

再生と利用

2016 Vol. 40

No. 151

主要目次

口絵	第 28 回下水汚泥の有効利用に関するセミナー（新潟市） 編集委員会事務局
巻頭言	被災地の復興および循環型社会形成のために親しまれ愛される再生と利用を目指して 野池 達也
論説	燃焼・乾燥・廃棄物処理 清水 忠明
特別寄稿	下水汚泥の農業利用 茅野 充男

特集 第 28 回下水汚泥の有効利用に関するセミナー特集（新潟市）

解説	新潟市における下水汚泥有効利用の取組み 山本 茂浩 下水汚泥有効利用の現状と推進に向けた取組 太田 太一 新潟県における“バイオガス発電”の取組 ～産官学連携による小型バイオガス発電機の開発～ 矢田部 桂 長岡市における下水汚泥から発生する 消化ガスの有効利用について 星野 正晴
研究紹介	下水汚泥利用促進に関する土木研究所の取組 南山 瑞彦、桜井 健介、高部 祐剛 下水汚泥有効利用の課題と日本下水道事業団における取組について 島田 正夫 下水道資源・資本の保全と活用＜地域における環境保全、健全経営のための連携・集約システムづくり＞ 落 修一 通気量自動制御の堆肥化システムによる省エネ化と見える化 宮竹 史仁
Q&A	蛍光 X 線分析について 川崎 晃
現場からの声	高温高濃度消化プロセスに適した再生可能エネルギーの利用について 島田 卓
文献紹介	植林地への下水汚泥施用：土壌－植物－カタツムリ間での微量金属移行に及ぼす影影 杉山 恵 養豚排水をバイオマスとして利用した光触媒水素ガス生成（実験的研究） 金澤純太郎
講座	有機性廃液を利用したバイオ水素エネルギー生産に関する研究 奈良 松範 超高温可溶性メタン発酵技術による下水汚泥の資源化 石橋 康弘 ポリ乳酸系バイオマスのエネルギー利用 山田 剛史
特別報告	下水汚泥の有効利用の促進策について 姫野 修司
投稿報告	オゾン溶解反応タンク及びインライン凝集による再生水造水の効率化 福地 広明、野本 睦志、田中 祐大、角川 功明
コラム	『雨を活かし循環する社会』の実現に向けて… 谷田 泰
報告	第 28 回下水汚泥の有効利用に関するセミナー パネルディスカッション概要 会場：新潟市 「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の導入ガイドライン（案）」の概要について 田嶋 淳 下水汚泥有効利用促進マニュアルー持続可能な下水汚泥の有効利用を目指してーの発刊（その 4. 下水汚泥エネルギー化利用編） 前田 明德、福沢 敬三
ニュースポット	ビストロ下水道、世界へ！ 柴田 美奈 畜産系廃棄物からの有用資源循環技術の確立 小倉 舞 「廃棄野菜で肥料をつくりたい」(株)和郷・山田バイオマスプラントリサイクルセンター 編集委員会事務局
資料	おしらせ（投稿のご案内、広告掲載申込）、汚泥再資源化活動、日誌・次号予告、編集後記・編集委員会委員名簿

第28回 新潟市 新潟東急REI 平成27年10月29日(木)～30日(金)

下水汚泥の有効利用に関するセミナー



会場に詰めかけた数多くの参加者

特別講演



長岡技術科学大学
姫野修司准教授



東京大学／秋田県立大学
茅野充男名誉教授



新潟大学・清水忠明教授

平成27年10月29、30の両日、新潟市・新潟東急インを開場に「第28回下水汚泥の有効利用に関するセミナー」が開催されました。産官学の各団体から計11名の講師による講演のほか、パネルディスカッションを行い、本誌「再生と利用」の150号を記念して、これまでの歩みを振り返るとともに、下水汚泥の有効活用策や、それを取り巻く状況、課題などについて知見を共有しました。



パネルディスカッションの様様

2日目 施設見学会

中部下水処理場



中部下水処理場施設内を見学



ガスエンジン



実験施設

2日目午後は、新潟市中部下水処理場の消化施設と市役所前のバスターミナル歩道部に設置されたロードヒーティング設備の見学を行いました。

新潟市中部下水処理場では、長岡科学技術大学と共同で消化ガス増量の取組みとして、下水汚泥に刈草を混合させる混合嫌気性実証実験を平成26年度まで行っており、見学会では、これら消化施設（消化ガス前処理装置、ガスエンジン発電機）及び、混合消化実験施設（切断機、投入コンベア、混合槽、混合液移送ポンプ、しき分離機）などを視察することができました。

市役所前のバスターミナル歩道部には、未処理下水から熱交換方式により採熱しヒートポンプを用いない簡易的なシステムにより歩道融雪を行うロードヒーティング設備が布設されており、見学会ではバスターミナル歩道部を歩きながら、制御盤などの前で説明を受けました。今後、交通施策との連携による下水熱利用モデルとして展開が期待されます。

ロードヒーティング



バスターミナル歩道部で説明を受ける



制御盤を覗き込む

口
絵

第 28 回下水汚泥の有効利用に関するセミナー（新潟市）

巻
頭
言

被災地の復興および循環型社会形成のために

親しまれ愛される再生と利用を目指して 野池 達也 (5)

論
説

燃焼・乾燥・廃棄物処理 清水 忠明 (6)

特
別
寄
稿

下水汚泥の農業利用 茅野 充男 (14)

特集 第 28 回下水汚泥の有効利用に関するセミナー特集（新潟市）

解
説

新潟市における下水汚泥有効利用の取組み 山本 茂浩 (20)

下水汚泥有効利用の現状と推進に向けた取組 太田 太一 (25)

新潟県における“バイオガス発電”の取組 ～産官学連携による小型バイオガス発電機の開発～

..... 矢田部 桂 (35)

長岡市における下水汚泥から発生する消化ガスの有効利用について 星野 正晴 (43)

研
究
紹
介

下水汚泥利用促進に関する土木研究所の取組 南山 瑞彦、桜井 健介、高部 祐剛 (51)

下水汚泥有効利用の課題と日本下水道事業団における取組について 島田 正夫 (60)

下水道資源・資本の保全と活用＜地域における環境保全、健全経営のための連携・集約システムづくり＞

..... 落 修一 (70)

研
究
紹
介

通気量自動制御の堆肥化システムによる省エネ化と見える化 宮竹 史仁 (78)

Q
&
A

蛍光 X 線分析について 川崎 晃 (86)

現場からの声

高温高濃度消化プロセスに適した再生可能エネルギーの利用について	島田 卓	(87)
---------------------------------	------	------

文献紹介

植林地への下水汚泥施用：土壌－植物－カタツムリ間での微量金属移行に及ぼす影響	杉山 恵	(90)
養豚排水をバイオマスとして利用した光触媒水素ガス生成（実験的研究）	金澤純太郎	(91)

講座

有機性廃液を利用したバイオ水素エネルギー生産に関する研究	奈良 松範	(93)
超高温可溶化メタン発酵技術による下水汚泥の資源化	石橋 康弘	(100)
ポリ乳酸系バイオマスのエネルギー利用	山田 剛史	(105)

特別報告

下水汚泥の有効利用の促進策について	姫野 修司	(110)
-------------------	-------	-------

投稿報告

オゾン溶解反応タンク及びインライン凝集による再生水造水の効率化	福地 広明、野本 睦志、田中 祐大、角川 功明	(118)
---------------------------------	-------------------------	-------

コラム

『雨を活かし循環する社会』の実現に向けて	谷田 泰	(128)
----------------------	------	-------

報告

第28回下水汚泥の有効利用に関するセミナー パネルディスカッション概要	会場：新潟市	(129)
「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の導入ガイドライン（案）」の概要について	田嶋 淳	(140)
下水汚泥有効利用促進マニュアル－持続可能な下水汚泥の有効利用を目指して－の発刊（その4. 下水汚泥エネルギー化利用編）	前田 明德、福沢 敬三	(147)

ニュース・スポット

ビストロ下水道、世界へ！	柴田 美奈	(154)
畜産系廃棄物からの有用資源循環技術の確立	小倉 舞	(156)
「廃棄野菜で肥料をつくりたい」(株)和郷・山田バイオマスプラントリサイクルセンター	編集委員会事務局	(158)

資料

おしらせ（投稿のご案内、広告掲載申込）	(161)
汚泥再資源化活動	(164)
日誌・次号予告	(165)
編集後記・編集委員会委員名簿	(166)

※本文中の表題で掲載した執筆者の所属団体・役職は、執筆当時のものです。

巻 頭 言

被災地の復興および循環型社会形成のために
親しまれ愛される再生と利用を目指して

東北大学名誉教授

野池 達也



再生と利用が新たな使命に向かって、第151号としてスタートいたしました。ご関係の皆様と心より慶びをともにさせていただきたく存じます。

バイオマス利活用、再生可能エネルギーの生産、下水処理水再利用等の行政、事業、研究に携われる方々の社会貢献への熱意こめられる輝かしいご活動の成果を、本誌に掲載させていただけますことを、編集委員会並びに事務局一同、心より光栄に存じます。循環型社会の基礎を支える有用な研究成果、技術開発、事業の現況を、志を同じくされる読者の皆様にご紹介し、相互の交流に役立たせていただきますことは、大きな喜びであります。

東日本大震災・原発被災地の復興、循環型社会の形成のために、今こそ、未利用の下水汚泥、大部分が焼却処分されている家庭生ごみ、食品廃棄物、直接農地還元されている家畜排せつ物等の有効利用による地域エネルギー生産の必要性が、強く認識されております。

東日本大震災より早くも5年が経過しました。廃墟と化した被災地に立ち、あまりの悲惨さにただ涙以外の何ものもありませんでした当時の思いを、今も忘れることはできません。この未曾有の大地震・津波により、福島原子力発電所が破壊され、放射性物質が環境に放出する深刻な事態が生じ、祖先から継承された大切な農地は荒野と化し、今なお地元の皆様のお苦しみは計り知れません。

宮城県南三陸町において、民間企業が事業主体となり、震災被災地第一号の家庭生ごみと浄化槽汚泥を対象とするメタン発酵施設が、志津川浄化センター跡に完成し、2015年10月、稼働が開始されました。竣工式に出席し、ご自分たちが分別した生ごみや浄化槽汚泥から、バイオガスと液肥を生産できるメタン発酵施設の誕生に、町民の皆様が如何に大きな喜びと期待に溢れておられるかを実感いたしました。

原発被災地の福島県伊達市霊山町下小国地区では、放射能で汚染された果実や雑草等のメタン発酵によりバイオガスを生産し、発酵残渣中の放射性物質濃度を測定し、メタン発酵の放射能濃縮機能の実証実験が、すべて手造りの実験装置を用いて、現地の大沼豊代表を中心に続けられ、期待された成果が着実に上げられております。何よりも大きな恩恵は、あれほどの打撃を受けられた現地の方々が、農地の除染後、大豆栽培を始め徐々に農業に立ち上がられたことであります。メタン発酵により、放射性物質で汚染され無価値となったバイオマスから、有価物のバイオガスと液肥を生産できる感動と喜びを体験されたことによります。南三陸町並びに伊達市霊山町の実例において、バイオマスの有効利用は、被災地の人々の傷心を癒し、復興への力をもたらしことを知らされます。

下水道ビジョン2100で示された将来像を踏まえ、資源のみち委員会による「資源のみち実現に向けて」の報告書には、政策展開上の基本的考え方が提示され、以来、バイオガス発電の発展やリン資源の回収技術の開発等に反映されて来ました。2005年～2008年度におけるLOTUSプロジェクトにより、下水汚泥消化槽に他のバイオマスを投入し、混合メタン発酵を行う卓越性が実証され、石川県珠洲市ほかの都市で実施されております。2011年度から開始された下水道革新的技術実証事業（B-DASHプロジェクト）では、メタン発酵の高効率化を始めバイオガスによる水素社会の実現等、世界に比類のない新技術の開発が実規模で行われております。栄養塩を豊富に含んだ下水汚泥を肥料化して、緑農地へ循環するBISTRO下水道の推進は、循環型社会形成の基盤を究極に支えるものであります。下水道新技術推進機構では、これまで汚泥消化槽がほとんど設置されてこなかった300～20,000m³/日の中小規模の下水処理場にも導入できる、画期的なマニュアルの作成が進められております。このようなリーディングプロジェクトによって生み出された目を見張るような成果は、次々に再生と利用に掲載されて参りました。

被災地復興のために、地域自然エネルギーの安定的な生産が必要とされます。COP21は、地球温暖化対策の新枠組み「パリ協定」を採択し、全世界の国々にCO₂の削減が求められる時代となりました。7府省によるバイオマス産業都市構想の国策も実施されており、バイオマス利活用の重要性そして本誌の使命は、ますます高まっております。

再生と利用は、皆様の熱意こめられた成果を、お気軽に公表される情報交換と励ましの場でありますことを心より願っております。ことに、若き技術者や学生の方々の投稿が望まれます。若い純粋な人々こそ、バイオマスの事業や研究の興味深さ・素晴らしさを、驚きと喜びをもって体験され推進する創造力に満ちておられます。被災地の復興および循環型社会形成のために、皆様に親しまれ愛される再生と利用を目指して、編集委員会並びに事務局一同、喜びをもって携わらせていただきたく願っております。

論 説

燃焼・乾燥・廃棄物処理

新潟大学工学部化学システム工学科

教授 清水 忠明

キーワード：流動層、バイオマス、一般廃棄物

1. はじめに

著者は、これまでに石炭・バイオマスなどの固体燃料の流動層燃焼の研究に従事してきており、特に、窒素酸化物と亜酸化窒素の発生対策を研究してきた。また、微生物によって代謝可能な湿潤バイオマスの堆肥化発酵熱を用いた乾燥の研究を行ってきた。加えて、新潟県内のいくつかの自治体のごみ焼却炉の運営方式決定や事業者選考の委員を務めてきており、廃棄物処理に携わった経験を有する。本論説では、これまで著者が研究・委員会・文献調査に携わった中から、下水汚泥処理に関する研究・技術内容の紹介をするとともに、問題点・今後の展望等を論ずる。

2. 流動層燃焼と NO_x 、 N_2O 排出

流動層燃焼装置は、大別して気泡流動層燃焼と循環流動層に分けられる (Fig.1)。いずれも砂等の粒子を流動媒体として用い、上向き気流中に粒子を浮遊させて流動化した状態の中で固体燃料を燃焼する。気泡流動層燃焼では、ガス速度が粒子の流動化開始速度より高く、終端速度より低い状態で運転され、粒子は気泡流動化した濃厚層を形成し、その上に粒子が希薄なフリーボードが形成される。循環流動層では大半の粒子の終端速度より高いガス速度で運転され、粒子はいっ

たん装置上部まで到達した後、気固分離装置 (サイクロンなど) によりガスと分離され、粒子はダウンカマーを通して装置底部へリサイクルされる。循環流動層においては、濃厚層とフリーボードの明確な境界は見られない。常圧の石炭燃焼では主に燃料が熱分解して生成した固体状炭素 (チャー) の燃焼効率を高くすることが求められるとともに、負荷追従性 (ボイラー出力の短時間での変化) が求められるので、チャーの粒子循環系内からの飛び出し損失が少なく、炉内からの熱回収における伝熱制御が容易な循環流動層が主に用いられている。しかし、廃棄物燃焼のように粗大な不燃物が混入するような場合には、気泡流動層が用いられる。汚泥燃焼においては、それぞれ特徴を生かした循環流動層と気泡流動層のいずれも用いられる。汚泥の燃料としての特徴は、含水率が高く、燃料の熱分解で揮発分が多く生成しチャーは少ない。また炉内からの熱回収も通常は考慮されない。気泡流動層はガス速度が遅く、フリーボードでの燃焼のためのガス滞留時間を稼ぐのに有利であるが断面積が大きい。一方、循環流動層は単位床面積当たり処理量が多くとれるが装置高さが高くなる。

汚泥の燃料としてのもう一つの特徴は窒素含有量が高いことであり、 NO_x (窒素酸化物、 $\text{NO}+\text{NO}_2$) および N_2O (亜酸化窒素) の生成が懸念されることである。 NO_x は光化学スモッグ原因物質であり、 N_2O は単位濃度あたり温室効果が CO_2 の約 300 倍ある温

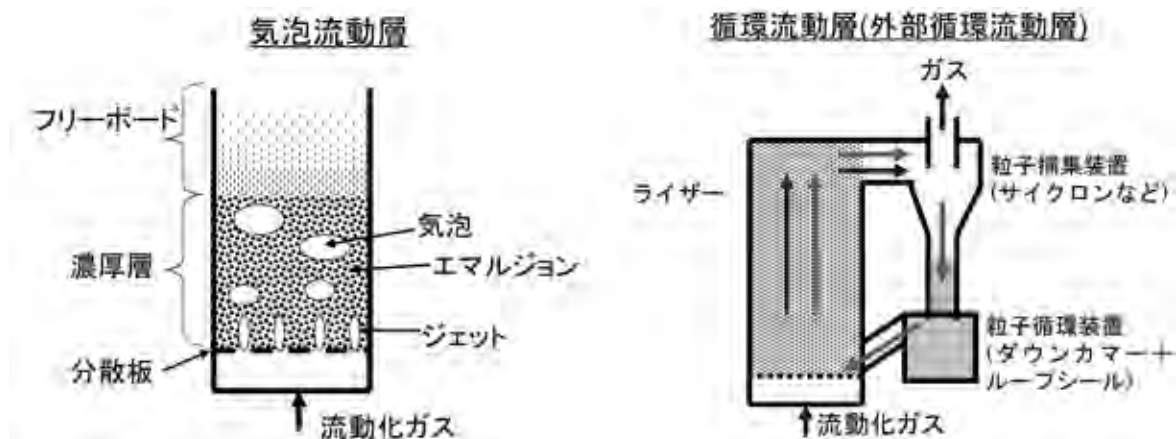


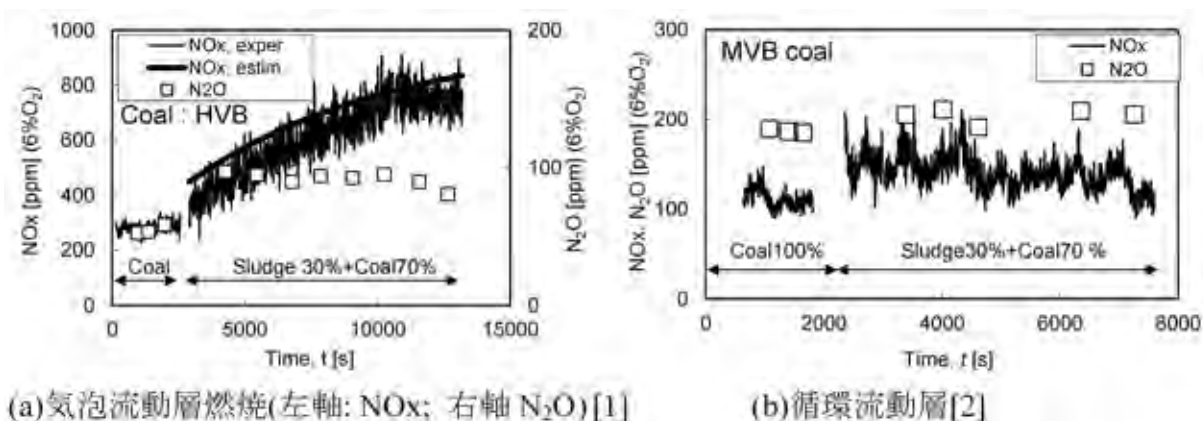
Fig.1 気泡流動層と循環流動層の概念図

暖化ガスである。これらの排出においても、循環流動層と気泡流動層に違いがみられる。**Fig.2**は同一の乾燥汚泥を石炭と混焼した場合での、気泡流動層と循環流動層における NO_x 、 N_2O 排出の比較である。気泡流動層の N_2O 排出は100ppm程度であるが、循環流動層では200ppmと高い。一方、 NO_x については気泡流動層の方が循環流動層よりかなり排出濃度が高く、加えて気泡流動層では時間の経過とともに NO_x 排出が増加したが、循環流動層ではほぼ一定であった。気泡流動層で NO_x 排出が増加した原因は、汚泥灰の蓄積である。この研究で用いた汚泥の灰には鉄分が多く含まれており、酸化鉄は汚泥が熱分解して生成する NH_3 等揮発性窒素化合物を NO_x に転換する触媒となることが知られている。灰の炉内蓄積量は、汚泥供給による増加と、層内粒子の流動に伴う灰摩耗と生成微粉の気流に伴う飛び出しのバランスで決定される。**Fig.3**に、 NO_x 増加から推定した灰の摩耗速度と流動化ガス速度の関係を示す。ガス速度の速い循環流動層の方が灰粒子摩耗を促進できるので灰蓄積防止に有利である。ただし、ガス速度が速いとガス滞留時間が短くなるため、装置高さを高くして未燃ガスを低減

するなどの対策が必要となる。

N_2O 低減には温度を高くして N_2O 分解を促進する方法があり、燃焼温度そのものを高くするほかに、燃焼後の排ガスにクリーンな燃料を添加して燃焼させて排ガス温度を高くする方法もある。循環流動層燃焼でサイクロン内あるいは出口へ天然ガス、LPG等を吹き込むことで N_2O を低減できる[3, 4]。気泡流動層でもフリーボードへのプロパン吹き込みと空気比制御を組み合わせると NO_x 、 N_2O 排出を低減できる[5]。下水汚泥の循環流動層燃焼(熱分解)でも、サイクロンの後に燃焼室を設けて燃料を吹き込む方法が実施されている[6]。この高温化による N_2O 気相分解の反応速度論については、加圧の影響も含めて後で詳しく述べる。

通常の流動層燃焼は大気圧下で運転されるが、加圧下で流動層燃焼を行うこともできる。加圧のメリットの一つは、高温高压の排ガスをを用いてタービンなどを駆動し、熱エネルギーを機械エネルギーに転換できる点である。石炭燃焼ではガスタービンを設置して回転エネルギーを電気エネルギーに転換するプロセスが実用化しており、日本においては九州電力の荻田360MWe装置が稼働している。下水汚泥の燃焼にも

Fig.2 気泡流動層と循環流動層で石炭と乾燥下水汚泥を混焼したときの NO_x 、 N_2O 排出の経時変化

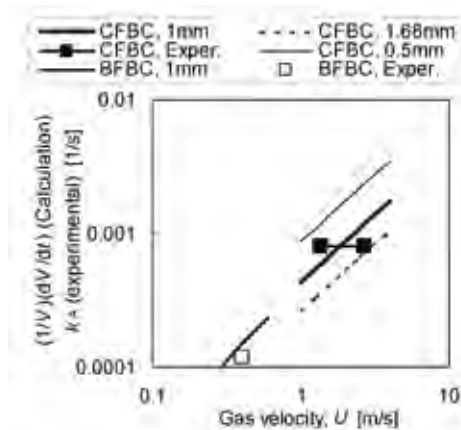


Fig.3 気泡流動層と循環流動層で汚泥供給開始・停止後の NOx 排出経時変化から推定した汚泥灰摩耗速度とガス速度の関係 [2]

加圧気泡流動層が適用されているが、この場合は機械的エネルギーを曝気処理用の加圧空気の製造に使うことが想定されている (Fig.4) [7, 8]。加圧下水汚泥燃焼においては、汚泥中の水分に由来する水蒸気もタービンを駆動する高温高压の作動流体として働くので、水分は単に蒸発熱を奪うネガティブな作用から、作動

流体としてのポジティブな面も出ている。

加圧は、 N_2O 排出低減にも寄与できる。高温で N_2O は気相中の第3体 (N_2 等の反応性を持たない成分) と衝突して熱分解するが、高压になると衝突頻度が増加し、その効果が増加する。Johnsson らが測定した不活性気体中での N_2O 分解速度式は、温度 T [K]、第3体濃度 C_M [mol cm^{-3}]、ガス滞留時間 θ [s] として次式で与えられる [9]。

$$d[\text{N}_2\text{O}]/d\theta = -k_{\text{N}_2\text{O}}[\text{N}_2\text{O}]C_M \quad (1)$$

$$k_{\text{N}_2\text{O}} = 6.2 \times 10^{14} \exp(-28230/T) [\text{mol}^{-1} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}] \quad (2)$$

この速度式を用い、気泡流動層燃焼の場合で、濃厚層上部での N_2O 濃度を仮定してフリーボードで気相 N_2O 分解のみが起こると仮定した時のフリーボード出口 N_2O 濃度の温度依存性を著者が計算した結果を、文献の実測値と比較して Fig.5 に示す。この反応速度式は、加圧気泡流動層燃焼の小型装置～71MWe 大型実証装置の広いサイズ範囲のデータに対して、フリーボードでの燃焼が無視できるような場合には、 N_2O 排出の温度依存性をよく再現できる。加圧のメリットの一つは、第3体濃度 C_M が高いことによる反応速度向上とガス体積が減ってガス滞留時間を長くすることによる分解の促進が挙げられる。

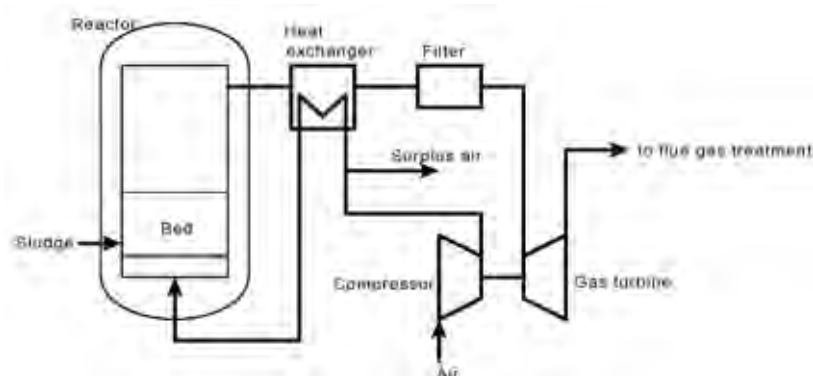


Fig.4 加圧流動層燃焼により高压空気を副生するプロセスの概念図 [7, 8]

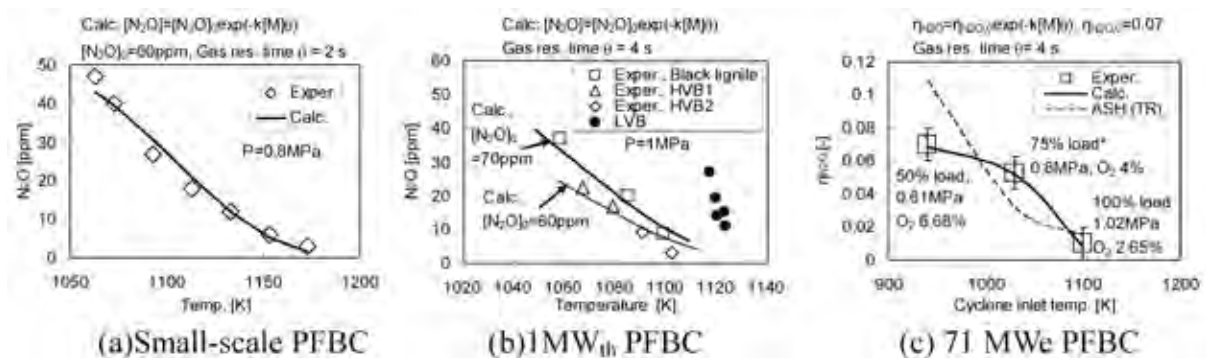


Fig.5 石炭の加圧流動層燃焼における温度と N_2O 排出の関係の実測値および Johnsson らの気相 N_2O 分解速度による温度依存性の筆者による推定結果との比較 ((a) : Suzuki [10] による小型装置の実測値との比較 ; (b) : Andersson ら [11] による 1MW パイロットプラントの実測値との比較 (注 : LVB はフリーボードで燃料が燃焼している可能性がある。) ; (c) : 辻ら [12] による 71MWe 大型装置の実測値との比較)

3. 湿潤バイオマスの乾燥

バイオマスや低品位炭の中には、汚泥を始めとして含水率がきわめて高いものがあり、そのまま燃焼する場合には水の蒸発熱と水蒸気による持ち出し顕熱のために熱損失が大きく、補助燃料などを必要とする場合がある。そのため、予備乾燥をすることで自立した燃焼を達成するとともに高効率な熱回収を行うことが考えられる。

乾燥方式には様々なものがあるが、大まかには加熱源の種類と、蒸気の蒸発熱回収の有無で分類できる。加熱源としては、燃料の中の有機物を加熱の熱源とするものと外部エネルギー源（電力あるいは燃料）を用いるものがある。蒸発した蒸気を非凝縮性乾燥ガス（空気など）とともに放出する場合と、非凝縮性ガスを含まない蒸気中で乾燥させ生成ガスをほぼ蒸気 100%とし、この生成蒸気を加圧して凝縮させて熱を回収する

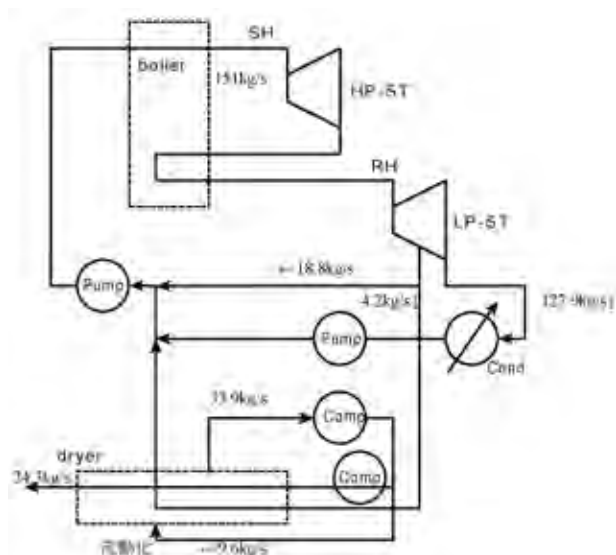


Fig.6 蒸気再圧縮熱回収乾燥プロセス付褐炭燃焼発電システムの蒸気流量試算例（供給 200 t/h、燃料中水分 55%）

方法にも分類できる。非凝縮性ガスを用いる場合は構造などが簡単になるが蒸発熱の回収ができず、また空気など酸素濃度の高いものを用いる場合は自然発火等に注意が必要である。蒸気中乾燥-蒸気再圧縮による熱回収は、構造的には複雑であるが、エネルギー的には有利であり、著者が試算した含水率 55% 褐炭燃焼火力発電の例 (Table 1, Fig.6) では、低圧蒸気タービンからの抽気によるロスおよび圧縮動力を差し引いても、蒸気持ち出し熱を減らせることによるボイラー効率向上の効果が勝り、総合効率が向上することが期待できる。

高含水率の石炭（褐炭など）に対して適用可能な蒸気再圧縮による熱回収を伴う乾燥装置の例としては、油中乾燥を用いた UBC プロセス [13]、過熱蒸気で流動化させる流動層を用いた乾燥プロセス [14, 15] がある。これらの構成要素は、いずれも気密式乾燥器、蒸気再圧縮機、伝熱管（蒸気凝縮管）である（Fig.7）。伝熱管から湿潤物への伝熱係数を高くして伝熱管内の飽和温度を低くすることが蒸気再圧縮の圧力低減すなわち圧縮動力低減のポイントになる。これら蒸気再圧縮法は原理的には汚泥にも適用可能である。ただし、石炭などでは粉碎による粒度の調整などが可能であるが、汚泥の場合には夾雑物の混入など、固体ハンドリング上の問題を考慮する必要がある。

燃料の中の有機物を加熱のエネルギー源とするものには、乾燥生成物を燃焼してその熱を乾燥器に与えるものと、燃料を発酵（堆肥化）させてその発酵熱を利用するものがある。微生物が代謝可能な成分を多く含むバイオマスについては、堆肥化法が適用可能である。著者は、平成 23～25 年度新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業「キノコ栽培廃菌床からのエネルギーと肥料の同時生産」（課題番号 23054）の研究プロジェクトに参画し、含水率 55% のエノキタケ廃菌床を堆肥化乾燥する方法の確立および乾燥物の燃焼試験を行った。このうち、堆肥化乾燥の結果について紹介する。

Table 1 蒸気再圧縮熱回収乾燥プロセス付褐炭燃焼発電システムの効率試算例（供給 200 t/h、燃料中水分 55%）

	石炭乾燥なし	水蒸気乾燥
ボイラー効率[%]	73.5	84.8
理論ランキン出力[MW]	191.2	226.0
発電[MW]	172.05	203.4
蒸気圧縮動力(5 kg/cm ²) [MW]		9.74
流動化蒸気圧縮(2 kg/cm ²) [MW]		1.19
発電－圧縮[MW]	172.1	192.5
総合効率%	29.7	33.2

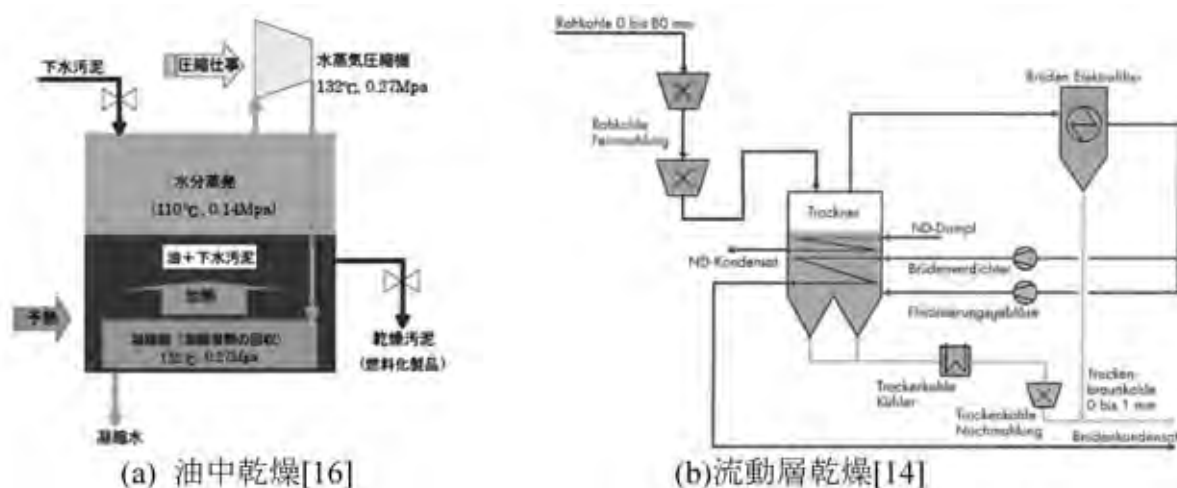


Fig.7 蒸気再圧縮による熱回収を伴う乾燥プロセスの例

ここでは、容量 3m^3 の固定層発酵装置で通気発酵実験を行った。加えて、小型断熱発酵槽（容量 2L の固定層と 6L の撹拌槽）を用いて通気発酵を行い、生成ガス中の CO_2 濃度と温度を連続測定した（Fig.8-(a)）。発酵で発生する熱量は、有機物の酸化による CO_2 発生時の発熱、すなわち燃焼熱と等しいと仮定し、 CO_2 発生速度から発熱速度を推定した。乾燥廃菌床の発熱量から CO_2 発生あたりの発熱は 112 kcal/mol-CO_2 ($=470\text{ kJ/mol-CO}_2$) とした。なお、酸素消費あたり発熱量に換算すると、この発熱量は文献値 440 kJ/mol-O_2 [17] とほぼ同じである。この発熱速度を用いて 3m^3 の固定層発酵装置のモデル化を行った。発酵で発生した熱は、水の蒸発熱、ガスの顕熱、容器外部への放熱として一部が失われて、発生した熱と放熱の差が廃菌床内に蓄積し温度上昇にあてられる。本計

算では Fig.8- (b) に示すように、装置内の廃菌床充填層を高さ方向に均等に4分割し、それぞれのセクションでの物質・熱収支をそれぞれとった。

Fig.9 に示すように、 6L の撹拌槽で得られた CO_2 生成速度を用いて 3m^3 発酵槽の温度上昇、蒸発挙動をある程度予測ができることが明らかになった。ただし、 6L 発酵槽では 72 時間を超えると CO_2 発生が次第に減少したが、 3m^3 発酵槽ではその後もまだ温度の高い状態が継続し、発酵が終わっていないと思われる。長時間発酵した場合の挙動予測についてはまだ改良の余地がある。

発酵を用いたバイオマス乾燥法については、基質を代謝できる発酵菌の存在が不可欠であるが、バイオマスによっては抗菌物質を含有し発酵させることに工夫が必要なものもある。本研究プロジェクトで対象とし

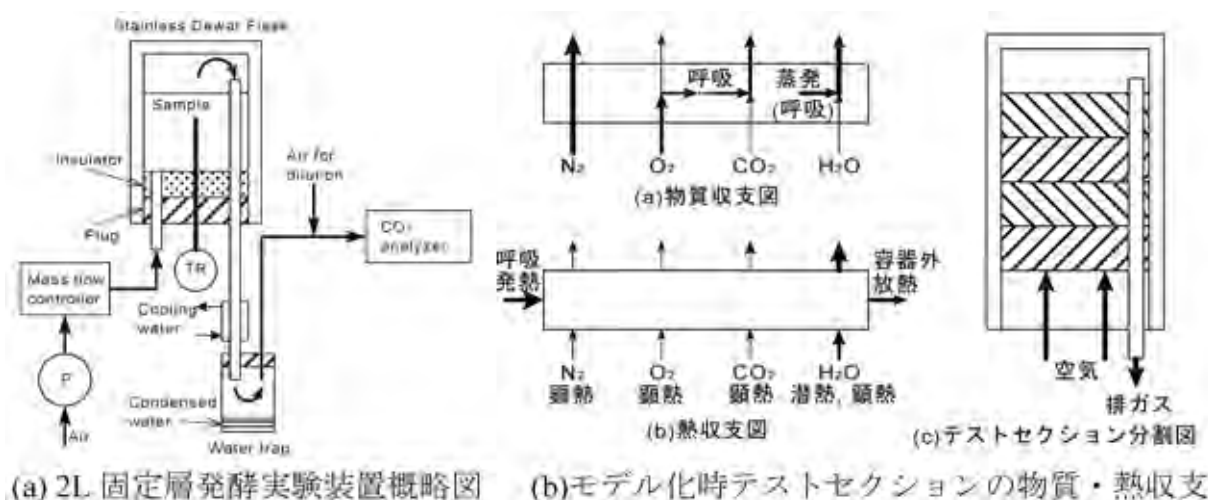


Fig.8 2L 固定層発酵実験装置および 3m^3 固定層発酵槽の温度・蒸発のモデル化に用いた廃菌床発酵乾燥時の装置内テストセクションの物質・熱収支の概念図

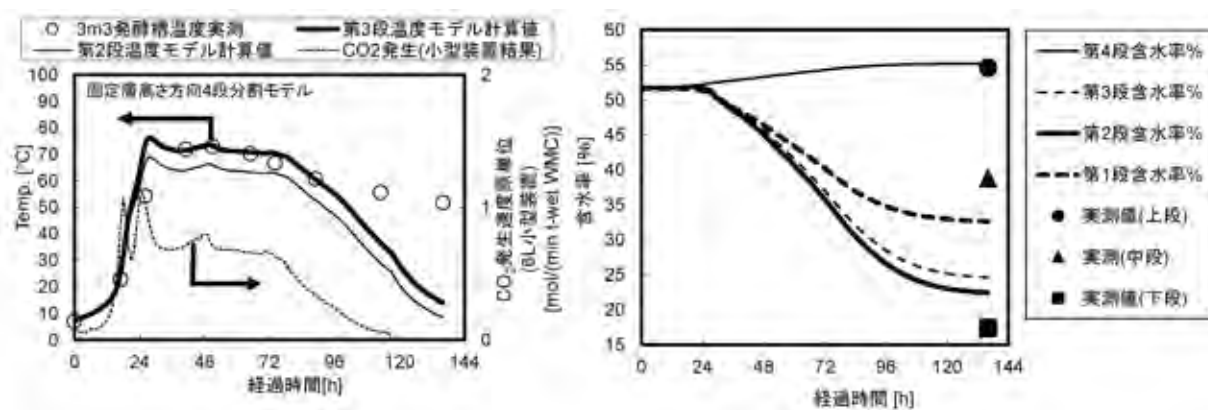


Fig.9 キノコ廃菌床の連続通気発酵乾燥の3m³発酵装置の結果と小形(6L)発酵装置で測定したCO₂生成速度に基づくモデル予測の比較

たキノコ廃菌床も抗菌物質を含有するものであり、発酵を開始するために十分な量の種菌を添加する必要があった。そのため、ある程度の量の発酵後の生成物を発酵前のバイオマスに添加する必要があった。

発酵菌の選択には2つの考え方があり、一つは短時間で発酵できるように高性能な特定の発酵菌を外部から購入するなどして用いる場合と、もう一つは性能は高くないが多様な発酵菌を用いることができるように余裕を持った発酵装置とする考えである。本プロジェクトの方針としては、発酵菌の安定調達、価格決定力を考えて、多様な(かつ調達が容易で安価な)発酵菌を用いる方針とし、市場において広く調達可能なものとして、発酵鶏糞、EMボカシ、乾燥牛糞、発酵豚糞、発酵油かす等、合計12種類の発酵堆肥を種菌として用いる実験を2L固定層実験装置で行い、いずれも繰り返し利用が可能で、発酵乾燥に使える程度の発酵時CO₂発生があることを確認した。

4. 一般廃棄物の焼却と民間活力の導入

これまで、著者は新潟県内のいくつかの自治体において、一般廃棄物焼却施設の運営方法の検討や、事業者選考の委員を務めたことがあり、その中でいくつかの論点について課題などを論ずる。

現在の一般廃棄物の中間処理(焼却)の運営形態は、民間事業者に設計・建設・運営を委託するDBO方式が主流となり、自治体による公設公営方式は少なくなっている。民間活用のメリットとして、「運営等を民間の資金、経営能力及び技術能力を活用して…国や地方公共団体等が直接実施するよりも効率的かつ効果的に行われることにより、事業コストの削減、より質の高い公共サービスの提供が実現できます」(経済産業省HP http://www.meti.go.jp/policy/local_economy/pfi/)

というものがうたわれている。また、著者がある自治体の運営方式を決定する委員会において、民間活力の導入のメリットは何かと問うたところ「民間の創意・工夫を導入する」という趣旨の回答があった。しかし、公設公営であっても創意・工夫の能力があってしかるべきであり、単に民間に任せればよいというものではない。民間の創意・工夫が具体的にどのように発揮できるかについて、あらかじめ使える資源、制約条件などを考えて構想する必要がある。例えば、余剰熱を用いて発電し、売電することで民間の創意・工夫を導入することが考えられる。この場合は、ごみは燃料でもあるので、ごみの発熱量と処理規模によって発電量がある程度決まってくる。したがって、発熱量がある程度あり、焼却量が多いほど発電に有利となると考えられる。Fig.10-(a)は著者がまとめたDBO方式で作られたごみ焼却炉における処理規模とゴミ発熱量の範囲である。この図をまとめた当時は、DBOの実績としてあったものは「某市」を除くものであり、その際はDBO実績の最小規模として、図中の規模・発熱量最低ラインAと書かれる線とゴミ発熱量最低ラインと書かれた線の右上側の実績だけがかった。その後、某市と書かれたものが加わり、最低規模ラインBと書かれた規模が、DBO実績における最低ラインになった。

Fig.10-(b)にはDBO方式のVFMと規模の関係を示す。ばらつきが大きいですが、規模が大きいとVFMが高くなる傾向がみられる。全体として6～15%のVFMが見込まれており、民間の創意・工夫を導入する効果が期待されている。民間の創意・工夫のうち余剰電力の売電は大きな寄与があるが、これまでは、余剰電力を高価格で販売できる相手を見つけることが民間の創意・工夫を発揮できる点となっていた。しかし、FIT制の導入により、このような形での民間の創意・

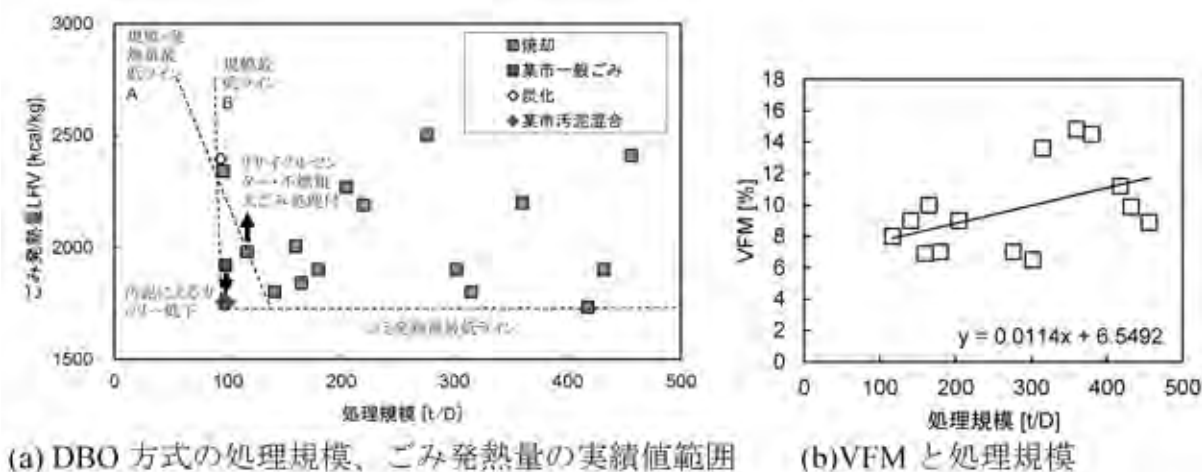


Fig.10 DBO方式による一般廃棄物焼却処理における処理規模、ごみ発熱量の実績値およびVFM（元データは自治体等の要求水準書等による）

工夫導入が難しくなり、売電収入を自治体の帰属とする場合が出てきた。この場合、自治体の実質の負担としては、処理費用から売電収入を除いたものになるので、いかに売電を増やせるかがポイントになる。しかし、どのように運営事業者に発電量を増やさせるかのインセンティブを与える方法については、まだ検討の余地がある。

自治体が建設・運営事業者を選定する際には、選考委員会を設置することが多い。この選考委員会は、実際にごみを焼却する実務に携わった経験を有する中立的な立場の人、自治体の職員、学識経験者などで構成される。また、コンサルタント会社が実務をサポートする。このシステムは中立性を担保する上で適切とは考えられる。一方、起こりうる問題点として、コンサルタント会社（案件に実際にかかわる担当者）の経験・能力や、学識経験者の適切な選択があると考えられる。筆者は、大学教員として教員の公募・採用にかかわったこともあるが、現在の大学教員の採用に関しては学術的業績（具体的には査読付き論文として公表されるもの）に重きが置かれる場合が多く見られ、特定分野の高度な学術的知見があるとは考えられる。しかし、ごみ焼却の事業者等選考では、総合的で幅広い知見を持つことが必要と思われる。また、分野としては焼却・発電等のエンジニアリングの分野の識者と、運営と経済性に関する会計の分野の識者の両者をそろえる必要がある。また、中立的な立場でごみを焼却する実務に携わった経験を有する人は、例えば自治体で長年公設公営のごみ焼却に携わった人などが考えられるが、DBO方式が主流になると、数十年後には公的部門において経験と専門知識を豊富に有する人材を確保することが困難になることが懸念される。

廃棄物の処理法を変更する場合には、一つのメリットだけでなく、多面的な検討を必要とする。ある自治体においては、従来は可燃ごみとともに焼却していた生ごみを、分別してメタン発酵に用いるように収集・処理法を変更した。しかし、この結果、生ごみが減ったことによりごみの水分が減少し、発熱量の増加により焼却炉内燃焼温度が上昇し、最終的には焼却炉の傷みが激しくなる問題が生じた。この他にも生ごみを可燃ごみから除くことで考えられる焼却設備側の問題としては、ごみのバルク密度が小さくなるためにごみピットの容量当たりの質量ベースでの貯留量が減ること、含水率が低いのでピット内での火災防止に注意が必要なこと、高所からのごみの落下による破袋をする場合はごみが軽くなるため破れにくくなること、焼却炉投入後の乾燥帯が短くなりごみに着火・燃焼する場所が変わること、などが挙げられる。特に、DBO方式など民間事業者が運営を行う場合は、20年間程度の運営を行うことが多く、その間のごみ質・ごみ量の変化は運営側から見ると事業リスクになる。したがって、生ごみをメタン発酵へ用いるなどのように、ごみの分別方式の変更を行う場合は、そのインパクトについてあらかじめ十分検討しておく必要がある。

5. おわりに

これまで著者が関わった流動層燃焼、バイオマス乾燥、自治体における廃棄物処理の経験と文献調査の中から、いくつか下水汚泥処理にも関連することを取り上げて、将来の課題等を論じた。今後の下水汚泥・廃棄物の処理に対して参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) Shimizu, T. et al.; *Fuel*, Vol. 86, No. 7-8, 957 (2007)
- 2) Shimizu, T. and Toyono, M.; *Fuel*, Vol.86, No.15, 2308 (2007)
- 3) Åmand, L.-E. et al.; European Workshop on N₂O Emissions LNETI/EPA/IFP (Lisbon, Portugal) , p.171 (1990)
- 4) Gustavsson, L. et al.; Proc. 11th Int. Conf. on Fluidized Bed Combust. (Montreal, Canada) , p.677 (1991)
- 5) 細田英雄ら、*化学工学論文集*、21 巻, 74 (1995)
- 6) 北井 剛、*日本エネルギー学会誌*、94 巻, 672 (2015)
- 7) Nagasawa, H. et al.; Proc. 9th Int. Conf. on Circulating Fluidized Beds (Hamburg, Germany) p.509 (2008)
- 8) Murakami, T. et al.; *Fuel Processing Technology*, Vol.90, 778 (2009)
- 9) Johnsson, J.E. et al.; Proc. the 5th International Workshop on Nitrous Oxide Emissions. (Tsukuba, Japan) , 193 (1992)
- 10) Suzuki, Y., Development of Pressurized Fluidized Bed Combustion Systems (Tokyo, Japan) , p.1 (2000)
- 11) Andersson, M. et al.; Proc. 15th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion (Savannah, GA, USA) , Paper No. FBC99-0189 (1999) .
- 12) 辻ら; *日本エネルギー学会誌*、78 巻, 191 (1999) .
- 13) 杉田 哲ら、*神戸製鋼技報*, Vol. 56, p.23 (2006)
- 14) Klutz, H.-J. et al.; VGB Powertech, 10, p.38 (2014)
- 15) 橋本 貴雄ら、*三菱重工技報*、Vol.48, 25 (2011)
- 16) 神鋼環境ソリューション、LOTUS project 提案技術説明書 「高効率油中乾燥技術による下水汚泥の燃料化」、
- 17) de Guardia et al.; *Waste Management*, Vol.32, 1091 (2012)

特 別 寄 稿

下水汚泥の農業利用

東京大学名誉教授・秋田県立大学名誉教授

茅野 充男

キーワード：地球環境と汚泥、土壌炭素、窒素資源、リン資源、汚泥堆肥化、亜鉛資源

昭和 50 年代に下水汚泥の農業利用を主要な目的として汚泥資源利用協議会が発足した。筆者は発足当時から各種委員に任命され、また、『再生と利用』の編集委員長を 10 年も務めるなど、長年、下水汚泥リサイクルに関係してきた。これによって、肥料資源やエネルギー資源、ひいては地球温暖化などの重要な研究課題を考察する機会を与えられ、貧しい研究生活に潤いを与えてもらった。

汚泥の農地施用にはメリットとデメリットがある。本稿では、両者を比較し、農地施用を考えたい。まず、1 節と 2 節では、汚泥農地施用による有機物（炭素）（1 節）と肥料元素（窒素とリン酸）（2 節）の供給が地球温暖化防止、肥料資源・エネルギー資源保全からメリットのあることを説明する。ついで、3 節では、堆肥製造と施用効果について述べる。また、4 節では、汚泥施用で問題とされる農地の亜鉛濃度上昇について解説する。併せて、亜鉛は人に必須な栄養元素であることにも触れたい。5 節はまとめである。

1. 炭素の問題と地球温暖化

平成 19 年版環境／循環白書によると、人類は地球の生物容量（BC）を上回る消費をしているという。その消費量がエコロジカル・フットプリント（EF）として計算されている（文献 1）。

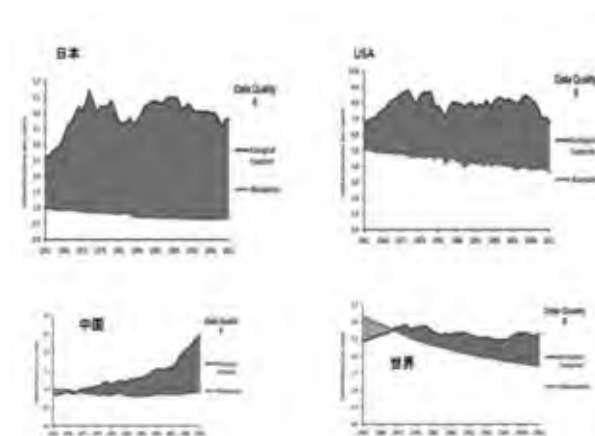


図 1 Ecological と Biocapacity

EF とは、人間活動が環境に与える負荷を浄化するために必要な土地や水界面積である。通常は、生活を維持するのに必要な一人当たりの面積を示す。例えば炭素については、人の活動で発生する二酸化炭素を吸収・除去するのに面積はどの程度必要かを示す。『生きている地球レポート 2006』（文献 2、Google 検索）によると、世界全領域では 1980 年代には EF が生物容量を上回る過剰状態に至ったとされている（図 1 中の世界の図）。2003 年時点では、EF が生物容量（BC）を 20% 強上回る状態となっているが、さらに、化石燃料の使用のみによる EF を計算すると 1961 年から

2003年の間に9倍以上になるという。

また、表1は日本のEFを項目別に解説したものである。我が国では食糧消費量からみると耕作地は2千8百万ヘクタール必要なのに実際には4百万ヘクタールしかない。また、石油消費によって発生する二酸化炭素を光合成で固定するには2億ヘクタール必要なのに実際には2千5百万ヘクタールしかないというデータが示されている。

この試算とは別に土地（土壌）の二酸化炭素吸収量というのが各地で試算されている。ヨーロッパでは各国が協力して古くから試算値を発表しているが、林地、草地は二酸化炭素の重要な吸収サイトだが、耕地は逆に二酸化炭素排出源となっている。その理由は化石エネルギーから生産される化学肥料の施用と有機物施用減少が主要な原因である。林地や草地を農地転換して穀物生産をすることは地球温暖化を促進する行為として糾弾されている（表2）（文献3）。

表1 日本のエコロジカル・フットプリント（EF）
（主に1990/91年の値）

項目(単位:ha)	説明	EF/人 (ha/人)	日本全体の EF (百万ha)	国内埋蔵 地 (百万ha)	必要面積/埋 蔵面積
食料生産		0.23	28.1	4.4	6.4
住居		0.17	21.5	0.8	26.9
森林		0.18	22.2	25.3	0.9
牧畜		1.61	199.3	25.3	7.9
二酸化炭素吸収 (埋蔵能力)	埋蔵能力と二酸化炭素排出量の差 で吸収するのには必要面積	0.57	70.4	25.3	2.8
化石燃料埋蔵	石油・天然ガス・石炭など	0.01	4.3	4.3	1.0
鉱産物	上記の総和	2.00	345.8	-	9.2
埋蔵能力埋蔵	農業資源再生	1.90	234.5	-	6.2
合計		4.70	580.3	37.8	15.4

表2 草地、林地、耕地及び泥炭地での炭素収支

正の数値は炭素吸収、負の数値は炭素放出

(単位:1平方メートルの炭素量/年、単位Tm)

国名	草地	林地	耕地	泥炭地	総計
オーストリア	25.5	89.9	-10.9	0.1	99.3
デンマーク	2.6	11.6	-39.9	-6	-31.8
フランス	12	25.9	-19.1	-0.7	18.2
ドイツ	13.6	64.5	-28.3	-6.4	43.3
イタリア	12.7	31.7	-19.5	-2.8	22.1
オランダ	18.4	21.6	-25.4	-47.1	-32.5
スイス	40.1	29.5	-10.5	-0.3	58.8
イギリス	24.2	10.6	-13.7	-27.5	-6.3

The carbon budget of terrestrial ecosystem at country-scale
European case study (Biogeosciences, 2, 15-26, 2005, L.A.
Jasson et al.)

2. 肥料（窒素とリン酸）資源としての汚泥

植物を栽培するには肥料の施用が必要である。農業栽培においては一般に窒素とリン酸とカリウムを施用する必要があるが、最も問題となるのが窒素肥料である。ハーバー・ボッシュ法などにより化学的に窒素ガスからアンモニア態窒素に固定される量は理科年表2007年版によると1億トンを超えている（図2）（文献4）。

一方、地表面や水面にある各種の窒素が窒素ガスになる、いわゆる、自然の脱窒量もほぼ1億トンであるが、自然に窒素ガスがアンモニアなどに微生物などによって固定される量も1億トン程度である。これらの結果として、地球表面には工業的に固定される窒素化合物が年々1億トン（窒素換算）以上積み残されていく。「地球は窒素まみれ」なのである。このことは、富栄養化による酸欠の水域を拡大し水棲生物の環境を大きく変えている。食料生産を維持し、かつ、水域の富栄養化を防止する解決策は窒素リサイクルの促進、すなわち汚泥など再生有機質資源の利用拡大に頼るしかない。

我が国の有機性廃棄物に含有される窒素は化学肥料で消費される窒素の2倍となる。汚泥の発生量を250万トンとすると、含有される窒素量は10万トン程度となり、窒素肥料消費量50万トンの20%程度を汚泥施用でまかなえることとなる。さらに、各家庭などでのデイスパーザーの普及が広がると食品残渣由来の窒素も利用されることになり、割合は高まる。

エネルギーの面から化学肥料合成を見ると以下のようなになる。窒素肥料の合成には石油資源が必要となる。農業上、ハーバー・ボッシュ法で固定された窒素肥料1kgを散布するとエネルギー的には平均1.5キログラムの原油を散布するのと同じこととなる（文献5）。わが国などで広く利用されている尿素態窒素を利用すると窒素1kgが石油換算2kg程度となる。

硝酸アンモニウムになるとより多くのエネルギーが必要である。もちろん、汚泥を肥料として利用する場合にもエネルギー資源消費の軽減も考慮する必要はある。

次に、リン酸（図2）であるが、生産国が限られていて、生産国による輸出制限が我が国には大きな問題である。しかし、食料・飼料の形でリンを多量に輸入しているので、廃棄物中に含有されるリンの量を計算すると輸入リン酸肥料とほぼ同じ量のリンが含まれている。特に汚泥にはリンが多く、我が国の肥料輸入量の15%が含有されている。

1節、2節に述べたことから次のようにまとめられる。

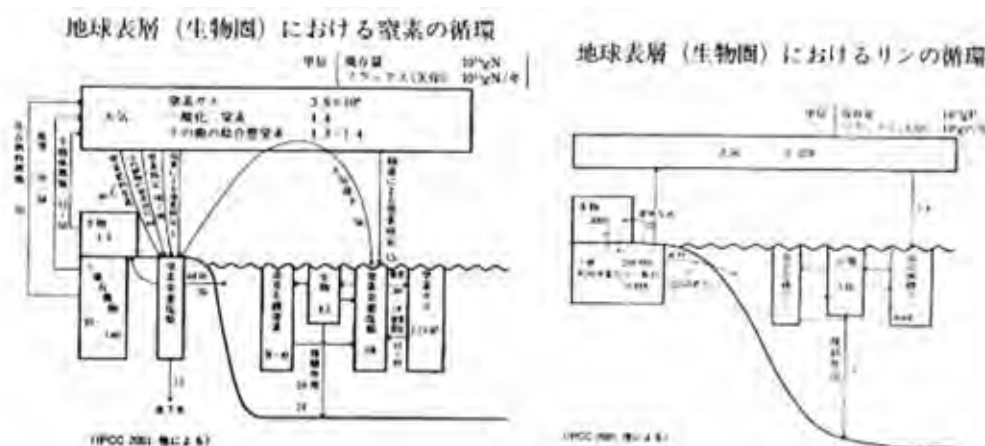


図2 地球上における窒素とリンの循環



図3 肥料散布は石油散布である

炭素の循環から見て、エコロジカル・フットプリントが生物容量を大きく超え、農地も二酸化炭素発生源となっていることを考えると、互いに矛盾し合う二つの問題、即ち、需要量の増大する食料増産によるエネルギー資源消費増と二酸化炭素削減の矛盾を解決する重要なキーは汚泥などの有機物を農地に施用して化学肥料の施用を減少することである。

3. 汚泥の堆肥化

汚泥は微生物による分解や水分の蒸散などによって成分が変動するので、肥料として成分保証することが困難である。そこで汚泥堆肥化が求められる。堆肥化とは有機物を一定の高さ（1.5～2メートル程度）に堆積し、ある程度の通気条件下で分解することによって製造される。写真は山形市での堆肥化の状況である。このようにある高さに堆積することによって、有機物の分解で生成する熱が堆積物中に閉じ込められ高温（60℃以上）となり、高温を数日程度維持した後、次



第に温度が低下し、20日程度して腐熟堆肥は製造される。通気条件を保つには水分含量を40-50%程度にし、強制的に空気を送るか、さもなければ、切り返しと言って堆積物を攪拌することによって通気条件を確保する。分解によって高温になると有害微生物の殺菌や混入する雑草種子の発芽能力の抑制も可能となる。高温経過後20日程度、時折切り返しをして堆積しておくことによって安定化が図られる。

堆肥化しないで汚泥を高温で乾燥すると、Co60放射線照射処理（IAEA）しても、成分の安定化や有害微生物の抑制も可能となるが、畑に施用して水分条件や温度が適温になると未分解の有機物が急激に分解し、アンモニア臭が発生し、植物にも有害となる恐れがある。

このように汚泥の堆肥化は有機物や肥料成分を安定化する効果がある（表3）。また、利用する農家にとっても堆肥という名称はなじみがあり、受け容れられやすい。

堆肥化の過程で問題となる指標の一つが炭素と窒素の比（C/N比）である。藁、落ち葉、廃材（おがくず）などの植物性の堆肥化資材は窒素含量が低いので、C/N比は30～50程度であるが汚泥や家畜ふんなど、微生物や動物性資材は窒素含量が多いのでC/N比は

表3 コンポストの長期貯蔵に伴う性状変化

	製造直後	15ヵ月経過後
pH	7.9~8.9	7.8
水分 (%)	30~43	39
有機分 (%)	26~35	29
窒素分 (%)	1.9~3.3	1.8
BOD (mg/g)	9~25	8
T-C (%)	16~22	15
C/N比	7~10	9
EC (Ms/cm)	1.8~3.2	3.1

10 以下である。堆肥化するとこの比はおおよそ 20 前後に落ち着き、安定化した腐熟堆肥となる。

汚泥腐熟堆肥の肥料効果は一般の有機質肥料と同様で緩効性である。効果は堆肥が微生物によって分解されることによって現れるので、低温では肥効は遅くなる。地温が高まり植物の成長が盛んになると肥効が早くなる。その意味で植物の成長と同調しており有効である。ただし、気温と土壌温度には時間差があるので、植物の成長と肥料効果がずれることもある（特に施設栽培）。堆肥の効果はむしろ長期連用することによって大きなものとなる。図4には筆者らが汚泥堆肥を長期連用した田無農場の土壌の微生物活性や種類を示す。いずれも汚泥堆肥の連用によって微生物活性が改良されている。土壌の物理性も改良され膨軟な土となり水持ちもよくなる。

150 年前から化学肥料と堆肥の効果を比較しているイギリスのローザムステッドの試験場での研究結果では両者を混合施肥した時の収量が最も高い。

さて、廃棄物からの堆肥生産は周年だが、需要期は限定されるため貯蔵場所の確保が必要となるなど、堆肥流通の課題は多い。

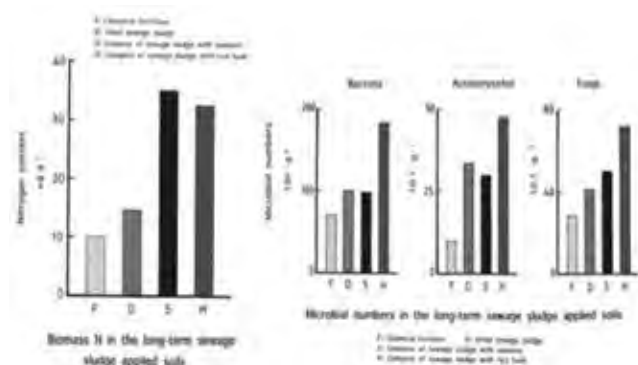


図4 汚泥施用に微生物量と数

我が国で汚泥堆肥化が順調になされているところの事例を見ると堆肥製造から流通までを外部委託しているところが多いようである。購買者である農業者あるいは農業者団体とも結びついている必要があるものと考えられる。堆肥製造から流通までを担う専門業者が多くなり発展することが必要である。その為の公的支援が願わしいと考える。

4. 汚泥施用に伴う重金属特に亜鉛の問題

汚泥の農地施用に対して大きなブレーキとなっているのが、昭和 59 年 11 月 8 日に環境庁（当時）から通達された規制「農用地における土壌中の重金属等の蓄積防止に係る管理基準」である。これは汚泥施用土壌における亜鉛濃度を 120mg/kg 以下に規制する管理基準である（文献 6）。既述のように、下水汚泥の農地利用には地球環境、土壌保全という点から多くのメリットがある。このような利点に比較して、土壌中亜鉛（Zn）濃度 120mg/kg の管理基準は厳守しなければ何らかの危害が及ぶような基準かというところではない（87 回衆議院農林水産委員会 -14 号 昭和 54 年 5 月 23 日）。岡本氏の研究でも神奈川県内の全土壌の亜鉛濃度の平均は 119 mg/kg となっているが（文献 7）、神奈川県の農作物は亜鉛の障害を受けていない。この基準を守るために汚泥利用を控えるというのは地球環境の保全、資源の保全という観点から取るべき道ではない。

世界では人間の排せつ物をそのまま処理せずに農地に灌漑水としてまた肥料として利用する農家が 2 億人いて、その面積は 2000 万ヘクタールに及ぶ（文献 8）。人間の生の排せつ物によるリスクより安価に食料を生産するメリットの方が重要であるということである。地球全体を考えると水と肥料の不足は人類生存に切実な問題を投げかけており、汚泥もそのような観点からメリットとデメリットを天秤にかけながら有効利用していく必要がある。

亜鉛の有害濃度に大きな影響を与えるのは土壌の pH（酸性度）と土壌の粘土含量及び有機物含量である。pH は高い方が、また、粘土および有機物含量も多い方が有害になりにくい。粘土や有機物をほとんど含有しない土壌では亜鉛の害は現れやすい。汚泥施用をするときには pH は 6 以上にするという条件を付しているところが多いが、欧米の亜鉛の許容基準は 150 ~ 1000mg/kg の範囲である。150mg/kg という厳しい基準はカナダのアルバータ州での砂質土壌においてのみである。英国では 560mg/kg、アメリカ合衆国環境省の勧告では 250 ~ 1000mg/kg、西ドイツ（当時）では 300mg/kg、カナダのオンタリオ州では 330mg/kg

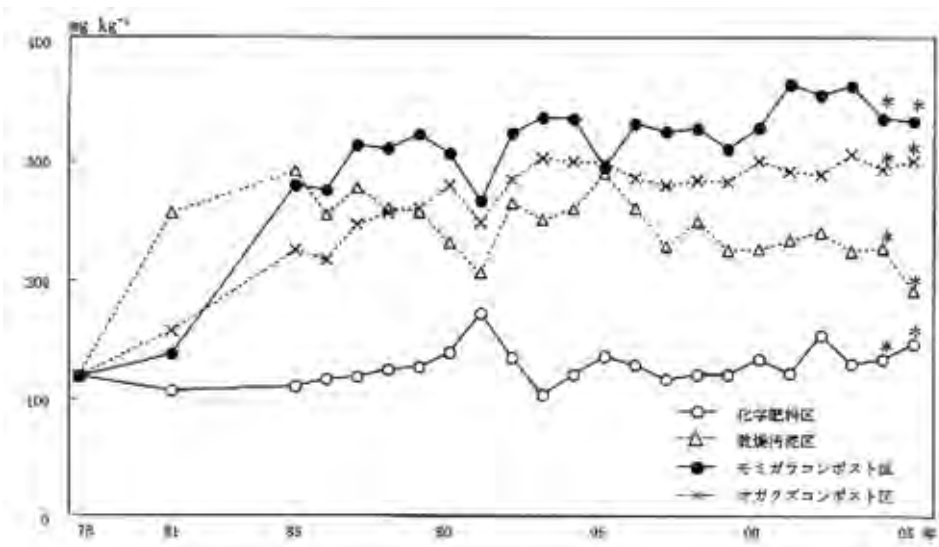


図5 試験区別表層土（0～10cm）中亜鉛含有量の経年変化（冬作前採取土壌）

kg、ニュージーランドでは 300mg/kg となっていて、いずれも許容濃度は 120mg/kg より高い。

岡本氏の研究では神奈川県農地の亜鉛濃度は樹園地では 171ppm となっている。富士火山灰系の火山灰土壌は亜鉛が高濃度になるという。

筆者が長年、下水汚泥堆肥を連用した東京都の東大田無農場の土壌は富士火山灰系であり汚泥施用をしない対照区でも亜鉛を 100ppm 含有しており、汚泥を施用するにつれ 300ppm にも上昇したが植物に障害が現れることはなかった（文献 9）。

ところで、亜鉛は人間を含めた哺乳類動物の必須養分であり、人は亜鉛を食物から摂取する必要がある。

乳児用のミルクには 0.8～1.7mg/L も亜鉛が含まれている必要がある（表 4、文献 10）。人への亜鉛栄養の供給を食品から摂取することを原則（表 5、文献 11）とすると、有機性肥料（堆肥）の供給が望まれる。汚泥の農地利用はその面からも評価されるべき手段である。ただし、植物中の亜鉛濃度を上げようとしても簡単ではない。筆者らが行った実験でも汚泥施用によって土壌の亜鉛濃度は上昇したが、生育する植物の亜鉛濃度は上昇しない（表 6）。土壌 pH の調整が必要であろうが、この面からの研究は海外では多くなされているようであるが我が国でもなされることが望まれる。

表 4 母乳・育児用粉ミルク中亜鉛、銅濃度

授乳時期	亜鉛(μg/dl±SD)	銅(μg/dl±SD)
2日	1,410±507	58.7±28.0
3日	768±404	39.6±17.2
4～5日	784±260	48.4±11.4
6日	532±139	65.4±11.4
7日	426±62	64.7±10.5
1ヵ月	217±59	38.9±9.0
2ヵ月	164±49	25.2±9.9
3ヵ月	118±47	31.8±7.5
4～5ヵ月	80±27	18.8±3.6
6～7ヵ月	86±44	16.1±3.4
市販育児用粉ミルク	78～170	3.12～20.4

〔多田 裕・他：周産期医学10, 613(1987)〕

表 5 重金属は豚や牛だけでなく人にも必要

Table 3. Daily intakes estimated in the present study for Japanese			
Element	Unit per person	Present study	Published data*
Na	g	2.3	3.5-7.2
K	g	2.3	1.4-5.2
Ca	g	0.53	0.54-0.72
Mg	g	0.27	0.50-0.90
P	g	1.1	0.9-1.2
Fe	mg	9.3	7-17
Zn	mg	6.3	6-20
Mn	mg	2.5	2.3-4.7
Cu	mg	2.1	1.0-2.8
Co	mg	1.6	1.5-3.6
Ba	mg	0.54	0.34-0.47
Cr	mg	0.29	0.03-0.9
Ni	mg	0.17	0.19-0.39
Li	μg	60	13.0-33.1
Cl	μg	22	31-66
Al	μg	9.1	10
Cd	μg	9.0	3.00
Hg	μg	20	71
U	μg	14	9.0-14
Th	μg	2.7	1.1-2.7
Pa	μg	0.00	<0.00
Ra	μg	0.00	<0.00
U-235	μg	15.17	15.17

* Literature values (g/100g)
〔重金屬と食物、西沢久仁雄、Biomed Res Trace Elements 15, 225-234, 2004〕

表 6 2000 年のオオムギの地上部乾物量、亜鉛および銅の含有量と吸収量

後藤・山岸・米山・茅野：下水汚泥コンポスト長期連用圃場における下水汚泥由来亜鉛および銅の土壌-作物系での分配

	乾物重(kg m ⁻²)		含有量(mg kg ⁻¹)				吸収量(mg m ⁻²)					
			亜鉛		銅		亜鉛		銅		総量	
	茎葉	穂	茎葉	穂	茎葉	穂	茎葉	穂	茎葉	穂	亜鉛	銅
モミガラ												
コンポスト区	0.56	0.78	19.1	31.6	2.7	5.6	10.7	24.6	1.5	4.4	35.3	5.9
オガクズ												
コンポスト区	0.19	0.24	16.3	27.4	2.6	5.0	3.1	6.6	0.5	1.2	9.7	1.7
乾燥汚泥区	0.78	0.57	44.8	51.3	4.6	6.5	34.9	29.2	3.6	3.7	64.1	7.3
化学肥料区	0.82	0.66	19.2	36.1	3.8	5.6	15.7	23.8	3.1	3.7	39.5	6.8

5. 将来展望

以上に述べたように、汚泥農地利用には地球温暖化防止、エネルギー資源保全、肥料資源保全という大きなメリットがある。現実には、衛生面での危険を冒しながらも人間の排泄物を生のまま農業生産に利用している人たちが2億人を超えるということを考えても、汚泥の持つ肥料資源価値は高い。これを衛生的に利用するために堆肥化し、流通することは今後の肥料資源の枯渇や水資源の富栄養化を防ぐ点でも意義がある。世界の食料を輸入し、それに伴い他国の水資源も奪っている日本としてはあらゆる有機資源を有効に利用していくことが人類福祉のために必要なことと考える。農地の重金属濃度を高めるというデメリットを適度に制御しながら、汚泥資源の有効利用を図っていくべきである。

文献

- 1) <https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h19/html/hj07010202.html>
- 2) 『生きている地球レポート2006』(Google 検索)
- 3) L.a. Jassen et al.: The carbon budget of terrestrial ecosystem at country-scale Europeancase study. Biogeoscience, 2, 15-26, 2005
- 4) 理科年表2007年版 972頁 丸善 平成18年11月出版
- 5) FAO CORPORATEDOCUMENT REPOSITORY, Environment and Natural Resources Working Paper, Chapter 2 Energy for Agriculture. <http://www.fao.org/docrep/003/x8054e/x8054e05.html>
- 6) 87回衆議院農林水産委員会-14号 昭和54年5月23日
環水土149号、<http://www.env.go.jp/hourei/syousai.php?id=0600049>
- 7) 岡本 保：再生と利用28巻、109号43～49、2005年
- 8) Yasha Eichenseher: National Geographic News August 21 2008
- 9) 後藤、茅野：下水汚泥の緑農地利用、用水と排水35巻10号、900-907、1993
- 10) 多田 裕 他：周産期医学、10、613頁 (1980)
- 11) 白石 久仁雄：微量元素と植物、Biomed. Res. Trace Elements, 15, 225 - 234 (2004)

特集：第 28 回下水汚泥の有効利用に関するセミナー特集（新潟市）

解 説

新潟市における
下水汚泥有効利用の取組み

新潟市下水道部下水道管理センター施設管理課

課長補佐 山本 茂浩

キーワード：下水汚泥利用、省エネルギー、消化ガス発電、混合消化、刈り草

1. はじめに

新潟市は、古くから「みなとまち」「米どころ」として栄え、江戸時代から物流拠点「新潟湊」として賑わいを見せていた「新潟町」は、安政 5 年にアメリカ・イギリスなど 5 カ国との修好通商条約によって、函館・横浜・神戸・長崎とともに開港 5 港の一つに指定されました。また、近年では、高速道路網や上越新幹線の整備により首都圏と直結しているなど、陸上交通網が充実しているほか、国際空港、国際港湾を擁し、国内

主要都市と世界を結ぶ日本海側の拠点都市として高次の都市機能を備えています。

明治 22 年の市政施行以来、戦争・大火・地震などにみまわれながらも、そのたび復興を成し遂げ発展し、平成 8 年に中核市に指定され、平成 17 年には 13 市町村との合併により、人口約 81 万人の本州日本海側最大規模の都市となり、平成 19 年 4 月には、本州日本海側初の政令指定都市となりました。

本市は、本州日本海側のほぼ中央に位置し、市域面積 726.45km²、東西 42.5km、南北 37.9km に広がり、地形はおおむね平坦で、日本を代表する大河の信濃川、阿賀野川が流れ、福島潟、鳥屋野潟、ラムサール条約登録湿地の佐潟など多くの水辺空間と里山などの自然に恵まれた環境にあり、農地が市域の約 48% で田園が市街地を包み込むように広がっています。

2. 新潟市の下水道

新潟市は、昭和 27 年下水道事業に着手し、昭和 39 年に船見下水処理場において下水処理を開始しましたが同年の新潟地震で被災し、昭和 42 年に下水処理を再開しました。その後、新潟市の 3 処理場と新潟県の 4 処理場が順次供用開始し、現在に至っております。

新潟市の下水道普及率は、昭和 42 年の船見下水処理場供用開始後から昭和 46 年頃まで徐々に向上しましたが、昭和 55 年の中部下水処理場・新潟浄化セン



図－1 新潟市の位置図及び都市構造総括図



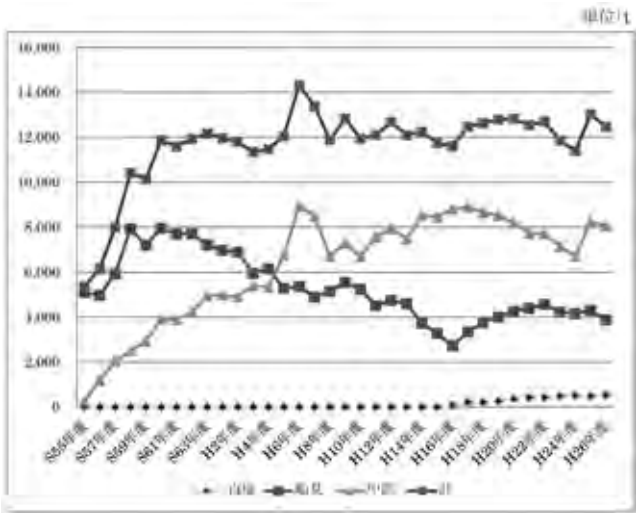
図－2 新潟市の下水道区域概略図

ター供用開始までの停滞期間がありましたが、その後は毎年1%以上向上しており、特に平成5年度から平成15年度までは普及率3%以上の急激な伸びを示し平成6年度には50%を超え、平成15年度に70%を越えて以降も堅調に伸び、現在は83.4%(平成26年度末)となって全国平均を上回ることができました。また、農業集落排水事業や合併浄化槽なども含めた污水处理人口普及率は86.0%となっております。

このほか、都市浸水対策達成率は57.2%、合流式下水道改善率は58.0%であり速やかな対策が必要となっているとともに、耐用年数を大幅に超えた老朽化設備も年々多くなり長寿命化対策や更新が必要な設備も増加しており、さらに建物などの耐震対策や老朽化対策も必要となっております。

3. 下水污泥の推移

新潟市は、下水道事業本来の目的である公衆衛生面から生活環境の改善や公共用水域の保全のため下水道

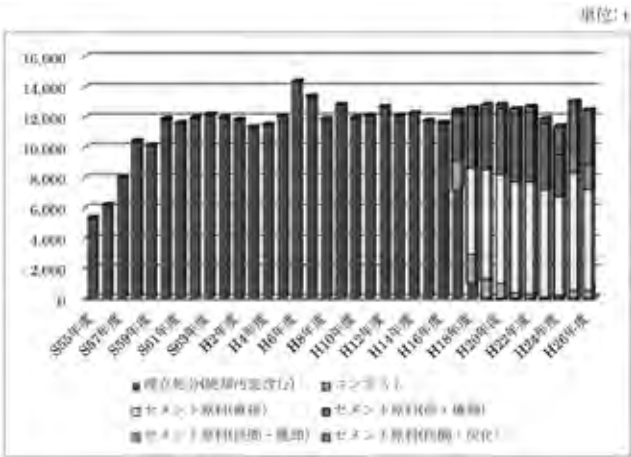


図－3 脱水污泥量の推移

表－1 新潟市の下水道全体計画概要

	処理区	計画面積 (ha)	計画人口 (千人)	処理場名	供用 開始	備 考
単 独	船 見	466	33.0	船見下水処理場	S42.4	合流
	中 部	4,600	235.3	中部下水処理場	S55.7	合流、一部分流
	白 根	1,088	35.9	白根中央浄化C	H16.3	分流
流 域 間 連	東 部	5,314	185.6	東部浄化C	S55.10	分流、一部分流
	新 津	2,203	69.8	新津浄化C	S58.4	分流
	北 部	2,925	67.2	新井郷川浄化C	H10.3	分流
	西 部	4,163	116.2	西部浄化C	H14.9	分流
計	計	20,759	743.0			
特 定	船 見	(57)	(2.3)	船見浄化C	H3.2	分流

※処理場名のCは、センター



図－4 下水污泥の最終処分・利用形態(脱水污泥量ベース)

の普及促進を急速に図って参りましたが、下水道普及率上昇とともに脱水污泥の発生量も増加しており、平成8年度に含水率の高かった脱水污泥の減量化ため污泥焼却施設を建設しました。

その後、持続可能な循環型社会や環境保全型社会の構築など時代の変化とともに下水污泥の埋立処分が難しくなってきたことから、平成17年度から平成19年度にかけて従来の埋立処分からセメント原料やコンポスト化などの下水污泥の有効利用へ転換を図りました。

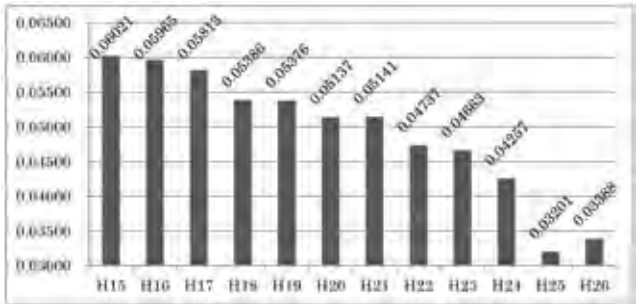
平成24年度の消化ガス発電稼働とともに、それまで稼働していた污泥焼却施設を全面停止し、脱水污泥の処理と利用を全て民間委託しております。今後は、污泥利用の最終形態がセメント原料に偏っているためリスク分散の観点から他の利用が可能な民間事業者を模索したいと考えています。

4. 消化ガス利用

下水道施設は、環境保全のための施設である一方で、多くのエネルギーを消費し温室効果ガスの発生量も大きいといわれており、多くの自治体で下水道施設の省

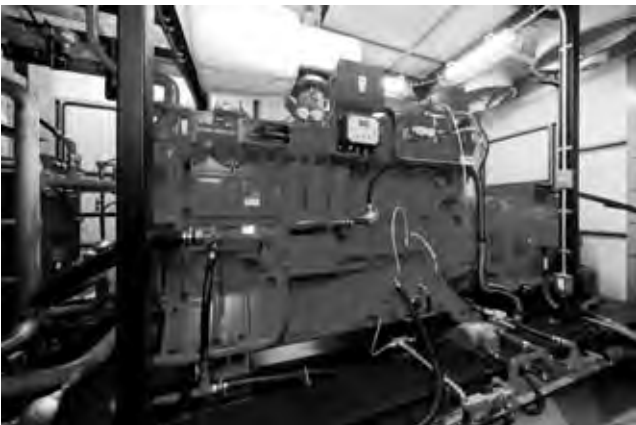
エネルギー化を進めています。

本市でも、平成 15 年頃より地球温暖化対策の視点から処理場の省エネルギー化を推進（図－ 5）してきており、平成 20 年代に入って汚泥焼却施設の温室効果ガス排出量抑制対策が求められてきたことから、平成 25 年に再生可能エネルギーを創出する消化ガス発電への転換を図りました。



※下水処理場のエネルギー原単位=エネルギー原油換算量 (kl) / 高級処理水量 (千m³)

図－ 5 中部下水処理場エネルギー原単位の推移



図－ 6 消化ガス発電（ガスエンジン＋発電機）

表－ 2 消化ガス発電設備概要

項目	概要
原動機	ガスエンジン・水冷4サイクル電気式
発電機	三相交流同期発電機
出力・電圧	280kw・6600V
発電効率	約33%
総合効率	約7.5%
台数	2台
消化ガス必要量	6,300Nm³/日
附帯設備	シロキサン除去装置・燃焼回数はニット・ラジエータなど
建設費	約10億円

表－ 3 消化ガス発電実績

項目	H25年度	H26年度
総電力使用量	11,434,439 kwh	11,413,118 kwh
発電量	4,123,970 kwh	3,978,970 kwh
電気料節約減額(基本料金分含む)	約4,470万円	約5,306万円
温室効果ガス削減量	-2,472t-CO2	-2,358t-CO2
稼働率	84.07%	81.11%

本市の中部下水処理場に消化ガス発電設備を導入することで、県内の下水処理場では初の本格稼働施設であり、県内最大のバイオマス発電施設となりました。本施設の当初計画では、440 万 kwh を発電し処理場の約 40%を賄う予定としており、年間約 5,000 万円（基本料金削減額含む）の電気料金と年間約 2,400t-CO2 の温室効果ガスの削減を見込んでいました。

しかしながら、平成 25 年度実績で 412 万 kwh、平成 26 年度実績で 399 万 kwh の発電量と計画発電量より少なくなっており、この要因としては、初期故障などの他に定期点検の頻度・停止期間の多さなど当初想定しなかったこととして挙げられますが、以前より認識していた点として、春から晩秋にかけての消化ガスの発生量の減少が分かっており発生量の少ない月が多い月の 6 割余りとなっているため発電量の低下に大きな影響を与えています。

今後、定期点検の頻度や点検期間については、メーカーなどと協議のうえ効率的・効果的な点検を行って必要最小限にするなどの見直しが必要と考えております。

5. 消化ガス増量

消化ガス発電の稼働率低下を招いている一因である春から晩秋にかけての消化ガスの発生量の減少については、気温の高い期間には消化槽に投入される以前に消化しやすい汚泥がガス化しているのでないかと思われる。このため、この期間より約 1 ヶ月前からガス化が容易なバイオマスを消化槽で混合消化することで、消化ガスを必要量確保することが可能となるのではないかと考えました。

このことから、稲わらと下水汚泥の混合消化で実績のあった長岡技術科学大学の姫野准教授にお願いし、刈り草を用いた混合消化の実証実験を平成 24・25 年度の約 2 年間わたり新潟市と大学との共同研究で実施しました。

混合消化の実験で刈り草を選定した理由としては、稲わらの実験結果から消化ガスの発生倍率がある程度は見込まれ、消化ガス量が低下する時期に刈り草が多く発生することや、処理場内への持込みに対し周辺住

表－ 4 混合消化実証実験の概要

項目	系 1 (対照系)	系 2 (対照系 1)	系 3 (対照系 2)
実験用消化槽	各 500 円		
投入汚泥割合	初比濃縮：糸巻濃縮＝3：2		
消化温度	35℃		
投入・引抜汚泥量	25kg/日		
消化日数	20日間		
混合バイオマス		刈り草	コーヒール
混合率(対汚泥量)		5%,10%,0.5%,1%,2%	0.1%,1%

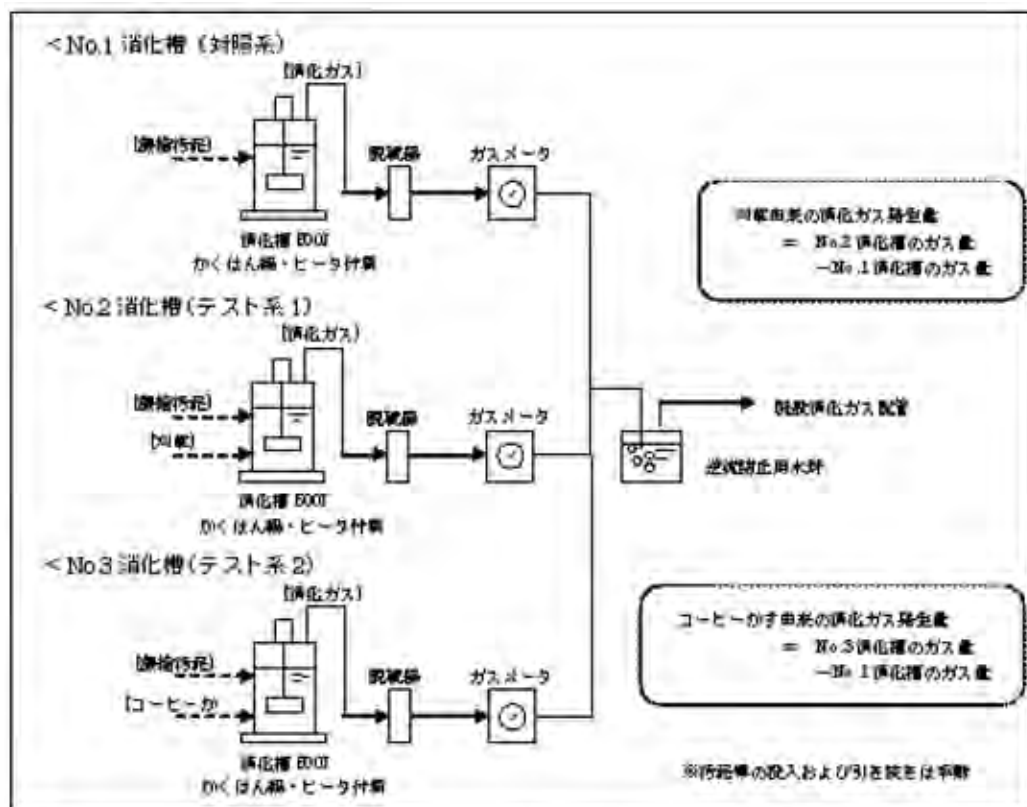
民の抵抗感が少なく、未利用もしくは低度利用で必要量の確保が容易なバイオマスであると思われたことから選定しました。

この他に将来、1年を通して利用できるバイオマスとして黒部市で実績のあるコーヒー粕を用いた実験も2年目に実施しました。

混合消化の実験方法は、表－4及び図－7に示す通り500リットルの実験用消化槽に当処理場の発生汚

泥量と同じ割合で、消化日数20日間となるよう汚泥の投入・引拔を繰り返し、混合バイオマスの混合率を変化することで発生ガス量・性状や消化汚泥量・性状がどのように変化するかの実験を行いました。

実験の結果は、表－5の通りとなったが刈り草の混合率が低いほど発生倍率が高くなる傾向があり、刈り草の投入量が1%以下であれば消化ガスの発生倍率が100倍程度となることが分かりました。



図－7 混合消化実験方法の概略

表－5 混合消化実験結果

項目	基質	5.0% (草)	10% (草)	0.5% (草)	1.0% (草)	2.0% (草)	1.0% (コーヒー)
TS[%]	重力濃縮	2.73	3.16	2.69	3.00	2.30	2.39
	機械濃縮	3.50	3.46	3.25	3.82	4.06	4.26
	ペレット	18.0	19.34	33.76	34.43	16.84	40.45
VS/TS[%]	重力濃縮	67.12	66.42	66.48	68.30	71.94	74.57
	機械濃縮	65.58	67.46	66.23	68.29	68.03	68.51
	ペレット	83.84	81.25	46.48	54.95	90.2	97.38
TS分解率[%]	単独消化	26.6	32.5	24.9	32.4	30.1	40.4
	混合消化	24.5	27.6	18.2	46.1	17.9	84.9
VS分解率[%]	単独消化	41.2	44.8	38.4	45.2	44.2	52.9
	混合消化	26.7	32.4	44.8	46.6	26.0	76.5
消化ガス転化量 (m ³ /kg 投入 VS)	単独消化	0.306	0.293	0.363	0.349	0.465	0.394
	混合消化	0.478	0.304	0.677	0.682	0.216	0.437
消化ガス発生倍率 (L/kg)	単独消化	7.4	6.42	7.98	7.94	9.95	9.7
	混合消化	72	58.4	108.3	109.4	32.9	172
消化ガス量 (L/日)	単独消化	171.2	130.8	188.0	198.4	242.5	242.5
	混合消化	264.5	283.2	201.1	225.7	253.7	246.4
メタン濃度[%]	単独消化	62.19	60.80	62.70	62.18	59.14	58.10
	混合消化	60.70	58.67	62.04	61.39	58.13	57.47

実際の消化ガスの発生量は、その期間の気温や雨量による汚泥性状が大きく関係するため予測するのは難しく、長期間に及ぶ実験の必要性を感じました。

また、2年目に並行して実験したコーヒー粕の混合消化については、発生倍率が約170倍とその効果が大きいことが判明しました。

消化ガスのメタン濃度については、対照系（汚泥単独）と比較してテスト系（混合消化）が若干低下する傾向にありました。

この実験の他にに行った混合消化汚泥の脱水実験結果は、表－6の通り消化汚泥1m³当りの刈り草混合汚泥は微増、コーヒー粕混合汚泥は低下することが想定されます。しかし、ろ過速度を同じくすると刈り草やコーヒー粕の混合が脱水汚泥の含水率低下に寄与することが推測されます。

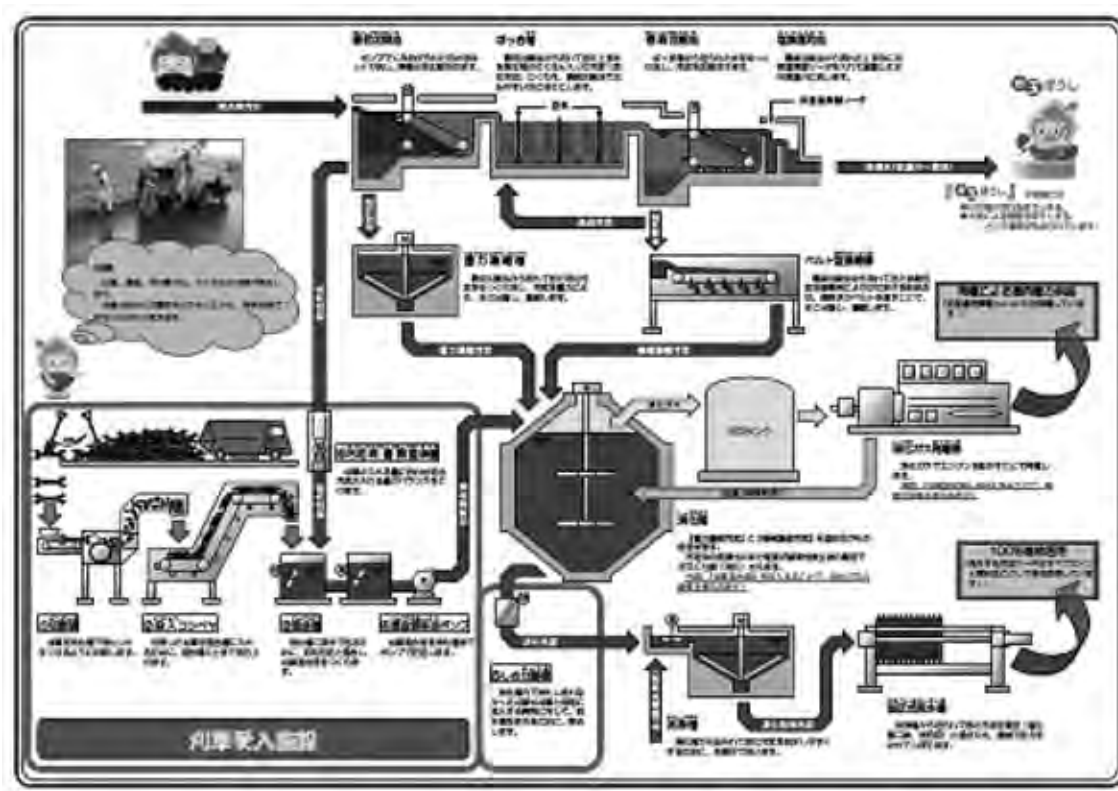
表－6 脱水汚泥量の推算結果

	対照系(単独消化)	刈り草 2.0%混合	リート堆肥 1.0%混合
消化内配1m ³ 当りの脱水汚泥重量	68.71(kg/m ³)	69.10(kg/m ³) (対照系比+0.57%)	65.38(kg/m ³) (対照系比-4.85%)

以上の結果から刈り草の混合消化は、消化ガスの増量に一定の効果があり、脱水汚泥量に対する影響は少ないことが解ったため、刈り草の混合消化を行うため

2t/日の刈り草受入れ施設を平成27年度に建設することを決定しました。

この刈り草受入れ施設は、図－8の赤線で囲まれた範囲で示す通り搬入した刈り草を細かく破碎したうえで初沈汚泥と混合し既存の消化槽に投入するための施設です。将来、この施設の混合槽のみを増設することで4.9t/日までの受入れが可能となる予定です。



図－8 混合消化全体フロー図

6. おわりに

本市では、これまで下水汚泥の処理や利用について様々な対応を行ってきましたが、脱水汚泥までの処理は高効率・低含水率化を基本に進めてきており、脱水汚泥については有効利用可能な民間事業者へ処理を委託する方向で進んできました。また、汚泥処理の過程で発生する消化ガスや他バイオマスと混合消化することで増加する消化ガスについては、消化ガス発電を中心にその有効利用を図って行きたいと考えております。このような取り組みによって、下水道が循環型社会や地球温暖化対策・エネルギー需給安定などに対し微力ながら貢献できるものと考えております。

このほか、本市では、既設下水道管渠を利用した下水熱利用についても積極的に進めており、①バス停周辺の融雪を目的としたヒートパイプ方式や②バスターミナル周辺の歩道融雪を行うための循環ポンプ方式と③常設花卉直売場の農業ハウス暖房用にヒートポンプ方式で下水熱利用を行っています。

このように時代とともに下水道が取り組むべき役割が変化もしくは新たに求められてきており、これまで進めてきた下水道事業の膨大なストックの維持・修繕や改築・改善など早急に取り組む必要のある事業も含め業務量は増加する一方ではありますが、今後も「下水汚泥の有効利用」に前向きに取り組むと考えております。

特集：第 28 回下水汚泥の有効利用に関するセミナー特集（新潟市）

解 説

下水汚泥有効利用の現状と
推進に向けた取組

国土交通省水管理・国土保全局下水道部

下水道企画課 課長補佐 太田 太一

キーワード：循環型社会、下水道資源、カーボンニュートラル、エネルギー利用、緑農地利用

1. はじめに

下水道は、生態系や自然の循環システムを健全に保つための重要な構成要素と位置付けることができる。今後とも、拡大する諸活動を支えつつ、それに伴う環境への負荷を極力抑制することが下水道に課せられた大きな使命である。一方、下水の排除、処理の過程で下水汚泥をはじめとして、スクリーンかす、土砂などが発生する。これら発生汚泥等を適正に処理することは、放流水の水質管理とともに、下水道の維持管理上最も大きな課題である。

平成 23 年度における全国の産業廃棄物排出量は約 3 億 8,121 万トンとなっている。そのうち約 20% の 7,479 万トンが下水汚泥であり（図 1）、その発生量は下水道の普及等に伴って今後さらに増加する見込みである（図 2）。これに対し、平成 24 年 3 月 31 日現在の産業廃棄物最終処分場の残余年数は全国で 14.9 年、首都圏で 5.3 年となっており、廃棄物の 3 R（Reduce, Reuse, Recycle）の推進が急務となっている。

また、循環型社会への転換、廃棄物処理の適正化が社会的な課題となる中で、循環型社会形成推進基本法や各種リサイクル関連法、循環型社会形成推進基本計画等が制定・改正されており、我が国における循環型社会構築に向けた取り組みが各方面で進められている。下水汚泥は多くの有機物を含んでいることから大

きな資源・エネルギーポテンシャルを有しており、下水道は、従来の下水を排除・処理する一過性のシステムから、集めた物質を資源・エネルギーとして活用・再生する循環型システムへと転換することが必要である。

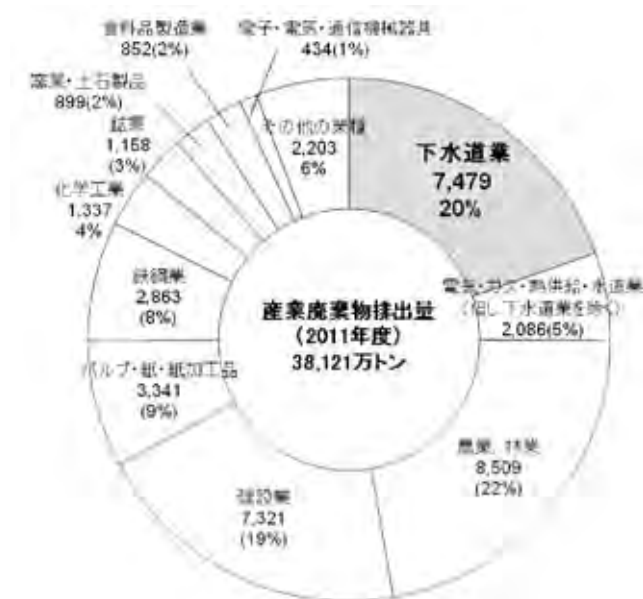


図 1 産業廃棄物排出量に占める下水汚泥の割合
(単位：万トン／年)

出典：環境省「産業廃棄物排出・処理状況等（平成 23 年度実績）」
(国土交通省にて一部加工)

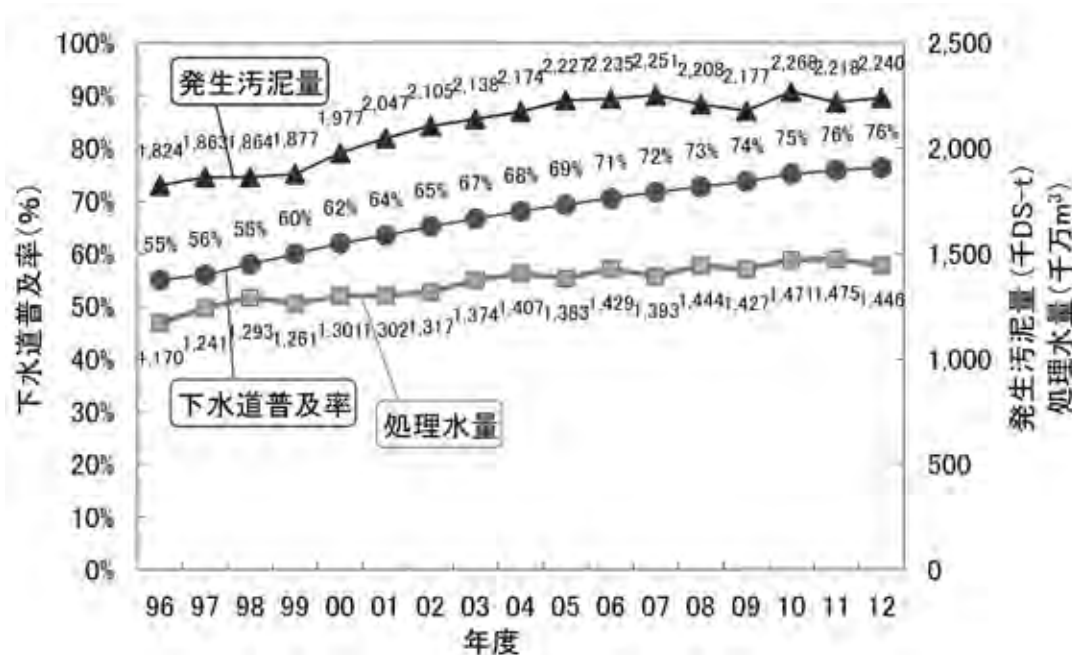


図2 下水道普及率と発生汚泥量、処理水量の推移

(下水道統計及び国土交通省調べ)

また、大量の資源・エネルギーの消費に伴う温室効果ガス排出量の増加により、地球温暖化の影響が顕在化してきている。平成27年7月には、我が国は国連気候変動枠組条約事務局に対して「日本の約束草案」を提出し、その中で、温室効果ガスの排出量を2030年度に2013年度比26.0%減の水準(約10億4,200万t-CO₂)にすることとされ、その対応は国際的な最重要課題となっている。下水道業における温室効果ガス排出量は、1990年から2012年の間に約45%増加しており、処理水量の伸び(同比約40%増加)を上回っている。

加えて、東日本大震災を契機とした東京電力福島第一原子力発電所事故によるエネルギー需給の逼迫への対応が急務である。下水道は我が国の年間消費電力量の約0.7%を占める電力の大口需要家であるとともに、下水道における使用電力費は下水道維持管理費において、全体の約9%を占め(図3)、今後、電力会社による電力料金の値上げによる下水道事業への影響に懸念もある。

こうした背景を踏まえ、平成26年4月10日に閣議決定された第4次「エネルギー基本計画」においては、「再生可能エネルギーについては、2013年から3年程度、導入を最大限加速していき、その後も積極的に推進していく。」とされている。

バイオマスである下水汚泥は、バイオガス化・固形燃料化等により再生可能エネルギーとして活用することが可能であり、温暖化対策やエネルギー構造の転換

等、社会的課題の解決に貢献できるポテンシャルを有している。

また、平成22年12月には「バイオマス活用推進基本計画」が閣議決定され、下水汚泥について、バイオガス化や固形燃料化等のエネルギー利用を推進することにより、2020年(平成32年)には約85%が利用されることを目指すとされている。平成27年9月には新たな「社会資本整備重点計画」(計画期間:2017～2020年度)が閣議決定され、下水汚泥中の有機物が



図3 下水道維持管理費の内訳

(下水道統計より国土交通省作成)

エネルギー利用された割合を示す、下水汚泥エネルギー化率（平成 25 年度：約 15%→2020 年度目標：約 30%）と、下水道における温室効果ガス排出削減量（平成 24 年度：約 168 万 t-CO₂/年→2020 年度目標：約 316 万 t-CO₂/年）が目標として掲げられている。

以上のように、循環型社会、低炭素社会の構築が求められる中、下水道事業ではバイオマスである下水汚泥という資源を大量に有しているため、下水道管理者は、率先して、地域の特性を踏まえ、下水汚泥をバイオガスや固形燃料として積極的に活用し、下水道を資

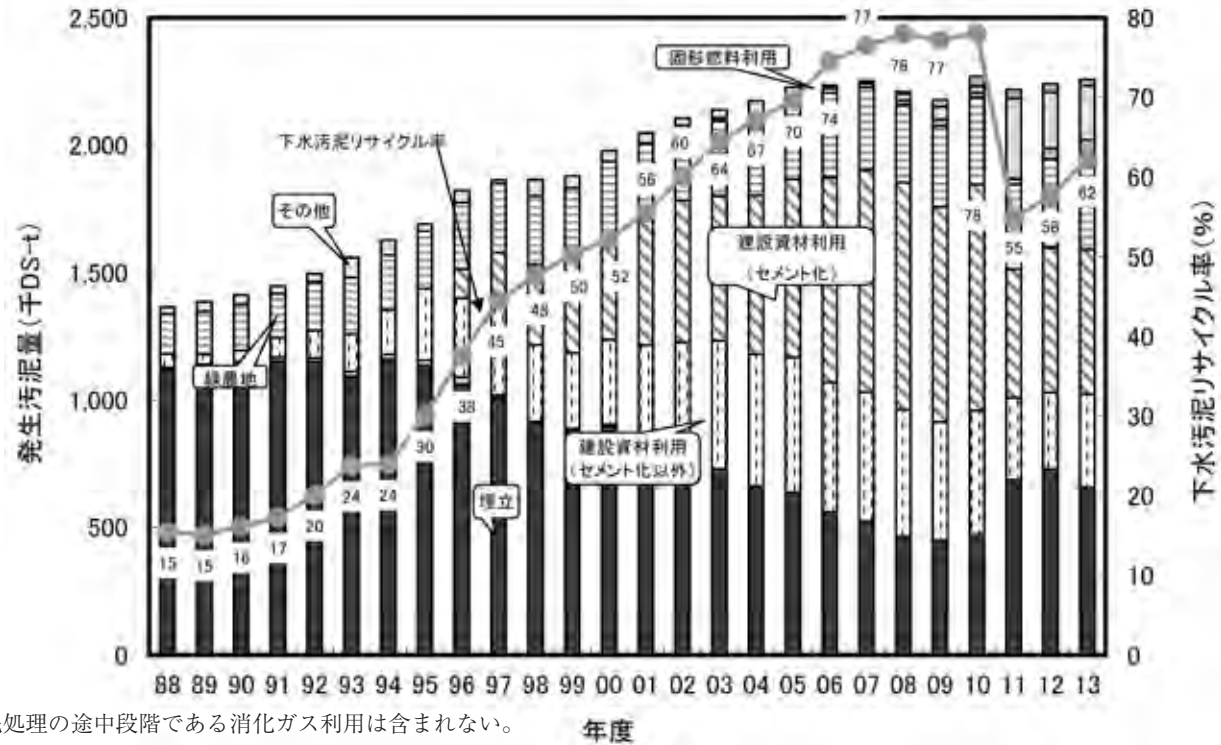
源・エネルギーの回収・再生・供給インフラとして整備することが求められている。

2. 下水汚泥の発生量と処理処分等の現状

平成 25 年度における下水汚泥の処理及び処分の状況を表 1、図 4 に示す。下水汚泥は年間約 226 万 DS-t（乾燥重量トン）が発生しており、そのうち約 62%（約 139 万 DS-t）が緑農地利用、建設資材利用、固形燃料利用等として有効利用されている。

表 1 下水汚泥の処理及び処分状況（発生固形物量ベース、平成 25 年度
（国土交通省調べ）

引き渡し先 処理後の 汚泥形態	最 終 安 定 化 処								合計	%
	埋立処分	緑農地利用	建設資材利用		固形燃料利用	その他の有効利 用	焼却スリマ	その他		
			セメント化	セメント化以外						
生汚泥	0	18	0	0	0	0	0	0	18	0.0%
濃縮内泥	3	3	0	4	0	0	0	0	10	0.0%
消化内泥	0	5	26	0	0	312	0	0	63	0.0%
脱水汚泥	19,363	19,529	94,562	7,106	1,389	9,952	3,183	2,583	153,607	6.8%
移動型脱水汚泥	0	439	0	0	0	0	0	0	439	0.0%
コシボネ土	0	272,724	0	187	0	56	0	10	272,977	12.1%
天日乾燥汚泥	107	190	0	0	0	0	0	0	297	0.0%
機械乾燥汚泥	2,040	30,786	11,308	53	10,220	3,892	906	4	59,248	2.6%
炭化汚泥	5,539	3,764	5,745	503	34,654	1,520	0	430	51,855	2.3%
焼却灰	624,203	53,039	453,823	207,547	347	10,690	235,028	39,983	1,325,560	67.6%
焼却スラグ	3,504	0	1,305	153,539	0	6,683	25,766	2,740	193,540	8.6%
合計	654,799	281,395	566,769	368,938	46,611	26,825	166,883	45,459	2,257,679	100.0%
%	29.0%	10.0%	25.1%	16.3%	2.1%	1.2%	7.4%	2.0%	100.0%	



※汚泥処理の途中段階である消化ガス利用は含まれない。

図 4 下水汚泥の最終処分・利用形態の経年変化（汚泥発生時乾燥重量ベース）
（国土交通省調べ）

下水汚泥の再生利用状況については、平成 23 年度以降東日本大震災の影響により下水汚泥が処理場内で保管等されたことから（表中では「その他」に含まれる。）、一時再生利用率が減少していたが、その後徐々に回復し平成 25 年度の再生利用率は 62%となっている。有効利用の内訳としては、セメント原料利用等の建設資材利用が最も多く、平成 25 年度では 41%が建設資材に利用されている。一方、下水汚泥固形燃料化等、下水汚泥のエネルギー化については依然として低い水準（平成 25 年度時点でエネルギー化率 15%）にとどまっており、より積極的な活用が求められている。

3. 下水汚泥の有効利用

東日本大震災の影響による一時的な再生利用の減少は見られたものの、セメント原料等としての建設資材利用やコンポスト等としての緑農地利用はこれまで着実に進展してきた。一方で、下水道バイオガス又は固形燃料としてのエネルギー利用は依然として低い水準にとどまっている。それぞれの状況を以下に概観する。

(1) 建設資材利用

下水汚泥の建設資材利用としては、セメント原料としての利用の割合が多くなってきており、平成 25 年度においては、乾燥重量ベースで約 41%が建設資材利用されており、うち 6 割がセメント原料としての利用となっている。建設資材としての利用形態は、大きく分けて次の 2 つがある。

- 1) 処理された下水汚泥（焼却灰や溶融スラグ）そのものを資材として利用するもの
（例：石灰系焼却灰の埋め戻し材、路盤材 等）
- 2) 焼却灰や溶融スラグを建設資材の原材料の一部又は全部として利用するもの
（例：高分子系焼却灰のブロック及び透水性レンガ原料としての利用 等）

最近では、焼却灰と掘削残土を用いて改良土を製造する技術が実用化されているほか、下水汚泥焼却灰だけで他の材料を添加することなく、レンガやタイル等の製品を作り出す技術も開発されている。

(2) 緑農地利用

下水汚泥には、多量の肥効成分や有機物が含まれており、適正な施用を行うことによって土壤改良材や肥料として十分な効果を有することが明らかになっており、平成 25 年度においては、乾燥重量ベースで約 17%が緑農地利用されている。

下水汚泥を緑農地に利用する場合の形態としては、コンポスト化汚泥に加え、脱水汚泥、乾燥汚泥、焼却

灰等が挙げられる。このうち、コンポスト化汚泥は、汚泥が質的に改善されており、取り扱いやすく、発酵処理の際に減菌・安定化する利点があるため、有効利用促進の観点からコンポスト化の意義は大きい。

なお、肥料の品質を保全するため肥料の規格等を定めている肥料取締法が平成 11 年 7 月に改正されたことにより、特殊肥料とされていた下水汚泥を原料とする肥料が普通肥料に位置付けられ、「下水汚泥肥料」等を生産又は輸入する場合には、農林水産大臣の登録を受けなければならないとされている。

また、最近では、全量を輸入に頼っているリンについて、その枯渇が懸念されていることや食料需要の増大及び産出国による輸出制限のため国際相場が乱高下しており、下水及び下水汚泥中に含まれるリンを回収し、肥料や肥料原料として活用する取組が注目されているところである。そのため、国土交通省では、平成 21 年度に「下水道におけるリン資源化検討会」（座長：津野洋 京都大学大学院教授）を設置し、検討を行い、平成 22 年 3 月にリン資源の現状と課題、リン資源化の視点、リン資源化の検討手順等を取りまとめた「下水道におけるリン資源化の手引き」を策定した。国土交通省では、今後とも、農林水産省など関係省庁をはじめとする多様な主体と連携しつつ、下水道におけるリン資源化が推進されるよう、取り組んでいく。

(3) 下水道バイオガス利用

下水道バイオガスには、下水汚泥の嫌気性消化過程において発生するメタンを主成分とするバイオガスと、下水汚泥をガス化炉により熱分解することで発生する一酸化炭素や水素を主成分とするバイオガスの 2 種類がある。ガス化炉は平成 22 年度に東京都において、世界で初めて導入されているが、全国では主に嫌気性消化によるバイオガス化が進められている。

平成 25 年度の消化槽からの下水道バイオガス発生量は約 3.3 億 m^3 であり、内訳をみると、約 73%（242 百万 m^3 ）が利活用されており、残り約 27%（89 百万 m^3 ）は焼却処分されている。また、下水道バイオガス発生量の約 26%割（86 百万 m^3 ）はガス発電に利活用されているが、約 28%（92 百万 m^3 ）は消化槽の加温用としての用途にとどまっており、今後、熱と電気を同時に発生させるコジェネレーション利用の普及が望まれる。

下水道バイオガスを用いた発電は、下水処理場の電力費の節約と資源有効利用の観点から進められている。平成 25 年度時点では、全国 55 箇所の処理場においてバイオガス発電が導入されており、総発電量は約 1.6 億 kWh/年に上り、全国のポンプ場及び下水処理場における年間消費電力量約 70 億 kWh（平成 25 年度）

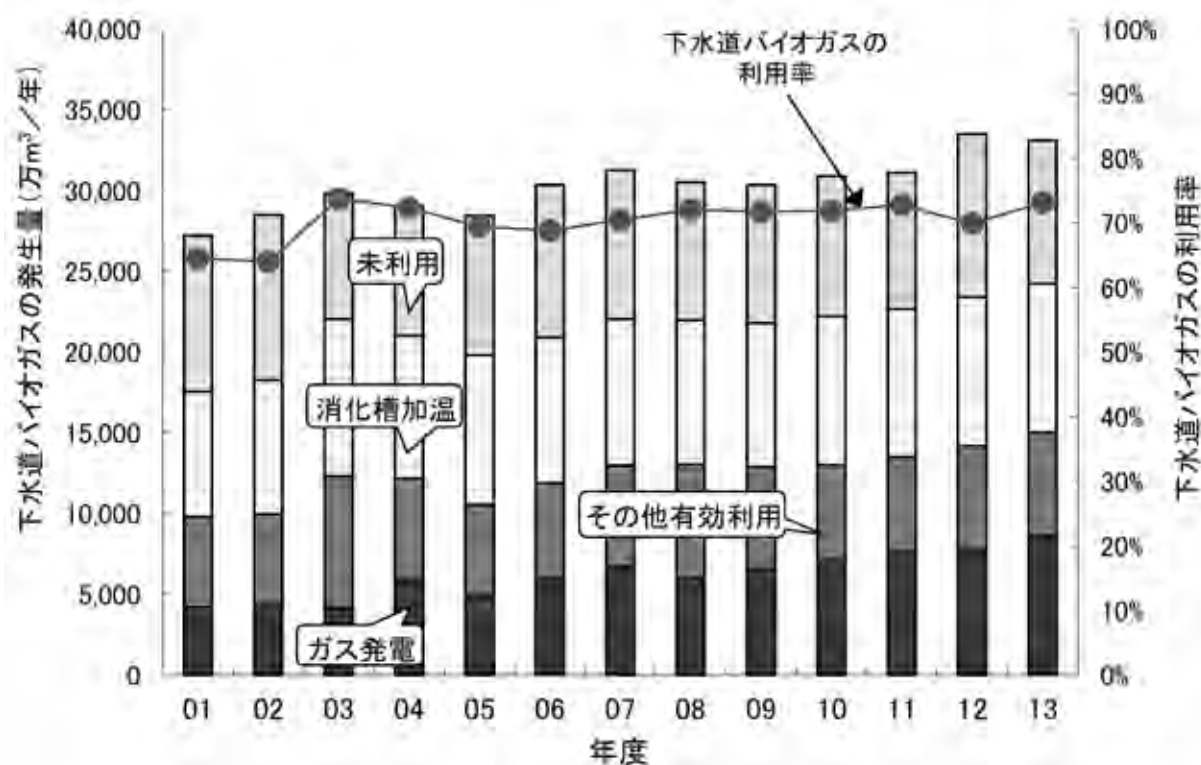


図5 下水道バイオガス利用の経年変化

（国土交通省調べ）

の約2%に相当する。

将来の二次エネルギーでは、電気、熱に加え、水素も重要な役割を担うことが期待される。水素は、取扱い時の安全性の確保が必要であるが、利便性やエネルギー効率が高く、また、利用段階で温室効果ガスの排出がなく、非常時対応にも効果を発揮することが期待されるなど、多くの優れた特徴を有している。このため、第4次「エネルギー基本計画」（平成26年4月閣議決定）においては、「水素社会の実現」が掲げられ、例えば、「2015年から商業販売が始まる燃料電池自動車の導入を推進するため、規制見直しや導入支援等の整備支援によって、四大都市圏を中心に2015年内に100ヶ所程度の水素ステーションの整備をするとともに、部素材の低コスト化に向けた技術開発を行う。」といった取組が示されている。

下水汚泥からの水素製造は、カーボンニュートラルな資源であるバイオマス由来の水素であるため化石燃料由来の改質水素よりも二酸化炭素排出量が少なく、また需要地に近接している場合には輸送コストも低減できるという特徴を有している。未利用の下水汚泥消化ガスを用いて水素を製造した場合、年間約1.3億m³の製造量（燃料電池自動車270万回充填に相当平成25年度末）のポテンシャルを有する。

（4）固形燃料化利用

下水汚泥の固形燃料化の手法として、現在、炭化、油温減圧乾燥及び造粒乾燥があり、火力発電所や製紙工場のボイラーの化石燃料代替として利用する取組が行われている。

炭化とは、脱水汚泥を乾燥した後、低酸素又は無酸素状態で蒸し焼きするもので、工程の温度に大きく依存するが、炭化汚泥は約14～21MJ/kg¹の発熱量（高位）を有しており（石炭は25.7MJ/kg²）、また、ほとんど臭いがしないという特徴を有している。炭化による固形燃料化施設については、現在、東京都や広島市、愛知県等で導入されているとともに、横浜市等で導入に向けた具体的な取組が進められている。

また、脱水汚泥を廃食用油等に投入し、減圧・加熱の条件下で水分を蒸発させる油温減圧乾燥汚泥は、約22MJ/kgの発熱量（低位）を有しており、福岡県御笠川浄化センターでは平成13年度より松浦火力発電所（電源開発（株））に供給を行っている。

平成24年度に固形燃料として利用された下水汚泥は約4.2万t-DSであり、全体の約2%にとどまっている。平成26年9月には、「下水汚泥固形燃料に係る日本工業規格（JIS Z7312）」が制定され、下水汚泥固形燃料の品質の安定化・信頼性の確立を通じた市場の活性化が図られている。現在、複数の自治体等で事業化

が検討されており、今後、固形燃料化の進展が期待される。

4. 重点施策

(1) 基本的な方針：水・資源・エネルギーの集約・自立・供給拠点化

平成 26 年 7 月にとりまとめられた「新下水道ビジョン」においては、長期ビジョンの 1 つの柱として、“水・資源・エネルギーの集約・自立・供給拠点化”が掲げられている。

この中では、現在、下水道の水処理技術は、公共用水域の水質改善に寄与する一方で、膨大なエネルギーを消費していることを踏まえ、今後は、有機物、栄養塩類を単なる除去対象物質でなく資源として捉え、革新的な技術・システム等を導入するとともに、他バイオマスを集約することで、下水処理場を水・資源・エネルギーの集約・自立・供給拠点化とすることとされている。また、下水道の有する資源・ポテンシャルを最大限活用することで、より一層の効率化、機能の高度化を促進するために、従来の下水道の枠にとらわれずに、水・バイオマス関連事業との連携・施設管理の広域化、効率化（他バイオマスの受入、水関連施設の一体的管理、取排水系統の最適化等）を実現し、広い意味での水管理システムとして進化させ、下水道が地

産地消の地域づくりに貢献することとされている。

(2) 個別重点施策

今後重点的に取り組む施策は、以下のとおりである。

① 下水道革新的技術実証事業（B-DASH³ プロジェクト）

B-DASH プロジェクトは、平成 23 年度より開始しており、下水道の有する資源・エネルギーを徹底的に活用するとともに、コストの削減等を実現する革新的技術について、国土交通省が主体となって、実規模レベルのプラントを設置して技術的な検証を行い、ガイドラインをとりまとめ、全国の下水処理場等への導入を促進することを主な目的としている。加えて、実証プラントは海外からの視察にも活用する等、水ビジネスの海外展開に対する支援にも活用することとしている。

平成 23 年度から平成 27 年度開始実証事業の概要について、以下に紹介する。また、平成 28 年度予算として、中小規模処理場にも導入可能な下水汚泥の有効利用技術等の実証を要求中であり、今後も着実な実証事業の実施を図るとともに、実証技術の水平展開を推進していく。なお、実証が終了した技術については、順次ガイドライン化を行い、国土技術政策総合研究所のホームページにて公開しているので、ご参照いただきたい。

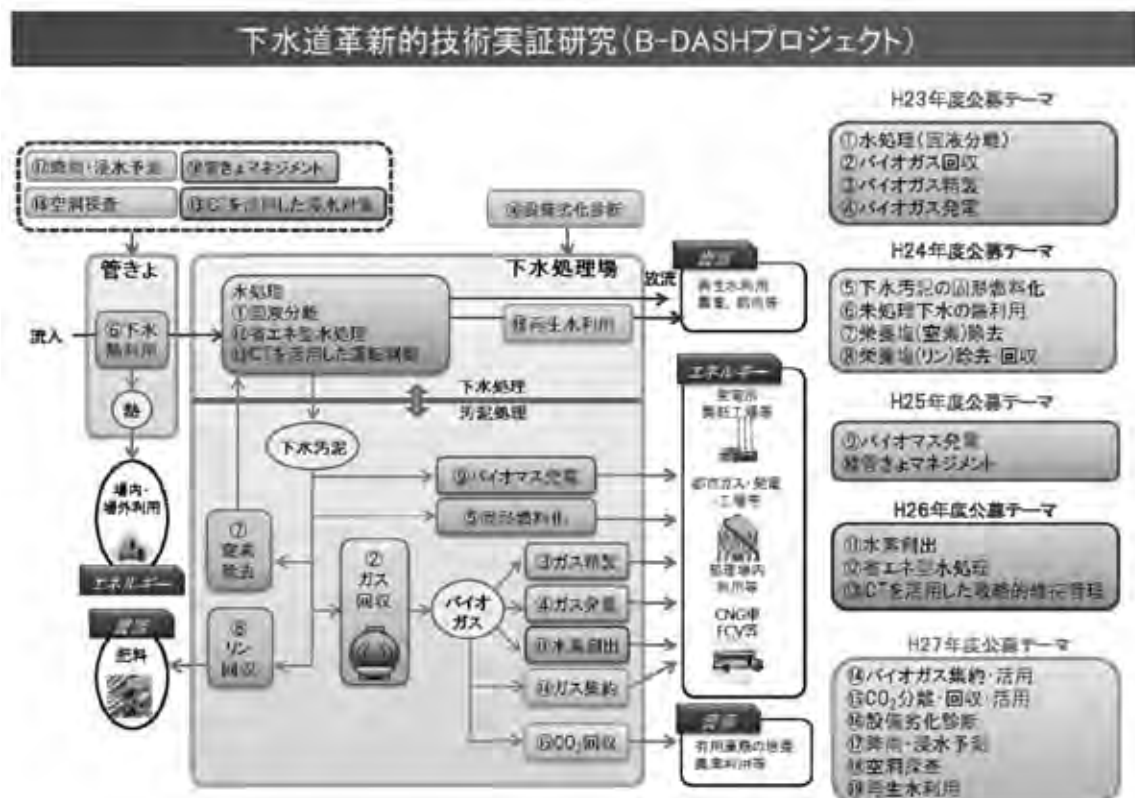


図 6 B-DASH のイメージ

【平成 23 年度開始実証事業】○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に関する実証事業

実施者：メタウォーター（株）・地方共同法人日本下水道事業団 共同研究体

実証フィールド：大阪市中浜下水処理場

概要：徹底的な固液分離と資源回収を基本コンセプトに、省エネルギー・創エネルギー両面から下水処理場全体をマネジメントする「エネルギー自給型下水処理場」を目指し、「上向流ろ過による超高効率固液分離による省エネルギー型水処理」「担体充填型の高効率高温消化」「消化ガスと都市ガスを併用できるハイブリッド型発電機を使用したスマート発電システム」を組み合わせ、システムとして機能させる。

○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

実施者：（株）神鋼環境ソリューション・神戸市共同研究体

実証フィールド：神戸市東灘処理場

概要：菓子類等の食品系バイオマス・剪定枝等の木質系バイオマスを下水処理場に受け入れてバイオガス発生量を増加させるとともに、「センサー類を設置することにより発酵状況の見える化を図った鋼板製消化槽」「パッケージ化を図った新型バイオガス精製装置」「下水処理水の熱エネルギー活用を図った高効率ヒートポンプ」等を組み合わせ、システムとして機能させるとともに、システム全体のコストダウンを図る

【平成 24 年度開始実証事業の概要】

平成 24 年度開始事業については、5 事業が選定され、うち 4 事業が下水汚泥関連である。

○温室効果ガスを排出しない次世代型下水汚泥固形燃料化技術

実施者：長崎市・長崎総合科学大学・三菱長崎機工（株） 共同研究体

実証フィールド：長崎市東部下水処理場

概要：連続式水熱反応器および高速消化槽を用いて生成した消化ガスを利用して消化汚泥を固形燃料化することによるコスト縮減効果や再生可能エネルギー創出効果等を実証する。

○廃熱利用型 低コスト下水汚泥固形燃料化技術

実施者：JFE エンジニアリング（株）

実証フィールド：松山市西部浄化センター

概要：焼却炉廃熱利用による下水汚泥固形燃料の低コスト製造や、製造燃料の焼却炉利用による補助燃料の削減等によるコスト縮減効果や省エネルギー効果等を実証する。

○固定床型アナモックスプロセスによる高効率窒素除去技術に関する技術実証事業

実施者：熊本市・地方共同法人日本下水道事業団・（株）タクマ 共同研究体

実証フィールド：熊本市東部浄化センター

概要：汚泥処理の返流水等からの窒素除去に、固定床方式を用いた高効率なアナモックス反応技術を適用させることによるコスト縮減効果や省エネルギー効果等を実証する。

○神戸市東灘処理場 栄養塩除去と資源再生（リン）革新的技術実証事業

－ KOBE ハーベスト（大収穫）プロジェクト－

実施者：水 ing（株）・神戸市・三菱商事アグリサービス（株） 共同研究体

実証フィールド：神戸市東灘処理場

概要：消化汚泥からのリン除去回収技術の高効率化によるコスト縮減効果や得られたリン資源の活用等を実証する。

【平成 25 年度開始実証事業の概要】

平成 25 年度開始事業については、5 事業が選定され、うち 2 事業が下水汚泥関連である。

○下水道バイオマスからの電力創造システム実証事業

実施者：和歌山市・日本下水道事業団・京都大学（高岡研究室）・株式会社西原環境・株式会社タクマ 共同研究体

実証フィールド：和歌山市中央終末処理場

概要：低含水率化技術（機内二液調質型遠心脱水機）＋エネルギー回収技術（次世代型階段炉）＋エネルギー変換技術（スクリュ式＋バイナリ式蒸気発電機）による、下水汚泥燃焼熱からの発電を実現し、電力自立等を目指すシステム。

○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の実証事業

実施者：メタウォーター・池田市 共同研究体

実証フィールド：池田市下水処理場

概要：個別の 3 つ革新的技術から構成されており、各技術をさらに連携、システム全体として最適化することで発電量を最大化するとともに、温室効果ガス排出量、維持管理費を抜本的に低減する。

【平成 26 年度開始実証事業の概要】

平成 26 年度開始事業については、6 事業が選定され、うち 1 事業が下水汚泥関連である。

○水素リーダー都市プロジェクト～下水バイオガス原料による水素創エネ技術の実証～

実施者：三菱化工機（株）・福岡市・九州大学・豊田通商（株） 共同研究体

実証フィールド：福岡市中部水処理センター

概要：水素社会に向けて、分離膜設備を組み合わせた水素改質技術により、消化ガスから効率的に高品質の水素を精製するものであり、水素の安定的な供給およびエネルギー創出効果等を検証する。

【平成 27 年度開始実証事業の概要】

平成 27 年度開始事業については、9 事業が選定され、うち 2 事業が下水汚泥関連である。

○複数の下水処理場からバイオガスを効率的に集約・活用する技術の実証～

実施者：JNC エンジニアリング（株）・吸着技術工業（株）・（株）九電工・シンコー（株）・山鹿都市ガス（株）・熊本県立大学・山鹿市・大津町・益城町 共同研究体

実証フィールド：大津町浄化センター、益城町浄化センター、山鹿浄水センター

概要：3 箇所の小規模な下水処理場の余剰バイオガスを運搬・集約し、精製装置によりメタンガスの純度を高めた後に、吸着剤入りの吸蔵容器でガスを貯蔵し、容器ごと車両で運搬することにより、低コストで 1 箇所に集約してより大きな発電規模で効率的にエネルギー化する。当該技術の導入により、集約の低コスト化、創エネルギー効果等を実証する。

○バイオガス中の CO₂ 分離・回収と微細藻類培養への利用技術の実証～

実施者：（株）東芝・日環特殊（株）・（株）日水コン・（株）ユーグレナ・日本下水道事業団・

佐賀市 共同研究体

実証フィールド：佐賀市下水浄化センター

概要：バイオガスから CO₂ を分離・回収し、回収した CO₂ と脱水分離液で微細藻類（ユーグレナ）の培養等を行うことで、① CO₂ 分離回収性能、② 微細藻類（ユーグレナ）の生産性能、③ 脱水分離液中の窒素・リンの除去性能について検証を行う。

② 固形燃料の JIS 化

下水汚泥固形燃料の利用先は、現状では発電所やセメント工場等に限られており、固形燃料化の取り組みは、一部の自治体等に限られている。

利用拡大への課題の 1 つとして、明確な品質基準や客観的判断基準がないことが挙げられる。そのため、下水汚泥固形燃料の品質の安定化及び信頼性の確立を図ることを目的として、平成 26 年 9 月に、下水汚泥固形燃料の日本工業規格（JIS）を制定したところである。さらに、下水汚泥固形燃料利用に対し、より多くの自治体および事業者の参入・市場の形成を目指し、事業スキーム方針等の普及方策を検討するため、国土交通省と下水道協会が共同で「下水汚泥固形燃料利用幹事会」を設置し、製品受入先に想定される業界の参加も得て、議論を行っているところである。

③ 下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン（案）の策定

国土交通省では、下水汚泥のエネルギー利用を推進するため平成 23 年 3 月に策定した「下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン（案）」について、その後の技術動向等を踏まえ、平成 27 年 3 月ガイドライン案の改訂を公表した。本ガイドラインは、地方公共団体等が下水汚泥エネルギー化技術の導入を検討する際に必要となる情報を集約したもので、下水汚泥エネルギー化技術の導入事例等の基礎的情報、導入検討の考え方や導入のケーススタディ等を取りまとめている。また、併せて下水汚泥エネルギー化導入の初期検討（特に事業採算性の概算検討）に資する検討補助ツール「下水汚泥のエネルギー化導入簡易検討ツール」を開発・公表している。

④ BISTRO 下水道

平成 25 年 8 月より、「BISTRO 下水道」と称して、食と下水道の連携強化に向けた取組みを推進するべく、国土交通省と日本下水道協会が事務局となり、先進的な取組みを行っている地方公共団体等の参画を得て、「BISTRO 下水道推進戦略チーム」を結成した。工夫事例等の情報共有・水平展開や下水道作物の魅力向上、イノベーションに向けた取組みを行うことで、下水道資源の食・農業利用を一層進めるとともに、海外展開も視野に入れた取組みを進めている。こうした取組みの成果として、「BISTRO 下水道推進戦略チーム」は、食と下水道の連携が一層進むよう、下水道資源を利用して栽培した食材を用いた調理例を発掘・収集し、「BISTRO 下水道～レシピブック～」として取りまとめており、平成 27 年 4 月には昨年度に引き続き Ver2.0 を公表している。平成 27 年度は 7 月には、下水道展に合わせ、東京都において第 7 回会合を開催した。

また、平成 27 年 6 月 17 日～18 日の 2 日間、「地球に食料を、生命にエネルギーを」をテーマとした

「ミラノ国際博覧会」に、「下水道が生み出すチカラ～新しい“いのちの循環”～」を出展者タイトルとして参画した。「食の生産に貢献する水・資源・エネルギーの循環」や、「食の生産」に貢献可能な我が国が誇る「水分野」の多様な技術について世界にアピールし来場者から高い関心を得た。

「BISTRO 下水道推進戦略チーム」は、これからも、食と下水道の連携が一層進むよう、定期的に会合を開催し、下水道資源を使って栽培できる作物の魅力などを伝えていくとともに、未来を担う次世代の下水道・環境への理解を深める取組みを進めていきたい。

5. その他の施策

前述の施策の他、下水汚泥の減量化・リサイクルの推進のため、以下のような施策を実施している。

(1) 固定価格買取制度

平成 24 年 7 月に「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」が施行され、「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」が開始された。本制度においては、下水汚泥を含むバイオマスを用いて発電された電気も再生可能エネルギーとして買取対象となっており、今後、本制度を活用した再生可能エネルギーの導入拡大が期待される。電気事業者による買取価格・期間については、再生可能エネルギーの種類や発電設備の規模等に応じて、中立的な第三者委員会（調達価格等算定委員会）の意見を受けて、経済産業大臣が毎年度定めることとされている。

(2) 下水汚泥処理・有効利用施設整備の支援

下水道管理者が整備する下水汚泥処理施設（脱水施設、焼却施設、固形燃料化施設、消化槽等）・有効利用施設（コンポスト化施設、リン回収施設等）整備に対して支援を行うとともに、新世代下水道支援事業制度として以下の事業を実施している。

①リサイクル推進事業＜再生資源活用型＞

下水汚泥の建設資材利用を促進するため、モデル都市と下水道施設を選定し、その都市における下水道施設の建設事業に汚泥製品（タイル、焼却灰を混入したブロック、路盤材等）を積極的に利用することを内容とする事業について支援する。

②リサイクル推進事業＜未利用エネルギー活用型＞

下水汚泥とその他のバイオマスを集約して有効利用を図る事業について、下水汚泥と他バイオマスを投入する消化施設、消化ガス利用施設及びその付帯施設、下水汚泥と他バイオマスの混合・調整施設、

外部利用のために下水処理場内に設置するバイオガス精製・供給施設の整備を支援する。

③ 機能高度化促進事業＜新技術活用型＞

下水道における新技術の開発と実用化の促進を目的としており、下水汚泥のエネルギー化技術など下水汚泥処理・有効利用等に関する新技術開発について支援する。

(3) 民間活用型地球温暖化対策下水道事業制度

下水汚泥等の資源化、流通、販売・利用を一体的に捉え、民間企業の有するノウハウを最大限活用することにより、下水汚泥等の資源・エネルギー利用を推進するため、下水道管理者が民間企業と一体となっていく下水汚泥等の循環利用に関する計画の策定や、同計画に基づき、PFI 手法等により整備される下水汚泥等の資源化施設の整備を支援する。

(4) 税制（グリーン投資減税）

下水汚泥固形燃料利用の促進のため、下水汚泥固形燃料の貯蔵装置及び払出装置等を取得した事業者に対して、税制の特例措置を講じている。当該事業者は、取得価額の 30% 特別償却（青色申告書を提出する法人又は個人）又は 7% 税額控除（中小企業のみ）を適用することができる。

(5) 品質管理・PR 等の推進

下水汚泥の緑農地利用や建設資材利用については、適切な品質管理の実施により、汚泥製品の品質向上に努めるとともに、その価値を積極的にユーザーに PR していく努力が必要である。そのため、（社）日本下水道協会において策定された「下水汚泥リサイクル資材一覧」の活用等により製品の周知を図っている。また、農林水産省により、平成 22 年 5 月に「汚泥肥料中の重金属管理手引書」が策定されており、この周知を図るとともに関係省庁との連携を進め、汚泥肥料の適切な品質管理に向けた体制強化を図っていく予定である。

なお、一般廃棄物や下水汚泥から生成された溶融スラグについては、コンクリート用骨材及び道路用として用いる場合の JIS が平成 18 年 7 月に制定されており、管きよの新設・更新等の公共事業の実施にあたり、JIS に適合している下水汚泥溶融スラグ製品が優先的に利用されることが望まれる。

(6) グリーン購入法（国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律）に基づく公共工事グリーン購入調達品目への対応

平成 13 年 4 月よりグリーン購入法が全面施行され、

国等の各機関においては、「環境物品等の調達の推進を図るための方針（調達方針）」を作成し、これに基づき調達を実施することになっている。

公共工事に係る調達品目のうち下水汚泥を使用した調達品目としては、「下水汚泥を用いた汚泥発酵肥料（下水汚泥コンポスト）」、「陶磁器質タイル」、「エコセメント（都市ごみ焼却灰等を主原料とするセメント）」、「再生材料を用いた舗装用ブロック（焼成）」及び「再生材料を用いた舗装用ブロック類（プレキャスト無筋コンクリート製品）」が調達品目として指定されている。

下水汚泥の有効利用推進のため、今後も「特定調達品目」に多種多様な下水汚泥関連製品が記載されるように努力していく必要がある。ただし、2009年度には、再リサイクル性確保の観点（製品の施工時及び使用時に加えて、廃棄後の他の用途への再利用時等も想定したライフサイクル的な視点での環境安全性の確認）から調達方針が見直されていることから、今後、下水汚泥の資源利用を推進する際に留意が必要である。

なお、各都道府県においては独自のリサイクル認定制度を策定している場合もあるため、環境部局や農政部局、他の建設部局等との連携を図ることも重要である。

6. 終わりに

下水汚泥の有効利用に関する諸課題の解決に向けて、地域特性に応じた適切な汚泥の有効利用の検討や、新技術の導入など、様々な分野における総合的な対策が進められている。

今後も引き続き、関係各位には下水道における資源・エネルギー循環の形成をはじめとした、汚泥の有効利用の推進に対し御理解、御協力をお願いする次第である。

参考文献

- 1 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」（2008.3）
- 2 経済産業省資源エネルギー庁「2005 年度標準発熱量」
- 3 B-DASH : Breakthrough by Dynamic Approach in Sewage High technology

特集：第 28 回下水汚泥の有効利用に関するセミナー特集（新潟市）

解 説

新潟県における“バイオガス発電”の取組
～産官学連携による小型バイオガス発電機の開発～

新潟県土木部都市局下水道課

流域下水道係 主任 矢田部 桂

キーワード：小型バイオガス発電、産官学連携、新技術普及・活用制度

はじめに

下水汚泥の処理過程で発生するバイオガスの利活用を図るため、新潟県では、産官学が連携し市販のディーゼル発電機をベースとした小型・低コストなガスエンジン発電システムの開発に取り組んでいる。本稿では開発に至る経緯及び成果、現在のバイオガス発電導入状況について紹介する。

1. 新潟県の下水道概要

本県の下水道は、新潟市が昭和 27 年に管きょと処理場（船見処理場）の整備を開始したのが始まりで、この船見処理場は昭和 39 年に処理を開始した。

現在、本県には 30 市町村が存在するが、このうち 28 市町村で下水道整備を行っており、全ての市町村が供用開始している。なお、残りの 2 村は農業・漁業集落排水や合併浄化槽のみで汚水処理している。

この 28 市町村の下水道の管理状況であるが、全部で 87 処理場が存在し、その内訳は、流域下水道が 7 処理場、公共下水道が 80 処理場である。

下水道整備開始が遅かったということもあり、本県の下水道処理人口普及率は 85.5%（全国 89.5%）、下水道処理人口普及率は 72.3%（同 77.6%）であり、全国平均よりも低く、都道府県のなかでは中位程度であ

る。（平成 26 年度末）

2. 流域下水道におけるバイオガス発生状況

本県の処理場で汚泥の消化をおこなっているのは、流域下水道の全ての処理場と公共下水道の 7 処理場である。

平成 25 年度に流域下水道 7 処理場で発生した消化ガスは年間約 729 万 Nm^3 。このうち汚泥消化タンクを加温するための燃料や汚泥乾燥設備の燃料として有効活用したのは 412 万 Nm^3 であり、残りの 317 万 Nm^3 は焼却処分されていた。処理過程で大量のエネルギーを利用している下水処理場において、未利用資源であるバイオガスを有効活用できるガス発電は維持管理費の低減に必要不可欠な技術である。

従来は、大規模処理施設へのガスエンジン、ガスタービン発電機の導入事例はあるものの、機器が大型であることや、メンテナンスコストが高いことから、中小規模の施設では採算性が合わずバイオガス発電機の導入が伸び悩んでいたため、小型発電機の開発と普及が課題であった。

3. 小型バイオガス発電機の開発

平成 17 年～ 20 年度に独立行政法人土木研究所らによって実施された研究を基に、平成 21 年度から新潟

県土木部都市局下水道課と国立大学法人長岡技術科学大学とが連携し、実証実験を通して中小規模の下水処理場でも導入可能な小型バイオガス発電機の開発に取り組んだ。

○堀之内浄化センターにおける実証実験概要

新潟県魚野川流域下水道堀之内浄化センターにて実施した実験設備フローを図-1に示す。

実証実験設備は、既設ガスタンク設備配管から分岐し、昇圧せずに発電設備に消化ガスを導入、活性炭吸着方式によるシロキサン除去装置にてシロキサン※を1ppm以下に除去した後、発電機へ供給している。実験当初の設置台数は1台で、25kWクラスの発電機を

同期投入方式により浄化センターの機械動力400V系へ系統連系している。また、発電機廃熱回収は温水として取り出す方法を採用し、取り出した温水は実証実験設備内で温水を循環させ、夏場はラジエータで放熱を、冬場は融雪に利用した。ここで使用した発電機の構成図を図-2に記す。

※シロキサン：ケイ素の化合物であり、下水汚泥消化ガス中にはシャンプーや化粧品を由来とする微量のシロキサンが混入しており、これがガスエンジン内部に混入した場合、燃焼により結晶化（酸化ケイ素）しエンジン内部に蓄積することでトラブルを引き起こす。

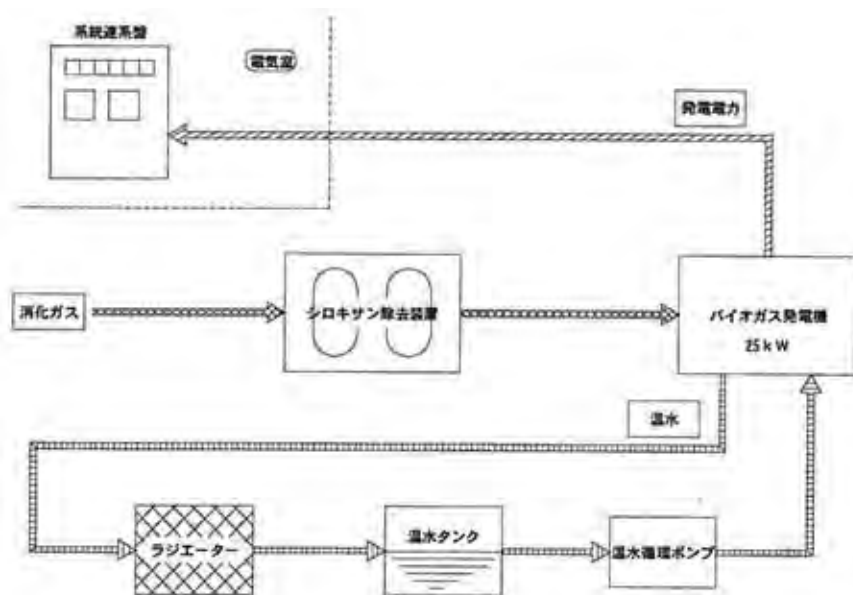


図-1 実験設備フロー

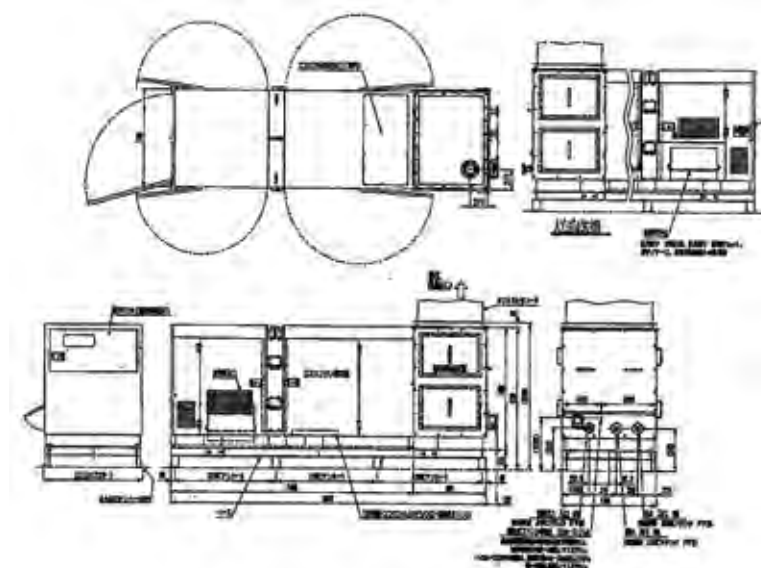


図-2 バイオガス発電機の構成



写真 -1 堀之内浄化センター実証実験風景

表 -1 魚野川流域下水道（堀之内処理区）堀之内浄化センター諸元

認可処理面積	1,248ha	敷地面積	32,860㎡
認可処理計画人口	28,200人	流入水量(H26)	10,509㎥/日
認可処理能力	14,450㎥/日	供用開始年月	平成4年8月
排除方式	分流式	処理方式	標準活性汚泥法



写真 -2 シロキサン除去装置

○平成 21 年度の結果（堀之内浄化センターにおける実証実験）

- ・バイオガスエンジン発電機を放電装置及び 2.2kW 程度の負荷と接続し、基礎データの収集
- ・バイオガス用バッファタンクを設置し合計最大

25kW を目標とした長期発電実験

- 23.85kW の各接続負荷機器を 120 時間連続で安定運転
- シロキサン除去装置（写真 -2）が持続的な除去が可能であることを確認

○平成 22 年度の結果（堀之内浄化センターにおける実証実験）

- ・小型ガスエンジン発電機の最大発電能力・始動性能等の確認
- ・シロキサン除去装置のデータ収集及び排気ガス分析
- 新規開発機が 25kW の発電出力を達成
- 1,000 時間の系統連携連続運転を達成

○平成 23 年度の結果（堀之内浄化センターにおける実証実験）

- ・年間を通じた連続運転によるメンテナンス項目の検証
- ・エンジン廃熱を温水として取り出す熱回収システムの構築
- 稼働率 99.88 %、平均出力 24.12kW、熱回収量 36.1kW を達成

○平成 24 年度の結果（堀之内浄化センターにおける実証実験）

- ・出力 25kW の発電機を 1 台追加しガス量に応じた台数制御及び運転時間平準化制御運転
- 25kW 発電機 2 台による台数制御、不具合発生状況等の確認

○新津浄化センターにおける実証実験概要

堀之内浄化センターで得られた結果を基に、平成 24 年度からは信濃川下流域下水道新津浄化センターにおいて、出力（kW）あたりのコスト削減と、省スペース化を実現するため、新たに開発した 50kW クラスのバイオガス発電機について、実バイオガスを燃料として連続運転をした際の耐久性、発電量の安定性の確認と遠方監視システム構築のための実証試験を行った。

○平成 24 年度の結果（新津浄化センターにおける実証実験）

- ・新規開発の出力 50kW クラスの発電機の連続運転時の耐久性及び安定性の確認
- 50kW 発電機で総運転時間 5,052 時間、発電効率 34.5%、熱回収率 49.1%、総合効率 83.6%を達成

○平成 25 年度の結果（新津浄化センターにおける実証実験）

- ・平成 24 年度に引き続き耐久性及び安定性の確認
- 総運転時間 17,577 時間 稼働率 95%、発電効率 35.0%、熱回収率 48.6%、総合効率 83.6%を達成
- ・遠方監視システム構築のための実証実験
- 発電機の電力等の情報を市販の監視システムを用いて監視可能なことを実証

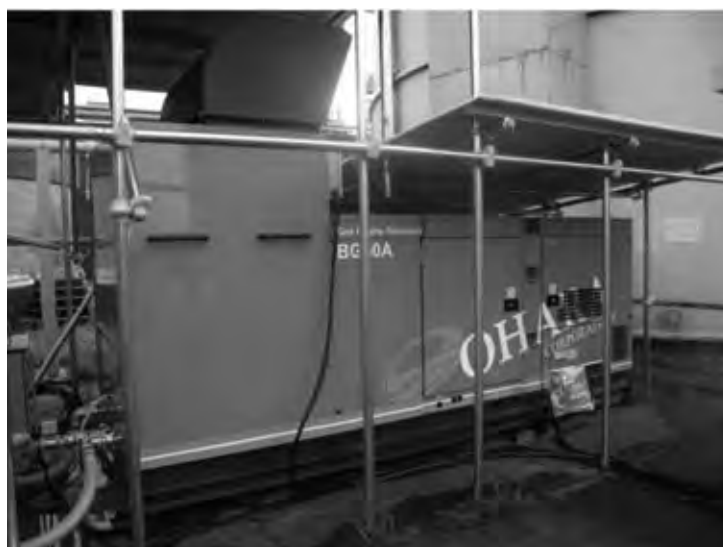


写真 -3 新津浄化センター実証実験風景

表 -2 信濃川下流域下水道（新津処理区）新津浄化センター諸元

認可処理面積	3,118ha	敷地面積	143,840㎡
認可処理計画人口	104,012人	流入水量(H26)	27,578㎡/日
認可処理能力	49,900㎡/日	供用開始年月	昭和58年4月
排除方式	分流式	処理方式	標準活性汚泥法

○実証実験の成果

前述の2処理場での実証実験から、25kWクラス及び50kWクラスの発電機諸元を確定することができたので、**図-3**及び**表-3**に記す。

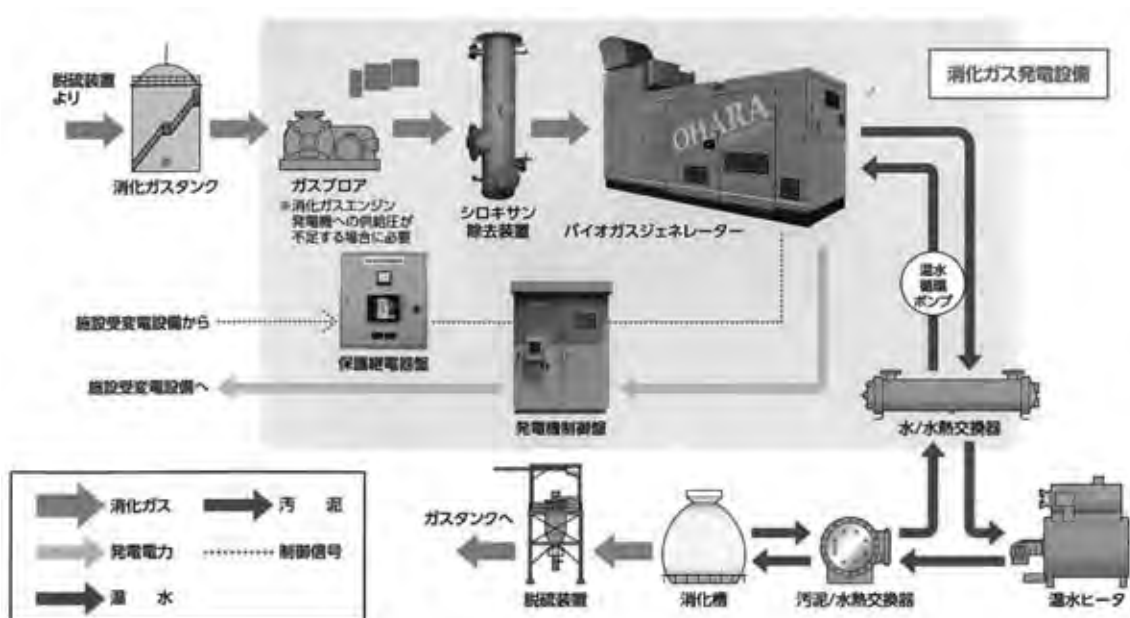


図-3 バイオガス発電システムフロー

表-3 バイオガス発電機諸元

型式		25kW級		50kW級		
出力	出力<連系>	kW	25	30	50	60
	周波数	Hz	50	60	50	60
	電圧	V	200/400	220/440	200/400	220/440
	相数		3相			
燃料ガス	メタン濃度	%	55～65			
	ガス消費量	Nm ³ /h	13.1	16.1	26.2	32.2
	供給圧力	kPa	2.0～3.0			
	ガス成分		硫化水素 10ppm以下 シロキサン 0.02ppm以下 4サイクル水冷直列縦型			
エンジン	形式		4サイクル水冷直列縦型			
	気筒数		4		6	
	排気量	L	4.329		7.961	
	回転数	rpm	1500	1800	1500	1800
発電機	形式		回転磁界形同機発電機			
	極数		4			
	励磁方式		ブラシレス方式(自動電圧調整器付き)			
	絶縁種別		耐熱クラス F種			
	冷却方式		自由通風形			
性能	発電効率	%	35	34	35	34
	回収熱量	kW	32	40	67	85
	熱供給能力	L/min	100(約5度差)	120(約5度差)	200(約5度差)	240(約5度差)
	熱回収効率	%	45	46	48	47
	総合効率	%	80	80	81	81

4. 流域下水道への本格導入

前述の実証実験を通して、小型ガスエンジン発電機を利用した消化ガス発電の事業化に目処がたったため、既にバイオガスを全量有効活用している長岡浄化センターを除く全ての流域下水道の処理場において本格導入する方針とした。

導入に当たっては、発電で得た電力を全量場内利用することで維持管理費を削減するため、適切な規模となるよう留意し、一般競争入札にて調達することとした。

まず初めに実証実験を開始した堀之内浄化センターにおいて導入することとし、平成23年度に設計、平成24～25年度で整備工事を行い、平成26年2月14日に供用開始した。

表-4 バイオガス発電機導入予定

処理場	発電機出力	平均 使用電力 (平成25年度)	発電機出力 /平均使用電力
堀之内浄化センター	25kW × 2基	111kWh/h	45%
新津浄化センター	50kW × 4基	439kWh/h	46%
新潟浄化センター	50kW × 4基	984kWh/h	20%
新井郷川浄化センター	50kW × 5基	461kWh/h	54%
六日町浄化センター	100kW	125kWh/h	80%
西川浄化センター	150kW	298kWh/h	50%

六日町及び西川浄化センターは予定

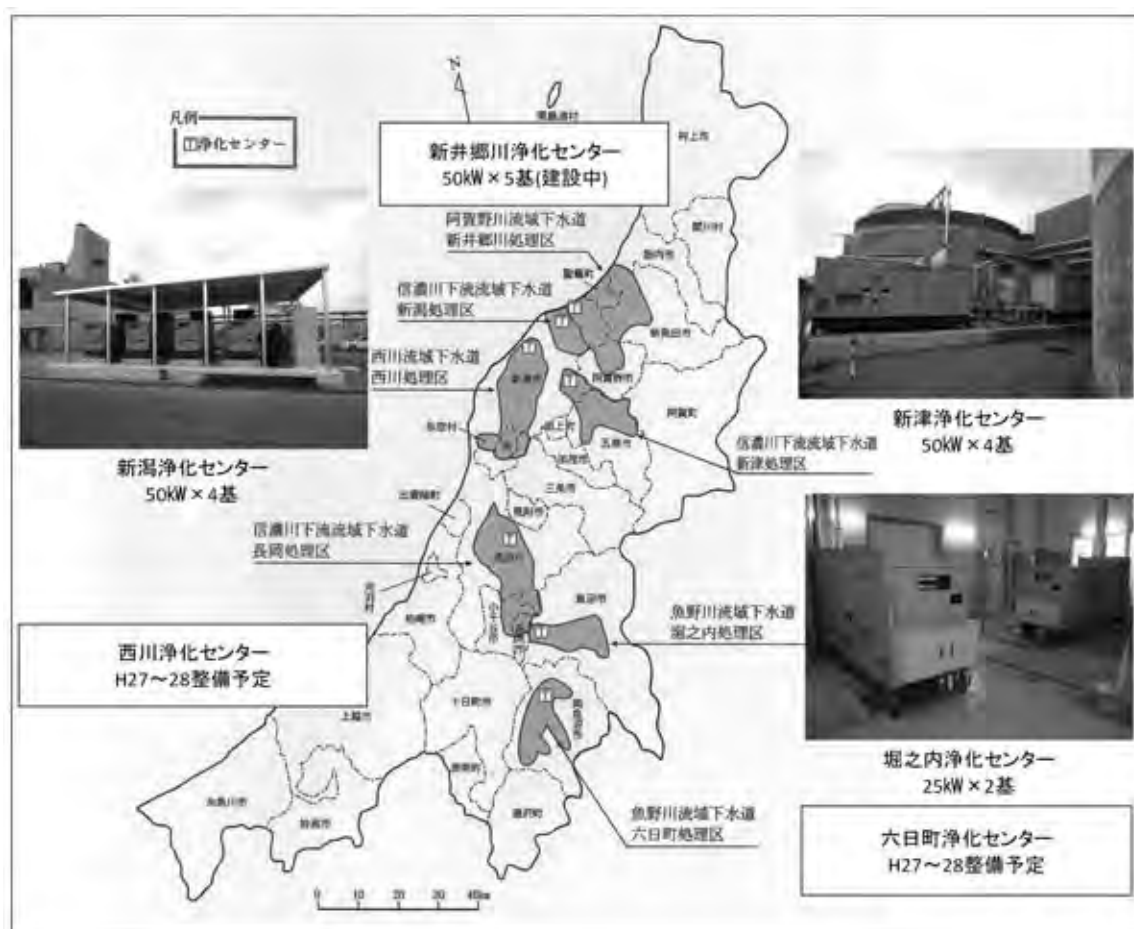


図-4 整備状況

続いてバイオガス発生量が多く、ほぼ概成した処理区である新潟及び新潟浄化センターにおいて、平成24年度に設計、平成25～26年度で整備工事を行い、平成26年度末に供用開始した。

今後流入量の増加が見込まれている新井郷川浄化センターにおいては、段階的な整備にすることとした。平成25年度に設計、平成26～27年度で第一期となる整備工事とし、現在整備中である。

平成25年度の消化槽運転開始から間もない西川浄化センターと、流域の中では小規模となる六日町浄化センターでは、それぞれ平成26年度に設計、平成27～28年度で整備予定である。

将来的には汚泥乾燥用にバイオガスを利用している新潟処理場と長岡処理場を除き、処理場で消費する全電力の4割近くがバイオガス発電で賄われることとなる(表-4)。流域下水道の各処理場における整備状況を図-4に示す。

○堀之内浄化センターの稼働実績

堀之内浄化センターでの運転実績を表-5に記す。当初の想定どおり処理場内の4割の電力を賄えるものとなっている。傾向として夏場の外気温上昇に伴う燃費の低下が見られたものの、安定した発電により維持管理費の低減に貢献している。

また、運転開始に伴う機器の初期不良を表-6に示

すが、いずれも周辺機器の不具合であり主機の不具合は発生していない。現在は再発防止対策及び最適化が行われており、運転を継続しているところである。

5. Made in 新潟への登録

新潟県では、県内の企業が開発した新技術の活用・普及を促進することで新潟県内の建設関連産業の活性化に資することを目的として「Made in 新潟 新技術普及・活用制度」を平成18年度から運用している。

平成26年度末現在の登録技術は176技術、活用件数約35,000件、売り上げ約640億円であり、最近では県外売り上げが県内売り上げを大きく上回っており、本県発祥の技術が全国で活躍している。

今回開発した「小型消化ガス発電システム」については、市販のパッケージ型ディーゼルエンジン発電機をベースに改良し、下水汚泥の処理過程で発生する消化ガスや生ゴミメタン発酵施設からのバイオガスを燃料とした小型・低価格・低メンテナンスコストが評価され、平成23年9月12日にMade in 新潟に登録されている。

これをうけ活用・普及が順調に進み、平成26年度の実績では、全登録技術中、本技術を採用した売上額が第2位、対前年度比の伸び率が第1位となった。

表-5 バイオガス発電機運転実績(堀之内浄化センター)

堀之内浄化センター	平成26年4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	合計
消費電力量 (kWh)	81,867	81,617	84,940	90,684	97,439	80,318	80,688	80,397	94,697	94,148	82,259	88,576	1,034,370
うち消化ガス発電機 (kWh)	36,357	37,827	36,700	36,654	36,919	36,538	37,488	37,947	37,457	39,448	35,170	39,596	448,410
自給率	44%	46%	43%	41%	38%	46%	46%	47%	40%	42%	43%	44%	43%
発電ガス量 (Nm ³)	18,326	19,494	19,053	19,432	19,541	19,365	19,389	19,183	19,668	20,168	18,029	20,154	231,346
燃費 (kWh/Nm ³)	1.984	1.940	1.926	1.897	1.893	1.888	1.934	1.978	1.962	1.957	1.951	1.955	1.938

表-6 初期不良一覧

発生日	設備名	故障状況	原因	処置
H26.4.24	No.1消化ガス発電機	熱交換部オイル漏れ	ホースの緩み	ホースバンド増し締め
H26.5.2	No.2消化ガス発電機	熱交換部漏水	配管継ぎ手ホースの緩み	ホースバンド増し締め
H26.7.26	No.1消化ガス発電機	緊急停止	ガス圧低下を検知	燃焼比の設定変更
H26.8.8	No.2消化ガス発電機	回転検出器異音	軸受けの劣化	回転検出器ベアリングユニット交換
H26.10.5	No.1消化ガス発電機	出力変動	O ₂ センサー誤動作	センサー清掃復帰
H26.12.8 H26.12.17	No.1消化ガス発電機	停止後立ち上がり遅	起動用バッテリー劣化等	バッテリー、オルタネーター交換調整
H27.3.20	No.1消化ガス発電機	排気部異音	ドレン配管の外れ	配管再接続工事

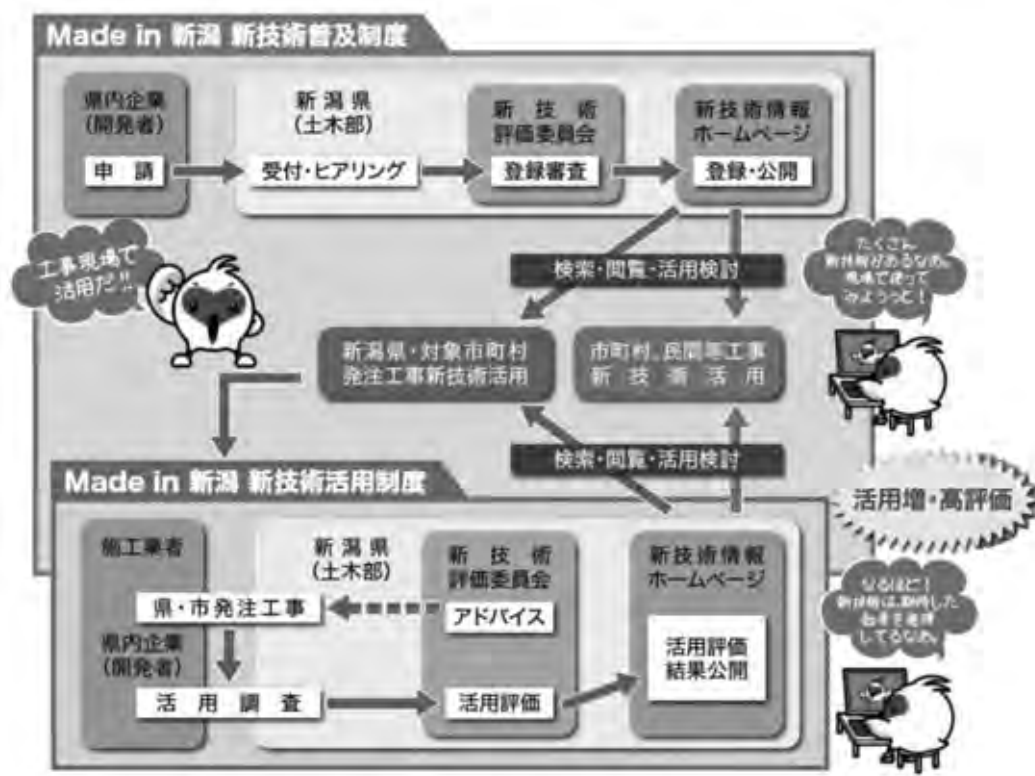


図-5 Made in 新潟 新技術普及・活用制度

6. 今後の課題及び展望

今回の取り組みにより、堀之内処理場で25kWクラス、新津処理場で50kWクラスの小型バイオガス発電設備の信頼性の確認ができた。

今後は計画的にバイオガス発電設備を導入するとともに、効率的な運転・メンテナンスの実施により、更なる維持管理費の低減に取り組む必要がある。

また、今回の開発により市場における小型バイオガス発電のラインナップが充実・活性化することになり、処理場の規模に合った効率的な設備投資の選択肢が広がりました。結果として未利用資源であるバイオガスの利活用が図られることになり、これは下水道事業のみならず畜産・生ゴミ・食品残渣などといったバイオガス関連事業への貢献が期待される。

参考文献

- 1) (社) 日本下水道協会：日本下水道史、1988年5月
- 2) 新潟市都市整備部下水道部：新潟下水道物語 2002年9月
- 3) (公財) 新潟県下水道公社、新潟県流域下水道維持管理年報（平成25年度）2014年7月
- 4) (独) 土木研究所、ライト工業（株）、（株）井上政商店：消化ガスエンジン動力システムの開発に関する共同研究報告書、2009年3月
- 5) (株) 大原鉄工所：バイオガス発電機技術説明書

特集：第 28 回下水汚泥の有効利用に関するセミナー特集（新潟市）

解 説

長岡市における下水汚泥から発生する
消化ガスの有効利用について長岡市土木部下水道課長岡中央浄化センター
センター長 星野 正晴

キーワード：下水道消化ガス事業、消化ガス有効利用、精製ガス、都市ガス原料、未利用エネルギー

1. はじめに

長岡市は、新潟県のほぼ中央に位置し、大河信濃川が中心市街地を流れている。平成 17 年度と平成 22 年度に周辺の 10 市町村と合併し、各地域の特色を伸ばしながら一体感のあるまちづくりを行っているところであり、現在人口約 28 万人の県内第二の都市である。

本市の下水道の歴史は古く、大正 13 年 1 月、全国で 7 番目に上下水道事業を同時に着手したことから始まり、中心市街地は昭和 2 年に竣工した。当時としては、画期的な事業で高く評価された。その後、下水道事業は、この蓄積された基盤をもとに着実に整備され今日に至っている。

平成 26 年度末における公共下水道の処理人口は、約 25 万人で水洗化率は 96.2%、また、農業集落排水施設の処理人口は、約 1 万 3 千人で水洗化率 96.8% などとなり、浄化槽を含む全体では処理人口が約 27 万人で水洗化率が 96.3% となっている。

当市が管理する污水处理施設は、公共下水道施設及び特定環境保全公共下水道施設が 7 施設、そして農業集落排水施設が 14 施設と合わせて 21 施設である。

今回、下水汚泥から発生する消化ガスの有効利用として紹介する「下水道消化ガス事業」（以下「本事業」という。）は、長岡中央浄化センターで実施している。当センターは、昭和 51 年 9 月に供用開始、本市の中



図－1 長岡中央浄化センターの位置図

央を流れる信濃川の旧長岡市右岸地域を処理区域とし、水洗化人口は約 12 万 4 千人、合流式及び分流式の 2 つの排除方式の污水等を処理する施設である。平成 26 年度年間流入量は、約 3,140 万 m^3 であり、このうち、汚水流入量が 64%、雨水流入量が 36% となっている。また、下水処理により発生する汚泥は、嫌気

性消化により処理を行なっている。年間発生汚泥（脱水汚泥）は、約 6,700 t であり、県が管理する中越流泥処理センター（汚泥乾燥施設）に運搬して乾燥処理後、セメント原料として再利用している。なお、表－1 に当市が管理する下水道施設の汚泥の有効利用を示す。

本センターでは、本事業を平成 11 年 4 月からスタートさせ、下水汚泥から発生する消化ガスのうち、余剰ガスを都市ガスに近い成分に精製し近接するガス工場に供給して、未利用エネルギーの有効利用を行なっている。この概要について紹介する。

表－1 下水道施設の汚泥処分状況（平成 26 年度）

区分	形 態	単位：特定廃棄物全量削減率		
		施設数	脱水汚泥 (t)	乾燥汚泥 (m³)
有効利用	セメント原料	6	7,807	722
	ゴキブリ大原料	1	1,395	—
	埋 立	0	—	—
	合 計	7	9,202	722

2. 本事業の実施経緯について

本センターは、当初嫌気性消化処理で発生する消化ガスのうち、約 4 割を消化タンク加温ボイラー用として利用していたが、残りのガスは余剰ガスとして焼却処分をしていた。このため、本センターでは、この余剰ガスの有効利用について、様々な有効利用用途の検討を行った。

また、本市は平成 7 年に建設省から環境共生モデル都市（エコシティ）の指定を受け、「長岡都市環境計画」や「長岡市環境基本計画」を策定したことにより、環境負荷の軽減や同計画に示された未利用エネルギーの

有効利用の取組みが一層必要となった。

消化ガスのうち、この余剰ガスである未利用ガスの有効利用については、処理場機能の優先、省資源・省エネルギー性、経済性、そして地域住民に広く利用されアピール性のある利用用途であることなどの点に留意して検討を行った。その結果、有効利用項目に、「消化ガス発電」、「隣接する都市ごみ焼却炉への燃料としての供給」、「民間ガス会社への都市ガスとしての供給」、「汚泥乾燥の燃料の利用」、「メタンガスの天然ガス自動車への供給」をリストアップしそれぞれの検討を行った。

検討結果は、次のとおりである。

(1) 消化ガス発電

「消化ガス発電」は、全国的にも稼働実績があり技術的にも確立していた。また、発生した電力は処理場で利用が可能のため省エネルギー性は高く、経済性も認められる。一方、消化ガス中の硫化水素による腐食が発生し、メンテナンスなどの費用が年々増加しているという実例が確認され、採算性や維持管理性などに問題があった。

(2) 隣接する都市ごみ焼却炉への燃料としての供給

「隣接する都市ごみ焼却炉への燃料としての供給」は、昭和 58 年から、隣接するゴミ焼却施設へ補助燃料として供給していたが、生活の多様化により焼却ゴミに占める古紙やプラスチックの割合が増し、発熱量が増加した。このため、補助燃料としての必要性は低下した。（結果的に、平成 8 年度以降は停止した。）このように、技術的に確立されているものの省エネルギー性や経済性・採算性に劣った。

(3) 民間ガス会社への都市ガスとしての供給

「民間ガス会社への都市ガスとしての供給」は、本センターから 750m 付近に北陸ガス㈱の施設が近接しており、未利用の消化ガスのメタン濃度を高めることで高品質化し、都市ガスの燃料として利用するものである。このような事例はあるが、消化ガスを直接供給していたためメタンガスの濃度が低く、都市ガスの高カロリー化が進められる中で、低カロリーガスの供給では将来的に問題があった。また、ガスの高品質化は、消化ガス中の二酸化炭素や硫化水素などの不純物質を除去することであり、ガス中の二酸化炭素などの除去技術は、すでに都市ガス業界ではある程度確立された技術であり、これを応用できるものと考えられた。この消化ガスの高品質化については、横浜市や大阪市などで取り組まれ、一部実用化されていたが、中小規模での安価な技術の開発が必要とされていた。省エネルギー性としては、高品質化にエネルギーを必要とするが、都市ガスに燃料として直接に供給できることから高い。



写真－1 長岡中央浄化センターの全景写真

法的には、導管延長が500m以下と想定され、「ガス事業法」に基づくガス主任技術者や工事計画の事前届も不要と考えられる。

(4) 汚泥乾燥の燃料の利用

消化ガスを汚泥乾燥設備の熱源に利用するものであり、全国的にも実例があり、技術的に確立している。この利用により、乾燥用の補助燃料が削減でき、省エネルギー性が高い。しかし、乾燥設備の設置により、維持管理面は不利となり、最終処分を汚泥乾燥設備へ切り替える必要があり、現計画に影響を与える。

(5) メタンガスのガス自動車供給

都市ガスとして供給する場合と同様に技術的に可能であるが、発熱量などの調整が必要となる。また、消化ガス中に含まれる微量の硫化水素が、エンジンに及ぼす影響が懸念される。省エネルギー性としては、高品質化にエネルギーを必要とするが、天然ガス自動車の燃料として直接に供給できることから高い。

維持管理性については、ガス供給のため運転管理用の人員配置が必要である。法的には、「高圧ガス保安法」、「ガス事業法」、「消防法」などに準拠する必要がある。

(6) 検討結果について

以上のことから、技術的には、高品質化のための設備計画が必要となるものの、未利用の消化ガスが概ね100%利用可能と想定されることで、省エネルギー性・アピール性にも優れ、また、ガスの売却により、下水道経営の健全にも寄与できることから「民間ガス会社への都市ガス原料供給」を有効利用として採用された。



写真－2 都市ガス原料供給施設

その後、汚泥濃縮工程に新たに機械濃縮機を導入したことにより余剰ガス発生量が大幅に増大する見込みとなった。

この事業は、長岡技術科学大学及び（財）下水道新技術推進機構の技術支援やガス事業者である北陸ガス（株）の全面協力により、北陸ガス（株）との共同事業の実用化へとつながったものである。

本事業は、平成10年3月に建設省から「アイデア下水道モデル事業」として採択され、さらに平成11年9月に建設大臣賞「いきいき下水道賞（下水道有効利用部門）」を受賞した。また、平成12年6月には（社）全日本建設技術協会第5回21世紀の「人と建設技術」賞を受賞した。

3. 本事業の概要について

本センターでは、下水処理で発生する汚泥を汚泥濃縮タンクや機械濃縮機で濃縮した後、消化タンクに投入している。この汚泥消化は、嫌気性2段消化方式を採用している。投入した汚泥は、約37℃に加温、約40日間貯留する。この間に、汚泥中の有機分が分解され、汚泥分が減量するとともに、メタンを主成分とする消化ガスが発生する。

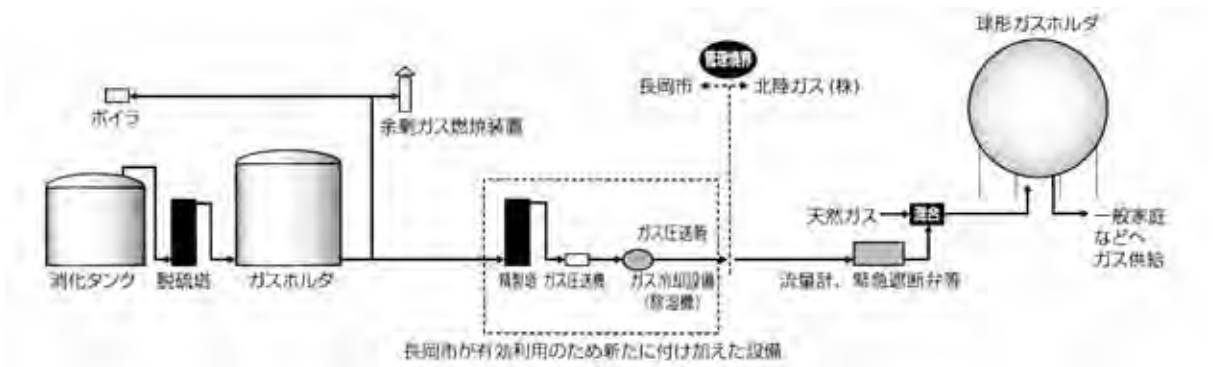
この消化ガスは、図－2のとおり、「脱硫塔（湿式脱硫方式）」と新たに同じ構造をもつ「精製塔」をもう一段付加することによりメタン濃度を高めて都市ガス原料としてガス事業者に供給している。

「湿式脱硫方式」は、図－3のとおり消化ガスを処理水で洗浄して硫化水素ガスを除去する方式で、ほぼ完全に除去されるが、同時に水に溶けやすい二酸化炭素も半分程度除去される。この結果、消化ガスに含まれるメタンガスの濃度が相対的に高まる。この方式による効果に着目し、もう一段脱硫方式を付加することによりメタン濃度をさらに高めるものである。（図－4参照）

メタン濃度の高品質化について、「湿式脱硫方式」の採用に至った経緯は、以下のとおりである。

都市ガスとしてガス事業者に供給するためには、表－2のとおりガスの成分を所定の品質まで調整しなければならない。消化ガス中には、都市ガス原料としての有効成分であるメタンガスの他に、硫化水素、二酸化炭素、水分、窒素、酸素等が含まれるが、このうち、硫化水素、二酸化炭素、水分は、特に高度に除去しなければならない。

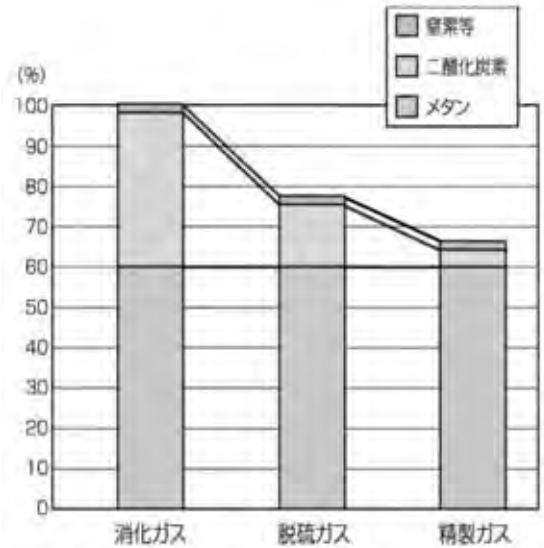
硫化水素の除去方法としては、一般的に液体に吸収させる「湿式脱硫法」と、固体に吸着させる「乾式脱硫法」がある。「湿式脱硫法」は、高濃度の硫化水素の除去に適しており、所要敷地面積は小さい。また、



図－２ 都市ガス原料供給施設のフローシート



図－３ 脱硫塔及び精製塔の構造
(湿式脱硫方式)



図－４ バイオガスの精製のしくみ

運転管理については、保守点検項目が多いが、連続運転が可能である。構造的には、環境問題を起こさないクローズドシステムが望ましいとされている。

また、「乾式脱硫法」は、低濃度の硫化水素の除去に適しているが、所要敷地面積が多く必要となる。運転管理としては、日常管理は比較的容易であるが、脱硫剤の詰め替えや再生、廃剤処理に多くの費用を要する。構造的には、ガス中に残るダストやナフタリン等の微少含有物も除去される。

次に、二酸化炭素の除去方法としては、「液吸収方式」、「冷凍方式」、「膜分離方式」、「吸着方式」などがある。

「液吸収方式」は、アルカリ溶液で、二酸化炭素を反応吸収させて、加熱放散により二酸化炭素を分離する。比較的安価で、水を多量に使うことから、下水処理場に適している。

また、「冷凍方式」は、空気を冷却し、二酸化炭素を凝固させて除去する。このため、冷却するためのエネルギーが多量に必要であるが、除去効率が高い。

表－２ 都市ガス供給条件

		供給条件
組 成	メタン	主成分とする
	二酸化炭素	4vol%以下
	硫化水素	2ppm以下
総発熱量 MJ/m ³ (kcal/m ³)		35.58以上 (8,500以上)
ガスの露点温度 (0.932MPaにおいて)		導管内に結露が生じ ない温度とする

「膜分離方式」は、多孔質性膜における分子の拡散速度の差を利用して二酸化炭素を除去する。設備コスト、運転経費とも割高であり、硫化水素による膜の劣化が著しいことが当時実験報告されていた。

「吸着方式」は、活性炭、ゼオライト等への吸着速度の違いを利用して除去する。設備コストや運転経費が割高であるが、この方式は、都市ガスの精製技術として利用されている。

以上のことを踏まえ、検討した結果、本センターの既存の脱硫装置が吸収方式であり、維持管理に手慣れていること、さらに吸収液として下水二次処理水が利用でき、量的な制約が少ないこと、そして、すでに脱硫塔において、消化ガス中の二酸化炭素が処理水に吸収される現象が発生しているなどの理由により「液吸収方式」が採用された。

また、水分については、ガス中に多量に含まれると、凝縮水による導管の閉塞が発生し供給能力の低下を招いたりするなど、保安面や環境面並びに経済面に問題が発生することが予想される。このため、ほとんどの稼働する都市ガスが実施している「冷却による脱水方式（間接冷却）」を採用した。

4. 有効利用状況について

平成 11 年度から平成 26 年度までの消化ガスの発生量は、図-5 のとおりである。年間約 150 万 Nm^3 ～ 180 万 Nm^3 の消化ガスの発生量があり、平均約 160 万 Nm^3 であった。投入汚泥量に対しての消化ガスの発生量は、図-6 のとおり約 10 倍から 29 倍で平均 19 倍となっている。また、消化ガス中のメタン濃度は、約 60% であり、発熱量は、 $23.8\text{MJ}/\text{Nm}^3$ (5,680kcal) で消化ガスの一般発熱量の $21\text{MJ}/\text{Nm}^3$ ～ $23.1\text{MJ}/\text{Nm}^3$ よりやや高かった。

この要因としては、消化タンクへの汚泥投入濃度などが考えられる。当センターでは、最初沈殿池で発生した生汚泥を重力濃縮式により汚泥濃縮を、また、最終沈殿池で発生する余剰汚泥は、機械濃縮機（遠心式及びベルト型ろ過式）で濃縮した後、それぞれ消化タ

ンクへ送っている。重力濃縮式からの供給濃度は平均 3.9%、機械濃縮式からの供給濃度は、平均 5.0% であり、下水道維持管理指針に示めされる投入汚泥の固形物濃度 3% 程度よりやや高いことが要因の一つとして考えられる。

メタン濃度の高品質化については、「液吸収方式」が大きな効果を上げている。図-7 及び 8 のとおり、二酸化炭素が脱硫塔及び精製塔により除去されることからメタン濃度が高くなり、品質が高まっている。二

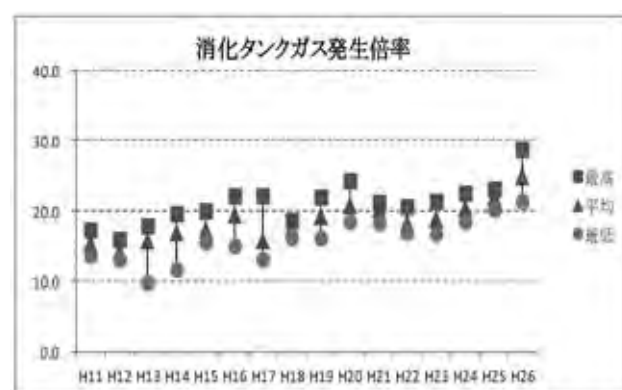


図-6 消化タンクガス発生倍率（倍率）

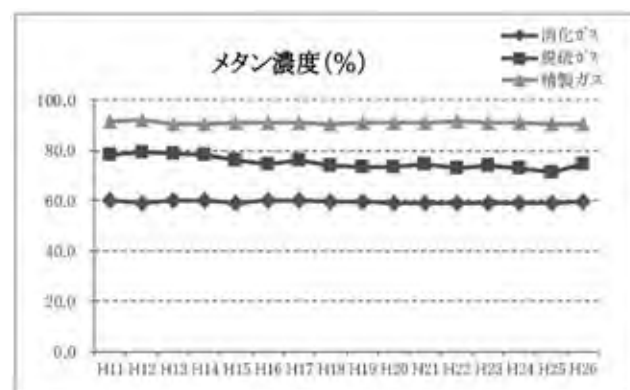


図-7 メタン濃度(%) (平成 11 年度～平成 26 年度)

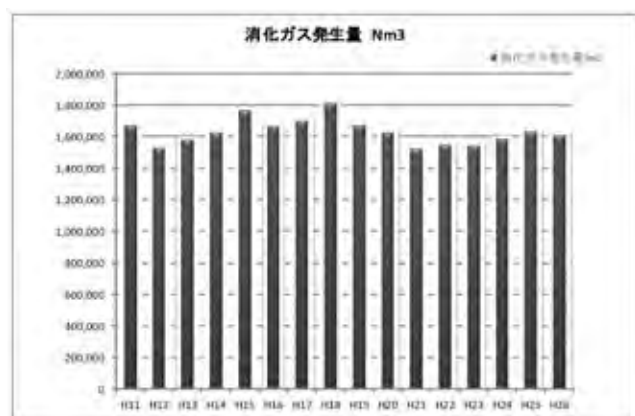


図-5 消化ガス発生量(平成 11 年度～平成 26 年度)

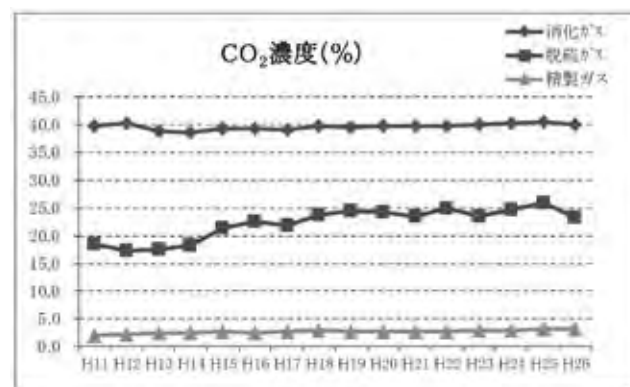


図-8 二酸化炭素 (CO₂) 濃度 (%)
(平成 11 年度～平成 26 年度)

酸化炭素濃度は、消化ガスで平均 39.7%であったが、脱硫塔後で濃度 22.3%、対脱硫塔での二酸化炭素の除去率は 44%であった。さらに精製塔後では濃度 2.7%、対精製塔での二酸化炭素の除去率は 88%となり、メタン濃度の高品質化に大きな効果が見られている。

平成 26 年度の消化ガスの年間発生量は、約 161 万 Nm³であった。

ガスホルダーから約 35%がボイラーほかに使用されるが、残り 65%の余剰ガス約 84 万 m³/年が有効利用されている。そして、精製塔で精製されたガスは、体積比で約 30%減少するが、このうち、本センター内の空調設備とガス計測設備で使用されるガスを除く約 95%が都市ガス原料として供給される。

都市ガス原料として供給されるガスの成分については、次のとおりである。(データは平成 26 年度)

(1) メタンガス

脱硫塔及び精製塔において二酸化炭素が除去されることにより、5 割程度濃度が高まって、36.3MJ/m³ (8,680kcal/m³) でガスの供給条件を満たしている。

(2) 二酸化炭素

精製ガスで年平均 3.1%であり、脱硫塔及び精製塔で 9 割以上除去されてガスの品質が確保されている。

(3) 硫化水素

消化ガスで平均約 130ppm 程度検出されるが、脱硫後は平均 0.1ppm 以下、そして精製後でも平均 0.1ppm 以下となっている。消化タンク内における硫化水素濃度については、工場排水に由来する鉄分と冬季間に消雪用として使用される地下水由来の鉄分の影響により、硫化水素がこの鉄分と反応して硫化鉄を生成するために比較的低い。

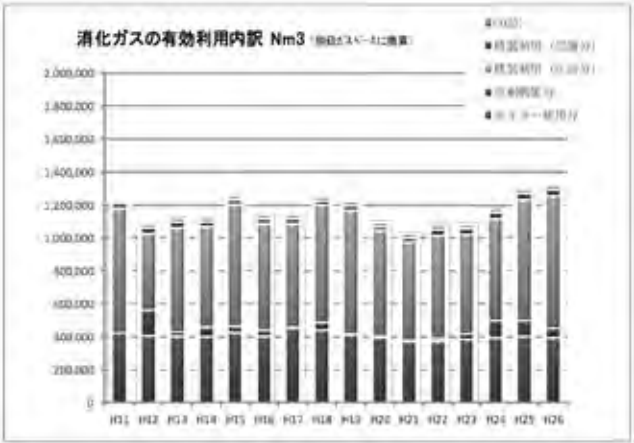
(4) このほかのガス

窒素が、精製後で約 6%と比較的高く検出されている。これは、精製工程で精製水中に溶解している窒素が精製塔内でガス化しやすくなるためと考えられ、メタンガス濃度にも影響するものである。窒素の溶解については、精製水量に応じほぼ一定と考えられることからガスの供給量が少ないほど相対的混入率が高まるので、極力窒素ガスの混入を抑えた運転を行っている。

こうして精製されたガスは、約 750 m離れたガス事業者にパイプラインで供給され、天然ガスと混合された後、一般家庭に供給されている。

平成 26 年度のガス事業者への供給量は、年間約 56 万 m³で一般家庭の都市ガス使用量の約 1,000 世帯分に相当する。

図－9 に平成 11 年度から平成 26 年度までの消化ガス有効利用の内訳を表す。



図－9 消化ガス有効利用内訳
(平成 11 年度～平成 26 年度)

表－3 都市ガス原料供給施設の主要設備

	設 備 名	設 備 仕 様
長 岡 市	消化タンク	1 次タンク 2 基、2 次タンク 2 基 (容積計 13,520m ³)
	ガスホルダー	低圧乾式型 容積：3,000m ³
	脱 硫 塔	湿式 脱硫水：2,400m ³ /日 φ2.1m×H6m 充填材：塩ビ管 φ5cm×5cm
	*精 製 塔	湿式 精製水：5,800m ³ /日 φ2.2m×H7m 充填材：塩ビ管 φ5cm×5cm
	*圧 送 機	スクリーコンプレッサ 140m ³ /時×9.5kg/cm ² ×2台 (1 台は予備)
	*除 湿 機	ブライン (-2℃) シェルアンドチューブ式
	*導 管	PLP (ポリエチレンライニングパイプ) 80A×250m
北陸ガス	*導 管	PLP (ポリエチレンライニングパイプ) 80A×500m
	*付帯設備	圧力調整機 流量計 緊急遮断弁 熱調設備等

*は消化ガス有効利用のため新たに設置した設備

5. 本事業の設備概要について

本市と北陸ガス（株）との管理および財産区分は、当センターの敷地境界とし、本市は精製設備・供給設備及び場内の導管を設置し管理している。一方、北陸ガス（株）はそれ以外の導管及び精製ガスの受入れに必要な付帯設備を設置し管理している。都市ガス原料供給施設の主要設備の仕様を表－3に、そして同施設の設備を写真－3に示す。本事業関連の建設費は、本市が224百万円（このうち、国から55／100の補助を受けた。）、北陸ガス（株）が70百万円である。



写真－3 都市ガス原料供給施設設備ほか
上：ガス圧送機 中：ガス冷却器
下：冷暖房設備室外機

本市が設置した主な設備の概要は以下のとおりである。

(1) 圧送機

圧送能力は、150m³/時（0.94MPa）となっているが、ガスの発生量などにより70m³/時（平成26年度実績）程度に調整して圧送している。また、供給先のガス会社のガスホルダーは、約0.8MPaに保たれているため、精製ガスは圧送機で約0.9MPaに加圧して供給している。

(2) 除湿機

ガスは、昇圧すると飽和水分量が低下するため、パイプライン中で結露が生じやすく、腐食の原因となる。このため、昇圧後、冷却により除湿を行っている。

(3) 監視制御システム

ガスホルダーの残量、二酸化炭素濃度及び供給ガス量が表示され、各操作を中央監視室で行えるようにし、また、二酸化炭素濃度が3.5%を超えた場合は警報を、4%を超えた場合は、自動停止するシステムとしている。

(4) その他

本センターの冷暖房設備は、従来からターボ冷凍機と重油焚き温水ボイラーを併用していたが、平成11年度に老朽化による更新に併せ管理棟などの空調熱源をガスヒートポンプに変更した。これにより、精製ガスと都市ガスの切り替えての使用が可能となった。

6. 本事業の効果および今後の課題について

下水汚泥から発生する消化ガスの精製利用は、本事業が示すとおり下水処理場に豊富に存在する処理水を使用することで、複雑なプラントを構成する必要はなく、ガスの品質も比較的安定して所定の濃度に保たれている。本事業による売渡し収入は、平成26年度末で約13百万円となり、これは増大する処理場維持管理費の一部を補てんし、下水道経営の健全化に寄与するものである。また、施設内の空調熱源として利用しており、経済効果をあげている。

一方、本事業はガス事業者と地理的条件に恵まれていたために、消化ガスを都市ガスの原料として供給できたものであるが、そのほかの地域でも利活用できるシステムの確立が望まれる。また、消化ガスの発生量が平成18年度をピークにやや伸び悩んでいるほか、窒素ガスの混入により熱量が期待したほど向上していないなどの課題が発生している。今後、消化率の向上や都市ガスのカロリーアップ化に対応できるよう技術的な改善が求められるものと考ええる。

本事業は、実用化からすでに16年を経過し、年々機器の精密点検など維持管理に係る経費の増加や処理施設全体の老朽化など緊急的な課題に直面している中で、いかに効率的な財政運営を行うか熟慮していかなければならない。

7. むすび

平成23年3月に発生した東日本大震災を機に、エネルギーなどの問題に対する関心が非常に高くなってきており、特に再生可能なエネルギーとして下水道が注目されている。

当市は、「長岡市環境基本計画」に基づき、市民、事業者、行政が一体となり、再生可能エネルギーなどの地域資源を最大限に活用した循環型で低炭素型社会の実現に向けて取り組んでいるところである。このような施策の中で、生ごみを原料とするバイオガスを利用した生ごみバイオガス発電センターが平成25年度から稼働している。この事業の実現に当たっては、バイオガスエネルギーを効率的に電気エネルギーに転換できるシステムが確立していたことが大きな要因と考える。

このように、再生可能なエネルギーなどの有効利用の実現については、技術的及び経済的な因子が重要となる。特に下水道資源は、バイオガスをはじめとする再生可能なエネルギーなど有効利用の可能性が高い。このことから、関連事業者からは、大規模の施設をはじめ、中小規模の施設での実用化に向けた技術の開発を望むとともに、今後も国からの財政や法規制の支援を受けながら、各自治体はその施設に適した事業が推進できるよう環境の整備に期待するものである。

こうした情勢のなかで、本事業の例が再生可能エネルギーなどの有効利用の実用化に向けての参考になれば幸いである。

【参考文献】

- 1 下水道維持管理指針 実務編 2014年版
公益社団法人 日本下水道協会
- 2 消化ガス有効利用基本計画 報告書 平成9年度
新潟県長岡市 財団法人下水道新技術推進機構

特集：第 28 回下水汚泥の有効利用に関するセミナー特集（新潟市）

研究紹介

下水汚泥利用促進に関する
土木研究所の取組国立研究開発法人 土木研究所 先端材料資源研究センター（資源循環担当）
南山 瑞彦、桜井 健介、高部 祐剛

キーワード：バイオマス利用、微細藻類、エネルギー回収、刈草、温室効果ガス

1. はじめに

国立研究開発法人土木研究所は、国の研究機関であった国土交通省土木研究所が、平成 13 年 4 月に国の機関（国土技術政策総合研究所）と独立行政法人とに再編されたことにより発足した研究機関のうち、独立行政法人土木研究所が、平成 27 年 4 月から国立研究開発法人となったものである。国土技術政策総合研究所が政策の企画立案に関する研究等を行うのに対し、土木研究所は、土木技術に関する先端的・基礎的な研究開発と技術指導を行う機関として位置づけられていることに加え、国立研究開発法人化に際し、これまで以上の研究成果の最大化を目指していくこととしている。

また、同じく平成 27 年 4 月に、土木研究所に先端材料資源研究センター（Innovative Materials and Resources Research Center、略称 iMaRRC、アイマーク）が設置された。iMaRRC では、コンクリートや鋼材など従来の土木材料に関する調査研究や技術開発を行うことに加え、先端的な材料を土木構造物へ適用し、社会インフラの長寿命化、耐久性の向上や、劣化検知・診断を容易にするための技術開発を行うとともに、土木材料、下水及び下水汚泥のリサイクル技術やエネルギー使用の効率化（創エネ等）技術の調査研究・技術開発を行うことにより、持続可能な社会、低炭素循環

型社会の構築に貢献することを目的としている。これに伴い、下水道施設に関わる材料の調査研究や技術開発に順次取り組んでいくこととなるが、独立行政法人土木研究所リサイクルチームとして進めてきた嫌気性消化技術の高度化や下水処理システムにおける藻類培養技術の開発など下水道資源の有効利用や再生可能エネルギーの利用技術、下水中に排出されるノロウイルス等の分析方法や対策技術など病原微生物に関する研究も、iMaRRC（資源循環担当）で引き続き実施される。

本報では、現在すすめている土木研究所の中期計画（計画期間平成 23～27 年、平成 23 年 3 月国土交通大臣及び農林水産大臣認可）で実施している下水汚泥等バイオマスの有効活用に関するプロジェクト研究について、その概要と、得られた成果の一部として、藻類による資源生産システムの開発と地球温暖化対策として有効な刈草の収集範囲の検討を紹介する。

2. 下水汚泥等バイオマスの有効活用に関するプロジェクト研究

都市や農村に広く、薄く存在しているバイオマスを資源やエネルギー源として地域で有効活用するため、バイオマスの効率的回収、生産、利用技術、および、バイオマスの地域循環型利用システムについて検討するプロジェクト研究として、「再生可能エネルギーや廃棄物系バイオマス由来肥料の利活用技術・地域への

導入技術の研究」を実施している。

このプロジェクト研究は、バイオマスとして、下水汚泥だけではなく公共緑地から発生する刈草等も対象とし、また、都市域だけではなく、農村域も含んだ広域をバイオマス利活用システムの検討範囲として設定していることが特徴である。このプロジェクト研究の中で、下水汚泥を主な対象としたバイオマス利用について以下の3課題を実施している。

2.1 低炭素型水処理・バイオマス利用技術の開発

本研究は、下水汚泥の濃縮、消化、焼却等のプロセスの効率化、省エネルギー化等をさらに促進するための技術開発を行うとともに、これと一体的なバイオマス利用技術を開発することを目的としている。また、これらの技術適用による水処理系への影響や温室効果ガス排出抑制効果等も評価する（図2-1）。

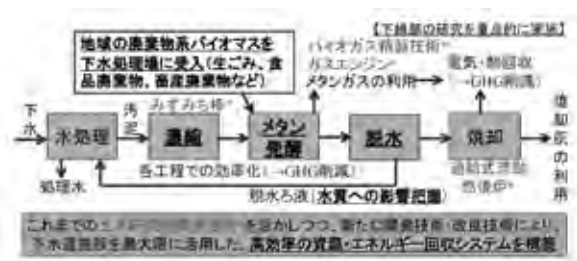


図2-1 低炭素型水処理・バイオマス利用技術の開発に関する研究の概要

研究の一つとして、高濃度の下水汚泥のメタン発酵技術について、実験的検討を行っている。これは、小規模下水処理場で発生する汚泥を、拠点となる下水処理場に効率的に輸送・集約して嫌気性消化を行い、メタンガスとしてエネルギー回収することを意図している。

これまで、脱水汚泥を用いた投入固形物（TS）5～20%程度の嫌気性消化実験を実施し、TS10%程度以下で従来と同程度のメタン回収（ $0.24\text{NL-CH}_4/\text{gVS}$ ・投入程度）が可能であることを示した。また、汚泥性状が異なると、アンモニア生成率が異なることを明らかにした。

2.2 下水道を核とした資源回収・生産・利用技術

本研究は、下水処理場の有する資源に着目し、バイオマスとして利用価値の高い藻類の培養などにより、高度な資源回収、生産を行うための技術開発を行うことを目的としている。また、回収、生産資源の利用可能性や安全性を検証し、最適な資源利用方法の提案を行うための研究を進めている（図2-2）。

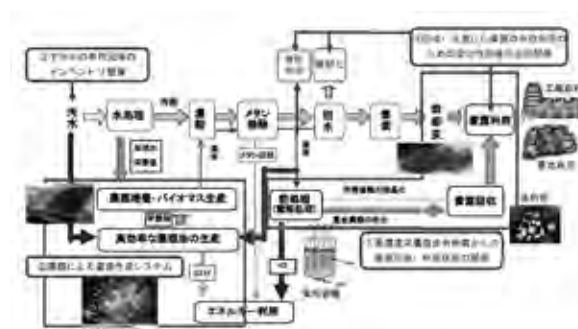


図2-2 下水道を核とした資源回収・生産・利用技術に関する研究の概要

このうち、藻類による資源生産システムの検討では、下水流入水および下水二次処理水を用い、室内や屋外で藻類培養実験を行い、藻類中の脂肪酸や発熱量の定量から下水培養された藻類バイオマスのエネルギー利用の可能性を示してきた。また、下水処理場に設置した380 L規模の培養水槽を利用し、下水二次処理水を用いた屋外藻類培養実験を実施し、 CO_2 添加が培養藻類の高位発熱量を向上させることを明らかにした。成果の一部を本報で紹介する。

2.3 地域バイオマスの資源管理と地域モデル構築

本研究は、公共緑地管理に由来するバイオマスについて、各種利用技術の CO_2 排出量を評価する手法を確立するとともに、バイオマスの有効な利用方法を提案することを目的としている。また、望ましいバイオマス利用方策を適用するための地域モデルを構築する（図2-3）。

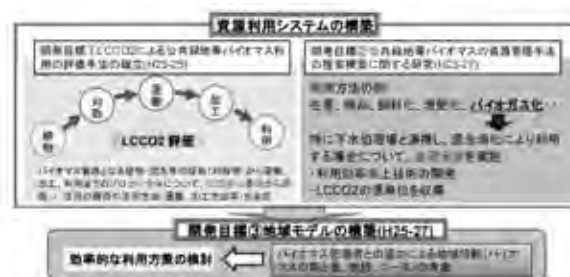


図2-3 地域バイオマスの資源管理と地域モデル構築に関する研究の概要

これまでに、道路や河川の管理上生じる刈草の処理方法について、温室効果ガス排出量算定モデルを開発してきた。今後、河川管理者などの公共緑地の管理者を対象に、温室効果ガス排出量を削減可能な中間処理施設等の選択に資するマニュアルを作成していく予定である。成果の一部を本報で紹介する。また、刈草と下水汚泥の混合物を用い、中温（ 35°C ）、高温（ 55°C ）

での連続消化実験を行った結果、高温条件で、安定したメタン転換が実現することが明らかとなった。さらに、回分式実験により、超高温（80℃）前処理でメタン転換率が向上することが示唆された。爆砕を施した木質チップ（コナラ）と下水汚泥の混合物を用いた実験も行い、従来（213℃）よりも低温（178℃）の爆砕処理でメタン転換が可能であることが明らかとなった。

3. 藻類による資源生産システムの開発

化石燃料利用にともなう地球温暖化を背景に、再生可能エネルギーの利用が推進されており、都市下水や工場排水に豊富に含まれる窒素、りんといった栄養塩を用いた藻類培養による新たな燃料の生産が試みられている^{(01), (02)}。既往研究において^{(04), (05)}、ボトリオコッカスやクロレラといったオイル含量の高い特定藻類を対象に、下水処理水を用いた培養が試みられているが、これら特定の藻類の培養は、実環境下での適用性に課題が残る。土木研究所では、植種を行わず、二次処理水を直接利用した藻類培養実験を行い、藍藻類や緑藻類が優占すること、また、CO₂添加および水理学的滞留時間（HRT）が藻類培養特性に及ぼす影響をラボレベルで明らかにしてきた^{(06), (07)}。一方で、自然条件下での藻類培養におけるこれら操作因子の効果については実証されていない。また、実施設計の方法、操作方法を提示するためには、まず、光、水温、降雨といった自然環境の変化、処理水質の変動等が藻類培養に及ぼす影響を明らかにするとともに、設計・操作因子を明らかにする必要がある。既往研究⁽⁰⁸⁾では、下水処理水を用いた藻類培養のモデルを構築しているが、自然環境の変化が藻類培養増殖特性に与える影響は考慮されていない。そこで、下水処理水を用い、CO₂を添加した条件下での藻類培養を、屋外に設置した培養装

置で実施し、自然条件下での藻類増殖特性およびCO₂添加効果を既往研究⁽⁰⁹⁾との比較を含め把握するとともに、自然環境の変化も考慮に入れた藻類増殖を表現する数理モデルを構築し、実測データを用いてその再現性を確認することとした。

3.1 方法

藻類培養に用いた下水二次処理水は、実流入下水を標準活性汚泥法処理装置（容積：100L、HRT：6時間）で連続的に処理して得た。実下水処理場の屋外に設置した Raceway 型培養装置（図 3-1）に流速 95L/日で連続的に二次処理水を流入させ、HRT4 日で藻類培養を行った。過去の知見⁽⁰¹⁾に従って、培養槽中 pH が 8 に達した時にガスボンベより CO₂を添加し、藻類増殖に必要な炭素源を供給した。装置への CO₂添加を 2014 年 6 月 6 日より開始し、11 月 21 日に装置の運転を停止した。

流入下水、処理水および培養水中の水温、pH および DO を平日 1 回、また、栄養塩（窒素、りん）、クロロフィル a、SS、有機・無機炭素濃度を原則週に 2 回測定した。また、藻類および動物プランクトンの同定を原則 2 週間に 1 度実施した。さらに、培養藻類の高位発熱量を測定した（n=10）。

pH および水温は、HM-31P（TOA DKK, Japan）で、DO は DO-31P（TOA DKK, Japan）でそれぞれ測定した。窒素およびりん濃度は、TRAACS2000（Bran Luebbe, Germany）で、また、有機・無機炭素濃度は、TOC-V CPH（Shimadzu, Japan）でそれぞれ測定した。SS、クロロフィル a および高位発熱量は Standard method⁽¹⁰⁾、河川水質試験方法（案）⁽¹¹⁾ および JIS M 8814⁽¹²⁾に従い測定した。藻類および動物プランクトンの同定は、光学顕微鏡（BH-2, Olympus, Japan）を用いて行った。

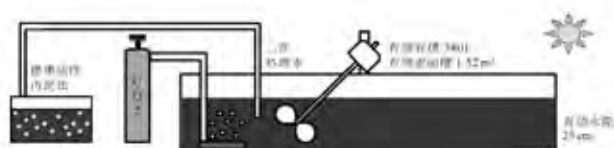


図 3-1 藻類培養装置の概略図³⁹⁾

3.2 結果

実験期間での培養を実施した地点における月別平均気温は 12.2-26.0℃ の範囲にあり 8 月で最も高く、また、全天日射量は 7.9-18.7 MJ/m²/day の範囲であり 7 月で最も高かった¹³⁾。

実験期間を通じた、藻類培養槽に流入する二次処理水の SS、全有機炭素、全窒素および全リンの中央値は、それぞれ 4.2mg/L、7.20mg-C/L、15.6mg-N/L および 2.00mg-P/L であった。

藻類培養槽での DO は、光合成により 10mg-O₂/L 以上と飽和・過飽和状態であり、pH は CO₂ 添加にともない 7.7-8.0 の間で安定していた。無機炭素濃度は、二次処理水で 11.8mg-C/L であったが、CO₂ 添加により培養槽では 21.4mg-C/L となった。

SS 濃度が比較的安定した 8 月での培養槽単位面積当たりの SS 培養量は 12.9g/m²/day であった。ニュージーランドでの流入下水を用いた HRAP (High Rate Algal Pond) において、夏季 (11 月 -1 月) で 15.3g/m²/day の培養量が得られており⁰¹⁾、本研究での 8 月の培養量は、この HRAP での 85% の値であった。藻類培養槽での溶存有機物濃度については、二次処理水の濃度変動に呼応する形で変化した一方で、培養期間での二次処理水中濃度 (中央値: 5.30mg-C/L) に比して、培養槽 (6.40mg-C/L) での濃度は高かった。藻類の炭素固定にともない SS が増殖し、藻類由来のデトリタスの一部が分解することで溶存有機物濃度が上昇したものと考えられる。

培養槽での藻類同定結果の一例を図 3-2 に示す。培養期間を通じて、全藻類細胞数に占める緑藻の細胞数の割合が 85-97% と高く、特にイカダモ科が 51-87% と優占した。

図 3-3 に培養藻類中高位発熱量を示す。本研究での高位発熱量は、SS が減少した 7 月 1 日で 13.5MJ/kg と特異的に低かったが、その他の期間では、15.3 から 18.0MJ/kg の範囲で安定した値を示した。また、CO₂ を添加していない条件での値⁰³⁾ に比して、高位発熱量が 36.7% 増加したことから、自然条件下での藻類培養における CO₂ 添加効果が示された。

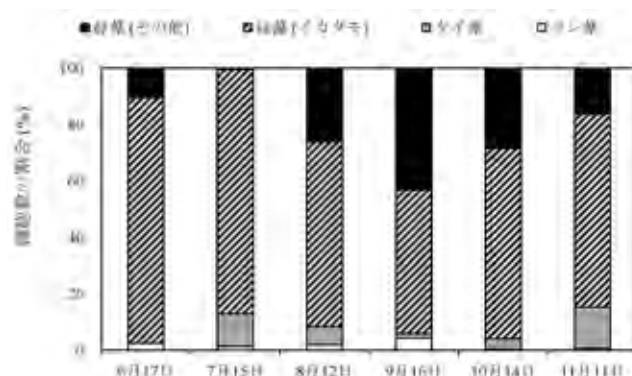


図 3-2 実験期間での培養藻類の構成³⁹⁾

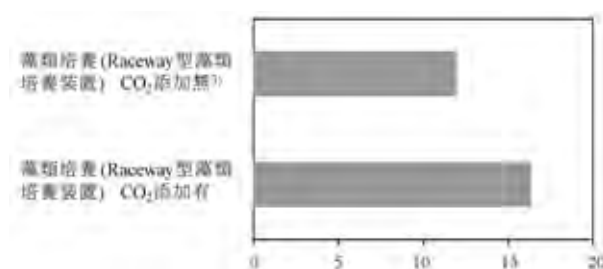


図 3-3 培養藻類の高位発熱量^{03), 39)}

藻類増殖を表現する数理モデルの概念図を図 3-4 に示す。数理モデルは、Tsuno et al.¹⁴⁾ の湖沼モデルを参考に構築し、さらに藻類の増殖における無機炭素の影響を考慮した。

藻類の増殖での影響項は無機炭素、無機態窒素および PO₄³⁻ 濃度、水温ならびに全天日射量を考慮し、影響項の式は既往研究を参照した^{14), 15)}。藻類の増殖、呼吸・枯死は一次式で、また動物プランクトンによる捕食は温度影響および藻類濃度による影響を考慮した¹⁴⁾。なお、培養槽での無機炭素の変化は、実測値を直線的に変化するものとし、培養槽内は完全混合であるとした。また、モデルで用いる諸係数については、本研究から得られた値、または文献値^{14) - 22)} を参照した。

構築したモデルによる計算結果のうち、SS (藻類 + 動物プランクトン + デトリタス)、溶存有機物濃度を実測値とともに図 3-5 に示す。数値計算は、SS の増

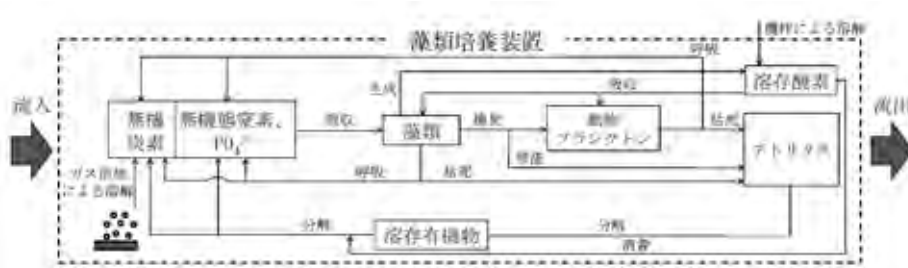


図 3-4 数理モデルの概念図³⁹⁾

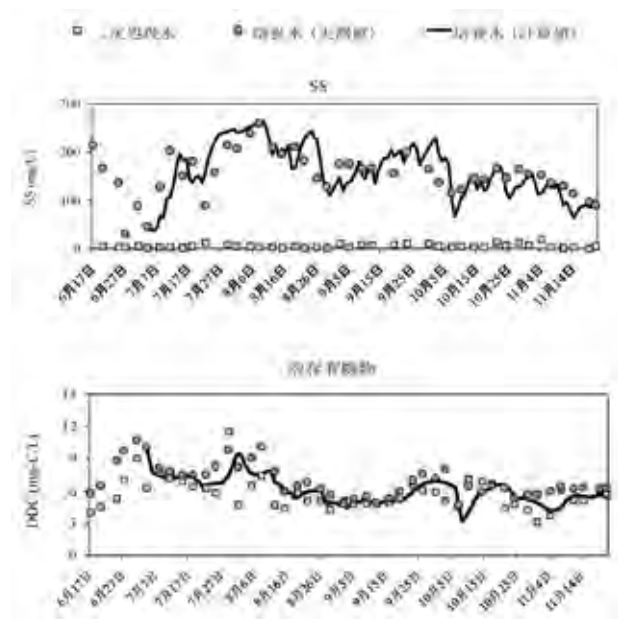


図 3-5 二次処理水および培養水での SS、溶存有機物濃度の実測値および数理モデルによる計算値³⁹⁾

加が始まった7月4日から行った。各項目ともに、培養槽での増減の傾向を良く再現できていた。また、SSが比較的安定した8、9月での実測値および計算値の中央値は、SS、無機態窒素、 PO_4^{3-} および溶存有機物濃度でそれぞれ、178 および 195mg/L、2.40 および 2.37mg-N/L、0.900 および 0.463mg-P/L ならびに 6.35 および 5.78mg-C/L であり、 PO_4^{3-} の計算値が実測値よりやや小さかったが、モデルでの計算値は実測値と同様の値となり、本モデルによる実測データの再現性が示された。

3.3 まとめ

下水処理水を用い、 CO_2 を添加した条件下での藻類培養を、屋外に設置した培養装置で実施し、自然条件下での藻類増殖特性および CO_2 添加効果を把握するとともに、自然環境の変化も考慮に入れた藻類増殖を表現する数理モデルを構築し、実測データを用いてその再現性を確認した。

4. 地球温暖化対策として有効な刈草の収集範囲の検討

河川、道路、公園、ダムなどの公物管理にあたり、草や木が多量に伐採・処分されている。それらをエネルギーや堆肥などの有機資材として有効利用し、化石資源由来のエネルギーやそのエネルギーの消費により製造される製品を代替できれば、温室効果ガス (Greenhouse gas, GHG) の排出を削減し、地球温暖

化対策として貢献が可能である。そこで、公共緑地等バイオマスを資源として位置づけ、恒久的に利用していくための要素技術やシステムの提示を目標として検討を進めている。

地球温暖化対策として、下水処理場の周辺で発生する刈草を、下水汚泥と混合して嫌気性消化する場合、刈草の運搬距離が、地球温暖化対策としての効果に大きく影響を与えられとされる。そこで、地球温暖化対策として有効な刈草の収集範囲を明らかにするため、嫌気性消化槽を有する既存の下水処理場へ刈草を運び下水汚泥と混合して嫌気性消化する事業を、一般的と思われる条件で仮定して、実施に伴う追加的な GHG 排出量、および、刈草を嫌気性消化しメタンガスを得て、発電することによる GHG 排出削減量を試算した。

4.1 方法

評価対象とした事業は、図 4-1 に示したとおり、灰色で着色した 11 個のプロセスで構成することとした。刈草、発生したメタンガス、および、消化残渣は以下の条件で処理されると仮定した。

- 除草場所は、肥料や農薬が施用されていない。
- 除草は、1 年に 2 回行われ、発生した刈草はその都度処理される。
- 刈草は、草刈機で除草・回収された後に、トラックで運搬され、嫌気性消化槽を有する既存の下水処理場へ運搬される。
- 運搬された刈草は、下水処理場内で機械破碎後、下水汚泥と混合して嫌気性消化される。

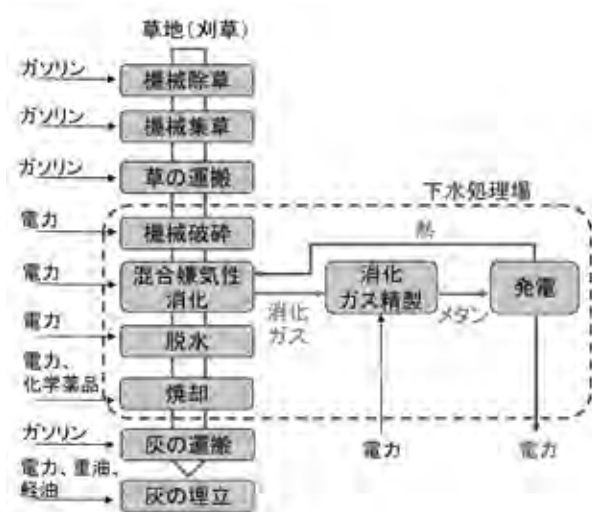


図 4-1 評価対象とした刈草と下水汚泥の混合嫌気性消化のフロー^{40), 41)}

(灰色で着色された角丸の長方形は、構成するプロセスを示す)

- 発生したメタンガスは発電に使われ、発電の排熱は刈草と下水汚泥の加温に利用される。
- 消化残渣は脱水後に焼却されて、灰は埋め立て処分場へ運搬し、埋め立てられる。

GHG 排出量、および、GHG 排出削減量は、除草面積 1000m²、1 年間あたりを単位として計算した。ここで、1000m² は、除草工の積算に使われる単位である。嫌気性消化以後の各プロセスでは、刈草の追加によって新たに消費した化石燃料、電力、化学薬品、または、発生した電力に着目し、既存の下水処理場で汚泥処理に伴い排出されていた GHG は評価対象外とした。

集計する GHG は、二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素とした。これらを合計する時には、メタンと一酸化二窒素の放出量に、温暖化係数 (GWP100)²³⁾ である 28 と 265 をそれぞれ乗じることで二酸化炭素換算量として計算した。GHG 排出量と排出削減量を、プロセス毎に算出した。プロセス毎の GHG 排出量を、活動に伴って消費された化石燃料、電力、化学薬品の量に GHG 排出係数²⁴⁾ (表 4-1) を乗じ、それらを合計して算出した。ただし、化学薬品の GHG 排出係数は、LCA ソフトウェア (MiLCA, 一般社団法人産業環境管理協会) を参照した。一方、発電機を用いてメタンガスで発電するプロセスでは、発電された電力が有効利用されたことにより消費されなかった電力量に GHG 排出係数を乗じ、GHG 排出削減量を計算した。

表 4-1 化石燃料、電力、化学薬品の使用による GHG 排出係数^{40), 41)}

分類	項目	温室効果ガス		
		CO ₂ (kg)	CH ₄ (g)	N ₂ O(g)
化石燃料	ガソリン (L)	2.32	1.87*	0.0215*
	軽油 (L)	2.58		0.0641
	重油 (L)	2.71		0.0685
電力	電力 (kWh)	0.550		
化学薬品	消石灰 (kg)	1.05		
	セメント (kg)	0.86		
	キレート剤 (kg)	1.37		

*トラックの場合は含まない

除草および集草プロセスでは、刈幅 150cm のハンドガイド式の草刈り機を用いることとした。草刈り機の性能は、表 4-2 の値を用いた²⁵⁾。土木研究所の過去の調査²⁶⁾ から、1,000m² あたり、1 回の除草から、数日乾燥させた状態 (含水率 18%) で 334kg-wet が発生するものとした。

運搬プロセスでは、1,000m² で発生した刈草につき、2 トントラック 1 台²⁷⁾ を計上し、走行距離を変数とした。トラックへの積み込みや積み下ろしは人力とし、

表 4-2 草刈機の性能^{40), 41)}

項目	作業効率 (h/1000m ²)	ガソリン燃費 (L/h)
除草	1.28	9.2
集草	1.04	3.0

GHG 排出量は無しとした。走行速度を 30km/h²⁵⁾ とし、ガソリン燃費 4.9L/h²⁸⁾ から、ガソリン使用量を算出した。

破碎プロセスでは、刈草を数 cm に破碎できる電気式の破碎機を使うこととし、効率は 0.023kWh/kg-dry と設定した²⁹⁾。

消化、脱水プロセスは、高温消化、遠心脱水によるものとした。高温消化は、既報³⁰⁾ のとおり、安定したメタン転換が行われたことから選択した。消化、脱水による電力消費量は、処理体積に比例するものと仮定し、汚泥体積と電力消費量の実測値³¹⁾ から、それぞれ 7.2、7.6kWh/m³ と設定した。刈草の比重は、220kg/m³ として計算した³²⁾。脱水プロセスでは、刈草の含水率が下水汚泥と比べてかなり低いため、刈草が保持していた水分は、脱水後も変化しないことと仮定した。

焼却プロセスは、100t/d の流動床式焼却炉を使用することを仮定した。焼却プロセスの GHG 排出量は、電力と化学薬品の使用に伴う GHG 排出量に、刈草が焼却される際に生じるメタンと一酸化二窒素の発生量を二酸化炭素に換算して、加えて計算された。刈草のメタンと一酸化二窒素の発生係数は、一般廃棄物のそれらと同じと仮定し、それぞれ、0.046g-CH₄-C/kg-C と 0.35g-N₂O-N/kg-N とした。これらは、一般廃棄物を連続燃焼式の流動床焼却炉で燃焼した時の重量あたりのメタンと一酸化二窒素の発生係数³³⁾ から一般廃棄物の炭素と窒素の含有率³⁴⁾ で除して計算された。刈草の投入による、電気と化学薬品の増加量は、都市ごみの量と質に応じた電気量と化学薬品量が計算可能なプログラム³⁵⁾ を利用して計算した。焼却灰のうち、集塵灰は、キレート剤による処理後、セメント固化されるものとした。

嫌気性消化槽で発生した消化ガスは、精製された後に、発電機で使用されることとした。メタン発生量は、1kg-VS の刈草の投入につき、0.19Nm³ のメタンが得られることとし³⁰⁾、刈草の VS 分解率は 40% とした。発電プロセスでは、刈草の追加によって増加したメタンガスを使ってガスエンジンで発電し、従来の化石燃料由来の電気と代替することを想定した。発電機に関

表 4-3 発電機に関する設定値^{40), 41)}

項目	値
消化ガス精製 ($\text{kWh}/\text{Nm}^3\text{-CH}_4$)	0.387
メタン低位発熱量 (MJ/Nm^3 , LHV)	35.9
ボイラー熱効率 (%)	87.0
ガスエンジン発電効率 (%)	33.0
ガスエンジン排熱回収率 (%)	34.0

する設定値は、既報³¹⁾でとりまとめられた値(表 4-3)を用いた。ガスエンジンの排熱は、刈草と下水汚泥の加温(20℃から 55℃を想定)に利用されることとした。これにより、従来、下水汚泥の加温に使われていたメタンガスの一部が不要になり、それらは、発電機で使われることとした。刈草の比熱は、既報³⁶⁾を参考に、 $4\text{kJ}/(\text{kg-dry} \cdot \text{K})$ と設定した。

刈草の焼却灰は、下水汚泥の焼却灰と混合されて、4 トンダンプを用い、埋め立て処分場への運搬されることとした。刈草の焼却灰の運搬によるガソリン消費量は、4 トンダンプのガソリン消費量に占有率(最大積載量 4t に占める刈草の焼却灰重量 $33\text{kg}/1000\text{m}^2$ の割合)を乗じて算出した。4 トンダンプのガソリン消費量は、燃費を 6.9 L/h ²⁸⁾、走行速度は 30km/h とした。1 回除草あたりの焼却灰の運搬距離は、日本国内の標準的な値として、往復で 21km とした。これは、国内の総面積 378 千 km^2 ³⁶⁾を、国内の灰埋め立て処分場数 $1,742$ 施設³⁷⁾で除した値と同面積の円の半径の往復分に、迂回率(直線距離に対する道路距離の比)を乗じて計算した。迂回率は、既報³⁸⁾を参考に 1.3 を使用した。灰の埋め立て処分場への運搬は、刈草の発生場所から下水処理場までの運搬と異なり、温室効果ガスの排出量の全体(刈草の運搬に伴う分は除く)に対し、 1% 以下で小さいため、固定して計算した。

灰の埋め立てプロセスは、焼却灰のセメント固化物を陸上埋め立てすることを想定した。計算には、既往のプログラム³⁴⁾を使用した。このプログラムでは、浸出水の処理に電気および重油が使用され、埋め立て用の重機に軽油が使用されることを想定している。

刈草の下水汚泥への追加的な投入による脱水性の改善²⁵⁾、焼却炉の補助燃料削減の効果(脱下水汚泥に刈草のメタン発酵残渣が含まれることによる保有熱量増加)も期待されるが、定量的な効果に関する知見が十分でなく、過剰な評価になることを避けるため、本計算には含めなかった。

4.2 結果

図 4-2 に各プロセスの GHG 排出量と発電された電力による GHG 排出削減量を示す。破線は、GHG 排出削減量、すなわち発電された電力量を GHG に換算した値を示している。GHG の排出削減量が排出量を上回るのは、年間走行距離が 163km (1 回の除草につきトラックの走行距離 81km) 以下のケースであった。迂回率を 1.3 とした場合、本結果から地球温暖化対策として有効な刈草の収集範囲は、下水処理場から直線距離で 31km 以下の地域であった。運搬プロセスを除いた GHG を排出したプロセスのうち、GHG 排出量は、除草、焼却、消化ガス精製の順に大きかった。

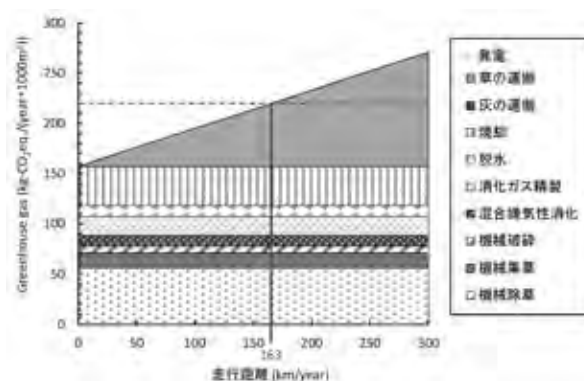


図 4-2 走行距離に応じた各プロセスの温室効果ガス排出量と発電された電力による温室効果ガス排出削減量^{40), 41)}

4.3 まとめ

地球温暖化対策として有効な刈草の収集範囲を明らかにするため、嫌気性消化槽を有する既存の下水処理場へ刈草を運び下水汚泥と混合して嫌気性消化する事業を想定し、実施に伴う追加的な GHG 排出量、および、刈草も嫌気性消化したメタンガスを用い発電することによる GHG 排出削減量を試算し、有効な刈草の収集範囲としてとりまとめた。

5. 研究開発成果の社会への還元

土木研究所では、自治体や大学、民間企業との共同研究による技術開発も行ってきた。みずみち棒、ガスエンジン等、既に下水道事業で活用されている技術も少なくない。産業技術総合研究所、民間企業との共同開発の成果である過給式流動燃焼システムは、本年度、第 17 回国土技術開発賞 最優秀賞、第 41 回優秀環境装置表彰経済産業大臣賞を受賞した。平成 28 年 1 月時点で計 5 基が稼働、計 3 基が建設中である。主にこれらの技術を対象として、土木研究所では「下水汚泥

などのバイオマス資源有効活用技術講習会」を行っており、技術の周知に努めるとともに、参加者との意見交換を通して、現場への研究成果の導入における課題を把握したいと考えている。

土木研究所 iMaRRC (資源循環担当) では、下水汚泥等バイオマスの処理・有効利用について対象範囲を広げて研究を実施しており、これにより、地域における有効なバイオマス利用システムの構築を目指している。引き続き、研究の進展に努めていきたいと考えている。技術上の相談があれば、下記宛ご連絡いただければ幸いである (土木研究所 iMaRRC (資源循環担当) メールアドレス recycle@pwri.go.jp)。

参考文献

- 01) Park, J.B.K., Craggs, R.J., Shilton, A.N.: Recycling algae to improve species control and harvest efficiency from a high rate algal pond, *Water Research*, Vol.45, pp.6637-6649, 2011.
- 02) Chinnasmy, S., Bhatnagar, A., Hunt, R.W., Das, K.C.: Microalgae cultivation in a wastewater dominated by carpet mill effluents for biodiesel application, *Bioresource Technology*, Vol.101, pp.3097-3105, 2010.
- 03) 津森ジュン、井上研一郎、日高平、桜井健介: 下水道を核とした資源回収・生産・利用技術に関する研究、平成 25 年度下水道関係調査研究年次報告書集、土木研究所資料 4294 号、pp.12-21、2013.
- 04) Cho, S., Luong, T.T., Lee, D., Oh, Y.K., Lee, T.: Reuse of effluent water from a municipal wastewater treatment plant in microalgae cultivation for biofuel production, *Bioresource Technology*. Vol.102, pp.8639-8645, 2011.
- 05) Sydney, E.B., da Silva, T.E., Tokarski, A., Novak, A.C., de Carvalho, J.C., Woiciechowski, A.L., Larroche, C., Soccol, C.R.: Screening of microalgae with potential for biodiesel production and nutrient removal from treated domestic sewage. *Applied Energy*. Vol.88 (10) , pp.3291-3294, 2011.
- 06) Inoue, K., Uchida, T.: Microalgae cultured by sewage and organic constituents, *Chemosphere*, Vol.93 (7) , pp.1442-1445, 2013.
- 07) Inoue, K., Uchida, T.: Microalgae cultured by sewage and organic constituents, *Chemical Engineering and Technology*, Vol.36 (12) , pp.2169-2173, 2013.
- 08) Drexler, I.L.C., Joustra, C., Prieto, A., Bair, R., Yeh, D.H.: Algae Sim: A model for integrated algal biofuel production and wastewater treatment, *Water Environment Research*, Vol.86, pp.163-176, 2014.
- 09) Craggs, R., et al., *Bioresource Technology*. 104, 1321-1328, 2011.
- 10) American Public Health Association Publication (APHA): Standard methods for the examination of water and wastewater, nineteenth ed. Washington, DC, USA, 2005.
- 11) 建設省技術管理業務連絡会水質部会、河川水質試験方法 (案)、1997.
- 12) Japanese Standards Association, Japan Coal Energy Centre: Coal and coke determination of gross calorific value by the bomb calorimetric method, and calculation of net calorific value, Tokyo, 2003.
- 13) 気象庁、過去の気象データ検索、<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/>
- 14) Tsuno, H., Hidaka, T., Jorgensen, S.E.: 2-Layer Model Development, Planning and Management of Lakes and Re-servoirs, Models for Eutrophication Management, PAMOLARE Training Package Version 1.0, UNEP International Environmental Technology Centre (UNEP-DTIE-IETC) and International Lake Environment Committee (ILEC) . pp.50-73. 2001.
- 15) Di Toro, D.M., O' Connor, D.J., Thomann, R.V.: A dynamic model for the phytoplankton population in the Sacramento San Joaquin Delta, *Advanced Chemistry Ser.*, Vol.106, pp.131-180, 1971.
- 16) Andersen, T., Hessen, D.O.: Carbon, nitrogen and phosphorus content of freshwater zooplankton, *Limnology and Oceanography*. Vol.36 (4) , pp.807-814, 1991.
- 17) Markager, S., Vincent, W.F.: Spectral light attenuation and absorption of UV and blue light in natural waters. *Limnology and Oceanography*. Vol.45 (3) , pp.642-650, 2000.
- 18) Geider, R.J., macIntyre, H.L., Kana, T.M.: A dynamic regulatory model of phytoplanktonic acclimation to light, nutrients, and temperature. *Limnology and Oceanography*. Vol.43 (4) , 679-694, 1998.

- 19) 津野洋、浦邊真郎、吉川克彦、草野文嗣：数理モデルによるエアリフト循環の余呉湖水質改善効果の予知に関する研究、水環境学会誌、Vol.19 (3) , pp.228-235, 1996.
- 20) 奥川光治、宗宮功：数理モデルによる富栄養化のシミュレーション解析、土木学会論文報告集、Vol.337、pp.119-128、1983.
- 21) Kirk, J.T.O.: Light and photosynthesis in aquatic ecosystems, Cambridge University Press., U.K., 1983.
- 22) Evervecq, E., Gosselain, V., Viroux, L., Descy, J.P., Potamon: A dynamic model for predicting phytoplankton composition and biomass in lowland rivers. Water Research. Vol.35 (4) , pp.901-912, 2001
- 23) Myhre, G., et al. : Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 659-740, 2013.
- 24) 環境省：温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル (Ver3.5)、2014.
- 25) 一般財団法人建設物価調査会：国土交通省土木工事標準積算基準書 (河川・道路)、p. III -2- ① -2、2013.
- 26) 独立行政法人土木研究所：公共事業由来バイオマスの資源化・利用技術に関する研究、平成 20 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 4157 号、pp.38-46、2011.
- 27) 公園緑地維持管理研究会：公園・緑地の維持管理と積算、p. 303、2005.
- 28) 一般財団法人経済調査会：月刊積算資料、2010.
- 29) 藤原宣夫：植栽樹木の二酸化炭素固定量からみた都市緑化施策の評価に関する研究、千葉大学博士論文、pp.37-50、2005.
- 30) 津森ジュン、日高平、桜井健介、堀尾重人、王峰：地域バイオマスの資源管理と地域モデル構築に関する研究、土木研究所資料第 4249 号、pp.7-11、2013.
- 31) 惣田訓、池道彦：処理規模を考慮した様々な下水汚泥処理システムのエネルギー消費量の比較評価、再生と利用、Vol.34、No.129、pp.6-15、2010.
- 32) Onoda, Y., et al. : Global patterns of leaf mechanical properties, Ecology letters, Vol.14, Issue 3, pp.301-312, 2011.
- 33) 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方法に関する検討結果 (平成 22 年 3 月)、2010. <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/santeiho/kento/h2203/7.pdf>
- 34) 社団法人全国都市清掃会議：ごみ処理施設整備の計画・設計要領、改訂版、p.36、2006.
- 35) 松藤 敏彦：都市ごみ処理システムの分析・計画・評価—マテリアルフロー・LCA 評価プログラム、2005.
- 36) Jones, H.G. : Plants and Microclimate. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1992.
- 37) 国土交通省国土地理院：平成 25 年全国都道府県市区町村別面積調、2013. <http://www.gsi.go.jp/KOKUJYOHO/MENCHO/201310/opening.htm>
- 38) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課：日本の廃棄物処理 平成 24 年度版、2014. http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/h24/data/disposal.pdf
- 39) Yugo Takabe, Taira Hidaka, Jun Tsumori, Mizuhiko Minamiyama: Effects of hydraulic retention time on cultivation of indigenous microalgae as a renewable energy source using secondary effluent, Bioresource Technology, Vol.207, pp.399-408, 2016.
- 40) Taira Hidaka, Feng Wang, Kensuke Sakurai, Jun Tsumori, Mizuhiko Minamiyama: Anaerobic Co-digestion of Grass and Sewage Sludge: Laboratory Experiments and Feasibility Analysis, WEF/IWA Residuals and Biosolids Conference, 14C, 2015.
- 41) 津森ジュン、日高平、桜井健介：地域バイオマスの資源管理と地域モデル構築に関する研究、平成 26 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 4309 号、pp.13-19、2015.

特集：第 28 回下水汚泥の有効利用に関するセミナー特集（新潟市）

研究紹介

下水汚泥有効利用の課題と
日本下水道事業団における取組について

日本下水道事業団技術戦略部

資源エネルギー技術課 島田 正夫

キーワード：汚泥の成分組成、担体充填式嫌気性消化、熱改質高効率嫌気性消化、焼却排熱発電、CO₂ 分離回収

1. はじめに

わが国の下水道処理人口普及率は平成 25 年度末で 77%に達し、都市部においては大部分の家庭に下水道がつながっている状況になった。下水処理過程で発生する汚泥の量も年々増加し、水処理施設からの発生量ベースで濃縮汚泥量として約 7,500 万 m³/年（乾燥固形物量として約 235 万 t/年）となっている。¹⁾

欧米などの下水道先進国では、下水汚泥はメタン発酵によるバイオガス利用及び緑農地利用など貴重なバイオマス資源として広く有効利用されているのに対し、日本では処理処分の面倒な産業廃棄物として位置づけられ、なるべく低コストで処理処分することが優先的に進められてきた。

近年地球温暖化対策や循環型社会構築の面から、平成 21 年 12 月には「バイオマス活用推進基本法」が制定されたり、再生可能エネルギー電力の固定価格買い取り制度の開始（平成 24 年 7 月）など、下水汚泥等バイオマスのより積極的な有効利用が求められるようになってきた。

国土交通省においては「新下水道ビジョン」（平成 26 年 7 月策定）の中で「循環のみち下水道」の持続とともに更なる進化をめざし、地域における水・資源・エネルギーの最適な循環、下水道施設におけるエネルギーの自立化、下水道のポテンシャルを活かした多様

な主体との連携を通じ、食料、資源、エネルギー分野等の多様な分野に下水道の貢献範囲を拡大していくとしている。今年 5 月 13 日成立の下水道法一部改正で、下水道管理者における発生汚泥等の処理においては単なる脱水、焼却、再利用等による減量化だけではなく、燃料化又は肥料としての再生利用されるよう努力義務が制定されたところである。

ここでは下水汚泥有効利用の現状と課題等について述べるとともに、日本下水道事業団（以下 JS という）で取り組んでいる汚泥有効利用テーマの中から、エネルギー回収を目的とする調査研究を中心に報告する。

2. 下水汚泥有効利用の現状と課題

2. 1 下水汚泥有効利用の実態²⁾

図 2.1 に、わが国における下水汚泥有効利用の推移を示す。昭和の末頃まで発生量の 15%程度が緑農地利用されていた以外、その大部分は埋め立て処分されていた。処分地の逼迫問題から平成（1989 年）に入ると焼却や溶融処理による減量化処理が導入され、1996 年頃から建設資材利用、特にセメント原料化が急速に普及し、現在では有効利用法の 70～80%が建設資材化で、緑農地利用は 20%弱となっている。

図 2.2 に、下水汚泥有効利用法におけるわが国と欧米の事例を比較して示す。欧米では中大規模処理場の大部分が汚泥の嫌気性消化を導入しており、バイオガ

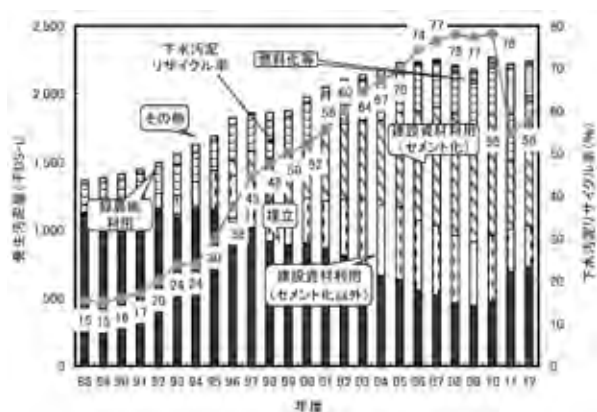
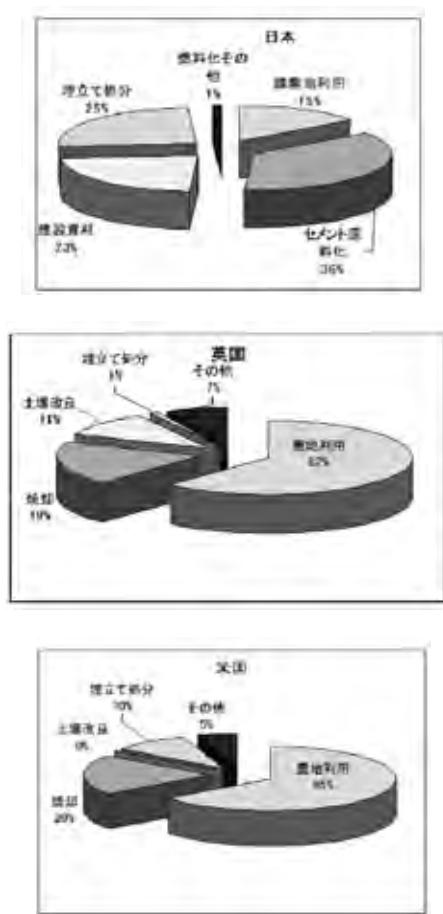


図 2.1 わが国における下水汚泥有効利用の推移

とも呼ばれている大豆と同等以上に栄養素含有量の高いバイオマスであることがわかる。廃棄物としての認識を改めるとともに、固形燃料化というサーマル利用より、まず肥料資源としての有効利用法を優先して検討することが望まれる。



図 2.3 大豆と下水汚泥の成分組成の比較

図 2.2 下水汚泥有効利用に関する日本と欧米の比較³⁾

スエネルギーとして利用するとともに、安定化した消化汚泥は液肥又はコンポスト化等により緑農地利用されている。

日本では下水汚泥は産業廃棄物と位置付けられていることもあり、バイオマス資源というより廃棄物という意識が強く残っている。図 2.3 に、下水汚泥（余剰汚泥）の成分組成を大豆のそれと比較して示す。下水汚泥のタンパク質は 50% 以上を示し、畑で採れる肉

2.2 世界のメタン発酵導入とわが国の実態

欧米を中心に、地球温暖化問題、エネルギー危機管理、枯渇資源対策の面から下水汚泥のようなバイオマス資源の積極的活用が推進されている。

図 2.4 は、ドイツにおけるバイオガスプラント（メタン発酵施設）の数と、それによる発電容量の推移を示したものである。2000 年から本格導入された再生可能エネルギーの固定価格買取り制度（ドイツでは EEG と呼ぶ）が引き金となって、個人農家が近隣の廃棄物系バイオマスやコーン等の資源作物を燃料とするバイオガスプラントを積極的に導入した結果である。

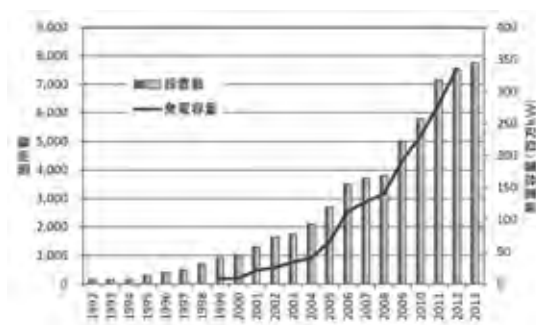
図 2.4 ドイツにおけるバイオガスプラント箇所数と発電量の推移⁴⁾

表 2.1 は、ドイツと日本の国勢と下水処理場におけるメタン発酵、消化ガス発電の現状を比較したものである。国土面積は同程度、人口や経済規模は日本の 6 割強の規模であるが、嫌気性消化を行っている箇所数はドイツの 1,156 ケ所に対し日本はわずか 285 ケ所、消化ガス発電を行っている箇所はドイツの約 600 ケ所に比べ日本は約 60 ケ所に過ぎない。

表 2.1 日本とドイツの下水処理場における嫌気性消化等の比較⁵⁾

		日本	ドイツ	備 考
国土面積	千km ²	378	357	1:0.94
人 口	100万人	127.1	81.1	1:0.64
GDP(2013年)	兆ドル	5.70	3.59	1:0.63
下水処理場数	箇所	2,250	10,200	ドイツに値は集約処理施設全てを含む
嫌気性消化箇所数		285	1,156	
消化ガス発電箇所数		60	600	

2. 3 下水汚泥とメタン発酵

わが国では約 285 ヶ所の処理場で嫌気性消化が行われているが、その多くは減量化、安定化が主目的で、消化ガス発電等の積極的なエネルギー回収利用を行っている箇所は前述したように 60 ヶ所程度と少ない。今後、再生可能エネルギー固定価格買取制度等を念頭に、嫌気性消化法をバイオガス製造施設としてガス回収を検討している自治体も多いと考えられる。

以下に、初沈汚泥と余剰汚泥のメタン発酵特性を理解し、より多くの安定したバイオガス生産・回収を図るための方法について述べる。

(1) バイオガス発生量の実態⁶⁾

図 2.5 に、下水処理場単位流入水量当りガス発生量の実態（H24 下水道統計）を示した。1 万 m³ 当りのガス発生量は 100m³～1,000m³ 以上まで大きな差がある。単位水量当りのガス発生量に違いが発生する要因は、流入下水の水質濃度（BOD,SS）にもよるが、図 2.6 に示すように、処理場流入 SS 当りのガス発生量を見ても 500m³/t-SS を中心に大きな開きがみられる。

また、図 2.7 に示すようにバイオガス発生量は夏季に少なく冬季に多くなるという季節変動を有するのが一般的である。ガス発生量の違いや季節変動の要因は、汚泥消化設備の運転よりはむしろ水処理を含めた処理場全体の運転管理方法の違いによるところが大きい。

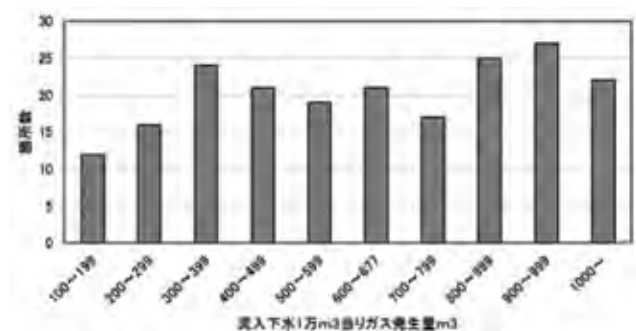


図 2.5 単位流入水量当りバイオガス発生量の実態

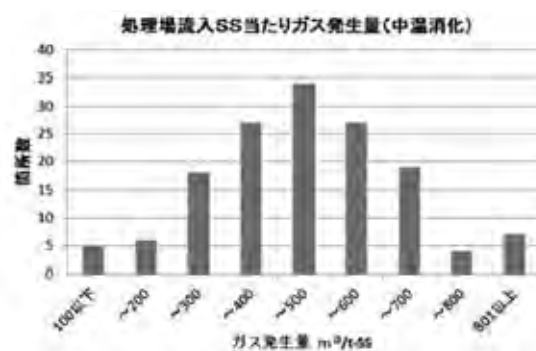


図 2.6 流入 SS 当りガス発生量の実態

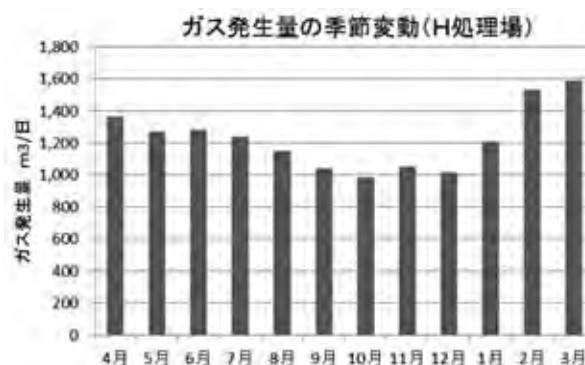
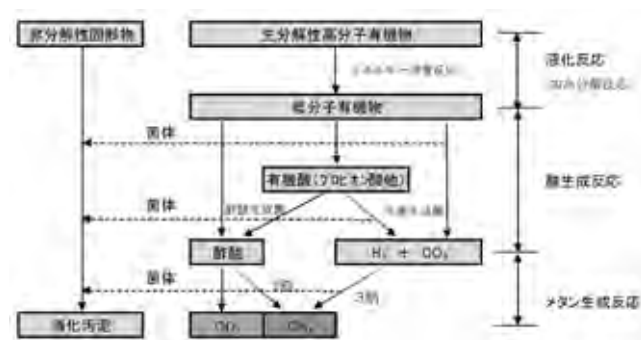


図 2.7 ガス発生量季節変動の事例

(2) メタン発酵の基本

図 2.8 にメタン発酵の基本メカニズムを示す。まず最初に液化反応（加水分解反応）による有機物の低分子化が生じ、次いで酸生成反応により各種の有機酸を経て酢酸や水素が生成する。最後にこれらを基質とするメタン生成反応が行われ、メタンガスや炭酸ガスが生成される。前段の液化反応と酸生成反応のことを一般に「腐敗」とも呼んでいる。有機物のすべてが分解ガス化するわけではなく、通常の微生物（酵素）反応ではほとんど分解しないものや、時間を経れば徐々に分解するものもある。多くのバイオマスにおいて、液化反応がメタン発酵全体の反応律速になり、その速度は温度にも大きく左右される。

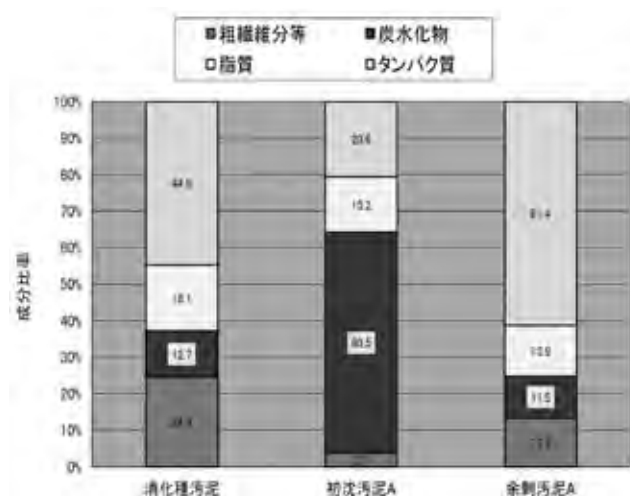
図 2.8 メタン発酵の基本メカニズム⁷⁾

(3) 初沈汚泥と余剰汚泥のメタン発酵特性

図 2.9 に、初沈汚泥、余剰汚泥及び消化汚泥の成分組成の一例を示した。初沈汚泥は比較的低分子の炭水化物系有機物（植物系バイオマス）が主成分であり比較的低分子の炭水化物系有機物（植物系バイオマス）が主成分であり比較的低分子の炭水化物系有機物（植物系バイオマス）が主成分であり比較的低分子の炭水化物系有機物（植物系バイオマス）が主成分である。一方余剰汚泥は活性汚泥微生物細胞体を中心とするタンパク質系有機物（動物系バイオマス）が主成分となっており、メタン発酵性は低い。

初沈汚泥と余剰汚泥の発生量割合（固形物ベース）は、水処理施設の運転方法等にもよるが平均的には初沈汚泥が約 6 割、余剰汚泥が約 4 割程度である。また、単位固形物当りのガス発生量は初沈汚泥が 450 ～ 550m³/t-TS、余剰汚泥が 250 ～ 350m³/t-TS であることから、処理場全体では初沈汚泥起源のガス量が全体の 7 ～ 8 割を占め、余剰汚泥起源のガス量は 2 ～ 3 割程度である。

また、消化汚泥の成分は余剰汚泥ほどではないが微生物細胞であるタンパク質が多く、難分解性である細胞壁等の粗繊維分の比率も高いことを示している。

図 2.9 初沈汚泥と余剰汚泥の有機分組成事例
(J S 技術戦略部内部資料)

(4) 安定したバイオガス生産・回収方法

<初沈汚泥の管理>

先述のように初沈汚泥は処理場全体のガス発生量に大きく関係するが、比較的早く液化反応や酸生成反応が進行するため、最初沈殿池における沈殿汚泥の引き抜き方法、重力濃縮槽の運転管理方法によっては、この段階で既に反応の一部が進行してしまう。特に水温の高い夏季にはその傾向が著しくなる。重力濃縮槽で酸生成反応が進むと反応生成物である各種の有機酸・酢酸や水素等が分離液として水処理施設に戻され、消化槽には相対的にメタン発酵性の低い汚泥のみが投入される結果となる。多くの処理場で冬季に比べ夏季に消化ガス発生量が少ない一番の要因となっている。

これを防ぐには、初沈で沈殿した汚泥を速やかに引抜くとともに、重力濃縮槽の滞留時間（沈殿濃縮時間）を必要以上に長くしないことである。現在の下水道設計指針をベースに重力濃縮槽容量を設計すると平均的に 12 時間程度の沈殿時間となる。初沈汚泥の沈降濃縮は静止沈殿の場合 1 ～ 2 時間程度でも十分進行する。沖縄県内の某処理場では重力濃縮の沈殿時間をわずか 1.5 ～ 2.0 時間で管理し、図 2.10 に示すように年間を通じて安定した汚泥の濃縮と、メタン発酵が行われている。

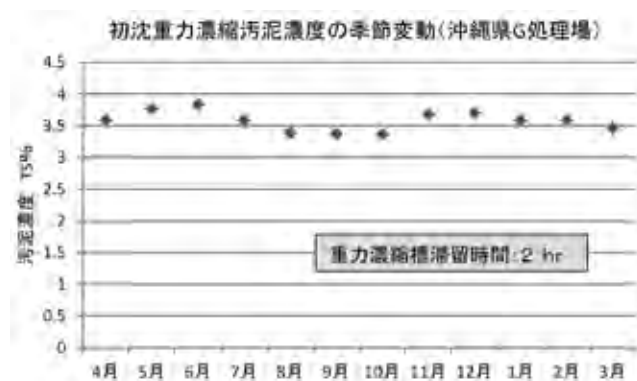


図 2.10 滞留時間2時間の重力濃縮槽運転事例(沖縄)

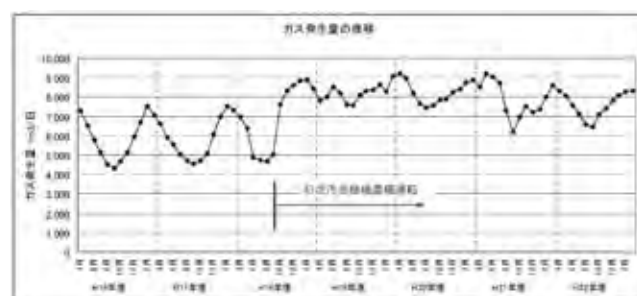


図 2.11 初沈汚泥を機械濃縮法に変更し消化ガス発生量が大きく増加安定した事例(神戸市)

わが国では初沈汚泥は重力濃縮法、余剰汚泥は機械濃縮法という分離濃縮法が一般に行われているが、近年初沈汚泥も機械濃縮を行う事例が増えている。図 2.11 は、神戸市内 T 処理場において初沈汚泥の濃縮を重力式から機械式に変更した結果、消化ガス発生量が大幅に増加した事例を示したものである。

このように、初沈汚泥も余剰汚泥とともに機械濃縮法を採用している処理場では、単位流入下水量当たりガス発生量が多い。

＜余剰汚泥の管理＞

余剰汚泥のメタン発酵性は水処理反応タンクの BOD-SS 負荷や SRT（固形物滞留時間）に大きく関係することが経験的に明らかになっている。

下水処理場に流入してくる有機分の内、浮遊性（SS）のものを中心に約半分が最初沈殿池で沈殿回収され、残りの溶解性分を中心とする有機分は反応タンクに送られ好氣的条件下で活性汚泥微生物のえさとして利用される。活性汚泥に吸着・吸収された有機分（エネルギー分）は細胞体生命維持や同化のエネルギー源として利用されるが、一部は細胞体内外に一時的に貯蔵される。

したがって、余剰汚泥中のメタン発酵基質（有機物）は、一時的に細胞内外に吸着吸収（貯蔵）されている有機分と微生物細胞体そのものの 2 つからなる。吸着吸収されている有機分は消化槽に投入されると比較的速度やかに細胞外に吐き出され酸生成反応からメタン発酵へと進むが、微生物細胞体を形成している有機物は分解に時間がかかる。

図 2.12 に、初沈汚泥と余剰汚泥の回分式メタン発酵試験結果の一例を示す。余剰汚泥に吸着吸収されている有機分（エネルギー分）は速やかに酸発酵が進む

ため、初期数日間のガス発生量は初沈汚泥のガス発生量と同じ傾向を示している。反応タンクの BOD-SS 負荷が大きい（SRT が短い）処理場の余剰汚泥においては吸着貯蔵の有機分が多いため分解ガス化率の高いのに対し、循環法による硝化脱窒などの高度処理を採用している処理場やオキシデーションディッチ法のように BOD-SS 負荷が小さい（0.03 ～ 0.1kg-BOD/kg-SS 日）処理場の余剰汚泥は、細胞内外に貯蔵しているエネルギー源が少なく、相対的にガス発生量は少ない。

通常の標準活性汚泥法による処理場の BOD-SS 負荷は 0.2 ～ 0.4kg-BOD/kg-SS 日であるが、消化ガス発生率の高い処理場（佐賀市、沖縄県流域等）の処理場における BOD-SS 負荷は 0.5 ～ 0.7kg-BOD/kg-SS 日で運転管理されている。

余剰汚泥からのバイオガス増収を期待する場合は、反応タンク MLSS・SRT を必要以上に高くしない運転方法を心がける必要がある。

余剰汚泥は先述したように一般に初沈汚泥に比べメタン発酵性の低い汚泥である。余剰汚泥の主体は活性汚泥微生物体であり、活着しているバイオマスである。水槽で泳いでいる魚は 1 か月たっても腐敗しないが、水槽から取り出し刺身にした魚は 1 ～ 2 日で腐敗を始める。余剰汚泥を速やかにメタン発酵させようとする目的で、薬品・オゾン等を用いた物理化学的方法、又は水熱反応など熱化学的な方法等で細胞体の不活性化（死滅・改質）処理する方法が提案されている。

3. JS における有効利用の取組み

3.1 効率的なメタン発酵技術

主なバイオ燃料化プロセスとしてバイオエタノール化、バイオディーゼル化、バイオ固形燃料化及びバイオガス（メタンガス）化がある。図 3.1 に示されるように、バイオガス化はシステムも単純でエネルギー収支的にも最も効率が高く、また、廃棄物系バイオマスを原料とすることが可能なことから食料資源との競合がない等の理由から世界中で積極的に導入が進められている。

しかし、わが国では「消化日数に 30 日も要す」、「バイオマスの半分しかエネルギー転換しない」などの理由で、かならずしも十分に導入が進んでいない。そこで JS では、下水処理場における嫌気性消化システムの導入促進を目的に、より高効率なメタン発酵技術について民間企業との共同研究を進めてきた。ここではそのいくつかについて紹介する。

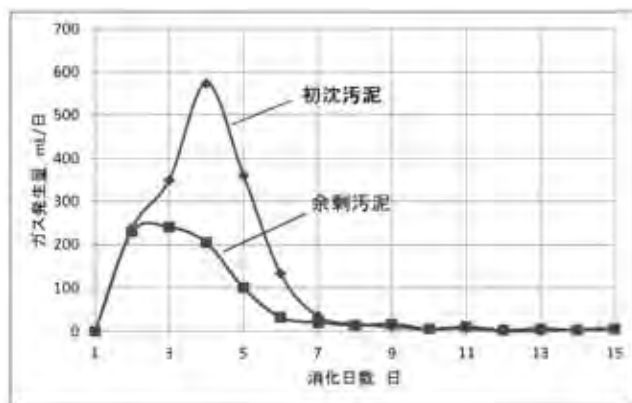


図 2.12 初沈汚泥と余剰汚泥の回分メタン発酵試験結果（JS 技術戦略部内部資料）

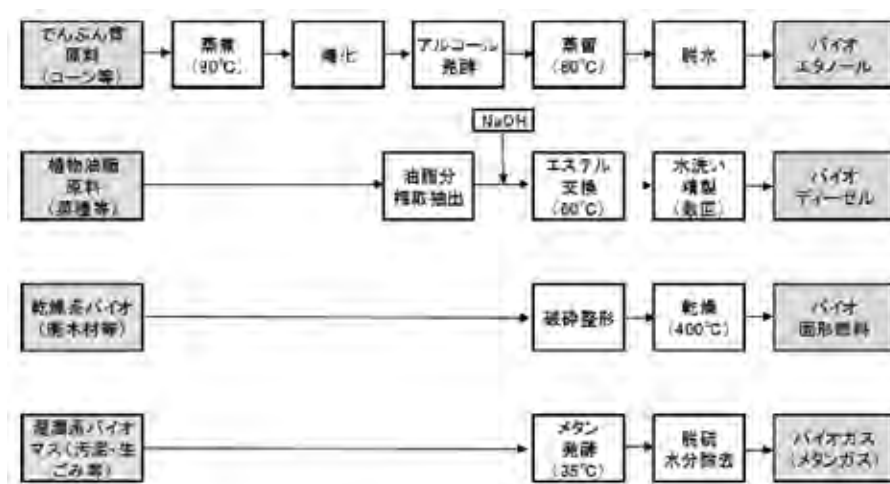


図 3.1 各バイオ燃料化のプロセス比較

(1) 消化槽のコンパクト化技術（担体充填法、高濃度消化法）⁸⁾

通常、汚泥の嫌気性消化処理（中温消化）には消化日数 20～30 日を必要とし、大きな消化タンクが必要となることから建設費や設置スペースの増大という課題を有している。これらの課題対策として JS では担体充填型高速嫌気性消化法や高濃度消化法の技術開発を行ってきた。

本来、有機物の嫌気性分解発酵（メタン発酵）は 4～7 日で約 9 割以上は完了するが、増殖速度の遅いメタン菌数を保持する上から 20～30 日の滞留時間を確保している。担体充填消化法は、増殖速度が遅く外的要因の影響を受けやすいメタン菌を担体（写真 3.1 参照）に付着固定化することで安定した消化を達成するシステムで、JS 新技術 I 類にも登録されている。平成 23 年度採択の B-DASH 技術として大阪市中浜処理場内に設置した実証試験プラント（高温消化）においても消化日数 5 日程度でも安定した汚泥の分解、ガス化の達成が確認されている。



写真 3.1 消化槽内に設置した担体

また消化槽投入汚泥濃度は一般に TS3～4% 程度で行われているが、より高濃度にすることで消化槽容量を縮減したり汚泥の加温に要するエネルギーを削減することが可能となることから、投入汚泥濃度を 8～10% 程度まで高濃度化する濃縮技術を組み合わせた高濃度消化技術の開発を進めている。

(2) 分解ガス化率の向上技術（熱改質法）⁸⁾

嫌気性消化はバイオマス（汚泥）の①液化（加水分解）⇒②酸発酵⇒③メタン発酵の順で反応が進むが、前述したように反応の律速は多くの場合①液化（加水分解）で決まる。特に余剰汚泥のような生きたバイオマス（活性汚泥という）はそのままの状態では低分子化（腐敗）しないので、反応を促進するには酸・アルカリやオゾン等の化学的処理、ミル破砕のような物理的処理、又は高温高压による熱化学的処理などの何らかの改質（前）処理が必要となる。

JS では各種の前処理方式について検討を進めてきた結果、システムがシンプルでエネルギー収支的に最も有利な消化脱水汚泥を対象とする熱可溶化（改質）高効率嫌気性消化法を開発した。図 3.2 に、システムの基本フローを示す。主な特徴としては

- ①消化脱水汚泥を対象に熱改質するので、改質のための熱エネルギーが極めて少ない（従来の消化槽加温エネルギーとほぼ同等）
- ②消化汚泥を対象とするため、臭気の発生が極めて少ない
- ③熱改質反応タンクは熱交換機などの複雑な装置を有さず、シンプルでかつコンパクトなことから既設消化槽への適用が極めて容易である。
- ④微生物細胞（壁）が熱改質されるため、汚泥の脱水性が大幅に改善される。結果的に、最終的な脱

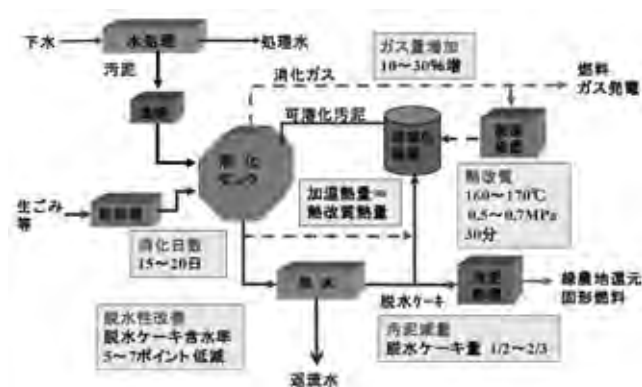


図 3.2 熱改質高効率嫌気性消化システムの基本フロー

汚泥量は従来嫌気性消化法の 1/2 ～ 2/3 に削減される。

本技術は、今後 JS として導入促進を図る新技術として登録（新技術 I 類）されている。

3.3 焼却廃熱からの電力回収技術⁹⁾

(1) 実証研究の目的

本技術は国土交通省総合技術政策研究所からの委託研究（平成 25 年度採択 B-DASH 技術）として、和歌山市・JS・京都大学・西原環境(株)・(株)タクマの 5 者の共同研究体で実施したものである。

近年下水汚泥脱水技術の進歩により 70% 前後まで含水率を低減できる低含水率型脱水機の開発や、200 ～ 300℃ 程度の低温排熱からでも電力を回収可能な小規模蒸気発電システムが開発実用化されてきた。このため図 3.3 に示すように、これらのプロセスを効率的に組み合わせることで従来エネルギー消費型であった汚泥焼却処理をエネルギー創出型に転換させることが可能となってきた。本研究は、下水道処理施設において「脱水汚泥低含水率化技術」、「エネルギー回収技術」、「高効率蒸気発電によるエネルギー変換技術」の 3 つの技術を組み合わせた“下水汚泥焼却排熱発電システム”を実規模プラントにおいて実証した研究である。

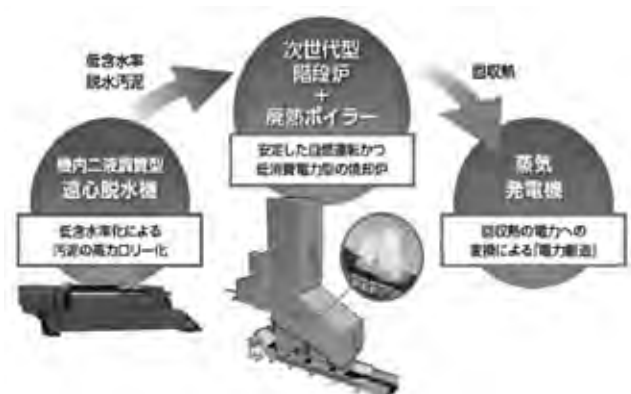


図 3.3 システムの基本概念図

(2) 実証研究の概要

下記に示す 3 つの技術を組み合わせたシステムにより、下水汚泥焼却処理からの電力エネルギー創出技術を実証した。

- 1) 機内二液調質型遠心脱水機による脱水汚泥低含水率化技術
- 2) 廃熱ボイラー付次世代型階段炉によるエネルギー回収技術
- 3) 蒸気発電機（スクリュ式 + バイナリ式）によるエネルギー変換技術

和歌山市中央終末処理場内に実証設備（焼却炉能力：35t-wet/日、発電能力：100kWh/h 以上）を設置、実際の下水汚泥を対象とする実証試験を進めてきた。図 3.4 に実証試験施設のフロー、写真 3.2 に施設の外観、図 3.5 に機内二液調質型高効率遠心脱水機の概要、写真 3.3 に小型蒸気発電機・バイナリ発電機を示す。

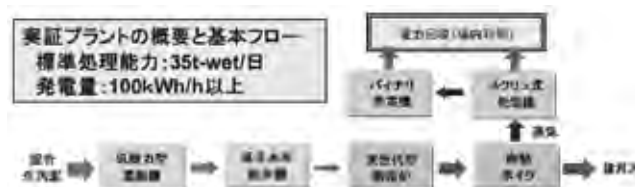


図 3.4 実証プラントの基本フロー



写真 3.2 実証プラント全景

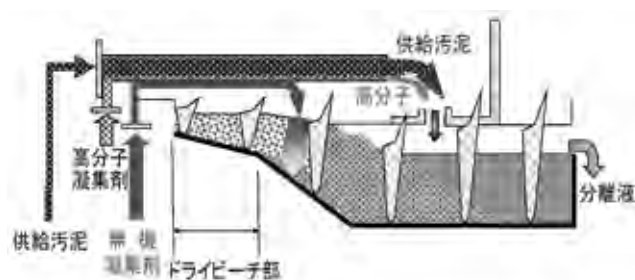


図 3.5 機内二液調質型高効率遠心脱水機



写真 3.3 小型蒸気発電機（左）とバイナリ発電機（右）

(3) 実証試験の結果

実証試験は平成 25～26 年度の 2 ヶ年にわたって行い、低含水率化技術で含水率平均 70% 以下、エネルギー回収技術で発生蒸気量 1.5t/h、エネルギー変換技術で発電量 100kWh/h 以上、温室効果ガス削減効果として N₂O 排出量が従来の概ね 1/6、当該焼却発電システム消費電力のほぼ全量を賄える発電量など当初の目的を概ね達成でき、下水汚泥燃焼熱からの発電を実規模レベルにて実証することができた。

実証試験結果を基に 100t/日（24t-DS）規模における導入効果試算では、従来方式（1 液脱水＋流動床焼却）に対して以下のような結果が得られた。

- ①維持管理費約 50% 低減
 - ②温室効果ガス排出量約 90% 低減
 - ③エネルギー（電力・補助燃料）消費量 70% 低減
 - ④エネルギー創出量 約 2,400 MWh / 年※
- ※処理場全体電力消費量の概ね 30% 相当の電力創出に相当する
- 階段炉の特徴として発生する焼却灰は写真 3.4 に示



写真 3.4 本実証試験炉焼却灰の外観形状

すように粒度分布に富んだ粒状であり、流動焼却灰のような微粉末状と異なり保管貯蔵時や建設資材として有効利用しようとする場合でも、極めて取扱い性が容易である（写真 3.5）。

3. 4 バイオガス中の CO₂ 分離・回収とその微細藻類培養への利用技術¹⁰⁾

本技術は国土交通省総合技術政策研究所からの委託研究（平成 27 年度採択 B-DASH 技術）として、(株)東芝・(株)ユグレナ・日環特殊(株)・日水コン・佐賀市・J S の 6 者の共同研究体で実施している。

(1) なぜ微細藻類か

地球温暖化対策や循環型社会を目標に、化石資源に代ってバイオマス資源の積極的な有効利用が世界的に進められている。図 3.6 に示すように、各種バイオマスの中でも通常の陸上植物に比べ 5～20 倍という圧倒的な成長速度（バイオマス増殖速度）を有する微細藻類が注目され、その実用化に向けての研究開発が行われている。米国では軍で使用する燃料の半分を 2020 年までに微細藻類等バイオ燃料から製造される燃料（グリーン燃料と称している）に切り替えると発表している。

燃料以外にも微細藻類は栄養豊富な補助食品（サプリメント）としての利用は、わが国では世界に先駆けてすでに事業化が行われている。

微細藻類は通常の植物と同様に体内に葉緑素を有し、その成長（増殖）過程においては光合成を行うために太陽光とともに CO₂ や窒素・りんといった肥料成分、ある一定以上の温度（水温）が必要になる。微細藻類の低コストで効率的な成長・増殖を達成するためにはこれらの成長要素を低コストで大量に安定して供給することが極めて重要となることから、下水道未利用資源の活用を検討するものである。



写真 3.5 階段炉焼却灰の利用状況例（S 市）

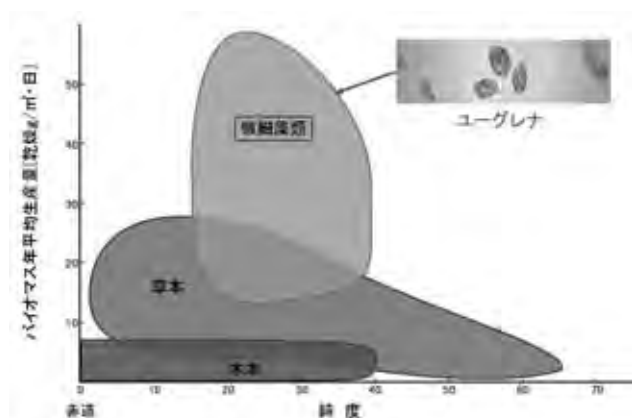


図 3.6 各種バイオマスの増殖（生産）速度¹¹⁾

(2) 実証試験の概要

今回の実証技術は、微細藻類の培養にこれまで利用されていなかった下水汚泥バイオガス（消化ガス）中の CO_2 や消化汚泥脱水ろ液中に豊富に含まれる窒素・リンを有効に活用する技術を実証するものである。

システムの基本フローを図 3.7 に示す。

- 1) 下水バイオガスからの CH_4 と CO_2 を効率的に分離・回収する、PSA（加圧減圧吸着）法による CCU 設備（二酸化炭素回収装置）
- 2) 回収した CO_2 と脱水分離液（窒素、リンその他のミネラル分を豊富に含んでいる）を用いて微細藻類を効率的に培養する微細藻類培養設備の 2 つの設備の組み合わせによる。

なお、 CO_2 ガス増収を図るための付帯設備として、消化槽投入汚泥の可溶化装置も計画している。

本事業に期待される効果として

- 1) 分離回収した CO_2 を有効利用することで、下水バイオガス中の CO_2 を新たな資源として位置づ

け、培養した微細藻類から飼料・肥料等新たな高付加価値資源の生産を行うことにより地域産業の創出を図ることが期待できる。

- 2) 脱水分離液中の窒素・リン利用による返流負荷の低減が期待できる。

本実証試験施設は佐賀市下水浄化センター内に設置し、今年度（H 27 年度）後半から本格的試験を開始する予定である。

4. おわりに

今年 7 月、世界の平均気温は過去最高だった。日本でも 8 月上旬にかけて各地で 35°C を超える猛暑日が続き、東京では過去最長の 8 日連続となった。9 月の茨城県を中心とする大洪水被害など、地球温暖化に起因すると思われる異常気象が世界各地で頻発している。国際気候変動枠組み条約締約国会議（COP21）が 11 月末からパリで開催され、新たな温暖化対策の国際的な枠組みを決めることになっている。日本が 7 月に発表している CO_2 削減目標や再生可能エネルギー導入目標等は他の先進工業国に比べ低すぎると国際社会から批判が出ている。

下水道は生活環境や公共用水質保全に欠かせない重要な社会基盤施設の一つとなっているが、下水の搬送や処理過程において多くのエネルギーを消費していることから、地球環境へ大きな負担をかけている。わが国では下水汚泥とともに貴重なバイオマス資源である家庭で発生する生ごみの大部分は可燃ごみとして焼却処分されているが、下水汚泥との混合メタン発酵により効率的にエネルギー転換が可能である。下水汚泥や生ごみを目先の経済性のみで安易に「廃棄物として処理」するのではなく、化石燃料に代わるバイオマス資

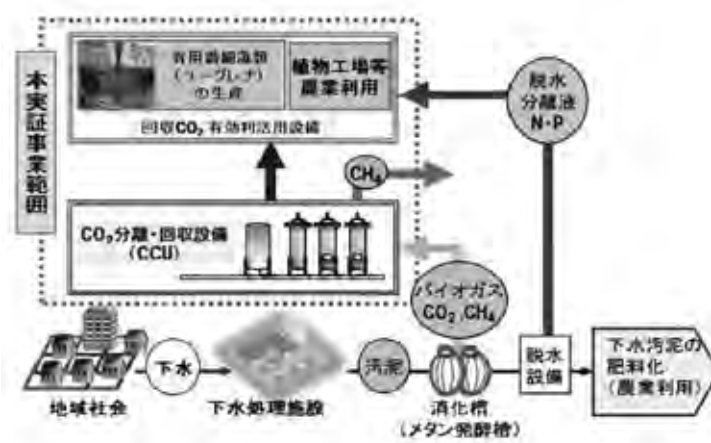


図 3.7 本実証研究のシステム基本フロー

源として利用することで下水処理場のエネルギー自給率向上、地球温暖化対策にも貢献することになる。生活環境の保全から一歩前をみた地球環境保全をも念頭においた下水道事業の推進を考える必要がある。

JSでは、今後とも下水汚泥のバイオマス資源としての有効活用に係る技術開発と普及促進に積極的に努めていく予定である。

<参考資料>

- 1) H 26 年度「日本の下水道」(社)日本下水道協会
- 2) 「再生と利用」Vol.37 No.139 2013 p 34 (社)日本下水道協会
- 3) H 26 年度食品標準成分表 文部科学省 H P
- 4) 「欧州の環境対策機器ビジネスの動向」2014 年 3 月 日本貿易振興機構報告書
- 5) <http://www.thebioenergysite.com/news/4357/energy-efficient-sewage-plants>
- 6) H24 年度下水道統計(社)日本下水道協会
- 7) 野池達也編著 メタン発酵 2009 年 5 月 技報堂出版
- 8) エネルギー回収を目的とした嫌気性消化プロセスの評価に関する報告書 平成 24 年 3 月 日本下水道事業団
- 9) H 25 年度 B-DASH 技術「焼却廃熱からの電力回収技術」(株)タクマ他 技術資料
- 10) H 27 年度 B-DASH 技術「バイオガス中の CO2 分離・回収とその微細藻類培養への利用技術」(株)東芝他 技術資料
- 11) H 20 年度バイオマスエネルギー関連事業成果報告会予稿集 NEDO

特集：第28回下水汚泥の有効利用に関するセミナー特集（新潟市）

研究紹介

下水道資源・資本の保全と活用

＜地域における環境保全、健全経営のための連携・集約システムづくり＞

（公財）日本下水道新技術機構

資源循環研究部 落 修一

キーワード：下水道資源、連携・集約システム、高機能消化槽、発酵床盤

1. はじめに

生活排水処理施設に限なく整備されようとしている今日、それを司る自治体の体制や経営がこれからの課題である。特に、行政区域が広域に渡り多数の集落から成る自治体や行政人口が小規模な自治体にあっては喫緊の課題となってきた。

自治体の体制は固有の背景・特性からくるものとして第三者が直接的に関係できるものではないが、経営に関しては技術の面から大いに貢献できることが分かっており、積極的な情報発信と協力・協働に努めて行かなければならない。我が国における経営の主要な殆どの場合がエネルギーに関係、起因している。そのエネルギーの形態は様々であるが、我々下水道の分野においても十分に当てはまるものであり、全国に整備されてきた下水道の資本を活用して下水道が有するエネルギー資源を開発・利用していくことが肝要と思われる。

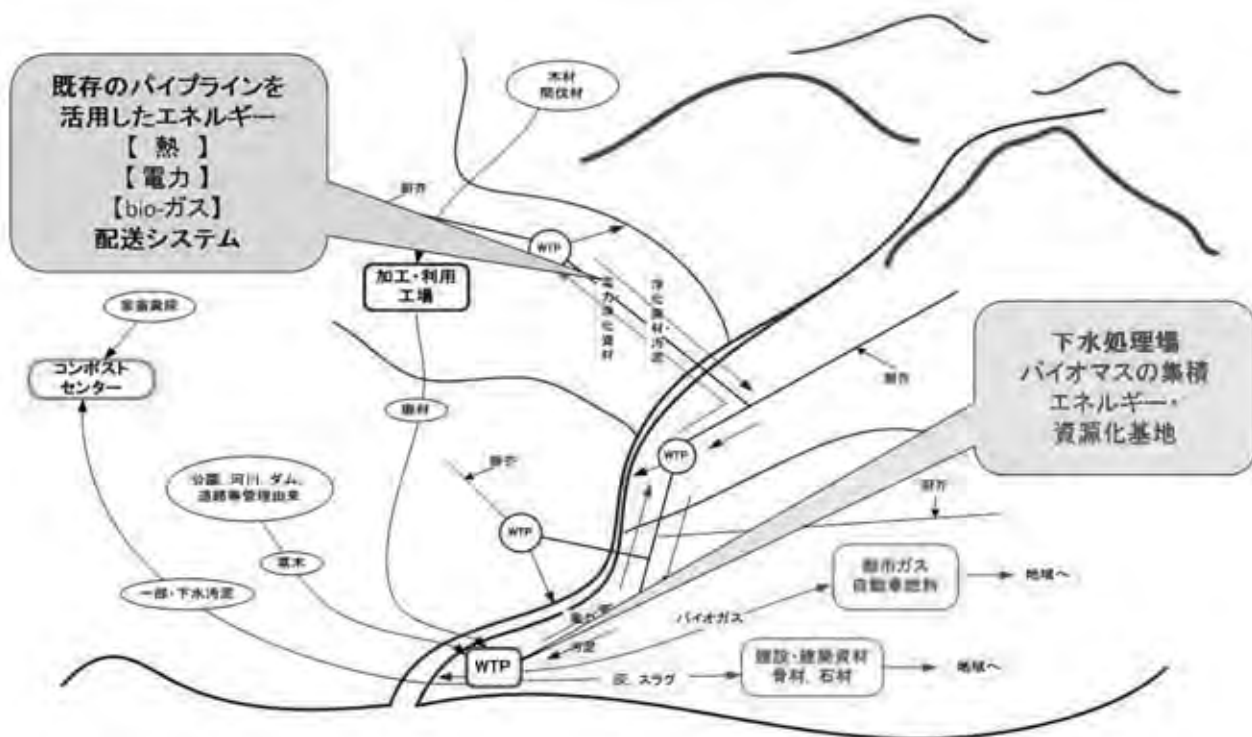
当機構は、従前より下水汚泥を資源と位置付けその有効利用のための調査研究、開発に取り組むとともに、地域の未利用バイオマスをエネルギー資源として活用するシステムの実用化に協働して取り組んできた。ここでは、当機構が取り組んでいる固有研究や共同研究の中から下水道経営に大いに資するであろう技術について紹介する。

2. 下水処理場を核とした資源・エネルギーシステムの構築

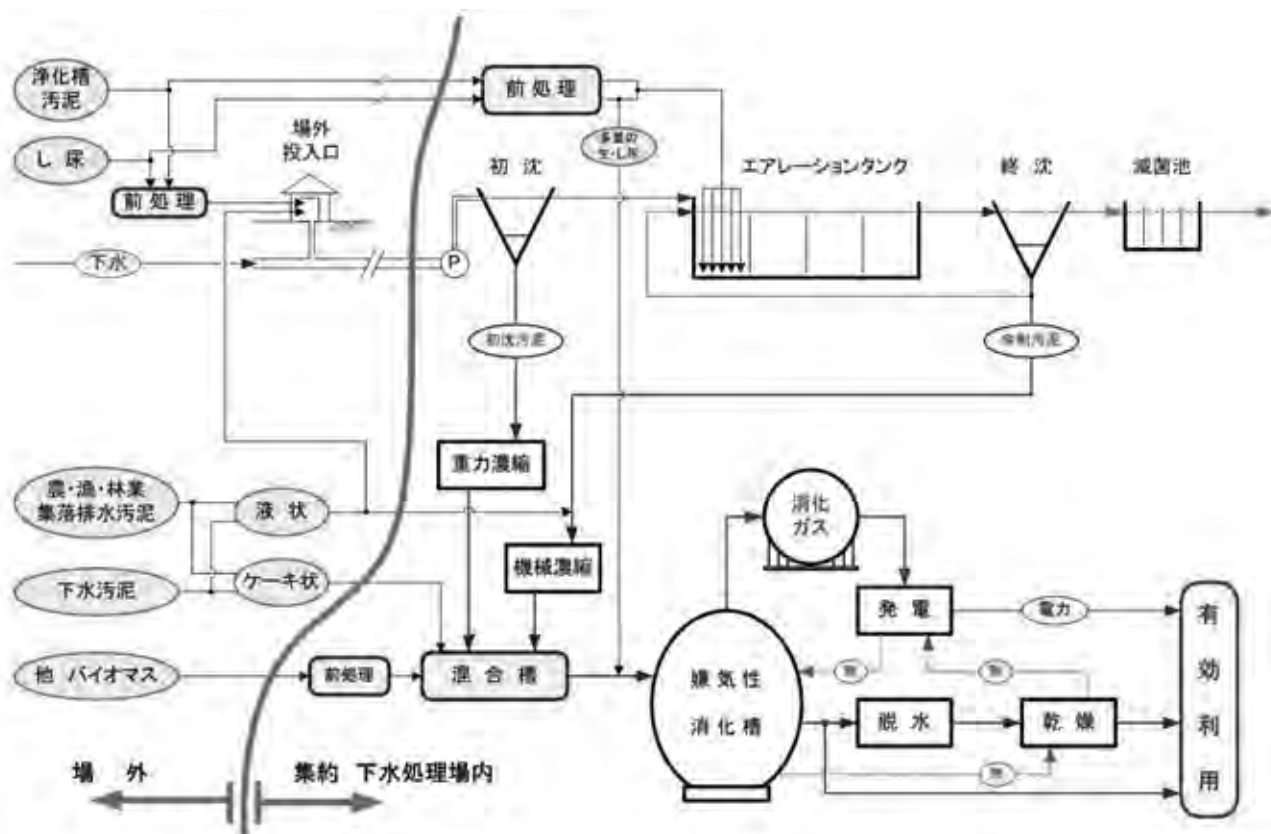
何故、下水処理場が核となるのか、核とするのか。一つは、地域、自治体にとって下水処理場が集約に適した立地と規模、システムを有していることにある。図-1は、筆者の理想を図化した相当に古いものであるが、現在もこれを目指して取り組んでいる。二つ目は、地域において汚水を浄化する能力が最も大きく、集約バイオマスの様々な加工を行っても、そこから排出される可能性のある排水を飲み込める能力を有する。また、加工に水や熱が必要な場合は、十分量を賄える処理水の資源と熱源を有する。三つ目は、バイオマスの生物学的な加工・改質を必要とする場合、例えばコンポスト化やメタン発酵などを行うに際して有用な生物資源と成り得る。その効果は下水汚泥中に回収・集約される豊富なミネラル成分にあると分析している。これを活用した「融合コンポスト化法」や「混合メタン発酵法」等を開発、実用化してきた。

2.1 連携・集約システム

我国には地方の小集落から都市部まで限なく生活排水処理システムが整備され、その数は下水道事業をはじめ農・漁業集落排水事業、コミュニティプラント等7,000箇所にあつたものである。しかし、そこでは、



図ー１ 下水処理場を核とした資源・エネルギーシステム（構想）



図ー２ 地域における連携・集約の実施の形

発生する汚泥の取扱いに相当のエネルギーと経費を必要とし、管理する自治体の大きな負担となっている。また、地域には個々の特性に応じて様々なバイオマスが存在し、中には未利用となっているものも多くある。これらを集約して資源化利用に繋げる必要がある。図－2に連携・集約の実施の形を模式的に示す。

国土交通省は、地域における污水处理施設の効率化により事業経営に大きく貢献することを目的に、この連携・集約をMICS事業として推進している。ここでは、集約拠点となる下水処理場においては、水処理に支障となることなく、集約を資源・エネルギー化に繋げることが重要である。

(1) 集約上の留意事項

し尿や浄化槽汚泥を受け入れる拠点にあつては、し渣を除去するための前処理が必要である。

さらに近年は、し尿と浄化槽汚泥を同一の収集車で一緒に混合して収集するケースが多く、本来のし尿の性状に比べて非常に薄い状態になってきている。この傾向は今後の「未普及解消施策の推進」により一段と進むと予想される。またこの場合、前述の「し渣の除去」も必要なくなる可能性もあることから、現状の発生状況を把握することが肝要となる。

実施に際しては、集約規模に応じた処理システムとするために、例えば、集約量が拠点となる下水処理場の水処理能力よりも遥かに小さい場合はエアレーショ

ンタンクに注入するのみで対応できる。それが、水処理能力を超える場合は汚泥処理施設の活用を検討し、合わせてエネルギー化・資源化利用に繋げる方法を検討する。

エネルギー化は、嫌気性消化による省ガス発電が最も有効である。発電機から発生する排熱で消化槽の加温を行う。この排熱を更に利用する方法として、乾燥装置を導入して排熱ラインを密閉・循環利用することも検討の価値がある。また、嫌気性消化により安定化された汚泥は、地域によっては液肥としての利用や乾燥肥料としての利用も可能となる。

(2) 先導事例

連携・集約の先駆けは石川県の珠洲市である。筆者は十数年前に相談を受け、協力してきた。

ここでは、し尿や農業集落排水汚泥、生ゴミ等を下水処理場に受け入れて、MICS事業として着手された。

処理フローは、〔前処理〕－〔メタン発酵〕－〔乾燥〕であり、乾燥汚泥は市民に提供され、好評を得ているとのことである。また、経営上も、地球温暖化対策上も大きく市政に貢献するものとなっている。

その後、表－1に示すとおり、着実に実施都市が増え、現在は一般的事業となりつつあり、国土交通省によると、平成25年時点で30道府県で107ヶ所が実施中となっている。



写真－1 珠洲市バイオマスメタン発酵施設（写真手前の部分）

表－1 その後の先進事例

都 市 名	行政人口 (人)	水処理方式	処理能力 ($\text{m}^3/\text{日}$)	受入バイオマス	資源化・利用法
珠 洲 市	16,900	オキシデーション・デッサー法	3,600	生ゴミ(事業系) し尿・浄化槽汚泥 農林産物	メタン発酵 → 乾燥 → 肥料
北広島市	60,400	標準活性汚泥法	26,833	生ゴミ し尿 浄化槽汚泥	メタン発酵 → 乾燥 → 肥料
高 岡 市	41,900	標準活性汚泥法	13,300	食品廃棄物(事業系) 農林産物 浄化槽汚泥	メタン発酵 → 発電 → 乾燥 → 肥料
鹿 井 市	37,600	標準活性汚泥法	16,900	〔抽出・下水汚泥〕 生ゴミ、紙屑、油類 水産物等	メタン発酵 → 発電 → 乾燥 → 堆肥 → 肥料
津 市	69,200	標準活性汚泥法	38,500	生ゴミ し尿	メタン発酵 → 発電(将来)

(3) 水処理施設における酸素供給能力の重要性

集約化を検討する場合、拠点となる下水処理場におけるエアレーションタンクの曝気・酸素供給能力に注意する必要がある。特に、小規模下水処理場に多く導入されているオキシデーションディッチ法では曝気能力に余裕がない場合が多いことから、明らかに不足する場合は、次を検討する。

- ①最初沈澱池の導入を検討する ⇒ メタンガスの増産にも繋がる。
- ②酸素供給能力を高める。⇒ 「高効率酸素溶解装置」等の導入を検討する。

2.2 下水道経営に資する嫌気性消化法

嫌気性消化法は、有機物の生物学的な安定化・減量化と合わせて、有用なエネルギー資源であるメタンガスを産することから非常に重要な技術である。

下水処理場の経営分析を行った事例を図-3に示す。小規模施設の経営が苦しいことが見て取れる。こ

この経営状況を改善するのに嫌気性消化法の導入による「汚泥運搬処理費」と「電力費」の削減がある。前者は嫌気性処理による汚泥の減量化であり、後者は消化ガス発電による削減である。

汚泥の削減や消化ガス発生については、データは少々古いが筆者は下水道統計に基づき表-2に示す解析結果を得ている。また、消化ガス発電においては小規模であってもエネルギー効率が35%に達するまでになっており、その場合のメタン含有率が約55～65%の一般的な消化ガスで発電する場合の電力転換として、 $1.8 \sim 1.9 \text{ kW} / \text{m}^3$ 〔消化ガス〕が得られている。

図-4は、日本下水道協会の協力から得られた我が国における嫌気性消化法導入の推移である。嫌気性消化法は前述のように有用な技術であるにも拘わらず、全く導入に進展が見られていない。これは、我が国における嫌気性消化施設の建設と維持管理に係わる費用が高いことが最も大きな理由である。

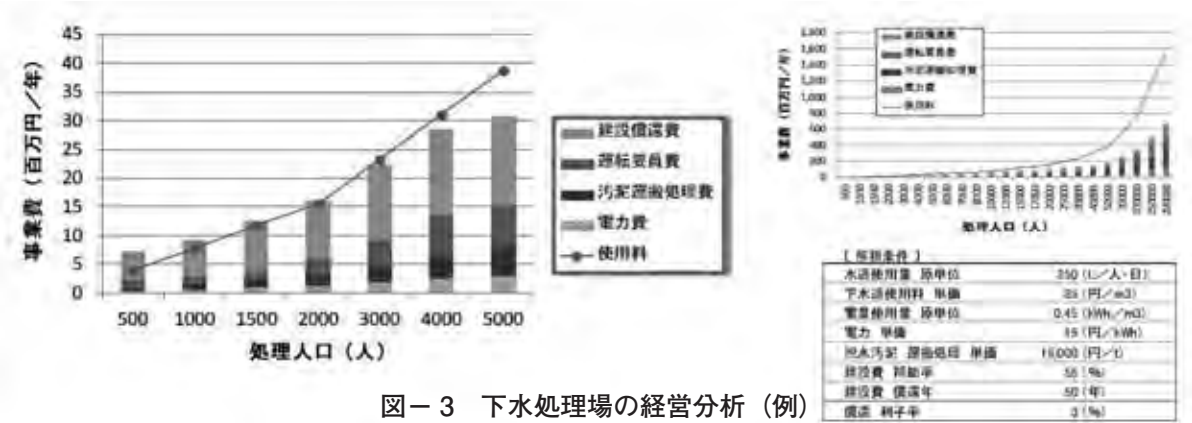


図-3 下水処理場の経営分析 (例)

表-2 我が国における平均的な消化成績

消化温度	消化率		ガス発生率	
	TS	VS	投入TS当たり	投入VS当たり
	(%)	(%)	(m ³ /t-TS)	(m ³ /t-VS)
<42℃	48.8	58.3	410	504
33~38℃	52.1	61.9	420	513
38~48℃	53.1	68.1	430	538
48℃<	57.1	68.7	403	606

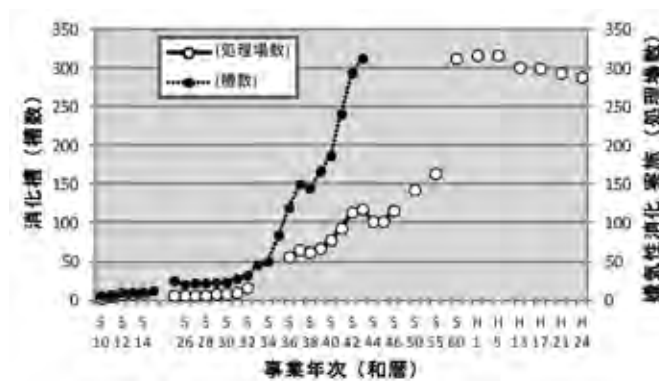
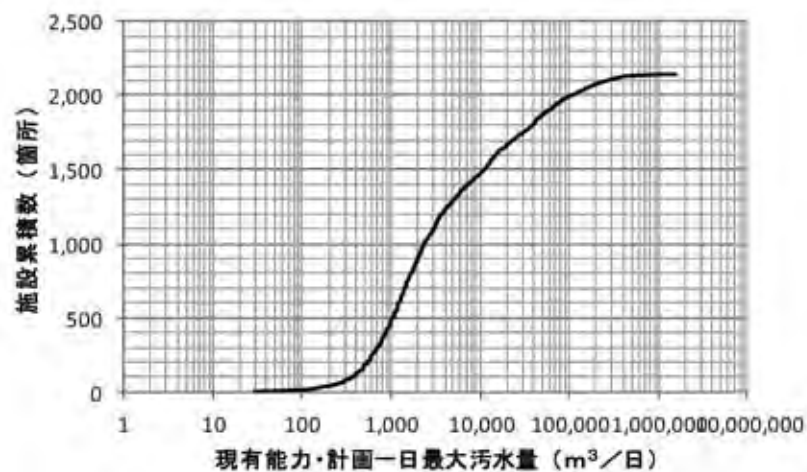


図-4 嫌気性消化法の導入・稼働実績 (下水道統計より)

3. 高機能嫌気性消化法の開発

これまでの、日平均処理水量が概ね $20,000\text{m}^3/\text{日}$ 以下の中小の下水処理場では嫌気性消化法は採算が合わないとの理由で導入が進んでこなかった。そこで筆者は、嫌気性消化法は古くより活用されている易しい技術であり、全ての規模において導入可能であるとの前提に立ち、それを実現する技術を早急に提供するための技術開発に取り組んだ。特に、下水処理場の大部分を占める地方の中小施設では、経営改善や循環型社会の創造、地球温暖化対策等を目指す立場から導入が強く望まれており、対応が急がれたことから協力者を得て取り組んできた。



図－5 我が国における下水処理場規模の分布

(2) 開発技術の概要

開発技術の特徴を図－6の説明図に示す。

嫌気性消化法の特性を考えると、消化槽内は完全無酸素・密封の状態が20～30年間維持され、無開封に置かれる。このために、槽の内部に稼働部を設けず、槽外ポンプ攪拌方式とする。これが技術のポイントの一つである。

技術のもう一つのポイントは、「発酵床盤」の設置にある。

従来は、大きな粒子の有機物も全て、均等に移動、攪拌できる方法が取られていた。しかし、有機性固形物の発酵においては、可溶性・酸発酵は系が均一である必要はなく、静止した状態でも容易に進行する。このために大きな固形物が堆積発酵するための「発酵床盤」が設けられる。この「発酵床盤」は、連続式・完全混合リアクターで危惧される未発酵物の流出防止

(1) 開発目標

図－5に、我が国における下水処理場の規模の分布を示す。 $20,000\text{m}^3/\text{日}$ 以下の処理場は全体の75%、1,700箇所にあつた。この1,700箇所が当面の目標となる。開発の要点として、次の5つを挙げた。

- ① 躯体は地元の企業（土木・建築工事）が容易に施工できる。
- ② 耐震化が容易に図れる。
- ③ 発酵・リアクターとしての機能が十分に発揮、維持できる。
- ④ 安価に建設できる。
- ⑤ 設備の保守・管理が容易、且つ経済的に持続できる。

と、槽内攪拌の効率向上にも寄与する。

本技術は、新設をはじめ既設消化槽の改築・更新・機能改善に適用できる。特に、極小規模用の消化槽であってもRC製のリアクターとすることが可能であり、国内においてRC構造物の施工実績があれば容易に建設できる。勿論、前述の「5つの開発要点」が満足されれば槽躯体の構造、材質は問わない。

1) 発酵床盤の考え方（その1）

発酵床盤の考え方の一つについて図－7に説明図を示す。

- 嫌気性消化槽の内部は完全混合が理想とされ、設計・施工されてきた。
- 従来槽の攪拌が完全混合となると、投入汚泥の一部が未発酵の状態で引抜かれる可能性が大きい。
- 発酵床盤は、これを防止できる。

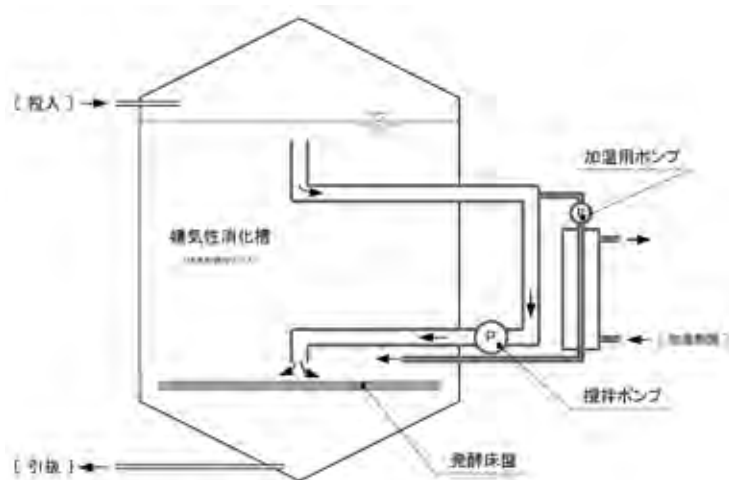


図-6 高機能消化槽（説明図）

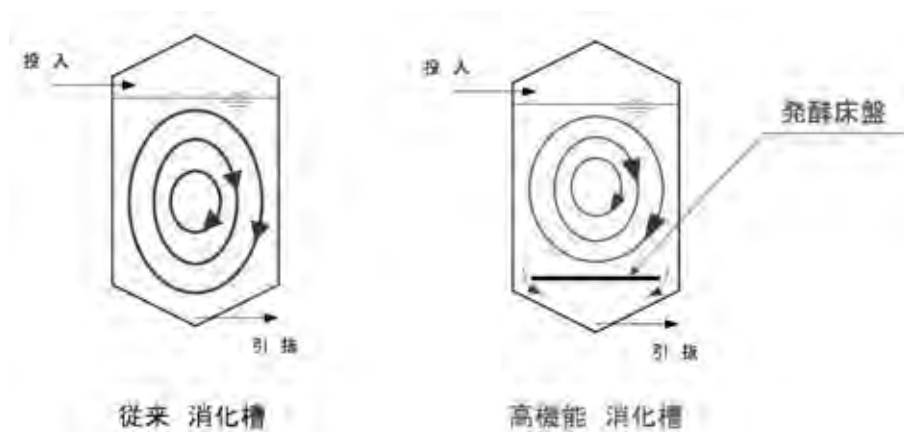


図-7 発酵床盤の機能・役割（説明図 その1）

2) 発酵床盤の考え方（その2）

発酵床盤の考え方のもう一つについて図-8に説明図を示す。

- 投入汚泥中に含まれる可能性のある野菜屑等の粗大有機物は、強制的に混合（完全混合）する必要はない。

- これらは、静置の状態でも円滑に可溶化・酸発酵が生じるものである。
- 発酵床盤は、粗大有機物を保持・寝かせるための床である。
- 発酵床盤で可溶化・酸発酵された浸出液は従来の消化液と一緒に移動・混合される。

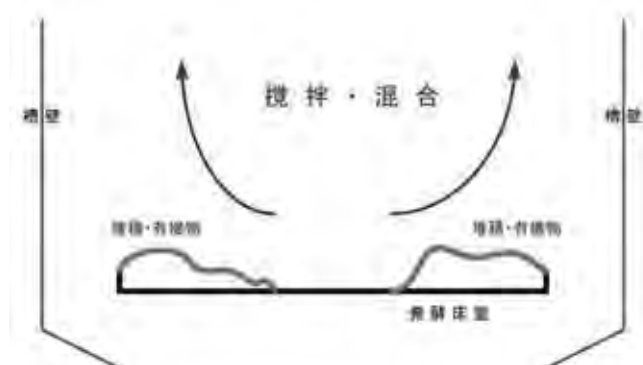


図-8 発酵床盤の機能・役割（説明図 その2）

3) 攪拌の考え方

消化槽内の攪拌の考え方について図-9に説明図を示す。

- 消化槽内の攪拌は、重力場における液体の「流れ」の特性にあり、液の円滑な流動・移動の確保に必要な動力は流量（流速）と実揚程（全揚程）に

支配される。

- 施設では、実揚程が小さく、且つ大流量が確保できる液送設備（ポンプ）が重要視される。
- これにより、槽躯体の形状には大きく影響されず、躯体施工に支障が無ければ如何様な槽形状にも対応できる。

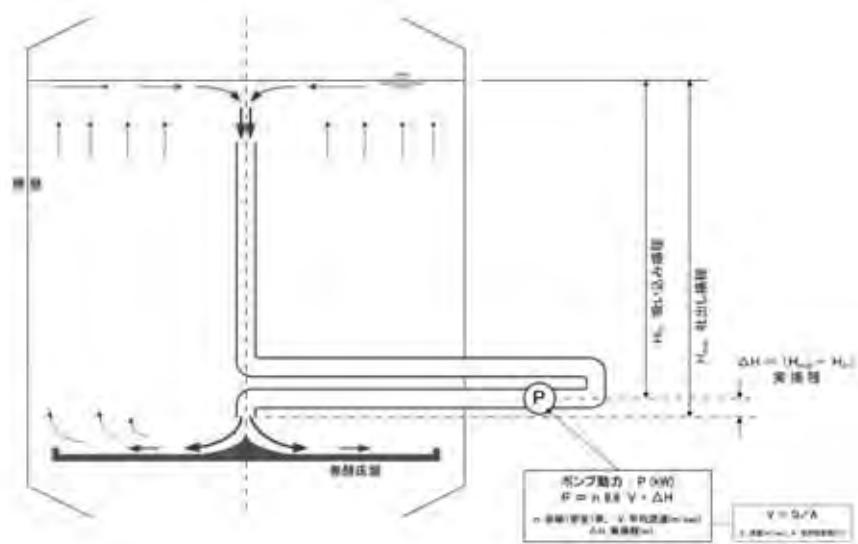


図-9 槽内攪拌の考え方（説明図）

4. 下水処理の省・創エネルギー化への取組み

当機構は、下水道経営に資する省・創エネルギー技術の導入・普及を目指した共同研究を行ってきている。現在進行中の課題は次の6件である。

(1) 消化ガス発電普及のための導入マニュアル策定に関する共同研究

1) 目的

地球温暖化対策やエネルギー対策が急がれる中で、消化ガスを産出して発電等の利用が可能でありながら焼却廃棄している事例が多く存在する。国土交通省がこの原因を調べた結果、導入コストが高くB/Cを満足できないというものが殆どであった。そこで、本共同研究では消化ガスが発生している下水処理場を対象として、発生量の規模を問わずに円滑に消化ガス発電設備を導入していくためのマニュアルを緊急的に整備することを目的とする。

2) 体制

今治市、飯能市、株式会社NJS、株式会社大原鉄工所、JFEエンジニアリング株式会社、株式会社神鋼環境ソリューション、新日鉄住金エンジニアリング株式会社、株式会社中央設計技術研究所、月島

機械株式会社、株式会社東芝、中日本建設コンサルタント株式会社、株式会社ニュージェック、株式会社松本鉄工所、株式会社明電舎、メタウォーター株式会社 および（公財）日本下水道新技術機構 計16者

(2) 嫌気性消化法の導入マニュアル策定に関する共同研究

1) 目的

下水道整備の拡充をみた今日、国は新下水道ビジョンを示し、そこでは下水汚泥のエネルギー利用率を35%まで高める中期計画を示した。そのメニューの主要技術と認識されている嫌気性消化法について、急ぎ導入を推進すべく、新設や改築更新に際して必要な技術や手法について調査研究を行い、マニュアルを作成する。特に、嫌気性消化法の導入が困難とされていた汚水処理量が概ね20,000m³/日に満たない中小規模の下水処理場においても嫌気性消化法を円滑に導入して、エネルギー利用、資源利用に繋げられる手法を示す導入マニュアルの策定を目的とする。

2) 体制

飯能市、氷見市、株式会社NJS、株式会社大原鉄工所、オリジナル設計株式会社、JFE エンジニ

アリング株式会社、株式会社神鋼環境ソリューション、住友重機械エンバイロメント株式会社、株式会社中央設計技術研究所、株式会社東芝、中日本建設コンサルタント株式会社、株式会社ニュージェック株式会社松本鉄工所 および（公財）日本下水道新技術機構 計14者

（3）省エネ型汚泥処理システムの構築に関する共同研究

1) 目的

自治体においては下水道経営の健全化と合わせて地球温暖化対策が重要な課題となっており、これらは効果的なエネルギー対策を図ることで同時に改善が進むことが期待される。そこで、エネルギー資源に位置付けられる下水汚泥に関して、その処理プロセスの改築更新に際して大幅な省エネルギー対策が講じられるシステムに移行していくための手法を示すマニュアルを整備することを目的とする。

2) 体制

株式会社石垣、株式会社クボタ、三機工業株式会社、JFE エンジニアリング株式会社、株式会社神鋼環境ソリューション、水ing株式会社、株式会社東京設計事務所、株式会社日水コン、日本水工設計株式会社 および（公財）日本下水道新技術機構 計10者

（4）省エネ型反応タンク攪拌機の導入促進に関する共同研究

1) 目的

東日本大震災以降の電力費高騰が下水道経営を圧迫しており、特に消費電力の大きな水処理施設の省エネ化を促進することが課題となっている。近年の当機構の審査証明事業では、多数の省エネ型反応タンク攪拌機が審査証明を取得しており、また資源循環研究部は、民間企業との共同研究の成果を「活性汚泥法等の省エネルギー化技術に関する技術資料」にとりまとめ、平成26年3月に発行した。

さらに、下水処理場におけるエネルギー消費量を指標化することにより日本全国の下水処理場のエネルギー消費状況を分析し、その結果を自治体の皆さまへお知らせする等、省エネの啓発に努めているところであるが、水中攪拌機設置の下水処理場で消費電力の大きいケースが多く、省エネ型攪拌機の普及促進が急務であると考えている。このために、自治体が導入を検討する際に必要な情報を技術マニュアルにとりまとめることを目的とする。

2) 体制

株式会社クボタ、三機工業株式会社、JFE エンジニアリング株式会社、株式会社神鋼環境ソリューション、住友重機械エンバイロメント株式会社、日

立造船株式会社、前澤工業株式会社 および（公財）日本下水道新技術機構 計8者

（5）チェーンフライト式汚泥かき寄せ機技術に関する共同研究

1) 目的

下水道の整備拡充をみた今日、下水処理場においても随時改築や更新の時期を迎えてくることになり、より省エネルギー性や処理性能、維持管理性に優れた技術が求められてきている。本共同研究では、下水処理場における最初沈澱池と最終沈澱池に敷設されている、或いは敷設する汚泥かき寄せ機に関して、その新設や改築更新に際して求められる技術について調査研究を行い、技術マニュアルを作成することを目的とする。

2) 体制

株式会社クボタ、三機工業株式会社、株式会社神鋼環境ソリューション、水ing株式会社、月島機械株式会社、日立機材株式会社、前澤工業株式会社、三菱化工機株式会社および（公財）日本下水道新技術機構 計9者

（6）OJI-MIXER による酸素供給電力削減に関する共同研究

1) 目的

提案企業は、パルプ排水の処理工程で純酸素方式を多く採用し、省エネルギー化を図ってきている。その要点は、酸素の溶解・供給方法に係わる技術であり、これを下水処理のエアレーションタンクに適用して電力量削減に寄与することを目的とする。研究では、先ず処理場数の多いOD法への適用を目指し、日平均汚水処理量が約2,000m³/日のOD法の下水処理場の実証機を設置し、1年間の処理実験を行い、効果を検証する。

2) 体制

王子ホールディングス株式会社・水環境研究所 および（公財）日本下水道新技術機構 の2者

5. むすび

地域社会には、その生活・活動の基盤となる環境保全施設が整備され、良好な環境が維持できるようになってきている。これからは、関係者にあってはこれらの施設の経年劣化や新技術・性能への対応等が求められる、より有効となる取り組みを目指していく必要がある。当機構は一貫して環境保全に係わる事業や施設の一体的取組みを支援してきている。これからは益々この傾向が強まっていくと予想され、更なる支援とより有効となる技術開発、システム作りに努めていきたい。

研究紹介

通気量自動制御の堆肥化システム による省エネ化と見える化

帯広畜産大学地域環境学研究部門

准教授 宮竹 史仁

キーワード：堆肥化、省エネルギー化、見える化、温室効果ガス

1. はじめに

堆肥化とは「生物系廃棄物があるコントロールされた条件下で、取り扱い易く、貯蔵性が良く、そして環境に害を及ぼすことなく安全に土壌還元可能な状態まで微生物分解すること」¹⁾と定義されている。つまり、汚泥や家畜ふん尿、生ごみなどの有機性廃棄物を好気性微生物の活動によって分解・安定化させ、堆肥としてリサイクルする技術である。このように製造された堆肥は、土壌を健全に保つための有機物であり、土づくりには欠かせない農業資材となる。ただし、堆肥を製造するためには、適切な条件や方法で作らなければならない。単に堆積しただけでは決して堆肥にはならない。その堆肥化に必要な条件として、栄養分、水分、空気（酸素）、微生物、温度、時間の6つが挙げられる²⁾。特に堆肥化の成否を決定づける最も重要なことは、堆肥材料の水分調整と空気の供給（通気や切り返し）である。堆肥材料を適切に水分調整すると、材料内部に空隙が生み出され、それにより好気性微生物への酸素供給が行われやすい環境となる。また送風機による通気や適切な切り返しも、好気性微生物への積極的な酸素供給や過剰な材料水分の発散を促し、発酵の促進と堆肥の乾燥を速める。つまり、堆肥材料への効率的な空気の供給は、好気性微生物を上手に働かせるための環境づくりであり、これが良好な堆肥化を導き、

延いては発酵期間の短縮や堆肥品質の向上にも繋がる。

このため多くの堆肥化施設では、送風機を用いて堆肥材料に空気を送風する「強制通気式堆肥化」が用いられている。強制通気式の堆肥化施設では、発酵槽底部のコンクリート溝に塩ビ有孔管を敷設し、その上に堆肥材料を堆積させる。送風機から送られる空気は、その塩ビ管を通り、堆肥材料の内部へ供給される仕組みとなっている。この堆肥化方法によって、発酵は劇的に促進され、堆肥製造日数も大幅に短縮される。しかしその反面、送風機使用による消費電力量が膨大であり、施設管理費の大半がこの電気使用料金に占められている現状がある。例えば、5.0～6.0kW程度の送風機を使用している堆肥化施設の場合、この送風機1台を稼働させた場合の電気料金は、1ヶ月で約6万円程度にもなる。堆肥化施設では、通常でも複数台の送風機が使用されており、それに掛かる電気料金も仰天するほどの高額になる。さらに昨今の電気料金の値上げが、それに追い打ちをかけており、堆肥生産コストの上昇を引き起こしている。

そこで筆者の研究室では、このような堆肥生産現場が抱えている問題を解決するために、良好な堆肥化を維持しながら送風機の電気代を削減させる「通気量自動制御堆肥化システム」の開発・製品化に取り組んできた。このシステムはセンサで常に堆肥化を監視し、その発酵状況に応じて好気性微生物が必要とする最低

限の通気量を自動的に供給するといった「省エネ化」システムである。また、ICT（情報通信技術）が付加されており、発酵中の温度や送風機の稼働状況などが、パソコンやスマートフォン、タブレット端末を用いて一目で確認できる「見える化」のシステムでもある。堆肥化施設で使用される送風機のランニングコストは長年の問題でもあり、施設管理者を常に悩まし続けている。本報ではその解決の一端を担えればと思い、この「通気量自動制御堆肥化システム」を紹介する。

2. 通気量自動制御堆肥化システムの原理とシステム構成

2.1 通気量自動制御堆肥化システムの基本原理

強制通気式の堆肥化施設では、発酵中に常に一定の空気が供給できるように送風機が稼働している。その適正な通気量は $50 \sim 300 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ （堆肥 1 m^3 当たり1分間に $50 \sim 300 \text{ L}$ の空気量）が推奨されており、 $100 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上の通気を行っている施設が多いと言われている³⁾。ここで、一般的な強制通気式堆肥化の酸素量の変化（ラボ試験による実測値）を示した図1（上）をご覧頂きたい。これは、一定通気量（ $65 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ ）で堆肥化を行った場合の酸素供給速度（送風機で堆肥材料へ供給している酸素量：●）と堆肥内部の酸素消費速度（好気性微生物が消費している酸素量：○）を示したものである。堆肥化過程では、その発酵状況に応じて堆肥中の好気性微生物が消費す

る酸素量（○）は刻々と変化する。一方、堆肥材料へ供給している酸素量（●）は常に一定であり、好気性微生物が必要とする酸素量よりも十分（過大）な量が供給されているのが分かると思う。つまり、現状の強制通気式の堆肥化施設では、発酵中に好気性微生物が使うだろうと予測される最大限の酸素量を通気することが基本となっている。そのため、微生物活性が最大値よりも下回る状況になると、過剰な酸素量を供給する結果となり、これが無駄な通気量として送風機の電気代を高くさせている原因となっている。ただし、強制通気式堆肥化施設では、いかなる状況でも嫌気的反応による発酵抑制や悪臭が生じないよう安全に堆肥化が行えるために、且つ、水蒸気の揮散を促して堆肥の乾燥効率を高めるために、この過剰な通気量や莫大な電気代は仕方が無いと諦めているのが現状である。

このような状況を改善するために、筆者の研究室では送風機の消費電力コストを大幅に削減させるためのシステム開発に取り組んできた。このシステムの発想は、好気性微生物の活性が変化し、必要な酸素量も常に変化するのであれば、その変化に応じて送風機からの通気量も変化させてしまおうという至極単純な発想である。これを表したものが図1（下）のグラフである。好気性微生物が消費する酸素量（○）は図1（上）と同様に発酵状況に応じて常に変化している。一方、堆肥材料へ供給している酸素量（●）は、その○グラフに呼応する形で変化しているのが見て取れると思う。つまり、本システムの基本原理は、好気性条件を

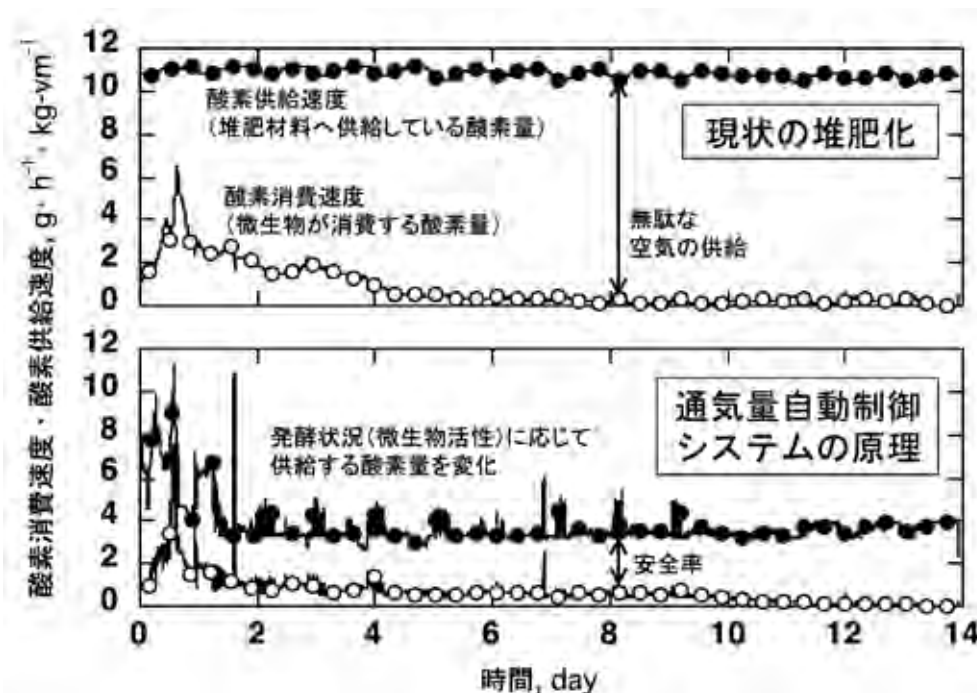


図1 堆肥製造過程における酸素供給量と微生物による酸素消費量の関係

維持できるように一定の安全率を確保しながら、微生物活性が高い時は通気量を増加させ、低い場合はそれに応じて通気量を減少させるというものであり、これが電気代の大幅な削減を可能にさせる。このように基本原理は単純明快ではあるが、実際には、堆肥生産現場に導入できるようなシステムを創り上げるためには7、8年の歳月を費やした。「通気量自動制御装置」のプロトタイプ開発機も3種類あり、様々な改良を経て4機目で漸く製品版へと辿り着いた（当然ながら、現在でも常に改良を施している）。次節では、製品化された「通気量自動制御堆肥化システム」の基本構成や特徴について紹介する。

2.2 通気量自動制御堆肥化システムの基本構成

図2に通気量自動制御堆肥化システムの概略図と写真を示した。このシステムの基本構成は、①堆肥に挿入された温度センサ（熱電対）の情報が無線LAN（Wi-Fi）によって、堆肥舎に設置された受信機（親機）を介して制御装置に送信される。②送信された情報は、制御装置（PLC）に組み込まれている通気量決定プログラムで処理され、現状の発酵状況に必要な通気量が決定される。③その必要な通気量となるようにインバータ（周波数を変化させて電圧の大きさを制御する装置）へ制御信号が送られて、決められた通気量となるようにインバータの周波数（0～60Hz）が自動で可変する。④その可変した周波数に応じて送風機の出力電圧が変化し、必要とする通気量が堆肥へ供給される、⑤発酵状況を顕す堆肥温度や電気代の目安である消費電力量ならびに送気機の稼働状況を示すインバータ周波数の情報が、インターネット通信網を介して管理者のパソコンやスマートフォン等で閲覧でき、一部制御することも可能である、という仕組みである。なお、この通気量自動制御堆肥化システムは最大30台程度の送風機を同時に制御することができる。

上記のシステムには幾つかの特徴がある。1点目は、堆肥温度をモニタリングすることで、微生物の活性状況と必要な通気量を把握していることである。通常、堆肥化微生物の活性を正確に把握するためには酸素センサや二酸化炭素センサを用いることが望ましい（プロトタイプ開発1号機ではそれらのセンサを使用していた）。しかしながら、堆肥生産現場では堆肥から発生するアンモニアガス等によって、それらのセンサが腐食したり、耐久性が低下したりする。加えて、酸素センサや二酸化炭素センサの価格が高いため、現場で消耗品として使用するには現実的では無いといった問題もある。そのため、堆肥生産現場での適応性を考えると、耐久性が高く、安価な温度センサを用いることが最も現実的な選択であった。また堆肥生産現場では、

日常業務としてバイメタル温度計で堆肥温度を目視確認するところが多く、堆肥への温度計の抜き差しにも慣れているといったことがある。そのため、堆肥温度によって制御を行うという選択を取ったが、ここで問題になったのが、堆肥温度から如何に微生物活性の状況や、それらの微生物が必要とする通気量を算出するかであった。幸い、筆者の研究室では、10年以上に亘る膨大な堆肥化基礎データの蓄積があり、それらを分析することで制御に不可欠なソフトウェア部分を開発することができた。

2点目は、温度センサからの情報通信が、Wi-Fiで無線化されていることである。有線センサを使用した場合、例えばホイールローダでの切り返し式堆肥舎等では、有線センサのケーブルが邪魔で作業性が悪くなったり、ネズミ等による通信ケーブルの咬害が発生したりする。そのような状況を防ぐために、可能な限り有線ケーブルを排除し、無線化によって利便性を高める必要があった。ただし、機械攪拌式の堆肥舎において本システムを適用する場合には、有線式センサを用いることもある。

3点目は、エラーやトラブルが生じた際に自動でそれらに対処するための緊急動作が制御装置に組み込まれていることである。堆肥化では、エラーやトラブルによって送風機が停止し、堆肥が嫌気的状況になるのは極力避けたい。そのため、エラーやトラブルが生じた場合でも送風機が停止するのではなく、常に稼働するような制御が施されている（停電の場合はシステムや送風機は当然停止するが、停電解除後は自動で復帰する）。

4点目は、ICTを利用して、堆肥温度や消費電力、送風機の稼働状況等といった堆肥化情報の「見える化」が可能ということである。これらの情報はインターネットを利用して、スマートフォンやパソコン、タブレット端末から、いつでもどこでも簡単に見ることができる。一部については簡単な送風機制御もそこから行える。それ故、施設管理者が遠隔地に居ても、常に堆肥の発酵状況を把握することができるし、その情報を元に現場の機械・施設オペレータに指示を出すこともできる。また、複数の堆肥化施設を運営している場合では、一箇所のオフィスで情報を集中管理することもできるため、効率的な施設運営管理が行える。

5点目は、本システムの導入により、堆肥化過程で発生する温室効果ガス（亜酸化窒素： N_2O 、メタン： CH_4 ）排出量や電力使用による間接的 CO_2 排出量を大幅に削減できるということである。これについては、次章「3. 通気量自動制御堆肥化システムの効果」で詳述する。

以上が「通気量自動制御堆肥化システム」の基本構

成と特徴である。製品化に至るまでに、プロトタイプ開発機であらゆる問題抽出を行い、改良と試験を繰返しながら製品化を目指してきた。次章では通気量自動制御堆肥化システムの導入効果について、実際の試験

結果を元に検証したいと思う。なお、本システムであるが「堆肥製造方法および装置（特許 5565773）」（帯広畜産大学による単独保有）として特許登録されている。

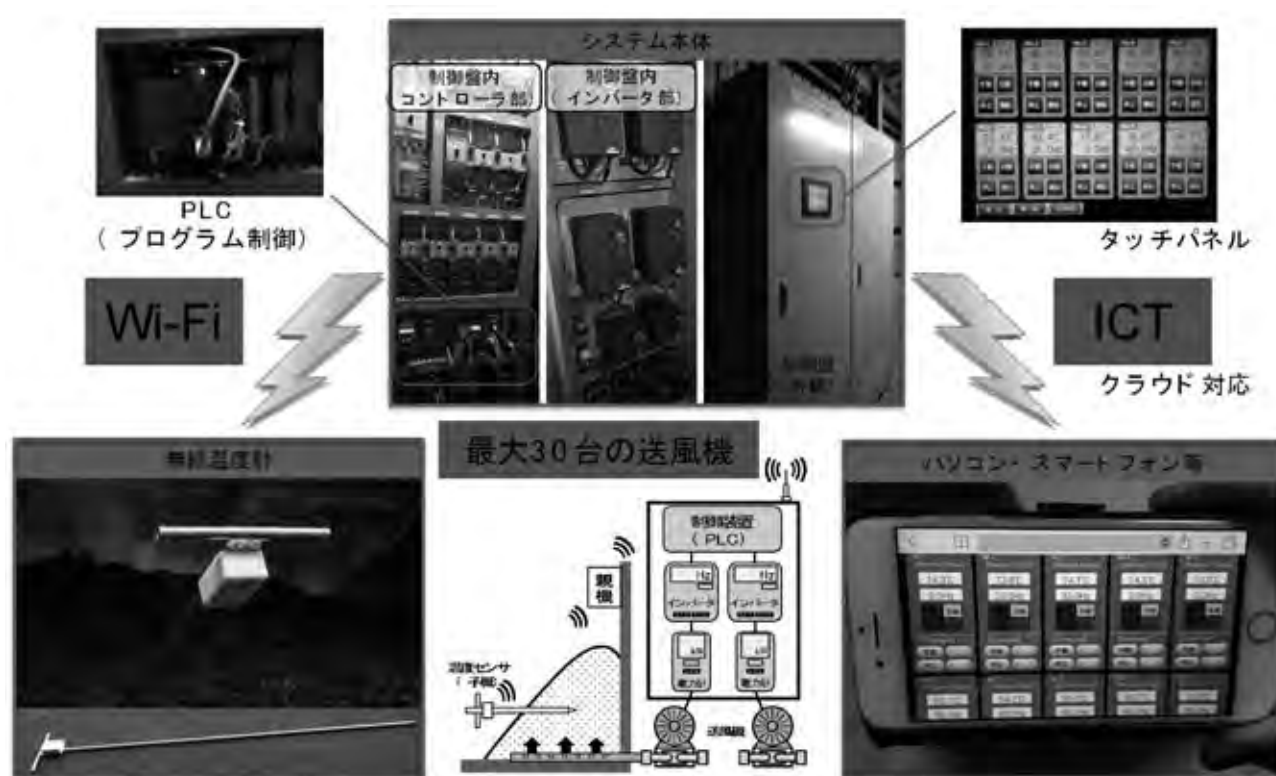


図2 通気量自動制御堆肥化システムの概略図と写真

3. 通気量自動制御堆肥化システムの導入効果

通気量自動制御堆肥化システムを導入することによって、堆肥製造における実利性と環境性を飛躍的に向上させることが可能であり、具体的には以下3点が挙げられる⁴⁾。

1点目は、送風機に掛かる電気代の削減である。本システムを導入した民間企業の堆肥化センター（北海道中標津町）の実例を挙げて紹介したい。導入先の堆肥化施設は、送風機の総出力が31.6kW（送風機10台：発酵槽に応じて1.7kW～5.0kWを使用）、年間の堆肥製造量は7,200t（堆肥原料は食品工業汚泥と下水汚泥を別々にロット管理）、150m³の発酵槽が全10槽、ホイールローダでの切り返しである。その施設全体に「通気量自動制御堆肥化システム（製品版開発1号機）」を2014年10月に導入し、既に1年以上が経過している。従来の堆肥生産（慣行区）による電気使用量は

504kWh/日（184MWh/年）であったが、システム導入後（制御区）の、この1年では平均185kWh/日（68MWh/年）となり、消費電力は63%減少、電気料金も年間202万円の削減効果が得られている（図3）。なお、電気料金の計算は北海道電力の低圧電力料金である17.35円/kWh（2015年12月現在）を使用している。この堆肥化施設では送風機全10台の使用であるが、通気量自動制御堆肥化システムは、本制御装置1台でさらに最大30台の送風機を制御することができるため、送風機の数が多ければ多いほど、また送風機出力が大きければ大きいほど電気代の削減効果も高く、システム導入費用の償還も早くなる（本システムは省エネ化と生産性の向上を図るシステムであり、各種補助金の利用も可能である）。以上のように、システム導入によって大幅な電気代の削減が可能であり、これは堆肥製造コストや施設維持管理コストの低減に直結する。

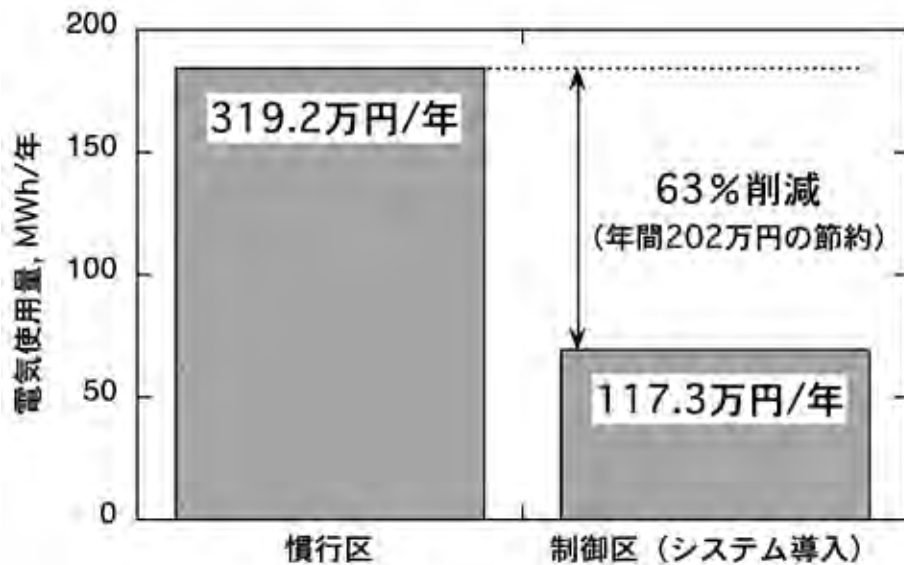


図3 システム導入による送風機の電力使用量の削減効果

2点目は、堆肥化過程で発生する温室効果ガス（ N_2O および CH_4 ）排出量の抑制効果である。図4に堆肥化過程の N_2O （上）および CH_4 （下）の排出速度の変化を示した。このグラフは、これらの排出速度の値が高い程、温室効果ガスの発生量が多くなることを意味している。また N_2O は CO_2 の298倍、 CH_4 は25倍の地球温暖化ポテンシャルを有する（例えば、 N_2O が1kg排出された場合、それは CO_2 を298kg排出したのと同じ作用をする）強力な温室効果ガスであり、排出削減が求められている。なお、この結果も上述の民間企業の堆肥化センターで試験を実施し、4週間の1次発酵について調査を行ったものである。 N_2O 排出速度は、制御区（システム導入区）で開始直後にシステム不具合が発生（製品版開発1号機の導入直後による試験で現地修正の必要が発生）したため高数値になったが、直ちに不具合を修正し、その後は慣行区よりも常に低い値で推移した。一方、 CH_4 排出速度は、慣行区で堆肥化開始直後に著しく上昇したが、制御区では発酵期間全体を通して非常に低い値であった。4週間の1次発酵において制御区を慣行区と比較すると、 N_2O 排出量は81%の排出削減となり、 CH_4 については95%の削減となった。また、1年間の堆肥製造において堆肥中から発生する N_2O および CH_4 と、送風機の消費電力による間接的 CO_2 排出量を併せた、総合的な温室効果ガス排出量（ CO_2 換算値）を図5に示した。システム導入により、当該堆肥化施設では、約65%の温室効果ガス排出量の削減を達成し、排出削減量は CO_2 換算で年間90tとなった。以上の結果から、通気量自動制御堆肥化システムの導入は、電気代削減と

いう実利性に加えて、堆肥化から発生する N_2O 、 CH_4 および間接的 CO_2 排出量も大幅に削減させることが可能であり、地球温暖化対策という観点からも貢献し得る技術である。

3点目は、良好な堆肥化反応と有機物分解率の向上である。図6に堆肥温度（上）、含水率（下）の変化を示した。この結果も民間企業の堆肥化センターにおいて、温室効果ガスの排出測定と同時に起こった堆肥化試験（4週間）によるものである。慣行区、制御区ともに堆肥温度は開始直後に70℃以上まで上昇し、順調な堆肥化反応を示している。ただし、制御区では実験開始直後の装置の不具合により温度が低下したが、直ちに修正することで、それ以降は問題無く堆肥化が行われた。温度変化において最も特徴的なのは、14日目以降に制御区で慣行区よりも高い温度が維持されたことである。これは、発酵状況に応じて通気量が低減されることで、堆肥材料からの熱損失が減少し、蓄熱反応が生じたためである。この高い温度の持続性は、病原性微生物の死滅や雑草種子に不活性化の確実性を高めるものとして効果がある。一方、含水率の変化（図6下）は、堆肥化が進行するにつれ、慣行区、制御区ともに同様の水分減少パターンを示した。制御区では通気量が低減されたことで水分蒸発量の減少が懸念されたが、乾燥効率は慣行区と全く同程度であり、システム導入による堆肥乾燥への支障は無いことを示す。これは制御区においても、乾燥効率に影響を及ぼさない程度の通気量が確保されており、また、高温の維持が水分蒸発を助けたと推測される。加えて、有機物分解率は制御区で30.5%、慣行区で18.2%となり（図

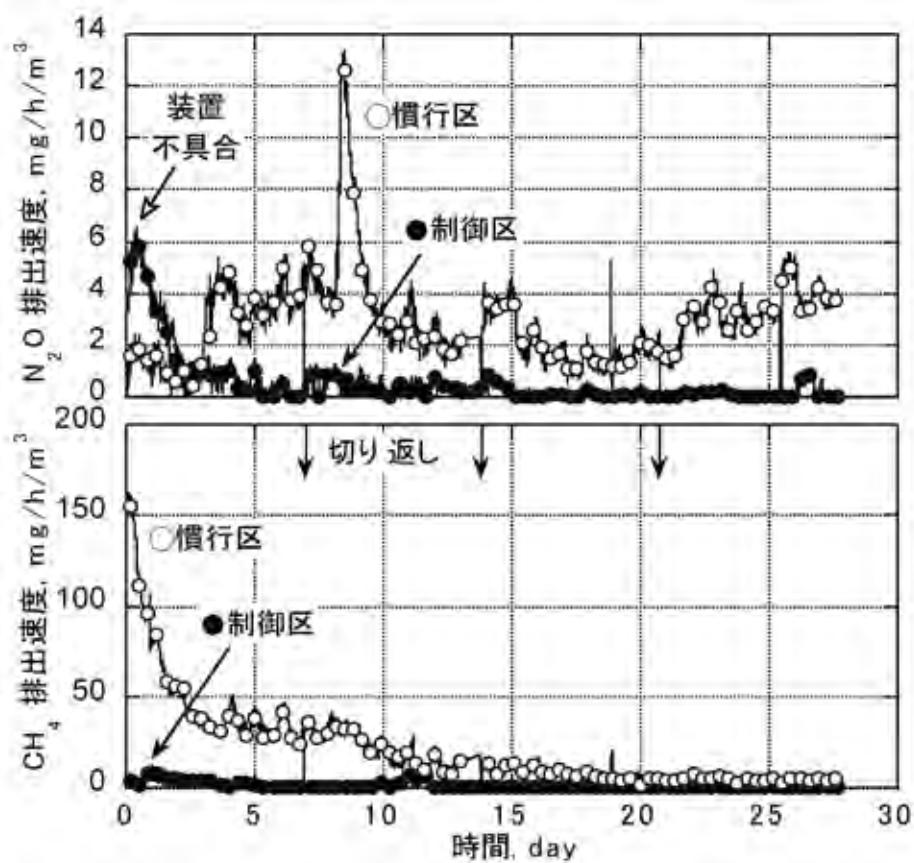


図4 堆肥化過程で発生する N_2O および CH_4 の排出速度の変化

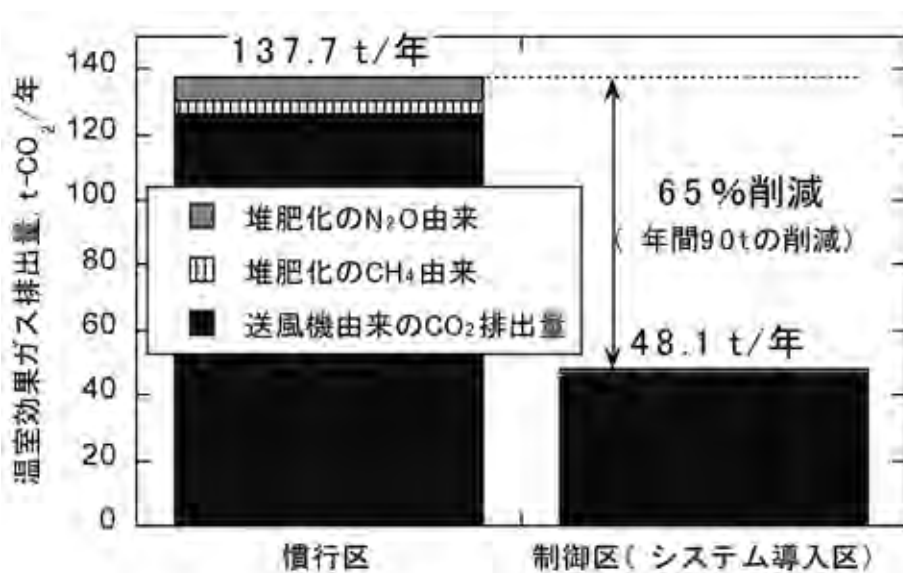


図5 システム導入による温室効果ガスの排出削減効果

7)、システム導入によって分解率が向上した。これは、堆肥化期間中に慣行区よりも温度が高く維持されることによって、微生物活性も高いレベルで維持された結果、有機物分解が進行したと思われる。これらの結果

は、システムを導入することによって、良好な堆肥化の維持や有機物分解率の向上など、堆肥化の発酵促進を促す作用が得られることを示唆する。

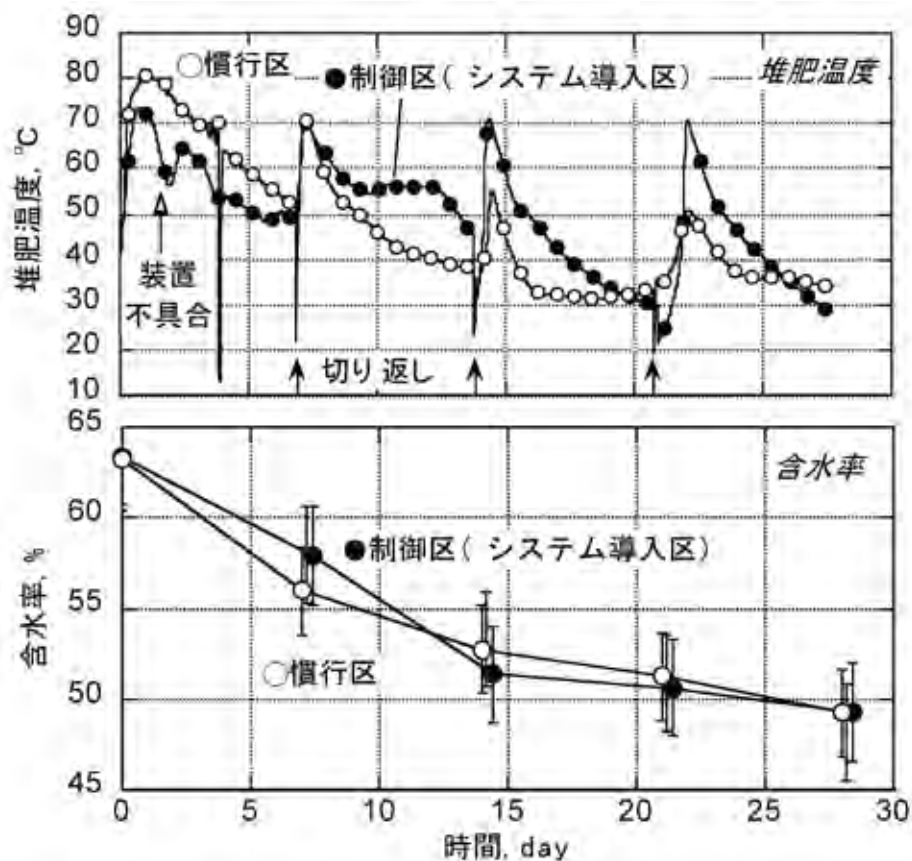


図6 堆肥温度（上）と含水率（下）の経時変化

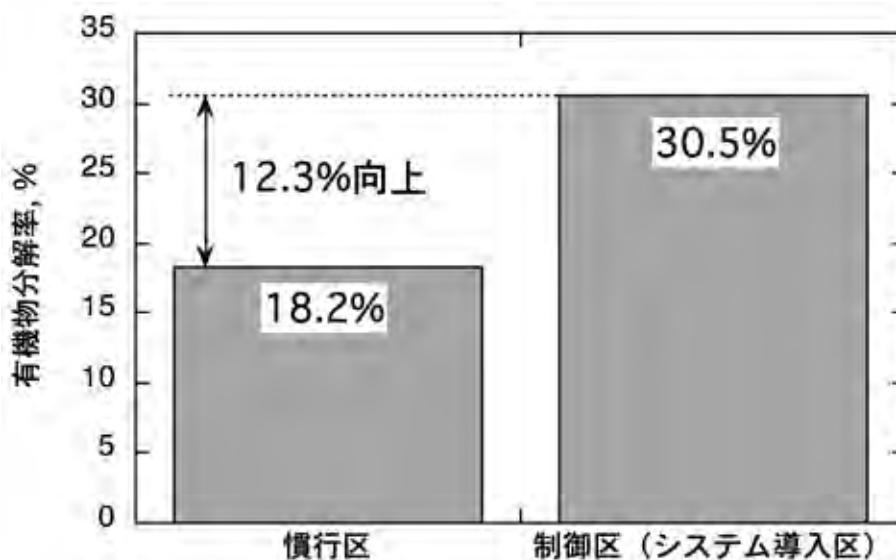


図7 システム導入による有機物分解率の向上

以上の結果から、通気量自動制御堆肥化システムの導入により、送風機の電気代削減という実利性に加えて、温室効果ガスの排出削減という環境性の向上や良好な発酵維持や分解率の向上など堆肥化品質の向上も期待できる。さらに本システムはICTなどのクラウドサービスの提供による、堆肥化の「見える化」が実現されており、堆肥化業務の効率性を高めるものとしても期待できる。

4. おわりに

「通気量自動制御堆肥化システム」の本格的な開発を始めたのは7、8年前である。2015年5月に漸く製品化まで漕ぎ着き、現在は民間企業とのライセンス契約のもと、販売を開始している。このシステム開発は、私一人の力では無く、民間企業との共同研究を介して、ともにタッグを組んできた成果でもある。現在も「通気量自動制御堆肥化システム」をさらに進化させるために、新たな幾つかの開発を進めている。その一つとして、堆肥化の発酵状況を自動的に診断するシステム（堆肥化の発酵診断プログラム）等である。現状の堆肥化施設では、堆肥生産者の知識や経験によって、堆肥化の成否が大きく左右される。「堆肥化が上手いかない」といった現場も珍しいことではない。それ故、堆肥化の発酵状況を科学的に分析、診断できるプログラムシステムがあれば、堆肥製造の経験の少ない管理者であっても、その診断に応じて堆肥を生産することが可能となる。通気量自動制御堆肥化システムには、堆肥の温度を測定するセンサ部があり、それらの情報を確認できる「見える化」の技術が搭載されている。つまり、これらのツールを利用・改良して、新たな「発酵診断プログラム」を開発、付加することができれば、堆肥化の成否や発酵不良時の原因および対処方法を、堆肥生産者のスマートフォンなどへ知らせることが出来るようになる。さらに、これらの情報を堆肥化の機械攪拌機とリンクさせることができれば、発酵状況に応じて機械攪拌機を自動的に稼働させることも不可能では無い。現在の日本の職場環境はどこも人手不足で困っており、堆肥製造現場においても今後の人材確保は難しくなるだろう。そのような状況においても、堆肥生産者の人材育成は重要であり、この通気量自動制御堆肥化システムと発酵診断プログラムが「科学に裏打ちされた堆肥化技術」を教示するためのツールになればと考えている（まだ実現には時間が掛かるが…）。最後に「通気量自動制御堆肥化システム」にご興味・ご関心がおありの方は、筆者（miyaf@obihiro.ac.jp）までご連絡いただければ幸いです。

引用文献

- 1) Golueke, G.C. 1977. Biological reclamation of solid wastes. pp.2. Rodale Press, Emmaus, PA, USA.
- 2) 押田敏雄、柿市徳英、羽賀清典. 1998. 畜産環境保全論. pp.57-60. 養賢堂.
- 3) 中央畜産会. 2007. 堆肥化施設設計マニュアル. pp.10-11. 社団法人中央畜産会.
- 4) 宮竹史仁、小川ひかり、小林雅之、藤本達也. 2015. 通気量自動制御による堆肥化システムの普及開発とその有効性の評価. 第26回廃棄物資源循環学会研究発表会. 講演原稿 2015(B6-9): 265-266.

Q & A

蛍光 X 線分析について

キーワード：蛍光 X 線、非破壊分析、スクリーニング分析

Q1 汚泥肥料中のカドミウム等の有害成分の量を簡便に知る方法がありますか。

A1 汚泥肥料等については、含有を許される有害成分の最大量が、ヒ素、カドミウム、水銀、ニッケル、クロム、鉛について定められています。肥料分析法(1992年版)、あるいは、独立行政法人農林水産消費安全技術センターが発行している肥料等試験法でカドミウムの分析方法をみると、汚泥肥料を酸分解した後、原子吸光法や ICP 発光分光分析法等で測定することになっています。酸分解は、無機分析を行う実験室では一般的な操作ですが、簡便とは言い難く、人手と時間がかかります。品質管理の目的で分析を行うときなど、迅速かつ簡便に有害成分の量を知りたいという場合があります。その目的に適した方法として、蛍光 X 線分析法があります。

Q2 蛍光 X 線分析法の利点は何ですか。

A2 蛍光 X 線分析は非破壊分析であり、試料を酸分解することなく、そのまま測定できるのが最大の特徴です。乾燥汚泥のような粉末試料の場合、試料の前処理は錠剤成型器を使って直径 10mm 程度のブリケットを作成するだけなので、化学分析に習熟していなくても操作できます。また、試料を自動で交換できるようになっていることが多く、最初に試料をセットすれば、後は自動で測定できます。簡易分析を利用した汚泥肥料の品質管理については、「汚泥肥料の規制のあり方に関する懇談会報告書(農林水産省消費・安全局、平成 21 年)」においても重要視されており、蛍光 X 線分析の活用についても触れられています。

Q3 蛍光 X 線分析の基本原理解について教えてください。

A3 ある物質に X 線をあてたとき、X 線のエネルギーの一部がその物質に吸収され、そのエネルギーによって原子の中の電子がはじき飛ばされます。X 線のエネルギーは、数 keV (キロ電子ボルト。1 電子ボルトは約 1.60×10^{-19} J) から数十 keV の範囲にあるので、原子の内殻電子を飛ばすことができます。内殻電子を失った原子は不安定な状態になるため、外殻電子が内殻に移動し、そのエネルギー差に相当する X 線を放出します。この X 線が蛍光 X 線(特性 X 線ともいう)です。蛍光 X 線のエネルギー(波長)から元素の種類が、蛍光 X

線の強度から元素の量がわかります。

吸収されなかった X 線は原子の中の電子によって散乱されます。このとき、X 線のエネルギーの一部を電子の運動エネルギーに与え、波長が長くなったものをコンプトン散乱、エネルギーを失わずに方向だけ変わったものをトムソン散乱と呼びます。コンプトン散乱は、蛍光 X 線分析において試料の厚さ補正に使うことがあります。

蛍光 X 線分析装置には、波長分散型とエネルギー分散型があり、前者は X 線回折の原理により波長を選別するのに対し、後者は半導体検出器で X 線を検出し、マルチチャンネルアナライザでエネルギーを選別します。エネルギー分散型は波長分散型と比べて感度の点で不利ですが、装置の小型化が可能であり、品質管理用途に適しています。

Q4 蛍光 X 線分析を使ってどのようにスクリーニング分析をするのですか。

A4 エネルギー分散型蛍光 X 線分析装置で生じる測定誤差は、X 線検出器の統計変動に起因します。X 線強度の測定値が I cps (1 秒あたりのカウント数)、測定時間が t 秒のとき、統計変動による理論標準偏差 σ (cps) は、

$$\text{理論標準偏差 } \sigma = \sqrt{\frac{I}{t}}$$

で表されます。この式は、測定値(cps)と測定時間(秒)から測定値の標準偏差が求められることを示しており、測定時間が 2 倍になれば、標準偏差は約 $1/1.41$ になるという関係です。別途作成した検量線の傾きから、標準偏差の濃度換算もできます。

さて、この式を使うと、基準となる値を超えない、あるいは超えるという判断(スクリーニング分析)が柔軟に行えます。たとえば、基準値からの偏差が標準偏差の 3 倍以上になったときに、基準値を超えない、あるいは超えると判断するというルールで測定したとすると、測定時間が短いときは、標準偏差が大きくて判断できない場合でも、測定時間が長くなるに従って標準偏差が小さくなり、判断できるようになります。これを自動化すると、判断した時点で分析を終了し、次の試料の分析に取りかかることが可能になります。しかし、基準値からの偏差が小さい場合は時間を長くしても判断できないことも考えられるため、ある程度の時間で打ち切ることも必要になります。

(農業環境技術研究所 川崎 晃)

現場からの

声

高温高濃度消化プロセスに適した 再生可能エネルギーの 利用について

キーワード：高温高濃度消化プロセス、消化ガス発電、固定価格買取制度

大阪市建設局下水道河川部水環境課

担当係長 島田 卓

1. はじめに

国全体の取組みとして再生可能エネルギーの活用が進められ、下水道分野においても低炭素社会構築への貢献が求められています。下水処理場には、都市から排出された有機物が集約され、バイオマスとしての下水汚泥が持続的に発生します。これを有効利用し、再生可能エネルギーとして都市や社会に還元することは、電力・化石燃料を消費して大量の温室効果ガスを排出している下水処理場に課せられた使命と言えます。本稿では、大阪市の特徴的な下水汚泥処理技術で

ある高温高濃度消化プロセスに適した再生可能エネルギー利用の概要について紹介します。

2. 大阪市の下水汚泥処理概要

大阪市では12か所の下水処理場で発生する汚泥をパイプ輸送により集約し、最終的には舞洲スラッジセンター及び平野下水処理場の2か所で、溶融処理または炭化処理を行っています（図-1）。最終処理に至る



図-1 大阪市の汚泥処理ネットワーク

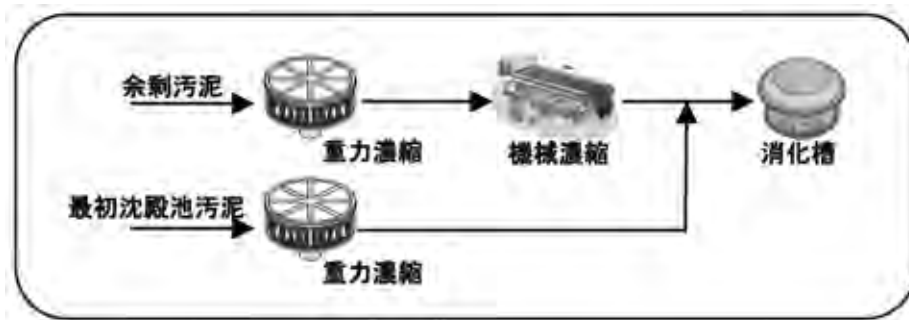


図-2 大阪市の高温高濃度消化プロセスの概要図

までの途中段階で、下水汚泥の減量化、安定化を目的として嫌気性消化槽を導入しています。大阪市の嫌気性消化の歴史は古く、昭和30年代から中温消化プロセスを導入していましたが、より効率的な処理を求めて高温高濃度消化プロセス（消化槽温度50℃以上、目標投入汚泥濃度5%）に移行しています。平成5年に津守下水処理場で高温高濃度消化に移行したことを皮切りに、各下水処理場への導入を進め、平成22年に消化槽を有する全6か所の下水処理場で高温高濃度化を実現しました。現在の高温高濃度消化プロセスは図-2のとおり、最初沈殿池汚泥と余剰汚泥を別々に濃縮する分離濃縮や機械濃縮に高分子凝集剤添加型のベルト型ろ過濃縮機等を導入するなどして処理の効率化に努めているところです。高温高濃度消化プロセスに移行したことで、従来20日必要であった消化日数が15日に短縮され、施設のコンパクト化が図れました。さらに、消化率が45%から60%に上昇したことで、汚泥のさらなる減量化を達成し、消化ガス発生量が増加しました。

消化ガスはメタンを60%程度含む有用な再生可能エネルギーであり、現在、大阪市全体で年間約2,800万Nm³発生しています。既に2か所の下水処理場で消化ガス発電を行い、電力は下水処理場に供給し、廃熱は消化槽の加温に用いるといったコージェネレーションシステムを導入しています。中浜下水処理場では平成7年から市直営事業で、津守下水処理場では平成19年からPFI事業で消化ガス発電を実施し、これらの下水処理場では消化ガスを全量有効利用しています。

残りの4か所の下水処理場では、主に消化槽を加温するための温水ボイラー燃料として消化ガスを用いていますが、未利用ガスが残っており、有効利用率は約60%に留まっている状況です。

そこで、消化ガスの全量有効利用をめざす観点から、この4か所の下水処理場で発生する年間約1,800万

Nm³もの消化ガスを発電し、再生可能エネルギーの固定価格買取制度（FIT制度）を活用して電力事業者に売電し、その利益の一部を大阪市が受け取るという「大阪市下水処理場消化ガス発電事業」を平成26年からスタートさせました。

3. 「大阪市下水処理場消化ガス発電事業」の概要

大阪市は、高温高濃度消化を採用していますので、消化ガス発生量が多い一方で、消化槽の温度を50℃以上に保つために、相当量の消化ガスを使用する必要があります。発電施設で利用できるガスは限られてきます。

そこで、発電効率と廃熱回収効率を踏まえて高温高濃度消化プロセスに適した消化ガス利用を検討したところ、大阪市が既に導入しているガスエンジンによる発電が最も有利ということになりました。消化槽を高温に保持するために必要な熱源供給は、発電施設からの廃熱と既設の加温設備からの熱による最適なバランスで運転することで、温水ボイラー燃料として利用していた消化ガス量は約半分に、発電施設で利用できる消化ガスが増えるため効率的なエネルギー利用が図れます（図-3）。

本事業は、民間事業者が自らの資金によりガス発電設備を整備し、電力会社へ電力を販売し、その収益により初期投資の回収や事業運営を行う民設民営事業です。大阪市は消化ガスの販売料と土地占用料を民間事業者から収益として得ます。設計・建設は平成29年3月まで、維持管理運営は平成29年4月～平成49年3月までの20年間です。

本事業の効果は、年間約1,400万Nm³の消化ガスを利用し、約2,600万kWhの電力を発電（7,100世帯相当分）し、年間約13,000tのCO₂削減につながります。大阪市が受け取る消化ガス販売料と土地占用料は年間約3億円となり、下水道の経営面にも貢献できる事業と言えます。また、発電施設の設計・建設を完

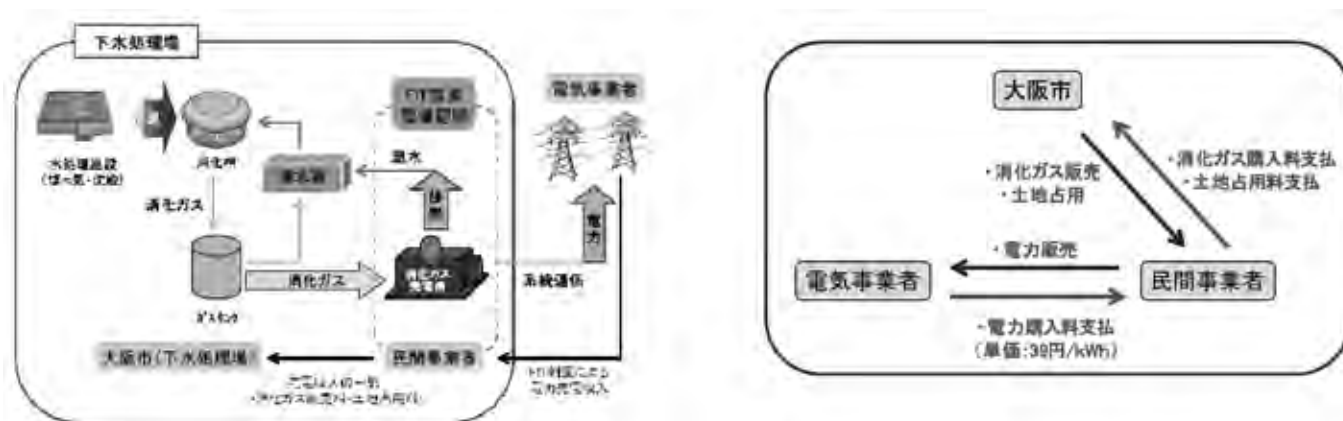


図-3 本事業の概要図及び大阪市と事業者の関係

了させ通常運転が可能になれば、大阪市の承諾を得て運営開始を前倒しできる契約になっていますので、早期の運転開始に向けて現在施設を整備中です。本事業の詳細については、発電施設が設置され、稼働実績ができた段階で運転状況とともに報告したいと思っています。

4. おわりに

大阪市がこれまで改良を加えてきた高温高濃度消化プロセスは、消化汚泥からの熱回収や攪拌方法の変更などによる発展の余地があり、これらに着手することで発電に利用できる消化ガス量が増加し、消化ガス発電事業の効果をさらに引き出せる可能性があると思われます。

国のエネルギー情勢が東日本大震災以降大きく変わり、低炭素社会構築へ向けた国の環境政策も刻々と変化しています。今後の下水汚泥処理を検討していくためには、その時々々の制度と最善の技術とのベストな組合せを選択していくことが重要であると考えます。

文献紹介

植林地への下水汚泥施用：土壌－植物－カタツムリ間での微量金属移行に及ぼす影響

Sewage sludge application in a plantation: Effects on trace metal transfer in soil-plant-snail continuum

Mohamed Bouriou, Frédéric Gimbert, Laurence Alaoui-Sehmer, Mohammed Benbrahim, Lotfi Aleya, Badr Alaoui-Sossé

Science of the Total Environment 502 (2015) 309-314

人口増加など都市化にともなう問題が深刻化していく中、下水汚泥の処理は世界的な課題であり、農地への施用法を改善することで最適な処理への努力が続けられている。しかし、汚泥には作物の吸収を経由して人間の食事に移行するにたる量の微量金属が含まれており、健康被害をもたらすことが危惧されている。農地に比較して植林地に下水汚泥を施用するリスクははるかに低いとされているが、環境と人間の健康や植物の生産性におよぼす影響を明らかにするために、植物、土壌、水、動物など生態系を構成する各要素を注意深く監視する必要がある。著者らは汚染環境下で微量金属を蓄積する可能性を有しそれ自体が地上無脊椎動物とヒトを含む脊椎動物の両方にとって汚染源となりえるものを考慮すべき生物指標と定義し、土壌および植物や草食動物を捕食する二次消費者とも密接に関連し土壌と食物連鎖の機能において重要な役割を果たしているカタツムリに注目し、植林生態系に下水汚泥を施用した後の土壌・植物・カタツムリ間での微量金属の移行とその溶脱の危険性に関して評価を試みた。

実験はフランス北東部オート＝ヌール県のメリゼで10歳齢のヨーロッパカラマツの植林地で行った(標高328m、勾配10%)。草本層はスゲ属で構成され、気候は半大陸性(7月に月平均最高気温27.8℃、1月に最低気温-3.7℃、年間降水量662mm)、土壌は埴壌土(疑似ルビソル、ムル型、粘土18.6%、壤土38%、砂36.9%)である。メリゼの都市廃水処理場から入手した下水汚泥を、2008年6月に0.4ton/ha、09年7月と10年3月にそれぞれ乾物で3ton/ha鋤き込まずに表面施用した。下水汚泥の施用を行わない対象区と施用区にステンレススチール製の小生態系(直径0.25m、高さ0.25m)を設置した。土壌と植生だけで構成された各小生態系には亜成体の食用カタツムリ *Cantareus aspersus* (5g) 10匹を配置し、14日後と28日後に採取した。各小生態系の植物体と土壌、土壌の上のリター層、まだ土壌生物によってほとんど分解されていない落葉落枝類および生物遺体や生物由来

の物質の破片や微生物の死骸、あるいはそれらの排泄物を起源とする微細な有機物粒子が堆積した層を採取した。

下水汚泥施用によってリター層では銅、亜鉛、鉛、カドミウム濃度が186、438、166、163%とそれぞれ大きく上昇した。土壌では亜鉛濃度のみ上昇した。移動性が低い銅、鉛とカドミウムはリター層で有機物に吸着されたため土壌への溶脱が阻害され、亜鉛は酸性土壌では移動性が高いためリター層より下の土壌に移行したと考えられる。下水汚泥施用後深さ20cmと40cmの土壌溶液を毎月採取したが、微量金属濃度に下水汚泥施用の影響はみられなかった。下水汚泥によって土壌に添加された銅と亜鉛の量は土壌に元々蓄積していた量の10%と0.8%に相当したにも関わらず、溶脱は無かったことが示された。配置28日後のカタツムリでは銅とカドミウム蓄積量が下水汚泥によって増加した。カタツムリの皮膚から吸収される微量金属は消化管を介して蓄積される微量金属より少ないことが報告されている(Dallinger et al., 2001)。植物には下水汚泥による微量金属濃度の上昇はなく、またカタツムリが接触を忌避した跡がみられたことから、カタツムリに亜鉛とカドミウムが蓄積した原因は主にリター層であり、本実験中で微量金属の移行における植物の役割は低いと判断された。下水汚泥施用と対照区ともにカタツムリの鉛蓄積量が実験開始時より5.5倍と大きく増加した原因は、下水汚泥ではなく、自然状態でも鉛濃度が高い土壌(13ppm)であることが示唆された。カタツムリの亜鉛蓄積は観察されなかった。すべてのカタツムリの乾物重は減少したが、これは本実験が行われた9～10月の平均気温、湿度(13.4℃、84%)および日照時間の大幅な減退が、Gomot (1997)が報告したカタツムリ生育の最適条件(温度20℃、湿度80%、明暗サイクル18時間明/6時間)と大きく異なったためと考えられる。

以上の結果から筆者らは、下水汚泥がリター層の微量金属濃度を上昇させること、実験期間が28日間と短く、食用カタツムリの生育にとって良好な条件でなかったにも関わらずカタツムリに銅とカドミウムが蓄積したことを指摘した。本研究ではカタツムリの死亡率は1%未満であり下水汚泥による毒性症状を示さなかったが、植林地の生態系に下水汚泥が与える影響を評価するにはさらに長期の実験を行うことが必要であるとしている。

(農業環境変動研究センター 主任研究員 杉山 恵)

文献紹介

養豚排水をバイオマスとして利用した
光触媒水素ガス生成（実験的研究）

Andrea Speltini, Michela Sturini, Federica Maraschi, Daniele Dondi,
Andrea Serra, Antonella Profumo, Armando Buttafava, Angelo Albini
Department of Chemistry, University of Pavia,
via Taramelli 12, 27100 Pavia, Italy

要約

今回は、養豚排水を犠牲とした水分解における、水素ガスの光触媒生成について、初めて報告する。

触媒として、白金めっきされた酸化チタンを用いて、UV-A 照射と太陽光照射の両方で、水素生成が確認された。

照射時間、触媒量、pH と養豚排水濃度の、水素生成量に対する影響が研究され、バッチ実験の再現性も確認された。

養豚排水中の基質の複雑さにも関わらず、ブドウ糖、蔗糖およびグリセロールが典型的な犠牲剤として働き水素が発生し、水素が優れた電子供与体であることを示した。

また、照射により触媒活性は回復し、酸性水による単純洗浄により、少なくとも3回再生利用することで、触媒量の節約が可能であった。

この実験的な研究は、養豚排水のような廃棄物が、水素ガスのような高付加価値化学製品を生成する安価な原料となりうることを証明している。

はじめに

従来の炭化水素燃料に代わるものとして、クリーン・エネルギーの観点から、水素ガスの需要は年々増加している。

実際、燃料電池内の水素反応は、エネルギーを効率的に発生させ、副産物として水だけを生成する。

現在では、水素のほとんどは天然ガス由来であり、一方、わずかにおよそ5%の水素が、主に水電気分解を利用して、再生可能資源から生成される。

残念ながら、天然ガスから水素を生成することには、化石燃料の枯渇問題やプロセスからの二酸化炭素(CO₂)の大量排出の問題がある。

これらの理由から、再生可能な資源（たとえばバイオマスや水）から水素を生成する革新的な技術開発が必要とされ、近い将来ホットな研究トピックとなろう。

光触媒水分解技術は、水素を光触媒による水分解から生成し、水が大量かつ再生可能な資源であるために、環境性という観点で価値あるプロセスとされている。

このプロセスには、水素と酸素の放出のために必要な大きな過電圧に対して、白金を二酸化チタンを付加したものが用いられる。

二酸化チタンは、その強い触媒活性と高い化学安定性と長期有効性から、最も広く使われており、一方、白金は、最も低い過電圧と最大の仕事関数を与えられるために、最も効果的な金属触媒ともされている。

水分解技術では、有機基質が酸化されるとともに犠牲試薬としてふるまうこととなる。一方、二酸化チタン原子価穴とOHラジカルは集められ、電子は触媒伝導または白金体（電流増倍効果）へ移送される。これにより、気相に水素を付与するために、水素イオンの還元が持続される。

白金の役割は、電荷分離を維持し、よりすぐに伝導帯の電子を利用できるようにすることである。

近年、いろいろな有機物質（メタノール、エタノール、グリセロール、ブドウ糖などを含む）について、光触媒水分解における犠牲材としてのテストがなされた。

しかしながら、液体の養豚排水を用いた光触媒による水素生成は、まだ研究されていない。

今回の研究報告では、液体の養豚排水からの光触媒による水素生成について報告する。

白金めっきされた二酸化チタンは、UV-A 照射下でも太陽照射下でも触媒として使用し、プロセス（触媒量、pH、照射時間とバイオマス濃度）に関係する主な変数について調査した。

水素生成量は、典型的な犠牲材（すなわち多価アルコール）を用いて観察したものと比較し、水素発生については、熱伝導率検知（TCD）を利用したガスクロマトグラフィー（CC）によって定量化した。

さらに、触媒の再生とリサイクルの可能性についてテストした。

試料の作成

生の養豚排水（平均値：pH 7.9、46.4g/L COD、3.6g/L T-N、1.7g/L NH₄-N、1.1g/L T-P、0.8g/L 溶解性PO₄-P）は、ポー川平野（北イタリア）にある養豚舎から集め、1mmふるいにかけて、浮遊物質40g/Lとなるように水で薄めた。養豚排水は遠心分離し、上澄みを蒸留水で薄めている。

ここへ、白金めっきされた二酸化チタンを加え、マグネチックスターラを用いて、懸濁液を静かに窒素（高純度99.9%）でガス置換し、それから4時間照射した。

実験操作上のパラメータの影響

養豚排水の大きな希釈は、水分解による水素生成量に影響を及ぼさなかった。

一方で、バイオマス濃度、触媒量または照射時間を増やすことは、ある程度水素量を増大させた。

また、アルカリ性 pH で観察される高い水素生成では、犠牲水分解が酸性媒体により妨げられた。

これらの予備調査結果より、触媒濃度、pH、照射時間とバイオマス濃度については、システムチェックに調査することが求められた。

触媒濃度が不均質である場合の光触媒作用が重要な鍵となるため、二酸化チタンのみにて実験を実施した。

pH の役割についても、適正な pH が光触媒水素生成に対して大きな影響を及ぼすことが判明した。酸性 pH で得られる低い水素生成量は、正に荷電する二酸化チタン表面に影響され、プロトン化されたバイオマス成分の低親和力に起因しているものと考えられる。

一方、アルカリ性 pH における高い水素生成は、半導体表面での帯電挙動で説明できる。pH > 6.8 で負に帯電し、その際に水素イオンが主に吸着され、汚水成分のイオン分布と光触媒粒子の分散を考えることで説明できる。

水素生成量は照射時間で増加し、照射初期にピークに達し、長い照射により減少した。

時間とともに発生率が減少する理由は、他文献にも記述のあるように、他のバイオマス（すなわちグリセロール、ラクトース、セロビオース）同様に、電子供与体の消費、および／または、照射の間に徐々に起こる触媒の部分的な非活性化によるものとされる。

多量の養豚排水が使われた際に、反応生成量が最大 70% 減少したため、最適なバイオマス濃度が判明した。この制約は、光侵入を妨げる濃度の溶液のフィルタ効果に起因すると考えられる。

また、対照系のプランクテストにより、暗室条件、あるいは、触媒無し条件下では、水素は発生せず、生の二酸化チタンを用いても発生しなかった。

上記の研究結果から、発生する水素が、主にバイオマスの酸化を通して犠牲水分解に由来すると言及できる。

典型的な犠牲剤の比較

液体状の養豚排水から水素生成の重要性を評価するため、類似実験は他の基質を用いて行われた。具体的には、ブドウ糖、蔗糖とグリセロールの標準的な水溶液を、水溶性汚水試料と同じ COD 濃度で調製し、光触媒の処置を施した。

結果は、前処理した養豚排水に比較して、テスト合成物からの水素量が倍になった。

この結果から、触媒以外の他のいかなる試薬も必要としないグリーン・プロセスによって、水素ガスを生成する廃棄物代替利用が可能と考えられる。

太陽光水素生成と触媒リサイクル

シミュレーションにより、UV-A 照射の代わりに、太陽光照射の使用について可能性を検証した結果、UV-A 照射による水素生成に比べ、94% の水素発生となった。

光触媒の耐久性についても試験し、使用後の触媒を、超純水中で 24 時間攪拌し、濾過し、溶出液が中性になるまですすいだ。

その結果、水素の平均的な生成量は、新しい触媒使用の 81% となり、同じ触媒の利用による 3 回目照射でおよそ 50% の水素生成となった。

つまり、白金めっき酸化チタンを照射後回復によりきれいにして、再生利用することが可能である。

考察

汚水バイオマスの存在による犠牲水分解は、直接水分解による水素ガス生成より 10 倍多い水素を提供する。

最適化された条件下で、触媒の実際の白金含有量を考慮すると、1m³ の水溶性養豚排水試料を処理するために 6.4g の白金が必要であり、2.1g の白金で 1 g の水素を得ることとなる。

さらに、触媒が 2 回再利用できることを考えれば、1 g の水素を生じるために 1g の白金が必要という計算になる。

結論

本研究は、初めて、犠牲剤として養豚排水バイオマスが存在する場合に、光触媒水電解によって水素を生み出す可能性を示した。

有機性廃棄物の使用は、費用対効果がよく、低環境負荷の水素生成を実現する。

犠牲水分解システムの挙動を研究し、照射時間、触媒量、pH とバイオマス濃度の影響を研究した。

また、優れた犠牲薬品（すなわち多価アルコール）との比較により、養豚排水バイオマスが水素生成に価値があり安価であることを示した。

使用後の触媒は活性の大部分を保持し、少なくとも 3 回の連続使用（リサイクル）ができた。

まとめると、この実験的な研究での結果は、水素生成のためにこの低価格廃棄物の使用を支援し、プロセスの導入を目的とした更なる研究の必要性を示唆している。

<原文より要約>

（日本下水道事業団 技術戦略部

資源エネルギー技術課 金澤純太郎）

講座：廃棄物系バイオマスの利活用手法について（研究取組）

有機性廃液を利用したバイオ水素 エネルギー生産に関する研究

諏訪東京理科大学

奈良 松範

キーワード：有機性廃液、バイオ水素生産、光合成細菌、環境エネルギー

1. はじめに^{1) 2)}

世界のエネルギー需要は、2030年には2010年の実績に比べて30%増加すると推定されている。その需要増加の9割は非OECD（経済協力開発機構）諸国のエネルギー需要の増加によるものである。他方、日本におけるエネルギー利用は化石燃料に依存しており、そのほとんどを海外からの輸入に頼っており、我が国の資源リスクは極めて高いことが指摘されている。エネルギーを巡る国際情勢の変化に過剰な反応をする状況になっている。国民生活と産業活動の基礎となるエネルギーの安定的な確保と供給は、国の安全保障にとっても重要な案件である。昨今、地政学的な軋轢あるいは地域紛争などの大きな環境変化に直面する中で、わが国のエネルギー安全保障を巡る環境は厳しさを増し、国民の生活に直接影響を与えているのが現状である。

オイルショック前の1970年におけるエネルギー自給率は14.9%であったのに対して、2010年は4.4%と自給率が低下しており、電力供給構造における海外からの化石燃料への依存度の増加は明白であり、わが国のエネルギー戦略の練り直しが必要であることを示している。また、こうした状況は、エネルギーコストの上昇と温室効果ガスの排出量の増加の原因となり、わが国の経済活動や地球温暖化対策の有効性に深刻な打撃を与えることになる。

このような現状に鑑み、エネルギー政策の着実な遂行を確保することを目的として、2002年6月に「エ

ネルギー政策基本法」が制定された。エネルギー基本計画では、電力システム改革を始めとした国内の制度改革が進展するとともに、北米からのLNG調達など国際的なエネルギー供給構造の変化がわが国に具体的に及んでくる時期（2018年～2020年を目途）までを、安定的なエネルギー需給構造を確立するための集中改革実施期間と位置付け、当該期間におけるエネルギー政策の方向を定めるとしている。エネルギー政策基本法には未消化な部分もあり、再生可能な自然エネルギーの確実な拡大や東日本大地震以降の原子力発電の在り方に関する論議についてはパラダイムチェンジ的な検討が期待される。

エネルギー問題と密接な関係にある地球温暖化問題においては、国際エネルギー機関（IEA）によれば、世界全体のエネルギー起源二酸化炭素の排出量は、2035年までに、さらに20%増加すると予測されている。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第5次評価報告書では、気候システムの温暖化は確実な事実であり、気候変動の影響を緩和するためには温室効果ガスの抜本的かつ継続的な削減が必要であることが指摘されている。地球温暖化問題の抜本的な解決には、国内における温室効果ガスの排出削減はもとより、世界全体においても排出量の大幅削減を行うことが喫緊の課題であるとしている。

また、わが国においては電力供給体制における問題も無視できない。東日本大震災では、太平洋側の多くの発電所が停止し、広域的な系統運用が十分にできなかったために停電が長期化し、市民の生活に甚大な支障を生じさせた、他方、東京電力管内においては計画

停電を実施することとなった。このような東日本大震災における経験は、災害における資源・エネルギーの緊急供給体制の見直しの必要性を示唆している。因みに、都市ガスについては、被災地の仙台においてLNG基地やガス供給網が破壊され供給がストップしたが、新潟から仙台にかけて存在したガスパイプラインを使って仙台近郊のガス供給のバックアップが可能となった。これまでのようなエネルギー供給が集中化され、一元化されることによって生じるリスクを適切にマネジメントする必要がある。エネルギーの地産地消を含め、エネルギー供給システムにおける集中から分散への構造転換の必要性とその可能性を模索する必要がある。

2. 再生可能エネルギーと水素生産技術

再生可能エネルギーは、現時点では安定供給あるいは生産コストにおいて課題が存在するものの、温室効果ガスを排出せず、国内生産が可能であるという観点から、資源・エネルギー自給率の改善にも寄与できるというメリットも加わり、有望な国産エネルギー資源である。また電気の供給は送配電網に頼っており、ネットワークが切断された場合、あるいはここにトラブルが生じた場合には供給が停止してしまう。こうした社会にとっての高いリスクを低減するためには、エネルギーの生産システム、貯蔵あるいは輸送など、二次エネルギーの供給方法の多様化等を含めて検討していくことが肝要である。このような観点から、蓄電池や水素燃料電池などの技術の開発は電力供給及び貯蔵に関連して、二次エネルギー利用システムの安全・安心を高めるためにも重要である。

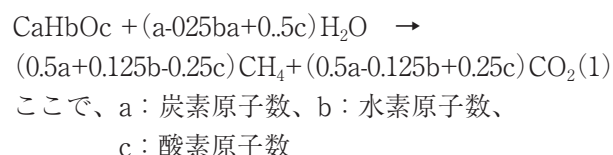
前述したように再生可能エネルギーを用いた分散型エネルギーシステムを構築することにより、新しい産業が起こることが期待されるので、地域経済の活性化に寄与すると同時に、緊急時においては地域に一定のエネルギーを確実に安定して供給できるという点は高く評価される。政府の方針においても、小規模な再生可能エネルギー源を組み合わせた分散型エネルギーシステムの構築が加速されるように、個人や小規模事業者も参加しやすくするための支援を行っていくことが合意されている。また、2013年の臨時国会において成立した農林漁業の健全な発展と調和のとれた再生可能エネルギー電気の発電の促進に関する法律（農山漁村再生可能エネルギー法）等の積極的な活用を図り、地域の活性化に資する再生可能エネルギーの導入を推し進めることになっている。

以上の観点に鑑みれば、分散型の再生可能エネルギーの利活用に関する強いドライビングフォースが働

いていることは明らかである。バイオ水素はこのような社会のニーズに適合する代表的なエネルギー源である。現在、水素社会の実現に向けた取組が加速されているが、水素は無尽蔵に存在する水や多様な一次エネルギー源から様々な方法で製造することができるエネルギーで、気体、液体、固体というあらゆる状態（相）にして貯蔵や輸送を行うことができる点は利用価値が高い。水素生産は、枯渇型資源だけでなく、廃棄バイオマスからも可能であり、生産された水素はエネルギー効率がよく、環境負荷も小さく、貯蔵された水素はいつでも燃料電池で発電することができる。特に有機性廃棄物やカーボンニュートラルな源から生産された水素は、将来の二次エネルギーとしての価値は高い。このような水素を本格的に利活用する社会を想定して水素社会という言葉が使われているが、水素社会を実現するためには、水素の低環境負荷で効率的な生産技術の開発を行うだけでなく、原料から生産、貯蔵、輸送、そして利用・廃棄に連なるサプライチェーン全体でその最適化を図らなければならない、特に、水素の燃焼特性から考えれば、第一にその安全性が確保された上で、環境負荷の最小化、利便性及び経済性の向上が達成されなければならない。

3. 有機性廃棄物からの水素生産

最近、生ゴミや食品残渣あるいは畜産汚泥や下水処理余剰汚泥などに発酵プロセス（嫌気性環境）を経由させることにより水素ガスやメタンガスを生産するというシステムの開発が盛んに進められている。その歴史は1970年代にまで遡ることができる。嫌気性微生物を用いた有機性排水処理は嫌気性消化法とよばれており、酸素のない環境で有機物を水素ガス、メタンガス、あるいは二酸化炭素にまで分解する方法である。例えば、投入基質と発生するメタンガスとの関係について、Buswell と Mueller の式があり、これにより基質量に対応させて理論的ガス発生量を求めることができる。



嫌気性処理は、菌体収率が小さいため好気性処理に比べて余剰汚泥発生量が半分程度であり、曝気エネルギーは不要、病原菌や寄生虫を死滅させることができ、さらに水素ガスやメタンガスなどの有用なガスを生成することができる。しかしながら、嫌気性細菌は増殖

速度が遅いため滞留時間が長くなること、即ち反応槽が大きくなる、そして嫌気性を維持するための管理が必要であることなどはデメリットである。

嫌気性処理により得られた水素ガスは燃料電池を使って発電に供することができると同時に、メタンガスは水素に転換することも、そのまま燃焼エネルギーとして利用することもできる。枯渇型資源によるエネルギー生産の抑制、原子力発電の抱える社会的な問題など、昨今のエネルギー事情を勘案すれば、わが国の将来のエネルギー戦略において、これまで焼却されていた有機性廃棄物を使ったバイオマス水素発電の実用化は喫緊の課題であるといえる。

バイオマスを利用して嫌気性発酵法によって生産されたメタンガスなどをエネルギーとして利用するシステムはドイツやスウェーデンなどの欧州各国において本格的な運用が行われているのに対して、わが国での導入は遅れているのが現状である。その導入が進まない原因として、バイオガスの製造コストの高さ（コストパフォーマンスが低いこと）が指摘されており、実用化を考えた場合、経済的には見合わないとされている。しかし、欧州においても同様に、コスト的な問題は存在するが、政策的な判断と社会的な合意に基づき、エ

エネルギー・環境戦略としてその実用化が図られているのも事実である。わが国においても、近年の環境問題の深刻化と社会情勢の変化、そして当該処理法の効率化や処理システムに係る関連技術の進歩が成された結果、経済的にも実用化の範囲に入りつつある。

われわれが提案している有機性廃棄物を用いた持続可能なエネルギー供給システムのイメージを図1に示した。生ゴミや食品残渣、そして食品工場からの食品廃棄物は微生物が利用できる基質を豊富に含んでおり、これら廃棄物を段階的に適切に利用することにより、水素ガス、メタンガス、そして肥料をカスケード的に生産することができる。しかしながら、既述したように斯様なバイオエネルギー生産システムはエネルギーコストが化石燃料を使用した場合に比べ高くなることから実用化が遅れていた。そこで、システムの効率向上を図り、コストパフォーマンスを向上させることにより、環境配慮型エネルギーとして実用化することを目指した。ただし以下では、図1に示したシステムの内、光合成細菌を用いた嫌気性処理による水素生産段階における効率向上を目的として光をコントロールするという新しい試みに関する実験的研究の結果についてのみ言及する。

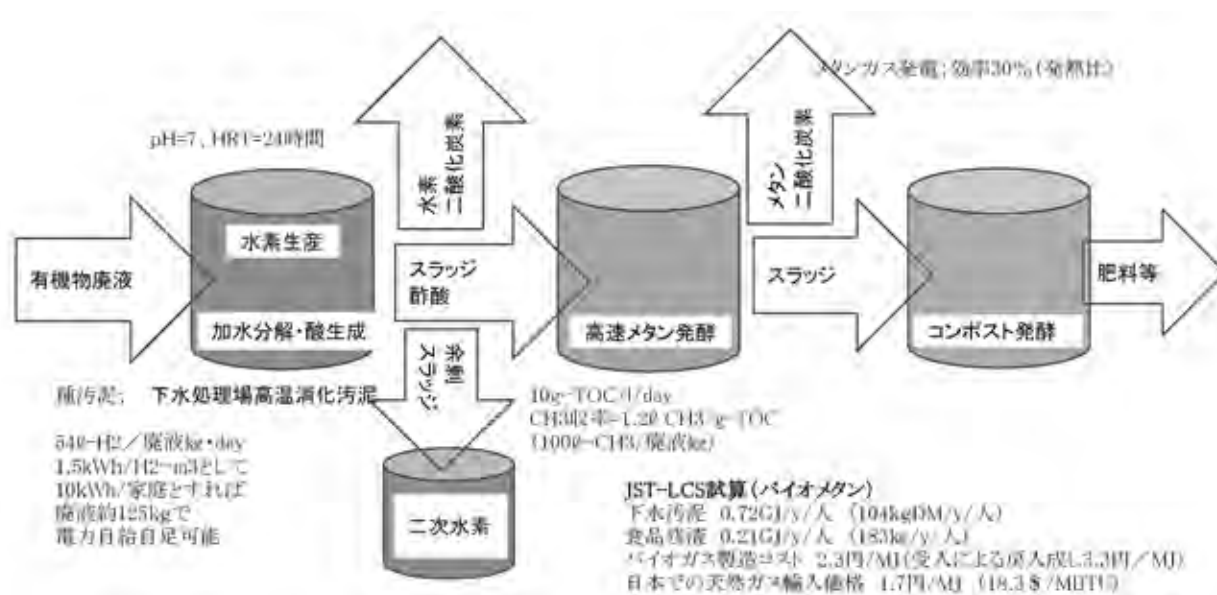


図1 有機性廃棄物を用いたバイオマスエネルギー生産システムの概要（水素、メタン、肥料生産）

4. 水素生産効率向上に係る実験的検討

4.1 光合成細菌³⁾

光合成細菌は私たちの身近な湖や沼などに生息しており、Rhodospirillaceae 科（紅色非硫黄細菌）、

Chromatiaceae 科（紅色硫黄細菌）、Chlorobiaceae 科（緑色硫黄細菌）、そして Chloroflexaceae 科（滑走性緑色硫黄細菌）の 4 科で構成されている。光合成細菌は硫酸還元菌や発酵細菌が生成した硫化水素や二酸化炭素を含む嫌気性水圏に生息しているので、通常の水質であれば溶存酸素濃度に少ない水深 5 m 以深がその

範囲となり、太陽光も減衰するので数 10 から数 100 ルクスの照度範囲である。光合成を行うことによりエネルギーを生産し、増殖しているわけであるから、その活動は太陽光の影響を受けることになる。一般に嫌気性環境に生育する光合成細菌は、水中の温度、pH、酸化還元電位、塩濃度、硫化水素濃度、光などの影響を受けているが、その中でも硫化水素と光環境による影響が大きい。光合成細菌は光エネルギーを利用するために光合成色素を持っており、これらはバクテリオクロロフィルとカロチノイドとよばれる。生息する水環境において受ける光の波長が 750nm 以下であれば、この環境で有利に生育できる光合成細菌はバクテリオクロロフィル a（吸収波長域 870nm 近傍）よりもバクテリオクロロフィル b（吸収波長域 715～720nm）を有する菌種である。一方、太陽光が届き難い環境における波長は 450～550nm（青緑色の範囲）となり、カロチノイドを有する菌種が優占種となる。

以上のことから光合成細菌に効率的な光合成（生育）を行わせるために照射光の波長成分を制御することが有効な手段であることがわかる。本研究では紅色非硫黄細菌、紅色硫黄細菌、そしてその他の嫌気性菌を含む混合培養系を想定して、光の波長 450nm、800nm、及び 850nm の各成分が処理効率に与える影響を評価した。因みに、紅色非硫黄細菌（*Rhodospseudomonas*）は好気性処理法における活性汚泥の中にも生育していることから、*Rhodospseudomonas* は通性嫌気性菌であり、好気性・暗環境下でも化学合成従属栄養的に生育することができる。

4.2 光合成の効率向上⁴⁾

本研究では太陽光に含まれる光合成微生物が利用可能な波長成分の比率を高めるために波長変換材料（ネット及び膜状）を利用した。この波長変換材料は最初、農業分野における農作物の収率向上のために開

発されたものであり、光合成（光化学反応系）の効率向上に資するツールである。ここで植物と光合成細菌における光合成の違いを確認しておく。植物における光化学反応は、光化学系 II（PSII）、シトクロム b6f、光化学系 I（PSI）の 3 種のタンパク質複合体で構成され、これらはすべてチラコイド膜に存在する。植物の光合成経路は基本的に全ての酸素発生型光合成に適用可能であり、水分子を電子供与体として用いることができる点が特徴である。光合成細菌などの酸素非発生型光合成は系統樹上極めて古く、光化学系を一つしか有していない。緑色硫黄細菌の光化学系は光化学系 I と相同性が高く、紅色細菌の光化学系は光化学系 II と相同性が高いとされている。図 2 は緑色植物の明反応を促進するために考えられた波長変換ネットと光散乱材料の写真である。図 3 は波長変換材料を通過した光の波長分布を示したものである。波長変換材料は、550nm 付近の緑色域の波長を吸収し、650nm 付近の赤色域の波長を発光していることがわかる。クロロフィルの場合、青色域（波長 400-500nm）の光と赤色域（波長 600-700nm）の光を吸収するのに対して、緑色域（波長 500-600nm）の光の吸収効率が悪いことから、光合成は 800nm 近傍の波長が必要であることがわかるが、波長変換材料はこの 800nm の波長の光を増幅していることがわかる。同様に光合成細菌においてもバクテリオクロロフィル b（吸収波長域 715～720nm）を含む菌種の光化学系が活性化されると考えた。

図 4 は人工光源（東芝クールビームライト 150W）を用いた光合成細菌による水素生産実験の様子であり、基質として製糖廃液であるモラセスを使用し、光強度は反応槽表面における照度を 100～200 ルクスの範囲にコントロールした。図 5 は自然光（太陽光）を光源とした場合の反応容器の状態を示したものである。既述したように光合成細菌は元来、光強度が小さ



図 2 波長変換ネット、反射アルミリボン

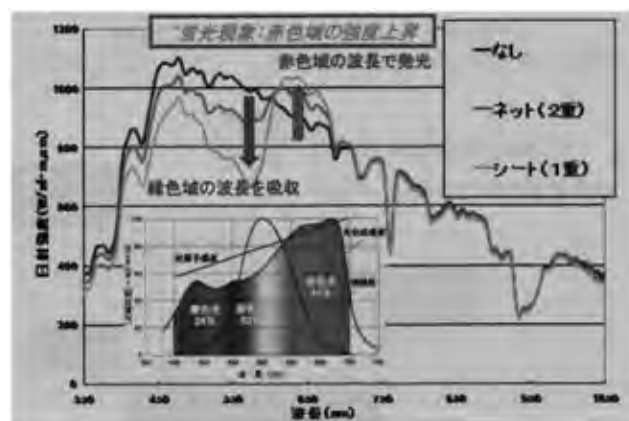


図 3 波長変換材料が変換する波長領域



図4 人工光源を用いた実験装置概観



図5 自然光源を用いた実験装置（反応槽のみ）

な環境に適応してきたことから、光強度が強くて1000ルクスを超えるような場合、光障害が発生する。自然光を用いた場合には、強すぎる光を確実にコントロールすることは難しく、水素ガス発生量が一定しない状況になり、統計的に信頼できるデータを得るためには何等かの対策が必要となる。既往の研究においても光合成細菌による水素生産において高温障害が発生することが指摘されており、特に夏季の高温時におけるシステムダウンを予防するためには高温耐性菌を準備する必要がある。

図6は、光合成に使われる光エネルギーをコントロールすることにより水素生産効率を向上させるための方法に関するフィージビリティ・スタディーを行った結果を示した。光エネルギーの制御手段として波長

変ネットと光散乱リボンを使った実験である。波長変換ネットはコントロールに比較して高い水素生産効率を示したことがわかる、他方、光散乱リボンを用いた場合、コントロールよりも水素生産量が減少していた。照射された光を反射させることにより、反応槽内で何度も繰り返し光エネルギーを利用することを目的としたが、逆に生産効率は低下した。その理由として、光散乱リボンが光の透過の障害になり、光の進路から見てリボンの後方に光が届かなかったこと、あるいは逆に光の強度（エネルギーの高さ）が高まり過ぎて細菌の生育障害になった可能性もある。光合成細菌による水素生産システムにおいては、光強度（エネルギー）よりも光の波長の方が重要であることを明らかにした。

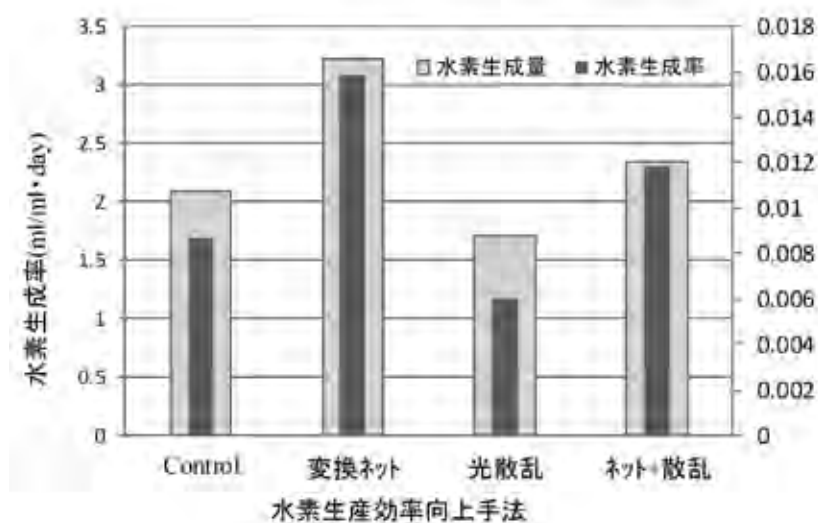


図6 各手法が水素生産量及び効率に与える影響
生成量：H₂ml / cell・substrate

4.3 光合成細菌による水素生産システムの設計⁶⁾

水素生産システムの設計を行うために、まず、光合成微生物 (Rhodospseudomonas Palustris) を純粋培養して生態学的特性を明らかにするためにそのカイネティクスを解析した。基質は製糖廃液であるモラセスを用いた。図7は実験より得られた投入基質量と水素生産率との関係を示したものである。本システムにおいて最適な投入基質量が存在することがわかる。ここで、光合成微生物による水素生産反応も酵素反応であることを考えれば、基質量と比増殖速度の間には、酵素反応のカイネティクスの研究から得られた Michaelis-Menten の式が成り立つと考えることができる。Michaelis-Menten 式を以下に示した。

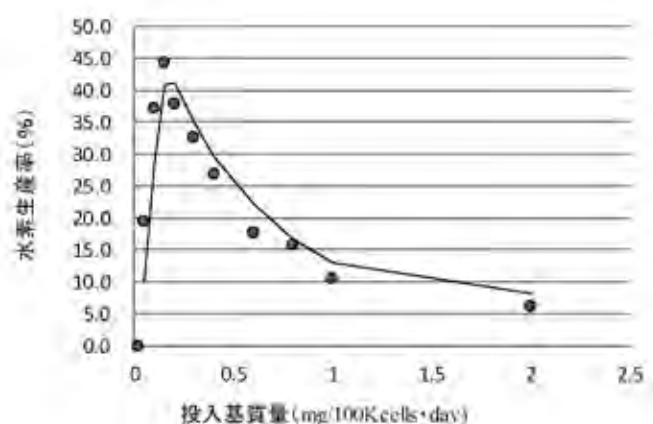


図7 投入基質量と水素生産量との関係

5. 水素・メタン生産に係るコスト分析

光合成微生物によって水素 1kg を生産させるためのラフコストを試算した。前提条件として、次のような仮定をした。①水素 1モルは、22.4L で 2 g とすれば、水素 1kg は 11.2kL となる、②水素を作る原材料として廃液を用いるので、1kg で 10 円の収入があるとする、③水素生産に必要な設備は 1.2 トン容器が 60 万円とする。また、使用エネルギーは太陽光であるのでコスト無しとする、④光合成細菌は、グルコース 1g から約 20ml (0.02L) の水素を作り、毎時 0.01g/L の割合でグルコースを消費する。

水素 1 kg を作るには約 560kg のグルコースが必要となる。廃液の 50% がグルコースだとすれば、廃液は 1120kg = 1.12 トン消費される。すなわち廃水処理費用として 11,200 円の収入があることになる。また、金利を考慮しない単純な収支計算によれば、初期投資

$$V = V_{\max} \cdot [S] / (K_m + [S]) \quad (2)$$

ここで、V は比増殖速度、V_{max} は最大比増殖速度、K_m はミカエリス定数である。

各基質濃度における菌体の比増殖速度のデータを用いて Lineweaver-Burk plot 法により当該光合成細菌における K_m 及び V_{max} を決定することができる。図8は、投入基質量の逆数 (1/S) と菌体比増殖速度の逆数 (1/X) との関係を示したものである。計算の結果、V_{max} は約 7.8mg/l、K_m は約 0.016 (1/day) が得られた、回帰曲線の相関係数は 0.83 であった。これらのパラメータを用いて実際の水素生産システムの基本設計を行うことができる。

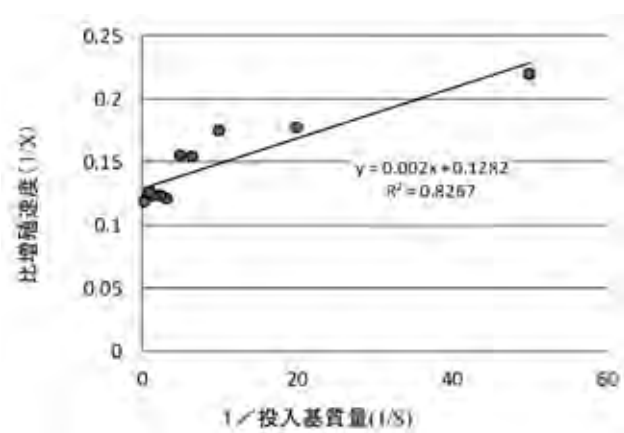


図8 Lineweaver-Burk plot (1/S vs. 1/X)

額は廃水処理を行うだけで 54 年後に償還される。ここで、家庭に設置する燃料電池の発電能力を 1kW とする場合、平均的に毎分 18L の水素ガスが必要であると仮定して、水素 1 kg で 1kW の発電が何時間継続できるかを計算してみた。水素 1 kg は 11.2kL であるから 10.3 時間となる。すなわち、3 日間の処理で 10.3kWh の発電量になる。年間発電量は 1253kWh となり、1 kWh あたり 40 円で売電したとすれば、年間 50,120 円の収入が期待されることになる。

また、低炭素社会戦略センターの試算⁴⁾によれば、食品残渣を処理するケーススタディーにおいて、設備費が約 18 億円、人件費が 400 万円/年 × 13 名、用役費としてエネルギーコスト 2 円/MJ として評価した結果、生ゴミ焼却処分費用を戻入した場合は 2.3 円/MJ、戻入なしの場合でも 3.3 円/MJ としており、わが国における天然ガス輸入価格を 1.7 円/MJ (18.3 \$/MBTU) と大差はないとしている。

6. おわりに

本文では再生可能エネルギーの一つであるバイオマスエネルギー、特に、廃棄物を用いたバイオマスエネルギーに関する技術と実用化に関する最近の動向に関するレビューを行ってきたが、ここでは技術を活用するソフトについて付言する。近年、ICT 技術の急速な進歩により様々な分野でその利用が進んでおり、情報処理とコミュニケーションの重要性が顕在化している。再生可能エネルギーを活用した分散型エネルギーシステムにおいても、このような ICT 技術を活用したエネルギーマネジメントシステムが実行されなければならない。分散型エネルギーシステムにおけるエネルギー需給を総合的に管理し、エネルギーの利活用を最適化するとともに、高齢者の見守りシステムや障害者などへのバリアフリーな生活支援サービスも取り込んだ新たな環境・エネルギー社会システム（Energy ICT）を構築することになる。そこではじめて再生可能エネルギーが社会システムの中に融合されることになる。

また、再生可能エネルギーの利活用にあたり教育も重要である。エネルギーは生活や産業活動の基礎であるが、そのエネルギーの重要性や社会・経済における役割を小学生あるいは中学生の段階から学ばなければならない。エネルギーの確保は国家にとっても重要な問題であり、これにより国家間の紛争が惹起されることも珍しくない。子供の時代からエネルギー問題の難しさとその解決策を常に意識することにより、将来、人類にとっての共通の課題である最適なエネルギー戦略の構築に貢献できるような人材を育てなければならない。

参考文献

- 1) 「エネルギー白書 2015 (PDF)」, 経済産業省資源エネルギー庁
- 2) “World energy outlook special report – Energy and climate change”, International Energy Agency
- 3) 「光合成細菌」、北村博、森田茂廣、山下仁平、学会出版センター、2000
- 4) 「バイオ水素エネルギー生産に関する研究」、奈良松範、第 21 回環境工学総合シンポジウム 2011、(2011.6.30)
- 5) “Garbage biotechnology energy”, Matsunori Nara, 2012 International symposium on Biomedical Engineering and Biotechnology(BEB2012), Proceedings PDF (2012.10.26)
- 6) “Bio-hydrogen gas production using light wave length conversion material”, Matsunori Nara, International Congress on Advanced Materials (AM2011), Proceeding PDF, (2011.5.13)

講座：廃棄物系バイオマスの利活用手法について（研究取組）

超高温可溶化メタン発酵技術による
下水汚泥の資源化

熊本県立大学環境共生学部

教授 石橋 康弘

キーワード：下水汚泥、再資源化、メタン発酵、可溶化、高温細菌

1. はじめに

家畜糞尿、下水汚泥および生ゴミ等の有機性廃棄物は、大量に発生するため、廃棄物処理の観点から大きな問題となっている。しかし、これらの有機性廃棄物はバイオマス資源であり、これらを有効利用することは、カーボンニュートラルの視点より地球温暖化防止や循環型社会の構築に大きく貢献できる。これらの有機性廃棄物を有効活用する場合、原料の含水率が問題となる。通常、有機性の廃棄物は、処理する場合、直接燃焼処理または炭化处理が考えられるが、前掲の有機性廃棄物は含水率が60～90%程度と高いため、大

量のエネルギーの投入を要する¹⁾。このような含水率の高い廃棄物を有効活用する方法として、現在、「メタン発酵」が再注目され始めている。

メタン発酵は長年活用されてきた技術であるが、その効率が低いことが課題である。メタンガス変換プロセスは、図1に示すように、1)可溶化(加水分解)工程、2)酸生成工程および3)メタン生成工程の3つのプロセスが必要とされ、既存のメタン発酵施設では、これらの工程を大きな発酵タンク一槽で行う「一槽式メタン発酵」が主流である。しかし、1つの発酵槽でこれら3つの工程の反応を進行させることとなるため、発酵効率が悪くなり、発酵期間の長期化(20日～30日)、施設(発酵槽)の大型化および消化液の

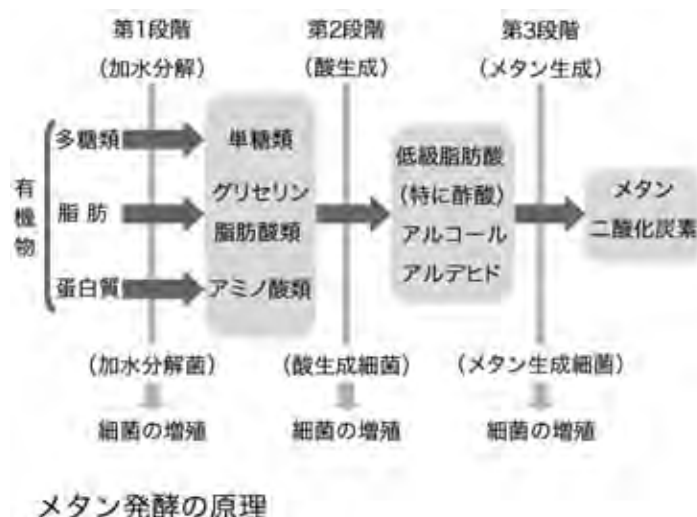


図1 メタン発酵の原理

処理等の課題を有し、事業性に乏しいものであった。そのため、メタン発酵における技術的課題は発酵効率の向上であった。

メタン発酵の発酵効率向上という課題を克服するために、メタン発酵工程の前段に「可溶化工程」を設置することによって発酵期間の短縮が期待されることから、「可溶化技術」に関する様々な研究開発が進められている。メタン発酵の反応過程は、前述した可溶化（加水分解）、酸生成、メタン生成の3つのプロセスを経てメタンが生成される。既存のメタン発酵施設ではこれらのプロセスを1つの大きな発酵タンクで行う「一槽式メタン発酵」が主流であったが、可溶化（加水分解）プロセスを行う可溶化槽とメタン発酵槽の二つの槽により構成される「二槽式メタン発酵」過程である。メタン発酵槽の前処理過程としてこのような可溶化槽を設置することで、原材料の可溶化（加水分解）が促進され、発酵効率を高めることが可能となる。

我々の研究グループは、80℃の好気高温環境下で耐熱性プロアテーゼを産生する微生物（*Anoxybacillus*

sp. MU3 株。以降、MU3 株と示す。）を可溶化プロセスで利用する技術を確立した。

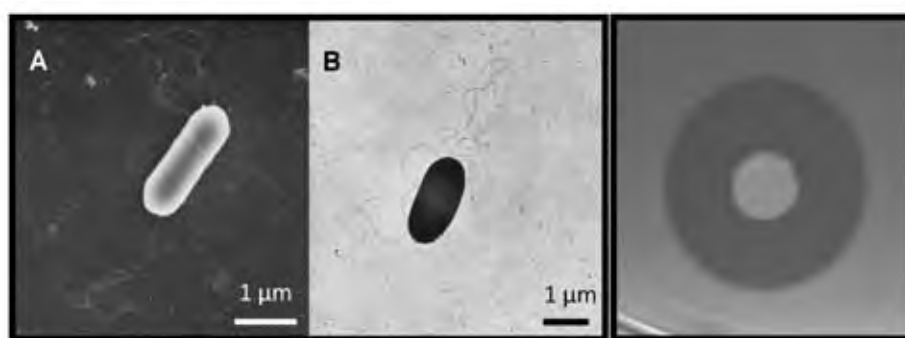
本講演では、メタン発酵の前処理プロセスに MU3 株を用いた高温可溶化メタン発酵システムについて紹介する。

2. MU3 株

MU3 株は別府温泉から単離した菌株であり、MU3 株が産生する酵素は優れた熱耐性（45～80℃で生育可能）を示し、広い pH 範囲（至適 pH は 6 付近）で高いタンパク質分解能を有する。

図2に MU3 株の電子顕微鏡写真とスキムミルク溶解性を示した。

図2の右側の写真のように、スキムミルクを溶解した培地に成長した MU3 株のコロニーの周りのスキムミルクが溶解され、大きなハローを形成し、高いタンパク質分解能を有することが確認される。



左, A) SEM 像, B) TEM 像; 右, スキムミルク可溶化写真

図2 *Anoxybacillus* sp. MU3 株の電子顕微鏡写真とスキムミルク溶解性

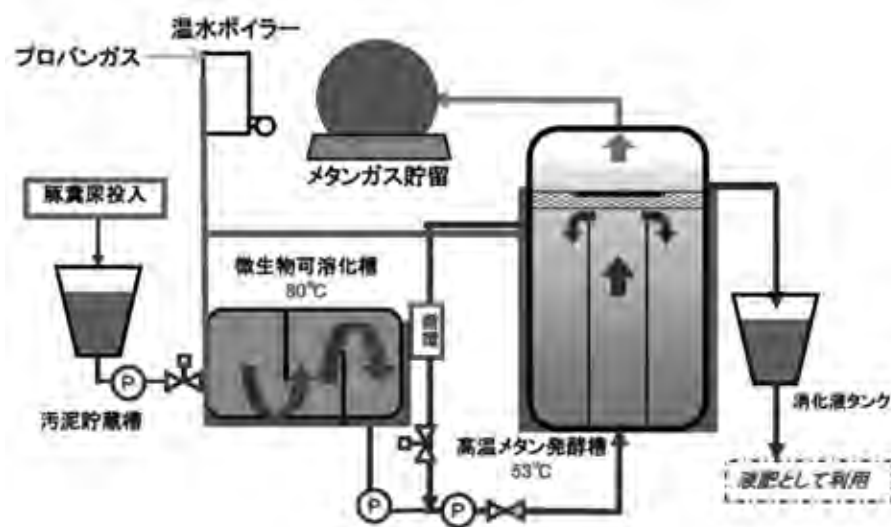


図3 超高温可溶化メタン発酵システムのフロー

3. 実証事業

3.1. 実証プラントの概要

本事業では、長崎市の東部下水処理場に高温可溶化メタン発酵システムの0.5 t/日規模の実証プラントを設置し、下水汚泥を用いてメタン発酵システムの実証試験を行った。

図3に超高温可溶化メタン発酵システムのフローを示した。

また、メタン発酵の実証プラント写真を図4に示した。

実証プラントは3.0m³の汚泥貯留槽、1.0m³の可溶化槽、5.0m³のメタン発酵槽及び1.0m³の排液タンクで構成されている。週1～2回汚泥を汚泥貯留槽に貰い受け、1日0.5m³可溶化槽に汚泥が投入される。汚泥は2日かけ可溶化槽において可溶化され、メタン

発酵槽に導入後、10日間メタン発酵槽内で滞留され、メタン発酵される。また、メタン発酵後の消化液（排液）は1日投入量の0.5m³が排液タンクに排出される。可溶化槽から発生したガスは回収され、アンモニア吸着装置を経由して燃焼装置で燃焼後、大気放出されることとなる。メタン発酵槽から発生したガスは、脱硫装置を経由してガス発生量を計測されたのち、可溶化槽から発生したガスと混合され、燃焼装置で燃焼・大気放出となる。

3.2. 実証試験結果

図5に可溶化槽における可溶化率の変化を示した。

実証プラントの可溶化槽における可溶化率は、実験室レベルの実験で得られていた結果とより高い結果となる40%を示し、良好な可溶化が行われていることが示された。

図6および図7に本実証プラントでの運転状況、



図4 メタン発酵の実証プラント写真

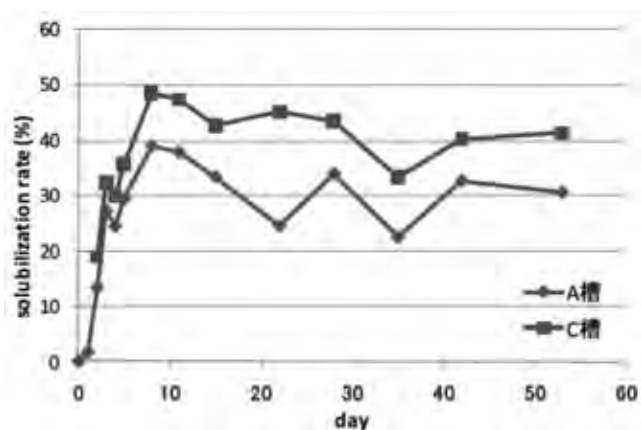


図5 可溶化槽における可溶化率の変化

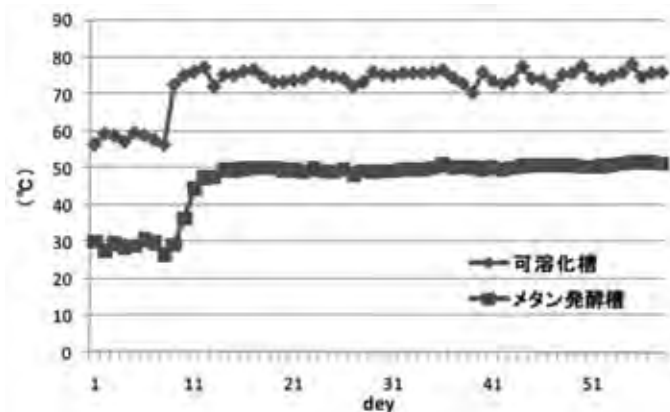


図6 実証プラントでの運転状況
(可溶化槽及びメタン発酵槽の温度変化)

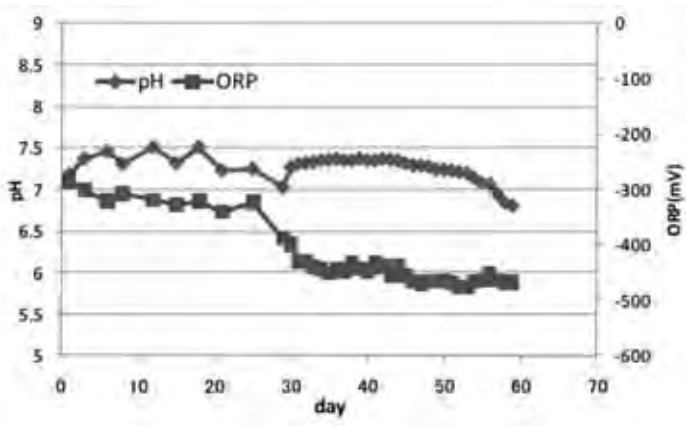


図7 実証プラントでの運転状況
(pH および ORP の経時変化)

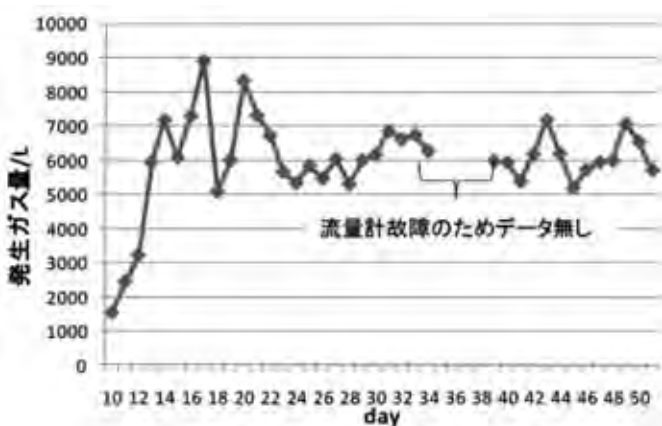


図8 バイオガスの発生量の経時変化

図8 にバイオガスの発生量の経時変化を示した。
実証プラントでは可溶化槽を 80℃、メタン発酵槽を 53℃で温度管理した。試験開始10日は温度センサーの不調のため、規定温度より 10℃低い状態であったが、原因である温度センサーの調整後は、可溶化槽メタン発酵槽とも設定温度で運転を行った。また、メタン発酵槽内は pH 7 で酸化還元電位 (ORP) 値は－400mV を示している。通常メタン生成菌の最適生育の最適 pH は中性域 (6.0 ～ 8.0)、ORP が－300mV 以下の還元的環境に生育するとされている。本実証プラントでは、最適生育条件にあることからメタン発酵は正常に行われたと考えられる。

図8 に示したように、運転開始からバイオガスの発生が確認された。これは既存のメタン発酵施設（福岡市西部下水処理場のメタン発酵施設）から汚泥を貰い受け、種汚泥として使用したため、すぐにバイオガスが発生したと考えられる。
その後、2 週間程度バイオガスの発生量が 2,000L 程度で推移していたが、2 週間経過後にはバイオガスの発生量が 1 日 5,000 ～ 9,000L、平均 6,500L となり、1 日 0.5m³ の下水汚泥の投入で平均 6,500L のバイオガ

スの発生が確認できた。
バイオガスの組成を表1 に示した。
表1 に示したように、バイオガス中のメタンの含有割合は約 61%、二酸化炭素が約 38%であり、その他の成分（窒素、酸素、水素等）については、極微量であることが示された。今回の実証試験のバイオガスのメタンの含有割合は、効率の良いメタン発酵プロセスと同等以上の割合であり、実証プラントから回収したバイオガスに直接点火して燃焼させたところ、自然したことから、十分に燃料として利用することが可能であることが示された。

下水処理場から発生する下水汚泥の SS 量は日ごとに変動があるもの、平均して約 20000mg/L であった。可溶化後メタン発酵処理された消化液は約 9000mg/L まで減少していた。実証プラントでの消化率を算出した結果、平均して約 50%の消化率を有していることが示された。
メタン発酵反応を安定させるには、メタン発酵槽の適切な有機物 (VSS) 負荷量の投入が行われるのが一般的である。適切な有機物負荷量はメタン発酵の減量や発酵プロセスにより異なり、今回の下水汚泥の高温

表1 バイオガスの組成

成分	存在割合 (%)	備考
メタン (CH ₄)	61.16	ガスクロマトグラフ分析
二酸化炭素 (CO ₂)	38.39	
窒素 (N ₂)	0.32	
酸素 (O ₂)	0.07	
水素 (H ₂)	0.03	

発酵では $5 \sim 7 \text{ kg} - \text{VSS}/\text{m}^2/\text{day}$ とされている。また、発酵槽内の滞留時間（HRT）は槽負荷と密接な関係があり、バイオガス発生率やメタン発酵菌濃度の維持に大きく関係する。通常固形物を対象としたメタン発酵では、高温発酵で10～20日、中温発酵で20～30日とされている。

実証プラントにおける投入VSSの除去率は、消化率と同等の約50%であった。投入有機物量に対するメタンガス発生率は約 $1200 \text{ L}/\text{kg-VSS}$ となった。通常の下汚泥を用いたメタン発酵施設では、約 $500 \sim 600 \text{ L}/\text{kg-VSS}$ とされており、実証プラントのバイオガス発生率はこれよりも高い結果を示した。また、適切な有機物負荷量と滞留時間でメタン発酵を行った場合、約 $1000 \text{ L}/\text{kg-VSS}$ のバイオガスが発生すると考えられるので、実証プラントでは、もっとも適切な条件でメタン発酵を行ったガス量より高いバイオガス発生量を示した。

4. まとめ

メタン発酵の前処理プロセスにMU3株を用いた高温可溶化メタン発酵システムの実証試験の結果、以下のような結果を得た。

- 1) 実証規模における発酵期間の短縮：10日（既存メタン発酵施設：15～30日）
- 2) 実証プラントにおける可溶化率（下汚泥）：45%（ラボレベル実験と同等）
- 3) $0.5 \text{ m}^3/\text{day}$ 下汚泥からのバイオガス発生量：6500L
- 4) 投入有機物量に対するガス発生率： $1200 \text{ L}/\text{kg-VSS}$ （既存メタン発酵施設の2倍のガス発生率）
- 5) バイオガス中に含まれるメタン濃度：約65%（既存施設のメタンガス濃度：50～60%）

参考文献

- 1) 竹村 昌太、坂本 昭一、崔 玉順、遠田 幸生、杉山 重彰、杉本 文男、今井 忠男、佐藤 勇、佐藤 博：下水汚泥ケーキの環境リスク低減型炭化処理バイオマスに関する基礎的研究、資源と素材、Vol. 119、pp66-70、2003
- 2) 田中 信壽、松藤 敏彦：都市ごみの適正処理と資源化技術、資源と素材、Vol. 118 pp588-597、2005
- 3) 有限会社 AT 研究所：島原県内での家畜糞尿を用いたバイオマスエネルギー活用可能性調査報告書、2009
- 4) 坪田潤、局俊明、津野洋：超高温嫌気性可溶化菌を利用したメタン発酵技術の開発、廃棄物学会論文誌、Vol.18、No.2、pp145-151、2007
- 5) 雨森司端利：メタン発酵法による食品廃棄物系バイオマスエネルギー回収事業の現状と課題、技術と経済、(473)、pp32-37、2006
- 6) 帆秋利洋、天石文、小嶋令一、羽川富夫、大原孝彦：メタン発酵の研究開発の現状と課題、大成建設技術センター報、第38号、pp24-1-24-4、2005
- 7) 矢木博、近藤実、小川浩、大森正男：水質測定技術（1）COD、用水と排水、Vol.18、No.10、pp79 - 90、1976
- 8) 池田由起、倉橋美彦、中村恒二、森忠明、亀岡俊則：都養豚廃水の中温メタン発酵処理におけるメタン収率と炭素転換効率の向上、廃棄物学会論文誌、Vol.17、No.1、pp87-95、2006
- 9) 櫻井邦宣、李玉友、野池達也：高濃度牛ふん尿の中温メタン発酵特性、廃棄物学会論文誌、Vol.6、No.1、pp65-73、2005

講座：廃棄物系バイオマスの利活用手法について（研究取組）

ポリ乳酸系バイオマスの エネルギー利用

豊橋技術科学大学 環境・生命工学系 テニユアトラック講師
山田 剛史

キーワード：ポリ乳酸、メタン、重量平均分子量、結晶化度、高温・高圧蒸気分解処理

1. はじめに

ポリ（L-乳酸）（PLLA）は、融点やガラス転移点が高く、機械的性質、化学的性質および物理的性質など従来の石油系プラスチックと同等の特性を備えており、それらの代替材としてもっとも有望な生分解性プラスチック素材である¹⁾。これまでに、農業資材、衣料、生活衛生資材、電子機器筐体、包装資材などのさ

まざまな PLLA 製品の開発が進んでおり（図 1）、さらなる利用用途や需要の拡大が見込まれている。PLLA の汎用的利用や需要の拡大は、大量の PLLA 廃材（バイオマス）の排出にも繋がることから、それらの処分や再利用が大きな課題となる。「きれいな」PLLA 廃材は、熱分解や加水分解による乳酸へのケミカルリサイクルが可能であるが、飲料や食料などが付着した再生に向かない生活衛生資材や包装資材などは、埋め立て、焼却および堆肥化による処理が考えら

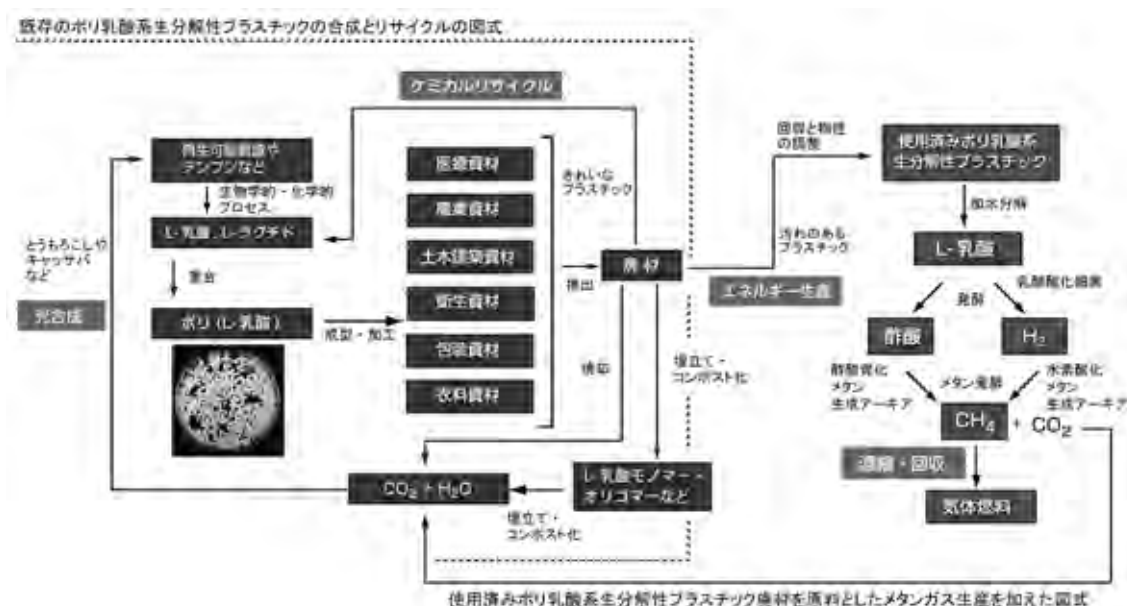


図 1 PLLA を巡る新たな資源循環システム（合成・リサイクル）の図式。再生に向かない PLLA 廃材は、メタンガス生産を行った後に自然に戻す。最終的に、PLLA は、二酸化炭素に戻り、植物などに炭酸固定される。

れているのみである。カーボンニュートラルの概念より、とうもろこしやキャッサバなどの植物を原料とする PLLA は、埋め立てや焼却によって PLLA 廃材を処理しても地球的な炭素の増加には大きく影響しない。しかしながら、再生に向かない PLLA 廃材（生活衛生資材や包装資材）を有効に活用できれば、地球環境に配慮した PLLA の新たな循環サイクルを構築できる。

再生に向かない PLLA 廃材の多くは、生ゴミなどとともに排出されることが想定される。したがって、このような PLLA 廃材は、地方自治体が導入・整備を進めている嫌気性消化反応槽において、生ゴミや下水汚泥とともにメタンガスに転換して回収することが望ましいと思われる。しかしながら、嫌気環境下における PLLA の生物学的加水分解はほとんど期待できないため²⁾、嫌気性消化反応槽での処理の実状に即したあらたな加水分解法の確立が必要となる。本稿では、PLLA の加水分解法について概説するとともに、筆者らが取り組んでいる PLLA の重量平均分子量と結晶化度に着目した加水分解法の概要とその PLLA を原料とした高温嫌気性消化反応槽における連続的なメタン生成特性について紹介する。

2. ポリ乳酸の加水分解とメタン発酵

嫌気環境下では、有機性廃棄物は代謝機能の異なる嫌気性微生物の連携プレーにより最終的にメタンと二酸化炭素に変換される。嫌気環境下における PLLA の分解では、まず、生物学的加水分解や化学的加水分

解のいずれか、もしくは両者の加水分解によって、PLLA から乳酸が生成される必要がある。生成された乳酸は、乳酸酸化細菌によって酢酸と水素に変換された後、それらを基質とする酢酸資化および水素資化メタン生成アーキアによってメタンと二酸化炭素に変換される。好気環境下における PLLA の生物学的加水分解は、一部の放線菌^{3), 4)} やカビ⁵⁾ が産生するプロテアーゼ、リパーゼやエステラーゼが作用していることが報告されている。しかしながら、現在までのところ、嫌気的環境下において PLLA を加水分解できる微生物は報告されていない。嫌気環境下では PLLA の生物学的加水分解はほとんど進行しないため、最初のステップである加水分解反応が、嫌気性消化反応槽内における微生物反応の律速となっている²⁾。事実、中温 (37℃) 嫌気性消化反応槽では PLLA の加水分解はほとんど進行せず、高温 (55℃) 嫌気性消化反応槽では、温度に依存した化学的加水分解のみが進行することも報告されている^{6), 7)}。したがって、嫌気性消化反応槽において、PLLA を原料とした良好なメタン生成を行うには、PLLA の化学的加水分解を促進させるあらたな方法の確立が重要であることがわかる。

PLLA の化学的加水分解方法は、嫌気性消化反応槽の処理現場の実状に適した方法であることが望ましい。そのような背景の中、これまで、PLLA の粉体化による水との接触表面積の拡大^{5), 6)} やポリエチレンやポリエチレンテレフタレートなどのポリマー分解で使われる高温・高圧条件下でのアンモニア処理などの方法^{8), 9), 10)} が報告されている。いずれの方法においても、処理条件や効率の違いはあるが、嫌気性消化反



図2 PLLA の加水分解速度に与える内部要因と外部要因の種類¹⁾。

応槽において、PLLA を原料としたメタン生成を成功させている。

筆者らのグループでは、PLLA の化学的加水分解に作用する内部要因に着目して研究を進めている。PLLA の化学的加水分解に大きく作用する内部要因は、分子量、架橋、結晶化度、結晶厚や複合化などである (図 2)。すなわち、「分子量の低下」、「架橋密度の上昇」、「結晶化度の上昇」、「結晶厚の低下」および「配向度の低下」により、PLLA の化学的加水分解速度は向上する¹⁾ (図 2)。これらの内、PLLA の分子量や結晶化度の調整は、オートクレーブのような高温・高圧蒸気分解装置を用いて、温度と処理時間の操作で比較的容易に行うことができる。筆者らは、PLLA の分子量や結晶化度の違いによる PLLA からの化学的加水分解による乳酸放出特性を評価した。嫌気性消化反応槽の運転温度 (37℃ と 55℃) 条件下の水溶液 (pH7.0) 中における乳酸放出速度試験を行ったところ、重量平均分子量約 16,000 以下 (37℃) および約 38,000 以下 (55℃) からそれぞれ乳酸放出が確認された²⁾。しかしながら、PLLA 製品とほぼ同等な (高分子域) 重量平均分子量範囲では、水中における乳酸放出はまったく確認されなかった。さらに、両温度域とも、結晶化度 (結晶化度: 0 ~ 約 40%) を調整した PLLA の乳酸放出速度は、結晶化度の増加とともに高まることが確認された²⁾。同じ重量平均分子量を持つ PLLA の乳酸放出速度は、37℃ の温度域に比べて 55℃ の温度域の方が高かった。通常、温度が高くなるほど PLLA の加水分解は進行しやすくなるが²⁾ (図 2)、温度に加えて、PLLA の低分子量化や高結晶化度化の操作が、PLLA の化学的加水分解性を相乗的に向上させたと推測できる。

次に、中温および高温嫌気性消化汚泥と重量平均分子量を調整した PLLA を用いたメタン生成活性を評価した。その結果、中温嫌気性消化汚泥のメタン生成活性は、重量平均分子量約 7,000 ~ 16,000 の間で認められたのに対し、高温消化汚泥を用いた場合では、重量平均分子量約 16,000 ~ 38,000 の範囲で確認された²⁾。結晶化度を調整した PLLA を用いた場合、PLLA の結晶化度が高くなるにつれて、中温・高温嫌気性消化汚泥のメタン生成活性値とも増加した²⁾。このことは、上述した PLLA の化学的加水分解による乳酸放出量の上昇が、メタン生成活性に直接的に影響を与えることを示している。

3. ポリ乳酸を原料とした連続的メタン生成特性

さらに、筆者らは、高温・高圧蒸気分解処理後の PLLA (重量平均分子量: 約 16,000、結晶化度: 約 40%) を唯一の原料とした高温嫌気性消化反応槽における連続的なメタン生成特性に関する実験を行った。約半年間にわたる PLLA の嫌気性消化実験では、COD 容積負荷と水理学的滞留時間 (HRT) を操作して、発生ガス量やガス濃度およびメタン転換率について評価した。運転開始 42 日の間、COD 容積負荷 0.5 kg-COD $\cdot$ m³ $\cdot$ d⁻¹ (HRT 100 日) において、反応槽内部の嫌気性微生物の馴養化を図った (図 2 および 図 3)。その後、嫌気性消化反応槽の HRT を徐々に短くしていき、0.5 ~ 2.0 kg-COD $\cdot$ m³ $\cdot$ d⁻¹ の範囲で COD 容積負荷を調整した。馴養期間において、最大バイオガス発生量は 0.23 m³ $\cdot$ kg-PLLA⁻¹ $\cdot$ day⁻¹ に達し、発生バイオガスあたりのメタン濃度は徐々に 50 ~ 55% 付近で安定した。また、この間、投入した PLLA 量に対

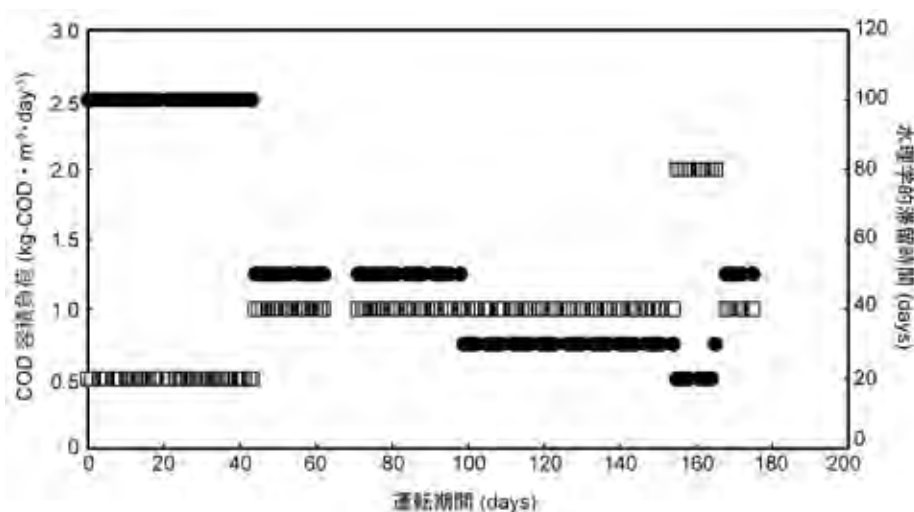


図 3 高温・高圧蒸気分解処理法で処理した PLLA を原料とした実験室レベル (有効容積: 7L) の高温嫌気性消化反応槽における運転条件 (●: 水理学的滞留時間、□: COD 容積負荷) (未発表データ)。

するメタン転換率は約 20～30% を推移した。運転期間 43～153 日の間も、HRT を短縮したり、COD 容積負荷を高めたにも関わらず、バイオガス発生量およびメタン濃度とも馴養期間中とほぼ同程度であった (図 2 および図 3)。一方、さらに HRT の短縮 (20 日) および COD 容積負荷 ($2.0\text{kg-COD}\cdot\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$) を高めたところ、バイオガス発生量およびメタン濃度も徐々に減少していった (図 2 および図 3)。PLLA のみを処理する嫌気性消化反応槽内の微生物叢は、倍加時間の小さい乳酸酸化細菌とメタン生成アーキアに徐々に収斂されていくことが予想される。PLLA 単体だけの処理では、引き抜いた汚泥量が微生物増殖速度を超えてしまったため、一般的な高温嫌気性消化処理で要求される HRT や COD 容積負荷を達成することができなかったと考えられる。したがって、高温・高圧蒸気分解処理を適用した PLLA 廃材単体を原料とした高

温嫌気性消化処理では、COD 容積負荷 $1.0\text{kg-COD}\cdot\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ において、HRT を 30 日程度に設定することが望ましいのかもしれない。

上述したように、高温・高圧蒸気分解装置による重量平均分子量と結晶化度調整にもとづく PLLA の化学的加水分解性を高める前処理方法は、これまで困難であった嫌気性消化反応槽での PLLA を原料とするメタン生成を行う上で有効な方法の一つとして提案できる。しかしながら、将来的な実用化に向けて、高温・高圧蒸気分解処理方法や嫌気性消化反応槽の運転方法のさらなる検討が必要であることについては言及しておきたい。今回の実験では、PLLA からのメタン生成特性を明確に評価するため、PLLA のみを原料としたが、PLLA 製品と生ゴミなどの実処理に近い形において、本研究で提案した処理方法を検討する必要があることについても述べておく。

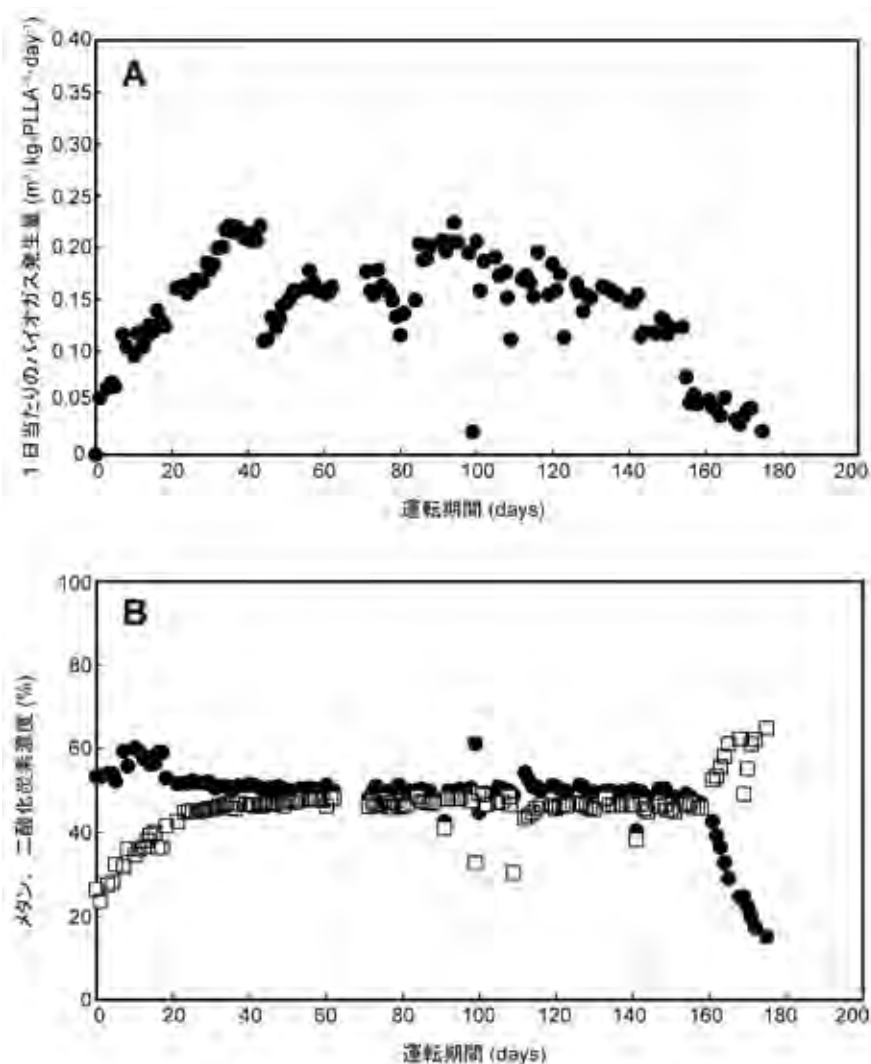


図 4 高温・高圧蒸気分解処理法で処理した PLLA を原料とした実験室レベル (有効容積: 7L) の高温嫌気性消化反応槽における (A) バイオガス生成速度と (B) ガス組成の変化 (●: メタン、□: 二酸化炭素) (未発表データ)。

4. おわりに

従来のプラスチックと同等の特性を備えている PLLA の汎用的利用は、今後ますます進んでいくと思われる。PLLA を取り巻く環境は急速に進歩しており、生ゴミや下水汚泥などとともに、嫌気性消化反応槽において、PLLA で作られた包装資材や生活資材が数多く処理されることになるとと思われる。現在、生ゴミや下水汚泥を原料としてメタンを回収するために、環境変動に比較的頑健な中温嫌気性消化反応槽が採用されるケースが多い。この度、筆者らは、高温・高圧蒸気分解処理法を適用した PLLA を原料とした連続的なメタン生成を明確にするため、微生物活性の高い高温嫌気性消化反応槽にて実証を行った。しかしながらバイアル実験ではあるものの、中温嫌気性消化汚泥を用いた場合であっても、PLLA を原料としたメタン生成活性が見られることから、本稿で紹介した高温・高圧蒸気分解処理による PLLA の化学的加水分解促進法を用いることによって、中温嫌気性消化反応槽においても連続的なメタン生成は可能であると考えられる。今後、本稿で紹介した PLLA の化学的加水分解法に留まらず、他の技術などとの融合などにより、再生に向かない PLLA 廃材からのメタン生成に関する研究が活発化することを期待したい。

本研究の一部は、科学技術振興機構 A-STEP 探索タイプ (AS242Z01149N)、第 38 回岩谷科学技術研究助成および中部電気利用基礎研究振興財団平成 23 年度研究助成の支援により実施したものである。最後に、本研究を進めるにあたり、さまざまな支援をいただいた豊橋技術科学大学の関係者に対して感謝を申し上げて、本稿の結びとする。

参考文献

- 1) Tsuji H.: Hydrolytic degradation. In Auras, R., Lim, L. -T., Selke, S. E. M and Tsuji H. (Eds.) Poly (lactic acid) - Synthesis, Structures, Properties, Processing and Applications. Wiley, 345-376 (2010)
- 2) 山田剛史、平石明：ポリ乳酸およびその廃材を原料とするメタンガス生産．化学工業、66 (3) , 212-217 (2015)
- 3) Tokiwa Y. and Calabia, B. P.: Biodegradability and biodegradation of poly(lactide) . Appl. Microbiol. Biotechnol., 72, 244-251 (2006)
- 4) Sukkhum, S., Tokuyama, S., Tamura, T., Kitpreechavanich, V.: A novel poly (L-lactide) degrading actinomycetes isolated from Thai forest soil, phylogenic relationship and the enzyme characterization. J. Gen. Appl. Microbiol., 55, 459-467 (2009)
- 5) Kim, D. Y. and Rhee, Y. H.: Biodegradation of microbial and synthetic polyesters by fungi. Appl. Microbiol. Biotechnol., 61, 300-308 (2003)
- 6) Yagi, H., Ninomiya, F., Funabashi, M. and Kunioka, M.: Anaerobic biodegradation tests of poly(lactic acid) under mesophilic and thermophilic conditions using a new evaluation system for methane fermentation in anaerobic sludge. Int. J. Mol. Sci., 10, 3824-3835 (2009)
- 7) Yagi, H., Ninomiya, F., Funabashi, M. and Kunioka, M.: Bioplastic biodegradation activity of anaerobic sludge prepared by preincubation at 55 ° C for new anaerobic biodegradation test. Polym. Degrad. Stab., 95, 1349-1355 (2010)
- 8) Wang, F., Tsuno, H., Hidaka T. and Tsubota J.: Promotion of polylactide degradation by ammonia under hyperthermophilic anaerobic conditions. Bioresour. Technol., 102, 9933-9941 (2011)
- 9) Wang, F., Hidaka, T., Oishi, T., Osumi, S., Tsubota, J. and Tsuno, H.: Degradation characteristics of polylactide in thermophilic anaerobic digestion with hyperthermophilic solubilization condition. Wat. Sci. Tech., 64, 2135-2142 (2011)
- 10) Wang, F., Hidaka, T., Tsuno H., and Tsubota, J.: Co-digestion of polylactide and kitchen garbage in hyperthermophilic and thermophilic continuous anaerobic process. Bioresour. Technol., 112, 67-74 (2012)

特 別 報 告

下水汚泥の有効利用の 促進策について

長岡技術科学大学 環境社会基盤工学専攻 資源エネルギー循環工学研究室

准教授 姫野 修司

キーワード：下水汚泥、嫌気性消化、バイオマス、バイオガス、再生可能エネルギー

1. はじめに

下水汚泥は、有機分や肥効料成分も幅広く含まれており、肥料として有効利用が図られている。一方、枯渇性資源の依存からの脱却や二酸化炭素の排出削減が求められている中、再生可能エネルギーとして利活用可能なバイオマス由来のエネルギー資源としての利用の拡大も期待されており、下水汚泥の有効利用はますます重要なものとなっている。このような中、2014年に国土交通省で提唱された「新下水道ビジョン」においても、下水処理場に集約される有機物・栄養塩を資源として捉え、下水処理場を集約・供給拠点化し、地域環境に貢献することが謳われている¹⁾。下水汚泥に代表されるバイオマスには、生ゴミ、家畜排泄物、し尿、農業集落排水汚泥、浄化槽汚泥、刈草除草等の都市廃棄物系バイオマスと稲わら、もみ殻、農業残渣などの農業系バイオマスに大別される²⁾。このような各都市で発生するバイオマスを地域環境に則した利活用を考える上では地域の下水処理場の果たす役割は一層重要なものとなる。下水処理場の地域の拠点化のために、下水処理場が有する汚水の集約機能、メタン発酵、バイオガス発電、バイオガス精製などのバイオマス変換機能、返流水処理などの発酵不適物再処理機能、固形燃料製造など再資源化機能などを見直し、再構築する事が必要である。

著者らはこれまで下水道が有するポテンシャルを最

大限に活かし、地域で発生する農業系、廃棄物系の未利用バイオマスを活用し再生可能エネルギー増産を可能にする技術開発を行ってきた。具体的には①下水汚泥の肥料利用技術、②稲わら等の農業残渣を利活用したバイオガス増産技術、③河川堤防、道路、公園で発生する刈草を利活用したバイオガス増産技術、④小規模処理場へ適用可能な高性能・小型バイオガス発電機の開発、⑤CO₂分離膜を用いたバイオガス精製と燃料製造技術の開発を進めてきた。本稿ではそれらを紙面が許す限り紹介したい。各要素技術に関しては、主要な参考文献を記載したので、詳細はそれらを参考いただきたい。

2. 下水汚泥焼却灰を原料とした高品質りん肥料作成技術^{3)～5)}

2.1 開発背景

リンは必須元素の一つであり農業、医薬の分野で広く用いられている。しかし、リン鉱石は世界的に枯渇問題が懸念されている資源であり、我が国ではリン鉱石がほとんど産出されずほぼ全量を輸入に依存しており、国内での安定したリン供給元の確保と循環が必要となっている。

下水汚泥を焼却し得られた下水汚泥焼却灰には15～30%という高濃度のリンが含まれている。下水汚泥焼却灰は日本全体で年間36万トン発生している⁶⁾ことから、リン酸換算で年間5～10万トン発生して

いる事になる。これはリン鉱石として輸入されるリン酸の14～28%に相当し、下水汚泥が国内のリン供給源になりうることを示している。これまでに下水および下水汚泥からのリン回収にはリンをリン酸マグネシウムアンモニウム（MAP）として回収するMAP法⁷⁾や、ヒドロキシアパタイト（HAP）として回収するHAP法⁸⁾、アルカリ抽出によりリンを回収する灰アルカリ抽出法⁹⁾が実用化されている。この中でも灰アルカリ抽出法はリンをリン酸カルシウムとして回収することができ、回収された肥料中の重金属含有量を抑えることが可能である。欠点としてはアルミニウム含有率が高く、アルミニウムは、肥料利用の際にリンの不活性化や、植物へのカルシウム、マグネシウムの吸収を抑制する作用がある。そのため、リン肥料の高品質化にはリン酸カルシウム中のアルミニウムを除去する方法の検討が必要とされている。それに対して、アルカリ抽出液にシリカ源を添加することで、焼却灰からアルミニウム含有量の少ないリン肥料を作成する技術を開発した。

2.2 灰アルカリ抽出法⁹⁾

灰アルカリ法は、下水汚泥焼却灰にアルカリ源として水酸化ナトリウム（以後：NaOH）を添加することでリンを抽出し、この抽出液に水酸化カルシウム（以後Ca(OH)²⁾を添加することでリン酸カルシウムとしてリンを回収するものである。このリン酸カルシウムは、含有リン酸の90%以上がク溶性リン酸であり、遅行性の肥料として利用できる。また、リン酸カルシウムはリン鉱石に近い組成を持っているため、硫酸を加えることで過リン酸石灰に加工し、速効性のリン肥料として使用できる。灰アルカリ法によるリン酸カルシウム作製方法を図1に示す。まず、下水汚泥焼却灰に水酸化ナトリウム溶液を加えリンを抽出する。リ

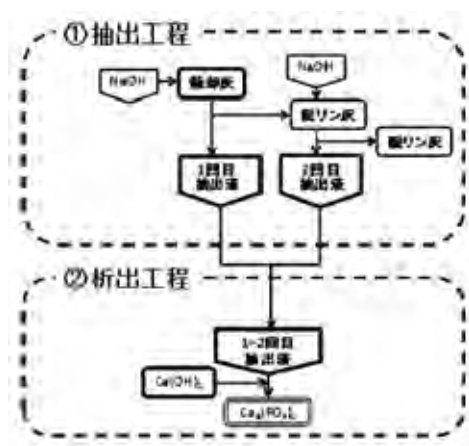


図1 灰アルカリ抽出法のフロー

ン抽出後、水酸化カルシウムを添加し、リンをリン酸カルシウムとして析出させ回収する。また、リン抽出工程で消費された水酸化イオンは、リン酸カルシウム析出工程で使った水酸化カルシウムより補給されリン酸カルシウム析出後の溶液はリン抽出用の反応液として循環利用が可能である。一方で、リンの抽出時にアルミニウムも同時に抽出され、リン酸カルシウム析出時にアルミニウムもカルシウムと反応し、リンと一緒に沈殿することでリン酸カルシウム中のアルミニウム含有量が増加する。

2.3 高品質リン酸肥料作製方法

リン抽出液にシリカ液を添加し、アルミニウムとシリカが反応しアルミノケイ酸塩として析出し、これを固液分離することで抽出液中のアルミニウムを選択的に除去することが可能となる。抽出液からのアルミ除去は図2に示す手順で行った。まず、下水汚泥焼却灰と1M-水酸化ナトリウム溶液の固液比を1:10の割合で調整し、抽出温度60℃、抽出時間30分でリンの抽出を行った。この後、抽出液と焼却灰を固液分離し1回目抽出液を作製し、シリカ液は抽出液に対して液量比率で1:1になるように添加を行った。シリカ溶液を添加した抽出液は1時間反応を行った後、固液分離によりアルミノケイ酸塩を除去し、2回目抽出液と混合してリン抽出液を得た。抽出以降の工程は共通で、作製した抽出液に水酸化カルシウムを添加することでク溶性のリン肥料となるリン酸カルシウムを析出させる。水酸化カルシウムの添加量は理論容量の1.3倍を加え6時間析出させた。焼却灰組成による適用性を評価するため、組成の異なる複数の焼却灰を用いてリン肥料作成を行った。表1に使用した焼却灰の組成を示す。

焼却灰Aを用いて1回目抽出液に添加するシリカ溶液の濃度を変化させ、抽出液中のアルミニウム除去率とリン抽出量から、最適なシリカ添加濃度について

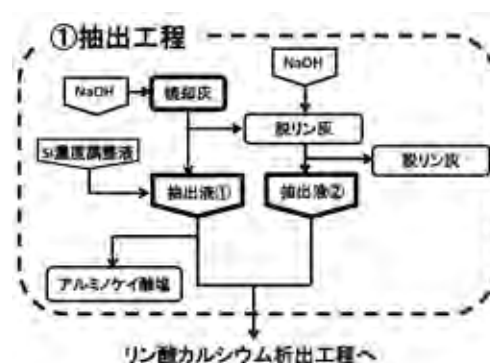


図2 Si添加法によるAl除去フロー

表 1 実験に用いた焼却灰組成

焼却灰	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O
	wt[%]					
A	34.2	12.7	21.1	11.9	3.4	2.7
B	31.5	14.9	25.6	2.9	3.7	2.1
C	30.3	13.6	26.5	2.4	3.7	2.7
D	25.4	14.3	28.8	2.9	2.7	2.1
E	20.5	14.4	33.1	4.9	2.9	1.7
F	14.9	12.9	38.1	5.1	2.9	1.6

検討を行った。作製したリン酸カルシウム中のリン含有率 (T-P₂O₅) とく溶性リン酸含有率 (C-P₂O₅) を図 3 に示す。図 4 にリン酸カルシウム中のアルミニウム含有率を示す。シリカ添加を行った全ての条件でアルミニウム含有率が 0.5% 以下になっていることが分かる。シリカ濃度が 7.5g/L 以上で T-P₂O₅ と C-P₂O₅ が低下する結果となり、シリカの過剰な添加はリン含有率を低下させることが分かった。また、灰組成の異なる焼却灰 6 種類を用いてシリカ添加を行いりん肥料を作成した (図 5)。その結果、焼却灰中のリン含有率が 20% 以下の焼却灰ではシリカ添加の効果は認められるものの、アルミニウム含有率は 4% 以上と、シリカ添加の効果は焼却灰中のリン濃度に影響する事が分かった。

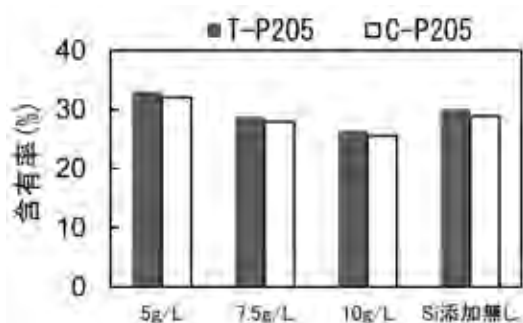


図 3 シリカ溶液濃度によるリン含有率の違い

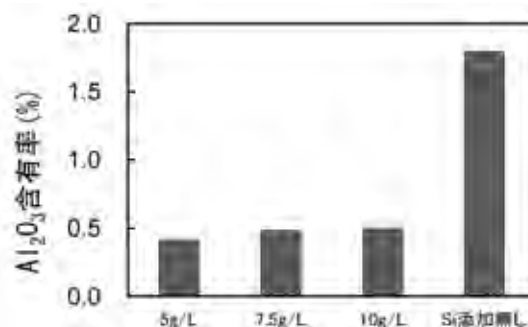


図 4 シリカ溶液濃度によるアルミ含有率の違い

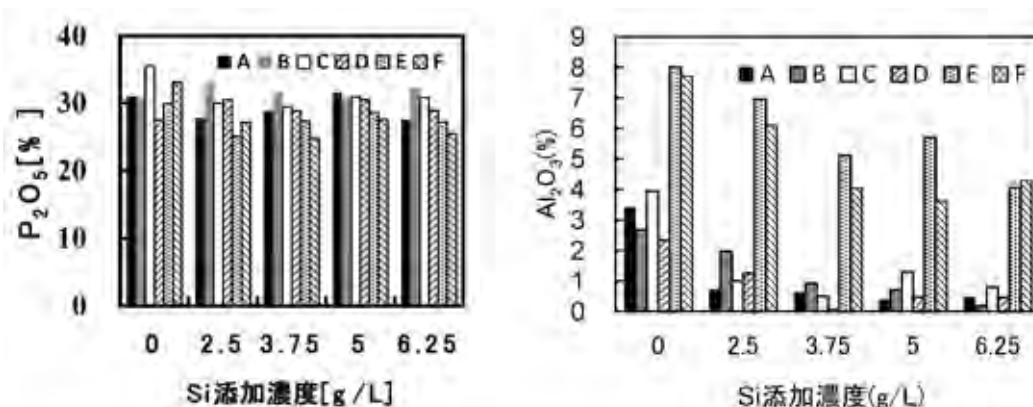


図 5 Si 添加法で作成したりん肥料 (左図：りん含有率、右図：アルミニウム含有率)

3. 下水汚泥を活用した未利用バイオマスからのエネルギー生産

3.1 稲わら、刈草のバイオガス化(混合嫌気性消化)の基礎実験

日本の主食である「米」を栽培するさいに発生する稲わらは、農業残渣系のバイオマスとして発生量が最も多い¹⁰⁾。現在の主な利用方法である水田に肥料として撒く鋤き込みは、積雪地帯では好気分解せずに嫌気性発酵を起こし、春先に稲わらが残存すること、温暖化ガスであるメタンを放出していることから新たな利活用技術が求められている。また、刈草は初夏から晩秋にかけて河川敷、道路、公園、一般家庭の庭など多くの場所で景観保護などのための除草の際に発生している。特に都市部で発生する刈草は有効な利用方法がないため、多くが一般廃棄物として処分されており、多大な処分費を要している。刈草は含水率が高いため、混合嫌気性消化を行った際に稲わらと比べ特別な前処理を施さなくとも、高いガス発生量を示すことが期待できる。また、刈草は一般廃棄物として扱われることが多く、その収集は自治体および河川管理者が行っており収集体系も確立しているなど、後述する稲わらで問題になる収集体系の課題が解決されている。

まず、稲わらと刈草の混合嫌気性消化における適応

性を検討するために、稲わらおよび刈草のポテンシャル評価を目的とした回分式嫌気性消化実験（以下、回分実験）を行った。刈草は国土交通省北陸地方整備局信濃川河川事務所の協力のもと、信濃川河川敷で6月に採取したものを使用した。稲わら、刈草は発生状態では茎丈が長く、消化槽に投入した際、管の閉塞に繋がる恐れがあるため、1センチ程度に破砕機を用いて破砕した。

稲わら、刈草の含水率と固形分あたりの有機分率（VTS）を測定した結果、含水率は稲わら8%、刈草76%、VTSは稲わら70%、刈草71%であった。回分実験の結果を図6に示す。試験中のpHは7付近の中性を示し安定していた。両者を比較した場合、5日目時点で刈草は稲わらの1.5倍のガス発生量を示し、初期の分解性が非常に高いことが分かった。また、30日目時点で600ml/g-VSと稲わらの1.2倍のガス発生量を示しており、分解性および得られるバイオガス量共に高く、メタンポテンシャルが高く混合嫌気性消化に適したバイオマスであることが確認できた。30日目のガス発生量は前処理を行った稲わらと同等の値であり¹¹⁾、刈草を用いる場合は破砕のみで十分な分解性を得られることが分かった。

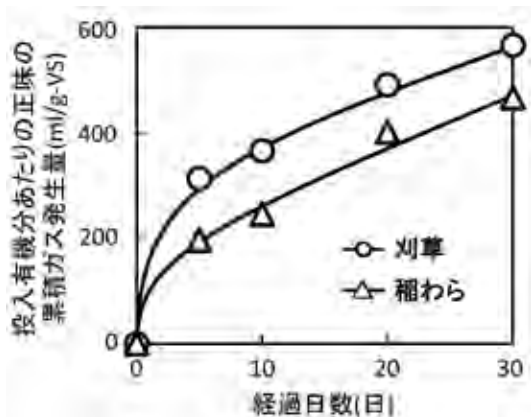


図6 刈草と稲わらのガス発生量の比較

3.2 稲わらと下水汚泥との混合消化実証実験

稲わらと下水汚泥との混合消化実証実験は平成23年～25年に渡り、新潟県信濃川下流流域下水道長岡浄化センター（以下、長岡浄化センター）で連続実証実験を行った。実験系列として、下水汚泥のみの系（汚泥単独系）と下水汚泥と共に稲わらを投入した系（稲わら系）を2系列、合わせて3系列を運転した。稲わらの投入負荷は下水汚泥量に対して固形分比1:0.5（湿潤重量約18%相当）に設定した。滞留日数は約29日（稲わら系は約25日）、消化温度36℃の中温消化で実験を行った。実験のフローを図7に示す。

稲わらは保存性が高い反面、そのままでは分解性が低い。稲わらのバイオガス化率を向上させるためには稲わらの前処理が必要となる¹²⁾。そこで、前処理としてこれまでに酵素やアルカリ処理を実施した。破砕した稲わらを酵素液やアルカリ溶液に浸漬させることで、稲わら中のセルロースと難分解成分であるリグニンの結合を分離できる。実証実験では0.25%の酵素溶液に20日間あるいは、0.5%の水酸化ナトリウム溶液に1日浸漬させたアルカリ処理稲わらを用いて実験を行った。アルカリ処理を行った場合の実証実験のガス量とpHの推移を図8に示す。

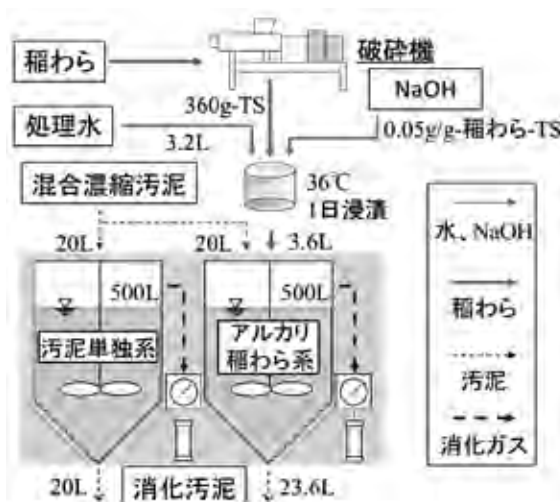


図7 混合嫌気性消化実証実験のフロー

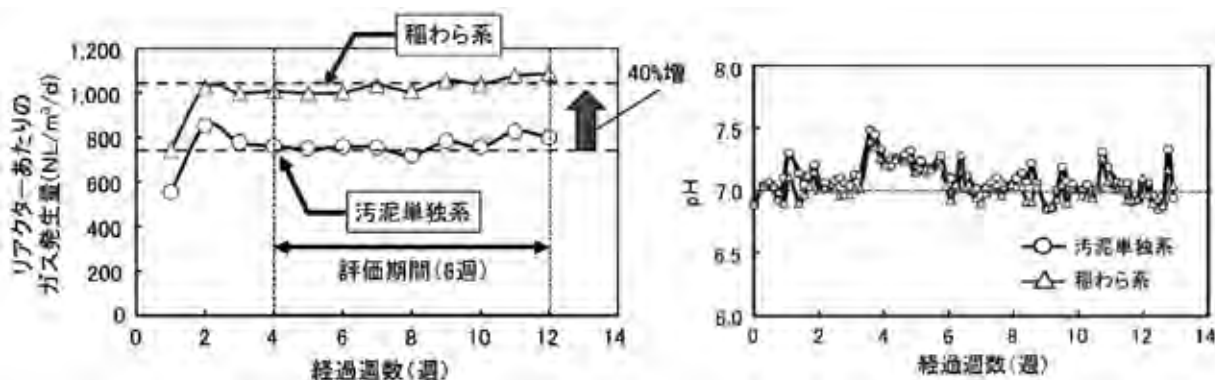


図8 稲わらの混合嫌気性消化発酵実証実験の結果（左図：ガス発生量、右図：pH）

図8より運転初期から安定した運転を継続し、長期間の消化運転が可能であることが確認された。またガス発生量も汚泥単独系に比べ1.4倍のガス増加量を示した。これまでアルカリ処理を用いた技術の問題であった消化槽のpHもバイオガス生成菌の適正範囲である6.5～7.5の間で推移しており、アルカリ投入による悪影響は確認されなかった。また消化液中のアンモニア性窒素も1,000mg/L以下で、アンモニアの蓄積は確認されなかった。

以上、稲わらを適切な前処理を行うことで、下水汚泥と同等の分解率でバイオガス化させることに成功した。稲わらは頑丈な構造を持っていることから長期間の保存ができる特徴を有する反面、未利用バイオマスを活用した事業として取り扱う場合に、廃棄物として扱うか有価物として扱うかで事業採算性が大きく異なること、それらの回収を担う事業体系を新たに構築することが必要となる。

3.3 刈草と下水汚泥との混合嫌気性消化

刈草と下水汚泥との混合嫌気性実証実験は、平成25年度から新潟市中部下水処理場、長岡浄化センターの2箇所で行った。

刈草は分解性が高い反面、稲わらのように長期間の保存ができないため、今回は1週間毎に、1週間分の刈草を採取した後、破砕機で破砕し、施設内で暗所保管および冷蔵保管した。刈草は、破砕処理以外の前処理は不要であるため、図7のフローのうち前処理を行わず破砕後、そのまま消化槽に投入した。実験系列は下水汚泥のみ投入した汚泥単独系と下水汚泥と共に刈草を投入した刈草系を運転した。投入負荷は稲わらの実験で安定運転を実証できた、下水汚泥量に対して固形分比1:0.5（湿潤重量約7%程度）とするために、採取毎に固形分を測定し投入量を調節した。刈草の含水率は45%、VTSは85%で、実験期間中の固形分、

有機分の大きな変動は確認されなかった。滞留日数は約29日（刈草系は約27日）、消化温度36℃の中温消化で実験を行った。新潟市中部下水処理場での実証実験のガス量の推移を図9に示す。

図9より、刈草を用いた場合でも稲わらと同様に運転初期から安定した運転が継続でき、pHも中性付近で推移したことから、長期間の消化運転が可能であることを確認した。ガス発生量もアルカリ処理稲わらと同様、汚泥単独系の1.4倍のガス量を示し、刈草の性状変動の影響は確認されなかった。また、前処理に関しても、破砕のみで安定したガス量が常に得られていることから、特別な前処理装置の導入は必要無いことが分かった。アンモニアの蓄積も確認されず安定した消化が可能であった。

4. バイオガスの利活用技術

メタン発酵で発生するバイオガスについては、約60%のメタンを主成分として二酸化炭素が30～40%含まれる。その他に窒素、硫化水素も微量含まれる。このメタンをエネルギー源として高度利用、多様化利用することもバイオマス利活用技術として重要である。

バイオガスは、多くの施設では消化槽の加温に熱源として利用されている。また、汚泥の集約施設や大都市の下水処理場では、バイオガス発電が行われている。通常は、消化槽の加温だけでは余剰ガスが発生するが、これまで多くの中小規模の下水処理場では経済性の理由から燃焼廃棄処分されてきた。そこで、中小規模施設にも適用可能にするためにバイオガス発電の低コスト化技術の開発が行われている¹³⁾。また、二酸化炭素が約40%以上含まれるバイオガスは熱量が低いため、利便性や経済的価値が低いことから、バイオガスから二酸化炭素を取り除き、天然ガスや都市ガスと同

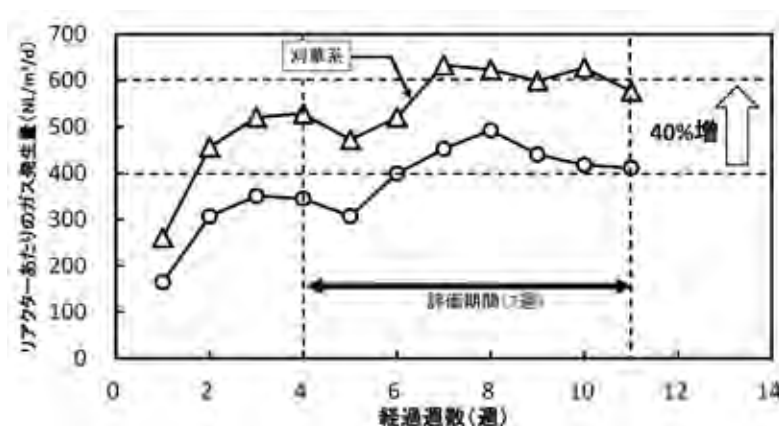


図9 刈草の混合嫌気性消化実証実験のガス発生量推移

等までメタン純度を向上させるバイオガス精製技術の開発も実施されている¹⁴⁾。著者らが開発に携わった小型消化ガス発電技術とバイオガスの精製技術について紹介する。

4.1 低コスト消化ガス発電システムの開発

(独) 土木研究所が基本開発した小型のガスエンジン発電機を用い、改良を行い下水処理場内で実証実験を実施した。本ガスエンジン発電機は、市販のディーゼル発電機を改造したもので、出力 25kW 程度の廉価な小型ガスエンジン発電機である (図 10)。実証実



図 10 土木研究所が開発したバイオガス発電機

4.2 バイオガスの精製技術

バイオガス中のメタン純度を向上させる技術は、二酸化炭素は比較的水に溶けやすい性質を利用し湿式脱硫などでも二酸化炭素は取り除かれる。このような湿式吸収法の他にメタンと二酸化炭素のゼオライトなどへの吸着材への吸着速度の差を利用した PSA 法やメタンと二酸化炭素の膜への透過 (拡散) 速度の差を利用した膜分離法がある。

我々は、これまで (独) NEDO、文部科学省の補助を受け、横浜市環境創造局の協力により日本ガイシ株式会社と共同で横浜市南部汚泥資源化センターで膜分離法による消化ガス精製システムの実証実験を行った。このとき用いた膜は、セラミック基材上に DDR 型ゼオライトと呼ばれる特殊なゼオライトを薄膜形成した気体分離膜である (図 12)。このゼオライトには、分子レベルの細孔が規則正しく開いており、メタンと二酸化炭素を分子の大きさの違いにより分離することが可能である¹⁵⁾。膜による精製の大きな特徴は、消化ガスを昇圧し膜に供給するだけのシステムが簡素な点である。実証実験では DDR 型ゼオライト膜を初めて消化ガス精製に適用し、メタン濃度 60% のバイオ

験ではバイオガス中のメタン (60%) を 70、80%、90% にそれぞれ濃縮したガスを燃料とし、各供給条件が発電効率に与える影響などの検討を行い、最終的にはメタン濃度 50-100% 以内で発電効率が 30% 以上となる燃焼制御でき、高効率で電力エネルギーに転換することが可能であった。さらに、ガスエンジン発電機の市販化を目指し新潟県土木部都市局下水道課、長岡技術科学大学で改良型のガスエンジン発電機を共同開発し、出力 25kW の高負荷運転時において発電効率 33% 以上を達成している。現在は、出力 50kW、75kW、90kW の発電機も商用化されている (図 11)。



図 11 商用化されたバイオガス発電機

ガスから①メタン濃度 90%、二酸化炭素 97% 以上、②メタン濃度 95%、二酸化炭素 95% 以上と利用用途に合わせて高純度でそれぞれで回収することに成功した (図 13)¹⁶⁾。さらに、国土交通省、内閣府の補助を受け、さらなる膜の高性能化や長期間の影響の評価やシステム全体の開発を行うために新潟県土木部都市局下水道課の協力により新潟県信濃川下流流域下水道長岡浄化センターで実証実験を行った。これまでに本膜のみでメタン濃度 98% 以上、CO₂ 濃度 98% 以上で精製可能で、その際のメタンと二酸化炭素の回収率もどちらも 98% 以上を達成している (図 14)。

さらに、膜分離は加圧のみの簡素なシステムで、メタンガスは圧力を持って精製されるために、例えば高压ガス取締法の準拠が不要な約 10 気圧で分離させ、その圧力を用いてメタンガスを貯蔵可能である。さらに、本膜は 100 気圧以上でも分離可能で、圧力に比例してガス透過量が増える (必要膜量が減少する) ため、高压で操作させることで設備がさらにコンパクトにできる。また、天然ガス精製や炭化水素の触媒反応系など自圧を有するガスからの CO₂ 回収に本膜を適用する事で大幅な省エネルギー化が期待されている。



図 12 DDR 型ゼオライト膜の特徴

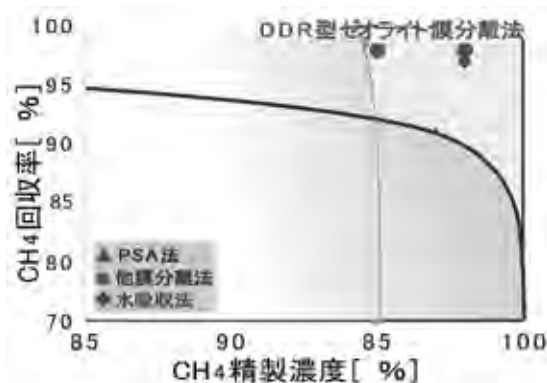


図 13 バイオガス精製の比較

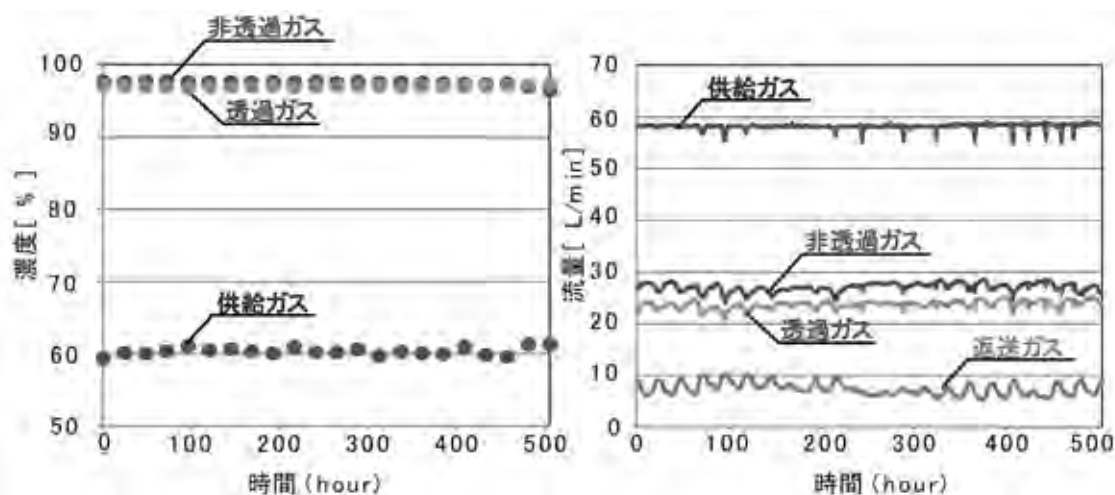


図 14 DDR 型ゼオライト膜によるバイオガス精製連続実験結果 (左: ガス濃度、右: 流量)

5. 他の有機性資源および下水道資源・エネルギーの利活用技術

本稿では、主に下水汚泥由来の無機資源、有機資源の活用技術を中心に紹介した。メタン発酵技術の適用に関しては、下水汚泥に限らず家畜ふん尿、し尿汚泥、生ごみ、食品廃棄物にも適用可能であることは広く知られている。他バイオマスの集約技術として生ごみ、家畜ふん尿、エネルギー作物、廃油等と有機性汚泥との混合消化技術の開発を進めている。また、本来は下水処理場におけるメタン発酵工程は、汚泥を減容化させることが目的である。著者らはバイオマスを加えたことによる汚泥の性状や脱水性の変化に注目し、汚泥発生量(脱水ケーキ量)を増加させない技術の開発と、それらを実証実験での検証を行っている。消化汚泥は

消化工程を経る分だけ有機物量が少なく、固形燃料化技術の導入が難しいとされている。それに対して、新たにバイオマスを加えることで汚泥の発生量を抑えつつ、有機物割合を保つ条件の確保を可能にする技術が期待できる。

さらに汚泥あるいはバイオガス以外にも下水道では未利エネルギー源である下水の熱利用、未利用資源として再生水中の窒素、リンなどの栄養塩類、バイオガス中の CO_2 ガスが発生している。現在、これらの利活用に向けて国土交通省、(独)土木研究所、新潟県下水道課と共同で下水処理場内での植物生産技術の開発に着手した。

また、バイオガス利用に関しても水素社会の構築が進められるなか、 CO_2 フリーな水素の供給源としてバイオガスが期待されている。有力な水素製造方法はメタンからの改質である。その際にはバイオガスを精製

しメタン純度を高める必要があり、燃料電池自動車等の燃料として適用するための低コスト水素製造技術の開発が必要であろう。このように下水処理場を積極的な再生可能エネルギー供給施設として位置付けるための技術開発を官民学で進める必要があり、地域の下水処理場の果たす役割はますます大きなものとなる。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部, 「新下水道ビジョン」, 2014
- 2) 野池達也, 震災復興に貢献するメタン発酵, 再生と利用 No.135 p6-19, 2012
- 3) 姫野修司他, 下水汚泥焼却灰を原料とするリン肥料の高品質化, 第 49 回下水道研究発表会講演集, 196-198, 2012
- 4) 和田拓己他, リン含有率が低い下水汚泥焼却灰を原料としたリン肥料の高品質化, 第 50 回下水道研究発表会講演集, 268-270, 2013
- 5) 和田拓己他, 下水汚泥焼却灰中のケイ素を利用したリン肥料の高品質化, 第 51 回下水道研究発表会講演集, pp493-495, 2014
- 6) 吉田佳子他, 下水汚泥焼却灰のアルカリ溶出によるリン回収の増大に関する研究, 土木学会論文集, No.769, pp55-64, 2004
- 7) 白毛宏和, MAP 法によるリン回収資源化システム, 環境バイオテクノロジー学会誌, 4 (2), pp109-115, 2005
- 8) 洙田泰臣他, 焼却灰に含まれる資源の効率的な回収に関する検討, 第 37 回下水道研究発表会講演集, pp951-953, 2000
- 9) 高橋正昭, 化学処理法による汚泥からのリン回収とその利用, 汚泥の処理とリサイクル技術, p229, 技術情報センター, 2010
- 10) 松村幸彦他, 稲わら(農業残渣)資源のポテンシャルとエネルギー利用の可能性, 日本エネルギー学会誌, 81 (5), 290-296, 2002
- 11) 高松量他, 下水汚泥と稲わらの一括バイオガス化技術の実用化を想定した嫌気性消化の検討, 第 48 回下水道研究発表会講演集 449-451, 2011
- 12) 小松俊哉他, 下水汚泥と稲わらの混合嫌気性消化技術の実用化に向けたパイロットスケール実験, 下水道協会誌, Vol.50 No.605, 109-117, 2013
- 13) 姫野修司, バイオガス利用拡大に向けたバイオガス増産・精製技術の開発, バイオガス事業推進協議会会報 第 11 号 p1-2, 2014
- 14) 瀧村豪他, 「こうべバイオガス」の都市ガス導管注入実証事業について～資源循環のみち 神戸モデル～, 下水道研究発表会講演集, 47, 441-443, 2010
- 15) 姫野修司他, CO₂ 分離膜を用いた簡素な消化ガス精製と利活用技術の開発, 再生と利用, 34 (128), 25-32, 2010
- 16) 竹谷究他, 気体分離膜を用いた消化ガス精製と新規ガスエンジンの発電プロセスの評価, 下水道研究発表会講演集, 45, 431-433, 2008

投稿報告

オゾン溶解反応タンク及び インライン凝集による 再生水造水の効率化

東京都下水道局 福地 広明
 東京都下水道サービス(株) 野本 睦志
 日之出水道機器(株) 田中 祐大
 メタウォーター(株) 角川 功明

キーワード：オゾン処理、エジェクター、凝集処理、スタティックミキサー、膜ろ過

1. はじめに

東京都下水道局では下水処理水をオフィスビルトイレ用水や清流復活用水として供給する再生水利用事業をおこない、循環型社会の形成に貢献している。下水処理水を再生水として供給するにあたっては、下水処理水にろ過やオゾン処理など、さらに高度な処理を施している。

芝浦水再生センターでは東系処理施設にオゾン処理と凝集処理＋セラミック膜ろ過を用いた造水量7,000m³/日の再生水設備を建設し、平成22年より稼

働している（図1-1）。本施設は濁度および色度の除去性に優れ、再生水利用に関する技術上の基準（国土交通省）のうち最も厳しい基準である親水用水基準（濁度2度以下、色度10度以下）を満足するレベルの再生水を造水している。

近年の電力危機や地球温暖化対策により下水道事業では省エネルギー化が強く求められている。また芝浦水再生センターはJR品川駅に隣接した都市部に位置し敷地が限られることから、将来的な設備の更新、増設を見据えた場合、省スペース化が必要である。しかしながら現在の処理方式では、オゾン発生器や凝集混和槽の攪拌で多くのエネルギーを消費している。また、

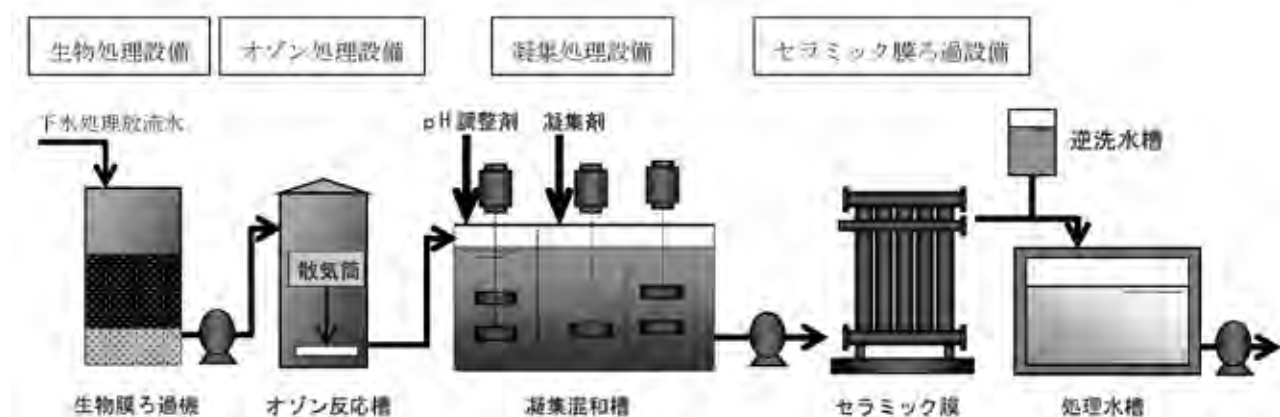


図1-1 芝浦水再生センター東系処理施設における既設の再生水造水設備フロー図

オゾン接触時間や凝集時間を要するためそれぞれ大きな槽を有していることから、省エネルギーと省スペースの点で課題を抱えている。

東京都下水道局、東京都下水道サービス㈱、日之出水道機器㈱およびメタウォーター㈱は、再生水の製造工程の中でオゾン処理と凝集処理工程を対象に、省エネルギー、省スペースでかつ維持管理性の向上を目指した技術の共同研究を進めている。

2. 開発技術の概要

今回開発を進めている技術は、オゾン処理についてはエジェクター＋溶解反応タンクを用いたオゾンの高効率溶解技術によってオゾン注入量の削減と接触時間の短縮を行い、凝集処理についてはスタティックミキサーを用いた凝集剤のインライン注入技術によって攪拌動力の削減と凝集混和時間の短縮をすることによって省エネルギー化と省スペース化を目指すものである。

3. オゾン処理の効率化

3-1 概要

再生水造水におけるオゾン処理の目的は、オゾンの酸化反応により、色度、臭気等の成分を分解・除去し、再生水の水質を向上させるものである。既設のオゾン処理設備では、散気筒によるオゾン処理を採用しているが、オゾン接触時間は10分程度の時間がかかっている。また、オゾン発生器に係る電力は再生水造水で使用する電力の約7割を占めており、今回、エジェクターによるオゾンの配管注入と特殊な溶解反応タンク方式を用いて、オゾン使用量の削減およびオゾン接触時間の大幅な短縮により使用電力量の削減とコンパクト化を目的に実験を行った。

3-2 実験方法

(1) 実験装置の概要

実験は芝浦水再生水センター内にエジェクターと特殊な溶解反応タンクを用いた方式（以下、溶解反応タンク方式と称す）のミニプラント（処理能力24m³/日）を設置して行った。実験には、既設の再生水設備の生物膜ろ過処理水を用いた。実験装置の概要と処理フローを図3-1に示す。本装置は、加圧ポンプ配管途中に取り付けたエジェクターでオゾンを吸引することでオゾン混合水を作り、溶解反応タンク上部ノズルから噴射し、タンク内に設置した内筒（乱流発生装置）で高速の乱流を発生させることで、加圧＋乱流効果によりオゾン溶解とオゾン反応効率を向上させ、オゾン処理を行うものである。

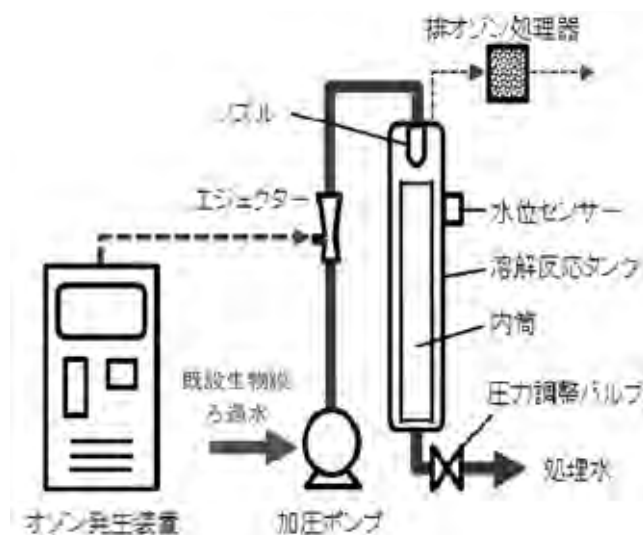


図3-1 実験装置と処理フロー図

(2) 水質等の主な管理項目

今回の調査における水質等の主な管理項目は、既設の管理項目と同等とし、オゾン処理水の色度（管理目標3度以下）、排オゾン量（目標10%以下～数パーセント）とした。

(3) 実験の手順および条件

実験は図3-2のステップでオゾン注入量、溶解反応タンク圧力、オゾン接触時間を変化させて行った。各ステップの条件を表3-1に示す。ステップ-1で溶解反応タンク圧力の影響を調査し、ステップ-2でオゾン接触時間を検討した。ステップ-1、ステップ-2で得られた結果から重回帰分析法によるシミュレーションにより最適条件を設定し、ステップ-3で実験により検証した。

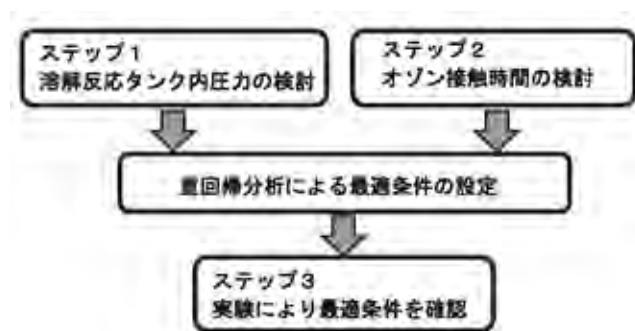


図3-2 実験の手順

表3-1 実験の条件

	オゾン注入量 (mg/L)	オゾン接触時間 (秒)	溶解反応タンク圧力 (MPa)
ステップ-1	5~15	30	0.015~0.100
ステップ-2	7	15,30,60	0.025~0.100
ステップ-3	7	30	0.05

生物膜ろ過水色度: 12~20度

3-3 実験結果と考察

(1) ステップ1：溶解反応タンク圧力の影響

溶解反応タンク圧力とオゾン注入量を変えた時のオゾン処理水色度を図3-3に示す。各オゾン注入量において溶解反応タンク圧力を高くすると、オゾン処理水色度は若干低くなる傾向はあるものの、大きな差は認められなかった。一方、オゾン注入量を増やすとオゾン処理水色度は低くなった。実験実施中の既存設備のオゾン注入量は平均8.8mg/L、オゾン処理水色度は1.9度であり、本実験で既存設備と同じオゾン処理水色度となった時のオゾン注入量は既存設備より少ない7mg/L、その時の溶解反応タンク圧力は0.050MPaであった。

(2) ステップ2：オゾン接触時間の検討

次に、ステップ-2としてオゾン接触時間（15秒、30秒、60秒）と溶解反応タンク圧力を変えた時のオゾン処理水色度を図3-4に示す。オゾン注入量は7mg/Lで固定した。いずれもオゾン処理水色度の管理目標値を十分に達成したが、オゾン処理水色度はオゾン接触時間15秒の場合と比べて30秒、60秒の方が良好な結果が得られ、30秒、60秒の結果は概ね同じであったことから、オゾン接触時間は30秒程度で十分であると判断される。

(3) ステップ3：最適運転条件の設定

オゾン注入量を増やすとオゾン処理水色度は低下するが排オゾン量が増し、オゾン発生に係る電力も増加する。一方、溶解反応タンク圧力を高くすればオゾン溶解効率上がるが、ポンプ動力が増加する。

したがって、オゾン注入量を抑えつつ、溶解反応タンク圧力を低めに抑えた状態でオゾン処理水色度及び排オゾン量の管理目標を満足することが求められる。そのため、ステップ1, 2で得られたデータを用いて、重回帰分析により最適なオゾン注入量と溶解反応タンク圧力を求めた結果、既設の生物膜ろ過処理水に対しては、オゾン処理水色度、排オゾン量の割合、省エネルギーを考慮したオゾン処理の最適な運転条件として次のとおりであることが検証された。オゾン接触時間については、30秒、60秒の結果が概ね同じであったことから30秒とした。

- ・オゾン注入量：7mg/L
- ・オゾン接触時間：30秒
- ・溶解反応タンク圧力：0.050MPa

(4) 排オゾン割合の確認

オゾンの物質収支は処理対象の生物膜ろ過水の水质によっても影響されるため、同一日におけるオゾン処理効率を評価するための物質収支調査を実施した。図3-5に溶解反応タンク圧力0.050MPaにおけるオゾン注入量別のオゾンの物質収支比較を示す。この時の排オゾン量の割合については、オゾン注入量が5、7、9、15mg/Lでそれぞれ4.2、4.7、10.7、15.1%であった。溶解反応タンク圧力0.050MPa、オゾン注入量が7mg/L以下における排オゾン量の割合は概ね5%以下となり、同日の既存設備の排オゾン量の割合の平均12.5%と比較し大幅な削減が可能であった。

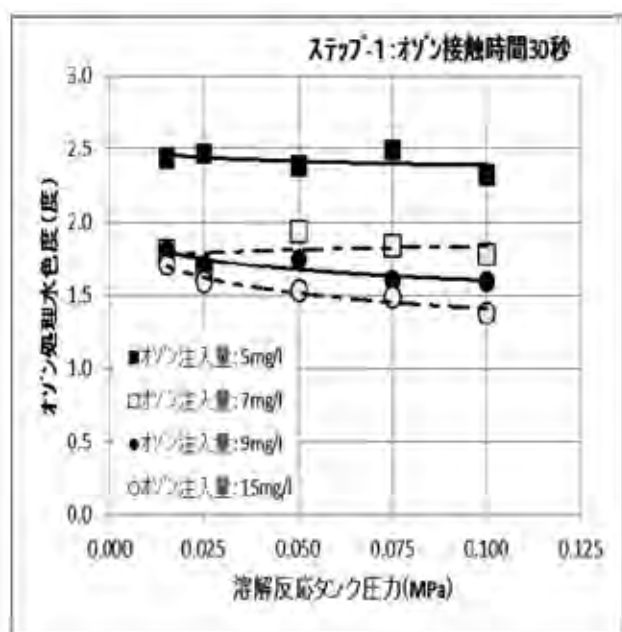


図3-3 溶解反応タンク圧力とオゾン注入量、オゾン処理水色度の関係



図3-4 オゾン接触時間と溶解反応タンク圧力、オゾン処理水色度の関係

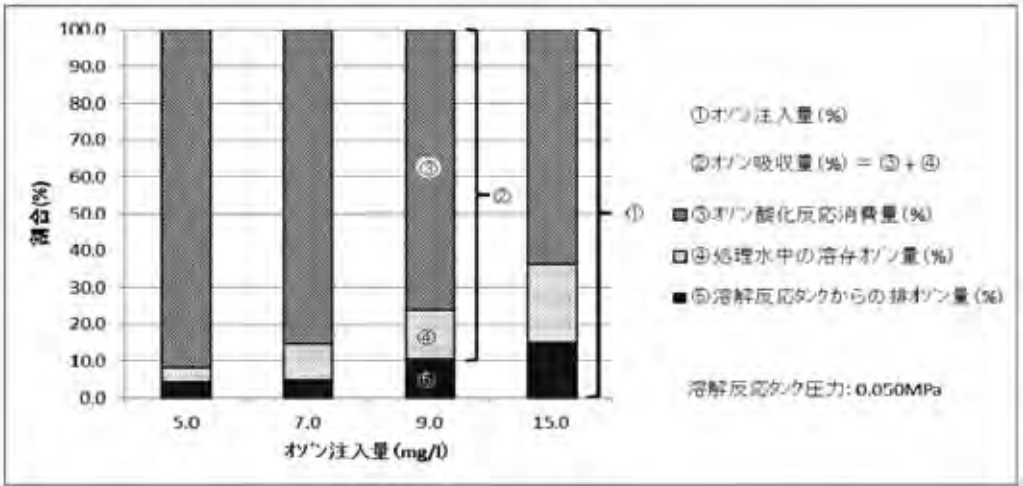


図3-5 オゾン注入量別のオゾン物質収支比較図

(5) 溶解反応タンク方式の導入効果

実験により得られた結論として、溶解反応タンク方式ではオゾン使用量を既存設備と比較して約 20% (既設：8.8mg/l→今回：7.0mg/l) 削減でき、オゾン接触時間は約 1/20 (既設：約 10 分→今回：約 30 秒) とすることが可能となった。排オゾン量の割合については、注入量に対して 5% 以下 (既設：約 12.5%→今回：約 4.7%) となり、目標を十分に満足することができた。

また、将来の実設備を想定し、既存施設の 1 系列分である処理能力 3,500m³/日を仮定した場合、表 3-2 に示すようにオゾン反応タンクの容量は既存設備の約 1/16 となり大幅な設備のコンパクト化を図ることが可能である。

4. 凝集混和処理方法の効率化

4- 1 概要

再生水造水における凝集混和処理は、再生水中の浮遊物質を凝集剤により凝集させることでフロック径を

大きくし、後段のセラミック膜閉塞を抑制するために行われる。既存の凝集処理設備では、混和槽へ凝集剤を添加し、攪拌機により約 10 分間かけて混合、凝集を行っている。今回、凝集剤のインライン注入とステイックミキサーによる混合により施設のコンパクト化と攪拌動力の削減を目的に開発を行った。

4- 2 実験方法

(1) 実験装置の概要

実験装置フローを図 4-1 に示す。凝集処理に使用する処理水は既設のオゾン処理水を用いた。本実験では A、B 二つの系列を備えたセラミック膜ろ過装置を用い、異なる凝集条件で並列運転することにより比較を行った。凝集条件の違いによる評価は、セラミック膜ろ過装置の膜差圧 (温度補正後) の推移および逆洗後膜差圧の上昇速度により評価した。水質分析は既設のオゾン処理水および実験装置のセラミック膜ろ過水を対象に図に示した位置より採水して実施した。

表3-2 オゾン処理既存設備と開発技術の設備比較 (3,500m³/日と仮定)

	既存設備	開発技術
オゾン処理方式	散気筒方式	溶解反応タンク方式
オゾン接触時間	約 10 分	約 30 秒
オゾン反応タンクの 大きさ	約φ 2.9m×5.0m 1 基 (容量約 33m ³)	約φ 0.88m×1.6m 2 基 (容量約 2m ³)
設置面積	約 8.0m×6.0m 1 基	約 6.3m×3.5m (2 基+予備ポンプ 1 台)

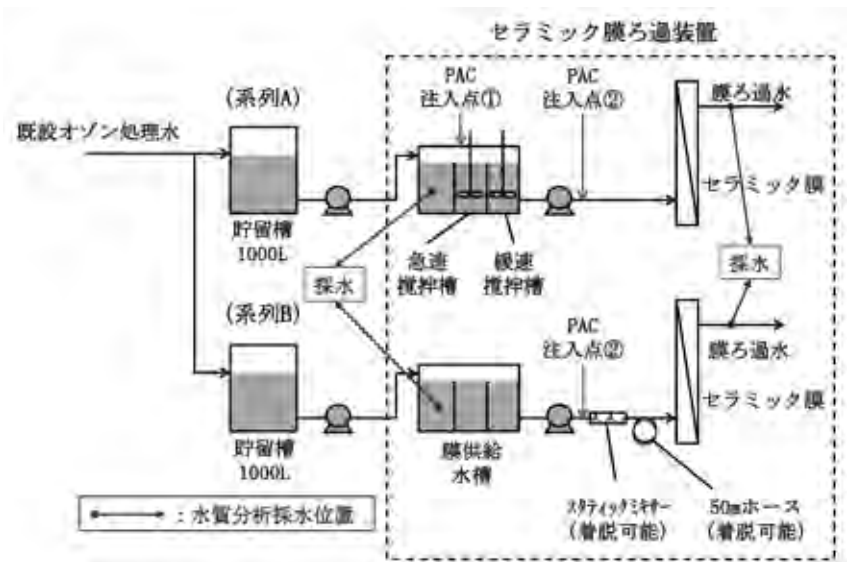


図4-1 実験装置フロー

表4-1 実験装置の仕様

項目		条件
凝集装置	凝集pH	6.4～7.3 (未調整)
	凝集剤	PAC
	凝集剤注入率	30mg/L
	急速攪拌槽滞留時間	1.0分
	緩速攪拌槽滞留時間	2.5分
	スタティックミキサー型式	C86-6-1※
セラミック 膜ろ過装置	膜エレメントサイズ	φ30×1000mm
	膜本数 (系列あたり)	1本
	膜面積	0.42m ²
	孔径	0.1μm
	膜ろ過流速	6.0m/d
	ろ過時間	60min
	逆流水量	2L/m ²
	逆流圧力	500kPa

※ (株)タカノがコーポレート製

(2) 実験条件

表 4-1 に実験装置の仕様と運転条件、表 4-2 に検討項目および実験条件の一覧を示す。凝集条件は既存設備に合わせて pH 調整なし、PAC 注入率 30mg/L とした。また、膜ろ過条件は逆洗後膜差圧の変化を短期間に評価するため、既存施設 3.0m/d の膜ろ過流速を実験装置では 6.0m/d と倍の流速で運転する加速試験をした。また、逆洗の間隔は 60min に設定した。

実験Ⅰでは、混和槽による凝集とインライン凝集の比較検討を実施した。実験Ⅱ、Ⅲでは、インライン凝集におけるスタティックミキサーの効果、および凝集剤注入後の滞留時間の影響について検討した。なお、滞留時間の調整はスタティックミキサー直後の配管を延長することで行った。

表4-2 検討項目および実験条件

No.	検討項目	系列	凝集方法	PAC 注入点	スタティックミキサー	滞留時間
Ⅰ	混和槽による凝集とインライン凝集の比較	A	混和槽	①	なし	数秒
		B	インライン	②	なし	数秒
Ⅱ	(インライン凝集における)スタティックミキサーの効果	A	インライン	②	なし	数秒
		B	インライン	②	あり	数秒
Ⅲ	(インライン凝集における)凝集剤注入後の滞留時間の影響	A	インライン	②	なし	数秒
		B	インライン	②	なし	5分

4-3 実験結果と考察

(1) 混和槽による凝集とインライン凝集の比較

実験Ⅰにおける膜差圧の変化を図4-2に示す。図には逆洗直前膜差圧（上側のプロット）、逆洗後膜差圧（下側のプロット）を示している。いずれの系列も運転時間に応じて逆洗後膜差圧の値は微増する傾向にあるが、インライン凝集では1回のろ過工程における膜差圧の増加は大きいものの、逆洗後膜差圧の上昇速度は0.9kPa/日となり、混和槽の場合の2.2kPa/日よりも低い値を示した。表4-3に水質分析結果を示す。処理水質に関しては、凝集方法の違いによる影響はなく、濁度、色度および溶存性有機体炭素（Dissolved Organic Carbon：DOC）ともに同等な結果であった。

これらの結果より、混和槽による凝集をインライ

ン凝集に変更してもセラミック膜ろ過運転の安定性に影響がなく、逆洗後膜差圧の上昇期間が延長されることを確認した。

(2) スタティックミキサーの効果

実験Ⅱにおける膜差圧の変化を図4-3に示す。逆洗後膜差圧の上昇速度は、スタティックミキサーありで5.3kPa/日に対して、スタティックミキサーなしで5.5kPa/日と、スタティックミキサーの有無に関係なくほぼ同等な結果となった。処理水質に関しても、ほぼ同等な結果であった（表4-3）。今回の実験装置では配管径が8mmと細いため、スタティックミキサー無しでも凝集剤が十分に混合されたためと考えられるが、実機規模では凝集剤の分散に違いがあると考えられるため、今後実機規模でのスタティックミキサーの効果についての検証を行う予定である。

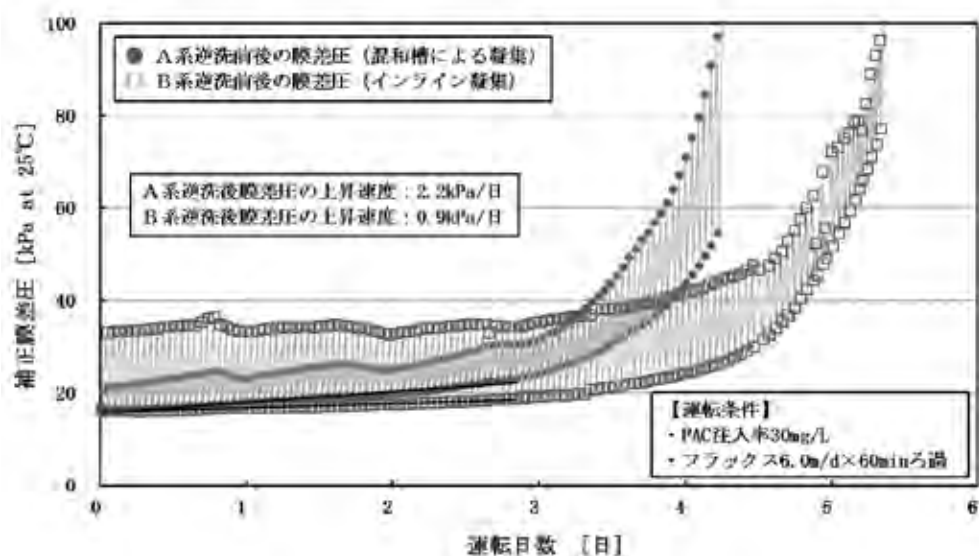


図4-2 混和槽による凝集とインライン凝集の比較

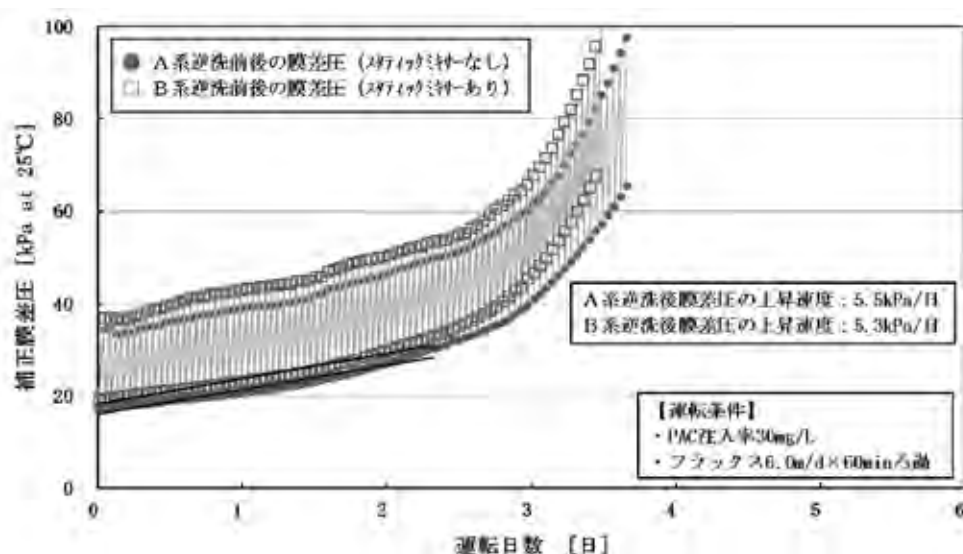


図4-3 インライン凝集におけるスタティックミキサーの効果

(3) 凝集剤注入後の滞留時間の影響

実験Ⅲにおける膜差圧の変化を図 4-4 に示す。1 回のろ過工程における膜差圧の増加量は、滞留時間を 5 分設けた方は 5kPa 程度であるのに対して、滞留時間を数秒とした方では 20kPa 程度と大きかった。しかしながら、逆洗後膜差圧の上昇速度は、滞留時間を 5 分とした方は 5.8kPa/日であるのに対して、滞留時間を数秒とした方では 1.7kPa/日と低い

値を示した。この挙動は実験Ⅰと同じ傾向であり、今回の既設オゾン処理水に対しては凝集剤注入後の滞留時間が長くなるほど、1 回のろ過工程における膜差圧の増加は抑制できるが、逆洗後膜差圧の上昇速度は大きくなり、セラミック膜ろ過の安定運転に影響を与える結果となった。膜ろ過処理水質に関しては、ほぼ同等な結果であった。(表 4-3)

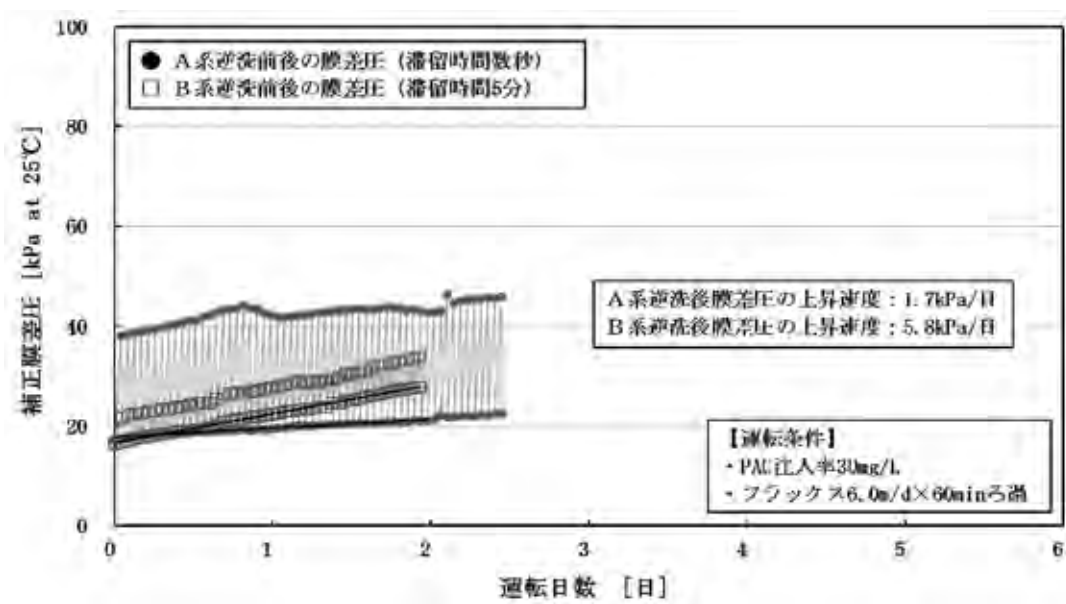


図4-4 インライン凝集における凝集剤注入後滞留時間の影響

表4-3 水質分析結果

No.	内容	項目	既設オゾン処理水	膜ろ過水	
				A系	B系
Ⅰ	混和槽による凝集とインライン凝集の比較	濁度	0.5	＜0.1	＜0.1
		色度	2.5	1.6	1.5
		DOC [※]	6.0	5.4	5.3
Ⅱ	(インライン凝集における)スタティックミキサーの効果	濁度	0.4	＜0.1	＜0.1
		色度	1.5	1.1	1.1
		DOC	5.4	5.0	5.0
Ⅲ	(インライン凝集における)凝集剤注入後の滞留時間の影響	濁度	0.3	＜0.1	＜0.1
		色度	2.5	1.5	1.6
		DOC	6.3	4.6	4.7

※DOC: 溶解性有機炭素 (Dissolved Organic Carbon)

5. 溶解反応タンク処理水のインライン凝集処理 + セラミック膜ろ過処理への影響評価

5- 1 概要

本章では溶解反応タンク方式によるオゾン処理水がインライン凝集 + セラミック膜処理に与える影響について、短期間の運転ではあるが評価を行った。

5- 2 実験方法

実験装置フローを図 5-1 に示す。実験装置および評

価方法は 4 章と同じく A、B 二つの系列を備えたセラミック膜ろ過装置を用い、それぞれのプロセスを並列運転することにより比較を行った。

表 5-1 に運転条件を示す。従来プロセスは既存設備のオゾン処理水を用いた。一方、開発プロセスは既存設備の生物膜処理水を今回開発した溶解反応タンク方式でオゾン処理したものを用い、オゾン注入率は 6.0mg/L で一定とした。この値は実験直前における既設設備のオゾン注入率を参考に設定した。凝集およびセラミック膜ろ過の条件は 4 章で示した表 4-1 と同じ設定とした。

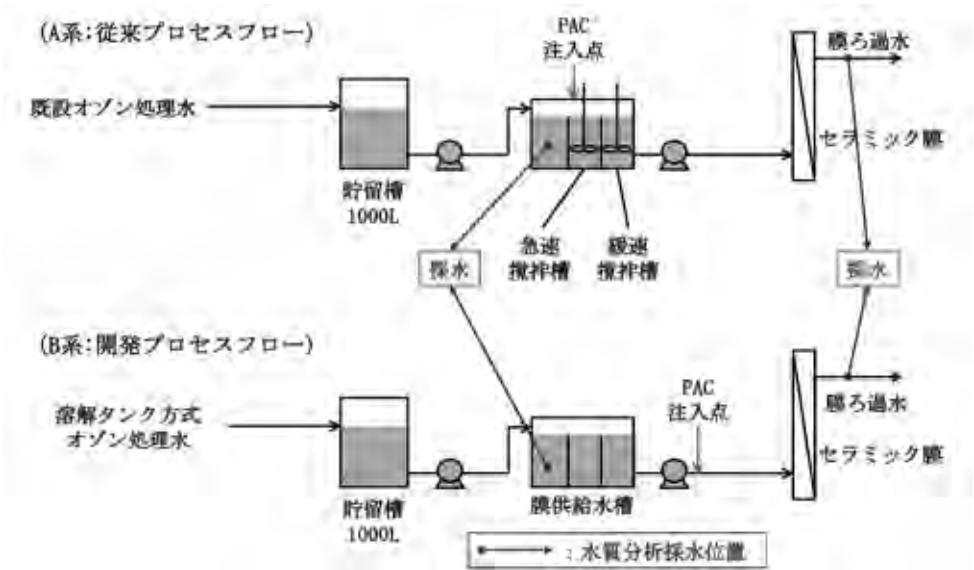


図5-1 実験装置フロー

表5-1 従来プロセスと開発プロセスの運転条件

項目		従来プロセス	開発プロセス
オゾン処理	処理方法	散気 + 反応槽	溶解反応タンク
	制御方法	溶存オゾン濃度制御	手動制御 オゾン注入率：6mg/L
	制御位置	オゾン反応槽出口	
	制御濃度	0.3mg/L	
凝集処理	凝集方法	混和槽による凝集	インライン凝集
	凝集pH	6.1～7.1（未調整）	
	凝集剤	PAC	
	凝集剤注入率	30mg/L	
	凝集条件	急速撹拌：150rpm×1.0min 緩速撹拌：50rpm×2.5min	スケーリングなし 滞留時間数秒
セラミック膜ろ過	膜ろ過流量	6.0m ³ /d	
	ろ過時間	60min	
	逆洗水量	2L/m ²	
	逆洗圧力	500kPa	

5- 3 実験結果と考察

セラミック膜ろ過における膜差圧の変化を図 5-2 に示す。実験期間中のオゾン注入率は開発プロセスが 6.0mg/L（一定注入）に対して従来プロセスが平均 6.9mg/L と、開発プロセスの方がオゾン注入率は低かったが、逆洗後膜差圧の上昇速度は、従来プロセスで 2.0kPa/ 日、開発プロセスで 1.7kPa/ 日と開発プロセスの方が小さい傾向であった。また、開発プロセスは 1 回のろ過における膜差圧の増加が大きいことが懸

念されたが、逆洗前の膜差圧は従来プロセスとほとんど同じ値で推移した。

表 5-2 に水質分析結果を示す。膜ろ過処理水質に関しては、プロセスの違いによる影響はなく、ほぼ同等な結果であった。これらの結果から、溶解反応タンク方式オゾン処理とインライン凝集＋セラミック膜ろ過設備の組み合わせによる運転特性および処理水質への影響がないことが示された。

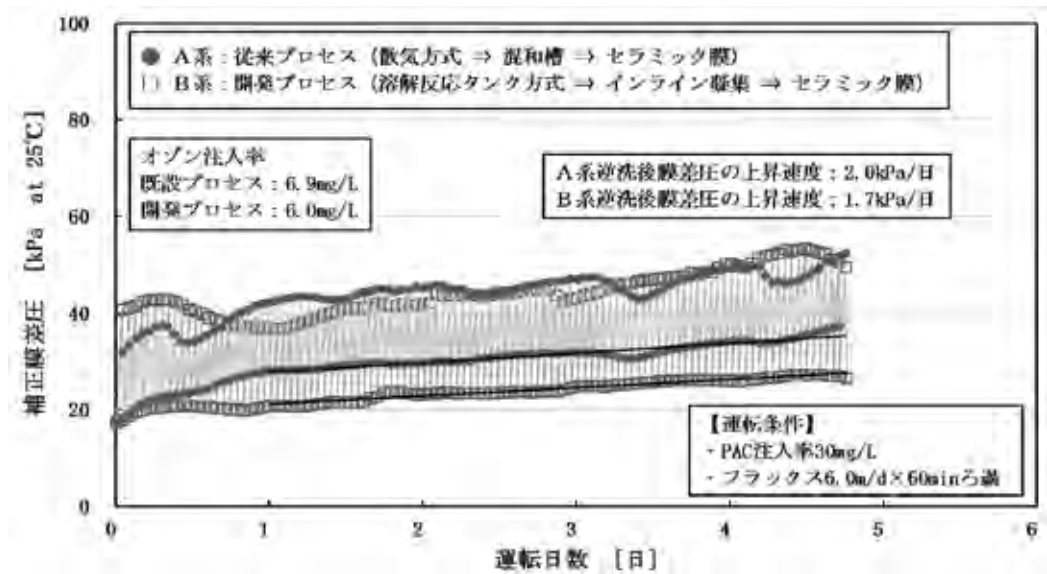


図5-2 セラミック膜ろ過運転特性の比較

表5-2 処理水質の比較

項目	単位	従来プロセス		開発プロセス	
		既設オゾン処理水	膜ろ過水	溶解反応タンク方式 オゾン処理水	膜ろ過水
濁度	度	0.2	<0.1	0.2	<0.1
色度	度	2.5	1.5	1.9	1.1
DOC	mg/L	5.4	3.9	5.7	4.4

6. まとめ

オゾン処理と凝集処理を組み合わせたセラミック膜による再生水造水プロセスについて、短期間の運転結果ではあるが、今回の調査で溶解反応タンク方式によるオゾン処理とインライン凝集を用いることで、オゾン注入量を約2割削減でき、凝集混和槽の攪拌機も不要となるのでエネルギーの削減が期待できる。また、オゾン接触時間と凝集混和時間の短縮により省スペース化が可能であることを確認した。既存設備と開発技術の比較を表6-1に示す。

現在、オゾン処理と凝集処理を組み合わせたセラミック膜による再生水造水技術の実用化に向けて長期間の連続運転安定性の確認と、運転の自動制御のためのパラメーター調査及び、エネルギー削減量や維持管理性についてさらに調査を進めている。また、イニシャル、ランニングコストの評価も実施予定である。

表6-1 既存設備と開発技術の比較

		既存設備	開発技術	備考
オゾン処理	オゾン注入量	8.8mg/L	7.0mg/L	同一期間での値
	排オゾン率	12.5%	4.7%	同一期間での値
	オゾン接触時間	約 10 分	約 30 秒	
	反応槽容量	33m ³	2m ³	
	設置面積	—	既存設備の約 1/2	
凝集混和処理	凝集混和時間	約 10 分	数秒	
	凝集混和槽容量	約 30m ³	不要	
	攪拌機	必要	不要	

コ ラ ム

『雨を活かし循環する社会』の実現に向けて…

2014年5月「雨水の利用の推進に関する法律」が施行された。この法律では「雨水」を「うすい」ではなく、「あまみず」と読む。これまで「雨水」は「うすい」と呼ばれ、速やかに排除するものとして扱われてきた。しかし、この法律によって、「雨水」は「あまみず」と呼び、下水道や河川への集中的な流出を抑えるために、水資源の一つとして有効に利用することとなった。また、この法律とともに施行された「水循環基本法」では、水は国民共有の貴重な財産とし、水循環の健全化を図ることが定められた。

法律の施行、また極端気象、ゲリラ豪雨の影響もあいまって、注目されはじめた「雨水活用（雨水の貯留・利用・浸透・蒸発散）」は目新しく思われがちだが、雨水利用の普及・推進など、雨を活かし循環する社会の実現に向けた活動は古くから続けられてきている。1994年墨田区で開催された「雨水利用東京国際会議」を機に発足した“雨水利用を進める市民の会（現、NPO法人雨水市民の会）”や各地で活動する市民団体をはじめ、日本建築学会の雨水活用関連の小委員会、全国約130の自治体で構成される“雨水利用自治体担当者連絡会”、企業集団としての“公益社団法人雨水貯留浸透技術協会”や“雨水利用事業者の会”など、産官学民、様々な立場で雨水循環型社会を目指した活動が展開されてきた。2008年には、これらの活動を連携させ、さらに拡大していくための、雨水に関する情報プラットフォーム“雨水ネットワーク会議”(<http://www/rain-net.jp>)が設立された。雨水ネットワーク会議は、雨水に関する活動を行う様々な団体や市民に加え、国土交通省、環境省もアドバイザーとして参画し、毎年、全国大会を開催し、最先端の情報の共有、最新事例の紹介や活動の交流等を行っている。

これまでの様々な活動の結果として、法律の施行、雨水の貯留・浸透施設の設置助成金、雨水活用の技術やその基準等といった、雨を活かし循環する社会の実現に向けた社会基盤や制度、技術などの“ハード”は徐々にではあるが整いつつある。これに対し、この“ハード”を運用するための“ソフト”をどう充実させていくかが今後の課題と言える。“ソフト”とは、雨を活かし循環させていく人であり、知識であり、文化である。その中でもポイントは、“人”である。雨を活かすという考え方を広める人（啓蒙者）、雨を活かすことを形にする人（技術者）、実際に雨を活かす人（実践者）をどのように育成し、増やしていくかが重要となる。ここ数年“雨水利用”や“雨水タンク”の認知度は上がり、雨を活かしたいと思う人は少しずつ増えている。しかし、その思いを形にできる技術者は増えているとはいえない。その要因は、『雨を活かす』ことがマーケットとして成熟しておらず、それを生業にしていることが難しいという点にある。今後、“ソフト”の充実のためにも、『雨を活かす』ことが一つの“産業”として成長できるような仕組みづくりも必要といえる。

この様に、『雨を活かし循環する社会』の実現には、社会基盤、制度や技術といった“ハード”の整備とともに、それを運用、維持、成長させていく“ソフト”の充実が不可欠であり、この両者をいかに調和させていくかが大きな課題である。産官学民の壁を越え、様々な立場の人々が連携し、同じ思いで、一歩ずつ進んでいくことも必要である。「雨のみちをデザインする」をテーマとして掲げる弊社も『雨を活かし循環する社会』の実現に向けて、“人”に焦点をあて、“ハード”と“ソフト”の充実と調和を図っていききたい。

株式会社タニタハウジングウェア
代表取締役社長 谷田 泰

報告

第28回下水汚泥の有効利用に関するセミナー パネルディスカッション概要

会場：新潟市



座長

落 修一 (公財) 日本下水道新技術機構 資源循環研究部副部長

茅野 充男 農学博士 東京大学名誉教授、秋田県立大学名誉教授 農業環境健康研究所顧問

島田 正夫 日本下水道事業団 技術戦略部資源エネルギー技術課長代理

パネラー

南山 瑞彦 土木研究所 先端材料資源研究センター(iMaRRC)材料資源研究グループ上席研究員

山本 茂浩 新潟市下水道管理センター 施設管理課課長補佐

太田 太一 国土交通省 水管理・国土保全局下水道部下水道企画課課長補佐

姫野 修司 長岡技術科学大学 環境社会基盤工学専攻 資源エネルギー循環研究室 准教授

※パネラーは発言順。
所属・役職は開催当時のもの。

■ 150 号を振り返って

○座長(落) それでは限られた時間ではございますが、これからパネルディスカッションを始めたいと思います。「再生と利用」が発刊されて間もなく150号を迎えます。「再生と利用」の始まりというのが下水汚泥の有効利用だったと聞いています。私も第1号から愛読させていただいてまして非常に勉強になったのですが、今日のパネラーは「再生と利用」に深く関係され



落座長

た方々です。そういうことで最初に、汚泥の有効利用についてこれまでを振り返っていただいて思いを一言ずついただこうかなと思います。まずは茅野先生にお願いしたいと思います。よろしくお願いします。

○茅野 下水汚泥資源利用協議会の発足は確か昭和52年ですね。その頃、私はまだ下水道関係に知り合いもなかったので、設立の経緯は詳しくは知りませんが、下水道協会と土壌協会が相談して、汚泥の農業利用を主目的として創設されたようです。この協議会の設立を契機として汚泥リサイクル活性化時代に入ったと思



茅野講師

います。私も事業団の森忠洋さん等に誘われて、堆肥づくりを始めました。堆肥づくりは我が国では古くから各農家がやっていたことですが、それまでの堆肥づくりは藁を中心にしたものですから、炭素が多くて窒素が少ない原料を堆肥化する。ところが下水汚泥は逆です。窒素が多くて炭素が少ない。これは何を意味するかということアンモニアが多く発生してしまうのです。アンモニア臭が強いので、その悪臭の問題にどう対処するかから議論が始まりました。量的にも多量ですし、汚泥は常時発生するが堆肥の需要期は春か秋に限られているなどの問題があります。それから皆で汚泥の堆肥化とは何か、堆肥が腐熟化するとはどういうことかというようなことを勉強し、議論しました。

当時、まだ私も若かったから元気もありましたし、下水道界も「終末処理から始発駅へ、即ち、リサイクルの出発点である」ということで、みんな若い人が元気を持っていた時代でした。その後、あまり農業利用は発展しない状態が継続し、私が「再生と利用」の編集委員長を仰せつかった頃からは焼却に傾いていきました。今回のセミナーで、またリン酸を農業利用するという方向に動いているという話を聞いて大変うれしくなりました。

○座長(落) ありがとうございます。非常に、私たち、指導していただいて本当に感謝しているところです。それでは次に島田さん、お願いします。

○島田 「再生と利用」が間もなく 150 号を発刊されるということですが、私が編集委員として携わり始めたのは、号数で言うと 102 号からです。「再生と利用」は、今、茅野先生が言われたように昭和 53 年から発行されたのですが、その内容は下水汚泥の「農業利用の促進」

が目的でした。歴史を今振り返ってみますと、日本のそもそもの下水道が本格的にスタートしたのは昭和 45 年の下水道法改正です。今まで生活環境の改善が中心であったものが、公共水質汚濁の改善という目標が加わりました。当時、大気汚染とともに公共用水域の水質汚濁が全国的に深刻な状況であったことから、それを改善するために早急に下水道整備をしなくてはならないということで昭和 45 年くらいから全国で事業着手されました。昭和 47 年に下水道事業団（当時下水道事業センター）がその目的を達成するために設立されました。下水道整備を進めていく中で、下水道管が繋がると今まで川や海へ垂れ流していた工場排水もすぐ下水に接続しなさいという、水質改善を早急に

達成するためにそういう施策がとられました。当時から除害施設という規定はあったのですが必ずしも十分守られていない事業所も多く、残念ながら、下水汚泥中の重金属濃度が高い処理場も多くありました。当初、われわれ下水道事業団でもいろいろな農業関係団体等と下水汚泥のコンポスト化による肥料利用の研究を共同で進めていたのですが、協力的だった農業団体からも「下水汚泥はちょっと重金属濃度が高すぎる、このまま使うと問題が発生するのではないか」という声が出てきてしまいました。先ほど茅野先生の話にもありましたように、畑地土壌の亜鉛濃度が 120ppm という管理基準ができたのが昭和 59 年です。農業サイドとしては、下水汚泥はなるべく畑に使うなというスタンスに変わってしまったのです。

下水道の整備はそれでもどんどん進めていく中で、汚泥の発生量は増え続けましたが農業サイドは使ってくれない。やむにやまれず減量化しなくてはいけない。廃棄物処分場の容量には制限がありますから、それで焼却炉導入が進められました。焼却灰のままではなかなか有効利用できないということで熔融スラグ化して建設資材利用を促進しようとなり、昭和 60 年くらいから下水道事業団も広域汚泥処理事業に着手しました。関西地区で 4 カ所スタートしたのですが、運転開始したのは平成の初めごろからです。それで焼却灰とか熔融スラグの建設材料というのが下水汚泥有効利用の大きなテーマになり、「再生と利用」の中身もそういう方向に変わってきました。

そうこうしているうちにバブルがはじけて日本経済が急激に落ち込んでいくと、一番困ったのはセメント業界です。セメントの需要量が大幅に減り始めて危機感を覚え、セメントの生産だけでは事業経営が成り立たないことから、各種の産業廃棄物を受け入れ処理するようになったのです。下水汚泥などもセメント原料化名目で、比較的安価な処分費で引取り始めたのが平成 10 年頃からで、その後各地のセメント工場が受入れ始めたことから急激に伸びて、現在でも下水汚泥の有効利用内訳ではセメント原料化が一番多くなっています。

しかし 10 年ほど前から、地球環境問題というのが世界的にクローズアップされるようになってきたことから、下水汚泥もバイオマス資源として積極的に有効利用しなくてはならないのではないかということになりました。エネルギー利用ですね。消化ガス発電や固形燃料化というのがここ 10 年ほど前から中心になって、「再生と利用」でもそのようなテーマが非常に多くなってきました。

それからもう一つ。昭和 40 年代、50 年代の下水汚泥中の重金属濃度は高かったのですが、その後、除害



島田講師

施設管理の徹底化や、事業所の皆さんの意識改革のおかげで汚泥中重金属濃度は随分と低くなり、以前に比べると 5 分の 1 から 10 分の 1 程度に減っています。

また、下水汚泥肥料を試しに試してみたら予想以上に施用効果が高く、こんなにいいものであればもっと使おうではないかという雰囲気がよくここ数年前から増え始めました。国土交通省のビストロ下水道やNHKなどでも下水汚泥の資源の素晴らしさというのが取り上げられるようになって、肥料としての価値が今見直されてきていますので、今後も「再生と利用」のテーマもそういう方向になっていくのではないかと期待しています。

○座長(落) 非常に歴史的な観点からありがとうございました。それでは次に南山さん、お願いします。

○南山 土木研究所の南山です。バイオマス資源の有効活用については、下水道の施設もその選択肢の一つとしていろいろなバイオマスを使っていこうという考え方が浸透してきました。

当然、「再生と利用」がそこを牽引してきたというのがありますし、地方公共団体の皆さんの意識も変わってきて、特に先進的な地方公共団体の方々が積極的に取り組んで牽引していただけていると考えています。方針が大きく間違っていなければ、いろいろな障害や障壁はあるかと思いますが、いつかはそれを突破していい方向に向かえると考えています。今はそのいい方向に向かえるスタート段階に立てていると私は考えています。

○座長(落) どうもありがとうございました。山本さん、お願いします。

○山本 私のほうからは新潟市のことしかお話しできないのですが、協会の方からあらかじめ「再生と利用の 150 号までのあゆみ」(※ 150 号に掲載)という一覧表をいただきました。それをざっと見させていただいたところ、創刊した昭和 53 年当時の記事には、下水道汚泥の緑農地利用が記載してありました。その後、消化ガス発電、焼却灰、溶融スラグの利用などが加わっています。そのあと、リン回収や汚泥燃料化、消化ガスの都市ガス利用、下水熱利用などの記載がありまし

て、最近ではビストロ下水道や他のバイオマスとの混合消化、それから消化ガスを改質して水素製造など、先端技術の紹介や実施事例の紹介などがあって非常に有意義な書籍だと思っています。

新潟市がこれらをすべてやっているわけではありませんが、新潟市は汚泥減量化などのために一部の汚泥を焼却しておりましたが、汚泥有効利用をやろうと最初に取り掛かったのは緑農地利用です。その後に焼却灰の利用についても検討したのですが、残念ながらそのところではできませんでした。汚泥のエネルギー利用の点では、汚泥焼却を 15 年余り稼動した後に廃止し、消化ガス発電に切替えております。下水以外のバイオマスとの混合消化という点で刈り草を利用しようとしています。そういった点では、わりかしそれに沿った取組みをやってきたのかなと思っています。

新潟市は、以前はすべての脱水汚泥を埋立て処分していましたが、平成 16 年頃より 3～4 年くらいで、ゼロから 100%まで有効利用を進めてまいりました。しかし、現在はセメント原料としての利用に偏っているため、今後もいろいろな利用方法を考えながら、より安定した利用に努めてまいりたいと思っています。

○座長(落) ありがとうございます。では次に太田さん、お願いします。

○太田 はい。下水汚泥有効利用を振り返ってということで、法律をひも解いてみるのが良いのではと思い、いろいろ考えてみました。明治 33 年の旧下水道法では生活環境を何とか良くしていこうという時代でした。これが昭和 33 年の新下水道法では、先ほど島田さまか

らもご紹介があったように、公害国会ということで河川や海とかをきれいにしよう。それで平成 8 年に、今度は、光ファイバーの空間利用などがあり、このときに減量化の努力義務化が出てきました。平成 15 年には、浸水対策にも分野が広がって、例えば 17 年には雨水流域下水道が登場してまいります。平成 26 年 7 月に、国土交通省より、処理場のエネルギーの自立化もしくはエネルギー供給拠点化などといった記載のある新下水道ビジョンを打ち出し、そして、平成 27 年 5 月 20 日に下水道法改正を迎えたところです。燃料または肥料としての努力義務化、それから下水熱の規制緩和といった内容が今回の下水道法改正に盛り込まれております。

さまざま歴史を踏まえてきたということが、法律の変遷からも見てとれますし、下水道の可能性が極めて



南山講師



太田講師



山本講師

広がってきたということも見えてくると思います。

さて、マスコミや一般の方々にお話をする機会、つまり下水道をPRする機会もあるのですが、そのときによく申し上げるのが「下水道は宝の山」。このキーワードを私はよく使っています。やはり一般の方々は下水道と言ってもなかなか入ってこない。いろいろな使われ方がありますと言っても入ってこない。そのときに何か一つキーワードがあるとスッと入ってきます。まず「下水道は宝の山なんですよ。エネルギーもとれますよ。肥料もできますよ。それからまちの中の水資源もありますよ。」そういったことを伝えて初めて、一般の方々、それからマスコミの方々も理解していただけるという印象を受けます。

最近では、ニュースやクローズアップ現代、サイエンスZEROとか、普通、下水道が出そうにない番組などで、エネルギーの利用、水素の利用、ガス発電といったことをニュースにしています。下水道のプレゼンスが今、益々向上している、まさに真っ最中であるように感じています。これは、まさに地方公共団体の皆さま、また民間の方々の技術開発をはじめ、今までの努力がやっと今、花を開きかけているということだと思うのです。これを今、止めるという手はないわけでありまして、この追い風をさらに使って進めていくべきと考えているわけです。

下水道界の強みは、下水道一家と呼ばれるように、やはり団結力、それから情報の共有力、ここが強みであると思っています。

一方、下水道のエネルギー化率は15%、農地も11%ということで、やはりまだまだです。逆に言えば、75%の可能性がまだ残っているといえますし、これからは勝負と考えています。今まで先進的な事例をつくっていただいた方、これはまさに財産だと思っていますので、そういった生の声を集約できればと。

新しい取組みというのは難しいものですが、難しいことにチャレンジして、それを乗り越え、またときには失敗もあるかと思っています。そういった体験等こそが財産であり、「再生と利用」には体験談等も載っています。こういった皆さんの声を共有するためにも、「再生と利用」を読んでいただくとことが、極めて重要であると思っています。それを読んだ上で、例えば自らの自治体で使ってみようという検討をしていただきたいと思います。これらを通して、下水道界がさらに発展、飛躍していくと思います。下水道ビジョンで言えば進化という言葉ですが、そういったものが進んでいくのではないかと思います。

○座長(落) どうもありがとうございます。姫野先生、お願いします。

○姫野 私は、一番まだ歴史が浅いのかもしれません。

振り返ってみますと、私が委員を務めさせていただいて、まだ何年でしょうか。150号ある中の120号代の半ばくらいから編集委員をさせていただいていると記憶していますので、ほぼ最後の10～20%くらいですね。私が編集委員になった頃から、エネルギー化どうか、省エネとか、そういうところにグッと下水道の新しい役割が加わってきたと思っています。

一方で今、大学のほうでは茅野先生をはじめ農業利用をしていただいて、今度もう1回、もう2～3回目かもしれないのですが、また新しい切り口で植物への供給、あるいは藻類からの窒素や炭素の固定というものにチャレンジしていきたいと思っています。

一方、この「再生と利用」というのは非常に読むところが多くて、皆さまにも古いものからぜひ見直していただきたいと思っています。論文は、確かに大学の先生はいっぱい書くのですが、今見直しても、この時代にもうこういう特集記事があったのかと。例えば、汚泥の固形燃料などはもう10年以上前、15年くらい前のものに特集されています。だから、もう一度見直すと、当時のまだ技術の始まりみたいなものがわかります。今の情報というのはたぶん完成に近いうところで、何となくはわかるのだけれども、本当に理解しようと思うと最初の開発当初みたいなところを理解するといいのかなと思っています。今後またバグナンバーを配布いただけるということも聞いていますので、そのときには私は読み返したいなと思っています。私としてはエネルギー利用から研究を15年間くらいさせていただいているのですが、今後はもう一度、エネルギーだけではなくて汚泥が持っている資源、あるいはそれを変換したあとも含めてできるだけ使い回すと、そういう技術開発をしていきたいと思っています。



姫野講師

■ これからの展望

○座長(落) ありがとうございます。実は歴史のある方から歳の順にお話して頂きました。皆さんに今の共通するところというのが、やはり下水汚泥が資源であるということ。そして、それをうまく使うことに努力してきたということで、今、相当にいい機会が来ているのではないかというお話だったと思います。非常にいろいろな苦勞をされてきています。そこで、これからの展望、あるいは先ほどの講演で言い残したこと。または自分にとってもここで言うておけば

やらざるを得なくなるというようなものがあるかと思っています。今度は逆に若い順番で姫野先生から、よろしくお願いします。

○**姫野** では二つだけ。一つは、私の研究室の前身は桃井清至先生がいた新潟の長岡技術科学大学の研究室です。本棚を整理していましたが、たぶん落さんも在籍されていたと思うのですが、旧建設省の土木研究所の毎年ではないのかもしれないのですが、結構まとった研究報告書が本棚から出てきました。それはまだまだ手書きをレターリングして印刷をしているような時代のものですね。タイトルくらいはワープロ書きになっていますけれども中身はほぼ丁寧な手書きみたいなものです。びっくりしてしまったのが、私が今やっていることはほとんど記載されていました。汚泥の可溶化、混合消化、エネルギー化、あと脱水、さまざまところが、今思うといくらお金をかけたのだろうというくらい。例えば汚泥の種類で言うと数十種類。それも、初沈と余剰を分けて、それぞれ発酵試験をしたり可溶化したり。それをエネルギー化するにはどうすればいいのかと。固形燃料化は炭化と書いてあります。これで唖然とした記憶があります。ですので、たぶんもう 20 年、30 年くらい前に要素技術というのはほぼ何となく先人の研究者は気づいていて、ただ、いろいろな時代背景、価値観、バランス、それはもちろん当時の経済性も含めて取捨選択された中で今のかたちができていると。私はそれをもう一度やろうとしているのかなと思っています。ただ同じ所を周回するわけにはいけないので、やはりスパイラルで上げていかないとけないと思っています。

もう一つは、最近ですけれども、土木研究所さん、国土交通省さんからもご指導いただきながら、下水処理場の中での植物生産に取り組んでいきたいと思っています。下水道の価値というのものが、汚泥も大事なのですが水も価値があるのではないかと。何かそういう、よく過大な設備だ、ポンプだとか言われているのですが、そういうポンプのようなものを本当に使えば

もっといろいろな農業分野に貢献ができるのではないかと。何かそういうところを、落さんから「言ったからにはやるのだろう」ということで、まだする前ですけれども、またいつか近い機会に紹介できればと思っています。

○**座長（落）** ありがとうございます。すごく期待して待っています。では次に太田さん、お願いします。

○**太田** 展望についてということですが、国土交通省下水道部の展開についてまとめたものが「新下水道ビジョン」です。エネルギーの自立化や供給拠点化とか、そういったところを踏まえつつ、下水道法改正につながりました。

もう一つ、社会資本整備重点計画にもエネルギー化率というものが記載されています。今 15%ということで、それを 30% まで引き上げようということで、われわれとしても積極的にこの下水汚泥の有効利用というものを進めていくつもりです。

さて、国の予算について少しお話しします。これは下水道に限らず全体的に厳しくなっているという点は、皆さんご存じの通りだと思います。そうすると、今までの施設を賢く使っていく必要があるのではないかと議論が出てくるわけです。国土交通省も、既存ストックの有効利用という概念を一つ掲げているところです。では、既存ストックの有効利用とは何かというと、下水汚泥の有効利用などが挙げられます。例えば発電施設を付けるだけとか、そういった既存ストック（下水道）を有効活用することによってエネルギーが生れてくる。そういった点をうまく説明材料として使って、予算要求にも活用しています。

もちろん、予算要求するにあたっては、様々な事例を紹介することにもなりますが、皆さんの頑張りがないと、なかなか難しいところがありますので、引き続き協力をお願いしたいと思います。

また予算要求のみならず、今後どうやって地方公共団体の皆さまの後押しをしていくのかについてお話しします。一つは予算制度の中でも B - DASH のように、新しい技術を実証して皆さまに技術的資料等をお示しするというものがあろうかと思います。平成 28 年度は今現在、要求中ですので認められるかどうかはわかりませんが、「中小規模の処理場を対象とした下水汚泥有効利用プロセスの実証」をテーマの一つとして、財政当局と調整をしているというところです。

大規模処理場での有効利用についてですが、これはだいたい日 5 万トン以上の所を大規模だと仮定して、箇所数として約 21% 程度有効利用をしている状況ですが、それ以下、1 万から 5 万トン／日くらいだと全体の 8% 程度、1 万トン以下だと、まさに 1% 程度という状況です。小規模になればなるほど有効利用が進



んでいない傾向があります。もちろん、コストの壁が出てくるわけで、そうしますと、中小規模向けを対象とした汚泥の有効利用のプロセスを、できる限り安くできる様々な方法、技術が今後必要になってくるかと思っています。

もう一つのテーマは「ダウンサイジングが可能な水処理技術」です。例えば、水処理をうまく実施して、汚泥量が減ることで汚泥処理施設が小さくて済む、安くて済むという低コスト技術など、これはあくまでも一例ですが、こうしたテーマで財務当局と調整をしているところです。

最近の動き、これは国土交通省の国総研なのですが、本省が策定しました「新下水道ビジョン」について、このビジョンを達成するために、どういう技術が今後必要になってくるかといった点をまとめた「下水道技術ビジョン」を現在パブコメ中です。これは国総研のホームページを見ていただければと思います。そういった技術の方向性も、今、皆さまにお示しをしているということです。

水素の展開ということを少し紹介させていただきたいと思います。水素というのは、まず貯めることが出来るという特質がございます。また、様々な物から作りやすい特徴がある、エネルギーセキュリティ上の問題など、様々な特徴や背景もありまして、国全体で進めていこうという流れが出てきています。その中で、下水道から水素がとれるということは一つ注目を浴びているところです。

福岡市で実証を申し上げましたが、水素をつくるにしても当然コストがかかります。では、そのコストの問題をどうしていくのか。例えば、今、燃料電池自動車の普及がまだまだ少ない状況ですが、その中でいきなり大規模な水素製造装置をつくっても、維持管理に困ることが想定されます。では発電とセットにしたかどうかとか、そういったさまざまな実行可能性を検討していくというのが、今、われわれがやっている水素委員会の内容になります。三つのフィールドをターゲットに検討しているという状況です。

その他、さまざまな拡充要求ということで、例えば民活イノベーション事業の拡充がございます。民活イノベーション事業自体は、もともと制度があるのですが、下水道熱を使うときに活用出来るよう、補助制度の拡充要求をしています。つまりデザインビルドで下水管を改築する際の補助制度とか、そういったところも要求させていただいているところです。こういったアイデアというのは、公共団体の皆さんの様々なアイデアや頑張りを集約しながら我々も考えていくところが大きいです。皆さんのアイデアや頑張りをわれわれにもお伝えいただければと思います。

最後になりましたけれども、先ほど「下水道は宝の山」ということでお話しました。今般、品川シーズンテラス、これは東京の品川駅近くのシーズンテラスというオフィスビルですが、下水処理場の上にビルを建てて、そこで下水熱や再生水を使う。そういう取組みが27年の5月にオープンしたわけなのですが、そこに皇太子と雅子さまがいらっしゃって下水道を見ていただいたという出来事もありました。そのときにいただいたお言葉が、「下水道というのはいろいろな使われ方があるのですね」でして、やっと皇太子にも下水道の可能性というものを示すことができたかなと思います。さらにこういった取組みをとおして、下水道の知名度を高めていければと思っていますので、皆さまの協力をぜひともお願いしたいと思っています。

○座長（落） どうもありがとうございました。それでは、南山さん、お願いします。

○南山 将来展望ということですが、下水道施設を核としたバイオマスの有効活用といった考え方の浸透には、意外と時間がかかるものだと思います。将来をしっかりと見定めて続けていかなければいけないというのが私の今言える正直なところだと思っています。

先ほどある意味、いいスタート段階に来ているのではないかと申し上げたわけですが、これからはどういくべきかと問われれば、これはすべての地方公共団体の皆さんが、自分たちの場合はどうなのかと具体的に考えていただくべきなのだろうと思っています。いろいろな制約がある中でもできることは必ずあるはずです。それをどう進めていくか、皆さんだけで解決できないというのは当然たくさんあるわけです。技術的な面につきましては、一緒にここにいる大学の先生の皆さん、そして下水道新技術機構、日本下水道事業団、そしてわれわれ土木研究所、皆そのようなニーズにどう対処していくかということと一緒に考えていきたいというふうに考えていると思います。われわれをぜひご利用いただきまして、解決に向かって少しでも進めていければと考えています。

○座長（落） どうもありがとうございました。心強い意見をいただきました。それでは山本さんお願いします。

○山本 私のほうからは、自治体の職員なのであまり自分の思いばかりお話しするわけにいけないので、ある程度抑えながらも、しかし思い切ってお話させていただきたいと思っています。施設は船見処理場と中部処理場と処理場が二つ大きなところがあるのですが、船見処理場については現在のところ水処理施設がかなり老朽化してしまっていて、改築もしくは再構築が控えているので、なかなか不透明なところがありますが、汚泥処理施設の改築に合わせて消化槽は廃止というこ

とで取り壊ししてあるのですけれども、今後、汚泥の有効利用ということでエネルギー利用の観点から消化槽の再建も含めた将来構想を再検討する必要があるのではないかと思います。

一方、中部処理場につきましては消化槽工程の高効率化が一応 27 年度で終了します。今後、古くなってきた脱水機の更新にあわせた低含水率で省エネ、省スペースの脱水機の導入検討を考えていかななくてはいけないのかなと思っています。

脱水汚泥の有効利用につきましては、今後も民間事業者による有効活用を進めていきたいと思っています。汚泥を直接セメント原料化する事業者以外には焼却後に有効利用する事業者、それと炭化して利用する事業者などがありますので、最終利用形態をセメント原料以外にならないかということで模索していきたいと思っています。もちろんコンポスト化もできることなら進めてまいりたいと思っています。

消化ガスの利用につきましては消化槽を加温できる消化ガス発電を基本的に進めてまいりたいと思っていますが、場内の空調がガスヒートポンプを使っていますので、その可能性もあるのではないかと個人的には思っています。

新たに始めた刈り草の混合消化については 28 年度に 1 日 2 トンの施設が稼働する予定になっていますので、当面は安定搬入と安定処理ということで進めてまいりたいと思っています。その後、受入れ増量目途がつき次第、増設したいと思っています。最終的に 1 日 10 トンまで増やすことができますと、現在ある消化ガス発電がフル稼働できる見込みです。

○座長(落) ありがとうございます。草の投入は期待を持って見させていただこうと思っていますので頑張ってください。それでは島田さん、将来展望ということでお願いします。

○島田 下水汚泥の有効利用の将来展望と言っても画一的にこれだというのはなかなか難しく、それぞれの処理場の規模とか立地条件等によっていろいろな方法が当然あると思います。最近特に私のところに相談が多いのは、比較的規模の小さい自治体から下水汚泥を何とかエネルギー利用等有効利用したいけれどもどうしたら良いだろうかというものです。

固形燃料化にしましても需要先がなかったり、規模の小さいところで固形燃料をつくっても大手の電力会社等では相手にしてくれないのが実態です。中小規模処理場における汚泥の有効利用はメタン発酵+緑農地利用が基本になると思います。しかしメタン発酵というのはスケールメリットの働くもので、ある程度の規模が大きいほど有利となります。今日は石川県さんもお見えですけれども、石川県では県が中心となって県

下の各自治体を対象に、昔の郡単位でしょうかね、人口ですと 5 万～10 万単位ぐらいの地域のブロックごとに汚泥を集約化してメタン発酵、下水汚泥だけだと量的に少ないですから、その地域で発生する未利用バイオマスなどを積極的に集約して、エネルギー化して有効利用しようというマニュアルを作って、ホームページでも公表しています。もし未だの方はぜひ見ていただきたいと思います。非常に素晴らしい取組みがされています。

この集約処理を考えたときに一番留意しないといけないのは、下水処理場にいろいろなバイオマスを集めてメタン発酵をしても 100%メタンガスに分解ガス化するわけではなくて、半分、ものによってはそれ以下しか分解ガス化しない。最終的には消化残渣というものが多く残りますので、その出口をしっかりと決めることが重要であると思います。特にバイオマスというのは地域循環資源の代表的なものだと思います。集約化して集めた下水汚泥等バイオマスの消化残渣はものすごくタンパク質が豊富で、栄養価の高い肥料原料資源ですので、一番は地域の農業利用、肥料として使っていただくのが非常に重要なのではないかと思います。

そういう意味では下水汚泥を中心とするバイオマスの肥料を農業サイドで「さあ、使ってくれ」と言っても農業サイドでも過去の経緯から抵抗感がありますから、できたら野菜くずとか畜産廃棄物など農業系のバイオマスと一緒に混合メタン発酵やコンポスト化してその地域で循環するというシステムをつくれば、農業サイドも受入れやすく循環型社会の構築としてより良いのではないかと思います。大都市ではなかなか難しいかもしれませんが、これからの地方都市などで汚泥の有効利用、エネルギー利用を進めていく上で、今、ご紹介しました石川県などの取組みなどは非常に参考になるのではないかと思います。

○座長(落) ありがとうございます。茅野先生にお願いしたいのですけれども、先生独自のことや、会場の人たちやパネラーへの期待でも結構です。お願いします。

○茅野 人生の終末期を迎えている私が将来展望なんて語る、ちょっと変な感じですが、人生を振り返ったとき私はまずいことをしたなんて反省はしません。私の人生は自分の能力のわりにはうまく流れに乗ってきたなと思っています。その中で特によかったなと思うことの一つは、下水道に関係したこと、下水汚泥の“再生と利用”に関係してきたことです。これは私の研究生活を非常に楽しいものにしていただきました。皆さんもそういう分野におられるわけですから、これからもますます発展していただきたい。

最近、汚泥、下水道関係がテレビに取り上げられていて、私は孫と一緒にいるものですから孫に「祖父ちゃんはこのを書いたのだ」と、昔、下水道協会さんから頼まれて書いた本など示すことができますし、下水道関係で楽しい思い出を持っています。そういう思いを持ったまま私がこの人生を終えられるように、ますます皆さんに頑張ってもらいたいと思いますし、本日、お話を伺ってCO₂の問題、リン酸の利用の問題等は私は改めて希望を持ちました。頑張ってもらいたいと思います。本当に今日はどうも呼んでいただきましてありがとうございました。

○座長(落) こちらこそ本当にすごく貴重なデータも示していただきましてありがとうございます。実は、私は20年ぐらい前に茅野先生と仕事をする機会があって、そのときに牛糞と下水汚泥を混ぜたコンポストというのをやりました。それは非常に良くて、普通は混ぜると平均した肥料になるのです。ところがそれ以上のものができるわけです。そういった現象を見て私は日本語を当てはめるのを探したのです。徹夜して。これは融合しかないと、融合コンポストって名前を付けたのです。

最初は農業サイドからものすごく批判されました。そこまでして、下水汚泥を農地に入れたいのかと言われたのですけれども、今は逆です。下水道界で融合コンポストを知っている人はそんなにいないと思うのですけれども農業サイドでは知っています。そういうように良いものは良い。本当に良いものができたのですね。そういう意味で先ほど先生が示されたデータなどがそれを反映しているということです。だから皆さんも、決して悲観的にならないで、先ほどパネラーの人たちが言っているように、前を向いて進んでいかれば良いのではないかというふうに思います。

■ 下水汚泥の肥料化について

○座長(落) ちょっと昔の話も入れましたけれども、こで会場の方から質問がきていますので、それについてパネラーの方から回答をいただければと思います。

下水汚泥の肥料化についての見解ということで、一つは下水道法改正により明文化されましたが、行政はどこまでできるか、どこまでやるべきなのかというのを聞かれています。それから官民の役割分担とか、需要供給バランスとか販路の確保、既存肥料との競合、将来的に需要はあるかどうか、民間委託による肥料化のリスク管理とかですね。太田さん、よろしくお願いします。

○太田 行政がどこまでできるかというところで、下水道法改正上は肥料または燃料ということで、

肥料でも良いし燃料でも良いということで、絶対肥料だけをしてくださいというわけではないのですが、肥料化又は燃料化について積極的に進めてほしい、少なくとも検討してほしいという思いがあります。行政がどこまでできるのかというこの意味合いはなかなか難しいところがありますが、これはいろいろなやり方があっていいのかなと思っています。

例えば下水処理場内にコンポスト施設をつくるというのもあるでしょうし、もしくは産業廃棄物処理業者がコンポスト施設を持っていて、そこに持って行くという方法もある。地域の事情に応じた方法で肥料利用等を進めて頂いて良いと思っています。ですので、官と民の境はどこかというものは、やはり地方の独自性というものが出てくるものと思っています。

一方でさまざまな事業形態があるというのも皆さんには知っておいていただきたいのです。例えば民設民営の方式とか、最近はPFIという方法も出てきています。公設民営という方法とか、またそういったさまざまな手法も手続きも、ガイドライン等でお示しをしている項目もありますので、御活用いただければと思っています。

それからリスク管理というところ。これはなかなか難しいところで、農水省の管轄である部分も大きいと思います。この下水道法改正の施行通知を出すに際し、いろいろ農水省ともお話をさせていただいた際、「汚泥肥料における重金属管理の手引きというものを出しているのでぜひそれを守ってほしい」と農水省はおっしゃっていました。施行通知の中にもそれは記載しておりますので、ご留意頂く旨、下水道管理者の皆さまには周知させていただいているところです。

また、農水省のほうからも肥料の生産者に対して同じ意味のような通知がなされているということもあります。また、どこの業者が安全なのかとかいうのはなかなか難しいかもしれませんが、農水省の担当者がおっしゃるには、「極力、市の農林部局にも相談してほしい。地方公共団体の農林部局に問い合わせてもらえればいろいろ協力してくれると思いますよ。」ということでした。地方公共団体の皆様におかれましても、農林部局と連携することが重要であると思っています。

販路拡大にしても同じです。これは農林部局が一番データを持っているわけですから、下水道だけで何とか解決しようというよりは、農林部局とも連携をして、そういった販路拡大についても検討いただくというのが重要なのかなと思います。

○座長(落) 太田さんにあと一つです。全国に約300あるメタン発酵施設は年内にほぼすべてFIT発電になると思うが、その後に水素利用導入になっても

両立しないと思う。FIT 制度よりももっと有利な国策を用意してまで水素社会を目指すのですか、というご質問です。

○太田 まず、300 のメタン発酵施設がすべて FIT になるかどうかはなかなか難しいところではあるかと思いますが、その FIT を使って増えてくるというのは確かだと思います。大事なのは 20 年後。FIT が、20 年が調達期間なので、それが終わった後どうするのかという話は間違いなく出てきます。これは FIT を使った人が考えるべき大きな宿題になってくるだろうと思われます。つまり FIT があればそれですべてが解決というわけではありません。水素社会というのは FIT とは別の切り口だというふうに私は考えています。

発電所などは、海外から石炭、石油を買ってきて発電しています。そうすると日本の自らの資源ではなくて海外に頼った電力供給となっており、それはエネルギーセキュリティ上課題があります。となると、我が国独自のエネルギーを使った発電というものをどんどん増やしていく必要があると。そうすればエネルギーセキュリティ上の問題に対して、解決の糸口が見える。こういった再生可能エネルギーの必要性について、エネルギー基本計画のときとかに議論されたのだろうと思います。だからこそ再生可能エネルギーを積極的に進めていきましょうという話になってきている。その中で水素というものの位置づけとしては、いろいろなものから作りやすいという点と保管しやすい点などが有益とされています。電気は、確かに蓄電池はありますが、お金が高いうえになかなか保存がきかない、蓄電池を置いておくと少しずつ電源が下がっていくという欠点もあります。水素はそういった点に優れているということで、水素社会に向けた取り組みが増えてきているということです。

ですので、水素社会を念頭に踏まえた上で下水道が今後どのように活用していけるのかということを議論していくことが、今現在重要なことかなと思います。

燃料化、肥料化とありますが、どちらか一方だけを進めるといったものではでないと私は思っています。地方公共団体によってさまざまな事情があります。肥料でも燃料でもいい、水素でもいい、そういった先進的な事例を集めて皆さまの選択肢を広げることが重要と思っています。そうすることによってエネルギー化、もしくは肥料化が進んでいくのだろうと思います。FIT 制度があるから水素は要らないなどといった限定的な考え方にはならない方が良いと思っています。最後はちょっと個人的な感想になってしまいましたが、水素社会に向けてわれわれも可能性を今探っている段階だというふうにご理解いただければと思いま

す。

○座長（落） ありがとうございます。科学者というサイエンスをやっている人は必ず一回は水素社会というのを夢見るのですね。どうやって水素をつくるかというのが非常に大きなところで、私個人で言いますと、日本を水素社会にするためには原子力しかないと思っていた時代がありました。しかし、この前の震災であきらめざるを得なくなったのですけれども、しかし水素というのは非常に魅力ある資源だというふうには思っています。

■ バイオガス発電について

○座長（落） 山本さま、次、バイオガス発電におけるガス発生量を増加するために苜蓿などを加えていますが、脱水汚泥の増加、メタンガス量減少によりコストアップとなっていると考えますがいかがでしょうかという質問です。メタンガス量の減少にはなっていないのですね。

○山本 はい。実際に実験では若干、汚泥量が増えるという結果になっていますけれども、これは他の文献等を見ますと、逆に減っているというのも中にはありまして、これは実際にやってみないとなかなかわからないところがあります。今回行うのが 1 日 2 トン程度の小規模なものでして、これは結果として汚泥かどうかというところもちょっとわからないところではありますけれども、間違いなく増えるというものではなくて、今後この点に関しては注視していく必要があるかと思っています。

○座長（落） ありがとうございます。それでは島田さん、日本においてバイオガスプラントが普及していないのはなぜですか。

○島田 バイオガスプラントが欧米に較べて普及していない理由、これは私の講演の中でも少しお話したのですが、昭和 50 年代から 60 年代のバブル期、大量生産・大量消費・大量廃棄という社会経済構造から廃棄物埋め立て処分場逼迫が重要な社会問題となっていました。その結果、ゴミもそうですが下水汚泥は有効利用というより減量化優先という施策がとられてきたのが大きく関係していると思います。焼却するのだったら別にわざわざメタン発酵しなくても直接焼却してしまったほうが簡単ではないかということで、政令都市や流域などの大規模処理場を中心に、直接焼却が行われ現状に至っています。欧米では、0.5 ～ 1 万 m³/日規模以上の処理場では下水汚泥はメタン発酵を行っているのが一般的です。メタン発酵によるエネルギー回収と安定化と緑農地利用が循環型社会の理想と考えられてきましたが、残念ながら日本では下水汚泥は廃棄

物という意識が強く、バイオガスプラントが普及しなかったというのはそういう理由かなと思います。

ただ地球環境問題がクローズアップされている中で、例えば埼玉県さんでは9か所の流域下水処理場汚泥は、今まで焼却処理をやっていましたが、最近の一部の処理場では既に固形燃料化が導入されたり、複数の処理場でバイオガス化の検討を始めています。どういう方式のメタン発酵が良いとか、将来的な水素社会も念頭に置いて進めようかというように、今までメタン発酵をやっていなかったところでもメタン発酵導入を検討し始めたところが増えていきますし、先ほど石川県さんの事例も話しましたが、規模の小さいところでもメタン発酵を導入してエネルギー回収というものを検討してきていますので、これからバイオガス化は相当増えていくのではないかなと私個人的にも期待しています。

○座長（落） 南山さん、何か他に、なぜ普及していなかったか。

○南山 メタン発酵を行うには消化タンクが必要で、消化タンクをつくると維持管理が必要になります。良いとわかっていてもそれを計画し、建設し、維持管理するということに努力が必要になるわけです。その努力をするほどのメリットを感じたかどうかということ、また、水域の窒素・リンの除去ということを考えますと、消化タンクの存在というのはリンの放出などで、必ずしもそれが富栄養化対策としてはプラスに働かないのではないかなということもあるわけです。そういう面も含めて総合的に考えてこれまではあまり普及してこなかったのではないかなということだと思います。ただ総合的な視点というのは時代が変わると変わってくると思います。

講義の中にもありました通り、例えばリン資源は重要で、世界情勢が変わると下水道の持っているリン資源というのはとても貴重なものになるかもしれません。そういう例も含めて考えれば、総合的な視点というのは時代によって、また個々の地方公共団体の皆さんそれぞれの状況によって全く変わってくると思います。今後、総合的な視点、時代がどう変わっていくかということを皆さんも一緒に考えていただいて、その評価をもっと長い目で見ていくようにしていけば、それが答えにつながっていくのだらうと思います。

■ 放射能の影響

○座長（落） ありがとうございます。再び太田さん、東日本大震災に伴う放射能の影響について、建設資材利用に際し支障にはなっていないのでしょうかという質問です。

○太田 東日本大震災後、放射性物質を含む下水汚泥が各下水処理場に保管されたというのは皆さんご存知の通りだと思います。最初なかなか、セメント会社をはじめ、産業廃棄物処理会社も受け入れてくれないということで、環境省は、「ベクレル数、8,000 ベクレル/kg以下であれば管理型処分場に入れます」「例えばセメントの製品になった段階で100 ベクレル/kg、を守る必要がある。」ということで、環境省のHPなどでPRをしていただいているというところです。受け入れの時のベクレル数では無く、製品の時点で100 ベクレル/kgだということです。詳しくは環境省HPを見て頂ければとおもいますが、そういった点を踏まえつつ、地元の下水道管理者と産廃処理業者とが協議して、今現在受け入れてもらっているところは受け入れてもらっているという、そういった流れになっていて、現在、徐々に処理が進んでいるというのが実態であると考えています。

もちろん震災が起きた当時は極めて高い濃度が出たところもありまして、福島県の堀河町終末処理場などがその一つです。合流式だと濃度が高くなる傾向があります。堀河町終末処理場では環境省の実証事業で乾燥機を作り、さまざまな企業がJVとして参加し、実証事業が行われました。続いて、県中浄化センターというところに、焼却施設が建設され、実証されました。減容化した物の保管はまだ続きますが、かなり減容化されたというのが今の状況です。

○座長（落） ありがとうございます。あと、リン回収技術、リンの有効利用方法に関して詳しく知りたいということがあるのですけれども、これは国土交通省のホームページでリンの手引きが出ていますので、そちらをご覧ください。

■ 新しいエネルギー利用のあり方

○座長（落） もう少し時間をいただいて、会場から聞いてみたいと思います。



○**質問者 1** 太田さんに質問です。さきほど水素の委員会の話がありましたが、詳しく教えてください。

○**太田** 10 月 22 日に第一回の委員会を開催したところでして、九州大学の田島先生、日本大学の森田先生を筆頭に、例えば弘前市、横浜市、埼玉県、そういった地方公共団体の方々も交えながら、処理場の中で、仮に福岡市の技術を使った場合はどうか、また下水汚泥から直接水素を取り出すような技術を使った場合はどうか、発電をしてちょっと残った水素を水素利用する場合はどうかなど、すべてを水素とするのではなくて、発電と組み合わせたりすることでうまく採算性が取れないか、そういった実行可能性を検討していき、その材料を皆で出しあい、今後、計算していくこととなります。第二回では実行可能性調査の中間報告となります。それが 12 月の下旬から 1 月上旬ぐらいにできればと思っています。

○**座長（落）** ありがとうございます。他に。

○**質問者 2** 質問というか、将来に向けたお願いというか、太田さまに関するものですが、F I T 発電に関してですが、民設民営方式が可能になるということが下水道処理場での F I T 発電の運用に関する通知が出たあとに急激に普及が伸びてきているという状況です。ただ、皆さんのお話にもありますように、大きな処理場のほうからよりコストメリットの大きいところから民間さんが着手しているという中で、将来的にはもっとどんどん普及していくと思うのですが、将来、中小規模の処理場、まだこれからの掘り起しというところで、そういったところに水素利用を、先進的な技術を導入していくためにはやはり F I T の前例に倣って民設民営で積極的な投資が水素利用の施設、下水処理場が水素ステーションになるような、そういった後押しを検討していただけると地方の自治体のほうでもいろいろ積極的に動けるかと思いたいで、是非お願いしたいと思います。

○**座長（落）** 太田さま、よろしくお願いいたします。お返事はいいです。ぜひ努力をしていただければ。他に質問、ご意見ありませんか。

○**質問者 3** 刈り草のバイオマス利用についてお聞きしたいのですが、うちの県のとある閉鎖性水域のほうで、葦（ヨシまたはアシ）という水辺に生えている草がかなり大量に繁茂してしまっていて、それを刈り取って外部に搬出すればかなり栄養塩が採れるということで、そういった検討を県の中でも話が出ているのですが、どうしても刈り取り自体が大変で、非常に費用もコストもかかるということで、なかなか進まないといった状況です。こういったバイオガスの利用というのが、もしかしたら一つの方法として上ってくるのではないかなと考えているところなのですが、かなり水分の多い草です。こういったものも使うことができるのかなと、お聞きしたいなと思います。

○**座長（落）** たぶん潰すとか何らかの処理が必要と思われるのですが、姫野先生如何ですか。

○**姫野** 少しだけやりました。中部処理場さんの中に、最初、試験で刈り草を国土交通省と折衝した上で、予備実験としては処理場に非常に生えているのでやろうと言って葦をやったのですが、葦は若干前処理がいりますね。生草のように碎いてパッと放り込めばいいというよりは、少しやはり潰すのです。ただ、そういう状態まで持って行くと発酵はうまくいくかもしれませんが、少し一工夫いるかもしれません。

○**座長（落）** それでは時間もまいりましたので、ここで締めさせていただきます。パネラーの皆様、どうもありがとうございました。

報 告

「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の導入ガイドライン(案)」の概要について

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
主任研究官 田 陽 淳

キーワード：機内二液調質型脱水機、低空気比燃焼設備、廃熱発電、連携最適化

1. はじめに

新技術の研究開発及び実用化を加速することにより、下水道事業におけるコスト縮減や再生可能エネルギー創出等を実現するため、国土技術政策総合研究所（以下「国総研」という。）下水道研究部では、国土交通省下水道部と連携して「下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト）」を平成 23 年度より実施している。

B-DASH プロジェクトは、国総研からの委託研究により、受託者が実規模プラントを設置し、革新的技術導入によるコスト縮減・温室効果ガス（以下「GHG」という。）排出量削減・省エネルギー効果等を実証し、国総研がその成果を踏まえて、下水道事業者による導入検討のためのガイドラインを策定し、もって普及を図るものである。

平成 25 年度に、下水汚泥バイオマス発電システム技術（低含水率化技術、エネルギー回収技術、エネルギー変換技術を組み合わせたシステム技術）について公募を行い、2 件のシステム技術を採用し、平成 26 年度にかけて行われた実証の成果を踏まえ、平成 27 年 9 月に技術導入ガイドラインをそれぞれ策定した。本稿では、そのうちの 1 件である「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技術実証研究」（実施者：メタウォーター・池田市共同研

究体 実証場所：池田市下水処理場）の成果に基づく「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の導入ガイドライン（案）」の内容について紹介する。

2. ガイドラインの概要

2.1 ガイドライン策定の方法

ガイドラインは実証技術毎に策定するものとし、実証研究の成果を踏まえるとともに、有識者及び実務に精通した地方公共団体の下水道事業者の意見を聴取しながらとりまとめ、有識者による評価を受けた。

2.2 ガイドラインの特徴

下水道事業者が実証技術の特徴や性能を把握し、下水処理場の状況に応じた導入可能性を容易に検討することが可能となり、かつ説得力の高いガイドラインとなるように、ガイドラインの策定にあたっては、特に以下の点に留意した。

- ①実証技術導入の前提条件や特に効果が見込まれる条件を具体的に記載。
- ②複数技術により構成されるシステム技術であり、予算等の関係上、一括導入が困難な場合も想定されることから、導入効果の高い段階的導入シナリオも併せて提示。
- ③エネルギー消費量をはじめとする性能指標項目を

設定し、実証成果を踏まえた性能指標値を処理規模別に提示。

- ④実証技術導入によるコスト、GHG 排出量、エネルギー消費量の簡易算定式を提示し、下水道事業者自らが導入効果を概算できるように配慮。
- ⑤段階的な導入シナリオも含め、従来技術との比較による実証技術の導入効果の試算例を提示。
- ⑥ガイドラインの技術的根拠となる実証研究の成果を資料編にとりまとめ。

2.3 ガイドラインの構成と主な内容

総則（第1章）

ガイドラインの構成、用語の定義等を記載した。

技術の概要と評価（第2章）

技術の特徴、技術導入の前提条件・推奨条件、効果的な段階的導入シナリオを提示した。

また、実証研究に基づく評価結果として、技術導入によるコスト、GHG 排出量、エネルギー消費量を処理規模別に提示した。また、環境性能（排ガス性状、灰性状、臭気、騒音）についても提示した。

導入検討（第3章）

導入効果の検討方法として、実証技術導入によるコスト、GHG 排出量、エネルギー消費量の簡易算定式を、処理規模の関数として提示した。また、導入効果の検討例として、従来技術（従来型脱水機＋流動焼却炉）との比較による実証技術の導入効果の試算結果（コス

ト縮減効果、GHG 排出量削減効果、省エネルギー効果）を提示した。

計画・設計（第4章）

第3章における検討結果として、導入効果が期待できると判断された場合に、導入に向けた具体的な計画・設計方法として、物質収支・熱収支計算手法及び施設計画の検討手法を提示した。

維持管理（第5章）

システム技術全体としての導入効果を高めるために必要となる運転管理の要点等、実施すべき維持管理の具体的方法を提示した。

資料編

ガイドラインの技術的根拠となる実証研究成果、簡易算定式の導出方法ならびにケーススタディ結果（実証技術の導入効果）の算出方法を提示した。

3. 実証技術の概要・特徴（第2章）

本システム技術は、従来の脱水技術、燃焼技術、発電技術をそれぞれ高度化・高効率化するとともに、各技術間で連携して運転条件を決定することで、システム全体の省エネ・コスト低減効果を最大化するものであり、燃焼技術及び発電技術については、気泡流動焼却炉の改造による導入も可能である。本システムのフロー及び実証設備の規模を図-1 及び表-1 に示す。

また、技術の適用条件ならびに推奨条件は表-2 に

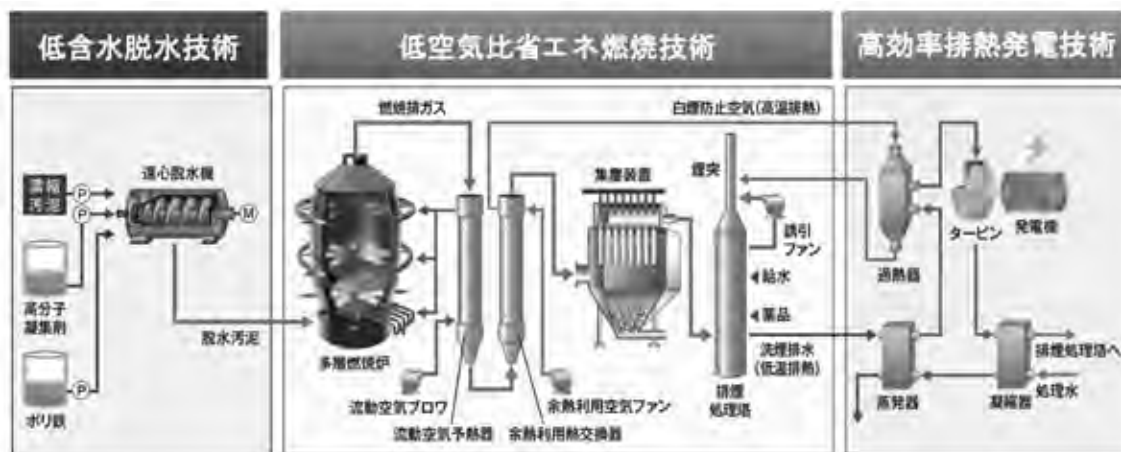


図-1 本システムの全体構成

表-1 実証設備の能力

設備	定格能力	備考
低含水脱水設備	20 m ³ /h	13-20 m ³ /hで運転可能
低空気比省エネ燃焼設備	25.2 t-wet/d	含水率 76%時
高効率排熱発電設備	25 kW	届出出力 37 kW

示す通りであり、①対象汚泥が未消化汚泥であること、②中規模程度（概ね 100 ～ 150t-wet/ 日）以上の焼却施設であること、③定格に近い処理量でかつ高い稼働率で運転できること 等の条件を満たす場合には特に高い効果を得ることができる。

本システムを構成する個別技術の概要・特徴について以下に記す。

3. 1 低含水脱水技術

脱水技術として、近年開発された機内二液調質型の低動力型高効率遠心脱水機の採用により、従来の脱水機よりも低含水化し、後段の燃焼工程における自然運転が可能となる。

また、本技術は、従来は運転員が判断していた遠心力・薬注率・差速の条件を、汚泥性状と目標含水率に依じて、最も経済的な運転となるように自動的に決定する機能を付加しており、人的負担の軽減、維持管理費の低減の両面で効果を発揮する。

3. 2 低空気比省エネ燃焼技術

本技術は、下水処理場において普及している気泡流動焼却技術を改良し、焼却炉に複数の箇所から空気を導入することにより低燃費、低 N₂O 排出を可能とした「多層燃焼技術」に、排ガス中の酸素濃度センシング機能を付加し、酸素濃度変化に対して流動空気ブローアの回転数を増減し、燃焼に必要な最小限の空気量となるように制御するものである（図 -2）。

空気量の低減に伴い、ブローア電力消費量ならびに補助燃料消費量の低減が可能となるだけでなく、焼却炉がコンパクト化され、建設費の低減も可能となる。実証研究における運転データの一例は図 -3 の通りであり、低含水脱水技術、低空気比省エネ燃焼技術及び連携・最適化機能により、重油消費量が 0（自然）かつ空気比 1.3 以下の運転を安定的に実現していることを確認した。

表 -2 本システムの適用条件及び推奨条件

適用条件（導入に不可欠な条件）		推奨条件（高い効果が期待できる条件）
システム全体	—	・ 混合生汚泥を対象とすること
低含水脱水設備	・ 粗大きょう雜物が除去または、破碎されていること ・ 十分な電力供給が確保できること	・ 脱水汚泥搬送設備の消費電力、補修費等が大きいこと
低空気比省エネ燃焼設備	・ 改造の場合は気泡式流動炉であること	・ 既設焼却設備の更新の空気比が 1.4 以上であること ・ 負荷率は定格に近く、稼働率も高い偏つことができること
高効率排熱発電設備	・ 二次処理水の年間平均水温が概ね 25℃ 以下 ・ 汚泥処理量 1 t/d あたり概ね 1 m ³ /h 以上の二次処理水が利用可能であること ・ 白煙防止空気およそ 300℃ 以上、排煙処理水 70℃ 以上の熱源が利用可能であること	・ 中規模（概ね 100 ～ 150 t/d）以上の燃焼炉に付設すること ・ 排煙処理塔の前段に、セラミックフィルタ等の集塵率の高い排ガス処理系統を有すること ・ 改造の場合、白煙防止空気の熱回収において、白防熱交換器出口排ガス温度が概ね 250℃ まで熱回収されていること
連携・最適化機能	・ 低空気比省エネ燃焼技術に加えて、低含水脱水設備あるいは、高効率排熱発電設備が導入されていること	・ 燃焼設備に供給される脱水汚泥含水率が定期的に自然水準（概ね 74 ～ 78% 以下）であること ・ 汚泥性状の短期的な変動が大きいこと

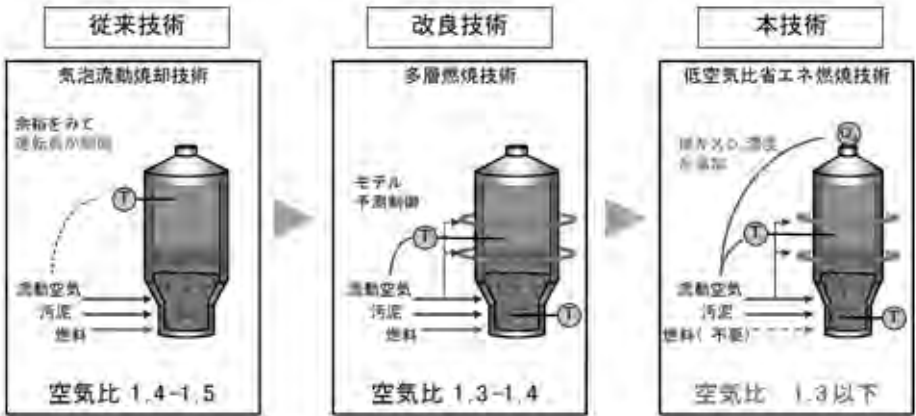


図 -2 従来型焼却技術と低空気比省エネ燃焼技術の差異

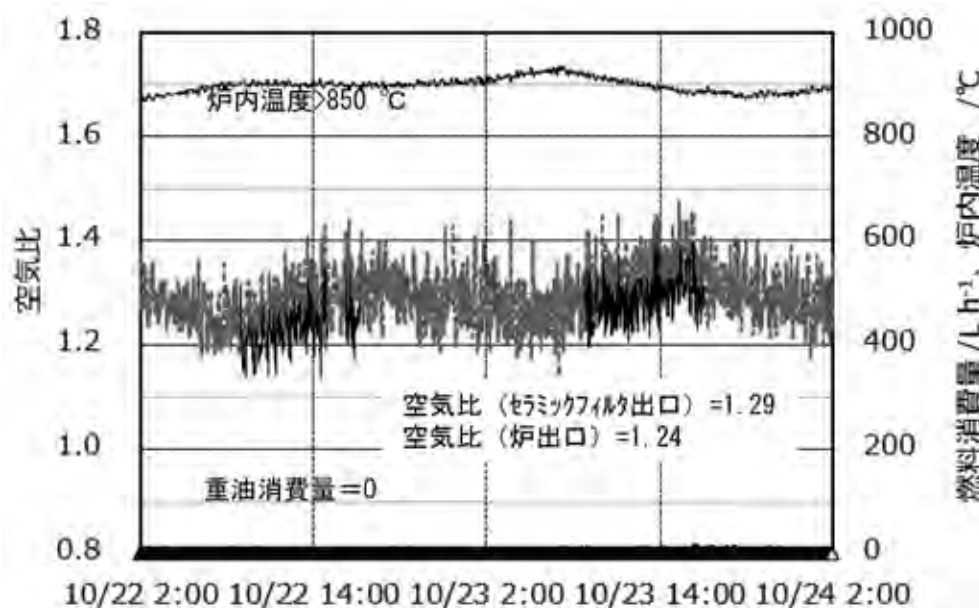


図-3 低空気比省エネ燃焼設備の運転データ（定格負荷運転時）

3.3 高効率排熱発電技術

本技術は、加熱熱源として排ガス・洗煙排水の2種類を用い、熱媒体としてアンモニア水を用いた2熱源

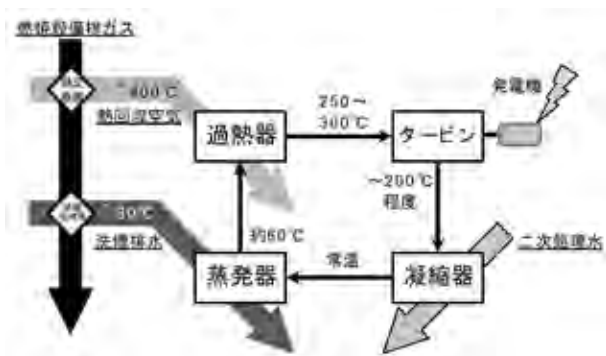


図-4 高効率排熱発電設備の基本サイクル

バイナリーサイクルによって発電するものであり、水分の多い下水污泥焼却システムにおいて発生し、未利用のまま捨てられていた洗煙排水の有する熱を、高温の排ガス熱と組み合わせて有効に活用する点が大きな特徴である（図-4）。

燃焼設備と容易に切り離すことが可能なオフライン型の構成としているため、従来焼却設備であっても白防空気熱交換器や排煙処理塔の改造により本技術の導入が可能である。また、発電設備の点検等による停止時においても焼却処理が可能となる利点もある。

実証研究における運転データの一例は図-5の通り（燃焼設備：定格負荷運転時）であり、熱回収空気温度と洗煙排水温度が設計温度に到達し、最大発電量30.8kWを達成した。

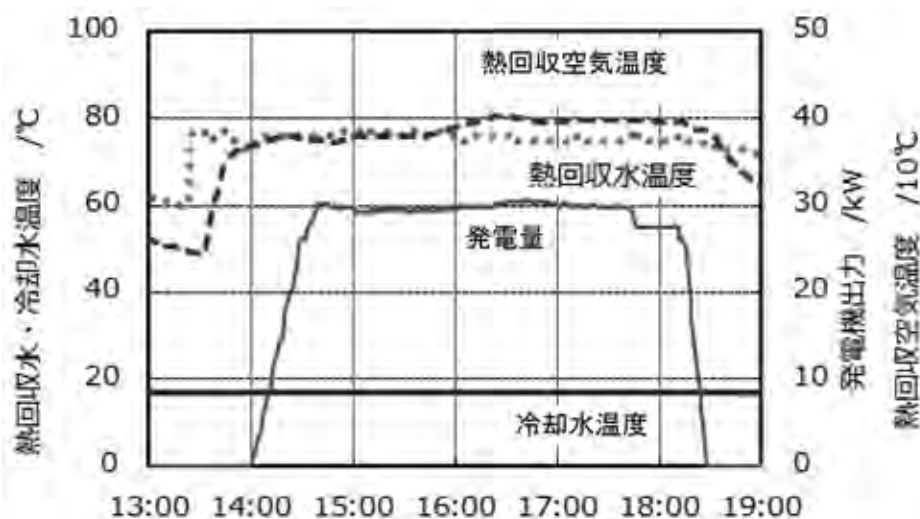


図-5 高効率排熱発電設備の最大発電時の発電量トレンド（2014/3/12）

3.4 連携・最適化機能

脱水・燃焼・発電の各設備の維持管理費用と脱水汚泥含水率の関係は図-6のようなイメージとなり、各設備の維持管理費にはトレードオフの関係が成立する。本機能はこうしたトレードオフの関係を踏まえ、前後の設備から得られる情報を基に、システム全体として効率的な運転条件を自動的に決定することにより、システム全体で維持管理費を最小化するものである。なお、実証施設には維持管理費最小モードの他に、GHG 排出量最小モードも併せ備えている。

実証研究における運転データの一例は図-7の通りであり、本機能によりシステム全体の運転費用が最小化する方向で推移しており、有効であることを確認した。

4. 実証技術の導入効果（第3章）

4.1 導入シナリオ

導入シナリオとしては、3技術を一括で導入するシナリオと、個別技術を段階的に導入するシナリオが考

えられるが、基本的には、一括導入シナリオないし燃焼設備を軸として先行導入するシナリオが、他の段階的導入シナリオに比べ追加的費用の発生が少なく効果が早期に発現されるため、効果的である。

4.2 導入効果の試算結果（一括導入シナリオ）

一括導入シナリオについて、表-3に示す試算条件により、従来技術（一液調質脱水機+流動焼却炉）との比較を行い、コスト（建設費、維持管理費、解体・廃棄費）、GHG 排出量、エネルギー消費量の各項目について、導入効果を試算した。なお、維持管理費には、電力費、燃料費、薬品費、補修費、灰処分費、人件費を計上した。電力費試算の結果、実証技術の導入により燃焼設備の消費電力（15,566GJ/年）の63%を発電分（9,756GJ/年）で賄うことが可能となり、従来技術と比較して、ライフサイクルコスト（LCC）で31%削減（うち維持管理費43%削減）、GHG 排出量で65%削減、発電分を考慮した正味のエネルギー消費量で77%の削減効果が得られると試算された（図-8～10）。

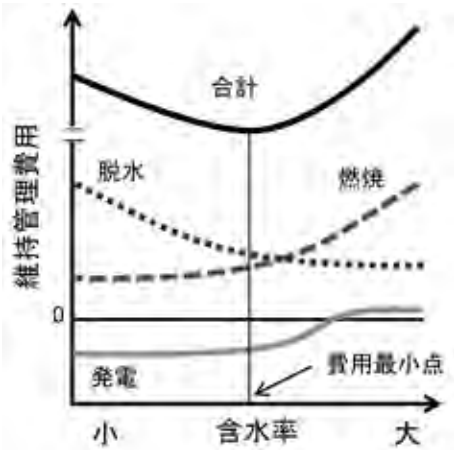


図-6 各設備の維持管理費用と脱水汚泥含水率の関係（イメージ）

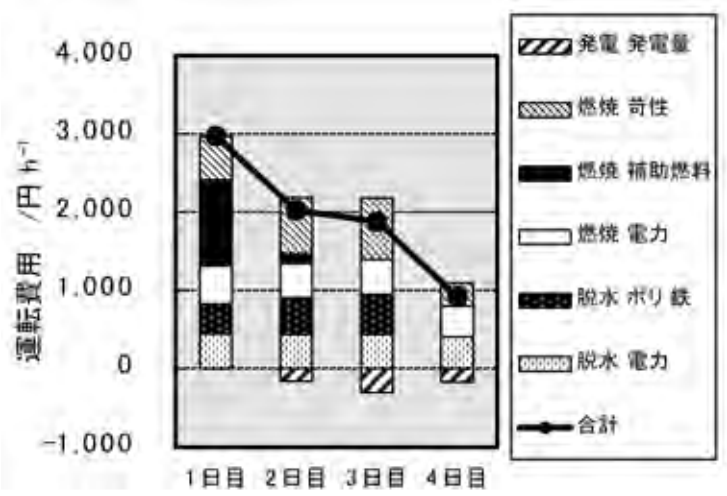


図-7 連携・最適化機能による運転コストの推移（2014/10/21～24）

表-3 導入効果の試算条件

項目	設定条件
処理汚泥性状	混合生汚泥、濃度：約3.3%
運転時間×稼働率(運転日数)×負荷率	24時間/日×80%(292日/年)×100%
処理汚泥中国形物量	24 t-DS/日
脱水汚泥含水率×処理量	従来：76%×100t-wet/日 革新：74%×92.3t-wet/日

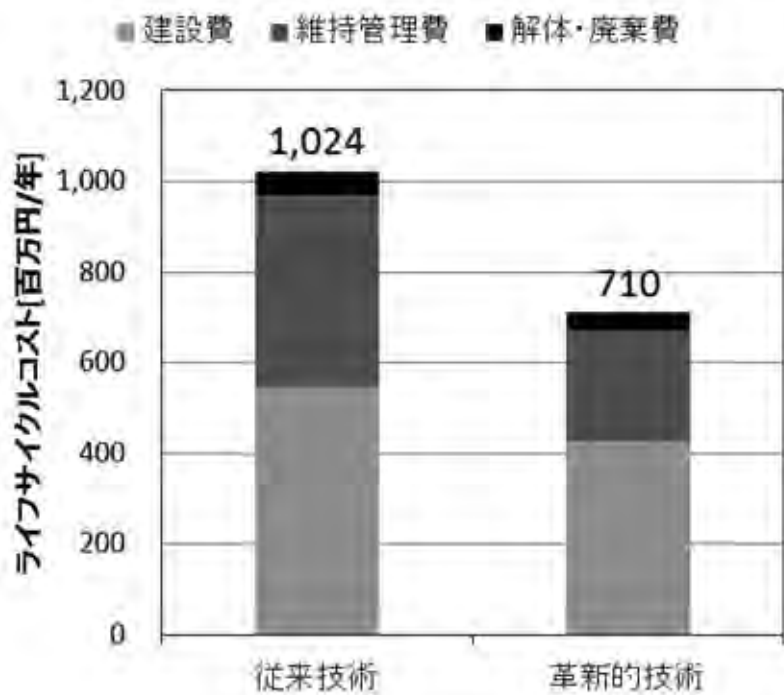


図-8 ライフサイクルコストの比較

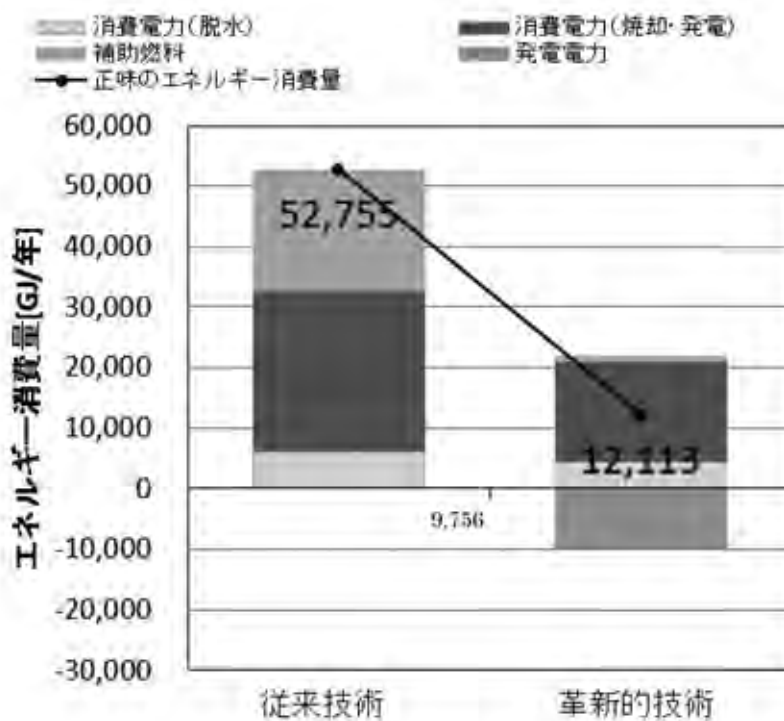


図-9 エネルギー消費量の比較

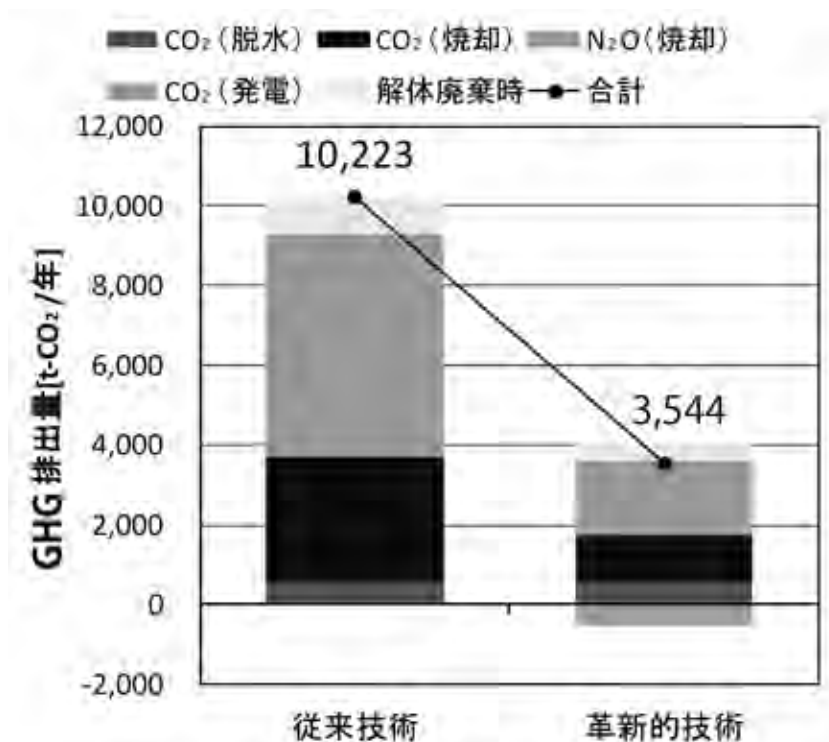


図-10 GHG 排出量の比較

5. 導入効果を高める運転管理の要点 (第5章)

本システムを効率的に運転するためには、燃焼設備の負荷率や稼働率をできるだけ高めることが望ましいが、図-11に示すように両者にはトレードオフの関係が存在するため、トレードオフの関係を踏まえ燃焼設備の負荷率及び稼働率を調整することが重要である。燃焼設備の負荷率を高めるためには、濃縮汚泥や脱水汚泥を貯留させる必要があるが、脱水汚泥の貯留量が大きい状態で運転すると、燃焼設備の運転状態が脱水条件に反映される時間が遅れるため、連携・最適化機能の効果発現の観点からは、濃縮汚泥の貯留を優先させるのが良い。

なお、本システムも含め、複数の汚泥処理系を有する場合には、本システムの運用を優先して燃焼設備の負荷率および稼働率を高めた運転を行うことにより、汚泥処理システム全体での効率的な運転が可能となる。

6. ガイドラインの公開と成果の普及展開

本ガイドラインは、国土技術政策総合研究所資料 No.859 として刊行され、国総研ホームページ (<http://www.nilim.go.jp/lab/ecg/bdash/bdash.htm>) からダウンロード可能である。ガイドラインの策定を契機として本システム技術の普及が進み、エネルギー多消費型の汚泥処理システムからエネルギー創出プラントへの転換が進むことを期待するものである。

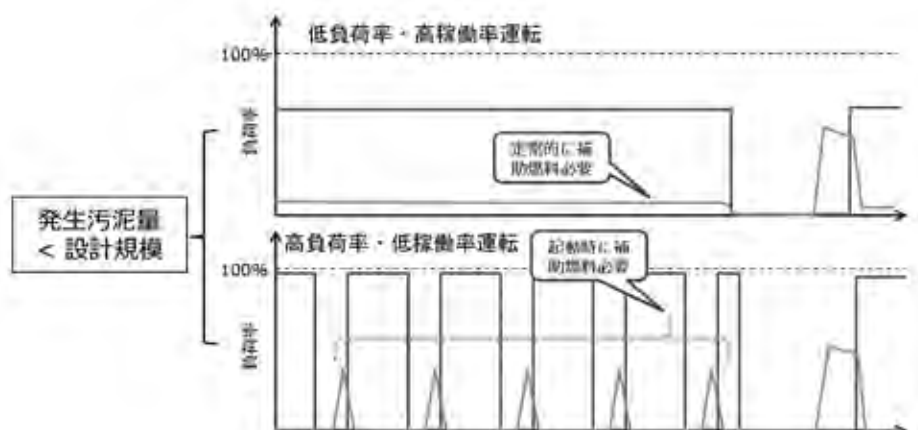


図-11 燃焼設備の負荷率・稼働率のトレードオフ (イメージ)

報 告

下水汚泥有効利用促進マニュアル －持続可能な下水汚泥の有効利用を目指して－の発刊 （その4. 下水汚泥エネルギー化利用編）

下水汚泥利用促進検討調査専門委員会 事務局

（公社）日本下水道協会 前田 明徳

（株）日水コン 福沢 敬三

キーワード：マニュアル、エネルギー、固形燃料、バイオガス

1. はじめに

前報（その1. 総論）にて示したとおり、本マニュアルの第3章はPDCA サイクルの中のPlan & Doを示しており、各分野技術のマネジメントとして下水汚泥肥料、下水汚泥建設資材、下水汚泥エネルギー化の3分野について基本事項および適用事例、課題と対応策について示してある。

本報では、その2. 肥料利用編、及びその3. 建設資材編に引き続き、下水汚泥エネルギー化利用について報告をする。

2. 旧マニュアルとの比較

本マニュアルは、日本下水道協会より発刊されている「下水汚泥エネルギー利用調査報告書 平成20年3月」の内容を主に基本事項を一部踏襲し、利用形態が大きく変化している最新情報を加え、更にアンケートによるニーズ調査を記載している。旧マニュアルに記載の内容から本マニュアルへ新しく盛り込んだ記載の内容は、表－1に示すとおりである。

以下、本マニュアルに記載の内容について報告する。

3. 下水汚泥を原料とするエネルギーの基本事項

1) エネルギー利用に関する下水汚泥の特性

下水汚泥から生成されるエネルギー資源として、固形燃料、バイオガス、熱分解ガスがあり、近年、固形燃料化やバイオガスの発電利用などを中心に下水汚泥のエネルギー化利用の取組事例が増加している。下水汚泥は、その固形物の約8割が有機物であり、質・量ともに安定した都市型バイオマスのエネルギー資源である。

本節では、他バイオマスの性状と対比し、下水汚泥の性状、元素の含有率、消化率、発熱量などを示した。

2) 下水汚泥エネルギー製品としての特性

我が国がエネルギー資源として輸入に大きく依存している化石燃料は、市場の影響を受け価格変動が大きい。これらに比べ、下水汚泥から生成されるエネルギー資源は、質・量ともに安定したエネルギー資源である。ここでは、処理施設外で多く利用されている各種下水汚泥固形燃料とバイオガスの発熱量などの性状例について解説している。

表－１ 旧マニュアルと本マニュアルの比較

下水汚泥エネルギー利用調査報告書の構成と 主な内容	本マニュアルで新しく盛り込んだ内容
1 総則	
2 社会的背景 温室効果ガス排出量の動向、エネルギー消費の動向、化石燃料の埋蔵量、エネルギー自給率、原油価格の動向、バイオマス利用状況、新エネルギー導入目標、利用者ニーズの状況	2 章の共通部分で、汚泥利用促進の現状について、記載している。 また、固形燃料やバイオガスユーザーに対して新たにアンケートを行った結果を記載している。（§2.2）
3 下水汚泥関連事項の現状 下水汚泥の発生量・リサイクル率等の動向、埋立処分の動向、電力消費量の動向、温室効果ガス、エネルギー的特徴、消化槽の設置状況	2 章の共通部分で、各種指標を用いて、現状を紹介している。震災前後の下水汚泥リサイクル率、メタン発酵によるバイオガスの有効利用に使用された有機物量、バイオマスリサイクル率、下水汚泥エネルギー化率など（§2.2）
4 国、下水道関連の施策 京都議定書、バイオマス・ニッポン総合戦略、バイオマスタウン構想、グリーン電力認証、新世代下水道支援事業制度、ロータスプロジェクト	2 章の共通部分で汚泥利用にかかる各種法定について記載している。新たな内容としては、再生可能エネルギー固定価格買取制度（FIT）、J-クレジット、下水汚泥固形燃料のJIS化など（§2.3）
5 各種関連技術	
5.1 消化ガス利用関連技術 嫌気性消化、汚泥熱分解、消化ガス発電、燃料電池、都市ガス供給	・燃料電池発電の長期に蓄積された運転データを用いた導入効果や評価を記載している。（§3.4.4） ・電力の固定価格買取制度（FIT）を利用したバイオガス発電の新たな事業形態である大村市の事例を紹介している。（§3.4.4） ・バイオガスの自動車燃料、都市ガス導管注入を行っている神戸市の先進的な事例を紹介している。（§3.4.4）
5.2 汚泥利用関連技術 炭化・燃料化、低温減圧乾燥、造粒乾燥、焼却炉排熱	・近年、導入事例が増加している低温炭化の2事例（広島市、熊本市）を紹介している。（§3.4.3）
5.3 広域連携 バイオマス連携、広域連携、混合焼却	
5.4 ロータスプロジェクト	最新技術の動向として、バイオガスから水素を製造する技術、固形燃料化技術などB-DASHプロジェクト等を紹介している。（§3.4.7）
5.5 各種関連技術における温室効果ガス削減効果及びコスト評価 温室効果ガス削減効果、コスト評価、計算例	中小規模処理場における検討事例として、近年の動向や市場価格を反映させた熊本県、笠岡市をモデルとしたバイオガス発電の導入検討事例を紹介している。（§3.4.9）
5.6 消化ガス利用の工夫事例及びコスト削減事例	

4. 下水汚泥エネルギー化の種類と特徴 （§3.4.2）

汚泥処理過程において図－1のフローで示されるエネルギー資源が創出されており、主なエネルギー資源として、固形燃料化技術（炭化技術、乾燥技術）、バイオガス利用技術（バイオガス回収、バイオガス発電（燃料電池を含む）、ガス精製、自動車燃料、ガス導管直接注入、都市ガス供給・都市ガス原料供給）、熱分解ガス化技術及びその他の技術を紹介している。

5. エネルギー化技術の適応事例

エネルギー化技術別に最新の適用事例を示し、自治体等が参考にできるよう整理している。固形燃料利用の事例、バイオガスの利用の事例、熱分解ガス化技術およびその他のエネルギー利用の動向に分けて事例を記載している。事例ごとに、「事業概要」「導入の背景」「導入効果」「今後の課題、展望」を記載している。

以下に、代表的な事例を示す。

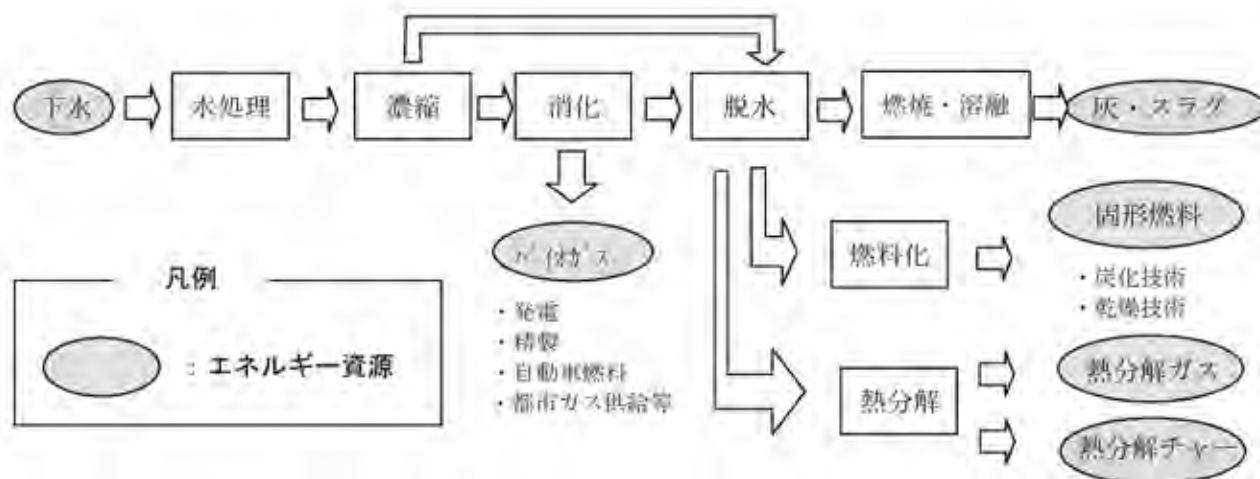


図-1 下水処理フロー例とエネルギー資源

1) 固形燃料利用（低温炭化，広島市西部水資源再生センター）

①事業概要

西部水資源再生センターでは、日本初となる下水汚泥の低温炭化燃料製造技術を用いた下水汚泥燃料化事業を行っている。下水汚泥から燃料化物を製造し、有価で火力発電の石炭代替燃料として供給する事業でDBO（Design: 設計、Build: 施工、Operate: 運営）方式を採用している。

②導入の背景

従前は、リスク分散の観点から、①コンポスト化、②セメント化、③焼却埋立の3とおりの方法により処分を行っていた。しかし、埋立処分場の確保が困難な状態となっていること、また、コンポスト化やセメント化については、製品の需要面から有効利用

量に限界があり、将来的に安定した処分の課題を抱えていた。このため、下水汚泥を再資源化して100%有効利用することを基本理念とし、下水汚泥燃料化事業を導入した。

③導入効果

固形燃料化施設の導入後は、脱水汚泥の100%を燃料化するとともに、発生するバイオガスの50%を燃料化施設の補助燃料として使用することとなった。これにより、従来と比べ、ガス発電と消化槽加温用ボイラへのバイオガス使用割合は減少するものの、燃料化施設にて発生する温水を消化槽の加温用ボイラで使用している。このため、この固形燃料化事業については、化石燃料消費量“ゼロ”を目標としており、大幅な温室効果ガス削減効果が期待される。



図-2 広島市汚泥固形燃料化施設の事業形態

また、温室効果ガス排出量の削減効果として、固形燃料化を実施することにより焼却炉の単独更新と比べ温室効果ガスの排出量を年間で約 8,700t (CO2 換算) 削減できると試算している。

④今後の課題と展望

固形燃料化を実施することにより、下水汚泥を 100% リサイクルし、建設費及び維持管理コストを年間で約 2 億円削減できる見通しであり、大幅な温室効果ガス削減効果が期待される。

2) ガス発電利用（大村市大村浄水管理センター）

①事業概要

大村浄水管理センターでは、平成 26 年 7 月から民設民営のバイオガス発電事業がおこなわれている。市は、バイオガスをセンター内に発電機を設置する事業者に売却し、ガス売却料、土地使用料、固定資産税等で収益を得る。市の収益は、下水道施設の維持管理費等に充当され、行政コストの削減に寄与することとなる。事業者自ら調達した資金で発電設備を建設し、設備を所有している。また、ガスを購入して発電及び、設備の運転管理も行い、固定価格買取制度を利用した売電収入を得て、20 年間の発電事業を運営している。(図-3 参照)

②導入の背景

当初は電力の場内利用を考え、補助事業による実施設計から建設までを計画していたが、平成 24 年 7 月に施行された「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法（平成 23 年

法律第 108 号)」に基づく固定価格買取制度の活用を含め、発電事業方式の検討を始めた。

主に「場内利用」「公設公営」「民設民営」でのリスク管理や費用対効果等について比較検討を行い、併せて発電機種や発電能力等の比較検討を行い「民設民営」方式による事業化に至った。

③導入効果

大村浄水管理センターの発電事業では、年間の売電収入が 74 百万円ほどになり、買取期間の 20 年間の合計で約 15 億円が見込まれる。「民設民営」方式を選択したことによって民間の資金、技術力、ノウハウ等を活用し、自治体側の財政負担や労力を最小限にして、20 年間にわたる事業リスクを軽減できたことは、市の下水道事業にとって大きなメリットになったものと考えられる。

④今後の課題と展望

発電事業は、開始から 20 年間の長期にわたる事業であり、この間に老朽化するガスタンクや消化槽等の汚泥処理設備の改築更新も必要となり、発電の安定性のためにバイオガス供給が滞ることやガスの品質が劣化することがないようにしなければならない。

さらには、バイオガス発生量を増加させ汚泥をより減量化できるように運転管理を行い、効率的な発電が続くよう検討している。また、排熱温水の有効利用についてもさらなる検討をしていく必要がある。

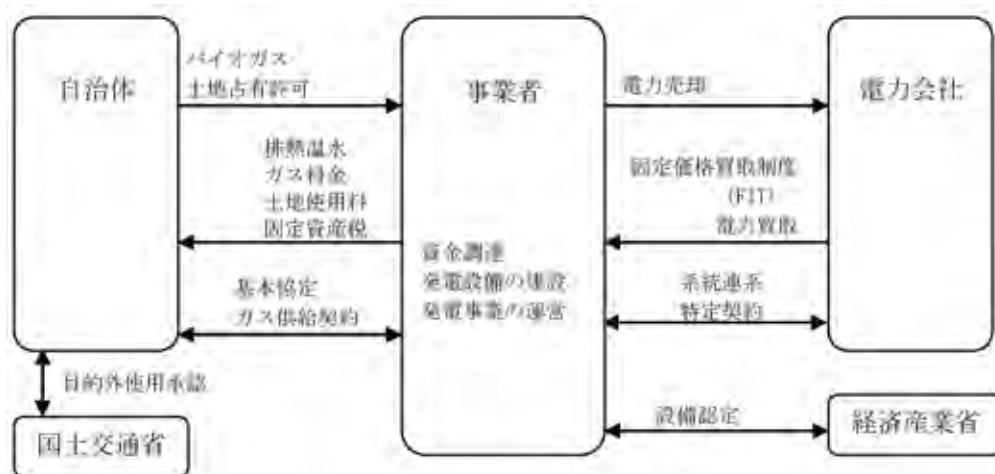


図-3 大村市のバイオガス利用事業のスキーム

3) 他バイオマス受入（黒部市黒部浄化センター）

①事業概要

下水道バイオマスエネルギー利活用施設は、民間の資金、及び技術力を活用したPFI事業であり、バイオマス受入対象物は、下水汚泥、農業集落排水・浄化槽汚泥、デイスパーザー由来生ごみと食品残渣（コーヒー粕）である。回収されたバイオガスは、ボイラにてスチーム生成を行い、乾燥機の補助燃料及び消化槽の加温の熱源として使用されて、残りのバイオガスはマイクロガスタービンによる発電し、場内の電力として使用されている。

②導入の背景

下水道汚泥は、全量セメント原料等に利活用されていた。また浄化槽・農業集落排水汚泥は土壌改良剤として利活用されていた。

バイオマス資源の利活用を推進する必要があることから、改修にともないバイオガス化施設を増設し、下水道汚泥等に加えて食品系残渣についても、バイオマス資源の有効利用を図る目的で導入した。

③導入効果

導入効果の試算（見込み）では、下水道事業のみで処理する場合、年間の費用は168（百万円／年）である。他バイオマスを受け入れることで、農集汚泥・浄化槽汚泥・事業系食品残渣受入による収益が見込め、下水道単独での事業に比べ約26百万円／年のコスト削減効果が得られる。

④今後の課題と展望

事業の継続性の視点から、当初計画に基づいた各種汚泥、食品残渣の受け入れ収入を継続して得るために、受け入れ量を確保する必要がある。

6. 適用事例の課題と対応策

マニュアル内では、エネルギー化技術の事例から出された課題を抽出し、他の事例から導き出される対応策や考えられる対応策等を記載している。

一例を以下に示す。

①十分かつ安定した量の確保が必要である。

⇒浄化槽汚泥、生ごみ等の他バイオマスを集約処理する。

②固形燃料受け入れ先の確保

⇒受け入れ先のニーズを把握し、製品の特性を活かした安定的な利用が可能となるようなシステムや受け入れ体制を選定する。

③停止時の汚泥処分方法の確保

⇒契約時に燃料化施設の運営事業者と協定を結ぶなど、処分先との取り決めや一時保管する場合の対策を十分に図る必要がある。

④事業採算性の確保

⇒初期投資が抑制できる消化プロセスに関する新技術が開発されている。また、高効率のバイオガス精製も、低コスト化が図られている。さらに、再生可能エネルギーの固定価格買取制度の電力買取価格は、比較的高い価格設定されているため、事業採算性を確保できる可能性が高いといえる。

その他諸問題の解決策として、エネルギー化技術は、開発による技術革新が目覚ましい分野であり、低コスト化、効率の向上が図られた新技術の導入や、DBOやPFIなど事業形態を検討することも採算性確保の観点から重要であると記載している。

7. 中小規模処理場におけるバイオガス有効利用手法の検討事例

中小規模処理施設におけるバイオガス利用の検討事例として、熊本県、笠岡市をモデルとした経済性の算定を行った。

熊本県下の中小規模処理施設では消化槽を有する処理施設が多く、15処理施設から年間206万 m^3N のバイオガスが発生し、83.5万 m^3N を加温等に利用しているが、122.5万 m^3N のバイオガスは余剰ガスとして焼却処分をしており、有効利用が進んでいない状況にある。

これら未利用のバイオガスの活用により、エネルギー使用量削減や温室効果ガス削減の効果が得られる。ここでは、バイオガス発電の導入について事業効果を検討した。想定する処理場のバイオガス発生量からコスト算定にあたっては、25kWマイクロガスエンジンを複数台設置するものとして経済性を算定した。

下水道管理者が自ら発電・場内利用する場合のバイオガス発生量と費用便益比(B/C)を図-4に示す。

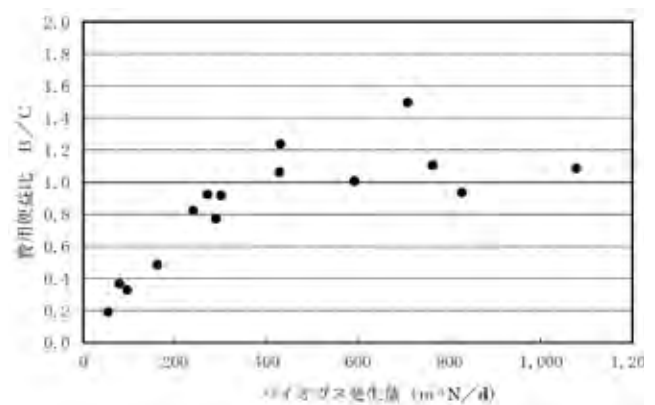


図-4 バイオガス発生量と費用便益費 (B/C)

便益は、電力料金単価（円 /kWh）×使用電力の削減量（kWh/年）で算出しており、電力料金単価は処理施設によって10～18円 /kWhと変動があるため、処理施設による費用便益比に差が生じている。おおむね、バイオガス発生量が400 m³N/日以上確保できる規模において事業採算性があるとの結果を得た。

また、バイオガス発生量から判断すると発電・売電については大きなメリットは見込めないため、バイオガスを運搬・集約し大規模化することや、他バイオマスを受け入れ有機物量を増加させることなどにより経済的な採算手法を検討すべきとした。

8. アンケートによる傾向分析

下水汚泥を原料とする固形燃料やバイオガスの利用促進を目指し、ニーズや普及方策等について、下水汚泥固形燃料を利用する可能性のある電力事業者やセメント業界事業者及び、バイオガスの利用先となる可能性のあるガス供給事業者へアンケートを行い、傾向について分析を行った。

下水汚泥固形燃料を発電炉やボイラの燃料として利用するニーズがあるかのアンケート結果は、約半数の事業者が、少なくともニーズがあると回答している。また、固形燃料利用事業者は、ボイラの燃料として使用する場合は、燃焼後の焼却灰等に残留する成分への法令等に悪影響を懸念して、含有成分への要求が多かった。

一方、都市ガス事業者は、バイオガスに関する情報が不足しており、事業採算性が確保できることが重要と考えている。また、調達単価が天然ガスよりも安価であることを要求した事業者は、回答者全体の約8割を占めていた。

9. マーケティング充実に向けた課題と対応策

アンケート結果や自治体の取組事例等から挙げられた課題を抽出し、マーケティング充実に向けた対応策を示している。

1) 安定性のアピール

下水汚泥固形燃料及びバイオガスの市場活性化を図るためには、供給量、品質の安定化及び信頼性の確立を図ることはもちろん、化石燃料の市場価格変動と比較して安価な価格設定が求められる。

安価な価格設定とあわせて、季節変動なく安定的な供給量、品質の確保等バイオマス資源のメリットを広くアピールすることによって市場拡大の可能性を秘めている。

2) 事業公告時における製品受入先確保に関する評価の工夫

燃料化物の長期的かつ安定的な利用先の確保を重視する場合には、燃料化事業の応募事業者コンソーシアムに燃料の受入先を加えた場合に、応募事業者を加点評価するなどの手法が考えられる。一方、化石燃料の市場動向等を踏まえた事業全体の継続性を重視する場合には、製品価格の設定及び製品の受入先の確保について民間事業者の創意工夫を促すため、事業開始後に製品の受入先の変更を認めるなど自由度を持った契約とすることが考えられる。

3) 支援制度の活用

再生可能エネルギー固定価格買取制度（FIT）やJ-クレジット制度などの活用により事業採算性を得やすくなり、導入が促進されることが期待できる。



図ー5 下水汚泥のエネルギー利用促進を進めるための課題に対する対応策

4) 多様な事業形態

近年では、民間の高度な技術力・ノウハウを活用したDB方式やDBO方式、又はPFI方式等の採用事例が増加している。これら方式は、従来、個別に発注していた設計、施工、維持管理、施設運營業務を、設計・施工（DB）、設計・施工・運営（DBO）、さらには、資金調達から事業の運営まで（PFI）を一括して発注する方式であり、事業の効率化（省コスト化）が図りやすくなることに加え、ライフサイクルコスト全体を管理しやすくなる。

5) 製品の受入先のPRによる下水汚泥のエネルギー製品利用のメリット向上

製品の受入先のニーズに応じ、下水汚泥のエネルギー製品を製造する自治体においても、製品の受入先の取組について積極的にPRすることで、下水汚泥のエネルギー製品利用のメリットを向上させ、事業採算性の向上に資すると考えられる。

9. おわりに

下水汚泥の有効利用を促進する下水道事業が継続的に推進されることにより、資源の乏しい我が国において、低炭素・循環型社会の構築に寄与していくことが期待される。

近年、下水道管理者にも地球温暖化対策への積極的な取組が求められており、省エネルギー対策とともに下水汚泥のエネルギー利用は大きく期待され、固形燃料のJIS規格化（表－2）やFITを活用したバイオガスの発電利用などを中心に今後とも取組事例が増加することを期待している。

表－2 下水汚泥固形燃料JIS規格(JIS Z7312)の概要

種 類	総発熱量 MJ/kg	全水分 ^{a)} 量の質量 分率 (%)	灰分・全硫黄・ 窒素の質量分率 (%)
BSF・15	15 以上	20 以下	— ^{b)}
BSF	8 以上		
注 ^{a)} 到着ベース、すなわちロットの受渡しの状態（すなわち、全水分含有状態）における分析値のベースとする。 ^{b)} 規定値は定めないが、試験した到着ベースによる値を報告する。その他の項目は、受け渡し当事者間の協定による。			

ニュース・スポット

関係団体の動き

ビストロ下水道、世界へ!

2015 年度 ミス日本「水の天使」
柴田 美奈

キーワード：水の天使、学びと感動、下水道法改正、
ビストロ下水道、ミラノ万博

こんにちは！2015 年度ミス日本「水の天使」の柴田美奈です。水の天使は、ミス日本コンテストで選ばれる 5 つの賞の中の一つで、日本の水を支える優れた技術や取り組みを世の中に発信する役割を担っています。活動内容は、水再生センターや多くの一般の方々が集まるイベントなどにおいて、講演や呼びかけをしたり、ポスターやこうした記事インタビュー等で発信したりしています。

こうした活動をするために、現場見学は欠かせず、全

国各地を回り様々な活動をさせていただいています。

水の天使になるまで、下水道のことを深く考えたことがありませんでした。毎日不自由なく使うことができるため、下水道の存在が当たり前となっていました。水再生センターを見学した際、24 時間必ずどなたかが異常がないかを確認し管理されているということ、下水処理の方法の一つではなく、新しい技術を生み出し稼働するために研究を重ねる方がいらっしゃるということなど、下水道を動かす方々の計り知れない努力を知り、日々感謝して使わなければ！と思うようになりました。

昨年、10 年ぶりに下水道法が改正されました。法律が変わることで、私達の生活にどのような影響があるのか知りたくなり、法改正に携わった方々に詳しく教えていただきました。今回の改正のメインは「浸水対策の強化」。近年多発している集中豪雨への最適な対応を学ぶことができ、下水道なしで生活は成り立たないということを改めて感じるきっかけとなりました。



ビストロ下水道で野菜を調理



ビストロ下水道で味の分析

下水道は、生活排水を綺麗にすることのみならず数多くの役割がある、ということも水の天使に就任したことで知ることができました。水循環の形成を促し川や海を美しく保つこと、下水から取り出す熱やガスで冷暖房や自動車が機能すること、どれも驚きでした。その中でも一番衝撃的だったことは「ビストロ下水道」です。下水道由来の肥料から野菜や果物、海苔などたくさんの食物が生まれること、想像もつかなかったです。この取り組みを初めて知った時は「本当に食べられるの？」と疑問を抱いてしまいましたが、実際にアスパラガスや玉ねぎ、オレンジなどをいただき、何の違和感もなく、全て一人で食べてしまいました！食物以外にも、可愛らしいお花に生まれ変わることもできます。お花が大好きな私にとって、とても嬉しい取り組みです。

昨年、絶大な人気を集めたミラノ万博の日本館。万博で「下水道が生み出すチカラ」をテーマにビストロ下水道の取り組みが展示され、注目を集めました。私は、ミラノの展示場で放映されるVTRに出演させていただきました。「普段は都会で働いているけれど、月一回の農業を楽しみにしている女性」をテーマに、ビストロ下水道の野菜やお花に囲まれて撮影を行いま

した。万博を通して世界へ発信するという大きな大きな企画に携わることができ、とても光栄です。

また以前、山形県鶴岡市で行われたビストロ下水道推進戦略チームの会合に参加させていただきました。レストラン「アル・ケッチャーノ」オーナーの奥田政行シェフが、ビストロ下水道の野菜を調理し、参加者全員で味の分析をするというイベントを行いました。化学肥料を用いて育てた野菜との食べ比べも行いました。大きく美しく育つことが、ビストロ下水道の食材の魅力。コストが抑えられることもあるそうです。まだあまり知られていませんが、この魔法のような取り組みが広まり、いつかスーパーの棚にズラッと並ぶ日が来るといいですね！海外のお店で、ビストロ下水道の文字を見る日も遠くないのではないのでしょうか！

水の天使になり、今まで知らなかった下水道の世界と出会いました。下水道が持つ様々な役割はもちろん、この業界の皆様の情熱や、温かい空間に感動する日々でした。私はすでに水の天使の任期を終えましたが、これからも下水道界を応援する一員として過ごしていきたいと思います。

ニュース・スポット

関係団体の動き

畜産系廃棄物からの 有用資源循環技術の確立

日立造船株式会社 環境事業本部
新事業・新製品推進室
小倉 舞

キーワード：畜産廃棄物、豚ふん、リン、炭化、肥料

1. はじめに

我が国では肥料の原料となるリン鉱石は輸入に依存していますが、輸入価格は年々上昇しており、安価で安定的なリン資源の確保が重要な課題となっています。リンは、鉄鋼スラグや下水汚泥、畜産系廃棄物等の未利用資源に含まれることから、循環利用することで限りある資源の有効活用が期待されます。

未利用資源の中で畜産系廃棄物は、植物の生育に必要なリンを豊富に含有していることから、堆肥化された後に農地還元することにより利用されてきました。しかし、畜産事業者が密集する地域では、利用先が限られることや遠距離輸送に費用がかかることから堆肥の全量利用が困難となる場合もあり、未利用となる廃棄物の有効活用が望まれているのが現状です。

そこで当社は、廃棄物のうちの未利用の豚ふんに着目し、含有するリンを濃縮して化学肥料の原料に用いることで、廃棄物を広域的に循環利用する技術の開発に取り組んできました。

2. 炭化システムの概要

未利用の豚ふんを広域的に循環利用するためには、輸送の便を図るため減容化の上、また臭気を低減させ

る必要があります。そこで当社は、豚ふんを炭化物に変換することによって、これらの課題の解決を試みました。変換する際に用いた炭化装置（間接加熱型ロータリーキルン）の外観を図1に、炭化処理の概要を図2に示します。一次発酵後の水分30-40%ほどの豚ふん（乾燥豚ふん）を炭化の原料として間接加熱型ロータリーキルンにて処理します。本装置は二重の筒状構造であり、内筒は空気が遮断された状態で回転しています。内筒に投入された原料は、外筒中を通過する高温のガスにより間接的に400-450℃まで加熱されます。この際、内筒では空気が遮断されているため燃焼が起こらず、燃焼灰の発生を防ぎながら原料を炭化物に変換することが可能です。また臭気の原因となる有機分は炭化炉内で気化して可燃性ガスとなり、後段の二次燃焼器で空気を混合することにより燃焼され、内筒中の原料の加熱に用いられます。すなわち本装置は化石燃料を外部より供給することなく、原料である豚ふんを炭化物に変換できる省エネルギー型の炭化システムです。



図1 炭化装置外観

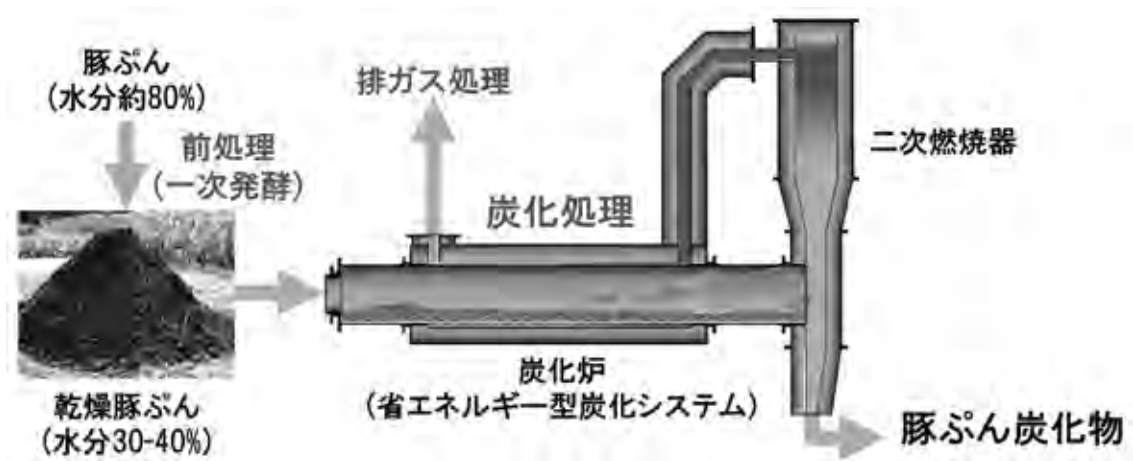


図2 炭化处理の概要



写真1 コマツナの栽培試験
提供) 大阪府立環境農林水産総合研究所

3. 研究成果

本システムの連続運転における安定性および原料や製品性状の季節変動の有無を検証するため、四季ごとにそれぞれ約1ヶ月間の実証試験を実施しました。試験では外部からのエネルギーの供給なく連続的に炭化处理でき、製造した炭化物の肥料成分は年間を通して大きな変化が見られませんでした。これにより肥料メーカーに対して安定した製品の供給が可能であることが確認できました。

また炭化物の肥料としての利用効果についても、栽培試験により検証しています。コマツナの栽培試験を従来の化学肥料の代わりに炭化物を施肥することで実施したところ、既存の化学肥料と同程度の生育結果が得られました(写真1)。次に炭化物によるリン酸肥料原料(リン鉱石)の代替可能性を確認するため、リ

表1 模擬的に製造した過リン酸石灰の各種リン酸濃度

炭化物 代替率	全リン酸	可溶性 リン酸	水溶性 リン酸
(%)	TP (%)	SP (%)	WP (%)
0	17.8	17.6	13.8
40	15.7	15.5	15.1
目標値		>15	>13

ン鉱石の一部を炭化物で代替して、リン酸肥料である過リン酸石灰の模擬的な製造試験を実施しました。その結果、リン鉱石を最大40%代替した条件において、肥料取締法で規定された可溶性リン酸や水溶性リン酸の含有濃度の目標値を満足でき、リン酸肥料原料の炭化物による代替が可能であることが明らかとなりました(表1)。

4. 現在の取り組み

豚ふん炭化物を原料とした化学肥料を生産し、販売するためには、肥料取締法の公定規格に基づいた肥料登録が大きな課題となります。そのため当社は、肥料メーカーの協力を得て、炭化物の利用効果および植害の有無等の必要なデータを集めながら肥料登録を目指しています。

以上のように当社は、豚ふんを用いて炭化物を製造し、肥料原料に用いることでリンを循環利用できる仕組み作りに取り組んでいます。さらに今後は炭化の原料として、豚ふんだけでなく鶏ふんや下水・し尿汚泥等の活用も視野に入れ、リン資源の循環を推進します。

ニュース・スポット

関係団体の動き

「廃棄野菜で肥料をつくりたい」
 ㈱和郷・山田バイオマスプラントリサイクルセンター

編集委員会事務局

キーワード：メタン発酵、液肥、食品廃棄物リサイクル

香取市は千葉県の北東部に位置し、利根川を挟んで対岸の茨城県と接します。農業が基幹産業で、米の出荷量は県内第1位とのこと。

今回は香取市内で、野菜などによるメタン発酵で肥料づくりに取り組まれている、㈱和郷の山田バイオマスプラントリサイクルセンター（処理規模約2t/日）の松岡隆雄さんと相原秀基さんに、これまでの取り組みや苦労している点などをお伺いしました。

——この山田バイオマスプラントリサイクルセンターという名称ですが、実際にはどのようなことを行っているのですか

相原 私たち㈱和郷はいろいろな農業に関するサポートをしている会社ですが、母体となっているのは農事組合法人と郷園でして、そこの生産者を支えるために設立した経緯があります。この山田バイオマスプラントリサイクルセンターでは、いい堆肥をつくって農家さんに提供しております。和郷では、ほかにもカット工場や冷凍工場など加工品工場があり、またこれら生産物を販売するための店舗事業や、温泉事業など、いろいろなサポートの面を拡充するため、年々拡大しております。

提携している農家さんは100家弱あり、いろいろな品目の多くの野菜をつくっております。そういった中、こちらのバイオマスプラントでは、資源循環型の農業を目指してきましたので、その一環としてバイオマス



相原氏（左）と松岡氏（右）

の試験研究に取り組んでまいりました。以前、この建物の横に（独）農業・食品産業技術総合研究機構の農村工学研究所がありまして、そこと連携しながら試験研究を行っていました。試験研究は農村工学研究所が主体でしたので、東京大学や千葉の農業総合研究センターといったところも参画して、いろいろな試験研究が進めてきました。

——資源循環型の取り組みは、もともと農研機構との共同研究から始まったのですか

相原 そうですね。そもそも山田バイオマスプラントは、バイオマス利活用の都市近郊農畜産業地域モデルとして、研究開発用に試作・設置したバイオマス変換プラント群の総称でした。メタン発酵、メタン吸蔵、メタン車両用燃料化、コジェネ、炭化、消化液濃縮、水蒸気爆砕、堆肥化等を連動させて、98%メタン（燃料）、液肥などを製造し利用する実証研究を行っていました。なお、プロジェクト研究は2007年にはじまり、2014年に終了しております。

——リサイクルセンターはその前からあったのですか？

相原 はい。まず和郷園のおおもととは平成3年に有



細かくカットされた食品廃棄物

志5名の農家で野菜の産直を開始したことが始まりです。平成10年に和郷園が設立し、その翌年にリサイクルセンターは野菜残渣処理を行うため、リサイクル事業を本格稼働するために作られました。約14年前の話ですが、その頃に政府の方針で、食品廃棄物だとかを各企業から20%削減しなさいという食品リサイクル法が発令になる前後でした。当初、まだ冷凍工場やカット工場はなく、ただ農事組合法人として野菜の出荷をやっていましたのですが、キャベツの外葉だとか、形の悪い大根だとか、一般廃棄物が出ていました。うちの代表の親戚が牧場を経営しており、そこではファームクリーンという堆肥のラインがあったのですが、それまでは牛糞専門でやっていたのですけれども、そこに野菜の残渣をあわせて、何とかリサイクルできないかと立ち上げたのが発端です。

——リサイクル法がきっかけだったのですね

松岡 実は私が入社したのがその14年前です。私がまったく畑違いのところである会社を退職したのを

機に、わが社から「野菜を堆肥化して肥料をつくりたい」と声をかけてもらいました。ビジョンとしてはその頃から、わが社の食品廃棄物をリサイクルしてうちの生産者の畑に返すと、循環させたいということで話でありました。そこから堆肥化事業がスタートしました。ですので、事業自体も14年前ということになります。

——堆肥化での苦心された点は

松岡 私自身、農業高校でしたけれども、そんなに細かい知識も深い知識もなかったもので、最初はいろいろな問題点が出て、すんなり上手くいきませんでした。うまく発酵せず、腐敗するために、堆肥にならない。それらを解決するには約3年から4年ぐらひは繰り返し試行錯誤しました。その間、いろいろ機械だとか、他所さんの知識をもらいながらやりました。ようやく水分が邪魔になると気づきました。要するに水分過多で発酵できなくて腐敗にいたのです。その水分を取り除くにはどうしたらいいのかということでやっている中で、鉄工所の社長と相談しながらいろいろ新たに固液分離機、絞り機だとかを自前でつくりました。そうすると固体と液体に分かれて、固体自体の発酵はスムーズにいくようになりました。しかし、今度は液体の処理が困難しました。結論から言うと、液肥化するため、このバイオマスのプラントが始まるようになりました。リサイクルが立ち上がってから約5年強してからスタートという感じです。

——固体の堆肥化と液体の残渣の処理、つまりメタン発酵で処理をするのは、かなりタイムラグがあったのですね

松岡 そうですね。すでに亡くなっていますが、元場長の阿部がそちら（発酵）の方面（知見）が強く、「液



メタン発酵タンク



タンクの内部

体の処理に困っているのならば、野菜の残渣も牛糞尿と一緒に投入してメタン発酵させて処理して液体肥料にしよう。さらにうちの生産者に液体肥料として散布して、なおかつ手数料をもらえればここは何とか運営できる。さらに農林水産省の補助事業にもなるのでは」と発案し、液肥化が始まりました。

——肥料の評判は

相原 最初はあまりよくはありませんでした。

松岡 肥料に関しては。ある意味ただで手に入る地域なのです。有機肥料に関しても単純に言えば堆肥、これは余っているのです。無償でもいいから撒かせてくれというような地域なのです。そこに液体肥料を有料で撒かせてくれというのは、農家でもかなり抵抗あったと思います。うちの生産者だから使ってくれましたが。

——逆に「使ってよかった」というような声はありますか

松岡 今はあります。「使ってよかった」というよりも、収量が減ることではなく1割程度でも増収、増量しているという例は現実にあります。

当初は国の100%補助事業でスタートしたので、値段はあってなくてよかったのですが、研究事業が終了するときに補助金がゼロになってしまったのです。補助金がなくなっても、えらいメンテナンスの費用が実際にかかっていたのです。年間最低でも200万円以上かかっていたのです。ですので、ある時点でほとんどの機械を止めて、メタン発酵させる部分、消化液をつくる装置だけの稼働にしたのです。そうするとほとんどメンテナンス費用はかからなくなりました。かかるのはランニングコストとしてかかるのは投げ込みのヒーターぐらいです。

——投げ込みのヒーターとは

松岡 このあたりは、冬場は寒いのです。氷点下5度、10度ぐらいまでは下がるのです。だから冬場の電気代のコストだけです。それにここで働く社員数も、当時の半分以上になりました。リサイクルセンタープラス液体肥料を撒く人だけ来てもらっているようにしているので、だいぶコストを下げられますので、現在は燃料代だけもらえれば撒きますよと。

——いくらくらいなのですか

松岡 トンいくらではなく、一反歩あたりで2000円ぐらいです。本当に燃料代なのですが、生産者限定ですし、利益を得ることは考えていません。



液肥を積んだタンクローリー

——その他、気を付けている点はありますか。夏場と冬場で成分が違うとか

松岡 分析などもしたのですが、あまりないですね。

相原 実は当初は牛糞を入れていたのですが、上の牧場で自前の処理施設が作られたため、まったく入れられなくなりました。そのため、硫化水素が当初8,000ppmくらいあったのが、今は生ガスで3,000ppmくらいになりました。また、たんぱく質が少なくなったので、窒素もだいぶ少なくなっています。

——それは困るんじゃないのですか

松岡 一応、牛糞が入らないがためにメタン菌がいなくなってメタン発酵ができなくなると困るのですが、今は、野菜の汁によるメタン発酵のみですね。

相原 確かにリン、窒素など成分が足りなくて発酵不良に陥るかと思っていて、ずっと現場の方には継続してほしいとお願いしていたのですが。今のところは不思議と特に問題はなく順調に動いています。

——最後に今後の抱負など

松岡 今後は食品廃棄物のリサイクルの取組みや、それらによる固形、液体肥料などを多くの方にもっと知っていただけるようになればと思います。今後も山田リサイクルセンターでも、いろいろとチャレンジしていきたいと思います。

——ありがとうございました

おしらせ

民間企業の投稿のご案内

「再生と利用」（公益社団法人 日本下水道協会 発行）は会員並びに関連団体に向けて、下水汚泥の有効利用に関する技術や事例等幅広い情報を発信し、一層の利用促進に寄与することを目的に発行しています。

近年、民間企業による調査研究等が積極的に行われ、先進的かつ有用な成果が多数見受けられます。そこで、これらの情報を掲載するため、投稿要領を次のとおり決めましたので、積極的な投稿をお待ちします。

投稿要領

（資格）

1. 本誌への投稿対象は、下水汚泥の有効利用に携わる民間企業のうち公益社団法人 日本下水道協会の会員となります。しかしながら非会員の場合でも、当会が会員と同等の調査研究の技術力を有する団体と特に認めるものであれば投稿対象とします。

（原稿掲載の取扱い）

2. 原稿掲載の適否は、「再生と利用」編集委員会が決定します。

（掲載可否の判断基準）

3. 掲載適否の主な判断基準は、次の3. 1、3. 2、3. 3、3. 4によります。
 3. 1 単に汚泥処理に関する投稿文でなく、下水汚泥の有効利用の促進に資するものであること。
 3. 2 特定の団体、製品、工法、新技術等を宣伝することを目的とした投稿文（客観的、合理的な根拠を示すことなく、優秀性、優位性、有効性等について具体名を挙げて記述）でないこと。
ただし、次の場合は除く。
 - ①特定の団体、製品、工法、新技術等の紹介が目的であっても、優秀性、優位性、有効性等の客観性かつ合理的な根拠を明確にし、下水汚泥の有効利用の促進に資すると認められるもの。
 - ②特定の団体、製品、工法、新技術等の名称を記述しているが、単に論文の主旨をわかりやすく伝えるために用いており、投稿文の趣旨とは直接関係のない場合。
 3. 3 特定の団体、製品、工法、新技術等を誹謗中傷する内容を含む投稿文でないこと。
 3. 4 その他編集委員会が適当と考える事項について適合していること。

（原稿の作成、部数、送付先等）

4. 原稿の作成は、次のとおりとします。
 4. 1 査読用 複写原稿2部（図表、写真を含みます）
 4. 2 事務用 複写原稿1部（図表、写真を含みます）
5. 原稿の送付先は、下記の担当に送付して下さい。

（校正）

6. 印刷時の著者校正は、1回とし、著者校正時の大幅な原稿の変更は認めません。

（著作権等）

7. 掲載した原稿の著作権は著者が保有し、編集著作権は、本会が所有します。

原稿登載区分

登載区分	原稿量（刷上り頁）	内容
研究紹介	8頁程度（原稿制限頁数はA4判により1頁2,300文字（1行24文字横2段））	独創性があり、かつ理論的または実証的な研究の成果
報告	6頁程度（原稿制限頁数は、同上）	技術導入や経営等に関する検討・実施

担当：公益社団法人 日本下水道協会 技術研究部技術指針課

住所 〒101-0047 東京都千代田区内神田2-10-12（内神田すいすいビル6階）

電話 03-6206-0369（直） FAX 03-6206-0796（直）

おしらせ

「再生と利用」への広告掲載方依頼について

日本下水道協会では、下水汚泥発生量の増加、埋立処分地の確保、循環型社会の構築等の課題に対して、地方自治体における下水汚泥の効率的な処理、有効利用を推進する観点から、「再生と利用」を発行しており、下水汚泥の有効利用に関する専門情報誌として、各方面から高い評価を得ています。本誌は地方公共団体を始めとする多くの下水道関係者のみならず、緑農地関係者にも愛読されていることから、広告掲載は情報発信として非常に効果的であると思われます。

つきましては、本誌に広告を掲載して頂きたい、下記のとおり広告掲載の募集を行います。

記

1 発行誌の概要

発行誌名	再生と利用
仕 様	A4判、本文・広告オフセット印刷
総 頁 数	本文 約100頁
発行形態	年 4 回発行（創刊 昭和53年）
発行部数	1,500部
配布対象	地方自治体 関係官庁（国交省、農水省等） 研究機関 関連団体（下水道、農業等）

2 広告掲載料・広告寸法等

掲載場所	サイズ	刷色	広告寸法	紙質	広告掲載料 （1 回当り）
表 3	1 頁	4 色	縦255×横180	アート紙	154,000円
後付	1 頁	1 色	縦255×横180	金マリ菊/46.5kg	41,000円
後付	1/2頁	1 色	縦120×横180	金マリ菊/46.5kg	25,000円

※ 表 3 は指定頁になります。原則として 2 回以上の継続掲載とします。

※ 広告掲載料は、消費税込みの金額です。

3 広告申込方法及び留意事項

- (1) 広告掲載は、本誌の内容に沿った広告に限り行います。
- (2) 広告掲載のお申込みは、掲載月の40日前（7月発行号に掲載希望の場合は、5月20日）までに別紙「広告掲載申込書」に広告原稿又は流用広告原稿の写しを添付して、次の5に表示の申込先宛にお申し込み下さい。
- (3) 原稿をデータで提出する場合は、データ制作環境（使用OS、アプリケーション、フォント等）を明記のうえ、出力見本を必ず添付して下さい。
- (4) 広告原稿の新規作成又は流用広告原稿の一部修正を依頼する場合は、別紙「広告掲載申込書」にレイアウト案、又は修正指示（流用広告原稿の写しに修正箇所等を明記）をそれぞれ添付して下さい。その際、書体、文字の大

きを指定する等、原稿作成又は修正に必要な事項を明記して下さい。

- (5) 広告原稿の新規作成及び流用広告原稿の一部修正費（デザイン、修正料等）は、広告掲載料とは別に実費をご負担いただきます。
- (6) 本会発行の図書等に掲載した広告に限り、その原稿を流用して掲載することができます。その場合は、別紙「広告掲載申込書」に当該図書名、掲載年月、掲載号等を明記のうえ、原稿の写しを必ず添付して下さい。
- (7) 広告掲載場所は、指定頁以外は原則として申し込み順とさせていただきます。
- (8) 広告申込掲載期間終了後は、その旨通知いたしますが、それ以降の掲載についてご連絡ない場合、または広告申込掲載期間中でも広告掲載料の支払いが滞った場合には、掲載を中止させていただきます。

4 お支払方法等

本誌発行後、広告掲載誌をお送りするとともに、「広告掲載料」及び「広告原稿作成費（広告原稿新規作成及び修正等の場合）」を請求させていただきますので、請求後、1箇月以内にお支払い願います。

なお、送金（振込）手数料は、貴社負担にてお願いします。

5 申込み先及び問合わせ先

広告掲載のお申込み及びお問合わせ先は、下記の広告業務委託先までお願い致します。

広告業務委託先 (株)LSプランニング（担当：「再生と利用」広告係）
〒135-0033 東京都江東区深川2-12-4-201
TEL. 03-5621-7850 (代) FAX. 03-5621-7851
Mail : info@lsweb.co.jp

(参考)

「再生と利用」特集企画予定

- 第152号（平成28年7月発行予定）
平成28年度下水汚泥資源利用等に関する予算及び研究内容と方針の解説
- 第153号（平成28年10月発行予定）
消化ガス設備導入事例
バイオマス産業都市構想の取組み報告
- 第154号（平成29年1月発行予定）
地産地消へ向けた取組み事例他
- 第155号（平成29年3月発行予定）
第29回下水汚泥の有効利用に関するセミナー特集

汚泥再資源化活動

第 139 回「再生と利用」編集委員会

日 時：平成 27 年 12 月 1 日

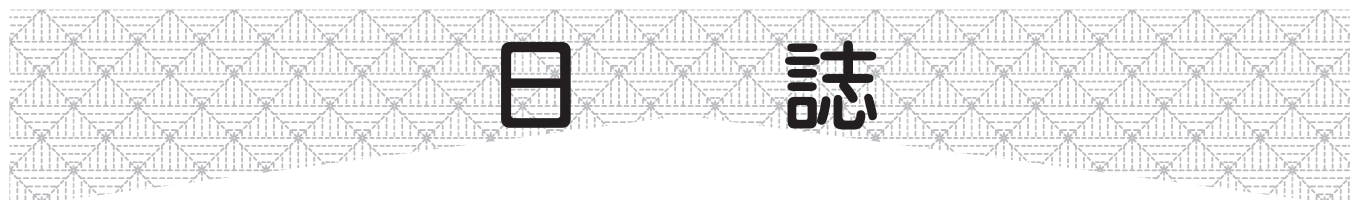
出席者：野池、森田、姫野、島田（正）、南山、落、西田、仲谷、工藤、杉江、島田（卓）、永松（代理）の各委員

- 議 題：（１）前回議事概要の確認
 （２）第 150 号「再生と利用」編集内容について
 （３）第 151 号「再生と利用」編集方針（案）について
 （４）平成 28 年度計画、その他意見交換

議事概要

- ① 前回議事概要について
事務局から資料 3 のとおり報告し了承された。
- ② 第 150 号「再生と利用」編集内容について
事務局から資料 4 のとおり報告し了承された。
- ③ 第 151 号「再生と利用」編集方針（案）について
事務局から、資料 5 のとおり説明を行った。
 学生等からの投稿論文は、担当教授等の連名による投稿であれば問題ないとした。
 国総研の B-dash のガイドラインの投稿紹介が今後シリーズ化されるとのことであれば、掲載区分は「投稿報告」から「報告」に変えるべきではないかとの意見あり、大阪市の中浜処理場での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技術実証事業の掲載についても検討すべきとの意見もあった。南三陸町では被災地で初のメタン発酵（生ごみ＋合併浄化槽汚泥）設備であり口絵等での紹介はしてもいいのではとの意見があった。

- ④ 平成 28 年度計画について
 事務局から、資料 6 のとおり説明を行った。
 特集テーマにおいて「汚泥肥料」の名称では一般的に抵抗があり名称は好ましくないため、「肥料化」等にすべきである。特集テーマにおいて「廃棄物処理技術～」の文言は好ましくない。例えば「下水道システム循環利用～」という表現にすべきとの意見があった。また J-クレジット制度やグリーン認証については石川県や柏崎市で実施しているはずであり、これらの取組み紹介については検討すべきではとの意見もあった。
 大規模農業法人との連携手法等については今後検討できないのかとの意見があり、現状、農作物系では化学肥料が使われているが、下水汚泥由来肥料でも LCC が有利という評価であれば普及は促進していくと考える。また下水汚泥には窒素はもちろんだが、リン酸も豊富に含まれているため、カリウム等の不足分を補えば良好な肥料としてその普及は進むのではないかとのことであった。さらに耕作地、遊休地については現状、化学肥料が使用されているが、これら緑化事業に対してもコンポストメーカーは汚泥由来肥料の使用を要望しているはずであり、これら汚泥由来肥料に含まれる窒素、リン等を緑化事業に対して有効活用した事例特集なども企画していくべきとの意見もあった。
- ⑤ その他・情報交換について
特になし。



平成 27 年 12 月 1 日

第 139 回「再生と利用」編集委員会

本会中会議室

次号予告

（題名は執筆依頼の標題ですので
変更が生じることもあります）

論 説：「バイオマス資源を利活用する水素エネルギー技術の新展開」
特 集：「平成 28 年度下水道事業予算の概要について」
「農林水産省におけるバイオマスの総合利用推進の方針について」
「日本下水道事業団における汚泥の処理・有効利用に関する調査研究の概要」
「土木研究所における下水汚泥等に関する調査」
「資源循環研究部における技術開発について」

研究紹介：「OD 汚泥へのマイクロ波照射によるメタン発酵の促進」
講 座：「リサイクルシステムの検証；「資源の回収」又は「エネルギーの回収」について」
特別報告：「コンポスト肥料中の残留する合成香料関連化合物の検出」
投稿報告：「汚泥燃料施設運転の取組みについて」
報 告：「下水道に集約されるリン資源量の最近の動向」
「JIS 規格に適する下水汚泥乾燥の高品質化の開発」
そ の 他：会報、行事報告、次号予告、関係団体の動き

編集後記

「再生と利用」の編集を担当させていただき、早くも3年が過ぎようとしております。

この期間におきましては目まぐるしい技術革新の中で「再生と利用」の編集のあり方も問われた時期でもあり、編集内容に対しては試行錯誤の繰り返しで大変苦労しました。

このような中での編集方針として下記内容を新たに盛り込むこととしました。

- ① 下水汚泥以外のバイオマス（例えば生ごみ系、食品系、畜産系、農業系等）の有効利用の取組み
- ② 下水道空間を活用した再生可能エネルギー（太陽光、風力、小水力等）の取組み
- ③ 下水処理再生水の有効利用の取組み

以上の項目を編集方針に盛り込むことにより、より幅広く自治体の皆様の取組み（例えばバイオマス産業都市構想、固定価格買取制度、複合バイオマス処理等）

を紹介させていただくことができ、かつ農業利用への取組みも肥料利用だけでなく、再生水利用にもスポットをあてることもできました。

また、研究機関の先生方に対しましても、下水汚泥だけにテーマを絞られることなく、バイオマス全般（水系からのN,P利用も含めて）の有効利用における研究紹介も行うことができ、より充実とした誌面とすることができました。

今後においても「再生と利用」は読者の皆様に対し、少しでもニーズに答えるべく新たなテーマ（新技術）及び、技術面や事業継続性などの課題点の模索を継続し、誌面へ反映させていただく予定です。

末筆ながら、前号の150号記念号の編纂におきましては編集委員の皆様及び、関係自治体、関係団体の皆様には多大なるご協力いただきましたことにこの場をお借りし厚く御礼申し上げます。（AM）

「再生と利用」編集委員会委員名簿

		(順不同・敬称略) (28.1.29 現在)
委員長	東北大学名誉教授	野池達也
委員	日本大学生産工学部土木工学科教授	森田弘昭
	長岡技術科学大学准教授	姫野修司
〃	国土交通省水管理・国土保全局下水道部 下水道企画課資源利用係長	和田直樹
〃	国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター上席研究員	南山瑞彦
〃	地方共同法人日本下水道事業団技術戦略部 課長代理	島田正夫
〃	(公財) 日本下水道新技術機構資源循環研究部副部長	落修一
〃	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 東北農業研究センター水田作研究領域上席研究員	西田瑞彦
〃	国立研究開発法人農業環境技術研究所 土壤環境研究領域長	川崎晃
〃	(一財) 日本土壌協会参与土壌部長兼広報部長	仲谷紀男
〃	札幌市建設局下水道施設部 新川水処理センター管理係長	村上栄一郎
〃	山形市上下水道部浄化センター水質係長	工藤守之
〃	東京都下水道局計画調整部 技術開発課技術開発主査	冠城敏之
〃	横浜市環境創造局下水道施設部 栄水再生センター長	広武賢一
〃	名古屋市上下水道局技術本部計画部 技術管理課主査(水質系技術開発)	杉江淳
〃	大阪市建設局下水道河川部水環境課担当係長	島田卓
〃	広島市下水道局管理部管理課水質管理担当課長	福田佳寛
〃	福岡市道路下水道局下水道施設部施設管理課長	崎野寛

「再生と利用」

Vol. 40 No. 151 (2016)

平成 28 年 3 月 31 日 発行
(平成 27 年第 4)

発行所 公益社団法人 日本下水道協会

〒101-0047 東京都千代田区内神田 2-10-12
(内神田すいすいビル 5～8 階)
電話 03-6206-0260 (代)
FAX 03-6206-0265

新刊案内

「下水汚泥有効利用促進マニュアル」

～持続可能な下水汚泥の有効利用を目指して～

平成 27 年 7 月 日本下水道協会発行

頒布価格 (CD-ROM 付) 26,000 円

員頒布価格 (CD-ROM 付) 13,000 円

本書は下水汚泥由来の資源・エネルギーの一層の有効活用に向けた時代ニーズに応えるため、これまでの下水汚泥有効利用関連の図書を 1 冊に統合したマニュアルです。

これまで、「下水汚泥の建設資材利用マニュアル(案) 2001 年版」、「下水汚泥の農地・緑地マニュアル 2005 年版」、等 を刊行し、一部の修正・見直しを行ってきました。

このような中、肥料利用においては汚泥由来の有機質肥料について調査を行い作物への施用効果の知見が蓄積されてきており、建設資材利用においては 1 部リニューアルを行ってきましたが、直近における民間や自治体の事例等を新たに調査し提供していく必要があり、またエネルギー利用においては近年バイオガスや固形燃料化などの有効利用技術手法も多様化しております。

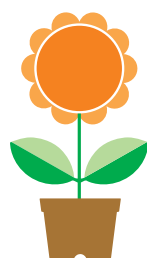
そこで、肥料利用、建設資材利用、エネルギー利用の 3 分野の技術を統合し、会員等の地域ニーズに適合した総合的な活用手法等を提供するため、最新の動向及び技術を盛り込んであります。

マニュアル目次構成

- 第 1 章 総則
- 第 2 章 下水汚泥利用促進の現状及び動向
- 第 3 章 各分野技術のマネジメント (Plan&Do)
 - 第 1 節 総説
 - 第 2 節 下水汚泥肥料
 - I 下水汚泥を原料とする肥料の基本事項
 - II 肥料化の適用事例
 - III マーケティングの充実に向けての課題と方策
 - 第 3 節 下水汚泥建設資材
 - I 下水汚泥を原料とする建設資材の基本事項
 - II 建設資材の適用事例
 - III マーケティングの充実に向けての課題と方策

- 第 4 節 下水汚泥エネルギー化
 - I 下水汚泥を原料とするエネルギーの基本事項
 - II エネルギー化技術の適用事例
 - III マーケティングの充実に向けての課題と対応策
 - 第 4 章 総合的な評価と見直しの考え方
 - 第 1 節 評価の基本的な考え方と評価手法
 - 第 2 節 見直しによる改善・更新等に当たっての考え方
- CD-ROM の添付内容 (目次)
- 1. 下水汚泥・有効利用にかかる主な各種法令一覧
 - 2. 公共事業における利用促進の具体事例 (マニュアル記載以外の事業実施事例)
 - 3. 汚泥有効利用促進に関する診断チェックシート

問合せ先 (公社) 日本下水道協会 技術研究部技術指針課
電話 03-6206-0369
FAX 03-6206-0796



再生と利用

公益社団法人 日本下水道協会

〒101-0047 東京都千代田区内神田2-10-12(内神田すいすいビル5～8階)
TEL03-6206-0260(代表) FAX03-6206-0265