

再生と利用

2014 Vol. 38

No. 142

主要目次

- 口絵 柏崎市自然環境浄化センター
消化ガス発電装置の導入について
下水污泥緑農地利用に関する調査研究活動
- 巻頭言 世界に誇れるリーディング都市へ 松浦 将行
- 特別寄稿 有機性廃棄物及び未利用バイオマスの資源・エネルギー化
ー特に下水污泥についてー 吉田 弘之

特集 中小規模の消化ガス発電導入事例、 開発事例&再生可能エネルギー固定価格買取制度導入事例

- 解説 山形市浄化センター 燃料電池による発電 工藤 守
ディスプレイと消化ガス発電の取組について 齊藤 卓也
太田川流域下水道東部浄化センター
ロータリーエンジン消化ガス発電システムについて 長尾 斉
石川県犀川左岸浄化センターにおける消化ガス発電の固定価格
買取制度の活用について 田中 伸佳
神戸市垂水処理場「こうべWエコ発電プロジェクト」について
..... 坂部 敬祐
栃木県県央浄化センターにおける燃料電池発電と固定価格買取
制度における設備認定 西川 能文
- 研究紹介 北陸・石川における污泥や廃棄性生物資源の利用 長谷川和久
- Q&A 堆肥とは？（続き） 仲谷 紀男
- 現場からの声 ベルトプレス脱水機における消化污泥脱水に用いる高分子凝集
剤の比較法 山口 実苗
- 文献紹介 污泥の動電学的処理によるカドミウム、ニッケル、亜鉛の移動
と変化 川崎 晃
バイオディーゼル生産のための湿潤下水污泥のエステル交換反
応 三宅十四日
- 講座 燐酸製造原料としての焼却灰利用の取り組み 用山 徳美
りん酸肥料代替資材としての下水污泥焼却灰の利用 城 秀信
- 特別報告 脱水・燃焼・発電を全体最適化した革新的下水污泥エネルギー
転換システム 守屋 由介・柳瀬 哲也・増井 文典・松村 茂樹
下水道バイオマスからの電力創造システムに関する技術実証研究
～平成25年度下水道革新的技術実証事業(B-DASHプロジェクト)～
..... 鮎川 大祐
- 投稿報告 スウェーデン・ヴェステロースで開催された包括的な污泥管理
に関する国際会議報告 大下 和徹・高岡 昌輝
嫌気性消化に関するIWA第13回国際会議（13th World
Congress on Anaerobic Digestion）参加報告
..... 小林 拓朗・李 玉友
- コラム （一社）地域環境資源センター（JARUS）における集落排水
とバイオマスへの関わり 佐藤 進
- 報告 下水污泥資源の平成23年度有効利用調査結果 安陪 達哉
- ニュースポット 污泥肥料の地産地消 地元高等学校と連携した特産物栽培研究
..... 岸本 賢一
- 資料 おしらせ（投稿のご案内、広告掲載依頼）、污泥再資源化活動、
日誌・次号予告・編集委員会委員名簿、編集後記

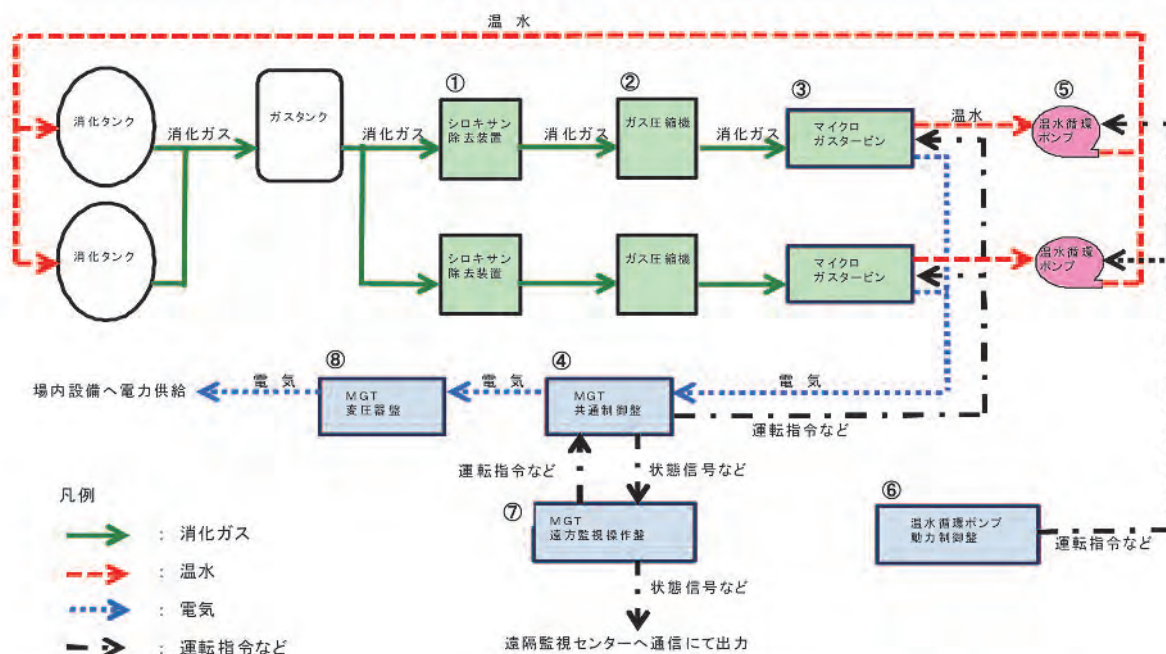
柏崎市自然環境浄化センター 消化ガス発電装置の導入について

柏崎市では平成18年度に「バイオマスタウン構想」を策定し、各種バイオマス資源の有効利用と事業化を行うことで二酸化炭素の排出抑制に取り組む方針を定めました。その中の主要事業の一つとして柏崎市自然環境浄化センター内に消化ガス発電装置の導入を行い、平成25年2月から本格稼働を開始しました。

同センターの汚泥減量化の過程で発生する消化ガス（年間約97万立方メートル）は、燃焼機器に有害なシロキサンを除去後、ガス圧縮機で0.6MPに昇圧され、2台のマイクロガスタービンに供給されます。これを燃焼させてタービンを回転することで発電を行い、装置内の発電制御盤で利用可能な電気に変換します。また燃焼後の高温な排気ガスから熱を回収し、温水を発生させて消化槽の加温に有効利用するコージェネレーションシステムを構築しており、発電を含めた総合熱効率は最大で76%になります。

発電出力は95kW×2台で合計190kW、年間約138万kWhを発電する見込みです。これにより同センターの使用電力量の34%をまかなうほか、760tの二酸化炭素の排出削減を予定しています。なお本格運転に先立ち15年間の保守管理業務委託（24時間遠隔監視含む）を(株)荏原製作所北陸支社と締結し、万全の体制で運転を行っています。

マイクロガスタービンコージェネレーションシステム概略フロー



① シロキサン除去装置



② ガス圧縮機



③ マイクロガスタービン



⑤ 温水循環ポンプ

下水汚泥緑農地利用に関する 調査研究活動

日本下水道協会技術研究部技術指針課
「再生と利用」編集委員会事務局



日本下水道協会と日本土壌協会では下水汚泥緑農地利用に関する調査研究活動として、千葉県白井市の圃場にて種々の下水汚泥肥料を施用して果菜類、葉菜類、根菜類などの食材に対する窒素肥効に関する調査研究活動を行っております。



窒素肥効試験から収穫されたズッキーニ及びナス

口絵

柏崎市自然環境浄化センター 消化ガス発電装置の導入について
下水汚泥緑農地利用に関する調査研究活動

巻頭言

世界に誇れるリーディング都市へ 松浦 将行..... (5)

特別寄稿

有機性廃棄物及び未利用バイオマスの資源・エネルギー化
ー特に下水汚泥についてー 吉田 弘之..... (6)

特集 中小規模の消化ガス発電導入事例、開発事例&再生可能エネルギー固定価格買取制度導入事例

解説

山形市浄化センター 燃料電池による発電 工藤 守..... (14)
ディスポーザと消化ガス発電の取組について 斉藤 卓也..... (19)
太田川流域下水道東部浄化センター
ロータリーエンジン消化ガス発電システムについて 長尾 斉..... (23)
石川県犀川左岸浄化センターにおける消化ガス発電の固定価格買取制度の活用について
..... 田中 伸佳..... (27)
神戸市垂水処理場「こうべWエコ発電プロジェクト」について 坂部 敬祐..... (30)
栃木県県央浄化センターにおける燃料電池発電と固定価格買取制度における設備認定
..... 西川 能文..... (32)

研究紹介

北陸・石川における汚泥や廃棄性生物資源の利用 長谷川和久..... (35)

Q & A

堆肥とは？（続き） 仲谷 紀男..... (41)

現場からの声

ベルトプレス脱水機における消化汚泥脱水に用いる高分子凝集剤の比較法 … 山口 実苗..... (43)

文献紹介

- 汚泥の動電学的処理によるカドミウム、ニッケル、亜鉛の移動と変化 …… 川崎 晃 …… (47)
バイオディーゼル生産のための湿潤下水汚泥のエステル交換反応 …… 三宅十四日 …… (48)

講座

- 燐酸製造原料としての焼却灰利用の取り組み …… 用山 徳美 …… (49)
りん酸肥料代替資材としての下水汚泥焼却灰の利用 …… 城 秀信 …… (55)

特別報告

- 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
…………… 守屋 由介・柳瀬 哲也・増井 文典・松村 茂樹 …… (58)
下水道バイオマスからの電力創造システムに関する技術実証研究
～平成25年度下水道革新的技術実証事業（B-DASHプロジェクト）～ …… 鮎川 大祐 …… (64)

投稿報告

- スウェーデン・ヴェステロースで開催された包括的な汚泥管理に関する国際会議報告
…………… 大下 和徹・高岡 昌輝 …… (71)
嫌気性消化に関するIWA第13回国際会議
（13th World Congress on Anaerobic Digestion）参加報告
…………… 小林 拓朗・李 玉友 …… (77)

コラム

- （一社）地域環境資源センター（JARUS）における集落排水とバイオマスへの関わり
…………… 佐藤 進 …… (85)

報告

- 下水汚泥資源の平成23年度有効利用調査結果 …… 安陪 達哉 …… (86)

ニュース・スポット

- 汚泥肥料の地産地消 地元高等学校と連携した特産物栽培研究 …… 岸本 賢一 …… (89)

資料

- おしらせ（投稿のご案内、広告掲載依頼） …… (91)
汚泥再資源化活動 …… (95)
日誌・次号予告・編集委員会委員名簿 …… (98)
編集後記 …… (100)

※本文中の表題で記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

世界に誇れるリーディング都市へ

東京都公営企業管理者 下水道局長

松 浦 将 行



新しい年を迎え、皆さま方に謹んで御挨拶申し上げます。

昨年9月7日、ブエノスアイレスにおいて2020年オリンピック・パラリンピック競技大会が東京で開催されることが決まり、久々に日本中に明るいニュースがもたらされたことと思います。

これからオリンピック・パラリンピック開催都市にふさわしい国際都市・東京を創造していく上で、東京都の下水道事業も6年後を目指した精力的な取組が求められることになります。開催期間中の安全性を確保するため、下水道機能の維持や道路陥没の未然防止を目的とした下水道管の再構築や、局部的集中豪雨などによる被害の防止に向けた浸水対策などを着実に推進するとともに、高速ろ過や雨水貯留池の整備等による合流式下水道の改善対策や高度処理および準高度処理の導入など、東京湾の水質改善に貢献する取組などを精力的に進めてまいります。

オリンピック・パラリンピックは、4年に一度の世界的なスポーツの祭典であり、その開催内容とともに開催都市のさまざまな取組が世界の注目を浴びることになります。我々も安全・安心できる快適な都市の実現に向けて、下水道の先進的な取組を展開することで、この世界的イベントの成功に貢献し、世界中からのお客さまを「おもてなし」していきたいと思っております。

さらに将来を見通すと、オリンピック・パラリンピック開催を契機として、東京を持続可能な都市として発展させるべく、上述の安全・安心の取組に加えてエネルギー利用のさらなる効率化など、都市活動と環境を両立させる取組が必要になります。

東京都区部では、1日あたり約500万 m^3 /日（東京ドーム約4杯）の下水を処理しており、その汚泥処理の過程で約2,600wt/日の脱水汚泥が発生しています。東京都では従前から最終処分場の延命化を喫緊の課題として、脱水汚泥は平成15年度から全量焼却し、1日当り約100tの焼却灰に減量化していますが、減量化に止まらず、循環型社会の形成のために焼却灰を有効な資源として活用するため、これまでに民間企業と連携してさまざまな製品を開発し、セメント原料、軽量骨材原料（メサライト）、粒度調整灰（スーパーアッシュ）と順次資源化の充実に努めてきました。

奇しくも平成23年3月11日に発生した東日本大震災の発生以降、東日本の多くの自治体で下水汚泥から放射性物質が検出され、下水汚泥の資源化は停止を余儀なくされています。最近では放射性物質の濃度が低減傾向にあることから、東京都においても安全性を確認しながら一部のメニューを再開していますが、本格的な再開には至っておりません。都民や関係機関に御理解と御協力をお願いしつつ、新たな資源化製品の開発なども視野に入れ、再開に尽力してまいります。

また、東京電力福島第一原子力発電所などの事故を受け、我が国全体のエネルギー政策のあり方が問われており、日々大量のエネルギーを使用する下水道事業も、省エネルギーや創エネルギーの取組を加速させる必要があります。

東京都では平成16年から森ヶ崎水再生センターにおいて、下水道事業では国内初となるPFI方式により汚泥消化ガスを使用した常用発電事業を開始したほか、平成19年には東部スラッジプラントにおいて、下水汚泥から炭化燃料を製造し、国内で初めて石炭火力発電所において石炭の代替燃料とする施設の運転を開始するなど、先導的に取組を展開してまいりました。

今後についてもコスト縮減の工夫を取り入れつつ、メガワット級の太陽光発電を森ヶ崎水再生センターなどに導入するほか、脱水汚泥の水分量を一層削減することで補助燃料を不要とし、焼却排熱の大部分を使用した発電により自ら電力を供給できる、超低含水率型脱水機とエネルギー自立型焼却炉を組み合わせた第三世代型焼却システムの開発・導入も進めてまいります。

下水道は都市活動において消費されたエネルギーなどが水とともに流入してくるという特性を有していることから、資源やエネルギーの有効利用に大きく貢献できるという強みがあります。

下水熱の利用に関しては、地域冷暖房事業などは東京都が平成6年に文京区後楽一丁目地区で開始したことを皮切りに全国に広まっており、近年は都市再生において下水熱の活用を促進する仕組みづくりが進められておりますが、こうした新しい社会の創成には下水道事業関係者はもちろんのこと、街づくりや社会資本整備に係わる各業界が連携していくことが必要となります。

東京都も世界に誇れるリーディング都市を目指して再生・利用の取組を広げてまいりますので、引き続き皆さまの御支援、御協力をお願いします。今年が多くの皆様にとってより良き年となりますよう祈念申し上げます。

特 別 寄 稿

有機性廃棄物及び未利用バイオマスの資源・エネルギー化 —特に下水汚泥について—

Universiti Putra Malaysia 教授、大阪市立大学客員教授、大阪府立大学名誉教授
吉田 弘之

キーワード：有機性廃棄物、亜臨界水、高速高消化率メタン発酵、ガス発電、メタン自動車・バイク、二酸化炭素削減

1. はじめに

我が国における産業廃棄物の排出量は2009年度実績で年間約3億9千万トン、一般廃棄物は約4千6百万トンにもものぼっている。これらの量は、国を挙げての努力により年々減少しつつあるものの、最終処分場の枯渇、二酸化炭素削減問題も含め、危機的状況にあることには変わりはない。

筆者は、これら廃棄物の70%以上を占める有機性廃棄物および未利用バイオマスの資源・エネルギー化技術確立すれば、わが国はもとより世界の廃棄物問題の多くを解決することになると考え、亜臨界水処理や過熱水蒸気による資源・エネルギー化技術開発の基礎から実用化まで詳細な研究を行ってきた。ここではそれらの研究の中で、特に下水汚泥の連続亜臨界水処理を前処理とする高速高消化率メタン発酵についていくつかを紹介する。

2. 亜臨界水とは

図1に水の状態図を示した。水を密閉容器に入れ温度を高くしていくと膨張して密度は小さくなる。一方、水蒸気の圧力は増加し密度が大きくなる。さらに温度を上げていくと、374℃、218atm (647K、22.1

MPa) で水と水蒸気の密度が等しくなり、それらの区別がつかない状態になる。この点を臨界点という。臨界点以上の温度圧力の水を超臨界水といい、少量の酸化剤の存在で強烈な酸化力を示し、有機物は瞬時に二酸化炭素になる。臨界点以下の温度圧力の水を亜臨界水と呼ぶ。図2に水のイオン積および誘電率に及ぼす温度の影響を示した。水のイオン積は、250℃付近で最大値を示す。亜臨界水の加水分解力はこの付近で最大となり、有機物を高速で水に溶ける低分子にまで分解する。しかし、酸化はほとんど起こらず二酸化炭素の発生もほとんどない。誘電率は温度の上昇に伴い小さくなるため、油を抽出する力が強く、有機物中の

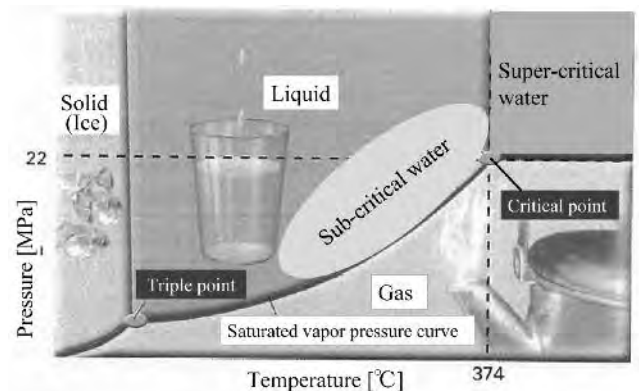


図1 水の状態図

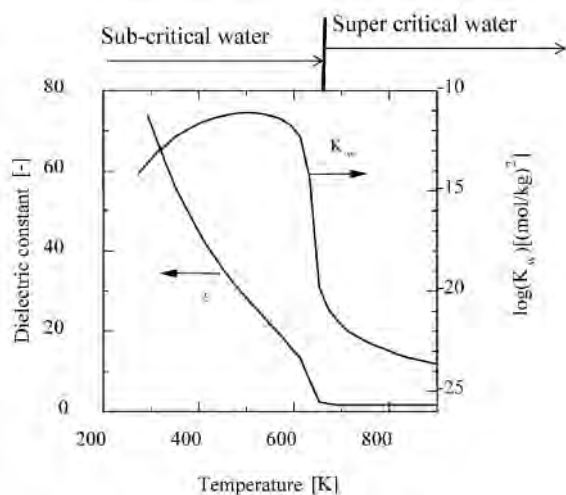


図2 水のイオン積及び誘電率に及ぼす温度の影響

油をほぼ100% 瞬時に抽出する。臨界点付近に近づく
と水のイオン積の減少に伴い加水分解力は衰え、熱分
解力が強くなる。以上の亜臨界水の主な特徴をうまく
利用すれば、高速高効率かつ低コストで有機性廃棄物
や未利用バイオマスから種々の有価物やエネルギーを
生産することが可能となる。

3. 有機性廃棄物や未利用バイオマスの亜臨界水処理

筆者らは、様々な有機物に対して詳細な亜臨界水処

理基礎・応用実験を実施した¹⁻¹¹⁾。結果の概略を図3
に示した。

250℃付近以下の温度では主に加水分解により、固
体タンパク質はほぼ完全に水に可溶化し、水溶性タン
パク質、ペプチド、アミノ酸、有機酸などに転換され
た。木質系バイオマスからは、糖類や有機酸が生成し
た。反応時間は10分以下で十分であった。木質系では
乾燥原料の約20%が糖類に転換できた。また、生分解
性プラスチックの原料となる乳酸は最大8%程度得ら
れた。骨は、骨を形成するタンパク質などの有機物が
加水分解により可溶化し、油分も亜臨界水に抽出さ
れ、結果としてフレーク状もしくは粉末の純度の高い
リン酸カルシウムとなった。魚、肉類などに含まれる
油は250℃以下の温度でほぼ100%抽出回収できた。

温度が250℃付近以上になると、温度の上昇に伴い
加水分解力が急激に衰え熱分解力が増加し、タール状
の油が生成する。木質系では乾燥原料の最大50%が油
化した。これは重油代替油として使用できると考えて
いる。また、水溶性タンパク質は反応時間30秒以下で
固化し生分解性プラスチックとなることも明らかにし
ている。

以上、詳細は省略するが、個々についてきわめて興
味深い結果を得ている。

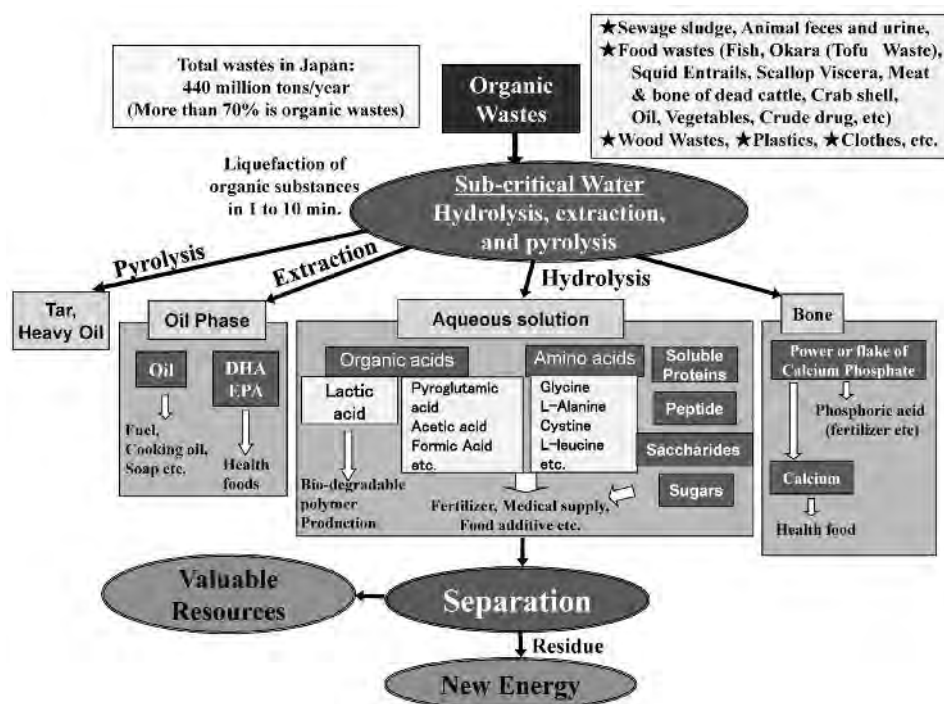


図3 有機性廃棄物の亜臨界水処理実験結果のまとめ

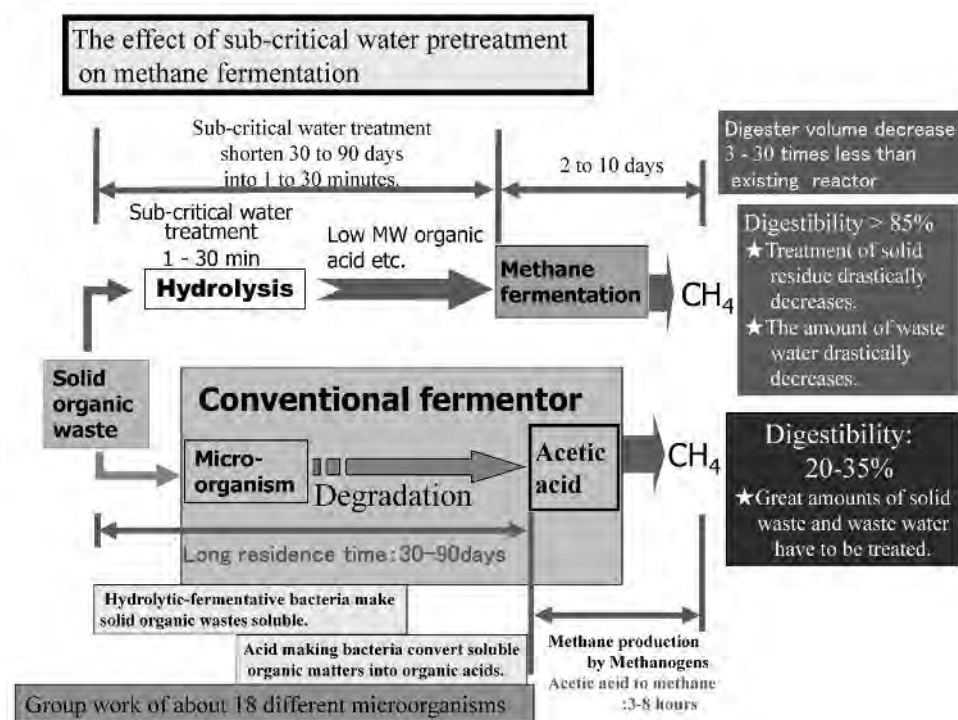


図4 通常のメタン発酵と亜臨界水処理を前処理とする高速高消化率メタン発酵の比較

4. 下水汚泥の連続亜臨界水処理を前処理とする高速高消化率メタン発酵

日本の産業廃棄物の約45%が汚泥であり、その多くは下水処理場から排出される余剰汚泥である。余剰汚泥は99.5%の水分と0.5%の有機物（主に微生物）からなり、わが国では、乾燥ベースで年間約215万トン排出されている。市町村は下水道の普及に努めなければならないが、しかし普及すれば余剰汚泥の処理費が比例して増加し財政負担も増加するという矛盾に常に悩まされるところである。

わが国では、余剰汚泥は通常含水率80%前後にまで濃縮脱水後、大量の化石燃料を用いて焼却（72.4%）、あるいは溶融スラグ化（8.9%）まで行なわれている。他国はほとんど埋め立て処分している。中国のある大都市高級住宅街の中心にある下水処理場を見学したことがある。活性汚泥処理プロセスはヨーロッパ製の最新の設備であったが、余剰汚泥の処理について質問したところ、「知らない」の一点張りであった。

余剰汚泥や動物の糞尿、食品廃棄物などをメタン発酵してエネルギー化しようとする試みも行われている。しかし、中温メタン発酵（37℃付近）では消化速度が30～75日と遅く消化率も25～35%、良くて50%と低い。従って、大面積の土地と大きな発酵槽が必要となり、さらに固体残渣の処理と廃水処理に大きなコ

ストがかかるため、土地の安い所に建設したメタン発酵・ガス発電プラントにおいても赤字が発生している。

図4に通常メタン発酵及び亜臨界水処理を前処理とするメタン発酵の比較を示した。既往の研究¹²⁾によると、メタン発酵は、約18種類の菌の共同作業により行われている。まず加水分解菌が固体有機物を可溶化し、ついで酸生成菌がこれを有機酸（主に酢酸）に転換する。この2つの過程が律速段階で、30～75日を要する。一旦有機酸になるとメタン生成菌により、3～8時間でメタン（約60%）と二酸化炭素（約40%）に転換される。

一方、亜臨界水の最大の特徴は、有機物を1～10分、長くて20分以内に加水分解し、糖、有機酸やアミノ酸などに転換することである。したがって、亜臨界水処理を前処理に置くことにより、通常メタン発酵の加水分解菌と酸生成菌が30～75日かけて行なう仕事を1～10分で行なうことになり、大幅な反応時間の短縮と装置の小型化、消化率の向上などの効果が期待できる。

図5に活性汚泥処理後の余剰汚泥（堺市泉北下水処理場）を亜臨界水処理した結果を示した。200℃では固相の量は原液に比べ1/3以下になった。280℃では、汚泥の有機物はほぼ全てが可溶化した。

活性汚泥の余剰汚泥（含水率92.9%）を反応温度240℃で亜臨界水処理した後、遠心分離をすると、最

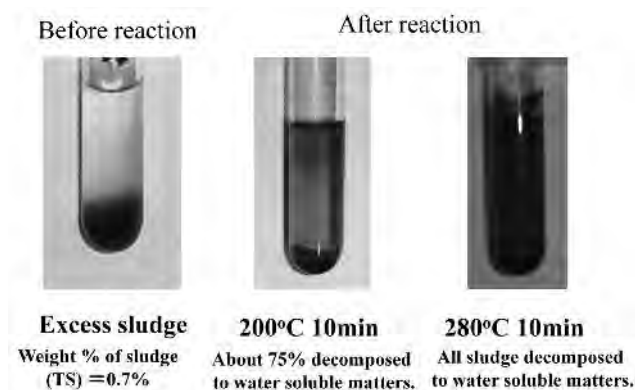


図5 下水の活性汚泥処理後の余剰汚泥の亜臨界水処理
(余剰汚泥：堺市泉北下水処理場提供)

下層に未反応汚泥、次に水相、最上層には油相を確認した。水相と油相の界面に白っぽい固体が集まった。これが何であるか分析できず不明であるため、Suspended Solid と呼ぶことにした。水よりも軽く油より重い固体が亜臨界水反応により生成したものと思われる。油は分析した結果でんぷら油であることが分かった。一般家庭、レストラン、食品工場から排出された食用油と考えられる。図6¹³⁾にそれらの割合(乾燥余剰汚泥基準)の経時変化を示した。5分以降未反応汚泥は一定値を示していることから、汚泥の有機物が5分以内にほぼ完全に分解したと考えられる。油は約8%含まれていた。

水相を分析すると、種々のアミノ酸および有機酸が生成していた。図7¹³⁾に全有機酸及び全アミノ酸収率の経時変化を示した。アミノ酸は5分以内に反応が終了している。一方有機酸は20分経過しても増加傾向にある。これは、加水分解により生じたペプチドやアミノ酸がさらに酸化分解あるいは熱分解により有機酸に転換するためである。

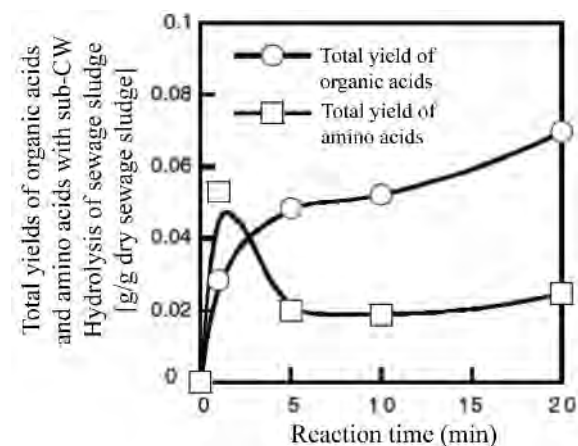


図7 余剰汚泥の亜臨界水処理による全有機酸及び全アミノ酸生成の経時変化
(反応温度：240℃、含水率92.9%)

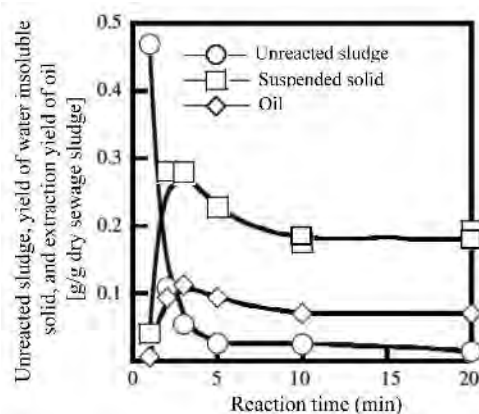


図6 余剰汚泥の亜臨界水処理による未反応汚泥、水に不溶な固体(SS)の生成及び油の抽出の経時変化(反応温度：240℃、含水率92.9%)

図8に水相中に生成した個々の有機酸およびリン酸収率の経時変化を示した。主な生成物はリン酸、酢酸及びピログルタミン酸であった。他は少量であった。なお、リン酸は下水中の濃度に比べかなり濃縮されており、この亜臨界水処理液からリン酸を回収すれば、下水からリン酸を回収するより低コストとなる。

図9に余剰汚泥のメタン発酵に及ぼす亜臨界水処理の前処理効果を示した。実験はバッチ発酵槽を用いて行った。メタン生成量は余剰汚泥を直接メタン発酵した場合に比べ2倍以上となっている。

連続メタン発酵実験も実験室レベルの装置を用いて実施した。詳細は省略するが、余剰汚泥を直接メタン発酵した場合、滞留時間が25日より短くなると発酵液のpHが急激に減少しメタン発生量が激減した。一方、亜臨界水処理で前処理した余剰汚泥を用いると、滞留時間が25日より長いところでは、メタン発生量は通常法の2倍あるいはそれ以上であった。さらに滞留時間を10日まで短くしても少しメタン発生量が少なくなる

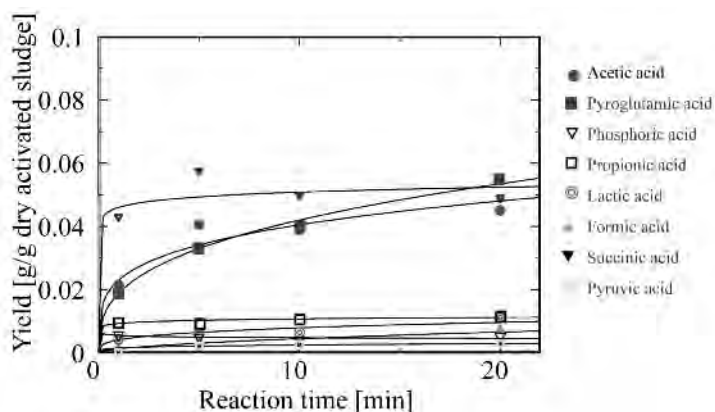


図8 余剰汚泥の亜臨界水処理による有機酸及びリン酸生成の経時変化
(反応温度：240℃、含水率92.9%)

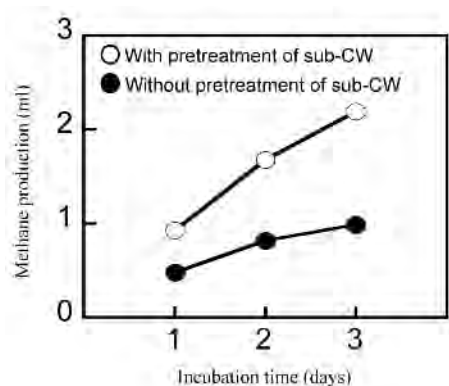


図9 余剰汚泥のメタン発酵に及ぼす亜臨界水前処理の影響（バッチ発酵）

程度で問題なく安定発酵を続けることができた。

筆者は余剰汚泥の亜臨界水処理を前処理とする高速高消化率メタン発酵プロセスを提案している（図10の下段）。図の上段は堺市の泉北下水処理場を例として示した典型的な大都市下水の活性汚泥処理場から発生する余剰汚泥処理プロセスの概略である。約17万人の下水を活性汚泥処理し、TS=1%の余剰汚泥が一日1000トン発生している。この余剰汚泥や他の下水処理場からの余剰汚泥（いずれもTS=1%）はそれぞれパイプラインで一つの焼却施設に集められ、そこで濃縮脱水後焼却あるいは溶融スラグ化が行われている。

図10下段の提案プロセスに従って、堺市泉北下水

処理場についてフィジビリティスタディを実施した。結果を表1に示した。まず、TS=1%の余剰汚泥をTS=10%まで脱水濃縮する。ここで、余剰汚泥の流量は1000t/dから100t/dに減少する。これを連続亜臨界水処理した後、メタン発酵槽に連続的に供給する。連続メタン発酵槽における反応温度は37℃、滞留時間は10日で通常のメタン発酵の滞留時間の1/3～1/6である。したがって、反応槽の大きさも通常法の1/3～1/6となり、イニシャルコスト及びランニングコストの大幅削減が期待できる。基礎実験の結果から、消化率を80%、発生ガスの組成はメタン60%、二酸化炭素40%として計算した。このバイオガスを用いてガス発電する場合、二酸化炭素の除去が不要でそのままジーゼルエンジン及び発電機を運転できることは後述のパイロットプラントで実証している。発電効率を30%とすると、発電量は年間4,600MWhとなる。亜臨界水処理及びメタン発酵の運転コストが年間860MWhと推定できることから、年間3,830MWhの余剰電力が得られる。これを下水処理場内で使用することにより買電量を削減することができる。

一方、従来法では、堺市はこの泉北下水処理場の余剰汚泥の処理だけで年間3.65億円を支出している。亜臨界水処理・メタン発酵を併設することにより、余剰汚泥のメタン発酵消化率80%が達成できることから、最終的に汚泥の処理工場に持ち込む量は従来法の1/5となり、処理費も1/5の0.73億円となる。この余

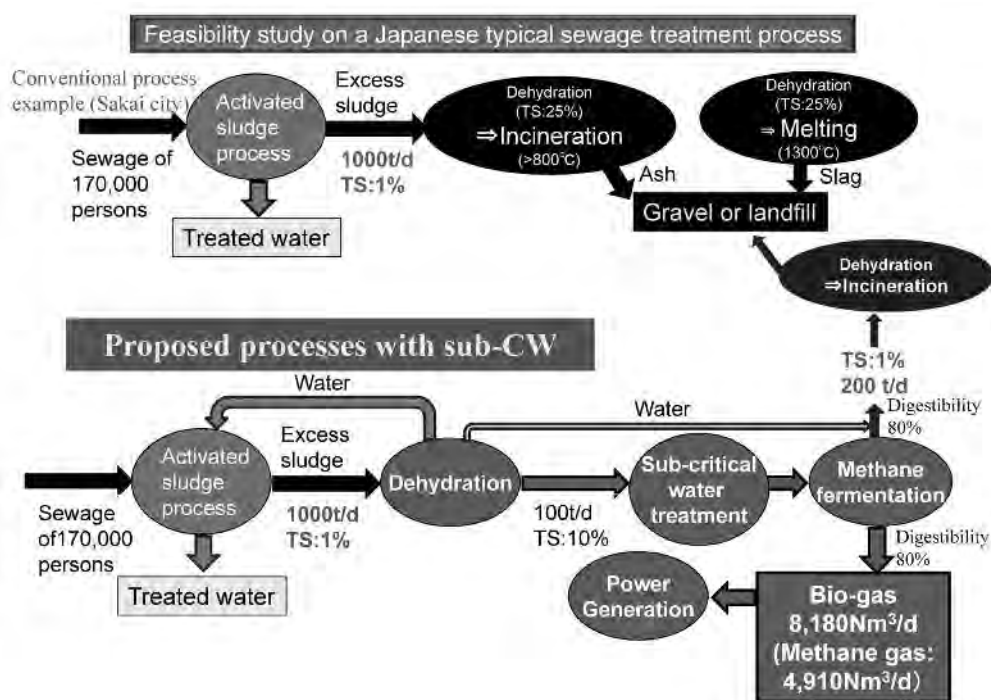


図10 大都市下水の活性汚泥処理余剰汚泥の処理プロセスおよび亜臨界水処理を前処理とする高速高消化率メタン発酵プロセスの提案

表1 亜臨界水処理を前処理とする余剰汚泥のエネルギー化プロセスに対するフィジビリティスタディー

Feed	Yield of gas (digestibility: 80%)	Power generation (efficiency: 30%) ①	Power consumption for sub-CW and fermentation processes ②	Excess Power that can be used in this factory ③ (= ① - ②)	Running cost for incineration of excess sludge	Reduction of CO ₂
Excess Sludge TS = 10% 100 tons/d	Biogas: 8,180 Nm ³ /d Methane: 4,910 Nm ³ /d	4,600 MWh/y	860 MWh/y	3,830 MWh/y	¥73 million/y (Conventional method: ¥365 million/y)	Use of power ③: 3,930 tons/y The amount of sludge incinerated is reduces to 1/5: 4,200 tons/y The amount of combustion improver (heavy oil) is reduces to 1/5: 9,300 tons/t Total: 17,430 tons/y

剰汚泥の削減効果は財政負担の軽減のみならず、以下の二酸化炭素削減に大きく寄与する。

5. 二酸化炭素の削減効果

前述の通り、本提案プロセスにより余剰電力 3,830MWh/y が得られ、これを活性汚泥処理工場内で使用すると工場内でのCO₂削減量は年間3930トンとなる。さらに、余剰汚泥の焼却量が従来法の 1/5 となるため膨大なCO₂削減効果が期待できる。まず、汚泥そのものの焼却に伴い発生するCO₂が従来法の 1/5 となることから、削減量は年間4200トンとなる。この焼却する余剰汚泥は80%程度の水を含んでおり、大量の重油を助燃材として用いている。この量も 1/5 になるとすると、重油の燃焼に伴うCO₂の削減量は年間9300トンとなる。その他、焼却場における電気使用量の削減にもつながるが、詳細が不明であるためここでは無視した。以上、亜臨界水・メタン発酵設備の導入により削減されるCO₂の全量は年間17430トンとなることから、大量の二酸化炭素削減にも寄与できる。

6. 他市の余剰汚泥を用いた場合

以上は、堺市の下水処理場の余剰汚泥に対する結果である。筆者は洲本市の活性汚泥処理場の余剰汚泥についても基礎実験を実施したが、堺市とほぼ同様の結果が得られた。

JXエンジニアリングは宮古島の下水処理場（活性汚泥処理）に連続亜臨界水処理を前処理とするメタン発酵のパイロットスケールプラントを建設し実証実験を実施した。結果は筆者らの実験室レベルの結果とほぼ同様で、亜臨界水処理の前処理効果はメタン発生量で年間平均約1.8倍と報告している¹⁴⁾。

一方、大阪府の下水処理場の余剰汚泥を用いて同様の実験を実施したが、亜臨界水処理の前処理効果はメタン発生量で1.1～1.3倍程度となり、堺市、洲本市及び宮古島市に比べ何故かなり小さくなった。この理由は今のところ明らかでないが、今後余剰汚泥の組成を十分検討する必要があると思われる。

7. 連続亜臨界水処理とメタン発酵を組み合わせた高速高効率資源・エネルギー化パイロットスケールプラント

図11に筆者の提案している一連のプロセスを示した。各写真のプラントや装置は、文部科学省21世紀COEプログラム「水を反応場に用いる有機資源循環科学・工学」（大阪府立大学、2002～2006年度、拠点リーダー：筆者）の研究の中で、発明、建設したものである。縦型連続亜臨界水処理プラントは1日4トンの処理能力を有しており、世界初の“連続”亜臨界水プラントである。実験室規模の基礎実験ではバッチ式装置は正確なデータを提供する。しかし、実用規模のプラントになると装置が大きくなればなるほど温度上昇と冷却に時間がかかり、亜臨界水本来の目的温度における短時間反応を達成することができない。原料及び製品の取り出しもむづかしくなる。さらに、ランニングコストは連続式に比べ極端に高くなる。連続式である本プラントでは、原料は反応塔に入る直前に高速加熱され目的温度に達し、反応塔内を出口に向かって所望の滞留時間流れる間に亜臨界水反応し、反応塔を出ると急速冷却により反応が停止するようになっている。滞留時間は7分～2時間まで変えられるように製作した。通常10分程度で十分であった。このプラントでは熱回収はしていないが、電気代を¥14/kWhとして計算すると、ランニングコストは原料1トン（含水

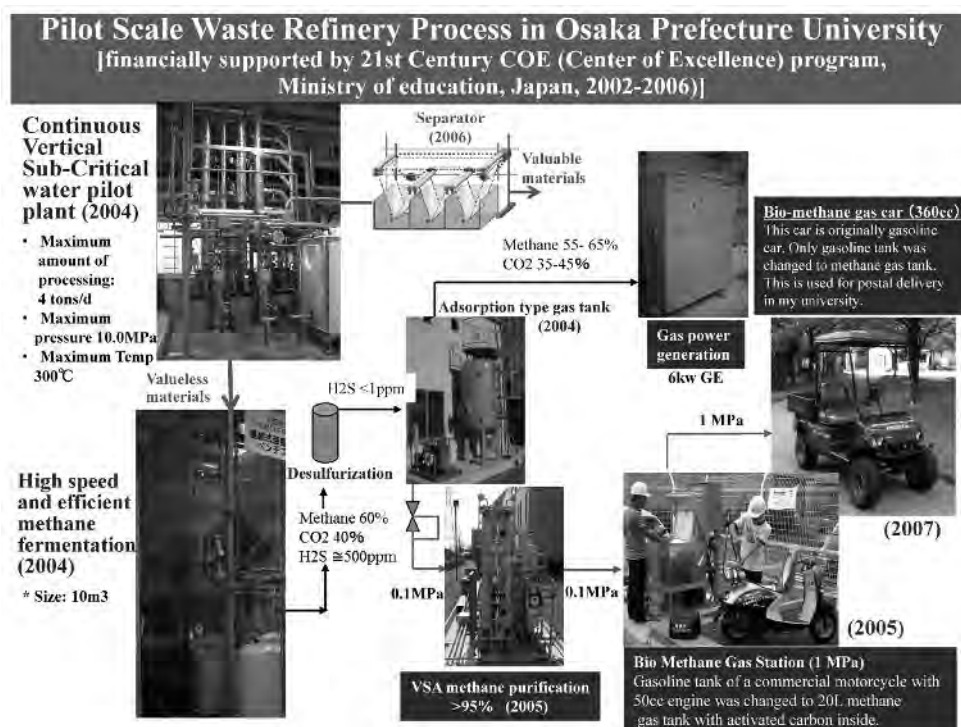


図11 有機性廃棄物の資源・エネルギー化パイロットスケールプラント
(文科省21世紀COEプログラム (2002-2006) により大阪府立大学内に建設)

基準) 当たり最大¥3300であった。実際には熱回収をし、廃熱利用などを行なえばさらにランニングコストを下げるができる。

亜臨界水処理後、分離装置により有価物を回収した後、連続メタン発酵装置に残渣を供給する。発酵槽容量は10m³である。発生したバイオガス(メタンガス約60%、二酸化炭素約40%)は、脱硫後吸着吸蔵装置に貯蔵する。4 m³の活性炭で150~200m³のバイオガスを吸蔵できる。吸蔵装置から取り出したバイオガスはそのままガス発電装置に供給する。発電機は二酸化炭素が40%共存しても問題なく作動した。

さらに、バイオメタンガスの運輸への応用を試みるため、市販の50ccバイクを改造し、バイオメタンガスバイクを製作した。バイオガスをVSA(ヴァキュームスイングアッドソープション)によりメタンガス濃度を95%以上に高め、これを10気圧まで昇圧後、バイクのガスタンク(20L)に貯蔵する。タンクにはメタンガス吸着用活性炭を充填しており、このため、内圧10気圧で1 Nm³のメタンガスを貯蔵できた。ガソリン車の排ガスは少し白く、臭気もあるが、メタンガスバイクの排ガスは無色無臭で低公害車と言える。さらに360ccのバイオメタンガス自動車を学内郵便配達用に導入した。当時、おからを亜臨界水処理してメタン発酵したが、おから2 kgからメタンガス約1 Nm³製造でき、これで50ccバイクは50km、360ccの自動車は20km走行できた。全プラントのランニングコストは

メタンガス1 Nm³当たり20円であった。以上の実験からメタンガス1 Nm³はガソリン1 Lにほぼ対応すると考えられることから、メタンガス製造コストの方がかなり安いことが分かった。

2009年度には、1.3トン/日の処理能力を有する可搬式連続亜臨界水処理パイロットプラントを学内に建設した。これは、トラックに積んでどこにでも搬送できるようにしたもので、様々な有機物に対し、現場で実証実験をすることが可能となった。

8. おわりに

有機性廃棄物を資源・エネルギーに転換し循環型社会に供するためには、化学的処理のみ、あるいは生物的処理のみではコスト的に成立しない。化学と生物の協同作業により有価物を資源として取り出し、残渣をエネルギー化する、この協調があって初めて成り立つものと考えられる。本稿では、余剰汚泥の亜臨界水処理を前処理とする高速高消化率メタン発酵を中心にその適用の可能性について論じた。筆者は、余剰汚泥の亜臨界水処理により得られる高濃度リンの資源化も提案しているが、本研究ではそれを除外してフィジビリティスタディーを実施した。リン回収による利益を考えなくても余剰電力の発生と大量のCO₂削減効果により、大都市の下水処理場における付帯設備として適用可能と考えられる。また、生成したメタンガスを公

用車などの燃料にも利用できることから、本プロセスを是非とも日本発信の技術として実用化したいと願っている。

参考文献

- 1) Yoshida, H., Terashima, M., Takahashi Y.: Production of Organic Acids and Amino Acids from Waste Fish Meat by Sub-Critical Water Hydrolysis., *Biotechnology Progress*, 15(6), 1090-1094 (1999)
- 2) Yoshida, H., Tavakoli, O.: Sub-critical Water Hydrolysis Treatment for Waste Squid Entrails and Production of Amino Acids, Organic Acids, and Fatty Acids, *J. Chem. Eng. Japan*, Vol. 37, No.2, pp.253-260 (2004)
- 3) Tavakoli O., Yoshida, H.: Effective Recovery of Harmful Metal Ions from Squid Wastes Using Subcritical and Supercritical Water Treatments, *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 39 No.7, pp.2357-2363 (2005)
- 4) Asghari F.S., Yoshida, H.: Acid-Catalyzed Production of 5-Hydroxymethyl Furfural from D-Fructose in Subcritical Water, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol.45, pp.2163-2173 (2006)
- 5) Wael, A., Yoshida, H: Synthesis of a Novel Protein-Based Plastic Using Sub-Critical Water Technology, *AIChE Journal* , Vol.52, No.7 , pp.2607-2617 (2006)
- 6) Wael, A., Yoshida, H: Simulation of Fast Reactions in Batch Reactors Under Sub-critical Water Condition, *AIChE Journal* , Vol.52, No.10, pp.3600-3611 (2006)
- 7) Wael, A., Yoshida, H: Kinetics and Mechanism of the Synthesis of a Novel Protein-Based Plastic Using Subcritical Water, *Biotechnol. Prog.* Vol.24, pp.466-475 (2008)
- 8) Pourali, O., Asghari, F.S., Yoshida, H., Sub-critical water treatment of rice bran to produce valuable materials, *Food Chemistry* 115,1,1 1-7 (2009)
- 9) Pourali, O., Asghari, F.S., Yoshida, H. Production of phenolic compounds from rice bran biomass under subcritical water conditions, *Chemical Engineering Journal*, 160,259-266 (2010)
- 10) Suyama, K., Kubota, M., Shirai, M., Yoshida, H., Chemical recycling of networked polystyrene derivatives using subcritical water in the presence of an aminoalcohol, *Polymer Degradation and Stability* 95, 1588-1592 (2010)
- 11) Kulkarni, A.K., Daneshvarhosseini, S., Yoshida H., Effective recovery of pure aluminum from waste composite laminates by sub- and super-critical water, *The Journal of Supercritical Fluids*, 55, 3, 992-997 (2011)
- 12) Gavala, H.N., Angelidaki, I., Ahring, B.K.: Kinetics and modeling of anaerobic digestion process, *Adv. Biochem. Eng. Biotechnol.*, 81, 57-93 (2003)
- 13) Yoshida, H., Tokumoto, H., Ishii, K. Ishii, R.: Efficient, high speed methane fermentation for sewage sludge using subcritical water hydrolysis as pretreatment., *Bioresource Technology*, 100,2933-2939 (2009)
- 14) 一般財団法人南西地域産業活性化センター：沖縄における新エネルギー導入に伴う新規事業性・経済性の調査研究報告書 (2012)

特集：中小規模の消化ガス発電導入事例、開発事例 & 再生可能エネルギー固定価格買取制度導入事例

解説

山形市浄化センター
燃料電池による発電

山形市上下水道部 浄化センター
水質係長 工 藤 守

キーワード：燃料電池、消化ガス発電、電力自給率

1. はじめに

山形市の下水道は、昭和36年に認可を受け事業に着手しました。山形市は戦災を免れた城下町であり、市内には江戸時代に整備された農業用の堰が機能していたため、雨水はこの堰を利用することとし、下水は汚水のみを排除する分流式を採用しました。これは当時としては画期的なことであり、幸いにも合流改善を行う必要がなくなっています。

山形市浄化センターは昭和40年に通水（一次処理のみ）後、昭和46年から標準活性汚泥法を用いた水処理を行い、現在、処理能力は日最大52,000m³、平均処理水量は40,000m³/日、山形市内の約半分の汚水を処理しており、残りは山形県の管理する流域下水道（山形処理区）で処理されています。

2. 消化ガス発電の経緯

浄化センターの概要は表1のとおりです。浄化センターには当初から汚泥の減量化、安定化のため消化槽が設置されていました。水処理から発生する生汚泥、余剰汚泥は濃縮後、消化槽に投入されます。消化槽は

表1 山形市浄化センター概要（平成24年度）

供用開始	昭和40年11月	
敷地面積	77,400 m ²	
排除方式	分流式	
汚水処理方法	標準活性汚泥法	
汚泥処理方法	濃縮—消化—洗浄 —濃縮—加圧脱水	
処理能力(日最大)	52,000 m ³ ／日	
流入水量(日平均)	38,730 m ³ ／日	
消化槽投入汚泥量	86,138 m ³ ／年	
含水率	96.1 %	
VTS	86.3 %	
消化ガス発生量	1,521,893 m ³ ／年	
処理水量1 m ³ あたり	0.108 m ³ ／m ³	
発電設備	ガスエンジン発電※	178 kW × 1基
	燃料電池	100 kW × 2基
総電力使用量	4,817,505 kWh／年	
処理水量1 m ³ あたり	0.340 kWh／m ³	
買電電力量	2,213,650 kWh／年	
処理水量1 m ³ あたり	0.155 kWh／m ³	
ガス発電電力量	2,603,855 kWh／年	
電力自給率	54.5 %	

※ 平成24年度末で燃料電池(100kW×2基)に更新

中温消化（槽内温度38℃）で、消化日数は3週間、発生する消化ガスにはメタンが約60%含まれています。この消化ガスの有効利用を図るため、昭和63年にガスエンジン発電機（178kW×1基）を導入しました。それまで消化ガスは消化槽の加温に利用しており、新たに加温用の燃料が必要とならないよう、発電排熱を回収して消化槽を加温するコージェネレーションで発電を開始しました。

その後、下水道整備の進捗による流入水量の増加に伴い、消化槽で発生するガスをエンジン発電機だけでは消費しきれなくなり、余剰ガスの処理方法が平成12年に検討されました。方法としては①余剰ガス燃焼装置②エンジン発電機③燃料電池について比較しましたが、コスト的には①余剰ガス燃焼装置が最も安価ですが返ってくるものが何もなく、②エンジン発電機は実績もありますが騒音、排気ガスの面で環境に優しくありません。③燃料電池はイニシャルコストが高価ですが環境に優しく（騒音、排気ガスが出ない）発電効率がエンジン発電機よりも高いとの理由により燃料電池（100kW×2基）が採用され、平成14年に導入されました。

3. ガスエンジン発電と燃料電池での運用実績

平成13年度から平成24年度までの電力使用量とその内訳は図1のとおりです。消化ガス発電の導入とともに、機器の更新にあわせてエネルギー消費の少ない機種へと変更することで使用電力量の削減をしています。特に、汚泥濃縮機については、余剰汚泥用2台、

消化洗浄汚泥用1台を全て、大きな動力を必要とした遠心濃縮機からベルト型濃縮機へ変更することで、大幅な省エネが行われました。また、消化槽の攪拌機設備については、ガス攪拌と攪拌ポンプによる攪拌方式からインペラによる機械攪拌に変更することで、ガスブローワー等が不要になり使用電力の削減ができました。

平成13年度から平成24年度までの電力自給率と買電電力原単位（流入水1m³あたりの買電使用量）の推移は図2のとおりです。ガスエンジンだけであった平成13年度では電力自給率23.4%でしたが、燃料電池の導入と機器の省エネルギー化で平成24年度では54.5%まで上昇しています。

浄化センターのガス発電設備の運転上の特徴としては、燃料電池は化学反応で発電しており発電効率が高く、また、装置の発停に時間と手間を要するため、点検時以外は出来るだけ停止しないよう24時間連続運転としています。燃料電池で消費しきれないガスは、脱水作業などで場内の消費電力がピークとなる日中にエンジン発電機を稼働させ、発電した電力はすべて場内で使用しています。このように燃料電池で消費電力のベース部分（電力基本量）を下げ、エンジン発電機でピークカットを行うことで契約電力及び買電電力量の削減を図り電力料金の削減に努めてきました。また、ガスエンジン発電、燃料電池とも発電の際の排熱を回収して汚泥消化槽の加温、建屋の暖房、給湯設備の予熱に利用しています。消化槽の加温はこの排熱利用でほぼ間に合っており、化石燃料の削減につながっています。

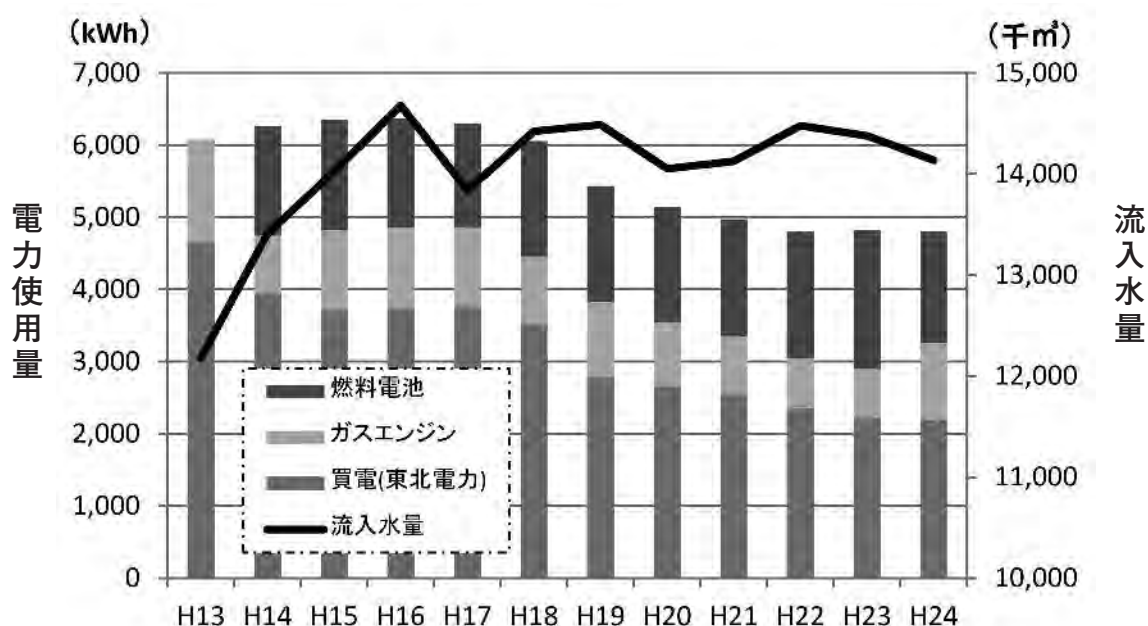


図1 流入水量と電力使用量の推移

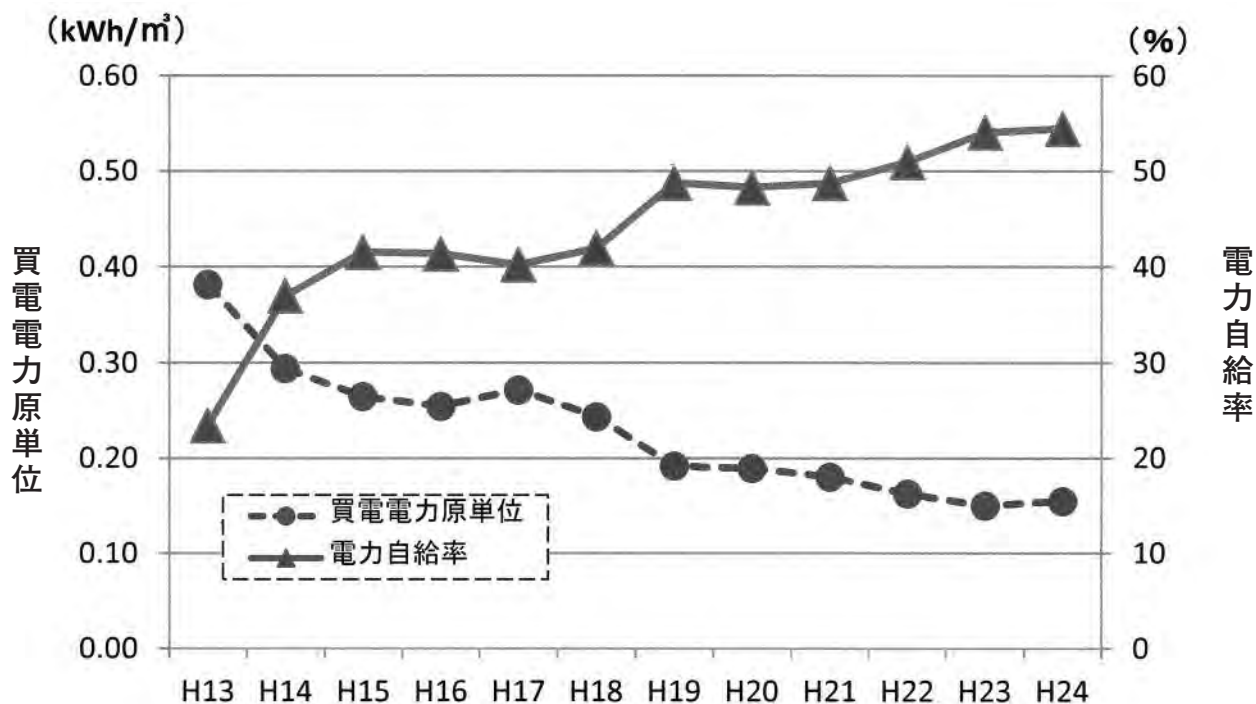


図2 買電電力原単位と電力自給率の推移

4. ガスエンジン発電の燃料電池への更新

その後、昭和63年に導入したガスエンジン発電機の老朽化が進んだために更新が検討されました。消化ガス発電は継続することとし、ガスエンジンと燃料電池が比較されました。現在の燃料電池は平成14年に導入したものと比べ、補機類がパッケージ化され屋外に設置が可能なものとなっていました。積雪のある山形市で実際に屋外においても大丈夫なのか心配され、平成23年1月から8月に実証試験を

行いました。8月まで実験を行ったのは、夏の気温の高い期間についても試験するためでした。実証試験の結果、屋外設置には問題ない事が確認されました。イニシャルコストは燃料電池の方が少し高くなりますが、発電効率の高さから電気料金の削減として回収でき、トータルコストでは同程度と見込まれるため、消化ガスをより有効に利用できる燃料電池に決定し、平成25年3月に新型燃料電池（100kW×2基）が設置されました。

浄化センターの処理フローは図3のとおりです。

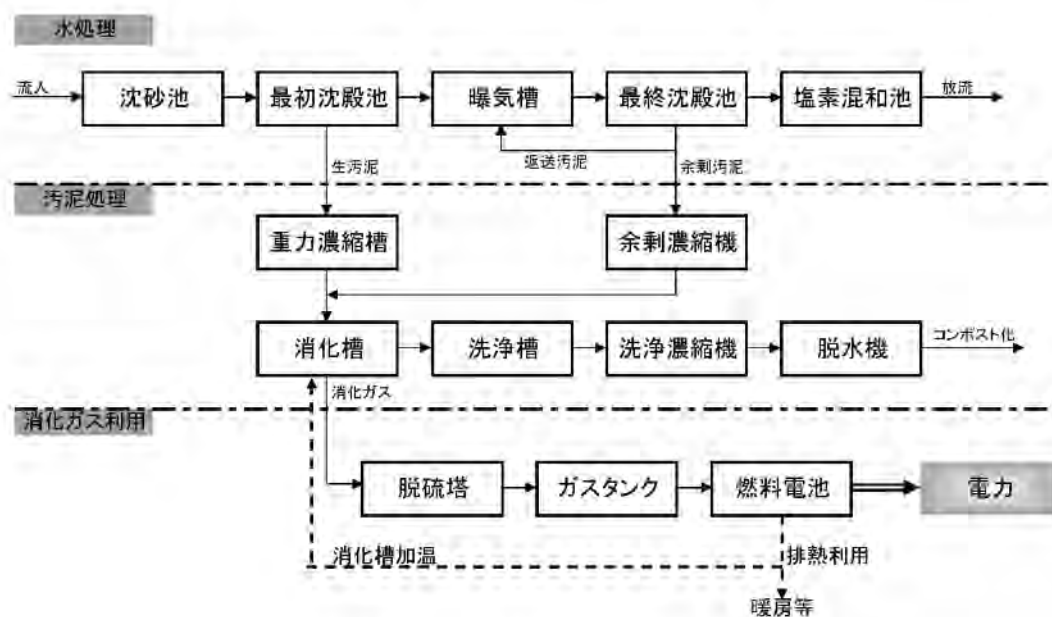


図3 処理フロー

5. 燃料電池4台体制での運転状況

平成25年4月から10月までの稼働実績は表2のとおりです。平成14年に導入した燃料電池をNo1, No2と平成25年に導入した新型燃料電池をNo3, No4と表記しています。導入したばかりのNo3, No4の発電効率は高く、使用した消化ガス1m³あたり2kWhの電力を発電しています。No1, No2は定期点検のあったことや夜間出力を落として運転した影響からか、若干低くなっています。月別に見ますとNo1, No2の定期点検のあった6月を除き、電力自給率はほぼ60%を越えており、10月までの平均で61.3%となっています。

10月までの稼働実績に更新前の設備（ガスエンジ

ン+燃料電池）を当てはめ、比較したものが表3です。発電量で12.3%、電力自給率では6.7ポイント上昇したものと推計されました。

前述のとおり燃料電池は頻繁な発停に向かないため、電力消費の少ない夜間には停止するのではなく、出力を落としてガスの消費を抑えることでガスエンジンの時と同様にピークカット運転を行っており、現在は発電効率の高いNo3, No4燃料電池を優先して運転しています。燃料電池はセルの経年劣化により徐々に発電効率が下がるため、定期的なセル交換が必要となり、今後はNo1, No2のセル交換を予定しています。従来はセル交換のような修繕については、単費で行わなければなりませんでした。が、長寿命化制度の創設により、計画に基づいて行う場合は補助対象となっ

表2 平成21年度～平成24年度の稼働実績

年 度		H21	H22	H23	H24	平均
発電電力量(kWh/年)	燃料電池	1,615,790	1,743,916	1,914,215	1,541,300	1,703,805
	エンジン	807,010	699,190	689,640	1,076,060	817,975
	合計	2,422,800	2,443,106	2,603,855	2,617,360	2,521,780
ガス利用量(m ³ /年)	燃料電池	851,968	923,178	1,030,889	824,643	907,670
	エンジン	536,018	463,754	442,007	680,935	530,679
	合計	1,387,986	1,386,932	1,472,896	1,505,578	1,438,348
発電電力量/ガス利用量(kWh/m ³)	燃料電池	1.90	1.89	1.86	1.87	1.88
	エンジン	1.51	1.51	1.56	1.58	1.54
	合計	1.75	1.76	1.77	1.74	1.75
処理水量(m ³ /年)		14,126,330	14,477,520	14,377,080	14,136,430	14,279,340
買電電力量(kWh/年)		2,549,260	2,327,060	2,213,770	2,189,362	2,319,863
買電電力量/処理水量(kWh/m ³)		0.180	0.161	0.154	0.155	0.162
電力自給率(%)		48.7	51.2	54.0	54.5	48.3

※燃料電池の発電電力量は外部補機分差引後の数値

※エンジンの発電電力量は外部補機分差引前の数値

表3 平成25年度 10月までの稼働状況

		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	合計
発電電力量(kWh/月)	燃料電池No1.No2	120,300	125,700	101,320	118,780	115,530	106,790	114,080	802,500
	燃料電池No3.No4	140,590	146,240	134,250	143,070	138,090	139,700	144,000	985,940
	合計	260,890	271,940	235,570	261,850	253,620	246,490	258,080	1,788,440
ガス利用量(m ³ /月)	燃料電池No1.No2	65,830	71,574	59,769	71,137	69,720	61,406	63,673	463,110
	燃料電池No3.No4	66,098	71,791	67,782	73,323	71,409	70,705	71,478	492,585
	合計	131,928	143,365	127,551	144,459	141,129	132,111	135,151	955,694
発電電力量/ガス利用量(kWh/m ³)	燃料電池No1.No2	1.83	1.76	1.70	1.67	1.66	1.74	1.79	1.73
	燃料電池No3.No4	2.13	2.04	1.98	1.95	1.93	1.98	2.01	2.00
	合計	1.98	1.90	1.85	1.81	1.80	1.87	1.91	1.87
運転時間(h)	燃料電池No1.No2	1,440	1,488	1,229	1,458	1,484	1,440	1,476	10,015
	燃料電池No3.No4	1,412	1,488	1,384	1,482	1,441	1,440	1,467	10,114
	合計	2,852	2,976	2,613	2,940	2,925	2,880	2,943	20,129
時間稼働率(%)	燃料電池No1.No2	100.0%	100.0%	85.3%	98.0%	99.7%	100.0%	99.2%	97.5%
	燃料電池No3.No4	94.9%	100.0%	96.1%	99.6%	96.8%	100.0%	98.6%	98.0%
	合計	99.0%	100.0%	90.7%	98.8%	98.3%	100.0%	98.9%	98.0%
発電電力量/運転時間(kWh/h・台)	燃料電池No1.No2	83.5	84.5	82.4	81.5	77.9	74.2	77.3	80.1
	燃料電池No3.No4	99.6	98.3	97.0	96.5	95.8	97.0	98.2	97.5
	合計	91.5	91.4	89.7	89.0	86.8	85.6	87.7	88.8
処理水量(m ³ /月)		1,049,600	1,202,970	1,220,640	1,532,030	1,413,080	1,310,520	1,318,520	9,047,360
買電電力量(kWh/月)		151,600	166,290	182,240	155,340	172,780	148,260	150,840	1,127,350
買電電力量/処理水量(kWh/m ³)		0.144	0.138	0.149	0.101	0.122	0.113	0.114	0.125
電力自給率(%)		63.2%	62.1%	56.4%	62.8%	59.5%	62.4%	63.1%	61.3%

※ 燃料電池No1.No2 (H14稼働 100kW×2基) 燃料電池No3.No4 (H25稼働 100kW×2基)

表4 発電設備更新効果

	更新後	更新前
	燃料電池 100kW×4基	ガスエンジン +燃料電池 178kW×1基 100kW×2基
発電電力量(kWh/月)	1,788,440	1,592,886
発電電力量/ガス利用量(kWh/m ³)	1.87	1.67
買電電力量(kWh/月)	1,127,350	1,322,904
買電電力量/処理水量(kWh/m ³)	0.125	0.146
電力自給率(%)	61.3%	54.6%

ており、維持管理経費の削減につながっています。

下水汚泥はバイオマス的一种であり、これを利用した消化ガスは温室効果ガスを増加させないカーボンニュートラルで、消化ガス発電機で発電した分、温室効果ガスの排出削減となります。発電及び排熱回収により、平成24年度では2,048 t（二酸化炭素換算）の削減効果があったと試算しております。

6. その他環境保全に向けた取組

水処理を行えば必ず汚泥が発生します。この汚泥の処分方法は各処理場で種々取り組まれています。どの方法が良いかは処理場が置かれている立場や背景によって異なります。

山形市の場合、将来にわたって安定した埋め立て処分場の確保が難しく、また汚泥の焼却施設もなかったため、汚泥のコンポスト（肥料）化事業を昭和55年から行っています。

コンポスト化は浄化センターの汚泥のみを原料とし、発酵が速やかに立ち上がるよう脱水ケーキの含水率を約65%まで下げ、これに発酵済みのコンポストを種として1：1～2の割合で混合しています。

下水汚泥には肥料成分である窒素・リンが豊富に含まれており、下水道資源については国土交通省の「資

源のみち」でも有効利用が示されています。コンポスト化による緑農地への還元は循環型社会の形成に貢献できるものと考えています。

7. おわりに

地球温暖化防止の推進、また、一昨年（2011年）の東日本大震災以降、バイオマスとしての下水道資源を有効利用しようとする動きが進んでいます。バイオマスのデメリットとして、広く薄く存在し収集コストがかかるというものがありますが、下水道は毎日休むことなく処理場に汚水として流入してきます。見方を変えれば資源が勝手に集まってくるようなものです。「混ぜればゴミ、分ければ資源」とゴミのリサイクルでいわれましたが、下水汚泥は「使えば資源」となります。

最後に、このたび第10回エコプロダクツ大賞の節電大賞を受賞いたしました。消化ガス発電を柱とした、浄化センターの「省エネルギー」「創エネルギー」を評価していただいたものと考えております。今、さまざまな技術が研究開発されており、実際に導入するにはコスト面を含めた判断が必要となりますが、今後ともより一層の環境負荷の少ない処理場を目指していきます。



平成25年導入の新型燃料電池（100kW×2基）／屋外に設置

特集：中小規模の消化ガス発電導入事例、開発事例 & 再生可能エネルギー固定価格買取制度導入事例

解 説

デイスポーザと消化ガス発電の
取組について伊勢崎市伊勢崎浄化センター
所長 斉 藤 卓 也

キーワード：デイスポーザ、消化ガス発電

1. はじめに

伊勢崎市では、一般家庭から出されるごみの分別収集を進めています。ごみの中でも高い割合を占める生ごみは、堆肥化等で再資源可能な物ですが、分別・再利用場所の確保が困難などの理由で可燃ごみとして排出・回収され焼却処分しているものが大半です。

一方、消化ガス発電については平成15年度、本市の廃棄物の分別・収集・処理システムを再検討することを目的として伊勢崎市都市代謝システム研究委員会が設置されました。その都市代謝システム研究委員会の作業分科会において、伊勢崎浄化センターで余剰ガスとして焼却処分している消化ガス（メタンガス）の有効利用に着目し、バイオマス発電について検討した結果・導入することになりました。

家庭の台所からの生ごみをデイスポーザによって下水道に排出し下水処理場で汚泥として回収・処理することにより、メタンガス発生量の増加と、生ごみの削減、またデイスポーザ利用者は生ごみを処理する利便性の向上が図れる。以上の条件を検討し、公共下水道に直接接続するデイスポーザ設置の社会実験を開始しました。

本稿では、本市におけるデイスポーザと消化ガスの取組について報告する。

2. デイスポーザの設置状況

デイスポーザの設置を認めるにあたり平成15年に公民館、公共施設等7カ所に設置しました。平成17年には伊勢崎駅前に建設した市営住宅50戸に実験的に設置し下水道施設への影響・利用者の反応などを調査しました。

その結果は、污水管や排水設備の閉塞などの影響は確認されていません。また、処理場への影響もデイスポーザの普及率が1.2%と低いためかもしれませんが、管路施設同様に影響の確認はされていません。利用者の反応については便利であるなどと好評でした。その調査結果をもとに検討し、平成19年に中心市街地及びその周辺の人口増加の促進及び地域の活性化、並びに生ごみのバイオマスエネルギー利用によるCO₂削減及び地域環境の改善に寄与することを目的として、中心市街地活性化区域の一般家庭を対象とし、デイスポーザの設置の社会実験を開始しました。

3年後の平成22年にはデイスポーザの利用可能区域を広げ、中心市街地活性化区域173haから単独公共下



図-1 ディスポーザ設置可能区域
(伊勢崎市単独公共下水道供用開始区域)

水道事業区域1185haへ利用可能区域を拡大しました。

平成24年度末時点における年度別のディスポーザの設置件数を表-1に示します。利用区域を拡大した平成22年度に設置件数が増加しているものの、総設置基数は239基にとどまっています。本市の単独公共下水道事業区域における水洗化戸数は18,864戸となっており、ディスポーザの普及率とすると1.2%と低く、ディスポーザの普及が課題となっています。その課題である普及促進をするため市主催の各種イベントにおける広報活動や、ディスポーザ購入の助成金の交付などにより設置の促進を行っています。

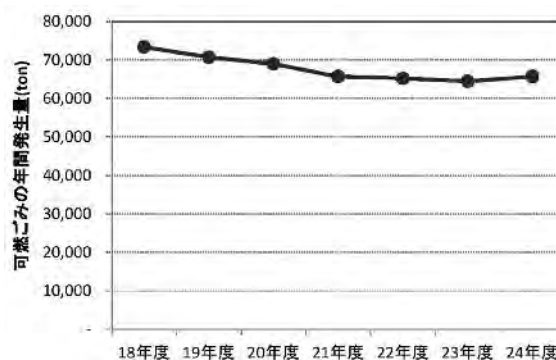
表-1 ディスポーザ設置件数

年度	設 置 件 数		
	一般住宅	公共施設	計
H15	—	7	7
H17	—	50	50
H19	19	0	19
H20	34	3	37
H21	7	8	15
H22	89	0	89
H23	11	0	11
H24	11	0	11
合 計	171	68	239



写真-1

表-2 伊勢崎市の可燃ごみの年間発生量



3. ごみ処理の状況

本市における可燃ごみの年間発生量の推移を表-2に示します。本市のごみの排出量は減少傾向にあることがわかります。しかし、可燃ごみ減少は本市のごみ削減政策の総合的な結果であり、ごみ減少の誘因を特定するには至っていません。前にも述べたように、本市のディスポーザの普及率は1.2%と低く、ディスポーザの導入がごみの減量への影響は現時点では小さいと考えられます。

4. バイオマス発電の設置状況

本市都市代謝システム研究委員会での検討に基づき、焼却処分していた余剰（消化）ガスの有効利用を目的とした設備でマイクロガスタービン（以下：MGTという）を用いたバイオマス発電設備（30kw×1台）を導入しました。機種選定においては、余剰ガス量と成分によるもので、その成分は、メタン（CH₄）60～65%二酸化炭素（CO₂）35～40%の低カロリーガスです。また、本設備導入にあたり小規模処

表-3 バイオマス発電の実績

年度	運転時間 (h)	総発電量 (kWh)	純発電量 (kWh)
H16	1,903	54,970	45,625
H17	8,116	220,128	182,706
H18	8,502	230,428	191,255
H19	7,971	214,562	169,150
H20	8,343	223,901	173,240
H21	8,642	232,036	179,620
H22	8,513	225,095	175,140
H23	8,492	225,036	174,230
H24	7,684	202,530	156,660
計	68,166	1,828,686	1,447,627

理場での消化ガスによるMGT発電機導入実績のある先行都市の調査、導入コストと発電見込み量及び助成金制度の利用等検討課題がありました。

○設備概要

事業費は22,680,000円でMGT発電設備は既設ボイラー室の隣接した屋外に設置し、消化ガスは消化槽用加温ボイラー設備への供給配管から分岐しました。この消化ガスは、消化槽より発生したガスで、脱硫設備で硫化水素を除去した後、ガスタンク（800m³）に貯



写真-2 バイオマス発電設備
※旧広域関東圏産業活性化センターより600万円の助成を受けました。

蔵し、その貯蔵したガスを使用時に不純物であるシロキサンを除去して燃料としています。発電した電力は商用電力と系統連系し、負荷設備に供給している。また、MGTの廃熱を利用して消化槽を加温するための水を温めることで加温効率の向上を図っています。
※純発電量は、補機の電力使用分を差し引いた値（処理場内供給電力量）

5. バイオマス発電の維持管理費等について

平成16年12月7日発電を開始後8年が経過しました。表-4で示していますが、MGT発電電気料金（換

表-4 バイオマス発電の維持管理費等

	純発電量	商用電力 単価	MGT発電電 気料金換算	MGT維持 管理費合計	削減電気料 金	バイオマス 発電業務
年度	(kwh)	(円 /kwh)	(円)	(円)	(円)	(円)
H16	45,625	12.40	565,751	0	565,751	0
H17	182,706	12.48	2,280,173	609,777	1,670,396	0
H18	191,255	13.11	2,507,356	339,654	2,167,702	0
H19	169,150	13.40	2,266,610	429,954	1,836,656	546,420
H20	173,240	15.30	2,650,572	1,765,968	884,604	234,580
H21	179,620	12.70	2,281,174	334,818	1,946,356	192,613
H22	175,140	13.19	2,310,096	267,209	2,042,887	203,609
H23	174,230	14.47	2,521,108	2,509,151	11,957	212,358
H24	156,660	15.32	2,400,031	4,666,249	-2,266,218	44,100
計	1,447,627		19,782,871	10,922,780	8,860,091	1,433,680

※商用電力単価は、該当年度の総支払い電力料金(円)を総使用電力量(kwh)で単純に除した単価

算)は19,782,871円になり、MGT維持管理費(管理委託費・修繕費等)は10,922,780円で、削減金額は8,860,091円となります。それにバイオマス発電業務委託による入金1,433,680円を足した金額が事業費の約半分となる。事業費回収には、今後の維持管理費が同様とすると、残り約8年で事業費回収見込みです。

※バイオマス発電業務とは、グリーン電力認証機構によるもので、バイオマス発電で発電された電力は処理場内で使用していますが、環境付加価値は、伊勢崎市とバイオマス発電業務委託契約しているエナジーグリーン(株)が、購入を希望する企業等へ販売し委託契約に基づき伊勢崎市へ入金されます。

6. し尿処理施設からの汚泥取込について

当浄化センターに隣接し、し尿処理場があります。し尿処理場ではし尿と浄化槽汚泥を処理しています。近年浄化槽汚泥の割合が高くなり処理に支障をきたすようになってきました。また、施設の老朽化に伴い修繕費がかさむようになってきました。そこで、現在のし尿処理場を受け入れ施設とし、し尿と浄化槽汚泥を受け入れできるよう検討をすすめています。このことにより、し尿処理場の維持管理費の削減と当浄化センターの汚泥の増加に伴い消化ガスの発生量を増やしバイオマス発電機を増設することが期待されます。

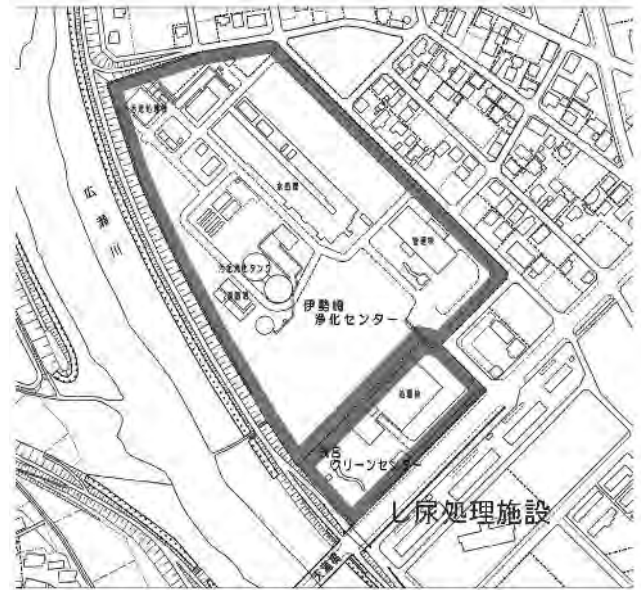


図-2 位置関係図

7. おわりに

デスポーザの普及は、思ったより普及が進んでいませんが、生ごみ汚泥が増加することにより効率よく消化が進み消化ガス発生量の増加が期待できます。本市では、し尿処理施設からの汚泥の受け入れを進めながら、デスポーザ設置の普及も促進し、消化ガス発生量を増加させ、バイオマス発電を増設する事により一層の資源のリサイクル、再生エネルギーの活用を努めていきたいと考えています。

特集：中小規模の消化ガス発電導入事例、開発事例＆再生可能エネルギー固定価格買取制度導入事例

解 説

太田川流域下水道東部浄化センター ロータリーエンジン消化ガス発電 システムについて

広島県土木局下水道公園課 流域下水道グループ

専門員 長 尾 斉

キーワード：消化ガス、有効利用、発電、ロータリーエンジン

1. はじめに

広島県は、風光明媚な瀬戸内海のほぼ中央部に位置しており、豊かな自然に恵まれている。瀬戸内海をはじめとする公共用水域の保全などを実現するため、広島県では県内3箇所で行域下水道事業を実施している。このうちの1箇所が、県庁所在地である広島市の一部と、広島市の周辺に位置する安芸郡府中町・海田町・熊野町・坂町の1市4町を処理区域とする、太田川流域下水道事業である。

太田川流域下水道事業は昭和53年に事業着手し、昭和63年10月に終末処理場である東部浄化センターを3池・24,600 m^3 /日最大で供用開始した。以後、流域関連市町の面整備の進捗にあわせて、東部浄化センターの施設を増設している。平成24年度末現在では、18池・148,380 m^3 /日最大で汚水処理を行っており、平成18年以降に供用開始した水処理施設では、広島湾の最奥部に位置している海田湾の水質改善を目的として、凝集剤併用型循環式硝化脱窒法による汚水処理を行っている。



図1 太田川流域下水道（瀬野川処理区）全体計画図

表 太田川流域下水道（瀬野川処理区）計画諸元

	全体計画	H24 末供用
計画人口 (人)	325,460	301,890
計画面積 (ha)	5,274.6	4,167.8
水処理能力 (m^3 /日最大)	208,090	148,380

2. ロータリーエンジン消化ガス発電システム 設置の経緯

東部浄化センターでは、下水汚泥を濃縮－消化－脱水の工程を経て、セメント原料化とコンポスト化により最終処分している。発生した消化ガスは消化タンクの加温用ボイラーの燃料に利用し、余った消化ガスは余剰ガス燃焼装置で焼却処分していたが、さらなる消化ガスの有効利用を図るため、平成18年度にはマイクロガスタービン消化ガス発電システム（30kW×5台）を導入し、消化ガスを利用した発電を開始し、東部浄化センター内で使用する電力の一部を賄ってきた。

平成23年度末には、広島市公共下水道大州処理区を太田川流域下水道へ編入し、東部浄化センターの処理水量の増加とそれに伴う消化ガス発生量の増加への対応が求められていた。このため、水処理施設と汚泥処理施設の増設を行うとともに、消化ガスを利用する施設についても増設を検討した。

検討は、余剰ガス燃焼装置、新しく開発されたロータリーエンジン消化ガス発電システム（以下「R E 発電システム」という。）及び他の消化ガス発電システム（燃料電池・ガスエンジン・マイクロガスタービン）と比較した。この結果、工事費・維持管理費・電力削減費を含めたライフサイクルコストが最も経済的となる、R E 発電システムを採用することとした。

3. 広島県の社会資本整備について

広島県では、平成22年におおむね10年後を展望して広島県総合計画「ひろしま未来チャレンジビジョン」を策定しており、これを受けて平成23年度から32年度の10年間を計画期間として、「社会資本未来プラン」を策定した。この中で社会資本マネジメントの3つの方針として、「1.社会資本整備の重点化」、「2.社会資本ストックの有効活用」、「3.社会資本の適正な維持管理」を掲げている。社会資本整備の重点化分野としての7分野中で、「環境保全と循環型社会の構築」の分野に下水道事業は位置づけられており、下水道未利用エネルギーの活用が取組みとして挙げられている。

さらに、平成24年3月には「今後の流域下水道の整備・管理のあり方」を策定し、この中で具体的な施策の方向性として、「積極的な環境保全への貢献」を掲げており、消化ガス発電はこれを実現するための施策として位置づけられている。

4. R E 発電システムの概要

ロータリーエンジンとは、広島の自動車メーカーであるマツダが実用化し、世界で唯一量産化しており、1967年にコスモスポーツを発売して以来、累計で約200万台の自動車に搭載されている。昨年にはロータリーエンジン搭載車の生産が中止されているものの、マツダの社長インタビューなどでは、ロータリーエンジンの開発を継続して行う意向が示されている。ロータリーエンジンは中央部に三角おむすびに似た形のローター（回転ピストン）があり、ローター1回の回転で、吸気・圧縮・爆発・排気の工程が3組進行して車軸を回す構造となっており、往復運動するピストンを用いたレシプロエンジンとは大きく異なる。

R E 発電システムは、消化ガス仕様としたロータリーエンジンの開発を経て、日本下水道事業団・寿工業・メタウォーターが、山口県周南市新南陽浄化センターと北九州市日明浄化センターで実証試験を行ってきた。今回の東部浄化センターへのR E 発電システムの導入が全国の下水处理場で初めての本格導入となった。

R E 発電システムのメリットとしては、以下のようなことが挙げられる。

- ①エンジンに吸排気バルブ・ピストンがないシンプルな構造で、維持管理が容易。
- ②国産エンジンを使用しているため、部品のコストが低く、調達が容易。
- ③低排気量（1,300cc）のエンジンのため、設備の小型化ができ、省スペース。

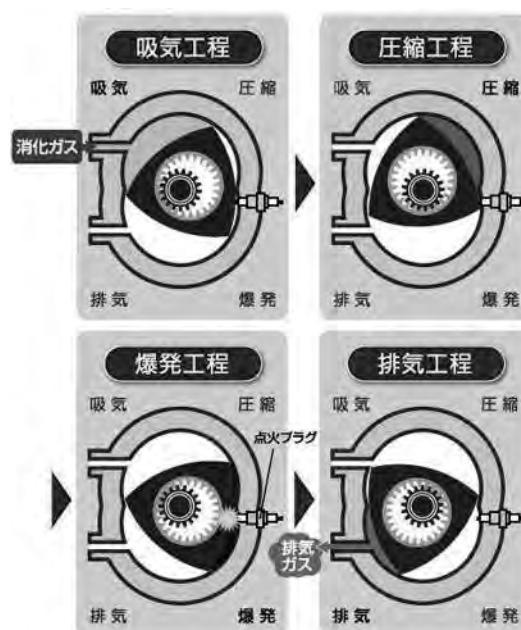


図2 ロータリーエンジンの動作イメージ

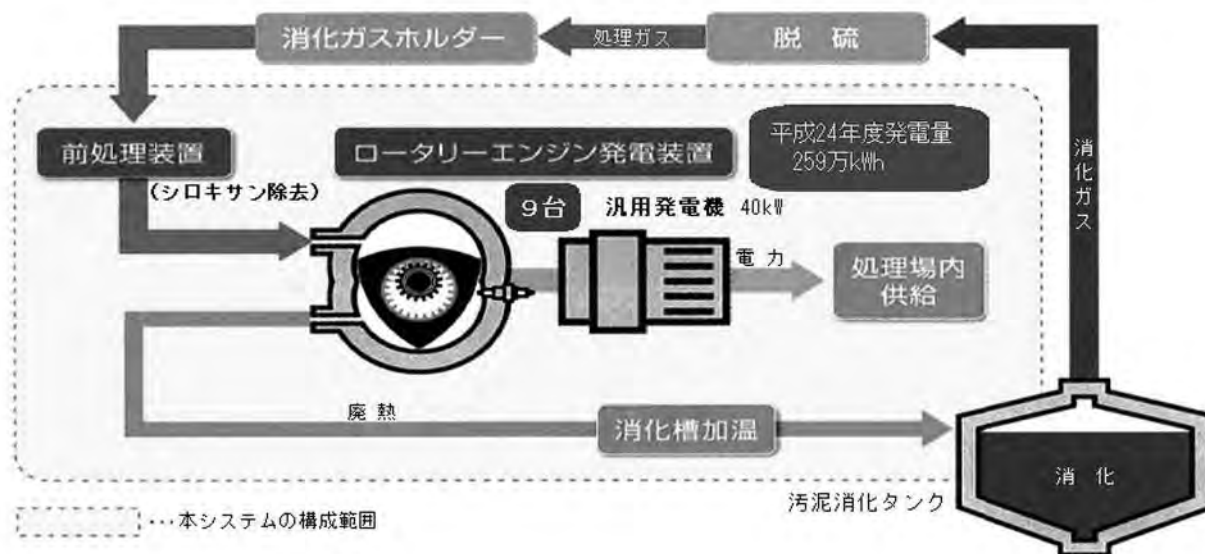


図3 RE発電システムのシステムフロー

（消化タンクで発生した消化ガスをロータリーエンジンの燃料とし、汎用発電機で発電する。発生した廃熱は、消化タンクの加温に利用する。）



写真1 RE発電システムの外観
（ロータリーエンジン発電装置 40kW×9台、制御盤、現場操作盤、熱交換器他一式）

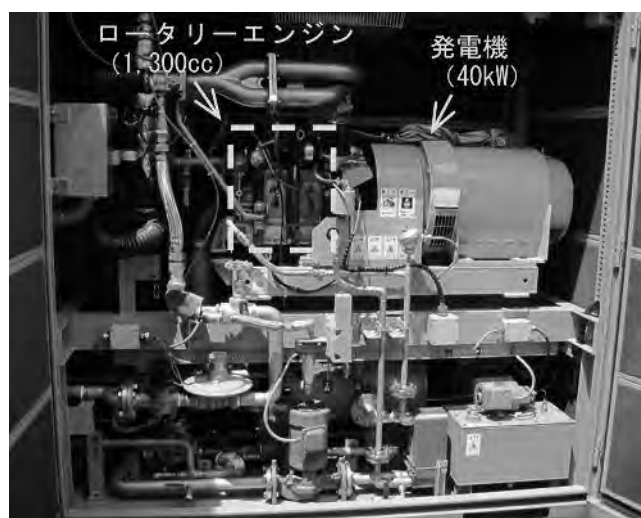


写真2 ロータリーエンジン発電装置の内部
（発電装置のパッケージ中央部に、ロータリーエンジンと発電機が設置されている。）

④複数台の設置となっているため、消化ガスの発生量に応じて運転・停止を行える。

一方で、次のようなデメリットがある。

①他の発電方式に比べて発電効率が低く、発電量が少ない。

②新たに開発された方式のため、下水処理場で本格稼動した実績がない。

東部浄化センターに設置したRE発電システムは、ロータリーエンジンが9台あり、それぞれのエンジンが消化ガスを燃料として出力40kWの汎用発電機を回して発電を行う。発電した電力は東部浄化センター内の水処理に利用するとともに、発電の際に生じた廃熱は、熱交換器を通して、消化タンクの加温に有効利用する。

5. 平成24年度の運転実績

RE発電システムの設置工事は、平成23年度に実施（工期：平成23年5月24日～平成24年3月27日、最終契約額：474百万円）し、工事期間中の試運転を経て、平成24年3月から供用を開始した。

平成24年度はRE発電システムを通年で運転した初めての年となる。1年間の総発電量は約259万kWh（一般家庭約720世帯の年間使用電力量に相当）となり、系統連系により東部浄化センターで使用する電力の約12%を賄った。同時に、温室効果ガスの排出量は、約1,300t-CO₂の削減となり、地球環境の保全に寄与した。

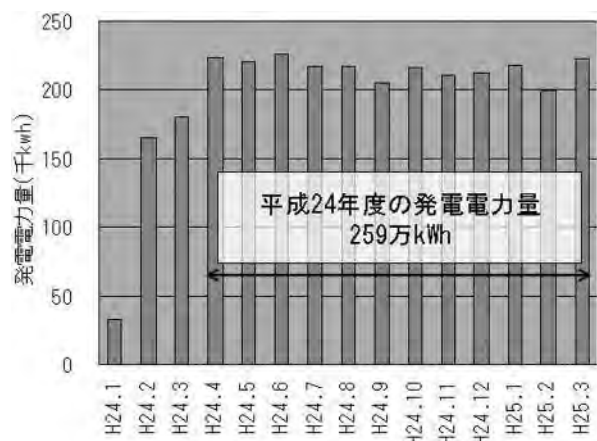


図4 RE発電システム発電量実績
(H24.1～H25.3)

また、東部浄化センターでの消化ガスの有効利用率は、RE発電システム導入前は71.7%で約3割の消化ガスを余剰ガス燃焼装置で処理していたが、導入後は有効利用率が98.3%に上昇し、下水汚泥の中に含まれるエネルギーの循環利用を実現している。

なお、RE発電システムのメリットを生かし、消化ガスの発生量に応じて、9台ある発電装置のうちの一部を停止し、運転台数を調整することにより、電力料金の単価が高い昼間にRE発電システムの発電量を増やすという運転上の工夫も行っており、運転保守の契約については、今年度からフルメンテナンス契約としている。

一方で、東部浄化センターのRE発電システム導入が、下水処理場で全国初の事例となっていることもあり、実証試験で露見しなかった初期トラブルが発生しており、その都度、施工業者がRE発電システムを調査して原因を究明し、処置を検討したうえで、必要な対策を行いながら、運転を続けている。

6. その他

RE発電システムの供用開始時には、マツダのロータリーエンジンを使用した消化ガス発電システムを、

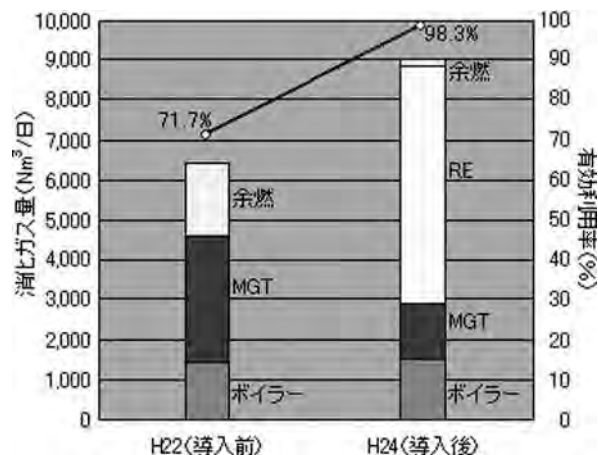


図5 東部浄化センター消化ガスの利用量と有効利用率
(RE発電システムの導入前後で比較)

※余 燃...余剰ガス燃焼装置

MGT...マイクロガスタービン消化ガス発電システム

マツダの地元である広島県が全国の下水処理場で初めて本格導入することで注目を集め、新聞・テレビ等の報道により、広島県の流域下水道での取組を広くPRすることができた。さらに供用開始後は、国内・国外から年間約350名がRE発電システムの視察のため、東部浄化センターを訪れている。

7. RE発電システムの今後について

広島県としては、県産の技術を生かしたシステムの導入が進むことにより、地場産業の活性化や新しい産業分野への展開を推進し、新たな経済成長へ繋がることを期待している。

維持管理面については、今後も運転を継続していく中で、システム構成部品の耐久性や交換頻度などを検証しながら、確認を続けていくこととしている。平成26年度には、導入決定時に2年を見込んでいるロータリーエンジンの交換周期を迎えることから、その結果等により維持管理にかかるコストについても更なる検証が可能になるものと考えている。

特集：中小規模の消化ガス発電導入事例、開発事例 & 再生可能エネルギー固定価格買取制度導入事例

解 説

石川県犀川左岸浄化センター における消化ガス発電の固定価格 買取制度の活用について

石川県環境部水環境創造課流域管理グループ

専門員 田中 伸佳

キーワード：固定価格買取制度、再生可能エネルギー、消化ガス発電、設備認定、補助対象範囲

1. はじめに

石川県では、地球温暖化防止の観点から、再生可能エネルギーの導入を積極的に進めてきており、下水道施設においても消化ガス発電導入を図ってきたところである。

このような中、平成24年7月より固定価格買取制度（FIT）がスタートしたことから、本県の犀川左岸浄化センターにおける消化ガス発電で得られる電力について、当該制度を活用して売電を行い、下水道経営の安定化にもつなげることをしている。

以下、当該制度の活用に至るまでの概要について述べる。

2. 消化ガス発電機の導入経緯

犀川左岸浄化センターは、県都金沢市とその周辺の野々市市、白山市の3市の下水を処理する犀川左岸流域下水道（犀川左岸処理区）の処理場で、平成6年度に供用開始し、平成24年度は、年間約1,300万 m^3 の下水を処理している。

汚泥消化については、平成12年度より行っており、



図1 犀川左岸浄化センター全景

発生する消化ガスは、一部を消化タンクの加温や管理棟の暖房に有効利用し、残りは余剰ガス燃焼装置により焼却していた。その後、平成19年度に、汚泥量の増加に伴う消化ガス発生量の増加に対応するため、温水ボイラ、余剰ガス燃焼装置の各1基増設する必要性が生じたが、資源の有効利用や地球温暖化防止の観点から、費用対効果も踏まえ検討した結果、消化ガス発電機を導入することとなった。

消化ガス発電機は25kW級の発電機10基で構成され、計250kWの発電能力となっており、平成22年12

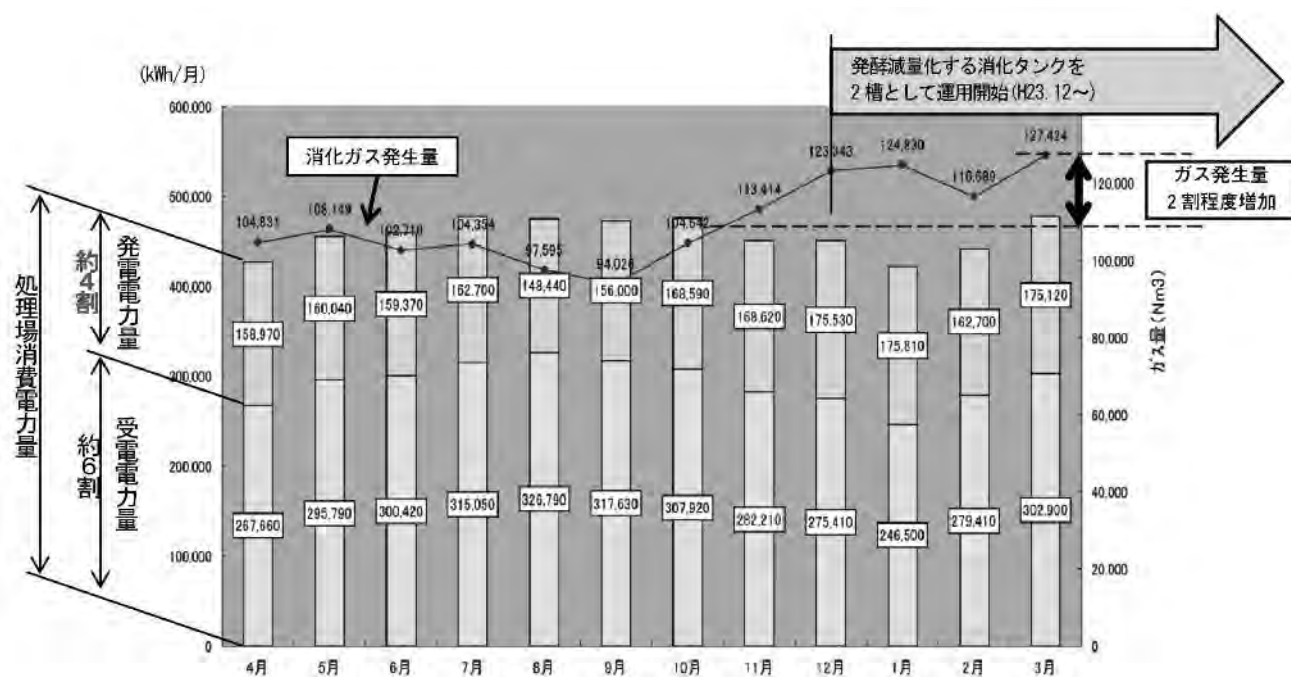


図2 犀川左岸浄化センターにおける消化ガス発生量と発電電力量の推移（平成23年度）

月に供用した。供用当初は、すべて場内で利用することとし、場内使用電力の約4割弱を賄うとともに、発電時に発生する熱エネルギーは温水として回収し、消化タンクの加温や管理棟の暖房に有効利用していた。

一方、汚泥消化については、消化タンク2槽で2段消化（発酵減量化+固液分離）を行っていたが、平成23年12月以降は消化タンク2槽ともに1段消化（発酵減量化のみ）として、運用することとした。

このため、消化日数が倍増し、これまで未消化だった有機分が分解され、ガス発生量が2割程度増加した。（図2参照）

この増加した消化ガスをさらに有効活用するため、平成24年度に消化ガス発電機2基（計50kW）を増設し、既設と合わせ、12基の計300kWの発電を行うこととした。

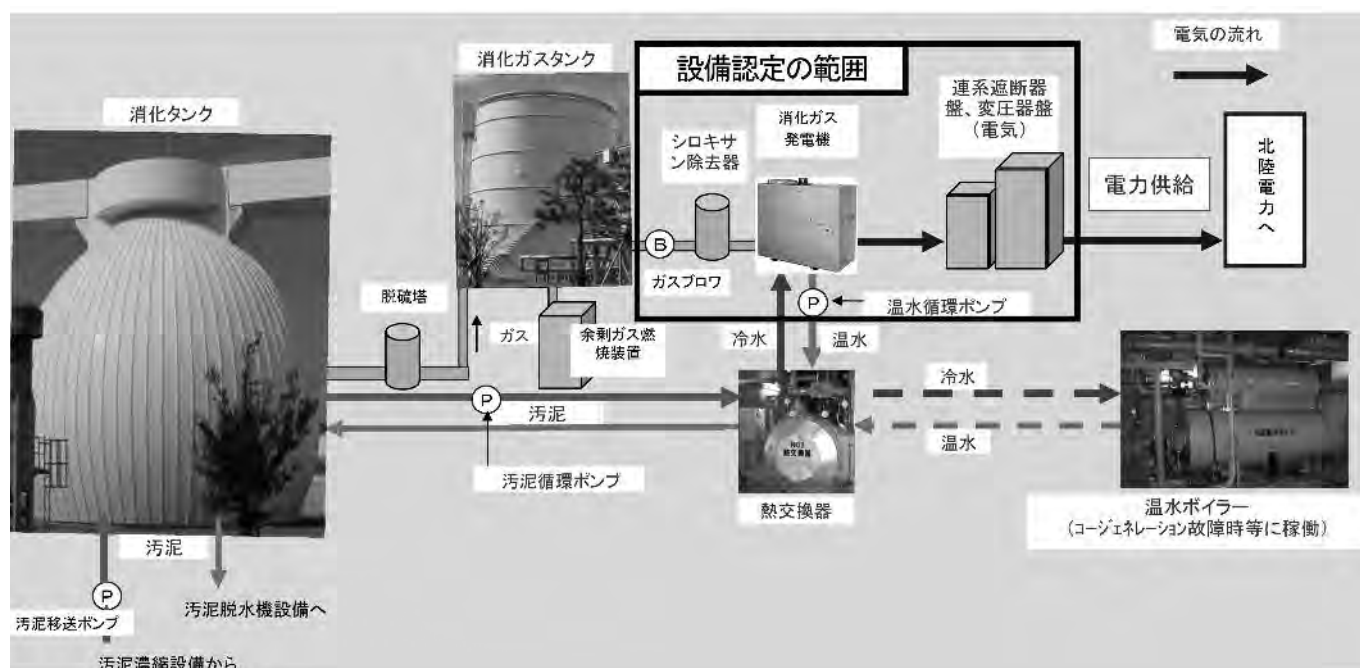


図3 設備認定の範囲

3. 設備認定の経緯及びその範囲について

本県では、消化ガス発電の電力を場内利用から、固定価格買取制度（FIT）を活用して、電気事業者への売電に変更することとし、その手続きや設備認定範囲などについて、経済産業省資源エネルギー庁と協議を重ねた。

協議の結果、犀川左岸浄化センターでは、既設10基と増設2基の発電機が同一の消化タンクに接続していることから、設備認定については、FIT開始前に設置された既設10基は、既存施設として取扱い、平成25年3月25日に設備認定を受け、昨年度設置した2基は、既存発電設備の増設として、平成25年6月18日に設備認定を受けている。その後、平成25年6月26日に北陸電力と売電契約を締結し、7月1日より売電を開始した。

設備認定範囲は、本県の場合、消化タンクの管理やガス供給は指定管理者である石川県下水道公社が行い、発電機の運転管理は、石川県が発電事業者として行うことから、発電機、発電機に付随する盤、温水循環ポンプ、ガスブロワなどとなっている。（図3参照）

4. 補助対象範囲について

固定価格買取制度の活用時における補助対象の考え方については、平成24年9月14日の国土交通省水管理・国土保全局下水道部下水道事業課からの事務連絡で示されており、売電のための発電、送電施設は補助対象外であるとされている。

犀川左岸浄化センター既設の10基の発電設備については、国庫補助を受けて建設している。また、増設の2基については建設時に補助対象範囲と県単独費での対応部分の線引きが必要となる。

このため、国交省と協議を重ねた結果、消化タンク加温用の温水施設については、国庫補助対象とした。

補助対象外となる発電施設についても、場内利用している期間（平成22年12月～25年6月末）は国庫補助対象とした。処分制限期間7年のうち、2.5年は補助対象となるため、国庫返納分は、7年のうち4.5年（7年－2.5年）とした。現在、国庫返納手続きを行っているところである。

5. 今後の展開

本県では再生可能エネルギーの導入を積極的に進める観点から、大規模な下水処理場のみならず、小規模な下水処理場においてもメタン活用の取組みを進めている。

メタン発酵設備の普及が比較的進んでいる大規模下水処理場では、今後もメタンガスの発電利用などを順次進めて行く予定である。平成25年度には加賀沿岸流域下水道（梯川処理区）の翠ヶ丘浄化センターにおいて、25kW級の消化ガス発電機4基設置することとしており、発電した電力は犀川左岸浄化センターと同様にFITを活用し、売電することとしている。

また、小規模下水処理場においてもメタンガスの利活用促進を図るため、県、金沢大学、土木研究所および民間企業で産学官連携しながら、小型メタン発酵設備の研究開発を進めている。平成25年度は県内の処理場の実験機を設置し、メタンガス発生の実証試験を行っており、今後は県内の小規模な下水処理場への普及促進を図りたいと考えている。

6. おわりに

犀川左岸浄化センター消化ガス発電設備の固定価格買取制度活用による売電開始に至るまでには、非常に多くの方々のご指導・ご助言をいただきました。紙面をお借りして、改めてお礼を申し上げます。

石川県としては、今後も再生可能エネルギーの導入に向け取り組んでいくこととしております。

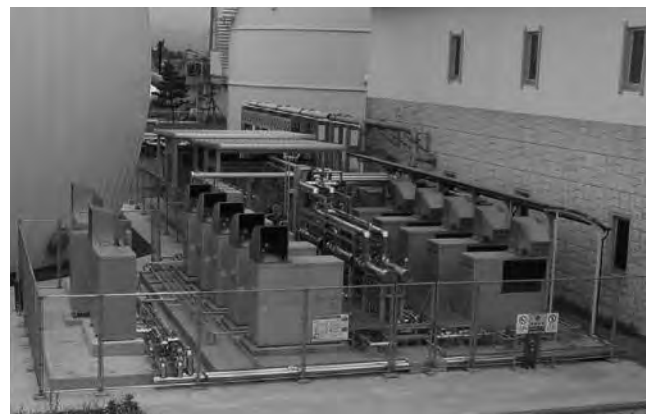


図5 犀川左岸浄化センター消化ガス発電設備（12基）

特集：中小規模の消化ガス発電導入事例、開発事例 & 再生可能エネルギー固定価格買取制度導入事例

解 説

神戸市垂水処理場 「こうべWエコ発電プロジェクト」 について

神戸市建設局下水道河川部保全課
処理場係長 坂 部 敬 祐

キーワード：太陽光発電、バイオガス発電、公民連携

1. はじめに

神戸市は、面積55,283ha、人口約154万人で、南は大阪湾に面し市街地の背後には六甲連山が迫る自然豊かな都市である。本市では、昭和33年に下水処理を開始し、平成24年度末では下水道人口普及率98.7%に達しており、市内6ヶ所の処理場において、1日平均約55万 m^3 の下水を処理している。

下水処理施設には様々な資源が集約されており、その代表的なものとして処理水や消化ガスなどがある。本市では処理水を処理場内での機械用水や雑用水に利用するほか、ポートアイランドや六甲アイランドでは、処理水をさらにオゾン処理した再生水を、島内の学校や商業ビルなどのトイレ用水や植栽の散水に利用している。また、山の中腹に位置する鈴蘭台処理場からの高度処理水は、放流する際の有効落差約65mと日量16,000 m^3 の水量を活用して、85kWの小水力発電を実施している。さらに発電に利用した水は、その後、阪神淡路大震災で被災した松本地区のせせらぎに送られ、平常時には都市に潤いを与えることで快適性を向上させ、火災などの非常時には防火用水として利用することで安全性の向上を図っている。

一方、汚泥処理の過程で発生するメタンを主成分とした消化ガスについては、一般的に場内で消化槽を加温する燃料や空調の熱源に活用されているが、本市東灘処理場においては、全国に先駆けて、この消化ガスを高度に精製した「こうべバイオガス」の天然ガス自動車への供給・都市ガス導管への注入を実施している。また、平成23年度からは、木質系（グリーン）と食品製造系（スイーツ）の下水道に好適な地域バイオマスを下水汚泥と混合することでバイオガス発生量を増加させることを目的とした「KOBEGREEN・スイーツプロジェクト」を実施している（平成23年度国土交通省 下水道革新的技術実証事業）。さらに垂水処理場では、平成23年度より「こうべバイオガス」を使用した660kWのガス発電を実施しており、得られた電気と熱は場内で利用している。

今回の神戸市垂水処理場「Wエコ発電プロジェクト」は、大規模太陽光発電と「こうべバイオガス」による発電であり、大阪ガス株式会社の子会社である「エネルギーバンクジャパン株式会社（EBJ）」と共同で実施する計画を進めている。太陽光発電は天候等により発電量が大きく変化するが、バイオガス発電は1日24時間1年365日、継続して発電できるため、両者を組み合わせることでより安定的な事業展開が可能とな



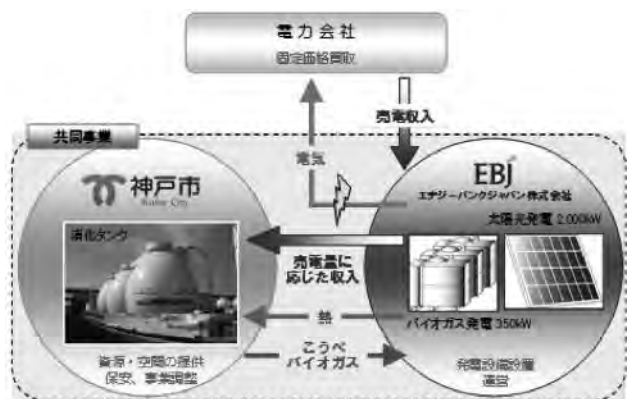
る。下水道資源を活用した太陽光とバイオガスの「Wエコ発電」は日本初の取組みである。

2. 公民連携による再生可能エネルギーの拡大と固定価格買取制度の活用

こうべWエコ発電プロジェクトには次の4つの特長がある。①太陽光とバイオガスの安定したWエコ発電事業であること、②公民連携による「共同事業方式」を採用していること、③神戸市が資源と空間を提供し、民間資金を活用して再生可能エネルギーを創出すること、④国の再生可能エネルギー固定価格買取制度を利用した20年間の事業であること。

EBJは、発電設備の設置・運営や、電気事業者である関西電力との売電契約の調整などを担うとともに、発電した電力を、固定価格買取制度により関西電力に売却し、収入を得る。

本市は、EBJに対し、発電設備の設置場所及び「こうべバイオガス」を提供する。なお、発電設備の設置に関して費用は負担せず、売電収入の一部をEBJから受け取る。そのほか、本市はバイオガス発電により発生する熱を受け取り、消化タンクの加温に利用することができる。



本年度中に発電と売電を開始する予定で、売電収入は本市とEBJそれぞれの役割に対して配分する。本プロジェクトでは、広大な敷地とバイオガスを一度に提供できる本市の強みと、設備調達能力、事業運営ノウハウといった民間事業者の強みといった双方の強みを生かすことで、市が直接、発電・売電するよりも事業性を高めている。

3. 神戸市垂水処理場における事業計画

太陽光発電は、平成23年度に供用開始した水処理施設の一部、約2haのスペースに約2,000kWのパネルを設置する。バイオガス発電は、「こうべバイオガス」を燃料とする25kWの小型発電機14台（合計350kW）を設置する。年間発電量は、太陽光発電が約200万kWh、バイオガス発電が約250万kWh、合計で約450万kWhとなる見込みで、一般家庭約1,300世帯が使用する電力を発電することができる。

	規模	年間発電量
太陽光発電	2,000kW (パネル約8,000枚)	約200万kWh
バイオガス発電	350kW (25kW×14台)	約250万kWh

4. おわりに

神戸市内の他の処理場においても、活用できる施設上部空間や消化ガスがあり、全処理場で推計すると、太陽光発電で5,000kW、バイオガス発電で2,300kWの設備を設置できる可能性があり、年間発電量は約2,350万kWh、一般家庭約6,500世帯分に登る。今後、垂水処理場の成果を踏まえて、他の処理場への展開を検討する。特にバイオガス発電については、効率的かつ安定的な発電をするために、既存の消化ガス脱硫設備等の改築時期を勘案して検討していく。

こうべWエコ発電プロジェクトは、本市と民間事業者、双方の強みを生かした取組みであり、再生可能エネルギーの取組みをさらに拡大する第一歩と考えている。「下水道は資源の宝庫」であり、今後とも「こうべバイオガス」を活用した様々な可能性を追求していきたい。

特集：中小規模の消化ガス発電導入事例、開発事例 & 再生可能エネルギー固定価格買取制度導入事例

解 説

栃木県県央浄化センターにおける 燃料電池発電と固定価格買取制度に おける設備認定

栃木県 県土整備部 都市整備課 下水道室
室長 西 川 能 文

キーワード：栃木県、消化ガス発電、固定価格買取制度、FIT、燃料電池、設備認定

1. はじめに

私たちのふるさと栃木県は、清らかな水や美しい緑に満ちあふれ、雄大な山並みと広く豊かな大地に恵まれています。この自然豊かな美しい“とちぎ”の環境を将来の世代にしっかりと引き継いでいくことは、現代に生きる私たちの願いであり、責務でもあります。

近年、私たちは様々な自然の異変に直面しています。地球温暖化に起因する地球規模での気候の変化に伴い、集中豪雨や竜巻といった異常気象は私たちの生活そのものを脅威にさらすとともに、豊かな恵みをもたらしてきた生物多様性の損失などが危惧されており、今こそ私たちは真剣に、環境問題に取り組まなければなりません。

また、平成23年3月に発生した東日本大震災による直接的な被害の復旧については目処が立ちましたが、福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の影響やエネルギー問題は、依然として我々の生活や産業に様々な影を落としています。

こうした中、本県では、平成23年3月に策定した「栃木県環境基本計画」に基づき、「とちぎ環境立県戦略」（2010）や栃木県重点戦略「新とちぎ元気プラン」

（2011～2015）に掲げるとちぎの目指すべき将来像の実現に向けて、各種施策を積極的に展開しています。

加えて、東日本大震災からの一日も早い復興を目指し、災害廃棄物等の処理や除染をはじめとする各種放射能対策や、地域特性を活かした再生可能エネルギーの普及拡大に積極的に取り組んでいます。

2. 流域下水道関連施設における再生可能エネルギーの活用

本県における流域下水道は、昭和51年度より事業を開始し、現在までに5流域7処理区を供用開始しています。

また、処理区域の拡大に伴い増加する下水汚泥を資源として有効利用するため、県と16市町の共同事業として平成14年度に「栃木県下水道資源化工場」を整備しました。ここでは、県内の流域下水道7処理場及び公共下水道28処理場の汚泥を集約、処理しており、焼却・熔融して製造したスラグは県内の下水管渠の埋め戻し等に使用してきました。

「とちぎ環境立県戦略」では、環境に配慮した取組として、省エネルギーの推進、再生可能エネルギーの利活用の推進を掲げています。また、「新とちぎ元気プ

ラン」では、環境負荷を低減し地球温暖化防止に貢献するため、循環型社会の形成に向けてバイオマスの総合的な利活用を促進することとしています。

この一環として、下水道部門では、平成24年度から鬼怒川流域下水道中央処理区の県央浄化センターにおいて、平成25年度からは鬼怒川上流浄化センター、巴波川浄化センター、北那須浄化センターにおいて、処理過程で発生するバイオガスを利用した発電施設の導入を進めています。

また、新たなエネルギーづくりとして、処理場の建物の屋根や処理施設の上部を利用した太陽光発電事業を進めています。

3. 県央浄化センターにおけるバイオガス発電事業について

(1) 県内初となるバイオガス発電導入の経緯

本県の流域下水道における平成23年度の消費電力は、年間22,616千kWhで、これは県有施設で使用する電気消費量の約32%を占めています。このうち県央浄化センターでの使用電力量は、年間6,243千kWhで、本県の流域下水処理場としては最大です。

県央浄化センターの処理工程で発生するバイオガス(メタンガス等)は年間130万m³であり、このうち約1/4は消化汚泥の加熱熱源として利用していますが、残る3/4は利用されずに燃焼処理されていたことから、平成23年度より自家発電の燃料としての活用について検討を進めてきました。

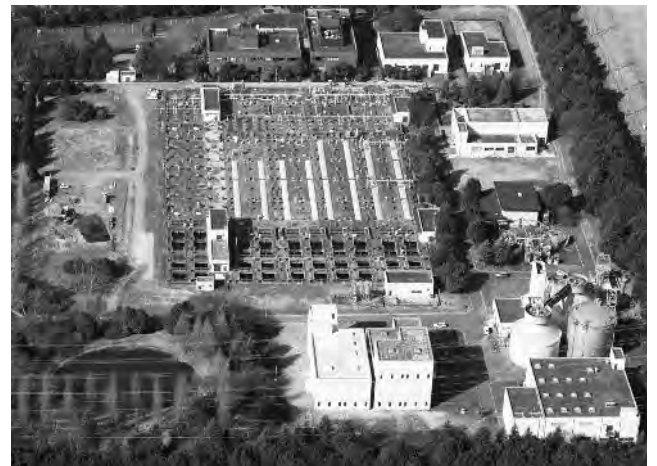
(2) 自己利用からFIT適用への経緯

このような中、平成24年7月から施行された「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」におけるバイオマス(メタン発酵ガス化発電)の買取価格は、24年度単価で39円/kWhとなり、県央浄化センターで購入している電気の約2.5倍の価格となりました。

そこで、当初計画では、発電した電気は処理場内で利用する予定でしたが、全量売電によるコスト削減の効果が大きいと判断し、同法を活用した事業へ計画を変更することとしました。

(3) 発電方式の選定

発電機については、様々な方式を比較検討しました。この結果、「発電効率に優れ、固定価格買取制度においては、コストメリットを出しやすい」、「排ガスが少ないことから、高校が隣接する当該センターの立地特性に適している」等の理由から、燃料電池発電機方式としました。



県央浄化センター

燃料電池発電機は、下水汚泥から発生するバイオガス(メタンガス)を改質器といわれる装置に供給し、触媒反応により水素を抽出します。抽出された水素は、りん酸を充填したセルスタックの燃料極に供給され、空気極に供給された酸素と電気化学的に反応し、継続的に電気を取り出す発電装置です。化学反応のため電気だけでなく熱も発生することから、排熱を消化槽の加温に利用することで高いエネルギー効率を実現することができます。

(4) 燃料電池発電設備の設備認定

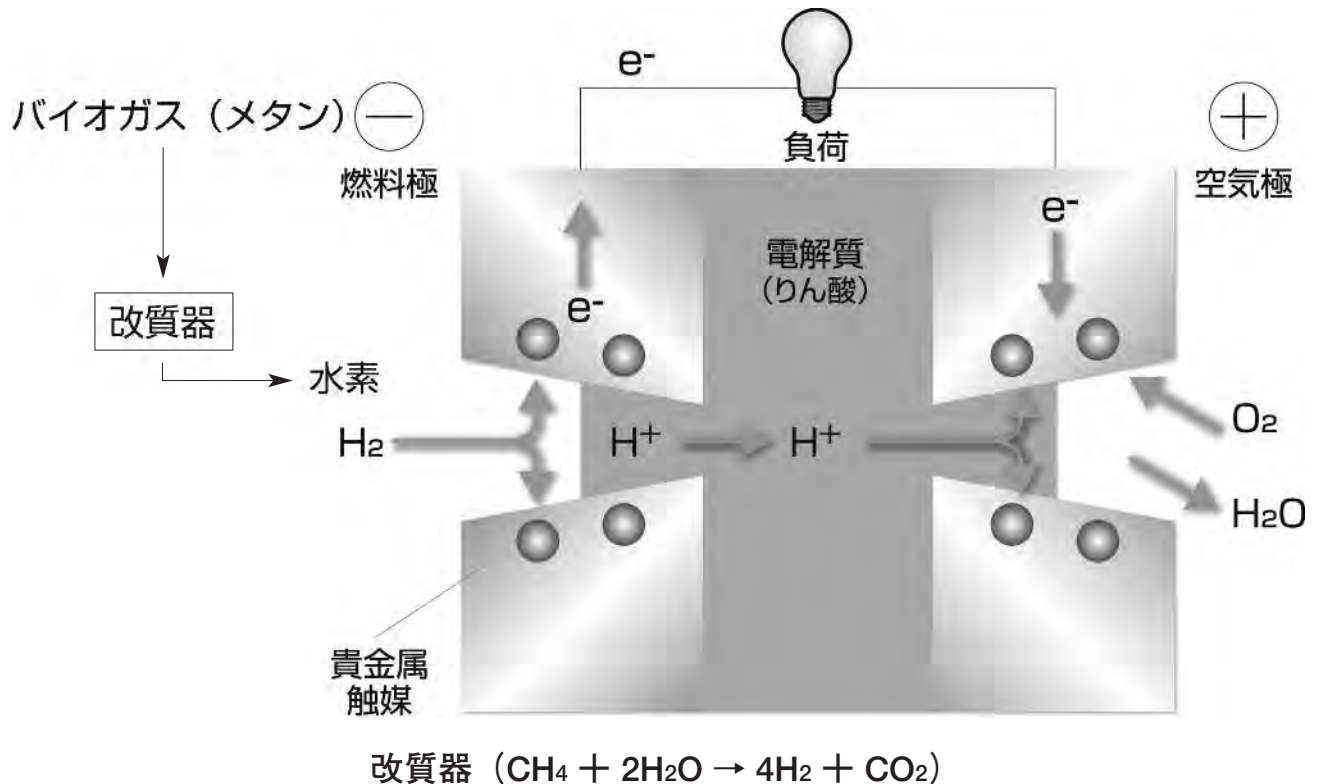
本県では平成24年9月から関東経済産業局と協議を進め、平成25年1月22日に設備認定の申請を行い、3月29日には経済産業大臣より設備認定の交付を受けました。

協議当初は、設備認定の対象設備は発電機のみとらえ、作業を進めていたところ、平成24年12月に経済産業省資源エネルギー庁から、「メタン発酵バイオガス発電の設備認定の対象設備」が公表され、県央浄化センターの認定設備は「消化槽」、「ガスホルダ」、「発電機」の3つとなりました。また、消化槽の攪拌機の電源は発電機から取るよう指導があり、施工時には攪拌機の電源改造工事も含むこととなりました。

なお、ポンプ類、監視制御施設等については「発電に必要な設備」ではなく、「汚泥処理に必要な施設」であることから、認定範囲には含まれていません。

(5) 接続検討及び系統連携

接続検討及び系統連携については、平成24年9月から東京電力(株)ネットワークサービスセンターと協議を進め、12月17日に接続検討申込みを行い、平成25年3月4日に回答を得た後、平成25年3月26日に接続供給及び系統連系申込みを行いました。



電気事業法施行規則では認定発電設備であれば1需要場所2引込みが可能です。県央浄化センターは、消化ガス発電のほかに太陽光発電も計画していたため、1需要場所3引込みとなることから、消化ガス発電設備を独立させることとしました。

具体的には、消化ガス発電設備をフェンスで囲い明確に区画し、専用の入口を設けることで、原需要+太陽光発電（1需要場所2引込み）と消化ガス発電（1需要場所1引込み）に区分し、系統連系を行うこととしました。

(6) 国土交通省との協議

下水処理場内におけるFIT適用事業については、国土交通省水管理・国土保全局下水道部平成24年9月14日付け事務連絡「再生可能エネルギーの固定価格買取制度における下水道事業の補助金等交付の考え方等について」によって、補助金等交付の基本的な考え方が示されており、本県では単独事業として行っています。

また、売電のための送電施設等については財産処分の承認が必要であり、平成26年度中の申請を予定しています。

(7) 事業効果

消化ガス発電事業の整備費は約4億2千万円、年間計画発電量は約250万kWhを見込んでおり、年間の事業利益は約6千万円と試算しています。

また、杉の木約13万本が吸収するCO₂と同量のCO₂削減効果を見込んでいます。

(8) 接続契約及び電気事業者との特定契約

平成25年3月に東京電力へ系統連携申込み及び接続供給申込みを行いました。今後、発電機の設置工事に着手し、平成26年度中には発電を開始する予定です。

なお、売電先となる電気事業者については、発電開始前に入札により決定することとしています。

4. おわりに

下水道事業は大きな潜在エネルギーを有しており、これをいかに有効利用していくかが課題であると考えています。

本県では、その手始めとして、バイオガス発電に取り組むこととしたところですが、将来的に継続的な温室効果ガスの削減を図り、新たなエネルギーや資源を創出していくためには、バイオガスの利用に止まらず、太陽光発電システムやリン回収等、新たな発想や新技術を積極的に研究し導入していくことが重要と考えます。

今後とも、下水道事業を通して良好な水循環システムを構築し、快適な生活環境、自然環境を次世代に継承していくとともに、下水処理場を新たなエネルギー創製基地にしたいと考えております。

研究紹介

北陸・石川における 汚泥や廃棄性生物資源の利用

堆肥化・新肥料研究所、NPO法人日中資源開発協会

代表・理事長 長谷川 和 久 (石川県立大学客員名誉教授)

キーワード：脱水汚泥入り堆肥、作物への肥効、汚泥炭化物、上水道汚泥、琵琶湖藻の肥料化、環境保全型農業

1. はじめに

北陸・石川地域から発生する無機および有機質（生物性）廃棄物を環境保全型農業や緑化保全用資源として利用する際の留意事項を現場の状況、試験結果などを紹介しながら述べる。

①上水汚泥、②脱水乾燥汚泥（根上町）、③農村集落下水道汚泥堆肥（中能登町）、④下水汚泥炭（輪島市）・と殺場汚泥炭（金沢市）、⑤汚泥焼却集塵灰の緑農地利用（試験、金沢市）、⑥流域下水道汚泥添加牛糞堆肥（金沢市）、⑦琵琶湖藻の肥料化。

2. 上水分離土壌（浄水場から発生する汚泥）

石川県においては、加賀市から七尾市までの広領

域の上水は主に手取川上流で、扇状地の扇央に位置する鶴来浄水場において、手取川ダムから取水した水中の泥を分離し、送水されている。この分離はPAC添加によりなされ、年間数百トンの土が発生している。土壌の主成分は石英で、粘土鉱物はイライトが主。SiO₂ 56.5%、Al₂O₃ 27.3%、Fe₂O₃ 5.9%。

筆者らは、この土壌を水稻栽培における機械移植用箱苗培土へ利用する配慮から試験をしたところ、リン酸成分添加によって利用可能なことがわかった。

すなわち、上水分離土1に山地下層砂壤土を重量比で9混合した土壌では、土壌4.5kg（イネ苗を育てる際の1箱分相当量）に対して、リン酸成分を過リン酸石灰の形で施すのが育苗に望ましいとわかった。上水分離土壌と混合土壌の性質は表1に、混合土壌の組成窒素およびリン酸の形態は表2に、この混合土壌で育苗した苗中のリン酸含有率は図1に示した。

表1 供試土壌の理化学性

土壌	土色(湿)	pH(H ₂ O)	全炭素 (10 ⁻² kg kg ⁻¹)	全窒素 (10 ⁻² kg kg ⁻¹)	有効態リン酸 (mg/100g)	リン酸吸収係数
上水分離土壌	7.5YR2/1	6.8	3.29	0.11	12	2260
混合土壌	10YR4/6	6.1	0.68	0.06	56	1230

上水分離土壌の粒径範囲は、2.0～4.5mmであった。

表2 試験区の構成（リン酸形態選択）

試験区 (No.)	供試土壌	施肥量 (g/箱)		
		窒素*	リン酸**	
1	混合土壌	2	4.5	*なたね油粕 **過リン酸石灰
2	"	2	4.5	*もみがら堆肥 **過リン酸石灰
3	"	2	4.5	*なたね油粕 **熔成リン肥
4	"	2	4.5	*もみがら堆肥 **熔成リン肥
5	"	2	4.5	*なたね油粕 **苦土重焼リン
6	"	2	4.5	*もみがら堆肥 **苦土重焼リン

3. 脱水乾燥汚泥

石川県下水道公社梯川流域下水道処理場（根上町、現・能美市）の含水率が80%の脱水ケーキ（乾燥汚泥）に容量で、3%の割合で生石灰を混合し天日乾燥後、粒径7～10mmにしたもの（石灰処理汚泥）について、畑土壌へ施用した場合の影響を調べた。供試乾燥汚泥の性質は水分含有率10.9%、pH5.8、全炭素25.8、全窒素4.1%、リン酸5.1%、石灰処理汚泥は水分32.3%、pH9.3、全炭素20.6%、全窒素2.9%、リン酸3.1%それぞれ含有する。

松林内の砂壤土（全窒素0.02%）に4m²の枠を設け、乾燥汚泥を10a当たり12.5t全層混合施用、同1tを

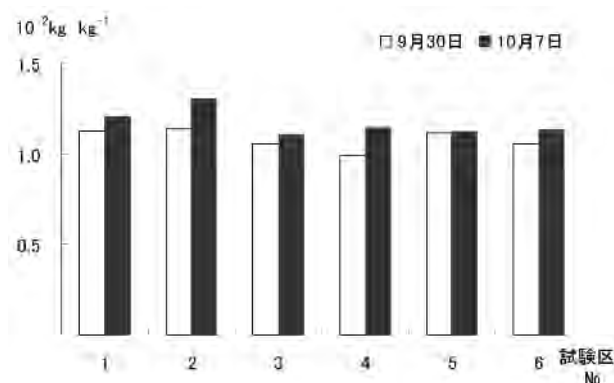


図1 茎葉中のリン酸含有率

表層施用、石灰処理汚泥を2t全層施用し、2年後（20ヶ月経過）の土壌三相分布を観察した結果は図2に示した。対照の無処理区に比べて、乾燥汚泥12.5t全層施用では固相減少、石灰処理汚泥2t全層施用では液相減少が特徴的。

砂壤土では、施用20ヶ月後のpHや有機物の値からみると、土壌への汚泥許容施用量は表3のように、

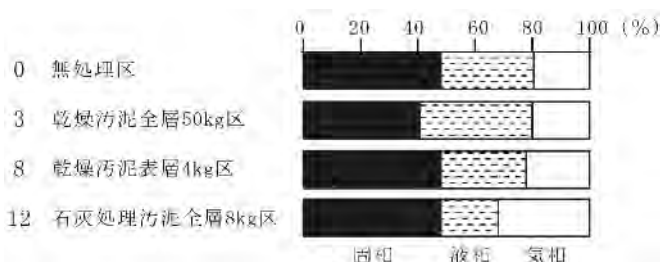
図2 汚泥施用土壌の三相分布
砂壤土、施用後2年目、20ヶ月経過（1991年11月）

表3 汚泥施用土壌の化学性 1990（平成2）年試験区（2年目）

試験区 No. (SL 砂壤土)	pH (H ₂ O)	pH (KCL)	腐植 (%)	全炭素 (%)	全窒素 (%)	炭素率
0 無処理区	6.02	5.07	1.17	0.69	0.045	15.3
1 乾燥汚泥全層 10kg [*] 区	5.98	4.73	0.77	0.45	0.032	14.2
2 " 30kg [*] 区	5.96	4.44	0.53	0.31	0.022	14.1
3 " 50kg [*] 区	5.61	4.63	1.93	1.12	0.114	9.8
4 石灰処理汚泥全層 15kg区	6.83	7.09	0.56	0.33	0.027	12.1
5 " 50kg区	7.17	7.06	1.98	1.15	0.091	12.6
6 " 90kg区	7.29	6.83	2.12	1.23	0.121	10.2
7 乾燥汚泥表層 2kg区	6.61	5.12	0.93	0.54	0.037	14.7
8 " 4kg区	6.54	5.33	0.97	0.57	0.043	13.2
9 " 8kg区	5.56	4.30	0.56	0.33	0.040	8.2
10 石灰処理汚泥表層 2kg区	7.15	6.88	1.19	0.70	0.054	12.9
11 " 4kg区	7.18	6.60	1.53	0.90	0.061	14.7
12 " 8kg区	7.32	6.60	0.64	0.38	0.020	18.6

*4m²当たり施用量

pH値によって制約を受けると考えられた。

全層施用では、石灰処理汚泥 4 m²当たり 15kg (10a 当たり 4 t 弱相当) 以上、乾燥汚泥同じく 2 kg (10a 当たり 500kg相当) 以上になると施用が作物栽培上、好ましくないとみられた。土壌肥沃度、有機物含有量を高める視点からは、4 m²当たり石灰処理汚泥90kg (10 a 当たり 20 t 強) 全層施用でも許容量内であった。周知のように、汚泥派生資材の農緑地利用は土壌の理化学性、栽培される作物、植生種、樹齢、管理内容 (耕起、表層施用) の違い、気象条件などによって影響を受ける。

4. 農村集落下水道汚泥由来堆肥ペレット化肥料

石川県鹿島郡鹿西町 (現・中能登町) において、成人 2,000 人強、居住戸数 500~600 対象の処理施設が、農村環境整備の観点から設けられた。この汚泥を堆肥化し、地域の農耕地へ還元することが勧められている。この際、肥効と安全性に関して、筆者らが観察した特徴は次の通りである。

堆肥の含有成分 (例) は水分 15.0%、全窒素 6.1%、リン酸 4.4%、カリウム 0.4%。現地未耕地洪積土 (オリブ褐色、pH 7.1、全窒素 0.03%、炭素率 13) を用い、5000 分の 1 アールポットで、窒素成分 1 g 施用条件で 1. 全量汚泥区、2. 半量汚泥区 (0.5 g は硫安で)、3. 化学肥料区 (硫安、過石、硫加)、4. 汚泥 2 倍量区を設け、コマツナを冬期 2 ヶ月間栽培比較したところ、図 3 のような生育を示した。半量汚泥区が相対的に生育が最も良く、化学肥料との併用区が良好であった。冬期は低温のため有機物の分解、無機化が遅れるため、速効性の化学肥料併用効果が現れる。コマツナ茎葉中のカドミウム、銅、亜鉛およびニッケルなどの重金属濃度は表 4 のようにいずれも許容値以下であった。また、栽培跡地土壌中のカドミウム、銅、

表 4 コマツナ中の重金属濃度 (乾燥試料中 ppm)

	全量汚泥区	半量汚泥区	化学肥料区	倍量汚泥区
カドミウム	0.247	0.364	0.384	0.330
銅	3.32	3.30	1.01	3.66
亜鉛	29.3	43.9	50.4	38.7
ニッケル	1.50	1.82	1.20	1.52

植物体中の重金属濃度はいずれも許容値以下である。

表 5 土壌中の重金属濃度 (例, ppm)

	供試肥料約 400kg/10a 施用コマツナ栽培跡地			
	カドミウム	銅	亜鉛	ヒ素
中能登町原土 (対照)	0.078	0.78	10.7	2.18
肥料施用畑	0.096	1.58	14.9	3.64

いずれも許容値以下

亜鉛およびヒ素濃度は、原土とは著しい差はなく、いずれも許容値以下であった (表 5)。

無機化試験によると施肥直後約 20% が無機態のアンモニア態窒素で速効性であるが、残りはゆっくり無機化、肥効発現する。作物の種類にもよるが 2~3 ヶ月の持続的効果が現れ、未分解部分 (収穫跡地) は土壌の理化学的改良に役立つ。作物栽培にあたり肥料成分をこの堆肥だけで施す場合には、施用窒素成分量の 2 倍余を施さないと十分な生育が確保されない。

5. 汚泥の炭化利用

汚泥は、周辺に利用できる農、緑地があれば比較的容易に土壌へ還元利用できる。しかし、離れていたり、排出される量と利用時期等が対応しない場合には滞留となり、保管コストがかかる。この点では脱水汚泥の減容、軽量化の選択肢として炭化がある。地域での事例を述べる。

① 輪島市の下水汚泥炭

明和工業 (株) 製炭化装置により、脱水乾燥汚泥を炭化した炭の農業用資材として配慮した性質は、次の通りである。

山地砂壤土 (最大容水量 36 g、pH 5.0、陽イオン交換容量 (CEC) 10.0 meq) 300 g をノイバウエルポット (約 500 ml 容) に入れ、窒素、リン酸およびカリ成分を化学肥料で 25 mg 混合処理し、これに炭を重量で 1.6% 1 区、3.3% 2 区、5% 3 区、6.6% 4 区配合処理し、炭なしの三要素成分のみのものを対照 5 区とし、コマツナを植害試験の方法に準じて播種、栽培した。

春季約 6 週間栽培したところ対照区に比べ、炭を 1.6~6.6% 混合すると図 4 のようにいずれも生育量が大きく増すことがわかった。図中参考と記した区は、土壌のみの区。土壌改良効果の発現が推察され

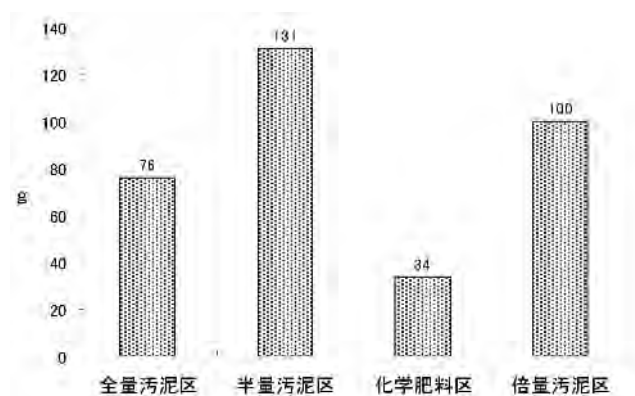


図 3 収穫時のコマツナ生育量 (g/鉢)

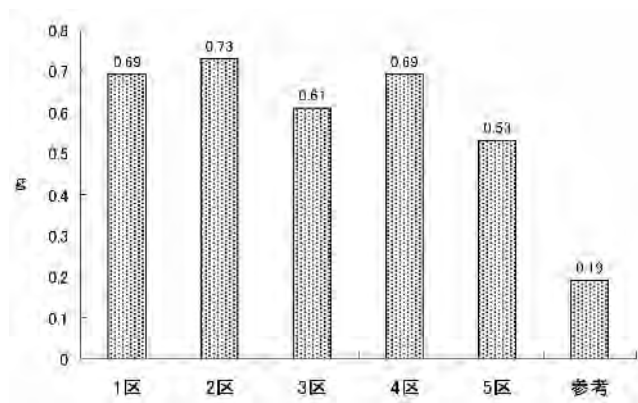


図4 乾物重 (2連平均)

る。

②金沢市と殺場汚泥炭

と殺場の汚泥を①と同様に炭化し、炭化物の農業用へ利用する際の特徴を調べた。炭の主要成分組成は水分62.8%、窒素2.6%、リン酸3.9%、カリ1.8%でリン酸含有率の高いことが特徴。

①で用いた土壌を使い、ノイバウエルポット試験で元肥窒素、リン酸、カリ成分をポット当たり25mg各区共通施用し、供試炭を窒素100mg (標準)、200mg (2倍)、300mg (4倍)、400mg (4倍) 施用処理をし、コマツナを6月 (1ヶ月弱) 栽培した。

図5のように供試炭 (肥料) は、対照とした市販の類似品 (肥料) に比べて劣らず、重量で0.1%以下の土壌混合で効果がはっきり現れることがわかった。(本品は、現在肥料登録申請中である。) なお、ここで紹介した方式による炭化による減少率は容積で約90%、重量で約95%である。汚泥発生現場と炭化装置メーカーが同一行政区域内にあり、多様な現場状況、汚泥の排出性状に対応した装置の改良、操作仕様の指導、啓蒙がなされたことが農業現場に利便性の高い製品開発につながったとみられる。

6. 汚泥焼却集塵灰

汚泥の炭化がらみで炉の温度を更にはげると灰が回収される。これは今まで北陸、石川では敦賀や糸魚川のセメント工場に運ばれ、原料の一部、アスファルトの骨材他へ利用されてきた。灰の由来上、含有無機成分の植物への利用が考えられ、地域でも検討された。

筆者らが金沢市の灰 (株金沢舗道提供 水分0.1%、窒素0.015%、リン酸1.7%、カリ0.057%、アルカリ分26) を水稲コシヒカリ栽培に施用したところ効果が明らかにみられた。すなわち、40L容角形コンテナに加越丘陵黄色土壌を13kg入れ、これに窒素、リン酸およびカリ成分を4g、LPコート100、過リン酸石灰および硫酸カリで施した (…対照区) うえ、上乗せでホタテ粉50g区、同4倍量区、ホタテ粉50g + 堆肥1kg区、能登カキ殻粉末鉄入りケイカル50g区、貝化石50g区、石炭灰 (FA) 50g区、鉄入りケイカル50g区、当該下水道汚泥焼却灰50g区等地域産資材を10a当たり耕深10cm換算約3.8トン元肥混合施用条件で栽培した。コンテナ当たりの玄米収量は図6の通りで、この条件では供試灰の効果が顕著であった。(灰は連用2年目)

石炭灰や貝化石肥料施用区も効果的なことからみて、アルカリ分、ミネラル分に加えて灰中のリン酸成分などの寄与が推察される。石川県の場合、地名が石の多い川と称される程、耕地、主な平野部土壌は有色鉱物由来の粘土含有量が相対的に少ない。また、灰色土壌が多く、地力 (生産力) が低い。従って、地域で得られるリサイクル可能な資材として、当該焼却灰は有効な農業用資材である。

原灰中の重金属含有量分析例では、カドミウム5.8、鉛130 (各ppm) と基準値に近いものもみられるが、使用対象農、緑地土壌の含有量、適切な灰資材中の濃度チェックと現場における施用指針を配慮すれば、十分に使用できるものである。

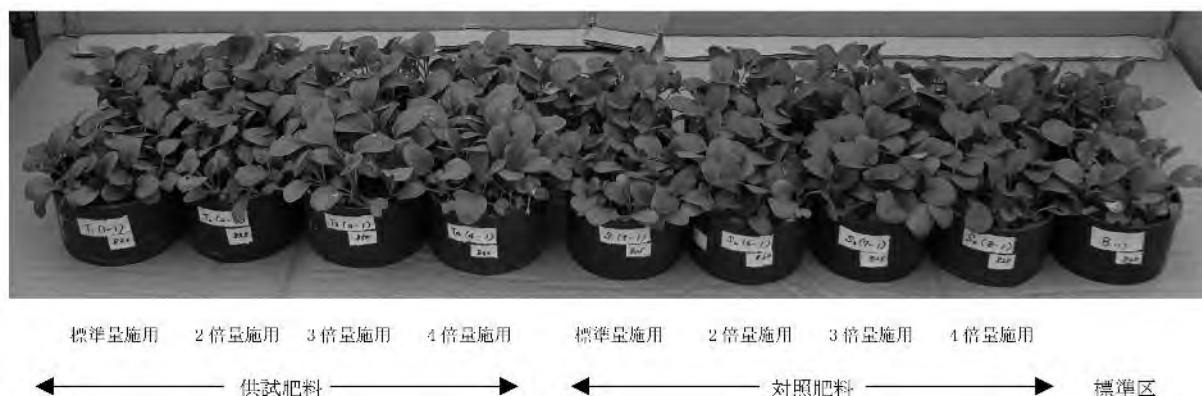


図5 と殺場汚泥炭がコマツナの生育に及ぼす影響

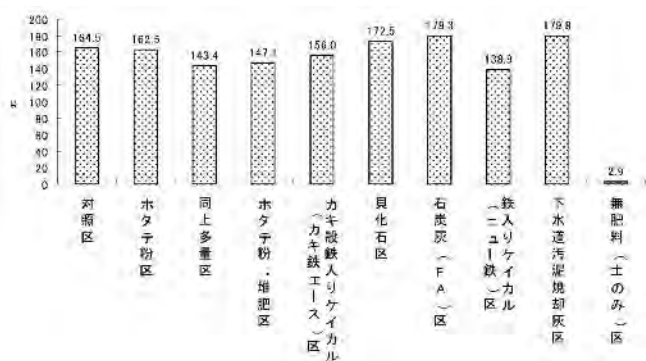


図6 正玄米収量

7. 牛糞堆肥の良質化に下水汚泥を利用

石川県金沢市近郊の河北潟干拓地内には酪農団地があり、域内に糞尿等を利用し年間1万トン強の牛糞堆肥を製造する施設(株河北潟ゆうきの里)がある。ここでは、鹿児島県から筆者らがY・M山村菌群を紹介、技術転移し、改良された方法が使用されている。この際、県下の流域下水道脱水汚泥を数パーセント混合堆肥化すると良質の製品が安定に確保できることがわかり、現在はペレット化されたハンドリングしやすい製品まで生産されている。

ちなみに、石川県内の脱水汚泥発生量は水分80%換算で、54,000トン(平成22年度)、うち金沢市が約60%を占めている。

作物の栽培においては、土の肉に相当する腐植、堆肥成分の施用は必須とされている。ここで紹介した河北潟の堆肥(C.Sと記す。水分30%、窒素約2%)の施用効果事例を示す。

水田転換畑(埴壤土)オオムギ後作のサトイモ栽培において基肥窒素成分40kgを有機化成：高度化成3：1で施したうえ(共通施用、対照区)、供試堆肥や既述のと殺場汚泥炭など地域産資材を基肥併用した場合の効果は、表6の通りである。

10a 当たり堆肥1.8トン施用すると対照区に比べ、

イモ重で約10%、個重で約20%勝る効果が見られる。と殺場汚泥炭や能登カキ殻粉末、鉄入りケイ酸と堆肥の併用効果もまた観察される。

8. 汚泥を養分とする琵琶湖カナダ藻などのペレット肥料化

河川や湖水などにおける富栄養化に伴う水質汚濁抑制は、依然生活環境の課題となっている。琵琶湖における外来の大型藻(カナダ藻草丈1m余)の繁殖抑制は、湖水が近畿2府2県の水源機能を果していることから重要な事になっている。流入する河川中の有機物の沈積、ヘドロ化、汚泥等を栄養に藻が生長している。年間4,000トン(現物)とされる藻に対して、除去は容易ではない。かつては、魚の飼料(藻場)、農地への自給性地域的肥料として評価され、利用もされたが、産業の発展で周知のように、現在は邪魔者扱いにされている。筆者らは、大津市の環境関連団体、法人等から、新たな視点での肥料化、農緑地への有効な利用法選択の検討を求められ、現在藻のペレット肥料化、汚泥土壌の培土利用について現場で低コスト、省力で使える方策を考慮している。

ちなみに、市販の米ぬかペレット成形機(株タイワ精機製、富山市)を利用して試作した藻入り米ぬかペレット肥料のコマツナ生育に及ぼす効果(例)は、表7の試験区構成で、秋季ガラス室内で、約6週間育てると図7～8の結果を示す。ここで、施肥はポット当たり窒素成分1gで、6の対照区は化成のみ、2は杉炭100g+化成区、5は杉炭100g+6で述べた堆肥(C.S)50g区、7は染色汚泥と能登ケイソウ土を混合焼成したポーラスな物の粉末(グリーンビズ=GB、小松精練(株)製)50g+C.S50g区、10は米ぬか8に対して貝化石1、乾燥琵琶湖藻0.5、GB0.5配合(重量)成形ペレット50g区である。藻は乾物率が小さいので、生の藻に換算すると米ぬかとの割合は、概算1：1である。

表6 試験区構成とサトイモの収量と品質

区名	処理	10a当たり施用量	イモ重 (kg/3.3㎡)	同左指数	イモ個重 (g, 30個)	同左指数	規格
1	対照区		6.3	100	43.6	100	M
2	河北潟堆肥(C.S)1.8t区		7.0	111	54.3	124	M
3	C.S+貝化石600kg区		3.8	60	41.3	95	M
4	C.S+金沢市と殺場汚泥炭300kg区		7.8	124	65.0	149	L
5	C.S+カキ殻入りケイ酸(カキ鉄)300kg区		7.0	111	61.3	140	L
6	漢方残渣堆肥1.8t区		6.6	105	57.0	131	M
7	C.S+ホタテ粉300kg区		6.7	106	50.6	116	M

表 7 試験区構成 (1/5000アールポット栽培) 土壌:砂壤土2.5kg 各2連

No.	供試肥料 (g)	化成9-8-9 (g)	C.S (g)
6区 対照区	-	11.1	-
2区 杉炭+化成区	100	11.1	-
5区 杉炭+C.S区	100	-	50
7区 GB+C.S区	50	-	50
10区 No.⑦GB+貝化石(Eh)+琵琶湖藻入り米ぬかペレット	50	-	-



図 7 コマツナの生育状況

この結果は、化学肥料（化成）やこれに杉炭を併用した処理に比べて、下水汚泥入り堆肥（C.S）に杉炭や多孔質のGBを併用すると、土壌の通気・透水がらみで物理性が改良され、さらに養分もゆっくり根へ供給され、生育が良好となることを示している。藻入りペレット肥料は土壌に施されると種子の発芽障害は見られないが、米ぬか、藻の初期分解に伴う見かけ上の生育遅延が発生する。通常約3週間でこれは解消に向かう。これを早め、この障害発生を抑制するには、ペレット成形時に窒素成分を富化するか、施肥に速効性肥料などを適量併用する、あるいは播種の3～4週前に土壌に施肥混合し、分解を促しておくなどの現場技能で対応できる。

以上、地域的な現場がらみの汚泥や有機質肥料資材を利用した環境保全と安全で良質な農作物生産、環境保全型農業を展望する実践的試験結果・事例を概略紹介した。詳細については文献を参照していただきたい。

文献

1. 中村静夫他4名：浄水場発生土の有効利用、クリーンジャパン69.38-43（1988）。
2. 長谷川和久：イネ箱苗用土に浄水場上水分離土壌を使う際のリン酸固定能力を具体的に下げる方法について、日本土壌肥料雑誌66 683-685（1995）。
3. 長谷川和久：畑地への下水道汚泥施用が土壌の孔隙および有機物含有量に及ぼす影響、石川県農業短期大学研究報告22 30-35（1992）。

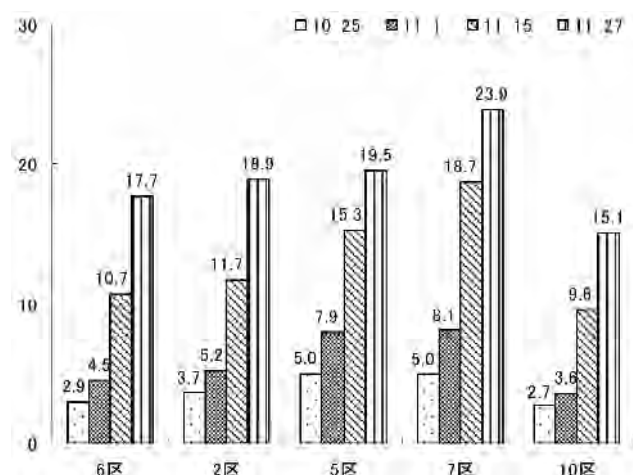


図 8 最大草丈 (平均)

4. 長谷川和久：環境保全型農業の理化学99-103（2009）. 養賢堂.
5. 長谷川和久・伊東志穂：農村集落下水道汚泥の利用、耕緑地還元—石川県鹿島郡鹿西町汚泥肥料の効果、石川県農業短期大学附属農場報告7～13（2005）。
6. 奥野まゆみ・長谷川和久：地域で排出される廃棄物の肥料化・登録事例、農業および園芸77 1157-1161（2002）。
7. 北國新聞（金沢）：石炭灰と下水汚泥を配合、環境に優しい肥料開発、2007年1月31日。
8. 北國新聞（金沢）：汚泥を肥料に、2012年7月14日。
9. 長谷川和久・伊東志穂・伊達彩香：サトイモ栽培における地域産堆肥、資材等の併用効果について、農業および園芸88 1071-1077（2013）。
10. 北國新聞（金沢）・北陸中日新聞・富山新聞・北日本新聞（富山）：琵琶湖の藻、肥料化、2013年10月9日。
11. 長谷川和久：土壌と生産環境128-133（2002）. 養賢堂.
12. 長谷川和久・伊東志穂・林文慧：有機質肥料・牛糞堆肥（かんとりースーパー河北潟）と貝化石肥料の併用効果、農業および園芸89（2014）. 23-28.

Q & A

堆肥とは？（続き）

キーワード：堆肥、堆肥化温度、C/N比

Q1

堆肥に必要な条件は何ですか？

A1

安定な作物生産には堆肥施用が求められますが、そのためには次の事項は最低限でも守って欲しいものです。

- ①作物に障害が出ないこと：堆肥に用いる素材によっては有機酸やフェノール性酸等の種子の発芽や作物の生育に有害な成分を含むことがありますので注意が必要です。また雑草の種子が含まれていてもいけません。
- ②有害成分を含まないこと：有害な重金属、ヒ素、カドミウム、水銀では、それぞれ堆肥キログラム当たり50mg、5mg、2mgを超えることは法律で禁じられています。亜鉛でも基準があります。
- ③製品が安定していること：今日では堆肥の素材が多岐にわたるため、その種類によって肥料成分や施用効果が異なります。販売には特性の明示が必要です。また、製造ロットごとに成分が異なるようでは、利用上問題が多いため、製造管理をきちんと行い、成分の安定化が求められます。
- ④悪臭がないこと：完熟堆肥では悪臭は発生しませんが、未熟な堆肥に見られます。完熟堆肥はかすかに縁の下の土の匂いがすると言う人もあります。言い得て妙です。
- ⑤取り扱いやすいこと：堆肥を農地に散布する場合は、一般に10アール当たり1トンは必要と言われています。重くてかさばりますから、取り扱いやすく、作業が効率的に進められることが大切です。いわゆる散布問題です。粒状化やペレット化技術が進んでいます。

堆肥は化学肥料と違って、施用すると次年度以降に残存することが多く、特に重金属等の有害成分が一度入り込むと、その除去には大変な労力が必要とされますので、注意が必要です。

Q2

堆肥づくりのポイントは何ですか？

A2

堆肥は、稲ワラや家畜排泄物等の有機物が微生物の働きによって分解され、完熟されたものです。すなわち、微生物の反応産物です。従って、醸造等と同じで、①温度、②水分、③酸素が必須です。他に堆肥製造に独特の項目として④炭素と窒素の割合（炭素率、C/N比）が加わります。

- ①温度については、原料を加熱するのではなく、堆積して酸素を与えれば（切り返しを行えば）、原料中の微生物の増殖によって60～70℃に上昇するのが、堆肥化の特徴です。
- ②水分については、人為的に60%前後に調節したいものです。
- ③酸素については、堆積したままにおかないで、いわゆる攪拌する必要があります。切り返しと言います。
- ④炭素と窒素の割合（炭素率、C/N比）については、有機物の分解と密接な関係にあり、一般的には、稲ワラのように堆肥の原料となる有機物C/N比が高いと、微生物のからだを作るもとになる窒素が不足するので、窒素を補うことがあります。

Q3

堆肥の原料は様々ようですが、それぞれ注意すべき点を教えてください。

A3

従来は、稲ワラや麦ワラ等の作物残渣、落葉、野草などの植物系と家畜排泄物系が主たる原料でしたが、最近では家庭からの生ごみ、都市ゴミ、下水汚泥、水産物を含む食品産業系廃棄物、剪定枝を始めとする林産系廃棄物等、極めて多岐にわたります。

これらの原料を堆肥化する際には、固有の物差しがあり、便利です。堆肥化の方法が異なります。それが原料の炭素と窒素の割合（炭素率、C/N比）です。

(1) C/N比が30以下の場合

家畜糞や下水汚泥は窒素含量が高く、C/N比も30

以下で、極めて分解しやすい資材です。しかし、新鮮な家畜糞は水分含量が高く、通気性も悪いため、生の状態では分解は進みにくい欠点があります。そのためオガクズやモミガラ、ワラ等の副資材を添加し、水分の調整と通気性の改善を図る必要があります。

(2) C/N比が30～100の場合

稲ワラやモミガラは、C/N比が70以上あるので、微生物のからだをつくるもとになる窒素が不足します。稲ワラを堆積するときは、C/N比が30～40前後になるように速効性の窒素を添加し、空気が入るように、また水分を60%程度に調整します。これにより有機物の分解が進み、効率よく堆肥化できます。他に麦ワラ、野草、落葉が相当します。

(3) C/N比が100以上の場合

オガクズやバーク（樹皮）のようにC/N比の極めて大きい原料は、窒素を補給しても稲ワラのように分解は進みません。これはリグニン、タンニンやワックスなど分解しにくい成分を多く含んでいるためです。市販されているバーク堆肥は原料を2～3年間野外に堆積して、古い物から順次粉碎し、鶏糞や尿素または硫酸などの窒素源を混合し、水分をおおよそ60～65%に調整して、発熱分解させたいものです。

Q4 堆肥の原料から見た良質堆肥の選び方や特徴を教えてください。

A4 堆肥の原料や素材は多種多様ですが、大きく分けると、生ごみ系、家畜排泄物系、木質系があり、それぞれ特徴があります。販売される堆肥には、肥料取締法で「種類」「原料」「成分」などの表示が義務づけられていますので、購入時に確かめることが賢明です。

生ごみ系は、養分が多く含まれ分解も早いので「肥料効果」が高いのが特徴です。木質系は窒素が少なく繊維などが多く、ゆっくりと分解されて土壌腐植となるため、保水性や通気性をよくする「物理性改善効果」が高いと言う特長があります。家畜排泄物系は両者の中間的な性格ですが、家畜排泄物単独では生ごみ系のように肥料効果が高く、おがくずやバークなどの混合量が多いと、木質系に近い性質になります。

家畜排泄物系の中では、一般に肥料効果は鶏糞が最

も高く、豚糞、牛糞の順です。一方土壌の物理性改善効果はその逆の順序になります。

生ごみ系堆肥や家畜排泄物系堆肥（中でも鶏糞堆肥）は窒素成分が多く、C/N比が低く、木質系の多く入った堆肥は逆に窒素成分が少なくC/N比が高くなります。

これらの特徴が見方を変えれば欠点となります。それぞれの欠点は未熟な堆肥ほど強いことに注意してください。

Q5 堆肥と肥料はどう違うのでしょうか？

A5 堆肥と肥料はともに作物にとって必要なものですが、肥料は、窒素、リン酸、カリウムなどの無機質の化合物そのものを粒状にしたもので、多くが水溶性で、直ぐに植物に吸収されます。一方、堆肥は直ぐに肥料として働きませんが、何ヶ月も経ってから、じわじわと栄養分が出てくると言う特性を持っています。肥料にも有機質肥料と言うものがあり、緩効性で栄養分が出てくるものもありますし、堆肥でも尿素を多く含む鶏糞を原料とする堆肥のように速効性に近いものもあります。

肥料は多くが速効性と言うこともあって、一作期間で作物にほとんど吸収されてしまいますが、堆肥は緩効性のゆえに効果が徐々に現れるとともに、連年施用するとその効果が累積する特長があります。いわゆる地力増強資材と言ってよろしいでしょう。

（（一財）日本土壌協会 仲谷紀男）

現場からの

声

ベルトプレス脱水機における消化汚泥脱水に用いる高分子凝集剤の比較法

キーワード：高分子凝集剤、テーブルテスト、消化汚泥脱水

1. はじめに

下水処理では、水処理と共に汚泥処理も重要であるが、中でも脱水汚泥の水分量は、その後の焼却処理や最終処分のハンドリングだけでなく経済性にも大きく関わってくる。脱水工程において含水率の低い脱水汚泥とするためには様々な要素があるが、適切な凝集剤の選択は重要なものの一つである。

現在、汚泥の脱水に最もよく用いられる高分子凝集剤には、分子量や極性基の違いにより凝集能の特徴が異なる多種多様な製品がある。

一方、脱水処理を行う汚泥についても消化汚泥、初沈汚泥、余剰汚泥とそれぞれ固形物濃度範囲や化学的性状が異なる。そのため、高分子凝集剤の選択を検討

福岡市道路下水道局下水道施設部水質管理課

水質研究係長 山口 実苗

する際に、汚泥と凝集剤を混合攪拌してフロックの性状を確認するテーブルテストを行う。しかしながら、テーブルテストの方法は公的に規格化されておらず、メーカー、ユーザー、担当者ごとに手法が異なるために、その結果は客観性に欠け、一律に比較ができない不便さがある。

今回、ベルトプレス脱水機による消化汚泥の脱水に用いる高分子凝集剤の比較を行う方法として、まずは①テーブルテスト方法を定め、次にそれを活用して、

(手順)

- 1) あらかじめ脱水機投入前程度の温度に調整した汚泥200mlを300mlビーカーに採取し、ジャーテスターにセットする。
- 2) 200rpmで攪拌しながら、凝集剤（溶解濃度0.2%）を所定量すばやく添加後、60秒攪拌し、汚泥をフロック化させる。攪拌終了後、フロック径を測定する。
- 3) 重力ろ過用ろ布の上に内径90mm円筒を置き、フロック化汚泥を円筒内にすばやく注ぎ入れ、重力ろ過を120秒間行う。ろ液量の測定は投入直後から10、20、30、120秒後とする。
- 4) ろ過（120秒）後、速やかに円筒を抜き取る。
- 5) ろ液のSS、ろ布上汚泥の自立性の測定を行う。

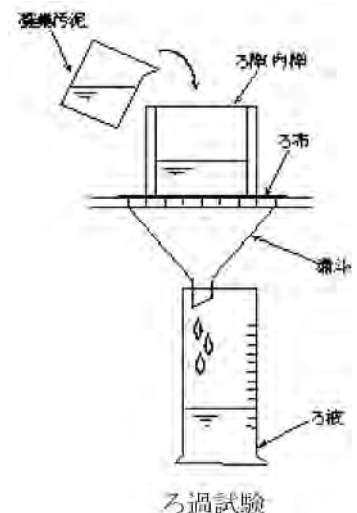


表1 高分子凝集剤テーブルテストの評価規準一覧

評価項目		評価規準
凝集性	フロック径	2~4mm程度
	ろ液割合 ＝ろ過量/(汚泥量+凝集剤添加量)	60(v/v)%以上
	ろ液のSS	300mg/L以下
	自立性	○又は◎
剥離性		○又は◎

※自立性

フロック化汚泥をろ過後に円筒をはずし、目視判定

- ◎ 円柱形状を保ち、崩れない状態
- 円柱形状がやや崩れた状態
- △ 円柱が崩れ、円錐台形状になった状態
- × 形状をとどめず、すぐにろ布上に広がる状態

※剥離性

汚泥を返して空け、ろ布を目視判定

- ◎ ろ布上に、汚れがほとんどない
- ろ布上に、1~2割程度汚れがみられる
- △ ろ布上に、3~5割程度汚れがみられる
- × ろ布全体に汚れがみられる



写真1 ジャーテストの様子

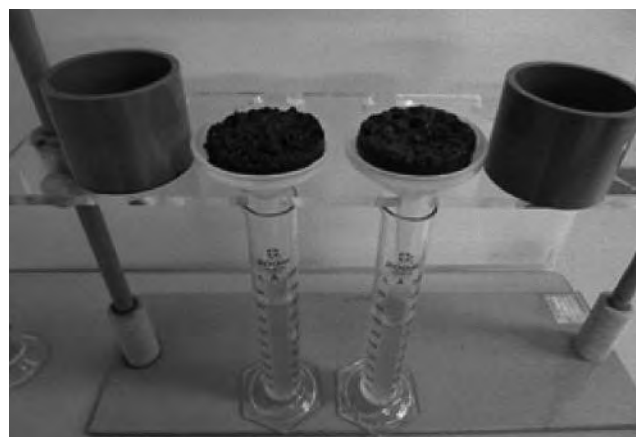


写真2 フロックの自立性

凝集剤を比較する手法として②「碁盤目法」を考案したので紹介する。

2. テーブルテストの方法

ベルトプレス脱水機において消化汚泥脱水の凝集剤添加に関するテーブルテスト（手順）の通り統一して行うこととした。判定規準については、重力ろ過120秒におけるろ液割合及びSS濃度のほかに、目視で行う自立性や剥離性も入れ段階表示とした。評価規準値は良好な脱水処理時と同一の条件で行ったテーブルテストの結果から定めた（表1）。

		消化汚泥固形分(%)				
		1.0	1.3	1.7	2.0	2.5
薬注率 %	0.5					
	1.0					
	1.5					
	2.0					
	2.5					
	3.0					

図1 テーブルテスト結果記入シート

3. 凝集剤を比較する手法として碁盤目法

(1) 碁盤目法とは

消化汚泥固形分と薬注率の両方がそれぞれ段階的に異なる多くの組み合わせについてテーブルテストを行い、評価規準をもとに凝集の良好な範囲を図示化するものである。評価結果記入シート（図1）が碁盤目に似ていることから「碁盤目法」と名付けた。

試験に用いるそれぞれの固形分濃度の消化汚泥は、消化汚泥を遠心分離機にかけ、その上澄液で元の消化汚泥を希釈したものと上澄液の一部を除去したもので段階的な濃度となるよう調整した。

(2) 高分子凝集剤の比較

消化汚泥の固形分濃度を1.0%から2.5%の間に5段階で調整し、薬注率は0.5%から3.0%の間に6段階に変化させ、それぞれの組み合わせ毎にテーブルテストを行なった。評価項目のうち、ろ液割合、ろ液のSS、自立性の3項目について、良好な結果を得たマス目に着色したものが、図2の上から1段階目（ろ液割合）、2段階目（ろ液SS）、3段階目（自立性）である。この3つの碁盤目を重ね合わせ、3項目ともすべて良好となるマス目に着色したものが4段階目の「総合評価」の碁盤目である。

		タイプA						タイプB						タイプC					
1	ろ液割合	消化汚泥固形分(%)						消化汚泥固形分(%)						消化汚泥固形分(%)					
		ろ液割合(%)						ろ液割合(%)						ろ液割合(%)					
		0.96	1.25	1.70	1.95	2.62		1.13	1.36	1.77	1.97	2.41		1.29	1.76	2.18			
ろ液割合	薬注率(%)	0.5	54	42	27	19	9	0.5	32	23	17	15	10	0.5	-	-	-		
		1.0	73	68	63	59	44	1.0	54	42	52	30	38	1.0	-	44	45		
		1.5	80	77	62	58	50	1.5	76	70	57	51	34	1.5	64	50	34		
		2.0	79	77	66	57	51	2.0	76	67	57	61	30	2.0	62	44	22		
		2.5	80	78	66	67	60	2.5	75	71	61	55	32	2.5	52	37	9		
		3.0	79	78	72	68	61	3.0	74	66	45	29	9	3.0	54	26	8		
2	ろ液SS濃度	消化汚泥固形分(%)						消化汚泥固形分(%)						消化汚泥固形分(%)					
		ろ液SS mg/L						ろ液SS mg/L						ろ液SS mg/L					
		0.96	1.25	1.70	1.95	2.62		1.13	1.36	1.77	1.97	2.41		1.29	1.76	2.18			
		0.5	3440	4440	5900	6900	8733	0.5	-	-	-	-	-	0.5	-	-	-		
		1.0	750	650	400	470	110	1.0	1240	1090	345	1030	320	1.0	-	690	340		
		1.5	270	68	53	57	120	1.5	145	73	160	160	255	1.5	158	170	260		
		2.0	85	75	140	155	190	2.0	67	180	230	135	190	2.0	145	260	270		
		2.5	135	180	210	140	145	2.5	165	185	230	230	220	2.5	210	240	200		
		3.0	200	145	155	180	125	3.0	190	190	170	160	183	3.0	220	270	290		
3	自立性	消化汚泥固形分(%)						消化汚泥固形分(%)						消化汚泥固形分(%)					
		自立性						自立性						自立性					
		0.96	1.25	1.70	1.95	2.62		1.13	1.36	1.77	1.97	2.41		1.29	1.76	2.18			
		0.5	×	×	×	×	×	0.5	×	×	×	×	×	0.5					
		1.0	○	○	○	△	○	1.0	×	×	○	×	△	1.0	-	×	△		
		1.5	◎	◎	◎	◎	◎	1.5	◎	◎	◎	◎	△	1.5	○	△	×		
		2.0	◎	◎	◎	◎	◎	2.0	◎	◎	◎	◎	×	2.0	△	×	×		
		2.5	◎	◎	◎	◎	◎	2.5	◎	◎	◎	◎	×	2.5	×	×	×		
		3.0		◎	◎	◎	◎	3.0						3.0	×	×	×		
4	総合評価	消化汚泥固形分(%)						消化汚泥固形分(%)						消化汚泥固形分(%)					
		総合評価						総合評価						総合評価					
		0.96	1.25	1.70	1.95	2.62		1.13	1.36	1.77	1.97	2.41		1.29	1.76	2.18			
		0.5						0.5						0.5					
		1.0						1.0						1.0					
		1.5						1.5						1.5					
		2.0						2.0						2.0					
		2.5						2.5						2.5					
		3.0						3.0						3.0					

図2 凝集剤タイプA、B、Cの基盤目法の結果

(3) 碁盤目法による凝集剤のタイプ別特徴

製造メーカーの異なる凝集剤タイプA、タイプB、タイプCについて、それぞれ碁盤目法を試みた結果、凝集剤の違いにより良好な凝集範囲の違いが図示化できた(図2)。

タイプAの凝集剤は、同じ薬注率で良好に凝集できる消化汚泥濃度範囲が3タイプの中で一番広がった。また、高い濃度の汚泥に対しても薬注率を上げることで良好に凝集した。

タイプBの凝集剤は、良好に凝集する範囲がタイプAより小さかった。また、高濃度の汚泥に対しては、薬注率を上げてもうまく対応できなかった。

タイプCの凝集剤は、良好に凝集できる汚泥濃度の範囲が著しく小さく、汚泥濃度の違いに対応できなかった。

4. 実施設での使用結果

高分子凝集剤のタイプA、B、Cは、当市施設において半年間ずつ、購入契約したものである。半年間の利用の結果、タイプAの使用期間中は操作変更も少なく安定した脱水機運転が行いやすかったが、タイプBは消化汚泥濃度の多少の変動で凝集性状が変わるので、操作を細かく変更する必要があった。タイプCは、消化汚泥濃度の変動に対し薬注率等を変更しても

凝集状態が良くなり、脱水汚泥の状態が改善しないことも生じたことから、やむなく使用を中止して、他の凝集剤へ変更せざるを得なかった。これは、メーカー等が行った事前のテーブルテストでは、予想できない事態であった。今回考案した碁盤目法の総合評価(図2)に基づけば、容易に予想可能なことであり、タイプCの選択を回避することも可能であったと考える。

5. 碁盤目法の今後の活用期待できること

消化汚泥の脱水に用いる高分子凝集剤を比較することができる碁盤目法は、今後、次のようなことに活用できると考える。

- 1) 汚泥と凝集剤のミスマッチングを回避できる。
- 2) 同じテーブルテスト手法、同じ判定規準を用いることにより、高分子凝集剤のデータベース化が可能となる。これは多くの製品がある高分子凝集剤を凝集能のタイプ別に整理することが可能となり、ひいてはハンドリングが良く、少ない薬注率で効果が得られる凝集剤の選択につながる。
- 3) 複数の脱水方式を持つ処理場では、共有できるタイプの凝集剤を選択することも期待でき、設備面、管理面、購入の一元化による経済性などに貢献できる。

文献紹介

汚泥の動電学的処理による カドミウム、ニッケル、亜鉛の移動と変化

Effects of electrokinetic treatment of contaminated sludge on migration and transformation of Cd, Ni and Zn in various bonding states

Jie Gao, Qi-Shi Luo, Jiang Zhu, Chang-Bo Zhang, Bing-Zhi Li
Chemosphere, 93, 2869-2876 (2013)

下水汚泥の農業利用は、先進国においては重金属含有量を基準に規制されているが、植物栄養と有機物補給、ならびに汚泥の有効な処分方法の両面から農地利用している国々も多い。環境リスクを回避する観点から、汚泥の重金属を低減する技術が求められている。動電学的（electrokinetic、EK）処理は重金属低減のための処理方法の1つとして期待されるものであり、EK処理の重金属除去効率を改善するための多くの研究事例がある。EK処理により発生する水素イオンや水酸化物イオンはpH、酸化還元電位、吸脱着特性を変化させ、汚泥中の重金属の形態にも影響すると考えられるが、これまでそれらの関係についてはあまり調べられていなかった。そこで本論文の著者らは、EK処理の時間を変えて汚泥中のCd、Zn、Niの除去を試験し、逐次抽出に基づく金属の形態とEK処理による除去効率との関係を調べた。

生活排水と工場廃水を受け入れている下水処理場の汚泥（Cd：99mg/kg、Zn：2772mg/kg、Ni：2954mg/kg、pH6.9）が試験に用いられた。EK処理には40×10×9 cmの容器を使い、陽極にはルテニウム・イリジウム・チタン電極、陰極にはグラファイト電極を用いた。汚泥は5個のセル（S1～S5、S1が陽極側、S5が陰極側）に280cm³ずつ充填し、汚泥のセルと電極の間はろ紙で区切った。電極の上部は開放し、発生したガスを逃がすようにした。定電圧電源を使って20Vで24時間から144時間通電した。EK処理前後の汚泥中の重金属の形態（交換態、易還元態、酸化物態、残渣）は、BCR法に基づく逐次抽出により定量した。

EK処理により、陽極側の汚泥（S1）のpHは初期値の6.9から144時間後には6.2に低下し、陰極側の汚泥（S5）は8.8に上昇した。これは、それぞれの電極で、水素イオン、水酸化物イオンが生成することに起因し、pHが低下する陽極側では、重金属の脱着の促進

が期待される。汚泥の水分含量は電気浸透流による移動を反映し、96時間後には陰極側で高まる傾向が認められた。

144時間のEK処理におけるCd、Zn、Niの除去割合は、それぞれ34%、33%、48%であり、Niは他の重金属より移動性の高い画分の割合が高かったものと考えられた。また、CdはEK処理後96時間まではほとんど除去されず、144時間でようやく34%の除去に達したのに対し、Niは24時間の処理でも30%は除去される傾向にあり、金属ごとに除去に要する時間が異なっていた。

EK処理前後の形態変化を見ると、Cd、Zn、Niすべてにおいて易還元態が減少し、酸化物態が増加傾向にあった。EK処理48時間後において、交換態と易還元態のCdの割合は、陰極に近づくほど高い傾向にあった。Zn、Niにおいても概ね同様の傾向が認められた。これにより、EK処理初期において、汚泥表面に存在しているこれらの金属が陽極側で脱着し、陰極方向に移動していることが確認された。

形態別の除去効率は、Cdにおいては、易還元態＞酸化物態＞交換態＞残渣の順であり、Zn、Niについても同様であった。このことは、EK処理による汚泥中重金属の除去は、形態に強く依存することを示している。

汚泥の交換態Cdは、易還元態Cdと有意な負の相関が認められ、易還元態Cdは残渣Cdと有意な負の相関が認められた。EK処理に伴うCdの脱着により、交換態Cdと易還元態Cdとの形態変化が示唆された。交換態Znは処理時間と正の有意な相関が認められ、処理時間が長くなるほど交換態Znが増加する傾向にあった。しかし、酸化物態Znは処理時間とは有意な負の相関が認められた。これは、酸化還元状態の変化が影響しているためと考えられた。交換態Niと残渣Niは処理時間と有意な正の相関を示し、易還元態と酸化物態は処理時間と有意な負の相関を示した。このことは、Niの形態が相互に変化しやすいためと考えられた。

以上の結果より本論文の著者らは、EK処理による汚泥からの重金属除去は重金属の形態に依存すること、EK処理により交換態の存在割合が増加することなどを指摘している。

（農業環境技術研究所 川崎 晃）

文献紹介

バイオディーゼル生産のための
湿潤下水汚泥のエステル交換反応

In-situ Transesterification of Wet Wastewater
Sludge for Biodiesel Production

O. K. Choi, J. S. Song, W. O. Cha, J. B. An, D. K.
Cha and J. W. Lee.

The 5th IWA-ASPIRE Conference, 09B2-5,
September 8-12, 2013

バイオディーゼルは、高い生分解性と有害物質の排出量が少ないことから環境上の利点があるとされ、動植物油等を原料として生成されている。しかし、その原料は食料源との争奪となり、バイオディーゼル生産費用の70%以上が原料供給に費やされている。また韓国では長い間実施されてきた下水汚泥の海洋投棄処分が2012年に禁止され、下水汚泥処分の課題がある。

近年、バイオディーゼル代替原料として下水汚泥が注目されているが、下水汚泥からのバイオディーゼル生産には、下水汚泥の高い含水率がバイオディーゼル生産時の触媒効率およびエステル交換反応に悪影響を及ぼす等の課題がある。そのため殆どの開発技術では、前提条件として乾燥工程が含まれている。しかし、湿潤汚泥の乾燥は多量のエネルギー消費につながるため有益ではない。そこで本研究では、エステル交換反応に主に使用されているヘキサンを代替溶媒としてキシレンを用いることにより、湿潤下水汚泥からのバイオディーゼル生産量の収率を高める手法の開発を行った。

比較対照となる乾燥下水汚泥からのバイオディーゼル生産は、ソックスレー抽出装置を用い、乾燥汚泥とメタノール、ヘキサンを混合し、55℃水浴でエステル交換反応を行い、上澄水を硫酸ナトリウムを用いて脱水しバイオディーゼル試料を得た。一方、湿潤下水汚泥試験は、脱水汚泥とヘキサンまたはキシレン、メタノール、硫酸を混合し、55℃および105℃で反応させた。また反応過程で蒸発した溶媒が再循環される装置を用いた。

乾燥汚泥試料として、最初沈殿池汚泥と余剰汚泥の2種類を比較した。その結果、バイオディーゼル収率は、余剰汚泥方がわずかながら上回った。またメタノール添加量が5 mL/gまでは、どちらも比例的に収率は増加したが、以降(10 mL/gまで)最初沈殿池汚泥では増加せず、余剰汚泥のみ増加した(最大収率9.68%)。それは余剰汚泥及び最初沈殿池汚泥での主たるバイオディーゼル源の違いに起因する。前者は生物膜中の脂肪酸であり、エステル交換によりFAMESに変換されるのに対し、後者のトリグリセリドはグリセロールが副生成物として残り、水酸基を持つメタノールの過剰添加により乳化物生成を助長するためである。

湿潤汚泥を用いたバイオディーゼル生産手法において、ヘキサンを溶媒とした場合の収率は3.28%であったが、キシレンでは収率8.12%と優れていたとともに、従来法である乾燥汚泥からの収率に匹敵した(表2)。

また、キシレンを用いて高温条件で反応させることで、反応速度の向上も見られ、ヘキサンを用い8時間反応させた場合と、キシレンを用い105℃で2時間反応させた場合のバイオディーゼル収率が同等であった。

生成されたバイオディーゼルの組成を比較すると、溶媒にキシレンを用いた場合、ラウリン酸(C12:0)、ミリスチン酸(C14:0)、ペンタデシル酸(C15:0)、パルミチン酸(C16:0)、ステアリン酸(C18:0)のメチルエステルのような高品質のバイオディーゼルにとって不可欠な成分を含む一方、不飽和脂肪酸メチルエステルと未反応の残留グリセリドの存在は無視できるほどとなり、FAMEのピーク数はより少なくシンプルになり、品質改善が見られた。

本研究では、キシレンのような適切な溶媒を選択することにより、湿潤汚泥を前処理として乾燥することなくバイオディーゼルのための供給原料になることを実証した。

(日本下水道事業団 三宅 十四日)

Table 2. Comparison of maximum biodiesel yield under different condition attempted in this study

Sludge type	Solvent	Sludge to methanol ratio (mLg ⁻¹)	Biodiesel yield (%)
Primary dried	n-Hexane	10	8.04
Secondary dried	n-Hexane	10	9.68
Dewatered	n-Hexane	2	3.28
	Xylene	2	8.12

講座

磷酸製造原料としての 焼却灰利用の取り組み

日本磷酸(株)

用 山 徳 美

キーワード：焼却灰、リン、磷酸、肥料、磷鉱石

1. はじめに

リンは全ての生物に不可欠な元素であり、植物の成長において肥料の3大要素のひとつである。私たちはそのほとんどを磷鉱石に頼っている。磷鉱石は他の鉱物資源同様に有限である。最近では、人類のグローバル問題として捉えられ、欧州を中心に「世界の食糧の安定供給には、持続的なリン利用が絶対に必要」とのパラダイムが登場した¹⁾。わが国はこれまで多量に磷鉱石を輸入することができた。これによって製造した肥料を、長年にわたり土壤に施し、耕作地を改良してきた。しかし、今日に至って、リン過剰の耕作地が散見され、メタボ状態と揶揄されることもしばしばある。その一方で、今、南の国々では食糧の生産に必要なリンが不足する状況が生まれている。日本のような先進国は「磷鉱石に依存しないでSecondary Sourcesを使っていくべき」¹⁾、肥料製造に携わるものとしての使命と再認識している。

わが国は、肥料用のリン資源を磷鉱石及び磷鉱石からの加工製品（磷安、熔リン等）の形態で輸入している。堆肥等で一部国内のリン資源の循環が行なわれているが、化学肥料においてはほとんどが海外のリン資源依存している。磷鉱石の輸入価格の高騰に見舞われ入手困難になったのはまだ記憶に新しい（図1）。国内の未利用リン資源の活用的重要性と、とりわけリン

資源が集約されている下水処理場への期待は前報²⁾に記載したとおりである。

前報を受けて、日本磷酸(株)では、下水処理汚泥の焼却灰（以下、焼却灰）について磷酸製造の原料としての適合性を実験室規模の試験研究及び実際の生産設備にて製造試験を行い、リン回収可能なことを実証し、現在商業的に磷鉱石の一部代替として使用を開始した。

本稿では、焼却灰の肥料用途の磷酸製造の原料としての品質の評価について再度レビューし、焼却灰使用の再資源化事業の概要を紹介する。

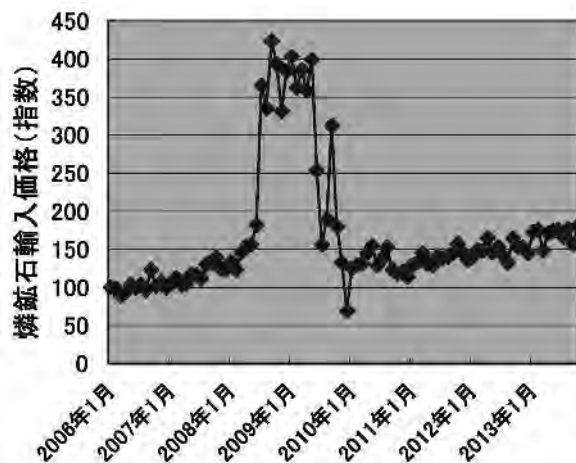


図1 リン鉱石輸入価格(指数)の推移
2006年1月の価格を100として指数で表示
出典：貿易通関統計値から作図

表1 焼却灰の化学成分

		焼却灰	磷鉍石
P ₂ O ₅	%	24～35	32～38
CaO	%	10～14	48～53
Al ₂ O ₃	%	10～14	0.2～0.8
Fe ₂ O ₃	%	2～15	0.2～0.7
MgO	%	4～6	0.2～1.0
SiO ₂	%	24～33	2～11
As	mg/Kg	2～10	2～20
Cd	mg/Kg	1～11	0.1～15
Pb	mg/Kg	40～100	1～15
Zn	mg/Kg	2000～5000	10～300

2. 下水汚泥焼却灰の肥料原料としての利用方法

下水処理場から発生する焼却灰には磷鉍石とそんなリンが含まれているが、焼却灰の土木建築資材への利用は行われているものの、リン資源としての活用事例は乏しい。焼却灰の肥料原料化の方法を図2に示す。第一に直接使用する方法である。「焼成汚泥肥料」として肥料登録すれば販売可能だが、有害成分である重金属濃度に対する品質管理面の課題、汚泥への抵抗感から普及していない。第二に、焼却灰を熔融、焼成等の加工処理をして「リン酸質肥料」として、農業利用することである。熔融処理した「熔融汚泥灰複合肥料」は既に肥料取締法の公定規格に定めてある³⁾。又最近では焼成処理してリン及びケイ酸を可溶化させた肥料も開発された⁴⁾。これからこのような肥料の普及に多いに期待している。そして、焼却灰をアルカリで処理した後、リン酸カルシウムとして回収する方法は既に岐阜市等で実用運転が行なわれ、「副産リン酸質肥料」として販売されている⁵⁾。ところが、化成肥料等の主成分である水溶性リン酸を供給するための原料である磷酸液にする方法については、まだ技術開発が進んでいない。

その理由は、焼却灰は表1に示すように磷酸原料である磷鉍石に比べ不純物が多いためである。焼却灰を磷酸製造に使用することはこれまで敬遠されてきた。何故、このような焼却灰を使用して、再資源化事業を立ち上げたか、その動機を次に示す。

3. 下水汚泥焼却灰の磷酸原料としての利用

3. 1. 焼却灰利用の目的と取り組み経緯

日本磷酸の主要原料である磷鉍石の確保は経営の最優先課題である。資源ナショナリズムの台頭、国際市況の価格変動等、リスクを抱える海外資源への依存から少しでも脱却しようと国内の未利用リン資源の活用を経営方針とした。そしてリン資源リサイクルのフロントランナーとして、資源循環型社会の構築への貢献を目的とした。さらに、焼却灰の再資源化事業の目的を、現在廃棄処分されている焼却灰をそのまま使用すること、すなわち安価な焼却灰を利用することでコストダウンを図るとした。事業の前提条件として、既存の設備で、現状保有している技術で、出来るところか

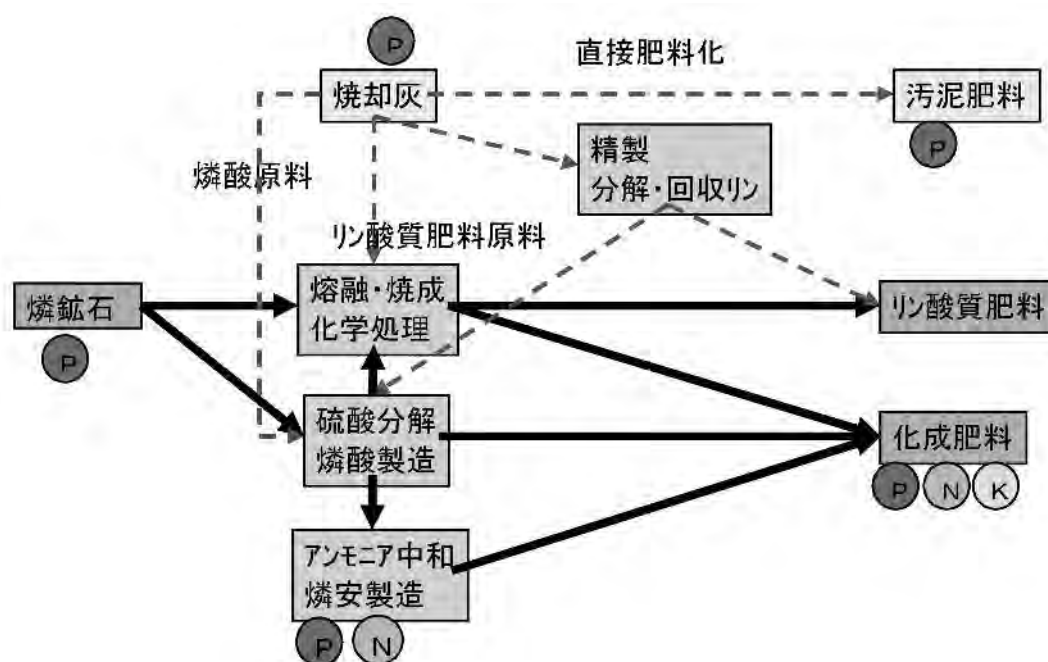


図2 焼却灰の肥料原料化の目標フロー

ら、事業を速く立ち上げることにした。

焼却灰のリン資源としての賦存量は関東圏で発生する焼却灰だけで13万tもあり、日本磷酸が使用している磷鉱石の量にほぼ匹敵する。

平成21年から関東近郊（千葉県、千葉市、東京都、埼玉県、茨城県）の焼却灰について磷酸製造への適合性を実験室規模の試験研究を開始した。平成22年4月には実際の生産設備にて製造運転を行い、リン回収が可能であることを実証した。

その後、原発事故の影響で放射性Cs含有のため近郊の関東圏の焼却灰の使用を中止せざる得なくなったが、放射性Cs不検出の東海地方以西の焼却灰について品質の事前評価を行い関東圏の焼却灰同様に使用可能との結論が得られ、平成24年11月に愛知水と緑の公社と焼却灰利用の契約を締結し、焼却灰の受け入れ、試験的使用を行い、本年1月から本格的な実用運転を開始した。

3. 2. 磷酸製造原料としての下水焼却灰の評価

磷酸製造の原料としての品質については前報でも記載したとおりであるが、再資源化の事業化に向けた検討において、これを実証することになった。以下、品質面の評価を再掲する。

焼却灰はリン酸カルシウム、リン酸アルミとシリカを主成分とし、表1に分析例を示す。リン濃度はリン鉱石と遜色ないリンが含まれており、貴重なリン資源として期待される所以である。リン鉱石に比べ金属（アルミニウム、鉄、マグネシウム）、シリカ、重金属（鉛、亜鉛）が多く、リン酸製造原料として使用する場合、自ずと使用可能な比率が制限される。

硫酸との反応でリンはリン酸として抽出され、カル

シウムは石膏になる。ここでシリカは固形物のまま石膏側に移行し、アルミニウムはリン酸に溶解する。実際にこれらの反応の影響を焼却灰のリン酸製造原料としての適合性評価試験にて明らかにして、焼却灰をリン鉱石にどれくらい混ぜてもリン酸の製造及び製品品質を維持しながら使いこなせるか調べた。本稿では諸要求項目の中から、磷酸製造工程の製品（石膏と磷酸液）品質への影響について述べる。

石膏品質（重金属の溶出）

焼却灰は表1に示すようにリン鉱石に比べ鉛が突出して多いことが特徴的である。磷酸製造工程では鉛は難溶性を示し石膏に移行する。石膏の溶出液のPb濃度は図3、図4のようにPb含有濃度に依存する。鉛は磷酸製造工程で除去することができないので、リン鉱石の場合、リン鉱石中の鉛濃度を制限している。焼却灰を使用するときも同様に焼却灰から持ち込まれる鉛濃度に応じて焼却灰の使用可能な量が決定される。

下水処理場では収集方式、地域によって焼却灰中の鉛濃度が異なる。Pb濃度50mg/Kg以下の焼却灰を選別すれば、現在使用されているリン鉱石の鉛濃度を前提にリン鉱石に対して2～3%混合使用が可能となる。

石膏の品質（形状）

焼却灰を使用したときの石膏の結晶形を写真1に示す。リン鉱石に対して10%以上混合して使用すると細長い結晶になる。石膏の用途である石膏ボード工場では石膏がこのような針状になると、付着水分が増え、石膏を混練するための水を多用しなければならず、石膏ボード工場のエネルギーコストが悪化する。従ってブランクのような板状の結晶形が好まれる。石膏の形状を維持するには焼却灰の使用は5%くらいが限界となる。焼却灰を使用したときの石膏の結晶形の変化は焼却灰中のシリカが影響していると考えられる。

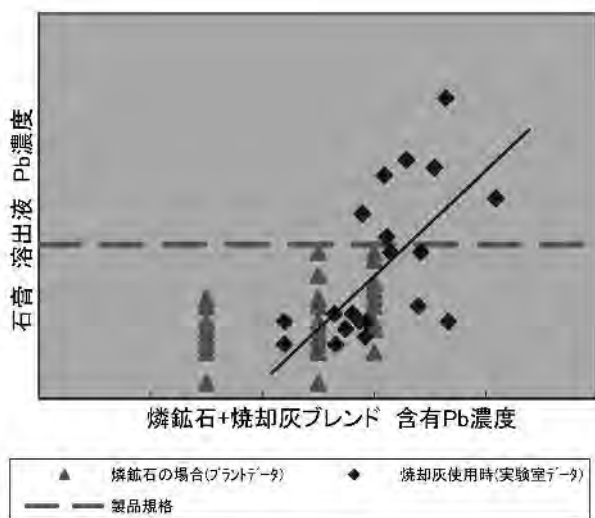


図3 焼却灰使用時の石膏の鉛溶出

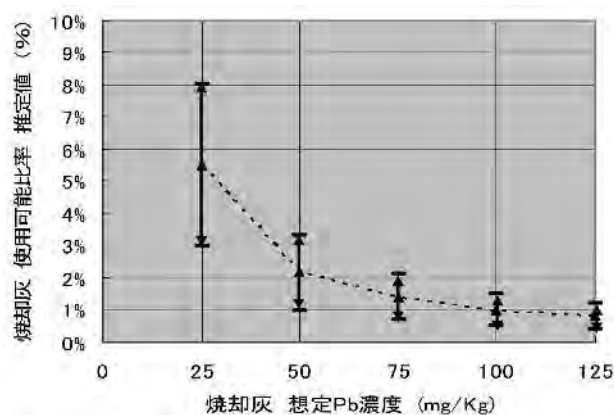


図4 焼却灰の鉛濃度と使用可能比率

写真1 焼却灰使用時の石膏の結晶形状

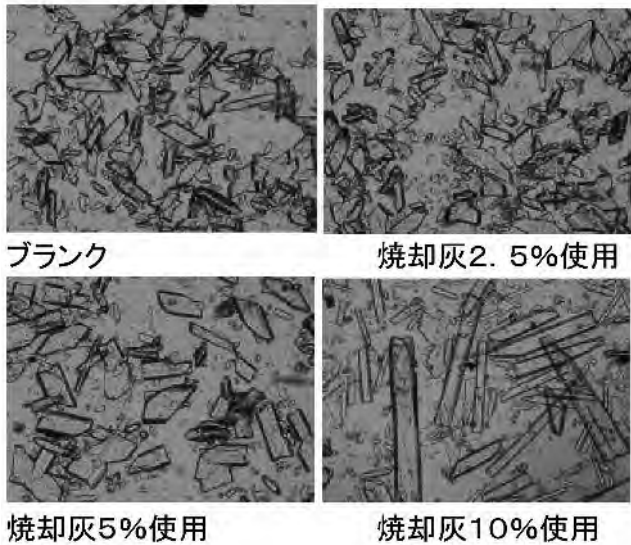
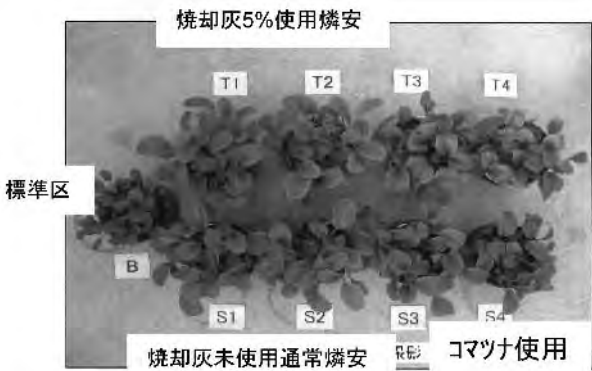


写真2 焼却灰使用、試作燐安の植害試験結果



燐酸液の品質（重金属と肥料成分）

肥料取締法にて肥料中の重金属等の有害成分を制限している。焼却灰の重金属は表1に示したように鉛、亜鉛以外は燐鉱石並であり現状の品質を維持できる。又鉛についても石膏側に移行するので燐酸製造工程でいわば精製、除去されて燐酸中の鉛濃度はまったく問題にならない。亜鉛については使用比率2～3%であれば、現行の燐鉱石の変動範囲である。

肥料製造において問題となるのは、焼却灰の中の金属塩であり、特にアルミニウムが多いことである。アルミニウムがリン酸と結合し $AlNH_4HF_2PO_4$ のような難溶性のリン酸塩を形成するのでリン酸成分の肥料としての効能が低下する。

通常の金属含有濃度（ $Al_2O_3+Fe_2O_3+MgO$ 合計20重量%）の焼却灰を使用して製造した燐酸から試作した燐安中の水溶性リン酸の濃度を図5に示す。水溶性リン酸は燐安の有効成分であり、焼却灰10%使用すると、燐安の水溶性リン酸の製品規格を保証できなくな

る。なお、焼却灰を使用して作成した燐安の安全性についても確認しており、植害試験結果を写真2に示す。

このように焼却灰は鉛を燐鉱石に比べ多く含み、使用を制限されるが2～3%であれば使用できることがわかった。実際の生産設備にて平成22年4月に焼却灰70tを燐鉱石に対して比率2.5%で使用し試験的に4日間の製造運転を行い、製品品質（機能、安全性）、環境（水質、大気）、そしてプラント性能とも問題ないことを実証した。

3. 3. 焼却灰のリン鉱石の代替使用の事業計画と使用実績

焼却灰の使用技術を実証し、関東圏の下水処理場からも焼却灰搬出の同意が得られたので、日本燐酸では、焼却灰を年間3,000t使用する表2の事業計画を決定し、平成23年7月には図6の焼却灰の受け入れ設備を建設（写真3）し、平成24年8月に産業廃棄物処分業（産業廃棄物の種類、燃え殻、ばいじん、でリン回収なものに限る）の許可を取得した。

事業のコンセプトは廃棄物削減と原料の安定確保の両立である。焼却灰を加工、精製せずコストをかけな

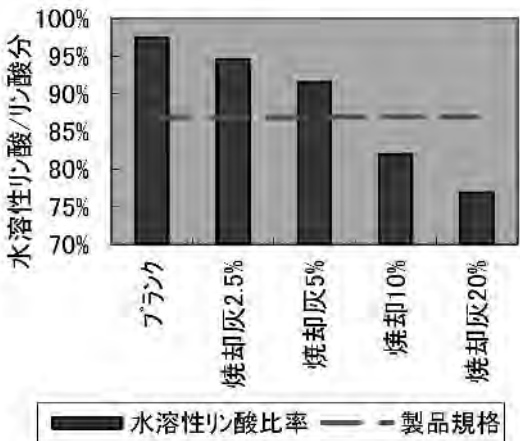


図5 焼却灰使用時の燐安の水溶性リン酸濃度

表2 焼却灰の再資源化の事業計画（日本燐酸株）

焼却灰形状	乾灰（ジェットバック車運搬）
要求品質（抜粋）	・P2O5 30%以上 ・Pb 60mg/Kg以下 以下、平成24年追加項目 ・放射性Cs不検出 ・特別管理産業廃棄物に該当する焼却灰使用不可
使用数量	3,000t／年間 （使用比率2.5%燐鉱石対比）
引取条件	有償（原料） 工場引渡し、輸送費用は下水処理場負担
廃掃法対応	中間処理施設設置 産業廃棄物処分業取得

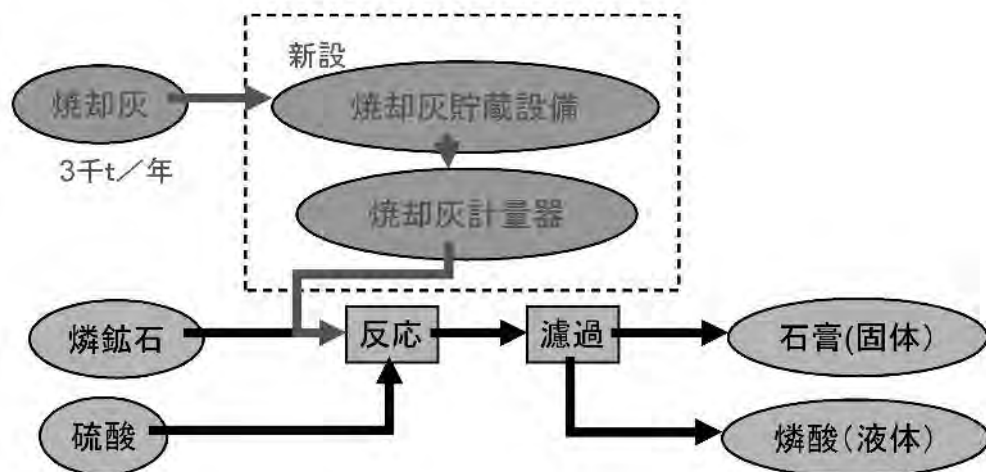


図6 焼却灰使用の概略フローと追加設備

写真3 焼却灰の貯蔵・計量設備



焼却灰サイロ



焼却灰空気輸送



焼却灰計量器

いで今発生しているものをそのまま使用し、かつ有償で購入する。輸送費は下水処理場で負担してもらうが、現状では処理費を払って負担しているケースが多く排出元の負担にならない。リン資源リサイクルの実現を目指すモデルケースと考えている。

産業廃棄物処分量の取得について、焼却灰の利用は、磷酸製造の原料としての利用が目的であり、廃棄物処分が目的ではない。ところが、現状下水処理場の焼却灰はばいじんや産業廃棄物として取り扱われていて、商品として流通していない。従って、産業廃棄物処分量の許可を持っていないと、焼却灰を使用することが出来ない。なお、日本磷酸は焼却灰のみならず未利用リン資源の利用推進を目指していて事業基盤として産業廃棄物処分量が必要との判断もあった。

昨年11月からの愛知県矢作川浄化センターの焼却灰の使用量を図7に示す。現在約100 t/月で安定に使用している。来年度は矢作川浄化センター以外の下水処理場の焼却灰を使用し年間1500 t への増量を目指して

いる。事業計画の3,000 t/年には及ばないが、関東圏の焼却灰の放射性Csの低下を待たざるを得ない。

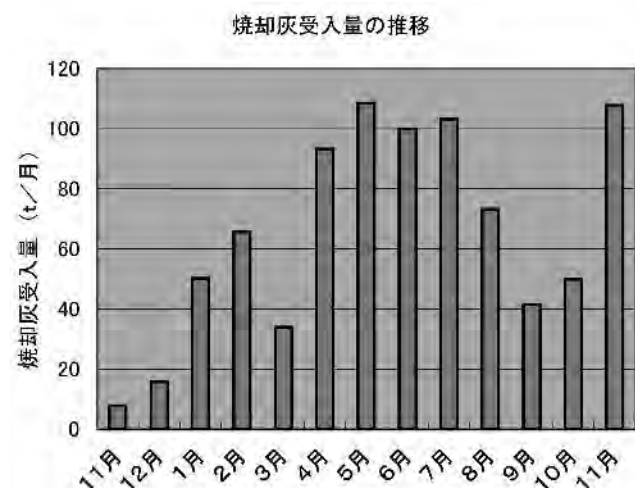


図7 焼却灰の受け入れ量の実績値

表3 焼却灰の重金属・金属除去の研究事例

焼却灰精製法	アルカリ分解後、リン酸カルシウム析出回収	・メタウォーターにて技術開発済(2プラント稼働、コスト低減が課題)
焼却灰抽出リン酸の精製法	酸分解後、回収粗リン酸から、イオン交換・電気透析等にて重金属・金属を分離して、精製磷酸を回収	・農林水産省委託事業にて下水道新技術推進機構で開発研究中 ・岩手県工業技術センターで開発中
	酸分解後、回収粗リン酸から、イオン交換・電気透析等にて重金属・金属を分離して、精製磷酸を回収	・三重県保健環境研究所にて明礬法を技術開発(プラント実績なし) ・日本磷酸も独自に開発研究中(工業化の課題多い)

3. 4. 焼却灰使用増量のための技術課題

現在のリン酸製造の使用技術では、焼却灰に含まれる鉛、シリカ、アルミニウムが焼却灰使用の制約条件となる。又、燐鉱石が低品質化していくとアルミニウム、鉄、マグネシウム、シリカが増えてくる。それはとりもなおさず焼却灰の使用を制限することになる。燐酸製造原料としての焼却灰の使用を拡大していくため、これら不純物の除去技術の開発が求められる。

焼却灰の重金属・金属の除去に関する研究事例を表3に示す。既にアルカリ溶出法については実用運転されている。開発中のものも含めて共通の技術課題は①経済的なプロセスの開発、②副産物の用途・市場の開拓であり、副産物に処理費用がかかるか、売れるか事業の採算性は雲泥の差である。日本燐酸でも、独自技術の開発研究に取り組んでいるが、経済的に事業化可能な技術の開発は極めてハードルが高い。

4. おわりに

日本燐酸ではまずは今持てる技術力、設備、営業力で、出来る事から始めること、第一歩を踏み出すことが重要と考えている「Take action without delay」。今回の事業はスタートであって、ゴールではない。

焼却灰を使用しながら使用技術を研鑽し、リンリサイクルの基盤を作って行きたいと願っているが、下水

処理場においても既成の捨てる焼却灰でなく利用されやすい焼却灰の製造を是非検討していただきたい。任意に投入している薬剤により焼却灰の品質が低下しているとすれば、一例として、処理水の脱リンのために無機凝集剤を使用しているとすれば他の脱リン方式に変更するとか、焼却灰の品質改善に関して取り組むべき課題は多いのではないかな。

今後、発生する側と利用する側の双方向の情報交換とマッチング、まさに産官学のオールジャパンの技術開発力が問われている。

参考文献

- 1) 大竹久夫：持続的リン利用 人類の新たなグローバル問題と世界の動き、再生と利用2013 vol.37 No140 6-12
- 2) 用山徳美：肥料用燐酸製造原料としての下水回収リンへの期待と要望、再生と利用 2010 vol.34 No127 171-177
- 3) 小松貴司：下水汚泥焼却灰を原料とする熔成汚泥複合肥料の開発、学会誌「EICA」2009第14巻第1号 19-22
- 4) 太平洋セメント(株)、小野田セメント(株)：りん酸肥料、及びその製造方法、特許第5188640号
- 5) 後藤幸造：焼却灰からのリン回収と販売について、第1回リン資源リサイクルシンポジウム 2009年7月30日

講座

りん酸肥料代替資材としての 下水汚泥焼却灰の利用

熊本県農業研究センター生産環境研究所

城 秀 信

キーワード：りん酸肥料、く溶性りん酸、水溶性りん酸

1. はじめに

農業の生産現場においてりん酸肥料は作物生産に必須の資材であるが、近年のりん酸肥料の需給を取り巻く情勢は厳しく、需給の逼迫による価格高騰が懸念されている。これはりん酸肥料の原料となる磷鉱石資源の枯渇化や世界的な穀物増産に伴うりん酸肥料の需要増大による需給バランスの悪化が背景にあり、実際に平成20年にはりん酸肥料価格の高騰が起こり大きな問題となった。このためりん酸肥料を大幅に節減できる省資源的な施用方法やりん酸肥料の代用となる未利用資源の探索・利用技術の開発が農業技術面での重要な課題となっており、りん酸肥料代替資材として家畜糞尿由来コンポストや下水汚泥焼却灰が有用資源として注目されている。熊本県農業研究センターでは下水汚泥焼却灰のりん酸肥料としての有用性に着目し、平成20～23年に下水汚泥焼却灰のりん酸肥料としての利用について（独）土木研究所と協同研究を実施した。ここではこの研究で得られた成果をもとに下水汚泥焼却灰のりん酸肥料としての利用について記す。

2. りん酸肥料資源としての可能性

りん酸肥料代替資材はりん酸含有率や物理的性状等がりん酸肥料により近いものが求められるが、下水汚

泥焼却灰は粉状で水分が少なく、りん酸含有率も高いために施用効果や取り扱い易さ、市販品として粒状またはペレット状に加工する場合の加工性等で圧倒的に家畜糞尿コンポストよりも優れている。また、下水汚泥焼却灰は年間に約23万トン発生しており¹⁾、資材としての安定供給の面からも有利である。農業生産者が負担する資材コストについてはこれから検討が必要であるが、現状の下水汚泥焼却灰の処理コストを考えれば比較的安価な価格で農業生産者へ供給できるのではないかと考えられる。このように下水汚泥焼却灰はりん酸肥資源として利用できる可能性が大きいと言える。

3. 下水汚泥焼却灰のりん酸成分

りん酸肥料中のりん酸成分は溶媒に対する溶解度の違いから水溶性りん酸、クエン酸可溶性りん酸（以下、く溶性りん酸と記す）、可溶性りん酸に分類される。このうち水溶性が植物に最も吸収されやすいりん酸であり、施用後に速やかに作物に吸収され易いことから速効性りん酸成分とも言われている。く溶性りん酸は2%クエン酸に溶解するりん酸成分であり、水には溶解しないが土壤中で植物根から分泌される有機酸等で徐々に溶解して植物に吸収されると言われている。可溶性りん酸はクエン酸アンモニウム液に可溶のりん酸成分で過りん酸石灰等に含まれているりん酸2

表-1 肥料取締法での主なりん酸肥料の成分規格

肥料の種類	含有すべきりん酸成分の最小量(%)		
	可溶性	水溶性	く溶性
過りん酸石灰	15.0	13.0	
重過りん酸石灰	30.0	28.0	
熔成りん肥			17.0
腐植酸りん肥		1.0	15.0

カルシウムなど水溶性りん酸以外のりん酸を評価するのに用いられる。肥料成分の規格を定めた肥料取締法による主なりん酸肥料の規格を表-1に示す²⁾。りん酸肥料は過りん酸石灰のように水溶性りん酸を主体としたものと熔成りん肥のようにく溶性りん酸肥料を主体にしたものに分けられるが、水溶性りん酸及び可溶性りん酸を主体にした肥料は作物へのりん酸補給を目的としているのに対してく溶性りん酸を主体とした熔成りん肥等は火山灰土壌の改良に用いられる等の土壌改良資材として用いられる場合が多い。なお、実際に作物の養分補給に使用されている肥料の大部分は窒素、りん酸、加里のうちの2成分以上を高濃度に含んだ複合肥料であり、このうちのりん酸成分は植物に吸収されやすい過りん酸石灰やりん酸アンモニウム等の水溶性りん酸が主体となっている³⁾。

下水汚泥焼却灰中にはりん酸が P_2O_5 換算で10~30%と高い濃度で含まれているが、この場合のりん酸成分は全りん酸で、この中には難溶性で植物が利用できない形態のりん酸成分が含まれている。これに対して植物が利用可能なく溶性りん酸は9~18%程度で全りん酸に対するく溶性りん酸の割合は44~99%程度となり⁴⁾、りん酸肥料代替資材として充分量のく溶性りん酸が含まれている。当所で肥料効果確認試験に用いた下水汚泥焼却灰の分析値は表-2の通りである⁵⁾が、この場合も上記で記したりん酸含量の範囲内に収まったものの全りん酸が範囲内の平均的な値となったのに対してく溶性りん酸はやや低めの値となった。また、当所では下水汚泥焼却灰の水溶性りん酸含量も測定したところ、0.02%という分析結果となった。下水汚泥焼却灰中の水溶性りん酸含量については菅原らも同様の結果を得ていることから⁶⁾、下水汚泥焼却灰には肥料として速効性のりん酸成分である水溶性りん酸は殆ど含まれていないものと考えられた。

このように下水汚泥焼却灰には相当量のりん酸が含まれているが、速効的な肥料効果を示す水溶性りん酸は殆ど含まれておらず、肥料として期待できるのは全りん酸の44%~99%にあたり穏やかで持続的な肥料効果があるく溶成りん酸である。下水汚泥焼却灰中のりん酸は種類により全りん酸、く溶性りん酸の含量が変

表-2 肥料試験に用いた下水汚泥焼却灰のりん酸成分

区分	材 料	水分	現物当たり P_2O_5 %		
			全りん酸	く溶性りん酸	水溶性りん酸
A	下水汚泥	2.2	24.9	9.9	0.02
B	下水汚泥	0.1	22.6	11.7	0.02
C	下水汚泥	0.04	19.5	8.6	0.03
D	下水汚泥、雑草 乾物比(1.8 : 1.0)	0.04	17.7	8.5	0.02

供試試料は(独)土木研究所から提供を受けた。

動し、全りん酸に対するく溶性りん酸の割合も変動が見られるので肥料的な利用を考える場合は各個にく溶性りん酸について成分分析を行う必要がある。

4. 下水汚泥焼却灰の肥料効果

当所では下水汚泥焼却灰の肥料効果を検討するために数種類の下水汚泥焼却灰と市販のりん酸肥料を用いてコマツナを栽培し、コマツナの収量とりん酸吸収量からりん酸肥料としての施用効果を比較した。下水汚泥焼却灰の施用量は焼却灰中のく溶性りん酸成分含量と作物のりん酸施肥基準から算出した。比較するりん酸肥料は水溶性りん酸主体の過りん酸石灰を対照とし、他にく溶性りん酸主体の熔成りん肥、水溶性りん酸とく溶性りん酸が1 : 1の割合で含まれている重焼隣の3種類の肥料を用いた。

下水汚泥焼却灰についてはりん酸施用量の全量を下水汚泥焼却灰で補う場合とりん酸施用量の1/2及び1/5を過りん酸石灰で施用し残りを下水汚泥焼却灰で補う場合の3通りの施用方法を検討した。なお、りん酸肥料を施用しない場合の収量、りん酸吸収量についても調査を行った。なお、試験には火山灰を母材とする厚層腐植質黒ボク土壌で可給態りん酸含量が2 mg/100g乾土未満の土壌を供試した。

りん酸肥料を全て下水汚泥焼却灰のく溶性りん酸で代替した場合、コマツナ収穫物の新鮮重及び乾物重、りん酸吸収量はりん酸無施用よりも大幅に向上し、下水汚泥焼却灰による明らかな施用効果が見られたが、水溶性りん酸が主体の過りん酸石灰と比べると大幅に劣り、く溶性りん酸が主体である熔成りん肥と比べても施用効果は劣る結果となった。これに対して下水汚泥焼却灰と過りん酸石灰を組み合わせる施用りん酸の一部を水溶性りん酸に替えて施用すると下水汚泥焼却灰単独施用と比べてコマツナのりん酸吸収量は高まり、収量も向上した。下水汚泥焼却灰と過りん酸石灰で施用するりん酸の割合を4 : 1とした場合、新鮮物の収量は過りん酸石灰施用の場合と同等となり、さら

に1：1まで高めるとコマツナ収穫物の新鮮物、乾物重のいずれも過りん酸石灰施用の場合を上回る結果が得られた⁵⁾。ただ、この場合、コマツナのリん酸吸収量は過りん酸石灰施用時の85%にとどまっており、コマツナの増収要因をりん酸吸収量だけでは説明できず、下水汚泥焼却灰のリん酸成分以外にコマツナの生育を促進する因子がある可能性も考えられた⁷⁾。

このように下水汚泥焼却灰はりん酸肥料代替資材としての施用効果が認められるが、下水汚泥焼却灰単独では一般的なりん酸肥料に比べて効果が劣るため、過りん酸石灰のような速効性のある水溶性りん酸を主体としたりん酸肥料と組み合わせて利用する方法が現実的な利用方法であると考えられる。

表-3 りん酸資材とコマツナの収量

資材の種類	新鮮重	乾物重
	g/ポット(比率%)	g/ポット(比率%)
過りん酸石灰	79.9 (100)	7.3 (100)
重焼りん	72.7 (91)	7.0 (96)
熔成りん肥	49.1 (61)	3.3 (46)
焼却灰C	44.0 (55)	2.6 (36)
灰C+過石(4:1)	90.5 (113)	6.7 (92)
灰C+過石(1:1)	92.4 (116)	7.9 (109)
焼却灰D	34.8 (44)	2.4 (33)
灰D+過石(4:1)	86.8 (109)	6.6 (91)
灰D+過石(1:1)	90.9 (114)	8.6 (118)
無りん酸	5.6 (7)	0.6 (8)

注1) 焼却灰：表-2で示した下水汚泥焼却灰

2) 比率(%)は過りん酸石灰を100とした場合の値

表-4 りん酸資材とコマツナの養分吸収量

処 理	(mg/ポット)		
	窒素 (N)	りん酸 (P ₂ O ₅)	加里 (K ₂ O)
過りん酸石灰	313	76	452
重焼りん	302	65	393
熔成りん肥	164	22	214
焼却灰C	129	15	227
灰C+過石(4:1)	311	42	496
灰C+過石(1:1)	339	65	485
焼却灰D	105	10	180
灰D+過石(4:1)	284	40	433
灰D+過石(1:1)	337	66	470
無りん酸	83	4	91

注1) 焼却灰：表-2で示した下水汚泥焼却灰

5. 下水汚泥焼却灰の肥料的利用の課題

下水汚泥焼却灰は肥料として利用できるりん酸を實用レベルで含んでおり、りん酸肥料として充分利用が可能であると考えられる。ただし肥料として利用する場合、肥料取締法に基づく肥料登録を行う必要がある。この場合、問題になるのが下水汚泥焼却灰に含まれる有害重金属含量であり、下水汚泥焼却灰には肥料の登録基準を上回るカドミウムが含まれている事例が報告されており、有害重金属含量のチェックが必須である。

さらに下水汚泥焼却灰自体は粉状であり、これを圃場に散布する場合、取り扱い性が悪いので、肥料として流通させる場合は圃場への散布が容易となる粒状またはペレット状に加工されることが望まれる。

また、ここでは下水汚泥焼却灰を過りん酸石灰の代替資材としての利用する場合について述べてきたが、下水汚泥のリん酸成分は熔成りん肥に近く、熔成りん肥の代替資材としての検討も必要である。

参考文献

- 1) 平成23年度下水道統計,日本下水道協会
- 2) 農林水産省告示第284号：肥料取締法に基づき普通肥料の公定規格を定める等の件
- 3) JA全農肥料農業部：肥料実務ガイド, 271-297, 1994
- 4) 岩井良博他：下水汚泥焼却灰を原料とした熔成りん酸質肥料製造における各種成分比と熔融条件の影響、廃棄物資源循環学会論文誌、vol.20, No3, 203-216, 2009
- 5), 7) 城 秀信、白石由美子：下水汚泥焼却灰のリん酸肥料代替効果、熊本県農業研究センター研究報告、第20号、6-14、2013
- 6) 菅原龍江他：下水道汚泥焼却灰等のリン肥料化技術調査、岩手県工業技術センター研究報告、第17号, 2010

特 別 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

メタウォーター・池田市共同研究体

メタウォーター株式会社新事業技術部 守屋 由介、柳瀬 哲也

池田市上下水道部 増井 文典、松村 茂樹

キーワード：低含水脱水、低空気比燃焼、焼却排熱発電、全体最適

1. はじめに

わが国の下水処理システムでは大量の電力等が消費されており、日本全体の電力消費量の約0.7%を占めている。また、東日本大震災から未だに続く不安定な電力需給環境、エネルギーコストの高騰の状況を鑑みると、下水処理に関わる大量のエネルギー（電力および燃料）消費は下水道事業者にとっての潜在的な大きなリスクとなりつつあり、エネルギー使用量をより一層低減する努力が各事業者に求められている。特に下水汚泥は日本全体で年間200万t-dry余りも発生しているが、有機分以上に多くの水分を含むことから、エネルギー転換方法として、高含水率バイオマスに適した湿式処理である消化ガス利用等が適用されてきた。しかし、新たに消化槽を設置する場合には、都市部の狭小な敷地にある程度のスペースが必要になることや、脱水性の悪化した消化汚泥の処理処分の問題があり、周辺条件等によってはその解決が困難であった。一方で、従来の焼却システムは、実績のある安定的な処理方法として広く普及してきたが、下水汚泥の持つ高い水分のために、多くの補助燃料を投入することで処理を成立させており、外部にエネルギーを取り出すことは非現実的であった。

我々が提案する「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システム」は、以上のような汚泥処理に関わる一種の閉塞状況を踏まえ、「厄介者」であった下水汚泥を地域に賦存するエネルギー源に転換し、処理場全体での創エネ・省エネ効果の最大化、および、建設・維持管理費を抜本的に低減することを目指して開発されたものである。

本システムが、平成25年度のB-DASHプロジェクトに採択されたことにより、国土交通省国土技術政策総合研究所からの委託研究として、本年度内に池田市下水処理場（大阪府池田市）内に既設焼却炉と同等規模（約25t-脱水汚泥/日）の実証設備を設置し、実規模での運転データの収集・解析を行うことでシステムの有効性を実証していく。

2. システムの概要

本システムは、①低含水脱水技術（脱水）、②低空気比省エネ燃焼技術（燃焼）、③高効率排熱発電技術（発電）の3つの特徴ある革新的な個別技術から構成されている。これらの個別技術は、機械設備・電気設備の設計、維持管理に関して我々が所有するノウハウを活用することで、従来の技術から高度化、高効率化された技術であり、さらに後述するように各々を連携させて運転することで、「システム全体の省エネ、省コスト、創エネ（発電）効果の最大化」を可能とする。



図1 本システムの全体構成

図1に本システムの全体構成を示した。従来の脱水・焼却のフローと大きく変わることはないが、燃焼炉の排熱を利用する発電システムが、排ガス処理系に付加されている点に大きな特徴がある。なお、本実証事業で目指すシステムの導入効果とその効果発現のアプローチは以下である。

・建設費の低減

低含水/低空気比化による排ガス量の低減、それに伴う燃焼設備のコンパクト化

・維持管理費の低減

個別技術の消費電力低減、薬品費の低減等に加えて、システム全体の最適化により実現

・エネルギー消費量の低減

低含水/低空気比化による、補助燃料ゼロ、プロワ類動力低減等で実現

・エネルギーの創造

排ガスの熱だけでなく、従来は未利用の排水の熱も活用することで実現

剤薬注率を増大させても同様に脱水汚泥含水率は低下するが、薬品費が増大する。このように、遠心力と無機凝集剤薬注率はトレードオフの関係になっており、含水率一定の条件においては、一方を増減させると、他方が逆方向に増減し、その両方を低減していくことは困難である。よって、このトレードオフ関係に、電力・薬品の購入単価等の経済的要因を加えて、所要の含水率の脱水汚泥を得るための、経済的な最適ポイントを睨んで運転することが、「脱水機としての最適運転」となる。

とりわけ経時的に変化する汚泥性状に対しては、運転員が状況を把握して経験に基づいて、これらのパラメータを調整していたため、きめ細かな管理を行うと人的負担が大きく、維持管理の手間を減らすためには、ある程度余裕を持った運転をせざるをえなかった。本技術を用いて経済的な最適ポイントでの運転を常に保持することができれば、人的負担の軽減、電力費・維持管理費の低減の両面で効果的である。

3. 個別技術

3.1 低含水率脱水技術

本技術はそのハードに多数の実績があり、既に汎用的な技術となりつつある低動力型高効率遠心脱水機（機内二液調質型）に対して、薬注率、遠心力、差速等の運転パラメータを脱水機内部で自律的に決定し、所定の脱水汚泥性状（含水率）を得るのに要する電力費、薬品費を総合的に最小化するソフト的な機能を加えたものである。図2に、脱水機の主要パラメータである、遠心力と無機凝集剤薬注率を例にとった費用最小化の手法を示した。遠心力が増加すると脱水汚泥含水率は低下するが、遠心力を増加させるために要する駆動機の消費電力が顕著に増大する。また、無機凝集

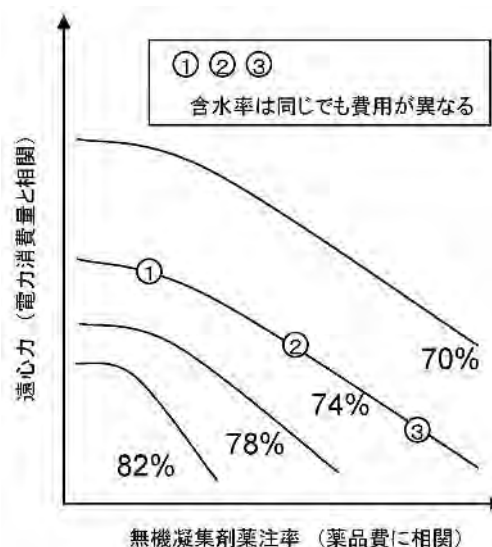


図2 脱水機の処理費用最小化の概念

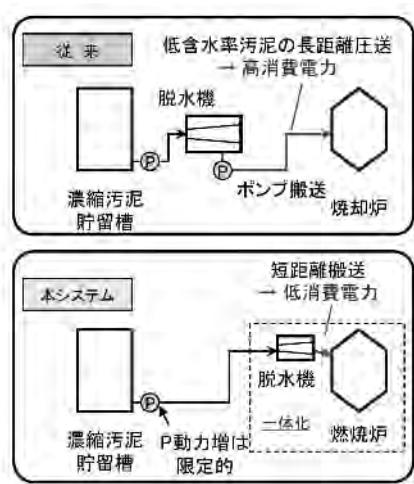


図3 脱水機と燃焼炉の近接設置

また本システムでは、図3に示したように近年東京都で導入が進んでいる¹⁾脱水機を燃焼炉の上部に隣接して設置する配置²⁾をとっている。従来の脱水機と焼却炉は、別々の敷地が宛がわれている場合が多く、その間の搬送は、臭気対策等の観点から気密性に優れたポンプ圧送によるものが主流である。ところが、燃焼炉の自燃を目指して低含水の脱水汚泥を脱水機棟と焼却炉ヤード間で搬送しようとする、含水率の低下に応じて配管での圧力損失が増大³⁾し、ポンプの所要電力が指数関数的に増大することのみならず、条件によっては、ポンプの機種の見直しや、配管径の増径、配管磨耗の対策などのハード的な対応が必要になる場合もある。

本システムでは脱水機と燃焼炉を近接設置することにより、このような低含水汚泥の搬送に関する課題の極小化を狙う。なお、濃縮槽から脱水機への間の搬送量は逆に大きくなるが、消費電力の増加は流量の増大に起因する比例的な水準に留まり、例えば含水率74%の低含水脱水汚泥を150mポンプ圧送する場合は、同等

の距離を濃縮汚泥で搬送する場合と比較すると、およそ2倍の消費電力量となる。

3. 2 低空気比省エネ燃焼技術

本技術は既に多くの導入実績を有する、燃焼空気を砂層と炉上部の複数の箇所から導入し、モデル予測制御を活用して低燃費、低 N_2O を実現する「多層燃焼技術」⁴⁾に、炉出口の酸素濃度の情報をさらに追加して低空気比での安定運転を実現するものである⁵⁾。図4に従来技術との差異をまとめて示した。なお、本技術は東京都下水道局との共同研究の成果を基に発展させたものである。

従来の気泡流動炉においては、性状変動の大きい脱水汚泥に対して不完全燃焼による未燃ガスの発生を防ぐために、比較的高い空気比(1.4~1.5)で運転し、炉の規模にも余裕を持たせることが不可欠であった。これに対して、低空気比省エネ燃焼炉では、排ガス中の酸素濃度をモニタリングすることで、投入空気量に対して実際に必要であった空気量の情報を把握することができる。排ガス中酸素濃度の情報を活用することにより、例えば、酸素濃度が低下トレンドをみせた場合は、投入汚泥の有機分が増加し、そのために炉内で消費される酸素量が多くなったと推定されるので、炉内への空気供給に使われているブロワの回転数を調整し風量の増加を指示する。風量を増加させたことで逆に、酸素濃度が過剰な上昇トレンドを示した場合には、風量を絞ってブロワ動力の低減を図り、さらに投入空気の加熱に消費される熱量が低減されることで、炉内の熱バランスを改善し、補助燃料使用量低減を図る。

性状変動の大きな下水汚泥の焼却に対してこのような繊細な運転を継続するためには従来型の単純なフィードバック制御では力不足であった。そこで、本技術では燃焼のダイナミックモデルを構築し、制御量



図4 従来型焼却炉と低空気比省エネ燃焼炉の違い

に対する変化量の動きを事前に予測し制御に活用する、「モデル予測制御」を駆使することで安定的な運転を実現する。

モデル予測制御を活用した緻密な運転により、従来の余裕を大きくとった運転方法では、補助燃料を必要としていた汚泥性状の領域（高含水率、低熱量）でも補助燃料を不要とすることができる。また、自然する低含水率の汚泥を投入した場合には、従来の焼却炉に比較して、ブロー動力の低減等で運転に要する電力の低減を図ることができる。さらに、従来型の気泡流動炉に対して、低空気比で運転することによってガス量が低減されることにより、炉の大きさや排ガス処理系のコンパクト化も可能となり、所要敷地面積や建設費の低減にも寄与する。

3. 3 高効率排熱発電技術

本技術は海洋温度差発電や地熱発電等に活用されてきた、バイナリーサイクル発電システムを下水汚泥焼却炉からの排熱の特徴を踏まえて改良した技術である。バイナリーサイクル発電システムとは、メインとなる高温の熱媒体（例えば水）の熱サイクルの凝縮・冷却系から取り出した未利用熱を使って、より低沸点の熱媒体（例えば、代替フロンガスやアンモニア）の

熱サイクルを回してエネルギーを回収するシステムを言う。例えば、ボイラ発電等への適用では、図5に示したように、蒸気・熱水サイクルから排出される概ね200度以下の排熱を利用して、低沸点熱媒サイクルを運転し、発電効率を一段階高めるために利用されている。

一方で本技術は、発電効率を高めるタイプのバイナリー発電サイクルではなく、従来発電に供することができなかった、低温の排熱を活用して電力に変換するものである。図6に本技術のフローを示した。本技術では、高温の熱媒体として、排ガス、スクラバ排水の二熱源を利用し、低沸点の熱媒体としてアンモニア水を用いたバイナリーサイクル発電システムを構成している。発電機内の低沸点熱媒体は、まずスクラバ排水からの熱（排ガス中水分に由来する凝縮熱/潜熱、水分の多い下水汚泥を燃焼させる下水汚泥焼却システムに特徴的な排熱）を受け取って沸騰・蒸発する。この際、この熱媒体はアンモニアと水の混合液となっているため沸騰中も温度が上がり続ける。このような非等温蒸発をする熱媒体を用いるサイクルをカーナサイクルと言い、等温蒸発する熱媒体を用いるランキンサイクルと比較して、同等の熱落差（高温熱源温度と冷却水温度の差）で取り出せる仕事量を大きくすること



図5 バイナリーサイクル発電

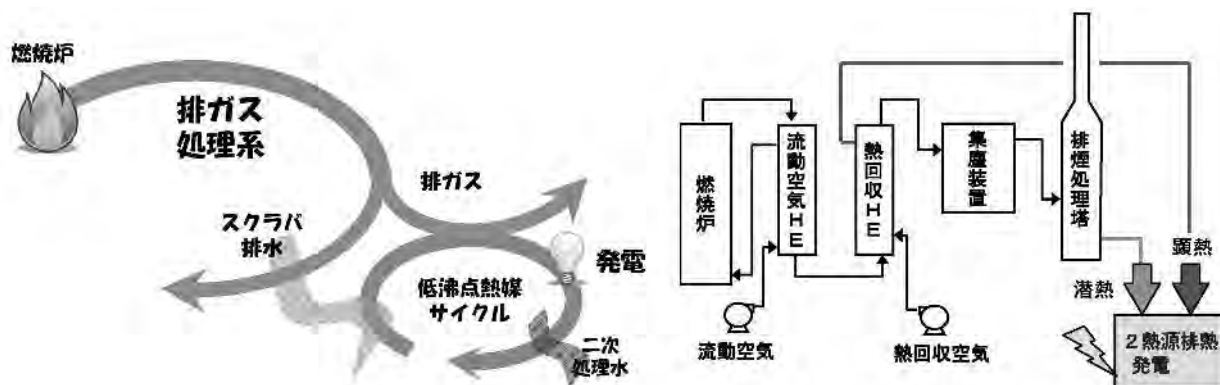


図6 高効率排熱発電システムのフロー

が可能であり、特に熱落差が小さい場合に有利な方式である。スクラパ排水の熱によって蒸発した熱媒体は、次に、排ガスが保有する高温熱（顕熱）によって過熱されてからタービンに供され発電機を回す。タービンを通じた熱媒体は凝縮器で冷却されるが、冷却水として温度が安定し、かつ膨大に存在する二次処理水を掛け流して使うことができる点で下水処理場への設置はメリットが大きい。

このように本技術は、下水汚泥の焼却システムに存在していた3種類の熱（排ガスの顕熱、スクラパ排水の潜熱、二次処理水の冷熱）をそれぞれ最大限に活用することで、従来は発電が非効率で困難であった小規模の焼却炉でも、経済的に成立させることを可能にする。

4. 連携・全体最適化

本システムでは、3つの個別技術の導入効果を最大化するために、各技術の制御を統合し一体的なシステムとして運用することを基本としている。この統合システムには、その主要な機能として「連携機能」と「自動最適化機能」を有している。

「連携機能」は、従来別々の制御体系で運転されていた個別技術同士を結びつける機能である。従来の汚泥処理系においては、脱水機から出力される脱水汚泥の性状や量が、燃烧炉の入力となるという意味での繋がりはあったが、脱水機からみて、燃烧炉がどのように運転されているかを知る経路は無く、ただ、熟練の運転員によってのみ、両技術の「連携」が果たされていた。言わば、「連携機能」は熟練の運転員が持つこのノウハウをソフト的にシステム化したものである。

例えば、脱水機の運転状況の把握には、脱水汚泥の性状の情報が不可欠であるが、従来は、定期的な含水率の測定や、VSS等の分析、そして最も原始的かつ直感的な方法として見た目や触感によって、供給される濃縮汚泥と脱水機の状態を推定し、経験的に脱水機に関わるパラメータを調整する一種の人力フィードバックを行っていた。しかし、人手に頼ったこのような方法では、汚泥性状変動への追従性の観点では不十分であり、ある程度の余裕（例えば、薬品を多めに注入する等）を持った運転をせざるを得なかった。一方で、燃烧炉からオンラインで得られる炉内温度や酸素濃度等のリアルタイム情報には、脱水汚泥の性状が反映されており、これらのパラメータの上下動を統計的に処理をすることによって、脱水機の運転状態・傾向を図る指標として活用することが可能である。脱水機は、燃烧炉から連携機能によってリアルタイムに送られる情報を踏まえて、より好ましい状態で運転をする。な

お、脱水機と燃烧炉を連携して運転する機能については東京都下水道局、東京都下水道サービス（株）他との共同研究によって得られた成果を活用している。同様に、「脱水設備または燃烧設備」と「発電設備」の間にも、燃烧炉の燃烧状態や脱水汚泥の性状と発電量に相関関係があり、連携機能によって、これらの情報を複合的に結び付け活用することで、次に述べる「自動最適化機能」を運用する上での基礎とする。

「自動最適化機能」は「連携機能」によって結び付けられた全体システムを、システム全体で「最も好ましい状態に自動的に導く機能」である。「好ましい状態」の代表的な例は、①薬品費や電力費等の維持管理費を最小化する、②排出温室効果ガスを最小化する等が考えられる。なお、各々の技術を個別に最適化することは、必ずしもシステム全体の最適化に繋がるとは限らない。

例えば、図7のように、薬品費と電力費を合計した値を指標とした場合、含水率を低減するために、消費電力、燃料や薬品の使用量を増加させると、それに比例して合計費用も増加する。一方で、燃烧側では自然域に到達するまでは、燃料使用量が含水率に相関して減少していくため、合計の費用は低減する。自然域からさらに含水率を下げていくと、燃料費低減効果は無くなるが、脱水に要する費用と、燃烧、発電側で現れるメリットが相殺されて、合計費用は増大する。システム全体の導入効果の最大化（＝最適化）を図るためには、こうしたトレードオフ現象を踏まえた、全体システムの「自動最適化機能」が不可欠である。

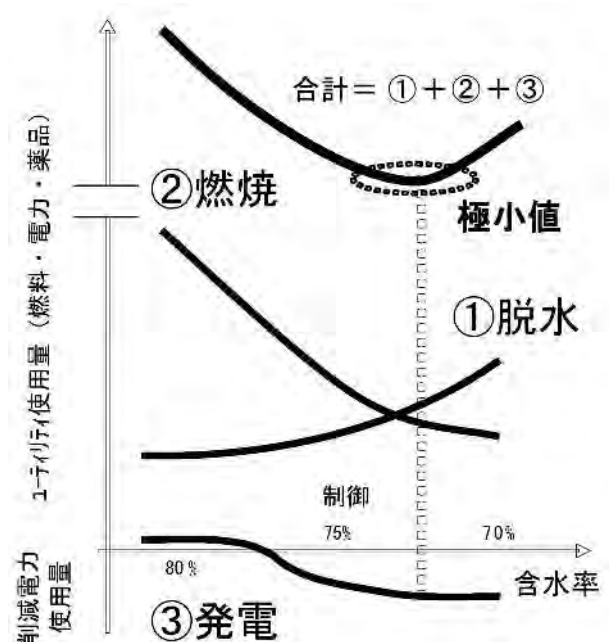


図7 トレードオフの例

表 1 実証試験設備の仕様

	能力	備考
低含水脱水機	20 m ³ /h×1 台	—
低空気比省エネ燃焼炉	25 t-wet/日	含水率 72%換算
高効率排熱発電設備	37 kW	(認可最大)

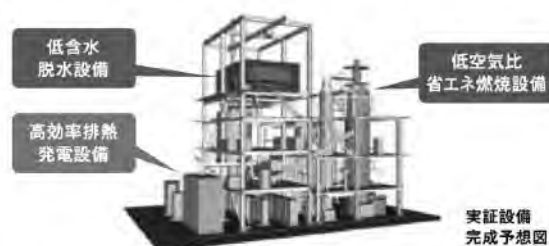


図 8 実証試験設備の完成予想図

表 2 個別技術実証項目

個別技術	実証項目
低含水脱水技術	任意含水率の脱水汚泥を自動的に調製
低空気比省エネ燃焼技術	目標低空気比運転 (1.3 以下) の達成
高効率排熱発電技術	目標発電量の達成

5. 実証試験設備

本実証事業で池田市下水処理場内に建設する実証試験設備の主な仕様を表 1 に、また完成予想図を図 8 に示した。3 技術の設備を約 500m²の敷地内にコンパクトかつ一体的に設置する。建設工事は、平成 25 年 6 月末から開始し、平成 26 年 2 月初旬の完工を目指して、池田市の施工監理の元で急ピッチに作業を進めている。なお、完工後の同 2 月中旬から実証試験運転を開始する予定である。なお、広く普及促進・さらに市民の理解を得ることを目的として、国内外からの見学者および一般市民向けのパネル、説明資料等も独自に整備する。

6. 今後の展開

本実証事業の成果は、H25 年度 3 月末に報告書として取りまとめる予定である。実証内容としては、表 2 に示した各技術毎の個別性能検証に加えて、汚泥性状の変動に対する連携・最適化の効果についても合わせて評価していく。

参考文献

- 1) 東京都下水道局、アースプラン 2010 (2010)
- 2) 井上ら、特許 5139847 号 下水汚泥処理システム (2011)
- 3) 下水道新技術推進機構、脱水汚泥の貯留・圧送技術マニュアル (2000)
- 4) 山本昌幸、多層燃焼システム, 環境浄化技術 vol.10 No.4 (2011)
- 5) 椿野ら、多層燃焼炉における燃費改善に向けた取組、第 50 回下水道研究発表会講演集 (2013)

特 別 報 告

下水道バイオマスからの 電力創造システムに関する技術実証研究 ～平成25年度下水道革新的技術実証事業 (B-DASHプロジェクト)～

和歌山市・日本下水道事業団・京都大学・(株)西原環境・(株)タクマ 共同研究体

(株)タクマ 企画・開発センター長 兼
プロジェクトセンター副センター長 鮎川 大祐

キーワード：下水道革新的技術実証事業、低含水率化技術、次世代型階段炉、汚泥焼却発電

1. はじめに

国土交通省では、下水道事業における大幅なコスト縮減・再生可能エネルギー創出および本邦企業による水ビジネスの海外展開支援などを目的とし、新技術の研究開発および実用化を加速するための「下水道革新的技術実証事業(B-DASHプロジェクト: Breakthrough by *D*ynamic *A*pproach in *S*ewage *H*igh Technology Project)」を実施している。平成25年度事業ではバイオマスである下水汚泥の燃焼による発電システム技術の公募があり、和歌山市、日本下水道事業団、京都大学、(株)西原環境、(株)タクマの共同研究体が企画提案した「下水道バイオマスからの電力創造システム」が実証事業として採択された。なお本実証事業は国土交通省国土技術政策総合研究所の委託研究として実施している。

本稿では3つの新技術(脱水汚泥低含水率化技術、エネルギー回収技術、エネルギー変換技術)を組み合わせた提案システムについて解説するとともに、本実証事業の概要を紹介する。

2. 下水汚泥からのエネルギー利用の現状

近年、気候変動問題への関心が高まる中、低炭素社

会の実現に向けてカーボンニュートラルであるバイオマス資源の利活用が期待されている。また、東日本大震災に起因する福島第一原子力発電所の事故の影響により全国的に電力需給が逼迫しており、バイオマス由来を含め再生可能エネルギーによる電力供給量の拡大は国家的な課題となっている。

下水汚泥は、人の生活に付随して常時一定の質・量で発生する安定したバイオマスであると同時に、下水道が収集インフラとして機能する集約型バイオマスであること、人口が集中する需要地ほど大量に回収できる都市型バイオマスであることなど、有効利用に適した特徴をもっており、資源として積極的に位置づけ、エネルギー利用を推進していくことが期待されている¹⁾。

下水汚泥は産業廃棄物の2割弱を占めており²⁾、これまで減量化および有効利用を目指す取組みが推進されてきた。2010年度には下水汚泥リサイクル率は78%と目標値を10%近く上回るなど、近年下水汚泥のリサイクル率は順調に向上しているが、有効利用方法の内訳を見ると、セメント化等の建設資材としての利用が大部分を占め、下水汚泥の固形分のうち、灰分のみがリサイクルされている。有機物基準の下水汚泥バイオマスのリサイクル率を見ると、有効利用されているのは全体の約1/4であり、そのうちエネルギー利用されているのは全体の13.1%に過ぎない³⁾。

下水汚泥の固形分のうち約8割は有機分であり、

2011年度における下水汚泥発生量約220万t-DSは乾燥基準では約108万kLの原油量に相当する¹⁾。このように燃料としてのポテンシャルを持つにもかかわらず、下水汚泥のエネルギー利用が進まなかったのは、下水汚泥の高い含水率に一因がある。一般的に脱水後の下水汚泥は水分を75～80%程度含むことから、湿潤ベースでの低位発熱量は固形物あたりの低位発熱量に対し10分の1程度となる。現状の主流の処理方式である焼却方式においては、汚泥の完全燃焼と温室効果ガスである N_2O 低減を目的として燃焼温度を約850℃とするため、燃焼ガスから熱回収して燃焼空気を予熱し、それでも燃焼温度が確保できない場合は補助燃料が必要になる。実際に現在の多くの焼却方式においては外部からのエネルギーが必要な熱収支となっており、発電に利用できる余剰熱量の回収は困難な状況になっている⁴⁾。

上記のような理由から、下水汚泥のエネルギー利用はそのほとんどが嫌気性消化により発生する消化ガス(バイオガス)を利用したエネルギー回収である。現在、全国約2,100箇所の下水処理場のうち、嫌気性消化処理が導入されているのは約1/7の約300箇所である。さらにそのうち発電設備が導入されているのは35箇所にとどまる⁵⁾。

また近年燃料化した汚泥を石炭火力発電所や石炭焚きボイラーを有する製紙工場等で石炭代替燃料として利用する汚泥燃料化が実用化されている。燃料という有価物として引き取られ、最終処分が不要になるというメリットがある一方、既存施設での受入を前提とするため、安定的に十分な受入能力を持つ施設の有無と、当該施設への運搬距離、受入単価の設定などにより実現性が大きく左右される。

しかし下水汚泥の約7割が焼却処理されている⁶⁾ことから、焼却システムをエネルギー創造等に転換することができれば、下水汚泥からのエネルギー利用を進める上でインパクトが大きいものと考えられる。

3. 下水道バイオマスからの電力創造システム

脱水汚泥は他の廃棄物と比較すれば含水率が高く、焼却時には含有される水分の蒸発に多くの熱量が必要で、その熱量を賄うために補助燃料が必要であることから、焼却処理はこれまでエネルギー消費型の処理方式であった。

汚泥焼却における補助燃料の低減方法として、脱水汚泥の低含水率化により燃焼物としての熱量を高くする方法が有効であり、従来技術においても混合生汚泥であれば概ね含水率75%程度で補助燃料を使用しない運転(以降自然運転)が可能となる。さらに含水率を低減させることが可能となれば、システム内でのエネルギーが余り、そのエネルギーを回収し電力等に変換すれば、従来エネルギー消費型であった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る。

本事業は上記の概念に基づくもので、下記に示す3つの技術を組み合わせた新システムにより、下水汚泥焼却処理からのエネルギー創出技術を実証するものである(図-1参照)。

- 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
- 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
- 3) 蒸気発電機によるエネルギー変換

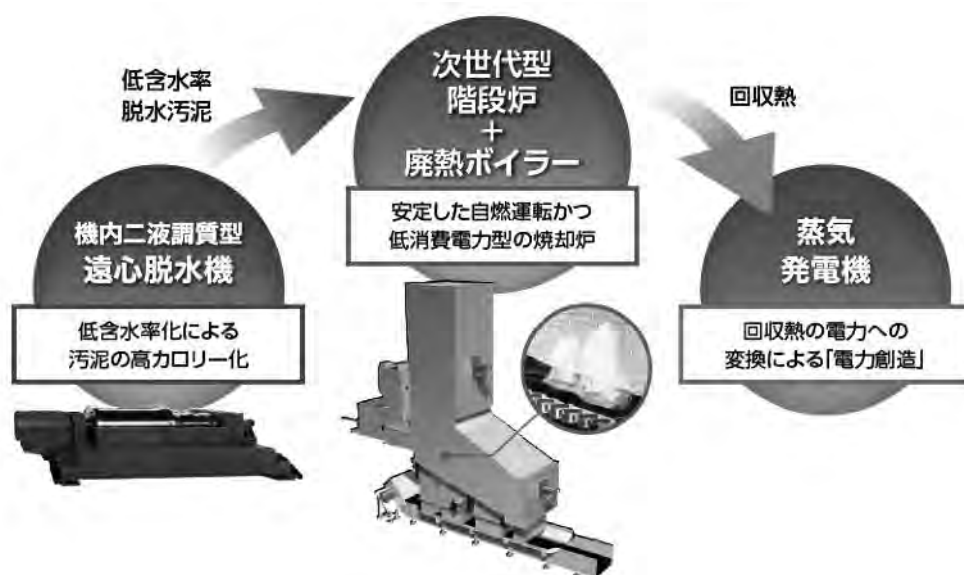


図-1 コンセプト

本システムでは一定規模以上では発電量が設備消費電力に対し同等以上となる「電力自立」、さらに余った発電電力を本システム外に供給する「創エネルギー」を目指す。なおバイオマスである下水汚泥の焼却発電により得られる電力はカーボンフリーであり、脱水汚泥の低含水率化による自燃運転により化石燃料が不要となるため、システム全体として大幅な温室効果ガス排出量削減が可能となる。

以下に各技術の概要と特長を示す。

(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

汚泥脱水機には、近年開発された「機内二液調質型遠心脱水機」(図-3参照)を採用する⁷⁾。

無機凝集剤(ポリ硫酸第二鉄)を汚泥の改質を目的

に汚泥供給ラインに添加していた従来の二液調質(図-2参照)に対し、「機内二液調質型遠心脱水機」では、遠心脱水機ボウル内部のドライビーチ部分に無機凝集剤を添加する機構(図-3参照)とした低動力型二液調質専用脱水機である。

ボウル内で固液分離の進んだ一次脱水汚泥に無機凝集剤を添加し、遠心力で分散・浸透・混合させることで脱水に効率よく利用でき、ドライビーチ部で更に二次脱水される。その効果により脱水汚泥含水率を従来の一液調質脱水よりも約7～10ポイント低減でき、含水率70%程度の粒状の脱水汚泥が得られる。低含水率化により脱水汚泥の発熱量は従来の約2倍となる(図-4参照)。その結果、焼却処理において補助燃料なしで高温燃焼が達成できる汚泥燃料となり、焼却システム内での回収エネルギーが増加する。

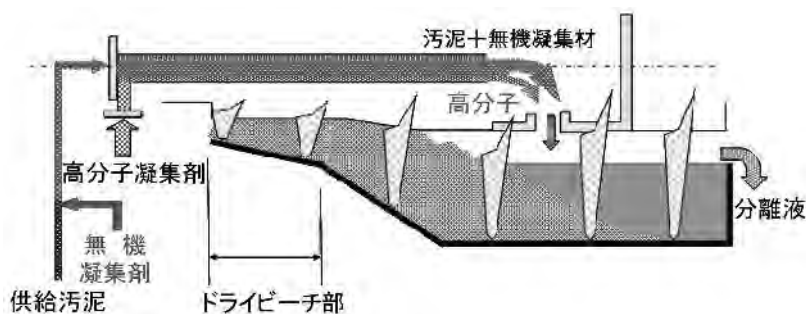


図-2 従来の二液調質型遠心脱水機

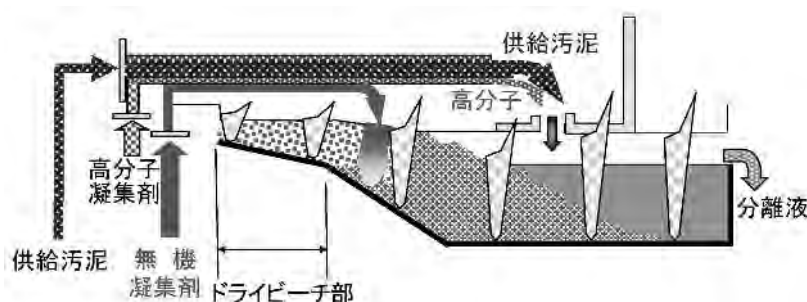


図-3 機内二液調質型遠心脱水



図-4 汚泥低含水率化の例

(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

焼却炉は広く普及している流動床炉ではなく階段炉を採用し、廃熱ボイラーにて焼却廃熱の回収を行う。流動床炉と比較した階段炉の特長を以下に示す。

1) 低消費電力

階段炉は流動床炉に比べ砂層流動の必要がなく低圧損なため、燃烧空気送風機の静圧が1/7程度、動力を1/5程度に低減でき、焼却設備の消費電力を約4割低減できる。

2) N₂Oの大幅な抑制

階段炉は炉内で乾燥段・燃烧段・後燃烧段とそれぞれの工程を経て汚泥を完全燃烧させる。乾燥工程にて水分蒸発させた熱量の高い汚泥を燃烧段で燃烧させることで、900℃以上の高温燃烧域を形成できるため、温室効果ガスであるN₂Oの発生量を流動床炉の約1/6に低減できる。

3) 安定した自然運転

炉内における汚泥の滞留時間は約2時間あるため、投入汚泥の質的・量的変動を受けにくく、安定した自然運転ができる。

また階段炉はごみ焼却炉などで実績が多数あり、廃熱ボイラーとの一体構造が可能なため、廃熱ボイラーを別置きする場合と比べ、省スペース化ができる。

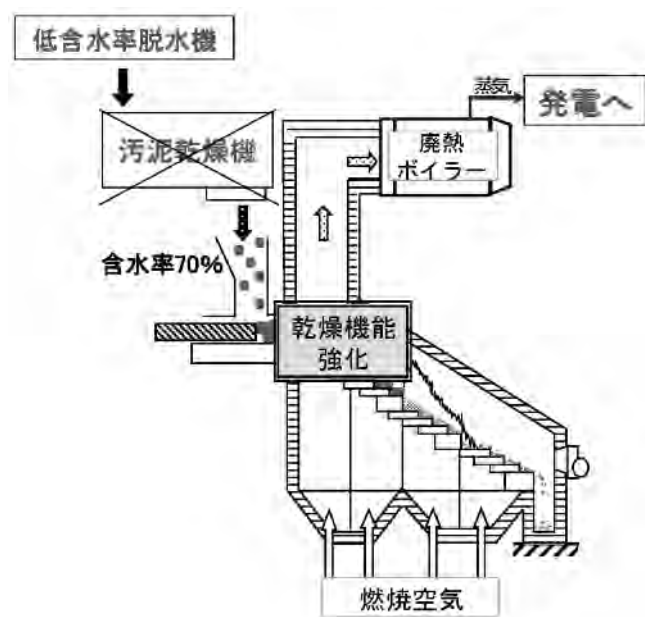


図-5 次世代型階段炉の概要

従来の一液調質脱水汚泥の場合、階段炉で焼却するためには乾燥設備が必要であったが、機内二液調質脱水汚泥であれば炉内乾燥機能を強化した次世代型階段炉を用いることで脱水汚泥の直接焼却が可能である(図-5)。これは機内二液調質脱水汚泥が無機凝集剤を添加することにより、形状が粒状となり付着性ならびに含水率が十分に低いことから、一液調質脱水汚泥と比較して炉内での乾燥が短時間で終わるためである(図-6)。そのため次世代型階段炉を用いることで乾燥設備が不要となり、設置に必要なスペース、ならびに建設コストの低減ができる。

(3) 蒸気発電機によるエネルギー変換技術

発電技術としては、火力発電所などに多数の実績がある復水タービン蒸気発電方式があげられる。特に下水処理場では潤沢な処理水を復水器の冷却水として利用することから水冷式復水器の採用が可能で、空冷式より大きな熱落差が得られるため、結果として高い発電効率を得られる。しかし、同方式は小型化に限界があり、比較的高圧・多量の蒸気を得られる大規模処理場(概ね20 t-DS/日以上)に適している。

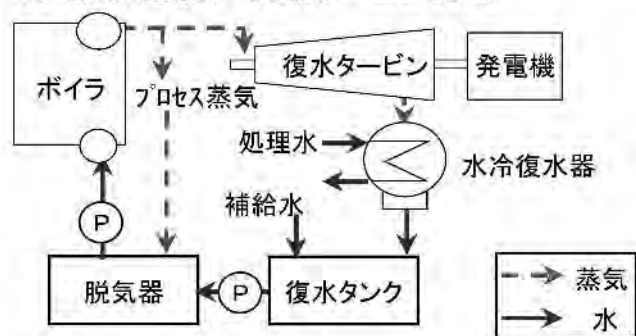
本事業では復水タービン導入メリットの低い中小規模処理場を想定し、低圧・少量の蒸気により100kW程度の発電が可能なスクリュ式小型蒸気発電機を採用する⁸⁾。本発電機は本来、中小規模の製造工場において小型ボイラーで発生させた蒸気を減圧弁で減圧してからプロセス利用しているようなケースで、減圧機能を持たせつつ発電を行う用途で開発されたものであるが、1～3 t/h程度の少量の低圧蒸気で発電が可能であることから、中小規模プラントでの蒸気発電への応用が期待されている。

さらに本発電機で利用した後の排蒸気は圧力・温度とも低いため、工場のプロセス蒸気以外には利用用途が無かったが、近年温泉熱などの低温熱源からの発電



図-6 機内二液調質脱水汚泥

(大規模施設) 復水タービン方式



(中小規模施設) スクリュー式+バイナリ発電

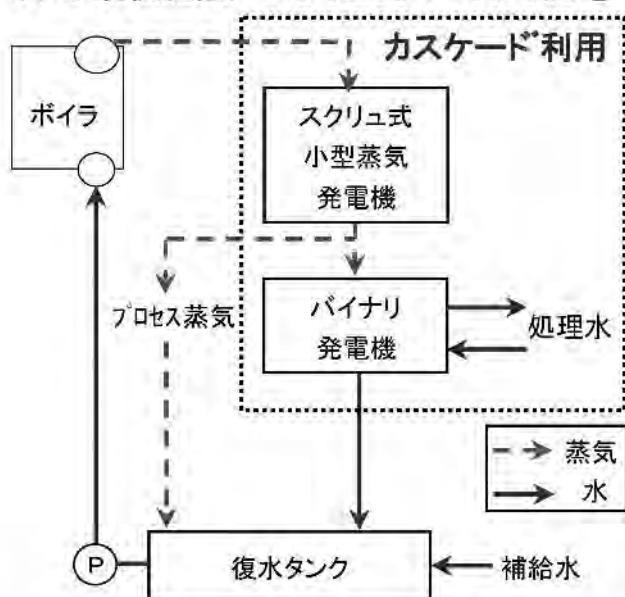


図-7 蒸気発電機によるエネルギー変換

方式として注目されているバイナリ発電機を用いることで更なる発電が可能となる。バイナリ発電とは、水より沸点の低い熱媒体（代替フロン、ペンタンなどの炭化水素、アンモニアなど）を作動流体として用いることで、低圧蒸気や温水などの低温熱源から電力を回収する発電システムである。今回前段の小型蒸気発電機の排気を熱源としてバイナリ発電でさらに電力を回収するシステムを構築した（図-7：蒸気のカスケード利用）。このような小型蒸気発電機とバイナリ発電の組み合わせは国内で実証事例がほとんど無いシステムで、新たな電力変換システムと言える。以上のような蒸気発電機によるエネルギー変換技術により、これまで発電ができなかった中小規模施設など広範囲の施設規模における発電を目指す。従来技術との比較イメージを図-8に示す。

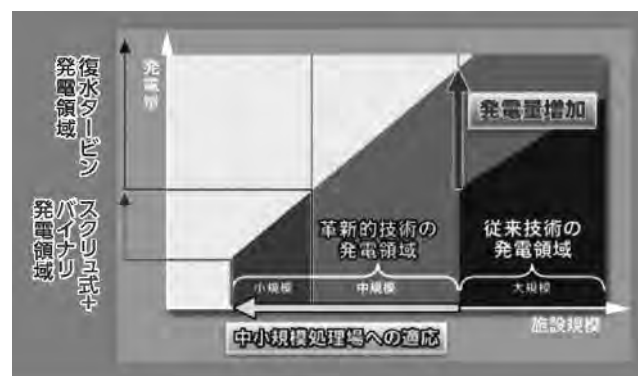


図-8 従来技術との比較イメージ

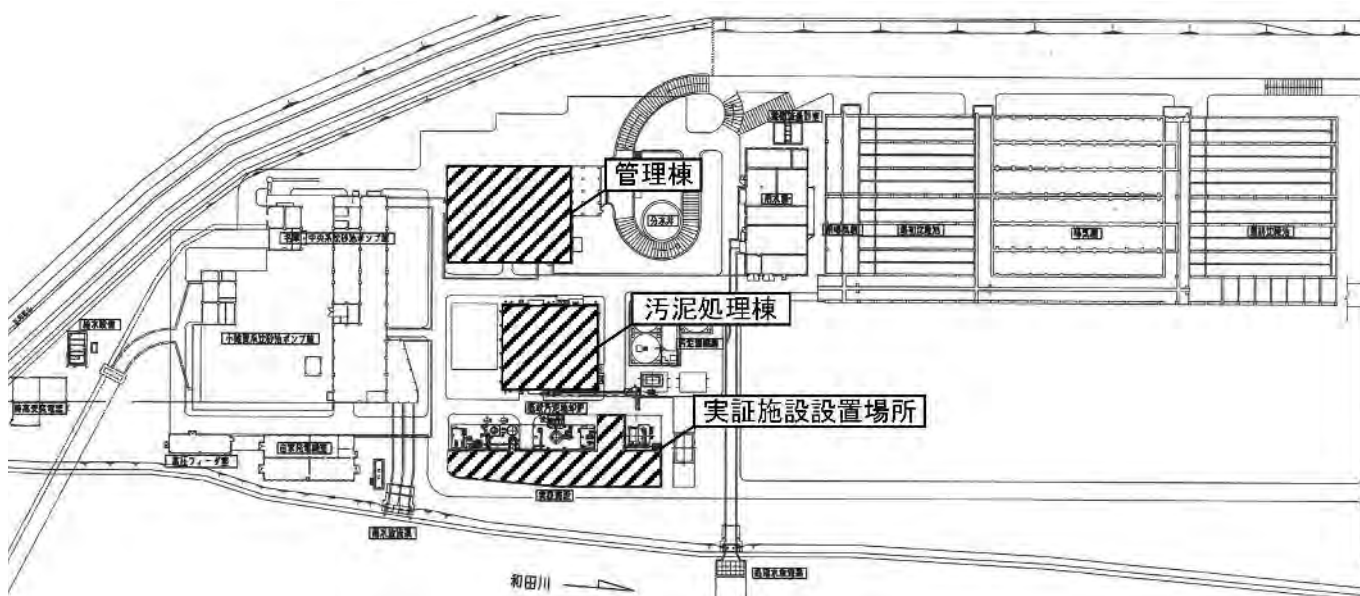


図-9 和歌山市中央終末処理場平面図及び実証施設設置場所

4. 実証事業の概要

(1) 事業概要

本実証事業は国土交通省国土技術政策総合研究所の委託研究として実施している。実証場所である和歌山市中央終末処理場内に、3つの技術を組み合わせた既設焼却炉と同等の処理規模(35 t-wet/日：汚泥含水率約70%)の実証プラントを設置し、実規模での運転を行い、発電量ならびに電力消費量等の運転データ、建設、維持管理コスト、温室効果ガス排出量等の確認を行う。和歌山市中央終末処理場の全体配置図を図-9に、完成予想図を図-10に示す。予想発電量は100kWで、設備消費電力の半分以上を賄う見込みである。

実証プラントの建設は平成25年7月末から土木建築工事、9月中旬からプラント建設工事を開始しており、11月末の時点で土工工事および機器据付工事がほぼ完了し、築炉・配管・ダクト・電気工事といった各種残工事を実施している。今後、平成26年1月下旬から個別の運転確認試験を実施し、2月中旬からシステム全体の運転によるデータ取得を予定している。

(2) 実証施設概要

実証施設は、低含水率化技術による脱水設備(低動力型濃縮機・低含水率脱水機)、エネルギー回収技術

による焼却熱回収設備(次世代型階段炉、廃熱ボイラー)、エネルギー変換技術による発電設備(スクリュ式小型蒸気発電機・バイナリ発電機)により構成される設備である。付帯設備として、脱水汚泥の貯留・搬送設備、排ガス処理・灰搬出設備、ユーティリティ設備を有する。

処理フローは次の通りである。既設の汚泥処理棟から混合生汚泥を汚泥濃縮機に送り、濃度4%程度に濃縮した後に脱水を行う。濃縮機は脱水性能を安定化させるため、脱水機への供給汚泥濃度の安定化を目的として設置している。脱水汚泥はポンプ圧送ではなくコンベヤ搬送とし、一時貯留し炉への投入量を調整する。なお、凝集剤としてポリ硫酸第二鉄を添加しているため一液調質脱水汚泥と比較して十分臭気濃度は低い。外部への臭気漏れについては、密閉式のコンベヤを採用することや機内の換気をおこなう対策を施している。

焼却炉に投入された脱水汚泥は乾燥段で乾燥された後、燃焼段で高温燃焼され、後燃焼段で残存する固定炭素を完全に燃焼させる。焼却炉の燃焼空気は炉の底部から投入する一次空気と炉の天井部から投入する二次空気があり、各々送風機と予熱用熱交換器を有している。燃焼空気は概ね200～250℃まで予熱して炉内に供給するが、脱水汚泥の含水率等の条件を満たしていれば熱収支計算上自然運転が可能である。焼却灰は、

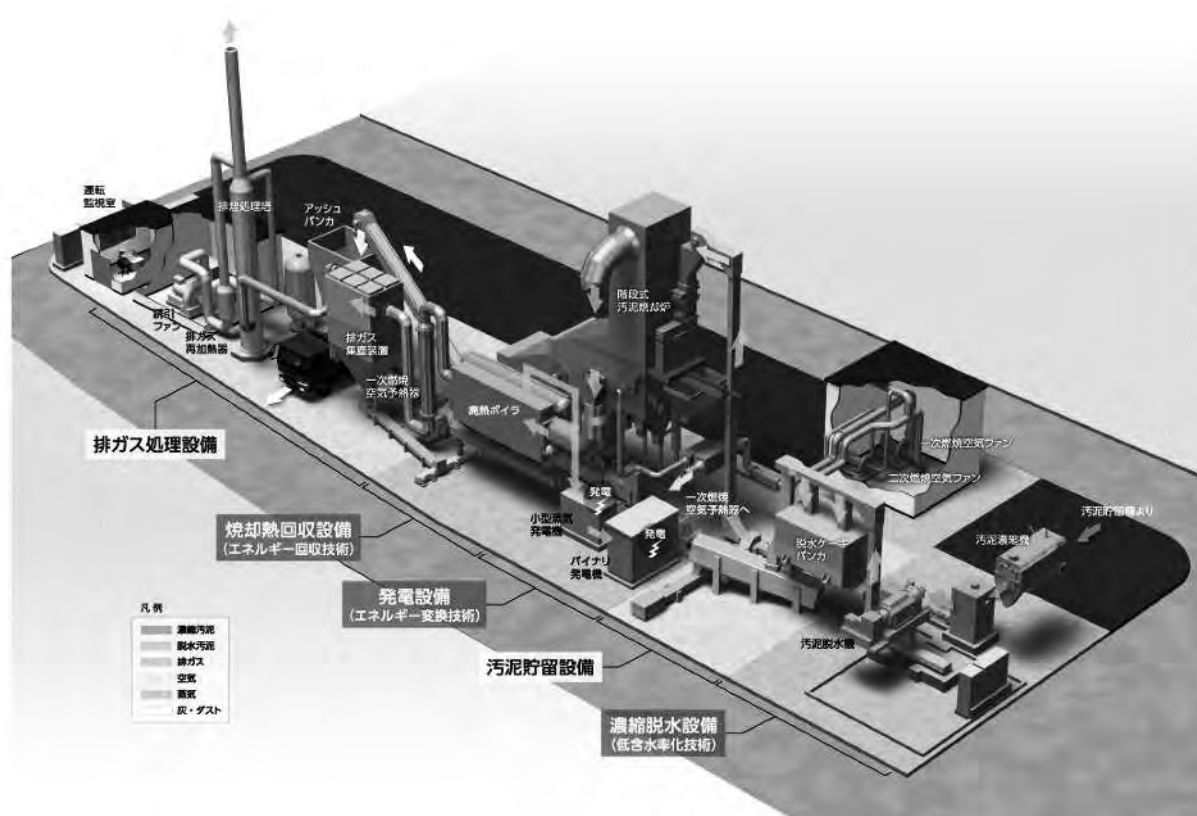


図-10 完成予想図

後燃焼段で完全燃焼され炉の底部より排出される主灰と、全灰量に対し数%程度の飛灰が発生する。排ガス処理は従来同様、飛灰除去のための集塵装置、排ガスの冷却・脱硫のための排煙処理塔、白煙防止のための排ガス再加熱器を具備している。

廃熱ボイラーから発生する蒸気は全量スクリュ式小型蒸気発電機に投入し、入口圧力0.9MPaGから出口圧力0.2MPaGまでの圧力差分のエネルギーを電力に変換する。その後排出された蒸気は燃焼空気の予熱と排ガスの再加熱に使用するが、残りはバイナリ発電機に投入され、約130℃から約50℃までの温度差分のエネルギーを電力に変換する。

5. おわりに

下水汚泥はこれまで順調にリサイクル率を伸ばしてきた分野であるが、エネルギー化という観点からはまだ発展の余地を大に残している。再生可能エネルギーに対する社会からの需要の高まりに加え、汚泥の低含水化技術と小規模蒸気発電技術の確立という技術的素地が整ったことにより、今後下水汚泥の焼却発電技術への期待は高まっていくものと考えられる。本システムは広範囲の施設規模において発電を可能にし、下水道処理施設の省エネルギー・創エネルギー・温室効果ガス排出量削減効果を増大し、ライフサイクルコストの低減に寄与するものである。実証事業を通して本システムの有効性を検証し、わが国での普及促進に貢献できるよう本事業を進めていきたい。

参考文献

- 1) 国土交通省 都市・地域整備局 下水道部, 下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン (案), 2011.
- 2) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部, 平成24年度事業 産業廃棄物排出・処理状況調査報告書 平成22年度実績 (概要版), 2013.
- 3) 国土交通省webサイト, 資源・エネルギー循環の形成,
URL: http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_tk_000124.html
- 4) 大下和徹, 高岡昌輝, 水野孝昭: 下水汚泥処理における焼却廃熱を利用した発電システムの検討, 土木学会論文集 G (環境), Vol.68, No.7, III_317-III_324, 2012.
- 5) 公益社団法人日本下水道協会編, 下水道統計 (平成22年度版), 2012.
- 6) 公益社団法人日本下水道協会webサイト、各種統計データ等、2. 実際の最終発生固形物量の試算
URL: <http://www.jswa.jp/data-room/data.html#article2>.
- 7) 久野清人, 鈴木和美, 井上剛, 宮内千里, 機内二液調質型遠心脱水機の実用化, 下水道協会誌論文集, Vol. 48, No. 590, pp. 91-98, 2011.
- 8) 世界初のスクリュ式小型蒸気発電機の開発、販売について, 株式会社神戸製鋼所・株式会社ティエルブイ・神鋼商事株式会社報道発表資料 (平成19年6月20日)

投稿報告

スウェーデン・ヴェステロースで 開催された包括的な汚泥管理に 関する国際会議報告

京都大学大学院地球環境学堂 准教授 大下 和徹

京都大学大学院地球環境学堂 教授 高岡 昌輝

キーワード：包括的汚泥管理、国際学会、IWA、スウェーデン

1. はじめに

2013年5月6日－5月8日の3日間、スウェーデンのヴェステロースにおいて、包括的な汚泥管理に関する国際会議が開催された。主催はIWA（International Water Association: 国際水協会）と、現地のメーラルダーレン（Mälardalen）大学であり、会議名称は、“1st International IWA Conference on Holistic Sludge Management”である。本会議は、IWAの汚泥管理（Sludge management）、嫌気性消化（Anaerobic digestion）、および栄養塩除去・回収（Nutrient Removal and Recovery）の3つの専門家グループが合同で開催した最初の会議であり、その主旨は、タイトルにある“Holistic”という言葉に集約されている。すなわち、扱うテーマとして、汚泥処理を中心に、その上流側に位置する下水処理での栄養塩の除去・回収や有害物質の除去から、嫌気性消化で発生するバイオガスの有効利用、および処理汚泥の農地への還元などを広く扱うものであり、それらの関係性に主眼を置くことを目指すものである。“Holistic”は、日本語では、“全体論的”、“総合的”、“総体的”、あるいは“ホリスティック”と直接的に用いられることも多くなってきたが、本稿では、本会議の主旨から、“包括的”という言葉を用いる。

開催都市であるスウェーデン、ヴェステロース（Västerås）市は、首都ストックホルムの北西110kmに位置するスウェーデン中部の都市であり、人口は約14万500人と国内第6位の都市である。この地域の重要な水源となっているメーラレン（Mälaren）湖の畔に位置しており、紀元前から成立した北欧でも最も歴史のある都市の一つである。かつて、ABBの鉄道部門やボンバルディア交通の航空機工場が存在した経緯もあり、電気・エネルギー・オートメーションをキーワードとした工業都市として有名である。会議は市の中心部に位置するAros Congress Centerで開催された（写真-1）。市内では、近郊下水処理場での下水汚泥メタン発酵により得られたバイオガスを燃料としたバスが走っている様子も見られた（写真-2）。

本会議は、IWA汚泥管理（Sludge management）専門家グループが中心になって関与した会議として14回目にあたる（表-1）。著者・高岡は2007年のMoncton（カナダ）会議以降、東アジア代表理事を務めているが、1997年から2007年のAntalya（トルコ）会議までは奥野長晴先生（滋賀県立大学名誉教授）が務められていた。

参加者の概略を表-2に示す。参加者は、33ヶ国から、175名であり、3つの専門家グループが合同で開催しているにせよ参加者数が少なかったように感じられた。内訳としては、全体の4割が開催国スウェー



写真-1 国際会議会場：Aros Congress Center



写真-2 市内を走るバイオガスバス

デンからの参加者であったうえ、ヨーロッパ諸国からの参加者が大半を占めており、アジア圏からの参加者は全体的に少なかった。アジア圏では、日本はタイに次いで6名の参加者があり、大学関係者が4名、下水道新技術推進機構から1名、NPO法人から1名の参加者であった。なお、日本からの発表数は5件であった。日本からの参加者は、前回2009年のHarbin（中国）での14名からすると少なく、日本から遠方であることも一要因であるかもしれないが、今後、発表・参加の呼びかけを積極的行いたいと考えている。

2. 基調講演、および特別表彰

基調講演は、初日開会式後に2件、2日目朝に3件、3日目朝に2件：計7件が講演された。

そのうち2件の講演について概説する。

Steven K Dentel 氏（USA：デラウェア大学教授）は、汚泥処理は重要な問題であり、下水処理場にかかる全体コストのうち約半分が汚泥処理コストであるものの、世界的にも有名な環境工学、下水処理工学のテキストで触れられている割合は水処理7割で汚泥処理は3割以下であること、包括的な汚泥管理を考えてい

表-1 IWA国際汚泥会議の開催履歴

回	開催年	都市	国	理事長	備考
1	1997	Bari	イタリア	P. Balmer（スウェーデン）	
2	1997	Chestochowa	ポーランド	P. Balmer（スウェーデン）	
3	1999	Fremantle	オーストラリア	P. Balmer（スウェーデン）	
4	1999	Athens	ギリシャ	P. Balmer（スウェーデン）	
5	2001	Taipei	台湾	P. Balmer（スウェーデン）	
6	2001	Acapulco	メキシコ	P. Balmer（スウェーデン）	
7	2003	Trondheim	ノルウェー	L. Spinosa（イタリア）	
8	2004	Singapore	シンガポール	L. Spinosa（イタリア）	
9	2005	Johannesburg	南アフリカ	L. Spinosa（イタリア）	
10	2006	Moscow	ロシア	L. Spinosa（イタリア）	
11	2007	Antalya	トルコ	Steven K Dentel（USA）	
12	2007	Moncton	カナダ	Steven K Dentel（USA）	
13	2009	Harbin	ハルビン	Steven K Dentel（USA）	
14	2013	Västerås	スウェーデン	Steven K Dentel（USA）	3SG共催

表-2 参加者の国別内訳

国名	参加者数
スウェーデン	75
フィンランド	11
ノルウェー	10
ドイツ	8
イタリア	7
タイ	7
カナダ	6
日本	6
デンマーク	5
ポーランド	4
スペイン	3
オランダ	3
シンガポール	3
オーストラリア	3
イギリス	3
USA	2
中国	2
台湾	2
ベルギー	1
ルクセンブルク	1
メキシコ	1
イスラエル	1
チリ	1
トルコ	1
チェコ	1
ナイジェリア	1
リトアニア	1
韓国	1
スロベニア	1
南アフリカ	1
バングラデシュ	1
ネパール	1
ブラジル	1
計	175

く場合には、持続可能性を具体的に評価する代表的なアプローチであるトリプル・ボトムライン（「環境」「経済」「社会」の3つの視点）から評価することが重要であることを主張した。さらに、近年注目している汚泥処理技術として、汚泥の重力濃縮等、上部が上澄み水、下部が濃縮汚泥に分離するようなケースを対象とし、上部を曝気により好気状態に保持し、下部が嫌気状態になることで生じる電位差を用いて発電するプロセス、地中深層での汚泥のメタン発酵、および疎水

性膜を用いた省エネルギー型の汚泥脱水・乾燥についての紹介があった。いずれも汚泥処理の省・創エネルギーの点で共通している技術であり、興味深い講演であった。

一方、栄養塩除去・回収（Nutrient Removal and Recovery）専門家グループのリーダーであるFrank Rogalla氏（スペイン：Aqualia）は、栄養塩の除去・回収を研究の主対象としつつも、下水処理・汚泥処理におけるエネルギー回収を対象とした近年の技術動向について報告があった。特に、微細藻類による光合成を用いたバイオオイル生産と、下水処理場を組み合わせた処理システムに関する報告があった。まず、植物光合成由来オイルの収率は、パームオイルが5,900L/ha/Year程度であるのに対し、微細藻類では、25,000L/ha/Yearと高いため、効率が高いことが述べられた。具体的な、プロセスは、UASBなどの嫌気性水処理の後段に、微細藻類Pondを組み合わせ、下水中の栄養塩を微細藻類の増殖に用いると効率的なシステムとなることが示された。またUASB自身から、あるいはそこで発生した余剰汚泥とオイルを抽出した微細藻類残渣のメタン発酵により、バイオガスが発生するため、更なるエネルギー回収が可能であることも示された。また、微細藻類の濃縮にはPAC+アニオン系高分子凝集剤が適していることや、DAF（Dissolved Air Flotation）：加圧浮上装置により、希薄な微細藻類溶液も、4%程度まで省エネルギーで濃縮できる要素技術の報告もあった。下水処理場に微細藻類によるオイル生産を組み合わせたプロセスについては、わが国でも筑波大学、東北大学、仙台市の連携で取り組みが進みつつあり、実用化が期待される。

なお、基調講演に使用されたスライド資料はPDF形式で、本国際学会のウェブサイトからダウンロード可能となっている。以下にアドレスを示しておくので、興味を持たれた方は参照いただければ幸いである。

<http://hsm2013.se/about-the-event/topics-programme/keynote-presentations>

また、2日目：夕刻に開催されたConference Dinnerでは、IWA国際汚泥管理専門家グループのリーダーある、Steven K Dentel氏（USA：デラウェア大学教授）に、長年の汚泥管理分野における研究・学会への貢献をたたえ、Specialist Medalが贈られた。Dentel氏は、2007年から本会議まで、汚泥管理専門家グループのリーダーを務め、特に汚泥の調質に関連する研究で著名である。このSpecialist Medalは、過去に、アメリカのAarne Vesilind氏、カナダのRejeshwar Tyagi氏、イタリアのLudovico Spinosa氏

が受賞している。なお本会議にて、汚泥管理専門家グループのリーダーは、Dentel氏からBanu Örmeci氏（カナダ：カルトン大学教授）にバトンタッチされた。

3. 口頭発表・ポスター発表

口頭発表では、全体を10テーマに分けたプログラムにて開催された。表-3にプログラムの一覧を示す。これまでの国際汚泥会議におけるプログラムとあまり大きな相違はみられなかったが、本会議では、“汚泥管理の影響を含めた包括的アプローチの必要性（The need for holistic approach including effects from sludge handling）”が本会議の主テーマと関連して設けられたのが特徴的である。発表件数は一般口頭発表が86件であった。一方、ポスター発表は8件で非常に少なかったため、7分の口頭発表を組み合わせたハイブリッド形式で実施された。

(1) 日本の参加者による発表

日本からの口頭発表は、4件であった。下水道新技術推進機構の小川氏は、日本における下水汚泥のエネルギー利用の現状について概説するとともに、汚泥バイオガス利用における規模の影響、固形燃料化に対する焼却や嫌気性消化の影響を、エネルギー消費量の観点からシミュレートして明らかにするとともに、高濃度濃縮+汚泥可溶化+嫌気性消化を組み合わせたシステムや、嫌気性消化に固形燃料化を組み合わせたシステムが、商業的にも実現可能性が高いことを試算によ

り明らかにした。

NPO21世紀水倶楽部の佐藤氏は、下水汚泥の嫌気性消化について混合汚泥を対象としたケース（標準モード）、初沈汚泥のみを対象としたケース（分離モード）、嫌気性消化をしないケース（直接脱水モード）について、窒素負荷に着目したエネルギー消費量、温室効果ガス（GHG）排出量を評価した結果について報告した。エネルギー消費量としては分離モードが最も低くなるが、脱水汚泥の焼却までを考慮した場合には、標準モードが最もGHG排出量を低減できることを示した。これは分離モードでは余剰汚泥に由来する窒素が直接汚泥焼却へ投入され、これが N_2O へ転換されることの影響が大きいと示唆された（写真-3）。

筆者らのグループからは2件の発表を行った。筆者高岡は下水処理場と都市ごみ焼却炉の有機性廃棄物を介した連携システムについての評価について報告した（写真-4）。日本における関西圏を想定し、下水汚泥と都市ごみとの混焼、都市ごみ中の厨芥類と下水汚泥の混合メタン発酵等、下水処理場と都市ごみ焼却炉の連携シナリオにおいて、処理水質、ライフサイクルコスト、GHG排出量を評価した結果、連携方策としては混合メタン発酵の効果が最も高いことが示された。

筆者大下は、消化ガス中に含まれるシロキサンに着目し、メタン発酵前段での加温による固形分可溶化処理に曝気を組み合わせ、あらかじめ汚泥中からシロキサンが除去するシステムについて報告した。本システムにより、80℃の加温と曝気処理を48時間実施すると、消化ガス量が増大できるとともに、消化ガス中に

表-3 プログラムの概要

内容		件数
Key note speech		7
セッション 1	Production and utilization of biogas	15
セッション 2	Nutrient recovery processes	10
セッション 3	Processes for hygienization of sludge	6
セッション 4	The need for holistic approach including effects from sludge handling	26
セッション 5	Use of sludge for energy generation	5
セッション 6	Emerging contaminants in sludge – upstream separation and optimization	4
セッション 7	Physical and chemical pre-treatment processes	6
セッション 8	Modelling of anaerobic processes	4
セッション 9	Greenhouse gas emission from sludge treatment	4
セッション 10	Novel processing ROUTES for effective sludge management	6
セッション 11	Poster session	8
合計		101



写真-3 NPO21世紀水倶楽部：佐藤氏の発表風景



写真-4 京都大学：高岡（著者）の発表風景

含まれるシロキサン量が9割以上低減できることを実験的に示した。

また、日本からのポスター発表は、1件であった。名古屋大学の片桐先生、入谷先生のグループは、汚泥の新たなフィルタープレス式脱水方法について報告した。固形分1%に調整した活性汚泥に、凝集剤としてPACを0.15%TS添加し、フロックを形成させて、圧力0.1MPaで脱水するが、通水してフロックを分散させたのちに、15MPaの高圧で脱水を行うというものであり、30分程度で含水率40%以下を達成し、活性汚泥微生物中の内部水の一部も物理的に脱水が可能となったことを報告した。またこの脱水挙動を動的なモデルで表現できることも報告された。

(2) 諸外国の発表の動向

他の海外研究者の報告では、全ての講演をチェックできたわけではないが、非常に多岐に渡っており、そのレベルも様々であったが、やはり汚泥のエネルギー利用（嫌気性消化など）、省エネルギープロセスの採用（Annamoxプロセスなど）、下水処理からの温室効果ガス排出（ N_2O など）に関する発表が大半を占めていたように感じた。ここに幾つかの発表についてレビューする。

ドイツ、エルフト地域の流域圏水処理を管轄するErftverbandのDr. Brepolsはエルフト川流域に約40存在する下水処理場群の長期的なビジョンについて、ライフサイクルコスト分析によりその方向性を示した。将来的には、下水処理場を約半分に減少させ、残った下水処理場への統合と増強を行い、広域的な下水処理を行うことが、スケールメリットの効果を最大限に発揮でき、最もコスト的に望ましいと結論付けた。一方

汚泥処理の観点から、ドイツでは、2003年に未処理の下水汚泥の埋立が禁じられ、近年農地還元も衰退し、2010年には焼却率が50%を超えている。そこで、同所属ErftverbandのDr. Schäferは、同地域の汚泥処理の観点からもライフサイクルコスト分析を行い、広域下水処理が進展していき、エネルギー問題が無視できなくなる中では、嫌気性消化や、バイオガスコジェネレーションを進めることが望ましいと結論付けている。この2編の発表に関しては、わが国と良く似た状況・傾向になってきていることを感じた。

スウェーデン王立工科大学のYangらは、複数の下水処理場の汚泥処理返流水中の窒素除去処理として、担体充填型の部分硝化/Annamoxプロセス、とシーケンス式回分反応型の硝化/脱窒プロセスを対象に、 N_2O の排出挙動を調査した。このために、本研究者らは、フロート式の、 N_2O 連続サンプリングモニタリング計を開発・使用し、下水中の溶存 N_2O と放散ガス中の N_2O の双方を測定した。結果としては双方のプロセスから N_2O が放出され、シーケンス式回分反応型の硝化/脱窒プロセスからは投入窒素負荷の0.4~2%程度が N_2O に転換されていた。一方Annamoxプロセスでも N_2O は発生するが、発生する濃度は低いようであった（転換率は不明）。連続データを得られた意義として、 N_2O の放出には、エアレーションのタイミングが大きく影響するのに加えてシステムの安定性が影響していることが報告された。Annamoxプロセスは省エネルギーであることから導入が進められようとしているプロセスであるが、 N_2O の発生量の把握することを含め、全体としての温室効果ガス排出量の報告が待たれる。

4. 今後の動き

IWA汚泥管理専門家グループが関連する会議の次の予定としては、2014年5月にトルコ、イズミール（Izmir）で、第4回汚泥管理に関するヨーロッパ会議（The 4th European Conference on Sludge Management-ECSM 2014）が開催されることが決定している。詳細を以下に示す。

開催時期：2014年5月26日（木）～28日（土）

会議名：The 4th European Conference on Sludge Management-ECSM 2014

主催：European Sludge Management Committee

共催：IWA（International Water Association）

テーマは、汚泥処理の法的・経済的側面からのアプローチ、汚泥の物性評価、汚泥発生量の最小化、革新的汚泥処理新技術、メタン発酵、汚泥脱水・乾燥・熱処理・最終処分、汚泥の有効利用、臭気、汚泥処理のライフサイクルアセスメントなど広く設定されている。

講演申し込みは2014年1月20日であり、まずは200字程度のアブストラクトが求められる程度である。フルペーパーの締切はA4、8枚程度で2014年3月24日である。一般参加も可能であり、是非ウェブサイト（<http://www.ecsm2014.org/>）をチェックされたい。

IWA汚泥管理専門家グループが主として関係する会議は、将来的にはヨーロッパ（チェコ）、さらには日本での開催も検討されているようである。

5. おわりに

今回の会議は、2009年の会議からは4年ぶりに開催され、包括的な汚泥管理に関する国際会議と題して、3つの専門家グループ合同で実施された。近年IWAの国際会議が単独の専門家グループ主催で開催されることは少なくなってきたおり、むしろ、他のグループや他の団体と共同で開催されることが多くなってきた。今回は第1回目ということもあり、挑戦的な取り組みとして、包括的な汚泥管理の重要性は謳われつつも、真に包括的な内容の発表は少なかったように思えた。今後回数を重ね、内容も洗練されてくるものと期待したい。

3グループ合同で実施された割には、参加者が少ない中で、我が国からの参加者・発表者も少なく、特に民間企業からの参加者、発表者は皆無であり、本専門家グループに積極的に関与している筆者らも、事前周知や広報について、反省すべき点がある。世界的にも不景気な中ではあるが、わが国の各自治体や民間企業では、様々な汚泥処理・有効利用技術の開発が行われている上、BDASHのような先進的な技術の実証プロジェクトも国土交通省が主体となって実施されている。また、本分野における日本の国際的な評価は非常に高く、特に汚泥の熱処理に関しては世界的にも注目されている。直近では2014年の会議が対象となるが、民間企業からの発表も含め、産官学で、日本の汚泥処理を世界に発信していくことができると考えている。

投稿報告

嫌気性消化に関するIWA第13回 国際会議 (13th World Congress on Anaerobic Digestion) 参加報告

国立環境研究所 研究員 小林 拓朗

東北大学大学院工学研究科 土木工学専攻環境保全工学分野教授 李 玉友

キーワード：嫌気性消化国際会議、下水処理、バイオマス資源化、新技術開発

1. はじめに

2013年6月25日から28日にわたって、スペイン サンティエゴ デ コンポステラにおいて嫌気性消化の国際会議である13th World Congress on Anaerobic Digestion (AD13) が開催された。本会議は、IWA (国際水協会) 嫌気性消化スペシャリストグループにより3年ごとに開催され、1997年には仙台国際セン

ターで第8回国際会議 (AD8) が開催されている。本会議では205件の口頭発表と475件のポスター発表で、合わせて680件の研究発表が行われ、約800人が参加した。日本からの発表件数は24件で、そのうち口頭発表は5件、ポスター発表は19件であった。近年のADにおける発表件数は図-1の通りで、本AD13は例年になく規模の大きな会議となり、嫌気性消化に対する世界的な注目が感じられた。会議は初日のオープニングセレモニーの後、2日目から4日目までは朝に基

調講演、午前中は3部屋に分かれて通常の口頭発表セッション、午後は同様に3部屋に分かれてショートプレゼンテーションと通常の口頭発表セッションが行われた。コーヒープレイクの時間は、ポスターセッションを兼ねていた。

口頭発表各セッションおよびポスターの掲示場所は、それぞれ研究トピックの種類ごとにまとめられていた。トピックの種類は、例えば固形廃棄物の嫌気性処理、産業廃水の嫌気性処理、下水の嫌気性処理、難分解性汚染物質の嫌気性分解、残渣の栄養塩除去・回収、モデリング、動力学、分子生物学ツールを用いたポ

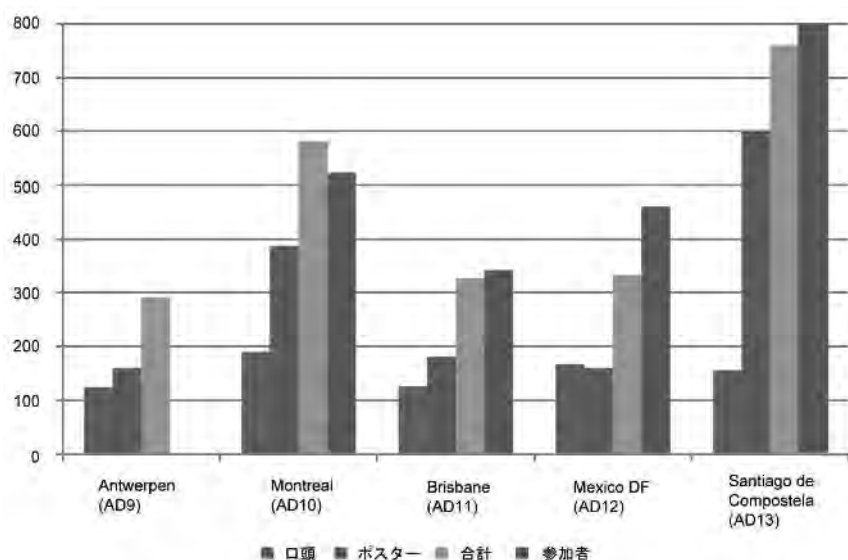


図-1 近年のADにおける発表登録件数(実際の発表数とは差異がある)等の推移



写真-1 口頭発表の様子



写真-2 記念撮影の様子

ピュレーションダイナミクス、阻害、ガス精製・エネルギー利用、政策・経済、環境影響等々全部で18項目程度あって、嫌気性消化の研究分野が多岐にわたっていることがわかる。本稿では、各トピックの研究発表の動向と、いくつか注目度の高い個別の話題について解説を行う。

2. 各研究トピックにおける発表動向

口頭発表とポスター発表の件数を、トピックごとに分類したのが表-1である。とくに発表件数の多かったトピックをいくつか順に挙げると次の通りである（括弧内は全発表件数に占める割合）：(1) モデリング・

表-1 AD13における主要なトピックとそれぞれの発表件数

トピック	発表件数	
	口頭	ポスター
固形廃棄物の嫌気性消化	12	41
混合嫌気性消化	9	45
新たなバイオマス原料	9	14
嫌気性処理をベースとしたバイオリファインリー	9	34
難分解性汚染物質の嫌気性処理	12	23
産業廃水の嫌気性処理	8	47
下水・生活排水の嫌気性処理	9	13
嫌気性膜分離リアクター	8	9
新規嫌気性リアクター・バイオ電気化学システム・微生物燃料電池等の技術開発	13	20
嫌気性微生物の阻害	9	13
モデリング・コントロール	26	38
技法・動力学	12	34
分子生物学ツール・ポピュレーションダイナミクス	21	37
投入原料の前処理	12	30
消化液の後処理・栄養塩回収・農業利用	14	40
ガス精製・エネルギー利用	6	11
フルスケール装置の運転・解析	10	8
環境影響・政策・経済	6	17

コントロール (9.4%); (2) 分子生物学ツール・ポピュレーションダイナミクス (8.5%); (3) 産業廃水の嫌気性処理 (8.1%); (4) 混合嫌気性消化 (8.0%); (5) 消化液の後処理・栄養塩回収・農業利用 (8.0%); (6) 固形廃棄物の嫌気性消化 (7.8%); (7) 技法・動力学 (6.8%); (8) (嫌気性消化をベースとした) バイオリファイナリー (6.3%)。このような主要なトピックの種類は前回、前々回のADと同様であった。

モデリング・コントロールのトピックに属する研究は、主として次に示す4つのタイプに分類された: (1) 嫌気性消化モデル (ADM) 等をはじめとした代謝反応群の解析; (2) モニタリングのための指標・手法の開発; (3) 流体力学計算による混合・攪拌のモデル化・解析; (4) 消化槽における気液間の化学平衡と物質移動の解析。分子生物学ツール・ポピュレーションダイナミクスに関する研究は、次のようなものが議論された: (1) リアクターの状態・種類に応じた微生物群集の構造・機能 (代謝) の変化; (2) 嫌気性処理リアクター内の群集構造・ポピュレーションダイナミクス; (3) 微生物群集情報の数学モデルや運転管理への導入。産業廃水の嫌気性処理に関する研究分野では、多様なシステム・多様な原料を用いた事例が報告された。システムの例として膜分離バイオリアクター; ハイブリッド生物膜リアクター; 嫌気性固定床; マルチステージup-flow anaerobic sludge blanket (UASB) リアクター等がある。原料の例としてバイオエタノール製造廃水; アゾ染料廃水; コーヒー製造廃水等が挙げられる。混合消化の研究分野では、次のような混合の事例が見られた: (1) 下水汚泥と食品廃棄物や都市ごみ; (2) 家畜排泄物と食品廃棄物; (3) 家畜排泄物、食品加工廃棄物および油脂; (4) 下水汚泥と油脂; (5) 下水汚泥と藻類; (6) 下水と都市ごみ; (7) 食品廃棄物と藻類。消化液後処理のトピックでは、Anammoxによる窒素除去や、微細藻類を用いた窒素・リン除去等が議論された。固形廃棄物の嫌気性消化のトピックでは、麦わら・鶏ふん・都市廃棄物・下水汚泥を扱う研究が多かった。麦わらや汚泥を扱う研究では、生物分解促進のための前処理や運転条件に関する議論が行われた。鶏ふんは窒素含有率が高く、消化槽中のアンモニアが高濃度になるので、アンモニア阻害に焦点を当てた研究がされていた。嫌気性処理の分野において近年注目されている現象の一つとして、高アンモニア濃度下あるいは高酢酸濃度下における酢酸→メタン経路から酢酸→水素経路 (共生酢酸酸化) へのシフトがある。モデリング、ポピュレーションダイナミクス、阻害といった複数の分野をまたいで共生酢酸酸化を扱う研究が報告されていた。

Westerholmらは、酢酸資化性メタン生成菌が阻害される高アンモニア濃度下で、微量金属の添加や温度条件の調整 (42-44℃) により共生酢酸酸化菌の活性を向上させ、水素資化性メタン生成菌を介した効率的なメタン化が可能であることを示した。バイオリファイナリーというトピックでは、嫌気性消化をベースにしたメタン以外の有価物生産プロセスが扱われていた。報告されたのは、主としてvolatile fatty acid (VFA) を経由したmedium chain fatty acid (MFA) の生産、polyhydroxyalkanoate (PHA) の生産、水素発酵、水素・メタン二段発酵 (バイオハイトン生産) に関する研究であった。Pavanらは、消化液循環を導入した生ごみからのバイオハイトン (水素+メタン) 生産のパイロットスケール実験について報告した。

3. 下水の嫌気性処理

近年、関心が増大してきたと感じられるトピックのひとつは下水の嫌気性処理である。下水の嫌気性処理を扱う研究発表の全発表件数における割合を、2007年に開催されたAD11と今回のADの間で比較すると、1.1%から3.2%に増加した。以下では下水処理に用いられる代表的な2つの嫌気性技術に関して記述する。

3. 1 UASBによる下水処理

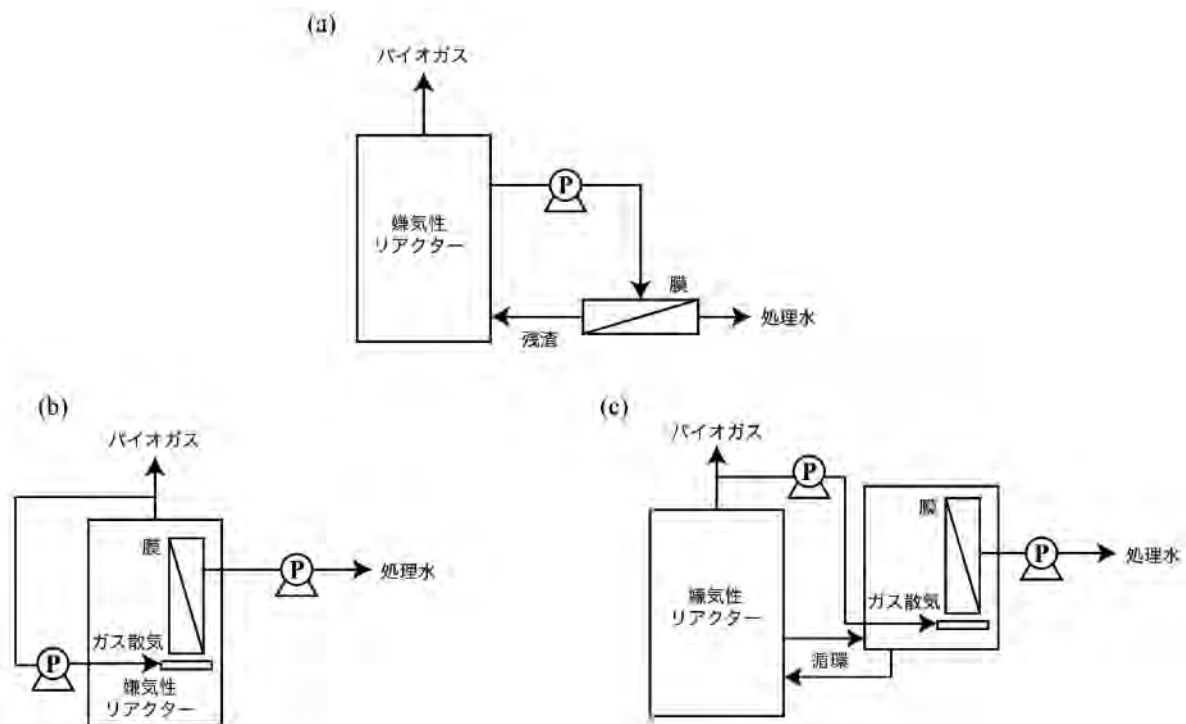
下水の嫌気性処理は、好気性処理と比較して低い運転コスト、維持管理が容易、余剰汚泥の発生量が少ない、エネルギーを回収可能である点で注目されている。元来、下水の嫌気性処理条件である比較的低温と低い有機物濃度は、伝統的な嫌気性システムによる処理を困難にしていたが、近年の技術開発によって好気性処理と遜色ない有機物の除去率を達成できるようになってきた。嫌気性処理法の中でも特に高速処理が可能であるUASB法をはじめとした流動床法の適用が下水処理施設の普及が遅れている熱帯・亜熱帯地域の開発途上国を中心に進んでいる。UASBを用いた下水処理プラントは、インド、ブラジル、メキシコ、コロンビア、エジプトなどを中心として世界200ヶ所以上に建設されている。近年は、温帯地域への適用のために、低温下においても安定的かつ効率的な嫌気性処理の実現に向けた研究も行われている。口頭発表のセッションでは、嫌気性消化の分野の代表的な研究者であるアメリカスタンフォード大学McCarty教授によるキーノートスピーチが行われ、2段式の嫌気性流動床槽かつ後段槽に分離膜を備えたプロセスを用いた下水処理において、10℃から25℃の幅広い温度範囲で90%以上のCOD_{Cr}除去率が達成されたことを報告した。同じくキーノートスピーチとして、ブラジルのミナ

ス・ジェライス国立大学Chernicharo教授からは、実規模プラントの経験をもとにUASBによる下水の嫌気性処理の問題点として (1) スカムの発生と (2) メタンの水への溶解によるロスを取り上げた。実機UASB上部に位置する気液分離装置のデザインの工夫によってスカム除去システムを構築し、90%のスカム除去率が達成されたことを報告した。スカム収率は0.20から0.24 L/m²/dであった。メタンのロスは、嫌気性リアクター内における高いメタン分圧と下水の体積あたりのメタン収率が低いことに起因する。さらに水温が低いほどメタンの溶解度が上昇することから、そのロス分は大きくなる。Souza et al.¹⁾ らによるとUASBによるCOD除去率が約70%であるのに対し、除去CODの36%しかガスとして回収されなかったという。除去CODの36%から40%は溶存メタンとして流出液と共に流れ出ていると考えられた。このようなメタンの流出は温室効果ガスの環境中への放出にもつながることから、問題視されている。嫌気性処理法と活性汚泥法で温室効果ガス排出量をCO₂基準で比較すると、消費電力量が少ないにもかかわらず、嫌気性処理法の方がCO₂排出量は多くなるという報告もある。このような溶存メタンの流出を抑制するための研究が試みられており、Chernicharo教授からは流出液の微曝気²⁾ やガス分離膜^{3, 4)} を用いた方法が紹介された。

3. 2 嫌気性膜分離リアクターによる下水処理

本ADでは、嫌気性膜分離リアクターを用いた研究発表が17件報告された。これまでのADの中で最多である。嫌気性リアクターと膜の組み合わせには、一般的に図-2のように3種類の形式がある。まずは、生物反応槽と膜分離部を独立して設置し、膜モジュール内部に高い圧力を加えて汚泥を流すことによりろ過を行うと同時に高い断面流速を与えて膜ファウリングを抑制するクロスフロー型MBRがある。これは、膜の洗浄や交換が単純である一方で速い流速（高圧力）でバイオマスを循環させるため、高いエネルギーコストや膜ファウリングが起りやすいといったデメリットがある。また、ポンプの種類によってフロックの形成や粒子サイズの低下や、溶解性有機物の増加が起ることが確認されている。粒子サイズの低下や溶解性有機物の増加は、早いフラックスの低下を引き起こす。他の組み合わせには吸引ポンプを用いて膜分離を行う形式が存在する。この形式には、生物反応槽内に直接膜を浸漬させ、吸引ろ過によって処理水を得る浸漬型MBRの2タイプが存在し、浸漬型MBRは一体型と槽別置型がある。槽別置型は、余計にポンプが必要になるが膜の洗浄が容易に行え、多くの好気性処理施設でこの形式が使用されている。膜をリアクターに浸漬させるメリットは、ポンプによるエネルギーコストが最低限にできる一方で、膜表面を洗浄するためにリアク

図-2 嫌気性MBRの形態; (a) クロスフロー型嫌気性MBR, (b) 浸漬型嫌気性MBR (一体型), (c) 浸漬型嫌気性MBR (槽別置型)



ター内に生成したバイオガスをポンプで循環させる必要がある。これにより、膜ファウリングを防止している。それでも、クロスフロー型MBRよりコストはかからない。多くの嫌気性MBR法の研究において、浸漬型の形式が使用されている。

嫌気性MBRによる下水処理については、人工下水を用いた研究と実下水を用いた研究があり、ラボスケールとパイロットスケールでの研究事例がそれぞれある。実下水の研究では、初沈後の下水や二次処理水等、浮遊物質が取り除かれている下水が利用されていた。全体を通して、浸漬型MBRに関する報告が多い。また、使用された分離膜は中空糸膜及び平膜が多く、管状膜の研究はいくつか報告されていた。膜の孔径は0.1~1 μm の研究が多い。パイロットスケールでの試験においては、孔径が0.1 μm 以下の膜がほとんどであった。室温・中温条件での下水処理は、標準活性汚泥並の処理水質が得られると確認されている。Smith et al.⁵⁾ がまとめた報告によると、既往の研究で、HRTは3時間から60時間程度の範囲で運転されており、平均COD除去率は80%以上のものがほとんどであった。Hu and Stuckey⁶⁾ はパイロットスケールの浸漬型の嫌気性MBRによって35℃の条件において人工下水を処理し、HRT 3時間で91%のCOD除去率を得ている。Gimenez et al.⁷⁾ はパイロットスケール装置を用いて33℃の条件において実下水を処理し、HRT10時間程度で87%のCOD除去率を達成した。本ADでは、Pena Miranda et al.⁸⁾ が、18±2℃の低温条件の下でのUASBと組み合わせた浸漬型嫌気性MBRによる実下水処理を行い、12時間のHRTにおいて約90%のCOD除去率、0.22L/g-CODremovedのメタン収率が得られたことを報告した。235Lの容積のUASB槽内には6 kg-VSのグラニュールが充填されており、高速の処理を可能とした。UASB槽の気液分離装置上部に膜モジュールが設置され、グラニュールを破壊する事なく浸漬膜の洗浄を行いながらろ過することが可能となっていた。Bae et al.⁹⁾ は膜のファウリングを抑制するため、膜の洗浄のために槽内で生成される流動の中で膜と粒状活性炭が接触する流動床型嫌気性膜分離リアクター (AFMBR: Anaerobic fluidized membrane bioreactor) の下水処理への適用を報告した。

4. エネルギー利用のための生物学的なガス精製法

消化ガスのアップグレードやエネルギー利用に関する研究も、本ADで発表が増加したトピックである。AD11とAD13の間で、全発表件数に占める割合は1.5%から2.5%に変化した。以下では、本ADで報告さ

れた3つの手法について解説する。

4. 1 微生物脱硫法

嫌気性消化で得られた消化ガスを有効利用する際に、含有される硫化水素の除去は重要な操作である。好気性の硫化物酸化細菌を用いた安価な生物学的方法 (微生物脱硫法) が、広く研究されている。この技術は、(a) 脱硫反応に特化した独立した装置を使う方式と、(b) 発酵タンク内に空気または酸素を吹込む方式 (マイクロエアレーション) の2種類に大別される。(a) 方式は、消化ガスに限定されず、多様な種類のガスに応用される。マイクロエアレーションは比較的小規模な施設で採用され、バイオガス関連では、近年はこの方式を扱う研究が多い。マイクロエアレーション方式に係る最近の研究は、主に (1) 様々な電子受容体、導入方式の比較; (2) 最適な空気 (酸素) の注入率; (3) 硫化物酸化細菌の生息環境を扱っている。

硫化水素発生速度に対する酸素の供給速度比 ($\text{O}_2/\text{H}_2\text{S}$) の適正範囲は、様々な条件の下で求められている。十分な硫化水素除去率 (99%) を達成している条件下での $\text{O}_2/\text{H}_2\text{S}$ の値には文献によって開きがあり、0.79~5.5 (mol/mol) の範囲で分布しており⁸⁻¹³⁾、最も多いのは3付近であった。空気または酸素注入場所として污泥中よりもヘッドスペースの方が、攪拌方法としてガス循環攪拌よりも污泥循環攪拌の方が、それぞれ $\text{O}_2/\text{H}_2\text{S}$ が小さくなる傾向がある。つまり供給する酸素はより少量で済む。本ADではこれまでの事例とは異なり、UASBリアクターに対するマイクロエアレーションの適用例が報告された。容積2.7LのUASBの流出からの返送水中に1 L/dの空気を吹込みながら約1年間の運転が行われた。 $\text{O}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比は約3.3であった。この条件のもとで、ガス中の硫化水素濃度が約6000ppmから平均70%程度低減され、対象系として設けたマイクロエアレーションなしのUASBと比較して運転性能にも影響がなかったことを報告した。

脱硫に寄与する硫化物酸化細菌の生息環境を扱う研究もこれまでに報告されている。KobayashiらとRamosらによって、発酵タンク内のヘッドスペースの重要性が指摘された^{12,13)}。Kobayashiらは、硫化物酸化細菌はヘッドスペース壁面に生物膜を形成して生息しており、活性を高めるためには生物膜への栄養の供給が必要である事を示した¹²⁾。Ramosらは、ヘッドスペース容積を全容積の3.6%の場合と0.57%の場合で脱硫性能を比較し、ヘッドスペースの縮小によって脱硫速度が約5分の1程度まで減少することを示した¹³⁾。本ADではRamosらによるヘッドスペースの機能に関する追跡調査が報告され、硫黄を蓄積した生物膜を掃除して取り除いたとしても脱硫性能の低下は確認され

ず、定期的なメンテナンス作業として生物膜の掃除を行う必要があることが示された。一方、Prochazka et al.はヘッドスペースだけでなく、消化液の表面も脱硫反応に寄与していることを主張した。Prochazka et al.はヘッドスペースへの空気吹き込みを行う消化槽において、攪拌のON/OFFをしながら硫化水素濃度をモニタリングしたところ、攪拌のない時間は気体と接する消化液表面に硫黄の形成が確認され、硫化水素濃度も低い水準に維持された。これと比較して、攪拌のある時間は硫黄が消化液の中に取り込まれ、硫化水素濃度も増大したことから、直接ガスと接触できるように消化液表面に硫化物酸化細菌が保持されれば、それらは脱硫性能の向上に寄与できるとした。

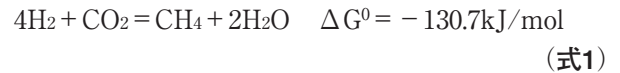
4. 2 高圧嫌気性消化法

嫌気性消化において生産される消化ガスは、典型的にはメタン60%、二酸化炭素40%で構成されるが、近年はメタン濃度を高めて高カロリーガス（バイオ天然ガス）化する取り組みがある。既に実用化されている方法として高圧水吸収法が挙げられ、我が国でも下水処理場の消化ガスのアップグレードに応用されている。回収ガスは自動車燃料や都市ガスといった新たなエネルギー活用が期待されている。この方法は、二酸化炭素とメタンの水への溶解度の差が高圧下で増大することを利用して、二酸化炭素を選択的に水へ溶解させるという原理を有する。高圧メタン発酵法では、発酵過程で発生するガスが密閉された発酵タンク内を高圧条件にし、上述の方法と同じ原理で二酸化炭素を発酵液中に溶解させ、高いメタン濃度のガスを取り出す。即ち1ステップで、加圧エネルギーを必要とせずにメタン発酵と高圧水CO₂吸収を行うプロセスである。二酸化炭素の溶解はpHの低下を引き起こすので、高圧下でメタン発酵を進行させるにはpHの制御が重要である。Lindeboom et al.は嫌気性グラニュール汚泥を植種源とし、アルカリ度/全無機炭素比が1の下で酢酸ナトリウムの回分式嫌気性発酵を行い、pHは約7に維持しつつ、生成するガスによってタンク内圧が上昇する中でメタン発酵が進行し、最終的に約20 bar、ガス中CO₂濃度1%を達成した¹⁴⁾。また、Lindeboom et al.は天然ミネラルをpH維持のためのバッファとして利用し、グルコース (g-COD) /ミネラル (g) 比約0.1において、最大10barまでの高圧下でグルコースの回分式メタン発酵を進行させ、CO₂濃度13%を得た¹⁵⁾。本ADではLindeboomによりこれら一連の研究がダイジェストで紹介され、今度の研究方針が示された。これまでのところ、高圧メタン発酵法は回分式の運転でありかつ投入基質濃度が希薄であるが、今後は連続運転が可能なスケールアップした装

置でより現実的な運用が検討されていくようである。

4. 3 水素導入法

メタン生成細菌の働きとして水素とCO₂からのメタン生成（式1）はよく知られた反応である。この反応は、もちろんメタン発酵タンクの内部でも起きている。



しかし、タンク内で利用し得る水素の量は、CO₂を十分にメタンまで変換するのに必要な量と比較して小さい。発酵タンクに外部から水素ガスを導入することでCO₂のメタンへの変換を促し、メタン純度の高いバイオ天然ガス、あるいは余剰水素とメタンが混合されたバイオハイタンガスを生産する方法が研究されている。Luoらは、牛ふん尿を連続メタン発酵処理する完全混合タンクに、CO₂生成速度の4倍の速度で水素を導入しながら実験を行い、水素導入のない対称系と比較してCO₂濃度は6割程度少ない平均15%を記録した。一方ガス中には20%の水素が残留した¹⁶⁾。メタン発酵において過剰量の水素の存在はネガティブな意味合いで言及されることが多い。水素分圧の上昇は、中間生成物である揮発性脂肪酸（プロピオン酸や酪酸）の分解の抑制に働くからである。この実験では、プロピオン酸濃度が対称系のそれより3倍高い約300mg/Lを示した。その後の研究の中で、Luoらは高い攪拌速度（500-800rpm）、高温発酵、水素注入率約2.4L/L-バイオガスの条件で、メタン濃度90%以上を達成した¹⁷⁾。さらにLuoらはCO₂生成速度の4倍の速度で水素を導入している高温メタン発酵タンク内の水素分圧を分析し、 $\Delta G_{\text{propionate}} = -37 \sim -35 \text{ kJ/mol}$ で、プロピオン酸の分解は熱力学的に進行し得ることを示した¹⁸⁾。本ADでは、Luoによってこれらの代表的研究成果が紹介された。

5. Syngas嫌気性消化法

本ADにおいて、新たな嫌気性消化の投入原料としてとくに注目を集めたのはSyngasである。Syngasは、バイオマスの熱分解ガス化処理において生成するCOとH₂のことを指す。通常これらは、触媒を用いた燃料ガスへの変換が試みられることが多いが、メタン生成菌との共生の下で、複合系微生物群集によってCO単独またはCOとH₂を基質とした以下の5種類の反応が起こり得る。

- (1) $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$
- (2) $2\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH}$
- (3) $4\text{CO} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{CO}_2$



これらはいずれもメタン生成細菌によってメタンへ変換されるが、メタン収率は理想的には $0.25 \text{ mol-CH}_4/\text{mol-CO}$ である。本ADにおいてGuiotは、この現象を利用して熱分解ガス化とメタン発酵を連携させた、都市廃棄物メタン化システムのビジョンを示した(図-3)。Guiotらは、嫌気性グラニュールが植種された中温条件の密閉ガスリフトリアクターを用いて、 N_2 で希釈されたCOガスのメタン発酵連続実験を行った¹⁹⁾。植種グラニュールは、バイアル瓶を用いたメタン生成活性試験 ($\text{CO} : 0.2 \text{ atm}$) において、 H_2 と CO_2 なしの条件で 4 mmol/g-VSS 、 H_2 と CO_2 ありの条件で $5 \sim 8 \text{ mmol/g-VSS}$ の消費速度を記録した。 CH_4 収率はほぼ理論値通りであった。これらの消費速度は酢酸のそれと同等であった。しかしながら、COの液相への物質移動が率速と考えられ、CO消費速度は攪拌速度に依存していた。それは連続運転においても同様であった。連続運転では、流入ガスのCO濃度20~40%、CO負荷15~18 mmol/g-VSS/d において、CO消費率は70~75%を示した。COは毒性を有することでも知られる。Guiotらは溶存CO濃度と微生物活性との間の関係を調査し、溶存CO濃度0.17 mmol/L の条件下で最高のCO消費速度が得られ、0.25~0.72 mmol/L の範囲では最高速度の半分程度であった。

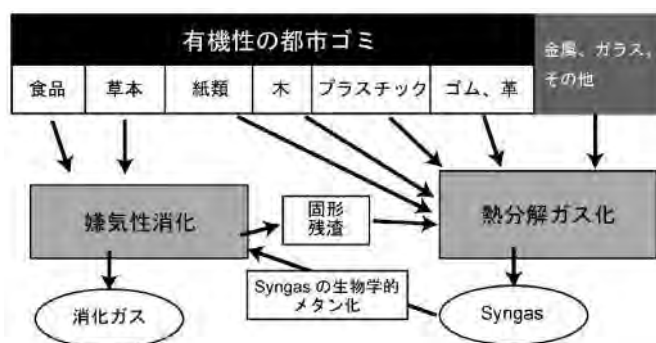


図-3 熱分解ガス化と嫌気性消化の融合システム

6. おわりに

はじめに述べたように、今回のADはこれまでと比較してとくに大規模で盛りだくさんの内容であり、嫌気性消化に関する研究が、世界的にますます盛んになってきていることがわかるとともに、同分野の最新動向について情報収集するのに大変よい機会となった。日本国内の研究者が取り扱っていないようなテーマの発表が数多く見受けられ、学問としての嫌気性消化の奥深さと、広い分野からの関心が感じ取られた。

最終日にはAD14の開催地を決定するための投票および開票が行われ、チリと中国との一騎打ちの結果、AD14はチリのビニャ・デル・マールで開催されることとなった。

国際会議活動の一環としてサンティアゴ デ コンポステーラの市街地での記念撮影も行われた(写真-2)。この地はキリストの十二使徒のひとり聖ヤコブ(サンティアゴ)の墓があったことから聖地として知られ、町を代表する建築物として大聖堂が建設されている。多くの巡礼者がこの町を訪れている様子が見受けられ、活気に満ちていた。また、余談になるが、われわれは飛行機乗り継ぎのためスペインの首都マドリードにも立ち寄ってみたが、ちょうどこの時期オリンピックの招致を巡って日本の東京とスペインのマドリードが競争していたので、関心をもってマドリード市内を歩いてみたものの、特に強い印象もなかった。結果、皆様をご存知の通り東京は圧勝であった。

参考文献

- 1) Souza, C. L.; Chernicharo, C.A.L.; Aquino, S.F. (2011) Quantification of dissolved methane in UASB reactors treating domestic wastewater under different operating conditions. *Water Science Tech.*, 64 (11) , 2259-2264.
- 2) Hartley, K.; Lant, P. (2006) Eliminating Non-Renewable CO₂ Emissions from sewage treatment: an anaerobic migrating bed reactor pilot plant study. *Biotech. Bio.*, 95 (3) 384-398.
- 3) Bandara, W.M.K.R.T.W.; Satoh, H.; Sasakawa, M.; Nakahara, Y.; Takahashi, M.; Okabe, S. (2011) . Removal of residual dissolved methane gas in an Upflow anaerobic sludge blanket reactor treating low-strength wastewater at low temperature with degassing membrane. *Water Research*, 45, 3533-3540.
- 4) Cookney, J.; MCadam, E.J.; Cartmell, E.; Jefferson, B. (2010) . Recovery of methane from anaerobic process effluent using poly-di-methylsiloxane membrane contactors. In: 12th IWA specialist conference on anaerobic digestion.
- 5) Adam L. Smith, Lauren B. Stadler, Nancy G. Love, Steven J. Skerlos, Lutgarde Raskin, (2012) Perspectives on anaerobic membrane bioreactor treatment of domestic wastewater: A critical review, *Bioresource Technology*, 122, 149-159.
- 6) Hu, A.Y., Stuckey D.C. (2006) Treatment of dilute wastewaters using a novel submerged anaerobic membrane bioreactor, *J. Environ. Eng-*

- ASCE, 132, 190-198.
- 7) Gimenez, J.B. Robles, A., Carretero, L., Duran, F., Ruano, M.V., Gatti, M.N., Ribes, J., Ferrer, J., Seco, A. (2011) Experimental study of the anaerobic urban wastewater treatment in a submerged hollow-fibre membrane bioreactor at pilot scale, *Bioresour. Technol.*, 102, 8799-8806.
 - 8) Díaz, I., Lopes, A.C., Pérez, S.I. and Fdz-Polanco, M. (2010) Performance evaluation of oxygen, air and nitrate for the microaerobic removal of hydrogen sulphide in biogas from sludge digestion, *Bioresour. Technol.*, 101, 7724-7730.
 - 9) Díaz, I., Pérez, S.I., Ferrero, E.M. and Fdz-Polanco, M. (2011) Effect of oxygen dosing point and mixing on the microaerobic removal of hydrogen sulphide in sludge digesters, *Bioresour. Technol.*, 102, 3768-3775.
 - 10) Jenicek, P., Keclik, F., Maca, J. and Bindzar, J. (2008) Use of microaerobic conditions for the improvement of anaerobic digestion of solid wastes, *Water Sci. Technol.*, 58 (7) , 1491-1496.
 - 11) Kobayashi, T. and Li, Y.Y. (2011) Performance and characterization of a newly developed self-agitated anaerobic reactor with biological desulfurization, *Bioresour. Technol.*, 102 (1) , 5580-5588.
 - 12) Kobayashi, T., Li, Y.Y., Kubota, K., Harada, H. and Maeda, T. (2012) Characterization of sulfide-oxidizing microbial mats developed inside a full-scale anaerobic digester employing biological desulfurization, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 93 (2) , 847-857.
 - 13) Ramos, I., Díaz, I. and Fdz-Polanco, M. (2012) The role of the headspace in hydrogen sulfide removal during microaerobic digestion of sludge, *Water Sci. Technol.*, 66 (10) , 2258-2264.
 - 14) Lindeboom, R.E., Weijma, J. and van Lier, J.B. (2012) High-calorific biogas production by selective CO₂ retention at autogenerated biogas pressures up to 20 bar, *Environ. Sci. Technol.*, 46 (3) , 1895-1902.
 - 15) Lindeboom R.E., Ferrer, I., Weijma, J. and van Lier, J.B. (2012) Silicate minerals for CO₂ scavenging from biogas in Autogenerative High Pressure Digestion, *Water Res.*, 47 (11) , 3742-3751.
 - 16) Luo, G., Johansson, S., Boe, K., Xie, L., Zhou, Q. and Angelidaki, I. (2012) Simultaneous hydrogen utilization and in situ biogas upgrading in an anaerobic reactor, *Biotechnol. Bioeng.*, 109 (4) , 1088-1094.
 - 17) Luo, G. and Angelidaki, I. (2012) Integrated biogas upgrading and hydrogen utilization in an anaerobic reactor containing enriched hydrogenotrophic methanogenic culture, *Biotechnol. Bioeng.*, 109 (11) , 2729-2736.
 - 18) Luo, G. and Angelidaki, I. (2013) Co-digestion of manure and whey for in situ biogas upgrading by the addition of H₂: process performance and microbial insights, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 97 (3) , 1373-1381.
 - 19) Guiot, S.R., Cimpola, R. and Carayon, G. (2011) Potential of wastewater-treating anaerobic granules for biomethanation of synthesis gas, *Environ. Sci. Technol.*, 45 (5) , 2006-2012.

コ ラ ム

(一社) 地域環境資源センター (JARUS) における 集落排水とバイオマスへの関わり

JARUSの前身である日本農業集落排水協会は、昭和58年8月に設立され、その活動内容は比較的小さい集落が散在する農村の形態を踏まえ、数集落単位で汚水を処理して用水路や河川に戻す小規模分散方式の処理施設を中心とした処理水や汚泥（有機資源）のリサイクルによる循環型農村社会の実現を目指したものである。

その後、平成16年に農業集落排水協会は地域資源循環技術センターへと改称され、平成23年4月に地域資源循環技術センターと農村環境整備センターとが合併し、社団法人地域環境資源センター (JARUS) となった。これにより二つの組織が培ってきた知見、経験及び技術を結集して農業農村の振興に向けて邁進することになり、平成25年4月には一般社団法人に移行した。また、平成25年は設立30年の記念すべき年であり、この機会にJARUSの最近の活動を振り返り、特に集落排水とバイオマスの2部門の今後の動向について述べる。

集落排水については、現在約5,300地区において農業集落排水施設が設置されているが、設置後20年経過した地区が約1,000近くあり、さらに今後10年間に毎年約300地区が設置後20年を迎える。これらの施設は施設の更新対策が課題となるが、JARUSは対応する技術開発及び調査・研究を重点的に実施している。まず、一つ目として既存施設のストックマネジメント手法を確立（手引き（案）の取りまとめ、最適整備構想策定支援システムの確立）、二つ目として、処理性能を高めコンパクトな改築を実現するJARUS-14R型の開発、三つ目として、維持管理における低コスト化技術（省エネルギー運転、汚泥減量化）の導入・促進である。加えて、集落排水汚泥の農地還元（コンポスト、乾燥汚泥）の取組みを一層強化していく必要がある。これらの調査・研究の成果及び開発した技術に関しては、研修会やインターネット等を通じて、情報提供を行っていくこととしている。

バイオマス関係では、周知のように、国民の地球温暖化に対する関心が醸成されている中で、バイオマス活用推進基本法が施行され、また、バイオマスタウン構想の策定市町村300の目標は一応達成された。さらに、ソフトセルロース利活用技術開発（バイオ燃料）に関する5カ年のプロジェクトも平成24年度に終了し、成果を取りまとめることができた。バイオマスタウン構想については、策定はされたものの実現に至っていない構想も目立ち、取組が必ずしも順調に進んでいる状況にあるとは言えないが、今後バイオマス産業都市構想へと展開していくことが期待される。これらからバイオマス利活用には長期の視点・推進努力が必要と思われる。東日本大震災以降、再生可能エネルギーへの期待がさらに大きく高まり固定価格買取制度も動き始めることで、バイオマス利活用や集落排水施設等における太陽光発電も含めて新たなステージに入っていくものと予想される。

加えて、国交省の国土審議会長期展望委員会の公表では、日本の総人口は2050年には3,300万人減少し9,500万人となり、高齢化率は20%から40%に上昇し、特に小規模な市町村で顕著にこうした現象が生じるとしている。人口減少と高齢化が進捗する状況で、集落排水施設の改築・更新の推進及び集落排水施設同士の統廃合は、長期的な観点では止むを得ないとみられる。一方、農村地域ではバイオマス利活用、太陽光発電及び小水力発電等の自然エネルギーの積極的な地産地消の利活用が進むものと想定している。今後もJARUSは、こうした時代の変化に対応し、農村地域の発展・活性化を具体化して行く地域支援センターとしての役割を担っていく所存である。



一般社団法人 地域環境資源センター 技術監 佐藤 進

報 告

下水汚泥資源の 平成23年度有効利用調査結果

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 安 陪 達 哉

キーワード：アンケート調査結果

1. はじめに

下水道は重要な都市インフラであるとともに、バイオマスとして活用可能な下水汚泥等の資源を豊富に有している。一方、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。また、電力需給の逼迫や地球温暖化も喫緊の課題であり、再生可能エネルギーの大量導入が求められている。このため、下水道が有する豊富な資源を活用することによって、こうした社会的課題の解決に貢献し、都市インフラとしての機能を最大限に発揮していくことが期待されている。

国土交通省においては、下水道事業に関する企画立案並びに研究の基礎資料とするため、毎年、下水道資源利用に関する調査を実施している。本稿においては、平成23年度の下水汚泥資源の有効利用状況を調査した結果について分析・紹介する。

2. 下水汚泥の有効利用の推移

下水汚泥のマテリアル利用の状況を図1に示す。全国のリサイクル率は、2010年度までは着実に有効利用

が進捗し、78%であったが、2011年度は55%となった。これは、東日本大震災の影響により埋立処分や場内ストックが増えたためと考えられる。実際、2010年度では24千t-DS/年であった、場内保管を含む「その他」の状況の下水汚泥が、2011年度では316千t-DS/年と10倍以上になっている。また、東日本大震災の影響を受けた地域を除いてリサイクル率を算出した場合、2010年度においては68.5%であったのが、2011年度においては68.4%とほぼ横ばいである。

有効利用の内訳としては、近年セメント原料利用等の建設資材利用が進み、2011年度では37%が建設資材

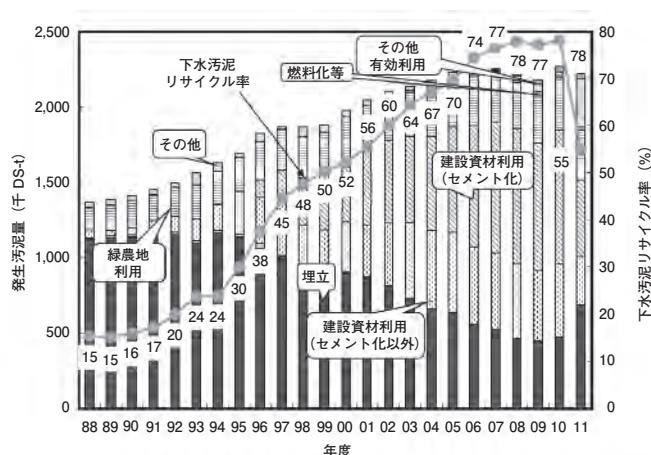
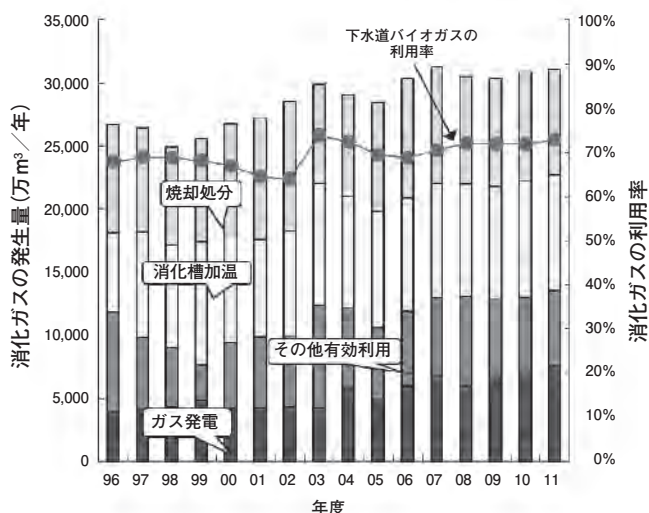


図1 下水汚泥のマテリアル利用の推移



※その他の有効利用としては、焼却補助燃料、汚泥乾燥、場内冷暖房利用等含む。

図2 消化ガスの発生量と利用内訳

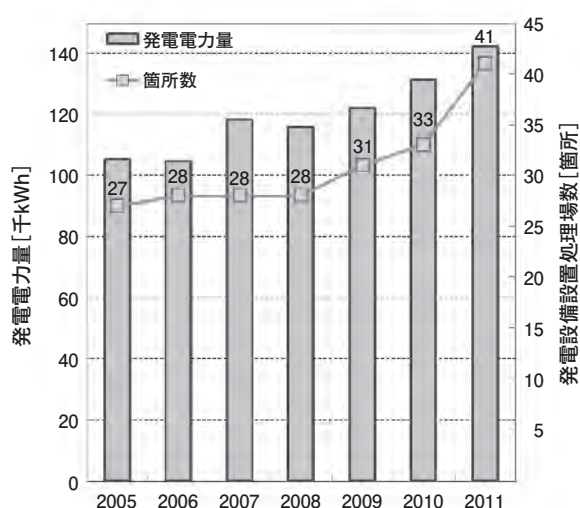


図3 消化ガス発電の発電電力量と処理場数

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（2011年度時点でエネルギー化率13%）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. エネルギー利用の状況

平成24年8月に閣議決定された「社会資本整備重点計画」（計画期間：2012～2016年度）では、下水汚泥中の有機物が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（2010年度：約13%→2016年度目標：約29%）が目標として掲げられている。しかしながら上述のとおり、2011年度時点でエネルギー化率は13%である。ただし、これも東日本大震災の影響を受けた地域を除いてエネルギー化率を算出した場合、2010年度においては13.9%であったのが、2011年度においては15.7%と増加している。下水汚泥のエネルギー利用は、主に下水道バイオガスの利用、固形燃料化であり、この他、下水汚泥焼却廃熱を利用した発電・冷暖房等がある。

3-1 下水道バイオガス（消化ガス）の利用

平成23年度の消化槽からの下水道バイオガス発生量は約3億m³であり、内訳をみると、約7割（227百万m³）が利活用されており、残り約3割（85百万m³）はいまだ焼却処分されている。また、下水道バイオガス発生量の約2割（76百万m³）はガス発電に利活用されているが、約3割（91百万m³）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。

ただし、消化ガス発電の導入は近年進捗している。2011年度における消化ガス発電は全国41箇所の処理場で実施されており、これにより、下水道施設の総電力消費量の約2%分を発電することとなった。現在では、固定価格買取制度により、消化ガス発電を実施することによる採算性は大きく向上しており、これを契機とした消化ガス発電のさらなる導入が期待される。2013年11月時点までに固定価格買取制度による売電の設備認定を受けたのは、横浜市、石川県（以上既設）、栃木県、久留米市、神戸市の5カ所であり、合計で約6,800kWの出力能力となる。

3-2 下水汚泥固形燃料の利用

下水汚泥固形燃料として利用された汚泥量（図1のうち燃料化等）の推移を図4に示す。2001年度においてはほぼゼロであったものが、2013年度では21千DS-t/年の汚泥が燃料化されており、近年増加しつつある。処理場内で製造された下水汚泥固形燃料について

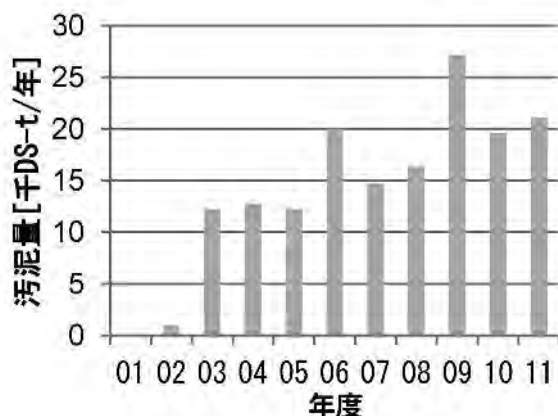


図4 燃料化された汚泥量の推移

表 1 処理場内の固形燃料化施設

No.	事業主体	処理場名	製品区分	施設概要 (wet-t/日)	供用開始
1	福岡県	御笠川那珂川流域下水道 御笠川浄化センター	乾燥	30t/日 (30×1基)	H12 年度
2	東京都	東部スラッジプラント	炭化	300t/日 (100×3基)	H19 年度
3	宮城県	阿武隈川下流流域下水道 県南浄化センター	乾燥	50t/日 (50×1基)	H21 年度
4	広島市	西部水資源再生センター	炭化	100t/日 (50×2基)	H24 年度
5	愛知県	衣浦東部浄化センター	炭化	100t/日 (100×1基)	H24 年度
6	東京都	東部スラッジプラント(その2)	炭化	300t/日	H25 年度
7	熊本市	南部浄化センター	炭化	50t/日 (50×1基)	H25 年度

集計すると、2013年度は製品ベースで約5,900tの燃料を製造している。

また、2013年11月時点までに稼働している処理場内の固形燃料化施設は表1のとおりであり、今後も多くの施設設置が予定されている。なお、下水汚泥固形燃料を用いた発電も、固定価格買取制度の対象である。

4. 浄化槽汚泥等の受入れ

下水処理場において下水汚泥以外の処理を行うこと

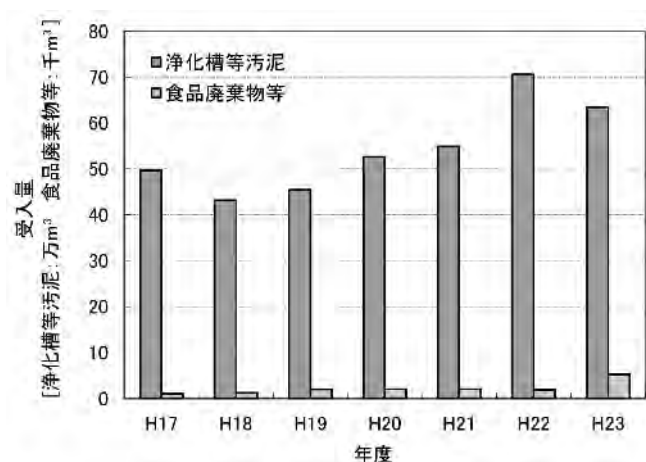


図5 下水処理場に受け入れられた浄化槽汚泥等の量の推移

については、効率的な污水处理の促進の観点から、平成7年度より污水处理施設共同整備事業（M I C S）によって、浄化槽等汚泥の処理について進めてきている。M I C Sは平成24年度末までに、96か所で実施されている。一方、近年は下水汚泥と食品廃棄物など他のバイオマスの混合消化・利用によるエネルギー回収を行い、下水処理場を地域のバイオマス活用の拠点とする考えから、食品廃棄物等の受け入れも行われている。

下水処理場に受け入れられた浄化槽汚泥等の量の推移を図5に示す。平成23年度においては浄化槽等の汚泥が635千m³、食品廃棄物等が5千m³であった（いずれも固形物のt重量との合算）。

5. おわりに

平成22年12月に閣議決定した「バイオマス活用推進計画」においては、2020年度に下水汚泥が約85%利用されることを目指すとされている。また、前述のように「社会資本整備重点計画」では、下水汚泥エネルギー化率（2010年度：約13%→2016年度目標：約29%）が目標として掲げられている。これらの達成のため、国土交通省としても引き続き下水汚泥の有効利用促進に努めてまいる。

ニュース・スポット

関係団体の動き

汚泥肥料の地産地消 地元高等学校と連携した特産物栽培研究

篠山市上下水道部下水道課
下水道係長 岸本 賢一

1. 乾燥汚泥肥料化事業

篠山市には、27箇所の下水道処理区（うち公共下水道が2処理区、特定環境保全公共下水道が8処理区、農業集落排水等が17処理区）があります。これらの処理施設から発生する下水道汚泥等は、平成23年度まではミックス事業により、し尿処理施設「あさぎり苑」で乾燥させて処分しています。現在、市内の処理場からは年間約3,000tの脱水汚泥が発生しており、これらを乾燥させることで約800tの乾燥汚泥が発生しています。

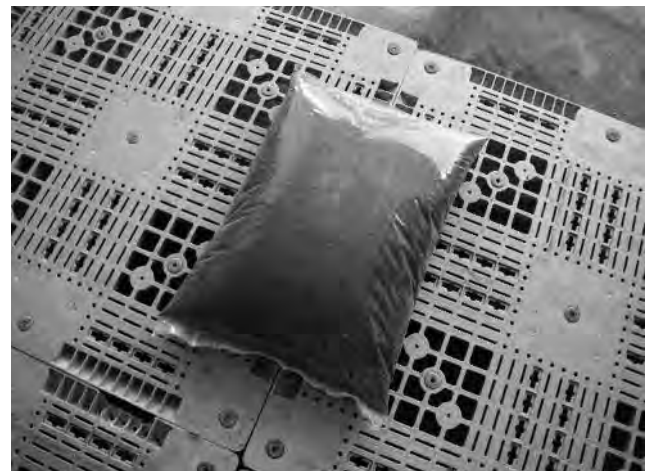
乾燥させた粗粒状の乾燥汚泥は、家庭菜園や緑農地の肥料として全国的にも利用されていることから、篠山市においても汚泥処分量の縮減と資源の有効活用を

目指した循環型社会構築の両面から、乾燥汚泥肥料としての普及拡大と利用促進を図るため、平成25年3月に「篠山市混合汚泥肥料」として農林水産大臣の肥料登録を受けました。

現在は、試験配布期間として、市民の皆さんに無料で汚泥肥料を配布し、家庭菜園や緑農地、市の主要作物（丹波黒大豆、山の芋など）の栽培などにご利用いただいています。また、利用者へのアンケートを実施して市民の皆さんの需要量の把握に努めたり、汚泥肥料のPR等を行ったりしています。

2. 地元高等学校との連携

そうした中で篠山市が兵庫県立篠山東雲高等学校と連携して取り組んでいるのが、汚泥肥料を使って丹波篠山特産の黒豆や山の芋を栽培する合同研究です。今回の合同研究は、汚泥肥料を普及させることにより循環型社会の構築を目指していくという市の施策展開と、市内で発生した汚泥を市内で消費することが環境や生徒たちの教育に役立つのではないかと同校の思いから実現しました。合同研究は2年間かけて行い、同校の農場で生徒たちが、市内の農家などで栽培され



篠山市混合汚泥肥料



兵庫県立篠山東雲高等学校の菊川裕幸教諭と生徒たち
(同校の黒豆栽培圃場にて)



同校の生徒たちによる黒豆の収穫作業（11月）

ている通常の方法と汚泥肥料を使用した方法とで丹波篠山特産の作物を栽培して、その効果を検証する予定。1年目の今年は丹波篠山黒大豆を栽培し、2年目には山の芋を栽培する計画です。

実際に汚泥肥料の使用を始めると、当初に懸念されていた汚泥特有の臭気も散布の際のみで、土壌と混和させることにより緩和されることが確認できました。また、今年の10月から11月に収穫を迎えた丹波篠山黒豆（丹波篠山黒枝豆）の栽培では、枝や葉の生育も順調に推移し、豆の実りも良好な結果となりました。



刈り取った黒豆を手に収穫を喜ぶ生徒たち

3. 丹波篠山の循環型社会の構築を目指して

今後は栽培結果から得られたデータを市民の皆さんに公表し、汚泥肥料の有効性をPRするとともに、汚泥肥料の消費を促すことで肥料の地産地消を目指していきます。また、篠山東雲高等学校との合同研究も今回の栽培試験だけにとどまらず、有効な利用方法などを検討していくものに発展させていきたいと考えています。

そして、市内での汚泥肥料の消費をさらに促して処分費の削減と地産地消の循環型社会の構築をより一層進めていきます。

篠山市混合汚泥肥料の主要な成分（％）

種 別	現 物		
	窒 素	リン酸	カ リ
篠山市混合汚泥肥料	3. 7	3. 2	0. 2

炭素窒素比 11. 1

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. 本誌への投稿は、原則として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に限ります。ただし、共同執筆（4企業以内）の場合は、同上会員以外の団体を含むことができますが、主たる執筆者は会員団体でなければなりません。

（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 技術研究部資源利用研究課

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 03-6206-0679（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	150,000円
後付	1 頁	1 色	縦255×横180	金マリ菊/46.5kg	40,000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（4 月発行号に掲載希望の場合は、2 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 申込み先及び問い合わせ先

広告掲載のお申込み及びお問い合わせ先は、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）
〒135-0046 東京都江東区牡丹2-2-3-105
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143号（平成26年4月発行予定）

第26回下水汚泥の有効利用に関するセミナー特集

【開催予告】

第27回下水汚泥の有効利用に関するセミナー開催について

開催期日：平成26年11月6日(木)～7日(金)

開催場所：佐賀市

「再生と利用」広告掲載申込書

公益社団法人 日本下水道協会 御中

(該当箇所にご記入及び○印を付けて下さい。)

掲 載 希 望 号	() 号
掲載場所・サイズ	表 3 ・ 後付1頁・後付1/2頁
掲 載 料 金	円／回 (消費税込み)
広 告 原 稿	完全原稿 (データ) ・ 新規作成依頼・流用 (一部修正含む)
	※広告原稿を流用 (一部修正含む) できる媒体は、次の本会発行の図書等に限ります。 「下水道協会誌」 (年 月号) 「下水道協会会員名簿」 (年度) 「下水道展ガイドブック」 (年度) 「下水道研究発表会講演集」 (回 年度)
掲載料納入方法	該当月納入 ・ 一括前納
備 考	

上記のとおり申し込みます。

平成 年 月 日

会 社 (団 体) 名 ㊟

住 所 〒

担当者所属・職・氏名 ㊟

TEL
FAX

[広告代理店経由の場合に記入]

広 告 代 理 店 名 ㊟

住 所 〒

担当者所属・職・氏名 ㊟

TEL
FAX

汚泥再資源化活動

第1回下水汚泥由来肥料利用小委員会

日 時：平成25年9月9日（月）

場 所：本会中会議室

出席者：藤原主査、大上、守山（代理）、岡、堀切、井上（研）、三宅、井上（恒）、杉山、岡本、山田、菅原の各委員

議 題：①委員会の設置の経緯について
②目次構成（案）について
③圃場試験について
④今後のスケジュール

概 要：①委員会の設置の経緯について
事務局から資料1のとおり説明を行った。
下水汚泥利用促進マニュアルについては計画・設計等の内容は重視せず、具体例を紹介したマネジメントを主体とすることでまとめることとする。調査検討期間は26年度までの2ヶ年であるが、作業の途中経過は「中間骨子案」として公表予定とする。
②目次構成（案）及びコンセプトについて
事務局から資料2のとおり説明を行った。
現状の目次構成案ではエンドユーザーの視点に適合したものになっていないため、このような視点から、アンケート等を実施しより内容も充実させたもの目次内容を見直すようにする。
③圃場試験について
土壌協会から資料4のとおり説明を行った。
圃場試験の結果、作付期間の短い作物においては窒素化合物画分との正の相関がみられ、長い作物についてはC/N比との負の相関がみられた。
④今後のスケジュール
事務局から資料6のとおり説明を行った。
次回委員会は来年1月頃開催予定とする。

第2回下水汚泥固形燃料JIS原案作成委員

日 時：平成25年9月11日（水）

場 所：日本下水道新技術機構中会議室

出席者：津野委員長、松本、山下、小池、寺尾、山本、落、千葉、松尾（英）、新井、松尾（孝）、岩岡、椎屋の各委員

議 題：①JIS原案の審議について
②規格化に係る性状確認試験について
③運用フローについて
④委員会スケジュールについて

概 要：①JIS原案の審議について
事務局から資料1のとおり説明を行った。
下水汚泥固形燃料の発熱量の区分については現状2段階の「等級」に区分けされているが、このままだと既存の低い等級側の製品が低品質である印象を与えるため、より高発熱量側の等級の固形燃料に技術開発が偏向刷る可能性があるため、「等級」を「区分」に見直す方向とする。また具体的な発熱量の数値区分についても再度吟味することとした。
②規格化に係る性状確認試験について
事務局から資料5のとおり説明を行った。
現状は6ヶ月に1回の測定で管理上問題ないとした。
③運用フローについて
事務局から資料6のとおり説明を行った。
JIS認証においては書面及び現地審査を経て認証となるが、現地審査は製造実績後となり月1回の頻度で行われるため、運用フローについてはそれに合わせて修正することとした。
④委員会スケジュールについて
事務局から資料7のとおり説明を行った。
次回委員会は10月末頃開催予定とする。

第1回下水汚泥エネルギー利用小委員会

日 時：平成25年9月12日（木）

場 所：日本下水道新技術機構特別会議室

出席者：姫野主査、斉藤副主査、安陪、池田、井上、宮川（代理）、八嶋、村岡、田尻、三宅、緒方、日高、碓井、福沢、高田の各委員

議 題：①委員会の設置の経緯について
②目次構成（案）について
③下水汚泥有効利用支援事業について
④今後のスケジュール

概 要：①委員会の設置の経緯について
事務局から資料1のとおり説明を行った。
下水汚泥利用促進マニュアルについては計画・設計等の内容は重視せず、具体例を紹介

したマネジメントを主体とすることでまとめることとする。調査検討期間は26年度までの2ヶ年であるが、作業の途中経過は「中間骨子案」として公表予定とする。

②目次構成（案）及びコンセプトについて事務局から資料2のとおり説明を行った。現状の目次構成案ではどのような技術を載せるのかの細かい表記がない。このため掲載すべき技術の吟味・検討を行い、目次内容に具体的な技術や法令等を明記するようにする。

③下水汚泥有効利用支援事業について事務局から資料4、資料5のとおり説明を行った。

本支援事業はあくまで笠岡市、熊本市に対して消化ガス利用にかかる導入すべき技術を検討しその方向性について、本小委員会にて審議を諮る位置づけとして進めていくこととする。

④今後のスケジュール

事務局から資料6のとおり説明を行った。

次回委員会は来年1月頃開催予定とする。

第1回下水汚泥建設資材利用小委員会

日 時：平成25年9月18日（水）

場 所：本会中会議室

出席者：服部主査、小池副主査、永井、稲葉、木村、桜井、島田、岩見、細川の各委員

議 題：①委員会の設置の経緯について

②目次構成（案）について

③セメント原料化について

④今後のスケジュール

概 要：①委員会の設置の経緯について

事務局から資料1のとおり説明を行った。

下水汚泥利用促進マニュアルについては計画・設計等の内容は重視せず、具体例を紹介したマネジメントを主体とすることでまとめることとする。調査検討期間は26年度までの2ヶ年であるが、作業の途中経過は「中間骨子案」として公表予定とする。

②目次構成（案）及びコンセプトについて事務局から資料2のとおり説明を行った。目次構成案のコンセプトとして、他の自治体の導入の参考となる最新事例を中心に背景・規模等を掲載することとする。

③セメント原料化について

事務局から資料4のとおり説明を行った。

下水汚泥焼却灰のセメント化における放射性物質濃度の扱いについては、セメント協会とも協議しながら記載していくとする。

④今後のスケジュール

事務局から資料7のとおり説明を行った。

次回委員会は来年1月頃開催予定とする。

132回「再生と利用」編集委員会

日 時：平成25年9月26日（木）

場 所：本会第一・二会議室

出席者：野池委員長、尾崎、姫野、安陪、津森、島田、西田、川崎、濱田、工藤、冠城、長谷川、北折、福田、吉村（代理）の各委員

議 題：①第141号「再生と利用」編集内容について

②第142号「再生と利用」編集方針（案）について

③平成26年度計画について

④その他・情報交換について

概 要：①第141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。

②第142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。第142号以降の論説又は特別寄稿の執筆依頼について姫野委員に検討いただくとした。

伊勢崎市の消化ガス発電の取組みについてはグリーン電力認証の取組みについても執筆していただくとする。国交省にて行っている資源有効利用調査やBISTRO下水道についても執筆依頼検討することとする。投稿報告予定の南信サービスは長野県松川町にて地域ぐるみで汚泥リサイクルの取組みを行っておりそのあたりの執筆をいただく。またF I Tの事例紹介では設備認定や補助金の範囲について明確に執筆していただくとする。

③平成26年度計画について

事務局から、資料9のとおり説明を行った。特集テーマについて東日本震災による被災地復興のためのバイオマス利用、メタン発酵からの液肥利用について検討する。特集テーマについてマーケティングの視点とバイオマス事業化事例は統一化も検討する。また講座が特集テーマに脱水工程にも着目したバイオマス利用の紹介も検討することとし、いずれかのテーマに民間活力の取組みなども検討する。

④その他・情報交換について

下水汚泥の有効利用を促進するためには国が下水処理場に明確なバイオマス利用率や電力自給率等の数値を定めるべきであり、国交省としてもベンチマーク指標やF I Tなどを積

極的に活用してもらおうと考えている。また下水汚泥の放射能に対する対処方法についてどのような状況なのかについては、基本は焼却による減量化であり、熱利用等は難しい。しかしながら時間の経過により放射能レベルは低下してきており、処分場などの受け入れは徐々に再開されてきている。今後は7府省庁で行っているバイオマス事業化戦略についても着目していくべきであると考えている。

第3回下水汚泥固形燃料JIS原案作成委員

日時：平成25年10月31日（木）

場所：本会第一・二会議室

議題：①JIS原案の審議について
②JIS原案の解説について
③スケジュールについて

出席者：津野委員長、松本、山下、小池、寺尾、山本、落、千葉、松尾（英）、新井、松尾（孝）、岩岡、椎屋の各委員

概要：①JIS原案の審議について
事務局から資料1のとおり説明を行った。
下水汚泥固形燃料の略称を「BSF」（Biosolids Fuel）とすることとした。また「等級」という表現を改め、「種類」へ変更し、種類は、発熱量8 MJ/Kg以上と、15MJ/Kg以上の2区分とすることとした。
②規格化に係る性状確認試験について
事務局から資料2のとおり説明を行った。
JIS原案解説の「1. 制定の趣旨及び経緯」の文中の「電力需給の逼迫に伴い」を「低炭素型社会の構築」に改め、JIS原案の「2.4原料の考え方」の文中の「BSFの燃料性能を高めるため」を「BSFの原料とするため」に改めることとする。
③スケジュールについて
事務局から資料5のとおり説明を行った。
今回で委員会は終了とし、原案は微修正の後日本規格協会へ提出することとする。

143回「再生と利用」編集担当者会議

日時：平成25年11月14日（木）

場所：本会第三会議室

議題：①第142号「再生と利用」編集内容について
②第143号「再生と利用」編集方針（案）について
③平成26年度計画について
④その他・情報交換について

出席者：島田、津森、川崎、工藤、西本、檀（代理）の各委員

概要：①第142号「再生と利用」編集内容について
事務局から資料3のとおり説明を行った。
口絵紹介する柏崎市の消化ガス発電については、1年後あたりに運転報告事例載せることとする。
来年度の有効利用セミナーを佐賀市で開催することは何らかで掲載することとした。
②第143号「再生と利用」編集方針（案）について
事務局から、資料4のとおり説明を行った。
投稿報告において民間業者の取扱い（広告掲載的な内容に対する掲載料等）について協会内部で今後検討すべきとの意見があった。また下水道資源を積極的に使用していることを写真等で掲載できればインパクトのある記事になるとのことで、11月末に帯広市にてBISTRO下水道推進会合を行うため、コンポスト化施設などの記事をニューススポットでの掲載を予定することとした。
③平成26年度計画について
事務局から、資料8のとおり説明を行った。
特集テーマの「マーケティング拡大の工夫」についてはテーマとしての位置付けが難しいものと考え、肥料利用等についてユーザサイドに直接アンケートを実施しこのあたりの要因分析が可能か検討することとした。また海外の有効利用動向についても掲載可能か検討してほしいとの要望を受けた。今年度、地球温暖化にかかるIPCCの報告がなされたため、それに関連したテーマを模索していくこととした。
④その他・情報交換について
山形市の下水汚泥肥料については農協を通じて販売しているためユーザサイドのニーズはあまり見えていないとのことであった。また大阪市ではオール大阪として下水道も含めて省エネに係るCO₂やN₂Oの削減に向けた取り組みを行っているとのことであった。

日 誌

平成25年 6 月 9 日	第 1 回下水汚泥由来肥料利用小委員会	本会中会議室
平成25年 9 月11日	第 2 回下水汚泥固形燃料 J I S 原案作成委員会	日本下水道新技術機構中会議室
平成25年 9 月12日	第 1 回下水汚泥エネルギー利用小委員会	日本下水道新技術機構特別会議室
平成25年 9 月18日	第 1 回下水汚泥建設資材利用小委員会	本会中会議室
平成25年 9 月26日	第132回「再生と利用」編集委員会	本会第一・二会議室
平成25年10月31日	第 3 回下水汚泥固形燃料 J I S 原案作成委員会	本会第一・二会議室
平成25年11月14日	第143号「再生と利用」編集担当者会議	本会第三会議室

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：「下水道をとりまく水環境の展望－環境リスクから生物多様性を守る－」
特 集：第26回下水汚泥の有効利用に関するセミナー特集（黒部市）
「黒部市下水道バイオマスエネルギー利活用事業について」
「下水汚泥資源利用の動向と今後の施策について」
「コンパクトなまちづくりと下水道事業について」
「下水道施設を利用した下水汚泥および有機性廃棄物の有効利用に関する土木研究所の最前線」
「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り組み」
「下水道汚泥利用促進に関する下水道新技術機構の取り組み」
「平成24年度下水汚泥由来肥料の窒素肥効効果試験について」

研究紹介：「微生物を用いた消化汚泥の資源化」
「下水汚泥焼却灰を活用した産学官連携研究の概要」
講 座：リン資源化新技術開発
「排水中のリンを回収・肥料化する技術開発」
投稿報告：「下水汚泥固形燃料化システムの実用化」
「消化ガスの火力発電利用による効果」
「汚泥発酵肥料「サツマソイル」の利用促進」
報 告：「第26回下水汚泥の有効利用に関するセミナー総合討議概要」
ニューススポット：BISTRO下水道推進チーム会合報告
そ の 他：会報、行事報告、次号予告、関係団体の動き

「再生と利用」編集委員会委員名簿

		(順不同・敬称略)
		(25.12.1現在)
委 員 長	日本大学大学院教授・東北大学名誉教授	野 池 達 也
委 員	秋田県立大学生物資源科学部教授	尾 崎 保 夫
委 員	長岡技術科学大学准教授	姫 野 修 司
委 員	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	安 陪 達 哉
委 員	独立行政法人土木研究所材料資源研究グループ上席研究員（リサイクル）	津 森 ジュン
委 員	地方共同法人日本下水道事業団技術戦略部戸田技術開発分課長代理	島 田 正 夫
委 員	(独)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主任研究員	西 田 瑞 彦
委 員	(独)農業環境技術研究所連携推進室長	川 崎 晃 男
委 員	(一財)日本土壌協会参与土壌部長兼広報部長	仲 谷 紀 男
委 員	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
委 員	札幌市建設局下水道施設部豊平川水処理センター管理係長	濱 田 敏 裕
委 員	山形市上下水道部浄化センター水質係長	工 藤 守 彦
委 員	横浜市環境創造局下水道施設部栄第二水再生センター長	長谷川 輝 彦
委 員	名古屋市上下水道局技術本部計画部技術管理課主査（技術開発）	北 折 康 徳
委 員	大阪市建設局下水道河川部水環境課担当係長	西 本 裕 二
委 員	広島市下水道局管理部管理課水質管理担当課長	福 田 佳 之
委 員	福岡市道路下水道局下水道施設部施設管理課長	崎 野 寛

図書案内

下水汚泥分析方法—2007年版—

—下水汚泥の緑農地利用における良質な製品の提供・円滑な流通を図るため—

2008.1 発行 A 4 版 (270頁) 価格5,500円 会員価格4,500円

本書は、下水汚泥を緑農地利用するに際し、品質管理のための分析方法をまとめた1996年版を改訂したものです。関連する肥料取締法、廃棄物の処理および清掃に関する法律および下水道法等の法改正や分析装置を含む分析方法の進歩等をふまえ、分析項目および分析方法の見直しや充実に努めています。

主な改訂を目次（追加項目を下線）にて示すと、以下のとおりです。

目 次

- | | | |
|-------------------|--------------------|--------------------|
| 1. 通則 | 8.1 バックグラウンド | 9.25.2 水素化合物発生 |
| 1.1 適用範囲 | 8.2 干渉 | ICP発光分光分析法 |
| 1.2 原子量 | 8.3 ICP発光分光分析法準備操作 | 9.26 セレン |
| 1.3 質量及び体積 | 8.4 ICP発光分光分析法測定操作 | 9.26.3 水素化合物発生ICP発 |
| 1.4 温度 | 付 ICP質量分析法 | 光分光分析法 |
| 1.5 試薬 | 9. 各成分定量法 | 9.27 ケイ素 |
| 1.6 機器分析法 | 9.1 アルミニウム | 9.28 スズ |
| 1.7 試料 | 9.2 ヒ素 | 9.28.1 原子吸光法 |
| 1.8 結果の表示 | 9.2.3 水素化合物発生 | 9.28.2 ICP発光分光分析法 |
| 1.9 用語 | ICP発光分光分析法 | 9.29 バナジウム |
| 2. 試料の採取と調製 | 9.3 ホウ素 | 9.30 亜鉛 |
| 2.1 試料の採取 | 9.4 炭素 | 10. 人為起源物質 |
| 2.2 調製法 | 9.5 カルシウム | 10.1 PCB |
| 3. 水分 | 9.6 カドミウム | 10.1.1 ガスクロマトグラフ法 |
| 3.1 加熱減量法 | 9.7 塩素（塩化物） | 10.2 アルキル水銀化合物 |
| 4. 灰分 | 9.8 コバルト | 10.2.1 ガスクロマトグラフ法 |
| 4.1 強熱灰化法 | 9.9 クロム | 10.3 揮発性有機化合物 |
| 5. 強熱減量 | 9.10 六価クロム | 10.3.1 ガスクロマトグラフ質 |
| 5.1 強熱灰化法 | 9.10.1 原子吸光法 | 量分析法 |
| 6. 原子吸光法及びICP（誘導結 | 9.10.2 ICP発光分光分析法 | 10.4 農薬類 |
| 合プラズマ）発光分光分析法に | 9.11 銅 | 10.4.1 有機リン農薬（EPN, |
| よる定量方法通則 | 9.12 フッ素 | パラチオン, メチルパラチオン） |
| 6.1 要旨 | 9.13 鉄 | ガスクロマトグラフ法 |
| 6.2 金属等の測定 | 9.14 水銀 | 10.4.2 農薬類 ガスクロマト |
| 6.3 試薬の調製 | 9.15 カリウム | グラフ質量分析法 |
| 6.4 前処理操作 | 9.16 マグネシウム | 11. その他の試験 |
| 7. 原子吸光法による測定時の干渉 | 9.17 マンガン | 11.1 pH |
| 7.1 要旨 | 9.18 モリブデン | 11.2 酸素消費量 |
| 7.2 物理的干渉 | 9.19 窒素 | 11.3 炭素・窒素比 |
| 7.3 分光学的干渉 | 9.20 ナトリウム | 11.4 電気伝導率 |
| 7.4 イオン化干渉 | 9.21 ニッケル | 11.5 植物に対する害に関する栽 |
| 7.5 化学的干渉 | 9.22 リン | 培試験の方法 |
| 7.6 バックグラウンド吸収 | 9.23 鉛 | 【参考資料】 |
| 7.7 準備操作 | 9.24 硫黄 | 1. 幼植物試験とは |
| 7.8 測定操作 | 9.25 アンチモン | 2. 融合コンポスト |
| 8. ICP発光分光分析法による測 | 9.25.1 水素化合物発生 | 付録. 原子量表 |
| 定時の干渉 | 原子吸光法 | 巻末資料 |

編 集 後 記

決算書等を作成すること、会社経営を会計的に見ることができる経理マンが求められています。

その経理マンの仕事は、①経営の意思決定に役立つ材料を提供する（「管理会計」）、②株主への報告及び税務調査に的確に対応する（「財務会計」）、の2つに要約できるといわれます。

会社や組織を継続する（存続する）、顧客へのサービスを持続するためには、経理マンでなくても、「管理会計」（経営を会計的に見る）をできる必要があるそうです。

そこで、会社経営上、決算書等を会計的に見る論点を考えてみます。1）固定資産の3つの区分：建物や土地、設備等、形のあるものが①「有形固定資産」（「建設仮勘定」は建設中のもの）、コンピューターのソフトウェア等形のないものは②「無形固定資産」、子会社株式等は③「投資その他の資産」に区分されます。2）売上に対応する分だけ「減価償却費」計上：減価償却とは、建物や設備等減価償却資産の帳簿価額の耐用年数分の一を毎年、費用＝減価償却費として償却する手続で、資産の帳簿価額から時間が経ち古びて価値が減った分を減らすのですが、減った分の資産を費用に移すため、残高試算表のバランスは崩れません。使える期間にわたって減価償却し、その年度の売上を上げるのにかかった分を費用として計上します（「費用収益対応の原則」）。3）キャッシュフローは「現金利益」：「自己金融」と呼ばれる「減価償却費」のように、経費になっているがお金が出ないものがあります。バランスシート（貸借対照表）の中に資産が計上されますが、現金でないもの、現金化すると目減りするものがあるため注意してください。例えば、含み益は換金してみないと、在庫は売ってみないとキャッシュの保証がありません。一方、設備投資は償却資産化した時から減価するため、減価償却費が計上でき、お金が出ないので、キャッシュフロー上プラスです。4）損益計算書の見方：ビジネス・商売上の取引を数字に置き換える作業は「帳簿をつける」、帳簿に付けられな

いビジネスは、商売ではないともいわれます。転記ミスをしていないことが経理マンの必要条件で、今はパソコン入力ですが、IT化されたからといって会計の仕組みが変わりません。割に合わないこと、損になることを「間尺に合わない」（間と尺は建築物の寸法）、転じて「損得計算」のたとえに使われ、また「入るを量りて、出ずるを為す」（収入を考えて支出を決める）は端的に「損益計算書」を表し、収入の範囲内で経費を使っていれば赤字になりません。5）目標利益から売上の逆算：利益から損益計算書を考えて、利益に目標を持たせる、目標利益（必要利益）から必要売上を逆算します（いくら利益を出すか、遡って売上に辿り着く）。利益から出発し、販管費のどこがムダか、仕入れは安くならないか、売上はどうすれば上げられるか、そんなやり方や手順を明確にします。6）貸借対照表と損益計算書は同時：決算では、貸借対照表の資産・負債・純資産の残高とともに、利益（損益）に関する科目の残高、すなわち損益計算書の収益・費用の残高も集計されます。残高試算表の収益と費用に段差（これは利益）があり、貸借対照表に利益が加わって「資産」と「負債＋純資産」にも段差ができますが、これを上下分離すれば、「損益計算書の基本形（収益－費用＝利益）」と「前期よりも利益の分だけ純資産が大きくなったこと」が分かります。

貸借対照表（お金の運用とお金の調達を表す）は、右側がインプット（投入）、左側がアウトプット（成果）で、左右の合計は一致しますから、お金の流れは一目で分かります。今後、有効利用の促進のために、ユーザー目線を踏まえ経営者の立場に立って、マーケティング戦略を検討し、その目標として、最小のインプットで最大のアウトプットの産出が求められるのではないのでしょうか。一方、人生のバランスシートは、複式簿記のように左右が一致する、帳尻が合うとは限らないようですが、沈む夕陽を追いかけること、夕陽とともに歩んでいくことはできそうです。（AK）

「再生と利用」

Vol. 38 No. 142 (2014)

平成26年1月31日 発行
(平成25年第3)

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

日本土壌協会は、土壌の健全な維持と 環境保全型農業の推進に貢献します。

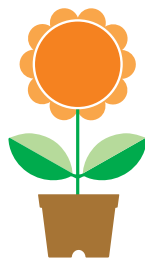
- ・堆肥等資材の特性評価試験、施用効果試験
- ・農作物の生育、収量、品質を対象とした土壌調査
- ・土壌医検定・資格と研修事業の実施
- ・土づくり推進フォーラム開催等の情報提供活動
- ・「土づくりとエコ農業(年6回発行隔月)」等、刊行物の出版
- ・エコファーマーネットワーク化への推進



本誌「土づくりとエコ農業」
(年6回発行隔月)

一般財団法人 **日本土壌協会**
<http://www.japan-soil.net>

〒101-0051
東京都千代田区神田神保町1-58 パピロスビル6階
TEL.03-3292-7281 FAX.03-3219-1646



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