

バイオ研究グループ

 <p>グループリーダー・ 主席研究員</p> <p>乾 将行</p>	サブリーダー・主席研究員	志賀 英晃	研究員	ナタリア	マリア	テレシア
	副主席研究員	寺本 陽彦	研究員	柏木 紀賢		
	副主席研究員	平賀 和	研究員	小林 淳平		
	主任研究員	寺崎 肇	研究員	橋本 淳子		
	主任研究員	田中 裕也	研究助手	渡邊 龍馬		
	主任研究員	須田 雅子	研究助手	池永 由布子		
	主任研究員	北出 幸広	研究助手	水口 祥子		
	主任研究員	豊田 晃一	研究助手	永守 美雪		
	主任研究員	加藤 直人	研究助手	内藤 香枝		
	主任研究員	長谷川 智彰	研究助手	池田 永和		
	主任研究員	渡邊 高久	研究助手	米田 和夕		
	主任研究員	小暮 健	研究助手	小泉 真夕		
	主任研究員	久保 俊宏	研究助手	西 淳子		
	主任研究員	大島 伸一	研究助手	森 佳代		
	主任研究員	生田 哲	研究助手	岩島 素巳		
研究員	清水 詔	研究助手	吉田 佳世			
研究員	橋詰 正義	研究助手	岡田 亜弥			
研究員	原 肥	研究助手	岸 紀美代			

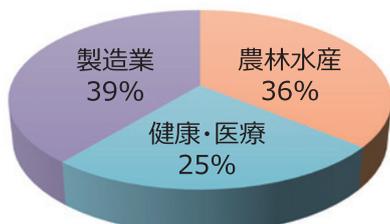
持続可能な社会の実現を目指したバイオリファイナリー生産技術の開発

1. はじめに

バイオテクノロジーは、ゲノム編集技術や合成生物学の急速な進展により、医療や健康・農業のみならず、工業なども含め幅広い分野に大きく貢献している。特に近年、バイオテクノロジーと再生可能な生物資源を活用して地球規模での課題を解決しながら経済成長を図る「バイオエコノミー」というコンセプトが欧米を中心にアジアまで拡大している。経済協力開発機構(OECD)によると、「2030年バイオ市場は加盟国全体で約190兆円規模に拡大、製造業分野は約4割に達する」と予測(図1)されており、全産業がバイオ化するともいわれている。そのような中で、2019年6月、政府は、「2030年に世界最先端のバイオエコノミー社会を実現」という全体目標を掲げて、11年ぶりに「バイオ戦略2019」を発表した。

当グループでは、微生物を利用して、このバイオエコノミーの中核技術であるバイオリファイナリー技術、即ち再生可能資源(バイオマス)を原料としてバイオ燃料やグリーン化学品を製造する技術の開発を進めている。本項では、まずバイオ燃料やグリーン化学品生産について、世界の概況を紹介する。

2030年、約1.7兆ドル



出典：The Bioeconomy to 2030. OECD(2009)、NEDO作成資料より

図1 バイオエコノミー市場予測

バイオ燃料

バイオ燃料の代表であるバイオエタノールは、米国ではトウモロコシ、ブラジルではサトウキビを原料として生産され、ガソリンに10~25%混合されて自動車用燃料として供給されている。最大の生産・消費国である米国では、米国エネルギー情報局(EIA)によれば、2018年159億ガロン(6,010万kL)のバイオエタノールが生産された。OECD-FAOの「Agricultural Outlook 2018-2027」によれば、2018年は1.22億kLのバイオエタノールが世界で生産されており、その半分を米国が占めたことになる。この割合はここ数年変わっていない。

原料が食料資源と競合しない第2世代バイオ燃料であるセルロースエタノールは、トウモロコシ等の農業残渣を原料として生産される。米国再生可能燃料基準(RFS)によるセルロース系原料からのバイオ燃料の2020年生産目標(米国環境保護庁(EPA)改訂案)は5.4億ガロン(約200万kL)である。これは2007年に定められたRFS目標値の5%余りにとどまっており、今後、商用化の加速が求められる。RITEでは、セルロース系バイオマスを効率的に利用できるバイオプロセスを開発している(2章参照)。

航空燃料に関しては、ICAO(国際民間航空機関)が、2010年総会にて、2020年以降温暖化ガスの総排出量を増加させないこと等を決めた。また、2016年の総会で、2020年以降に市場メカニズムを活用した温室効果ガス削減制度(GMBM: Global Market-Based Measures)を導入すると決定した。それに基づき国際航空運送協会(IATA)は、バイオジェット燃料の使用、排出権取引の活用などによる具体的な行動計画を策定した(図2)。GMBMは、2021年から開始される予定である。それらに伴い、バイオジェット燃料は、主として欧米で年々普及が進んでおり、調

理用廃油などを利用したサステナブルな航空燃料 (SAF) として商業飛行が継続されている。RITEでもバイオブタノールを原料とした民間のバイオジェット燃料生産プロジェクトへの技術協力を2018年から開始した (トピックス参照)。

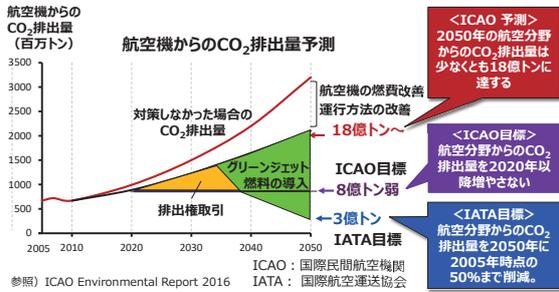


図2 航空機からのCO₂排出量削減対策

船舶燃料に関しては、2018年、IMO (国際海事機関) が、2030年までに2008年比で炭素排出効率の40%以上削減するとの温室効果ガス削減戦略を採択した。その中で、有効な対策候補として、すでに導入されている燃費規制の強化や運行効率の改善 (減速運行や航路最適化等) に加えて代替燃料の導入があげられている。これらは、いずれも候補であり、実際に行う対策については、今後の検討・交渉事項となり、2023年に削減戦略 (改訂版) として採択される予定である。

グリーン化学品

近年、ペットボトルや使い捨てプラスチックによる環境破壊の問題が国際的な問題としてクローズアップされている。特に海洋におけるマイクロプラスチック汚染は深刻であり、また中国や東南アジアの廃棄プラスチック輸入禁止は、日本のプラスチックリサイクルに大きな影響を及ぼしている。このような背景から、再生可能資源であるバイオマスを原料としたバイオプラスチックや生分解プラスチックに大きな期待が寄せられている。「バイオ戦略2019」でも9つの市場領域の1つに「バイオプラスチック (汎用プラスチック代替)」が取り上げられており、2020年度の概算要求には、「プラスチック有効利用高度化事業」(国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 委託事業) などが組み込まれている。

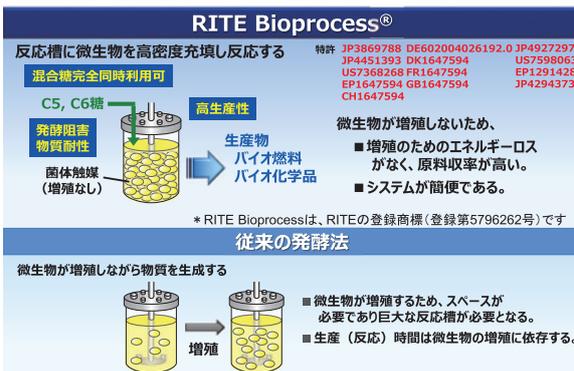


図3 RITEバイオプロセス (増殖非依存型バイオプロセス) の特長

2. RITEバイオプロセスの特長

当グループでは、これまでに新しい技術コンセプトに基づく革新的バイオプロセス「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、アミノ酸・芳香族化合物を始めとしたグリーン化学品を、高効率で製造する技術開発に大きな成果を上げ、国内外から高い評価を得ている。

本プロセスでは、目的物質を効率的に生産できるように高度に代謝設計されたコリネ型細菌 (スマートセル) を大量に培養し、細胞を反応槽に高密度に充填後、嫌気的な条件や、増殖に必須な因子を削除することにより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、増殖に必要な栄養やエネルギーも不要である。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を備えたバイオプロセスが実現した。また、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。さらに、本プロセスは、セルロース系バイオマスを加水分解した混合糖に存在するフラン類等の発酵阻害物質に対しても耐性が高い (詳細はRITE Today 2013~2017参照)。

現在、エタノール、L-乳酸、D-乳酸、アミノ酸等の高効率生産に加えて、ブタノールやジェット燃料素材、芳香族化合物などの高機能化学品生産へ幅広い展開を図っている (図4)。次章以降では、当グループの主要ターゲットであるバイオ燃料および芳香族化合物を含むグリーン化学品の生産技術開発について説明し、それらの実用化に向けた取り組みについて紹介する。

バイオ燃料	グリーン化学品
<ul style="list-style-type: none"> ガソリン混合・代替 <ul style="list-style-type: none"> エタノール* バイオジェット燃料 <ul style="list-style-type: none"> イソブタノール* n-ブタノール* 100%グリーンジェット燃料 (C9~C15飽和炭化水素 + 芳香族化合物) バイオ水素 	<ul style="list-style-type: none"> 芳香族化合物 <ul style="list-style-type: none"> シキミ酸 (インフルエンザ治療薬タミフル原料) フェノール* (フェノール樹脂、ポリカーボネート) 4-ヒドロキシ安息香酸* (ポリマー原料) アニリン* (石油外天然資源タイヤ原料) 4-アミノ安息香酸* (ポリマー・医薬品原料) プロトカテック酸* (化粧品・医薬品原料) 有機酸 <ul style="list-style-type: none"> D-乳酸*、L-乳酸* (ステレオコンプレックス型ポリ乳酸) コハク酸* アミノ酸 <ul style="list-style-type: none"> アラニン (キレート剤) バリン (次世代飼料用アミノ酸、医薬品原料) トリプトファン (飼料用アミノ酸、医薬品原料) メチオニン (飼料用アミノ酸、調味料) アルコール <ul style="list-style-type: none"> イソプロパノール (プロピレン原料) キシリトール (甘味料)

図4 RITEのバイオリファイナリー技術による生産物質の例

3. バイオ燃料の生産技術開発

3.1. バイオブタノール

ブタノールは、ガソリン代替としてエタノールよりもエネルギー密度が高く、蒸気圧が低く、水と混和しにくいという優れた特性を有している。さらにブタノールを出発原料として化学変換によってジェット燃料を製造することができる。即ち、植物由来のバイオブタノールから製造したバイオジェット燃料で航空機を飛ばすことができる。航空機からのCO₂排出削減に

は原油から植物由来の原料に置換することが必須と認識され、業界団体の動きが加速している。ブタノールを原料としたジェット燃料は、Alcohol to Jetを略してATJ燃料と呼ばれ、2016年に米国材料試験協会 (ASTM) の規格をクリアし、商業フライトへ利用が可能となった (<http://www.gevo.com/>)。

こうした動きに先駆け、当グループでは、RITEバイオプロセスを利用した高効率バイオブタノール生産プロセスの開発を進めている。2015年度からは、経済産業省の「革新的なエネルギー技術の国際共同研究開発事業」を推進中である。我々の生産技術の特長は、原料としてセルロース系バイオマス由来の混合糖を利用可能で、且つ高速・高収率生産が可能な点にある (図5)。

しかし、ブタノールは細胞毒性が強い問題がある。そこで、本事業では高度な育種技術により、RITEバイオプロセスの高い生産性を更に引き上げると共に、米国立再生可能エネルギー研究所 (NREL) との共同研究により、非可食バイオマス由来の混合糖を原料としたバイオブタノール生産技術の開発を加速させている。

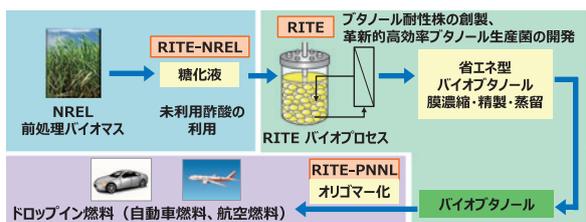


図5 RITEバイオプロセスによるバイオブタノールおよびジェット燃料生産

更に、2017年からは米パシフィック・ノースウエスト国立研究所 (PNNL) との共同研究により、ブタノールを化学的にオリゴマー化したり、ブタノールのバイオ生産時に原料由来の酢酸を同時にエタノール化し、ブタノール/エタノールの混合物をオリゴマー化したりする新しいアイデアに基づいて、ジェット燃料などのdrop-in燃料に変換する技術開発を進めている。

ブタノール生産においては、蒸留におけるエネルギー消費が大きいことから、蒸留とPV (pervaporation) 膜濃縮を組み合わせることによって、精製に必要なエネルギーを約10分の1に低減する省エネルギー型ブタノール回収技術の開発も並行して進めている。ブタノールのバイオ生産では、世界最高レベルの高生産性を達成しており、生産菌のブタノール耐性の向上、生産菌の代謝経路の最適化、および上記省エネルギー型ブタノール回収技術の開発などの個別要素技術開発に成功した。

今後は本プロジェクトの成果に基づき、これらの要素技術と数々のノウハウを組み合わせることにより、バイオブタノールの実用化・事業化を目指す。

3.2. グリーンジェット燃料

ジェット燃料は炭素数9~15個のイソパラフィン、

シクロパラフィン、芳香族化合物等の炭化水素化合物の混合物で、析出点や密度など様々な物性が厳密に規格化されている。

イソパラフィン、シクロパラフィンや芳香族化合物より密度が軽く、ジェット燃料の密度は含有する各炭化水素成分の含量比を反映し、産地ごとに異なる。ASTMによって認証済みのバイオジェット燃料は石油系ジェット燃料と最大50%までの混合使用が認められているが、いずれもイソパラフィンを主体とするためその密度はジェット燃料の規格よりもかなり軽い。したがってアフリカや中東産の密度が軽い石油系ジェット燃料と50%も混合するとその密度は規格を下回るためジェット燃料として使用できなくなる。このような不適合を防ぐにはバイオジェット燃料にもシクロパラフィンや芳香族化合物の含有が必須である。

そこで当グループでは単独でも密度の規格を満たし、石油系ジェット燃料の産地に依存せず最大限混合可能な新規グリーンジェット燃料の開発を目指している。即ち、様々な分岐鎖および環状前駆物質を非可食バイオマスを原料として省エネルギーなバイオプロセスによって高生産した後、これらを簡単な化学変換によってイソパラフィン、シクロパラフィン、芳香族化合物からなるバイオジェットに変換する。しかし、一般的にこれら前駆物質は脂溶性が高く細胞毒性が高いため微生物による高生産は困難である。そこで脂溶性が高く細胞毒性が高い前駆物質を生産と連続して水溶性化する修飾によって低毒性化し、高生産可能にする技術の開発を進めている (図6)。

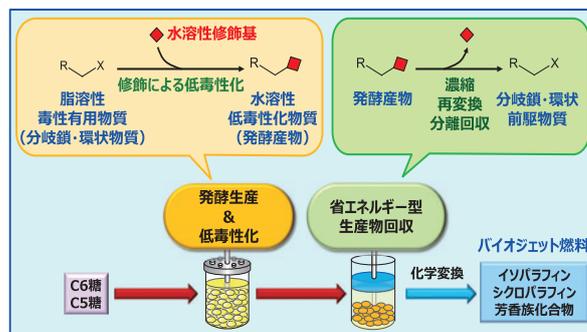


図6 高汎用性バイオプロセスを利用した新規バイオジェット燃料生産技術

本技術は2017年から経済産業省の「革新的なエネルギー技術の国際共同研究開発事業」における「様々な有用化学品の低コスト・低炭素型生産を可能にする革新的高汎用性バイオプロセスの開発」にて開発している。

3.3. バイオ水素

水素は燃焼時に水しか生成しないため、究極のグリーンエネルギーとして期待される。しかしながら、現行の主要な水素製造技術は化石エネルギーを原料とするため、これに由来するCO₂の排出が大きな課題となる。2017年に開催された「再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議」において策定された「水素基本

戦略」では、2030年前後の水素利用技術本格普及に向けた目標を踏まえつつ、2050年を見据えた中長期の水素社会の実現のために革新的なCO₂フリー水素製造技術開発の重要性が示されている。

微生物を利用した水素生産（バイオ水素生産）は、将来の持続可能なCO₂フリー水素製造技術となり得るが、経済性あるバイオ水素生産技術の確立には、生産性の飛躍的な向上が必要とされる。当グループは、シャープ株式会社との共同研究により、ギ酸を介する水素生産経路を利用した高速バイオ水素生産プロセスを開発し、従来技術と比較して2桁程度高い生産速度を達成している。この成果を基盤として、現在、経済産業省の「革新的なエネルギー技術の国際共同研究開発事業」の中で、光エネルギーに依存しない「暗発酵水素生産」と光エネルギーを利用する「光発酵水素生産」の統合による水素収率の大幅向上に向けた研究開発に取り組んでいる（図7）。

本研究開発では、京都大学およびフランス国立科学研究センター（CNRS）と連携して暗発酵水素生産微生物の改良を進め、高効率な反応機構を有する新規水素生成酵素の高発現に成功した。また、暗発酵で副生する酢酸から光発酵により水素を生産する光合成細菌の水素生成酵素発現制御因子の改変により実用化に向けた検討に極めて有利な恒常的水素高生産株を確立した。さらに、NRELと連携してセルロース系バイオマス（コーンストーバー）由来混合糖利用能の強化について検討し、キシロース利用系発現制御因子の改変の有効性を示した（図7）。

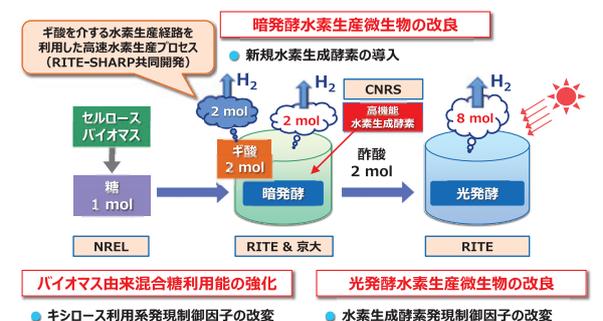


図7 セルロース系バイオマスからの高効率バイオ水素生産プロセスの研究開発

4. グリーン化学品の生産技術開発

4.1. NEDOスマートセル

NEDOが実施する「植物等の生物を用いた高機能品生産技術の開発」（スマートセルプロジェクト）に当グループは初年度の2016年から参画し研究開発を継続している（RITE Today 2019参照）。このプロジェクトでは「高度に機能がデザインされ、機能の発現が制御された生物細胞」いわゆるスマートセルを設計する技術の開発とその技術の有効性検証を行う。

当グループはこれまでに生産検証データをスマートセル設計システム開発チームに提供することで設計技術の高精度化に貢献してきた。同時に、これらの設計

技術をコリネ型細菌に適用し生産株の育種期間の短縮を目指した。今回、有用芳香族化合物の1つを生産ターゲットとして生産株の開発を進めた。この化合物は産業的な利用価値が高いものの、これまで生物を利用して高濃度生産された例はない。微生物全般に対して毒性を示すことと、糖からの代謝経路のステップ数が多く複雑なことがその原因だと考えられる。また、コリネ型細菌は元々この目的芳香族化合物の生産経路を持たない。

このような状況から開発を始め、複数のスマートセル設計システムが提案する各代謝改変指針に基づきコリネ型細菌の育種を行った。その結果、目的芳香族化合物の生産が可能になると共に大幅な濃度向上を確認した（図8）。これによりプロジェクトの中間目標を大きく超える生産性を達成した。現時点では未適用の提案においても生産性の改善を示唆する予備検討結果を得ているため、スマートセル設計システムを利用することで今後もさらなる生産性向上が期待できる。

NEDO スマートセルプロジェクト

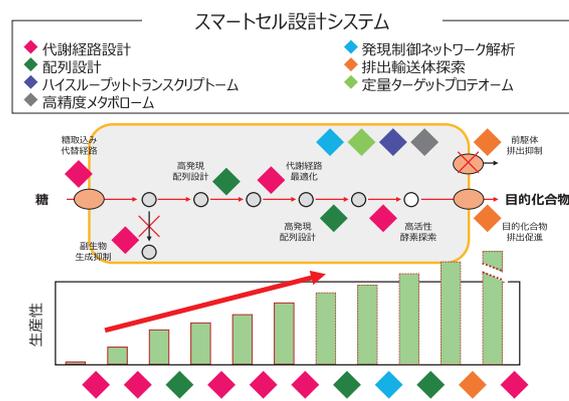


図8 スマートセル設計システムを活用した生産性向上

4.2. SIP第2期

戦略的イノベーション創造プログラム（SIP: Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program）は府省・分野の枠を超えて基礎研究から実用化・事業化までを見据えた取り組みを産学官連携で進めるプログラムである。第1期(11課題)が2014年から5年間の計画で進められ、2018年から第2期として12課題の取り組みが開始された。課題の一つ「スマートバイオ産業・農業基盤技術」では、バイオとデジタルの融合・データ活用により生物機能を活用したものづくりによる持続可能な成長社会の実現を目指している。RITEは、本課題を形成する複数のコンソーシアムの一つ「革新的バイオ素材・高機能品等の機能設計技術及び生産技術開発」に参画している。本課題では、市場が所望する新機能を有するポリマーを、合成されたモノマーを用いて合成することを目標としており、ポリマーグループとモノマーグループに分かれて取り組んでいる。目標達成のために、前者は、ポリマー設計技術、ポリマー機能予測技術およびこれらの技術検証を行い、後者は、モノマーの生成に向け

た代謝設計、酵素機能改変技術の開発ならびにその検証を行う。RITEはモノマーグループのリーダーとして、グループ内の各チームより提案される目的モノマー合成能を有すると推測された酵素候補および合成能を付与させるための改変候補について、コリネ型細菌を宿主として検証を行う。2019年度は候補モノマーの一つ、ジオール生合成に関与する酵素を対象に技術検証を行っており、さらに対象酵素を拡大して技術開発、技術検証を進めている。

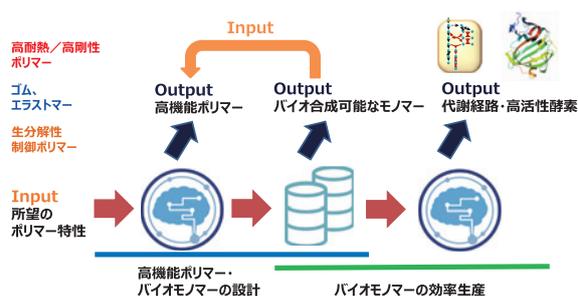


図9 バイオマテリアル設計・生産技術統合システム

4.3. 様々な芳香族化合物への展開

芳香族化合物は、ポリマー等の原料として重要な基幹工業化学品であると同時に、医薬品、機能性栄養素材、香料、化粧品等の原料となる高付加価値な化合物が数多く存在する。芳香族化合物は現在、石油や天然の植物等を原料として製造されているが、脱石油依存、環境保全、および生産性の観点から、高効率なバイオ生産法の確立が望まれている。微生物細胞内ではフェニルアラニン、チロシン、トリプトファンといったアミノ酸や葉酸（ビタミンB9）、補酵素Qなど種々の芳香族化合物が生合成されている。これらの化合物は全てシキミ酸経路と呼ばれる代謝経路から派生する（図10）。我々は適切な遺伝子組換えを施したコリネ型細菌を高効率バイオ変換技術へ適用することで、非可食バイオマスを原料としてインフルエンザ治療薬タミフルの原料とされるシキミ酸、機能性ポリマー原料として有望な4-アミノ安息香酸、そしてポリマー、医薬品、化粧品、食品原料として有望な芳香族ヒドロキシ酸の高生産プロセスの確立に成功している。

また、多種生物由来の遺伝子を導入することによりコリネ型細菌が本来合成できない有用芳香族化合物についても高生産菌株の育種を進めており、前述したスマートセルプロジェクトにおいて開発された技術を活用することで更なる生産性向上を図る。

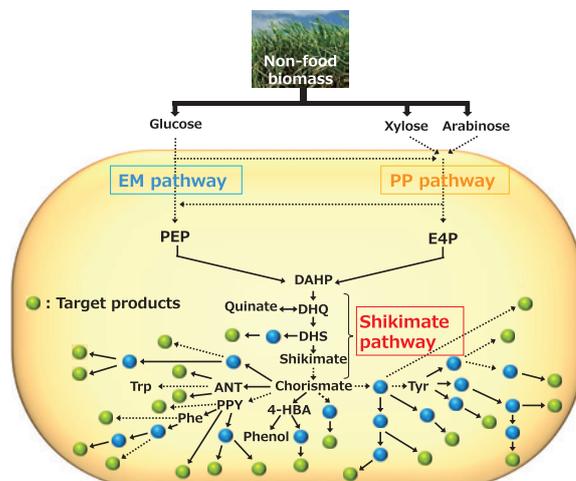


図10 様々な芳香族化合物の生合成経路

5. 実用化への取り組み

5.1. フェノール/芳香族化合物

現在の工業生産されているフェノールはすべて石油由来の原料から製造されている。我々は地球環境保全や温室効果ガス削減の観点からグリーン化が困難とされてきたバイオ法によるフェノール製造技術開発を進めてきた。我々の開発した2段工程法を利用した実用生産を早期に実現するため、住友ベークライト株式会社と共同で2014年5月にグリーンフェノール開発株式会社（GPD）を設立した。2018年4月にはGPDはグリーンケミカルズ株式会社（GCC）へ社名を変更した。

GCC、住友ベークライト株式会社による「非可食バイオマス由来グリーンフェノールの工業生産に向けた技術開発」が、NEDOの「戦略的省エネルギー技術革新プログラム」においてその研究開発の功績が特に顕著であったとして優良事業表彰を受賞し、表彰式と受賞講演は2019年1月30日～2月1日に東京（ENEX2019会場）で行われた（図11）。



図11 NEDOによる優良事業表彰

現在、グリーンフェノール生産技術開発で培った量産技術とノウハウを活用し、従来は不可能と考えられていた芳香族化合物などの付加価値の高い様々なグリーン化学品の量産技術の確立を鋭意進めており、顧客ニーズに合致したグリーン化合物の商品化を加速している。

5.2. アミノ酸

一般的なアミノ酸発酵は、微生物の培養と発酵生産に通気（酸素）を必要とし、この通気量が適切にコントロールされることが、高生産性の達成に重要である。これに対してRITEでは、前述したように通気の必要がないRITEバイオプロセスを用いて、シンプルなプロセス制御による省エネルギー、高生産なアミノ酸生産プロセスの開発を進めてきた。非通気条件でアミノ酸を生産するには、酸素を使わずに細胞内の酸化還元バランスを適正に保つ仕組みが必要であり、この目的のためには目的アミノ酸に応じた人工的な生合成経路を細胞に導入する必要がある。当グループでは、こうした課題を解決した非通気条件でのアミノ酸生産プロセスのコンセプトを2010年に学術雑誌に発表した (Appl. Microbiol. Biotechnol. 87: 159-165, 2010.)。

RITEは、RITE発ベンチャー企業Green Earth Institute株式会社 (GEI) を2011年9月に設立し、RITEバイオプロセスによるアミノ酸等のグリーン化学品やバイオ燃料の事業化を目指した共同研究を実施している。本共同研究において、アミノ酸の一種であるL-アラニン生産に関しては、生産菌株の開発、スケールアップ検討やコスト低減のための各種検討を進め、2016年には、GEIの国内パートナー企業が保有する商業スケールの発酵槽を用いた試験生産に成功し、実用生産の段階に進んでいる。試験生産には、当グループの研究者も参加し、現地のメンバーと力を合わせて成功へ導いた。RITEが開発したアラニン生産株を利用して生産されたL-アラニンは、2017年8月、厚生労働省食品安全委員会による評価の結果、食品添加物としての安全性が確認され、工業用用途のみならず食品添加物としても利用可能になった。現在、海外の複数の国で商用生産に向けた取り組みが進んでいる。また、アミノ酸の一種であるL-バリン生産に関してもRITEは世界最高レベルの生産濃度と生産効率の菌株作製に成功し、GEIや海外パートナー企業との実用化プロジェクトを完了し、商用生産を実現している。更に、他のアミノ酸についても同様の実用化を目指し、研究開発を進めている。

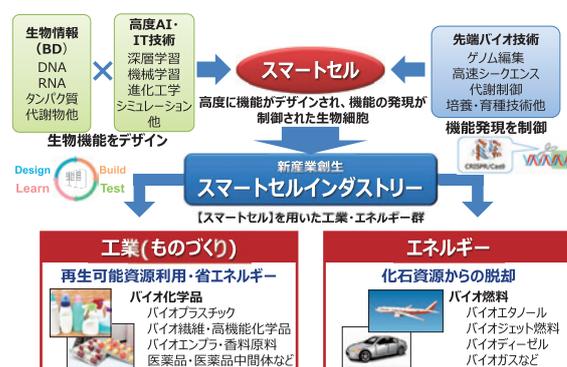
6. おわりに

現在、世界で50以上の国・地域がバイオエコノミー戦略を策定している。日本も「バイオ戦略2019」において、バイオエコノミー社会の実現を目標として掲げた。その中で、9つの市場領域の内、前述の「バイオプラスチック」に加えて、「高機能バイオ素材」および「バイオ生産システム」の3つが我々の技術分野と関連しており、今後、政府の重点開発項目に取り上げられると思われる。

バイオ燃料の分野では、政府は、2018年から5年間、年間50万KLのバイオエタノールを導入する目標を定めているが、原料コスト（主にトウモロコシ）のためそのほとんどを輸入に頼っている。廃棄物の非可食バイオマスを原料とすることで、食料競合とコスト低減

を同時に解決しつつ、大量生産を実現することが望まれている。

バイオ化学品の分野では、近年発展が著しいIoTやAIなどの情報技術（デジタル）とバイオテクノロジーの融合に基づいた複数のプロジェクトが政府主導により進められ、RITEも参画している（4章参照）。これらのプロジェクトでは、前述したスマートセルを利用したバイオリファイナリー技術が中核技術として大きな役割を果たし、エネルギーに加えて工業分野（ものづくり）にも大きな波及効果を与えることが期待されている（図12）。



出典：経産省 バイオエコノミーの実現に向けた国際動向と我が国の取組, H30年9月25日資料を参考に作成
図12 バイオ×デジタルが変える工業/エネルギー分野の融合

当グループでは2020年も引き続き最先端バイオテクノロジーである「スマートセル」を中心とした革新的なバイオリファイナリー生産技術の開発に取り組み、低炭素社会の構築や持続可能社会の実現に貢献していきたい。