

第 13 章 バイオマス発電システム概論

1. バイオマス発電システムの類型と特徴

1.1 投入バイオマスによる類型

1.1.1 木質系バイオマス

木質系バイオマスを利用した発電システムとしては、「直接燃焼（専焼、混焼）」、「ガス化」によるものが代表として挙げられる。

直接燃焼法は原料である木質等のバイオマスを直接燃焼させ、ボイラーでスチーム（水を蒸発）を発生、その圧力で蒸気タービンを駆動して発電する方法である。概要フローについては図 1 に示す。フロー中の各構成機器についてはそれぞれ既に技術的には確立したものであり、入口である投入バイオマス量、もしくは出口である発電量から各構成機器の能力である、必要蒸気量、タービン能力、伴う連結機関などを算出、設計し、設備化を容易に行うことができる。また特徴としては、伝熱効率が高く安定した運転が可能なこと、スケール効果が大きく大規模施設に適用できること、などがあげられる。

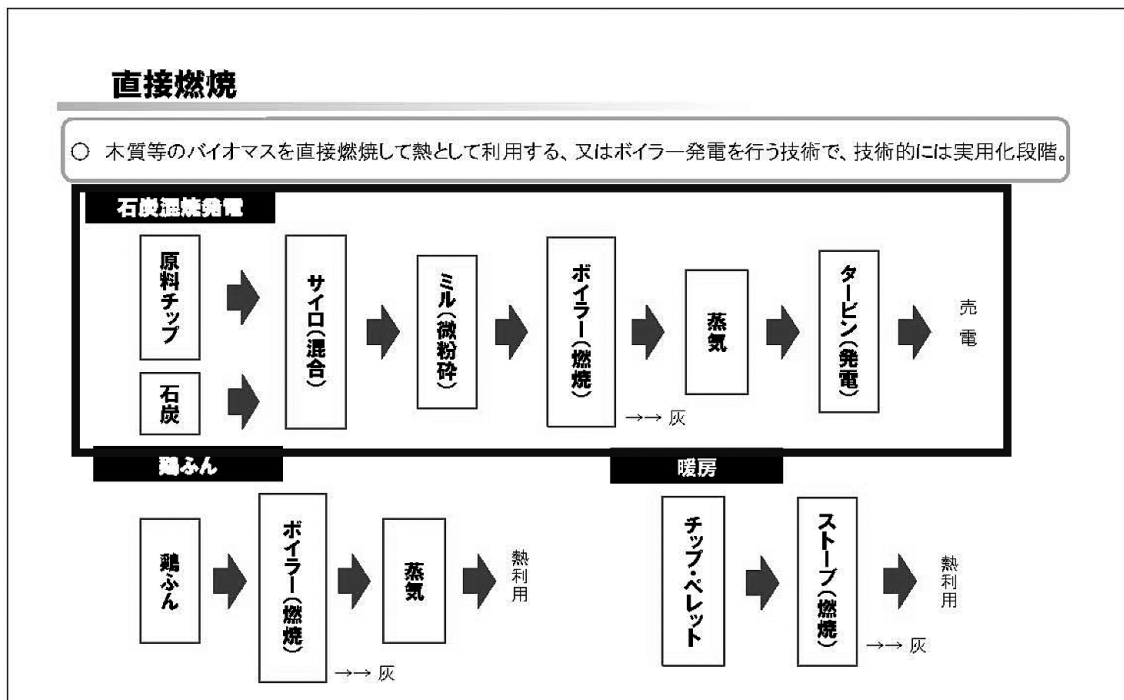


図 1 直接燃焼の概略フロー（出典：「バイオマス事業化戦略検討チーム」第 6 回会議（平成 24 年 4 月 27 日） 参考資料 1 主要技術の概要（農林水産省）

ガス化は、加熱・還元状態の雰囲気中で高分子化合物であるバイオマスに高エネルギーを与え、分子レベルで分解し、低分子化された可燃性ガスを得る物理的操作である。図 2 に示す通り、木質系バイオマスの構成成分であるセルロースとリグニンは約 200℃程度以上で加熱されることにより分解が始まり、600℃程度ではほぼ 80～90%程度、800℃以上で

はそのほとんどが熱分解し、一酸化炭素、二酸化炭素、水素、メタン、エタン、他低分子有機化合物に変換される。ここで発生したガスは、図3に示す通り、サイクロンで除塵、冷却機で含有している水分を凝縮、取り出した後にさらにフィルターでろ過し精製される。その後、ガスホルダーなどにより一時貯留され、系内圧力、ガス成分の安定化を図りながら規定量をガスタービンもしくはガスエンジンに投入、発電が行われる。

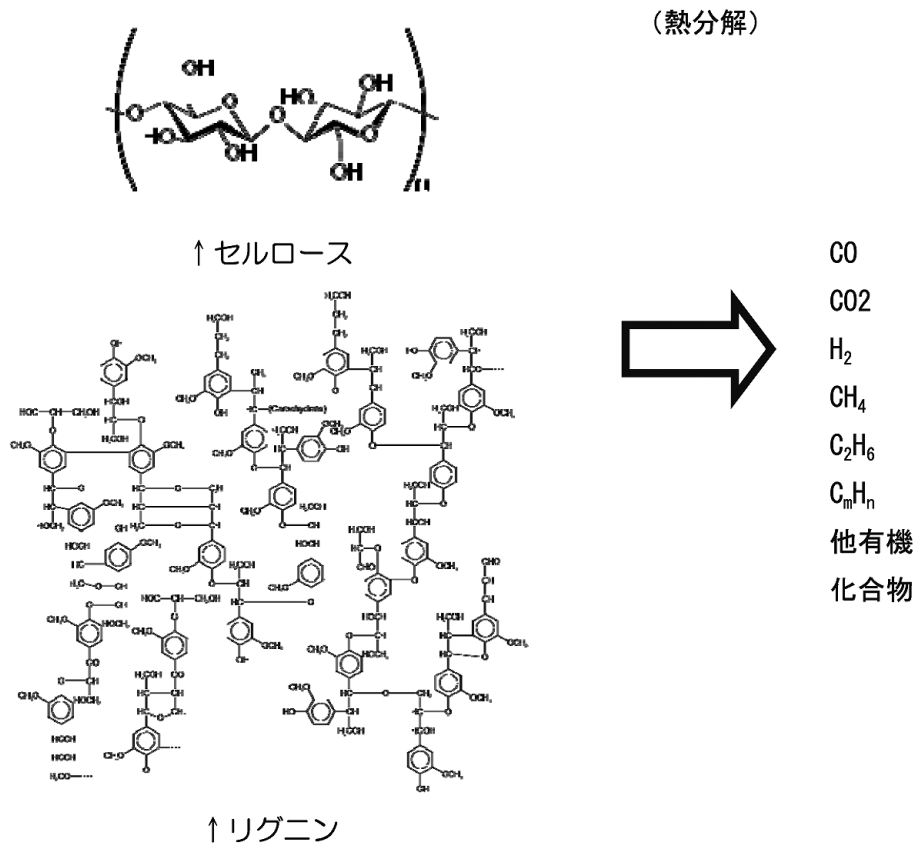


図2 熱分解

ガス化

○ 木質等のバイオマスの水蒸気・酸素等のガス化剤によってガス化し発電や熱利用を行う、又は、生成したガスから触媒を用いて液体燃料(メタノール、ジメチルエーテル、ガソリン代替燃料、ジェット燃料等)を得る技術。有機性化合物であれば、木質系、草本系、厨芥類等幅広いバイオマスに利用可能。

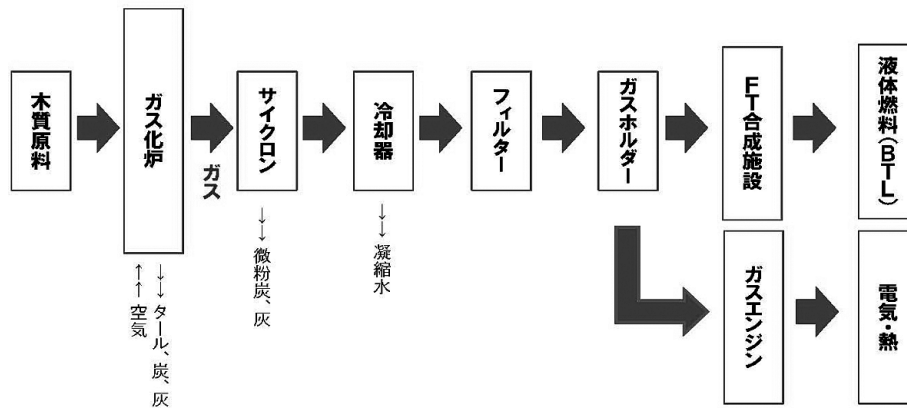


図3 ガス化の概略フロー

(出典:「バイオマス事業化戦略検討チーム」第6回会議(平成24年4月27日) 参考資料1 主要技術の概要(農林水産省))

ガスタービンは、ガス化された燃料ガスを燃焼し発生したガスをタービン(羽根車)にぶつけて回転力を得る機構を有した発電機である。特徴としては、1～100,000kWといった大規模出力も可能であり、蒸気タービンと比較して小規模でも比較的高い発電効率が得られること、発電効率は後述のガスエンジンと比較して低く(…20～30%)なるが、小型で高出力を得ることができること、などが挙げられる。

一方、ガスエンジンはガスを燃料として駆動するエンジンのことで、エンジン自体の駆動原理は自動車等のものと同様である。特徴としては、出力規模は50～4,000kW程度、コンパクトであること、小規模であっても発電効率が高いこと、などが挙げられる。

なお、先述の蒸気タービンとガスタービンを組み合わせた複合サイクル発電システムも存在する。基本原理は、ガス化ガスを燃焼後にガスタービンを使って発電、その排熱を利用して発生させた蒸気により蒸気タービンを回転させもう一度発電させるものである。特徴としては、排熱を利用することにより熱効率が向上することが挙げられ、蒸気タービン単独では43%、ガスタービン単独では40%のところ、複合サイクルにすることにより50%まで高めることが可能である。火力発電所ではほとんどが複合サイクルシステムを採用している。

ガス化について余談として、ガスを取り出すことを目的としているのでガス化と表現しているが、炭の取り出しが主なら炭化、油分なら液化・油化、現象・操作から見ると熱分解、などといった具合に目的、着目点により複数の表現があるが、基本的にはほぼ同じ処

理方法として位置付けられている。

燃焼と熱分解の違いについてイメージを図4に示す。図の通り、燃焼はバイオマスのほぼ全てのエネルギーを熱エネルギーとして得るものである。一方、ガス化は熱分解された可燃性ガスを得るものであり、熱分解時の温度により炭の量、ガスの量などの制御が可能となる。

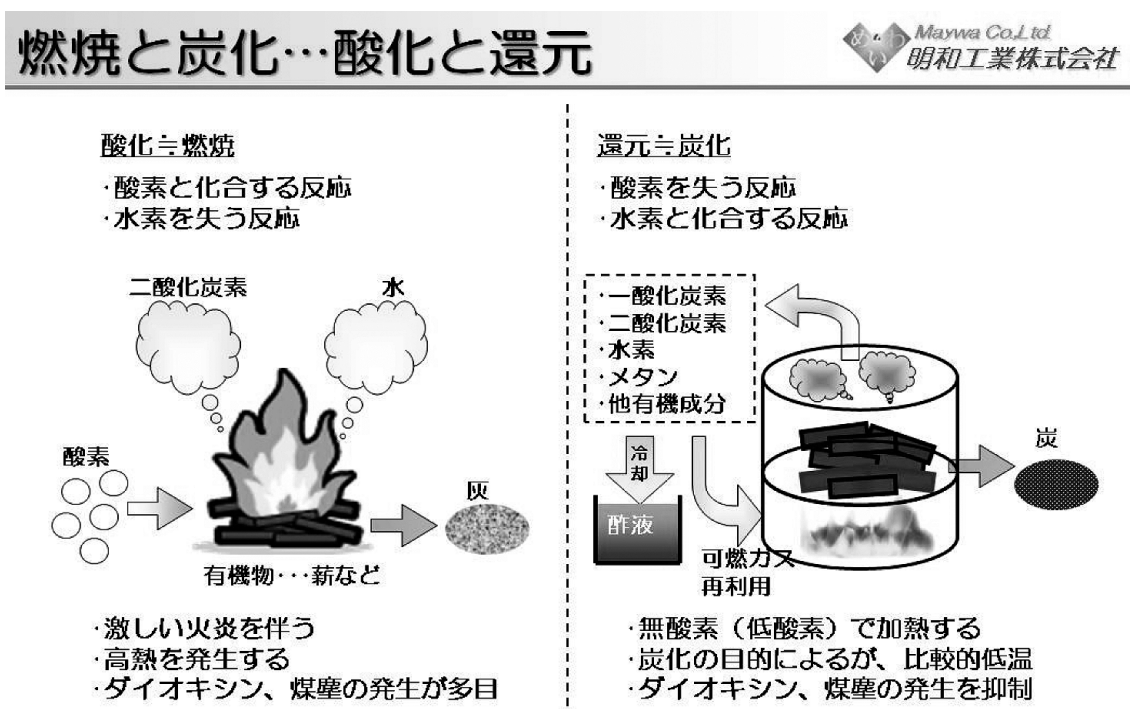


図4 燃焼と炭化のイメージ

ここで制御方法を決定する指標の一つである熱分析について紹介する。熱分析とは、物質の温度を制御しながら、その応答を分析する手法の総称であり、プラスチックなど材料の特性を知るために、材料科学・材料工学分野で多用される。物質は温度変化によって融解やガラス転移などの相転移、あるいは熱分解などの化学反応が進行する。そしてそれらの特性に着目し、物質の温度を制御しながらその物理的または化学的性質の変化を測定し、物質の特性を知ることができる。熱分析に関する手法として、加熱または冷却しながら質量変化を測定する熱重量分析（:TGA）、比熱や反応熱の変化を測定する示差熱分析（:DTA）や示差走査熱量測定（:DSC）、機械的性質の変化を測定する熱機械分析などがある。また、熱分解生成物を分析するものとして、熱天秤とガスクロマトグラフィー、質量分析計を連結した Pyro-GC-MS と呼ばれる装置もある。ここではガス化の指標となり得る熱重量分析について説明を加える。

熱重量分析の原理と測定データの様式は図5になる。原理は、サンプルに対して一定率の昇温で加温していきサンプルの重量変化を測定するものである。燃焼しないよう窒素を

注入しており、ほぼ純粋に無酸素状態での熱分解の状態を測定することができる。大体の有機物においてはほぼ図中のようなグラフ様式となる。ある一定温度に達するまではほぼ横ばい、揮発成分と呼ばれるヘミセルロース、セルロース、リグニンなどが熱分解する温度に達した後に本格的に熱分解が進みだし、分解、ガス化が進むとともに重量が減っていく。一般的なバイオマスでは、先に記した各種成分がほぼ全体を占めており、それぞれの分解温度はほぼ一定の幅の中で分布しているので、分解に伴う熱重量の減少は急激な形となりやすい。大体においては図のような減量線を描くが、稀になだらかに減少するものもある。ほぼ 400 ~ 500℃付近に達すると熱分解する成分がほぼ無くなり減少カーブは落ち着いてくる。その後はなだらかに残成分の分解が進みながら減少を続け、700 ~ 800℃程度になるとほぼ分解が終了し、そのバイオマスが元来から含んでいる灰（ミネラル）分、固定炭素の重量分が分解の影響を受けず、そのまま残ることになる。熱重量分析曲線はガス化を行う際の基礎的参照先として大変重要なものになる。ガス化装置を初動時に制御する際は、加熱温度、滞留時間などを曲線の特性に応じて調整することとなる。

熱分析・TG



物質が加熱を通じて減量する曲線を測定し、熱による質量の変化がわかる
 ⇒炭化温度設定、収率計算、発熱量推定等により装置の設計に利用

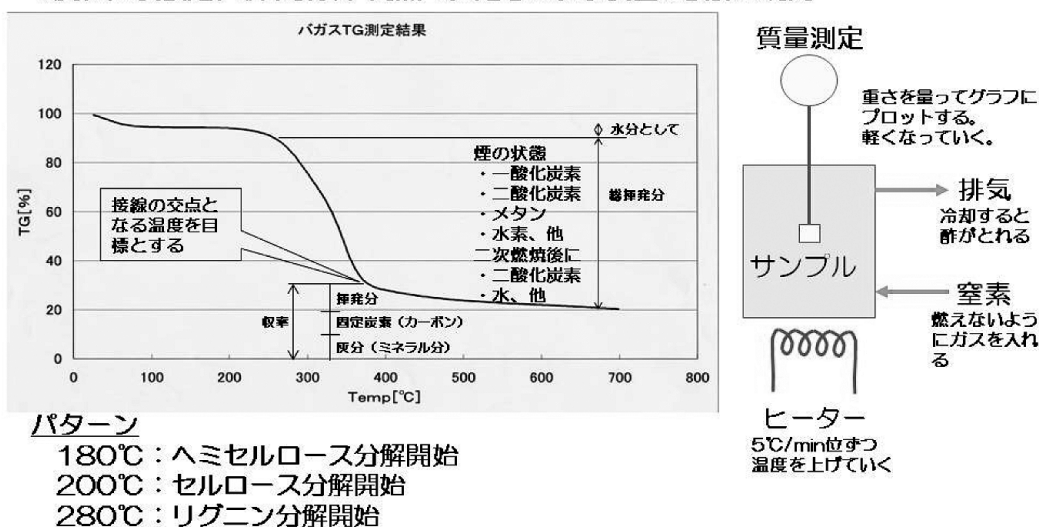


図5 熱分析 TG 図

表1に直接燃焼とガス化の特徴と課題を記した。先述の通り、燃焼は各機器において技術的に確立されたものばかりである。ただ、一度発生した熱をボイラーなどで蒸気とし、その蒸気でタービンを回すといった一連の流れは、小規模では途中のエネルギー損失が大きくなってしまいうので否応なく大量バイオマス処理、高出力発電を目的とする大規模設備

向けとなってしまいます。そのため、大量のバイオマスの調達が必要となり、地産地消が基本であるバイオマス利活用設備が遠方からの調達に頼ることになってしまうといった矛盾を抱えることが多々ある。

一方のガス化は、制御方法により取り出すガス発生量、熱量、炭の量などを適宜変更することは可能である。また、エンジンの出力、発電量により要求されるガス量、熱量が算出されるので設備規模の大小は特に問われない。ただ、熱分解、冷却の過程で高分子量の有機化合物であるタールが発生することは避けられず、しばしば、設備内配管、エンジン内の閉塞などといったトラブルの原因にもなっている。また、専用のガスエンジンの設置、ガス化炉、その後の精製プロセスにおけるタール対策などにより設備がその処理バイオマス量、発電量に対して高価となってしまいうこともあり、費用対効果の面で疑問を抱かれることがある。

表 1 直接燃焼とガス化における課題（出典：農林水産省）

技術	技術レベル	技術面の課題	事業化の課題
直接燃焼 (専焼、 混焼)	実用化	<ul style="list-style-type: none"> エネルギー利用率の改善 混焼による発電効率の低下抑制技術の開発 ペレット・チップ製造コストの削減 	<ul style="list-style-type: none"> 原料の安定調達(特に発電所等での燃料利用の場合) 熱・電気の販路確保(FIT売電等) 発電所、製鉄所等の既存熱利用施設に併設(熱直接利用とコスト削減)
ガス化 (発電・ 熱利用)	実証	<ul style="list-style-type: none"> 製造コストの削減(設備が高価) タールの抑制・利用技術開発 	<ul style="list-style-type: none"> 原料の安定調達 熱・電気の販路確保(既存熱利用施設に併設等) 製鉄所、製紙工場等の既存施設に併設(ガス・タールの直接利用) 電気と熱の複合利用

1.1.2 農産系バイオマス

農産系バイオマスとしては、表2に示されたものが作物残さとして挙げられている。なかでも容易にバイオマスとして利用できる代表例は、田畑及び調製過程から排出される、稲わら、籾殻、草本などが挙げられる。籾殻については、国内において刈り取られた稲のほとんどがコントリーエレベーター、ライスセンターといった規格化された調製機器が配置された大量集中調製施設に集約されるので、形状、性状とも安定して発生している。

表2 作物残さの発生量と特徴（出典：新エネルギー穀殻発電（荻須吉洋））

	生産量 [t/年]	残渣率 [-]	残渣発生量 [t/年]	含水率 [-]	灰含有量 [-]	エネルギー量 [PJ/年]
米	9 472 000	1.43	13 544 960	0.2	0.22	157.2
小麦	688 200	2.53	1 741 146	0.28	0.14	20.1
大麦	192 200	2.5	480 500	0.09	0.15	6.9
サツマイモ	1 008 000	1.14	1 149 120	0.89	0.1	2.1
ジャガイモ	2 844 000	1.14	3 242 160	0.89	0.1	6.0
大豆	235 000	2.14	502 900	0.6	0.15	3.2
サトウキビ	1 395 000	0.52	725 400	0.8	0.16	2.3
青刈り トウモロコシ	5 287 000	1.1	5 815 700	0.47	0.1	51.6
ソルゴー	1 625 000	1.57	2 551 250	0.6	0.16	15.9

日本エネルギー学会編 シリーズ 21 世紀のエネルギー 太陽の恵みバイオマス
松村幸彦著 コロナ社発行より

穀殻の燃料としての特徴は先述以外に、比重が小さい（…約 100kg/ m³）ので貯蔵効率が悪く、当然のことながらコントリーエレベーター等以外で取り扱う場合の輸送効率も大変悪いこと、成分の約 20% 程度が灰分であること、その灰分が熱処理の際にクリンカとして炉内で固化し、被覆、閉塞といった障害を発生させやすいことが挙げられる。

上述のクリンカは直接燃焼した際に発生しやすいので、その対策として炭化によりエネルギーを回収する方法がある。炭化は先述の通り、低温・還元雰囲気で行われるのでクリンカの発生を抑制することができる。穀殻炭化のフロー例を図 6 に示す。図中では、炭化炉内で発生した熱分解ガスは二次燃焼炉で燃焼、その排熱をボイラーで回収することになっているが、熱分解ガスをガスエンジンに投入する、熱分解ガスの燃焼排気でガスタービンを駆動する、排熱回収ボイラーで蒸気タービンを駆動するといった方法が可能である。副産物として生成された穀殻炭については、融雪材、土壌改良材などといった農業資材としてのマテリアル利用、穀殻炭ガス化プラントを付設してさらにガス化、発電等によりエネルギーを回収する方法がある。このガス化プラントも還元雰囲気が基本なので、クリンカの発生を抑制できると考えられる。

籾殻は最も良質なバイオマス

- ・水分が少ない
- ・品質安定
- ・粒が揃っている
- ・大量安定供給

炭は土壌改良材、融雪材、燃料、
調湿材、保温材、加炭材などに

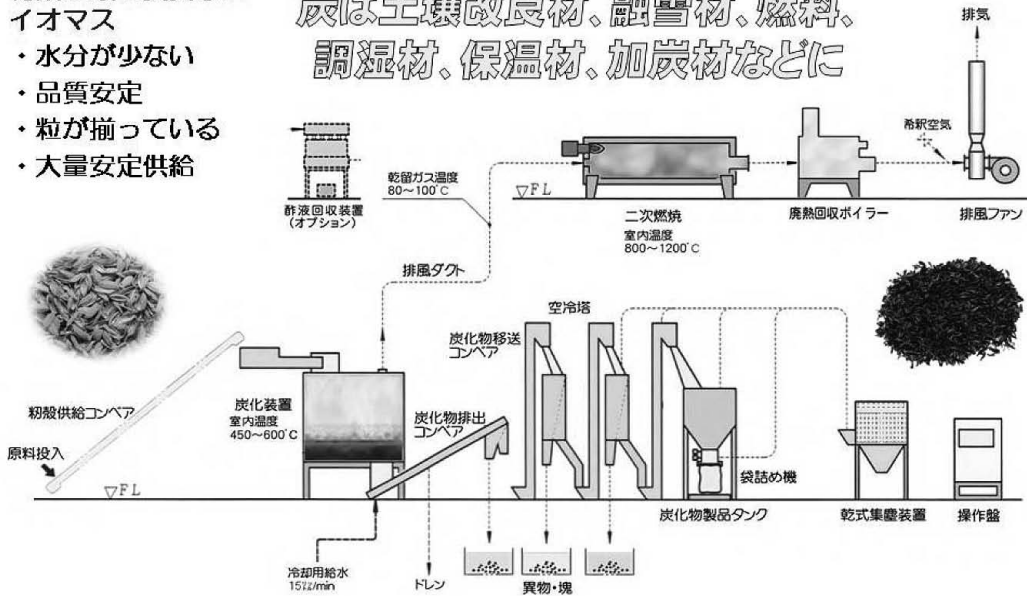


図6 籾殻炭化フロー

1.1.3 畜産系バイオマス、食品系バイオマス、下水汚泥

ここに掲げたバイオマス種であるが、共通項目として高水分であることが挙げられる。バイオマスを燃焼もしくは熱分解を用いて燃料として利用するときには水分を一定量以下に抑える必要がある。ここで便宜的に、水の蒸発潜熱を 2,258kJ/kg (: 540kcal/kg)、灯油の発熱量を 36.8MJ/l (: 8,800kcal/l) とすると、水の顕熱を無視、灯油の発熱量が損失無しで全て水の蒸発に与えられるとすると、灯油 11 で水 16.31 が蒸発、バイオマスから除かれる計算になる。これを実際にイメージ化すると図7となる。水分率が 90% の高含水率バイオマスを水分率 15% 程度に調整する場合、水分を蒸発させるために調製後のバイオマスの発熱量以上の熱量を要することが分かる。ここでは加熱操作に伴う熱損失、顕熱は考慮していないので、実際には表記以上の熱量を有することは明らかである。すなわち、この種のバイオマスについてそのまま燃焼、熱分解処理することはエネルギー収支上、マイナスになる。

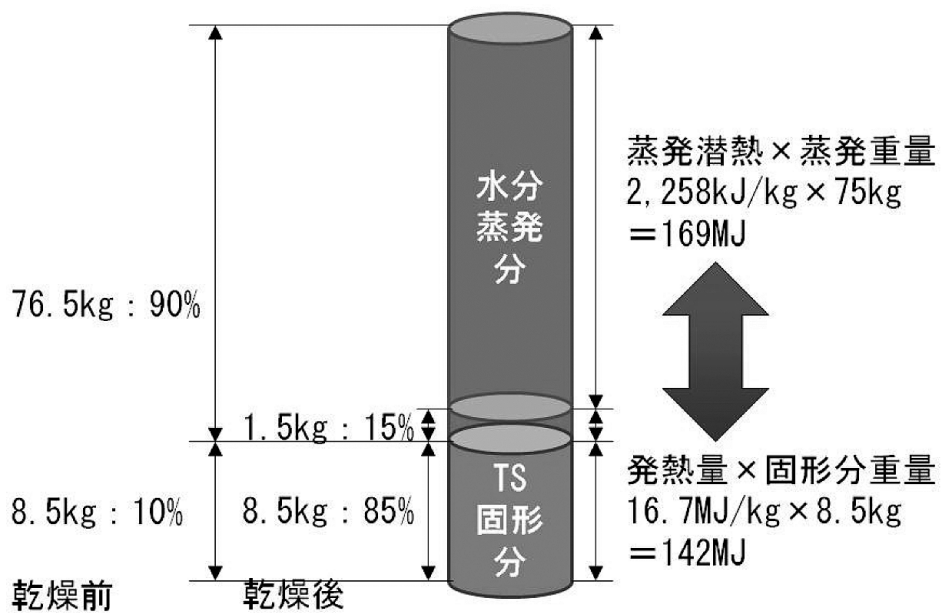


図7 蒸発潜熱と発熱量

よって、これらバイオマスを燃料化する際は、メタン発酵システムを適用することが一般的となっている。メタン発酵システムの一般的なフローは図8になる。

上記のバイオマスを嫌氣的に微生物で分解させて、メタンガスを発生させ回収したメタンガスをボイラーや発電に利用するもの。また、分解過程で消化液と呼ばれる液体が副産物として発生します。メタン発酵にはこの消化液の処理が必要で、建設費が高いなどの欠点がある。

メタン発酵

- 下水汚泥、家畜排せつ物、食品廃棄物等のバイオマス微生物による嫌気性発酵によってメタンガスを発生させる技術で、液状の原料を利用する湿式と水分80%程度の固形原料を利用する乾式がある。メタンガスは熱や発電利用のほか、都市ガスや自動車燃料等に利用可能。

メタン発酵（嫌気性発酵）

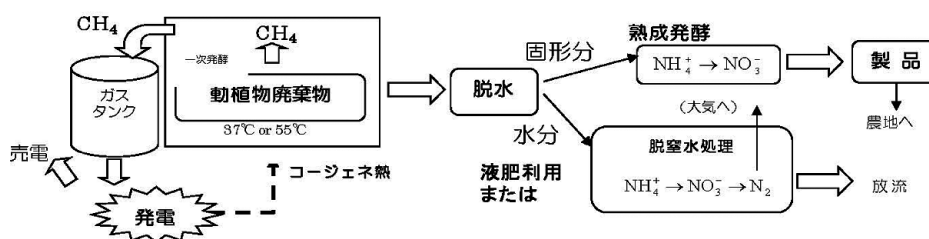


図8 メタン発酵フローシート

(出典：「バイオマス事業化戦略検討チーム」第6回会議（平成24年4月27日）
参考資料1 主要技術の概要（農林水産省）

メタン発酵で得られるガスはメタンガスが65%程度、他に二酸化炭素や硫化水素を含んでいるので、メタンガス濃度が100%近い天然ガスと同じように利用できるわけではない。そして、金属などを腐食してしまう硫化水素を除去する必要があり、機能は安定しているがコストがかかる化学的方法、コストは安い管理が不十分だと機能を発揮しなくなる生物学的方法がある。なお、バイオガスを利用するボイラーや発電機は、緊急時のために軽油や天然ガスでも稼働できるものを導入した方が無難である。

消化液には処理バイオマス中に含まれている窒素やリンが、ほぼそのままの量で残る。バイオマスが分解されているのでスラリーよりも流動性があり、即効性の高い良質の液肥なので農地還元に適している。ただし、悪臭はスラリーよりは少ないものの注意が必要となるので、近隣に民家がない農地に散布するか、土中に注入するインジェクターを使って散布するなどの対処が必要となる。湛水した水田の施肥に利用できるのなら、水口から流し込むだけで手間がかからず、臭気もほとんど問題にならない。消化液は、堆肥と違って窒素の即効性が高く、ほとんど後効きしないので、化学肥料と同様に元肥だけでなく追肥にも使える。

消化液を浄化して河川などへ放流するにはかなりの費用がかかってしまうので、基本は農地還元で、どうしても処理しきれない分を浄化することになる。浄化は、活性汚泥法のみでは窒素が除去しきれないので、生物学的脱窒などによる処理が必要となる。

メタン発酵は汚水の量や質の安定供給、発酵施設の維持管理、消化液の処理、バイオガ

スの有効利用といった管理も必要である。通常の污水处理よりも複雑になるので、高度な管理技術が要求され、管理が適切であれば、低コストで污水处理でき、エネルギー源を得られる優れた技術と言える。しかし、管理しきれなくなると、処理が滞って運用自体に支障をきたすので、導入の際には、十分な検討が必要である。

メタン発酵法には、発酵温度が 37℃付近の中温発酵法と、55℃付近の高温発酵法がある。高温発酵法は、加温するためのエネルギー損失が大きい、有機物の分解効率が高い、発酵タンクを小さくできる、高温殺菌処理がなされるなどの特徴がある。また、メタン発酵法は、水分 90%程度の液体で発酵させる湿式法と、水分 80%程度の半固形状態で発酵させる乾式法がある。乾式法では、樹木の剪定枝や古紙を污水に混合してメタン発酵する方法が行われている。

1.2 発電方式による類型と投入バイオマス

1.2.1 燃焼～スチームタービン発電システム（木質系）

燃焼によるスチームタービン発電の事例を図 9 と表 3 に示す。ボイラーの燃料が木くず（木質系バイオマス）に置き換わったものと考えれば良く、一般にあるスチームタービン発電システムとは大きく変わりは無い。このシステムの特徴は大規模型に適していることであるが、逆に言えば小規模には適さないことと断言できる。スチームタービン発電の発電効率は、バイオマスや廃棄物の処理量が 100t/日程度の規模の場合は 10%程度になると一般的に言われている。よって、本システムを利用する場合は、確実に大量の木質バイオマスが集積することが必須条件になる。

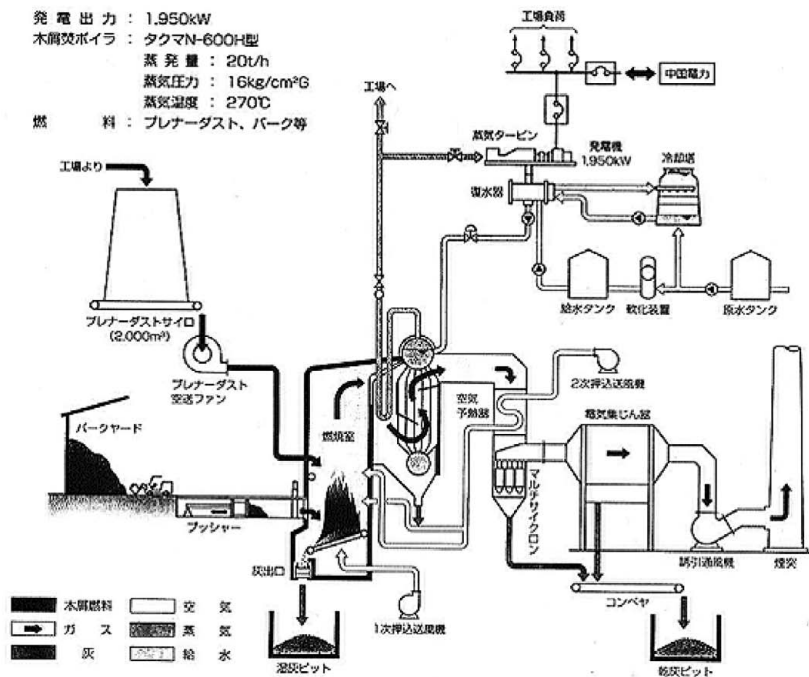


図 9 スチームタービン発電システムフロー
 (出典：栃木県地域新エネルギービジョン)

表3 スチームタービン発電システム諸元例

	銘建工業(木材加工業) エコ発電所
対象とする新エネルギー等	森林バイオマスエネルギー
導入施設の種類	森林バイオマス発電及び熱利用
イニシャルコスト	約10億円(周辺施設整備含む)
施設規模	発電出力:1,950kW 木くず焚きボイラ:蒸気量 :20t/h 蒸気圧力:16 kg/cm ² G 蒸気温度:270°C 燃料:プレナーダスト、パーク等
環境負荷削減効果	単に焼却していた木くずによる発電であり、発電分について温室効果ガス排出量の抑制となる。なお、熱については木材の乾燥に利用される。
経済効果(経費削減効果)	自家発電による電力購入コスト削減量:4500万円/年
課題	・売電価格が太陽光など他の自然エネルギーに比べて低く設定されているため、資本回収が困難。 ・現在、輸入木材の加工後廃材を使用。国産材は伐採搬出コストが高い。

1.2.2 ガス化～ガスエンジン発電システム

ここでは明和工業で実際に製品化、随時改良実証中である「ペンタジェンシステム」について記す。このシステムについては国土交通省（国土技術政策総合研究所）から平成24年度「国営みちのく杜の湖畔公園における再生可能エネルギー活用技術実証研究」の名目で委託を受け、実証研究事業として各種定量データの獲得に取り組んでいる最中である。また、平成24年末から本年初頭にかけては、独立行政法人国際協力機構（：JICA）の事業の一つである「持続可能な地域農業・バイオマス産業の融合プロジェクト」の一環として国内支援体制の一翼の担っている東京大学から本システムを受注、ベトナム社会主義共和国のホーチミン市郊外のタイミー村に実証プラント設置、現地においての実証研究を担うホーチミン市工科大学の協力を得ながら運転指導を行ってきた。

なお、ペンタジェンの語源であるが、ペンタはギリシャ語表記で5、ジェンはジェネレーター（：Generator、発電機、発生機の意）の略、この2つを組み合わせた造語である。特徴は一つのバイオマス処理プラントで炭、酢液、バイオオイル、電気、熱源といった5つの有用資材を生成することである。

ペンタジェンの処理フローは図10の通り。処理対象となるバイオマスは木質系、農産系は問わないが、前処理として破碎や粉碎による細粒化、粒径の均一化、乾燥による含水率の低減が必要となる。前者は輸送を容易に行うためとガス化処理の際に均一性を保持するため、後者はガス化処理する際に加熱時における熱エネルギーの損失を回避するためである。

ペンタジェンフローシート

Maywa Co., Ltd.
明和工業株式会社

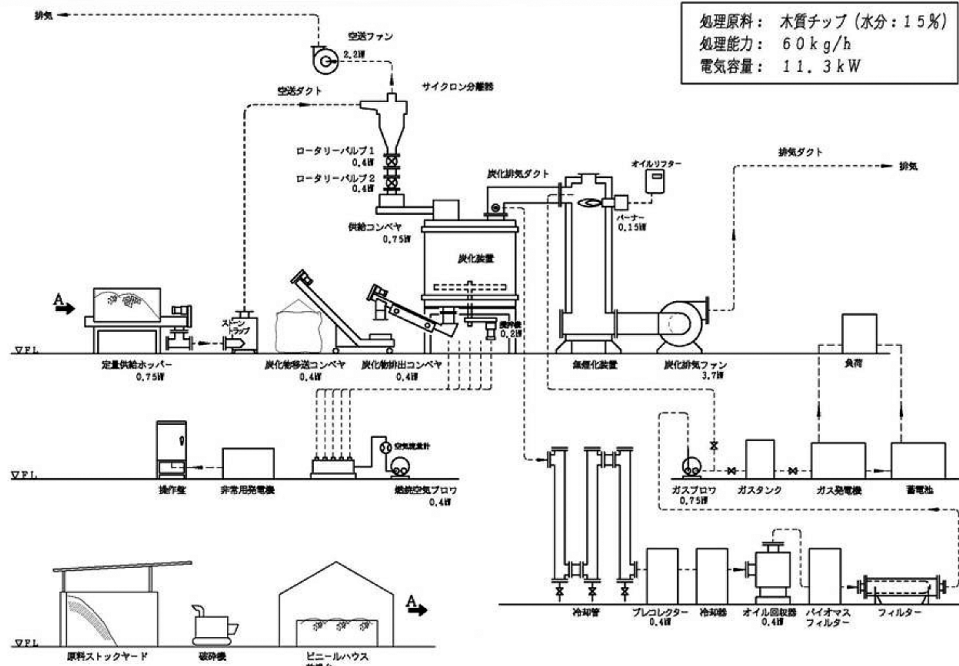


図 10 ペンタジェンフローシート

破砕・粉砕については処理前の対象径、処理能力（単位時間あたりの重量ベース）、処理後の要求径などによって専用の装置が多分にそろっており、処理前後の仕様を関連メーカーに問い合わせることにより容易に選定することができる。

一方、乾燥についても関連装置は多様に存在しており選定するに困ることはない。ただ、メタン発酵の項でも述べた通り、乾燥バイオマスを得るためにその得られる熱量以上の熱量を化石燃料などで補うことは本末転倒である。一般的にはガス化プラント等から発生する排熱を利用する、図中にあるように専用のヤードに仮置きしながら、ビニールハウス等を利用して太陽熱等の自然エネルギーを活用する、といったように極力化石燃料等を使用しないシステムが一般的になっている。

このように前処理されたバイオマスは輸送機器によりガス化（図中では炭化装置）装置本体に投入される。ガス化装置内の概要イメージは図 11 の通り。投入されたバイオマスは下方に流れその過程でガス化される。残りは炭化物として底面から排出される。底面では攪拌による混合とガス化ガスのごく一部を燃焼させるに必要なだけの空気を投入しながらその燃焼熱を炉内に伝播、バイオマスのガス化を促している。ガス化ガスは上方の導出管から排出され次工程へ輸送される。

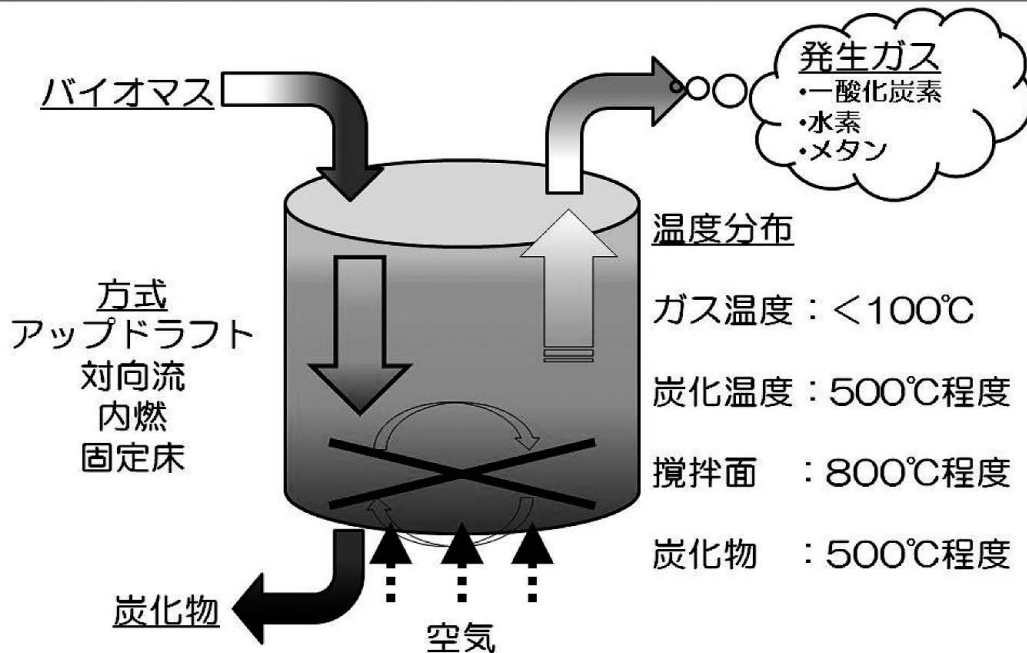


図 11 ガス化装置内イメージ

このガス化方式はガス化ガスが下方から上方へ移動、導出されるので「アップドラフト」と言われる。このときガス流れの向きを逆にした場合、すなわち上方から下方へ移動、導出するときは「ダウンドラフト」方式と呼ばれることになる。また、バイオマスの処理流れは上方から下方でありガスの流れとは逆なので「対向流」となる。先述のダウンドラフトとした場合は処理流れとガス流れが同じとなるので「並行流」となる。

炉内の熱源維持については前述の通り、「内燃」方式としている。これは何らかの手段、よく使用される方法としては化石燃料の燃焼、電気ヒーターによる加熱、で炉内にあらかじめ充填しておいたバイオマス、もしくは着火材に着火、部分的な燃焼を起こし、その燃焼熱でもってバイオマスを加熱、バイオマスのガス化を促しながら最終的にそのガス化ガスが燃焼、その燃焼熱をもってバイオマスを加熱、このサイクルを続けながら炉内の温度維持とバイオマスのガス化を連続的に行っていく方式である。初動時の着火を除いては原則、供給されるバイオマスのエネルギーの一部を燃焼熱として利用することにより炉内の温度維持が可能であること、炉内における燃焼なのでその熱を直接的にバイオマスへほぼ満遍なく伝えられることから熱効率も良い。ただ、部分燃焼を維持するために燃焼空気として酸素をわずかながら注入しているが、バイオマスの供給量と注入空気量のバランスが悪くなると炉内で焼却が始まりガス化ガスの抽出ができなくなる、もしくは部分燃焼が続き失火してしまう、などといった懸念点があり、制御調整に十分な注意が必要となる。

また、ガス化ガスの一部が燃焼することによりガスとして取り出せるエネルギー量はその分減じてしまい、導出される燃焼ガスの発熱量は低めの数値を示す。あくまで一般的な概算であるが、内燃式ガス化装置から生成されるガス化ガスはおよそ $4.184\text{MJ}/\text{m}^3$ (ntp) (: $1,000\text{kcal}/\text{m}^3$ (ntp)) 前後であることが多く、その熱量に対応したエンジン、燃焼装置の準備、調整が必要になる。

一方の「外熱」方式とは、炉内を論理的に無酸素（実際には低炭素）状態に保ちながら炉外からガス化ガスの発生に必要な熱量を与えるものである。ガス化と加熱が分かれているので定量的に制御を行いやすいことが特徴として挙げられ、ガス化されるバイオマスの供給量と炉内滞留量、炉外からの加熱量のバランスを適正化することにより、ほぼ一定の収支で炭化物、ガス化ガスが生成される。ここでのガス化ガスは先の内燃式と比較して、炉内における燃焼を必要としないので部分燃焼用空気、燃焼で減じる分による熱量減は発生しない。ただ、短所としては、円筒型の炉を用いる場合にその外側から加熱することになるが、断面方向で炉壁付近はよく伝熱されるが、中心に向かって伝熱が悪くなりガス化に十分な熱が与えられないことがある。そのため、炉内には滞留しているバイオマスを十分に攪拌できる機構を付設するか、伝熱の損失を減じ中心部にも十分な熱を与えるために細径の円筒炉を用いなければならない。また、伝熱自体が炉壁を通じての間接的なものであり、内燃式のように発生した燃焼熱が直接バイオマスに伝熱しないので、ここでもある程度の伝熱損失を考慮しておく必要がある。ガス化ガスについては、内燃式の場合と比較してその単位容量あたりの発熱量は高いと記したが、一方では内燃式でよく行われる高温酸化、それに伴う改質がそのプロセスの特性上行われないので、高発熱量の要因となっているタールの析出が導出管以降で発生、装置のトラブルの原因となることがしばしばある。炭化（ガス化）の方式の組み合わせ例については図 12 になる。

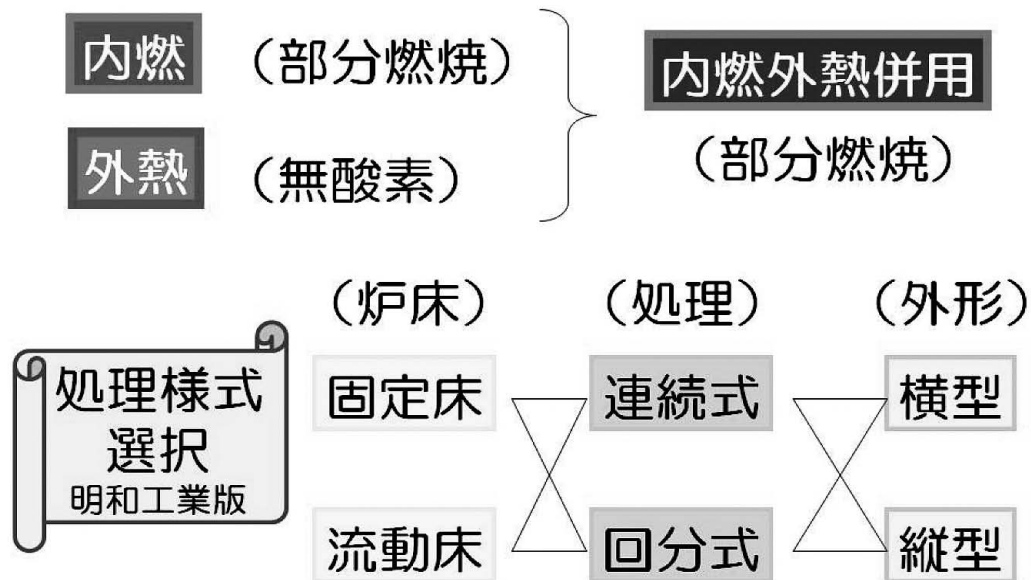


図 12 炭化方式の組み合わせ

炭化物及び酢液だけの取り出しを目的とする炭化装置であれば、ここで発生したガス化ガスはそのまま燃焼炉に移送され、完全燃焼の後に大気に開放される。

ガス化～ガスエンジン発電システムであるペンタジェンシステムでは、発電他のエネルギー抽出発現が目的であり、それに対応した精製、処理が必要になるのでその概要について以下の通り記す。発生したガス化ガスはまずは冷却管に移送される。冷却管では多重管による間接冷却が行われ、管内側を移送しているガス化ガスは管外側を循環（もしくは通水）している冷却水により間接冷却される。冷却されたガス化ガスは沸点の高いものを中心として凝縮していき液化する。ここではほとんどが酢液として回収される。

冷却管で凝縮しなかった成分、もしくは回収されなかった成分はプレコレクター部に移送される。ここでは冷却凝縮に加えて遠心分離とろ過分離が行われる。これらの一連の操作により定量データは得ていないがガス化ガス中に含まれるほとんどの液分、油分が回収される。ここで回収された液分（油分）は軽質バイオオイルとも呼ばれ、水分率が高めのために粘性は水とほぼ同じ、発熱量としては 16.7～20.9MJ/l（：4,000～5,000kcal/l）、pH は 2～4 程度の性状を伴った燃料である。特殊の燃焼装置を利用すれば通常の灯油や重油を使用したバーナーと変わらない燃焼機器として使用することができる。

次はさらにもう一度冷却器、オイル回収器を通過する。この構成は前段と同じであるが、先にほとんどの液分、油分が回収されているので対象となる処理量が減少していることを勘案して機器の大きさは小さくなっている。ここで回収される液分、油分は重質バイオオイル、すなわちタールが主となる。前段で回収できなかったミスト状のものをここで最終的に捕集する。そのような経緯なので回収量自体は大変小さく、意味合いとしては冷却凝縮、遠心分離、ろ過の機構が2段直列で設置されていると考えれば良い。なお、前段含むバイオオイルの利用については後述する。

そして、エンジン投入前に最後のガス精製としてろ過機構を設置している。ここでは、処理しているバイオマス原料の充填塔をバイオマスフィルターとして、繊維状のろ布をフィルターとして、2段によるろ過を実施している。前段のバイオマスフィルターについては充填密度と高さによる単なる抵抗ろ過であり、前の回収機構でも捕集できなかった油分、液分の捕集を目的とする。メリットとしては、ある程度はガス化ガス中の油分が付着することになるので、一定期間経過後にバイオマス原料として利用できるもので、ろ過部分のリサイクルが可能であることが挙げられる。発展途上国等において回収精度があまり要求されないバイオマスのガス化では、このようなバイオマスフィルターを大容量の充填塔として設置、ろ過機構として利用しながら最終的にはバイオマス原料として利用するというフローで処理の流れが出来上がっている。最後のフィルター部で使用されているろ布は通常市販されている集塵用のポリエステル製ろ布を使用している。これまでの回収機構で十分にガス中のガス成分以外のものが捕集、回収されているのでここではそれほど多くは捕集されないため、ろ過の寿命はある程度確保できる。初期投資を減額するため、または回収副産物が不要との理由により冷却、遠心分離、ろ布フィルター以外のろ過機構を削除、ろ布フィルターのみとする方法もあるが、その場合のろ過量は著しくろ過性能の寿命もかなり短期化し、ランニングコスト上昇となり、得策とならないことも多い。

一連のガス精製が終わりガス化ガスは一旦タンクに貯留、系内圧力の安定化を図る。安定化を必要とする理由は、エンジンに置いては一定量（一定熱量）のガスを必要とするが、一般的なバイオマスガス化炉におけるガス発生量（熱量）は安定しておらず、数値的には上下する傾向にある。そのため系内圧力の変動もみられ、その変動がエンジンに悪影響を与え出力の不安定化につながることもよくある。そのためバッファリング機能としてここでは2～3 m³程度のタンクを設置し、貯留より安定化を主目的としている。ガスタンクからは一定量のガス化ガスがエンジンに供給され、発電することになる。電気は蓄電池で蓄電され、そこから安定した形で負荷に放電される。

最後に、当社で実施されている前述の国土交通省関連実証事業用プラントの写真を図13、想定収支を図14とした。

ペンタジェンシステム

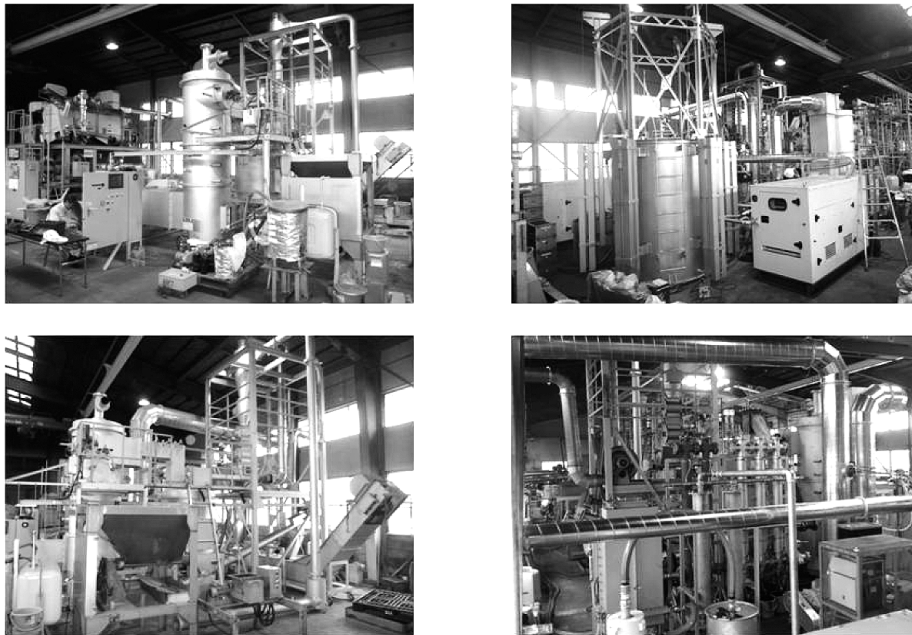


図 13 ペンタジェンシステム概要写真

ペンタジェンシステム収支予想

原料及び生成物(炭化物、酢液、オイル、ガス、熱回収)の予想収支

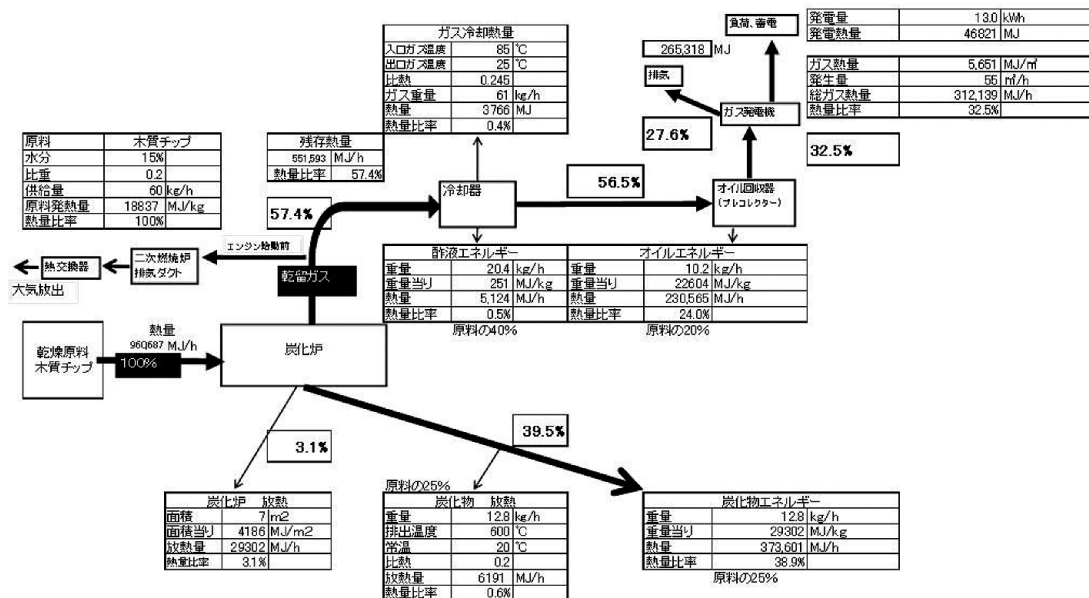


図 14 ペンタジェンシステム収支予想

1.2.3 バイオオイル

(2) のガス化ガス精製の説明でバイオオイルについて触れたがここで詳細について説明を付記しておく。

バイオオイルとはバイオマスを急速熱分解処理することにより発生する液体燃料であり、化石燃料と比較するとその発熱量は小さいが、十分に燃焼を維持できる発熱量はあり、液体ゆえの特性から保管、流通といった面で気体（ガス）や固体と比較して取り扱いが容易であるので、昨今注目されつつある処理方式、生成物である。バイオオイルの生成プロセスの概略を図 15 に示す。まずは破碎、乾燥といった前処理が施されたバイオマスを 1,000K/s に相当する急速加熱により熱分解する。このときの熱分解温度は 425～600℃程度適度であり、大体は 500℃付近で設定する。これは、目的が液体燃料を取り出すためのものであるため高温であると有機物の結合の分解がより進み、メタン、一酸化炭素、水素などといったガス成分が多くなることを防ぐためである。その後、熱分解により発生し気体となっている有機物を今度は急速冷却処理を施し、一気に液化（油化）を行い、オイルとして取り出す。これら急速昇温と冷却によりバイオオイルの回収率は向上し、一般的には、バイオマス処理量ベースで 60～75% 程度の収率が期待される。

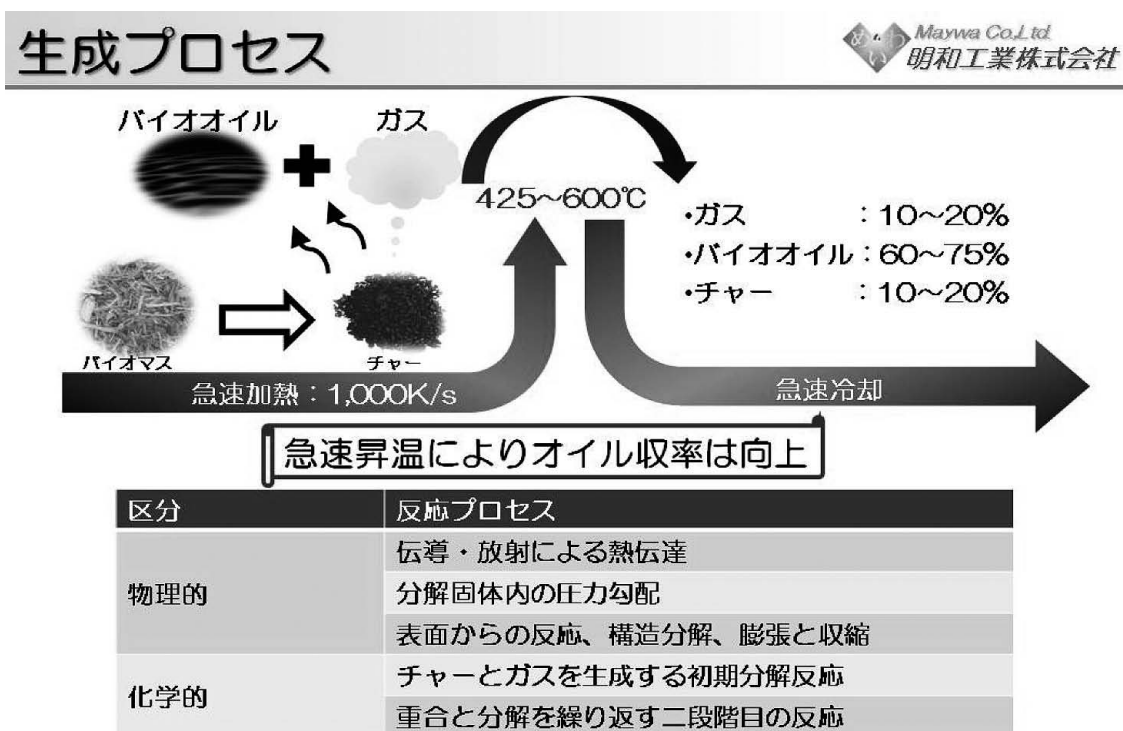


図 15 バイオオイルの生成プロセス

このバイオオイルに関して、実際に明和工業では、新エネルギー・産業技術総合開発機構から平成 23・24 年度「バイオマスエネルギー技術研究開発／戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業（次世代技術開発）」について委託を受け「急速接触熱分解による新たなバイオ燃料製造技術の研究開発」をテーマとして東京大学と共同、北陸先端科学技術大学院大学、と産業技術総合研究所に再委託して四者共同で実証研究を行っている。引き続き平成 25・26 年度も継続していくことが決定しており、実証をさらに進めていく予定である。

この事業の概要を図 16 に示す。ここでは触媒によるバイオオイルの改質(グレードアップ)を研究テーマとして掲げているので、二段式連続流動層となっている。写真はそのうちの熱分解部分であり、数十 kg/h レベルのベンチ装置となっている。流動層の熱媒体としては砂を用いており、投入されたバイオマスは循環流通している加熱された砂と接触、急速熱分解が促されると結果になる。

装置概要



二段流動層による急速接触熱分解システムの研究開発について

- ◆ 明和工業株式会社は、ベンチレベルの接触急速熱分解装置の設計・製作を完了
- ◆ 熱分解部の循環確認、ホット運転（改質無し）試験を実施
- ◆ 改質部の循環確認も平成24年度内には担体を用いた運転を実施予定

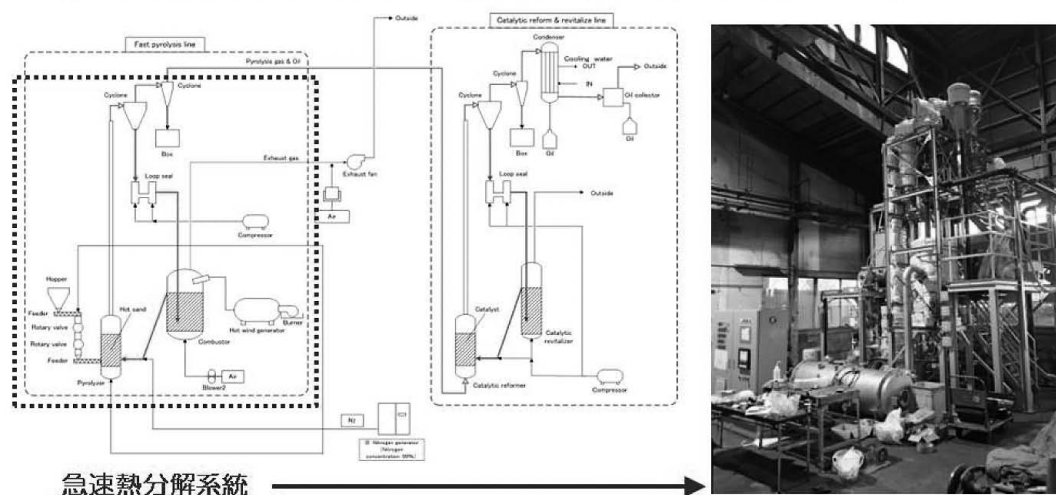


図 16 急速熱分解用流動層のベンチ装置

また、バイオオイルの実際の燃焼試験風景については図 17 に示す。左上の写真は鍋に浸したバイオオイルを加熱、発火した様子である。他の 3 枚は既存の廃油・タール燃焼装置を利用したバイオオイルの燃焼試験風景である。これらから見て分かる通り、バイオオイルの性状に適した調整を行うことにより燃焼処理は可能であり、将来的には、ディーゼル発電等、発電機用燃料としての用途を考えており、電源系統等の無い地域へ簡易プラン

ト、発電機を持ち込み、バイオマスを熱分解処理しながらバイオオイルを生産、一部を発電機用に、一部を市場流通用にといった想定を行っている。

バイオオイル燃焼実証試験

Maywa Co., Ltd.
明和工業株式会社



バイオオイルの単純加熱による燃焼試験



バイオオイル（燃焼機タンク内）



タール等廃油専用燃焼機



燃焼状態

図 17 バイオオイル燃焼試験

1.2.4 スターリングエンジン

ここで、バイオマス利用設備でよく話に上がるスターリングエンジンについて説明を加えておく。スターリングエンジンとは、加熱と冷却による気体の膨張と収縮を利用した往復運動機構であり、熱源さえあれば運転が可能であるため、バイオマス利用の一策としてよく挙げられる。以下、NPO スターリングエンジン普及協会の説明資料から抜粋したものを概要の説明とさせてもらい、参照いただきたい。

スターリングエンジンとは

スターリングエンジンは、19世紀初頭に、スコットランドの牧師ロバート・スターリングによって発明された人に優しい＝安全な“熱空気エンジン”です。この当時はカルノー以前の時代でサイクル論もない時代でした。しかし、時は産業革命の真只中、ジェームスワットの大気圧蒸気機関の高性能化を目指して、気鋭の技術者達が蒸気圧力の高圧化を競っていました。

しかし、当時は高圧（大気圧以上・・・当時は数気圧～10気圧）に耐えうる蒸気缶を製造する鋳造技術が未熟で、鋳物に、いわゆる“巣（空気泡）”ができ、そのために、高

圧に耐えられず蒸気缶が爆発する事故が度々発生し、多くの作業者が事故の犠牲者となりました。

その様な状況を憂いて、ロバート・スターリング牧師は、安全なエンジンを作り、世に送り出したと云われています。このエンジンの生産台数は2,000台とも云われ、広く普及しました。

スターリングエンジンのメカニズム

ロバート・スターリングが考案したエンジンは、 β 形と言われる形式のエンジン（図18）でした。

このエンジンは図18の中で、“9”で示されるピストン(ディスプレイサーピストン)と“2”で示されるパワーピストンが、互いに 90° 程度の位相差で動くように作られ、ディスプレイサーの側面とシリンダー内壁の間には隙間があり、作動ガス（この場合は空気）がその隙間を通過して自由に移動できる構造になっています。

したがって、ディスプレイサーが下方に位置しているときは、シリンダー内の空気は上方に集まり、加熱され、体積は増加し、シリンダー内の圧力は上昇します。そしてその圧力が頂点に達する少し前で、パワーピストンが下方に押されはじめ（膨張過程）、仕事が発生することになります。

また、その逆にディスプレイサーが上方に移動すると、シリンダー内の空気は冷却され、収縮し、パワーピストンは上方に戻り（圧縮過程）、ディスプレイサーは下方に移動してきます。このような一連の運動を繰り返し、エンジンは連続して動いていくわけです。

したがって、スターリングは、密閉空間内の空気を、2つのピストンに位相差をつけて動かして、エンジン内部の体積を増加・減少（圧力の増減）させ、熱を仕事のエネルギーに変える仕組みを考案したわけです。実に巧妙なメカニズムを発見したと言えます。

現在スターリングエンジンの形式は、 β 形のほか、 α 形、 γ 形、ダブルアクティング形、フリーピストン方式がありますが、これらは熱力学的に同じサイクルに基づいています。

スターリングエンジンの定義

スターリングエンジンの特徴は、外燃機関であることです。したがってスターリングエンジンを加熱するエネルギーは化石燃料のほか、各種バイオマスや太陽熱、廃熱が利用できるため、近年資源・環境の両面から大きな期待が寄せられるようになりました。

それゆえ、スターリングエンジンのメカニズムをやや広義に捉え、密閉された空間内にある気体を、加熱、冷却によって膨張・収縮させ、出力を取り出す仕組みを持った機械と定義したいと考え始めています。そうすると、従来のスターリングエンジンから離れた発想が生まれ、新しいスターリングエンジンが生まれるのではないかと思うからです。

最近、ようやく商用・量産エンジンが出現してきました。これからスターリングエンジンの時代が始まると考えていますが、このような時代を迎えたいま、新しいエンジンメカニズムが生まれ、エンジン概念を変えて行くことが必要ではないのでしょうか。

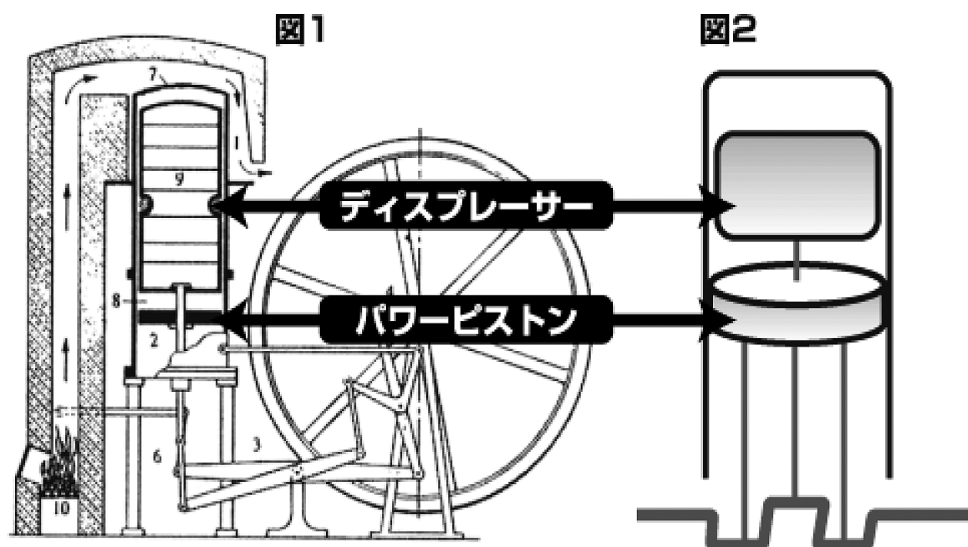


図 18 ロバート・スターリングエンジン
(スターリングエンジンの理論と設計 (山海堂) から引用) / 図 2: β 形の模式図

2. バイオマスエネルギーの賦存量

バイオマスの賦存量と利用可能量について図 19 に示した。図を見て分かる通り、かなりの割合で利用が進んでいる、用途先が決まっていることが分かる。ただ、食品廃棄物、農作物非食用部、林地残材については過半が未利用であり、割合こそ少ないが紙も絶対量は大きい。これらについては先に掲げたバイオマス発電システムへの利用は可能なものであるが、フィールドなどの周辺整備が必要である。

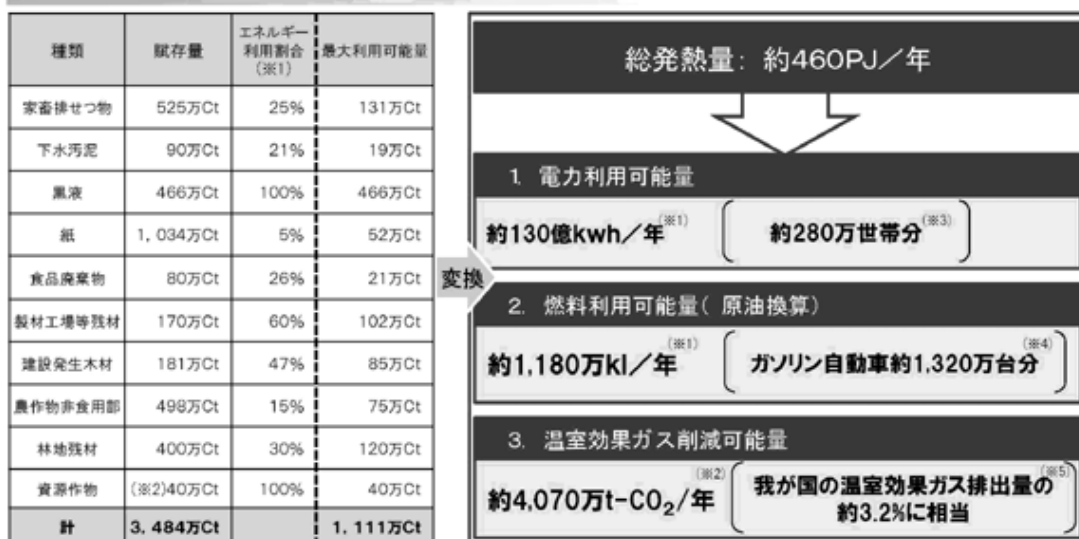
図 20 にバイオマスエネルギー利用のポテンシャルについて示しておいた。賦存量とエネルギー利用量 (想定) の関係が分かる。

バイオマスの賦存量と利用可能量



図 19 バイオマスの賦存量と利用可能量
(バイオマス事業化戦略検討チーム資料より)

バイオマスのエネルギー利用のポテンシャル(試算)



※1: エネルギー利用割合は、2020年における利用率目標を全てエネルギー利用向けの増加により達成するものと仮定し、試算したもの
※2: 資源作物は、2020年の目標生産量

※1: 1PJ(ペタジュール) = 258万kl(原油換算) = 2.78億kwh
電力利用可能量は、発電ロス・ガス化効率等を勘案し試算(総発熱量から単純に換算した場合は約1,270億kwh)
※2: 最大利用可能量(Ct)をCとCO₂の分子量の比で換算したもの
※3: 一世帯あたり電力消費量を4,734kwh/年(エネルギー白書2010)として試算
※4: 自動車1台あたり1,000L/年のガソリンを消費するものとして試算
※5: 2010年度速報値12億5,600万トン

図 20 バイオマスのエネルギー利用のポテンシャル(試算)
(バイオマス事業化戦略検討チーム資料より)

3. 再生可能エネルギーの固定価格買取制度

平成 24 年 7 月 1 日から施行された再生可能エネルギーの固定価格買取制度について概略を以下に示す。これらの資料は経済産業省、資源エネルギー庁からの抜粋であり、バイオマス以外の分野、手続きなど詳しくは関連省庁のパンフレット、ホームページ等を参照いただきたい。

バイオマス発電に関する基準

1. 使用するバイオマス発電のバイオマス比率を正確に算定できる管理体制を整備するとともに、燃料の使用量、発熱量等の算定根拠を帳簿に記載しつつ発電し、毎月 1 回当該バイオマス比率を算定できる体制を整えること。
2. 使用するバイオマス燃料について、その利用により、当該バイオマス燃料を活用している既存産業等への著しい影響がないものであること。
3. 既存産業への影響を判断するため、また、適用する調達区分を判断するため（※）、使用するバイオマス燃料について、その出所を示す書類を添付すること（異なる複数の調達区分が存在する木質バイオマス（リサイクル木材を除く）を燃焼する発電については、グリーン購入法に基づく「間伐材チップの確認のガイドライン」に準じたガイドラインに基づいた証明書を当該出所を示す書類として添付すること。）。

※なお、バイオマス発電については、その燃料種により適用される調達価格が異なることから、添付書類により、当該バイオマス燃料がどの調達区分のものであるかを判断できない場合には、調達価格が最も低いリサイクル木材の価格を適用することとする。

調達価格・調達期間

電源		太陽光		風力		地熱		中小水力		
買取区分		10kW以上	10kW未満	20kW以上	20kW未満	1.5万kW以上	1.5万kW未満	1,000kW以上 30,000kW未満	200kW以上 1,000kW未満	200kW未満
費用	建設費	32.5万円/kW	46.6万円/kW	30万円/kW	125万円/kW	79万円/kW	123万円/kW	85万円/kW	80万円/kW	100万円/kW
	運転維持費 (1年当たり)	10千円/kW	4.7千円/kW	6.0千円/kW	—	33千円/kW	48千円/kW	9.5千円/kW	69千円/kW	75千円/kW
IRR		税前6%	税前3.2% (*1)	税前8%	税前1.8%	税前13% (*2)		税前7%	税前7%	
買取価格 1kWh当たり	税込 (*3)	42.00円	42円 (*1)	23.10円	57.75円	27.30円	42.00円	25.20円	30.45円	35.70円
	税抜	40円	42円	22円	55円	26円	40円	24円	29円	34円
買取期間		20年	10年	20年	20年	15年	15年	20年		

(*1) 住宅用太陽光発電について

10kW未満の太陽光発電については、一見、10kW以上の価格と同一のように見えるが、家庭用についてはkW当たり3.5万円(平成24年度)の補助金を加えると、実質、48円に相当する。
なお、一般消費者には消費税の納税義務がないことから、税抜き価格と税込み価格が同じとなっている。

(*2) 地熱発電のIRRについて

地表調査、調査井の掘削など地点開発に一件当たり46億円程度かかること、事業化に結びつく成功率が低いこと(7%程度)等に鑑み、IRRは13%と他の電源より高い設定を行っている。

(*3) 消費税の取扱いについて

消費税については、将来的な消費税の税率変更の可能性も想定し、外税方式とすることとした。ただし、一般消費者向けが太宗となる太陽光発電の余剰買取の買取区分については、従来どおりとした。

図 21 調達価格・調達期間 1

調達価格・調達期間

電源		バイオマス						
買取区分		ガス化(下水汚泥)	ガス化(家畜糞尿)	固形燃料燃焼(未利用木材)	固形燃料燃焼(一般木材)	固形燃料燃焼(一般廃棄物)	固形燃料燃焼(下水汚泥)	固形燃料燃焼(リサイクル木材)
費用	建設費	39.2万円/kW		41万円/kW	41万円/kW	31万円/kW		35万円/kW
	運転維持費 (1年当たり)	18.4千円/kW		27千円/kW	27千円/kW	22千円/kW		27千円/kW
IRR		税前1%		税前8%	税前4%	税前4%		税前4%
買取価格 1kWh当たり	区分	【メタン発酵ガス化バイオマス】		【未利用木材】	【一般木材(含パーム椰子殻)】	【廃棄物系(木質以外)バイオマス】		【リサイクル木材】
	税込	40.95円		33.60円	25.20円	17.85円		13.65円
	税抜	39円		32円	24円	17円		13円
買取期間		20年						

図 22 調達価格・調達期間 2