ISSN 0386 - 5878

共同研究報告書

整理番号第 423 号

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 独立行政法人產業技術総合研究所 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。

共同研究報告書 第423号2011年8月

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》	亰研究グループ	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
			自	前上席研究員	尾崎	正明 ^{*1}
			前総括	专主任研究員	落	修—※2
				前研究員	宮本	豊尚 ^{※3}
独立行政法人産業	技術総合研究所コ	ニネルギー技術研究語	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
	E	ニネルギー技術研究語	部門燃焼評価グループ	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 й	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 熱エンジェ	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ワや 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、N₂0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	
3. 3. 1 自立運転	
3.3.2 排ガス性状	
3. 3. 3 汚泥性状、焼却灰性状	
3. 3. 4 余剰加圧空気	
3. 3. 5 低負荷運転	
3. 4 温室効果ガス削減	
3. 4. 1 №20排出量削減	
3. 4. 2 温室効果ガス削減の試算	
3. 5 運転制御	
3. 6 長期運転	
3. 6. 1 はじめに	
3. 6. 2 供試汚泥	
3. 6. 3 運転結果および考察	
3. 6. 4 過給機軸受寸法測定結果および考察	
3. 7 解体研究	
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 9 過給式流動恒宝証プラントに上ろ燃焼試験	65
4. 2. 3 シミュレーション解析	65
 3 実験結果および考察 	66
4.3.1 基礎燃焼実験によるN ₂ O排出特性	66
4.3.2 実証プラントによるN ₂ O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	
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	
 6.2 草木系バイオマスの実態調査 	90
6. 2. 1 組成性状	
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 	
6. 4 まとめ	
第7章 資源化研究	
7.1 はじめに	101
7. 2 成分分析	
7.2.1 肥料成分	101
7.2.2 重金属	
7. 3 試験栽培	
7.3.1 試験栽培(2009年度)	
7.3.2 試験栽培(2010年度)	
7. 4 まとめ	
第8章 結言	

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 箇所の下水処理場が供 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、処分地のひっ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、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燃焼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N2O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N₂O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、N₂O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N₂O分解が進み、大きなN₂O排出量削減効果を得ることができ 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℃程度の高温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℃程度まで予熱される。排ガスは600℃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ことが出来ないため起動用のブロワ 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ブロワ、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。
 - 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、草木バイオマス海	起烧運転

:2010年9月22日~2010年10月30日

表-3.2.1 污泥処理量

	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):	Ф1,200 (Ф700)
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予熱源と 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 m³_N/h (常用) 予熱空気量: 534 m³_N/h 交換熱量: 310 MJ/h 伝熱面積: 17.2 m²



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 た灰抜出装置によって系外へ排出される。灰抜出装置は、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:	$2\sim 15 \text{ m}^3/\text{min}$
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 m³_N/min

吐出圧力: 45 kPa(G)





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。

図-3.3.1 定格での焼却運転(例)

	(2 1)	0 kg/h	I		I	I.	I	I	I	I	T	
ガス分析葉	(20)	384 kg/h	38 kø/h	04	kg/h	30 m ³ _N /h	29.5 m ³ _N /h	0 5 m ³ _N /h	20°C	690 kPaG	I	
	(1 9)	170 kg/h	168 kø/h	5	kg/h	132 m ³ _N /h	130 m ³ _N /h	2 m ³ _N /h	20°C	690 kPaG	T	
	(1 8)	604 kg/h	I		I	I.	I.	I	I	I	T	
# # # 7 / / / / / / / / / / / / / / / /	(1 7)	35 kg/h	I		I	I.	I	I	448°C	I	1 MJ/h	
	(16)	0 kg/h	I	Γ	I	I.	T	I	I	I	I	
	(15)	I	I		I	I.	T	I	I	I	T	
	(1 4)	164 kg/h	I		I	19 3 L/h	I	I	20°C	I	T	
	(1 3)	ţ	Ļ		ţ	Ļ	Ļ	Ļ	441°C	104 kPaG	261 MJ/h	
	(1 2)	537 kg/h	532 ke/h	s .	kg/h	417 m ³ _N /h	412 m ³ _N /h	5 m ³ _N /h	105°C	105 kPaG	24 MJ/h	
	(1 1)	0 kg/h	I		I	I.	I	I	I	I	T	
	(1 0)	0 kg/h	T		I	I.	I	I	T	I	T	
- 10 - 10 - 10 - 10 - 10 - 10 - 10	(6)	Ļ	→		Ļ	Ļ	ţ	→	105°C	105 kPaG	24 MJ/h	
	(8)	537 kg/h	532 k@/h	5	kg/h	417 m ³ _N /h	412 m ³ /h	5 5 2	27°C	-2 kPaG	24 MJ/h	
	(2)	897 kg/h	401 101	196	kg/h	769 m ³ _N /h	525 m ³ _N /h	244 m ³ _N /h	328°C	2 kPaG	861 MJ/h	
	(9)	ţ	ţ		ţ	Ļ	ţ	Ļ	404°C	Ļ	954 MJ/h	
	(2)	ţ	ţ		Ļ	Ļ	Ļ	Ļ	448°C	91 kPaG	954 MJ/h	160 MJ/h
*v.	(4)	ţ	ţ		ţ	Ļ	Ļ	Ļ	552°C	92 kPaG	1,113 MJ/h	42 2 MJ/h
	(3)	859 kg/h	663 k@/h	196	kg/h	739 m ³ /h	496 m ³ /h	243 m ³ /h	788°C	101 kPaG	1,407 MJ/h	83 4 MJ/h
	(2)	0 kg/h	I		I	I.	I	I	I	I	Т	
# 本 脱水 下水汚	(1)	180 0 kg/h	240 kø/h	156 0	kg/h	I.	I	I	20°C	I	Т	
		憲憲	複		¥	流量	苑	大分	温度	圧力	熱量	放熱



過給式流動炉 収支図

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℃を下回るときに若干高くなっているが、800℃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、N₂O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N₂O濃度が瞬間的に上昇することから N₂O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+ppm以下での運転が可能である。

	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
			_

表-3.3.1 汚泥専焼における有害性物質の測定結果

※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/m³Nであり、 分析結果から規制値を満足している。

測定項目		毒性等価係数	毒性等量 ng-TEO/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	0.000078
	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

表-3.3.2 汚泥専焼におけるダイオキシン類の測定結果

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。

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
С	44.9	%-DS
Н	6.7	%-DS
0	26.4	%-DS
Ν	8.2	%-DS
S	1.05	%-DS

表-3.3.3 下水汚泥の性状(長万部汚泥)

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)	ひ)	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_2O_5	(%)	20.51		



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。

重金属類	単位	汚泥	汚泥	埋立基準
		(Case1)	(Case2)	
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

表-3.3.5 焼却灰重金属溶出量

(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わる。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。

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

表-3.3.6 下水汚泥から焼却灰への重金属移行率

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 150m³_Nh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、それに追随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)の圧力も降下したが、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 層の硅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 N₂0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、燃焼温度が高いと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焼速度が大きくなるため早い段階で完全燃焼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。

電力由来の温室効果ガス削減率 (1-<u>1222</u>)×100=**47.9%**

		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※		0,002	4 919	
	$[kg-CO_2/\exists]$	0,000	4, 213	
	[t-CO ₂ /年]	2, 344	1, 222	

表-3.4.1 電力由来の温室効果ガス削減効果

※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14.4Lhに対して実際の運転データが14.7Lh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。

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 [m³ _N /h]	189. 4	162. 5
温室効果ガス排出量 ※ [kg-CO ₂ /h]	431. 3	370. 0
[t-CO2/年]	3, 002	2, 575

※都市ガスの温室効果ガス排出係数は 2.277kg-CO₂/m³N

(4) N₂0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。

N₂O由来の温室効果ガス削減率 (1-<u>5969</u>)×100=**57.6%**

	従来型流動炉	過給式流動炉
N2O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-C0 ₂ /年]	14, 078	5, 969

表-3.4.3 N₂O由来の温室効果ガス削減効果

(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。

総合した温室効果ガス削減率 (1-9766)×100=49.7%

	従来型流動炉	過給式流動炉
電力由来[t-CO2/年]	2,344	1,222
補助燃料由来[t-CO2/年]	3,002	2,575
N2O由来[t-CO2/年]	14,078	5,969
合計[t-CO2/年]	19,424	9,766

表-3.4.4 総合温室効果ガス削減効果

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℃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℃ 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	〇 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	\bigtriangleup	◎ 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CO2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	0	◎ 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。

		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		
С		45.6	37.4
Н		6.5	5.5
О		26.7	21.4
Ν		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-3.6.1 第1クール供試汚泥の性状

		巨士亦不知	道内汚泥
		安万部乃犯	(消化汚泥)
含水率	%	84.7	81.5
可燃分	%	88.4	71.9
可燃分組成	%–DS		
С		45.6	38.0
Н		6.49	5.48
О		26.9	21 5
Ν		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

表-3.6.2 第2クール供試汚泥の性状

また、汚泥処理量について表-3.6.3に示す。

	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

表-3.6.3 汚泥処理量

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N₂O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-3.6.2 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-3.6.4 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ロにて実施。排ガス流量計上流部に位置して いるためサンプリングロ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 ロ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。



	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	$1\mu\mathrm{m}$	4.568mm	$0\mu\mathrm{m}$
1,618 時間運転後	4.568mm	$3 \mu\mathrm{m}$	4.566mm	$2\mu\mathrm{m}$

表-3.6.4 過給機軸受寸法測定結果

※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±1µm

※測定は室温21℃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20μmであることから、1年間の運転時間である8000時間で20μm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(キャスタ)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タ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 ろ過が行われ、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。

54





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 上部ヘッダ (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ダ(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N₂Oの排出が懸念されている。 N₂Oの地球温暖化係数はCO₂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N₂O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、N2O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N₂O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)。燃料はモーノポンプ(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号硅砂(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-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-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

	水分	78.0
工業分析値	揮発分	13.9
[wet, wt.%]	固定炭素	1.8
	灰分	6.3
元素分析値 [dry, wt.%]	С	29.8
	Н	4.0
	N	5.0
	S	1.1
	0	31.4
高位発熱量 [MJ/kg (dry)]		17.10

表-4.2.1 基礎実験で使用した脱水汚泥性状

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 CHEMKIN ⁸ 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5.6W(/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。

ガス	モル分率 [-]
H_2	0. 0039
CO	0. 0097
CH ₄	0. 0117
C0 ₂	0. 0513
H_2O	0. 3199
02	0. 0585
N_2	0. 5450

表-4.2.2 フリーボード入口のガス組成

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ー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。


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。

	従来型	過給式
N_2O 排出係数 [g- N_2O /t-脱水汚泥]	645	280
NO _x 濃度(O ₂ :12%) [ppm]	100	31.5

表-4.3.1 実証規模におけるN2OおよびNOx濃度の比較

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。結果を図ー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N₂O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N₂O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。図ー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)

っぎに、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ー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、図ー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。図ー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N₂O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 N₂O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。N₂O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N₂O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-N₂O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
- T. Murakami, *et. al.*: Study on Freeboard Properties to Maintain Low N₂O 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
- M. Shoji, *et. al.*: Modeling Study of Homogeneous NO and N₂O 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 一転換要素技術開発,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パの容量を半分とし、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。



	カンテナ 箱型	ケーキ 混合 供給 ホッパ パドル式	ケーキ供給 ポンプ 一軸 ねじ式	汚泥計量機 ロードセル	フレックス コンテナ 円筒型	バイオマス 計量ホッパ スライディング	バイオマス 切出機	バイオマス 計量機	バイオマス搬送機	汚泥パイオマス 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
	箱型	パドル式	一軸ねじ式	ロードセル	円筒型	スライディング									
						フレーム	一軸スクリュ式	ロードセル	スクリュー コンペア	パドル式	ロードセル	二輪スクリュ (一軸逆転可)	ビストン式	油圧電動装置	二軸スクリュ式
	1.0m ³ \$9360 kg	約 1.6 m ³ 9.1RPM	0.2~0.5m ³ /h 100A	2.0x2.0m 最大計測5.0t	\$ 31 m ²	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 最低読取0.5kg	250 ¢/x45 00mm	約1.2m ³ 14RPM	最大計測2.0c 最低読取1kg	約3.4L/回転 3.6 RPM	0.4MPa 2m³/h 200A	-	225 ?/h
ŧ	-	7.5kWx2 00V	3.7kWx200V インパータ	-	-	0.7 5kW×200V	1.5kWk200V インパータ	-	1.5kW	1.5 kWx2 00Vx2	-	0.4kWk200Vx2 インパータ	-	30kWx200V	0.4kWx200V
	3台	18	18	1合	-	18	1番	1合	1台	18	1台	13	1合	1台	18
	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	4~20 mA出力	-	,	〈イオマス混合撒送装	t	逆流防止 ゲート付	-	
	1.0m ³ 約360kg - 3合 汚泥搬送用	約1.8㎡ 9.1RPM 7.5kWx200V 1基 レベルスイッチ付	0.2~0.5m ³ /h 100A 3.7kW×200V インバータ 1 基 -	2.0x20 m 最大計測 5.0 t - 1合 4~20mA出力	約1 m ² - - バイオマス教送用	約1.6m ³ 0.7 5kW×200V 1基 パイオマス	************************************	Lal 2m 最大計算i 0: 最低狭取0.5kg - 1合 4~20 mA出力	250 ¢x45 00mm 1. SkW 1 21 —	約1.2m ³ 14RPM 1.5kWk200Vx2 1畫 /	最大計測2.0c 最低読取1kg - 1合 (イオマス混合搬送装	約34L/回転 3.5RPM 0.4kWk200Vx2 インパータ 1基 重	2m ³ /h 200A - 1台 逆波防止ゲート	#	- 30k₩×200V 1合 村 -

図-5.1.1 汚泥・バイオマス供給装置(2007年度まで)



	Ð	Ø	3	6	6	6	0	8	0	0	0	\ @ /	0	6	6
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	パイオマス 計量ホッパ	パイオマス 切出機	パイオマス 計量機	バイオマス搬造機	汚泥バイオマス 混合装置	汚泥バイオマス 混合計量機	入イオマスポンプ 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	パドル式	一軸ねじ式	ロードセル	円筒型	スライディング フレーム	一軸スクリュ式	ロードセル	スクリュー コンペア	パドル式	ロードセル	二輪スクリュ (一輪遊転司)	ピストン式	油圧電動装置	二輪スクリュ式
仕様	1.0m ³ ₿9 380 kg	89 1.6 m ³ 9.1RPM	0.2~0.5m ³ /h 100A	2.0x2.0m 最大計測5.0t	\$\$1 m 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	250 øx45 00mm	約1.2m ³ 14RPM	最大計測2.0t 最低読取1kg	40 3 A 100 AE 36 RP3M	0.4MPa 2m³/h 200A	-	225 ?/h
電動機	-	7.5kWx200V	3.7kWx200V インパータ	-	-	0.7 5kWx200V	1.5 kWk200V インパータ	-	1.5kW	1.5 kWx2 00Vx2	-	4 kWk200Vx2 インバータ	-	30kW×200V	0.4kWx200V
数量	3台	皤	18	1台	-	播	1番	1合	1台	18	1台	/ 🇯 /	1台	1台	1番
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	-	,	(イオマス混合搬送装	2	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)



	(T)	Ø	3	a	6	ത	თ	ര	(1)	60	መ		6	ß	6
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	パイオマス 計量ホッパ	・ バイオマス 切出機	バイオマス 計量機	バイオマス撤送機	汚泥パイオマス 混合装置	デ 泥パイオマス 混合計 量機	11オマスポンプ 第3種	パイオマス 圧送ポンプ	油圧ユニット	
型式	箱型	パドル式	一軸ねじ式	ロードセル	円筒型	スライディング フレーム	一軸スクリュ式	ロードセル	スクリュー コンペア	パドル式	ロードセル	二輪スクリュ (一輪遊転可)	ピストン式	油圧駆動装置	二軸スクリュ式
仕様	1.0m³ ₿9360 kg	約 1.6 m ³ 9.1RPM	0 2~ 0.5 m ³ /h 1 00A	2.0x2.0m 最大計測5.0t	\$ 91 m ²	約1.6m ³	約0.7kg/min(D.B.) 約1.4kg/min(W.B.) 4.1RPM	12x12m 最大計測1.0t 最低読取0.5kg	250 ¢x45 00mm	約1.2m ³ 14RPM	最大計測2.0t 最低読取1kg	#) 3.4 ()(8) #E 76 RPM	0.4MPa 2m³/h 200A	-	225 ?/h
電動機	-	7.5kWx2 00V	3.7kWx200V インパータ	-	-	0.7 5kWx200V	1.5 kWk200V インパータ	-	1.5kW	1.5 kWx2 00Vx2	-	4kWk200V2 インバータ	-	30kWx200V	0.4kWx200V
数量	3台	18	1基	1台	-	18	1基	1合	1台	18	1合	18	1台	1台	18
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	-	,	〈イオマス混合撒送装	t	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。

バイ-	トフフ括粘	版古	エップ	X	刂草
	八月月、八任共		テッノ	(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	热量[kJ/kgDS]	17,800	19,400	18,200	19,800
	С	43.9	48.3	43.8	43.1
	Н	6.0	6.2	5.6	6.6
組成	Ν	1.3	<0.1	0.75	0.84
[%-DS]	0	45.1	48.2	42.7	42.3
	S	0.12	<0.01	0.11	0.47
	CI	0.45	<0.01	0.51	0.20

表-5.2.1 バイオマス性状

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。

バイオマス種類 牧草		混焼質量比	固形物比	焼却
		汚泥:バイオマス	汚泥:バイオマス	時間
		8.8:1 1.4:1		14
-	۲ –۴	2.9:1	2.9:1 0.7:1	
		2.4:1	0.6:1	3
とう	(生)	5.6:1	1.9:1	7
- 刈早	(天日乾燥)	3.9:1	1.3:1	7

表-5.2.2 バイオマス供給量

(2) 炉内温度と燃焼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、燃焼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、燃焼温度(砂層温度)が安定した焼却となっていることがわかる。

燃焼空気圧力は約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。



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、 燃焼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、燃焼空気圧力、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ッパ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 題はない。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(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

測完物質		畄位	測知	自住	相制其淮储
例足物員		中国	牧草	刈草	风雨盔牛胆
		実測値	< 0.01	0.021	
ばいじん	g/m³ _N	酸素12%換算	< 0.01	0.014	0.15
SOv	volppm	実測値	780	230	_
SOX	m³ _N /hr	排出量	0.62	0.33	2.01
		実測値	71	73	_
NOx	volppm	酸素12%換算	51	50	250
		実測値	39	70	_
塩化水素	mg/m ³ _N	酸素12%換算	28	50	700

(長万部汚泥と牧草・刈草(生) 混焼時)

※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未満の新設 施設基準に該当するので5ng-TEQ/m³N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

ेम्बर नि			主州卒具
測定 項目	牧草混焼	毒性等価係数	毋'生守里
項ロ		1	ng-TEQ/Nm [*]
7	2,3,7,8 TECDD	1	0.00028
1	1,2,3,7,8-PeCDD	1	0.0008
オ	1,2,3,4,7,8 ⁻ HxCDD	0.1	< 0.0001
Ŧ	1,2,3,6,7,8 ⁻ HxCDD	0.1	0.00017
シ	1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.1	0.00015
ン	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	2,3,7,8-TeCDF	0.1	0.00041
ベ	1,2,3,7,8+1,2,3,4,8-PeCDF	0.03	0.000138
ン	2,3,4,7,8-PeCDF	0.3	0.00132
ゾ	1,2,3,4,7,8+1,2,3,4,7,9-HxCDF	0.1	0.00075
フ	1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.1	0.00067
ラ	1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.1	0.0001
ン	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
П	3,3',4,4'-TCB(#77)	0.0001	0.000001
プ	3,4,4',5-TCB(#81)	0.0003	0.00000099
ラ	3,3',4,4',5-PeCB(#126)	0.1	0.00026
ナ	3,3',4,4',5,5'-HxCB(#169)	0.03	0.000021
-	2,3,3',4,4'-PeCB(#105)	0.00003	0.000000207
PCB	2,3,4,4',5-PeCB(#114)	0.00003	0.000000018
	2,3',4,4',5-PeCB(#118)	0.00003	0.00000036
	2',3,4,4',5-PeCB(#123)	0.00003	0.00000039
	2,3,3',4,4',5-HxCB(#156)	0.00003	0.00000042
	2,3,3',4,4',5'-HxCB(#157)	0.00003	< 0.00000002
	2,3',4,4',5,5'-HxCB(#167)	0.00003	0.00000039
	2,3,3',4,4',5,5'-HpCB(#189)	0.00003	< 0.00000002
	Total Coplanar PCBs		0.00028
合計			0.0073

測定	加盘追陸	害州竺価係粉	毒性等量
項目		毋注守恤你致	ng-TEQ/Nm ³
ダ	2,3,7,8-TeCDD	1	0
イ	1,2,3,7,8-PeCDD	1	0.022
才	1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.1	0.0042
キ	1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.1	0.0069
シ	1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.1	0.0044
ン	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	2,3,7,8-TeCDF	0.1	0.0021
ベ	1,2,3,7,8+1,2,3,4,8-PeCDF	0.03	0.00177
ン	2,3,4,7,8-PeCDF	0.3	0.0207
ゾ	1,2,3,4,7,8+1,2,3,4,7,9-HxCDF	0.1	0.0097
フ	1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.1	0.011
ラ	1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.1	0.0012
ン	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
П	3,3',4,4'-TCB(#77)	0.0001	0.0000038
プ	3,4,4',5-TCB(#81)	0.0003	0
ラ	3,3',4,4',5-PeCB(#126)	0.1	0.0017
ナ	3,3',4,4',5,5'-HxCB(#169)	0.03	0.00051
-	2,3,3',4,4'-PeCB(#105)	0.00003	0
PCB	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	0.0000036
	Total Coplanar PCBs		0.00221506
合計			0.11

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

(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	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	逞[%]	0.23	0.23	0.34	0.33	0.27
灰分	`[%]	99.09	98.83	99.25	98.90	98.97
比重	t[—]	0.871	0.686	0.839	0.837	0.752
平均粒	径[µm]	104.0	97.1	150	76.6	106
	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
成分	MgO	2.77	3.24	2.71	2.92	3.33
[%]	Fe ₂ O ₃	<mark>5.98</mark>	5.53	5.56	5.28	5.66
	K₂O	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			
		牧草混焼	チップ混焼	刈草 (生) 混焼	汚泥専焼	汚泥専焼	埋立 基準
Pb		<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	mg /1	<0. 0005	<0. 0005	<0.0005	<0.0005	<0. 0005	0.005
As	IIIg/ L	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、Ong-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。

測定		畫性笔価係数	毒性等量
項目		每江守Ш小奴	ng-TEQ/g
ダ	2,3,7,8-TeCDD	1	< 0.02
イ	1,2,3,7,8-PeCDD	1	< 0.03
才	1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.1	< 0.002
キ	1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.1	< 0.002
シ	1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.1	< 0.002
ン	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	2,3,7,8-TeCDF	0.1	< 0.001
ベ	1,2,3,7,8+1,2,3,4,8-PeCDF	0.03	< 0.0003
ン	2,3,4,7,8-PeCDF	0.3	< 0.003
ゾ	1,2,3,4,7,8+1,2,3,4,7,9-HxCDF	0.1	< 0.003
フ	1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.1	< 0.003
ラ	1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.1	< 0.001
ン	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	3,3',4,4'-TCB(#77)	0.0001	< 0.000004
プ	3,4,4',5 - TCB(#81)	0.0003	< 0.000003
ラ	3,3',4,4',5-PeCB(#126)	0.1	< 0.002
ナ	3,3',4,4',5,5'-HxCB(#169)	0.03	< 0.0006
-	2,3,3',4,4'-PeCB(#105)	0.00003	< 0.0000027
PCB	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-5.2.8 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	加异油陸	害州空伍区粉	毒性等量
項目	71 早化成	毋且守Ш你奴	ng-TEQ/g
ダ	2,3,7,8-TeCDD	1	0
イ	1,2,3,7,8-PeCDD	1	0
オ	1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.1	0
キ	1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.1	0
シ	1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.1	0
ン	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	2,3,7,8-TeCDF	0.1	0
ベ	1,2,3,7,8+1,2,3,4,8-PeCDF	0.03	0
ン	2,3,4,7,8-PeCDF	0.3	0
ゾ	1,2,3,4,7,8+1,2,3,4,7,9-HxCDF	0.1	0
フ	1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.1	0
ラ	1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.1	0
ン	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
Э	3,3',4,4'-TCB(#77)	0.0001	0
プ	3,4,4',5-TCB(#81)	0.0003	0
ラ	3,3',4,4',5-PeCB(#126)	0.1	0
ナ	3,3',4,4',5,5'-HxCB(#169)	0.03	0
-	2,3,3',4,4'-PeCB(#105)	0.00003	0
PCB	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

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

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、風乾して粗粉砕、微粉砕を施し、 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章で下水汚泥と草木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木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「草木系バ 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 草木類バイオマスの資源化検討用の値

	水分 (%一全重)	強熱減量 (%-乾重)	<mark>高位発熱量</mark> (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

(生資材分析値:中央値±10%の値)

			ſ	-								
	z	O	т	S	0	Ca	¥	Mg	Na	٩	Si	Fe
	(%-乾重)					(g/kg-乾重)		8)	mg/kg-乾重)
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
最小值	0.362	34.6	4.50	0.00.00	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
中均値	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-6.2.2 草本類に関する主要元素の集計結果

表-6.2.3 木本類の木幹部に関する主要元素の集計結果

												0
	z	O	Т	S	0	Ca	¥	Mg	Na	٩	Si	Ре
試料部位	(%-乾重))	g/kg ⁻ 乾重	(ŝ			(mg/kg-乾	臣)
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	00.00	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-6.2.4 木本類の小枝・葉部に関する主要元素の集計結果

	z	o	Т	S	0	Ca	¥	Mg	Na	٩	S	Fe
	(%-乾重)					(g/kg-乾重	(6			(mg/kg-乾重	()
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

92

(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砕してから雷 かい機及び高速微粉砕器(ワンダーブレンダー)にて再度微粉砕化させた。



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。

百日	合业业	改 劫 试 早		構成	成 元 素 重 量 比	土		古佔丞劫早	低位発熱量
項日	古小平	」 ※ 派 里	炭 素	水素	酸素	窒素	硫黄	同世光於里	(推算値)
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	$17,500 \pm 1,600$	$4,900 \pm 2,400$
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	$17,300 \pm 1,100$	$11,000 \pm 4,500$

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)

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。



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回のみの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*(J/year)を以下のように推算した。

$$E = A \times W \times \frac{100 - w}{100} \times h \qquad \cdot \cdot \cdot (\not \exists 1)$$

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^2)とし、wは1年間の単位面量(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($g/m^2/year$

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¹¹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360km²で あり、そのうち、河川事業が約290km²、道路事業が約60km²であった。また、2007年度の のべ除草面積は、650km²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7km²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5km²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/m²/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、 収草回数が減少傾向にあり、安定した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、集草と共に定期的に実施していた。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り、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い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業を行いな 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 0.2~0.3kg-DS/m²・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 8.5×10⁷L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 等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を下水 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。

	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 ₂ O ₅	0.020%	0.024%	0.046%
T-K ₂ O	2.4%	4.7%	4.2%
C-K ₂ O	1.2%	2.3%	1.6%
W-K ₂ O	0.15%	0.29%	0.40%

表-7.2.1 リン酸・カリの形態別含有量

この結果、焼却灰中のT-P₂O₅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-K₂O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。

[※] T:含有量、C:ク溶性、W:水溶性

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、これは生育阻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⁾。

					0,
砒素	カドミウム	水銀	ニッケル	クロム	鉛
50	5	2	300	500	100

表-7.2.2 汚泥肥料中重金属の許容値(単位:mg/kg)

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

	平均值(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。

	平均值(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℃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P₂O₅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。



(1) 無リン



(3) 汚泥専焼灰施肥





(4) チップ混焼灰施肥

```
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-P₂O₅=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。



(対照系)



(過リン酸石灰)



(専焼灰)



(チップ混焼灰)



(牧草混焼灰)

図-7.3.3 試験終了時のコマツナ

表-7.3.3 試験	冬了時の測定結果
------------	----------

		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。







(チップ混焼灰)



(牧草混焼灰)

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

- 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 土壌肥料学会誌,第61巻,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。

- 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。
- 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N2O分解が進み、大きなN2O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%

・N₂O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N₂O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 N₂O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。N₂O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N₂O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)
- 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0.2~0.3kg-DS/m²・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 8.5×10⁷L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)

- 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