

低温下における建設施工の 環境負荷低減に関する検討 —ガーベージ・バイオガスの有効利用の提案について—

寒地土木研究所 寒地機械技術チーム ○平 伴斉
片野 浩司
山口 和哉

生ゴミや家畜排泄物をメタン発酵させ生成されたバイオガスは、ボイラなどの燃料として使用されているが、余剰ガスが発生し、通常は焼却処分されている。

このガーベージ（生ごみ）バイオガスは、メタン濃度が 50～60%と低いため、車両の燃料として使用は不可能であるが、濃度を上げ圧縮することで CNG 車両の燃料として利用する方法を検討した。

バイオガスを使用した車両の冬期始動性や排出ガス特性について検討を行った結果、冬期使用には支障が無く CO₂ がガソリンに比べ 30%程度削減されることがわかった。

また、バイオガス精製圧縮充填装置についてコスト縮減や精製効率向上について検討を行った。

キーワード：リサイクル、省エネルギー、再生・回復、バイオガス

1. まえがき

「バイオマス・ニッポン総合戦略」では、地球温暖化対策、循環型社会の形成、バイオマスを活用することが推進されており、これらの目標を達成するうえで、家畜排泄物・稲わら・生ゴミなどを有効活用することが期待されている。

北海道では、バイオマスエネルギーの一つであるバイオガスプラントがいくつかの地域で導入され、バイオガスを燃料として発電施設や暖房に導入している事例があるが、余剰ガスが発生し、通常は焼却処分されている。この余剰ガスの有効活用方法のとしてバイオガスを車両などの燃料として利用する方法がある。しかし、車両へバイオガスを充填する精製圧縮充填装置や車両本体は、積雪寒冷地での導入事例が少なく、始動性など低温下における影響が不明である。

そこで、積雪寒冷地における影響の調査として、車両に充填を行う圧縮充填装置への影響や、車両の始動性・動力性能調査を行った。

2. バイオガス精製圧縮充填装置

バイオガスを CNG 車へ充填する際には、バイオガス精製圧縮充填装置を使用するが、これは、北海道開発局において、「バイオマス・ニッポン総合戦略」の目標を達

成すべく、バイオガス多角的利用に関する地産地消モデル構築調査の一環として、エアール・ウォーター(株)との協力により開発された装置である。

特徴としては、すべての機器・配管類を 20 フィート（約 6m）コンテナ内に搭載し、車両での移動を可能としている。

また、メタン濃度が 50～60%の原料バイオガスを膜分離装置によって約 93%程度まで精製することにより、熱量を都市ガスの 12A 相当に調整可能になる。さらに、CNG 車などのボンベに充填するために圧縮機を用いて約 20MPa まで昇圧する。処理フロー及び主要諸元を図-1 及び表-1 に、写真を写真-1 に示す。

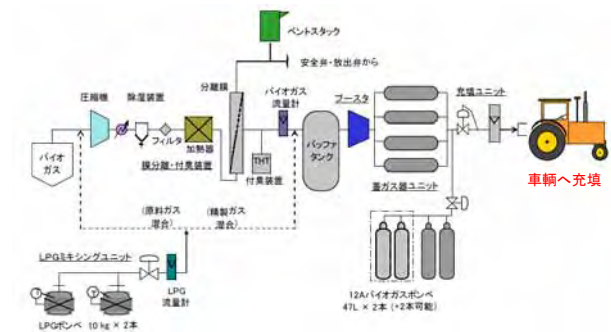


図-1 バイオガス精製圧縮充填装置の処理フロー

表-1 バイオガス精製圧縮充填装置主要諸元

大気条件		温度	-20~40℃
		湿度	30~80%RH
原料バイオガス条件			
組成	メタン	50~60%	
	二酸化炭素	35~45%	
	窒素	5%	
	硫化水素	5ppm以下(脱硫処理後)	
精製ガス(想定値)			
組成	メタン	93.0%	
	二酸化炭素	0.5%	
	窒素	5.5%	
	硫化水素	1ppm以下	
	付臭剤	微量(THT)	
発熱量	12A相当	約38MJ/Nm ³	
精製量	96Nm ³ /日程度		
精製方式	膜分離方式		
充填能力			
	上限充填圧力	24.5MPa(35℃)	
	有効蓄ガス量	50Nm ³	
使用条件			
	運転期間	通年	
	設置場所	屋外	
使用電力			
	200V 三相		
コンテナ			
	長さ	5,919mm	
	幅	2,340mm	
	高さ	2,380mm	



写真-1 バイオガス精製圧縮充填装置

試験に使用する車両は4台であり、トヨタハイラックスサーフ及び、日産エクストレイルはガソリンとCNG(圧縮天然ガス)を切り替えて使用することが可能である。

この車両は、必要に応じ、バイオガス精製圧縮充填装置を用いてガスの充填を行い、通常の道路巡回業務や鹿追町における公務にて使用されている。両車両ともにガソリンエンジンをベースとし、CNGも燃料として使用できるように車両を改造したものである。今回は、CNGに変えてバイオガスを使用した。

CNG車両の主要諸元を表-2に示す。両車種ともにガソリンと切替可能なバイフューエルタイプであるが、エクストレイルは、ガソリンにて始動後、エンジン温度が70℃に到達しないとCNGに切り替えられない構造である。

また、大型車両としていすゞエルフCNG専用車及びいすゞエルフディーゼルを比較した。

表-2 主要諸元表

項目	仕様	仕様	仕様	仕様
ベース車両	トヨタ ハイラックスサーフ	日産 エクストレイル	いすゞエルフCNG車	いすゞエルフ ダンプ
全長	4,770mm	4,450mm	6150mm	4690mm
全幅	1,875mm	1,760mm	2080mm	1690mm
全高	2,120mm	1,650mm	3220mm	1990mm
車両総重量	2,325kg	1,795kg	3,470kg	2,780kg
乗車定員	5名	5名	2名	2名
機関	形式:ガソリン機関、CNG切替使用可 最高出力(ガソリン)120kW 最大トルク(ガソリン):246Nm	形式:ガソリン機関、CNG切替使用可 最高出力(ガソリン)110kW 最大トルク(ガソリン):200Nm	形式:CNG専用 最高出力:88kW 最大トルク:323Nm	形式:Diesel専用 最高出力:90kW 最大トルク:294Nm
排気量	2,700cc	1,998cc	4,334cc	4,334cc
クラッチ形式	トルクコンバータ式	ロックアップ機構付トルクコンバータ	トルクコンバータ式	マニュアル5速
駆動方式	前2駆動(選択)-後2駆動	前2駆動-後2駆動(選択)	後2駆動	後2駆動
タンク容量	ガソリン 87ℓ CNG 27Nm ³	ガソリン 60ℓ CNG 66.2Nm ³	-	-
主な使用地	滝川市	鹿追町	鹿追町	鹿追町
試験項目	・始動性 ・出力特性試験 ・排出ガス測定試験 ・燃料消費量試験	・排出ガス測定試験	・始動性試験	・始動性試験

3. エンジン始動性調査

CNG車のエンジン始動は、着火性の違いにより、ガソリンよりも時間がかかる場合がある。バイオガスの場合もエンジン始動性には難がある可能性があり、特に気温が下がり着火性が悪くなる冬期間においては懸念がある。よって、パトロールカー及びいすゞエルフ(CNG、ディーゼル)を対象とし冷間時におけるエンジン始動時のセル動作時間を計測した。

なお、計測は手動であり、若干の誤差は想定される。セル動作は、エンジンが掛かった段階ですぐに止めて2回目以降を繰り返し計測した。結果を表-3に示す。気温に対し、エンジン表面温度が低いのは、ボンネットの中にあるエンジンが前夜に冷え込んだまま、午前中は、まだ外気温まで上昇していないためである。

セル動作時間は、パトロールカーの1回目が4~5秒程度と最も時間がかかり、2回目以降は3秒程度で安定しているが、ガソリンは、1秒程度で始動することから、始動時間は3倍程度かかることがわかった。

いすゞエルフディーゼルは、1秒以下で安定しているが、いすゞエルフ(CNG、ディーゼル)の始動性は、1回目が2.15秒ともしっかりと始動時間がかかり、2回目以降はほぼ同じ時間を要することがわかった。

また、エンジン表面温度による影響はないことがわかった。

表-3 セル動作時間

パトロールカー(ハイラックスサーフ)			いすゞエルフ ディーゼル	いすゞエルフ CNG	
月日	10月28日	12月25日	2月12日	2月9日	2月9日
測定時間	AM10:30頃	AM10:30頃	AM11:00頃	AM9:00	AM9:07
気温	8.3℃	4.3℃	2.1℃	-3.6℃	-3.6℃
湿度	68%	67%	57%	-	-
エンジン表面温度	5.3℃	-2.0℃	-2.9℃	-16℃	-15℃
セル動作時間					
1回目	5.4sec	3.6sec	5.4sec	1.00sec	2.15sec
2回目	2.8sec	3.0sec	3.5sec	0.69sec	1.78sec
3回目	2.7sec	3.2sec	3.5sec	0.71sec	1.61sec
4回目	2.7sec	3.0sec	3.1sec	0.91sec	1.60sec
5回目	3.1sec	3.1sec	3.3sec	0.69sec	1.45sec
6回目(ガソリン)	0.8sec	0.9sec	1.1sec	-	-

4. CNG車両における出力特性(出力、トルク計測試験)

一般的にCNG車の出力は、ガソリン車に比べて低下する可能性がある。ガソリンの主成分でオクタン価(ノッキングの起こりにくさ)の指標値を100としているイソオクタン(C₈H₁₈)と比較すると、天然ガスの主成分であるメタン(CH₄)のオクタン価は130程度であり、燃焼効率から考慮すると向上するが、天然ガスは気体であり、単位容積における発熱量が少ないため、エンジン出力は低下する。バイオガスの主成分は、メタンでありCNG車同様の結果になると考えられるが、バイオガス使用時の知見がないため、実際のガソリン燃料使用時との比較をシャーシダイナモを使用し、出力及びトルク測定を実施した。なお、測定は後輪駆動のみとし、ガソリン使用時とバイオガス使用時で比較測定した。今回は、燃料の違いにおける基本的な出力特性を計測するため、一車種(ハイラックスサーフ)のみ計測とした。計測状況を写真-2に、測定結果を図-2に示す。



写真-2 シャーシダイナモ測定状況

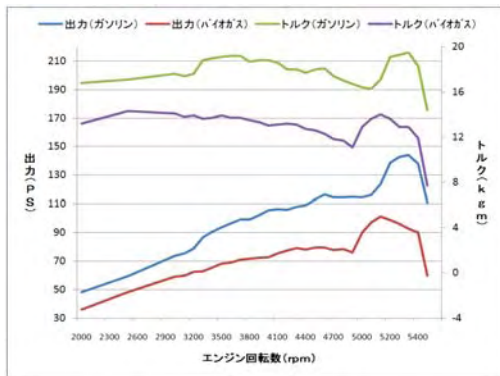


図-2 出力・トルク曲線

測定結果より、ガソリン使用時の最大出力は、105.8kW (143.9PS) となっているが、バイオガス使用時における最大出力は74.4kW (101.2PS) であった。よって、約30%程度バイオガス使用時の出力がダウンしている。トルクについてもほぼ同様な傾向が見られる。市販されているガソリン車の出力で73.5kW(100PS)程度の車両は、排気量が1,500ccクラスであり、一般的な使用方法では影響はないと考えられる。また、実運用時におけるエンジン回転数は、50km/h走行時にて約2,000rpmであり、CNG車使用時における出力の落ち込みは30%程度であるため一般走行には影響は少ない。通常乗車している運転員の聞き取りからも、登坂時に力のなさを感じるが、一般道での走行では特に問題ないとのフィーリング結果を得ている。

5. バイオガスにおける排出ガス計測試験

排出ガス測定は、ハンディ型である「Auto 5.1」を用いて、CO₂を比較計測した。なお、測定はアイドリング状態で5分程度行い、安定した1分間を比較することとした。測定結果を図-3に示す。ハイラックスサーフのバイオガス使用時のCO₂は、ガソリン使用時と比較し30%程度減少する。

また、エクストレイルの場合は、40%程度減少する。よって、バイオガスは、カーボンニュートラルでありCO₂は0とみなされるが、この考え方を利用しなくともCO₂が30%~40%程度削減されるクリーンエネルギーである。

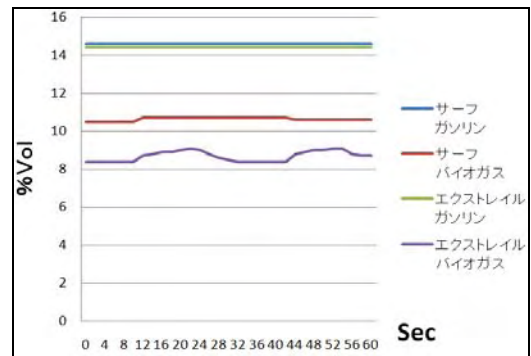


図-3 排出ガスデータ(CO₂)

6. バイオガス圧縮充填装置の導入における問題点

バイオガス精製圧縮充填装置の導入価格は、約4,000万円であり、装置購入者の負担を考慮すると普及が難しい。また、電気代や消耗部品などのランニングコスト低減を図ることが装置普及の必要条件である。さらに、冬期使用時における凍結などの問題がある。これらの問題を解決するため、装置の改造を行い、冬期適用性試験・バイオガス精製効率向上やコストの削減を行う。

6. 1 バイオガス精製圧縮装置冬期適用試験

積雪や気温を考慮し、コンテナにビニールシートなどを用いて冬囲いを行った(写真-3)。

冬囲い後長期試験を行った結果、圧縮機の出口圧力が0.4MPaに対し、膜分離装置の入口圧力が0.2MPaと低下したため、膜分離装置や膜分離装置付近の配管を外し確認した。その結果、コンプレッサー出口付近の配管やフィルター中に結露が発生し、抵抗となっていたため十分な圧力が得られなくなったことがわかった。配管結露状況を写真-4に示す。

原料バイオガスは、圧縮機によって圧縮熱が発生し、圧縮熱を持ったバイオガスが金属配管内を通り膜分離装置へ行くが、冷気と接触した配管にて急激にバイオガスが冷やされ、配管内が結露する。

対処として、ドレンポットより除水後、圧縮機より出ている配管に熱交換機による冷却装置を設置し、バイオガスに熱をなるべく残さない対策とした(写真-4)。対策後は、問題がなく良好に稼働している。



写真-3 冬囲い状況

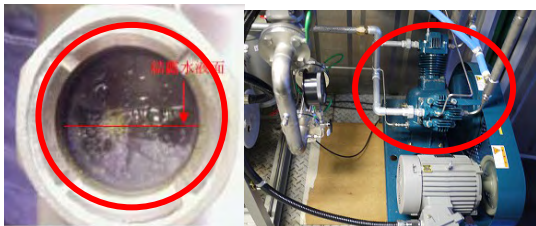


写真-4 配管結露状況、冷却配管設置状況

6. 2 膜分離装置の改造

原料ガスは、メタン濃度が60~63%程度であり、そのままでは熱量が不足しているため、膜分離装置を用いて、メタン濃度を90%以上に高める。

旧膜分離装置は、膜分離装置本体に断熱材や電熱線を巻き付けた簡易的な構造であったため、膜分離装置が運転可能温度である50℃までに達する時間がかかることや、温度維持に電気代がかかる。そのため、膜分離装置本体にカーボンヒータを巻き付け、それを金属枠内に設置し断熱塗料を塗布した。膜分離装置全景を写真-5に、膜分離装置改造部品を写真-6示す。規定の温度50℃に達する時間を計測した結果、1時間程度であり、有効性が確認された。

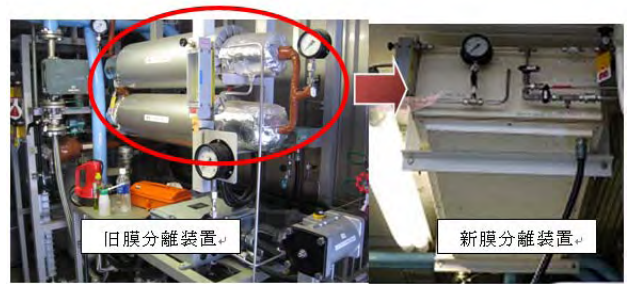


写真-5 膜分離装置改造風景



写真-6 膜分離装置改造部品

6. 3 膜分離装置の評価

膜分離装置の改造に伴い、精製能力を評価する。試験は、配管やバルブの切替えによって2段精製と3段精製の比較を行う。また2段精製は、膜分離装置内圧を0.1、0.2、0.3MPaに変化させメタン濃度や、回収率(原料ガスに対してのメタン量)を比較した2段精製フローを図-4、3段精製フローを図-5、結果を図-6に示す。

2段精製メタン濃度は95.8%であり、車両の燃料として十分な燃焼カロリーが取得できるため、調整のためのLPGガス添加が必要なくなり、メタン濃度が高いガスを必要とする車両には有効であることが確認された。一方、3段精製は膜分離装置内圧0.2MPaでメタン濃度が92.5%であり、車両の燃料としては、95%以上の濃度が必要であるため、LPG添加による調整が必要であるが、メタン濃度92.5%メタン回収率が98.0%であり、原料ガスに対してメタン回収率を高める場合には、有効であることが確認された。

よって、車両の燃料として使用する場合には2段式が最良であり、3段式は、プラント施設内などの暖房やヒーティングなどに使用する場合には、有効である。

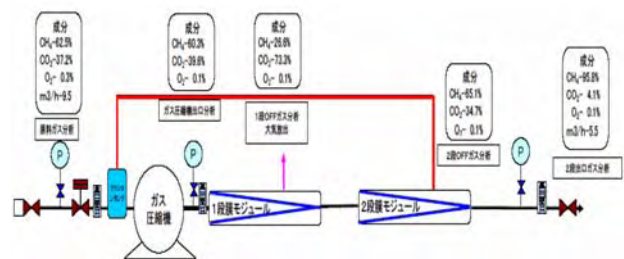


図-4 2段精製フロー

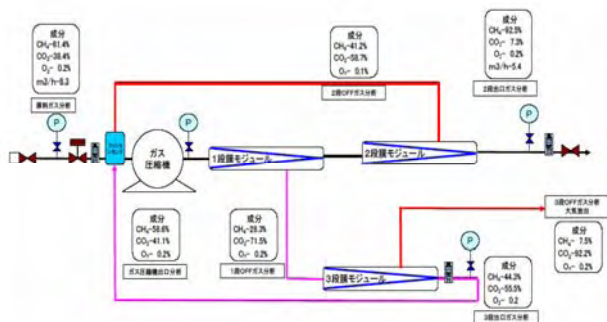


図-5 3段精製フロー

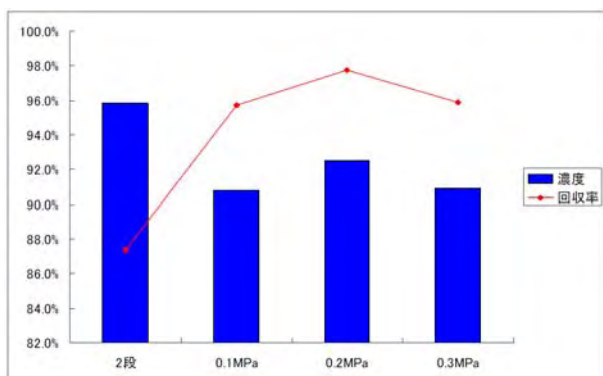


図-6 精製ガス濃度とメタン回収

6-4 低圧圧縮機の改造

従来の可燃性ガス専用低圧圧縮機は、約 400 万円と高価であり、装置全体の約 1 割に該当する。導入時のコスト削減やバイオガス精製の効率化を図るため、汎用品である空気圧縮機の改造を行った。概要及び写真を以下に示す。

- 通常の空気圧縮機は、気密性は考慮されずに製作されている。気密性を保つため各部品接合部にシールパッキンや液体パッキンを用いて外部の漏れをなくした(写真-7)。
- ピストンの気密性を確保するため、ピストンリングを交換し、空気混入をなくした(写真-8)。
- 静電気防止のため接地を行った。
- モータを防爆タイプとした。
- 通常の空気圧縮機を流用し、改造を行った結果、現行システムよりも圧力が1.2MPa上昇し圧縮機のみでも335万円のコスト削減が確認された。

また、防爆や接地を行っているため、安全性も向上している。



写真-7 気密性の保持



写真-8 ピストンリング取付状況

6-5 改造の効果・必要経費

総合的な改造効果を計測するため、膜分離装置や圧縮機の改造を行い、時間当たりのバイオガス精製量を計測した。結果を表-4に示す。改造後、バイオガス精製量が時間当たり 1.1 m³向上していることが確認された。これは、圧縮機変更によって 1.2MPa 圧力が上昇したことや膜分離装置の効率化を行ったことによって、システム全体の精製能力が向上したためである。

また、圧縮機のモータ出力ダウンや、膜分離装置を変更したことによって、システム消費電力が 5.5kWh より 3.7kWh となり、1.8kWh 程度減少した。

この結果をもとに、年間の稼働率を 50%、4,380 時間(24h×365 日×0.5)とし、年間消費電力料金を算出した。なお、北海道電力の料金表より、基本料金 1,785 円/kW・月、電力量料金 12.29 円/kWh にて試算した。その結果、年間約 15 万円の縮減が可能である。

さらに、圧縮機の消耗部品推奨交換時間が 4,000 時間とされているが、消耗品の部品点数が減少したため、工賃も安価となり、年間 18 万円程度のコスト削減が見込まれる。

維持費や電気代などのランニングコストが減少した効果によって、1 m³当たりの精製バイオガス単価が 98.0 円/m³より 53.0 円/m³に削減された。

車両に充填するシステム構成を目的とする場合には、圧縮機による日当たりの精製効率が向上し、LPG 添加装置が不要となったことなどによって、最大 1 千万程度の導入コスト削減が可能となった。

また、LPG 添加が不要となったことで、LPG や消耗品が年間最大で約 23 万円程度削減された。

ただし、今回バイオガス精製圧縮充填装置を設置した滝川市のリサイクルクリーンでは、硫化水素の除去のため生物脱硫を行い、生ガスに大量の空気を混合する構造であったため、原料ガス濃度が 50%を下回ることがあった。原料ガス濃度が 50%を下回ると車両に必要な濃度が十分に得られなくなる。このため、新たな乾式脱硫を行った。乾式脱硫には、脱硫剤が 122kg/年必要であり、プラントの構造にもよるが必要経費としてかかる場合がある(脱硫剤 210 円/kg)。

そのほか、蓄ガス器が性能を保持しているかを調べる法定自主点検に約 30 万円かかることや機器の総合動作

点検に 25 万円程度かかる。

表-4 バイオガス精製量

	既存	新規
使用原料ガス量	2.3m ³	1.6m ³
バイオガス精製量	3.2m ³ /h	4.3m ³ /h

7. バイオガスにおける燃料消費量・長期使用試験

改造した精製バイオガス圧縮充填装置を用いてバイオガスを車両に充填し、車両の燃料消費量や経済効果を評価する。燃料消費量試験は、道路パトロールカーであるハイラックスサーフのみとした。道路パトロールカーは、ほぼ毎日のように定期的な道路点検、緊急時点検及び、異常時点検などに使用しているが、今回バイオガス圧縮充填装置改造が、11月に終了したことから、バイオガスの使用が11月からとなった。年間の走行実績を表-5に示す。

表-5 年間走行実績

平成22年度	ガソリン走行距離(km)	ガソリン消費量(ℓ)	バイオガス走行距離(km)	バイオガス消費量(m ³)
4月	5,904	767	0	0
5月	6,098	729	0	0
6月	5,878	707	0	0
7月	2,555	372	0	0
8月	5,610	754	0	0
9月	2,919	394	0	0
10月	5,932	754	0	0
11月	2,372	350	536	58.1
12月	5,428	752	533	71
1月	3,254	474	837	106.6
2月	3,782	541	531	66
3月	2,678	381	1,340	145
合計	52,410	6,975	3,777	446.7

- バイオガスを用いて走行した燃料消費量は、8.5km/m³(3,777km÷446.7m³)である。

- 年間のガソリン燃料消費量は、7.5km/ℓ (52,410km ÷6,975km)である。
- 年間の総走行距離は、56,187km(52,410km +3,777km)であり、ガソリン代(経済効果)を算出すると117万円である。(56,187km ÷7.5km/ℓ ÷7,492ℓ ×155円/ℓ =1,116,120円 ÷1,170,000円)
- バイオガス1km走行時における必要な金額は、53円 ÷8.5km/m³ =6.3円/kmである。
- ガソリン1km走行時における必要な金額は、155円 ÷7.5km/m³ =20.7円/kmである。故にバイオガスを使用した場合の燃料費は、ガソリンと比較すると約1/3になる。
*155円/ℓ は、2011/4/25時点での北海道平均価格
また、鹿追町や滝川市は-10℃以下になる低温地域であるが、バイオガスを用いた車両の通年稼働を行った結果、車両に全く問題がなかった。

8. 積雪寒冷地におけるバイオガス燃料導入について

積雪寒冷地において、バイオガス精製圧縮充填装置やバイオガスを燃料とする車両を導入した場合、以下のことがわかった。

- 1) バイオガスを用いた車両の始動性はガソリンと比較し、始動時間が3秒程度かかるが特に問題はない。
- 2) バイオガスを用いた車両の出力はガソリンと比較し30%程度低下する。
- 3) 排出ガス中のCO₂量は、ガソリンと比較し、カーボンニュートラルを適用しなくとも30~40%削減される。
- 4) 積雪寒冷地において、バイオガスを用いた車両の長期使用には、問題がない。
- 5) 圧縮充填装置の効率化を行った結果、イニシャルコストやランニングコストが削減された。

参考文献

- 1) 城石 賢一：鹿追町環境保全センターにおける地域バイオマスの資源循環利用の取り組み