Original Paper

Inventory Analysis of Transportation Fuel Synthesis from Woody Biomass by Large-Scale Plantation

Kiyotaka TAHARA^{*1}, Yuya TSUTSUMI^{*2}, Akihiro YAMASAKI^{*2},
Shigeo SATOKAWA^{*2}, and Toshinori KOJIMA^{*2}

(Received August 7, 2008)

大規模植林を想定した木質バイオマスの輸送用燃料化におけるインベントリ分析

田原聖隆^{*1}, 堤 友哉^{*2}, 山崎章弘^{*2}, 里川重夫^{*2}, 小島紀徳^{*2}

The biomass energy production by intensive cultivation is expected in future. In this study, we assumed large-scale plantation in an arid land of Western Australia. We analyzed inventory about conversion processes to various fuels from produced wood. Our evaluation indexes are calorific yield as fuel (energy in produced fuel per one ton dry-wood), CO₂ emission (CO₂ emission from fuel production process per one ton dry-wood) and external energy consumption per one ton wood (primary energy basis). Calorific yield as fuel was also evaluated for the independent case where all input energy was assumed to be supplied from biomass itself or fuel from it.

From the results on energy consumption and CO₂ emission analyses with external energy input, transportation of wood or fuel was found to be negligibly small in case that the conversion process was located in Australia. But in case that conversion process was located in Japan, that was considerably high (15-40%). From the independent scenario (without energy input except that from biomass itself) analysis, in case of conversion process in Australia and transportation of produced fuel to Japan, 34% of the energy in the whole wood (at the maximum condition of 50% in the feedstock except felling loss) was at the maximum, expected to be recovered as energy in fuel for methanol production case. More than 30% (up to 55%) of the energy in the wood was exhausted in the conversion process. Energy based yield of fuel and CO₂ emission were much more influenced by the difference of target fuel or conversion process than the conditions of location and transportation.

Key Words

LCA, Biomass, CO₂ emission, Transportation fuel

1. 緒 言

2005年に京都議定書が発効となるなど、近年CO₂削減が大きな問題となっている。また、新エネルギー国家戦略によって、輸送用燃料における石油依存度を現在のほぼ100%という状況から80%にまで下げるといった目標が設定された。このような背景により、近年バイオマスが注目されている。バイオマスは賦存量が多く、カーボンニュートラルであるため地球温暖化緩和に有効なエネルギー資源である。また有機物であ

り、液体・気体のいずれのエネルギーにも変換が容易であるため、エネルギー多様化対策に向けた優れたエネルギー源であると位置づけられる。特にノーブルユース（石油資源でなければ対応しにくい用途）の一つである輸送用燃料としての利用が考えられる。

バイオマスの高効率な利用のためには大規模エネルギーブランシェーションが有用な手法と考えられる。しかし、日本では土地の確保が難しいため他の対象国を探す必要がある。エ

* 1 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
16-1 Onogawa, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8569, Japan
* 2 Department of Materials and Life Science,
Seikei University
3-3-1 Kichijojikimachi, Musashino-shi, Tokyo 180-8633,
Japan

* 1 (独)産業技術総合研究所
〒305-8569 茨城県つくば市小野川16-1
* 2 成蹊大学理工学部物質生命理工学科
〒180-8633 東京都武蔵野市吉祥寺北町3-3-1

エネルギープランテーションは広大な土地を有する国での適用が有効である。一方、樹木の生育環境が良い地域では食糧生産などの他の土地利用との競合が生じる。そこで本研究では食料生産と競合しない西オーストラリア荒漠地での大規模植林を想定した。植林樹種としては現地での植林実績があり、成長速度が速い樹種であるユーカリを想定した¹⁾。本研究では、これらを刈り取り、集め、輸送し様々な液体燃料化を行い、得られた燃料を日本に輸送するとした。

バイオマスの輸送用燃料化についてはトヨタ自動車(株)・みずほ情報総研(株)²⁾をはじめ多くの研究・評価が行われているが、いずれも各プロセスによって投入エネルギー源が異なるため、最終的に製造する燃料の違いなどを考慮すると、シナリオ間の平等な評価を行うことはできない。シナリオ間の平等な評価を行うためには、木質自身の持つエネルギーで燃料化及び発電を行い、プロセスで使用するシナリオ(以下、自立型シナリオと呼ぶ)の評価を行う必要がある。そのため、本研究では2.3に記述した仮定によって自立型シナリオでの評価も行った。すなわち、バイオマスからの液体燃料への転換にあたっては、その過程で必要となるエネルギー源に、化石燃料資源由来の他エネルギーを用いる(外部エネルギー投入)シナリオ(以下、外部エネルギー投入シナリオと呼ぶ)と、バイオマス起源のエネルギーのみを用いる(自立型)シナリオでの値を算出し、それぞれについての評価を行った。後者では、今回製造する(主として液体)燃料が輸送用というノーブルな2次エネルギーであり、またバイオマス自身は現地では発電に用いることも出来ることから、刈り取り、転換、輸送などの過程で必要となるエネルギー源にバイオマス起源のエネルギーのみを用いるという自立型シナリオが可能となった。

2. 方法

2.1 対象プロセス

本研究での評価対象とした全てのプロセスと外部エネル

ギー投入シナリオの概要はFig. 1のようにまとめられる。本研究では200km×200kmのエリアの植林を行うと仮定した。伐採時に発生する枝・葉などの残渣を木材の3割(エネルギーベース)と仮定した。木材の平均輸送距離は100km, 燃料合成工場から主要港までの距離は上記の面積をもち年間降雨量200mm以下の地域から主要港までの距離である500km, 海上距離はJEMAI-LCA Pro Ver.4 (Software)³⁾を利用し、オーストラリアから日本までの平均距離である9,000kmとした。燃料流通のための日本国内輸送距離は燃料小委員会⁴⁾の値から往復200kmと仮定し、インベントリ分析を実施した。なお、積載率は木材の場合は0.6, 液体燃料の場合は0.8とし、JEMAI-LCA Pro Ver.4 (Software)³⁾を利用することによってインベントリデータの算出を行った。また、燃料を日本国内で製造する場合には、木材の平均輸送距離は600kmとして算出を行った。最終製造燃料はDME(ジメチルエーテル), FT油(フィッシャー・トロプシュ合成油), MeOH(メタノール), EtOH(エタノール)とした。それぞれのプロセスについて用いた文献^{2)5)~11)}をプロセスの特徴と併せてTable 1に示した。また、外部エネルギー投入, 自立型の両シナリオについて、①廃熱利用と天日干しなどによって乾燥工程でのエネルギー消費を抑制する, ②廃熱利用をせず, 軽油焚き乾燥機を利用して木質チップを乾燥させる, という2つのケースを考えた。

本研究においては、木質バイオマス中での窒素や硫黄の含有量はわずかであるためNO_x, SO_xなどのその他の環境負荷物質については配慮しなかった。また、LCI(ライフサイクルインベントリ)の検討については、積み上げ法および産業連関法の二つの方法がある¹²⁾が、産業連関法は検討過程が製造プロセスと結びつかないため、積み上げ法と比べると理解しにくい面もあり、また現実に流通していない製品には統計資料がないことから、本研究では積み上げ法でLCIを検討した。本研究で使用した換算係数及び排出源単位はTable 2に示した。両地域における電力についてはエネルギー・経済統計要覧¹³⁾の電力構成値を用い、燃料のCO₂排出量および低位発熱量と

Fig. 1 Process flow diagram

Table 1 Fuel synthesis

Fuel	Synthesis method	Literature
DME	After gasification, direct synthesis without heat recovery	5
	After gasification, direct synthesis with heat recovery	6
	After gasification, direct synthesis (H_2/CO ratio is 1.4)	2
	After gasification, direct synthesis	7
FT fuel	Using woody biomass	5
	Synthesis, after treatment and compression, consumes all the excess fuel gas produced by the facility to generate electric power for sale (Aspen Process)	8
	Synthesis, after compression of syngas (H_2/CO ratio is 2.2), using woody biomass	9
	After gasification, direct synthesis (H_2/CO ratio is 1.4)	2
	Synthesis, after compression of syngas (H_2/CO ratio is 2.2)	9
MeOH	Converting a refined syngas by a gasification, not using by-product (hot water)	5
	Converting a refined syngas by a gasification, using by-product (hot water)	5
	Converting a refined syngas by a gasification, considering heat recovery, the air ratio of the combustion is 1.2	10
	After gasification, direct synthesis (H_2/CO ratio is 1.4)	2
	Considering heat recovery (89.9%)	10
	Without heat recovery	10
EtOH	Fermentation, after hydrolysis with H_2SO_4	11
	Fermentation by recombinant enzyme	11

Table 2 Conversion factors and CO_2 emission factors

Heat	4.18	J/cal
Electric power (Australia)	230.0	g- CO_2 /MJ
	9.97	MJ/kWh
Electric power (Japan)	111.5	g- CO_2 /MJ
	8.48	MJ/kWh
DME	66.3	g- CO_2 /MJ
	28.8	MJ/kg
FT fuel	70.7	g- CO_2 /MJ
	44.0	MJ/kg
MeOH	68.9	g- CO_2 /MJ
	19.9	MJ/kg
EtOH	71.3	g- CO_2 /MJ
	26.8	MJ/kg

しては JHFC¹⁴⁾ の値を用いて、 CO_2 排出原単位を算出した。

2.2 外部エネルギー投入シナリオにおける評価指標

本研究の検討項目は燃料の製造熱量および CO_2 排出量、エネルギー消費原単位とした。

(1) 製造燃料が有する熱量

木質バイオマス 1 t から得られる燃料の持つエネルギー量を算出した。

(2) CO_2 排出量

CO_2 排出量は、植林から輸送までをも含めた全過程で外部から投入される各エネルギー（燃料、電力）量に各々の CO_2 排出係数を乗じて算出した。

(3) エネルギー消費量

木質バイオマス 1 t から製品を製造するために外部から投入されるエネルギー（1 次エネルギー換算）を算出した。

2.3 自立型シナリオの詳細と評価

化石燃料を使わずにバイオマスのみですべてのプロセスに必要なとされるエネルギーをまかなったときに、バイオマスの有するエネルギーのうち、最終的にどれだけのエネルギーを日本で輸送用エネルギーとして得られるのかを求めることが目的である。転換プロセス以外のところで用いられる投入エネルギーは大部分が輸送用エネルギーにも転用できる液体燃料であることから、また得られた液体燃料を輸送することは比較的容易であることから、これらには自ら製造した液体燃料を使用するものとした。転換プロセス内での投入エネルギー（燃料・電力）についても木質バイオマス自身のエネルギーを用いて代替する。自立型シナリオの例を、Fig. 2 に示す。

Fig. 2 に示したように、自立型シナリオでは燃料合成によ

Fig. 2 Image diagram of independent scenario

て製造する燃料やバイオマス発電によって原木自身のエネルギーを各プロセスに投入した後に、最終的に輸送用燃料として得られたエネルギーがどれだけ残るのが算出される。また、バイオマス自身はカーボンニュートラルと通常考えられており、全ての必要エネルギーを木質バイオマス自身のエネルギーでまかなう自立型シナリオでは外部からの投入エネルギーが無く、CO₂は排出ゼロとカウントできるので、2.2項における評価指標のうち、(2)と(3)はゼロとし、(1)のみが評価対象となる。自立型シナリオについては燃料製造を豪州で行った場合についてのみ計算した。

ここで、外部エネルギー投入シナリオで使用される軽油・重油と、自立型シナリオでのバイオマスから合成された液体燃料とは、低位発熱量ベースで換算を行った。また、バイオマス発電の発電効率を20% (川崎重工¹⁵⁾の値を引用)とし、燃料製造プロセスに必要な電力から、使用すべき量を計算した。なお、外部エネルギー投入プロセスでは、LNGは発電の他、肥料製造過程でも利用しているが、この場合でもバイオマスとLNGの発電効率の違い (LNGを用いた時の発電効率52%)を利用して両者の換算を行った。

なお伐採時に廃棄する林地残渣 (枝・葉) は発電のみには使用できると考え、プロセス内で有効利用する場合についても検討を行ったが、その発電効率については文献¹⁶⁾に従い、13.3%と低い値に設定し、評価を行った。

評価方法として、2.2(1)に示した木質バイオマス1tあたりの製造燃料の有するエネルギー量に加え、この値からエネルギー収率を以下の式により求めた。

$$E = \frac{\text{(このプロセスで投入されるエネルギー)}}{\text{(木質の持つエネルギー)}}$$

2.4 CO₂削減量の評価

自立型シナリオにおいては、バイオマスから製造した液体燃料はCO₂削減効果があることから、CO₂削減量の算出を行った。概念をFig. 3に示す。①はバイオマスからの輸送用燃料の製造時に排出するCO₂排出量を示し、この負の値に②原油井から軽油を製造するまでに排出するCO₂量と③軽油を使用 (燃焼) する際に排出するCO₂量を加え、真の削減量とした。

このようにして得られたCO₂削減量は、外部エネルギー投入シナリオでのCO₂削減量とも比較を行った。

Fig. 3 The calculation method of the CO₂ reduction

3. 結果および考察

3.1 立地条件の比較

Fig. 4, Fig. 5には燃料製造を国内 (日本) で行う場合と現地 (豪州) で行う場合のエネルギー消費量とCO₂排出量のそれぞれを比較して示した。エネルギー消費については代表的な例としてDMEの場合のみ示したが、その他の燃料製造の場合も同様の結果を得た。エネルギー消費において、豪州に燃料製造プロセスをおいた場合では輸送の占める相対的な割合は低い、日本に燃料製造プロセスをおいた場合では輸送の占める相対的な割合が大きくなるのがわかる。これは最も長距離である豪州日本間を、豪州で燃料製造を行う場合では液体燃料を輸送するのに対し、国内で燃料製造を行う場合ではエネルギー密度が低い固体である木材を運ぶ必要があるからである。DMEのみCO₂排出量が現地製造の方が多くなる理由は、燃料製造時に現地の主に石炭を原料とするCO₂排出原単位が大きい電力を多く用いるためである。また、エネルギー

Fig. 4 Comparison of external energy consumption (primary energy basis)

Fig. 5 Comparison of CO₂ emission by external energy consumption

消費量においても、CO₂排出量においても、燃料製造は国内よりも現地で行ったほうが有利であることが示された。なお、この評価においては、次項で示す廃熱利用は考慮しない。

3.2 外部エネルギー投入シナリオの評価

Fig. 6は外部エネルギー投入シナリオにおける各燃料製造時の化石燃料消費をプロセス別・投入エネルギー別に図示したものである。併せて各燃料のエネルギーベースでの製造量をTable 3に示す。また、プロセス毎のエネルギー投入とCO₂排出について、DMEの場合をFig. 7に示した。これらの結果より、単位エネルギーを有する燃料を製造するために単位エネルギー以上のエネルギーが投入されていることがわかる。また乾燥工程において多量のエネルギーを消費するため、天日干しや廃熱を用いて乾燥工程でのエネルギー消費を抑えることが有用であることがわかる。現実には、廃熱利用には困難を伴うことが多いものの、乾燥時のエネルギー投入量はプロセスにより大きく左右されることから、以降の自立型シナリオの評価とCO₂削減量に関して両シナリオの比較を行う際には、標準ケースとして廃熱利用を行うシナリオを用いて評価を行った。

3.3 自立型シナリオの評価

投入エネルギーが想定プロセス毎にまちまちである外部エ

ネルギー投入シナリオにおいては、同一燃料を製造するプロセスについて、3.1で示したような比較評価はある程度行えるが、異なる製造燃料間についての評価を公平に行うことはできない。そのため木質自身あるいは製造した燃料のもつエネルギーを外部エネルギー投入シナリオでの投入エネルギーに代えて用いると仮定した。2.3に示した方法で算出した。また、引用した文献では天然ガスを用いて発電を行っているため、LNGの換算についてはプロセス内で必要なLNGで発電量と同等の電力を発生するのに必要となるバイオマス量によって相殺した。これを基に自立型シナリオでの評価を行った結果をFig. 8に示す。Fig. 8では各燃料製造について自立型シナリオのプロセスごとのエネルギー消費量を図示した。どの燃料製造においてもエネルギー消費の大半は燃料合成が占める。また、転換プロセスを豪州で行うとしたため、輸送の相対的な比重は低い。炭素数が少ない燃料（メタノール・DME）では炭素数の多い燃料（FT油）に比べて燃料製造量（熱量換算）が多い。これはFT合成では、多くの副生物が産出し、触媒反応での選択率が低いためであるとも考えられる。

3.4 林地残材利用の評価

Fig. 9は、伐採時の林地残材（枝・葉）をプロセス内で発電によって利用する場合についての評価結果を示したものである。Fig. 8に示した結果と比較しながら考察する。本評価では、

Fig. 6 Energy consumption for each conversion process

Table 3 Energy recovery as fuel

	MJ-fuel/t-wetwood (50%)
DME	5573
FT fuel	3011
MtOH	3859
EtOH(A)	4165
EtOH(E)	5103

12540MJ/t-wetwood (50%) include felling loss

Fig. 7 Example of energy flow (DME production case)

Fig. 8 Fuel yield for each conversion process (Independent scenario without felling loss recovery)

Fig. 9 Fuel yield for each conversion process (Independent scenario with felling loss recovery)

前述のようにこれを用いた発電効率は、本来の収穫バイオマスである幹部の発電効率の約 1/2 として計算した結果であるが、このことにより濃硫酸法によるエタノール製造の場合を除き、発電のために幹部を発電に使用する必要がなくなり、さらにプロセス内で余った電力は売電できることになる。しかしながら、林地残材を利用する場合、枝や葉のかさ密度が低いため輸送時にバイオマスから得られた輸送用燃料を多量に消費するので、結果として林地残材利用を行ったときの燃料製造量は林地残材を利用しない場合での燃料製造量に比べて少なくなる場合もみられた。両者の得失は、次項 (3.5) で考察する。なお、林地残材をペレット化するなど前処理を行い輸送する場合には、合成した燃料の使用量を大きく削減できる可能性もある。

3.5 CO₂削減量

Fig. 10 に各シナリオについて燃料毎の平均の値を使用し、CO₂削減量の計算を行った結果を示す。外部エネルギー投入シナリオではメタノールと組み替え酵素でのエタノール製造以外はCO₂削減効果が無いことが示された。特にDMEについては、燃料収量が多いにもかかわらず、外部エネルギー投入シナリオではCO₂が増加するという結果になった。これは、燃料製造時に (CO₂排出原単位が大きい) 現地の石炭を主として原料とする電力を多用するためであると考えられる。次に、単位原料木質バイオマス量当たりでは、これから燃料を製造するより発電に用いた方がCO₂削減効果が高いことがわかる。しかし、電力は風力や太陽光発電などその他の再生可能エネルギーからも生み出すことができるため、輸送用液体燃料が不可欠でありかつ、これを再生可能エネルギーから製造する

Fig. 10 Net CO₂ reduction

場合にはバイオマスから製造することが妥当なシナリオとなる。また、林地残材を利用した場合は、売電可能電力分によるCO₂削減量が大きく、ネットでもCO₂排出削減に寄与するケースが多いことがわかる。ただし、エタノール（濃硫酸法）／自立型シナリオにおいては林地残材を利用した場合の方がCO₂削減量が低くなっている。

4. 結 言

海外木質バイオマスを用いて外部からのエネルギー投入も行いながら、様々な輸送用燃料を製造し、日本で利用するケースに対しインベントリデータを利用することにより、燃料油収量、CO₂排出量、エネルギー消費量に関する検討を行った。その結果、外部エネルギー投入量に関しても、CO₂排出量に関しても、DME製造の場合のCO₂発生量を除いて燃料製造は日本国内よりも現地豪州で行ったほうが有利であることが示唆された。これは最も長距離である豪州日本間を、豪州で燃料製造を行う場合では液体燃料を輸送するのに対し、国内で燃料製造を行う場合ではエネルギー密度が低い固体である木材を運ぶ必要があるからである。DMEのみCO₂排出量が現地製造の方が多くなる理由は、燃料製造時に現地の主に石炭を原料とするCO₂排出原単位が大きい電力を多く用いるためである。また、単位エネルギーを有する燃料を製造するために単位エネルギー以上のエネルギーが投入されていることがわかった。

次いで、外部から投入していたエネルギーの全てを自らあるいは得られた輸送用燃料を用いて代替する自立型シナリオに対する評価から、木材の持つエネルギーのうち、林地残材をも発電に利用しメタノール製造を行うと、最大34%の燃料化が期待できることがわかった。さらに、CO₂削減という観点ではすべてのプロセスについて、外部エネルギー投入シナリオより自立型シナリオの方がCO₂削減量が増えるという結果を得た。また、燃料の収量やCO₂排出量は立地条件の違い以上に、製造する燃料やプロセスの違い（林地残材の利用など）によるものが大きいということが確認された。さらに、燃料

製造時に多くのエネルギーを消費するため、今後エネルギー変換効率が高い触媒や発酵菌の開発を含めた技術開発が望まれる。また、林地残材を利用した場合、輸送用燃料の消費が増えるため、燃料の収量は若干減少するが、余剰電力を売電でき、ネットでのCO₂削減量の増大が見込まれることがほとんどのケースで示唆された。

謝 辞

本研究の一部は三井物産環境基金の助成の下で行われた。

文 献：References

- 1) Kojima, T., Hamano, H., Abe, Y., Tanouchi, H., Egashira, Y., Saito, M., Law, J., *Journal of Arid Land Studies*, **16**, 167 (2006)
- 2) トヨタ自動車(株), みずほ情報総研(株), 輸送用燃料のWell-to-Wheel 評価(研究報告書), p. 45-59 (2004): Toyota Motor Corporation, Mizuho Information & Research Institute, Report on Yusouyounenryou no Well-to-Wheel Hyouka, p. 45-59 (2004)
- 3) Japan Environmental Management Association for Industry, JEMAI-LCA Pro Ver.4 (Software), (2006)
- 4) 総合資源エネルギー調査会石油分科会石油部会燃料政策小委員会(第9回)配布資料4-2 バイオマス燃料のCO₂排出等に関するLCA(ライフサイクルアセスメント)評価について(2)～我が国で想定される導入形態へのLCA適用による試算結果～, (2003): Sougousigen Energy tyousakai Sekiyu bunkakai Sekiyubukai Nenruouseisaku Syouiinkai (9th) material No.4-2 Baiomass nennryou no CO₂ Haisyututou ni Kansuru LCA Hyouka nituite (2) - wagakuni de Soutei sareru Dounyukeitai heno LCA Tekiyouni niyoru Sizannekka -, (2003)
- 5) Ahlqvist, P., Brandt, A., Well-to-Wheel Efficiency---For Alternative Fuels from Natural Gas or Biomass, Vagverket Publication, Borlange 2001: 85, p. 17-26 (2001)
- 6) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, (株)ダイヤリサーチマーテック, バイオマスからのジメチルエーテル

- (DME)の生産に関する実用化可能性調査, p. 159-164 (1999): NEDO, DRMI, Biomass karano DME no Seisan ni Kansuru Jitsuyoukanouseichousa, p. 159-164(1999)
- 7) 堂脇清志, 江口勉, 大久保壘, 玄地裕: 電気学会論文集C部門, **128**, 168(2008): Dowaki, K., Eguchi, T., Okubo, R., Genchi, H., *Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan, Part C*, **128**, 168-175(2008)
 - 8) Marano, J. J., Ciferno, J. P., Life-Cycle Greenhouse-Gas Emissions Inventory For Fischer-Tropsch Fuels, (USDOE National Energy Technology Lab.), p. 13-30(2001)
 - 9) 藤本真司, 隈部和弘, 福田哲久, 花岡寿明, 第一回バイオマス科学会議発表論文集, p. 44-45(2006): Fujimoto, S., Kumabe, K., Fukuda, T., Hanaoka, T., Minowa, T., Yabe, A., JIE, Preprint of First Biomass Science Conference, p. 44-45(2006)
 - 10) 隈部和弘, 藤本真司, 福田哲久, 花岡寿明, 美濃輪智朗, 第一回バイオマス科学会議発表論文集, p. 138-139(2006): Kumabe, K., Fujimoto, S., Fukuda, T., Hanaoka, T., Minowa, T., JIE, Preprint of First Biomass Science Conference, p. 138-139(2006)
 - 11) Kadam, K. L., Camobreco, V. J., Glazebrook, B. E., Forrest, L. H., Jacobson, W. A., Simeroth, D. C., Blackburn, W. J., Nehoda, K. C., Environmental Life Cycle Implications of Fuel Oxygenate Production from California Biomass(USDOE, National Renewable Energy Laboratory), (1999)
 - 12) LCA実務入門編集委員会, LCA実務入門(丸善), p. 22-40(1998): LCA Jitsumu Nyumon Henshuiinkai, LCA Jitsumu Nyumon(Maruzen), p. 22-40(1998)
 - 13) 日本エネルギー経済研究所計量分析部(編), エネルギー・経済統計要覧'06(省エネルギーセンター), p. 217(2006): EDMC(ed.), Energy Keizai Toukei Youran'06, p. 217(2006)
 - 14) 日本自動車研究所, 「JHFC総合効率検討結果」報告書, p. 2(2006): Japan Automobile Research Institute, JHFC Sogo Kouritsu Kentou Kekka, p. 2(2006)
 - 15) Kawasaki Heavy Industries, Ltd., homepage(http://www.khi.co.jp/earth/pdf/04_houkokusyo_07.pdf), (2007)
 - 16) Larson, E. D., Consonni, S., Katofsky, R. E., Iisa, K., Frederick, Jr., W. J., A Cost-Benefit Assessment of Gasification-Based Biorefining in the Kraft Pulp and Paper Industry, Final Report, Volume.1 DE-FC26-04NT42260(USDOE), p. 14-18(2006)
-