

バイオマス 廃棄物利用の高度化

地域資源循環の達成と国際燃料チェーンの確立

電力中央研究所「電気と環境のフォーラム」



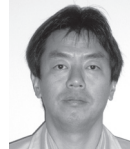
芦澤正美

電力中央研究所 エネルギー技術研究所 上席研究員、「バイオマス／廃棄物高度利用技術」課題責任者。石炭、超重質油、バイオマスのガス化炉の研究開発に従事。



大高円

電力中央研究所 エネルギー技術研究所 上席研究員、博士(工学)。石炭、超重質油、バイオマスのガス化炉の研究開発に従事。



井内正直

電力中央研究所 社会経済研究所 上席研究員、博士(学術)。空間情報を活用した日本・アジア地域のバイオマスポテンシャル評価に関する研究に従事。



吉原利一

電力中央研究所 環境科学研究所 上席研究員、博士(農学)。東京理科大学客員研究員。植物による環境修復技術(ファイトレメディエーション)の開発、およびエネルギー植物の栽培(LCA評価)に関する研究に従事。

1 バイオマス 廃棄物利用の 新たな展開

ブルーカラー、ホワイトカラーに続き、新エネルギー産業労働者を指すグリーンカラーという言葉が生まれた。低炭素社会の実現に向け、各国政府が「グリーン・エネルギー政策」に取り組み、新エネルギー・環境ビジネスを優遇する措置を講じ、投資が集中することで新産業創出につながったことに起因する。そもそも新エネルギーは全般的にコスト高であるため、市場原理だけに任せておくと、遅々として普及しない。そこ

で、RPS (Renewable Portfolio Standard)：再生可能エネルギーの導入義務化) やFIT (Feed-in Tariff)：新エネルギーの固定価格買い取り制度) などの社会制度が重要となる。各国の新エネルギー政策の違いにより普及スピードや持続性に差異が見られるが、欧米ではIT産業に続くビジネスチャンスととらえられ、投資が集中する分野が存在する。風力、太陽光、スマートグリッド、プラグインハイブリッド車(PHEV)、電気自動車(EV)などはそのよい例と言える。

そのような中、バイオマスは毀誉褒貶が激しい状況にある。カーボンニュートラルなクリーンエネルギーとして一時は注目を集めたものの、現在では、導入効果が見問視されるケースもあり、食料価格高騰の要因のひとつと言われることもある。これらは、利用の促進が急がれ、植林などの生産・整備が後手に回ってしまったことや、一部で食料や飼料をエネルギー利用してしまったために生じたものと考えられる。そこで、森林の管理をもう一度見直し、緑化や植林の推進を図るとともに、これらの整備に伴って発生する「廃材系バイオマス(林地残材、剪定枝

など)や、食料との競合を避けた「非食品バイオマス(農業や食品加工で発生する残渣など)」、放置すれば地球温暖化物質を放出してしまう「腐敗性バイオマス(都市ゴミ、下水汚泥など)」などの利用率を高めることが重要と考えられる。バイオマスの利用には優先位があり、食料や肥料、マテリアル利用を優先させ、エネルギー利用は、これらより低位に位置付けて考えることが大切である。本来、バイオマスは、カーボンニュートラルであるといった重要性のほかに、天候依存型のほかの新エネと異なり、計画的に利用可能

2

バイオマス発電の 現状から見た 今後の課題

なエネルギーであり、人の生活で廃棄されるゴミの有効利用や、プランテーションによる生産など、資源循環と資源確保の両面でも重要なエネルギーと言える。

以上の観点から、バイオマス／廃棄物利用の今後の展開を考えると、①まずは、地域ごとの活動において発生する未利用バイオマスの高効率エネルギー利用（地域資源循環の達成）を継続的に発展させるとともに、②将来的には、賦存量が豊富な海外バイオマスを対象に、現地でエネルギー密度を高めた上で輸入利用（国際燃料チェーンの確立）することが重要と考えられる。これらを実現するためには、そのままでは燃料として利用しにくいバイオマス／廃棄物の新たな高度エネルギー利用技術の開発などが重要になってくる。本稿では、今後の技術開発の方向性と当研究所の取り組みについて述べる。

(1) 海外動向

バイオマス利用を先進的に進める欧州では、1990年代にバイオマスの高効率ガス化複合発電（IGCC）が数地点建設されたが、運用コストが高く中断されたケースが多い。しかし、おおむね2000年以降、低コストで実現可能な方策として、「既設の大型熱電併給プラントでの混焼（木質ペレットや麦わらなど）」「既設の石炭IGCCでの混焼（木質や下水汚泥など）」「地域熱供給プラントでの中小規模利用（地域発生の木質バイオマス）」がいずれも軌道に乗って順調に稼働している。また、未利用な廃棄物を対象に、分別・資源化プラントと発電プラントの建設が盛んとなっている。さらに、次世代向けの研究として、バイオマスのガス化液体燃料合成や、廃棄されている動物油脂を利用する技術開発などが進められている。これらの背景には、08年12月に定められたEU指令が大きく影響しているものと考えられる。EU指令では、バイオ燃料の導入目標が、

再生可能資源を原料とする電力を含め、20年までに10%と大きく定められている。なお、廃棄物や非食用作物起源のバイオ燃料は、2倍量としてカウントするなど、資源循環を優先させた政策となっている。さらに、大気のみならず、地質・水質などへの環境影響、雇用創出や地域貢献などの社会影響、食料価格影響など、これらの影響に対する新たな基準のクリアが前提とされるなど、社会制度の成熟度も増していると言える。わが国でも、これらの事例や政策の分析が進められ、経済産業省が中心となって日本版のバイオ燃料持続可能性基準の策定を目的に、バイオ燃料持続可能性研究会が設置され検討が進められている^[1]。

(2) 国内動向

わが国では、RPS法が施行された03年4月以降、バイオマスを生じた発電事業が年々増加の一途をたどっており、これまでに約300地点、合計1200MWの発電設備容量に至っている。その手

法としては、石炭火力発電所でのバイオマス混焼発電とバイオマス専焼発電の2通りに大別される。おのおの実態と現状から見た今後の課題を以下にまとめて示す。

① 石炭火力でのバイオマス混焼発電の現状

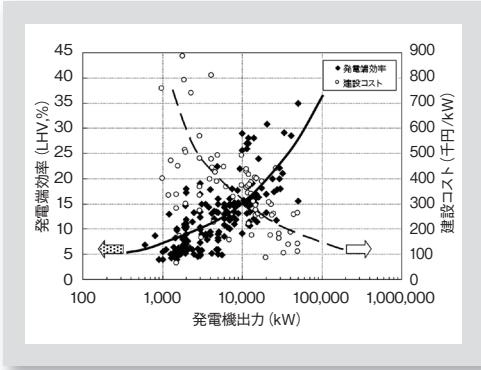
電力各社では、主に石炭火力でのバイオマス混焼発電を進めている。これは、大型の石炭火力は発電効率40%程度の高効率で運転されており、バイオマスを重量ベースで1〜3%程度混ぜただけでも、効率を維持しながら数千〜数万kW（バイオマスによる発電分）もの電気が得られるためである。混焼発電は、バイオマスの効率的な利用方法のひとつと言える。ただし、わずか数%の混焼率であっても、大規模発電であるため、年間数万tのバイオマスが必要となる。大量のバイオマスを、いかに低コストかつ長期的に安定して調達するかが課題と言える。

② バイオマス専焼発電の現状^[2]

(a) 熱効率・経済性の比較

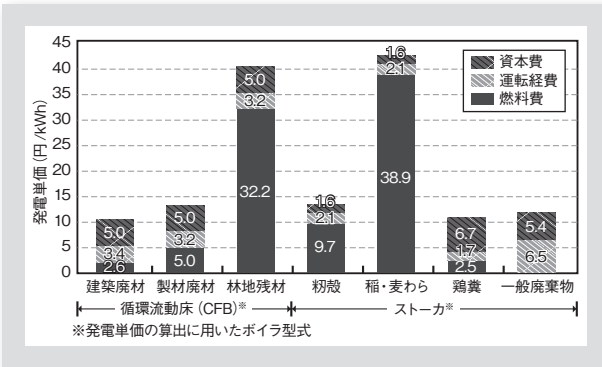
発電端効率（LHV）および建設コストと発電機出力との関係を図1に示す。国内におけるバイオマス専焼発電設備の規模は、バイオマス収集量の制約などにより、発電機出力で数百kW～5万kWの範囲に分布している。ここで注目すべきは1万kW未満のスケールであり、設備件数が多いに

図1 発電機出力と熱効率・経済性



もかかわらず、発電端効率は約15%以下と低く、建設コストは30万円/kWを超えている。このことから、1万kW未満の中小規模クラスにおける高効率発電システムの開発が重要であると言える。

図2 バイオマス種類別による発電単価の比較



(b) バイオマス種類別の経済性の比較

バイオマス種類別の経済性を評価するため、1万kWの専焼発電設備を想定し、バイオマス種類別の発電単価を算出した(図2)。その結果、建築廃材、製材廃材を用いた場合が最も安価であり、次に鶏ふん、もみ殻、一般廃棄物となり、最も高価となるのが、林地残材、稲・麦わらとなることが分かった。ただし、建築・製材廃材は、10年までに運開予定の発電設備を含めると、年間200万t必要とされるが、利用可能量は年間230万tと言われており、既に需給逼迫状態で、燃料入手が困難な状況にある。また、林地残材や稲・麦わらなどの農業系残渣は、利用可能量が多いものの、現状では燃料費が高く事業採算性が低いと言える。低コストの燃料調達インフラの整備が不可欠である。

(3) バイオマス利用拡大に必要な課題のまとめ

バイオマス発電の現状を踏まえ、

利用拡大に必要な課題を種類別に(表1)にまとめて示す。課題は社会的なものと技術的なものと大別されるため、これらを分けて示した。今後、木質をはじめとする国内バイオマスの利用拡大は、燃料調達インフラの整備が重要な課題と言え、林道の追加整備や列状間伐などによる林地残材の効率的反取集、マテリアル利用とエネルギー利用のカスケード化によるコスト削減など、利用技術の事前の技術開発・整備に加え、ビジネスアイデアなどにより燃料コストをいかに削減できるかにかかっている。さらに、利用可能量の多い一般廃棄物、下水汚泥、食品加工残渣など、廃棄物系バイオマスの利用も重要である。欧州で優遇措置が講じられているように、わが国でも廃棄物などの地域資源循環の確立に向け、一層のエネルギー利用の推進と廃棄物発電の効率向上が重要と考えられる。

また、海外バイオマスの導入を視野に、国際燃料チェーンを確立することが重要と考えられる。例とし

バイオマス		利用可能量 (万トン/年)	現 状	課 題 (○は社会的な課題、◎は技術的な課題を示す)
国内	木質系	建築廃材	(184) ・供給量不足によるコスト増 ・燃焼灰は産廃処理となりコストが増加	(燃料需給逼迫の状況)
		製材廃材	(50) ・1箇所の製材所からの生産量は少量 (広く薄く分布)	
		林地残材	370 ・伐採箇所からの収集・運搬コスト高 ・発生量に季節変動	○低コストな燃料調達インフラ整備や投資家にとって魅力的な山作り ○多目的利用(マテリアル)と一体化した利用(カスケード利用) ◎列状間伐等の効率的な収集技術 ◎輸送・貯蔵時の安全管理指針の構築 ◎高品位燃料化技術(乾燥、高密度化等)
		流木等	10(※1) ・発生量に季節変動 ・収集に難	◎発生地点までモバイル可能な小型エネルギー転換技術
農業系	籾殻	47 ・発生時期が限定 ・利用可能量は少量(広く薄く分布)	○低コストな燃料調達インフラ整備 ◎高品位燃料化技術(乾燥、高密度化等)	
	稲・麦わら	717 ・発生時期が限定 ・農家からの回収となり収集・運搬コスト高	◎石炭火力混焼技術	
畜産系	鶏糞	248 ・発生地域が限定 ・燃焼灰は肥料として販売可能	○立地箇所選定、低コストな燃料調達インフラ整備 ◎低灰融点に起因するファウリング対策技術	
廃棄物系	一般廃棄物	2945(※2) ・エネルギー利用の一層の拡大が望まれる ・不純物、腐食性物質の含有量が多い ・自治体での処理義務付けで中小規模件数大 ・燃料性状不均一 ・含水率が高い	○分別回収(住民の理解) ○集約処理による大型化で高効率化 ◎中小規模でも高効率なオンサイト型熱電併給システムの開発	
	下水汚泥 (dry solid)	2174(※3) ・高含水	◎高品位燃料化技術(脱水、炭化等) ◎石炭火力混焼技術	
	食品加工残渣	1772(※4)	◎中小規模でも高効率なオンサイト型熱電併給システムの開発	
海外	搾り滓等 (ドレック グス系)	搾油滓 (パーム、ジャ トロファ等) (※5)	・発酵しやすい ・高張る(低密度)	○CDM等の国際的制度の充実 ◎賦存量、利用効果、環境影響、価格動向、事業採算性等を評価可能なポテンシャル評価技術 ◎環境低負荷型のプランテーション技術 ◎国際燃料チェーン構築に向けた燃料化(ペレット燃料化、メチルエステル化、液体燃料併産型ガス化発電等)

表1 各種バイオマスの現状と課題

※1:台風被害年等で左右するが文献[3]より概ねの値として試算。※2:環境省HP。※3:国交省HP。※4:厚生労働省HPよりそれぞれ引用。その他の賦存量は文献[2]。
 ※5:予測ポテンシャルは(図5)の注釈参照。

(1) 拡大成長期
 (2009~2014) について

当研究所が考えるバイオマス導入/資源循環量の拡大に向けた技術開発ロードマップを(図3)に示す。このロードマップは、技術の進化に伴う世代別(導入期、拡大成長期、成熟期)にまとめた。現在を拡大成長期の入口とし、今後の主な課題について、以下に述べる。

3 電力中央研究所の取り組み

では、東南アジアで大量栽培が想定されるパームやジャトロファの搾油滓の利用が有望で、ペレット化、ブリケット化、液体燃料化などを図り、エネルギー密度を高め、効率的に流通(輸送)させることが肝要である。この中で、液体燃料は、産業界で広く利用できるため、用途拡大の観点でより望ましい燃料形態と言える。例えば、PHEVで使用する化石燃料分をバイオマス由来の液体燃料に置き換えることで、より低炭素化を実現することも可能となる。

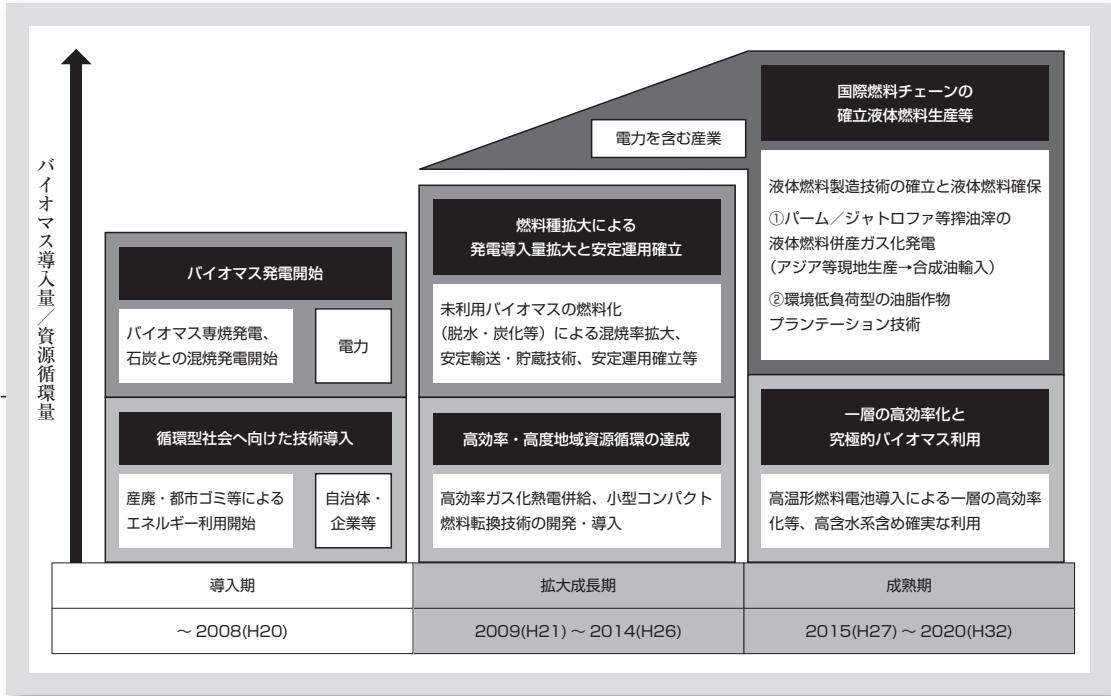


図3 バイオマス導入量／資源循環量の拡大イメージとその手法

拡大成長期においては、食品加工残渣、汚泥、都市ゴミ、間伐材、農業系残渣など、これまであまり利用されていないバイオマス／廃棄物の利用が重要となる。これら、未利用バイオマス／廃棄物による高度地域資源循環の達成は、低炭素社会の実現のみならず、化石燃料使用量削減の観点で、わが国のエネルギーセキュリティの確保にとっても重要な課題と言える。

① 未利用バイオマス／廃棄物の高品位燃料化技術

未利用バイオマス／廃棄物は、一般的に高含水でカロリーが低いなどの理由により、そのままでは燃料として利用しにくい。そこで、バイオマスをエネルギー利用する施設(主に発電所)にとつて扱いやすいバイオマス、すなわち高カロリー化、粉砕動力低減化、高密度化などの事前処理をすることが重要で、高効率脱水、炭化、ペレット化、ブリケット化などによる高品位燃料化技術が必要となる。これらの開発・普及に加え、燃料の流通整備を進め、取引価

格の低廉化が図れば、バイオマス専焼発電所や、石炭火力発電所での混焼利用が進むものと考えられる。

② 中小規模でも高効率なガス化発電技術

わが国では、一般廃棄物を自治体ごとに処理しているため、比較的中小規模の清掃工場が多い。約250t／日以下の処理施設件数が全体の約8割と大半を占めており、このうち発電設備の設置割合は約1割未満と言われている[4]。また、産廃業や食品加工工場などの処理規模を見ても、日量平均で数t～数十t程度の廃棄物が1地点に集約されているケースが多い。広域収集を行い、スケールアップで利用効率を高めることも考えられるが、立地場所に関する地域住民との調整などの課題から、現状では難しい状況にある。従って、処理量で250t／日未満、発電出力で約1万kW未満の中小規模発電システムが必要と言える。しかし、第2章でも述べたように、中小規模クラスではヒートロスが大きいため、汽力発電方式では発電端効率が15%

以下と低効率なのが実態である。そこで、当研究所では、中小規模でも高効率な「炭化ガス化発電システム」の開発を進めてきており、5t/日と小規模の実験装置ながら、木質系からドレググス系バイオマス（珈琲滓、麦酒粕、茶殻などの食品加工残渣、パームやジャトロファの搾油滓など）に至るまで、高効率ガス化実証運転に成功[5]している。さらに、これらのバイオマスを用いて、ガスエンジンや高温形燃料電池による発電実証も行い、ガスエンジン利用で発電効率25%程度[6]、乾式ガス精製と高温形燃料電池利用で32%程度となる見通しが得られている。今後は、高含水廃棄物（都市ゴミ、下水汚泥など）に燃料種を拡大し、実用化を図る計画である。

③ 小型コンパクト型の高効率利用技術

流木・農業系残渣のような季節変動があつて、分散して存在するバイオマスの利用も重要である。これらに対応するためには、発生地帯でガス化して、高品位な原料ガスや液

体燃料を合成することが考えられる。

バイオマス発生地帯で発電しても電気の送りに困るほか、小規模な売電収入では採算を得るのが難しいためである。従つて、エネルギー密度が高く、輸送に適した液体燃料などに転換し、付加価値を高めることが望ましい。液体燃料合成のためには、 H_2/CO 比率の高いガスが必要で、燃焼ガスをガス化ガス中に混ぜない間接加熱型のガス化方式が有望で、欧米でも盛んに開発が進められている。当研究所では、溶融炭酸塩を利用した間接加熱型のガス化技術に着目し、(図4)に示すような、革新的にコンパクトな高効率ガス化技術の開発に着手している。これまでの基礎実験において、水素30%を有する H_2/CO 比率の高い、高品位な生成ガスが得られることや、脱硫・脱ハロゲン・タール分解などが溶融炭酸塩の中で同時に達成できることを確認している[7]。本技術が開発できれば、従来のガス精製装置が不要で、極めてコンパクトなモバイル型ガス化液体燃料合成システムを提供可能と考えている。

④ バイオマス混焼発電の高度化

今後、石炭火力発電所でのバイオマス混焼率をより拡大するためには、燃料側と燃焼システム側の課題解決が必要である。燃料側の課題としては、燃料調達インフラ整備のほか、前記①のバイオマス燃料化技術開発が重要である。また、燃焼システム側の課題としては、安定した燃焼・環境特性の維持、安全な輸送・貯蔵管理指針の構築、部分負荷時などの運用性の向上（粉碎性、燃焼・伝熱障害対策）などが挙げられる。当研究所では、さまざまな条件での燃焼実験のほか、粉碎条件可変型ローラーミルによる粉碎性評価、サイロを模擬した貯蔵安全性評価実験を行つており、今後も継続的に実施する計画である。

(2) 成熟期

(2015～2020) について

電力を含む産業界においては、海外バイオマスの導入拡大（国際燃料チェーンの確立）が、また、廃棄物や汚泥を扱う企業や自治体などに

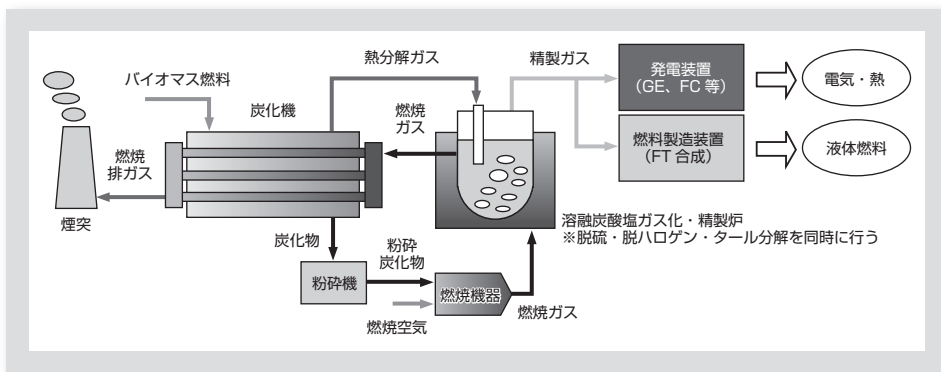


図4 溶融炭酸塩を利用したコンパクトガス化・ガス精製技術

おいては、高温形燃料電池などの高効率発電機器の導入などが重要と考えられる。ただし、前者は、燃料の取り合いも十分予想されるため、東南アジアなどへの技術提供や協力により、現地の雇用創出や経済発展への寄与を考慮しつつ現地生産を進めることが重要と言える。

① 国際燃料チェーンの確立(例えば、液体燃料併産型ガス化発電技術)

海外バイオマスを導入するにはさまざまな方法が考えられるが、食料との競合を避け、廃材利用を優先して考えた場合、その1例として、アジア・オセアニア諸国で、膨大な栽培が予想されるパームやジャトロファの搾油滓や、パルプ廃材を燃料に、現地でガス化発電を行うつつ液体燃料の併産を行い、エネルギー密度を高めた状態でわが国へ輸入する方法が考えられる。また、東南アジアでは褐炭などの賦存量が多いため、これを混合利用することでスケールメリットを高められるとともに、安定供給性を担保することも可能となる。そのイメージを(図5)に示す。

製造した液体燃料は発電部門のみならず、運輸部門や化学工業部門へも供給可能であり、将来のわが国のエネルギーセキュリティ確保の観点からも重要な技術と言える。ここには新たなビジネスチャンスが存在するため投資家にも魅力的な技術と言え、環境と経済を両立させた高いサステイナビリティを実現可能である。なお、液体燃料併産型のガス化発電技術は、将来的に国内の未利用バイオマスにも適用可能であり、前述した、林地残材や農業系残渣の流通整備が進めば、事業的にも量的にも十分実現可能と考えられる。

② 環境低負荷型の油脂作物プランテーション技術

当研究所では、どのようなバイオマスを、どこで、どう作れば温暖化防止やエネルギーセキュリティの確保に有効なのかを検討するため、赤城試験センター(群馬県前橋市)において、国内草本系植物のプランテーション試験を実施し、エネルギー収支や環境影響評価を行った。バイオマス種は陸稲、ナタネ、ヒマワ

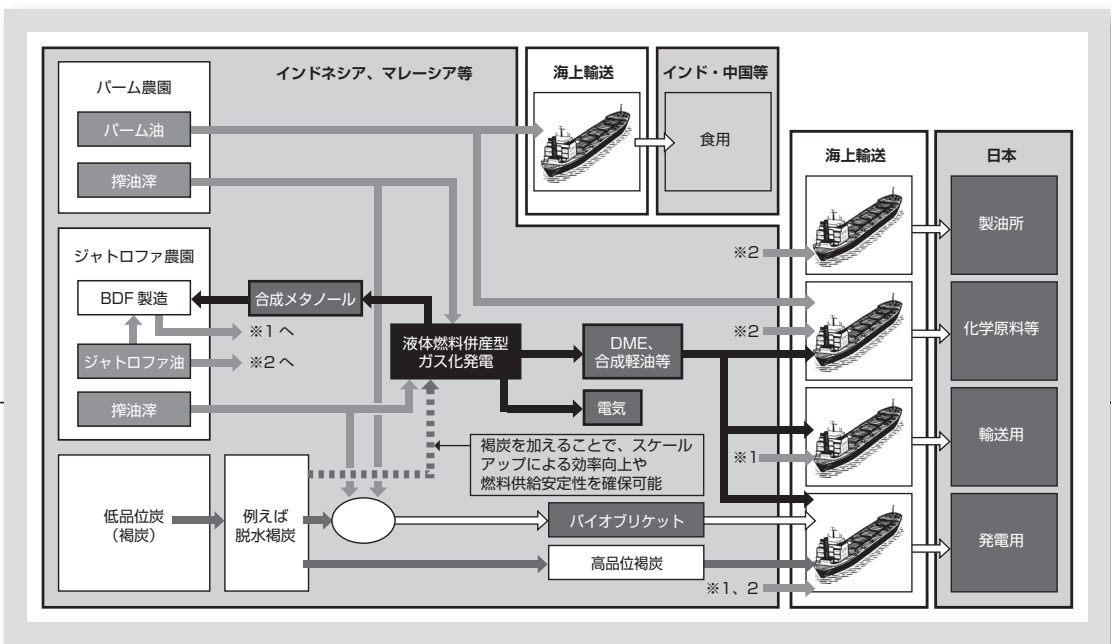


図5 パーム、ジャトロファを例としたガス化発電液体燃料併産のイメージ (現地改質)

(注釈) パームとジャトロファのポテンシャル

(1) パーム油の生産量は現在3350万t、2017年で約6000万tと予測されている[8]。

(2) ジャトロファの生産面積は93万6千haと推計[9]されており、5t/haの生産量で、3割が油とすると140万tとなる。また、2015年には1280万haまで拡大すると予測[9]されており、この場合1920万tと推定できる。

(3) 搾油滓などについては、これらとほぼ同量がそれ以上と推定できる。

りなど合計8種類を選定した。比較のため、施肥を行う慣行農法と、必要最低限の施肥で済む粗放農法の2種類で対照実験を行った。その結果、慣行農法では、施肥に伴う温暖化物質 N_2O の発生が多いため、エネルギーの生産目的（食料生産などを除く）で慣行農法による生産をむやみに拡大すべきではないことが定量的に見出された^[10]。そこで、当研究所では、主に油脂作物を対象に、施肥を必要最小限で済ませる粗放型農法による効率的プラントーション技術の開発と、大気のみならず、土壌や水質などへの影響も含め、環境基準や持続的発展性を考慮した、利用可能なバイオマスポテンシャル評価技術^[11]が重要な課題と考え、これらについて継続的に研究を進める計画である。

以上、新エネルギーの新たな展開として、バイオマス/廃棄物の高度利用技術の開発が重要であることを述べた。利用促進には社会制度から技術開発に至るまで課題が山積

している。しかし、わが国のいしえからの知恵と技術開発力をもってすれば、地域社会や国際社会との連携を深め、利用促進を図ることは可能と考えられる。ネイティブアメリカンの思慮深い言葉「地球は、先祖から受け継いでいるのではなく、子孫から借りているだけである」を念頭に、当研究所も微力ながら経済発展と環境保全を両立した先進的な資源循環達成に向け貢献していく所存である。

参考文献

- [1] 経済産業省News Release「バイオ燃料持続可能性研究会」報告書について「日本版バイオ燃料持続可能性基準の策定に向けて」、平成21年4月14日
<http://www.meti.go.jp/press/20090414004/20090414004.html>
- [2] 小島他、「国内バイオマス燃焼発電システムの現状調査・分析」、電力中央研究所調査報告M107002、

2007/7.

- [3] 尾崎他、「草木廃材の緑化資材としての有効利用技術に関する研究」、平成16年度 下水道関係調査研究年次報告書集、pp183-188.
- [4] 西田他、「国内一般廃棄物発電設備の現状調査・分析」、電力中央研究所調査報告M08015、2009/3.
- [5] 大高他、「バイオマス/廃棄物炭化ガス化炉の開発—加工残渣系バイオマスの炭化ガス化性能評価—」、電力中央研究所研究報告M08018、2009/3.
- [6] 藤本他、「高効率炭化ガス化ガスエンジン発電システムの開発」、ロージエネレーション、Vol.23、No.1、2008/4.
- [7] 河瀬他、「バイオマスガス化ガスの溶融炭酸塩による高温ガス精製技術の開発」、電力中央研究所研究報告M08024、2009/3.

[8] OECD - FAO Agricultural Outlook 2008 - 2017, Highlights.
<http://www.oil.or.jp/topics/news200806.html> (社団法人日本植物油協会)

- [6] The Global Exchange for Social Investment (GEXSI), "Global Market Study on Jatropha Main Findings," Roundtable on Sustainable Biofuels Brussels, May 15th, 2008.
<http://www.jatropha-platform.org/index.htm>
- [10] 吉原他、「中山間地における草本性バイオマス生産に関するLCA的手法による評価」、電力中央研究所研究報告V08035、2009/3.
- [11] 例えば、井内他、「バイオ燃料としてのジャトロファ油のポテンシャル評価—インドネシア・ロンボク島でのケーススタディー」、電力中央研究所研究報告V08032、2009/3.