

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（案）に対する意見公募手続の結果について

令和4年9月26日
経済産業省
商務・サービスグループ
生物化学産業課

「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（案）」について、令和4年6月8日から同年7月8日まで意見公募手続を実施いたしました。

提出意見と提出意見を考慮した結果については以下のとおりです。なお、提出意見は整理又は要約しております。

1. 意見公募の実施方法
 - ・ 意見募集期間：令和4年6月8日（水）～令和4年7月8日（金）
 - ・ 実施方法：電子政府の総合窓口（e-Gov）における掲載
 - ・ 意見提出方法：e-Gov
2. 提出意見数
5件
3. 提出されたご意見の概要及びご意見に対する考え方
別紙のとおり。

御協力いただき、誠にありがとうございました。

ご意見の概要及びご意見に対する考え方

	提出意見	提出意見を考慮した結果
1	<p>その二酸化炭素を固定した製品は当然使用されて後にゴミになると思われるが、そのゴミを固定された二酸化炭素を排出せずにリサイクル、または排出された二酸化炭素を回収することはできるのか。日本ではゴミの排出量が多いので、リサイクルなど循環して使用できるものが望ましいと思う。</p>	<p>CO2 回収・固定に係る他の技術と本プロジェクトで開発する技術を組み合わせることにより、焼却場や工場由来の二酸化炭素を原料として、カーボンリサイクル製品の開発が可能になると考えております。また、製品を処理する際に発生する二酸化炭素についても、同様に回収・固定し、原料として循環させることが可能であると考えております。</p> <p>ご指摘のように、循環して使用できる製品など環境価値の高いバイオものづくり製品の開発を後押ししてまいります。加えて、一部の製品においては、生物機能を用いてアップサイクル（元の製品以上の価値を付与）できるケースも報告されておりますので、このような視点も含めて検討してまいります。</p>
2	<p>何十兆円も使ってやろうとしていることが、誤った認識（カーボンニュートラルを実現する）に基づいていますから、悲しい限りです。</p> <p>特に日本においては、CO₂ を減らすことに何の意味もありません。</p> <p>グリーン・イノベーション事業自体をやめてください。</p>	<p>地球温暖化について様々な見解があることは承知しておりますが、政府としては、IPCCをはじめとする科学的調査の結果も踏まえ、人類の経済活動により大気中に排出されたCO₂ が地球温暖化を招いている可能性は十分にあるものと認識しており、そのような認識に基づき将来的な気候変動のリスクを抑える観点から、2050年にカーボンニュートラルを実現するべく必要な技術開発等に取り組んでまいります。</p>
3	<p>当該「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（案）におけるP21・P22の「【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等の開発・実証」における（委託・補助の考え方）に記載のラボ？大規模に至るスケールアップの規模の記述について、藻類や光合成細菌のような太陽光とCO₂を直接利用するバイオものづくりプロセスを考慮する場合、その</p>	<p>御指摘を踏まえ、記載を修正いたします。</p>

	<p>スケール感は太陽光が降り注ぐ面積で規定される。つまり、スケールアップの規模も生産培養のボリューム単位ではなく、面積単位で議論されることが望ましい。</p>	
4	<p>バイオものづくりは石油化学工業を代替し得るポテンシャルを持っている。現状では、発酵食品、アミノ酸工業、工業用酵素生産、医薬品原料、一部の化成品や化成品原料の製造等に留まっているがグリーンイノベーション、脱炭素を達成するために産業基盤の強化が必要な研究領域である。また、我が国は歴史的に発酵・醸造技術レベルが高く、アミノ酸工業等の発展において、培養工学分野を中心に微生物物質生産を世界をリードしてきた背景があるが、かつて、近年は大学での技術者育成が十分ではなく技術者育成基盤も弱くなりつつある。</p> <p>バイオリソース？育種？プロセス開発の研究基盤整備ならびに技術者育成基盤の強化、それらの社会実装を目的とした「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」プロジェクトはバイオ戦略など我が国の国策にマッチした重要な事業であり、資源の少ない日本においては、資源安全保障にも繋がるので、今後も推進すべきと思う。</p>	<p>賛同の御意見として承りました。</p>
5	<p>【大きな視点から】</p> <p>1. 微生物は付加価値の高い有用物質（アミノ酸・抗生物質・医薬原料等）を一定規模でつくることは得意とされていますが、プラスチック、航空燃料など、石油系化石資源から作られる圧倒的に低コストな化成品を、同じような低コスト（大きく妥協しても10倍程度のコスト）で生産することには全く不向きです。微生物には、1) 化成品に必</p>	<p>・微生物等を活用して付加価値の高い有用物質を生産する場合、現状においては、開発費や原材料費に加えて、量産までのプロセスが確立できていないこと等の要因によって、石油由来プロセスで生産する場合と比較して高コストとなると認識しております。このような高コストを低減化するため、今回のプロジェクトにおいて、目的物質を生産可能な微生物等の組成・改良技術の開発を行うことで生</p>

要な多様な化学素材原料の生産能力がそもそもない、あるいは極端に低いこと、2) そうした生産物のもつ化学的屬性(毒性や溶解度を含む)に基づいて生産性に決定的な限界があること、3) 大きなプラントでの培養制御が難しいこと(特にガス基質等の場合)、4) 水を含んでいることも相まって精製プロセスに大きなエネルギーがかかること、など、すべての段階で困難を極めます。仮に一部の原材料をバイオで作れても、他の原材料を石油系化学物質に求めなければなりません。過去40年に及ぶバイオ研究の苦闘が多くを物語っており、実際、この四半世紀の間に微生物によって商業的に量産化された化成品系物質は全くありません。ゲノム時代・AIの時代になってもその本質は変わりません。

2. 地球規模でのCO₂の削減に寄与できる生物はなんといっても植物です。これは生物社会の成り立ち、生態学的炭素循環から見ても理にかなったものです。植物は太陽エネルギーを用いて最も安価な分子と言える水(H₂O)から電子を引き抜きCO₂を固定します。プランテーション等で得られる植物体をどう用いるかという選択肢も豊富です(食べる・燃やす・加工する・化成品を作る等)。微生物もCO₂を固定しますが、地球規模での炭素循環においてはむしろ有機物を分解しCO₂を作る役割を担っていると言えます。(もちろん植物利用にも種々の難問があります)。

3. 高濃度CO₂の処理を微生物に行わせるという発想は古くからあります。計画案 p4 には一部の独立栄養性細菌が藻類と比べ50倍以上の高い炭素固定

産性を向上させ、また、培養を行う際は小規模なラボスケール(試験管レベル~数十L)、比較的小規模なパイロットスケール(数十~数百L)、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スケール(数万~数十万L)と段階的にスケールアップをしつつ、培養条件の最適化を進めていく予定です。その際、各段階においてステージゲートを設けて、技術水準の評価を行った上で、次の段階へ進めるべきか否かの判断を行う事としております。加えて、バイオ由来製品に係る評価や表示のあり方についても検討を進めることを通じて、市場拡大の促進を図り、コスト低減、量産化を進めていきます。なお、培養・精製プロセス等において、エネルギーを要しますが、プロジェクト参画者、個々のプロジェクトにおいてCO₂削減となる形で、併せて、最終的には、プロジェクト単位での経済効率性も追求する形で実施していく予定です。

・CO₂を直接利用できる植物等についても、CO₂を原料として行うバイオものづくりに該当すると考えております(修正版・社会実装計画案の注49)。申請案件に含まれる場合、作成された計画案等を厳正に評価した上で案件として採択するか検討いたします。

・データの諸元はお示ししておりですが(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)、ご指摘のとおり、藻類に関しては、水と

能力があると記されています。50倍とは何をどう比較して50倍なのか何ら明記されていません。はっきり言えるのは藻類は水と光だけでCO₂を固定できるにもかかわらず、独立栄養細菌は高コストで作られる水素と高コストな装置がなければCO₂を固定できません（下記参照）。何を基準に考えるかで炭素固定能力の値踏みは大きく変わります。

4. この計画案では水素の給源や調達方法についての議論や経産省の立場が一切触れられていません。あえて飛ばしているということだと思います。しかし日本にはグリーン水素どころかブルー水素を供給する仕組みすらありません。また、例えグリーン水素であったとしてもその製造はその製造装置の製造にあたって膨大なCO₂の放出を伴うもので、その正当性は依然問われたままです。こうした議論の根底が危うい中でバイオによるCO₂固定はややもすれば机上の空論になりかねません。p7に「安価な水素の供給が求められる」とありますが、安価な水素など、どこにもありません。

【個別な視点から】

CO₂固定にあたっては水素を用いた独立栄養細菌のことが幾度となく触れられています。

1. まず水素の給源に関する根源的問題が解決されていません（上述の通り）。

光によってCO₂を固定できる微生物であり、本プロジェクトにおいてもCO₂を資源化する微生物等の一部として包含しております。藻類などのように光をエネルギー源としてCO₂を固定する微生物等に関しては、エネルギー源のコストに関しては優位性があるものの、大量生産を行うために広大な面積を必要とし、その管理にかかるコストも膨大となるどころ、水素などの化学エネルギーによってCO₂を固定できる微生物等は、プラント等の閉鎖系で扱えるため、管理にかかるコストが低くなるという利点を有しております。御指摘いただいた点も踏まえまして、それぞれの微生物等の特徴を最大限活かしながらバイオものづくりによるカーボンリサイクルを推進していく予定です。

・水素の調達手法については、個別のプロジェクトにおける具体的な実施内容によって決定するものと考えており、提案者間の競争の源泉になり得る要素とも言えますので、国側が一義的に定めるものではないと考えております。なお、グリーンイノベーションプロジェクトでは、大規模水素サプライチェーンの構築や、再エネ等由来の電力を活用した水電解による水素製造により、水素の供給コストの削減に取り組んでおり、これら本基金で実施している他の水素関連プロジェクトの成果等とも連携する形で実施することも視野に入れることとで、安定的かつ安価な水素の確保を後押ししていく予定です。

・水素の調達手法については、個別のプロジェクトにおける具体的な実施内容によって決定するものと考えており、提案者間の競争の

源泉になり得る要素とも言えますので、国側が一義的に定めるものではないと考えております。(同上)

2. 水素を用いる好氣的な独立栄養細菌の種類は少なく、化成品の原材料を作るような機能はほとんど知られていません。これを遺伝子組換えなどで改変するというのは途方もない時間が必要で、いきなりプラントを作るような研究ではなく非常に基礎的な研究からスタートしなければなりません。

3. 具体的な培養のイメージをご紹介します。上述の通り、既存の水素細菌は何も取り柄がありませんので、遺伝子組換えなどでスーパーな株が作られたことを前提とします。3 m³ (3 トン、1 m x 1 m x 3 m の大きさです) のそこそこ立派なパイロットスケールのリアクターを想定します。そこには無機液体培地 3 トンが入っています。ここに約 90KL (キロリットル) (90 m³ = トヨタ”MIRAI”の一回の充填に必要な水素の 8 回分) の水素、22KL (22 m³) の二酸化炭素、22KL (22 m³) の純酸素を吹き込んで、すべてがうまく進むと、最大理論値として 30 kg の微生物菌体を得られます。そして、もしスーパーな遺伝子改変の結果、この菌体成分に 20% のバイオ燃料なりプラスチック原料が含まれているとするならば、6 kg の原料を得ることになります。菌体を集め、溶媒等で完全抽出すれば 6 kg の原料が得られる、ということです。どんな

・御指摘のように、水素を用いた独立栄養細菌を用いる場合、最適な培養を行うためには、いきなりプラントを作るのではなく、予め菌の改良を行い、必要物質の生産能力を最適化した上で、小規模なラボスケール (試験管レベル~数十 L)、比較的小規模なパイロットスケール (数十~数百 L)、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スケール (数万~数十万 L) と段階的にスケールアップをしつつ、培養条件の最適化及び生産量の確保を順次進めていくことになります。その際も専門家による事業の評価等を行いながら、進めていく予定です。

・水素酸化細菌の培養については、ご示唆いただいた点等も踏まえつつ、プロジェクトの設計を進めております。最終的な製品の社会実装からバックキャストして、コスト等が非現実的なものとならないよう、案件採択時に設定する、キーマイルストーン (CO₂ 固定化能力を 5 倍程度に向上、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) 及びステージゲートも活用しながら進めていく予定です。また、社会実装のために必要な各種製品の生産量については、研究者や事業者からのヒアリングに加え、諸外国の先進的な技術動向等も参考としているところであり、今後提出される各社の計画にて、需要に見合った量をどの程度確保できるのかを確認すると共に、実証期間においても、専門家の意見・評価を踏まえ、進めていく予定です。

にスーパーな微生物を作っても理論的にこの数値以上のものをひねり出すのは困難です。3トンのリアクターの体積の30倍の体積の水素, 7倍の体積の二酸化炭素, 7倍の体積の純酸素（もしくは30倍の空気）を吹き込んで、それがすべて溶け込んで、生物に変換されての話です。現実にはH₂の溶解度は3トンの水に対して1.6g、気体量としては40Lほどです。上述のように完全に溶かし込むべきH₂は90KL(=90,000L)です。酸素も混ぜるので大爆発の危険が隣り合わせです。攪拌装置、防爆装置、温度管理どれをとっても大きなコストとエネルギーが必要になります。また、この規模のプラントでどんなに頑張っても一回あたり、6kgの原材料がとれるだけです。世界のプラスチック生産量は3億トンです。東京ーニューヨーク間のジェット燃料の使用量は片道100トンです。こうした量論的理解をきちんとしないと、非現実的なプロジェクトになりかねません。

【お願いしたいこと】

微生物を活用したCO₂固定にはさまざまな限界があるものの、それを少しでもブレイクする技術開発の目を絶やしてはいけないと感じます。特に申し上げたいことだけ書きます。

1. 「思考実験」はとても重要です。これまでの実験データ、LCA、サプライチェーン、経済政策、世界の資源動向、carbon pricing など多くの要素をより正確に取り入れて多彩なシミュレーションを行う必要があります。本当に微生物によるCO₂固定はfeasibleなのかを様々な専門家が、思考実験して検証すべき、ということです。

・本プロジェクト実施に当たって外部の専門家を交えて議論を行い、野心的でありつつもフィージビリティを看過しないように進めていく予定です。

2. (AI 等を使って) 最適な遺伝子組換えを行う実験ももちろん大切ですが、初期においてはさまざまなアイデアを併存・競争・共創させる場が必要で、一課題の予算は小さく FS として走らせ、順次、水と肥料を与えるような計画にすべきです (基金なのでそれが可能はずです)。すべての課題がそうあるべきです。現況のどのような既存技術も本目的からすれば圧倒的に未熟です。一方、イノベーションは非線形的に起こります。小さくランダムな試行を数多く経産省が主導し、良い技術をステップアップさせるべきです。

3. いきなり大きなプラントを作ります、こんな組換え体ですべて解決します、といった提案に対して大規模な予算を使うのは確実に失敗に終わります。予算を大切に使って頂きたいと思えます。

・実施企業の採択時において、各事業の比較を行うなどし、事業の初期段階では、多くの企業に対して、支援を実施し、企業の併存、競争、共創を促し、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、事業の進捗に応じて、絞り込みを行った上で、企業側に高い目標へリスクを取って挑戦する意欲のあることを前提として大規模な支援を行っていく予定です。

・前述いたしましたように、初めから大規模なプラントを作るのではなく、予め菌の改良を行い、必要物質の生産能力を最適化した上で、小規模なラボスケール (試験管レベル～数十 L)、比較的小規模なパイロットスケール (数十～数百 L)、中規模のパイロットスケール (数千～数万 L)、商用レベルの生産で必要な大規模スケール (数万～数十万 L) と段階的にスケールアップをしつつ、培養条件の最適化及び生産量の確保を順次進めていくこととなります。その際も専門家による事業の評価等を行いながら、進めていく予定です。