

## &lt;論文&gt;

## 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研究報告

木原均<sup>1</sup>, 長沢英和<sup>2</sup>, 落修一<sup>3</sup>, 鈴木善三<sup>4</sup><sup>1</sup>三機工業㈱ 技術開発本部(〒242-0001大和市下鶴間1742-7 E-mail:hitoshi\_kihara@eng.sanki.co.jp)<sup>2</sup>月島機械株㈱ 研究開発部(〒104-0051東京都中央区佃2-17-15 E-mail:h\_nagasawa@tsk-g.co.jp)<sup>3</sup>(独)土木研究所 材料地盤研究グループ(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 E-mail:ochi@pwri.go.jp)<sup>4</sup>(独)産業技術総合研究所 クリーンガスグループ(〒305-8569 茨城県つくば市小野川16-1 E-mail:suzuki.y@aist.go.jp)

## 概要

都市部で発生する下水汚泥と剪定枝、刈り草など公園、河川敷等で発生するバイオマスを流動層で混合焼却することにより、補助燃料を削減し、さらにエネルギー回収可能な技術を比較し検討した。この結果、加圧流動層燃焼装置と過給機(ターボチャージャー)を組み合わせたプロセスで、発電を伴わず余剰のエネルギーをバイプロダクトである加圧空気として有効利用するプロセスがもっとも効果的であることが推定された。このプロセスの実現性を確認するための実証試験に先立ち、要素技術として過給機運転特性、および低加圧下での汚泥燃焼特性について実験的な検証を行ない、①設備の起動時に問題になる過給機サージングについては、小容量の起動プロワによる送風状態から過給機の運転を切り替えても実質的には問題がないこと、②高水分の汚泥を加圧流動層内で燃焼させる場合、0.3MPa(abs)程度では水分負荷を考慮する必要がないことがわかった。

キーワード:バイオマス、流動層、加圧、ターボチャージャー、

## 1.はじめに

地球温暖化防止および、自然エネルギーの資源としてバイオマスのエネルギー利用が注目されており、バイオマスのエネルギー化について多くの研究・開発が推進されている。

しかしながら、バイオマスエネルギー利用においては地域的、時間的にバイオマスが偏在することが収集上の問題点となり、その利用における経済性を大きく左右する要因となる。

特に森林廃棄物や、農産廃棄物など、従来エネルギー資源として利用の対象と見られなかったものは有効な収集方法が確立されておらず、その利用は小規模な範囲に限定され、経済効率、エネルギー効率の観点から実用上の大きな課題とされている。

一方、都市部で発生するバイオマスについていえば、食品廃棄物などの様にそのまま飼料化・肥料化するマテリアル利用が可能な場合を除き、公園緑地、河川敷から発生する剪定枝、刈り草など草木系バイオマスは一般廃棄物として大半が焼却処分の対象とされている。

ここで、もう1つの都市バイオマスともいえる生活排水処理由来の下水汚泥脱水物(ケーキ)に注目してみると、高含水率のため難燃性であること、発生する場所が下水処理場に限定され広域からの収集の必要がないことなどから独自の焼却方式・設備により発生場所で焼却処理されている。

しかしながら、水分が高く難燃性の下水汚泥焼却処理に通常用いられる流動層式焼却方式は焼却炉内に珪砂の流動層を形成させるため、必要な送風圧が比較的高く運転にかなりの動力を要する。また、単一設備あたりの処理規模も都市ごみ処理と比較して小さいこと、下水汚泥脱水物の熱

量が小さく高含水率のため、取り出せる熱量が小さいなど、エネルギー資源としての利用は経済的に困難であると考えられてきた。

以上のように下水汚泥ケーキはエネルギー源としてみた場合には魅力の乏しいものであるが、

- ① すでに整備されたインフラによって安定的にかつ自動的に収集されるバイオマス資源である。
- ② 下水処理場においてすでに汚泥が焼却処理されている。
- ③ 都市型バイオマスとして、さらに公園、河川敷等で発生する剪定枝、刈り草など草木系バイオマスが自治体により組織的に収集されている。
- ④ 下水汚泥+草木系バイオマスの混合燃焼によりエネルギー消費の改善が見込める。

などの優位点に注目し、以下の低加圧流動層焼却プロセスを提案した。

- i、0.3MPa(abs)程度の低加圧下で下水汚泥と草木系バイオマスを混焼し、補助燃料を削減するとともに、ターボチャージャー(過給機)を利用して圧縮空気を製造し、排ガス圧力を送風・加圧のための動力として利用する。
- ii、加圧下で燃焼させることにより燃焼速度を向上させると共に、加圧により設備をコンパクト化する。<sup>1) 3) 4)</sup>
- iii、余剰のエネルギーは余剰加圧空気として取り出し、サイトの下水処理用曝気空気として利用する。

今回、このプロセスの開発における第一段階として、実証試験に先立ち可能性検討およびプロセスの各要素技術について実験的な検討を実施したのでここに報告する。

## 2. 都市型草木系バイオマスの賦存量

Table1に、(独)土木研究所にて調査・推定した公共緑地管理由来バイオマスの賦存量を示す。下水汚泥の発生量は、平成14年の下水道統計によれば210.5万t／年(dry)でほぼ同量の発生量があることがわかる。そして、このうちの相当量の公共緑地管理由来バイオマスが自治体の収集ルートにて収集されていることが推定され、高含水率で自己燃焼が困難な下水汚泥脱水ケーキと混焼されることにより、補助燃料の削減あるいはまったく不要とすることが可能と考えられる。(なお、バイオマスの賦存量、有効発熱量などについては今後詳細な調査を予定している。)

Table1 公共緑地管理由来バイオマス発生量

(独立行政法人 土木研究所推定値)

管理資産量	バイオマス量			
	枝葉 (10 <sup>3</sup> t-wet)	刈草 (10 <sup>3</sup> t-wet)	流木 (10 <sup>3</sup> t-wet)	計 (10 <sup>3</sup> t-dry)
道路 (10 <sup>3</sup> km)	1,172	101.7	660	315
河川 (10 <sup>3</sup> km)	144		1,626	1,138
ダム (箇所)	938		287	160.6
港湾 (箇所)	1,084		10.8	6.07
海岸 (10 <sup>3</sup> km)	34		169.4	94.9
空港 (箇所)	101	1,485	23.8	15.05
鉄道 (10 <sup>3</sup> km)	17.6	26.0	63.9	38.5
都市公園 (箇所)	61,597	50.1	321	218
合 計	179.2	2,695	467	1,986

## 3. プロセスの選定

下水汚泥の脱水ケーキはその含水率がおよそ75wt%から80wt%程度で、常温の空気では、自己燃焼することは不可能である。また、その粘着性の物性により通常の火格子式の燃焼装置では空気との接触効率が悪く、燃焼速度も低くなる。

このため、ほとんどの下水汚泥焼却設備では珪砂を流动媒体とした、流动層型の焼却炉が適用され、また汚泥の発熱量不足を補うため、補助燃料の使用と燃焼空気の焼却排気ガスによる500°C～650°C程度までの予熱を併用している。(一部には乾燥プロセスとの2段階焼却方式もある。)

しかしながら、流动層方式は流动層を形成させるため空気の吹き込み圧力が必要で、送風動力に比較的大きなエネルギーを必要とするうえ、汚泥水分によっては前述のようにオイルや、ガスなどの補助燃料も必要とする。

以上の欠点はあるものの、相対的にみれば、乾燥工程と組み合わせるプロセスと比較して、工程がシンプルであり、発生排気ガスに未燃ガスが含まれない(汚泥乾燥プロセスからは臭気を含むガスができるため処理が必要)など、優位性が高い。

これらの観点から、今回のエネルギー回収型プロセスの基本プロセスは、流动層方式を前提として、エネルギー回収方法を検討することとした。

## 3.1 エネルギー回収方法の比較

Table2に、これまでに比較検討されてきたエネルギー回収型の流动層汚泥焼却炉の一覧表<sup>2)</sup>を示した。(焼却量: 下水汚泥 100t／日で比較)

蒸気ボイラーによる蒸気タービン発電では蒸気ボイラーの設置には法律上(労働基準法等、第1種圧力容器設備)の制約も大きく、汚泥ケーキのような低カロリー物の焼却では回収エネルギーが小さいため、経済的に成り立たない。さらに、電力としてエネルギーを回収し、一部を自家消費する場合には商用電源との併用が必要で、系統連携設備のコスト負担が大きくなる。

また、加圧流动層+ガスタービン発電の組み合わせでは高価な発電設備の建設コストを回収するために発電量の確保が必要で、発電効率を上げるために、集約・大規模化と高圧運転が必須となり設備の立地、耐圧設計、安全確保など大きな課題が浮上してくる。

これらの点を考慮し、今回開発の目標は次に示す低加圧流动層焼却プロセスを選択した。

## 3.2 低加圧流动層焼却プロセス

Fig.1に今回開発対象として選定した低加圧流动層焼却炉のフローシートを示す。

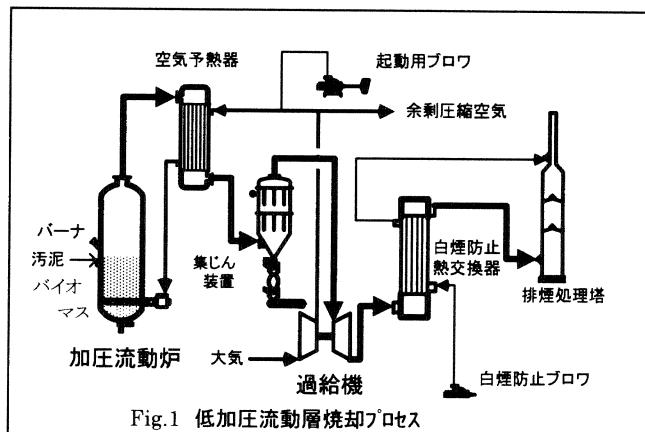


Fig.1 低加圧流动層焼却プロセス

下水汚泥脱水ケーキおよび、緑地管理バイオマスは加圧流动炉(0.3MPa)に供給され流动層内で激しく攪拌されながら燃焼する。

燃焼排気ガスは空気予熱器で燃焼用送風空気を加熱し熱回収された後、およそ600°Cで高温集じん器により除じんされる。除じんされた排気ガスはターボチャージャー(過給機)に導入され、圧縮空気を製造する。製造された圧縮空気の一部は、加圧流动炉の流动化空気として使用されるが、余剰圧縮空気が有り、これは系外で利用される。タービンを出た低圧の排気ガスは排煙処理塔で有害ガスを処理された後大気に排出される。

このようにターボチャージャーを使用することにより、通常の流动層焼却炉で必要となる送風機の動力(通常電力)を自己燃焼熱エネルギーでまかなうことが可能となり、従来の常圧流动層炉と比較して約40%運転電力を節約することが可能となる。<sup>2)</sup>

Table2 エネルギー回収型下水汚泥流動層焼却炉の比較<sup>2)</sup> (下水汚泥処理=100t/日で比較)

炉及びエネルギー回収方式	常圧流動層炉 +廃熱ボイラー発電	加圧流動層炉(1.2MPa) +ガスタービン発電	低加圧流動層炉(0.3MPa) +ターボチャージャー																
システム構成																			
システム概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>炉内は僅かに減圧を保たれ排ガスの外部漏洩を防止</li> <li>空気予熱後の排ガス系に廃熱ボイラーを設け、蒸気を発生させて蒸気タービンで発電する</li> <li>買電と併用するため電力の系統連携設備が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>炉内を高圧に保ち高温高圧の排気ガスを発生させる</li> <li>排気ガスはガスタービンを駆動し、燃焼用高圧空気を発生させ、さらに発電機を駆動する</li> <li>通常高圧部分をすべて耐圧隔壁内に収納する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>炉内は低加圧状態に保たれるが、圧力隔壁は持たない</li> <li>排ガスの圧力が低いためガスタービンの代わりにターボチャージャーを使用する</li> <li>発電機は持たず、自己運転のための加圧空気を得る</li> <li>余剰の加圧空気が発生するので水処理用曝気空などに利用可能</li> </ul>																
ケーキ含水率	78%(wetベース)	78%(wetベース)	78%(wetベース)																
補助燃料(重油)	65kg/h	127kg/h(焼却炉) +333kg/h(GT発電用)	53kg/h																
電力	<table border="1"> <tr> <td>消費</td><td>480kW</td><td>272kW</td><td>272kW</td></tr> <tr> <td>発電</td><td>164kW</td><td>1784kW</td><td>無し</td></tr> <tr> <td>買電</td><td>312kW</td><td>-1512kW</td><td>272kW</td></tr> <tr> <td>発電効率</td><td>3.20%</td><td>16.80%</td><td>—</td></tr> </table>	消費	480kW	272kW	272kW	発電	164kW	1784kW	無し	買電	312kW	-1512kW	272kW	発電効率	3.20%	16.80%	—		
消費	480kW	272kW	272kW																
発電	164kW	1784kW	無し																
買電	312kW	-1512kW	272kW																
発電効率	3.20%	16.80%	—																
システム	<table border="1"> <tr> <td>炉形式</td><td>常圧流動層炉</td><td>加圧流動層炉(耐圧隔壁内収納)</td><td>加圧流動層炉(耐圧隔壁無し)</td></tr> <tr> <td>空気供給</td><td>流動プロワ(電動式)</td><td>ガスタービンの圧縮機(GT出力の60%)</td><td>ターボチャージャーの圧縮機</td></tr> <tr> <td>炉内圧力(ゲージ)</td><td>-0.2~ -0.3kPa(減圧)</td><td>1.16MPa</td><td>0.2MPa</td></tr> </table>	炉形式	常圧流動層炉	加圧流動層炉(耐圧隔壁内収納)	加圧流動層炉(耐圧隔壁無し)	空気供給	流動プロワ(電動式)	ガスタービンの圧縮機(GT出力の60%)	ターボチャージャーの圧縮機	炉内圧力(ゲージ)	-0.2~ -0.3kPa(減圧)	1.16MPa	0.2MPa						
炉形式	常圧流動層炉	加圧流動層炉(耐圧隔壁内収納)	加圧流動層炉(耐圧隔壁無し)																
空気供給	流動プロワ(電動式)	ガスタービンの圧縮機(GT出力の60%)	ターボチャージャーの圧縮機																
炉内圧力(ゲージ)	-0.2~ -0.3kPa(減圧)	1.16MPa	0.2MPa																
技術課題	<table border="1"> <tr> <td>炉本体</td><td>既存技術</td><td> <ul style="list-style-type: none"> <li>水分負荷を考慮した、加圧流動層の燃焼特性</li> <li>炉体、補機の耐圧構造設計</li> <li>加圧下での固形バイオマスの供給方法</li> <li>高温腐食防止のための層内脱硫方法の検討、及び脱硫剤供給・抜き出し方法の開発</li> </ul> </td><td> <ul style="list-style-type: none"> <li>水分負荷を考慮した、加圧流動層の燃焼特性</li> <li>炉体、補機の耐圧構造設計</li> <li>加圧下での固形バイオマスの供給方法</li> <li>高温腐食防止のための層内脱硫方法の検討、及び脱硫剤供給や抜き出し方法の開発</li> </ul> </td></tr> <tr> <td>集じん機</td><td>既存技術</td><td> <ul style="list-style-type: none"> <li>高温集じん機、セラミックフィルター、マルチサイクロンなどの開発</li> <li>耐圧隔壁内でのメンテナンス方法の確立</li> </ul> </td><td> <ul style="list-style-type: none"> <li>低加圧状態で使用可能な高温集じん機の開発</li> <li>低加圧下でのフィルターの逆洗方法の開発</li> </ul> </td></tr> <tr> <td>ガスタービン &amp; ターボチャージャー</td><td>—</td><td> <ul style="list-style-type: none"> <li>既存GT改造での対応可能性検討</li> <li>排気ガスや煤じんによる腐食・摩耗対策</li> <li>電気事業法関連の制限事項</li> <li>電力の系統連携制御</li> </ul> </td><td> <ul style="list-style-type: none"> <li>既存ターボチャージャーの耐久性掌握</li> <li>排気ガスや煤じんによる腐食・摩耗対策</li> <li>要求仕様と市販品とのマッチング検討(特注は大幅なコスト高になる)</li> </ul> </td></tr> </table>	炉本体	既存技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>水分負荷を考慮した、加圧流動層の燃焼特性</li> <li>炉体、補機の耐圧構造設計</li> <li>加圧下での固形バイオマスの供給方法</li> <li>高温腐食防止のための層内脱硫方法の検討、及び脱硫剤供給・抜き出し方法の開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>水分負荷を考慮した、加圧流動層の燃焼特性</li> <li>炉体、補機の耐圧構造設計</li> <li>加圧下での固形バイオマスの供給方法</li> <li>高温腐食防止のための層内脱硫方法の検討、及び脱硫剤供給や抜き出し方法の開発</li> </ul>	集じん機	既存技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>高温集じん機、セラミックフィルター、マルチサイクロンなどの開発</li> <li>耐圧隔壁内でのメンテナンス方法の確立</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>低加圧状態で使用可能な高温集じん機の開発</li> <li>低加圧下でのフィルターの逆洗方法の開発</li> </ul>	ガスタービン & ターボチャージャー	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>既存GT改造での対応可能性検討</li> <li>排気ガスや煤じんによる腐食・摩耗対策</li> <li>電気事業法関連の制限事項</li> <li>電力の系統連携制御</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>既存ターボチャージャーの耐久性掌握</li> <li>排気ガスや煤じんによる腐食・摩耗対策</li> <li>要求仕様と市販品とのマッチング検討(特注は大幅なコスト高になる)</li> </ul>						
炉本体	既存技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>水分負荷を考慮した、加圧流動層の燃焼特性</li> <li>炉体、補機の耐圧構造設計</li> <li>加圧下での固形バイオマスの供給方法</li> <li>高温腐食防止のための層内脱硫方法の検討、及び脱硫剤供給・抜き出し方法の開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>水分負荷を考慮した、加圧流動層の燃焼特性</li> <li>炉体、補機の耐圧構造設計</li> <li>加圧下での固形バイオマスの供給方法</li> <li>高温腐食防止のための層内脱硫方法の検討、及び脱硫剤供給や抜き出し方法の開発</li> </ul>																
集じん機	既存技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>高温集じん機、セラミックフィルター、マルチサイクロンなどの開発</li> <li>耐圧隔壁内でのメンテナンス方法の確立</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>低加圧状態で使用可能な高温集じん機の開発</li> <li>低加圧下でのフィルターの逆洗方法の開発</li> </ul>																
ガスタービン & ターボチャージャー	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>既存GT改造での対応可能性検討</li> <li>排気ガスや煤じんによる腐食・摩耗対策</li> <li>電気事業法関連の制限事項</li> <li>電力の系統連携制御</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>既存ターボチャージャーの耐久性掌握</li> <li>排気ガスや煤じんによる腐食・摩耗対策</li> <li>要求仕様と市販品とのマッチング検討(特注は大幅なコスト高になる)</li> </ul>																
その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>ボイラーエquipmentが1種圧力容器のため、1回/年の定期検査が必要</li> <li>発電(自家消費)系統連携の設備が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高加圧状態の焼却炉に固形状のバイオマスを安全に投入する方法が現状では無いため補助燃料に固形バイオマスを代替することが困難</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>市販のターボチャージャーを利用する為 使用方法により耐食性の問題が生じる可能性がある(例: 脱臭空気による腐食など)</li> </ul>																

注、1): 加圧流動層炉+ガスタービン方式の検討では既存のガスタービンに小容量の物が無く、2,700kwのガスタービンを使用することで検討した。

注、2): 本表は、文献2)における検討結果を基に筆者らが修正したものです。

### 3.3 プロセスの特徴

プロセスの構成は加圧状態で運転される流動層焼却炉と、ターボチャージャー(過給機)との組み合わせで、ガスタービンを使用する石炭火力発電用加圧流動層とほぼ同じであるが、以下の特徴がある。

- ① このプロセスでは、燃焼空気の加圧手段として、広く市販されており、コスト的に有利なディーゼルエンジン用のターボチャージャーを使用することに特徴がある。ターボチャージャーは量産品であり、軽自動車用から大型船舶用まで、その送風容量に幅広いラインアップが用意されており、メンテナンス体制も整っているため、実用焼却炉の処理容量に応じて選定が自由にできる。
- ② また、ターボチャージャーはエンジン排気で駆動する設計となっており、ガスタービンほどの耐熱は無いが（およそ600°C～700°C）空気予熱器下流の下水汚泥焼却排ガス温度もほぼそのくらいで、設計上無理がなく、排ガス中のSOxによるタービン羽根の腐食もこの温度域では軽微と考えられる。
- ③ 加圧圧力を0.3MPa(abs)程度におさえ、装置設計を耐圧構造にしないで対応可能となる。特に法律上の圧力容器とならない範囲での設計が可能となる。
- ④ 自己燃焼不能な下水汚泥を主なエネルギー源とするため回収可能なエネルギー量が少なく、発電設備は持たない。

代わりに、必要な送風動力を自己発生エネルギーでまかない、さらに発生する余剰の加圧空気を下水処理場内で必要な曝気空気として利用すれば、水処理用電力の削減が期待できる。

### 4.先行実験結果

今回の研究開発計画では、最終的に200t／日(wetベース)の汚泥+バイオマスを焼却する低加圧流動層焼却装置を開発することを前提に、5t/day程度の実証プラントによる実証実験を計画している。

この実証実験に先立ち、以下の要素について実験的に検証が必要と考えられ、先行実験を実施した。

#### 4.1 ターボチャージャー起動実験<sup>5)</sup>

このプロセスは流動層を燃焼器とした内燃機関であるため、起動には何らかの外力でターボチャージャーに初期回転を与える必要がある。通常の手段であるセルモーター駆動は、市販のターボチャージャーには装備されておらず、別付けには大きな改造が必要となる上、焼却炉の立ち上がりまでの長時間に渡り数万回転の回転数をターボチャージャーに与えつづけることは不可能では無いとしても、相当な設備と電力が必要となる。(起動電力が大きくなり、受電容量も大きくなる)

このため、起動・昇温時には低圧の送風プロワで流動層焼

却炉を運転し排ガス温度が高くなるにしたがってターボチャージャーに排ガス流路を切り替えることで対応する事とした。この時のターボチャージャーの運転特性を測定した。

#### (1)実験装置

この実験設備のフローシートをFig.2に、使用したターボチャージャー、燃焼機の仕様をTable3,4に示す。また、Fig.3にターボチャージャーの写真を載せた。

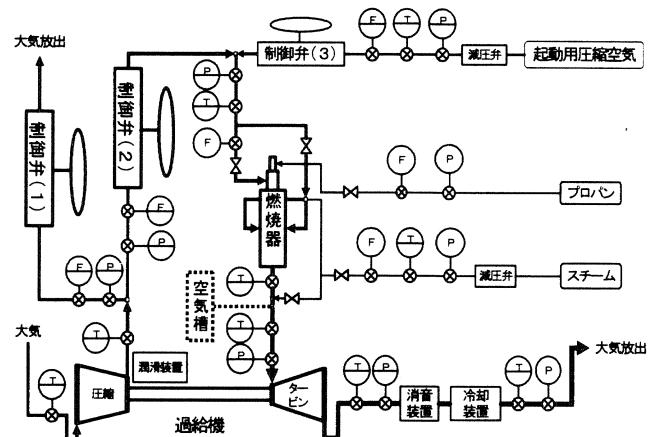


Fig.2 ターボチャージャー起動実験装置

実験は小型ディーゼルトラック用の過給機を使用し、加圧した空気を燃焼器に送りプロパンガスを燃焼させて昇温し、ターボチャージャーのタービンを駆動する。

起動は、コンプレッサから起動用圧縮空気を別ラインで燃焼器に送り、燃焼温度が上昇してタービン回転数が増加していくに従って制御弁(1)、(2)、(3)を制御して最終的には自立運転させる。

また、実際の設備では、燃料の他に燃焼物(主に汚泥)の水分が加わり、排ガス量が増加するため、これを模して水蒸気を排ガスラインに注氣するラインも設けた。

Table3 ターボチャージャー仕様

形式	遠心式
最高回転数	14,000rpm
圧縮側圧縮空気	2～15m <sup>3</sup> /min
圧力比	3
許容タービン入口温度	750°C
重量	約10.5kg

Table4 燃焼器の仕様

形式	円筒二重缶式
燃料	プロパン
燃料消費量	8.0m <sup>3</sup> /h
排ガス温度	600°C
外径	Φ267.4mm
長さ	1,263mm

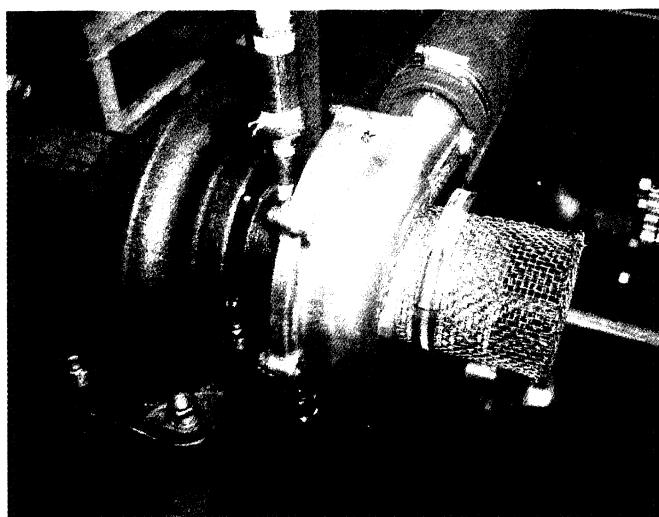


Fig.3 ターボチャージャー写真

## (2) 実験結果

### 1) 運転特性

実設備を想定した場合に、燃焼空気流量は流動状態による変動や下水汚泥の燃焼による変動が考えられる。そこで、運転条件を変化させて、実験装置の追随性を見たが、運転に問題となる程の変動は見られなかった。

定常時の安定性を見るために、Fig.4 に過給機圧縮空気流量と燃焼器出口排ガス温度を示す。流量に周期的な変動が見られ、排ガス温度の変動も見られる。この周期的変動を緩和するため燃焼排ガスラインに空気槽(容積約 100L)を取り付けた結果を Fig.5 に示す。周期的な流量変動は小さくなり安定度が増したことがわかる。燃焼空気と排ガスは過給機により影響を及ぼし合うため、排ガス側の空気槽が燃焼空気の安定に寄与していると考えられる。

実際の装置では、燃焼系には焼却炉本体、空気予熱器、集じん器など大容量の装置があるため、排ガスの変動は小さくなるものと期待される。

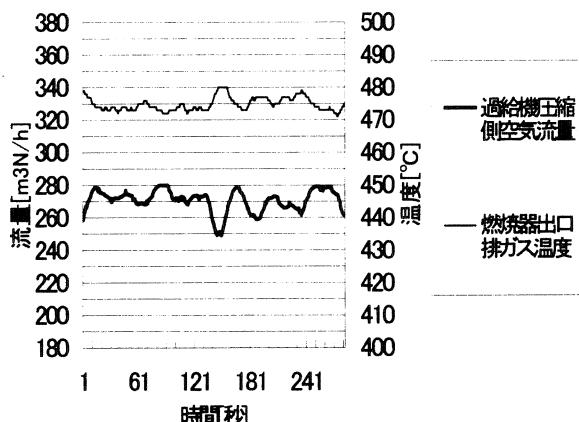


Fig.4 TC 運転データ(空気槽無し)

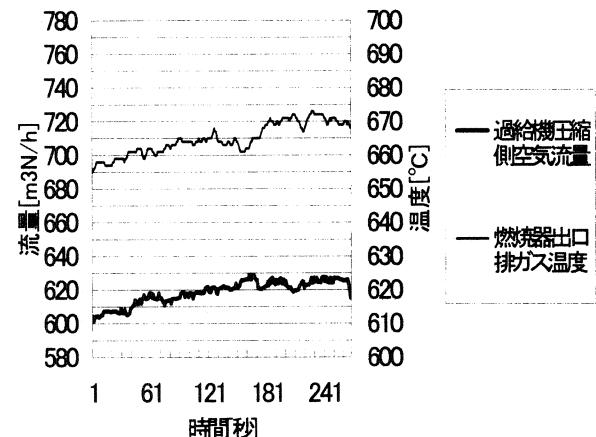


Fig.5 TC 運転データ(空気槽有り)

### 2) 起動特性

加圧流動層焼却プロセスでは、定格時の運転では流動プロワ(燃焼空気)、誘引プロワが不要になるが、起動時には起動プロワによる立ち上げを想定している。起動プロワは起動時のみに使用するため、電力消費量への影響は小さいが、契約電力、イニシャルコストへの影響が大きく出来るだけ小型化したい。

また、圧縮側は起動の際低風量域となり、サーリングを起こす可能性があるため、ターボチャージャーの起動特性を調査した。(Table5, Fig.6)

燃焼器着火後の起動状況例を①～④に示す。①は、制御弁(1)を閉じて行き過給機圧縮側圧力が起動用圧縮空気の圧力より高くなり制御弁(2)を開け始める前の状況である。②は、制御弁(2)が全開になり、制御弁(1)が全閉になった状況である。③④は、プロパン供給量を増やして負荷を上げた状況である。⑤⑥はスチームを添加した場合の特性である。

①は、起動用圧縮空気を燃焼空気に切り換える状態であり、この時が起動用圧縮空気流量が最大となり、流量は過給機タービン側流量に相当する。圧力は過給機圧縮側吐出圧力とほぼ同じである。過給機圧縮側の弱サーリングに近い運転であるが、負荷が低いため異常は見られなかった。

②では、過給機圧縮側空気が燃焼器に流れ、配管や燃焼器の圧力損失が増加するため①より流量、圧力比が高くなっている。

③、④では、プロパン供給量を増やすと過給機の回転数が上がり燃焼空気が増える。それと共に羽根車が抵抗となり圧力も上昇する。流量と圧力の関係は、燃焼器とダクトの圧力損失と過給機特性により決まる。

この起動実験の結果、低流量、低圧力比の運転では、圧縮側は弱サーリングに近い運転条件であるが、過給機の振動などの問題なく運転出来、圧縮空気による起動状態から自己継続運転へ問題なく切り替え可能なことを確認した。

⑤、⑥は排ガスにスチームを添加(50kg/h)し排ガスを增量した場合で、起動特性をサーリングより離すことが可能

Table 5 過給機運転状況

	①	②	③	④	⑤	⑥
圧縮側流量(Q)	m <sup>3</sup> /N/min	1.7	4.7	7.8	12.1	3.0
吐出圧力	MPaG	0.019	0.047	0.083	0.158	0.027
圧力比(πc)	-	1.18	1.46	1.82	2.55	1.27
回転数	rpm	50000	70000	91000	122000	55000
吐出温度	°C	35	54	82	124	41
タービン側流量	m <sup>3</sup> /N/min	3.4	8.4	11.4	14.8	5.2
入口圧力	MPaG	0.009	0.035	0.063	0.131	0.016
入口温度	°C	527	282	365	566	421
					スチーム添加	スチーム添加

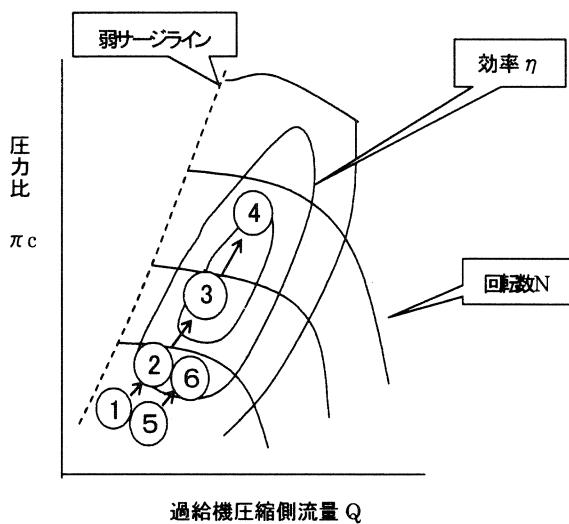


Fig. 6 ターボチャージャガス側運転特性

なことを示している。

### 3) 実設備の起動用プロワの検討

参考文献 1)のデータと実験結果より 100t/日規模の設備を想定して検討を行った。起動用プロワを小さくするために、過給機が低負荷状態で圧縮側の空気を燃焼空気に切り換える必要がある。この場合、加圧流動焼却システムの起動用プロワは、過給機特性より  $2950\text{m}^3/\text{N/h} \times 3000\text{mmH}_2\text{O}$  の能力が必要となると推測される。従来からの気泡流動炉の流動プロワ能力は、 $6000\text{m}^3/\text{N/h} \times 3500\text{mmH}_2\text{O}$  程度である。

送風機の所要動力は、流量と圧力に比例するので起動用プロワの所要動力は気泡流動炉の流動プロワの 42% ( $2950/6000 \times 3000/3500 \times 100$ )となる。さらに、小型化するために、燃料消費量は増えるが、スチーム添加や水噴霧することで排ガス量を増加すると、排ガス水分 30%の場合で、所要動力を 29% ( $0.42 \times 0.7 \times 100$ )まで小さくすることができると考えられる。

### 4.2 加圧流動層燃焼実験

加圧焼却の利点は、排ガスの圧力エネルギーから直接動力エネルギーを回収することができる点と云えるが、さらに加圧燃焼では、燃焼場における酸素分圧が高くなるため、燃焼速度が速くなり、燃焼炉を小型に設計できることも大きな利点である。通常石炭火力発電などで実施されている加

圧流動層ボイラーでは燃焼速度はほぼ運転圧力に比例するといわれており、下水汚泥の焼却においても同様な性能が期待される。<sup>6)</sup>

しかしながら、下水汚泥の様な高含水スラッジを焼却する場合、その燃焼過程は、汚泥ケーキの分散→乾燥→ガス化→燃焼 となることが予想され、特に乾燥工程は流動層粒子および流動ガス→汚泥ケーキ粒子への熱移動が支配因子となることが予想され、この過程が全体の律速因子になると考えられる。

このため、実証実験に先立ち以下の点を明確にするため、実証試験規模の加圧流動層炉を試作し、下記項目を目的に加圧燃焼実験を実施した。

- ① 加圧流動層焼却炉内での流動層容積当たりの汚泥許容燃焼負荷が、運転圧力を増加させた場合、予想通り増加するかどうか確認する。  
すなわち、流動層蒸発水分負荷を検討する。
- ② 実炉における耐圧焼却炉設計に必要な耐圧シール構造の健全性を確認する。

#### (1) 実験設備

実験設備のフローシートおよび概観を Fig. 7 および Fig. 8 に示す。

流動層炉は実証試験での流用を考慮し、 $190\text{kg}/\text{h}$  (Wet ベース) の下水汚泥脱水ケーキを焼却可能なサイズとし、内径  $700\text{mm} \phi \times 7200\text{mmL}$  (Bed+Freeboard)、フランジ継ぎによる3分割構造とした。(フランジのシール性確認のため: 設備の分解時に調査予定)

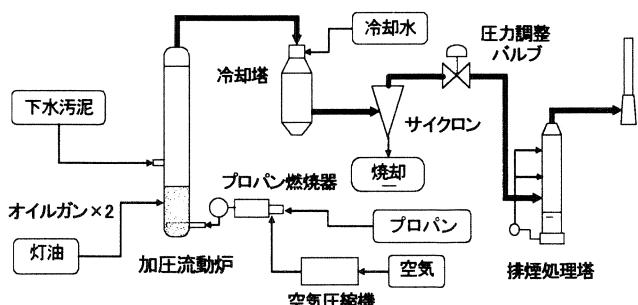


Fig. 7 加圧流動層燃焼実験設備フロー

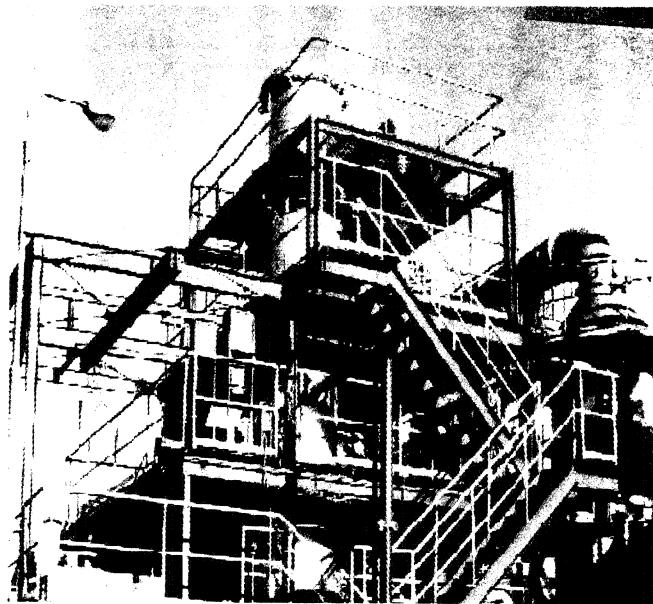


Fig.8 加圧流動層燃焼実験設備写真

## (2) 実験結果

### 1) 収支検討

加圧流動炉本体の仕様を Table6に示す。また運転条件をTable7に示す。汚泥供給量は185kg/h(wetベース)、補助燃料は、プロパンと灯油を使用した。砂層水分負荷を測定するため、汚泥に水を添加し水分 78.6%で運転を行った。

熱収支を検討した結果、炉の放熱は約 10%であり、小型のテスト装置としては低めであった。

### 2) 温度特性

下水汚泥、供給時の温度変化をFig.9に、その時の燃空気、排ガス流量と炉内圧力の変化をFig.10に示す。汚泥供給前は、砂層温度が高く、フリーボードの温度は低く、温度差が300°C程度あった。汚泥供給後砂層温度は下がり、フリーボード温度が高くなり、温度差は小さくなった。

フリーボードの下部温度が非常に高くなっているが、砂層や炉出口温度が低いことから、輻射の影響で高い温度指示となったと考えられる。これは加圧効果により気相の燃焼速度は速くなるため、常圧の気泡流動よりフリーボード下部での燃焼が良好となり、火炎輻射による温度上昇と考えられ

る。

また、砂層(上部)温度の変動が大きくなつた、これは、下水汚泥を圧入するとき下水汚泥が均一ではなく塊で供給されたためと考えられる。

Table6 加圧燃焼実験用流動層炉

内 径	700mm $\phi$
高 さ	約 9,200mm
空塔速度	約 0.7m/s
流動媒体種類	5号と4号ケイ砂混合
流動媒体量	530kg(流動部分)

Table7 実験条件

汚泥供給量	185kg/h
補助燃料	
プロパン	約 5m <sup>3</sup> /h
灯 油	約 17L/h
燃焼空気	約 540m <sup>3</sup> N/h
炉内圧力	約 0.15MPa (G)

Table8 汚泥性状

水 分	78.6	%
Ig-loss	86.5	dry%
高位発熱量	19.4	kJ/g-dry
低位発熱量	18.0	kJ/g-dry
C	43.7	dry%
H	6.4	dry%
O	30.8	dry%
N	5.1	dry%
全 S	0.584	dry%
全 Cl	0.071	dry%

### 3) 砂層水分負荷

下水汚泥の水分は、ほとんど流動部で蒸発し水蒸気となる。

常圧流動炉では、流動媒体あたりの蒸発水分量を決めて流動媒体の量を決めており、砂層水分負荷として  $150 \text{ kg-H}_2\text{O}/(\text{t-sand} \cdot \text{h})$  程度である。本研究では、加圧流動炉の砂層水分負荷は、 $275 \text{ kg-H}_2\text{O}/(\text{t-sand} \cdot \text{h})$  と常圧流動炉の 1.8 倍程度近く大きくなつたが、特にベッド温度の低下や、温度分布の異常も無く、また、燃焼不良による不完全燃焼などの問題は生じなかつた。

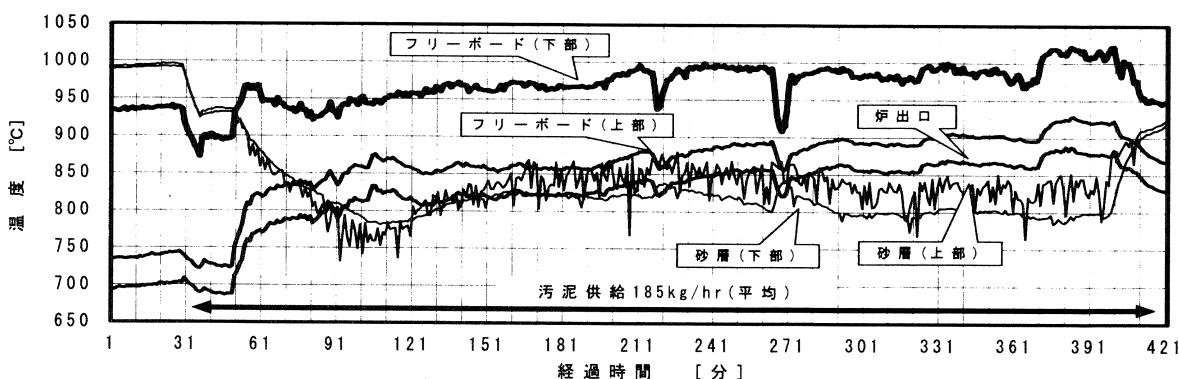


Fig.9 汚泥燃焼データ(温度)

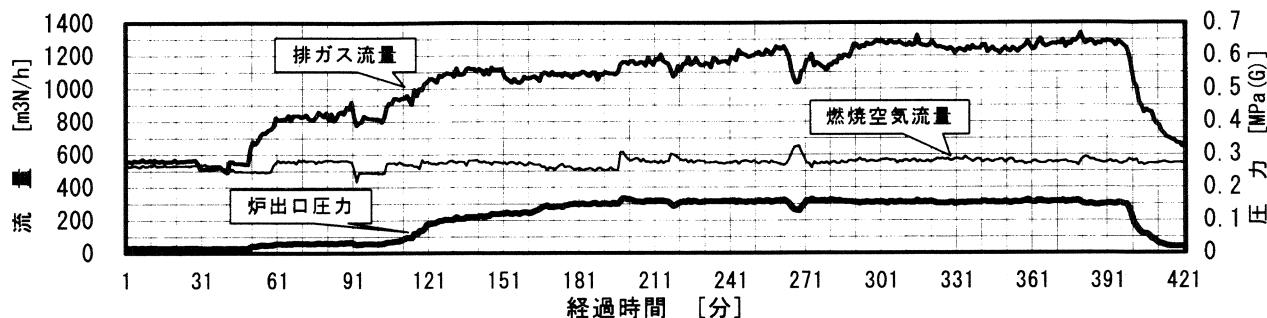


Fig.10 汚泥燃焼データ(流量、圧力)

この効果については

- ① 加圧により流動状態が改善され、伝熱の効率が良くなつた。  
(ガス密度・粘度の増大により流動状況がよくなる)
- ② 加圧によりガス密度が上がりガス流動媒体間での伝熱速度が増すため、汚泥の乾燥速度が速くなつた。
- ③ 加圧運転により、燃焼時の酸素分圧が高くなり、流動層内での汚泥燃焼速度が大きくなるため、部分的に見れば汚泥粒子周りの温度が高くなり、燃焼時の流動媒体への伝熱が大きくなつた。
- ④ もともと、流動層への水分負荷は経験的に決められたものであり実質的にはより多くの負荷が可能である。

などの要因が考えられるが、詳細は今後の研究により明らかにしたい。

転における問題点を明らかにし、健全な設備設計のためのデータを蓄積して、早期の実用化を目指すものである。

Table9 実証実験の概要

項目	仕 様
計画処理能力	190kg/h (下水汚泥ケーキ換算)
処理方式	低加圧流動層燃焼方式
加圧方式	ターボチャージャーによる自己加圧
補助燃料	固形バイオマスおよび重油(始動時)
加圧圧力	0.3MPa(abs) = 約0.2MPa G
運転温度	800°C ~ 850°C
設置予定場所	長万部終末処理場内

## 5.まとめ

以上の結果、以下の知見が得られた。

- ① 都市部に賦存する緑地管理由来バイオマスと、下水汚泥を混合焼却するエネルギーを回収型焼却設備として低下圧流動層炉とターボチャージャーの組み合わせプロセスを検討した結果、経済性において実現可能なものとなり得ることがわかった。
- ② このプロセスのキーポイントとなる、ターボチャージャーの運転特性を実験的に確認し、起動時の低風量運転でも問題なく運転可能で、低容量の起動用プロワで設備の起動が可能なことが確かめられた。
- ③ また、実証試験規模の下水汚泥脱水ケーキの加圧燃焼試験において、0.3MPa (abs) 程度では処理能力はほぼ運転圧力上昇に伴って向上し、水分負荷による限界は影響しないことがわかった。

## 6.今後の予定

先行実験で得られた結果を基に下水汚泥ケーキで 190kg/h の処理能力を持つ実証試験設備を北海道長万部下水処理場内に建設することを計画し設備の設計を開始した。

その概略仕様を Table9 に示す。

この実証試験により低加圧流動層焼却プロセスの実用運

## 参考文献

- 1) 小嶋洋史、高角章夫、塚本稔ら: 加圧燃焼法による下水汚泥の焼却システム、第 41 回下水道研究発表会講演集、pp987~989(2004)
- 2) 落修一他: 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、(独)土木研究所 共同研究報告書 第 308 号(2004)
- 3) 鈴木善三、落修一、高角章夫ら: 下水汚泥の加圧流動層燃焼、第 41 回下水道研究発表会講演集、pp984~986(2004)
- 4) 鈴木善三、落修一、野島智之、片岡正樹、塚本稔: 下水汚泥の加圧流動層燃焼によるエネルギー回収システム、再生と利用、Vol.27, No.106, pp29~35(2004)
- 5) 長沢英和、原達也、落修一ら: 下水汚泥を想定した加圧燃焼に於ける運転特性、第 42 回下水道研究発表会講演集、pp1065~1067(2005)
- 6) 鈴木善三: 第 16 回流動層技術コーステキスト(2004)

共同研究者: (月島機械株式会社) 寺腰和由、永吉義一、高須利昌、渡會知則、(三機工業株式会社) 岩井良博、原達也、平野元康、(独立行政法人土木研究所) 尾崎正明