

〈論文〉

下水汚泥の高効率脱水と焼却廃熱発電システムの評価

山田 恭平¹⁾, 大下 和徹²⁾, 高岡 昌輝³⁾, 藤森 崇⁴⁾, 水野 孝昭⁵⁾
星 隆伸⁶⁾, 山崎 正博⁷⁾, 下川 克之⁷⁾, 島田 正夫⁸⁾, 川住 亮太⁹⁾

¹⁾ 京都大学大学院工学研究科
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C-1 E-mail: yamada@epsehost.env.kyoto-u.ac.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-1 E-mail: oshita@epsehost.env.kyoto-u.ac.jp)

³⁾ 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-1 E-mail: takaoka@epsehost.env.kyoto-u.ac.jp)

⁴⁾ 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-1 E-mail: fujimori@epsehost.env.kyoto-u.ac.jp)

⁵⁾ (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)

⁶⁾ (株)西原環境 EPC 本部
(〒108-0022 東京都港区海岸 3-20-20 E-mail: takanobu.hoshi@nishihara.co.jp)

⁷⁾ 和歌山市建設局下水道部
(〒641-0011 和歌山県和歌山市三葛 510 E-mail: shumatsushori@city.wakayama.lg.jp)

⁸⁾ 日本下水道事業団技術戦略部
(〒113-0034 東京都文京区湯島 2-31-27 湯島台ビル E-mail: Shimadam@jswa.go.jp)

⁹⁾ 国土交通省国土技術政策総合研究所
(〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 E-mail: kawasumi-r92ta@nilim.go.jp)

概 要

平成 25~26 年度に国土交通省 B-DASH プロジェクトにて、下水汚泥焼却廃熱発電システム(革新型システム)の実証事業が和歌山市で実施された。本研究は、約 2 年間の、既設設備と革新型システムの各種汚泥の性状調査から、物質・熱収支モデルを作成した。その上で、コスト、GHG 排出量を算出した結果、革新型システムでは、既設設備に比較しそれぞれ 59%、26% まで低減できることを示した。モデルの感度分析から、本規模での革新型システムは、含水率 73% 以下、有機分 78% 以上の汚泥について適用できることがわかった。

キーワード：下水汚泥，遠心脱水，低含水率化，焼却廃熱発電，ポリ硫酸第二鉄

原稿受付 2016.5.10 原稿受理 2016.9.16

EICA: 21(2・3) 161-170

1. 背景と目的

我が国は、資源・エネルギーの供給源の多くを海外に依存しており、それらの安定確保が不可欠である。2011 年の東日本大震災に伴い発生した東京電力福島第一原子力発電所事故や 2012 年に開始された再生可能エネルギー由来電力の固定買取価格制度などを背景に、近年では再生可能エネルギーの利用やそれに伴う温室効果ガス(GHG)の排出削減がより一層強く求められている。

下水汚泥は、我が国において最も多く発生する産業廃棄物の一つであるが、バイオマスでもあり、そのエネルギー利用が注目されている。下水汚泥のエネルギー利用技術は主に、I. メタン発酵由来の消化ガスの発電や燃料利用、II. 乾燥汚泥、または炭化汚泥の

石炭代替燃料としての利用、III. 汚泥熱分解ガスの発電利用、という 3 つが挙げられ、その普及が進められている。一方で、我が国において下水汚泥の多くは主に焼却されている。しかし、下水汚泥は含水率が高く、燃焼に補助燃料が必要であり、重油などの化石燃料を多く消費する。このため、一般廃棄物分野のごみ発電のような廃熱からの電力回収は困難で、一部の大規模処理場での採用以外、実績はほとんどない¹⁾。

以上のような背景のもとで、平成 25 年度には、国土交通省の下水道革新的技術実証事業(B-DASH プロジェクト)により、「下水道バイオマスからの電力創造システム実証事業」が開始された。本事業は、和歌山市中央終末処理場に、機内二液調質型遠心脱水機による汚泥の低含水率化技術、次世代型階段炉によるエネルギー回収技術、および、蒸気発電機によるエネ

ルギー変換技術の3技術を組み合わせた実設備を設置し、下水汚泥焼却廃熱を用いた発電を実現するシステム（以下革新型システム）を実証するものである。

このように既存のシステムに代わって新たなシステムを導入する場合には、双方のシステムの物質収支、熱収支などの特性を把握し、比較検討することで新たなシステムの導入効果を評価することが、システムの普及条件を明らかにするうえでも重要である。これまで、下水汚泥の既存のエネルギー利用技術や、本革新型システムを対象にフィージビリティ・スタディを行い、コストやGHG排出量の観点から評価した例はあるが²⁻⁵⁾、それらは標準的な組成の汚泥や設備規模を設定条件とし、想定される結果を提示しているに過ぎない。

そこで、本研究は、和歌山市中央終末処理場の既設設備と革新型システムの調査を行い、これらの物質収支・熱収支、ランニングコスト、GHG排出量について明らかにし、革新型システムの導入効果や適応範囲を評価することを目的とした。具体的には、汚泥等の性状を調査し、その基礎特性を明らかにするとともに、種々の文献による情報や処理場の運転月報から、既設設備および革新型システムの物質収支・熱収支モデルを構築した。そしてこのモデルにより既設設備、革新型システムのランニングコスト、およびGHG排出量を算出し、比較することで革新型システムの導入効果を明らかにした。さらにモデルの感度分析から、革新型システムが有利となる汚泥性状の適応範囲も求めた。

2. 調査方法

2.1 調査対象システムの概要

調査対象の和歌山市中央終末処理場は分流および一部合流式の終末処理場である。計画処理人口は105,600人で、現有下水処理能力は80,400 m³/dayである。平成26年度末の時点で和歌山市の中央処理区1,580 ha、供用人口89,930人の家庭排水や事業所排水等を9か所の中継ポンプ場で集約し（うち7つが分流式で、2つが合流式）、本終末処理場にて前曝気—最初沈澱池—標準活性汚泥法—最終沈澱池—次亜塩素酸ソーダによる滅菌といったフローにより水処理を施し、河川に放流している。

Fig. 1には既設設備と革新型システムのフロー図を示す。まず、既設設備では、最初沈澱池汚泥と、余剰汚泥が混合されて重力濃縮され、得られた混合濃縮汚泥は高分子凝集剤による調質後、ベルトプレス脱水機で脱水された後、和歌山市北部下水処理場から受け入れた脱水汚泥とともに、流動床式焼却炉で燃焼され、焼却灰が電気集じん機により捕集される。焼却過程で発生した酸性ガスの処理に冷却水、苛性ソーダが用いられスクラバ排水が発生する。一方、革新型システムでは、混合濃縮汚泥を更にドラム濃縮機で濃縮する。これは、混合濃縮汚泥の固形物濃度が約1.6%と低い^{6,7)}ため、脱水機への供給汚泥の固形物濃度を4%程度に保ち、後段の脱水を安定化させるために設置されている。次に、脱水では、高分子凝集剤、およびポリ硫酸第二鉄（以下、ポリ鉄）を用い、機内二液調質型遠心脱水機により低含水率まで脱水する。本脱水方式は、高分子凝集剤にて脱水の進行した脱水汚泥にポリ

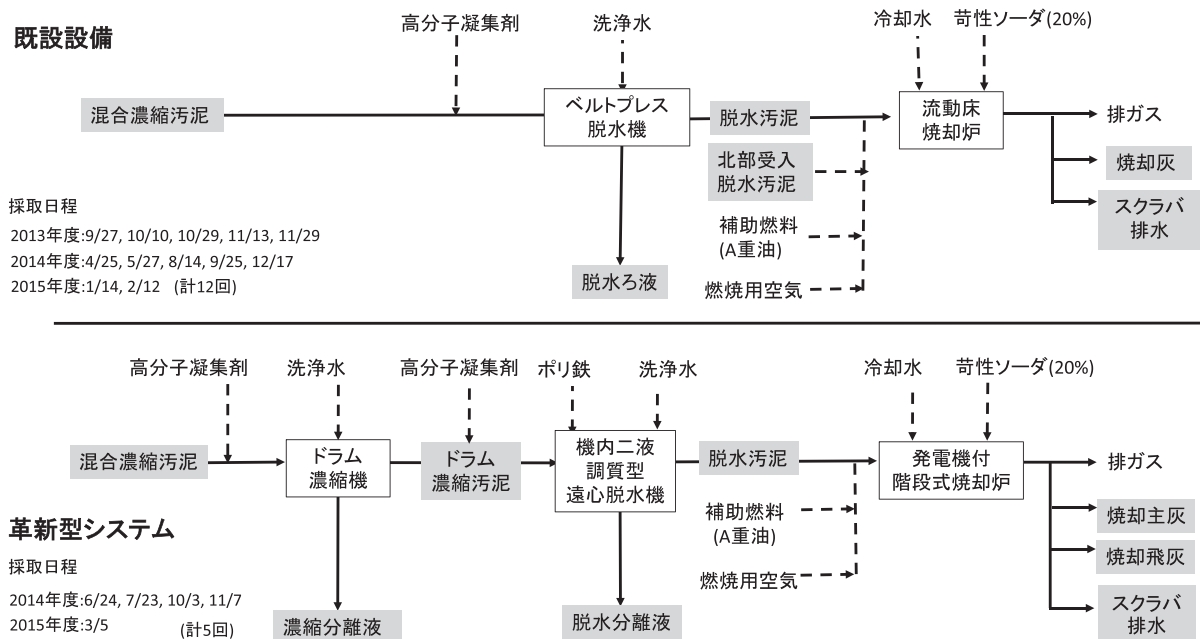


Fig. 1 The flow diagrams of the existing and innovative sludge treatment system in Wakayama Chuo wastewater treatment plant

鉄を分けて添加し、更に脱水することで、従来の脱水方式よりも汚泥含水率を低下できる技術である⁸⁾。この脱水汚泥を発電機付階段式焼却炉で燃焼させて、階段炉底部から焼却主灰、バグフィルターから焼却飛灰、湿式スクラバよりスクラバ排水が得られる。なお、本焼却炉には廃熱ボイラーとスクリュウ式蒸気発電機、バイナリー発電機が設置され廃熱発電が行われる。

2.2 サンプルングと対象試料

サンプルングは2013年度から2015年度の期間中、Fig. 1に付記したサンプルング日において、既設設備は12回、革新型システムは5回行った。サンプルング対象とした試料は、Fig. 1中に灰色で示した部分であり、各システムの物質収支がある程度把握できるように設定した。具体的には、既設設備については、混合濃縮汚泥、脱水汚泥、脱水ろ液、北部受入脱水汚泥、焼却灰、およびスクラバ排水とし、革新型システムでは、既設設備と共通となる混合濃縮汚泥に加え、ドラム濃縮汚泥、濃縮分離液、脱水汚泥、脱水分離液、焼却主灰、焼却飛灰、スクラバ排水とした。これら各試料についてスポットサンプルングを行った。

2.3 分析項目と分析方法

分析項目の詳細をTable 1に示す。各試料について全固形物(TS)、強熱減量(VTS)を測定した。つぎに、均一に粉碎した乾燥試料について、CHN組成を測定した。なお脱水汚泥に関しては高位発熱量も測定した。また革新型システムの特徴として脱水助剤としてポリ鉄を使用する点が挙げられるが、ポリ鉄の主成分であるFeは汚泥中の固形分や焼却灰発生量に影響することが想定され、Sは、焼却排ガス中の硫酸酸化物が増加し、湿式スクラバーにおける苛性ソーダの消費量が増加する等の影響が想定される。さらにポリ鉄による汚泥中の溶解性Pの不溶化により、革新型システムにおけるリンの挙動も変化する可能性がある。よってこれらの元素についても、ICP発光分析もしくは蛍光X線分析(XRF)により分析した。ICP発光分

析については、各試料を塩酸、硝酸、フッ酸を用いホットプレートもしくはマイクロウェーブ分解装置(CEM社製:MARS5)で酸分解したものを、イットリウム(Y)を内標準とした多点検量線法により測定し、蛍光X線分析については均一に粉碎した乾燥試料を、FP法により測定した。なお全ての分析について、採取試料を3つに分割しそれぞれ測定して平均値を求めた(n=3)。

3. 調査結果と考察

3.1 各試料の性状比較

本節では、既設設備および革新型システムの代表的なサンプルとして、脱水汚泥と焼却灰に着目し、それらの性状比較を行った。

Fig. 2に脱水汚泥の性状データ比較を、含水率、VTS、発熱量、S、Fe、P濃度について示す。それぞれ既設設備12回と革新型システム5回の調査結果の平均値を示し、エラーバーは標準偏差を示す。

脱水汚泥の含水率に関しては、革新型システムは既設設備に比較して平均6.9%低くなり、低含水率化の影響が窺えた。ドラム濃縮機は、脱水機への供給汚泥濃度および、脱水性能を安定化させるために用いているため、直接的な低含水率化への寄与は、高分子凝集

Table 1 The analytical methods and instruments for each sample

分析項目	分析方法および使用機器等	測定対象など
TS, VTS	下水試験方法に準拠 ²⁾	全試料
CHN組成	CHN コーダ (ジェイ・サイエンス・ラボ製: JM10, MA10)	
高位発熱量	ボンベ熱量計(島津製作所:CA-4AJ)	脱水汚泥のみ
P S Fe	蛍光X線分析装置 (島津製作所製:XRF-1800), ICP発光分析装置 (サーモエレクトロン社製:IRIS Intrepid Duo)	蛍光X線分析は液体試料以外の全試料

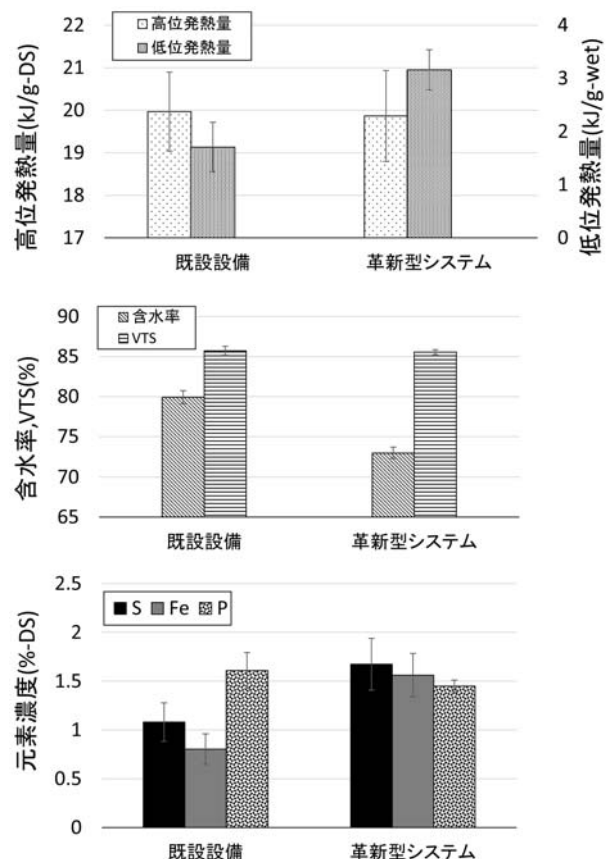


Fig. 2 The water contents, volatile total solids, heating values and Fe, S and P concentrations of dewatered sludge in each system

剤とポリ鉄を分離して注入し、機内二液調質遠心脱水機で汚泥を脱水するプロセスによるものと考えられる。久野らは、本プロセスについて、実機レベルの遠心脱水機を用いて検討し、高分子凝集剤単独の場合に比較して脱水汚泥含水率は、混合生汚泥（供給汚泥の TS: 2.18~3.53%）の場合で、6.8~7.3% 低下したとしており⁸⁾、本研究の調査結果も妥当であると考えられた。また、この結果、既設設備の脱水汚泥発生量の 12 回平均値は 25.1 t/day であったのに対し、革新型システムの 5 回平均値は 17.0 t/day まで低減された。

一方、VTS は両システムで差はなかった。革新型システムでは脱水前にポリ鉄をドラム濃縮汚泥に平均約 10%TS の割合で添加しており、この場合の無機分の増加を考慮した VTS の低下割合を試算すると 0.82% 程度である。この程度の添加割合では、脱水を経て固液分離が進行した脱水汚泥においても、その VTS に影響はないと判断できる。発熱量に関して高位発熱量は既設設備、革新型システムで差異は認められなかったが、低位発熱量は革新型システムの方が、既設設備に比べて 1.85 倍高くなることが分かった。この要因としては、VTS や高位発熱量に大きな差がないことから、汚泥含水率の低下によるところが大きいと考えられた。

脱水汚泥中の元素濃度に関して革新型システムでは S, Fe 濃度は既設設備のものに比べてそれぞれ平均で約 1.5 倍、約 1.9 倍となった。仮にポリ鉄に含まれる S, Fe の全量が、脱水分離液には移行せず、脱水汚泥に残留すると考えた場合は、それぞれ濃度が最大 2.3 倍、2.25 倍になると想定され、汚泥に添加されたポリ鉄により脱水汚泥中の S, Fe 濃度が上昇するものの、幾分かは脱水分離液へ移行していることが確認できた。一方、P 濃度は平均で 0.90 倍と、既設設備に比較して差異は認められなかった。

次に、Fig. 3 に既存設備の焼却灰および革新型システムの焼却主灰、焼却飛灰の S, Fe, P 濃度の比較を示す。既設設備の焼却灰と革新型システムの焼却主灰中の Fe 濃度を比較すると、革新型システムの Fe の方

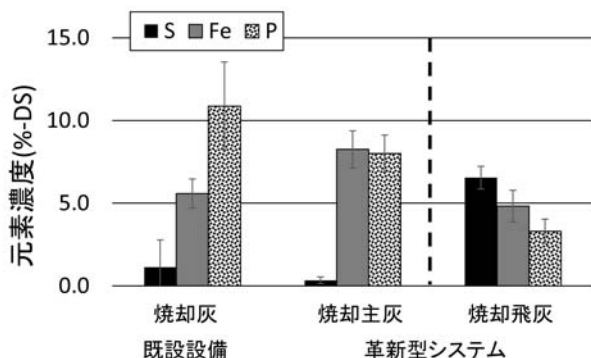


Fig. 3 The Fe, S and P concentrations of ashes in each system

が既設の場合よりも 1.5 倍程度高くなった。また既存設備の焼却灰と革新型システムの焼却飛灰の S を比較すると、焼却飛灰中 S の方が既設設備の焼却灰よりも 11.8 倍大きくなった。これらのことから、Fe は焼却主灰へ、S は焼却飛灰へと主に分配されていることが予想された。一方 P に関しては既設設備の焼却灰に比較し、革新型の焼却主灰、焼却飛灰は、それぞれ 0.68 倍、0.28 倍であった。P は通常の焼却温度、空気比では揮発することはないと考えられ、革新型の焼却飛灰よりも焼却主灰の方が高くなる傾向になったと考えられる。ただし、ポリ鉄添加により汚泥中の無機分が増加するため、既設の焼却灰に比較すると、焼却主灰は、相対的に濃度が低くなっているものと予想された。

本節では Fe, S, P 濃度からの各元素の挙動の予測を行ったが、後述の物質収支、元素収支の計算結果の部分にて、各元素の挙動について考察を行った。

3.2 物質収支および各媒体への分配割合

対象とした全試料の性状調査結果と、和歌山市中央終末処理場の設備運転月報および日報^{6,7)}の各媒体の流量データを乗じ、両システムの各プロセスについて物質・元素収支を求めた。

その一例として、TS, VTS, C, H, N, S, Fe, P について既設設備と革新型システムの脱水機まわりの物質収支、元素収支の計算結果を Table 2 に示す。各値は、既設設備の 12 回の調査の平均と革新型システムの 5 回の調査の算術平均をまとめたものである。高分子凝集剤については、ジメチルアミノエチルメタクリレート系のカチオンポリマーを想定し、その組成式を C₈H₁₅NO₂ (メタクリル酸 2-(ジメチルアミノ)エチ

Table 2 The results of mass and elemental balance around dewatering process in each system

設備	項目	IN (t/day)			OUT (t/day)		OUT/IN	移行率 (%)			
		混合濃縮汚泥	高分子凝集剤	ポリ鉄	脱水汚泥	脱水分離液		中央値	最大値	最小値	
											脱水汚泥
既設 (N=12)	TS	5.14	0.02		5.03	1.16	1.20	81.2	88.1	76.6	
	VTS	4.24	0.02		4.31	0.63	1.16	87.2	94.1	83.5	
	H	0.32	0.00		0.32	0.05	1.15	87.6	96.9	81.4	
	C	2.17	0.01		2.23	0.31	1.17	87.6	93.0	83.5	
	N	0.28	0.00		0.29	0.03	1.09	91.5	94.3	88.4	
	S	0.05	0.00		0.05	0.01	1.17	86.2	92.1	76.4	
	P	0.08	0.00		0.06	0.03	1.21	66.3	75.9	56.1	
	Fe	0.05	0.00		0.04	0.02	1.17	72.5	86.6	52.9	
	革新型 (N=5)	TS	3.77	0.02	0.12	4.58	0.16	1.21	96.7	98.0	94.4
		VTS	3.21	0.02	0.06	3.94	0.05	1.21	98.6	98.8	97.6
H		0.24	0.00	0.00	0.28	0.00	1.18	98.4	98.9	97.7	
C		1.65	0.01	0.00	1.96	0.02	1.19	98.8	99.7	98.0	
N		0.20	0.00	0.00	0.23	0.00	1.18	98.4	99.0	97.1	
S		0.04	0.00	0.06	0.08	0.02	0.93	81.4	88.0	68.4	
P		0.05	0.00	0.00	0.06	0.00	1.04	99.2	99.8	97.9	
Fe		0.04	0.00	0.06	0.09	0.01	1.01	94.0	98.4	81.6	

ル))として、その使用量とから CHN 成分の投入分を考慮した。

各項目について、OUT/IN の値は 0.93~1.21 で概ね 1.00 に近い値をとっていたため脱水機まわりの物質収支、元素収支は整合しているといえる。本結果のうち、OUT の値を用いて各元素の脱水汚泥への配分割合を移行率として、各サンプリング毎に次式にて算出した。

$$\text{移行率(\%)} = \frac{\text{脱水汚泥中成分量}}{\text{脱水汚泥中成分量} + \text{脱水分離液中成分量}} \times 100 \quad (1)$$

各項目のサンプリング別の移行率を検討すると、大きな変動はなく、最大値と最小値の差異は概ね 15% 以内に収まっていることが分かった。ただし Fe や P は TS の移行率に値が左右されやすい傾向にあり、とくに既設設備の Fe は 34% の変動幅を示した。なお、TS を見ると、既設設備は 19% が脱水ろ液へ移行しているのに対し、革新型システムでは 3% のみの移行であった。またリンに関しては、既設設備は 24% が脱水ろ液へ移行したのに対し、革新型システムでは 0.2% 程度の移行にとどまった。したがって、革新型システムにおいては脱水プロセスにおける固形物回収率を既設設備より高くでき、脱水汚泥へのリン回収率も、ポリ鉄による溶解性リンの不溶化の効果により、高くできることが期待される。

革新型システムにおけるドラム濃縮機および、両システムの焼却炉についても物質収支、元素収支が整合していることを確認したのち、ドラム濃縮機についてはドラム濃縮汚泥への移行率を、焼却炉まわりについては焼却灰、スクラバ排水、排ガスへの移行率をそれぞれ脱水機の場合と同様に設定し、物質収支モデルに用いた。

3.3 既設設備および革新型システムの物質収支モデル構築

既設設備と革新型システムの物質収支、元素収支、熱収支についてモデルを構築した。具体的には、混合濃縮汚泥中の各元素が、各プロセスにおいてそれぞれの移行率により各媒体へ分配されることを用いて物質収支モデルを構築した。混合濃縮汚泥の有機分の構成元素として C, H, N, O, S を考え、これらの総和を VTS として考えた。また、汚泥中の無機分として、Fe, P, その他 FTS を考え、これらの総和を FTS として考えた。なお FTS とは強熱残留物を示し、主に汚泥固形分中の無機成分を示す。VTS と FTS の和が汚泥中の固形分であり、それ以外は水分として考えると、汚泥を中心とした既設システムの物質収支は、C, H, N, O,

Table 3 The average characteristics of thickened sludge and consumption unit of chemical reagents for mass balance calculation

混合濃縮汚泥	TS	15700	mg/L	
	VTS	13000	mg/L	
	H	6.15	%-TS	
	C	42.1	%-TS	
	N	5.50	%-TS	
	O	31.5	%-TS	
	S	1.05	%-TS	
	P	1.49	%-TS	
Fe	0.963	%-TS		
標準システム	ベルトプレス脱水機	高分子凝集剤	0.468	%TS
		洗浄水	96.6	m ³ /t-投入汚泥 TS
	流動床焼却炉	冷却水	239	m ³ /t-脱水汚泥
		NaOH	0.587	t-20% 溶液/day
革新型システム	ドラム濃縮機	高分子凝集剤	0.300	%TS
		洗浄水	0.053	m ³ /min
	機内二液調質型遠心脱水機	高分子凝集剤	0.589	%TS
		ポリ鉄	12.5	%-TS
		洗浄水	0.260	m ³ /t-汚泥
発電機付階段焼却炉	冷却水	135	m ³ /t-脱水汚泥	
		NaOH	1.99	t-20% 溶液/day

S, Fe, P, その他 FTS, および水分の流れ、および各プロセスでの分配を考慮することで表現できる (なお O の移行率は C, H, N の移行率の平均値、その他 FTS の移行率は Fe, P の移行率の平均値を用いた)。次に、その他のインプットとなる媒体は、高分子凝集剤、苛性ソーダ (20% 溶液)、脱水の洗浄水、焼却の冷却水であり、革新型システムにおいてはそれらに加えてドラム濃縮機の洗浄水、ポリ鉄があり、これらの使用量、添加率は月により変動するため、その都度和歌山市中央終末処理場の月報等^{6,7)}を基に原単位を設定した。これらの計算値および設定値を混合濃縮汚泥の性状とともに **Table 3** に示す。ただし、本表は混合濃縮汚泥については 17 回の結果の算術平均、その他の諸係数は既設設備 12 回、革新型システム 5 回の算術平均を示している。

焼却炉においては、下水汚泥焼却炉における燃焼計算、物質収支計算方法⁹⁾を参考に各炉の熱収支を求め、補助燃料消費量あるいは蒸気発電機による発電量を求めた。

最後に既設設備の場合は外部受入脱水汚泥を無視することとし、焼却炉投入汚泥が 45 t/day (脱水汚泥含水率を 80% とした時の既設設備焼却炉の標準容量)となるように、混合濃縮汚泥量を定め、これを標準システムとした。革新型システムにおいても、焼却炉投入汚泥が 35 t/day (脱水汚泥含水率を少なくとも 74% とした次世代型階段炉の標準容量)となるように同様にモデルを構築した。

以上のモデルを用い、**Table 3** の値を用いた収支計算の結果を、流量、特に S, P, Fe について **Fig. 4** に示

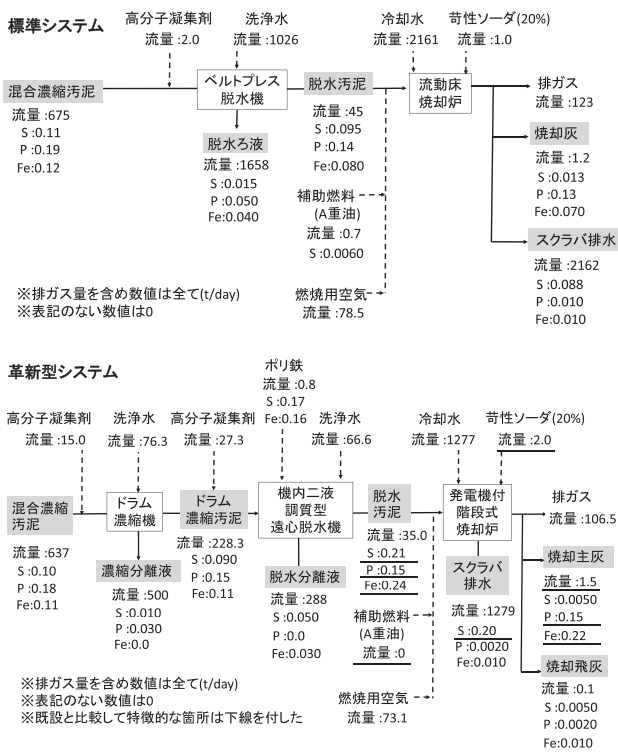


Fig. 4 The mass and elemental flow in the standard system (upper) and in the innovative system (lower)

す。標準システムの脱水汚泥を見ると、汚泥中 S 量は 0.095 (t/day), Fe 量は 0.08 (t/day) であったのに対し、革新型システムはポリ鉄の影響で脱水汚泥中 S 量は 0.214 (t/day), Fe 量は 0.24 (t/day) となり、それぞれ量として S は 2.3 倍, Fe は 3.0 倍となった。補助燃料の部分と比較すると、ポリ鉄により低含水率化された革新型システムの脱水汚泥は、標準システムに比べ低位発熱量が高くなるため、補助燃料が不要となり自燃ができることが示された。しかし、脱水汚泥中 S 量が増加した革新型システムでは、これを焼却した際に生じる SO₂ を中和する為の苛性ソーダ量が増大し、標準システムに比べ約 2 倍の苛性ソーダが必要となり、これに伴って脱水汚泥中の S 分の 95% 以上がスクラバ排水に移行することとなった。焼却灰中の S に関しては、前述したように、S 濃度として焼却飛灰は焼却主灰より 12 倍程度高く、スクラバ排水への移行分以外の S 分の多くは焼却飛灰に移行していることが予想されたが、量としては飛灰よりも、主灰の方が 15 倍程度多かった。この結果、スクラバ排水に移行した以外の S 分は、概ね等量ずつ焼却主灰、焼却飛灰に配分された。

また革新型システムにおける脱水汚泥中の Fe 分も S 分と同様に増加しており、前述の Fe 濃度からの予測通り、90% 以上が焼却主灰に移行した。この結果革新型システムの焼却主灰量が標準システムの 1.3 倍となった。

P に関しては、既設設備において、混合濃縮汚泥に含まれる P の 26% が、脱水プロセスで脱水ろ液に移行した。一方革新型システムでは、ドラム濃縮プロセスで、混合濃縮汚泥中 P の 16% が濃縮分離液に移行したが、脱水プロセスではポリ鉄の影響もあり、ほとんど脱水汚泥に移行した、この結果、革新型システムでは、既設設備とほぼ同量の P が焼却炉に投入されることになった。これは、前述したように、両システムの脱水汚泥中の P 濃度 (乾燥汚泥ベース) がほとんど変わらなかったことと整合する。また両システムともに、焼却炉に投入された P はそのほとんどが焼却灰、あるいは焼却主灰に移行した。ただし革新型システムでは焼却主灰の量が Fe の影響で多くなっており、その分 P が希釈され、前述したように、既設設備の焼却灰中 P 濃度に比較して、焼却主灰の P 濃度が低減したものと考えられた。

4. 既設設備を想定したシステムと革新型システムのランニングコスト、および GHG 排出量の比較

既設設備を想定した標準システムと革新型システムの物質収支、熱収支計算結果と種々の原単位を基にランニングコストおよび GHG 排出量を算出し、これを比較検討した (Fig. 5)。ランニングコストおよび GHG 排出量の算出で考慮した項目については Table 4 にまとめた。特に N₂O 排出係数に関しては流動床焼却炉の場合は、高分子凝集剤を脱水助剤として用い、得られた脱水汚泥を約 850℃ で燃焼する従来の方式を用いた。発電機付階段炉に関しては、多段吹込燃焼式流動床炉、二段燃焼式循環流動床炉、ストーカ炉 (階段炉) における N₂O 排出係数を用いた。ここには必ずしも革新型システムの機内二液調質遠心機を用いない場合も含まれており、これらの排出係数は炉形式の違いによって定義されている。なお、各プロセスの稼働日数は年間 330 日として計算している。計算結果は標準システムの 12 回の調査の平均を 100 としたときに対する、革新型システムの 5 回の調査の平均の割合である。

ランニングコストに関して、標準システムの平均を 100 としたときに対し革新型システムでは合計値で 59 であり、およそ 40% のランニングコストの削減が期待できる。これに最も大きく寄与したのは、革新型システムでは燃料費 (A 重油) が不要であるという点であった。補助燃料の有無に関しては、汚泥の低位発熱量が大きく関係しており、それには汚泥の含水率が最も影響を及ぼすと考えられる。なお、標準システム計算結果のなかには、原因ははっきりしないが、脱水汚泥の含水率が低くなり、その結果、低位発熱量が高

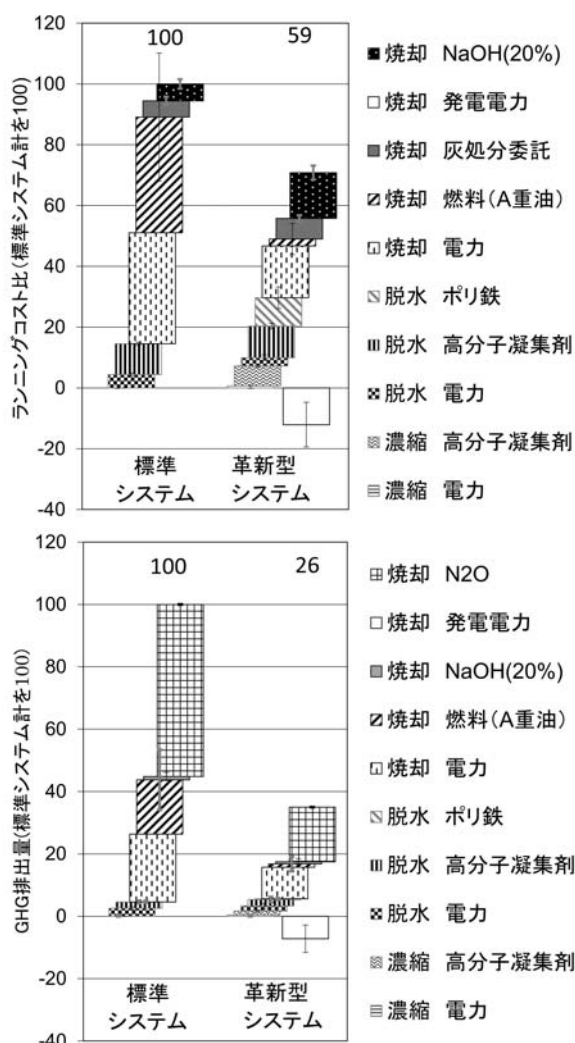


Fig. 5 The result of running costs (upper) and GHG emissions (lower) calculation in each system

くなる月があった。その結果、このケースでは補助燃料が例外的に不要となったが、その場合であっても20%のランニングコスト削減が可能であった。次にランニングコストの低下に影響が大きかったのは焼却に要する電力で、革新型は標準システムに比べて53%削減されていた。これは革新型の階段式焼却炉の消費電力原単位が既設の流動床焼却炉の消費電力原単位より40%削減されていることに起因する。革新型はこのうえに発電によるコストの削減分が加わり、その割合は革新型システムのなかで17%を占めている。

一方、革新型システムで標準システムに比べてコストが大きく増大する項目として、濃縮および脱水に要する凝集剤費(高分子凝集剤および無機凝集剤)と苛性ソーダの費用がある。凝集剤費について、脱水に要する高分子凝集剤費は革新型システム、標準システムで差はないが、革新型システムでは標準システムにはないドラム濃縮工程で高分子凝集剤を使用しなければならず、さらに、脱水にはポリ鉄も使用する。この2

Table 4 The energy consumption units, cost units and GHG emission units for the calculation of running cost and GHG emission

項目	プロセス	値	単位	参考文献
電力消費量	ベルトプレス脱水機	70	kWh/t-DS (投入汚泥)	10)
	流動床焼却炉	138	kWh/t-投入汚泥	6)
	ドラム濃縮機	0.16	kWh/m ³ -投入汚泥	11)
	機内二液調質型遠心脱水機	1.7	kWh/m ³ -投入汚泥	8)
	発電機付階段式焼却炉	82.8	kWh/t-投入汚泥	12)
価格	電力	14	円/kWh	12)
	高分子凝集剤	500	円/kg	12), 3)
	ポリ鉄	20	円/kg	3)
	NaOH (20%)	18	円/kg	3), 13)
	A重油(比重0.86)	90	円/L	12)
	焼却灰処分	8000	円/t	12), 3)
CO ₂ 排出係数	電力	0.55	kg-CO ₂ /kWh	12)
	A重油(比重0.86)	2.71	kg-CO ₂ /L	
	高分子凝集剤	6.5	kg-CO ₂ /t	
	苛性ソーダ	0.938	kg-CO ₂ /t	
	ポリ鉄	0.0308	kg-CO ₂ /t	
N ₂ O排出係数	流動床式焼却炉	0.645	kg-N ₂ O/wet-t	14)
	発電機付階段式焼却炉	0.263	kg-N ₂ O/wet-t	

点がコストの増加につながり、凝集剤費は2.6倍になった。さらに、ポリ鉄を使用することで汚泥中Sが増え排ガス処理に要する苛性ソーダ費は約2.7倍に増加した。ポリ鉄、苛性ソーダ費は革新型システムのなかで42%を占め、革新型の更なる効率化を望む際、この点から改善が必要である。

次に、GHG排出量に関して、標準システムの平均を100としたときに対し革新型システムでは合計値で26であり、およそ74%のGHG排出量削減が可能と試算された。その要因として、ランニングコストの時と同様に補助燃料が不要である点や発電による削減などが挙げられるが、最も寄与したのは階段式焼却炉によるN₂O排出量が低減されたことである。標準システムが補助燃料を使用しない場合であっても最低でも56%のGHG排出量が削減でき、炉形式や燃焼方式が変わったことによりN₂O排出係数が低減されたことに加え、高効率脱水の採用により含水率が低減し、対象汚泥量が減少した影響が大きいことがわかった。

5. モデルの感度分析による革新型システムの適用範囲の検討

物質収支・元素収支、熱収支モデルについて、革新型システムを対象に、本システムに大きく影響をおよぼすと考えられる因子として、脱水汚泥の含水率とVTS、および重油価格を選び、感度分析を行って、

ランニングコストおよび GHG 排出量の変化を求め、革新型システムの適用範囲について検討した。

5.1 脱水汚泥の含水率と VTS の変化の影響

脱水汚泥の含水率を変化させた条件としては、革新型システムにおける脱水汚泥の含水率およそ 73% を基本として 1% 刻みで、最大 82% (従来型脱水機を想定)、最低 64% まで条件を設定した。いっぽう汚泥中有機分を変化させた条件としては、供給汚泥の有機分およそ 83%TS を基本として 5% 刻みで、最大 93%TS、最低 63%TS まで条件を設定した。本検討は、意図的に脱水汚泥の含水率または有機分を変化させるのみであり、汚泥の性状など他の設定は変化させなかった。また、革新型システムの焼却炉において補助燃料が必要となった場合には、発電は実施しない設定とし、補助燃料が不要になった時点で発電を実施するものとした。なお本検討は Fig. 4 の結果に基づいて計算を行った。Fig. 6 にそれぞれ、革新型システムにおける脱水汚泥含水率および有機分を変化させた場合の、ランニングコスト、および GHG 排出量の算出結果を示す。

図より、ランニングコスト、および GHG 排出量ともに、脱水汚泥含水率の上昇、汚泥 VTS の減少ともなって増加する傾向が見られた。図の曲線において、含水率が低下するとともに、コストや GHG 排出量の低下割合が緩やかになる点が見られるが、このポイントが発電が可能となるポイントになる。つまり、図中に鉛直に記した破線より左側でなおかつ VTS を示す曲線のうち下から三つめまでであり、具体的には革新型は例えば、汚泥含水率が概ね 73% 以下で VTS が 83% 以上になれば安定して発電できることが分かった。なお、83%TS 付近での VTS 変化を 1% 刻みで行ったところ、VTS: 79%TS 以上が発電可能領域の境界であると分かった。つまり本条件での革新型システムでは、汚泥含水率が概ね 73% 以下であること、また、汚泥中有機分が 79%TS 以上であること、この 2 点を適用範囲とすることが妥当であると考えられる。なお、VTS が 68%TS 以下となると、含水率を 73% にしても発電は不可能であることが示されたため、炉投入汚泥の種類が消化汚泥の場合、その VTS は一般的に 70%TS 以下となるため、本条件では嫌気性消化と革新型システムを組み合わせることは、あまり現実的ではないと考えられる。ただし、大規模下水処理場など、スケールメリットにより汚泥焼却炉の熱収支が改善できる場合は、実現できる可能性も否定できない。

5.2 重油単価の変化の影響

重油単価は、Table 4 においては平成 26 年 1~9 月の推移値を参考に 90 円/L で設定しているが¹²⁾、平成

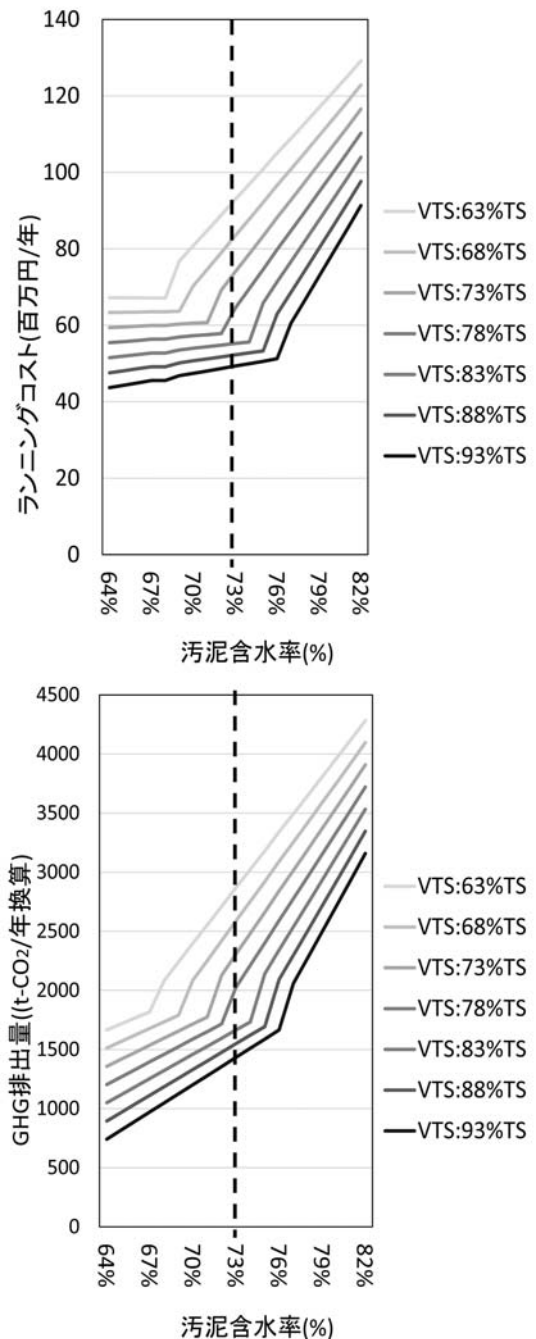


Fig. 6 The results of sensitivity analysis changing VTS and water content of dewatered sludge in the innovative system on running costs (upper) and GHG emissions (lower)

28 年 5 月時点で、重油単価は全国平均で 47 円/L まで低減している。また過去には、平成 20 年 8 月に 115 円/L まで上昇している¹⁵⁾。Fig. 5 より重油単価は標準システムおよび革新型システムの比較において影響が大きかったことから、重油単価を 40 円/L から 120 円/L まで変化させてその影響を確認した。Fig. 7 に重油単価を変化させた場合の、革新型システムのランニングコストを、標準システムのランニングコストを 100 とした場合の比率として示す。図より、重油単価が高いほど、汚泥の自燃が可能となる革新型システムが有利になることが確認された。また結果を直線近

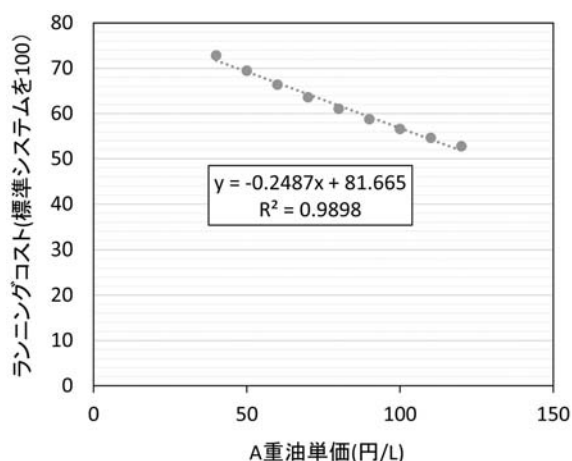


Fig. 7 The results of sensitivity analysis changing the unit cost of A heavy oil in the innovative system on running costs

似で外挿し、重油単価0円/Lの場合を予測しても、標準システムに比較して約20%は低減できることが窺えた。

以上より、革新型システムにおいては、本研究で設定した規模、条件において、重油単価に依存することなく標準システムよりもランニングコストの面で有利になると考えられた。

6. ま と め

本研究では、機内二液調質遠心脱水機、および発電機付階段焼却炉を組み合わせた革新型システムの和歌山市中央終末処理場への導入にあたり、既設設備および革新型システムの長期調査を行って、両システムの物質収支・熱収支、ランニングコスト、GHG排出量について明らかにし、革新型システムの導入効果、適用範囲を評価した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 脱水汚泥含水率は、革新型システムの場合、既設設備に比較して平均で6.9%低下したが、有機分割合は変化がなかった。また、脱水汚泥の低位発熱量は革新システムが、既設設備の1.85倍まで上昇した。
- 2) 革新型システムの脱水でのポリ鉄添加により脱水汚泥中のFeは1.9倍、焼却主灰中のFeは1.5倍増加し、焼却灰量が増加することが示唆された。またSについても、脱水汚泥で1.5倍程度の上昇がみられ、排ガス処理のための苛性ソーダ費の増大が示唆された。
- 3) 調査結果、および処理月報等から、汚泥中の各元素を中心とした物質・元素収支を検証しその妥当性を明らかにした。また、既設設備を想定した標準システム、革新型システム双方の物質収支、元素収支モデルを構築し、両システムの比較評価を行った結果、革新型システムでは補

助燃料が不要となり自燃可能となることが示唆された。しかし、排ガス中のSO₂が増加するため、標準システムに比べ2倍の苛性ソーダが必要となり、更に焼却灰量が標準システムの1.3倍となると試算された。

- 4) 構築したモデル、および各種原単位を用い、両システムのランニングコスト、およびGHG排出量を評価したところ、革新型システムは、標準システムに比較しランニングコストが平均で59%、GHG排出量が26%まで低減できることが示された。本結果には、焼却炉で補助燃料が共通して大きく寄与し、GHG排出量にはN₂O排出量の低減が大きく寄与した。
- 5) 構築した革新型システムのモデルにおいて、脱水汚泥含水率、および供給汚泥の有機分をパラメータとして、感度分析を行った。ランニングコスト、およびGHG排出量を低減するためには、補助燃料が不要となり発電が可能となることが重要であり、この観点からの革新型システムの適用範囲としては、供給汚泥有機分が78%TS以上、脱水汚泥の含水率が73%以下であることが必要であると示された。またA重油価格を変化させた場合の感度分析結果からは、本研究の範囲において、重油価格にかかわらず、革新型システムがコスト的に優位となることが示された。

参 考 文 献

- 1) 社)日本下水道協会：下水道統計(平成21年度版)(2011)
- 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) 大下和徹, 高岡昌輝, 水野孝昭：下水汚泥処理における焼却廃熱を利用した発電システムの検討, 土木学会論文集G(環境), Vol. 68, No. 7, pp. III_317-III_324 (2012)
- 4) 須田礼二, 宗宮 功, 脇坂啓司, 前田 洋：下水汚泥固形燃料広域利用システムのモデル研究, 下水道協会誌論文集, Vol. 49, No. 594, pp. 112-118 (2012)
- 5) 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, 下水道機構情報, Vol. 3, No. 9 (2009)
- 6) 和歌山市中央終末処理場：運転月報(平成25年9月~11月, 平成26年4月~12月, 平成27年1月~2月)
- 7) 革新型実証設備：処理日報(平成26年6月~11月, 平成27年3月)
- 8) 久野清人, 鈴木和美, 井上 剛, 宮内千里：機内二液調質型遠心脱水機の実用化, 下水道協会論文集, Vol. 48, No. 590, pp. 91-98 (2011)
- 9) 田崎光雄：下水汚泥焼却システムのエネルギー効率化に関する研究, 京都大学博士論文, pp. 190-201 (2011)
- 10) 大下和徹：前凝集プロセスを組み込んだ下水処理システムの特性に関する研究, p. 152 (2007)
- 11) 和歌山市・日本下水道事業団・京都大学・(株)西原環境・(株)タケマ 共同研究体：平成25年度下水道革新的技術実証事業

- (B-DASH プロジェクト)「下水道バイオマスからの電力創造システムに関する技術実証研究」設計計算書(案), pp. 13-15 (2013)
- 12) 国土交通省 国土技術政策総合研究所: 下水道革新的技術実証研究に関する統一的な評価のための諸値について, pp. 3-5, 7 (2014)
- 13) 中津川市: 入札結果公表一覧表 苛性ソーダ 25% 単価契約 (2013)
- 14) 環境省温室効果ガス排出量算定方法検討会: 温室効果ガス排出量算定に関する検討結果, 廃棄物分野における算定方法の改善について, p. 4 (2013)
- 15) (-) 日本エネルギー経済研究所, 石油情報センターウェブサイト, A 重油産業用価格 (2016), <https://oil-info.ieej.or.jp/price/price.html#sangyo>

Sewage Sludge High Efficiency Dewatering and Incineration System with Power Generation

Kyohei Yamada¹⁾, Kazuyuki Oshita²⁾, Masaki Takaoka²⁾, Takashi Fujimori²⁾, Takaaki Mizuno³⁾
 Takanobu Hoshi⁴⁾, Masahiro Yamasaki⁵⁾, Katsuyuki Shimokawa⁵⁾
 Masao Shimada⁶⁾ and Ryota Kawasumi⁷⁾

¹⁾ Department of Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University

²⁾ Graduate School of Global Environmental Studies, Kyoto University

³⁾ TAKUMA Co., Ltd.

⁴⁾ Nishihara Environment Co., Ltd.

⁵⁾ Wakayama City

⁶⁾ Japan Sewage Works Agency

⁷⁾ National Institute for Land and Infrastructure Management, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism

† Correspondence should be addressed to Kyohei Yamada :

(Department of Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University
 E-mail : kurata.gakuji.5a@kyoto-u.ac.jp)

Abstract

Since 2014 the waste heat power generation system of sewage sludge (the innovative system) was installed in Wakayama city, Japan on B-DASH project. In this study, we investigated the sewage sludge characteristics of the existing and the innovative system, built the mass and heat balance model, calculated and compared the running cost and GHG emission of each systems. Results show that, running cost and GHG emission of the innovative system were decreased to 59% and 26% respectively compared with these of the existing system, and the effectual range of waste heat power generation system as for moisture content and organic content ratio of sewage sludge is under 73%, and over 78% respectively.

Key words : sewage sludge, centrifugal dewatering, decreasing of water content in sewage sludge, waste heat power generation, polyferric sulfate