

「環境低負荷型の社会システム」  
平成 8 年度採択研究代表者

野池 達也

(東北大学工学部 教授)

## 「新世代型低負荷環境保全技術による廃棄物の エネルギー化・再資源化」

### 1. 研究実施の概要

近年、地球温暖化をはじめとする地球規模環境問題がクローズアップされ、地球環境にやさしい新世代型科学技術の開発や新しい知的社会システム創造の重要性が強く認識されるようになった。わが国では1980年代後半から、ごみ排出量が急速に伸びてきている。一般廃棄物では紙類とプラスチック類の排出量が増大しているにもかかわらず、その再資源化割合は産業廃棄物と比較して極めて低いのが現状である。特に、廃プラスチックの増大により燃焼処理を行っているごみ処理施設の耐用年数の低下を引き起こすこと等の問題が生じている。また、産業廃棄物の50%近くを占めている下水汚泥等の処分も、埋立処分地が不足していることから深刻な社会問題となってきた。人間と環境の調和のとれた社会の実現を目指すには、環境への負荷を軽減する物質循環に基づいた新しい環境保全技術が不可欠である。

本研究は、エネルギー・物質循環を重視した廃棄物処理技術の開発に焦点を当て、環境負荷を最小とする新しい環境保全技術を確立することにより、環境低負荷型社会システム実現の一翼を担おうとするものである。図 - 1 に本研究の構想を示す。都市から排出される廃棄物を易分解性廃棄物（廃水、生ゴミ、汚泥など）と難分解性廃棄物（廃プラスチック）に分けて、再資源化およびエネルギー化を行うことを目的としている。易分解性廃棄物は、水素発酵で水素ガスを回収した後に重金属除去を行い、コンポストとして土壌に還元される。さらに、プロセスの最終段階では病原ウイルスに関して安全性評価を行う。難分解性廃棄物については適切な処理を施した後、主に資源化される。プロセスは五つのユニットに分割され、各研究グループによって研究が進められている。平成11年度までの研究において、各ユニットの研究が完成に近い状態になり、個々のユニットでも十分に機能することが明らかになった。平成12年度後半からは、各ユニットの研究をさらに発展させながら、プロセス全体を完成させる予定である。

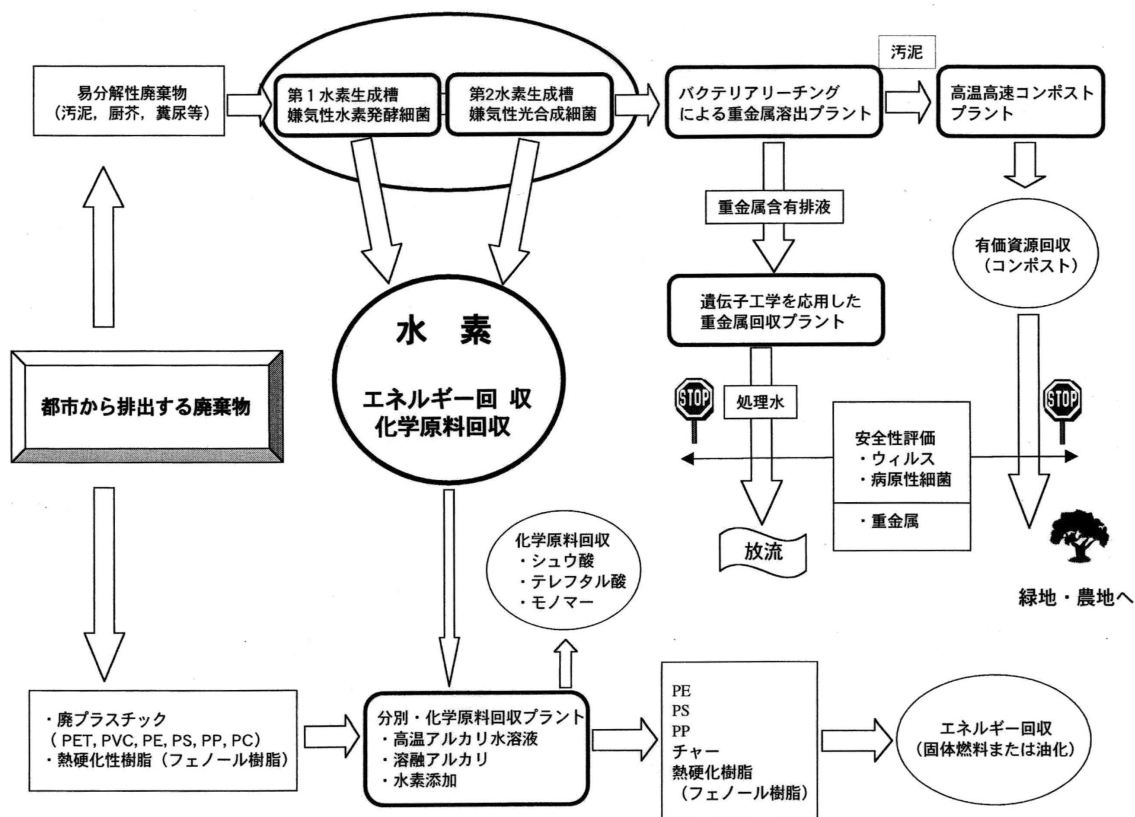


図 - 1 研究構想の概略

## 2. 研究実施内容

### (1) 水素およびメタン発酵法を利用した都市廃棄物のエネルギー化

水素発酵の実用化を目指して、有機性廃棄物(おから、米糠、小麦ふすま)および高濃度炭水化物を含有する製麺排水からの水素回収を検討した。有機性廃棄物および製麺排水からの水素収率は、2.5(おから)、1.3(米糠)、1.7(小麦ふすま)、1.5mol/mol hexose(製麺工場排水)であり、水素回収が可能であった。また、嫌気性消化汚泥を熱処理することで、メタン生成機能を除去し、水素発酵汚泥へと改質することに成功した。タンパク質から水素を生成する機能を有する細菌の単離・同定に成功した。光合成細菌を用いた水素生成では、実用化を目標として混合培養の光合成細菌を利用し、水素発酵細菌および光合成細菌を組み合わせた二相式プロセスによる水素回収を検討する研究を開始した。

### (2) 都市プラスチック廃棄物のエネルギー化・再資源化

都市ごみから分別した混合廃プラスチックのアルカリ処理による原燃料化の実験的研究は、既に7割程度成果を得た。ポリエステルやポリカーボネート樹脂のアルカリ触媒分解技術に関する基礎的反応条件がほぼ明らかになり、石炭の廃プラスチック処理による難燃化の研究では、10~20%の廃プラスチックと混合処理

することにより、効果的に難燃化と高発熱量がほぼ達成できることが明らかになった。また、超臨界水による熱硬化性プラスチックの化学原料化の研究では、ビスフェノールAなどのモデル化合物による高温水分解の機構がほぼ解明された。

### (3) 生物学的重金属除去

#### (2-1) 重金属耐性能の遺伝子工学を用いた強化

水俣湾底泥サンプルから26株のClostridium属に分類される嫌気性水銀耐性細菌および1株のBacillus属に分類される好気性水銀耐性細菌を単離した。27株の水銀耐性細菌全ての染色体DNA上での水銀還元遺伝子であるmerAおよびmerBの保有を明らかにした。また、下水汚泥よりヒ素耐性細菌およびカドミウム耐性の細菌を新たに1株ずつ分離し、それぞれの耐性能を評価した。水俣湾より分離できた嫌気性水銀耐性細菌および好気性水銀耐性細菌はプラスミドを持っておらず、水銀耐性遺伝子は染色体上にコードされていること、この好気性水銀耐性細菌の水銀オペロンは染色体上のトランスポゾン領域にコードされていること、このトランスポゾンは水平伝達に關与する可能性があることが明らかとなった。

#### (2-2) 水素発酵残渣への重金属蓄積機構の解明

標準活性汚泥法を採用している下水処理場の中から、処理規模、工場系排水割合が幅広い範囲となるように16カ所を対象として調査した。Znは無機炭酸塩態および有機結合態の画分が主であり、流域規模等の違いによる重金属の存在形態に有意な差はみられなかったが、Cuは安定な形態と考えられる硫化物塩態と残留態が主な画分であり、流域規模の大きな処理場では不安定な形態の占める割合が多かった。下水処理場内の重金属類の形態変化については、Zn、Cuとも存在形態の比率がほとんど変化しないことが明らかになった。嫌気性消化過程では、発生したHCO<sub>3</sub><sup>-</sup>やHS<sup>-</sup>等との結合のし易さが金属によって異なり、Cuは最も結合しやすく堅固な形態となっていくこと、ZnはCuに比べて遙かに低く、また堅固な形態のNiは全くなかったことが明らかになった。

#### (2-3) 水素発酵残渣からの重金属溶出技術の確立

CP-MSを用いて下水汚泥中の重金属濃度を分析する際の前処理には王水煮沸法が適しており、前処理した試料液を100倍以上に希釈すれば測定に影響しないことを明らかにした。消化汚泥中に硫黄及び鉄を酸化する細菌が生息していることを確認し、この細菌と下水汚泥中に存在する物質および下水処理場で生成する廃棄物のみを利用して下水汚泥からの重金属除去をclosed systemとして行える可能性が明らかになった。また、各種汚泥からのヒ素の除去手法の開発について検討した結果、吸着態のヒ素の割合が多く、ヒ素はpHを酸あるいはアルカリ側にすれば溶出率を増加でき、特に、pHを11にすると

24時間で90%以上の溶出率が得られた。

(4) 遺伝子工学を用いたコンポスト細菌の機能強化

耐熱性コラーゲン分解酵素生産菌の単離とキャラクタリゼーションの研究では、NTAP-1株を液体培地で通気攪拌培養して耐熱性コラーゲン分解酵素を均一状態に精製した。本酵素は60℃、pH 4で30分間の熱処理後も100%の活性を保持しており、コラーゲンに高い特異性をもつ酸性プロテアーゼの一種であることが示唆された。また、高温環境に生息する高度好熱性古細菌から高度に耐熱性の脂質分解酵素遺伝子をクローニングすることにより、高温コンポスト化の促進に有用な耐熱性脂質分解酵素を取得することを試みた結果、Escherichia coli JM109株をを宿主として、高度好熱性古細菌Sulfolobus shibataeのゲノミックライブラリーを構築し、およそ2000の形質転換体の中から5-bromo-4-chloro-3-indolyl acetateを分解するクローンを三つ取得した。このクローンのキャラクタリゼーションを行ったところ、耐熱性の脂質分解酵素をコードしていることが明らかになった。

(5) 病原細菌・ウイルス・原虫および毒性物質の安全性評価

加水分解酵素を用いて汚泥フロックを分解し、かつ陽イオン交換樹脂によって夾雑物の影響を取り除くことにより、下水汚泥からのウイルス誘出を促進する方法（Enzymatic Virus Elution Method；EVE法）を開発した。この方法は、米国環境保護庁（USEPA）により採用されている従来のウイルス検出方法に比べて、約2倍のウイルス検出効率を示した。また、病原ウイルスとして弱毒ポリオウイルスを使用し、ポリオウイルス表面タンパク質の中から抗体との特異的吸着部位（抗原ペプチド）を特定し、人工的にその抗原ペプチドを合成し、これを用いて活性汚泥から特にポリオウイルスとの親和性の高い3種類のタンパク質（ウイルス吸着タンパク質）の分離に成功した。また、病原微生物（細菌・ウイルス・原虫）が引き起こす水系感染症のリスクを、年齢による感染症への感受性の違いを考慮して評価するモデルを構築してリスク評価を行った。

3. 主な研究成果の発表（論文発表）

Lay, J.J. and T.Noike (1999) Hydrogen production and degradation of cellulose by anaerobic digested sludge, 土木学会論文集、No.636/VII-13, 97-104.

Lay, J.J., Lee, Y.J. and Noike, T. (1999) Feasibility of biological hydrogen production from organic fraction of municipal solid waste, Water Research, 33, 2579-2586.

山肩健史、黄介辰、成田勝、遠藤銀朗：グラム陽性細菌Bacillus megateriumMB-1株が持つ新規有機水銀耐性オペロンの同定と有機水銀分解遺伝子の機能解析、環境工学研究論文集, Vol.36, pp.39-47 (1999)

成田勝、黄介辰、小泉卓哉、山肩健史、遠藤銀朗：絶対嫌気性細菌Clostridium属における水銀耐性遺伝子の普遍的保有と重金属耐性スペクトラムの評価に関する

る研究、環境工学研究論文集, Vol.36, pp.29-37 (1999)

C.C. Huang, M. Narita, T. Yamagata and G. Endo, In situ molecular breeding for bioremediation of mercury-polluted water environment. Proceedings of 7th IAWQ Asia-Pacific Regional Conference, Vol.1, pp.322-327 (1999)

M. Narita, C.C. Huang, T. Koizumi, T. Yamagata and G. Endo (1999) Characteristics of anaerobic mercury-resistant bacteria isolated from mercury-polluted sediment. Proceedings of 7th IAWQ Asia-Pacific Regional Conference, Vol.1, pp.310-315.

C.C. Huang, M. Narita, T. Yamagata and G. Endo (1999) Identification of three merB genes and characterization of a broad-spectrum mercury resistance module encoded by a class II transposon of *Bacillus megaterium* strain MB1. Gene, No.239, 361-366.

C.C. Huang, M. Narita, T. Yamagata, Y. Itoh, M. and G. Endo (1999) Structure analysis of a class II transposon encoding mercury resistance of gram-positive bacterium, *Bacillus megaterium* MB1, a strain isolated from Minamata Bay, Japan., Gene, No.234, 361-369 (1999)

M. Narita, C.C. Huang and G. Endo (1999) Molecular analysis of merA gene possessed by anaerobic mercury-resistant bacteria isolated from Minamata Bay., *Microbes and Environments*, Vol. 14, No.2, 77-84.

Ito, A., Umita, T., Aizawa, J., Takachi, T. and Morinaga, K. (2000) Removal of heavy metals from anaerobically digested sewage sludge by a new chemical method using ferric sulfate, *Water Research*, 34, 751-758.

土田武志、福士謙介、田中宏明、大村達夫:環境水における病原微生物数確率分布を考慮したリスク評価モデル、土木学会論文集、No. 615/VII-10, pp. 61-68, 1999.