

バイオリファイナリーの世界動向と 実用化への取り組み

1. はじめに

バイオリファイナリーとは、バイオマス資源からのバイオ燃料や化学品製造に関する技術や産業を意味する米国エネルギー省(DOE)の造語であり、米国ではIT産業とともに21世紀の脱化石資源・循環型社会の構築に向けた重要な新産業と位置付け、1990年代から国家科学戦略として技術開発・産業化を強力に推進してきた。バイオリファイナリー産業の将来市場規模は、2020年には\$230 Billion、2030年には\$300 Billionに達すると予測されており(World Economic Forum 2011)、本分野に流入する投資資金は、90年代にIT産業に投入された額をすでに上回るとの推測である。このため、バイオリファイナリー関連のベンチャー企業が90年代後半から次々と誕生し、一部の企業はこの数年で株式上場による資金調達を果たしている。しかし、米国での大規模なバイオエタノール生産に代表されるバイオ燃料の急拡大は、トウモロコシ等の穀物を主要な原料に使用していることから、食料資源との競合による世界的な穀物価格高騰の主要な原因とされ、批判を受けている。そのため現在では、非食料バイオマスである農業残渣(コーンストーバーなど)やエネルギー作物(スイッチグラス、ミスカンサスなど)等のセルロース系バイオマスを原料とするバイオリファイナリー技術の実用化開発が世界各国で進められている。バイオマスは光合成でCO₂を固定した植物由来資源のため、燃焼させるとCO₂が発生するが、ライフサイクル全体で見ると大気中のCO₂濃度には影響を与えないとされており(カーボンニュートラル)、バイオ燃料はクリーンな燃料として大きな期待が寄せられている。

2. 米国でのバイオエタノール生産状況と次世代バイオ燃料への期待

2012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225億ガロン(8500万KL)に達する見込みである。米国での昨年の燃料エタノール生産量は、干ばつによるトウモロコシ価格の高騰などにより予想生産量を若干下回ったが、世界生産量の58~59%(約130億ガロン)を占め、さらにE15(エタノール15%添加ガソリン)の販売も開始されたことから、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約40%がバイオエタノール原料として消費されていることから、米国政府は非食料バイオマス原料を利用したバイオ燃料開発を推進している。

2-1. 再生可能燃料基準(RFS2)の修正

このように、原料転換を推進し、食料との競合を回避しながら、自国での再生可能燃料の製造・消費拡大を行うため、米国は2007年12月にエネルギー自立・安全保障法(Energy independent and security act of 2007:EISA)を成立させ、2005年に制定した再生可能燃料基準(Renewable Fuel Standard: RFS)をさらに拡大修正した(RFS2)。この計画によれば、2010年~2011年は、

そのターニングポイントとなるはずであった(図1左)。ところが、食料資源トウモロコシから非食料であるセルロース原料への転換は順調に推移するどころか、完全にストップしている状況にある。米国環境保護局(EPA)は、RFS2で定められているセルロースエタノールの使用義務量達成は困難として2010年以降、毎年目標値を大幅に減少させた値に修正している(図1右)。

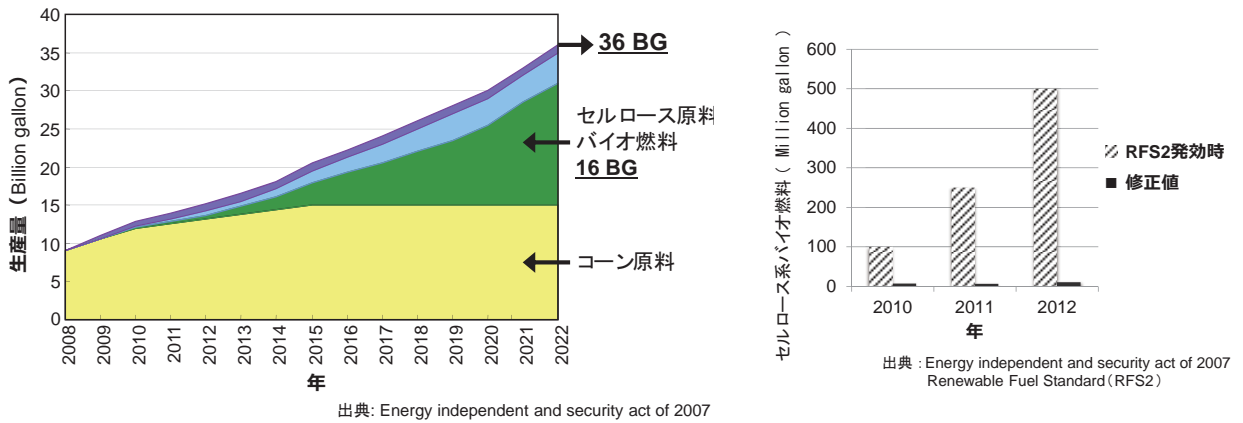


図1 米国におけるバイオ燃料導入計画

2-2. セルロースエタノールの現状と問題点

この理由は、膨大な研究開発費が投入されてきたにもかかわらず経済性あるセルロースエタノール製造が現状技術では確立されていないことにある。セルロースエタノールのキーとなる製造プロセスは、セルロースの結晶構造を緩めて糖化を促進する前処理工程と発酵工程の2つから構成される。「技術的な壁」は、前処理工程における「発酵阻害物質(フルフラール等)」の副生である(図2)。

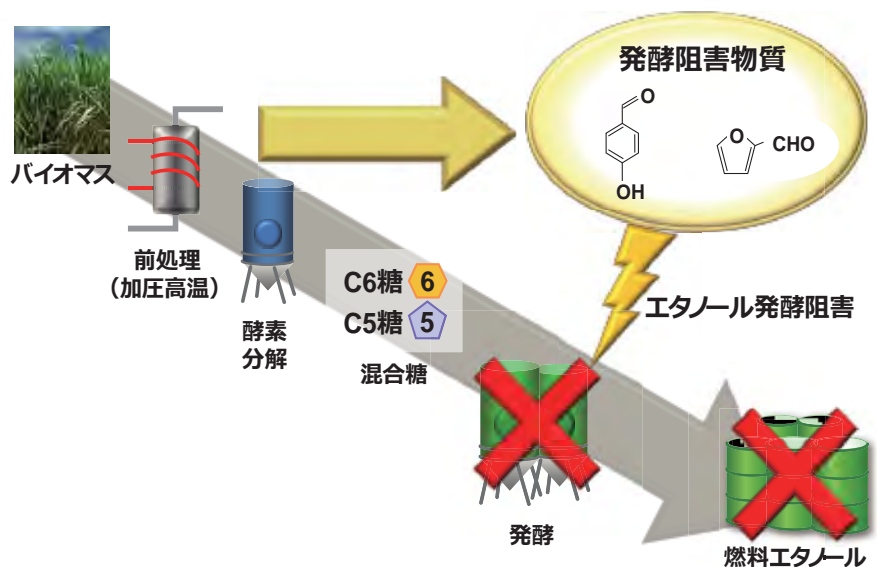


図2 工業化に障害：発酵阻害物質

副生を抑えるため、原料セルロースの前処理条件(温度、処理時間等)をマイルドにすると、糖化酵素セルラーゼの必要量の大幅アップが避けられず、当初予測をはるかに超える量となる点にある。逆にハードな前処理条件にすると、セルラーゼ必要量が減り酵素コストが下がるが、発酵阻害物質が多量に副生してエタノール発酵効率が低下する。即ち、前処理条件と必要酵素量はtrade-offの関係となっているのである(図3)。現状では、必要酵素セルラーゼのコストは、ガロン・エタノール当り、\$3~5に達すると言われ、経済性が低い状況である(ガソリンの末端価格から計算されるエタノール価格は\$3前後となる)。

これに対し、工学的に該阻害物質を除去する方法や、発酵に用いる微生物に耐性機能を付与させる試みなどが行われているが、経済性ある解決策がないのが現状である。このため、一部の石油メジャーは、セルロースエタノール事業計画から撤退を表明しており、その他の主要企業は実証生産の開始時期を軒並み2013年以降に繰り延べとしている。

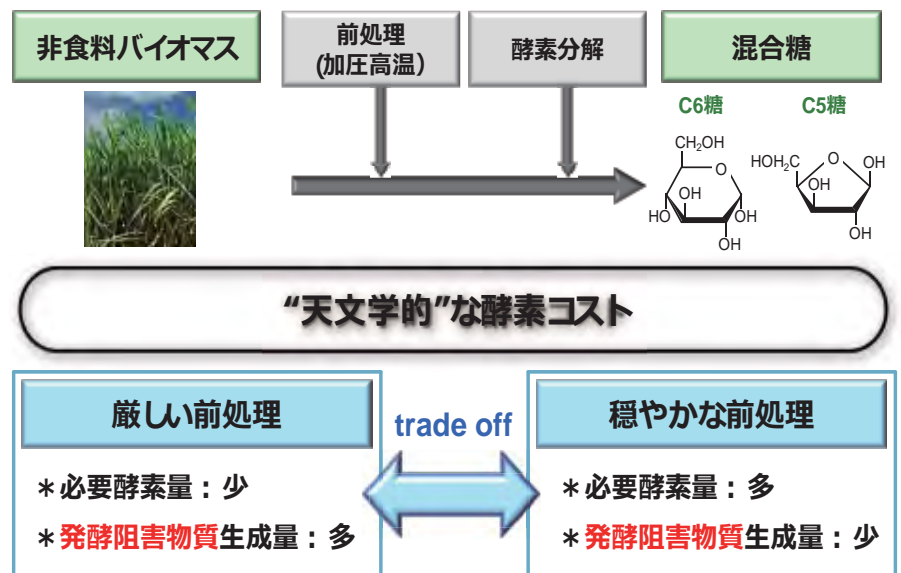


図3 “セルロースエタノール生産” 実現への障害

2-3. 次世代バイオ燃料への期待

国際エネルギー機関(IEA)が2011年に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。エタノールに続く次世代バイオ燃料として注目されているのが、ブタノール燃料である。ブタノールは熱密度が高く、水にはほとんど溶けないために製油所で混合し、既存のインフラ設備(パイプライン)で輸送できるという大きな利点がある。ブタノールは、20世紀初頭から糖を原料としてクロストリジウム属細菌による発酵法(ABE発酵)によって工業生産が開始され、その後1950年代から石油を原料に工

業生産されていたが、近年、バイオ燃料推進の動きの中でバイオマス資源を原料とする発酵法が改めて取り上げられている。研究開発手法には既存のABE発酵の改良や、新たに工業用微生物にブタノール生合成遺伝子を導入してブタノールを生産させる方法などがある。RITEでは、大腸菌にブタノール生合成遺伝子を導入したブタノール生産を世界に先駆けて発表している。最近では、分岐鎖アミノ酸合成経路の中間代謝物を利用したイソブタノール生産の可能性が報告され、これらの代謝系を利用した幅広い微生物種での製造技術開発が行われている。現在、バイオマス資源からのブタノール燃料の工業化を目指し、石油メジャーやベンチャー企業が相次いで参入しているが、将来的な大規模製造には非食料バイオマス資源の利用が必須である。この場合も前述のセルロースエタノール製造と共通する課題“発酵阻害物質”が避けて通れないと予想される。

3. グリーン化学品

バイオ燃料とは状況が大きく異なるのが、グリーン化学品分野である。グリーン化学品は、バイオ燃料と比較し、より高度な技術開発が求められるが、製品としては、付加価値も高く、ビジネスモデルも設計しやすい。グリーン化学品の将来市場は、2020年に約\$100 Billionに達するとされ(Pike Research 2011)、続々とベンチャー企業が誕生している。また、セルロースエタノール生産を主な事業計画としていたベンチャー企業も、事業計画を変更し、グリーン化学品製造を当面の目標とするところも出てきている。

これらベンチャー企業のビジネスプランを見ると、グリーン化学品生産は、バイオ燃料と比較し、生産量自体も小さいため、食料資源との競合の批判も少ないとの判断から、各社とも当面は、トウモロコシ等の澱粉由来のC6糖を原料としている。しかしながら、サステナブルな産業として発展していくためには、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食料バイオマスへの転換が必要である。

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グリーン化学品を、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、非食料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、一昨年から米国エネルギー省傘下の研究所との共同研究も実施し

ている(後述)。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、目的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4)。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。

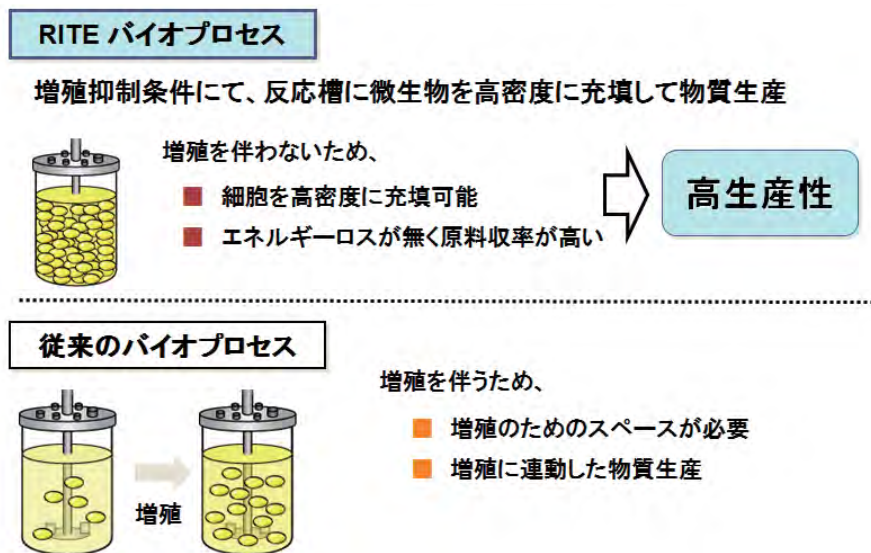


図4 RITEバイオプロセスと従来法の比較

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(図5)。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、コリネ型細菌の代謝系の改良により、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。

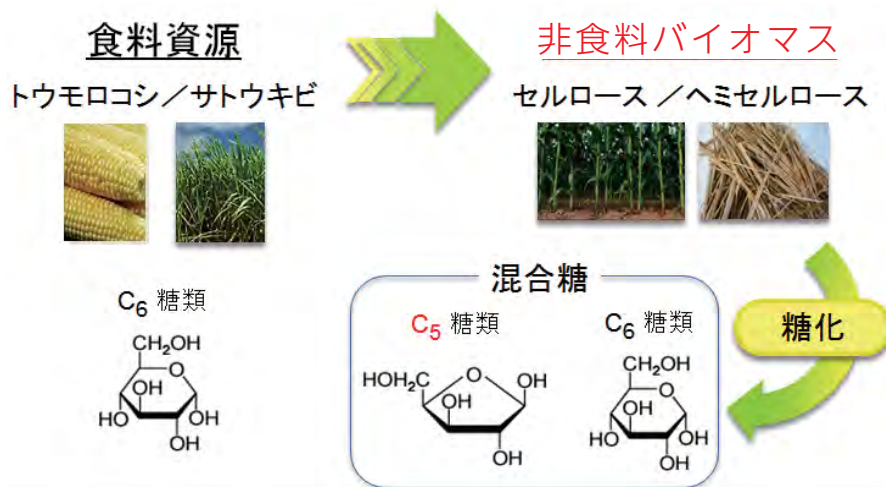


図5 非食料バイオマスの糖化による混合糖の利用拡大

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(図2)。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. 生産物の拡大

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、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バイオ燃料やグリーン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(図6)。

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。

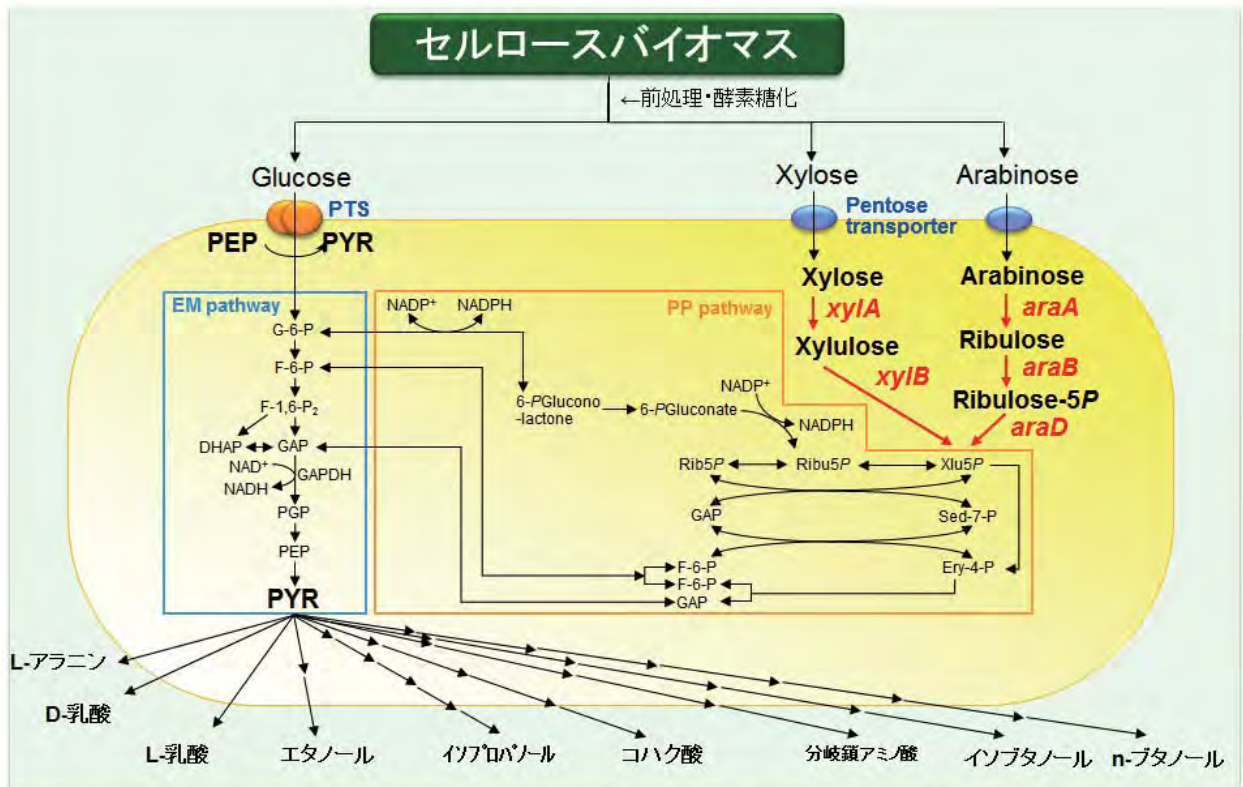


図6 コリネ型細菌の代謝設計によるグリーン化学品・燃料（鎖状化合物）の生産

5. RITEの取り組み

5-1. RITE発ベンチャー企業の創立

前述したように、RITEバイオプロセスは高生産性や非食料バイオマス由来混合糖の完全同時利用、発酵阻害物質に対する高度耐性等の重要な特性を有することから国内外の産業界より高く評価されている。これらの研究成果をバイオリファイナリー産業の実現に活用し世界をリードする機能設立の要望を受け、RITE発のベンチャー企業として、Green Earth Institute (GEI) 株式会社を、2011年9月に創立した。創立趣旨は、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 (RITE Today 2012トピックス参照)。

5-2. 米国エネルギー省「再生可能エネルギー研究所 (NREL)」との共同研究

NRELは、バイオリファイナリー分野で、米国のみならず世界の研究をリードする研究機関である。長年開発してきた非食料バイオマス資源からの混合糖調製に関する研究蓄積は膨大であり、幅広いバイオマス種に対応しうる技術を保持している。前述したように、セルロースエタノールの経済性ある製造実現には、課題である「発酵阻害物質」の解決が必須である。この解決にRITEバイオプロセスが有する発酵阻害物質耐性機能の活用が期待されることから、2011年よりNRELと民間企業を含めた共同研究を実施してきた。この結果として、お互いのこれまでの研

研究成果を組み合わせることにより、該課題が抜本的に解決される目途が基礎研究レベルで得られた。今後は、これまでの成果を踏まえ、新たにGEIの参加による取組みにより、経済性あるセルロースエタノール生産の実現が期待される(トピックス参照)。

6. 終わりに

NRELとの共同研究開発における当面の目標は、非食料バイオマスからの燃料エタノールの高経済性生産であり、この実現による波及効果はエタノール生産に止まらない。バイオリファイナリー産業の原料となる“非食料バイオマス由来の混合糖”が、低コストで供給可能となることにより非食料バイオマスからのバイオ燃料製造とともに、グリーン化学品の広範囲な製造も可能となる。NRELとの国際共同研究により、バイオリファイナリー産業の実現・拡大による地球環境保全、さらに持続可能社会の実現を図っていきたい(図7)。

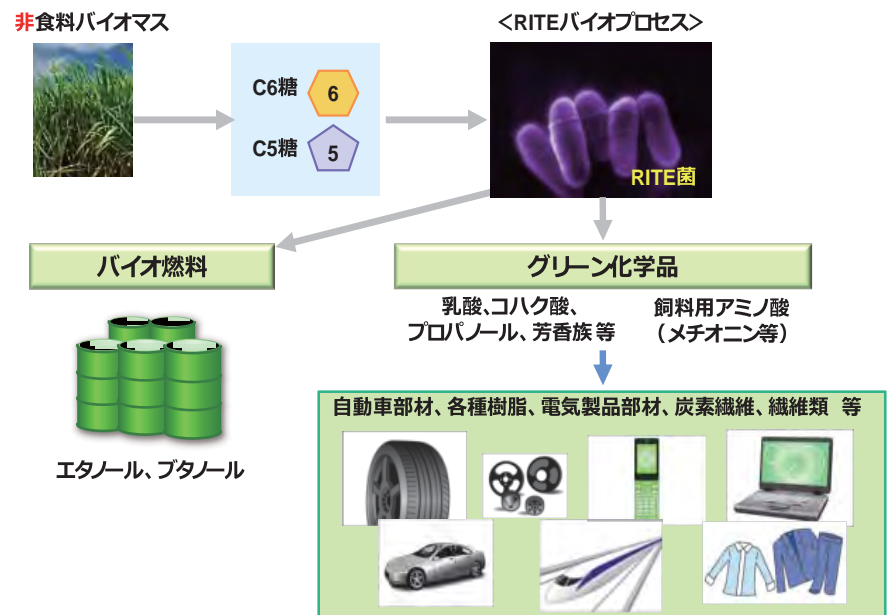


図7 バイオリファイナリー産業の早期実現へ