共同研究報告書

整理番号第 394 号

消化ガスエンジン動力システムの開発に関する共同研究報告書

平成２１年３月

独立行政法人土木研究所
ライト工業株式会社
株式会社井上政商店

Copyright © (2009) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

共同研究報告書
第394号 2009年3月

消化ガスエンジン動力システムの開発に関する共同研究報告書

リサイクルチーム　上席研究員 岡本誠一郎
研究員 宮本豊尚

ライト工業 株式会社　杉山好司
木間正夫
川人鉄雄
阿部正直

株式会社 井上政商店　井上政義
茅　洪新
橘　隆一

要旨

本報告書は、平成１７年度～２０年度に土木研究所、ライト工業株式会社、株式会社井上政商店との間で実施した共同研究の成果である。本研究では、下水処理場で発生している消化ガスの利用促進のため、市販の発電機のエンジンを改造することにより小規模な消化ガスエンジン動力システムを開発し、実際の処理場において実証実験を行った。下水処理場で発生している消化ガスを燃料として使った実用に耐えうる廉価なエンジンシステムの開発の目処が立った。

キーワード：消化ガスエンジン ，小規模 ，実証実験 ，エネルギー利用

共同研究「消化ガスエンジン動力システムの開発」
参加者名簿　(平成 21 年 3 月現在)

岡 本　誠一郎　（独）土木研究所　材料地盤研究グループ（リサイクル）上席研究員
宮 本　豊 尚　（独）土木研究所　材料地盤研究グループ（リサイクル）研究員
尾 﨑　正 明　岡山市　下水道局　局長
（前（独）土木研究所材料地盤研究グループ（リサイクル）上席研究員）
落　　修 一　（財）下水道新技術推進機構　資源循環研究部　副部長
（前（独）土木研究所材料地盤研究グループ（リサイクル）総括主任研究員）

杉 山　好 司　ライト工業株式会社　開発本部 開発本部長
木 間　正 夫　ライト工業株式会社　機械部　部長
川 人　鉄 雄　ライト工業株式会社　機械部　部長
阿 部　正 直　ライト工業株式会社　開発本部　開発部長
高 橋　　徳　ライト工業株式会社　技術本部　技術部　課長
近 藤　勇 輔　ライト工業株式会社　宇都宮機材センター
青 木　　登　（前　ライト工業株式会社　機械部　部長）
大 内　公 安　ライト工業株式会社　名古屋支店　営業部　部長
（前　ライト工業株式会社　法面技術部　環境緑化グループ長）

井 上　政 義　（株）井上政商店　専務取締役
茅　　洪 新　（株）井上政商店
橘　　隆 一　（株）井上政商店

ま　え　が　き

地球環境保全やエネルギー源多様化の観点からバイオマスの利活用が強く求められ、その一手法としてメタンガス生産が可能な嫌気性消化法が注目されている。本法は全国約 300 箇所の下水処理場で稼働し、さらに、他の分野でも技術開発、実用化の兆しがある。しかし、現時点では、生産されるメタンガスの利用に関して、経済的に安定した持続可能な利用技術･システムが見出されておらず、本法の普及拡充を制限している大きな要因となっている。

そこで消化ガスの安定利用に資す技術・システムを提供するために汎用性のある消化ガスエンジン動力システムの開発に取り組む共同研究の公募を行い、ライト工業株式会社・株式会社井上政商店のグループと 4 年間にわたる研究を実施してきた。

本報告書は、これらの成果を取りまとめたものである。

目次

第１章　序論 1
１．１　開発の背景 1
１．２　開発目標 3
１．３　開発の手順 4

第２章　開発エンジンの概要 5
２．１　はじめに 5
２．２　エンジンの基本性能 5
２．２．１　改造前機と改造内容 5
２．２．２　高圧メタンガスによる試験結果 7
２．３　結論 10

第３章　実証実験 13
３．１　人工混合ガスにおける実験結果 13
３．１．１　目的 13
３．１．２　稼働確認実験 13
３．１．３　制御系調整実験 14
３．２　消化ガスにおける実験結果 15
３．２．１　鶴岡市浄化センターにおける実験結果 15
（１）目的 15
（２）実験概要 15
（３）実験結果 16
３．２．２　函館湾浄化センターにおける実験結果 17
（１）目的 17
（２）実験概要 17
（３）実験使用機械一覧表 18
（４）長期連続運転での発電結果 20
（５）環境への影響評価 23
（６）補機類の性能評価 25

第４章　実用化検討 27
４．１　運用システムの検討 27
４．２　コスト分析 28

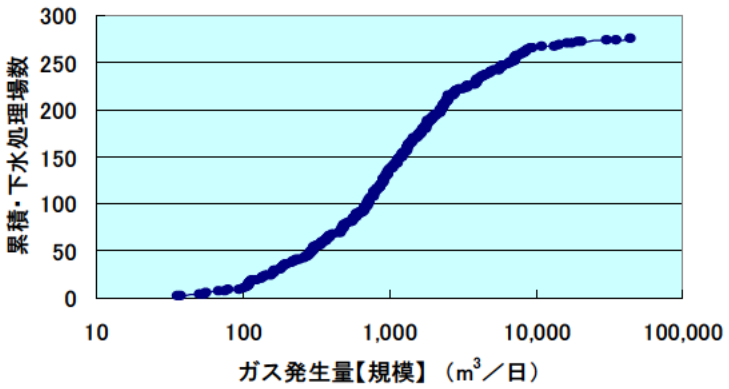
第５章　結論 29

第１章　序論

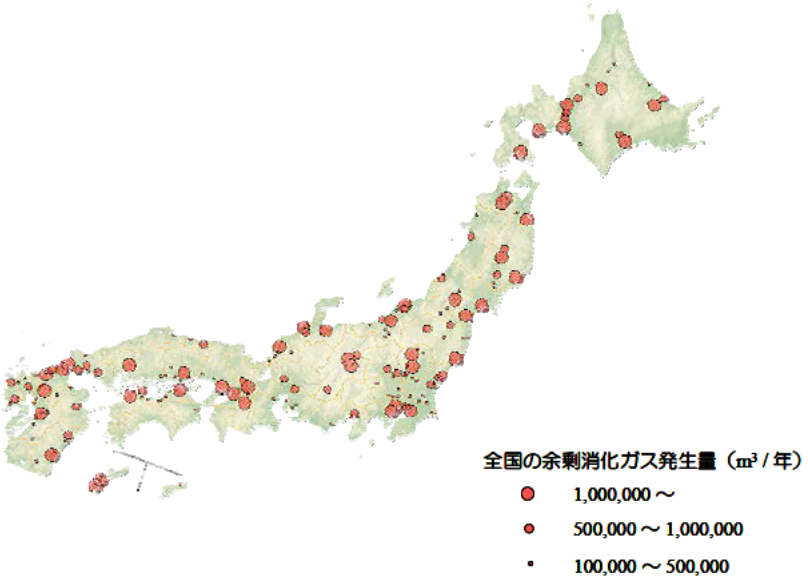
１．１　開発の背景

現在、地球温暖化対策やエネルギー対策としてバイオマスの利活用推進が強く求められており、従来より下水処理場で行われてきている下水汚泥の嫌気性消化（メタン発酵）は、これに大きく応えられるメニューの一つである。下水道統計[1)]によると、全国には平成 18 年現在で 291 箇所の下水処理場で嫌気性消化が行われているが（図－1.1、図－1.2)、そこから得られる消化ガスが完全に利用されている訳ではなく、年間発生量の約 3 割相当の 87 百万 m^3 が焼却されている（図－1.3)。

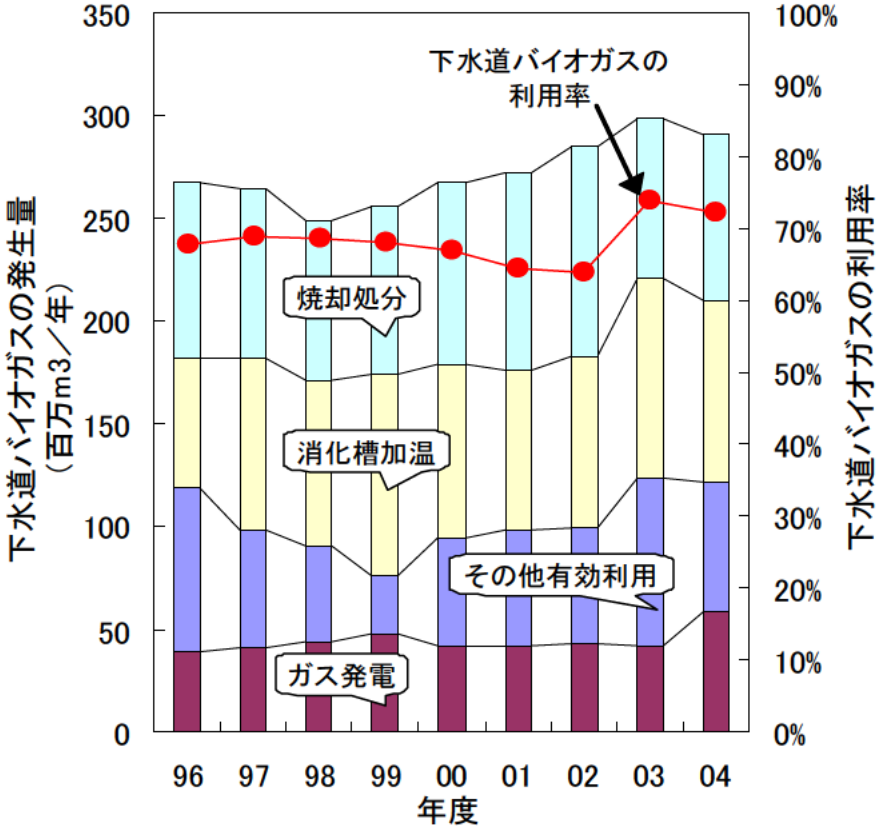
下水処理場は水処理・汚泥処理の過程で多くの電力を必要としており、消化ガスによる発電を行えば下水処理場のエネルギー自給向上・経営健全化に大きく貢献するものであるが、現有のガスエンジン発電やマイクロガスタービン発電は、出力からみて相当に高価であり必ずしも普及が進んでいない。本研究は、これを解決するために、消化ガス発電機を始めとする汎用性の高い動力システムを開発するとともに、その効果的な運用システム構築を目的とするものである。



図－1.1　消化ガス発生量規模別の処理場数（累積分布図）（参考文献 1 より作成）



図－1.2　余剰・消化ガス発生量分布図（参考文献 1 より作成）



図－1.3　　下水道バイオガスの発生量と利用内訳（参考文献 1 より作成）

１．２　開発目標

地球温暖化対策やエネルギー対策として余剰消化ガスの利用を推進していくためには、コスト面で市場に流通し得る方法でなければ、対策としての投資効果は得られない。得られるエネルギーが低コストであるほど対策効果は大きいということになる。このため、研究開発対象とするガスエンジンシステムの開発目標は、エンジンシステムの価格帯により設定することとした。

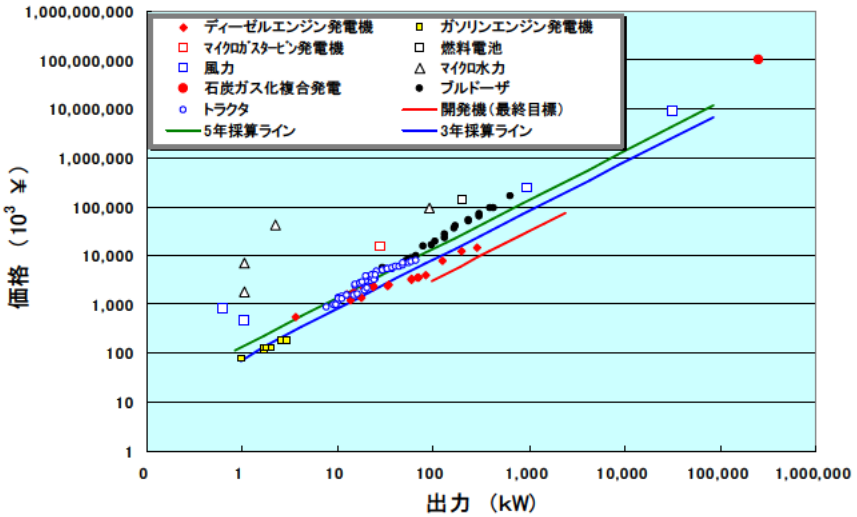
図－1.4 は、発電機等の発電または機械の出力規模と価格の関係を示したものである。機関の出力が不明な一部の発電機については、発電機の効率を 0.95 と仮定して出力規模を算定した。

ここで、工事現場で用いられている（多くはリースで）ディーゼルエンジン発電機やガソリンエンジン発電機は相対的に機器コストが安いことが分かる。また、トラクタやブルドーザの価格に比べて、最近普及しつつある新技術であるマイクロガスタービンや燃料電池の価格は現時点では相当に高くなっていることも見て取れる。

本研究では、開発目標としてディーゼルエンジン或いはガソリンエンジン発電機相当の価格帯の動力システムの開発を目指すこととする。これは、開発を予定している動力システムは、既に市販されているエンジンと発電機の組合せのみであることを考えると、必要となるコストはプラットホームとエンジン、発電機のみであり、これを組み立てたものはトラクタやブルドーザの価格帯よりも安価にすることが可能であるという判断によるものである。

圧縮天然ガス（CNG）自動車トラックの専門メーカーへのヒアリングによると、約 100kW エンジン搭載トラックの価格は数百万円ほどでありエンジン価格はその 1 割ほどを占めており、仮にエンジン単体であれば、その倍程度の取引価格と推定されるとのことであった。以上の分析から、開発機が製品化され、一定台数が市場に流通した段階において達成すべき目標の価格帯を「最終目標」として同図に掲載した。

一方、導入する顧客の投資金額が 3～5 年以内に回収できることが重要と思われる。電力単価を￥12/kWh とすると、3 年以内で回収できる価格帯は図－1.4 に示す開発目標値の青線になり、5 年以内で回収できる価格帯は緑線となる。当面の開発目標は 5 年以内に採算があう機器を開発することとした。



図－1.4　機械出力規模と価格の関係および開発目標（参考文献 2～9 より作成）

１．３　開発の手順

本共同研究では、以下の手順によって開発を行った。

まず、市販されているエンジンを消化ガスで稼働するように改造を施した。そして、市販の工業用ガスを混合して作成した人工混合ガスにより運転方法の検討を行った。（平成 18，19 年度）

次に、山形県鶴岡市浄化センター内にエンジンを設置して処理場で発生する消化ガスを使用したエンジンの実験を行った。ここでは主に供給圧力と出力の関係を調査した。（平成 19 年度）

さらに、北海道函館湾流域下水道函館湾浄化センター内にエンジンを設置し、長期間にわたり処理場で発生する消化ガスを使用したエンジンの実験を行った。（平成 20 年度）

第２章　開発エンジンの概要

２．１　はじめに

本研究の目的は、消化ガス発電機を始めとする汎用性の高い動力システムを開発するとともに、その効果的な運用システムを構築するものである。システムを出来るかぎり廉価にするため、市販のディーゼルエンジン発電機に改造を施して消化ガスで運転可能なエンジンを開発した。本章では、開発したエンジンの概要について述べる。

２．２　エンジンの基本性能

２．２．１　改造前機と改造内容

本研究開発では、市販の発電機を改造して消化ガスエンジンを製作した。改造に供したエンジンはデンヨー社製ディーゼルエンジン（DCA－60ESH）である（図－2.1）。ベースモデルより、燃料タンク、噴射ポンプ、噴射ノズル、高圧配管を取り外し、消化ガスで動くように燃料系統に改造を施している。

図－2.1　デンヨー社製　防音型エンジン発電機 [10)]

型式　DCA－60ESH

表－2.1　主要緒元 [10)]

<table>
<tr><td colspan="3">型　　式</td><td colspan="2">DCA－60ESH</td></tr>
<tr><td colspan="3">交流発電機</td><td colspan="2">ディーゼルエンジン</td></tr>
<tr><td colspan="2">周　波　数</td><td>50Hz</td><td>60Hz</td><td>名称</td><td>日野W04D-TG</td></tr>
<tr><td rowspan="2">出力</td><td>三相(3線)(4線)</td><td>50KVA</td><td>60KVA</td><td>形式</td><td>直接噴射式・過給器付</td></tr>
<tr><td>単相(3線)</td><td>28.9KVA</td><td>34.6KVA</td><td>気筒数-内径x行程</td><td>4-104mm x 118mm</td></tr>
<tr><td rowspan="2">電圧</td><td>三相(3線)(4線)</td><td>200V</td><td>220V</td><td>総排気量</td><td>4,009cc</td></tr>
<tr><td>単相(3線)</td><td>100V/200V</td><td>110V/220V</td><td>定格出力</td><td>57.4kW</td></tr>
<tr><td colspan="2">電　　流</td><td>144A</td><td>157A</td><td>定格回転数</td><td>1500/1800 rpm</td></tr>
<tr><td rowspan="2">力率</td><td>三相(3線)(4線)</td><td colspan="2">0.8(遅れ)</td><td>燃料</td><td>軽油</td></tr>
<tr><td>単相(3線)</td><td colspan="2">－</td><td>燃料タンク容量</td><td>125L</td></tr>
<tr><td colspan="2">励磁方式</td><td colspan="2">ブラシレス(AVR付)</td><td>燃料消費量</td><td>50%負荷6.3L/h 75%負荷10.6L/h
50%負荷7.9L/h 75%負荷11.6L/h</td></tr>
<tr><td colspan="2">極　　数</td><td colspan="2">4</td><td>冷却水容量</td><td>12.2L</td></tr>
<tr><td rowspan="2">単相
出力</td><td>電圧</td><td>100V</td><td>110V</td><td>潤滑油量</td><td>16.5L</td></tr>
<tr><td>出力</td><td colspan="2">7.5KVAx2</td><td>バッテリーx個</td><td>80D26Rx2</td></tr>
<tr><td colspan="3">全長x全幅x全高</td><td colspan="2">2050mm x 880mm x 1250mm</td></tr>
<tr><td colspan="3">乾燥質量（整備質量）</td><td colspan="2">1,240kg(1,380kg)</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">騒　音　値</td><td colspan="2">7mdB(A)</td><td colspan="2">61dB/64dB(無負荷時7m四方向平均値)</td></tr>
<tr><td colspan="2">LwA dB</td><td colspan="2">92dB(音響ﾊﾟﾜｰﾚﾍﾞﾙ 無負荷定格回転(60Hz)時)</td></tr>
<tr><td colspan="3">排出ガス対策指定機</td><td colspan="2">第2次排出ガス対策型建設機械</td></tr>
</table>

２．２．２　高圧メタンガス（CH_4　150MPa）による試験結果

改造を施したエンジンに対して、100%メタンガスを用いて、①温度上昇試験、②燃料消費量／排気背圧測定試験、③速度変動率測定試験を行った。

①温度上昇試験

ヒートバランスの試験は下記の通りであった。なお、60Hz の 47.6kW のデータは、データ採取直後オーバーヒートによりエンジンが停止したため、参考値として掲載している。ディーゼルに比べてオイル温度は同じだが、冷却水で 10℃、排気ガスでは 110～150℃高い。排気ガス温度が 650℃以上になると、排気バルブ、シリンダーヘッド、ターボチャージャー、排気フレキ等の排気系統に重大な影響を及ぼす可能性がある。安全を考え、排気ガス温度は 600℃にするのが望ましい。

外気温度 35℃において排気ガス温度を 600℃以下にするには出力をディーゼルの 50%程度まで下げる必要があることが分かった。

表－2.2　温度上昇

50Hz

出力(kw)	0	11.4	22.2	27.7	39.1
負荷率	約0/4	約1/4	約2/4	約3/4	約4/4
周囲温度（測定℃）	31.1	31.7	30.8	29.9	29.4
冷却水温度(Eng出口℃)	33.2	42.4	54.2	59.5	69.1
エンジン油温(℃)	42.4	54.6	66.1	72.9	81.6
排気温度(ターボ後℃)	469.6	483.6	556.3	573.4	599.6
ハーネス(ターボ下℃)	18.8	21.6	31.3	36.0	43.0
吸音材(ターボ横℃)	39.5	44.4	62.6	70.9	76.6

60Hz

出力(kw)	0	13.6	27.2	33.9	40.5	(47.6)
負荷率	約0/4	約1/4	約2/4	約3/4	約7/8	約4/4
周囲温度（測定値℃）	28.9	30.2	30.7	31.0	32.1	30.5
冷却水温度(Eng出口℃)	35.1	43.8	53.9	59.2	65.3	69.1
エンジン油温(℃)	44.5	55.4	67.7	72.6	77.5	82.0
排気温度(ターボ後℃)	491.9	524.4	594.9	611.6	629.7	633.5
ハーネス(ターボ下℃)	22.0	23.4	34.6	36.6	41.4	44.5
吸音材(ターボ横℃)	43.3	47.7	66.8	64.9	80.2	80.6

参考として、ディーゼルでの温度上昇量を示す。

周波数　(定格)	50Hz (定格40kW)			60Hz (定格48kW)		
負荷率	2/4	3/4	4/4	2/4	3/4	4/4
周囲温度（測定値℃）	25.2	26.0	26.1	26.3	25.5	24.9
冷却水温度(Eng出口℃)	36.6	46.7	60.5	37.1	47.1	59.4
エンジン油温(℃)	56.7	66.0	80.6	56.0	67.9	81.1
排気温度(ターボ後℃)	293.5	382.8	486.8	307.6	392.3	481.7
ハーネス(EXマニホールド近辺℃)	16.5	21.6	28.9	15.4	20.4	26.5

②燃料消費量／排気背圧測定試験

ガスエンジンの発電効率はディーゼルに較べて 5～6%低い。その分排気損失が多いと思われる。排気温度が高いものの排気背圧は低い。エンジンメーカーが示している許容値（1000mmAq）に対して十分余裕があった。

表－2.3　燃料消費量

50Hz

出力(kW)	0.0	11.4	22.2	27.7	39.1
燃費(m^3/h)	3.86	5.78	8.88	10.26	13.66
発電効率(%)		19.8	25.1	27.1	28.8
排気背圧(mmAq)	55	58	95	150	305

60Hz

出力(kW)	0.0	13.6	27.2	33.9	47.6
燃費(m^3/h)	4.42	7.66	11.1	12.49	16.35
発電効率(%)		17.9	24.6	27.3	29.3
排気背圧(mmAq)	94	90	166	212	460

注１．使用燃料はメタン発熱量 35.8MJ/m^3

注２．燃費は質量を測定、流量は換算値

参考として、ディーゼルでの発電効率を示す。

（軽油；密度　0.84g/m^3、真発熱量　42.9MJ/kg）

50Hz

定格出力割合	1/4	2/4	3/4	4/4
発電効率(%)	24.2	31.4	33.7	34.3

60Hz

定格出力割合	1/4	2/4	3/4	4/4
発電効率(%)	22.5	30.2	33.0	34.0

③速度変動率測定試験

ガス機関の速度特性には整定速度率と瞬時変動率がある。表－2.4 に速度変動率測定試験の結果を示す。

整定速度変動率とは、無負荷時の速度（周波数）と負荷時の速度（周波数)の差で、例えば無負荷時 52.5Hz で 100%負荷時 50.0Hz になれば（52.5-50.0）÷50.0Hz＝4.4%となる。本エンジンでは整定速度変動率は電子制御によりほぼ 0%となっており、問題はなかった。

瞬時変動率とは、負荷を瞬間的に投入／遮断する前後の速度（周波数）の差である。瞬時変動率はディーゼルに比べて悪かった。特に投入時は定格負荷の 25%（50Hz:11.4kW、60Hz:13.6kW）を投入したのと、ディーゼルでの定格負荷の 100%を投入したのが同じレベルであった。定格負荷の 75%（50Hz:27.7kW、60Hz:33.9kW） 以上では投入後のオーバーシュートが遮断時の変動率を上回っていた（図－2.2)。さらに、発電用火力設備の技術基準の解釈第 40 条（非常停止装置）には [12]、回転速度が 1.16 倍を超える以前に速やかに非常停止することと記されているが、投入後のオーバーシュートによる回転速度は 100%（50Hz:39.1kW、60Hz:47.6kW）の負荷をかけた時に+20%を超えており、発電用火力設備の技術基準の解釈の回転速度の基準値を超えている。

表－2.4　速度変動率測定試験結果

50Hz

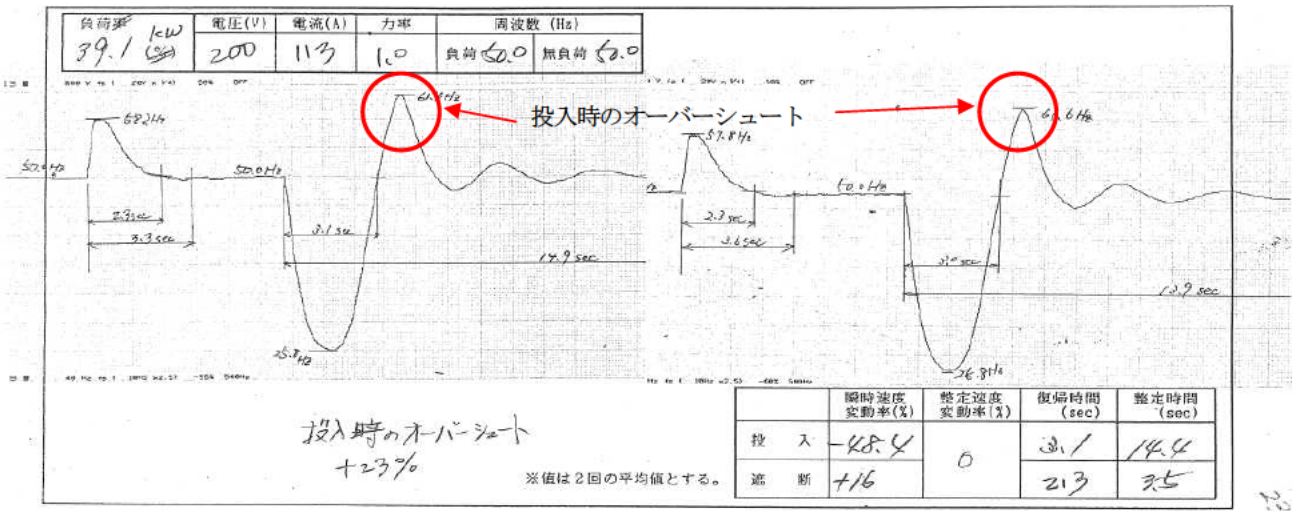
負荷(kW)	11.4		22.2		27.7			39.1		
瞬時変動率(%)	投入	遮断	投入	遮断	投入	(オーバーシュート)	遮断	投入	(オーバーシュート)	遮断
	-8.0	+7	-16.8	+11.2	-23.6	＋14.0	+13.2	-48.4	＋23.2	+16
整定時間(sec)	3.7	2.3	4.6	2.8	6.5		2.3	14.4		3.5

60Hz

負荷(kW)	13.6		27.2		33 9			47.6		
瞬時変動率(%)	投入	遮断	投入	遮断	投入	(オーバーシュート)	遮断	投入	(オーバーシュート)	遮断
	-7.7	+5.5	-14.7	+9.3	-20.7	＋15.7	+11.2	-53.3	＋20.0	+13.3
整定時間(sec)	2.6	2.2	4.9	2.2	7.9		2.3	12.3		2.2

参考として、ディーゼルでの速度変動率測定試験結果を示す。

負荷(kW)	40（50Hz）		48（60Hz）	
瞬時変動率(%)	投入	遮断	投入	遮断
	-7.0	+8.8	-4.5	+7.1
整定時間(sec)	2.4	2.5	1.7	2.6



図－2.2　速度変動率測定試験結果例(50Hz　100%負荷時)

2．3　結論

改造ガスエンジンはメタンガスを燃料とした場合、出力としては、軽油燃料のディーゼルエンジンの定格出力と同じ程度の出力は可能であった。但し運転時の各部温度がディーゼルエンジンに比べて高くなる傾向にあり、排気ガス温度が 650℃以上になると、排気バルブ、シリンダーヘッド、ターボチャージャー、排気フレキ等の排気系統に重大な影響を及ぼす可能性がある。このため、ディーゼルエンジンと同じ出力での連続使用を行うことはできず、連続使用にあたっては出力を下げた状態での使用が必要と判断された。

速度変動率については、整定速度変動率は電子制御のため 1%以下と問題はないが、瞬時変動率は、ディーゼルエンジンの約 75%負荷での運転時で回転速度の基準値に達している。

以上のことから、改造ガスエンジンとしての実用出力（連続出力）は、余裕をみて外気温 35℃において 50/60Hz、20kW 程度になるものと思われる。

添付資料

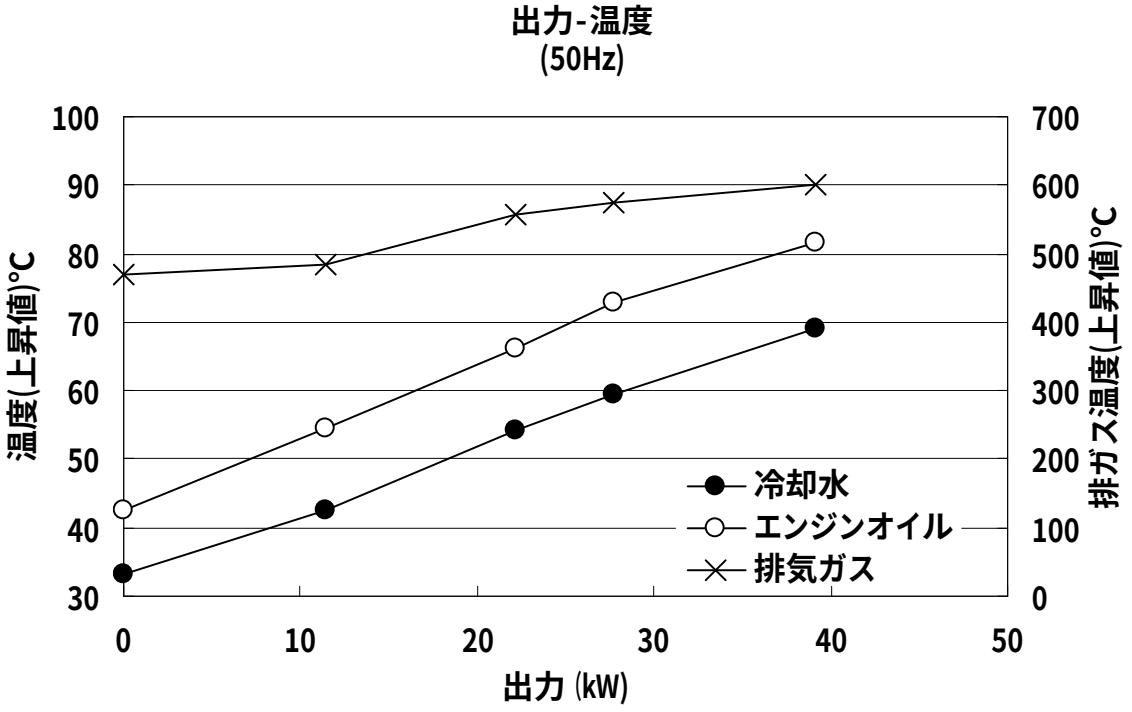
A. 出力－温度（50Hz）の関係

B. 出力－燃費－排気背圧（50Hz）の関係

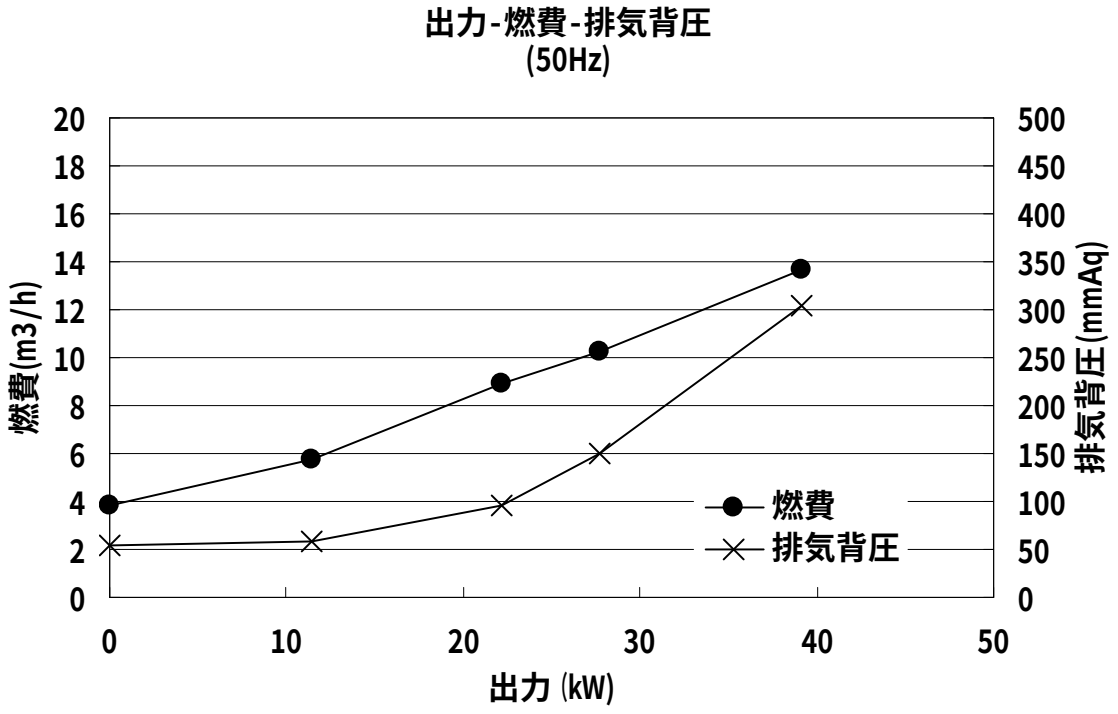
C. 出力－温度（60Hz）の関係

D. 出力－燃費－排気背圧（60Hz）の関係

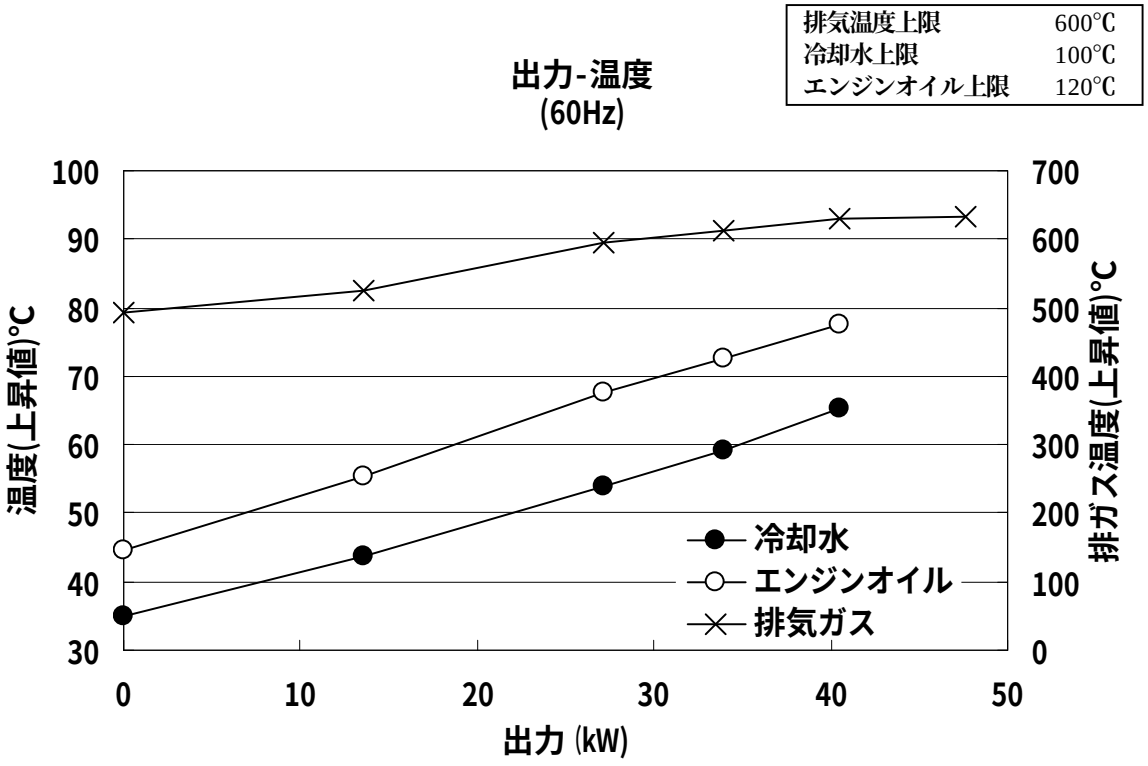
A. 出力ー温度（50Hz）の関係



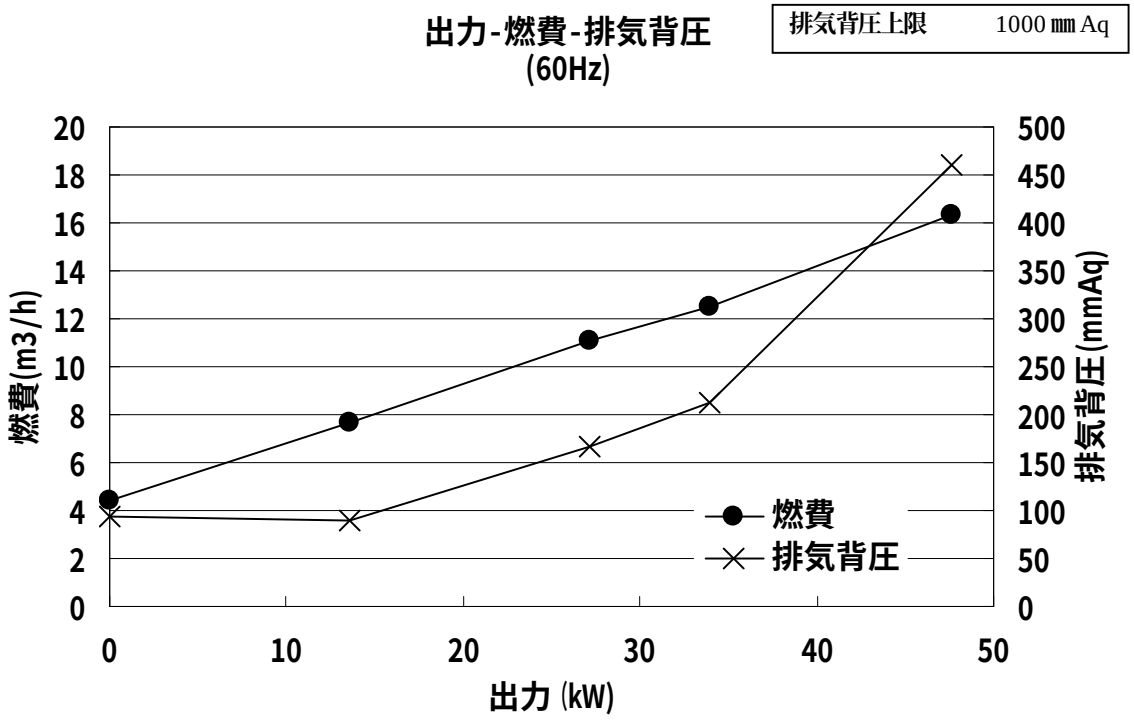
B. 出力ー燃費ー排気背圧（50Hz）の関係



C. 出力－温度（60Hz）の関係



D. 出力－燃費－排気背圧（60Hz）の関係



第３章　実証実験

３．１　人工混合ガスにおける実験結果

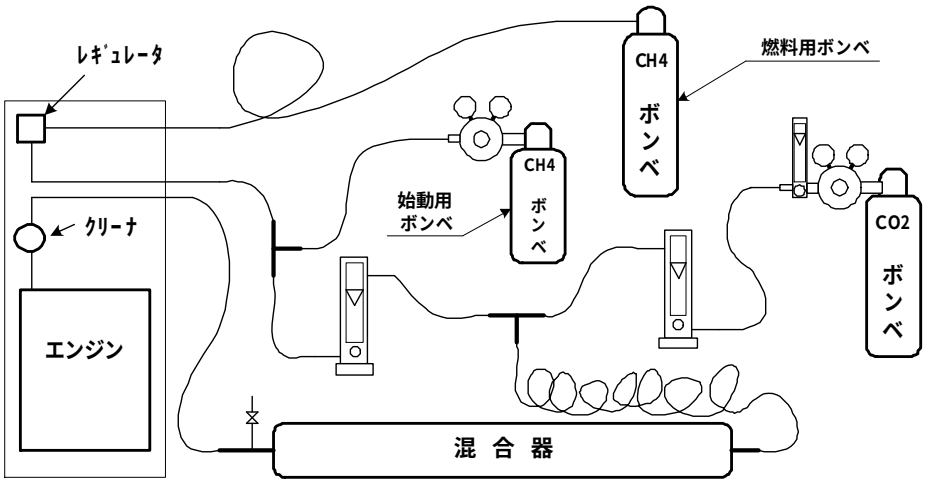
３．１．１　目的

第２章に示したエンジンの改造により、エンジンはメタンガスでの運転が可能となった。このエンジンが実際の下水処理場等における消化ガスを燃料として利用できるか検討することを目的として実証実験を行った。その最初の段階として、工業用のメタンガスと炭酸ガスを混合して作成した人工混合ガスを用いた稼働実験を行った。人工混合ガスによる実験は稼働確認実験（H18 年度）と制御系調整実験（H19 年度）の二つの段階に分けて実施した。

３．１．２　稼働確認実験

（1）実験概要

実験は、土木研究所内で、図－3.1 に示す燃料フローのとおり、CH_4 と CO_2 の純ガスを用いて消化ガスを模擬する混合ガス製造ラインを設け、これをエンジンに供給して負荷試験を行った。負荷は発電機稼働とし、50Hz と 60Hz のそれぞれについて 3 相 200 V 発電を 0～140 A の出力範囲で行った。

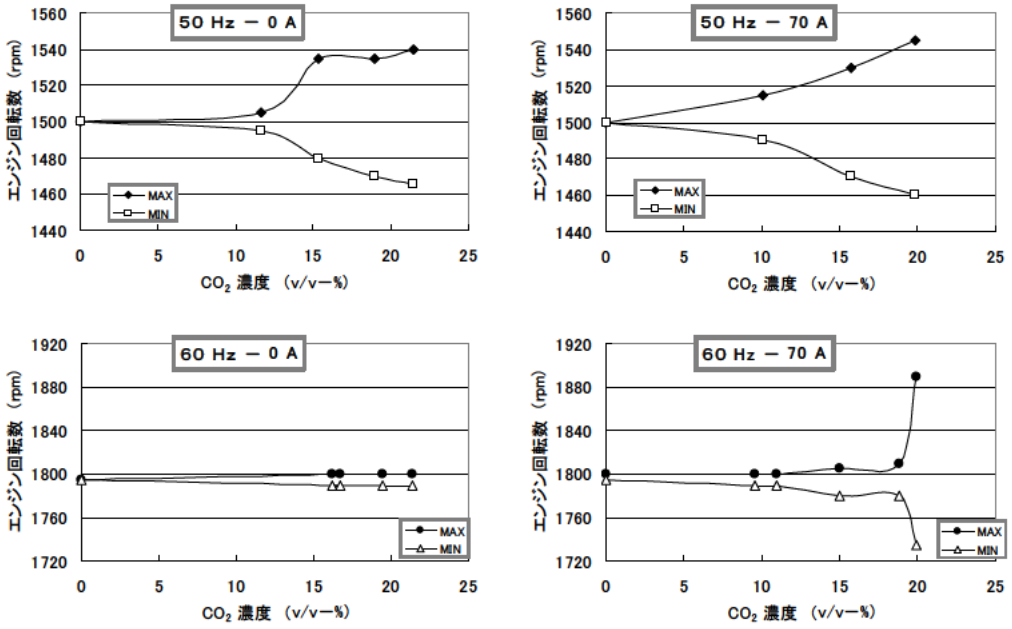


図－3.1　エンジン実験システム

（2）実験結果

実験結果を図－3.2 に示す。エンジンは、CO_2 濃度が高まる毎に回転数が不安定となった。特に CO_2 濃度が 30 %-v/v よりも高濃度となると稼働不能となった。これはエンジン自体の初期設定を 100 %の CH_4 ガス燃料で行っているために、燃料組成の変化に対応できないことにあると予想された。すなわち、燃料組成や品質に応じたエンジン制御システムが必要となると判断される結果となった。

また、100 %－CH_4 ガス燃料はエンジン温度を上昇させやすい傾向にあり、高負荷運転ではエンジン排気温度が容易に制限温度である 600℃以上となった。一方で、自明のことながら CO_2 濃度が高まるほどにエンジン温度は低いものとなった。



図－3.2　エンジン稼働実験における燃料中の CO_2 濃度とエンジン回転数の関係（一部）

３．１．３　制御系調整実験

（１）実験概要

稼働確認実験では、CO_2 濃度が高まる毎に回転数が不安定となった。そのため 100%メタンガスで初期設定されているエンジンの制御系を、外部操作により変更できるよう改造を施した。

ガスエンジンが CH_4 濃度範囲：100～50 %-v/v で始動、安定稼働するための開発実験を行った。実験には CH_4 ガスと CO_2 ガスを圧力計と流量計で一定濃度となるよう調整し、エンジンに供給する方法を取った。

（２）実験結果

結果は、燃料ガスの供給圧力が 0.3～0.4 MPa の範囲において始動と安定稼働を達成できた。0.3 MPa 以下の実験は装置の制約から実施できなかった。

また、人工ガスを用い約 24 時間の連続運転を実施したが、問題は現れなかった。

３．２　消化ガスにおける実験結果

３．２．１　鶴岡市浄化センターにおける実験結果

（1）　目的

３．１．３で示した人工混合ガスを燃料とした制御系調整実験の結果から、実際の消化ガスを燃料として利用できる可能性が見いだせた。そこで、実際の処理場で発生している消化ガスを用いた稼働確認実験を実施した。さらに、実際の消化ガスのみで始動が可能かどうか実験を行った。また、ガスエンジンの運転に伴って発生する排気ガスの成分についても調査を行った。

（2）　実験概要

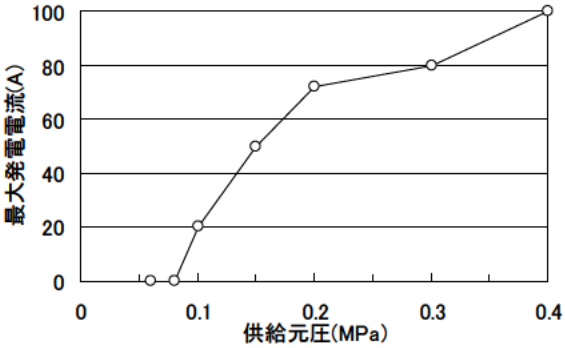
消化ガスエンジン発電機を山形県鶴岡市浄化センターに設置し、平成19年8月27日～8月31日の期間で、既存施設により脱水・脱硫・脱シロキサン処理がなされた同センターのバイオガスを用いて稼働実験を行った。発生している消化ガス中の平均 CH_4 濃度は60.3 v/v-%であった。実験では、供給圧力を0.4，0.3，0.2，0.15，0.1，0.08，0.06 MPaと順次低下させ、エンジンの始動と安定稼働を調べた。また、排気ガスのサンプリングは周波数を2通り（50Hzと60Hz）、電流を3通り（0A、30A、80A）変化させた計6種類の条件で行った。分析対象物質は、窒素酸化物、一酸化炭素、二酸化炭素、水素、メタンの5項目とした。分析方法は、窒素酸化物については化学発光法、一酸化炭素と二酸化炭素は赤外吸収法、水素についてはPED定電位電解法、メタンについてはGC-FID　ガスクロマトグラフ法を用いた。

図－3.2　機械配置図

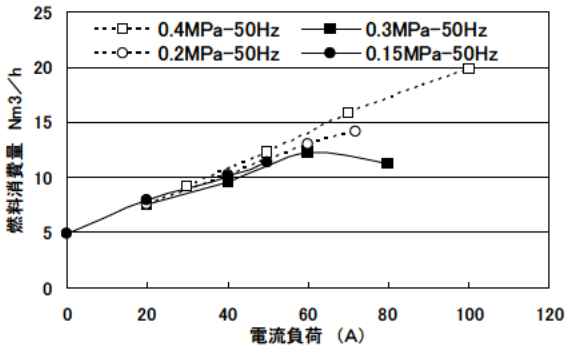
（3）　実験結果

図－3.3 に供給ガスの元圧と、発電できた最大の電力値を示す。周波数は 50Hz、電圧は 200V である。0.4～0.06MPa までのいずれの元圧条件下でも、エンジンは始動することができた。しかし、元圧が 0.1MPa 未満では、発電のために回転数を高めるとエンジンが停止した。元圧が 0.2MPa 以下では発電電流はガスの供給量によって制限されており、0.3MPa 以上では排気ガス温度の上限値によって制限されていた。

電流負荷と燃料消費量の関係は図－3.4 のように一次関数で示される。電流を流していない時でもエンジンの駆動の為に燃料を約 5Nm^3/h で消費している。発電効率（消費燃料ガスの熱量に対する発電電力量の比）は、今回の実験では最高で 20%を超えていた。



図－3.3　供給ガスの元圧と最大発電電流



図－3.4　電流負荷と燃料消費量

排気ガスの分析結果を表－3.1 に示す。

排気ガス中の主成分は窒素と二酸化炭素であるが、分析の結果 NOx や CO も含まれている。また一部試料では、未燃分として水素やメタンが観測されている。排ガス性状を向上するために、エンジンの制御設定をより細やかに確認することが重要であり、燃費の向上にもつながることが予想される。

表－3.1　排気ガスの分析結果

試料名	分析結果				
	窒素酸化物 (ppm)	一酸化炭素 (ppm)	二酸化炭素 (vol%)	水素 (ppm)	メタン ppm
1500-0A	35	3700	12.6	-	-
1500-30A	200	7700	13.8	1400	3800
1500-80A	330	7000	14.4	2200	3200
1800-0A	21	2500	12.6	-	-
1800-30A	91	6700	13.8	1300	730
1800-80A	300	7800	14.3	-	1400

３．２．２　函館湾浄化センターにおける実験結果

（１）　目的

鶴岡市浄化センターにおける1週間程度のフィールド実験により、実際の消化ガスを対象としたエンジンシステムとしての実用化の可能性が見いだせた。そこで、本システムが長期間の連続稼働に耐え得るかどうか確認を行うために、実験を実施した。また、シロキサン除去装置やコンプレッサーなどの付帯装置についても検討を行った。

（２）　実験概要

バイオガスエンジンを北海道函館湾浄化センターに設置し、約 40 日間にわたり同センターで発生している脱硫済のバイオガス（CH_4濃度：58.3 v/v-%）を用いて稼働実験を行った。燃料ガスは後述するシロキサン除去装置によって簡易精製したバイオガスで、0.4 MPa に加圧してエンジンに供給した。ガスエンジンで発電した電力は三相交流の 200 v-約 10A であり、浄化センター内の消化槽に設置された排風機（1.5kW）・送風機（2.2kW）の電源として使用した。

また、エンジン性能の他、補機類についても検討を行った。

実施期間：平成20年10月3日～12月3日

H20年10月3日～10月6日　　機械設置・調整・配管・配線

H20年10月7日～10月9日　　試運転、消化ガス分析、シロキサン除去状況分析調査、騒音測定

H20年10月9日～11月19日　　長期連続試運転（41日+8.92hr）

H20年12月1日～12月3日　　後片付け

実働設備：汚泥消化タンク内設備

送風機2.2kW（全負荷電流値9.2A 起動電流値（約6倍-55.2A）自動起動・停止運転）

排風機1.5kW（全負荷電流値6.5A 起動電流値（約6倍-39A）自動起動・停止運転）

（3） 実験使用機械一覧表

本実験で使用した機器は以下のとおりである。

表－3.2 実験使用機器一覧表

機械名	型式	寸法	数量	付帯設備
消化ガスエンジン発電機	DCA-60ESH(改)	(L)2,050mm (W) 880mm (H)1,250mm	1	制御用PC
ガスコンプレッサー	SYA015L 15Nm3 /h	(L)1,030mm (W) 630mm (H)1,110mm	1	操作盤別置き
シロキサン除去装置	300L×2	(L)2,354mm (W)1,400mm (H)2,690mm	1	活性炭300L× 2=600L
負荷装置用タンク	$2m^3$	(φ)1,040mm (H)1,560mm	1	負荷試験装置付 電動ホイスト(100V)付 負荷遮断(150A)装置付 キャプタイヤ60mm2x5mx2本
消化ガスエンジン発電機 データ集収制御盤		(L)500mm (W)600mm (H)1,230mm	1式	最大計測点数：7 排気背圧：1 速度：1 熱電対：3 予備：2
ガス用ホース	採取源→ガスコンプレッサー	外径25mm 内径33mm	1式	
	ガスコンプレッサー→シロキサン除去装置	外径18mm 内径12mm	1式	
	シロキサン除去装置→ガス発電機	外径18mm 内径12mm	1式	
ハウス 安全柵 単管パイプ、クランプ			1式	

ガスタンク
ガス採取箇所(配管40A)
ガスコンプレッサ(2.2kw 15Nm3/h)
シロキサン除去装置(300Lx2連式)
ガス発電機
遮断機
負荷装置
データ収集盤
パソコン画面
受電盤
送風機2.2kw(全負荷電流値9.2A-起動電流値55.2A)
排風機1.5kw(全負荷電流値6.5A-起動電流値39A)
配電盤
配電盤内部
発電機より結線
停止時点滅
運転時点灯
表示灯
集中コントロール室に設置

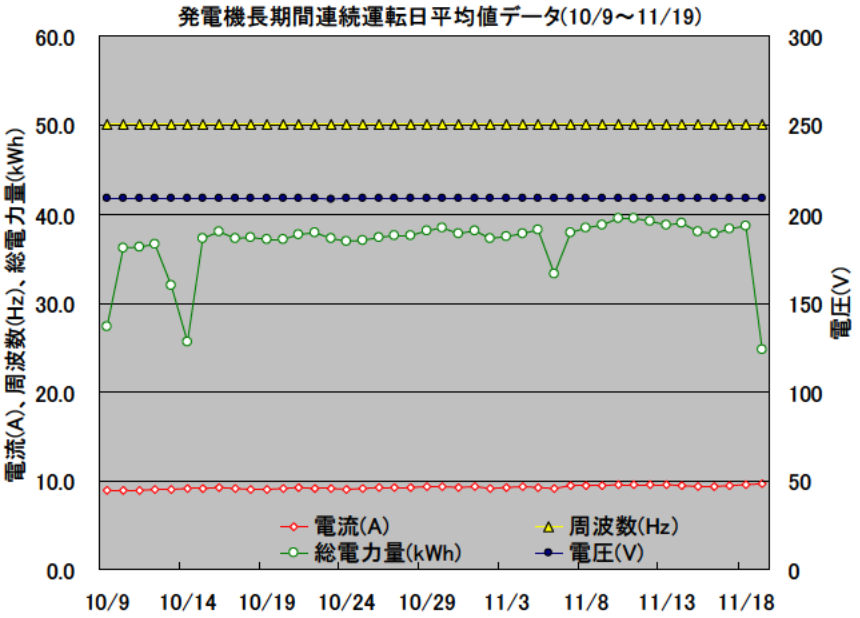
図－3.5　機械配置図

（4）　長期連続運転での発電結果

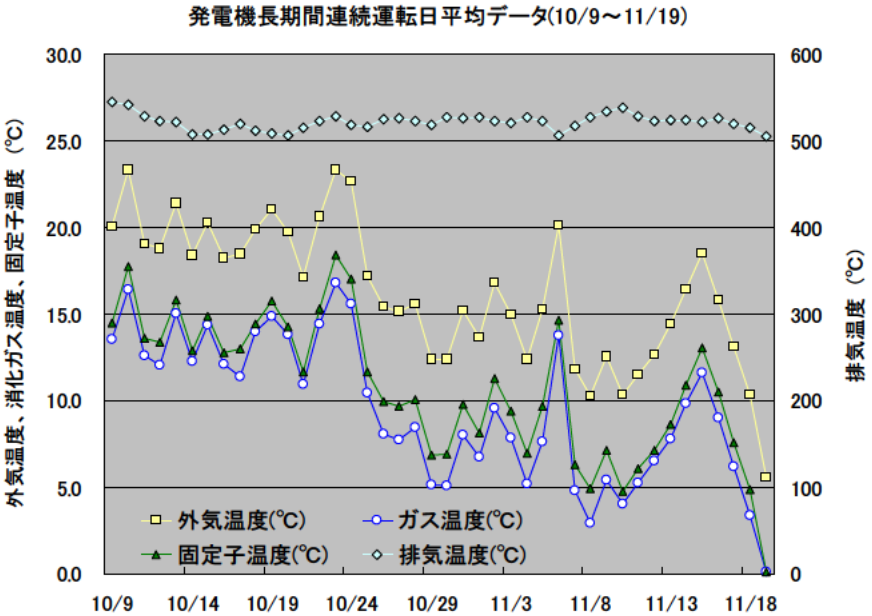
①　長期的な性能

図－3.6、3.7 に日総電力量と日平均の電圧・電流・周波数・外気温度・消化ガス（燃料）温度・固定子温度・排気ガス温度の推移値を示す。

エンジン回転数平均値はほぼ一定回転数となっており、周波数は安定していた。電圧の平均値も安定しており、人為的な要因を除くと、安定して電力を供給することができたといえる。排気ガス温度は外気温度に左右され、実験期間を通じて570℃以下と600℃を下回っていた。本実験での発電効率は、供給電流が10Aと定格発電量と比べて少ないため、3%程度であった。



図－3.6　日総電力量と日平均の電圧･電流･周波数の推移



図－3.7　外気温度･消化ガス(燃料)温度･固定子温度･排気ガス温度の推移

②瞬間的な変化

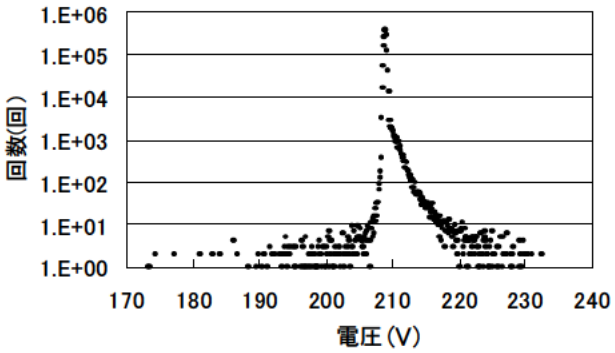
発電機性能を評価する上では、電圧変動率、周波数変動率が重要となる。本実験期間中では、電圧・周波数変動率は下記の数値を示した。

表－3.3　電圧変動率と周波数変動率

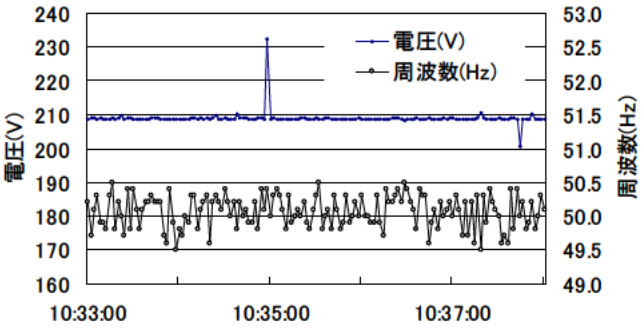
実験日	電圧変動率	判定	周波数変動率	判定
最良データ日	10/17 8.7%～-2.6%	○	10/11 4.8%～-3.7%	○
最悪データ日	10/14 7.1%～-15.2%	×	10/10 0.8%～-1.3%	○
平均データ	8.6%～-7.9%	○	1.4%～-1.6%	○
基準値	±10%[12]		±5%[13]	

2秒毎での変動を見ると、運転安定時においても電圧は232.3～173.1Vで変動しており（図－3.8、3.9）、これは「電力品質確保に係る系統連系技術要件ガイドライン」[12]に示されている202±20Vの基準値の幅を超えていることから、そのままでは系統連系ができないことがわかった。電圧変動率に関しては、市販の発電機に対してかなり劣っている（例えばデンヨー社社内基準は0.5%）。JIS等で、変圧器や防災用の発電機では±5%、白熱電球では±6%の許容電圧変動と規定されており、パソコン等精密（計測）機器への単独使用も不可である。一方で誘導電動機（モーター）やコンデンサ、電灯類についてはJISによって許容電圧変動幅が±10%となっており、電圧変動の影響が少ない機器については利用が可能であると考えられる。但しインバータで整流すればすべての機器を単独運転することは可能となる。

周波数（回転数）の変動については、公共建築工事標準仕様書（電気設備工事編）[13]に記されている、調速機の定格回転速度の±5%の基準値を満足している。周波数はエンジン回転数に連動しており、回転数を電子制御しているため問題はない。



図－3.8　実験期間中に観測された全電圧の頻度分布



図－3.9　2秒毎の電圧・周波数の変動の一例

11/2（電圧最高値観測時前後）

③　人為的ミスによる切断とその復旧

11/6（14:14:18～16:35）、動力回路が切断された。すぐに送風機と排風機を同時起動したが、起動電流が大きく再起動はできなかった。そこで、送風機（2.2kW）を立ち上げた後、排風機（1.5kW）を立ち上げることで復旧することができた。

同時起動できなかった理由として、同時起動時に必要な起動電力を賄うだけの発電が本実験系ではできなかった。機器の起動時など一時的に多くの電力を必要とする場合には、燃料投入量を増加するため、一時的に供給圧を高める工夫や高カロリーな燃料を一時的に使用するなどの改良の余地が残されている。エンジン内部の温度が低いときには始動時に時間がかかるという問題も燃料系統の改良により改善されると考えられる。

④実験終了時

2008/11/19 22:58に発電機が停止した。この理由として外気温が低下し、配管内の細管部にたまった水分が徐々に凍結し、消化ガスの供給が停止。その後シロキサン除去装置内に比較的高圧で蓄えられていたガスを消費してしばらく運転していたが装置内の圧力が低下し、ガスの吸気ができなくなったためガスエンジンの運転が停止したと推察している。結果として、気温が氷点下になるような地域では、断熱材の使用や配管の大径化、効果的な水分除去などの凍結防止策をとる必要がある。

今回の実験では気温の低下によって実験は終了することとなったが、製品化の為には一年を通した連続実験を行い問題点を洗い出す必要がある。その際には、エンジンオイルや冷却水に関する検討も必要となる。

表－3.4　エンジン停止時のデータ

時刻	電圧	電流	周波数	電力量	ガス流量	ガス圧力	ガス温度	排気温度	油温度	外気温度	冷却水温	固定子温	回転数
	V	A	Hz	kW	Nm3/h	MPa	℃	℃	℃	℃	℃	℃	rpm
22:58:01	209.3	15.9	49.8	0.0	7.5	0.317	0.0	513.5	79.1	3.4	80.9	-2.1	1,489
22:58:03	209.2	10.8	49.8	2.6	7.5	0.316	0.0	513.9	79.1	3.4	81.2	-2.1	1,484
22:58:05	209.2	10.7	50.2	2.5	7.5	0.316	0.0	513.9	79.1	3.4	81.6	-2.1	1,501
22:58:07	209.2	10.7	50.0	2.3	7.4	0.317	0.0	514.1	79.1	3.4	81.9	-2.1	1,502
22:58:09	209.2	10.7	49.9	2.3	7.5	0.319	0.0	514.7	79.2	3.4	82.2	-2.1	1,496
22:58:11	209.2	10.5	50.3	2.2	7.5	0.318	0.0	515.6	79.2	3.4	82.5	-2.1	1,512
22:58:13	209.0	10.8	49.0	2.2	7.6	0.317	0.0	516.0	79.2	3.4	82.7	-2.1	1,470
22:58:15	173.3	16.1	32.9	1.0	6.8	0.317	0.0	512.8	79.2	3.4	82.7	-2.1	1,053
22:58:17	47.3	3.5	-	0.1	5.2	0.318	0.0	482.9	79.2	3.3	82.1	-2.1	395
22:58:19	0.5	0.1	-	0.2	3.7	0.319	0.0	456.8	79.2	3.3	81.3	-2.1	0
22:58:21	0.1	0.1	-	0.2	-	0.319	0.0	444.9	79.4	3.4	80.7	-2.1	0
22:58:23	0.0	0.1	-	0.2	-	0.319	0.0	435.1	79.3	3.4	80.3	-2.1	0
22:58:25	0.1	0.1	-	0.2	-	0.320	0.0	427.9	79.3	3.4	80.0	-2.2	0
22:58:27	0.1	0.1	-	0.3	-	0.319	0.0	422.6	79.3	3.4	79.8	-2.2	0
22:58:29	0.1	0.1	-	0.6	-	0.320	0.0	418.8	79.4	3.4	79.6	-2.2	0

（５）環境への影響評価

① 大気汚染

燃料の燃焼能力が重油換算35L/h以上のガス機関に、大気汚染防止法が適用される。実験機は燃料の燃焼能力が重油換算35L/h未満であるため、ばいえん発生施設には該当しないものの、環境への影響評価を行うため調査を行った。以下に示すようにばいじん及び硫黄酸化物については検出されず問題がなかったが、窒素酸化物の排出基準（NOx）600ppmを満足したのは10kW未満の負荷の場合であった。また、一酸化炭素濃度も高く、NOx・COについては大型化する際の課題として挙げられる。

表－3.5 排気ガスの分析データ（その1）

測定項目	排出基準※	負荷量			
		0kW	2kW（長期実験中）	10kW	20kW
ばいじん(ダスト)濃度	(0.05 g/m^3)	<0.01 g/m^3	<0.01 g/m^3	<0.01 g/m^3	<0.01 g/m^3
いおう酸化物量※※	(0.015m^3 /h)	<0.01m^3 /h	<0.01m^3 /h	<0.01m^3 /h	<0.01m^3 /h
窒素酸化物	(600 ppm(vol))	180 ppm(vol)	320 ppm(vol)	1400 ppm(vol)	1300 ppm(vol)

※ 排出基準[14)]は参考値

※※ いおう酸化物（SOx）の排出基準[14)]

$q = K \times 10^{-3} \times He^2$

q いおう酸化物の量（m^3/h）

K 政令で定める地域ごとの値（函館市は11.5）

He 補正された排出口の高さ（m）

He = 1.0mで計算すると**q**＝0.015**m**^{3}/h

表－3.6 排気ガスの分析データ（その2）

測定項目		負荷量			
		0kW	2kW（長期実験中）	10kW	20kW
排出ガス温度(℃)		145	178	241	296
水分量(%)		13.9	12.0	16.6	16.4
組成	酸素濃度(%)	2.88	3.16	3.12	1.92
	二酸化炭素濃度(%)	12.74	14.22	13.5	15.32
	一酸化炭素濃度(%)	0.50以上	0.50以上	0.50以上	0.50以上
	窒素濃度(%)	83.88	82.12	82.88	82.26
空気比		1.13	1.15	1.15	1.08
平均流速(m/s)		11.02	11.09	12.46	17.76
湿り排出ガス量(Nm^3/h)		130	120	120	150
乾き排出ガス量(Nm^3/h)		110	100	100	120

② 騒音

騒音規制法に基づき、特定工場等において発生する騒音の基準が公示により定められている。なお、市町村においても独自に規制基準を定めている場合がある。下水処理場の敷地は広い場合が多く、境界線での騒音値はかなり低減化されると考える。本エンジンでは、少なくとも境界から50～100m程度距離をとれば、点音源を仮定した理論上は45～40dBとなり、問題がないことが分かる。

騒音に係る環境基準について[15)]

地域の類型	基　準　値	
	昼　間	夜　間
AA	50デシベル以下	40デシベル以下
A及びB	55デシベル以下	45デシベル以下
C	60デシベル以下	50デシベル以下

※　昼間を午前6時～午後10時
　　夜間を午後10時～翌日午前6時とする

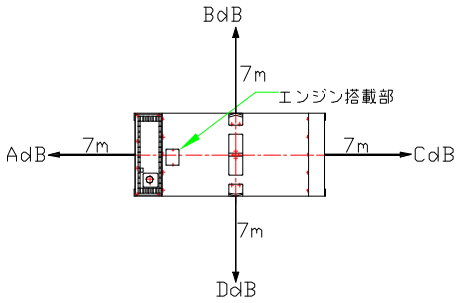
※※　AAを当てはめる地域は、療養施設、社会福祉施設等が集合して設置される地域など特に静穏を要する地域とする。Aを当てはめる地域は、専ら住居の用に供される地域とする。Bを当てはめる地域は、主として住居の用に供される地域とする。Cを当てはめる地域は、相当数の住居と併せて商業、工業等の用に供される地域とする。

発電機騒音測定結果(dB)(10～15A負荷時)

A	B	C	D	7m四方平均値
62.5	63.6	61.5	61.4	62.3

ガスコンプレッサー騒音測定結果(dB)(全負荷時)

A	B	C	D	7m四方平均値
60.0	63.1	62.3	61.6	61.8



図－3.10　発電機騒音測定結果 (dB)　(10～15A負荷時)

（6）　補機類の性能評価

①　シロキサン除去装置

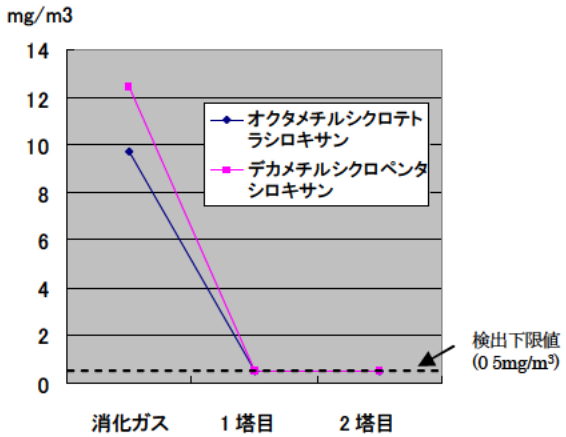
消化ガス中に含まれているシロキサンは燃焼時に分解し、生成したシリカが部品の摩耗・損傷、触媒劣化を促進させ、効率低下や不調・故障を引き起こす[16]。エンジン耐久性向上のためには除去が必要不可欠である。本実験で使用したシロキサン除去装置は処理量:30Nm^3/h・流塔速度:0.05m/secの条件で設計している。また、1連ずつの並列運転又は、2連での直列運転可能となっており、本実験では2連直列運転で使用した。1塔あたりの活性炭交換時期：180日以上（24hr連続使用)30Nm^3/h×24hr×180日=13万Nm^{3}とした。

仕　様　諸　元

項　　目		内　　容
タ　ン　ク		第2種圧力容器
タンク材質		SS400
内　容　物		空気及びメタンガス
最高使用圧力		0.5MPa
水圧試験圧力		0.75MPa
内容積	タンク上部	0.017m^3
	タンク下部	0.352m^3
	総　容　量	0.369m^3
全　　幅		1400mm
全　　長		2354mm
全　　高		2690mm
全　重　量		約2000kg

図－3.11　シロキサン除去装置とその諸元

本装置の通過前後のシロキサンの含有率を示す。1 塔目通過後に検出下限値以下となっており、今回の実験においては、実験初期では過剰な能力を有していたといえる。ただし、時間の経過とともにシロキサンの除去能力も低下する。長期試験中の除去能力については不明であり、今後の検討が必要である。



図－3.12　シロキサン除去装置の能力（実験開始時）

② オイルレスガスコンプレッサー

函館湾浄化センターでは消化ガスを常圧で貯蔵しているため、エンジンにガスを供給するためにはコンプレッサー等で加圧する必要がある。本実験では、以下の仕様のコンプレッサーを使用した。

機械設計仕様	項目	実使用範囲
メーカー名	宇野澤組鐵工所	
型式	SLY015L	
取り扱いガス	バイオガス(CH_4:60%,CO_2:40%)	
ガス流量	11Nm^3/h	7～8Nm^3/h
吸い込み圧力	0 kPaG	
吐出圧力	400 kPaG	0.7 MPa
回転数制御	400～1,200rpm	1,000～1,200rpm
出力・極数	2.2kW 6P	

図－3.13 オイルガスコンプレッサーとその諸元

今回作動させた動力は下記の通りであった。

A.送風機2.2kW（全負荷電流値9.2A 起動電流値（約6倍-55.2A）自動起動・停止運転）
B.排風機1.5kW（全負荷電流値6.5A 起動電流値（約6倍-39A）自動起動・停止運転）

（4）③で前述したように、送風機と排風機の同時起動は不可であり、実験では送風機を立ち上げた後排風機を立ち上げた。これはガスの供給量が不足して起動に必要な電力を発電できなかったことが原因である。鶴岡での実験結果からQ=25Nm^3/h程度のガスコンプレッサーが必要であったと予想される。なお、配管の大径化やシロキサン除去装置内の圧力損失を軽減することで、コンプレッサーの能力を抑えることが可能となると考えられる。

また、抵抗器の起動時など、瞬間的に大容量となる電力を供給するために一時的に多くのガスを必要とする場合に備え、4～5m^{3}程度のバッファタンクを取り付ける等の対策も必要である。

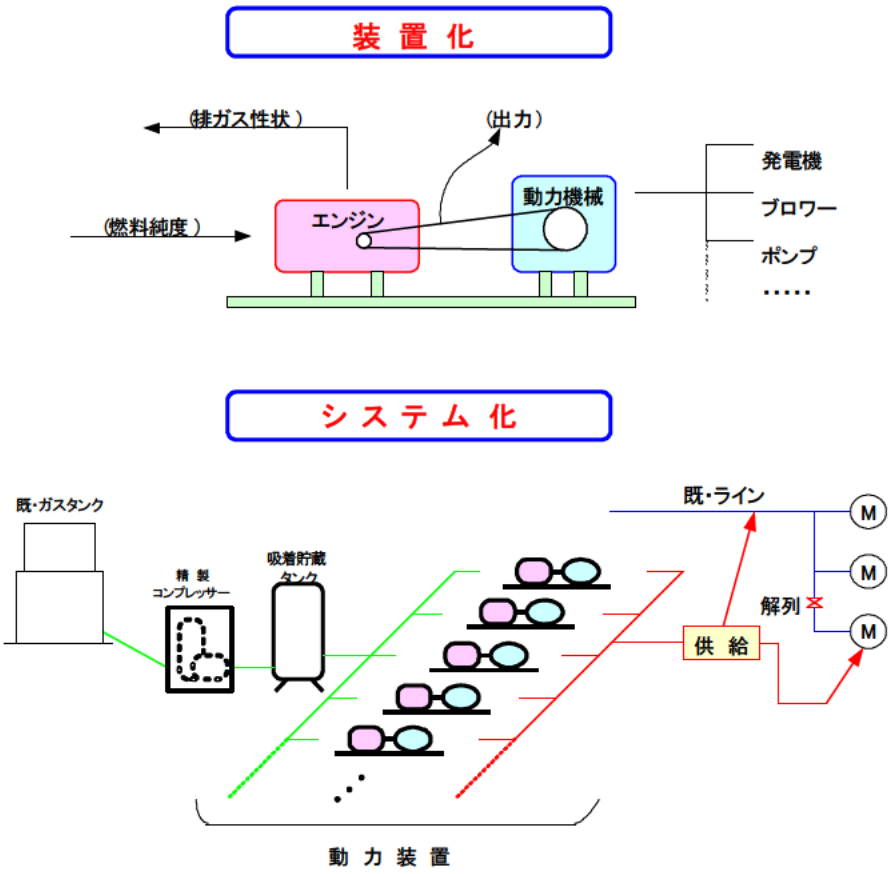
第４章　実用化検討

４．１　運用システムの検討

下水処理場内には様々な機器があり、多くの電力を消費している。本共同研究における実験結果より、開発したガスエンジンの運用システムを検討した。

電気設備は汚水ポンプや水処理系のブロワーといった大電力を必要とするもの、各種機器の制御に使われているコンピューター等の電圧が変動しない高品位な電力を供給する必要がある機器、多少の電圧変動を許容しかつ消費電力が相対的に小さい電灯やファンなどに分けられる。開発した消化ガスエンジン動力システムの工学特性から、本システムを実施設へ適用する場合には、必要電力が小さく多少の電圧変動の影響を許容する機器（あるいはインバータを搭載した機器で電圧変動の影響を吸収するもの)を系統から解列して発電機と直接連絡する方法が有力であると考える。

また今後の可能性としては、エンジンの大型化や複数台同時運転といった運転方法が考えられる。複数台数を整備する場合には、定期的に１台ずつを点検整備しながら運用して行くことが予想される。定期点検整備は、近隣の自動車整備工場に委託するシステムを取ることで維持管理費の高騰も避けられる。



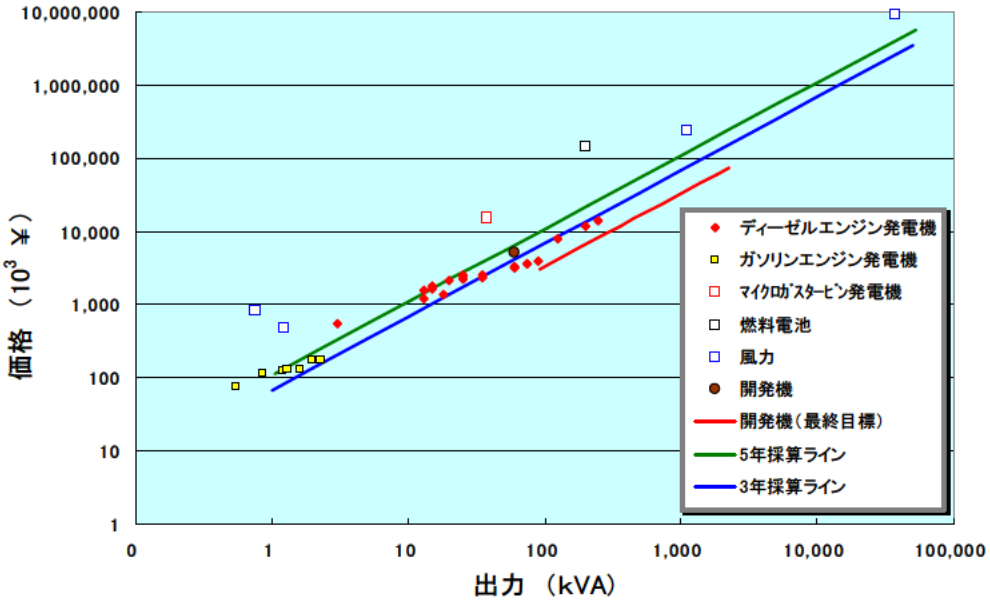
図－4.1　運用システムのイメージ

４．２　コスト分析

１．２　開発目標で述べたように、余剰消化ガスの利用を推進していくためにはその利用コストが市場的に流通し得るコスト成立するものでなければ対策としての投資効果は得られない。ここでは、開発したシステムのコストについて分析を行った。

本研究では、土木工事等の現場で用いられているディーゼルエンジン発電機 50kVA（50Hz）を購入し、これを点火プラグ式のガスエンジン発電機に改造するとともに、必要な改良を重ねたものであるが、このときの改造経費は約 200 万円であった。したがって、販売価格を想定すると、図－4.2 に示すディーゼルエンジン発電機の価格に改造経費を加算し、さらに、これに実用化研究経費回収相当額、利益等を考慮、加算した額が販売価格となる（図－4.2 の茶色の●印）。実際に企業等が事業化する場合は、ここで示す図－4.2 のディーゼルエンジン発電機の価格はカタログ値であり、実際に企業等が事業化する場合は、開発システムに用いる発電機の購入販売価格は交渉となることから、カタログ値よりも下がる可能性もある。

以上を考慮すると開発したガスエンジン発電機は、当面の開発目標である 5 年以内に採算が取れる可能性が高く、廉価な消化ガスエンジンシステムの開発の目処が立ったと考えられる。



図－4.2　開発ガスエンジンのコスト試算結果

第５章　結論

嫌気性消化によって消化ガスは得られるが、年間発生量の約 3 割の消化ガスは焼却されている。本研究では、消化ガスの利用促進のため消化ガス発電機を初めとする汎用性の高い動力システムを開発するとともに、その効果的な運用システムを構築することを目的として開発を行ったものである。

市販のディーゼル発電機のエンジンを改造することにより、純メタンでの運転が可能となった。制御系を操作することにより、CH_4・CO_2混合ガスにおいても安定した発電が可能となった。さらに鶴岡市浄化センターでの実証実験により実際の消化ガスでの運転が可能であることを証明した。函館湾浄化センターでの実証実験により、処理場内の施設へ約 40 日間にわたり安定して電力を供給することに成功した。

本共同研究により、下水処理場で発生している消化ガスを燃料として使った実用に耐え得る廉価な消化ガスエンジンシステムの開発の目処が立った。

一方で、今後に残している課題は以下のとおりである。

○　実用化に向けた一年程度の連続運転の実施

○　ガス供給ラインに関する検討課題

・配管の大径化とそれに伴うコンプレッサーの容量の設計

・シロキサン除去タンクでの圧力損失の見積もりと配管の設計

○　エンジンの運転方法の高度化

・始動時に時間がかかる（エンジン内部の温度が低いときは特に始動しにくい）

・機械の起動時などの瞬間的に大容量となる電力を供給する方法

・窒素酸化物（NOx）濃度の低減

・電圧変動率の改善

○　エンジン本体の低価格化

・エンジン冷却システム

・エンジンのサイズをはじめとした各種部品の最適化

○　エネルギー効率

・システム全体での発電効率の算定と効率化

参考文献

1) (社)日本下水道協会：下水道統計
2) 建設物価調査会：建設物価
3) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 HP：資料データベース
http://www.nedo.go.jp/nedata/16fy/03/g/0003g002.html
4) 日経 BP 社 HP：小型風力発電機が実用レベルで本格離陸へ、ゼファーが量産出荷開始 (2006/3/6)
http://www.nikkeibp.co.jp/archives/423/423972.html
5) グローイングピース社　HP：
http://growing-peace.com/Wind%20Power%20Generation/wind%20power%20generation.html
6) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 HP：新エネルギーガイドブック
http://www.nedo.go.jp/nedata/16fy/12/g/0012g001.html
7) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 HP：マイクロ水力発電導入ガイドブック
http://www.tech.nedo.go.jp/PDF/100007768.pdf
8) クリーンコールパワー社 HP：http://www.ccpower.co.jp/topics/sekitan_01.pdf
9) ヤンマー社 HP：http://www.yanmar.co.jp/products/agri/nouki/tractor/index.html
10) デンヨー社 HP：http://www.denyo.co.jp/products/generator/dca_b3.html
11) 経済産業省　原子力安全・保安院：発電用火力設備の技術基準の解釈について　(2005/12/14)
http://www.nisa.meti.go.jp/safety-kanto/denki/hatsuden/data/171214-2.pdf
12) 資源エネルギー庁：電力品質確保に係る系統連系技術要件ガイドライン（2004/10/1）
http://www.meti.go.jp/policy/tsutatsutou/tuuti1/a490.pdf
13) 国土交通省：公共建築工事標準仕様書（電気設備工事編）　(2007/9/5)
http://www.mlit.go.jp/gobuild/kijun/touitukijyun/07_d_hyoujyun_siyousho_s.pdf
14) 大気汚染防止法施行規則
15) 平成 17 年 5 月 26 日 環境省告示第 45 号　騒音に係る環境基準について
http://www.env.go.jp/kijun/oto1-1.html
16) 山田昭捷ら：シロキサンに着目した脱硝・脱臭触媒の劣化、下水道協会誌、vol.32、No.389、pp.76-78 (1995)

共同研究報告書
Cooperative Research Report of PWRI
No.394 March 2009

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所 企画部 業務課
〒305－8516 茨城県つくば市南原1－6 電話029－879－6754