

正念場を迎えた米国の第二世代バイオエタノール（2）

（バイオリファイナリー建設ラッシュ）

エネルギー技術調査部 財部明郎

はじめに

ガソリンの代替として自動車燃料に使用されるバイオエタノールは、現在は主にトウモロコシやサトウキビのような穀物や糖類から作られている。これは基本的に酒の製造すなわち醸造と同じ技術である。しかしながら、燃料として使用するのであれば、食味や口に入れたときの安全性などを考慮する必要はない。（事実、燃料用バイオエタノールには、食用に転用できないように毒性のあるメタノールや天然ガソリンが添加されている。）

エタノールを燃料として利用するなら、できるだけ安価かつ持続可能な方法で、大量に製造されることが望ましい。このため従来のような醸造という借り物の技術ではなく、燃料用に特化した新しいバイオエタノールの製造技術が開発されようとしており、それが第二世代バイオエタノールである。

第二世代バイオエタノールの特徴の1つは、第一世代で主流の食用穀物ではなく原料としてありふれた草や木などのいわゆるバイオマス資源が用いられることである。これは安価かつ大量に入手が可能と考えられるからである。

つまり、そのあたりに生えている草や木、廃木材や都市ごみ、糞尿までが自動車燃料へと転換できる、ある意味夢のような技術である。しかしながら、この技術の実用化にあたっては、様々な障害が待ち構えている。

今回は、そのような障害の例として、第二世代バイオエタノールの開発会社であるレンジフュエル社が破たんしたことと、米国環境庁（EPA）が第二世代バイオエタノールの供給目標を引き下げたという2つの悲観的な情報について解説した。

しかしながら、一方で、米国ではいくつかの商業規模の第二世代バイオエタノール製造工場の建設が進められており、今年（2013年）から来年にかけて、これらの工場が完成ラッシュを迎えることになる。

今回は第二世代バイオエタノール開発の影の部分について述べたが、今回は光の部分について述べることにしたい。

1. 米国のバイオリファイナリー建設計画

バイオマスを原料としてバイオエタノールを作る工場では、単にエタノールを作るだけにとどまらない。副産物を燃やして発電したり、その燃焼熱を利用したり、飼料や化学品なども同時に作られる。

実験室段階では、バイオエタノールの製造に特化して研究がおこなわれるが、実際のプラントでは当然のことながら副産物が発生し、これを発電や化学品その他の用途に有効に使わなければ、経済的に成り立たない。

このようにバイオエタノールだけでなく、それに付帯して様々な生産や処理も同時に行う

複雑な工場を統合型バイオエタノール工場あるいはバイオリファイナリーと称している。バイオリファイナリーには様々な付帯設備が必要となり、それだけ大規模になり、投資額も大きくなる。ちなみに米国再生可能エネルギー研究所（NREL）によると、年間エタノール製造能力 20 万 kℓのバイオリファイナリーを建設するには 3 億 8,000 万ドル（342 億円）の費用がかかると見積もられている¹⁾。

米国では様々な企業、研究機関が第二世代バイオエタノール技術の開発に取り組んできた。この中には独自の技術を引っ提げて参加した多くのベンチャー企業も含まれているが、今年あるいは来年操業を開始するとみられる商業規模のバイオリファイナリーをみると、商業段階に達した多くが大手企業であり、また採用された手法も生化学法が主となっている（表一1）。

表一1 第二世代バイオリファイナリー（商業規模）の建設計画

社名	建設場所	完成時期	年間生産量	技術
KiOR	ミシシッピ州コロバス	2013年10月	4万9,000kℓ	熱化学法
イネオス	フロリダ州ベロビーチ	2013年内	3万kℓ	熱生化学法
アベンゴア	カンザス州ヒューゴトン	2013年内	9万5,000kℓ	生化学法
ポエト・DSM	アイオワ州エメッツバーグ	2013年末	9万5,000kℓ	生化学法
ファイバーライト	アイオワ州ブライヤーズタウン	2013年初頭	2万3,000kℓ	生化学法
デュポン	アイオワ州ネバダ	2014年	11万4,000kℓ	生化学法

企業名をみてみるとイネオスとデュポンは世界でも有数の化学会社であり、ポエトは米国最大手のエタノールメーカー、アベンゴアはスペインを拠点とする電子、建設、エネルギーなどを幅広く手掛ける世界企業である。上表のうち、ベンチャー企業は KiOR とファイバーライトだけであり、ベンチャー企業が苦戦している様子が窺える。

第二世代のバイオエタノール製造技術だが、大きく分けて生化学法と熱化学法があることは前回述べた。商業化段階では KiOR だけが熱化学法、またイネオスは原料を熱的にガス化したあと生化学的にエタノールを合成する方法であり、これら以外はすべて生化学法が採用されている。なお、2011年に破綻したレンジフュエル社はベンチャー企業で、かつ熱化学法であった。

2. プロジェクト・リバティ

このように、今年から来年にかけて、商業規模のバイオリファイナリーが次々に立ち上がる予定であるが、このうち本命の1つと目されているポエト・DSM社のプロジェクトについて、やや詳しく解説したい。

ポエト・DSM社の親会社であるポエト社は1987年にトウモロコシ農家のプロイン家によって創業されたエタノール製造会社である。当時の米国ではトウモロコシの生産が過剰となり、日本のコメと同じように減反政策がとられていた。このような生産抑制策に業を煮

やしたブロイン家は、自家のトウモロコシ農場を抵当に入れて銀行から資金を借り受け、7万ドルで中古の小規模なエタノール工場を手に入れた。これがポエト社（当時はブロイン社）の始まりである。

まず、ポエト社はこの小規模なエタノール工場に手を入れて生産効率を向上させ、収益を上げられるように改善した。さらにエタノール工場を次々に傘下に収めていき、「重労働と国の政策と銀行の信用とわずかばかりの運」²⁾に恵まれたおかげで、ポエト社は全米に 27 のエタノール工場を持つ、米国最大のエタノール製造業者となった。こうした事業拡張を指揮したブロイン家の社主の息子ジェフ・ブロインはいわゆる立志伝中の人物である。

ポエト社は 2006 年から第二世代バイオエタノール技術開発計画を「プロジェクト・リバティ」と名づけて推進してきた。2011 年にはロイヤル DSM 社と共同でポエト - DSM 社を設立し、現在、「プロジェクト・リバティ」はこのポエト-DSM 社によって進められている。

なお、ロイヤル DSM 社はオランダに本拠を持つ、食品、医薬品、化粧品、飼料等、主にライフサイエンス関係製品の製造販売を行う世界的企業で、第二世代バイオエタノールに必要とされる先進的な発酵や酵素技術を持っている。

ポエト社のホームページ³⁾その他からの推定によると、「プロジェクト・リバティ」のプロセスは次のとおりであるが、典型的な生化学法を採用していることが分る。

(1) 原料収集

プロジェクトの原料は、トウモロコシの茎や葉（コーンストーバ）や実を取った残りの芯（コーンコブ）である。「プロジェクト・リバティ」では年間 30 万トンの原料が必要となるが、これを工場から半径 35 マイル以内にあるトウモロコシ農家から買い取ることにしている。

(2) 前処理

集められた原料は粉碎されたあと、強固な構造を弱めるために前処理が行われる。これによって次の工程の効率が左右され、経済性に大きな影響を持つ。前処理はプロジェクトの成否を分ける非常に重要な工程である。

ポエト-DSM 社はアンドリッツ社から二段階前処理技術を導入すると発表している⁴⁾。アンドリッツ社は、オーストリアに本拠を置き、水力発電や紙パルプなどの業界に機器を提供している企業である。ポエト-DSM 社が導入する技術はスチームによって加圧、減圧を行う水蒸気爆砕法の一つである。

(3) 糖化

前処理された原料はセルラーゼと呼ばれる酵素によって、原料中のセルロースが糖に転換される。セルラーゼは近年、価格が劇的に低下してきているものの、高価な酵素であるため使用量をできるだけ減らすシステムが工夫されている。なお、ロイヤル DSM 社は酵素メーカーであるから、セルラーゼについては豊富なノウハウを持っていると推測される。

(4) 発酵

糖化工程でできた糖を酵母のような微生物を使って発酵させてエタノールに転換する工程である。ポエト社はトウモロコシからエタノールを作ってきた会社であるから、この工程については当然ながら十分な経験があるだろう。ただしバイオマス原料から製造された糖はトウモロコシと違って、通常の酵母を使ったのでは一部しかエタノールに転換することができない。「プロジェクト・リバティ」では通常の酵母ではなく、遺伝子組み換え操作によって効率を高めた酵母あるいはザイモナスとよばれる微生物を使用していると思われる。

3. このプロジェクトの利点と問題点

(1) 利点

「プロジェクト・リバティ」で最初の商業プラントはアイオワ州エメッツバーグに建設されている。このプロジェクトの最大の特徴は新設プラントがポエト社傘下の既存のエタノール工場に隣接していることであろう。これによって、以下に述べるような様々な利点が生まれる。

① 原料の収集

既存のエタノール工場は広大なトウモロコシ農作地(コーンベルト)の中に位置している。集荷されたトウモロコシの実の部分は既存の工場ではエタノールに転換するが、従来、畑に放置されていた部分を使ってバイオエタノールが作られる。つまり既存工場に併設することで原料を入手することが非常に容易なのである。

ただ、このような農業残渣物をすべて畑から取り去ってしまうと耕地が浸食されたり、肥料不足になったりすることが懸念される。これを防止するために「プロジェクト・リバティ」では農業残渣物のうち、75%以上を畑に残すよう農家を指導している。このあたりは、トウモロコシ農家をルーツに持つポエト社ならではの配慮であろう。

② 設備の共用

既存設備に隣接してバイオリファイナリーを建設することによって、一部の設備を共用することができ、建設コストを削減することができる。たとえば、製品エタノールタンクは従来のエタノールタンクと技術的にまったく変わるところがないから、そのまま使用することもできる。意外に費用のかかる出荷設備や取り付け道路も新設する必要がない。冷却水や変電設備などのユーティリティ設備も既存の設備を一部使うことができる。

③ エネルギーの融通

第二世代バイオエタノールの製造過程ではかなりの量の副産物が発生する。その多くはボイラーで燃焼させて、スチームや電力としてバイオリファイナリー内で活用することになる。「プロジェクト・リバティ」では、このスチームや電力を、隣接した既存のエタノール工場でも使用することになっている。これによって既存の工場ですべて使っていた天然ガスの使用量を削減することができる。

従来のトウモロコシを原料としたエタノール生産方法では、原料と製品間では基本的にカーボンニュートラルだが、熱源として大量の天然ガスを使用するため、CO₂ 発生量の削減効果は数十%にとどまると考えられていた。しかし、「プロジェクト・リバティ」では余剰熱源を隣接工場に供給することによって 100%を超える CO₂ 発生量削減効果が可能になるという。

④ ノウハウ・人材の共有

ポエト社は長年にわたってトウモロコシからエタノールを製造してきた会社であるから、第二世代のバイオエタノールについても、生化学法を採用する限りにおいては様々なノウハウを活用でき、人材も生かすことができる。

たとえば、使用する酵素や酵母は、種類は違っていても、基本的にその活用方法は同じである。操業時のトラブルが発生しても、従業員の経験によって比較的容易に対応できるだろう。

⑤ 顧客の確保

ベンチャー企業の場合は、技術ができたとしても製品販売先の確保が問題になる。あるいは、販売先が確保できずにその技術をエタノール製造企業に売らなければならないかもしれない。第二世代バイオエタノールもトウモロコシエタノールと品質的にはまったく変わるところがないから、ポエト - DSM 社は、石油精製業者やブレンド業者など従来の顧客にそのまま販売することができる。

(2) 問題点：前処理技術

酵素技術や発酵技術は現有技術の延長上にあり、ポエト・DSM 社は実験室で入念な試験を繰り返しているであろうことから、技術の完成度は高いと思われる。

しかし、もう 1 つの重要技術である前処理については、一般的に言って未だに技術が確立していないのが現状である。この技術については大きく分けて、酸やアルカリ、有機溶剤などの薬品を使う方法と高温・高圧の水を使う方法が提案されている。

薬品を使う方法は前処理効果が大きいですが、使用した薬品の回収が必要になることや、機器の防食が必要になることから、設備が複雑、高価になる。また、薬品自体のコストもかかる。

水を使えばこのような問題はないが、効果を上げようとするれば高温、高圧にならざるを得ない。このため高温、高圧に耐える設備が必要となって、やはり設備が高価となり、運転コストも大きくなる。高圧を使うことによる安全性の問題もある。

ポエト・DSM 社が導入するアンドリッツ社の二段階前処理技術は水を使った方法で、従来から回分式で行われてきた水蒸気爆砕法の一つであるが、これを連続式にすることはエンジニアリング的にかなり難しいのではないだろうか。

すなわち、バイオマスのような固体を密閉容器に入れ、高温・高圧の水に接触させ、再び密閉容器から取り出す操作を連続的に、かつできるだけ漏洩のないように行わなければならないが、これはかなり高度な技術を必要とする。

小規模な実験室でうまくいったとしても、規模を大きくした場合には、いろいろな問題が

発生するのではないだろうか。前処理工程がうまくいかないと、次の酵素糖化工程や発酵工程に支障が出ることになる。技術的には、この前処理工程の成否がプロジェクト全体の成否にかかわってくる可能性がある。

4. 今後の展望

今年から来年にかけて米国では商業規模の第二世代バイオエタノール工場が次々に立ち上がる予定である。しかし、収率が上がらない、装置がうまく稼働しない、酵素使用量が予定よりも多いなど、設計段階で予知できなかった様々な理由により、これらの工場のうちいくつかは失敗する可能性がある。

しかしながら、第二世代バイオエタノール製造技術の開発という観点からすれば、すべてのプロジェクトが成功する必要はない。極端に言えば、1つでも成功すれば技術は完成したことになる。あとはその成功した技術を拡張、応用していくことになるだろう。

技術が首尾よく完成したとすれば、そのあとは以下のような段階を経て普及していくと考えられる。

(1) 既存エタノール工場併設型の拡大

「プロジェクト・リバティ」のように既存のエタノール工場に併設してバイオリファイナリーを建設することは大きな利点がある。今回、紹介しなかったが、表1に掲げたアベンゴアやデュポンのように規模の大きなものはいずれも既存のエタノール工場に併設した形を採用している。

このような既存エタノール工場併設型のプロジェクトが成功すれば、今後、ほかのエタノール工場にも応用されていくであろう。特にポエト社は併設予定のエメッツバーグ工場以外に26のエタノール工場を傘下に抱えているため、まずこれらの工場に順次導入されていくことになるだろう。

(2) 原料の拡大

既存工場併設型の第二世代バイオエタノール製造工場が建設、操業されるに従って、次第に経験が積み上げられていき、効率の向上やコストの低減が進められ、さらにトウモロコシ残渣物以外の原料についても応用できるようになるだろう。

たとえば、製材屑や間伐材のような木質系残渣あるいは食品廃棄物や建築廃材、汚泥のような都市で発生する原料にも広がるかもしれない。また、廃棄物や副産物ではなく、スイッチグラスやエリアンサス、アカシアやユーカリのような成長の早い草本類や樹木を専用に栽培して、これを原料とすることも検討されている。

(3) 米国以外への展開

米国で成功すれば、この技術は米国内だけでなく、海外にも広まる可能性がある。たとえば、ブラジルのサトウキビ残渣（バガス）やカナダの森林残渣、東南アジアの稲わらなどからバイオエタノールを作る産業が発達するかもしれない。

また、第二世代バイオエタノール技術は前処理や発酵、酵素、膜分離、バイオマスボイラ、

排水処理など様々な要素技術の組み合わせでもある。日本や欧州、その他の国々が得意とする要素技術が採用されていく可能性も十分あるだろう。

第二世代バイオエタノールの開発目的の1つは中東や南米などから輸入している石油をなるべく減らし、エネルギー自給率を上げること、すなわち米国のエネルギー安全保障に貢献することである。ところが、シェールガス革命によって米国内で非在来型のシェールガスやタイトオイルが安価かつ大量に産出することになると、バイオ燃料による安全保障という意味合いが小さくなっていく。このことは、第二世代バイオエタノール技術開発に対する国の支援やベンチャーキャピタルなどからの投資を鈍らせることになる。

ただ、第二世代バイオエタノールは、農家所得の向上や新規雇用の創出、あるいは米国はあまり熱心ではないが、温室効果ガス排出量の削減という目的も持っている。こうしたことから国の支援については計画どおりに行われるだろう。

米国の第二世代バイオエタノールの商業プラントがうまく軌道に乗るかどうかが、一斉に操業開始する今年から来年にかけて、まさに第二世代バイオエタノール製造技術開発の正念場となる。

参考文献

- 1) F.K.Kazi, J.Fortman, R.Anex, G.Kothandaraman, D.Hsu, A.Aden, A.Dutta, "Techno-Economic Analysis of Biochemical Scenarios for Production of Cellulosic Ethanol, Technocal Report NREL/TP-6A2-46588, NREL (2010)
- 2) "Press Club Speech", POET Press Release, POET(2010)
- 3) "Project LIBERTY" <http://www.projectliberty.com/about/>
- 4) "POET-DSM makes major technology process purchase for commercial cellulosic bi0-ethanol", News & Media-Project Liberty, POET-DSM (2012)
- 5) "Biomass Program Fact Sheet (POET Project LIBERTY)", DOE(2010)