である。

図8は長万部町の5t/d実証試験機で得られたフリーボードの温度分布の一例である。層表面から2m付近(ガス分散板から3m付近)の温度が局所的に高くなり、以降炉出口に向かって温度が低下する温度分布を形成している。これに対し、同サイズの常圧炉ではフリーボード温度が炉出口に向かって単調に増加する温度分布を示している。加圧条件ではフリーボード下部に局所的に1200Kに達する高温場が形成されていることが、大きな特長であり、この局所高温場によりN<sub>2</sub>O生成が抑制されていることは明らかである。この結果を理論的に確認するため、化学動力学計算を試みた<sup>12,13)</sup>。汚泥の熱分解データ

より、フリーボード最下部(流動層表面)における未燃ガス組成を推定し、化学動力学ソフトウェアCHEMKIN-IIIを用い、フリーボード部は一次元流れと仮定してガス状未燃分の燃焼速度を計算した。計算結果からフリーボード各位置における体積熱発生速度 $Q$  kW/m<sup>3</sup>を炉壁の熱伝達係数をパラメータにして求めた結果を図9に示す。計算により、層表面2m付近で局所的に未燃ガスの燃焼反応が活発になり、大きな熱の発生があることが判る。これにより図8の加圧条件での局所的な高温場形成が説明できる。常圧の条件での計算結果では、燃焼反応速度が最大となるのは層表面3m以降であり、その場合は放熱を考慮すると加圧条件ほど局所的な高温場形成には至らない。以上のように、理論的にも加圧流動層条件での脱下水汚泥の燃焼は、フリーボードに自然に局所高温域を形成しN<sub>2</sub>Oの分解反応を促進するため、結果的に低N<sub>2</sub>Oを実現することが確認できた。従来のN<sub>2</sub>O対策に、フリーボード部に二次空気や場合によっては補助燃料を吹き込んで、意図的に高温場を形成させる方法があるが、それを内在していると言える。

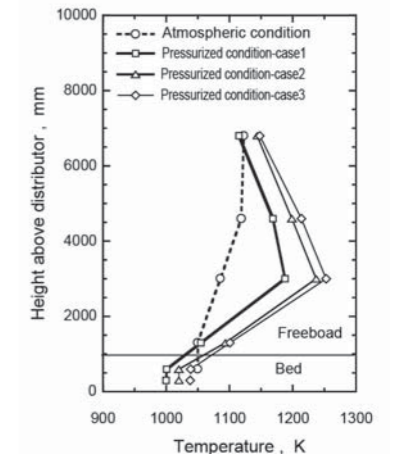


図8 5t/d実証機でのフリーボード温度分布の一例  
Fig.8 Temperature profiles in freeboard section of 5 t/day scale pilot turbo-charged pressurized fluidized bed sewage sludge incinerator.

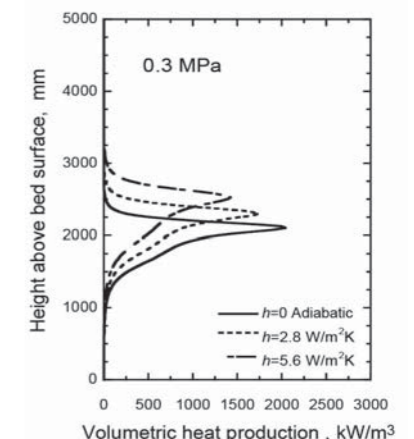


図9 フリーボードでの体積熱発生速度の計算結果  
Fig.9 Calculated volumetric heat production rates in freeboard.



## 5 おわりに

筆者の専門は石炭の流動層燃焼であり、この分野で長年研究を続けてきた。常圧の気泡型流動層燃焼にはじまり、次いで循環流動層燃焼、そして最後にたどり着いたのが加圧流動層燃焼であった。この最後に出会った加圧流動層燃焼は石炭等の固体燃料の燃焼装置としては極めて高い性能、すなわち大きな燃焼速度、高い燃焼負荷、低NO<sub>x</sub>性を示し、それまでの燃焼装置とは一線を画するものである。ただし、実用機としての使用法は大規模な複合発電に限られるというのがこの分野での常識的な考え方であった。その後、本家の石炭分野では残念ながら加圧流動層燃焼技術は多くの問題を抱えて技術開発は停滞してしまっただ。この基本技術である加圧流動層燃焼の下水汚泥焼却炉への転用というアイデアを持ち込まれたときは驚いたが、石炭での状況から正直実用化には不安があった。しかしプロセスの検討を続け、特にガスタービンから過給機への変更がブレイクスルーで、このアイデアにより石炭で露呈したシステム全体の弱点を克服できる見通しが得られた時点で、不安は一掃された。ただし、基本システムがfeasibleということであり、実用化には月島機械をはじめとするメーカーの努力があって、はじめて実用化できたものである。今回の過給炉の開発は、結果的に廃棄物焼却分野では、世界で初めて加圧流動層燃焼を用いたプロセスを実用化した例になったと思われる。今回の技術開発は、ある分野で「落第点」とった技術でも、目的や評価軸が異なる別の分野なら充分転用・活用ができることを示した好例だと思う。技術史等を調べるとこの様なことは技術開発の中では珍しいことではないようである。技術者、特に若い技術者へ、今回の過給炉の開発の経緯が一つの教訓になれば幸いである。

## 参考文献

- 1) Anderson, J. and S.A. Jansson: "Commissioning experience from three PFBC plants," Proc. 11th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, p.787-793, 1991.
- 2) Hippinen, I. and A. Jahkola: "The Experimental Studies of Pressurised Fluidised Bed Combustion at Helsinki University of Technology 1991-92," Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, 1993.
- 3) Lu, Y., I. Hippinen, J. Jalovaara and A. Jahkola: "Emissions of Nitrogen Oxides (NO<sub>x</sub> & N<sub>2</sub>O) in Pressurised Fluidised Bed Combustion," Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, 1993.
- 4) 新エネルギー・産業技術総合開発機構報告書: 炭化水素系エネルギー資源利用技術の総合開発に関する調査報告書, 2001.
- 5) Cuenca, M. A. and Anthony E. J. ed., Pressurized Fluidized Bed Combustion, Blackie Academic & Professional (London), 1995.
- 6) Suzuki, Y., H. Hatano and H. Moritomi: "Experimental Study of Pressurized Fluidized Bed Combustion by Using a Laboratory Scale Combustor," Proc. 17th Pittsburg Coal Conference, Pittsburg, 2000.
- 7) 鈴木善三、守富 寛、幡野博之: 実験室規模の加圧流動層燃焼における窒素酸化物の生成特性 —チャーによるNO<sub>x</sub>分解—, 日本エネルギー学会誌, p.773-779, 2005.
- 8) Suzuki, Y., Ochi, S., Terakoshi, K. and Iwai Y.: "Combustion of sewage sludge in a pressurized fluidized bed combustor," Proc. 19th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, Vienna, Austria, 2006.
- 9) 温室効果ガスインベントリオフィス(GIO)編、環境省地球環境局温暖化対策課監修: 日本国温室効果ガスインベントリ報告書, p.8/16-17, 2008.
- 10) 長沢英和、山本隆文: 過給式流動焼却炉の実証運転, TSK技報, No. 9, p.6-13, 2008.
- 11) Konnovv, A.A.: "Implementation of the NCH pathway of prompt-NO formation in the detailed reaction mechanism," Comb. & Flame, p.2093-2105, 2009.
- 12) 村上高広、北島暁雄、鈴木善三、長沢英和: 過給式流動炉を利用した下水汚泥燃焼場におけるNO-N<sub>2</sub>O排出特性, TSK技報, No. 13, p.6-10, 2010.
- 13) 北島暁雄、村上高広、鈴木善三: 加圧流動層炉運転時燃焼特性に関する詳細化反応を考慮した数値解析, 第47回燃焼シンポジウム予稿集, p.364-365, 2009.



実績紹介 >>

# 過給式流動焼却設備の実用運転

## Practical Operation of a Pressurized, Fluidized Bed Incineration System



山本 隆文  
Takafumi YAMAMOTO  
水環境事業本部  
ソリューション技術部  
熱技術グループ

### Abstract

The pressurized, fluidized bed incineration systems that we built at the Kasai Water Reclamation Center of the Tokyo Metropolitan Area and at the Sagami River Basin Right-bank Treatment Plant of Kanagawa Prefecture last year are currently running smoothly. In relation, the Tokyo metropolitan government has formulated its “Smart Plan 2014” basic energy plan and actively works to reduce energy consumption. Kanagawa Prefecture also lists measures regarding global warming and the circulation of resources and energy in its “Kanagawa Prefecture Basin Sewage Medium-term Vision” and actively promotes energy conservation measures. As part of these efforts, our pressurized fluidized bed incineration system can reduce power consumption and auxiliary fuel usage, and can also reduce N<sub>2</sub>O emissions through high-temperature combustion zones formed using the effects of pressure. We thus report on the reduction of greenhouse gas emissions in practical operation.

昨年度、東京都の葛西水再生センターおよび神奈川県相模川流域右岸処理場に過給式流動焼却設備を納入し、現在順調に稼働中である。東京都ではエネルギー基本計画「スマートプラン2014」を策定してエネルギー削減に積極的に取り組まれており、神奈川県では「神奈川県流域下水道中期ビジョン」で地球温暖化対策や資源・エネルギーの循環等を掲げて省エネ対策を積極的に進められている。これらの取り組みの一環として、消費電力および補助燃料使用量が削減でき、加圧効果による高温燃焼領域の形成でN<sub>2</sub>O排出量も削減できる当社の「過給式流動炉」を採用されているが、本報では実用運転における温室効果ガス排出量の削減効果について報告する。

キーワード：過給式流動炉、過給機、自立、温室効果ガス排出量、削減効果  
Keyword: Pressurized fluidized bed incineration, turbocharger, independence, greenhouse gas emissions, reduction effect

### 1 はじめに

東京都葛西水再生センター（以下、葛西）の1号炉（300t/日）および神奈川県相模川流域右岸処理場（以下、四之宮）の北系2号炉（100t/日）に過給式流動炉を採用いただき、現在は順調に稼働中である。

過給式流動炉は省エネ化を図るために開発した気泡流動炉と過給機を組み合わせた焼却炉であり、圧力下で脱水ケーキを焼却する。焼却炉で発生した燃焼排ガスが過給機に導入されてタービンを駆動し、コンプレッサーで圧縮空気を製造する。このシステムにより消費電力、補助燃料使用量およびN<sub>2</sub>O排出量が削減される。

本報では、東京都および神奈川県で実用運転されている過給式流動焼却設備の概要、稼働状況、エネルギー削減効果および温室効果ガス排出量の削減効果について報告する。

### 2 設備概要

「過給式流動焼却炉」は図1に示すように流動焼却炉と過給機を組み合わせた焼却設備である。圧力下で脱水ケーキを燃焼し、その燃焼排ガスが圧力の低い大気圧下の煙突に向かって流れる過程に過給機が設置されており、これを駆動する。駆動した過給機は外気を取り込んで圧縮空気を生み出し、燃焼空気として炉に供給することが可能となる。これによって、従来の焼却設備で必要であった流動ブロウおよび誘引ファンが不要となる。また、過給機の仕組みについて図2に示す。脱水ケーキは含水率が高く、従来炉ではこの水分が燃焼の妨げになっていたが、過給式流動炉では脱水ケーキ中に含まれる水分が焼却炉で蒸発するときのボリュウム増加エネルギーを含んだ燃焼排ガスが過給機タービンの駆動源となっている。

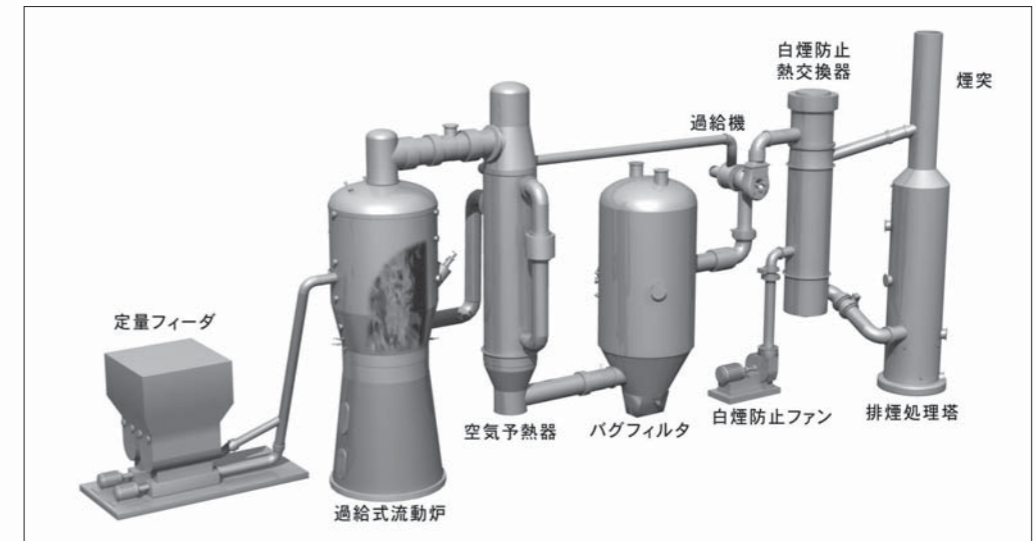


図1 過給式流動焼却設備の概略フロー  
Fig.1 The flow of the Pressurized fluidizedbed incineration system

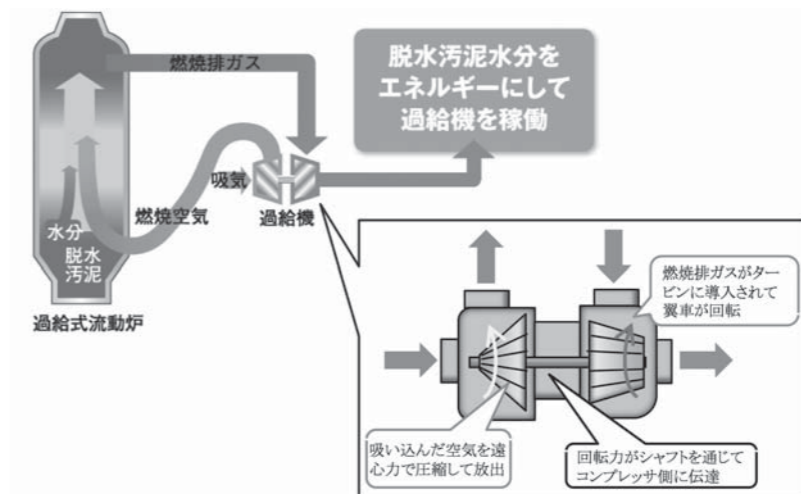


図2 過給式流動焼却設備の概略フロー  
Fig.2 The flow of the Pressurized fluidizedbed incineration system

2.1 葛西水再生センター

葛西水再生センター(以下、葛西)に納入した焼却設備の処理規模は世界最大級となる300t/日である。外観およびフローをそれぞれ図3および4に示す。

焼却炉で発生した燃焼排ガスで燃焼空気の子熱を行うのは従来炉同様である。空気予熱器の後ろにはバグフィルタを配置して、燃焼排ガス中に含まれる焼却灰を過給機に導入される前に捕集する。集塵温度が約600℃となるためフィルタはセラミックフィルタを採用している。集塵後の燃焼排ガスは過給機に導入され、タービンを駆動して圧力が下がる(圧力が最も低い煙突出口まで流れていける圧力を残してタービンに仕事をさせることとなる)。

その後は従来炉同様に、白煙防止空気の子熱のために熱回収され

た後に、脱硫・脱塩・除湿のため排煙処理塔を経て無害化された燃焼排ガスが煙突より排出される。

既設焼却炉との仕様比較を表1に示す。焼却炉から過給機までが約110~130kPa・G(定格処理時)の正圧となるため、焼却炉の内径は従来炉と比較して65%程度、断面積は40%程度となる。過給式流動炉では過給機により加圧された状態で焼却するため、焼却炉内部の燃焼排ガス容積が小さくなり、焼却炉~過給機(ダクト含む)までが従来炉と比べてコンパクトにできる。

また、炉のみならずバグフィルタ構造は円筒式(天板は鏡板)となる。バグフィルタはフィルタ配列により2基併設となっている。また、過給機についても国内最大級の船用過給機2基併用である。



図3 葛西水再生センター焼却設備の外観写真①

Fig.3 The picture of Kasai water Reclamation center incineration system(1)



図3 葛西水再生センター焼却設備の外観写真②

Fig.3 The picture of Kasai water Reclamation center incineration system(2)

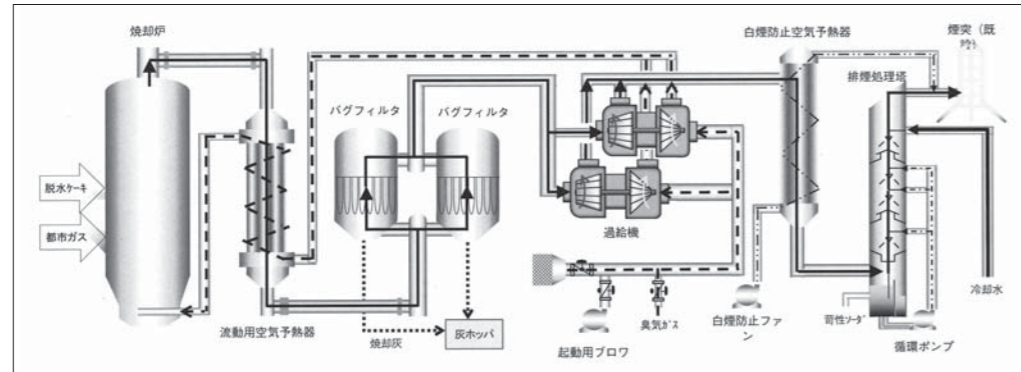


図4 葛西水再生センター焼却設備のフロー

Fig.4 The flow of Kasai water Reclamation center incineration system

表1 焼却炉仕様の比較(既設との比較)  
Table1 The comparison of the incinerator specification (of existing incinerator)

	従来炉 (5号炉)	過給炉 (1号炉)
処理能力	t/日 300	300
内径	mm 8,200	5,400
外径	mm 8,900	6,100
常用時 炉内圧力	kPa・G -0.5	120~130
炉内 最高温度	℃ 850	870~890

2.2 相模川流域右岸処理場

相模川流域右岸処理場(以下、四之宮)に納入した焼却設備の処理規模は100t/日、外観およびフローをそれぞれ図5および6、焼却炉仕様の比較を表2に示す。



図5 相模川流域右岸処理場焼却設備の外観写真①

Fig.5 The picture of Sagami River basin right bank treatment plant incineration system(1)

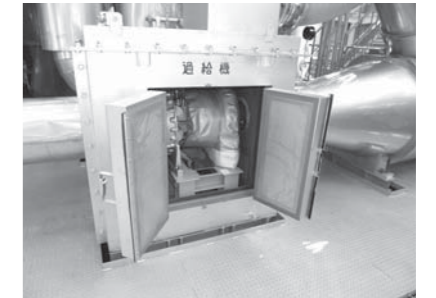


図5 相模川流域右岸処理場焼却設備の外観写真②

Fig.5 The picture of Sagami River basin right bank treatment plant incineration system(2)

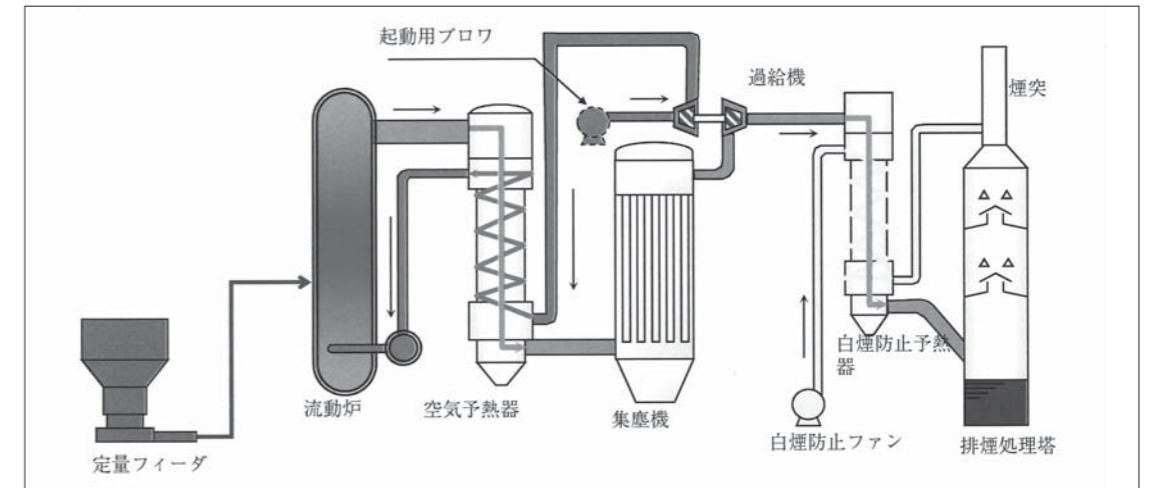


図6 相模川流域右岸処理場のフロー

Fig.6 The flow of Sagami River basin right bank treatment plant incineration system

表2 100t/日規模の焼却炉仕様の比較

Table2 The comparison of the incinerator specification (of 100t/day scale)

	従来炉	過給炉 (四之宮2号炉)
処理能力	t/日 100	100
内径	mm 4,800	3,200
外径	mm 5,500	3,900
常用時 炉内圧力	kPa・G -0.5	110
炉内 最高温度	℃ 850	870~880

表3 葛西水再生センターおよび相模川流域右岸処理場の稼働状況

Table3 The operation situation of Kasai water Reclamation center and the Sagami River basin right bank treatment plant

<葛西水再生センター>		2015年4月15日現在	
処理運転時間	5,343 hr	ケーク供給系運転	
稼働日数	270 日		
脱水ケーク処理量	58,639 ton		
平均処理量	263 t/日	脱水ケーク処理量÷処理時間×24hr/日	
稼働率	82.5 %	処理運転時間÷(稼働日数×24hr/日)×100	
<相模川流域右岸処理場>		2015年4月13日現在	
処理運転時間	4,684 hr	ケーク供給系運転	
稼働日数	235 日		
脱水ケーク処理量	14,949 ton		
平均処理量	77 t/日	脱水ケーク処理量÷処理時間×24hr/日	
稼働率	83 %	処理運転時間÷(稼働日数×24hr/日)×100	

#### 4 立ち上げおよび立ち下げ

過給機は駆動機を持たないため、立ち上げ時には起動用ブロワ(従来炉の流動ブロワと役割は同じ)を運転して焼却炉の流動空気や補助燃焼装置の燃焼空気を供給する。昇温完了後に脱水ケーキ投入を開始した後、排ガス流量増加に伴って過給機回転数が上昇して過給機から供給される圧縮空気量が増加するとともに起動用ブロワ回転数が低下して最終的には起動用ブロワを停止する。この起動用ブロワによるアシストが不要となる状態を自立運転(過給機自立)と呼ぶ。

また、立ち下げ時は脱水ケーキ供給を停止すると排ガス流量低下に伴い、過給機で生成される燃焼空気も減少する。脱水ケーキ供給停

止直後は焼却炉内に若干残った脱水ケーキの燃やしきりおよび過給機を安定的に停止させる必要があることから立ち上げ時同様に起動用ブロワを運転する(起動用ブロワの発停は自動制御)。燃やしきり運転終了後は、従来炉同様に順次設備を停止する。

#### 5 運転状況

葛西における運転状況を図7および8に示す。各部温度および圧力とも安定している。過給機入口空気圧力が $-2\text{kPa}\cdot\text{G}$ 程度の負圧となっており、設備が自立している。

#### 6 低負荷運転

四之宮の設備において、脱水ケーキの供給量を変動させて設備の安定性を確認した。供給量は低負荷の方へ $2.5\sim 3.5\text{t/h}$ と変動させた(定格 $4.2\text{t/h}$ )。図9に示すようにケーキ負荷変動に対して各パラメータの追従性はよく、非常に安定した運転が行えた。また、負荷を下げておける間の $\text{O}_2$ 濃度がほぼ一定で安定しており、空気比一定運転が可能であった。負荷を下げる場合、ケーキの燃焼に必要な燃焼空気量が減少するが、従来炉では焼却炉内の空塔速度(排ガスの上昇速度)を保持する必要があるため(流動砂の流動を保持する必要あり)

焼却炉に供給する空気量を絞れず(空気比が高くなってしま)、燃費が悪くなる傾向があったが、過給式流動炉においては、低負荷運転で過給機の回転数が下がるとともに圧縮空気圧力が下がるため実風量を確保でき、炉内流動砂の流動悪化が起きにくく、 $\text{O}_2$ 濃度はほぼ一定のまま負荷変動対応が可能となる。

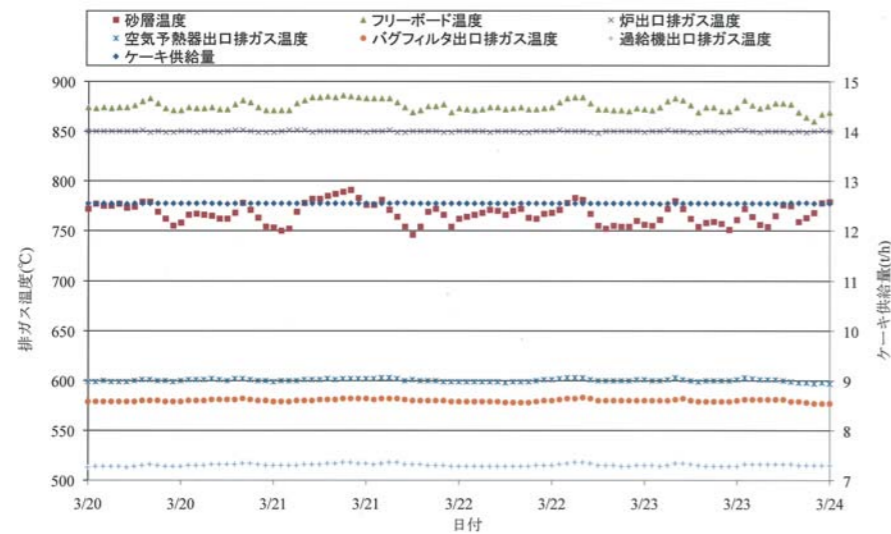


図7 葛西水再生センターにおける運転状況(温度)  
Fig.7 The operation conditions in Kasai water Reclamation center (temperature)

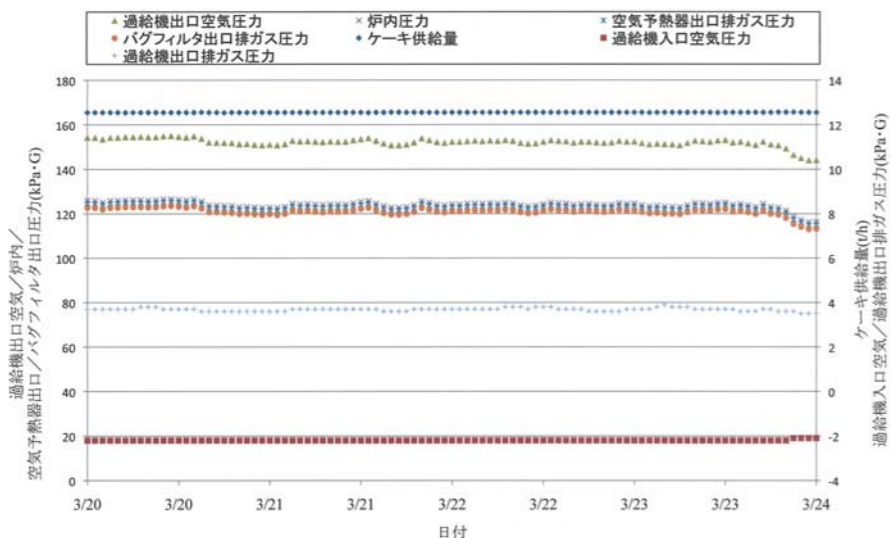


図8 葛西水再生センターにおける運転状況(圧力)  
Fig.8 The operation conditions in Kasai water Reclamation center (pressure)

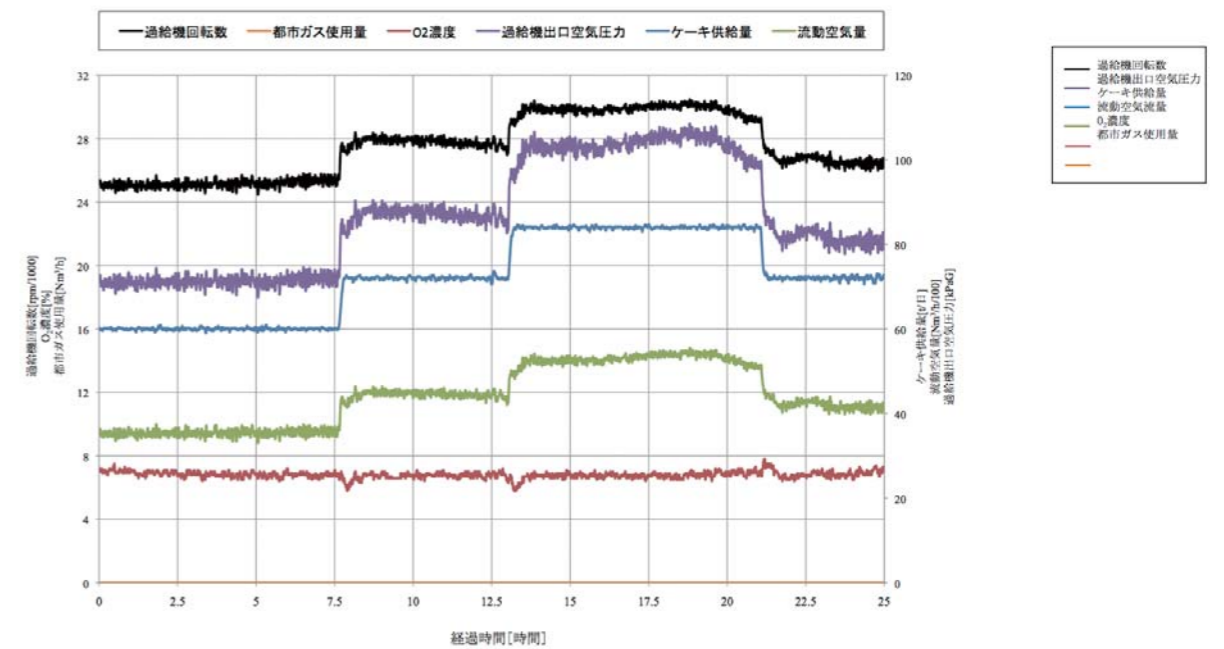


図9 低負荷運転時の運転状況(四之宮)  
Fig.9 The operation conditions at low load operation (Shinomiya)

また、葛西水再生センターにおける低負荷運転状況を図10および図11に示す。葛西でも四之宮同様に負荷低下に合わせて過給機回転数が下がり、過給機出口空気圧力が追従して低下する。排煙処理塔入口O<sub>2</sub>濃度も5～6%でほぼ一定となっており、脱水ケーキ性状の極端な変動がない場合は燃費が悪くならないことが分かる。

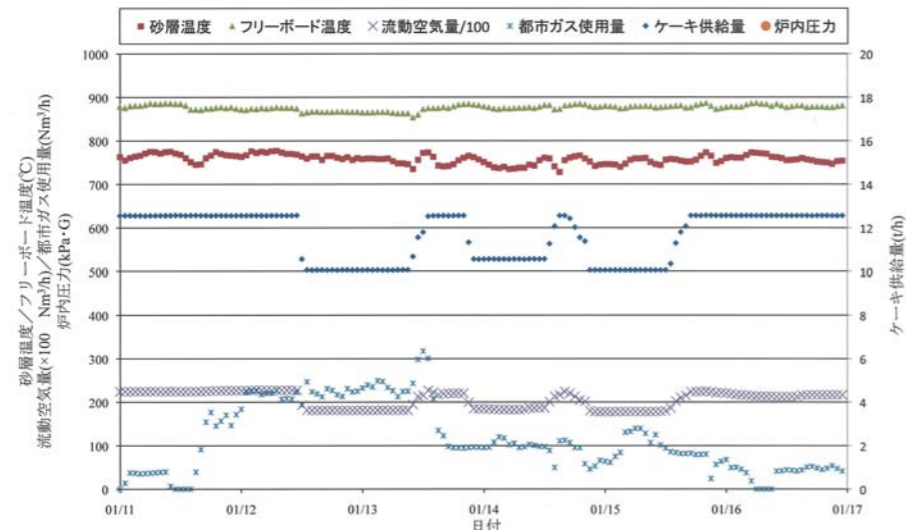


図10 低負荷運転時の運転状況(葛西)  
Fig.10 The operation conditions at low load operation (Kasai)

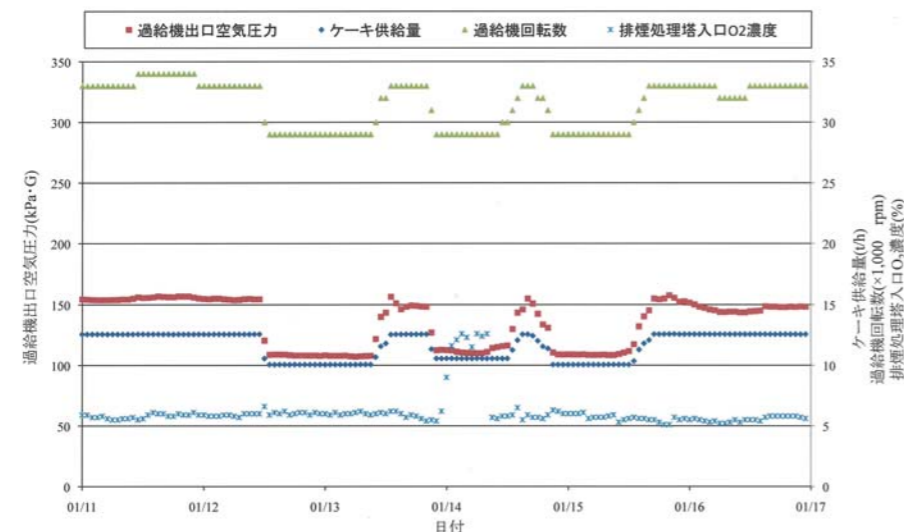


図11 低負荷運転時の過給機運転状況(葛西)  
Fig.11 The operation conditions of turbocharger at low load operation (Kasai)

## 7 エネルギー削減効果

### 7.1 消費電力削減

従来焼却設備のフローを図12に示す。従来焼却設備には焼却炉で必要な燃焼空気を供給するための流動プロウと焼却炉で発生する燃焼排ガスを大気に放出するための誘引ファンが備えられている。一方、過給式流動焼却炉は前述したように過給機で燃焼空気が生成され、焼却炉で発生した燃焼排ガスは自らの圧力で煙突まで流れて排気される。

葛西において、脱水ケーキ供給設備～排ガス処理設備およびユーティリティ設備を含む消費電力量を既設と比較すると、既設は脱水ケーキ1t-DS当たり392kWh/t-DSに対して、過給式流動炉は流動プロウおよび誘引ファンが不要となるため消費電力は132kWh/t-DSとなった。よって、過給式流動焼却炉における消費電力の削減率は約66%となった。

四之宮においては、既設は97.8kWh/t-wetに対して、過給式流動炉は39.0kWh/t-wetとなった。よって、過給式流動焼却炉における消費電力の削減率は約60%である。

### 7.2 補助燃料使用量削減

過給式流動炉の大きさは、圧力下での燃焼で燃焼排ガスが圧縮されるため、焼却炉における燃焼排ガスの空塔速度(上昇する速度)は従来炉と変わらないが、炉径が細くなる。したがって、焼却炉の表面積が既設炉に比べて小さくなり、焼却炉の放熱量が低減されて補助燃料使用量が削減される。

葛西における補助燃料使用量は既設が63.7Nm<sup>3</sup>/t-DS、過給式流動炉が48.7Nm<sup>3</sup>/t-DSとなった。過給式流動炉における都市ガス使用量の削減率は約24%である(脱水ケーキ含水率平均値78%)。但し、脱水ケーキ含水率が75～76%で自然することは確認済みである。

四之宮では既設炉および過給式流動炉とも脱水ケーキが自然している。

## 8 温室効果ガス排出量削減

葛西においては1t-DS当たり、四之宮においては1t-wet当たりのCO<sub>2</sub>排出量で従来炉との比較を行った。

### 8.1 消費電力由来

葛西においては電力のCO<sub>2</sub>排出係数0.382kg-CO<sub>2</sub>/kWhより、消費電力由来のCO<sub>2</sub>排出量は、既設炉が150kg-CO<sub>2</sub>/t-DSとなるのに対して過給式流動炉は50kg-CO<sub>2</sub>/t-DSとなった。

四之宮では電力のCO<sub>2</sub>排出係数0.521kg-CO<sub>2</sub>/kWhより、消費電力由来のCO<sub>2</sub>排出量は、既設炉が50kg-CO<sub>2</sub>/t-wetとなるのに対して過給式流動炉は20kg-CO<sub>2</sub>/t-wetとなった。

### 8.2 補助燃料由来

葛西において都市ガスのCO<sub>2</sub>排出係数2.277kg-CO<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup>より、補助燃料由来のCO<sub>2</sub>排出量は、既設炉が145kg-CO<sub>2</sub>/t-DSとなるのに対して過給式流動炉は111kg-CO<sub>2</sub>/t-DSとなった。

### 8.3 N<sub>2</sub>O由来

N<sub>2</sub>O排出量は排ガス測定による結果(排ガス中のN<sub>2</sub>O濃度[ppm])から算出した数値を用いて比較を行った(排ガス流量×N<sub>2</sub>O濃度および重量換算して算出)。

葛西では、高温焼却を行っている既設が脱水ケーキ1t-DS当たり2.3kg-N<sub>2</sub>O/t-DSであるのに対して、過給式流動炉は0.82kg-N<sub>2</sub>O/t-DSとなった(総排ガス量33,500Nm<sup>3</sup>/h、排ガス中水分4.3%、N<sub>2</sub>O濃度32.6ppm、ケーキ投入量12.5t/h、ケーキ含水率79.9%より)。過給式流動炉におけるN<sub>2</sub>O排出量の削減率は約64%である。

四之宮では高温焼却を行っている既設が脱水ケーキ1t-wet当たり0.645kg-N<sub>2</sub>O/t-wetであるのに対して、過給式流動炉は0.254kg-N<sub>2</sub>O/t-wetとなった。過給式流動炉におけるN<sub>2</sub>O排出量の削減率は約60%である。

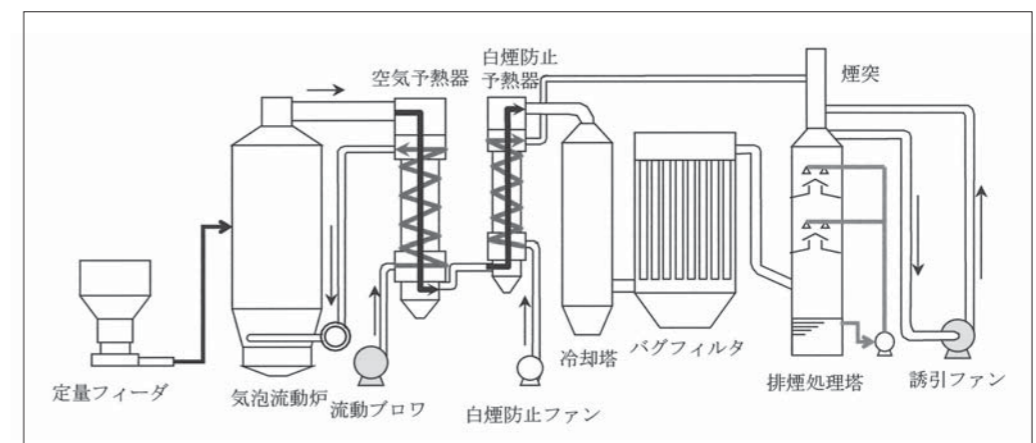


図12 従来焼却設備のフロー  
Fig.12 The flow of the past incineration system

### 8.4 合計

N<sub>2</sub>Oの地球温暖化係数はCO<sub>2</sub>の310倍であるから、それぞれのN<sub>2</sub>O排出量をCO<sub>2</sub>排出量に換算すると、葛西では既設713kg-CO<sub>2</sub>/t-DSに対し、過給式流動炉は254kg-CO<sub>2</sub>/t-DSとなり、四之宮では既設200kg-CO<sub>2</sub>/t-wetに対し、過給式流動炉は79kg-CO<sub>2</sub>/t-wetとなった。

CO<sub>2</sub>排出量比較を表4に示す。消費電力、補助燃料およびN<sub>2</sub>O由来のCO<sub>2</sub>排出量合計は、葛西が既設1,008kg-CO<sub>2</sub>/t-DSに対し、過給式流動炉415kg-CO<sub>2</sub>/t-DSであり、過給式流動炉における消費電力、補助燃料およびN<sub>2</sub>O由来のCO<sub>2</sub>排出量合計の削減率は約59%となった。四之宮では、既設251kg-CO<sub>2</sub>/t-wetに対し、過給式流動

炉99kg-CO<sub>2</sub>/t-wetであり、過給式流動炉における消費電力およびN<sub>2</sub>O由来のCO<sub>2</sub>排出量合計の削減率は約60%となった。

また、年間CO<sub>2</sub>排出量比較を表5および図13に示す。葛西の日処理量300t/日、年間稼働日数292日/年、脱水ケーキの平均含水率を78%とすると、年間CO<sub>2</sub>排出量はそれぞれ既設が19,426t-CO<sub>2</sub>/年に対して、過給式流動炉は7,998t-CO<sub>2</sub>/年で、年間11,428tのCO<sub>2</sub>が排出削減される。一方、四之宮においては日処理量100t/日、年間稼働日数292日/年とすると、年間CO<sub>2</sub>排出量はそれぞれ既設が7,300t-CO<sub>2</sub>/年に対して、過給式流動炉は約2,891t-CO<sub>2</sub>/年で、年間4,409tのCO<sub>2</sub>が排出削減される。

表4 CO<sub>2</sub>排出量比較  
Table4 The comparison of the CO<sub>2</sub> amount of emission

	葛西			四之宮		
	原単位(kg-CO <sub>2</sub> /t-DS)		削減率 %	原単位(kg-CO <sub>2</sub> /t-wet)		削減率 %
	従来炉	過給炉		従来炉	過給炉	
電力由来	150	50	66.3	50	20	60.0
補助燃料由来	145	111	23.6	0	0	—
N <sub>2</sub> O由来	713	254	64.4	200	79	60.5
合計	1,008	415	58.8	250	99	60.4

表5 年間CO<sub>2</sub>排出量比較  
Table5 The comparison of the annual CO<sub>2</sub> amount of emission

単位はt-CO<sub>2</sub>/年

	葛西		四之宮	
	従来炉	過給炉	従来炉	過給炉
電力由来	2,891	964	1,460	584
補助燃料由来	2,794	2,139	0	0
N <sub>2</sub> O由来	13,741	4,895	5,840	2,307
合計	19,426	7,998	7,300	2,891

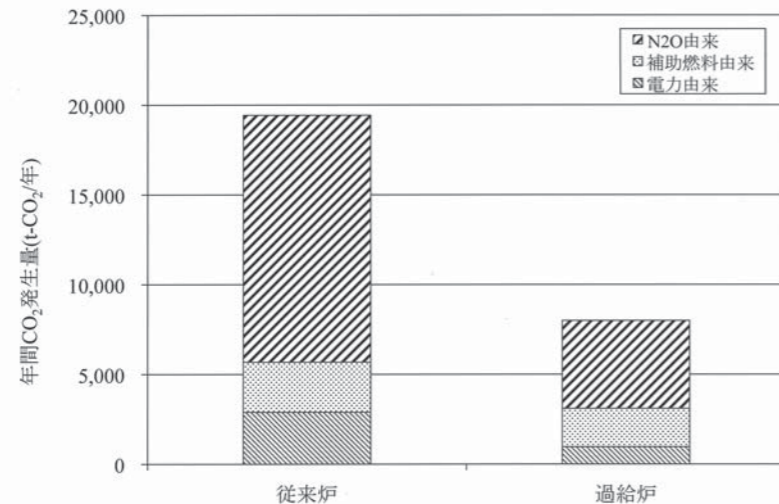


図13 年間CO<sub>2</sub>排出量比較  
Fig.4 The comparison of the annual CO<sub>2</sub> amount of emission

### 9 6ヶ月点検結果

四之宮において引き渡し後、6ヶ月の各機器点検を行った。焼却炉、空気予熱器、バグフィルタ、過給機等の主要機器について、加圧下での運転状況を重点的に確認するために点検を行った結果、いずれも使用上問題はないと判断できるものであった。

### 10 まとめ

昨年度から運用した葛西および四之宮の過給式流動炉において、起動用ブロフによるアシスト抜きでの自立運転が確認でき、大幅な消費電力の削減が可能となった。また、補助燃料使用量およびN<sub>2</sub>O排出量においても削減効果が得られ、温室効果ガス発生量は既設を大幅に下回る効果が得られた。

葛西については、消費電力および補助燃料使用量の削減率がそれぞれ66%、24%となった。また温室効果ガス排出量についても既設よりも約59%削減できることが分かった。

一方、四之宮についても消費電力の削減率が60%となり、温室効果ガス排出量についても既設よりも約60%削減できることが分かった。

また、低負荷時でもO<sub>2</sub>濃度が安定しており、空気比一定運転が可能であった。

葛西、四之宮いずれも順調に稼働中であり、安定した運転と高い稼働率となっている。

### 11 謝辞

葛西水再生センターおよび相模川流域右岸処理場の試運転実施および本稿を執筆するにあたって各種データを提供していただいた東京都下水道局葛西水再生センター様、東京都下水道サービス株式会社様、神奈川県流域下水道整備事務所様等の関係者に深く感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) 清水大輔、山本隆文、折戸敢：過給式流動炉の長期連続運転、第47回下水道研究発表会講演集、pp.852-854 (2010)

# 体脂肪の燃焼

燃焼はヒトの体でもエネルギーを消費する重要な役割を果たす。肥満解消には、運動で体脂肪を燃焼させて減らす必要がある。まずはウォーキングから始め、15分のジョギングを2ヵ月こなしてスマートな体になる。



## 4 筋トレを組み合わせると効率アップ

有酸素運動による消費エネルギーはどのくらいか。たとえばジョギングであれば、体重60kgの人が1km走った場合、**体重×距離＝消費エネルギー**なので、消費エネルギーは60kcalになる。ウォーキングの場合は、ジョギングの約半分の30kcal。とても多いとはいえない数字だ。

厚生省の「健康づくりのための身体活動基準2013」でも、体重60kgの人の消費エネルギーは、普通歩行10分20kcal、速歩10分30kcal、水泳10分75kcal、ランニング15分110kcalとなっている(表1)。

実は有酸素運動による体脂肪燃焼は、効果を上げるのに効率がよいとはいえないのだ。ここで前述の筋肉を鍛えて基礎代謝量を増やすことに注目しよう。短時間でも行えて筋肉を増やす運動が、筋肉トレーニングや短距離の無酸素運動。筋肉が増えると体脂肪が分解されるので、無酸素運動を有酸素運動に組み合わせると、体脂肪燃焼の効率がアップするのだ。

- ① 有酸素運動による脂肪の燃焼
- ② 無酸素運動による筋肉の増強

ポイントは、無酸素運動の筋トレを最初に行うこと。筋トレは体脂肪を分解しても酸素を使わないので燃焼はしない。体脂肪は分解しないと燃えない。だから、**A. 最初に無酸素運動で筋肉を鍛え、代謝を上げて体脂肪が燃えやすくなる**  
**B. 次に有酸素運動で体脂肪を燃やす**

表1 運動で消費するエネルギー 厚生省「健康づくりのための身体活動基準」(2013年)

	普通歩行	速歩	水泳	自転車 (軽い負荷)	ゴルフ	軽い ジョギング	ランニング	テニス (シングルス)
運動時間	10分	10分	10分	20分	60分	30分	15分	20分
体重別エネルギー消費量(単位:kcal)								
50kgの場合	20	25	60	55	130	130	90	105
60kgの場合	20	30	75	65	155	155	110	125
70kgの場合	25	35	85	75	185	185	130	145
80kgの場合	30	40	100	85	210	210	145	170

## 6 肥満者は男性の約3割で40代が多い

厚生労働省の「国民健康・栄養調査」(2013年版)によると、BMI25以上(BMI=体重(kg)÷(身長(m)×身長(m)))の肥満者の割合は年齢別平均で男性28.6%、女性20.3%。女性より男性のほうが高く、男性の肥満者で最も多いのは40代だ(表2)。

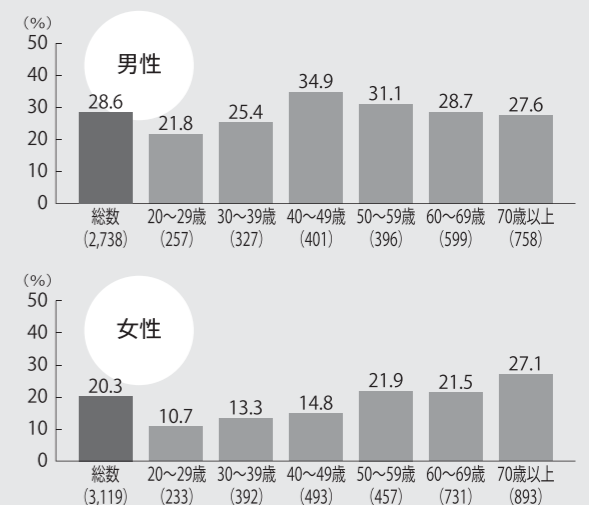
同調査で運動習慣のある人の割合を見てみると、男性33.8%、女性27.2%(20代から70代の平均)。男女とも60代、70代の高齢者で高く、働き盛りの30代、40代はやはり低い。肥満気味で運動習慣のない人は、まずウォーキングからスタートし、ジョギングに挑戦しよう。

- ① 腕を振り歩幅を大きくしてフォームを意識する
- ② 次第に早歩きを行っていきと燃焼効果が高まる
- ③ 体力をつけながら徐々に走ってみる

呼吸が苦しくない程度で、無理なく走る。早歩きとジョギングを交互に行ってもよい。体が慣れてきたら時間を少しずつ増やして15分に挑戦。その間、ジョギングの前に5分の無酸素運動も取り入れていく。

筋トレで筋力がつくまでに最低2週間、体が引き締まるまでに2ヵ月。2ヵ月継続できれば颯爽と走る自分に会うことができるだろう。

表2 肥満者の割合(性・年齢階級別) 厚生省「国民健康・栄養調査」(2013年)



## 5 筋トレ5分、ジョギング15分

- たとえば、
- ① 筋トレによる無酸素運動5分
  - ② ジョギングなど有酸素運動15分
  - ③ 1回20分の運動を週3回継続すること

また日常生活の活動も有酸素運動の1つとしてとらえて実践すると、有酸素運動の時間を短縮できる。意識して運動量を増やし、体脂肪を燃焼させよう。

- A. 通勤では歩行を多くする
- B. 電車内では座らないで必ず立つ
- C. 階段を積極的に利用する

## 1 有酸素運動で体脂肪燃焼を

体脂肪を燃焼させるには、エネルギー消費量が食事による摂取エネルギー量を最低限上回らなければならない。まず食事内容や食べ方を見直し、1日3食を守りながら摂取エネルギーを抑える。食物繊維の量を増やす、減塩する、早食いや夜食をやめるなどの工夫をする。「日本人の食事摂取基準」(厚生省2015年)によると、一日のエネルギー必要量は(活動量が「普通」の場合)、  
・男性18歳~49歳2650kcal  
・女性18歳~29歳1950kcal、30~49歳2000kcalである。これ以上の摂取エネルギーは余分となり、消費する必要がある。

体内に蓄えられたエネルギーは、運動や生活での身体活動で消費する。運動は必須で、中でも有酸素運動は欠かせない。なぜならば、

- ① 体脂肪を燃焼させるためには酸素が必要
- ② 有酸素運動は酸素を取り込んで体脂肪を燃焼するからだ。ウォーキングやジョギング、自転車、水泳など、身近で気軽な有酸素運動に取り組んでみよう。

## 2 燃焼に必要な3点セット

体は安静にしているときも、呼吸など生命活動のためのエネルギーを消費しており、これを基礎代謝という。消費エネルギーと基礎代謝量を合わせたものより、摂取エネルギーが少なければよいのだ。

**摂取エネルギー<消費エネルギー+基礎代謝量**  
基礎代謝はエネルギー消費の約60%も占める。基礎代謝のうち筋肉が占める割合が70%で、全体の約40%が筋肉によるエネルギー消費なのだ。ところが、加齢にともない筋肉量が減っていき、基礎代謝量は低下していく。

運動で筋肉を鍛えれば基礎代謝量が増え、余分に摂取したエネルギーを消費しやすい体になる。以上のことから、体脂肪を燃焼させるには3点セットで取り組もう。

- ① 食事による摂取エネルギーを抑える
- ② 有酸素運動を行って直接脂肪を燃焼させる
- ③ 筋肉を鍛えて基礎代謝量を増やす

## 3 燃焼のゴールデンタイムは20分?

有酸素運動では、体脂肪は20分以上経たないと燃焼しないといわれてきた。それは、運動するとエネルギー源としてまずブドウ糖が優先的に消費されるからだ。

- ① ブドウ糖を使い切ると脳から脂肪を分解してエネルギーに変換するよう命令が出る
- ② それで、ようやく体脂肪のエネルギー消費が始まる

脂肪を燃焼するには、瞬発的な激しい無酸素運動よりも持続的な有酸素運動のほうが効果的なのはそのためである。最近では、もっと短時間でも脂肪の燃焼が起こるとされるようになり、20分という燃焼のゴールデンタイムに無理やりこだわらなくて、取り組みやすくなった。

# 月島機械の焼却技術

## Tsukishima Kikai's Incineration Technology

### Abstract

Tsukishima Kikai's involvement in incineration technology started with the introduction of a multistage incinerator technology from BSP in USA, with the company entering the sludge incineration field in 1963. At first, many multistage incinerators which provided the integrated function of slow drying and incineration were installed. Its fluidized bed incinerator (FBI), using sand as a fluidized medium, has provided an alternative to multistage incinerators, which come with the problem of fumes from flue gas. Thus far, FBIs have achieved excellent results due the continuous improvement of the technology used, aiding situations of increased excess sludge and necessity for sludge combustion. Against this backdrop, new incinerator technology has been developed, involving a fast-fluidized bed incinerator utilizing a circulating-type fluidized bed and a multipurpose incinerator with applications for several types of waste. This supercharging fluidized bed incinerator is the result of more than 50 years of experience and technical know-how in incineration technology.

On the other hand, the melting kiln for combustion of industrial solid waste was introduced by Steinmüller Babcock Environment (previously, AE&E) in 1994, and the first commercial kiln was installed at Sun Eco Thermal Co., Ltd., which was subsidized by Tsukishima Kikai. Here, trial & error has resulted in major improvements to kiln technology, through continuous research into combustion air supply. Furthermore, since 1965, Tsukishima Kikai has been developing wastewater incinerators for chemicals recovery in the field of pulp & paper. Subsequently, submerged combustion technology was established for application to highly concentrated waste for which treatment using microorganism was not possible, and many positive results were achieved.

This paper focuses on fluidized bed incinerators, melting kilns, and submerged combustion for waste liquid.

月島機械の焼却技術は1963年、米国のBSP社から多段炉を技術導入し、汚泥焼却炉分野へ適用・参入したことから始まる。当初、多段炉の緩慢な乾燥、焼却の一体化された機能が市場ニーズに適合し、数多く顧客へ納入された。多段炉排ガスの臭気等の問題から砂等の流動媒体を使用した流動焼却炉方式に変わり、技術改良の積み重ねと余剰汚泥の増加に伴う、焼却のニーズの拡大を踏まえ、現時点でトップクラスの実績を誇っている。本技術から循環流動型の高速流動焼却炉や多用途に対応した多目的焼却炉の開発につながっている。その後50年余にわたる焼却技術の経験とその技術基盤をもとに新たに過給式流動焼却炉が誕生することとなる。

一方、産業廃棄物(固体)の焼却向けに1994年にSteinmüller Babcock Environment社(旧AE&E社)より熔融キルン技術を導入し、1号機として月島機械の関連会社サンエコサーマルに商業機として納入した。その中で燃焼空気の供給方法等の試行錯誤を繰り返して高性能なキルン技術を確立した。また、1965年頃より紙パルプ関連で薬液回収を目的として廃液焼却に着手していた。その後、同技術は生物処理の難しい高濃度廃液に向けた焼却技術として独自開発に取り組み廃液燃焼技術を確立し、多くの実績をあげている。

月島機械の原料種別に分類した焼却技術の一覧を図1に示す。これらの技術体系の中、流動焼却技術、熔融キルン並びに廃液燃焼技術について以下に紹介する。

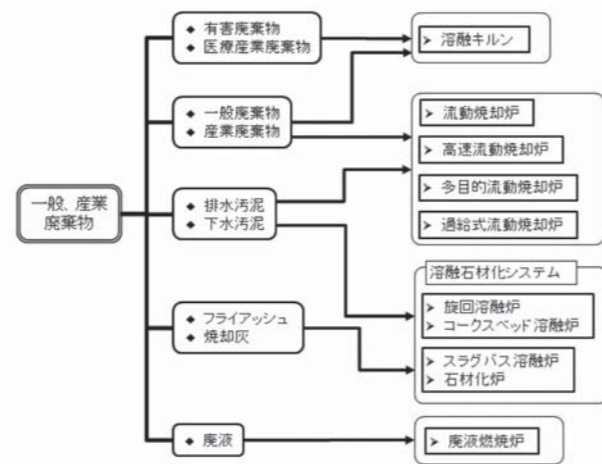


図1 月島機械の焼却技術  
Fig.1 Incineration Technology of TSK

## 1 流動焼却技術

### 1.1 下水汚泥焼却技術の変遷と背景

1963(昭和38)年末に、汚泥の減容化の必要に迫られていた愛知県一宮市に、わが国初の堅型多段炉による汚泥焼却設備(処理量5t/日)が、月島機械により納入された。その後、日本の下水汚泥(高水分ケーキ)の焼却に適用するための改良を行い、大阪市(15t/日)、東京都(160t/日)、京都市(60t/日)等へ納入していった。そして、1970~1975年をピークとして、1980年までに5~300t/日の規模のものが44基、民間向けを含めると59基が納入され、一世を風靡した。その後、1980年ごろから、汚泥処理の脱水工程に使用される脱水助剤は、焼却灰の減量要望が強まるにつれ、無機凝集剤(石灰、塩化第2鉄)から高分子凝集剤へ転換されていった。この転換により、多段炉から発する臭気濃度が大きくなり、多段炉での高分子系の汚泥脱水ケーキの焼却は、クリンカの発生や運転温度管理の難しさなどが問題となり、堅型多段炉の時代は終わりを迎え、流動床式焼却炉へと急激に移行していった。

### 1.2 流動焼却炉実用化の経緯

月島機械の流動床焼却炉は、米国のGAT社より1963(昭和38)年に技術導入した流動乾燥機を焼却炉に発展させたものである。流動焼却は内部が均一温度に近く、排ガスも高温のまま排出され、分散板以外は炉内の金物もなく、多段炉の問題点を解決するものであった。また、分散板は他社の耐火物製と違って鋼板製であり、流動炉の特徴のひとつである間欠運転に適合したものであった。流動焼却炉の第1号機は、1973年に納入した石油系スラッジ焼却用であった。その後、ソ連(現ロシア)の東シベリアに建設されたパルプスラッジ焼却用として、300t/日炉3基を納入した。

下水汚泥への納入1号機は1973年の横須賀市下町処理場の40t/日炉である。また、当時は流動炉の大型化は構造上も、機能上も困難といわれていたが、葛西処理場に納入した100t/日炉を使って1983年に大型化調査を行い、その知見をもとにして1984年小台処理場に当時としては国内最大規模の200t/日炉を納入した。現在では規模として300t日までの実績があり、納入基数も50基と業界のトップクラスに位置している。近年では、し渣(爽雑物)、沈砂との混焼を考え、不燃物が容易に抜き出せるように分散板に代わる分散管タイプの流動炉を開発し、実績を上げている。

また、1978年のオイルショックを契機に省エネ化が叫ばれ、経済的で安定・完全焼却する炉が要求されるようになった。そこで、熱効率が高く、排ガス量の少ない間接加熱式インクラインドディスクドライヤ(IDD)を1981年に開発し、1983年には間接加熱式乾燥機と流動焼却炉を組み合わせた設備を横浜市金沢下水処理場に納入して脚光を浴びた。この「乾燥-焼却プロセス」は、脱水ケーキ中の約80%が水分であることに着目し、脱水ケーキ水分の蒸発を焼却炉で燃焼と同時に進行のではなく、焼却排ガスからの廃熱を水蒸気として回収し、回収水蒸気により炉前段で乾燥を行うことでエネルギーロスを低く抑え、総合熱効率を向上させるという画期的なプロセスであった。流動

層の特性が生かされ、このような改良開発が重ねられたことで機能も充実し、現在では汚泥焼却炉といえば流動床式焼却炉を指すようになっている。納入実績が増すにつれ技術の信頼性が評価され、最大処理量300トン/日、納入総数72設備(2014年現在)を達成している。

### 1.3 流動焼却技術の特徴

#### 1.3.1 流動層の特性

図2に示すように、多孔板を挟んで上部が流動ゾーン、下部が流動用空気取り入れ室(プレナム室)で構成される。上部流動ゾーンに砂を1/3程度装入し、徐々に装入空気を増加していくと、ある空気量までは砂層は固定層のままで、空気は砂の隙間をくぐり抜けていく。この状態がAである。さらに空気量を増加させると、砂は沸騰する液体のような状態、すなわち流動化状態Bに入る。Cの状態はさらに空気量が増加し、輸送状態になっていることを示している。流動物質には砂だけでなく、さまざまな粒状物質を使用し、流動化流体には、ガス・液体のいずれも使用可能である。

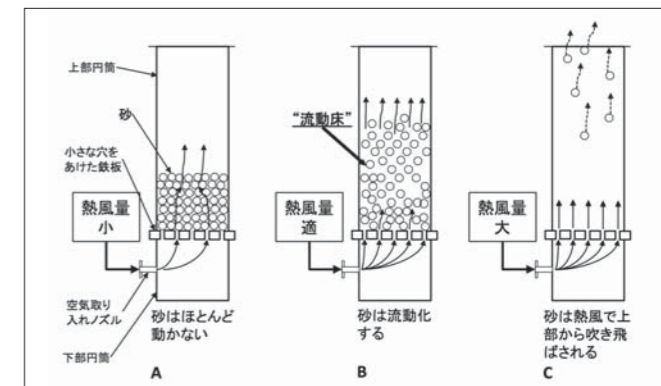


図2 熱風の量と砂の動き  
Fig.2 Relation between amount of hot air and sand behavior

#### (1) 流動媒体と効果

流動している媒体の激しい動きは、

- ①投入された物質を細かく砕く
  - ②投入物質(焼却物)→流動媒体(砂)→流動化用流体(空気)の間で熱や水分の移動を速める
  - ③流動層内の温度を均一にする
- といった、優れた作用を有する。

#### (2) 空気吹込方式

当初、流動層炉の流動空気の供給方式は、分散板に取り付けたノズルパイプ+ノズルヘッドの穴から、空気を100m/秒程度の流速で炉内砂層底部へ吹き込む方式であった。この分散板方式は、比較的均一な流動状態を得ることができるという優れた機能を持っていたが、その反面、流動砂のプレナム室への漏れ込みや、大型化にともなうメカニカルな問題もあった。



①分散板方式

分散板方式では、流動砂が分散ノズルを逆流し、プレナム室(ウインドボックス)に落下する。これは分散ノズル穴径の問題や、炉停止中もオイルガン噴霧空気吹き込みを継続するため、流動砂が攪拌されて浮遊することで分散ノズルを逆流する現象である。

②分散管方式

沈砂、し渣の混焼を実施する場合、不燃物等の炉内抜き出しが必要であるが、大型炉では金属製板の割れや流動層内で不燃物が流動層底部(分散板上)に沈積してしまうため、抜き出すことができない状態となる。この改善策として、分散板をパイプ方式にすることでプレナム室をなくし、不燃物を下部から抜き出せるようにした。

③分散管の熱膨張対策

初期の分散管の構造は、パイプ先端を炉壁に設けたパイプ受座に挿入しており、これがパイプの熱膨張を阻害し、パイプの変形を生じさせた。パイプ先端を炉壁の手前までの長さにし、熱膨張に対してフリーとする方式に改善することで、このトラブルは解消することができた。

④分散管による流動状態

分散管における流動状態は、十分攪拌が行われており、砂層部とフリーボード部の温度乖離は、分散板方式と比べ少なくなっている。

投入された汚泥は、流動床の作用により瞬時に解砕され、水分の蒸発と部分燃焼による有機物のガス化および固定炭素の燃焼が流動床内で起こる。このガスは上昇して、フリーボードと呼ばれる燃焼室空間部で炉内の高温により自然着火し、燃焼を完結して排ガスとなり、炉頂から排出される。汚泥中の無機物は流動床内で細くなったあと、排ガスに伴って炉から排出し、サイクロン、バグフィルタ等で焼却灰として分離される。

このように流動炉は、簡単な構造でありながら多くの機能を有しており、下水汚泥を良好に焼却することができる。一般の流動焼却設備は、流動炉のほかに汚泥の貯留供給装置とサイクロン、電気集塵機またはバグフィルタ、スクラバ等の排ガス処理装置で構成されている。

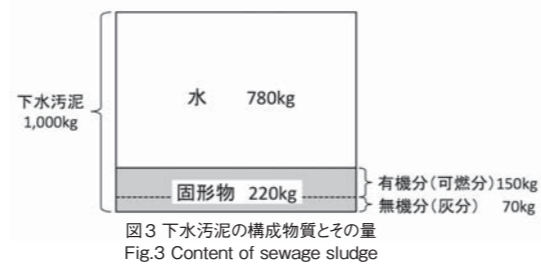


図4 流動炉概観  
Fig.4 Overview of fluidized bed incineration plant

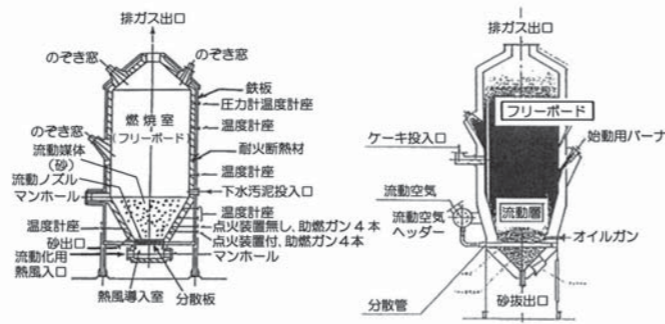


図5 流動炉の内部構造  
Fig.5 Internal structure of fluidized bed incinerator

1.3.3 流動焼却炉のシステム例

図6にシステム例を示す。脱水ケーキは定量フィーダから定量に切り出され、計量されたのち炉へ供給される。焼却灰は排ガスに伴い、炉外へ排出される。排ガスは空気予熱器、白煙防止予熱器を経て、サイクロン、電気集塵機またはバグフィルタにより集塵され、排煙処理塔で脱硫および冷却(減容)され、煙突から放出される。白煙防止予熱器からの加熱空気を煙突で混合し、白煙を防止する。

乾燥焼却システムの場合は、焼却排ガスから廃熱ボイラによる熱回収で発生させた蒸気により、汚泥をプレ乾燥させる。乾燥機はIDDを採用し、水分を40%とした乾燥ケーキを未乾燥ケーキと混合することで、炉への投入水分は60~70%程度となる。

通常焼却では、補助燃料を多量に必要とする脱水ケーキの場合に、乾燥焼却システムを採用すると、100トン/日規模で補助燃料は約20L/トナーケーキの低減となる。また、処理能力は約50%アップし、150トン/日処理が可能となる。

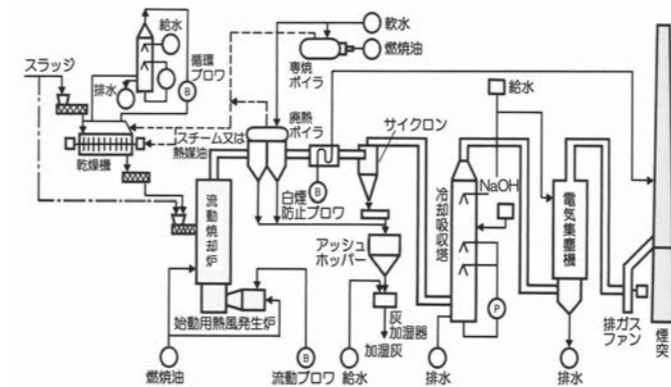


図6 流動焼却炉のシステム例  
Fig.6 System flow of fluidized bed incinerator

1.4.2 高速流動焼却炉の特徴と応用

(1) 高速流動層の特性

固体粒子層に下から気体を送るとある流速で固体粒子が浮き上がり、流動化が始まる。さらに気体を増加すると層の膨張が起こり、気体は気泡として分散する。この気泡流動層からさらに気体を増加させ、単一粒子の終末速度以上に速度をあげると、一部粒子は上昇し、層を飛び出す状態になる。飛び出した粒子をサイクロンで捕集し、その粒子を戻すことにより循環高速流動層を形成する。これが攪乱、高速流動層で、循環する固体粒子の量が多い状態を高速流動層と呼ぶ。この状態は、単一の粒子ではライザ部を飛び出すのが、粒子が群(クラスタ)として動くので、クラスタが集合、離散しながら上昇、下降を繰り返し、激しい流動層を形成する。この高速流動層の操作範囲は次の式で計算される粒子の終末速度の2~4倍の範囲で操作される。この領域を利用したものが高効率(高速)流動焼却炉である。

$$U_t = D_p (\rho_s - \rho) g / 18\mu$$

$$U_t = \{4(\rho_s - \rho)^2 g^2 / 225\mu\}^{1/3} D_p$$

$U_t$ : 粒子沈降速度(m/秒)、 $D_p$ : 粒子径(m)  
 $\rho_s$ : 粒子密度(kg/m<sup>3</sup>)、 $\rho$ : 流体密度(kg/m<sup>3</sup>)  
 $\mu$ : 流体粘度(kg/m秒)、 $g$ : 重力加速度(m/秒<sup>2</sup>)

ガス速度をさらに加速すると、クラスタは形成されなくなる。また、粒子がライザにたまらなくなり、すべて飛び出す状になって、輸送層へ移行し、空気輸送(ニューマチックコンベア)として利用される。(図7)

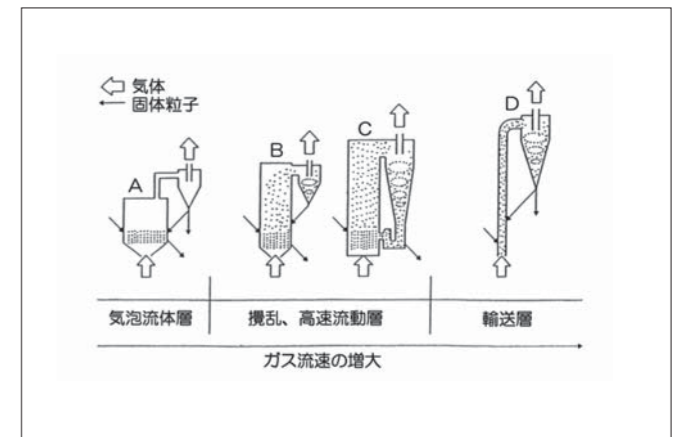


図7 粉流体に対する流動化操作の遷移  
Fig.7 Transitions of fluidizing operation

1.4 高速流動焼却技術<sup>1),2)</sup>

1.4.1 高速流動層技術

高速流動操作の概念は、1930年代にスタンダード・オイル社が取得した特許に始まる。現在、高速流動層自体はCFBC(Circulation Fluidized Bed Combustion)石炭ボイラの一方法として広く利用されており、循環の方法、媒体の利用等で各種方式が報告されている。一般的な特徴としては次のようなことがあげられている。

- (1) 石炭を微粉砕する必要がなく効率的。
- (2) 2段燃焼方式になるのでNOxの生成が少ない。
- (3) 原料とともに石灰を炉内へ入れることで炉内脱硫ができる。

また、一般的に焼却炉へ適用した場合、流動化速度が速く、媒体同士の相対速度が大きいため、シンタリングを起こしにくいといった報告もされている。

1.4.3 高速流動焼却技術の特徴<sup>3)</sup>

高速流動焼却炉は、燃焼室とホットサイクロンで構成される(図8)。燃焼室の下部には700～800℃の炉砂を保有し、1次空気の吹き込みにより膨張し、流動化される。1次空気の吹き込みは、炉下部の円周方向数カ所より行われ、適切な吹き込み方向、位置、流速を設定することにより、保有砂は上下、左右に活発な流動を起こす。この部分はデンスベット(濃厚な砂層域)になっており、この中へ投入された焼却物は、この流動砂により激しく混合、攪拌されて蒸発、分解し、一部は燃焼する。この1次空気ノズルの一部は、助燃料あるいは高カロリー液状廃棄物の吹き込みノズルとしても使用され、エアアトマイズにより流動砂中へ適切に分散される。

一方、2次空気は保有砂の上部へ、やはり円周方向数カ所より吹き込まれる。これにより塔内流速は4～8m/秒に加速され、激しく攪拌されながら炉砂の一部は排ガスとともに上昇し、燃焼室上部のライザ部よりホットサイクロンへ入る。ライザ部では2次空気により十分空気を与えられて、有機物は完全に分解、燃焼する。ホットサイクロンに入った砂は、遠心力により排ガスと分離され、燃焼室の流動部へ戻り、循環する。この循環砂量は通常運転時、時間当たり保有砂量の4～7倍と大容量であり、デンスベット部とともにライザ部でも燃焼エリアとしての機能が発揮される。また、循環砂による熱移動が十分に行われることで、炉内温度の均一化が図れる。

従来より、流動焼却炉は都市ゴミ、下水処理の余剰汚泥の焼却炉として多く使われてきた。流動焼却炉は、ほかのストーカ炉、キルン等の焼却方式に比べ、流動媒体が持つ大きな接触面積と保有熱のために、焼却物の性状に対する許容幅が大きく、液状のものでも、固体物でも効率よく焼却できる。燃焼効率は非常に高く、空気比1.3～1.5で完全な燃焼が行われ、排ガス処理設備もコンパクトになる。月島機械の高速流動炉は、これらの長をさらに効率よくするとともに、従来の気泡流動層では難しかった幅広い焼却適応性および省エネルギーを達成した。以下に主な長をあげる。

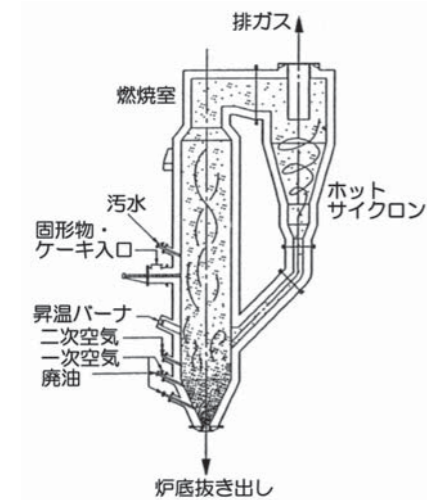


図8 高速流動焼却炉構造図  
Fig.8 Structure of high speed fluidized bed incinerator

(1) 多種多様な焼却物に最適

従来の流動焼却炉で液状廃棄物を多く焼却する場合、砂層部で蒸発し、ライザ部で燃焼するため、砂層部の温度が下がり、炉頂部で高温となる温度乖離現象が起り、安定運転が難しかった。しかし、高速流動焼却炉は、大量の循環砂によるライザ部での熱移動により、炉内温度の乖離が少なくなるため、脱水の難しい高含水廃棄物や、高カロリー廃液の焼却も可能であり、種々雑多な廃棄物を一括して同時焼却することが可能である。

(2) ターンダウンが自由で安定焼却が可能

焼却負荷により燃焼空気が自由に調整できる。通常負荷時は高速流動焼却が行われるが、低負荷時は普通流動域でも運転できるため、ターンダウンが大きくできる。たとえば、1/6程度に負荷が下がった場合でも、普通流動炉としての機能は十分発揮でき、安定焼却が可能であるとともに、燃焼エアも1/6程度に絞ることができ、大幅な省エネルギー化が図れる。

(3) 動力費の低減

供給する空気の約70%は2次空気として供給され、その必要圧力は1500mmAqとなり、普通流動炉での3000mmAqに比べ約半分で済むため、プロワ動力は約65%に低減される。

(4) 低融点アルカリ含有物に適用可能

流動焼却炉は、炉内でよい流動状態を維持することが必要条件となる。Na、Kなど低融点の無機塩を多く含む廃棄物を焼却する場合、固着(シンタリング)を起し、流動が悪くなる場合がある。これを防止する方法には下記の2つがある。

① 焼却物中の低融点無機塩の炉砂内濃度を一定濃度以下にするよう、系外へコンスタントに飛散排出する。

② 流動媒体(硅砂、アルミナ等)と低融点無機塩を炉内で反応させ、 $SiO_2-NaO-CaO$ あるいは $Al_2O_3-Na_2O-SiO_2$ 系などという高融点生成物に変える。

月島機械でも、さまざまな高融点生成物②のテストを実施したが、うまく高融点生成物とはならず、シンタリングを効果的に防止することは難しかった。これに対し、炉内アルカリ濃度を一定濃度以下にする系外飛散方法①は、テストでも実機においてもある濃度までは実証済みで、シンタリングなしに安定運転が可能である。これは、投入焼却物中のアルカリ(Na、K)分が、コンスタントに飛散アッシュに付着して系外に出るため、流動砂のアルカリ分が一定値以上には増加しないためである。

(5) 低NOx、SOxの運転が可能

構造上、2段燃焼となるため、NOxの生成は低く抑えられる。また、石灰投入により炉内脱硫を行った場合、石灰が循環されるため脱硫の効率がよい。

(6) 高速流動焼却システム例

図9にシステムの一部を示す。脱水ケーキはケーキホップより定量フィーダで切り出され、コンベヤで炉内へシールされながら供給される。また廃水はライザ部でスプレー噴霧される。また、廃油は補助燃料としてライザ下部流動部に供給される。

焼却炉排ガスは、ホットサイクロンから排出後、一般にエアヒーター

および廃熱ボイラで熱回収され、焼却炉の熱源および蒸気として利用される。そして、排ガス中のアッシュは、サイクロンおよびスクラバ、EPで浄化され、排出される。最近では、完全乾式で排ガス処理を行うバグフィルタ方式も多く採用されている。

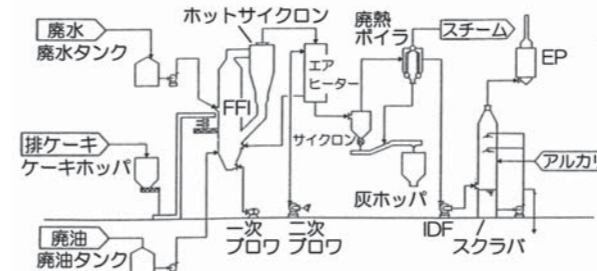


図9 高速流動焼却炉のシステム  
Fig.9 System flow of fast fluidized bed incinerator

2 産廃焼却溶融キルン

2.1 技術導入の背景

月島機械は固形廃棄物の処理技術としては、1970～80年代に都市ごみの熱分解設備(PF)を開発し、納入したが単発に終わっており、その後も極めて限定的な固形廃棄物の処理設備を何基か納入しただけにとどまっていた。1990年代に入り、産業廃棄物処理分野に参入する方針が立てられ、固形廃棄物焼却炉の技術提携先として欧州で実績を持つ有力メーカーであるSteinmüller Babcock Environment社(旧AE&E社)と交渉し、1994(平成6)年に焼却溶融キルンを技術提携した。本炉は、基本的に有機汚泥の燃焼には向いておらず、固形廃棄物と汚泥の混焼の要求がある客先には対応できない。汚泥用には、流動焼却炉が適しているため、1980年代末に高速流動焼却炉を固形廃棄物との混焼用に改良し、多目的焼却炉(MFI)の名で商品化した。

1998年、月島機械は関連会社のサンエコサーマルに1号機を納入し現在も順調に稼働している。溶融キルン設備は、その後順調に実績を重ね、2004年には、処理量200トン/日の世界でも最大規模の設備が稼働した。

2.2 焼却溶融キルン技術の特徴

(1) キルン、2次燃焼炉

炉の構成は、図10に示すようにキルンと2次燃焼炉(SCC)から成る。キルン上流部のエンドに設置されたフロントウォールには供給設備が設けられており、固形廃棄物はシュートから、液状、ペースト状の廃棄物はバーナあるいは専用のランスから噴霧供給される。また、昇温、助燃用のバーナおよび燃焼用の空気供給口が設けられている。キルンは下流に向かい若干傾斜させており、キルン本体が回転することにより焼却物は徐々に下流側に移動していく。キルン内では、固形廃棄物は所定の充填量を保ち、廃棄物に最適な滞留時間のなかで、1200～1300℃程度の運転温度で、乾燥・焼却・溶融の一連の反応が進んでいく。溶融物はキルン出口から流下し、

SCC下部に設置されている水封槽で水砕され、スラグとしてスラグコンベヤで排出される。

(2) 供給設備

溶融キルンでは多様な廃棄物が処理されるため、供給設備はさまざまな形態をとる。固形廃棄物は通常はピットに貯留され、クレーンを用いて供給コンベヤ、供給ホップに供給される。廃棄物はクレーンの掴み量か、供給シュート上のダブルダンパーで計量され、処理量が管理される。医療系廃棄物は密閉容器に収納され、焼却前に開封することは禁じられているため、これも容器ごとキルンに供給される。液状廃棄物は、タンクに貯留されるか特定の容器に貯留され、そこからキルンに供給される。キルンでは、通常のバーナ(油噴霧用)では供給できないペースト状の廃油は、専用のランスを用いて、スチーム等でアトマイズしながら供給される。廃棄物の性状によっては、加温あるいは加圧容器からの窒素による圧送などを行う場合もある。比較的粘度の低い廃油は、バーナを用いてキルンあるいはSCCに供給される。

(3) 排ガス処理設備

溶融キルン設備では、小規模の設備でない限りSCC下流部に廃熱ボイラを設け、熱回収を行う。キルンでは高温で処理するため、重金属、アルカリ塩類などが揮発し、排ガスに同伴される。また、溶融物も一部ガスに同伴する。ボイラで排ガスが冷却される過程で、気化した成分の析出、溶融物の沈着がチューブ表面で起こるため、通常の焼却設備に比べてダストの付着は激しい。このため、流入部はメムレン構造のラディエーションゾーンとし、付着に強い構造にしている。ラディエーションゾーンの範囲は経済性を踏まえて最適なサイズが決定されるが、燃焼物によってもダスト性状は異なるため、設計においては注意を要する。チューブバンクではチューブピッチ、スートブローの数と位置、また、代替のダスト払い落とし方法などの検討が重要となる。月島機械の第1号機においては、結果的に3カ月に1度の清掃が必要となっており、清掃頻度がどの程度許容できるかによってボイラの構造は異なってくる。

日本では、ボイラ以降の排ガス処理設備は従来の焼却設備と大きな違いはない。減温塔での排ガス冷却、石灰噴霧による乾式酸性ガス処理、バグフィルタによる除塵ののち、触媒によるダイオキシン分解を行うのが基本フローである。酸性ガスの濃度によっては、湿式スクラバを設置する場合もある。除塵設備からの飛灰はキレート処理をし、管理型の埋立地で処分される。

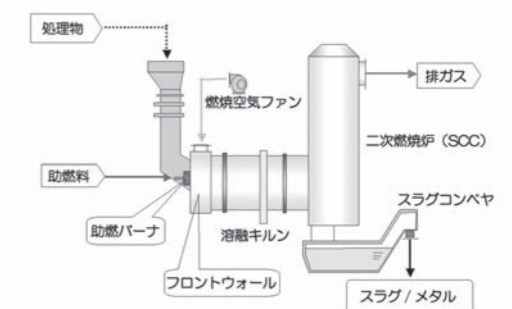


図10 キルンの構成  
Fig.10 System of melting kiln

### 2.3 熔融キルンの設計技術

#### (1) キルン、2次燃焼炉サイジング

キルンでは、設計基準となる被燃焼物の仕様に基づき熱計算を行うが、通常は空燃比（過剰空気率）1.5～2.0、1200～1300℃の運転温度にて熱収支、排ガス量が算出される。

2次燃焼室（SCC）では、キルンとの接合部からの漏れ空気があり、ガス量はその量を加えて算出される。通常、キルン出口部の温度計はSCC下部に取り付けられており、漏れ空気により温度低下したガス温が計測されているため、キルン内の温度測定に精度を求める場合は放射温度計で確認する必要がある。SCCで廃油を燃焼する場合は、キルンと同様に熱計算を行い、所定の出口排ガス温度にて熱収支、排ガス量を算出する。

#### (2) 処理特性図

熔融キルンにて燃焼処理する廃棄物は多岐にわたるため、実際には設計仕様どおりの廃棄物が集荷されるわけではなく、処理物の仕様は変動する。炉の寸法は上記に示すように炉の入熱量で決まり、廃棄物の熱量に応じて処理可能量が異なる。設計段階において、処理量と炉入熱量の関係とその設備の処理可能な廃棄物仕様を示したものが処理特性図である。図11に処理特性図の一例を示す。

横軸、縦軸はそれぞれ処理量、入熱量を示し、一定の傾きを持った直線は、ある発熱量の廃棄物の処理量と発熱量の関係を表す。入熱量の上限は設計負荷量で規定され、処理量の上限は、一般的には廃棄物供給設備の搬送能力で規定される。下限はそれぞれターンダウンで規定され、50～60%に設定される。

これらの操作線で囲まれる範囲が運転可能範囲であり、発熱量の高い廃棄物は設計供給量を満たせない場合がある。また、この運転範囲をクロスする形で自然ラインがあり、この線の下では助燃油を用いて運転をしなければならない。

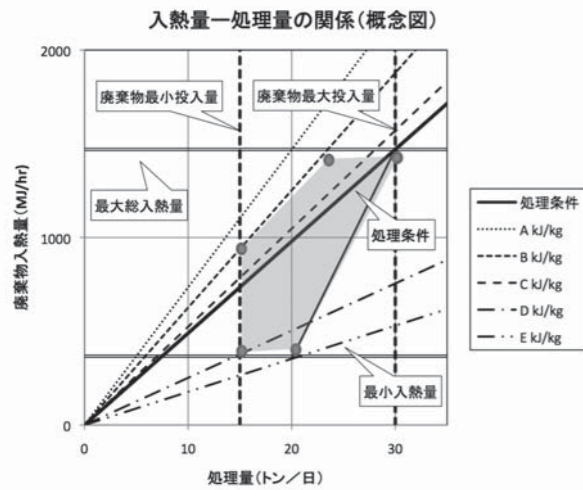


図11 処理特性図  
Fig.11 Treatment Characteristic figure

#### (3) 耐火材とスラグ層形成

キルンでは熔融運転を行うため、熔融ゾーンではアルミナクロム系の耐火材を使用する。熔融ゾーンにおいては熔融スラグによる耐火材の侵食が激しく、欧州では、その対策として意図的にスラグ固化層を形成し、耐火材を保護しつつ運転を行うとしている。これによりクロムレンガの寿命は1年以上となる。

## 3 廃液燃焼炉

### 3.1 廃液燃焼技術の変遷

#### (1) 月島式廃液燃焼炉の誕生(1972～1976年)

現在の月島式廃液燃焼炉の1号機は、エチレンプラントから排出される廃ソーダの焼却設備である。開発品1号機の納入先は試運転時にはさまざまな問題に遭遇した。しかし、2号機以降はこれらの諸問題も解決し、その後、順調に受注実績を伸ばすことができた。当初、焼却炉とディゾルバの関係は図12に示したタイプで、炉底燃焼を考慮した構造であったが、スモルトの連続排出に安定性がなく、安全性も考慮した結果、4基目以降はストレートタイプ図13に設計変更している。

#### (2) 水冷壁燃焼炉の出現(1977～1986年)

順調に稼働を続けるうえでの廃液燃焼炉の弱点は、耐火物の寿命にあった。当初、高価な電鍍レンガを耐火材として使用していたが、廃液中のアルカリと反応し、1年ほどで張り替えが必要になる炉もあり、メンテナンス費用が膨大になった。この対応策として考えられたのが、焼却炉を水冷ジャケット構造として耐火物を薄く張り、この耐火物の外側を冷却し、焼却後の溶融塩を耐火物表面にセルフコーティングさせる方法である。このセルフコーティングにより、耐火物寿命を延ばす方式を適用することにし、研究所に実験機を設置、実験を繰り返し行った。

採取したデータをもとに、水冷壁燃焼炉の第1号機を納入し、良好な結果を得た。さらに、海外向け1号機であるラクタム廃液燃焼設備、引き続きモジュール工法を採用しシガポールに輸送した廃液燃焼設備等が相継いだ。とくに海外で水冷壁構造における低メンテナンス性が高く評価され、現在までの納入設備の半数は輸出で占められている。

#### d) ディップチューブ・ディゾルバ型廃液焼却炉への改良(1987年～現在)

焼却後の高温排ガスの冷却は、1号機からスプレーによる冷却方式を採用してきたが、ハロゲン含有廃液を焼却後冷却する場合のディゾルバのケーシングの材質選定に苦慮することとなった。とくに医薬品廃液燃焼設備は、排出される廃液中にハロゲン物質が混入していたため、ハロゲンによる損傷防止対策としてディゾルバケーシングにフレックライニングを行い、さらに内面に抗火石を内張りすることになった。ハロゲンを含有する廃液の場合には、焼却炉からの腐食性高温排ガスをすべてディゾルバに張り込んである温水中を通過させて冷却する方式が検討され、ディゾルバのディップチューブタイプ方式の廃液燃焼炉の出現となった(図14)。

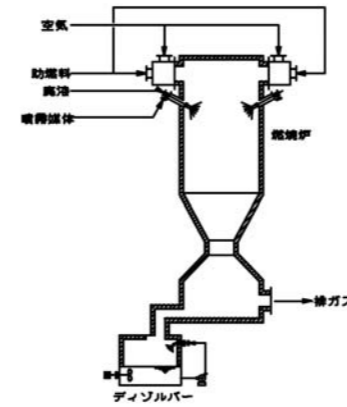


図12 1号機形状  
Fig.12 Structure of 1st incinerator

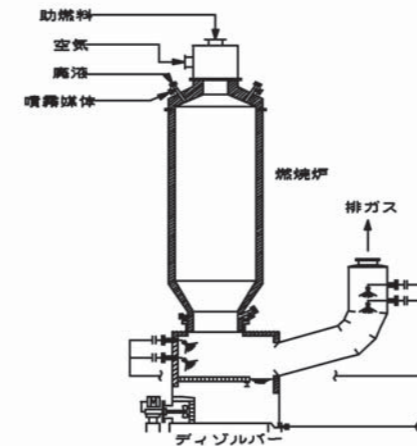


図13 ストレート型燃焼炉  
Fig.13 Structure of straight type incinerator

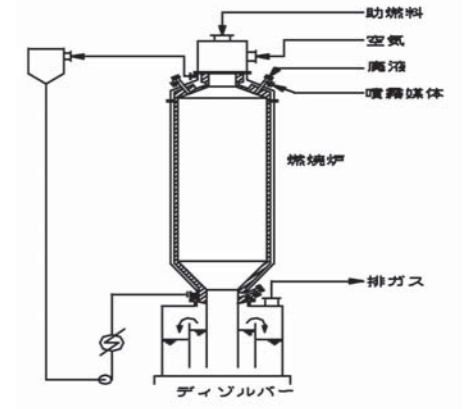


図14 現在の廃液燃焼設備  
Fig.14 Current incinerator for waste liquid

### 3.2 燃焼技術の特徴と留意点

#### (1) 廃液燃焼の最適条件(温度、滞留時間、混合等)

廃液燃焼の目的は、廃液中のCOD成分、その他の有害物質を、燃焼(酸化)反応により分解または安定化することにある。基本は燃焼反応であるので、一般の燃焼理論と同様、3T(温度:Temperature、滞留時間:Retention Time、混合:Turbulence)を最適に決めることが重要となるが、月島機械の廃液燃焼においては経験的な要素も踏まえ、以下のような条件設定を行っている。

##### a) 燃焼温度

一般的に有機物の酸化分解には800℃以上が必要であり、高温であるほど燃焼速度は速く、分解効率はよくなるが、一方で高温化は燃料の大量消費につながり、NOxの発生、耐火材の損傷等の問題を引き起こす。これらを考慮し、燃焼温度は通常900～1000℃の範囲で設定される。

##### b) 滞留時間

理論的には、高温雰囲気下に噴霧された液滴の蒸発、およびその後の酸化反応に要する時間が必要な滞留時間となる。廃液燃焼においては平均噴霧粒子径150μm、最大噴霧粒子径は500μm程度であり、900～1000℃雰囲気における蒸発時間は0.2～1秒以内である。実設計上は、反応時間、多少の噴霧悪化を考慮して余裕を持たせ、2秒以上の滞留時間をとっている。ダイオキシン対策特別措置法の施行後は、法的にも2秒以上の滞留時間の遵守が必要条件となった。

##### c) 混合

可燃分と酸素との反応を迅速に行う上で適切な混合が重要となる。しかし、廃液燃焼の場合、アルカリ塩類が含まれることが多く、強力な旋回流等の混合操作は、バーナまたは近傍への塩類付着による噴霧不良、アルカリと耐火材との反応の促進等の副次的な

ラブルを引き起こす。したがって、炉内全体の積極的な混合は通常考慮しない。このことを補う意味でも滞留時間に余裕を持たせている。

(2) 廃液燃焼に求められるバーナ特性

助燃バーナは、燃焼炉本体に必要な熱量を供給するため、空気比1.2前後、温度1500～1600℃の条件で運転される。COが低いことはもちろんのこと、NOxも低レベルに抑える必要がある。また、燃焼炉本体へは火炎が延びないように、燃焼はコンパクトに完結しなければならない。これらの要件を満たすため、一般に高負荷燃焼型といわれるバーナ、燃焼器を使うことが多い。とくに廃液燃焼では、助燃料としてメインプロセスの副生油(重質)やC重油等の低質燃料を使うことが多く、助燃バーナ選定には注意を要する。

(3) 廃液スプレヤ形式と特性 (2流体、噴霧粒径、固形物析出等)

廃液スプレヤは、廃液燃焼設備において重要なパーツであり、従来はバーナメーカーからの購入品であった。最近では、月島機械独自のUSD (UltraSmallDiameterTypeSprayer) スプレヤを自社開発し、各社に納入している。

本スプレヤは、液圧を従来型スプレヤより高く設定することおよびアトマイザ構造を工夫することにより、従来型より少量の噴霧媒体で、より小さな噴霧粒径を得ることができる。本スプレヤの外形図および噴霧粒径のデータを、図15、図16に示す。ただし異物が混入する場合にはストレーナーの設置が必要となる。

(4) スメルト爆発

高温溶融塩(以下スメルトと称す)を安全に水溶液にするには、スメルト爆発(水蒸気爆発)に留意する必要がある。高温の溶融状態のスメルトが水と接触すると、多量の水蒸気がスメルトの周囲に発生する。この発生蒸気は水面の表層で剥離できれば問題ないが、大きな塊のスメルトが落下した場合、水面の下部で多量の水蒸気が発生し、爆発につながる事が知られている。爆発防止の基本は、スメルトを炉内から連続的にディゾルバに排出することが肝要である。

(5) 酸露点と防止対策

ClなどのハロゲンやSなどを含む廃液を処理する場合は、酸露点腐食に留意する必要がある。焼却炉に用いる耐火材は多孔質であり、燃焼によって発生したHCl、SO<sub>3</sub>などのガス成分は容易にそれを通過し、缶体面に達することができる。缶体が露点温度以下になった場合には、これらの酸性ガス成分が結露を起こし、腐食が発生する。これを防止するためには、炉壁の伝熱を考慮し、缶体が酸露点温度以下にならないように耐火材の構成を決定する。

(6) 排水水質と燃焼効率

廃液燃焼は、高CODの廃水を燃焼処理により、そのまま系外に排出できるレベルのCOD値まで低下させるように設計することが一般的である。燃焼効率を評価する指標は入口と出口のCOD総量値の差により求められる。

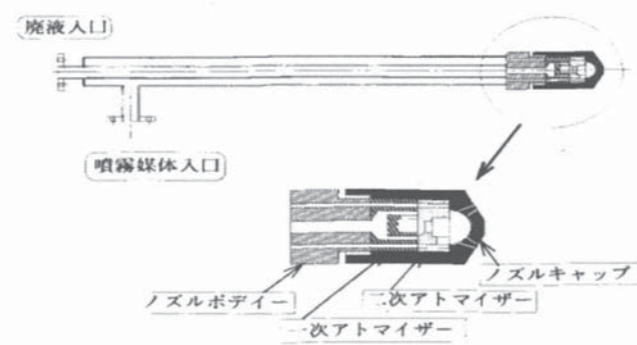


図15 USD スプレヤ外形図  
Fig.15 Outline drawing of USD sprayer

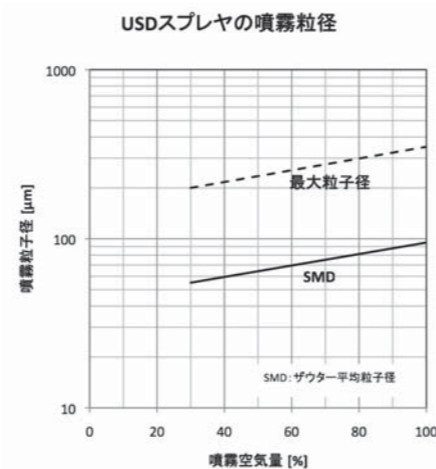


図16 USD スプレヤの噴霧粒径  
※ SMD: ザウター平均粒径  
Fig.16 Spraying particle diameter of USD sprayer  
SMD: Sauter's mean diameters

4 おわりに

廃棄物の分別、資源回収が叫ばれるなかで現状は多くの問題をはらんでいる。化石燃料の高騰、枯渇問題の解決策として、単純燃焼による発電だけでなく貯蔵、搬送可能なエネルギー源として回収する技術、ケミカル原料としてリサイクルする技術が検討され、実施されている。月島機械は汚泥の過給式流動焼却技術を開発し、省エネルギー型の焼却システムを提供することや炭化処理による燃料化技術等に取り組んでいる。資源を有効利用しCO<sub>2</sub>を削減するとともに地球温暖化防止へ貢献することは、継続的な新規技術や省エネルギー技術の改良開発とともに企業に課せられた重要なミッションであると認識している。

本文は「月島機械 百年の技術」(2005年発刊)に掲載した焼却技術をもとに編集したものである。

引用文献

- 1) 東稔節治: 固気相反応装置への応用、ケミカルエンジニアリング、Vol.29、No.5、p.372-379、1984
- 2) 沖野泰也ら: 「産業廃棄物処理への循環流動層技術の適用」、化学装置、Vol.39、NO.6、p.54-58、1997
- 3) 上村敏雄: 特集 高率化焼却と維持管理 高速流動焼却炉システム、燃料及燃焼、Vol.61、NO.11、p.818-821、1994

過給式流動燃焼システム 受賞歴



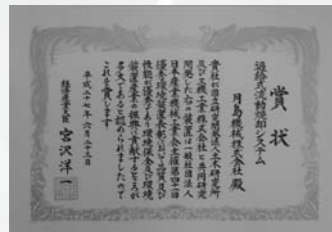
2012年度 化学工学会技術賞

過給式流動燃焼システム 受賞歴

- 2008年度 日本エネルギー学会 奨励賞
- 2008年度 環境システム計測制御学会 奨励論文賞
- 2011年度 化学工学会流動層分科会 技術賞
- 2012年度 化学工学会 技術賞
- 2015年度 日本産業機械工業会 優秀環境装置  
経済産業大臣賞



2015年度 日本産業機械工業会 優秀環境装置 経済産業大臣賞



表彰を受ける当社代表取締役社長 山田和彦

おわりに



寺腰 和由

Kazuyoshi TERAKOSHI

執行役員  
水環境事業本部  
ソリューション技術部長

入社以来のほとんどが下水汚泥の熱技術に携わってき  
おり、乾燥・焼却・溶融・石材化など様々な設備に関与し  
てきた。溶融石材化など処理技術の向上を目指す、とたく  
設備が複雑になってしまうジレンマと戦いながら「過給式流  
動燃焼システム」にたどりついたのが正直な経緯である。下  
水汚泥は約80%が水分であり、燃焼には高温の砂を多量  
に保持している流動床式の焼却炉が非常に有効である。し  
かしながら、多量の砂を保有しているがゆえに、燃焼するた  
めの空気を送風する多量の動力が必要であった。本システム  
は過給機を用いて燃焼排ガスによる動力を回収し、送風  
動力を必要としないのが一番の特徴である。シンプルで高  
性能を兼ね備えたシステムとなっている。

本システムの開発は2000年当初、土木研究所・産業技  
術総合研究所と民間企業3社の間による、研究会からス  
タートしたものである。当時システムの骨格は机上で考えら  
れたが実用化できるのかの疑問も強く、各社の諸事情もあり  
民間企業は当社以外撤退してしまい開発継続の第1回目  
危機(民間企業撤退)が訪れた。当社1社による開発継続  
には負担も大きく、一緒に開発を推進していける企業を探  
し、三機工業(株)の賛同を得ることが出来た。開発再開を誓  
う4者の関係者による決起集会在、つくばの薄汚い居酒屋  
で行われた事が思い出される。開発は今まで扱ったことの

無い過給機の特性を確認することから始め、次には圧力燃  
焼の特性把握のための試験機を当社の研究所に製作・設  
置し段階を踏まえ進めていった。最終的には炉から過給機  
までを組み合わせた実証プラント(5t/日)を北海道の長万部  
町に建設し、実証試験を進めることとしたが開発資金の確  
保という第2回目の危機(開発資金難)があった。最終的に  
はNEDOの助成を得ることが出来たがNEDOへ応募するも  
の1回は落選する苦い経験もしていた。実証試験を開始  
し、初めて送風動力無しでの運転状態「自立運転」を確認  
したのが2007年で、その時の感動は今までの苦難を忘れ  
させるものであった。その後試験を継続し実機への諸デー  
タを取得することが出来、実用化に踏み切れるまでたどりつ  
いたが、第3回目の危機(浪人生活)に直面した。本システ  
ムを採用していただくため、自治体への技術説明を全国へ  
展開した。しかし、ポテンシャルは理解してもらえたが実績  
重視社会の壁は高く初号機の受注には3年の年月を要し  
た。本システムを評価して頂き、初号機の勇気を持ち合わ  
せていたのは東京都であった。但し、東京都は実際に東  
京都の汚泥を使った実証と耐久性の確認が必要とのことか  
ら共同研究を行い、雪中のなか1ヶ月連続運転を2回実施  
し確認試験を行った。その結果第2世代炉としての認定が  
得られ、初号機である葛西水再生センター向けの受注成  
功につながった。しかしながら処理量は300t/日で国内最  
大規模であり、月島機械技術陣の手腕が問われるもので  
あった。初号機の試運転では初期トラブルは見られたが、  
東京都 葛西水再生センターと神奈川県四之宮処理場と  
も順調に稼動しており、当初の計画を大幅に上回る温室効  
果ガス削減効果が得られている。今まで沢山の障壁があっ  
たが、人に恵まれ、あきらめずにやり続けた事が成功の鍵  
だったと考えている。あきらめなければ失敗は成立しないも  
のである。

本システムは我々月島機械だけでなく、産・官・学が連  
携して開発したものであり様々な関係者の努力の賜物であ  
る。これまでに14年間の長い年月と数え切れない方々の  
協力が無ければ成し得なかったものであり、関係各位に厚  
く御礼申し上げたい。また、本開発事例が今後新しい事に  
挑戦する技術者の奮起材料になれば幸いである。

## 会社概要

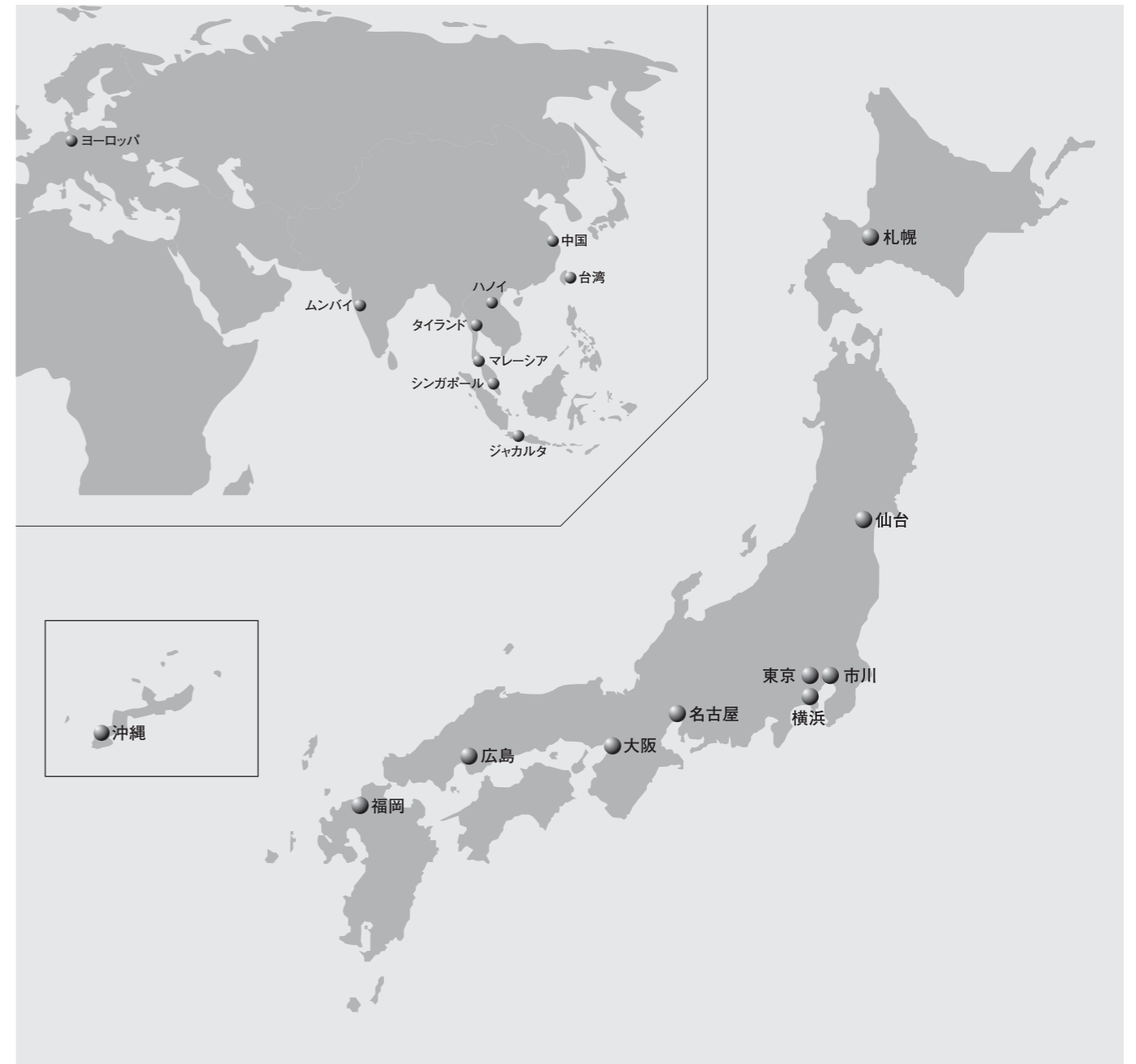
名称	月島機械株式会社 (TSUKISHIMA KIKAI CO.,LTD.)	資本金	66億4600万円
代表取締役社長	山田 和彦	従業員数	689名(グループ2,175名)(平成27年3月末現在)
創業	明治38年8月	売上高	単体：429億円 連結：756億円(平成27年3月期)

## 事業所

本社	〒104-0053 東京都中央区晴海3-5-1 TEL.03-5560-6511 FAX.03-5560-6591	市川事業所(工場)	〒272-0127 千葉県市川市塩浜1-12 TEL.047-397-6111 FAX.047-397-3354
東京支社	〒104-0053 東京都中央区晴海3-5-1 TEL.03-5560-6541 FAX.03-5560-6593	(研究所)	〒272-0127 千葉県市川市塩浜1-12 TEL.047-359-1651 FAX.047-359-1661
大阪支社	〒541-0045 大阪市中央区道修町2-6-6(塩野日生ビル) TEL.06-6229-1331 FAX.06-6229-1415	〈海外〉	
札幌支店	〒060-0807 札幌市北区北七条西4-1-2(KDX札幌ビル) TEL.011-726-0510 FAX.011-726-0520	TSKジャカルタ駐在員事務所 Tsukishima Kikai Co.,Ltd.Jakarta Representative Office Setiabudi Atrium 2nd Floor, Unit 207 Jl. HR. Rasuna Said Kav. 62, Kuningan, Jakarta 12920, Indonesia TEL. +62-21-521-0491/0492 FAX. +62-21-521-0490	
仙台支店	〒980-0014 仙台市青葉区本町1-11-2(SK仙台ビル) TEL.022-227-9267 FAX.022-223-0316	TSKハanoi駐在員事務所 Tsukishima Kikai Co.,Ltd.Hanoi Representative Office Unit 13-03A, Prime Centre, 53 Quang Trung Street, Hai Ba Trung District, Hanoi, Viet Nam TEL. +84-(0)4-3766-9965/9967/9968 FAX. +84-(0)4-3766-9969	
横浜支店	〒231-0015 横浜市中区尾上町4-47(リスト関内ビル) TEL.045-651-7331 FAX.045-664-5086	TSKムンバイ駐在員事務所 Tsukishima Kikai Co.,Ltd.Mumbai Liaison Office 602 B, Excel Ark, Mercy Nagar, Ramdev Park Road, Mira Road (E), Thane - 401 107, Maharashtra, India TEL. +91-9967645572	
名古屋支店	〒045-0003 名古屋市中村区名駅南1-17-29(広小路ESビル) TEL.052-581-2378 FAX.052-581-1624	TSKヨーロッパ駐在員事務所 Tullastraße 64 76131, Karlsruhe, Germany TEL. +49-721-9-64-56-783 FAX. +49-721-9-64-56-10	
広島支店	〒730-0015 広島市中区橋本町10-10(広島インテス) TEL.082-227-3093 FAX.082-223-8771		
福岡支店	〒810-0062 福岡市中央区荒戸2-1-5(大濠公園ビル) TEL.092-741-5736 FAX.092-761-4806		
沖縄営業所	〒901-2131 沖縄県浦添市牧港2-54-2(沖縄土木設計ビル) TEL.098-874-5793 FAX.098-874-6262		

## 関連会社

月島テクノメンテサービス(株)	〒135-0031 東京都江東区佐賀1-3-7 月島機械永代ビル TEL.03-5245-7150 FAX.03-5245-7155	〈海外関連会社〉	
月島マンセルス(株)	〒135-0031 東京都江東区佐賀1-3-7 月島機械永代ビル TEL: 03-5621-5911 FAX: 5621-5912	月島エンジニアリングマレーシア(株) TSUKISHIMA ENGINEERING MALAYSIA SDN. BHD. <TEM> 月島エンジニアリングシンガポール(株) TSUKISHIMA ENGINEERING SINGAPORE PTE. LTD. <TES> SUITE16, 04-05, 16th Floor, Wisma Mca, 163 Jalan Ampang, 50450 Kuala Lumpur, Malaysia TEL. +60-3-2162-8679 FAX. +60-3-2162-8377	
月島ビジネスサポート(株)	〒104-0053 東京都中央区晴海3-5-1 (月島機械(株)内) TEL.03-3533-4824 FAX.03-3536-0968	TSKエンジニアリングタイランド(株) TSK ENGINEERING (THAILAND) CO., LTD. <TET> United Center Building 14th Floor, Room1404, 323 Silom Road, Bangrak, Bangkok 10500, Thailand TEL. +66-2-231-1726~30 FAX. +66-2-231-1731	
サンエコサーマル(株)	〒322-0017 栃木県鹿沼市下石川737-55 TEL.0289-72-0371 FAX.0289-72-0381	TSKエンジニアリング台湾(株) TSK ENGINEERING TAIWAN CO., LTD. <TETA> 6th Floor, No.24, Min Sheng, W.Road, Taipei, Taiwan R.O.C. TEL. +886-2-2523-6975~6 FAX. +886-2-2521-1429	
月島環境エンジニアリング(株)	〒104-0053 東京都中央区晴海3-12-1 (KDX晴海ビル) TEL.03-6758-2310 FAX.03-6758-2324	月島環保機械(北京)有限公司 TSK ENGINEERING CHINA CO., LTD Unit2205-2206, Block A, ZhuBang 2000 Business Center No.100 Balizhuang Xili, Chaoyang District, Beijing 100025, P.R.China TEL. +86-10-8590-6595 FAX. +86-10-8590-6593	
大同ケミカルエンジニアリング(株)	〒530-0053 大阪府大阪市北区末広町3-3 大同パークサイドビル TEL.06-6312-6621 FAX.06-6312-6626	BOKELA Ingenieurgesellschaft für Mechanische Verfahrenstechnik mbH Tullastraße 64 76131, Karlsruhe, Germany TEL. +49-721-9-64-56-0 FAX. +49-721-9-64-56-10	
寒川ウォーターサービス(株)	〒253-0106 神奈川県高座郡寒川町宮山4058-6(事業所) お問い合わせ先： 月島機械株式会社 水環境事業本部 事業推進部 TEL.03-5560-6530 FAX.03-3533-4103		
尾張ウォーター&エナジー(株)	〒450-0003 愛知県名古屋市中村区名駅南1-17-29 (月島機械株式会社名古屋支店内) お問い合わせ先： 月島機械株式会社 水環境事業本部 新事業推進部 TEL.03-5560-6540 FAX.03-5560-6595		



## 編集後記

## Editor's Note

### 荒井 健 編集委員

東日本大震災以降、電力需給対策は我々が直面する重要な社会的な課題となっています。

電力の安定供給はもちろんのこと、使用者においては、更なる省エネ機器の導入や抑制などが求められています。本技報で紹介した「過給式流動焼却システム」は、これらのエネルギー問題の中、電力消費を従来の気泡流動炉と比べ40%以上削減できるシステムとして、注目を集めています。本技報にて、お客様と技術を軸に一層のコミュニケーションを深めることができると確信しております。

本システムは、調査、研究から実用化まで、10数年の歳月をかけてきました。技術者の地道な努力と飽くなき探究心に敬意を表したいと思います。

### TSK技報 NO.18 2015

問い合わせ先:giho@tsk-g.co.jp

発行:月島機械株式会社 技報編集委員会

総責任者:中島 和男

編集委員長:寺腰 和由

編集委員:佐藤 正則 荒井 健

高田 真木 山本 隆文

高橋 正純 高須 利昌

高尾 ひろ子

15073000A