

車載式高効率汚泥乾燥設備の 実用化研究

1. はじめに

中・小規模下水処理場における単独の汚泥処理は、施設の稼働率や維持管理費を考慮すると、特に初期段階では経済的でないことが多い。また、石川県七尾市鹿島地区では、維持管理費に占める汚泥処分費の割合が年々高くなる傾向にあることから汚泥ケーキの効率的な処理・処分が急務である。

本技術は、図-1に示すように下水処理場の汚泥ケーキをガスタービン発電機の排熱を利用し、乾燥、成形し、汚泥ケーキの減容化、乾燥汚泥の多目的利用を図るものである。

また、本技術は、従来の乾燥炉のように熱風発生炉を使うことなく、かつ、外部からの電源を必要としない独立型の乾燥システムであり、本乾燥設備を

トラックに搭載することにより複数の小規模下水処理場を巡回して乾燥処理が可能となり、効率的な運用が図れる。

2. 研究内容

2.1 研究項目

本実用化研究は、平成9年度～平成11年度の3ヶ年にわたって実施するものであり、全体の研究項目は、以下の通りである。

- ① 発電機排ガス利用による乾燥効率、集塵機（スクラバ）での乾燥排ガスの脱臭効果
- ② 設備のコンパクト化
- ③ 乾燥汚泥の活性炭添加による脱臭効果
- ④ 総合エネルギー効率の確認
- ⑤ 乾燥汚泥の品質と有効利用用途の検討

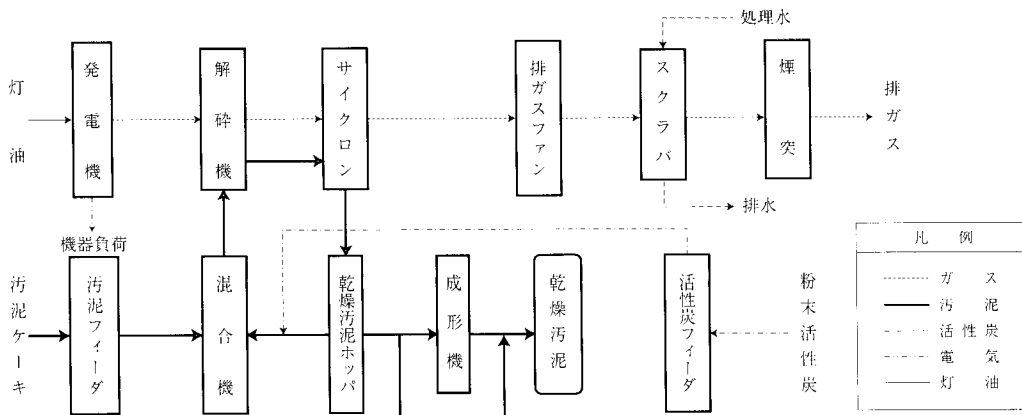


図-1 対象技術のフロー

2.2 研究工程

本実用化研究の全体研究工程を表-1に示す。

表-1 全体研究工程

| 項目 | 平成9年度 | 平成10年度 | 平成11年度 |
|----------|-------|--------|--------|
| 各プロセス評価 | — | | |
| (プラント設計) | ----- | | |
| (プラント製作) | | ----- | |
| 実証実験 | | | — |
| 性能評価 | | | — |
| 評価検討 | | | — |
| 報告書作成 | | | — |

を確認する。

表-2 主要機器リスト

| 機器No. | 名称 | 型式 | 仕様 | 動力(kW) |
|-------|-------------|----------------|------------------------|--------------|
| 1 | 発電機 | ガスタービン | 75kVA | 60 |
| 2 | 燃料タンク | 床下角型 (ポンプ付) | 700ℓ | 0.09 |
| 3 | 解砕機 | ケージミル | 400kg/h | 11 |
| 4 | サイクロン | 接線流入式 | 40 m ³ /min | |
| 5 | スクラバ | 水洗式 | 40 m ³ /min | |
| 6 | 排ガスファン | ターボファン | 90 m ³ /min | 22 |
| 7 | 混合機 | スクリュュー式 | 0.15 m ³ /h | 5.5 +0.75 |
| 8 | 成形機 | 押し出し式 | 50 ℓ/h | 3.7 |
| 9 | 活性炭 フィーダ | ロータリー式 | 12 ℓ/h | 0.1 +2.0 |
| 10 | コンプレッサ | 可搬式 | 150 ℓ/min | 1.5 |

3. 研究結果

本年度は、現地（七尾市西部水質管理センター）で実機（400kg/h）を使用し、西部水質管理センターの汚泥ケーキを用いて冬季の実証実験を行った。

実機を写真-1、そのフローシートを図-2に示す。また、主要機器リストを表-2に示す。

3.1 研究工程及び内容

- ・表-3に本年度の研究経緯を示す。
- ・実験は、現地で実機を使用し11～12月に汚泥ケーキによる実負荷運転を行い、性能評価調査として以下の項目について調査した。

表-3 本年度研究工程

| 項目 | 平成10年 | | | | | | | | | | | | 平成11年 | | | |
|----------|-------|---|---|---|---|---|----|----|----|---|---|---|-------|--|--|--|
| | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | | | | |
| 実証実験計画 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 性能評価試験 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 解析・報告書作成 | | | | | | | | | | | | | | | | |

(1) 乾燥性能調査

- ① 物熱収支を測定し、エネルギー効率と乾燥効率を検討する。
- ② 乾燥排ガスの水洗による脱臭効果と排水性状を調査し、排ガスの公害対策を検討する。
- ③ 乾燥汚泥の活性炭添加による脱臭効果を測定し、製品の長期保存性の検討を行う。
- ④ 乾燥汚泥の成分分析と溶出試験を実施して、有効利用の有用性を確認する。
- ⑤ 最大負荷量を確認して、緊急時の装置の上限能力を確認する。

(2) 維持管理性能調査

- ① 設備の立ち上がり特性を把握して、装置の定格運転に達する時間を把握する。
- ② 連続運転における安定性を調査し、連続運転の安全性を確認する。
- ③ 走行に対する耐久性を、リークテスト等で確認する。
- ④ 摩耗に対する耐久性を、主要個所の実測定で確認する。
- ⑤ 騒音・振動調査を行い、周辺環境への影響度

3.2 研究結果

(1) エネルギー効率と乾燥効率

今年度、実証実験時の物熱収支結果を平成9年度小型実験機の運転結果及び設計収支計算値と共に表-4に示す。

また、今年度実証実験時の物熱収支図を図-3に示す。

乾燥効率は約67%と、小型実験機と同等であった。設計計算値と比較して、乾燥排ガス温度（80℃→110℃）、乾燥汚泥温度（60℃→70℃）が高くなっているが、これは排水へのSS移行分を少なくするため乾燥汚泥循環量を下げたことによる。

循環量を下げ、汚泥と熱風との接触表面積が小さくなった分、蒸発速度が低下し、乾燥機出口温度が上昇した。

乾燥前後の乾物有機分は、ほぼ同じで、乾燥による有機分の分解は認められなかった。

エネルギー効率は、図-4に示すように約55%と小規模実験機、実機の想定結果のエネルギー収支と比較すると、やや下回る結果であるが、従来の乾燥機に比して高効率であることが確認できた。



写真-1 実機 (400kg/h) の外観

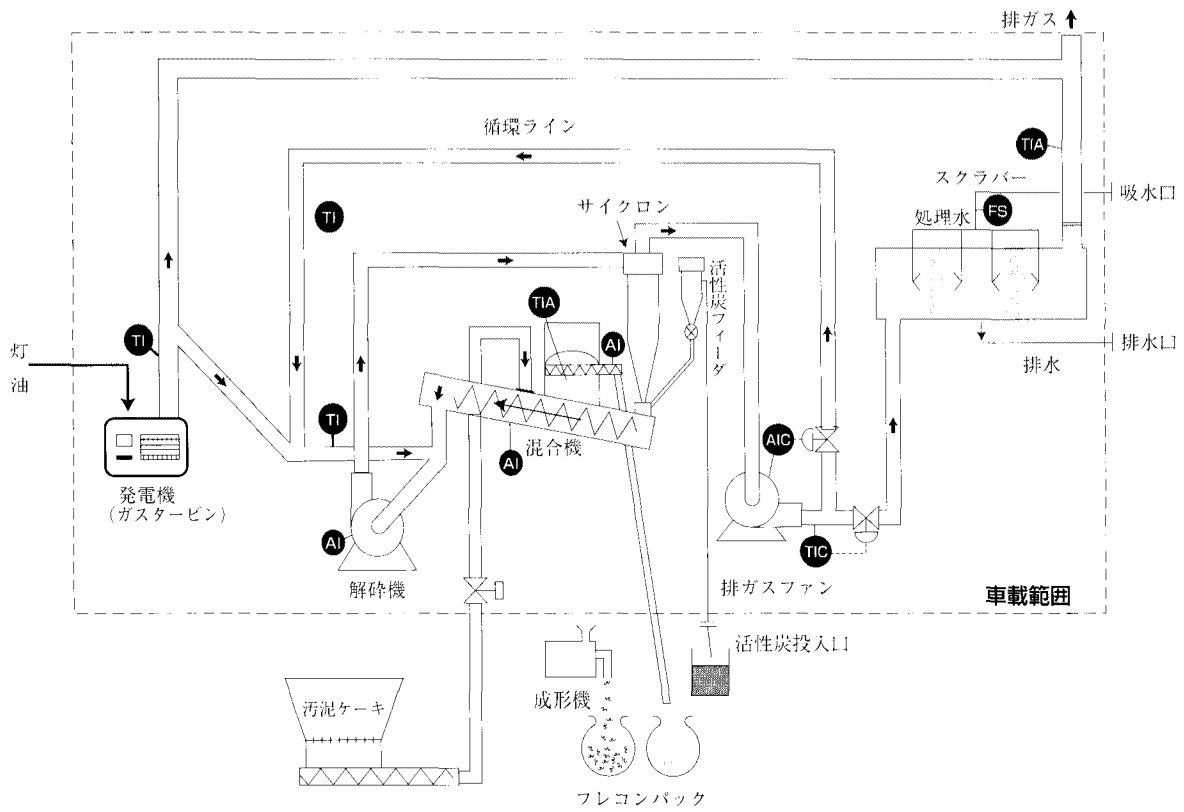


図-2 高効率汚泥乾燥装置フローシート

表-4 物熱収支の比較

| | H9小規模実験機 | 今回の結果 | 計算値 |
|---------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 汚泥ケーキ投入量 | 50 kg/h | 400 kg/h | 400 kg/h |
| 汚泥ケーキ含水率 | 85 % | 85 % | 85 % |
| ガスタービン排気温度 | 267 °C | 450 °C | 475 °C |
| 発電量 | 2.2 kW | 25 kW | 25 kW |
| 乾燥機入口温度 | 264 °C | 306 °C | 300 °C |
| 乾燥排ガス温度 | 64 °C | 110 °C | 80 °C |
| スクラバ出口ガス温度 | 40 °C | 33.2 °C | 40 °C |
| 乾燥汚泥温度 | 50 °C | 70 °C | 60 °C |
| 乾燥汚泥含水率 | 15 % | 21 % | 20 % |
| 灯油消費量 | 3.6 kg/h | 38.4 kg/h | 38 kg/h |
| 乾燥効率 | 67.5 % | 67.2 % | 73.5 % |
| 乾燥汚泥循環比 (DS比) | 105 | 117 | 124 |
| 乾燥排ガス量 | 511.5 Nm ³ /h | 2,025 Nm ³ /h | 2,104 Nm ³ /h |
| 排水SS | - | 350 mg/ℓ | - |
| SS回収率 | - | 94 % | - |
| スクラバ洗浄水量 | L/G=20 ℓ/m ³ | L/G=5 ℓ/m ³ | - |
| 脱水ケーキ有機分 (DS) | - | 80.1 % | - |
| 乾燥汚泥有機分 (DS) | - | 79.2 % | - |
| 活性炭添加率 | 2 % | 2 % | - |

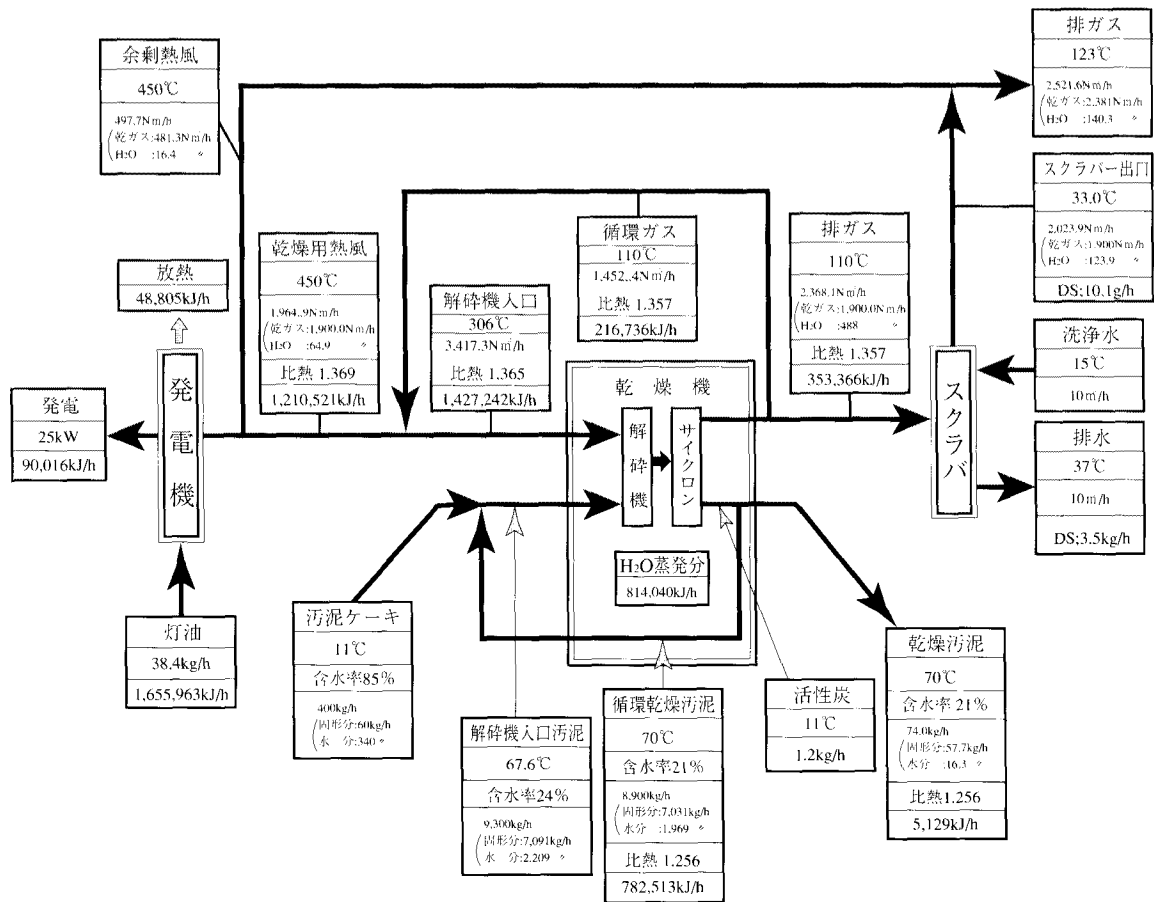


図-3 実機における物熱収支

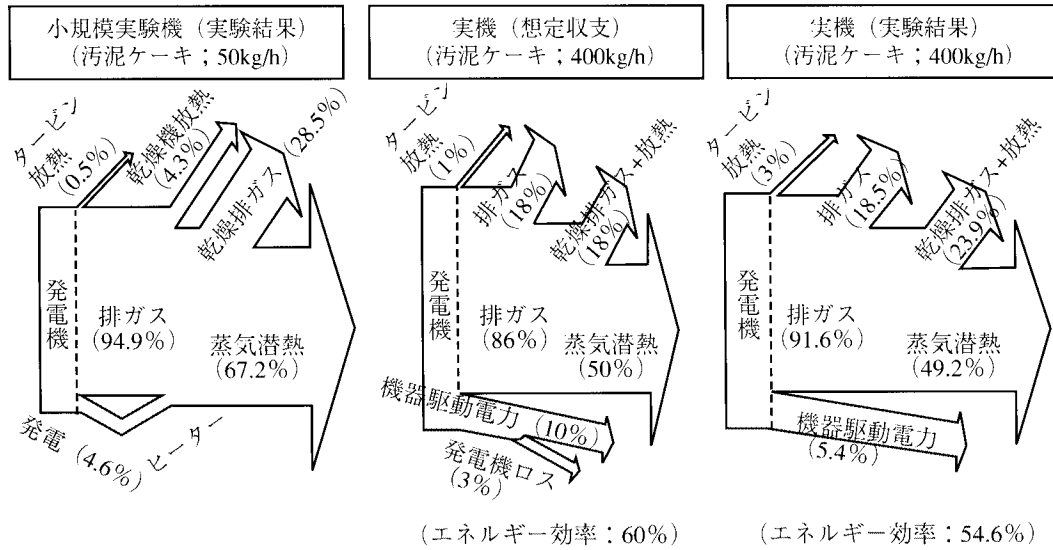


図-4 実機と小規模実験機のエネルギー収支図

(2) 乾燥排ガスの性状と排水性状

実機の灯油使用量は、40 l/hであるため大気汚染防止法の規制対象外であるが、本法の規制対象物であるダスト、SOx、NOx等について、湿式のスクラバ方式による処理効果の調査結果を表-5、表-6に示す。

この結果、ダスト濃度は洗浄水 6 m³/hで0.03g/N m³と殆ど除塵でき、SOx、NOxとも法的規制をクリアできるものであった。

臭気濃度は、洗浄水量が多いほど低くなる傾向が見られ、洗浄水量10m³/hで、悪臭防止法上の臭気強

度2.5に対応する許容出口臭気濃度は、法的な基準値(臭気濃度：2,182)以下であった。

洗浄排水に関しても、表-7に示したように、洗浄水量10m³/hで、SS：346mg/l、BOD：185mg/lと流入下水の水質程度の値となった。

表-5 排ガス処理後の有害成分濃度(煙突全体)

| 項目 | ダスト濃度 (g/N m ³) | SOx濃度 (ppm) | SOx排出量 (N m ³ /h) | NOx濃度 (ppm) | O ₂ 濃度 (%) |
|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------|------------------------|
| 法規制値 | 0.2 ^{*1} | | 0.04 ^{*2} K=2.34 | 230 ^{*1} | |
| 洗浄水量 | | | | | |
| 0 m ³ /h | 0.38 | 0.6 | 0.001 | 36.8 | 17.2 |
| 6 m ³ /h | 0.03 | 0.9 | 0.001 | 48.2 | 17.1 |
| 10 m ³ /h | 0.026 | 0.9 | 0.001 | 46.9 | 17.1 |
| 項目 | 温度 (°C) | 湿りガス量 (N m ³ /h) | 乾燥ガス量 (N m ³ /h) | 水分 (%) | CO ₂ 濃度 (%) |
| 洗浄水量 | | | | | |
| 0 m ³ /h | 175.6 | 2,950 | 2,300 | 17.7 | 2.8 |
| 6 m ³ /h | 160.5 | 2,555 | 2,300 | 6.9 | 2.8 |
| 10 m ³ /h | 142.6 | 2,524 | 2,300 | 6.1 | 2.7 |

*1:ばいじん、窒素酸化物の規制値は、乾燥炉の規制値を適用した。

*2:硫黄酸化物排出量の算出の際、中筒のガス温度、乾きガス量、K値として特別排出基準の2.34を採用した。

表-6 臭気成分及び臭気濃度

| 項目 | 洗浄水量 | | |
|-----------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| | 0 m ³ /h* | 6 m ³ /h* | 10 m ³ /h* |
| 臭気濃度 | 7,840 | 3,440 | 1,360 |
| 臭気指数 | 39 | 35 | 31 |
| アンモニア | ppm 0.70 | 0.90 | 0.74 |
| メチルメルカプタン | ppm N.D | N.D | N.D |
| 硫化水素 | ppm 0.027 | 0.014 | 0.030 |
| 硫化メチル | ppm 0.022 | 0.041 | 0.033 |
| プロピオン酸 | ppm 0.0028 | 0.012 | 0.0031 |
| n-酪酸 | ppm 0.0002 | 0.0026 | 0.0010 |
| アセトアルデヒド | ppm N.D | N.D | N.D |

*:活性炭の添加は全て固形物当たり2%である。

表-7 排水成分分析表

| 洗浄水量 | SS (mg/l) | NH ₄ ⁺ -N (mg/l) | BOD (mg/l) |
|----------------------|-----------|--|------------|
| 処理水 | 0.4 | - | - |
| 6 m ³ /h | 543 | 8.2 | 293 |
| 10 m ³ /h | 346 | 6.8 | 185 |

(3) 乾燥汚泥の活性炭添加による脱臭効果

乾燥汚泥製品の成形後の臭気発生について3日後の測定結果を表-8に示した。活性炭の5%添加で、臭気が約半減することがわかった。ここで用いた試料は平成11年度にかけて、長期保存中の臭気発生の経時変化に測定する予定である。

また、成形操作を行う場合には、圧縮成形時に成形品表面が加熱されるため、乾燥直後に直接成形すると強いアンモニア臭を発する。このため、乾燥汚泥を室温程度に温度を下げてから成形する必要がある。

表-8 臭気成分及び臭気濃度

| 項目 | 添加率 | | | | |
|--------------|-----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 成形物形状：5φ×10mm (L/D=2) | | | | |
| | 0% | 2% | 5% | 10% | 15% |
| 臭気濃度 | 2,300 | 1,700 | 1,300 | 730 | 410 |
| アンモニア* (ppm) | N.D (<0.2) | N.D (<0.2) | N.D (<0.2) | N.D (<0.2) | N.D (<0.2) |
| 硫化水素* (ppm) | N.D (<0.1) | N.D (<0.1) | N.D (<0.1) | N.D (<0.1) | N.D (<0.1) |

*：ガス検知管の定量下限値を結果として用いた。

表-9 乾燥汚泥の性状

| 項目 | 基準値# | 測定値 |
|----------------------------------|---|--------------------|
| 有機物 (乾物当り) | 35%以上 | 79.1% |
| 炭素-窒素比 (C/N比) | 10以下 | 6.05 |
| 窒素全量 (乾物当り) | 2%以上 | 6.99% |
| リン酸 (P ₂ O) 全量 (乾物当り) | 2%以上 | 4.19% |
| アルカリ分 (乾物当り) | 25%以下 | 6.26% |
| 水分 (乾物当り) | 30%以下 | 21% |
| pH (-) | - | 6.4 |
| カリ (K ₂ O) 全量 (乾物当り) | - | 0.27% |
| ヒ素 (As) (乾物 1kg当り) | ※50mg以下 | 9.7mg |
| カドミウム (Cd) (乾物 1kg当り) | ※5mg以下 | 1.6mg |
| 水銀 (Hg) (乾物 1kg当り) | ※2mg以下 | N.D (<0.0005) |
| 銅 (Cu) (乾物当り) | 600ppm以下 | 290ppm |
| 亜鉛 (Zn) (乾物当り) | 1,800ppm以下 | 550ppm |
| 高位発熱量 | - | 17,665 kJ/kg |
| 微生物試験* | 大腸菌 ○1,000 MPN/g-DS サルモネラ菌 ○3 MPN/g-DS | 11 MPN/g-DS N.D |

#：「有機質肥料等品質保全研究会報告書」より下水汚泥肥料品質概要

※：「肥料取締法」にある規制値を準用

*：「衛生試験法」(1990) 1.3.12 汚染指標細菌試験法

○：EPA基準

(4) 乾燥汚泥の品質

表-9に乾燥汚泥の含有試験、及び肥料成分等の分析結果を、図-5に粒度分布の結果を示した。

この結果、肥料の推奨成分を総て含み、施肥効果が期待される。また、粒度分布は、平成9年度小規模実験時より若干小さい結果が得られた。

溶出試験結果(「下水汚泥肥料に関する溶出基準項目」)は、ヒ素以外の溶出量は、すべて基準を満足していた。なお、ヒ素については、活性炭の添加量を増やすことで溶出基準以下に押さえることが確認できた。

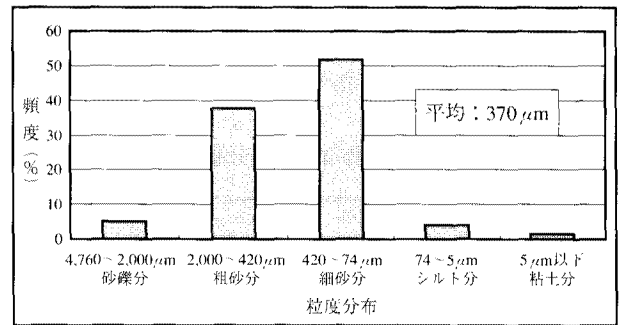


図-5 乾燥汚泥粒度分布 (μm)

(5) 最大負荷量の検討

定格前後の負荷量について、乾燥汚泥循環量を変えて乾燥汚泥含水率を20%に維持する様に運転した結果を表-10に示した。

最大負荷量は乾燥汚泥循環量を最大にして、乾燥排ガス温度を110℃程度にしたときに得られる。先の図-4に示したように、乾燥の熱源であるガスタービン排気ガスは定格蒸発量の20%程度余裕があるものの、乾燥汚泥循環量が律速となり、最大負荷量は約5%増であった。

表-10 最大負荷量

| 処理量 | 乾燥排ガス温度 | 乾燥汚泥循環量 (DS比) | 乾燥汚泥温度 | 乾燥汚泥含水率 |
|----------|---------|---------------|--------|---------|
| 375 kg/h | 105℃ | 117倍 | 67℃ | 20% |
| 375 kg/h | 102℃ | 147倍 | 66℃ | 20% |
| 400 kg/h | 110℃ | 117倍 | 70℃ | 21% |
| 400 kg/h | 105℃ | 147倍 | 67℃ | 20% |
| 420 kg/h | 110℃ | 147倍 | 70℃ | 22% |

(6) 起動・停止時間

今回の実験結果では、起動時間はケーキ供給ポンプ運転（200kg/h）まで約20分、定格（400kg/h）まで約50分であった。

また、長期間停止させた場合は乾燥汚泥ホッパや混合機内のケーシングに結露水が付着し、乾燥機内の乾燥汚泥含水率が上昇し起動時間が長くなる可能性があるため、乾燥汚泥ホッパに取り付けたトレースヒーター（100V外部電源、5 kW）で保温することが望ましい。

停止時間は、次回運転のために乾燥汚泥を貯留するための運転を30分程度行うが、ケーキ供給ポンプを停止してからは20分以内に全工程が終了する。20分間の運転は、停止中の結露に対し乾燥汚泥含水率を下げておく運転と、機内ケーシング等への付着汚泥を除去するための空運転を行う。

(7) 連続運転

24時間連続運転状況を図-6に示す。定常状態に達するまでの運転は、汚泥ケーキの供給量の増減で調整し、定常状態に至った以降は、主に乾燥汚泥温度を見ながら排ガス温度の設定変更で運転を行った。

尚、定常状態に入ってから、乾燥汚泥温度、排ガス温度、乾燥汚泥含水率等の変化は少なく、排ガス温度の適性値を決めることで、調整等は不要であった。

また、燃料消費量は、ガスタービン発電機の発電量（消費電力量）によって決まるので、運転中は、ほとんど増減なく、38~39kg/hであった。

(8) 走行に対する耐久性

富山県高岡市から石川県七尾市までのトラック走行において、走行前後の配管リークテストを行った。走行距離約100km、走行時間2時間半であった。

リークテストは、解砕機出口からサイクロンを経て排ガスファン手前までの配管と機器にて行った。

リークテストの結果は、走行前後で有意な差が見られず、走行による配管の亀裂、フランジボルトの緩み等は認められなかった。

(9) 摩耗検査

工場材料検査時と実証試験終了時に、摩耗の予想される個所に対して行った肉厚測定結果と比して、2週間、約100時間の実負荷運転後の比較結果では、ほとんど摩耗は認められなかった。

今回の結果を初期値として、平成11年度において継続的に測定を行う。

(10) 振動・騒音

振動、騒音ともに低いレベルであり、振動についてはトラックのタイヤがクッション剤となり防震に、騒音はトラックウィングが遮音壁となり防音に効果があった。

また、夜間、設備に最も近い敷地境界においても第3種区域の基準内であり、夜間運転も支障なく行うことを確認した。

(11) 軸受け温度

各機器の軸受け温度を測定したが、いずれも起動から150分には温度は安定しており、温度異常な箇所も存在しなかった。

(12) 運転操作

【乾燥汚泥含水率と混合機電流値】

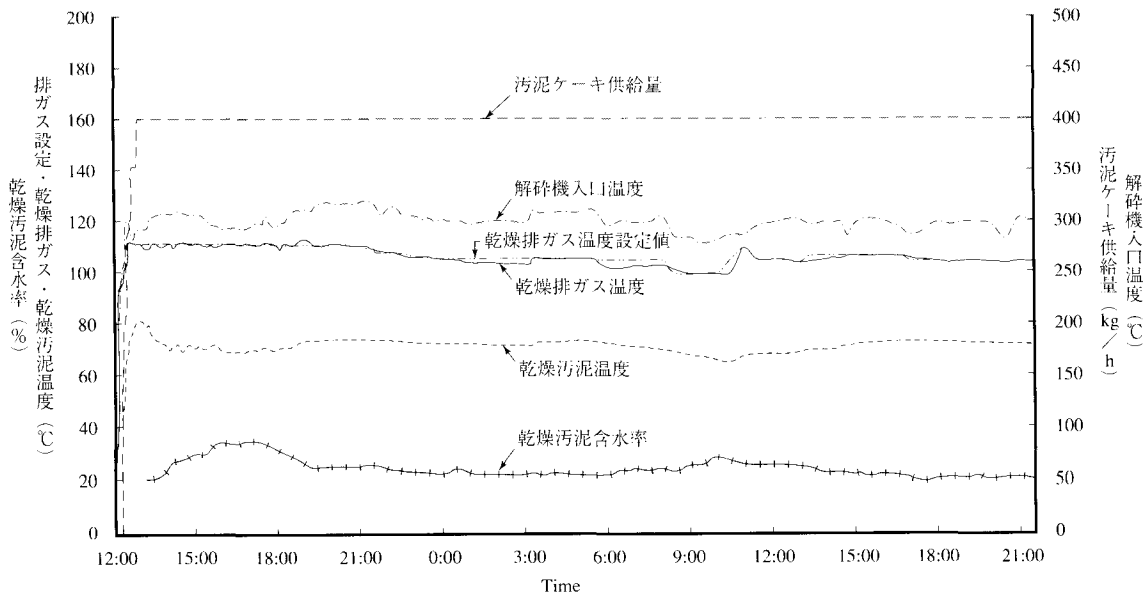


図-6 24時間連続運転状況

乾燥汚泥の使用方法によっては乾燥汚泥含水率が高くても良い場合もあることから、乾燥汚泥含水率の許容範囲を検討した。

図-7に乾燥汚泥含水率と混合機電流値の相関を示したが、乾燥汚泥含水率が高いと乾燥汚泥が塊状になり、混合機負荷が増大する。逆に含水率が低すぎると混合機の電流値は低いがサイクロン捕集率が低下する。このことから乾燥汚泥含水率は20~25%が適切な運転範囲といえる。

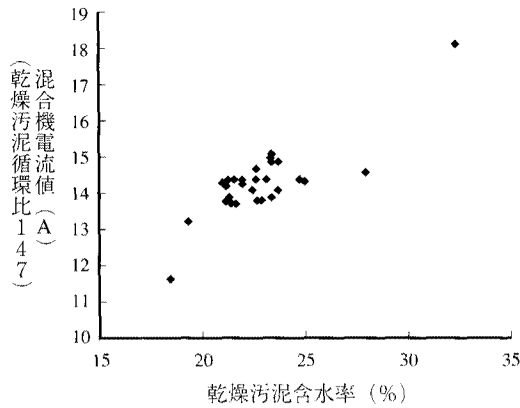


図-7 乾燥汚泥含水率と混合機電流値の関係

【乾燥汚泥温度】

混合機電流値は乾燥汚泥含水率との相関があることを前項で示したが、乾燥汚泥温度が高いと乾燥汚泥含水率が低くなる傾向があり、400kg/h、乾燥汚泥循環比(DS)114倍での乾燥汚泥温度と混合機電流値の経時変化を図-8に示した。

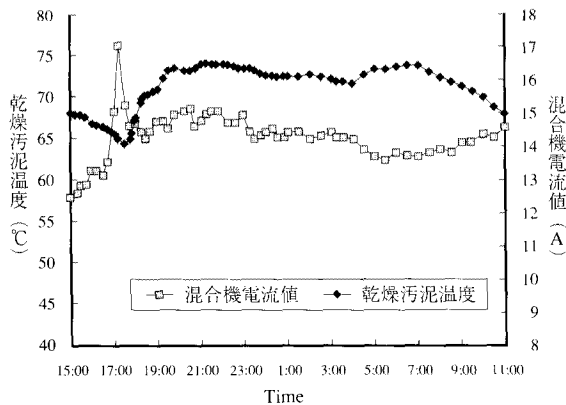


図-8 乾燥汚泥温度と混合機電流値の関係

汚泥温度が低下すると、混合機電流値が上昇し、温度を上げると電流値が低くなる。よって、日常の運転管理は乾燥汚泥温度を指標にして操作することが可能と思われる。

(13) 想定ランニングコスト (ユーティリティ費用)

冬季の実験結果を基に、下記の計算条件で、ランニングコストを試算した。なお、維持管理費については、四季の実験結果に基づき、今後検討を行うものとする。表-11及び乾燥汚泥の粉末活性炭による脱臭効果や、粉末活性炭のコスト低下傾向から判断して、当初計画ランニングコスト(約7,000円/ton汚泥ケーキ)を達成できる見通しである。

表-11 ユーティリティ費用試算結果

| 運転時間 hr/日 | 実稼動時間 hr/日 | 1日灯油 使用量 kg/日 | 汚泥 ケーキ 処理量 ton/日 | ユーティリティ費用 (円/ton) | | |
|--------------|---------------|---------------------|---------------------------|----------------------|-------|-------|
| | | | | 活性炭添加率 (DSあたり) | | |
| | | | | 2% | 5% | 10% |
| 24 | 24 | 921.6 | 9.6 | 4,080 | 4,440 | 5,040 |
| 16 | 16.7 | 641.3 | 6.4 | 4,248 | 4,608 | 5,208 |
| 8 | 8.7 | 334.1 | 3.2 | 4,416 | 4,776 | 5,376 |
| 4 | 4.7 | 180.5 | 1.6 | 4,753 | 4,153 | 5,713 |

<計算条件>

- 処理汚泥ケーキ量 400 kg/h
- 汚泥ケーキ含水率 85%
- 乾燥汚泥含水率 21%
- 発電機灯油消費量 38.4 kg/h
- 活性炭添加率 (DS当たり) 10%
- 灯油単価 40円/kg
- 活性炭 (中国炭) 単価 80円/kg

4. 今後の予定

平成11年度は引き続き残り3季節の実機を使用した実験を行い、一連の実験結果により、評価検討及び解析を行い、報告書としてまとめる予定である。

●この研究に関する問い合わせは

研究第一部長
研究第一部主任研究員
研究第一研究員

大嶋 吉雄
鈴木 文雄
王尾 和寿