

ゼロエミッションのための未利用植物バイオマスの資源化

迫田章義¹⁾、望月和博¹⁾、安部郁夫²⁾、片山葉子³⁾、川井秀一⁴⁾、沢田達郎⁵⁾、
棚田成紀⁶⁾、中崎清彦⁷⁾、中村嘉利⁵⁾、藤田晋輔⁸⁾、船岡正光⁹⁾、三浦正勝¹⁰⁾
吉田 孝¹¹⁾

摘 要

現在、循環型社会に移行することの重要性が大きく叫ばれている。しかしながら、有限な化石資源を基盤とする限りは原理的に完全循環型の社会は不可能であり、これを実現するためには早晩、再生可能資源(植物などの生物体=バイオマス)を基盤とする社会経済システムに転換しなければならない。すなわち、使い捨ての石油化学物質を提供する社会から、再生可能な物質を介して機能を提供する社会への移行が必須である。今まさに石油精製(Oil Refinery)基盤からバイオマス精製(Biomass Refinery)基盤への転換によって、再生可能な物質資源であるバイオマスから得られる工業原材料から製造される「バイオマス起源製品」による機能代替の可能性を明確な形で切り拓いておく必要がある。このことを視野にいれて、文部科学省科学研究費補助金特定領域研究(平成9年度~12年度)「ゼロエミッションをめざした物質循環プロセスの構築」には植物バイオマスワーキンググループが設けられ、各種の資源化技術を研究開発すると共に、それぞれの資源化技術のゼロエミッション技術としての位置付けを検討・整理した。

キーワード:ゼロエミッション、バイオマス、物質変換

1 緒言

穀物、野菜、樹木などの植物バイオマスは、食用、建材、製紙をはじめ様々な目的で生産・利用されているが、農林業生産地における残材、加工過程での絞り粕、用途を終えた製品等が未利用植物バイオマスとして大量に排出されている(図1)。これらの一部は、従来より肥料・飼料、薪や木炭、再生紙の原料などとして活用されてきているが、その需要には限りがあることや高度な有効利用法がないために廃棄処分されているものも多い。近年、人間活動からの環境への排出を可能な限りゼロに近づけ、かつ生産活動を持続可能とするために、業種を越えた産業ネットワークによる物質循

環を実現しようとする「ゼロエミッション」¹⁻³⁾の試みが活発に行われているが、未利用植物バイオマスの資源化はゼロエミッションネットワークの要となる場合が多い。

植物バイオマスの化学組成は図2のように大別できる。リグノセルロースと呼ばれる植物バイオマスの主成分はホロセルロースとリグニンに分けられ、ホロセルロースはさらにセルロースとヘミセルロースに分けることができる。セルロースはグルコースを基本単位とする多糖類で、通常は水・酸・アルカリに不溶である。ヘミセルロースとは植物細胞壁中でセルロースと結合して存在する多糖類の総称であるが、細胞壁成分中のセルロースとペクチン質を除いた水不溶・アルカリ可

2000年9月18日受付、2001年6月22日受理

- 1) 東京大学生産技術研究所 〒106-8558 東京都港区六本木7-22-1
- 2) 大阪市立工業研究所 〒536-8553 大阪市城東区森之宮1-6-50
- 3) 東京農工大学農学部 〒183-8509 東京都府中市幸町3-5-8
- 4) 京都大学木質科学研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄
- 5) 金沢大学工学部 〒920-8667 石川県金沢市小立野2-40-20
- 6) 近畿大学薬学部 〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1
- 7) 静岡大学工学部 〒432 静岡県浜松市城北3-5-1
- 8) 鹿児島大学農学部 〒890-0065 鹿児島市郡元1-21-24
- 9) 三重大学生物資源学部 〒514-8507 三重県津市上浜町1515
- 10) 北海道工業技術研究所

11) 北見工業大学工学部 〒090-8507 北見市公園町 165

溶性多糖類を指すことが多く、ホモ多糖類、ヘテロ多糖類、酸性多糖類の複雑な混合物と考えられる。図2には例としてキシランを示したが、このような単純な構造をもつ化合物を代表物質と考えることは難しい。一方、リグニンフェニルプロパンを単位とする分子量が事実上無限大の三次元網目構造をもつ高分子化合物である。これらは、細胞膜を構成する成分ならびに細胞同士を結合する部分を構成する成分で、植物体の形成に直接関与する物質である。その他、脂質、タンパク質、テルペンなどの有機物および灰分が含まれているのが一般的であり、タンパク質が豊富に残存しているオカラや多量のシリカを含む粕殻のように、特徴的な成分を多く含むものもある。

ここでは、文部省科学研究費特定領域研究(292)「ゼロエミッションをめざした物質循環プロセスの構築」の領域内に設置された植物バイオマスワーキンググループが研究開発した資源化技術について、それらの概要を整理すると共に、古来よりの伝統技術である生物処理による資源化(コンポスト化、メタン発酵、キノコ栽培など)との比較も含めて、各種資源化技術のゼロエミッション技術としての位置付けを検討した。

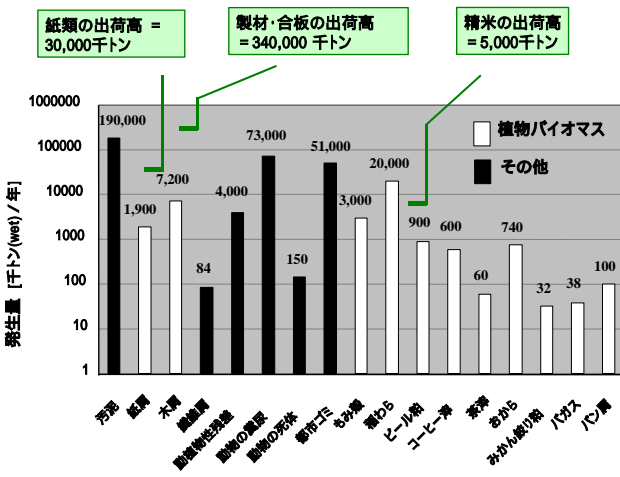


図1 我国の未利用物質の年間排出量

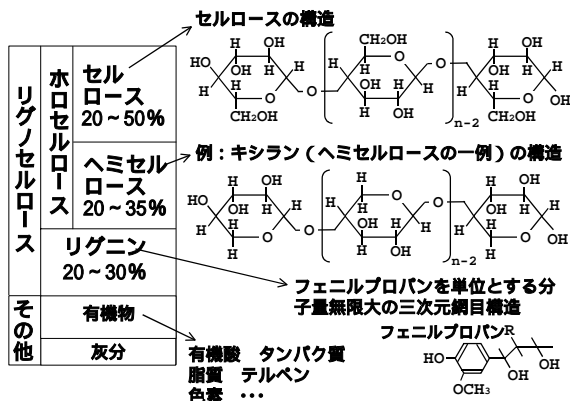


図2 植物バイオマスの基本化学組成

2 工業原材料への変換

2.1 機械的加工

木材は木材として直接建材等として再利用することが可能である。また、チップ、合板、複合繊維板などの木質ボードなど、高機能・高付加価値製品の製造も試みられている。

川井らは、竹⁴⁾、アブラヤシ、アシ^{5、6)}、雑草⁷⁾などの未利用植物繊維、解体材⁸⁾、農産廃棄物のバガス⁹⁾、小麦茎ワラ^{5、6)}を再資源化し、木質建材に変換するための開発研究を行っている。例えば、単板廃材ストランドを表層に配向させ、コアに解体材パーティクルを用いた三層パーティクルボードを製造し、フェイス/コア構成比や接着剤の種類および添加量の材質に及ぼす影響を詳細に検討して、三層パーティクルボードが合板代替の構造用パネルとして使用しうる優れた材質をもつことを明らかにしている。また、アシや小麦茎ワラパーティクルボードはシリカや抽出成分を多く含有し、これらがそれぞれアミノ系樹脂接着剤の硬化阻害を招くことを明らかにし、それぞれのボードの製造にシランカップリング剤の添加や抽出処理が有効であることを見いだしている。さらに、アシや小麦茎ファイバーボードの解繊工程が硬化阻害成分の除去に有効であることを示して最適解繊条件を明らかにしつつある。

無機接着剤を用いた木片セメントボードの製造工程では、竹・バガス・アブラヤシ等の植物繊維はヘミセルロースを多く含有するため、アルカリ溶解成分によってセメントの硬化が阻害されることが知られている。硬化促進のための促進剤の添加や蒸気噴射プレスによるマットの成形技術、ならびに高圧二酸化炭素による硬化養生技術について検討し、従来の製品の数倍の性能をもつ木片セメントボードを数1/100の短時間で製造する迅速硬化プロセスを開発しつつある。

2.2 炭化

上述の成型資材としての活用は化学物質過敏症などの原因として考えられるバインダーの選択が難題として横たわっている。そこで、藤田らは植物バイオマスを炭化物に変換することによる活用を試みている¹⁰⁾。この試みは、まず植物バイオマスをメタン発酵させることによりメタンガスを取り出し、その後の残さを400~800の温度で炭化することによって、建築資材、調湿資材、浄化資材、土壌改良資材等として活用しようとするものである。つまり、動物もしくは植物性のタンパク質を基本とした天然性バインダー(セルコラーズ®)を利用して植物バイオマスの炭化物を成型体にして活用する研究開発を行っている。このシステムは、図3に示すように製造過程に発生する廃棄物、製品として市場に提供されたあとのリユースも考慮に入れた製品設計がとられている。炭化物は調湿、断熱、吸音、電磁波遮蔽、化学物質吸着等の性能を所有しているために^{11、12)}、

建築資材としての活用は大きな期待が持たれ、起業化され、市販される日も近いと思われる。また、この炭化物成型製造法を基本とした今後の用途として農業用資材、浄化資材、輸送資材等への応用展開も期待されている。特に化学処理（例えば防汚処理等）が行われている廃木材は、単純に炭化することによる土壌改良資材、建築資材としての活用は困難である。したがって、化学的処理を行った廃木材の活用は今後解決しなければならない課題も多く、炭化物と言えどもリサイクル、ゼロエミッション構想を取り込んだ製品設計は、最終的に廃棄されることを念頭に置かなければならない。

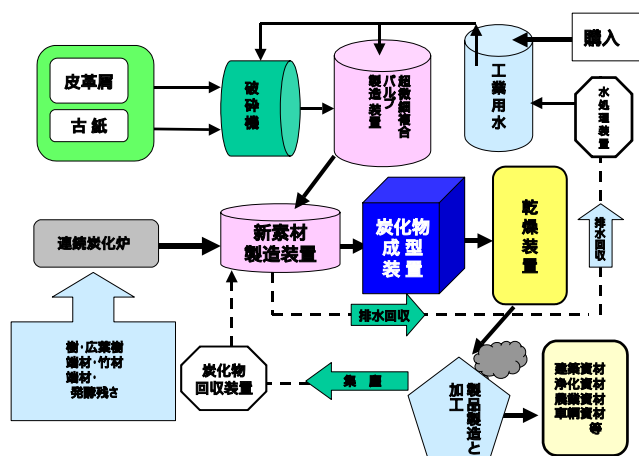


図3 炭化物を絡めた炭素循環

また、棚田・安部らも同様の試みを行っている。すなわち、植物バイオマスから種々の炭化条件で炭素材料を製造し、ゴムのカーボンブラック代替剤¹³⁾ならびに高機能性複合材料として利用するというプロセスを便宜的に次の3過程に分類して研究開発を行っている。

(i)炭化：バイオマス未利用物質の質および量を明らかにした上で炭素材料の製造を行う。この際にエクセルギー、収率、物性、二酸化炭素の収支などの評価も行う。

(ii)炭素利用：製造した炭素材料をゴム、プラスチック、繊維、コンクリートなどの高機能化剤として利用する。

(iii)炭素循環：高機能性複合材料が不要になった後に、再び炭化することにより炭素循環を行わせる。

まず、炭化過程においては、食品系未利用物質（コーヒー豆のかす、焼酎蒸留残渣、綿実ハルブラン、おからなど）、農業系未利用物質（籾殻）、木質系未利用物質（おがくず）、繊維系未利用物質（綿）から様々な炭化条件により物理的性質の大きく異なる炭素材料を製造できる。また、炭素利用過程においては、炭素材料をゴムへ添加し特徴ある複合材料の製造を試みている。一方、綿および綿実ハルブランを炭化した炭素材料は有害有機性物質除去用吸着剤として有効であることを見出ししている¹⁴⁾。さらに、炭素循環過程において副産物由来炭素材料を添加したゴム

を再び炭素材料として循環使用する場合の炭素収率などを現在検討している。

2.3 物理化学反応

図2に示しているように植物バイオマスの主成分はセルロース、ヘミセルロースおよびリグニンであり、これらを物理化学的に変換・分離することで、工業原料として利用することが可能である。一般に炭水化物であるセルロースおよびヘミセルロースの加水分解ではキシロースやグルコースなどの糖類が得られる。糖類はアルコール発酵や乳酸発酵の基質として利用でき、エタノール（バイオ燃料）や乳酸（生分解性プラスチックの原料）に変換されるほか、キシロースからは食品添加物として注目を集めているキシリトールが生産できる¹⁵⁾。さらに、二次分解（糖の分子内脱水）生成物であるフルフラール類は合成繊維や合成樹脂をはじめ、多種多様な生物化学製品の原料として利用でき、大部分の石油化学製品を代替することが理論上可能であるといわれている。また、セルロースは、セルロースアセテート、セルロース-キトサン混合素材¹⁶⁾、高衝撃緩衝性セルロース系梱包材¹⁷⁾などの高機能セルロース関連製品の製造に利用されている。一方、リグニンは部分的な分解を受けて低分子化されることで、溶媒抽出などの操作による分離が容易になる。分離されたリグニンは粘結・造粒剤や燃料として利用されるほか、最近では、分散剤やキレート剤、あるいは選択的構造制御によりフェノール系リニア型リグニン素材を誘導、循環型合成樹脂の原料、酵素機能制御素材、生分解性リサイクル複合体として高度な機能的利用が期待されている¹⁸⁾。

吉田、三浦らは、寒冷地森林資源の高度有効利用を目的にマイクロ波急速熱分解法により木材からレボグルコサン、高品位炭化物、新木酢液へと変換するプロセスを開発している¹⁹⁾。タール中に含まれるレボグルコサンはカチオン開環重合法によって高分子量多糖へと導くことが可能であり、生体機能性材料、石油代替ポリマー原料として期待されている。不要になったタールは土に戻せば、土壌の改良、延いては砂漠緑化にも貢献できると考えられる。さらに、焼畑等に見られるように木材を燃焼させれば、固定された炭素を二酸化炭素として放出することになり地球温暖化の一因となるが、マイクロ波急速熱分解法では、得られる炭化物に木材中の炭素の約60%（炭素元素分析値を80%として）を固定化することができ、一般の炭焼きから得られる木炭の炭素固定化率約45%と比べても効率がよい。木材のマイクロ波急速熱分解法は、炭素の滞留時間延長、物質の出入りが明確、生成物を次の工業原料として利用、エミッションが少ないという大きな特徴を持っている。ある程度の電力を必要とするが社会情勢の変化によってコスト的な問題も解決されると期待できる。

沢田らは、林産資源を例に水蒸気爆砕によって木質物質から分離されたセルロース、ヘミセルロース、

メタノール可溶性リグニン、Klason リグニンなどをそれぞれに適合した製品に変換する技術を、効率・コスト・環境付加の面から究明している。水蒸気爆砕は木質物質中の構成成分の分離と低分子化のための効果的な前処理操作である。セルロースからはアルコールやメタンなどの可燃性物質やパルプ、ヘミセルロースからはキシロースやキシロオリゴ糖などの機能性食品、メタノール可溶性リグニンからは天然素材樹脂、Klason リグニンからは活性炭や土壌改良剤などが製造される²⁰⁾。図4は爆砕木材から抽出分離されたメタノール可溶性リグニンからのリグニン樹脂の製造方法を示す。メタノール可溶性リグニンは比較的均一な分子量をもち、反応性の高いフェノール性水酸基を多く含むので、種々の樹脂化に適した素材といえる。メタノール可溶性リグニンから合成されたエポキシ化リグニンは内分泌攪乱物質と言われるビスフェノール A 成分を骨格に含まず、市販のビスフェノール A ジグリシジルエーテルよりも熱硬化性に優れていることから、生態系に優しい高機能性樹脂として期待される²¹⁾。

図4 メタノール可溶性リグニンの樹脂化

船岡らはリグノセルロース系複合体を植物系分子素材工業へと誘導する要素技術として、新たに相分離系変換システムを提案している^{18、22、23)}。このシステムのキーポイントは、植物体構成炭水化物およびリグニンに対し、それぞれ相互に混合しない別の溶媒系を設定し、常温、開放系にて異なる相で個々に精密構造変換することにある。本法によって、細胞壁 IPN 構造が完全に解放されるため、素材の変換・分離は定量的であり、樹種特性は認められない。相分離系を形成させることによって、天然リグニンは選択的にベンジルアリールエーテルの解裂を受け、直鎖状サブユニットへと解放されると同時に、各構成単位は 1,1-ビス(アリール)プロパン型構造へと変換され(リグノフェノールの誘導) これによって構造、反応性の均一化が達成される(図5)。リグノフェノールは従来のリグニン試料と全く異なる特性を有する素材であり、さらに、分子内に高頻度で存在する 1,1-ビス(アリール)プロパン-2-0-アリールエーテル構造ユニットを機能変換素子として活用し、その特性(分子量、フェノール活性など)を任意に制御することも可能である。したがって、リグノセルロース系複合体(バージンおよび製品変換体)を相分離系変換システムにかけることによって、分離した炭水化物区分の変換利用とともに、構造の不規則性から従来その高度活用が困難であったリグニン区分をも、循環型高分子合成原料、酵素機能制御素材、リサイクル複合素材などとして、カスケード型に長期循環活用することが可能となり、リグノセルロース資源の分子素材レベルにおけるゼロエミッション型完全循環活用が達成されると期待される。

迫田らは、種々の未利用植物バイオマス(木くず、もみ殻、ビール粕など)に触媒非共存下で高温高圧水処理を行い、工業原料となる化学物質に変換するプロセスの開発を行っている^{2、24)}。

高温高压水処理ではセルロースやヘミセルロースからは加水分解により多糖類・単糖類が生成し、さらに糖類の二次分解でフルフラール類や有機酸が生成する。また、リグニンの一部は低分子化され可溶性リグニンとなる(図6)。これらの反応が生じる温度領域はそれぞれ異なっており、例えば、ヘミセルロースの加水分解は 200~220、セルロースは 250~280 付近が適することが見出されており、反応温度を制御し、適宜分離操作を組み込むことで原料となる植物バイオマスの大半を有価物に変換・回収することが可能であると期待される。さらに詳細な速度論的検討^{25、26、27}を進めると同時に、大量処理を念頭においた連続装置の開発や前処理としての蒸煮爆砕法の導入に関する研究を並行して行っている。

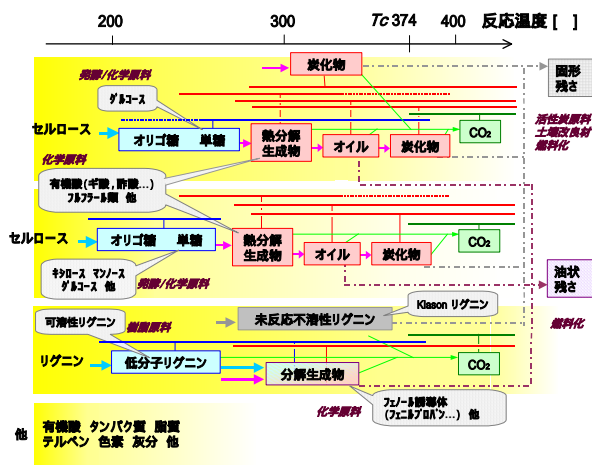


図6 高温高压水によるリグノセルロースの工業原料化

2.4 生物反応

中崎らは、汚泥から生分解性プラスチックの原料である L-乳酸を生成することによって、汚泥をプラスチック工業の原料に変換する技術の開発を行っている(図7)。汚泥の中でも製紙工業の排水処理過程で発生する汚泥は有機物の含有量が多く、加水分解によってグルコースに変換可能な多糖類を高濃度を含んでいる。製紙汚泥はそのままの状態では乳酸菌を作用させても乳酸を生成しないが、適正な方法で加水分解し、糖化することによって乳酸の生成が可能となる²⁸。汚泥中多糖類をセルラーゼで糖化するときには、糖化の結果生ずるグルコースがセルラーゼ活性そのものを阻害する生成物阻害を避けるために、糖化と発酵が同時に同一の容器内でおこなわれる同時糖化発酵の適用が有効である。セルラーゼ活性と乳酸菌 LA1 株による L-乳酸生成活性のための最適 pH と温度は一致しないが、両者の活性を同時に高く維持する pH は 5.0 付近の比較的狭い範囲にあり、温度では 35~40 にあることを明らかにして、同時糖化発酵によって製紙汚泥から 9.77g/L の L-乳酸を生成できることを確かめている²⁹。さらに高濃度の乳酸を生成するために、汚泥中に含まれる多糖類の効率的な加水分解と乳酸生成プロセスを改善することの検討に

加えて、乳酸の精製、重合を含めたポリ乳酸製造のための詳細なコスト試算にとりかかっている。

片山は、古紙の再利用を念頭に、食品加工業の工程から出される、雑多な成分を高濃度に含むバイオマスを利用したセルロース合成を試みている。酢酸菌をはじめとする一部のバクテリアには、リグニンやヘミセルロース等を含まないほぼ純粋のセルロース繊維を、細胞外に伸長させながら生育するものが知られている³⁰。このバクテリアセルロースは多くの優れた性質を有し、それを利用した音響振動板などはすでに実用化されている³¹。セルロース合成のためには糖質を豊富に含む廃糖蜜などが利用されてきたが、経費や供給量の変動などに問題があった。セルロース合成を広めるためには、バクテリアが利用できしかも安価な原料を用いることが重要である。バクテリアセルロースは劣化が著しい古紙の紙質改良にも有効であることから³²、原料の選択によっては未利用バイオマスの有効利用と同時に、紙製品の再資源化にも資するところが大きいと期待される。既に、イースト加水分解物やタンパク質分解物などが高濃度に含まれる条件下で酢酸菌培養を行い、良好なセルロース合成を見出している。また、多糖類、タンパク質さらに脂質も豊富に含む豆腐製造排水の場合でもセルロース合成は起こり、大豆加工工程からの排水の利用が可能であることも見出している。

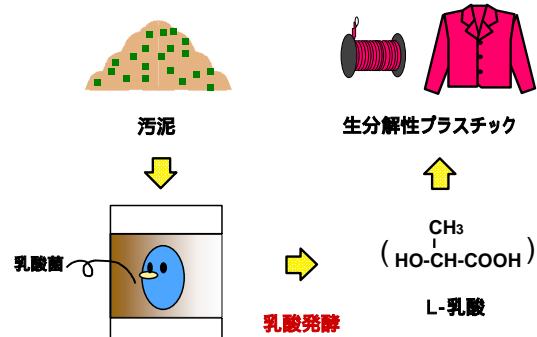


図7 製紙汚泥の同時糖化発酵による乳酸の製造

3. ゼロエミッション技術としての位置付け

これまでに述べた植物バイオマス資源化技術を伝統的な生物変換も含めて図8に整理した。未利用物質として環境中に排出される植物バイオマスは、たまたま寸法・形などが建材等との利用に不向き・不都合であるが材料としては木材そのものであるもの(間伐材、端材、残材など)から、いわゆる食品関連産業廃棄物(絞り粕、汚泥など)まで様々な形状のものがある。それらの厳密な階層化は困難であるが、より自然界の草木に近いもの、加工の手が加わっていないものを上位と考え、植物体の原形をとどめないもの、加工残さなどを下位と考えても差支え

ないであろう。図 8 の左側に示したように自然界でおこる微生物による分解作用は、上位を下位に変換する作用であり、最終的に炭素はメタンや二酸化炭素となって大気中に排出され地球規模の炭素循環に戻る。伝統的な生物反応による資源化（堆肥、バイオガスなど）は、この自然現象を人間の管理化、制御下で行わせるものと言えよう。

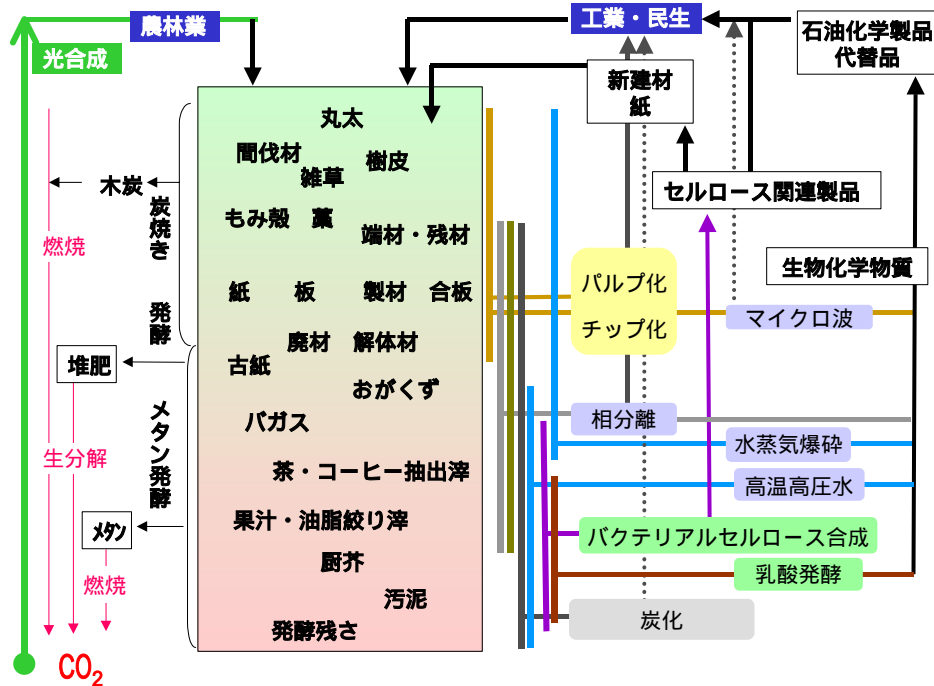
これらに対してゼロエミッションのための資源化技術は図 8 の右側に示したように、未利用バイオマスの階層レベルに適した技術によって再び工業・民生等で利用することのできる有価物に変換する技術と言える。さらに、一旦、各種の産業で利用されたそれら有価物が再び未利用物質群に戻り、これを再度、別の技術で別の有価物に変換することによる繰返し利用も可能となろう。このことは、地球規模よりもはるかに小さい時定数および空間スケールでの循環が可能となることを意味する。これらの物質変換には外部からのエネルギーの投入が必要であるが、バイオマスの一部や変換残さなどを燃焼させることにより（部分燃焼の考え方）自給できる場合が多いであろう。

ここで紹介した新しい資源化技術の多くは、低密度に分散したバイオマスの収集、適切な前処理等までも考慮した全体としてのエネルギー収支やコスト計算など多くを今後の課題として残している。しかしながらこれらは、究極のゼロエミッションである完全循環型社会を創生するために、物質資源を石油からバイオマスに転換（Replace）しようとする、いわゆるバイオマスリファイナリー構想³³⁾の基盤技術の一部となる可能性は高いように思われる。

図 8

文 献

- 1) 鈴木基之（1999）ゼロエミッションが求める工業社会、化学工学、63(2)、69-75
- 2) 迫田章義、鈴木基之（2000）ゼロエミッション - サステナブルコミュニティのための物質循環プロセス -、生産研究、52(3)、132-135
- 3) 迫田章義、羽野忠、吉田弘之、藤江幸一、鈴木基之（2000）ゼロエミッションをめざした物質循環プロセスの構築、用水と廃水、42(4)、333-339
- 4) 張敏、川井秀一、スレイマン・ユスフ、今村祐嗣、佐々木光（1997）リグノセルロース系原料を用いた木質ボードの製造とその性質（第3報）竹パーティクルボードの性質と蒸気噴射プレスによる寸法安定性の改善、木材学会誌、43（4）318-326
- 5) Han, G., Zhang, C., Zhang, D., Umemura, K., Kawai, S. (1998) Upgrading of Urea Formaldehyde-bonded Reed and Wheat Straw Particleboards Using Silane Coupling Agents, *J. Wood Science*, 44(4), 282-286
- 6) Hang, G., Umemura, K., Kawai, S., Kajita, H. (1999) Improvement Mechanism of Bondability in UF-bonded Reed and Wheat Straw Boards by Silane Coupling Agent and Extraction Treatments, *J. Wood Science*, 45 (4), 299-305



- 7) 張敏、川井秀一、中路誠、仲井慶(1998)河川敷きに自生する草本植物を原料に用いたパーティクルボードの製造とその性質、木材学会誌、44(4)、255-261
- 8) 村上幸一、上田実、松田英明、張敏、川崎珠美、川井秀一(1999)合板表層用単板廢材ストランドを表層に配向させた三層パーティクルボードの製造と性質(第1報)フェイス/コア構成比、接着剤の種類および添加量の影響、木材学会誌、45(5)、395-402
- 9) 張敏、川井秀一、楊萍、本田貴久(1997)リグノセルロース系原料を用いた木質ボードの製造とその性質(第2報)高性能バガス複合ボードの製造と有限要素法による弾性応力解析、木材学会誌、43(4)、310-317
- 10) 前村記代、藤田晋輔、寺床勝也 他(2000)第50回日本木材学会大会(京都)研究発表要旨集、559
- 11) 藤田晋輔(1997)日本住宅・木材技術センター編、木炭を生かす、76
- 12) 石原茂久(1996)木質系炭素材料開発の新しい展開、木材学会誌、42(8)717-723.
- 13) Abe, I., N. Kawasaki, T. Nakamura, T. Kondo, S. Tanada (2000) Study of Production of Rubber with Carbon Materials Produced from Organic By-products, *Environ. Sci.*, 13(2), 235-238.
- 14) Abe, I., T. Tabuchi, O. Shinohara, S. Iwasaki, N. Kawasaki, S. Tanada (2001) Removal of Endocrine Disruptors by Carbonaceous Materials Produced from Cottonseed Shell as Organic By-products., *Environ. Sci.*, in contribution.
- 15) Leathers, T. D., B. S. Dien (2000) Xylitol production from corn fiber hydrolysis by a two-stage fermentation process, *Process Biochemistry*, 35, 765-769
- 16) 細川純・西山昌史(1999)天然高分子の材料化. 高分子、39(4)、276-279.
- 17) Noguchi, T., M. Miyashita, J. Seto, M. Tan, M. Kawano (1997) Development of moulded pulp materials for the packing of electronic equipment. *Packing Technology and Science*, 10, 161-168.
- 18) 船岡正光(1999)機能可変型リグニン系ポリマー. 高分子加工、48(2)、66-73.
- 19) M. Miura, H. Kaga, S. Tanaka, K. Takahashi, K. Ando (2000) Rapid microwave pyrolysis of wood, *J. Chem. Engn. Japan*, 33, 299 - 302
- 20) 沢田達郎、中村嘉利、折笠仁志、大永 誠、井上英一(1997)汚染物の無発生を目指した稲わらの前処理と構成成分の有用資源化、環境科学会誌、10(4)、313-322
- 21) 中村嘉利、沢田達郎、中本義章(1998)爆砕リグニンからの樹脂の合成に関する基礎的研究. ネットワークポリマー、19(3)、26-33.
- 22) 船岡正光(1997)天然リグニンからのポリマー合成、高分子加工、46、122-130
- 23) Funaoka, M. (1998) A new type of phenolic lignin-based network polymer with the structure-variable function composed of 1,1-diarylpropane units, *Polymer International*, 47, 277-290
- 24) 望月和博(2000)高温高压水処理による植物バイオマス系未利用素材の有価物化. 分離技術、30(2)、136-140.
- 25) Mochidzuki, K. A. Sakoda, M. Suzuki (2000) Measurement of the hydrothermal reaction rate of cellulose using novel liquid-phase thermogravimetry, *Thermochemica Acta*, 348, 69-76.
- 26) Lu, Xiuyang, A. Sakoda, and M. Suzuki (2000) Decomposition of Cellulose by Continuous Near-critical Water Reactions, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 8(4): 321-325
- 27) Mochidzuki, K. A. Sakoda, M. Suzuki (2001) Liquid-phase thermogravimetric measurement of the conversion of biomass wastes in pressurized hot water: A kinetic study, *Advances in Environmental Research*, in press.
- 28) Nakasaki, K., N. Akakura, T. Adachi and T. Akiyama (1999) Use of wastewater sludge as a raw material for production of L-lactic acid. *Environ. Sci. Technol.*, 33, 198-200.
- 29) 中崎清彦、安達友彦(2000)ゼロエミッションのための汚泥の工業原料化技術、環境科学会誌、13(5)、570-578
- 30) P. Ross, R. Meyer, and M. Benziman (1991). Cellulose biosynthesis and function in bacteria. *Microbiol. Rev.* 55, 35-58.
- 31) 吉永文弘、外内尚人、渡部乙比古(1997). バクテリアセルロース研究の新展開化学と生物、35、772-779.
- 32) S. Yamanaka, K. Watanabe, N. Kitamura, M. Iguchi, S. Mitsuhashi, Y. Nishi, and M. Uryu (1989). The structure and mechanical properties of sheets prepared from bacterial cellulose. *J. Mater. Sci.*, 24, 3141-3145.
- 33) 迫田章義(2001)バイオマスを基盤とする完全循環型社会をめざして、第16回環境工学連合講演会講演論文集、75-80

Material Conversion of Unutilized Plant Biomass for Zero Emissions

Akiyoshi SAKODA (Institute of Industrial Science, University of Tokyo)
Kazuhiro MOCHIDZUKI (Institute of Industrial Science, University of Tokyo)
Ikuo ABE (Osaka Municipal Technical Research Institute)
Yoko KATAYAMA (Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology)
Syuichi KAWAI (Wood Research Institute, Kyoto University)
Tatsuro SAWADA (Faculty of Engineering, Kanazawa University)
Seiki TANADA (School of Pharmaceutical Sciences, Kinki University)
Kiyohiko NAKASAKI (Faculty of Engineering, Shizuoka University)
Yoshitoshi NAKAMURA (Faculty of Engineering, Kanazawa University)
Shinsuke FUJITA (Faculty of Agriculture, Kagoshima University)
Masamitsu FUNAOKA (Faculty of Bioresources, Mie University)
Masakatsu MIURA (National Industrial Research Institute of Hokkaido)
Takashi YOSHIDA (Faculty of Engineering, Kitami Institute of Technology)

Abstract

Biomass is renewable resources for material and energy, which can really achieve sustainable societies. The amount of carbon contained in biomass annually unutilized and emitted into environment in Japan is about 30-40% of carbon consumed to produce a variety of petrochemicals from oil. Also, biobased products can be reused and/or recycled easily as compared to oil-basis plastics. These facts mean in principle that we already have plenty of renewable resources as far as materials concerned. A concept of "Biomass Refinery" has been proposed recently as an alternative of oil refinery, where services can be provided by biochemicals and biobased products. In this work, material conversion technologies developed in the Monbusyo project, "Zero Emissions Oriented Material Cycle Processes" (The Ministry of Education, Science, Sports and Culture; Grant-in-Aid for Scientific Research on Priority Areas 292, 1996-2000), were summarized and organized in comparison with traditional and conventional biomass utilization technologies.

Key Words: Zero Emissions, Biomass, Material Conversion

図5 相分離によるリグニンの変換・利用

図8 ゼロエミッション技術としての未利用植物バイオマスの物質変換