# る。研究論文特集 エネルギーシステムと社会

# 養分循環を考慮したバイオマスエネルギーシステムの ライフサイクル分析─エネルギー収支及びLCCO2の検討

Life Cycle Analysis of Biomass Energy Systems Taking Nutrients-Circulation into Consideration

堂 脇 清 志\* ・ 石 谷 久\*\* ・ 松 橋 隆 治\*\*\* Kiyoshi Dowaki Hisashi Ishitani Ryuji Matsuhashi

(原稿受付日2000年8月2日,受理日2001年4月11日)

#### Abstract

In this paper, direct and indirect  $CO_2$ , that is, life cycle  $CO_2$  (LCCO<sub>2</sub>) emissions in the biomass energy system were evaluated using life cycle methodologies. In this study, we assumed that the biomass energy system consists of the two subsystems, the biomass cultivation process and the energy conversion process. However here we mainly focused the discussion on the latter.

In the energy conversion process, we designed the biomass IGCC plant. The biomass material is Eucalyptus deglupta, which is a kind of the fast growing tree. The plant scale is approximately 81 MW. The gasifier is an air-blown pressurized fluidized-bed type. The gas turbine is the free-power turbine, which permits the operation in low calorific fuel such as biogas. Especially, the basic data on the performance of the gasifier were acquired by the experiments concerning the pyrolysis and the gasification. Using the basic data of each experiment respectively, we calculated the system efficiency on the gasification.

Furthermore, it was assumed that ash and NH<sub>3</sub> can be collected by the gas-cleaning systems of the cyclone and the wet-type scrubber, which could be recycled to the reforestation area as nutrients.

In the case that the input of the biomass at 20% (wet-base) is 35.0t/h, the net power output become 76MW, the net system efficiency is 40.6%(LHV), in addition LCCO<sub>2</sub> emissions become 34.9g-CO<sub>2</sub>/kWh in the case of recycling nutrients.

## 1. はじめに

近年,バイオマスはそれ自身が温暖化ガスであるCO<sub>2</sub>を 固定することから,比較的森林資源の多い東南アジア,オ セアニアあるいは南米を中心植林事業が進められつつあ る.これらの植林資源は既存の天然林資源を保護する点で も重要なことであるが,一方で持続可能な条件で利用する ことができればCO<sub>2</sub>削減効果は相当大きなものと期待され る.筆者らは,これまで早生樹種を対象とした植林資源が 豊富な発展途上国において電力エネルギーとして利用する ことについて,マクロ的にエネルギー収支やライフサイク ルCO<sub>2</sub>(LCCO<sub>2</sub>)を検討してきた<sup>11</sup>.このような地域では CO<sub>2</sub>排出削減目標が定められていないこと,また将来的に エネルギー需要が増加することから,CDMによる技術移 転の可能性が十分に予測されるため,原料の供給方法をは じめ,その原料の特性及び最終的なエネルギー供給に至る までより精度の高い評価が必要となることが考えられる.

従って、本研究では具体的なモデル地域としてPapua New Guinea国(PNG)を選定し、当該国における Eucalyptus deglupta(ユーカリ)について、エネルギー 植林によって持続可能な条件で得られる原料をIGCCプロ セスで発電することを想定し、プロセス全体におけるエネ ルギー収支やLCCO2を検討した。特に、ガス化プロセス については、熱分解組成及びガス化反応速度の基礎的なデ ータを熱分解及びガス化実験を行うことによって取得し、 ガス化プロセスの設計パラメータとして利用し、最終的に は、バイオマスガス化コンバインドシステムの効率計算を 実施した。さらに、バイオマス特有である養分の損失につ いても、エネルギー収支やLCCO2の分析において考慮した。

# 2. 実験を考慮したガス化プロセス(加圧型流動床 ガス化炉)の設計

### 2.1 実験目的

本研究で対象とするガス化システムは空気吹き加圧型流 動床ガス化炉を前提としたシステム設計を行う.

本研究におけるガス化モデルでは、空気及び原料が流動

層に投入され、熱分解反応及び燃焼反応が行われ、続いて 1次フリーボード及び2次フリーボードにおいて、Char (主成分C)のガス化反応が行われることを想定したモデ ルである.なお、流動層では同時にTar(主成分CmHa)が 発生することが予想されるが、ここではすべて燃焼するも のとして取り扱うことにし、またC2以上の炭化水素につ いては無視することとした.

ここで,このモデルシミュレーションを行うためには, 流動層における熱分解組成を検討すること,反応器内の主 反応のうち律速であるCharのガス化反応特性について検 討することが必要となる.従って,本研究では,以下に示 す2種類の実験を行うことによって,これらの特性を検討 することとした.

#### 2.2 流動層における熱分解組成の決定

図1に示される実験装置を用いて,急速熱分解実験を行った.試料であるユーカリを金属ホイルに梱包し,その金 属固有のキューリー点まで急速加熱し,発生するガス成分 をガスクロマトグラフで分析した.急速熱分解反応は,原 料(ユーカリ)のガス化炉投入時の状況をより正確に表現 していると推定されるため,流動層内における熱分解ガス 組成を与えることとなる.なお,検討する発生ガスについ



データ取得





図2 熱分解反応におけるH<sub>2</sub>の温度依存性の検討

てはH<sub>2</sub>, CO及びCH<sub>4</sub>とする.この他,H<sub>2</sub>O及びCO<sub>2</sub>が想定 されるが,前述した仮定からTar及びCharの一部がガス化 剤中に含まれる酸素と反応するとしているので,これらの ガスについては実験結果及び原料の元素分析値から求める ことができる.

熱分解反応における反応速度モデル式は,これまでさま ざまなモデル式が提案されている<sup>233(45)</sup>.ここでは,熱分解 反応を単一反応として,次の反応速度モデル式を利用して 検討した.

熱分解反応における第j成分の時間t[s]までに発生した ガス生成量M<sub>i</sub>[mol/kg],最大生成量M<sub>i</sub>\*[mol/kg]とし, 反応温度T[K],気体定数R[J/molK],活性化エネルギー E<sub>i</sub>[kJ/mol]及び反応速度定数E<sub>0j</sub>[1/s]とするとき,反応速 度モデルは

$$\frac{dM_j}{dt} = k_{0j} e^{-E_j/RT} \left( M_j^* - M_j \right) \qquad (1)$$

のように表すことができる.(1)式をある時間まで積分す ると、次式のようになる.

$$\ln\left\{\ln\left(\frac{M_{j}^{*}}{M_{j}^{*}-M_{j}}\right)\right\} = \ln(k_{0j}t) - E_{j}^{*}/RT$$
 .....(3)  
(3) 式において, ある時間(一定)を与え, そのときま  
でに発生したガス量を利用して,  $\ln\left\{\ln\left(\frac{M_{j}^{*}}{M_{j}^{*}-M_{j}}\right)\right\}$ と  
I/Tの関係をロットすることによって, ある温度Tに対す  
る発生ガス生成量 $M_{j}$ を把握することができる. なお, こ  
のとき最大生成量 $M_{j}^{*}$ が必要となるが, 後述する熱天秤を  
用いて1,040℃の分解率を測定した結果, 原料の無水無灰  
基準の85.3% (重量換算) となったため, この条件におけ  
るガスの発生量についても同等であるとして評価した.

ここでt=9.7[s]とした場合のH₂, CO及びCH₄の結果を 図 2 ~ 図 4 に示す.







これらの図から,統計的に解析することによって次式で 表されるのガス生成量M<sub>i</sub> [mol/kg]を決定することができ る.なお,r<sup>2</sup>は決定係数,())内の数字はt値を表す.

$$\ln\left\{\ln\left(\frac{M_{H_{2}}}{M_{H_{2}}^{*}-M_{H_{2}}}\right)\right\} = 7.399 - 9316.7/T \qquad r^{2} = 0.974(24.0 - 29.3)$$

$$\ln\left\{\ln\left(\frac{M_{CO}}{M_{CO}^{*}-M_{CO}}\right)\right\} = 4.726 - 5908.2/T \qquad r^{2} = 0.980(27.8 - 33.7)$$

$$\ln\left\{\ln\left(\frac{M_{CH_{4}}^{*}}{M_{CH_{4}}^{*}-M_{CH_{4}}}\right)\right\} = 4.457 - 5122.5/T \qquad r^{2} = 0.852(10.4 - 11.5)$$
(4)

#### 2.3 フリーボード内におけるCharガス化反応の特性

次に、フリーボード内におけるCharのガス化反応の特 性について検討した.ここでは、不活性ガス中で行った熱 分解反応及び燃焼反応後に残存しているCharについて、 反応ガス成分との反応実験を行い、その結果を踏まえた反 応速度モデルを評価し、そのモデル式によってフリーボー ド内のCharの反応特性を近似することとした.図5に示 すガス化実験装置を用いて、熱分解後残存しているChar について、(5)式のように反応ガスであるCO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>Oを投 入することによってガス化反応を起こさせ、そのときの重 量変化を測定した.なお、反応ガスの濃度は小島ら<sup>®</sup>の検 討結果を参考に、反応速度定数がほぼ一定値となる範囲、 すなわち、反応ガス濃度の依存性がない範囲で行った.ま た、試料が少量であることから、形状による影響はほとん ど無視できるとして扱うことができるものと判断した.

 $\begin{array}{c} C + CO_2 \rightarrow 2CO \\ C + H_2O \rightarrow H_2 + CO \end{array} \tag{5}$ 

ここでは、反応ガス濃度に依存しない範囲でのCharの 重量変化を次式で表される容積反応モデルによって解析し た.なお、反応次数については測定結果からn=1/3を採 用した.

また反応速度定数k[1/s]は,温度の関数として次式の ように記述される.

ここでA[1/s]は頻度因子, E[kJ/mol]は活性化エネル ギーである. (7) 式の両辺の対数をとり, ln kとl/Tのプ ロットすることによって反応速度式を得ることができる (図6). なお, r<sup>2</sup>は決定係数, () 内の数字は t 値を表 す.



図6 反応速度定数の温度依存性の検討



図5 Charのガス化実験(定量分析)概要



バイオマスガス化コンバインドシステムの概要

$n k = 6.453 - \frac{14643}{T}$	$r^2 = 0.993(17.9, -30.1) \cdots (8)$
---------------------------------	---------------------------------------

これから、フリーボード内におけるCharのガス化反応 速度式は次式のように近似される.

 $\frac{dX}{dt} = 635 \exp\left(-\frac{14643}{T}\right)(1-X)^{1/3}$ 

## 3. バイオマスガス化コンバインドシステムの設計

#### 3.1 システム概要

これまでの実験によるガス化特性に関する基礎データを もとに、本研究におけるバイオマスガス化発電システムを 図7のように想定する.

このシステムの特徴としては、サイクロン及び湿式スク ラバにて、灰分を回収し、また湿式スクラバにてNを回収 することによって、これらの養分を植林地ヘリサイクルが 可能であるとしたシステムである.また発電規模について は,現在欧州においては、50[MW]~100[MW]を開発目 標としているため、本研究においてもその範囲内の規模を 想定した.一方,発電規模は植林規模にも関係するが, PNGの場合、これまでの植林実績から、目標の発電規模 と同程度の設計が可能である. なお, ガス化プロセスにつ いては以下の基礎実験により、原料(ユーカリ)の特性を 検討し、システム評価を行った.

#### 3.2 ガス化炉特性の把握

2章の実験結果を参考にして、空気吹き加圧型流動床ガ ス化炉の特性について検討する.なお、以下の評価では、 ガス化効率の算定を主な目的として、森ら"の流動層石炭 ガス化で用いられている解析法をもとにシミュレーション を行うこととした(図8).

ここでの計算は、ガス化炉内の第jステージの温度T<sub>[</sub>[K] 及び圧力P。[MPa]を与え、さらにCharの反応率Xを与え ることによって、各ステージの物質収支を(9)式に従っ



図 8 ガス化シミュレーション計算フロー

て修正し、最終的に全体の熱バランスがとれるようにガス 組成等を決定する方法である.また同時に、メタン改質反 応及びアンモニア合成反応<sup>8</sup> についても評価することとし た.

表1におけるガス化炉の条件及び表2における原料の性 状をもとに、前述した理論に従ってシミュレーション計算 を行った(表3).なお、表3の最適ケースとは、ガス化

表1 ガス化炉操作条件

炉内圧力 Pg[MPa]	2.60
流 動 層 温 度 T <sub>0</sub> [℃]	750
1 次 フ リ ー ボ ー ド 温 度 T <sub>1</sub> [℃]	900
熱損失率 E[%]	5.0
ガ ス 化 剤 及 び 搬 送 気 体	空気

C 48.800 [wt%]\*1 [wt%]\*1 H 6.280 [wt%]\*1 0 44.111 [wt%]\*1 S 0.019 [wt%]\*1 N 0.160 [wt%]\*1 灰分 0.630 [wt%]\*2 P 2 O 5 8.254 Na<sub>2</sub>O 0.905 [wt%]\*2 [wt%]\*2 C a O 19.048 灰分 [wt%]\*2 K 2 O 11.746 [wt%]\*2 V 2 O 5 0.159 MgO等 59.889 [wt%]\*2 [kJ/kg]\* 1 総発熱量 25.900 原料含水率 [%(湿)] 20.0 原料投入量 35.0 [t/h] 融点 (酸化雾囲気) > 1.400 [°C] 融点(還元雰囲気) > 1,400 [°C]

表2 ユーカリの性状

※ 1 乾 最 基 進

※ 2 灰 分 全 体 を 100% と し た 場 合 の 含 有 量

表3 最適ケースにおけるガス化性能

ガス化剤投入(0)	(C)[·]	1.05						
ガス化剤投入 [N	m <sup>3</sup> /h]	25,480						
冷ガス効率 (LHV	') [%]	72.52						
熱 ガ ス 効 率 ( L H V	) [%]	93.31						
炭素転換率[9	6]	97.66						
生 成 ガ ス 発 ( LHV) [	MJ/Nm <sup>3</sup> ]	6.62						
	H 2	25.935						
	СО	26.849						
	CH <sub>4</sub>	0.010						
	C O 2	4.883						
生 成 ガ ス 組 成	H <sub>2</sub> S	0.005						
[mol/kg原料]	NH 3	0.005						
	H 2 O	10.344						
	N 2	25.162						
	A r	0.315						
	残存C	0.761						
生 成 ガ ス 量 [ N m	3 / h ]	73,357						
2次フリーボード法	2 次 フ リ ー ボ ー ド 温 度 [℃] 1,321							

コンバインドサイクルシステムのパラメータ 表 4

生 成 ガ ス 発 熱 (LHV)[MJ/Nm <sup>3</sup> ]	7.38
ガスタービン入口温度[℃]	1,260
圧 縮 機 断 熱 効 率 [ % ]	85.0
ガスタービン断熱効率 [%]	88.0
ガスタービン発電機効率 [%]	95.0
ガスタービン機械効率 [%]	99.0
排 ガ ス ボ イ ラ 出 口 温 度 [ ℃ ]	157
排 ガ ス ボ イ ラ 出 口 圧 力 [ M P a ]	0.107
蒸気タービン内部効率 [%]	95.0
_ 蒸 気 タ ー ビ ン 発 電 機 効 率 [ % ]	95.0
蒸気 タービン 機 械 効 率 [ % ]	99.0
低 圧 蒸 気 条 件	0.6[MPa],228[°C]
高 圧 蒸 気 条 件	6.3[MPa],538[°C]

表5 プラント性能

原料供給量[t/h]·含水率[%]	35.0,20 (湿基準)
年 間 稼 動 時 間 [h]	6,600
総 発 電 量 [ M W ]	81.0
(ガスタービン出力 [ M W ] )	(50.3)
(蒸気タービン出力[MW])	(30.7)
所 内 動 力 [ M W ]	5.4
正 味 発 鼅 量 [MW]	75.6
全 ブ ラ ン ト 効 率 (LHV) [%]	43.5
所 内 率 [ % ]	6.7
正 味 ブ ラ ン ト 効 率 ( L H V ) [ % ]	40.6
年間正味発電力量[GWh/年]	498.8

剤を変化させたときの最高の冷ガス効率を与えるケースで あり、このガス化炉の仕様をもとにガス化コンバインドシ ステム全体の設計を行うこととした.

3.3 ガス精製装置(サイクロン及び湿式スクラバ)

ガス精製装置は、ガスタービン側で要求されるガス条件 をクリアにするために設置されるが、本研究においては、 養分である灰分及びNH₃の回収を行うために,設置するこ とを目的としている.ここでは、サイクロン及び湿式スク ラバを想定する.サイクロンは、気体中に浮遊する粉塵や ダスト等の固体粒子を気体の旋回運動による遠心力で周辺 方向に沈降させる装置である.

また、湿式スクラバについては、サイクロンで捕集でき なかった集塵と可溶性気体であるNH3の回収にある.特に, 灰分及びN分(養分)を回収し、林地へリサイクルするこ とは、その他ミネラル分のリサイクルも行うことになり、 持続可能なバイオマス資源の生産及びLCA的観点からも 重要な要素となる.なお、これらの養分が育成にどのよう な影響を与えるかについては、今後の研究課題としたい. 3.4 コンバインドサイクル発電システム

本研究におけるコンバインドサイクル発電システムの特 徴としては、低カロリーであるバイオマスガスを燃料とし て発電可能なガスタービンである例えば米国GE社製の LM2500PH<sup>9)</sup>を想定し、蒸気タービンには復水式混圧軸流 タービンを想定した評価とする. なお, 計算に用いるパラ メータについて表4にまとめるとおりである.

以上のパラメータを用いて, 各ケースのプラントのシス テム計算を行う. なお、計算では捕機動力等についても算 出し、全体の効率について検討した(表5).

# 4. バイオマスエネルギーシステムのエネルギー収 支及びLCCO2の検討

これまでの検討結果及び図9に示すシステムバウンダリ ーに従って、当該システムのエネルギー収支及びLCCO2



図9 バイオマスエネルギーシステムのシステムバウンダリー



- $LCCO_{\mathbb{P}}[g-CO_{\mathbb{P}/k}Wh] = \frac{各 \\ \\ T □ t Z CO_{\mathbb{P}/k} \\ \\ H \| & \mathcal{R} \| \\ \\ \mathcal{R}$ 
  - 図11 バイオマスエネルギーのエネルギー収支比・ LCCO<sub>2</sub>検討結果

の検討を行うことした<sup>10110</sup>. なお,各素材等の原単位の算 出は我が国の1990年産業連関表を利用して算出した.

図9における原料供給プロセスの外部投入エネルギー量 及びLCCO<sub>2</sub>排出量については、PNGにおいて持続可能な植 林システムとして図10に示すように植林面積20,160[ha], 林地傾斜角5度,植林間隔4[m]×4[m]及び7年サイク ルによる伐採を想定し、この条件で原料(含水率20%)を 得るまでの評価を行った(表6).なお,植林期間中に損 失する土壌に含まれる養分についても、肥料と質的に同等 であるとして評価に加えた.このとき、対象とする養分は N(窒素),P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(リン)及びK<sub>2</sub>O(カリウム)とし、また、 林内作業については、現地の雇用確保の観点からなるべく 多くの労働を投入することを想定した.

次に, エネルギー変換プロセスにおける外部投入エネル ギー量及びLCCO2排出量はプラントを構成する素材, プ ラントの組立エネルギー及び養分回収に伴うエネルギーで ある. なお, これらのデータについては, 表7のようにま とめられる.

以上の結果から、当該システムのエネルギー収支比及び

表6 原料供給プロセスの外部投入エネルギー・LCCO2

															原	料	供	給	ブ		セ	ス
外	部	投	入	II.	ネ	N	ギ		[	G	J	/	年	]		+	2	98	, 0	39		
		L	CO	0 0	211	t - (	0.0	2/1	Ŧ	1						1	1	9.	60	5		

表7 エネルギー変換プロセスの外部投入エネルギー・LCCO2

						エネルギー [GJ/年]	LCCO <sub>2</sub> [t·CO <sub>2</sub> /年]
プ	ラ	2	F	素	材	4,972	406
プ	ラ	ン	F	組	立	2,990	282
	赉	分		収		39,757	2,867

LCCO<sub>2</sub>について検討した(図11).なお,ここでの評価では,養分の回収がある場合とない場合について検討した.

### 5. まとめ

本研究の成果を以下のようにまとめる.

- ①バイオマスのガス化発電システムの導入可能性については、実験的にガス化特性を確認し、さらに発電システムの概念設計を行うことによって、その実証性について確認することができた。
- ②灰分回収を行うことで、回収を行わない場合に対してエネルギー収支比で約15%、LCCO2で約14%改善する. また、灰分回収は成長過程に不可欠なミネラル分のリサイクルも可能となるため、持続可能な植林システムにおいて極めて重要となる.
- ③本研究のバイオマス発電システムのLCCO2原単位は34.9 ~40.7[g-CO2/kWh]であり、化石資源による火力発電シ ステムの原単位(500~900[g-CO2/kWh])<sup>111</sup>よりも1桁 程度小さくなることがわかった。

# 参考文献

- 1) 堂脇清志,石谷久,松橋隆治;バイオマスエネルギーシステムの導入可能性評価,エネルギー資源学会第21巻第2号 (2000),70-77
- 三浦孝一,前一広;石炭の迅速熱分解による有用化化学物質の製造,化学工学論文集,第20巻第6号(1994),733-745
- 3) 神戸博太郎;熱分析, 講談社 (1975)
- 4) 安藤安俊;物質科学のための熱分析の基礎,共立出版 (1990)
- A. W. Coats, J. P. Redfern ; Kinetic Parameters from Thermogravimetric Data, Nature Vol.201(1964), 68-69
- 6)小島紀徳,古澤健彦,国井大蔵;流動層を用いた石炭チャーのガス化速度の測定,化学工学論文集,第10巻第5号(1984), 596-601
- 7) 森滋勝ほか4名;2段流動層石炭チャーガス化テストプラントのモデル解析およびその計算法,化学工学論文集,第7巻第5号(1981),505-511
- 8) 化学便覧第5版 応用化学編,日本化学会 (1995), I-606
- 9) Charles E. Neilson; LM2500 Gas Turbine Modifications For Biomass Fuel Operation, Biomass and Bioenergy, Vol. 15 No. 3(1998), 269-273
- 10) 堂脇清志,石谷久,松橋隆治;実験を考慮したバイオマスエネルギーシステムのLCA評価,エネルギー・資源学会第19回研究発表会講演予稿集(2000),237-242
- 11)田原 聖隆ら他4名;持続的な植林によるバイオマス発電の CO<sub>2</sub>排出削減量の評価,日本エネルギー学会誌,第77巻5号 (1998),403-409

378