

## 博士学位論文

### 学位論文内容の要旨および審査結果の要旨

氏名 中山 博敬

学位の種類 博士（農学）

学位授与の条件 酪農学園大学学位規程第3条第3項に該当

学位論文の題目 共同利用型バイオガспラントのエネルギー利用方法に関するライフサイクル的評価

#### 審査委員

主査 教授 干場 信司（動物資源生産学）

副査 教授 森田 茂（動物資源生産学）

副査 教授 高橋 圭二（動物資源生産学）

## 【目的】

液状ふん尿の管理施設の一つに、メタン発酵（嫌気発酵）を利用したバイオガスプラントがある。この施設ではふん尿を一定温度に保持しながら嫌気発酵させ、発酵後に残る消化液を圃場へ散布して肥料として利用する。発酵時にはバイオガスが発生し、エネルギーとして利用することができる。

北海道でのバイオガス利用方法は、ガスボイラーを用いて熱のみを利用する方法、またはコージェネレーター（以下、**CHP** と表記）を用いて熱と電力を利用する方法に大別することができる。また、近年、移動式の精製圧縮充填装置が開発され、精製ガスを天然ガス自動車やガスコンロの燃料に使用する実証試験が実施されている。このように、バイオガスの利用方式はガスボイラー、**CHP**、精製装置があるが、既往の研究では、寒冷地におけるこの3つの利用方式についてのエネルギー生産効率を比較して評価した報告はない。

そこで本論文では、寒冷地の共同利用型バイオガスプラントにおいて、バイオガスをガスボイラー、**CHP**、精製装置で利用する場合のエネルギー生産効率および経済性について、ライフサイクル的視点から評価を行う。具体的には、以下の内容について明らかにする。

（１）バイオガスプラントの運転状況を模擬することが可能なシミュレーションプログラムを構築し、寒冷な北海道の気象条件下でのエネルギー収支を求め、バイオガスの利用方式別に産出されるエネルギー量およびエネルギー生産効率を明らかにする。

（２）プラントの建設およびふん尿運搬にかかるエネルギー量を考慮して、バイオガスの利用方式別にエネルギー収支を明らかにし、ライフサイクル的視点でエネルギー利用方式を評価する。

（３）プラントで生産されたエネルギーを化石エネルギーと代替する場合の経済性を、プラントの建設、維持管理にかかる費用を考慮したライフサイクル的視点で評価する。

（４）今後の北海道の地域づくりを見据えた、寒冷地での共同利用型バイオガスプラントを核としたエネルギー利用方法を提案する。

## 【方法】

**（１）エネルギー生産効率の検討** バイオガスの利用方法は複数想定されるが、それぞれのガス利用過程が異なる（図 1）。そのため、産出されたエネルギー量を比較するだけではどの方法が効率的にエネルギーを生産しているかの判断ができない。そこで、稼働中の共同利用型バイオガスプラントで実測したデータをもとにプラントの稼働を模擬するシミュレーションモデルを構築し、バイオガス利用方法がガスボイラー、**CHP** および精製装置の場合でのプラント運転時のエネルギー収支について定量的に比較する。また、投入化石エネルギー量と産出エネルギー量の比率から、効率的なバイオガス利用方法を明らかにする。

**（２）ライフサイクル的視点でのエネルギー利用方式の評価** バイオガスを生産するためのプラントの建設、更新や原料であるふん尿の運搬時にはエネルギーが必要である。また、消化液を肥料として利用することで化学肥料使用量を削減できるため、消化液利用により化学肥料

の製造に必要なエネルギー相当がバイオガスプラントから産出されていると見なすことができる。そこで、プラント建設およびふん尿運搬時に必要なエネルギー量と、上述の（１）で求めたプラントから産出されるエネルギー量から、施設の耐用年数を考慮したライフサイクル的視点でのエネルギー収支を明らかにする。

**（３）バイオガスの利用方式と経済性の検討** バイオガスプラントから外部へ供給可能なエネルギーはバイオガスの利用方式によって異なり、熱、電力、精製ガスの形で供給することができる。これらのエネルギーは、既存の化石エネルギーと代替することができるが、代替可能な化石エネルギーは複数存在する（図 2）。また、化石エネルギーの価格およびエネルギー量はそれぞれ異なる。さらに、エネルギーを産出するシステム全体としての経済性を評価するためには、バイオガスプラントの建設費、維持管理費および更新費を考慮した経済性を評価する必要がある。そこで、バイオガスプラントから外部へ供給可能なエネルギーと代替可能な化石エネルギーを対比し、施設の耐用年数を考慮したライフサイクル的視点での経済性を明らかにする。

**（４）共同利用型バイオガスプラントを核としたエネルギー利用方法の提案** バイオガスのエネルギー利用の現状を見ると、発生するエネルギーのうち、特に熱エネルギーを有効に利用しているとはいえない。そこで、バイオガスプラントでの熱エネルギーの効率的な利用方法を検討する。また、バイオガスの利用方式別に、今後の北海道におけるバイオガスのエネルギー利用方法を提案する。

#### 【結果】

表 1 にバイオガスの利用方式別のエネルギー収支およびエネルギー生産効率を示す。乳牛 1,000 頭分のふん尿を管理するバイオガスプラントでは、エネルギー生産効率が最も良いガス利用方法は CHP を用いた場合であることが明らかとなった。図 3 に CHP を用いた場合の月別の産出エネルギーとエネルギー生産効率を示す。産出エネルギーの季節変化は、冬季のプラント内での熱需要が多いため、冬季にプラント外部へ供給可能なエネルギー量が少なくなることが明らかとなった。

ライフサイクル的視点でのエネルギー利用方式の評価では、プラント運転開始から 35 年目までのエネルギー投入量と産出量を比較した結果、いずれのガス利用方式においても、プラント運転開始後 6 年目または 7 年目以降にエネルギー産出量がエネルギー投入量を上回ることが明らかとなった。

プラント運転開始後 35 年目までの経済収支をライフサイクル的視点で評価した結果は、いずれのケースでも収支はマイナスであることが明らかとなった。そこで、経済収支改善方法として、建設費補助による支出軽減、副原料受け入れによる収入増加、代替可能な化石エネルギーの単価引き上げによる収入増加の 3 つの方法を想定した検討を行った。その結果の概要を表 2 に示す。プラント建設費用の 2 分の 1 を補助することを想定した場合は、いずれのケースでも、主要施設の更新を迎えるまでは収支がプラスとなるが、更新費の補助がなければ、その後の収支はマイナスで推移することが明らかとなった。副原料受け入れ費の収入を想定した場合は、いずれのケースでも、長期的には収支がプラスで推移することが明らかとなった。FIT 制度での電力買取価格を参考に、代替可能な化石エネルギーの価格を 1MJ 当たり 11.4 円と想

定した場合は、ガス利用方式がガスボイラーのケースでは、長期的には収支がプラスで推移することが明らかとなった。一方、ガス利用方式が CHP のケースでは、収支はマイナスで推移することが明らかとなった。すなわち、プラントの長期的な収支を成立させるためには、副原料受け入れなどにより収入増加をはかる必要があることが明らかとなった。また、副原料の受け入れを行わない場合は、FIT 制度による電力価格設定のように、バイオガス由来の熱エネルギー利用促進のための新たな制度を整備する必要があると考えられる。

上記の結果より、バイオガスの利用方式別のエネルギー利用方法を以下の通り提案する。バイオガスをガスボイラーのみで温水として利用する場合は、夏季に十分な需要を見込める施設を供給先とし、冬季には熱が不足するため、他のエネルギーによる熱供給ができるような仕組みを整える必要がある。バイオガスを CHP で利用する場合は、電力と熱の両方のエネルギーを得ることができ、電力は電力線を介しての送電が容易である。熱は夏季に多く産出され、冬季に少なくなる特徴があるため、熱を利用する施設の選定に注意が必要である。バイオガスを精製装置で利用する場合は、天然ガスと同等のガスを得ることができる。精製ガスを遠方へ運搬してガスボイラーや CHP で利用することは、エネルギー効率から考えて適しているとはいえない。したがって、精製ガスを需要家が受け取りにくる仕組みを考える必要がある。

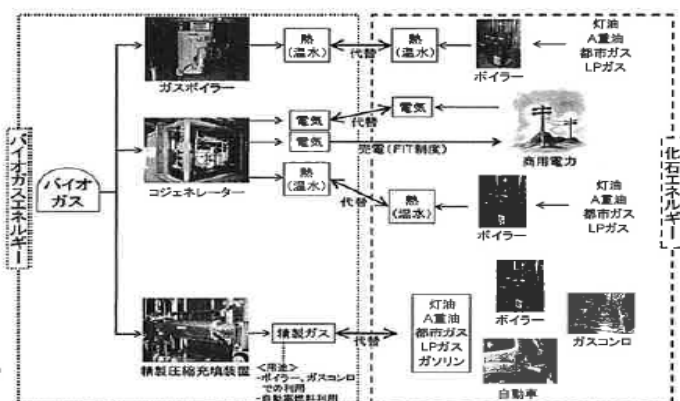
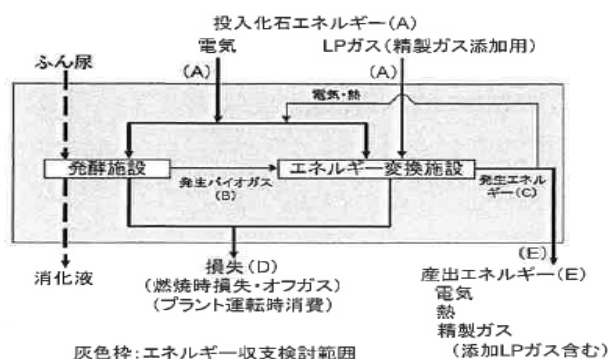


図1 バイオガスプラントにおけるエネルギー収支

図2 バイオガスのエネルギー利用と代替可能な化石エネルギー

表1 エネルギー収支およびエネルギー生産効率

(GJ/y)

シミュレーションケース	①ガスボイラー	②CHP + ガスボイラー	③精製装置 + ガスボイラー
投入化石エネルギー (A)	1,042	145	2,705
バイオガス (B)	12,110	12,110	12,114
発生エネルギー (C)	9,688	9,797	11,225
損失 (D)	9,154	9,069	9,284
産出エネルギー (E)	3,998	3,186	5,535
(E) - (A)	2,956	3,041	2,830
エネルギー生産効率 ((E-A)/E)	0.74	0.95	0.51

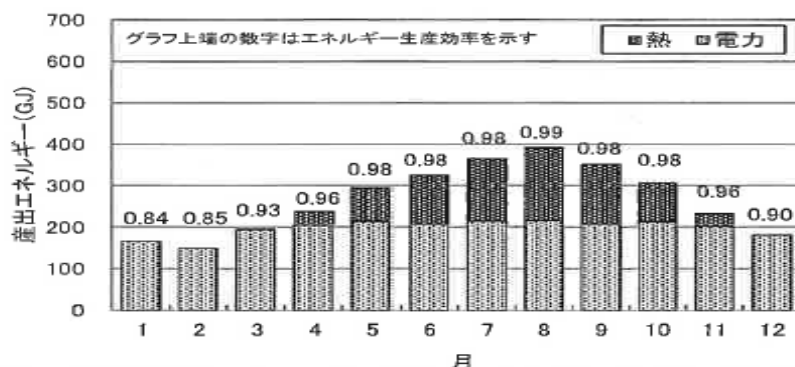


表2 経済性評価の概要 (プラントから産出されるエネルギーをすべて利用する場合)

ガス利用方式	ガスボイラー		コジェネレーター + ガスボイラー		精製装置 + ガスボイラー	
プラント建設後の期間	短期	長期	短期	長期	短期	長期
プラントの建設補助なし	×	×	×	×	×	×
建設費の2分の1補助	△	△	△	×	△	×
建設補助なし、副原料受け入れ	△	○	△	○	△	○
建設補助なし、代替化石エネルギーの単価引き上げ	△	○	×	×	×	△

○: 黒字化する

△: 一時的に黒字化するが、その後黒字化しない

×: 黒字化しない

### 1. 論文審査の要旨および結果

第1章の「序論」では、本論文の背景と関連する既往の研究および研究目的ならびに論文の構成について述べている。東日本大震災の発生後、自然エネルギーに関する関心は高く、バイオガスプラントも注目されているが、バイオガスの各種利用方式に関するエネルギー生産効率や経済効率を評価した報告は少ない。そこで本論文では、寒冷地の共同利用型バイオガスプラントにおいて、バイオガスをガスボイラー、コジェネレーション（以下 **CHP**）、精製装置で利用する場合のエネルギー生産効率および経済性について、ライフサイクル的視点から評価を行っている。

第2章の「バイオガスの利用方式とエネルギー収支の検討」では、第3章・4章におけるライフサイクル的評価に先立ち、運転時のエネルギー収支を検討している。稼働中の共同利用型バイオガスプラントで実測したデータをもとにプラントの稼働を模擬するシミュレーションモデルを構築し、バイオガス利用方法がガスボイラー、**CHP** および精製装置の場合でのプラント運転時のエネルギー収支について定量的に比較し、投入化石エネルギー量と産出エネルギー量の比率から、効率的なバイオガス利用方法を明らかにしている。また、投入した化石エネルギー量および精製時に排出されたオフガス中のメタン量ならびに精製ガスに添加した **LP** ガス量から温室効果ガス排出量を求め、環境に対する負荷について明らかにしている。その結果、乳牛 1,000 頭分のふん尿を管理するバイオガスプラントでは、エネルギー生産効率が最も良いガス利用方法は **CHP** を用いた場合であることが明らかとなった。また、温室効果ガス排出量の最も少ないガス利用方法は **CHP** を用いた場合であり、最も多いのは精製装置を利用した場合であった。産出エネルギー1GJ 当たりの温室効果ガス排出量は、精製装置を利用した場合では、**CHP** を利用した場合の 10 倍以上であることを明らかにしている。

第3章の「ライフサイクル的視点によるバイオガスプラントのエネルギー収支の検討」では、プラント建設およびふん尿運搬時に投入するエネルギー量と、第2章で明らかにしたプラントから産出されるエネルギー量を整理し、施設の耐用年数を考慮したライフサイクル的視点でのエネルギー収支を検討している。その結果、いずれのガス利用方式においても、プラント運転開始後6年目または7年目以降にエネルギー産出量がエネルギー投入量を上回ることを明らかにした。

第4章の「バイオガスの利用方式と経済性の検討」では、バイオガスプラントから外部へ供給可能なエネルギーと代替可能な化石エネルギーを整理し、施設の耐用年数を考慮したライフサイクル的視点での経済性を検討している。その結果、プラント建設費および更新費を除いた単年度での経済収支の検討では、すべてのケースで運転経費より収入が多い結果となり、経済収支がマイナスになることはなかった。プラント建設費および更新費と単年度の運転時収支から、プラント運転開始から 35 年目までの経済収支をライフサイクル的視点で検討した結果、いずれのケースでも収支はマイナスであることを明らかにした。そこで、経済収支改善方法とし

て、建設費補助による支出軽減、副原料受け入れによる収入増加、代替可能な化石エネルギーの単価引き上げによる収入増加の3つの方法を想定して検討し、プラント建設費用の2分の1を補助することを想定した場合では、いずれのケースでも、主要施設の更新を迎えるまでは収支がプラスとなるが、更新費の補助がなければ、その後の収支はマイナスで推移することを明らかにした。既往の研究を参考に、毎年4,152万円の副原料受け入れ費の収入を想定した場合では、いずれのケースでも、長期的には収支がプラスで推移することを明らかにした。FIT制度での電力買取価格を参考に、代替可能な化石エネルギーの価格を1MJ当たり11.4円と想定した場合では、ガス利用方式がガスボイラーのケースでは長期的には収支がプラスで推移し、精製装置のケースでは一時的に収支がプラスとなることを明らかにした。一方、ガス利用方式がCHPのケースでは、収支はマイナスで推移することを明らかにしている。

第5章の「総合考察」では、バイオガスの利用方式別のエネルギー利用方法として以下のことを提案している。バイオガスをガスボイラーのみで温水として利用する場合は、夏季に十分な需要を見込める施設を供給先とし、冬季には熱が不足するため、他のエネルギーによる熱供給ができるような仕組みを整える必要がある。バイオガスをCHPで利用する場合は、電力と熱の両方のエネルギーを得ることができ、電力は電力線を介しての送電が容易である。熱は夏季に多く産出され、冬季に少なくなる特徴があるため、熱を利用する施設の選定に注意が必要である。バイオガスを精製装置で利用する場合は、天然ガスと同等のガスを得ることができる。精製ガスを遠方へ運搬してガスボイラーやCHPで利用することは、エネルギー効率から考えて適しているとはいえない。したがって、精製ガスを需要家が受け取りにくる仕組みを考える必要がある。

## 本研究の評価

本論文は、現在実際に行われているバイオガスの3つの利用方法について、エネルギー効率および経済性の両面から評価を行った研究である。バイオガスの利用に関するこのような幅広い比較評価自体、これまであまり行われていないが、本研究のさらなる特徴は、これらの評価を「ゆりかごから墓場までの評価」と称されるライフサイクル的な視点で行ったことである。これにより、現在注目されているバイオガスの利用に関する長期的な方向性を示すとともに、将来的な自然エネルギー利用システムの評価方法をも提示するものである。

以上のことから、審査員一同は、中山博敬氏が提出した本論文が博士（農学）に値するものと判断した。

2014年2月14日

## 審査員

主査	教授	干場	信司
副査	教授	森田	茂
副査	教授	高橋	圭二