

バイオマス資源をローテクな平炉で炭化、 排熱を熱源に温水供給と発電

村 上 誠・島 田 勇 巳

全国に点在する未利用なバイオマス資源をプール式の平炉で炭化し有効活用、炭化時の排熱を熱源として活用し、温水・電気を家庭・事務所・ハウスなどに供給。カーボンニュートラルなバイオマス資源をエネルギーに変換するため、CO₂の発生を抑制し地球温暖化防止に貢献する。大型公園、大規模農園、ゴルフ場等で活用を検討中である。

キーワード：未利用バイオマス、炭化、創熱、オンサイト、オフグリッド

1. はじめに

本年3月東京都は1934年発生した室戸台風同等の「スーパー台風」の高潮による浸水区域図を発表した。23区の3割が浸水し、浸水の最大深さは10メートル以上、墨田区・江東区は7メートル浸水になる被害が想定されている。

近年、我が国に限らず全世界的に、スーパー台風、ゲリラ豪雨、寒暖差の拡大、海水温度上昇等の異常気象が多発している。これらは、二酸化炭素(CO₂)等の温室効果ガス増加の影響による地球温暖化が原因と考えられている。2015年COP21パリ会議では各国の2030年時点のCO₂削減の目標値が具体的に提示され、CO₂の排出抑制に向けた具体的な対策が徐々に進み、我が国でも2050年の再生可能エネルギーを中心とし、蓄電池・水素を活用した戦略が発表された。

本稿では、現在あまり活用されていないカーボンニュートラルな未利用バイオマスを活用し、温室効果ガスの主成分であるCO₂の発生を減少させるオンサイトのバイオマスの炭化時に生じる排熱や炭を燃料とした事例を紹介する。

(1) バイオマスの種類

バイオマスの分類は使用目的・用途により大きく変わるが、本稿では以下の3種類に分類する。

- ・廃棄物系バイオマス(食品廃棄物、建設発生木材、家畜排せつ物など)
- ・未利用バイオマス(森林・竹林地残材、稲藁、粉殻など)
- ・資源作物(資源として利用を考えられて栽培され

たバイオマス)

(2) バイオマスの賦存量とエネルギーポテンシャル

平成24年にバイオマス推進会議が発表した資料によると、日本全体で全体のバイオマス賦存量は炭素量に換算して凡そ3400万t。これを2020年度国が想定するエネルギー利用割合で活用した場合(例えば林地残材 現在は数%⇒2020年30%利用等)で電力利用可能量を算出すると、約130億kWh/年の膨大な量である。

一方、100万kW級の原発1基の年間発電量(100%稼働)は大凡87億kWh/年、従って現状技術でのエネルギーポテンシャルは1.5基分に相当する。今後バイオマスの発電効率・利用技術が上ればさらにアップすると考えられる。しかしながら、バイオマスのエネルギー利用は進んでないのが現状である。

(3) 未利用バイオマス

我が国の国土面積は3770万haその66%は森林であり、森林割合ではフィンランド・スウェーデンに次ぎ世界3位の森林大国である。森林賦存量は60億m³、バイオマスエネルギー発電が約8%のドイツ34億m³の約2倍である。この膨大な森林資源は我が国独特な急峻な斜面により林道整備が難しく、それにより大型林業機械の導入が遅れ、木材の生産コスト・搬出コストをアップさせ市場競争力を無くしている。尚、この膨大な森林資源は(2)のバイオマス賦存量には含まれていない。各種発表のデータによると、バイオマス発生量は林地残材は800万トン、農作物非食用(稲わら粉殻など)1300万トン。利用率は林地残

材数%,そして農作物非食用は利用率30%でほとんどが堆肥での活用である。

(4) 炭化手法

バイオマスを炭化する手法はいくつか存在するが基本的には「簡易製炭法」「築窯製炭法」「工業的炭化法」の3つに大きく分けられ、炭の種類としては製炭手法や温度によって「薫炭」「黒炭」「白炭」の3種類がある。

- ①「簡易製炭法」 伏せ焼きやドラム缶方式と呼ばれる簡易な製炭手法で製炭温度は約400℃。製炭物の多くは「薫炭」。
- ②「築窯製炭法」 製炭温度が約600℃で「黒炭」を作る黒炭窯と、備長炭に代表される「白炭」を約800℃で製炭する白炭窯がある。
- ③「工業的炭化法」 ロータリーキルンに代表されるプラントとしての製炭手法で大量に製炭が可能。製炭温度を約400～1000℃で調整する事が可能で、「黒炭」と「白炭」も作り分ける事が出来る。
- ④「新しい平炉製炭法」詳細は3章で紹介。

2. 炭化物の活用事例

炭そのものの特性としては、弱アルカリ性であること、臭いやガス・湿気を吸い取り、ゆっくり排出するなど炭独特の特性や調整機能があり、さまざまな国や地域で古来からその特性を活かして利用されて来た。特に近年では、土壌改良炭として畑に漉き込んだり、建物の床下調湿炭として燃やさず活用することで炭素貯留を推進し、CO₂の使用を削減することで直接的に地球温暖化の抑制に大きく貢献することができるためその効果に注目が集まっている。

また燃料として炭化することで、本来なら約3000kcal程度の未利用資源が、約5000kcal以上のカロリーを持ち且つカーボンフリーな良質で高効率な燃料ともなるため、化石燃料に代わる熱エネルギーとしての活用が盛んになりつつある。以下炭の活用事例を示す。

(1) 土壌改良炭

粒度の小さい粉炭を有機肥料などと混ぜて畑や田んぼの土壌に漉き込むことで、作物の成長と共に進む土壌の酸性化を抑制するだけでなく、保水性や保菌性を向上させ農作物の成長や収量の改善を促す。

(2) 飼料炭

家畜や養殖魚の餌に数パーセントの細かい炭を混ぜて食べさせることで糞尿の消臭効果を発揮するだけでなく整腸作用によるストレスの緩和もあり品質の向上が見込める。また、炭入りの堆肥としての商品的付加価値も向上する。

(3) 燃料炭

昔からの地域にあるナラやカシ・クヌギなど広葉樹を原料とする黒炭が生活用の燃料炭として広く活用されて来た。「備長炭」と呼ばれる特殊な手法で作られる白炭は、高価だが高カロリーで遠赤外線も非常に多く発する高品質な燃料炭として重宝されている。現在は主に飲食店やBBQ（バーベキュー）用の燃料として利用されるが、暖房や温水ボイラー用としても活用されている。

(4) 吸放湿・吸臭炭

孟宗竹を主原料とする竹炭においては、内部に形成される非常に多くの微小なマクロ孔が空気中の湿気を吸・放出する機能があるため、古来より建物や施設の床下における空気環境を整える意味で多くの量の炭が埋設されてきた。また、ガスやニオイを吸着する機能も高く、冷蔵庫やトイレ等で利用されるケースも多い。

(5) 水質浄化炭

炭だけでなく鉄分など他のミネラル的要素を加えた固形物を汚れた川や海に投入することによって微生物が繁殖しやすい環境を整える。また竹炭は、水道水に含まれる塩素分等を微小なマクロ孔が吸着し飲料水やお風呂水を軟らかくする。

3. 平炉製炭法を活用した地域未利用バイオマス資源の循環活用への新たな取組み

本来なら針葉樹林の活用が最盛期を迎え活性化するのは林業が苦戦する今の日本において、未利用再生可能エネルギーへの新たなアプローチとして導入が進む大規模バイオマス発電の燃料として活用が注目されている。しかし、多くの地域において助成金に依存する伐採や運用等が行われて来た結果、発電の必要量が供給出来ず海外からの輸入材に依存するという皮肉な状態に陥っている。しかも、バイオマス発電での必要量が伐採・搬出する事が出来たとしても、発生条件により電力の買い入れ価格が大きく変わり、電力の買い入れ価格の安い材は搬出される事なく伐採地の現場



図一 天王山 出典：サントリーホールディングス HP より

に放置されているケースが殆どである。また、放置残材が大雨等による土砂崩れが発生した場合、流れる土砂と共に大きな被害を与える要因にもなり大きな社会問題になっている。

一方、全国各地で表面化する荒廃竹林も大きな問題となっている。竹材工芸やタケノコ栽培が盛んな時代には管理されていた竹林も安価な輸入材・半加工品の増加や生産者の高齢化により荒廃するエリアが急速に拡大しつつある。現在平炉が設置されている地元である高槻市や島本町・山崎町・長岡京市を中心とする天王山地域もその例外ではなく、多くのタケノコ農家が廃業に追い込まれ竹林の荒廃化が進んでいる。ただ、その天王山地域のエリアにある大山崎蒸溜所を有する大手飲料メーカーが管理する「天然水の森・天王山」では、水質の維持や防災を目的として地域と連携した環境保全が行われており長期的な指針のうえで適切な伐採・剪定等が行われている（図一1）。

高槻に製炭炉が完成される以前は伐採・剪定材の有効利用が見いだせず現地に据置している状態だった。しかし、高槻に製炭炉が完成して以降は竹炭の原料材として活用し、炭化した竹炭を商品化するという事業を開始した。新たな地域ブランド品「天王山竹炭」として竹炭の大きな特徴である吸・放湿性や吸臭性を活かし、身近な日常生活の中で竹炭を活用する「生活雑



図二 天王山竹炭 ブランドロゴ

貨炭」として販売をスタートさせている。また、地域の手づくり市等のイベントにも積極的に参加する事で、地元産の炭のある生活の啓蒙にも取り組んでいる（図二）。

しかし、このプロジェクトでの最も重要なポイントは、製炭資源となるまでの成長期間が広葉樹で約30年、針葉樹で約15年と言われている中において、竹の約3～5年という急速な成長特性を活かすところにある。現在、この竹材の特性を生かし、安価で安定した循環型資源と簡単な平炉製炭法により高いコストパフォーマンスを得て多岐にわたる適用で販売を広げ採算に乗せることが出来ている。

平炉製炭法は、全国何処にでも存在する荒廃竹林間

題をポジティブに解決する新しい視点での手法としてだけでなく、竹以外の様々な未利用バイオマスをも活用できる新たな取り組みとして各地から問合せがあり、仕組みの導入に向けて複数の具体的なプロジェクトがスタートしている。

4. 平炉製炭法を活用した創熱・排熱活用（温水・発電）…実証実験例

火山国である我が国で本来有望視されるべき再生可能エネルギーとしては地熱発電がある。しかし、発電に活用できる大きな熱源の殆どが国立公園内に位置することから、その多くを有効活用出来ていないのが現状である。ところが近年、既存の温泉地から湧き出る70℃から150℃の温泉熱や工場廃熱等比較的低温な熱源を活用し発電できる「バイナリー発電」という小規模な発電が大きな注目を浴びており、現在では別府や草津等の有名温泉地でも活用され始めている。これは地域でのエネルギーの地産地消を小規模であっても実現できるシステムとして非常に有望であることを示しているが、活用出来るのが熱源のある場所に限定されていることが大きなデメリットでもある。

そこで、炭化物を燃料として約80℃の温水から「無圧式温水器」がメイン熱源を生み出し、約800℃～1000℃で炭化する製炭炉をサブ熱源として約80℃の温水をバイナリー発電に供給出来るシステムを構築出来れば、温泉熱や工場廃熱等の場所性に縛られない独自の「地域バイオマス炭化発電システム」を実現することができる。その事により、再生可能エネルギーを産み出すエネルギー源としてバイオ炭を継続的に活用出来るだけでなく、地域としてCO₂を削減し地球温暖化の抑制に貢献する事が可能となる。

そして、バイナリー発電機の発電サイズは約10kW

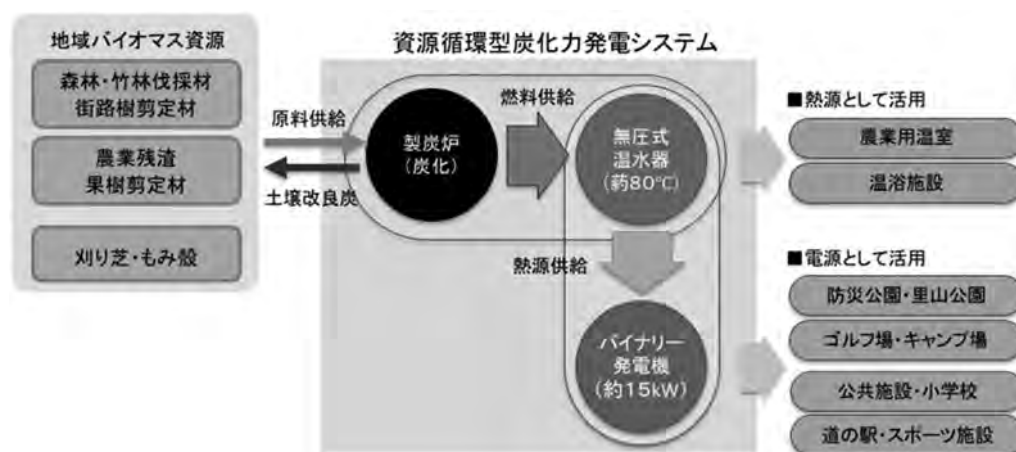
～40kWと比較的小規模ながら、天候に左右されず長時間発電することが可能である。このことから、地域にあるバイオマス資源を過剰に使って大量に発電しベース電源用として売電するのではなく、地域のオフグリッド電源として地域の公共・民間施設や公園や学校等で電源自給する事により地域における継続的な再生可能エネルギーシステムとして機能させる事が出来る。

実施に向けた課題としては二つあり、一つは地域によって活用する資源の種類が多彩である為、適切な製炭手法のバリエーションを把握する必要があること。もう一つは作られたバイオ炭の種類によって熱量や粒度の違いがあり燃料としての効率や熱交換のための最適な温水の流量を把握することが挙げられる（図—3）。

（1）平炉における炭化メカニズム及びその多様性

木炭や竹炭を作るために昔から用いられてきた一般的な土窯と平炉の製炭能力の大きな違いは二つある。その一つは、製炭時の温度とその製炭量。シンプルな構造的でありながら大きな違いを生む最大の要件は、プール式と呼ばれるオープンで大容量な製炭炉の形状そのものである。機械を使わず高い燃焼機が生み出す自然な強いドラフト力で約800℃にも達する製炭炉内の空気の流れを炉内全体に循環出来る所にある（図—4）。

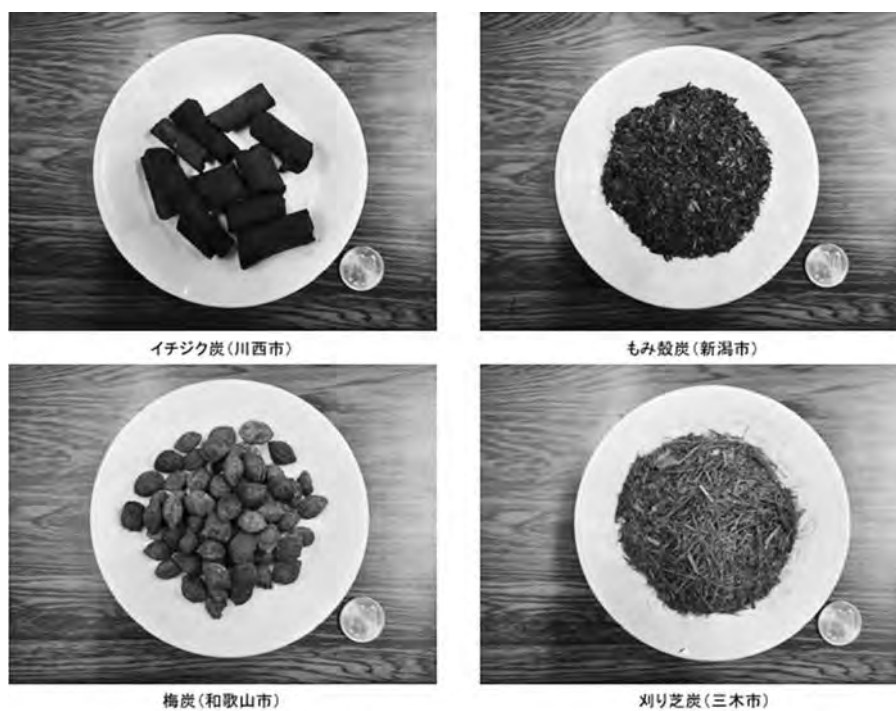
もう一つの大きな違いは炭化物の多様性。この平炉で製炭出来るバイオマス原料は木材や竹材は勿論のこと農業残渣や食品残渣といった非常に水分率の高いものまで炭化出来るという多彩さにある。また、ゴルフ場の刈り芝や米所のもみ殻などをも大量に炭化できる独自の製炭手法により、様々な地域での炭化による資源の有効活用が可能となる（図—5）。



図一 3 炭化力発電システム概要フロー



図ー4 製炭炉概要



図ー5 木炭・竹炭以外のさまざまなバイオ炭

(2) 平炉製炭の排熱を利用したバイナリー発電 実証試験概要 (図ー6～8)

バイナリー発電では、発電に必要な温水熱エネルギーをいかに効率的に熱交換器に伝えられるかが最も重要なポイントとなる。このため、いかに高い温水熱エネルギーを生み出せるかと、それを伝える仕組み及び発電機での循環手法を確立する為に今回の実証試験を行った。

今回の実証試験は、平炉製炭炉内に発電機及び温水

器を設置。

試験内容

- ① 温水器および燃焼機から生み出される温水温度及び流量等の測定
- ② 温水器および燃焼機の個々での発電量の変化及び推移測定
- ③ 温度差による発電量の変化及び推移
- ④ 温水器および燃焼機を連動させた場合の発電量の変化及び推移測定



試験機材概観(左から 発電機・貯湯槽・無圧式温水器)

図—6 実証試験概観

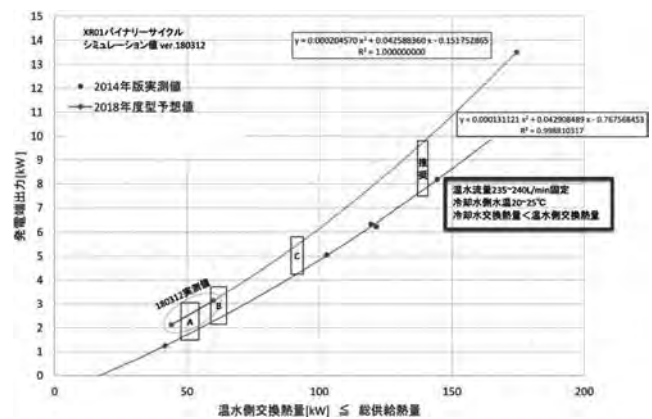


バイナリー発電機

図—7 実証試験用バイナリー発電機

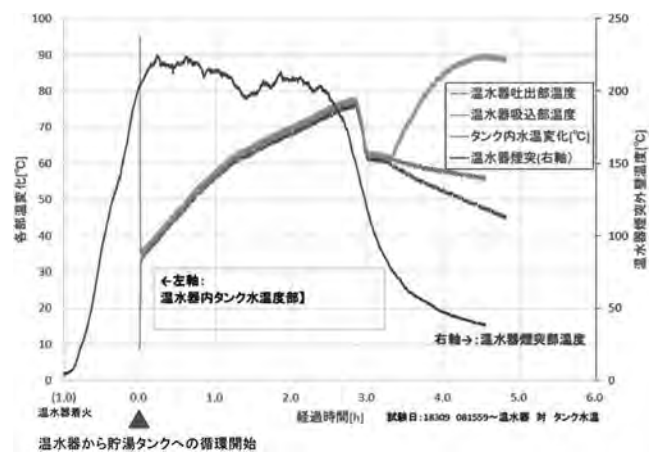
■事前の想定仕様 (図—9, 10)

基本的には約10～15 kWの発電を前提にしている。

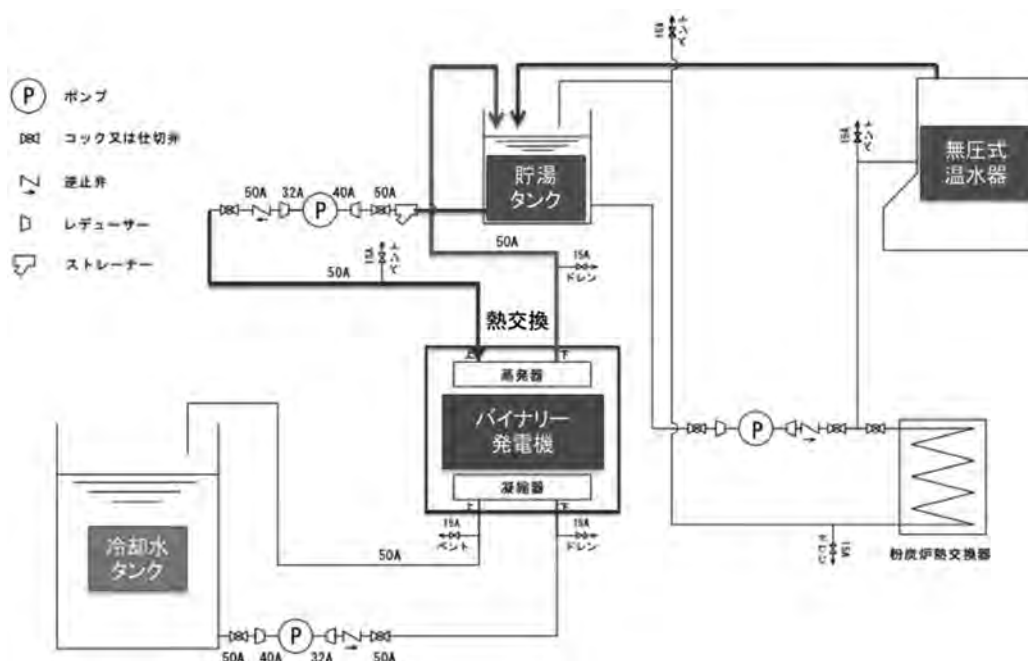


図—9 事前性能想定仕様

■初期の試験結果



図—10 循環温度試験 (3時間)



図—8 試験用温水・冷却水配管システム

表一 平炉製炭炉温水器試験中間結果

日時 単位	温水器出力 kW	水温上昇率 ℃/h	燃空温度 ℃	最高水温 ℃	タンク水温 ℃	流量 L	タンク水量 L	配管流れ	吸熱管燃料量	投入量
2018/4/4 12:26	31.335	32.859	231.7	78.00	78.40	280.85	-	上入下出		
2018/4/5 13:16	25.068	26.244	254.3	80.70	78.90	211.46	-	上入下出		
2018/3/7 17:28	24.892	23.140	237.9	83.40	81.10	274.59	567	上出下入		
※2 2018/4/26 13:15	23.535	32.020	199.9	80.60	79.00	140.13	300	上入下出	○	
2018/4/6 15:07	23.542	18.037	194.9	78.00	78.40	211.63	200	上入下出		
2018/4/5 11:32	22.291	26.244	225.6	70.60	69.10	213.11	-	上入下出		
2018/3/2 14:47	22.001	25.390	227.3	83.20	81.60	191.16	-	上出下入		
※2 2018/4/22 14:33	14.923	38.870	163.0	80.80	79.70	140.33	200	上入下出	○	
※2 2018/4/19 13:55	8.740	12.793	140.2	65.10	64.00	137.76	200	上入下出	○	
2018/2/18 0:00	保温なし	18.356	-	約60	約60	約200	400	上出下入		
	23.243	60	-	80			200	上入下出		
鳥根テスト推測	46.488	60		80			400	上入下出		
	65.697	60		80			567	上入下出		

※温水器出力 出力[kW]＝(温水器出口温度－タンク内水温)×4.184[kJ/kg]×流量[kg/min]/60(s)
 ※2温水器出力 吸熱管追加後は温水器 吸込み温度が不明。水の量からの算定。
 実温水加温ベースは温水器出力×0.6(放熱差)から推測

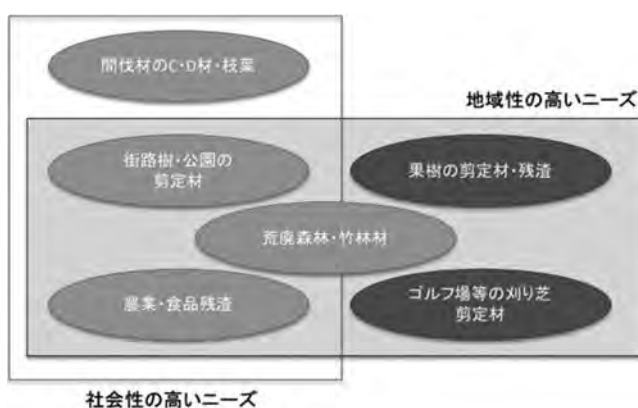
表一 1 の進行中実証試験の中間結果から、発電機側の熱エネルギーの必要量が当初の想定よりも大きい事が判明。現在は、温水器と発電機を繋ぐ配管システムの手直しや温水器の部分的な修正等を行った上で再度データ収集を行っている。その結果を集約し、発電に適した新たな熱エネルギー循環プログラムを構築し商品化を進める。

5. 今後の展開（複合炭化炉活用案）

(1) 未利用バイオマスが多く発生する地区を中心に設置する。

通常は炭化炉と熱源・電気の供給拠点として、災害時は非常用の熱源・電気の供給が出来る避難場所として活用する。

現在、火力発電所の燃料として脚光を浴びている「間伐材」は、未利用バイオマスのうちでも売買可能な非常に特殊な材であると言える。それぞれの地域には、平地にも存在する荒廃竹林や農業から発生する農業残渣や果樹の剪定材ばかりでなく、意外と見逃されている街路樹の剪定材も大量に発生するため、これらを含めた未利用のバイオマス資源を活用して地域で活かす



図一 11 未利用バイオマスニーズ

新しい取り組みとして、全てを炭化して有効利用する新たな循環システムを構築することは充分可能である(図一 11)。

「循環型炭化力発電システム」を開発することにより、地元の未利用バイオマス資源を活用した全く新しいエネルギーグリッドを実現させることが出来るため、一時的な問題への対処ではなく、年間や季節に起こる地域や企業が抱える問題に対して継続的に応える事が可能になる。

このため、何を炭化するのではなく、誰が炭化するのかというニーズからの視点でいくつかのターゲットを設定して、商品として分かりやすくするとともに企業や施設内での活用や地域のインフラ的な使い方が見込まれる。このケースでは、売電ではなく「企業」や「地域」が資源の自己循環運用するためオフグリッドでのインフラが前提となる。

- 都市公園… 園内の廃棄している剪定材・街路樹の剪定材の炭化・発電
全国に約 10 万箇所。大規模公園は約 200 箇所
- ゴルフ場… ゴルフ場の芝・剪定材の炭化・発電
全国に 2331 箇所 関西 410 箇所
- 大規模農場… 穀物や農業残渣の炭化とビニールハウスの空調・発電
3 ha 規模農園が全国に 4600 箇所

(2) これらを運用主体にした 2 種類の体系

地域循環を主旨とする「資源循環型炭化力発電システム」は売電を前提とするのではなく、エリアや利用主体を限定する「オフグリッド」で自らが活用することを前提としている。地元資源と生み出せるエネルギーの適切なバランスを生み出すことが出来、システムの継続的な活用が可能になる。

- (a) 企業や施設内でのインフラ 生産や運用上継続的に発生する未利用資源・残渣の活用
 代表的事例 「ゴルフ場」「大型農場・ワイナリー」「冷泉の温泉地」

企業や施設内で活用する場合は、ゴルフ場（刈り芝・剪定材）や大規模水耕栽培農場（農業残渣）、ワイナリー等の食品加工（食品残渣）を含めた小規模工場などから継続的に生まれる未利用資源を炭化し土壤改良や燃料炭としてだけでなくお湯や電気をオフグリッドでの活用を促進する。

特にゴルフ場の場合は、箇所数も多くほぼ同じような問題点を抱えているため、システムをパッケージ化して地域での数カ所の連携も含めた展開が可能であり、積極的なアプローチを考えている。

また、零細農業の減少に反して3ha以上の大規模果樹園農家が増大している現状において、大量に発生する農業残渣等をエネルギーとして活用するシステムへの興味は非常に高まっており、約4600件にもものほ大規模果樹園農家のニーズを整理し対応していきたい。

①ゴルフ場へのアプローチ 兵庫県

「ゴルフ場の芝や剪定材を資源化する」

兵庫県三木市

ゴルフ場が多くある三木市で問題になっていたのは場内の剪定材だけでなく年中大量に発生する「刈り芝」の処理である。三木商工会議所からの依頼で「刈り芝」を製炭炉で炭化させ、土壤改良炭としてゴルフ場で試験的に採用した。現在、発電と製炭品による全体の収益性や運用方法の具体化を進めている（図-12）。



図-12 平成29年1月25日 神戸新聞掲載記事

②地域農場へのアプローチ 兵庫県

「地元イチジクを炭化し地元産品化する」

兵庫県川西市

イチジクの産地で知られる川西市では、イチジク剪定材の野焼き問題を解決するため、約2年前から農家から剪定材の供給を受け、製炭作業をサポートしている。製炭したイチジク炭は、農家の土壤改良炭としての活用だけでなく川西市の特産品としての取り扱いとなる予定。昨年から、黒川地区にある市営のキャンプ場でBBQ炭としての利用が始まったことから、この地区への製炭炉の誘致プロジェクトがスタート。現在用地の選定を行っており決まり次第製炭炉建設に着手しキャンプ場での電気と温水の自活を行う（図-13）。



図-13 平成28年6月7日 読売新聞掲載記事・イチジク剪定枝写真

- (b) 地域のインフラ 地場産品の剪定材や残渣等や公園・街路樹の剪定材の有効利用

代表的事例 「公営の里山公園・キャンプ場」「広域の大型都市・防災公園」

現在進行中の川西市のプロジェクト同様に他地域のインフラとして活用する場合には、地元特産品農園から出る農業残渣を活用する事へのニーズに応える事が重要である。例えば川西市のイチジク農園や富山市の梨、和歌山県の梅のタネや柿の皮等。地元資源を熱エネルギーに変えて役所や小学校等の公共施設の電気として活用して受益者を地域住民全体に均質化する。

特に地域の防災公園や自然公園内公共施設等での活用において日常時の公園管理だけでなく、非常時における非常電源や災害用備蓄炭等有大きなメリットを想定している。

また、ほぼ全てのシステムを「無動力」で利用するため、中山間地や海外での活用も視野に展開する仕組みを構築できればと考えている。

①都市公園へのアプローチ 大阪府

大阪府内の都市公園内での熱エネルギー活用は植物



図ー14 大阪府における都市公園候補事例

温室や各施設での給湯等多岐に渡る。また、毎日の使用電力も管理棟の他各施設や広い園内の街路灯等運営経費としても非常に大きな負担ともなっている。このため、園内に年間大量に集積され廃棄されている府道の街路樹の伐採・剪定材等を製炭し再生可能エネルギーとして施設内での有効利用を可能にすることで、化石燃料に依存するエネルギーへの負担を軽減し自己循環比率を高め地球温暖化抑制にも貢献出来る為、複数の都市公園における活用プロジェクトを推進中である（図ー14）。

- 使途 1. 電気エネルギー 管理棟・街路灯等 現在購入している電気量を軽減する。
- 使途 2. 熱エネルギー 植物園・競技場・プール等 現在使用中の化石燃料ボイラーと無圧式粉炭温水器を貯湯槽で連動させ効率的に活用し燃料経費を削減する。
- 使途 3. 防災用エネルギー 各施設 防災時の非常用電源としての活用とお風呂等の防災用給湯設備としての活用を想定している。

6. おわりに

現在、我が国においては FIT 制度を活用し、海外からのバイオマス資源（パーム油・木材チップ等）の輸入を想定した大型発電計画が数多く計画されている。しかしながら、材料の継続的な入手の困難性と産出国の環境悪化も懸念されている。また、エネルギーをかけ発電するためのバイオマス資源を運搬する事も

多くの矛盾が考えられる。

本稿で紹介した平炉炭化装置は発電能力としては 20 kW 以下の小型のものであるが、バイオマス発生地域のオンサイトで設置が出来、小規模であるが、その地区独自のオフグリッドな電気を活用できるシステムである。活用地区も森林近傍、大型公園、大規模圃場、大規模農園、ゴルフ場・・・設置可能場所也多岐にわたる。COP21 で 2100 年地球の温度上昇を 2 度未満に抑えるために、各国政府は 2030 年の CO₂ の削減目標値を決定し、活動し始めている。そのような中で民間の我々が貢献できることは日々の省エネへの努力と本稿で書いたような小型であるがオンサイトで活用できる技術の開発が有効であると考えている。本稿が地球温暖化防止の一助になれば幸甚である。

J C M A

【筆者紹介】

村上 誠（むらかみ まこと）
NPO 法人 新エネ研究会東日本
理事長



島田 勇巳（しまだ はやみ）
NPO 法人 新エネ研究会東日本、
侑紋珠、
高槻バイオマス粉炭研究所 所長

