

バイオマス水素生産のエネルギー収支評価

佐野 寛

地球エネルギーシステム研究所

〒562-0004 大阪府箕面市牧落 5-8-2-106

Energy balance of bio-hydrogen production from biomass resource

keywords : bio-hydrogen, energy efficiency, energy ratio for income and expense

1. バイオマス燃料生産におけるエネルギー評価

バイオマス燃料は、バイオマス(生物体)を原料とするので、植物を栽培して生産できる再生可能性に特徴がある。地上における最も代表的な太陽エネルギー間接利用の形態である(図1)。その燃焼利用によってCO₂を排出しても、一時的な環境負荷増大は、やがて植物の光合成によって吸収されると期待され、持続可能なエネルギーシステムのホープである。ただし生態系は複雑であり、返済が災害や乱伐などで失敗することもあり、その場合は化石燃料システム(図2)となんら変わらない環境評価に転落する。

化石燃料(石油、石炭、天然ガス)利用は、約1億年前に備蓄したバイオエネルギー取り崩しの一方向で、炭素の戻る道がない(図2)。大気集積(速度=+百数十億tCO₂/年)されている。

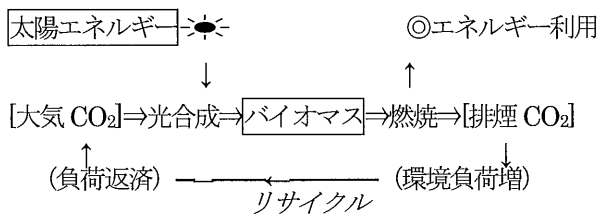


図1. バイオエネルギーシステムにおける物質循環流

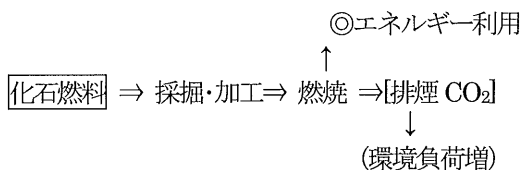


図2. 化石エネルギーシステムにおける物質不可逆流

バイオマス燃料は一般に薪、ワラ、植物廃棄物などの固体燃料が主であり、化石燃料に比べて使い勝手はよく

ない。そこで2次的な燃料が追求される。例としては、木炭、植物油、アルコール、メタン発酵ガス、熱分解ガスなど、固体・液体・気体燃料全域にわたる。

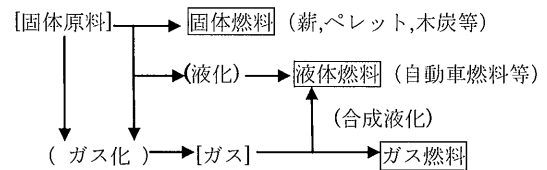


図3. 固体バイオマス資源から各種燃料への道

バイオマス資源供給の大部分は、固体であるから、ニーズの高い液体燃料などに変換する技術が開発されている。しかしその変換には大きなエネルギー損失を伴う、という需給間の矛盾を内包している。ガス燃料への変換、特に水素への変換も可能であるが、変換損失はやはり問題である。

2. 変換プロセスのエネルギー損失の評価法

変換に伴う物質収支(原料⇒燃料の移転率、収率)は判り易いのでつい目が行くが、それだけでは足りない。変換プロセスに外部から注入されたエネルギーは、しばしば、生成燃料に匹敵するほど大きいので、外部エネルギー(あるいはプロセスエネルギー消費)率に注目して、評価されねばならない。

さらに、バイオマスにおいては、採取以前にさかのぼって栽培に投入されるエネルギーも一種のプロセスエネルギーとして考慮する必要がある(化石燃料では、資源略奪型なので無視されている)。

産出されるバイオ燃料のエネルギー Q_f に対して、投入エネルギー X が大き過ぎれば、全体エネルギー収支は

当然、最初からマイナスになる (図 4)。変換技術の成功が必ずしもエネルギーシステムの成功にならないことに注意が必要である。

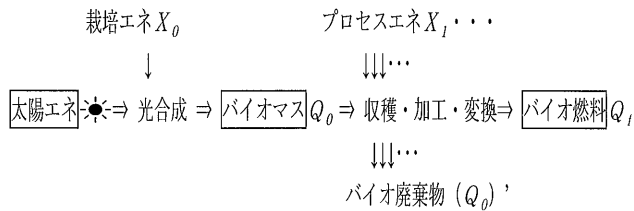


図 4 バイオ燃料システムにおけるエネルギー収率とエネルギー投入

Q : バイオエネルギー、 X : 外部投入エネルギー

バイオ燃料の主要な評価指標としては、①エネルギー収支、②エネルギー収支比、③原料エネルギー回収率、などがあり、目的に応じて用いられる。

① エネルギー収支: $[Q_f - X]$

産出されたバイオ燃料のエネルギー Q_f から、全投入エネルギー X を差し引いた値で、 $[Q_f - X]$ がマイナスだとエネルギー赤字になるから、もはやエネルギー生産システムではない。

② エネルギー収支比、(産出/投入): $[Q_f / X]$

$[Q_f / X] > 1$, ならばエネルギー生産システムである。だが、現実的なエネルギーシステムには $[Q_f / X] > 2$, が欲しい。 $[Q_f / X] < 1$, ならば (図 5 の右下側) 赤字システムである。もちろん、研究開発事業、教育啓発事業としての意義は存在する。

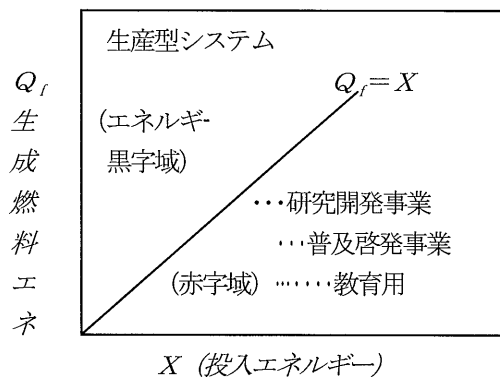


図 5 エネルギー産出/投入比によるエネルギープロジェクト分類

③原料エネルギー回収率: $[Q_f / Q_0]$

産出バイオマスの 1 次エネルギー資源 Q_0 は、再生可能であっても有限 (年・ km^2 当たり) であるから貴重で

ある。収率 100% ($[Q_f / Q_0] = 1$) が理想であるが、現実には 1/2 前後を確保できる程度である。自己資源の一部を燃料消費して外来エネルギー X を削減し、 $[Q_f / X]$ を改善する (②の評価) ことも行われるが、資源保護の立場からは③のエネルギー回収率が逆に低下することも警戒すべきである。

3. 固体燃料 (薪、チップ、ペレット、炭化物)

究極の変換燃料である水素を検討する前に、バイオマスの変換を最小限にした固体燃料を見ておこう。バイオマス資源の王者は、木質森林資源である。昔は薪と木炭が、燃料のすべてであった。しかし、厨房燃焼器のカマドは、不衛生・低伝熱効率 (10~20%) として LP ガス・天然ガスに代り、暖房も薪ストーブから灯油ストーブに代わり、さらに大規模炉や熱機関は重油や石炭に替った。2000 年以降、石油ピーク論と温暖化対策とで、木質燃料の復活が始まったが、それは薪炭ではなく、チップとペレットを指向している (図 6)。その順序に燃焼制御が容易になるためであるが、製造エネルギー X は逆に大きくなって行くので、全体システムとして折り合いをつける評価が必要になる。

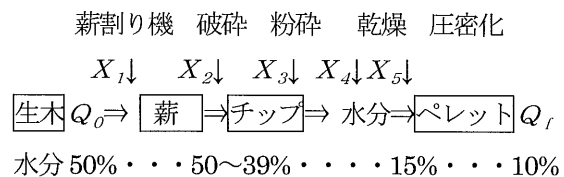


図 6 木質燃料におけるエネルギー収支要素

3.1. 木質燃料/市場に出てこない潜在資源も

薪、チップ、ペレットの乾物組成は、基本的に同一である。したがって、外部エネルギーが自由に投入できれば、 $Q_0 = Q_f$ (無損失) も可能である。しかし、使用した外部エネルギー X の総和は、後の方ほど大きくなり、ペレットまでくると外部支援の増大のためカロリー価格も薪の 2 倍以上になる。水分については、粉碎段階までは水分が多いほど柔らかくて加工に有利、圧密化整形には水分が多すぎると崩壊するので不利、と逆転する。したがってペレット段階で急に熱乾燥エネルギーがかさみ高コストになる。

さらに、生木 Q_0 に到る前に、林業での栽培・収穫に

も課題がある。現状では林地残材が林道端まで出てくる段階(図7の X_{01})でのエネルギー消費(地形・傾斜度により激変)が、後の加工処理よりも大きいと云われている。その結果、日本の山林では大部分が切り捨て間伐となってバイオマス資源が放棄されている現状であり、収穫システム改良の余地は極めて大きい。

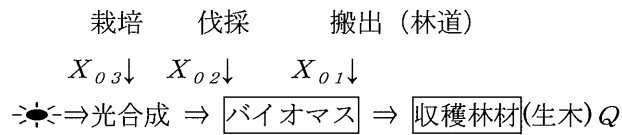


図7. 林業バイオマス採取に先行するエネルギー消費点

3.2. 木炭化／副産物への分岐

炭化プロセスの特徴は、成分変化を伴うため、製品が多岐にわたる(図8)ことである。昇温とともに乾燥(〜180°C)、部分脱水(300°C前後)と黒化、400°C以上で盛んにガス・木酢液・タールなどを放出して木炭化が進む。

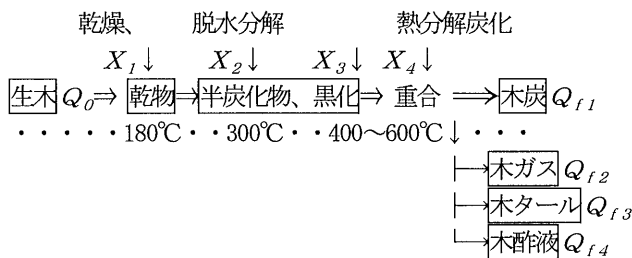


図8. 木質炭化におけるエネルギー分配

ここで原材料の含有熱量は、木炭(残炭) Q_{f1} と留出物 $Q_{f2} \sim Q_{f4}$ とに分配される。

$$Q_0 = Q_{f1} + Q_{f2} + Q_{f3} + Q_{f4}$$

各産物への分配率は加熱条件により変動する。基本的には、木炭 Q_{f1} が約半分のエネルギー収率で最大であり、次いでタール Q_{f3} が5〜40%、木酢液 Q_{f4} は重量収率は大きいけど大部分が水で(酢酸数%の水溶液)発熱量は低く、燃料としては使い物にならない。木ガス Q_{f2} は CO_2 が主成分の低カロリーガスであり、水素源としては使い物にならない。かろうじて可燃性であり、炭化炉の自家燃料(低級燃料でよい)として消費するのが普通である。

3.3. 廃棄物燃料／脱水；エネ支出多過ぎる

ごみ、汚泥、家畜糞などの粗悪燃料は、利用側から忌

避されていたが、近時、マイナス価格で原料が供給される、という前提で、ゴミ発電などかなりの導入が進んでいる。これらのうち、60%以上の高水分のものの直接燃焼は水の蒸発熱による妨害が大きく、補助燃料を必要とするので、事実上マイナス燃料である。そのため、安価で省エネ的な脱水・乾燥方法など前処理技術が大きな課題となっている。図9のプロセスに当てはめれば、96%水分の下水汚泥などでは乾燥エネルギー X_1 が巨大化してそれだけで得られる炭化物の熱量 Q_f を上回ってしまうことになる。そのため、汚泥処理場では乾燥に先立って圧搾脱水などを前置する(図9の X_1) が、今度は汚染度の高い「脱離水」が多量に発生し、その水処理エネルギー消費(および費用)など新しい負担を発生する。

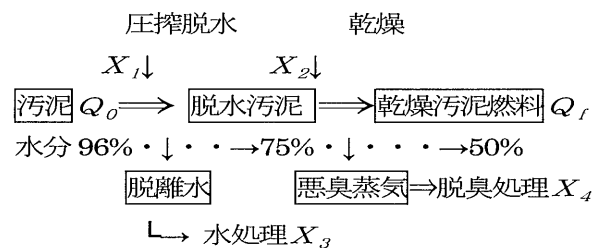


図9. 汚泥など高水分廃棄物からの燃料製造システム

3.4. 廃棄物燃料／メタン発酵：半量が資源化

そこで高水分燃料資源に対しては発想を転換して、「非蒸発の燃料分離」が可能なメタン発酵システム(図10)への切替えが課題になる。図10の発酵 X_1 、精製 X_2 は非常に小さく、バイオガスは自動的に水から浮上分離してくる。ただし、メタン発酵は有機物全量をメタン化できず、通常発酵時間条件では約半量がガス転換され、残渣が半量発生する($Q_0/2 = Q_f$)。バイオガスの組成はメタン： CO_2 が半々であるから精製後、メタン部分を水素源として変換することは可能である(追加の投入エネルギーは必要)。

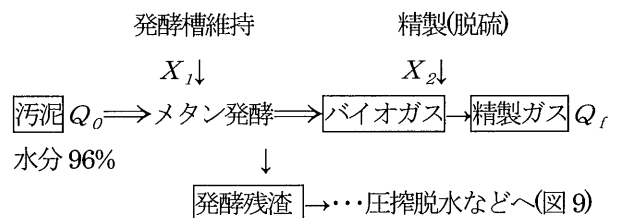


図10. 下水汚泥のメタン発酵システムにおけるエネルギー出入り

4. 液体燃料 (植物油、エタノール)

石油代替としてもっともニーズが高いのは①軽油用と②ガソリン用であり、それぞれ植物油、エタノールが対応している。水素燃料とは直接関係がないので、簡単に触れる。

4.1. 油脂系燃料 (BDF)

油脂系の軽油利用は BDF (Bio-Diesel Fuel) と総称される。パーム椰子、菜種、大豆、ひまわりなど油糧作物は、植物油としてバイオマス資源としては最も高熱量 (38~40GJ/t) が得られ、木質の約2倍、石油の 85~90%のレベルである。昔から食用および灯火用に栽培されてきた。油脂原料としては、植物体の一部 (主に種子) だけが対象になるので、圧倒的な資源量を誇る木質バイオマスに比べると生産量としては少ない。

日本の BDF では廃食油回収資源が中心である。だが食油需要=2.3 百万 t/年、廃食油量推定値=0.4 百万 t/年、現在の軽油需要=33 百万 t/年を考慮すると、典型的な小規模、教育・啓発事業と考えられる。

植物油の物性は、分子量 700 前後、粘度 20~100Cst であるから、軽油 (分子量 200~250) 代替としては分子が大き過ぎる (=粘度が高過ぎる)。そこで、メタノール化分解によって、油脂分子を 3 分割する操作がよく行われる。その分解油を FAME (Fatty Acid Methyl Ester, 脂肪酸メチルエステル) と称する。この反応は単純だが、微量の水が妨害するので前処理が必要、またグリセリン・アルカリ廃水など副産物が多く後処理が必要で、かなりのエネルギー損失を伴う。粗い試算では、現在の FAME 事業では、廃油原料 Q_0 からその約 9 割が製品油 Q_1 になるが、その半分ほどが投入エネルギー各種 X として失われると見られる。

発想の転換としては、ディーゼルエンジン側の改良により高粘度油が使えるようにする SVO (Straight Vegetable Oil) システムがある。ドイツなどで普及 (BDF 全体の 1/4 くらいのシェアがある) している。国策として FAME を採るか、SVO を採るか、は植物油資源有効利用の立場から定量的な検討が必要である。

4.2. バイオエタノール

ガソリン代替には、沸点 78°C のエタノールが標的になる。エタノール (=酒精) は糖分 (または糖化可能な澱

粉など) の発酵によって容易に得られる。だが二つの問題点がある。

(1) 発酵性資源は、①糖質、②澱粉、③繊維である。発酵容易さの順は、①>②>③であるが、資源存在量の順は、逆に①<②<③、である。

(2) 資源①と②の利用については、食糧との資源競合という修羅場を招いた (2007 年)。

栽培型バイオエタノールでエネルギー収支比 (産出/投入、 $[Q_1 / X]$) が 8 以上と十分に大きいのは、ブラジルのサトウキビエタノールシステム (図 11) だけである。

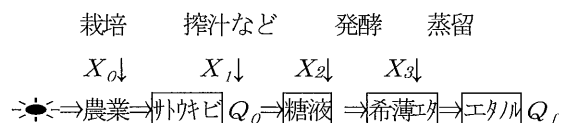


図 11. さとうきび・エタノールシステムにおけるエネルギー収支

図 11 の X_1 、 X_2 、 X_3 プロセスが非常に容易なのが成功の要因である。日本のバイオエタノール計画で候補とされる多収穫米はもっと不利で、栽培エネルギー X_0 の投入段階ですでに収穫物 Q_0 の値に迫る。現在、 X_0 を 1/10 に圧縮する研究開発が進行中である。農業系バイオマスは、栽培エネルギー X_0 (耕作、施肥、農薬、労役) などが大きく、それを節約すると収穫量も減るという関係があるので「燃料農業」への期待は多難の道である。

林業は面積当たりの生産性 (GJ/ha・年) は農業に及ばないのが普通であるが、耕作・施肥・農薬などが僅かで済むため、栽培エネルギー X_0 の負担が少ない。そのため「燃料林業」の可能性は広く認められている。最近では食糧競合のない草・木の繊維質 (リグノセルロースが主成分) を栽培・糖化してエタノール発酵を、というのが第 2 世代バイオエタノールとして提唱されている。

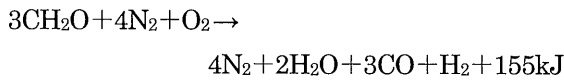
しかし、繊維系の糖化前処理は非常に困難なプロセスで、 X_0 の負担が少ない分を後段の X 増大で食いつぶしてしまっている。

5. ガス化燃料

5.1. 低カロリーガス化

バイオマス資源を部分燃焼すれば、簡単に低カロリーガスが得られ (図 12)、ガス化発電燃料として実用化されている。熱分解ガス化するためには高温が必要なので、自己の部分燃焼により補熱する (Q_0 からの損失)。燃焼

排煙により熱分解ガスは希釈されるから、部分燃焼度は低いほどよい。一般に原料バイオマスの1/3を燃焼消費するので、エネルギー収率 $[Q_f/Q_0]=2/3$ 、が限界である。バイオマス組成のモデル式を CH_2O とし、空気成分を $4N_2+O_2$ として反応式を示すと、



この反応式から見ると、水素源になるべき $[CO, H_2]$ ガスが、40%しか含まれていない。そのため、水素源としては不利である。

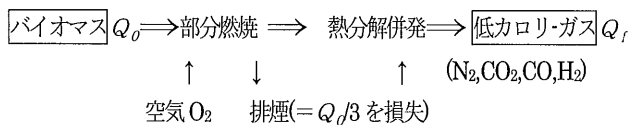
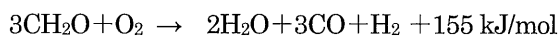


図 12. 低カロリーガス化におけるエネルギー収支

5.2. 高カロリーガス化

工業原料になる合成ガス ($CO+2H_2$) を得たい場合には、窒素 (N_2) による希釈を避けるために、空気 (組成 $=4N_2+O_2$) ではなく純酸素 (O_2) を使用する。

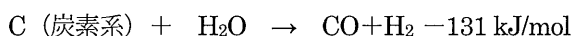


水素源になるべき $[CO, H_2]$ ガスは、66%含まれる。もし冷却して水蒸気 (H_2O) を除去すれば可燃ガスが100%になる。そのため水素源として、より好適である。

低カロリーガス製造の空気吹きと比べて酸素吹き生成ガスのエネルギー Q_f は同じであるが、空気から純酸素を得るために電力と設備 LCA によるエネルギー損失を差し引くとむしろ損なように見える。しかし、生成ガス温度は高くなるから、ガス化剤としての酸素量を絞ることができる (=部分燃焼度を低減できる) ので、結局両者のエネルギー回収率 $[Q_f/Q_0]$ は、ほぼ同等になる。

さらに、このガスをシフト反応によって水素転化を進め、メタノール合成に使う ($CO \cdot 2H_2$)、あるいは燃料電池に使う (H_2 のみ) 場合においては、同熱量の燃料容積がほぼ半減していることによる反応器小型化のメリットが大きい。

部分燃焼度を低減することは、ガス化におけるエネルギー回収率 $[Q_f/Q_0]$ を1に近づけることになるので、エネルギーシステムとして極めて望ましいが、水蒸気ガス化反応が強い吸熱反応であるため、部分燃焼度を下げられず、 $[Q_f/Q_0]$ を2/3以上に高めることは難しい。



C (バイオマス系) $+H_2O \rightarrow CO+H_2$ 約 66 kJ/mol だが外部の高温熱源から供給を受けられる場合には、水蒸気だけをガス化剤として水性ガス化反応 (吸熱反応) を促進 (図 13) し、部分燃焼をゼロにして高いエネルギー回収率 $[Q_f/Q_0=1]$ を得ることが可能である。理論的にはガス化吸熱の分だけ Q_f を増熱できる。バイオマス炭素の発熱量(kJ / モル-C)は種によって 455~465 とさまざまなので、約 460 とすれば、66 / 460 で 14%ほどの増熱が期待できる。

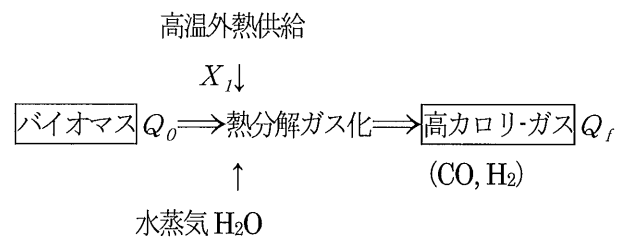
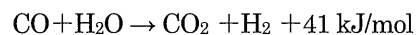


図 13. 高カロリーガス化システムにおけるエネルギー収支

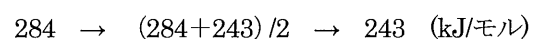
ただし、外熱 X_f に化石燃料を使えば、バイオマス活用の意義が薄れる。将来的には太陽炉熱などが可能性がある。現在ではバイオマス自己燃料の一部を燃やしてその熱でガス化を助ける。ただし生成ガスが燃焼排煙で希釈されないようなシステムが必要で、ロータリーキルンで間接加熱、2 塔流動層により 1 塔を熱媒体加熱用の燃焼塔に使う、などの工夫が行われている。だが、 X_f を自己燃料とする限り、エネルギー回収率 $[Q_f/Q_0]=2/3$ 、からなかなか高められないのが普通である。

6. バイオマス水素の得失

バイオマス水素は、酸素吹きガス化による $[CO, H_2]$ ガスの延長線上に現れる。水蒸気による CO の転化で水素 (H_2) を得る反応は、僅かな発熱の可逆反応である。



CO の燃焼熱 284 kJ/mol の約 14%なので、水素転換自体によるエネルギー損失も無視できない。つまり、



の順序にエネルギーは減少する。だから、バイオマスのガス化に際して、もし後続に燃焼発電など接続する場合には、水素を指向せず、 CO / H_2 比をなるべく高く維

持しておいた方が得である。

なお、バイオマスガス化において原料の固体バイオマスのエネルギーは1/3が失われるのが普通だから、もし、固体燃焼でも高効率発電(>40%)ができる大規模火力が使える状況が近傍にあれば、あえて1/3のエネルギー損失を先払いするガス化発電を行う意味はなくなる。

ガス化バイオマスをメタノール合成、FT合成反応などに提供する場合には、合成ガス(CO+2H₂)の比率に調整することが必要になる。メタノール合成反応は原料ガスの熱量に対して11%の発熱反応である。



したがってメタノールを火力などに向けるのはもったいないことであり、11%の損失に報いられる用途を探すべきと考えられる。ガス燃料と異なり、密度の高い液体燃料なので輸送・貯蔵性に優れていることが活かされなければならない。エネルギー用としての特徴としては、自動車に使える石油代替燃料、DMFCに象徴されるように最も燃料電池適性が高い液体燃料、最も低温で熱分解水素を発生できる液体、などが挙げられる。

水素は、燃料電池用の最良の燃料である。バイオマスからの変換連鎖のもっとも遠いところに位置しており、同時に、あらゆる燃料の中でもっとも熱量あたり体積の大きい燃料でもあるので、輸送・貯蔵性に問題があることも事実である。それゆえ、需要地における水素のオンサイト発生が重要になる。

バイオマスもまた空隙が多いため嵩張るのが特徴といわれる資源であり、輸送性が悪いため産地利用が提唱されている。しかしガス燃料に比べればコンパクトである。バイオマス水素という場合には、バイオマス→ガス化→精製→変換→水素、という連鎖を想定し勝ちであるが、バイオマス産地に水素需要を引き寄せるのは、かなりの無理がある。といって、水素需要地にバイオマスを運び込むのも、嫌われそうである。ここでは、エネルギー媒体としてメタノールを、うまく社会システムの上に乗せて行くことを検討して行きたいと思う。