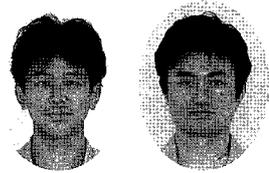


固形残渣の発生しない 食品廃棄物のメタン発酵システム —パメディス—

New methane fermentation system
for food waste without solid residue generation
—PAMEDIS—



(技)第2研究開発部第5研究室
桂 健 治
Kenji Katsura
佐 藤 朋 弘
Tomohiro Sato

当社は、従来のメタン発酵技術に当社で開発した汚泥可溶化技術（エステ技術）を組み合わせることにより、固形残渣の完全消滅も可能な新しいメタン発酵システム『パメディス』（PAMEDIS: Pantec Methane Dissolution System）を開発した。本システムにおいては、発生した固形残渣を好熱性細菌（好熱菌）が分泌する酵素によって可溶化し、可溶化液をメタン発酵槽に返送してメタンガスに転換することにより、メタンガス回収率を向上できるとともに、固形残渣を大幅に減量することができる。本システムの実証を目的に、食品加工工場においてパイロット実験を実施し、固形残渣を消滅できるとともに、メタンガス回収率を約90%まで向上できる可能性をえた。

A new methane fermentation system named PAMEDIS has been developed by combining our sludge degradation technology, S-TE, and the conventional methane fermentation technology. In this system, generated solid residue is solubilized by enzyme secreted from thermophilic bacteria and converted to methane gas by methane bacteria. A pilot test of the system conducted at a food-processing factory suggested the possibility of complete removal of solid residue and the methane recovery rate of approx. 90%.

Key Words

食品廃棄物	Food waste
資源リサイクル	Recycling of resources
メタン発酵	Methane fermentation
固形残渣	Solid residue
可溶化	Solubilization
好熱菌	Thermophilic bacteria
酵 素	Enzyme

まえがき

食品加工工場から発生する動植物性残渣や食品の流通および消費により発生する生ゴミ（売れ残りや残飯）等のいわゆる食品廃棄物は年間約2000万トンが排出されており、その90%以上が焼却・埋立

処理されている。そこで、食品廃棄物の資源リサイクルを促進するため、2001年5月に農林水産省から「食品循環資源の再生利用などの促進に関する法律（通称：食品リサイクル法）」が施行された¹⁾。食品廃棄物のリサイクル技術としては、堆肥化、飼料化

およびメタン発酵技術が検討されているが、なかでも、メタン発酵技術は発生したメタンガスを汎用的なエネルギー（電気、熱など）に転換して利用するため、社会的ニーズが高まりつつある。しかしながら、メタン発酵技術には、メタン発酵工程およびその後処理（活性汚泥処理）工程から発生する固形残渣の処理の問題が残されている。現在、固形残渣の堆肥化などへの検討が進められているが、農地への施肥の許容量から安定した供給先を確保することは非常に困難であり、固形残渣の処理がメタン発酵技術の普及を図る上でのカギになると考えられている^{2)~4)}。したがって、メタン発酵技術を普及させるには、メタン発酵システムから発生する固形残渣を消滅し、かつ、メタンガス発生量を大幅に増大できる画期的な技術開発が必要とされていた。

このような背景のもと、当社は従来のメタン発酵技術に当社で開発・商品化した汚泥可溶化技術（エステ技術）を組み合わせることにより、新しいメタン発酵システムを開発した。今回、食品加工工場から発生する食品廃棄物を用いてパイロット実験を実施したので、以下にその結果を報告する。

1. パイロット実験の概要

1.1 目 標

食品廃棄物のメタン発酵処理工程および、その後処理である活性汚泥処理工程から発生する固形残渣

（未分解の食品廃棄物および余剰汚泥）を消滅し、かつ、メタンガスの回収率を90%以上に向上することを目標とした。

1.2 使用した食品廃棄物

本実験では、処理対象として食品加工工場から発生する食品廃棄物（植物性残渣）を使用した。処理量は1日あたり約80 kg（湿潤ベース）とした。

1.3 システムの構成

写真1にパイロット実験装置を示す。本装置は、縦5 m、横8.3 m、高さ3.5 mのスキッドマウント上に据付け、食品加工工場の屋外に設置した。図1にパイロット実験のシステムフローを示す。本システムは、前処理（破袋、分別、破碎）工程、メタン発酵処理工程、後処理（活性汚泥処理）工程および可溶化処理工程の4つの工程から構成されている。本システムの最大の特長は、従来のメタン発酵システムに好熱菌を利用した可溶化処理工程を組込んだことにある。

2. 実験条件および実験方法

表1に各工程の実験条件の概要を示す。また、各工程の操作方法の詳細を以下に述べる。

2.1 前処理（破袋、分別、破碎）工程

食品廃棄物から発酵不適物（容器、ビニール袋）を選別、除去するため、破袋・分別機をもちいた。破袋・分別機に投入された廃棄物は回転ブレードに

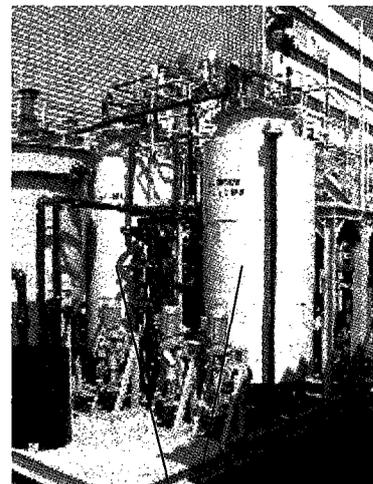


Tearing and separation equipment

Methane fermentation tank (5m³)

Activated sludge tank (2.5m³)

(a) Whole view



Solubilization tank (0.5m³ × 2)

(b) Solubilization tank (S-TE tank)

写真 1 パイロット実験装置
Photo 1 Pilot test plant

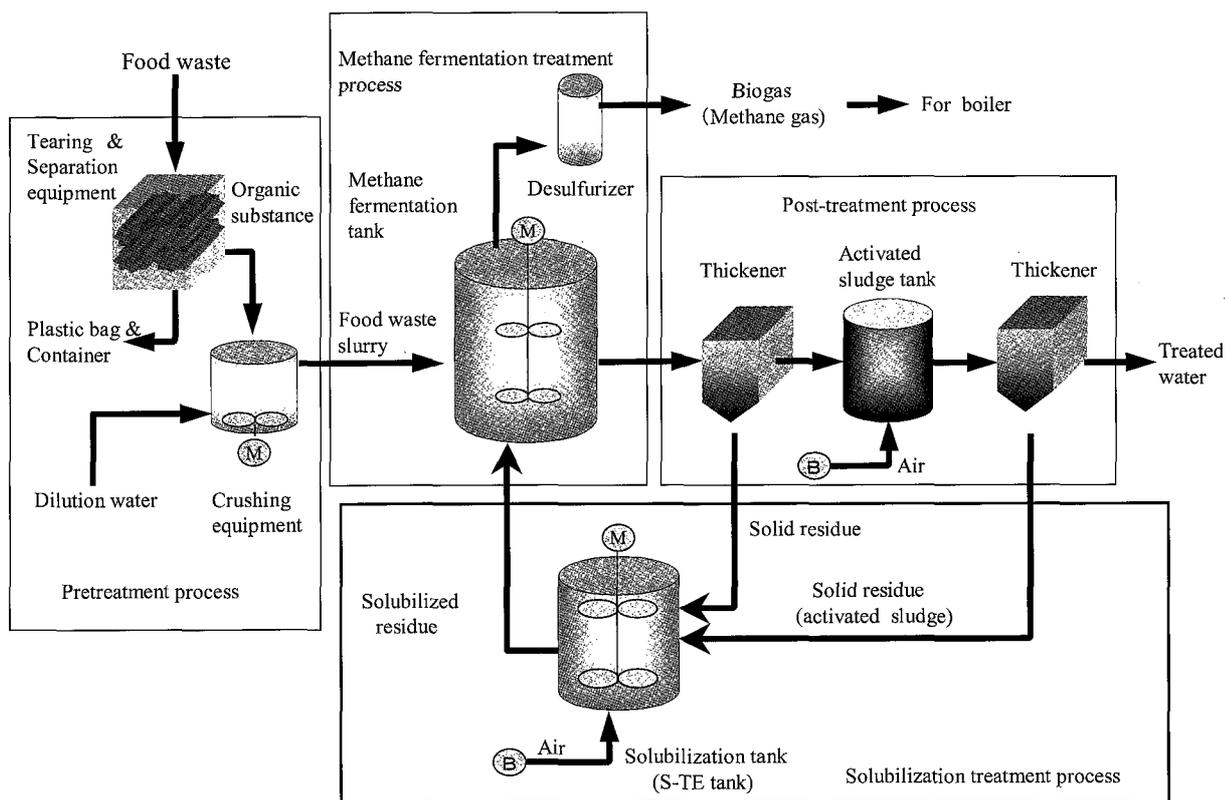


図 1 パイロット実験のシステムフロー
Fig.1 Flow diagram of pilot test

表 1 実験条件
Table1 Experimental conditions

Process	Items	Unit	Design value
Pretreatment	Amount of treated food waste	kg/d (wet base)	80.0
Methane fermentation treatment	Temperature	℃	54.0
	Hydraulic retention time	d	10.0
	Volumetric COD _c loading rate	kg/m ³ /d	11.5
Post-treatment	Volumetric BOD ₅ loading rate	kg/m ³ /d	0.5
Solubilization treatment (S-TE treatment)	Temperature	℃	65.0
	Rate of aeration	vvm	0.05
	Hydraulic retention time	d	3.0

より破袋，破碎され，下部スクリーンより回収される。一方，破袋された容器およびビニール袋は，回転ブレードにより発生する遠心力および風力により排出，除去される。回収された食品廃棄物はポンプにより破碎機へ移送され，希釈水を添加することにより，TS (Total Solids：蒸発残留物) 濃度を所定の濃度に調整し，その後破碎し，スラリー状に破碎された食品廃棄物はメタン発酵処理の原料として供給された。

表 2 に食品廃棄物スラリーの性状を示す。TS 濃度を約 80 000 mg/L (80%) に調整した結果，T-COD_c は約 117 000 mg/L (11.7%)，T-BOD₅ は約 60 000 mg/L (6%) であった。

表 2 食品廃棄物スラリーの性状
Table2 Characteristics of food waste slurry

Items	Unit	Average	Range
TS	mg/L	81 100	76 500 — 83 400
VS	mg/L	77 600	73 200 — 81 600
SS	mg/L	65 300	62 200 — 68 300
VSS	mg/L	63 100	59 500 — 65 200
T-COD _c	mg/L	117 000	103 000 — 129 000
T-BOD ₅	mg/L	60 200	56 700 — 64 000
T-N	mg/L	2 200	2 050 — 2 410
T-P	mg/L	450	370 — 550
Hexane extracts	mg/L	6 100	5 200 — 6 700
pH	—	4.2	3.9 — 4.4

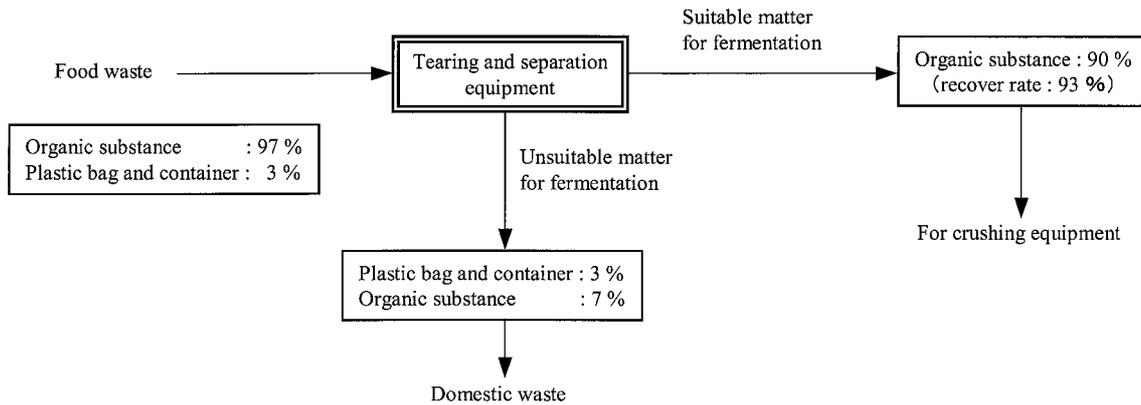


図 2 破袋・分別機の物質収支
Fig.2 Mass balance of tearing and separation equipment

2.2 メタン発酵処理工程

メタン発酵槽は、攪拌機により発酵液を攪拌する完全混合方式を採用した。操作温度は54℃の高温式で、ジャケットに温水を供給することにより温度調節をおこなった。食品廃棄物スラリーは回分的に投入され、1回当たりの投入量を反応容積(2.0 m³)の2%(40 L)とし、1日あたりの食品廃棄物スラリーの投入回数を増やしてHRT(Hydraulic Retention Time: 水力学的滞留時間)を短くすることにより、COD_{Cr}容積負荷を上昇させた。最終的にHRTを10日に設定した結果、COD_{Cr}容積負荷は約12 kg/m³/dとなった。なお、本実験では高温メタン発酵の種汚泥として、下水処理場の高温消化汚泥を使用した。

2.3 後処理(活性汚泥処理)工程

メタン発酵処理液に凝集剤を添加して固液分離し、その上澄み液を活性汚泥槽(反応容積: 2.5 m³)により処理した。最終的なBOD₅容積負荷は約0.5 kg/m³/dであった。

2.4 可溶化処理工程

本システムの最大の特長である可溶化槽には、攪拌機により固形残渣を攪拌する完全混合方式を採用した。操作温度は65℃とし、ジャケットに温水を供給することにより温度調節をおこなった。また、装置下部よりブロワにて0.05 vvm (m³/m³/min)の空気を供給した。メタン発酵処理工程から発生する固形残渣(未分解の食品廃棄物および増殖したメタン菌)と活性汚泥処理工程から発生する固形残渣(余剰汚泥)を可溶化槽へ投入し、好熱菌が分泌する体外酵素により固形残渣の可溶化処理をおこなった。HRTは1日および3日とした。可溶化処理してえられた可溶化液は、メタンガスの回収率向上を目的に、全量をメタン発酵槽へ返送するフローとした。

表 3 メタン発酵槽の処理性能

Table3 Treatment performance on methane fermentation tank

Items	Data
Methane gas recovery rate (T-COD _{Cr} removal rate)	80 %
Methane gas production rate	6.6 Nm ³ /d (0.34 Nm ³ /kg removed COD _{Cr})
Composition of biogas	
Methane (CH ₄)	60 %
Carbon dioxide (CO ₂)	40 %
Hydrogen sulfide (H ₂ S)	50 ppm (<1 ppm)*
VFA (as COD _{Cr}) in the tank	800 mg/L

* After desulfurization

3. 実験結果および考察

3.1 食品廃棄物の破袋・分別処理

食品廃棄物の分別処理の結果として、図2に破袋・分別機の物質収支を示す。下部スクリーンから回収された食品廃棄物は細かく破碎されており、容器やビニール袋の混入はほとんど認められなかった。最終的に食品廃棄物(内容物)の回収率は約93%となった。また、分別された容器と袋への食品廃棄物の混入は、麺類がわずかに見られた程度であり、回収できなかった食品廃棄物の割合は投入量に対して7%程度であった。以上の結果から、本破袋・分別機を使用することにより食品廃棄物を効率的に破袋、分別できることを確認した。

3.2 従来型システムによるメタン発酵処理

本システムの効果を比較するために、従来型のメタン発酵システムの運転をおこなった。従来型のメタン発酵処理では、固形残渣の可溶化処理をおこなわないで、固形残渣を系外へ排出した。

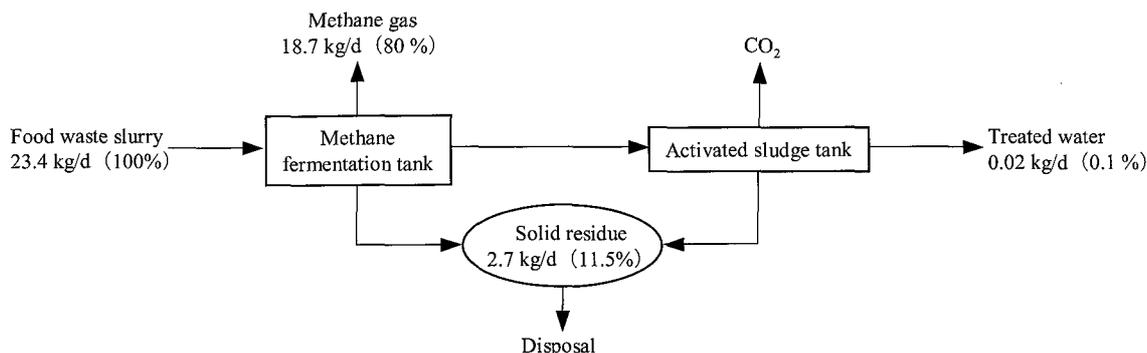


図 3 従来型のメタン発酵システムにおける COD_{Cr} 物質収支
Fig. 3 Mass balance of COD_{Cr} on conventional methane fermentation system

3. 2. 1 メタン発酵処理

表 3 にメタン発酵槽の処理性能を示す。COD_{Cr} 容積負荷は約 12 kg/m³/d と高負荷運転をおこなったが、メタンガスの回収率は約 80 % と高い回収率が安定してえられた。除去された COD_{Cr} 当たりのメタンガス発生量は 0.34 Nm³/kg となり、理論値の 0.35 Nm³/kg とほぼ等しくなった。バイオガス中のメタンガスの割合は 60 % 前後で安定して推移した。

発酵槽内の VFA (Volatile Fatty Acid : 揮発性脂肪酸) 濃度は 800 mg/L (COD_{Cr} 換算) 前後で推移した。一般的に、高温メタン発酵では、食品廃棄物中の蛋白質の分解により発生するアンモニア (アンモニア性窒素として 2 000 ~ 3 000 mg/L) によりメタン菌が阻害され、VFA 濃度が 5 000 mg/L 以上に上昇すると言われている。表 2 に示すとおり、今回使用した食品廃棄物スラリー中の窒素濃度は約 2 200 mg/L と低く、槽内のアンモニア性窒素濃度も 1 600 mg/L 前後で推移した。したがって、本実験ではアンモニアによるメタン菌への阻害が小さく、結果として VFA 濃度を低く抑えることができたと考えられる。

3. 2. 2 活性汚泥処理

表 4 に本システムにおける活性汚泥槽の処理性能を示す。T-COD_{Cr}、T-BOD₅、SS およびヘキサン抽出物質はいずれも 90 % 以上の分解率となり、下水放流できることを確認した。

3. 2. 3 COD 収支

図 3 に後処理プロセスも含めた COD_{Cr} の物質収支を示す。メタン発酵処理では、投入した COD_{Cr} 23.4 kg/d のうち 18.7 kg/d がメタンガスに転換され、メタンガスの回収率は約 80 % になった。また、後処理も含めて投入した COD_{Cr} のうち約 12 % にあたる 2.7 kg/d の固形残渣が発生した。

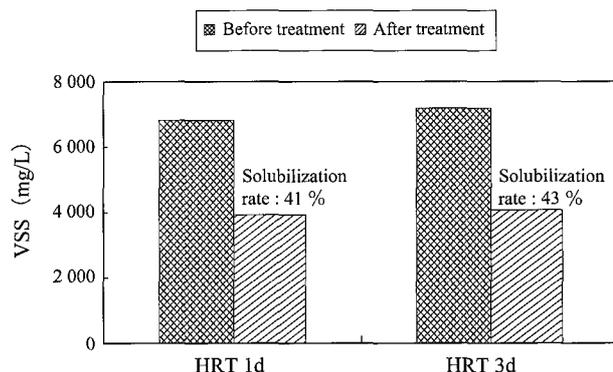


図 4 可溶化槽における処理性能
Fig. 4 Treatment performance on solubilization tank

表 4 活性汚泥槽の処理性能

Table 4 Treatment performance on activated sludge tank

Items	Before treatment mg/L	After treatment mg/L	Removal rate %
T-COD _{Cr}	17 000	150	99.1
T-BOD ₅	7 100	20	99.7
SS	1 400	60	95.7
Hexane extracts	350	20	94.3

3. 3 固形残渣の可溶化処理

上述の従来型のメタン発酵システムから発生した固形残渣の可溶化処理をおこなった。図 4 に可溶化槽における処理性能を示す。滞留時間の影響を調べるために HRT を 1 日および 3 日の 2 条件でおこなったが、いずれの条件においても固形残渣の VSS 可溶化率は 40 % 以上と高い可溶化率がえられた。通常、汚泥の減量化を目的としたエステプロセスの適用基準は VSS 可溶化率 30 ~ 35 % 以上である。したがって、本実験でえられた約 40 % の VSS 可溶化率は基準値を上回っており、本システムを実現できる可能性が示唆された。

本実験では空気の供給量を 0.05 vvm と低く設定したにもかかわらず、高い VSS 可溶化率がえられ

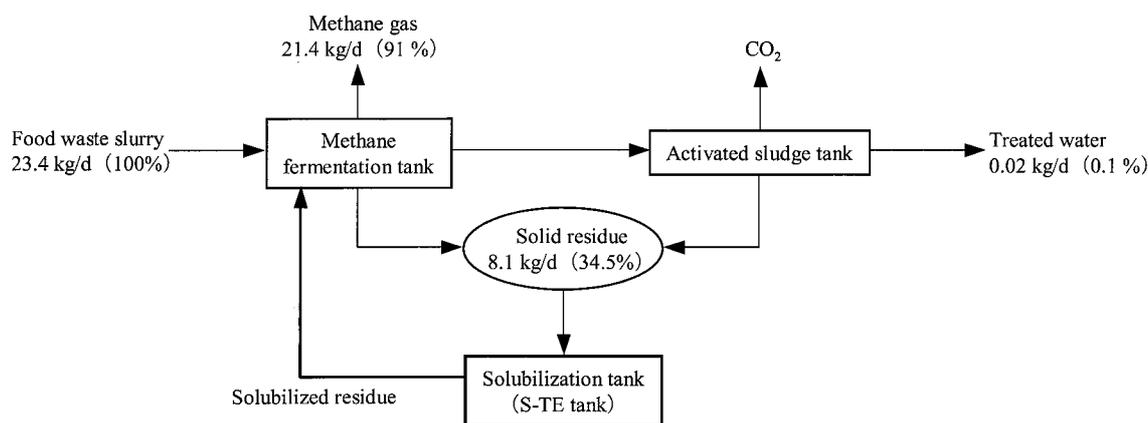


図 5 本メタン発酵システムにおける COD_{Cr} 物質収支の試算結果
Fig.5 Calculated mass balance of COD_{Cr} on new methane fermentation system

た。可溶化槽での酸化還元電位は-150~+50 mVで推移しており、いわゆる好気状態となっていたが、好熱菌の酵素生成に及ぼす影響は認められなかった。

3.4 本システムの評価

上述の実験結果から、本システムの構築の可能性を考察した。図5に後処理プロセスも含めたCOD_{Cr}の物質収支の試算結果を示す。

固形残渣の消滅については、可溶化槽におけるVSS可溶化率が基準値の30~35%を上回ったことから、従来型システムにおいて発生した固形残渣2.7 kg/dの3倍量の8.1 kg/dを可溶化処理し、可溶化液の全量をメタン発酵槽へ返送することにより達成できると考えられた。

メタンガスの回収率の向上については、可溶化液をメタン発酵槽へ返送することにより、可溶化液中の溶解性の有機物がメタンガスに転換されるため、90%以上のメタンガス回収率がえられると考えられた。すなわち、投入したCOD_{Cr}23.4 kg/dのうち21.4 kg/dがメタンガスに転換されると試算した。

むすび

本パイロット実験により、固形残渣を消滅するとともに、メタンガス回収率を約90%まで向上できる可能性をえた。上述の通り、固形残渣の処理は、メタン発酵技術の普及を図る上でのカギになると考えられている。今後、本システムを実用化すること

により、食品廃棄物のメタン発酵技術の普及に向けて大きく貢献できると考えている。また、本システムの実用化により、処理対象物が食品廃棄物だけでなく、一般家庭から発生する生ゴミや家畜糞尿等の有機性廃棄物にまで拡大されることが予想される。その結果、有機性廃棄物の集約化処理が進展することが予想され、これまで経済的理由でメタンガスの発電設備としての導入が難しかった燃料電池等の導入が容易になり、地球温暖化防止にも貢献できると考えている。

本実験を実施するにあたり、実験場所および食品廃棄物のご提供等、多大なるご協力を頂いた生活協同組合コープこうべ六甲アイランド食品工場殿にお礼申し上げます。また、メタン発酵槽の立ち上げのために下水汚泥をご提供頂いた神戸市建設局東部建設事務所水環境センター殿にお礼申し上げます。本開発は、NEDOの「平成12年度 地球環境保全技術開発事業費助成事業」として実施したものである。

[参考文献]

- 1) 農林水産省：食品循環資源の再生利用等の促進に関する法律（2000）
- 2) 原田靖生：有機性資源の有効利用と窒素の適正制御，第1回農林水産環境シンポジウム（2000）p.1
- 3) (財)地球環境産業技術研究機構：地球環境関連技術の推進に関する調査（1999）p.118
- 4) 生物系廃棄物のリサイクル研究会：生物系廃棄物のリサイクルの現状と課題（1999）

連絡先

桂 健 治 技術開発本部
第2研究開発部
第5研究室

TEL 078-992-6525
FAX 078-992-6504
E-mail k.katsura@pantec.co.jp