

下水処理場におけるエネルギー循環利用技術に関する研究

山下 洋正¹・藤井 都弥子¹・大西 宵平¹

¹国土交通省 国土技術政策総合研究所 下水道研究部 下水処理研究室（〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地）

本研究は、下水汚泥エネルギー化率及び下水道に係る温室効果ガス削減量向上に資する下水汚泥燃料化技術やバイオガス利用技術等の資源・エネルギー循環利用技術の普及促進のため、下水中の資源やエネルギーの利用可能性及び循環利用技術の評価、下水処理場を核とした地域における資源・エネルギー循環の実現に向けたシナリオの提示、資源・エネルギー循環利用技術のフィージビリティの検証を通じ、資源・エネルギー循環利用技術の導入を推進することを目的とした。

キーワード エネルギー循環利用技術、下水汚泥エネルギー化率、温室効果ガス削減

1. はじめに

下水道事業で使用される電力は、我が国の総電力消費量の0.7%を占め、自治体が実施する公共事業の中でも温室効果ガスの排出量が比較的多いとされている。平成24年8月31日に閣議決定された第3次社会資本整備重点計画（平成24～28年度）では、下水道分野においても低炭素・循環型社会の実現に向けて未利用・再生可能エネルギーの利用や省エネの促進に関する指標として、H28年度末までに下水汚泥エネルギー化率を約29%、下水道に係る温室効果ガス排出削減量を約246万t-CO₂/年とすることが掲げられている。

下水道資源は集約性・安定性に優れたバイオマスとして見直されており、近年では下水道資源を活用したバイオガス発電や固形燃料化等を導入する処理場が大都市を中心に増えてきている。しかしながらH22年度末での下水汚泥エネルギー化率は約13%であり、全国の下水処理場が有するポテンシャルを考えると多くの下水道資源が未利用となっており、更なるエネルギー化技術の導入が求められている。

本研究では下水処理場における資源・エネルギー化技術の評価のため、下水道における資源化・エネルギー化技術（固形燃料化、バイオガス化等）の現状把握および導入可能なシナリオの検討を行うとともに、下水処理場の規模から見た導入可能かつ事業性のある導入シナリオについて検討した。

また、国総研下水道研究部では、優れた革新的技術の実証、普及により下水道事業におけるコスト縮減や再生可能エネルギー等の創出を実現し、併せて、本邦企業に

よる水ビジネスの海外展開を支援するため、下水道革新的技術実証研究（B-DASHプロジェクト）を平成23年度から行っており、平成25年8月現在、「超高効率固液分離技術を用いたエネルギーマネジメントシステム」及び「バイオガスを活用した効果的な再生可能エネルギー生産システム」の導入にむけた技術ガイドラインを公表している。

2. 下水道の資源・エネルギー循環利用技術の現状及び課題

下水道の資源・エネルギー循環利用技術の現状及び課題を把握するため、下水道資源有効利用調査（平成23年度実績）¹⁾において全国の下水処理場を対象とした下水道資源有効利用の実施状況の調査を行い、汚泥リサイクル率、下水道バイオマスリサイクル率、温室効果ガス発生量等のとりまとめを行った。調査対象処理場数は2,181カ所である。

(1) 下水汚泥の発生量と処理処分・有効利用の状況

下水道事業を実施している全ての地方公共団体に対して、下水汚泥の発生から最終利用・処分までの処理フローの概要及び下水汚泥の処理・有効利用状況等（平成23年度実績分）に関するアンケート調査を実施し、その結果を整理・集計した。

平成22年度及び平成23年度における下水汚泥の処理及び処分の状況を汚泥発生時乾燥重量ベースでそれぞれ表

-1, 表-2, 下水汚泥の有効利用の経年変化を図-1に示す。下水汚泥の有効利用率は約78%から約55%に大きく減少した。これは東日本大震災に伴う原発事故により、放射性物質を含む下水汚泥が東日本を中心に検出されたためである。有効利用の内訳としては、従来、緑農地利用が中心であったが、過去10年程度の間にはセメント原料などの建設資材利用が進んできており、平成23年度におけるセメント原料としての利用は乾燥重量ベースで約23%と、前年度の約39%から大きく落ち込んだが、それでもなお主要な有効利用先となっている。固形燃料はここ数年の間に利用が増えているが、約1%と割合は小さく、地球温暖化対策推進のためにはより一層の普及促進が必要である。

(2) 下水道の資源・エネルギー有効利用事業の事業種別毎の課題

1) 消化ガス利用

下水道事業における消化ガス利用には、嫌気性消化により発生した消化ガスをもとにした発電（エンジン、タービン、燃料電池等）、自動車燃料化、都市ガス燃料化などがある。これら消化ガス利用に係る法制度面、技術面の課題について以下に挙げる。

a) 法制度面の課題

- ・汚泥を燃料や都市ガスの原料として利用する場合、ガス製造場所は、建築基準法施行令（第130条の9の5）に基づき、都市計画法上の工業地域である必要がある。

- ・発生する臭気について、悪臭防止法に基づく規制地域の指定及び規制基準を遵守する必要がある。

- ・下水処理場に他のバイオマスを受け入れる場合、廃掃法第6条に基づき、運搬は一般廃棄物又は産業廃棄物の運搬業の許可を有する業者が行う必要がある。また、受入施設は廃棄物の中間処理施設として位置付けられるが、施設の設置届、設置許可の必要性については、管轄する都道府県の環境部局の判断に委ねられる。

- ・ガス発電機を導入する場合には、電気事業法第43条に基づき、一定規模以上のガスエンジンの場合は電気主任技術者資格が必要であり、ガスタービンの場合は電気主任技術者及びボイラ・タービン主任技術者が必要である。
- ・処理場内外の電力設備との系統連係のための電力会社との事前協議が必要である

b) 技術面の課題

- ・余剰ガス発生量の季節変動への対応
- ・ガス精製装置によるガス成分の安定化や貯留施設の設置による発電電力量の安定化
- ・消化行程の高温化に要するエネルギーと回収エネルギーの収支のバランスの確保

2) 汚泥固形燃料化

下水汚泥の固形燃料化技術には、炭化技術として低温炭化、中温炭化、高温炭化などがあり、汚泥乾燥技術

としては造粒乾燥、油温減圧乾燥、改質乾燥などがある。

a) 法制度面の課題

- ・汚泥燃料を廃棄物処理施設以外の場外施設で利用しようとする場合、利用施設の立地自治体において、汚泥燃料が廃棄物処理法第2条の廃棄物の定義における「不要物」ではなく、「燃料」として認定してもらう必要がある。

- ・臭気や煤塵について、各種規制を遵守する必要がある。
- ・下水処理場に他のバイオマスを受け入れる場合、廃掃法第6条に基づき、運搬は一般廃棄物又は産業廃棄物の運搬業の許可を有する業者が行う必要がある。

- ・製品の長期的かつ安定的な受入先の確保

b) 技術面の課題

- ・燃料の保管、運搬に係る安全性の確保、技術指針化
- ・造粒乾燥時の造粒を阻害するしごの除去
- ・脱臭用スクラバ排水に含まれる硫化水素の返流水への影響の除去

表-1 下水汚泥の処理及び処分状況（汚泥発生時乾燥重量ベース、平成22年度）

引き渡し先 処理後の 汚泥形態	最終安定化先								合計	%
	埋立処分	緑農地利用	建設資材利用 セメント化	セメント化以外	固形燃料利用	その他有効利用	焼内ストック	その他		
生汚泥	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%
濃縮汚泥	26	9	0	0	0	0	0	0	35	0.0%
消化汚泥	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%
脱水汚泥	23,161	34,998	105,197	10,016	620	3,856	82	42	177,972	7.8%
移動脱水重汚泥	0	115	20	9	0	0	0	0	144	0.0%
コンポスト	0	249,890	0	0	0	0	0	0	249,890	11.0%
機械乾燥汚泥	1,910	33,589	15,907	415	17,477	10,705	0	0	80,003	3.5%
天日乾燥汚泥	167	381	0	22	0	0	17	0	587	0.0%
炭化汚泥	45	3,646	183	190	1,488	443	195	0	6,190	0.3%
焼却灰	447,581	18,446	757,845	282,873	0	19,748	149	1,143	1,527,785	67.4%
溶融スラグ	117	484	6,012	193,282	0	3,137	22,041	449	225,522	9.9%
合計	473,007	341,559	885,163	486,807	19,585	37,889	22,783	1,634	2,268,126	100.0%
%	20.9%	15.1%	39.0%	21.5%	0.9%	1.7%	1.0%	0.1%	100.0%	

表-2 下水汚泥の処理及び処分状況（汚泥発生時乾燥重量ベース、平成23年度）

引き渡し先 処理後の 汚泥形態	最終安定化先								合計	%
	埋立処分	緑農地利用	建設資材利用 セメント化	セメント化以外	固形燃料利用	その他有効利用	焼内ストック	その他		
生汚泥	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%
濃縮汚泥	12	12	0	9	0	0	0	0	33	0.0%
消化汚泥	0	0	0	0	0	0	314	0	314	0.0%
脱水汚泥	43,358	25,651	88,701	5,198	772	3,615	11,505	0	178,800	8.1%
移動脱水重汚泥	0	489	0	0	0	0	0	0	489	0.0%
コンポスト	1,132	248,835	0	2,980	0	288	114	0	253,349	11.4%
機械乾燥汚泥	2,881	30,533	8,991	422	15,982	3,863	2	0	62,674	2.8%
天日乾燥汚泥	138	265	0	5	284	0	10	0	702	0.0%
炭化汚泥	34	3,630	5,122	157	3,383	39	4,875	0	17,240	0.8%
焼却灰	634,953	21,685	399,639	148,810	670	20,306	250,354	6,546	1,482,963	66.9%
溶融スラグ	3,321	0	2,695	165,472	0	6,833	41,766	1,006	221,093	10.0%
合計	685,829	331,100	505,147	323,052	21,091	34,943	308,940	7,552	2,217,653	100.0%
%	30.9%	14.9%	22.8%	14.6%	1.0%	1.6%	13.9%	0.3%	100.0%	

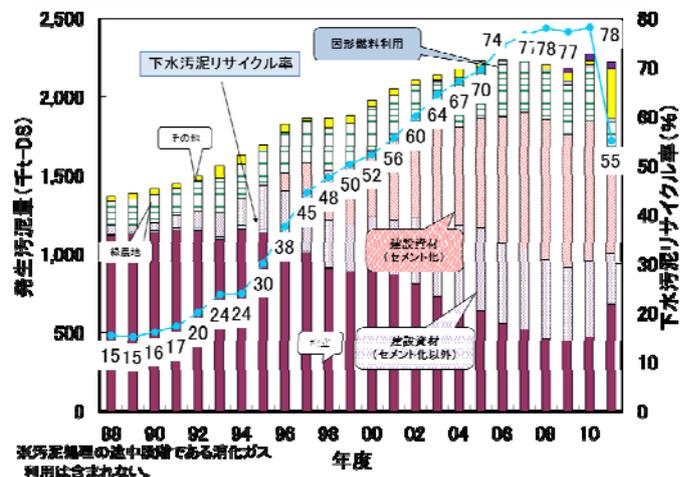


図-1 下水汚泥有効利用の経年変化

3. 下水道の資源エネルギー循環利用に係る課題

の構造及び影響度の分析

下水道の資源・エネルギー循環利用技術のうち、「消化ガス利用」は一部の事例を除き処理場内での利用が主となっており、「下水熱利用」は都市再生特別措置法の一部改正等により、今後導入が進むことが期待されるものの、都市再開発や新規開発と同時に事業化されることが多く、他事業との調整に時間を要する場合が多い。一方、「汚泥固形燃料化」については、汚泥焼却炉を更新する際の代替施設として炭化炉が検討されるケースが増えており、また、平成23年3月の原子力発電所事故による汚泥の放射能汚染や電力需給の逼迫等により、汚泥コンポスト化やセメント工場受け入れに代わる汚泥の処理処分方法として関心が高まっていることなどから、ここでは「汚泥固形燃料化」を対象として、当該事業の実施について事業実施者が意思決定する際の要件等について、2つの手法を用いて分析した。

(1) 汚泥固形燃料化の意思決定に係る要件及び構造分析

自治体が下水汚泥の固形燃料化等の事業を検討する場合、各種規制の有無、自治体の財政状況、周辺地域住民の理解・協力の有無などについて分析し、事業実施の可否を総合的に判断することが一般的である。固形燃料化事業の実施について判断する際の一般的な要件について、アンケート調査や各種文献より抽出し、表-3に示す。これらの要件の相互影響関係及び解決困難度について分析することにより、下水道の資源・エネルギーの有効利用促進に向けた効果的な対応が期待できる。

本研究では、下水汚泥の固形燃料化事業を実施、または現在検討中である11の自治体を対象としたアンケート調査や聞き取り調査を行い、事業化の意思決定に係る要件を抽出するとともに、その構造について社会的構造分析手法（DEMATEL法）及び階層化意思決定法（AHP法）を用いて分析した。

(2) 社会的構造分析手法（DEMATEL法）による相互影響関係の把握

a) 社会的構造分析手法（DEMATEL法）の概要

社会的構造分析手法（DEMATEL法）とは、問題を構成する要因並びにその要因間の関連が複雑かつ不明瞭な問題（いくつかの問題が混在しているような状態）の構造を探ることを目的としている。通常の方法では分析不可能な問題に対して、要因間の直接的な影響の有無とその強さを定量的に分析・把握することにより、問題の構造を把握する方法である。

DEMATEL法では初めにアンケートを実施し、回答者は個々の要因毎に、どの要因がどの要因に影響を与える

かについて、影響の大きさにより◎、○、△、空欄などの記号を回答用紙に記入する。記号は数値化し、要因毎に「自分が他に与えた影響」と「他から自分に与えられた影響」の値を算出する。この2つの値を足したものをその要因の役割の大きさ（中心度）と見なし、2つの値の差をその要因の真の存在価値（原因度）とする。このようにして分析した「影響度と被影響度の相関グラフ」及び「原因度と中心度の相関グラフ」の結果を図-2、図-3に示す。図-2の縦軸は影響度、横軸は被影響度を示しており、上方に位置するほど他の要因に影響を与える因子であり、右方に位置するほど他の要因から影響を受けやすい因子である。また、図-3の縦軸は原因度、横軸は中心度を示しており、上方に位置するほど問題の原因となる因子であり、右方に位置するほど問題の中心となる因子である。

本研究では、表-3に示した固形燃料化事業の実施に係る「要件」を分析対象としており、上記で説明した「要因」とは性質が異なるが、DEMATEL法は要件の相互影響関係を分析する手法としても採用可能なことから、当該手法を用いて分析した。

b) DEMATEL法による分析結果

図-2、図-3に11自治体の総合分析結果を示す。「⑥事業実施費用の代替手段に対する経済的メリット」が他の要件に最も影響を与えやすい一方、「①下水道部局の

表-3 固形燃料化事業実施のための主な要件

要件	内容
①下水道部局の評価	下水道部局による下水汚泥燃料化が他の手法よりも優れているとの評価
②財政部局の評価	財政部局が下水汚泥燃料化に関する調査予算や実証予算をつけるという評価
③首長の評価・議会の評価	下水汚泥燃料化を導入することが自治体住民への利益につながるという首長や議会の評価
④施設周辺住民の同意、周辺環境の改善・維持への期待	燃料化導入に対する周辺住民の同意、既存の処理から燃料化に切り替えることが施設周辺環境の改善にも繋がるという周辺住民の期待
⑤固形燃料の製品としての流通経路	廃棄物処理法に抵触しない安定的な販売先の確保できること
⑥事業実施費用の代替手段に対する経済的メリット	初期費用のうち自治体が負担する部分が焼却や埋立よりも事業費が嵩まないこと
⑦環境負荷の削減効果	焼却や埋立よりもCO2削減効果や、埋立処分量削減効果があること
⑧地元産業・企業の事業機会の創出	地元で経済効果が期待できること
⑨事業実施体制の確保	燃料化事業を検討していく上で局内の担当人員を確保することや、事業を実施する人員を民間委託なども含めて確保すること
⑩施設運転・管理の容易性	設置後の停止リスクや維持管理費増大リスクが小さく、施設運転・管理が想定している体制で持続していけること

評価」は他の要件から最も影響を受けやすく、中心度の度合が最も高かった。「①下水道部局の判断」が、様々な要件の影響を受けながらも、意思決定の際の中心的な要件となっている。

また、2番目に影響度および原因度の値が大きかった「⑤固形燃料の製品としての流通経路」も、全11自治体中6自治体で影響度が1位であったことから、固形燃料化事業において重要な要件である。

なお、「⑤固形燃料の製品としての流通経路」が与える影響度が1位でなかった自治体は全て、順位が5位以下と低くなっており、当該要件の影響度が1位を占めた自治体とは明確な差がみられた。

⑤の要件の影響度が1位となった自治体では、既存の処理方法（焼却やセメント工場などの受け入れ等）に変更が迫られていることや、固形燃料の受入先に明確な見通しが立っていないことなどの問題を抱えていると考えられる。一方、⑤の要件の影響度の順位が低かった自治体では、事業化検討当初から受け入れ先が確定していたり、複数の引き渡し先候補が存在するなどの理由から、流通経路の確保が比較的容易であったと考えられる。

(3) 階層化意思決定手法 (AHP法) による実現困難度の把握

a) 階層化意思決定手法 (AHP法) の概要

階層化意思決定手法(AHP法)とは、不確定な状況や多様な評価基準がある場合に有効な意思決定手法である。問題を「最終目的」「評価基準」「代替案」の3つの構造に分解し、階層図を構築して「評価基準」の全てに対して一対比較を行う。階層図のイメージを図-4に示す。この一対比較を全ての組み合わせ $(n \times (n-1)/2)$ 通り：nは要素数)について行う。さらに、評価基準ごとに「代替案」の一対比較を行い、a)評価基準のウェイト、b)評価基準ごとの代替案のウェイトを算出し、a)とb)を掛け合わせて、最終目的に基づく代替案の困難度のウェイトを計算するのが一般的である。

本研究では、表-3に示した下水污泥固形燃料化事業における各種要件の実現困難度について把握することを目的としていることから、いくつかの候補（代替案）から選択するという意思決定は不要であり、図-4の上から2段目の「評価基準」についてアンケート調査を実施し、一対比較を行うことにより、実現困難度の高い要件について分析した。なお、表-3中の①～③の要件については、AHP法ではアンケート回答者である自治体の行政担当者には比較が困難であることから比較対象外とした。

b) AHP法による分析結果

AHP法による分析結果を表-4に示す。DEMATEL法で1位及び2位であった「⑤固形燃料の製品としての流通経路」と「⑥事業実施費用の代替手段に対する経済的メリット」については、AHP法においても約半数の自治体で

表-4 AHP法による評価基準の分析結果（網掛けは各自治体において最もウェイトの高い要件）

自治体名	④施設周辺住民の同意	⑤固形燃料の製品としての流通経路	⑥代替手段に対する経済的メリット	⑦環境負荷削減効果	⑧地元産業・企業の事業機会創出	⑨事業実施体制の確保	⑩施設運転・管理の容易性	C I 値 (整合性指数)
A	14%	14%	14%	14%	14%	14%	14%	0.000
B	5%	30%	20%	6%	2%	30%	6%	0.100
C	14%	14%	14%	14%	14%	14%	14%	0.000
D	0%	69%	10%	14%	8%	0%	0%	0.000
E	0%	24%	17%	6%	9%	35%	9%	0.000
F	16%	14%	9%	4%	43%	8%	6%	0.099
G	48%	3%	25%	3%	3%	6%	12%	0.240
H	2%	24%	37%	9%	3%	6%	19%	0.113
I	38%	20%	15%	4%	8%	8%	7%	0.278
J	0%	12%	40%	0%	9%	26%	14%	0.000
K	16%	32%	25%	4%	9%	9%	6%	0.098
全自治体合算評価	16%	20%	21%	8%	9%	14%	12%	0.019

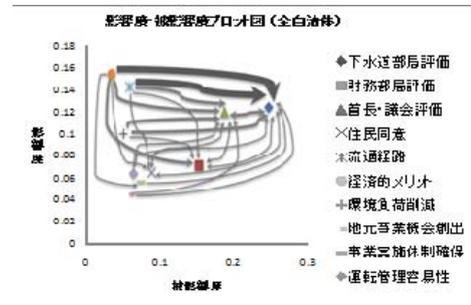


図-2 影響度・被影響度プロット図 (11自治体)

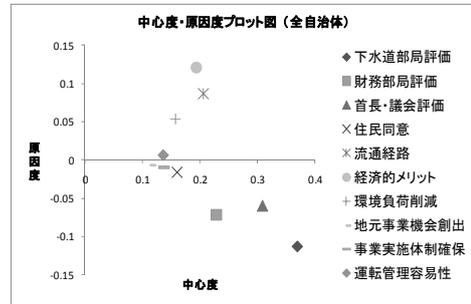


図-3 原因度・中心度プロット図 (11自治体)

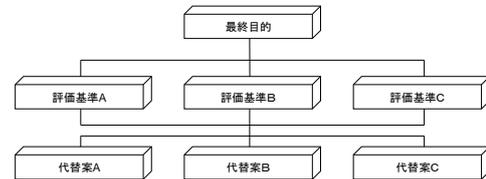


図-4 AHP階層図のイメージ

これらの要件の実現困難度が他の因子より高いと判断されており、全11自治体を総合評価した場合、「⑥事業実施費用の代替手段に対する経済的メリット」は④～⑩の評価基準全体のウェイトに対して21%、「⑤固形燃料の製品としての流通経路」は同20%とほぼ同程度のウェイトであった。また、「⑨事業実施体制の確保」のウェイトが1位となったBとEの自治体は、固形燃料化事業の実施を早い時期に決定しており、燃料化事業の先駆者と

しての実績を有することから、事業化に至るまでの実務面における困難度が実経験としてアンケートに反映されたのではないかと推測される。さらに「④施設周辺住民の同意」のウェイトが1位となった自治体も2自治体あることから、施設の設置に際して周辺住民の理解が得られることも重要であることがわかる。

4. 下水処理場への資源・エネルギー循環利用技術の導入シナリオの検討

下水処理場における資源・エネルギー循環利用技術の導入効果を評価するため、下水処理場の規模から見た導入可能かつ事業性のある導入シナリオについて検討した。

(1) 処理場条件別の技術導入実績

消化ガス発電や固形燃料化導入を検討するため、下水道資源利用調査（23年度実績）より処理場規模（濃縮汚泥発生量）ごとの消化および消化ガス発電の導入実績について整理した結果を表-5に示す。焼却炉導入全数と20年以上経過（平成4年3月以前）かつ稼働中の焼却炉について処理場数、焼却炉数、焼却能力、汚泥焼却量について整理した結果を表-6に示す。汚泥消化は500t-DS/年以上の規模で導入率が高くなり500t-DS/年以上で消化ガス発電を導入していることが把握できた。焼却炉は全国で129処理場、計254基であり、20年以上経過かつ稼働中の焼却炉は39処理場、計53基であった。また、焼却能力や焼却汚泥量で比較した場合約2割を占めた。

(2) 導入シナリオの検討及び評価

導入シナリオとしてエネルギー化技術の現状より消化ガス発電、固形燃料化設備導入を仮定し、以下のようなシナリオを検討した。シナリオ1は消化ガス発電を実施する処理場は500t-DS/年以上であるため、発電を導入していない処理場を対象に消化ガス発電導入を仮定した。シナリオ2は20年以上経過し稼働中の焼却炉を固形燃料化設備の導入を仮定した。

- ・シナリオ1 500t-DS/年以上で消化設備を保有し、発電を実施していない処理場で消化ガス発電を導入
- ・シナリオ2 20年以上経過かつ稼働中の焼却炉を固形燃料化施設に更新

導入シナリオは下水汚泥エネルギー化率および下水汚泥エネルギー化による温室効果ガス削減量をもって評価した。下水汚泥エネルギー化率および下水汚泥エネルギー利用に伴う温室効果ガス削減量の算出式を示す。

- ・下水汚泥エネルギー化率[%] = (消化ガスまたは汚泥燃料として有効利用された有機物量) ÷ 下水汚泥有機物量 × 100

- ・温室効果ガス削減量 = 濃縮汚泥発生量[t-DS/年] × エネルギー化率[%] × 汚泥固形分発熱量[GJ/t-DS] × A重油炭素排出係数[t-C/GJ] × 44/12 [t-CO₂/年]
- ※有機物量は消化率50%、汚泥有機分率80%と仮定し汚泥固形物量より算出した。汚泥固形分発熱量18GJ/t-DS²⁾、A重油炭素排出係数0.0189t-C/GJとした。

シナリオごとの消化ガス発電、固形燃料化設備の導入対象となる下水処理場数、下水汚泥のエネルギー化による温室効果ガス削減量（t-CO₂/年）および下水汚泥エネルギー化率の試算結果を図-5に示す。各試算にあたり消化ガス発電を導入した処理場は有効利用率を100%とし、20年以上経過した焼却炉は全焼却炉の約2割を占めているため焼却した汚泥（有機物量）の2割を固形燃料化利用として試算した。

シナリオ1では消化ガス発電導入する処理場は177ヶ所となり下水汚泥エネルギー化率は4.7%向上した。シナリオ2の20年以上経過した焼却炉に注目した場合は39ヶ所の処理場が固形燃料化施設導入の対象となり下水汚泥エネルギー化率は約10%向上した。

本検討では一定規模以上の下水処理場を対象としているが、更なる技術普及のため、小規模処理場でも導入可能な低コストかつ導入が容易なエネルギー化技術が求められる。

表-5 処理場規模ごとの消化および消化ガス発電の導入実績（23年度実績）

処理場規模 (t-DS/年)	処理場数	消化実施数	消化導入率	消化ガス発電実施数	ガス発電導入率
100未満	1,017	6	0.6%	0	0.0%
100～500	315	53	16.8%	0	0.0%
500～1000	135	56	41.5%	3	5.4%
1000～5000	254	119	46.9%	21	17.6%
5000以上	102	43	42.2%	17	39.5%
全体	1,823	277	15.2%	41	14.8%

※集約処理を行っている場合、送り側は処理場数には加算せず、受け側の濃縮汚泥量に加算している。

表-6 焼却炉全数と20年以上経過した焼却炉との比較

焼却炉	処理場数	焼却炉台数	焼却能力合計 (t/日)	焼却汚泥量 (t/年)
導入実績 (23年度)	129	254	24,920	4,675,572
20年以上経過かつ稼働中	39	53	5,113	794,672

※炭化炉及び熔融炉は含まない。

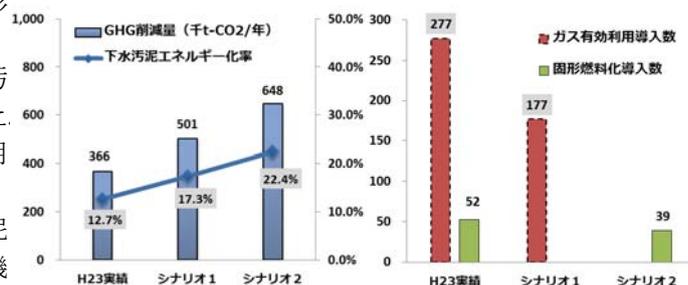


図-5 シナリオごとの導入対象処理場及びGHG削減量・下水汚泥エネルギー化率

