

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名 「資源回収型の都市廃水・廃棄物処理システム技術の開発」

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点)

研究代表者

津野 洋 (京都大学大学院工学研究科 教授)

主たる共同研究者

清水 芳久 (京都大学大学院工学研究科 助教授)

宗宮 功 (龍谷大学理工学部 教授)

3. 研究内容及び成果

都市廃水は下水道で収集され、最下流の終末処理場で処理され放流されている。また固形廃棄物は車で収集・運搬され焼却処理されるのが現状である。近年になり、我が国でのダイオキシン汚染が問題となり、ごみ焼却場からの排出削減が求められている。しかしながら、その対応のためには、ごみ焼却場での高温で連続的な燃焼と発生除去施設(排煙処理施設)の設置が必要となり、このため大規模な広域的なごみ焼却場の設置が必要となっている。さらには容器・包装リサイクル法の施行によりプラスチックなどの高カロリーのごみの分別収集のため水分の多い生ごみの高温での焼却のためには多くの補助燃料が必要となることが懸念されている。このため、生ごみ収集や燃焼のためのエネルギーの消費量の増加、衛生的問題、生成捕集ダイオキシンの処分などが問題となっている。一方、下水道にあつては、汚水の処理のため多くのエネルギーを消費しており、さらに湖沼や内湾などでの富栄養化による水質汚濁問題の対策や地域の健全な水循環の確立のためより高度な処理が求められ、またこれらの技術は省エネルギー型であることも求められている。また、都市下水中には、多くの有機物のみならず、気体の状態がなく自然循環の乏しく枯渇が懸念されているリンなどの人為的に循環使用すべき物質も含まれている。資源の循環や流域の健全な水循環の基調の中で、新たな下水道システムの展開も希求されている。地球温暖化防止のため炭酸ガス発生量を削減するためには、都市システムでの削減が重要である。しかしながら、現状の都市システムの状態での削減方策には限界があり、省エネルギー機器開発が進んでいる我が国においては、さらなる削減は難しい状況にある。このような中で、都市システムを構築し直すことにより削減しうる方策が重要となる。都市生活において、そこから発生する廃水や廃棄物の処理は不可欠な事項であり、またこれらのために使われるエネルギー(炭酸ガス発生量)は大きな割合を占めている。

これらの問題点を踏まえ、処理・処分の概念で展開している二元システムである現状の下水処理と生ごみ処理を組み合わせ一元化した場合、上記問題の多くは解決しうる問題となるとの発想にいたった。これは、現在の都市施設や生活様式をそれほど大きく変化させずに実施可能であり、省エネルギーシステムであると同時にエネルギー創出型のシステムとしうる。さらに、廃水や

廃棄物が資源の原料と考えた場合には一元化により有効に対処しうる。自然循環性が乏しく枯渇が懸念されており、米国ではこのため輸出制限を考えている、リンの回収・人工循環系の創出や地域水循環資源の創出などはこのよい例である。また、ダイオキシン問題、高齢化時代の環境保全、容器・包装リサイクル社会などへの貢献も大きく期待される。一元化システムの実現のために必要な要素技術については、研究代表者らが展開してきた研究を、この目的のために展開することにより開発可能であると判断した。

そこで本研究では、都市で発生する廃水や廃棄物を資源、あるいは資源材料として取り扱い、都市や地域内で資源を循環利用することをコンセプトに、下水道共用区域の中で可能な地域を限り各家庭などからの生ごみを、ディスポーザにより下水道に取り込み、下水道システムでのポンプ場などの拠点で浮遊性固形物質を回収し有機物の効率的な高温メタン発酵などによりエネルギーを回収し、発電し、その電気や熱の利用を図るとともに、下水から地域の水循環を支える用水を創出するという、都市廃水と廃棄物の一元化システムの確立を目指して、その要素技術の開発を行った。また、このシステムでは、尿尿分離型トイレシステムや汚泥減量化・リン資源回収型下水処理技術を開発することにより、尿中の資源であるリンの回収や終末処理場での汚泥生成量の減量とリンの回収も目的としている。

このシステムを支える要素技術と得られた成果は以下のとおりである。

#### (1) 尿尿分離トイレと窒素・リンなどの資源回収技術

尿中のリンおよび窒素を回収するために尿尿分離トイレを用いて尿を分離し、尿中の有価物であるリンをストラバイト(MAP、 $MgNH_4PO_4$ )の沈殿として連続的に回収できる装置・方法を開発した。基礎実験データおよび本研究で構築したMAP生成機構を説明しうる数理モデルに基づき、最適な条件を提示し、この結果を基に自動運転可能な連続式の尿尿分離トイレ・MAP製造装置を設計し、連続・自動運転を行った。反応槽におけるリンの回収率は78.0～82.6%であり、1Lの貯留槽内尿から0.60gのMAPを回収することができた。また、このときのMAPの純度は63wt%であることが分かった。

#### (2) 一元化下水道システム技術

##### 2-1) ディスポーザ粉碎生ごみと下水道からの浮遊固形物質回収技術

ディスポーザ処理廃水からの固液分離には、ろ過やメッシュ0.5mmのスクリーンが適用可能であり、回収されたSS濃度は10,000～20,000mg/Lであることを示した。処理水側ではT-CODcrが125～146mg/L増加するのに対して、T-NおよびT-Pは2mgN/Lおよび0.2mgP/L程度の増加にすぎず、下水処理場での高度処理には有利となることが示された。加圧浮上分離にも注目して、ディスポーザ破碎生ごみの回収およびメタン発酵実験特性を検討した。加圧浮上分離の処理条件を滞留時間15分、加圧水圧力400kPa、加圧水量比20%としたところ、短時間で良好な分離性能を示すことが確認できた。

また固形物の濃縮・脱水特性の検討では、100,000mg/Lまでの高濃度化が可能であった。そして、ディスポーザ破碎物を含む下水汚泥はメタン発酵性が良いことも明らかにした。

##### 2-2) 回収浮遊固形物質の高温高負荷メタン発酵とエネルギー回収技術

回収生ごみの高温・高負荷一相式メタン発酵技術の開発を試み、汚泥を返送させる条件で処理を安定化させることができ、COD<sub>Cr</sub> ベースで流入有機物の 80%以上をメタンに変換する効率的な有機物負荷率として 20 kgCOD<sub>Cr</sub>/(m<sup>3</sup>・d)が適切であることを明らかにした。そして生ごみ 1 kgCOD<sub>Cr</sub> 当たり 280 L のメタンガス(乾燥生ごみ 1 kg 当たり 435 L のメタンガス)が生成されることを明らかにした。運転操作にあたってはアンモニア阻害が重要であり、アンモニア性窒素濃度が 2,000mgN/L を超えると生じ始めること、また添加生ごみ中の全窒素濃度は 4,000mgN/L 以下とする必要があることが明らかになった。

生ごみと最初沈殿池生汚泥の混合率を変化させて回分実験を行った結果、同じ VS 容積負荷率に対して、初沈汚泥は生ごみの約 62%のメタン発生量が得られた。初沈汚泥に対してもメタン発酵は安定しており、十分に適用できることが示された。

二相式メタン発酵技術の開発も行った。発酵液を基質とした場合、投入 COD<sub>Cr</sub> の 86%をメタンとして回収できた。一相式メタン発酵槽と比較して、前処理として高温酸発酵を行うことで処理効率の向上が可能であると判断できた。

メタン発酵槽内の微生物群集の解析を分子生物学的手法で行う手法を開発した。ラボスケール実験および生ごみのメタン発酵に関する実施で適用した結果、処理状況に応じた微生物群が検出され、発酵槽の効率的で安定的な運転のためのモニタリング指標となることが示された。

メタン発酵ガスを用いた発電では、マイクロタービン発電機(発電容量 28 kW と排熱回収装置(出力 56 kW)を一体化したもの)を用いて、生ごみメタン発酵ガスと都市ガスの混焼実証実験を行い、その適用性と必要技術を検討し、発電効率は任意の混合ガス比率で、バルブの開度を調節することで、タービンの運転停止をせずに安定して運転可能であることを実証した。下水処理汚泥由来の消化ガスによる実証試験では、定格出力で安定して連続運転が可能であることが確認され、シロキサンによる影響部位の確定もなされた。現場での発電により熱を有効に利用できれば、エネルギー利用率は 70%にもなり、CO<sub>2</sub> 発生量の削減にも貢献できることも明らかにした。

### 2-3) 下水道管の途中の拠点で高度処理水を得るための効率的・省エネルギー型高度処理技術

自動制御を有し自動運転可能な前凝集・生物ろ床タイプの物理生物化学的処理プロセス(前凝集槽—沈殿槽—無酸素ろ床—好気ろ床—仕上ろ床)を開発した。原水(沈砂池流出水)を対象に約2年間にわたる連続処理実験を行った結果、ろ床部での全滞留時間は 3 時間程度で BOD は 5 mg/L 程度、全窒素は 2 mgN/L 以下、SS は 3 mg/L 以下、そしてリンは 0.2 mgP/L 以下、透視度は 100 度以上と、安定して処理しうることを実証した。硝化液を最初沈殿池下部へ循環させることで、メタノール添加量は 31%削減可能であることも実証した。

これらの各要素技術の開発により得られた成果を基に 5,000 人および 100,000 人規模の地区においてディスプレイを導入し、固形物を回収し、また、廃水の 20%を高度処理により再利用することを想定し、実験値を用いエネルギー収支の概算を行った。5,000 人規模の場合、1 日あたりで 180 kWh の電気および 360 kWh の熱エネルギーが回収される。電気エネルギーは、嫌気性処理に必要なエネルギーを回収でき、さらに水処理に必要な電気エネルギーの約 6 割もまかなえる可能性が示された。また、嫌気性処理は 55℃での高温運転を想定しており、その加温のための熱

エネルギーは十分得られている。100,000 人規模の場合、電気エネルギーは嫌気性処理および水処理に必要な電気エネルギーもまかなえ、約 1,000 kWh を他の目的に利用できる可能性が示された。

#### 2-4) 終末処理場での汚泥発生抑制・リン回収型処理技術

リンの濃縮と溶出という生物学的リン除去生物の特性と汚泥の可溶化・基質化というオゾン処理の特性を組み合わせ、リンを結晶の形で回収する技術の開発を行った。実験室規模での連続処理実験を実施し、リン回収率 86%、余剰汚泥削減率 90%以上を達成した。また、本プロセスでは従来プロセスと同等の処理水質を維持しうることを明らかにした。本プロセスの設計・運転上重要な因子として、オゾン処理における汚泥可溶化率、オゾン処理率、リン処理率、余剰汚泥引抜率を提示した。また、安定的な運転の指標として、生物反応槽内の汚泥中リン含有率、汚泥の酸素利用速度 (OUR)、リン放出能力を提示した。本プロセスは従来プロセスに比較し、消費エネルギー量を 9%、二酸化炭素消費量を 14%削減でき、余剰汚泥の削減およびリンの資源としての回収以外に、エネルギーの観点からも有利なプロセスであることを明らかにした。

次に、この処理水からの窒素除去と清澄な水を得ることを目的とした、生物膜ろ過反応器の開発を試みた。処理水の SS 濃度 5mg/L 以下、BOD 濃度 3mg/L 以下、全窒素濃度 5mgN/L 以下、そして透視度 100cm 以上の清澄な処理水を得ることが、ろ床部での全滞留時間が 0.24 時間程度で可能であることを示した。

#### (3) 社会経済的評価

面積 1,780ha、人口 146,000 人の処理区のポンプ場を想定し、同処理区においてディスポーザによる生ごみ処理を実施し、ポンプ場内に浮遊固形物回収施設と高効率メタン発酵によるメタンガス発電・熱供給施設を設置し、500 戸程度の集合住宅で用いる場合の経済性・環境性を検討した。環境性においては、1次エネルギー消費量、CO<sub>2</sub> 排出量とも削減効果は 2 割程度であった。システム経済性においては、現状システムよりエネルギー単価は約 1.5 倍程度高くなるため、システムのコスト削減が必要であることが示された。また、面積 1,780ha、人口 146,000 人の処理区にて、①ディスポーザ導入によるごみ収集作業における環境性、経済性、②ディスポーザ導入によるごみ処理 (焼却) における環境性、経済性について検討を行った。ディスポーザ導入によって厨芥はすべて下水道に排出されエネルギー利用されることから、ごみ処理量そのものが削減される一方で、低位発熱量は増加しごみ発電によるエネルギー回収量は増大し、普及なしの場合に比べエネルギー削減量、CO<sub>2</sub> 削減量も一定程度期待できると試算された。

以上のように、本研究では、各要素技術について、実用化に必要な情報を提示することができ、それらを組み合わせた一元化下水道システムについて、エネルギー、物質循環や地球温暖化の観点からも有効であることが示された。これらの技術は個別に適切な箇所において適用可能であり、単独で稼働する実施が建設されている。高温高負荷メタン発酵技術 (50 t/d 規模) での運転には本研究成果が活用されている。また効率的・省エネルギー型高度処理技術 (1,400 t/d 規模) が建設され、運転を開始している。新規地域や下水道などの更新を行う地域では、一元化下水道システムの導入が可能であると考えられる。また、下水汚泥を基質とした高温メタン発酵も可能

であることが示されたので、ディスポーザが利用できない地域でも本システムの理念は導入可能である。

#### 4. 事後評価結果

4-1. 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況  
発表論文数は国内8編、海外5編、小計13編、口頭発表数は国内29件、海外13件、小計42件、特許出願件数は国内2件。研究成果の見事さに比し、海外への特許申請が少なかったことは残念であった。

都市廃水は下水道で収集され、最下流の終末処理場で処理された後、放流されている。他方、固形廃棄物は、車で収集・運搬され焼却されている。近年、容器・包装リサイクル法の施行によって、プラスチックなどの高カロリーのごみの分別・収集のため、水分の多い生ごみの高温での焼却のためには、多くの補助燃料の投入が必要となることが懸念されている。このため、生ごみの収集や燃焼のためのエネルギー投入量の増加、附随する衛生的諸問題などが課題となっている。

他方、下水道については、汚水の処理のために多くのエネルギーを消費しており、さらに湖沼や内湾などでの富栄養化による水質汚濁問題の対策や、地域の健全な水循環の確立のために、より高度な処理が求められると同時に、省エネルギー性も要求されているのが現状である。

本研究は「資源回収型の都市廃水・廃棄物処理システム技術の開発」と題し、処理・処分の概念で展開されている現状の下水処理と生ごみ処理という二元システムを、組み合わせ一元化した場合に、これらの問題の多くは解決可能となることに着眼した点に独創性がある。都市下水中には多くの有機物のみならず、枯渇が懸念されているリンなど人為的に循環使用されるべき資源も含まれている。現有の都市施設や生活様式に、あまり多くの改変を施すことなく、廃水や廃棄物を資源化して循環再利用することの重要性、有用性は指摘するまでもない。本研究で開発され特許出願(2003年6月)中の尿尿分離型トイレは、尿を分離回収して尿中の有価物であるリンをストラバイト( $MgNH_4PO_4$ )の沈澱として連続的に回収する装置・方法を開発した。本研究で構築したストラバイト生成機構を説明する数理モデルを用いて、最適な条件を提示し、その結果をもとに自動運転可能な連続式の尿尿分離トイレとストラバイト製造装置を設計し製作した。反応槽におけるリンの回収率78.0～82.6%であり、1 $\frac{1}{2}$ 日の貯留槽内の尿から0.60g(純度63wt%)のストラバイト回収に成功している。

他方、ディスポーザ処理廃水からの固液分離には、濾過やメッシュ0.5mmのスクリーンが適用可能であり、回収された固形物濃度は10～20g/Lであった。また濃縮・脱水特性の試験では100g/Lまでの高濃度化が可能であることが明らかとなり、また、下水処理場での高度処理にも有利であることが示された。同時にディスポーザ破砕物を含む下水汚泥はメタン発酵性が優れていることも明らかになった。高温高負荷一槽式メタン発酵槽による実証試験では、生ごみ1kgあたり280L(乾燥生ごみ1kgあたり435L)のメタンガスが生成されることも確認された。運転操作にあたってはアンモニア阻害対策が重要であることもわかり、添加生ごみ中の全窒素濃度は4,000mgN/L以下に抑えることなどの設計資料が得られたことは貴重である。二槽式メタン発酵技術の開発も行い、一槽式と

比較して高温酸発酵を前処理として施すことの有効性も確認された。

これらのメタン発酵ガスを用いた28kWマイクロガスタービンによる発電・排熱回収実験も行われ、生ごみメタン発酵ガスと都市ガスの混焼実証実験では、任意の混合ガス比率で、バルブの開度を調整することでタービンを停止することなしに安定運転が可能であることもわかった。下水処理汚泥由来の消化ガスによる運転試験では、定格出力で安定して連続運転が可能であり、シロキサンによる影響部位も確定された。排熱回収を含むエネルギー利用効率は70%を上回ることも確認された。

下水道管途中での高度処理水を造る実験では、自動運転可能な前凝集・生物濾床タイプの物理生物化学的高度処理技術を開発し原水(沈砂池流出水)を対象に約2年間にわたる連続処理実験を行って、ろ床部での全滞留時間3時間程度でBODが5mg/L程度、全窒素は2mgN/L以下、リンは0.2mg/L以下、透視度は100度以上と安定して処理しうることを実証した。

これら各要素技術の開発により得られた成果をもとに、5,000人、及び100,000人規模の地区に於いてディスポーザを導入し、固形物を回収し、さらに廃水の20%を高度処理により再利用すると想定して、エネルギー収支を概算すると100,000人規模の場合、嫌気性処理および水処理に必要な電気エネルギーを賄い、別に約1,000kWhの電力を別に用いることも可能なことが示された。

#### 4-2. 成果の戦略目標・科学技術への貢献

本研究では下水道供用区域の中で、可能な地域を限り、各家庭などからの生ごみをディスポーザにより下水道に取り込み、下水道システム中のポンプ場などの拠点で浮遊性固形物質を回収し、有機物の効率的な高温メタン発酵などによりエネルギーを回収して発電し、排熱も回収・利用し、併せて地域の水循環を支える用水を創出するという「都市廃水と廃棄物の一元化システムの確立」を目指して、尿尿分離型トイレシステムや汚泥減量化・リン資源回収型下水処理技術など、実用性の高い要素技術の開発を行い、これらの効果の実証にも成功しており社会に与える貢献度は極めて高いと高く評価できる。京都府亀岡市では50t/D規模の押し出し式メタン発酵槽の実施設が建設され、その運転には本研究成果が活用されている。また神奈川県平塚市では、1,400t/D規模の効率的・省エネルギー型高度処理技術実証施設が建設された。さらに愛知万博では、省エネルギー型廃水処理技術・実証実験プラントに活用された。以上のような成果は、社会に与える直接的なその貢献度の高さを考慮すると、平成10、11、12年度に採択した16件の研究チームの中でも特記に値する。

併せて、社会・経済的な観点からの研究も、今後行われることが望ましい。

#### 4-3. その他の特記事項(受賞歴など)

- ①下水道協会誌 論文奨励賞 日高 平ほか:「生物膜ろ過反応器での前凝集汚泥活用に関する研究」(2004)
- ②前田工学賞・山田一字賞 日高 平:「前凝集・生物膜反応器による下水高度処理法の開発」(2004)

③京都大学環境衛生工学研究会優秀プロジェクト賞 津野 洋ほか:「資源循環・エネルギーミニマム型システム技術:資源回収型の都市廃水・廃棄物処理システム技術の開発」(2004)