

改質乾燥による 下水汚泥のバイオマス燃料化技術 に関する共同研究

1. 研究目的

現在、下水汚泥の利用用途において、一部は緑農地利用としてコンポスト化されており、その大部分は焼却・溶融等の処理を経て建設資材の原料等として再利用されている。平成 17 年度における下水汚泥の再利用状況は、全国で発生する汚泥全体の約 70% (154 万 9 千トン) を占め、今後さらなる拡大が期待されている。また、建設資材としての利用は、引き取りコストの上昇や需要の頭打ち等のリスクも想定されるため、長期的に安定した利用用途の開拓が望まれている。そこで、新たな下水汚泥の用途として石炭の代替燃料を製造する下水汚泥固形燃料化技術が検討されており、既に、一部の技術が実用化されている。下水汚泥は、集約性があり、量・質的に安定していることから、事業性の高いバイオマス燃料として注目されている。

下水汚泥の固形燃料化技術は、乾燥または炭化技術により下水処理過程で発生する汚泥から燃料価値を有する固形燃料を製造するものである。製造した固形燃料は、石炭火力発電所等で化石燃料に替わる新たなカーボンニュートラルな燃料としての利用により、温室効果ガスの削減につながる技術としても期待されている。

本研究は、水熱反応により汚泥を改質し、低含水率に脱水することで乾燥に要するエネルギーの低減を図り、相対的に高品位な固形燃料を製造する「改質乾燥による下水汚泥のバイオマス燃料化技術」について、技術の概要、特徴を示すとともに、その適

用範囲をはじめ、施設の計画・設計・施工および維持管理等に至る技術的事項について明らかにすることを目的に行った。

2. 研究体制

本研究は、滋賀県、三菱商事(株)、三菱化工機(株)および(財)下水道新技術推進機構の計 4 者による管理者参加型共同研究として実施した。

3. 研究内容

本研究は、下水汚泥から発熱量の高い高品位の燃料製品をエネルギー的に効率良く製造する本技術の実用化に向け、実証実験による性能の検証を行い、また、製造した燃料製品については品質や安全性の評価を行った。それらから得られた結果を基に技術導入に必要な計画、施工、維持管理等にかかわる技術的事項を取りまとめた。

3.1 技術概要

3.1.1 改質乾燥の原理

改質は、図-1 に示す飽和水蒸気圧下の高温高压水(200~230℃, 1.6~3.0 MPa)を用いて脱水汚泥が熱化学的に水熱反応することである。

高温高压水は、水のイオン積が増加し誘電率や粘性が減少する等の性質があり、化学作用の特徴として有機物の溶解作用と加水分解作用がある。この作用により有機物が低分子化するため固形分が液状化

する。

高温高压水による脱水汚泥の熱化学的改質は、下記に示す2つの働きがある。

- ① 汚泥の脱水性を改善し、低含水率での脱水が可能となり、燃料製品化に要する乾燥エネルギーの大幅削減、乾燥装置の規模縮減に寄与する。
- ② 汚泥が組成変性され、酸素分子の減少割合が大きくなり、燃料特性（発熱量）を改善する。

また、改質乾燥の処理温度は、図-2 のイメージで示すように乾燥と炭化の中間に位置する。

炭化は、低酸素状態、もしくは無酸素状態で加熱することで水分および吸着ガスを放出して熱分解が始まり、分解ガスを放出した後に炭素を主体とした炭化物として生成する過程である。その過程で有機成分の分解が進み、固定炭素に富んだ状態となる。また、乾燥は、水分を蒸発させる操作のため、基本的に脱水汚泥中の有機成分は分解されていない。改質乾燥の場合、水分の蒸発だけでなく、脱水汚泥の有機成分の一部が分解されるが、熱分解で蒸発する揮発成分が水熱反応では圧力下にあるために脱離液中に溶解したままである。

3.1.2 処理システムの概要

本技術の処理システムの基本フローを、図-3 に示す。施設構成は、主に①改質・冷却装置、②脱水・乾燥装置および③排水処理装置の3要素からなる。

下水処理施設から発生する含水率約 80%の脱水汚泥は、高温スチームが供給される改質器において連続的に水熱反応により液状化し、同時に有機成分の一部が分解、酸素が離脱して改質される。その後、機械脱水により含水率 50%程度まで脱水され、乾燥工程を経て含水率 10%以下の燃料製品となる。なお、乾燥は、冷却装置において循環する熱媒で回収した熱エネルギーを利用する。

また、脱水設備からの脱水ろ液は、高濃度の有機成分を含有しているため、メタン発酵（UASB 法）処理してメタンガスを回収し、改質用ボイラの補助燃料として利用する。メタン発酵後の処理液は、膜分離装置（精密ろ過膜；NF 膜）で所定の水質以下に処理して下水処理施設へ返流する。なお、排水処理設備は、返流水の既設水処理設備への影響および設備全体のエネルギー回収の比重を考慮して、膜分離装置のみを設置する場合、またはメタン発酵装置と膜分離装置を設置する場合の2方式とする。

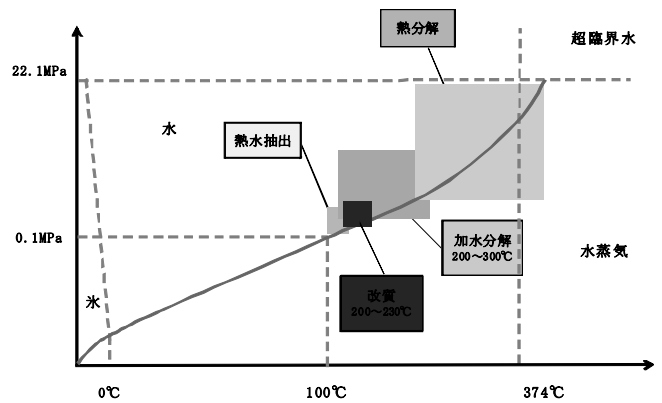


図-1 飽和水蒸気圧と温度の関係

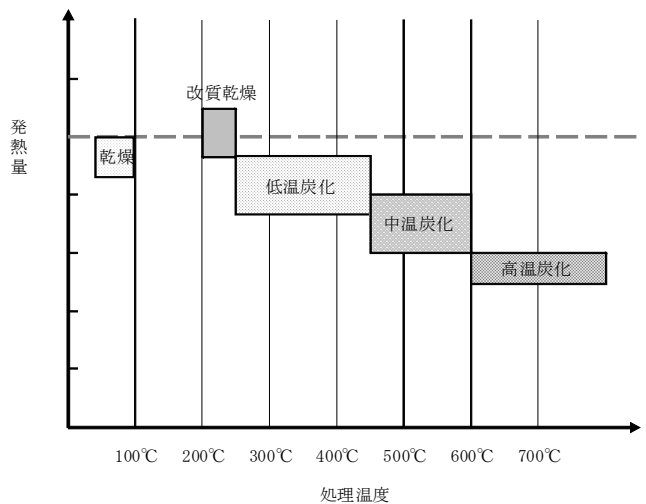


図-2 処理方式と温度領域

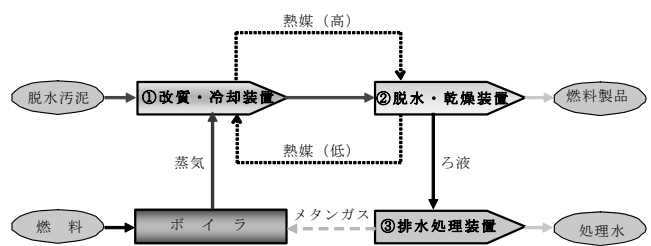


図-3 基本フロー

3.1.3 特徴

本技術の特徴は、下記のとおりである。

- (1) 相対的に高品位な石炭代替燃料

下水汚泥を水蒸気にて飽和水蒸気圧下、高温高压水で加熱することにより汚泥中の微生物の細胞を破壊するとともに一部は可溶化し、酸素分子が外れる等して炭素分の多い汚泥に改質される。これによっ

て単なる水分蒸発の乾燥とは異なり発熱量の高い燃料が得られる。また、多くの炭素分が揮発してしまう炭化と比較して、改質乾燥は炭素含有量が多く、回収熱量が大きい。

(2) 改質時の温室効果ガスの発生

汚泥改質工程では、200~230℃の水熱反応条件下における有機物の加水分解、可溶化を行うものであり、250℃以上の気相における炭化処理とは異なり有機物の熱分解によるCO₂、N₂O等の温室効果ガスの発生はほとんどない。

(3) 改質効果による乾燥エネルギーの低減

改質により脱水汚泥の脱水性が改善され、含水率約80%の脱水汚泥が改質後は約50~60%程度まで脱水可能である。このため、蒸発水分量は改質しない場合の約4分の1となり、乾燥エネルギーが大幅に低減される。

(4) システム全体のエネルギーの低減

脱水汚泥の改質に要したエネルギーの約50%を回収し、乾燥用エネルギーとして利用する。また、脱水ろ液のメタン発酵処理で発生するメタンガスはボイラ燃料の約20%に相当し、ボイラ燃料として利用することにより、システム全体のエネルギー消費量を低減する。

3.1.4 燃料製品の性状・成分

(1) 燃料製品の発熱量

改質乾燥による燃料製品は、水熱反応により脱水汚泥中の酸素が減少するため、可燃分当たりの発熱量が向上する。この効果により燃料製品の発熱量は脱水汚泥と比較して同等以上の値となる。また、総発熱量は、一般的な石炭の平均発熱量の約70%程度となる。

(2) 燃料製品の基本物性

一般的な石炭の平均値は灰分12%程度、揮発分36%程度、固定炭素50%程度、燃料比1.5程度に対して、燃料製品は水分5~10%、揮発分65%、固定炭素10%程度、燃料比0.2程度と灰分・揮発分が高く燃料比が低い。なお、燃料製品の性状は3mm^φ以下の粒子状粉体であり、嵩比重0.85程度と比較的高い。

表-1に改質乾燥の燃料製品の基本物性として実証実験の平均値を示す。

表-1 燃料製品の基本物性

項目	単位	未消化脱水汚泥	燃料製品	
総発熱量	MJ/kg-DS	18.4	18.4	
真発熱量	MJ/kg-DS	16.9	17.1	
燃料比	—	0.13	0.16	
工業分析	水分	%	80.1	4.5
	灰分	dry%	18.6	26.7
	揮発分	dry%	72.2	63.2
	固定炭素	dry%	9.3	10.1
元素分析	炭素	dry%	40.8	40.8
	水素	dry%	6.5	6.0
	酸素	dry%	29.2	23.7
	窒素	dry%	4.2	2.4
	全硫黄	dry%	0.60	0.42
	塩素	dry%	0.07	0.02
嵩比重	g/cm ³	—	0.85	

3.2 実証実験について

3.2.1 実験方法

本研究は、湖南中部浄化センターから発生する未消化汚泥を対象に、脱水汚泥処理量4.0ton/d、排水処理量1.6m³/dの実証実験の設備にて、冬季、中間季および夏季に連続運転を行った。実証実験の設備フローを、図-4に示す。

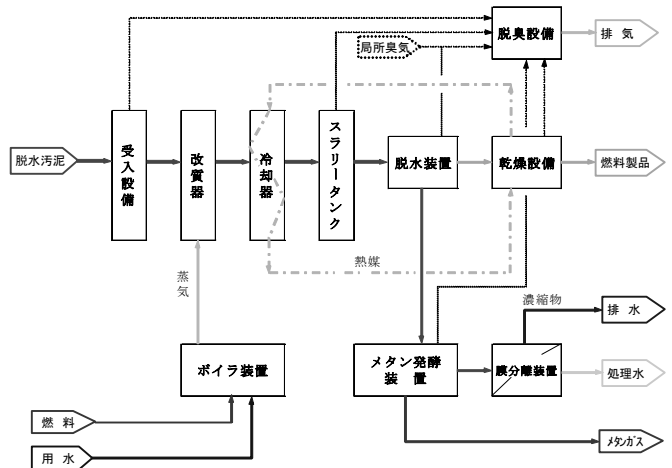


図-4 実証実験 設備フロー

3.2.2 実験内容

実証実験は、燃料製品の製造に関して熱処理実験として、また、脱水ろ液の処理に関して排水処理実験として本技術の検証を行った。その他、燃料製品の安全性や実用性等についても調査を行った。

(1) 熱処理実験

熱処理実験の検証項目と目標を、表-2に示す。

(2) 排水処理実験

排水処理実験の検証項目と目標を、表-3 に示す。

(3) その他の調査

本技術の燃料製品に関して、安全性、石炭との混焼実験から実用性および脱水汚泥との混焼実験から既設焼却設備への効果・影響について調査を行った。また、市場性の調査や消化汚泥における改質効果の検証も行った。

3.3 ケーススタディ

実証実験の結果に基づき脱水汚泥処理量 50 t / 日 (未消化脱水汚泥, 含水率 80%, 燃料製品発熱量 18.4MJ/kg-DS) の設備規模における導入効果および経済性の評価を行った。

3.3.1 導入効果

(1) 温室効果ガスの削減

本技術の運用時に消費する電力および燃料に由来する CO₂ 排出量と改質乾燥の燃料製品を石炭と混焼した場合の石炭代替燃料分の CO₂ 排出量の試算を行い、削減効果について評価した。

(2) 消費エネルギーの削減

脱水汚泥を、本技術で燃料製品化し、石炭代替燃料として有効利用した場合と焼却処理した場合のエネルギー収支で比較を行った。

3.3.2 経済性

本技術の経済性の評価は、脱水汚泥を処分する場合の LOTUS Project 評価基準 16,000 (円/ton-脱水汚泥) を用いて行った。

4. 研究結果

4.1 実証実験の結果

(1) 熱処理実験

各季節の脱水汚泥と燃料製品の発熱量の平均値および各検証項目の結果を、表-4 に示す。

定格運転を行った中間季, 夏季は目標を満足する結果を得たが, 冬季は定格量の 1/2 の低負荷運転であった影響により脱水汚泥の発熱量を若干下回る結果となった。

また, 消化汚泥を対象とした場合, 未消化汚泥と同様に燃料製品の発熱量が脱水汚泥より向上する結果を得た。なお, 発熱量は, 未消化汚泥より消化汚泥の燃料製品の方が低くなった。

(2) 排水処理実験

メタン発酵装置と膜分離装置の排水処理および各検証項目の結果を、表-5 に示す。

BOD, SS 共に目標値を達成し, メタン発酵装置で回収したメタンガスは, 熱量でボイラ燃料の 2 割程度を削減できた。

表-2 熱処理実験の検証項目, 目標

検証項目	目標
1) 使用エネルギーに対する収支	100%以上
2) 脱水汚泥に対する燃料製品利用率	10%以上
3) 燃料製品含水率	5~10%

表-3 排水処理実験の検証項目, 目標

検証項目	目標
1) 処理水質	BOD 600mg/L以下 SS 10mg/L以下
2) 使用燃料に対するメタンガス利用率	10%以上

表-4 熱処理実験の結果

項目		冬季※	中間季	夏季
脱水汚泥平均発熱量	MJ/kg-DS	18.96	18.24	17.85
	MJ/kg-可燃	23.01	22.43	22.18
燃料製品平均発熱量	MJ/kg-DS	18.83	18.53	17.97
	MJ/kg-可燃	25.42	25.13	24.95
改質効果発熱量向上率	DSベース	99.30%	101.60%	100.70%
	可燃分ベース	110.50%	112.00%	112.50%
1) エネルギー収支		101.13% (>100%)	108.99% (>100%)	106.12% (>100%)
2) 燃料製品利用率		12.2% (>10%)	13.2% (>10%)	12.7% (>10%)
3) 燃料製品含水率		1.82% (<10%)	6.73% (<10%)	5.04% (<10%)

※ 冬季は, 定格 1/2 の低負荷運転であった。

表-5 排水処理実験の結果

項目			メタン発酵		膜処理	
			原水	処理水	原水	処理水
BOD	中間季	mg/L	7,440	2,170	2,000	340
	夏季	mg/L	8,030	2,590	2,020	336
SS	中間季	mg/L	190	175	145	<1
	夏季	mg/L	260	120	72	<1
1) 処理水質						
BOD	中間季	mg/L	—		340 (<600)	
	夏季	mg/L	—		336 (<600)	
SS	中間季	mg/L	—		<1 (<10)	
	夏季	mg/L	—		<1 (<10)	
2) メタンガス利用率						
	中間季	%	27.19 (>10)		—	
	夏季	%	27.79 (>10)		—	

(3) その他調査内容

改質乾燥の燃料製品の安全性に関する調査結果を、表-6に示す。既往燃料化技術である造粒乾燥、低温炭化および高温炭化と比較して同程度の安全性が確認できた。

次に、石炭を燃料とするボイラ設備で燃料製品と混焼した結果、混焼の有無による排ガス分析等の運転データは同程度であり、混焼による影響はみられなかった。また、既設焼却溶融設備での脱水汚泥と燃料製品との混焼実験では、焼却炉で19.4%、焼却溶融設備全体で5.7%の補助燃料の削減効果が確認できた。

市場性は、バイオマス燃料の使用実績および使用可能性の面から抽出した会社へアンケートを行った結果、複数の会社に受け入れる可能性がある、もしくは、関心・興味があることが判明した。また、調

査から引き取りに関して安全性や含有成分等の課題が抽出された。

4.2 ケーススタディの結果

4.2.1 導入効果

(1) 温室効果ガスの削減

本技術の運用時のエネルギー消費に伴うCO₂排出量と燃料製品の石炭代替分のCO₂排出量を試算し、削減効果を検討した結果を、図-5に示す。

改質乾燥の燃料製品を石炭代替燃料として使用することで、温室効果ガスの削減効果は3,574 kg-CO₂/日となった。

(2) 消費エネルギーの削減

脱水汚泥を改質乾燥、または焼却により処理した場合のエネルギー収支について行った試算結果を、図-6に示す。

表-6 安全評価分析の測定結果

試験項目	改質乾燥	造粒乾燥	低温炭化	高温炭化	備考
熱分析 (TG-DTA)		*1	*1	*1	加熱時の挙動を評価
開始温度 DTA [°C]	309.8	121.0	123.0	283.1	消防法危険物 (第5類)
100°Cでの減量率 TG [%]	10.5	2.4	2.5	4.4	
自然発火性試験 (SIT試験)	*3	*1	*1	*1	貯蔵時の自然発火性を評価
発熱開始設定温度 [°C]	140	80	130	250	SIT型試験機
誘導時間 [min]	153	1244	378.4	593.8	
自己発熱性試験 (ワイヤバスケット試験)	*3	*1	*1	*1	保存時の自己発熱性を評価
発熱開始設定温度 [°C]	140	130	140	250	国連勧告/試験マニュアル準拠
ASTM式発火点試験					発火危険性の評価
最低発火点温度 [°C]	458	-	-	-	JIS K1474 4.8
発生ガス		*2	*2		可燃性ガスの発生を確認
水添加無し 水素 [vol-ppm]	< 5	<1,000	<1,000	-	消防庁評価書による試験
一酸化炭素 [vol-ppm]	9	<1,000	<1,000	-	
メタン [vol-ppm]	4	4	7	-	
水添加 (20%) 水素 [vol-ppm]	< 5	<1,000	<1,000	-	
一酸化炭素 [vol-ppm]	19	<1,000	<1,000	-	
メタン [vol-ppm]	3	20	24	-	
粉塵爆発試験 (爆発下限界濃度)					保存、運搬時の爆発性を評価
[mg/l]	790	-	-	-	JISZ8818準拠

注記) ※1 消防庁消防研究センター「再生資源燃料等の危険性評価に関する研究報告書」
 ※2 日本下水道事業団「下水汚泥固形燃料化システムの技術評価に関する報告書」(消化汚泥を原料とする製品評価)
 ※3 設定温度100°Cにおいて1,440 min発熱なし。

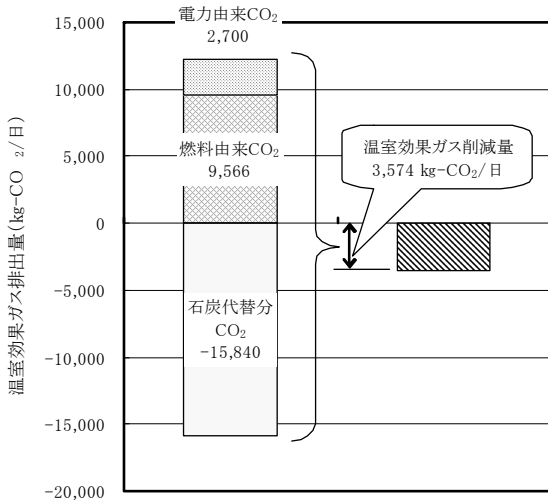


図-5 温室効果ガス削減効果

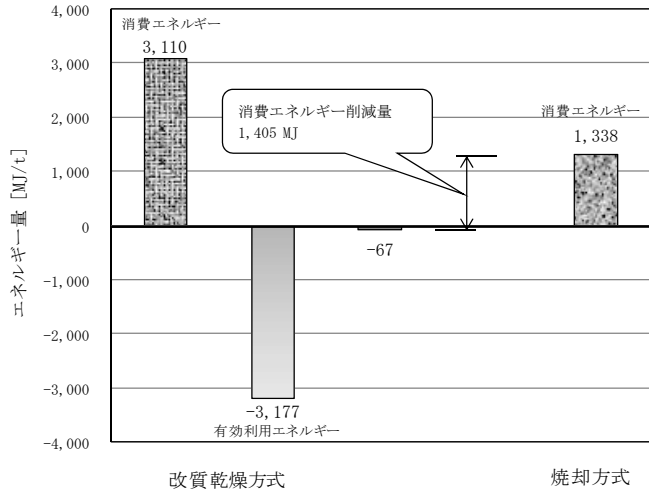


図-6 エネルギー削減効果

改質乾燥の燃料製品を石炭代替燃料とすることで、消費エネルギーの削減効果は脱水汚泥 1ton 当り 1,405MJ となった。

4.2.2 経済性

本技術の施設導入・運転、燃料製品の運用等から、脱水汚泥 1ton 当たりで試算した汚泥資源化コストの結果を、表-7に示す。

汚泥資源化コストは、LOTUS Project 評価基準 16,000 円/ton-脱水汚泥以下の 15,000 円/ton-脱水汚泥で下水汚泥を再利用可能と試算された。

表-7 汚泥資源化コスト 結果概要

項目	設定値	備考
脱水汚泥処理量	50ton/日	含水率80%
年間運転数	335日	
汚泥資源化コスト	15,000円/ton-脱水汚泥	建設費、運転委託費、ユーティリティ等

また、脱水汚泥処理量 120ton/日の場合、汚泥資源化コストは 12,200 円/ton-脱水汚泥と、施設規模が大きいくほどコスト削減効果がある結果となった。

5. 技術マニュアルの構成

技術マニュアルは、本編と資料編からなり、構成は以下のとおりである。

第1章 総則

- 第1節 目的
- 第2節 適用範囲
- 第3節 用語の定義

第2章 技術の概要

- 第1節 概要と特徴
- 第2節 製品の性状・成分
- 第3節 導入効果

第3章 施設の計画

- 第1節 施設の適用条件
- 第2節 計画の手順
- 第3節 計画上の留意点

第4節 関連法規

第4章 施設の設計

- 第1節 施設の構成と設計手順
- 第2節 容量計算
- 第3節 各設備の機器構成

第5章 施設の施工

- 第1節 施工計画
- 第2節 施工手順
- 第3節 試運転

第6章 設備の維持管理

- 第1節 維持管理

資料編

1. 各種実験結果
2. 市場性調査
3. ケーススタディ
4. 参考図
5. 積算資料(案)
6. 問い合わせ先

6. まとめ

改質乾燥の燃料化技術を用いて製造した燃料製品について、本研究より得られた結果を以下にまとめる。

- ・脱水汚泥と同程度以上の発熱量を有し、既往燃料化技術と比較して同等の安全性を有することが実験で実証された。
- ・石炭代替燃料として利用することで、温室効果ガスおよび消費エネルギーの削減への有効性が確認された。
- ・脱水汚泥を処分するよりも低コストで再利用できる結果が得られた。
- ・関心・興味がある会社が複数あり、市場性があることが判明した。

本研究の成果として、実験により実証・確認された技術の概要、特徴や導入効果等の他、下水汚泥燃料化施設の計画、設計、施工、維持管理等に関する技術的項目について技術マニュアルに取りまとめた。

●この研究を行ったのは

資源循環研究部長	石田 貴
資源循環研究部副部長	落 修一
資源循環研究部主任研究員	吉田 秀潔
資源循環研究部研究員	岩下 真理

●この研究に関するお問い合わせは

資源循環研究部長	石田 貴
資源循環研究部副部長	落 修一
資源循環研究部研究員	松村 洋史