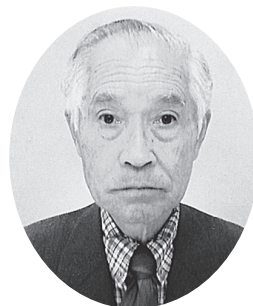


耐熱性酵素を用いてセルロースから バイオエタノールの生産

食品技術懇話会

技術士（生物工学部門）、農学博士 酒井 重 男



はじめに

セルロース系バイオエタノールの製造は、セルロース系原料を硫酸法あるいは酵素法によりグルコースへと糖化する工程と、糖化したグルコースをエタノールへと変換する工程の大きく二つに分けられる。後者の反応は12種類の酵素が関与しており、酵母ではこれらの酵素反応によりエタノールを生産している。耐熱性酵素を用いて酵素反応を高温化することで、酵素反応と反応産物蒸留の同時進行が可能となる他、反応速度の向上、雑菌の混入抑制など更なる利点も期待される。そこで、(株)耐熱性酵素研究所は、耐熱性酵素を用いてセルロース、ヘミセルロースからエタノールを製造するプロセスの開発を行っている。木質バイオマスを液体燃料に変換するには、セルロースを分解する必要があるが、この反応を助けるセルラーゼは、通常、常温でしか働かない。これに対して、耐熱性セルラーゼは、70℃以上の高温でも効果を発揮する耐熱性の酵素で、これにより高温でも処理が可能となる。その結果、処理が高速になる、安定性が高まるなどのメリットが生じる。トウモロコシから液体燃料を作る処理では、同量の資源から従来の3倍のエタノールが出来るようになる。

1. 耐熱性酵素とは

私たち人間を含む常温で生活している生物が

持つ酵素は、通常50～60℃以上の温度域では変性し、その働きを失う。しかし、高温（70℃以上）で生活している微生物（超好熱性菌）から得られる超耐熱性の酵素は次のようなユニークな特徴を持っている。

- ① 高温条件での高い反応性（70～100℃）
- ② 常温付近での長期保存安定性
- ③ 容易に高純度まで精製が可能
- ④ 目的の活性以外を容易に、且つ完全に除去可能

これまでの酵素は、各種の反応に触媒として利用しようとする、安定性が低いため随時酵素を加えなければならず、非常に高いコストがかかった。しかし、耐熱性酵素を使用することによって様々なメリットが得られる。特に、遺伝子組み換えによって生産される当社の耐熱性酵素は、一般的な酵素に比べ酵素単体の純度が極めて高く、ファインケミカルなど、これまで酵素の利用には不向きと考えられてきた分野も利用が可能となる。

2. 耐熱性酵素のメリット

- ① 安定性が高く長期間の使用に耐える。
- ② 有機溶媒に対する耐性も見込める。構造が強固な耐熱性酵素は、有機溶媒の存在下でも活性を維持し、水と油のような混ざり合わない物質同士の界面でも反応する。

- ③ 雑菌の繁殖を抑える特別な措置が不要である。耐熱性酵素の反応を60℃以上で行うため、たとえ雑菌が混入しても増殖できず、腐敗を防ぐ特別な措置は必要ない。
- ④ 非酵素的な反応に比べて反応特異性が極めて高い。
- ⑤ 温度を上げることで反応速度を高めることが出来る。反応温度を10℃上げることができれば、反応速度は2倍になる。

3. 新技術について

この新技術は図1に示すように、グルコースを原料に幾つかの酵素（耐熱性酵素）を用いた反応を組み合わせ、生物による発酵過程を経ずにバイオエタノールまたはその中間体を生成するものである。現在、バイオエタノールを生成するにはバクテリアや酵母などの微生物を用いた発酵法が主流であるが、本開発では酵素のみを用いて触媒反応により、連続的にアルコールまたはその中間体のアルデヒドを生成することが可能となった。

この技術はこれまでの微生物を用いた方法に比べ、アルコール生産を連続的に行えるようになる。また反応を段階的に制御できるので中間物質の生産にも利用できる。原料グルコースからのアルコール収率は理論的と変わらず、グルコース1トン当たり約600～640Lのエタノールが生産できると見積られる。時間的な要素に関しては、現段階で1トントank（反応容積1000L）の使用を想定した場合、24時間で20Lのエタノールが生成される。この生産量は酵素の反応条件の最適化で200～400Lまで高められると推察している。仮に10トンの反応タンクを作成した場合、このタンク1基で年間700～1500KLのエタノールが生産でき、今後の開発によってはさらにこの数倍まで増産可能と期待される。

4. 技術の詳細について

本開発ではグルコースからエタノールもしくはアセトアルデヒドを生成するに際し、如何に酵素を長期間、劣化することなくその性能を保つことができるかが実用化にむけての重要なカギとなる。本反応系において酵素反応を阻害する要因として2点挙げられる。

1点は酵素反応により生成する物質が反応系内に留まることで反応が停止するもの（可逆的な阻害）、もう1点はその生成物質が酵素そのものにダメージを与えて失活させてしまうもの（不可逆的な反応）。

1点目に関しては、反応生成物を反応系から除去することで反応の停止は解除される。2点目も同様ではあるが、反応生成物を「速やかに」反応系から除去し酵素へのダメージを極力抑える必要がある。

グルコースからエタノールを酵素反応で生成する場合、その過程において生成するアセトアルデヒドが酵素に対して深刻なダメージを与える。しかしながら、この過程を経ないことにはエタノールは合成できない。すなわち、アセトアルデヒドの反応系内の滞留時間を如何に下げることが、この技術の最も重要なポイントである。アセトアルデヒドの滞留時間を短縮するには、

- ① 生成したアセトアルデヒドを速やかに蒸発させ、回収する。
- ② 生成したアセトアルデヒドを速やかに酵素に対してダメージの少ない物質へと変換する。

①については図2に示すように、アセトアルデヒドの沸点は約20℃であることを利用し、効率蒸発できる温度にまで反応温度を上昇させることによってアセトアルデヒドを分離する方法である。この方法を利用することで酵素活性を安定に保ちながら効率良く連続的にアセトアルデヒドを生成、回収することが出来る。②についてはアセトアルデヒドをエタノールに変換する酵素を添加し、エタノールまで直接生成する

系は確立している。

おわりに

近年、環境問題、原油依存脱却の観点から、木質バイオマスを原料としたバイオエタノールの重要性が高まってきている。現在はバイエタ

ノールの製造は、酵母などを用いた発酵法が主流であるが、酵素を用いたバイオエタノールの製造が実現すれば、エタノール産生の高効率化および反応産物精製の簡易化が可能になる。

参考文献：(株)耐熱性酵素研究所の資料



図1 11段階の酵素反応

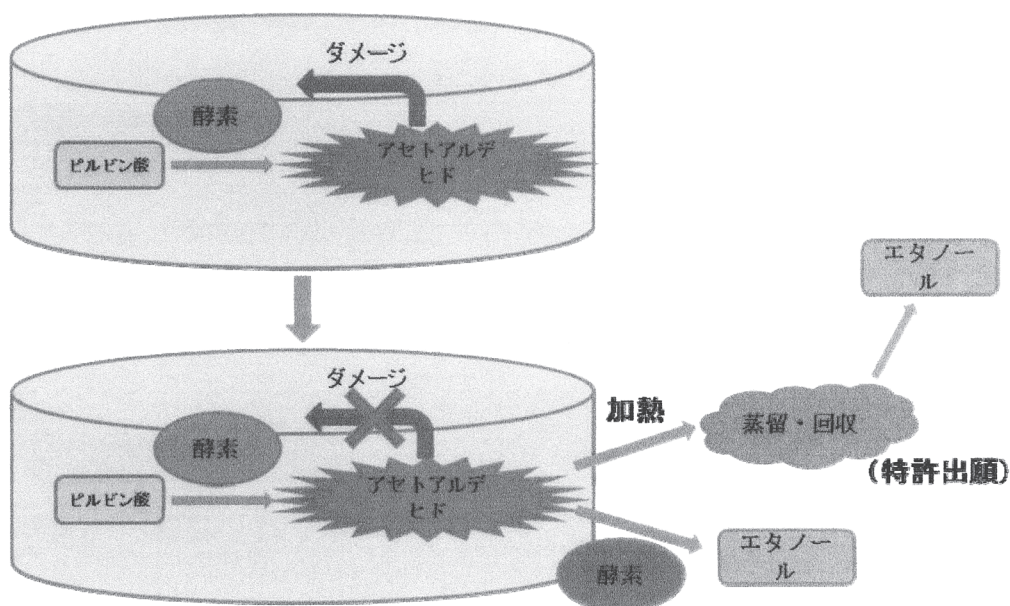


図2 アセトアルデヒドをエタノールに変換