

展望

バイオマスの利用と鉄鋼への展開

Utilization of Biomass and its Application to Steel Making Industry

奥野嘉雄
Yoshio Okuno

新日本製鐵(株) 顧問

1 はじめに

何故、今、バイオマスか？。それはバイオマスがCO₂削減とエネルギーセキュリティーの両面にメリットを提供するためである。バイオマスは‘カーボンニュートラルエネルギー’と言われるが、その所以は、バイオマスは何れ自然状態でも腐敗・分解でCO₂を放出するので人間がそのエネルギーを利用してCO₂の増大につながらないことによる。従って、バイオマス利用によって化石燃料が置換された炭素分のCO₂発生量は削減できる。

地球温暖化に関するCOP7の会議でも日本のCO₂の森林吸収量がロシアに次いで2番目の規模の年間1.3千万t(炭素換算)とされたが、これは見方を変えればCO₂削減の世界的合意を遵守するためにもバイオマス利用が不可欠であることを意味する。

国内のCO₂発生量の約15%を占める鉄鋼業にとってバイオマス利用はCO₂発生量の削減ができる点で魅力的であり、製鉄所のインフラや低質排熱も利用できる。加えて、鉄鋼業の保有技術を活かしてバイオマス処理や京都メカニズム関連ビジネスを進めることもできる。しかし、現実にはバイオマス量はどの程度有るのか？利用技術はどの程度進んでいるのか？利用の経済性は？また集荷は大丈夫か？などの疑問点が浮かぶ。

本報告はこれらの疑問に答えるべく調査したもので、木質系バイオマスの国内外での規模や利用への取り組み状況、更には鉄鋼分野での将来性について紹介する。

2 バイオマスとは

バイオマスとは樹木、草、藻類、農産廃棄物、生物系都市廃棄物などを指す。そのエネルギーをバイオマスエネルギーと呼ぶが、資源エネ庁の定義では「化石資源を除く動植物に

由来する有機物であってエネルギー源として利用可能なもの」としている¹⁾。

植物は光合成によりCが3ヶと4ヶの2種類の化合物(=バイオマス)を造るが、その95%はC3型であり樹木、農産物などが含まれる。C4型にはサトウキビ、トウモロコシ、アワ、キビなどでありCO₂固定には一層有用な植物である。なお、林木の炭素固定能力は若齢木(樹齢20年)の固定能力を1とすると壮齢木(樹齢50年)は0.3~0.5、老齢木(樹齢100年)は0.1未満とされる。従って、木質系バイオマスの利用対象は植樹後10年程度のものがベストとされる。森林材や廃木材は一般に破碎されてチップとして市場に供給される。写真1にチップの外観を示す。

バイオマスの特徴として、①賦存量が多くかつ枯渇がないエネルギーであり、エネルギーの安定確保に寄与する、②カーボンニュートラルエネルギーでかつ、NO_x、SO_x等の有害ガス排出が少ない、③液体や気体燃料に転換可能であり、貯蔵も可能なエネルギーである、④再利用が可能で循環型社会に適合できるエネルギーであるなどが挙げられる。加えて、日本での利点として、①化石燃料の輸入量削減、②山間地の



写真1 間伐材チップの外観

保水事業、③林業・農業の活性化と雇用促進などがある。一方、利用が進まない理由として、①エネルギー転換効率が20%前後と低い(灯油は60%)、②傾斜林が多く集荷・輸送インフラが未完成である、などが挙げられる。

バイオマスには森林・農産物などからの発生材と利用後の廃棄物の2種類がある。木質系バイオマスの成分例を表1に示す²⁾。生では10～60%の水分を含む。

昇温すると100℃付近で脱水、300℃付近で発熱分解、380℃付近から炭化が進む。1000℃までの昇温乾留ではガス23%、液(油+水分)52%、残渣26%が得られる。ガス成分(体積%)はH₂15%、CH₄18%、CO31%、CO₂34%、C₂H₄他2%を示す。森林材からのバイオマス発生歩留まりは0.7程度と言われる。

バイオマスのもとになる植物構造体はセルロース、ヘミセルロース、リグニンからなる。セルロースが主成分で分子構造は(C₆H₁₂O₅)_nである。セルロースは‘鉄筋’、ヘミセルロースは‘針金’、リグニンは‘セメント’に例えられる。各々の割合は50、25、25%である。

森林材や廃木材の解砕方法としては、機械処理のほか高温高圧水処理や水蒸気爆砕処理もあるが、一般的には粉碎機で破碎してチップにする方法が採られる。近年、日本でも林地残材や建築廃材の処理マシンや集荷システムの開発が進められている。建機メーカーでは現場で速やかに移動して伐採木、間伐材を素早くチップ化するマシン、更には木屑チップの生産システムや木質ペレットの生産・配給システムを開発しつつある。最近ではチップを水と混ぜてスラリーとしてパイプ輸送する方法も開発している。一方、建築廃材についてはゼネコンが移動式分別容器を開発し、家庭ゴミ集荷法と同じように区分して巡回回収する試行を首都圏で開始している。回収率は10～20%から70%に向上するとしている。

バイオマスエネルギーの主な転換方法としては直接燃焼、熱化学変換、生物化学変換がある。それぞれの主製品は電力、ガス・液体燃料、メタン・肥料などである。木質系バイオマスは熱化学的転換に、また、都市廃棄系バイオマスは生物化学的転換に向くとされる。上記以外に、最近では水素燃料、造

粒材、プラスチック用素材、土壌改良材、脱臭材、菌培養材、農薬・医療薬用材の研究開発が活発である。

3 バイオマス資源の規模は

バイオマスは世界の供給可能なエネルギー量の12.1%を占める。しかし、1990年実績では一次エネルギー消費量の2.9%に過ぎない。

報告されている世界と日本のバイオマスソースのポテンシャル量と使用可能量を整理した。日本のポテンシャル量は年間2.4～3.7億tとされるが、この量は全てをメタノールに変えると国内のガソリン消費量の75%が賄えるとされる。木質系バイオマスに限ると利用可能量は年間2.1～5千万tの規模とされる。発生内訳の一例を図1に示す¹²⁾。良質の木質系バイオマスも現在は余り利用されず、利用率は53%に留まっている。これはコスト面で成立せず、間伐材などが林内に放置されているためである。

別報告によると、廃木材の発生量は年間1.3千万tであり、現状ではその多くが焼却に回っているとしている。また、建設・土木分野に限れば廃木材の発生量は年間0.6千万tであり、現状37%のみが再利用されて残りは焼却処分されている。更に、日本の休耕地は400万haあってこの土地から森林系よりも多い年間4千万t(油換算)のバイオマスエネルギー生産が可能との報告があり、休耕地利用が期待される。

一方、世界のポテンシャル量は年間55～91億tであり、その内、アジア・オセアニアは36%を占めている。ポテンシャルを知るには各国の森林規模を知るのが有効である。世界の森林面積は陸地全体の1/3程度であり、その内、途上国の面積は60%弱である。木材生産量は年間約34億m³であり、途上国が75%を占める。ポテンシャル量の維持には途上国の保林が重要である。利用可能量は年間10～43億tの規模であり、この量は現在の世界の石炭消費量と同じオーダーにあるとされる。木質系バイオ量に限ると年間約8～15億tの規模とされる。

表1 バイオマスの成分例

	枝葉チップ	木屑チップ	廃木チップ	R D F
C (wt%-乾)	50		50.8	51.6
H (wt%-乾)	6.2	5.9	5.8	8.3
O (wt%-乾)	43		43	26.3
N (wt%-乾)	0.3	0.3	tr	0.7
灰分 (wt%-乾)	1.0	0.7	0.4	12.9
水分 (wt%)	55	30	14	5.1
高位発熱量 (MJ/kg-乾)	19.3	19.3		

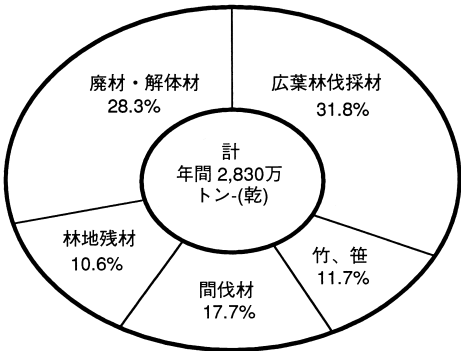


図1 木質系バイオマスの国内利用可能量

4 バイオマスと森林のCO₂吸収量との関連は

地球温暖化の国際会議ではCO₂の森林吸収量が議論されているが、これはバイオマス利用と密接な関係を持つ。

COP7は日本の森林のCO₂吸収量をロシアに次いで2番目の年間1.3千万t(炭素換算)の規模にすることで合意した。この量は日本の2010年のCO₂目標削減量65%を占める規模であり、鉄鋼業のCO₂削減目標量の約3倍に相当する。なお、「CO₂吸収量」とは1990年以降での森林の成長に伴う吸収量と新たな植林による吸収量の合計値である。

日本の現実の森林吸収量は1千万t/年(炭素換算)程度と見積もられており、合意量の76%に留まっている。合意量を確実に履行するには森林吸収量を上げる対策、即ち、樹木の早期育成と老木・剪定材除去による森林材の回転効率の向上が必要となる。具体的には、森林の早期育成や植林の事業と共にバイオマスの利用事業が強く求められる。

植林用苗木の早期育成については従来の3倍の速度で育成でき、かつ活着率が1.5倍にできる研究成果が省力林業研究所より報告されている³⁾。また、最近は遺伝子組み替え技術の適用研究もなされている。一方、植林事業は製紙業界主体で進められている。1999年までの国内と海外での植林面積はそれぞれ13万ha、25万haであり、合計38万haとなる。2010年までの累計目標は55万haとしている。温帯林、熱帯林の炭素固定量はそれぞれ150t/ha、200t/haと言われる。国内で植林面積が10万ha広がると(10年で伐採)割当量の約11%に相当する吸収量が確保される。海外の植林事業には1万ha当たり10～20億円程度かかるとされる。採算性を高めるには早期育成の技術と伐採材の付加価値を上げる技術が非常に重要となる。

5 バイオマス利用のシナリオと国内外の取り組みは

国連IPPC(気候変動に関する政府間パネル)は世界のCO₂発生量削減にはバイオマスの大幅な利用が不可欠と予測している⁴⁾。本予測によると「環境に配慮しないケース」では2100年には2010年に比べてエネルギー需要量は4倍、CO₂排出量は3倍程度になるとし、「環境と経済の調和を図るケース」ではエネルギー需要量は2倍になるがCO₂排出量は0.7倍程度に留められるとしている。後者のケースを実現するにはバイオマスエネルギーの比率を2025年には世界の一次エネルギー供給量の15.7%、22世紀初頭には45.6%まで高める必要があるとしている。このことはバイオマス利用しかCO₂削減の有力な手段が無いことを示すものである。

日本の場合も(財)新エネルギー財団がCO₂削減について4種類のシナリオを提示している⁵⁾。即ち、現状維持、積極的利用、経済的支援強化及び総合的施策推進の4種類である。総合的施策推進のケースでのバイオマス利用量は年間1.89千万kl(油換算)であり、炭素量換算で年間1.37千万tに相当する。この利用量の規模は1997年のCO₂排出量の4%に相当する。何れのシナリオでも木質バイオマスへの依存割合が33～49%と高い。

日本の取り組みは欧米よりも遅れている。これは集荷コストが高く、経済性に難点があるためである。日本の一次エネルギー供給量のなかでバイオマスを含む新エネルギーの割合は約1%と低く、バイオマスに限れば1999年度実績で0.8%に過ぎない。表2に米国、欧州、日本における2010年の目標利用量と対一次エネルギー比率を示す。日本の目標値はバイオマスを含む新エネルギーの総量で示すが、欧米の1/3の規模に留まる。この目標値は経産省総合エネルギー調査委員会で策定されたが、バイオマスの発電用燃料や熱回収利用への期待が大きく、新エネルギー全体の1/3をカバーする内容となっている。開発ポイントとして、①輸送機関用燃料への転換、②食料生産と競合しない未利用バイオマスの利用、③海洋バイオマスによる燃料油の生産、④木材のガス化によるメタノール生産を挙げている。

バイオマスの代表的なエネルギー変換プロセスの開発状況を図2に示す。熱分解、高圧プロセス、超臨界ガス化等はまだ研究段階との評価である⁶⁾。

利用を進めるには集荷システム、輸送費、処理費、生産性に問題があると言われる。今後は税制面の優遇による素材費の低減が求められる。また、「建設リサイクル法」で代表されるような利用促進に関わる法律の整備も求められる。

欧米の取り組みは積極的である。理由として大気環境改善に加え、エネルギーのセキュリティ、農業地域の活性化などが挙げられる。米国のバイオマスエネルギーの一次エネルギーに占める比率は現在2.9%である。クリントン大統領は1999年8月の大統領令で2010年のバイオマスエネルギー供給量を現状の3倍の8.7%にすると発表し⁷⁾、世界の注目を

表2 バイオマスエネルギーの利用計画規模

	1995年		2010年	
	油換算量 (百万 t/年)	比率 ¹⁾ (%)	油換算量 (百万 t/年)	比率 ¹⁾ (%)
日本 ²⁾	6	<1	16	3.3
米国	61	2.9	183	8.7
E U	45	3.3	135	約 9

1) 対一次エネルギー供給量比率、2) バイオマスを含む新エネルギー総量

があるとされる。バイオマス利用のコジェネプラントは既にフィンランドやスウェーデンで稼働中である。日本の省庁も地域省エネルギー普及の一環として事業化に力を入れている。

現在、微粉炭に木屑を5～10%混ぜた混焼発電が試みられているが、木質バイオマス発電が競争力を持つには発電の副産物である熱の有効利用が欠かせない。このため、発電効率の落ちない熱電併給方式が実用化されつつある。本方式での総合エネルギー効率は70～80%とされる。鉄鋼メーカーも建設廃材の循環流動層型燃焼方式による発電法やRDFを燃料とする発電法を中心に本事業への進出が報告されている。

木質系バイオマス発電はバイオマス中のCl、S、P分が微量なため排気ガスはクリーンであり、また燃焼灰も土壤改良材に利用できるなど環境に優れた特徴を持つ。本技術の課題としては、①ガス化効率の向上、②低コスト化、③自動運転にあると言われる。促進のために建設補助金や電力買い取り優遇策の適用などが期待される。

ガス転換事業については鉄鋼業が開発している石炭熱分解ガス化技術の利用が期待される。ガス化には高温乾留方式と発酵方式があるが、最近では超臨界水方式も提案されている。鉄鋼メーカーも高温乾留方式に加え、食品廃棄物を発酵させてメタンガスを得る技術を海外から導入して開発を進めている。ガス化は燃料代替だけでなくメタノール、ジメチルエーテル(DME)、水素などへの転換プロセスに繋がるものである。

バイオマスのガス化は流動層による高温乾留方式が一般的である。代表的な方式として固定床型炉や固定床型並流炉、加圧二段流動床型炉などが挙げられる。オランダでは循環流動層型炉(径200mm、高さ6m)で10種類のバイオマス(廃材、草木チップ、紙スラッジ、枕木、都市スラッジなど)のガス化試験を実施し、炭素転換率は平均92%、冷ガス効率は61%を達成したとしている⁹⁾。

最近では自動車関連のバイオマス利用研究もなされつつある。鉄鋼業としてもこの動向に十分留意して置く必要がある。研究の主体はメタノール、DME、H₂などの自動車用燃料の製造や部品代替のプラスチックに関するものである。バイオマスからの燃料は煤、SO_xの発生がなく、NO_xも石油の1/2～1/4と少ないことに魅力がある。バイオガスからのメタノール転換について日間1tのベンチ規模試験なれどバイオマスからメタノールを50%、また、DMEをメタノールの80%収率で取出すことに成功したとの報告がある¹⁰⁾。また、この報告ではメタノールの80%をガソリン車、50%をディーゼル車に混合した試験を行い問題のないことを確認している。メタノールは含酸素燃料であることから石油系燃料と混

合することで排気ガスを低公害化する利点がある。一方、新たな動きとして自動車メーカー自体が東南アジアでの生産性の高い植物で生分解プラスチックを製造する研究、更には遺伝子組み替え技術を用いて植物の早期育成を図る研究も開始しており注目される。

6.3 京都メカニズム対応事業への展開

CO₂削減を図る京都メカニズムとして、①先進国間同士の排出権取り引き、②共同実施、③先進国と途上国間のクリーン開発メカニズムの3項目が挙げられている。本メカニズムによる事業はCO₂削減の成果が2ヶ国間で取り合えるので国内での対策よりも経済的とする見方がある。従って、鉄鋼業もCO₂削減対策の一環として本事業の展開が考えられる。具体的には、既存の環境改善技術の海外への適用事業に加え、例えば海外植林材による活性炭製造事業やメタノール合成事業、排出枠をセットした原燃料購入事業、更には海外植林事業に伴う炭素吸収量の認証、モニタリングに関わるビジネスの展開が提案される。日本でも既に電力・石油分野の企業が豪州の森林企業との間で自主的に排出枠の取引ビジネスを始めている。また、排出権とセットした豪州石炭との契約も既に行なわれている。

7 バイオマスの処理コストは

国内でのバイオマス利用の最大の課題は集荷システムが未確立で、集荷コストが高い点にある。費用は処理規模、場所、処理形態等で大きく変わり、森林系バイオマスの集荷・運搬コストの試算でも数千円～数万円/t(乾)の幅がある。現状では処分に困り、運搬費だけで取引される場合もある。現状の一般廃棄物の処理費が平均44千円/tなので、バイオマスの事前処理費もほぼ同等のレベルと見られる。なお、森林系バイオマス原料の買い取り価格について横山¹¹⁾は灯油45円/1と同等のバイオマスメタノールを得るためには2.25万円/tが損益分岐点と試算している。

粉碎までの処理コストはバイオマスエネルギー単位当たりの費用で比較しても日本と北欧との格差が大きい。また、スウェーデン、デンマークなどでは木質系バイオマスの燃料価格も税的な補助を受けて石炭価格の1/2～2/3のレベルに押さえている¹²⁾。日本も当面は欧州のように税制面でのサポートを受けて利用促進することが必要である。また、法令で利用促進を図ることも期待される。

バイオマスからの燃料製品の製造コストと従来製品の市場価格との比較が米国の例で報告されている。これによるとバイオマス由来のメタノールや中位の熱カロリーを有するガス、代用天然ガスは、それぞれ市場価格の1.0～1.9倍、0.9

～2.5倍、1.0～2.4倍となり、総じて高いレベルにある¹³⁾。

小宮山ら¹⁴⁾は「植林から始まる7種類のバイオ燃料製品」を得るための製造コストを試算し、油換算のトン当たりで液化油は22.6千円、エタノール（発酵法）は25.6千円、メタノール（ガス転換）は25.9千円、水素（ガス転換）は25.6千円になるとしている。なお、計算では最終のエネルギー量は各ケースとも年間25.6万t（石油換算）とした。コストの内訳を見ると設備費、土地代、労務費がその多くを占めている。製造コストが植林の育成効率、機械化により削減できればバイオの経済的実用性は十分期待できると結論している。

一方、バイオマスはその使用自体がCO₂の削減をもたらすので、他法のCO₂削減対策費との相対比較でコスト評価をする必要がある。EUでは新エネルギーの各種技術についてCO₂削減量1t当たりで見たコストを評価している¹²⁾。各技術のコストと15ヶ国のCO₂削減量を表3に示す。廃材バイオマスによる熱供給やコジェネ発電のコストはエネルギー生産による利益が出るので‘負記号’となっている。これはエネルギー生産による収入が見込めることによる。

バイオマスの発電事業は上述のように経済性のある分野と期待されるが、我が国で民間事業として推進するにはまだバイオマスの素材費のハードルが高い。渡辺¹⁵⁾はバイオマス電熱併行発電法を対象に送電端発電量4.5 MW、熱出力量5.7 MWのケースについてペイしうるバイオマスの素材費を求め、2.4千円/t以下にする必要があるとしている。この価格は廃棄処分木材などに適用できる値段であるが森林系バイオマス全体の価格としては乖離が大きい。現在、バイオマス、太陽光、風力、水力、地熱を利用する発電事業促進を狙って、RPS (Renewable Portfolio Standard) の導入が進められている。本制度は「電力小売り事業者＝電力会社」に対して販売電力の一定割合を再生可能エネルギーによる電力で

賄うことを義務づけるものである。このような法的なサポートによってバイオマス発電は一層具現化されよう。

8 まとめ

鉄鋼業は日本のCO₂排出量の15%を占める。CO₂削減には従来技術の適用だけでは効率面で限界に近いことからバイオマスの利用が期待される。製鉄所ではインフラ、排熱の利用も期待できる。利用対象として石炭代替の還元材、発電燃料、造粒材、自動車などへの燃料などが挙げられる。また、京都メカニズム関連で海外ビジネスへの展開も期待される。現在、バイオマスの集荷、加工システムが未完でコスト面に大きな難点はあるが、CO₂削減量1t当たりの必要コストを他の削減方法と比べた場合、バイオマスの利用には競争力が認められる。今後、バイオマスの利用促進に向けて税制面、制度面でのサポートがあれば環境とエネルギー確保の両面からバイオマス利用が一層促進され则认为る。

参考文献

- 1) 熊野幸一：日本エネルギー学会，第7回フォーラム・エネルギー21講演資料，Dec. 20，(2001)，37.
- 2) 日本エネルギー学会：平成13年度新エネルギー等導入促進基礎調査報告書，Aug.，(2001)
- 3) 日本工業新聞，Sept. 26，(2001)
- 4) 小木知子他：BIO INDUSTRY，3 (2001) 18，56.
- 5) 横山伸也：第9回日本エネルギー学会講演要旨集，Aug. 23，(2000)，117.
- 6) 小木知子：日本エネルギー学会誌，80 (2001) 3，154.
- 7) 内田二郎：日本エネルギー学会，第7回フォーラム・エネルギー21講演資料，Dec. 20，(2001)，19.
- 8) <http://www.sustainabletechnology.com.au>，Feb. 15，(2001)
- 9) A. van der Drift， et al.： Biomass & Bioenergy,20 (2001) 1，45.
- 10) 日刊工業新聞，March 8，(2001)
- 11) 横山伸也：バイオエネルギー最前線，森北出版，東京，(2001)
- 12) 熊崎 実：日本エネルギー学会，第7回フォーラム・エネルギー21講演資料，Dec. 20，(2001)，1.
- 13) バイオマスエネルギー，学会出版センター，(1980)
- 14) H. Komiyama， et al.： Fuel 808，(2001)，707.
- 15) 渡辺 裕：日本鉄鋼協会，応用マテリアル工学資料，Nov. 14，(2001)

(2002年12月16日受付)

表3 CO₂削減量1t当りの経済性評価

エネルギー利用技術	CO ₂ 削減コスト (Euro/t-CO ₂)	CO ₂ 削減量 (百万 t/年)
廃材バイオマスによる熱供給	-42	25
同上によるコジェネ発電	-34	4
嫌気性消化によるコジェネ発電	-23	4
陸上風力発電	3	30
大規模水力発電	11	15
木質バイオマスによる熱供給	15	64
同上によるコジェネ発電	20	29
地熱発電	53	2
洋上風力発電	88	18
バイオマスによるエタノール	236	9
バイオディーゼル	299	24
太陽光発電	308	1