

# 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及び実用化への取り組み

### 1. はじめに

バイオリファイナリーは、米国エネルギー省（DOE）による造語であり、バイオマス資源からのバイオ燃料や化学製品製造に関する技術や産業を指している（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見ると大気中のCO<sub>2</sub>濃度には影響を与えないとされている（カーボンニュートラル）。米国では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、1990年代から国家科学戦略として強力に推進してきた。EUも本技術の重要性を強く認識し、米国同様に様々な支援策を打ち出している。国際エネルギー機関（IEA）が昨年発表した輸送用バイオ燃料のロードマップによれば、バイオ燃料の輸送部門における寄与度（使用総エネルギーに占める割合）は、現在の2%から2050年には27%に増加すると予測されている。この場合、バイオ燃料の生産量が現在に比べて2050年には10倍に増えることになるが、原料バイオマス栽培に必要な耕作地については、トータルでの生産性の向上などにより、現状の3倍の面積で賄うことが

可能との予測である。

直近の動向では、現在のバイオリファイナリーの負の側面として、食料資源との競合が深刻な問題となっており、非可食バイオマスへの原料シフトが喫緊の課題である。経済協力開発機構（OECD）と国連食糧農業機関（FAO）が昨年共同で発表した報告書（Agricultural Outlook 2011-2012）では、途上国や新興国の人口増加や経済成長による穀物等の農産物の需要拡大と、エネルギー価格高騰による農産物生産コスト上昇により、今後も農産物価格の高止まりが予想されている（図2）。

### 2. バイオ燃料

2011年の世界バイオエタノール生産量は、F.O. Licht社等によると234億ガロン（8900万KL）に達する見込みで、2009年から20%の伸長が予想される。米国での生産量は約60%（135億ガロン）を占め、2010年にはE15（エタノール15%添加ガソリン）が認可されたことから、今後も需要が増える予測である。しかし、米国内のトウモロコシの40%がバイオ燃料原料として消費されていること

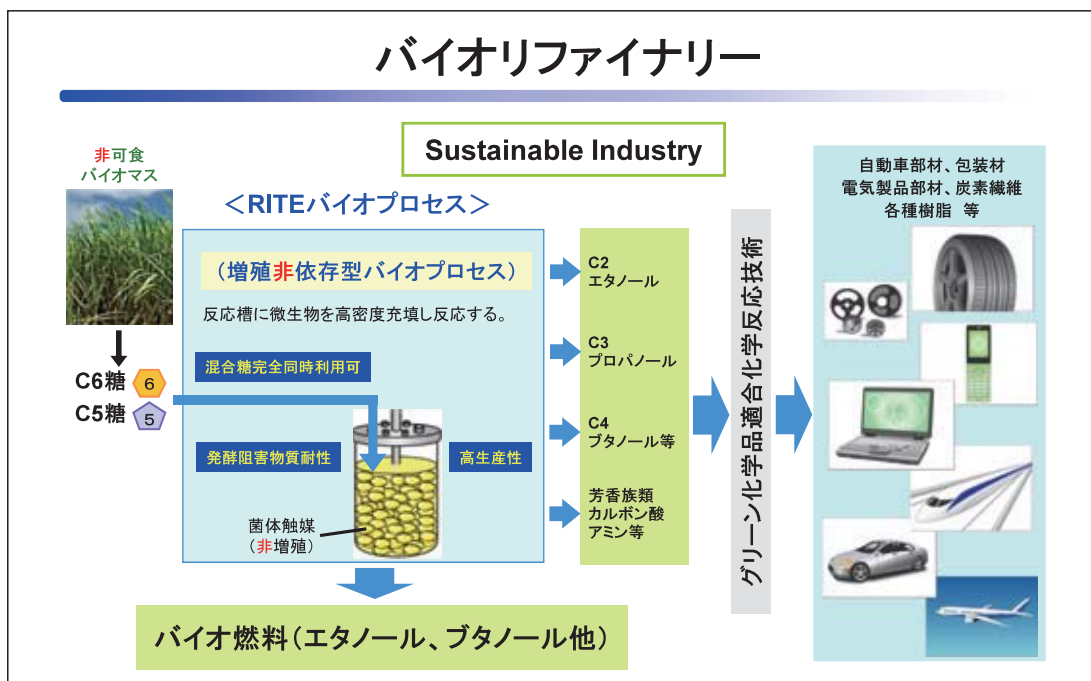


図1 非可食バイオマスを原料としたバイオ燃料やグリーン化学製品生産

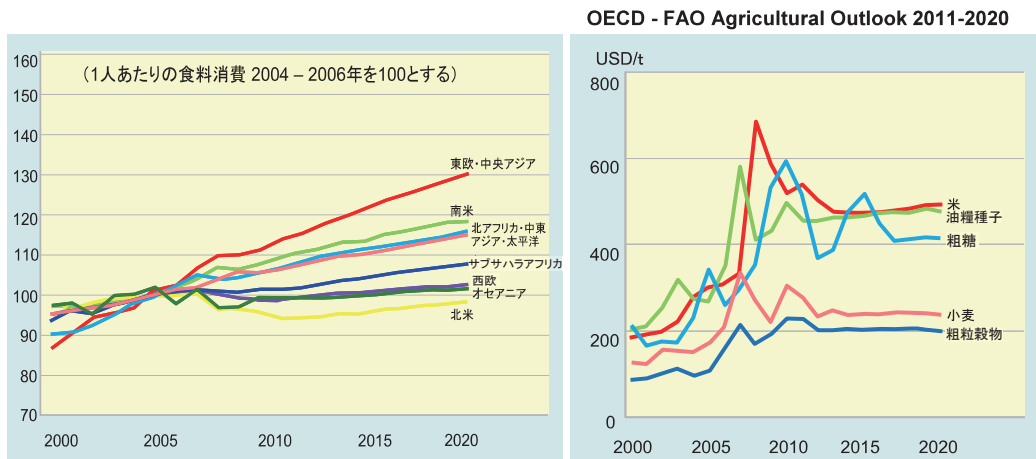


図2 世界食料消費の増加（左）と農産物価格の上昇（右）

から早急な原料転換が求められている。そのため米国政府は、非可食バイオマスであるコーンストーバー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を利用したバイオ燃料開発を強力に推進している。セルロース・エタノールは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が、米国でのセルロース・エタノール実証生産は、発酵阻害物質に関連する技術的な課題等により計画が遅れている模様である。

バイオ燃料全体の2011年世界生産量は446億ガロンと予測されており、2015年にはさらに20%拡大するとされている（Lux Research社）。EUでは、バイオ燃料生産における環境破壊への懸念などを背景としたバイオ燃料への増税や近年の景気後退から、バイオディーゼルの消費が鈍化しているが、中国やインド、東南アジア、南米などの新興国では、積極的なバイオ燃料への投資拡大が続いている。日本でも「エネルギー基本計画」が2010年に閣議決定され、バイオ燃料については、2020年までに全国ガソリン消費量の3%相当以上の導入を目指している。

### 3. グリーン化学品

バイオ燃料と同じく成長が見込まれるのがバイオプロセスによる化学品生産の分野である。グリーン化学品の生産は、バイオ燃料より高度な技術開発が求められるが、バイオリアファイナリーの観点からはさらに広い製品群や市場規模が予想され、サステイナブルな産業として今後の発展が期待されている。原料としてはバイオ燃料と同様に、食料

資源と競合しない非可食バイオマスの利用が求められている。ターゲットとしては、プロパンジオール生産などのファインケミカルからアクリル酸、イソプレン等の大型市場品、各種カルボン酸、アミン類、芳香族化合物などに拡大しており、ジョイントベンチャーも数多く誕生している。グリーン化学品の将来市場としては、種々の推定が出されているが、一般的な見方としては、2015年には\$70B、2020年には\$100Bとされている。

### 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を、高経済性で製造する技術開発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達成しており、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)。本プロセスは海外でも注目されており、当グループリーダーは2011年度米国工業微生物学会Fellowship awardを日本人で初めて受賞した(トピックス参照)。また、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（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、嫌気的な条件で細胞の分裂を停止させた状態で反応を行う（図3）。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させることにあり、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 糖類と C5 糖類を同時利用できることが効率的物質生産に必須の条件となる。我々は、コリネ型細菌の遺伝子改良により、C6 糖類および C5 糖類の完全同時利用を達成し、効率的なセルロース系バイオマス利用を可能とした。

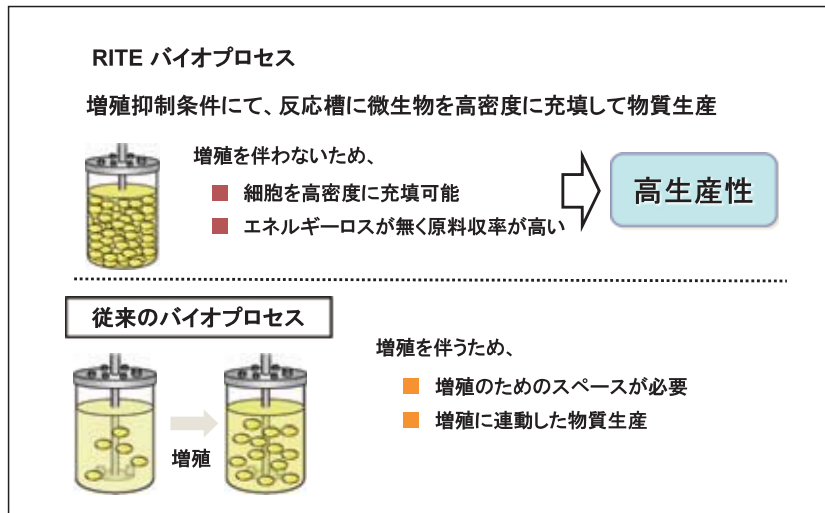


図3 RITE バイオプロセスと従来法との比較

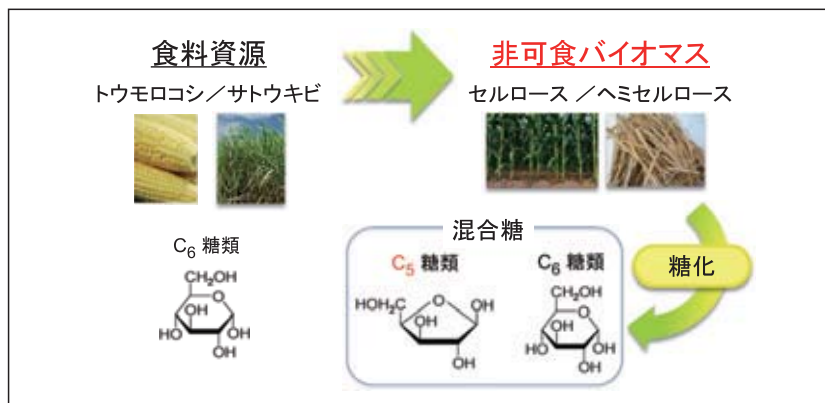


図4 非可食バイオマスの糖化による混合糖の利用拡大

#### 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フラン類、有機酸類などを指し、セルロース系バイオマスの糖化工程で副生されるバイオマスの過分解物である。微生物の生育を強力に阻

害するため工業化では大きな課題であった。しかしながら、RITE バイオプロセスは、これらの発酵阻害物質に対して高い耐性を示した。この理由は、発酵阻害物質の作用機構は微生物の増殖阻害であり、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いては、その代謝機能は、発酵阻害物質から影響を受けないことが明らかとなった。

#### 4.4 今後の技術開発

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遺伝子改良により、本プロセスを利用したターゲット化学品の拡大を進めている。エタノール、L、D 乳酸、コハク酸等の高効率生産に加えて、ブタノールや芳香族、アミノ酸など幅広い展開を図っている。

芳香族化合物は、電子機器や自動車産業等では部品や素材原料の主要化合物であるが、従来の発酵法では経済的生産が極めて困難とされている。従って、これらを RITE バイオプロセスでグリーン化学品として生産することにより、日本企業が高い競争力を維持している産業分野のさらなる強化に貢献できる。また、アミノ酸は、通気攪拌用のコンプレッサーや攪拌モーター等の設備が必要な好気プロセスで発酵生産されている。RITE バイオプロセスは、これらの設備を大幅に簡略化でき、より低コストでの生産が可能と予想されることから、本プロセスを利用したアミノ酸製造技術開発を進めている。

#### 4.5 実用化への取り組み

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、一昨年から「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、企業や公的研究機関との共同研究が可能である。現在、「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」及び「バイオブタノール製造技術研究組合」の二つを設立して共同開発を進めている。昨年、さらに事業化を加速させるため、事業会社 Green Earth Institute (株)を設立した（トピックス参照）。設立趣旨は、RITE バイオプロセスの事業化、ならびに温暖化対策を含む地球環境の保全及び持続可能な脱化石資源社会の実現である。

#### 5. 終わりに

地球温暖化防止や環境対策に資する技術開発競争は、今後も世界レベルで激化・拡大し続けると予想される。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努力していきたい。

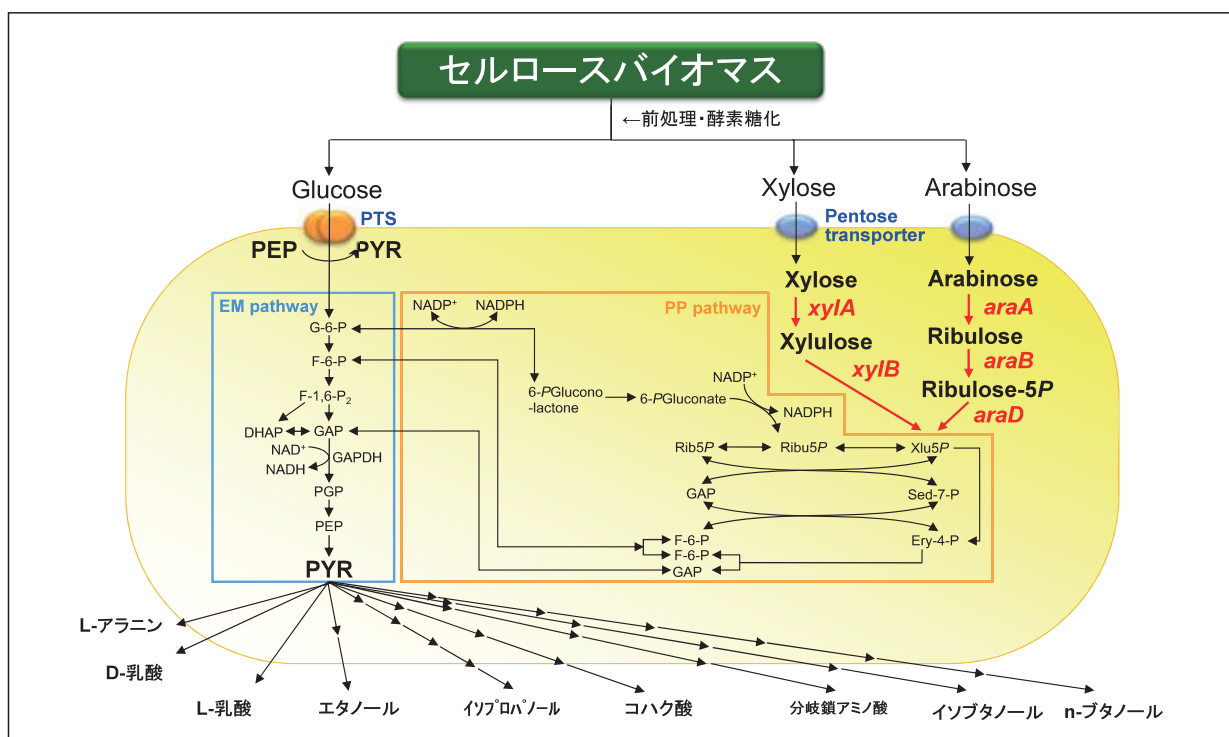


図 5 コリネ型細菌の代謝設計によるグリーン化学品・燃料（鎖状化合物）の生産