

牛ふんバイオガスプラントの余剰熱利用の 熱収支に関する研究

吉松 凜¹・石井 一英²・佐藤 昌宏³・落合 知⁴

¹ 非会員 北海道大学修士課程 大学院工学院 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

E-mail: yoshimatsu.rin.y7@elms.hokudai.ac.jp

² 正会員 北海道大学教授 工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

E-mail: k-ishii@eng.hokudai.ac.jp

³ 正会員 北海道大学助教 工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

E-mail: satomasahiro@eng.hokudai.ac.jp

⁴ 正会員 北海道大学特任助教 工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

E-mail: ochiai.satoru@eng.hokudai.ac.jp

バイオガスプラント (BGP) における余剰熱の利用実態を明らかにするために本研究では、北海道大学 BGP (HBGP) と鹿追町 BGP (SBGP) を対象に、①余剰熱利用の実態の調査・解析、②その解析結果に基づき余剰熱利用効率向上の可能性を検討した。HBGP では、発酵槽-バイオガスボイラ-貯湯槽-温水配管-ハウスの冬期間の解析を行った。結果として、冷えたふん尿投入による発酵槽温度の低下が無視できないことと、ハウス間の地下配管からの熱損失が大きいことが明らかになり、さらなる配管断熱と投入ふん尿の加温による改善の可能性を示した。SBGP では蓄熱槽の熱収支に着目し、解析を行った結果、プラントから蓄熱槽までの送水温度による配管からの熱損失の違いが顕著であり、送水温度の最適化が必要である。

Key Words: manure, biogas, utilization of surplus heat, heat loss

1. 背景と目的

家畜ふん尿は、近年の酪農・畜産の大規模化により大量発生しており、適切に管理・処理されないなどの問題が生じている。家畜ふん尿は適切に管理・処理されていないと、河川への流入、もしくは地下水への浸透により水質汚濁をおこしたり、周辺への悪臭問題などがおこりやすくなる。また、野積みされた家畜ふん尿から発生するメタンなどの温室効果ガスが問題となっている。環境保全に配慮した資源循環型酪農・畜産が求められる昨今、家畜ふん尿を資源として利用することが重要である。家畜ふん尿を有効活用する方法として、たい肥化があるが、スラリー状の家畜ふん尿は好気発酵が困難であり、たい肥化には向いていない。たい肥化以外の有効利用方法としてメタン発酵がある。家畜ふん尿をメタン発酵する施設としてバイオガスプラント (以下、BGP) があり、BGPでは家畜ふん尿を発酵槽でメタン発酵し、バイオガスを回収する。発酵残渣は液肥として農地に散布される、あるいは固液分離のち固形分を敷料として利用される。

密閉空間でメタン発酵されるため、地域の悪臭問題を解決できることや、発生したバイオガスを燃焼させることで電気や熱といったエネルギーに変換し利用できることから注目を集めている。現在は BGP で製造されたバイオガスは発電機により熱・電気に変換され、熱は発酵槽の加温に、電気は再生可能エネルギー固定価格買取制度 (以下、FIT 制度) により売電されており、これから得られた収入で BGP の運転資金を確保しているのが現状である。しかし、今後 FIT 制度の終了や電力買取価格の低下が予想されるため、BGP の持続可能な運営のためには、新たな収入源が必要である。また、送電線が脆弱なため、FIT 制度を適用することができない地域で、今後 BGP を普及させていくのにも FIT 制度に頼らない新たな収入源が必要である。

一方で、多くの BGP では余剰熱が発生している。余剰熱とは BGP で発酵槽の加温に使用される熱以外の熱のこととするが、利用されずにそのまま排出される場合も少なくない。この余剰熱を用いて新たな事業にチャレンジしている BGP が少しずつ出現している。例えば、

北海道鹿追町の環境保全センターでは、余剰熱を用いてマンゴー栽培、サツマイモ保管及びチョウザメ飼育を行っており、将来の新たな事業として注目されている。BGPの事業採算性の向上のためには、余剰熱利用の際に無駄がないように効率的に利用することや、BGPと余剰熱利用先の全体での熱利用の最適化の検討も行う必要がある。

BGPの事業運営に関する既往研究として、三宅¹⁾らはFIT制度に頼らないBGPの事業運営方法の検討を行っている。ふん尿処理費や液肥散布費の値上げや売ガスによる収入増加に着目したものであり、エネルギー効率向上による収入の増加は検討していなかった。BGPのエネルギーに関連する研究として、鈴木²⁾らはGISを用いて家畜ふん尿発生量、周辺施設の熱需要状況などのデータから、バイオガスプラント導入を想定したモデルを構築し、経済性などを評価した。これはBGPの立地による家畜ふん尿の収集可能量やバイオガスの利用法による収益の最適化を検討していた。これらの既往研究のように、BGPの事業採算性や地域における資源循環・エネルギー利用のためのBGPの導入検討などはあるもの、BGP自体のエネルギー効率に関する研究は見当たらない。本研究では、BGPだけでなく熱利用施設であるハウスと組み合わせる熱利用効率について解析する。

以上から、現時点ではBGPにおける熱利用の実態は明らかにされておらず、効率向上策の検討もなされていない。本研究では、余剰熱利用を行っているBGPで小規模の北海道大学バイオガスプラントと大規模の鹿追町バイオガスプラントを対象に①余剰熱利用の実態の調査・解析を行い、②その解析結果に基づき余剰熱利用効率向上の可能性を検討することを目的とする。

2. 北海道大学バイオガスプラントの熱利用解析

(1) プラントの概要

北海道大学バイオガスプラント(HBGP)は北海道大学の農場に位置し、原料は主に乳牛ふん尿で計画処理量は4.0 t/dayである。一日約80~120 m³のバイオガスが発生しており、温水ボイラーで燃焼して温水で発酵槽の加温などを行っている。余剰熱はハウスの加温に使用されている。プロセスフロー図を図-1に示す。

(2) 測定項目と測定箇所

HBGPでの取得可能なデータに限界があったため、発酵槽-バイオガスボイラー-貯湯槽-温水配管-ハウスまでの冬期間の解析を行った。

図-1に示した箇所以下項目を測定した。

T₁:発酵槽送り温度、T₂:発酵槽戻り温度

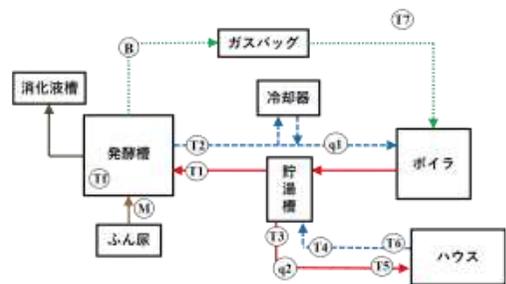


図-1 北海道大学 BGP のプロセスフロー及び測定箇所

T₃:ハウス送り温度、T₄:ハウス戻り温度
T₅:ハウス入口温度、T₆:ハウス出口温度
T₇:外気温度、T_f:発酵槽温度
q₁:発酵槽への温水流量、q₂:ハウスへの温水流量
B:バイオガス発生量、M:ふん尿投入量

(3) 解析方法

a) 発酵槽

発酵槽の加温に必要な熱量を節約し、余剰熱をできるだけ多く確保するために発酵槽の熱収支を求めた。発酵槽の熱収支は式(1)~(6)で表される。

$$\frac{\Delta C}{\Delta t} = Q_{in} - Q_{emit} + Q_{m-in} - Q_{m-out} \quad (1)$$

$$\Delta C = V \cdot \Delta T_f \cdot \rho_m \quad (2)$$

$$Q_{in} = (T_1 - T_2) \cdot q_1 \cdot \rho_w \quad (3)$$

$$Q_{emit} = K \cdot \Delta T \cdot A \quad (4)$$

$$Q_{m-in} = M \cdot T_m \cdot \rho_m \quad (5)$$

$$Q_{m-out} = M \cdot T_f \cdot \rho_m \quad (6)$$

ΔC:発酵槽内の熱量変化 [kcal]

Δt:時間 [h]

Q_{in}:発酵槽への供給熱量 [kcal/h]

Q_{emit}:発酵槽の放出熱量 [kcal/h]

Q_{m-in}:投入ふん尿熱量 [kcal/h]

Q_{m-out}:排出发酵残渣熱量 [kcal/h]

ΔT: |T₇ - T_f| [°C]

T_m:投入ふん尿温度 [°C]=8.7

ρ_w:水の比熱 [kcal/(kg·°C)]=1.0

ρ_m:ふん尿の比熱 [kcal/(kg·°C)]=1.0

K:発酵槽熱伝達率 [kcal/(m²·h·°C)]

V:発酵槽体積 [m³]=100

A:発酵槽表面積 [m²]=150

プラント稼働開始直後の2008年2月に測定されたデータを使用した。投入ふん尿温度に関しては、測定されていなかったため、今回は参考までに実際に測定した投入ふん尿温度 8.7°Cを用いて、発酵槽温度の実測値と計算

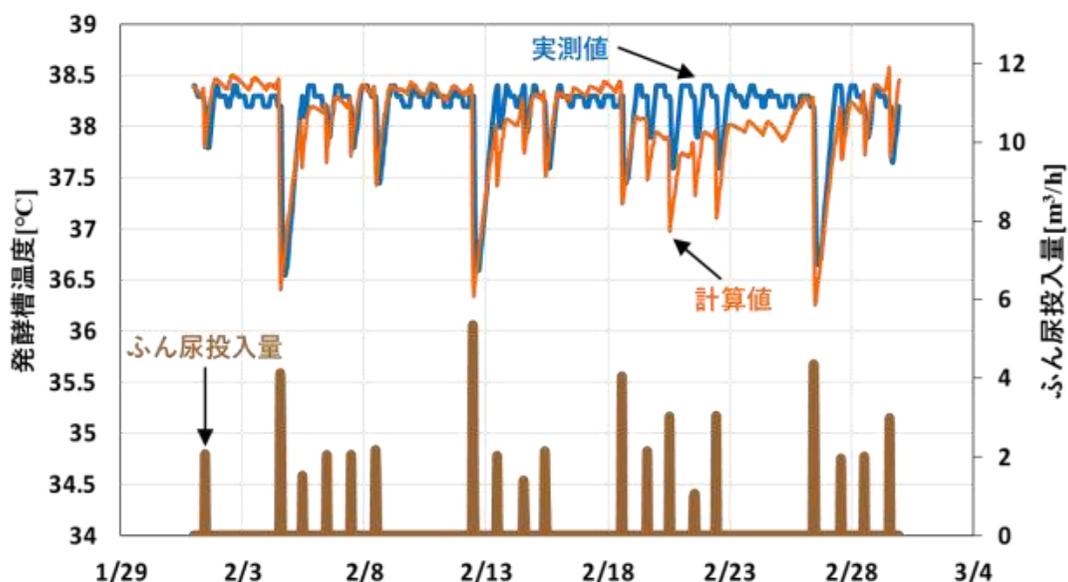


図-2 発酵槽温度とふん尿投入量の関係 (2008年2月)

値の二乗の差が最小となるようにエクセルのソルバー機能を用いて発酵槽の熱伝達率を求めた。

b) 貯湯槽－温水配管－ハウス

貯湯槽からハウスまでの配管からの熱損失を求めるために、貯湯槽からハウスまでの熱収支を解析した。熱収支は式(7)～(10)で表される。

$$Q_{tank} = Q_{phl} + Q_{greenhouse} \quad (7)$$

$$Q_{tank} = (T_3 - T_4) \cdot q_2 \cdot \rho_w \cdot t \quad (8)$$

$$Q_{phl} = (T_3 - T_5) \cdot q_2 \cdot \rho_w \cdot t \quad (9)$$

$$+ (T_6 - T_4) \cdot q_2 \cdot \rho_w \cdot t$$

$$Q_{greenhouse} = (T_5 - T_6) \cdot q_2 \cdot \rho_w \cdot t \quad (10)$$

Q_{tank} :貯湯槽から出力された熱量 [kcal/h]

Q_{phl} :配管からの熱損失 [kcal/h]

$Q_{greenhouse}$:ハウスの加温に使用された熱量 [kcal/h]

それぞれの区間の温水の温度差に流量、時間、比熱をかけることで貯湯槽から出力された熱量、配管からの熱損失、ハウスの加温に使用された熱量を求めた。2020年1月から2020年3月までのデータを使用した。

(4) 結果と考察

a) 発酵槽

発酵槽の熱伝達率を求めた結果、0.35 kcal/(m²・h・°C)となった。設計値である 0.3 kcal/(m²・h・°C)とほぼ同等であった。図-2 に発酵槽温度の実測値、計算値、ふん尿供

給量を示す。

発酵槽温度は約 38°C～38.5°Cの間に保たれていたが、急激に 36.5°C付近まで下がる時があった。図-2 より、ふん尿を投入した際に発酵槽温度が大きく下がるのが明らかになった。なお、発酵槽温度の実測値と計算値が一部合わない部分があるが、その理由として投入ふん尿温度を 8.7°Cと一定として計算したことが原因であると考えられる。

冷えたふん尿投入により発酵槽温度が低下すると考えられるため、改善策として、発酵槽から同温度で排出される発酵残渣が持つ熱量による投入ふん尿の加温を想定した。これにより発酵槽の加温に必要な熱量を削減することができる。この削減割合を求めるために、発酵槽供給熱量を求めた(3)式の流量 q_1 を新しい流量 $q' = X \cdot q_1$ として発酵槽内の熱量変化が変わらないように X を調整して求めた。発酵槽の加温に必要な熱量の削減割合は $(1 - X) \cdot 100\%$ となる。投入ふん尿温度 8.7°Cから、14°Cまで加温した場合を計算し、投入ふん尿温度と発酵槽の加温に必要な削減割合を図-3 に示す。例えば、8.7°Cの投入ふん尿を 14°Cまで加温して発酵槽に投入することで発酵槽の加温に必要な熱量が約 10%削減されることが明らかになった。

b) 貯湯槽－温水配管－ハウス

貯湯槽からハウスまでの熱収支の計算を行った結果を表-1、図-4 に示す。貯湯槽から出力された熱量の約 60%が配管で損失し、約 40%の熱量しかハウスの加温に使用されていなかった。余剰熱利用効率の向上策として、

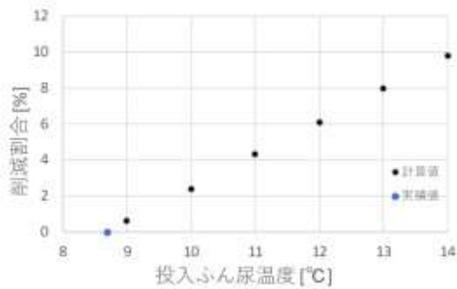


図-3 投入ふん尿温度と削減割合

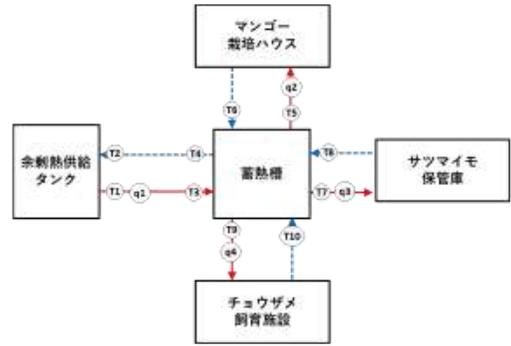


図-5 鹿追町環境保全センターBGPの余剰熱利用先の測定項目

表-1 2020年1月～3月の Q_{tank} 、 Q_{phl} 、 $Q_{greenhouse}$

	貯湯槽から出力された熱量 Q_{tank} [MJ]	配管からの熱損失 Q_{phl} [MJ]	ハウスの加温に使用された熱量 $Q_{greenhouse}$ [MJ]
1月	417	224	192
2月	459	306	153
3月	383	284	99

熱槽は約 80 m 離れており、蓄熱槽から各余剰熱利用先へは約 30m 離れている。

(2) 測定項目と測定箇所

SBGP では図-5 で示す箇所以下項目を測定している。全体の熱収支の解析は行えず、プラント-温水配管-蓄熱槽-余剰熱利用先(マンゴー栽培、チョウザメ飼育、サツマイモ保管)の熱収支の解析を行った。

- T_1 :余剰熱供給一次 送水温度 [°C]
- T_2 :余剰熱供給一次 還水温度 [°C]
- T_3 :蓄熱槽一次温度 [°C]、 T_4 :蓄熱槽下部温度 [°C]
- T_5 :マンゴー栽培ハウス 送水温度 [°C]
- T_6 :マンゴー栽培ハウス 還水温度 [°C]
- T_7 :サツマイモ保管庫 送水温度 [°C]
- T_8 :サツマイモ保管庫 還水温度 [°C]
- T_9 :チョウザメ飼育施設 送水温度 [°C]
- T_{10} :チョウザメ飼育施設 還水温度 [°C]
- q_1 :余剰熱供給一次 流量 [L/min]
- q_2 :マンゴー栽培ハウス 流量 [L/min]
- q_3 :サツマイモ保管庫 流量 [L/min]
- q_4 :チョウザメ飼育施設 流量 [L/min]

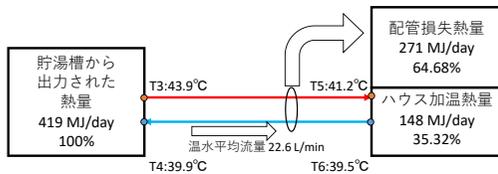


図-4 貯湯槽とハウスの熱収支
(2020年1月～3月の平均値)

配管の断熱が考えられる。また、新規の余剰熱利用先を作る場合は、貯湯槽から余剰熱利用先までの配管距離を短くするなどが向上策として考えられる。

3. 鹿追町バイオガスプラントの熱利用解析

(1) プラントの概要

鹿追町バイオガスプラント (SBGP) は北海道十勝平野の北西部の鹿追町環境保全センターに位置する。処理能力は 94.8 t/day で主に乳牛のふん尿が原料で、バイオガス生産量は一日約 3900 m³ である。発生したバイオガスを発電機 (190 kWh、100 kWh)、温水ボイラー (100,000 kcal×3)、蒸気ボイラー (1,000 kg/h) で燃焼し、プラントの稼働に使用している。余剰となった電気は売電し、余剰熱は温水の形で蓄熱槽に貯蔵し、マンゴー栽培、チョウザメ飼育、サツマイモ保管を行っている。プラントと蓄

(3) 解析方法

a) プラントから蓄熱槽までの配管

プラントから蓄熱槽までの配管からの熱損失を次の式から求めた。

$$\text{配管からの熱損失} = (T_1 - T_3) \cdot q_1 \cdot \rho_w \quad (11)$$

b) 蓄熱槽

蓄熱槽の熱収支は式(12)～(17)で表される。得られたデータに限りがあったので、蓄熱槽の熱損失は考慮せず、余剰熱利用先への供給熱量は配管損失込みの値である。

$$\Delta Q = Q_{in} - Q_m - Q_{sp} - Q_s - Q_{out} \quad (12)$$

$$Q_{in} = T_3 \cdot q_1 \cdot \rho_w \cdot t \quad (13)$$

表-2 配管熱損失 (2017年1~3月, 11月, 12月)

	配管熱損失 [GJ]	平均外気温度 [°C]	平均流量 [L/min]	平均送水温度 [°C]
1月	31	-9.44	151.8	53.0
2月	26	-5.77	147.0	51.7
3月	34	-1.17	137.6	53.3
11月	84	-0.67	145.9	61.0
12月	78	-7.03	58.2	60.2

表-3 蓄熱槽の熱収支 (2017年1~3月, 11月, 12月)

	流入熱量 Q_{in} [GJ]	流出熱量 Q_{out} [GJ]	マンゴー 栽培ハウス 加温熱量 Q_m [GJ]	サツマイモ 保管庫 加温熱量 Q_{sp} [GJ]	チョウザメ 飼育施設 加温熱量 Q_s [GJ]	蓄熱槽の 熱量変化 ΔQ [GJ]
1月	1482	1224	87	29	12	123
2月	1260	1055	68	26	9	102
3月	1343	1133	68	27	20	96
11月	1573	1301	85	22	17	148
12月	576	472	83	31	11	-21

$$Q_m = (T_5 - T_6) \cdot q_2 \cdot \rho_w \cdot t \quad (14)$$

$$Q_{sp} = (T_7 - T_8) \cdot q_3 \cdot \rho_w \cdot t \quad (15)$$

$$Q_s = (T_9 - T_{10}) \cdot q_4 \cdot \rho_w \cdot t \quad (16)$$

$$Q_{out} = T_4 \cdot q_1 \cdot \rho_w \cdot t \quad (17)$$

ΔQ :蓄熱槽の熱量変化

Q_{in} :蓄熱槽への流入熱量 [GJ]

Q_m :マンゴー栽培ハウス 加温熱量 [GJ]

Q_{sp} :サツマイモ保管庫 加温熱量 [GJ]

Q_s :チョウザメ飼育施設 加温熱量 [GJ]

Q_{out} :蓄熱槽からの流出熱量 [GJ]

ρ_w :水の比熱 [kcal/(kg·°C)] = 1.0

なお2017年1月~3月, 11月, 12月のデータを用いて熱収支を求めた。

(4) 結果と考察

a) プラントから蓄熱槽までの配管

表-2に示すように11月と12月の配管からの熱損失は1~3月の熱損失と比べて2倍以上あった。配管熱損失の違いの原因として考えられる外気温度, 流量, プラントからの送水温度のそれぞれの平均値を比較した。配管熱損失の大きかった11月と12月の送水温度が60°C付近と1~3月と比較したとき, 約10°C高かった。配管の熱損失は周囲との温度差で決定されるので送水温度による影響が大きいことが分かる。余剰熱利用効率向上のためにはプラントからの送水温度の最適化が必要である。

b) 蓄熱槽

蓄熱槽への流入熱量, 流出熱量, それぞれの余剰熱利用先の加温熱量と蓄熱槽の熱収支を表-3に示す。

蓄熱槽からの熱損失を考慮していないため, この収支の値は過剰に評価したものになる。12月の蓄熱槽の熱収支が負の値になったのはプラントからの流入熱量 Q_{in} が小さかったのが原因である。表-2に示す12月の配管からの熱損失が大きかったことが流入熱量 Q_{in} 低下の一因であると考えられる。また, 12月と同様に配管からの熱損失が大きいかにも関わらず, 11月の熱収支が+148 GJとなったのは流入熱量 Q_{in} が大きく流出熱量 Q_{out} との差もあったことが理由だと考えられる。

4. 結論

北海道大学 BGP では, 温水配管からの熱損失が大きく, また冷えたふん尿投入による発酵槽温度の低下が無視できないことを示した。配管断熱の他, 投入ふん尿の加温による改善可能性がある。

鹿追町 BGP では, プラントから蓄熱槽への送水温度による配管からの熱損失の違いが顕著であった。余剰熱の利用効率向上のためには送水温度の最適化が必要である。

それぞれの BGP で明らかになった, 冷えた投入ふん尿の影響, 配管からの熱損失の大きいこと, そして送水温度が配管からの熱損失に与える影響が大きいことは, 対象とした BGP だけでなく, 他の BGP にも当てはまることだと考えられる。

現在のBGPでは、必ずしも熱収支を計算するために必要なデータが測定されているわけではなく、完全にはそのBGPの余剰熱利用効率を評価できないことが課題である。必要なデータを測定すればさらなる余剰熱利用効率向上の余地があるものと考えられる。

謝辞：本研究を実施するにあたり、データの収集やバイオガスプラントの見学などをご協力いただきました北方生物圏フィールド科学センターの平様、北海道鹿追町の城石様、井上様、機器類や配管などについて情報をご提供いただいた北海道エア・ウォーターの尾崎様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 三宅琢, 石井一英, 藤山淳史, 佐藤昌宏: FITに頼らない牛ふんバイオガスプラントの事業運営に関する研究—バイオガスプラントの導入効果を踏まえて—、第44回環境システム研究論文発表会講演集 pp.29-34, 2016.
- 2) 鈴木剛, 稲野一郎, 関口建二, 白井康宏, 村石靖: GISを援用した畜産系バイオマス資源循環・エネルギー利用モデルの構築、バイオマス科学会議発表論文集、p. 173-174、2011年.
- 3) 市川治: 資源循環型酪農・畜産の展開条件、農林統計協会、2007
- 4) 鹿追町ホームページ: <https://www.town.shikaoui.lg.jp/>
- 5) 北海道庁: 畜産系バイオガスプラント導入ガイドブック、2015

(Received June 19,2020)

STUDY OF HEAT BALANCE IN UTILIZATION OF SURPLUS HEAT FROM A BIOGAS PLANT FOR COW MANURE

Rin YOSHIMATSU, Kazuei ISHII, Masahiro SATO, and Satoru OCHIAI

The actual condition of surplus heat in biogas plants (BGP) has not been clarified. In this study, we investigated the use of surplus heat at Hokkaido University BGP (HBGP) and Shikaoui Town BGP (SBGP) by (1) analyzing the actual condition of surplus heat utilization, (2) investigating the possibility of improving the efficiency of heat utilization based on the results of the analysis. For HBGP, we analyzed the fermenter-biogas boiler-hot water tank-pipe-greenhouse during the winter period. As a result, the temperature of the fermenter decreased due to the input of cold cow manure and the heat loss from the underground pipes between the greenhouse and plants was large, indicating the possibility of improving the efficiency by insulating the pipes and heating the input cow manure. For SBGP, we analyzed the heat balance of a heat storage tank. As a result, there is a significant difference in heat loss from the pipes between the plant and the heat storage tank depending on the temperature of the water. Optimization of the water temperature is required.