21 世紀における木材バイオ工業

木材成分総合利用技術研究組合 原 口 隆 英*

Wood Bioindustry in the 21st Century

Takafusa Haraguchi

Research Association for Systematic Utilization of Wood Components

Wood bioindustry seems to be able to realize in the early 21st century. Systematic isolation process of wood components, and production of reduced type of xylooligosaccharides from the isolated hemicellulose and ethanol from the cellulose in a pilot plant were described. A feasibility study shows the probability of industrialization of wood-component utilization on the basis of such effective uses of lignin as carbon fiber.

1. はじめに

木材バイオ工業なるものを、先ず、次のように定めておきたい。すなわち、木質資源に物理的・化学的技術のほか、生物工学的技術を加えて行う有用物質の生産とする。ここに生物工学的技術とは、微生物培養、発酵、酵素生産などの古典的技術と遺伝子組換え、細胞融合、バイオリクター、組織培養などの新技術を合わせた技術を指す。このような木材バイオ工業は、まだ現実には成立していないが、恐らく 21 世紀初頭にはその姿を見ることができると筆者は想像している。

世界の人口は国連人口基金の世界人口白書によると 1990 年で 52 億 8 千万人であるものが、1 日 25 万人の割合で増え、この 10 年は年間 9 千万から 1 億人ずつ増加して 2000 年には 62 億 5 千万人に達するという。これは食糧はじめ生活必需物資及びエネルギーの深刻な不足をもたらす要因となる。一方、石油その他の地下資源は限りあるものである。短期的には小康を保っている石油事情も、長い目でみると安泰ではない。したがって、この爆発的ともいえる人口増加に対処するためには、多角的な資源・エネルギー対策が必須である。

約 40 年前に、チェコスロバキヤ出身のグレシンガーが「来るべき木材時代」という一書を著した¹⁾。第二次世界大戦直後の衣食住すべてにわたる欠乏から人類を開放し、さらに一層の福祉繁栄を図るためには林産資

源の活用が最も有効であると熱をこめて主張したものである。その内容は技術的にはいささか古くなってしまったが、再生可能な木質資源を適切に利用することが人類の福祉と世界の平和につながるのと諸説は益々輝きを増してきたといえるであろう。

この 10 年ほどの間に、木材の化学成分すなわち、セルロース、ヘミセルロース、リグニンを有用物質に変換する技術は格段に進んできた。それに大きく寄与したものの一つに、農林水産省のバイオマス変換計画がある。この計画によって、木材成分利用の基盤技術がほぼ固まってきたといってよい。さらにそれを受けて同時進行的に木材成分総合利用技術研究組合が創立され、有力民間企業 13 社の協力を得て木材の化学的利用の実用化研究が進められてきた。これは鋸工業技術研究組合法に基づいて設立された法人で、総額 13 億 6 千万円の事業費と約 4 年の歳月をかけて 14 の研究課題が推進されてきた。一応、林野庁の補助事業は 1990 年 3 月に終了したが、さらに 4 年間研究組合は存続することとなり、現在、自主的に研究が進められている。この 14 課題の研究成果は一本にまとめられ、1990 年 10 月に同研究組合から発行された²⁾。

14 課題のうち、10 課題は木材バイオ工業の範囲に入るものであるが、本稿においては、それらのうち、とくに研究の進展した数課題を選び、なるべくわかり易く解説することとした。ただ、木材バイオ工業の出発点として木材成分の分離分別工程は必須であるので、これは全く物理的、化学的操作から成り立っているが、簡単に述べることにした。これらの解説は、きたるべ

* 東京農工大学名誉教授

き木材バイオ工業の片鱗を示すだけのものであるが、読者に何らかの御参考になれば幸いである。

2. 木材成分の分別

木材細胞壁の構成成分であるセルロース、ヘミセルロース、及びリグニンは、それぞれ相互に物理的あるいは化学的に結合している。そこで、これら各成分を変換利用するためには、各成分を分離分別する必要がある。各種のパルプ製造法は勿論、木材成分の分別法の一つであるが、主体をセルロースにしているので、他の2成分を木材の中に在るがままの状態で分別するには不向きである。そこで考え出されたいくつかの方法のうち、ここには、研究組合で実施した3法を示す。始めの二つは、純物理・化学的分別法である。

2.1 蒸煮爆砕法

この方法は、木材チップを耐圧容器に送り込み高温高压の蒸気を通して短時間蒸煮後、急激に大気圧下に排出して、木材繊維をバラバラにするというものである。研究組合で開発した装置は図1に示すようなもので、原料チップをスクリューフィーダーと油圧シリンダーで圧縮しつつ爆砕用容器に詰め込み、それによって容器内の圧力をシールする。また、排出側には高压ロータリーバルブを用いている。最高使用圧力40 kgf/cm²・g、最大チップ処理量は日量4tとした。これをもとに、チップ処理量1日100tの装置の概念設計も行い、設備費、運転費、製品コスト等について試算を行った。なお、爆砕後の各成分分別処理装置のフローシートを図2に示す。先ず爆砕装置からプロータンク

に落とされた爆砕繊維を抽出機に導入し、水を向流的に通してヘミセルロース部分を抽出する。ここでヘミセルロースは、キシロースを主体とした単糖から10糖及びそれ以上の糖からなる糖濃度約10%の水溶液として得られる。次に残渣繊維は真空滷過器へ導き脱水を行う。真空滷過器内の残渣繊維(セルロース・リグニン残渣)に1%水酸化ナトリウム液を注加し、リグニンを抽出する。この抽出液はスラリータンク内で塩酸を用いて中和し、リグニンを沈澱させ、遠心分離機と圧滷器で分離回収する。さらに、真空滷過器内に残った残渣は図2右端の圧滷器に導き脱水し、セルロース部分を得る。これで3成分の分別処理は終了となる。

2.2 酢酸蒸解法

はじめに、この方法による木材成分分別装置のフローを図3に掲げる。上述の蒸煮爆砕法が広葉樹チップ専用であるのとは異なり、酢酸蒸解法は広葉樹のほか針葉樹チップにも適用できる。この方法は、オルガノソルブパルプ化法の一つで、0.1%塩酸を対チップで1%程度加えた酢酸で木材チップを蒸解した後、酢酸を回収し、蒸解液からヘミセルロース、リグニンを抽出分離し、蒸解槽からセルロースを取り出すという工程から成っている。この方法による原料チップ処理量100t/日の規模の装置についても概念設計を行い、製品コスト等について試算を行った。

2.3 微粉碎糖化法

装置のフローを図4に示す。木材チップは先ず木粉の状態にまで粉碎し、さらにローラプレス等で微粉碎して、糖化槽に投入する。一方、培養槽にて、例えば

図1 連続爆砕装置²⁾

図 2 木材成分分別処理装置フローシート²⁾ 図 3 酢酸蒸解分別装置のフロー²⁾

図 4 微粉碎糖化装置のフロー

Acromonium 菌を培養してセルロースとヘミセルロースの分解酵素液を調製し、遠心分離で菌体を除去してから先の糖化槽に導入し、木材多糖の糖化を行う。ただ単に多糖の糖化を行えばよいという場合なら培養槽から出る培養液中の菌体を分離する必要はないが、後段でリグニンを分別利用することを考えると、菌体の除去工程を組み込んでおく方がよい。糖化終了後糖液とリグニンを分別する。この方法はバイオ工業的成分分別の法である。微粉碎には本来多量のエネルギーを要するという難点がある。しかし、微粉碎の程度を強くすれば必ず糖化率が上昇するというものでもない。適正微粉碎度を守ることと、糖化条件の適正化を図ることによって、この方法も十分実用に堪えるものとなろう。なお、微粉碎糖化法の最大の利点は、分別されるリグニンが殆ど変質していないというところにある。磨砕リグニンとかノルトリグニン³⁾(木粉に腐朽菌を植えて多少セルロースを分解後、エタノールで抽出したもの) 類似のリグニンと考えられるので利用上好都合である。

3. 分別成分の化学的・生化学的変換

3.1 ヘミセルロースの変換

ヘミセルロースの変換利用としては、徹底的に加水分解して単糖のキシロースとなし、さらに還元キシリットとして甘味料、医薬等にもっていくということも考えられるが本研究組合では当面、キシロオリゴ糖及び還元キシロオリゴ糖への変換と、微生物を用いた2,3-ブタンジオールへの変換を課題として取り上げた。本稿では、そのうち前の課題について述べることにする。

(1) キシロオリゴ糖の製造・精製・濃縮

先ず装置のフローは図5に略記したとおりである。爆砕装置等を組みこんだ分別処理系から出てきたヘミセルロース抽出液は酵素反応槽に導き入れ、水酸化ナトリウム液を加えてpHを5に調整した後、ヘミセルロース加水分解酵素を添加し、55℃で24時間加水分解を行う。この酵素は放線菌起源のもので、タンク培養して得た培養液から菌体を分離したものを酵素液として使用する。市販の酵素を使うことも可能である。この処理でヘミセルロース抽出液中の多糖は分子鎖が切断されてキシロース、キシロビオースなどを含んだ粗キシロオリゴ糖となる。この加水分解を行わないと、精製段階で高分子キシロオリゴ糖が樹脂に吸着して収率が低くなってしまう。粗キシロオリゴ糖には着色物質や塩類などの不純物が多量に含まれているので、これらを精製工程で除去するが、ここではイオン交換樹脂を主体とした精製塔を用いることにした。すなわち、軟化塔では、Ca, Mg分を除去し、次の樹脂塔でイオン排除クロマトグラフィーを適用して多量の不純イオンと有機酸系着色物質を排除する。使用樹脂は強酸性陽イオン交換樹脂 HFS-471 X ナトリウムイオン形である。脱色塔(脱色樹脂 XT-5007 塩化物イオン形), K 塔(強酸性陽イオン交換樹脂アンバーライト 120 B 水素イオン形), A 塔(弱塩基性陰イオン交換樹脂 XT-6020 E 遊離塩基形), MB 塔(強酸性陽イオン交換樹脂アンバーライト IR-200 C 水素イオン形と強塩基性陰イオン交換樹脂アンバーライト IRA-411 水酸化イオン形の混床)を次々に通して精製を終わる。次の工程は濃縮であり、これは3重効用蒸発缶を用いる。ここで精製キシロオリゴ糖は50%溶液として得ることができる。

(2) 還元キシロオリゴ糖の製造

図 5 ヘミセルロースからキシロオリゴ糖の製造・精製・濃縮装置のフロー²⁾

図 6 還元キシロオリゴ糖

図 6 の還元キシロオリゴ糖製造装置のフローに沿って簡単な説明を加えることとする。精製キシロオリゴ糖液とニッケル触媒（キシロオリゴ糖固形分に対して 3.7%）を原料仕込槽内で混合し、オートクレーブに導入して、圧力 150 kgf/cm²・g、温度 130℃、反応時間 2 時間の条件で水素添加を行う。これにより、各構成糖のカルボニル基が還元され相当する糖アルコールになる。反応終了後触媒を濾過し、活性炭処理槽を通して、K 塔、A 塔、MB 塔を順次通過させ精製を行う。得られた還元キシロオリゴ糖液は 3 重効用蒸発缶によって減圧濃縮し、マイクロフィルターを通してから

製品貯槽に受ける。還元キシロオリゴ糖は、各種試験の結果、低粘度、低甘味、低カロリーという性質をもつほか、虫菌をひきおこす細菌による pH 低下も少なく、また変異原性、急性毒性もないので、非う蝕性食品素材として有望である。

なお、キシロオリゴ糖、還元キシロオリゴ糖とも、木材チップ 1 日処理量 100 t 規模の生産について検討を行い生産コスト等を試算した。その結果は後述する。

3.2 セルロースの変換

セルロースの化学的・生化学的変換利用としては、酵素加水分解によってグルコースとし、それから化学

的にソルビット、(ソルビトールのこと、グルコースの高圧水素還元でつくられ、ビタミンCの合成原料となる)、ヒドロキシメチルセルロース、生化学的にフルクトース、発酵によってアセトン、酢酸、エタノール等々多種類の物質が誘導でき、さらに2次的にきわめて多彩な物質をつくることのできる。研究組合では、これらのうちエタノール生産に的をしぼり、それを効率的に行うために、高活性セルラーゼ系酵素の生産と糖化、耐熱・耐アルコール性酵母の作出、セルロースの同時糖化発酵法の3課題を設定した。省エネルギー的、生化学的セルロース利用と、残材、廃材等低価値木材の利用という観点から、これらの課題は意義あるものと考えている。

(1) セルロース糖化酵素の生産と糖化

今までにセルロース糖化に用いられてきたセルラーゼ系酵素は *Trichoderma* 属か *Aspergillus* 属由来のものが殆どであったが、今回 *Acremonium* 属の菌から強い活性をもつセルロース分解酵素を分離することができた。これは、アビセラゼ、CMCアーゼ、セロビアーゼ及びキシラナーゼを含有しており、セルロースの糖化酵素*として十分使用可能である。この菌の培養には、汙紙粉末やアビセル（結晶性の微細セルロース）が好適炭素源であり、窒素源としてはペプトン（タンパク質の部分加水分解物でオリゴペプチド、アミノ酸を含む）、乾燥酵母などが適していた。大量生産も可能であり、とくにセロビアーゼ活性が *Trichoderma* 由来のものより高かったことは注目に値する。

* 糖化酵素：セルロースの糖化に関係のある酵素は大別して3種ある。アビセラゼは主として結晶部分に作用してセロビオースを生成し、CMCアーゼは非結晶部に作用してセルロース鎖を切断しグルコースのオリゴマーを生成する。セロビアーゼは、生成したセロビオースをグルコースに加水分解する。木材へミセルロースの糖化に関与する酵素としては、キシラナーゼが重要である。これは、キシランを加水分解してキシロースとそのオリゴマーを生成する。

糖化酵素の製造装置としては特段記すこともないが、装置のフローは図7のようである。

爆砕シラカンバセルロースを基質とした糖化実験によると、*Acremonium* 由来の酵素は従来品と同等かややすぐれていた。糖化酵素は別種のを混合して用いると糖化率が向上する例が知られているが、*Acremonium* 酵素の場合にもそれが認められた。すなわち、*Trichoderma* 酵素4に対して *Acremonium* 酵素1の重量比で混合すると、両者それぞれ単独時よりも約10%の糖化率上昇をみた。一般に、酵素の濃度を大にすると糖化反応の速度は大になる。また、一定の

図7 糖化酵素製造装置のフロー²⁾

酵素濃度のとき糖化基質たるセルロース濃度が高くなると直線的に反応速度が上昇し、ある基質濃度（ミハエリス定数*）を超えるとその上昇は鈍り、ついには一定の速度にとどまってしまう。上記の4:1混合酵素系でもこれらの関係が認められた。ただし、酵素濃度は5%で飽和状態になっているようである。したがって、実用濃度として約5%の酵素を用い、セルロースはなるべく高濃度にするのが望ましい。しかし、セルロースは水不溶の固体であるので無制限に高濃度というわけにはいかない。一般的にいうセルロースは5% (W/V)以上の濃度になると攪拌が困難になるので、それ以上の濃度で糖化を行うときには、時間経過とともにセルロースを追加投入する方法をとる。一例を述べると、15%のセルロース濃度を設定したいときは、先ず5%で反応を始め、4時間後に5%、さらに24時間後に5%を追加するといった仕方で行う。

* ミハエリス定数：酵素反応の速度と基質濃度の関係式（ミハエリス・メンテン式）中の定数で、その物理的意味は、酵素反応の速度が最大速度の1/2であるときの基質濃度と考えればよい。この定数の値が小であるほど酵素は低濃度の基質で飽和してしまう。

なお、生産コストを下げるためには酵素の回収が必要である。これを検討した結果によると、排除分子量1万の膜を用いた限外濾過によって80~90%の酵素が回収でき、また糖化残渣からは酸性でCMCアーゼとセロビアーゼが、中性でアビセラゼが抽出回収できた。図8はセルロースの糖化・発酵装置のフローであるが、その左上部に糖化槽から限外濾過器を通して酵素を回収し、再び糖化槽に戻す経路を示してある。

爆砕シラカンバセルロースの *Acremonium* セルラーゼによる糖化反応は、pH 4.5、温度 50℃で順調に進行する。糖化酵素の生産と糖化についても、木材チッ

図8 残渣セルロース糖化・発酵装置のフロー²⁾

プ1日処理量100tの規模における生産コスト等の検証を行った。

(2) 耐熱・耐アルコール性酵母の作出

上述のとおり、糖化は50℃という比較的高い温度で行われるので、それに続く発酵工程もそのままの温度でできることが望ましい。ところが通常用いられているアルコール発酵用の酵母は35℃ですでに生育阻害を起こし、アルコール生産を停止してしまう。したがって発酵槽には冷却装置が必要である。もし、50℃に耐える酵母があればその必要もなく、また高温であるため雑菌汚染の危険も減り、さらに、生産されたアルコールを順次発酵槽の外へ取り出すフラッシュ連続発酵方式を組み込むときにも燃費を節約できるなど多くの利点を生み出す。そのような酵母を自然界から探し出す、いわゆるスクリーニングを根気よく続けるとともに、細胞融合やミトコンドリア*の導入を実施して耐熱酵母を創出する研究が行われた。

* ミトコンドリア：細菌、藍藻以外のすべての生物細胞中に存在する糸状・粒状の小器官。この内部には呼吸に関係する酵素が含まれ、また耐熱性などにかかわる遺伝子があるといわれている。

まずスクリーニングの成果であるが、土壌から分離された酵母菌の2株が45℃に耐えることがわかった。しかし、肝心のエタノール生産性は6.6%(V/V)とよくない。この2株に熱ショック処理(52℃, 60分)を繰り返し、さらに45℃で馴養する方法により、1株(No.227)については、5回の処理で初めの菌株にくらべて200倍の生存率となるまでに耐熱性を向上させた。しかし、エタノール生産性の方は相変わらずよくないので、人工変異株の誘導や細胞融合により優良株の育成

を図ることとした。

まず人工変異の誘導であるが、これを容易にするため、一倍体*細胞をつくることから始めた。さきの熱ショック処理と馴養で得た耐熱性株からマイクロマニピレーション法**で一倍体を分離したが、これには自己接合能があり、不安定な一倍体なので変異の誘導には不向きである。そこでエタノール生産性は劣るが耐熱性の高い別の分離株(TS 800)を用い、ベノミル処理***を施して一倍体の誘導を試みたところ安定な一倍体を得た。このベノミルは染色体を欠落させる作用のある物質で、染色体の欠落を繰り返すうちに、二倍体*から一倍体への変化が起こるものである。

* 一倍体、二倍体：生物の生活機能の調和を保つのに欠くことのできない染色体の一组をゲノムというが、ただ一つのゲノムからできている個体を一倍体(例、生殖細胞)、二組からできているものを二倍体(例、体細胞)という。

** マイクロマニピレーション法：顕微鏡下で、微細なガラス針やピペットを用いて、微生物、孢子などの単離や生理学的実験を行う技法。

*** ベノミル処理：ベノミルはベンズイミダゾール系殺菌剤で次のごとき構造を有する。この物質は、酵母などに微量を与えると、有糸分裂の阻害によりDNA合成が妨げられる。

ここに得られた一倍体にエチルメタンスルホン酸(EMS)を作用させて突然変異株を人工的に誘発する

こととした。EMSは、強力なアルキル化薬剤であり、DNA*のグアニン7位の窒素をエチル化することによって突然変異を誘発するものである。この処理によって、たしかに変異株は得られるのであるが、そのなかから、エタノール生産性の高い変異株を探すのは困難である。このような人工変異誘発剤は、DNAのある特定部位に損傷を与えるものであるから、エタノール生産性向上というようなプラスの方向性をもった変異株の直接的取得には向かない。しかし、パイオバルブ化に必要なセルロース分解能を欠損したりグニン分解菌を誘発するときなどには有効であろう。ただし、次に述べる細胞融合による優良株育成の前段階処理としては有意義なものである。

* DNA：デオキシリボ核酸のこと。これは遺伝子の本体で、アデニン、グアニン、シトシン、チミンの四塩基とデオキシリボース、リン酸基から成る生体高分子。二重らせん構造を形成している。

細胞融合の一般的手順は、①細胞壁を溶解酵素で取り除き、細胞膜に包まれたプロトプラスト*を分離する、②2種類のプロトプラストをポリエチレングリコールなどの高分子試薬によって融合させる、③雑種細胞の選抜と培養を行う、④安定な組換え体の作出と優良株の選抜を行う、ということになる⁴⁾。耐熱性と且つエタノール生産性の大きい酵母を作出するには、親株2種のうち1種が耐熱性であり、他種がエタノールをよく生産する株であることはいうまでもないが、③の段階で2種のプロトプラストが融合してできた雑種細胞を、同種のプロトプラスト融合体から選り分けるために、何等かの目印をあらかじめつけておく必要がある。このための方法はいくつかあるが、ここで用いたのは栄養要求性の突然変異株を利用する方法である。すなわち、親株の一つは、耐熱性の *Kluyveromyces* sp. TS 808 の一倍体でアデニン要求性株**である。これは前述のEMS処理によってつくった突然変異株である。他の一つは、エタノール生産性の高い *Saccharomyces cerevisiae* TS-8 の一倍体で、アクリフラヴィン含有培地で誘導した呼吸欠損株である。これらはグリセリンを唯一の炭素源とする培地では生育できない。そこで、①、②の手順を済ませて得た融合体をグリセリン培地に播き、そこで生育する株を拾えば③の選抜ができたことになる。実際にこの方法で40株の融合株を取得している。④について検討したところ、融合株間では差があるにしても、どの株も高温での生育能を獲得していることがわかった。これらのうちF-1株と名づけた融合株は43℃で親株TS 808より成育が速く、エタノール生産性も向上していた。耐熱性は両親株の

中間の性質を示していた。

* プロトプラスト：原形質体ともいう。細胞壁を酵素で溶かすと、細胞膜に包まれた原形質の球状体として得られる。酵母に例をとれば、細胞壁をとり除いた酵母細胞の全体ということになる。細胞壁がないので、他種のプロトプラストと合体、融合がし易くなる。

** アデニン要求性株：突然変異の結果生じた変異株のうち、培養基中にアデニン(核酸の一分で、6-アミノプリンともいう)がないと生育しない菌株のこと。この菌は、グリセリン培地などには生えないが、他のアデニン合成能力のある菌株のプロトプラストと融合すれば、生えるようになる。これから逆に、他種のプロトプラストとの融合が起こったことが証明できるわけである。

酵母の耐熱性にはミトコンドリアが関与しているといわれている。そこでF-1株及び両親株について、ミトコンドリアと耐熱性についての関係を調べた。その結果、両者には関係が認められ、また、F-1株のミトコンドリアはTS 808由来のものと推定できた。そこでTS 8株の方からミトコンドリアを分離し、それをF-1呼吸欠損株のプロトプラストに導入し、グリセリン培地上から拾った25株の形質転換体のうち、呼吸能を安定的に保持していると思われる数株について、耐熱性を調べた。それらのうち、TF 4及びTF 10株は、43℃において増殖能、発酵能とも親のF-1より優れていた。これらのことより、TF 4とTF 10の両株はTS-8のミトコンドリアに存在する耐熱性因子が導入されたものであると推定した。すなわち、ここに、耐熱性のある高温発酵性酵母を創出したわけで、今後この手法を応用して一段と高性能の酵母を育種する道が拓けたといえよう。

糖化とそれに続く発酵装置のフロー(図8)で、中央部下側から右半分が発酵の部分である。糖化液受槽から酵母*タンクに糖化液を導き、そこへ種酵母と助成料(硫酸アンモニウム、過リン酸石灰、米糠など)を入れ、約1日間培養して酵母をつくる。これを発酵タンク内のもろみ**に仕込んで約4日間発酵を続けた後、もろみ塔の上部から発酵液を入れ、塔底からは蒸気を吹き込んでエタノールの蒸留を行う。次いで濃縮塔、精製塔を通して96%(V/V)のエタノールとする。

* 酒田：酵母を多量に含んだ培養液で、発酵タンク内での発酵の種菌となるもの。

** もろみ：発酵原料(糖化液と助成料)を蒸煮殺菌した液状物。

この場合も、木材チップ1日当り100t処理として出てくるセルロースを糖化、発酵させることを想定し

て生産コストを試算した。それについては後に述べる。ただし、この場合には、通常の酵母を使用するものとした。というのは、フィージビリティ・スタディを行った当時には、まだ効率的な耐熱・耐アルコール性酵母を取得するに至っていなかったからである。

(3) セルロースの同時糖化発酵法

セルロースをエタノールに直接変換する嫌気性細菌の一群がある。*Clostridium* 属細菌が最も著名で、直接発酵といわれている⁵⁾。直接変換といっても、まずセルロースの糖化が行われ、ひきつづいて糖の発酵が進行するという反応である。酵素的にはセルロース分解酵素とグルコースをエタノールに変換するための酵素群が関与しており、*Trichoderma* 菌と酵母の両方の機能をこの嫌気性細菌は併せもっているというわけである。しかし、アルコール耐性が低いとか、反応時間が長いとか、実用化には克服すべき問題を沢山かかえている。

本組合がとりあげた同時糖化発酵法は、主として今ある技術を組み合わせ、直接発酵と同様なセルロース変換法を開発しようというものである。

まず、予備的に糖化と発酵を別々に行った実験から、糖化で糖の生成する速度は3~4 g/lit., hr であり、発酵による糖の消費速度は5~6 g であった。したがって、両者を組み合わせた場合、セルロースから糖が生成するそばからエタノールに変換され、従来知られているグルコースによる糖化阻害の起きる心配がないことになる。この例では、出発原料はシラカンパチップを蒸煮爆砕してから、ヘミセルロース、リグニンを抽出した残渣セルロースで、15%程度とかなり多量のリグニンをまだ含んでいる状態のものである。また糖化条件は、*Trichoderma* および *Aspergillus* 由来のセルラーゼを1:1の割合で混合したもので、酵素濃度は1%, pH 4.5, 温度 45°C, 糖化時間 7時間, 発酵には *Sacchromyces cerevisiae* を用い、pH 4.5, 温度 30°C の条件で行った。

次いで同時糖化発酵について研究を進めた。糖化酵素としては本研究組合開発の *Acremonium* sp. 由来の酵素と *Trichoderma* 由来の酵素を1:4の割合で混合したものを1.5%の濃度で用いた。酵母は耐熱性のある *Kluyveromyces* (本研究組合開発) を使用し、温度は35°C~45°Cの範囲で変えてみたが、45°Cでは十分発酵が進まず、35°Cがもっともよかった。この酵母は発酵温度によって耐エタノール性に差があるために、このような結果を得たものと思われる。爆砕チップからのセルロース仕込み量は多いほどよい結果を与えたが、仕込み量が16%以上になると、発酵終了時の発酵液の粘度が非常に高くなってしまうので、仕込みの標準は

16%の濃度とした。

このような一槽で糖化と発酵を同時に行う方法により、最終的にエタノール濃度 80 g/lit を達成することができた。これはグルコース濃度に換算すると、160 g/lit に匹敵し、酵素糖化のみでは達成が困難な濃度である。また、その際の酵素使用量は 30 gG/gE, すなわち、1 g の酵素で 30 g のグルコースを生産したことになる。従来の成績は、20 gG/gE 程度であることを考えると、同時糖化発酵法の優位は明らかである。

さらに膜分離装置を発酵槽の次に設置し、省エネルギー的なエタノールの回収を図った。膜蒸留法* では、エタノールの濃縮はできなかったが、透過液にはグルコース、酵素、酵母等は含まれていず、エタノール部分を反応系外に取り出すことができた。逆浸透膜は透過液量の低下が激しく使用に耐えなかった。目下のところ、同時糖化発酵液中には3~5%のリグニンや未糖化セルロース残渣が固形分として含まれており、これが膜分離法の適用を困難にしているものと考えられる。

* 膜蒸留法: ここで用いたのは直接法で、その原理は次のようである。発酵液と回収液を疎水性の多孔質膜で仕切っておくと、この膜は液体をはじくので、液は多孔質膜を透過できない。発酵液が回収液の温度より高いと、発酵液の表面で発生した水やエタノール蒸気は膜の穴を通過して回収液の表面で凝縮する。これによって、発酵液中からエタノールを分離することができる。

4. モデルプロセスについての経済性評価

リグニンの生物工学的利用としては、リグニン分解酵素を用いた低分子化反応による各種のフェノール類とその誘導体生産が考えられるが、それには、関連酵素の大量生産が必要である。将来、遺伝子工学的技術によって、リグニン分解酵素が大量且つ安価に供給されるようになれば、リグニンバイオ工業やバイオパルプ化も成り立つであろう。現在の段階では、リグニンに関しては、物理的・化学的手法によってのみ有用物質への工業的規模での変換が可能である。研究組合では、リグニンからの炭素繊維の製造について研究を進め、多大の成果を得ているが、本稿の範囲から外れるのでここには記述をさし控えたい。ただ、部分的であるにせよ木材バイオ工業を成立させるためには、3成分すべての利用が前提となる。そこで本章においては、ヘミセルロースからは還元キシロオリゴ糖、セルロースからはエタノール、そしてリグニンからは炭素繊維を製造するとして、このような工業が、はたして成り立ち得るか否かについて、若干の考察を加えてみたい。

ロオリゴ糖精製処理までの工程とそれ以外の工程に分けて設置するものとして積算を行った。

(4) 生産費と生産コスト

生産費の算出には、人件費、ユーティリティー費、薬品・消耗品費、設備費、及びその他の項目ごとに、単価等を表3のとおりに設定し、その単価等に必要量

表1 物質収支（絶乾）

	日 (t)	年 (t)
原料	100	30,000
爆砕繊維	80	24,000
ヘミセルロース	17	5,100
キシロオリゴ糖	15.3	4,600
還元キシロオリゴ糖	15	4,500
リグニン	12	3,600
炭素繊維	5.1	1,542
残渣セルロース	51	15,300
グルコース	39.4	11,808
96%エタノール	18	5,412
	(22.2 kL)	(6,658 kL)
糖化残渣リグニン	10	3,000

表2 設備投資額²⁾

工 程	金額(千円)	割合(%)
木材成分分別	2,158,000	19.2
キシロオリゴ糖精製・濃縮	1,500,000	13.3
還元キシロオリゴ糖製造	1,000,000	8.9
炭素繊維製造(フェノール化法)	4,121,000	36.6
セルロース糖化酵素製造	710,000	6.3
セルロース糖化	1,014,000	9.0
エタノール醗酵	760,000	6.7
合 計	11,263,000	100.0

表3 生産費算出のための単価等

項 目	単 価 等	項 目	単 価 等
人件費	12,000 千円/人・年	水素	100 円/Nm ³
用水費	150 円/m ³	フェノール	200 円/kg
電力費	15 円/kWh	炭素源	4,500 千円/バッチ
重油	50 円/lit	チップ	30 円/kg
環境費	2 円/kg	減価償却費	10% 引き 10 年定率
食塩	30 円/kg	金利	設備費×7%/年
塩酸 (35%)	22 円/kg	保全費	設備費×2%/年
苛性ソーダ (50%)	30 円/kg	固定資産税	設備費×1.4%/年
窒素	55 円/Nm ³	保険料	設備費×1%/年

を掛けて金額を出し、それらを合計して各工程ごとの生産費を算出した。蒸煮爆砕法による成分分別処理工程については表4に、ヘミセルロースからオリゴキシロ糖を経て還元キシロオリゴ糖へ変換する2工程については表5に、セルロースの糖化とエタノール発酵の2工程については表6に示した。炭素繊維と糖化酵素生産については記載を省略したが、各工程の生産費をまとめた表7には、それらも含めて掲げてある。ただし糖化酵素の生産費5億3,400万円余という金額は、糖化工程の生産費算出の際に組み込んである。表7により、モデルプロセス全体の年間生産費は約69億7,800万円である。

また、生産コストは、生産費を表1の年生産量で割って求め、同じく表7に併記した。すなわち、還元キシロオリゴ糖は422円/kg、炭素繊維は1,440円/kg、エタノールは221円/kgと算出されている。

(5) 3製品の年間生産額

このモデルにおいて、糖化工程で排出される残渣リグニンは燃料として用いることができるので、これも製品のひとつとして生産額に加えた。結果は表8のとおりで、このモデルプロセスにおける年間生産額は、約69億1,000万円となる。

(6) 経済性評価に関する一考察

このモデルプロセスにおける3製品の年間生産額69億1,000万円(表8)と年間生産費69億7,800万円を較べると、全体では年間6,800万円の赤字ということになる。この金額は生産額の0.98%、生産費の0.97%という小さな値であることから、市場価格のきわめて小幅な上昇によって吸収もできようし、生産コストの僅かな引き下げ努力によって改善できる程度のものであろう。しかしながら、一つ一つの製品について、市場価格と生産コストを比較すると、その程度には大差のあることがわかる。すなわち、還元キシロオ

表 4 蒸煮爆砕法による木材成分分別処理費

項 目	単 価	必 要 量	金額(千円)
人件費	12,000 千円/人・年	12	144,000
用水費	150 円/m ³	109,595	16,440
電力費	15 円/kWh	5,162,400	77,436
重油	50 円/lit	10,075,000	503,750
塩酸	22 円/kg	1,051,200	23,126
苛性ソーダ	30 円/kg	921,600	27,648
チップ	30 円/kg	30,000,000	900,000
減価償却費	10%引き 10 年定率		194,220
金利	設備費×7%/年		151,060
保全費	設備費×2%/年		43,160
固定資産税	設備費×1.4%/年		30,212
保険料	設備費×1%/年		21,580
合計			2,132,632

表 5 ヘミセルロースから還元キシロオリゴ糖への変換工程における生産費

項 目	キシロオリゴ糖の精製・濃縮		還元キシロオリゴ糖製造	
	必 要 量	金額(千円)	必 要 量	金額(千円)
人件費	4 人	48,000	9 人	108,000
用水費	435,000 m ³	65,250	120,000 m ³	18,000
電力費	4,200,000 kWh	63,000	1,342,000 kWh	20,130
環境費				11,200
食塩	1,080,000 kg	32,400		
塩酸	900,000 kg	19,800	610,000 kg	13,420
苛性ソーダ	1,270,000 kg	38,100	447,000 kg	13,410
粉炭			45,000 kg	22,500
水素			671,000 Nm ³	67,100
触媒			46,500 kg	116,250
酵素	15,300 kg	25,322		
消耗品		90,000		26,830
包装材				202,500
減価償却費		135,000		90,000
金利		105,000		70,000
保全費		30,000		20,000
固定資産税		21,000		14,000
保険料		15,000		10,000
合計		687,872		823,340

リゴ糖では、生産コストの方が kg あたり 28 円低く、炭素繊維に至っては、それが 1,060 円も低い。それに対してエタノールでは、逆に 49 円高いという結果であ

る。

現在、エタノールは石油の熱分解産物であるエチレンに水を付加して安価に合成することができるので、

表 6 セルロースの糖化・醗酵工程における生産費

項 目	セルロースの糖化		エタノール醗酵	
	必 要 量	金額(千円)	必 要 量	金額(千円)
人件費	4 人	48,000	5 人	60,000
用水費	337,200 m ³	50,580	265,933 m ³	39,890
電力費	7,570,200 kWh	113,553	441,936 kWh	6,629
UF 膜		20,700		
膜洗浄剤		543		
酵素	330,192 kg	534,574		
酢酸	113,400 kg	7,938		
アルギン酸 Ca ゲル				5,322
ゲル安定化剤				863
減価償却費		91,260		68,400
金利		70,980		53,200
保全費		20,280		15,200
固定資産税		14,196		10,640
保険料		10,140		7,600
合計		982,744		267,744

表 7 生産費と生産コスト

生 産 品 目	工 程	製 品	生産量 (t/年)	生 産 費 (千円)	生産コスト (円/kg)
還元キシロオリゴ糖	木材成分分別	爆砕繊維	24,000	2,132,632	89
	オリゴ糖生成濃縮	キシロオリゴ糖	4,600	687,872	150
	還 元	還元キシロオリゴ糖	4,500	823,340	183
	計				422
炭 素 繊 維	木材成分分別				89
	フェノール化～炭素化	炭素繊維	1,542	2,083,603	1,351
	計				1,440
エ タ ノ ー ル	木材成分分別				89
	糖化酵素生産	糖化酵素		(534,574)	
	糖化 (含酵素代)	グルコース	11,808	982,744	83
	エタノール醗酵	エタノール	5,412	267,744	49
	計				221
合 計				6,977,935	

コスト的には勝負にならないという事情がある。しかし、いずれは起こるであろう石油価格の上昇・油田の荒廃、枯渇等の事態及び人口の爆発的增加による食糧事情の悪化を考えれば、石油やテンポンに依存しないセルロースからのエタノール生産については今後も継

続して研究を行うべきである。先に述べたように、効率のよい混合糖化酵素と耐熱・耐エタノール性酵母を組み合わせたプロセスや、それらを同一反応槽で行う同時糖化発酵技術、それに膜分離技術等の発展により、エタノール生産コストの低下は可能と考えられる。と

表 8 各製品の年間生産額²⁾

製 品	生産量 (t/年)	市場価格 (円/kg)	生産額 (千円/年)
還元キシロオリゴ糖	4,500	450	2,025,000
炭素繊維	1,542	2,500	3,855,000
エタノール (96%)	5,412	172	930,864
糖化残渣リグニン	3,000	33	99,000
合 計			6,909,864

くに最近開発の進められているパーヴェイパレーション膜*によるエタノールの濃縮は省エネルギー的且つ効率的で期待のもてる技術である。

* パーヴェイパレーション膜：カルボキシメチルセルロースとキトサンの積層型複合膜で、浸透気化膜といってよい。

この膜の一方に混合液体（例えば水・エタノール混液）を導入し、反対側を減圧状態にすると、膜内に浸透した液体（大部分エタノール）は気化して膜を通過する。通過蒸気は冷却し液体として補集する。これによって目的とする物質を効率的に濃縮することができる。

しかしながら、目下のところこのモデルプロセスでは、エタノールが全体の足を引張っているわけである。これを早期に改善するためには、エタノールの代りにもっと経済性のある製品を導入すべきである。例えば各種の高機能性セルロースとか、爆砕セルロースにはリグニンがかなり含まれているのを利用した紫外線防止包装紙とかがある。図 10 にはそれらと共にヘミセルロース及びリグニン並びに爆砕繊維自体から誘導できる製品を示した。なお、針葉樹間伐材などの利用を考えて、この図には酢酸蒸解も組み込んである。これら

の製品を適宜組み合わせた木材成分総合利用システムの構築によって、木材バイオ工業も活かされてくるであろう。

そのほか、生産規模を大きくすることによっても、経済性を改善することができる。例えば、木材チップの蒸煮爆砕処理費は、1日100tよりも1日200t処理の方がkg当り8円は低下するし、それが1日500t処理となると、100t規模より17円低くなることが試算されている。また、還元キシロオリゴ糖やエタノールの生産コストも規模拡大によって低下することは明らかである。逆に、規模が1日1tのチップ処理量となったときは、蒸煮爆砕による分別処理費はkg当り422円にはね上り、キシロオリゴ糖の精製・濃縮工程のコストは1,419円に上昇するなど、規模は生産コストに大きく影響してくる。

生産規模を大きくすると、製品によっては市場規模をはるかに超える生産量となろう。たとえば、還元キシロオリゴ糖類似の甘味料フラクトオリゴ糖の市場規模は年間3,600t、ピッチ系炭素繊維は二通りの情報があってはつきりしないが、1,200~6,000tといわれている。木材チップを原料とする産業からこれらを上まわる製品を送りこむのは容易ではない。したがって、製品の多角化と新用途開拓に力を注がねばならない。

以上のほか、今回行った生産コストの試算についても一層精細な検討を加える必要がある。たとえば、各工程における生産設備の配列、人員の配置等の適正化を行ってコストの軽減を図る等である。また、今回はプロセスの評価を主にした、いわゆる上から下へ向けてのフィージビリティ・スタディを実施したのであるが、企業評価としての下から上へ向けてのFSを行う必要がある。

5. おわりに

以上は、木材成分総合利用技術研究組合において過去4年間にわたって実施してきた研究のうち、木材バイオ工業の範囲にあるものを主として取り上げ、それに私見を加えつつ紹介したものである。詳細については、参考文献2)の成果集を御参照いただきたい。このような工業を成立させるための条件は非常に複雑で、今後さらに検討を加えねばならないところである。そういった条件の一つでもある原料の問題についてここで少々触れ、しめくくりとしたい。

地球全体では、莫大な炭素資源が蓄積されており、また年々光合成反応によって著量の炭素資源が生産されている。これに関する正確な測定値はないが、おおよその推測は各所でなされている。その一つに Hall²⁾

の示した値がある。それによると年間の光合成による炭素の固定量は840億tC、またバイオマス貯蔵量は8,100億tCであり、その90%は樹木の形で固定されているという。現在1年間に全世界で使用されているエネルギー量は50億tCであるから、年間の光合成量はその16.8倍、バイオマス貯蔵量は同じく162倍に上る勘定である。若干過大な推測値かもしれないが、話半分としても相当な量であることは間違いない。

ひるがえって、日本国内では木質資源はどのような状況におかれているのであろうか。それを考える前に、先程述べたモデルプロセス、すなわち、木材チップ処理量1日100t規模の工場一つでどの程度の森林面積が必要かを試算してみよう。年間300日稼働として、3万tの広葉樹チップを消費するが、現在、放置されている里山広葉樹林からは1ha当り52tのチップが採れるといわれている。そのような広葉樹林でその工場の原料をまかうとすると、3万tを52tで割って577haの面積が必要ということになる。いま、この広葉樹林の伐期を30年とすると577ha×30(年)=17,310haの面積が、工場を継続して動かすために必要である。しかし、これは放置されたままの生産性のきわめて低い広葉樹林の場合である。このような森林の年間成長量はha当り1.7t程度である。したがって、その10倍の成長量のある森林であれば面積は1/10の1,700haあればよいことになる。事実成長のはやいポプラ、ヤナギ、ヤマナラシ、モリシマアカシアなどの林では15tから20tの年成長量を期待できる。

かつて木炭の生産が盛んであった頃は、600~700万haの広葉樹林から年々2,000万t程度 of 木材が伐採利用されていた。現在は、せいぜいその1/3くらいが利用されているに過ぎない。今後、なんとかして、この放置されたままの400~450万haの広葉樹林の生産性を向上させる必要がある。

ごく最近の調査によると、いわゆるバイオマスとしての広葉樹資源量は日本全国で約10億t、うち利用可能量は2億8,000万tに上るといわれる。地域的には北海道が1位で利用可能量2,900万t、次いで、鹿児島、宮崎、島根、岩手、福島、長野、熊本、山口の各県がこの順で並んでおり、利用可能量はそれぞれ1,000万t台である。このほかに、末木枝条、未利用間伐材、工場残材があわせて1,200万tは存在する。

このようにみえてくると、木材成分利用工業とか、木材バイオ工業用の資源は、さし当りは国内でまかなえるものと考えてよいであろう。しかし、21世紀中に石油が枯渇するものと仮定すると、その代替資源として木質資源への要求度は飛躍的に高まるものと予想され

る。しかも、環境保全と両立させなければならない。そのような事態への対応策は今から十分に練っておくべきである。森林は一日では成らないからである。

参 考 文 献

- 1) E. Glesinger, The coming age of wood, Simon & Schuster, Inc., 1949, 邦訳, 来るべき木材時代, 森林資源総合対策協議会, 1953
- 2) 木材成分総合利用技術研究組合編, 木材成分総合利用研究成果集, 同技術研究組合, 1990
- 3) 原口隆英ほか編著, 木材の化学, 文永堂, p.118, 1985
- 4) 佐々木恵彦編著, 森林のバイオテクノロジー入門, 創文, pp.135—154, 1987
- 5) 中野準三ほか監修, ウッドケミカルの先端技術と展望, シーエムシー, pp.111—116, 1983
- 6) 志水一允, 生物資源の効率的利用技術に関する総合研究—広葉樹等木質系バイオマス資源の変換・複合利用システムの設計と評価—紙野伸二他編, 林業科学技術振興所, pp.112—122, 1988
- 7) D. O. Hall, Proceedings, World Conference on Future Sources of Organic Raw Materials, P.584 Toronto, 1978