

第4章 バイオマス

4.1 世界の賦存量

バイオマスエネルギーの賦存量（供給可能量、ポテンシャル）についてはこれまでも幾つかの研究事例が見られるが、ここでは賦存量の考え方と主な推定結果を整理した上で、現状における賦存量を試算する。

4.1.1 賦存量の考え方と主な推定事例

バイオマスは、「再生可能」そして「カーボンニュートラル」という2つの大きな特徴を有することから、地球環境問題の解決オプションと成り得る新たなエネルギー源として注目されており、現在、地球上には森林や海洋をはじめとする広範な地域にわたって膨大な量のバイオマスがストックとして存在する。また、同時に、そこでは光合成によって常に新たなバイオマスがフローとして生産されている。

ここで、「再生可能」を維持するとの前提条件に立てば、再生産を伴わないストックの消費は避けることが求められ、採取可能なバイオマス賦存量は、地球上における植物が光合成によって生産しているバイオマスの純1次生産量（光合成によって固定された全エネルギー量から植物の呼吸によって消費される量を差し引いた純生産）に等しい、と考えることができる。そして、この自然植生の純1次生産量は、陸上の森林だけでも250億トン～350億トン-C/年の生産量があるといわれており、この数値は人類の年間消費エネルギーの約10倍に相当する。

しかしながら、この光合成により生産された1次バイオマスは、既に人類をはじめ様々な生物にとっての食料として利用されており、さらに人類が営む社会活動において、食料以外の用途として様々な形でバイオマスを利用している。従って、エネルギー源としての賦存量を評価・推定するに際しては、これら既存のバイオマス利用との競合を考慮する必要がある。

こうした既存のバイオマスフローの利用競合を避けるために、エネルギー目的の植林や草本類の栽培により、新規のバイオマスを生産するエネルギープランテーションの導入が多くのシナリオで提案されている。しかし、この場合にはプランテーション用地の確保に際しての土地利用の競合を考慮する必要がある。例えば、耕地、住宅、工場など人類の活動空間としての土地需要の他、人類が直接的には利用していない森林などについても生物多様性、生態系を維持することが必要である。

このような競合を考慮しながら、エネルギー源としてのバイオマス賦存量を評価する場合には、その対象は大きく2つに分けられる。1つは、現時点において既に生産されながらも十分に利用されていない「廃棄物系バイオマス」、もう一つが現時点では十分な生産を行っていない未利用地・低利用地をエネルギーのために使用し生産する「プランテーション系バイオマス」である。

バイオマスエネルギーの賦存量（あるいはポテンシャル）は、これまでも幾つかの推定例が見られるが、それらにおいても概ね廃棄物系、プランテーション系という分類がなされている。

ここで、バイオマスエネルギーの賦存量の主な推定事例を第 4.1-1 表に示す。

研究者等により前提条件が異なるため、結果にばらつきや幅は見られるが、将来的なポテンシャルとして概ね 200～300（EJ）程度と推定されている。

第 4.1-1 表 バイオマスエネルギーの主な推定事例

研究者等（年）	結 果
RIGES ¹⁾ （Johanssonら）	バイオマスエネルギー供給量を 2025 年には 145EJ、2050 年には 206EJに。145EJの 55%はプランテーションから供給。
Larson ²⁾	2025 年の途上国におけるエネルギープランテーションによる供給可能量はアジア：31.2EJ、アフリカ：18.4EJ、ラテンアメリカ：22.3EJ。
土手ら ³⁾	2100 年のプランテーションによる供給可能量はシナリオに応じて 0～844（EJ）の幅で変動。
杉山ら ⁴⁾	2010 年～2020 年にはプランテーションにより 33.5EJのバイオマスエネルギーを供給。2100 年における供給可能量は、シナリオに応じて 0～353（EJ）の幅で変動。
山本ら ⁵⁾	2050 年にはエネルギー作物により 80EJ、バイオマス残余により 82EJを供給。2100 年にはそれぞれ 154EJ及び 113EJを供給。
WEC ⁶⁾	バイオマスエネルギー供給量を 1990 年の 47EJから 2020 年には 70EJに増進。うち、新型（商業用）バイオマスエネルギーを現在の 5EJから 25EJに。
Dessus et.al. ⁶⁾	バイオマスエネルギー供給量を 2020 年には 135EJとする。うち 51%は商業用森林から、17%は非商業用森林から（以上木材）、20%は廃棄物から、12%はプランテーションのエネルギー作物から供給。
EPA ⁶⁾	バイオマスエネルギー供給量を 2025 年には 136EJ、2050 年には 215EJに。

出所：1) “Renewable Energy”（T.B.Johansson et al,1993）

2) “CO₂ Mitigation Potential of Biomass Energy Plantation in Developing Regions（平成 6 年度「地球再生計画」に関する調査報告書参考資料集）”（Larson,1995）

3) “森林系バイオマス・エネルギーの供給量予測”（土手、小木、資源と環境、Vol.6, No.6, 1997）

4) 杉山大志、斎木 博、渡部良朋、中園 聡、藤野純一、電力中央研究所報告、Y95006(1995)

5) “世界土地利用モデルによるバイオマスエネルギーポテンシャルの評価”(山本、山地、電力中央研究所報告、Y96002、1996)

6) “エネルギー・資源ハンドブック”(エネルギー資源学会編、P232、1997)より引用

4.1.2 バイオマスエネルギーの現在の賦存量

前述のようにエネルギー源としてのバイオマスは廃棄物系とプランテーション系に分けられる。

ここでは、これらについて現在における賦存量の試算結果を示す。

(1) 廃棄物系バイオマス

推定方法

a．対象とするバイオマス

廃棄物系バイオマスとしては様々なものが想定され、林産系(木材残さ、くず、黒液など)、農業系(穀物等残さ、バガスなど)、狭義の廃棄物系(ゴミ、糞など)等に分類することが可能である。

廃棄物系バイオマスについては、その処理にあたってコスト面・環境面などから問題が発生しており、エネルギー回収によって有効な処理方法が提案できればその導入が大いに期待できる。

b．バイオマス資源量

これらの廃棄物系バイオマスは農業や林業等の生産に伴い発生するものであるが、廃棄物の発生量を具体的なデータとして直接得ることが困難である。そこで、バイオマス資源の発生源となる農産・林産物生産量並びに家畜頭数に対し、廃棄物発生率・残さ率等を仮定した上で積算する方法を用いた。この考え方はこれまでの事例においても主に用いられている。対象とする廃棄物系バイオマス、推定方法及び推定に用いた廃棄物発生率・残さ率を第 4.1-2 表に示す。

c．林産物・農産物生産量

上述の方法を用いるためには、バイオマス資源の発生源となる各種林産・農産物の生産量を把握する必要がある。ここでは、それらの生産量はFAOの統計⁸⁾を用いて整備するものとした。

d．エネルギー量

推定されるエネルギー源としての資源量からエネルギー量への換算に際し、ここでは単位資源量当りのエネルギー量(GJ/t)を林産系廃棄物:15(GJ/t)、農業系廃棄物:12(GJ/t)、畜産系廃棄物:15(GJ/t)と仮定するものとした。

4.1-2 表 対象とした廃棄物系バイオマス及び推定に用いた残さ率・廃棄物発生率

対象バイオマス		残さ率・発生率の 考え方()	残さ率・発生率 (t/t) (air-dry-ton)	
林産系	丸太残余	丸太生産量 × 残さ率	丸太生産量 あたり発生量	0.639
	燃料木材残余	燃料木材生産量 × 残さ率	燃料木材生産量 あたり発生量	0.250
	黒液	パルプ生産量 × 発生率	木材パルプ生産量 あたり発生量	1.180
	用材くず	用材生産量 × 発生率	用材生産量 あたり発生量	0.818
農業系	穀物残余	穀物生産量 × 残さ率	穀物生産量 あたり発生量	1.30
	サトウキビ 残余	サトウキビ生産量 × 残さ率	サトウキビ生産量 あたり発生量	0.28
	バガス	サトウキビ生産量 × 発生率	サトウキビ生産量 あたり発生量	0.15
畜産系	牛糞	牛頭数 × 発生率	牛 1 頭 あたり発生量	1.10
	羊・山羊糞	羊・山羊頭数 × 発生率	羊・山羊 1 頭 あたり発生量	0.18
	豚糞	豚頭数 × 発生率	豚 1 頭 あたり発生量	0.22
	水牛・駱駝糞	水牛・駱駝頭数 × 発生率	水牛・駱駝 1 頭 あたり発生量	1.46
	鶏糞	鶏頭数 × 発生率	鶏 1 頭 あたり発生量	0.037

出所：林産系... “ バイオマス・フローを考慮した世界土地利用エネルギーモデルの開発 ” (山本、山地、
電力中央研究所報告、Y96001、1996) ⁷⁾等より作成

農業系、畜産系... “ Renewable Energy ” (T.B.Johansson et al,1993) ¹⁾

推定結果

以上の方法により推定した廃棄物系バイオマスのエネルギー賦存量を第 4.1-3 表に示す。

世界全体では約 91 (EJ/y) と賦存量で、畜産系が最も大きく約 35 (EJ/y) (38%) 、農業系が約 33 (EJ/y) (36%) 、林産系が約 23 (EJ/y) (26%) となった。

エネルギー賦存量を地域別にみると、畜産系、農業系ではアジア地域のみで 45% を占め、林産系は北米とアジアで 58% を占めるという結果になり、全体ではアジアが約 40% にも達した。

第 4.1-3 表 廃棄物系バイオマス資源量及びエネルギー量の推定結果

	林産系 エネルギー量 (PJ/y) ¹	農業系 エネルギー量 (PJ/y) ²	畜産系 エネルギー量 (PJ/y) ³	エネルギー量 合 計 (PJ/y)
ア ジ ア	5,871	14,961	15,512	36,344
オセアニア	431	647	1,156	2,234
ヨーロッパ	5,001	5,854	4,379	15,234
北 米	7,748	5,193	2,209	15,150
南 米	1,946	3,301	5,473	10,720
アフリカ	2,035	1,844	5,126	9,005
その他地域	292	1,083	971	2,346
合 計	23,326	32,883	34,826	91,035

1：林産系廃棄物の単位重量当りエネルギー量を 15 (GJ/t) として算出

2：農産系廃棄物の単位重量当りエネルギー量を 12 (GJ/t) として算出

3：畜産系廃棄物の単位重量当りエネルギー量を 15 (GJ/t) として算出

(2) プランテーション系バイオマス

推定方法

a．対象とするバイオマス

エネルギープランテーションとして一般に提案されているのは「木本類あるいは草本類のなかでも成長量が高い作物を栽培し、成長が鈍る前に短いサイクルで伐採する」というものであり、該当する具体的な作物は気候帯によって異なるが、例えば、乾燥地帯であればユーカリ、寒冷地帯ではヤナギ、熱帯ではサトウキビ等の糖質系作物等が想定される。これらのバイオマス資源は、これまでの推定事例等ではエネルギー作物 (Energy Crops) として定義されていることが多い。

また、エネルギープランテーションは、エネルギー利用を目的としたバイオマス資源の生産ということになるが、この観点においては、上述のエネルギー作物以外に、現在でもエネルギーとして消費されている燃料木材 (Fuelwood/Charcoal) もプランテーション系バイオマスとして含めることができる。

したがって、ここではエネルギー作物及び燃料木材を対象とするものとした。

b．バイオマス資源量

プランテーション系バイオマスにおいては、前述の廃棄物系バイオマスとは異なり、

生産される全量を資源量として考えることができる。したがって、燃料木材の資源量は現時点における生産量となる。

一方、エネルギー作物の資源量は、その生産を目的としたプランテーション用地面積、並びに単位面積当たりの生産性（成長量）を想定することにより推定することができる。

c．プランテーション面積

エネルギープランテーションを実施・想定する場合には、その用地・面積の見積りには考慮すべき様々な制約因子がある。

例えば、生物多様性に配慮して天然林を除外し、既存の用途に利用されている人工林・農地あるいは住宅地なども除外した上で、現在の未利用・低利用地の一部をプランテーション用地とすることが望まれる。また、未利用地・低利用地を利用する場合においても、将来予測される人口増加に伴う農地等の拡大圧力についても配慮が必要であることから、休耕地なども対象外とする。一方、残された未利用・低利用地は土壌の肥沃度や気候条件などが植物の生育に必ずしも有利な条件で無かったり、エネルギー需要地である人口集中地域まで長距離輸送を必要とする等が予想されることから、その全てをプランテーションに転用することは経済的に困難であるかもしれない。

しかしながら、こうした条件を満たし得る土地面積を的確に把握することは非常に困難であるため、ここでは、Larsonによる考え方²⁾を引用し、現状の土地利用形態における「牧草地＋その他」の10%がプランテーション用地に転用可能と仮定するものとした。引用に従った理由は、対象地及びその比率の設定が、土地利用の競合あるいは立地条件の制約を考慮したうえで、それほど過大評価にはならない条件であろうとの判断による。

d．単位面積当たりの生産性

プランテーションにより生育される樹木の成長速度や生産量は、気候帯により適した樹木が異なる。したがって厳密にはプランテーション用地の土壌やその地域の日照量や降水量等を反映することが望ましいが、そのためにはプランテーション用地を具体的に想定し、その局所レベルにおけるデータを用いる必要がある。

したがって、ここでは単位面積当たりの生産量（単収）をLarsonの文献を参考に仮定するものとし、その地域別平均値からアジアでは12.0（t/ha）、南米では15.7（t/ha）、アフリカでは8.3（t/ha）とした。Larson²⁾はブラジルのユーカリ林プランテーションの経験に基づく年間降水量と単収の相関を求め、この相関と対象各国の年間降水量を用いることにより、各国における単収を仮定している。ただし、この設定値は商業プランテーションとしての良好な条件を前提としているため、プランテーション用地として比較的良好な条件が前提とされている点に注意が必要である。

また、同事例では対象とされていない欧米・オセアニア等における単収は、Johanssonら¹⁾が用いている15（t/ha）と仮定した。

e．土地利用データ及び燃料木材生産量

土地利用データ、燃料木材生産量のいずれもFAOの統計⁸⁾を用いて整備するものとした。

f．エネルギー量

エネルギープランテーションにより生産されるバイオマス資源の単位資源量当りのエネルギー量は、20 (GJ/t) と仮定するものとした。

推定結果

a．エネルギー作物

以上の方法により推定したエネルギー作物のプランテーション面積、資源量及びエネルギー賦存量を第 4.1-4 表に示す。

想定したプランテーション面積 7.37 億haから 91.3 億t/yが生産され、世界全体でのエネルギー賦存量が約 183 (EJ/y) となった。この値は廃棄物系バイオマスの賦存量約 56 (EJ/y) の約 3.2 倍に相当する。

エネルギー賦存量を地域別にみると、アジア地域が 26%を占め、アフリカの 19%が続いているが、廃棄物系バイオマスほどの地域的偏りが少なく、各地域とも一定量のポテンシャルを有するとの結果となった。

第 4.1-4 表 エネルギー作物のプランテーション面積、資源量及びエネルギー量の推定結果

	プランテーション面積 (1000ha)	単位面積 当り収量 (t/ha)	資源量 (100 万t/y)	エネルギー量 (PJ/y)
ア ジ ア	197,026	12.0	2,364	47,286
オセアニア	58,991	15.0	885	17,697
ヨーロッパ	99,685	15.0	1,495	29,905
北 米	86,222	15.0	1,293	25,867
南 米	70,837	15.7	1,112	22,243
アフリカ	205,742	8.3	1,708	34,153
その他地域	18,325	15.0	275	5,497
合 計	736,827	-	9,132	182,649

単位重量当りエネルギー量を 20 (GJ/t) として算出

b．燃料木材

燃料木材の資源量 (生産量) 及びエネルギーとしての賦存量を第 4.1-5 表に示す。

世界全体の資源量は 13.8 億 t となり、これらの資源量から得られるエネルギー賦存量は、世界全体は約 28 (EJ/y) となった。この値は廃棄物系バイオマスによるエネルギー量 (約 56EJ/y) の約 2 分の 1 に相当するが、林産系廃棄物によるエネルギー量 (約

23EJ/y) よりも大きい。

エネルギー賦存量を地域別にみると、アジア地域が 48% と非常に集中しており、アフリカの 28% が続いているが、地域的な偏在性が大きい。

第 4.1-5 表 燃料木材の資源量及びエネルギー量の推定結果

	資源量 (100 万t/y)	エネルギー量 (PJ/y)
ア ジ ア	662	13,237
オセアニア	7	131
ヨーロッパ	65	1,302
北 米	75	1,502
南 米	144	2,888
アフリカ	378	7,563
その他地域	45	893
合 計	1,376	27,718

単位重量当りエネルギー量を 20 (GJ/t) として算出

(3) 現在の賦存量

以上の結果を整理すると第 4.1-6 表のようになる。

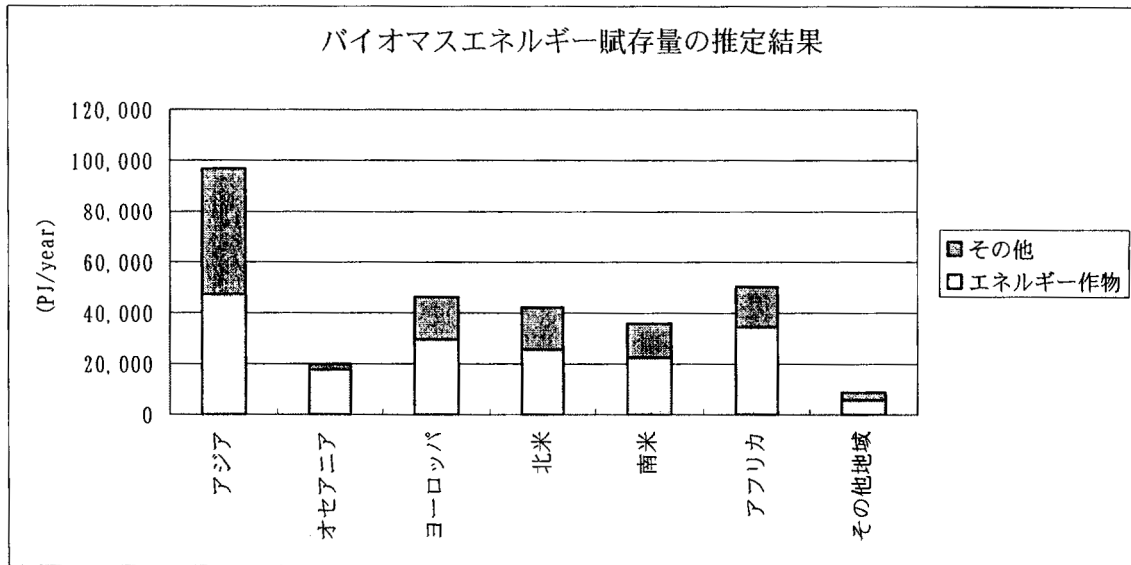
世界全体で約 301 (EJ/year) の賦存量が存在し、バイオマス種別に見るとプランテーションによるエネルギー作物が圧倒的に多く約 61% を占め、地域別ではアジアが最も多く約 32% を占めることが分かった。

第 4.1-6 表 バイオマスエネルギー賦存量の推定結果

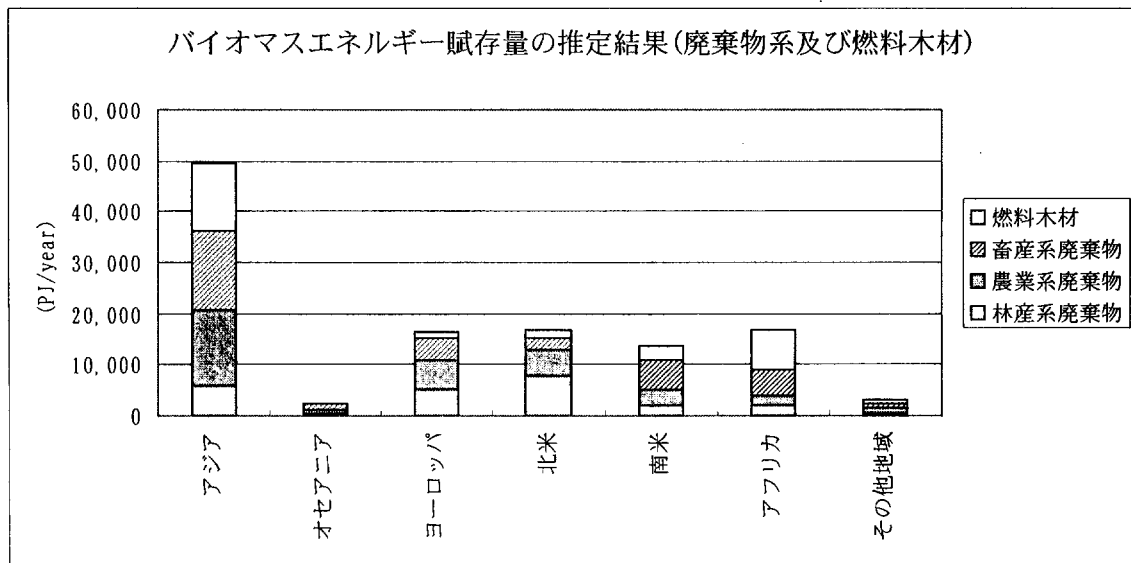
単位：PJ/year

	廃棄物系			プランテーション系		合 計
	林産系	農業系	畜産系	エネルギー作物	燃料木材	
ア ジ ア	5,871	14,961	15,512	47,286	13,237	96,867
オセアニア	431	647	1,156	17,697	131	20,062
ヨーロッパ	5,001	5,854	4,379	29,905	1,302	46,441
北 米	7,748	5,193	2,209	25,867	1,502	42,519
南 米	1,946	3,301	5,473	22,243	2,888	35,851
アフリカ	2,035	1,844	5,126	34,153	7,563	50,721
その他地域	292	1,083	971	5,497	893	8,736
合 計	23,326	32,883	34,826	182,649	27,518	301,202

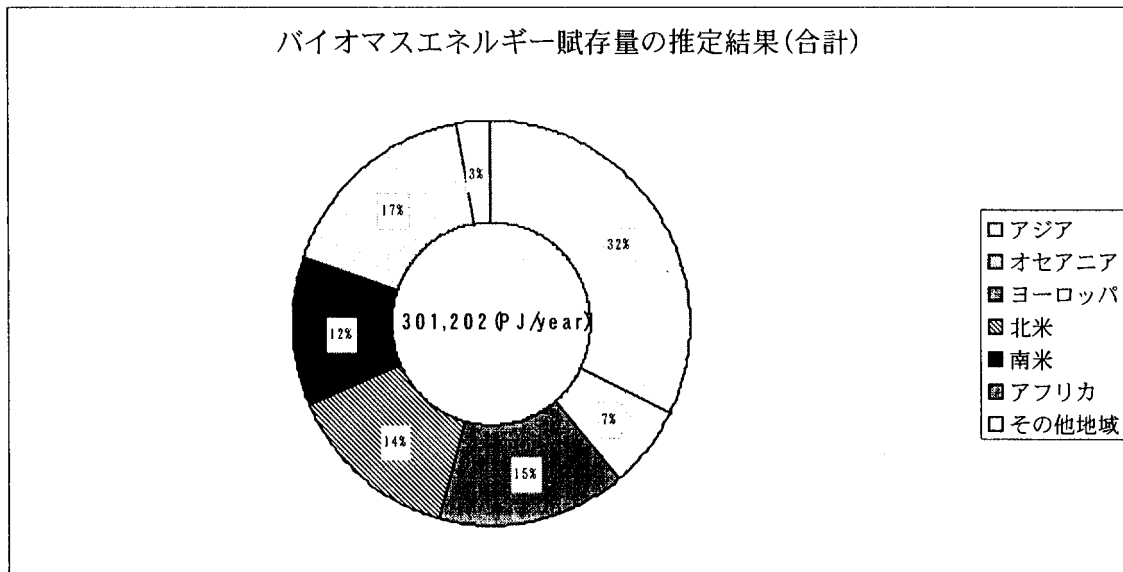
第 4.1-1 図 バイオマスエネルギー賦存量の推定結果



第 4.1-2 図 廃棄物系バイオマス及び燃料木材のエネルギー賦存量



第 4.1-3 図 バイオマスエネルギー賦存量の推定結果（地域別構成比）



4.2 現在の導入量

バイオマスは古くから薪炭等を燃焼させるといった形態にてエネルギーとして利用されており、途上国においては現在でも一次エネルギーとしての主要な位置を占めている。

ここでは、現在のバイオマスエネルギー消費実績を整理する。

4.2.1 世界のバイオマスエネルギー消費実績

バイオマスは、薪炭等を燃焼させるといった様式により古くからエネルギーとして利用されており、途上国においては現在でも一次エネルギーとしての主要な位置を占めている。

第 4.2-1 表に 1996 年におけるバイオマスエネルギーの消費実績を、一次エネルギー供給とともに示す。

一次エネルギー供給 (TPES) に占める割合は世界全体で 11.0%、OECD 諸国では 3.1%、Non-OECD 諸国では 20.5% となっている。

バイオマスエネルギー消費量を地域別にみると OECD 諸国が 15%、Non-OECD 諸国が 85% となり、アジア地域 (中国含む) が 50% 以上を占めている。

第 4.2-1 表 1996 年のバイオマスエネルギー消費量

単位：PJ/year

		Biomass	TPES	Share of Biomass
OECD	Europe	2,340	71,887	3.3%
	North America	3,665	105,214	3.5%
	Pacific	571	33,076	1.7%
	OECD-total	6,575	210,177	3.1%
Non-OECD	Africa	9,236	18,673	49.5%
	Latin America	3,385	17,752	19.1%
	Asia(excluding China)	14,622	40,235	36.3%
	China	8,628	45,929	18.8%
	Former USSR	803	39,021	2.1%
	Non-OECD-Europe	130	5,108	2.5%
	Middle East	40	13,230	0.3%
	Non-OECD-total	36,844	179,907	20.5%
World Total		43,419	395,569	11.0%

出所：“Energy Statistics and Balances of Non-OECD Countries 1995-1996 ” (OECD/IEA,1998)⁹⁾

4.2.2 バイオマス種類別の消費実績

以上のように、バイオマスエネルギーは既に世界の一次エネルギー供給量の 11%相当の量が導入・消費されているが、ここで、このようなバイオマスエネルギー消費のバイオマス種別の内訳を整理する。

第 4.2-2 表に、バイオマスエネルギー消費の種類別内訳を示す。ここで、Solid Biomass and Animal Productsとは、4.1 にて推定対象としたような廃棄物系バイオマス及び燃料木材等としての利用を意味し、Gas/Liquid from Biomassとはバイオマス資源の発酵等により気体、液体燃料としての利用である。また、Municipal Waste、Industrial Wasteは、日本で言うゴミ発電・焼却熱利用等の廃棄物利用に相当する。

バイオマス種別の消費量を見ると、圧倒的にSolid Biomass and Animal Productsが多く、世界全体では 96.7%、Non-OECD諸国では 98.9%を占めている。また、OECD諸国においてもSolid Biomass and Animal Productsが 84.4%を占めているが、ゴミ発電・焼却熱利用等の廃棄物利用がNon-OECD諸国と比較して多いことが分かる。

第 4.2-2 表 バイオマスエネルギー消費の種類別内訳 (1996 年)

単位: PJ/year

		Total	Solid Biomass and Animal Products	Gas/Liquid from Biomass	Municipal Waste	Industrial Waste
OECD	Europe	2,340	1,891	102	215	131
	North America	3,665	3,130	126	286	123
	Pacific	570	527	6	27	11
	total	6,575	5,547	234	529	265
Non-OECD	Africa	9,235	9,235	0	0	0
	Latin America	3,385	3,088	297	0	0
	Asia(excluding China)	14,622	14,622	0	0	0
	China	8,628	8,578	50	0	0
	Former USSR	803	738	0	0	65
	Europe	130	118	0	0	12
	Middle East	40	40	0	0	0
	total	36,844	36,421	347	0	76
World		43,419	41,968	581	529	341

出所: “ Energy Statistics and Balances of Non-OECD Countries 1995-1996 ” (OECD/IEA,1998)⁹⁾

第 4.2-3 表にはNon-OECD諸国におけるSolid Biomass and Animal Products消費の内訳を示す。ここで、Woodは主に燃料木材、Vegetal Wasteとは農業系廃棄物を意味し、Black Liquorは黒液である。

種類別の消費量を見ると、Wood（燃料木材）が多く 60%を占め、それに次ぐのが農業系廃棄物（23%）である。地域別にみると、中国ではVegetal Wasteの消費量が全体の 50%以上でWoodを上回っているが、他の地域ではWoodが主流である。

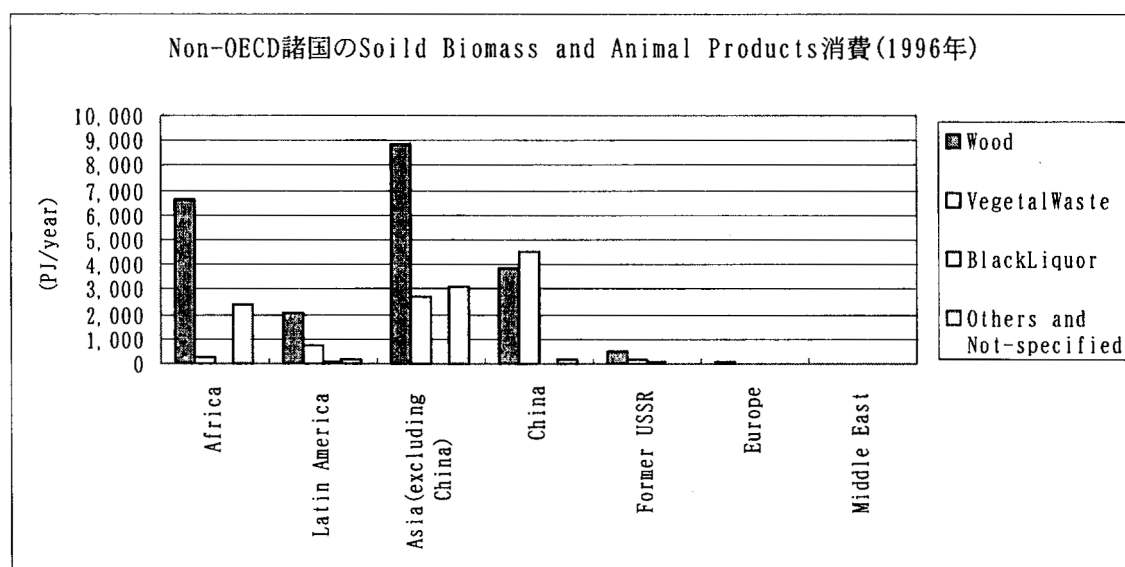
第 4.2-3 表 Non-OECD諸国のSolid Biomass and Animal Products消費の内訳 (1996 年)

単位: PJ/year

	Biomass Total	Solid Biomass and Animal Products				
		Total	Wood	Vegetal Waste	Black Liquor	Others and Not- specified
Africa	9,235	9,235	6,604	237	0	2,395
Latin America	3,385	3,088	2,074	778	107	129
Asia(excluding China)	14,622	14,622	8,816	2,728	0	3,079
China	8,628	8,578	3,879	4,529	0	170
Former USSR	803	738	499	157	83	0
Europe	130	118	110	8	0	0
Middle East	40	40	35	5	0	0
total	36,844	36,421	22,016	8,442	190	5,773

出所: "Energy Statistics and Balances of Non-OECD Countries 1995-1996" (OECD/IEA,1998)⁹⁾

第 4.2-1 図 Non-OECD諸国のSolid Biomass and Animal Products消費

出所: "Energy Statistics and Balances of Non-OECD Countries 1995-1996" (OECD/IEA,1998)⁹⁾

4.2.3 用途(部門)別のバイオマスエネルギー消費実績

ここでは、バイオマスエネルギー消費の用途(部門)別の内訳を示す。

第 4.2-4 表は前述のバイオマスエネルギー消費について、用途(部門)別の内訳を整理したものである。

家庭用エネルギーとしての消費量が多く、世界全体では 69%、Non-OECD諸国では 76%

を占めている。中でも、中国では全量が家庭用として消費されている。

一方、OECD諸国では家庭用消費が32%程度と比較的少なく、エネルギー転換が38%を占めている。

第 4.2-4 表 バイオマスエネルギー消費の部門別内訳（1996 年）

単位：PJ/year

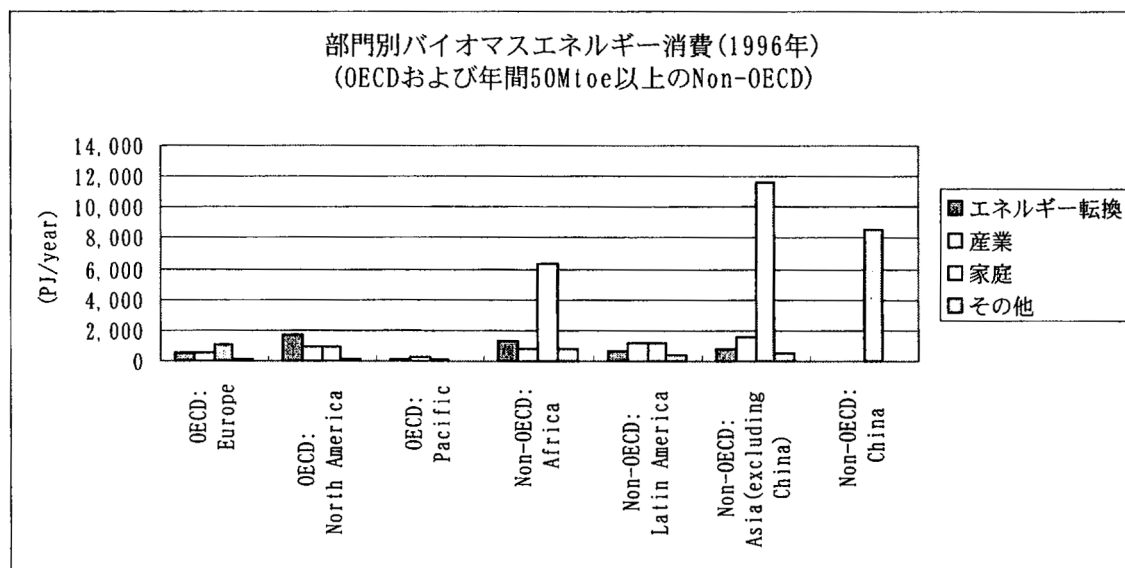
		Total	エネルギー 転換	産業	家庭	その他
OECD	Europe	2,340	590	475	1,085	190
	North America	3,665	1,711	928	928	99
	Pacific	570	194	228	97	51
	total	6,575	2,494	1,631	2,109	340
Non-OECD	Africa	9,235	1,349	829	6,330	727
	Latin America	3,385	640	1,167	1,131	447
	Asia(excluding China)	14,622	828	1,585	11,640	570
	China	8,628	0	0	8,402	0
	Former USSR	803	291	72	177	263
	Europe	130	11	18	85	15
	Middle East	40	11	5	0	24
	total	36,844	3,130	3,675	27,992	2,046
World		43,419	5,625	5,306	30,101	2,387

出所：“Energy Statistics and Balances of Non-OECD Countries 1995-1996 ” (OECD/IEA,1998)⁹⁾

第 4.2-5 表には、Non-OECD諸国のバイオマスエネルギー消費のほとんどを占めるSolid Biomass and Animal Productsについて、その種類別に用途（部門）別の内訳を整理したものである。

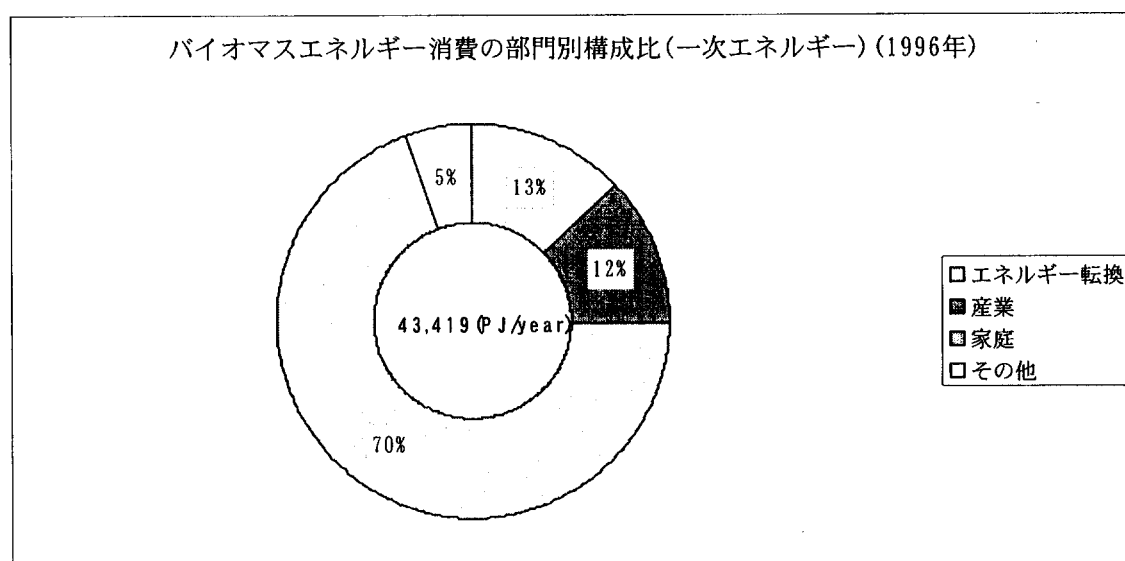
Wood（燃料木材）の消費内訳は76%が家庭用、13%がエネルギー転換用、6%が産業用となっており、Vegetal Waste（農業系廃棄物）は家庭用が74%、エネルギー転換用が3%、産業用が22%と、産業用が比較的多い。また、黒液は家庭用としては使用されていない。

第 4.2-2 図 バイオマスエネルギー消費の部門別内訳(OECD及び年間 50Mtoe以上のNon-OECD)



出所：“ Energy Statistics and Balances of Non-OECD Countries 1995-1996 ” (OECD/IEA,1998)⁹⁾

第 4.2-3 図 バイオマスエネルギー消費の部門別構成比 (世界計)



出所：“ Energy Statistics and Balances of Non-OECD Countries 1995-1996 ” (OECD/IEA,1998)⁹⁾

第 4.2-5 表 Non-OECD諸国のSolid Biomass and Animal Productsの用途別消費 (1996 年)

単位: PJ/year

	Biomass Total	Solid Biomass and Animal Products				
		Total	Wood	Vegetal Waste	Black Liquor	Others and Not- specified
Africa	9,235	9,235	6,604	237	0	2,395
エネルギー転換	1,349	1,349	1,349	0	0	0
産業	829	829	727	101	0	1
家庭	6,330	6,330	3,928	77	0	2,325
その他	727	727	600	58	0	68
Latin America	3,385	3,088	2,074	778	107	129
エネルギー転換	640	636	515	86	19	16
産業	1,167	1,165	334	655	83	94
家庭	1,131	1,131	1,114	0	0	17
その他	447	156	111	37	5	3
Asia(excluding China)	14,622	14,622	8,816	2,728	0	3,079
エネルギー転換	828	828	819	9	0	0
産業	1,585	1,585	250	1,047	0	287
家庭	11,640	11,640	7,638	1,671	0	2,331
その他	570	570	109	0	0	461
China	8,628	8,578	3,879	4,529	0	170
エネルギー転換	0	0	0	0	0	0
産業	0	0	0	0	0	0
家庭	8,402	8,578	3,879	4,529	0	170
その他	0	0	0	0	0	0
Former USSR	803	738	499	157	83	0
エネルギー転換	291	275	80	113	81	0
産業	72	33	24	8	1	0
家庭	177	177	166	12	0	0
その他	263	254	229	25	0	0
Europe	130	118	110	8	0	0
エネルギー転換	11	8	4	4	0	0
産業	18	13	8	5	0	0
家庭	85	85	85	0	0	0
その他	15	13	13	0	0	0
Middle East	40	40	35	5	0	0
エネルギー転換	11	11	11	0	0	0
産業	5	5	0	5	0	0
家庭	0	0	0	0	0	0
その他	24	24	24	0	0	0
total	36,844	36,421	22,016	8,442	190	5,773
エネルギー転換	3,130	3,106	2,778	211	101	16
産業	3,675	3,630	1,342	1,822	84	382
家庭	27,992	27,941	16,810	6,289	0	4,842
その他	2,046	1,744	1,086	120	5	532

出所: " Energy Statistics and Balances of Non-OECD Countries 1995-1996 " (OECD/IEA,1998)⁹⁾

4.2.4 エネルギー転換部門におけるバイオマスエネルギー消費実績

以上のように、現在のバイオマスエネルギー消費におけるエネルギー転換部門に占める割合は世界全体では約 13%、OECD諸国においては約 38%がエネルギー転換部門による消費である。

ここでは、エネルギー転換部門におけるバイオマスエネルギーの内訳を整理する。

(1) 一次エネルギー供給

エネルギー転換部門において一次エネルギーとして供給・消費されているバイオマスエネルギー量を整理した結果を第 4.2-6 表に示す。

世界全体のエネルギー転換部門におけるバイオマスエネルギー消費のうち、約 16%が発電所用、約 30%がCHPプラント用、約 6%が熱供給プラント用となり、これら以外の消費が約 48%である。

OECD諸国について見ると約 31%が発電用、約 64%がCHPプラント用、約 5%が熱供給プラント用とほぼ全量の内訳が特定できる。一方、Non-OECD諸国では約 5%が発電所用、約 3%がCHPプラント用、約 6%が熱供給プラント用となるが、約 86%はそれ以外の特定されない用途である。

この発電所用に供給されているバイオマスエネルギー量は、世界全体では発電所用一次エネルギー供給量の約 0.8%に相当し、OECD諸国では約 1.7%、Non-OECD諸国では約 0.4%に相当する。

第 4.2-6 表 エネルギー転換部門におけるバイオマスエネルギー消費の内訳 (1996 年)

単位: PJ/year

		Total	発電	CHP プラント	熱供給 プラント
OECD	Europe	590	139	349	128
	North America	1,711	460	1,218	0
	Pacific	194	163	31	0
	total	2,494	762	1,597	128
Non-OECD	Africa	1,349	0		
	Latin America	641	147		
	Asia(excluding China)	828	9		
	China	0	0		
	Former USSR	291	0		
	Europe	11	5		
	Middle East	11	0		
	total	3,130	159	103	194
World		5,625	920	1,700	324

Non-OECD諸国においては発電用以外不明。

出所: “ Energy Statistics and Balances of Non-OECD Countries 1995-1996 ” (OECD/IEA,1998)⁹⁾

“ Energy Balances of OECD Countries 1995-1996 ” (OECD/IEA,1998)¹⁰⁾

(2) 発電電力及び熱供給量

エネルギー転換部門において発電されている電力量、及び熱エネルギーとしての供給量を第 4.2-7 表に示す。

Non-OECD諸国における発電所からの発電電力以外のデータが得られていないが、発電所による発電電力量は約 75TWh、OECD諸国のCHPプラント分を合わせると約 136TWhとなり、この発電電力量は、1996 年における世界全体の電力消費量の約 1.1%に相当する。

一方、CHPプラント及び熱供給プラントによる熱エネルギーとしての供給量は、OECD諸国の合計で約 258PJとなる。

第 4.2-7 表 エネルギー転換部門におけるバイオマスエネルギー消費の内訳 (1996 年)

		発電電力量 (GWh)		熱供給量 (PJ)	
		発電所	CHP プラント	CHP プラント	熱供給 プラント
OECD	Europe	12,885	23,102	100	128
	North America	30,948	36,003	29	0
	Pacific	21,228	2,858	0	0
	total	65,031	61,963	129	128
Non-OECD	Africa	0			
	Latin America	10,014			
	Asia(excluding China)	265			
	China	0			
	Former USSR	0			
	Europe	5			
	Middle East	0			
	total	10,284			
World		75,315	61,963 ~	129,427 ~	128,226 ~

Non-OECD諸国のCHPプラント、熱供給プラントによる出力は不明。

出所：“ Energy Statistics and Balances of Non-OECD Countries 1995-1996 ” (OECD/IEA,1998)⁹⁾

“ Energy Balances of OECD Countries 1995-1996 ” (OECD/IEA,1998)¹⁰⁾

4.3 現在の利用分野

現在のバイオマスエネルギーの消費実績においては、そのほとんどが家庭用であり、現在の利用分野の大半は、家庭等において燃焼させ熱を得る、ということになる。しかしながら、それ以外の利用分野として、エネルギー転換部門における発電用並びにCHP・熱供給プラント用、その他のGas/Liquidとしての利用もみられ、このGas/Liquidは発酵により得られる燃料でGasとはメタン、Liquidとはエタノールが主たるものと推測される。

ここではこれらの用途を踏まえた上で、現在利用されている技術（実証含む）の概略を整理する。

4.3.1 バイオマスエネルギー利用技術の種類

第 4.3-1 表にバイオマスエネルギーの利用技術の例を示す。

バイオマスをエネルギーとして利用する技術は、研究開発段階の技術を含めると直接燃焼、熱化学燃料変換、生物化学的変換に大別することが可能である。

直接燃焼とはバイオマス資源を原料として直接燃焼し、熱あるいは電力として利用するものである。熱化学的変換、生物科学的変換は、まず、バイオマス資源の燃料としての性

状を転換するガス化、液化という技術があり、得られる燃料が液体の場合には、その精製等により液体燃料として利用することができる。得られる燃料が気体である場合には、それらを原料として発電等を行う、あるいはさらに液体燃料に転換する、という技術が必要となる。

これらのうち、現時点で実用化されている技術は、バイオマス資源を直接原料とする直接燃焼、並びに生物化学的変換の中の糖質系バイオマス为原料とするエタノール発酵である。その他の技術はいずれも実証・研究段階にあるが、例は少ないものの、実証運転等が実施されている技術もある。

第 4.3-1 表 バイオマスエネルギー利用技術の種類と利用・導入状況

(導入状況：○…導入・実証例あり、…研究段階)

バイオマスエネルギー利用技術			利用・導入状況
直接燃焼		直接燃焼	実用化
		混焼	
		バイオブリケット	
熱化学的変換	加熱によるガス化・液化	熱分解ガス化	○
		熱分解液化	
		高压ガス化	
		高压液化	
	変換燃料からの応用	ガスタービン発電	○
		ガス化エンジン発電	○
		メタノール合成	
生物化学的転換	生物発酵によるガス化・液化	エタノール発酵（糖質系）	実用化
		エタノール発酵（木質系）	
		メタン発酵	○
		水素発酵	
	変換燃料からの応用	消化ガス発電	○

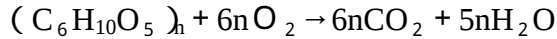
4.3.2 現状の利用分野

ここでは、バイオマスエネルギーの現状の利用分野として、既に実用化している直接燃焼及びエタノール発酵、並びに導入・利用事例が見られるメタン発酵・発電、バイオマスガス化・発電について、その概略を記す。

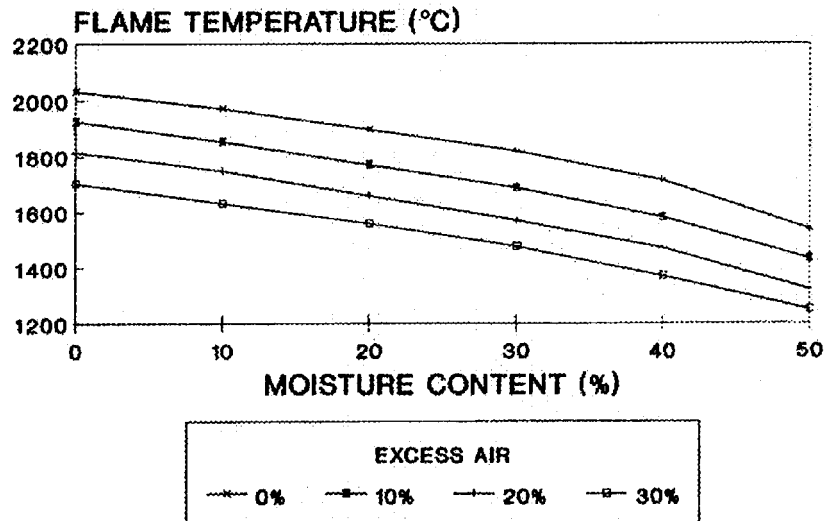
(1) 直接燃焼

バイオマス資源を直接燃焼させて（熱）エネルギーを得る技術である。

燃焼に伴う反応は例えば下式のようにあり、燃焼温度はバイオマス資源中の水分含有量や酸素量によって異なってくる。



第 4.3-1 図 水分含有量、酸素量と燃焼温度の関係



出所：“ Biomass for Renewable Energy, Fuels and Chemicals ” (D.L.Klass, 1998)¹¹⁾

バイオマス資源から直接燃焼によってエネルギーを得る具体的な転換技術として

Residential and Small Commercial System

Solid Waste Incineration

Electric Power Production

が挙げられる。

Residential and Small Commercial System

丸太や薪を直接燃やして熱エネルギーを得る、主に家庭用の在来型バイオマスエネルギーの利用形態である。現在でも途上国農村部等にて消費されるエネルギーの大半はこの形態によるものと言われている。エネルギー転換に必要な装置はWoodstoveであるが、酸素供給の様式等によってその効率は 13% ~ 75% という大きな幅がある。

Solid Waste Incineration (焼却熱利用)

バイオマスを直接燃焼し、より大きな規模で熱エネルギーを得る形態であり、いわゆる廃棄物焼却熱利用である。この場合には、農業廃棄物や林産廃棄物、MSW、廃棄物固形化燃料 (RDF) 発電など様々なバイオマス資源が燃焼に利用される。

Electric Power Production (発電)

バイオマス燃料を直接燃焼して熱エネルギーに変換し、蒸気タービンによる発電あるいは熱供給 (コージェネ含む) としてエネルギー利用する。燃料としては主に廃木

材（チップ・樹皮など）が利用されるケースが多く、発電あるいはボイラー燃料として多くの導入事例がある。

第 4.3-2 表 全米でのバイオマス燃焼発電（蒸気ボイラー）の燃料種別

Feedstock	Portion (%)
Wood Fired	77
MSW	11
Agricultural gas	7
Landfill gas	4
digesters	1

木材の大半は林業廃棄物

出所：The Potential of Renewable Energy(DOE,1990)¹²⁾

バイオマスは多量の水分を含み（生木の含水率は約 50%）、自然乾燥を行っても含水率を 20%程度まで低下させるのが精一杯である。こうした特性から、バイオマス燃焼による熱回収効率は同じ固体燃料である石炭よりも低いものに留まることが多く、全米でのバイオマス直接発電を通じての効率は 14%～18%のレベルにすぎず、同様の蒸気タービン方式による石炭火力に比して低い効率に留まっている。これは稼働率・負荷率自体が低めに抑制されていることも大きな原因である。

一方、Abelsonらによる発電効率の研究によれば、トータルの熱効率には明瞭なスケールメリットがある。

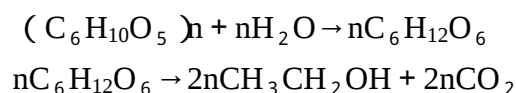
第 4.3-3 表 バイオマス直接燃焼発電の効率の検討

規 模（乾燥ton/day）	50	100	500	1,000
送電端電力（MW）	1.8	4.3	27.3	55.7
総合効率	17.2	20.9	26.4	26.8

出所：Abelsonら（1980）¹³⁾

(2) エタノール発酵

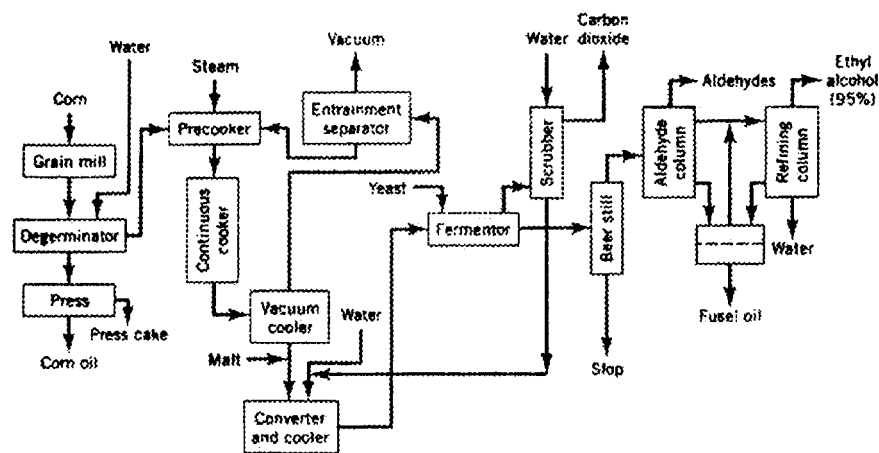
エタノールの合成はエチレンを原料とする工業的製法もあるが、下記の反応式によりバイオマス資源から得ることができる。この反応がエタノール発酵である。



バイオマス中の糖質・デンプンを発酵してエタノールを得る技術は成熟段階にある。主

な原料としてはサトウキビ、トウモロコシなどが用いられている。トウモロコシを原料とした場合のエタノール発酵プロセスの例を第 4.3-2 図に示すが、発酵プロセスは、概ね pH3 ~ 5、27 ~ 38 の条件下で 2 ~ 3 日間の反応により転換される。バイオマス中の糖分の約 90% はエタノールに転換されエネルギー変換率でも約 80% といわれるが、原料バイオマス中の糖質・炭水化物の含有率によって原料重量当りのエタノール生成量は異なる。その例を表 4.3-4 に示す。また、蒸留のために生成されたエタノールのおよそ半分のエネルギーを消費するとされている。

第 4.3-2 図 エタノール発酵プロセスの例



出所：“ Biomass for Renewable Energy,Fuels and Chemicals ” (D.L.Klass,1998)¹¹⁾

第 4.3-4 表 バイオマス資源からのエタノール合成可能量の例

Feedstock	Yield(L/t)
Apples	61
Babassu	80
Barley	330
Buckwheat	348
Carrots	41
Cassava	180
Cellulose	259
Chees whey	23
Corn	355-370
Dates(dry)	330
Figs(dry)	250
Grapes	63
Jerusalem artichoke	83
Molasses	280-288
Oats	265
Peaches	48
Pears	48
Pineapples	65
Plums	45
Potatoes	96
Prunes(dry)	300
Raisins	340
Rice(rough)	332
Rye	329
Sorghum(grain)	332
Sorghum(sweet)	44-86
Sugar beets	88
Sugarcane	160-187
Sweet potatoes	125-143
Wheat	355
Yams	114

出所：“ Biomass for Renewable Energy,Fuels and Chemicals ” (D.L.Klass,1998)¹¹⁾

(3) メタン発酵（嫌気性消化）

メタン発酵の仕組みは、嫌気性条件下で微生物の働きにより有機物が低分子の脂肪酸やアルコールなどに分解され、これらの物質が嫌気性メタン菌のもつ酵素によってメタンに変換される、というものである。こうして嫌気性消化によって得られた生成ガスは一般にバイオガスといわれ、60%程度のメタンと二酸化炭素が主成分となっている。

このメタン発酵は、廃棄物処理の方法の一つとして、古くから取り組まれてきているが、近年、単なる廃棄物処理に留まらず、得られたバイオガス中のメタンをエネルギーとして利用する技術の実証・導入が積極的に行われ始めている。

また、このような嫌気性消化によって得られたバイオガスを発電に利用する例も幾つか見られている。

メタン発酵

メタン発酵の反応熱損失はメタンの保有熱量 213kcal/mol の約 1 割強で、原料有機物エネルギーの大部分が回収できる。しかし、分解があまりに遅い物質は発酵途中で打ち切ることになるため、メタン収率は半分程度に留まるケースが多い。

一般的な反応条件としては、36℃ で 1% ~ 2% 濃度の原料を 30 日間程度掛けて消化している。これに対し、荏原製作所などが開発したメビウスシステムでは、約 55℃ という条件下で高濃度（10% ~ 15%）かつ短期間（16 日間）で効率的なバイオガス回収が可能であるとしている。

メタン発酵資源の対象となるのは、自燃境界線上の 50% ~ 80% 含水有機物（都市ごみ、農林廃棄物）及び自燃性のない 90% 以上含水の高水分バイオマス（畜産廃棄物、し尿、下水汚泥など）灰分が主な腐食・汚泥などである。これらは元来、何らかの処理を必要とされている廃棄物であり、その処理費用が掛かっていることから、他のバイオマスエネルギー利用技術と比べ、コスト面の制約が一般に小さくなる。

また、メタン発酵プロセスは、加水分解→酸生成→メタン生成という三つのステップに分けることができるが、この酸生成を担う低分子脂肪酸生成菌とメタン発酵菌という 2 種類の微生物群を異なる発酵槽で処理する Two-Phase 処理を行うことによって発酵速度を改善することができる。これは、二つの微生物群のそれぞれ異なる最適発酵条件を与えることが可能になるためであり、メタン濃度及び収率にも向上がみられる。

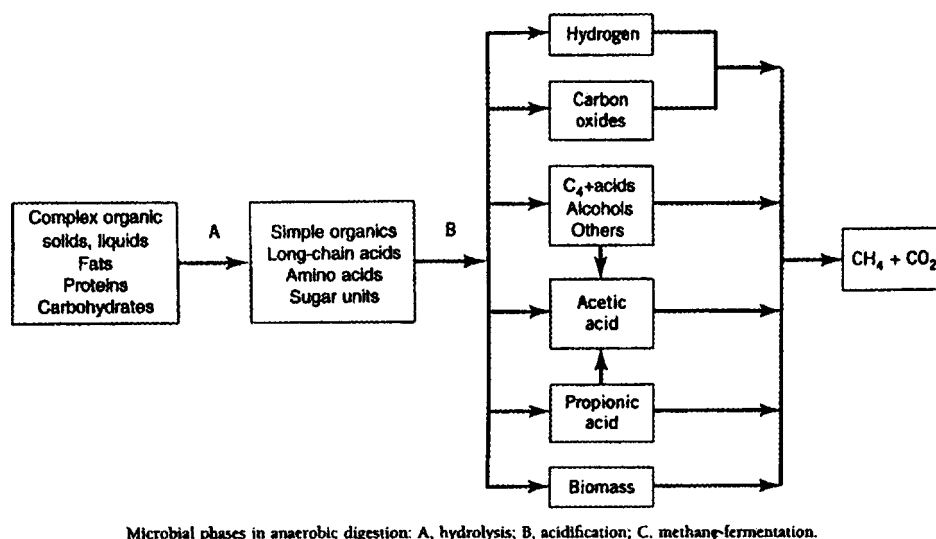
消化ガス発電

嫌気性消化によって得られたバイオガスの利用方法として、ガスエンジンによる消化ガス発電がある。エネルギーの約 30% が電力に変換され、20kW ~ 3,000kW の発電が行われている。排ガスの熱は 50% 回収でき消化タンクの保温に使われる。

ここで、排熱をシステム内部で消費することから、総合効率を 80% として評価することは難しい。しかし、一般に原料となるのは下水汚泥や畜産廃棄物など何らかの処理を必要とするバイオマスであり、現実には好気性発酵など他の処理技術を用いた場合には投入エネルギーを必要としている。つまり、比較対象を一般のエネルギーシステムではなく、廃棄物バイオマス処理設備とした場合には、（不要となるエネルギー投入量）+（発電等により生産されるエネルギー量）を合わせて評価すべきと思われる。

ドイツでは電力供給において 5.5%（1996 年）ものシェアを占めているとされる。

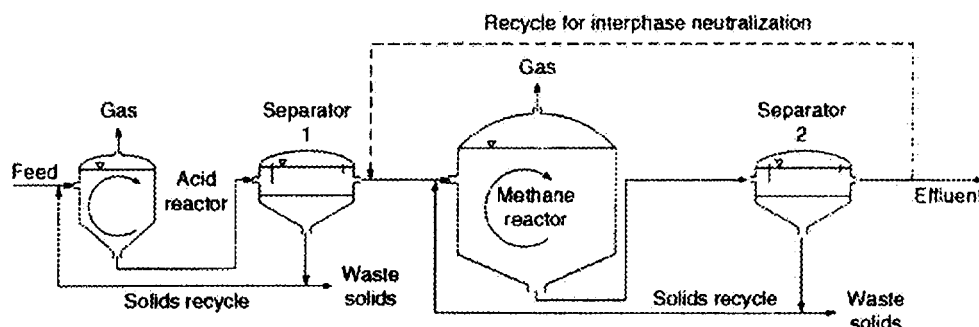
第 4.3-3 図 メタン生成プロセス（加水分解、酸生成、メタン生成）



Microbial phases in anaerobic digestion: A, hydrolysis; B, acidification; C, methanogenesis.

出所：“ Biomass for Renewable Energy, Fuels and Chemicals ” (D.L.Klass, 1998)¹¹⁾

第 4.3-4 図 Two-Phaseメタン発酵装置の構造



出所：“ Biomass for Renewable Energy, Fuels and Chemicals ” (D.L.Klass, 1998)¹¹⁾

(4) バイオマスガス化発電

バイオマス資源を直接気体（ガス）に転換する技術である。得られたガスをさらなる反応によってメタノールや水素等として利用する技術の開発とともに、得られたガスをを用いて発電を行う技術も実証・研究されている。

バイオマスガス化

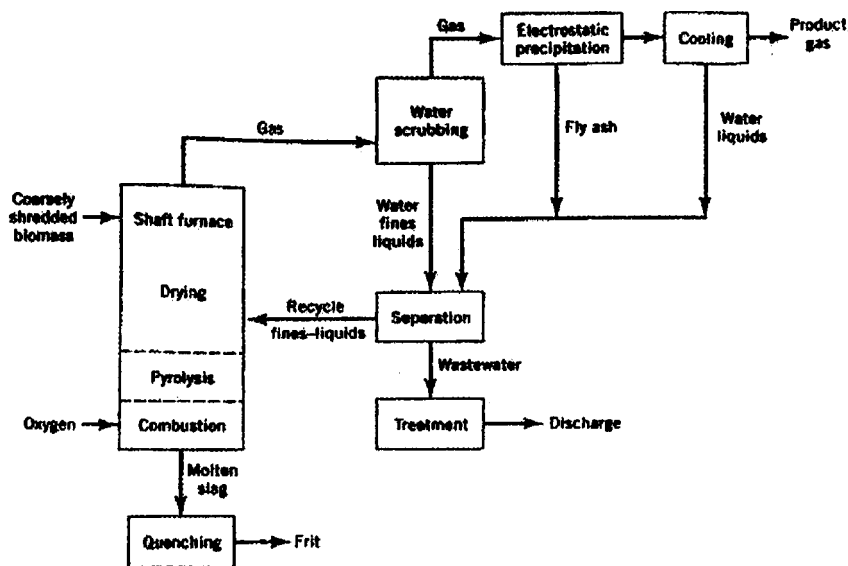
バイオマスガス化の基本的なプロセス、a)Pyrolysis Gasification、b)Partial Gasification、c)Steam Gasificationに分類でき、b)はバイオマス資源の化学量論比を整え、完全燃焼させるために酸素を供給するもので、c)は空気とともにsteamを供給するものである。

およそ 600 以上の高温状態で熱分解を行うことにより、分解生成物のガス化比率を上昇することが出来る。ただし、反応温度を上げることによってチャーなどの生成を押さえることが出来る一方、バイオマスの完全燃焼（二酸化炭素と水の生成）が進

んでしまい、燃料として利用できるガスの生成効率が低下する点には注意しなければならない。

また、ガス化後の目的に応じて酸素あるいは水蒸気をガス化剤として投入することがある。酸素はバイオマスの燃焼を促し、高温状態を作ることによってガス化効率を上げることが主な目的であり、水蒸気は合成ガスにおける水素比を高めることを目的とする。

第 4.3-5 図 バイオマスガス化のプロセス例



出所：“ Biomass for Renewable Energy, Fuels and Chemicals ” (D.L.Klass,1998)¹¹⁾

ガスタービン発電

熱分解ガス化によって得られたガスを燃焼して直接ガスタービンを回す方法で、蒸気タービンに比して高い効率が得られる。大きな特徴として小規模であっても効率の低下が顕著でないことが挙げられる。高温・高圧のガスがタービンを通過するため、要素技術は耐食性、耐摩耗性の実現である。またガス化炉からタービンに至る経路に粒子状物質を除去するフィルターを装備することが必須である。一般にガスタービンを回した後も高温度を維持しているため、この技術単体で用いられることは少なく、廃熱による蒸気タービンを併用して効率上昇が図られ、ガス化複合発電が行われる。

Larsonの試算¹⁴⁾によれば、バイオマスガス化プラントの発電効率は、処理能力 743t/日の場合、発電量 53.1MW、ガス化炉での熱効率が 77%、タービンでの発電効率が 42%、システム全体の効率が 33%とされている。

ガス化エンジン発電

熱分解ガス化炉をディーゼルエンジンと組み合わせたプラント構成も可能である。まず、バイオマスガス化によって一酸化炭素（18%～20%）と水素（18%～20%）が

らなる合成ガスを得る。これを冷却しガス密度を上げ、更に洗浄して空気と共にディーゼルエンジンに導入して発電するシステムである。

ディーゼル燃料との二重燃料方式では必要エネルギーの 80% 以上をバイオガスで賄えると考えられ、その効率はバイオマス原料の種類、水分含量にあまり左右されないと考えられている。

ガソリンの場合の 60% のパワーを得ることができる。5kW ~ 100kW の小規模の発電システムとして位置づけられ、インドでは小規模の農家において 100kW 以下の発電システムが稼働している。

4.4 現在の市場規模

現在のバイオマスエネルギーの利用分野を再整理すると、第 4.4-1 ~ 2 表のようになる。

一次エネルギーベースでは世界全体の消費量が約 43EJ となり、家庭部門が 30EJ (69%)、エネルギー転換部門が 5.6EJ (13%)、産業部門が 5.3EJ (12%)、その他が 2.4EJ (6%) である。

また、エネルギー転換部門による電力及び熱の生産量を見ると、電力が CHP プラントを含め、約 137GWh 以上、熱供給は 557PJ 以上となる。

従って、バイオマスエネルギーの市場規模をエネルギー量にて示す場合、電力が 137GWh 以上、家庭部門等における消費も含めた電力以外の形態による利用が 38EJ 以上ということになる。

第 4.4-1 表 部門別バイオマスエネルギー消費量 (一次エネルギーベース) (1996 年)

単位: PJ

	合 計	エネルギー転換	産 業	家 庭	その他
OECD	6,575	2,494	1,631	2,109	340
Non-OECD	36,844	3,130	3,675	27,992	2,046
世界計	43,419	5,625	5,306	30,101	2,387

出所: "Energy Statistics and Balances of Non-OECD Countries 1995-1996" (OECD/IEA, 1998)⁹⁾

第 4.4-2 表 バイオマスエネルギーによるエネルギー転換部門の生産量 (1996 年)

	電力 (GWh)		熱 (PJ)		不明 (PJ)
	発電所	CHP プラント	CHP プラント	熱供給プラント	
OECD	65,031	61,963	129	128	5
Non-OECD	10,284	(不明)	(不明)	(不明)	2,675
世界計	75,315	61,963 ~	129 ~	128 ~	2,680

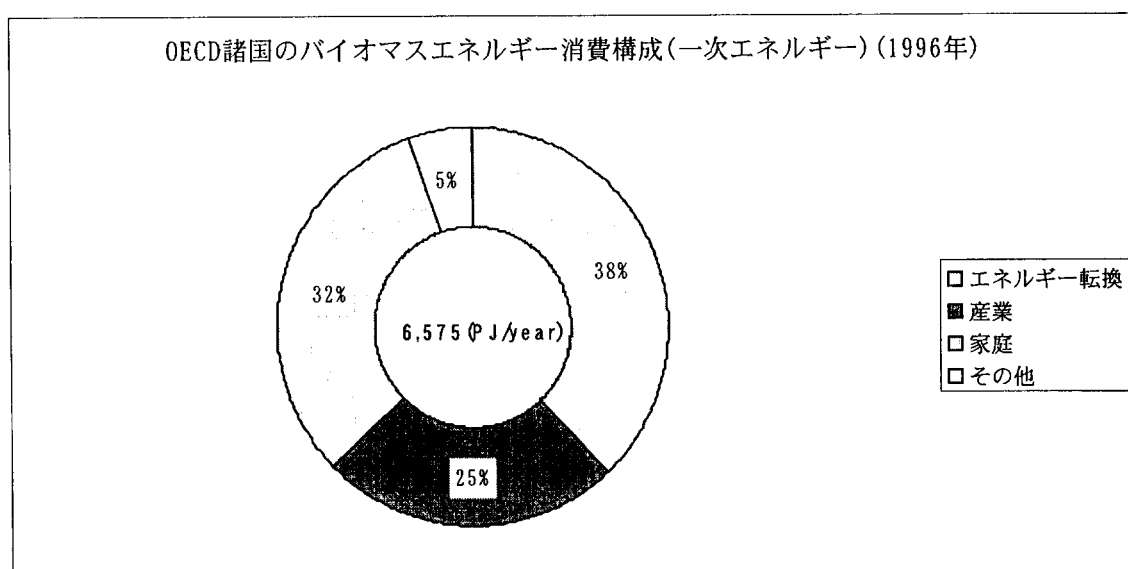
出所: "Energy Statistics and Balances of Non-OECD Countries 1995-1996" (OECD/IEA, 1998)⁹⁾

"Energy Balances of OECD Countries 1995-1996" (OECD/IEA, 1998)¹⁰⁾

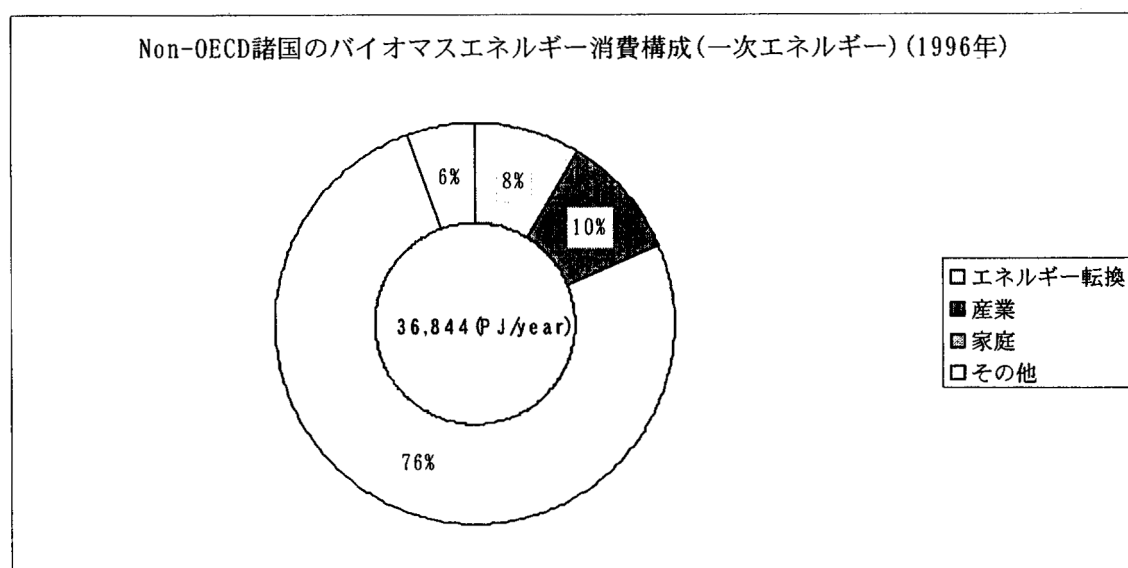
ここで、バイオマスエネルギーが原油等の化石燃料を代替しているものと仮定し、現在の消費量が原油代替としてどの程度の市場価値を満たしていることになるか、という概算を行う。

1998 年前半の原油価格はおよそ 12\$/bblであり、原油換算 1bbl=0.136toeとすると、約 88.2\$/toe程度となる。一方、1996 年におけるバイオマスエネルギー消費実績は 1,037Mtoeである。従って、これらの値を積算すると、バイオマスエネルギーの原油代替としての市場価値は約 910 億ドル (=約 10.5 兆円) に相当することになる。

第 4.4-1 図 OECD諸国のバイオマスエネルギー消費部門別構成比(1次エネルギー)(1996 年)

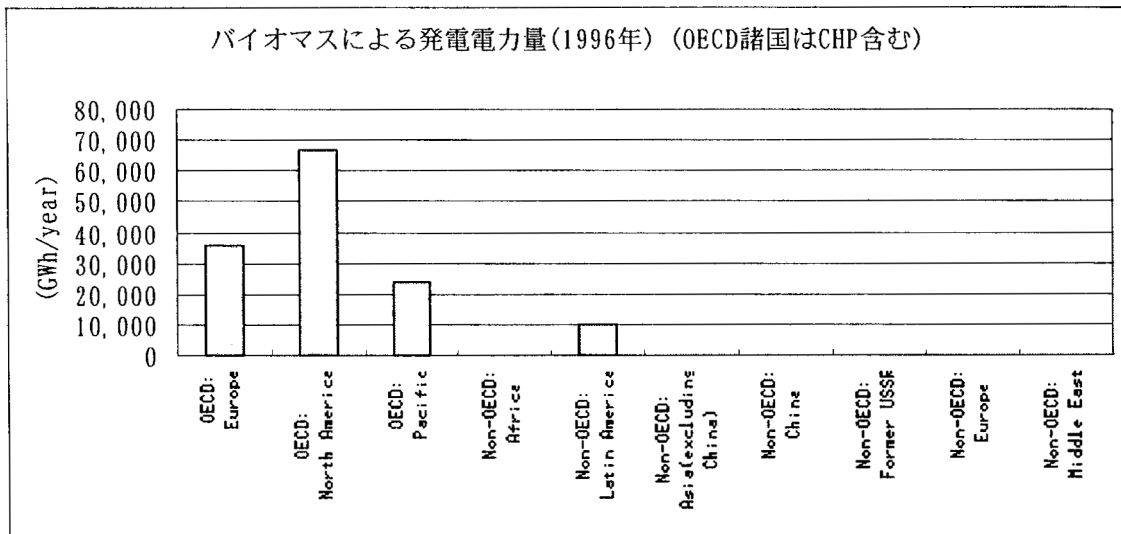


第 4.4-2 図 Non-OECD諸国のバイオマスエネルギー消費部門別構成比(1次エネルギー)(1996 年)



出所：“Energy Statistics and Balances of Non-OECD Countries 1995-1996”(OECD/IEA,1998)⁹⁾

第 4.4-3 図 バイオマスによる発電電力量 (1996 年) (OECD 諸国は CHP 含む)



出所：“Energy Statistics and Balances of Non-OECD Countries 1995-1996” (OECD/IEA, 1998)⁹⁾

“Energy Balances of OECD Countries 1995-1996” (OECD/IEA, 1998)⁹⁾

4.5 現在のコスト

前述のように、現在のバイオマスエネルギー消費量の大半は、発展途上国等における家庭用エネルギーとして利用されており、それらは非商業エネルギーとして取り扱われていることから、そのコストを求めることは困難である。一方、既に実用化あるいは実証されているバイオマス発電（ガス化発電、嫌気性消化ガス発電含む）エタノール生産については幾つかのコスト評価例があり、実証段階にある新しい技術についても幾つかのコスト試算例が報告されている。

ここでは、これらの事例に基づき、現在のコストの状況を整理する。

4.5.1 バイオマス発電

バイオマス発電に関するコスト評価の例を第 4.5-1 図に示す。このコスト評価例には、既存発電所の実データを用いているもの、既存発電所のプラント仕様と発電実績から推定しているもの、設計・計画段階における仕様から推定しているものが混在しているが、発電コストは年々低下する傾向にある。

図中の黒色のプロットは、実際の稼働プラントの発電コストを示しているが、1992 年時点のデータで見ると、バイオガス発電では 23.4 セント/kWh、木材廃棄物を原料とするコージェネレーションでは 5 セント/kWh以下となっている（第 4.5-1 表）。

この評価事例におけるバイオマス発電に対する評として、通常の発電プラント技術は既に成熟しているため、原料バイオマスのコストダウンが必要であり、具体的な方法の一例として、エネルギープランテーションによる低コストのバイオマス生産を導入することを挙げている。また、発電プラントについてもガス化複合発電については技術的に未熟な面が

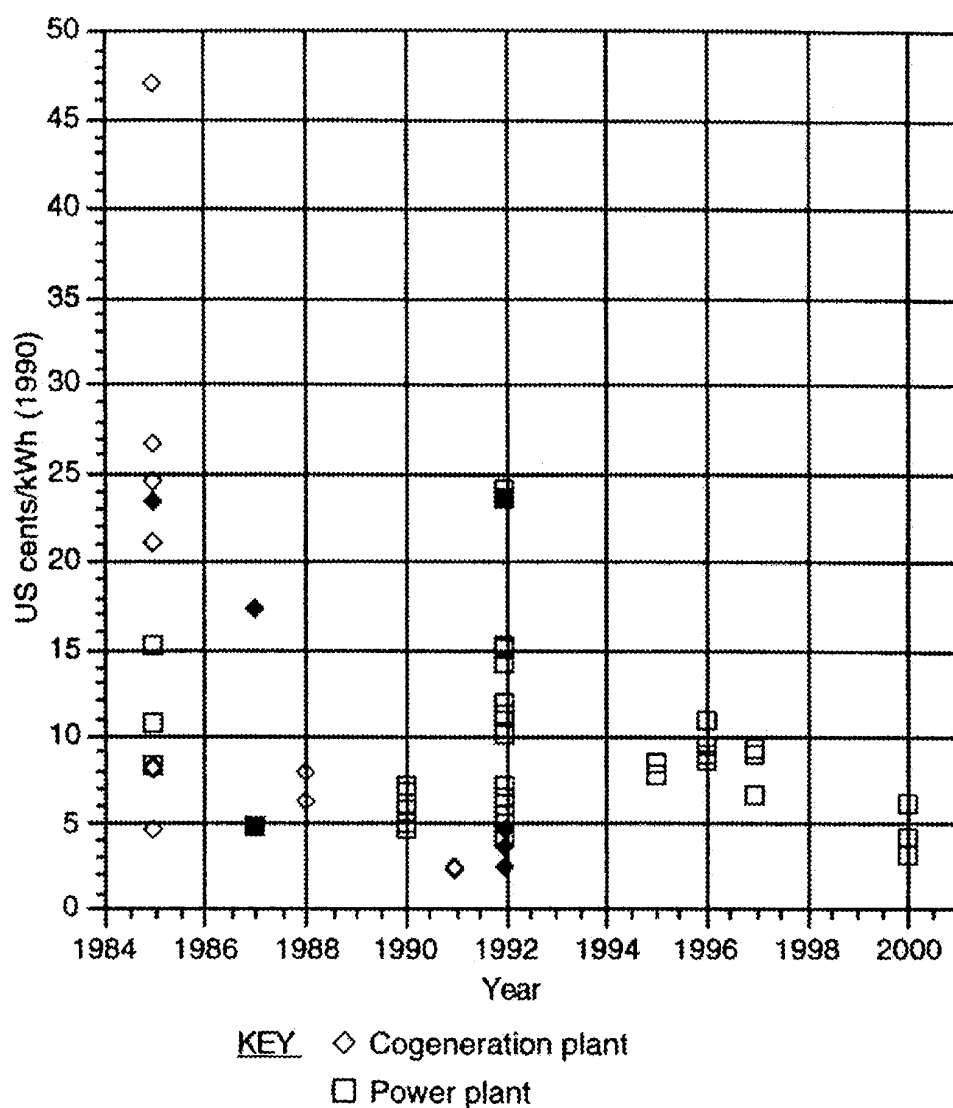
あることから、今後の開発によっては大型プラントのコストダウンが可能となるとしている。

第 4.5-1 表 稼働プラントに関する発電コストの例 (1992 年)

発電タイプ	発電所規模 (kW)	発電コスト (セント/kWh)	関連事項
バイオガス発電	5	23.4	運転時間：4.2hour/day
コージェネレーション発電 (木材廃棄物を原料)	880	3.5	ベース運転時
		4.6	ピーク運転時
	3,500	2.3	

出所：“Renewable Energy Technologies”(World Bank,1993)¹⁵⁾

第 4.5-1 図 発電コストの評価事例 (黒い箇所が実稼働プラント)



出所：“Renewable Energy Technologies”(World Bank,1993)¹⁵⁾

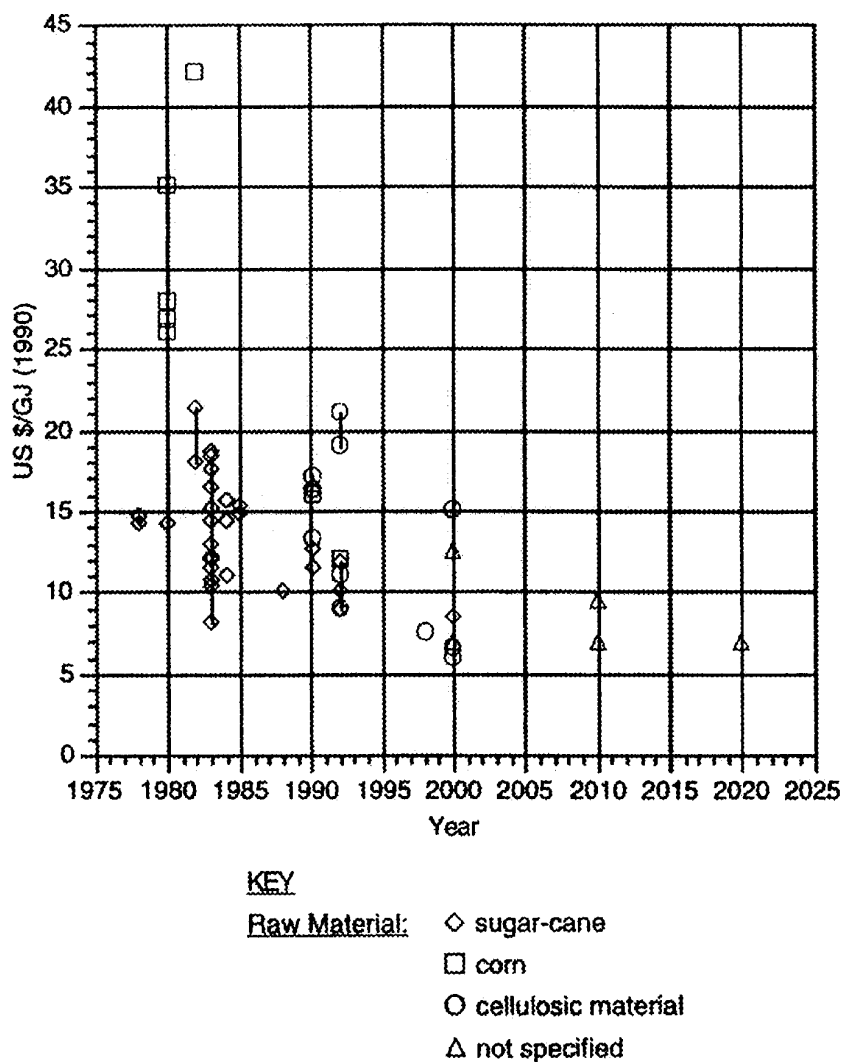
4.5.2 エタノール発酵

エタノール発酵におけるエタノール生成コストの評価例を図 4.5-2 に示す。

これらのデータの大部分は、既に実用ベースでエタノールを生成しているブラジルのデータ、並びにエタノール発酵に積極的に取り組んでいるアメリカ合衆国によるデータである。

1970 年代以降、コストは低下し、近い将来には 1\$/ガロン以下になると見られる。このコストの低下は技術革新の成果、並びに安価な穀物へのシフトによるものと考えられる。現時点における原料費はコストの約 60%～80%を占めており、エタノールの価格変動は原料費に由来している。更なるコストダウンを図る方策として、原料価格が安いセルロース系バイオマスのエタノール発酵を挙げている。ただし、現時点では効率よくセルロースをエタノール化する技術が確立していないことから、今後のバイオテクノロジーの進歩をはじめとする技術の成熟をまたなければならないと指摘している。

第 4.5-2 図 エタノール生成コストの評価事例



出所：“Renewable Energy Technologies” (World Bank, 1993)¹⁵⁾

第 4.5-2 表及び第 4.5-3 図には、エタノールのエネルギー利用を積極的に進めているブラジルにおける価格変動データを示す。

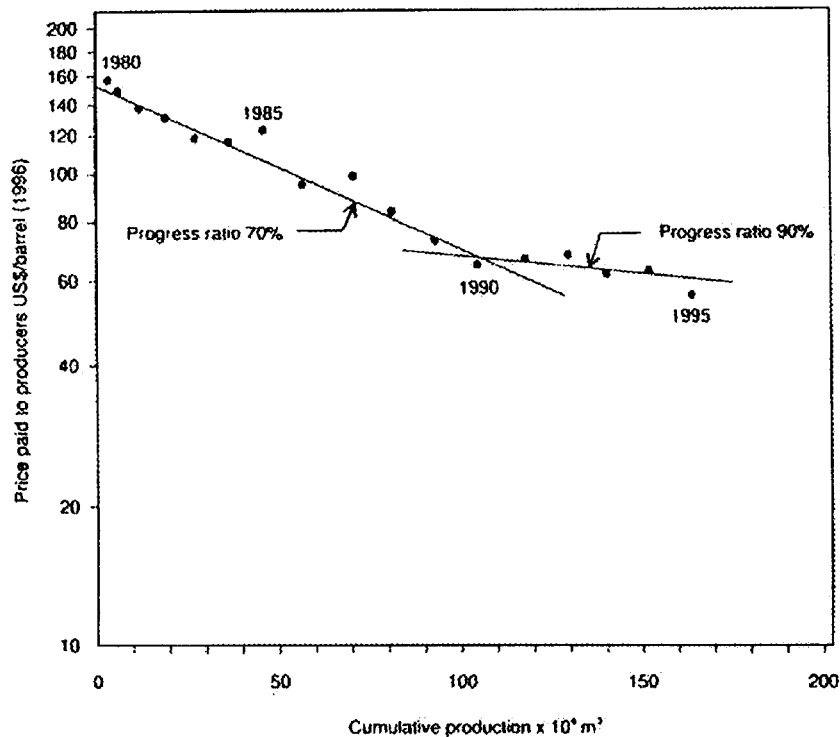
1980 年から 1990 年にかけてのコストダウンが、その後、鈍化しており、1995 年におけるエタノールコストは 60\$/barrel 弱である。

第 4.5-2 表 ブラジルのエタノール生産量とコスト（1978 年～1995 年）

	エタノール生産 ($\times 10^3 \text{m}^3$)	生産者価格 (ドル/ m^3)	生産者価格 (ドル/バレル)
1978 年まで	2,673	952.41	152.3
1979 年	2,854	968.88	155
1980 年	3,676	422.33	147.5
1981 年	4,207	862.42	138
1982 年	5,618	827.09	132.3
1983 年	7,951	745.45	119.3
1984 年	9,201	733.04	117.2
1985 年	11,563	764.07	122.2
1986 年	9,983	581.23	93
1987 年	12,340	612.5	98
1988 年	11,523	532.54	85.2
1989 年	11,629	446.84	71.5
1990 年	11,518	406.13	65
1991 年	12,863	413.4	66.14
1992 年	11,763	428.53	68.6
1993 年	11,195	385.04	61.6
1994 年	12,512	384.33	61.5
1995 年	12,647	345.15	56.82

出所：“The Evaluation of Ethanol Costs in Brasil”(J.Goldemberg,1996)¹⁶⁾

第 4.5-3 図 ブラジルのエタノール累積生産量とコストダウン (1978 年以降)



(*) Progress Ratio : コストダウン速度を表す指数。80%ならば、累積生産量が倍になった時点で 20%のコストダウンが達成されることを示す。すなわち、数値が小さいほど、コストダウンの進行が速い。

出所 : “ The Evaluation of Ethanol Costs in Brasil ” (J.Goldemberg, 1996) ¹⁶⁾

4.5.3 熱分解ガス化発電

熱分解ガス化発電に関するコスト評価例を第 4.5-3 表に示す。

技術進歩、規模拡張を想定した推定結果が導かれており、近い将来には 10 セント (0.1\$) /kWhを下回るという見通しが示されている。

第 4.5-3 表 熱分解ガス化発電のコスト評価例

	発電能力 (MW)	原 料	発電効率 (%)	発電コスト (セント/kWh)	前提条件等
	5	バイオマス (含水率 50%)	34	10.6	1996 年時点
	5	バイオマス (含水率 50%)	34	9.6	2000 年時点
	5	バイオマス (含水率 50%)	34	8.3	2005 年時点
	5	バイオマス (含水率 50%)	37	5.8 ~ 6.4	2020 年時点
	8	バイオマス (含水率 50%)	35	12.3	DEMOレベル
	30.3	バイオマス (含水率 50%)	40	9.8	1 st Commercialレベル
	33.3	バイオマス (含水率 50%)	44	6.5	Maturedレベル
	33.3	バイオマス (含水率 50%)	44	5.4	Future
	20	森林バイオマス (含水率 53.92%)	27.6	8.4	ガスエンジン
	20	森林バイオマス (含水率 53.92%)	37.9	8.9	IGCC
	20	短期輪作バイオマス (含水率 45.2%)	27.6	8.6	ガスエンジン
	20	短期輪作バイオマス (含水率 45.2%)	37	9.2	IGCC

出所：“Gasification and Pyrolysis-Routes to Competitive Electricity Production from Biomass in the UK”
(S.N.Barker,Energy Convers.Manag.,Vol.37,No6/8,1996)(~)¹⁷⁾

“Technoeconomic Assessment of Biomass to Energy”(C.Mitchell et al.,Biomass Bioenergy,Vol.9,No1/5,
1995)(~)¹⁸⁾

4.6 バイオマス導入事例調査

バイオマス導入事例として、ここでは、直接燃焼発電、エタノール発酵、メタン発酵、ガス化発電に関する導入、実証例を示す。

4.6.1 直接燃焼発電

アメリカ合衆国：ミシガン州の木材廃棄物燃焼 36MW発電所

ミシガン州の廃棄木材燃焼Grayling発電所は、36.2MWの電力を供給するとともに環境問題の軽減に貢献している。この発電所は、地域の産業と家庭用に発電を行い、商品価値のある土壌添加剤を生産し、また、Grayling市の新設下水処理場の排水処理能力も活用している。

その概略を第 4.6-1 表に示す。

第 4.6-1 表 アメリカ合衆国ミシガン州の木材廃棄物燃焼 36MW発電所の概略

概 要	燃料の廃棄木材は、35%～40%が粉碎された樹皮、35%が伐採現場に残った大きな枝等をチップ化したもの、残り 25%～30%が楓材のブロック製造時に出るかんなくずや切れ端などのきれいな燃料からなる。燃料は、3 ヶ月に及ぶ貯蔵の間に乾燥される。発電所は、水分率 48%の燃料まで扱える。燃焼前に、粗い燃料と細かい燃料を混ぜ合わせ良好な混合燃料にする。炉とボイラは細かい燃料の比率を 40%と想定して設計されており、火室のサイズ、オーバーファイア・エアの量、ボイラ高、燃料送入システムは、細かい燃料の燃焼に最適のように設計されている。燃焼の大部分は火格子燃焼ではなく浮遊燃焼である。廃棄木材燃料は 6 台の気送ディストリビュータで炉に送入される。 下向流サイクロンで集められたチャーは、非可燃物を分離した後、ボイラに再噴入される。このチャー再噴入は、土壌pH改良材として販売できるフライアッシュの炭素含量を下げるのに役立つ。このフライアッシュは石灰に代わるpH改良材として州天然資源部に認可されている。また、酸化マグネシウムでボイラのスラグ付着を防ぎ、尿素噴射でNOx排出レベルを下げる（ピーク負荷時で 50%減）。下水処理場のエアレーション池下流から取られた水は、発電所冷却塔の冷却用水として使われ、処理場に戻った時には減量している。暖められて戻ったこの水は、アンモニア分が抜かれているため、廃棄物処理バクテリアの働きを高める。
稼働状況	発電所は、発熱量 10.5～11.2MJ/kgの木材燃料を 56t/h燃焼する。ボイラは、510 、8,800kPa.Gの蒸気を 143,000kg/h発生する。熱消費率は 14.3MJ/kWhである。電力の半分から 2/3 は地場の産業が使い、残りは家庭に送られる。発電所の能力は 3 万戸以上の世帯を賄える。開所以来の平均稼働率はメーカ保証の 88%を上回る 95%となっている。
経 済 性	エンジニアリング、建設、金融費用を含むプロジェクトの総コストは、6,800 万米ドル、すなわち 1,878 米ドル/kWであった。1987 年成立の州法は、電力会社に、Grayling 発電所の電力をプロジェクト資金償還の全期間にわたり固定料金で売電することを求めている。Consumer Power社への売電契約では、料金は、容量に対して 0.0405 米ドル/kWh、運転維持に対して 0.004 米ドル/kWh、石炭価格をベースに燃料に対しては 0.0175 米ドル/kWhの合計 0.062 米ドル/kWhとなっている。本発電所の燃料コストの大部分は、輸送とハンドリングの費用である。

出所：CADDET, Renewable Energy Technical Brochure, No.12, 1995¹⁹⁾

イギリス：養鶏場廃棄物の寝わらを燃料とした発電所

鶏舎寝わらの廃棄処理はイギリスの養鶏産業にとって問題の種となっているが、Eyeに建設された中小規模 12.7MWの発電所は、養鶏寝わらを燃料に用いて発電し、地方電力会社を通じて全国規模の送電会社National Gridに供給している。廃棄寝わらは大部分が鶏の排泄物で（通常 90%が排泄物、10%がわら・かんなくず等）、食用鶏を放し飼いでいる幾つもの大型の空調付きブロイラー舎から出されたものである。

その概要を第 4.6-2 表に示す。

なお、この発電所のデベロッパーであるFibrowatt Ltd.はその後も寝わらを燃料としたGlangordプロジェクト（13.5MW）を成功させ、第 3 のプロジェクトとしてThetfordプロジェクトを実施している。このThetfordプロジェクトは出力 38.5MWというヨーロッパ最大の規模を有するものである²¹⁾。

第 4.6-2 表 イギリス：養鶏場廃棄物の寝わらを燃料とした発電所の概略

概 要	発電所の建設は 1991 年春に始まり、1992 年 4 月に試運転を、6 月から電力送出を始めた。燃料寝わらは半径 50km範囲内の幾つかの養鶏場から特別設計の収集車で搬入される。発電所は、最大 7 日分の燃料貯蔵スペースを有する。 用いられた技術の大部分は、標準的な固体燃料燃焼・蒸気発生技術である。燃料は、臭気と粉塵の発散を防ぐため負圧にされたバンカーに蓄えられ、ここからクレーンで 16t/hの率で燃焼ユニットの燃料装入システムに運ばれる。燃焼ユニットは、本質的には往復火格子固体燃焼システムであるが、寝わらの水分率の変動による燃料発熱量の変化に対応するため、燃料ハンドリングと装入のシステムに特に重要な変更が施された。さらに、燃焼の効率化のため空気供給装置に、また高アルカリ濃度の灰による腐食対策のため灰除去にも変更がなされた。ボイラは、自然循環の標準的な 3 パス単胴ユニットである。タービン交流発電機を駆動した蒸気が空冷の復水器で凝縮されて熱サイクルが完了する。3 段電気集塵機で粉塵を除去された排煙は、硫黄、塩素、重金属の濃度が極めて低く、直接大気中への放出が許される。発電された電力は、「非化石燃料義務」(NFFO)の第一次分として地域配電会社へ売電されている。加えて、燃焼灰が、リンとカリウム分に富んだ肥料として収入を生んでいる。 立地は飛行場跡地で、ブロイラー養鶏場が集まっており、輸送にコストがかからず他への迷惑も少なく、系統連系の便が良いことなどから選ばれた。場所は、自治体が支援している工業開発用地の縁にある。また、一連の集会・協議により地元住民の理解を深めるよう努めた。地元の意見は、環境上の利点と雇用増加の見通しから肯定的であった。
稼動状況	Eye発電所は、13,000 世帯の電力を賄うことができる 12.7MWの発電能力（年間発電量 101GWh）を有し、年 13 万トンの鶏舎寝わらを燃焼する。ボイラの定格は 56MWthで、6,500kPa、450 の蒸気を発生する。復水タービン交流発電機の定格は 17MWA、11kVである。発電された電力の一部は所内消費される。
経 済 性	Eye発電所は、イギリス初の大型鶏舎寝わら火力発電所で、土地、金融・資本調達費、プロジェクト費を含む総投資額は 2,200 万英ポンドであった。 燃料は、ブロイラー養鶏場主との長期契約により、品質により差はあるが 1991 年価格基準でトン当たり最高 10 英ポンドで調達している。発電所側はブロイラー舎構

	内から寝わらを除去する責任を有する。発電所は 24 時間稼働で、年間の運転費は年 100 万英ポンドと見積もられている。なお、本プロジェクトは EC より 75 万ポンドの補助金を受けている。
--	--

出所：CADDET, Renewable Energy Technical Brochure, No.17, 1995²⁰⁾

4.6.2 エタノール発酵

ブラジルにおけるバイオマスエタノール

ブラジルでは既にバイオマスから生成されたエタノールを燃料とする自動車（エタノール 100%、又はガソリン：エタノール = 80：20）が実用化して走行しているが、この背景には、石油価格が高騰した 1975 年に打ち出された「将来は全液体燃料をアルコール化する」という国家アルコール計画がある。

当時ブラジルでは、国内生産が低迷し、輸入の依存度が高く、政変も関係して世界有数の赤字国となった。その輸入の中で石油の輸入が大きく、ガソリンを代替燃料に置き替えないと赤字から脱却できないという問題点を持っていた。一方、サトウキビやキャッサバを主産物とする農業は国際競争力が弱く、広い土地がありながら開拓は進まず、生産はほとんど向上しない状況が続いていた。

このような様々な背景が重なり、糖質や澱粉質の資源からエタノールを作り、ガソリンに代替させようというプランは大きな期待を担って、国家的事業として推進されるようになった。

国家計画発足当初は、ガソリンに 20% のエタノールを混合する燃料から始まり、徐々に、エタノールの比率が高くなっていった。その後、バイオマスエタノールの生産量は 1980 年代は順調に拡大していったが、1990 年代に入り、その増加率は小さいものとなり、ここ数年、エタノールコストの低下が鈍化している。

1995 年におけるエタノール生産量は 1,260 万 m³、そのコストは 56.82\$/bbl である。

アメリカ合衆国におけるエタノールプロジェクト

アメリカ合衆国はブラジルとともにバイオマスからのエタノール生成に古くから積極的に取り組んでおり、現在、年間約 3×10^6 m³ の燃料用アルコールが主としてトウモロコシから生産されている。

エタノール生成への取り組みは当初は余剰トウモロコシ対策によるものであったが、現在は、自動車用燃料の 97% が石油であり、また、全体の石油消費量の 67% が運輸部門によって消費されているということで、自動車用代替燃料として位置づけられている。

バイオマスからのエタノールは通常、コーンスターチ（澱粉）から生成され、これは水に溶けやすく、比較的容易に発酵・変換することができるが、現在は、トウモロコシに代わるバイオマスとして、サトウキビのかす（バガス）や米の藁からエタノールを生成するプロジェクト、木質系バイオマスから生成するプロジェクトが発足して

いる。

アメリカ合衆国では現在、1 億 3,000 万haの土地から 13.5t/ha/yrのバイオマス資源が得られ、1tのバイオマスから約 300λのエタノールが得られている。そして、2,727t/day 及び 9,090t/dayという二つのプラントを対象としたエネルギー省の試算によれば、バイオマス 1t当り\$37～\$46、熱量換算で 8.6\$/GJとなり、現在のガソリン価格 5.8\$/GJと比較すると競争力は持っていないが、今後の技術革新により現在の約 2 分の 1 程度までの低コスト化を目標としている。

また、バイオマスエタノールの生産・利用を促進するために、幾つかの施策が施されており、バイオマスから製造したエタノールには 54 セント / ガロン / 年の補助金が 1998 年から 2007 年まで支給され、ガソリン中に 7%～10%程度エタノールが混合されて販売されている。州による取り組みも見られ、例えば、ミネソタ州では、ガソリンの 10%にエタノールを購入するという規制がある。

フランスにおけるバイオエタノール

フランスにおいても、輸送用燃料代替としてバイオエタノールの利用に取り組んでおり、当初はバイオマスから生成したエタノールをガソリンに混合する形態であったが、近年、バイオマスから生成したエタノールとイソブチレンの混合により得られる ETBEもオクタン価を向上させるための添加剤として利用されるようになってきている。

第 4.6-3 表にバイオマスからのエタノール、ETBEの生産量の推移を示す。ガソリン中に混入できるエタノールの比率は法律で規制されているが、2～3 年後には改訂され、その混入比率が大きくなる予定である。また、現時点におけるバイオエタノールのコストは $3.2 \sim 3.4 \text{ FF} / \lambda$ ($0.58 \sim 0.62 \text{ USドル} / \lambda$) である。

第 4.6-3 表 麦、ビートの栽培面積とエタノール、ETBEの消費量

	1995 年	1996 年	1997 年
Wheat Surface Area(ha)	8,850	12,100	10,460
Sugar beet Surface Area(ha)	6,250	10,100	12,092
Ethanol Consumption(t/yr)	37,916	60,340	83,370
ETBE Consumption(t/yr)	80,000	111,070	177,400

出所：“The Potential of Liquid Biofuels in France” (ADEME,1998)²²⁾

4.6.3 メタン発酵

ヨーロッパにおけるメタン発酵

ヨーロッパでは現在、EUプロジェクトINCO-COPERNICUSの中のRENEGERATEというバイオガス研究プロジェクトが進行しており、欧州各国においてバイオガスプラント開発が積極的に行われている。

第 4.6-4 表 ヨーロッパにおけるメタン発酵への取り組み

国	概 略
ドイツ	現在、400 の農業廃棄物バイオガスプラントが稼動しており、技術的には 500 ～ 800 億DMの投資により、全土に 220,000 の農業系バイオガスプラントが設置可能としている。
オーストリア	現在、70 の農業系バイオガスプラントが稼動しており、その設置数は増大傾向にある。農業系及び有機系廃棄物をすべてメタン発酵するためには 13,000 ～ 46,000 のバイオガスプラントが必要であるとしている。
ポーランド	畜産系廃棄物が 2010 年には現在の 3 倍に増加すると予想されており、この処理のためにバイオガス製造とコンポスト製造を組み合わせたプランと開発が進行している。
デンマーク	農業系バイオガスプラントの設置数は現在 20 であるが、農業廃棄物の増大に伴いバイオガスプラントの開発計画が進行中である。
フィンランド	1996 年におけるバイオガスによる総発電量は 189.5GWhであるが、このうち下水処理によるものが 115GWh、工業廃棄物からのものが 15.2GWh、埋め立て地から回収したものが 53GWh、その他が 6.3GWh であり、農業系バイオガスの生産量が非常に少ない。 現在建設中の農業系バイオガスプラントは 2,3 であり、建設計画中のものが 2 つである。 このように他のヨーロッパ諸国から大きく遅れをとっているが、今後の農業系廃棄物の増大に対応するため、国内において農業系バイオガスプラントの設置の必要性が指摘されている。

出所：Biomass for Energy and Industry, Proc. Of 10th European Conference and Technology Exhibition, 1998²³⁾

また、オランダでは、鶏糞による公害を減らすと同時にエネルギー消費を削減するため、鶏糞嫌気消化の実験的設備が設置されており、鶏糞は 2 段階で消化され、メタンと二酸化炭素の可燃混合気体であるバイオガスを生み出し、農場のコージェネプラントで天然ガスに代わって用いられ、340MWh/年の電力と 690MWh/年の熱を作り出している。消化槽の単純回収期間は 5.9 年である。

第 4.6-5 表にその概略を示す。

第 4.6-5 表 オランダ：鶏糞の嫌気消化によるバイオガス・コージェネの導入

概 要	1984 年に、45,000 羽の産卵用雌鶏の鶏糞を処理する消化槽が、Nistelrode の gebr.Rijkers 養鶏場に設置された。鶏糞は 80m³ の貯槽に集められ、乾いた性状に流動性を与えるため、豚糞、水及び消化工程廃水を加えてから、ポンプで消化槽に送られる。硫化水素の排出抑制のため、この流動体には、食肉・魚加工業廃水からの凝集スラッジが添加される。これは、脂肪、脂肪酸、蛋白質のほか、硫黄の結合剤として働く塩化第二鉄を含んでいる。消化槽は、主消化室(75m³) その上の二次消化室(35m³) 及び両消化室をつなぐ流路からなる。鶏糞の消化は主消化室で始まり、メタン(64%) と二酸化炭素(36%) が発生して、槽の上部にたまり、そのガス圧力が高まると、主室の底部から流路を通して上の二次消化室へ鶏糞を押し上げる。二次発酵槽の液面がオーバーフローレベルを越えると、消化鶏糞の一部が貯蔵バンカーへ溢流する一方で、新しい鶏糞が主消化槽に加えられる。ここでガスバルブが開かれると、二次消化槽の部分消化鶏糞の一部が主消化槽に戻り、新しい鶏糞と混合して発酵が再開される。バイオガスは、貯蔵バンカーの消化鶏糞に浮かぶバルーンタンクに蓄えられ、発電機を駆動する 95W ガスエンジンと、51kW ボイラの燃料になる。エンジンとボイラの熱は、養鶏場の建物で使う。建設中又は当初に、幾つかの問題が生じ、次のように解決された：機械式ミキサが必要となり、このため大きな混和井が建設された；予想より鶏糞の乾物分が多く流動抵抗が高かったため、大型の輸送ポンプが必要となった；予想に反し、消化槽内の混和サイクル制御のため、ガスポンプが必要であった；ガス圧安定化のため、ガス輸送管にブローを設置した。本プロジェクトにより、鶏糞嫌気消化とコージェネレーションの組合せの技術的実用性は実証された。経済的フィージビリティは、精製されたガスをどれだけ熱及び電気として活用できるかにかかっている。
稼動状況	1986 年の実績データは次のとおりである：運転時間、7,750 時間 / 年；処理量、鶏糞 1,970m³/年、豚糞 742m³/年、凝集スラッジ 614m³/年、合計 3,326m³/年；バイオガス発生量、295,545m³/年、平均 236,436m³/年；ガス組成、64%CH₄、36%CO₂；低位発熱量、23MJ/m³。発電量は 340MWh/年で、310MWh を自家使用し、30MWh を売電した。熱生産は 690MWh/年で、169MWh を消化槽加熱に、163MWh を養鶏場の建物で用い。残る 358MWh は使用されていない。ボイラとコージェネ設備で用いたバイオガスで、天然ガス 50,000m³/年が節約される。現在は、廃棄物輸送に関する規制が変わり、希釈用の豚糞と凝集スラッジの移送が禁止されたため、この設備は稼動していない。しかし、輸送問題のない同様の設備が、他所で満足な稼動状況を見せている。
経 済 性	1988 年には、電力費が 43,500 オランダギルダー(NLG)/年、天然ガス費が 27,900NLG/年節減された。加えて 29,900kWh/年の売電で 2,300NLG/年の売上があり、収益総額は 73,700NLG/年となり、投資コスト 433,183NLG は 5.9 年で回収される。

出所：CADDET, Renewable Energy Technical Brochure, No.2, 1994²⁴⁾

インドにおけるメタン発酵

インドでは、農村地帯の家庭用燃料製造、肥料製造、衛生の向上を主目的として家畜糞尿を主原料とするバイオガスを家庭単位、あるいは農村単位で製造する“ National Programme on Biogas Development ” が 1981 年に発足している。以降、自家用バイオガス製造プラントの設置件数は増加し、1992 年～1993 年には年間 18,800 台の発酵槽が

設置された。家庭での料理には一人当たり 150 λ ~ 200 λ のバイオガスが必要とされ、5 ~ 6 人家族では 1 家族当たり 1,000 λ ~ 1,200 λ のバイオガスを製造する 2 m^3 ~ 4 m^3 の発酵槽が推奨されている。

家庭用発酵槽としては、インド内で開発されたガスホルダーが浮遊する浮遊式発酵槽と中国で開発された固定式ガス貯蔵ドームが使用されている。また、インドでは農地に生える雑草の処理が大きな問題として取り上げられており、その処理策の一つとしてメタン発酵が試みられている。

日本におけるメタン発酵

日本においては古くは 1920 年代から関西地方を中心に生活廃棄物を対象とする家庭用メタンガス発生装置の研究開発が盛んに行われていた。その後、メタンガス発生装置が普及した時期もあったが、戦後、プロパンガスの普及とともにその利用は激減した。

しかし、その一方で、大規模の下水浄化施設にメタン発酵処理を採用する都市が増加し、その浄化処理技術も向上した。そして、第一次石油危機以降になりメタン発酵の研究例が増加し始め、各所で発酵槽が設置・導入されるようになった。

メタン発酵を利用した発電に関する事例としては、平成 8 年に京都府八木町において家畜の糞尿及び食品工場の有機廃棄物から堆肥とメタンガスを発生する大規模なプラントが建設された。施設でははじめに、農家からバキュームカーなどで家畜の糞尿を回収し、食品工場から発生する「おから」を搬入する。これを受入槽に投入し、沈砂槽で粗大物の沈殿除去を行い、さらに破砕機でわらなどの固形物を粉砕し、糞尿とともに原水槽で一時貯留する。これをBIMA消化槽に投入して 35 ~ 30 日間嫌気発酵を行うことにより、メタンを 65% 含むバイオガスを発生する。バイオガスはガスホルダーに貯留し、脱硫塔で硫化水素を除去した後、プロワでガスエンジンに送り、発電機で発電する。この施設は家畜 2,500 頭以上の糞尿を処理する大規模な施設であり、コンクリート製の発酵槽の容積は 2,100 m^3 にも達するものである。

また、京都市伏見区において、生ゴミ処理施設の建設を計画中であり、メタンガスを発酵させて、600kWの発電を行うことが検討されている。

更に、通産省では、1999 年度から、中国の国家発展計画委員会と共同で、家畜の糞尿から発生するメタンガスを使用する発電システムの実用化実験を行う計画を発表している。

4.6.4 バイオマスガス化

アメリカ合衆国におけるバイオマスガス化プロジェクト

アメリカ合衆国ではバイオマスエネルギーを利用した高効率発電の開発を目的とし、バイオマスガス化発電プロジェクトを実施している。

これまでにコロラド州のバーモント、及びハワイ州マウイ島にて実証プロジェクト

を実施し、ハワイ島のプロジェクトは 1998 年に終了する予定であるが、代わってミネソタ州におけるプロジェクトが発足している。

以下にこれらの概略を示す。

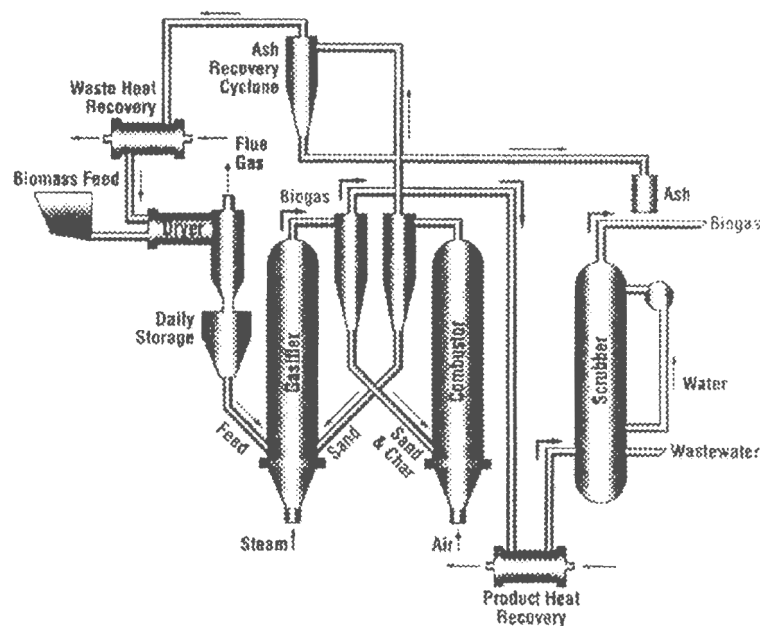
a . コロラド州におけるプロジェクト

コロラド州バーモントのプロジェクトは、木材廃棄物を燃料とする既存の 50MW の発電プラントにさらに 15MW 規模のガス化発電装置を組み込むというものである。

このプロジェクトはDOE,Battelle,NREL,Burlington Electric Department,FERCO (ガス化装置メーカー) によって実施されており、ガス化発電に係る投入原料は 200t/day である。

プロジェクトの計画は三段階に分かれており、第一段階はガス化装置の設計及び建設で 1998 年に完了している。第二段階は 1998 年から 1999 年にかけてのガス化装置の試験運転で、第三段階はその後のガス化発電である。

第 4.6-1 図 バーモント州ガス化発電システム



出所：“ Project Update:Vermont Gasfier ” (DOE,1998)²⁵⁾

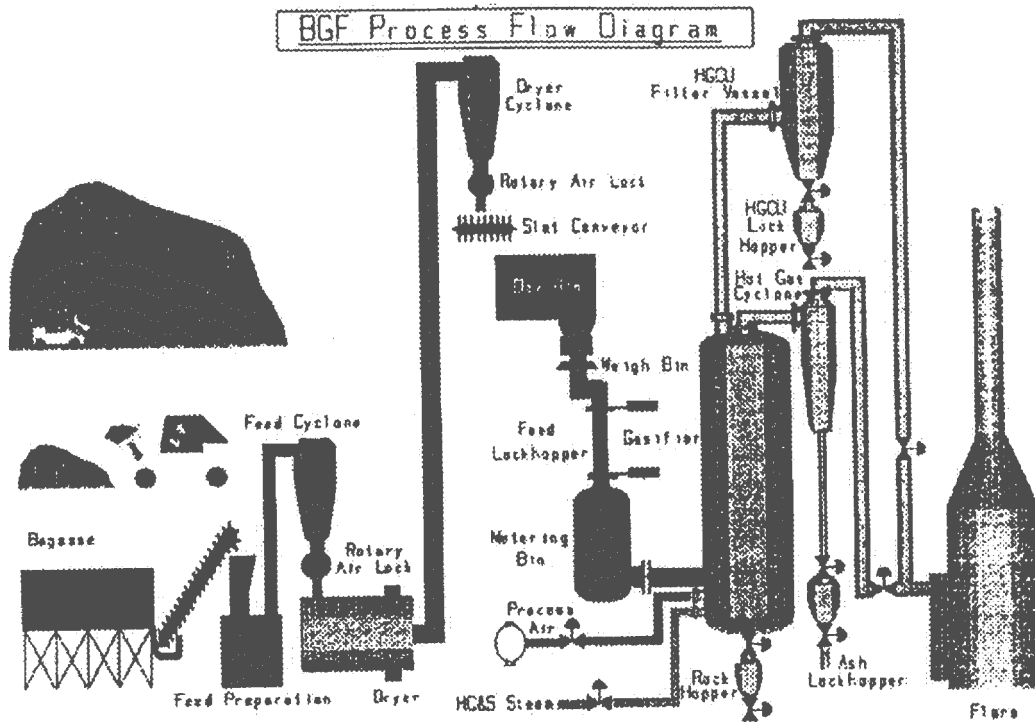
b . ハワイにおけるプロジェクト

ハワイにおけるプロジェクトはバガス (水分含有率 20%) を原料とした 100t/day の規模のものであり、DOE,ハワイ州,IGT(Institute of Gas Technology) 等により実施された。

このプロジェクトはIGTが開発したREGUNUSプロセスを利用したもので、当初は

発電が目的であったが、設置予定地よりも遠隔地に設置することになり、電力供給がコスト的に非常に難しくなり、実際にはガス化のみの実証となり、ガスタービンは設置せず、電力供給も行われていない。

第 4.6-2 ハワイのバイオマスガス化システム



出所：“The Hawaiian Project” (IGT,1997)²⁶⁾

c. ミネソタ州におけるプロジェクト²⁷⁾

このプロジェクトはアルファルファを原料とするガス化複合発電で、その規模は75MWpが予定されている。

原料調達のために、180,000acresの土地から、年間 680,000tのアルファルファが栽培され、プラントへの投入規模は 100t/dayとされている。

現在、プロジェクト実施に伴う環境アセスメントが実施されており、1999 年中に建設工事に着手される予定である。

スウェーデン・ベルナモのガス化複合発電

スウェーデンのBioflow Ltd.では 1991 年以来、バイオマスガス化複合発電の開発を行っており、現在、発電規模 6MW、地域熱供給 9MWの能力を有するプラントの実証運転を行っている。

そのプラントに関する主要データを第 4.6-5 表に示す。

木材チップを用いたガス化装置の試験運転が 1993 年に開始され、1996 年 5 月まで

に 4,000 時間以上実施された。その後、ガス化発電プラントとしての運転が開始されており、1997 年 6 月時点で 1,000 時間以上の運転がなされている。

第 4.6-6 表 ベルナモのプラントに関する諸データ

プラント規模	18MW
発 電	6MW
熱 供 給	9MW
燃 料	木材チップ
ガス化圧力	20bar
ガス化温度	950 ~ 1,000
生成ガスの熱量	5MJ/Nm ³
発電能力	6MWe
熱供給能力	9MWth
発電効率	32%
総合効率	83%
蒸気温度	455
蒸気圧力	40bar

出所：State of the Art Report on Biomass Gasification(1997)²⁸⁾

4.7 2010 年までの価格低減の見通し

バイオマスエネルギーは既に世界の一次エネルギー供給の 11%を担っているが、その大半は発展途上国等における家庭用等としての非商業的な消費であり、エネルギー転換部門における利用はバイオマスエネルギー消費の 13%程度、世界の一次エネルギー供給の 1.1%に過ぎない。

また、バイオマスエネルギー利用技術には様々な種類があるが、現時点で実用的に導入されているのは直接燃料発電とエタノール発酵のみで、その他の技術についてはメタン発酵、ガス化発電等の導入・実証が見られ始めたばかりであるが、「再生可能」「カーボンニュートラル」という特性上、21 世紀以降のエネルギー源としての期待は大きい。

ここでは、現時点で実用・導入されている技術に関する価格低減の可能性、並びに現在研究開発段階にある主な技術の概略について整理する。

4.7.1 既存技術の価格低減の可能性

現時点で実用・導入されている技術として直接燃焼発電、エタノール発酵、メタン発酵（バイオガス発電）ガス化発電が挙げられるが、前章までに整理したこれら技術の現状レベルのコストは第 4.7-1 表の通りである。

第 4.7-1 表 バイオマスエネルギー利用技術のコスト（現状レベル）

利用技術	コスト	関連事項
直接燃焼発電	5 ~ 15 （セント/kWh）	推定も含む平均
	2.3 ~ 4.6 （セント/kWh）	コージェネレーション
バイオガス発電	23.4 ~ （セント/kWh）	
ガス化発電	10.6 ~ （セント/kWh）	
エタノール発酵	8.6\$/GJ（1.6\$/ガロン）	

これらのうち、ガス化発電については、近い将来に 10 セント/kWhを下回り、発電容量の拡大と技術の成熟によって、2020 年頃には 5 ~ 6 セント/kWh程度にまで低下すると予測されている。

また、エタノール発酵では、近い将来に 1\$/ガロンを下回ると予想されており、米国においても当面の目標が 0.8\$/ガロンとされている。

一方、バイオマスを利用した各種発電技術に関する将来価格の見通しとして米国のDOEとEPRIによる研究（予測）がある。この研究では 2030 年までの様々な再生可能エネルギー発電の発電コスト等を予測しているが、その中で対象とされているバイオマス発電に関するものを表 4.7-2 に示す。

第 4.7-2 表 EPRIによるバイオマス発電コストの見通し（2030 年時点）

Technology	Capacity (MW)	Annual Gen. (GWh/y)	Capital Cost (\$/kW)	O&M Cost (¢ /kWh)	Feed Cost (\$/GJ)	Total Cost (¢ /kWh)
Direct-Fired	184	1,290	1,115	3.87	2.50	5.8
Gasification- Based	110	771	1,111	3.12	2.50	5.0
Cofiring	400	2,978	207.6	1.595 0.857	0.48 2.7	

出所：DOE and EPRI, Renewable Energy Technology Characterizations, TR-109496, 1997

(<http://www.eren.doe.gov/sunlab/>)

表中のCofiringとは石炭火力とバイオマスとの混焼発電を意味するが、これについては 4.7.2 で述べる。なお、石炭のコストは 39.09 ドル/トン进行仮定し、バイオマスの燃料コストは 0.48 ドル/GJの場合と 2.7 ドル/GJの 2 種類を仮定している。直接燃焼発電は、第 4.7-1 表に示した値と比較して数分の 1 となっている。

発電に限らずバイオマスを利用する技術においては一般に原料コストがトータルコストを大きく左右し、発電効率等技術の向上のみならず、原料コストの低減が発電コスト低下の鍵となる。

また、ガス化発電技術の発電コストは前述の見通し価格と近いレベルとなっている。現状レベルのコストの約 2 分の 1 に低下しているが、一層の低下のためには、やはり発電効率の向上、原料コストの低減が重要となる。

4.7.2 新たな利用形態の可能性

バイオマスエネルギー利用技術には様々な種類がある。

ここでは、それら技術のうち、混焼発電（直接燃焼）、液化並びにガス化メタノール合成について、その技術の概略と見通しを整理する。

(1) 混焼発電

バイオマス単体では燃焼安定性に不安が残ることから、石炭との混焼によって燃料安定性を向上させ、大型ボイラーの燃料として使用する試みがなされている。バイオマスを混焼させることにより、NO_x、SO_xの発生を減少させることができるという側面からも評価されている。ただし、SO_x削減の理由は、石炭と異なりバイオマスがほとんど硫黄分を含まないことに起因する。

この混焼発電の試みは過去にも見られ、オランダのIFRFによる報告²⁹⁾ではワラを 1cm 寸法にまで粉碎して微粉炭と混焼する燃焼実験が行われているが、このワラ供給システムが不安定なことから実験中断が何度か発生した。

しかしながら、近年、アメリカ合衆国を中心に実用化を目的とした研究開発が行われるようになり、DOEでは、アイオワ州における混焼発電プロジェクトが発足している。

このプロジェクトは、DOE,DOA,NREL,Alliant Power Company等の共同により実施される予定で、Alliant Power Companyが有する 650MWの石炭火力発電所において、約 5%相当の 35MW分の燃料としてバイオマスを混合させるものである。混合されるバイオマスはスイッチグラスで、40,000 acres ~ 50,000acresの面積から年間 200,000tが栽培されることになる³⁰⁾。

この混焼発電についてEPRIでは、ガス化発電よりも早く実用化するであろうと見通している。

現在のアメリカ合衆国における商業用バイオマス発電は、木材バイオマスを燃料とする直接燃焼発電 7GW、廃棄物発電 2.5MWであるが、石炭火力発電所において燃料の 10%程度であれば容易にバイオマスを燃料として混合できるとし、将来的にはさらに 7GWの混焼発電導入を見込んでいる。

混焼発電の発電コストはその条件により異なるが、2030 時点における発電コストとして 6.2 ~ 14.9\$/MWhと予測している。

(2) バイオマス液化

液化はガス化に比べて反応過程が複雑であり、高品質の油（軽質炭化水素油）を高収率

で製造するのは難しいといわれているが、現在、研究されている技術として熱分解液化と高圧液化がある。

熱分解液化

粒径を 2mm 以下程度に小さくした原料を急速に加熱・冷却を行うことによって（反応時間数秒以下）、熱分解生成物の 2 次反応（分解・重合）に由来するチャー生成を抑制するものである。これにより、通常の熱分解で 20%～30% に過ぎないタールの収率を 70% 程度にまで挙げることが出来る。

カナダ・ENSYN 社では、木材処理量 100kg/h の実証規模の急速熱分解プラントで試験を行い、好結果を挙げている。まず、原料バイオマスを木粉化してから投入し、保持時間 200ms、反応温度 650℃ で最大収率 75% のタール生成に成功した。このタールは、含水率 23%、高位発熱量 17.5MJ/kg の性状であった。このほか、NREL ではタール収率 66% を、アストン大学（イギリス）ではタール収率 81% を達成したとの報告もある。ただし、高収率で得られるタールは直接燃料として利用することは難しく、実用上は粘度の低下や脱酸素による安定化など用途に応じた改質処理を必要とする。

高圧液化

高圧下においてバイオマスを液化する方法で、代表的なプロセスとして米国鉱山局が開発した PERC プロセス、カリフォルニア大学 Lawrence Berkeley Laboratory が開発した LBL プロセスがある。

PERC プロセスは石炭液化の概念に近く、得られたオイルの一部をリサイクル溶媒として用いる、高圧の合成ガスを用いて反応させる、合成ガスを得るために別途ガス化工程を必要とする、などの特徴がある。具体的には水分が 4% になるまで木材を乾燥し、次いで約 35 メッシュに粉碎する。これをリサイクル油に 20%～30% 混合、触媒として炭酸ナトリウムを約 5% 添加し、スラリー状にする。これを反応塔に送入し、反応温度 260℃～340℃ において合成ガスで加圧（約 280 気圧）する。液化反応の際に用いる合成ガスは、木材のガス化で製造され、CO を主成分とし、加圧後反応塔に供給される。オイル収率は木材重量の約 42%、熱効率は約 63% とされている。

一方、LBL プロセスはリサイクル油ではなく、水を反応媒体に用いるという特徴を持つ。まず、木材を酸性溶液で加水分解して低分子化するとともにスラリー状にする。この加水分解は温度 180℃、圧力 10 気圧、反応時間 45 分、硫酸濃度 0.17（wt%：対木材比）の条件で行われる。得られたスラリーを中和し、炭酸ナトリウムと触媒を加え、合成ガスとともに反応塔に送入する。液化反応は 360℃、圧力 280 気圧で行い、合成ガスは副生成物として得られる炭状の固形物をガス化して製造する。

この他、水溶液状態のまま高温・高圧下処理することによって、直接液化を行う技術が資源環境技術総合研究所により開発されている。木粉の水溶液による実験では、300℃・100 気圧の条件下でアルカリ触媒により液化が可能であった。さらに、下水汚泥の場合、汚泥中の灰分が触媒作用を示すため新たに触媒添加の必要なく、5t/日のパ

イロットプラントの連続運転に成功している。有機物基準で約 50%、エネルギー回収率では約 70%のオイルが生成され、このオイルの持つエネルギー量はプラントの運転に必要なエネルギーを上回る。オイルの性状は、発熱量約 9,000kcal/kg、粘度約 100cp と石油系の重油に匹敵する。

コスト評価例

熱分解液化と高圧液化に関するコスト評価例を第 4.7-3 表に示す。

現状並びに技術進歩を想定した将来コストの推定結果が導かれており、現状レベルの技術におけるエネルギーコストは熱分解液化が 16.24\$/GJ、高圧液化が 19.54\$/GJ、将来技術においては熱分解液化が 12.99\$/GJ、高圧液化が 14.77\$/GJとそれぞれ 20%、25%程度のコストダウンが予想されている。しかしながら、現状のエネルギー価格（Product Energy Value）と比較すると、将来技術においても、高コストという結果になっている。

第 4.7-3 表 熱分解液化及び高圧液化のコスト評価例

Parameter	Atmospheric flash pyrolysis		Pressurized solvent liquefaction	
	Present (\$10 ⁵)	Potential (\$10 ⁶)	Present (\$10 ⁵)	Potential (\$10 ⁶)
Fixed capital investment				
Primary liquefaction	38.9	20.6	65.8	37.8
Crude upgrading	36.4	26.8	20.9	20.3
Product finishing	11.4	0.5	11.9	0.6
Total:	86.7	47.9	98.6	58.7
Total capital requirement				
Primary liquefaction	49.8	26.4	84.2	48.4
Crude upgrading	46.6	34.3	26.8	26.0
Product finishing	14.5	0.7	15.3	0.7
Total:	111.0	61.3	126.2	75.1
Fixed operating cost				
Operating labor	6.68	6.43	5.58	4.73
Maintenance labor	0.86	0.49	0.99	0.59
Overhead	1.74	0.96	1.98	1.18
Maintenance materials	2.60	1.44	2.96	1.76
Taxes and insurance	1.74	0.96	1.98	1.18
Others	0.86	0.49	0.99	0.59
Total:	14.48	10.77	14.48	10.03
Variable operating cost				
Feedstock	20.00	20.00	20.00	23.30
Electricity	4.89	3.57	9.72	10.14
Catalyst	0.30	0.02	2.36	0.01
Sludge disposal	0.16	0.02	0.04	0.09
Fuel cost	0.39	0.06	1.32	0.06
Total:	25.74	23.67	33.44	33.60

Capital charges	12.96	7.17	14.75	8.78
Total cost finished product	53.18	41.61	62.67	52.39
Product cost \$/t				
Primary oil	150.00	131.90	423.30	298.10
Finished product	673.80	514.50	815.00	584.70
Energy cost,\$/GJ				
Primary oil	9.32	6.91	13.44	12.27
Finished product	16.24	12.99	19.54	14.77
Product energy value,\$/GJ				
Primary oil	6.70	6.70	5.20	5.20
Finished product	8.30	8.45	8.15	8.45
Product cost/value				
Primary oil	1.39	1.03	2.58	2.36
Finished product	1.96	1.54	2.40	1.75

“ Adapted from Elliott et al.(1990).The product energy value is the average U.S. spot market price from 1977 to 1987 for comparable petroleum-based liquid fuel.The average price of U.S.crude oil at the wellhead in1987 was \$2.61/GJ(\$15.40/bbl).

出所：“ Biomass for Renewable Energy,Fuels and Chemicals ” (D.L.Klass,1998)¹¹⁾

(3) ガス化メタノール合成

熱分解ガスには一酸化炭素及び水素が含まれていることから、メタノールを合成することが可能である。メタノール合成のためには一酸化炭素と水素の比が 1:2 になることが望ましいが、熱分解ガスは一般にCOが過剰となることから、水蒸気改質によって水素の比率を上昇させる必要がある。また、合成ガスの精製も必要となっている。

坂井によれば³¹⁾、水蒸気改質反応は 300 、1～10 気圧の条件下にて行う。こうして得られた改質ガスを酸化銅・酸化亜鉛系の触媒反応（350 、40～80 気圧）によって、メタノールを合成することが出来る。原料バイオマスに対する重量収率約 50%、エネルギー換算では約 60%のメタノールを合成できるとしている。

ガス化メタノール合成に関するコスト評価例を第 4.7-3 表に示す。

対象とされているガス化プロセスはこれまでに実証等にて用いられてきたプラント仕様に基づくもので、Wright-Malta及びBattelleが通常のガス化、IGTとShell Oilは酸素供給を伴うガス化で、Shell Oilのプラントは石炭ガス化用のプラントが想定されている。

評価結果は 0.17～0.25\$/λとなっており、IGT、Shell Oilでは酸素供給プラントの設備コストがメタノールコストに影響している。

第 4.7-4 表 熱分解ガス化メタノールのコスト評価例

Process developer:	Wright-Malta	Battelle	IGT	Shell Oil
Wood feedrate,dry t/day	1650	1650	1650	1650
GJ/h	1439	1383	1315	1315
Methanol production,t/day	1004	705.1	965.9	915.9
GJ/h	949.2	667.0	913.9	866.3
10 ³ L/day	1269	891	1220	1157
Capital cost,\$10 ⁵				
Installed hardware				
Feed preparation	7.4	18.6	16.4	34.6
Gasifiers	64.0	7.23	29.0	29.0
Oxygen plant	0	0	41.7	59.6
Reformer feed compressor	0	11.0	0	0
Reformer	16.7	15.5	16.7	0
Shift reactors	9.40	9.40	9.40	9.40
Union Carbide Selexol treatment	13.7	14.5	19.4	27.4
Methanol synthesis-purification	48.5	45.1	38.0	43.7
Utilities/auxiliaries	49.9	30.3	42.6	50.9
Subtotal:	200	152	213	254
Contingencies plus:	77	52	71	84
Total working requirement	277	204	284	338
Working capital	20.0	15.2	21.3	25.4
Land	2.30	2.30	2.30	2.30
Operating costs,\$10 ⁵ /yr				
Variable costs				
Biomass feedstock	22.7	21.8	20.7	20.7
Catalysts & chemicals	1.92	2.88	1.92	1.92
Purchased energy	7.13	0.65	3.08	5.28
Subtotal:	31.7	25.3	25.7	27.9
Fixed costs				
Labor	0.99	1.18	0.99	0.99
Maintenance	5.99	4.55	6.39	7.63
General & direct overhead	4.99	4.25	5.25	6.05
Subtotal:	12.0	9.98	12.6	14.7
Total operating costs	43.7	35.3	38.4	42.6
Levelized costs,\$/GJ				
Capital	5.64	4.61	8.33	8.01
Biomass	3.02	3.09	3.82	3.09
Labor & maintenance	1.85	1.82	2.68	2.47
Purchased energy	0.95	0.09	0.57	0.79
Product methanol	11.46	9.61	15.40	14.36
Product methanol,\$/L	0.20	0.17	0.27	0.25

“ Adapted from Larson and Katofsky(1992).All costs are in 1991 U.S.dollars.Capacity factor,90%.

出所 : “ Biomass for Renewable Energy,Fuels and Chemicals ” (D.L.Klass,1998)¹¹⁾

第 4 章 参考文献

- 1) T.B.Johansson et al. : Renewable Energy, Island Press, 1993
- 2) E.D.Larson : CO₂ Mitigation Potential of Biomass Energy Plantation in Developing Regions, 平成 6 年度「地球再生計画」に関する調査報告書参考資料集、1995
- 3) 土手裕、小木知子 : 森林系バイオマス・エネルギーの供給量予測、資源と環境、Vol.6、No.6、1997
- 4) 杉山大志、斎木 博、渡部良朋、中園 聡、藤野純一 : 電力中央研究所報告、Y95006、1995
- 5) 山本博巳、山地憲治 : 世界土地利用モデル (GLUE) によるバイオマスエネルギーポテンシャルの評価、電力中央研究所報告、Y96002、1996
- 6) エネルギー資源学会編 : エネルギー・資源ハンドブック、P232、1997
- 7) 山本博巳、山地憲治 : バイオマス・フローを考慮した世界土地利用エネルギーモデル (GLUE) の開発、電力中央研究所報告、T96001、1996
- 8) FAO statistical database(<http://apps.fao.org>)
- 9) OECD/IEA : Energy Statistics and Balances of Non-OECD Countries 1995-1996, 1998
- 10) OECD/IEA : Energy Balances of OECD Countries 1995-1996, 1998
- 11) D.L.Klass : Biomass for Renewable Energy, Fuels and Chemicals, Academic Press, 1998
- 12) DOE : The Potential of Renewable Energy, 1990
- 13) H.Abelson and J.J.Gordon : Distributed Solar Energy System Volume IV ; Wood Combustion Systems for Process Steam and On-Site Electricity, for USDOE, Contract No.ET-78-C01-2854, The MITRE Corporation, May. 1980
- 14) E.D.Larson et al : biomass-Gasifier Steam-Injected Gas Turbine Cogeneration, J.Eng.Gas Turb. Power, 112, pp.157-163, 1990
- 15) World Bank : Renewable Energy Technologies, 1993
- 16) J.Goldemberg : The Evaluation of Ethanol Costs in Brasil, Energy Policy, Vol.24, No.12, 1996
- 17) S.N.Barker : Gasification and Pyrolysis-Routes to Competitive Electricity Production from Biomass in the UK, Energy Convers.Manag., Vol.37, No.6/8, 1996
- 18) C.Mitchell et al. : Technoeconomic Assessment of Biomass to Energy, Biomass Bioenergy, Vol.9, No.1/5, 1995
- 19) CADDET, Renewable Energy Technical Brochure, No.12, 1995
- 20) CADDET, Renewable Energy Technical Brochure, No.17, 1995
- 21) CADDET, Renewable Energy Newsletter, Issue 3/98, Sep. 1998
- 22) ADEME : The Potential of Liquid Biofuels in France, Sep. 1998
- 23) Biomass for Energy and Industry, Proc. Of 10th European Conference and Technology Exhibition, 1998
- 24) CADDET, Renewable Energy Technical Brochure, No.2, 1994
- 25) DOE : Project Update : Vermont Gasfier, Sep. 1998
- 26) IGT : The Hawaiian Project, Oct. 1997

- 27) DOE : Project Update : Minnesota Agripower,DOE,Sep.1998
- 28) EU/IEA : State of the Art Report on Biomass Gasification,Nov.1997
- 29) 池田勇：バイオマスエネルギーの有効利用　ワラと微粉炭の混焼、日本機械学会関西支部定
時総会講演会講演論文集、Vol.72、1997
- 30) DOE : Project Update : Chariton Valley,DOE,Sep.1998
- 31) 坂井：バイオマスが拓く 21 世紀エネルギー、森北出版、1998
（平成 10 年度調査報告書　一部抜粋）
（NEDO-P-9831）