

第五十八回定例研究会 「下水道とエネルギー」

「下水道とエネルギー・資源」

大阪市立大学大学院教授 貫上佳則

ただ今ご紹介いただきました、大阪市大貫上です。

今日の話ですが、処理水、汚泥の有効利用について、資源化の話と、エネルギー利用の話が今日はメインになるかと思えます。さらに、その他の利用、新しい取り組みについて話をさせて頂けたらと思います。

下水処理場の処理過程では、汚水処理系と汚泥処理系があります。下水処理場で有効利用、あるいはエネルギー利用出来るとなると、下水処理水と、発生する下水汚泥、消化タンクから発生するバイオガス、それと焼却灰等々があります。これらが下水道資源として

第一に有効活用するものになると思います。

1 下水道の目的

下水道法では、雨水排除、汚水排除と汚水処理、の3つが下水道の目的となっています。今後はこれらだけでなく、下水道の問題として震災対策、耐震化、再生可能エネルギーの創出などが、大事になってくるだろうと思います。

洪水対策、雨水対策、これも下水道の一つの大きな目的となっています。特に最近多い10年に1回の大雨が毎年降るような状況、いわゆるゲリラ豪雨に対して貯留管や浸透

施設が設けられたりしています。

下水道の水質保全に関する役割ですが、図

1の大阪府

のホームページ

を見ますと、

下水道の普及

率が上がるに

したがって、

生活排水に起

因する汚濁物

の負荷量が緩

やかに減少し

ていきます。

一方、産業排

水に起因する

汚濁負荷量は、昭和四十五年あたりから急に

減り、改善していることが分かります。

同様に、図12の横浜市のホームページの

グラフを見ますと下水道の普及率が高くなる

にしたがって、周辺の鶴見川や大岡川の水質

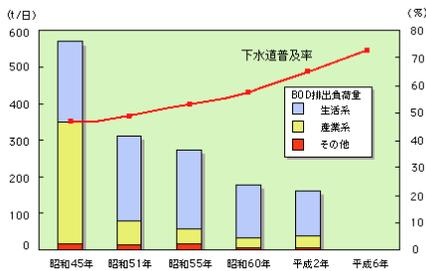


図-1 大阪府における下水道普及率とBOD排出負荷量の変遷

出典 大阪府ホームページ

が大きく改善していることが分かりま

すし、琵琶

湖におきま

しても、図

3のよう

に、滋賀県

の下水道普

及率が上が

るにしたが

って、南湖

に流入する

河川の水質

(BOD)

が大きく低

下して、南湖の水質も改善されています。

このように下水道の3つの目的については、

おおよそ達成しているものと認識して良いかと

思います。

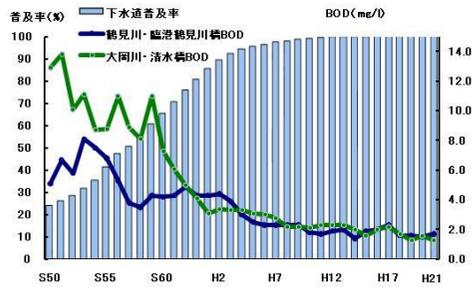


図-2 横浜市における下水道普及率と市内河川のBOD濃度の変遷

出典 横浜市ホームページ

ただ、

東日本大震災でのマンホール、下水管に対する被害の例を見ますと、地盤の液状化により地下に埋設された下水管が不等沈下したり、マンホール等が浮上して、多くの被害が出ています。

また、パイプだけではなくて、処理場も大きな被害を受けています。今回の東日本大震災でも、特に仙台市、あるいは岩手県の下水処理場を中心に大きな被害を受けています。

最近、大阪府の検討会で震災時の被害予測



図-3 滋賀県の下水道普及率と南湖流入河川、南湖のBOD濃度の変遷
滋賀県ホームページ

が更新されたと報告されており、関西、特に大阪の直下型の地震が非常に気になるところで、それに対する耐震化対策が大きな課題になっております。

次に、下水道のポテンシャルとして、国土交通省では図-4に示すようなものが議論され、注目されています。

1つは、下水・下水処理水の持てるポテンシャルで、下水熱に関するものです。これに

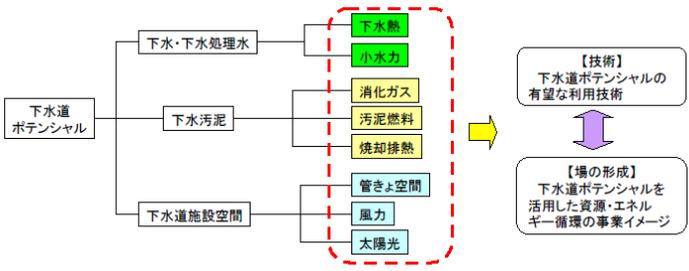


図-4 下水道ポテンシャル

については、大阪市でもB・DASHプロジェクトで、海老江下水処理場でプロジェクトが進んでいますし、ほかのところでもプロジェクトが進められつつあるところです。また、わずかな落差を使つての小水力発電に取り組まれているところもあります。

下水汚泥につきましては、消化ガス（メタン発酵）を使ったエネルギー化もありますし、最近では汚泥炭化の話も注目を浴びています。

それから、下水汚泥の焼却をしたときの排熱をエネルギーとして位置付け利用されているところ、太陽光パネルを広いスペースを活用して発電したり、風力発電をされているところ、あるいは、管渠空間を利用されているところなどもあります。

2 下水処理水の有効利用の現状

処理水のお話をする前に、水の利用ということで、まず地球上にどれだけ水があつて、われわれが人間としてどれだけ水を使つてい

るかという話をさせていただきます。

国土交通省がとりまとめている『日本の水資源』では、図-5に示すように、水の惑星といわれている地球の上には約14億 km^3 という膨大な量の水がありますが、大半が

海水です。淡水は、わずか2.5%しかありません。淡水は、そのうち3分の2が氷河といふかたちで固定されて、表流水は3分の1しかありません。その3分の1の水も8割が

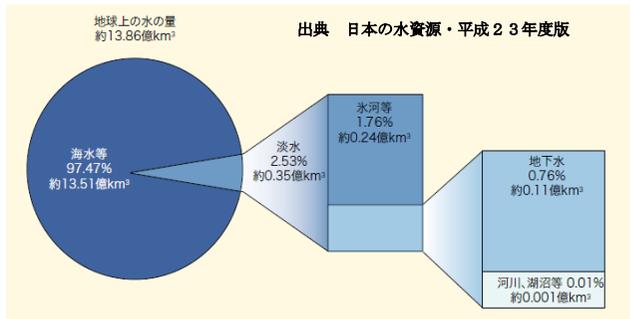


図-5 地球上の水資源量

地下水で、地下を下を流れていきます。河川、湖沼等にある表流水は全体の0.01%の約14万km³しかないことになります。

今、世界人口は約七〇億人ですから、365日で単純に割りますと、全世界平均して1人1日約33トンとなります。他の動植物等

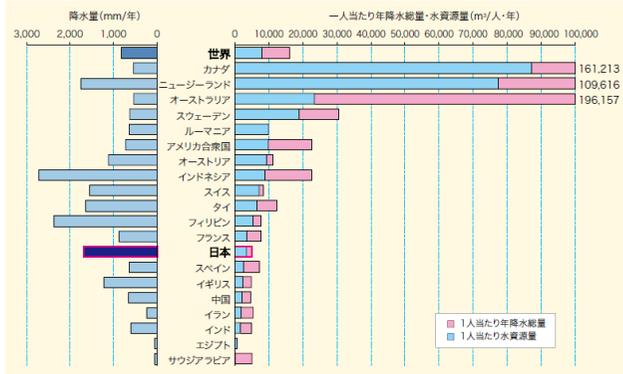


図-6 各国の降水量と一人あたりの水資源量
出典 日本の水資源・平成23年度版

にはまったく水資源を渡さなければこのような数字になるわけで、決して多くないと思っています。

地球上の場所によっては降水量も当然異なります。日本は年間約1700ミリも降水量があり、世界平均の約2倍もありますので、水の豊かな国だと考えられています。しかし、図-6の通り、日本の水資源賦存量（降水量―蒸発量）は年間1人当たり約5000トンで世界平均の5分の1しかなく、水は決して豊かではないというのが現状です。

その豊かではない水の使用量は図-7のような内訳で、生活用水（水道水）として利用されているのは、年間で約140億トンです。基本的にはこれがそのまま下水として処理されていることになります。

この膨大な量の下水処理水を有効活用したところですが、現状では下水処理水の再利用率は2%もありません。その内訳は、修景用水、河川維持用水、融雪水などで、合計2

億約ト
ンぐら
いしか
使つて
いない
のが現
状です。
東京
都のホ
ームペ
ージに
よると、
東京都
では清
流を復
活させ
るために河川維持用水として使ったり、一部
雑用水、いわゆる中水道というかたちで使つ
たり、その他、モノレールの洗浄用水などに
使われています。

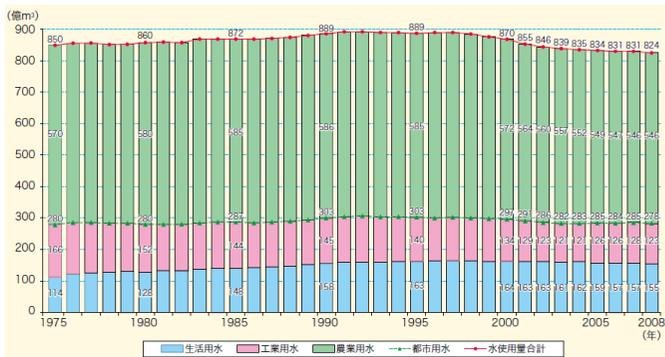


図-7 我が国の水資源利用量の内訳とその変遷

出典 日本の水資源・平成23年度版

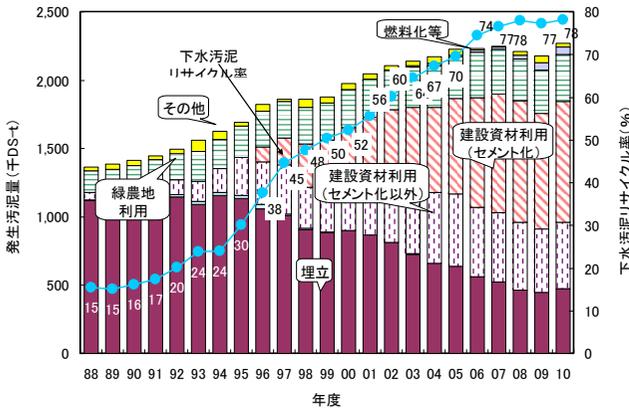
その他、夏場のヒートアイランドの対策として、処理水を道路に散水することでヒートアイランド現象を抑えようという利用の仕方もあるされています。大阪では、十五年ほど前からこのような取り組みをされていたと聞いています。

さらに、堺市の三室下水処理場では一年半ほど前から、処理水を湾岸沿岸部のシャープの工場群に工業用水として供給する事業が行なわれています。高度処理後の下水処理水を、さらに繊維ろ過とオゾン処理をし、計画では3万トン/日供給されており、国内では最大級の下水処理水の有効利用の事例であると思っております。

3 下水汚泥の有効利用の現状

下水処理で発生する下水汚泥中の固形物の内訳は約2割が無機分、残りの約8割が有機分です。無機分はセメント原料、レンガ、骨材、土壌改良剤等いろいろな建設資材化が行

われていきます。一方、約8割を占める有機物は、以前から肥料化（コンポスト化）が行われており、徐々に利用量が増加しております。



図一 8 我が国の下水汚泥発生量とその有効利用・処分量の変遷

出典 国土交通省下水道部ホームページ

その他、エネルギー利用としては、下水道バイオガスの利用と固形燃料化という2つが、大きな有効利用の方法となっています。

図一8に示すとおり、一九八八年の段階では、我が国全体で下水汚泥は乾燥固形物量として年間約130万トン発生しておりましたが、そのうちの9割が最終的に埋立処分されてきました。その後、下水道普及率の増加に伴って下水汚泥の発生量も増えましたが、埋め立て処分量は減少し、二〇一〇年度ではその割合は2割以下まで減少しており、下水汚泥のリサイクル率は80%近くまで達成されています。

埋め立て処分量を減少することができたのは、一九九〇年代から広がってきた汚泥の建設資材化利用技術であり、発生している汚泥の約6割がセメントやレンガ、ブロック、軽量骨材などの建設材料として有効利用されています。特に一九九〇年代からはセメント原料として有効利用される割合が増加して、

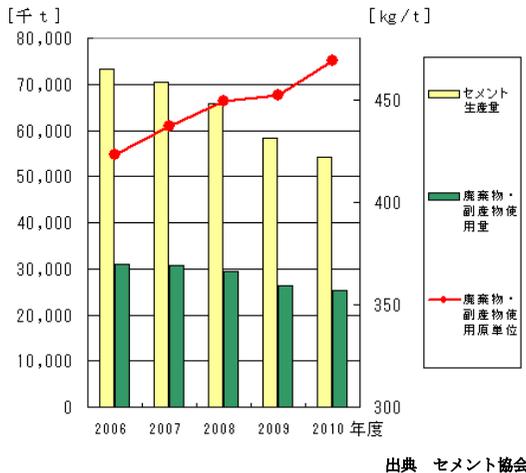
現状では発生汚泥量の約4割にも達していません。

そもそもセメントとは、カルシウムとケイ素、アルミ、および鉄、この4つの元素の比率をうまくブレンドして焼成し、石膏を加えて粉砕したものです。その原料は何であつても構わなくて、その4つの元素の比率が重要です。下水汚泥中にもカルシウムやケイ素、アルミ、鉄が含まれていますので、下水汚泥もセメント原料として使えることになりました。ただ、リンが多く入っていると、硬化時間が遅くなるという性質があるので注意が必要です。

図19にセメント生産量と、廃棄物・副産物使用量を示しますが、二〇〇六年時点では国内向けのみでセメント生産量が年間約700万トンでしたが、二〇一〇年度には約5500万トンまで減少しています。

ただ、セメント1トンをつくるのに、原燃料として約1.4トン必要です。図19から

は下水汚泥や浄水汚泥、石炭灰、スラグ、廃タイヤ、都市ゴミ焼却灰などの廃棄物・副産物がセメント生産に利用されており、その量



出典 セメント協会
図9 我が国のセメント生産量と廃棄物・副産物使用量の変遷

は二〇一〇年度で約2500万トンと膨大な量が有効活用されており、原料の約3分の1はこのような廃棄物・副産物が利用されてい

ます。図―9でお示ししたとおり、下水汚泥発生量（乾燥固形物量）が約230万トンですからセメント製造に活用されている廃棄物・副産物量の10分の1以下ですので、下水汚泥のセメント原料化としての有効利用の割合が増加しています。このように、セメント業界は非常に有望なリサイクル業だと言えると思います。ただ、セメント原料化で一番のネックは何かというところ、セメント工場は石灰岩の産地近くに設置されているため、国内に分散して設置されていないということ。近畿圏でもセメント工場はあまり近くには存在しないため、下水汚泥焼却灰の運搬コストが問題になります。

4 下水汚泥の有効利用(リン資源などの回収)

下水汚泥の無機物利用という点で、リン回収の話もおきたいと思います。

下水の高度処理で、富栄養化対策として窒素やリンを除去しています。しかし、それら

は植物プランクトンである藻類にとつては栄養源であり、農業分野では、窒素、リン酸、カリウムは三大必須元素となります。

一方、日本にはまったくリン資源が存在しないため、国内消費量の全量を輸入しています。しかし、世界のリン鉱石の埋蔵量は今世紀中には枯渇すると言われています。我が国のリン鉱石の主要輸入相手国は、ここ二十五年間でアメリカ、中国、南アフリカと大きく変化しました。その理由は、アメリカや中国で自国の農業生産を保護するためにリン鉱石の輸出規制措置がとられたためであり、数年前にはリン鉱石の価格が一時的に3倍、4倍にはね上がりました。そのため、日本国内でのリンのリサイクルが不可欠となってきます。リン鉱石といっても、リンの成分は約3分の1しか含まれておらず、下水汚泥焼却灰には約4分の1もリンが含まれています。そのため、下水汚泥の焼却灰からリンを抽出する技術や、液体状のリン酸（オルトリン酸）、リ

ン酸イオンからリンを回収する技術などのプロジェクトが進められています。また、消化汚泥の脱離水からリンを回収する技術としてMAP法、HAP法、凝集沈殿法なども開発されています。さらに、処理水からリンを回収する吸着技術なども開発されています。

焼却灰からのリンの回収する技術となりますと、LOTUSプロジェクトとして取り上げられた技術があります。5～6年前ですが、岐阜市で作られたプラントで、焼却灰4トン/日からアルカリ、苛性ソーダを用いて抽出するということかたちで精製し、700kg/日近くのリンが回収されています。

MAP法は、リン酸マグネシウムアンモニウムという結晶構造物にしてリンを回収するものです。難溶性のリンにするためにマグネシウムを添加することと、アルカリ条件にすることがポイントです。マグネシウムが薬剤としてはコストがかかりますので、そのコスト高がネックになっています。ただ、重金属

などの不純物をほとんど含まない遅効性の肥料として有望なので、MAP法は脚光を浴びつつあります。

カルシウムを使ったHAP法もあります。同じようにしてカルシウムを添加してアルカリにして、リン酸ヒドロキシアパタイトという形態にして回収します。リン肥料工場の原料として有効活用できるということで、実用化が検討されています。

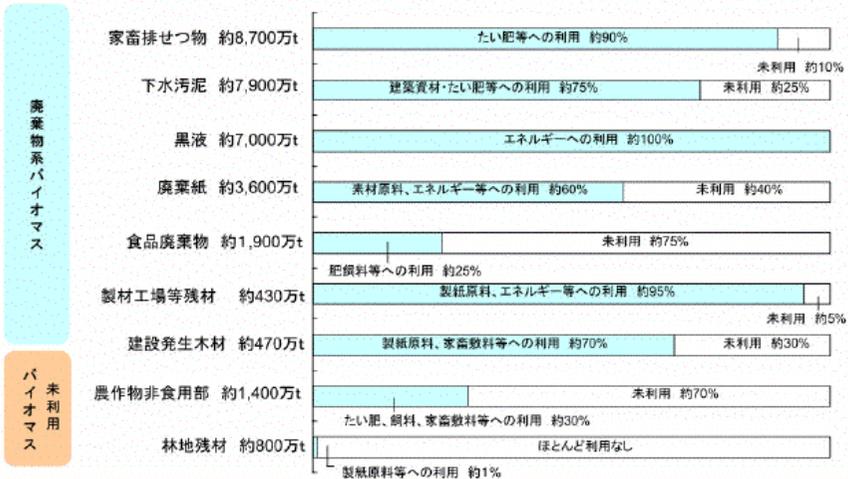
その他、無機物を回収するという意味では、長野県流域下水道豊田終末処理場で金を回収しているという記事が新聞で大きく取り上げられました。1トンの焼却灰から2キロの金が採れるということですが、まれな例だと思っています。金だけでなく、下水汚泥中にレアメタルもあるのではと、調査がすすめられています。

5 下水汚泥の有効利用（バイオガス化）

下水汚泥の有機物はバイオマスとして認識

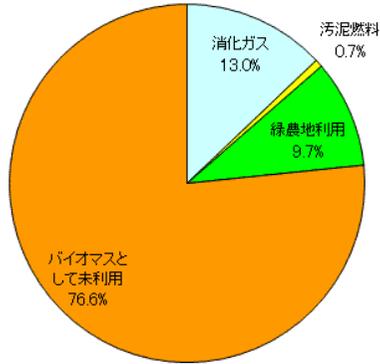
されています。図10はバイオマス・ニッポン総合戦略会議でとりまとめられた図です。廃棄物系のバイオマスと未利用バイオマスの2つに大きく分類されています。

バイオマスの資源化、あるいはエネルギー化には、需要先である都心部に近いところで発生し、かつ有効利用率の低いものが有望なものになるわけですが、下水汚泥は都心で発生し、かつ発生量が多く（年間約8000万トン…湿重量として）、有効利用率が約23%と低いために有望なバイオマスとみることができません。図10では有効利用率が75%と高く表示されていますが、これは無機物の有効利用量を加味した数値であり、有機分のみに限って有効利用率を計算すると、図11に示す通り、消化ガスとして有効活用されている割合が13%、コンポストとして利用されている割合が約10%、その他固形燃料の割合も含めても4分の1にしかなりません。4分の3は焼却されて減容化され、有機



出典 「第12回バイオマス・ニッポン総合戦略推進会議およびバイオマス・ニッポン総合戦略推進7*パイザリーグループ会合同会議参考資料」(2009)

図10 我が国のバイオマス賦存量とその有効利用量



(総バイオマス量177万トン)

図一 1 1 下水汚泥中の有機物の有効利用率

出典 国土交通省下水道部ホームページ

物としては有効活用されていないのが現状です。そのため、下水汚泥中の有機分の有効活用を進めることが課題です。

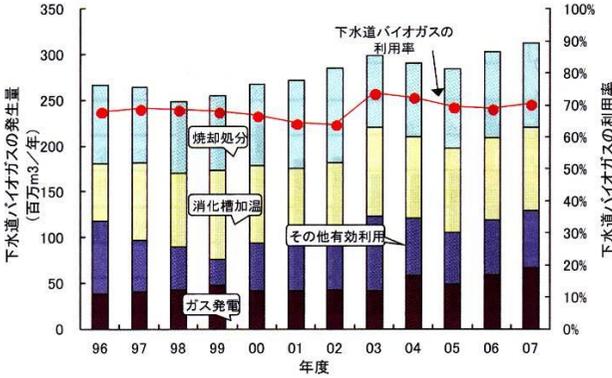
その1つが汚泥のメタン発酵処理によるバイオガスとしての利用です。年間約145億トンの流入下水を処理すると濃縮汚泥が約4億6000万トン発生します。この中の固形物量が約230万トンで、このうち消化タン

クで処理されている量は約70万トン、発生している濃縮汚泥の約3割に過ぎません。約3割の濃縮汚泥からバイオガスが年間約3億N_m³発生しており、バイオガスのうち約3分の2がメタンガスです。年間約2億N_m³ものメタンガスが下水汚泥から生み出されていることとなります。国内のLNG(液化天然ガス)の販売量が約330億N_m³/年ですので、下水汚泥由来のメタンガス量は約0.6%もの量に相当することになります。国内すべての下水汚泥をメタン発酵処理すれば、その発生量は国内LNG販売量の2%近くに相当する量になり、カーボンニュートラルなエネルギーとして認識されている下水汚泥由来のメタンガスの有効活用はCO₂の発生抑制に大きく貢献できるといえます。

図一 1 2は日本全国で発生する下水汚泥からのバイオガスの用途をまとめられたものです。消化タンクは加熱しないといけませんので、発生しているバイオガスの約3割が消化

槽の加温熱源として使用され、2割弱が下水汚泥の焼却炉の補助燃料や汚泥乾燥の燃料、あるいは施設の空調用の燃料として使われています。

バイオガス発電に用いられているのは約2割に過ぎず、残りの約25%焼却処分されています。このように、処分されているバイオガスの有効利用が大きな課題です。



図ー1 2 我が国の下水道バイオガス発生量とその利用割合の変遷

出典 白崎 下水道協会誌(2011)

ガス発電以外の事例として、ガスの改質後に燃料電池で発電する例や、消化タンクで発生したバイオガスを市バスの燃料に使ったり、さらに成分調整して、ガス管に直接注入して都市ガスとして有効利用している神戸市の事例もあります。

バイオマスの利用をもっと進めていくべきですが、下水だけで事業を進めていくのではなく、生ごみや家畜排泄物、剪定枝を入れるなど、下水以外のバイオマスとともにメタン発酵することで、バイオガスをより多く生み出すことも検討されています。

その一例として、能登半島の先端にあります約2万人の珠洲市では、下水処理場のメタン発酵槽に生ごみ、農業集落排水処理施設の汚泥、浄化槽汚泥も一緒にメタン発酵処理され、発生したバイオガスは消化槽の加温だけでなく、コンポスト製造時の熱源として活用されています。

また黒部市では、下水処理場の消化槽で下

水汚泥だけではなく、地元の特産のコーヒー粕（産業廃棄物）も加えてバイオガスの発生量を増やしバイオガス発電で電力を処理場に還元しています。さらに、メタン発酵の残さは固形燃料化して、それを電力事業者に渡し、有効活用されています。

6. 下水汚泥の有効利用（炭化）

下水汚泥を無酸素状態で蒸し焼きにして水素と酸素をガス化して取り除き、炭素を残して炭化することで固形燃料や吸着材として利用することが普及し始めています。炭化温度によって高温炭化、中温炭化、低温炭化と大別されますが、低温炭化処理が中心で普及され始めています。また、炭化物の発熱量は石炭の約半分から3分の2程度であり、発熱量以外の特性は石炭とあまり遜色ないため、主に石炭火力発電所で石炭の代替物として有効利用されています。

もう1つ、電力事業者に対しては「電力事

業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法」（通称…RPS法）で新エネルギーを一定量以上活用することが義務付けられており、下水汚泥の炭化物がRPS法の対象物としてカウントできることが大きなメリットです。実際に、石炭火力発電所では使用されている輸

入石炭の5%ぐら
いまで下
水汚泥炭
化物を混
入させて
も、施設
運用上、
まったく
問題ない
ことが確
認されて
おり、表

表一1 我が国における下水汚泥炭化処理の事例

| 自治体 | 東京都 | 愛知県 | 広島市 | 熊本市 | 大阪市 |
|---------------|------------|------------|-------------|-----------|------------|
| 処理場 | 砂町水再生センター | 衣浦東部浄化センター | 西部水資源再生センター | 南部浄化センター | 平野下水処理場 |
| 発電所 | 常盤共同火力・勿来 | 中部電力・碧南火力 | Jパワー・竹原火力 | Jパワー・松浦火力 | Jパワー・高砂火力 |
| 事業開始 | H19 | H24 | H24 | H25 | H26竣工予定 |
| 炭化方式 | 中温炭化(500℃) | 中温炭化(500℃) | 低温炭化 | 低温炭化 | 低温炭化 |
| 汚泥処理量(t-WS/年) | 99,000 | 33,000 | 27,900 | 16,000 | 10,890(DS) |
| CO2削減量(t/年) | 37,000 | 8,000 | 9,700 | 6,300 | 11,500 |

― 1 に示す複数の発電所で下水汚泥炭化物が利用されています。

下水道事業者にとっては、汚泥焼却灰の処分先を考えなくていいことから、下水道事業者と電力事業者ともにメリットがあるため、徐々に実施事例が増えています。

7 その他の有効利用

その他の有効利用例として、下水熱についてお話しします。一般的には、大阪では冬場でも下水の水温は15℃を切ることはありません。気温から比べると約10℃の温度差があるので、暖房熱源として下水熱を活用することができず。夏場には大阪では下水の水温が30℃近くまで上がるため、冷熱源としてはあまり魅力がないのかもしれませんが、冬期における暖房の熱源としての下水熱の利用は非常に魅力的です。たとえば、全国の水(年間約140億トン)を対象として、5℃の温度を回収したとすれば、そのポテンシャル

は305PJ/年となります。原油、天然ガス、石炭といった国外から輸入している1次エネルギーの合計は年間約21000PJ/年ですので、その約1.5%に相当します。

実際に下水全量から5℃に相当する熱を回収することは非常に難しいため、下水熱としてのポテンシャルが大きすぎるという批判が出ておりますが、仮に全下水から1℃回収できたとしたら、約60PJ/年(1次エネルギーの約0.3%)ものエネルギーに相当することになり、非常に魅力的な資源であることがわかります。

具体的には、下水処理水を対象として熱交換器とヒートポンプで地域冷暖房熱源として利用している幕張の例、夾雑物の多い下水そのものから熱を回収している東京の後楽一丁目地区での事例、仙台駅で地域冷暖房に使っている事例があります。今後いろいろなどろで活用されていくと期待しています。

8 新しい取り組み

B・DASHプロジェクトが3年ほど前から新しい取り組みとして、国土交通省による

表-2 B-DASHプロジェクト一覧

| 採択年度 | 実施事業 | 実施者 |
|-------|---|-----------------------------|
| H23年度 | 超高効率固液分離技術を用いたエネルギーマネジメントシステム | メタウォーター・日本下水道事業団 |
| | 神戸市東灘処理場 再生可能エネルギー生産・革新的技術 | 神領環境ソリューション・神戸市 |
| H24年度 | 温室効果ガスを排出しない次世代型下水汚泥固形燃料化技術 | 長崎市・長崎総合科学大学・三菱長崎機工 |
| | 廃熱利用型 低コスト下水汚泥固形燃料化技術 | JFEエンジニアリング |
| | 管路内設置型熱回収技術を用いた下水熱利用 | 大阪市・積水化学・東亜グラウト |
| | 固定床型アナモックスプロセスによる高効率窒素除去技術 | 熊本市・日本下水道事業団・タクマ |
| H25年度 | 神戸市東灘処理場 栄養塩除去と資源再生(リン) 革新的技術 | king・神戸市・三菱商事アグリサービス |
| | 脱水・燃焼・発電を全体最適化した革新的下水汚泥エネルギー転換システムの実証事業 | メタウォーター・池田市 |
| | 下水道バイオマスからの電力創設システム実証事業 | 和歌山市・日本下水道事業団・京都大学・西原環境・タクマ |

進められています。民間の新しい開発技術をバックアップして、国の100%補助で各自治体の下水処理場に実証施設を導入し、その技術の有効性を検証するというプロジェクトです。平成二三年度からスタートして、表1-2に示すような9例が認可を受け、事業が進められています。

私どもも、今年度の環境省のCO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業に応募したプロジェクトを採択していただいております。下水処理場のメタン発酵槽における加温エネルギーとして未利用エネルギーを用いて活用する実証事業に今年度から着手いたします。

現状では、発生したバイオガスの30〜45%が消化槽の加温のために自己消費されていますが、これまで有効活用されていない太陽熱温水器で得られる温水の熱や消化汚泥の保有熱、あるいは下水処理水の熱を回収してヒートポンプで昇温し、これらを用いて消化槽を加温することで、自己消費するバイオガ

量を極力減らし、再生可能エネルギーとして有効活用できるバイオガスを増やすこと

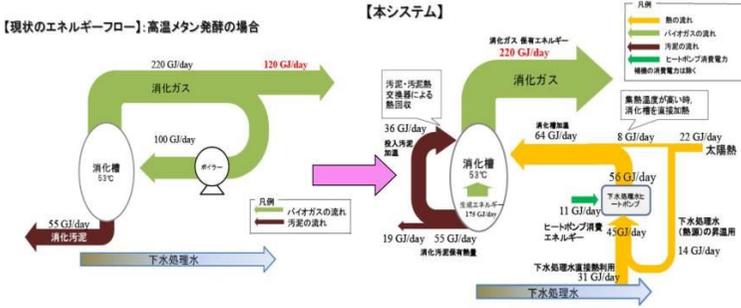


図-13 太陽熱・汚泥熱などを有効利用する新しい消化槽加熱システムによる熱収支の例

を目指したプロジェクトです。図-13は1つの試算例ですが、このような新たな取り組みも始めようとしておりますので、またいろいろとご支援・ご助力いただけたらありがたいです。

最後になりますが、これからの下水道は、下水道法上の3つの目的を果たすことはもちろんですが、それだけではなく、平時は再生可能なエネルギーを生み出せる拠点として、非常時は災害拠点としての役割を果たしていくべきであり、その機能を十分担えると確信しています。皆さまのご協力のもと、下水道の本来の機能と新たな機能をもっとPRして、一般の方々に下水道を再評価していただきたい、思っております。

ご清聴ありがとうございました。

(二〇一三年十一月九日、

大阪市下水道科学館にて)