

生ごみのバイオガス化と燃料電池発電の組合わせシステム

Combined System of Thermophilic Methane Fermentation of Garbage and Fuel Cell Power Generation

東 郷 芳 孝¹⁾
多田 羅 昌 浩
後 藤 雅 史

要 約

有機性廃棄物をメタン発酵処理し、発生したバイオガスを燃料とする燃料電池システムは、環境、エネルギー問題双方に大きく貢献することができる。しかし、生ごみのメタン発酵処理と燃料電池を組み合わせたシステムの実績例はこれまで無い。今回、筆者らが開発した固定床式高温メタン発酵法による有機性廃棄物処理施設（商品名：メタクレス）で生ごみを処理し燃料電池で発電を行うシステムの実用性を検証するための実証実験を実施した。本実証実験では複合商業施設から排出される生ごみを1日平均125kg処理し、発生バイオガスの性状、発電特性の変化等を把握した。その結果、生ごみ中の有機物負荷変動に依らずバイオガス中のメタン濃度は60～70%で安定しており、生ごみ1トン当たり平均240Nm³のバイオガスが回収された。また、メタン濃度67～93%の範囲のバイオガスで発電実験を実施したが、使用した燃料電池の都市ガスでの発電効率36.1%に比してわずかに約2%の効率低下が見られただけで、本システムが十分に実用的であることが実証された。

目 次

- I. はじめに
- II. 実証試験装置
- III. 実験方法
- IV. 実験結果
- V. 考察
- VI. まとめ

I. はじめに

生ごみは毎年2,000万トン程度が排出されており¹⁾、そのほとんどが焼却処理や埋立処分されている。しかし、焼却に伴うダイオキシンの発生や埋立処分用地の逼迫、悪臭等の問題が顕在化しており、環境負荷の少ない新しい処理方法が求められている。

筆者らは、生ごみを再資源化する固定床式高温メタン発酵法による有機性廃棄物処理施設（商品名：メタクレス）を開発し実際の商業施設に設置して運転しており、良好な処理実績をあげている²⁾。

メタクレスは、メタン生成菌を主体とする高温嫌気性微生物で生ごみ等の有機性廃棄物をメタンを主成分とするバイオガスに分解するものであり、エネルギー源として有効利用可能なバイオガスを効率良く回収することができる。特に、バイオガスを最近著しい進歩を遂げている燃料電池に燃料ガスとして供給すれば、ダイオキシンや窒素酸化物を排出せずに有機性廃棄物をクリーンに処理し、かつ高効率の発電を可能とするシステムを構築することができ、環境・エネルギー問題に大きく貢献することが可能である。

バイオガスを利用した燃料電池発電は、下水処理場で発生する余

剰汚泥やビール工場の廃水の処理場で運転されている例があるが、生ごみでは世界的にも実績が無い。NEDOの即効型提案公募事業として実施した本実証実験では、生ごみから発生するバイオガスの性状を把握するとともに、燃料電池による発電実験を行い、生ごみメタン発酵-燃料電池発電システム構築のための検証を行った。

生ごみの嫌気処理に伴って発生するバイオガスは、タンパクなどに含まれる硫黄や窒素に由来する硫化水素やアンモニアなどの腐食性不純成分をある程度含んでいるが、燃料電池の燃料ガスとして利用するためには腐食性不純成分の除去が不可欠である。また、バイオガスの主成分であるメタン濃度も、投入生ごみの質や量によって変動すると予想される。そこで、燃料電池への燃料ガスとして満たすべき性状について、乾式ガス精製法適用の可否並びにバイオガス中のメタン濃縮工程の必要性についても検討を加えた。

II. 実証試験装置

Fig.1に本実証実験装置のフロー図を示す。また、Photo 1, 2, 3に生ごみ前処理装置/バイオリクター、ガスホルダー及び燃料電池設備をそれぞれ示す。装置の概要は以下のとおりである。

本実証実験は、鹿島建設技術研究所飛田給施設内に設置した「生ごみ高温メタン発酵処理・燃料電池発電システム」を用いて実施した。本装置は、Fig.1に示すとおり、生ごみ前処理装置、バイオリクター（高温メタン発酵槽）、バイオガス精製/濃縮/貯留装置、燃料電池発電装置、温水ボイラ装置から構成されている。本装置は、燃料電池による発電実験に係わる装置を除けば、基本的には商業施設に納入した実機を小型化したものである。

1) エンジニアリング本部有機性廃棄物資源化推進室

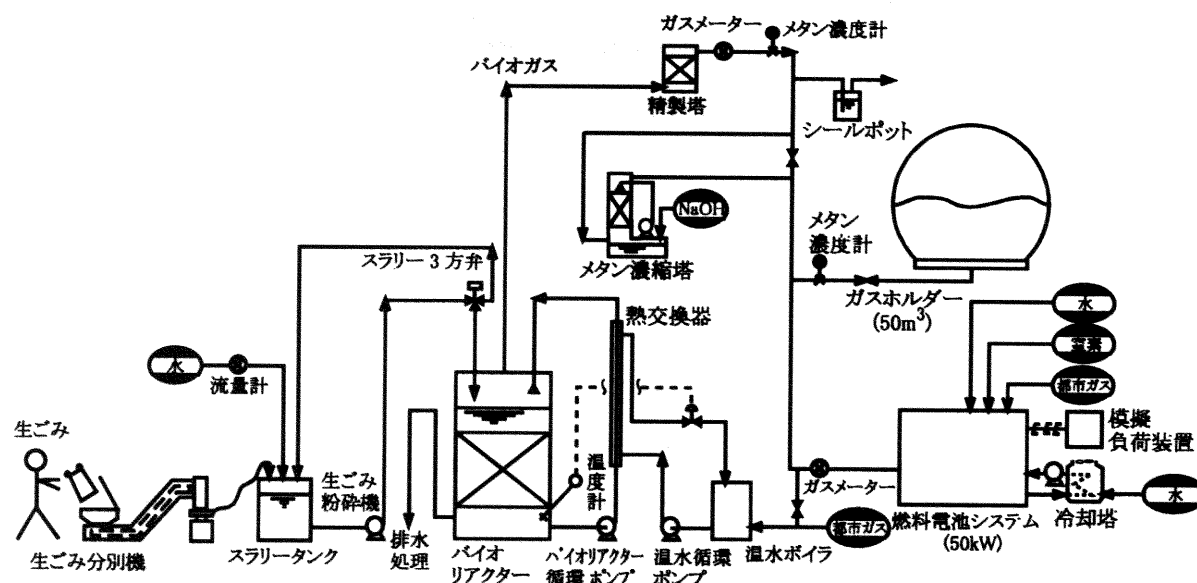


Fig. 1 Flow diagram of the demonstration system

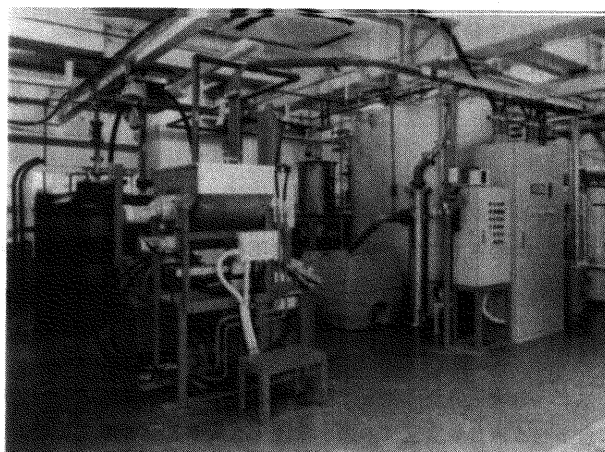


Photo 1 Pretreatment Process (left) and Thermophilic Methane Fermentor (right)

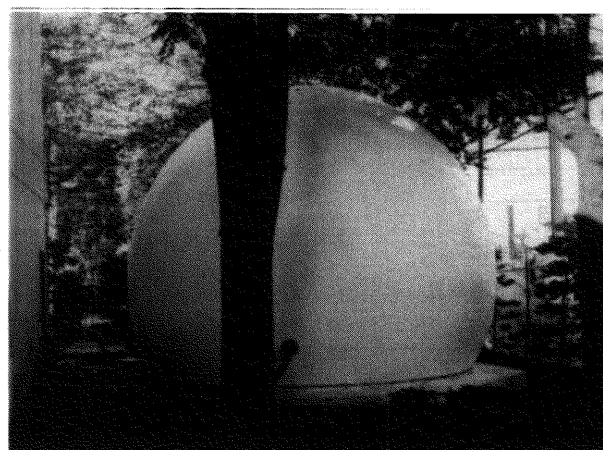


Photo 2 Biogas Holder

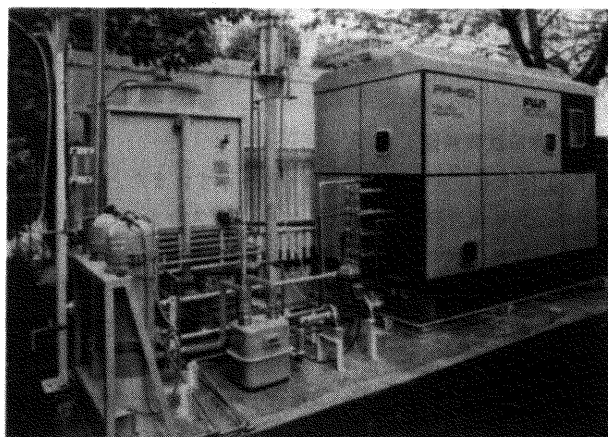


Photo 3 Fuel Cell (PAFC)

実験で用いた生ごみは、複合商業施設で発生する残飯、食物素材及び食品調理残渣、賞味期限切れ食品等である。生ごみは2日～

3日に一度の頻度で実証実験施設に搬入して前処理に供した。一度に搬入した生ごみ重量は250～350kg程度である。

1. 生ごみ前処理装置

前処理装置に搬入された生ごみは高圧圧縮分別機のホッパに投入され、40トン油圧プレスによる異物分別、有機物のペースト化を行う。本装置では、ラップ、プラスチック容器、金属片、割り箸、ビニール等は異物として分別除去し、微生物分解に適した有機物のみをペースト化する (Photo 1, 左手前)。しかし、ペースト化された有機物は粘度が高く、また、粒度も大きいため、重量・容積比では同量の稀釈水 (水道水) を加えた後、連続湿式破砕機により微粉碎し、生ごみスラリーとしてスラリータンクに貯留する。生ごみスラリーの平均的な性状は、Table 1に示すとおりである。

Table 1 Average Characteristics of Garbage Slurry

[mg/L]					
有機物濃度* (T-CODcr)	固形分 (S-CODcr)	油分 (SS)	窒素 (VSS)	油分 (n-hex)	窒素 (K-N)
207,250	66,350	99,280	94,060	12,860	5,000

* T-CODcr:全CODcr, S-CODcr:溶解性CODcr

Table 1に明らかとなり、希釈・調整した生ごみスラリーの有機物濃度はT-CODcr（重クロム酸法による全COD）で約200,000mg/Lと非常に高くかつ非溶解性成分が多い（T-CODcrの約68%が非溶解性CODcrであった）。また、全固形分（SS）の約95%は揮発性固形分であり、固形分のほとんどが有機物であると考えられる。なお、Table 1に示したスラリー分析値は平均値であり、日々のスラリー性状は投入ごみ質によって大きく変動していたものと推定される。

2. バイオリアクター

バイオリアクター本体は、内径2,000mm、高さ2,500mmのステンレス製円筒形の固定床式リアクターである（Photo 1、右奥）。内部に、直径100mm、長さ約1,000mmに成形した炭素繊維不織布の微生物担体を流下方向に隙間なく充填し、担体上に付着増殖した嫌気性微生物と投入スラリーの接触を行う構造となっている。担体充填部容積（有効容積）は約3m³であり、設計スラリー投入量における平均滞留時間は約8日間とした。本リアクターは生ごみスラリーをリアクター上部から投入する下向流型であり、リアクター底中央部から引き抜いた発酵液はリアクター上部に循環させることにより、リアクター内部の攪拌を行う。リアクター上部への発酵液循環ラインには二重管式熱交換器を設置し、60℃の温水で加熱することによってリアクター内の発酵液温度を55℃に自動制御する。温水は都市ガス（13A）とバイオガスの自動切り替え方式の温水ボイラーから供給した。

発酵液の一部はオーバーフローラインから発酵廃液として廃液タンクに排出し、飛田給施設外の好気性排水処理設備に移送し二次処理を行った。

3. バイオガス精製・濃縮・貯留装置

投入生ごみの性状にも依存するが、バイオガスは主要成分であるメタン及び二酸化炭素の他に、硫化水素、アンモニア等の腐食性不純ガス成分を含んでいる。これらの成分を除去するために脱硫剤（酸化鉄ペレット、150L）及び活性炭（100L）を充填した乾式ガス精製塔を設置した。ガス精製塔は内径600mm、充填高さ880mm、充填容積250Lのステンレス製円筒形である。

燃料電池発電特性に対するバイオガス中のメタン濃度依存性等を把握するため、アルカリ溶液スクラバによる2塔式メタンガス濃縮塔を設置した。各スクラバは内径300mm、高さ1,900mmのPVC製で、内部に吸収リングを充填した。アルカリ剤として水酸化ナトリウムを用い、水酸化ナトリウム溶解量はガスホルダー内のバイオガスの平均メタン濃度を所定の値に調整するために必要な二酸化炭素除去量を算出して決定した。

今回の実験に用いた燃料電池（富士電機（株）製、リン酸形）は定格出力が50kWのシステムであり、据え置き型製品としては最小型である。しかし、本実証試験のバイオリアクターから発生するバイオガス量は40Nm³/d程度であり、最小型の燃料電池でも連続発電することはできない。そこで、精製並びに濃縮したバイオガスを容量50m³のガス貯留施設に貯留し、燃料電池施設は定格出力以下の出力でバッチ運転することとした。バイオガス貯留施設は、内圧が200mmHgに維持された二重バルーン構造のポリエステル製球形ガスホルダーである（Photo 2）。

4. 燃料電池発電装置

燃料電池発電装置は定格発電能力50kWのりん酸形燃料電池であ

る。本装置は、燃料改質装置、直交変換装置等をユニット化した装置で、外部補機としてクーリングタワー、水処理装置等を付帯している（Photo 3）。

5. 温水ボイラ装置

発電実験に供さないバイオガスの燃焼処理並びにバイオリアクター加熱熱源として温水ボイラを設置した。本ボイラは都市ガス並びにバイオガスの燃焼が可能なデュアル燃料バーナ方式である。本ボイラの13A使用時の定格出力は251MJ/h（60,000kcal/h）である。

本温水ボイラーは、発電実験を行わない時のバイオガス消費施設も兼ねており、バイオガス燃焼を優先させる制御系とした。

III. 実験方法

実験では、2～3日毎の生ごみの搬入及び前処理、バイオリアクターの連続運転、貯留バイオガスによる週に1～2度の燃料電池による発電を実施した。発電のための燃料電池制御パラメータは、事前に計画したバイオガス中メタン濃度に基づいて設定した。実際の発電に供したメタンガス濃度は濃縮装置の操作等にも依存するため、必ずしも計画値どおりではなかった場合もある。

1. バイオリアクターの運転

バイオリアクターは、複合商業施設に設置した生ごみ高温メタン発酵処理システムで採取した嫌気汚泥を種汚泥として植種し、実際の生ごみスラリーを徐々に投入することによって微生物の十分な増殖、馴致を図った。有機酸濃度、嫌気汚泥濃度、バイオガス組成等のバイオリアクターの運転状況に係わる各項目の分析は、JIS K0099、同 K0102、同 K0107 及びガスクロマトグラフ法によった。

2. バイオガスの調製、貯留

バイオリアクターが安定運転している状態におけるバイオガス中のメタン濃度は62%～67%程度の範囲で変動した。発電実験に供するバイオガスについては、メタン濃度をほぼバイオリアクター出口濃度程度（約67%）から約93%の範囲に調製したものをを用いた。

メタン濃度の調製はガス濃縮装置で得ることのできる高濃度メタンガスと濃縮していない低濃度ガスを、バイオガス貯留装置で適宜混合することで行った。ガスホルダー内での混合は自然拡散混合が主体となるが、十分な均質化を図るためガスの供給・貯留は実験開始48時間前までに終了し、以後は静置するようにした。なお、バイオガス中のメタン濃度は密度式連続ガス濃度計（横河電機、GD400型）、燃料電池へのガス供給量は乾式ガスメータ（愛知時計電機、N30型）によって測定した。

3. 発電実験

実験には所定のメタン濃度に調製した貯留装置内のバイオガス（約50m³）を用いたが、4時間程度の発電実験/データ収集時間を確保するために、定格の60%（30kW）の出力で発電した。発電された電力は模擬負荷装置により熱として大気中に放出した。

IV. 実験結果

1. 生ごみのメタン発酵

本実証実験期間を通じてバイオリアクターは安定した処理状況を維持した。バイオリアクターへの有機物容積負荷率が10～30kg T-CODcr/m³/dの範囲で生ごみスラリー投入量を変化させたが、それぞれの負荷において発酵液中有機酸濃度に若干の違いは生じたが、有

機酸が蓄積して行くことはなかった。

Table 2 に示すとおり、実験期間を通じた投入有機物の分解率は T-CODcr 基準で 87%、投入固形分 (SS) の可溶化率は 89.9% (揮発物基準 (VSS) では 90.8%) であった。なお、発酵廃液中の固形分の多くはバイオリクター内で増殖した嫌気性微生物であることから、実際の投入生ごみスラリーに由来する固形分の可溶化率は 90%を超えていると考えられる。

Table 2 Performance of Methane Fermentor

	除去率 [%]				
	T-CODcr	S-CODcr	SS	VSS	n-hex
10月平均	89.4	81.1	91.2	91.9	94.3
11月平均	85.1	70.6	88.5	89.6	97.9
全平均	87.3	75.9	89.9	90.8	96.1

油分 (n-ヘキサン抽出物濃度: n-hex) は 96% が除去されていた。投入生ごみスラリー中の有機態窒素は、発酵廃液では投入有機態窒素 (ケルダール窒素: K-N) のほぼ半量がアンモニア態窒素に変換されているが、アンモニアによるメタン菌への阻害は観察されていない。なお、平均的な運転状態における有機物投入量は 59.1kg T-CODcr/d、有機物容積負荷率は 18.8kg T-CODcr/m³/d であった。

前処理設備における平均異物排出率は 0.8% (重量) であり、分別除去された異物の大半はプラスチックフィルム類、魚などの骨、木片 (串、割り箸など) であった (Photo 4)。

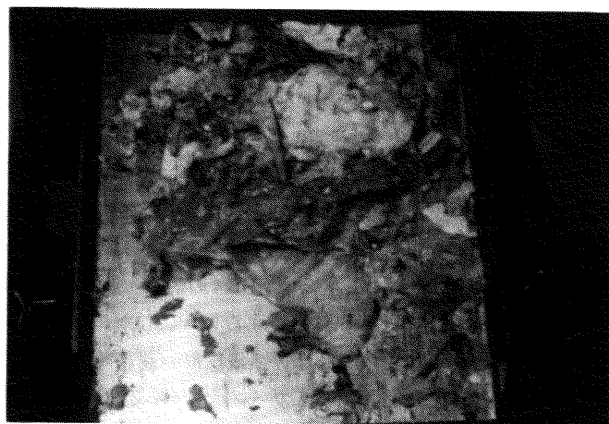


Photo 4 Non-biodegradable Matters
Separated by Ultra-high Pressure Separator

2. 生バイオガス量、メタンガス濃度

Table 3 に示すとおり、バイオリクターから発生するバイオガス量は、日平均生ごみ投入量 125kg 当たり 29.9Nm³ (生ごみ 1 トン当たり 240Nm³) であった (11 月平均値)。また、発生バイオガス中のメタンガス濃度は有機物負荷にも依存するが、単純平均値は約 63.4% (11 月平均値) である。したがって、除去された有機物のメタンへの平均転換率は理論値³⁾の約 108% であった。

Table 4 にバイオガス中に含まれる不純ガス成分の濃度 (精製塔

入り口) 並びに精製後の平均濃度 (それぞれ 4 回の実験中に測定した濃度の平均) を示す。表に明らかとなっており、発生バイオガス中には高濃度の硫化水素 (平均 650ppm) が含まれている。また、比較的高い濃度のアンモニア (平均 28ppm) や塩化水素 (平均 5.5ppm) も検出されているが、これらのガス成分は燃料電池には有害であるため完全に除去する必要がある。本実証実験設備では脱硫剤・活性炭による乾式ガス精製塔を設置したが、実験期間を通じてこれらの不

Table 3 Biogas Production

	10月平均	11月平均	全平均
生ごみ処理量 [kg/d]	155	125	140
バイオガス発生量 [Nm ³ /d]	35.0	29.9	32.5
バイオガス発生量 [Nm ³ /t-生ごみ]	226	240	233

Table 4 Impurities in Biogas

	精製塔入り口			精製塔出口		
	最大濃度	最小濃度	平均濃度	最大濃度	最小濃度	平均濃度
硫化水素	970.0	367.0	654.7	<0.0005	-	<0.0005
水素	<0.1	-	<0.1	<0.1	-	<0.1
塩化水素	9.5	3.4	5.5	<0.4	-	<0.4
アンモニア	31.7	23.5	27.6	<0.1	-	<0.1

純ガス成分は全て検出限界以下にまで除去されていた。

3. 発電効率

Table 5 に示すとおり、燃料電池設備の発電効率は、投入バイオガス (燃料ガス) の発熱量に対して 32~35 % 程度 (送電端基準) であった。バイオガス-燃料電池システムは、バイオリクター出口濃度程度の非濃縮ガス (メタン濃度 67%) によっても濃縮ガス (メタン濃度 93%) と同程度の効率で発電できた。また、発電効率のバイオガス中のメタン濃度への依存性については、明確な相関は認められなかった。本実証実験に使用した燃料電池に都市ガスを供給した場合の発電効率は 36.1% であった。

Table 5 Summary of Power Generation Experiments

RUN	使用 ガス量	平均メタン 濃度	最大・最小 メタン濃度	燃料電池 設定濃度	発電量	発電効率
	[Nm ³ /h]	[%]	[%]	[%]	[kWh]	[%]
1	9.50	92.50	92.0 ⇄ 93.5	90	30	34.3
2	11.08	86.11	84.8 ⇄ 86.6	90	30	31.6
3	10.85	80.15	79.9 ⇄ 80.4	80	30	34.7
4	10.99	80.38	80.2 ⇄ 80.5	80	30	34.2
5	10.84	84.80	84.2 ⇄ 86.3	80	30	32.8
6	12.18	71.64	69.7 ⇄ 74.2	70	30	34.6
7	13.60	66.60	66.1 ⇄ 67.9	70	30	33.2
						(平均効率 33.6)
都市ガス	-	-	-	-	30	36.1

V. 考察

1. 生ごみのメタン発酵

本実証実験に用いたバイオリクターは、有機物負荷 10~30kg T-CODcr/m³/d の範囲で安定したメタン発酵が可能であった。この時のメタンとして回収された有機物は T-CODcr 投入推定量から換算して理論値³⁾の約 108% (105~117%) であり、実験期間を通じて高効率メタン発酵が維持されていた。

バイオガス発生量は有機物負荷の変化に良く追従しており、バイオリクターが安定した状態であったことが分かる (Fig. 2)。また、Fig. 2 には示していないが、実験期間を通じて発酵液中の残留有機酸濃度も低い値で推移していた。

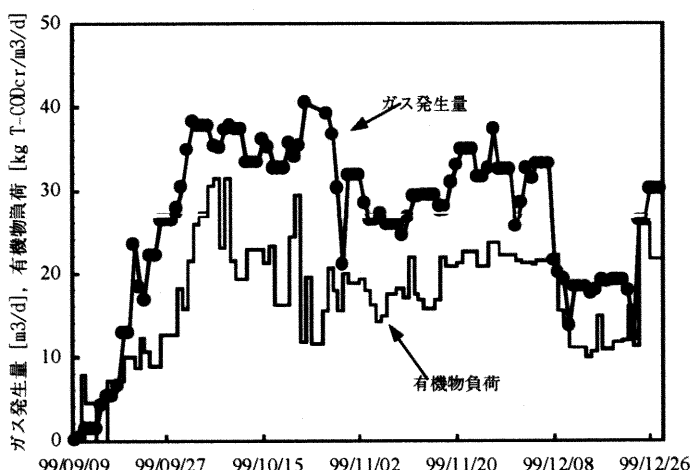


Fig. 2 Timecourse of Organic Loading and Biogas Production

バイオガス中のメタン濃度については、数時間間隔で実施したスラリーの間欠的な投入と同期した周期の短い変化が見られるが、平均的なメタン濃度と有機物負荷 (数日間の平均値) との間には明確な相関性は見られない (Fig. 3)。Fig. 3 に示されているとおり、有機物負荷を 50% 変化させても生成バイオガス中のメタン濃度に大きな変化は見られず、このことからリアクターは安定した状態であったと考えられる。なお、Fig. 2 に明らかなとおり、メタン濃度の変動幅は大きなものではなく、既存の燃料電池側の制御系によって十分に対応できるものと判断される。

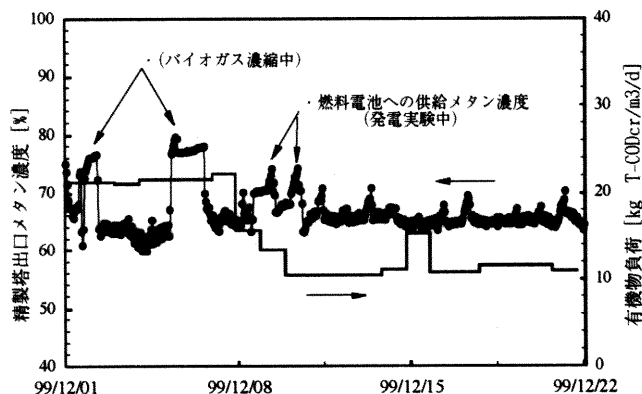


Fig. 3 Timecourse of Organic Loading and Thermal Efficiency

前述のとおり、投入生ごみスラリー及び発酵廃液の分析結果によると投入有機物の約 2/3 は固形性であるが、発酵廃液では全有機物の約 1/3 が固形性であった。今回の実験における固形分除去率並びに全有機物除去率は、それぞれ約 89% 及び約 85% と高い効率であった。

2. バイオガスによる発電

発電に関与しない二酸化炭素を含むバイオガスでは若干の効率低下が生じることは十分予想されたが、Fig. 4 に示すとおり必ずしもメタン濃度と発電効率の間に一義的な相関は見られない。

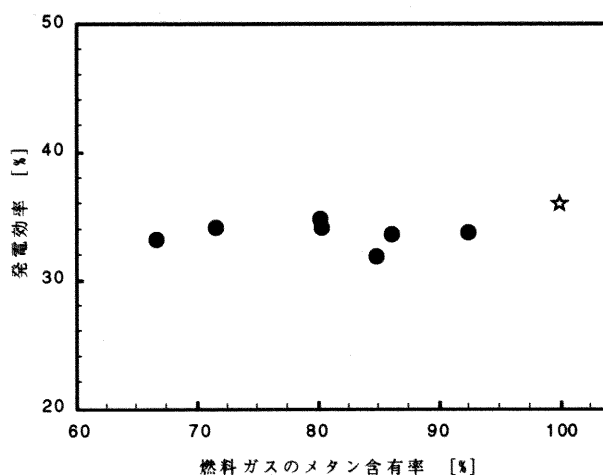


Fig. 4 Methane Concentration and Thermal Efficiency
(☆: thermal efficiency with a natural gas)

今回の実験では、各発電実験の事前に設定バイオガス性状に応じた燃料電池制御系のパラメータ調整を行ったが、設定濃度と実際の供給精製バイオガス中のメタン濃度との間に差があり、このために発電効率にある程度のバラツキが生じた可能性がある。そのため、燃料ガスのメタン濃度と発電効率の間に明確な相関が認められなかったものと推定される。したがって、燃料電池側の諸運転パラメータ設定に際して想定した濃度と実際の燃料ガス中のメタン濃度との差を小さくすることで、更なる発電効率の向上が期待できるものと考えられる。また、脱硫剤及び活性炭による乾式バイオガス精製装置の性能は、燃料電池の燃料ガスとして要求される純度を十分に達成できるものであったと考えられる。

VI. まとめ

複合商業施設から排出される生ごみを 1 日平均 125kg の割合で固定床式高温メタン発酵装置 (メタクレス) にて処理した。投入有機物は高効率で分解、メタン化され、生ごみ処理量 1 トン当たり平均 240Nm³ のバイオガスが回収された。また、バイオガス中のメタン濃度は、バイオリクターへの有機物負荷変動に依らず約 63~67% の範囲で安定していた。

バイオガス中には比較的高濃度の硫化水素、アンモニア、塩化水素が含まれているが、これらの不純ガス成分は脱硫剤及び活性炭による乾式精製塔で十分に除去でき、燃料電池の燃料ガスとして利用することが可能であった。

不純ガス成分除去等のガス精製処理を施したバイオガス中のメタン濃度が 67~93% の範囲で、リン酸形燃料電池の平均発電効率とし

て 33.6%を達成した。本実証試験に用いた燃料電池装置では、バイオガスを燃料ガスとして供給した場合、都市ガスを燃料ガスとした場合に比して発電効率が若干低下したが、他に実用上の問題は無く、本バイオガス-燃料電池発電組合せシステムが十分に実用的であることが実証された。

今後は、今回の実証実験で得た知見を踏まえ、さらに大きな設備による実証発電を実施し、有機性廃棄物の高温メタン発酵-燃料電池発電の実用化・普及を実現していきたい。

本実証試験は、NEDOの平成10年度即効型提案公募事業に採択さ

れたもので、鹿島建設(株)エンジニアリング本部環境技術部の協力を得て実施したものである。

参考文献

- 1) 生物系廃棄物リサイクル研究会；生物系廃棄物のリサイクルの現状と課題，生物系廃棄物リサイクル研究会，1998.
- 2) 東郷ら；生ごみの高温メタン発酵，鹿島建設技術研究所年報，第47巻，(1999.9)，pp.56-62.
- 3) R. E. Speece; Anaerobic Biotechnology, Archae Press, Nashville, TN, 1996.