

B-52 木質系バイオマス・エネルギーの利用技術及び供給可能量の評価に関する研究  
(3) 木質系バイオマスのエネルギー変換技術の評価

独立行政法人産業技術総合研究所

エネルギー利用研究部門 バイオマスグループ 小木知子

計測標準研究部門 中西正和

宮崎大学工学部 土手裕

平成12～14年度合計予算額 16,624千円  
(うち、平成14年度予算額 5,939千円)

〔要旨〕 再生可能で大気中のCO<sub>2</sub>を固定するため、温暖化軽減に寄与すると期待されるバイオマスからエネルギーを製造・導入した場合の、温暖化軽減効果を試算した。

1) エネルギー変換プロセスとして、木質系バイオマスから糖化-発酵によりエタノールを製造、これをディーゼル燃料代替として発電に用いた場合のCO<sub>2</sub>削減効果を試算、その結果をこれまでに検証の終わった燃焼発電、ガス化発電、熱分解と比較した。その結果、原料の産地や変換地の事情によりCO<sub>2</sub>削減量は変動するが、4種のプロセスで最も削減効果が大きかったのはガス化発電であった。

2) 日本国内のバイオマスを用いて燃焼orガス化発電を行う場合について、モデル地域を想定し、地域特性に応じた適正規模の発電技術とシステムの検討を行った。その結果、日本の東北地方の小都市（人口3万人相当）では、マイクロガスタービンコージェネ（300kW, 複数基）による小型分散発電システムが適していること、300kWのマイクロガスタービンコージェネ発電に必要な木材量は、約25AD-t（1基）であり、この地域の調達可能木質系バイオマス量に適合することが判った。

3) 日本における小型燃焼発電の調査とコスト試算、エタノール発酵のコスト試算を行った。日本における木質系バイオマスの発電コストは6～189円/kWhとばらつきが大きく、現状では石炭火力との経済的競合は困難であるが、炭素税等の温暖化対策措置を考慮すれば、競合可能となり、その場合、原料バイオマスのコストの圧縮が重要であることがわかった。エタノール発酵に関しては、木質系バイオマスから製造したエタノールのコストは平均約84円/Lで、粗留アルコール（44円/L）には及ばないが、発酵エタノール（86円/L）と競合可能、原料費を大幅に下げれば合成アルコール（74円/L）とも競合できることが示唆された。

〔キーワード〕 木質系バイオマス、バイオエネルギー、CO<sub>2</sub>削減、  
マイクロタービンコージェネ、エタノール発酵

## 1. はじめに

再生可能で温暖化軽減効果を有するバイオマスは、環境調和型エネルギーとして、その大

量導入の試みが欧米を中心に推進されている。これまで日本においてバイオマスエネルギーの導入の動きは盛んでは無かったが、2001年6月の新エネルギー部会報告にて初めて「バイオマス」が新エネルギーとして定義づけられ<sup>1)</sup>、2002年1月の政令改定をもって正式に決定<sup>2)</sup>、バイオマスエネルギー導入目標値（2010年度の導入目標量：595万kl、原油換算、1次エネルギー総供給量に占める割合の約1%）が設定された。また新エネルギー導入支援策の一環として、2003年4月からはRPS(Renewable Portfolio Standard)制度が開始され、電気事業者は、販売電力量の一定割合以上の新エネルギー電気を利用することを義務づけられることとなった。<sup>3)</sup>バイオマスエネルギー導入の機運は高まっているものの、日本において、バイオマスエネルギーは未だ商業ベースで大規模に稼働しておらず、バイオマスの供給可能性やエネルギー導入システムについての計量的な評価研究が必要とされている。

## 2. 研究目的

本研究では、木質系バイオマスエネルギーの導入・実用化に資するバイオマスエネルギー評価の一環として、木質系バイオマスからエネルギーを製造するプロセスを導入した場合の温暖化軽減効果を、計量的に評価することを目的とする。また変換プロセスだけでなく、原料バイオマスの収集、搬送、あるいは製造エネルギーの供給システムを含む一連のプロセスでのエネルギー、ならびに放出/吸収CO<sub>2</sub>量を試算し、より正確な評価を試みる。

## 3. 研究方法

木質系バイオマスからエネルギーを製造する変換プロセスの主なものとして、燃焼発電、ガス化発電、ガス化-液化による液体燃料製造、熱分解(Pyrolysis)、エタノール発酵等が挙げられる。本課題において、これらのプロセスの温暖化(CO<sub>2</sub>)削減効果試算を行うと共に、有望とされたプロセスについて、日本の国内に導入する場合の適正規模の検討やコスト試算を行った。

### (1) 各種変換プロセスのCO<sub>2</sub>削減効果の評価

#### ① エタノール発酵プロセスのCO<sub>2</sub>削減効果の評価

木質系バイオマスからのエネルギー変換プロセスとして、燃焼発電、ガス化発電、熱分解(パイロリシス)、エタノール発酵について検討した。上記4技術のうち燃焼発電、ガス化発電および熱分解については、一部前の地球環境総合推進課題で明らかにしており<sup>4)</sup>、今回はエタノールエタノール発酵について検討した。

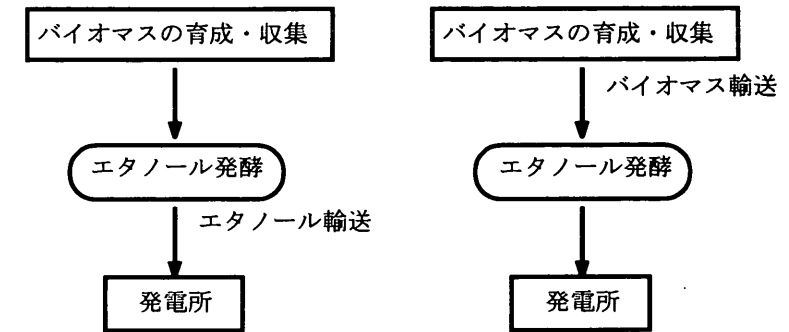
エタノール発酵は、バイオマスを糖化し、得られた糖から生化学的にエタノールを生成する技術で、生成されたエタノールは、化石燃料の代替としてディーゼルエンジンに用いられる可能性がある。また、輸送に関して、空隙率の高いバイオマスそのものを輸送するよりも有利と考えられ、特にバイオマスの栽培地域と利用地との間に距離がある場合に、非常に有効であると予想される。現時点では、研究の多くは実験段階にあり、まだ商業化にはいたっていない。また、エタノールを用いた発電方法として、現時点でディーゼル発電が報告されているが、商業化には至っていない。

本研究では、エタノール発酵により得られたエタノールを石炭代替として発電に用いた場合

の正味の炭素削減量を文献調査によって得られたパラメータを用いて求め、効率的なエタノール発酵システムの組合せを明らかにする。さらに、バイオマスの燃焼発電、ガス化発電、パイロリシスでの正味の炭素削減量との比較を行い、エネルギー変換技術の評価を行った。

ア. 対象とするシステム

本研究では、図1に示すようにエタノール発酵システムを、a) エタノールを輸送する場合と、b) バイオマスを輸送する場合、の大きく2つに分けて考える。a) の場合は発電所とエタノール発酵プラントが離れているので、エタノール製造時に外部のエネルギーを利用することによるCO<sub>2</sub>放出量R<sub>CONV</sub>を考慮している。b) の場合は、発電所とエタノール発酵プラントが隣接しているため、プラントには発電所から電力が供給されるものとして、R<sub>CONV</sub>は考慮しない。



ア) エタノールを輸送する場合      b) バイオマスを輸送する場合

図1. エタノール発酵利用システムフロー

発電方法は、ディーゼルエンジンによる発電（ディーゼル発電）を考慮する。また、バイオマス栽培地で利用する場合を30 km、日本で利用する場合を20000 kmとして2種類の輸送距離を考える。

イ. 正味の炭素削減量の計算方法

バイオマスを1 t 利用することにより削減される正味の炭素削減量 (kg-C/t-B) は、次式で表される。

$$R_N = R_G - (R_P + R_{CB} + R_{PT} + R_T + R_{CONV})$$

ただし、

R<sub>G</sub> (kg-C/t-B) ; バイオマスを利用した場合の炭素削減量

R<sub>P</sub> (kg-C/t-B) ; バイオマスの育成により放出される炭素量

R<sub>CB</sub> (kg-C/t-B) ; バイオマスの収集により放出される炭素量

R<sub>PT</sub> (kg-C/t-B) ; 前処理時に放出される炭素量

R<sub>T</sub> (kg-C/t-B) ; バイオマスあるいはエタノール輸送時に放出される炭素量

R<sub>CONV</sub> (kg-C/t-B) ; エタノール発酵プラントに必要なエネルギーを得るために放出される炭素量で以下の式により計算する。(ただし、バイオマスを輸送する場合は0)

$$R_{CONV} = \theta_{EL} \times E_{EX} \times Y_E$$

ただし、 $\theta_{EL}$  (kg-C/GJ) ; 現地で電力を1 GJ得る場合に放出される炭素量。ここでは石炭火力発電所を想定して93.3 (kg-C/GJ) としている<sup>5)</sup>。

E<sub>EX</sub> (GJ/t-E) ; エタノール1 tを製造するために必要外部エネルギー

Y<sub>E</sub> (t-E/t-B) ; バイオマスからのエタノール収率

である。

また、R<sub>G</sub>は次のようにして計算した。

$$R_G = \theta_C \times Y_E \times (Q_E \times \eta_E - E_{EX}) / \eta_C$$

ただし、

$\theta_c$  (kg-C/GJ) ; 石炭の単位エネルギー当たりの炭素放出量、27.99

$Q_E$  (GJ/t-E) ; エタノールの発熱量、29.7

$\eta_E$  (-) ; エタノールを用いたときのディーゼル発電効率

$\eta_c$  (-) ; 石炭火力発電所の効率、0.37

$E_{EX}$ はエタノールを輸送する場合にはエタノール発電による電力を発酵に用いないので0とする。

## ② 4種の変換プロセスのCO<sub>2</sub>削減効果の比較

燃焼発電、ガス化発電、熱分解のプロセスにおいても、エタノールと同様の方法で正味のCO<sub>2</sub>削減量を求めた。(詳細は文献参照) 熱分解から得られるバイオオイルは、代替ディーゼル燃料として用いるものとして試算した。計算式はエタノールと同じで、因子として、バイオオイル収率、バイオオイル発熱量、バイオオイルを1t製造するために必要な外部エネルギー等を文献調査により求めた。燃焼発電とガス化発電については、以下の式を用いた。

$$R_G = \theta_c \times (\eta_B / \eta_c) \times H_B \quad (\text{燃焼発電とガス化発電の場合})$$

$\eta_c$  : 石炭火力発電所の発電効率 (-) 0.37

$\eta_B$  : バイオマス発電所の発電効率 (-)

$\eta_B = \alpha C_A^\beta C_A$  : 発電所の規模 (MW)、 $\alpha$ 、 $\beta$  : 発電規模と発電効率の相関関係から求めた係数

各パラメーターを文献調査より求めた。 $R_p$ 、 $R_{CB}$ 、 $R_{TR}$ については、以前の研究で得られた値を用いた。

## (2) 日本の地方小都市でバイオマス発電を導入する場合の適正規模/システムの検討

日本の小都市に、木質系バイオマスを主原料とし、バイオマスエネルギーを導入するケースを想定した。直接燃焼発電、CHP (熱電併給: Combined Heat and Power、コジェネ)、ガスタービン発電、マイクロガスタービンコジェネ、ガスエンジンコジェネにより電気エネルギーを生産し、都市に電気供給する場合の必要木材量、発電適正規模を検討した。モデル都市は、東北の小都市で、人口3万人規模(世帯数約9,000)、周囲を山林で囲まれ域内に木工団地を有する、と想定した。(表1参照) 都市の電力、水の使用量、使用パターン、各種発電プロセスの発電規模と発電効率、等を文献資料から調査した。燃焼発電については、日本国内で実際に木質系バイオマスを専用用いて発電している事業所の調査を行い、発電規模や効率を調査した。(本調査結果はコスト試算にも用いた。) 得られたデータを基に適正発電規模、規模ごとの供給可能世帯数、必要供給木材量等を求めた。

## (3) 日本におけるバイオマスエネルギーのコスト試算の検討

### ① 燃焼発電のコスト試算

日本におけるバイオマス燃焼発電のコストを調査するため、NEDOのホームページに掲載されている産業廃棄物発電を行っている事業所のうち発電に用いている原料が、木質系廃棄物、植物残渣であった事業所に対して、アンケート用紙を郵送し調査を行った。(2)の方法参照) また、海外における発電コストと比較するための海外の発電コストについては、文献調査を

行った。

収集したコストデータを比較検討するため、1990年の日本円で換算した。換算方法には、日本国内のデータについては、1990年度を100としたGDPデフレーターを使用し、価値の修正を行った。海外のデータについては、データの年度の円とドルの平均為替レートよりドルを円に変換し、日本国内と同様にGDPデフレーターを用いて1990年の円に変換した。

発電規模当たりの建設費、建設コスト、運転コスト、原料コストの定義は以下の通りである。なお、運転コストの内訳は維持費と人件費である。

発電規模当たりの建設費 (万円/kW) : 建設費 (万円) ÷ 発電規模 (kW)

建設コスト (円/kWh) : 建設費 (円) ÷ 減価償却期間 (年) ÷ 年間発電量 (kWh)

運転コスト (円/kWh) : 運転費 (円/年) ÷ 年間発電量 (kWh)

原料コスト (円/kWh) : 購入価格 (円/t) × 年間処理量 (t) ÷ 年間発電量 (kWh)

発電コスト (円/kWh) : 建設コスト + 運転コスト + 原料コスト

## ②エタノール発酵のコスト試算

日本における木質バイオマスからのエタノール発酵の経済性に関するデータは見受けられなかったため、海外の木質系バイオマスからのエタノール発酵技術の文献調査を行った。海外でのコストを、日本国内での既存のエタノール製造コストと比較し、エタノール発酵のエネルギー利用システムの経済性を評価した。

対象とするシステムは、エタノールの製造までとした。比較する既存のエタノール製造システムは、現在の石油からの合成エタノールと発酵エタノールである。また、NEDOが海外から輸入している粗留アルコールとも比較を行なう。収集したコストデータを比較検討するため、燃焼発電と同様の方法で1990年の日本円で換算した。

エタノール製造量当たりの建設費、建設コスト、運転コスト、原料コストの定義は以下の通りである。

処理規模当たりの建設費 (万円/ton/day) = 建設費 (万円) ÷ 処理規模 (ton/day)

建設コスト (円/L) = 建設費 (円) ÷ 減価償却期間 (年) ÷ 年間エタノール製造量 (L/year)

運転コスト (円/L) = 運転費 (円/年) ÷ 年間エタノール製造量 (L/year)

原料コスト (円/L) = 原料費 (円/年) ÷ 年間エタノール製造量 (L/year)

## 4. 結果と考察

### (1)各種変換プロセスのCO2削減効果の評価

#### ①エタノール発酵プロセスのCO2削減効果の評価

##### ア. パラメータ調査結果

文献調査<sup>6-18)</sup>によって得られた結果を表1に示す。得られたエタノール収率の範囲は0.11~0.38(t-E/t-B)であり、平均で0.22(t-E/t-B)であった。

また、エタノールの

発電効率は0.40で

エタノール1tを製造

するのに必要な

表1  $Y_E$ 、 $E_{EX}$ 、 $\eta_E$ の調査結果

	$Y_E(t-E/t-B)$	$E_{EX}(GJ/t-E)$	$\eta_E(-)$
最大値	0.38	12.2	0.4
平均値	0.22	10.6	
最小値	0.11	0	

エネルギー量は

0-12.24(GJ/t-E)であり、

平均で10.61(GJ/t-E)であった。エタノール発酵での発電規模は、ディーゼル発電の経済的規模がおおよそ5MWなので標準発電規模を $C_A=5MW$ を用いた。また、バイオマス収率は10t-dry/ha/yを用いた。

イ. エタノール発酵プロセスの正味CO2削減量

エタノール発酵システムの各プロセスの排出原単位(発電規模5MW)を表2に示す。30km近距離輸送の場合、バイオマスとエタノールのどちらを輸送しても、 $R_N$ は、140(kg-C/t-B)でほとんど同じであった。20000km長距離輸送の場合、 $R_N$ はバイオマスを輸送した場合マイナスとなった。長距離輸送には、製造したエタノールを輸送した方が炭素削減に有効である。また排出プロセスの中で、炭素削減に最も寄与しているのは、30km輸送の場合、バイオマス育成からの炭素放出量32(kg-C/t-B)で、20000km輸送の場合、バイオマス輸送からの炭素放出量145.0(kg-C/t-B)であった。

表2 エタノール発酵利用システムでの炭素削減量および排出原単位(kg-C/t-B)

輸送物	輸送距離(km)	$R_G$	$R_P$	$R_{PT}$	$R_{CB}$	$R_{TB}$	$R_{CONV}$	$R_N$
バイオマス	30	180	32	6.9	0.39	2.4	—	138
エタノール	30	198	32	6.9	0.39	1.2	21.8	135
バイオマス	20000	180	32	6.9	0.39	145	—	-4
エタノール	20000	198	32	6.9	0.39	72.6	21.8	64

② 4種の変換プロセスのCO2削減量の比較

エタノールを輸送した場合のエタノール発酵の $R_N$ と、直接燃焼、ガス化発電、パイロリシスの $R_N$ との比較(発電規模5MW)を輸送距離30kmの場合を図2に、輸送距離20000kmの場合を図3に示す。輸送距離がいずれの場合でも、直接ガス化発電を用いた方が $R_N$ の値が大きいことが分かった。これは、発電規模25MWの場合でも、同じ結果が得られた。

日本での利用を考えて、輸送距離を20000kmに設定した場合のバイオマスの栽培必要面積を表3に示す。1992年の気候変動枠組条約により、全世界で2000年以降の二酸化炭素量を1990年レベルで安定化することが求められている。1990年度の日本の炭素放出量は0.32Gtであり、エネルギー転換部門の寄与率が30%、そのうち石炭火力の寄与率が20%であることから、わが

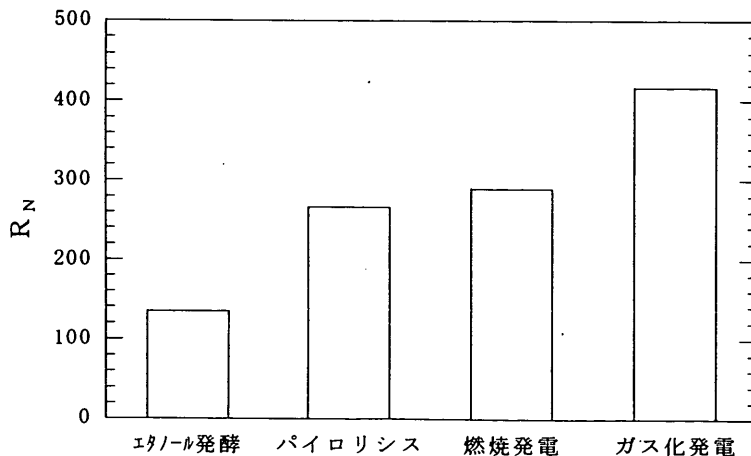


図2 技術間の $R_N$ の比較(30km)

N

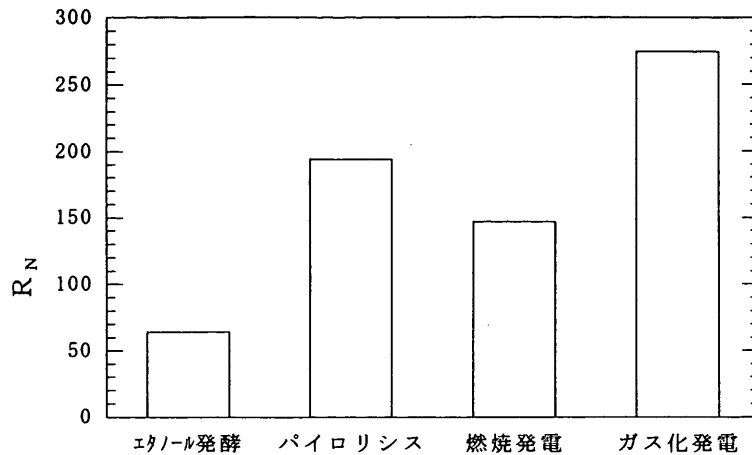


図3 技術間のR<sub>N</sub>の比較(20000km)

表3 日本でバイオマスを利用する場合の海外に確保すべき植林面積

変換技術	エタノール発酵	パイロリシス	燃焼	ガス化
植林面積(Mha)	30	9.8	12.9	6.9

国の炭素削減量の目標値を19Mtとして計算を行った。その結果、バイオマスの栽培必要面積について、日本での利用の可能性が最も高かったのは、直接ガス化発電であった。直接ガス化発電のバイオマス栽培必要面積は、6.9Mhaで日本の国土面積の18%であった。また森林減少面積の5%であった。

## (2) 日本の地方小都市でバイオマス発電を導入する場合の適正規模／システムの検討

### ① 想定モデル都市のパラメータ

表4にバイオマス発電導入を想定した都市のパラメータを示す。東北（冬期の熱源の必要な寒冷地）の小都市で、周囲を山林に囲まれ、域内に木工団地を有する、と想定した。

表4. 想定モデル都市の設定パラメータ

モデル都市	人口	世帯数	使用電力量	使用水量
	30,000人	9,000戸	330kWh/月/各世帯	1.1m <sup>3</sup> /日/各世帯
供給可能木材量*	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
	3,500t/y	4,500t/y	8,000t/y	20,000t/y

Case 1: 市域内でのバーク・端材発生量 Case 2: 市域内でのチップ・おが屑発生量

Case 3: 1 + 2 合計 市域内発生木質系燃料材

Case 4: 隣接町村からの林産廃棄物搬入を考慮 \*含水率50%計算

### ② 燃焼発電における発電規模と効率の相関

図4に、バイオマス専焼燃焼発電の発電規模と効率の相関関係の調査結果を示す。データは主に海外のもので、実在とモデル計算の結果の両方を含んでいる。燃焼発電は石炭火力発

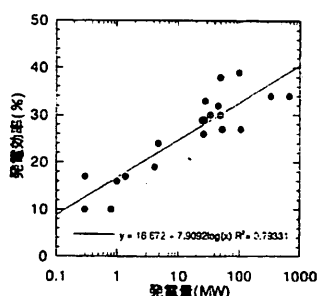


図4. バイオマス燃焼発電：発電規模と効率の相関関係

表5. 日本における木質系バイオマスを用いた燃焼発電の規模と効率

規模別事例数	発電規模	発電効率(%)
1MW以下 3事例	330～550 kW	10～17
1～3MW 7事例	1100～3000 kW	5～18*1
平均効率		12%

\*1 発電効率5%は1170kWでの報告例

3100kWでの効率33%という報告例あり、除外

電で実用化されている成熟した技術であり、スケールメリットを有することから、石炭では1000MW程度の規模での稼働が通常であるが、バイオマスでは原料供給の制限性から50-100MWが最大（適正）規模と報告されている。海外でのバイオマス燃焼発電事例としては25-50MW規模のものが多く、それらの発電効率は25-35%であるが、本ケースのような小都市では大規模発電に対応する原料供給は望めず、発電規模もより小さく、従って発電効率も低くなると予想される。そこで日本において実際に木質系バイオマスを専用に燃焼して発電している事例を調査し、それらの発電効率を求めた。その結果を表5に示す。

### ③モデル都市に応じた適正発電システムの検討

①、②の項目調査で得られたデータを基に、適正発電規模、規模ごとの供給可能世帯数、必要供給木材量等を求めた結果を表6に示す。

燃焼発電の導入を考えた場合、発電規模10MW、効率20%とした場合の必要木材量は288AD-t/日、現在のバイオマス燃焼発電規模平均の3MW（効率12%）とした場合の必要木材量は144AD-t/日で、この地域の調達可能量（300-1600t/月）を越えるものであった。

ガスタービン発電は、発電規模が小さい場合でも比較的発電効率が高いため、中規模の小型分散発電方法として適している。しかし本モデル都市の供給調達可能木材量と供給可能世帯数を考慮すると、5MWクラスのガスタービン発電はまだ規模が大きく（必要木材量107AD-t/d）、本モデル都市においては、マイクロガスタービン、あるいはガスエンジンの複数基（3から5）稼働による発電プロセスが適しているとの結果が得られた。本モデル都市に隣接する市町村から木質系バイオマスの調達が可能で熱源供給先が確保できる場合は、ガスタービン発電も有望であると考えられる。



表6 木質系バイオマス用いた発電の発電規模と供給世帯数の関係

	発電規模 (容量)	発電効率 (%)	供給可能世帯数	必要木材量 (AD-t/日)*
直接燃焼発電	10~40 MW	25~33*1		
	(例) 10 MW	20	約18,000戸	288
	(例) 3 MW	12*2	約 5400戸	144
	(例) 1 MW	8	約 1,800戸	72
ガスタービン発電	2.5~30 MW (例) 5 MW	30~35*3 30	約1万戸	107
マイクロガスタービンコジェネ	28~300 kW	20~35	60~650戸	0.7~24.7
ガスエンジンコジェネ	10~5000 kW (例) 100 kW	30~40 30	220戸	3.6

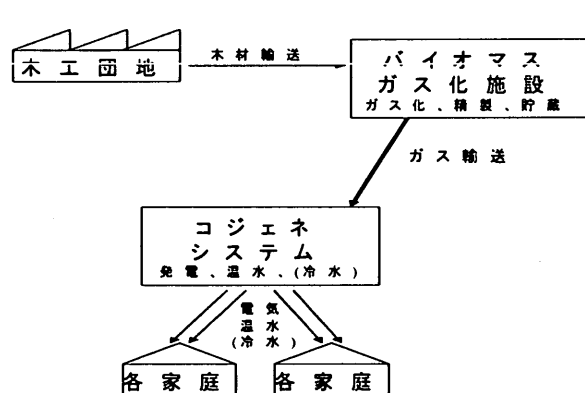
\*AD-t=Air dry ton (20%含水)

\*1 25-50MWの実機 (実在) のバイオマス発電所の値

\*2 日本におけるバイオマス燃焼発電 (実機稼働) 9カ所での平均値

\*3 2.5-30MWの実証プラントの値、50-150MWのモデル計算での発電効率は約30-48%

④モデル都市での導入例の提示



木工団地 ~ ガス化施設  
 近: 高効率、  
 遠: 木材輸送、ガス化施設の騒音  
 ガス化施設 ~ コジェネ  
 近: 高効率、配管費用 & 配線費用小  
 遠: ガス冷却 - 低効率、  
 ガス輸送コスト大  
 特にパイプライン敷設の場合  
 コジェネシステム ~ 家庭  
 近: 高効率、運転楽  
 遠: 電気配線費用大、配管費用大、  
 温水の温度低下  
 < 既設設備活用が重要 >

図5 各施設の位置関係

モデル都市の立地条件を考慮しながら、原料収集とエネルギー変換サイトの配置、エネルギー輸送システムの形態の検討を行った。新たに小型発電システムを導入する場合、設備として以下のもの 1)原料収集 (木工団地)、2)ガス化施設、3)ガス貯蔵・輸送施設、4)コジェネシステム、5)コジェネシステムの付帯設備 が考慮される。このうち、1)木工団地内製材所での原料収集が既存設備 (固定) で、他の設備は新たに整備することとなり、それらの配置と形態が問題となる。(図5参照) モデル都市の現地調査を行い、1)~5)の設置個所を検討した。その結果、モデル都市において、(A)ホテル-公共複合施設へのコジェネ (B)木工団地でのコジェネが候補としてあげられた。案(A)では、木工団地内で収集した木質系廃棄物を団地内にてガス化、製造したガスは、パイプライン輸送、あるいはポンプ輸送して市内のホテル (既設の発電、温水利用設備有り) / 公共複合施設で発電、温水利用のコジェネを行

う。案(B)は、木工団地内で収集、ガス化、発電—コジェネを行うクローズなシステムである。

### (3) 日本におけるバイオマスエネルギーのコスト試算の検討

#### ① 燃焼発電のコスト試算

##### ア. アンケート調査結果の概要

全体で8事業所から回答があり、木材・紙屑等を原料としている事業からの回収率は75%、サトウキビの絞りかす(バガス)を原料としている事業からの回収率は50%、全体としての回収率は67%であった。

発電規模の範囲は300kW~9500kWであり、発電規模1000~2000kWの発電施設が最も多かった。発電施設のほとんどは、2000kW以下の規模の施設であった。また、処理規模の範囲は14t/d~1080t/dであり、処理規模250t/d未満の発電施設が最も多かった。発電効率の回答数は少なく、3ヶ所のデータしか得られなかった。発電効率の範囲は8~18%であった。

発電の原料として、自社の廃棄物を使う事業所が3件、他社の廃棄物のみを使う事業所が1件、両方を使う発電施設が4件であった。他社の廃棄物のみを使う事業所では、他社から産業廃棄物(建設廃材)を処理費用とともに受け取り、その廃棄物のうち木材・木屑を利用して発電を行っていた。今回調査した事業所では廃棄物を原料としていることから、原料コストはゼロとみなした。

売電を行っていた事業所はなく、電力と熱を事業所内で利用していた。

##### イ. コストの試算結果

発電規模と規模当たりの建設費を図6に示すが、特に相関は見られなかった。CO<sub>2</sub>対策(PSA法)を施した石炭火力発電所(1000kW)の規模当たりの建設費として33.7万円/kWの報告があり<sup>19)</sup>、アンケート回答のあった事業所のうち5ヶ所がCO<sub>2</sub>対策を施した場合の石炭火力発電所と競争できることが分かった。

発電規模と発電コストの関係を図7に示すが、スケールメリットが見られた。発電コストの範囲は6.1~189円/kWhであり、平均では50.2円/kWhであった。石炭火力発電の発電コストは6.3円/kWhであり<sup>20)</sup>、バイオマス発電は経済的に競争できないことが分かった。しかし、CO<sub>2</sub>対策を施した場合の石炭火力発電の発電コストは17.7円/kWhであり、調査したうち3ヶ所の事業所のコストはこれを下回っていた。これらの事業所は、発電規模1MW以上、1年間を通して24時間連続運転している事業所であった。すなわち、温暖化対策を考慮するとバイオマス発電は経済的に競争できる場合があることが分かった。また、海外のバイオマス発電(ボイラー+蒸気タービン)の調査結果<sup>21-26)</sup>も図7に示すが、発電規模が同程度であれば日本と海外の発電コストは同程度であることが分かった。ただし、海外の場合はバイオマスのコストとして1.2~1.7円/kWhを含んでいた。

#### ② エタノール発酵のコスト試算

##### ア. 木質系エタノール製造技術の概要

文献調査結果を表7に示す。利用できるデータが記載されている論文は文献A<sup>13)</sup>、B<sup>28)</sup>、C<sup>29)</sup>、D<sup>30)</sup>、E<sup>31)</sup>の5編であり、コストは全て計算値であった。コスト計算に用いた緒元として実験値を参考にしているのが5編、実在する発電施設に隣接して建設した場合の値を見積

もったものが1編、論文から引用しているのが1編である。なお、実験の実施場所や計算の対象としている場所は米国が6編、スウェーデンが1編であった。

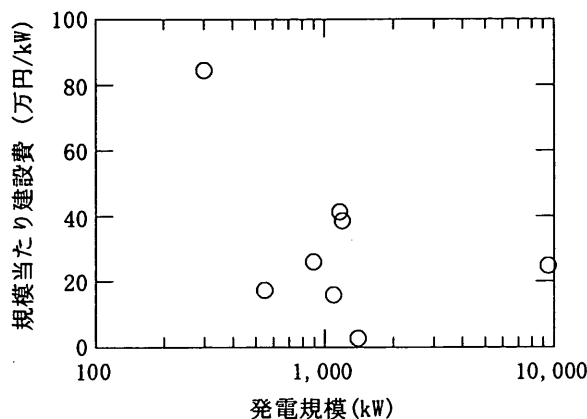


図6 規模あたりの建設費

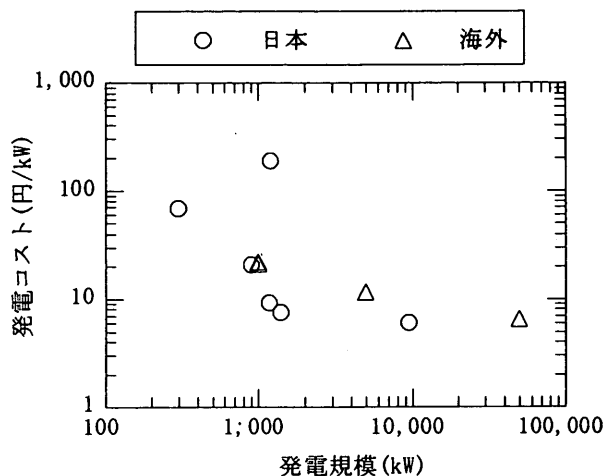


図7 発電コスト

表7 木質系エタノール製造コストに関する概要

文献番号	A	B	C	D (a)	D (b)	D (c)	E
規模 (t/d)	500	1,920	411	1,837	522	474	333
糖化方法	酸	酸→微生物	酸(二段)	希酸	濃酸	酵素	酸(二段)
発酵全体	SSF	SSF	SHF	SHF	SHF	SHF	SHF
分離方法	膜		蒸留	蒸留	蒸留	蒸留	蒸留
データの質	実験値+推計	実験値+推計	?+推計	実験値+推計	実験値+推計	実験値+推計	実験値+推計
研究場所	米国	米国	米国	スウェーデン	スウェーデン	スウェーデン	米国
原料	Pine	Wood	Soft wood	Pine	Pine	Pine	Hard wood
年度	1994	1990	2000	1992	1992	1992	1988

#### イ. コストの結果

図8に規模と建設コストの関係を示す。規模と建設コストとの関係は見られなかった。平均は20円/Lであった。

図9に規模と運転コストの関係を示す。運転コストも規模と運転コストとの関係は見られなかった。平均は46円/Lであった。文献番号Cの運転コストが非常に高いが、他の文献の運転費には含まれていない借用費が運転費全体の65.5%をしめているため高くなっている。

図10に規模と原料コストの関係を示す。平均は18円/Lであった。

図11に規模と合計コストの関係を示す。規模と合計コストとの間には関係は見られなかった。平均は平均値84円/Lであった。文献番号Cの全コストが他と比べて非常に高いが、上述したように運転コストの割合が高いためである。

コストの内訳を図12に示す。平均で建設コストが24%、運転コストが55%で原料コストが22%であった。

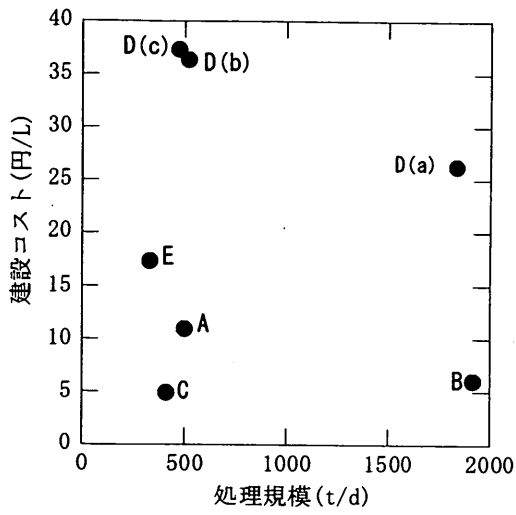


図8 建設コスト

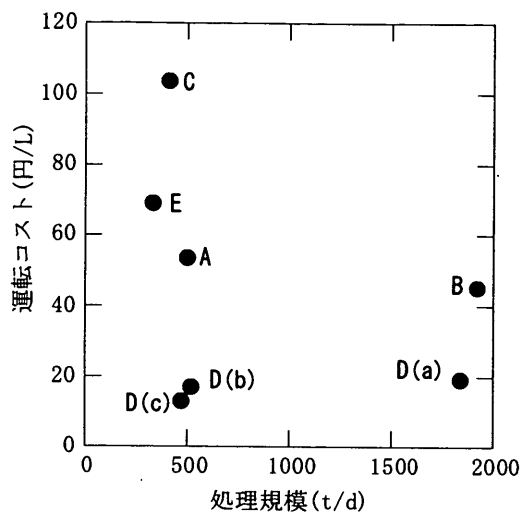


図9 運転コスト

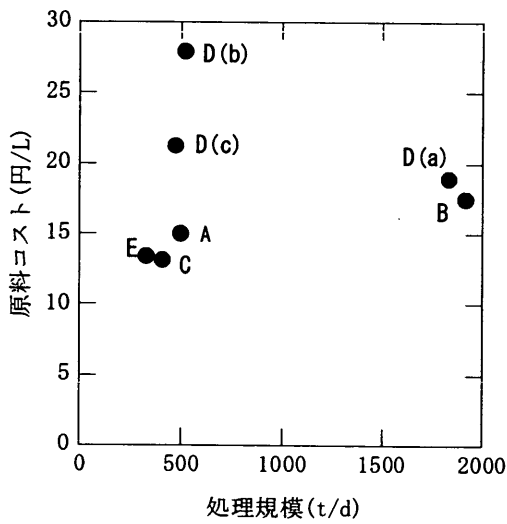


図10 原料コスト

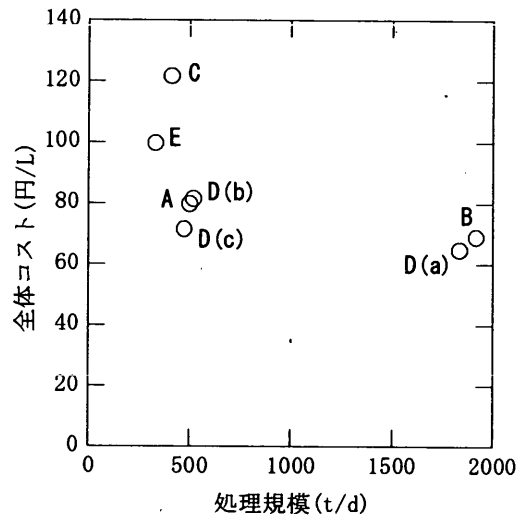


図11 合計コスト

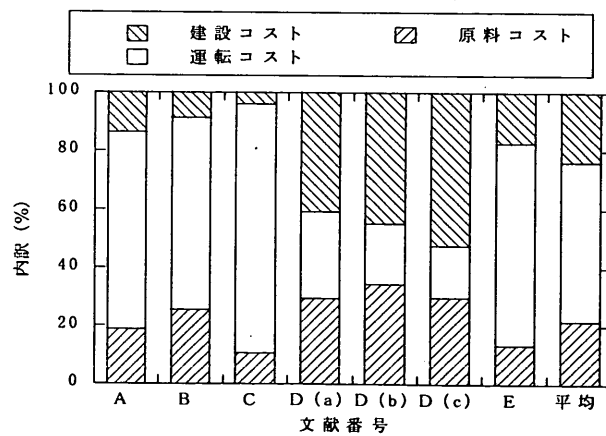


図12 コストの内訳

日本でのエタノール製造コストを表8に示す。木質系バイオマスからのエタノール製造コストは、粗留アルコールコストには及ばないが、発酵エタノールとは競争が可能である。また、原料コストを除いた木質系バイオマスからのエタノール製造コストは64円/Lとなり、合成エタノールと競争可能である。

表8 日本でのエタノール製造コスト

	合成エタノール	発酵エタノール	粗留アルコール
コスト(円/L)	73	86	44

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 各種変換プロセスのCO2削減効果の評価

①木質系バイオマスのエネルギー変換技術のうちエタノール発酵について、発酵施設がバイオマス栽培地に隣接している場合と、製造したエタノールを利用するエネルギー変換施設に隣接している場合について正味の二酸化炭素削減効果を検討した。

その結果、発酵施設がバイオマス栽培地に隣接している場合（エタノール発酵＋エタノール輸送の組み合わせ）が正味の炭素削減に最も有効であった。また日本への輸送を行っても炭素削減が可能であったが、バイオマスの栽培面積を確保することは困難であることが予想された。

②木質系バイオマスのエネルギー変換技術である、燃焼発電、ガス化発電、熱分解（パイロリシス）、エタノール発酵について、エネルギー変換施設がバイオマス栽培地に隣接している場合と遠隔地にある場合とで正味の二酸化炭素削減効果を比較した。

その結果、炭素削減に最も有効なバイオマスエネルギー変換技術は、直接ガス化発電であった。バイオマス1t当たりの得られた正味の炭素削減量は、エネルギー変換施設が隣接している場合（50km）で420kg-C、遠隔地に離れている場合（2000km）で280kg-Cであった。

### (2) 日本の地方小都市でバイオマス発電を導入する場合の適正規模／システムの検討

日本の地方小都市で、バイオマス発電を導入するケースを想定し、直接燃焼発電、CHP（熱電併給：コージェネ）、ガスタービン発電、マイクロガスタービンコージェネ、ガスエンジンコージェネにより、電気エネルギーを生産／供給する場合の、必要木材量、適正発電規模を検討した。またモデル都市の立地条件を考慮して、原料収集－エネルギー変換－エネルギー輸送の各要素の配置や形態を検討し、適正システムの構築を試みた。

その結果、モデル都市（東北地方、人口3万人規模、木工団地有）においては、木工団地の近くにガス化プラントを建設し、製造したガスをパイプライン／ポンペによりホテル－公共施設複合体へ搬送し、100kW程度の発電器複数代と商用電源の連結運転により、熱電併給を行うのが有望であるとの結果が示された。

### (3) 日本におけるバイオマスエネルギーのコスト試算の検討

①日本におけるバイオマスの燃焼発電コストについて調査した。日本でバイオマス発電を

行っている事業所にアンケート調査した結果、バイオマス発電施設の発電規模は、300～9500kWであり、発電コストの平均は50.2円/kWhであった。発電施設のほとんどは自社の廃棄物を原料とする発電施設であった。

CO<sub>2</sub>対策を施した石炭火力発電プラントと日本のバイオマス発電の発電コストを比較した場合、発電規模1MW以上、1年間を通して24時間連続運転している事業所のバイオマス発電の施設はCO<sub>2</sub>対策プラントと競争的であった。

海外でのバイオマス発電コストを調査した結果、海外で想定された発電施設には1000～100,000kWの発電施設があり、発電コストの平均は10.9円/kWhで日本の方がコストが高かった。しかし、同程度の発電規模では、日本と海外のバイオマス発電コストは同程度であった。

②日本におけるエタノール発酵によるエタノール製造コストを海外の文献調査から推定した。その結果、エタノール製造コストの範囲は64.5～121.6円/Lで平均は83.8円/Lであった。日本国内での既存のエタノール製造コストは、発酵エタノールの平均が85.5円/Lで合成エタノールの平均が73.7円/Lであったので、木質系バイオマスからのエタノール製造は十分に日本国内の既存エタノール製造コストに対抗できることがわかった。

## 6. 引用文献

- 1) 経済省(資源エネルギー庁)新エネルギー部会報告書(2001年6月)
- 2) 新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法施行令(改正2002年1月25日)
- 3) 堀史郎、「新エネ電気の導入を図るRPS制度」エネルギーフォーラム, No9,
- 4) 森林総合研究所、人為活動による森林・木材分野の炭素収支変動評価(環境庁地球環境総合推進費 陸域生態系の吸収源機能評価に関する研究)、pp.106-113(2000)
- 5) 岩田和彦、バイオマス利用による正味のCO<sub>2</sub>削減量評価に関する研究、H11年度宮崎大学工学部土木環境工学科環境制御講座卒論(2000)
- 6) C. Krotscheck, F. Konig & I. Obernberger, Ecological assessment of integrated bioenergy systems using the sustainable Process Index, *Biomass and Bioenergy*, 18, pp. 341-358(2000)
- 7) M. Larsson, M. Galbe & G. Zacchi, Recirculation of process water in the production of ethanol from softwood, *Bioresource Technology*, 60, pp.143-151(1997)
- 8) K. Stenberg, M. Bollok, K. Reczey, M. Galbe & G. Zacchi, Effect of substrate and cellulase concentration on simultaneous saccharification and fermentation of steam-pretreated softwood for ethanol production, *Biotechnology and Bioengineering*, 68, pp. 204-210(2000)
- 9) M. Wayman, C. Seagrave & S.R. Parekh, Ethanol Fermentation by *Picia stipitis* of combined pentose and hexose sugars from lignocellulosics prehydrolysed by SO<sub>2</sub> and enzymatically saccharified, *Process Biochem.*, 22, 2, pp.55-59(1987)
- 10) S. C. Grado & M. J. Chandra, A factorial design analysis of a biomass to ethanol production system, *Biomass and Bioenergy*, 15, pp.115-124(1998)
- 11) A. Boussaid, J. Robinson, Y. Cai & D. Gregg, Fermentability of the hemicellulose-derived sugars from steam-exploded softwood (Douglas fir),

- Biotechnology and Bioengineering, 64, pp.284-289(1999)
- 12) M. Kaylen, D. L. Van Dyne, Y. Choi & M. Blasem, Economic feasibility of producing ethanol from lignocellulosic feedstocks, *Bioresource Technology*, 72, pp.19-32(2000)
  - 13) N. Qureshi & G. J. Manderson, Bioconversion of renewable resources into ethanol: an economic evaluation of selected hydrolysis, fermentation, and membrane technologies, *Energy Sources*, 17, pp. 241-265(1995)
  - 14) S. J. B. Duff & W. D. Murray, Bioconversion of forest products industry waste cellulose to fuel ethanol: a review, *Bioresource Technology*, 55, pp. 1-33(1996)
  - 15) H. K. Sreenath & T. W. Jeffries, Production of ethanol from wood hydrolyzate by yeasts, *Bioresource Technology*, 72, pp.253-260(2000)
  - 16) L. Gustavsson, P. Borjesson, B. Johansson, and P. Svaningsson, Reducing CO<sub>2</sub> emissions by substituting biomass for fossil fuels, *Energy*, 20, pp.1097-1113(1995)
  - 17) I. C. Macedo, Greenhouse gas emissions and energy balances in bio-ethanol production and utilization in Brazil(1996), *Biomass and Bioenergy*, 14, pp.77-81(1998)
  - 18) J. Goldemberg, L. C. Monaco & I. C. Macedo, The Brazilian fuel-alcohol program, *Renewable Energy*, T. B. Johansson et al. eds., pp.841-863(1993)
  - 19) 内山洋司、発電プラントの温暖化影響評価 -ライフサイクルから見たCO<sub>2</sub>/コスト分析、*電力経済研究*、32、pp. 3-16(1993)
  - 20)九州電力資料、くらしとエネルギー2001、p.7(2001)
  - 21) C. R. McGowin, & G. A. Wiltsee, Strategic analysis of biomass and waste fuels for electric power generation, *Biomass and Bioenergy*, 10, pp. 167-175(1996)
  - 22) Y. Solantausta, A. V. Bridgwater & D. Beckman, The performance and economics of power from biomass, *DEVELOPMENTS IN THERMOCHEMICAL BIOMASS CONVERSION*, A. V. Bridgwater and D. G. B. Boocock eds., BLACKIE ACADEMIC & PROFESSIONAL, pp.1539-1555(1997)
  - 23) C. P. Mitchell, A. V. Bridgwater, D. J. Stevens, A. J. Toft & M. P. Watters, Technoeconomics assessment of biomass to energy, *Biomass and Bioenergy*, 9, pp. 205-226(1995)
  - 24) 山本博巳、藤野純一、山地憲治、岸田裕一、横山伸也、バイオマスエネルギー利用技術の効率・コストに関する研究・分析、第18回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集、pp. 353-358(1999)
  - 25) 熊崎実、木質バイオマスのエネルギー利用-これからの展望-、*紙パ技協誌*、55、pp. 648-651(2001)
  - 26) NEDO、平成10年度調査報告書 バイオマス資源を原料とするエネルギー変換技術に関する調査、NEDO-GET-9815(1999)
  - 27) 経済産業省製造産業局アルコール課、NEDOアルコール販売価格の概要(平成13年4月)、pp.38-39(2001)
  - 28) N. D. Hinman, D. J. Schell, C. J. Riley, P. W. Bergeron & P. J. Walter, Preliminary Estimate of the Cost of Ethanol Production for SSF Technology, *Applied Biochemistry and*

Biotechnology, 34/35, pp.639~649(1992)

- 29) K. L. Kadam, R. J. Wooly, A. Aden, Q. A. Nguyen, M. A. Yancey & F. M. Ferraro, Softwood Forest as a Biomass Source for Ethanol Production: A Feasibility Study for California, *Biotechnology Progress*, 16, pp.947~957(2000)
- 30) M. von Sivers & G. Zacchi, A techno-economical comparison of three processes for the production of ethanol from pine, *Bioresource Technology*, 51, pp.43~52(1995)
- 31) R. O. Lambert, Jr., M. R. Moore-Bulls & J. W. Barrier, An evaluation of two acid hydrolysis processes for the conversion of cellulosic feedstocks to ethanol and other chemicals, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, pp.773~783, 1990

## 7. 国際共同研究等の状況

なし

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表 (学術誌・書籍)

<学術誌 (査読あり)>

- 1) 小木 知子, "バイオマスエネルギー - エネルギー資源としてのバイオマスの特性とバイオマスエネルギー変換技術の現状-", *計測と制御*, 39, (1), p48-54 (2000)
- 2) S. Yokoyama, T. Ogi and Anan Nalampoon, "Biomass Energy Potential in Thailand" *Biomass and Bioenergy*, 18, p405-410 (2000)
- 3) Y. Dote, T. Ogi, and S. Yokoyama, "Estimate of the net CO<sub>2</sub> reduction by replacing coal and oil with biomass in Japan" *Progress in Thermochemical Biomass Conversion*, Blackwell Science, p 956-963 (2001)
- 4) 小木知子, 「--陸の植物と資源: バイオマス--」 *日本エネルギー学会誌*, 80, p29-35 (2001)
- 5) 小木知子, 「バイオマスとバイオエネルギー」 *日本エネルギー学会誌*, 80, p154-163 (2001)
- 6) 小木知子, 「バイオマス・エネルギー開発の動向」 *ケミカル・エンジニアリング*, 47, p908-915 (2002)
- 7) 小木知子, "Annual Energy Reviews 2001, 5.6バイオマス", *日本エネルギー学会誌*, 81, p598-600, (2002)

<学術誌 (査読なし)>

- 1) 小木知子, 「バイオマスからのエネルギー 製造」 *BIO INDUSTRY*, 18, p56-65(2001)
- 2) 小木知子, 「バイオマスのエネルギー変換 技術と今後の展望」 *高圧ガス*, 38, p140-149, (2001)
- 3) 小木知子, 「バイオマスとバイオエネルギーについて」 *生活と環境*, 47, p33-37(2002)
- 4) 小木知子, 「バイオマスエネルギーの動向について」 *グリーン・エイジ*, No. 344, p32-39, (2002)

<書籍>



- 1) 小木知子、「バイオマスエネルギー利用の最新技術」監修：湯川英明、(株)シーエムシー、「第1章：直接液化技術」(2001)
- 2) 小木知子、「バイオマス・エネルギー・環境」坂志郎編集、(株)アイピーシー、「第4章：4.4加圧熱水反応」(2001)
- 3) 小木知子、「バイオマスエネルギーの特性と変換・利用技術，バイオマスエネルギーの特性とエネルギー変換・利用技術」NTS ( (株) エヌ・ティー・エス、第2講；バイオマスのエネルギー変換と最適プロセスの構築，(2002)
- 4) 小木知子、「バイオマスハンドブック」(社)日本エネルギー学会(編)、第1章バイオマスの定義と分類、第3章バイオマスの組成、第4章バイオマスの含有エネルギー量 (2002)
- 5) 小木知子、「環境ハンドブック」(社)産業環境管理協会(編)、2部4章廃棄物問題の推移、廃棄物問題の処理(2002)

〈報告書類等〉

- 1) 小木知子、「樹木の炭化による温暖化防止等複合環境対策技術の開発、日本における木質炭化資源の賦存量」(財)地球環境産業技術研究機構、平成12年度報告書(2001)
- 2) 小木知子、「バイオマスのエネルギーへの利用技術の現況と課題」, 小木 知子, 第18回日本エネルギー学会関西支部セミナー「尽きることのない新エネルギー：太陽とバイオマス」資料, p. 29-36、(2002)

(2) 口頭発表

- 1) 小木知子、土手裕、第9回日本エネルギー学会大会、2000、08、東京 「バイオマスエネルギー利用による温暖化軽減効果：バイオマス発電システム導入による代替炭素量見積」、
- 2) 小木知子、立教大学特別講義、2000、11、東京、「加圧熱水反応によるバイオマスからのエネルギー／ケミカルズ製造」
- 3) 小木知子、東北大学特別講義、2000、12、仙台「熱化学法によるバイオマスからの燃料製造
- 4) 小木知子、電気学会、地球環境対応型エネルギーシステム調査専門委員会、2001、03、東京、「バイオマスエネルギーについて」
- 5) 小木知子、土手裕、第10回日本エネルギー学会大会、北九州、2001、08、「バイオマスエネルギー利用による温暖化軽減効果－4種のプロセス導入による代替炭素量見積」
- 6) 土手裕、愛媛大学特別講義、松山、2001、06、「バイオマスのエネルギー変換技術の評価」
- 7) 小木知子、(株)タクマ所内研修会、2001、07 「バイオマスエネルギーに関する技術開発の現状と将来展望」
- 8) 小木知子、バイオマスエネルギーの特性とエネルギー変換及び利用技術に関するセミナー、東京、2001、08、「バイオマスのエネルギー変換と再起プロセスの構築」
- 9) 小木知子、新日本製鐵株式会社講演会、富津、2001、09、「バイオマスエネルギーに

関する技術開発の現状と将来展望」、

- 10) T.Ogi, Y.Dote , Evaluation of technology on energy conversion on woody biomass, Woody Biomass Project Tohno WS, Tohno/Japan, 2001, 09
- 11) 小木知子、エネルギー開発センター講習会、東京、2001, 10、「エネルギー資源から見たバイオマス」
- 12) 小木知子、福岡県工業技術センター講演会、福岡、2001, 12、「未利用木質系バイオマスからのエネルギー製造」、
- 13) 小木知子、Techno Information Systems 講演会、東京、2001, 12、「バイオマスとバイオエネルギー変換利用の展望」、
- 14) 小木知子、緑の循環シンポジウム、東京2002, 01、「バイオマスエネルギーに関する動向」、
- 15) 小木知子、「熱化学変換法によるバイオマスからのエネルギー製造プロセス」、T I C (技術情報センター) セミナー：バイオマスエネルギーの事業戦略・採算性、東京、2002, 04
- 16) 木質系バイオマスからのエネルギー製造 愛媛大学特別講義 小木知子、松山、2002, 05
- 17) 熱化学的変換プロセスによる木質系バイオマスからのエネルギー／ケミカルズ製造、小木知子、バイオマス利用研究会第17回研究会、京都、2002/07/16
- 18) 小木 知子、中西 正和、土手 裕、久保山 裕史、天野正博、「木質系バイオマスのエネルギー変換技術の評価--実用化に向けた地域分散型発電システムの検討--」、日本エネルギー学会創立80周年記念大会、東京、2002, 08
- 19) バイオマスからのエネルギー変換技術の現状と展望、小木 知子、第1回エネルギー環境研究会・第73回北海道石炭研究会、札幌、2002/08/23
- 20) 分散型エネルギー転換技術システム、小木 知子、堤 敦司(東京大学大学院工学系研究科)、阿尻 雅文(東北大学多元物質科学研究所)、石井 格、市川 建美( (財)電力中央研究所)、第1回エネルギー環境研究会・第73回北海道石炭研究会講演会、札幌、2002/08/23
- 21) T.Ogi, Biomass Energy--Present State and Prospects for Future of Energy Conversion Technology--, JICA Training Course 2002, つくば、2002, 08
- 22) T.Ogi, Y.Dote, "Evaluation of Technology of Generating Electricity with Woody Biomass--Estimate of Reduction in CO2 Emission", GHGT-6(Sixth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies), 京都、2002, 10
- 23) 小木知子、「地域分散型バイオマスエネルギーシステムの検討」、アクアリス21研究講演会、福岡、2002, 11
- 24) 小木知子、「バイオマス廃棄物からのエネルギー／ケミカルズ製造--液化とガス化--」、バイオマスセミナー、和歌山市、2002, 11
- 25) 小木知子、柳下立夫、「バイオマスエネルギーの活用--汚泥からオイル、藻類から電気--」、筑波研究者一日教師派遣事業、江刺市、2002, 11
- 26) 小木知子、「バイオマスのエネルギーへの利用技術の現況と課題」、日本エネルギー学会関西支部セミナー、大阪、2002, 12
- 27) 小木知子、「バイオマスエネルギー利用、最近の動向と将来展望」、アルコール・バイオマス研究会講演会、東京、2003, 02

28) 小木知子、「バイオマスのエネルギーへの利用技術の現状と課題」, (社) 火力原子力発電技術協会中部(名古屋)支部講演会, 名古屋、2003、02

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

1) 小木知子、日本エネルギー学会進歩賞(2000)

(5) 一般への公表・報道等

- 1) 日本工業新聞(2001年4月13日、全国版) 「バイオマス、生物の力を資源に」の記事
- 2) TBSラジオ放送、(2001年6月4日放送) 番組「グッドモーニングジャパン!」で「バイオマスエネルギー」について紹介(15分)
- 3) 青森放送(ラジオ)、FM青森(2001年9月2日と9月7日放送) 番組「エネルギーサロン」で「バイオマスエネルギー」について紹介(25分)
- 4) 雑誌「最新テクノロジー解体新書」(日刊工業新聞社) Vol1. 2001年7月号 p96-99, 「古くて新しいエネルギー源に注目: バイオマス」
- 5) 雑誌「TRIGGER」(日刊工業新聞社) 2001年11月号 p111-113, 「環境調和型エネルギー資源として需要拡大必須! バイオマスエネルギー」
- 6) 日経産業新聞(2001年9月27日、全国版) 「バイオマス種々実用」の記事
- 7) 毎日新聞、(2002年11月22日、東北版) 「バイオマスエネルギーの活用で」の記事
- 8) 胆江日々新聞(2002年11月23日、東北版) 「新たな熱源に理解」の記事

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会における新エネルギー部会報告書の作成にあたり、本部会にて初めて取り上げられた「バイオマス」の項について、新エネルギー対策課の諮問に応じて、技術開発面から今後考えられる新エネルギー対策について資料作成に協力した。