

バイオマスおよび廃棄物のエネルギー変換技術

Technologies for Energy Conversion from Biomass and Waste products

義家 亮*

1. 燃料としてのバイオマスおよび廃棄物

バイオマスと廃棄物との分類はかなりオーバーラップする領域がある。図1は世の中に流通するバイオマスに分類される物質と廃棄物に分類される主な物質を挙げてグルーピングにまとめたものである。国内ではエネルギー作物はほとんど普及しておらず、廃棄物に分類されないバイオマス資源の種類は少ない。一方、斜体で表した無機系廃棄物の廃酸・廃アルカリ、金属くず、がれき等を除いて、廃棄物の大半が可燃分を含み、燃料として利用可能である。また、廃プラ、ゴムくず、廃油はほぼ化石資源由来であるが、それ以外の可燃性廃棄物は動植物から産出された原料や製品に由来する物質であり、バイオマス系廃棄物あるいは廃棄物系バイオマスと呼ばれ、上述のオーバーラップ領域となる。行政において廃棄物は一般廃棄物と産業廃棄物に分けられ、多くのバイオマス系廃棄物は産業廃棄物に組み込まれる。また、バイオマスに関するFIT（固定価格買取制度）の適用についても、メタン発酵、間伐材、未利用材、廃棄物系などに細かく区分が分けられている。

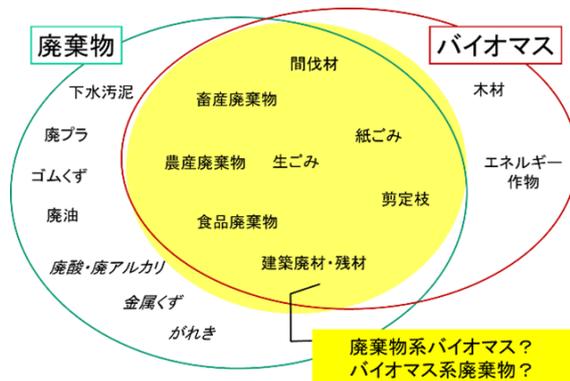


図1 バイオマスと廃棄物の分類
(斜体は無機系廃棄物)

る。しかし、2050年までのカーボンニュートラル実現に向けて、非化石資源からの高効率エネルギー回収を速やかに拡大しようとする立場では、行政の枠組みを超えた協力関係や補完技術に基づくトータルプロセスの最適化が不可欠であり、本稿ではバイオマスも廃棄物も等しく非化石固体燃料として取り扱うものとする。同様の理由で、通常は廃棄物焼却炉と呼ばれる施設も、本稿ではあえて「廃棄物燃焼炉」と表現する。

固体燃料の燃焼特性を議論するにあたり、まず燃料の特徴を定量的に評価する基準が必要であり、一般に工業分析（Proximate Analysis）が用いられる。工業分析では、燃料の中でネガティブ要素となる水分と灰分を区分し、さらに可燃分については揮発分と固定炭素に分けてその質量割合を求める。具体的には、107℃で一時間乾燥させて、その減少重量で水分を評価し、その後空気雰囲気815℃で十分に完全燃焼させて、その残渣重量から灰分を評価する。揮発分は窒素雰囲気900℃の熱分解条件にて7分間加熱する間に放出される重量から求め、残った残渣から灰分の割合を差し引いた値が固定炭素となる¹⁾。固体燃料の工業分析の結果の解釈として、まず水分は発熱量を下げる要因であるため、少ないほうがよい。また、灰分は発熱量に対する影響はほとんどないが、燃焼残渣あるいは排ガス中ダストとして火炉から排出され、燃焼装置の腐食や摩耗の原因となるため、やはり少ないほうがよい。揮発分は適度に含まれると燃料の着火性が良くなり、燃料としての利便性が高まる。しかし、揮発分が高すぎると燃焼排ガス中におけるタールやススの発生要因となる。

固体燃料の燃焼性評価において重要なもう一つの

* 東海国立大学機構名古屋大学
大学院工学研究科機械システム工学専攻 准教授

表1 バイオマスと廃棄物の工業分析・元素分析・低位発熱量の評価例

		石炭	廃棄物		バイオマス	
		瀝青炭	RDF	汚泥	木質ペレット	PKS
工業分析	Dry base(%)*1					
	水分	2.9	2.0	19.1	4.6	9.2
	揮発分	34.2	79.7	75.2	83.6	72.4
	固定炭素	56.5	9.9	14.0	15.8	26.0
	灰分	9.3	10.4	10.8	0.6	1.6
元素分析	DAF base (%)*2					
	C	77.4	54.8	44.6	49.6	55.1
	H	4.6	7.8	6.1	6.7	5.9
	N	2.0	1.1	5.7	0.2	0.5
	O	15.0	36.2	42.9	43.6	38.5
	S	1.1	0.1	0.6	-	-
発熱量	LHV (MJ/kg)	24.9	18.3	10.4	15.6	16.3

*1: 乾燥基準（水分を除く揮発分・固定炭素・配分の合計が100%）

*2: Dry Ash Free ベース（無灰無水基準，水分と灰分を除く可燃分の合計が100%）

指標は元素分析 (Ultimate Analysis) である。揮発分と固定炭素を合わせた可燃分の質量を分母として、それに含まれる炭素 (C)、水素 (H)、窒素 (N)、硫黄 (S)、酸素 (O) の各元素の質量割合で表される。C、H、N、S を有機元素分析測定装置で分析し、酸素は差し引き (balance) で評価することが多い。

工業分析と元素分析の結果を用いて、以下の式により燃料としての発熱量 (低位発熱量, MJ/kg) を見積もることができる。式中の c, h, s, o, w は燃料 1kg 中に含まれる C、H、O、S、水分の質量割合 (到着ベース, kg/kg) である。到着ベースとは、水分・揮発分・固定炭素・灰分のすべてを分母に含めた質量割合である。

$$H_l = 32.76c + 120.0h + 9.26s - 17.7o - 2.42w$$

表1に筆者らの研究にて取り扱っているいくつかのバイオマスおよび廃棄物の工業分析および元素分析の評価例を示す。またそれらから推算した低位発熱量を示す。参考のため化石燃料の一種であり、現在も石炭火力発電所で用いられている瀝青炭の一例も併記する。バイオマスおよび廃棄物の組成は多種多様であるので、表1に示したデータはあくまで典型的なバイオマスや廃棄物の例であることに注意されたい。表1より石炭に対するバイオマスや廃棄物の固体燃料としての特徴を把握できる。まず、類似点として揮発分、固定炭素、灰分をそれぞれ含むことが挙げられる。したがって火炎を伴う揮発分燃焼からチャー（揮発分放出後の固体燃料成分）が赤熱して燃える固定炭素燃焼へ移行し、炉内に灰分が残存するという燃焼過程は石炭とよく似ており、燃焼

装置の設計においては石炭燃焼で蓄積された多くの知見を流用できる。一方、相違点としては石炭と比較してバイオマスや廃棄物の単位質量あたりの発熱量が低いことが挙げられる。これは水分や元素組成中の酸素 (O) が多いことに起因する。また、表1の中には示されないが、灰分における腐食性成分 (バイオマスではアルカリ成分、廃棄物では塩素) の含有量が高いことが多い。これらは、例えば蒸気タービン発電プロセスにおいては、燃焼ボイラーの伝熱管表面の劣化や破損の要因となる。したがって、バイオマスや廃棄物の蒸気タービン発電では、伝熱管保護のため水蒸気温度を 450℃ 程度以下に抑える必要があり、発電効率が低い理由になっている。さらに、前述のとおりバイオマスや廃棄物の組成は多種多様であるが、その不均一性そのものが燃料としてのデメリットとなる。つまり、火炉の安定操業のためには、きめ細やかな空気比制御や温度制御が不可欠である。ようするに、バイオマスと廃棄物からのエネルギー変換を考えると、化石燃料である石炭と比較して、バイオマスと廃棄物は不便で低品質な燃料であることを認めなくてはならない。

2. 燃焼によるエネルギー変換

バイオマスでも廃棄物でもある程度の規模以上のエネルギー変換プラントでは、石炭火力発電と同様に、燃焼ボイラーによって高温高压の蒸気を発生し、蒸気タービンを駆動して電力を取り出すのが一般的である。木質バイオマス燃料とする発電施設では発電出力で 5000kW を超える規模において、蒸気タービン発電が多く使われており、BTG (ボイラ・

タービン発電設備)とも呼ばれる²⁾。

図2に蒸気タービンサイクル(ランキンサイクル)における発電出力とタービン発電効率の関係を示す。発電出力が5000kWを下回ると、蒸気タービンの発電効率が低下するため、次節で紹介するガス化発電施設の割合が高くなる。一方、廃棄物燃焼施設では廃棄物処理量100トン/日程度の規模(おおよそ発電出力1500kW程度に相当、ただし施設の運用方針によって大きく差がある)においても蒸気タービン発電を付帯して所内電力供給や売電を行うものが多い。それ以下の規模では暖房や給湯等の熱利用のみに留める施設が多い。いずれの場合も、石炭における微粉炭ボイラーのように、燃料を微粉化・均質化して燃焼バーナーに直接吹き込むことは、バイオマスや廃棄物では困難であるため、不均質な燃料や発熱量が低い燃料に適した燃焼装置が利用される。本節ではそれらの主な例を紹介する。

2.1 ストーカー炉

廃棄物の焼却装置、すなわち廃棄物燃焼炉において国内でもっとも多く利用されているのがストーカー炉である。バイオマス発電においても規模に関わらず広く利用される。図3にストーカー炉の模式図を示

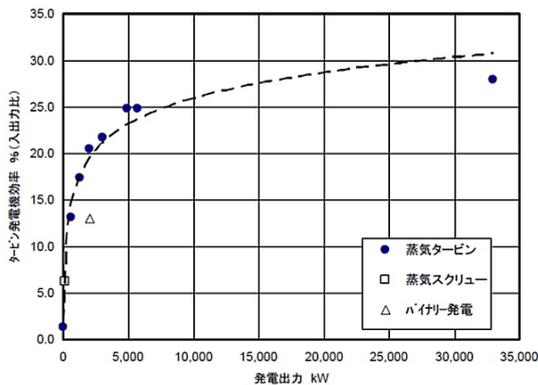


図2 蒸気タービンサイクル(ランキンサイクル)における発電出力とタービン発電効率の関係²⁾

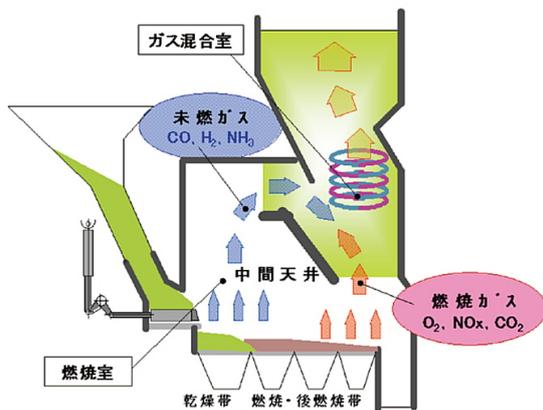


図3 ストーカー炉の模式図³⁾

す³⁾。ストーカー炉とは火格子炉ともよばれ、火格子の上に落とされた燃料(バイオマス、廃棄物)に対して、その下部から空気を通して燃焼させる。火格子は可動式の複数段で構成されて、それらが個々に摺動運動することによって、廃棄物を少しずつ下段に移動させる(火格子の形状・段数・動き方には様々なバリエーションがある)。炉内は上流側から乾燥段、燃焼段、後燃焼(チャー燃焼)段と分けられ、大きな廃棄物や水分を含んだ廃棄物であっても、ゆっくりと時間をかけて完全燃焼することが可能である。最近では発電効率向上のために低空気比高温燃焼条件で操業される傾向にあり、炉内最高温度は1300℃以上に達することもある。

2.2 循環流動層炉

国内における大規模バイオマス発電にもっとも多く使われているのが循環流動層である。図4に循環流動層燃焼炉の模式図を示す²⁾。数センチ未満に破碎された燃料(バイオマス)を流動媒体である砂層に落として燃焼させる。空気は火炉下方から供給されて砂層と燃料を攪拌する。砂層の一部と未燃炭素(チャー)は上方の燃焼域を経て火炉出口まで吹き飛ばされた後、サイクロンにて排ガスと分離されて火炉の砂層へ循環する。燃焼温度が900℃程度であり、ストーカー炉より低い。前述のとおり、バイオマス中の灰分はアルカリ成分が多く含まれており、その融点が高いので、循環流動層の低い燃焼温度は灰分の融解および炉内固着を防ぐのに適している。

2.3 ガス化溶融炉

ガス化溶融炉は廃棄物に含まれる灰分を高温で融解してスラグ化することにより、廃棄物燃焼灰を無害化および減容化することを目的として導入される。したがってガス化ガスをガスタービン等の熱機

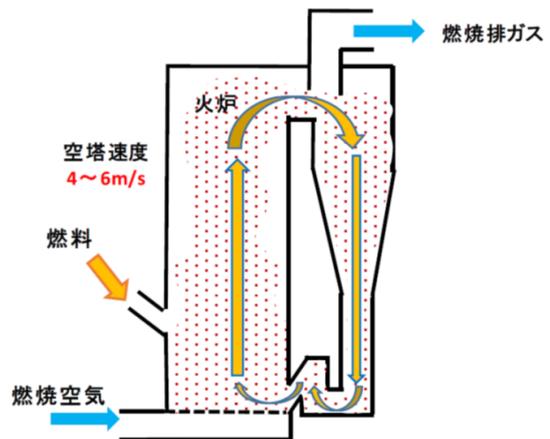


図4 循環流動層燃焼炉の模式図²⁾

関に直接導入することではなく、前項のストーカ炉等と同様に、燃焼ボイラーにて蒸気を発生して蒸気タービンを駆動することによって発電する。ガス化溶融炉には様々な種類が存在するが、大きく分けて一体型（シャフト炉式）と分離型（キルン式、流動層式など）に区別できる。図5(a) (b) にそれぞれのガス化溶融炉のシステム概念図を示す^{4), 5)}。いずれの場合も廃棄物が投入されるガス化炉は還元雰囲気にて可燃性ガス（ガス化ガス）を生成する。よって灰分がスラグとして回収されるほかに廃棄物中不純物として含まれる金属成分がメタルとして回収できるという長所がある。図5(a) のシャフト炉式は製鉄業の高炉技術を応用したもので、ガス化炉内にコークスを充填する。これによって還元雰囲気であっても1300℃以上の高温場を維持することができる。昨今では、温暖化ガス排出削減の観点から、コークス利用料の低減を図った低炭素型シャフト炉

(図5(a) 右) が提案されている⁴⁾。一方、分離型のキルン式と流動層式は熱分解ガスを燃焼炉で空気燃焼して高温場を作り出し、そこに含まれる未燃チャー中の灰分や飛灰を溶融する。図5(b) の流動層式は気泡流動層をガス化炉として用いる。廃棄物に含まれる灰分のうち金属類などの比重の大きい不燃物は砂層の底に沈み、砂と一緒に炉外に排出される。砂層を低温で運転すれば、鉄を酸化させずに回収できるだけでなく、燃焼炉では回収できないアルミ類を回収できるなど、リサイクル性も向上させることができる⁵⁾。

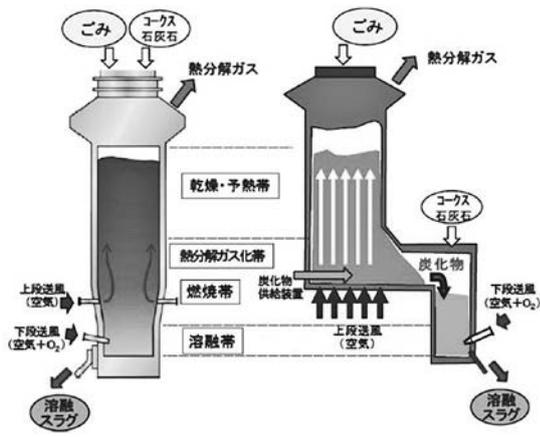
3. それ以外のエネルギー変換

前述のように数十トン/日未満の廃棄物燃焼施設では熱利用のみで発電システムを持たない場合が多い。一方、バイオマスの場合には小規模であっても燃料の発熱量と均質性が担保されれば発電システムを構築できる場合がある。その際、小規模でも熱効率の高いガスエンジン等の熱機関に組み合わせるため、単なる燃焼ボイラーではなく、バイオマス資源から気体燃料への変換プロセスが適用される。本節ではそれらの主な例を紹介する。

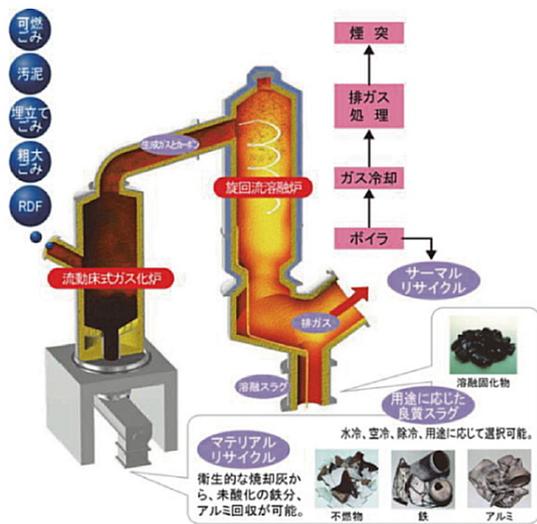
3.1 バイオマスガス化

バイオマスガス化発電とは、木質チップやペレット等のバイオマスをも800℃程度以上の高温場で熱分解・ガス化反応によって水素および一酸化炭素を主成分とする生成ガスに変換して、そのガスを燃料としてガスエンジン等を駆動して発電する技術である。小規模でも比較的高い発電効率を得られるが、燃料種や水分に非常にデリケートなため、バイオマス燃料の形状や水分率等の品質の安定確保が最大の課題となる。また、総合エネルギー利用率の向上のために、熱利用と組み合わせることが多い。発電と熱供給を両立する熱電併給システムは、国内では長くコジェネレーションと呼ばれてきたが、最近では欧米での呼称に合わせてCHP (Coproducton of Heat and Power) と呼ばれることもある。

バイオマスガス化は吸熱反応であるため、ガス化炉には熱源を必要とする。他の熱源から熱交換によって得られた高温水蒸気をガス化剤として導入することもあるが、一般にガス化炉へ空気を供給し部分燃焼条件とすることで、燃焼熱と生成水蒸気をガス化反応に供する。このように外部熱源を必要としないガス化炉を自律型（オートサーマル）と呼ぶ。小型の場合はバイオマス燃料を上部から供給する充填層ガス化炉が多い。ガス化剤となる空気は、下か



(a) 一体型（シャフト炉式）⁴⁾



(b) 分離型（流動層式）⁵⁾

図5 ガス化溶融炉の概念図

ら供給するアップドラフトと上から供給するダウンドラフトに分けられる。図6にもっとも多く使われるダウンドラフト型ガス化炉の概念図を示す⁶⁾。

3.2 メタン発酵

メタン発酵は、嫌気性微生物の働きを通して、食品廃棄物、家畜排せつ物、下水汚泥などの有機性廃棄物をエネルギー（バイオガス、主にメタン）と液肥（または堆肥）に変換するプロセスである。メタン発酵は含水率の高いバイオマスやバイオマス系廃棄物の利用に適する。特に畜産廃棄物などの悪臭を低減する効果や出力変動が発生しにくい安定した再生可能エネルギーとしてのメリットがある。発酵残渣には窒素、リン、カリウムが含まれており、良質な肥料として農作物栽培に利用できる。ただし液肥や堆肥の供給先がないと水処理や焼却処理が必要となるため、こうした「出口」の確保が事業性のカギとなる。下水汚泥の処理分野ではメタン発酵槽のことを消化槽、発酵残渣のことを消化液（消化汚泥）と呼ぶ。図7にもっとも単純な完全混合メタン発酵槽の模式図を示す⁷⁾。バイオガスには硫化水素が含まれることが多いため、バイオガス利用の前段には脱硫装置を設置するのが一般的である。

4. バイオマスおよび廃棄物エネルギーの今後

2021年10月に第6次エネルギー基本計画が閣議決定され、2030年度の電源構成のうち再生可能エネルギーは36～38%を担うとする方向性が示された。その内訳としては、太陽光14%～16%、水力11%に次いで風力5%とならびバイオマスは5%の寄与が期待されている⁸⁾。一方、これに続くのは地熱の1%だけであり、内訳の中に廃棄物の項目はない。よって、バイオマスの中には廃棄物系バイオマ

スが含まれると考えてよい。本節ではバイオマスと廃棄物からの発電を中心とするエネルギー回収を今後拡大するための方向性について述べる。

4.1 地域分散型エネルギー資源としての期待

バイオマス発電は、地域産業の活性化を通じた経済・雇用への波及効果が大きいなど、地域分散型、地産地消型のエネルギー源として多様な価値を有するエネルギー源であるとされている。一方、地域から発生する廃棄物は、すでに地域資源の一つになっていると考えてよい。「NIMBY (Not In My Back Yard)」などと揶揄された時代は終わり、高い環境性能を備えた昨今の廃棄物燃焼プラントは、近隣への熱供給にとどまらず、電力会社の電力系統に接続して、積極的な売電を行う施設も増えている。ただし、前述のとおりバイオマスや廃棄物は燃料として低品質であり、廃棄物燃焼発電の発電効率全国平均は14.05%⁹⁾、バイオマス発電は形式や規模によって大きく差があるがそれでも10～30%と決して高くない。最新鋭の微粉炭火力が42%、天然ガス火力（ガスタービンと蒸気タービンの複合サイクル）が63%の発電効率であることと比較すれば、雲泥の差である。よってバイオマスや廃棄物からのエネルギー変換は、既存の大規模集約型の火力発電に速やかに置き換わるものではない。まずは地産地消の資源を用いて、それぞれの地域の境界条件に即した地域分散型のエネルギー生産プロセスとして成立すべきである。その際、発電はエネルギー回収の一手段に過ぎない。既に一部のバイオマス発電施設や多くの廃棄物処理で行われているように、発電と熱供給による総合エネルギー利用率を重視したプロセス構築が不可欠である。

4.2 マルチリソース・マルチプロダクト

上記のような熱電併給を行なっても地域の中で採算の取れるプロセスを構築するのは簡単ではない。そのブレイクスルーとして、成瀬はマルチリソース・

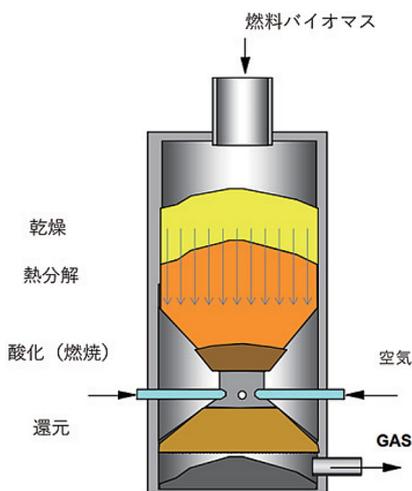


図6 ダウンドラフト型ガス化炉の概念図⁶⁾

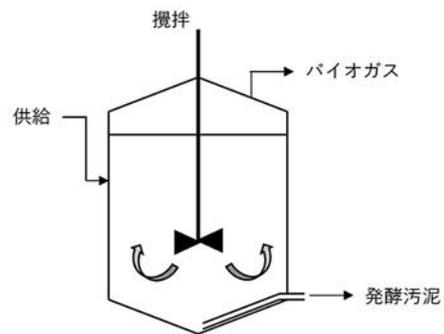


図7 完全混合メタン発酵槽の模式図⁷⁾

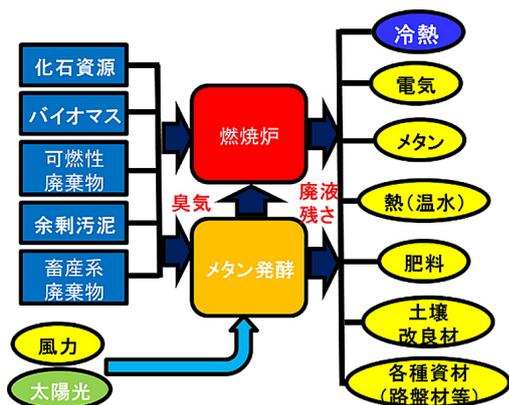


図8 マルチリソース・マルチプロダクトの概念図¹⁰⁾

マルチプロダクト型地域物質・エネルギー変換拠点を提唱している。図8にその概念図を示す¹⁰⁾。ここでは燃焼炉とメタン発酵をプロセスのコアに置き、様々な種類のバイオマスおよび廃棄物をエネルギー資源として受け入れ、アウトプットには電力・熱供給だけでなく、貯蔵可能なエネルギー媒体であるメタン、さらには肥料・土壌改良材・路盤材といった再生資材が含まれる。メタン発酵では臭気処理や、消化液・発酵残さの処理がシステム全体のエネルギー収支向上のための課題になるが、本システムでは臭気を含む空気を燃焼用空気として利用、消化液や発酵残さも燃焼処理することでメタン発酵の課題をクリアしている。さらに太陽光や風力などの再生可能エネルギー由来の電力を、攪拌槽などの所内動力として受け入れる。太陽光発電や風力発電は、発電に適した時間帯と電力需要ピークの不一致に起因する出力調整（抑制）が大きな問題となっているが、本システムに組み込むことによって、メタン発酵槽がタイムラグを解消するバッファとなり、太陽光発電や風力発電の稼働率向上にも寄与する。図8は燃焼炉とメタン発酵を中心に構成されているが、低水分のバイオマス・廃棄物が多い地域であれば、熱分解ガス化炉と燃焼炉でシステムを組んでも構わない。太陽光・風力の発電出力が大きい地域であれば、水電解水素製造装置を追加しても良い。水素がアウトプットに加わるだけでなく、水素製造副生酸素は燃焼炉やガス化炉の高効率操業のために有効利用できる。すなわち、マルチリソース・マルチプロダクトの概念は、全国共通の廃棄物処理システムではなく、各地域の境界条件に合わせた柔軟な廃棄物利用システムであり、その地域で得られる物質資源やエネルギー資源をその地域で環境に調和させながら高効率に有効利用する物質・エネルギー変換拠点

そのものである。

5. おわりに

国内の様々なバイオマス資源の利用は脱炭素に貢献可能なポテンシャルを有しているものの、収集性や輸送コストの観点から大規模集約型発電プラントの燃料とするのは困難であり、オンサイト処理を基本とする小規模エネルギー生産施設の発展が強く期待される。一方、バイオマス資源は、風力・太陽光・太陽熱と同様に農村・里山・山林地域に散在するため、それらを組み合わせた自律分散型の高効率複合エネルギー創成ネットワークの構築が可能である。その具体的な概念がマルチリソース・マルチプロダクトである。日本太陽エネルギー学会の皆様に対してここでお願い申し上げたいのは、この異種再生可能エネルギー間の協力である。バイオマス、廃棄物、太陽光、太陽熱、風力の単独発電プラントの蓄積だけでは、大規模集約型の化石燃料由来の発電プロセスに置き換わるのは困難である。しかし、複数の再生可能エネルギーを組み合わせた自律分散型の複合エネルギー創成プロセスが、各地域の実情に合わせた多様な形で成立し、それらのノウハウがデータベース化されて後続の地域に対する成功モデル群となれば、そのネットワークは有機的に拡大していくであろう。それが全国に広がったとき、化石燃料から脱却した持続可能社会が成立すると信じる。

参考文献

- 1) JIS M 8812, 石炭類及びコークス類－工業分析方法
- 2) NEDO バイオマスエネルギーの地域自立システム化事業実証, バイオマスエネルギー地域自立システムの導入要件・技術指針第6版, 実践編（木質系バイオマス）(2022)
- 3) 岩崎敏彦, 中山剛, 傳田知広, 木ノ下誠二, 中川知紀, 鮎川将, 廃棄物燃焼技術における最近の動向, 日本燃焼学会誌, **53** (164), 85-90 (2011)
- 4) 小野義広, シャフト炉式ガス化溶融炉における温暖化対策の最新技術, 日本エネルギー学会機関誌えねるみくす, **97**, 650-653 (2018)
- 5) 細田博之, 流動層による廃棄物やバイオマスの混焼技術, 日本燃焼学会誌, **59** (190), 264-271 (2017)
- 6) 笹内謙一, 国内におけるバイオマス小規模ガス化発電の最新の動向と課題, 日本エネルギー学

会機関誌えねるみくす, 101, 660-668 (2022)

- 7) 令和3年度経済産業省資源エネルギー庁委託事業「新エネルギー等の導入促進のための広報等事業委託費における再エネ導入・運転人材育成支援事業」メタン発酵バイオガス発電における人材育成テキスト (2021)
- 8) 第6次エネルギー基本計画の概要, 資源エネルギー庁 (2021)
- 9) 令和4年版環境白書・循環型社会白書・生物多様性白書, 環境省 (2023)
- 10) 成瀬一郎, 地産地消エネルギー源である廃棄物の燃焼技術, 日本エネルギー学会機関誌えねる

みくす, 97, 623-630 (2018)

著者略歴



義家 亮 (ヨシイエ リョウ)

1997年3月東京工業大学大学院総合理工学研究科エネルギー科学専攻博士課程修了(工学博士), 同年4月岐阜大学工学部助手, 2008年1月より現職. 主に廃棄物燃焼, バイオマス燃焼・ガス化, 燃焼排出物放出抑制に従事.