

バイオブタノールはポストバイオエタノールとなり得るか？

小林 元太

我が国では、2002年6月に制定された「エネルギー政策基本法」に基づき、エネルギーの需給に関する施策の長期的、総合的かつ計画的な推進をはかるため、「エネルギー基本計画」が策定された。その中で、セルロース系エタノールは次世代バイオ燃料開発の柱であることが明示され、2020年に持続可能性基準を踏まえたバイオ燃料をガソリンの3%相当以上導入することと、2030年に国産の増産に加えて「アジア地域等での開発輸入の促進」によりバイオ燃料の最大限の導入を目指すという目標が掲げられている。

一方、農林水産省と経済産業省は2007年11月に「バイオ燃料技術革新協議会」を立ち上げ、セルロース系バイオマスからバイオ燃料などを効率的に生産するため「バイオ燃料技術革新計画」を策定した。そこには、バイオ燃料としてのブタノールの可能性として、「現行規制範囲（含酸素量1.3%）までであれば、ガソリンに混合利用としても影響が少ないと推定される。（中略）ある範囲での混合であれば、貯油・給油設備、燃料系統に与える影響や、排ガスシステムなどへの影響が少ないと考えられ、既存インフラをすぐ活用できるなど利点がある」と記されている。

では、バイオブタノールは“ポストバイオエタノール”となり得るか？ その鍵を握るのがブタノールの発酵生産性であり、そこでの最大の問題点は最終生産物であるアセトン、エタノール、ブタノールなどの溶剤が菌体の増殖を阻害することにある。一般に、回分培養における *Clostridium* 属細菌の代謝は、溶剤濃度が約20 g/lに達すると阻害されて停止する。特にブタノールの生育阻害は強く、アセトンとエタノールの50%致死濃度が約40 g/lであるのに対し、ブタノールは7-13 g/l程度である¹⁾。また、各溶剤の菌体に対する致死濃度は、アセトンが約70 g/l、エタノールが約50-60 g/lであるのに対し、ブタノールは約12-16 g/lであり、本発酵の低い生産性は、ブタノールの細胞毒性に依るところが大きい。菌体に対するブタノールの阻害メカニズムは未解明な部分が多いが、ブタノール存在下での細胞膜の流動性変化が主な要因と考えられている。

このブタノールの毒性をいかに回避するかという難問に対して、現在、耐性株の取得と発酵プロセスにおけるブタノール分離が試みられてきている。従来は発酵液からのブタノール分離回収には蒸留法が用いられていたが、エネルギーコストを下げる代替法が模索されてきた。

具体的には、溶剤抽出法、浸透気化法、ガスストリップング法などがよく検討されている²⁾。

溶剤抽出法では、菌体に対して毒性のない抽出剤を用いてブタノールを効率的に系外に分離することで発酵の効率化を図っているが、抽出剤からのブタノール回収にはまだ検討の余地が多い。また、浸透気化法ではブタノール発酵液を濃縮して高純度ブタノール溶液を得ることはできるが、ブタノール透過流速が分離温度やブタノール濃度に依存するために、さらなるブタノール高性能分離膜の開発が必須である。現在は、連続発酵、菌体固定化、高密度培養など培養システムの工夫によるブタノール生産の向上も検討されており、中空糸膜によって高密度化した菌体を用いて連続発酵を行うことで、溶剤生産性を10 g/l/hとした研究例が報告されている³⁾。

なお、ブタノールによる糖の取り込み阻害の程度は、基質となる糖がグルコースかキシロースかで大きく異なる⁴⁾。植物系バイオマスは、グルコースから成るセルロース、キシロースやアラビノースから成るヘミセルロース、そしてリグニンの3種が複合体を形成しているため、糖の違いによる阻害程度の差は、植物系バイオマス、特にヘミセルロースを発酵原料とする場合には注意すべき問題点である。

第二次世界大戦中、化石燃料の乏しい我が国において、戦闘機を飛ばす燃料生産のために研究されてきたアセトン・ブタノール発酵であるが、数十年を経て、化石燃料に依存しない新たなエネルギー生産法として見直されてきたのも不思議な巡り合わせと言える。当時は思いも寄らなかったであろう近年の遺伝子改変技術の誕生と向上は、個々の遺伝子を標的としたブタノール耐性付与を可能にし、その遺伝子発現の溶剤生産および耐性向上への寄与を評価可能にした。今後、代謝制御系解析シミュレータを用いた代謝工学解析⁵⁾などの応用によって、バイオブタノールの実用化も、そう遠くない未来に達成されるかもしれない。

- 1) Jones, D. T. *et al.*: *Microbiol. Rev.*, **50**, 484 (1986).
- 2) Ezeji, T. *et al.*: *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **85**, 1697 (2010).
- 3) Tashiro, Y. *et al.*: *J. Biotechnol.*, **120**, 197 (2005).
- 4) Ounine, K. *et al.*: *Appl. Environ. Microbiol.*, **49**, 874 (1985).
- 5) Shinto, H. *et al.*: *Process Biochem.*, **43**, 1452 (2008).