

〈特集〉

下水道におけるエネルギー有効利用の取り組みと新たな動向

鈴木 穰

国土交通省 国土技術政策総合研究所 下水道研究部
(〒305-0804 つくば市旭1 E-mail: suzuki-y92ta@nilim.go.jp)

概要

地球温暖化防止のため、下水汚泥の有するエネルギーの有効利用が求められている。これまで行われてきた消化ガス発電や固形燃料化などの取り組みを振り返るとともに、近年の技術動向を紹介する。

キーワード：下水汚泥，エネルギー，有効利用，技術，システム

原稿受付 2015.12.13

EICA: 20(4) 27-30

1. はじめに

地球温暖化防止のため、空气中二酸化炭素濃度の上昇原因である化石燃料使用量を減らすことが、世界的に求められている。また、エネルギー資源を有効に利用する観点から、未利用エネルギーの活用も重要な課題である。このような中で、人間の社会生活や生産活動から多量に排出される有機性廃棄物は、未だ十分に活用されていないエネルギー源として、有効利用の促進が求められている。

有機性廃棄物のうち下水汚泥は、高位発熱量として15~20 MJ/kg-DS¹⁾のエネルギーを有する物質であり、その保有エネルギーの有効利用は重要な課題である。

これまで、下水汚泥エネルギーは、嫌気性消化によって得られる消化ガスを用いた発電のほか、固形燃料化などより有効利用されてきた。本稿では、これまでの有効利用の取り組みを振り返るとともに、新たな有効利用に向けた近年の技術動向を紹介する。

2. エネルギー有効利用の取り組み

2.1 背景

エネルギー有効利用に関する社会的要請を顧みると、昭和48年(1973年)のオイルショックに端を発すると考えられる。アラブ産油国の原油輸出制限により、当時主力エネルギー源であった石油が不足して高騰し、社会全体でエネルギー消費を削減することが求められた。

その後、1990年代に地球温暖化が問題として認識されるようになり、平成9年の第3回国連気候変動枠組み条約締結国会議(於京都)(COP3)において、温室効果ガス総排出量を2008年~2012年までに1990年比で少なくとも5%削減する議定書が採択され、

日本には6%の削減が割り当てられた。

これを受けて、地球温暖化対策推進大綱が平成14年3月に決定され、さらに、同年6月に成立した新エネルギー法において、電力事業者には、販売電力量の1%程度を風力やバイオマスなどの再生可能エネルギーでまかなうことが義務づけられた。

その後、平成24年7月に「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」が開始され、電気事業者は、下水汚泥など再生可能エネルギー源を用いて発電された電気を買取ることが義務づけられた。

さらに、平成24年8月に第3次「社会資本整備重点計画」(計画期間:2012~2016年度)が閣議決定され、下水汚泥のエネルギー利用割合を2010年度の約13%から、2016年度に約29%に引き上げる目標が設定された。

また、平成23年度からは、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などを目的に、優れた革新的技術の実証等を行う「下水道革新的技術実証事業(B-DASHプロジェクト)」が、国交省下水道部および国土技術政策総合研究所下水道研究部により実施されている。

2.2 有効利用技術の進展

(1) 消化ガスの発電への利用

昭和48年のオイルショックの後、昭和50年から建設省土木研究所が「汚泥消化によるエネルギー回収に関する研究」の中で、消化ガス発電の検討を開始している。この研究²⁾において、下水汚泥のエネルギー利用に関する基本的諸元、即ち、下水汚泥の保有エネルギー、消化ガスとしてのエネルギー回収、ガス発電における動力変換効率と消化槽加温用を含めたエネルギー収支等が、ほとんど明らかにされていると言ってよい(Table 1)。

Table 1 Outline of research results of sludge energy recovery by digestion (Report in 1979)

検討項目	検討結果
下水処理場におけるエネルギー消費 ・ 電力消費量実態 ・ 消化ガスエネルギーと電力消費量の比較	下水 1 m ³ 当たり 0.7~1.1 MJ (0.2~0.3 kWh) エアレーション用ブロワが約半分を占める 消化ガスのカロリー換算値は消費電力量カロリー値に匹敵
日本における消化ガス利用の実態 ・ 消化槽加温用の燃料	冬期には投入汚泥量の 8 倍のガス発生量が必要
ガスエンジンシステム ・ 欧米での適用例における動力変換効率および加温用熱回収効率 ・ 消化槽加温のために必要なガス発生倍率	動力変換効率：約 30% 加温用熱回収：約 40% 日本の下水汚泥では投入汚泥量の 10 倍以上
下水汚泥の消化ガス発生量 ・ 下水汚泥のエネルギー ・ 消化ガスとしての回収エネルギー ・ 有機物含有率とガス発生量の関係	1 kg DS 当たり約 17 MJ (約 4,000 cal) 1 kg DS の下水汚泥から約 8.4 MJ (約 2,000 cal) VS/TS 比が高いほど投入有機物当たりのガス発生量は多い 10 倍量ガス発生に必要な汚泥濃度を VS/TS 比に対して提示
有機物成分とガス発生量 ・ 初沈汚泥と余剰汚泥の比較 ・ 消化ガス回収に必要な水処理システムの条件	初沈汚泥から、より多くのガス発生量 初沈汚泥の炭水化物含有率が高いことが原因 最初沈殿池での SS 除去率の向上

その結果を要約すると、以下ようになる。消化ガスのエネルギーは下水処理場の電力消費量に匹敵し、発電効率 30% のガスエンジンを用いることにより、消費電力の約 3 割をまかなうことができる。しかし、消化タンク加温熱量が不足気味なので、消化タンク投入汚泥の高濃度化が必要である。また、初沈汚泥からより多くのガスが発生することから、最初沈殿池での SS 除去率を向上させることが必要である。

昭和 59 年には、昭和 57 年から 59 年にかけて相次いで供用を開始した消化ガス発電システムの運転状況等が報告されている。概ね当初の計画に見合った 30~34% の発電効率、40~50% の熱回収効率が得られており、ガス発電による省エネルギー効果も示されているが、さらなる効率化のために、消化タンク加温に要する熱量の削減、消化ガス発生量の増大が課題とされている。この対策として、消化槽投入汚泥の濃度を高めるための機械濃縮の導入などが挙げられている。

その後平成 2 年に、稼働開始から 7~8 年を経過した消化ガス発電について、運転実績や費用効果が報告されている。発電や熱回収面では比較的順調な運転が行われており、汚泥集約処理を行っている処理場での費用面で効果が報告されているが、商用電力料金がオイルショック当時から低下したこともあり、消化ガス発電設備の定期点検整備費用や補修費用が問題となるケースが見られるようになっている。

その後しばらくは、主にコストの面で、消化ガス発電の新規採用は停滞していたが、小容量対応のマイクロガスタービンや小型ガスエンジンの開発等によって適用範囲が広がり、また、エネルギー有効利用に対する意識の高まりや、固定価格買取制度の制定を契機に、消化ガス発電の採用によるエネルギー有効利用が進展しつつある。

なお、消化ガス中のメタンガスを改質・変成して水

素と二酸化炭素に変換し、燃料電池により発電を行うシステムは、ガスエンジンより発電効率が高く、窒素・硫黄酸化物が発生せず、騒音・振動がない等の特徴があり、平成 11 年から実用機による運転が行われた。特に、その発電効率が 42%¹⁾ほどと高いことから、固定価格買取制度における収益性の観点から採用箇所数が増えている^{3,4)}。発生汚泥を全て嫌気性消化している処理場においては、消化ガス全量を燃料電池により発電利用した場合、電力自給率として約 61% という高い値が得られている³⁾。

(2) 下水処理場外への消化ガス供給

消化ガスの利用先を広げ、地域全体としてエネルギーの有効利用を進める技術も開発されてきた。

1) 都市ガス供給

消化ガスを都市ガス原料として利用するため、平成 11 年から、脱硫、二酸化炭素除去、除湿によって消化ガスを精製した後に、地域ガス会社に供給を行っている例がある。ガス量としては、市内で消費される都市ガス量の約 1~2% であるが、年間 900~1,500 t の二酸化炭素排出量の削減効果があったと計算されている⁵⁾。また、都市ガス導管に直接、精製・調整したガスを供給する事業も行われており、その供給ガス量は、約 2,000 戸の家庭使用量に相当している⁶⁾。

2) 天然ガス自動車燃料利用

消化ガスを高圧水吸収法により精製してメタンガス濃度を約 98% に高め、平成 20 年から天然ガス自動車の燃料として供給している。この精製法では、エンジンに障害となるシロキサンも有効に除去され、精製に要するエネルギーも精製ガス保有エネルギーの 10 分の 1 以下に抑えられている⁷⁾。

(3) 汚泥の燃料化

汚泥を固形燃料化する技術として、乾燥技術が平成 13 年に、炭化技術が平成 19 年に稼働し、その製品で

ある汚泥固形燃料は、カーボンニュートラルな燃料として石炭火力発電所等で利用されており、順次その採用数を増やしている¹⁾。

(4) 消化ガスの貯蔵技術

嫌気性消化により生成される消化ガスは、冬場においては消化タンク加温に多くの量が消費され、一方、夏場においては余剰が生じる。消化ガスのエネルギー源としての利用性を高めるには、余剰ガスを貯蔵し、年間を通して安定した消化ガス供給を可能にする必要がある。

消化ガスを貯蔵するための一般的な装置はガスタンクであり、圧力を上げれば貯蔵量を増加させることができるが、高圧には限界がある。一方、活性炭を吸着材とした貯蔵法では、ガス分子が活性炭に吸着して安定化する。これにより吸着貯蔵法では、同じ圧力に対して、ガス貯蔵量が飛躍的に増大する⁸⁾。

2.3 下水道システムにおける工夫

(1) 地域バイオマスの有効利用

下水汚泥からのメタン回収については、汚泥の有機物量によってその上限量が決まってくるため、回収量増加には限界がある。一方、家庭生活や食品事業活動、社会インフラ管理からは、下水道に排出される以外の有機性廃棄物が生成されており、家庭ゴミや事業系廃棄物、建設廃棄物などとして排出されている。これら有機性廃棄物を下水道に受け入れて、エネルギー利用する取り組みが進んできている。

1) ディスポーザーの利用

家庭生ゴミについては、ディスポーザーで破碎し、下水道に排出するシステムが米国等で普及している。日本におけるディスポーザー導入社会実験⁹⁾によると、下水処理場への流入負荷量原単位は、SS、BODで2割増加することが示されており、また、他の調査結果¹⁰⁾では、増加したSS分は沈降性が良く、最初沈殿池において沈殿除去されると報告されている。このため、生ゴミ由来の固形性有機物を最初沈殿池汚泥として回収し、より多くの有機物を嫌気性消化に供給できると考えられることから、生ゴミのバイオマス利用を目的として、ディスポーザー導入を進める地方公共団体も増えつつある^{11,12)}。

2) 汚泥消化タンクへの投入

事業系食品残渣や家庭生ゴミ、木質系バイオマスを前処理した後、汚泥消化タンクに投入することによって、消化ガスの増加を図り、ガス発電によりエネルギーを回収する事業が実施されており^{11,13,14)}、またそのような構想を立案している地方公共団体も増えている。

(2) 汚泥の広域集約化

小規模な施設では、汚泥処理・有効利用の事業が非

効率となりやすい。このため、浄化槽や農業集落排水処理施設等の汚泥も含めて処理の広域共同化を進め、核となる処理場への汚泥の搬入とエネルギー利用等を行う計画が進められている¹⁵⁾。また、汚泥の運搬コストを縮減するために、汚泥を脱水して運搬し、処理場において高濃度消化を行う方法が検討されている¹⁶⁾。

(3) その他

下水道における技術的対応ではないが、エネルギーの有効利用を考えた場合、下水道使用者の一人当たり使用水量を低下させることも重要である。

日本とドイツの下水処理場における物質収支とエネルギー消費を比較した調査¹⁷⁾によると、ドイツにおいては、水量原単位が130 L/(d・人)とほぼ日本の約半分であることに起因して、流入下水濃度が日本のほぼ2倍であり、流入下水水量当たりの汚泥発生量も約2.5倍となって、消化ガス発生量も同様の倍率となっている。水処理消費エネルギーは、下水濃度の高い方が汚濁物量当たりで低い傾向にあるため、全体としてみると、高い下水濃度によってより有効にエネルギーが回収される状況となっている。

3. エネルギー有効利用の新たな動向

ここでは、主に、平成23年度から実施されている下水道革新的技術実証研究(B-DASHプロジェクト)を対象とし、本特集の解説で対象とされている以外の技術で、既にガイドラインが出されているものについて紹介する。新しい動向としては、流入下水中固形分の高度回収、他のバイオマスの有効利用、効率的消化、バイオガスの効率的精製、水熱処理の適用、脱水・燃焼・発電の最適化が挙げられる。

(1) 固液分離による汚泥回収と高温消化・ガス発電

流入下水から高効率でSSを除去・回収することは、1980年代後半に行われた建設省総合技術開発プロジェクト「バイオテクノロジーを活用した新排水処理システムの開発」で示された、処理の効率化とエネルギー回収のための重要なコンセプトである。

B-DASHプロジェクトにおいては、原水SS濃度145 mg/Lに対して、70%のSS除去率が得られており、有効に流入下水中の固形性有機物が回収されている。これに生ゴミを加えた高温消化と生成消化ガスの燃料電池発電により、水処理施設を加えた電力費は、従来技術に比べて110%削減されると計算されている¹⁸⁾。

(2) 地域バイオマスの利用と新型バイオガス精製

食品製造系バイオマスや木質系バイオマスを前処理・調整後、下水汚泥とともに消化させる技術を検討し、消化ガスが60%増加する結果が得られている。新型バイオガス精製装置による精製まで含めた施設に

ついて温室効果ガス排出量を検討したところ、従来技術に比べて463%削減されると計算されている¹⁹⁾。

(3) 水熱処理と担体式高温消化を用いた固形燃料化

下水汚泥の水熱処理と担体式高温消化を組み合わせ、消化ガスへの効率的な転換を図り、その熱量で汚泥の固形燃料化を行う技術を検討し、流動焼却炉との比較では、事業全体におけるエネルギーが24 t-DS/日規模において23%削減されると計算されている²⁰⁾。

(4) 脱水・燃焼・発電を全体最適化

コストやエネルギー消費の低減を目的として、低含水脱水、低空気比省エネ燃焼、高効率排熱発電の各設備から構成されるシステムについて検討し、従来技術に比べて、エネルギー消費量で77%削減されると計算されている²¹⁾。

4. おわりに

地球温暖化防止のため、今後さらに、バイオマスエネルギーの有効利用が求められると考えられる。下水処理場を核とした地域バイオマス有効利用システムに向けて、引き続き技術・行政両面での検討が期待される。

参考文献

- 1) 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 —— (2015)
- 2) 佐藤和明：下水汚泥からのエネルギー回収、再生と利用, 2(6), pp. 23-29, (1979)
- 3) 工藤 守：山形市浄化センター燃料電池による発電、再生と利用, 38(142), pp. 14-18, (2014)
- 4) 西川能文：栃木県県央浄化センターにおける燃料電池発電と固定価格買取制度における設備認定、再生と利用, 38(142), pp. 32-34, (2014)
- 5) 岩淵 茂：長岡市における消化ガスの都市ガス原料化について、再生と利用, 27(106), pp. 90-95, (2004)
- 6) 瀧村 豪, 長岡 務：神戸市東灘処理場再生可能エネルギー生産・革新的技術実証事業 —— KOBE グリーン・スイーツプロジェクト ——, 再生と利用, 36(134), pp. 25-29, (2012)
- 7) 竹中恭三：消化ガスの「こうべバイオガス」化技術について、再生と利用, 31(118), pp. 21-24, (2008)
- 8) 落 修一：消化ガス（バイオガス）の生産・利用促進のための技術、再生と利用, 25(94), pp. 18-24, (2002)
- 9) 国土交通省国土技術政策総合研究所：デスポーザー導入社会実験に関する調査報告書, 国土技術政策総合研究所資料, No. 226, (2005)
- 10) 吉沢正宏, 鈴木 穰：デスポーザー導入に対応した高度処理施設の開発に関する研究, 平成8年度下水道関係調査研究年次報告書集, 土木研究所資料第3528号, pp. 63-74, (1997)
- 11) 小崎敏宏：黒部市下水道バイオマスエネルギー利活用施設整備運営事業の概要について、再生と利用, 36(134), pp. 31-37, (2012)
- 12) 斉藤拓也：デスポーザと消化ガス発電の取り組みについて、再生と利用, 38(142), pp. 19-22, (2014)
- 13) 長谷晃司：恵庭下水終末処理場におけるバイオマス利活用（発電等）の取り組み、再生と利用, 37(141), pp. 11-17, (2013)
- 14) 宮本博司, 川嶋 淳：B-DASH 神戸市東灘処理場再生可能エネルギー生産・革新的技術実証研究, 再生と利用, 37(141), pp. 18-21, (2013)
- 15) 工藤 守：秋田県における広域での汚泥集約処理について、再生と利用, 39(149), pp. 86-88, (2015)
- 16) 武藤栄治郎：メタン活用いしかわモデル —— 中能登町における高濃度混合バイオマスメタン発酵 ——, 再生と利用, 39(149), pp. 70-74, (2015)
- 17) 鈴木 穰, 高橋正宏：下水処理・資源回収のための最適システムの開発に関する調査, 平成7年度下水道関係調査研究年次報告書集, 土木研究所資料第3458号, pp. 187-199, (1996)
- 18) 国土交通省国土技術政策総合研究所：B-DASH プロジェクト No. 1 超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導入ガイドライン（案）, 国土技術政策総合研究所資料, No. 736, (2013)
- 19) 国土交通省国土技術政策総合研究所：B-DASH プロジェクト No. 2 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導入ガイドライン（案）, 国土技術政策総合研究所資料, No. 737, (2013)
- 20) 国土交通省国土技術政策総合研究所：B-DASH プロジェクト No. 8 温室効果ガスを抑制した水熱処理と担体式高温消化による固形燃料化技術導入ガイドライン（案）, 国土技術政策総合研究所資料, No. 870, (2015)
- 21) 国土交通省国土技術政策総合研究所：B-DASH プロジェクト No. 9 脱水・燃焼・発電を全体最適化した革新的下水汚泥エネルギー転換システム導入ガイドライン（案）, 国土技術政策総合研究所資料, No. 859, (2015)