

バイオガスプラントの有効性・実用性の実証と評価

木下強¹⁾、池田純子、岩淵守男²⁾、齋藤憲夫³⁾、高柳晃治、阿久津充⁴⁾、
前田綾子、黒澤良介、福島正人⁴⁾、加藤大幾⁴⁾、小池則義²⁾

1)現 河内農業振興事務所、2)現 栃木県農業大学校、3)現 芳賀農業振興事務所、4)現 畜産振興課

要 約

酪農経営におけるバイオガスシステム導入の有効性・実用性を実証するため、畜産酪農研究センター（以下、センターとする）内にバイオガスプラントの実証施設（乳牛80頭規模）を建設し、エネルギー、物質収支、経済性、環境影響等の観点から評価した。併せて、バイオガスプラント（以下、プラントとする）に投入する原料や運転条件による影響について検証した。

(1)投入原料単位容積当たりのバイオガス発生量は、牛舎洗浄水等が多いため、家畜ふん尿のみ投入で13.4Nm³/m³と、他県の同規模施設と比べて発生量が低かったが、食品残渣の投入により単位容積当たりのガス発生量は増加し、発電量も増加した。

また、回収したバイオガスの期間中平均電力エネルギー変換効率は22.2～25.7%、熱エネルギー変換効率は40.3～47.0%と概ね計画どおりの値が得られた。

一方、気温が低下する冬季では、発酵槽の加温にエネルギーの大部分を費やすことになることから、余剰エネルギーが減少することが明らかになった。

(2)現物重量ベースで投入した原料の約87%が液肥（メタン発酵消化液）、13%が堆肥（固液分離残渣）となり、通常の全量堆肥化処理に比べ、家畜排せつ物の減容効果は期待できないことを確認した。また、メタン発酵消化液中の肥料成分は、発酵工程にける窒素（アンモニアなど）の揮散がほとんどなく、即効性の肥料として有用であることがわかった。

(3)実証施設運用経費の大部分を占める減価償却費は、総合耐用年数から14年として計算した。イニシャルコストが高額であるため、補助金分（50%）を圧縮しても、収支はプラスにはならないが、ふん尿処理施設として考えた場合、水分調整用副資材を必要とせず、ダイレクトでふん尿処理が可能であるため、スラリー処理農家では有用な処理方式であると考えられた。

(4)プラント運転時に発生する臭気を測定した結果、プラントから5m以上離れた地点及び堆肥発酵ハウス外では、季節を通してアンモニアや硫化水素などの臭気成分は検出されなかった。また、メタン発酵消化液の飼料畑散布直後の臭気を測定したところ、調査時期にかかわらず、敷地境界線上ではアンモニアは非検出であり硫化水素も弱い臭いであった。

(5)プラントから排出される固液分離残渣の堆肥化過程および消化液貯留時に発生する温室効果ガス（CH₄、N₂O、CO₂）を測定したところ、それぞれ通常の堆肥化過程、スラリー貯留時に比較して温室効果ガスの発生量は低い値であった。

(6)プラント実機の投入原料として一定量の肉用牛ふん尿や豚舎汚水を乳用牛ふん尿に混合したところガス発生量増加に一定の効果がみられた。また、小型メタン発酵試験装置を用いて乳用牛ふん尿をベースに廃食用油やバイオディーゼル燃料（BDF）残渣（グリセリン）、ブドウ糖、食品残渣（厨芥）、野菜くず搾り汁、パルプ粕の併用効果を検証したところ、野菜くず搾り汁、パルプ粕以外でメタンガス発生量が増加した。

(7)小型メタン発酵試験装置を用いて、高温（55℃）メタン発酵、消化液リサイクル利用について検証した結果、高温メタン発酵条件に保つことでガス発生速度が速くなることを確認した。

また、消化液を再度加温して、バイオガスの発生量を検証した結果、投入原料の7割程度のガス発生が可能であることがわかった。

目 的

栃木県は、生乳生産量全国第2位の酪農を始め、畜産業の盛んな県である。これら畜産経営から発生する家畜のふん尿については堆肥化等により有効活用する「資源循環型畜産経営」を推進してきた¹⁾。

更には家畜のふん尿をエネルギー源として活用し、環境への負荷を軽減して地球温暖化防止にも貢献できるバイオマス総合利活用マスタープランを策定し、推進してきた。そのため「バイオガスエネルギー活用型酪農経営」の普及を図ることを目的に、センター内にプラントを建設し、平成20年からバイオガスシステムの実証試験に取り組んできた。

材料及び方法

1. プラントの概要

1.1 プラントの処理能力

センター内に設置されたプラントは、80頭の乳用牛から1日に排せつされるふん尿等4,850kgと食品廃棄物など地域内で排出される有機質資源1,000kgを処理・利用する能力を有する。(図1)。

1.2 プラントの主な構成施設・機器

プラントを構成する主な施設・機器は表1のとおり。

1.2.1 固液分離機

牛舎から搬入された家畜排せつ物等を固形分と液分に分離する。液分は発酵原料としてメタン発酵槽に送られ、固形分(水分75%程度)は堆肥化施設に送られる。

1.2.2 発酵槽

発酵槽は約36℃に保たれ、投入された有機物を原料にメタン細菌等の働きによりバイオガスが発生する。バイオガスは、メタン60%と二酸化炭素40%の混合ガスで、微量な硫化水素、窒素、水素等を含んでいる。

1.2.3 気液分離器・脱硫槽

発生したバイオガスは、まず気液分離器で水分を、次に脱硫槽で硫化水素が除去され、ガスホルダに蓄えられる。

1.2.4 ガスホルダ

二重膜構造で半球状のガスホルダは、発生したバイオガスを貯留する。

1.2.5 ガスエンジン

バイオガスを燃料としたコージェネレーションガスエンジンにより電力と熱を回収する。本システムでは1日4,850kgの家畜排せつ物から146kWhを発電(食品廃棄物1,000kgが加わった場合350kWh)する計画で、発電した電力は、プラントで使用される外、余剰電力は、ミルクパーラーや牛舎等で使用される。また、発生した熱は温水として回収され、発酵槽の加温や消化液の殺菌等に利用される。

1.2.6 消化液貯留槽

メタン発酵残さである消化液は、雑草の種子等を不活化するため加熱殺菌され、貯留槽に蓄えられた後、液肥として利活用する。本システムでは、約半年分の消化液を貯留することが可能である。

表1 プラントの仕様

名 称	仕様、性能
発酵槽	形式 鉄筋コンクリート製半地下式
	容量 有効容積:211m ³ 全容積:253m ³
	仕様 内面気密処理、発酵温度36℃
ガスホルダ	形式 ダブルメムラン方式
	容量 80m ³
	仕様 圧力調整弁、放圧装置付
消化液貯留槽	形式 内面防水処理鋼板式
	容量 消化液150日分貯留(839.3m ³)
	仕様 内面防水処理
ガスエンジン 発電機	形式 ガスエンジン発電機
	単機出力 3-200V 25kWh
	仕様 排熱回収付
温水ボイラ	形式 多管式貫流ボイラ
	熱出力 60Mcal/時
	仕様 LPガス・バイオガス燃料切替式
堆肥化施設	形式 開放直線型ロータリー型攪拌移送機
	容量 槽面積:150m ² 槽深さ:0.5m
	仕様 建屋:鉄骨造ビニールハウス

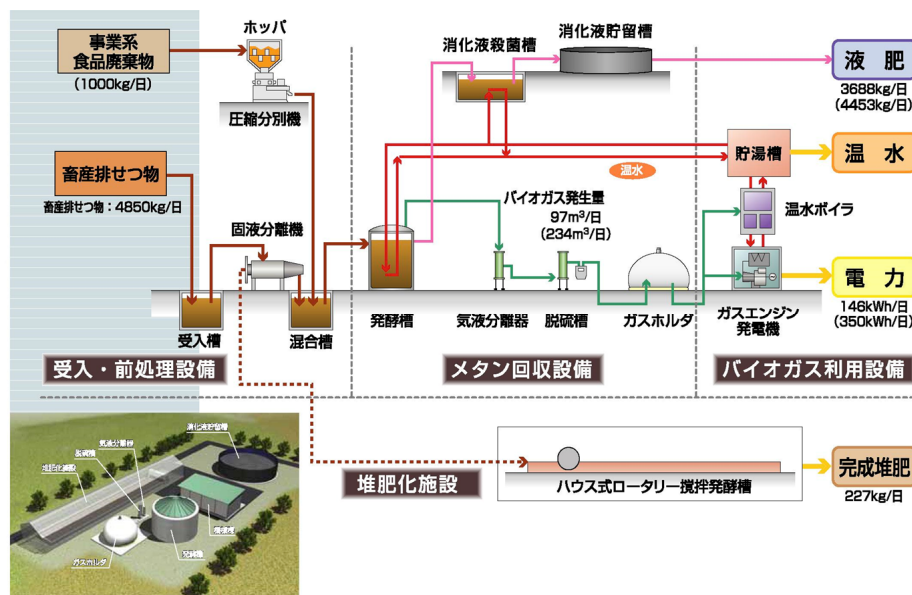


図1 プラントの主な構成施設・機器

2. プラント実証試験の概要

2.1 基本性能の評価

実証試験 (2.2.3に記載) に先立って実施した未利用バイオマスの発酵特性の結果を踏まえ、2008年4月から9月までの6カ月間と2009年10月から2010年3月までの6カ月間は家畜ふん (乳牛ふん尿約5.7 m³/日) のみで試験を実施した。また、2008年10月から2009年9月までの12カ月間は、バイオガスの発酵原料として家畜ふんと併せて地域内の観光ホテル由来食品残渣 (厨芥) の投入試験を実施し、分析データをもとにエネルギー、物質収支、経済性、環境影響等の観点から評価した。

2.2 投入原料の検証

2.2.1 豚舎汚水の実機投入試験

センター内の豚舎から排出される汚水 (豚ふん尿、豚舎洗浄水等) 1.8m³/日 (バキュームカー1台分) の豚舎汚水をプラントの原料として乳牛ふん尿とともに投入し、設備への影響、ガスの発生効率、消化液の性状について検証した。

2.2.2 肉牛ふん尿の実機投入試験

センター内の肉用牛舎から排出される肉用牛ふん尿 (敷料はおが屑) 0.3m³/日をプラントの原料として乳牛ふん尿とともに投入し、設備への影響、ガスの発生効率、消化液の性状について検証した。

2.2.3 小型実験装置による未利用バイオマス添加効果検証

未利用バイオマスとして、観光ホテルの厨房で発生す

る食品残渣、漬け物工場の野菜くず搾り汁及び製紙工場のパルプ粕の3種類を小型メタン発酵試験装置の原料としてプラントの固液分離液 (乳用牛ふん尿) とともに投入し、バイオガスの発生量等について検証した。

食品残渣は重量比で6%、野菜くず搾り汁は重量比20%、パルプ粕は有機物比20%を添加した。

2.2.4 小型実験装置による廃食用油添加効果検証

一般家庭で天ぷらの調理などに使用した廃用植物油を小型メタン発酵試験装置の原料としてプラントの固液分離液 (乳用牛ふん尿) とともに容積比で2%を投入し、バイオガスの発生量等について検証した。

2.2.5 小型実験装置によるBDF生成残渣 (グリセリン) 投入効果検証

栃木県北部N町BDFプラントで発生するBDF生成残渣を小型メタン発酵試験装置の原料としてプラントの固液分離液 (乳牛ふん尿) とともに容積比で2%を投入し、バイオガスの発生量等について検証した。

2.2.6 小型実験装置による糖類添加効果検証

糖類添加については活性汚泥浄化槽の活性化資材として県内の事業者が試作した固形資材 (280g/個) を小型メタン発酵試験装置の原料としてプラントの固液分離液 (乳牛ふん尿) とともに重量比で1%を投入し、バイオガスの発生量等について検証した。

2.3 運転管理技術等の検証

2.3.1 高温メタン発酵運転の検証

プラントの高温発酵条件における運転をシミュレーションするため、小型メタン発酵試験装置を用い、高温(55℃)条件下でメタン発酵試験を実施した。

2.3.2 メタン発酵残渣消化液のリサイクル利用効果検証

センターのプラントは、投入原料である乳用牛ふん尿の希釈液として消化液を再利用することで発酵槽の有機物負荷を向上させることができる仕様となっている。

消化液のバイオガス発生量を検証するため、小型メタン発酵試験装置に消化液殺菌槽から引き抜いたメタン発酵消化液を単独で投入し、ガスの発生量及び発酵中のORP、pHについて調査した。

2.4 バイオガスプラントから発生する温室効果ガスの検証

2.4.1 メタン発酵投入原料固液分離残渣の堆肥化過程で発生する温室効果ガス

プラント導入による温室効果ガス削減効果検証の基礎データを収集するため、メタン発酵処理施設において乳用牛ふん尿を固液分離によって得られる固形分の堆肥化時に発生する温室効果ガス等を測定し、通常の堆肥化処理と比較検証した。

2.4.2 メタン発酵消化液貯留時における温室効果ガス

プラント導入による温室効果ガス削減効果検証の基礎データを収集するため、メタン発酵消化液貯留槽から発生する温室効果ガスを測定するとともに消化液の化学性状について調査した。

結果及び考察

1. 基本性能の評価

1.1 エネルギー的評価

1.1.1 バイオガス発生量

平均 49 頭の乳用牛及び食品残渣から年間バイオガス 74,530Nm³が発生した。

投入原料単位容積当たりのガス発生量は、食品残渣投入期間で 20.4Nm³/m³、家畜ふん尿のみ投入期間で 13.4Nm³/m³であり、食品残渣の投入により単位容積当たりのガス発生量は増加した。しかし、当施設と規模が同等の施設である北海道湧別町プラントの数値 21.4Nm³/m³からは低い値となったが、この原因については、牛舎の洗浄水や雨水の流入等が影響していると推察される²⁾。

春夏季(4~9月)の稼働実績について、乳用牛ふん尿のみの2008年と乳用牛ふん尿と食品残渣の2009年の比較では、食品残渣の投入によりガス発生量(149%)、発電電力量(157%)ともに約1.5倍に増加した。また、投入有機物当たりのガス発生量は食品残渣投入により121%となっ

ており、投入実量で比較すれば、家畜ふん尿等の4%程度量の食品残渣投入により、発生ガスが大幅に増加していたことから、食品残渣は非常に効率の良いプラント投入資材であると考えられた(図2)。

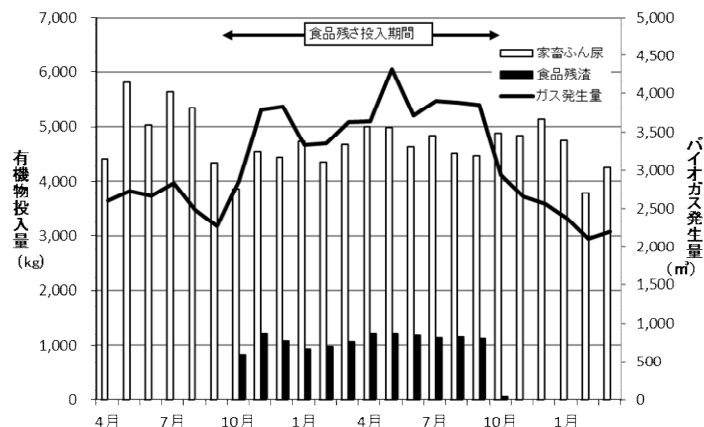


図2 原料投入量及びバイオガス発生量

発生したガスの利用仕向けについては、大部分をガスエンジン発電機(GE)に利用したが、外気温が低下する冬季については、最大の月で発生したガスの1/4を発酵槽加温のためボイラの燃料として利用せざるを得ない状況であった(図3)。

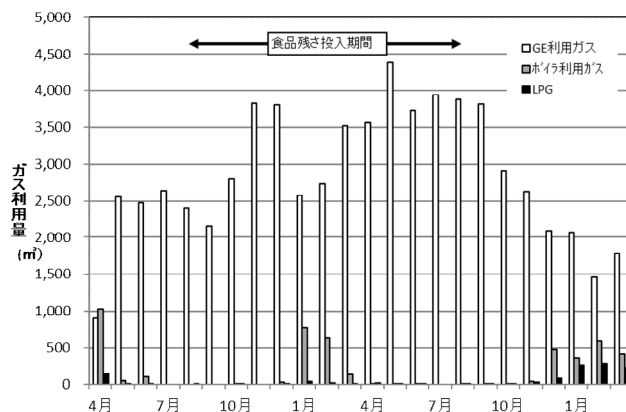


図3 発生バイオガスの利用先

1.1.2 発電量

2008~2009年の2年間で発生したバイオガス74,530Nm³から105,414kWhの発電量を得た。

プラント本体(堆肥化施設含む)の電力自給率は125%であり、ふん尿のみの期間が106%だったのに対し、食品残渣投入期間は142%と余剰電力が大幅に増加した。

また、事業所(センター)全体の電力自給率については、最大の月で32%、最小は稼働開始時の7%であり、平均年間電力自給率は21%であった(図4)。

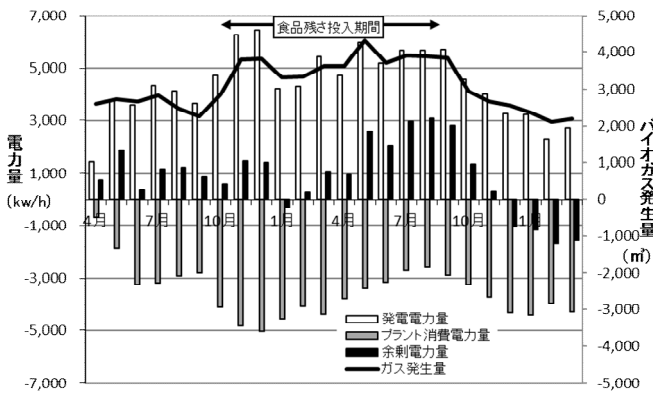


図4 プラントの電力収支(2008～2009)

1.1.3 発熱量

プラントの各装置における熱量は、熱供給装置としてガスエンジン発電機の回収熱及びガスボイラを計測対象とし、熱利用装置として発酵、消化液殺菌槽を計測対象とした。

計測方法は、各装置の温水配管の入口と出口の水温及び温水流量を1分間隔で記録し、出入口温度差に流量を乗じ、 $1\text{cal} = \Delta 1^\circ\text{C} \times \text{水 } 1\text{ml}$ (比重 1.0) として積算した。

なお、2008年4～9月の期間は、プラントのシステム調整や落雷による機器損傷により温水流量のデータ欠損が生じたため、2008年10月～2010年9月のデータをもとに解析を行った。

2年間の総回収熱量は168,488Mcalとなり、回収熱量の66%相当はメタン発酵槽の加温に利用された。それらの内訳は、ふん尿のみの期間で67,235Mcalであったのに対し、食品残渣を投入した期間では101,253Mcalと回収熱量が増加し、気温が低下する冬季でも発酵槽の保温に要する熱量のほとんどを自給することが出来た(図5)。

また、回収熱量の16%を消化液殺菌槽の加温に利用したが、夏季以外は消化液殺菌槽の加温に利用できなかった。特に12～3月の期間は、気温低下のためガスエンジン発電機の回収熱だけでは、プラントの維持に必要な熱エネルギーが確保できなかったため、ガスボイラを併用した。また、食品残渣を投入しなかった期間では、発生したバイオガスだけでは必要な熱エネルギーが充足できなかったため、LPガスを使用した(図5)。

逆に、夏季はガスエンジン発電機から発生する熱エネルギーが余剰となり、大気中に放熱する場面もあり、見かけ上の熱回収率は低くなった(図5)。

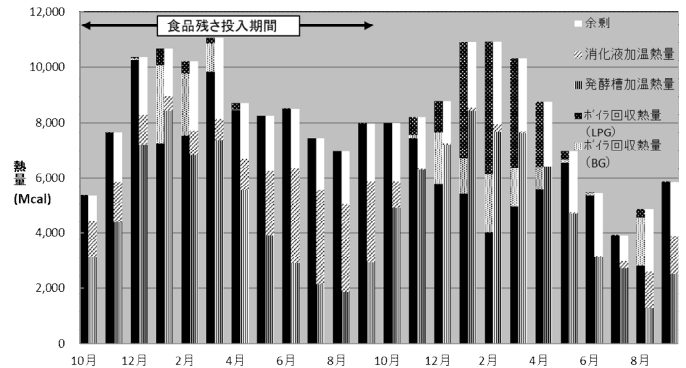


図5 プラントの熱収支(2008～2009)

1.1.4 発生ガスのメタン濃度

バイオガス中のメタンガス濃度は、2カ月ごとにガスホルダからバイオガスを採取し、ガスクロマトグラフで測定する一方、気体熱伝導式のポータブルガス検知器(新コスモス電子製 XP-3110)を用いて日々のメタンガス濃度の変動を調べた。

ガスクロマトグラフで測定したメタンガス濃度は、平均で59.0%であり最大68.6%～最小49.25%の範囲で変動した。また、ポータブルガス検知器で毎日測定したメタンガス濃度は、平均で72%とガスクロマトグラフの測定値よりも高くなるが、ガス濃度の変動幅は月平均で最大81%～最小62%(日変動幅は最大84%～最小56%)と同程度であった(図6)。

食品残渣の有無によるメタンガス濃度の比較では、ガスクロマトグラフによる測定値で家畜ふん尿のみの期間が61.2%(同ポータブル72.3%)に対し、家畜ふん尿に食品残渣を加えた期間では57.2%(同ポータブル71.5%)と濃度は低くなった(図6)。

また、食品残渣投入の有無を考慮せず、単純にガス発生量とメタンガス濃度の関係をグラフにしてみると、ガスの発生量の増加に伴い、メタンガス濃度は低くなる傾向がみられた(図7)。

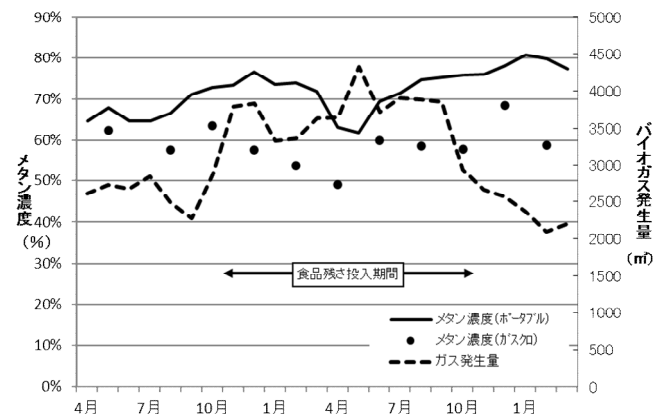


図6 発生ガスのメタン濃度(2008～2009)

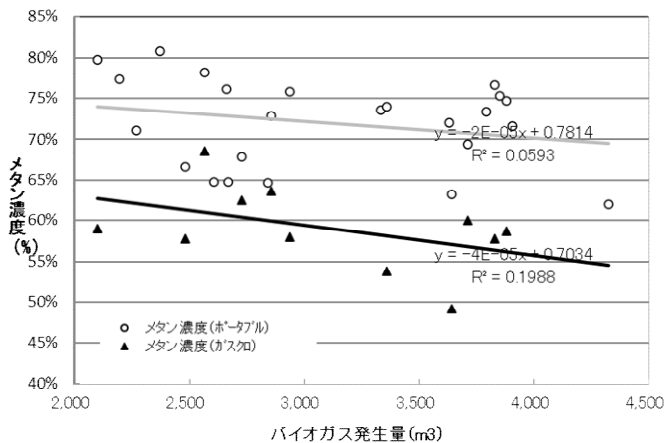


図7 ガス発生量とメタン濃度の関係(2008~2009)

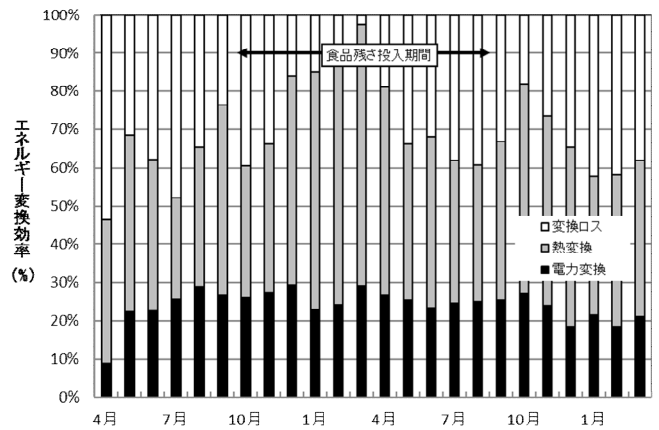


図8 バイオガスのエネルギー変換効率(2008~2009)

1. 1. 5 エネルギー回収率

発生したバイオガスの電力と熱エネルギーへの変換効率について、実証プラントの実測値及びガス発生量から計算した熱エネルギー理論値との比較により算出した。

なお、計算に用いたメタンガス濃度は、ガスクロマトグラフで測定した値を用いた。理論値の算出に用いた計算式及び電力の熱エネルギー換算式は次のとおり。

$$\begin{aligned} & \text{メタンガス発生量から計算される熱エネルギー (Mcal)} \\ & = \text{バイオガス発生量 (Nm}^3/\text{日)} \\ & \quad \times \text{メタン濃度 (\%)} \times 0.01 \\ & \quad \times 8.55 \text{ (Mcal/Nm}^3\text{)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{発電量から試算される熱エネルギー (Mcal)} \\ & = \text{積算電力量 (kWh)} \\ & \quad \times 0.86 \text{ (Mcal/kWh)} \end{aligned}$$

電力エネルギーについてガスエンジンの積算電力量及び利用ガス量から算出した結果、年間平均の変換効率は24.1%となり、日別の最大29.0%~最小18.6%であった。

熱エネルギーについては、2008年4~9月のデータに測定機器損傷による欠測値が多かったため、稼働条件が同じ2010年4~9月のデータを補正して代用した。

ガスエンジン発電機、ガスボイラからの発生熱量及び各利用ガス量から熱エネルギーの変換効率を算出した結果、年間平均の変換効率は44.4%となり、最大62.6%~最小34.5%であった(図8)。

また、食品残渣投入期間の電力エネルギー変換効率は25.7%、熱エネルギー変換効率は47.0%に対し、食品残渣投入無しの間では電力エネルギー変換効率は22.2%、熱エネルギー変換効率は40.3%と低下した(図8)。

2年間の実証試験においては、機器のトラブルやメンテナンスのため、プラントが停止した期間があったが、その分を考慮すれば当初の計画に近いエネルギー変換効率(電力25%、熱量50%)が達成できたと考えられる。

1. 2 物質収支評価

1. 2. 1 バイオマス処理量

試験期間中の平均49頭の乳用牛由来の家畜ふん尿等4,201t(うち61tは廃棄乳)、食品廃棄物77tを投入した。食品廃棄物の投入量は通常10%を越えるとガスの発生効率が低下するとされているが、今回の実証試験では3.5%であり、プラントの能力的には余裕を残す結果となった。

期間中、乳牛飼養技術に係る試験研究のため飼養頭数が制限されたこと、想定外の雨水流入等により、発酵槽の容積当たり有機物(VS)負荷量は設計値に対し平均0.82 kg/m³・日と低い値となった(図9)。

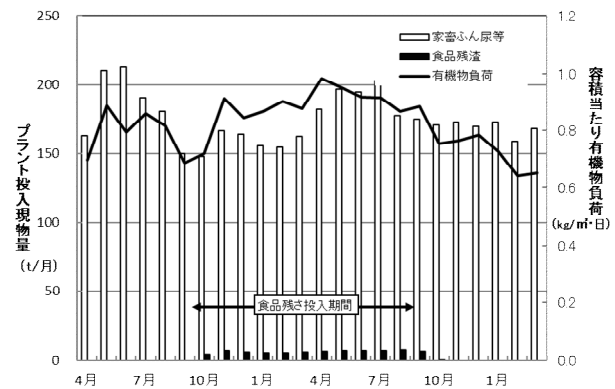


図9 発酵槽有機物負荷量の推移

1. 2. 2 分離固分発生量及び液分発生量

2年間の原料投入量は図2に示したとおり、夏季は快樂の飲水増加や雨水の流入により固液分離液分の量が多く推移した。

また、乳用牛由来の家畜ふん尿等4,201tは固液分離機により503t(13%)の固分と3,375t(87%)の液分に分離された。また、食品残渣77tは圧縮分別機により67t(87%)の圧縮分離液が得られた(図11)。

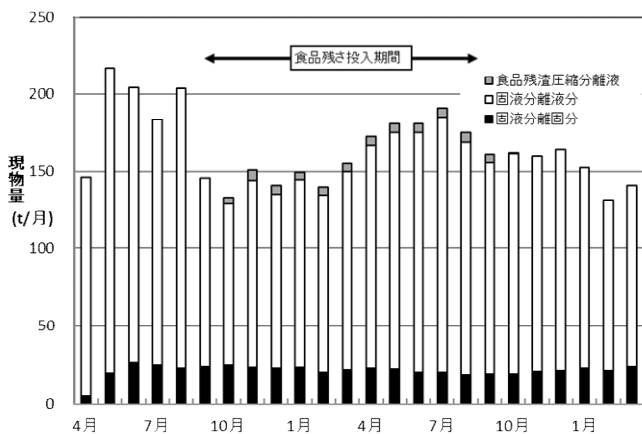


図 10 バイオガスプラントにおける原料投入量の推移 (2008～2009)

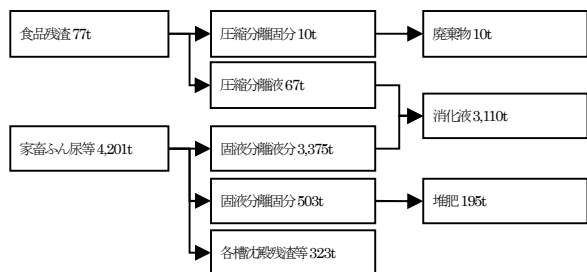


図 11 バイオガスプラントにおける2年間の物質収支 (2008～2009)

※食品残渣+家畜ふん尿等を100%とした

表 2 メタン発酵消化液成分濃度の生産工程における変化

成分名	消化液(mg/l)			固液分離固分 (mg/現物kg)
	混合槽 (発酵前)	殺菌槽 (発酵直後)	貯留槽 (一定期間貯蔵後)	
蒸発残留物(乾物)	39,000	29,000	16,000	231,000
強熱減量(灰分)	9,200	10,000	7,000	—
アンモニア性窒素	980	1,500	1,700	—
全窒素	2,600	2,200	1,800	2,500
BOD	14,000	1,000	890	—
COD	15,000	10,000	8,800	—
TC(全炭素)	16,000	10,000	6,400	—
有機体炭素(TOC)	15,000	8,200	4,700	90,000
全リン酸(P2O5)	530	470	420	1,300
酸化カリウム(K2O)	2,200	2,400	2,300	1,900
酸化カルシウム(CaO)	1,700	2,000	1,200	1,900
酸化マグネシウム(MgO)	360	420	230	300
硫酸イオン	160	70	42	—
塩化物イオン	1,000	1,200	980	—
銅	2	2	1	3未満
亜鉛	36	36	17	42
揮発性有機酸	4,000	2,000	30未満	—
水分(%)	96	97	98	77

※プラント投入原料(家畜ふん等)→ 固液分離器→ 液分(混合槽へ)→ メタン発酵槽→ 殺菌槽→ 貯留槽
固分(堆肥化施設へ)

1.2.3 メタン発酵消化液成分濃度の生産工程における変化

メタン発酵消化液生産工程における消化液の成分変動の分析結果を表2に示した。

実機によるデータのため、水分の揮散や雨水の流入などを考慮できないが、工程の進行とあわせて有機物が分解され乾物含有率は減少した。

肥料成分として重要な位置づけとなる窒素、リン酸、カリウムの濃度はカリウムを除き、工程の進行とあわせて漸減した。また、貯留槽のカルシウムとマグネシウムは殺菌槽の濃度と比べ約60%、55%と半減した。

これらの要因については、微生物による分解や大気中への揮散、雨水による希釈各槽における沈殿分離等が考えられる。特に実証試験を行った、センタープラントの消化液貯留槽は、雨水の浸入を防ぐための屋根や沈殿物の堆積を防止する攪拌装置を備えていないことから、消化液の利用にあたっては、これらの肥料成分変動をある程度考慮する必要があり、新たにプラントを設置しようとする場合、攪拌機の装備が望ましいと考えられた。

1.2.4 肥料生産量

2年間の消化液生産量は3,110t、堆肥生産量は195tであった。年次別の比較では1年目の消化液生産量1,570tに対し2年目は1,540tで生産量は、ほぼ同量であった。同様に1年目の堆肥生産量95tに対し、2年目は100tで5t増加した(図12)。

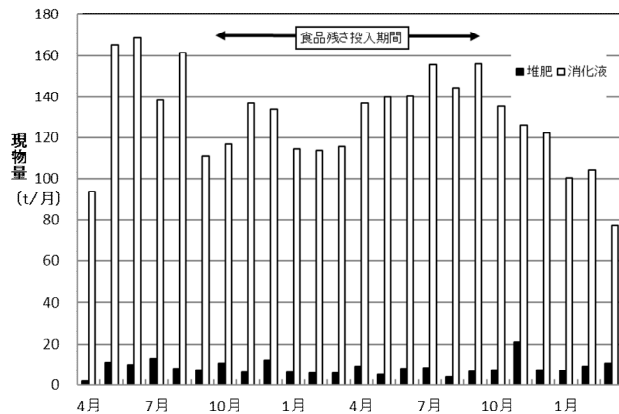


図12 消化液及び堆肥の生産量(2008~2009)

表3 メタン発酵消化液成分濃度の月次別推移(2008~2011)

成分名	消化液(mg/l)											
	2008/5/9	2008/7/24	2008/9/26	2008/11/21	2009/1/26	2009/3/18	2009/5/14	2009/7/30	2009/9/17	2009/11/26	2010/1/28	2011/2/1
蒸発残留物	20,900	25,000	24,600	27,800	29,500	29,100	27,900	26,200	26,700	27,200	28,300	29,000
強熱減量	14,800	16,500	15,500	17,800	19,500	19,400	17,800	16,000	17,300	17,300	16,800	10,000
アンモニア性窒素	1,200	1,100	1,200	1,500	1,700	1,800	1,800	1,600	1,700	1,700	1,800	1,500
全窒素	2,000	2,000	2,100	2,600	2,900	2,900	2,900	2,600	2,600	2,400	2,600	2,200
BOD	2,000	2,600	1,800	3,900	3,300	2,700	4,300	3,000	3,800	2,700	2,600	1,000
COD	13,000	8,200	8,300	9,900	9,500	9,000	9,400	7,400	8,400	7,200	8,100	10,000
TC(全炭素)	8,500	9,300	8,800	9,800	8,500	9,800	11,000	6,900	7,700	7,800	7,400	10,000
有機体炭素(TOC)	7,300	7,700	7,200	9,100	8,400	8,900	9,000	5,400	6,500	5,400	5,600	8,200
全リン酸(P2O5)	390	520	580	620	1,200	500	530	580	540	600	680	470
酸化カリウム(K2O)					2,300							2,400
酢酸	25未満	25未満	25未満	69	32	280	700	270	860	130	25未満	
プロピオン酸	25未満	25未満	25未満	25未満	25未満	25未満	25未満	25未満	25未満	25未満	25未満	
水分%	97.9	97.5	97.5	97.2	97.1	97.1	97.2	97.4	97.3	97.3	97.2	97.1

1.3 経済評価

1.3.1 支出項目

1.3.1.1 減価償却費

総合耐用年数を算出するため、プラントの取得価額を細かく区分し、「減価償却資産の耐用年数等に関する省令」やメーカーの保守管理計画書を参考にしながら耐用年数を設定した。設定した耐用年数に基づき個別の減価償却費を計算した結果は表4のとおりであるが、一次発酵を終えた堆肥のストックヤードについては、既存のコンクリート堆肥舎を活用しているため、計算からは除外した。

なお、建物や建物に付属する設備(電気設備、配管類等)、構築物の基礎部分の取得価額については、部分ごとに算出されている取得価額から、主な機械及び装置の取得価額を差し引いた金額として計算した。

1.2.5 メタン発酵消化液成分濃度の経時的変動

メタン発酵消化液殺菌槽からサンプリングした消化液成分濃度の月次推移を表3に示した。

全窒素及びアンモニア態窒素は、プラント運転開始時は低い値を示したが、食品残渣投入期間頃から値が高くなり安定した。また、食品残渣の投入により原料中の炭水化物量が増加したことなどから、BOD及び酢酸の値が上昇した。

メタン発酵槽から毎日返送される消化液の成分濃度は、若干の変動はあるが、数カ月から半年分を貯蔵して利用することを考えれば、堆肥に比べ比較的的成分値が安定した肥料であると考えられる。

また、機械棟については、建物本体(鉄骨スレート)に比べ、付属する設備のウエートが高いことから、機械棟全体を建物の付属設備として耐用年数を設定した。

その結果、年間償却費の合計は13,219,111円となり、プラント全体の取得価額(設置費用)185,827,950円を除いて算出される、総合耐用年数は約14年(表4)となり、北海道にある別海プラントの総合耐用年数13.1年に近い値となった³⁾。

しかし、プラントの償却期間は、一般的には20年として計算されることが多いことから、本プラントの経済評価についても、他の事例に準じて20年として計算することとした。

計算の結果、年間償却費は9,291,397円となったが、交付金事業(50%負担)を利用したため、交付金分を圧縮した金額を償却費とすると4,645,699円となる。一般的

に普及している堆肥発酵施設(乳用牛100頭規模、堆肥舎及び攪拌型発酵施設)の減価償却費が約2,500千円とすると、約1.8倍の高額となる。

表4 総合耐用年数から算出した減価償却費

区分(全体)	取得価額	区分(部分)	取得価額	区分(詳細)	取得価額	耐用年数	年間償却費	備考	
バイオガスプラント	157,750,150	機械棟	93,813,800	固液分離機	4,455,000	7	636,429	機械及び装置	
				圧縮分別機	8,235,000	7	1,176,429	機械及び装置	
				ガスエンジン	9,180,000	15	612,000	内燃力発電設備	
				ガスボイラー	2,700,000	7	385,714	機械及び装置	
				ポンプ類	4,320,800	7	617,257	機械及び装置	
				建物・配管・電気等	64,923,000	15	4,328,200	建物付属設備(電気・配管設備)	
		ガスホルダー	12,848,490		ガスホルダー	8,190,000	7	1,170,000	機械及び装置
					基礎部分	4,658,490	40	116,462	構築物(コンクリートその他)
		貯留槽	21,131,420		貯留槽	10,400,000	22	472,727	構築物(金属サイロ)
					基礎部分	10,731,420	40	268,286	構築物(コンクリートその他)
		脱硫槽等	1,940,400		脱硫槽	653,000	7	93,286	機械及び装置
					気液分離機	383,000	7	54,714	機械及び装置
		発酵槽	28,016,040		基礎部分	904,400	40	22,610	構築物(コンクリートその他)
					発酵槽本体	26,666,040	35	761,887	構築物(鉄筋コンクリートサイロ)
		堆肥舎	23,802,320	堆肥舎	23,802,320	攪拌機	1,350,000	7	192,857
堆肥攪拌機	5,754,000					7	822,000	機械及び装置	
外構	4,275,480	外構	4,275,480	建物	18,048,320	15	1,203,221	温室(金属)	
合計	185,827,950			外構	4,275,480	15	285,032	構築物(コンクリート下水)	
						14	13,219,111		

1.3.1.2 維持管理費(人件費、点検交換費、修理費)

職員でプラントを管理しているため基本的に労働に関する実費はかからないことから、運転管理に要する労働時間に労働単価を乗じて人件費を試算した。なお、試算に用いた労働単価は、「勤労統計」におけるパートタイム労働者の単価(1,000円強)を参考に1,000円として算出

した。

なお、試算に用いた所要時間や人数、回数等は、3年間の実証期間における実際の作業時間や聞き取り調査を参考に平均的であると思われる数値を設定した(表5)。

表5 年間人件費の試算

作業内容	①所要時間(時間)	②人数(人)	③年間作業回数(回)	④延べ作業時間 ④=①×②×③(時間)	⑤労働単価(円/時間)	⑥人件費 ⑥=④×⑤(円)	備考
運転管理	2.00	1.0	365.0	730.0	1,000	730,000	2時間×365日
堆肥切り返し	8.00	1.0	12.0	96.0	1,000	96,000	月1回切り返し作業
堆肥散布	0.25	1.0	120.0	30.0	1,000	30,000	散布1回15分
消化液散布	0.25	1.0	400.0	100.0	1,000	100,000	散布1回15分
点検整備	8.00	2.0	12.0	192.0	1,000	192,000	毎月2名で8時間作業
合計				1,148.0		1,148,000	

※労働単価は勤労統計におけるパートタイム労働者の単価を参考として、1,000円/時間として計算した。

プラントを維持管理するためには、定期的な保守管理が重要である。その中でも専門的知識と技能を要する保守管理については、他県のプラントにおいても、メーカーに委託している場合が多い。

本プラントについても、プラント全体の点検調整や消耗部品の交換作業をメーカーに委託しており、その金額

は決して安価であるとは言えないが、突発的なトラブルの防止やプラントの耐用年数を引き延ばすためにも実施するべきである(表6)。ただし、保守管理の費用については、プラントを構成する装置によっては耐用年数が短いものもあり、極端に保守管理経費が膨らむ年次も出てくることから、プラントを設置する段階で、メーカーと

良く打合せを行い、長期的な視点に立った保守管理計画（経費も見積もってもら）を立てておくことが大切である。

表 6 点検交換費用

年度	保守管理内容	保守管理委託費(円)	備考
2008年	年次保守点検・性能保証点検	0	
2009年	年次保守点検・性能保証点検	2,420,250	
2010年	年次保守点検	2,900,000	
2011年	年次保守点検	2,750,000	
2012年	年次保守点検	2,285,000	
2013年	年次保守点検	1,900,000	契約により2年間は毎月性能保証点検を実施
2014年	年次保守点検	1,940,000	
2015年	年次保守点検	1,940,000	
2016年	年次保守点検	1,940,000	
2017年	年次保守点検	1,940,000	
2018年	年次保守点検	1,940,000	
2019年	年次保守点検	1,984,000	

初年度は、実際の稼働条件に合わせて不具合を解消したため修理の項目も多かったが、2年間の性能保証期間中

表 7 修理費

区 分	内 容	2008年度	2009年度	2010年度	2011年度	2012年度	2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度
初期改修	バイオガスプラント排気口変更工事	性能保証期間											
	バイオガスプラントガス配管工事	性能保証期間											
	消化液配管支柱設置工事	性能保証期間											
	受入槽棚設置工事	性能保証期間											
	電動チェーンブロック設置工事	性能保証期間											
	受電盤MCB間配線盛替え	性能保証期間											
	受入槽ガード取付工事	性能保証期間											
	消化液殺菌槽点検蓋改造	性能保証期間											
	消化液貯留槽バルブエア抜き設置	性能保証期間											
	ガスホルダーユニット移設工事	性能保証期間											
	逆止弁追加、絶縁ホルト工事	性能保証期間											
	統合運転管理システム帳票追加	性能保証期間											
	統合運転管理システム追加改造	性能保証期間											
	PCのPLCプログラム改造	性能保証期間											
	発酵槽攪拌ポンプ絶縁不良改修工事	性能保証期間											
	殺菌槽攪拌機ベアリング調整	性能保証期間											
混合槽ポンプ脱着装置交換	性能保証期間												
追加改修	排水側溝・危険防止フェンス設置工事		1,785,000										
	系統連携装置避雷システム設置工事				928,200								
	硫化水素対策電気室換気扇取付工事				185,000								
	消化液貯留槽攪拌機取付工事										912,600	(硫化水素対策)	
小 計		0	1,785,000	0	1,113,200	0	0	0	0	0	0	912,600	
修 理	落雷修理(ガスエンジン、制御盤等)	2,749,950	(保険適応)	3,286,500	(保険適応)								
	ガスエンジン発電機熱交換機交換												
	ガスエンジン発電機スロットル調整												
	ガスエンジン発電機ヒューズ交換												
	ガスエンジン発電機シリンダーヘッド交換												
	制御盤内DCサブライ交換			135,450									
	コンポストキャブタイヤケーブル交換			38,693									
	ボイラ温度表示基板交換			10,972	32,550								
	シーケンスPLC CPUユニット交換				241,500								
	温度処理PLC CPUユニット交換								196,560				
	データ記録用PC交換				99,800								
	消化液移送ポンプ修理						57,750						
	受入槽攪拌ポンプ修理							300,000					
	デジタルマルチメータ交換(電力計)							89,250					
	ガスエンジンガスメータ								98,334				
	受入槽上部カバー取手交換								16,200				
	ガイドパイプ交換												
	発酵槽攪拌機交換										1,830,000		
	液面計交換											243,000	
	発酵槽屋根修繕											2,754,000	
	発酵槽攪拌モーター電線											49,680	
	混合槽-発酵槽逆流防止弁												55,286
	タッチパネル操作盤												302,400
ガスエンジン熱交換器&排気部交換												788,854	
小 計		2,749,950	0	3,471,615	373,850	57,750	389,250	114,534	196,560	1,830,000	3,046,680	55,286	1,091,254

の契約に基づき、メーカー負担により作業を実施できたため、落雷の復旧費用を除いては、それほど大きな金額にはならなかった。

2年目については、メーカーの修理を要するトラブルもなくプラントを稼働することが出来たが、3年目に再び落雷により、プラント運転制御盤からガスエンジン発電機にいたるまで大きな損傷を被ってしまった。

また、3年目には、硫化水素等による金属の腐食に起因する電子部品の不具合やガスエンジン発電機の熱交換機について水漏れ等の故障が散見された。

なお、3年間の修理費（脱硫剤費用を除く）の平均は2,141,455円となり、補助金を圧縮する前の減価償却費13,214,285円の16.2%と見積もられたとして計算した(表7)。

1.3.1.3 光熱費 (LP ガス、電力)

プラントの発酵槽や殺菌槽の加温は基本的にガスエンジン発電機から発生する熱エネルギーにより加温されるが、外気温が極端に低下する冬期間の補助加温装置として、ガスボイラが併設されている。

このガスボイラは、バイオガスもしくはLP ガスのいずれかを燃料とすることが出来るよう設計されているが、低カロリーのバイオガス使用時についてもボイラの燃焼を安定させるため、約4%のLP ガスを混合する必要がある。

今回の実証試験においても、発酵槽の槽内温度を維持するため、冬季のみガスボイラを併用せざるを得なかったため、LP ガス料金が発生した。

実証試験の期間は2008年4月から2010年3月の2年間であるが、データの継続性を考慮し、ふん尿+食品残渣投入期間である2008年10月から2009年9月の1年間と、食品残渣投入終了の2009年10月から2010年9月1年間を比較対象として費用を算出した(図13)。

その結果、食品残渣投入期間はバイオガスをボイラの燃料として利用できたためLP ガスの年間使用量は80m³であり430円/m³を乗じると34,231円となったのに対し、ふん尿のみの投入期間では、ボイラに利用できるバイオガスが確保できないため、LP ガスの年間使用量は1,108m³であり、金額に換算すると約14倍の476,347円となった。

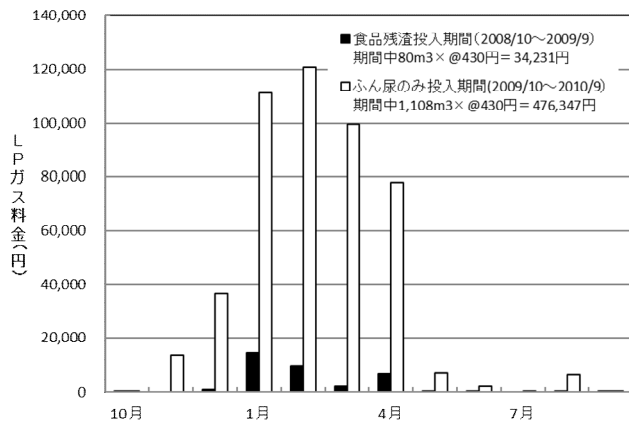


図13 LPG 使用量(2008~2009年)

プラントを運転するために必要な電力については、前述のエネルギー的評価の項でも触れているが、経済評価の項ではデータの期間をLP ガスの算定期間と同じ期間で評価することとした。

なお、電力の単価については、電力会社の状況により変動するが、ここでは11円/kWhとして計算することとした。

LP ガスと同様に食品残渣の投入期間とふん尿のみの期間で比較した結果、食品残渣投入期間の年間電力消費量

は45,416kWhであり、金額に換算して499,580円となった。一方、ふん尿のみ投入期間の年間電力消費量は41,545kWhであり金額に換算して456,992円と食品残渣投入期間の換算電力料金の方がやや高額な数字となった。食品残渣を投入する場合、そのままの状態では直接発酵槽に投入することが出来ないため、圧縮分別機でペースト状に調整する必要がある。この圧縮分別機を稼働させるための電力分が電力料金を押し上げる原因であると考えられる。

また、月別に比較すると秋から冬にかけて電力消費量が増えているが、原因としては、発酵槽を加温するために温水ポンプや発酵槽内攪拌機の稼働時間が長くなっているためであると考えられる(図14)。

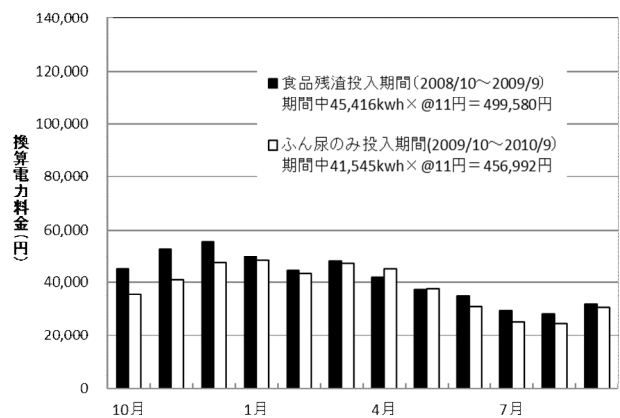


図14 積算電力使用量(2008~2009年)

1.3.1.4 雑費(水道料)

プラントにおいては、発生熱の媒体として水を利用するが、閉鎖系における循環利用のため、基本的には水道水を補給する必要はほとんど無いと言える。

ただし、プラント内や原料供給を担う牛舎における機材の洗浄に温水を利用していることから、これらに要する水道使用量についても、プラントの維持経費を算出するために集計した。

2008年4月から9月までについては、データの集計システムが対応していなかったため、2008年10月から2010年9月までの2年間について月別に水道使用量を集計した。その結果、食品残渣投入期間である前半の12カ月間における年間水道使用量は214m³/年であり、水道料金単価を174円/m³(那須塩原市20m³超時単価)として計算すると37,252円/年となった。また、後半の12カ月における年間水道使用量は、牛舎における温水の使用量増加等により、466m³/年と大幅に増加した。

月ごとの水道使用量では、特に冬季に温水の使用量が極端に増えることが明らかとなり、プラント全体における冬場の熱量不足の一因となっていると思われる(図15)。

1.3.2.2 購入肥料費節減効果

プラントで生産される消化液と堆肥（固液分離固分）について、NPK 成分値と生産量をもとに単肥に換算した場合の価格を、ふん尿のみ投入期間と食品残渣投入期間に分けて算出した。その結果、ふん尿のみの期間では消化液と堆肥の合計で 1,729,541 円、食品残渣投入期間では 1,800,071 円の価値があるという結果となった。単位製品量当たりには換算すると、消化液 1t あたり 1,048 円、堆肥は 1,274 円という結果となった（表 9）。ただし、この計算で用いた堆肥とは、水分 75%前後の固液分離固分であり、発酵乾燥後の製品堆肥では、水分 55%前後となり 1t あたりの価格も 10,000 円程度となる（数量は減少する）。

しかしながら酪農家が従来のふん尿処理体系からプラントによるふん尿処理体系に切り替えた場合、従前から

飼料畑に還元されていたふん尿の量については処理方式が変わっても基本的に増減はないものと考えられるが、堆肥化（4割揮散）に比べ、メタン発酵では窒素の揮散率が小さいことから、窒素についてだけ見ればある程度の効果が期待できると思われる。すなわち揮散で失っていた窒素の金額である 350 千円程度の低減効果があると思われる。

なお、共同利用型プラントである北海道別海町のプラントでは、メタン発酵処理施設の導入というよりは、ふん尿処理施設の共同化により労働力に余裕が出来たため、ほ場によって過不足が生じていたふん尿の適正施用が可能となり、その結果、不要となった化学肥料の購入金額の減少を効果としてあげている⁴⁾。

表 9 消化液・堆肥の金額換算

区分	食品残渣	成分値(%)			生産量(t)	資材換算(t)			金額換算(円)※			合計
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O		硫安	溶性リン肥	塩化カリ	硫安	溶性リン肥	塩化カリ	
消化液	無	0.22%	0.05%	0.20%	1,504	15.76	3.53	4.98	826,412	288,584	460,800	1,575,796
	有	0.22%	0.05%	0.20%	1,606	16.82	3.77	5.32	882,459	308,155	492,051	1,682,665
堆肥	無	0.25%	0.13%	0.16%	110	1.31	0.72	0.29	68,685	58,380	26,681	153,745
	有	0.25%	0.13%	0.16%	84	1.00	0.55	0.22	52,450	44,581	20,374	117,405
合計	無	—	—	—	1,614	17.07	4.25	5.27	895,097	346,964	487,481	1,729,541
	有	—	—	—	1,690	17.82	4.32	5.54	934,909	352,736	512,426	1,800,071

※硫安、溶性リン肥の単価は、肥料の農家購入価格情報(H23.1)、塩化カリはH23.1市価を参考

1.3.2.3 労働力低減効果

実証プラントの運転管理に係る年間の人件費について、各作業に要するおおよその所要時間や人数、回数から延べ作業時間を算出し、労働単価を乗じて人件費を試算した結果、1,148,000 円となった（表 5）。

実証プラントでは、メタン発酵処理工程そのものの運転管理に要する作業時間は運転ボタンの操作程度であるが、投入原料の固液分離固分を堆肥化施設へ搬入するための作業に労力を要するため、トータルでは労働力の削減にはつながっていないのが現状であり、堆肥化工程の自動化が労働力低減の課題であると思われる。

なお、共同利用型プラントである北海道別海町のプラントで、共同利用施設の利用前後で労働力低減費の比較を行っているが、購入肥料費節減効果同様、メタン発酵施設の導入というよりはふん尿処理施設の共同化により労働費が軽減されていると思われ、固形ふん+尿では 4,265 円/頭・年、スラリーのみでは 3,515 円/頭・年と試算されている⁴⁾。

1.3.2.4 温室効果 (CO₂) ガス低減効果

実証プラントそのものはカーボンニュートラルであり、主要な温室効果ガスとして排出される CO₂ 量の増減はないため、プラントで発生した電気や熱を利用することにより削減される、化石エネルギー由来 CO₂ の削減量として効果を数値化した（表 10）。

ただし、数値化にあたり、プラントで発生した電気や熱の大部分はプラントを稼働させるために利用されてしまうが、プラントの設置目的がふん尿処理のための施設という観点から、差し引きしないこととした。

数値化の方法は、発電量と熱量（灯油換算）に CO₂ 削減係数を乗じて算出した。その結果、食品残渣投入期間の合計 51,963kg に対しふん尿のみの期間では 33,908kg であった。

一般家庭が一年間に排出する CO₂ 排出量を 4,806kg/戸（H14 地球温暖化対策地域協議会調査結果）とすると、食品残渣投入期間が 11 戸、ふん尿のみの期間では 7 戸に相当する。