

## ■解説論文／REVIEW PAPER■

## 木質系バイオ燃料の利用形態と燃焼特性—研究・開発動向—

## Utilization and Combustion Characteristics of Woody Bio-Fuel — Trend of the Research and Development —

永橋 優純<sup>1\*</sup>・村上 和彦<sup>2</sup>・雑賀 高<sup>3</sup>NAGAHASHI, Yusumi<sup>1\*</sup>, MURAKAMI, Kazuhiko<sup>2</sup>, and SAIKA, Takashi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 高知工業高等専門学校 機械工学科 〒783-8508 高知県南国市物部乙 200-1  
Kochi National College of Technology, 200-1, Otsu, Monobe, Nankoku, Kochi, 783-8508, Japan

<sup>2</sup> 首都大学東京 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1  
Tokyo Metropolitan University, 1-1 Minami-osawa, Hachioji-shi, Tokyo 192-0397, Japan

<sup>3</sup> 工学院大学グローバルエンジニアリング学部 〒192-0015 東京都八王子市中野町 2665-1  
Kogakuin University, 2665-1 Nakano-cho, Hachioji, Tokyo 192-0015, Japan

2009年6月4日受付; 2009年7月13日受理 / Received 4 June, 2009; Accepted 13 July, 2009

**Abstract** : A survey of published papers was carried out related to R&D of woody bio-fuels for industrial and civil usage. 45 domestic papers and 33 overseas papers were analyzed covering three categories — solid bio-fuels, liquid bio-fuels and gas bio-fuels. For the research and development of woody solid-biofuel, research on utilization of wood pellets is predominant in Japan, and current R&D is mainly on the development of combustion devices. There appears to be little fundamental research in this area. For woody bio-liquid utilization, fundamental research seems to predominate. In this category, two types of processes are receiving attention. One is direct liquefaction with a liquid base and high-pressure treatment in autoclaves, or more recently by supercritical fluid technology. The second type of process leads to bio-oil or bio-oil/char-slurry which is appropriate for dry-biomass feedstocks such as woody biomass. The bio-oil-char/slurry route has an advantage in its high energy density and ease of storage and transport. Research and development appears to be very active in northern America and northern Europe, but there are few research reports from Japan. The most active R&D is carried out in the third category of bio-gas utilization. Various energy conversion process, from conventional fixed beds to fluidized bed and spouted bed systems are being investigated in terms of combustion characteristics and conversion system analysis, including cost estimation. Most systems are based on conventional coal gasification, and therefore they all suffer from wood-tar generation which is peculiar to biomass gasification. A number of methods for overcoming tars are being studied, typically using catalysts, but the efficacy of these processes is unclear at this time. The major trend of R&D in this category is oriented to reduced tar gasification process. Device and system development focused on Japanese utilization (locally scattered and small scale) combined with cost simulation are especially important.

**Key Words** : Biomass, Bioenergy, Woody Bio-Fuel, Pyrolysis, Gasification, Survey, Research Trends

## 1. 緒言

低炭素社会実現へ向けての一つの有望な方法として、再生可能エネルギーとしての木質バイオマス材のエネルギー利用が最近特に注目され始めている。ここでは、木質バイオマス材の燃料としての利用形態と燃焼特性に関する研究開発動向を、ここ10数年間に出版された研究論文等をもとに調査した結果を報告する。

現在、バイオマス材の燃料化研究の多くは木質バイオマス材を対象にしたものとなっている。その利用形態としては、大きく固体燃料、液体燃料、気体燃料の3種類に分けられる。表1は、古くからの薪炭材を除いた木質バイオマス材の燃料化を分類整理したもので、最近では各項目分野ごとに精力的に研究が進められている。本稿では、固体、液体、気体の各燃料分野ごとに文献から読みとれる技術開発や研究の現状をまとめ、今後の課題を提起することとしたい。

\* Corresponding author. E-mail: naga@me.kochi-ct.ac.jp

Table 1 Classification of biofuel.

	燃料形態	燃料製造方法・改質方式	熱利用機器
固体燃料	ペレット, ブリケット, 木粉, チップ, チャー (炭)	ペレタイザー, 木材ミル, チッパー, 炭化・ガス化炉	燃焼炉, ボイラ, バーナ
液体燃料(*1)	木質液化油, バイオオイル, 黒液	各種液化プロセス (PERC 法, LBL 法ほか), オートクレーブ法, 急速熱分解法	ボイラ, バーナ
気体燃料	バイオガス	熱分解炉・ガス化炉 (固定床方式, 流動床方式, 噴流床方式, キルン方式)	ボイラ, ガスタービン, ガスエンジン

(\*1) 廃食用油改質油, バイオエタノールなどの機関用バイオ燃料に関しては省略, 特集「植物油燃料の適用技術-バイオディーゼル燃料について-」, 吉本・木下[79]参照.

## 2. 固体バイオ燃料の利用形態と燃焼特性

固体バイオ燃料の利用形態としては, より直接的には木質材をチップ状, 粉状にして使用する直接燃焼方式, 1次加工してペレットやブリケットにした後に一般的な燃焼炉やボイラで燃焼させる方法, 炭化・ガス化の副生物として生成するチャーを利用する方法などが挙げられる. これらの多くは現在, 民間レベルの地域ごとの実用化が先行している傾向が強く, 個々の研究論文として確認できるものは少ない. 木質バイオマス材の直接燃焼方式として, 火力発電所や事業所内自家発電所でペレットやチップを石炭と

混焼する試みがなされている[1]が研究論文としては未だ見当たらない. 木粉をバーナに送り込み直接燃焼させるものとしては, 2, 3の例が特許文献[2,3]に見られるが, 重油との混焼に関しては藤田ら[4]の報告が見られる程度である. 藤田らは小型の液体噴霧燃焼炉で, 細かな木粉とA重油の混焼を行いその有効性を確認している. 木粉混焼率を上げると火炎長さが増大すること, 熱利用面ではA重油と同等であることを確認している. 一方, バイオマス材をペレット, ブリケットの形に変えた後の燃焼に関する研究はいくつか見られ, 成瀬・大竹らによる一連の研究[5-7]や, ごく最近の甲斐らの実証的研究[8]がある. 大竹らは石炭とバイオマスを高圧成形したバイオブリケットの基本的燃焼特性を検討し, 石炭のみの場合に比べバイオマス添加により着火性と燃え切り性が良好になることを示し, バイオブリケットの燃焼モデルを与えている[5]. 次いで, ブリケットの構成材料や成形条件の燃焼速度に及ぼす影響を解析的に検討し, 燃焼特性を良く予測するモデルや半実験式を提示している[6]. さらに, このバイオブリケットに黒液を添加することで脱硝効果に優れることを明らかにした[7].

甲斐ら[8]は木質ペレットを燃料とする冷暖房システムの実証試験を吸収式冷温水機を利用して実施し, 実用化に当たっての課題などを提示している. また, 難波ら[9]は木質ペレットの熱分解実験によりその燃焼特性を検討し, ペレットサイズが燃焼特性に及ぼす影響やペレットと他の鋸屑やセルロースとの燃焼特性の違いなどを検討している(図1).

これらペレット燃焼において最近特に注目されているのがペレットストーブであり, 小規模な民生用の木質ペレット利用法として地域レベルでの開発[10]が活発になって来ている. ただし, 研究報告としてはまだ少ないようである.

この分野での研究・開発は, それぞれに規模は小さく地域レベルでの個々の要素開発・実証化が先行し, 基礎研究的な論文はほとんど見られない. 研究動向としては, 要素技術を組み合わせたコストシミュレーション主体の実証的検討が今後さらに活発化しそうである.

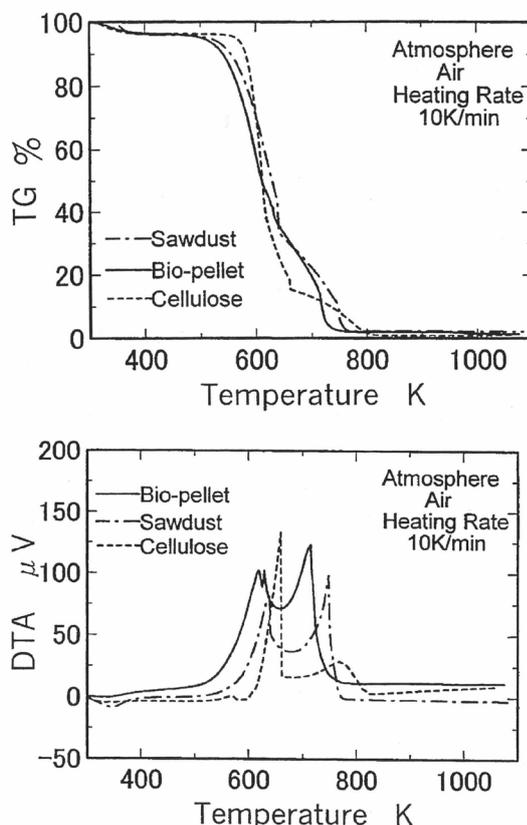


Fig.1 Comparison of TG-DTA curves for woody biomass; upper fig. TG curves, lower: DTA curves [9].

Table 2 Effect of moisture content on heavy oil yield and its properties [11].

Moisture content [%]	Heavy oil extracted Yield [%]	Elemental analysis			Heating value [MJ/kg]	ECR
		C	H	O [wt%]		
50.0	19.3	74.04	7.33	18.63	32.3	0.24
54.5	25.5	66.50	6.59	26.91	27.1	0.25
60.0	58.7	68.02	6.58	25.40	27.9	0.13
66.7	55.4	67.84	6.51	25.65	27.7	0.17
75.0	54.1	66.39	6.57	27.04	27.1	0.26
85.7	50.1	66.67	6.53	26.80	27.1	0.53
90.9	45.7	63.60	7.19	29.21	26.6	0.98
94.1	44.9	64.56	6.51	28.93	26.0	1.61

Reaction conditions: 4wt% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> at 4.0MPa and 300°C for 0 min

### 3. 液体バイオ燃料の製造と利用形態・燃焼特性

木質バイオマス材を液体燃料とする方法には、表1に示すようにオートクレーブ利用も含めた各種液化プロセスがあり、それにより得られる液体燃料が木質液化油である。一方、バイオマス材を一度ガス化し、それを冷却して得られるのがバイオオイルである。バイオ液体燃料としてはそれら以外に、パルプ廃液としての黒液なども燃料利用されている。

木質液化油(重油状燃料)の研究としては、美濃輪らの報告[11,12]が見られる。これら高温・高圧を利用する液化プロセスでは、バイオマス材の燃料化で不可欠な乾燥のためのエネルギーが不要なことから、エネルギー消費率を低く抑えられるメリットがある。この研究では、4 MPa, 300 °Cのオートクレーブ内での木粉の直接液化を行い、含水率60%での液化反応がエネルギー消費的に最も有利と報告[11]している(表2)。さらに、一度生成した油状物質が冷却過程での縮重合で減ずるのを避ける目的で、水蒸気爆砕による急速加熱・冷却による直接液化を試み[12]、この方法による最適操作条件を探っている。

これに類する研究として、超臨界水を利用しバイオ燃料を創生する方法なども概説[13]されている。また、林ら[14]はオートクレーブ法で有機性廃棄物からNaOHを触媒として水素ガスの製造を試みている。液体燃料を有効に利用できる新しいエネルギー変換システムの検討も行われている。朴ら[15]は、化学再生プロセスにより改質された水素リッチなガスをガスタービンで動力化するCRGTシステム(Chemically Recuperated Gas Turbine)をバイオマス材へ適用した場合の可能性を検討し、水分含有率の高いバイオエタノールを有効利用するための発電プロセスに有望であると報告している。

これら木質材の直接液化(燃料化)に対して、ガス化を経由して液体燃料化するバイオオイルの関連研究が最近注目されている。バイオオイルは、無酸素状態で約500°C前後での急速熱分解およびその後の発生ガスの急冷により得ら

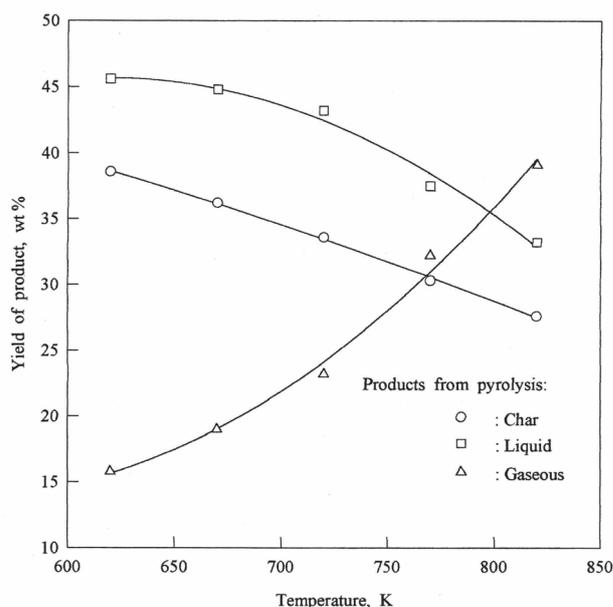


Fig.2 Effect of temperature on yield of products from direct pyrolysis. Final temperature: 820 K; heating rate: 1.6 K/s [18].

れる油状物質のこと[16]で、バイオオイルの生成方法やその改質に関する研究が最近盛んに行われている[17]。Demirbasら[18,19]は、バイオオイル生成域である500°Cを含む比較的広い温度範囲で各種農業バイオマスの熱分解を行い、反応温度帯ごとの気体、液体(一部バイオオイル)、固体生成物の発生挙動に関する検討を行っている(図2)。バイオオイル生成が成った後の検討、すなわちオイルの改質や事業性の検討も行われている。Yiら[20]は農業廃棄物の急速熱分解により得られるバイオオイルの成分分析とそれを基にコスト試算を行い、集中型バイオオイル精製所の可能性を示している。また、Luoら[21]、Wangら[22]、Van de Valdenら[23]は、それぞれ流動床方式、高速循環流動床方式の反応炉における実験とモデル解析的検討を行い、各々のシステムにおける技術的・経済的可能性について述べている。また、バイオオイルのガス改質については、水素化処理についての最近の研究動向をDouglas[24]が概説している。

また、バイオマスを部分燃焼させていったんガス化し、水素および一酸化炭素を含む合成ガスを触媒を用いてメタノール合成する研究[25]も報告され、農林水産省の研究で実証プラントが報告されている。

興味深い例として、生物を利用した木質材のエタノール発酵があるが、現状は木質バイオマスを糖化するに適した微生物を探索する段階にある。また、化学的処理として硫酸法や超臨界法も考えられているようだが、実用化の論文が見当たらないのが現状である。食物と競合しないバイオエタノールとしての今後の研究開発が期待される。

最後に黒液の燃料利用に関しては、ブリケット化することでの脱硝作用を備えた利用法の提案[26]や、石炭・黒液

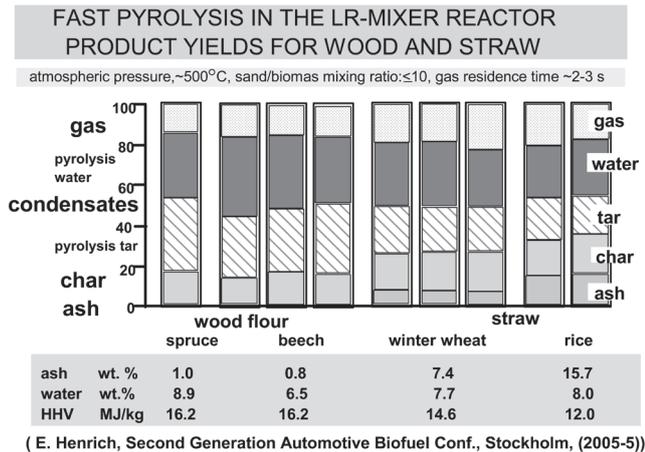


Fig.3 Product yields for wood and straw (fast pyrolysis) [28].

ガス化複合発電の可能性が報告[27]されたりしている。製紙工場内の自家発電用ボイラの燃料利用への動きもあるが報文としては未だ見当たらない。

以上、バイオマス材の液化・燃料化に関しては、バイオマス材燃料化に必須の原料の乾燥が不要で、したがってエネルギー消費率を低く抑えられるという点からウェットバイオマスを主体に高圧利用の液化プロセスが考えられてきた。農業系廃棄物などに多いウェットバイオマスではこの高温・高圧利用による直接液化に関する研究が続くと考えられる。一方、木質材などドライバイオマスを対象にした場合、反応装置が比較的シンプルで低温反応であること、バイオオイルとチャーの混合スラリー[28,29]とすることで(図3)、エネルギー密度・炭素密度が高くなること(バイオオイル/チャー・スラリーでは、木質チップの5~10倍)などの理由から、バイオオイル関連の研究が活発化してきている。バイオオイルの研究では、現状は製造工程の考案・検討などの要素研究やバイオオイルの改質ガス化の研究が主となっている。今後の研究としては、更なる要素開発や、液化された燃料原料を再度改質・ガス化する必要があることから、事業性も含めたシステムとしての最適化の検討、バイオオイルの直接・間接(ガス改質後)の熱利用機器への適用に関する研究などが増えてくるものと考えられる。

#### 4. 気体バイオ燃料の製造と利用形態・燃焼特性

木質バイオマス材のエネルギー変換に関わる研究として、最近特に研究例の多いのが気体燃料に関してである。その利用形態としては、バイオマス材をガス化してそれを燃料として発電する方式が多いが、水素ガスの生成[30-32]や燃料電池発電への利用[33]などを想定した研究も見られる。一度ガス化・熱分解しそれを冷却しバイオオイルとする方法はすでに前項で述べた。

ガス化の方式としては、固定床方式[34-39]、噴流床方式[40,41]、流動床方式[42-46]、キルン方式[47]、キルン方式

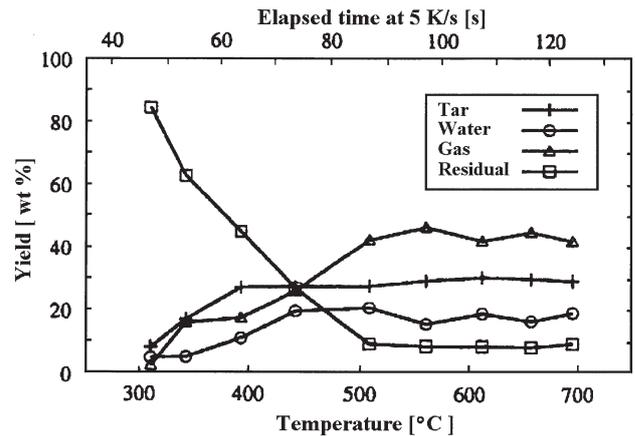


Fig.4 Cumulative yields of pyrolysis products [51].

+ダウンドラフト方式の2段階ガス化方式[48]などに分けられる。

それらの研究は内容的に、①ガス化・熱分解の基本特性と反応シミュレーション、②ガス改質とタール処理、③バイオ水素の生成、④エネルギー変換システムとシステム(コスト)評価にまとめられる。以下、項目ごとに研究レビューを行う。

①**ガス化・熱分解の基本特性**を扱ったものとしては、松井ら[49]、Demirbasら[50]、上岡ら[51]、武野ら[52]の研究がある。松井らは杉材を熱分解し、ガス、液状残渣、固形残渣、等の生成物の物質収支や、得られた各生成物の物質特性などを調査・特定している。上岡らはセルロースをモデル材とした熱分解実験を急速加熱方式により行い、300~500°Cにおける熱分解一次反応を実験的に確認している(図4)。これより設定温度レベルにおけるバイオマス材の熱分解挙動を明らかにするとともに、揮発分、タール分、固形残留分の生成等に関する反応式を求め提示している。Demirbasら[31,32,53,54]は、ドライバイオマスとしての各種農業廃棄物のガス化研究を精力的に行い、反応温度帯と各種生成物の収率などを明らかにしている。さらに、呉ら[35]は500~600°C範囲での木屑の熱分解結果を、また朴ら[33]は1600Kという高温雰囲気下での熱分解特性を報告している。

その他、比較的早くから検討されてきた都市ごみの熱分解[55]や産業廃棄物の流動床や噴流床によるガス化技術を基に、その後バイオマス材のガス化へ適用している報告[40-42]なども見られる。

②**ガス改質やタール処理**に関して、触媒利用によるタールの分解・改質を検討した例[36,37,43,44]や、おが屑のフィルター効果を確認した例[56]、セルロースをモデルバイオマス材としてガス生成、タール生成を予測する反応速度式を提示した上岡らの報告[51]がある。

本来燃料ガスとなるべきものが液化しタールとなることでガス収率が減ることや、さらには粘着質のタールが機器

への不具合要因となることなどは好ましくなく、各種触媒での分解・ガス化が試みられている。活性アルミナ[43,44]やCa系触媒[36]、さらにはRu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>触媒[37]で良い結果が得られたと報告されている。触媒としては、ドロマイト系[57-59]、アルカリ金属[60-65]、ニッケル[66-68]、アルミナ[43,44,69]、遷移金属[37]などが有効と報告されている。ドロマイトはMgCO<sub>3</sub>、CaCO<sub>3</sub>を主成分とし、炭化水素の分解に効果的である。カーボンの堆積で非活性化し、消耗するが安価であり交換が簡単である。アルカリ金属はタールを除去する効果が非常に高いが、再生が難しくコスト高となりうる。ニッケル触媒は炭化水素の分解に効果的であるが600℃より低いとメタンリッチなガスになる。ドロマイトと併用する第二触媒として最も効果的とされる。また、流動層内で二酸化炭素吸収剤によりガス化と同時に二酸化炭素を吸収・吸着させ発生ガスを水素リッチにシフトする研究[70,71]が報告されている。

孫ら[72]は、タールを軽質タールと重質タールに分類・定義し、微量な軽質タールの計測方法を提案するとともに、実機で分離除去困難な軽質タール除去には活性炭が効果的なこと、一方、同じく実機で有害となるタール由来のナフタレン除去におが屑が有効なフィルターとなり得ることを報告している。

上岡ら[51]はバイオマス材を熱分解した際に生成する揮発分中のガス、タール、水分の量の予測が可能な反応速度式を求め、セルロースをモデル物質とした実測値との比較からその妥当性を検証している。

③バイオ水素の生成に関して、美濃輪[73]、山田[74]の研究や、二酸化炭素を吸収・吸着させ発生ガスを水素リッチにシフトする研究[70,71,75]が、またZnCl<sub>2</sub>等の触媒を用いた水素リッチガスの生成については[30-32]が報告されている。パラジウムなどの貴金属を担持させた木質系バイオマスをマイクロ波によって加熱し、水素リッチガスを生成する方法も特許出願されている[75]。

一般にバイオマスを高温でガス化し、水蒸気を添加することで水素濃度を高め、触媒により改質反応やシフト反応によりガス組成を調整する。水素と二酸化炭素に変換した後、二酸化炭素を取り除けば水素を取り出すことができる(図5)。二酸化炭素除去には、アミン溶液による吸収法や吸着剤を用いた方法が開発されている。また、膜を利用した水素透過や膜リアクタも研究開発されている[73]。

美濃輪ら[73]は、同じ反応器の中で発生する二酸化炭素を吸収させて、水素のみを一段の工程で生成する方法(HyPr-RING法[14])を用いている。高温高压(600~700℃、~10MPa)の条件下で反応が進行する。二酸化炭素を吸収して生成したCaCO<sub>3</sub>は、加熱することでCaOに再生される。一段で水素が生産できるので、コストの低減が図れる。山田ら[74]は900℃の高温過熱水蒸気を発生する小型システムを開発し、空気や燃焼ガスを含まない純粋な高温水蒸気のみを用いて改質を行った。熱分解実験と比較して約2倍弱まで生成水素量が増加した。過熱水蒸気のもとでは、

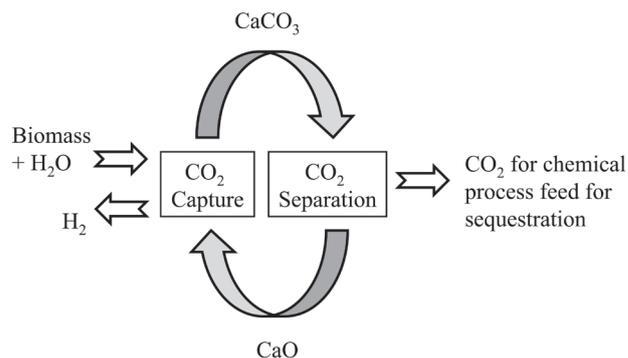


Fig.5 Simplified schematic illustrating the steam gasification of biomass coupled with in situ CO<sub>2</sub> capture using a CaO sorbent [76].

タールや残さが減少するので、タールトラブルや残渣の低減に有効である。

さらに、流動層内で二酸化炭素吸収剤によりガス化と同時に二酸化炭素を吸収・吸着させ、発生ガスを水素リッチにシフトする研究[70,71]が報告されている。Madhukarら[77]の研究では、CaOを用いて、500~700℃、大気圧下での実験を行った結果、水素生成割合が増加し、CO、CH<sub>4</sub>の濃度が低くなった。すなわち、CaOは吸収剤と触媒の両方の役割を演じていることになる。Hanaokaら[70]は、0.6MPaでCaOを用いるとCO<sub>2</sub>が排出されず水素が生成し、他の炭化水素系原料に比べて非常に低圧で行うことができることを示した。また、H. Florinら[71]は、CaOによる二酸化炭素吸収を伴う水素リッチガスの生成過程を明らかにするために、熱力学的な解析を行い、反応温度、反応圧力、蒸気/バイオマスの比率、吸収剤/バイオマスの比率について最適値を求めた。二酸化炭素吸収剤としてはCaOが有力であるとされているが触媒との関連も重要であり、今後の報告が期待される。

④エネルギー変換システムとシステム(コスト)評価に関しては、吉川らの研究グループによる報告が見られる。まず、流動床方式に類似のペブル床方式による高温雰囲気下での石炭・バイオの混合粉のガス化システムを検討し[78]、その後、木質粉を高温空気炉中に吹き込み直接ガス化しエンジン発電機で発電するというMEET(Multi-staged Enthalpy Extraction Technology)システムの技術的・経済的可能性の検討[45]を行っている。システムの大型化で効率増大が見込めるとしている。次いで、小型ガス化発電や固定床式ガス化炉を対象としたSTAR-MEETシステムと称するガス化発電システムの実験的検討[38,56]を行い、実証化に向けての基礎データを整備している(図6)。

一方、富塚ら[46]は、高性能触媒と流動床反応器を組み合わせることで、他の方式に比べ低い温度域でのガス化が可能でプロセスを提案し、より高効率なガス化システムの可能性を報告している。

以上、バイオマス材ガス化研究の分野では、従来からの

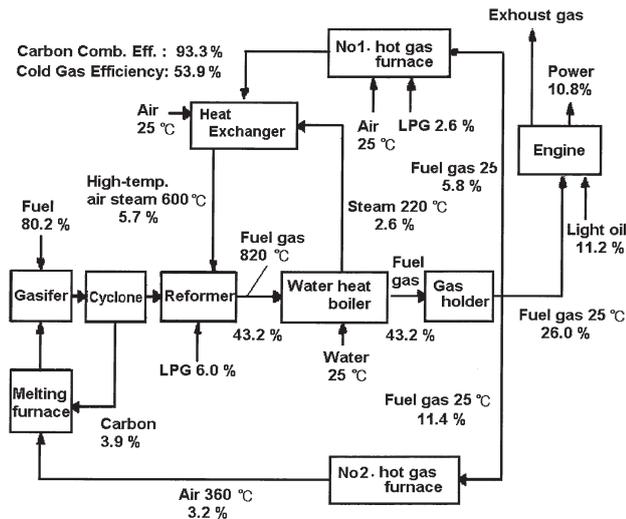


Fig.6 Energy balance for STAR-MEET system [56].

石炭ガス化技術を基礎に置いた研究手法で要素技術の研究開発が試みられているが、固定床方式から流動床方式に至るほとんどの変換プロセスでバイオマス材ガス化に特有のタール生成の抑制やその改質が技術的ネックとなり実用化への高いハードルとなっている。この課題克服が個々の要素技術の開発に次ぐガス化研究の第二段階として重要となっている。

## 5. 結言

木質系バイオ燃料の利用形態と燃焼特性に関して、国内外の研究論文等 78 編を調査し、その研究や開発動向に関して総括した。木質バイオマス材の利用形態として、固形燃料、液体燃料、気体燃料の 3 分野に分類し、その各々に関して研究開発の現状や今後の課題を考察した。

(1) 固体バイオ燃料分野での研究開発では、各種燃料化の方法が検討されているものの、それぞれに規模は小さく地域レベルでの要素開発や実証化が先行し、基礎研究はほとんど見当たらない。木質ペレットを利用した燃焼炉の開発を中心にコストシミュレーションなど実証的検討が更に活発化しそうな状況にある。

(2) 液体バイオ燃料分野では、主に農業系廃棄物などのウェットバイオマスを対象として高温・高圧利用によるバイオマス材直接液化の研究が続けられている。また木質バイオマス材などのドライバイオマスでは、バイオオイルやバイオオイル/チャー・スラリーの研究開発が北米、北欧を中心に活発に進められている。バイオオイル研究では、オイル製造装置の要素研究や熱利用機器への適用に関する研究がさらに求められる状況にある。

(3) 気体バイオ燃料分野では、従来からの石炭ガス化技術をベースとした研究開発が試みられているが、固定床から流動床反応炉に至るまでのほとんどの変換プロセスにお

いて、バイオマス材ガス化に特有のタール発生が実用化に向けての高いハードルとなっている。この課題克服が木質材の気体燃料化への重要事項として顕在化してきている。触媒利用などその対策研究がますます重要となってきている。

このようにバイオマス材の燃料化に関しては様々な方法で精力的な研究開発が続けられているが、それらほとんどのエネルギー変換システムで事業採算性の悪さ(コスト問題)が大きな課題として残っている。実用、普及している北欧・北米のバイオ燃料事情と異なる国情や地勢の日本で本格的にバイオ燃料が普及されるよう、今後は、要素開発やコスト問題も含めたシステムの統合・最適化に関する日本独自の研究がますます重要になってくるものと考えられる。

## 謝辞

本稿は、日本燃焼学会「バイオ燃料の燃焼研究動向に関する調査研究委員会」において実施した調査研究の成果をとりまとめたものである。本調査研究を実施するにあたり、日本燃焼学会関係者各位から多大なご配慮をいただいた。ここに記して深く感謝の意を表す。

## References

1. Kiuchi, N., *Focus NEDO* (in Japanese) 4(15): 15-16 (2004).
2. Kaneko, M., *Japanese Patent Application* (in Japanese) 2007-164598 (2007).
3. Suko, T., *Japanese Published Unexamined Patent Application* (in Japanese) 2007-101083 (2007).
4. Fujita, H., et al., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 72 (722): 2353-2358 (2006).
5. Lu, G-Q., et al., *Kagaku Kogaku Ronbunshu* (in Japanese) 23(3): 404-412 (1997).
6. Lu, G-Q., et al., *Kagaku Kogaku Ronbunshu* (in Japanese) 23(6): 954-961 (1997).
7. Kim, H-J., et al., *Kagaku Kogaku Ronbunshu* (in Japanese) 24(5): 779-783 (1998).
8. Kai, T., et al., *Monthly Clean Energy* (in Japanese) 15(2): 9-13 (2006).
9. Namba, K., et al., *Journal of the Japan Institute of Energy* (in Japanese) 83(10): 788-793 (2004).
10. Kanazawa, S., *Solar Energy* (in Japanese) 30(5): 39-44 (2004).
11. Minowa, T., et al., *Kagaku Kogaku Ronbunshu* (in Japanese) 15(4): 761-766 (1989).
12. Minowa, T., et al., *Kagaku Kogaku Ronbunshu* (in Japanese) 17(4): 816-822 (1991).
13. Saka, S., *Journal of the Combustion Society of Japan* (in Japanese) 49(148): 85-91 (2007).

14. Lin, S., et al., *Kagaku Kogaku Ronbunshu* (in Japanese) 28(5): 626-630 (2002).
15. Park, H., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 73(730): 1331-1336 (2007).
16. Homma, C., *Rinsanshi-dayori* (in Japanese), Hokkaido Forest Products Research Institute 3: 2-3 (2001).
17. Bridgewater, A.V., Peacocke, G.V.C., *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 4: 1-73 (2000).
18. Caglar, A., Demirbas, A., *Energy Conversion and Management* 41: 1749-1756 (2000).
19. Demirbas, A., *Energy Sources*, 24: 337-345 (2002).
20. Weiming, Y., et al., *ASAE Paper* 056141 (2005).
21. Zhongyang, L., et al., *Biomass & Bioenergy* 26: 455-462 (2004).
22. Wang, Z. X., et al., *Energy & Fuels* 21(4): 2421-2432 (2007).
23. van de Valden, M., et al., *ECI*, Brooklyn, NY: 897-904 (2007).
24. Douglas, E., *Energy & Fuels* 21(3): 1792-1815 (2007).
25. Sakai, M., "Energy at 21st Century by Biomass" (in Japanese) *Morikita Publishing* (1998).
26. Kim, H-J., et al., *Kagaku Kogaku Ronbunshu* (in Japanese) 24(5): 779-783 (1998).
27. Inoue, T., Harada, E. and Masuda, T., *Kasawaki Technical Review* (in Japanese) 153: 22-27 (2003).
28. Henrich, E., *Second Generation Automobile Biofuel Conference*, Stockholm, (2005-5).
29. Zwart R.W.R., Boerrigter H. and van der Drift, A., *Energy & Fuel* 20(5): 2192-2197 (2006).
30. Andries, G.C.J. and Spliethoff, H., *Energy Conversion and Management* 44: 2289-2296 (2003).
31. Caglar, A., Demirbas, A., *Energy Conversion and Management* 43: 109-117 (2002).
32. Caglar, A., Demirbas, A., *Energy Conversion and Management* 43: 489-497 (2002).
33. Park, K., et al., *Kagaku Kogaku Ronbunshu* (in Japanese) 30(4): 385-390 (2004).
34. Hirata, S., *Monthly Clean Energy* (in Japanese) 14 (3): 68-71 (2005).
35. Go, I., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 69(682): 1527- 1534 (2003).
36. Murakami, K., et al., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 72(724): 3082-3088 (2006).
37. Umeki, K., et al., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 73 (725): 321-327 (2007).
38. Hara, T., et al., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 72(723): 2604-2611 (2006).
39. Kamata, H., Maeda, Y., and Watabe, N., *Monthly Clean Energy* (in Japanese) 16(8): 27-30 (2007).
40. Shoji, Y., Nakamura, M. and Ozaki, H., *Kagaku Kogaku Ronbunshu* (in Japanese) 27(1): 27-33 (2001).
41. Shoji, Y., Shindo, K. and Kamiyoshi, T., *Kagaku Kogaku Ronbunshu* (in Japanese) 27(1): 34-41 (2001).
42. Marumoto, T., et al., *Kagaku Kogaku Ronbunshu* (in Japanese) 30(4): 447-454 (2004).
43. Namioka, T., et al., *Kagaku Kogaku Ronbunshu* (in Japanese) 30(6): 762-770 (2004).
44. Teramae, T., *Kagaku Kogaku Ronbunshu* (in Japanese) 33(3): 246-256 (2007).
45. Sugiyama, S., Yoshikawa, K. and Ishii, T., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 71(701): 268-274 (2005).
46. Tomishige, K., et al., *Kagaku Kogaku Ronbunshu* (in Japanese) 28(6): 666-672 (2002).
47. Sasauchi, K., *Journal of the Combustion Society of Japan* (in Japanese) 47(139): 31-39 (2005).
48. Ahn, C., et al., *Journal of the Combustion Society of Japan* (in Japanese) 49(150): 228-235 (2007).
49. Matsui, T., *Nippon Kagaku Kaishi* (in Japanese) 1: 53-61 (2000).
50. Demirbas, A., *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 73: 39-43 (2005).
51. Kamioka, K., et al., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 70 (694): 1598-1603 (2004).
52. Takeno, K., Ichinose, T. and Fukuda, K., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 72(715): 778-783 (2006).
53. Demirbas, A.H., Demirbas, A.S., Demirbas, A., *Energy Sources* 26: 821-827 (2004).
54. Demirbas, A., *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 76: 285-289 (2006).
55. Ogawa, S., et al., *Journal of Chemical Engineering of Japan* 38(5): 373-384 (2005).
56. Son, Y., et al., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 72(722): 2367-2374 (2006).
57. Delgado, J., Aznar, M.P. and Corella, J., *Industrial Engineering Chemistry Research* 36: 1535 (1997).
58. Perez, P., et al., *Energy and Fuels* 11(6): 1194-1197 (1997).
59. Simell, P.A., Hakala, N. and Haario, H.E., *Industrial Engineering Chemistry Research* 36(1): 42-51 (1997).
60. Mudge, L.K., et al., *Journal of Solar Energy Engineering, Trans. ASME* 107(1): 88-92 (1985).
61. Hauserman, W.B., *International Journal of Hydrogen Energy* 19(5): 413-419 (1994).
62. Li, T.C., Yan, Y.J. and Ren, Z.W., *Fuel Science and Technology International* 14(7): 879-896 (1996).
63. Gebhard, S.C., et al., *Biomass and Bioenergy* 7 (1-6): 307-313 (1997).
64. McKee, D.W., *Fuel* 62(2): 170-175 (1983).
65. Jin, G., *Energy* 30(7): 1192-1203 (2005).
66. Zhang, R., et al., *Energy Conversion and Management* 45(7-8): 995-1014 (2004).
67. Coll, R., et al., *Fuel Processing Technology* 74(1): 19-31

- (1991).
68. Courson, C., et al., *Catalysis Today* 63(2-4): 427-437 (2000).
69. Matsuoka, K., et al., *Energy and Fuels* 20(3): 1315- 1320 (2006).
70. Hanaoka, T., et al., *Biomass and Bioenergy* 28(1): 63- 68 (2005).
71. Florin, N.H. and Harris, A.T., *International Journal of Hydrogen Energy* 32(17): 4119-4134 (2007).
72. Son, Y., *JSME Trans. B.* (in Japanese), 73(730): 1399-1405 (2007).
73. Minowa, T., et al., “Hydrogen Utilization Technology Vol. 2” (in Japanese) *NTS Inc.*: 28-31 (2005).
74. Yamada, O., et al., “Hydrogen Utilization Technology Vol. 2” (in Japanese) *NTS Inc.*: 32-41 (2005).
75. Ito, K., Yui, M. and Manome, I., *Japanese Published Unexamined Patent Application* (in Japanese) 2007- 126301 (2007).
76. Florin, N. and Harris, A., *Environmentalist* 27:207-215 (2007).
77. Madhukar, R., et al., *International Journal of Hydrogen Energy* 32: 2803- 2808 (2007).
78. Kato, Y. and Yoshikawa, K., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 69(683): 1692-1697 (2003).
79. Yoshimoto, Y. and Kinoshita, E., *Journal of Combustion Society of Japan* (in Japanese), 51-156: 121-128 (2009).