

# バイオ研究グループ

## バイオリファイナリーの世界状況と研究概要

### 1.はじめに

バイオマス資源を原料とするバイオリファイナリーは、数年前に米国エネルギー省（DOE）により作られた新規造語であり、バイオマスからの化学品・エネルギー製造に関する技術、新規産業を意味している（図1）。バイオマスは光合成でCO<sub>2</sub>を固定した植物由来資源のため、燃焼させるとCO<sub>2</sub>が発生するが、ライフサイクル全体でみると大気中のCO<sub>2</sub>濃度には影響を与えないとしている（カーボンニュートラル）。米国では1990年代からバイオリファイナリーを国家科学戦略として進めており、これらの技術開発は、21世紀の脱化石資源・循環型社会の構築に向けた重要な施策と位置付けられている。国際エネルギー機関（IEA）によれば、世界のエネルギー消費は2008～2009年の経済停滞にも関わらず、中国やインドをはじめとする新興国の需要により年率2%前後で拡大を続けている。このため、化石資源に替わって、バイオマス資源から化学品やエネルギーを製造するバイオリファイナリーの確立に大きな期待が寄せられている。

### 2.バイオ燃料

2010年の世界のバイオエタノール生産量は、F.O. Licht社等によれば227億ガロン（8600万kl）と予想され、2009年から15%以上の伸びを示している。近年は、食料との競合や環境への負荷を低減するため、非可食バイオマスを原料とした生産技術開発が急速に進展している（図2）。コーンストーバ等の農産廃棄物や、スイッチグラス等のエネルギー作物に由来するセルロース類を原料とするバイオ燃料製造は、LCA（Life Cycle Assessment）評価からもCO<sub>2</sub>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期待されている。米国DOEは非可食バイオマスからのバイオ燃料生産技術開発を強力に支援しており、2011年以降、セルロース・エタノールの実証生産が始まる予定である。米国は輸送用燃料における再成可能燃料の使用義務量を2022年には360億ガロンに増加させる目標を掲げると共に15%までのエタノールを含む燃料（E15）の販売制限を昨年10月に解除した。欧州では経済停滞や収益性低下等の理由によりバイオ燃料消費の主役であるバイオディーゼルの伸びが鈍化しているが、2020年

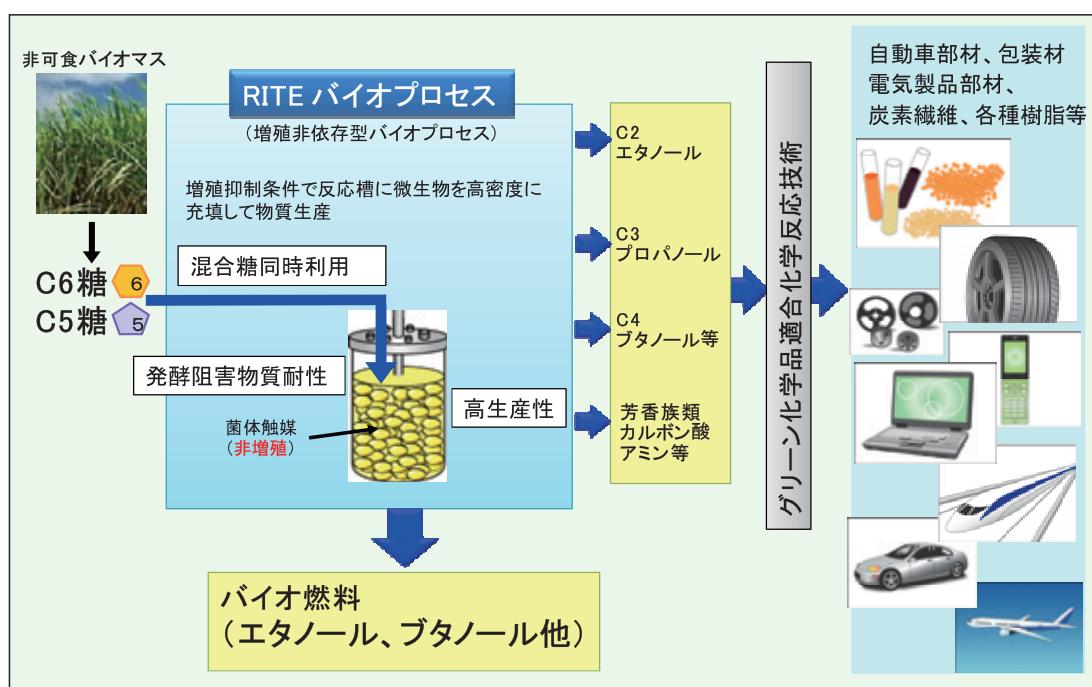


図1 バイオリファイナリー：非可食バイオマスを原料としたバイオ燃料やグリーン化学品の生産

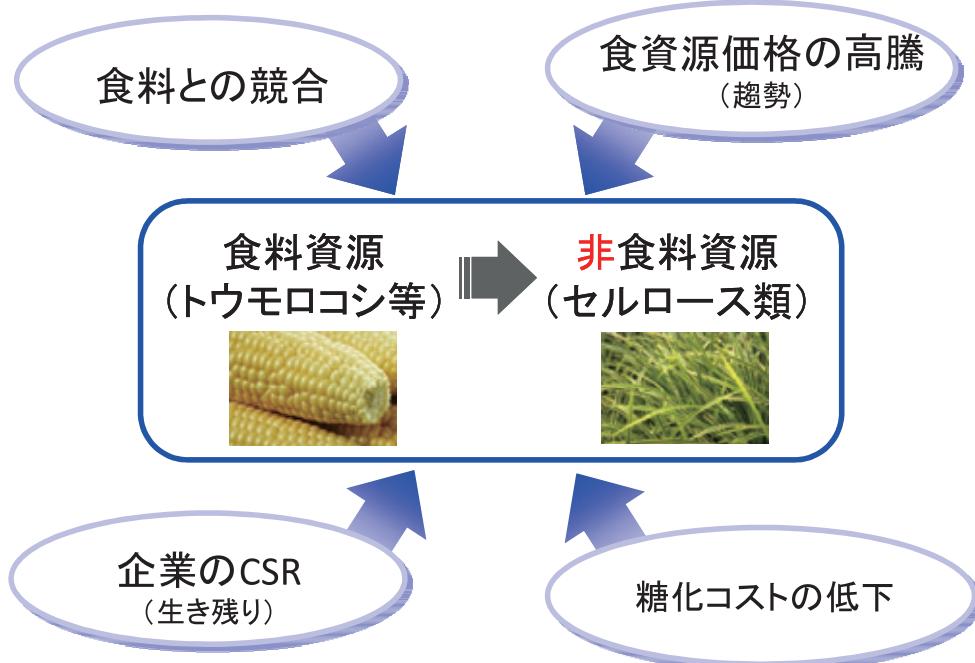


図2 非食料資源へのシフト現象

までに輸送用エネルギー消費のうち 10% を再生可能エネルギーで賄う目標を掲げている。日本でも、経済産業省がまとめた2030年までのエネルギー政策の指針「エネルギー基本計画」が閣議決定され、バイオ燃料等の導入や利用拡大を促進するとしている。

### 3. グリーン化学品

バイオ燃料と同じく高い成長が見込まれるのがバイオプロセスによる化学品（グリーン化学品）生産の分野である。グリーン化学品の市場は 30% 前後の速度で成長しており、2015 年以降に 100 億ドルを超える市場が形成されると予想されている。バイオ燃料と同様に非可食バイオマスを原料とした生産が製造企業にとって必須の条件である。また、セルロース分解酵素（セルラーゼ）の生産技術開発が進んで酵素価格や糖化コストが低下し、非可食バイオマスからの安価な混合糖（C6 と C5 糖類）が利用できる見込みが立ったことも要因となっている。従来の有機酸やジオール類に加えて、近年の新しい動きが、“石油化学からグリーン化学への変革”である。当初のファインケミカルズ分野から、化学品全般のグリーン化が重要視され、プラットフォームとして、C2 化学品はエタノール、C3 化学品としてプロパンノール、C4 化学品としてブタノール類が期待されている

（図1）。今後、各種カルボン酸、アミン類、芳香族類等にプラットフォームが拡大していくと予想される。

### 4.RITE バイオプロセス（増殖非依存型バイオプロセス）の技術開発

バイオ研究グループでは、これまでに新規技術コンセプトに基づく革新バイオプロセス「RITE バイオプロセス（増殖非依存型バイオプロセス）」を確立し、バイオ燃料や有機酸を始めとした有用化学品の生産に大きな成果を上げてきた。本プロセスは、非可食バイオマス由来の混合糖（C6 と C5 糖類）の同時利用をはじめとする世界初の成果をしており、バイオ燃料生産に応用した「セルロースからの混合糖同時変換によるエタノール製造技術」は、第 18 回日経地球環境技術賞の大賞に選出されるなど高い評価を頂いている（RITE Today 2009 トピックス参照）。また、海外でも本プロセスは注目されており、特にドイツの研究グループがコリネ型細菌を用いて追試を行い、微生物の増殖と生産フェーズを分離する我々の革新的なバイオプロセスが可能であることを確認している。以下に RITE バイオプロセスの技術内容を紹介する。

#### 4-1. RITEバイオプロセスの特徴

本プロセスでは、ターゲット物質を効率的に生産できるように代謝設計した微生物（RITE 菌；コリネ型細菌）を大量に培養し、細胞を反応槽に高密度に充填後、細胞の分裂を停止させた状態で物質生産を行う（図 1）。高効率化の鍵は、微生物の増殖を抑制した状態で化合物を生産せることにあり、このため増殖に必要な栄養やエネルギーが不要である。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することが可能で、通常の化学プロセスと同等以上の高い生産性（space time yield；STY, 単位反応容積の時間あたりの生産量）を備えたバイオプロセスが実現した。

#### 4-2. C6 糖類、C5 糖類の完全同時利用

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、セルロース系バイオマスの加水分解物である混合糖には、セルロース由来の C6 糖類と、ヘミセルロース由来の C5 糖類（キシロース、アラビノース）が共存している。そのため、発酵工程に用いる微生物は、混合糖中の C6 と C5 糖類を同時利用できることが効率的な物質生産に必須の条件となる。我々は、RITE 菌に C5 糖類の利用遺伝子を導入し、それを RITE バイオプロセスに適用することにより、セルロース系バイオマス由來の C6 および

C5 糖類の完全同時利用を達成した。この成果により、効率的なセルロース系バイオマス利用が可能になった。

#### 4-3. 発酵阻害物質に対する高度耐性

発酵阻害物質とはフェノール類やアルデヒド類、有機酸類などを指し、セルロース系バイオマスの酵素糖化を容易にするための前処理工程（水熱処理等）で副生されるバイオマスの過分解物である。発酵プロセスでの微生物の生育を強力に阻害することが知られており、バイオ燃料生産では大きな問題であった。ところが、RITE バイオプロセスは、これらの阻害物質に対して高い耐性を示した。この理由は、阻害物質の作用機構が微生物の増殖阻害であるのに対し、我々のプロセスは非増殖状態で物質生産が行われているためである。即ち、増殖非依存型の RITE バイオプロセスにおける微生物代謝は、発酵阻害物質から影響を受けないことを明らかにした。

#### 4-4. 今後の技術開発

解読したコリネ型細菌のゲノム情報に基づいたメタボローム解析や代謝設計、ゲノム工学等のシステムバイオロジーを駆使した菌体改良により、本プロセスを利用したターゲット物質の拡大を進めている。図 3 にはセルロース系バイオマスを原料にしたピルビン酸（PYR）を経由す

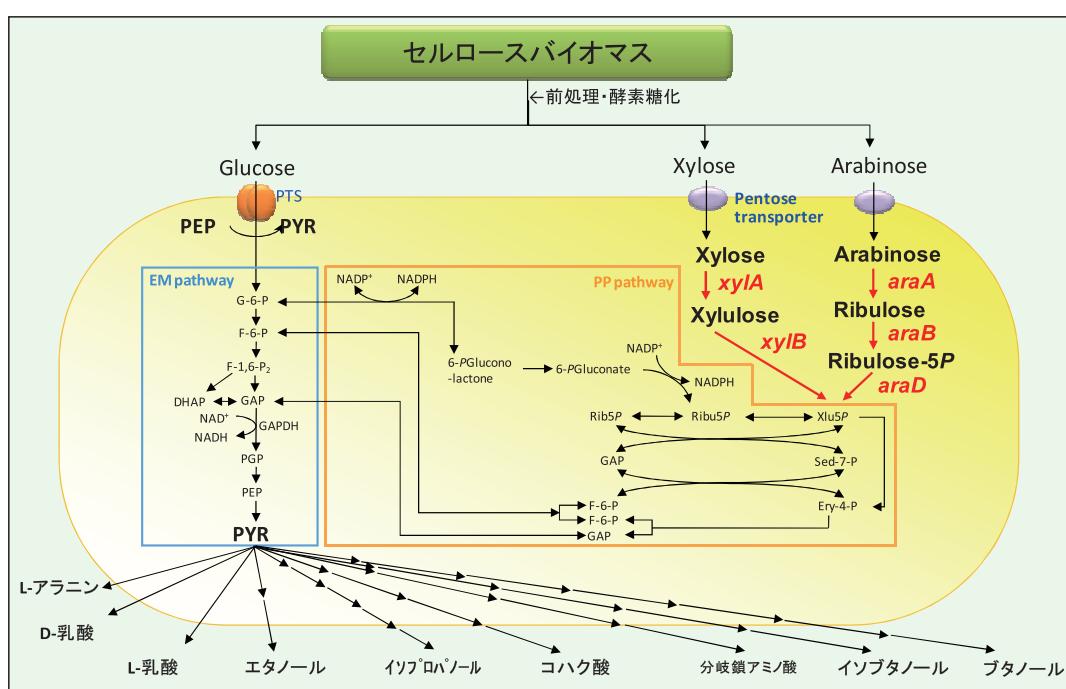


図 3 コリネ型細菌の代謝設計によるグリーン化学品・燃料（鎖状化合物）の生産

る鎖状化合物生産の概要を示す。エタノール、L、D 乳酸、コハク酸等の高効率生産に加えて、現在、ブタノールやグリーン芳香族、アミノ酸など幅広い製品への展開を図っている。芳香族化合物は既存の発酵法では経済的生産が極めて困難とされているが、これらは、日本企業が高い競争力を維持している電子機器や自動車産業等の先端産業で基礎材料とされている化合物でありグリーン化が期待されている。また、好気発酵で生産されている製品群への「RITE バイオプロセス」の応用としてアミノ酸に注目している。既存のアミノ酸発酵プロセスは通気攪拌型で、コンプレッサーや攪拌モーター等の設備費が高いのが大きな弱点であった。現在、複数のアミノ酸について RITE バイオプロセスを適用した嫌気的生産法の技術開発を進めている。既にラボレベルで高い生産性を達成した化合物もあり、順次学会等で報告していく予定である。

#### 4-5. 実用化への取組み

企業とのセルロース・エタノール生産等の共同開発に加えて、昨年から“技術研究組合”を設立して研究開発の効率化を進めている。組合は法人格を持ち、企業と公的研究機関との共同研究が可能であり、共同研究終了後、事業法人に組織変更して共同研究成果を事業化できるなどのメリットがある。すでに設立した“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”や“バイオブタノール製造技術研究組合”に続いて次のターゲット製品を目指した技術研究組合を準備中である。

#### 5. 終わりに

昨年 11 月、世界気象機関は CO<sub>2</sub> の世界平均濃度が 2009 年に過去最高を記録したと発表した。原因是調査中のことだが、地球環境対策に有効なバイオリファイナリー等の世界レベルでの技術開発の動きは、今後もさらに激化・拡大し続けると予想される。前述したように、バイオ燃料分野は、セルロース・エタノールに関しては実証プラントが建設され工業化が目前である。また、芳香族等の基礎材料のグリーン化は、我が国の先端企業の競争力強化に重要な役割を果たすと期待される。我々 RITE は独自技術である「RITE バイオプロセス」を基盤とし、内外企業との共同研究開発により、バイオリファイナリー産業を早期に実現すべく今後とも努力していきたい。