

三重県における汚泥炭化処理技術の 適用性に関する研究

1. 研究目的

三重県の下水道普及率は、平成9年度末現在18%であり、流域下水道も4処理区が供用している。このような中で、下水道施設から処分される汚泥は、平成8年度には約21,000tに達し、一部有効利用が図られているものの、その他は埋立てによる委託処分がほとんどである。汚泥の発生量は今後ますますの増加が予想され、処分地の永続的な確保、委託処分費の増加、廃掃法等の規制の強化などの問題への対応が難しくなってくる状況にある。

これらの問題に対処するために、三重県では、現状で技術的評価を受けているいくつかの処理方式から適用可能な方式を選び、その方式について建設費、維持管理費、環境への影響、運転操作および必要原料の供給、製品の需要について検討および評価を行った。その結果、経済性および有効利用の観点から炭化処理方式が最も有望であったが、一方で炭化処理方式は実施事例がないため、いくつかの課題も残された。

本研究は三重県と下水道新技術推進機構が共同で実施したもので、これまでの調査結果を受けて、下水汚泥の炭化処理方式について、聞き取り調査によって特徴や問題点を整理するとともに、小規模炭化処理プラントを用いた実験を行ってデータの収集を行い、それにより得られた知見をもとに、適用性の検討を行った。

2. 研究内容

- (1) 炭化処理技術の概要
現在研究中および実用化されている炭化処理技術について整理した。
- (2) 炭化処理実験
小規模炭化実験装置を用いて脱水汚泥を対象に炭化処理を行った。
- (3) 炭化処理の適用性に関する検討
小規模実験結果に基づき、エネルギー収支、製品の有効利用など、下水汚泥の炭化処理の適用性について検討を行った。

3. 研究結果

3.1 炭化処理技術の概要

(1) 炭化処理の原理

乾燥汚泥または脱水ケーキを、無酸素または低酸素状態で加熱（乾留という）すると、汚泥中の有機物が熱分解してガスを発生する。炭素分は燃焼せずに残留するため、「炭化物＋無機物」という新しい組成をもつ物質（以後「炭化汚泥」という）が生成する。

炭化汚泥は、木炭や活性炭と似た性質をもつことから、土壌改良材や脱臭剤など下水汚泥の新たな有効利用先として期待されている。

(2) 炭化処理技術の分類

炭化処理方式については、自治体・研究機関や民間で様々な方式の研究・開発が行われている。処理機構を大きく分けると、炭化炉へ脱水ケーキを直接投入する方式と、乾燥工程を経た汚泥を投入する方式に大別される。また、炭化工程で発生したガスを炭化炉の外周側の炉で燃焼させて熱源とする外熱式と、発生したガスを二次燃焼炉で燃焼させて熱交換によりエネルギー回収を行う内熱式に分けることができる。炭化処理方式の分類を表-1に示す。

また、4つの炭化処理技術を比較すると、表-2のとおりである。

表-1 炭化処理方式の分類

エネルギー回収方式	乾燥工程あり	乾燥工程なし
外熱式	外熱式スクリー方式 外熱式ロータリー方式	/
内熱式	内熱式ロータリー方式	

3.2 炭化処理実験

(1) 実験に用いた汚泥

雲出川左岸浄化センターの脱水ケーキ（含水率約80%）を使用した。

表-2 汚泥炭化処理方式の比較

炭化方式	外熱式スクリー方式	外熱式ロータリー方式	内熱式ロータリー方式	内熱式ロータリー方式 (脱水ケーキ直接投入方式)
処理機構の概要	脱水汚泥を炭化炉の排ガスに混合し解砕機で汚泥の粉体化と乾燥を行い、さらに気流管内で分級乾燥し、熱風と乾燥物はサイクロンで分離する。分離された乾燥物を炭化炉で炭化する。炭化炉内の汚泥の攪拌・移動は内筒部のスクリーフイーターによって行う。炭化の排ガスは二次燃焼、熱交換、脱硫し排出する。乾燥排ガスは、除湿、熱交換を通し循環使用し、余剰分は炭化炉で燃焼、排出する。	乾燥汚泥を炭化炉に供給し、炭化する。炭化炉は二重構造で、汚泥は内筒部の回転する管体内で乾燥され、分離されたガスは管体から噴出し、外筒で燃焼させ、これを熱源とする。さらに排ガスは二次燃焼させ排出する。乾燥排ガスは循環させ、熱風炉で燃焼脱臭する。	汚泥を乾燥、成形し炭化炉で炭化する。汚泥は炭化炉内で低酸素雰囲気中でガス化され、炉の回転とともに排出側へ移動し、スクリーフコンベヤで排出する。乾燥排ガスは除湿後、熱交換器を通し、炭化の再加熱炉で燃焼脱臭する。炭化の排ガスは再加熱炉、熱交換、脱硫後排出する。	脱水ケーキを直接炭化炉へ投入する。炭化炉の機構は左記に同じ。炭化の排ガスはサイクロンで分離後、二次燃焼炉で燃焼脱臭され、熱交換、脱硫後排出する。
炭化物の形状	粒径1mm以下、粒状と粉状の混合	粒径2~5mm、粒状と粉状の混合	粒径3~5cm、ペレット状	粒径3mm以下、粒状と粉状の混合
特徴・その他	乾燥部では、気流管内で極めて短時間に乾燥されるため、乾燥工程が省スペースとなり、全体として施設面積が小さくなる。維持管理費も安くなる。	施設面積は大きい。	成形工程があるため、製品の形状が均一で取り扱いに容易である。成形工程があるため、建設費が高くなる。	脱水ケーキ直接投入方式のため炭化炉本体は大きくなるが、乾燥工程が省略されるので全体として設備コストが安くなる。

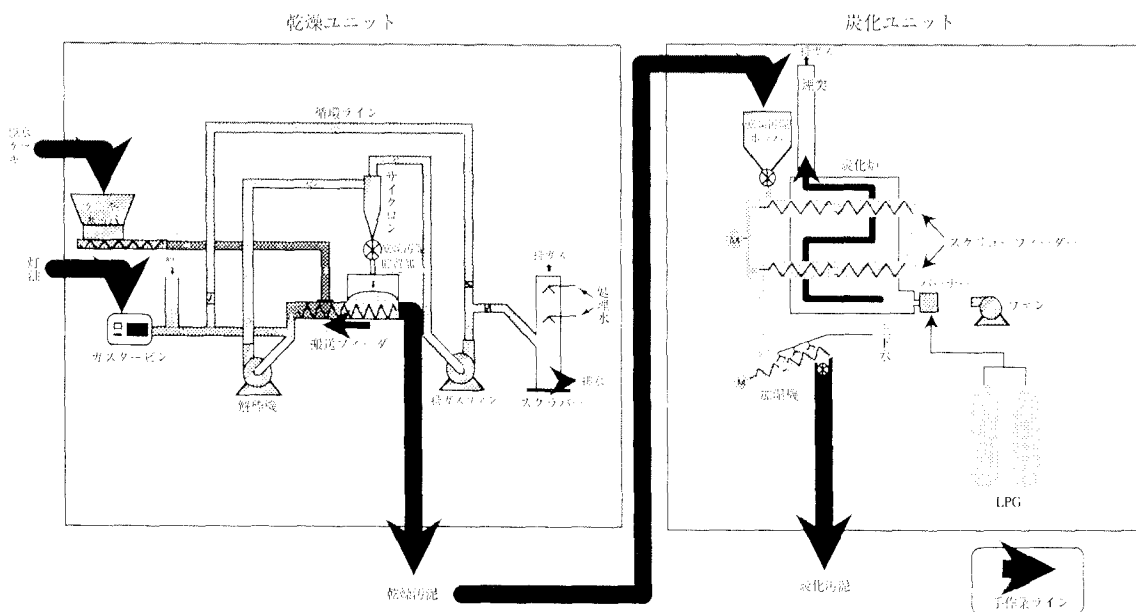


図-1 乾燥・炭化小規模実験装置フロー

(2) 実験装置および実験方法

① 実験装置

実験装置は、乾燥設備と炭化設備からなる。図-1に実験装置のフローを、表-3に仕様を示す。

表-3 実験装置の仕様

装置	乾燥装置	炭化装置
形式	ガスタービン熱風気流乾燥機	外熱スクリーン式
処理能力および性能	脱水ケーキ(水分約80%) 最大30kg/h	乾燥汚泥(水分約20%) 最大100kg/h 炭化温度:700~900℃ 二次燃焼温度:900、1,000℃
構成機器	ガスタービン発電機 解砕機 搬送フィーダ 乾燥汚泥ホッパ サイクロン 排ガスファン バグフィルター スクラパー	乾燥汚泥ホッパ 炭化炉冷却コンベア LPGバーナ バーナファン

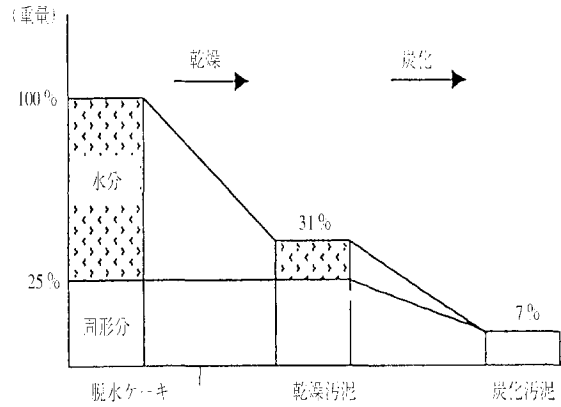


図-2 乾燥および炭化処理による脱水ケーキの減量化

② 運転に関する測定項目

- ・ 処理能力に関する測定：脱水ケーキの投入量，乾燥汚泥の生産量，乾燥汚泥の投入量，炭化汚泥の生産量
- ・ エネルギー収支に関する測定：燃料使用量，炉内温度，排ガス温度
- ・ ユーティリティ使用量に関する測定：水道，電気，その他
- ・ 排ガスに関する測定

③ 炭化汚泥の性状に関する測定項目

- ・ 物理的性状に関する測定：比重，含水率，強熱減量（炭化炉燃焼温度3水準についてJIS規格により測定）
- ・ 化学的性状に関する測定：化学組成（BET法にて分析）
- ・ 吸着量：メチレンブルー吸着量を測定
- ・ 安全性に関する測定：肥料推奨基準13項目
- ・ 重金属等の溶出：環境庁告示による24成分

(3) 実験結果

① 物質収支

乾燥および炭化工程における物質収支は図-2に示すとおりであり，乾燥工程では水分のみが蒸発し，炭化工程では乾燥汚泥中の水分の蒸発と固形分中の熱分解有機分が減少する。脱水ケーキに対する減量化率は，乾燥汚泥31%，炭化汚泥7%（いずれも重量比）であり，減量化の効果が大きいことがわかる。

また，汚泥の成分分析による乾燥質量あたりの組成は図-3に示すとおりで，炭化工程において，炭素だけが残留し，硫黄および窒素の臭気成分の構成

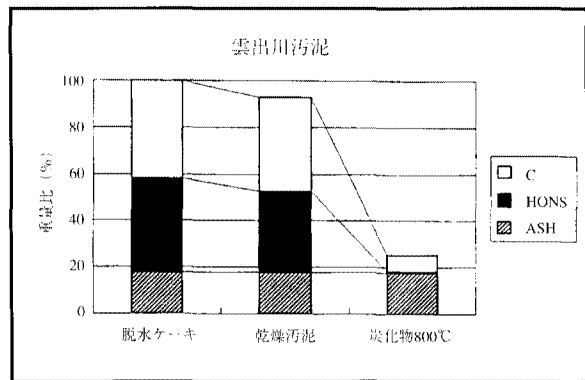


図-3 乾燥質量あたり組成分析結果

元素は熱分解によって除去されていることがわかる。

② 炭化温度による炭化汚泥の物性

炭化汚泥の物性を表-4に示す。炭化温度と強熱減量，低位発熱量，MB吸着量および比表面積の関係を示したものが，図-4，図-5である。これによれば，炭化温度が高くなるほど強熱減量・低位発熱量は小さく，比表面積・MB吸着量は大きくなる傾向にある。さらに炭化温度750℃と800℃ではほとんど変化がないことから，炭化温度750℃で炭化がほぼ完了していることを示している。

③ 炭化汚泥の安全性に関する試験結果

炭化物の肥料成分および重金属含有量について試験を行った。表-5に示すように肥料成分は，炭化工程で窒素分が熱分解して除かれるため，コンポストの推奨基準からは外れている。しかし，重金属含有量に関しては「肥料取締法」の規制値を超えるものはなかった。

また，重金属等24項目についての溶出試験結果では，すべての項目に対して「土壌汚染に係わる環境

表-4 炭化汚泥の物性

測定項目	単位	脱水ケーキ	乾燥汚泥	炭化汚泥 (下欄は炭化温度)		
				700℃	750℃	800℃
水分	wt%	77.8	19.3	0.68	0.05	0.13
灰分☆	wt%DS	17.8	19.1	61.2	70.8	69.6
かさ密度	—	1.07	0.43	0.79	0.72	0.59
強熱減量☆	wt%DS	82.2	80.9	38.8	29.2	30.4
比表面積	m ² /gDS	—	—	21.9	26.6	27.2
MB吸着量	ml/gDS	—	—	0.14	0.29	0.25
低位発熱量	J/gDS	—	—	12,644	9,378	10,237

☆：800℃処理

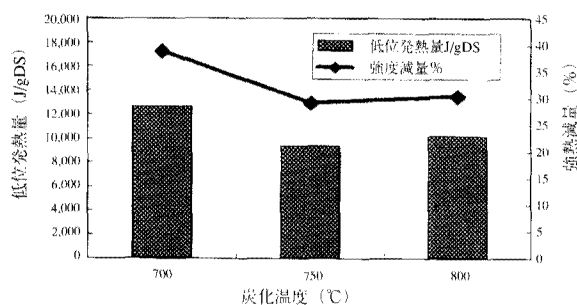


図-4 炭化温度と強熱減量, 低位発熱量

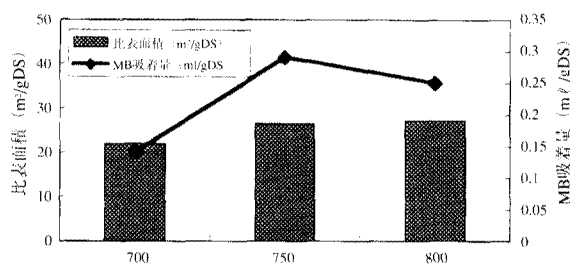


図-5 炭化温度と比表面積, MB吸着量の関係

基準 (環境庁告示第25号)」の基準値以下であり、
 土壌改良材としての使用が可能であることが確認された。

④ 排ガスおよび排水の調査

乾燥設備および炭化設備 (炭化温度800℃) 運転中の排ガスの性状および、乾燥設備スクラバーからの排水の分析結果は表-6のとおりである。

本実験の乾燥工程でのガス臭気は高いが、排ガスはスクラバーで水洗されたのち、炭化設備の燃焼空気として用いられるため、系外には排出されない。炭化設備からの排ガスは、NO_xおよびSO_x対策を講じる必要がある。

また、スクラバーからの排水は水処理系へ逆流するが、水量が少ないため負荷は小さく、水処理系への影響は無視できる。

表-5 炭化汚泥の肥料成分分析結果

測定項目	単位	脱水ケーキ	乾燥汚泥	炭化汚泥800℃	基準値
水分	wt%	77.8	19.3	0.13	#30%以下
灰分☆	wt%	17.8	19.1	69.6	—
C/N比	—	7.6	9.2	23.4	#10以下
アルカリ分	mg/kg	1.2	1.1	4.5	#25%以下
窒素	wt%	5.5	4.7	1.2	#2%以上
リン酸	wt%	6.2	6.0	10.6	#2%以上
K ₂ O	wt%	—	—	0.8	—
炭素	wt%	41.9	43.3	28.1	—
pH	—	—	—	9.3	—

☆：800℃処理

3.3 炭化処理の適用性に関する検討

(1) 検討にあたっての条件

- ・ 脱水ケーキ処理量：30t/日
- ・ 脱水ケーキ含水率：80.0% (年間平均値)
- ・ 脱水ケーキ有機分率：78.0%DS
- ・ 乾燥熱源：炭化炉排ガスからの熱回収
- ・ 炭化の補助燃料：灯油

表-6 排ガス, 排水性状分析結果

分析項目	単位	乾燥機 スクラバー	炭化800℃	分析方法	規格
煤塵	g/Nm ³	0.032	0.020	円筒ろ紙法	JIS Z8808
水分	v/v%	2.15	3.53	吸湿管法	JIS Z8808
O	v/v%	18.7	13.5	オルザット法	JIS Z0301
N ₂	v/v%	79.9	81.0	(N ₂ =100-O ₂ ·CO ₂)	-
CO ₂	v/v%	1.4	5.5	オルザット法	JIS Z0301
NO _x	v/vppm	20	92	フェノールジスルホン酸吸光度法	JIS K0104
SO _x	v/vppm	<2	24	比濁法	JIS K0103
臭気濃度	-	7,200	730	3点比較式臭袋法	環境庁告示第7号
排ガス量 (wet)	Nm ³ /h	314	711	-	-
排ガス量 (dry)	Nm ³ /h	307	686	-	-
平均排ガス温度	℃	15	734	-	-
排水中SS (L/G=5)	mg/ℓ	400	-	-	-

(2) エネルギー効率を考慮した処理フローに関する検討

小規模実験装置は、乾燥設備と炭化設備が独立しており、各燃料系統を有していたが、実際の設備では、エネルギー効率を向上させるため、炭化炉排熱を乾燥熱源として用いることとする。フローを図-6に示す。

- ① 脱水ケーキはポンプ圧送により乾燥設備に投入される。
- ② 脱水ケーキは炭化排ガスと熱交換した熱風とともに乾燥機に送られ、粉体状に解砕された状態で乾燥が行われる。
- ③ 乾燥した汚泥はサイクロンで捕集され乾燥汚泥ホッパーで一時貯留したのち、炭化炉へ導入される。
- ④ 乾燥排ガスは水洗により除湿されたのち、乾燥用熱源として再利用するため、空

気加熱器にて炭化炉排ガスと熱交換される。

- ⑤ 炭化炉へ導入された乾燥汚泥は空気を遮断した状態で熱を加えられ、ほとんどの固定炭素以外の有機物を熱分解により除去し、炭化汚泥として排出される。
- ⑥ 一方、熱分解ガスは、過剰空気により完全燃焼し、排ガス処理後、系外へ放出される。

(3) 炭化汚泥の有効利用に関する検討

炭化汚泥の有効利用用途は、種々のものがあるが、今回の実験で得られた炭化汚泥は、その形状が粉体であること、有害物質を含有していないこと、有害物質の溶出も認められないこと、一部の肥料成分を含有すること、低位発熱量が大きいこと、を考慮すれば、有効利用用途としては次のものが有望である。

① 脱臭剤および脱色剤

比表面積が大きく、吸着能もあることから、脱臭剤および脱色剤として、下水処理施設において有効利用が可能である。

② 脱水助剤

脱水過程で炭化汚泥（特に粉体）を添加することによって、脱臭効果と合わせて脱水性を改善する効果が期待できる。

③ 緑農地還元材

通気性および保水性に富むため、土壌改良材としての使用が可能である。また、一部の肥料成分を補うことによって、コンポストとしての有効利用も可能となる。

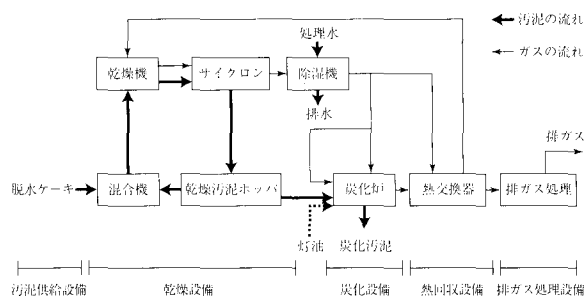


図-6 エネルギー効率を考慮した汚泥炭化処理フロー

- ④ セメント原料
微細な粉体であるため、セメント添加物としての利用も考えられる。セメント工場の受入れ条件である臭気がないことも利点となる。
- ⑤ 補助燃料
発熱量の高い炭素を含むため、補助燃料としての利用が可能である。また、固形化燃料(RDF)を製造する際の脱臭および水分調整としての利用も考えられる。

4. まとめ

三重県における下水汚泥の炭化処理方式の適用性について研究を行った結果をまとめると、次のようである。

- ① 炭化汚泥は、脱水ケーキまたは乾燥汚泥を無酸素または低酸素状態で加熱することにより、汚泥中の有機物が熱分解し、燃焼せずに残留した炭素分と無機分からなる。
- ② 炭化処理方式は、乾燥工程の有無、エネルギー回収方式により分類すると、4つの方式に分類でき、それぞれ特長があるが、いずれも下水道での実績はない。
- ③ 小規模実験装置を用いて炭化処理実験を行った。その結果、脱水ケーキに対する減量化率は7%（重量比）であった。乾燥工程では水分のみが、炭化工程では水分と固形分中の熱分解有機分が減少している。
- ④ 炭化温度を700～800℃まで3水準で実験を行った。強熱減量、比表面積等の変化から750℃で炭化がほぼ完了していることがわかった。
- ⑤ 炭化汚泥からの重金属等の溶出は認められなかった。
- ⑥ 小規模実験に基づき、エネルギーの効率化を考慮した汚泥乾燥・炭化処理フローを提案した。
- ⑦ 炭化汚泥の有効利用用途としては、コンポストの補助材や土壌改良材などの緑農地還元、吸着性

能を生かした脱臭剤や脱色剤、セメント原料および補助燃料などが有効であると考えられる。

5. 今後の課題

汚泥炭化処理の適用性について検討を行ったが、今回の実験は1処理方式の小規模実験機によるもので、エネルギー効率、処理方式の違いによる炭化汚泥性状等については、実証規模施設における調査、実験により検討する余地がある。

また、炭化汚泥の有効利用用途をいくつか示したが、有効利用にあたっては具体的な試験を行って効果を確認する必要がある。たとえば、炭化汚泥の吸着能（比表面積の大きさなど）は活性炭より小さいため、吸着剤として使用する場合の交換頻度やメンテナンスに関しても検討する必要がある。

最後に、本研究が下水汚泥の有効利用技術の一つとして、さらに研究開発および普及に寄与できれば幸いである。

<参考文献>

- 1) 大場康久, 照沼 誠: 炭化炉による炭化汚泥の有効利用基礎調査, 第33回下水道研究発表会講演集, pp.979～981
- 2) 大場康久, 照沼 誠: 炭化汚泥の有効利用実験報告, 第34回下水道研究発表会講演集, pp.983～985
- 3) 照沼 誠, 籠橋 章: 外熱式ロータリーキルンによる下水汚泥の炭化実験, 第34回下水道研究発表会講演集, pp.986～988
- 4) 照沼 誠, 森野節也, 柘植 勝: 炭化汚泥に関する基礎研究, 第34回下水道研究発表会講演集, pp.989～991
- 5) 澤井正和, 楠田浩雅: 下水汚泥炭化物を利用した有害物除去システム, 第20回全国都市清掃研究発表会

●この研究に関する問い合わせは 研究第一部長 大嶋 吉雄
研究第一部主任研究員 馬渡 裕二
研究第一研究員 山口 英