技術報告

伊賀市における BDF 製造による CO₂発生量削減試算 － CO₂発生係数による簡易試算の試み－

加藤 進*, 紀平 征希*, 小林 康志**
八木田 浩史***, 前田 広人*

要 旨

BDF に伴う CO₂削減量試算を CO₂発生係数によって推定した。BDF の品質は、水分と FAME 純度を除きニート基準を満足していた。年間 BDF の製造量は8256L で、これを基礎に削減 CO₂量を試算した。単純計算では21796kg-CO₂/y が削減、軽油との発熱量換算を実施すると、20381kg-CO₂/y となった。BDF の製造試薬(KOH とメタノール)を加味すると、17850kg-CO₂/y となった。電力量を考慮すると17436kg-CO₂/y まで減少した。なお、境界システムを考慮すると、17305kg-CO₂/y となった。

キーワード：BDF, CO₂削減試算, 原料, 電力量

1. はじめに

三重県中央部の伊賀市では、人口が減少、過疎化、疲弊した農林部分の活性化をするためにバイオマスタウン構想を打ち立てた。なかでもこの構想の重要な骨子が「菜の花プロジェクト」である。この伊賀「菜の花プロジェクト」では廃食油あるいは菜種からバイオディーゼル燃料（BDF）の製造を実施する部分が計画の大きな骨子の一つである。すでに、平成21年6月にBDF製造所を開所以来1年間以上が経過した。

このプロジェクトの主眼は、①農村部分の活性化あるいは都市部との交流および②地球温暖化防止（＝CO₂量の削減）である。このような活動部署（伊賀市では農林振興課）では、プロジェクトの実施によって実際に削減したCO₂量の公表を求められることが多い。しかしながら、現在のCO₂削減量計算の主流はライフサイクルアセスメント（LCA）であり、対象となる小規模事業所では容易に計算できるものではな

い。そのために、先行する「菜の花プロジェクト」や「BDF製造に伴うエコ活動」をしている団体では、BDF製造に伴う「CO₂発生削減量」としてBDF製造量に軽油のCO₂発生係数（2.64kg-CO₂/L）を乗じて報告している場合が多い。削減量把握は行政的にも重要な因子であり、web-site等に同様の試算結果が報じられている。この削減量には当然のことであるが、BDFを製造する際に利用する副原料（メタノール等）、電力量および廃グリセリン等の考慮がなされていないので、計算されたCO₂の削減量は過大評価されていることになる。

したがって、高価なソフトウェアによるLCA評価¹⁾よりも簡易的に、上記の寄与も含めてCO₂の削減量を試算する手法があれば当該従事者には便利と思われる。本報では、製造したBDFの品質を化学分析によって明らかにすると同時に、1年間の試験的運用の結果、重大なトラブルが機械に発生しないことを確認後、BDF製造原料や電力量の寄与も実測し、す

Tentative Estimation of CO₂ Reduction Amount from BDF-processing at Iga-city

* 三重大学伊賀研究拠点 Susumu KATO, Masaki KIHARA, Hiroto MAEDA

** 伊賀市農林振興課 Yasushi KOBAYASHI

*** 日本工業大学 Hiroshi YAGITA

2010年12月13日受付

2011年5月11日受理

に環境省²⁾等から報告されているCO₂の発生係数を利用して、化学的な知識があれば、容易にできるCO₂削減量の簡易試算方法を提案するものである。

2. 方 法

伊賀 BDF 研究所ではワンダーランド200型の BDF 製造機を使用している。この手法による BDF の製造工程を図 1 に示した。当所での合成法は典型的なアルカリ触媒・水洗法である。この工程は CO₂削減シナリオを考える上でも重要な部分でもあるので、若干の説明を加えておく。BDF の製造には、エステル化が必要で、この反応にメタノール (MeOH) と水酸化カリウム (KOH) を利用し、約 60℃ で加温し、1 時間エ

図 1 アルカリ触媒法による BDF 製造工程

ステル化をする。精製した BDF をグリセリンと分離後、夾雑物や副生物を除去する意味で水洗する。水洗によって BDF 層には水分が蓄積され、エンジン稼動に支障をきたすので、脱水工程でこれを除去し、孔径 2 μm のフィルターでろ過後、燃料として利用するものである。

廃油、メタノール、廃グリセリンおよび排水量等は調整マスに刻印を行い、稼働前後の変化によって使用体積を求めた。電力量の測定は本体のブレーカー（6 個）に計測器（自作）を接続し、1 サイクルに必要な量を求めた。なお、KOH の CO₂発生係数が見当たらなかったため、LCA 計算ソフトウェア (JEMAI-LCA Pro) を用いて計算した³⁾。

BDF の品質に関しては、密度（浮子式）、動粘度（B 型回転式粘度計）、酸価と水分量（電量滴定方式）、高級脂肪酸エステル濃度 (FAME) (GC/FID) で求めた。標準には混合標準を用いた。残存するトリグリセライドは HPLC/RI によって、トリオレンを標準として求めた。また、BDF と廃グリセリンの発熱量はボンベ熱量計（委託試験）で求めた。廃グリセリン中のメタノールは委託分析（GC 法）、K は HNO₃-HClO₄分解後 ICP-AES で、グリセリンは HPLC/RI で、水分は電量滴定法で実施した。表 1 には機器分析の条件をまとめた。

3. 結果と考察

3.1 BDF の品質

得られた結果を表 2 に示した。密度（15℃）の平均値は $\rho = 0.884\text{g/mL}$ であった。動粘度（40℃）も密度

表 1 機器分析の条件

HPLC グリセリン	カラム 移動相 検出器 流速	Carbohydrate アセトニトリル／水 示差屈折率 0.8mL/min	25cm×4.6mm φ = 85/15 (V/V%)
HPLC トリグリセライド	カラム 移動相 検出器 流速	Mightysil Si-60 BDF n-ヘキサン／イソプロパノール 示差屈折率 1.0mL/min	25cm×4.6mm φ = 99.6/0.4 (V/V%)
GC 脂肪酸エステル	カラム カラム温度 気化室温度 キャリアーガス H ₂ Air 検出器 スプリット比	BD-WAX He FID	30m×0.5 μm (膜厚) 220℃ (20min)→220~240℃ (10℃/min) 200℃ 30mL/min 40mL/min 200mL/min 280℃ 20

表2 製造した BDF の物性値

	密度(g/mL)	動粘度(mm ² /s)	酸価(mg-KOH/g)	水分(mg/L)	純度(%)
平成21年 7月31日	0.884	4.568	0.255	—	90.5
8月 7日	0.885	4.568	0.200	—	90.2
9月25日	0.884	4.595	0.327	680	92.1
10月10日	0.885	4.594	0.224	495	91.1
11月12日	0.885	4.589	0.243	680	93.6
平成22年 1月22日	0.884	4.599	0.222	500	90.7
3月16日	0.884	4.583	0.236	780	92.6
5月21日	0.884	4.594	0.264	853	91.4
6月 1日	0.884	4.599	0.200	870	89.7
7月 6日	0.884	4.599	0.318	882	91.3

密度 15℃測定, 動粘度 40℃測定

表3 製造した BDF の配送による CO₂発生量試算

配布先	車 種	燃費(km/L)	距離(km)*	回 数	発生CO ₂ kg
伊勢農場	三菱トラック	15	26	8	36.6
公 社	スバルサンパー **	15	17.2	15	39.9
長田友の会	ホンダ軽トラ **	10	13.2	18	55.1
計					131.6

*: 往復, **: 2.32を係数として利用, 残りは2.64を利用

同様に B100のニート基準値(混合 FAME 品質規格, JIS-K2390)内に収まっていた。酸価は大部分の試料で0.3mgKOH/g未満であり, ニート基準値内であった。BDF を1か月放置してもこの値の著しい増加は認められなかった。しかし, 水分は500~1000ppm とニート基準より2倍ほど高かった。FAME 純度も90%程度であり, 1段反応ではこれ以上純度を上げることは困難のように思えた。なお, トリグリセライドの存在量はニート基準未満であった。

施設に持ち込まれた他の BDF 製造所検体分についても同じ項目を分析した。密度, 動粘度および酸価は大部分がニート基準値以内であった。しかし FAME については, やや低い場合も認められた。なお, 傾向として家庭からの廃食用油を原料にする製造所の場合, 明瞭なトリグリセライドのピークが認められることがあった。また, 大部分の試料では水分が1000ppm を超過していた。水分については, 容器中の残存水分量が無視できず, 大部分の試料はポリ容器に採取され, これから, 分取されているので, 採取法を考える必要があるように思われた。

本施設で製造した BDF による農機具の稼働および車の走行上の問題点を聞き取りしたが大きなトラブルは見当たらなかった。したがって, この品質で十分と判断し CO₂削減試算に移った。

3.2 CO₂削減量の簡易試算法

この計算の境界については以下のように決定した。BDF 製造所で製造した BDF はその10%が BDF 車による廃食用油の収集に利用されている(したがって, カーボンニュートラルから計算しない)。82%は協力団体で, 農機具に燃料として使用されている(カーボンニュートラルから計算しない)。しかし, 製造した BDF の現地輸送には化石燃料を利用するトラックを利用している。そこで, CO₂発生量の寄与を推定するため往復距離, 燃費等から発生する CO₂を試算した。その結果を表3に示した。表3からわかるように, 往復距離が小さいことから, この寄与は年間で131kg-CO₂と比較的小さなものであった。また, 伊賀ではメタノールと水酸化カリウムは BDF 装置納入者が BDF 車で運送するのでカウントしていない。

図2には1年間の BDF 製造量変化を示した。BDF 製造にやや増減が認められる。当初は週1回の稼働であったが, 11月以降は原則として週2回の稼働を実施している。廃食油100Lを利用する1回の操作から96Lの BDF が製造される。この期間中86回の製造を行ったので, 年間 BDF 製造量は

$$96\text{L} \times 86\text{回} = 8256 \text{ (L/年)}$$

である。CO₂の発生量削減試算のためには以下に述べ

図2 平成21年6月から平成22年6月までの月間BDF製造量変化

る5つの場合を考慮することにした。すなわち、

- ①シナリオ (I) 単純計算：平成21年6月から22年6月までのBDF製造量は8256Lである。したがってこれが軽油と同レベルの燃料価値があるから、発生係数 $2.64\text{kg-CO}_2/\text{L}$ を利用すると、

$$8256\text{L} \times 2.64 = 21796\text{kg} - \text{CO}_2 \quad (1)$$

の CO_2 を削減したことになる。この近似法は、NPOや自治体で簡便であることからよく採用されている。しかし、BDFと軽油では発熱量が異なるので、これを加味しなくてはならない。

- ②シナリオ (II) 発熱量換算をした場合：発熱量(BDF： 39.7MJ/kg (実測値)と軽油： 45MJ/kg)と密度(15°C , BDF= $884\text{kg}/\text{m}^3$, 軽油^{注)}= $834\text{kg}/\text{m}^3$)を考慮すると、この値は軽油=7720Lに相当するので、

$$7720\text{L} \times 2.64 = 20381\text{kg-CO}_2 \quad (2)$$

の削減になる。さらに、BDFの製造には、KOHとMeOHが原料として不可欠である。

- ③シナリオ (III) 副原料を考慮した場合：MeOHの CO_2 発生係数= $1.5\text{kg-CO}_2/\text{kg-MeOH}$ と密度($=785\text{kg}/\text{m}^3$)、また、KOHの使用も不可欠であることからKOHの CO_2 発生係数= $4.12\text{kg-CO}_2/\text{kg-KOH}$ 、MeOHは22L/回、KOHは880g/22LMeOHの使用量を考慮すれば、

$$\begin{aligned} &20381 - 2219(\text{MeOH}) - 312(\text{KOH}) \\ &= 17850\text{kg} - \text{CO}_2 \end{aligned} \quad (3)$$

の削減になる。BDFの製造には電気も不可欠である。

- ④シナリオ (IV) 電力量を考慮した場合：図3には、各工程の使用電力量の実測値を示した。電力量を測定した結果、大きな電力が反応炉の加熱(エステル化： 60°C)と脱水(105°C)に使用されていることがわかった。さらに、送液用のポンプ、攪拌用のモーター等も電力量を実測したがこれらに比べると微々たるものであった。電力量として平均 10kWh/回 の結果を得た。中部電力⁴⁾の CO_2 発生係数= $0.481\text{kg-CO}_2/\text{kWh}$ から、

$$10\text{kWh/回} \times 86\text{回} \times 0.481 = 414\text{kg} - \text{CO}_2$$

よって、

$$17850 - 414 = 17436\text{kg-CO}_2 \quad (4)$$

の削減量になる。なお、使用する水については CO_2 発生係数= $0.58\text{kg-CO}_2/\text{m}^3$ (環境省²⁾)を用いても極めて少ないので無視した。

- ⑤シナリオ (V)：境界システムを考慮した場合：初めにも述べたように製造したBDFの運搬には燃料に化石燃料を利用しているので、この寄与分131kgを差し引くと

$$17436 - 131 = 17305\text{kg} - \text{CO}_2 \quad (5)$$

である。全体の結果を図4に示した。

したがって、BDFの製造量から単純に推定した削減量=21796 kg- CO_2 に比べて、発熱量、原料、電力量および境界システムを考慮するとその削減量=17305 kg- CO_2 になることがわかった。

以上の考察では副生するグリセリン(以下廃グリセリン)の寄与は無視されている。現実には、廃グリセリンが存在するので、この寄与を推算した。1回のBDF製造で20Lの廃グリセリンが副生する。したがって、年間では

注

・(注)石油学会：軽油標準物質

図3 工程毎の使用電気量

図4 シナリオに見た CO₂削減量変化

$$20\text{L} \times 86\text{回} = 1720\text{L}$$

となる。この廃グリセリンの組成分析は困難で、分析した範囲では、グリセリン30～40%、水分1～2%、メタノール10～13%、カリウム3～5%であった。残りの50%程度の成分は不明である。実測によれば、廃グリセリンの発熱量は25.5MJ/kgであった。したがって、廃グリセリンの密度(15℃)=1040kg/m³を考慮し、軽油との発熱量換算を実施すると、この体積は、

$$1720 \times (1040 \times 25.5 \times 0.001) / (834 \times 45 \times 0.001) = 1215 \text{ (L- 軽油)}$$

となる。

ところで、筆者らがBDFの研究を始めた平成13年頃は、この廃グリセリンは厄介物で、製造者が有償で処理を業者に委託していた。しかし、数年前における

燃料の高騰化がこの状態を変えた。すなわち、聞き取り調査によれば、現在三重県では廃グリセリンは0～10円/L程度で、処理業者が引き取っている。そして、軽油等と混ぜて、ボイラーの補助熱源として利用されているとのことである。したがって、このことを考慮すると、前述の軽油対応量にCO₂の発生係数を乗じたCO₂量は、通常の化石燃料よりもCO₂発生の低減に寄与すると考えられるので、シナリオ(V)に加える必要がある。この値(1215×2.64=3207)を加味すると、CO₂の削減試算は年間で20512kg-CO₂となる。ただし、これはあくまでも計算上で、廃グリセリンの運搬等で化石燃料を使えば、また別の計算になることは言うまでもない。

4. ま と め

伊賀BDF研究所で製造したBDFの品質および

BDF 製造に伴う CO₂削減量の簡易試算を既存の発生係数から推定した。その結果、

- 1) 1 年間にわたり試験運用したが、重大なエンジントラブルはなかった。
- 2) 密度、動粘度、酸価は全てニート基準を満足していた。しかし、水分は400~800ppm でニート基準の約 2 倍高かった。FAME 純度は90%前後であったが、トリグリセライドは基準以下であった。
- 3) 年間 BDF の製造量は8256L で、これを基礎に削減 CO₂量を試算したところ、単純計算では21796kg の CO₂量が削減された。さらに、軽油との発熱量換算を実施すると、この値は20381kg-CO₂となった。BDF の製造試薬 (KOH とメタノール) を加味すると、この値は17850kg-CO₂となった。さらに、電力量を考慮すると17436kg-CO₂まで減少した。なお、電力量の中で寄与率が大きいのは、反応工程 (60℃, 1 時間) と脱水工程 (105℃, 1 時間) であった。
- 4) モデルの境界に位置する廃食用油と BDF の運搬過程で発生する CO₂量は、131kg-CO₂で、電力量の寄

与からさらに差し引くと、17305kg-CO₂となった。

- 5) 副生するグリセリンが補助燃料として利用されていることを考慮すると、この値は増加し、20512kg-CO₂となった。

発生係数を利用すると、このようにより現実に近い条件で、複雑な LCA ソフトを利用しなくても CO₂削減量が試算できるのではないと思われる。(なお、本研究は、農水省：高度バイオマスタウン構想推進の補助金によって実施した)。

参 考 文 献

- 1) 竹内淨, 盛田宗利, 鈴木利康, 石田哲夫, 小倉隆, 井上雄一, 伊中悦子, 飯嶋渡; 廃喰油燃料化事業における二酸化炭素削減効果の LCA 的評価, 第32回環境・公害研究合同発表会予講演集 (神奈川県), 9-12, 2008.
- 2) 環境省; 環境家計簿 (2008年版) および三重県: 環境連携三重の環事業, 28-32, 2005.
- 3) (社) 産業環境管理協会; JEMAI-LCA Pro, (オンライン) <http://www.jemai.or.jp/CACHE/lca_details_lcaobj6.cfm>, (参照2010.11.01).
- 4) 中部電力; 中部電力二酸化炭素 (CO₂) 排出量の推移, (オンライン), <<http://www.jt-sys.co.jp/business/keisuu.html>>, (参照2010.11.01).