

〈研究発表〉

階段炉による下水汚泥焼却発電システムの評価

萩田 諭¹⁾, 水野 孝昭¹⁾, 株丹 直樹¹⁾宍田 健一¹⁾, 大下 和徹²⁾, 高岡 昌輝²⁾¹⁾ (株)タクマ 水処理技術部

(〒660-0806 兵庫県尼崎市金楽寺町2-2-33 E-mail: t-mizuno@takuma.co.jp)

²⁾ 京都大学大学院地球環境学堂

(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂Cクラスター1-3-463 E-mail: oshita.kazuyuki.6e@kyoto-u.ac.jp)

概要

階段炉による下水汚泥焼却廃熱発電システムの有効性の評価を目的として、エネルギー収支、温室効果ガス排出量、維持管理費を評価項目として他の技術との比較を行った。比較対象は、従来焼却方式として気泡式流動炉、他の下水汚泥エネルギー化技術として燃料化方式とし、消化設備の有無、脱水機の型式といった条件を組み合わせで行った。その結果、本システムは維持管理費の面において最も優れ、エネルギー収支、温室効果ガス排出量においても他の下水汚泥エネルギー化技術と同程度以上の性能を持つことが認められた。

キーワード：下水汚泥焼却発電システム、GHG 排出量、階段炉

原稿受付 2016.6.30

EICA: 21(2・3) 179-183

1. はじめに

近年、下水道事業においても再生可能エネルギーの利用、温室効果ガス(GHG)排出量の削減が強く求められるようになってきている。下水汚泥処理の分野においては、消化や炭化に加え、焼却発電技術が導入され始めている。

下水汚泥中エネルギーの活用、GHG 排出量削減に資する取り組みとして、和歌山市、日本下水道事業団、京都大学、(株)西原環境、(株)タクマの共同研究体は、平成25、26年にB-DASHプロジェクトとして「下水道バイオマスからの電力創造システム実証事業」を実施した。本実証研究は国土交通省国土技術政策総合研究所からの委託研究として実施し、研究成果は「下水道バイオマスからの電力創造システム導入ガイドライン(案)」¹⁾(以下、B-GL)として公表されている。実証を行った技術は、機内二液調質型遠心脱水機により含水率70%程度まで低含水率化した脱水汚泥から、階段炉を用いた焼却発電システムにより焼却廃熱による発電を行うものである。

汚泥焼却と他のエネルギー化技術の導入効果の比較は以前から行われている^{2,3)}が、焼却発電との比較による研究例はない。そこで、本研究では、階段炉による焼却発電システムと他の汚泥エネルギー化技術の導入効果の比較を行った。本研究では、各システムにおいて消費されるユーティリティ量、エネルギー化物製造量等を基に、エネルギー収支、GHG 排出量、維持

管理費の面から比較し、各処理システムの特徴を明らかにした。

2. 試算方法

2.1 試算対象とするシステム

本研究では下水汚泥の処理において流動炉による焼却、階段炉による焼却発電、燃料化による炭化およびこれらに消化を組み込んだシステムを試算対象とした。

Table 1に試算を行うシステムの一覧を示す。流動炉をA、階段炉をB、炭化をCとして表記した。濃縮汚泥受入以降を対象として試算を行った。

流動炉による焼却については、国土交通省水管理・国土保全局下水道部発行の「下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン—改訂版—」⁴⁾(以下、E-GL)に示された試算式を用いることとした。

Table 1 Constitution of evaluated systems

	焼却(流動炉)		焼却発電(階段炉)			燃料化(炭化)	
条件	A1	A2	B1	B2	B3	C1	C2
方式			TYPE-D		TYPE-B	中温	低温
消化		○		○			○
脱水	○	○	○	○	二液	○	○
乾燥			○	○			

階段炉による焼却発電は、2種類のシステムについて試算を行った。一方は、前述のB-GLで紹介されている低含水率の二液脱水汚泥を直接焼却するシステム(以下、TYPE-B)であり、もう一方は一液脱水

汚泥を乾燥機によって低含水率化させたのち焼却するシステム（以下、TYPE-D）である。消化を組み込む場合はTYPE-Dのみを対象とした。

燃料化には乾燥方式と炭化方式があるが、本研究では実績の多い炭化方式について検討を行った。炭化方式についてもE-GL内で試算式が示されている。炭化は一般にその反応温度によって低温炭化、中温炭化、高温炭化に分類される。E-GL内のケーススタディ例に従い、消化していない一液脱水汚泥を炭化する場合は中温炭化、消化一液脱水汚泥を炭化する場合は低温炭化とした。それぞれ投入するエネルギー量、製造される炭化物の量および単位重量あたりの発熱量が異なる。製造した固形燃料は、石炭代替燃料として処理場渡しで販売することを想定した。

消化を組み込んだ場合、消化ガスは発生させた全量を焼却あるいは燃料化の燃料として使用し、A重油の使用量を削減することとする。なお、消化後の汚泥は有機分が消化ガス側に移行するため発熱量が低下する。この発熱量低下分を見込んだ上で、燃料消費量の試算を行った。

また、脱水方式はB3以外の試算では一液脱水方式とした。

ユーティリティ消費量として消費電力、A重油、高分子凝集剤、無機凝集剤、苛性ソーダ使用量を、エネルギー化物製造量として発電量と固形燃料製造量を算出した。また、GHG排出量算出のためにN₂O排出量を、維持管理費算出のために灰発生量を算出した。以下、これらの項目を「ユーティリティ消費量等」と記す。本研究ではユーティリティ消費量等に各原単位を乗じて積み上げる方法で、エネルギー収支、GHG排出量、維持管理費を算出した。なお、建設費、補修費、および人件費については本研究では含まないものとした。

2.2 施設規模および汚泥性状

施設規模は、消化を行わない場合の一液脱水汚泥量で100t/日となる濃縮汚泥量を基準とした。含水率はE-GLおよび「平成26年度機械設備標準仕様書」⁵⁾から設定した。濃縮汚泥中の可燃分率を80%、消化率を50%として算出した。消化に関する設定値はE-GL内のケーススタディ例から引用した。これをTable 2に示す。また、二液脱水の場合の無機凝集剤（ポリ硫酸第二鉄）の添加率はB-GL同様10%-DSと設定

Table 2 Evaluation parameter of digestion

項目	設定値
消化率	50%
消化ガス転化率	550m ³ /t-VS
消化ガス低位発熱量	21.4MJ/m ³
消化ガス加温利用割合	32%

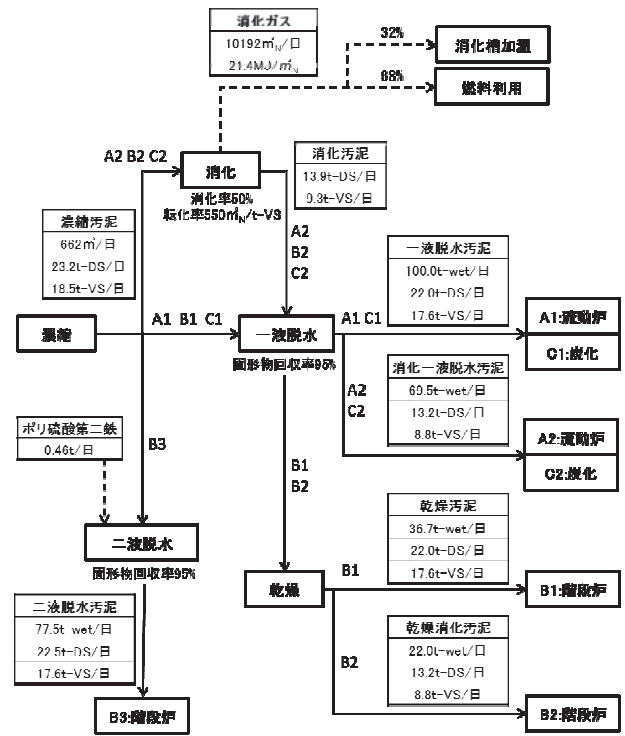


Fig. 1 Material flow of evaluated systems

した。濃縮汚泥受入から焼却・燃料化に至るまでの物質フローをFig. 1に示す。

2.3 ユーティリティ消費量等の算出

ユーティリティ消費量等の試算式一覧をTable 3に示す。出典を参考文献番号で、注釈を番号付の※印で付記した。

TYPE-Dの消費電力およびA重油使用量については算出式が公表されていないため、熱収支計算および必要機器の消費電力の積算により算出した。

消化を行う条件(A2, B2, C2)でのA重油使用量は消化ガスによる代替分を差し引いた値となる。これをTable 3に記載した。流動炉(A2)および階段炉(B2)では消化ガスにより燃料を完全に賄うことができたが、炭化(C2)の場合は消化ガスだけでは賄えず、さらにA重油が必要となった。

苛性ソーダ使用量については汚泥中S分の量から算出した。焼却の場合、汚泥中S分は全量排ガス側に移行するものとし、苛性ソーダと排ガス中SO_xはNaOH:SO_x=2:1のモル比で反応するものとした。苛性ソーダとSO_xの反応効率率は100%とした。なお、階段炉TYPE-B(B3)の場合、無機凝集剤中にS分が含まれるため、余分の苛性ソーダが必要となる。

焼却灰の処分量については、流動炉、階段炉ともに投入した汚泥中の可燃分は完全燃焼され、灰分の全量が焼却灰として排出されるものとした。焼却灰は湿灰として搬出するものとし、湿灰重量は乾灰重量の1.3倍として灰処分量を算出した。

Table 3 Calculation formula of utility consumption

ユーティリティ消費量等	処理方式	焼却 (流動炉) A1,A2	焼却発電 (階段炉・一液脱水) B1,B2	焼却発電 (階段炉・二液脱水) B3	燃料化 (炭化) C1,C2
消費電力	消化	5.3kWh/m ³ 4)			
	直接脱水	5.8kWh/t-wet 4)		20.39X-18.17(MWh/年) 1)	5.8kWh/t-wet 4)
	消化脱水	20kWh/t-wet 4)		-	20kWh/t-wet 4)
	焼却	92kWh/t-wet 4)	- ※1	39.39X+222.84(MWh/年) 1)	-
A重油使用量	炭化	-	-	-	129kWh/t-wet 4)
	消化なし	25L/t-wet 4)	- ※1	0.093X(kL/年) 1) ※2	34L/t-wet 4)
高分子凝集剤使用量	消化あり	0L/t-wet ※3	0L/t-wet ※3	-	9.8L/t-wet ※3
	直接脱水	1.48X (t/年) ※4		2.07X(t/年) 1) ※4	1.48X (t/年) ※4
無機凝集剤使用量	消化脱水	3.25X (t/年) ※4		-	3.25X (t/年) ※4
	直接脱水	-	-	29.57X(t/年) 1) ※5	-
苛性ソーダ使用量	焼却	23.15X(t/年)		40.50X(t/年) 1) ※2	-
	直接脱水・中温炭化	-	-	-	5.79X(t/年) ※6
	消化脱水・低温炭化	-	-	-	- ※6
固形燃料製造量	消化なし・中温炭化	-	-	-	0.068t/t-wet 4)
	消化あり・低温炭化	-	-	-	0.157t/t-wet 4)
N ₂ O排出係数	焼却・炭化	0.645kg-N ₂ O/t-wet 6)	0.1kg-N ₂ O/t-wet 1)	0.1kg-N ₂ O/t-wet 1)	0.0312kg-N ₂ O/t-wet 4)

/m³: (濃縮汚泥あたり消費量) /t-wet: (脱水汚泥あたり消費量または生産量) X: 1日当たり処理DS量(t-DS/日)

- ※1 熱収支計算および必要機器の消費電力の積算により算出
- ※2 B-GLの算出式を可燃分割により補正した式
- ※3 A重油使用量から消化ガスによる代替分を差し引いた値
- ※4 高分子凝集剤添加率 直接一液脱水0.5%-DS, 消化一液脱水1.1%-DS, 直接二液脱水0.7%-DS
- ※5 無機凝集剤添加率 直接二液脱水10%-DS
- ※6 中温炭化の場合、汚泥中S分の排ガスへの移行率を25%とし、苛性ソーダ使用量は焼却(流動炉)の25%とする。低温炭化の場合は排ガスへの移行率は0%とする⁷⁾

2.4 各原単位

エネルギー量原単位, GHG 排出係数, 諸費用原単位を Table 4~6 に示す。

Table 4 Energy quantity units

項目	原単位	出典
電気	9.5MJ/kWh	8)
固形燃料(中温炭化)	17MJ/kg	4)
固形燃料(低温炭化)	15MJ/kg	4)
A重油	39.1MJ/L	6)

Table 5 GHG emission units

項目	原単位	出典
電気	0.579kg-CO ₂ /kWh	9)
A重油	2.71kg-CO ₂ /L	6)
高分子凝集剤	6.5kg-CO ₂ /kg	6)
無機凝集剤	0.0308kg-CO ₂ /kg	10)
苛性ソーダ	0.938kg-CO ₂ /kg	10)
固形燃料石炭代替	-0.091kg-CO ₂ /MJ	11)
N ₂ O排出	298kg-CO ₂ /kg-N ₂ O	4)

Table 6 Cost units

項目	原単位	出典
電気	15円/kWh	1)
A重油	96円/L	1)
高分子凝集剤	500円/kg	1)
無機凝集剤	20円/kg	1)
苛性ソーダ	18円/kg	1)
灰処分量	8,000円/t	12)
固形燃料売却	105円/t	4)

Fig. 1 に示した濃縮汚泥量, 脱水汚泥量, DS 量を Table 3 の算出式に代入し, ユーティリティ消費量等

を求めた。ユーティリティ消費量等に対し Table 4~6 の原単位を乗じて積み上げることでエネルギー収支, GHG 排出量, 維持管理費を算出した。いずれの計算も稼働率 90% (消化設備のみ 100%), 負荷率 90% の条件で行った。

3. 試算結果

3.1 エネルギー収支

エネルギー収支の試算結果を Fig. 2 に示す。ここでは, 発電および固形燃料製造によるエネルギー生産を正の値とし, 消費電力および A 重油の使用によるエネルギー消費を負の値として, その合計をエネルギー収支として表現した。これより, エネルギー収支がプラスならば余剰のエネルギーが得られることを表す。

プラスとなったのは B3 と C2 のみであり, これらはエネルギー創出が可能な方式と言える。階段炉は

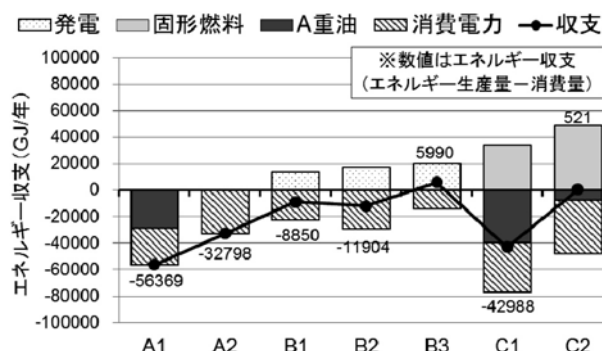


Fig. 2 Results of energy balance evaluation

A 重油使用量、消費電力が少なく、発電電力が得られることから、最もエネルギー収支に優れたシステムであった。また、流動炉と比較した場合、階段炉はいずれのシステムもエネルギー収支は優れていた。炭化は、石炭代替燃料としての発電所での利用を考慮したエネルギー収支では優れているものの、処理場内におけるエネルギー投入量は最も多くなった。

流動炉と炭化の場合は消化ガスの利用により、A 重油使用量を大きく削減でき、エネルギー収支が改善された。階段炉の場合、消化ガスを焼却炉に投入して燃焼させるため発電量は増加したが、エネルギー収支では消化なしの条件が優れていた。

3.2 GHG 排出量

GHG 排出量の試算結果を Fig. 3 に示す。流動炉は他方式と比較して排出量が多く、その多くが N₂O 排出に由来している。階段炉は、立上げ時を除いて補助燃料を使用せず、N₂O 排出量も少ないため、流動炉と比較して排出量削減に有効な方式である。なかでも B3 の排出量が最も少ない。これは二液脱水により乾燥機が不要となるため消費電力が少なく、かつ余剰蒸気で発電を行うことで B1, B2 よりも多くの発電量が得られるためである。炭化の場合は固形燃料を石炭

代替品として利用することで大幅に排出量を削減できる。

3.3 維持管理費

維持管理費の試算結果を Fig. 4 に示す。最も維持管理費が低かったのは B1 で、B2, B3 も同程度に低かった。階段炉は補助燃料使用量、消費電力が少なく、発電電力が得られることから、いずれの条件でも流動炉、炭化と比較して維持管理費は低くなった。炭化は消化と組み合わせた場合維持管理費は減少するが、C1, C2 いずれも高い傾向にあった。炭化物の販売価格が 105 円/t と安価であることが理由の一つとして挙げられる。

4. ま と め

階段炉による下水汚泥焼却発電は、エネルギー収支、GHG 排出量、維持管理費の面で総合的に見て優れたシステムであった。特に維持管理費は他方式と比較して最も優れており、エネルギー収支、GHG 排出量においても炭化と同程度の性能を持つことが認められた。また、施設の稼働に必要なエネルギー量が少なく、エネルギー自立性に優れた方式であることが分かった。

消化との組み合わせという観点では、流動炉および炭化は、全ての評価項目で消化を行う条件が優れていた。階段炉の場合は、GHG 排出量は消化を組み合わせた条件がやや優れていたが、エネルギー収支と維持管理費では消化を組み合わせない条件がやや優れており、消化を設けずとも優れた効果を発揮するシステムだといえる。

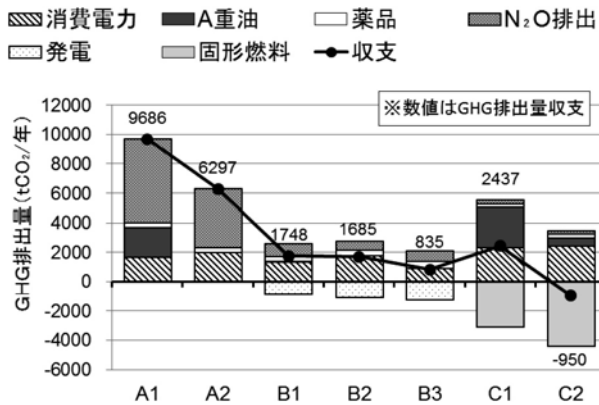


Fig. 3 Result of GHG emission evaluation

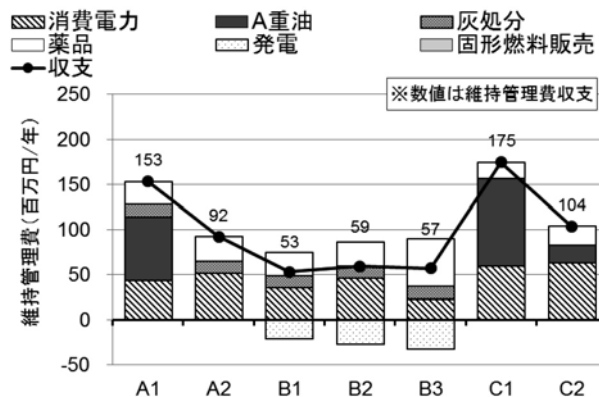


Fig. 4 Result of cost evaluation

参考文献

- 1) 国土交通省 国土技術政策総合所：B-DASH プロジェクト No. 10 下水道バイオマスからの電力創造システム導入ガイドライン (案) (平成 27 年)
- 2) 木室洋介, 古林敬顕, 中田俊彦：下水汚泥エネルギー利用システムのインベントリ分析による性能評価, 日本エネルギー学会誌, Vol. 90, No. 3, pp. 247-257 (2011)
- 3) 内田賢治：下水汚泥のガス化、燃料化等についての必要エネルギー等に関する研究, 下水道協会誌論文集, Vol. 49, No. 594, pp. 112-118 (2012)
- 4) 国土交通省 水管理・国土保全局 下水道部：下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン —改訂版— (平成 27 年 3 月)
- 5) 日本下水道事業団：機械設備標準仕様書 (平成 26 年)
- 6) 国土交通省：下水道における地球温暖化防止実行計画策定の手引き (平成 21 年 3 月)
- 7) 須網 暁, 小林信介, 浜辺 久, 沢井正和, 板谷義紀：堆肥化乾燥汚泥炭化時の窒素および硫黄成分の挙動, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 829 (2015)
- 8) 資源エネルギー庁：エネルギー源別標準発熱量及び炭素排出

- 係数の改訂について(平成26年11月14日)
- 9) 環境省:平成26年度の電気事業者ごとの実排出係数・調整後排出係数(平成27年11月30日)
 - 10) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課:廃棄物処理施設の基幹的設備改良マニュアル(平成22年3月)
 - 11) 環境省:算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧
 - 12) 下水道技術開発プロジェクト(SPIRIT21)委員会:下水汚泥資源化・先端技術誘導プロジェクト(LOTUS Project)下水汚泥のバイオソリッド燃料化に係る技術資料(2008)