

循環型社会に向けて ～産総研及び岡山県のバイオマスの利用技術への取り組み～

小田喜一

(独) 産業技術総合研究所中国産学官連携センター
イノベーションコーディネータ
〒739-0046 東広島市鏡山 3-11-32

1. はじめに

「持続可能な開発」とは、現代の世代が、将来の世代の利益や要求を充足する能力を損なわない範囲内で環境を利用し、要求を満たしていこうとする理念で、「持続可能な開発」が行われ持続可能性を持った社会を「持続可能な社会」といわれています^{1, 2)}。このためには、循環型社会（3Rを通じた資源循環）、自然共生社会（自然の恵みの享受と継承）、低炭素社会（温室効果ガスの排出量の大幅削減）を目指した統合的取組の展開の重要性が示されています³⁻⁵⁾。

従って、循環型社会に向けて、金属資源やエネルギー資源がどのような状況にあるかを認識することが重要です。

そこで、2章では、環境とエネルギーについて産業、特にものづくり産業の立場から、これら資源の持続可能性について生産量と埋蔵量から検証します。悲観的な見方ではありますが、“枯渇”することを直感的に理解して頂くと共に、将来世代のために残しておくにはどのような方策があるか、3Rの重要性を強調します。

循環型社会に向けて、植物の生命力の助けを借り、再生産が可能なバイオマスを利活用することが非常に重要となります。3章では、(独) 産業技術総合研究所（産総研）バイオマス研究センターのバイオエタノールの製造技術に関する研究成果の一端を紹介します。

4章では、循環型社会に向けた地域の取り組みとして、岡山県のグリーンバイオ・プロジェクト

について、バイオマスイノベーション推進事業、「森と人が共生する SMART 工場モデル実証」事業、おかやまバイオマスネットワーク構築事業、バイオマスイノベーション創出拠点形成事業について紹介します。

2. 循環型社会に向けての課題

(1) 金属資源の枯渇

世界全体では、金属資源は毎年幾ら消費されているのか、また、いくら残っているのか、身近な金属について見てみます。表1に参考となるデータを示します。銅は電気を伝える材料として、各種電線、電動モーター、金具、銅合金（真鍮、砲金）部品などに用いられています。金は、金貨や資産として金塊、装飾用もありますが、ICチップなどの電子部品のリード線など無くてはならない材料です。インジウムは単体で用いられることは少なく、ITO(Indium-Tin-Oxide) 透明導電性電極として、TVや携帯電話の液晶パネルに用い

表1 世界の金属資源の生産量と埋蔵量⁶⁾

金属資源	可採掘年数	生産量	埋蔵量	産出国
銅	31	1,070万トン	3.1億トン	チリ、米国、カナダ
金	20	2,300トン	4.6万トン	南ア、米国、オーストラリア
インジウム	11	200トン	2600トン	日本、カナダ、中国、フランス
鉄	151	10億トン	1,510億トン	中国、ブラジル、オーストラリア
鉛	25	280万トン	6,900万トン	オーストラリア、中国、米国
銀	19	1.46万トン	28万トン	メキシコ、ペルー、米国
スズ	37	19万トン	700万トン	中国、インドネシア、ペルー
亜鉛	20	720万トン	1.4億トン	カナダ、中国、オーストラリア

られています。鉛は自動車の鉛蓄電池の電極材料、電子通信機器部品に不可欠な PLZT(チタン酸ジルコン酸ランタン鉛) 圧電材料として用いられています。この他、工業的に重要な金属は沢山ありますが、殆どの金属資源は埋蔵量を生産量で割った可採掘年数が 50 年以下となります。特に、電気・電子部品に必要な金属資源は 30 年以下で、喫緊の課題といえます。

しかし、「都市鉱山」⁷⁾という別の見方をすると、日本は金属資源に富んでいるともいえます。原田らの調査報告によると、日本の都市鉱山には、金は総量 6,800 トン (世界の埋蔵量の約 16%)、銀は 60,000 トン (〃 22%)、インジウム (〃 61%)、錫 (〃 11%)、タンタル (〃 10%) など⁸⁾、日本の都市鉱山には全世界埋蔵量の一割を超える金属が多数存在し、世界でも有数の資源国になります。

従って、日本のみならず世界に向けて「都市鉱山」という概念を広め、3R を推進することが、資源の枯渇を避ける方策と考えます。

(2) エネルギー資源の枯渇

エネルギー資源について先ほどと同様に表 2 に示します⁹⁾。石油は、サウジアラビア、イラン、イラク、クウェート、アラブ首長国連邦、ベネズエラ、インドネシア、ロシア、米国、ナイジェリア、アルジェリアなど生産量、埋蔵量とも世界の限られた国でしかありません。石油の埋蔵量は、ロシア、中国の様に政府、あるいは石油メジャーからの限られた情報しかありませんが、現在の生産量がピークで次第に減少していくとの報告もありますが、埋蔵量は 1.33 兆バレルとなっています。シェールガスが最近注目されているが、これは地

表 2 世界のエネルギー資源の生産量と埋蔵量⁹⁾

エネルギー資源	可採掘年数	生産量	埋蔵量	産出国
石油	45.7	291億バレル	1.33兆バレル	サウジ、イラン、イラク、クウェート、ロシア、UAE、ベネズエラ、ナイジェリア、リビアなど
天然ガス	62	3兆m ³	187兆m ³	ロシア、イラン、カタール、サウジ、UAE、米国、ナイジェリア、アルジェリア、ベネズエラなど
石炭	119	69.3億トン	8,260億トン	中国、ロシア、米国など
ウラン	117	5.4万トン	631万トン	カザフスタン、カナダ、オーストラリア、ニジェールなど

下深く埋蔵されている低品位の石炭の一種である頁岩をガスにして地上に取り出す採掘技術が開発されたため、その埋蔵量は莫大なもので、世界中では数百年分あるといわれています。

石炭は、このままの消費を続ければ、119 年しか持たないということです。国内で生産されている石炭、石油は 115 万 t(自給率 0.6%)、80 万 kl(自給率 0.4%)、一方、輸入は 1.87 億 t、2.14 億 kl で、殆どを海外からの輸入に頼っています¹⁰⁾。

原子力発電に必要なウラン資源は、現在のウラン 235 の核分裂により発生した熱エネルギーを利用する発電で、このまま消費すると 117 年しか持ちませんが、これを少しでも長く利用するために、MOX 燃料とか、発生したプルトニウムを積極的に利用する高速増殖炉が開発されています。我が国においては、発電に必要な化石エネルギー資源の殆どを輸入に頼らざるを得ません。原子力発電では、核廃棄物の処理、原子炉を含む発電と地震・津波等自然災害に対する安全対策など解決すべき多くの課題が残されています。

(3) 再生可能エネルギー資源

地球温暖化対策の一つとして、温室効果ガスの削減が進められてきましたが、原子力以外のエネルギーとして最近特に注目されているのが、再生可能エネルギーです。2012 年 7 月に「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」(電気事業者に対して再生可能エネルギー電気の固定価格での買い取りを定めている法律)が施行されました。対象となるのは、風、太陽光、地熱、水力、バイオマスなどです。

風力資源は、中国、ヨーロッパ、米国など大陸地域が多く、世界の風力発電設備容量(2010 年)は 1.94 億 kW です。国内での設備容量は 220 万 kW(2009 年度)で、年間の発電量から逆算すると 20%程度が実行発電力となります。風力発電の大型のものは翼長 50m 近くもあり、低周波騒音が問題となっています。そのため、国内では東北、北海道、九州など、多くは急峻な山頂や原野など、設置場所は市街地から離れた場所に限定されま

す。他方、浅海や洋上での発電も考えられていますが、漁業報償や、塩による腐食、台風対策など技術面でも課題があります。

太陽光発電は、太陽光を Si 半導体素子等により直流電圧に変換させるもので、基板に単結晶 Si、多結晶 Si、アモルファス Si が用いられています。商品化されているものでは、発電変換効率は 8～20%です。家庭用では、3.6kW (パネル面積 20m²) が発売されています。100 万 kW の発電を行うとすると、50km² の面積が必要となります。山手線の内側の面積は 62km²。従って、発電規模、土地の価格を考慮すると、国内では、あくまで補助的手段といえます。

間伐材や製材端材などを燃料とするバイオマス燃焼発電は、2 万 kW 以上の規模でないと採算が見込まれないとされてきましたが、発電電力の買取制度によって復活の兆しがあります。2 万 kW の発電を行うと、年間 30 万トン近くの木質燃料が必要で、森林の多くが急峻な地形である我が国では、燃料確保が課題となります。

バイオエタノールについて、その原料から見ることにします。2010/11 年に米国で生産されたトウモロコシは 130 億 bu(3.16 億 t)で、その 40% の 50 億 bu がエタノールの生産 (5,282 万 kl) に向けられています。バイオエタノール生産が拡大したのは、2005 年「エネルギー政策法」による再生可能燃料基準(The Renewable Fuel

Standard)によるもので、トウモロコシ価格の高騰もあり米国内の畜産業界などからは反対の声があります。従って、トウモロコシ (食料用と家畜飼料・エタノール用では品種が異なる) のエタノール原料への大量使用は、世界的な食料事情に大きな影響を及ぼすので望ましいことではありません (図 1)。

ブラジルの 2009/10 年のサトウキビ生産量は 6 億トンで、砂糖生産に 45%、エタノールに 55% が振り向けられています。砂糖の生産は 3,300 万トン、輸出は 2,220 万トン、エタノール生産は 2,600 万 kl で、2010/11 年には 3,000 万 kl に達すると推計されています。殆ど自動車用燃料として消費されています。サトウキビからのエタノール生産も、所詮食料品との競合関係にあり、今後は、バガス (サトウキビの絞りかす) を積極的に利用したエタノール生産が望まれます。

3. 産総研のバイオマスの利用技術への取り組み

産総研中国センターバイオマス研究センター (H17.10～H24.3) の水熱・成分分離チームでは、木材や稲わらなど食料にならないバイオマスから自動車用燃料や化学工業原料として使用できるバイオエタノールを製造するための研究開発を行ってきました^{11, 12)}。

木材の主成分 (水分を除く) は多糖類であるセルロース (約 50%) やヘミセルロース (キシラン、グルコマンナン等約 20%)、リグニン (20～30%)、副成分はテルペン類等です。エタノールを造るためには、多糖類 (セルロースやヘミセルロース) を単糖類 (グルコースやキシロース) にしなければなりません(糖化)。硫酸法・希硫酸法では、廃棄物処理や環境負荷の低減に係るコストが必須なため、産総研では酵素糖化法を採用してきました。木材は、図 2 のように、ヘミセルロースやリグニンにより強固な構造となっているため、オガ粉程度に粉碎し水と酵素を作用させても糖化は殆ど起こりません。しかし、粗粉碎した木材を湿式カ



図 1 木材等からバイオエタノールを製造する意義

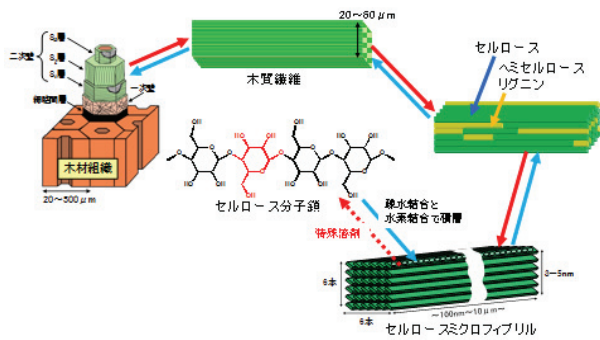


図2 木材のマクロ・ミクロ構造

ッターミルで微粉碎し、135℃で水熱処理（圧力鍋で炊く）した後、ディスクミルで超微粉碎すると、超微細なファイバー（セルロースナノファイバー）が得られます。幅～10nm のファイバーからなっており、酵素（～5nm）が作用できるようになります（図3）。

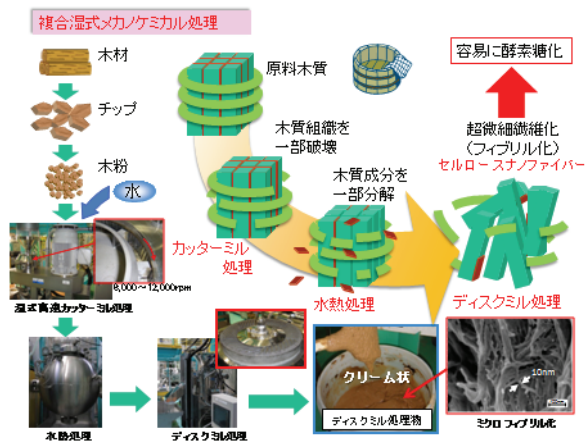


図3 木材のメカノケミカル処理によるセルロースナノファイバーの製造¹³⁾

ユーカリだと、糖化率は80%に達します。木材をメカノケミカル処理によりナノレベルに超微粉碎することで、糖化率の高い酵素糖化法が可能となりました¹⁴⁾。この糖化処理により、単糖類のグルコースやキシロースを得ることができ、リグニンは残渣となります。

グルコースを餌に酵母はエタノールを造りますがキシロースには作用しません。キシロースからエタノールを造るにはどの様にするか。グルコ

ースとキシロースを別々にするプロセスではコストに見合わないので、両者をアルコール発酵させることが必要となります。産総研バイオマス研究センターと京都大学は、遺伝子組み換え技術を駆使して酵母における補酵素（酸化還元）特異性を変えることで、高効率でキシロースからのエタノール発酵を実現しました。この結果、木材に含まれるセルロースやヘミセルロースから効率的にエタノールに変換できるようになりました¹³⁾。

また、産総研バイオマス研究センターでは、王子製紙、京都大学、東京大学、新日鐵エンジニアリングなどと NEDO プロジェクトに加わり開発を行ってきました。平成23年11月にパイロットプラントが完成し、糖化率は80%以上、木材1トンから250 lのエタノールを生産することができます。現時点で世界最高の効率で生産が行われています¹³⁾。将来、この技術をブラジル、オーストラリア、マレーシアなど莫大なバイオマスが期待できる国にプラントを輸出し、現地生産したエタノールを輸入し、エネルギー資源や化学合成原料として安定的調達を図ることが重要と考えます。

4. 岡山県のバイオマスの利用技術への取り組み

グリーンバイオ・プロジェクトは、木質系バイオマスを中心とした産業クラスター形成のため、未利用間伐材や製材端材等の地域のバイオマス資源を活用した付加価値の高い新素材等の実用化に向け、セルロースナノファイバーの製造技術を主とした先端的技術開発と用途開発を目的としています。事業として、研究開発・補助金、国家プロジェクト推進、ネットワーク構築、新規用途開発・先導的研究開発の構築の4つの事業を行っています。

(1) バイオマスイノベーション推進事業

本事業は、セルロース系バイオマス資源を活用した新素材の製品化技術や製造時の副産物等用途技術の確立のため、県内大学や企業等が保有する将来性のある有望な技術シーズを発掘し、研究

委託や必要な経費の補助を行うことにより研究の進展、実用化、事業化の加速化を図ることを目的としています。補助金事業の成果の例として、現在、冷凍倉庫用ウッドプラスチック製パレットが生産されていますが、今後、需要が期待される輸送用製パレット(1.1x1.1x0.144m、PE：木粉＝50：50)が開発されました((株)ウッドプラスチックテクノロジー)。また、自動車内装部品として高剛性リアシェルフ(PP：木粉＝50：50)等が開発されました((株)日本ジー・オー・アール)。

(2)「森と人が共生する SMART 工場モデル実証」事業¹⁵⁾

間伐材や製材端材等未利用バイオマスを原料に用いて高付加価値工業材料を製造しようとするものです。これに必要なエネルギーは新エネルギー(太陽光、風力、バイオマス)を利用し、CO₂の排出が少なく環境負荷が小さい林工一体型工

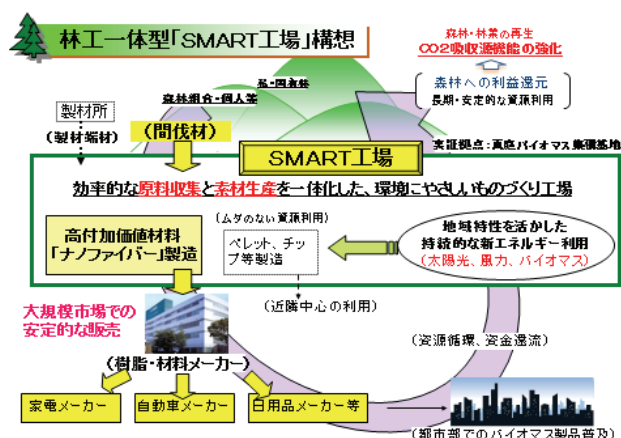


図4 SMART 工場概念図

場、SMART (Small Advanced Regional Technology) 工場、を目指しています。高付加価値材料として3章で述べたセルロースナノファイバーを、またその製造技術とプラスチックとの複合化技術の研究開発を行っています。プラスチックフィルムとして、日用品、情報家電製品、自動車などへの応用を目指しています。こうして得られた資金を、森林へ利益還元し、長期的・安定的な森林資源の活用、林業人材育成と SMART 工場による中山間地域の経済的な活性化を図ることを目指しています。岡山県が総括責任者となり、

13機関が協力してプロジェクトを進めています。

超微粉砕技術の開発として、粉砕テスト機が設計・試作されました。原料にヒノキの製紙用チップを用いて、150℃で1時間の水熱処理を施した後、二軸スクリーュー爆砕式粉砕機(モリマシナリー(株)製 B22)を用いて粉砕を行い、その後、粉砕テスト機で超微粉砕を行いました。その結果、500nm レベルの粉砕に成功しました。現在、粉砕テスト機を元に、6連の粉砕機構からなる実験機を試作し、試験運転を行っています。

新エネルギー複合利用技術の開発では、軽量・施工が容易・安価な薄膜系太陽電池モジュールの開発を行うとともに、壁面やカーポートに設置できる二次製品の開発を行っています。また、小型風力発電機(翼直径1.5m、出力0.5kW)を元に、SMART 工場システムで系統連係可能な試作機(翼直径2m、出力1.5kW)を設計・試作し、発電試験を行って



図5 a-Si 太陽光発電モジュールの製品

います。さらに、新エネルギー複合利用技術に必要な充放電システムでは、Li 二次電池への効率的な充放電技術の開発を行っています。

(3) おかやまバイオマスネットワーク構築事業
産学官の連携の場として、研究・技術開発の情報交換、共同研究の推進、プロジェクトの立ち上げ、単県研究委託・補助金事業などグリーンバイオ・プロジェクトを推進するため、平成16年に「岡山プラスチック研究会」が設立され、現在、産学官約70機関が参加しています。

事業として、年3~4回の研究会開催やカナダオンタリオ州への調査を行ってきました。研究会

は、大学等研究機関や企業などから、バイオマス、バイオプラスチック、バイオエタノール、高機能セルロース繊維、セルロースナノファイバー等の研究・技術開発、用途開発について講演が行われました。

(4) バイオマスイノベーション創出拠点形成事業

おかやまリサーチパークイノベーションセンター(ORIC)内に、平成 21 年におかやまバイオマスイノベーション創造センター (OBIC) が設立されました。OBIC では、県内外の大学、公設試等の「知」を結集し、若手研究人材を活用して、セルロースやセルロースナノファイバー、セルロースナノ結晶の基礎的研究を行うと共に、事業化を見据えた新規用途開発のための先導的研究を行っています。

5. まとめ

(1) 世界の鉱物資源の多くは、可採採掘年数が 50 年以内で、特に、電気・電子材料用金属資源の枯渇は喫緊の課題である。「都市鉱山」の概念を日本から世界に発信し、3R の推進が急がれる。「都市鉱山」では、現在の技術ではリサイクルが経済的に見合わないもの(貧鉱石)でも、将来のために備蓄しておくことも方策である。

(2) エネルギー資源の大部分を輸入に頼らざるを得ない我が国は、石油、石炭、天然ガス・シェールガス火力、原子力や新エネルギーなどエネルギーを多様化し、リスクの低減、安定的供給を図る必要がある。また、省エネルギー、高効率発電、安全などの技術開発の推進が必要である。

国内においては、再生可能エネルギーは資源量、地勢的要因から、補助的手段である。

(3) 循環型社会に向けて、バイオマスを利用した石油代替製品の開発、非食料からバイオエタノールの製造技術の開発、マテリアル利用の促進を図ることが重要である。国内バイオマス原料を活用するためには、高付加価値化、カスケード利用技術の開発が必要である。

(4) 循環型社会に向けて、国民的意識が最も重要である。

6. 謝辞

「森と人が共生する SMART 工場モデル実証」(平成 22~26 年度)事業は、文部科学省科学技術戦略推進費「気候変動に対応した新たな社会の創成に向けた社会システムの改革プログラム」によって行っているもので、ここに謝辞を申し上げます。

7. 引用文献

- 1) Wikipedia : 持続可能な開発
- 2) 「環境基本法」第 4 条
- 3) Wikipedia : 循環型社会
- 4) 「循環型社会形成推進基本法」
- 5) 「循環型社会形成推進基本計画」
- 6) 鉱物資源 ;
<http://home.hiroshima-u.ac.jp/er/Rmin.html>,
Mineral Commodity Summaries(2007)
- 7) 南條道夫「都市鉱山開発—包括的資源観によるリサイクルシステムの位置付け」『東北大学選鑛製錬研究所彙報』,第 43 巻,第 2 号,1988 年, 239-251 頁
- 8) NIMS 「レアメタル・レアアース特集」
- 9) 「エネルギー白書 2011」化石エネルギーの動向
- 10) 平成 22 年度「エネルギーに関する年次報告」
- 11) 産総研 ; <http://www.aist.go.jp/>
- 12) 「技術を社会へ」(独)産業技術総合研究所中国センター (H23 年度版)
- 13) 平成 23 年度産総研バイオマス研究センター研究成果発表会資料 (2012.3)
- 14) 遠藤貴士,「バイオ燃料を木材からナノテクで生産する」, *Synthesiology*, 2 巻,4 号,310-320 頁 (2009)
- 15) 「森と人が共生する SMART 工場モデル実証」(「気候変動に対応した新たな社会の創成に向けた社会システムの改革プログラム」文部科学省)