

研 究 報 告 編

I 報 文

余熱利用型バイオディーゼル燃料製造装置の開発

竹野 大志、東川 圭吾、赤澤 貴光¹、陳内 秀樹²、洲上 大輔³

バイオディーゼル燃料製造に必要となる熱エネルギーを温泉余熱から得て BDF を製造する装置を開発した。装置は約 100℃の源泉温度と 4,500 トン/日の湯量を有する雲仙市小浜温泉に接続設置した。製造能力は 200L/バッチの規模で温泉熱のみを熱源として BDF を製造することが可能である。同時に雲仙市において、一般家庭の廃食用油の分別収集を開始し、市役所支所を拠点とした回収方式によってリサイクルする体制を構築した。製造した BDF は、雲仙市のごみ収集車の燃料として B100 利用している。温泉 BDF の製造コストとライフサイクルアセスメント評価し、コストは 110 円/L、CO₂ 排出量は 0.266kg-CO₂/L と評価した。ランニングコストは人件費を含めても軽油とほぼ同額であり CO₂ 削減量は軽油と比較して 90%削減可能であると示唆された。

キーワード: バイオディーゼル燃料、温泉余熱利用、コスト評価、ライフサイクルアセスメント

はじめに

現在、国内の多くのバイオディーゼル燃料(以下、BDF と記す)の製造装置は、100~200L/バッチの製造能力規模が多く、湿式アルカリ触媒反応によって製造されている。アルカリ触媒反応による BDF 製造には、化学反応の促進や燃料の脱水のために、熱エネルギーと温水が必要であり、この加熱には電気を用いるが、電気の使用は温室効果ガスの発生を伴う。BDF は、そもそも軽油燃料の代替燃料として用いることで、温室効果ガス(以下、GHG(Greenhouse Gas)と記す)の発生量の削減を目的として製造されるため、製造工程における GHG の発生削減も同時に追求されるべきである。

そこで、約 100℃の源泉温度と 4,500t/day の湯量を有する小浜温泉の余剰地熱エネルギーを利用した BDF 製造装置を開発した。この装置は、自然エネルギーを活用することで、低ランニングコスト、低環境負荷型のバイオディーゼル燃料製造ができる。

装置の研究開発は、平成 20 年度に産学官民の共同研究体制を構築して取り組み、同時に地域の関係団体と連携して、原料となる廃食用油の収集社会システムの構築に取り組んだ。また、地元の実業系高校である島原工業高等学校・島原農業高等学校と連携し、学生の知的財産教育や BDF の普及拡大にも取り組んだ。装置の設計製作については、環境保健研究センターと県内の環境機器製造事業者と共同開発した。環境保健研究センターでは、研究の全般的な総括に加え、化学反応工程の検討と BDF の品質分析、経済評価・ライフサイクルアセスメントを行ったので報告する。

装置概要・特徴

製造装置は、雲仙市役所が管理する小浜町歴史資料館内の温泉源に接続設置した。この温泉源は、近隣の一般家庭に給湯利用されているが、自噴泉のため一般家庭が使用しない日中は、77~80℃ 200L/min の量の温泉水が未利用のまま海に放流されている。

装置の構造は、メチルエステル化反応を行う反応槽と廃食用油や水をあらかじめ加温するための加温槽から構成される。1回の廃食用油投入量は 200L/バッチの能力とし、製造収率約 90%にて 180L の BDF が製造される。反応槽と加温槽には、余剰温泉水を掛け流し、化学反応に必要な熱を可能な限り温泉熱を利用する構造としている。反応槽は、温泉スケールの付着による熱交換率の減衰に対応するためにシンプルな構造とし、維持管理が容易に行えるよう熱交換機は設置していない。また、装置への温泉水の導入は、導管に接続したボールバルブの開口面積によって制御している。温泉水の導入管は、耐熱性塩化ビニールパイプを用い、装置本体の温泉水と廃食用油の接液部の材質は、SUS316L を採用し対塩性と対食性に対応したもので製作した(図 1、写真 1)。

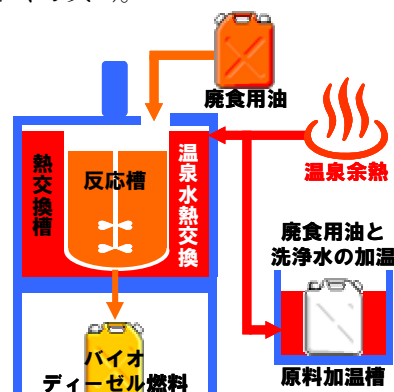


図 1 余熱利用 BDF 製造装置概要

1 雲仙市環境保全課
2 長崎県立島原農業高等学校
3 長崎県立島原工業高等学校

製造方法の概要

メチルエステル化反応による BDF の製造は、食用油の主成分であるトリグリセライドにメタノールと触媒の混合物を反応させて、グリセリンを分離除去する反応である。この反応によって廃食用油は、分子量が小さくなり粘度が低下してディーゼルエンジンの燃料として利用できる性状になる。一般的にこのメチルエステル化反応は、廃食用油の動粘度を下げ、反応を促進させるために 60℃程度に加熱して反応を開始する。余熱利用型 BDF 製造装置では、この反応や洗浄水の加熱に必要なエネルギーに温泉熱を利用する仕組みとなっている。また、メチルエステル化反応以後は、温泉熱から得られる最高温度である 77℃によって、加熱脱水まで行う方法で製造した(図2)。なお、200Lの廃食用油は約 30 分の温泉加熱にて、初発反応温度である 60℃まで加熱が可能である。

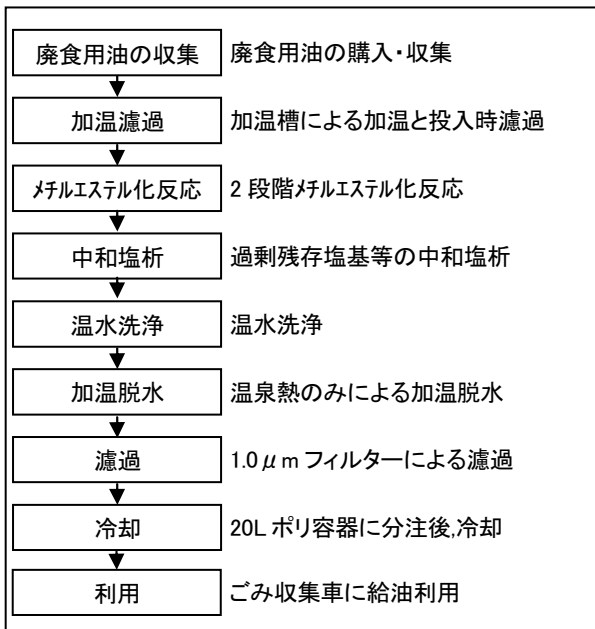


図2 余熱利用 BDF の製造フロー

原料の収集体制の構築

原料となる廃食用油は、産業廃棄物扱いとなる旅館や飲食店等から排出されるものと一般廃棄物扱いとなる家庭から排出される 2 系種がある。

1 カ所で多量に排出され収集し易いのは、産業廃棄物扱いとなる廃食用油である。これらの収集については、温泉地には旅館ホテルが付帯するものなので、雲仙市小浜町では発生密度が高い地点であるといえる。

一方、一般廃棄物扱いとなる家庭から排出される廃食用油は、分別されることなくこれまで可燃ごみとして、その殆どは焼却処理されていた。そこで雲仙市と連携して、一般家庭における廃食用油の分別収集体制を構

築し、平成 21 年 10 月から開始した。収集の方法は、雲仙市役所の 7 支所に専用の回収ポリタンクを設置し、市民それぞれが開庁時間に廃食用油を持ち寄る方法で収集した。持ち寄られた廃食用油は、1ヶ月毎に雲仙市によって回収され実験原料として BDF 化した。なお、廃食用油の収集量については、それぞれの拠点毎に数量を記録しているが、季節的な変動や市民の意欲の醸成等による変動要因が大きいため、本報では具体的な数値資料を割愛する。

製造 BDF の分析結果

製造した BDF は、雲仙市のごみ収集車 1 台の燃料として利用している。この車両は、BDF 給油専用車として、BDF 用に給油チューブ等を一部改造した車両であり、BDF は 100%濃度使用(B100)している。B100 を利用する場合、B100 には強制的な品質規格が定められていないものの、B5 の原料とする B100 の JIS 規格(JIS K 2390)が定められているため、この基準値を参考とすることができる。実験製造した温泉 BDF の分析結果を表 1 に示す(平成 22 年 2 月末製造現在)。

表1 温泉 BDF の品質分析結果

項目	単位	参考基準値	
		JIS K 2390 自動車燃料 混合用脂肪酸 メチルエステル	分析結果
脂肪酸メチルエステル	質量%	96.5 以上	95.4
密度(15℃)	g/cm ³	0.860 ~ 0.900	0.884
動粘度(40℃)	mm ² /s	3.50 ~ 5.00	4.832
引火点(PM式)	℃	120 以上	166
硫黄分	質量%	0.0010 以下	0.0003未満
10%残留炭素	質量%	0.3 以下	0.65
セタン価	—	51.0 以上	53.8
硫酸灰分	質量%	0.02 以下	0.01未満
水分	mg/kg	500 以下	405
固形不純物	mg/kg	24 以下	2
銅板腐食試験(3h,50℃)	—	1以下	1
酸化安定性(110℃)	hours	当事者間の合意による	2.9
酸価	mgKOH/g	0.50 以下	0.2
ヨウ素価	—	120 以下	113
リノレン酸メチル	質量%	12.0 以下	7.2
メタノール	質量%	0.20 以下	0.01未満
モノグリセライド	質量%	0.80 以下	0.46
ジグリセライド	質量%	0.20 以下	0.35
トリグリセライド	質量%	0.20 以下	0.03
遊離グリセリン	質量%	0.02 以下	0.01未満
全グリセリン	質量%	0.25 以下	0.17
金属(Na+K)	mg/kg	5.0 以下	1未満
金属(Ca+Mg)	mg/kg	5.0 以下	1未満
リン含有量	mg/kg	10.0 以下	2未満
流動点	℃	当事者間の合意による	-10
目詰り点	℃	当事者間の合意による	-8

BDF の品質基準項目の中で最も重要であるのが、BDF の純度を示す脂肪酸メチルエステルであるが、参考基準値が 96.5%であるのに対し 95.4%とわずかに満足しなかった。また、その不純物の内訳ともなる 10%残油炭素量とジグリセライドが参考基準値をわずかに満足していない結果であったが、基準値を大幅に上回るものではなく、直ちにエンジンに影響を与えるものではないと思われる。しかし長期的間隔で影響を与えるおそれがあるため、今後も実証試験期間に反応工程を改良し参考基準を満足することが今後の課題である。流動点と目詰まり点は、氷点下温度であり、雲仙市の平野部で使用するにあたっては特別問題にならないと思われる。

ライフサイクルコスト(LCC)について

温泉余熱を利用した BDF の最大の特徴は、製造に必要となる熱エネルギーを自然エネルギーで賄う点である。そこで一般的な電熱式 BDF と製造コストを比較した。平成 22 年 3 月現在の長崎県の軽油販売単価が 118 円/L であるのに対して、製造人件費を含めた製造コストは、電熱式 BDF が 116 円/L、温泉余熱式 BDF が 110 円/L と試算される(表 2)。

ライフサイクルアセスメント(LCA)について

BDF の製造と利用は、燃料費のコスト削減や廃棄物のリサイクル・雇用の創出等が、目的の一部として含まれるが、最大の目的は GHG の削減である。GHG の削減量は、ライフサイクルアセスメント手法(LCA)によって定量評価できる。BDF の LCA については、2009 年 11 月に気候変動対策認証センターによって二酸化炭素排出量の定量方法論が提示された(JEAM004)。この方法に基づき、温泉余熱式 BDF と電熱式 BDF と軽油から排出される GHG を定量比較した(表 3)。

定量条件は、温泉余熱の効果比較を分かりやすくするために、製造規模と製造条件を一般的な電熱式と製造条件を合わせて評価をしている。評価の結果、軽油は 2.62kg-CO₂/L であるのに対して、電熱式 BDF は、0.369kg-CO₂/L(軽油比 86%削減)温泉余熱式 BDF は、0.266kg-CO₂/L(軽油比 90%削減)となった。この結果により、客観的にみても温泉余熱式は、電熱式の製造方法より、CO₂ の排出を削減することが可能であると示される。この結果から具体例として、現在運用している BDF 給油のごみ収集車の年間利用によって算出される CO₂ の削減量は 4,462kg-CO₂/年と試算される。

まとめ

この研究は、平成 20～22 年度の 3 カ年計画で実施し、平成 22 年度は実証試験の継続と改良を行い、平成 23 年以降に事業化を目指している。

本報告は、平成 20～21 年度に実施した途中経過であり、LCC・LCA 評価は平成 22 年 3 月現在の数値を基に試算しているが、温泉余熱を利用した BDF 製造は、軽油とほぼ同額の 110 円/L の製造コストであり、CO₂ 削減率は、軽油と比較して 90%削減が期待できると示された。電熱式 BDF 製造装置の比較では、GHG の削減量は 4%に止まっているが、これまで未利用であった温泉水の新たな利用方法の一つとして、地元の関連業者に与えた影響は大きいと思われ、余剰温泉水の新たな利用を考えるきっかけとなっている。

また、実業系高等学校への環境教育と知的財産教育では、高校生自ら温泉余熱式 BDF の取り組みのシンボルマークにもなりえる商標登録を出願取得するなど、波及的な効果も様々あったと思われる。

さらに温泉余熱利用型の BDF 燃料製造装置の開発は、焼却場や食品工場等の余熱が発生する場所においても応用可能性があり、ごみ集積地点における余熱利用のバイオディーゼル燃料の製造は家庭ゴミ収集体系からも応用性が高いと考えられる。

謝辞

長崎総合科学大学 藤川卓爾副学長には、温泉 BDF 研究会の会長として、研究の強力な牽引をして頂いた。

雲仙市役所には、実証試験に関して温泉源の紹介から、収集運搬体制の構築に大きな協力を頂いた。小浜温泉観光協会および雲仙観光協会には、実証試験の協力と広報活動に協力頂いた。また、雲仙市民の皆様には、廃食用油の分別収集に協力頂いている。他、多くの方々に本研究の協力・指導を頂いた。深く感謝申し上げます。

なお、この取り組みは、雲仙市が応募した環境省 ストップ温暖化「一村一品」大作戦 全国大会 2010 にて審査員特別賞を受賞した。

参考文献

- 1) 坂志朗: バイオディーゼル燃料のすべて(2006): アイピーシー出版部
- 2) 廃食用油由来のバイオディーゼル燃料の車両における利用に関する方法論(JEAM004)

<http://www.4cj.org/jver/index.html>



写真1 装置全景

表2 温泉BDFのライフサイクルコスト

大項目	中項目	小項目	単位	単量	単価	軽油	電熱式BDF	温泉BDF			
						使用量	コスト	使用量	コスト		
製造コスト	製造ランニング	廃食用油投入量					200		200		
		メタノール	L	18	3,000		36	6,000	36	6,000	
		KOH	kg	0.5	1,050		2.0	4,200	2.0	4,200	
		電気	kWh	1	12		35	420	2	24	
		ガス	Nm ³	1	550		1.1	605	0	0	
		水道	m ³	1	130		0.16	21	0.16	21	
		その他の薬品	円/200L					82		82	
		小計	円					11,328		10,327	
		製造量(収率)	率					0.9	180	0.9	180
		製造ランニングコスト小計	円/L						63		57
		製造人件費	製造人件費単価	円/時間		738		8	5,900	8	5,900
			製造人件費小計	円/L					33		33
		小計	ランニング+人件費合計	円					17,228		16,227
			製造コスト小計	円/L					96		90
収集コスト	収集ランニング	廃食用油回収車走行距離	km/日	40			40		40		
		廃食用油回収車燃費	km/L	3.7							
		収集燃料使用量	L				10.8		10.8		
		収集作業に伴う燃料費(BDF)	円					680		620	
		収集コスト小計	円/L					680		620	
			円/L					4		3	
		収集人件費	収集人件費単価	円/時間	1	730		4	2,920	4	2,920
			収集人件費小計	円					2,920		2,920
			円/L						16		16
		小計	ランニング+人件費合計	円					3,600		3,540
	収集コスト小計	円/L					20		20		
全体コスト	収集と製造コストの合計	円/L				118	116		110		

表3 温泉 BDF のライフサイクルアセスメント

	項目	単位	軽油使用時	電熱式BDF	温泉BDF	
	原料量	L-BDF		200	200	
収集時	廃食用油回収量	L-廃食用油		200	200	
	1日の収集走行距離	km		40	40	
	収集車両の燃費	km/L		3.5	3.5	
	収集走行時のCO2排出原単位	g/km		0	0	
	回収時のCO2排出量	g-CO2/L-BDF		0	0	
メタノール 使用	メタノール使用時のCO2排出量	kg-CO2/kg-CH3OH		1.38	1.38	
	メタノール使用量	kg		28	28	
	メタノール使用時のCO2排出量	kg-CO2/L-BDF		0.26	0.26	
反応熱 攪拌動力	購入電力のCO2排出係数	kg-CO2/kWh		0.387	0.387	
	ヒーターの電気使用量	kWh		35	0	
	攪拌モーターの電気使用量	kWh		1	2	
水道水 使用	反応時のCO2排出量	kg-CO2/L-BDF		0.094	0.005	
	上水のCO2排出原単位	kg-CO2/m3		0.187	0.187	
	水道使用量	m3		0.16	0.16	
製造時	水道使用時のCO2排出量	kg-CO2/L-BDF		0.0002	0.0002	
	水の量	g		160000	160000	
	水の比熱	J/g・K		4.217		
	水道水温度	°C		15		
	温水温度	°C		80		
	反応時の 温水製造	温度差	K		65	
	理論必要熱量	MJ		43.9		
	都市ガスの発熱量	MJ/Nm3		44.8		
	都市ガスの使用量	Nm3		1.0		
	都市ガスのCO2排出量	kg-CO2/MJ		0.0507		
	温水製造時のCO2排出量	kg-CO2/L-BDF		0.0150	0.0000	
	小計	製造時のCO2排出量	kg-CO2/L-BDF		0.369	0.266
	輸送時	輸送時のCO2排出量	kg-CO2/L-BDF		0	0
使用時	軽油のCO2排出原単位	kg-CO2/L-軽油	2.62			
	BDFのCO2排出原単位	kg-CO2/L-BDF		0	0	
	使用時のCO2排出量	kg-CO2/L-燃料	2.62	0	0	
補正值	BDF製造収率	率		0.9	0.9	
	BDF製造量	L-BDF		180	180	
	回収時に必要となるBDF差し引き	L-BDF		169	169	
	軽油との燃費効率補正	率	1.0	0.88	0.88	
	BDF正味製造量(軽油熱量換算)	L-BDF		148	148	
計	CO2排出合計値	kg-CO2/L	2.620	0.369	0.266	
	CO2削減量(軽油比較)	kg-CO2/L	-	2.251	2.354	
	CO2削減率(軽油比較)	%	-	86	90	

Development of a Biodiesel Fuel Production System Utilizing Residual Heat

Taiji Takeno, Keigo Higashikawa, Takamitsu Akazawa, Hideki Jinnai and Daisuke Fuchigami

Biodiesel fuel production requires heat energy. Here, a system that utilizes residual heat from natural hot springs to produce biodiesel fuel (BDF) has been developed. The system that yields approximately 4,500 tons of hot water of about 100°C per day has been installed at the Obama Hot Spring located in Unzen City, Nagasaki Prefecture in Japan. It is capable of producing 200 liters of biodiesel fuel per batch, utilizing the heat from the hot spring as its only energy source. At the same time, Unzen City has started the separate collection of used cooking oil from general households, and a recycling system based on a collection method was constructed with branch city offices acting as hubs. The biodiesel fuel, B100, which is produced is used to fuel Unzen City's garbage trucks. Upon conducting a production cost evaluation and lifecycle assessment of the hot spring BDF, the cost was estimated to be 110 yen per liter with CO₂ emissions of 0.266kg per liter. This suggested that compared to producing light diesel oil, the running cost is about the same even with the inclusion of labor costs, and the amount of CO₂ emissions can be reduced by 90%.

Keywords: Biodiesel fuel, Residual heat from hot springs, Cost evaluation, Lifecycle assessment