

下水汚泥炭化処理技術 に関する実用化研究

1. はじめに

1.1 はじめに

三重県における下水道普及率は平成11年度末で23%である。しかし流域下水道4処理区が供用を開始し、その普及率は急速に伸びている。現状においては下水道施設から発生する汚泥は、平成12年度には脱水汚泥ベースで約29,000t-wet/年に達し、一部有効利用が図られているものの、埋立処分が大半となっている。

汚泥の発生量は今後ますます増加することが予想され、本技術適用対象となっている雲出川左岸浄化センターでは、平成24年度には20t-wet/日の脱水汚泥が発生するものと推定されている。また処分場の残余年数の減少・委託処分費の増加・廃掃法等の規制強化など、汚泥処分への対応が今後難しくなっていくことが予想されるため、汚泥の減量化・有効利用体制の確立が急務となっている。

一方、下水汚泥の炭化処理は、焼却処理や熔融処理に比較して一般的に設備が安価であり、排ガス発生量も少なく、かつ生成物の有効利用用途先が広範囲であることから、各方面にて注目されている。

1.2 目的

本研究は、下水汚泥から有効利用可能な炭化物を製造する技術を確認するものであり、今後の実用化に向けて、設備設計のための基礎データを収集し、設計諸元を確認すると共に、生成した炭化物の有効利用の可能性を調査するものである。

生成する炭化物は乾燥工程・炭化工程を経て、賦活工程まで行い、活性を高めた“活性炭化物”の生成を目指すものとする。

2. 研究内容

2.1 技術の概要

本技術は、下水処理場の脱水汚泥を一連の装置内

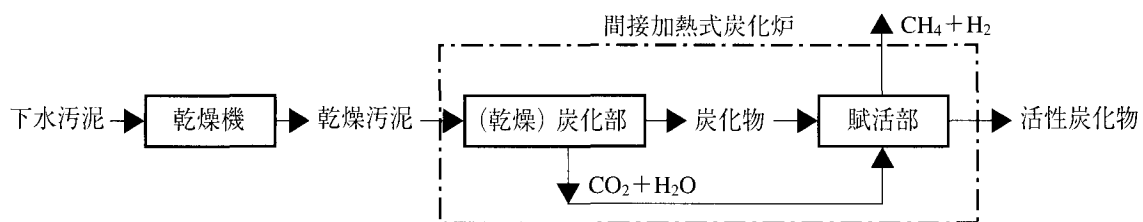


図-1 活性炭化物の製造プロセス

で効率よく「乾燥・炭化・賦活」させるものであり、汚泥の減量化と多目的有効利用を図るものである。

下水汚泥炭化処理技術とは、脱水汚泥または乾燥汚泥を無酸素または低酸素状態で加熱し、汚泥中の有機物を熱分解し、ガスとして揮散させ、炭素分と無機分からなる炭化汚泥を生成するものである。生成される炭化物は多孔質で比表面積が大きく、吸着性能がある。

本研究においては、生成された活性炭化物の脱臭用および脱水助剤用としての有効利用の可能性を調査対象とする。

2.2 本技術の特徴

汚泥炭化処理技術は焼却、溶融処理に比較して設備が簡便であり、建設費や維持管理費も安価となる。また汚泥の効果的な減量化を図りながら、有効利用先の拡大が図られるものである。加えて製品からの臭気発生もなく、その取り扱いが容易である。

本研究においては、脱水汚泥を乾燥、炭化、賦活を行うことにより従来の汚泥炭化物に対して吸着性能を増した製品を生成することが大きな特徴であり、利用用途先の一層の拡大が期待できるものである。

2.3 性能目標

主要性能目標を以下に示す。

① 汚泥処理設備としての性能

- | | |
|-----------------------|--|
| 汚泥減量化 | ： 脱水汚泥（含水率80％）
に対して10％以下 |
| 運転の安定性 | ： 24時間連続運転が可能で、
自動化されていること。
脱水汚泥含水率等の既設
変動に対応できること。 |
| 維持管理性 | ： 日常点検、整備が容易に
行え、設備の運転につい
て特別な技能を必要とし
ないこと。 |
| 設備の安全性
および
環境対策 | ： 設備の破損につながるト
ラブルは事前に検知しフ
ェールセーフの考えに基
づき安全に設備停止が行
われること。また、現場
および周囲の環境に影響
を与える可能性がある項
目（騒音、振動、排ガス、
臭気等）は関連法規を遵
守すること。 |

建設費

： 焼却処理に比べ安価であること。

維持管理費

： 人件費、点検補修費、ユーティリティ費、処分費の合計が焼却設備に比べて安価であること。

② 炭化物の現状

比表面積

： 脱臭剤利用 100m²/g-炭素以上
脱水助剤利用 50m²/g-炭素以上

処理条件

： 使用用途毎に適切な吸着能力を有するよう炭化炉温度、滞留時間等の運転パラメータを調査する。

③ 炭化物の有効利用

脱臭剤としての利用

： 代表的な臭気ガス成分に対する吸着試験を行い、脱臭剤としての性能および寿命を評価する。

脱水助剤としての利用

： 下水汚泥の脱水性を向上させ、脱水汚泥含水率の低下あるいは凝集剤添加量の軽減を図る。また、脱水汚泥の臭気および脱水工程より生じる臭気を軽減させる。

2.4 実用化研究内容

2.4.1 既往研究成果のとりまとめ

汚泥炭化設備は、既に日本下水道事業団において実験設備による基礎データ収集が行われ、実設備稼働に向けて動いている。また他都市においても実験設備稼働による知見が報告されている。本研究においては、これら既往研究の成果をとりまとめ、本研究に反映させる。

2.4.2 基礎データの収集

脱水汚泥乾燥機および炭化炉は、既に各方面で運用され、技術的に確立された設備ではあるが、下水汚泥を対象とし、かつ有効利用に適した炭化物を製造するための基礎データは十分とは言えない。

したがって、本研究においてはパイロットプラントによる試験を行い、運転条件、物質および熱収支の把握等基礎データの収集を行う。

また、排ガス中の有害物質および臭気濃度を測定し、安全性の検証を行う。

2.4.3 設備設計諸元の確立

下水処理工程で発生する汚泥を対象として、有効利用の可能な活性汚泥炭化物を生成する設備の設計諸元を確立する。

パイロットプラント試験により収集した基礎データを基に、設備各機器の設計諸数値を検討・確立させ、設備基本フローを設定する他、2.4.4項に示す有効利用の可能性を含め、経済性の評価を行う。

2.4.4 有効利用の可能性の調査

対象浄化センターより発生する汚泥から製造した炭化物を用いて、脱水機の実機試験により脱水助剤としての効果を確認する。助剤としての効果は、脱水汚泥含水率の低下あるいは脱水用凝集剤注入率の低減を目指すものとする。

また脱臭剤としての効果は、各臭気成分の濃度に対する炭化物の吸着特性を調査し、水処理系（低濃度）汚泥系（高濃度）臭気における炭化物消費量を算出する。これらの試験によって得られた基礎データにより実設備における設計諸元としてまとめ、合わせて経済性の評価を行う。

3. 研究成果

3.1 既往研究のまとめと課題

既往研究の結果をまとめると以下の通りとなる。

- ① 下水汚泥の炭化処理システムは、数種類の方式について研究開発がなされており、実用化に近い段階になっている。
- ② 生成炭化物は比表面積等において市販活性炭に大きく劣るため、賦活化させてその吸着能力を高める研究が行われている。
- ③ 生成炭化物は土壌改良材、園芸用土壌、脱水助剤、脱臭剤など多目的に利用できる可能性があるが、安定した需要の確保が最も大きな課題となる。

3.2 基礎データの収集

3.2.1 パラメータ試験による炭化物条件の確立

炭化炉の運転パラメータである、炭化温度、処理量、炉内滞留時間を変動させ、炭化物が有効利用に応じた性状を有するように運転条件を調査した。

試験結果を表-2に示す。

① 強熱減量

各条件の強熱減量の差は、おもに有機物熱分解の進行の差と考えられる。炭化炉下部温度900℃の条件⑤⑥は比表面積、MB吸着量が他に比べて顕著に低いにも関わらず、強熱減量には大きな差が見られなかった。このことより強熱減量は、吸着能力に寄与する賦活程度の指標にはならないと考えられる。

表-2 パラメータ試験結果

パラメータ	単位	条件①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
炭化炉下部温度	℃	950	950	950	950	900	900	1,000	1,000
処理量（炭化炉投入量）	kg/h	40	40	20	20	40	40	40	40
滞留時間 （炭化コンベヤ移送速度）	min m/min	15 (0.38)	30 (0.18)	15 (0.38)	30 (0.18)	15 (0.38)	30 (0.18)	15 (0.38)	30 (0.18)
測定項目									
炭化炉上部温度	℃	700	750	720	750	650	650	750	780
炭化炉中部温度	℃	850	860	830	820	800	790	900	920
炭化炉下部温度	℃	950	950	950	950	900	900	1,000	1,000
熱分解ガス温度	℃	860	870	850	830	740	750	860	950
炭化物水分	wt%	0.0	0.0	1.26	0.17	1.63	0.0	0.0	0.0
炭化物強熱減量（VS）	wt%-DB	40.0	44.5	42.3	43.7	41.2	44.7	40.6	42.1
炭化物粒度分布	—	図-2に記載							
炭化物かさ密度	g/cm ³	0.52	0.49	0.53	0.44	0.57	0.46	0.47	0.43
炭化物発熱量（低位）	kJ/g-DS	12,184	14,319	12,979	14,319	12,853	14,361	11,849	14,779
炭化物発熱量（低位）	kJ/g-VS	30,459	32,177	30,683	32,766	31,198	32,127	29,184	35,105
炭化物比表面積	m ² /g-DS	136	98	98	105	74	24	100	113
炭化物比表面積※	m ² /g-炭素	370	239	252	261	195	58	268	292
炭化物MB吸着能※	ml/g-炭素	5.7	2.98	4.42	2.98	2.03	1.92	3.75	3.41
炭化物細孔容積	cc/g-DS	図-5, 6に記載							
炭化物成分分析	—	表-2							
pH	—	8.2							

ただし、同量投入時において15minと30minでは、やや30minの方が強熱減量が高い傾向にある。これは滞留時間とコンベヤ内の充填率が高くなれば、熱分解程度に影響を与え、滞留時間を長くとするより充填率を下げた方が、汚泥当たりの伝熱面積が増大し、熱分解が進みやすかったためと考えられる。

さらに炭化コンベヤ充填率は、スクリー内部での熱分解ガスや水蒸気のガス通過量にも影響し、充填率が高い時に熱分解が進みにくい一因になったと考えられる。

② 粒度分布, かさ密度

各条件の粒度分布を図-2に示す。

平均粒径(累積50%)は200~400 μ mと大きな違いはないが、高温でゆっくりコンベヤを移動させた条件⑧が顕著に粒子が大きくなった。

これは、高温でコンベヤ内充填度の高いときに粒子が接触して再結合したのではないかと考えられる。

かさ密度は、0.5g/cm³前後の値を示していたが、平均粒径の大きい時に比較的小さくなる傾向があった。そのため、かさ密度は粒径の大きさと相関するものと考えられる。

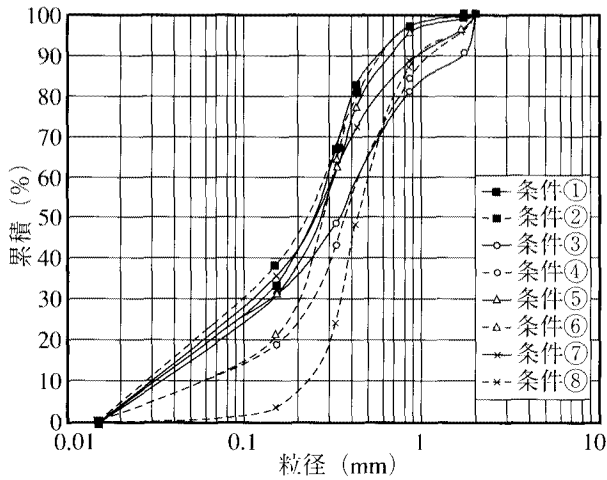


図-2 各条件における粒度分布

③ 発熱量

発熱量は強熱減量と相関があり、有機分の多く残っている条件では高い値となっている。図-3に強熱減量1g当たりの発熱量を示すが、約30,000J/g-強熱減量であり、炭素の発熱量32,700J/gに近い値となり、有機分がほぼ炭化していることを示すものである。

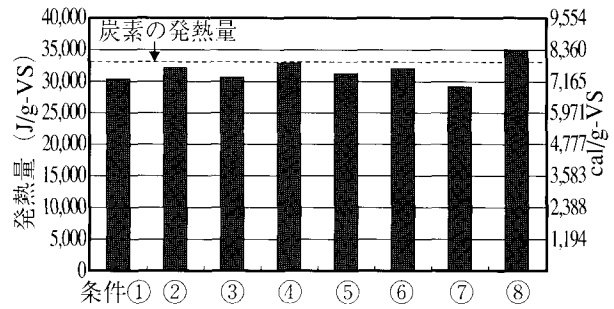


図-3 炭化物発熱量(強熱減量1g当たり換算)

④ (BET)比表面積・MB吸着性能

賦活の度合いを判断するために比表面積を測定したところ、全条件で58~370m²/g-炭素とばらつきが見られた。これは、条件①での強熱減量中の炭素分92%(表-3参照)を用い、それぞれを炭素当たりとして算出している。条件⑤⑥の炭化炉下部温度900 $^{\circ}$ C(熱分解ガス温度約750 $^{\circ}$ C)のみ著しく低い値となり、賦活に必要な熱量が不足していると考えられる。それ以外の条件では200m²/g-炭素以上あり、他の運転条件による影響を受けなかった。

図-4に各条件の生成物の炭素1g当たりの比表面積およびMB吸着能を示す。MB吸着能についても同様の計算による算出である。

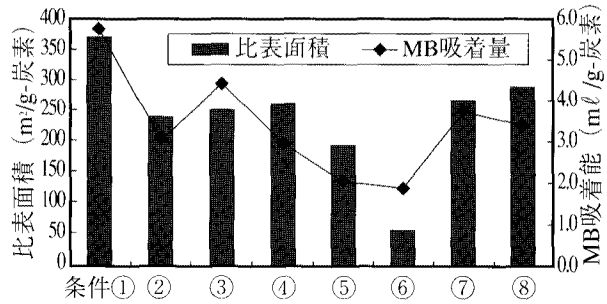


図-4 各炭化物の比表面積およびMB吸着能

⑤ 細孔容積

細孔容積分布を示す。図-5が吸着時、図-6が脱着時のものである。

細孔容積は比表面積やMB吸着量とほぼ同様の傾向がみられたが、特に吸着時で100 Å 以下のメソ孔(10~250 Å)が発達している。活性炭と比較して吸着初速度に影響を与える径の大きな細孔についても多く分布しているのがわかる。脱着時の35 Å 付近以外では細孔径が小さくなると細孔容

積は増大しており、マイクロ孔 (<10Å) を含む 12.5Å 以下の細孔容積もかなり分布している。炭化物はマイクロ孔からメソ孔、マクロ孔 (>250Å) まで細孔が広く分布し、粒子表面での幅広い吸着力が期待できる。

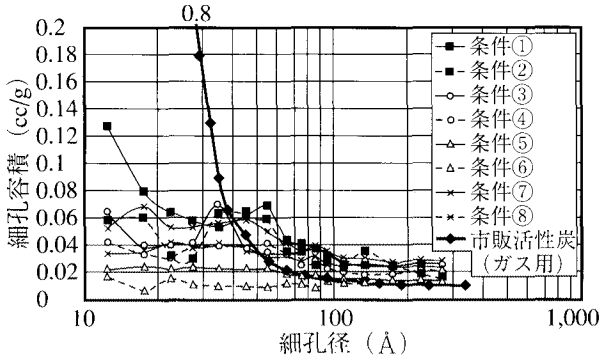


図-5 吸着時の細孔容積分布

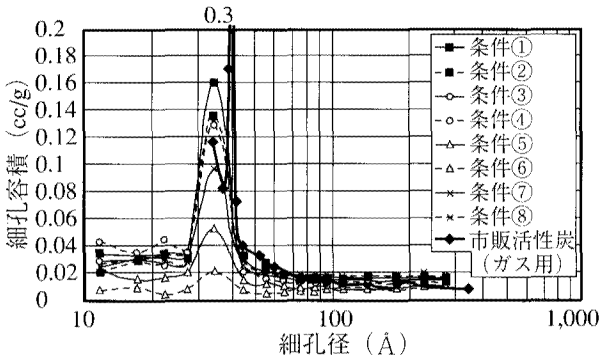


図-6 脱着時の細孔容積分布

炭化物の場合、吸着時と脱着時で違う挙動となっており、脱着試験時に35Å付近で大きなピークを有している。

⑥ 熱分解ガス温度

賦活温度は実験結果や装置の耐熱性より、850℃が望ましいと裏付けられる。

表-2中の熱分解ガス温度は、スクリーフィーダの最終段のフィーダ内温度であり、取付可能な温度計位置のうち最も賦活工程温度に近い値である。

熱分解ガス温度が750℃程度の条件⑤⑥では、強熱減量も多く、MB吸着量、比表面積も特に小さかった。条件⑤⑥以外の比表面積、MB吸着量がほぼ同程度であることから、炭化・賦活反応は熱分解ガス温度を850℃に保つことが必要と考えられる。

ただし実際の運転に際しては、熱分解ガス温度

を制御パラメータに用いると炉内の熱バランス、特に燃料供給系の制御が不安定になる恐れがあるため、安定運転のためにはバーナー出口に最も近い炭化炉下段温度で制御するのが好ましく、熱分解ガス850℃以上を維持していた炭化炉下段温度950℃での運転にすべきである。

⑦ 最適条件

以上の結果を踏まえ、炭化物の製造における最適な条件は、条件①(炭化炉下部温度950℃、処理量40kg/h、滞留時間15min)とし、以後の試験・分析は条件①に基づいて行う。理由を以下に列記する。

- 1) 生成炭化物の比表面積および吸着能力は、条件①において最も高い値を示した。
- 2) 炭化炉下部温度950℃,1000℃では吸着能力に大差は無いが、運転コストの観点から低温度・高処理量・短滞留時間である条件①が有利となる。

炭化物製造条件

条件①：炭化炉下部温度950℃、処理量40kg/h、滞留時間15min
(熱分解ガス温度850℃)

3.2.2 炭化物性状分析結果

① 炭化物含有成分

前述において最適条件の条件①の炭化物の組成について測定した結果を表-3に示す。

表-3 炭化物成分分析結果(条件①による炭化物)

項目	単位 (DS当たり)	測定値	参考基準値※	有機分(強熱減量)比
炭素	wt%	36.79		92.0%
水素	wt%	0.31		0.78%
酸素	wt%	0.97*		2.43%
窒素	wt%	1.7		4.25%
亜鉛	wt%	0.16		
銅	wt%	0.05		
ニッケル	wt%	0.02	<0.03	
クロム	wt%	<0.01	<0.05	
T-S	wt%	0.23		0.58%
T-Cl	wt%	0.11		
ヒ素	wt%	<0.001	<0.005	
カドミウム	wt%	<0.0005	<0.0005	

* 計算値

※ 肥料取締法にある規制値を準用

② 溶出試験結果

炭化汚泥は、土壤汚染の指標に用いられている

「土壤汚染に係わる環境基準」のいずれの項目においても基準値以下であった。

③ 物熱収支

炭化物製造条件から得られた条件①で実機設計に反映させるための物熱収支は表-4のようになった。

また、解砕機熱容量係数は以下のようになった。

解砕機熱容量係数：12,406kJ/m³h⁻¹℃ (循環汚泥比30 (DSベース))

表-4 物熱収支結果

パラメータ	単位	条件①
炭化炉下部温度	℃	950
処理量	kg/h	40
滞留時間	min	15
測定項目		
脱水汚泥 流量	kg/h	150
水分	Wt%	77
温度	℃	10
乾燥汚泥 水分	Wt%	20
温度	℃	70
発熱量	kJ/kg	17,752
強熱減量	%-DB	83.0
炭化物 水分	%	0.0
発熱量	kJ/kg	14,570
強熱減量	%-DB	40.0
灯油 流量	ℓ/h	6
乾燥用熱風 温度	℃	350
解砕機入口 温度	℃	210
乾燥排ガス 温度	℃	120
煙突排ガス 温度	℃	250
洗浄水 流量	m ³ /h	3.6
温度	℃	13
排水 SS	mg/ℓ	53

3.2.3 排ガス、排水分析結果

炭化炉煙突の排ガスに関しては、測定項目すべて基準値以下であり、また、排水中のSS負荷量も低く、環境に影響を与えるものはなかった。

3.2.4 炭化設備と焼却設備のコスト比較

施設規模5t-wet/日で炭化設備と焼却設備のコスト比較(表-5)を行うと建設費、維持管理費ともに炭化設備の方が安価であった。

3.3 設備設計諸元

設備設計諸元を以下に示す。

① 乾燥設備：気流乾燥機 (乾燥汚泥含水率20wt%前後)

解砕機熱容量係数12,406kJ/m³h⁻¹℃

[循環汚泥比30 (DSベース)]

解砕機入口温度 250℃

乾燥排ガス 120℃

乾燥汚泥温度 70℃

② 炭化設備：外熱式スクリュウ炭化炉

表-5 炭化設備と焼却設備のコスト比較

項目	炭化処理設備		標準流動焼却設備 (参考)	
	施設規模	5t-wet/日 (24時間連続運転)		5t-wet/日 (24時間連続運転)
運転日数	365日 (稼働率100%)		365日 (稼働率100%)	
年間処理量	1,825t-wet/年		1,825t-wet/年	
発生残渣量	119t/年 (炭水物)		100t/年 (焼却灰30%加湿)	
	減量比率 6.5%		減量比率 5.5%	
建設費 (千円)	620,000	年当たり建設費 (千円/年) 38,067	建設費 (千円) 1,360,000	年当たり建設費 (千円/年) 78,533
維持管理費 (千円/年)		40,120		47,003
建設費+維持管理費 (千円/年)	78,187		125,536	

炭化炉下部温度 950℃

炭化炉出口温度 650℃

燃焼空気比 1.3

3.4 有効利用の可能性の調査

(1) 脱臭剤としての利用

脱臭剤としての炭化物はアンモニア (アルカリ性ガス)、硫化水素 (酸性ガス) に対しては市販活性炭と同等以上の能力を有しているという実験結果を得た (図-7 ~ 図-9)。

しかしながら、酸性ガス、アルカリ性ガス用の添着炭と比較すると吸着能力は極端に低く、充填塔の吸着剤としては炭化物にさらに添着する等の処理が必要であるため、代用は困難であると考え、バグフィルター脱臭装置として使用する場合を検討し、良好な結果を得た。バグフィルターでは炭化物の交換がタイマー制御により自動化できることから、臭気に合わせた交換頻度の設定が行える。対象浄化センターにおいては、5t/日の脱水汚泥から製造される炭化物は、場内の脱臭剤のほぼ全必要量をまかなうことが可能である。

バグフィルター式脱臭にて炭化物を利用した場合の資源節約効果を便益として評価すると、充填塔式とバグフィルター式の施設費用は同等とみなせるため、既設更新 (または新設) 時にバグフィルター式に変更するとした際の便益として、市販活性炭の交換費用14,025千円/年が見込める。

(2) 脱水助剤としての利用

脱水助剤としての効果は、汚泥含水率や臭気の高減で確認されたものの (表-6)、対象浄化セ

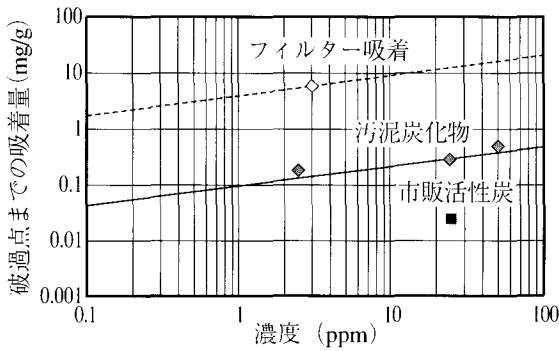


図-7 アンモニア吸着量

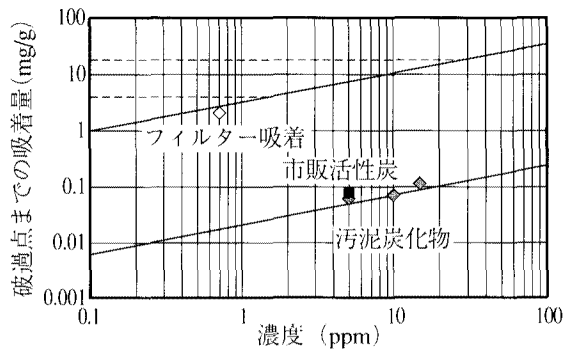


図-8 硫化水素吸着量

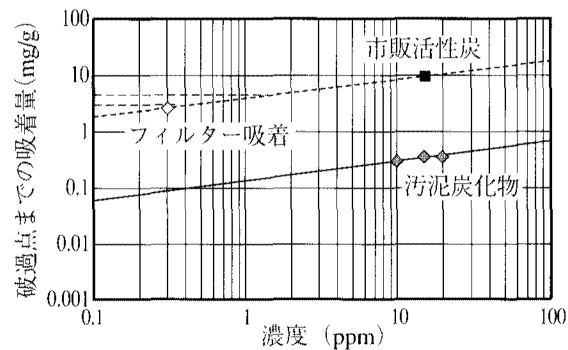


図-9 メチルメルカプタン吸着量

ンターのように汚泥の脱水性が良好な場合には、実脱水汚泥量ベースでの処分量減少効果および、高分子凝集剤の使用量低減効果は少なかった(表-7)。

また、効果的な添加率は、脱水時に汚泥総量が増大しない15% (DS比)程度と考えられる。

4. まとめ

(1) 汚泥処理設備としての性能

① 汚泥の減量化

目標の脱水汚泥に対して、10%以下(実績6.5%)であった。

② 運転の安全性

本システムは全自動運転が可能で連続運転の安全性は良好である。

③ 維持管理

日常点検、整備が容易に行え、整備の運転について特別な技能を必要としない。

④ 設備の安全性及び環境対策

設備の破損につながるトラブルは事前に検知し、安全に設備停止が行われる。周囲の環境に影響を与える可能性がある項目は関連法規を遵守できる。

⑤ 維持管理費

建設費、維持管理費ともに、焼却処理に比べて安価であった。

(2) 炭化物の性状

炭化物中の炭素の割合は約37%であり、比表面積は開発目標値をクリアし、200m²/g-炭素以上であった。溶出試験において測定項目すべて基準値以下であった。

表-6 脱水試験考察(炭化物変動)

条件	結 果					考 察	
	脱水汚泥含水率 (%)	計算含水率① (%)	脱水ろ液 SS (mg/ℓ)	SS回収率 (%)	臭気濃度 (-)	計算含水率② (%)	発生汚泥比 (-)
0.0	75.2	75.2	55	99.80	1.74×10 ⁶	75.2	1.000
15.2	71.4	72.5	60	99.81	5.50×10 ⁵	74.2	0.998
31.2	68.9	70.0	50	99.86	4.12×10 ⁵	74.4	1.045
46.8	68.3	67.7	48	99.88	7.33×10 ⁵	76.0	1.147

表-7 脱水試験考察(炭化物一定投入, 薬注率変動)

条 件	結 果					考 察	
	炭水物添加率 (%)	脱水汚泥含水率 (%)	脱水ろ液 SS (mg/ℓ)	SS回収率 (%)	臭気濃度 (-)	計算含水率② (%)	発生汚泥比 (-)
0.428	0.0	76.4	48	99.83	7,330	76.4	1.000
0.428	27.8	69.3	43	99.88	—	74.2	0.982
0.347	27.8	73.3	350	99.01	3,090	77.8	1.129
0.252	27.8	72.8	2,400	93.21	—	77.4	1.108

(3) 炭化物の有効利用

① 脱臭剤としての利用

アンモニア（アルカリ性ガス）、硫化水素（酸性ガス）に対しては市販活性炭と同等以上の能力を有しているという実験結果を得た。バグフィルター脱臭装置として使用する場合は、良好な結果を得、対象浄化センターにおいては、5t/日の脱水汚泥から製造される炭化物は、場内の脱臭剤のほぼ全必要量をまかなうことが可能である。

② 脱水助剤としての利用

脱水助剤として汚泥含水率および臭気の低減効果は確認したが、対象浄化センターでの汚泥脱水性が良好のため、実脱水汚泥量ベースでの処分量減少効果および高分子凝集剤の使用量は低減効果はわずかであった。

(4) 事業効果

現状の陸上埋立処分と汚泥活性炭化システムに

よる処理コストの比較（処理規模 5t/日）を表-8に示す。本システムは、現状の汚泥処分費相当と考えられ、実施可能な技術と評価できる。

表-8 処理コスト比較（処理規模 5t/日）

	陸上埋め立て 処分（現状）	汚泥活性炭化 （本システム）
t当たり処理概算額 （円/t）	35,950※	約30,650～38,340

※平成13年度予定額

●この研究を行ったのは

研究第一部長
研究第一部総括主任研究員
研究第一部主任研究員
研究第一部研究員

江藤 隆
栗林 栄
小野塚敏彦
石渡 英樹

●この研究に関するお問い合わせは

研究審議役兼研究第一部長
研究第一部総括主任研究員
研究第一部主任研究員
研究第一部研究員

宮原 茂
栗林 栄
小野塚敏彦
鈴木 純二