

グリーンイノベーション基金事業

「バイオものづくり技術による
CO₂を直接原料としたカーボンリサイクルの推進」
プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画

令和4年10月27日

経済産業省

商務・サービスグループ

目次

1. 背景・目的.....	3
2. 目標.....	10
3. 研究開発項目と社会実装に向けた支援.....	19
4. 実施スケジュール.....	26
5. 予算.....	30

1. 背景・目的

- カーボンリサイクルにおけるバイオものづくり技術の重要性と課題解決の方向性
 - バイオものづくり技術を利用したカーボンリサイクルは、バイオマス資源や大気中の CO₂ を原料として、バイオプラスチックや機能性素材などの化学品、燃料、タンパク質や飼料等の食品を生産する取組である。炭素の固定経路としては、大きく①バイオマス資源利用による CO₂ の資源化、②植物による CO₂ の直接資源化、③微生物による CO₂ の直接資源化といった 3 類型が存在する。ゲノム編集、ゲノム構築等再先端のバイオ技術を適用することで、今後大幅な生産性の向上が期待できることから、バイオものづくりはカーボンニュートラル社会の実現に向けた有力な選択肢のひとつといえる。
 - 日本の部門別 CO₂ 排出量(電気・熱配分後)のうち、製造業・工学プロセスが占める割合は 36.7%。このうち、特にバイオものづくりに関連する化学、繊維、食品飲料からは 21.9%の年間 8,901.7 万トンの CO₂ が排出されており¹、これらの業種についてはバイオものづくり技術による CO₂ 排出削減への貢献が期待できる。
 - バイオものづくりに関心が集まる背景として、直近 10 年でゲノム合成、ゲノム編集等の技術革新により、合成生物学が急速に台頭していることがある。さらに、ゲノム解析、IT・AI 技術の進展とあいまって、バイオ×デジタルの潮流が加速し、ゲノムと代謝物の関係を明らかにできるようになった。その結果、高度にゲノムがデザインされ、物質生産性を高度に高めた細胞（＝スマートセル）を利用することにより、インプットとアウトプットのバリエーションを大幅に拡大した新たな物質生産プロセスを利用することが可能となりつつある（バイオものづくり革命）。
 - OECD や米国のシンクタンクが実施した試算によると、細胞内分子や細胞、臓器を活用して物質生産するバイオエコノミーの世界市場は、2030 年には 200 兆円に成長すると予測しており²、2040 年には、高位予測のケースでは 400 兆円に達すると予測も出ている³。また、バイオ技術の利用は農林水産、健康医療分野で先行したが、今後は、素材やエネルギー、食品などの分野でも高い成長が予測されている。
 - 合成生物学でトップを走る米国産業界では、近年、IT 業界実業家や VC が合成生物学ベンチャー企業に積極的に投資を行い、ポスト第四次産業革命を担うバイオベンチャーが続々と誕生している。2021 年にはバイオベンチャーに対する投資額が前年度比で倍増し、年間 178 億ドル（＝約 2 兆円）の投資を集めている⁴。バイオベンチャーのうち、特に急速に資金調達額を伸ばしているのは、微生物等改変プラットフォーム事業者である。
 - バイオものづくりでは、上流の微生物等開発では、AI・ロボットを用いた効率的な微生物等改

¹ 国立環境研究所「温室効果ガスインベントリ(2019 年確報値)」より

² OECD 「The Bioeconomy to 2030」より

³ 「2020 McKinsey Global Institute Analysis」より

⁴ SynBioBeta 「4Q 2021 Synthetic Biology Venture Investment Report」より

変プラットフォーム技術、下流の発酵生産では、培養・精製技術の高度化といった、バリューチェーンの段階に応じて全く異なる高度な技術・設備が必要となる。このため、今後のバイオものづくり産業は、水平分業化が進展し、それぞれの基盤技術を確保したプレーヤーが付加価値の源泉を握ることが予測される。

- 米国の微生物等改変プラットフォーム事業者等とも競争・連携できるような事業者を国として育成していくことは重要であるが、担い手となる国内事業者は萌芽段階であり、現状では海外事業者との間に大きな差がある。こうした微生物等改変プラットフォーム事業者に対して、異分野事業者等からの投資や微生物等改変のノウハウなどが集約するように国として先行的かつ重点的に投資を行っていく。他方で日本の得意分野/不得意分野を上手く使い分けることも重要であり、特に日本が苦手な分野については、海外事業者との協力により進めることも妨げない。
- また、我が国は、南北に長い領土から生まれる多様な環境や、火山や深海といった極限環境を有し、そのような幅広い条件下に生息する微生物がいることから、バイオものづくりの上流工程で重要となるゲノム情報のバリエーションが豊かであると考えられる。さらに、悠久の歴史を持つ発酵・醸造産業を有しており、下流工程で重要となる大量発酵生産技術についても数多くの実績を持った事業者が存在していることから、独自の強みを生かせることが見込まれる。
- 本プロジェクトでは、こうした認識の下、革新的な素材や燃料などの異分野事業者との共同開発の促進等を通じて、バイオものづくりの中核を担う微生物等改変プラットフォーム事業者と大規模発酵生産とバイオものづくり製品の生産を担う製造事業者・事業会社の育成・強化を図るとともに、プラットフォーム事業者による高効率な微生物開発技術を活用することで微生物等が持つCO₂固定能力を最大限に引き出し、バイオマス原料を用いないCO₂を原料としたバイオものづくりによりカーボンサイクルを推進するために必要となる各要素の技術的な課題の解決を図る。さらに、原料のCO₂供給から製品製造までのバリューチェーンを構築し、商用生産までのスケールアップや製造技術の高度化を推進することで、CO₂を原料とした新しいバイオものづくり製品の社会実装とCO₂の資源化による産業構造の変革を目指す。

- 本プロジェクトを取りまく現状と課題解決の具体的方策

- 化学プロセスは、800℃以上の高温高压条件のプロセス⁵を経てもものづくりが行われる場合が多いが、バイオプロセスでは、自然条件下（常温常圧下）でもものづくりが進行し、CO₂排出量の削減が期待できるが利点となる。また、バイオものづくりでは、化学プロセスとは違い一般的に多段階の反応を重ねる必要がないので、炭素数の多い複雑な物質生産ほど競争力が高いという特徴がある。
- 原料面では、従来、バイオものづくりは主にバイオマス資源由来の糖や油脂を原料として用いて行われてきたが、2050年カーボンニュートラルの実現に寄与する観点からは、CO₂を吸収

⁵ 石油化学工業協会「石油化学工業の現状 2020年」より

して、直接原料として利用する新しいバイオものづくりに発展させることが重要である。CO₂ の直接原料化により、バイオマス資源利用の場合と比べて、①CO₂ 固定効率を 2 桁以上向上できるポテンシャルがある⁶、②狭い空間で原料生産や物質転換を行うことができるという利点がある。また、国内の発電所や工場等から排出される CO₂ を効率よく利用できるようになれば、国内での炭素固定化や輸送時の CO₂ 排出削減にも寄与できる可能性がある。

- 一部の独立栄養細菌は、藻類（ラン藻）と比較して 50～70 倍高い炭素固定能力を持つ報告もある⁷ことから、CO₂ の吸収源として有望。独立栄養細菌の中でも水素酸化細菌は、光エネルギーに依存せず、水素の化学エネルギーによって CO₂ を固定できるため、高速・高密度の培養が可能であり、産業化へのポテンシャルも高い。化石資源由来の物質生産と比べて、生産過程における CO₂ 排出を削減するだけでなく、CO₂ を吸収するダブルの効果により、排出量が大幅に削減される可能性がある。
- 一方、バイオ技術により生産できる物質数を増やすためには、目的物質ごとに最適化された微生物の生産株・生産技術を開発する必要がある。特に、水素酸化細菌をはじめとする、CO₂ を直接原料利用する微生物に関しては、これまで多様な物質生産に対して本格的に商用利用された実績はなく、最適な代謝経路を持つ有用微生物の開発や、当該有用微生物を発酵生産し、分離・精製するための技術を新たに開発する必要がある（微生物・目的に応じてばらつきがあるが、TRL レベル 2～4 相当⁸のものが多い。）。
- バイオものづくりに関わるステークホルダーは多様であり、微生物等改変プラットフォーム技術の開発は主に大学、微生物等改変プラットフォーム事業者（主にベンチャー）、有用微生物の設計・開発は微生物等改変プラットフォーム事業者と事業会社との協業、物質生産段階では事業会社とプラント会社・エンジニアリング会社等の協業が想定される。また、物質生産段階では、発酵生産の実証を行った結果として、微生物の生産効率性やロバスト性（熱、酸性度、攪拌による衝撃への耐性）が課題となることも多く、その場合は有用微生物の開発にフィードバックを行い、より生産に適した微生物の改変を施す必要があるなど、段階間の相互連携も重要な要素となる。
- 2030 年までの本プロジェクトを進める中で、バイオものづくりのバリューチェーン全体を見渡し、諸外国の動向も見ながら、どの部分に日本として将来的にフォーカスすべきかを見定めていくことは重要である。どういった事業分野に重点を置くかという戦略については、ユーザーのニーズや諸外国企業との競合状況も踏まえて事業者の自由な発想に委ね、現時点での強みにとらわれずに進めて行くことが重要である。
- 主な技術開発要素と本プロジェクトにおける具体的な取組は以下の通りである。なお、バイオものづくりの社会実装に際しては、技術開発・実証に加えて、サステイナブルな製品としてのバ

⁶ Metabolic Engineering 62 (2020) 207 より

⁷ 三菱総合研究所「微生物の機能を活用した CO₂ 固定化の検討」No34、1999 より

⁸ IEA の TRL（11 段階）指標に基づく。TRL レベル 2 はコンセプト・アプリケーションの明確化、TRL レベル 3 は概念検証、TRL レベル 4 は初期プロトタイプ（実験室レベル）。

イオ製品の位置づけの確立を進める必要がある。本プロジェクトでは、関連する制度面の検討と並行して、評価手法・表示方法の標準化等に必要データ収集や手法開発等についても実施する。

① 有用微生物等の開発を加速する微生物等改変プラットフォーム技術の高度化

- 微生物等⁹による物質生産を効率的に行うためには、製造しようとする特定の物質の種類ごとに、当該物質の製造に最適化されて極限まで生産性が高められた微生物株を開発することが必要である。しかしながら現状では、各物質に最適化された微生物株が少ないこと、微生物株の開発 1 件当たりに必要な時間・コストが極めて大きく、その結果として生産できる化学品の種類も限定的である。
- 有用微生物の開発を迅速かつ効率的に行うためには、AI やロボティクス等のデジタル技術を最大限に活用して、生物のゲノムや代謝経路情報を基に目的の機能を発現する遺伝子を設計・合成し（デザイン：D）、合成した遺伝子を搭載した微生物を作り（ビルド：B）、搭載した遺伝子が目的の機能を発現したかテストし（テスト：T）、得られたデータを学習・分析し、代謝経路の設計等に反映させる（ラーン：L）一連のサイクル（DBTL サイクル）を高速で行うことが重要である。
- 特に、効率的な微生物開発を行うためには、多種多様な微生物がもつゲノム配列を解読して、ゲノム配列から特定の物質を効率的に生産する代謝経路に関係する部分を発見し、ゲノム配列の改変につなげていくための AI 活用、微生物ライブラリ・代謝物ライブラリ¹⁰の拡充が重要である。また、ゲノム構築、微生物の構築、代謝物データ収集等は、実験室で試薬や培地を用いた生物化学的な実験を、多い場合には数万回にもわたって繰り返す必要があり、長い場合には 10 年以上といった非常に多くの時間と費用を要することから、ロボティクス技術、自動でデータを収集するセンシング技術、収集したデータを統合処理するためのシステム開発等も重要である。
- 本研究開発項目では、上記の課題を解決するため、バイオの基盤技術と IT・AI 等のデジタル技術やロボティクス等の自動化技術を統合した微生物等改変プラットフォーム技術の開発支援を行うことで、DBTL サイクルをより高速に回転させ、高効率に CO₂ を吸収・固定化し物質を生産する有用微生物の種類の拡大と、改変に要する時間・費用の低減に資することを目指す。

② CO₂ を原料に物質生産できる有用な微生物等の開発・改良

- 微生物による物質生産を効率的に行うためには、製造しようとする特定の物質の種類ごとに、

⁹ 微生物等とは、微生物、動物細胞、植物細胞、ウイルスとする。なお、CO₂ の固定を目的とした酵素の開発について行うものも本プロジェクトの対象とする。

¹⁰ 微生物ライブラリ・代謝物ライブラリとは、微生物そのもの(菌体)、微生物の遺伝子配列等のゲノム、微生物が代謝した結果として排出される化合物のデータが集積したライブラリのことである。

当該物質の生産のために代謝経路等が最適化されて、生産性が高められた微生物株を開発することが必要である。

- CO₂ を原料として吸収・固定化し物質生産できる微生物の開発については、大きく2つのアプローチ方法が考えられる。一つは、多数の微生物の中から効率的にCO₂を吸収・固定化し物質を生産する代謝経路を持つ微生物（水素酸化細菌、光合成細菌等）を選択するとともに、さらに当該微生物にゲノム編集・遺伝子改変等を行うことにより、従来よりも物質生産効率能が高い産業用微生物を開発するアプローチである。もう一つは、CO₂を吸収・固定化し物質を生産する代謝経路を持たないものの目的物質の効率的な生産ができる有用な微生物（大腸菌、枯草菌等）を活用して、当該微生物にゲノム編集・遺伝子改変等の技術によってCO₂を吸収・固定化し物質を生産する代謝経路を新たに組み込み、商用化可能な産業用微生物を開発するアプローチである。
- 本研究開発項目では、バイオものづくりの中核を担う微生物等改変プラットフォーム事業者と革新的な素材や燃料などの異分野事業者との共同開発の促進等を通じて、製造しようとする特定の物質の種類ごとに、物質生産をするための代謝経路等が最適化されて、生産性が高められた微生物株を開発する。

③ CO₂を原料に物質生産できる微生物等による製造技術等の開発・実証

- 一般に微生物の培養条件は、小規模なラボスケール（試験管レベル～数十L）、比較的小規模なベンチスケール（数十～数百L）と、中規模のパイロットスケール（数千～数万L）、商用レベルの生産に必要な大規模デモンストレーションスケール（数万～数十万L）では大きく異なるため、段階的にスケールアップをしつつ、培養条件の最適化を順次進めていく必要がある。
- 通常の微生物による物質生産では、バイオマス資源由来の糖（グルコース）等の炭素原料を溶かした液体培地中で、微生物を培養する。一方、CO₂を炭素原料として使用して物質生産を行うには、従来とは異なる供給方法の炭素原料や還元力を用いる微生物株を培養する必要があることから、必然的にその培養方法も異なり、新たに開発する必要がある。また、本事業で生産する物質は、原料とその代謝プロセスである反応系が異なるため、微生物の断片や培地等が混濁した液体から目的物質を回収するための、生産物質ごとに最適化された分離・精製技術の開発が求められる。生産された物質を産業利用するためには、最終製品も念頭に置いた素材加工技術・品質評価手法の開発も必要となる。
- さらに、バイオものづくりの生産プロセスについては統一的なLCA評価手法が未確立であり、CO₂削減効果を容易に見通せないという課題があることから、物質生産実証の際にはLCA評価手法の開発やCO₂固定量の評価などの標準化にかかる開発も行う。

● 関連基金プロジェクトと既存事業

- 関連基金プロジェクト

- 「大規模水素サプライチェーンの構築」プロジェクトなど
CO₂ 固定機能を持つ有用微生物の一部（水素酸化細菌等）は原料の一部として水素を活用するため、安価な水素が安定的に供給される体制が確立されることが重要な要素となり得る。本プロジェクトの実施体制として、水素供給源を持つ事業者自身のプロジェクト参画や、プロジェクト外での有機的な連携等により、バリューチェーン構築の円滑化を図ることが重要である。
- 「CO₂ の分離・回収等技術開発」プロジェクト
CO₂ を直接原料としたバイオものづくり技術による GHG 削減効果を最大化させるためには、工場、発電所、焼却所等から排出される CO₂ の原料化に加えて、大気から回収した CO₂ の原料化が必要となり、CO₂ の分離・回収技術は不可欠である。

➤ 既存事業

- 以下の予算事業を通じて、特にバイオマス資源を活用するバイオものづくりを推進するため、グローバルバイオコミュニティの中核的な拠点としてバイオファウンドリ生産実証拠点を整備するとともに、同拠点を半公共的な共用拠点として大学・ベンチャー・民間企業等の利用のために供することを通じて、有用微生物の開発・生産を推進している。

【予算事業】

- カーボンリサイクル実現を加速するバイオ由来製品生産技術の開発事業(令和3年度～令和8年度、令和4年度予算 29.6 億円)

● グリーン成長戦略の実行計画における記載（抜粋）

- ③ カーボンリサイクル化学品（人工光合成等によるプラスチック原料）

ウ)バイオものづくり技術の活用

<現状と課題>

バイオものづくり技術は、カーボンリサイクル技術のひとつであり、ゲノム編集等により機能を高めた微生物等を用いて、バイオマス資源や大気中の CO₂ を原料として、バイオプラスチックや機能性素材等の化学品を生産することが可能である。また、常温・常圧の生産プロセスによる省エネルギー効果や、動物由来繊維に変えて人工繊維等を製造すること等による家畜の生産段階の排出削減効果等も期待される。

バイオマス資源を用いたバイオものづくりは、既存の化学品に比べてコストが高いこと、生産できる化学品の種類が限定的であること等が課題である。また、大気中の CO₂ を原料とするバイオものづくりは、商用化を見据えた研究開発を行っている事例もあるものの、効率的な物質生産が可能で遺伝子改変微生物等の開発や培養技術など、要素技術の開発が課題である。

<今後の取組>

バイオマス資源を用いたバイオものづくりについては、ゲノム編集等による産業用の微生物等の開発、AI 等による効率的な生産プロセスの開発・実証などを実施する。今後 10 年間の集中的な取組により低コスト化を進め、2035 年までに商業ベースで生産可能な化学品の種類・機能を拡大する。大気中の CO₂ を原料とするバイオものづくりについては、培養に適した微生物株の開発等により、基盤技術を確立し、2040 年頃からの実用化を目指す。

2. 目標

● アウトプット

➤ 研究開発の目標

1. 2030年までに、DBTLサイクルの1サイクルあたりの時間を短縮するための技術開発、さらに、サイクル回数を削減しコストを低減する技術を確立し、有用微生物の開発期間を最大1/10程度に短縮する技術を確立。
2. 2030年までに、一般的な天然株と比較して物質生産機能またはCO₂固定化能を5倍程度¹¹向上させ、商用レベルで物質生産できる微生物（商用株）を開発、もしくは既に物質生産機能またはCO₂固定化能の高い微生物にゲノム編集等を行って生産機能等を保ちながら従来とは異なる原料・目的物質を利用可能な微生物（商用株）を開発。
3. 2030年までに、微生物等を用いて、CO₂を原料として生産した物質の製造コストが、2030年時点の代替候補の製品の1.2倍以下となる技術を開発。

（目標設定の考え方）

1. 効率的な微生物開発を行うためには、①微生物ライブラリ・代謝物データ等のデータベースの拡充¹²、②AIなどのデジタル技術を用いて、多種多様な微生物がもつゲノム配列を解読して、特定物質の効率的な生産に関連する代謝経路等との関係を明らかにし、効率的なゲノム設計・微生物設計に反映するためのシステム・アプリケーション開発、③ロボティクス技術、自動でデータを収集するセンシング技術等を駆使して、ゲノム構築、微生物の構築、代謝物データ収集等の生物化学的な実験を効率化するためのシステム構築、④収集した代謝物データ等を統合処理するためのシステム開発等といった、DBTLを構成する各要素技術を開発するとともに、これらの一部／全部を組み合わせてプラットフォーム化することが重要。

有用微生物の開発期間を短縮は、主に③、④によりDBTLの1サイクルあたりの時間を短縮するとともに、主に①、②のAI・デジタル技術の活用によりシミュレーション等を通じて最適な代謝経路を導き出すことで生物化学的実験の回数を削減しDBTLサイクル数を削減することによって達成される。DBTLサイクル数が年平均30%程度短縮し続けると、2030年には、当初の1/10程度の期間に短縮することとなる。なお、有用微生物の開発期間を1/10程度に短縮という目標は、①～④の総体として達成されるものであるが、実際には①～④の一部のみのプラットフォーム化に取り組む者の参画も十分に想定される。このような部分的なプラット

¹¹ 微生物の種類とターゲット物質により目標値が異なるため、個別の提案を精査し事業ごとに設定。

¹² ライブラリやデータベースには、行政機関が提供する公共のものや企業が独自に保有するものが想定される。データベースを拡充することで目的に沿った酵素やゲノム配列の探索が容易となり、微生物開発能力の向上に貢献する。

ームの開発を行う場合は、個別の提案の内容に応じて精査し、案件採択時において開発期間 1 / 10 程度という総合目標達成に匹敵する野心的な水準での目標設定を求めることとする。

2. CO₂を吸収・固定化し物質を生産する代謝経路を持つ微生物を使用する場合は、年平均 26%の物質生産効率・CO₂固定化能の向上を達成し続けたと仮定すると、2030 年には 5 倍程度の効率が達成される。本来生合成経路をもたない目的物質を生産させる場合および CO₂固定化能を持たない微生物に CO₂固定化能をもたせる場合は、個別に定量的な開発目標を定め、商業レベルでの物質生産能を持つ微生物株を開発することとする。なお、微生物による物質生産では、ターゲット物質の種類ごとに、当該物質の生産のために最適化されて極限まで生産性が高められた微生物株を開発することが必要であり、使用する微生物の種類に応じて、ゲノム編集や遺伝子改変の効率が異なるため難易度やアプローチが異なる。

こうした状況を踏まえると、本プロジェクトに参加する者の提案の柔軟性を確保しつつも一定の基準を示すため、物質生産効率・CO₂固定化能の向上目標「5 倍程度」を目安とするが、CO₂を吸収・固定化する微生物等によるバイオものづくりは非常に先進的な技術領域であり、ベンチマークとなる例が非常に少なく、使用する微生物や目的とする化合物によって難易度が変わりうることから、個別の提案の内容に応じて精査し、案件採択時により具体的に決定することとする。また、プロジェクト開始後にも技術・社会実装推進委員会等専門家の意見を踏まえ、目標の見直しを行うこととする。

3. 微生物等を用いた物質生産は、使用する微生物株や生産する物質毎に生産速度やロバスト性などの違いにより培養や分離精製、加工等のプロセスが変化し、新規技術の開発が必要となることや、スケールアップ毎に最適な培養条件が異なるといった課題があるが、社会実装のためにはこうした課題を克服し、競合品とのコスト差を低減する必要がある。

従来のバイオマス由来での物質生産より難易度の高い CO₂を原料とした物質生産において、製造コストが代替候補製品に比べて概ね 1.2 倍以下となれば、価格に含まれない環境価値相当分も考慮の上、社会実装の進展につながるが見込まれる。(なお、2050 年に向けた中長期的な目標としては、代替候補製品と同等以下のコスト水準となることが期待される。)

(目標達成の評価方法)

1. プロジェクト開始時の一般的な微生物開発期間と比較して、物質生産機能あるいは CO₂固定化能が向上した有用微生物の開発に要した期間が 1 / 10 程度に短縮されていることを確認する。微生物ライブラリ・代謝物データ等のデータベースの拡充のみを実施する場合など部分的なプラットフォームの開発を行う場合は、個別の

提案内容に応じて精査し、開発期間 1 / 10 程度という総合目標達成に匹敵する野心的な水準での目標の達成状況を確認する。

2. プロジェクト開始時のベース微生物の物質生産効率と比較して、微生物等による CO₂ を原料とした物質生産効率の向上率を確認する。また、技術開発の難易度やアプローチに応じて、通常の目標とは異なる目標を設定した場合には、当該目標の達成状況を個別に精査することとする。
3. 製品 1kg あたりの製造コストを確認する。その際に具体的な代替候補製品とコスト目標を実施者に提出させ、精査することとする。その前提として、製品製造に当たっては、LCA 評価を行うことで、環境性能と CO₂ 削減効果が定量的に評価されていることを確認する。

(目標の困難性)

1. 微生物等改変プラットフォームに関連する技術については、一部の技術の組み合わせにより限定的な範囲で事業化が進められているものもあるが、引き続き微生物・代謝物データの大量収集、ゲノム配列の解読、生物化学実験における再現性の確保等で多くの課題がある。それぞれの課題の解決方法を実験室レベルで模索している段階であり、高いリスクが伴う。
2. 水素酸化細菌をはじめとする CO₂ を直接原料利用するための微生物に関しては、これまで本格的に商用利用された実績はなく、最適な代謝経路を持つ有用微生物の開発は CO₂ 固定経路の効率向上を始めとする多くの課題があり、高いリスクが伴う（微生物・目的に応じてばらつきがあるが、TRL レベル 3、4 相当のものが大半。）。
3. 水素酸化細菌をはじめとする CO₂ を直接原料利用するための微生物に関しては、これまで本格的に商用利用された実績はなく、有用微生物を発酵生産し、分離・精製するための技術を新たに開発する必要がある（微生物・目的に応じてばらつきがあるが、TRL レベル 3、4 相当のものが大半。）。

● アウトカム

今回開発に取り組む CO₂ を原料としたバイオものづくりの実用化・商用化により期待される世界の CO₂ 削減効果、予想される市場規模について以下の前提に基づき機械的に算出した。本プロジェクトによる成果は 2040 年頃からの実用化を目指したものであるため、2040 年と 2050 年の CO₂ 削減効果・経済波及効果をアウトカム目標と設定した。

➤ CO₂ 削減効果（ポテンシャル推計）

- 約 13.5 億トン/年（2040 年）
- 約 42.1 億トン/年（2050 年）

【算定の考え方】

CO₂ を原料としたバイオものづくり技術によりリーチしやすい市場として、素材、繊維(化学繊維、動物性繊維)、燃料、食品、飼料を想定した。欧州の素材メーカー等 52 社を対象としたアンケート¹³によると、既存製品の価格に対して、2 割の上乗せまでであれば、バイオプロセスで生産した製品の購入を考えると回答した企業が 25%に及び、1 割の上乗せであれば 69%の企業が購入を考えるとの結果が出た。本プロジェクトで目指す 2030 年断面での製造コストが代替製品の 1.2 倍以下となれば、CO₂ を原料として生産した製品の十分な初期需要が生み出され、その後のさらなるコストダウンと市場拡大に向けた大きな布石となる。アンケート結果よりも保守的に見積もり、既存製品の 1.2 倍以下のコスト目標を達成していることが見込まれる 2040 年には 20%、既存製品と同等程度のコスト目標を達成していることが見込まれる 2050 年には 50%が、本プロジェクトの成果を活用した製品に代替したと仮定し、CO₂ 削減効果を試算した。それぞれの分野の CO₂ 削減効果を合算することで本プロジェクトによる CO₂ 削減効果とした。

■ 素材

【利用したパラメータ】

①容器包装用途の世界のプラスチック推定消費量¹⁴

2040 年：4.17 億トン

2050 年：5.60 億トン

②プロセス転換による CO₂ 削減係数：1.90 (kg-CO₂/kg-製品)¹⁵

③原料としての CO₂ 吸収係数：2.04 (kg-CO₂/kg-製品)¹⁶

計算式：CO₂ 削減量 = (①×(製品代替率)×②) + (①×(製品代替率)×③)

2040 年削減量：3.28 億 (トン-CO₂)

2050 年削減量：11.04 億 (トン-CO₂)

■ 化学繊維

【利用したパラメータ】

¹³ Horizon2020/BIOFOEVER 研究結果 Bioplastic MAGAZIN (Issue5.2020) より

50%以上の価格の上乗せでもバイオプロセスで生産した製品の購入を検討すると回答した事業者が 4%、20~40%の上乗せであれば検討すると回答した事業者が 21%、10~20%の上乗せであれば検討すると回答した事業者が 44%であった。

¹⁴ UNEP Single-Use Plastics より、2017 年における包装、民生品、運輸用途のプラスチックの消費量を合計し、経済産業省「世界の石油化学製品の今後の需給動向」より CAGR を 3%と仮定し推定消費量を計算。

¹⁵ LCI データベース IDEA Version 3.1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域 安全科学研究部門 IDEA ラボ より

¹⁶ 二酸化炭素の分子量=44 と PHA：ポリドロアルカンの分子量=86 より、 $4 \times 44 \div 86 = 2.04$ と計算。

①繊維用途の世界のプラスチック推定消費量¹⁷

2040年：1.14億トン

2050年：1.54億トン

②プロセス転換によるCO₂削減係数：3.19 (kg-CO₂/kg-製品)¹⁸

③原料としてのCO₂吸収係数：2.04 (kg-CO₂/kg-製品)¹⁹

計算式：CO₂削減量 = (①×(製品代替率)×②) + (①×(製品代替率)×③)

2040年削減量：1.20億 (トン-CO₂)

2050年削減量：4.02億 (トン-CO₂)

■ 動物性繊維

【利用したパラメータ】

①世界の羊毛の推定生産量²⁰

2040年：182万トン

2050年：171万トン

②プロセス転換によるCO₂削減係数：1.82 (kg-CO₂/kg-製品)²¹

③原料としてのCO₂吸収係数：1.67 (kg-CO₂/kg-製品)²²

計算式：CO₂削減量 = (①×(製品代替率)×②) + (①×(製品代替率)×③)

2040年削減量：0.012億 (トン-CO₂)

2050年削減量：0.028億 (トン-CO₂)

■ 燃料

【利用したパラメータ】

①世界の灯油、ジェット燃料の推定消費量²³

¹⁷ UNEP Single-Use Plastics より、2017年における繊維用途のプラスチックの消費量を合計し、経済産業省「世界の石油化学製品の今後の需給動向」よりCAGRを3%と仮定し推定消費量を試算。

¹⁸ LCI データベース IDEA Version 3.1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域 安全科学研究部門 IDEA ラボ より

¹⁹ 二酸化炭素の分子量=44とPHA：ポリヒドロアルカンの分子量=86より、 $4 \times 44 \div 86 = 2.04$ と仮定。

²⁰ IWTOF「World Sheep Numbers & Wool Production」より2020年の羊毛(原毛)の生産量を採用、CAGRは同報告書より-0.6%を採用。

²¹ LCI データベース IDEA Version 3.1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域 安全科学研究部門 IDEA ラボ より

²² たんぱく質を主に構成する20種のアミノ酸の平均炭素含有率45.58%より計算。

²³ The Global Economy.com より 各国の2019年のジェット燃料の消費量を合計し、さらにindex mundi より各国の2014年の灯油の消費量を合計し、EIA「International Energy Outlook 2021」より2019年から2050年までのCAGRを0.71%と仮定し推定消費量を試算。

2040年：3486億L

2050年：3741億L

②プロセス転換によるCO₂削減係数：2.53 (kg-CO₂/L-製品)²⁴

③原料としてのCO₂吸収係数：2.48 (kg-CO₂/L-製品)²⁵

計算式：CO₂削減量 = (①×(製品代替率)×②) + (①×(製品代替率)×③)

2040年削減量：3.49億(トン-CO₂)

2050年削減量：9.37億(トン-CO₂)

■ 食品

【利用したパラメータ】

①世界の牛肉の推定消費量²⁶

2040年：1.29億トン

2050年：1.74億トン

②世界の豚肉の推定消費量²⁷

2040年：1.98億トン

2050年：2.66億トン

③世界の鶏肉の推定消費量²⁸

2040年：2.42億トン

2050年：3.25億トン

④世界の生乳の推定消費量²⁹

2040年：12.31億トン

2050年：14.29億トン

⑤牛肉1kgあたりのたんぱく質含有量：198g³⁰

⑥豚肉1kgあたりのたんぱく質含有量：217g³¹

⑦鶏肉1kgあたりのたんぱく質含有量：229g³²

⑧生乳1kgあたりのたんぱく質含有量：33g³³

²⁴ 経済産業省「CO₂等を用いた燃料製造技術開発」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画より、 $0.8 \times 3.16 = 2.528$

²⁵ 二酸化炭素の分子量=44とC12のアルカンの分子量=より、 $12 \times 44 \div 170 \times 0.8 = 2.48$ と仮定。

²⁶ FAO 統計 2020より2020年の牛肉の推定消費量を採用、A. T. Kearny 「How will cultured meat and meat alternatives disrupt the agriculture and food industry.」より食肉市場のCAGR3%を採用。

²⁷ FAO 統計 2020より2020年の豚肉の推定消費量を採用、食肉市場のCAGR3%を採用。

²⁸ FAO 統計 2020より2020年の鶏肉の推定消費量を採用、食肉市場のCAGR3%を採用。

²⁹ FAO 統計 2020より2020年の鶏肉の推定消費量を採用、食肉市場のCAGR3%を採用。

³⁰ 文部科学省 食品栄養データベースより、牛肉(赤身・生)100gあたりのたんぱく質含有量の平均値19.8gを採用。

³¹ 文部科学省 食品栄養データベースより、豚肉(赤身・生)100gあたりのたんぱく質含有量の平均値21.7gを採用。

³² 文部科学省 食品栄養データベースより、鶏肉(皮なし・生)100gあたりのたんぱく質含有量の平均値22.9gを採用。

³³ 文部科学省 食品栄養データベースより、牛乳100gあたりのたんぱく質含有量3.3gを採用。

- ⑨プロセス転換による CO₂ 削減係数（牛）：8.93 (kg-CO₂/kg-製品)³⁴
- ⑩プロセス転換による CO₂ 削減係数（豚）：1.27 (kg-CO₂/ kg-製品)³⁵
- ⑪プロセス転換による CO₂ 削減係数（鶏）：0.68 (kg-CO₂/ kg-製品)³⁶
- ⑫プロセス転換による CO₂ 削減係数（生乳）：1.04 (kg-CO₂/ kg-製品)³⁷
- ⑬原料としての CO₂ 吸収係数：1.67 (kg-CO₂/kg-製品)³⁸

$$\text{計算式：CO}_2 \text{ 削減量} = (\text{①} \times \text{⑤} \times (\text{製品代替率}) \times \text{⑨}) + (\text{②} \times \text{⑥} \times (\text{製品代替率}) \times \text{⑩}) + (\text{③} \times \text{⑦} \times (\text{製品代替率}) \times \text{⑪}) + (\text{④} \times \text{⑧} \times (\text{製品代替率}) \times \text{⑫}) + (((\text{①} \times \text{⑤}) + (\text{②} \times \text{⑥}) + (\text{③} \times \text{⑦}) + (\text{④} \times \text{⑧})) \times (\text{製品代替率}) \times \text{⑬})$$

2040 年削減量：5.38 億（トン-CO₂）

2050 年削減量：17.23 億（トン-CO₂）

■ 飼料

【利用したパラメータ】

- ①世界の魚粉の推定消費量³⁹

2040 年：2212 万トン

2050 年：2592 万トン

- ②プロセス転換による CO₂ 削減係数：1.52 (kg-CO₂/kg-製品)⁴⁰

- ③原料としての CO₂ 吸収係数：1.67 (kg-CO₂/kg-製品)⁴¹

$$\text{計算式：CO}_2 \text{ 削減量} = (\text{①} \times (\text{製品代替率}) \times \text{②}) + (\text{①} \times (\text{製品代替率}) \times \text{③})$$

2040 年削減量：1411 万（トン-CO₂）

2050 年削減量：4134 万（トン-CO₂）

➤ 経済波及効果（世界市場規模推計）

³⁴ LCI データベース IDEA Version 3.1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域 安全科学研究部門
IDEA ラボ より

³⁵ LCI データベース IDEA Version 3.1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域 安全科学研究部門
IDEA ラボ より

³⁶ LCI データベース IDEA Version 3.1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域 安全科学研究部門
IDEA ラボ より

³⁷ LCI データベース IDEA Version 3.1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域 安全科学研究部門
IDEA ラボ より

³⁸ たんぱく質を主に構成する 20 種のアミノ酸の平均炭素含有率 45.58%より計算。

³⁹ FAO 統計 2020 より 2020 年の養魚飼料の推定消費量を採用、FAO Food Outlook より CAGR は 1.6%を採用。

⁴⁰ LCI データベース IDEA Version 3.1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域 安全科学研究部門
IDEA ラボ より

かたくちいわしの場合で試算。

⁴¹ たんぱく質を主に構成する 20 種のアミノ酸の平均炭素含有率 45.58%より計算。

- 約 65.4 兆円／年（2040 年）
- 約 199.4 兆円／年（2050 年）

【算定の考え方】

CO₂ 削減効果と同様の製品代替率を仮定し、分野ごとの製品単価を以下の通り仮定し経済効果を機械的に推計した。

計算式：経済波及効果 = (分野ごとの推定消費量) × (製品代替率) × (製品単価)

■ 素材

CO₂ から生産したバイオものづくり製品によって代替する製品を汎用プラスチック原料と仮定し、販売単価を 188 円/kg⁴²とした。

2040 年経済波及効果：17.11 兆円

2050 年経済波及効果：57.47 兆円

■ 化学繊維

CO₂ から生産したバイオものづくり製品によって代替する製品を汎用プラスチック原料と仮定し、販売単価を 197 円/kg⁴³とした。

2040 年経済波及効果：8.21 兆円

2050 年経済波及効果：27.60 兆円

■ 動物性繊維

CO₂ から生産したバイオものづくり製品によって代替する製品を羊毛原料と仮定し、販売単価を 2595 円/kg⁴⁴とした。

2040 年経済波及効果：8.91 兆円

2050 年経済波及効果：20.99 兆円

■ 燃料

CO₂ から生産したバイオものづくり製品によって代替する製品を灯油、ジェット燃料と仮定

⁴² 経済産業省 2020 年生産動態統計年報化学工業統計編より、2020 年度のポリプロピレンの単価を 156.6 円と求め、1.2 倍することで想定販売価格とした。

⁴³ 経済産業省 2020 年生産動態統計年報化学工業統計編より、2020 年度の繊維用ポリエステル単価を 164.5 円と求め、1.2 倍することで想定販売価格とした。

⁴⁴ 財務省貿易統計より、2021 年度の羊毛(原毛)の単価を 2162.1 円と求め、1.2 倍することで想定販売価格とした。

し、販売単価を 199 円/L⁴⁵とした。

2040 年経済波及効果：13.88 兆円

2050 年経済波及効果：37.24 兆円

■ 食品

CO₂ から生産したバイオものづくり製品によって代替する製品を食肉、食用タンパク質と仮定し、販売単価を 5864 円/kg⁴⁶とした。

2040 年経済波及効果：16.37 兆円

2050 年経済波及効果：53.56 兆円

■ 飼料

CO₂ から生産したバイオものづくり製品によって代替する製品を養魚用飼料と仮定し、販売単価を 197 円/kg⁴⁷とした。

2040 年経済波及効果：0.87 兆円

2050 年経済波及効果：2.55 兆円

⁴⁵ 経済産業省「CO₂等を用いた燃料製造技術開発」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画 より

⁴⁶ 財務省貿易統計より、2021 年度の牛肉の単価を 967.6 円と求め、価格を 1.2 倍し、牛肉 1kg 当たりのたんぱく質量 = 0.198kg を用いて、たんぱく質 1kg 当たりの想定販売価格とした。

⁴⁷ 財務省貿易統計より、2021 年度の魚粉の単価を 163.8 円と求め、1.2 倍することで想定販売価格とした。

3. 研究開発項目と社会実装に向けた支援

- 研究開発項目の考え方
 - バイオものづくり技術の活用による物質生産は、上流の微生物開発、下流の微生物による物質生産、及びこれらを支える要素技術の集合体であるプラットフォーム技術、の大きく3つの異なるフェーズの研究開発要素がある。このうち、特に上流の微生物開発、下流の微生物による物質生産については、これに携わる事業者同士が連携し、双方向にフィードバックしながら一体的に研究開発が実施される体制が望ましい。このため、複数の研究開発項目、内容を組み合わせ、幅広い分野の事業者が連携して実施することを可能とする。
 - 本プロジェクトは、本プロジェクトの成果を活用した製品・サービスの社会実装を念頭に置いたプロジェクトであり、プラットフォームの高度化を行う研究開発項目1及び大量生産実証等を行う研究開発項目3については、他の研究開発項目と組み合わせずとも社会実装が見込めることから、他の研究開発項目と組み合わせていない提案も可能とする。微生物開発については、大量物質生産と連携することで社会実装につながる可能性が大きく向上すると考えられることから、研究開発項目2については、単独で実施する事業者もしくはコンソーシアムにおいて、研究開発項目3と組み合わせ、一体的に実施をする提案のみ採択することとする。
 - 本プロジェクトに対して、提案可能な組み合わせは以下の通りとする。
 - ・研究開発項目1 + 研究開発項目2 + 研究開発項目3
 - ・研究開発項目2 + 研究開発項目3
 - ・研究開発項目3
 - ・研究開発項目1
 - 本プロジェクトにおいて、実施者は、他の研究開発テーマに裨益する共通基盤技術について、研究開発・実証テーマの垣根を越えてプロジェクト全体として研究成果の最大化を図るように努めるものとする。また、本プロジェクトにおいては、有識者やNEDOからの意見も取り入れつつ開発を実施することが不可欠であることから、必要に応じて秘密保持契約や共同研究契約等の締結や実施計画の変更及び実施体制の見直しを柔軟に行うことも可能とし、実施者間の密接な連携をとることとする。
- 【研究開発項目1】有用微生物の開発を加速する微生物等改変プラットフォーム技術の高度化★⁴⁸
 - 目標：2030年までに、DBTLサイクルの1サイクルあたりの時間を短縮するための技術開発、さらに、サイクル回数を削減しコストを低減する技術を確立し、有用微生物の開発期間を最大1/10程度に短縮する技術を確立する。

⁴⁸ ★マークがある研究開発項目については、大学・研究機関等が主たる実施者（支出が過半を占める実施者）となることが可能（★マークがない項目は、企業等の収益事業の担い手が主たる実施者となる必要）

➤ 研究開発内容：

【委託（企業等の場合はインセンティブ 1/10）】

本研究開発項目では、有用な微生物等の開発を加速する微生物等改変プラットフォーム技術の高度化に向けて、主に①微生物ライブラリや代謝物データベース等の拡充、②AI などのデジタル技術を用いて多種多様な微生物がもつゲノム配列を解読して、特定物質の効率的な生産に関連する代謝経路等との関係を明らかにし、効率的なゲノム設計・微生物設計に反映するためのシステム・アプリケーション開発、③ロボティクス技術、自動でデータを収集するセンシング技術等を駆使して、ゲノム構築、微生物の構築、微生物の性能試験（代謝物データ収集等）等の生物化学的な実験を効率化するためのシステム構築、④収集した代謝物データ等を統合処理するためのシステム開発等といった、DBTL を構成する各要素技術を開発するとともに、これらの一部／全部を組み合わせてプラットフォーム化するための開発を行う。

これらは、バイオものづくりを実施する複数の民間企業等に跨がる共通基盤的な課題を解決するための研究開発である一方、個別の開発項目に関しては目標達成に向けたアプローチが複数存在し、項目によっては異なる主体が開発するほうが効率的な場合も十分想定されることから、複数者の採択を想定する。ここでの研究開発成果は、研究開発項目 2 の有用微生物の開発等において積極的に活用することが期待されており、商用利用を念頭に有用な微生物等の開発を行う事業者との協業を行う場合は、審査において考慮要素とする。

本研究開発項目においては、CO₂を原料としたバイオものづくりと関連する分野も含めた、プラットフォームの高度化を目的とする開発を実施することも可能とする。

（委託・補助の考え方）

- 微生物等改変プラットフォーム技術の高度化については、バイオものづくり産業全体にまたがる共通基盤的な課題であり、収益化を容易に見通せない技術課題を有するため、国として積極的な支援を講じる必要がある。微生物等改変プラットフォームは、微生物開発のノウハウや実績が集積するまでは事業性が予測できないことから、本研究開発項目については 9/10 委託 + 1/10 インセンティブの委託事業として実施する。
- また、本研究開発項目で取り扱う微生物等改変プラットフォーム技術の要素には、公的機関や大学等が行う、微生物資源及び生物資源データベースの拡充、ゲノム・核酸・たんぱく質・代謝物等の高度な測定・評価に関する基盤技術の開発・実装も不可欠であるため、産業界の積極的な利用を想定した官民一体の取組の場合には、公的機関や研究機関等が主体となる提案も認めることとする。
- 微生物等改変プラットフォーム技術を構成する先進技術は、近年技術開発が加速しており、2～3 年置きに技術的ブレークスルーが起きている。競争力のある微生物等改変プラットフォームの構築に当たっては、こうした最新技術を取り込むことで常にプラットフォームをアップデートしていく必要があるため、3 年をめぐり、最新技術の取得を目的とした事業計画の変更を可能とし、事業の継続状況に応じてステージゲートの後に追加公募を行うことを可能とする。なお、当該プラ

トフォーム技術の高度化に資する国内外の先進技術・産業の最新動向に関する調査を 1～2 年おきに実施することとする。

● 【研究開発項目 2】CO₂を原料に物質生産できる微生物等⁴⁹の開発・改良

- 目標：2030 年までに、一般的な天然株と比較して物質生産機能または CO₂ 固定化能を 5 倍程度⁵⁰向上させ、商用レベルで物質生産できる微生物（商用株）を開発、もしくは既に物質生産機能または CO₂ 固定化能の高い微生物にゲノム編集等を行って生産機能等を保ちながら従来とは異なる原料を利用して目的物質を生産可能な微生物（商用株）を開発。

- 研究開発内容：

【(9/10 委託→2/3 補助) + 1/10 インセンティブ】

微生物による物質生産を効率的に行うためには、製造しようとする特定の物質の種類ごとに、当該物質の製造に最適化されて極限まで生産性が高められた微生物株を開発することが必要である。

CO₂を原料として吸収・固定化し物質生産できる微生物の開発については、①CO₂を吸収・固定化し物質を生産する代謝経路を持つ微生物（水素酸化細菌、光合成細菌等）に、ゲノム編集・遺伝子改変等の技術によって、従来よりも物質生産機能が高い産業用微生物を開発する手法のほか、高い物質生産性を有する既存の産業微生物（大腸菌、枯草菌等）に、ゲノム編集・遺伝子改変等の技術によって CO₂を吸収・固定化し物質を生産する代謝経路を組み込み、商用化可能な産業用微生物を開発する手法などが考えられる。

本研究開発項目では、利用する微生物株や目的物質の種類等に応じて、目標達成に向けたアプローチが複数存在することから、複数事業者の採択を想定している。また、微生物等の物質生産機能の大幅な向上や、製造可能となる目的物質の大幅な拡大を目指す観点から、本プロジェクトはバイオものづくりの中核を担う微生物等改変プラットフォーム事業者と革新的な素材や燃料などの異分野事業者との共同開発により実施されることが強く期待されており、研究開発項目 1 及び研究開発項目 3 と一体的に開発を実施し、実際にこうした異分野の共同研究を行う場合には、審査において考慮要素とする。

（委託・補助の考え方）

- CO₂を原料として物質生産できる微生物株の開発については、事業化が見通せる水準で物質生産が可能な技術は確立されておらず、大規模培養等の事業化に必須となる要素技術の確立が不確実な中で民間企業等が単独で実施することは困難であることから、国として積極的な支援を講じる必要があるため、本研究開発項目では、商用スケールでの生産実証が可能となる水準までの微生物開発は 9/10 委託 + 1/10 インセンティブの委託事業として実施する。

⁴⁹ 本研究開発項目における開発の対象は、CO₂を直接原料として物質生産できる微生物等とし、特定の微生物等に限定するものではない。

⁵⁰ 微生物の種類とターゲット物質により目標値が異なるため、個別の提案を精査し事業ごとに設定。

- 商用スケールでの生産実証の実施段階においても、実証の結果を踏まえて、生産性向上やロバスト性の向上などの観点から追加的な微生物株を開発・改良する必要があり、商用生産の開始に不可欠な実証を国として積極的に支援する必要があることから、商用スケールでの生産実証の実施段階にある微生物開発は 2/3 補助 + 1/10 インセンティブの補助事業として実施する。
- 【研究開発項目 3】CO₂を原料に物質生産できる微生物等⁵¹による製造技術等の開発・実証★⁵²
 - 目標：2030 年までに、微生物等を用いて、CO₂を原料として生産した物質の製造コストが、2030 年時点で代替候補の製品の 1.2 倍以下となる技術を開発する。
 - 研究開発内容：
 - スケールアップ：【(9/10 委託→2/3 補助+ (1/10 インセンティブ)】
 - 分離・精製・加工：【(9/10 委託→2/3 補助→1/2 補助+ (1/10 インセンティブ)】
 - (LCA 評価等⁵³については委託（企業等の場合はインセンティブ 1/10））

一般に微生物の培養条件は、小規模なラボスケール（試験管レベル～数十 L の培養タンクを使用する規模）、比較的小規模なベンチスケール（数十～数百 L の培養タンクを使用する規模）と、中規模のパイロットスケール（数千～数万 L の培養タンクを使用する規模）、商用レベルの生産実証に必要な大規模のデモンストレーションスケール（数万～数十万 L の培養タンクを使用する規模）では大きく異なるため、段階的にスケールアップをしつつ、培養条件の最適化を順次進めていく。

なお、光合成細菌や藻類等の光をエネルギー源として CO₂ の固定を行う微生物等については、培養タンクの体積ではなく、採光面積によってスケールを評価することが適切であるため、培養槽等を設置する土地の面積を基準とした指標を用いることとする。

CO₂を直接原料とする上では、従来の液体のみの培養と異なり、液体中に CO₂などの気体を吹き込みながら培養を行うガス発酵培養等の技術開発が必要となる。ガス発酵培養においては、水素と酸素が共存したガス等、爆発のリスクのあるガスを使用する場合も想定されるため、防爆仕様の培養槽等を用いてスケールアップするといった技術開発が必要となる。

本プロジェクトで生産する物質は、従来のバイオものづくりの目的物質とは異なるため、微生物の断片や培地等が混濁した液体から目的物質を回収するための、生産物質ごとに最適化され

⁵¹ 本研究開発項目における開発の対象は、CO₂を直接原料として物質生産できる微生物等とし、特定の微生物等に限定するものではない。

⁵² 本研究開発項目のうち、CO₂を原料として生産した製品等の環境性能等の評価・表示手法の確立、LCA 評価・CO₂固定量の評価などの標準化にかかる技術開発部分のみ、研究機関・公的機関が主体となった提案を可能とし、生産実証については研究機関・公的機関が主体となった提案は認めない。

⁵³ CO₂を原料として生産した製品等の環境性能等の評価・表示手法の確立、LCA 評価・CO₂固定量の評価手法の開発及び標準化に関する技術開発とする。

た分離・精製技術の開発を行う。特に、目的物質がポリマー、油脂、燃料等の場合、脂溶性の物質をターゲットとした新たな分離・生成技術が必要であり、生産された物質を産業利用するためには、最終製品も念頭に置いた素材加工技術・品質評価手法の開発も必要となる。加工技術・品質評価技術の開発を行う上では、事業会社の先にいるユーザー企業等のニーズを踏まえた開発を実施することが重要となる。

また、回収した CO₂ を原料とするために必要な微生物等の生育に有害となる夾雑物の除去や CO など微生物等が代謝しやすい物質への変換といった、前処理技術の開発・実証を行う。

さらに、バイオものづくりの生産プロセスについては統一的な LCA 評価手法が未確立であり、CO₂ 削減効果を容易に見通せないという課題がある。本研究開発項目では、物質生産実証の際には LCA 評価を実施することとする。

CO₂ を原料として生産した最終製品の社会実装に当たって必要となる、当該製品の環境性能等の評価・表示手法の確立、LCA 評価・CO₂ 固定量の評価などの標準化にかかる技術開発は、研究機関・公的機関等と民間企業等のコンソーシアムでの連携など業界横断的に協力し実施することとし、研究機関・公的機関等が主体となる提案も可能とする。

研究開発期間終了時点で、評価サンプルによる生産物評価を行うことより、品質・機能性、環境合理性、経済性等の面で総合的に競争力が見込めるバイオ由来製品として社会実装が見通せる段階までの開発を行うこととする。

（委託・補助の考え方）

- CO₂を原料として物質生産できる微生物の大量培養技術については、未だTRL3程度の未成熟なレベルであり、さらなる技術革新が必要である。また、当該技術の確立については、複数の民間企業に跨がる共通基盤的課題であり、高いリスクが伴うことから、初期の培養に関する基盤技術開発及び小規模（数十～数百Lまたは数ha）の生産実証については9/10委託＋1/10インセンティブの委託事業として実施し、中規模（数千～数万Lまたは数十ha）のパイロットスケールでの実証については、2/3補助率＋1/10インセンティブの補助事業として実施する。
- 大規模プラント（数万～数十万Lまたは数百ha）での実証段階では、小規模・中規模プラントでの実証により製造プロセスが改良されることにより一定程度事業リスクは低減されているものの、1桁以上のスケールアップを行う場合には、培養タンクや培養槽の大規模化に伴い攪拌の困難性や水圧の影響による微生物の非活性化、適切な生育環境の保持の自動化などの新たな課題が発生し、引き続き大きな事業リスクが残されていることから、大規模（数万～数十万L）デモンストレーションスケールでの生産実証については2/3補助率＋1/10インセンティブの補助事業として実施する。分離・精製、加工技術については、大量培養技術との一体的な開発が必要であるが、バイオのスケールアップと比べて技術的な難易度や開発リスクは高くないと考えられるため、小規模のベンチスケールの実証に伴う技術開発については9/10委託＋1/10インセンティブの委託事業、中規模のパイロットスケールの実証に伴い実施する技術開発につい

ては 2/3 補助+1/10 インセンティブの補助事業として実施し、大規模デモンストレーションスケールでの実証に伴う技術開発・実証については 1/2 補助 + 1/10 インセンティブの補助事業として実施する。

- CO₂を原料として生産した最終製品の品質評価・表示手法の確立、LCA 評価、CO₂ 固定量の評価技術など標準化にかかる技術開発については、バイオものづくり全体に共通する基盤的な技術開発であり、国として積極的に体制を整えて支援を講じる必要があることから、委託事業として実施する。

● 【社会実装に向けた支援】

- バイオものづくりを活用して生み出された製品（バイオ由来製品）の社会実装を進める上では、バイオ由来製品が有する非化石価値や、海洋生分解性などのサステナブルな製品としての価値がユーザー企業や消費者に正しく認識され、化石資源由来、動物由来の製品と差別化されて、環境プレミアムが反映された適切な値付けがなされることが重要である。
- そのための手段の一つとして、バイオ製品の品質評価手法の標準化、バイオ製品とそれ以外の製品を区別するための製品表示制度の確立が必要である。バイオマス資源由来のプラスチックについては、既にバイオマスプラ識別表示制度といった表示制度が存在するが、今後バイオマス資源由来「以外」のバイオ由来製品についても、評価や表示のあり方を検討していく必要がある。本プロジェクトにおいても、国際市場の確保も見据えて、バイオ関連の標準化や品質評価手法の確立に必要な研究開発やデータ取得等について支援を行う。
- 標準化活動については、製品や微生物種等に応じて進め方を検討していく必要があることから、プロジェクトを実施する中で、有識者や NEDO、民間企業、国の間で議論することで実施主体を定め、必要な体制の構築を進めて行くこととする。
- また、現状では、バイオ由来製品の市場が必ずしも大きくないため、設備投資効率が上げられず製品コストが高止まりする原因にもなっていることから、グリーン購入法なども含めた政府調達の拡大により初期需要を生み出すことで、市場拡大の促進を図ることも必要である。
- なお、現状、各所で用いられている「バイオプラスチック」の用語の定義には、バイオマス資源由来のプラスチックと生分解性プラスチックのみが含まれる形となっており、CO₂ を直接原料として用いたバイオ由来製品については位置づけがないことから、今後これらの取扱いについても検討する必要がある。
- 開発した技術・製品で、日本の事業者が利益を生み出していくには、海外を含めたマーケットを獲得していくことが不可欠であるが、海外展開に当たっては、国際標準に準拠した形でなければならない。そのため、競争的な観点だけでなく、基準作りの段階から、有志国との適切な協力・協業も模索することとする。また、技術・製品開発を行うに当たって、国内事業者だけでなく、海外事業者とも適切に連携をすることで、自社のビジネスが有利に進められることも考えられる。日本の得意分野/不得意分野を上手く使い分け、特に、苦手な分野については、海外事業者との協力により進められるよう、ネットワーク形成を後押しするといったことも検討を行う。

- さらに、生物情報のデジタル化、データベース化を考える際、産業の活用促進のための情報共有と国際競争を見据えた知的財産の保護・囲い込みをいかに組み合わせるかは大きな論点であり、経済安全保障の観点も踏まえながら、本プロジェクトと並行する形で国としての方針を検討していくこととする。また、関係省庁と連携し日本の強みである極限環境等から取得されるゲノム情報等がプラットフォームに集約されるように合同プロジェクトを組むことも検討する。
- 2025 年大阪・関西万博は「いのち輝く未来社会のデザイン」をテーマとしており、日本館の基本計画でも「いのちと、いのちの、あいだに」がテーマとして掲げられている。⁵⁴ 展示体験の柱としても、「炭素中立型の経済社会」や「循環型社会」の一例として、「循環を見据えたものづくり」や「はかなく小さな生き物」といったバイオものづくりとの関係性が深いものが挙げられている。このため、本プロジェクトでは、例えば本プロジェクトを通じて得られた研究開発の成果物の一部を万博会場内や日本館などに体験型展示として活用したり、万博会場を未来社会の実験場として実証事業の一部の要素を会場で実施したりといった取組を通じて、バイオものづくりの社会実装の推進に貢献するものとして認められる研究開発計画を提案する場合には、委託事業として万博への出展にかかる費用を本プロジェクトの事業費から支出できることとする。また、万博全体の展示内容等の検討スケジュールより早い段階で公募を実施する場合には、公募時には万博との連携の仕方を企画する上で必要な要素に不確定な部分を多分に含むこととなるため、採択審査時には万博との連携を進めて行くことについてのコミットメントのみを持って考慮要素とし、具体的な連携の仕方については高い自由度を持たせることとする。提案時にコミットメントをした実施者に対して、2023 年度以降をめどに具体的な連携の仕方を提案させ、全体の提案数と予算額に応じて、必要な予算を支出することとする。連携の実施についてコミットメントをしたものの、連携を実施しない場合には、実施者に対し、モニタリング WG の場での説明を求める。
- 最後に、上記の様な制度等の取り組みに加えて、バイオものづくり技術の社会実装には、バイオと IT の融合領域の人材育成やバイオ系の人材が産業界に十分に貢献できるような方策が必要となることから、人材育成・活用ともに、関係省庁と連携し支援の形を検討することとする。

⁵⁴ 「日本政府出展事業（日本館）基本計画」より

4. 実施スケジュール

● プロジェクト期間

以下のスケジュールはあくまで一例であり、複数の研究開発項目、内容を組み合わせて早期の目標達成のために最適なスケジュールを組むことは妨げない。

➤ 【研究開発項目 1】有用微生物の開発を加速する微生物等改変プラットフォーム技術の高度化

第一世代微生物等改変プラットフォームの構築をした後、プラットフォームの更新・拡充（第二世代、第三世代プラットフォーム）を進め、研究開発項目 2 と連動しながら微生物等の開発実績を重ねることでプラットフォームの更新・拡充と DBTL サイクルに必要な期間の大幅な短縮を行うことを想定している。一連の取組に十分な時間を確保し、常に最新技術を取り入れた競争力のあるプラットフォームを構築する観点から 2022 年度から 2030 年度までの最大 9 年間の実施を想定している。9 年間の間に 3 年をめぐりにステージゲートを設けること、で事業継続性を適切に判断し、効率的な開発を実施する。

➤ 【研究開発項目 2】CO₂を原料に物質生産できる微生物等の開発・改良

CO₂を原料に商用スケールでの物質生産実証が可能な水準の性能を持つ微生物等の開発を実施し、研究開発項目 1、研究開発項目 3 と相互にフィードバックをしながら追加的な改良を実施することを想定している。微生物等の開発については、微生物等の物質生産性を向上させるような開発に 3～5 年の期間を要し、後半のスケールアップした場合にも、ラボスケールで達成した物質生産性が維持されることを確保するための開発にも少なくとも 3 年程度の期間を要する見通しである。そのため、事業期間を十分に確保する観点から、2022 年度から 2030 年度までの最大 9 年間の実施を想定している。微生物開発のフェーズに応じてステージゲートを設け、効率的な開発を実施する。

➤ 【研究開発項目 3】CO₂を原料に物質生産できる微生物等の製造技術の開発・実証

CO₂等を原料に数百 L 程度の小規模スケール技術確立をした後に、数千～数万 L の中規模スケール、数万～数十万 L の大規模スケールでの生産実証へと移行し、製品製造コストの低減に向けた検討を実施することを想定している。生産実証には、各段階での実証に最低でも 2 年程度が必要となるなど、開発に時間がかかるため、一連の取組に十分な時間を確保する観点から 2022 年度から 2030 年度までの最大 9 年間の実施を想定している。また、品質評価等の技術開発については小スケールでの実証が開始した後に開発を開始する形を想定しており、2024 年度から 2030 年度までの最大 7 年間の実施を想定している。

- キーマイルストーン・ステージゲート設定

研究開発目標の達成には、様々なアプローチが考えられることから、早期の目標達成は目指しつつも開発の難易度に応じ、技術・社会実装推進委員会等での議論を経て、最適なスケジュールを組むことは妨げない。以下の通り、事業化段階の切れ目において、キーマイルストーン及びステージゲートを設定し、事業の進捗を見て、継続可否を判断する⁵⁵ことを基本とする。キーマイルストーン及びステージゲートの設定に当たっては、提案時にステージゲートにおけるマイルストーン目標を明確にし、提案された目標が低い場合などは技術・社会実装推進委員会等の専門家の意見も踏まえて野心的かつ適切な目標と改め、ステージゲート実施時に、研究開発の成果が当該目標に達しない場合は事業の中止を含めて検討する。ただし、対象とする微生物等やターゲット製品毎に開発段階が大きく異なるという事業特性から、技術・社会実装推進委員会等の専門家の意見を踏まえ、実施者単位でステージゲート実施年度を基本年度の前後の年度に設定するといった形や適切な水準となるように目標を見直すといった形も可能とし、プロジェクト全体に一定の柔軟性を持たせることとする。研究開発項目1については、必要性が確認された場合には追加公募を行う。

また、複数種類の微生物等、目的生産物質、技術的アプローチを対象とした開発・実証テーマを複線的に実施し、ステージゲートを通じて競争力や成長性の高さが認められる有望な開発テーマを残し、絞り込みを行うこととする。

- 【研究開発項目1】有用微生物の開発を加速する微生物改変プラットフォーム技術の高度化

- 第一世代微生物等改変プラットフォームの構築（現在ある社会課題を解決するために、効率的に微生物等の継続的な改変を行い、研究から実用化までを繰り返し実施することができる手法の確立を持って構築とする。下表の例では2025年頃に事業継続判断）
- 第二世代微生物等改変プラットフォームの構築（社会課題を解決するために、最新技術を取り入れた上で効率的に微生物等の継続的な改変を行い、研究から実用化までを繰り返し実施することができる手法の確立を持って構築とする。下表の例では2028年頃に事業継続判断）
- 第三世代微生物等改変プラットフォームの構築（社会課題を解決するために、最新技術を取り入れた上で効率的に微生物等の継続的な改変を行い、研究から実用化までを繰り返し実施することができる手法の確立を持って構築とする。）

- 【研究開発項目2】CO₂を原料に物質生産できる微生物等の開発・改良

- 商用レベルの物質生産効率をもった有用微生物等の開発（下表の例では2025年頃から事業継続判断を開始。）

⁵⁵ 判断を行う際、実施者とNEDO双方の合意に基づき事業内容及び目標の柔軟な見直しを行うことも可能とする。

- 商用レベルの物質生産効率をもった有用微生物等の実証環境に合わせた改良
- 【研究開発項目3】CO₂を原料に物質生産できる微生物等の製造技術の開発・実証
 - 基盤生産技術の開発・小規模ベンチスケール培養槽による実証（数十～数百 L 規模の培養槽等において安定的な微生物等の培養と商用レベルの効率による物質生産を達成する。）（下表の例では 2025 年頃に事業継続判断）
 - 中規模パイロットスケールプラントにおける実証（数千～数万 L 規模の培養槽等において安定的な微生物等の培養と商用レベルの効率による物質生産を達成する。）
 - 大規模デモンストレーションスケールプラントにおける実証（数万～数十万 L 規模の培養槽等において安定的な微生物の培養と商用レベルの効率による物質生産を達成する。）
 - LCA 評価・CO₂固定量に係る評価手法の確立（バイオによる生産実証プロセスの LCA 評価の実施を持って確立とする。）
 - CO₂ 固定量等に関する標準化に係る技術開発（本プロジェクトで実施した複数種類の物質・製品についての LCA 評価手法及び CO₂ 固定量についての評価手法を一部統合する形での標準化を想定。）

表1：プロジェクトの想定スケジュール（例）

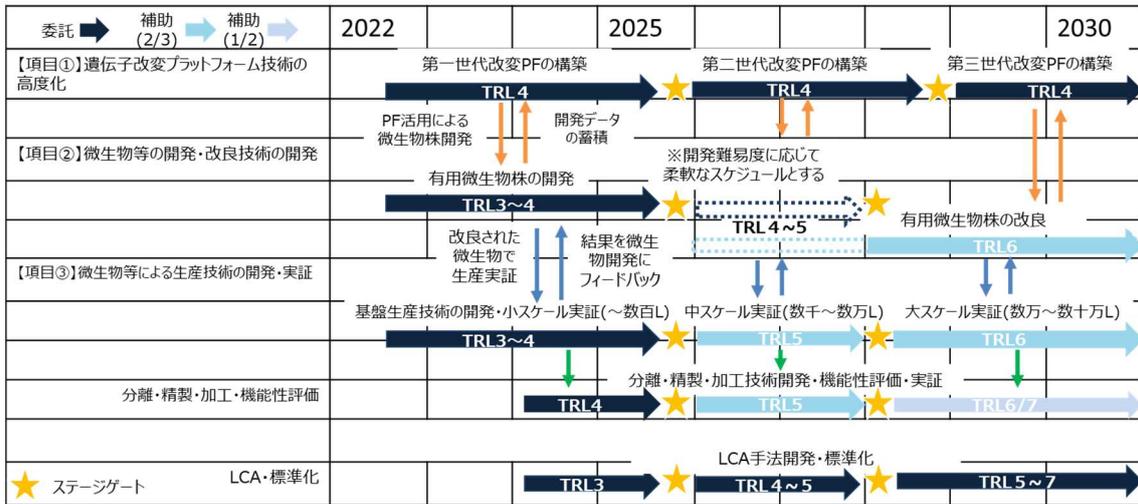


表2：社会実装スケジュール

●導入フェーズ： 1. 開発フェーズ 2. 実証フェーズ 3. 導入拡大・コスト低減フェーズ 4. 自立商用フェーズ



5. 予算

- プロジェクト総額（国費負担額のみ。インセンティブ分を含む額）：上限 1,767 億円

【研究開発項目 1】有用微生物の開発を加速する微生物等改変プラットフォーム技術の高度化

- 予算額：上限 160 億円
- 予算根拠：DBTL の各要素の周辺技術の開発に関して、過去の事業及び複数の事業者へのヒアリング等から機械装置費、消耗品費、人件費、外注費等を参考とし、想定採択件数を考慮し、所要額を試算。

【研究開発項目 2】CO₂を原料に物質生産できる微生物等の開発・改良

- 予算額：上限 81 億円
- 予算根拠：微生物等開発に関して、過去の事業及び複数の事業者へのヒアリング等から機械装置費、消耗品費、人件費、外注費等を参考とし、想定採択件数を考慮し、所要額を試算。

【研究開発項目 3】CO₂を原料に物質生産できる微生物等による製造技術の開発・実証

- 予算額：上限 1,517 億円
- 予算根拠：生産実証に係るパイロットプラントの整備に係る開発・実証や品質評価手法等の開発に関して、過去の事業及び複数の事業者へのヒアリング等から機械装置費、消耗品費、人件費、建設費、外注費等を参考にして、想定採択件数を考慮し、所要額を試算。

【社会実装に向けた支援】

- 予算額：上限 9 億円
- 予算根拠：本プロジェクトの途中成果の一部を活用し、2025 年大阪・関西万博と連携した社会実装実証等を実施することを想定し、想定採択件数を考慮し、所要額を試算。

- 取組状況が不十分な場合の国費負担額の返還率：返還が決定した時点における目標達成度を考慮し、WGにおいて、「10%、30%、50%」の3段階で評価

(参考) 改定履歴

- ・2022 年 10 月 制定