

温室効果ガスと投入・産出エネルギーから見た 乳牛ふん尿由来のバイオガス輸送システム の評価

大塚 舜¹・石川 志保²・石井 一英³・落合 知⁴

¹北海道大学学生 工学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
E-mail: pori_viran11@eis.hokudai.ac.jp

²酪農学園大学准教授 農食環境学群 (〒069-8501 江別市文京台緑町 582 番地)
E-mail: shiho@rakuno.ac.jp

³北海道大学教授 工学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
E-mail: k-ishii@eng.hokudai.ac.jp

⁴北海道大学特任助教 工学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
E-mail: ochiai.satoru@eng.hokudai.ac.jp

脆弱な送電網と太陽光発電の系統接続の急増により、バイオガス(BG)発電を前提としたバイオガスパラント(BGP)の建設が困難な状況にある。そこで BG を需要が多い場所まで輸送・供給する方法について、温室効果ガス(GHG)と投入・産出エネルギーの視点で評価することを目的とし、4 つのシナリオを作成した。シナリオ 1 はメタン濃度 60%の BG(生ガス)を変換せずに輸送する。シナリオ 2, 3 では異なる精製圧縮方法を用いたメタン濃度約 90%のバイオメタンを取扱う。シナリオ 4 は生ガスを精製し液化する。BG 量を 2000 m³、輸送距離を 0~50 km とした場合、総じてシナリオ 4 は優位となる可能性があったが、データに不確実性があった。他に優位性を示したのは、GHG 排出量ではシナリオ 1、正味のエネルギー生産量及び EPT(Energy payback time)では約 10 km までシナリオ 1、以降はシナリオ 2 であった。

Key Words: biogas transportation, purification, liquefaction, sustainable society, cow manure

1. 序論

2050 年までにカーボンニュートラルを目指すためには、様々なエネルギー源を使用可能であることが望ましい。バイオガス(BG)は貯蔵・輸送できるといった強みがある。これは電力の需給バランスの調整力やブラックスタート、他のガス体エネルギーの代替として使用できる。また経済産業省^{注1)}によると、電力だけでなくガス分野での脱炭素化が必要であると位置づけられており、ガス自体の脱炭素化には、メタネーション(水素と CO₂ 合成)、水素、BG が 2050 年にむけて期待されている。このように BG はかなりの需要が見込まれる。エネルギー需要が少ない地域で製造した BG を、酪農家や地域団体及び各市区町村が連携して新たな特産品作りに利用する研究もすすんでいる^{注2)}。

再生可能エネルギーが豊富な北海道酪農地域でのバイオガスパラント(BGP)の導入コスト及びランニングコス

トは高く、BG・消化液売却の収入、専ら FIT 制度の導入が事実上前提となっている。しかし酪農地域で BGP が建つような場所では、送電網が脆弱である。または、既に他の再生可能エネルギー電源に占有されて容量が残っていない場合が多く、ノンファーム型に限定されている。そこで BG を需要が多い場所まで運び売却することも検討する必要がある。このときの課題は供給する過程で追加のコストがかかることと、エネルギーを消費して追加の温室効果ガス(GHG)が排出することである。

コスト評価をしている既往研究は存在するため、本研究では BG 輸送における環境面を評価することとした。具体的には、GHG 排出量と投入・産出エネルギー量及び EPT(Energy Payback Time)を算出した。その理由として、多くの GHG を排出してしまうと再生可能エネルギーとしての意義が薄れてしまうことがあげられる。また、一定の運転期間での消費エネルギーに初期投入エネルギーを加えた全投入エネルギーを毎年の正味の生産エ

エネルギーで除した EPT (Energy Payback Time)がシステムの比較のための指標としてよく用いられるが、EPT が減価償却年数を超過する場合にも、再生可能エネルギーとしての意義が薄れてしまうからである。

2. 研究方法

(1) 機能単位とシステムバウンダリー

乳牛約 600 頭の糞尿から、メタン濃度 60%，2000m³の BG が脱硫・除湿後、ブロワから送り出されたところから供給先までを考えた。自家消費分は無視した。

(2) 変換工程の設定

過去のガス輸送の実証実験では、精製と圧縮を組み合わせることで輸送を効率化している²⁾。そこで本研究でも精製と圧縮を組み合わせたシナリオを作成した。圧縮装置は、BGP から出てくるほぼ大気圧の生ガスを圧縮する装置である。PSA 法は高純度での精製が可能、膜分離法は装置が単純で規模が小さいというメリットがある。またこれに加えて、メタンの液化も検討することとした。

(3) 輸送方法

地域規模での BG の輸送方法には、トラック等を使った道路輸送とパイプライン、鉄道による輸送がある。パイプラインは送るための圧力が必要になるが、道路輸送の場合トラックの燃料と容器に封入するための圧力が必要となり、パイプラインを使ったほうが全体で 8%の GHG 排出量削減が期待できる結果あった³⁾。しかしパイプラインは、設置のための費用(特に土地代)が大きく、一度設置するとサイズや配置を変更できないデメリットがある。鉄道輸送も同じ理由で、鉄路から離れた場所に運ぶ場合にはさらに別の輸送が必要になる。ここで、輸送車輛に BG を使用するという発想もあるが、ガス車ト

ラックの需要が少なく導入が難しいと考えられる。したがって本研究では、軽油使用による道路輸送を採用した。

なお輸送距離は、0～50km を想定した。北海道の市区町村を見たときに、北海道の大きい市区町村間においても約 50 km 以内に収まる。そのため輸送距離 50 km までを想定すれば、域内での BG 地産地消が可能となると考えた。B-DASH の実証実験²⁾では、合計 30km の輸送距離を想定しており、十分に余裕をもった想定と言える。

(4) トラック台数の設定

決められたガス量を時間内で運ぶ必要があり、その分台数が増える。例えば生ガスを運ぶ場合は圧縮ガスのときよりも、必要なトラック台数は多くなる。労働基準法に従い、最長 7.25 時間トラックを運転する。トラックの待ち渋滞を考慮し、ガスを一日で運び切ることができる最小のトラック台数を設定した。

3. シナリオ設定

(1) シナリオ

シナリオを図-1 に示す。シナリオ 1 はそのままの生ガスを輸送する。トラックに積載するガスバッグへブロワから充填され、トラックで供給先まで輸送し、再びブロワで供給先側のガスバッグへ充填する。既往研究¹⁾よりガスバッグの容量は 58.4 Nm³ とし、充填に要する時間は 10 分とした。このシナリオは最も基本となる形で他のシナリオと比較する際の基準となる。

シナリオ 2 は生ガスを、PSA (Pressure Swing Adsorption) 法によりメタンを凝縮させ、その後低圧圧縮装置で圧縮し、ガスタンクに充填しトラックで輸送する。運搬に使用したガスタンクのまま供給先に保管する。既往研究¹⁾よりガスタンクのスペックは 200 Nm³ とし、充填に要する時間 10 分とした。

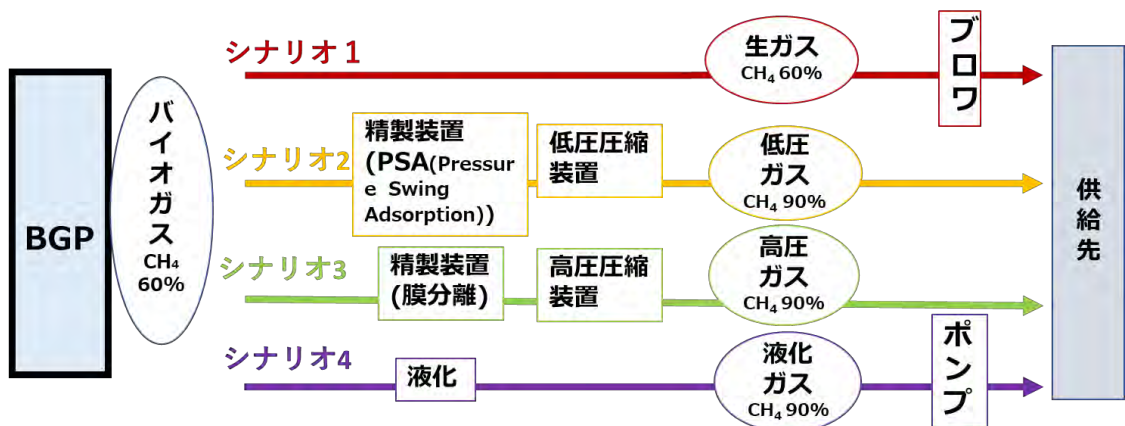


図-1 シナリオフロー図

シナリオ3は生ガスを膜分離法の精製装置にて精製し、その後高圧圧縮装置で圧縮し、ガスボンベに充填しトラックで輸送する。運搬に使用したガスボンベのまま供給先に保管する。ガスボンベのスペックは7Nm³とする。ガスボンベはカードルによる管理とし、カードル1セットでガスボンベ6本を収容する。カードルは想定するトラックに18セット積載可能であり、1台のトラックに収容可能な高圧ガス量は756Nm³とした³⁾。すべての充填に要する時間は10分と仮定した。現在実用可能な技術の中で最も圧縮してガス運搬が可能な方法である。

シナリオ4は生ガスを液化し、LNGタンクローリーで輸送する。輸送先では液化ガスのまま保管する。BGの液化技術は現在実証中の技術であるため、本論文では、天然ガスの液化で実用化されている技術と同等とした。LNGタンクローリーのスペックは積載重量6t、最高充填圧力0.6t、総重量19.75tの一般に普及しているものを選択した³⁾。前述した変換方法の中では液化が最も輸送効率が高いと考えられる。シナリオ1~3までは1日に複数のトラックが必要となるが、LNGタンクローリーの場合は、数日分のガス量を1度に運ぶことができる。酪農家側に必要とされるガスバッグの規模が大きくなってしまったため今回は毎日輸送とした。

(2) シナリオごとの生産エネルギー

各シナリオで1日あたりに供給先に供給できたエネルギー量を e_p とし、表-1に整理した。

表-1 生産エネルギー計算結果(2000m³/day処理時)

要素	段階	単位	scenario			
			1	2	3	4
ガス量	変換前	Nm ³	2000	2000	2000	2000
	変換後	m ³	2000	1333	1290	3.33
		%-CH ₄	60	90	93	90
	生産	m ³	2000	1200	1161	3.33
エネルギー e_p	圧縮ロス込	GJ/day	46.8	42.12	42.12	46.8

(3) シナリオごとのGHG排出量

GHG排出量は、トラックの軽油、変換装置及び供給先装置の稼働時の電力消費量に加えて、放出ロスの合計とし、 g_{sw} と表した。ここでGHGは、二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素の3種類を想定した。各地球温暖化係数として順に1, 23, 296を使用した。トラックは先と同様に計算した。電力使用量に対する排出量の値は0.57kg-CO₂/kWhを採用した⁴⁾。PSA及び低圧圧縮⁴⁾、膜及び高圧圧縮⁵⁾を元データで想定されているガス量は異なるためそれぞれ熱量で調整し算出した。

放出分排出量は松田³⁾から算出した。カーボンニュー

トラルの考えから二酸化炭素分については考慮しない。メタンの物質量と同じ物質量の二酸化炭素が大気から吸収されていたことを考え、その分を差し引いて計算した。以上表-2に整理した。

表-2 GHG排出量計算結果(2000m³/day処理時)

要素	単位	scenario			
		1	2	3	4
輸送車両	kgCO ₂	輸送距離に依存、別途計算			
変換装置	kgCO ₂ /day	-	795	3507	285
名称	-	-	低圧	高圧	液化
放出分排出量	kgCO ₂ /day	-	別途計算		-
供給先装置	kgCO ₂ /day	1869	-	-	3.11
名称	-	プロワ	-	-	ポンプ

(4) シナリオごとの初期投入エネルギー

初期投入エネルギーは輸送車両、容器、変換装置、供給先装置の建設する際のエネルギー消費量の合計とし、 E_{invest} と表した。トラックは、大型トラックとした⁶⁾。充填容器の値は使用するすべての本数の合計とし、ガスバッグはあるBGPの初期投資料金内訳から算出した⁴⁾。他はガスバッグを基準に考え、ガスバッグについてはガスタンクとガスボンベは輸送用と供給先での保管を考え2倍とし、液化ガスタンクはガスバッグと同等と考えた。変換装置のうち、精製装置は供給先装置のプロワと同等とし、液化装置は13Aガス製造時と同等とした⁷⁾。供給先装置のプロワは、ガスバッグと同様の手法で求めた。以上表-3に整理した。

表-3 初期投入エネルギー計算結果(2000m³/day処理時)

要素	単位	scenario			
		1	2	3	4
素材製造	GJ/台	19,001			
部品・製造	GJ/台	6,140			
車両合計	GJ/台	25,141			
輸送車両台数	台	別途計算			
充填容器	GJ	7,059	14,118	14,118	7,059
名称	-	ガス バッグ	ガス タンク	ガス ポンベ	液化ガス タンク
変換装置	GJ	-	4,871	4,871	4.59
名称	-	-	低圧	高圧	液化
供給先装置	GJ	4,872	-	-	8.12
名称	GJ	プロワ	-	-	ポンプ

(5) シナリオごとの消費エネルギー

一日あたりの変換時の電力、輸送時の軽油の熱量の合計、供給先器具の電力の合計を消費エネルギーとし、 e_c と表した。トラックは燃費3.5km/L、軽油発熱量38.04MJ/Lとして計算した。変換施設のうち、PSAは(3)と同

様で、膜分離高圧圧縮装置は企業の報告書より作成した⁸⁾。液化施設は⁷⁾供給先装置はプロワを基準にポンプも同等と考えた⁹⁾。以上表-4に整理した。

表-4 消費エネルギー計算結果(2000m³/day処理時)

要素	単位	scenario			
		1	2	3	4
輸送車両	kgCO ₂	輸送距離に依存、別途計算			
変換装置	kgCO ₂ /day	-	795	3507	285
名称	-	-	低压	高压	液化
放出分排出量	kgCO ₂ /day	別途計算			
供給先装置	kgCO ₂ /day	1869	-	-	3.11
名称	-	プロワ	-	-	ポンプ

(6) 施設・機器耐用年数

一律15年とし、Yと表す。

4. 評価方法

(1) GHG 評価

GHG 評価は、 g_e の値を比較した。BGP の導入による酪農業全体の GHG 排出量削減効果については、既に研究¹⁰⁾が進んでいるため、BGP の設置に伴う排出量は割愛した。

(2) 正味のエネルギー生産量

正味のエネルギー生産量は e_{net} とし、式(1)から算出した。消費エネルギーが生産エネルギーを上回ると正味のエネルギー生産量は負となり、エネルギー生産システムとして不適であるといえる。

$$e_{net} = e_p - e_c \quad (1)$$

(3) EPT (Energy Payback Time)

まず減価償却年数の15年間必要とされるエネルギー量 E_n を式(3)で算出した。

$$E_{in} = E_{invest} + e_c \times 365 \times Y \quad (2)$$

EPT は、 E_n を毎年の正味の生産エネルギーによって回収するまでの時間を表す^{注9)}。EPT は減価償却年数を超える場合定義されない。また EPT の値が小さいエネルギーほど全投入エネルギーの回収に要する時間が短く、エネルギー源として優秀であるといえる。

$$EPT = \frac{E_{in}}{e_c \times 365} \quad (3)$$

5. 結果と考察

(1) GHG 評価

GHG 排出量は図-2 のようになった。6km まではシナリオ1が最も GHG 排出量が少ないことがわかった。シナリオ2, 3は0km地点から多くの排出量が生じるのは、精製圧縮装置の導入に多くの GHG 排出量が伴っているためと考えられる。

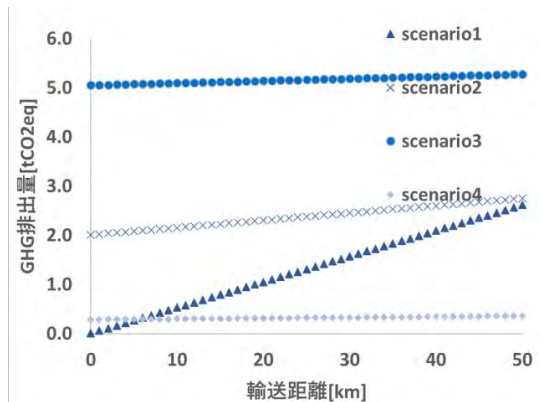


図-2 GHG 排出量結果

(2) 正味のエネルギー生産量評価

正味のエネルギー生産量の結果は図-3 のようになった。シナリオ3は約36km地点まで最も正味のエネルギー生産量が少なかった。約36km以降はシナリオ1が最も正味のエネルギー生産量が少なくなった。また約10km地点までは、シナリオ1の生ガス輸送が優位な結果であった。2000m³/dayのガス量を0~50kmの範囲で輸送する場合、全てのシナリオで正味のエネルギー生産量は負にはならなかった。ここでも精製、液化による輸送効率上昇によりグラフの傾きはゆるやかであった。

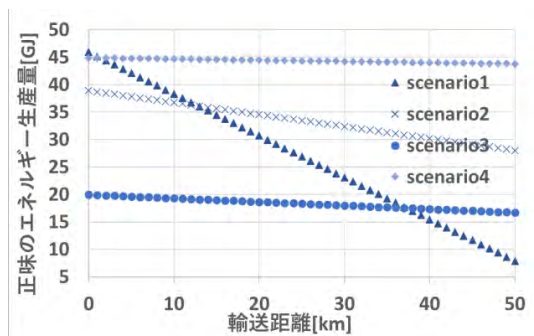


図-3 正味のエネルギー生産量結果

(3) EPT(Energy Payback Time)評価

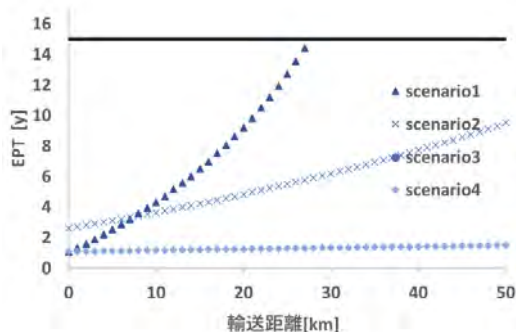


図-4 EPT結果

シナリオ3全体とシナリオ1の28km以上で定義外となり、表示していない。シナリオ1が約10km地点でシナリオ2を上回り、それ以降の距離ではすべてのシナリオの中で最も悪いEPTの値となった(図-4)。シナリオ1が輸送距離の増加に伴い初期投入エネルギーが上昇し、正味のエネルギー生産量が急激に減少したためだと考えられる。また輸送距離によるシナリオ1での変化が大きかった。他のエネルギー源ではバイオマス火力発電が、1.9～5.3であるのに対しこの結果では1～15となっており、他のエネルギー源との競合するためには、輸送距離を短くしてシナリオ1または、シナリオ2及びシナリオ4を選択する必要がある^{注6)}。

(4) BG量を変更したときの試算結果

以下に取り扱うガス量を500m³と10000m³に変更した場合の結果を示す。なお、10000m³の場合、シナリオ1において本論文で設定したトラックの容量では1日で運び切ることができなかったため結果から除外した。胃か簡単に結果を示す。GHG排出量は、各シナリオの相対関係は変わらず、排出量の規模だけが変化し、ガス量が大きいほど大きくなった。次に正味のエネルギー生産量についても、各シナリオの相対関係は変わらず、ガス量が大きいほど大きくなった。最後にEPTも同様に相関関係は変わらず、ガス量が大きいほど小さくなった。

(5) シナリオ4のパラメータ精査

ここまでシナリオ4はデータの不確実性から結果を示すのみとしてきた。ここで液化メタンのパラメータを他の論文と比較した。Tratzi(2022)¹¹⁾はイタリアにおいて液化BM(LBM)を大型車両の燃料に使う際の環境影響評価を行った。液化に伴う排出量、電力消費量ともに、本論文よりも大きく見積もられていた。

6. 結論と今後の課題

GHG排出量評価ではシナリオ1が全体的に優位であった。正味のエネルギー生産量とEPRの結果は大きくは変わらず、輸送距離が約10kmまでシナリオ1が優位となり、以降はシナリオ2が優位となった。シナリオ2の結果からわかるように、評価方法によって最適なシナリオが異なる。3つの評価において全体的にシナリオ3が悪い結果になった。シナリオ3の結果は、膜分離装置の全投入エネルギーに対する処理能力が低いことが原因であったことから、精製装置の選択は環境面の評価においても重要である。

課題としては結果として一般化できたのがEPTのみであること、エネルギー源としての使いやすさを評価できなかったこと、シナリオ4のデータ不足があげられる。

謝辞：本研究を進めるにあたって多くの方々のご支援をいただきました。本研究のために貴重なお時間を割いて協力していただいた、北海道ガス株式会社の市原様、大成建設株式会社の鈴木様、エア・ウォーター北海道株式会社の尾崎様に心より感謝申し上げます。

NOTES

- 注1) 経済産業省:一般社団法人日本ガス協会、資料3ガスの役割を果たすための取り組み2021年<閲覧日時2022/2/8>, https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/2050_gas_jigy/pdf/006_03_00.pdf
- 注2) 鹿追町バイオガスプラントからの余剰熱を活用した事業について<閲覧日時2022/2/16>, <https://www.town-shikaoli.jp/work/biogasplant/yojonetsu/>
- 注3) エア・ウォーター: LNG equipment facility<閲覧日時2022/2/10>, https://www.awpe.co.jp/awpe_lng.pdf
- 注4) 北海道電力株式会社 当社のCO2排出実績について, http://www.hepco.co.jp/corporate/environment/global_warming/results_co2.html
- 注5) EPT/EPRの定義 太陽光発電技術 産総研<閲覧日時<2022/8/19>>, https://unit.aist.go.jp/tpd-enzyme/PV/ja/about_pv/supplement/EPTdefinition.html
- 注6) 産総研:産総研について再生可能エネルギー源の性能<閲覧日時2022/2/12>, https://unit.aist.go.jp/tpd-enzyme/PV/ja/about_pv/e_source/RE-energypayback.html

REFERENCES

- 1) 松田和樹ら:乳牛ふん尿由来のバイオガス収集によるエネルギー供給事業の可能性検討,北海道大学情報科学院修士論文,(2021).
- 2) 国土交通省 国土技術政策総合研究所:メタン精製装置と吸蔵容器を用いたバイオガス集約技術導入ガイドライン

- (案) B-DASHプロジェクト No.25 国土技術政策総合研究所資料No.1090,2019<閲覧日時2022/8/20>
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn1090.htm>
- 3) O'Shea, R., Wall, D. M. & Murphy, J. D.: An energy and greenhouse gas comparison of centralised biogas production with road haulage of pig slurry, and decentralised biogas production with biogas transportation in a low-pressure pipe network, *Appl. Energy*, 208, pp.108–122 (2017)
 - 4) 菱沼竜男、干場信司、森田茂ら: 個別農家用バイオガスプラントのエネルギー的評価, 農業施設, 33巻, pp.45–51 (2002)
 - 5) 企業Aより提供の報告書,
 - 6) 鈴木徹也: 運輸部門のエネルギー消費構造分析に基づく材料関連省エネルギー技術の効果に関する研究、東京大学, (2005)
 - 7) 田村至ら: 都市ガス及びLNGのライフサイクルCO₂分析, エネルギー・資源, pp.68–75 (1999)
 - 8) 日向貴久、原仁: 共同利用型バイオガスプラントの稼働時におけるLCA, 積雪寒冷地におけるバイオガスプラントの利用に関する国際シンポジウム, pp.275–283 (2003)
 - 9) 菱沼竜男: LCA手法を用いたメタン発酵施設によるふん尿処理・利用方式の環境影響の評価—堆肥化・液肥化処理の分析, 日本家畜管理学会誌・応用動物行動学会誌, pp.7–19 (2008)
 - 10) 和田年弘ら: 炭素・窒素循環から見るバイオガスプラント導入の環境効果の評価手法の提案, 土木学会論文集G (環境), Vol.77, pp.II_171-II_181 (2021)
 - 11) Tratzi, P. *et al.*: Liquefied biomethane for heavy-duty transport in Italy: A well-to-wheels approach, *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, 107, pp.103288 (2022)

(Received March 28, 2022)

(Accepted August 22, 2022)

EVALUATION OF BIOGAS TRANSPORTATION SYSTEMS FROM DAIRY COW MANURE REGARDING GREENHOUSE GAS AND INPUT-OUTPUT ENERGY

Shun OTSUKA, Shiho ISHIKAWA, Kazuei ISHII and Satoru OCHIAI

The vulnerable power grid and the rapid increase in the number of solar power grid connections have been making it difficult to construct new biogas plants (BGP) based on biogas (BG) power generation. In this study, four scenarios were developed with the aim of evaluating the transportation and supply of BG to the locations with high demand in terms of greenhouse gas emissions and energy input/output. Scenario 1 transports BG (raw gas) with a methane concentration of 60% without conversion. Scenarios 2 and 3 deal with biomethane with a methane concentration of about 90% using different upgrading and compression methods. Scenario 4 involves upgrading and liquefying the biomethane. When the BG volume was 2000 m³ and the transport distance was 0 - 50 km, Scenario 4 had a possibility of being superior in general, but there were uncertainties in the data. The other superior scenarios were Scenario 1 for GHG emissions, Scenario 1 for net energy production and EPT (Energy pay-back time) up to about 10 km, and Scenario 2 for the rest.