

高含水バイオマスの熱化学的エネルギー 直接変換技術に関する共同研究報告書

平成 23 年 8 月

独立行政法人土木研究所

独立行政法人産業技術総合研究所

月島機械株式会社

三機工業株式会社

Copyright © (2011) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

高含水バイオマスの熱化学的エネルギー 直接変換技術に関する共同研究報告書

| | | | | |
|-----------------|-------------|------------|----------|---------------------|
| 独立行政法人土木研究所 | 材料資源研究グループ | リサイクルチーム | 上席研究員 | 岡本 誠一郎 |
| | | | 研究員 | 桜井 健介 |
| | | | 研究員 | 堀尾 重人 |
| | | | 前上席研究員 | 尾崎 正明 ^{※1} |
| | | | 前総括主任研究員 | 落 修一 ^{※2} |
| | | | 前研究員 | 宮本 豊尚 ^{※3} |
| 独立行政法人産業技術総合研究所 | エネルギー技術研究部門 | クリーンガスグループ | グループ長 | 鈴木 善三 |
| | | | 研究員 | 村上 高広 |
| | | | 研究員 | 北島 暁雄 |
| 月島機械株式会社 | 水環境事業本部 | ソリューション技術部 | | 寺腰 和由 |
| | | | | 山本 隆文 |
| | 水環境事業本部 | 事業統括部 | | 井川 学 |
| | 企画開発本部 | 研究開発部 | | 長沢 英和 |
| | | | | 永吉 義一 |
| 三機工業株式会社 | 環境システム事業部 | 熱エンジニアリング部 | | 梅沢 昭仁 |
| | | | | 廣瀬 均 |
| | | | | 折戸 敢 |
| | 環境システム事業部 | | (前任研究員) | 岩井 良博 |
| | 技術開発本部 | | (前任研究員) | 木原 均 |
| | | | (前任研究員) | 小関 多賀美 |

※1：現国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部 下水道研究官

※2：現財団法人下水道新技術推進機構資源循環研究部 副部長

※3：現国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部下水道研究室 研究官

要旨

本研究は、加圧流動床式燃焼炉とターボチャージャーとを組合せた「過給式流動燃焼システム」について、次世代の省エネ型下水汚泥焼却システムとして、また草木等の有機性廃棄物を下水汚泥と混合して燃焼することにより、これらのエネルギー変換プロセスとして実用化することを目的としている。北海道長万部町に設置した実証設備による燃焼試験により、本システムは流動ブロウや誘引ファンを使用しない自立運転を安定的に行えることを確認した。このため、本システムは省電力であり、 N_2O も加圧燃焼によって高温燃焼域が形成されるために、従来の気泡流動炉より排出量の削減が可能であった。また、草木系バイオマスとの混焼により、重油等の補助燃料の削減効果が十分に得られるとともに、排ガスや焼却灰の性状について問題ないことを確認し、さらに得られた灰の資源化について検証した。

キーワード：下水汚泥、バイオマス、加圧流動層、焼却、エネルギー、温室効果ガス

ま え が き

わが国の温暖・多雨な気候は豊富なバイオマスの資源量をもたらすが、一方でバイオマス資源は、発生地域が分散していること、形状・性状が多種多様にわたること、有機質であり品質が安定せず変質する可能性が高いこと、資源化・エネルギー化のために一定の処理が必要な場合が多いことなど、その利活用推進には依然として課題も多い。

こうしたバイオマスのうち、下水処理過程で発生する下水汚泥や、道路・河川・公園等の公共緑地の管理過程で発生する草木廃材等のバイオマスは、発生量や質が安定しており、国や地方公共団体が公物管理、公共サービスの一環として取り扱っているために管理システムが確立しているなど、利用上の特性を有しているものの、特に草木廃材は未利用のまま処分されているものも多い。これらのバイオマスを効率的に利活用していくためには、その特性に留意しつつ、出来るだけ既存の施設・システムを活用した利活用システムの構築が有効であり、そのための要素技術の開発が望まれるところである。

こうした背景を踏まえ、独立行政法人土木研究所では、2004年度（2005年2月）より2010年度まで、6年余りにわたって、現在、焼却あるいは埋立処分されている下水汚泥や草木などのバイオマスの環境負荷を大幅に低減するとともに、有効活用を推進することを目的として、独立行政法人産業技術総合研究所、月島機械株式会社、三機工業株式会社との共同研究を実施した。なお、本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の新エネルギー技術研究開発バイオマスエネルギー高効率転換技術開発（転換要素技術開発）における「都市バイオマス収集システムを活用するためのエネルギー転換要素研究開発」（2005～2007年度）の共同研究と並行して行われた。

本共同研究報告書は、NEDO共同研究の成果報告書で既に公表されている研究成果以外の研究課題およびNEDO共同研究以降の研究に関する成果を取りまとめたものである。

目次

| | |
|-------------------------------|----|
| 第1章 序論 | |
| 1. 1 研究の背景 | 1 |
| 1. 2 研究の目的 | 1 |
| 1. 3 研究の構成 | 2 |
| 第2章 過給式流動焼却システムの説明 | |
| 2. 1 はじめに | 4 |
| 2. 2 特徴 | 4 |
| 2. 3 過給式流動焼却システム | 5 |
| 第3章 過給式流動焼却システムの検証 | |
| 3. 1 はじめに | 7 |
| 3. 2 実証設備 | 7 |
| 3. 2. 1 設備概要 | 7 |
| 3. 2. 2 主要機器 | 10 |
| 3. 2. 3 その他機器 | 17 |
| 3. 3 運転結果 | 22 |
| 3. 3. 1 自立運転 | 22 |
| 3. 3. 2 排ガス性状 | 27 |
| 3. 3. 3 汚泥性状、焼却灰性状 | 29 |
| 3. 3. 4 余剰加圧空気 | 31 |
| 3. 3. 5 低負荷運転 | 33 |
| 3. 4 温室効果ガス削減 | 35 |
| 3. 4. 1 N ₂ O排出量削減 | 35 |
| 3. 4. 2 温室効果ガス削減の試算 | 37 |
| 3. 5 運転制御 | 39 |
| 3. 6 長期運転 | 42 |
| 3. 6. 1 はじめに | 42 |
| 3. 6. 2 供試汚泥 | 42 |
| 3. 6. 3 運転結果および考察 | 44 |
| 3. 6. 4 過給機軸受寸法測定結果および考察 | 49 |
| 3. 7 解体研究 | 53 |
| 3. 8 まとめ | 59 |
| 第4章 制御システムの検討 | |
| 4. 1 はじめに | 61 |
| 4. 2 実験方法および条件 | 61 |

| | | |
|--------------------------|-----------------------------|-----|
| 4. 2. 1 | 実験室規模の加圧流動層燃焼炉による基礎燃焼実験 | 61 |
| 4. 2. 2 | 過給式流動炉実証プラントによる燃焼試験 | 65 |
| 4. 2. 3 | シミュレーション解析 | 65 |
| 4. 3 | 実験結果および考察 | 66 |
| 4. 3. 1 | 基礎燃焼実験による N_2O 排出特性 | 66 |
| 4. 3. 2 | 実証プラントによる N_2O 排出濃度の比較 | 67 |
| 4. 3. 3 | シミュレーションによる燃焼炉内温度分布の圧力による影響 | 69 |
| 4. 4 | まとめ | 72 |
| 第5章 草木系バイオマス混焼システムの検証 | | |
| 5. 1 | 汚泥・バイオマスの供給手法 | 73 |
| 5. 2 | 混焼による補助燃料の削減効果 | 77 |
| 5. 3 | まとめ | 89 |
| 第6章 草木系バイオマスの資源管理システムの検討 | | |
| 6. 1 | はじめに | 90 |
| 6. 2 | 草木系バイオマスの実態調査 | 90 |
| 6. 2. 1 | 組成性状 | 90 |
| 6. 2. 2 | 発生量 | 95 |
| 6. 3 | 草木系バイオマスの収集・集約方法の検討 | 98 |
| 6. 4 | まとめ | 99 |
| 第7章 資源化研究 | | |
| 7. 1 | はじめに | 101 |
| 7. 2 | 成分分析 | 101 |
| 7. 2. 1 | 肥料成分 | 101 |
| 7. 2. 2 | 重金属 | 102 |
| 7. 3 | 試験栽培 | 103 |
| 7. 3. 1 | 試験栽培（2009年度） | 103 |
| 7. 3. 2 | 試験栽培（2010年度） | 103 |
| 7. 4 | まとめ | 107 |
| 第8章 結言 | | |
| | | 108 |

第1章 序論

1. 1 研究の背景

バイオマスは、太陽エネルギーを使って生産される生物由来の有機質資源であり、持続的に再生可能な資源である。わが国の廃棄物系バイオマス資源のエネルギー賦存量は、原油換算で2,600万キロリットルと推定されており(平成12年資源エネルギー庁「バイオマスエネルギーの実態等基礎調査」)、これらをエネルギー源または他の原材料等の資源として利用することは、地球温暖化防止や循環型社会形成に寄与するものである。

2009年には「バイオマス活用推進基本法」が制定され、2010年には同法に基づく「バイオマス活用推進基本計画」(以下、「基本計画」という)が策定されるなど、バイオマス資源の積極的な利用が期待されている。基本計画では、バイオマス活用推進のためには、「経済性の向上」が重要であり、そのためには効率的な収集システムの確立、幅広い用途への活用などの総合的取り組みが必要と指摘している。さらにそのためにはバイオマス供給者、バイオマス製品の製造者、地域の行政機関、関係府省が一体となった取り組みを推進していくこととされている¹⁾。

一方、現在、わが国の下水道普及率は73.7%に達しており(2009年度末)、2120箇所の下水处理場が供用している(2008年度末)²⁾。これらの処理場の多くは下水汚泥処理施設を有しており、下水汚泥の減量化、資源化等を行っている。特にわが国では、処分地の逼迫から汚泥処分量の減量を強く求められた経緯があり、全国のおよそ7割の汚泥が焼却処理されている。近年、セメント原料等の建設資材化や、炭化燃料化等の取り組みも進められているが、将来的にも汚泥焼却プロセスが維持される都市も多いと推定される。

下水道分野において、低炭素化社会、循環型社会の構築に寄与するためには、近年、下水道分野での温室効果ガス(以下、「GHG」という)排出量増加が著しい下水汚泥の焼却処理の効率化、省エネ化など、GHG排出量の抑制を進めることが重要である³⁾。こうした要求に応える汚泥焼却プロセスとして、(独)土木研究所では、民間企業との共同研究により、下水汚泥やメタン発酵残渣の脱水物と未活用である緑地管理由来の草木系バイオマスを燃料として、化石燃料の使用を最小限に抑えて、効果的な動力および熱回収により余剰エネルギーを供給できるエネルギー転換技術のコンセプトを提案した⁴⁾。

1. 2 研究の目的

本研究は、文献⁴⁾で提案した次世代型下水汚泥焼却システムである「加圧流動床式焼却炉とターボチャージャーとの組合せシステム」の実用化とともに、現在、焼却または埋立処分されている草木等の有機性廃棄物が持つ熱量を効果的に利用することが可能なエネルギー変換プロセスを確立し、下水汚泥処理プロセスのGHG排出抑制対策技術として早期の実用化を目指すことを目的としている。

このために、本研究では、現在、焼却あるいは埋立処分されている下水汚泥や草木などのバイオマスの環境負荷を大幅に低減するとともに、有効活用を推進するために、これらのバイオマスが有する熱量を効果的に利用可能なエネルギーに転換できる新しい焼却システムの開発を目標として、パイロットプラント

実験その他の試験研究を行うものである。

1. 3 研究の構成

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の新エネルギー技術研究開発バイオマスエネルギー高効率転換技術開発（転換要素技術開発）における「都市バイオマス収集システムを活用するためのエネルギー転換要素研究開発」（2005～2007年度）の共同研究と並行して行われたものである。NEDO共同研究の成果については既に公表されている⁵⁾ことから、本共同研究報告書は、既に公表されている研究成果以外の研究課題およびNEDO共同研究以降の研究に関する成果を取りまとめている。

以下に、本研究報告書における研究概要について示す。

第1章では、本研究の背景、目的、構成、NEDO共同研究との関係等について提示した。

第2章では、本研究で提案する過給式流動燃焼システムの特徴、システムフロー等について概要を紹介した。

第3章では、過給式流動燃焼システムを構築する各設備群の概要を示すとともに、実証設備における試験運転結果を提示し、流動ブロワ等を必要としない自立運転が可能なこと、従来型の気泡流動炉と比較して N_2O などのGHG削減効果が高いこと、低負荷時の運転でも既存流動炉と比べて燃費面で優位であること等を明らかにしている。また、長期間運転後の実証設備の結果より、消耗部品の寿命や、実証設備本体の耐久性について確認している。

第4章では、燃焼基礎試験及び実証設備の燃焼試験結果より、過給式流動燃焼システムにおける N_2O の排出特性を明らかにするとともに、排出が低減される機構の解明や、 N_2O の抑制に関連する炉内温度分布の炉内圧力による影響予測を行っている。

第5章では、混合装置の改造により汚泥・バイオマス混合物の混合装置内での固着改善を実施した。また、バイオマスとして牧草、チップ、刈草を用いた混焼試験を実施し、補助燃料の使用量を削減できることを確かめた。

第6章では、草木系バイオマスの資源としての特性について検討し、道路管理や河川管理により発生する草木廃材の含水率などの特性から、汚泥焼却の補助燃料代替として活用可能なことを明らかにするとともに、利用可能資源量（ポテンシャル）等に関する推定を行っている。

第7章では、本システムによる焼却灰の資源化に関する研究として、焼却灰中の肥効成分を中心とした成分分析を行い、特に草木類を混焼した場合のカリウムの含有量に注目し、その効果に関する基礎実験を行った。

以上の成果を、第8章として取りまとめ、結言とした。

参考文献

- 1) バイオマス活用推進基本計画,http://www.maff.go.jp/j/biomass/b_kihonho/pdf/keikaku.pdf,2010.12
- 2) (社)日本下水道協会：平成 20 年度版下水道統計,2011.7
- 3) 岡本誠一郎：下水汚泥の再生利用技術の新しい展開, 環境技術,vol.39, No.11 , pp.665-66, 2010
- 4) 土木研究所共同研究報告：有機性排出物保有熱量の高度電力変換技術に関する調査・研究, 土木研究所共同研究報告書第 308 号,2004.10
- 5) 平成 17 年度～19 年度 NEDO 成果報告書:都市バイオマス収集システムを活用するためのエネルギー転換要素技術開発,2008

第2章 過給式流動焼却システムの説明

2.1 はじめに

これまで高含水バイオマスのエネルギー利用に関して“加圧流動燃焼炉(0.3MPaG)×船舶用過給機(圧縮空気生成)”のシステムを選定し、100t/日の処理規模を想定した検討・設計を実施している。

本研究では、これまでに得られた成果に対して選定システムのブラッシュアップを図り、実証設備により選定システムの実証を行った¹⁾²⁾。

システム検討において、余剰加圧空気(圧縮空気)を生成して有効利用する方法も検討しているが、燃焼空気に設備の臭気を混入し燃焼脱臭するニーズも大きいため、その対応策として過給機への排ガスを一部バイパスし、燃焼に必要な空気のみ過給機で生成するシステムの検証も行った。

2.2 特徴

- (1) 流動炉と過給機(ターボチャージャー)を組み合わせた高含水バイオマスからエネルギー変換するシステム
- (2) 省エネ(電力、補助燃料):
 - ・従来型流動炉で必要であった流動(燃焼空気)ブロワ、誘引ファンが不要となり消費電力を削減できる。
 - ・機器がコンパクトになるため放熱面積が減少し補助燃料が削減できる。
- (3) 温室効果ガス削減:
 - ・加圧効果により流動炉での燃焼速度が大きくなる。これにより、流動炉内のフリーボード部に高温域が出来る。この高温域で N_2O 分解が進み、大きな N_2O 排出量削減効果を得ることが出来る。
- (4) 加圧空気の有効利用:
 - ・過給機から必要な燃焼空気より多い加圧空気を生成できるため、その分を有効利用することが可能である。
- (5) 機器がコンパクト:
 - ・圧力下で運転するための機器は従来型流動炉に対してコンパクトにすることが出来る。このため、設置面積も小さくできる。

2. 3 過給式流動焼却システム

(1) システムフロー

実用設備のシステムフローシート例を図-2.3.1 に示す。

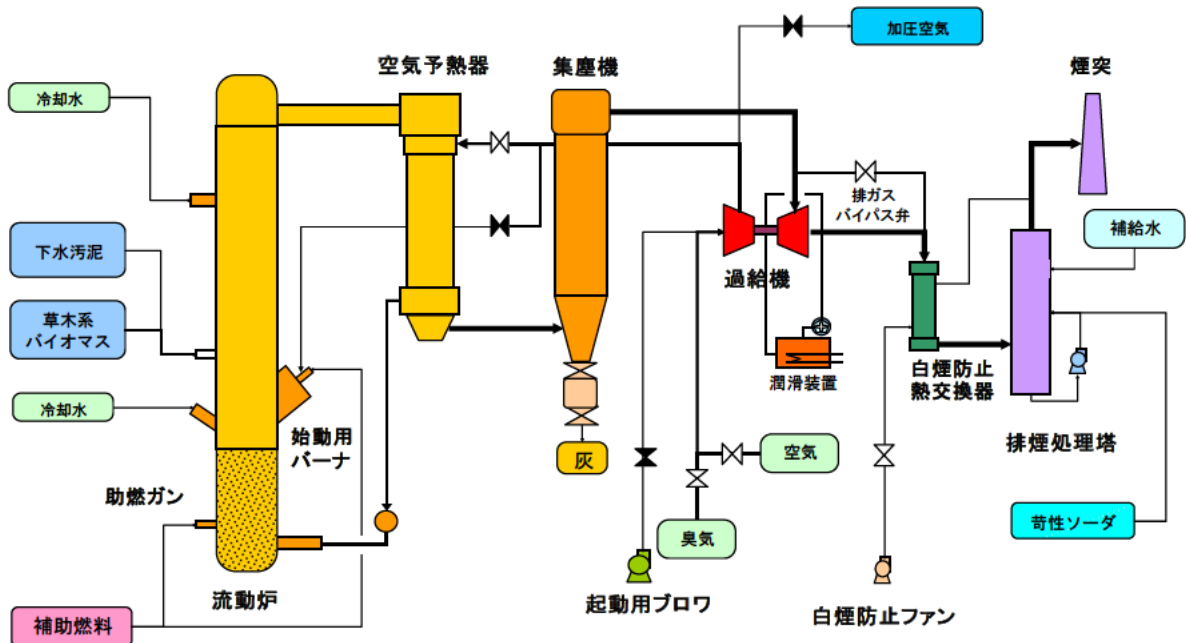


図-2.3.1 過給式流動焼却システムフローシート

(2) システムの説明

[定常運転]

- ①高含水バイオマスである下水汚泥や草木系バイオマスは、下水汚泥供給ポンプやピストンポンプ等により流動炉内へ圧入される。炉下部で流動している高温の流動砂により細かく分解されながら乾燥、ガス化、燃焼する。未燃ガスは流動炉上部のフリーボード部で完全燃焼する。炉内は100kPaGから200kPaGの加圧状態である。焼却灰は排ガスに同伴される。
- ②流動炉から出た排ガスは、850°C程度の高圧で空気予熱器において燃焼空気と熱交換する。燃焼空気は650°C程度まで予熱される。排ガスは600°C程度に温度が下がり、その後、集塵機で除塵される。除塵された排ガスは、過給機のタービンを回し、コンプレッサーで燃焼空気を加圧する。排ガスは、常圧近くまで圧力が低下する。
- ③その後、白煙防止熱交換器で白煙防止空気を加熱し、排煙処理塔で脱硫、脱塩、冷却、除湿され煙突から排出される。煙突では、大気に出た時の水蒸気による白煙を防止するため白煙防止熱交換器で加熱された空気と混合される。
- ④温度が低い起動時は、過給機のタービンが十分な仕事をする事が出来ないため起動用のプロフを必要とするが、焼却運転時には、従来型流動炉で必要とした流動プロフ、誘引ファンが不要となる。

[運転のバリエーション]

- ①排ガスは、高含水バイオマス由来の水蒸気で燃焼空気よりガス量が増えている。過給機での収支では、必要な燃焼空気量以上の加圧空気を発生することができ、この余剰加圧空気を有効利用することが出来る。
- ②下水汚泥の焼却では、設備の臭気を燃焼空気として取り込み燃焼脱臭する場合がある。余剰加圧空気に臭気が混ざるため有効利用しにくい場合もあることから、過給機のタービンを回す排ガスをバイパスラインを使って減らし、必要な燃焼空気だけを生成する運転も可能である。

(3) 運転制御

1) 自動運転

- ・設備の起動停止、定常運転は、制御により自動化した。

2) 制御装置

- ・流動炉や過給機まわりの温度・風量・圧力等の多入力情報をもとにした高度制御装置を用いて、次のような安定・安全かつ省エネとなる制御を行うことができる。
 - ① 昇温時の起動用ブロワによる運転から自立運転（起動用ブロワを停止し過給機による運転）へのなめらかな自動切替え
 - ② 定常運転時の省エネ・温室効果ガス排出量低減を優先した炉内温度制御
 - ③ 負荷変動等にも過給機特性を考慮して安定・安全に対応する自動制御

単位の注釈

MPaG : Pa(パスカル)は圧力の単位。G はゲージ圧であることを示し、絶対圧力から大気圧を差し引いた数値。M はメガで 100 万倍を示す。

参考文献

- 1)土木研究所共同研究報告：有機性排出物保有熱量の高度電力変換技術に関する調査・研究，土木研究所共同研究報告書第 308 号,2004.10
- 2)平成 17 年度～平成 19 年度 NEDO 成果報告書：都市バイオマス収集システムを活用するためのエネルギー転換要素技術開発, 2008

第3章 過給式流動焼却システムの検証

3.1 はじめに

北海道長万部町の長万部終末処理場内に実証設備を建設した。設備の概要および、試験運転による①焼却運転（システムの実証）、②温室効果ガス削減、③運転制御、④長期運転（耐久性）の結果について報告する。これらの試験研究のうち、特に②温室効果ガス削減効果の算定、④長期運転による耐久性検証については、東京都下水道局との共同・協力により実施したものである。

3.2 実証設備

3.2.1 設備概要

処理量：180kg/h（下水汚泥）

焼却温度：850℃

運転圧力：200kPaG 未満

設置場所：北海道山越郡長万部町 長万部終末処理場内

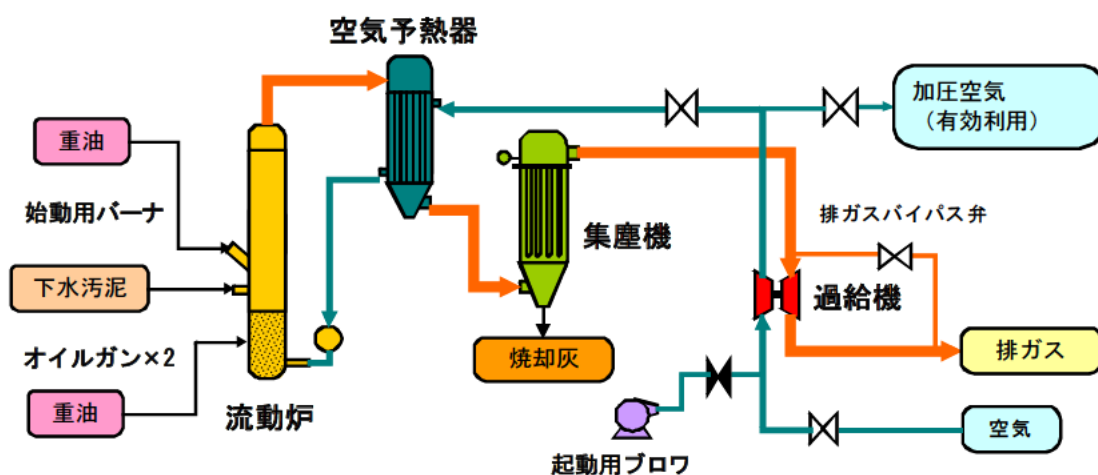


図-3.2.1 実証試験設備フローシート

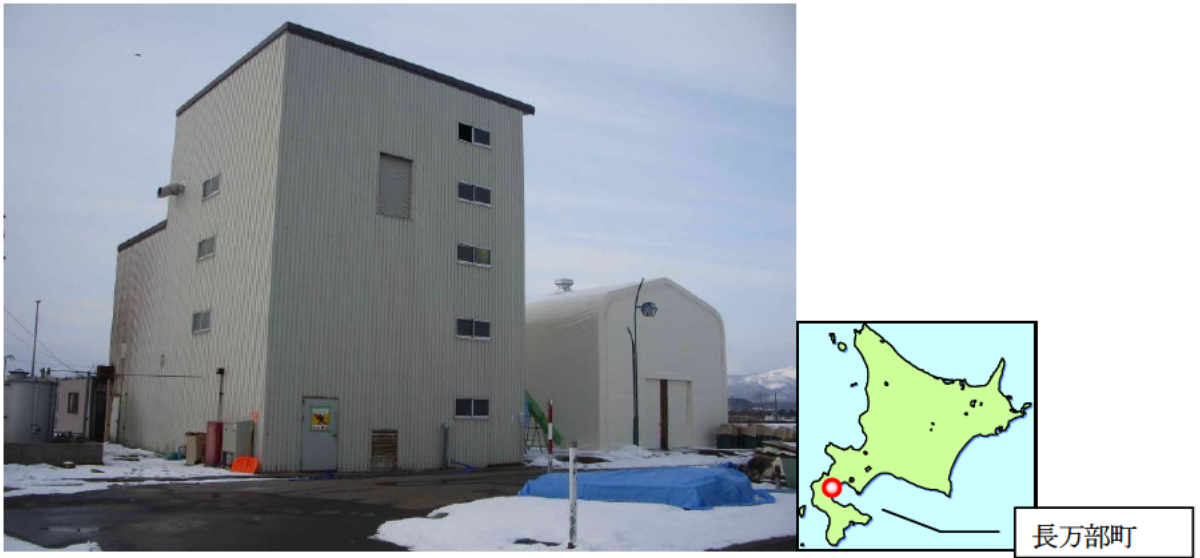


図-3.2.2 実証試験設備全体

[主な運転履歴]

システム確認運転 : 2007年1月31日～2007年2月7日
 汚泥専焼運転 : 2007年2月23日開始
 草木系バイオマス混焼運転 : 2007年3月15日開始
 汚泥専焼連続運転 : 2007年8月1日～2007年8月3日(48時間)
 汚泥混焼連続運転 : 2007年8月23日～2007年8月24日(24時間)
 低負荷運転 : 2007年10月3日
 負荷変動運転 : 2008年6月15日
 高度制御開始 : 2008年7月15日
 道外処理場汚泥焼却運転 : 2009年6月18日～2009年8月7日
 長期運転 : 2010年1月8日～2010年4月3日(800時間×2回)
 汚泥専焼、草木バイオマス混焼運転 : 2010年9月22日～2010年10月30日

表-3.2.1 汚泥処理量

| | 運転時間 | 焼却時間 | 汚泥処理量 |
|--------|----------|----------|----------|
| 2006年度 | 316.5時間 | 11.5時間 | 2.1ton |
| 2007年度 | 1336.5時間 | 376.0時間 | 67.7ton |
| 2008年度 | 809.0時間 | 274.0時間 | 49.3ton |
| 2009年度 | 2155.0時間 | 1757.0時間 | 316.3ton |
| 2010年度 | 495.0時間 | 210.5時間 | 37.9ton |
| 合計 | 5112.0時間 | 2629.0時間 | 473.3ton |

3. 2. 2 主要機器

(1) 下水汚泥供給ポンプ

脱水した下水汚泥を流動炉またはバイオマス混合搬送装置に供給するための設備である。

汚泥は、長万部終末処理場の汚泥ホッパから金属容器（通称カンテナ）に直接受け入れる。この金属容器をフォークリフトにより運搬し、下水汚泥供給ポンプ上部に設けられた下水汚泥混合供給ホッパへ投入する。この際、汚泥重量は計量機で計測する。ホッパ内の脱水汚泥は下水汚泥供給ポンプにより定量で切り出される。送泥先は汚泥専焼時には流動炉へ、また草木系バイオマス混焼時には汚泥バイオマス混合装置へ手動弁の切り替え操作によって変更する。

下水汚泥供給ポンプの仕様は以下の通りである。

形式： 一軸ねじ式ポンプ+パドル式ミキサー
搬送量： 0.2~0.5m³/h（水分85%）
容量： 約1.6m³
計量機： ロードセル式(max.5.0t)

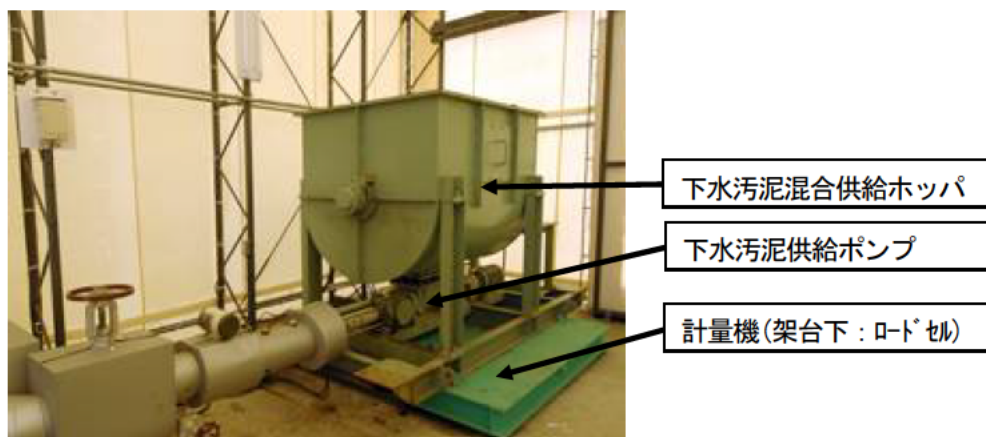


図-3.2.3 下水汚泥混合供給ホッパ、下水汚泥供給ポンプ、計量機外観



図-3.2.4 カンテナ外観

(2) 流動炉

脱水した下水汚泥等を加圧状態で燃焼する流動式焼却炉である。

加圧効果により酸素分圧が高くなり燃焼速度が大きくなる。ガス密度が大きくなるため、従来の気泡流動炉に比べて排ガスボリュームが2/5程度となるため流動炉を小型化することができる。

流動炉の昇温は始動用バーナにより熱風を発生させて炉に供給する。砂層温度が550℃以上でオイルガンに着火し、所定の温度まで昇温する。昇温には重油・燃焼空気の比率を一定に保ちながら設定温度まで自動制御を行う昇温プログラムが組まれている。昇温完了後は炉内温度を一定に保つ制御に切り替わる。昇温完了後、汚泥供給口から下水汚泥もしくはバイオマス混合汚泥を投入する。過給式流動炉で発生した排ガスは高温・高圧のまま空気予熱器へと導入される。

過給式流動炉の仕様は以下の通りである。

| | |
|---------|--------------|
| 形式： | 流動式 |
| 投入汚泥量： | 180 kg/h |
| 外径（内径）： | Φ1,200（Φ700） |
| 補助燃料： | A 重油 |
| 流動媒体： | ケイ砂 |



図-3.2.5 流動炉外観



図-3.2.6 汚泥供給口

(3) 空気予熱器

流動炉からの高温高圧排ガスは空気予熱器により熱回収を行い、回収した熱を燃焼空気の前熱源として有効に利用することができる。熱回収された排ガスは集塵機へと導入される。

空気予熱器の仕様は以下の通りである。

| | |
|--------|---|
| 形式： | シェル&チューブ |
| 排ガス量： | 890 m ³ _N /h (常用) |
| 予熱空気量： | 534 m ³ _N /h |
| 交換熱量： | 310 MJ/h |
| 伝熱面積： | 17.2 m ² |



図-3.2.7 空気予熱器外観

(4) 集塵機

空気予熱器から導入される排ガスには、下水汚泥を燃焼した際に発生する灰分（ダスト）が含まれている。

集塵機では高温・高圧を維持しながら排ガス中の灰分を集塵除去するためにセラミックフィルターを使用する。排ガスがセラミックフィルターを通過する際、灰分はフィルター表面で除塵される。除塵された排ガスは過給機へと導入される。フィルター表面に堆積した灰はパルスジェットにより定期的に逆洗され集塵機下部コーン部に払い落とされる。コーン部に溜まった灰は集塵機下部に設けられた灰拔出装置によって系外へ排出される。灰拔出装置は、排出弁を中間タンクの上下に設置した2段構成とし、交互に開閉しながら灰を排出する。

集塵機の仕様は以下の通りである。

| | |
|----------|--|
| 形式： | バッグ型（セラミックフィルター） |
| 排ガス量： | 890 m ³ _N /h(常用) |
| ろ過面積： | 24.7 m ² |
| 入口排ガス温度： | 630 °C |
| 出口ダスト濃度： | 0.02 g/m ³ _N (D.B)以下 |

集塵機の外観を図-3.2.8 に示す。また、セラミックフィルターの写真を図-3.2.9 に示す。



図-3.2.8 集塵機外観



図-3.2.9 セラミックフィルター

(5) 過給機ユニット

集塵機から導入された高温高圧状態の排ガスのエネルギーで過給機（ターボチャージャー）を駆動し、加圧空気を発生させるものである。転換される加圧空気は一部を燃焼用空気に用いるとともに余剰加圧空気を有効利用することが可能である。

過給機ユニットには過給機軸受部へ潤滑油を供給するポンプおよび、熱交換器により潤滑油の温度を一定に保つ機構を有する。

過給機の仕様は以下の通りである。

| | |
|-------------|--------------------------|
| 形式： | 遠心式 |
| 最高回転数： | 140,000rpm |
| 圧縮空気量： | 2～15 m ³ /min |
| 最大圧力比： | 3.0 |
| 許容タービン入口温度： | 750 °C |
| 重量： | 10.5kg |



図-3.2.10 過給機ユニット外観と過給機本体

(6) 起動用ブロワ

過給機による自立運転に切り替えるまでの間、過給機に燃焼用空気を送るためのものである。
起動用ブロワの仕様は以下の通りである。

形式： ターボブロワ

風量： $9.0 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{min}$

吐出圧力： 45 kPa(G)



図-3.2.11 起動用ブロワ外観

3. 2. 3 その他機器

(1) 環境集塵機 (図-3.2.12)

灰抜出装置および流動砂抜出装置の作動時に発生する粉塵を吸引

仕様： フィルター付きターボファン

ろ過面積： 4.1 m²

(2) 冷却水循環ポンプ (図-3.2.13)

過給機ユニット内の熱交換器に冷却水を供給

仕様： 渦巻きポンプ

吐出量： 0.1 m³/min

全揚程： 30 m

(3) 冷却水供給ポンプ (図-3.2.14)

ウォーターガンおよび噴霧水スプレーノズルに冷却水を供給

仕様： 渦巻きポンプ

吐出量： 0.05 m³/min

全揚程： 70 m

(4) コンプレッサー (図-3.2.15)

計装用および噴霧用で使用する圧縮空気を供給

仕様： オイルフリースクリュー式

吐出量： 3.4 m³/min

吐出圧力： 0.69 MPa(G)

(5) 除湿器 (図-3.2.16)

コンプレッサーから供給される圧縮空気を除湿

仕様： 冷凍式

処理空気量： 3.9 m³/min

(6) 動力制御盤 (図-3.2.17)

各機器の作動、制御、警報表示 他

(7) 監視装置 (図-3.2.18)

温度、圧力、流量、警報の監視 他



図-3.2.12 環境集塵機外観



図-3.2.13 冷却水循環ポンプ外観



図-3.2.14 冷却水供給ポンプ外観



図-3.2.15 コンプレッサー外観



図-3.2.16 除湿器外観



図-3.2.17 動力制御盤外観



図-3.2.18 監視装置外観

3. 3 運転結果

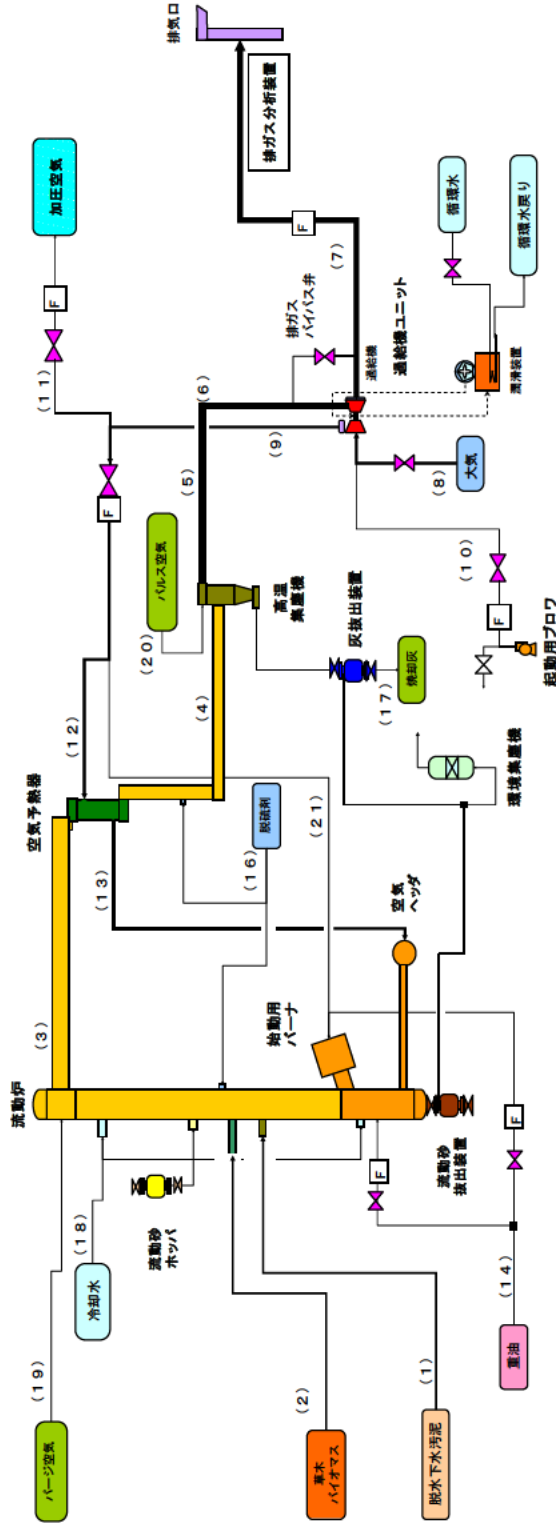
3. 3. 1 自立運転

設備の立ち上げ直後は、起動用ブロワから燃焼空気を供給し始動用バーナにより流動炉の昇温を行う。同時に流動炉から集塵機間の温度が上昇し、過給機への排ガス温度が高くなり過給機タービンの仕事量(回転数)が増加する。過給機から発生する加圧空気の圧力も増加し、系内の圧力が上昇する。この間、起動用ブロワの押し込み圧力は低下してゆく。昇温が完了し定格で焼却するまでに、起動用ブロワから過給機へ空気を押し込む必要はなくなり、過給機が自ら吸気するようになる。

実証運転試験により、最終的に燃焼空気吸気ラインを開けて、起動用ブロワを停止すると起動用ブロワのアシスト無く自立して焼却運転が行えることを確認した。

定格での焼却運転例を図-3.3.1 に示す。

過給式流動炉 収支図



| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) | (11) | (12) | (13) | (14) | (15) | (16) | (17) | (18) | (19) | (20) | (21) | |
|----|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------|
| 流量 | 1800 | 0 | 859 | ← | ← | ← | 897 | 537 | ← | 0 | 0 | 537 | ← | 164 | ← | 0 | 35 | 604 | 170 | 384 | 0 | |
| 乾 | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h |
| 水分 | 1560 | ← | 196 | ← | ← | ← | 196 | 5 | ← | ← | ← | 5 | ← | ← | ← | ← | ← | ← | 2 | 0.4 | ← | |
| 水分 | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h | kg/h |
| 流量 | — | — | 739 | ← | ← | ← | 769 | 417 | ← | — | — | 417 | ← | 193 | ← | — | — | — | 132 | 30 | — | |
| 乾 | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | L/h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | |
| 水分 | — | — | 496 | ← | ← | ← | 525 | 412 | ← | — | — | 412 | ← | — | ← | — | — | — | 130 | 29.5 | — | |
| 水分 | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | |
| 温度 | 20°C | — | 788°C | 552°C | 448°C | 404°C | 328°C | 27°C | 105°C | — | — | 105°C | 441°C | 20°C | — | — | — | — | 20°C | 20°C | — | |
| 圧力 | — | — | 101 | 92 | 91 | ← | 2 | —2 | 105 | — | — | 105 | 104 | — | — | — | — | — | 690 | 690 | — | |
| 熱量 | — | — | 1,407 | 1,113 | 954 | 861 | 24 | 24 | 24 | — | — | 24 | 261 | — | — | — | — | — | 1 | — | — | |
| 放熱 | — | — | 83.4 | 42.2 | 160 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | |
| | — | — | MJ/h | MJ/h | MJ/h | MJ/h | MJ/h | MJ/h | MJ/h | MJ/h | MJ/h | MJ/h | MJ/h | MJ/h | MJ/h | MJ/h | MJ/h | MJ/h | MJ/h | MJ/h | MJ/h | MJ/h |

図一3.3.1 定格での焼却運転 (例)

流動炉の流動部とフリーボード(FB)部の炉内温度計取付位置の関係は下記のようにになっている。流動砂温度は、砂層温度(1)と砂層温度(2)で測定している。流動砂が多くなる場合以外は、砂層温度(3)はフリーボード下部の温度を示す。

炉内温度の測定位置を図-3.3.2 に示す。

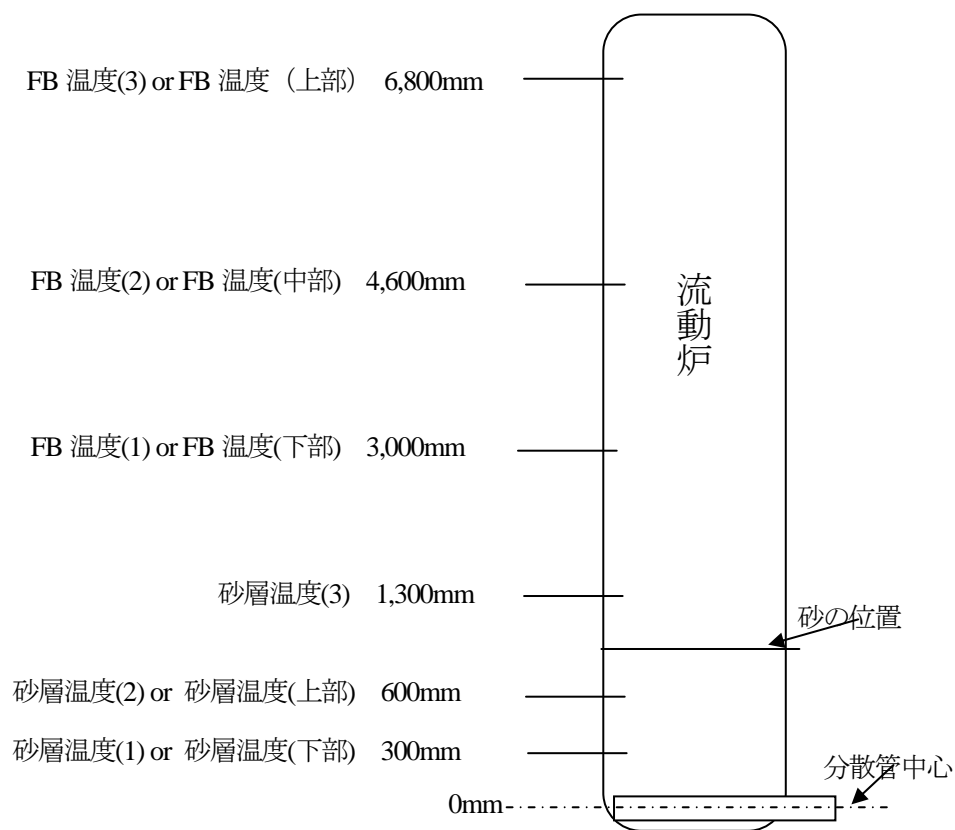


図-3.3.2 分散管から炉内温度計までの高さ

運転時の汚泥供給量、重油供給量および流動炉各部の温度、圧力変化を図-3.3.3 に、燃焼空気量、排ガス流量および排ガス性状の変化を図-3.3.4 に示す。

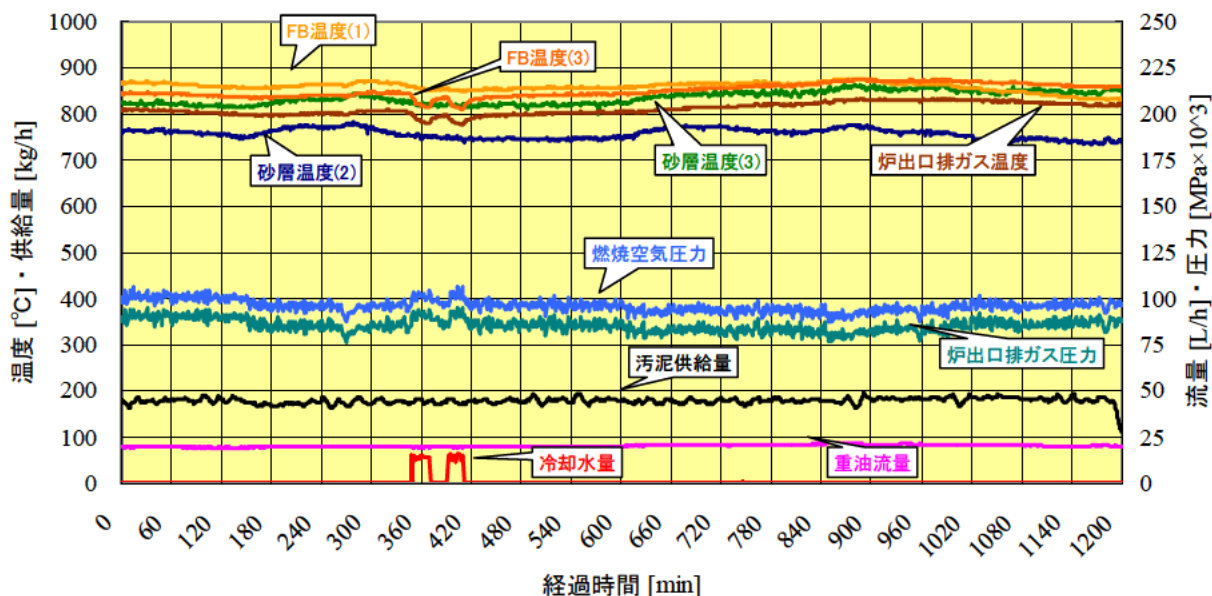


図-3.3.3 温度、圧力および汚泥、重油供給量の経時変化

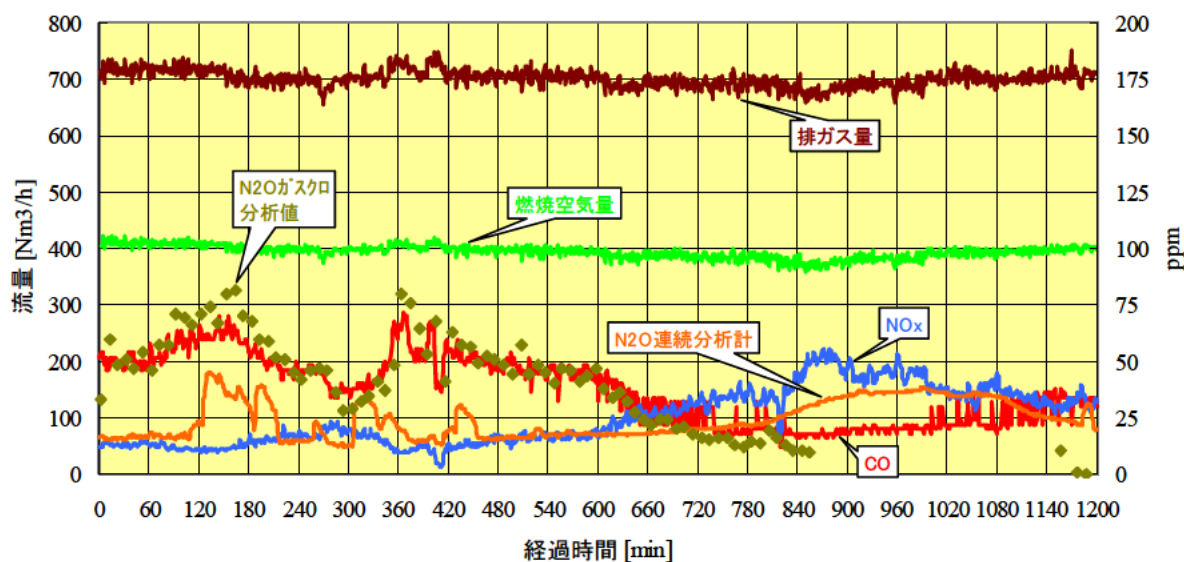


図-3.3.4 燃焼空気量、排ガス量、排ガス性状の経時変化

運転中は炉内温度、圧力ともに安定している。汚泥を180kg/hで供給し定格運転できることを確認した。排ガス性状は、CO濃度は炉出口温度が800°Cを下回るときに若干高くなっているが、800°C以上では50ppm以下で推移している。また、N₂O濃度はNO_x濃度とトレードオフの関係が見られ、CO濃度と正の相関があることが分かる。経過時間600min以降で、炉内温度が少し上昇した時にN₂O濃度が急激に減少して

いることから炉内温度に依存することも確認できる。尚、 N_2O 濃度についてはガスクロと連続分析計の両方で分析を行い、考察は信頼性が高いガスクロ分析値(10min/回)で行った。

また、炉内に水を噴霧して(360~420min間に2回)、炉出口温度調整の確認を行った。水噴霧によってフリーボード上部(FB温度(3))および炉出口は低下し、それに伴って N_2O 濃度が瞬間的に上昇することから N_2O 濃度が炉内温度に依存することが裏付けられた。

3. 3. 2 排ガス性状

汚泥専焼におけるばいじん、SO_x、NO_xおよび塩化水素濃度の測定結果を表-3.3.1に示す。汚泥専焼において各排ガス成分は規制基準値以下となっている。実証設備では脱硫設備がないためにSO_x濃度が従来型流動炉より高い値となっているが、実用設備においては排煙処理塔で脱硫を行うので当然SO_x濃度は従来型流動炉と同程度の数十ppm以下での運転が可能である。

表-3.3.1 汚泥専焼における有害性物質の測定結果

| 測定日 | | 測定値 | 規制基準値 |
|-----------------|--|-------|-------|
| ばいじん濃度 | 実測値(g/m ³ _N) | 0.009 | |
| | 酸素 12%換算(g/m ³ _N) | 0.006 | 0.15 |
| SO _x | 実測値(volppm) | 200 | |
| | 排出量(m ³ _N /hr) | 0.12 | 1.87 |
| NO _x | 実測値(volppm) | 36 | |
| | 酸素 12%換算(volppm) | 25 | 250 |
| 塩化水素 | 実測値(mg/m ³ _N) | 52 | |
| | 酸素 12%換算(mg/ m ³ _N) | 37 | 700 |

※SO_x排出量の規制基準値は、排出流量とK値から算定したものである

さらに、汚泥専焼におけるダイオキシン類濃度の測定結果を表-3.3.2に示す。実証設備のダイオキシン類排出基準値は、廃棄物焼却炉で焼却能力2t/h未満の新設施設基準に該当するので5ng-TEQ/m³_Nであり、分析結果から規制値を満足している。

表-3.3.2 汚泥専焼におけるダイオキシン類の測定結果

| 測定項目 | | 毒性等価係数 | 毒性等量 ng-TEQ/m ³ _N |
|----------------|-------------------------------|------------|--|
| ダイオキシン | 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD | 0.01 | 0.00023 |
| | OCDD | 0.0001 | 0.0000022 |
| | Total PCDDs | — | 0.0002322 |
| ジベンゾフラン | 2,3,7,8-TeCDF | 0.1 | 0.0012 |
| | 1,2,3,7,8+1,2,3,4,8-PeCDF | 0.05 | — |
| | 2,3,4,7,8-PeCDF | 0.5 | — |
| | 1,2,3,4,7,8+1,2,3,4,7,9-HxCDF | 0.1 | — |
| | 1,2,3,6,7,8-HxCDF | 0.1 | 0.0013 |
| | 2,3,4,7,8,9-HxCDF | 0.1 | 0.0011 |
| | 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF | 0.01 | 0.0003 |
| | 1,2,3,4,7,8,9-HpCDF | 0.01 | — |
| | OCDF | 0.0001 | — |
| | Total PCDFs | — | 0.0039 |
| コプラナ-PCB | 3,4,4',5-TCB | 0.0001 | 0.0000017 |
| | 3,3',4,4'-TCB | 0.0001 | 0.0000078 |
| | 3,3',4,4',5-PeCB | 0.1 | 0.0027 |
| | 3,3',4,4',5,5'-HxCB | 0.01 | — |
| | 2,3',4,4',5-PeCB | 0.0001 | 0.000016 |
| | 2,3,3',4,4'-PeCB | 0.0001 | 0.000011 |
| | 2,3,4,4',5-PeCB | 0.0005 | — |
| | 2,3',4,4',5,5'-HxCB | 0.00001 | 0.00000019 |
| | 2,3,3',4,4',5-HxCB | 0.0005 | 0.0000275 |
| | 2,3,3',4,4',5'-HxCB | 0.0005 | — |
| | 2,3,3',4,4',5,5'-HpCB | 0.0001 | — |
| Total コプラナ PCB | — | 0.00276419 | |
| 合計 | | | 0.0069 |

3. 3. 3 汚泥性状、焼却灰性状

(1) 汚泥、焼却灰性状

本実験に使用した下水汚泥の性状を表-3.3.3 に示す。

表-3.3.3 下水汚泥の性状(長万部汚泥)

| | |
|-------|----------------|
| 水分 | 86.1 % |
| 強熱減量 | 87.2 % |
| 高位発熱量 | 20,300 kJ/kgDS |
| 低位発熱量 | 18,800 kJ/kgDS |
| C | 44.9 %-DS |
| H | 6.7 %-DS |
| O | 26.4 %-DS |
| N | 8.2 %-DS |
| S | 1.05 %-DS |

汚泥専焼運転時に採取した焼却灰の組成を表-3.3.4 に、粒度分布を図-3.3.5 に示す。

表-3.3.4 焼却灰の物性値

| | | |
|--------------------------------|-----|-------|
| 強熱減量 | (%) | 0.14 |
| 灰分 | (%) | 99.4 |
| かさ比重(ゆるめ) | | 0.75 |
| 成分 | | |
| SiO ₂ | (%) | 39.97 |
| CaO | (%) | 6.33 |
| Al ₂ O ₃ | (%) | 10.88 |
| MgO | (%) | 2.57 |
| Fe ₂ O ₃ | (%) | 3.78 |
| K ₂ O | (%) | 1.63 |
| Na ₂ O | (%) | 0.63 |
| P ₂ O ₅ | (%) | 20.51 |

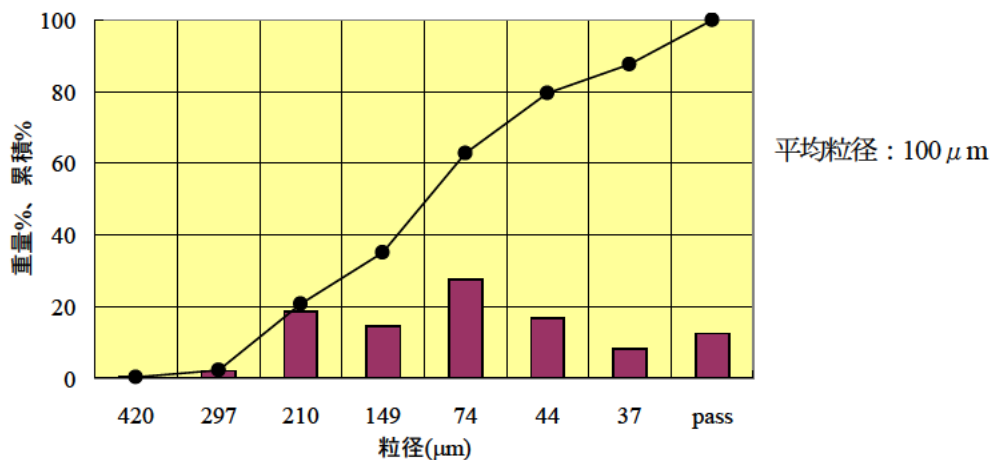


図-3.3.5 焼却灰の粒度分布

表-3.3.4 および図-3.3.5 から過給式流動炉の焼却灰は従来型流動炉の焼却灰と同等である。

(2) 重金属の溶出量

焼却灰に含まれる重金属類の溶出値を以下に示す。重金属類の溶出量は全て埋立基準以下である。砒素は、基準値以下であるが高いのは、長万部町の処理区域内に温泉があるためである。

表-3.3.5 焼却灰重金属溶出量

| 重金属類 | 単位 | 汚泥 (Case1) | 汚泥 (Case2) | 埋立基準 |
|------------------|------|---------------|---------------|-------|
| Hg | mg/L | <0.0005 | <0.0005 | 0.005 |
| Pb | mg/L | <0.0005 | <0.0005 | 0.3 |
| Cd | mg/L | <0.0005 | <0.0005 | 0.3 |
| Cr ⁶⁺ | mg/L | <0.0005 | <0.0005 | 1.5 |
| Se | mg/L | 0.0098 | 0.0043 | 0.3 |
| As | mg/L | 0.11 | 0.10 | 0.3 |

(3) 重金属の焼却灰への移行率

脱水汚泥中の重金属は焼却(850℃)によって、酸化されて集塵機により焼却灰に付着して捕集されるが、集塵機の温度条件によって焼却灰への移行率が変化する。溶出試験で溶出したセレンとヒ素の脱水汚泥および焼却灰中の重金属含有量から焼却灰への重金属の移行率を下記に示す。

表-3.3.6 下水汚泥から焼却灰への重金属移行率

| | Case1 | Case2 |
|-------------|-------|-------|
| 集塵温度(入出口平均) | 510℃ | 507℃ |
| 入口温度 | 570℃ | 564℃ |
| 出口温度 | 451℃ | 449℃ |
| Se | 3.55% | 1.58% |
| As | 95% | 89% |

移行率を見ると沸点の低いセレン(Se,二酸化セレンの沸点317℃)は、沸点よりも高い温度で集塵されているため焼却灰への移行率が低い結果となっている。ヒ素(As,三酸化二ヒ素の沸点465℃)については、集塵機の出口排ガス温度が沸点を下回っているために焼却灰への移行率は下がっていない。

実用設備における集塵温度は入口約600℃、出口約550℃を想定しており、セレンは脱水汚泥の重金属含有量に差異がなければ同様の結果が推察される。また、ヒ素については実証設備での結果からでは低減率を想定するには至らず、実用設備で確認していきたい。

3. 3. 4 余剰加圧空気

過給機からは加圧した燃焼空気が得られるが、ここでは焼却に必要な燃焼空気量以上の余剰加圧空気を確保できるかを確認した。加圧空気量変化による炉内温度、圧力変化を図-3.3.6に、その時の排ガス性状変化を図-3.3.7に示す。

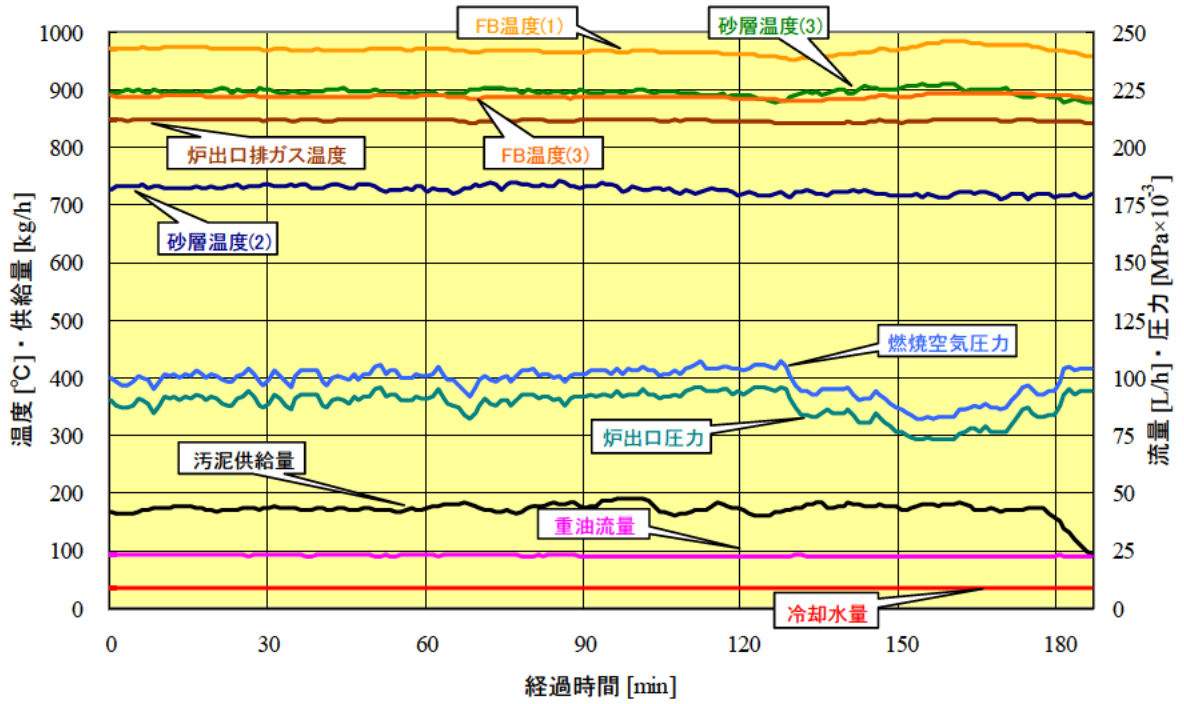


図-3.3.6 加圧空気発生時における温度、圧力、流量変化

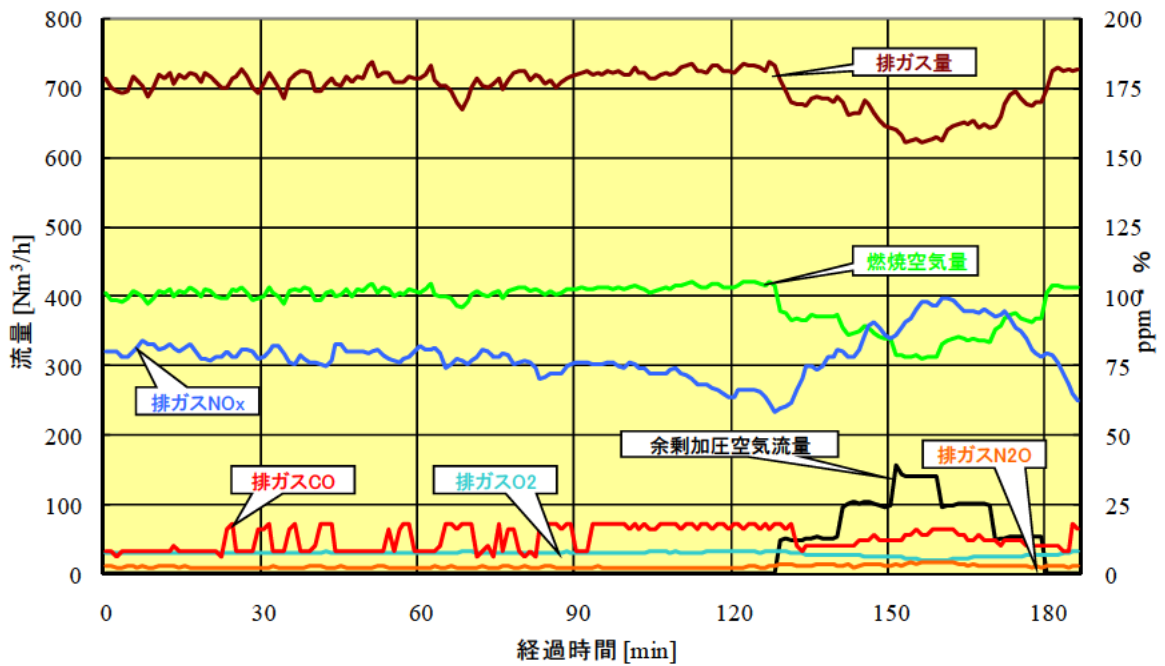


図-3.3.7 加圧空気発生時における流量、排ガス性状変化

図-3.3.6 に示すように経過時間 120min以降に加圧空気弁を徐々に開けていき、加圧空気を放出した。これによって、炉に供給される燃焼空気および炉から排出される排ガス量が減少したが、送風および吸気のない過給機だけの自立運転は維持されている。また、O₂濃度も有効利用加圧空気が $150\text{m}^3_{\text{N}}/\text{h}$ の時に 5.5%(空気比は 1.3 程度)であり、CO濃度にも変化が見られないことから燃焼空気の不足による未燃ガスが発生していない。

3. 3. 5 低負荷運転

実際の焼却設備において供用開始直後は定格処理量に満たない量の脱水汚泥を処理することがあるため、汚泥の供給量を変動させて負荷変動試験を行った。汚泥供給量変化による温度、圧力、流量変化を図-3.3.8に、その時の流量、排ガス性状変化を図-3.3.9に示す。

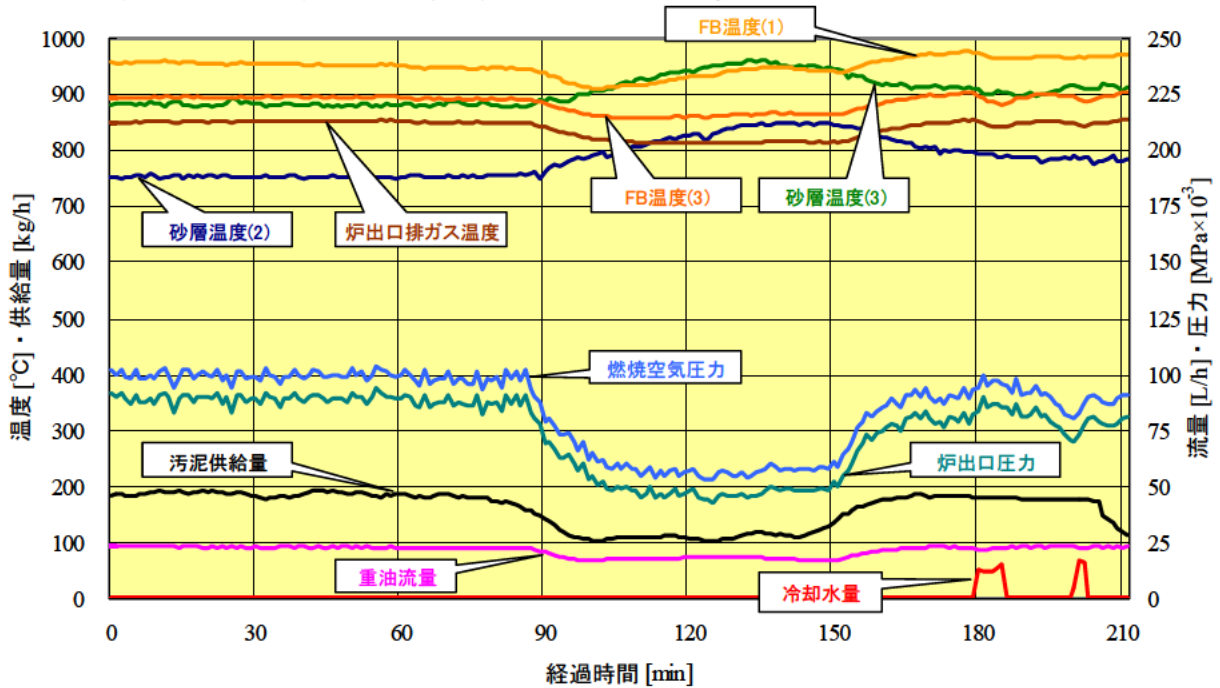


図-3.3.8 汚泥供給量変化による温度、圧力、流量変化

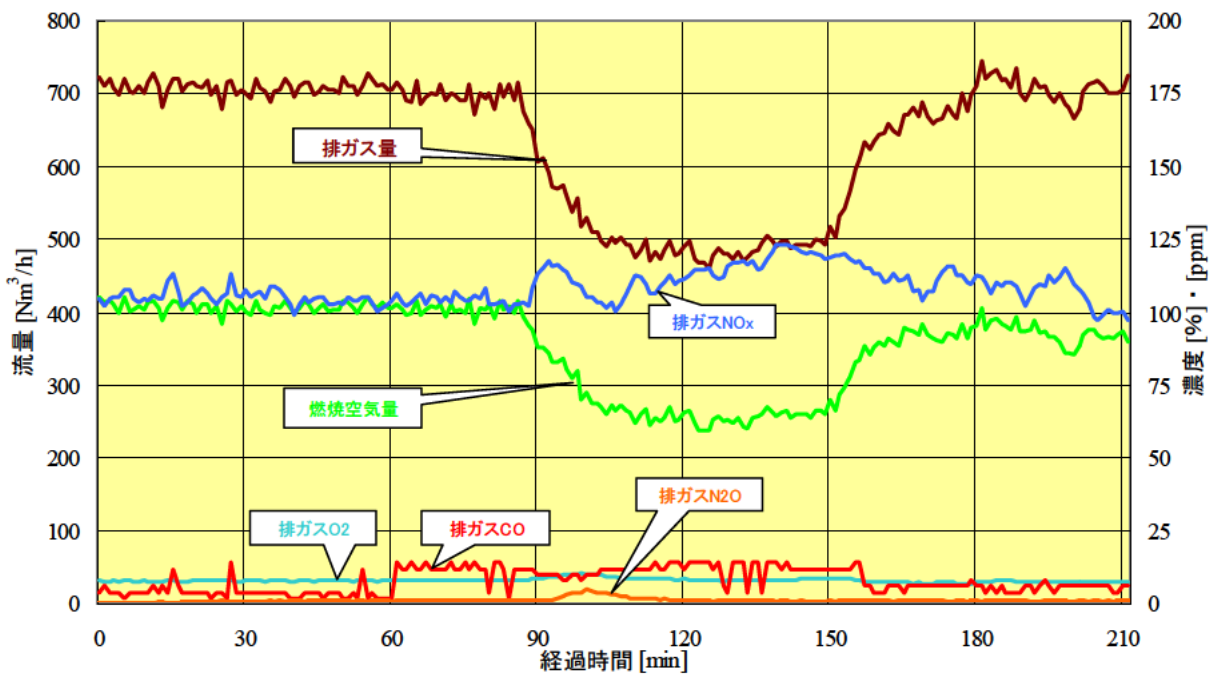


図-3.3.9 汚泥供給量変化による流量、排ガス性状変化

図-3.3.8 に示すように経過時間 80min 以降に汚泥供給量をそれまでの定格 180kg/h から 110kg/h に絞って運転を行った。これによって、排ガス量が低下し、それに追従して燃焼空気量も低下した。過給機における駆動エネルギー減少により、圧縮空気（燃焼空気）の圧力も低下したが、排ガス CO 濃度からも分かるように不完全燃焼等の悪影響は見受けられなかった。

従来の気泡流動炉では低負荷運転を行う際に、その負荷に見合う燃焼空気量に調整しようとしても、砂層の砂を流動させるために必要な空気量があるため一定流量以下には燃焼空気量を下げられない。このため炉内砂層部は空気過剰となって砂層部の温度が下がる。そのため、熱量を補うために補助燃料使用量を増やさなければならないというデメリットがあった。開発したシステムでは、系内の圧力が低負荷に応じて下がるため、負荷に合わせて燃焼空気量を減らしても炉内の空塔速度を一定に保つことができる。そのため、砂層の流動を維持するために過剰な空気を供給する必要はなく、低負荷運転時は従来型流動炉に比べて燃費が悪くなりにくいことが確認できた。

3. 4 温室効果ガス削減

3. 4. 1 N₂O排出量削減

流動炉におけるフリーボード温度とN₂O変換率には負の相関があることが知られており、燃烧温度が高いとN₂O分解が促進されN₂O 排出量は少なくなる。本システムでは図-3.4.1 に示すようにフリーボード（FB）下部に高温域が出来る。これは、加圧効果により酸素分圧が大きくなり燃烧速度が大きくなるため早い段階で完全燃烧するためと考えられる。

過給式流動炉を従来の気泡流動炉と同じ炉出口温度で運転した場合には、この高温域によりN₂O変換率が小さくなり、過給式流動炉においてはN₂O変換率を従来の気泡流動炉より低減できると考えられる。

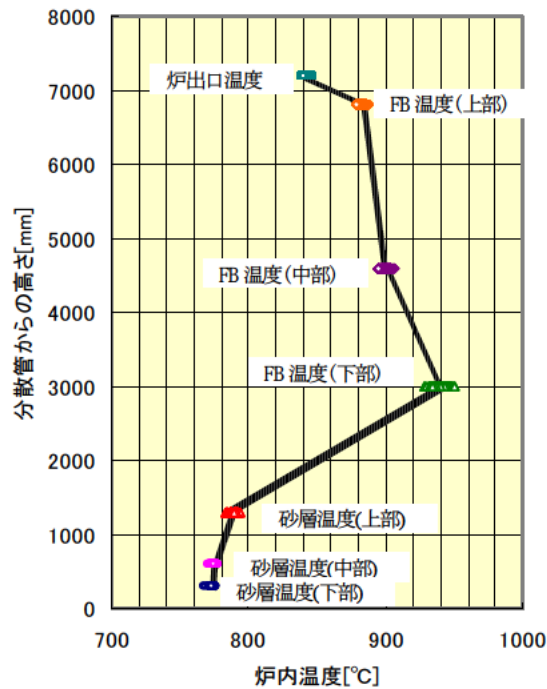
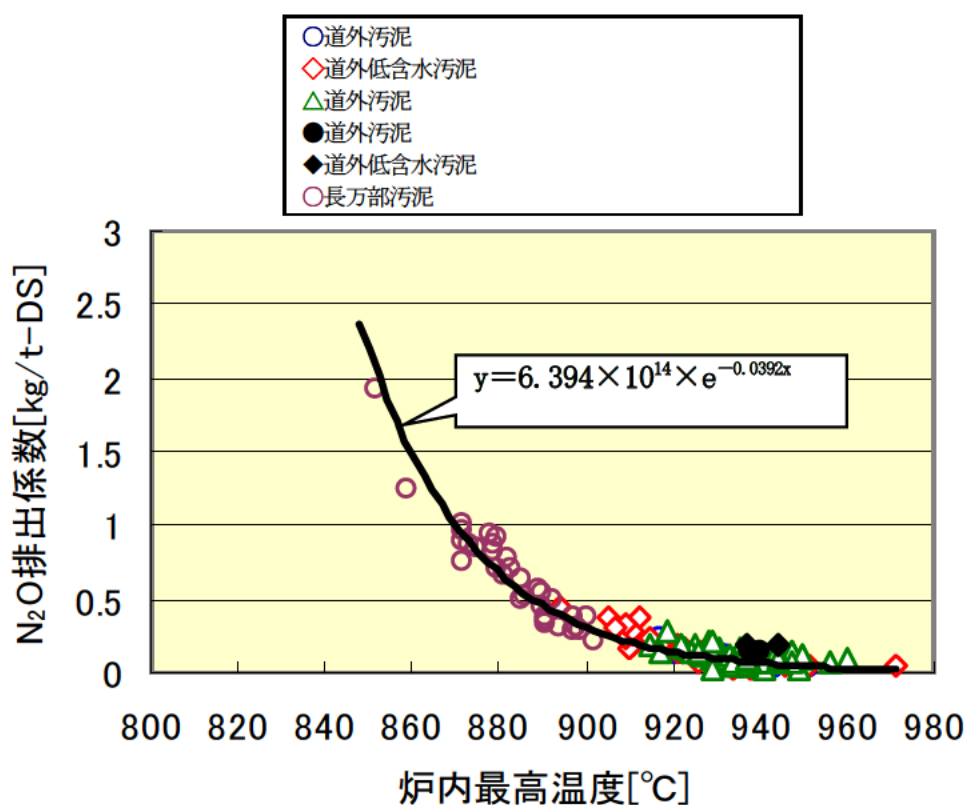


図-3.4.1 実証設備における炉内温度分布（定格焼却運転時）

長万部終末処理場汚泥と北海道外の処理場汚泥（東京都葛西水再生センターの脱水汚泥。以下、「道外汚泥」という）を焼却した実証試験で得られた炉内最高温度とN₂O排出係数の関係を図-3.4.2に示す。図から分かるようにN₂O排出係数は炉内最高温度と相関が見られる。



※長万部汚泥は、道外処理場汚泥とt-DSあたりの窒素含有量が違うため、道外汚泥と同じ窒素含有量に換算してプロットした

※道外汚泥のプロットは汚泥の採取日およびN₂Oの分析方法が違う

図-3.4.2 炉内最高温度とN₂O排出係数

3. 4. 2 温室効果ガス削減の試算

(1) 試算の条件

汚泥処理規模を 300t/日とし、道外汚泥性状(脱水汚泥含水率 77.6%、可燃分 78.5%)で試算する。補助燃料は都市ガスとする。また、年間稼働日数は稼働率を 80%として 290 日/年で試算する。なお、従来型流動炉の温室効果ガス排出量の算定根拠は、文献 1) に依った。

(2) 電力由来の温室効果ガス削減効果

従来型流動炉と過給式流動炉の電動機容量および温室効果ガス排出量比較を行った結果を表 3.4.1 に示す。

$$\text{電力由来の温室効果ガス削減率} = \left(1 - \frac{1222}{2344}\right) \times 100 = 47.9\%$$

表-3.4.1 電力由来の温室効果ガス削減効果

| | 従来型流動炉 | 過給式流動炉 |
|---------------------------------------|-------------|-------------|
| 消費電力 [kWh/日] | 21, 158. 76 | 11, 028. 36 |
| 温室効果ガス排出量※ [kg-CO ₂ /日] | 8, 083 | 4, 213 |
| [t-CO ₂ /年] | 2, 344 | 1, 222 |

※電力由来の温室効果ガス排出係数は 0.382kg-CO₂/kWh

(3) 補助燃料由来の温室効果ガス削減効果

5t/日規模において過給式流動炉の補助燃料使用量は、試算予測の 14.4L/h に対して実際の運転データが 14.7L/h とほぼ同等であった。300t/日試算を同様に行った結果を表 3.4.2 に示す。

$$\text{補助燃料由来の温室効果ガス削減率} = \left(1 - \frac{2575}{3002}\right) \times 100 = 14.2\%$$

表-3.4.2 補助燃料由来の温室効果ガス削減効果

| | 従来型流動炉 | 過給式流動炉 |
|-----------------------------------|--------|--------|
| 都市ガス使用量 [m ³ /h] | 189. 4 | 162. 5 |
| 温室効果ガス排出量※[kg-CO ₂ /h] | 431. 3 | 370. 0 |
| [t-CO ₂ /年] | 3, 002 | 2, 575 |

※都市ガスの温室効果ガス排出係数は 2.277kg-CO₂/m³_N

(4) N₂O由来の温室効果ガス削減効果

それぞれのN₂O排出係数および温室効果ガス排出比較を行った結果を表-3.4.3に示す。

過給式流動炉で炉出口排ガス温度を850℃として焼却運転した場合、高温域が形成されることから汚泥処理規模300t/日を想定して炉の放熱を考慮すると炉内最高温度が870℃に達し、N₂O排出係数は図-3.4.2の実測データから得られた相関式より0.988kg/t-DSとなる。従来型流動炉における高温焼却(850℃)時のN₂O排出係数は、2.330kg/t-DSであり、過給式流動炉では大幅に削減される。

$$\text{N}_2\text{O由来の温室効果ガス削減率} = \left(1 - \frac{5969}{14078}\right) \times 100 = 57.6\%$$

表-3.4.3 N₂O由来の温室効果ガス削減効果

| | 従来型流動炉 | 過給式流動炉 |
|----------------------------------|--------|--------|
| N ₂ O排出係数[kg/t-DS] | 2.330 | 0.988 |
| N ₂ O排出量[kg/日] | 156.6 | 66.4 |
| 温室効果ガス排出量[kg-CO ₂ /日] | 48,546 | 20,584 |
| 1年間の発生量[t-CO ₂ /年] | 14,078 | 5,969 |

(5) 総合した温室効果ガス削減効果

電力、補助燃料およびN₂O由来の温室効果ガス削減効果を表-3.4.4に示す。

$$\text{総合した温室効果ガス削減率} = \left(1 - \frac{9766}{19424}\right) \times 100 = 49.7\%$$

表-3.4.4 総合温室効果ガス削減効果

| | 従来型流動炉 | 過給式流動炉 |
|--|--------|--------|
| 電力由来[t-CO ₂ /年] | 2,344 | 1,222 |
| 補助燃料由来[t-CO ₂ /年] | 3,002 | 2,575 |
| N ₂ O由来[t-CO ₂ /年] | 14,078 | 5,969 |
| 合計[t-CO ₂ /年] | 19,424 | 9,766 |

3. 5 運転制御

(1) 制御システム

本研究の制御システムで使用した制御弁、インバータの取付位置を図-3.5.1 に示す。
 本システムに適した制御方法を確認するため、PID 制御（従来方式）と多入力制御の高度制御（改良方式）を切替えて使用できる図-3.5.2 に示す構成とした。

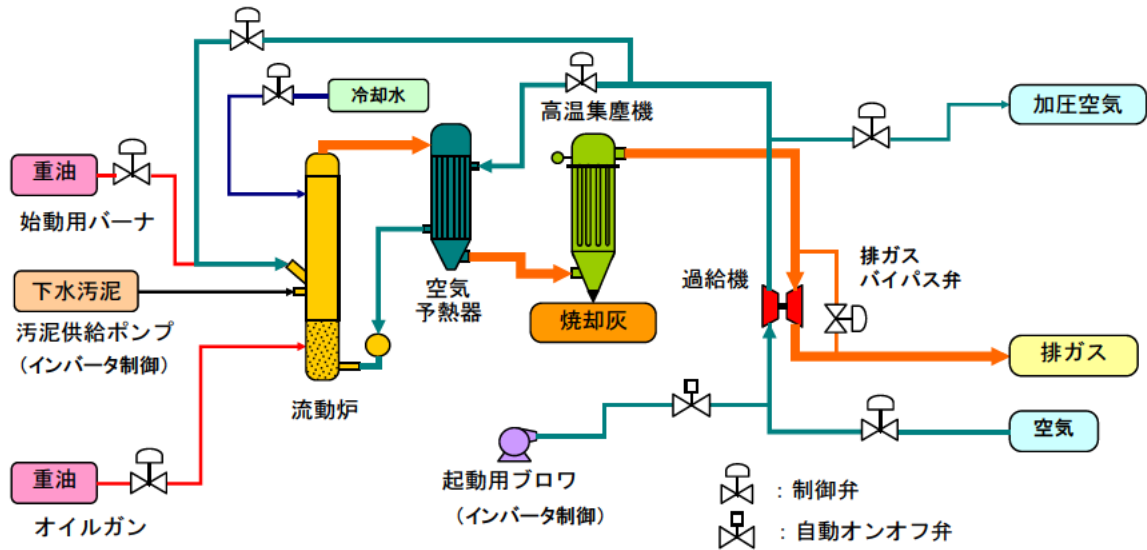


図-3.5.1 制御説明フロー

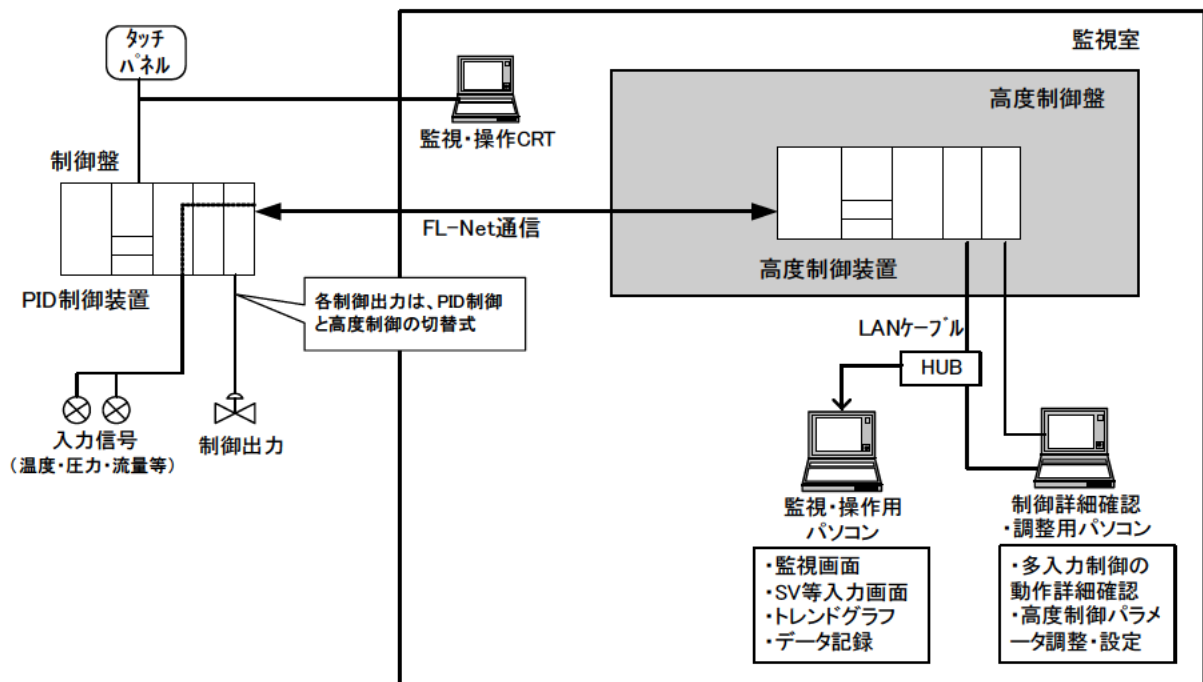


図-3.5.2 制御システム構成

(2) 自動昇温

設備の昇温は、自動プログラムを使用して始動用バーナ、オイルガン等を制御して行った。昇温曲線を図-3.5.3 に示す。

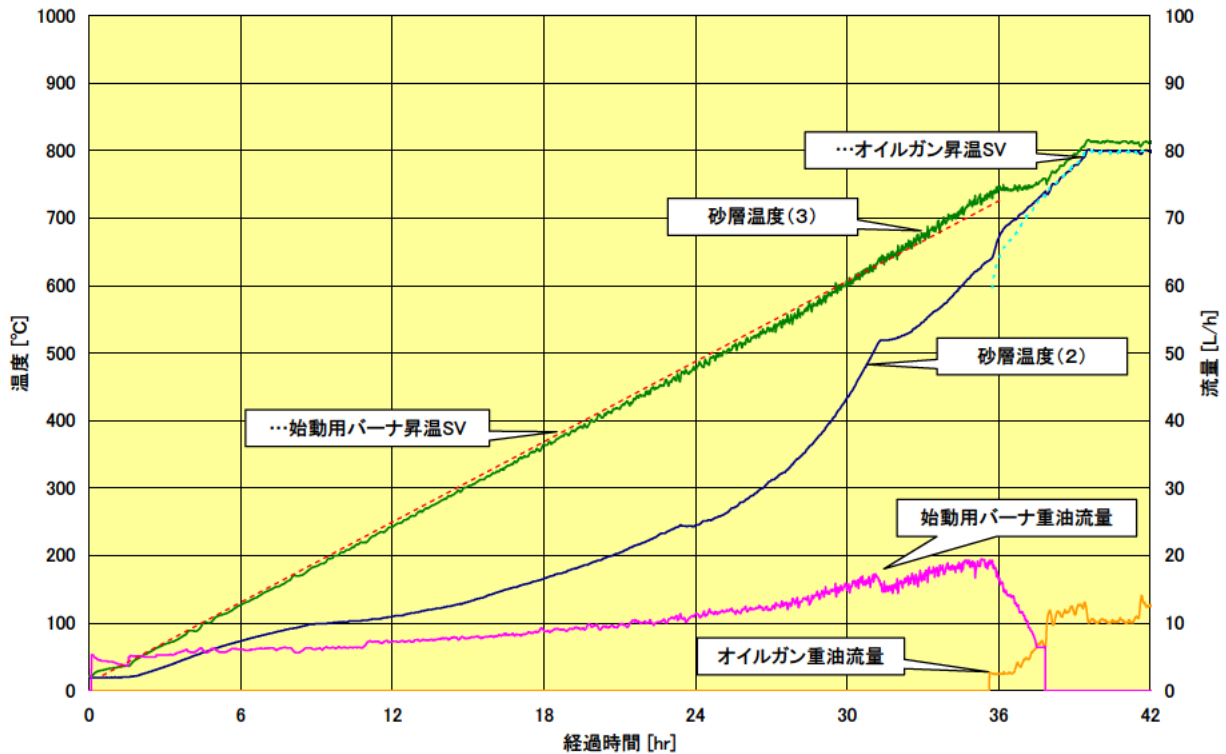


図-3.5.3 自動プログラムによる昇温曲線

立ち上げ当初は、始動用バーナで砂層温度(3)を制御対象としてプログラム昇温を行った。破線で示す始動用バーナ昇温 SV 値(=砂層温度(3)のプログラム昇温曲線)に沿って、実際の砂層温度(3)が上昇しており、始動用バーナによるプログラム昇温が正常に行えることが確認できた。

オイルガンは、砂層温度が 550°C 以上で着火可能であるが、より CO 発生量を押さえるため、600°C を越えたところでオイルガンを着火した。オイルガンで砂層温度(2)を制御対象としてプログラム昇温を行った。

オイルガンを着火した直後は、砂層温度(2)の実測値がオイルガン昇温 SV 値(=砂層温度(2)のプログラム昇温曲線)を上回ってはいるが、制御が暴走することはなく、自動昇温が行われており、オイルガンにおいてもプログラム昇温が正常に行えることが確認できた。オイルガン着火後は、オイルガン重油流量を増やしつつ始動用バーナ重油流量を減らす制御をしている。

このことから、実証試験設備において自動昇温が何の支障もなく行えることを確認した。

3) 制御方式の比較

PID 制御と高度制御を切替えて使用したときの両制御の評価を表-3.5.1 に示す。

過給式流動焼却システムにおいては、操作性、省エネ・低CO₂かつ安定運転の制御など多くの点において、多入力情報をもとにした高度制御の方が適していることを確認した。

表-3.5.1 PID 制御と高度制御の比較

| | PID 制御 (従来方式) | 高度制御 |
|-----------------------------|--|--|
| 制御方式 | 基本は1入力1出力 (2入力以上の時はカスケード制御やオーバーライド制御、制御切替え等が必要) | 多入力1出力 (多入力情報による演算) |
| 操作性 | ○ 昇温・降温工程がPID制御切り替え毎に複数工程に分かれ、運転操作が煩雑 | ◎ 昇温時等の操作が少なく済み、運転が容易 |
| 昇温時自立切替え処理 | △ 圧力・風量等が切り替え前後で大きく変化し、制御が不安定となる傾向がある | ◎ 極めてなめらかに切替える |
| 過給機サージング回避 | △ | ◎ 自動制御に組み込み検証した |
| 省エネ・低CO ₂ かつ安定運転 | △ | ◎ 炉内温度制御は、定常運転時には省エネ・低CO ₂ 優先で運転し、炉内圧上昇等の非定常時には、すみやかに安全制御(炉内圧上昇回避)に自動切替えする |
| 負荷変動への対応 | ○ | ◎ 過給機特性を考慮し、安全・安定に制御 |

3. 6 長期運転

3. 6. 1 はじめに

過給式流動炉は従来の気泡流動炉をブラッシュアップした技術であり基本的には従来設備と同等の信頼性があるが、新しく組み合わせた過給機などの耐久性を確認するため、連続運転 800 時間を 2 回（第 1 クールおよび第 2 クール）実施した。

3. 6. 2 供試汚泥

長期運転で供試した長万部終末処理場の汚泥および北海道内の他都市の消化汚泥（以下、「道内汚泥」という）の汚泥の性状を表-3.6.1、表-3.6.2 に示す。

表-3.6.1 第 1 クール供試汚泥の性状

| | | 長万部汚泥 | 道内汚泥 (消化汚泥) |
|---------|---------|--------|----------------|
| 含水率 | % | 85.2 | 81.5 |
| 可燃分 | % | 88.4 | 71.3 |
| 可燃分組成 | %-DS | | |
| C | | 45.6 | 37.4 |
| H | | 6.5 | 5.5 |
| O | | 26.7 | 21.4 |
| N | | 8.8 | 6.2 |
| S | | 0.9 | 1.7 |
| 灰分 | %-DS | 11.5 | 27.8 |
| 発熱量(高位) | kJ/kgDS | 20,800 | 17,100 |

表-3.6.2 第2クール供試汚泥の性状

| | | 長万部汚泥 | 道内汚泥 (消化汚泥) |
|---------|---------|--------|----------------|
| 含水率 | % | 84.7 | 81.5 |
| 可燃分 | % | 88.4 | 71.9 |
| 可燃分組成 | %-DS | | |
| C | | 45.6 | 38.0 |
| H | | 6.49 | 5.48 |
| O | | 26.9 | 21.5 |
| N | | 8.42 | 5.93 |
| S | | 1.17 | 1.83 |
| 灰分 | %-DS | 11.4 | 27.3 |
| 発熱量(高位) | kJ/kgDS | 20,600 | 17,200 |

また、汚泥処理量について表-3.6.3 に示す。

表-3.6.3 汚泥処理量

| | 第1クール | 第2クール |
|---------|------------------|-----------------|
| | 2010年1月10日～2月12日 | 2010年2月28日～4月3日 |
| 長万部汚泥 | 43.3ton | 51.1ton |
| 道内処理場汚泥 | 105.0ton | 99.8ton |
| 合計 | 148.3ton | 150.9ton |
| 運転時間 | 806時間 | 812時間 |
| 平均焼却量 | 184.0kg/h | 185.8kg/h |

3. 6. 3 運転結果および考察

運転結果の例として、炉内各温度、補助燃料使用量および N_2O 濃度等の経時変化を図-3.6.1、図-3.6.3に各圧力および流量の経時変化を図-3.6.2、図-3.6.4に示す。

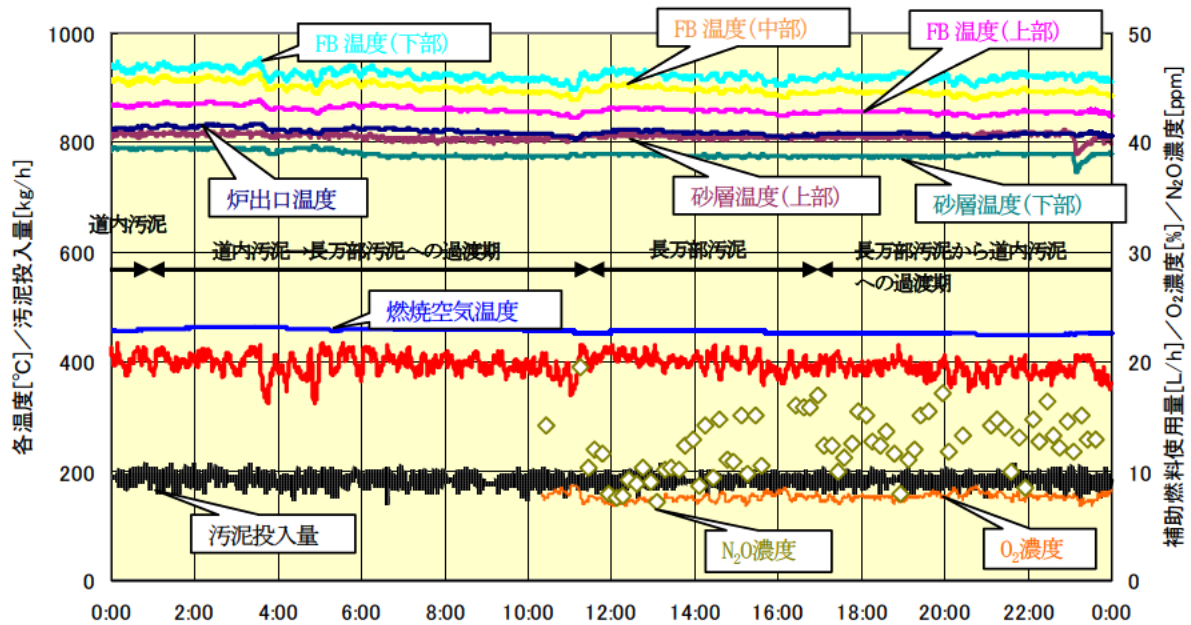


図-3.6.1 焼却炉運転状況 (第1クール、1/28)

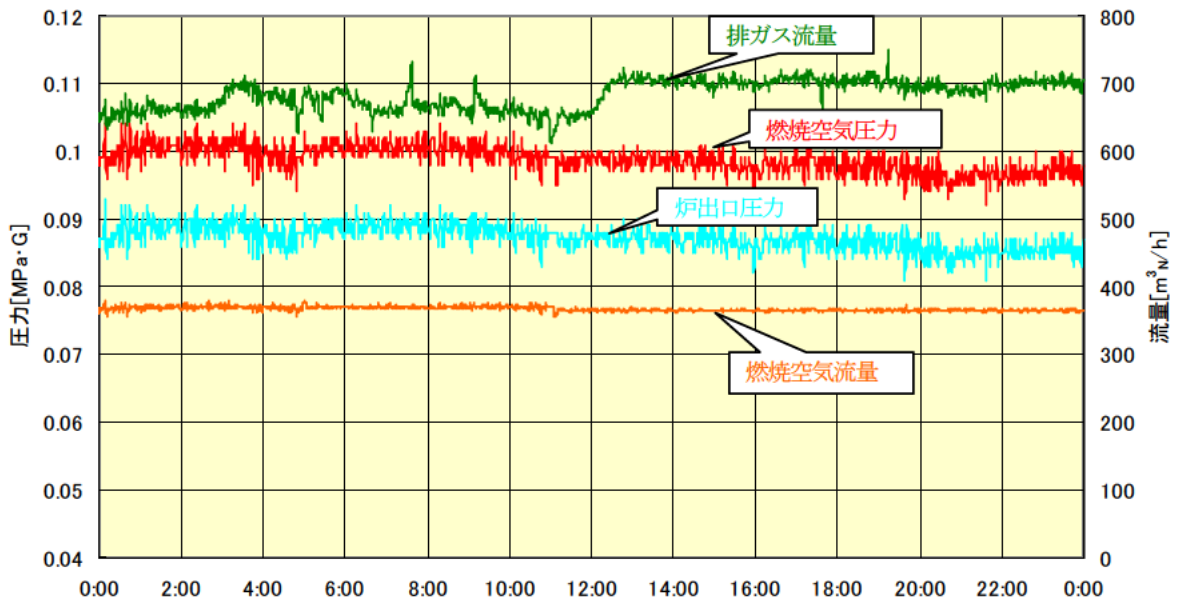


図-3.6.2 運転圧力状況 (第1クール、1/28)

※過渡期 : ホッパ内で汚泥が混合されて、混合汚泥が焼却炉に供給されている期間

※単独供給 : 過渡期終了後、ホッパデッド部 (混合されない部分) と圧送配管内の汚泥が焼却炉に供給されるまでが単独供給期間

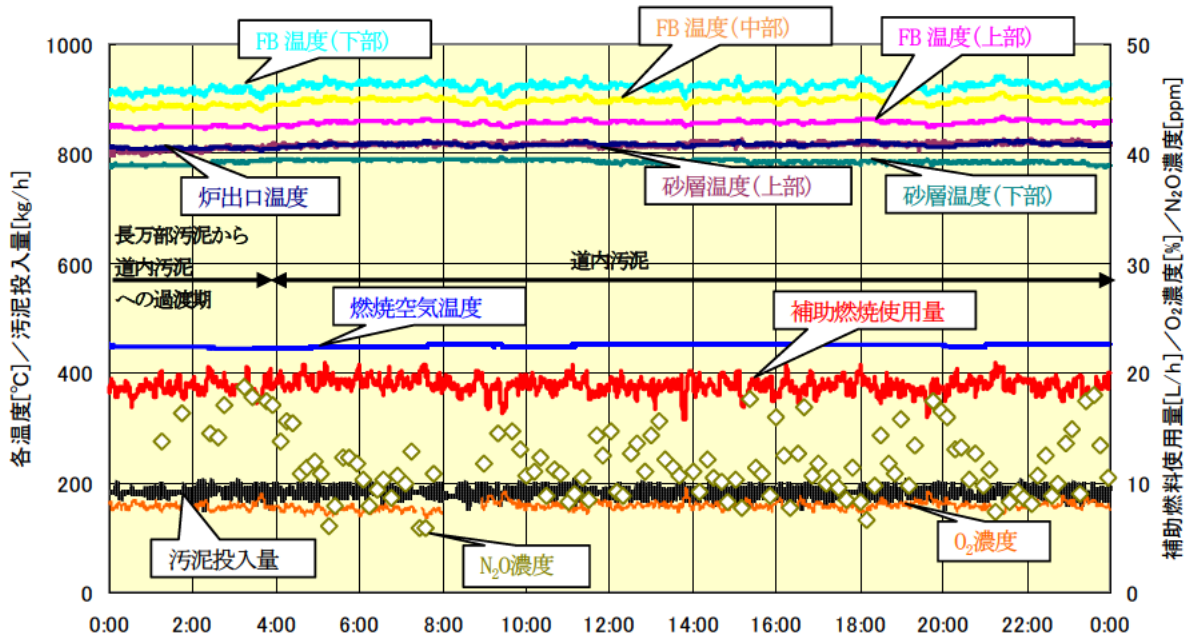


図-3.6.3 焼却炉運転状況 (第1クール、1/29)

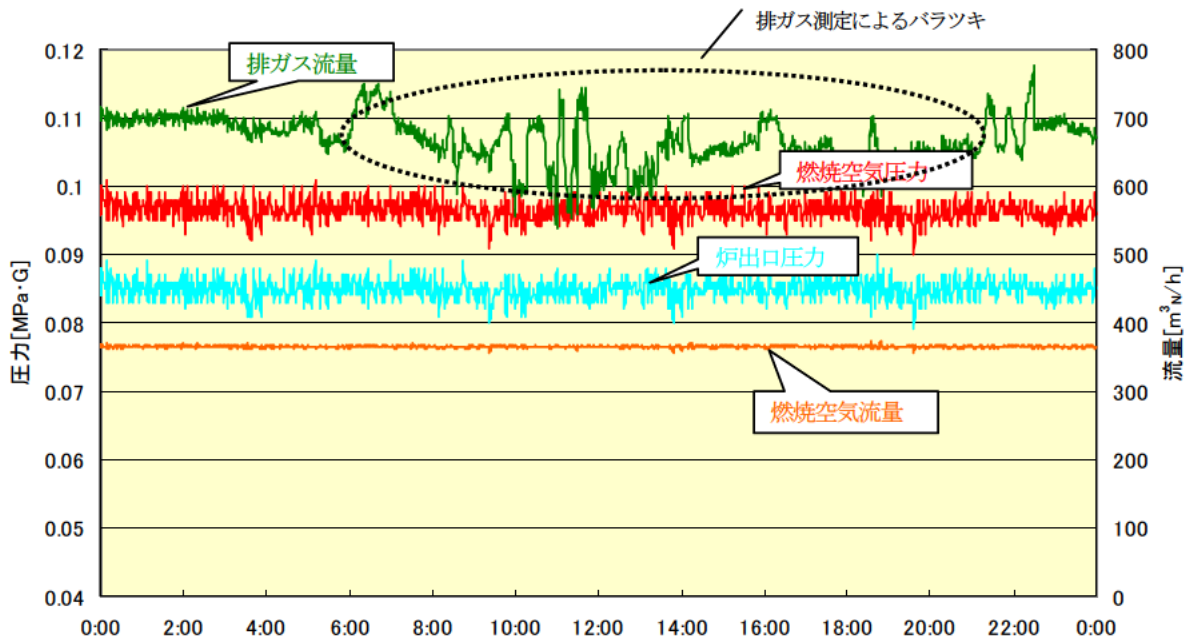


図-3.6.4 運転圧力状況 (第1クール、1/29)

※排ガス測定は過給機出口排ガスダクトのサンプリング口にて実施。排ガス流量計上流部に位置しているためサンプリング口の開閉によって排ガス流量のバラツキが見られるが、燃焼空気および炉出口圧力が共に安定していることから運転への影響はなかった。

図-3.6.3、図-3.6.4 は、排ガス分析を実施した日の運転結果例で、図-3.6.1、図-3.6.2 は前日のデータであるが、炉内温度、圧力等に大きな乱れはなく、非常に安定した運転が継続できた。

また、第2クールについても排ガス分析を実施した日の前日の運転状況の例を図-3.6.5、図-3.6.6 に排ガス分析実施日の運転状況の例を図-3.6.7、図-3.6.8 に示す。

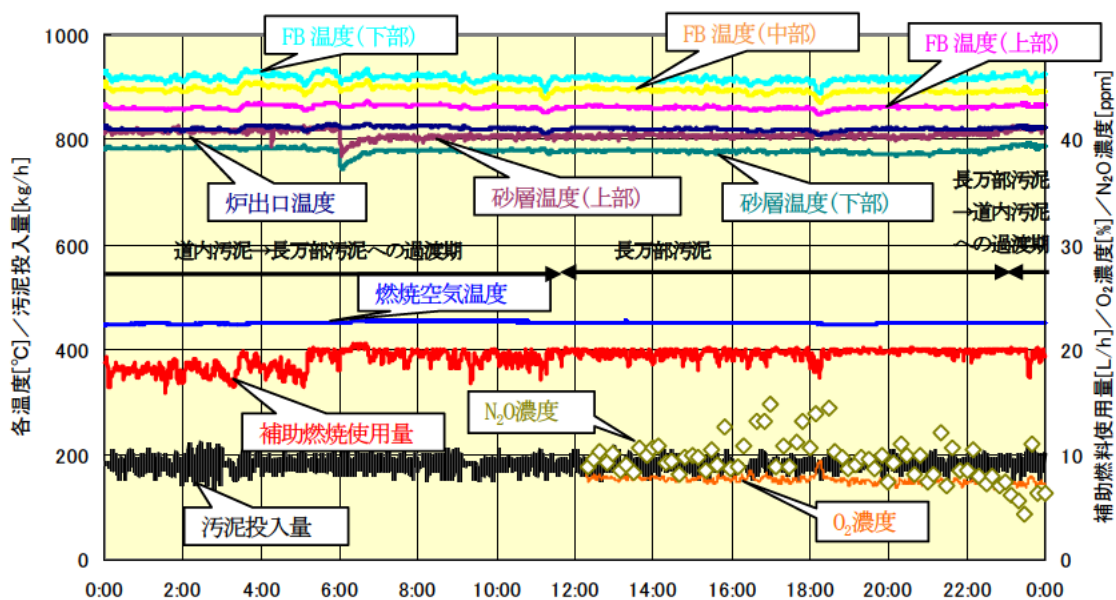


図-3.6.5 焼却炉運転状況 (第2クール、3/15)

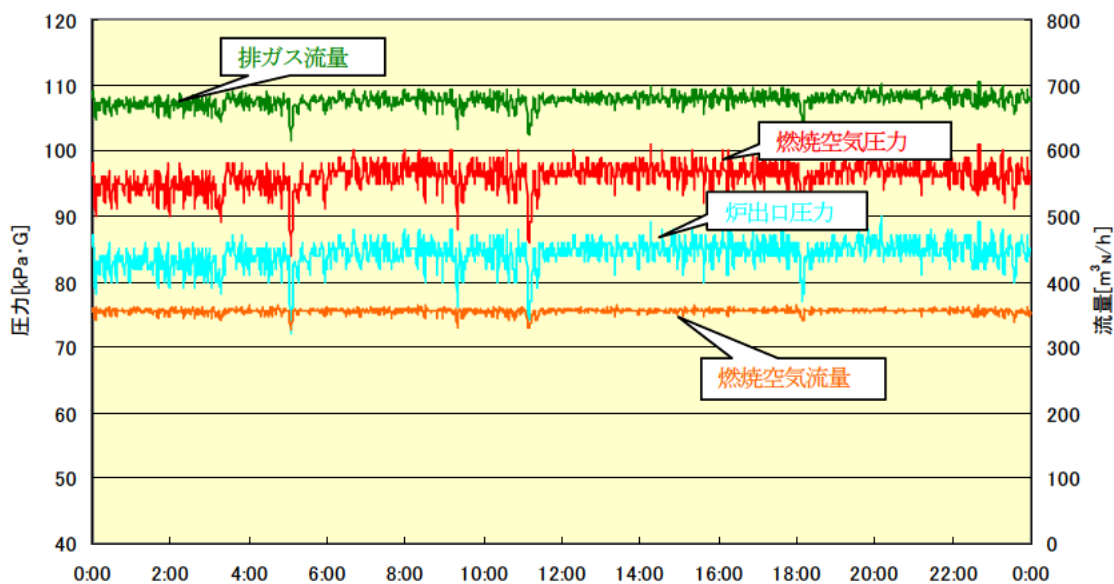


図-3.6.6 運転圧力状況 (第2クール、3/15)

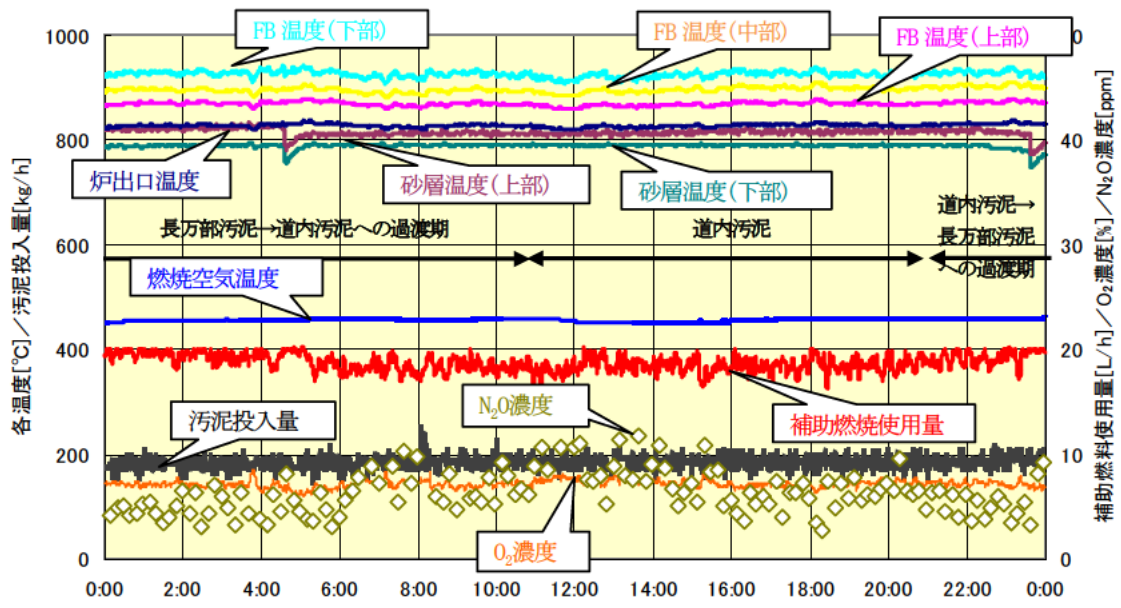


図-3.6.7 焼却炉運転状況 (第2クール、3/16)

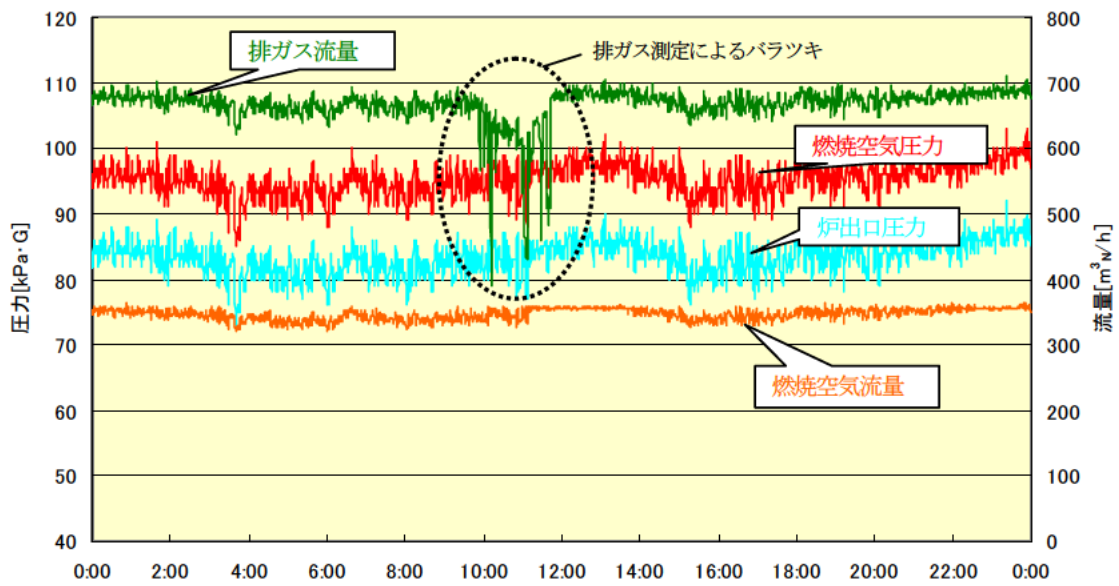


図-3.6.8 運転圧力状況 (第2クール、3/16)

第2クールにおいても炉内温度、圧力等に大きな乱れはなく、長万部汚泥と道内汚泥と性状が異なる汚泥が頻繁に (2~3回/日) 切り替わる焼却をしても非常に安定した運転が継続できた。

3. 6. 4 過給機軸受寸法測定結果および考察

過給機の軸受は下図のようにフロート式で円筒形をしており、シャフトに取り付けられている。過給機軸受寸法の測定結果を表-3.6.4、測定時の外観写真を図-3.6.9、図-3.6.10、図-3.6.11 に示す。

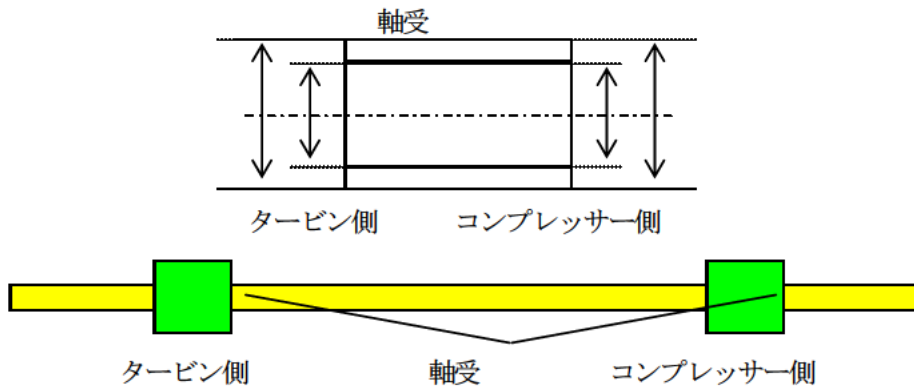


表-3.6.4 過給機軸受寸法測定結果

| | タービン側 | | コンプレッサー側 | |
|-------------|---------|-----------|----------|-----------|
| | 軸受厚み | 摩耗量 | 軸受厚み | 摩耗量 |
| 新規過給機 | 4.571mm | / | 4.568mm | / |
| 806 時間運転後 | 4.570mm | 1 μ m | 4.568mm | 0 μ m |
| 1,618 時間運転後 | 4.568mm | 3 μ m | 4.566mm | 2 μ m |

※軸受厚みは軸受の内径、外径をタービン寄りとコンプレッサー寄りの2箇所測定した平均値より算出したものである。

※測定器はマイクロメータで、計測精度は $\pm 1 \mu$ m

※測定は室温 21°C に温度管理された状態で実施している。



図-3.6.9 新規過給機の軸受および各インペラ外観



図-3.6.10 806 時間運転後の過給機の軸受および各インペラ外観

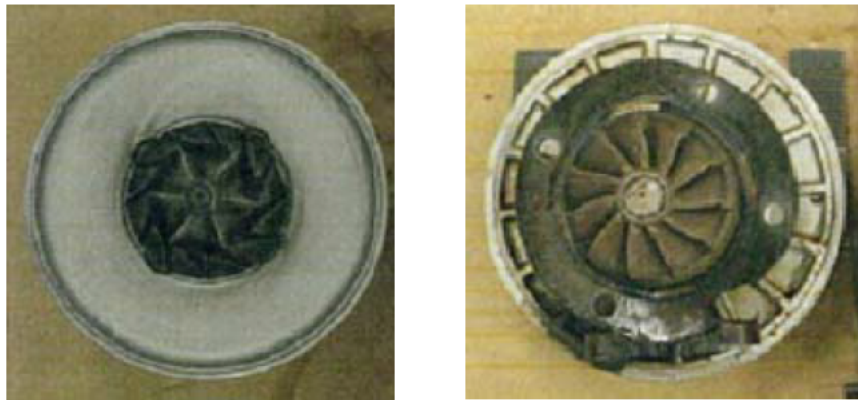


図-3.6.11 1,618 時間運転後の過給機の軸受および各インペラ外観

次に、軸受摩耗量変化を図-3.6.12 に示す。

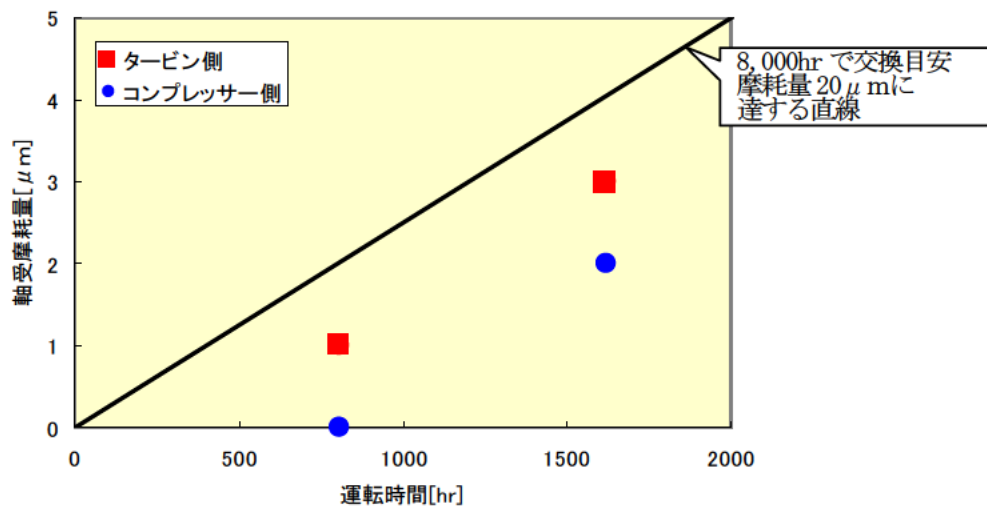


図-3.6.12 軸受摩耗量変化

過給機の軸受は流体潤滑のため軸受の摩耗は、運転時間に比例する。過給機メーカーの軸受を交換する摩耗量の目安は $20\mu\text{m}$ であることから、1年間の運転時間である8000時間で $20\mu\text{m}$ 摩耗する場合に、許容される800時間と1600時間の摩耗量を図-3.6.12に黒の実線で示す。

タービン側およびコンプレッサー側軸受とも摩耗量は交換時間8,000時間とした場合の摩耗量ペース(黒の実線)以下(図中の■, ●とも直線の下側)であり、軸受寿命は8,000時間以上と判断できる。

3. 7 解体研究

実証試験設備の解体撤去にあたり、主要機器を対象に行った調査結果について述べる。

800時間×2回の連続運転の他、運転・停止を30回以上行ってきた。

連続試験による対磨耗度合ならびに運転・停止におけるヒートショックにおける損傷度合いを解体工事において調査した。



図-3.7.1 解体工事（研究） 風景

(1) 焼却炉

実証試験設備の焼却炉は内径700mm、外径1200mmであり、耐火物（キャスト）による耐火耐熱構造である。図-3.7.2から図-3.7.4に解体時の焼却炉調査記録を示す。

過給式流動炉は従来気泡流動炉に比べ2~3倍の圧力下ならびに若干（30~50℃）高い温度にて運転をする。一方、空塔速度は同等の設計を行うため、流動媒体である硅砂による内面（耐火物）への影響は従来と大きく変化することはないと考えられる。

解体時の調査においてはその内面の耐火物の磨耗状況を主として確認を行った。ノズル周りにキャストの亀裂が生じているが、従来気泡炉においても同様の事象は生じるものであり、運転時の熱膨張により塞がり、運転に支障が生じない程度であった。

(2) 空気予熱器

実証試験設備の空気予熱器は伝熱チューブを配列した多管式であり、従来気泡炉と同様の構造である。空気予熱器は運転・停止によるヒートショックの影響が大きく、本解体研究においては、伝熱チューブへの排ガスの流入口（管板とチューブの接合箇所）ならびに本体の熱膨張を吸収するコンペンセータ（伸縮管）の調査を主として行った。

図-3.7.5 から図-3.7.7 に空気予熱器の解体時調査記録を示す。

伝熱チューブと管板部分に損傷はなく、チューブ内に焼却灰に起因するスケーリングによる閉塞もなく良好な状態であった。

また、中間に位置する熱膨張を吸収するコンペンセータにおいても亀裂・腐食等は見られず良好な状態であった。

(3) 集塵装置

実証試験設備の集塵装置は、セラミックフィルターをろ材とした高温による集塵を特徴とする構造である。高温下におけるセラミックフィルターの使用状況（取付状態）ならびに集塵灰による磨耗状況を調査した。

図-3.7.8 から図-3.7.10 に集塵機の解体時調査記録を示す。

セラミックフィルターに磨耗痕ならびに損傷等はなく、逆洗管との取付状態も良好であった。

また、集塵装置は焼却炉同様に耐火物を内張りとした耐熱・耐磨耗構造であり、耐火物の状況も耐火物の磨耗・剥離等良好な状態であった。

(4) 過給機

過給式流動燃焼のシステム構成において従来気泡炉とは異なる構成機器である過給機は、連続運転による時系列の詳細の調査を行っており、“3. 6 長期運転”にて記述している。

(5) ダクト

機器間を接続するダクト、伸縮管を機器の撤去・解体時に熱・焼却灰の影響について調査した。

図-3.7.11 から図-3.7.13 に集塵機の解体時調査記録を示す。

排ガスに焼却灰が混在する集塵前のダクト（図-3.7.11）の状態は、偏磨耗・剥離等は見られず良好であった。

集塵後の排ガスダクト（図-3.7.12）には、焼却灰の堆積・付着は無く、セラミックフィルターによる過が行われ、過給機に流入する排ガスに焼却灰の混入が極めて少ない試験であったことがわかる。

予熱した空気を焼却炉に導入する空気ダクトにおいては、ダクトルートに応じて熱膨張を吸収する伸縮管（図-3.7.13）を配置している。今回の調査において圧力下・高温下での運転ならびに運転・停止の度重なる収縮においても亀裂等の損傷はなく良好な状態であった。

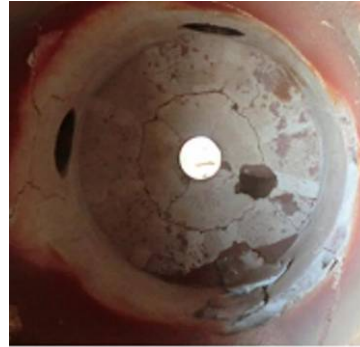


図-3.7.2 焼却炉下部



図-3.7.3 焼却炉 炉床・炉頂



図-3.7.4 焼却炉 バーナ

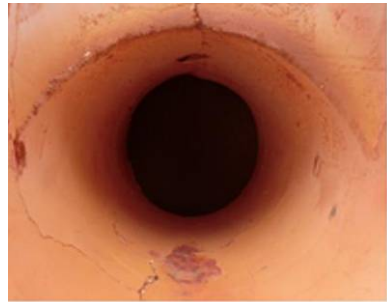
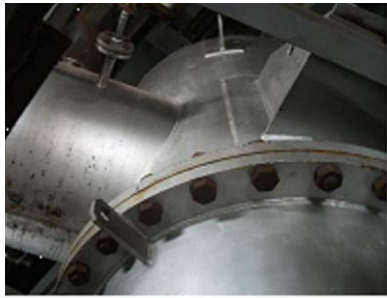


図-3.7.5 空気予熱器 上部ヘッド (排ガス流入口)

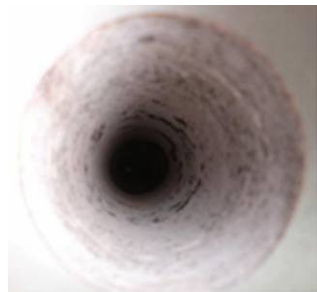


図-3.7.6 空気予熱器 管板・チューブならびにチューブ内 (右)

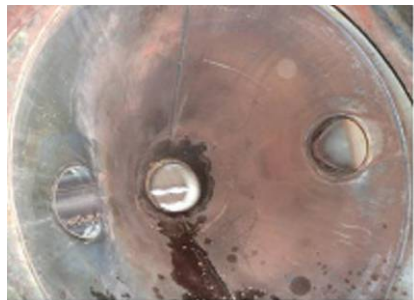


図-3.7.7 空気予熱器コンペンセータならびに下部ヘッド (右)



図-3.7.8 集塵機本体（左）と内部状況（右）



図-3.7.9 集塵機逆洗装置（左）とセラミックフィルター（右）



図-3.7.10 集塵機下部 灰排出装置



図-3.7.11 集塵機入口排ガスダクト



図-3.7.12 集塵機出口排ガスダクト



図-3.7.13 焼却炉入口空気ダクト

3. 8 まとめ

(1) システムが成立することを実証

流動炉と過給機を組み合わせたシステムが流動ブロワ（送風動力）および誘引ファン（吸気動力）を使用しない自立運転が出来ることを確認した。

(2) 下水汚泥焼却運転時の基礎的な燃焼特性の検証

排ガス性状（SO_x、NO_x、CO）は、気泡流動炉と同等であり、N₂O濃度については、フリーボードの高温域での分解により気泡流動炉より大幅に削減できる。ダイオキシン類およびばいじん濃度の分析も実施した結果、ダイオキシン類濃度；0.0069ng-TEQ/m³_N、ばいじん濃度；0.009g/m³_Nであった。いずれも規制値を下回る数値で、従来の気泡流動炉と同等以下であることが確認できた。

焼却灰性状は従来の気泡流動と同等であるが、高温で集塵するため焼却灰へのセレンの移行率が低減される。

(3) 安定的に燃焼空気および加圧空気（有効利用）を得るシステムの確立

焼却運転において余剰の加圧空気を得られることが確認できた。また、それにより燃焼空気および排ガス量が減少して系内圧力が降下してもシステムの自立運転は維持される。また、O₂濃度は下がっても5.5%程度であり、CO濃度にも変化がないことから完全燃焼している。

この結果から、本システムでは流動ブロワ、誘引ファン等の送気、吸気動力なしによる消費電力削減効果が得られるとともに、加圧空気の有効利用によって更なるエネルギー削減効果も期待できる。

(4) 低負荷運転

実用設備の供用開始直後には低負荷での運転が求められることもあるので、汚泥の供給量を下げて低負荷運転を行った。汚泥供給量180kg/h→110kg/hにしても設備運転には支障ない。逆に系内圧力の変化によって炉内の流速（空塔速度）が一定に保たれるため、砂層部で流動させるために過剰空気を供給する必要がないことが確認された。従って、従来の気泡流動炉のような燃費悪化が見られない。

(5) 温室効果ガス削減

過給式流動炉は、従来の気泡流動炉と比較し、ブロワを使用しないため省電力である。また、加圧下で燃焼するため機器がコンパクトになり放熱が減り補助燃料が少なくなる。地球温暖化係数が大きい温室効果ガスであるN₂Oについては加圧燃焼の効果によって高温燃焼域が形成されるために、従来の気泡流動炉より排出量の削減が可能である。300t/日規模の実用システムを想定した温室効果ガス排出量削減効果は下記のようになる。

- ・電力由来の温室効果ガス削減効果：47.9%
 - ・補助燃料由来の温室効果ガス削減効果：14.2%
 - ・N₂O由来の温室効果ガス削減効果：57.6%
- ※上記3つを総合した温室効果ガス削減効果：49.7%

(6) 運転制御

設備の立ち上げにおいて、昇温プログラムに沿って炉内温度を上昇させることができ、従来設備同様に自動起動における応答制御が可能であることを確認した。

(7) 長期運転

800 時間連続運転を 2 回行い新規採用機器である過給器の耐久性を確認した。過給機消耗部品（軸受）の摩耗量検証から寿命が 8000 時間以上となることが確認できたため、軸受交換は年 1 回の定修時に行うことで十分である。

また、長期運転においては性状が異なる汚泥の供給が頻繁に切り替わる状況で安定運転できることが確認できた。

(8) 解体研究

2007 年 1 月に実証プラントにおける試験を開始、2010 年 11 月まで 4 年、延べ運転時間 2600 時間を超える試験を行った。実証プラントの撤去解体にともない、解体時に機器等の損耗度合について調査を行った。

主要機器は、従来気泡炉をベースとする設計により製作・施工されており、過給式システムへの適用性を経年による損耗度合からもその妥当性について調査を行い、問題の無いことを確認できた。

参考文献

- 1) 樋田靖広、清水大輔：省エネ型流動焼却システム（ターボ型流動焼却炉）による温室効果ガス削減技術の実用化検証, 東京都下水道局技術調査年報 2010, pp.175-176, 2010,
<http://www.gesui.metro.tokyo.jp/gijyutou/gn22/nenpou2010/3-1-2.pdf>

第4章 制御システムの検討

4. 1 はじめに

下水汚泥は、窒素含有量が他の燃料と比較して極めて高く、焼却時には N_2O の排出が懸念されている。 N_2O の地球温暖化係数は CO_2 の310倍と高く、その排出量の低減がシステムを運用する上で重要となる。そこで以下の方法により、下水汚泥からの N_2O 排出特性における圧力の影響を明らかにすることを目的とした¹⁾。

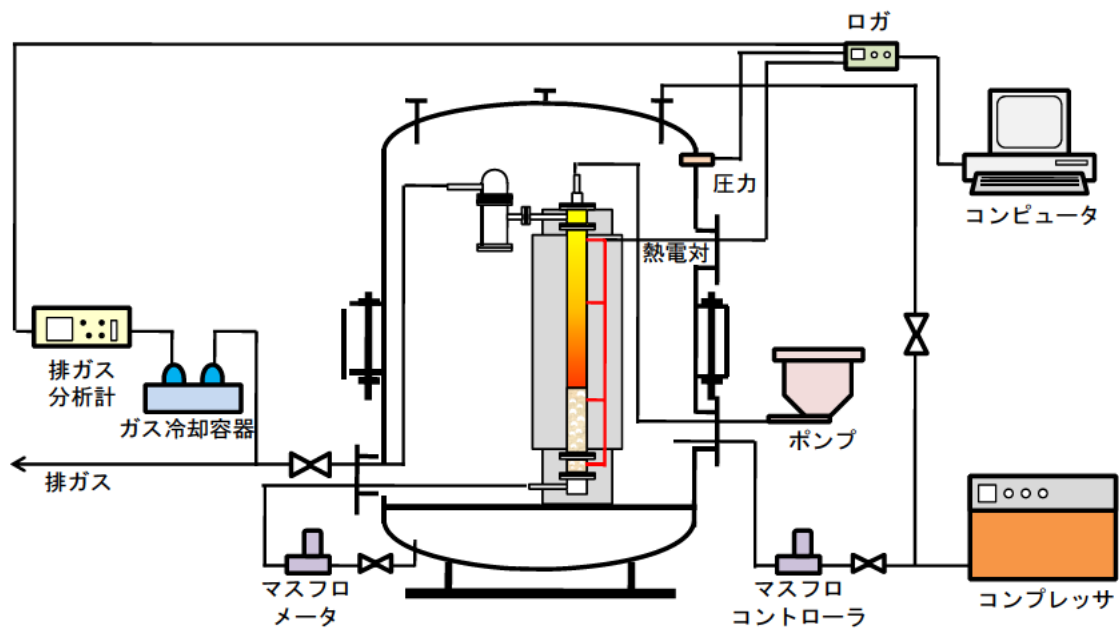
- ・産総研内にある実験室規模の加圧流動層燃焼炉 (Pressurized Fluidized Bed Combustor; PFBC) により、広範な運転圧力条件で基礎燃焼実験を行い、 N_2O 排出における圧力の影響を明らかにする。
- ・北海道長万部町の過給式流動炉実証プラントを運転し、排ガス中の N_2O 排出濃度を測定し、従来型の常圧流動炉のそれと比較する。またその相違について、燃焼炉内温度分布の比較により考察する。
- ・シミュレーション解析により、流動層燃焼炉内の温度分布における圧力の影響について理論的に考察する。

4. 2 実験方法および条件

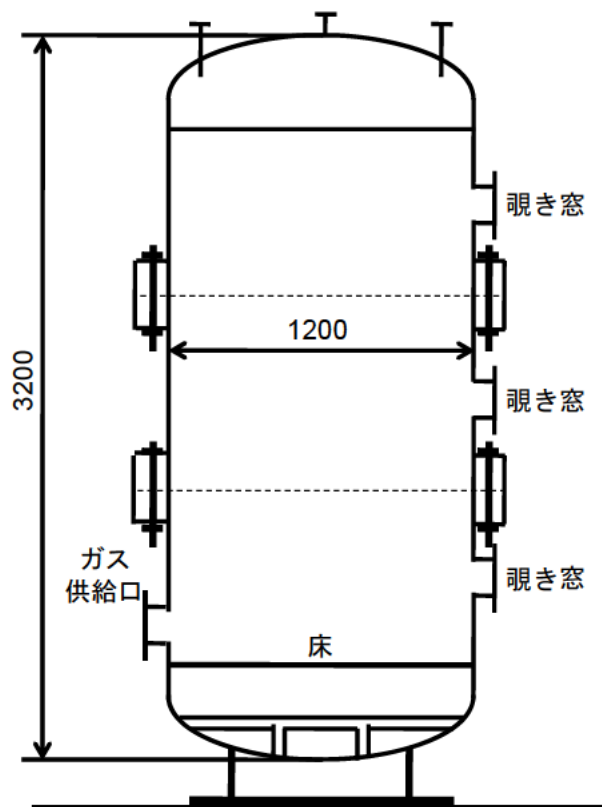
4. 2. 1 実験室規模の加圧流動層燃焼炉による基礎燃焼実験

図-4.2.1に加圧流動層燃焼システムの全体構成を示す。加圧容器(内径:1200mm、高さ:3200mm、図-4.2.2に概略図を示す)内にバブリング流動層燃焼炉(反応管内径:80mm、高さ1200mm、図-4.2.3に概略図を示す)を設置し、各種制御装置は容器の外部に設置することで、電気炉や供給空気量を操作した。コンプレッサーで製造された加圧空気は、加圧容器内へ所定の圧力条件になるまで供給した。流動層実験装置内の空気量を計測するために、その配管を一旦容器外に導き、マスフローメータで計量した後、再び容器内に戻し、装置下部へ接続して供給する構造とした。圧力容器内の圧力は、容器内の温度変化、流動層の層高変化、流路の圧力損失の変化による空気流量の変化などにより若干変化する。このため、マスフローコントローラを手動制御することにより、容器内の圧力を一定に保った。運転中の温度は、熱電対により砂層内(T_{b1} :50mm、 T_{b2} :300mm)およびフリーボード(T_{fb1} :800mm、 T_{fb2} :1200mm)で各2点測定した(括弧内の数値は分散板からの高さ)。燃料はモノポンプ(図-4.2.4に外観写真を示す)により、所定温度に到達後、装置最上部の垂直投入管より連続供給した。汚泥供給の様子を図-4.2.5に示す。流動媒体には7号珪砂(平均粒径:約0.24mm)を使用し、静止層高で300mmとなるように充填した²⁾⁴⁾。

実験条件として、燃料は表-4.2.1に示す実脱水汚泥を使用した。運転圧力は0.2、0.3および0.6MPaの3条件とし、砂層温度は1000~1200K、流動条件は最小流動化速度の約3倍とした。燃焼後の排ガスは、セラミックフィルタで脱塵し、大気圧まで減圧した後、ガス中の水蒸気をインピンジャーにより凝縮除去させ、ガス分析計より排ガス濃度を測定した。



図一4.2.1 実験室規模の加圧流動層燃焼システムの全体構成



図一4.2.2 加圧容器概略図

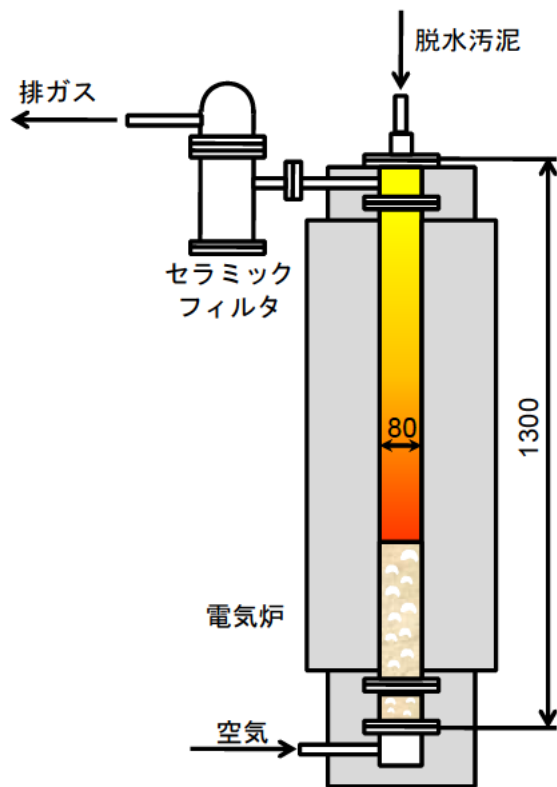


図-4.2.3 バブリング流動層燃焼炉概略図



図-4.2.4 モーノポンプ外観写真



図-4.2.5 下水汚泥供給の様子

表-4.2.1 基礎実験で使用した脱水汚泥性状

| | | |
|-----------------------|------|-------|
| 工業分析値 [wet, wt. %] | 水分 | 78.0 |
| | 揮発分 | 13.9 |
| | 固定炭素 | 1.8 |
| | 灰分 | 6.3 |
| 元素分析値 [dry, wt. %] | C | 29.8 |
| | H | 4.0 |
| | N | 5.0 |
| | S | 1.1 |
| | O | 31.4 |
| 高位発熱量 [MJ/kg (dry)] | | 17.10 |

4. 2. 2 過給式流動炉実証プラントによる燃焼試験

本実証プラントの概要、運転方法、脱水汚泥性状などは、第3章に示すとおりである⁵⁾⁷⁾。試験条件は、脱水汚泥供給量は180~190kg/hとし、砂層温度で1000~1050K、圧力は約0.2MPaとした。空気比は排ガス中のO₂濃度ベースで約1.6とし、流動条件は最小流動化速度の約6倍とした。

4. 2. 3 シミュレーション解析

実証規模の流動層燃焼炉内の温度分布について理論的に考察するために、汎用詳細化学反応計算ソフトCHEMKIN⁸⁾ IIIパッケージを使用してシミュレーション解析を行った⁹⁾。使用した燃焼反応式(化学種: 49、素反応: 277)は、GRI-Mechサイトより引用した¹⁰⁾。実証プラントの条件を模擬するために、脱水汚泥(性状は第3章に示す)およびA重油供給量は、180および20kg/hにそれぞれ設定し、空気比は1.5とした。熱損失は、断熱および燃焼炉から周囲雰囲気への熱移動を考慮した場合の2条件を行った。熱移動については、周囲温度は360K(実測値)、総括熱伝達率(h)を2.8および5.6 W/(m²K)に設定した。圧力は常圧流動炉と加圧流動炉の運転条件を考慮し、0.1および0.3MPaの2条件とした。両圧力条件において、ガス速度を一定にするため、燃焼炉の高さは圧力に依らず一定とした。計算開始点は、砂層最上部、すなわちフリーボード最下部とした。

フリーボード入口のガス組成が初期条件として計算に必要であるため、主要なガス組成(H₂, CO, CH₄, CO₂, H₂O, O₂およびN₂)について、脱水汚泥の乾燥および熱分解、A重油の燃焼は砂層内で完了すると仮定し、これら燃料の物質およびエネルギー収支により、表-4.2.2のようにガス組成を決定した。SO₂については、少量であったために省略した。

表-4.2.2 フリーボード入口のガス組成

| ガス | モル分率 [-] |
|------------------|----------|
| H ₂ | 0.0039 |
| CO | 0.0097 |
| CH ₄ | 0.0117 |
| CO ₂ | 0.0513 |
| H ₂ O | 0.3199 |
| O ₂ | 0.0585 |
| N ₂ | 0.5450 |

4. 3 実験結果および考察

4. 3. 1 基礎燃焼実験によるN₂O排出特性

実験室規模のPFBCにおけるN₂O排出濃度とフリーボード温度との関係を図-4.3.1に示す。本図より、圧力が高くなるに連れて、N₂O濃度は若干高くなる傾向にあるが、フリーボード温度に強い依存性を示した。フリーボード温度が高くなるに連れて、その濃度は低くなっている。したがって、脱水汚泥の燃焼では、加圧条件においても、燃焼炉内のフリーボード温度で排ガス中のN₂O濃度を整理できる。

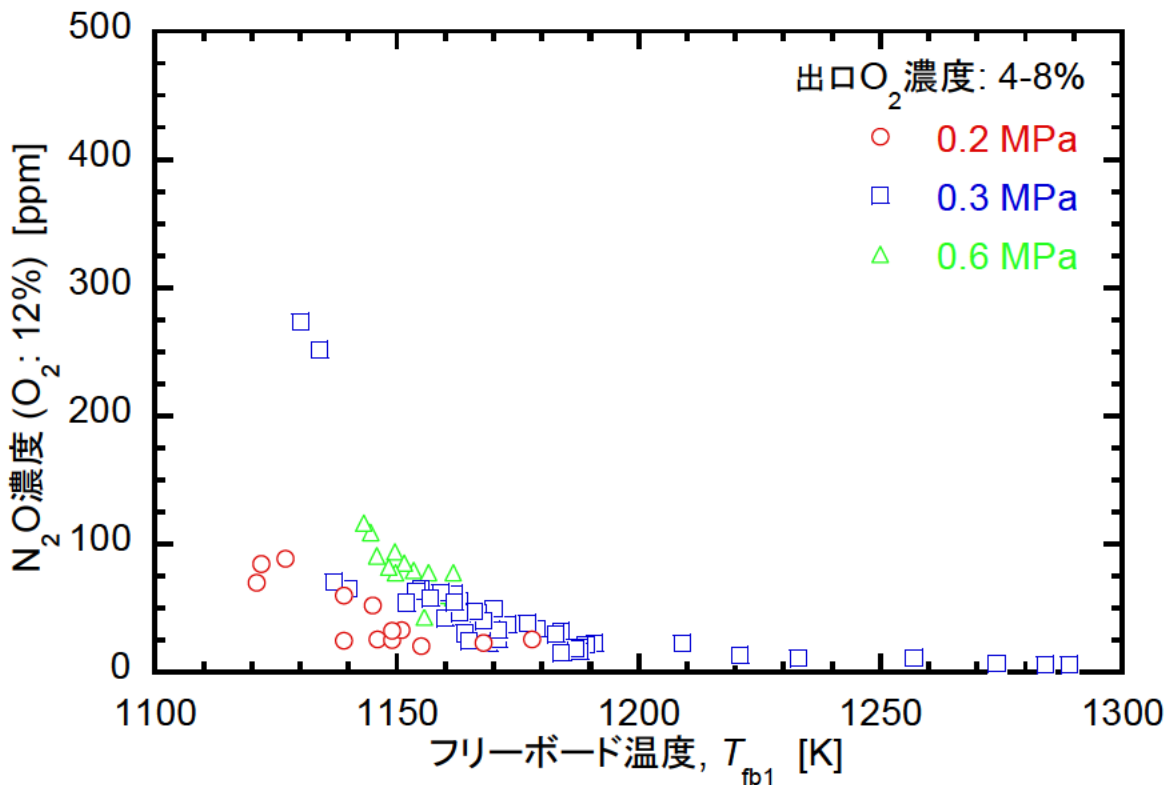


図-4.3.1 排ガス中のN₂O濃度とフリーボード温度との関係

また、N₂O以外の窒素化合物であるNO_xについても測定し、運転圧力の影響についてまとめた結果を図-4.3.2に示す。本図より、NO_x排出濃度は運転圧力に依存し、圧力が高くなるに連れてその濃度は低くなっている。本傾向は、石炭燃焼の場合と同様である¹¹⁾。石炭燃焼では、層内でチャーによるNOの還元効果が、圧力が増加するに連れて高くなることにより、NO_x濃度は低くなると考えられる。したがって、本研究で使用した揮発分の燃焼が主体である脱水汚泥の燃焼においても、このような加圧の効果があるといえる。さらに、汚泥中の水分はとても高いため、OラジカルやOHラジカル濃度に影響を与え、NO生成反応を抑制する効果があるが¹²⁾、加圧条件により水蒸気分圧が高くなるので、NO_x抑制効果も大きくなると推測できる。

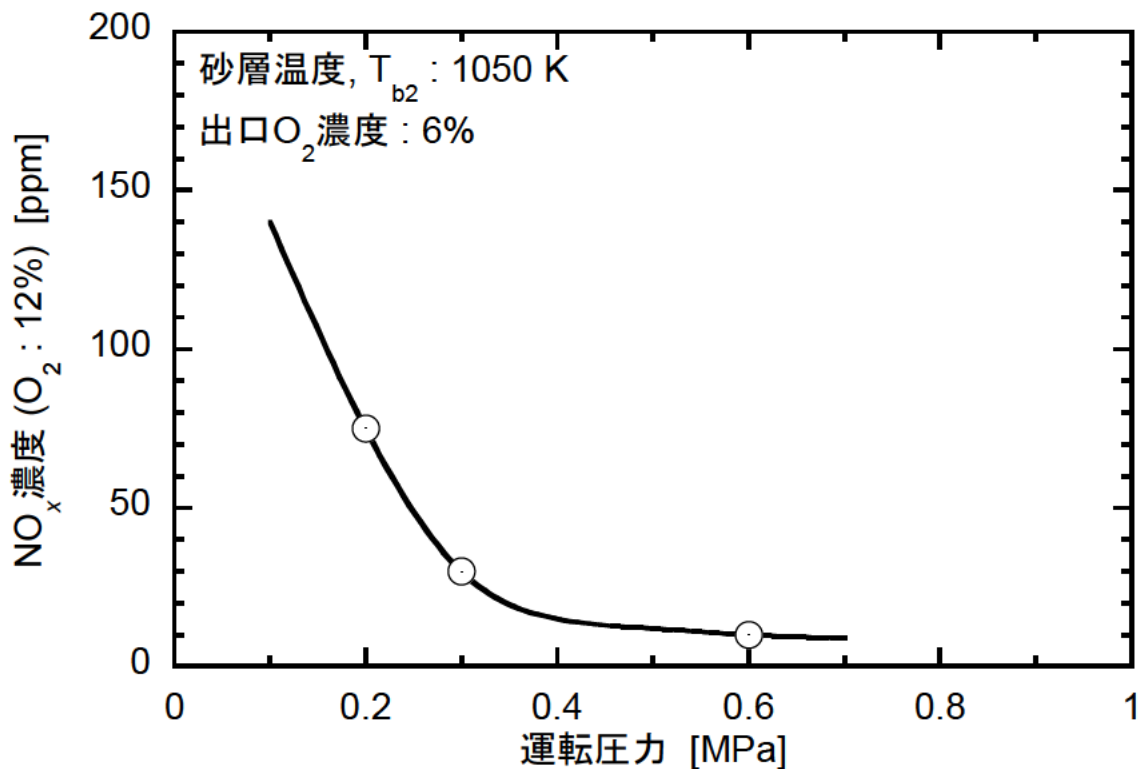


図-4.3.2 排ガス中のNO_x濃度と運転圧力との関係

4. 3. 2 実証プラントによるN₂O排出濃度の比較

排ガス中のN₂O排出係数の過給式流動炉と常圧流動炉との比較を、NO_x濃度と併せて表-4.3.1に示す¹³⁾⁻¹⁵⁾。N₂O排出係数とは、1トンの脱水汚泥から排出されるN₂O量で定義される。結果として、両濃度とも過給式流動炉の方が、常圧流動炉よりも半分以下の濃度に低減できることが分かった。N₂Oについては、基礎実験では、圧力が高くなるに連れて、その排出濃度は若干増加する傾向にあったが、実証プラントでは過給式流動炉の方が半減した。一方、NO_xについては、基礎実験結果から得られたように、加圧により層内でチャーによるNO還元効果の増大、高水蒸気分圧によるNO生成の抑制効果の増大により、排出量を低減できるといえる。

表-4.3.1 実証規模におけるN₂OおよびNO_x濃度の比較

| | 従来型 | 過給式 |
|--|-----|------|
| N ₂ O排出係数 [g-N ₂ O/t-脱水汚泥] | 645 | 280 |
| NO _x 濃度 (O ₂ :12%) [ppm] | 100 | 31.5 |

基礎実験では、燃焼炉内のフリーボード温度を電気炉により独立に制御していたため、ここでは実証規模での燃焼炉内温度分布に着目し、両炉での比較を行った。結果を図-4.3.3に示す¹³⁾。本図中の常圧流動炉の温度分布は、本実証プラントと同規模の運転データを採用した。両流動炉とも砂層内の温度が最も低く、ここでは汚泥燃料の乾燥および熱分解が起こっていると考えられる。一方、フリーボード温度においては、両炉間に顕著な差異が生じた。過給式流動炉では、分散板より3000mm付近のところで局所的な高温域を形成し、その後、出口へ向かって温度は減少している。砂層温度条件を変化させても、同様の結果が得られた。これは、加圧により燃焼速度が促進されたことで、砂層内で熱分解したガスが、この付近で燃焼していると考えられる。一方、常圧流動炉では、過給式流動炉よりもフリーボード内の温度上昇が緩慢であることから、熱分解ガスはフリーボード全体で燃焼していると考えられる。したがって、過給式流動炉では、フリーボード下部の局所的な高温域で N_2O が分解され易くなるため、その排出量を低減できるといえる。

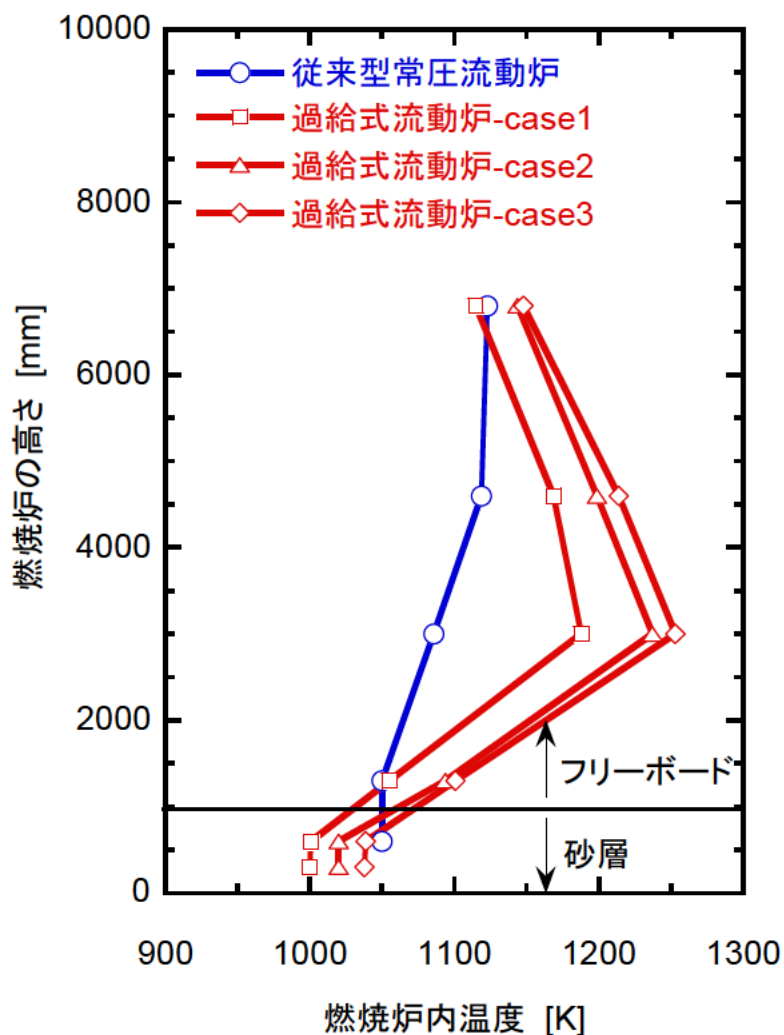


図-4.3.3 実証規模における燃焼炉内温度分布の比較

4. 3. 3 シミュレーションによる燃焼炉内温度分布の圧力による影響

前節では、排ガス中の N_2O 濃度は、過給式流動炉の方が常圧流動炉よりも半減でき、これは炉内温度分布の差異によるものと考察できた。ここでは、燃焼反応式を組み込んだシミュレーション解析により、圧力による燃焼炉内温度分布の差異について理論的に考察した。図-4.3.4 に計算で得られた断熱条件におけるフリーボード内温度分布の圧力による影響について示す。本図より、圧力が高くなると温度の立ち上がりが速くなっており、フリーボードの下部で最高温度に達している。これは加圧の効果により、特定の素反応の化学反応速度が促進されたことによると考えられる。したがって、圧力が高くなるほど、温度はフリーボード下部でシャープに上昇することが分かった。

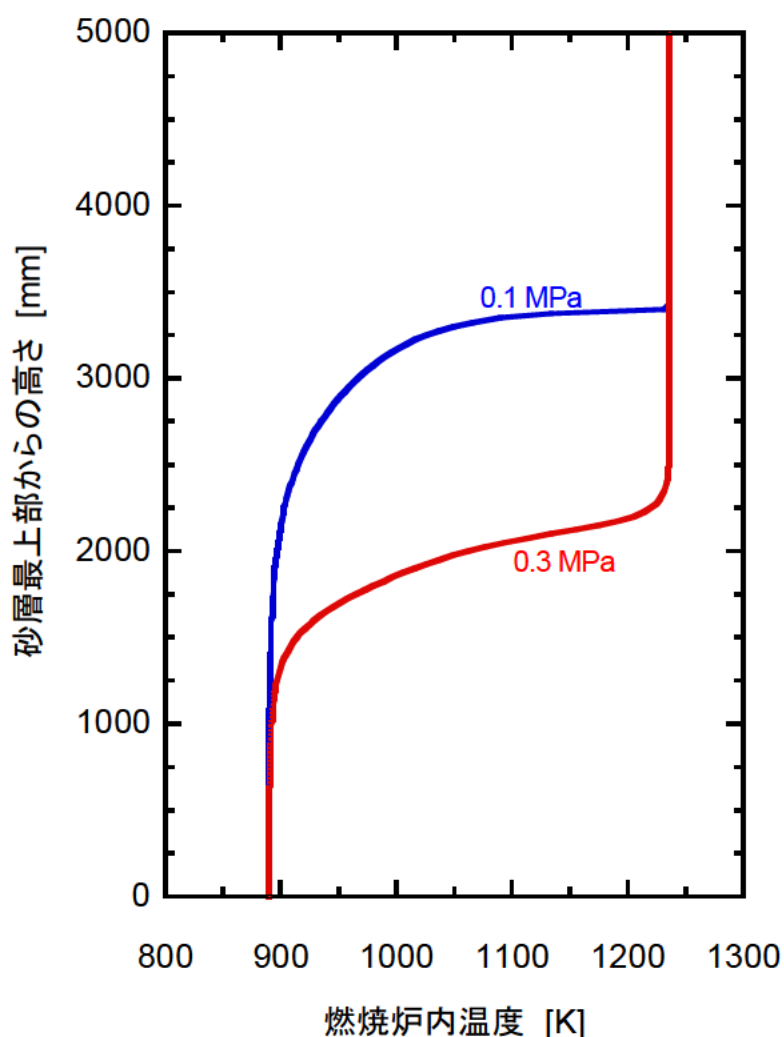


図-4.3.4 フリーボード内温度分布の圧力による影響（断熱条件）

つぎに、加圧条件において、燃焼炉内の熱損失を考慮した結果を図-4.3.5 に示す。熱損失が高くなるほど、温度の立ち上がりおよび最高温度への到達は、フリーボード上部へ移動しており、最高温度到達後、炉の出口へ向かって温度は低下している。これは、図-4.3.3 に示す過給式流動炉の温度分布の傾向と一致する。図-4.3.6 には、総括熱発生速度で整理した結果を示す。総括熱発生速度とは、各素反応の熱発生速度の総和で定義される。本図より、各条件における最高温度到達点と総括熱発生速度がピークとなる領域は一致している。熱損失が高くなるほど、総括熱発生速度の生成はブロードになる傾向にあり、これは熱損失が高くなるに連れて、特定の素反応の化学反応速度が遅くなることによる。したがって、実証規模の燃焼炉内の温度分布は、ガス燃焼反応式を組み込んだシミュレーション解析により予測できることが分かった。

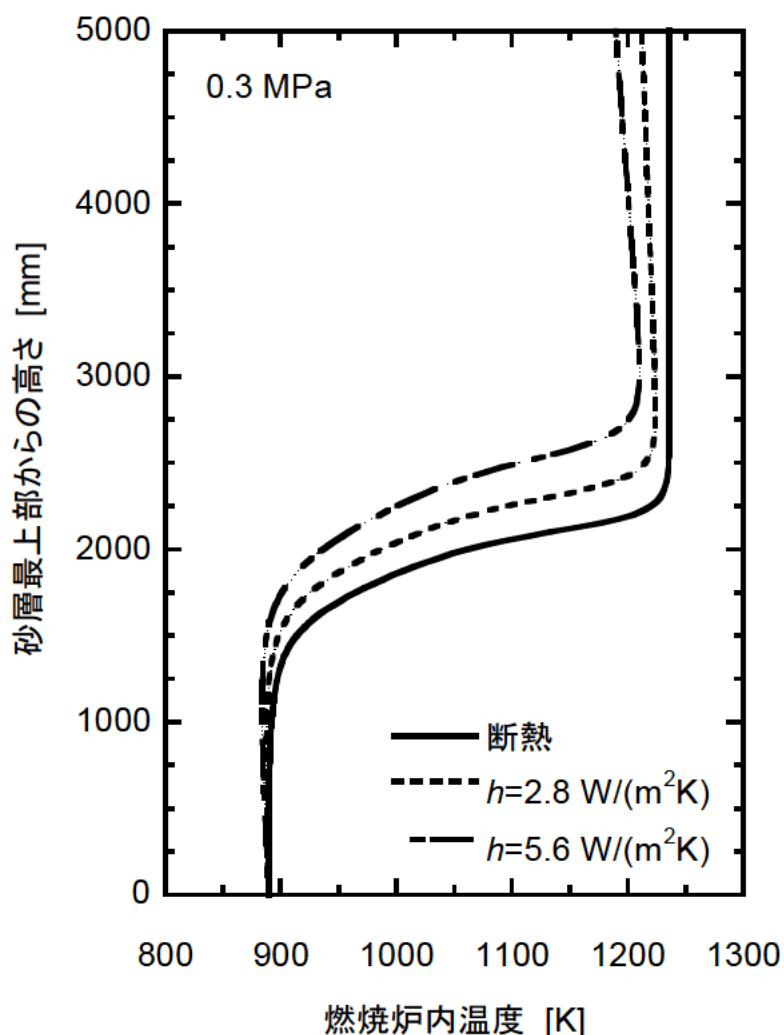


図-4.3.5 フリーボード内温度分布の熱損失による影響（加圧条件）

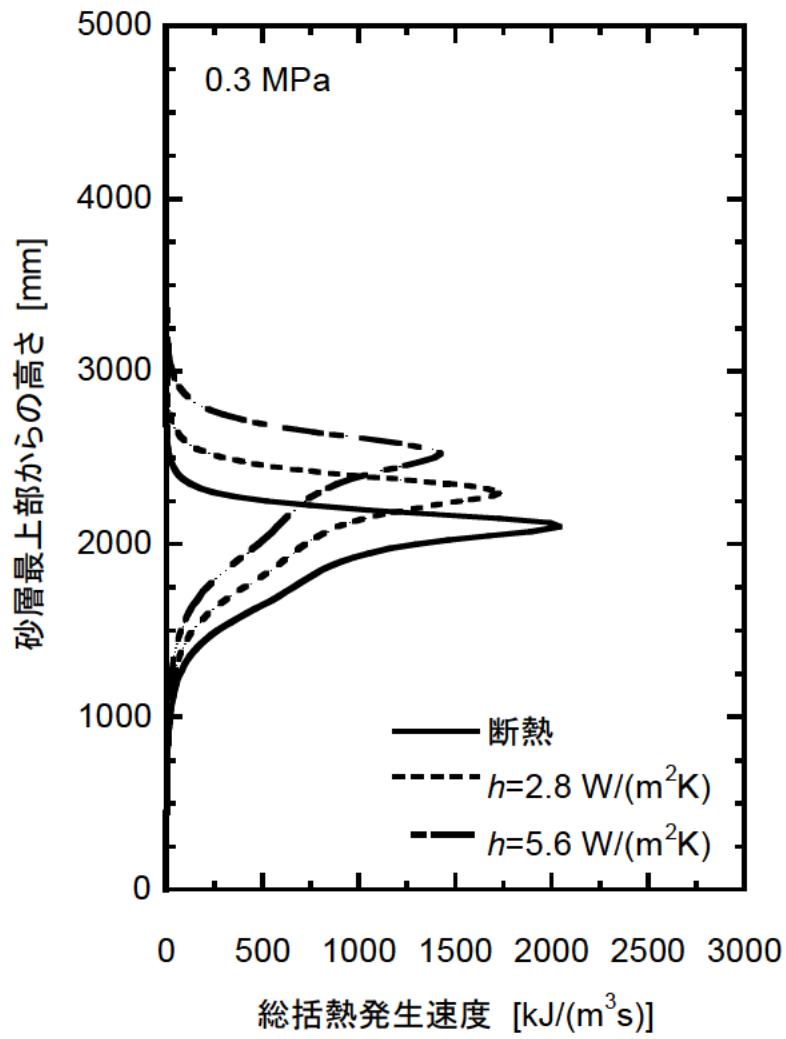


図-4.3.6 フリーボード内熱発生速度の熱損失による影響（加圧条件）

4. 4 まとめ

本研究により、得られた成果を以下に示す。

- 1) 実験室規模の加圧流動層燃焼炉による基礎実験より、排ガス中の N_2O 濃度は、燃焼炉内のフリーボード温度分布が同等の条件であれば、圧力が高くなるに連れて若干増加する傾向にあるが、フリーボード温度に強い依存性を示すことが分かった。一方、排ガス中の NO_x 濃度は、圧力が高いほど層内でのチャーによる NO 還元効果、および高水蒸気濃度による NO 生成抑制効果により低くなること分かった。
- 2) 過給式流動炉実証プラントによる燃焼試験より、過給式流動炉では、常圧流動炉よりも排ガス中の N_2O および NO_x 濃度を半分以下に低減できることが分かった。 N_2O については、過給式流動炉では、フリーボード下部に局所的な高温域を形成し、そこで N_2O は分解されるために低減できる。
- 3) 燃焼反応式を組み込んだシミュレーション解析により、実証規模の燃焼炉内温度分布の圧力による影響を予測することができた。

参考文献

- 1) 村上高広ら：過給式流動炉を利用した下水汚泥燃焼場における NO_x - N_2O 排出特性,TSK技報,p.6～10,2010
- 2) 村上高広ら：過給式流動炉における下水汚泥の基礎燃焼特性,高温学会誌,p.166-170,2008
- 3) 村上高広ら：研究室規模の加圧流動層燃焼炉による下水汚泥の排ガス特性に及ぼす圧力の影響,高温学会誌,p.9-12,2010
- 4) T. Murakami, *et. al.* : Study on Freeboard Properties to Maintain Low N_2O Emissions from Sewage Sludge in a Fluidized Bed Combustor, *Energy & Fuels*, p.4879-4882, 2010
- 5) 村上高広ら：過給式流動炉実証プラントにおける下水汚泥の燃焼特性評価,高温学会誌,p.81-84,2009
- 6) T. Murakami, *et. al.* : Combustion Characteristics of Sewage Sludge in an Incineration Plant for Energy Recovery, *Fuel Proc. Tech.*, p.778-783, 2009
- 7) T. Murakami, *et. al.* : Combustion Characteristics of Sewage Sludge using a Pressurized Fluidized Bed Incinerator with Turbocharger, 20th Intl. Conf. on fluidized bed Combustion, p.877-882, 2009
- 8) 「CHEMKIN」は Reaction Design 社の登録商品
- 9) T. Murakami, *et. al.* : Effect of Operating Pressure on Freeboard Temperature Distribution in a Pressurized Fluidized Bed Incinerator of Sewage Sludge, *J. Japanese Society for Experimental Mechanics*, p.58-61, 2010
- 10) C. T. Bowman : http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/
- 11) 鈴木善三ら：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_x 分解—,日本エネルギー学会誌,p.773-779,2005
- 12) M. Shoji, *et. al.* : Modeling Study of Homogeneous NO and N_2O Formation from Oxidation of HCN in a Flow Reactor, *Energy*, p.337-345, 2005
- 13) 平成 17 年度～19 年度 NEDO 成果報告書：都市バイオマス収集システムを活用するためのエネルギー転換要素技術開発,2008
- 14) 本多裕姫：次世代型下水汚泥焼却炉,地球環境,p. 98-102,2001
- 15) 清水俊昭：地球温暖化とインベントリ,下水道新技術推進機構—下水道機構だより,2007

第5章 草木系バイオマス混焼システムの検証

5.1 汚泥・バイオマスの供給手法

下水汚泥の脱水物（脱水汚泥、以下、汚泥）を燃焼する際、未活用である緑地管理由来の草木系バイオマスを補助燃料として混合焼却（以下、混焼）することによって、従来から汚泥焼却に使用されてきた化石燃料（重油や都市ガスなどの補助燃料）使用量の削減が図れる。この結果、下水汚泥焼却時に補助燃料に由来して発生する二酸化炭素量の減少が望める。

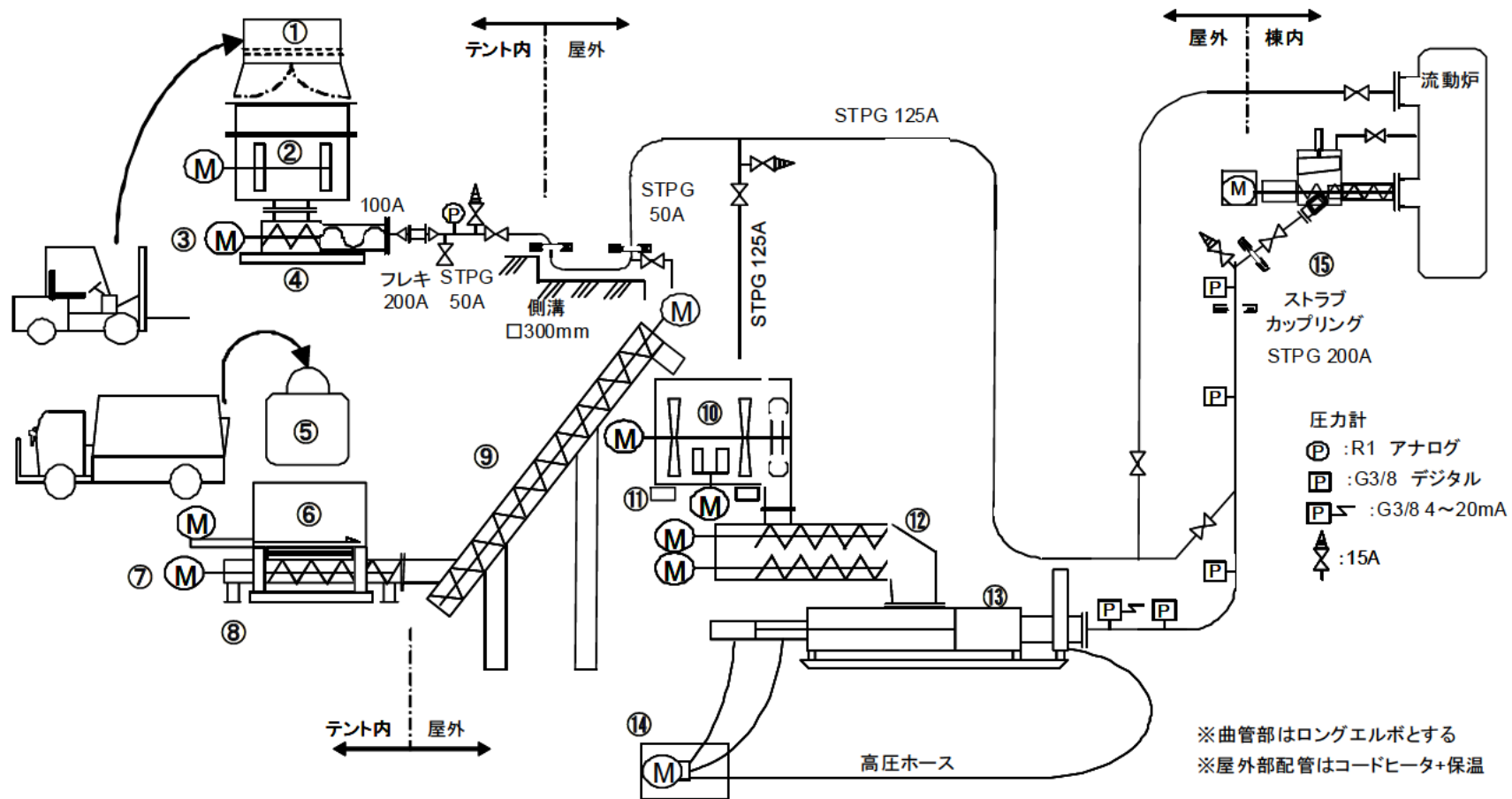
加圧流動炉では、炉内圧力を 0.15MPaG 程度（ゲージ圧力。以下も断わり無き場合は同じ）まで加圧して燃焼するため、燃焼物質は炉内圧力より高い圧力にて供給する必要がある。

そこで、実証試験設備では、図-5.1.1 に示す様に、汚泥とバイオマスを混合装置にて予混合してからバイオマス圧送ポンプで炉近傍の汚泥ケーキ押込機まで送り、汚泥ケーキ押込機にて加圧流動炉へ投入する方法により間隙が大きいバイオマスを加圧流動炉へ供給できることを 2007 年度までに確認した¹⁾。

一方で、汚泥は低含水率のバイオマス（日干しした牧草など）と混合すると粘度が高まり、搬送性が著しく低下することもわかった。図-5.1.1 の供給手法においては、バイオマス押込機における圧密や、混合装置における混合パドル軸への固着が発生する場合があった。そこで、2008 年度以降においては、図-5.1.2、図-5.1.3 の様に順次改良し、搬送を容易に実施することができた¹⁾。

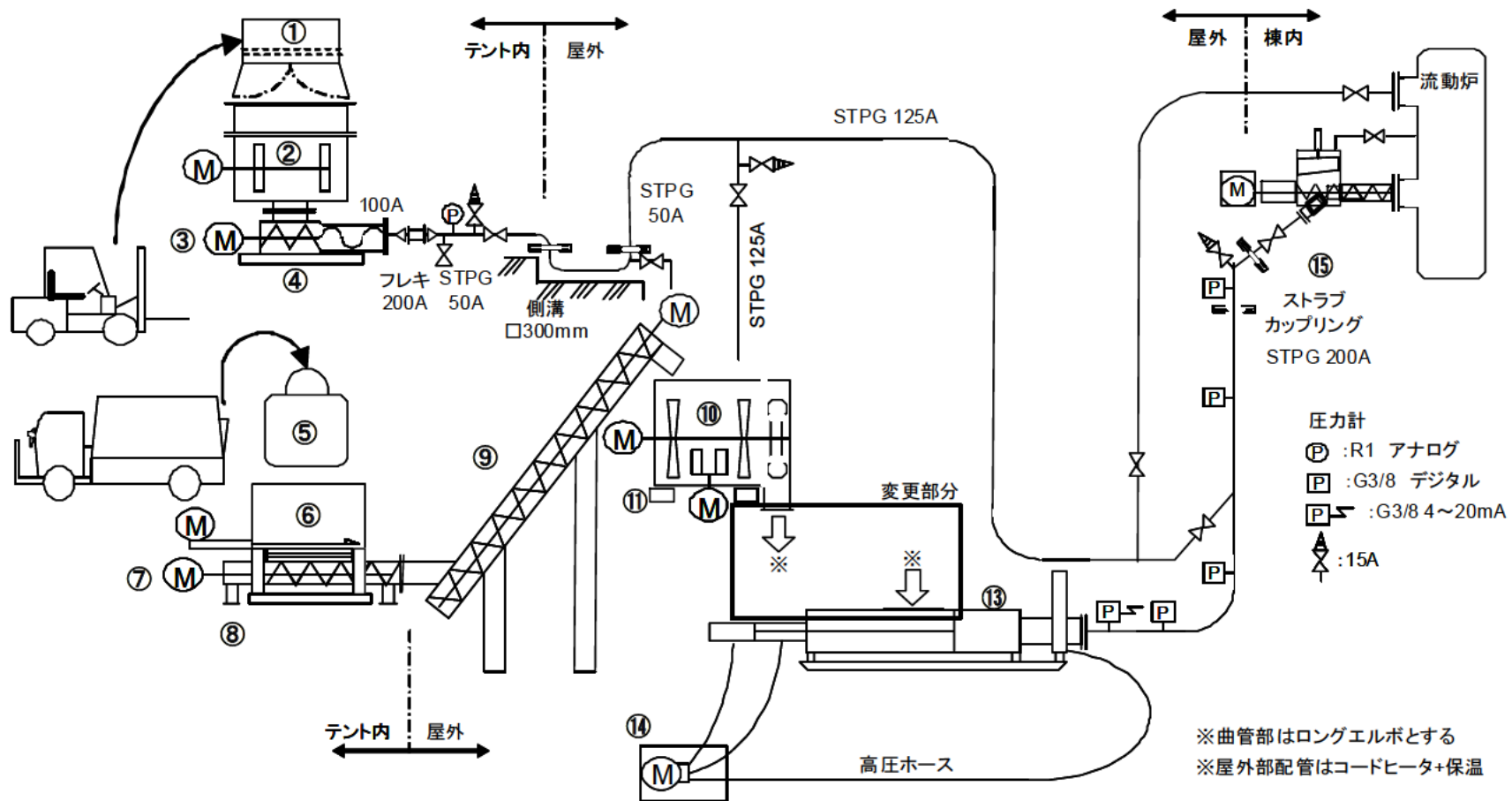
図-5.1.2 の改良においては、汚泥・バイオマス混合物が圧密するバイオマス押込機を排除し、汚泥バイオマス混合装置のパドルにより直接的にバイオマス圧送ポンプへ供給した。

図-5.1.3 の改良においては、仕切り板により汚泥バイオマス混合装置ホップの容量を半分とし、汚泥とバイオマスの混ざり過ぎ（バイオマスによる過剰の吸湿）による粘度増加を抑制した。



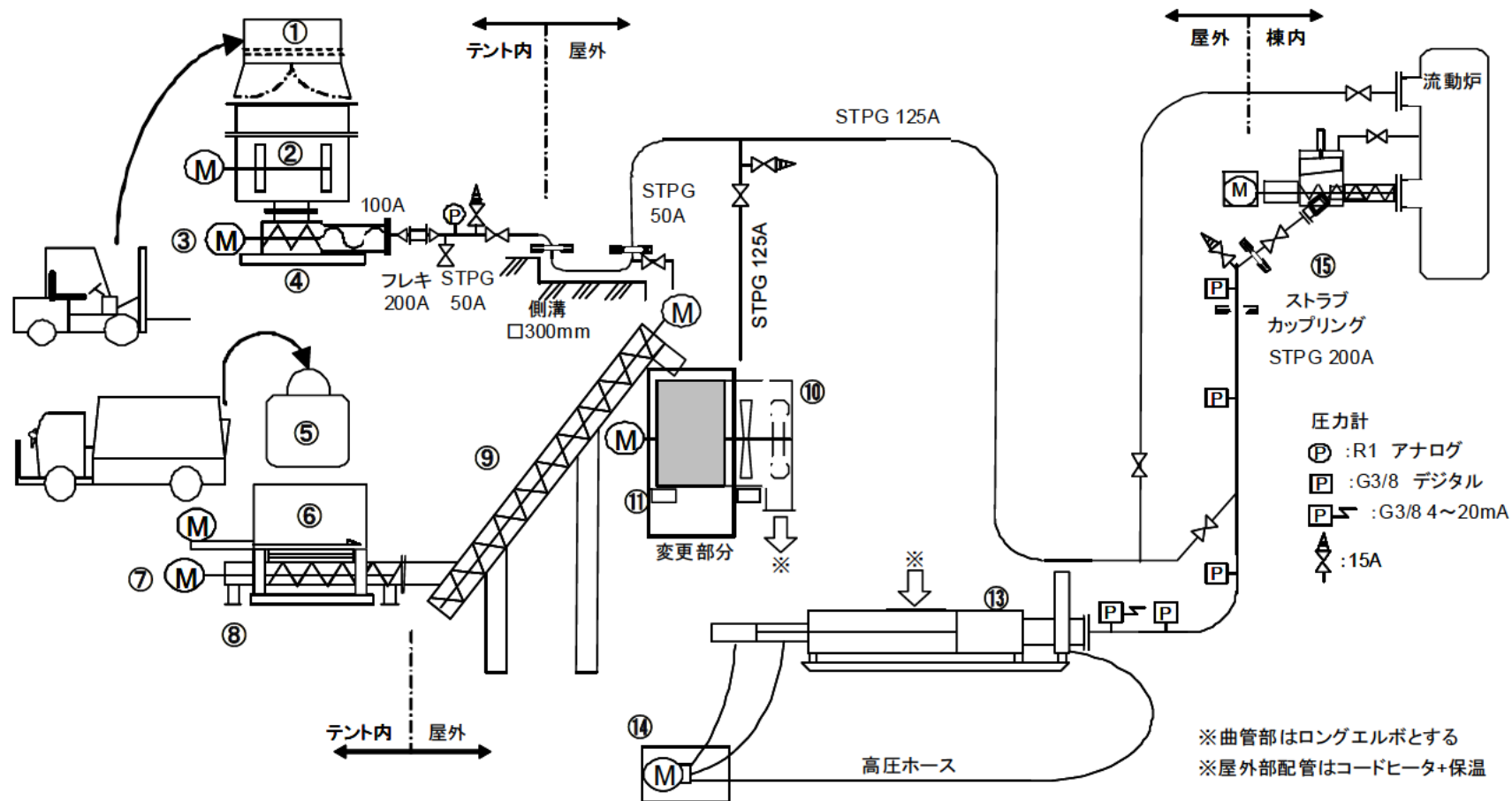
| | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ | ⑦ | ⑧ | ⑨ | ⑩ | ⑪ | ⑫ | ⑬ | ⑭ | ⑮ |
|-----|-----------------------------|------------------------------|----------------------------------|---------------------|------------------|--------------------|--|-----------------------------------|-------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------|--------------------------------------|-----------|------------|
| 名称 | カンテナ | ケーキ混合供給ホッパ | ケーキ供給ポンプ | 汚泥計量機 | フレックスコンテナ | バイオマス計量ホッパ | バイオマス切出機 | バイオマス計量機 | バイオマス搬送機 | 汚泥バイオマス混合搬送機 | 汚泥バイオマス混合計量機 | バイオマスポンプ押込機 | バイオマス圧送ポンプ | 油圧ユニット | 汚泥ケーキ押込機 |
| 型式 | 箱型 | バドル式 | 一輪ねじ式 | ロードセル | 円筒型 | スライディングフレーム | 一輪スクリュウ式 | ロードセル | スクリュウコンベア | バドル式 | ロードセル | 二輪スクリュウ(一輪逆転可) | ピストン式 | 油圧駆動装置 | 二輪スクリュウ式 |
| 仕様 | 1.0m ³ 約300kg | 約1.8m ³ 9.1RPM | 0.2~0.5m ³ /h 100A | 2.0x2.0m 最大計測50t | 約1m ³ | 約1.8m ³ | 約0.7kg/min(D.B.) 約1.4kg/min(W.B.) 4.1RPM | 1.2x1.2m 最大計測1.0t 最軽取扱0.5kg | 250φx4500mm | 約1.2m ³ 14RPM | 最大計測2.0t 最軽取扱1kg | 約3.4L/回転 3.8RPM | 0.4MPa 2m ³ /h 200A | - | 225 t/h |
| 電動機 | - | 7.5kWx200V | 3.7kWx200V インバータ | - | - | 0.75kWx200V | 1.5kWx200V インバータ | - | 1.5kW | 1.5kWx200Vx2 | - | 0.4kWx200Vx2 インバータ | - | 30kWx200V | 0.4kWx200V |
| 数量 | 3台 | 1基 | 1基 | 1台 | - | 1基 | 1基 | 1台 | 1台 | 1基 | 1台 | 1基 | 1台 | 1台 | 1基 |
| 備考 | 汚泥搬送用 | レベルスイッチ付 | - | 4~20mA出力 | バイオマス搬送用 | バイオマス定量供給機 | 4~20mA出力 | - | - | バイオマス混合搬送装置 | - | 逆流防止ゲート付 | - | - | - |

図-5.1.1 汚泥・バイオマス供給装置 (2007年度まで)



| | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ | ⑦ | ⑧ | ⑨ | ⑩ | ⑪ | ⑫ | ⑬ | ⑭ | ⑮ |
|-----|-----------------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------|------------------|--------------------|--|-----------------------------------|-------------|-----------------------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------------------|-----------|------------|
| 名称 | カンテナ | ケーキ混合供給ホッパ | ケーキ供給ポンプ | 汚泥計量機 | フレックスコンテナ | バイオマス計量ホッパ | バイオマス切出機 | バイオマス計量機 | バイオマス搬送機 | 汚泥/バイオマス混合装置 | 汚泥/バイオマス混合計量機 | バイオマスポンプ押込機 | バイオマス圧送ポンプ | 油圧ユニット | 汚泥ケーキ押込機 |
| 型式 | 箱型 | バドル式 | 一輪ねじ式 | ロードセル | 円筒型 | スライディングフレーム | 一輪スクリュ式 | ロードセル | スクリュコンベア | バドル式 | ロードセル | 二輪スクリュ(一輪送転可) | ピストン式 | 油圧駆動装置 | 二輪スクリュ式 |
| 仕様 | 1.0m ³ 約380kg | 約1.8m ³ 9.1RPM | 0.2~0.5m ³ /h 100A | 2.0x2.0m 最大計量5.0t | 約1m ³ | 約1.8m ³ | 約0.7kg/min(D.B.) 約1.4kg/min(W.B.) 4.1RPM | 1.2x1.2m 最大計量1.0t 最低取扱0.5kg | 250φx4500mm | 約1.2m ³ 14RPM | 最大計量2.0t 最低取扱1kg | 約3.0m ³ 送転 30RPM | 0.4MPa 2m ³ /h 200A | - | 225t/h |
| 電動機 | - | 7.5kWx200V | 3.7kWx200V インバータ | - | - | 0.75kWx200V | 1.5kWx200V インバータ | - | 1.5kW | 1.5kWx200Vx2 | - | 0.4kWx200Vx2 インバータ | - | 30kWx200V | 0.4kWx200V |
| 数量 | 3台 | 1基 | 1基 | 1台 | - | 1基 | 1基 | 1台 | 1台 | 1基 | 1台 | 1基 | 1台 | 1台 | 1基 |
| 備考 | 汚泥搬送用 | レベルスイッチ付 | - | 4~20mA出力 | バイオマス搬送用 | バイオマス定量供給機 | 4~20mA出力 | - | - | バイオマス混合搬送装置 | - | 逆流防止ゲート付 | - | - | - |

図-5.1.2 汚泥・バイオマス供給装置 (2009年度)



| | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ | ⑦ | ⑧ | ⑨ | ⑩ | ⑪ | ⑫ | ⑬ | ⑭ | ⑮ |
|-----|-----------------------------|------------------------------|----------------------------------|---------------------|------------------|--------------------|--|-----------------------------------|-------------|-----------------------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------------------|-----------|------------|
| 名称 | カンテナ | ケーキ混合供給ホッパ | ケーキ供給ポンプ | 汚泥計量機 | フレックスコンテナ | バイオマス計量ホッパ | バイオマス切出機 | バイオマス計量機 | バイオマス搬送機 | 汚泥バイオマス混合搬送機 | 汚泥バイオマス混合計量機 | バイオマスポンプ押込機 | バイオマス圧送ポンプ | 油圧ユニット | 汚泥ケーキ押込機 |
| 型式 | 箱型 | バドル式 | 一輪ねじ式 | ロードセル | 円筒型 | スライディングフレーム | 一輪スクリュウ式 | ロードセル | スクリュウコンベア | バドル式 | ロードセル | 二輪スクリュウ(一輪送給可) | ピストン式 | 油圧駆動装置 | 二輪スクリュウ式 |
| 仕様 | 1.0m ³ 約300kg | 約1.6m ³ 9.1RPM | 0.2~0.5m ³ /h 100A | 2.0x2.0m 最大計測50t | 約1m ³ | 約1.6m ³ | 約0.7kg/min(D.B.) 約1.4kg/min(W.B.) 4.1RPM | 1.2x1.2m 最大計測1.0t 最低読取0.5kg | 250φx4500mm | 約1.5m ³ 14RPM | 最大計測2.0t 最低読取1kg | 約3.4m ³ 回転 36RPM | 0.4MPa 2m ³ /h 200A | - | 225 ?/h |
| 電動機 | - | 7.5kWx200V | 3.7kWx200V インバータ | - | - | 0.75kWx200V | 1.5kWx200V インバータ | - | 1.5kW | 1.5kWx200Vx2 | - | 0.4kWx200Vx2 インバータ | - | 30kWx200V | 0.4kWx200V |
| 数量 | 3台 | 1基 | 1基 | 1台 | - | 1基 | 1基 | 1台 | 1台 | 1基 | 1台 | 1基 | 1台 | 1台 | 1基 |
| 備考 | 汚泥搬送用 | レベルスイッチ付 | - | 4~20mA出力 | バイオマス搬送用 | バイオマス定量供給機 | 4~20mA出力 | - | - | バイオマス混合搬送装置 | 逆流防止ゲート付 | - | - | - | - |

図-5.1.3 汚泥・バイオマス供給装置 (2010年度)

5. 2 混焼による補助燃料の削減効果

汚泥に草木系バイオマスを混合して焼却することで、補助燃料の使用量を削減することができることを、2007年度までに確認した¹⁾。2008年度以降においては、牧草、チップ、刈草との混焼試験を実施し、このデータを補完した。また得られた焼却灰について、資源化研究（第7章）を実施した。これに伴い、刈草との追加の混焼試験を実施した。ここでは、混焼試験結果および補助燃料削減効果等についてまとめる。

(1) バイオマス性状と汚泥バイオマス混合比率

使用したバイオマスの種類と性状を表-5.2.1に示す。草類としては、牧草（牛の食用として刈り取られたもの）、チップ、刈草（長万部終末処理場の敷地内にて採取）を使用した。チップは風乾燥等によって一定期間乾燥を行い、牧草、刈草については破砕機（株式会社力緑産製、バイオチョッパーミキサー）により5cm程度まで破砕してから使用した。

表-5.2.1 バイオマス性状

| バイオマス種類 | 牧草 | チップ | 刈草 | | |
|----------------|--------|--------|--------|--------|------|
| | | | (生) | (天日乾燥) | |
| 含水率[%] | 13.3 | 39.5 | 62.0 | 56.8 | |
| 強熱減量[%] | 93.5 | 99.6 | 93.3 | 93.3 | |
| 高位発熱量[kJ/kgDS] | 17,800 | 19,400 | 18,200 | 19,800 | |
| 組成 [%-DS] | C | 43.9 | 48.3 | 43.8 | 43.1 |
| | H | 6.0 | 6.2 | 5.6 | 6.6 |
| | N | 1.3 | <0.1 | 0.75 | 0.84 |
| | O | 45.1 | 48.2 | 42.7 | 42.3 |
| | S | 0.12 | <0.01 | 0.11 | 0.47 |
| | Cl | 0.45 | <0.01 | 0.51 | 0.20 |

各実験における汚泥とバイオマスの質量比および、それらの焼却時間を表-5.2.2に示す。なお、以降、表中および単位のDS（Dry Solid）は、バイオマス等が水分を含まない乾燥状態であることを表す。

供給量は、汚泥とバイオマスの合計で炉の定格である180kg/h前後である。

表-5.2.2 バイオマス供給量

| バイオマス種類 | | 混焼質量比 | 固形物比 | 焼却時間 |
|---------|--------|----------|----------|------|
| | | 汚泥:バイオマス | 汚泥:バイオマス | |
| 牧草 | | 8.8:1 | 1.4:1 | 14 |
| チップ | | 2.9:1 | 0.7:1 | 7 |
| | | 2.4:1 | 0.6:1 | 3 |
| 刈草 | (生) | 5.6:1 | 1.9:1 | 7 |
| | (天日乾燥) | 3.9:1 | 1.3:1 | 7 |

(2) 炉内温度と燃烧空気および炉出口ガス圧力の経時変化

各混焼試験の結果を図-5.2.1 から図-5.2.3 に示す。

牧草を混焼した場合の炉内状況として、砂層温度、フリーボード (FB) 温度、炉出口温度および炉出口、燃烧空気圧力の経時変化を図-5.2.1 に示す。この際の汚泥と牧草の乾燥重量比は、汚泥：牧草=1.4：1 (DS)である。

炉内温度は 800~950℃で推移し、FB 温度 (1) が最も高い温度であった。また、砂層温度は約 800℃で安定して (制御温度にて) 推移した。(重油流量の変動が、炉内温度制御を示すものである。)

また、一時的に供給が低下 (図-5.2.1 における炉内圧力の低下) においても、系内は焼却を継続し、燃烧温度 (砂層温度) が安定した焼却となっていることがわかる。

燃烧空気圧力は約 0.1MPaG、炉出口ガス圧力は約 0.09MPaG で安定的に推移した。

供給系においては、混合機パドル軸への汚泥・バイオマス混合物の固着という事象が安定供給において妨げとなることがわかった。特に固着しはじめの状態から時間の経過とともに混合時間が長くなり、粘度増加すると固着がより顕著となり、課題となったことから、図-5.1.1~3 に示す混合装置の改良により対応した。

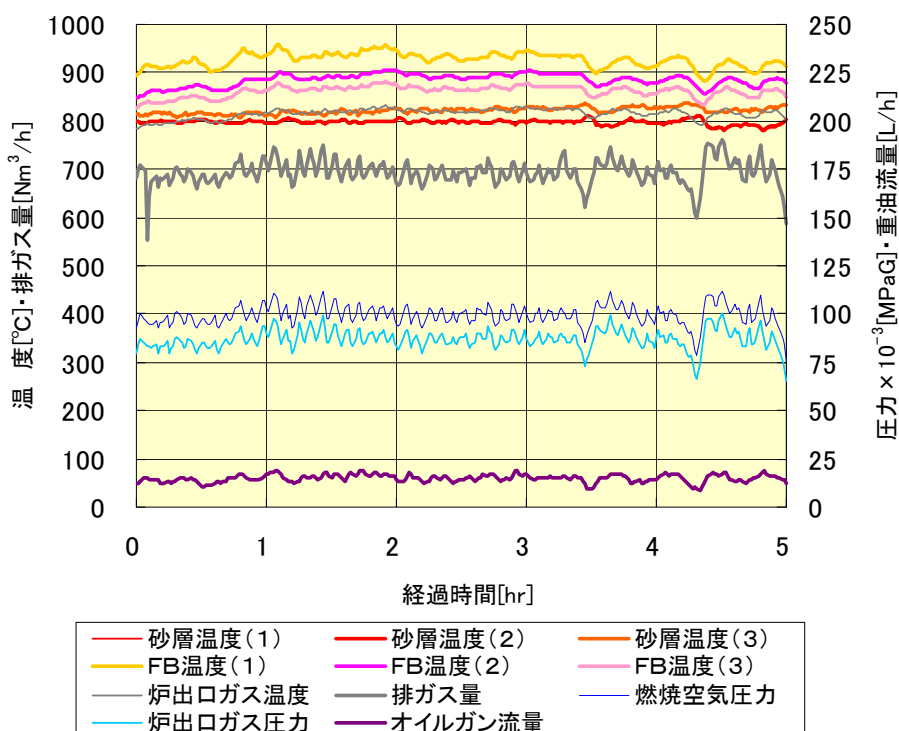


図-5.2.1 牧草混焼における温度・圧力変化

チップを混焼した場合の砂層温度、フリーボード (FB) 温度、炉出口温度および炉出口、
 燃烧空気圧力の経時変化を図-5.2.2 に示す。この際の汚泥とチップの乾燥重量比は、汚泥：
 チップ=0.5：1 (DS)である。それぞれの温度は 750~980℃で推移し、FB 温度 (1) が最も
 高い温度であった。

この試験では、重油の供給量を一定 (1~3 時間) として、供給物の状況に応じた炉内状況
 の確認をしている。炉内への混合物の供給が安定しているから、各温度は安定して推移し
 た。

また、燃烧空気圧力、炉出口ガス圧力は約 0.1MPaG で安定的に推移した。

供給系においては、混合機パドル軸への汚泥・バイオマス混合物の固着という事象がこ
 の試験では極めて影響が小さい結果であった。また、牧草における試験と異なり、チップ
 の場合は混合時間が牧草同様でも粘度増加は限定的であり、搬送性は牧草に比べ良好であ
 った。

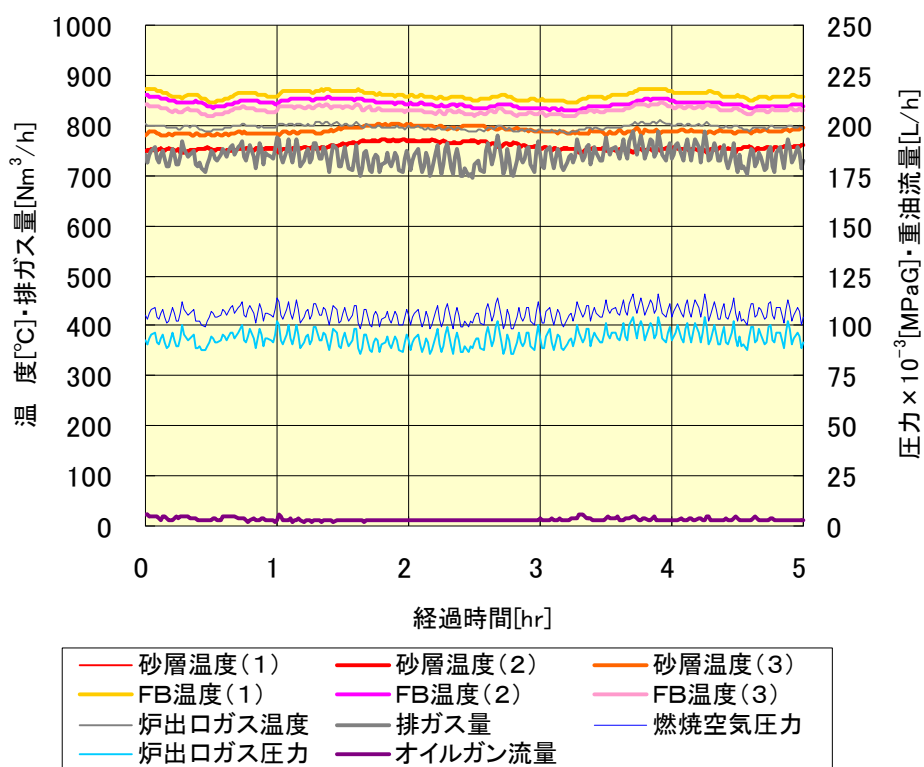


図-5.2.2 チップ混焼における温度・圧力変化

刈草（生）を混焼した場合の砂層温度、フリーボード（FB）温度、炉出口温度および炉出口、燃焼空気圧力の経時変化を図-5.2.3に示す。

グラフ左が刈草（生）、右が刈草（天日乾燥）の結果である。

刈草（生）の乾燥重量比は、汚泥：刈草=1.9:1(DS)、刈草（天日乾燥）の乾燥重量比は、汚泥：刈草=1.3:1(DS)である。

炉内温度は780~930℃で推移し、FB温度（1）が最も高い温度であった。また、特に砂層温度は安定して（制御温度にて）推移した。

燃焼空気圧力は約0.1~0.12MPaG、炉出口ガス圧力は約0.09~0.1MPaGで安定的に推移した。この差圧は流動層の砂層圧であり、本試験では砂層圧を若干高めに運転を行った。

この両試験においては、供給系を前述の図-5.1.3の改良による、混合機に仕切り板による汚泥バイオマス混合装置ホoppa容量を半分とすることで、汚泥とバイオマスの混ざり過ぎによる粘度増加を抑制し実施した。これにより、供給系の運用において大きく改善した。

図-5.2.3左側が供給系改良後最初の試験であり、炉内供給までの供給系の詳細な設定、調整過程であったことから、燃焼物質（混合物）の供給変動により幅がある炉内状態となった。

その場合においても、系内はその変動に応じた運転が行われ、焼却の継続性においても問題は無い。これは、供給の変動に対して許容が大きい加圧流動炉の特徴である。

右側は、供給系の詳細な設定、調整によるものであり、混合物を燃焼する場合においては極めて変動幅の少ない良好な運転となった。

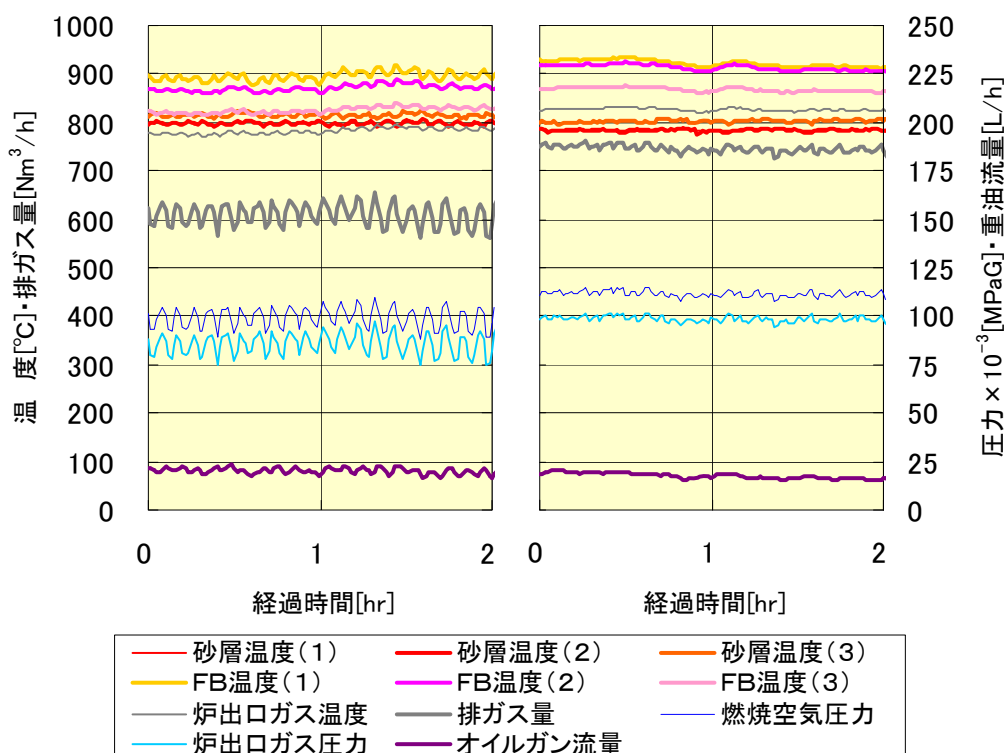


図-5.2.3 刈草における温度・圧力変化

(3) 汚泥・バイオマス混焼による重油削減効果

汚泥とバイオマスの混焼時の補助燃料削減効果を図-5.2.4 に示す（2007 年度までに得たデータも記載）。縦軸は、炉内総熱量に対する重油の熱量（顕熱量と燃焼熱量）の比率であり、横軸は、炉内総熱量に対するバイオマスの熱量（顕熱量と燃焼熱量）の比率である。ここで、炉内総熱量とは、下水汚泥、バイオマス、補助燃料の顕熱量および燃焼熱量と、炉へ供給される燃焼空気、水、機器冷却用（パージ）空気の顕熱量の合計である。

本試験における汚泥のみの焼却では、炉内総熱量と重油の熱量の比率は 0.5～0.6 程度である。炉内総熱量とバイオマスの熱量の比率が大きくなるに従い、すなわち、下水汚泥に含まれるバイオマスの割合が高くなるに従い、補助燃料と炉内総熱量の比率は小さくなる。これによって、下水汚泥とバイオマスを混合焼却によって、下水汚泥のみの焼却に必要な供給重油量を削減できることが分かる。

2008 年度以降では、炉内総熱量と重油の熱量が 0.08 程度の試験データを補完した。

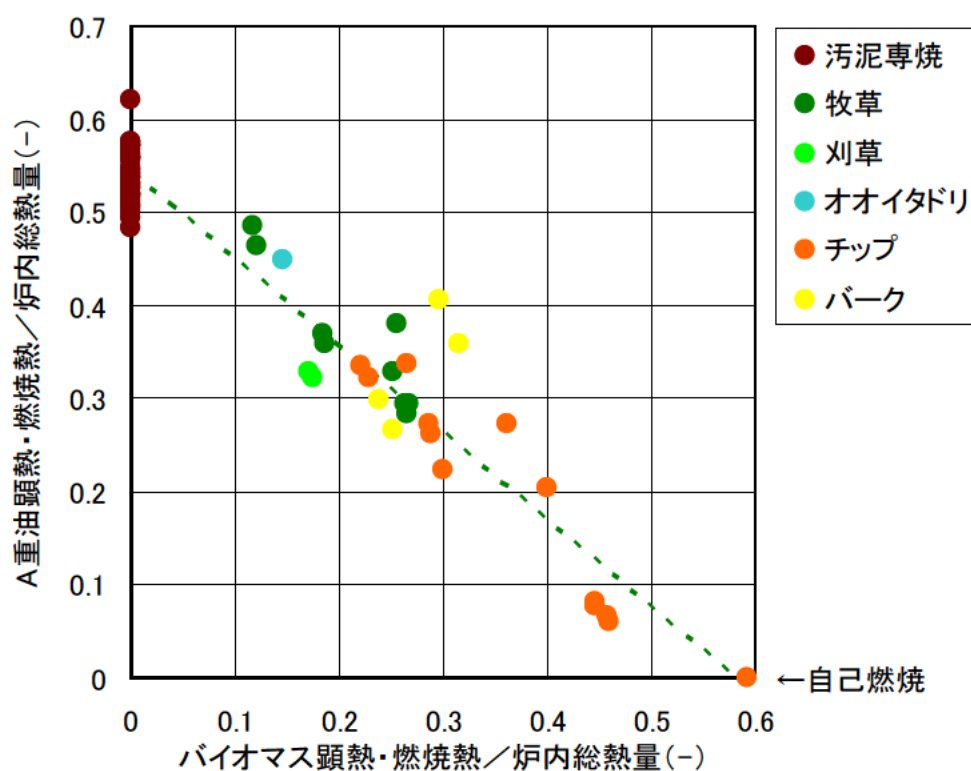


図-5.2.4 汚泥バイオマス混焼による重油削減効果

(4) 汚泥・バイオマス混焼時の排ガス性状

a. ばいじん、硫黄酸化物、窒素酸化物、塩化水素

汚泥・バイオマス混焼時におけるばいじん、硫黄酸化物(SOx)、窒素酸化物(NOx)および塩化水素濃度の測定結果を表-5.2.3 に示す。汚泥専焼と同様に、汚泥バイオマス混焼時においても、各排ガス濃度は規制基準値以下となっている。

表-5.2.3 有害性物質の測定結果
(長万部汚泥と牧草・刈草(生)混焼時)

| 測定物質 | 単位 | | 測定値 | | 規制基準値 |
|------|---------------------------------|---------|-------|-------|-------|
| | | | 牧草 | 刈草 | |
| ばいじん | g/m ³ _N | 実測値 | <0.01 | 0.021 | — |
| | | 酸素12%換算 | <0.01 | 0.014 | 0.15 |
| SOx | volppm | 実測値 | 780 | 230 | — |
| | m ³ _N /hr | 排出量 | 0.62 | 0.33 | 2.01 |
| NOx | volppm | 実測値 | 71 | 73 | — |
| | | 酸素12%換算 | 51 | 50 | 250 |
| 塩化水素 | mg/m ³ _N | 実測値 | 39 | 70 | — |
| | | 酸素12%換算 | 28 | 50 | 700 |

※SOx 排出量の規制基準値は、排ガス流量とK値から算定したものである。

b. ダイオキシン

汚泥と牧草・刈草の混焼時におけるダイオキシン類濃度の測定結果を表-5.2.4、表-5.2.5に示す。実証設備のダイオキシン類排出基準値は、廃棄物焼却炉で焼却能力 2t/h未滿の新設施設基準に該当するので 5ng-TEQ/m³_Nである。分析結果から規制値を満足している。

表-5.2.4 長万部汚泥と牧草による混焼時のダイオキシン類の測定結果

| 測定項目 | 牧草混焼 | 毒性等価係数 | 毒性等量 |
|---------------------|-------------------------------|---------|------------------------|
| | | | ng-TEQ/Nm ³ |
| ダイオキシン | 2,3,7,8-TeCDD | 1 | 0.00028 |
| | 1,2,3,7,8-PeCDD | 1 | 0.0008 |
| | 1,2,3,4,7,8-HxCDD | 0.1 | < 0.0001 |
| | 1,2,3,6,7,8-HxCDD | 0.1 | 0.00017 |
| | 1,2,3,7,8,9-HxCDD | 0.1 | 0.00015 |
| | 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD | 0.01 | 0.00024 |
| | 1,2,3,4,6,7,8,9-OCDD | 0.0003 | 0.0000201 |
| | Total PCDDs | | 0.0017 |
| ジベンゾフラン | 2,3,7,8-TeCDF | 0.1 | 0.00041 |
| | 1,2,3,7,8+1,2,3,4,8-PeCDF | 0.03 | 0.000138 |
| | 2,3,4,7,8-PeCDF | 0.3 | 0.00132 |
| | 1,2,3,4,7,8+1,2,3,4,7,9-HxCDF | 0.1 | 0.00075 |
| | 1,2,3,6,7,8-HxCDF | 0.1 | 0.00067 |
| | 1,2,3,7,8,9-HxCDF | 0.1 | 0.0001 |
| | 2,3,4,6,7,8-HxCDF | 0.1 | 0.0015 |
| | 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF | 0.01 | 0.00032 |
| | 1,2,3,4,7,8,9-HpCDF | 0.01 | 0.00013 |
| | 1,2,3,4,6,7,8,9-OCDF | 0.0003 | 0.0000174 |
| | Total PCDFs | | 0.0054 |
| コプラナーPCB | 3,3',4,4'-TCB(#77) | 0.0001 | 0.000001 |
| | 3,4,4',5'-TCB(#81) | 0.0003 | 0.00000099 |
| | 3,3',4,4',5'-PeCB(#126) | 0.1 | 0.00026 |
| | 3,3',4,4',5,5'-HxCB(#169) | 0.03 | 0.000021 |
| | 2,3,3',4,4'-PeCB(#105) | 0.00003 | 0.000000207 |
| | 2,3,4,4',5'-PeCB(#114) | 0.00003 | 0.000000018 |
| | 2,3',4,4',5'-PeCB(#118) | 0.00003 | 0.000000036 |
| | 2',3,4,4',5'-PeCB(#123) | 0.00003 | 0.000000039 |
| | 2,3,3',4,4',5'-HxCB(#156) | 0.00003 | 0.000000042 |
| | 2,3,3',4,4',5',5'-HxCB(#157) | 0.00003 | < 0.00000002 |
| | 2,3',4,4',5,5'-HxCB(#167) | 0.00003 | 0.000000039 |
| | 2,3,3',4,4',5,5'-HpCB(#189) | 0.00003 | < 0.00000002 |
| Total Coplanar PCBs | | 0.00028 | |
| 合計 | | | 0.0073 |

表-5.2.5 長万部汚泥と刈草（生）による混焼時のダイオキシン類の測定結果

| 測定項目 | 刈草混焼 | 毒性等価係数 | 毒性等量 |
|---------------------|-------------------------------|------------|------------------------|
| | | | ng-TEQ/Nm ³ |
| ダイオキシン | 2,3,7,8-TeCDD | 1 | 0 |
| | 1,2,3,7,8-PeCDD | 1 | 0.022 |
| | 1,2,3,4,7,8-HxCDD | 0.1 | 0.0042 |
| | 1,2,3,6,7,8-HxCDD | 0.1 | 0.0069 |
| | 1,2,3,7,8,9-HxCDD | 0.1 | 0.0044 |
| | 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD | 0.01 | 0.0038 |
| | 1,2,3,4,6,7,8,9-OCDD | 0.0003 | 0.000063 |
| | Total PCDDs | | 0.041363 |
| ジベンゾフラン | 2,3,7,8-TeCDF | 0.1 | 0.0021 |
| | 1,2,3,7,8+1,2,3,4,8-PeCDF | 0.03 | 0.00177 |
| | 2,3,4,7,8-PeCDF | 0.3 | 0.0207 |
| | 1,2,3,4,7,8+1,2,3,4,7,9-HxCDF | 0.1 | 0.0097 |
| | 1,2,3,6,7,8-HxCDF | 0.1 | 0.011 |
| | 1,2,3,7,8,9-HxCDF | 0.1 | 0.0012 |
| | 2,3,4,6,7,8-HxCDF | 0.1 | 0.014 |
| | 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF | 0.01 | 0.0024 |
| | 1,2,3,4,7,8,9-HpCDF | 0.01 | 0.00039 |
| | 1,2,3,4,6,7,8,9-OCDF | 0.0003 | 0.0000144 |
| | Total PCDFs | | 0.0632744 |
| コプラナーPCB | 3,3',4,4'-TCB(#77) | 0.0001 | 0.0000038 |
| | 3,4,4',5'-TCB(#81) | 0.0003 | 0 |
| | 3,3',4,4',5'-PeCB(#126) | 0.1 | 0.0017 |
| | 3,3',4,4',5,5'-HxCB(#169) | 0.03 | 0.00051 |
| | 2,3,3',4,4'-PeCB(#105) | 0.00003 | 0 |
| | 2,3,4,4',5'-PeCB(#114) | 0.00003 | 0 |
| | 2,3',4,4',5'-PeCB(#118) | 0.00003 | 0.0000009 |
| | 2',3,4,4',5'-PeCB(#123) | 0.00003 | 0 |
| | 2,3,3',4,4',5'-HxCB(#156) | 0.00003 | 0 |
| | 2,3,3',4,4',5'-HxCB(#157) | 0.00003 | 0 |
| | 2,3',4,4',5,5'-HxCB(#167) | 0.00003 | 0 |
| | 2,3,3',4,4',5,5'-HpCB(#189) | 0.00003 | 0.00000036 |
| Total Coplanar PCBs | | 0.00221506 | |
| 合計 | | | 0.11 |

(5) 汚泥・バイオマス混焼時の灰性状

バイオマス混焼時の灰性状を表-5.2.6に、重金属溶出試験を表-5.2.7に示す。

参考として汚泥専焼時灰性状を併記する。

重金属溶出試験結果は、汚泥専焼との比較で大きな差異は生じていない。

表-5.2.6 バイオマス混焼時の灰性状（汚泥は長万部汚泥専焼時）

| バイオマス種類 | 牧草 | チップ | 刈草 (生) | 汚泥 | 汚泥 | |
|-----------------------|--------------------------------|-------|-----------|-------|-------|-------|
| 混焼DS比 (汚泥:バイオマス) | 1.4:1 | 0.7:1 | 1.9:1 | - | - | |
| 強熱減量[%] | 0.23 | 0.23 | 0.34 | 0.33 | 0.27 | |
| 灰分[%] | 99.09 | 98.83 | 99.25 | 98.90 | 98.97 | |
| 比重[-] | 0.871 | 0.686 | 0.839 | 0.837 | 0.752 | |
| 平均粒径[μm] | 104.0 | 97.1 | 150 | 76.6 | 106 | |
| 成分 [%] | SiO ₂ | 34.62 | 30.42 | 36.2 | 32.11 | 31.8 |
| | Al ₂ O ₃ | 10.17 | 9.48 | 9.71 | 11.18 | 10.4 |
| | CaO | 6.94 | 8.11 | 6.29 | 7.34 | 7.68 |
| | MgO | 2.77 | 3.24 | 2.71 | 2.92 | 3.33 |
| | Fe ₂ O ₃ | 5.98 | 5.53 | 5.56 | 5.28 | 5.66 |
| | K ₂ O | 2.61 | 3.90 | 1.61 | 2.13 | 1.81 |
| | Na ₂ O | 0.68 | 0.81 | 0.58 | 0.71 | 0.79 |
| | P ₂ O ₅ | 21.91 | 23.98 | 19.02 | 23.16 | 23.11 |

表-5.2.7 焼却灰の重金属溶出試験結果（環告13号）

| | | 試験結果 | | | | | 埋立 基準 |
|------------------|------|---------|---------|-----------------|---------|---------|----------|
| | | 牧草混焼 | チップ混焼 | 刈草 (生) 混焼 | 汚泥専焼 | 汚泥専焼 | |
| Pb | mg/L | <0.005 | <0.005 | <0.005 | <0.005 | <0.005 | 0.3 |
| Cd | | <0.005 | <0.005 | <0.005 | 0.007 | 0.009 | 0.3 |
| Hg | | <0.0005 | <0.0005 | <0.0005 | <0.0005 | <0.0005 | 0.005 |
| As | | 0.14 | 0.20 | 0.10 | 0.10 | 0.12 | 0.3 |
| Cr ⁶⁺ | | <0.005 | <0.005 | <0.005 | <0.005 | <0.005 | 1.5 |
| Se | | 0.002 | 0.002 | 0.002 | <0.001 | 0.001 | 0.3 |

また、汚泥と牧草・刈草の混焼灰中のダイオキシン類濃度(含有量)は、毒性等量に換算すると、0ng-TEQ/gであった(表-5.2.8、表-5.2.9)。規制値は3ng-TEQ/gであるから規制値を満足している。

表-5.2.8 長万部汚泥と牧草混焼による灰のダイオキシン類の測定結果

| 測定項目 | 牧草混焼 | 毒性等価係数 | 毒性等量 |
|----------|-------------------------------|---------|-------------|
| | | | ng-TEQ/g |
| ダイオキシン | 2,3,7,8-TeCDD | 1 | < 0.02 |
| | 1,2,3,7,8-PeCDD | 1 | < 0.03 |
| | 1,2,3,4,7,8-HxCDD | 0.1 | < 0.002 |
| | 1,2,3,6,7,8-HxCDD | 0.1 | < 0.002 |
| | 1,2,3,7,8,9-HxCDD | 0.1 | < 0.002 |
| | 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD | 0.01 | < 0.0002 |
| | 1,2,3,4,6,7,8,9-OCDD | 0.0003 | < 0.000054 |
| | Total PCDDs | | 0 |
| ジベンゾフラン | 2,3,7,8-TeCDF | 0.1 | < 0.001 |
| | 1,2,3,7,8+1,2,3,4,8-PeCDF | 0.03 | < 0.0003 |
| | 2,3,4,7,8-PeCDF | 0.3 | < 0.003 |
| | 1,2,3,4,7,8+1,2,3,4,7,9-HxCDF | 0.1 | < 0.003 |
| | 1,2,3,6,7,8-HxCDF | 0.1 | < 0.003 |
| | 1,2,3,7,8,9-HxCDF | 0.1 | < 0.001 |
| | 2,3,4,6,7,8-HxCDF | 0.1 | < 0.002 |
| | 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF | 0.01 | < 0.0001 |
| | 1,2,3,4,7,8,9-HpCDF | 0.01 | < 0.0001 |
| | 1,2,3,4,6,7,8,9-OCDF | 0.0003 | < 0.000012 |
| | Total PCDFs | | 0 |
| コプラナーPCB | 3,3',4,4'-TCB(#77) | 0.0001 | < 0.000004 |
| | 3,4,4',5'-TCB(#81) | 0.0003 | < 0.000003 |
| | 3,3',4,4',5'-PeCB(#126) | 0.1 | < 0.002 |
| | 3,3',4,4',5,5'-HxCB(#169) | 0.03 | < 0.0006 |
| | 2,3,3',4,4'-PeCB(#105) | 0.00003 | < 0.0000027 |
| | 2,3,4,4',5'-PeCB(#114) | 0.00003 | < 0.0000009 |
| | 2,3',4,4',5'-PeCB(#118) | 0.00003 | < 0.000012 |
| | 2',3,4,4',5'-PeCB(#123) | 0.00003 | < 0.0000003 |
| | 2,3,3',4,4',5'-HxCB(#156) | 0.00003 | < 0.0000009 |
| | 2,3,3',4,4',5'-HxCB(#157) | 0.00003 | < 0.0000006 |
| | 2,3',4,4',5,5'-HxCB(#167) | 0.00003 | < 0.0000003 |
| | 2,3,3',4,4',5,5'-HpCB(#189) | 0.00003 | < 0.0000009 |
| | Total Coplanar PCBs | | 0 |
| 合計 | | | 0 |

表-5.2.9 長万部汚泥と刈草（生）混焼による灰のダイオキシン類の測定結果

| 測定項目 | 刈草混焼 | 毒性等価係数 | 毒性等量 |
|---------------------|-------------------------------|---------|----------|
| | | | ng-TEQ/g |
| ダイオキシン | 2,3,7,8-TeCDD | 1 | 0 |
| | 1,2,3,7,8-PeCDD | 1 | 0 |
| | 1,2,3,4,7,8-HxCDD | 0.1 | 0 |
| | 1,2,3,6,7,8-HxCDD | 0.1 | 0 |
| | 1,2,3,7,8,9-HxCDD | 0.1 | 0 |
| | 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD | 0.01 | 0 |
| | 1,2,3,4,6,7,8,9-OCDD | 0.0003 | 0 |
| | Total PCDDs | | 0 |
| ジベンゾフラン | 2,3,7,8-TeCDF | 0.1 | 0 |
| | 1,2,3,7,8+1,2,3,4,8-PeCDF | 0.03 | 0 |
| | 2,3,4,7,8-PeCDF | 0.3 | 0 |
| | 1,2,3,4,7,8+1,2,3,4,7,9-HxCDF | 0.1 | 0 |
| | 1,2,3,6,7,8-HxCDF | 0.1 | 0 |
| | 1,2,3,7,8,9-HxCDF | 0.1 | 0 |
| | 2,3,4,6,7,8-HxCDF | 0.1 | 0 |
| | 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF | 0.01 | 0 |
| | 1,2,3,4,7,8,9-HpCDF | 0.01 | 0 |
| | 1,2,3,4,6,7,8,9-OCDF | 0.0003 | 0 |
| | Total PCDFs | | 0 |
| コプラナーPCB | 3,3',4,4'-TCB(#77) | 0.0001 | 0 |
| | 3,4,4',5-TCB(#81) | 0.0003 | 0 |
| | 3,3',4,4',5-PeCB(#126) | 0.1 | 0 |
| | 3,3',4,4',5,5'-HxCB(#169) | 0.03 | 0 |
| | 2,3,3',4,4'-PeCB(#105) | 0.00003 | 0 |
| | 2,3,4,4',5-PeCB(#114) | 0.00003 | 0 |
| | 2,3',4,4',5-PeCB(#118) | 0.00003 | 0 |
| | 2',3,4,4',5-PeCB(#123) | 0.00003 | 0 |
| | 2,3,3',4,4',5-HxCB(#156) | 0.00003 | 0 |
| | 2,3,3',4,4',5'-HxCB(#157) | 0.00003 | 0 |
| | 2,3',4,4',5,5'-HxCB(#167) | 0.00003 | 0 |
| | 2,3,3',4,4',5,5'-HpCB(#189) | 0.00003 | 0 |
| Total Coplanar PCBs | | 0 | |
| 合計 | | | 0 |

5. 3 まとめ

1) 汚泥・バイオマスの供給手法の検証

草木系バイオマスを補助燃料として汚泥と混焼することを目的として、本研究では間隙が大きくシール性に難がある含水率の低いバイオマスを汚泥と予混合し、炉内圧力が0.15MPaG程度の過給式流動炉への供給について実証、確認をした。

バイオマスとの予混合により、汚泥の粘度が高まり、その搬送性が著しく低下した場合においても、搬送装置の改良により、バイオマス・汚泥の圧密や混ざり過ぎを防止することで容易に搬送を可能とすることが確認できた。

2) 混焼による補助燃料の削減効果

草木系バイオマスを補助燃料として汚泥と混焼することにより、従来から汚泥焼却に使用されてきた化石燃料（重油や都市ガスなどの補助燃料）使用量の削減について検証し、削減可能であることを確認した。

3) 混焼による排ガス・焼却灰性状の検証

草木系バイオマスを補助燃料として汚泥と混焼することによる排ガスや焼却灰の性状について測定し、規制基準値を満足する良好な結果が得られた。

発生する焼却灰性状から、含有する成分による資源化についても検証した。(第7章資源化研究)

参考文献

- 1) 平成17年度～19年度 NEDO 成果報告書：都市バイオマス収集システムを活用するためのエネルギー転換要素技術開発,2008

第6章 草木系バイオマスの資源管理システムの検討

6.1 はじめに

河川、道路、公園等の公共緑地の整備・管理過程で発生する刈草や剪定枝等の草木廃材は、エネルギー賦存量が大きく、エネルギー消費が大きい都市域周辺で安定的に発生することから、利用価値の高い優良資源と言えるが、現状では利用があまり進んでいない。地球温暖化対策や地域資源利用の観点から、安定的な利用を行っていくための資源管理システムの構築が求められている。

本章では、持続可能な資源管理システム構築のための基礎的検討として実施した草木系バイオマスの組成や発生原単位調査結果について述べる。

6.2 草木系バイオマスの実態調査

公共管理過程で発生する未利用の草木系バイオマスの資源利用を進めるためには、発生状況（量・時期・場所）、バイオマス性状を把握し、状況に即した管理手法を採る必要があることから、バイオマスの組成性状や発生量に関する調査を行った。

6.2.1 組成性状

(1) 組成分析（生試料、植物種別）

① 方法

北海道から九州までの国直轄の10河川と11国道、北海道南部陣屋川、長万部終末処理場敷地ならびに独立行政法人土木研究所構内において、直接83種98検体を採取し、植物種別に生試料の分析を行った¹⁾。

採取した試料は、水分と強熱減量を測定するとともに、風乾して粗粉碎、微粉碎を施し、高位発熱量のほかN, C, H, S, Oなどの主要構成元素からCa, K, Mg, Na, P, Si, Fe, B, Al, Mn, Zn, Sr, Ba, Cr, Ni, Cu, Mo, Co, Pb, Li, V, Cd, As, Se, Sn, Be, Ag, In, Sb, Te, Tl, Uなどの微量ならびに極微量元素までを分析した。熱量分析にはボンブ熱量計を用い、元素分析にはC-H-N-O-S元素分析計、ICP分析計およびICP/MS分析計を用いた。

② 結果

水分、強熱減量、高位発熱量の取りまとめ結果を表6.2.1に示す。草木類バイオマスの資源化を検討する際の伐採時における生資材の値としては、中央値から±10%の範囲内にある表6.2.3に示す値を用いて良いものと思われる。高位発熱量は17,500～19,600kJ/kg-乾重

(4,180～4,680kcal/kg-乾重)であり、値が極端に低いスギナ、オオブタクサなどを除くと、エネルギー作物として注目されているソルガム：約4,200kcal/kg、ケンタッキーブルーグラス：約4,480kcal/kg、キャッサバ：約4,180kcal/kgと類似の熱量を有している。

また、草本及び木本類の主要元素に関して、集計結果を表-6.2.2、表-6.2.3 及び表-6.2.4 に示す。無機元素の結果はミネラルを豊富に含有していることを示している。後ほど、第7章で下水汚泥と草本系バイオマスの混焼灰の肥料資源化について述べるが、焼却灰の高付加価値化の観点からは、カリウムを多く含有した草本系バイオマスが混焼バイオマスとして有望であると言える。また、これらの元素以外に25元素の分析を行った。これらの個々の分析値は前掲の水分や強熱減量、高位発熱量の結果も含めて土木研究所資料「草本系バイオマスの組成分析データ集」²⁾にとりまとめた。

表-6.2.1 草本類バイオマスの資源化検討用の値

(生資材分析値：中央値±10%の値)

| | 水分 (%-全重) | 強熱減量 (%-乾重) | 高位発熱量 (kJ/kg-乾重) |
|----------|--------------|----------------|---------------------|
| 草 本 | 67~73 | 91~93 | 17,500~18,100 |
| 木本(木幹) | 48~52 | 91~97 | 18,700~19,100 |
| 木本(小枝・葉) | 58~62 | 89~94 | 19,000~19,600 |

表一6.2.2 草本類に関する主要元素の集計結果

| | N (%-乾重) | C | H | S | O | Ca (g/kg-乾重) | | | Mg | Na | P | Si (mg/kg-乾重) | Fe |
|------|--------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-----------------|---------------|--------------|--------------|--------------|-------------|------------------|----|
| 最大値 | 3.80 | 49.1 | 6.20 | 0.1779 | 45.8 | 22,200 | 56,100 | 5,190 | 20,400 | 4,180 | 50.1 | 1,123 | |
| 最小値 | 0.362 | 34.6 | 4.50 | 0.0000 | 27.7 | 480 | 4,700 | 570 | 0 | 350 | 0.091 | 24.5 | |
| 中央値 | 1.345 | 44.2 | 5.62 | 0.0000 | 41.4 | 5,310 | 16,880 | 1,540 | 270 | 1,500 | 6.88 | 129.4 | |
| 平均値 | 1.474 | 44.1 | 5.62 | 0.0079 | 41.4 | 7,240 | 18,290 | 1,902 | 1,198 | 1,675 | 9.71 | 182 | |
| 標準偏差 | 0.73 | 2.4 | 0.32 | 0.033 | 2.66 | 5,540 | 11,100 | 1,160 | 3,120 | 947 | 9.6 | 188 | |

表一6.2.3 木本類の木幹部に関する主要元素の集計結果

| | N (%-乾重) | C | H | S | O | Ca (g/kg-乾重) | | | Mg | Na | P | Si (mg/kg-乾重) | Fe |
|------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-----------------|--------------|------------|-------------|------------|--------------|------------------|----|
| 試料部位 | | | | | | | | | | | | | |
| 最大値 | 1.052 | 49.5 | 6.30 | 0.000 | 48.3 | 11,560 | 10,550 | 2,270 | 364 | 984 | 11.33 | 537 | |
| 最小値 | 0.146 | 46.0 | 5.70 | 0.000 | 41.4 | 0.00 | 1,023 | 164 | 0 | 156 | 0.090 | 0.00 | |
| 中央値 | 0.432 | 47.4 | 5.92 | 0.000 | 43.1 | 7,150 | 3,020 | 547 | 33 | 562 | 1.108 | 57.3 | |
| 平均値 | 0.483 | 47.4 | 5.96 | 0.000 | 43.5 | 7,570 | 3,510 | 639 | 68.6 | 539 | 1.585 | 87.8 | |
| 標準偏差 | 0.21 | 0.94 | 0.18 | 0.00 | 1.63 | 5,400 | 2,040 | 440 | 105 | 230 | 2.40 | 122 | |

表一6.2.4 木本類の小枝・葉部に関する主要元素の集計結果

| | N (%-乾重) | C | H | S | O | Ca (g/kg-乾重) | | | Mg | Na | P | Si (mg/kg-乾重) | Fe |
|------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|------------|-------------|------------------|----|
| 最大値 | 3.51 | 51.3 | 6.50 | 0.072 | 42.7 | 18,840 | 13,150 | 3,040 | 1,138 | 1,468 | 12.97 | 757 | |
| 最小値 | 0.783 | 43.6 | 5.51 | 0.000 | 37.4 | 1,395 | 4,670 | 464 | 0.00 | 459 | 0.459 | 51.0 | |
| 中央値 | 1.576 | 48.1 | 5.88 | 0.000 | 41.2 | 7,290 | 6,830 | 1,381 | 39.1 | 847 | 1.111 | 127.0 | |
| 平均値 | 1.815 | 47.9 | 5.88 | 0.003 | 40.8 | 8,850 | 7,400 | 1,536 | 170.2 | 925 | 2.69 | 186.8 | |
| 標準偏差 | 0.75 | 1.75 | 0.26 | 0.015 | 1.37 | 5,100 | 2,800 | 790 | 350 | 320 | 3.8 | 210 | |

(2) 組成分析 (公共管理由来試料)

① 方法

北海道から九州までの国直轄の10河川事務所及び13国道事務所より、公共管理に伴い発生した刈草や剪定枝葉を収集し、理化学分析を実施した³⁾。試料については河川事務所より86試料、国道事務所より46試料を得た。各試料の採取にあたっては、その工区の標準的な試料となるよう配合の上、分析した。理化学分析のフローを図-6.2.1に示す。採取してきた試料は、生の状態の重量を測定した後、試料毎に一週間ほど風乾させ、それぞれの植物の部位を平均に混合し、1cm以下に裁断した後、フードミルである程度粉碎してから雷かい機及び高速微粉碎器 (ワンダーブレンダー) にて再度微粉碎化させた。

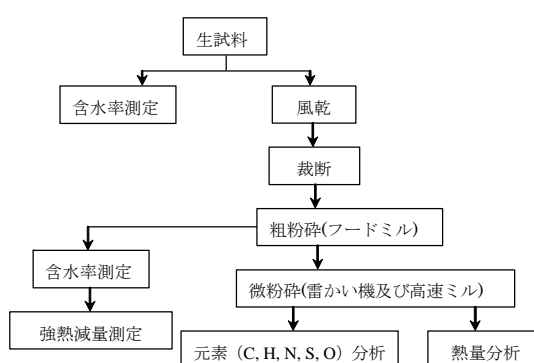


図-6.2.1 試料の理化学分析のフロー

② 結果

試料の性状を表-6.2.5に示した。含水率は、道路と河川の管理に由来する試料の間で、大きく異なっており、平均は道路試料の方が高く、標準偏差は河川試料の方が大きかった。

表-6.2.5 道路・河川管理に由来する試料の性状 (平均±標準偏差)

| 項目 | 含水率 | 強熱減量 | 構成元素重量比 | | | | | 高位発熱量 | 低位発熱量 (推算値) |
|----------|-----------|----------|----------|---------|----------|---------|-------|--------------|----------------|
| | | | 炭素 | 水素 | 酸素 | 窒素 | 硫黄 | | |
| 単位 | (%-湿潤重量) | (%-絶乾重量) | (%-絶乾重量) | | | | | (kJ/kg-風乾重量) | (kJ/kg-湿潤重量) |
| 道路管理由来試料 | 63.3±10.6 | 87.6±7.3 | 47.0±3.9 | 5.4±0.5 | 40.3±2.9 | 1.3±0.4 | 0.1未満 | 17,500±1,600 | 4,900±2,400 |
| 河川管理由来試料 | 22.3±22.0 | 90.2±4.4 | 46.6±2.6 | 5.5±0.3 | 40.7±2.3 | 1.3±0.4 | 0.1未満 | 17,300±1,100 | 11,000±4,500 |

道路・河川管理に由来する試料の含水率の分布を図-6.2.2に示す。河川管理に由来する試料の含水率は、10-20%が多く、次に60-70%が多かった。刈草・剪定枝葉は、乾燥させた方が軽量で運搬しやすい。しかし、道路管理に由来する刈草・剪定枝葉は、存置できる空間が少なく通行への支障が生じやすいことから、即日の収集が行われることが多いため、河川管理に由来する試料と比較して含水率が高かったと考えられる。また、伐採時の草本及び木本 (小枝・葉) の含水率は、それぞれ67-73%、58-62%程度であり、草本の方が木本 (小枝・葉) よりも高い傾向がある。河川管理に由来する刈草・剪定枝葉は、道路管理に由来する刈草・剪定枝葉に比べ、草本の割合が高かったが、含水率は低い傾向にあること

から、回収された試料の含水率は、試料の草本及び木本（小枝・葉）の構成比よりも、除草・剪定から回収までの工程での乾燥などの影響が大きいと考えられた。また、道路と河川試料で、強熱減量、構成元素重量比、高位発熱量には、大きな差異は見られなかった。

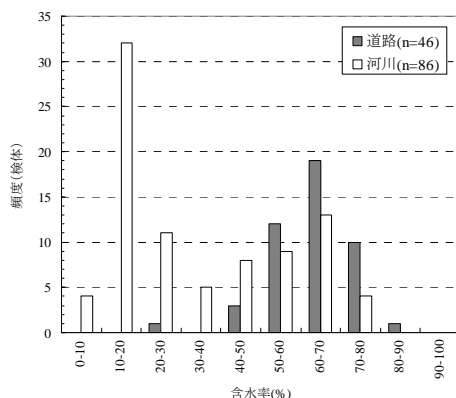


図-6.2.2 道路・河川管理に由来する試料の含水率の分布

図-6.2.3 に、道路・河川管理に由来する回収時試料ベースの低位発熱量の相対累積度数分布を示す。この回収時試料ベースの低位発熱量は、含水率に影響を受けることから、大きく異なっていた。一般にバイオマスは、含水率 60-70%以上では自燃することができないとされている。含水率 60%以上の試料は、道路で 46 検体中 30 検体 (65%)、河川で 86 検体中 17 検体 (20%) であり、これらの燃料利用にあたっては、乾燥の工程を加えるか、メタン発酵等により、エネルギー回収させることが望ましいと考えられた。また、これら試料を下水汚泥の焼却時の補助燃料として取り扱う場合、低位発熱量の観点から判断すると、有機物含有率 70%の下水汚泥の自燃限界保有熱量は、50t/日規模の従来型流動焼却炉で、2,560kJ/kg-湿ケーキと試算されており、道路管理に由来する 7 試料 (15%)、河川管理に由来する 3 試料 (3.5%) を除く全ての試料は、これらを上回っており、下水汚泥と混燃する場合には大部分の試料が補助燃料としての効果が期待されることから、下水汚泥燃焼時の化石燃料の削減効果が期待できる結果となった。

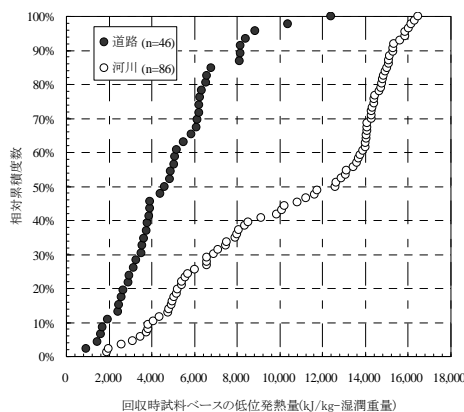


図-6.2.3 道路・河川管理に由来する回収時試料ベースの低位発熱量の相対累積度数分布

6. 2. 2 発生量

(1) 発生量原単位

① 方法

北海道から九州までの各地方整備局管内における任意の1ヶ所ずつの事務所等を対象に、河川や国道事務所が実施している堤防法面や道路法面の除草管理からの刈草発生量に関する調査を行った¹⁾。

また、別途、緑地管理方法と刈草発生量の関係を把握するための基礎調査を行った¹⁾。試験フィールドは長万部町の下水道終末処理場と土木研究所の敷地内に設定し、各フィールドには年間に1回刈り、2回刈り、3回刈りを行う3つの試験区を併設して設け、それぞれ道南地方や関東地方で行われている草刈り時期に合わせて草刈りを実施した。草刈りは肩掛け式刈払い機で行い、全量を回収、重量を測定した。試験区の大きさは、長万部町下水道終末処理場フィールドが6.5m×20m×3区、独立行政法人土木研究所フィールドが3.3m×23.7m×3区である。

② 結果

一部除草管理区間における除草1回当たりの刈草発生率の結果を図-6.2.4に示す。結果は0.05~1.17 kg-DS/m²・回と大きな範囲の中にあるが、1回当たりの発生率としては、平均的にみて0.2~0.3 kg-DS/m²・回にあるとして良いものと思われる。これらの人工法面の植生は大部分がイネ科主体の混合植種となっているが、現地調査からは時間経過とともに自然に単一種優先となってきている緑地も多く存在した。特徴的に北海道地区で見られたオオイタドリ群生地とクマザサ群生地の生育状況を調べた結果、それぞれオオイタドリ：1.34 kg-DS/m²、クマザサ：1.11 kg-DS/m²と大きな値が得られた。

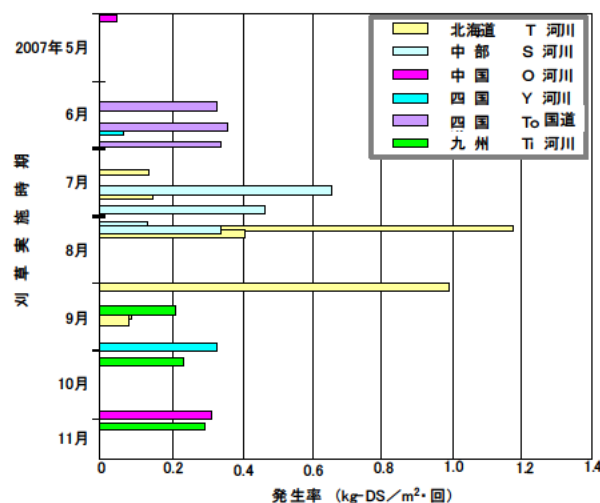


図-6.2.4 河川及び道路の法面除草における1回当たりの刈草発生量

また、刈り草回数と発生量の関係を長万部町下水道終末処理場フィールドの結果について図-6.2.5に、土木研究所フィールドの結果について図-6.2.6に示す。

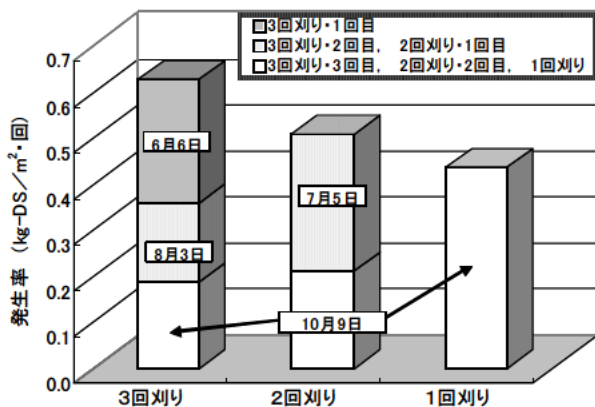


図-6.2.5 長万部フィールドにおける
刈草回数と発生量の関係

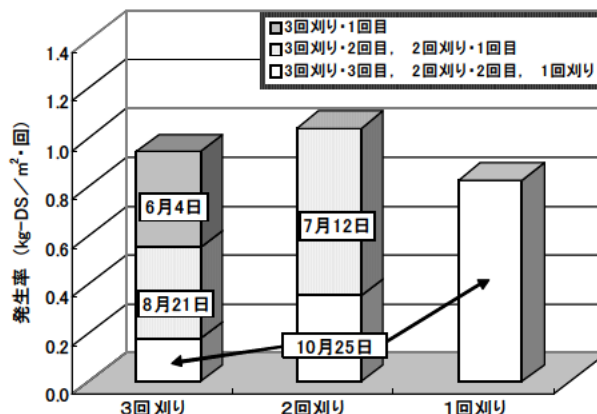


図-6.2.6 土木研究所フィールドにおける
刈草回数と発生量の関係

刈草の発生率は、1回当たりでみた場合は年間の刈り草回数が少ない方が高く、年間では刈り草回数が多い方が高くなる傾向にあるとして良いものと思われる。ここで、2つのフィールドには緑地管理上の特徴として、前者が毎年3回の除草が行われているのに対して後者は年1回のみ除草となっていることがあり、このために、前者は3回刈り緑地管理に馴染んだ安定した植生のもとでの結果であり、後者は2回や3回刈りの経験がない1回刈り管理に馴染んでいる植生のもとでの結果といえる。

以上より、既に報告している通り、植生及び除草回数と刈草発生量の関係から、管理の方法によってバイオマスの収量を増加できる可能性があり、緑地をバイオマスの資源地として管理していく際の参考値となるような成果を得ている¹⁾。

(2) エネルギー賦存量

① 方法

緑地・樹木の除草・剪定の実施状況について、国土交通省北海道開発局、同省各地方整備局、内閣府沖縄総合事務局の道路、河川、公園、ダム事務所を対象に、アンケート調査を実施することで、各事務所の管理する緑地・樹木の2007年度の除草・剪定の実施状況を調査した³⁾。そして、6.2.1(2)組成分析の結果と合わせることで、これらバイオマスのエネルギー賦存量 $E(\text{J/year})$ を以下のように推算した。

$$E = A \times W \times \frac{100 - w}{100} \times h \quad \dots (式1)$$

ここで、 A は1年あたりの除草面積(m^2)または剪定量(本または m^3)とし、 w は1年間の単位面積(除草面積または剪定量)あたりの除草物または剪定物の回収時の平均重量($\text{g}/\text{m}^2/\text{year}$)

または $g/本/year$)とし、 w は回収された除草物または剪定物の平均含水率(%)とし、 h は、除草物または剪定物の乾燥重量あたりの高位発熱量(J/g)とした。1年あたりの除草面積または剪定量は、アンケート調査により各事務所の管理する緑地・樹木における2007年度の除草・剪定実績を用いた。除草物の回収時の重量及び含水率は、除草物の大半が数日乾燥後に回収されていることを踏まえ、2日以上後に回収されたデータを基にした。剪定物の回収時の重量及び含水率は、剪定物の大半が即日回収されていることを踏まえ、即日回収されたデータを元にした。また、除草物または剪定物の発熱量は過年度調査¹⁾から、刈草 $17,800kJ/kg-dry$ 及び剪定枝葉 $19,300kJ/kg-dry$ とした。

② 結果

緑地・樹木の除草・剪定の実施状況調査は、109 国道事務所、102 河川事務所、17 公園事務所、25 ダム事務所からアンケートの回答を得た。

結果、アンケートに回答した事務所の定期的な除草を要する緑地の合計は、約 $360km^2$ であり、そのうち、河川事業が約 $290 km^2$ 、道路事業が約 $60 km^2$ であった。また、2007 年度ののべ除草面積は、 $650km^2$ であり、定期的な除草を要する緑地のほとんどが年1回以上除草されていた。定期的な剪定を要する樹木の合計は、高木（高さ $3m$ 以上）約 60 万本、単独植えの中低木が約 200 万本、寄せ植えの中低木の表面積は、約 $7km^2$ であり、それぞれの8割以上が道路事業によるものであった。2007 年度ののべ剪定量は、高木約 26 万本、単独植えの中低木が約 24 万本、寄せ植えの中低木の表面積は、約 $5km^2$ であり、全樹木が毎年剪定されるわけではない。

また、本アンケートの結果から、賦存量推算にあたって必要となる2日以上存置後回収された除草物の単位面積あたりの平均年間発生重量を計算した。2日以上存置後に回収された除草物の回収時重量のヒストグラムを図-6.2.7に示した。このヒストグラムは、正規分布よりも対数正規分布に近かった。この2日以上存置後に回収された109 除草物の回収時重量の相加平均値は、 $667(g/m^2/year)$ であった。

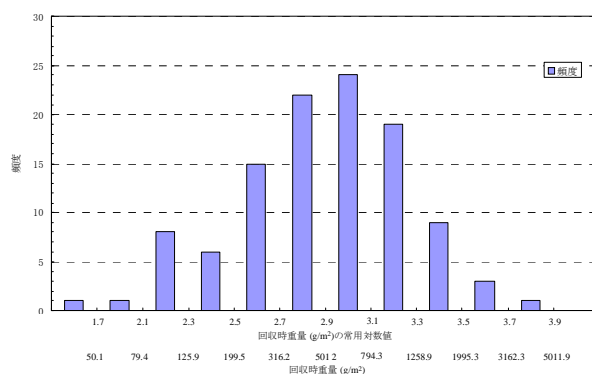


図-6.2.7 2 日以上存置後に回収された 109 除草物の回収時重量のヒストグラム

剪定物については、高木、中低木（単独植え）、中低木（寄せ植え）に分け、単位剪定量（本数又は表面積）あたりの剪定物の平均重量を計算した。即日回収された単位剪定量（本数又は表面積）あたりの剪定物の平均重量は、高木 61.8kg/本、中低木（単独植え） 10.2kg/本、中低木（寄せ植え） 1.5kg/m²であった。

以上の結果と前掲の含水率データを用い、国土交通省管轄の緑地・樹木管理から発生する除草物・剪定物のエネルギー賦存量を推定したところ、式(1)より、それぞれ 3.1PJ/year、0.17PJ/yearであった。この熱量は、A重油 8.5×10⁷L（3万tタンカー(日本の主要な港に出入り可能なスケール)約3台分）に相当した。A重油の熱量は、39.1 MJ/Lとした。地域別の国土交通省管轄の緑地・樹木管理から発生する除草物・剪定物のエネルギー賦存量を図-6.2.8に示した。

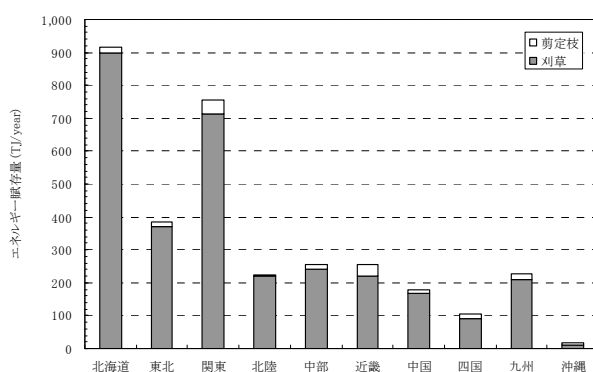


図-6.2.8 推算された地域別の国土交通省及び内閣府沖縄総合事務局管轄の緑地・樹木管理から発生する除草物・剪定物のエネルギー賦存量

6. 3 草木系バイオマスの収集・集約方法の検討

今後、持続可能な資源管理システム構築に向けては、バイオマスの供給者・利用者間でのバイオマスの収集・集約・利用のためのシステム作りを進める必要がある。

これらの安定的なシステム構築のためには、バイオマスの発生期間、種類、質、量、運搬状況、経費等の詳細を取り決める必要がある。これらのうち、種類、質、量については、6. 1及び6. 2において得られた知見の活用も可能である。発生期間については、従来は年2～3回の除草作業が行われていたが、近年のコスト縮減の一環として、年間の除草、刈草回数が減少傾向にあり、安定的なシステム構築の際にはこうした動向に留意する必要がある。

今回、関東地方の直轄事務所を対象に行ったヒアリングの結果では、運搬については、全量を一度に運搬するのではなく、除草期間中、集草と共に定期的実施していた。従って、搬入量が分散されるため、一度に運搬を行う場合と比較して、処分先との調整は行いやすいと考えられる。また、維持工事における刈草の処分先の選定方法については、工事契約の仕様書上では特に規定されておらず、工事の受注者が処分先と調整し、処分先を決

定しているとのことであった。予算縮減の圧力が高まる中で、処分費は、全体の費用（除草、集草、積込運搬、処分費）の中で最も低減が期待できる部分であり、安価な処分先があれば、優先的に運送を行いたいといった意見もあった。運送先については、仕様書で明確に規定していないため、受注者の裁量に依り決定される部分が大きいが、現在、自治体の管理下にある処分場は、受入れに余裕が無く、一部民間のリサイクル施設への運送も行っていた。受入れ余力の観点から、今後、処分単価の設定方法次第では、資源利用施設への収集が積極的に進む可能性は大きいと思われる。

事業形態を検討する場合には、バイオマスの処理コストを供給者・利用者間でどのように分担するかを決定する必要がある、この場合、バイオマスの利用に必要なコストが現状の処理コスト以下となることが望ましい。将来的に、これらの草木系バイオマスが資源として広く認識されるようになれば、利用側がバイオマスを買取るような事業形態もあり得るが、現時点においては、こうした事業形態を構築できるようなモデル的事业を行いながら、関係者間でその他の課題を解決していくことが望ましい。

6. 4 まとめ

- ・ 公共管理過程で発生する草木系バイオマスの生試料の性状分析を行ったところ、発熱量は資源作物と同等であり、ミネラルを豊富に含有していた。
- ・ 含水率 60%以上の河川由来試料及び道路由来試料は、それぞれ全検体中の 65%、20%であり、通常、これらの燃料利用は大きなエネルギー消費を伴うが、3.5%の河川由来試料及び 15%の道路由来試料を除く全ての試料の低位発熱量は、下水汚泥の低位発熱量を上回っており、下水汚泥と混燃することで、補助燃料の削減が期待できた。
- ・ 除草 1 回当たりの刈草発生率は平均で $0.2\sim 0.3\text{kg-DS}/\text{m}^2 \cdot \text{回}$ 程度であるが、植種や除草回数によって値は変化したため、管理の方法によってバイオマスの収量を増加できる可能性がある。
- ・ 国土交通省管轄の緑地・樹木管理から発生する除草物・剪定物のエネルギー賦存量を推定したところ、それぞれ 3.1PJ/year 、 0.17PJ/year であり、この熱量は、A重油 $8.5\times 10^7\text{L}$ に相当した。
- ・ 持続可能な公共緑地管理由来バイオマスの資源化システム構築に向けては、バイオマス供給者・利用者間でバイオマスの安定的供給・利用を取り決めることが必要であり、モデル的な取り組みの実施が期待される。

参考文献

- 1) 平成 17 年度～19 年度 NEDO 成果報告書：都市バイオマス収集システムを活用するためのエネルギー転換要素技術開発,2008

2)独立行政法人土木研究所：草木系バイオマスの組成分析データ集, 土木研究所資料,平成
20年2月

3)独立行政法人土木研究所：平成20年度下水道関係調査研究年次報告書集,土木研究所資料
第4157号,2009

第7章 資源化研究

7.1 はじめに

下水汚泥中には各種の無機資源が含まれており、特に下水汚泥焼却灰のリン酸含有率はリン鉱石と同程度含まれている場合も多いことが分かっている。リン鉱石単独でも肥効性がある¹⁾ことから、下水汚泥焼却灰も同様に肥効性が期待できる。そこで、過給式流動炉の運転により発生した下水汚泥焼却灰について、その成分分析や植物の試験栽培に基づく肥料への資源利用について検討を行った。

7.2 成分分析

7.2.1 肥料成分

既往の分析結果では、リン以外の肥料成分である窒素とカリウムについては焼却灰中には乏しいことが分かっている。窒素は焼却時に NO_x ガスとして失われてしまうが、カリウムは焼却により失われにくいと考えられる。そこで、過給式流動炉を用いて、カリウムを多く含んでいる草木系バイオマスと下水汚泥と混合燃焼し、焼却灰中のカリウム濃度等の変化特性を調べた。具体的には、2009年の下水汚泥専焼試験で発生した下水汚泥焼却灰（以下、専焼灰とする）及び、2010年に実施した、表-5.2.2の条件下での下水汚泥とチップ（汚泥とチップの固形物比=0.7:1）及び牧草との混焼試験で発生した下水汚泥焼却灰（以下、混焼灰とする）を用いた。また、肥料取締法に準拠した試験を行い、ク溶性・水溶性リン酸及びカリウムの資源量を測定することで、肥料としての性質の把握を行った。分析結果を表-7.2.1に示す。

表-7.2.1 リン酸・カリの形態別含有量

| | 専焼灰 | 汚泥+チップ | 汚泥+牧草 |
|---------------------------|--------|--------|--------|
| T- P_2O_5 | 26% | 26% | 27% |
| C- P_2O_5 | 5.5% | 7.8% | 5.8% |
| W- P_2O_5 | 0.020% | 0.024% | 0.046% |
| T- K_2O | 2.4% | 4.7% | 4.2% |
| C- K_2O | 1.2% | 2.3% | 1.6% |
| W- K_2O | 0.15% | 0.29% | 0.40% |

※ T:含有量、C:ク溶性、W:水溶性

この結果、焼却灰中のT- P_2O_5 濃度は混燃の有無に係らず25%以上あった。カリウムについては、混燃を行った系ではT- K_2O として5%弱まで高まっており、混燃により濃度を調整できる可能性が見出せた。実際に肥料として利用可能なク溶性ならびに水溶性の形態は、単体では焼成リン肥や化成肥料等の規格を満たしていない。一方予備実験で用いた別の焼却灰ではク溶性リン酸の割合が13%程度と高く、化成肥料等の規格を満足していた。肥料取締法に基づく肥料ないし肥料原料としての利用を行うためには成分保証が必要になることから、今後は原料汚泥や焼却炉の形式による違いや、日々の変動についても把握する必要があると判断された。

7. 2. 2 重金属

以上のように、下水汚泥焼却灰は肥料成分を含有しているが、一方で排水由来の重金属を含有する恐れがあり、これは生育障害につながり得ることから注意が必要である。肥料取締法に基づく汚泥肥料の公定規格では、砒素、カドミウム、水銀、ニッケル、クロム、鉛の6成分について、表-7.2.2の通り、含有を許される有害成分の最大量（以下、「許容量」とする。）が定められている²⁾。

表-7.2.2 汚泥肥料中重金属の許容値（単位：mg/kg）

| 砒素 | カドミウム | 水銀 | ニッケル | クロム | 鉛 |
|----|-------|----|------|-----|-----|
| 50 | 5 | 2 | 300 | 500 | 100 |

そこで、実証試験期間中、計14回にわたり焼却灰中重金属含有量の測定を行った。各元素に関する測定結果の平均値及び表-7.2.2に示した許容値の超過率は、表-7.2.3の通りになった。なお、ニッケルについては測定は行わなかった。

表-7.2.3 実証試験において発生した焼却灰中重金属含有量の平均値及び許容値の超過率

| | 平均値(mg/kg dry) | 許容値超過率(%) |
|----|----------------|-----------|
| Pb | 59.0 | 0 |
| Cd | 8.9 | 57.1 |
| Hg | 0.004 | 0 |
| As | 39.0 | 21.4 |
| Cr | 68.2 | 0 |

表-7.2.3より、カドミウム及び砒素については、基準を超過したものが存在しており、重金属の観点からは、そのまま肥料利用するには注意を要する結果となった。3. 3. 3で述べたように、長万部町の処理区域内に温泉が存在することが影響していると思われる。

また、一般的な下水汚泥焼却灰の重金属含有量の傾向を把握するため、別途、土木研究所において取りまとめた資料³⁾を元に、表-7.2.4の通り、各元素に関する測定結果の平均値及び許容値の超過率を整理した。同資料は、複数の処理場において生産された下水汚泥焼却灰について、年度別に重金属含有量を整理したものである。

| | 平均値(mg/kg dry) | 基準値超過率(%) |
|----|----------------|-----------|
| Cd | 4.78 | 41.9 |
| Pb | 126 | 55.8 |
| Hg | 0.04 | 0 |
| As | 34.5 | 8.1 |
| Cr | 175 | 9.3 |
| Ni | 458 | 39.5 |

表-7.2.4 複数の処理場由来の下水汚泥焼却灰中重金属含有量の許容値の超過率

（総検体数：86検体）

表-7.2.4 より、水銀以外の元素については、許容値を超過したものが存在し、超過率も比較的大きかった。従って、焼却灰の肥料利用を検討する場合、各処理場の汚泥について十分に比較検討した上で、重金属含有量の低い地域の汚泥を選択的に利用する必要があると思われる。

7. 3 試験栽培

7. 2において成分分析を行った各種焼却灰を用い、2009、2010年度の2回に渡りコマツナの試験栽培を行った。

7. 3. 1 試験栽培（2009年度）

冬季に播種を行い、温室内(温度制御なし)で試験を行った。実験期間中の室温は日中でも10°C程度となることもあった。実験には市販の赤玉土を用い、元肥としてリン肥料(各焼却灰と過リン酸石灰)を P_2O_5 として0.8mg与えた。窒素肥料はほとんど与えず、播種15日後に塩化アンモニウムを0.25mg追肥したのみである。休日を除く毎日、水を5~10ccほど与えていたが、土の表面は乾燥していることが多かった。

焼却灰を施肥した場合、発芽率が若干低下する傾向が見られたが、65日後には図-7.3.1に示すように無リン系と比べて生育が良く、化学肥料と比べても葉の大きさや枚数等は遜色がなかった。植物は焼却灰中の栄養塩を吸収しているといえ、焼却灰の肥効成分を直接的に利用できる可能性が見出せた。

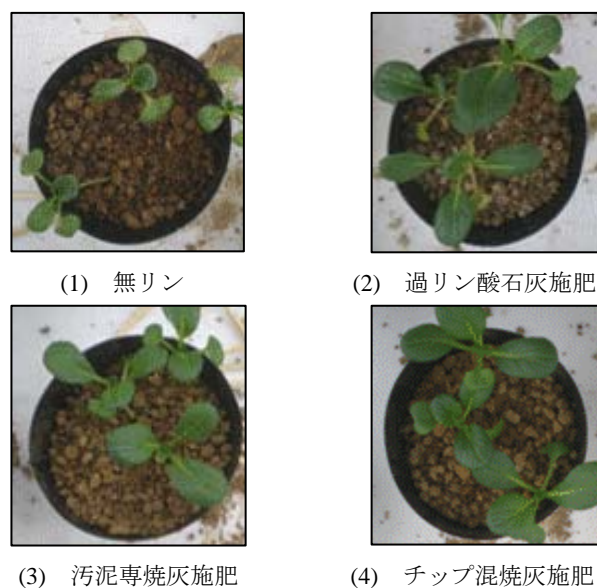


図-7.3.1 播種65日後のコマツナの生育状況（冬季）

7. 3. 2 試験栽培（2010年度）

2009年度の試験により、焼却灰を直接肥料利用できる可能性が見出せたことから、2010年度の試験では、その再確認を行うとともに、バイオマス混焼によるカリウム濃度の調整が肥効性に与える影響について、追加的に検討を行った。

試験は2010年9月19日~2011年2月18日の153日間実施した。土壌は市販の赤玉土を用い、5mmの篩を用いて粒度を均一にした。窒素肥料は市販の尿素を用い、 $N=2(kg/a)$ となるように調整し、試験開

始時に土壌と十分に混合した。その後、表-7.3.1 の条件で各試験区を設定し、試験を開始した。なお、対照区（無リン区）以外の試験区については、 $T-P_2O_5=2(kg/a)$ となるように、成分分析の結果から施肥量を決定した。

表-7.3.1 試験区の設定条件

| | 対照 | 過リン酸石灰 | 専焼灰 | チップ混焼灰 | 牧草混焼灰 |
|--------|----|--------|-------|--------|-------|
| 施肥量(g) | 0 | 1.292 | 0.858 | 0.869 | 0.849 |

試験は日当たりの良い屋内で実施し、週6日ペースで水を与えた。試験区によって土壌表面の乾きやすさに差があったため、水の量は10~30ccと幅を持たせ、土壌表面の湿り具合が同程度となるようにした。発芽率は表7.3.2の通りであり、対照区を除きほぼ100%であった。また、播種後16日目に5本に間引きを行った。

表-7.3.2 各試験区の発芽率

| | 対照 | 過リン酸石灰 | 専焼灰 | チップ混焼灰 | 牧草混焼灰 |
|-----|------|--------|-------|--------|-------|
| 発芽率 | 7/10 | 10/10 | 10/10 | 10/10 | 9/10 |

初期生育は、過リン酸石灰区が最も良く、専焼灰区、チップ混焼灰区、牧草混焼灰区は同等であり、対照区が最も劣った。図-7.3.2に、播種後72日目の各試験区の生育状況を示す。葉の総数は、過リン酸石灰区・チップ混焼区(43)>専焼灰区・牧草混焼灰区(37)>対照区(31)であるが、葉の大きさから見ると過リン酸石灰区が最も良く育っている。



(対照系)



(過リン酸石灰)



(専焼灰)



(チップ混焼灰)



(牧草混焼灰)

図-7.3.2 播種72日後のコマツナ

試験は播種後 153 日目まで実施したが、葉の枚数は図-7.3.2 からほとんど変化せず、試験期間を長く設定したことから、図-7.3.3 に示すように試験終了時には枯れているものも見られた。従って、試験終了時の測定結果を表-7.3.3 に示すが、葉伸長・幅、重量については参考値であり、比較考察を行う際には注意を要する。

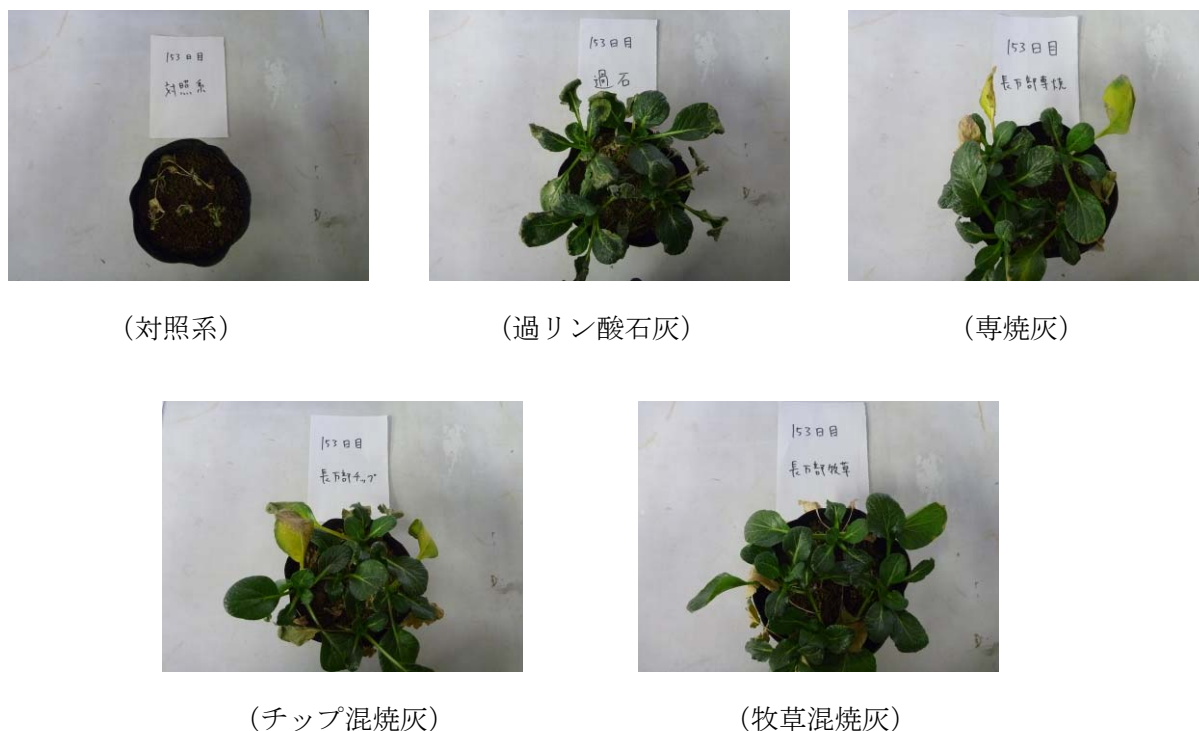


図-7.3.3 試験終了時のコマツナ

表-7.3.3 試験終了時の測定結果

| | | 対照系 | 過リン酸石灰 | 専焼灰 | チップ混焼灰 | 牧草混焼灰 |
|----------|---------|------|--------|------|--------|-------|
| 葉総数 | | 31 | 43 | 37 | 39 | 43 |
| 最大葉 | 葉伸長(cm) | 1.8 | 5.4 | 7.5 | 5.7 | 8 |
| | 葉幅(cm) | 2 | 4 | 4.7 | 3.9 | 5.2 |
| 地上部重量(g) | | 0.51 | 13.9 | 9.87 | 10.53 | 11.97 |

以上の結果より、初期成育・収穫時生育共に、焼却灰区は過リン酸石灰区にやや劣るが、対照系との比較では明らかに良く育っており、2009 年度試験と同様に、焼却灰を肥料利用できる可能性を見出すこ

とができた。また、専焼灰区と混焼灰区の葉総数・地上部重量を比較することで、バイオマス混焼の肥効性への影響を推察することができるが、誤差の範囲内であると思われる。従って、根肥とも呼ばれ、一般に植物の根の成長に寄与していると言われるカリウムの影響を詳細に把握するため、図-7.3.4のように専焼灰区と混焼灰区のコマツナの根を採取し、写真撮影(観察)及び根幅の測定を行った。なお、根と土壌を正確に分離することが困難であったことから、根の伸長は正確に把握できないと判断し、伸長の測定は行わなかった。

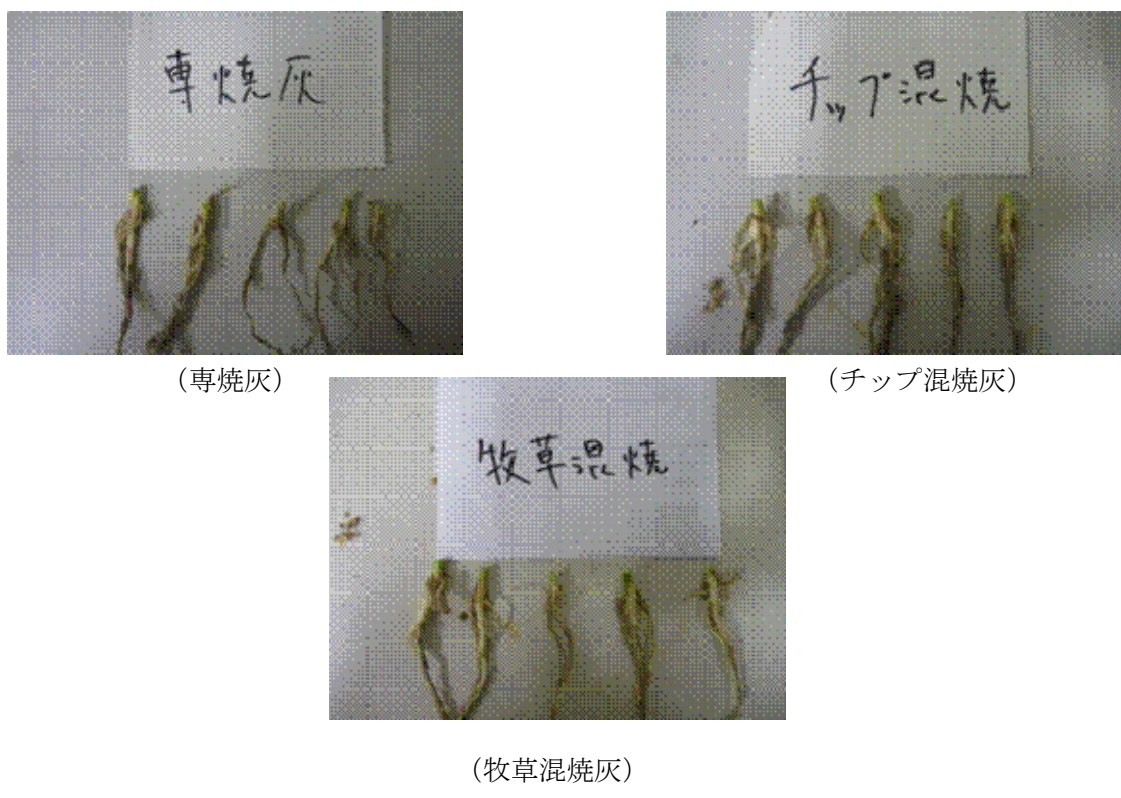


図-7.3.4 試験終了時のコマツナの根

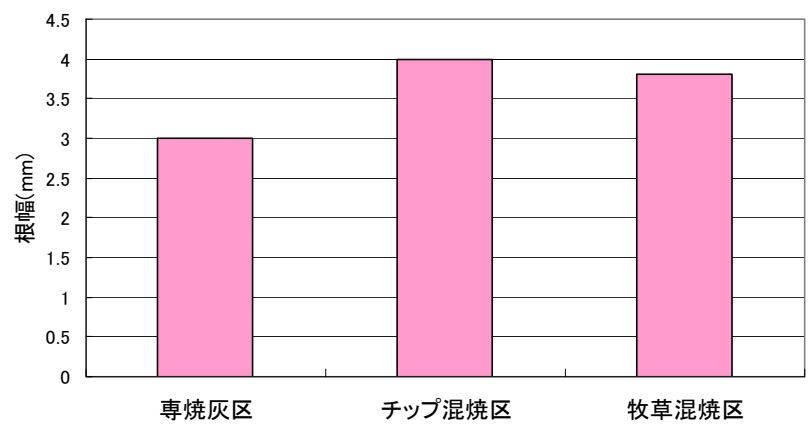


図-7.3.5 各試験区のコマツナの根幅

結果、まず観察により、混焼灰区は専焼灰区と比較して、根の生育状況が良いことを確認した。実際

に根幅を測定したところ、混焼灰区は専焼灰区の 27~33%増となっていた。

カリウムの肥料効果に関する既存の評価事例³⁾を見ると、植物の生長量（乾物重）及びカリウム含有率によって評価を行っているほか、カリウムは、光合成反応、デンプン・タンパク質合成、茎や葉の物理的な強さ、貯蔵器官への光合成産物の転流に寄与しているとの報告がある⁴⁾。従って、上記のように専焼灰区と混焼灰区とで差を生じる結果となったが、詳細な考察を行うためには、追加的に検討を行い、多角的に評価することが必要であると思われる。

また、今回、チップ・牧草混焼灰共に、分析に用いたのは 1 試料のみであるため、バイオマス混合率と焼却灰中カリウム含有量に関する定量的な議論は難しいが、今回の試験条件と比較してさらにバイオマス混合率を上昇させることで、焼却灰中カリウム含有量を高められる可能性がある。但し、5. 1 で述べたように、バイオマスが混合されることにより、汚泥の粘度が高まり、搬送性が著しく低下するといった問題が存在する。今回はバイオマス供給装置を順次改良することで対応したが、さらにバイオマス混合率を高めることは、追加的な対応が必要になる可能性もあり、あまり現実的ではないと言える。先述したように、今回の試験条件下でもカリウム含有量増加による一定の効果は現れており、今回程度のバイオマス混合率が現実的であると思われる。

以上を整理すると、今回設定したバイオマス混合率の範囲内において、バイオマス混焼によりカリウム濃度を調整することで、焼却灰の肥効性が向上する可能性を見出すことができたが、詳細な考察を行うためには、更なる多角的な評価が必要であると思われる。

7. 4 まとめ

- ・ 下水汚泥と草木系バイオマスの混焼灰の成分分析結果より、混焼により焼却灰中のカリウム濃度を調整できる可能性が見出せた。また、肥料規格への適合状況は焼却灰によって異なったことから、今後は原料汚泥や焼却炉の形式による成分の違いや、日々の変動についても把握する必要がある。
- ・ 焼却灰中重金属の含有量を測定したところ、一部の元素で汚泥肥料の許容値を超過しているものが存在した。他の処理場の焼却灰についても、一部の処理場では同様の傾向が見られることから、焼却灰の肥料利用を検討する場合、各処理場の汚泥について十分に比較検討した上で、重金属含有量の低い地域の汚泥を選択的に利用する必要がある。
- ・ 下水汚泥焼却灰を用いたコマツナの試験栽培の結果、焼却灰を直接肥料利用できる可能性が見出せた。また、混焼灰区は専焼灰区と比較して、根の生育状況が良いことが確認できたことから、バイオマス混焼によりカリウム濃度を調整することで、焼却灰の肥効性が向上する可能性を見出すことができたが、追加的に検討を行い、多角的に評価することが必要と思われた。

参考文献

- 1) 宮本豊尚,岡本誠一郎,落修一：安定的リン資源確保のための下水道における資源化モデル,学術誌 EICA,Vol.13, No.2, pp.199-202, 2008.
- 2) 農林水産省：汚泥肥料中の重金属管理手引書,2010
- 3) 早川修,渡辺紀元：下水汚泥の脱水ケーキと焼却灰における肥料的効果および重金属吸収の比較,日本土壤肥料学会誌,第 61 卷,第 2 号,pp.134-141,1990
- 4) 山本友英：カリウムの吸収と生理作用,農業技術体系,pp.85-90,1987

第8章 結言

本研究は、次世代型下水汚泥燃焼システムである「加圧流動床式燃焼炉とターボチャージャーとの組合せシステム」の実用化とともに、これまで焼却または埋立などにより処分されてきた草木等の有機性廃棄物が持つ熱量を効果的に利用することが可能なエネルギー変換プロセスを確立し、下水汚泥処理プロセスの GHG 排出抑制対策技術として早期の実用化を目指すことを目的として実施されたものである。以下に、本研究において得られた知見を示す。

(1) システムの概要 (第2章)

本研究で実証したシステムは、加圧流動床式焼却炉と過給機 (ターボチャージャー) を組み合わせた高含水バイオマス向けの燃焼・エネルギー転換システムである。

本システムでは、以下の効果を期待することが可能であると考えられ、それぞれについて基礎実験や実証設備における燃焼試験により、その効果を検証した。

① 省エネ (電力、補助燃料) :

- ・従来型流動炉で必要であった流動 (燃焼空気) ブロウ、誘引ファンが不要となり消費電力を削減できる。
- ・機器がコンパクトになるため放熱面積が減少し補助燃料が削減できる。

② 温室効果ガス削減 :

- ・加圧効果により流動炉での燃焼速度が大きくなる。これにより、流動炉内のフリーボード部に高温域が出来る。この高温域で N_2O 分解が進み、大きな N_2O 排出量削減効果を得ることができる。

③ 加圧空気の有効利用 :

- ・過給機から必要な燃焼空気より多い加圧空気を生成できるため、その分を有効利用することが可能である。

④ 機器がコンパクト :

- ・圧力下で運転するための機器は従来型流動炉に対してコンパクトにすることが出来る。このため、設置面積も小さくできる。

(2) 過給式流動焼却システムの検証 (第3章)

① システムが成立することを実証

流動炉と過給機を組み合わせたシステムが流動ブロウ (送風動力) および誘引ファン (吸気動力) を使用しない自立運転が出来ることを確認した。

② 下水汚泥焼却運転時の基礎的な燃焼特性の検証

排ガス性状 (SO_x 、 NO_x 、 CO) は、気泡流動炉と同等であり、 N_2O 濃度については、フリーボードの高温域での分解により気泡流動炉より大幅に削減できる。ダイオキシン類およびばいじん濃度の分析も実施した結果、ダイオキシン類濃度 ; $0.0069ng-TEQ/m^3_N$ 、ばいじん濃度 ; $0.009g/m^3_N$ であった。いずれも規制値を下回る数値で、従来の気泡流動炉と同等以下であることが確認できた。

焼却灰性状は従来の気泡流動と同等であるが、高温で集塵するため焼却灰へのセレンの移行率が低

減される。

③ 安定的に燃焼空気および加圧空気（有効利用）を得るシステムの確立

焼却運転において余剰の加圧空気を得られることが確認できた。また、それにより燃焼空気および排ガス量が減少して系内圧力が降下してもシステムの自立運転は維持される。また、 O_2 濃度は下がっても5.5%程度であり、 CO 濃度にも変化がないことから完全燃焼している。

この結果から、本システムでは流動ブロウ、誘引ファン等の送気、吸気動力なしによる消費電力削減効果が得られるとともに、加圧空気の有効利用によって更なるエネルギー削減効果も期待できる。

④ 低負荷運転

実用設備の供用開始直後には低負荷での運転が求められることもあるので、汚泥の供給量を下げて低負荷運転を行った。汚泥供給量 $180\text{kg/h} \rightarrow 110\text{kg/h}$ にしても設備運転には支障ない。逆に系内圧力の変化によって炉内の流速（空塔速度）が一定に保たれるため、砂層部で流動させるために過剰空気を供給する必要がないことが確認された。従って、従来の気泡流動炉のような燃費悪化が見られない。

⑤ 温室効果ガス削減

過給式流動炉は、従来の気泡流動炉と比較し、ブロウを使用しないため省電力である。また、加圧下で燃焼するため機器がコンパクトになり放熱が減り補助燃料が少なくなる。地球温暖化係数が大きい温室効果ガスである N_2O については加圧燃焼の効果によって高温燃焼域が形成されるために、従来の気泡流動炉より排出量の削減が可能である。300t/日規模の実用システムを想定した温室効果ガス排出量削減効果は下記の通りである。

- ・ 電力由来の温室効果ガス削減効果：47.9%
- ・ 補助燃料由来の温室効果ガス削減効果：14.2%
- ・ N_2O 由来の温室効果ガス削減効果：57.6%

以上を総合した温室効果ガス削減効果は49.7%となった。

⑥ 運転制御

設備の立ち上げにおいて、昇温プログラムに沿って炉内温度を上昇させることができ、従来設備同様に自動起動における応答制御が可能であることを確認した。

⑦ 長期運転

800時間連続運転を2回行い新規採用機器である過給器の耐久性を確認した。過給機消耗部品（軸受）の摩耗量検証から寿命が8000時間以上となることが確認できたため、軸受交換は年1回の定修時に行うことで十分である。

また、長期運転においては性状が異なる汚泥の供給が頻繁に切り替わる状況で安定運転できることが確認できた。

⑧ 解体研究

2007年1月に実証プラントにおける試験を開始、2010年11月まで4年、延べ運転時間2600時間を超える試験を行った。実証プラントの撤去解体にともない、解体時に機器等の損耗度合について調査を行った。

主要機器は、従来気泡炉をベースとする設計により製作・施工されており、過給式システムへの適用性を経年による損耗度合からもその妥当性について調査を行い、問題の無いことを確認できた。

(3) 制御システムの検討 (第4章)

- ① 実験室規模の加圧流動層燃焼炉による基礎実験より、排ガス中の N_2O 濃度は、燃焼炉内のフリーボード温度分布が同等の条件であれば、圧力が高くなるに連れて若干増加する傾向にあるが、フリーボード温度に強い依存性を示すことが分かった。一方、排ガス中の NO_x 濃度は、圧力が高いほど層内でのチャーによるNO還元効果、および高水蒸気濃度によるNO生成抑制効果により低くなることが分かった。
- ② 過給式流動炉実証プラントによる燃焼試験より、過給式流動炉では、常圧流動炉よりも排ガス中の N_2O および NO_x 濃度を半分以下に低減できることが分かった。 N_2O については、過給式流動炉では、フリーボード下部に局所的な高温域を形成し、そこで N_2O は分解されるために低減できる。
- ③ 燃焼反応式を組み込んだシミュレーション解析により、実証規模の燃焼炉内温度分布の圧力による影響を予測することができた。

(4) 草木系バイオマス混焼システムの検証 (第5章)

① 汚泥・バイオマスの供給手法の検証

草木系バイオマスを補助燃料として汚泥と混焼することを目的として、本研究では間隙が大きくシール性に難がある含水率の低いバイオマスを汚泥と予混合し、炉内圧力が0.15MPaG程度の過給式流動炉への供給について実証、確認をした。

バイオマスとの予混合により、汚泥の粘度が高まり、その搬送性が著しく低下した場合においても、搬送装置の改良により、バイオマス・汚泥の圧密や混ざり過ぎを防止することで容易に搬送を可能とすることが確認できた。

② 混焼による補助燃料の削減効果

草木系バイオマスを補助燃料として汚泥と混焼することにより、従来から汚泥焼却に使用されてきた化石燃料（重油や都市ガスなどの補助燃料）使用量の削減について検証し、削減可能であることを確認した。

③ 混焼による排ガス・焼却灰性状の検証

草木系バイオマスを補助燃料として汚泥と混焼することによる排ガスや焼却灰の性状について測定し、規制基準値を満足する良好な結果が得られた。

(5) 草木系バイオマスの資源管理システムの検討 (第6章)

- ① 公共管理過程で発生する草木系バイオマスの生試料の性状分析を行ったところ、発熱量は資源作物と同等であり、ミネラルを豊富に含有していた。
- ② 含水率60%以上の河川由来試料及び道路由来試料は、それぞれ全検体中の65%、20%であり、通常、これらの燃料利用は大きなエネルギー消費を伴うが、3.5%の河川由来試料及び15%の道路由来試料を除く全ての試料の低位発熱量は、下水汚泥の低位発熱量を上回っており、下水汚泥と混燃することで、補助燃料の削減が期待できた。
- ③ 除草1回当たりの刈草発生率は平均で $0.2\sim 0.3\text{kg-DS}/\text{m}^2$ ・回程度であるが、植種や除草回数によって値は変化したため、管理の方法によってバイオマスの収量を増加できる可能性がある。
- ④ 国土交通省管轄の緑地・樹木管理から発生する除草物・剪定物のエネルギー賦存量を推定したとこ

ろ、それぞれ3.1PJ/year、0.17PJ/yearであり、この熱量は、A重油 8.5×10^7 Lに相当した。

- ⑤ 持続可能な公共緑地管理由来バイオマスの資源化システム構築に向けては、バイオマス供給者・利用者間でバイオマスの安定的供給・利用を取り決めることが必要であり、モデル的な取り組みの実施が期待される。

(6) 資源化研究 (第7章)

- ① 下水汚泥と草木系バイオマスの混焼灰の成分分析結果より、混焼により焼却灰中のカリウム濃度を調整できる可能性が見出せた。また、肥料規格への適合状況は焼却灰によって異なったことから、今後は原料汚泥や焼却炉の形式による成分の違いや、日々の変動についても把握する必要がある。
- ② 焼却灰中重金属の含有量を測定したところ、一部の元素で汚泥肥料の許容値を超過しているものが存在した。他の処理場の焼却灰についても、一部の処理場では同様の傾向が見られることから、焼却灰の肥料利用を検討する場合、各処理場の汚泥について十分に比較検討した上で、重金属含有量の低い地域の汚泥を選択的に利用する必要がある。
- ③ 下水汚泥焼却灰を用いたコマツナの試験栽培の結果、焼却灰を直接肥料利用できる可能性が見出せた。また、混焼灰区は専焼灰区と比較して、根の生育状況が良いことが確認できたことから、バイオマス混焼によりカリウム濃度を調整することで、焼却灰の肥効性が向上する可能性を見出すことができたが、追加的に検討を行い、多角的に評価することが必要と思われた。

共同研究報告書
Cooperative Research Report of PWRI
No.423 August 2011

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754