研究論文

浄化槽汚泥を対象とした超高温可溶化： メタン発酵処理システムの環境影響評価

甲斐 穂高・中道 隆広・有菌 真澄・竹本 直道・蒲原 新一・石橋 康弘

Environmental Impact Assessment of Methane Fermentation System with Hyper Thermal Solubilization of Sludge

Hotaka KAI, Takahiro NAKAMICHI, Masumi ARIZONO, Naomichi TAKEMOTO,
Shinichi KAMOHARA and Yasuhiro ISHIBASHI

Synopsis:

Objective. We have developed the “Methane Fermentation System with Hyper Thermal Solubilization (Methane Fermentation System – H.T.S)” that consists of an 80 °C solubilization tank and a 53 °C methane fermentation tank. Organic matter (sludge) is solubilized by a specific microorganism, *Anoxybacillus beppuensis* MU3, which produces thermophilic protease. We isolated this microorganism from Beppu hot spring located in the Kyushu Island of Japan. The system can produce 6,500 L/day biogas from 0.5 m³/day sewage sludge (65.7% digestibility in VSS equivalent). It generates approximately 2-fold higher biogas than the general single-tank methane fermentation system and seems more environmentally friendly, although it requires relatively more resources (e.g., pumps, electricity, and tubes) for its operations. This study, therefore, comparatively evaluated the environmental impacts of both these systems by LCA method.

Results and Discussion. The Methane Fermentation System – H.T.S requires more propane gas than the single-tank methane fermentation system to maintain the temperature of the solubilization tank at 80°C; thus, the environmental impact of this system on fuel consumption increases. Therefore, the results of the Environmental Impact Assessment have shown that the Methane Fermentation System – H.T.S has a more significant impact on human health and social assets than the single-tank methane fermentation system. Similar results were obtained with regard to the single index. On the other hand, the Methane Fermentation System – H.T.S had a smaller impact on biodiversity, whereas both systems showed nearly the same degree of impact on primary production, as the impact on fuel consumption was lesser than that on biodiversity and primary production. Furthermore, it was observed that the reduced use of thermal energy generated by burning the biogas (methane gas) produced, for keeping the solubilization and fermentation tanks warm, could significantly reduce the consumption of propane gas and, consequently, the impact on human health, social assets and single index.

Conclusion. From the above results, it can be concluded that although the Methane Fermentation System – H.T.S can generate more biogas than the single-tank methane fermentation system, efforts must be made to reduce the propane gas consumption in order to reduce the environmental impact of such biogas production.

Keywords: Environmental impact assessment; hyper thermal solubilization; methane fermented; sludge

甲斐 穂高／鈴鹿工業高等専門学校 生物応用化学科／〒 510-0294 三重県鈴鹿市白子町
中道 隆広・蒲原 新一／長崎総合科学大学 環境・建築学部／〒 851-0121 長崎県長崎市宿町 3-1
有菌 真澄・石橋 康弘／熊本県立大学 大学院環境共生学研究科／〒 862-8502 熊本県熊本市月出 3-1-100
竹本 直道／熊本県立大学 環境共生学部／〒 862-8502 熊本県熊本市月出 3-1-100

Hotaka KAI / Department of Chemistry and Biochemistry, Suzuka National College of Technology / Shiroko, Suzuka, Mie 510-0294
Takahiro NAKAMICHI and Shinichi KAMOHARA / Faculty of Environment and Architecture, Nagasaki Institute of Applied Science / 3-1, Syuku-machi, Nagasaki 851-021
Masumi ARIZONO and Yasuhiro ISHIBASHI / Graduate School of Environmental and Symbiotic Science, Prefectural University of Kumamoto / 3-1-100 Tsukide, Kumamoto 862-8502
Naomichi TAKEMOTO / Faculty of Environmental and Symbiotic Science, Prefectural University of Kumamoto / 3-1-100 Tsukide, Kumamoto 862-8502

1. 諸言

現在、様々な地球環境問題が顕在化している。その中でも地球温暖化の影響は非常に著しく、地球温暖化防止のための対策は、緊急を要する課題となっている。地球温暖化防止のためには化石燃料への依存を減らすことが必要である。これに加えて、カーボンニュートラルの観点から、バイオマス資源由来のエネルギー利用が有効とされており、現在、様々な技術開発が進められている。バイオマス資源には様々な種類があるが、家畜糞尿、食品残渣及び下水汚泥等の廃棄物系バイオマスは、廃棄物の適正処理の観点から利用を促進すべきバイオマス資源である。これらのうち、下水汚泥は我々の生活活動に伴ってほぼ同じものが定常的に発生する有機性廃棄物であり、量と質が共に安定している集約性が高いバイオマス資源である。下水汚泥の含水率は処理方式の違いによって差があるが、おおそ97～99%くらい^{1,3)}と報告されている。また、水分を除いた乾燥重量基準では木質バイオマスと同等の高位発熱量(19.9 MJ/kg-DS)を持っている⁴⁾。下水汚泥のバイオマス資源としての賦存量は湿潤重量約7,500万トン/年(含水率97%)⁵⁾と報告されており、十分な賦存量であることから有効利用が期待されているエネルギー源である。下水汚泥の約7割は建設資材や肥料等に再資源化されている現状¹⁾にあるが、関係市場を観察するとこれらは余剰の状態にある。また、残り約3割については再資源化されずに焼却や埋立処分されており、下水汚泥はバイオマス資源として十分に有効利用されていない現状にある。近年では下水処理場で処理される下水量は増加傾向にあり、これと比例してそこから発生する下水汚泥量も増加している。焼却や埋立処分される下水汚泥からは、その処理過程において大量の二酸化炭素及び一酸化二窒素が発生しており、地球温暖化を促進させる。従って、焼却や埋立処分されている下水汚泥をバイオマス資源としてエネルギー利用することは、地球温暖化防止の点から非常に重要である。

下水汚泥からエネルギーを賄う方法の一つにメタン発酵処理がある。メタン発酵によって得られるメタンガスは、非化石燃料由来のエネルギーとなるので、地球温暖化防止に貢献できる技術とされている。これを客観的に証明するためには、メタン発酵処理プラントの建設、実際にメタン発酵処理を行う際の投入資源量または投入エネルギー量、発生するメタンガス量とそこから得られるエネルギー量、及びメタンガスをエネルギーに変換して使うことによって削減される化石燃料の量(発生が抑制される二酸化炭素量)を明らかにして、これらの環境影響評価を行うことが必要である。本研究では、筆者らが開発した超高温可溶化-メタン発酵処理システムの環境影響評価を行い、従来のメタン発酵処理システムとの比較を行った。

2. 評価対象と範囲、及び評価方法

2.1 超高温可溶化-メタン発酵処理システムの概要

メタン発酵処理は、①固形物の可溶化・加水分解工程、②酸生成工程、③メタン生成工程の3工程から成る。以前は、これらの3工程を1つの大きな発酵槽で行う一槽式メタン発酵処理(Single methane fermentation)が行われていた。しかし、発酵効率が不十分または、発酵期間が長引く(中温メタン発酵で30日以上、高温メタン発酵で15日以上)時があるなどの問題があった。そこで、これらの問題に対応するかたちで、メタン発酵槽の前段に、物理化学的処理⁶⁻⁷⁾や生物化学処理⁸⁻¹⁰⁾によってバイオマス資源を可溶化(または低分子化)する反応槽を設けた二槽式メタン発酵技術が開発されている¹¹⁾。

筆者らは、環境中から単離した耐熱性プロテアーゼを産生する好気高熱性微生物(*Anoxybacillus beppuensis* MU3)によって80℃で超高温可溶化処理を行うメタン発酵処理技術(超高温可溶化-メタン発酵処理システム: Methane Fermentation System with Hyper Thermal Solubilization)の研究を行ってきた¹²⁻¹⁴⁾(現在、特許申請中)。そして、実際に長崎市東部下水処理場で実機規模の1/100スケールのメタン発酵実証プラントを設置し、超高温可溶化-メタン発酵処理システムの化学的評価を行った。

本システムの概略図をFigure 1に示す。下水汚泥0.5 m³/dayを超高温可溶化-メタン発酵処理システムに引き込み、1.0 m³の80℃可溶化槽で2日間かけて可溶化し、そして5.0 m³の53℃メタン発酵槽で10日滞留させることでメタンガスが発生し、また、投入下水汚泥量と同量の消化液が排出される。可溶化槽とメタン発酵槽の加温及び保温は、プロパンガスを燃料とする温水ボイラーによって行っている。得られたメタンガスは、マイクロガスタービンなどの発電機の燃料に利用することで電力が生産できたり、また、燃焼によって生じたエネルギーから温水や温風を作り出して利用したりすることができる。加えて、メタン発酵後の消化液は、特別な処理を行うことなく、そのまま液肥として田畑または水耕栽培用の肥料として使うことができる。

本システムのメタン発酵槽内の有機物消化率はTable 1¹⁵⁾に示したとおりメタン発酵前後のVSS(Volatile suspended solids)値から平均65.7%であり、そして平均6,500 L/dayのバイオガス発生を確認した。発生したバイオガスの組成はTable 2¹⁵⁾のとおりであり、メタンガスが約65%、二酸化炭素が約34%、その他の微量成分が約1%であった。メタン発酵槽で発生したバイオガスは、アンモニア除去フィルターと脱硫フィルターを通過する(バイオガスの通り道にフィルターが設置されている構造で、アンモニア除去や脱硫のための電力等、特別な動力源は不要となって

Figure 1. Flow of Methane Fermentation System with Hyper Thermal Solubilization.

Table 1. Mass balance and digestion rate of Methane Fermentation System with Hyper Thermal Solubilization.

VSS in storage tank [mg/L]	VSS after methane fermented [mg/L]	VSS consumption [mg/L]	digestion rate	Average digestion rate	Average bio gas volume	date of gas generation [L/kg-VSS]
15,521	6,264	9,257	59.6%	65.7%	6,500L	1,404
20,667	6,494	14,173	68.5%			917
15,824	5,832	9,992	63.1%			1,301
17,180	4,867	12,313	71.6%			1,055

Table 2. Composition of biogas generated by Methane Fermentation System with Hyper Thermal Solubilization

	unit	output gas of solubilization tank	output gas of methane fermentation tank (before desulfuration)	output gas of methane fermentation tank (after desulfuration)
CH ₄	%	38 (ppm)	64	63
H ₂	%	< 0.1	< 0.1	< 0.1
CO ₂	%	0.7	33.5	33.5
H ₂ S	ppm	< 1	34	< 1
NH ₃	ppm	23	< 1	< 1
S	mg/m ³ N	-	42	< 1
O ₂	%	20.8	0.6	0.4
siloxaneD3	mg/m ³ N	< 0.01	0.01	0.03
siloxaneD4	mg/m ³ N	0.01	< 0.01	< 0.01
siloxaneD5	mg/m ³ N	0.16	0.3	< 0.01

いる)。これによってアンモニア等や硫化水素の濃度は検出できないレベルまで下がっていた。なお、発生したバイオガスについて、VSS1 kgあたりから発生するメタンガス量に換算すると約1,200 L/kg-VSSとなる。通常の一槽式メタン発酵では同500 ~ 600 L/kg-VSSとされている¹⁶⁾。これより、筆者らの開発したメタン発酵技術は、汚泥処理の能力が0.5 m³/dayの条件で、従来技術よりも約2倍のメタンガスを発生できる技術であると評価している^{15, 17)}。

2.2 メタン発酵処理システムの規模と対象地域

下水汚泥や家畜糞尿などの有機性廃棄物からメタン発酵によって生産したエネルギーを有効活用する上で、有機性廃棄物の収集運搬の経済性やエネルギー利用形態を考慮することは非常に重要である。筆者らは、長崎県の島原半島をモデルケースとし、同半島内で発生する家畜糞尿を対象としてメタン発酵を行った場合の事業性評価を行った。事業性評価では、建設費、収入費（売電収入、糞尿処理手数料収入など）、支出（メンテナンス費、人件費、減価償却費、

支払金利、租税公課、一般管理費)、税引前後利益、法人税、年間キャッシュフローなどの項目を細かく設定し、これらを基にして初期投資の回収年月などを具体的に算出した。30 t/dayの処理能力では、操業開始から8年目で黒字転換し、15年目で初期投資額を回収できる事業性採算となった。一方で、大規模となる100 t/dayや1,300 t/dayの処理能力では、黒字転換が大幅に遅れ、また、15年以上経過しても初期投資を回収できず、事業採算性を確保することはできないと試算された。最終的には、30 t/day未満となるような小規模メタン発酵処理システムであれば、初期投資の回収に時間はかかるが、建設費の低減、糞尿の適正処理、周辺水域の汚染防止、生活環境の保全、持続可能エネルギー供給体制の構築に期待ができるという成果を得た。加えて、大型のメタン発酵施設を建設して稼働するよりも、小型のメタン発酵施設を対象地域で分散させた上で稼働させることが、環境負荷をより低減できると推察した¹⁸⁾。

現在、日本国内には139,176の農業集落¹⁹⁾(農家戸数: 2,452,631戸²⁰⁾、農家人口: 11,001,144人²⁰⁾が存在している。また、各都道府県または地方自治体では、公共用水域の水質保全および農業用排水施設の機能維持または農村の生活環境の改善を図り、生産性の高い農業の実現と活力ある農村社会の形成に資することを目的とした農業集落排水事業を進められている。農業集落排水施設からは浄化槽汚泥が排出される。農業集落排水施設は法律上は浄化槽にあたるので、下水汚泥を排出する下水処理場とは異なる施設である。よって、浄化槽汚泥と下水汚泥は別物であり、浄化槽汚泥賦存量は、先述の下水汚泥賦存量約7,500万トン/年に含まれていない。しかし、浄化槽汚泥は下水汚泥と同様にメタン発酵処理できるバイオマス資源であり、メタン発酵して得られたエネルギーを農業集落排水施設や同集落内に還元して利用することは、可能であると筆者らは考えている。各都道府県が公表している農業集落排水処理施設の処理状況等によると、1施設から発生する浄化槽汚泥量は0.4 ~ 0.6 m³/day(含水率98%)となっている例もあり、これを農業集落排水処理1施設あたりの供用人口で表すと

約600人になる^{21, 22)}。筆者らはメタン発酵処理の事業性評価を行ったと述べているが、0.5 m³/dayの処理能力の場合での評価は行っていない。ある事業を進めようとする際に事業性、すなわち経済的な評価を行うことは必要であるが、これと同時に、その事業が環境に与える影響も評価することが必要である。このことを踏まえて、先述した汚泥発生量(1施設から発生する浄化槽汚泥量は0.4 ~ 0.6 m³/day(含水率98%))を処理能力と設定し、筆者らが開発した超高温可溶性-メタン発酵処理システムでこの浄化槽汚泥をメタン発酵処理できると仮定した。その上で、本システムが環境に与える影響を評価するために、次節のとおりシステム境界と機能単位の設定を行った。

2.3 システム境界と機能単位の設定

評価対象としたシステム境界は、農業集落排水施設から発生する浄化槽汚泥をメタン発酵処理するプロセスとした。システム境界をFigure 2に示した。メタン発酵の際の浄化槽汚泥消化率は2.1で述べたとおり65.7%とした。メタン発酵処理では、発生したメタンガスを利用して、マイクロガスタービンなどを稼働させることで、電力を生産することができる。しかし、筆者らの実証試験では発電に利用できるほどのメタンガス量が生成できなかったため、電力を生産するシステムにはなっていない。また、メタン発酵後の消化液を適正に処理する際に環境負荷が発生するデメリットがある。消化液は液肥として利用することで、排水処理の観点での消化液の特別な処理は不要と考えられる。液肥として利用する場合は、利用する場所までの運搬方法、液肥の散布回数、散布方法、及び使用が抑制できる化学肥料の量を考えた上で、これらの環境負荷を評価範囲に含める必要がある。しかし、現在までに筆者らの開発したシステムで発生する消化液の利用に関する諸データを十分に確立できていないことから、本システム境界から消化液利用の工程は除外した。そして本研究の機能単位は、農業集落排水施設から発生する浄化槽汚泥0.5 m³/dayを20年間毎日メタン発酵処理することと設定した。

Figure 2. System boundary.

2.4 評価シナリオと評価方法

下水汚泥の処理方法には、焼却、固形燃料化²³⁾、部分燃焼ガス化²⁴⁾などの様々な方法がある。これらの方法で下水汚泥の処理を行うと大量の化石燃料が消費され、また二酸化炭素よりも温室効果が310倍高い一酸化二窒素も大量に排出されている²⁵⁾。下水汚泥のメタン発酵処理のメリットは、メタンガスがバイオマスエネルギーとして利用できる点に加えて、地球温暖化を著しく促進させる一酸化二窒素の排出量が少なく、地球温暖化を抑制できる技術であることである。先述したとおり、浄化槽汚泥は下水汚泥の中には含まれていない。しかし、両者はメタン発酵できるバイオマス資源であることから、浄化槽汚泥処理も下水汚泥処理と同じ焼却処理や固形燃料化処理は可能であり、

メタン発酵処理技術とこれらの環境影響評価を比較することは非常に重要である。これまでに報告されている研究事例をもとにして、下水汚泥を焼却処理²⁶⁾、低温と高温での固形燃料化処理^{27, 28)}した際に発生する温室効果ガスを二酸化炭素換算したものをTable 3にまとめた。これらの結果と、筆者らの開発した超高温可溶化-メタン発酵処理システムを比較することが、メタン発酵処理が地球温暖化に与える影響を評価することになる。しかしながら、これらは50 ~ 100 m³/dayの処理能力で汚泥を処理している実際のプラントを対象としており、筆者らが設定した機能単位が異なっているため、超高温可溶化-メタン発酵処理システムとの環境影響評価を比較しても、それは正しい評価とは言えない。

Table 3. Comparison of GHG gas emission (other's study).

	sludge incinerator ²⁶⁾	high temperature carbonized incinerator ²⁷⁻²⁸⁾	low temperature carbonized incinerator ²⁷⁻²⁸⁾
electricity	25	17.5	18.9
LPG		155.3	44.5
A heavy oil	51	1	1
N ₂ O discharge	280	45.3	3.7
CO ₂ discharge	356	219.1	68.1

※ unit: converted to CO₂ value (kg-CO₂/dewatered sludge t)

Table 4. LCI data for construction of Methane Fermentation System with Hyper Thermal Solubilization.

No.	equipment	weight	detail						
			iron	copper	stainless steel	aluminum	rubber	rock wool	resin
M-1	stirring machine of solubilization tank	22kg	10kg	0.4kg	6kg	6kg	-	-	-
M-2		22kg	10kg	0.4kg	6kg	6kg	-	-	-
M-3		22kg	10kg	0.4kg	6kg	6kg	-	-	-
M-4	stirring machine of methane fermentation tank	225kg	114kg	1.5kg	111kg	-	-	-	-
P-1	sewage transfer pump	47kg	41kg	0.6kg	5kg	1kg	-	-	-
P-2	solubilization tank issue pump	47kg	41kg	0.6kg	5kg	1kg	-	-	-
P-3	fermented sewage circulation pump	104kg	80kg	1.0kg	20kg	1kg	3kg	-	-
P-4	solubilized sewage circulation pump	11kg	-	0.3kg	11kg	-	-	-	-
P-5	hot-water pump	10kg	8kg	0.3kg	2kg	-	-	-	-
P-6		10kg	8kg	0.3kg	2kg	-	-	-	-
P-7	air pump	3kg	1kg	0.1kg	-	1kg	-	-	1kg
P-8		3kg	1kg	0.1kg	-	1kg	-	-	1kg
P-9		3kg	1kg	0.1kg	-	1kg	-	-	1kg
BO-1	hot-water boiler	62kg	5kg	-	57kg	-	-	-	-
S-1	solubilization tank (1m ³)	870kg	830kg	-	-	-	-	40kg	-
S-2	methane fermentation tank (5m ³)	2190kg	2100kg	-	-	-	-	90kg	-
-	control panel	300kg	30kg	100kg	150kg	10kg	-	-	10kg
-	pipe arrangement	383kg	333kg	-	-	-	-	-	50kg
	total	4334kg	3623kg	106kg	381kg	34kg	3kg	130kg	63kg

foundation construction 8m × 2.5m × 0.5mH	total weight	concrete	reinforcing bar
	23400kg	23000kg	400kg

超高温可溶化-メタン発酵処理システムの特徴は、1.諸言でも述べたとおり、従来技術よりも約2倍量のメタンガスを発生できる技術である点である。メタンガス発生量が2倍になることは、単純に、利用できるバイオマスエネルギーが2倍になることから環境により良い技術であると思われるが、可溶化槽やポンプがより多く設置され、投入される電力などの負荷も増えることから、これらを考慮した上でのシステム全体の環境影響評価を行うことが必要である。そこで本研究では、機能単位が同じとなるように一槽式メタン発酵処理システムを比較対象として、メタンガス発生量が2倍となる超高温可溶化-メタン発酵処理システムの環境影響評価を行うこととした。

本研究における評価シナリオは、以下のとおりにした。評価範囲は、メタン発酵施設の建設と20年間の施設の維持管理、実際のメタン発酵処理（メタン発酵を行う際に消費される電力消費量、発酵槽等の保温や加温に使われる燃料消費量（プロパンガス））、20年経過後のシステム全体の廃棄処分の4ステージと設定し、ステージごとの環境影響を評価した。施設の建設に必要な建設資材や装置等はTable 4とTable 5のとおりであり、これらの消費電力は

Table 6に示した。また、20年間の施設の維持管理は、ポンプ、モーター及び発酵槽等の設備更新を行うことと定め、Table 7のとおりに設定した。Table 4からTable 7のデータは、例えば、施設の建設に必要な建設資材等は、実際の建設資材量や関連企業への調査やヒアリングを通しての調査、これまでの実証試験で得たデータから作成した。両メタン発酵処理を行う場所は日本国内とし、それ以外の詳細な場所は特に指定しないこととするため、建設資材等の輸送にかかる環境負荷は考慮しないこととした。なお、筆者らの開発した超高温可溶化-メタン発酵処理システムの評価は、同機能単位のもとで、従来行われている一槽式メタン発酵処理システムの場合と比較することとした。概略をFigure 3に示した。この際は、一槽式メタン発酵の53℃発酵槽の加温と保温に必要なプロパンガス量は、実際に消費されるデータを持っていないため、理論上必要と考えられる熱量から、必要なプロパンガス量を求めて利用した。また、一般的に、53℃でメタン発酵を行う場合の滞留時間は10～15日となっているが、様々な文献や報告等で滞留時間が14日～16日となっている²⁹⁾ものもあることから、本研究では滞留時間を15日間と設定し、その際の発酵槽

Table 5. LCI data for construction of Single Methane Fermentation System.

No.	equipment	weight	detail						
			iron	copper	stainless steel	aluminum	rubber	rock wool	resin
M-4	stirring machine of methane fermentation tank	225kg	114kg	1.5kg	111kg	-	-	-	-
P-1	sewage transfer pump	47kg	41kg	0.6kg	5kg	1kg	-	-	-
P-3	fermented sewage circulation pump	160kg	123kg	1.0kg	32kg	1kg	4kg	-	-
P-6	hot-water pump	10kg	8kg	0.3kg	2kg	-	-	-	-
BO-1	hot-water boiler	62kg	5kg	-	57kg	-	-	-	-
S-3	methane fermentation tank (15m ³)	3550kg	3400kg	-	-	-	-	150kg	-
-	control panel	220kg	10kg	70kg	120kg	10kg	-	-	10kg
-	pipe arrangement	224kg	208kg	-	-	-	-	-	16kg
	total	4498kg	3909kg	73kg	327kg	12kg	4kg	150kg	26kg

foundation construction 8m × 2.5m × 0.5mH	total weight	concrete	reinforcing bar
	23400kg	23000kg	400kg

Table 6. Electricity consumption of Methane Fermentation System with Hyper Thermal Solubilization.

Equipment (number)	electricity (kWh/h)	number	total (kWh/h)
stirring machine of solubilization tank (M-1,M-2,M-3)	0.2	3 unit	0.6
stirring machine of methane fermentation tank (M-4)	0.75	1unit	0.75
sewage transfer pump (P-1)	0.4	1unit	0.4
solubilization tank issue pump (P-2)	0.4	1unit	0.4
fermented sewage circulation pump (P-3)	0.75	1unit	0.75
solubilized sewage circulation pump (P-4)	0.2	1unit	0.2
hot-water pump (P-5, P-6)	0.08	2unit	0.16
air pump (P-7, P-8, P-9)	0.02	3unit	0.06
total (kWh/h)			3.32

Table 7. The information of system repairing.

No.	equipment	time of repair
M-1	stirring machine of solubilization tank	once every 5 years
M-2		
M-3		
M-4	stirring machine of methane fermentation tank	once every 5 years
P-1	sewage transfer pump	once every 5 years
P-2	solubilization tank issue pump	
P-3	fermented sewage circulation pump	
P-4	solubilized sewage circulation pump	
P-5	hot-water pump	once every 5 years
P-6		
P-7	air pump	once every 5 years
P-8		
P-9		
BO-1	hot-water boiler	once every 10 years
-	solubilization tank (1m ³)	once every 10 years
-	methane fermentation tank	once every 10 years
-	control panel	-
-	pipe arrangement	once every 5 years

Figure 3. Flow of Single Methane Fermentation System.

の容量を7.5 m³として評価を行うこととした。

評価を行うために、まず超高温可溶化-メタン発酵処理システムと一槽式メタン発酵処理システムのライフサイクルインベントリ分析 (LCI分析) を行った。LCI分析は、(社) 産業環境管理協会JEMAI LCA ProソフトウェアVer.2.1.1³⁰⁾で行った。LCI分析に必要なデータはTable 4～Table 7に示したもの、及び「産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID: Embodied Energy and Emission Intensity Data for Japan using input-output tables)」と「環境負荷原単位と品目別国内生産額との対応表」を利用して³¹⁾、LCI分析に利用できるように筆者らで整理した。なお、施工時の燃料消費量については、データの収集が不可であったため、LCI分析には含めなかった。LCI分析後、同ソフトウェアを利用して、日本版

被害算定型環境影響評価手法 (LIME: Life-cycle Impact assessment Method based on End point modeling) によるライフサイクルインパクトアセスメント (LCIA: Life Cycle Impact Assessment) を行い、特性化、被害評価、統合化の3ステップで両メタン発酵処理を評価した。バイオガス中の二酸化炭素は、カーボンニュートラルの概念から評価対象としなかった。特性化では、両システムの地球温暖化に対する環境影響に注目し、地球温暖化に関する大気関連環境負荷物質9項目 (二酸化炭素、ばいじん、炭化水素、非メタン炭化水素、硫黄酸化物、二酸化硫黄、窒素酸化物、一酸化二窒素、メタン) の発生量を比較した。被害評価と統合化では、設定したシステム境界内で大きな影響を与えている要因を検討した。

また、2.3で述べたとおり、筆者らのメタン発酵処理シ

システムの規模では電力を生産することは難しい。しかし、発生したメタンガスを温水ボイラーなどで燃焼させて熱源として利用することは可能である。メタン発酵処理システムでは、発酵槽の保温が必要であり、これをプロパンガスの燃焼によって行っていた。これをメタン発酵システムで発生したメタンガスを燃焼させた時の熱エネルギーで補うことができれば、燃料であるプロパンガスの消費量を抑えることができ、これが環境に与える影響を小さくできると考えた。そこで、Figure 4に示すようにメタン発酵処理で得られたメタンガスを燃料にして、これによって得られた熱エネルギーをメタン発酵処理システムの可溶化槽または発酵槽の熱源に還元した場合に、環境に与える影響をLIMEで評価した。

3. 結果と考察

3.1 特性化結果と大気関連環境負荷物質について

建設と維持管理、システム稼働の消費電力、システム稼働の燃料使用、処分の4ステージにおいての特性化の結果をTable 8とTable 9に示した。特性化の結果、超高温可溶化-メタン発酵処理システムでの地球温暖化の影響が、一槽式メタン発酵処理システムと比べて大きくなる結果が示された。この原因は、超高温可溶化-メタン発酵処理システムの燃料使用における影響が非常に大きくなっていることにある。

同システムでは、53℃のメタン発酵槽の前段に、80℃の可溶化槽を設けている。従って、一槽式メタン発酵と比較すると、超高温可溶化-メタン発酵処理システム稼働のための燃料使用量は増える。筆者らは、実証試験計画段階で発酵槽と可溶化槽の加温と保温に必要な熱量について、

年間平均気温、汚泥や材料の比熱、熱伝達率、放散熱量などのパラメータを考慮して計算を行い、必要なプロパンガス量を求めたところ、2槽の加温と保温のために必要となる熱源は理論値として4,040 kcal/hであった。加温と保温のために使った温水ボイラーの能力は24,500 kcal/hであったことから、1年間(24 h × 365 日)に必要な総熱量は 3.54×10^7 kcalとなる。プロパンガスの低位発熱量21,800 kcal/m³とから必要とされる1年間あたりのプロパンガス量は1,628 m³となる。筆者らの実証試験で消費されたプロパンガス量は2,514 m³であり、理論値の約1.5倍のプロパンガスが消費されていた。槽の加温と保温に必要な熱量をプロパンガス消費量から判断するとボイラー効率率は65 %となるが、一般的なボイラーの効率は低位発熱量基準で80 ~ 90 %くらいであることを考えると筆者らの算出した65 %という値は低すぎであるので、これを「見掛け上のボイラー効率」と称して、本論の結果-考察に用いることとした(以下、本論で登場するボイラー効率という言葉は、これと同義とした)。なお、一槽式メタン発酵の場合は、メタン発酵槽の加温と保温が必要であり、このために必要な熱源は理論値として2,065 kcal/hであった。これを1年間あたりプロパンガス量に換算すると743 m³となるが、超高温可溶化-メタン発酵処理システムの場合と同様に、実際の消費量は理論値から大幅にずれると考え、本研究では同1.5倍の1,115 m³が消費されると仮定して評価を行った。可溶化槽と発酵槽の加温と保温のために、システム稼働の燃料使用における地球温暖化に対する影響が大きくなった結果が示されたが、これを抑制できれば、両メタン発酵処理システムの地球温暖化の影響を小さくできると考えられる。

また、建設と維持管理、および処分の2ステージでは、

Figure 4. Flow of Methane Fermentation System with Hyper Thermal Solubilization with heat reduction.

両メタン発酵システムの影響はほぼ同じレベルであった。両システム構成を比較すると可溶化槽の有無とメタン発酵槽の大きさに差があるが、これらの違いは環境に与える影響に大きな差を与えないことが明らかになった。一方で、消費電力については超高温可溶化-メタン発酵処理システムの影響が大きかったが、これは可溶化槽の汚泥移送ポンプやエアレーションポンプの動力分が必要となるため、一槽式メタン発酵処理システムよりも消費電力の影響が大き

くなることが分かった。

二酸化炭素をはじめとする大気関連環境負荷物質9項目の発生量をTable 10に示した。同表より、二酸化炭素、一酸化二窒素およびメタンの地球温暖化に直接寄与する物質の発生量は、超高温可溶化-メタン発酵処理システムの方が大きかった。この理由も上述したとおりのシステム稼働での燃料使用とポンプ動力分の電力消費が多かったことに起因している。

Table 8. Result of characterization (Methane Fermentation System with Hyper Thermal Solubilization).

hyperthermal solubilized methane fermentation	construction and maintenance	electricity	fuel	disposal	total
global warming IPCC-100 years index (2001)	6.91E+04	2.46E+05	3.19E+05	1.06E+02	6.34E+05
human toxicity (carcinogenicity) HTP_cancer	5.17E-01	8.13E+01	7.64E-03	2.23E-02	8.19E+01
human toxicity (chronic condition) HTP_chronic disease	1.98E-04	3.12E-02	2.93E-06	8.57E-06	3.14E-02
ecotoxicity (aquatic) AETP	3.19E+00	5.02E+02	4.71E-02	1.38E-01	5.05E+02
ecotoxicity (terrestrial) TETP	7.23E+01	1.14E+04	1.07E+00	3.13E+00	1.15E+04
acidification DAP	1.29E+02	1.32E+02	1.29E+02	4.74E-02	3.90E+02
eutrophication EPMC	1.37E+00	1.37E+00	1.80E+00	1.43E-03	4.54E+00
photochemical oxidant OECF	9.64E-01	6.51E+00	2.09E+00	1.86E-03	9.56E+00
waste m ³	1.61E+00	3.57E-03	4.82E-07	2.37E+01	2.53E+01
resource consumption 1/R (Sb standrad)	7.22E+00	3.46E+00	1.41E+00	1.12E-03	1.21E+01
energy consumption MJ	2.87E+05	5.70E+06	4.65E+06	2.13E+03	1.06E+07

Table 9. Result of characterization (Single Methane Fermentation System).

single methanefermentation	construction and maintenance	electricity	fuel	disposal	total
global warming IPCC-100 years index (2001)	7.05E+04	2.02E+05	1.56E+05	1.31E+02	4.29E+05
human toxicity (carcinogenicity) HTP_cancer	5.79E-01	6.69E+01	3.74E-03	2.75E-02	6.75E+01
human toxicity (chronic condition) HTP_chronic disease	2.22E-04	2.57E-02	1.44E-06	1.06E-05	2.59E-02
ecotoxicity (aquatic) AETP	3.57E+00	4.13E+02	2.31E-02	1.70E-01	4.17E+02
ecotoxicity (terrestrial) TETP	8.11E+01	9.36E+03	5.24E-01	3.85E+00	9.45E+03
acidification DAP	1.31E+02	1.08E+02	6.34E+01	5.83E-02	3.03E+02
eutrophication EPMC	1.40E+00	1.13E+00	8.80E-01	1.76E-03	3.41E+00
photochemical oxidant OECF	1.11E+00	5.35E+00	1.02E+00	2.29E-03	7.48E+00
waste m ³	1.54E+00	2.93E-03	2.36E-07	2.92E+01	3.08E+01
resource consumption 1/R (Sb standrad)	9.11E+00	2.84E+00	6.89E-01	1.38E-03	1.26E+01
energy consumption MJ	2.96E+05	4.69E+06	2.28E+06	2.63E+03	7.26E+06

Table 10. The environmental burdens concerned with air of both methane fermentation system.

	hyper thermal solubilized methane fermentation	single methane fermentation
CO ₂	6.60E+05	4.68E+05
Dust	1.15E+01	9.19E+00
Hydrocarbon	1.22E+01	9.85E+00
NMHC	1.04E+01	8.58E+00
SO _x	6.12E+01	5.15E+01
SO ₂	3.51E+01	3.29E+01
NO _x	3.33E+02	2.67E+02
N ₂ O	1.71E+01	1.31E+01
CH ₄	8.59E+00	6.53E+00

unit : kg

3.2 被害評価結果

Figure 5に「人間の健康」に対する被害評価、Figure 6に「社会資産」に対する被害評価を示した。それぞれの図の左グラフは、影響領域の内訳を示している。また、同右グラフは、建設と維持管理、システム稼働での電力消費量、システム稼働の燃料使用、処分の4ステージごとの被害量を示している。「人間の健康」における被害影響は、超高温可溶化-メタン発酵処理システムの方が一槽式メタン発酵システムよりも大きかった。詳細は、地球温暖化の影響が非常に大きくなっている。ステージ別に見た場合、超高温可溶化-メタン発酵処理システムのシステム稼働の燃料使用での被害影響が大きくなっており、建設と維持管理、電力消費量、処分の影響に差は見られなかった。一槽式

メタン発酵システムの発酵槽7.5 m³は、超高温可溶化-メタン発酵処理システムの同5.0 m³と比べて大きい。しかし、これが環境に与える影響は、燃料が与える影響に比べると非常に小さくなることが明らかになった。「社会資産」に対する被害評価も「人間の健康」と同様に、燃料使用に起因する地球温暖化と資源消費の影響が大きかったため、超高温可溶化-メタン発酵処理システムの方が一槽式メタン発酵システムよりも被害量が多かった。

Figure 7に「生物多様性」に対する被害評価を示した。同図から、僅かな差であるが資源消費と廃棄物が環境に与える影響が大きかったため、一槽式メタン発酵システムの影響が大きかった。4ステージ中の内訳で見ると、両システムの処分における影響量で差が見られた。「人間の健康」

Figure 5. Impact on Human Health.

Figure 6. Impact on Social Asset.

Figure 7. Impact on Biodiversity.

Figure 8. Impact on Primary Production.

では発酵槽の大きさに起因する影響が、燃料消費の影響と比べると非常に小さかったので目立たない形となっていた。発酵槽が大きいと、それを処分する負荷も大きくなり、「生物多様性」の被害評価ではこれが見える形で評価された。Figure 8は、「一次生産」に対する被害評価を示した。両被害評価は、ほぼ同じ影響量であった。「生物多様性」の場合と同様に資源消費と廃棄物の影響で差が認められると思われたが、「生物多様性」ほど目立たない形となっていた。なお、「人間の健康」と「社会資産」で著しく大きな影響量を示した燃料消費については、ここでは大きな影響量を示していなかった。以上の4被害評価の結果から、燃料消費による影響がシステム全体に与える影響の大部分を占めていることと、これに関係して、両システム発酵槽の大きさの違いはシステム全体が与える影響に大きく寄与しないということが明らかになった。

3.3 統合化結果

Figure 9に影響領域とステージごとの統合化結果を示した。統合化結果では、超高温可溶化-メタン発酵処理システムの方が、環境に与える影響が大きくなる結果となった。影響領域の内訳で見ると、超高温可溶化-メタン発酵処理システムにおける地球温暖化の影響が一番大きく、また都市大気汚染と資源消費の影響も大きくなっている。これは3.2 被害評価で述べたとおりであり、また同図のステージごとの内訳でも示されているとおり、燃料使用の影響が大きくなっていることから、このような結果が示された。発酵槽の大きさや処分に起因する両者の差は、その他の影響量が大きかったことから認められなかった。以上より、システム稼働の燃料使用を抑えることができれば、超高温可溶化-メタン発酵処理システムが環境に与える影響は大きくなり、一槽式メタン発酵処理システムよりも環境負荷が高くなることが明らかになった。

Figure 9. Impact on Single Index.

Figure 10. Impact on Human Health of Methane Fermentation System with Hyper Thermal Solubilization without and with biogas use for heating.

Figure 11. Impact on Social Asset of Methane Fermentation System with Hyper Thermal Solubilization without and with biogas use for heating.

3.4 メタンガスのエネルギー還元利用における環境影響評価

超高温可溶化-メタン発酵処理システムでは、6.5 m³/day (6,500 L/day) のバイオガスが発生しており、メタンガスが占める割合は約65 %であることから、4.225 m³/dayのメタンガスが発生していることになる。これを全て燃焼させた場合、メタンガスの発熱量を9,900 kcal/m³とすると、1.53 × 10⁷ kcal/yearの熱量が得られる。この熱を超高温可溶化-メタン発酵処理システムの可溶化槽と発酵槽に利用することは、この熱量と等価なプロパンガスが

削減される。先述のとおりプロパンガスの低位発熱量を21,800 kcal/m³とすると、700 m³のプロパンガスに相当する。従って、実証試験では2,514 m³のプロパンガスを消費していたが、メタンガスを還元利用することで1,814 m³までプロパンガス消費量を削減することができる。これを設定した評価シナリオのもとでLIME評価を行い、Figure 10に4ステージごとの被害評価「人間の健康」、Figure 11に同「社会資産」を示した。両図から、必要となるプロパンガスの量が抑制でき、環境に与える影響を小さくすることが可能であることが分かった。Figure 12に示した統合化結

Figure 12. Impact on Single Index of Methane Fermentation System with Hyper Thermal Solubilization without and with biogas use for heating.

果にも同様の結果を示していた。なお、「生物多様性」と「一次生産」への影響量は、熱エネルギー還元を考慮しても、変化しなかった（結果の図は省略）。今後はこの点を視野に入れて、より環境に与える影響が低くなる超高温可溶化-メタン発酵処理システムへの改良を検討していきたい。

4. 結論

本論文では、超高温可溶化-メタン発酵処理システムと一槽式メタン発酵処理システムの環境影響評価を行い、以下の結論を得た。

- 1) 筆者らが行った実証試験の結果を基に行った超高温可溶化-メタン発酵処理システムにおける環境影響評価は、一槽式メタン発酵システムと比べて地球温暖化の影響が大きくなり、「人間の健康」と「社会資産」の被害量が大きかった。これは、可溶化槽とメタン発酵槽の加温と保温に必要なプロパンガスの消費量が著しく大きくなった実証試験結果が原因であり、プロパンガスの使用量を抑制できれば、これらの両影響を抑えることが示唆された。
- 2) 同様に、「生物多様性」の被害量は、両システム間で資源消費と廃棄物による影響に差があったので超高温可溶化-メタン発酵処理システムの方が一槽式メタン発酵システムと比べて僅かに小さい結果となった。一方で、「一次生産」の被害量について、両システム間での差は見られなかった。
- 3) 超高温可溶化-メタン発酵処理システムでは、見掛け上のボイラー効率が65 %であり、可溶化槽と発酵槽の加温と保温に必要な燃料プロパンガスの消費量が著しく多かったために、被害評価において地球温暖化や

都市大気汚染などの燃料由来の影響が非常に大きかった。さらに、統合化結果でも同様の理由から、超高温可溶化-メタン発酵処理システムの影響が大きくなった。

- 4) 超高温可溶化-メタン発酵処理システムで発生したメタンガスを燃焼させて得られた熱エネルギーを可溶化槽と発酵槽の保温に還元利用した場合、プロパンガスの消費量を大きく抑制できることから、環境に与える影響を小さくできることが分かった。

（平成24年2月27日受付、平成24年9月5日採択）

参考文献

- 1) 国土交通省, 下水汚泥資源利用の現状と課題, 国土交通省ホームページ, 入手先 <<http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewage/gyosei/sigen1st/04.pdf>>, (参照 2011-7-15)
- 2) 湯川英明 (2001): バイオマスエネルギー利用技術, シーエムシー出版, 東京, 95
- 3) 独立行政法人 新エネルギー産業技術総合開発機構, バイオマス種と推計方法 市町村単位 廃棄物系資源-家畜ふん尿・汚泥 - 下水汚泥 (濃縮汚泥), バイオマス賦存量有効利用可能量の推計ホームページ, 入手先 <<http://apl.infoc.nedo.go.jp/biomass/about/COOutSC.pdf>>, (参照 2012-7-1)
- 4) 社団法人 日本エネルギー学会 (2002): バイオマスハンドブック, オーム社, 東京, 422pp.
- 5) 国土交通省, 下水道の有するポテンシャルとその活用状況について, 国土交通省ホームページ, 入手先 <<http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewage/gyosei/>>

- sigen4th/02-2.pdf>, (参照 2011-7-21)
- 6) 荒金光弘, 今井剛, 村上定瞭, 竹内正美, 浮田正夫, 関根雅彦, 樋口隆哉 (2006): 土木学会論文誌G, 62(4), 427-434
 - 7) V.アラヴィンタン, 味埜俊, 佐藤弘泰, 滝沢智, 松尾友矩 (1998): 環境工学研究論文, 35, 189-198
 - 8) 坪田潤, 局俊明, 津野洋 (2007): 廃棄物学会論文誌, 18(2), 145-151
 - 9) 坪田潤, 角新支朗, 津野洋 (2008): 廃棄物学会論文誌, 19(1), 51-60
 - 10) 坪田潤, 黒木浩二, 洪鋒, 千智勲, 津野洋 (2008): 廃棄物学会論文誌, 19(4), 265-274
 - 11) 今井剛, 荒金光弘, 樋口隆哉, 関根雅彦, 村上定瞭, 竹内正美 (2008): 廃棄物学会論文誌, 19(1), 1-8
 - 12) Nakamichi T., Nakashima T., Fujisaki H., Takamatsu N., Muramatsu T., Takahashi Y., Ishibashi Y. (2010): Environmental Engineering Science, 27(12), 993-999
 - 13) 中道隆広, 宮城彰平, 藤崎浩嗣, 甲斐穂高, 石橋康弘 (2009): 環境科学会2009年会講演集, 東京, 86-87
 - 14) 中道隆広, 中島琢自, 甲斐穂高, 高松伸枝, 高橋洋子, 石橋康弘 (2010): 第21回廃棄物学会研究発表会講演論文集 (CD-ROM), 金沢, B9-2
 - 15) 学校法人 長崎総合科学大学 (2009): 平成21年度経済産業省「低炭素社会に向けた技術発掘・社会システム実証モデル事業」, 超高温可溶化技術を利用した高濃度メタン発酵システムの実証最終報告書, 47
 - 16) 公益社団法人 日本下水道協会 (2009): 下水道施設計画・設計指針と解説 後編, 東京, 717
 - 17) 学校法人 長崎総合科学大学 (2010): 平成22年度「長崎県新エネルギー産業等集積促進事業」, 新エネルギー・環境産業事業可能性調査, 高温可溶化システムを用いた下水汚泥メタン発酵技術の確立事業調査報告書, 65
 - 18) 有限会社 AT研究所 (2008): 平成20年度「新エネルギー・環境産業事業可能性調査委託事業」, 島原半島内での家畜糞尿バイオマスエネルギー活用可能性調査報告書, 79
 - 19) 独立行政法人 統計センター, 2010年世界農林業センサス 第8巻 農業集落類型別統計報告書, 政府統計の総合窓口ホームページ, 入手先 <<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000001036141&cycode=0>>, (参照 2012-4-16)
 - 20) 独立行政法人 統計センター, 2005年農林業センサス第8巻 農業集落類型別統計報告書, 政府統計の総合窓口ホームページ, 入手先 <<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000001012003&cycode=0>>, (参照 2011-7-25)
 - 21) 滋賀県農村振興課, 平成19年の農業集落排水処理施設の処理状況, 滋賀県ホームページ, 入手先 <<http://www.pref.shiga.jp/g/noson/topics/h19-haisui-shori.pdf>>, (参照 2011-7-25)
 - 22) 株式会社スリーケー, 農業集落排水処理施設の機能改善, 株式会社スリーケーホームページ, 入手先 <<http://suri-k.com/sec4-3.html>>, (参照 2011-8-10)
 - 23) 地域共同法人 日本下水道事業団 技術評価委員会, 下水汚泥固形燃料化システムの技術評価に関する報告書, 日本下水道事業団ホームページ, 入手先 <<http://www.jswa.go.jp/g/g4/g4g/pdf/gihyo24.pdf>> (参照 2011-8-28)
 - 24) 永野雅博, 並木圭治, 田崎敏郎 (2007): 下水汚泥ガス変換発電システムの実用化検証, 東京都下水道局技術調査年報2007, 東京都下水道局ホームページ, 入手先 <<http://www.gesui.metro.tokyo.jp/gijyutou/gn19/nenpou2007/3-3-1.pdf>>, (参照 2011-8-16)
 - 25) 環境省・経済産業省, 温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル (Ver3.3) 第II編 温室効果ガス排出量の算定方法, 環境省ホームページ, 入手先 <http://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/manual/chpt2_3-3.pdf>, (参照 2012-8-1)
 - 26) 高橋隆一, 桐原隆, 松田博希, 鎌田浩三, 伊藤貴浩, 下水汚泥炭化処理技術に関する研究, 財団法人 下水道新技術推進機構ホームページ, 入手先 <<http://www.jiwet.jp/result/annual/sludgeprocessing/2003a1-2-3-13m.htm>>, (参照 2011-8-28)
 - 27) 大同特殊鋼株式会社, 製品・技術紹介 <地球温暖化対策と対応技術特集> 下水汚泥低温炭化システムによる本質効果ガス削減効果, JEFMAホームページ, 入手先 <<http://www.jefma.or.jp/jefma/57/pdf/jefma57-15.pdf>>, (参照 2011-8-26)
 - 28) 内田賢治, 下水汚泥のガス化、燃料化等についての必要エネルギー等に関する研究, 財団法人 下水道新技術推進機構ホームページ, 入手先 <<http://www.jiwet.jp/quarterly/n009/pdf/n009-003.pdf>>, (参照 2011-8-28)
 - 29) 湯川英明 (2001): バイオマスエネルギー利用技術, シーエムシー出版, 東京, 96-99
 - 30) 社団法人 産業環境管理協会, ライフサイクルアセスメント実施支援ソフトウェアJEMAI LCA Pro Ver2.1.1, 東京, 2008-7-10
 - 31) 南齋規介, 森口祐一, 東野達, 産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID) 1995年度版, 独立行政法人 国立環境研究所 地球環境研究センターホームページ, 入手先 <<http://www.cger.nies.go.jp/publications/report/d031/jpn/datafile/index.htm>>, (参照 2011-7-1)