バイオリファイナーの現状と展望

Current Outlook of Biorefinery

乾 将行・湯川 英明

1. はじめに

近年の石油価格の高騰や地球温暖化に対する意識の向上が契機となり、日本国内においてバイオエタノールやバイオディーゼルが注目されている。しかし、米国では1990年代よりバイオエタノールを含め、バイオマスからのエネルギーや化学品の大規模製造を新規コンセプトの「バイオリファイナー」として注目し、国家戦略として技術開発を強力に推進してきた。

こうした背景から、バイオエタノールの市場規模は予測を上回るペースで拡大している。しかしながら、バイオ燃料の生産急増は、原料作物や他の農産物価格の高騰、農地拡大による森林伐採などの環境破壊を引き起こすなど、負の側面も指摘されるようになってきた。これに対し、非可食資源であるリグノセルロース系バイオマスからのバイオ燃料製造は、LCA(Life Cycle Assessment)評価からも二酸化炭素(CO₂)排出削減に高い効果が示されるなど、クリーンな燃料として大きな期待を集めている。

このような状況の下、(財)地球環境産業技術研究機構(RITE)ではリグノセルロース系バイオマス、中でもリグニン含有量が比較的少ないソフトバイオマスからのバイオ燃料・化学品製造技術の開発を行ってきた。本稿では、米国におけるバイオ燃料、バイオ化学品の現状と今後の動向、およびRITEにおける研究開発について紹介する。

2. 米国におけるバイオリファイナーの現状と今後

2.1 バイオ燃料

米国では1999年の大統領令を発端にバイオマスの利用技術開発が国家戦略の一つとして位置づけられ、エネルギー省や農務省などの政府機関による研究支援が強化された。2007年の年頭教書でブッシュ前大統領は、10年間でガソリン使用量を20%削減するという意欲的な「Twenty in Ten」の目標を設定し、同年12月にはこれに沿ったエ

ネルギー法案として、2022年までに1億3660万kLのエタノールを主とするバイオ燃料の使用義務を示したEnergy Independence and Security Act of 2007(EISA 法)が発効された。このような背景の下、バイオエタノールは生産と消費の両面から手厚い補助を受け、生産量が増加しており、2008年度の生産量は「EISA 2007」の2008年使用義務量を超える量まで増大した。しかしながら、このようなバイオエタノール生産量の急増は原料作物(コーン、サトウキビ)の価格急騰の要因と指摘されるなど、バイオ燃料の負の側面も顕在化してきた。

現在、米国においてバイオエタノールの原料はトウモロコシを指すが、「Twenty in Ten」計画や「EISA 法」はトウモロコシだけを原料としたものではない。もともと農務省は、トウモロコシからの生産量の限界を約2800万kLとし、それ以上の生産は、ソフトバイオマスを原料とする計画であった。具体的には、非可食資源である農業廃棄物(稲わら等)やエネルギー作物(スイッチグラス等)に由来するセルロース類を原料とするため、食料との競合を軽減可能としている。

2.2 バイオ化学品

バイオ化学品分野においては、当初はDu Pontのプロパンジオール生産計画などに代表されるごとく、いわゆる“炭素数3~6ケの化学品製造”が主たる動きであった。これは、既存の石油化学プロセスでは経済性を有するコストでの製造が困難であり、バイオ技術での製造が期待されている製品群である。

これに加えて、ごく直近、1~2年前よりの新しい動きが、“石油化学からグリーン化学への変革”である。既存の石油化学技術、プラントを生かし、原料をバイオマス由来のバイオ化学品に代替するというものである。特に注目される動きが、ポリプロピレン樹脂(PP)のグリーン化で

MASAYUKI INUI
(財)地球環境産業技術研究機構 バイオ研究グループ 副主席研究員 東京工業大学 連携教授 グリーンフェノール・高機能フェノール樹脂製造技術研究組合 技術部長 工学博士
〒619-0292 京都府木津川市木津川台9-2
(財)地球環境産業技術研究機構(RITE)バイオ研究グループ
Tel: 0774-75-2308 Fax: 0774-75-2321
E-mail: inui@rite.or.jp
〈専門〉分子生物学、代謝工学、応用微生物学

HIDEAKI YUKAWA
(財)地球環境産業技術研究機構 理事、バイオ研究グループ グループリーダー 奈良先端科学技術大学院大学 連携講座教授(客員) グリーンフェノール・高機能フェノール樹脂製造技術研究組合 専務理事 農学博士
〒619-0292 京都府木津川市木津川台9-2
(財)地球環境産業技術研究機構(RITE)バイオ研究グループ
Tel: 0774-75-2308 Fax: 0774-75-2321
E-mail: mmg-lab@rite.or.jp
〈専門〉分子生物学、微生物利用学、酵素化学

ある。現在、自動車に使われている樹脂の9割がPPであり、これのグリーン化は、CO₂削減効果に関して激しい競争となっている自動車業界にとっては“垂涎的”と言える。

2.3 ソフトバイオマス原料法への期待

(1) CO₂の削減効果

米国のアカデミアで長年、論争となっていたバイオエタノールの温室効果ガス削減効果に対するLCA評価議論には、ほぼ結論が下されている。2004年に国際エネルギー機関(IEA: International Energy Agency)は、ガソリンが排出する温室効果ガスに対しコーン原料のバイオエタノールでは20~40%、セルロース原料のバイオエタノールでは70~90%の削減効果があるとの調査結果を発表した。さらに、各種自動車燃料のLCA解析評価法で最も定評のある、米アルゴンヌ国立研究所のGREETモデルにおいても、セルロース原料のバイオエタノールはガソリンに比べて温室効果ガス排出量が25%以下であり、他の燃料の中で最も削減に貢献できる可能性があることを示している。

(2) ソフトバイオマス原料法の経済性

ソフトバイオマスは、商品作物に比べて気候や栽培地の適合性に関するハードルが低く、栽培可能地域がはるかに広い。従って、世界中で低価格なバイオ燃料の生産が可能と期待されている。

さらに、ソフトバイオマスからのバイオ燃料生産は地政学的なエネルギー・リスクを低減させ、貧困地域(国)の農業振興、新規雇用の発生といったグローバルなプラスの効果を生むことへの期待も大きい。

3. ソフトバイオマス原料法の開発

3.1 要素技術

ソフトバイオマスからのバイオエタノール生産は2つの要素技術から構成される(図1)。すなわち、ソフトバイオマスからの糖類生成工程、生成糖類からエタノールへのバイオ変換工程である。前者は使用する酵素(セルラーゼ)のコストが鍵であり、酵素メーカーによる技術改良、大規模

図1 ソフトバイオマスからのエタノール生産プロセス

生産による大幅なコストダウンが見込まれている。従って、後者のバイオ変換工程の技術確立が現在の最大の課題と考えられている。

3.2 バイオ変換工程に必要な技術特性

ソフトバイオマス原料法におけるバイオ変換工程には次の3つの技術特性が要求される¹⁾。

- ・高生産性
- ・C6、C5糖類の同時利用
- ・リグノセルロース由来「発酵阻害物質」に対する耐性

デンプン系バイオマスの構成糖はグルコースなどのC6糖類であるが、ソフトバイオマスにはキシロースやアラビノースなどのC5糖類も共存する。そのため、エタノール変換工程に用いる微生物は、C6糖類、C5糖類を同時利用できることが必要となる。さらに、ソフトバイオマスからの糖類生成工程では、酵素糖化を容易にするために、水熱などによる前処理を必要とするが、バイオマスの過分解によってフェノール類やアルデヒド類、有機酸類などが副生成する(図2)。これらの副生物は微生物に対して強力な生育阻害作用を示し、「発酵阻害物質」として大きな問題となっている。物理・化学的除去方法の開発も進められているが、新たな工程の追加はコスト高になるため、発酵阻害物質に影響を受けない開発技術が求められている。

従来の酒やワインの発酵生産に用いられてきた酵母などの微生物は、デンプン系バイオマス原料法には利用できるが、ソフトバイオマス原料法に利用するには上述の技術特性をクリアすることが課題となっている。

図2 主な発酵阻害物質

E. Palmqvist, B. Hahn-Hägerdal Bioresource Technology 74 (2000) 25-33, より改変

4. RITEにおける技術開発

我々はこれまでに、工業的に多用され優秀な物質生産能を所持するコリネ型細菌を用いた、新規コンセプトに基づく高生産性バイオプロセス「RITEバイオプロセス」の基盤技術を確立している²⁻⁵⁾。この技術をソフトバイオマスからのバイオエタノール生産プロセスの開発に応用し、世界に先駆けて前記の技術特性の確立の目処を得た。以下にその特徴について紹介する。

4.1 高生産性 RITE バイオプロセス

RITE バイオプロセスの高効率の鍵は、図3に示すように微生物細胞の分裂増殖を人為的に停止した状態で化合物を製造させることにある。このプロセスでは、遺伝子レベルで機能改善した微生物細胞(RITE 菌; *Corynebacterium glutamicum* R)を大量に培養し、反応槽に高密度に充填する。そして細胞の分裂増殖を停止させた状態で高速度の反応を行う。これにより微生物細胞をあたかも化学プロセスにおける触媒のように利用でき、通常の化学プロセスと同等以上の生産性(space time yield; STY、単位反応容積の時間あたりの生産量)が実現される²⁻⁵⁾。この技術を応用したバイオエタノール生産に関しても従来の発酵プロセスと比較して格段に高い生産性を実現した⁶⁾。

図3 RITE バイオプロセスと従来法との比較

4.2 高生産性「エタノール RITE 菌」の創製

RITE では近年急速に進歩したシステムバイオロジーに基づいて微生物細胞を開発するための基盤技術として、*C. glutamicum* R の全ゲノム配列の解読を終了し⁵⁾、遺伝子レベルでの革新的改良法を確立している^{7,8)}。この技術を応用して、コリネ型細菌にエタノール高生産能力を付与した「エタノール RITE 菌」の構築に成功した⁶⁾。

4.3 C6 糖類、C5 糖類の同時利用

RITE 菌には、ソフトバイオマスに含まれる C5 糖類利用のために、キシロースおよびアラビノース利用に与する他微生物由来遺伝子を導入している⁹⁻¹³⁾。さらに、RITE 菌を用いた RITE バイオプロセスにおいては、C6 糖類および C5 糖類の完全同時利用を確認しており、効率的な原料利用が可能となっている。

4.4 発酵阻害物質に対する高度耐性

RITE バイオプロセスにおいては、フェノール類やアルデヒド類、有機酸類などの発酵阻害物質によるエタノール生産性の低下がないことを認めている¹⁴⁾。発酵阻害物質の作用機構は増殖阻害であるが、本プロセスにおいて微生物細胞は非増殖状態にあることから、エタノール生産に関与する代謝には影響を与えないことを明らかにした。

4.5 工業化に向けた取り組み

上述のように、RITE ではソフトバイオマス原料法における技術要素確立の目処を得たことから、早期工業化を目指し、2006 年 9 月に(株)本田技術研究所との共同研究開発を表明した。2007 年 4 月より、(株)本田技術研究所の研究センター内において、工業化基礎検討を進めており、これまでに工業化基礎データの取得を完了した。現在、工業生産へ向けて FS(Feasibility Study)を開始している。

5. おわりに

ソフトバイオマスからのバイオエタノール製造法に関しては基礎研究段階を既に過ぎ、工業化の検討段階となっている。一方、基礎研究レベルにおいては、ソフトバイオマス原料からのバイオエタノール生産が注目されている。エタノールはディーゼルエンジンの燃料である軽油への混合が可能なバイオ燃料であり、地球環境と経済性で大きな問題を抱えている既存の植物油由来のバイオディーゼル燃料に代替できることから実用化への期待は大きい。

2009 年 1 月に就任したオバマ大統領はエネルギー新政策「New Energy for America」を発表し、今後 10 年間で 1500 億ドル(約 13 兆 5000 億円)を再生可能エネルギーなどの事業に注ぎ、500 万人の雇用を創出する目標を示した。さらに、自然エネルギーを導入割合で 2025 年までに 25%、温室効果ガスを 2050 年までに 1990 年度比で 80% 削減する長期目標も掲げている。こういった地球温暖化対策に関する動きは、今後も世界レベルで拡大し続けると予想される。我々 RITE もこのような動きの一端を担うべく、バイオエネルギーの革新的製法確立に向けて引き続き全力で研究に取り組んでいきたい。

引用文献

- 1) Dien, B. S., Cotta, M. A., and Jeffries, T. W. (2003) *Appl Microbiol Biotechnol* **63**, 258-266
- 2) Inui, M., Murakami, S., Okino, S., Kawaguchi, H., Vertès, A. A., and Yukawa, H. (2004) *J Mol Microbiol Biotechnol* **7**, 182-196
- 3) Inui, M., Suda, M., Okino, S., Nonaka, H., Puskas, L. G., Vertès, A. A., and Yukawa, H. (2007) *Microbiology* **153**, 2491-2504
- 4) Okino, S., Inui, M., and Yukawa, H. (2005) *Appl Microbiol Biotechnol* **68**, 475-480
- 5) Yukawa, H., Omumasaba, C. A., Nonaka, H., Kós, P., Okai, N., Suzuki, N., Suda, M., Tsuge, Y., Watanabe, J., Ikeda, Y., Vertès, A. A., and Inui, M. (2007) *Microbiology* **153**, 1042-1058
- 6) Inui, M., Kawaguchi, H., Murakami, S., Vertès, A. A., and Yukawa, H. (2004) *J Mol Microbiol Biotechnol* **8**, 243-254

- 7) Suzuki, N., Okayama, S., Nonaka, H., Tsuge, Y., Inui, M., and Yukawa, H. (2005) *Appl Environ Microbiol* **71**, 3369-3372
- 8) Vertès, A. A., Inui, M., and Yukawa, H. (2005) *Appl Environ Microbiol* **71**, 7633-7642
- 9) Kawaguchi, H., Sasaki, M., Vertès, A. A., Inui, M., and Yukawa, H. (2008) *Appl Microbiol Biotechnol* **77**, 1053-1062
- 10) Kawaguchi, H., Sasaki, M., Vertès, A. A., Inui, M., and Yukawa, H. (2009) *Appl Environ Microbiol* **75**, 3419-3429
- 11) Kawaguchi, H., Vertès, A. A., Okino, S., Inui, M., and Yukawa, H. (2006) *Appl Environ Microbiol* **72**, 3418-3428
- 12) Sasaki, M., Jojima, T., Inui, M., and Yukawa, H. (2008) *Appl Microbiol Biotechnol* **81**, 691-699
- 13) Sasaki, M., Jojima, T., Kawaguchi, H., Inui, M., and Yukawa, H. (2009) *Appl Microbiol Biotechnol* **85**, 105-115
- 14) Sakai, S., Tsuchida, Y., Nakamoto, H., Okino, S., Ichihashi, O., Kawaguchi, H., Watanabe, T., Inui, M., and Yukawa, H. (2007) *Appl Environ Microbiol* **73**, 2349-2353