

The cover features a diagonal split design. The upper-left portion is white, while the lower-right portion is a photograph of golden wheat stalks against a clear blue sky. The design is framed by large, overlapping geometric shapes in blue, yellow, and green.

2023 成果報告書

農林水産省 農林水産技術会議事務局
研究開発動向等調査委託事業
(海外・異分野動向調査)

令和6年3月

デロイト トーマツ コンサルティング 合同会社

目次①

研究開発動向	4	AIと多重ゲノム編集ツールを活用した育種プラットフォーム	39
プラズマ技術を用いた低環境負荷の窒素固定技術	5	ゲノム編集技術を活用した高機能農作物の生産	40
水素細菌を活用した土壌内での窒素固定化	7	金属有機構造体（MOF）の活用によるアンモニアリサイクル技術の開発	42
バイオエタノールからのSAF製造	8	画像解析の高度化による高速フェノタイピング技術	43
エタノールを原料とするATJ技術によるSAF製造	12	アメリカミズアブを用いた代替タンパク生産（養殖飼料）	44
遺伝子組換え技術を適用した微細藻類によるバイオ燃料製造	15	リモートセンシングとAI技術を組み合わせた栽培管理支援システム	45
Asparagopsis（通称カギケノリ）を原料とした飼料添加物の開発	18	クラウド型営農支援サービス「天晴れ」	52
赤外光を活用する透明太陽電池の開発	20	光学衛星群にて取得する高解像度画像を活用した、より精緻な圃場情報の提供	55
細胞及び合成生物学的手法の設計・製造プラットフォームによるバイオファウンドリの展開	21	無償公開の衛星データを用いた天候に依存しない圃場モニタリング	57
日本初の統合型バイオファウンドリ	24	過酷環境下での農作物の栽培を想定した植物工場システムの開発	59
マイクロペプチドを用いた作物の成長促進及び保護用資材の開発	27	密閉型栽培装置を活用した人工光型植物工場	60
環境ストレスへの耐性向上や生育促進に資するバイオスティミュラント製品の開発及び販売	28	草地環境下にて雑草検出かつ自動走行する除草ロボットの開発	62
大規模言語モデルを活用した「惠农AI」の開発	34	レーザーを活用した除草機器を搭載する自動運転車両の開発	63
ゲノム情報を活用したAIプラットフォームによる非遺伝子組換え食品の開発	37	植物による医薬品用タンパク質の生産	65
		半数体誘導を用いたゲノム編集技術	67
		ゲノム情報を利用した有用物質生産	70

目次②

研究開発環境・スタートアップ支援	80
イノベーション・エコシステムの核を担うスタートアップ支援機関や研究機関 （オーストラリア：ビクトリア州）	81
研究都市としての環境を活用した政府機関との連携 （米国：メリーランド大学）	84
公益有限会社という形態を活用した外部連携体制の構築 （ドイツ：ドイツバイオマス研究センター）	87
イノベーション・エコシステムの核を担う研究機関 （オランダ：ワーヘニンゲン大学リサーチセンター）	91
イノベーション・エコシステム形成（イスラエル）	98
技術戦略分析	114
①SAF	116
②バイオスティミュラント	136
③人工衛星等による生育観測	153
④ゲノミックセレクション	167

研究開発動向

プラズマ技術を用いた低環境負荷の窒素固定技術（オランダ・VitalFluid社）

- 従来アンモニアを原料として製造する硝酸を、プラズマ技術により即時に空気中の窒素を水に溶解させることで生成可能
- 本装置で生成された硝酸とカルシウムやカリウムを混合することで液体肥料を製造可能であり、従来の肥料と同等の収量が確保可能であることを実証済

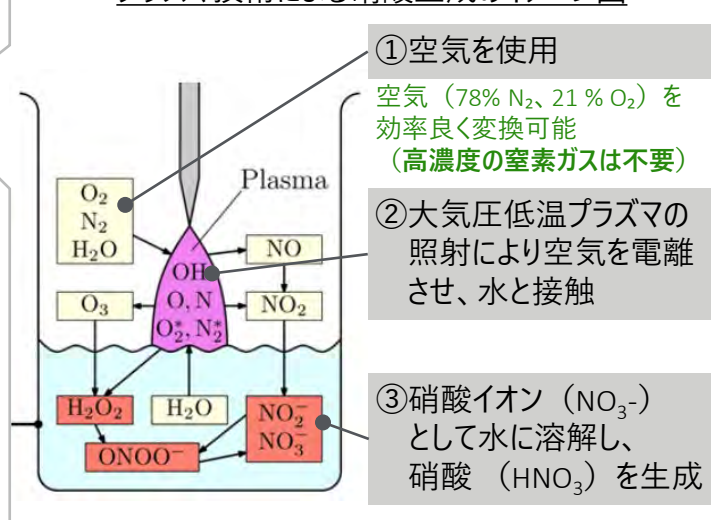
窒素固定モジュール 「Freya Natural Nitrogen system」



空気と水から
硝酸を生成

- ・生成する硝酸のpH：3¹⁾
- ・消費電力量：15 kW
- ・硝酸塩の生成量：1.3 kg/時間
- ・15kW級モジュールの寸法：
2 x 1.2 x 2.1 m（幅 x 奥行 x 高さ）

プラズマ技術による硝酸生成のイメージ図



- ・生成する硝酸水の濃度は約300mmol/Lであり、通常10～15mmol/Lに希釈
- ・硝酸とカルシウム等を混合し、**硝酸カルシウムや硝酸カリウムを含む液肥**として点滴灌漑に利用
- ・電源があれば、圃場に近い拠点にて窒素肥料の生産が可能

点滴灌漑における実証の様子



▲垂直農法によるレタス栽培



▲温室におけるキュウリの栽培
（左：VitalFluid社の液肥による栽培
右：USDA有機基準に基づく栽培）

1) 灌漑用水は炭酸水素塩を多く含み、アルカリ性となることが多いことから、その中和に用いることを想定してpH値を設定

普及状況等

- ・15kW級モジュールの導入コストは15万€（設置コストを含む）
- ・現在、オランダにおけるトマト・キュウリの栽培や米国でのレタス栽培等で使用実績あり（なお、他にもスペイン、モロッコにて展開）
- ・本モジュールで生成された肥料を用いて生産された作物について、食品安全性のリスク評価を実施中

開発企業・研究機関の情報等

VitalFluid社

- ・2014年設立
- ・EUの研究開発プログラムHorizon 2020の助成を受けて開発（2018年9月～2021年12月）
- ・ワーヘニンゲン大学の園芸用試験設備やフェンロにあるBrightBox社の垂直農業施設にてトマト栽培やレタス栽培による実証を実施

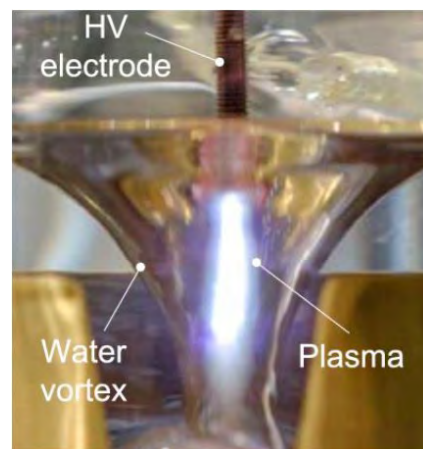
出典：CORDIS “Nitrogen-enriched plasma activated water, an unparalleled plant feeding system” <https://cordis.europa.eu/project/id/836896>、Wageningen University & Research and Innovation and Demo Center Water “Plasma Activated Water in USDA-organic fertilization”（2021年8月） <https://vitalfluid.com/wp-content/uploads/2022/03/Newsletter-1-VitalFluid-in-USDA-organic-tomato-cultivation.pdf>等より作成

プラズマ技術を用いた低環境負荷の窒素固定技術（オランダ・VitalFluid社）【補足】

- 大気圧低温プラズマによる硝酸生成が比較的容易であることを踏まえ、近年農業分野を含め応用先が拡大
- 本技術により生成される硝酸を原料とする液体肥料は、従来の肥料と同等の性能を有することを確認

1 プラズマ技術による硝酸生成の概要と応用例

- 水に大気圧低温プラズマ¹⁾を照射することで、空気中の窒素から硝酸イオン (NO_3^-) 及び亜硝酸イオン (NO_2^-) を生成し、水中で硝酸を生成
- 2000年頃以降、大気圧低温プラズマの生成が比較的容易になった背景を受け、応用例が拡大



▲水への大気圧低温プラズマの照射

1) 真空や高温等の特殊な環境下で生成されるプラズマに対して、大気圧下で低温に生成するプラズマのこと。放電電流を短時間で断つことにより、ガス温度を低くすることができる

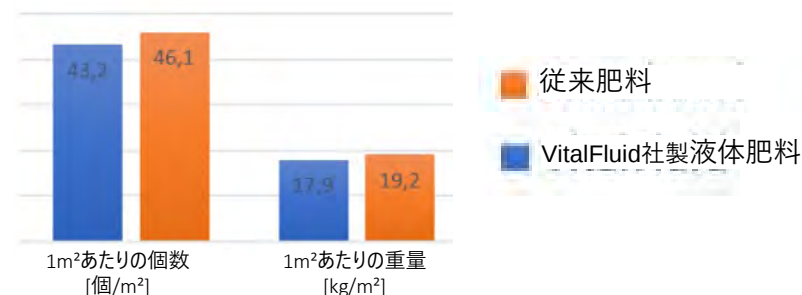
農業における大気圧低温プラズマの利用方法例

- スマート農業施設や陸上養殖施設の殺菌、種子や苗への照射による成長促進といった活用方法を想定

2 本技術を活用した液体肥料の効果

作物収量の担保

- USDA（米国農務省）が定める有機栽培基準に基づき、キュウリの圃場に同社製の液体肥料＜硝酸カルシウム＞と従来肥料をそれぞれ施用した結果、同等の収量レベルを実現
- なお、ユニット1つあたりの使用可能面積は1ha程度



給水管の目詰まり防止

- 井戸水や灌漑用水には、高濃度な炭酸水素塩が含まれるため、塩沈殿物を形成し給水管内を塞ぎやすいが、液体中の硝酸により中和・分解が可能

今後の開発上の課題

- モジュールの大量生産及びそれに伴う導入コストの更なる低減
- モジュールの更なる小型化・軽量化
- 露地栽培への適用に向けた設備の改良

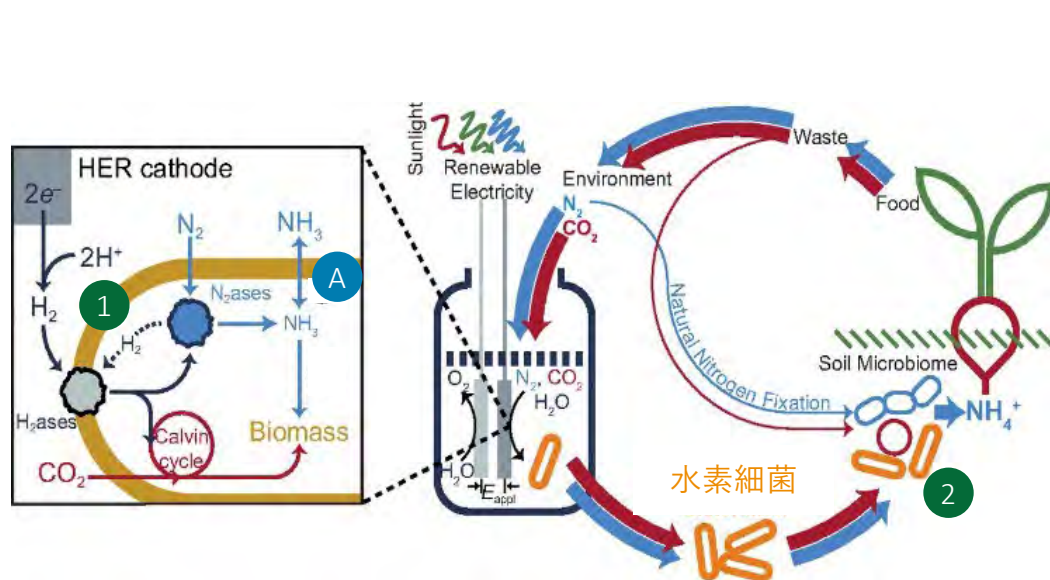
関連する技術事例

- 東北大学金子教授を研究代表者とする研究グループがプラズマ技術により生成した N_2O_5 ガスを植物に処理し、植物免疫が活性化した実証例を2022年6月に報告

出典：VitalFluid社“Cucumber Cultivation USDA Organic” <https://vitalfluid.com/wp-content/uploads/2022/03/Project-19-24-External-Cucumber-cultivation-USDA-organic.pdf>等より作成

水素細菌を活用した土壌内での窒素固定化（米国・Kula Bio社）

- 水素細菌（Hydrogen-oxidizing bacteria）に対し、バイオリクター内で電気分解由来の水素及び大気中の窒素、エネルギー源となる炭素を供給し、土壌改善剤としての機能を強化することで作物の収量が増加
- 阻害剤を添加することで、アンモニア生成源としての利用も可能



土壌改善剤としての利用

- 1 独自のバイオリクター内で、電気分解由来の水素及び炭素源等を供給し、水素細菌の機能を増強（空気中の窒素を取り込み、細胞内でアンモニア（ NH_3 ）を生成し、同時にカルビンサイクルにより炭素源を細胞内に貯蔵）

土壌等に水素細菌を投入※

- 2 水素細菌に貯蔵された NH_3 及び NH_4^+ の放出と、土壌中の細菌との相互作用により窒素固定を促し、土壌を改善することで、収量増加等に貢献

NH_3 生成源としての利用

- A 阻害剤（ホスフィトリシン）の添加により、 NH_3 からグルタミン酸への生成反応を抑制することで、水素細菌は細胞外に過剰となったアンモニアを放出するように変化

※栄養枯渇条件下で水素細菌の生存数は7日間で半減するため、一定の頻度で水素細菌を投入する必要があることが確認されている

水素細菌とは

- 水素をエネルギー源、 CO_2 を炭素源として生育する細菌
- 本技術で用いられる水素細菌（生物種名：Xanthobacter autotrophicus）は好気性微生物の一種

普及状況等

- カリフォルニア州とアリゾナ州にプラントを設立し、大規模な実証を計画中だが、2024年2月末時点で製品化状況は未確認

開発企業・研究機関の情報等

Kula Bio社

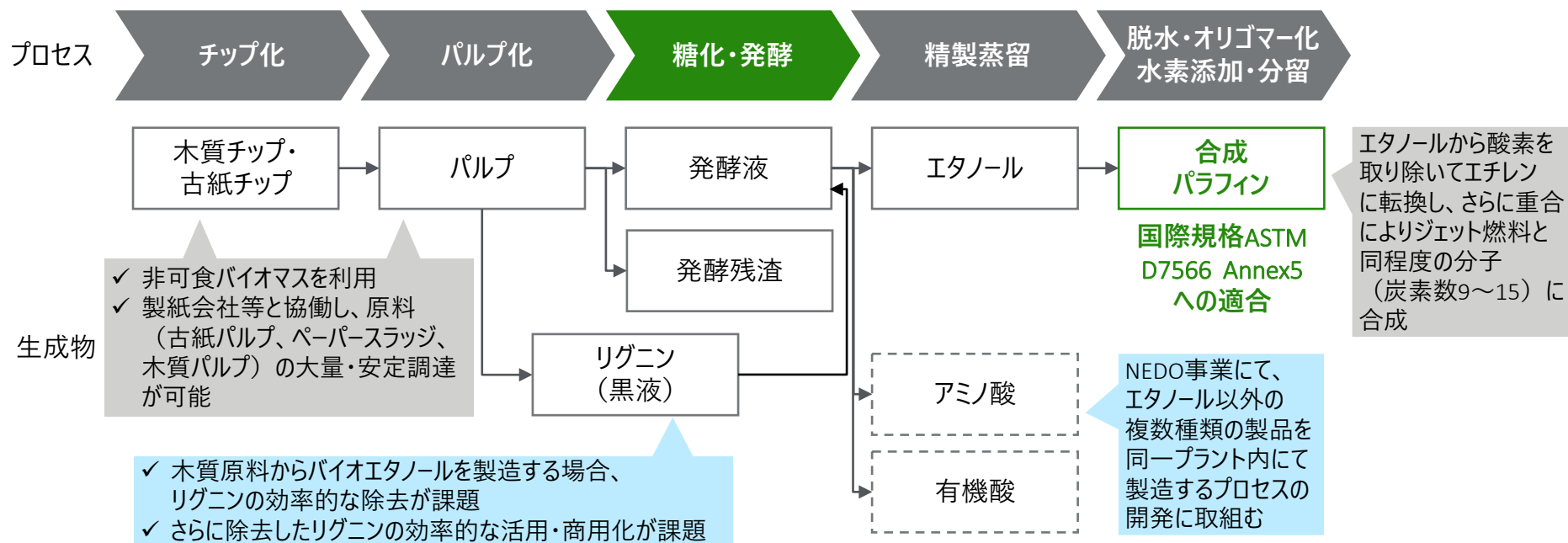
- 2018年設立
- ハーバード大学発のスタートアップ（同大学のDaniel Nocera教授が技術顧問）
- 2021年5月に米国VCより5,000万米ドルの資金を調達

出典：Chong Liu et al. "Ambient nitrogen reduction cycle using a hybrid inorganic-biological system" *The Proceedings of the National Academy of Sciences* 114 (25) 6450-6455 (2017)
https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1706371114?url_ver=Z39.88-2003&rfr_id=ori%3Arid%3Acrossref.org&rfr_dat=cr_pub++0pubmed等より作成

バイオエタノールからのSAF製造（日本・Green Earth Institute社）

- 国内で安定供給可能な木質バイオマス为原料としてエタノール及び高付加価値のアミノ酸・有機酸の同時製造を目指す
- そのエタノールを原料としてジェット燃料を製造するための技術開発が現在進められている

木質バイオマス为原料としたSAF（Sustainable Aviation Fuel）の製造プロセス（ATJ：Alcohol To Jet）



普及状況等

- GEI社は、日本製紙、住友商事と協働し、日本製紙の工場内で、年産数万キロリットルの国産材由来のバイオエタノールを2027年度に製造開始予定

開発企業・研究機関の情報等

Green Earth Institute社

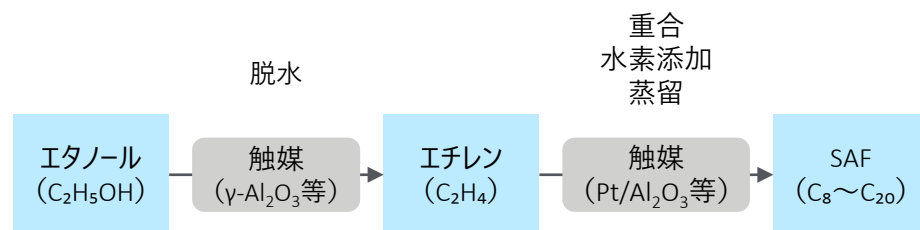
- 2011年設立
- 地球環境産業技術研究機構（RITE）発のベンチャー企業
- 「RITE Bioprocess®」によるアミノ酸等のバイオ化学品やバイオ燃料の事業化に取り組む

バイオエタノールからのSAF製造（日本・Green Earth Institute社）【補足①】

- ATJとは、エタノール等のアルコールを原材料としてSAFを製造する技術
- 現在主流となっているSAF製造技術は植物油や動物油等の水素化処理（HEFA）であるものの、原材料調達の制約を鑑みると、長期的にはATJが主流となる可能性も存在

1 ATJの概要

- 木質バイオマス等を原料に、糖化発酵にエタノール等のアルコールを生産
- 生産したアルコールに対し触媒を用いることで、エチレン等に転換した後、それらを重合することでSAFを製造
- 糖化発酵技術自体は既に実用化しており、SAFへの変換技術（例：エタノールからエチレンへの転換）も、既存の化学工業で実用化済の技術であることから、社会実装の確度が高いSAF製造手法として期待



今後の 開発上の 課題 (ATJ)

- エタノール等の製造技術及びSAFへの変換技術の低コスト化
- エタノールからSAFへと変換する際の収率向上を可能とするSAF製造プラントの設計や触媒の開発・運用技術等の確立

2 ASTM D7566規格の概要

- SAF燃料の製造方法及び原料に係る国際規格である「ASTM D7566」では、7種類のAnnexを策定
- 上記規格の中で、社会実装段階に至っている規格は、Annex2（HEFA）及びAnnex5（ATJ）の2種類のみ

規格	製造技術	原料	原料例
Annex1	Fischer-Tropsch 法により精製される合成パラフィンケロシン（ガス化FT）	有機物全般	都市廃棄物、木質セルロース
Annex2	植物油等の水素処理により精製される合成パラフィンケロシン（HEFA）	生物系油脂	大豆、パーム
Annex3	発酵水素化処理糖類由来のイソ・パラフィン(SIP)	バイオマス糖	サトウキビ
Annex4	非化石資源由来の芳香族をアルキル化した合成ケロシン(SPK/A)	有機物全般	都市廃棄物、木質セルロース
Annex5	アルコール・ジェット由来の合成パラフィンケロシン(ATJ)	バイオマス糖 紙ごみ	サトウキビ、トウモロコシ
Annex6	Catalytic Hydrothermolysis Jet (CHJ)	生物系油脂	廃食油
Annex7	Hydrocarbon-HEFA (HC-HEFA)	微細藻類	ボツリオコッカス

現在最も活用されている規格はAnnex2（HEFA）であるものの、原材料である生物系油脂に限りがあるため、長期的にはAnnex5（ATJ）が主流となる見込み

出典：資源エネルギー庁「CO₂等を用いた燃料製造技術開発プロジェクトの研究開発・社会実装の方向性」（令和3年10月）

https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/energy_structure/pdf/007_02_00.pdf等より作成

バイオエタノールからのSAF製造（日本・Green Earth Institute社）【補足②】

- 日本航空社と連携の上、古着を原料としてATJによりSAFを製造し、商用フライトでの活用を実現
- RITE Bioprocess®（増殖非依存型バイオプロセス）の活用により、糖をアルコールに変換する酵素の製造コストを従来の1/10程度に抑えることが可能であり、通常の化学プロセスと同等以上の高生産性を実現

3 ATJ技術に係る取組状況

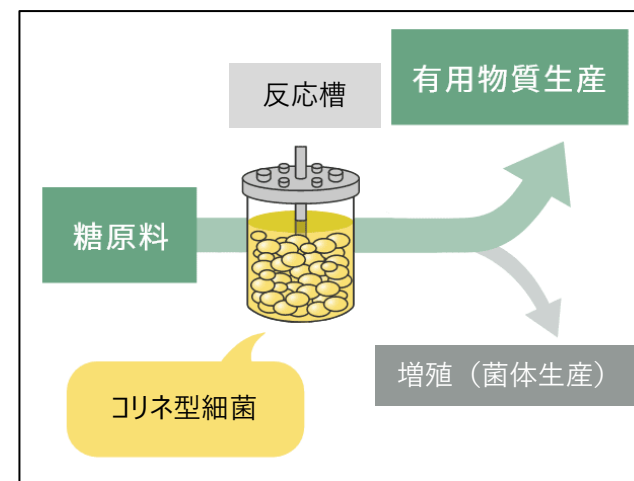
- ・ 日本航空社や公益財団法人地球環境産業技術研究機構（RITE）と共同で、古着約25万着を原料としたSAF製造を実施
- ・ 製造したSAFは、令和2年3月に国際規格「ASTM D7566」のAnnex5に合格し、令和3年2月には、国産バイオジェット燃料として、初の商用フライト（東京－福岡間）を実現

古着からSAFの製造フロー

- 1 古着（綿製品）中のセルロースをアルカリ処理し、糖化酵素により糖に変換
- 2 コリネ型細菌を活用するRITE Bioprocess®により、糖をイソブタノールに変換
- 3 複数の蒸留装置を用いて、99%以上の純度のイソブタノールに濃縮
- 4 触媒を用いて、イソブタノールから脱水を経てC8、12、16 オレフィンを製造（オリゴマー化）
- 5 水素を用いて、オレフィンを不安定な二重結合のないパラフィンに変換
- 6 ジェット燃料の沸点範囲規格を満たすように、蒸留装置で分留して沸点範囲を調整
- 7 ジェット燃料の保管・輸送時の酸化劣化を防ぐため、規定量の酸化防止剤を添加

出典：Green Earth Institute社「古着から製造した国産バイオジェット燃料を搭載した初フライトが実現」（令和3年1月）https://gei.co.jp/ja/img/newsrelease/news_20210128.pdf等より作成

RITE Bioprocess®の概要



有用物質生産の流れ

- ・ 有用物質を効率的に生産できるよう、C5糖輸送体遺伝子を導入したコリネ型細菌を大量に培養し、反応槽内に高密度で充填
⇒ 上記により、セルロース系バイオマスに含まれるC5糖とC6糖を同時に利用することが可能
- ・ 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、細胞分裂を停止させた状態で、原料となる糖を投入
- ・ 細胞分裂に必要な栄養や大きなエネルギーが不要となることから、原料となる糖は目的物質の生産のみに活用

バイオエタノールからのSAF製造（日本・Green Earth Institute社）【補足③】

- 木質バイオマスからのエタノール製造時に発生する副生成物の一つであるリグニンについては、エタノール製造における発酵及び蒸留工程にて、熱エネルギー源として活用する見込み

4 副生成物であるリグニンの活用方法

原料	主成分	用途	備考
木質 バイオマス	セルロース	• バイオプラスチック • SAF • 食品 • バイオゴム 等の原料	-
	ヘミセルロース		
	<u>リグニン</u>	• 化学プロセスにおける熱エネルギー源	• 紙への需要量低下に伴い、今後は<u>エタノールの製造プロセス</u>（特に<u>発酵、蒸留工程</u>）において必要となる熱エネルギー源として、リグニンが活用される見込み • 理論上、エタノールの製造プロセスで<u>必要な熱エネルギーを100%賄うことが可能</u>

リグニンの有効活用に向けた開発企業の他の取組

- GEI社は、令和5年11月に住友林業社と木質バイオマスを原料としたバイオリファイナリー事業の推進に向けて業務・資本提携契約を締結
- 直近の取組としては木材の成分分離技術確立し、木材の新たな利用用途を開拓することで、リグニン等を原料とした化学品の商用生産を目指す

関連する技術事例

Lanzajet社：
農業残渣や都市ごみ等を原料としてエタノールを生成し、それらを用いて、ATJによりSAF製造する技術を保有しており、世界各国でSAFの大量製造に向けたプロジェクトを展開

出典：住友林業「木質バイオマス化学品の研究開発に着手～木材の成分分離技術の確立で木のカスケード利用を促進～」（令和5年11月）、Lanzajet社“Airbus and LanzaJet to Collaborate on Sustainable Aviation Fuel Production”（2023年6月）等より作成

エタノールを原料とするATJ技術によるSAF製造（米国・LanzaJet社）

- ATJ技術の一つである「連続触媒プロセス」では、化石燃料からジェット燃料を製造する場合と比較して、温室効果ガス排出量を70%以上削減可能
- 本社が存在する米国ジョージア州では、商用化規模のSAF製造プラントの建設が完了しており、今後世界各国へSAFを供給する体制を整備

LanzaJet社のSAF製造技術の概要

- ・農業廃棄物や都市廃棄物を原料として製造されるエタノールに対し、同社が開発した「連続触媒プロセス」によるATJ技術を活用し、SAF及びディーゼル燃料を製造可能
- ・本技術の主な特徴は以下の通り
 - 様々な原材料（例：農業廃棄物、都市廃棄物）が活用可能
 - 高い変換効率（生成される炭化水素の約9割がSAFとして利用可能）
 - 高いエネルギー密度
 - SAF及びディーゼル燃料の製造比率を調整可能
- ・ATJが対象である「ASTM D7566 Annex5」として、認証取得済み

普及状況
等

- ・世界各国にてSAF製造プラントの建設を予定しており、2030年時点で年間約385万klのSAFを製造する予定

社会実装に向けた最新動向

対象国	プロジェクト概要	SAF製造目標
 米国	世界初の <u>エタノールからSAFを製造するプラント</u> を2024年1月24日に <u>開所済</u>	・ エタノールから年間 <u>約3.4万klのSAF</u> 及び約0.4万klのディーゼル燃料を製造可能
 英国	<u>農業廃棄物や木材残渣をエタノールに変換</u> する技術を持つNova Pangaea Technologies社と共同でSAFを製造	・ <u>年間12万klのSAFを製造</u> 見込み ・ ライフサイクル全体で <u>CO2排出量を年間23万トン削減</u> する見込み
 オーストラリア	クリーンテック企業のJet Zero Australia社と共同で、SAFを製造	・ <u>サトウキビ等の農業副産物から年間最大10万kl</u> のSAFを製造する見込み
 ニュージーランド	ニュージーランド国内の <u>廃棄物を活用してSAFを製造</u>	-
 インド	石油会社であるIndianOil社とSAF製造に向けたパートナーシップ契約を締結	-
 日本	コスモ石油社及び三井物産社と共同で、コスモ石油社の製油所にて、国産SAFの大規模製造を目指す	・ 2027年度までに <u>年間22万klの国産SAFを製造</u> する見込み

開発企業・
研究機関
の情報等

LanzaJet社

- ・ 2020年設立（微生物の発酵技術を使ってエタノールを製造する技術を持つLanzaTech社から、2020年にスピンアウトして設立）
- ・ エタノールを原料とするATJ技術によりSAFを製造する事業を展開
- ・ 2022年には、Microsoft社のInnovation Fund及びBreakthrough Energy Venturesから合わせて1億ドルの資金調達

エタノールを原料とするATJ技術によるSAF製造（米国・LanzaJet社）【補足①】

- 廃棄物やエネルギー作物等の原材料由来のエタノールを活用して、SAFを製造することが可能
- 製造されるSAFとディーゼル燃料の割合は最大 9 : 1 であり、高効率でのSAF製造プロセスを確立

1 ATJによるSAF製造技術の概要

原料となるエタノールの生成方法（図1）

- 産業排ガスやエネルギー作物、都市廃棄物、林業残渣、ランドフィルガス等の多種多様な原材料から製造されるエタノールを活用可能
- 産業排ガスを原材料としてエタノールを生成する場合は、LanzaTech社の一酸化炭素やCO₂、水素を含むガスを微生物により発酵させる技術を活用

SAF製造までのプロセス（図2）

- ① エタノールを脱水し、エチレンを生成（触媒：γ-Al₂O₃）
- ② エチレンをオリゴマー化し、オレフィンに変換（触媒：Ni/SiO₂-Al₂O₃、H-βゼオライト）
- ③ 水素化によりオレフィンを飽和させパラフィン、イソパラフィンを生成（触媒：Pt/Al₂O₃）
- ④ 目的の製品（SAF、ディーゼル）への分離を経てSAFを製造

LanzaJet社のATJ技術の特徴

- SAFに加えてディーゼル燃料も生成可能であり、その製造比率を調整することも可能
- 本プロセスではSAF：ディーゼル燃料＝9：1の割合で製造可能であり、ガス化FTやHEFAに比べSAFへの変換効率が低い（ガス化FT合成やHEFAでは6：1程度）

図1. 微生物発酵技術の概要

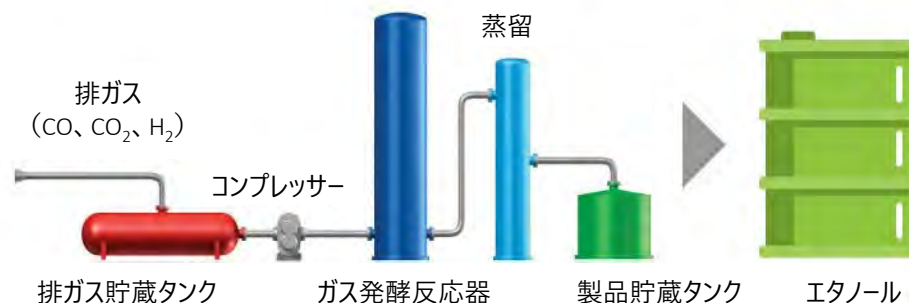
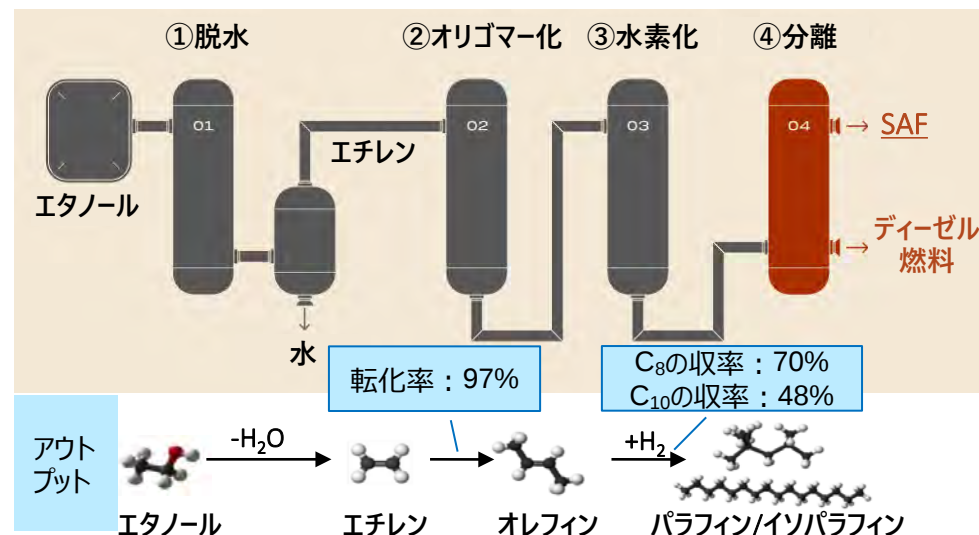


図2. SAF製造の流れ



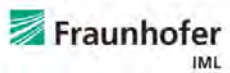
出典：LanzaJet社 ウェブサイト、三井不動産社 ウェブサイト、IEA “Progress in Commercialization of Biojet/Sustainable Aviation Fuels (SAF): Technologies, potential and challenges”（2021年5月）、CORDIS “Fuel via Low Carbon Integrated Technology from Ethanol D7.3 Data management plan”（2021年5月）等より作成

エタノールを原料とするATJ技術によるSAF製造（米国・LanzaJet社）【補足②】

- 欧州委員会が支援する技術開発・実証プロジェクト「FLITE」では、オランダのSkyNRG社が中心となり、都市廃棄物由来エタノールを原料とするSAF製造プラントの建設・実証を実施しており、LanzaJet社はATJ技術（連続触媒プロセス）を提供

2 研究開発中のプロジェクト

プロジェクト名	■ FLITE
プロジェクト期間	■ 2020年12月1日～2024年11月30日
取組主体	■ SkyNRG （オランダのSAF製造会社）
概要	■ 欧州委員会から支援により、欧州初の都市廃棄物由来エタノールを原料とするSAF及びディーゼル燃料の製造プラントを設計、建設、実証 ■ プラントの稼働率は75%以上で、年間約3.8万kLのSAFを製造する見込み
本プロジェクトにおけるLanzaJet社/LanzaTech社の役割	LanzaTech社 ■ SAF製造プラントの設計、建設、運営を担当 LanzaJet社 ■ ATJ技術（連続触媒プロセス）を提供
今後の開発上の課題	・ 現時点で主要な成果は確認できず ・ 製造するアルコール（主にエタノール）の収量や製造性、力価（濃度）の最適化（アルコールの製造時に使用する微生物に遺伝子組換え技術を適用することで実現可能な見込み）

本プロジェクトの狙い	本プロジェクトの目的
 ■ ATJによるSAFの製造効率向上	 ■ SAFの商用化前規模での製造
 ■ ジェット燃料製造における、温室効果ガスの削減	 ■ 社会的、経済的、環境に配慮した手段でのSAFへの移行
 ■ ATJによるSAF製造の経済性向上	 ■ SAFの開発と普及
パートナー企業	
	■ 科学技術分野における応用研究機関であり、物流分野の課題解決に従事
	■ 環境や社会への影響に配慮した原材料の製造等を支援する非営利組織であり、RSB（Round Table for Sustainable Biomass）認証取得に向けて支援
	■ 環境系コンサルティング会社であり、SAF製造におけるLCA評価に従事

出典：CORDIS "Fuel via Low Carbon Integrated Technology from Ethanol" <https://cordis.europa.eu/project/id/857839>等より作成

遺伝子組換え技術を適用した微細藻類によるバイオ燃料製造（米国・Phytonix社）

- 水やCO₂、光を原料として、遺伝子組換えのシアノバクテリアを活用しn-ブタノールを合成
- 化学工場等から排出されるガスからCO₂を回収して、n-ブタノールの原料として使用することで、CO₂回収技術としての活用も可能

シアノバクテリアによるn-ブタノールの合成



▲フォトバイオリアクター（屋外）



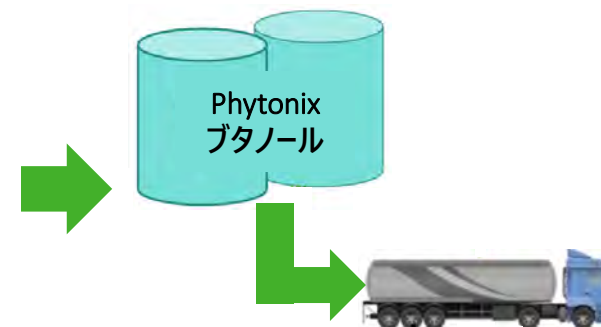
▲フォトバイオリアクター（屋内）

- シアノバクテリア（*Synechocystis* sp. PCC 6803）に対して遺伝子組換え技術を適用し、n-ブタノール（炭素数4の直鎖アルコール）合成の経路を導入及びシアノバクテリアの貯蔵糖生成経路を制御
- 屋内外に設置されるフォトバイオリアクター内にて、光合成によりH₂OやCO₂からn-ブタノールを合成
 - 化学工場やセメント工場、バイオマス発電所等の工場排ガスからCO₂を回収し、光合成に活用
- CO₂1トン当たりのn-ブタノールの合成量は522.4リットル
- n-ブタノールの目標製造価格は0.66米ドル／リットル（既存のn-ブタノールの製造価格は2.18米ドル／リットル）

普及状況等

- 2025年年頭を目途に、遺伝子組換えシアノバクテリアの開発及び屋内の小型フォトバイオリアクターにてパイロット試験を実施予定
- 2025年内に第1段階フォトバイオリアクターの運用を開始予定（ブタノール合成量：～10万L）
- 2026年内に運用規模を拡大予定（ブタノール合成量：～120万L）

ブタノールの回収・精製



- 培地からn-ブタノールを分離・回収
- 純度99%以上のブタノールを精製
- ブタノールの販売価格は2.91米ドル／リットル

開発企業・研究機関の情報等

Phytonix社

- 2017年設立
- 遺伝子組換えによるバイオ燃料製造技術を開発
- 2021年にイノベーション＆アントレプレナーシップの国際コンペティションにて最優秀賞を受賞

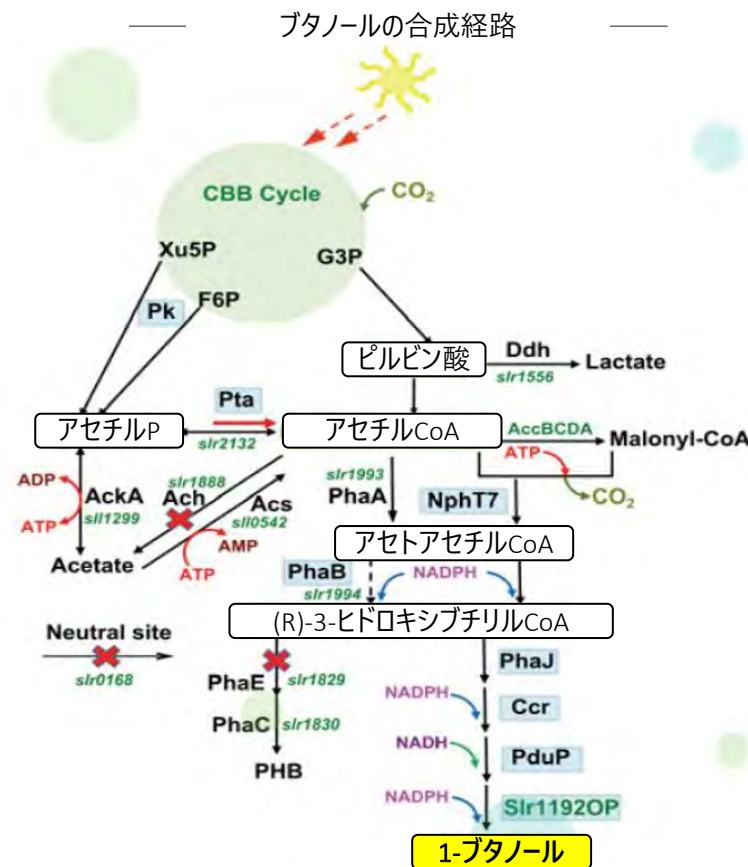
出典：Phytonix社 “Low-Cost Photosynthetic 1-Butanol Production From Carbon Dioxide Emissions : From Laboratory to Commercialization”（2023年5月）等より作成

■ シアノバクテリアの遺伝子組換えにより、貯蔵糖生成経路の制御や光合成変換効率の向上等を実現

1

- 遺伝子組換えにより得られる機能の概要

- 1) アデノシン三リン酸、植物の光合成等の代謝過程にエネルギーを供給するために使用する化合物
- 2) 酵素の活性を発現させる非タンパク質性の低分子の有機化合物（補酵素）



今後の 開発上の 課題

- ・ ブタノール生産の高効率化による、生産コストの低減

関連する 技術事例

- ちとせ研究所社：
光合成を活用した藻類の生産に取り組んでおり、マレーシア
サラワク州にて世界最大規模（5ha）の藻類生産設備
「CHITOSE Carbon Capture Central」を竣工しており、SAF等の
製造に向けた藻類の長期大規模培養技術の確立を目指している

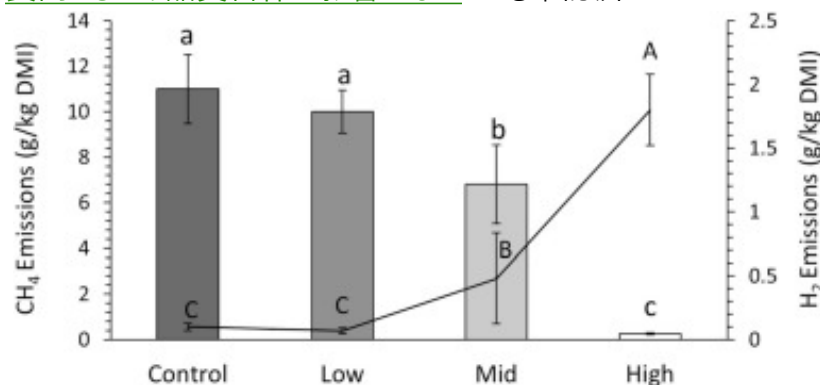
出典：Phytonix社“Low-Cost Photosynthetic 1-Butanol Production From Carbon Dioxide Emissions : From Laboratory to Commercialization”（2023年5月）、ちとせグループ「藻類産業を構築するプロジェクト「MATSURI」を運営するちとせグループ世界最大規模の藻類生産設備の稼働を開始」（令和5年3月）https://chitose-bio.com/wp2019/wp-content/uploads/2023/03/230320_C4press_3.pdf等より作成

Asparagopsis（通称カギケノリ）を原料とした飼料添加物の開発（オーストラリア・Sea Forest社）

- ウシ等の反芻動物に紅藻類の一つである「*Asparagopsis*（通称カギケノリ）」を摂取させることで、腸内におけるメタンガスの生成量を削減可能
- 商業規模での*Asparagopsis*の養殖施設を展開しており、2028年までに年間7,000tの生産能力を確保する見込み

*Asparagopsis*の活用による、反芻動物から発生するメタンの削減効果

- *Asparagopsis*は抗メタン生成特性を有するブロモホルムを多く含み、反芻動物の腸内におけるメタン（CH₄）生成抑制への貢献に期待
- Robert D. Kinley *et al.*（2020）は、牛の飼料に*Asparagopsis*を添加した実験にて、最大98%のメタン排出削減効果を確認
- 実環境でも、肉牛で約80%、乳牛で約40%のメタン削減効果を確認
- 食肉としての品質自体に影響がないことも確認済



▲実験系における*Asparagopsis*添加割合別のメタン排出量（棒グラフ・左軸）

普及状況等

- 飼料添加剤の製造能力は、1時間当たり最大4t
- *Asparagopsis*の生産量については、2028年までに年間7,000tの生産能力を確保することを目標（CO₂換算で、120万t分の削減に相当）
- オーストラリア以外の国においても、「SeaFeed™」の使用開始を予定

当社における資金調達状況及び商業化状況

資金調達状況

- オーストラリア政府が産業成長を目的として設立した非営利組織「The Advanced Manufacturing Growth Centre（AMGC）」より約67万豪ドルの資金を調達（総額約320万豪ドルのプロジェクト）
- 上記資金を活用しながら、*Asparagopsis*の海洋及び陸上養殖を商業規模（栽培面積：約1,800ha）で展開しており、得られた海藻を用いて飼料添加剤「SeaFeed™」を製造

商業化状況

- 「SeaFeed™」の販売価格は、肉牛1頭に対して約1豪ドル／日
- オーストラリア国内のハンバーガーチェーン「Grill'd」は、本飼料添加剤を摂取した肉牛を材料とするハンバーガーを販売
- 民間組織Verraが運営するボランタリークレジット「Verified Carbon Standard」において、クレジット発行に必要な当社製品によるメタン排出削減効果の算定方法論を1件登録済

Sea Forest 社

開発企業・研究機関の情報等

- 2018年設立
- オーストラリア連邦科学産業研究機構（CSIRO）とジェームズクック大学等の開発成果を基に設立されたFutureFeed社が保有する*Asparagopsis*の生産技術に関する特許を活用

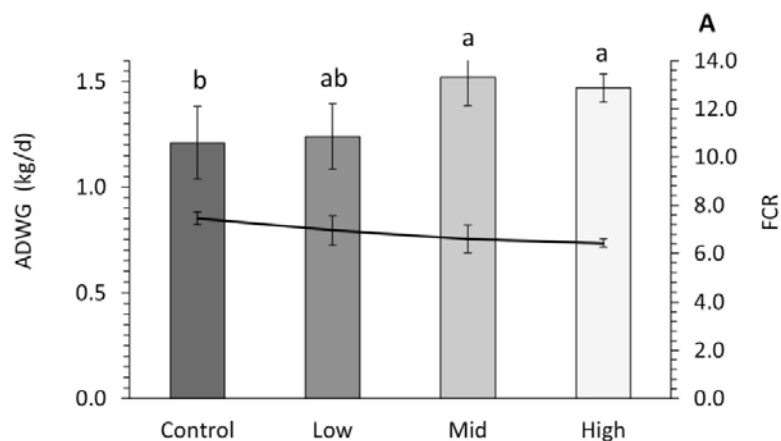
出典：Robert D. Kinley *et al.*（2020）「Mitigating the carbon footprint and improving productivity of ruminant livestock agriculture using a red seaweed」Journal of Cleaner Production, Vol. 259
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620308830>等より作成

Asparagopsis（通称カギケノリ）を原料とした飼料添加物の開発（オーストラリア・Sea Forest社）【補足】

- Asparagopsisによりメタン生成が抑制されることで、メタン生成に用いられていたエネルギーが不要となり、代わりに家畜の体重増加を促進する効果も確認されている

1 Asparagopsisの活用によるメタン排出削減以外の効果

- 前頁と同じ論文では、Asparagopsisの含有量が中程度（0.1%）及び高い（0.2%）割合であった飼料を摂取した牛について、一日当たりの平均体重増加量が従来よりも20%以上高いことを確認
- その理由は、腸内でのメタン生成に用いていたエネルギーが、牛の体重増加に振り分けられたためと推測



▲実験系における平均体重増加量（棒グラフ・左軸）

2 Future Feed設立の経緯

～2020年

- CSIRO（オーストラリア連邦科学産業研究機構）とジェームズクック大学、MLA（オーストラリアの肉牛と羊の生産者の出資によって設立された生産者団体）が共同で、海藻（Asparagopsis）による反芻動物でのメタン生成抑制効果を確認

2020年

- 上記の技術の商業化を目的として、CSIRO発のスタートアップ「FutureFeed」を設立
- 同社自体がAsparagopsisを生産するのではなく、知的財産のライセンス供与を実施

2022年

- Sea forest社に対し、Asparagopsis栽培に関するライセンス供与を発表

現在

- Asparagopsisの生産者/加工業者全9社に対し、ライセンス供与を実施中

政府の研究機関における開発成果を基に、
Asparagopsisに関する技術の商業化・普及拡大に成功

今後の開発上の課題

- Asparagopsisに含まれるプロモホルム含有量を最大化しつつ、メタン生成抑制効果の最大化及び海藻製品の使用量を最小限に抑えるための技術の開発

関連する技術事例

- CH4 Global社：Asparagopsis armata/taxformisを原料とした飼料添加物の商用販売・供給を実施
- Volta Greentech社：Asparagopsisを原料とした飼料添加材「LOME™」（牛に1日あたり100g与えることで、メタン排出量を最大90%削減可能）を製造・販売

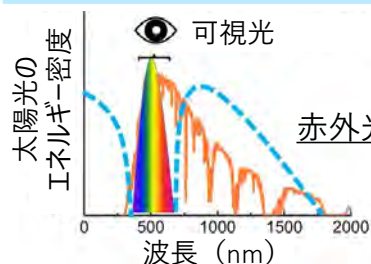
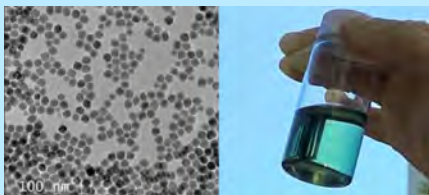
出典：Robert D. Kinley *et al.* (2020) 「Mitigating the carbon footprint and improving productivity of ruminant livestock agriculture using a red seaweed」Journal of Cleaner Production, Vol. 259
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620308830>等より作成

赤外光を活用する透明太陽電池の開発（日本・OPTMASS社）

■ 赤外光のみを吸収して電力に変換することが可能なナノ粒子の製造技術を核とした、可視光透過型の透明太陽電池を開発

無機ナノ粒子材料の概要

スズドープ酸化インジウムナノ粒子



赤外光のみを吸収し、
電力に変換

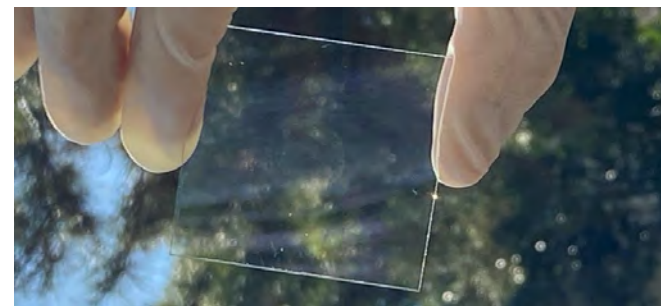
- 入射した光が金属表面に当たると電子が一斉に振動する「局在表面プラズモン共鳴」の原理を利用し、赤外光を電力に変換することが可能
- 添加物の混ぜ具合により、吸収波長を制御することも可能

普及状況等

- 令和5年7月時点では、ナノ粒子の量産化技術の開発を進めており、令和9年頃を目途に、発電窓ガラスの社会実装を目指している
- 令和12年頃を目途に、透明太陽電池の量産技術の確立を目指している

コア技術として活用

透明太陽電池の概要



▲透明太陽電池の外観

- 高い耐久性と可視光透過率（ナノ粒子をガラス基板の上に製膜した状態で可視光を95%透過）を両立した透明な太陽電池
- 可視光を透過する性質を活用することで、ビルや大規模施設の窓ガラス等への適用が可能
- 現状の電力変換効率は約1%であり、今後はセル単体で3～4%まで向上させる見込み

OPTMASS社

開発企業・研究機関の情報等

- 2021年設立
- 無機ナノ粒子材料をコア技術とする透明太陽電池の開発及び社会実装に取組む
- 令和4年2月にリアルテックファンド、サムライインキュベートより1.6億円の資金調達を実施（累計2.05億円の資金を調達済）

細胞及び合成生物学的手法の設計・製造プラットフォームによるバイオフィアウンドリの展開（米国・Ginkgo Bioworks社）

■ 生物学試験の自動化・高速化及び独自のデータベースを用いた遺伝子設計による微生物及び合成生物学的手法の設計・製造プラットフォームを構築

- 2つの技術資産を基盤とする独自の微生物及び合成生物学的手法の設計・製造プラットフォームを保有

Ginkgo Foundry

- 独自のソフトウェアで自動化・高スループット化を実現したセルエンジニアリングのプラットフォーム
- 微生物設計コストは約50%削減可能

Ginkgo Codebase

- Ginkgo Foundryで得られた独自データに加え、タンパク質配列に関する公開データベースも組み込むことで、約57億件のデータセットを蓄積

普及状況等

- クライアント向けのサービス提供として、2022年には新たに59件のプロジェクトを開始しており、以前から継続して実施しているものも含めると、合計約170件のプロジェクトを実施
- 細胞及び合成生物学的手法の設計・製造の成功確率の向上や、Ginkgo Codebaseの拡充を目的として、当社が独自に実施しているプログラムはこれまでに約160件存在

開発企業・研究機関の情報等

Ginkgo Bioworks社

- 設立年：2009年
- 事業内容：クライアントニーズに応じた、微生物や生物学的合成プロセスの設計、製造方法の開発

出典：Ginkgo Bioworks社 “Annual Report 2022” https://s28.q4cdn.com/823357996/files/doc_financials/2023/ar/Ginkgo-2022-Annual-Report-Letter-10-K.pdf 等より作成

細胞及び合成生物学的手法の設計・製造プラットフォームによるバイオフィアウンドリの展開（米国・Ginkgo Bioworks社）

- 農業分野では微生物開発に必要な生物資源の調達及び蓄積から、開発工程の自動化による効率的な微生物開発、開発した微生物を活用した目的物質の大量生産プロセスの開発まで一気通貫でのサービスを提供

農業分野におけるバイオフィアウンドリの特長

生物資源調達・蓄積

目的とする微生物等の設計・構築に必要な遺伝情報や合成DNAを調達・蓄積

微生物開発

設計・構築・試験・学習の各工程を自動化し、目的とする微生物を効率的に開発

- ✓ ゲノムシャフリング（細胞のDNAをランダムに切断／再結合）と超高速処理を組合せ
- ✓ 開発された変異株はGinkgo社独自のライブラリを基に代謝経路等を最適化（ライブラリは約20億個の遺伝子で構成）

プロセス開発

開発した微生物等を利用し、目的物質の大量生産プロセスを開発

- ✓ 最大容量3,000Lの発酵槽を含むパイロットプラント施設を活用し、顧客側の製造施設への技術移転を支援
- ✓ 具体的には、懸濁液や葉・種の処理製剤、生理活性を強化するアジュバント等の製造プロセスの確立を支援

データアセット

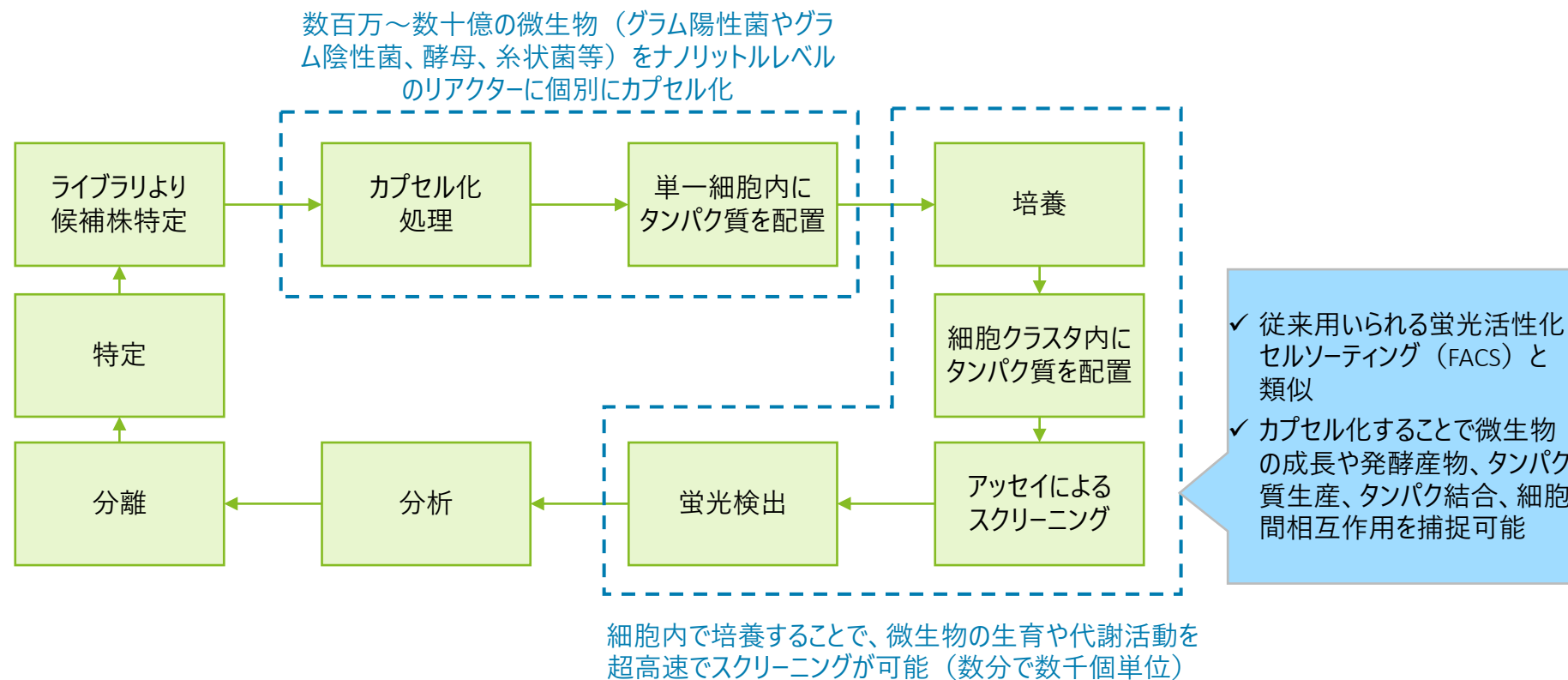
微生物の遺伝情報・発酵環境とその代謝機能に関するデータを大量に取得・蓄積

- ✓ *Bacillus*や*Paenibacillus*等を筆頭に、約20万種類以上の微生物ライブラリを保有（2022年にBayer社のAg Biologicals R&D部門を買収して取得）
- ✓ ナノリットル程度のリアクターに単一細胞を封入しカプセル化することで、カプセル内に閉じ込められた分泌物の高速スクリーニングを実施（「EncapS」技術）

研究開発テーマの一例として、「食品成分を生産する微生物の開発」（ADM社）や「食品製造用酵素の生産効率化」（Kerry社）、日本企業では「アミノ酸発酵生産菌の育種改良」（味の素社）、「生物農薬の開発」（住友化学社）等が挙げられる

細胞及び合成生物学的手法の設計・製造プラットフォームによるバイオフィアウンドリの展開（米国・Ginkgo Bioworks社）

- 独自のEncapS（Encapsulation and Screening）技術によって、微生物の高速スクリーニングと選択が可能
- 微生物を個々に微小な液滴内に配置してカプセル化することで、各微生物が独立した環境で生育できるようになり、個々の微生物の特性を正確に評価し、目的とする微生物を開発



上記サイクルにてランダム変異誘発を超高速で処理することで、新たな微生物株の発見や既存の微生物株の改良を大幅に加速することが可能（10万以上の候補株から、3～5の候補株に絞り込みが可能）

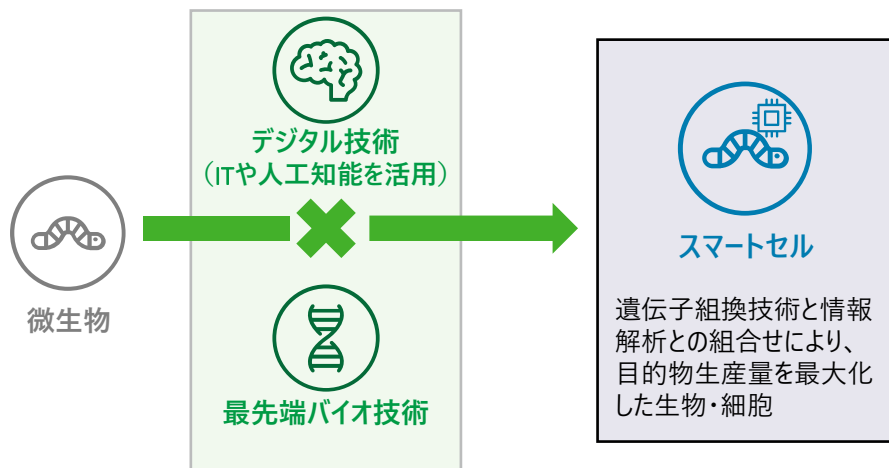
日本初の統合型バイオフィウンドリ（日本・バックス・バイオイノベーション社）

- デジタル技術を活用した「DBTLサイクル」によるスマートセル開発技術を保有しており、目的物質を生成する微生物等を高速で開発するためのプラットフォームの構築を進めている
- 現在、グリーンイノベーション基金事業に参画しており、CO₂を原料とする世界初のガス発酵バイオフィウンドリの確立を目指している

技術概要

別紙にて補足①

- ・人工知能等のデジタル技術を活用して、有用物質を開発するためのサイクル「DBTLサイクル」を高速で繰り返すことで、製造対象となる物質の生産量を最大化した細胞である「スマートセル」を開発



左記技術の社会実装に向けた取組状況

別紙にて補足②

- ・NEDO「グリーンイノベーション基金事業」の一環として、左記技術を活用した、CO₂を原料とする世界初のガス発酵バイオフィウンドリの確立に向けた研究開発プロジェクトを実施
- ・具体的には、CO₂を原料とする水素酸化細菌スマートセルを開発し、その提供速度を従来の1/10に短縮することで、バイオフィウンドリの事業化を図る



普及状況等

- ・日揮ホールディングス社と共同で、2027年度に数千リットル規模のパイロットプラント実証棟を稼働予定
- ・2030年までに微生物開発～パイロット生産設備までの一気通貫の技術開発拠点を設置予定
- ・グリーンイノベーション基金事業終了後の2031年度より、ガス発酵バイオフィウンドリの事業化を計画

開発企業・研究機関の情報等

バックス・バイオイノベーション 社

- ・設立年：2020年（神戸大学発のスタートアップ）
- ・最先端のスマートセル開発技術を保有し、遺伝子の設計から微生物の育種、生産プロセスのスケールアップまで一括したサービスを提供
- ・2021年2月、DEFTA Partners社、ロート製薬社、太陽石油社より、総額12億円の資金調達を実施
- ・2023年5月、出光興産社より資金調達を実施

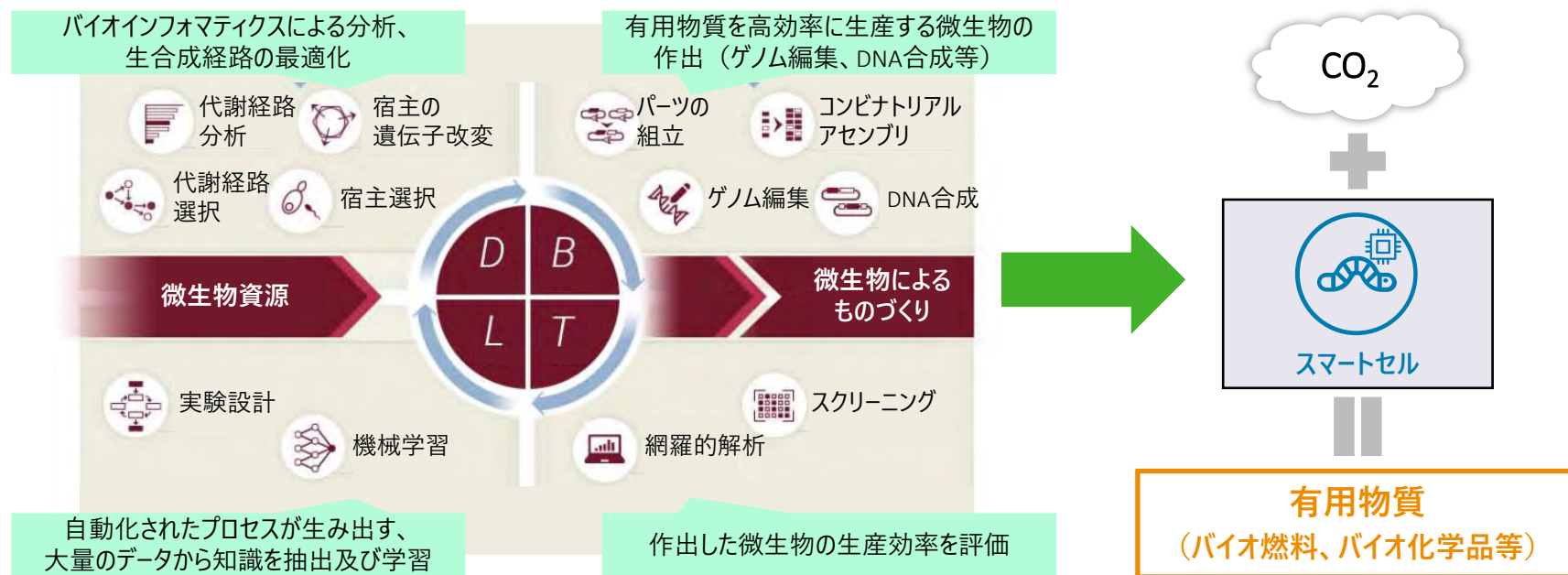
出典：バックス・バイオイノベーション「事業戦略ビジョン 実施プロジェクト名：CO₂からの微生物による直接ポリマー生産技術開発」<https://green-innovation.nedo.go.jp/pdf/bio-manufacturing-technology/item-001-002-003/vision-b2i-001.pdf>等より作成

日本初の統合型バイオフィウンドリ（日本・バックス・バイオイノベーション社）

- 「バイオフィウンドリ」とは、遺伝子設計、微生物作成、生産物質評価、学習予測から構成される「DBTLサイクル」を高速で繰り返し、従来手法では製造することが難しい高機能素材を容易に製造可能とする技術を指す

1 バイオフィウンドリの概要

- 最先端の**バイオ工学分野の技術等を用いて遺伝子改変微生物を効率的に開発**し、従来とは異なる方法で有用な物質を生産する一連のシステム
- その開発サイクルは、**Design（D：遺伝子設計）・Build（B：微生物作成）・Test（T：生産物質評価）・Learn（L：学習予測）**の頭文字から「**DBTLサイクル**」と呼ばれる
- 「DBTLサイクル」を高速で繰り返すことにより、従来の化学合成で製造することが難しい高機能素材の製造を容易にすることが可能



日本初の統合型バイオフィアウンドリ（日本・バックス・バイオイノベーション社）

- NEDO「グリーンイノベーション基金事業」では、ガス発酵バイオフィアウンドリをデータ駆動からAI駆動へ段階的に進化させることで、ガス発酵に適したスマートセルを開発しつつ、その育種期間を1/10に削減することを目指す

2 社会実装に向けた取組みプロジェクト

プロジェクト名

■ CO₂からの微生物による直接ポリマー生産技術開発（NEDO事業）

プロジェクト期間

■ 2023年度～2030年度

取組事業者

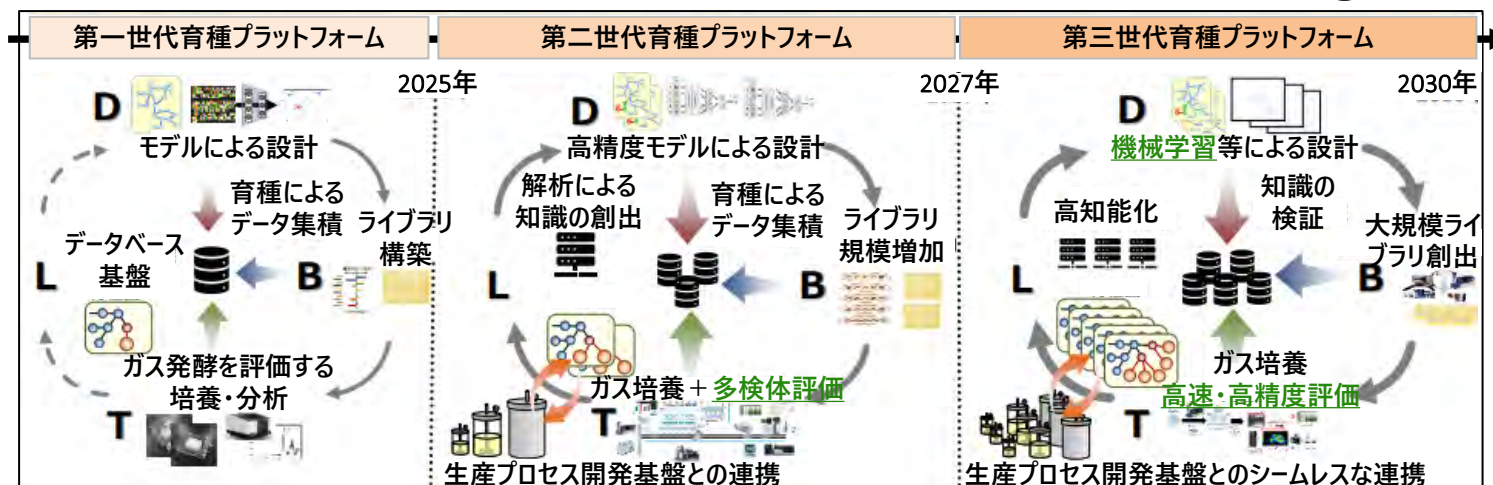
■ バックス・バイオイノベーション社、カネカ社、日揮ホールディングス社、島津製作所社

- 要素技術を統合することで、段階的に育種プラットフォームを高度化

- 第一世代プラットフォーム：ガス発酵型微生物の生産性評価システムの開発
- 第二世代プラットフォーム：ガス発酵型微生物の**多検体**生産性評価システムの開発
- 第三世代プラットフォーム：ガス発酵型微生物の**多検体・高速**生産性評価システムの開発



概要



今後の開発上の課題

- 設計から販売までの一連のプロセスを統合する高効率なシステムの開発
- CO₂・水素・酸素の混合気を効率よく取り込みものづくりをする微生物の開発

従来植物油由来であった、カネカ社の生分解性ポリマー「Green Planet < PHBH (3-ヒドロキシブチレート-co-3-ヒドロキシヘキサノエート重合体) >」をCO₂由来で生産する微生物の開発が目標

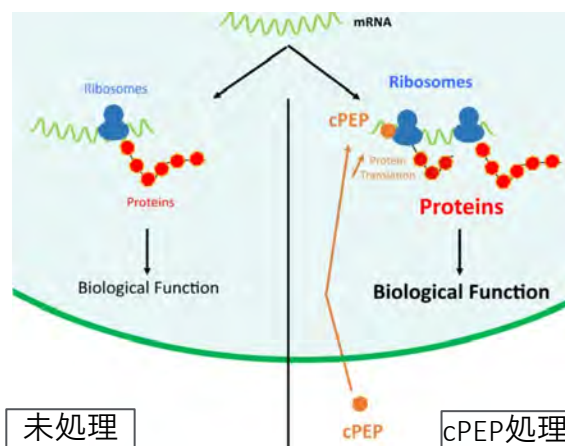
出典：バックス・バイオイノベーション社「事業戦略ビジョン 実施プロジェクト名：CO₂からの微生物による直接ポリマー生産技術開発」<https://green-innovation.nedo.go.jp/pdf/bio-manufacturing-technology/item-001-002-003/vision-b2i-001.pdf>等より作成

マイクロペプチドを用いた作物の成長促進及び保護用資材の開発（フランス・Micropep Technologies 社）

- 植物に対して、外部から相補性ペプチド（complementary peptides：cPEP）を適用し、標的とするタンパク質の収量増加や表現型の調整を可能にする技術を開発
- 実験にて、植物の熱耐性向上や成長促進、雑草の増殖阻害効果等を確認

相補性ペプチド（cPEP）の概要

- 植物の細胞に浸透させると、植物内のRNAと相互作用し、標的とするタンパク質の転写を増加するように設計されたペプチド
- 遺伝子組換え植物を用いずに、タンパク質発現のコントロールが可能



▲ 相補性ペプチドの作用の概略図

普及状況等

- 真菌の増殖抑制を目的としたcPEP製品「MPD-01」については、実用化に向けて、投与量や散布時期、他の製品との適合性の評価を実施している段階
- それ以外の製品（例：植物における免疫応答促進、雑草の増殖阻害）については、研究開発段階

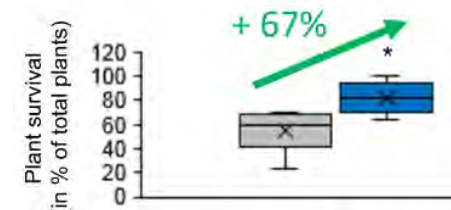
相補性ペプチド（cPEP）の機能確認に係る実験結果例

植物の
熱耐性
向上



▲ ダイズにおける熱ストレス耐性比較結果（左：他のペプチド処理、右：cPEP処理）

cPEP処理により、熱ストレスへの耐性が約67%向上

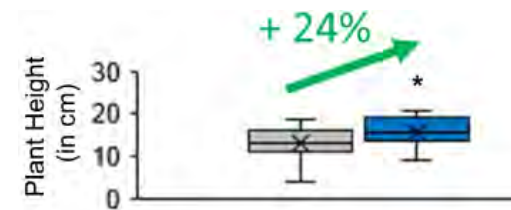


植物の
成長促進



▲ ダイズの成長比較結果（左：他のペプチド処理、右：cPEP処理）

cPEP処理により、植物の高さが約24%向上



開発企業・研究機関の情報等

Micropep Technologies 社

- 2016年設立
- マイクロペプチドを用いた作物保護ソリューションを開発
- 国立科学研究センター(CNRS)とトゥールーズ大学の研究センター「トゥールーズ植物科学研究所(LRSV)」発のスタートアップ

出典：Mélanie Ormancey *et al.* (2023) "Complementary peptides represent a credible alternative to agrochemicals by activating translation of targeted proteins" Nature Communications, 14, <https://www.nature.com/articles/s41467-023-35951-0#MOESM1>等より作成