

## 論文

## 廃食油からのバイオディーゼル燃料生成のエネルギー収支分析

黒原大輔<sup>1</sup>・松島 潤<sup>2</sup>

投稿受付：2009年7月10日 受理日：2010年10月27日 WEB公開日：2010年11月2日

## 要旨

2000年代後半の原油高騰を背景に、また循環型社会構築に向けて、自動車の燃料としてバイオ燃料を使用することが注目されている。この流れの一環として、廃食油をリサイクルすることによりBDFを取り出し、自動車燃料として使用する取り組みが自治体等で行われている。本研究では、このBDFのエネルギー収支分析を行い、有効なエネルギーであるか検証を行う。山形県と京都市の取り組みを例にEPRの計算を行い、それぞれ4.9、5.7という結果を得、他のバイオ燃料と比較した結果、有効なエネルギー源であることがわかった。また、この研究の過程でBDFの生成にどれだけのエネルギー投入が必要であるかが明らかとなり、これを元にBDFの更なる効率的利用への提言を行った。

## 1. 序論

現代社会において、石油は「文明の生き血である」と言われるほどに我々の生活を支えている(石井, 2006)。これは石油無しの社会を想像すれば明白である。日本における石油の消費分野は図1のようになっている。石油が使用される分野・用途は、主に運輸、産業、民生である。特に運輸には40%程度の石油が使用される(図1)。これは、常温で液体の石油が内燃機関には最適であるからである。そして運輸システムの発達で、世界を急速に狭いものとし、現在のグローバルゼーションを支えている。また、モノ作りも石油によって成り立っている。大規模な工場は石油を動力とした建設器機で建設され、大量生産の源となった生産設備の自動化は石油で作られた電気動き、大量生産された製品は前述の運輸システムによって社会に送り出される。つまり、グローバルゼーション、大量生産といったものはすべて安価な石油の存在を前提としているのである。

そして、我々の食を支える農業も石油漬けである。広大な農地を利用する米国の機械化

農業では1kcalの食糧エネルギーを生産するのに3kcalの石油エネルギーを使用していると言われている(Pimentel and Pimentel, 1995)。農業を大規模化するにはそれを支える機械が必要であり、そして大量の化学肥料や農薬が必要である。食糧の60%を輸入に頼る日本にとってはこれらを輸送する手段も重要となる。すべて石油が存在するからこそ為し得る。

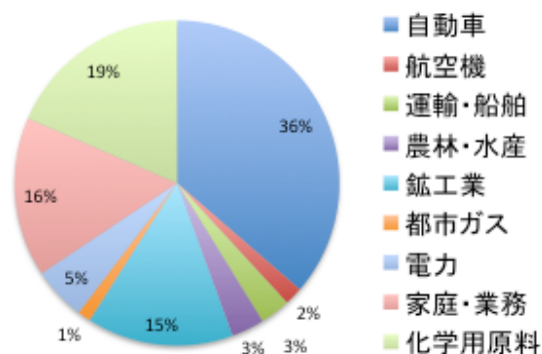


図1 日本の石油消費分野  
(資源エネルギー庁・エネルギー白書 2004)

<sup>1</sup>黒原大輔 (くろはら だいすけ)  
東京大学工学部システム創成学科  
知能社会システムコース

<sup>2</sup>松島 潤 (まつしま じゅん)  
東京大学大学院工学系研究科  
エネルギー・資源フロンティアセンター



近年、石油の生産量が需要に追いつかなくなってしまうという石油ピーク論が唱えられている (e.g., Campbell and Laherrere, 1998)。石油ピーク論とは、石油の生産量が需要に追いつかなくなってしまうということである。石油とは、数百万年前の生物の遺骸が土砂の堆積層に捕えられ、地中の高温、高圧によって炭化水素に変化したものである (e.g., Deffeyes, 2005)。石油の埋蔵量評価は概ね 2 兆バレルから 3 兆バレルの間で評価者・機関によりかなりばらついており (Tsoskounoglou et al., 2008)、結果として石油ピーク到来時期にもばらつきを生じさせている。

一方で、オイルシェールやオイルサンドを含めて考えれば石油資源量は膨大という意見もある。国際エネルギー機関 (IEA: International Energy Agency) が発行している World Energy Outlook 2008 によると、長期的な視点で回収可能な非在来型石油は合計で 6.5 兆バレルとなっている。また、代替エネルギーとして、海中に存在するウランを濃縮し原子力発電に使用すれば資源量は膨大であるなどという意見もある。しかし、これらは資源を単純に「量」の観点からしか見ていない意見である。もちろん「量」の尺度も重要であることは間違いないが、エネルギー源を見る上でこれから重要になるのは「質」である。エネルギーとして我々が使用することができるのは、濃縮された資源である。しかし、自然界では常に現象はエントロピーが増大する方向、すなわち拡散、分散、劣化の方向に向かう。これを濃縮させるには必ずエネルギーが必要であることが熱力学で証明されている。つまり、海中のウランを収集するには必ずエネルギーが必要なのだ。そのエネルギーはウランを原子力発電に使用して得られる電力に対してどの程度必要なのかを考える、それが「質」を考えるということである。また、例えばカナダのオイルサンドの生産現場では大量の天然ガスを使用している。さらに取り出した重質の油はそのままでは使用できず、水素を添加したり石油を混ぜたりしなければならぬ (McKellar et al., 2010)。つまり現在実利用に至っていない非在来型資源などは、確かに量は膨大であるが、それを使用するには大量のエネルギーが必要であり、質を評価することが重要であることがわかる。

2000 年代後半の原油高騰を背景に、自動車の燃料としてバイオディーゼル燃料 (以下 BDF: Bio Diesel Fuel) やバイオエタノールなどのバイオ燃料を使用することが注目されている (e.g., Farrell et al., 2006a; 2006b)。この流れの一環として、一般家庭あるいは飲食店から出てくる廃食油をリサイクルし、BDF として使用する取り組みが行われている。本研究では、この BDF のエネルギー収支分析を行い、

有効なエネルギーであるか検証を行う。また、BDF のエネルギー分析を行うことで、どの過程においてエネルギーが多く使用されているか、どの部分を効率化することができるかということをも明確化する。さらに、これを元に、エネルギー的観点から、BDF を効率的に利用するにはどうすべきか、ということをも提言する。

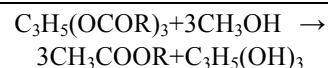
## 2. 廃食油からの BDF 生成

### 2.1 BDF とは何か

BDF とは、菜種油や大豆油などの植物油や動物の脂肪、廃食油を原料として生成されるディーゼル燃料である。日本ではオイルショック以来、植物油から BDF を製造し、ディーゼルエンジンの燃料として利用する試みが研究されてきた。運輸部門は石油で成り立っているのが現状であるが、廃食油を燃料化することにより地球温暖化防止や化石燃料からの脱却が可能であるため注目されている。BDF には以下のような利点がある (池上, 2008)。

- (1) 再生可能である: BDF の原料となるのは動植物からの油であり、自然由来であるので再生可能である。
- (2) エネルギーの観点から有用である: BDF は、軽油など一般的なディーゼル燃料と同等の発熱量がある。
- (3) 化石燃料からの脱却: 軽油やガソリンなど、従来の化石燃料からの動力源から脱却できる。
- (4) 二酸化炭素排出量を減らすことができる: BDF は植物由来であるため、カーボンニュートラルであり、二酸化炭素排出量を減らすことができる。
- (5) 大気汚染物質を排出しにくい: BDF は含酸素燃料であるため完全燃焼しやすく、SO<sub>x</sub> などの大気汚染物質の排出を減らすことができる。

次に BDF の生成方法について述べる。BDF とは、以下のように油脂とメタノールの反応によって生成する脂肪酸メチルエステルである。



BDF を生成する技術には、アルカリ触媒法、酸触媒法、酸・アルカリ触媒法、超臨界メタノール法など多くの種類があるが、現在工業プロセスとして安価で品質の良い BDF を生成できる技術はアルカリ触媒法などの一部に限られている。アルカリ触媒法においては、アルカリ触媒として水酸化ナトリウムや水酸化カリウムが使用される。この場合、BDF 生成後に触媒の除去などのために何度も洗浄を行う。

## 2.2 BDF 利用の現状

従来、廃食油は石鹼や肥料などにリサイクルされてきたが、近年のディーゼル用燃料の不足や価格高騰、また地球温暖化防止の観点から BDF の製造が注目されている。特にヨーロッパとアメリカが BDF の先進国であり、世界全体の生産量のほとんどを占めている。これらの地域では、1990 年代前半から休耕地などを利用して菜種や大豆を栽培し、それらから得られる植物油を BDF の原料としていた。2004 年の年間生産量は EU で約 217 万 kL であり、そのうちの約 115 万 kL をドイツが占めている。アメリカの生産量は約 9.5 万 kL となっている。図 2 に EU での生産量の経過をグラフで示す。

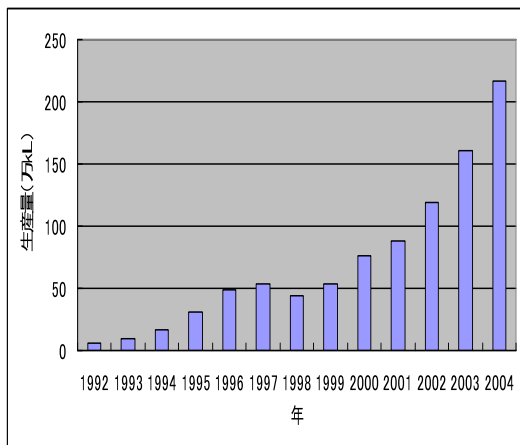


図 2 EU における BDF 生産量の推移 (池上, 2008)

一方、日本国内でも BDF の利用が注目されており、特に廃食油からの製造が各地で取り組まれるようになった。京都市では日量 5,000L の製造能力を持っており比較的大規模であるが、その他ではおおむね日量 100L から 800L の製造能力であり、小規模であると言える。日本国内での 2004 年の BDF 生産量は約 5,000kL となっている。

## 2.3 分析対象とする団体

本研究では、小規模プラントの例として山形県の取り組みを、大規模プラントの例として京都府の取り組みを取り上げ、エネルギー収支分析を行う。この節では、この 2 府県の取り組みを紹介する。

### 2.3.1 山形県の取り組み

本研究では、小規模プラントの例として山形県の東根市外二市一町共立衛生処理組合 (以下愛称：クリーンピア共立) の取り組みを例にエネルギー収支分析を行う。以下では

まず、この組合の取り組みを紹介する。

クリーンピア共立では循環型社会の構築に向けてバイオマスの利活用について検討を行った結果、BDF 製造に着目し、事業を始めることとした。そして平成 17 年 8 月より本格稼働を開始した。表 1 に平成 18 年の製造能力、実績を示す(東根市外二市一町共立衛生処理組合, 2008)。クリーンピア共立では BDF 生成装置として株式会社エムエスデーの BDK-200 を使用しているが、この装置の詳細を表 2 に示し、その概観を図 3 に示す(株式会社エムエスデー, 2009)。さらに、BDF 生成フローを図 4 に示す。なお、クリーンピア共立では、BDF 生成において発生する廃液は隣接する、し尿処理施設において酸性廃水の処理を行っている。さらに、反応副生成物であるグリセリンは、焼却炉において焼却処分を行っている。ランニングコストについて、平成 18 年に実際に使用した材料の名前、量については表 3 に示す。なお、生成した BDF は、し尿収集車や、市町連絡・視察研修用車に使用されている。平成 19 年度の平均燃費は、市町連絡・視察研修用車：7.27 km/L、し尿収集車：4.25 km/L となっている(東根市外二市一町共立衛生処理組合, 2008)。

表 1 平成 18 年におけるクリーンピア共立の製造状況

製造能力	日量 200L
廃食油処理量	38,200L
製品量	33,755L
稼働率	約 52%

表 2 BDK-200 の詳細

生成容量	200L
生成方式	バッチ式
寸法	1,500(幅) × 1,045(奥行き) × 1,295(高さ)mm



図 3 BDF 生成装置の外観 (株式会社エムエスデー, 2009)

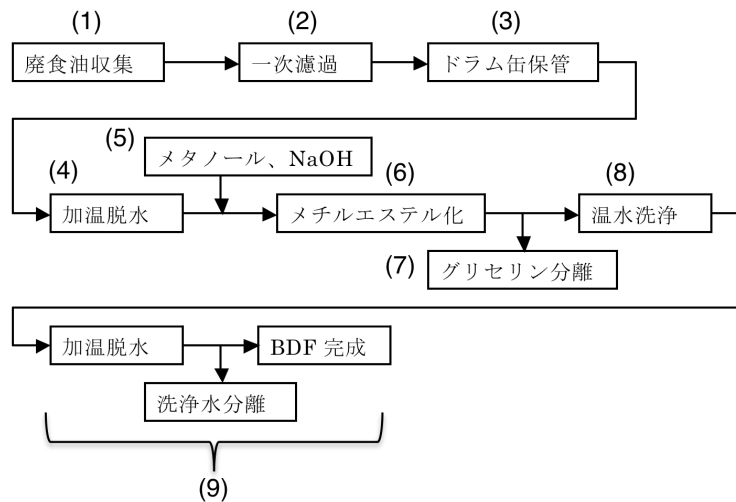


図4 クリーンピア共立におけるBDF生成のフロー図

- (1) 廃食油の収集を行う。家庭では油こしきで天かすなどを取り除いた油をペットボトルなどの容器に入れ、燃えるごみの収集日にステーションに排出する。そして燃えるごみ収集車のサイドスペースの箱を利用し、収集を行う。
- (2) 回収した廃食油をドラム缶の上部に設置した濾過用の布で一次濾過を行う。
- (3) 濾過された油は、生成用の200Lが溜まるまでドラム缶で保管する。
- (4) 200L溜まり次第、これを脱水槽に投入し、加熱する。
- (5) 加熱終了後、メタノール(36L)に水酸化ナトリウム(1.4kg)を完全に溶解させる。
- (6) 完全溶解させた液を反応槽に投入する。
- (7) 反応時間経過後に、反応副生成物であるグリセリンを分離する。
- (8) 温水で生成したBDFを洗浄する。
- (9) 加熱して生成したBDFを脱水する。洗浄水を分離するとBDFが完成する。

 表3 平成18年度のクリーンピア共立におけるBDF生成のランニングコスト  
(東根市外二市一町共立衛生処理組合, 2008)

項目	備考、使用量
水酸化ナトリウム	324.7kg
メタノール	6,876L
塩酸	75.6L
流動点降下剤	64L
電気料金	9,343.4kWh

### 2.3.2 京都市の取り組み

本研究では、大規模プラントの例として京都府京都市の取り組みを例にエネルギー収支分析を行う。ここではこの京都市の取り組みを紹介する。

京都市では、地球温暖化防止京都会議の開催に先立ち、平成9年11月から廃食油からのBDFをごみ収集車に供給開始した。また、平成12年4月からは一部の市バスにも供給を開始した。そして、地域内での廃食油の循環利用システムを確立し、BDFの安定供給を目的とし、平成14年度からは廃食油燃料化施設の整備に取り組み始めた。この結果、平成16年6月から日量5,000LのBDF製造能力を持つ大規模なプラントが稼働し始めた。表4に京都

市の平成19年度のBDF製造能力、実績を示す。京都市は日本最大のBDF製造量を誇っており、技術的にもBDFの品質基準を規定した京都暫定規格を定めるなど日本におけるBDF製造のフロンティアを走っていると言える。表5に京都市の生成プラントの概要を示す。工程ごとにタンクがあり、ほとんどの工程が自動化されている。図5にBDF生成フローを示す。京都市では、BDF生成によって排出させる洗浄廃液は焼却炉で家庭ごみと一緒に焼却処理をしている。また、廃グリセリンは、焼却炉の助燃剤として利用し、サーマルリサイクルを行っている。平成19年に実際に使用した材料の名前、量については表6に示す。生成したBDFは、平成18年時点でごみ収集

車 220 台と市バス 95 台に使用されている。収集車には B100 (100%BDF 燃料)、市バスには B20 (軽油に 20%の BDF を混合) を使用している。

表 4 京都市の BDF 製造状況

製造能力	日量 5,000L
廃食油処理量	1,538,297L
製品量	1,514,871 L
稼働率	約 83%

表 5 京都市の BDF 生成施設の概要(京都市環境局適正処理施設部施設整備課, 2009)

建設場所	京都市南部クリーンセンター構内	約 1,900 m <sup>2</sup>
生産規模	BDF	5,000L / 1 日
	軽油混合燃料 (軽油 : BDF = 80 : 20)	3,000L / 1 日
プラント設備	設計施工	日立造船株式会社
主要設備	原料貯蔵タンク	容量 51,000L
	前処理槽	容量 10,240L
	反応分離槽	容量 10,240L
	精製槽	容量 10,240L
	メタノール貯蔵タンク	容量 14,500L (地下式)
	軽油貯蔵タンク	容量 14,500L (地下式)
	軽油混合器	ラインミキサー
	製品貯蔵タンク	縦型円筒, 容量 57,000L
	製造補機設備	ボイラ, 空気圧縮機, 窒素発生器ブラインチャラー, 冷却塔

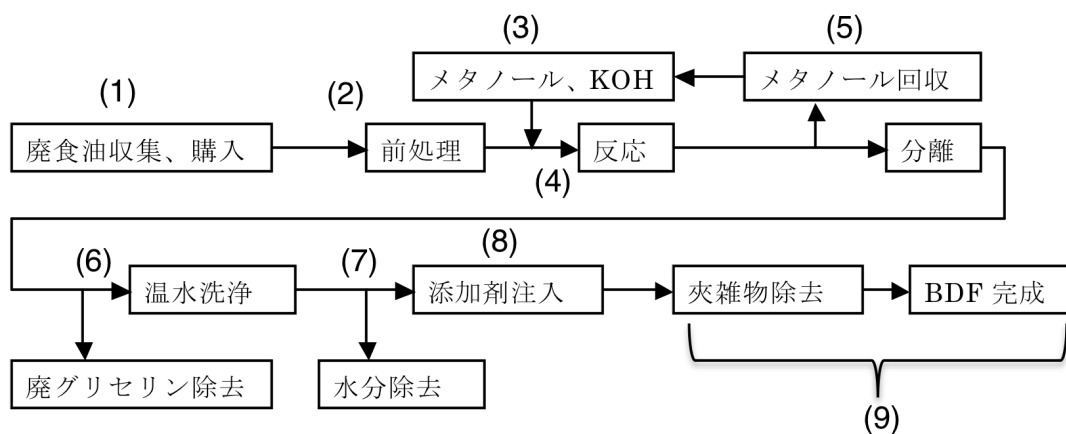


図 5 京都市の BDF 生成のフロー図

(1) 廃食油の収集を行う。京都市では、平成 9 年 8 月より廃食油の回収を開始し、平成 18 年現在、回収拠点は約 1,000 か所にもなっている。手順は、市民団体の役員宅前や小中学校、商業施設などに設けられた回収拠点にポリタンクを設置し、月に 1 度程度廃食油を各家庭から回収している。このポリタンクをボランティアがドラム缶まで運搬し、そのドラム缶の回収は京都市が委託した民間業者が行っている。平成 19 年度の家庭系回収量は 160,897L となっている。

また、京都市では家庭からの回収以外に、飲食店などの業務系からも廃食油を購入している。この場合、各飲食店において廃食油を回収する。平成 19 年度の事業系からの回収量は 1,377,400L となっている。

- (2) 前処理を行う。この処理によって、廃食油に含まれる水分や不純物を取り除く。
- (3) 廃食油にメタノールと触媒の水酸化カリウムを加え、メチルエステルを生成させる。反応副生成物としてグリセリンも生成される。
- (4) グリセリンを分離し、排出する。
- (5) グリセリンの分離後、メチルエステル中に残っているメタノールを回収し、再利用する。
- (6) 洗浄水を加え、メチルエステル中に含まれるグリセリンや触媒などの不純物を除去する。
- (7) 比重の差を利用して洗浄水とメチルエステルを分離させ、洗浄水を排出する。
- (8) 流動点を降下させるための添加剤を加える。
- (9) 最後に、精製したメチルエステル中に含まれる夾雑物をフィルターによって取り除く。BDF が完成する。

表 6 平成 19 年の京都市の BDF 生成のランニングコスト

項目	使用量
電気	301, 017kWh
水酸化カリウム	11, 290kg
灯油	42, 871L
メタノール	185, 670kg

### 3. エネルギー収支分析

本研究では、エネルギー収支分析を行うにあたり、EPR (Energy Profit Ratio) という指標を用いる。EPR とは、何らかの方法で社会に供給されるエネルギーと、それを生産するために直接的、間接的に投入された全エネルギーの比であり、エネルギー生産の効率性を表す指標であり以下のように定義される。

$$\text{EPR} = \frac{\text{出力エネルギー}}{\text{入力エネルギー}}$$

ここで、出力エネルギーとは生産されたエネルギーを表す。一方入力エネルギーは、その資源のライフサイクル全体に必要なエネルギーの合計を指し、例えば本研究においてはプラントや設備の建設、廃棄物の処理、反応に必要な材料を生産するためのエネルギーなどがこれにあたる。EPR が 1 を超えると資源として意味があり、値が大きいほど効率的な資源であると言える。このように、EPR を用いて各種エネルギーを定量的に評価することで、それぞれのエネルギーの優位性や、解決すべき課題を客観的に明らかにすることができる。近年、EPR を用いた各種エネルギーの収支分析は盛んに行われているが、入力エネルギーをどこまで含めるべきかという境界が曖昧であることが指摘される。以下に、含める入力エネルギーについて考察する。

Gately (2007)によると、入力エネルギーは 4 つの層に分けることができる。第 1 層は、直接的な材料のみを含めるものである。直接的な材料とは、新しいエネルギーの生産時に使

用される材料を指す。次に、第 2 層とは、直接的な材料に加えて、建設や他の産業製品、作業にかかるエネルギーを含めたものである。第 3 層は、第 2 層に加えて、政府用役や労働にかかるエネルギーを含めたものであり、第 4 層は第 3 層に加えて環境補修を含めたものである。

本研究では、第 3 層の政府用役や労働にかかるエネルギー以外のエネルギーを入力エネルギーとする。すなわち、BDF 生成の際に排出される廃液の処理エネルギーなどについても考慮する。

さらに、本研究では、入力エネルギーを計算するにあたり、エネルギー原単位というデータを用いた。エネルギー原単位とは、ある素材を単位量製造するのにどれだけのエネルギーが必要であるかという指標である。例えば、鉄鋼を製造するためには鉄鉱石を採掘し、工場まで輸送した後に工場内で銑鉄、製鋼などのプロセスが必要であるが、エネルギー原単位はこれらのエネルギーをすべて合計し、単位量当たりのエネルギー量に換算したものである。例えば、プラント建設や BDF 製造に必要なエネルギーは以下のように求めることができる。

$$\text{素材エネルギー} = \text{エネルギー原単位} \times \text{素材量} \times \text{補完係数}$$

最後に、エネルギー収支分析の考え方を廃食油のリサイクルに適用する場合における注

意点を述べておきたい。EPR は元来、自然界に存在するエネルギー源に対して、それを社会に利用できるまでに要したエネルギーと、最終的に得られたエネルギーの比であるが、廃食油をリサイクルする場合は、人間が廃棄した状態においてエネルギー源が潜在していると考えるため、通常のエPR 分析の考え方と少し異なることに注意されたい。

### 3.1 山形県での取り組みのエPR

#### 3.1.1 出力エネルギーの計算

BDF の出力エネルギーは、BDF の発熱量とする。これは軽油の発熱量と同程度であり(池上, 2008)、38.2 MJ/L である。平成 18 年の BDF の生産量は 33,755L であるから出力エネルギーは、以下となる。

$$33,755 \times 38.2 = 1,289,441 \approx \mathbf{1,290,000 \text{ MJ}}$$

出力エネルギーの計算結果を以下の表 7 に示す。

表 7 クリーンピア共立における BDF 生成の出力エネルギー

エネルギー原単位	38.2 MJ/L
年間生産量	33,755L
BDF 発熱量	1,290,000 MJ
合計	1,290,000 MJ

#### 3.1.2 入力エネルギーの計算

以下にそれぞれエネルギー量の計算結果を示す。

\* 電力、水酸化ナトリウム、メタノール、塩酸

電力、水酸化ナトリウム、メタノール、塩酸のそれぞれの製造エネルギーについて以下のように計算を実施した。

まず、電力については、平成 18 年の消費電力は 9,343.4 kWh であった。また、電力の発電効率を考慮すると 1 kWh = 2,150 kcal = 9.0MJ であるから、電力のエネルギーは、以下となる。

$$9,343.4 \times 9.0 = 84,090.6 \approx \mathbf{84,000 \text{ MJ}}$$

次に、水酸化ナトリウムを製造するのに必要な電力は 2,449 kWh/t である(日本ソーダ工業会, 2009)。水酸化ナトリウムは塩化ナトリウムの電気分解で製造されるため、この電力エネルギーが水酸化ナトリウムの製造エネルギーであるとする。平成 18 年に使用した水酸化ナトリウムは 324.7 kg = 0.3247 t であるから、これを製造するための電力は、

$$2,449 \times 0.3247 = 795.1903 \text{ kWh}$$

であり、1 kWh = 9.0 MJ であるからエネルギー量は、

$$795.1903 \times 9.0 = 7,156.7127 \approx \mathbf{7,200 \text{ MJ}}$$

となる。

メタノールのエネルギー原単位は 6.714 Gcal/t であり(東洋エンジニアリング株式会社, 1999)、平成 18 年のメタノール使用量は 6,876 L である。メタノールの比重は 0.79 であるからこの重さは、

$$6,876 \times 0.79 = 5,432.04 \text{ kg} = 5.43204 \text{ t}$$

である。したがってメタノールの製造エネルギーは、

$$5.43204 \times 6.714 = 36.470716 \text{ Gcal}$$

となり、1 cal = 4.1868 J であるから、単位を変換すると、

$$36.470716 \times 4.1868 = 152.69559 \text{ GJ}$$

$$\approx \mathbf{150,000 \text{ MJ}}$$

となる。

最後に、塩酸については、平成 18 年の塩酸の使用量は 75.6 L = 75,600 cm<sup>3</sup> である。塩酸の密度は 1.18 g/cm<sup>3</sup> であるから、使用した塩酸の重量は、

$$75,600 \times 1.18 = 89,208 \text{ g} = 0.089208 \text{ t}$$

となる。塩酸のエネルギー原単位は 3,000Mcal/t であるから(天野治, 2008)、塩酸製造にかかるエネルギーは、

$$0.089208 \times 3,000 = 267.624 \text{ Mcal}$$

となる。1cal = 4.1868 J であるから、単位を変換すると、

$$267.624 \times 4.1868 = 1,120.4881 \approx \mathbf{1,120 \text{ MJ}}$$

となる。

以上をまとめたものを表 8 に示す。

表 8 クリーンピア共立における電力、水酸化ナトリウム、メタノール、塩酸の入力エネルギー

材料	年間使用量	エネルギー原単位	単位換算係数	熱量換算値
電力	9,343.4(kWh)	--	9.0(MJ/kWh)	84,000(MJ)
水酸化ナトリウム	0.3247(ton)	2,449(kWh/ton) <sup>1)</sup>	9.0(MJ/kWh)	7,200(MJ)
メタノール	5.43204(ton)	6.714(Gcal/ton) <sup>2)</sup>	4,186.8(MJ/Gcal)	150,000(MJ)
塩酸	0.089208(ton)	3,000(Mcal/ton) <sup>3)</sup>	4.1868(MJ/Mcal)	1,120(MJ)

<sup>1)</sup> 日本ソーダ工業会, 2009

<sup>2)</sup> 東洋エンジニアリング株式会社, 1999

<sup>3)</sup> 天野, 2008

### \* 作業室建設

作業室建設に使用された主な材質名、量は以下の表 9 の通りである（クリーンピア共立からのデータに基づいている）。作業室建設に使用されたエネルギー量についての結果を表 9 に示す。

表 9 クリーンピア共立における作業室建設の入力エネルギー

材料	使用量	単位変換係数	エネルギー原単位	熱量換算値
コンクリート	12.7 (m <sup>3</sup> )	--	1,099,400 (kcal/ m <sup>3</sup> )	13,962,380 (kcal)
鉄筋	407 (kg)	--	5,657 (kcal/kg)	2,302,399 (kcal)
グラスウール	8.7 (m <sup>3</sup> )	10 (kg/ m <sup>3</sup> )	220,000 (kcal/kg)	19,140,000 (kcal)
木材	6.183 (m <sup>3</sup> )	--	68,623 (kcal/ m <sup>3</sup> )	424,296.009 (kcal)
合板	0.42 (m <sup>3</sup> )	--	433,794 (kcal/ m <sup>3</sup> )	182,193.48 (kcal)
アスファルトルーフィング	0.057 (m <sup>3</sup> )	1,047.619 (kg/ m <sup>3</sup> )	22,000 (kcal/kg)	1,313,714.226 (kcal)
プラスター	0.9675 (m <sup>3</sup> )	700 (kg/ m <sup>3</sup> )	2,043 (kcal/kg)	1,383,621.75 (kcal)
モルタル	1.47 (m <sup>3</sup> )	--	670,000 (kcal/ m <sup>3</sup> )	984,900 (kcal)
アルミニウム	300 (kg) (仮定)	--	10,528 (kcal/kg)	3,158,400 (kcal)
塩化ビニル	500 (kg) (仮定)	--	9,810 (kcal/kg)	4,905,000 (kcal)
ガラス	200 (kg) (仮定)	--	5,410 (kcal/kg)	1,082,000 (kcal)
合計 (kcal)	--	--	--	48,838,904.465 (kcal)
合計 (MJ)	--	--	--	204,478.725214062 (MJ)

\* 各材質のエネルギー原単位（室井ら，1993）

### \* 設備

クリーンピア共立で BDF 生成のために使用している設備名と重量は表 10 のとおりである。

表 10 クリーンピア共立での設備一覧

電気温水器	22 kg
ペレットストーブ	43 kg
インラインファン	6.5 kg
局所排気装置	18 kg
床排水ポンプ	28 kg
pH 計	0.33 kg
BDF 生成装置	200 kg
加温脱水機	200 kg

ここでは、これらの設備の材質はすべて鉄であると仮定する。鉄のエネルギー原単位は 7,000Mcal/t である（天野，2008）。また、寿命は 10 年であるとし、1 年あたりの設備エネルギーを求める。設備は材料である鉄を製造するだけでなく、その鉄を加工し機械に仕上げるための加工エネルギーも必要である。この加工エネルギーは材料エネルギーの 30% であるとする。

以上のことから、これらの設備を製造するためのエネルギーは、 $0.51783 \times 7,000 =$

$3,624.81$  Mcal となり、 $1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J}$  であるから単位を変換すると、 $3,624.81 \times 4.1868 = 15,176.354 \text{ MJ}$

となる。これに加工エネルギー 30% を考慮すると、 $15,176.354 \times 1.3 = 19,729.26 \text{ MJ}$  となり、寿命 10 年であるから 1 年あたりのエネルギーは、

$$19,729.26 \div 10 = 1,972.926 \approx \mathbf{2,000 \text{ MJ}}$$

となる。

### \* 廃液処理

廃液を処理するのに使用しているし尿処理施設の動力源は電力である。し尿処理施設で使用した電力は、平成 19 年で 3,119,870 kWh であり、このし尿処理施設の処理実績は平成 19 年で 24,607 kL である。したがって、このし尿処理施設で処理している液体 1kL 当たりの電力使用量は、 $3,119,870 \div 24,607 = 126.7879 \text{ kWh}$  である。BDF 生成過程において処理した廃液の量は平成 18 年で 7.64 kL であるため、これを処理するのに必要な電力は、 $126.7879 \times 7.64 = 968.6596 \text{ kWh}$  となる。 $1 \text{ kWh} = 3.6 \text{ MJ}$  であるから、廃液処理に必要なエネルギーは、 $968.6596 \times 3.6 = 3,487.17456 \approx 3,487 \text{ MJ}$  となる。以上をまとめて表 11 に示す。



表 11 クリーンピア共立における廃液処理のエネルギー

	電力使用量	単位変換係数	熱量換算値
廃液処理	968.6596 (kWh)	9.0 (MJ/kWh)	8,717.9364 (MJ)

\* 無視するエネルギー

(1) 廃食油収集エネルギー

クリーンピア共立では、廃食油の収集はごみ収集と同時にっており、廃食油収集のために特別に収集車などを用意しているということではないため無視する。

(2) グリセリン廃棄エネルギー

クリーンピア共立では、副生成物であるグリセリンをごみ焼却炉で焼却処分しているとのことだが、グリセリン自体が可燃性の物質であるため焼却エネルギーはかからないとする。

(3) 流動点降下剤

BDF は冬季に気温が低くなると、流れが悪くなることもあるため流動点降下剤を添加する。この流動点降下剤のエネルギーは本研究では無視する。

以上の項目を総合した計算結果を表 12 に示す。また、図 6 にクリーンピア共立における各入力エネルギーの全体に占める割合を示す。

図 6 より、メタノール製造に投入するエネルギーが支配的であることがわかる。表 12 より、出力エネルギーが 1,290,000 MJ、入力エネルギーが 264,020 MJ であるため、これらを EPR の定義式に代入すると、EPR は以下となる。

$$EPR = 1,290,000 \div 264,020 = 4.8859934 \approx 4.9$$

表 12 クリーンピア共立における BDF 生成の入力エネルギー

電力	84,000 MJ
水酸化ナトリウム	7,200 MJ
メタノール	150,000 MJ
塩酸	1,120 MJ
作業室建設	11,000 MJ
設備	2,000 MJ
廃液処理	8,700 MJ
合計	264,020 MJ

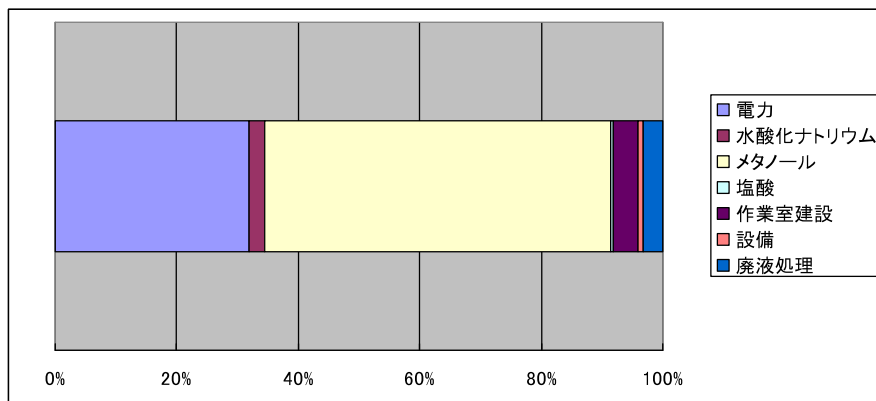


図 6 クリーンピア共立における入力エネルギーの全体に占める割合

## 3.2 京都市での取り組みの EPR

### 3.2.1 出力エネルギーの計算

京都市では、副生成物であるグリセリンをごみ焼却炉の助燃剤として使用してサーマルリサイクルを行っているため、これも出力エネルギーとして算入することにする。したがって、

(ア) BDF 発熱量 + グリセリンの発熱量

(イ) BDF 発熱量のみ

の 2 種類の出力エネルギーについて EPR を算出する。

\* BDF 発熱量

山形県での計算と同様、BDF の出力エネルギーは、BDF の発熱量とし、38.2 MJ/L である。平成 19 年度の BDF の生産量は 1,514,871L であるから出力エネルギーは、

$$1,514,871 \times 38.2 = 57,868,072 \approx 57,900,000 \text{ MJ}$$

となる。

\* 廃グリセリンの発熱量

グリセリンは、5,000L の BDF 生成で 800L

が副生成物として排出される(池上詢, 2008)。平成 19 年度の BDF 生成量は 1,514,871L であるから 1 年あたりの廃グリセリン量は、

$$1,514,871 \div 5,000 \times 800 = 242,379.36 \text{ L}$$

となる。廃グリセリンの密度は 1,260kg/m<sup>3</sup> であるから(三重県環境森林部資源循環室, 2005)、重量に直すと、

$$242,379.36 \times 1,260 \div 1,000 = 305,397.99 \text{ kg}$$

となる。廃グリセリンの発熱量は 25 MJ/kg であるから(山田章ほか, 2007)1 年あたりの廃グリセリンのサーマルリサイクル発熱量は、

$$305,397.99 \times 25 = 7,634,949.7$$

$$\approx \mathbf{7,600,000 \text{ MJ}}$$

となる。表 13 に出力エネルギーの計算結果を示す。

表 13 京都市における BDF 生成の出力エネルギー

BDF 発熱量	57,900,000 MJ
廃グリセリン発熱量	7,600,000 MJ
合計	65,500,000 MJ

### 3.2.2 入力エネルギーの計算

以下にそれぞれエネルギー量の計算結果を示す。

\* 電力、水酸化カリウム、メタノール、灯油

電力、水酸化カリウム、メタノール、灯油の製造エネルギーについての計算結果を表 14 に示す。

表 14 京都市における電力、水酸化カリウム、メタノール、灯油の入力エネルギー

	年間使用量	エネルギー原単位	単位換算係数	熱量換算値
電力	301,017(kWh)	--	9.0(MJ/kWh)	2,700,000(MJ)
水酸化カリウム	11.29(ton)	2,449(kWh/ton) <sup>1)</sup>	9.0(MJ/kWh)	250,000(MJ)
メタノール	185.67(ton)	6.714(Gcal/ton)	4,186.8(MJ/Gcal)	5,219,000(MJ)
灯油	42,871(L)	8,900(kcal/L) <sup>2)</sup>	0.0041868(MJ/kcal)	1,600,000(MJ)

<sup>1)</sup> 水酸化ナトリウムと同じであると仮定

<sup>2)</sup> 天野(2008)

以下では、それぞれの概略について述べる。

まず電力については、プラントの運営に使用した平成 19 年度の総電力量は、301,017 kWh であり、1 kWh = 9.0 MJ であるため、エネルギー量は、

$$301,017 \times 9.0 = 2,709,153 \approx \mathbf{2,700,000 \text{ MJ}}$$

となる。

次に水酸化カリウムは、水酸化ナトリウムと化学的性質が非常に似ており、工業的製法も水酸化ナトリウムは塩化ナトリウムの電気分解、水酸化カリウムは塩化カリウムの電気分解と、非常に似ているため、エネルギー原単位は水酸化ナトリウムと同じであると仮定する。平成 19 年度の水酸化カリウムの使用量は 11,290 kg = 11.29 t であり、エネルギー原単位は 2,449 kWh/t であるから、水酸化カリウムを製造するのにかかるエネルギーは、

$$11.29 \times 2,449 = 27,649.21 \text{ kWh}$$

となり、1 kWh = 9.0 MJ であるから、

$$27,649.21 \times 9.0 = 248,842.89 \approx \mathbf{250,000 \text{ MJ}}$$

となる。

メタノールについては、メタノールのエネルギー原単位は 6.714 Gcal/t であり、平成 19 年度の水酸化カリウム使用量は 185,670 kg = 185.67 t である。したがってメタノールの製造エネルギーは、

$$185.67 \times 6.714 = 1,246.5883 \text{ Gcal}$$

となり、1 cal = 4.1868 J であるから、単位を変換すると、

$$1,246.5883 \times 4.1868 = 5,219.2158 \text{ GJ} \\ = 5,219,215.8 \text{ MJ} \approx \mathbf{5,219,000 \text{ MJ}}$$

となる。

最後に灯油については、灯油のエネルギー原単位は 8,900 kcal/L であり(天野, 2008)、平成 19 年度の水酸化カリウム使用量は 42,871 L である。したがって灯油の製造エネルギーは、

$$42,871 \times 8,900 = 381,551,900 \text{ kcal} \\ = 381,551.9 \text{ Mcal}$$

であり、1 cal = 4.1868 J であるから、単位を変換すると、

$$381,551.9 \times 4.1868 = 1,597,481.4 \\ \approx \mathbf{1,600,000 \text{ MJ}}$$

となる。

\* プラント、設備

プラント、設備の建設エネルギーは、

- (1) 管理棟、製造棟の建設エネルギー
  - (2) BDF 製造施設の敷地内のコンクリート舗装にかかるエネルギー
  - (3) 主要タンクの製造エネルギー
- の合計エネルギーであるとし計算を行った。表 15 に計算結果を示す。

表 15 京都市におけるプラント、設備の入力エネルギー

	使用量	エネルギー原単位	単位換算係数	熱量換算値
管理棟・製造棟	871.02 (m <sup>2</sup> )	8,950 (MJ/ m <sup>2</sup> ) <sup>1)</sup>	--	7,795,629 (MJ)
コンクリート舗装	285 (m <sup>3</sup> )	1,099,400 (kcal/ m <sup>3</sup> ) <sup>2)</sup>	0.0041868 (MJ/kcal)	1,311,845.9 (MJ)
主要タンク	9,588 (kg)	10,040 (kcal/kg) <sup>3)</sup>	0.0041868 (MJ/kcal)	403,036.1 (MJ)

<sup>1)</sup> 鈴木ら (1995)

<sup>2)</sup> 天野 (2008)

<sup>3)</sup> 天野 (2008), 材質はステンレス。

以下に、それぞれの概略を述べる。

(1) 管理棟、製造棟の建設エネルギー

BDF 生成施設内には、生成を管理する建物と、実際の生成を行う建物がある。これら 2 つの建設エネルギーを計算する。

管理棟と製造棟はそれぞれ延べ床面積が 406.34 m<sup>2</sup>、464.68 m<sup>2</sup> の鉄骨製の建物である。これらの建設にかかるエネルギーは、一般の事務所ビルの建設エネルギーと同等であると仮定する。一般の事務所用ビルの建設エネルギーは、8,950 MJ/ m<sup>2</sup> であるため(鈴木ほか, 1995)、管理棟と製造棟の建設エネルギーは、

$$(406.34+464.68) \times 8,950 = 7,795,629 \\ \approx 7,800,000 \text{ MJ}$$

となる。

(2) BDF 製造施設の敷地内のコンクリート舗装にかかるエネルギー

BDF 製造施設の敷地面積は 1,900 m<sup>2</sup> であり、コンクリートの厚さは 150 mm であると仮定する。このとき、コンクリートの量は、

$$1,900 \times 150 \div 1,000 = 285 \text{ m}^3$$

となる。コンクリートのエネルギー原単位は 1,099,400 kcal/ m<sup>3</sup> であるから(天野, 2008)、コンクリート舗装にかかるエネルギーは、

$$285 \times 1,099,400 = 313,329,000 \text{ kcal} \\ = 313,329 \text{ Mcal}$$

となり、1 cal = 4.1868 J であるから単位の変換を行うと、

$$313,329 \times 4.1868 = 1,311,845.8 \\ \approx 1,300,000 \text{ MJ}$$

となる。

(3) 主要タンクの製造エネルギー

主要タンクはステンレス製である。ここでは各タンクに使用されているステンレスの量を推定し、タンク製造にかかるエネルギーを計算する。

まず、消防法には、危険物を貯蔵するタンクは容量が 2,000 L を超える場合、タンクに使用されるステンレスの厚さは 3.2 mm 以上で

なければならない、とある。このような場合、ステンレスの厚さは 4.0 mm とするケースが多いため、ここでは、タンクに使用されるステンレスの厚さは 4.0 mm であると仮定する。また、タンクの形状は円筒形であると仮定し、底面である円の直径と円筒の高さが等しいとして計算する。すなわち、底面の円の半径を  $r$  とすると、体積が  $2\pi r^3$ 、表面積が  $6\pi r^2$  と表わされる。以下の表 16 に主要タンクの容量を示す。

表 16 京都市における主要タンクの一覧(京都市環境局適正処理施設部施設整備課, 2009)

原料貯蔵タンク	容量 51,000L
前処理槽	容量 10,240L
反応分離槽	容量 10,240L
精製槽	容量 10,240L
メタノール貯蔵タンク	容量 14,500L
軽油貯蔵タンク	容量 14,500L
製品貯蔵タンク	容量 57,000L

表 5 に示したように、51,000 L のタンクが 1 つ、10,240 L のタンクが 3 つ、14,500 L のタンクが 2 つ、57,000 L のタンクが 1 つある。以下に 52,000 L のタンクのステンレスの体積の計算結果を示す。

51,000 L = 51 m<sup>3</sup> であり、体積は  $2\pi r^3$  と表わせるため、 $2\pi r^3 = 51$  となり、これを解くと  $r = 2.009694771$  となる。これを表面積の公式  $6\pi r^2$  に代入すると、表面積 = 76.13096384 m<sup>2</sup> となる。ステンレスの厚さは 4 mm であるから、使用したステンレスの体積は、 $76.13096384 \times 4 \div 1000 = 0.304523855$  m<sup>3</sup> となる。

同様にして 10,240 L のタンク、14,500 L のタンク、57,000 L のタンクについて使用したステンレスの体積を求めると、それぞれ 0.104417792 m<sup>3</sup>、0.131669909 m<sup>3</sup>、0.327962689 m<sup>3</sup> となるため、全タンクの総ステンレス量は、 $0.304523855 + 0.104417792 \times 3 + 0.131669909 \times 2 + 0.327962689 = 1.209079739$  m<sup>3</sup> となる。ステンレス (SUS304) の密度は 7,930 kg/ m<sup>3</sup> であるから、重量は、 $1.209079739 \times 7,930 =$

9,588.00233 kg となる。ステンレスのエネルギー原単位は 10,040 kcal/kg であるから(天野, 2008)、ステンレスのエネルギー量は、 $9,588.00233 \times 10,040 = 96,263,543.4$  kcal = 96,263.5434 Mcal であり、1 cal = 4.1868 J であるから単位を変換すると、

$$96,263.5434 \times 4.1868 = 403,036.2035 \\ \approx 403,000 \text{ MJ}$$

となる。

また、ステンレスからタンクを製造するには運送や溶接などの加工エネルギーがかかるため、これをステンレスのエネルギーの 30% として加算すると、

$$403,036.2035 \times 1.3 = 523,947.0645 \\ \approx 520,000 \text{ MJ}$$

となる。

以上の(1)、(2)、(3)を合計すると、

$$7,800,000 + 1,300,000 + 520,000 \\ = 9,620,000 \text{ MJ}$$

となる。これらの BDF 製造施設の寿命を 40 年であると仮定すると、1 年あたりのプラント、設備エネルギーは、

$$9,620,000 \div 40 = 240,500 \approx \mathbf{240,000 \text{ MJ}}$$

となる。

#### \* 廃食油収集

まず、一般家庭からの回収を考える。回収は月に 1 回、すなわち年に 12 回行っており、ドラム缶の回収は 1 台の回収車で行っている。収集エネルギーを考えるにあたり、以下のように仮定をする。

1 度の回収にかかる時間：8 時間

その間の回収車の平均時速：20 km/h

回収車(軽油)の燃費：8 km/L

1 度に回収車が移動する距離は、 $8 \times 20 = 160$  km となり、この走行に必要な軽油の量は、 $160 \div 8 = 20$  L となる。1 年に 12 度の回収をするため、1 年に必要な軽油の量は、 $20 \times 12 = 240$  L となる。軽油のエネルギー原単位は 9,200 kcal/L であるため(天野, 2008)、エネルギー量は、 $240 \times 9,200 = 2,208,000$  kcal となる。1 cal = 4.1868 J であるから、単位の変換を行うと、 $2,208,000 \times 4.1868 = 9,244,454.4$  kJ = 9,244.4544 MJ  $\approx$  9,000 MJ となる。

次に事業系からの回収について計算を行う。飲食店などからは業務委託を受けた民間業者

が適宜回収ルートに沿って回収を行っているが、単位廃食油量当たりの必要エネルギー量は家庭系からの回収の時と同じであると仮定する。すると、平成 19 年度の家庭系からの回収量は 160,897L、事業系からの回収量は 1,377,400L であったため、事業系からの回収にかかるエネルギー量は、

$$9,244.4544 \div 160,897 \times 1,377,400 \\ = 79,139.519 \approx 80,000 \text{ MJ}$$

となる。

したがって、廃食油全体の回収エネルギーは、 $9,000 + 80,000 = \mathbf{89,000 \text{ MJ}}$  となる。

回収は委託された民間業者が行っており、その業者の一部業務として廃食油収集を行っているものであり、この取り組みのためだけに回収車を使用しているわけではないのでここでは回収車自体の製造エネルギーは無視する。

#### \* 無視するエネルギー

##### (1) 廃液処理

BDF の洗浄などで排出された廃液は、京都市ではごみ焼却炉において焼却処理をしている。通常、ごみ焼却炉では焼却炉内の温度が上がりすぎないようにするため、水を投入する。京都市では廃液をこの水の代用として使用しているため、廃液処理にはエネルギーが使用されていないと解釈する。

##### (2) 流動点降下剤

山形県での例と同様、無視する。

以上より、表 17 に入力エネルギーをまとめたものを示す。さらに、図 7 に京都市における各入力エネルギーの全体に占める割合を示す。図 7 より、山形県の場合と同様にメタノール製造に投入するエネルギーが支配的であることがわかる。

表 17 京都市における BDF 生成の入力エネルギー

電力	2,700,000 MJ
水酸化カリウム	250,000 MJ
メタノール	5,219,000 MJ
灯油	1,600,000 MJ
プラント、設備	240,000 MJ
収集	89,000 MJ
合計	10,098,000 MJ

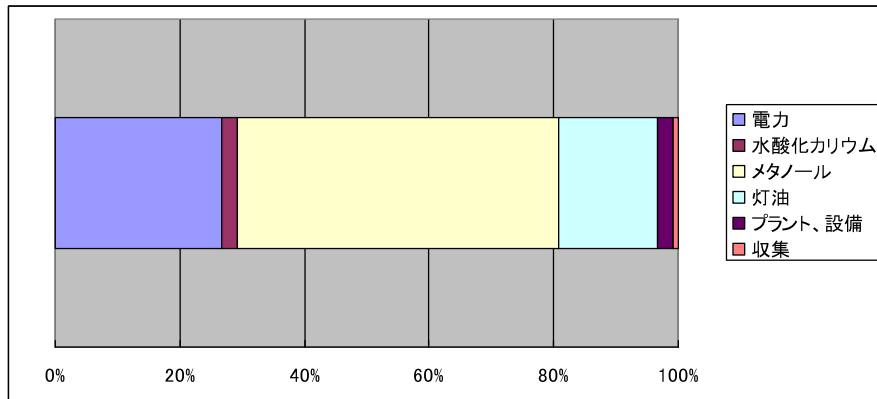


図7 京都市における入力エネルギーの全体に占める割合

### 3.2.3 EPR の計算

以上のように、出力エネルギーは、  
 (ア) BDF の発熱量+グリセリンの発熱量は、  
 65,500,000 MJ  
 (イ) BDF 発熱量のみでは、57,900,000 MJ  
 となり、入力エネルギーは、10,098,000 MJ  
 となったため、これらを EPR の定義式に代入  
 すると、EPR は以下のようにそれぞれ計算さ  
 れる。

(ア) BDF の発熱量+グリセリンの発熱量の  
 場合

$$\text{EPR} = 65,500,000 \div 10,098,000 = 6.486432957$$

$$\approx 6.5$$

(イ) BDF の発熱量のみの場合

$$\text{EPR} = 57,900,000 \div 10,098,000 = 5.733808675$$

$$\approx 5.7$$

## 4. 考察

### 4.1 BDF の EPR 計算結果の妥当性について

今回の EPR 計算過程において、図 4 ならび  
 に図 5 に示した BDF 生成過程フロー図を作成  
 することから開始しているが、このフロー作  
 成段階において、必要となる建設、運用、廃  
 棄などの一連のリスタップは比較的容易に  
 実施できたと考えている。これは、全体の工  
 程がさほど複雑でないことが理由である。し  
 たがって、それぞれの計算部分で仮定してい  
 る入力値や入力を無視した場合の影響を考え  
 ることで、EPR 計算結果の妥当性を示すこ  
 とができる。

#### 4.1.1 山形県の取り組みの EPR 計算結果

クリーンピア共立における取り組みの EPR  
 は、電力、水酸化ナトリウム、メタノール、  
 塩酸、廃液処理については実際のデータを用  
 いて計算を行ったため、有効数字以外の誤差

要素は無いと考えられる。

次に設備であるが、設備にかかるエネル  
 ギーを計算する上で、設備の材質は鉄である、  
 寿命は 10 年である、加工エネルギーは材質エ  
 ネルギーの 30%であると仮定を行ったが、図  
 6 に示したように設備にかかるエネルギーは  
 全体の 0.75%であり、非常に小さいためこれ  
 らの誤差は無視できると考える。そして作業  
 室建設についてであるが、この計算で行った  
 仮定は、以下の 3 つである。

(1) アルミ、塩化ビニル、ガラスの量をそれ  
 ぞれ 300kg、500kg、200kg とした。

(2) 加工エネルギーを材料エネルギーの 30%  
 とした。

(3) 作業室の寿命を 25 年とした。

ここで妥当性を検討するために、以下のよ  
 うに仮定した値を振らせて EPR の計算を再び  
 行った。アルミニウム、塩化ビニル、ガラス  
 については元の仮定の±50%で値を振らせた  
 (表 18)。加工エネルギーは±80%とした。作  
 業室の寿命については、法定で 22 年以上と定  
 められているため、最小値を 22 年、最大値を  
 40 年とした。その結果、EPR は最小で 4.7951  
 …、最大で 5.001…となったため、(元の計算  
 の EPR は 4.885…) おおむね EPR は 4.8~5.0  
 の間にあると考えられる。

表 18 クリーンピア共立における仮定値の幅

項目	最小値	元の仮定	最大値
アルミニウム	175kg	300kg	450kg
塩化ビニル	250kg	500kg	750kg
ガラス	150kg	200kg	300kg
加工エネルギー	6%	30%	54%
作業室の寿命	22 年	25 年	40 年

#### 4.1.2 京都市の取り組みのEPR計算結果

京都市における取り組みのEPRは、電力、メタノール、灯油については実際のデータを用いて計算を行ったため、有効数字以外の誤差要素は無いと考えられる。収集エネルギーの計算においては仮定を行ったが、図7に示したように収集エネルギーは全体の0.88%と非常に小さいため、誤差は無視できると考える。

水酸化カリウムのエネルギーの計算においては、エネルギー原単位が水酸化ナトリウムと同じであると仮定した。水酸化カリウムと水酸化ナトリウムは化学的に非常によく似ており、製法もともに電気分解によるため、エネルギー原単位はほぼ同じであると考えた。ここでは水酸化ナトリウムのエネルギー原単位2449kWh/t±25%で再び計算を行った(表19)。

またプラント、設備のエネルギーの計算に

おいては、プラント、設備エネルギーは、管理棟と製造棟の建設、敷地内のコンクリート舗装、主要タンクの設置の3つとして計算を行ったが、実際はこれらに加えてドラム缶などの雑品や、タンク間を結ぶ配管などのエネルギーもかかる。したがってここではプラント、設備エネルギーを240,000MJ~360,000MJすなわち、元の値~+50%で再び計算を行った(表19)。その結果、

(1) 出力エネルギー=BDFの発熱量+グリセリンの発熱量の場合

EPRは6.372~6.525となったため、おおむねEPRは6.4~6.5にあると考えられる。

(2) 出力エネルギー=BDFの発熱量のみの場合

EPRは5.633~5.768となったため、おおむねEPRは5.6~5.8にあると考えられる。

表19 京都市における仮定値の幅

項目	最小値	元の値	最大値
KOHのエネルギー原単位	1836.75kWh/t	2449 kWh/t	3061.25 kWh/t
プラント、設備エネルギー	240,000MJ	240,000 MJ	360,000MJ

#### 4.2 他のバイオ燃料との比較

今回廃食油からのBDF生成のEPRを計算した結果、クリーンピア共立の取り組みで4.9、京都市の取り組みで5.7となり共に1を超えたため、エネルギーとして意味のある資源であると言える。Hall et al. (2009)は、輸送システムの成立させるための燃料の最低限のEPRを3と定義しており、この基準から考えても十分有効なエネルギーになっていることが判断される。また、他のバイオ燃料とのEPRと比較すると図8のようになる。図8に示したように、廃食油からのBDFは、サトウキビエタノールほどではないが、他のバイオ燃料と比較して効率的なエネルギーであることが分かる。この要因として考えられるのは、BDFはエタノールに比べて燃料への変換が容易である点、そして甜菜、コーン、大豆、サトウキビからの燃料は、これらの作物を栽培するための農業エネルギーが必要であるが、廃食油からの燃料の場合、一度使用して廃棄する

予定のものをリサイクルして使用しているため農業エネルギーがかからないという点が考えられる。

さらに、廃食油からのBDFの利点としては、生成プロセスにおいて二酸化炭素が排出されるものの、燃料として使用する段階では二酸化炭素が排出されない点あげられる。BDFは作物由来であるため、燃焼させた時の二酸化炭素は作物として育てられていたときに吸収した二酸化炭素であるからである。これをカーボンニュートラルであるという。また、他のバイオ燃料はもともと食糧であったものを燃料に変換しているため、穀物価格の高騰の原因になっているなどの批判もあるが、廃食油からのBDFは一度食糧として使用され、廃棄予定のものをリサイクルして使用している点も利点であると言える。また、バイオ燃料生成のための作物を育成に係る水資源消費量の観点も今後の比較の視点として重要になってくることも指摘しておきたい。

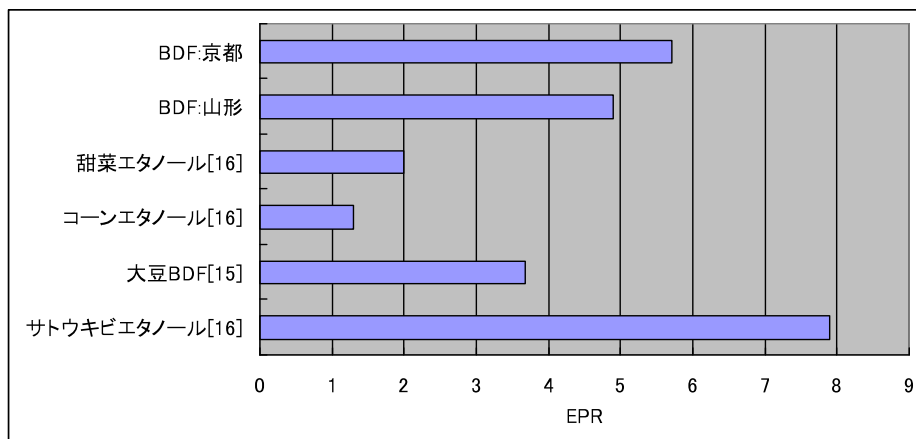


図8 バイオ燃料のEPRの比較([15]:Hill et al., 2006; [16]:von Blottnitz and Curran, 2006)

### 4.3 廃食油からBDF生成の効率的利用に向けての提言

今回の計算で、山形県の取り組みのEPRは4.9、京都市の取り組みのEPRは5.7という結果が得られたが、この結果を元にBDFの効率的な利用法の提言を行う。

#### 4.3.1 EPRをさらに高める利用法とは

図6ならびに図7に示したように、山形県、京都市どちらの場合も電力、触媒、メタノール、灯油といった直接的な材料が入力エネルギーのほとんどを占めており、山形県では約92%、京都市では約97%となっている。未反応部分も考えられるが、化学反応によりBDFを生成しているため、BDF生成に必要な触媒やメタノール量の大幅な削減は見込めないであろう。したがって、EPRをさらに高くするには、以下の方策が考えられる。

- (1) 同じ施設でなるべく多くのBDFを生成する、すなわち稼働率を上げる。そのためには、廃食油の収集率を上げる、もしくは京都市のように、食用油を多く使用する飲食店の多い地域で廃食油を回収する。
- (2) 建設や収集にかかるエネルギーは全体に比べて非常に小さいため、施設が大規模であるほどEPRは高くなることが考えられる。
- (3) 京都市のように、未反応メタノールの回収をし、再利用する。

#### 4.3.2 EPR向上のために解決すべきこと

BDF生成では大量の廃グリセリンが排出されるが、この有効利用が大きな課題となっている。グリセリンは、工業用の材料や、農業

用の土壌への混合材、ビニルハウスストーブの燃料など様々な分野で使用されているが、BDFからの廃グリセリンには未反応のメタノールや触媒などの不純物が含まれているため、これらの利用には向かない。現在京都市では、ごみ焼却炉の助燃剤として使用し、サーマルリサイクルを行っている。このサーマルリサイクル分をEPRに含めると5.7であったものが6.5に改善される。また、この廃グリセリンのメタン発酵によるバイオガス化の研究も行われている。このように、廃グリセリンはBDFのEPRの向上につながるため、有効利用の方法の考案が課題である。

#### 4.4 化石燃料からの脱却のために

他の燃料との比較において、確かにEPRだけを見れば、ガソリンは23程度(天野, 2008)であるためBDFや他のバイオ燃料に比べて非常に大きい。しかし、そもそもエネルギーを質で評価する前提として石油ピークがある。我々の生活を大きく支える車の動力として、石油由来であるガソリンや軽油に取って代わることができる、その意味においてバイオ燃料は有効である。そしてその中でもBDFのEPRは高いという結果になった。

しかし、確かに車に使用する時点では化石燃料を使用していないように見えるが、BDF生成に必要なメタノールは化石燃料由来の材料である。現在メタノールは、工業的にはほとんどが天然ガス、残りは石炭やナフサを原料として製造されている。そしてこのメタノールが入力エネルギーの半分以上を占めているのが現状である。安価で完成された工業プロセスとしてアルカリ触媒法が用いられているが、真に化石燃料からの脱却を目指すならば、メタノールを使用しない製法の確立、そしてEPRでの評価が必要であろう。

また、同様に製造段階において電気も使用されている。現在、日本の発電のうち、約 6 割が火力発電である。すなわち、BDF 生成に使用される電力の 6 割が化石燃料由来であると言える。BDF を生成するにはどのような製法においても電気は不可欠であるため、化石燃料からの脱却のためには、この電力を太陽光などの自然エネルギーや原子力エネルギーから生み出すことが考えられる。

## 5. 結論

本研究では、廃食用油からバイオディーゼル燃料を生成する過程におけるエネルギー収支分析として、山形県と京都市の取り組みを例に EPR の計算を行い、それぞれ 4.9、5.7 という結果を得、他のバイオ燃料と比較した結果、有効なエネルギー源であることがわかった。また、この研究の過程で BDF の生成にどれだけのエネルギー投入が必要であるかが明らかとなり、これを元に BDF の更なる効率的利用への提言を行った。

## 参考文献

天野治, 2008, 石油ピーク後のエネルギー - EPR(エネルギー収支比)から資源の有効利用を考える -, 愛智出版。

天野治, 2008, エネルギー原単位, もったいない学会 EPR 部会シンポジウム資料。

池上詢, 2008, バイオディーゼル・ハンドブック ~地球温暖化の防止と循環型社会の形成に向けて~, 日報出版。

石井吉徳, 2006, 石油最終争奪戦, 日刊工業新聞社。

株式会社エムエスデー, “<http://www.e-msd.co.jp/>”, BDF (バイオディーゼル燃料) 生成装置と FA 機器の開発, アクセス日時: 2009 年 1 月 26 日

京都市環境局適正処理施設部施設整備課, “<http://www.city.kyoto.lg.jp/kankyo/page/0000002292.html>”, 廃食用油燃料化施設 (2), アクセス日時: 2009 年 1 月 26 日

鈴木道哉, 岡建雄, 岡田圭史, 矢野謙禎, 1995, 産業連関表による建築物の評価 その 4 事務所ビルの建築・運用に関わるエネルギー消費量、二酸化炭素排出量, 日本建築学会計画系論文集 第 476 号, 37-43。

東根市外二市一町共立衛生処理組合, “<http://kurinpia.or.jp/bdf/>”, 廃食用油燃料化の概要, アクセス日時: 2008 年 6 月 3 日

東洋エンジニアリング株式会社, “メタノールの製造方法”, 公開特許, 1999

日本ソーダ工業会, “[http://www.jsia.gr.jp/data/guide2007\\_10.pdf](http://www.jsia.gr.jp/data/guide2007_10.pdf)”, 電解ソーダ工業の電力消費量、買電・自家発電比率、電力原単位の推移, アクセス日時: 2009 年 1 月 27 日

三重県環境森林部資源循環室, 2005, 地域循環ネットワークモデル構想策定事業廃食用油部会報告書。

室井俊一、野城智也、山畑信博、田中隆司, 1993, 木造住宅の建設に伴うエネルギー消費量・CO<sub>2</sub>発生量の試算, 日本建築学会大会学術講演梗概集。

山田章、石田哲也、横濱 充宏, 2007, 粗製グリセリンのバイオガス発生効果”, (独) 土木研究所 寒地土木研究所 資源保全チーム。

Campbell, C.J. and Laherrere, J.H., 1998 The End of Cheap Oil, Scientific American, 278(3), 78-83.

Deffeyes, K. S., 2005, Beyond Oil, Hill and Wang, 202p.

Farrell, A. E., Plevin, R. J. Turner, B. T., Jones, A. D. O'Hare, M. and Kammen, D. M., 2006a, Energy returns on ethanol production, Science, 312, 1746-1748.

Farrell, A.E., Plevin, R.J., Turner, B.T., Jones, A.D., O'Hare, M., and Kammen, D.M., 2006b Ethanol can contribute to energy and environmental goals, Science, 311, 506-508.

Hall, C.A.S., Balogh, S., Murphy, D.J.R., 2009, What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have?, Energies, 2, 25-47.

Hill, J., Nelson, E., Tilman, D., Polasky, S., and Tiffany, D., 2006, Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels, Proc. Natl. Acad. Sci. U S A, Vol. 103, No. 30, 11,206-11,210.

International Energy Agency, 2008, World Energy Outlook, 569p.

Gately, M., 2007, The EROI of U.S. offshore energy extraction: A net energy analysis of the Gulf of Mexico, Ecological Economics, 63, 355-364.

McKellar, J. M., Bergerson, J. A., MacLean, H. L., 2010, eplacing Natural Gas in Alberta's Oil Sands: Trade-Offs Associated with Alternative Fossil Fuels, Energy Fuels, 24, 1687-1695.

Pimentel, D. and Pimentel, M., 1995, Land, Energy and Water: The Constraints Governing Ideal U.S. Population Size, NPG forum series



([http://www.npg.org/forum\\_series/land\\_energy&water.htm](http://www.npg.org/forum_series/land_energy&water.htm))

Tsoskounoglou, M., Ayerides, G., and Tritopoulou, E., 2008, The end of cheap oil: Current status and prospects, *Energy Policy*, 36, 3797–3806.

von Blottnitz, H. and Curran, M. A., 2006, A review of assessments conducted on bio-ethanol as a transportation fuel from a net energy, greenhouse gas, and environmental life cycle perspective, *Journal of Cleaner Production*, 15, 607-619.

#### 謝辞

本研究は、東根市外二市一町共立衛生処理組合、京都市環境局・適正処理施設部・施設整備課のデータ提供により行いました。また、財団法人電力中央研究所 天野治博士よりご指導を頂きました。また、匿名の査読者ならびに大久保泰邦編集委員長からは原稿改善のための有益なご指摘をいただきました。ここに関係各位に謝意を表します。