



国立研究開発法人  
新エネルギー・産業技術総合開発機構

ムーンショット型研究開発事業[目標4]

# MOONSHOT GOAL-4

2050年までに、  
地球環境再生に向けた  
持続可能な資源循環を実現





# MOONSHOT GOAL-4

## 2050年までに、 地球環境再生に向けた 持続可能な資源循環を実現

大胆な発想に基づく破壊的なイノベーションの創出を目指し  
内閣府が推進する、「ムーンショット型研究開発プログラム」。  
NEDOはその10の目標のうちの一つ、目標4の推進を担っています。  
すでに温暖化や汚染の進んでしまった地球環境を再生し、  
2050年までに持続可能な資源循環を実現する技術の社会実装を目指し、  
様々な革新的研究が行われています。



### ムーンショット目標4では

「2050年までに地球環境再生」を実現するために、  
二つの問題の解決に挑んでいます。



**Cool Earth**  
地球温暖化問題  
の解決

2030年までには  
地球温暖化に起因する  
温室効果ガスに係る  
環境技術を開発する

**Clean Earth**  
環境汚染問題  
の解決

2030年までには  
環境汚染物質を有益な資源に変換  
または無害化する技術を  
開発する

## Planetary Boundaries

プラネタリー・バウンダリー

環境汚染などを地球が許容できる臨界点。  
特に窒素化合物の影響が懸念されている。



## Cool Earth プロジェクト一覧

**01** 希薄なCO<sub>2</sub>をしっかりキャッチ!カギは吸収剤と熱制御  
児玉 昭雄/金沢大学 新学術創成研究機構 教授

**02** 都会に現れる高層の森林  
CO<sub>2</sub>を吸収して資源利用!未来の都市型人工光合成  
杉山 正和/東京大学 先端科学技術研究センター 教授

**03** 「冷やすチカラ」で大気中のCO<sub>2</sub>をドライアイス化  
則永 行庸/名古屋大学 大学院工学研究科 教授

**04** 家でも学校でも会社でも  
CO<sub>2</sub>を極薄膜で分離しマルチに活用  
藤川 茂紀/九州大学 カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 教授

**05** 世界最速級のスピードで自然の風からCO<sub>2</sub>を回収  
将来的な利用で炭素循環型社会へ  
山添 誠司/東京都立大学 大学院理学研究科 化学専攻 教授

**06** CO<sub>2</sub>の固定からエネルギーの生産まで  
海洋の褐藻が大活躍  
植田 充美/京都大学 成長戦略本部 特任教授

**07** CO<sub>2</sub>を高速に固定し炭素の収支も正確に  
風化促進技術の進化形  
中垣 隆雄/早稲田大学 理工学術院 教授



**08** 土の中に潜む小さな生き物が  
温室効果ガスを抑制!!  
南澤 究/東北大学 大学院生命科学研究所 特任教授



## Clean Earth プロジェクト一覧

**09** 迷惑者を資源に!  
リサイクル技術で窒素循環型社会を実現  
川本 徹/産業技術総合研究所 材料・化学領域 ナノ材料研究部門 首席研究員

**10** 強さとやさしさを兼ね備えた  
“海に還る新素材”  
伊藤 耕三/東京大学 特別教授、物質・材料研究機構 フェロー

**11** 釣り具も丈夫な漁業資材も海底で生分解  
粕谷 健一/群馬大学 大学院理工学府 教授

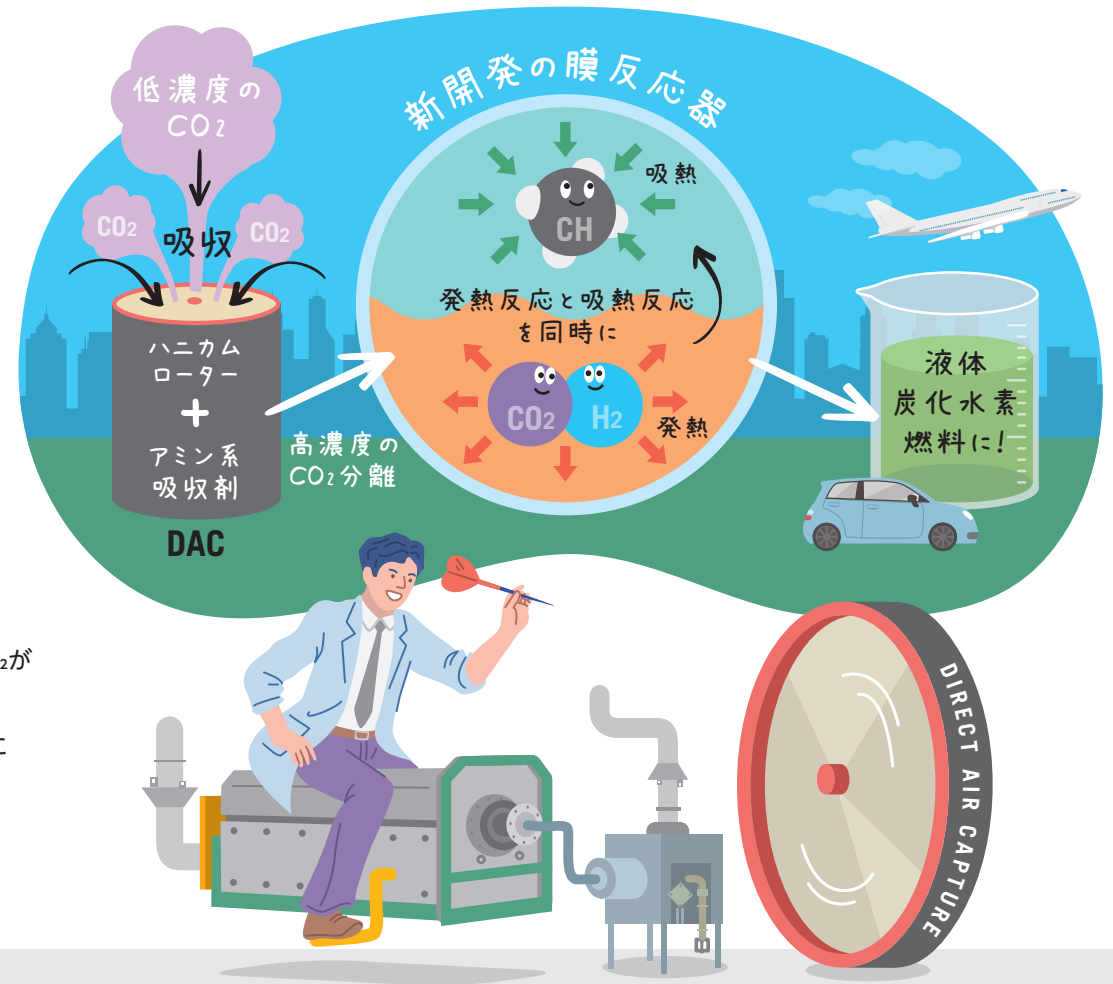


# 01 PROJECT

## 希薄なCO<sub>2</sub>を しっかりキャッチ! カギは吸収剤と熱制御

### 大気中からの高効率CO<sub>2</sub>分離回収・炭素循環技術の開発

過去30年における温室効果ガスの動向を見ると、産業活動によって人為的に排出されるCO<sub>2</sub>が最も増えています。このCO<sub>2</sub>を大気から直接回収するシステムとして注目されているのがDAC (Direct Air Capture) です。DACのCO<sub>2</sub>回収能力は、用いられるCO<sub>2</sub>吸収剤の性能に左右されます。また、回収したCO<sub>2</sub>を分離・濃縮するプロセスには、大きな熱エネルギーを要することが課題です。私たちは、DAC能力の最大化、および課題解決に必要な技術の開発に取り組み、地球温暖化問題の解決に求められる答えを導きます。



新しい技術で、  
地球と共創する  
理想の未来へ。

児玉 昭雄

金沢大学  
新学術創成研究機構 教授

資源ごみの分別や家電のリサイクルなど、エコを感じられる取り組みが日常にも定着してきましたね。また、燃料やエネルギーを効率的に利用する技術開発も進んでいます。しかし、これらの取り組みや技術を一括りに「地球にやさしい」とアピールすることに私は違和感を覚えます。なぜなら、我々人類が地球に掛けた負荷は、地球が自己修復して生態系を守っているからです。私たちは地球の優しさに甘え、負荷を掛け続けている人為的活動を見直し、新しい技術で自然との共生を目指します。

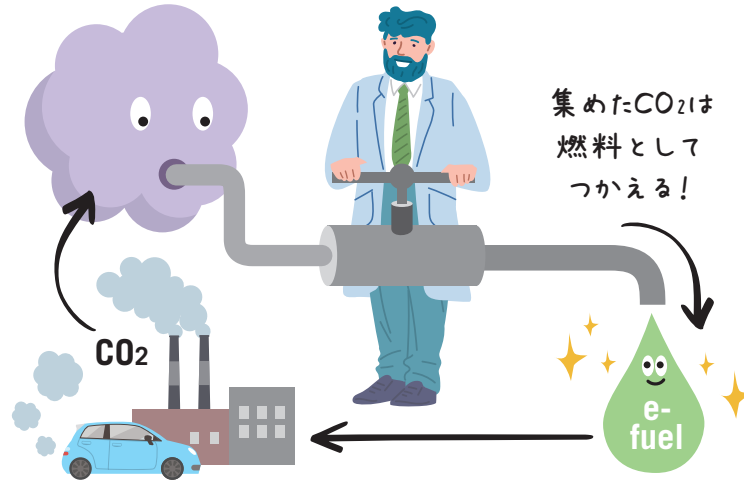
希薄なCO<sub>2</sub>をしっかりとキャッチ！  
カギは吸収剤と熱制御

## >> 新開発アミン+ハニカム構造の実力

CO<sub>2</sub>の吸収剤に用いるアミンは、吸収量に優れています。しかし、吸収したCO<sub>2</sub>の分離・濃縮に大きな熱エネルギーを要することや、酸化劣化後はCO<sub>2</sub>をほとんど吸収しなくなるという欠点もあります。私たちは研究を重ねた結果、この二点の課題をクリアしたアミンの開発に至りました。また、DACの心臓部であるアミンを塗布した吸収材のハニカム（通気性の良い多孔性の構造）化により、送風動力を抑えられることや、アミンの塗布面積が増すことでCO<sub>2</sub>吸収速度も増加し、迅速回収できることを発見しました。

## >> 合成燃料でゼロエミッションへ

私たちが回収・生成した高濃度CO<sub>2</sub>は、連携機関によって利活用されます。その一つに、水素(H<sub>2</sub>)と反応させて生成する液体炭化水素燃料



への変換があります。合成燃料(e-fuel)とも呼ばれる石油代替燃料で、エンジン車も使用できます。エネルギー密度が高いことや、従来の施設(ガソリンスタンド等)が利用できること、資源国以外でも製造できるなどのメリットから、次世代燃料として期待されています。また、気体合成燃料のe-methaneへの変換も可能です。これら合成燃料(e-fuel,e-methane)を使用する際に排出されるCO<sub>2</sub>は、元々大気中から回収したCO<sub>2</sub>であるため、正味の温暖化係数はゼロです。

### KEYWORD

アミン

炭素や窒素などで構成されている、アルカリ性の化学物質。CO<sub>2</sub>をよく吸収する一方で、加熱や減圧によってCO<sub>2</sub>を脱離させることが可能です。また、分子構造をデザインしやすいため、用途に適したアミンを作ることも可能です。

2025

未来への歩み  
**FUTURE VISION**

### 大阪・関西万博でDACを展示

大阪・関西万博で、社会での実用化を想定したサイズのDACシステムを展示。実証実験を行い、運用していくうえでの問題点を抽出するほか、CO<sub>2</sub>の分離回収のエネルギーコストなどを分析します。



2027

### DACシステムを繰り返し検証

大阪・関西万博での展示を経て入手したデータを分析し、よりサイズの大きい装置を製作。さらに実証実験を繰り返し、社会実装を見据えたDACシステムの規模や性能を検証します。



2029

### DAC技術を確立し評価を実施

DACの技術を確立します。またCO<sub>2</sub>の分離回収のエネルギーコストを踏まえ、DACシステムの構築に目処をつけます。さらには、ほかのプロジェクトや企業と連携して影響や実用性、適用性、経済性の評価を行います。

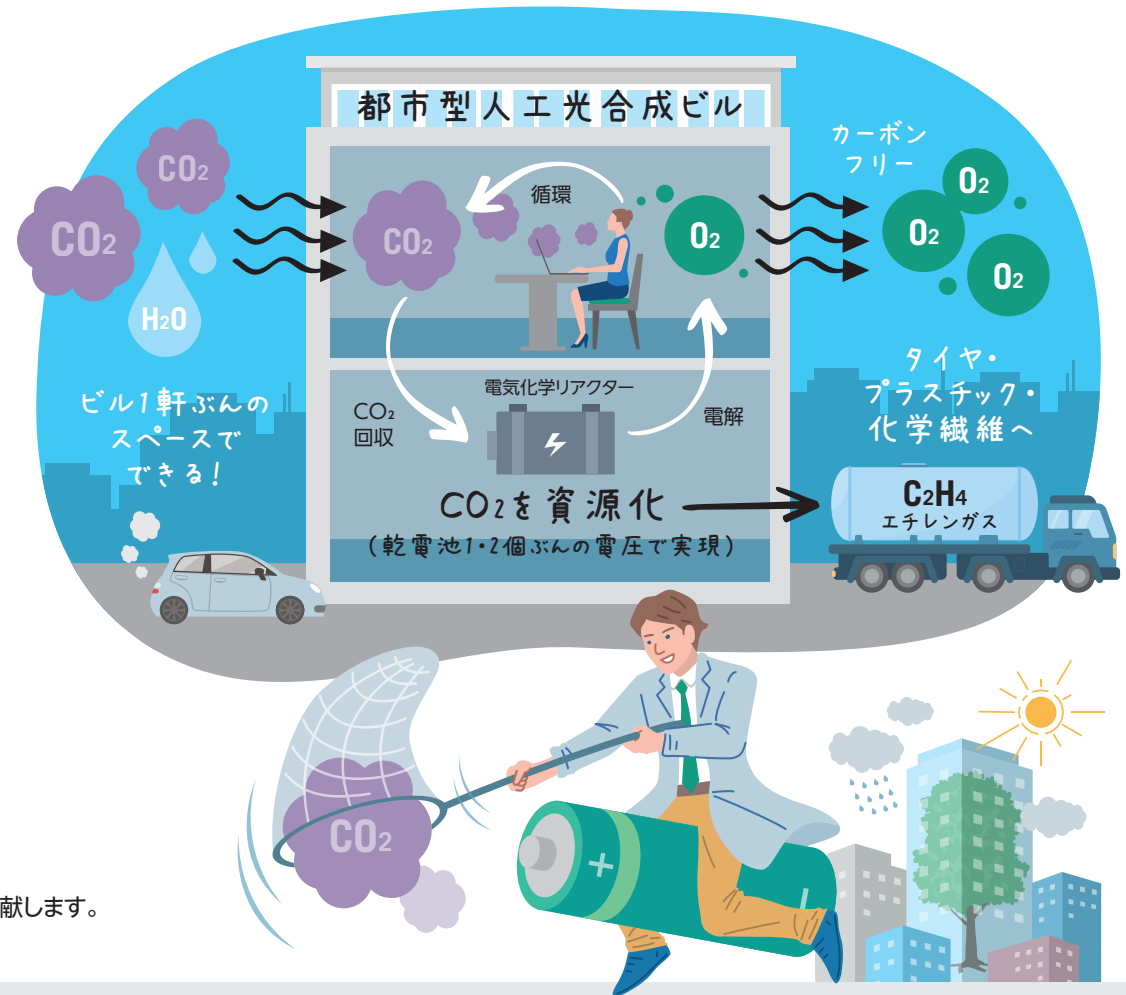


# 02 PROJECT

## 都会に現れる高層の森林 CO<sub>2</sub>を吸収して資源利用! 未来の都市型人工光合成

### 電気化学プロセスを主体とする 革新的CO<sub>2</sub>大量資源化システムの開発

地球の持続性という境界条件を意識せず、利便性を追求し続けた結果として、今、人類は地球温暖化問題に直面しています。この問題を解決に導く手段の一つとして、CO<sub>2</sub>を回収して資源化するカーボンリサイクルシステムの開発に取り組んでいます。システムの心臓部には、少量の電力でCO<sub>2</sub>を選択的に通すフィルターがあり、コンパクトな反応器で有用な資源(エチレン等)に変換します。我々は、コア技術となる電気化学に基づき、このシステムを活用した都市づくりを通じて、カーボンニュートラルに貢献します。



基礎的な学問から  
社会の仕組みを変えるまで、  
マルチスケールに対応します。

杉山 正和  
東京大学  
先端科学技術研究センター 教授

誰もが呼吸によってCO<sub>2</sub>を排出します。そのCO<sub>2</sub>が酸素になって戻ったり、有用な資源に変換されて化学製品の材料になったり…。これは、マジックのネタ?ではありませんよ。

近い将来、それぞれの生活環境の中で、皆さんが体現することになる炭素循環の一例です。日常的なパーソナル炭素循環が生活者の行動変容を促し、行動変容が習慣を変え、習慣が環境保全に繋がる。そんな社会を目指す取り組みも、科学者の使命の一つと感じています。

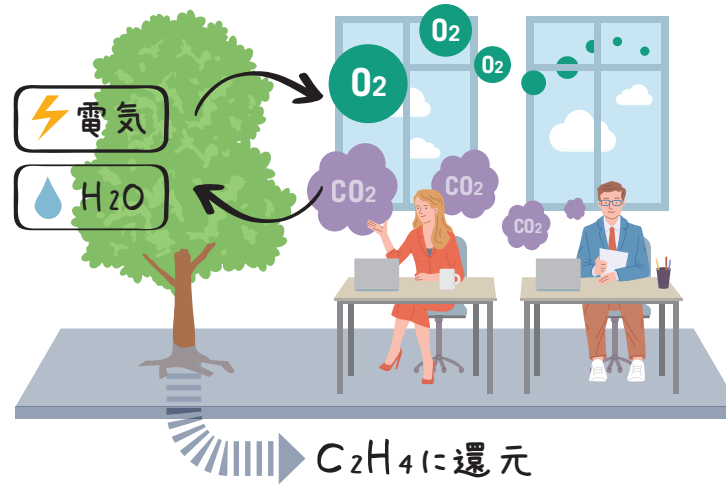
## 都会に現れる高層の森林 CO<sub>2</sub>を吸収して資源利用!未来の都市型人工光合成

### >> ビルが光合成をする!?

空調装置による空気の流れを利用して、常時CO<sub>2</sub>を回収できることが、我々のシステムの強みです。CO<sub>2</sub>を水と反応させて、暮らしに身近な化学製品の材料となるエチレン(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)などの資源に転化する際、副生成物として酸素が得られます。この酸素を空調装置によりビル内に循環させ、我々の呼吸に使います。CO<sub>2</sub>の回収から資源化、副生成物である酸素の利用までをビルの中で完結する仕組みは、さながら光合成であり、ビルそのものが“生きた木”のようです。

### >> 日々の暮らしでエコを実感!

ビルの空調装置を利用した我々のシステムは、酸素濃度を維持しつつ、CO<sub>2</sub>濃度を低減するため、従来エアコンが行っていた外気の取り込みが不要です。したがって、外気の温度調節に消費されていた電力の大



幅な削減が可能です。このような利点を踏まえると、光合成をするビルは、エネルギーや物質を無駄なく利用する形でCO<sub>2</sub>の回収から資源化を実現できるのです。毎日通うオフィスも、ショッピングに訪れるデパートも、リゾート地のホテルだって、未来の都市型人工光合成を担う、炭素循環の先端基地になるのです!

#### KEYWORD

エチレン

プラスチックや化学繊維など身近な化学製品の原料となる物質です。我々のシステムでは、水の電気分解による水素を必要とせず、CO<sub>2</sub>を水と直接反応させることでエチレンを製造できます。

2025

未来への歩み  
**FUTURE  
VISION**

#### 炭素循環の仕組みづくり

電気化学を活用し、小型かつCO<sub>2</sub>からエチレンへの変換効率の高い装置を仕上げて、「パーソナル炭素循環」を実現するための土台を固めます。

2027

#### 設計図から見えてくる社会実装

企業と協力しながら、CO<sub>2</sub>を回収してエチレンに変換する装置を実際にビルの空調システムへうまく組み込むための、仕組みづくりに取り組みます。

2029

#### お披露目!パーソナル炭素循環

デモンストレーション用の部屋を完成させ、一般人に「自分の吐き出したCO<sub>2</sub>がエチレンになる」という実体験をしてもらいます。

委託先

東京大学、大阪大学、理化学研究所、  
UBE(株)、清水建設(株)、千代田化工建設(株)、  
古河電気工業(株)

プロジェクト  
紹介動画

[https://www.youtube.com/watch?v=pEM3\\_YTDNC8&list=PLZH3AKTCrVsW02NDqRxLnSvVc5zqVDFAT](https://www.youtube.com/watch?v=pEM3_YTDNC8&list=PLZH3AKTCrVsW02NDqRxLnSvVc5zqVDFAT)

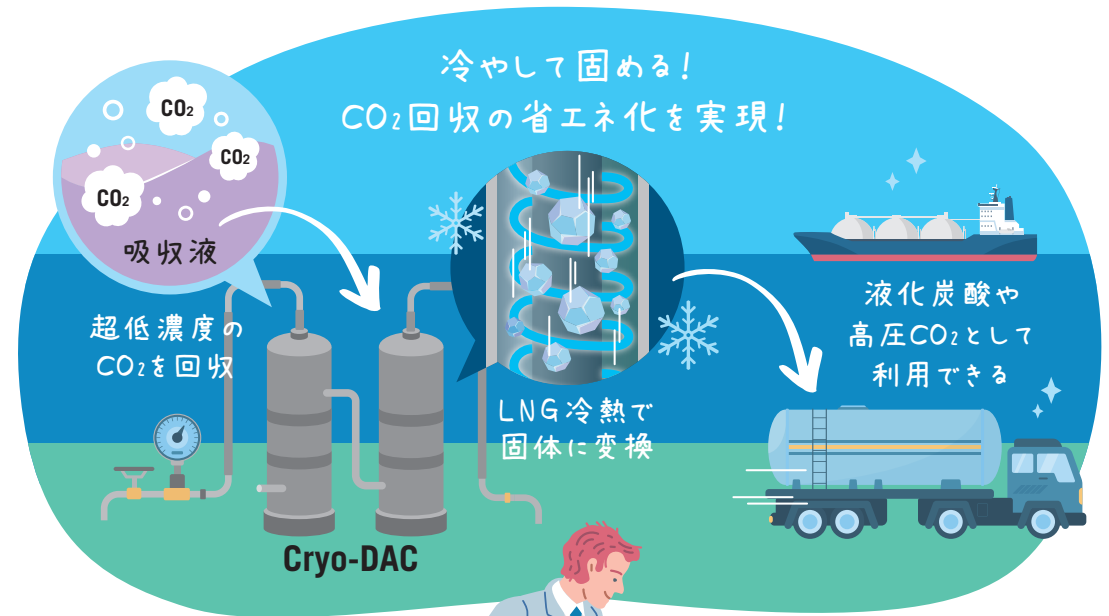


# 03 PROJECT

## 「冷やすチカラ」で 大気中のCO<sub>2</sub>を ドライアイス化

### 冷熱を利用した大気中二酸化炭素直接回収の研究開発

地球温暖化の原因となる温室効果ガス排出量の内訳を見ると、CO<sub>2</sub>が75%を占めています。しかし、濃度は約400ppm(100万分の400)ですから、大気中の分子1万個のうち、CO<sub>2</sub>はたった4個です。この希薄なCO<sub>2</sub>を効率よく直接回収する仕組みの一つにDAC(Direct Air Capture)がありますが、高温の熱エネルギーを大量に必要とすることが課題です。その課題解決に向け私たちは、これまでの高温の熱エネルギー投入とは逆の発想で、「**冷熱**」によってCO<sub>2</sub>を回収する技術の開発に取り組んでいます。



日々の発見が、  
研究の推進力です。

則永 行庸  
名古屋大学  
大学院工学研究科 教授

産業革命以降の化石燃料の大量消費によって大気中に蓄積したCO<sub>2</sub>を除去することは、人類の重要な課題です。その解決には、社会全体の共通インフラとなるようなスケールで装置やプラントをデザインすることが必要であり、エンジニアリングに軸足を置いた私たちの研究開発は、そこに重要な役割を果たすと考えています。技術的なハードルや想定外の課題に直面した際に実感することは、類を見ないユニークな技術を用い、世界の最前線で取り組んでいるという喜びであり、技術が社会実装される未来像が、研究者としてのモチベーションに繋がっています。

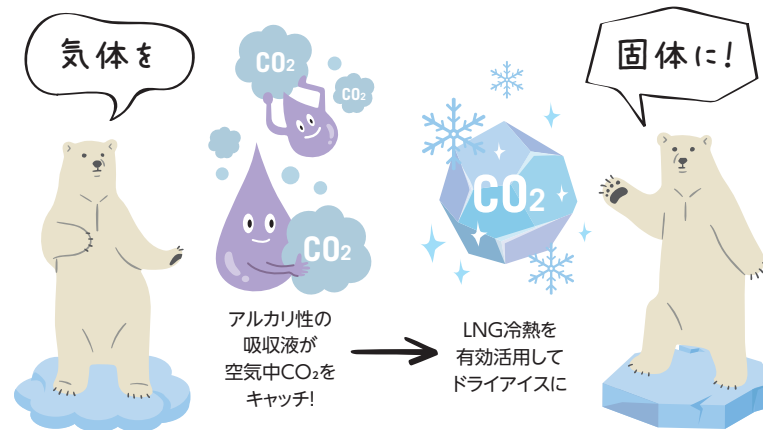
## 「冷やすチカラ」で 大気中のCO<sub>2</sub>をドライアイス化

### >> 新たなプロセスへの挑戦

「冷」と「熱」…相反する文字を組み合わせた「冷熱」という言葉に戸惑うかもしれません。ここで示す「冷熱」とは、LNG（液化天然ガス）が、気体になる際に周囲から熱を奪い冷却する能力です。LNGは、約-160℃の液体で輸送され、受け入れ基地で気体に戻す際に冷熱が発生します。しかし、この冷熱の多くはエネルギーとして利用されず、海水などに廃棄されています。私たちは、廃棄されるエネルギーの有効利用とDACの抱える課題解決の双方を充足させる仕組みとして、Cryo（低温の）-DACを核とするカーボンリサイクルの発想に至りました。

### >> 固体から液体（=流体）への トランスフォーム

Cryo-DACでは、アルカリ性の液体にCO<sub>2</sub>を吸わせて濃縮し、冷熱に



よる減圧で吸収液からCO<sub>2</sub>を回収、ドライアイス化します。また、密閉下で環境温度に戻せば、輸送や地下貯留にも適した液化炭酸にすることができます。通常、CO<sub>2</sub>の液化には圧縮エネルギーを大量に消費しますが、Cryo-DACではこの圧縮は不要となり、省エネルギー化を実現します。LNGは流通量が多いため、これまで廃棄されていた冷熱を新たなエネルギーとして活用するインパクトは大きく、国際的なDACによるCO<sub>2</sub>回収指標の約3割に貢献するポテンシャルを見込んでいます。

#### KEYWORD

### 冷熱

環境温度より低い温度で周囲の熱を奪うことを利用するエネルギー。

2025

未来への歩み

## FUTURE VISION

### 大阪・関西万博でデモンストレーション

万博に出展して半年間の実証試験を行い、Cryo-DACを使って大気から確実にCO<sub>2</sub>の回収ができることを示します。また、大学内のベンチプラントで運転を成功させ、多くの人にこの研究について知ってもらうことを目指します。

2027

### さらに検証を実施

様々な企業の協力も得ながら、社会実装に向けて検証を進めます。数ある技術の中で、競争力を発揮できるものになっているかどうか確認します。

2029

### 事業化に向けたフェーズへ

商用機概念設計を完成し、社会実装へのシナリオを完成させます。国内外でDACの導入を希望する企業を募集し、実装に向けて事業環境の整備を進めます。



# 04 PROJECT

## 家でも学校でも会社でも CO<sub>2</sub>を極薄膜で分離し マルチに活用

### “ビヨンド・ゼロ”社会実現に向けた CO<sub>2</sub>循環システムの研究開発

なぜ植物は葉を広げるだけでCO<sub>2</sub>を吸収して光合成ができるのか。  
そんな興味から研究を重ね、細胞膜に類似した機能を持つ、非常に薄いナノスケールの膜の開発に成功しました。この膜を利用した小型のシステムが、企業や自治体のみならず一般家庭に普及すれば、私たちの日常にもCO<sub>2</sub>回収拠点が広がります。  
いつでも・どこでも大気中からCO<sub>2</sub>を直接回収し循環利用できる社会インフラを形成し、地球環境再生を目指します。



敵か味方か？  
CO<sub>2</sub>の本質に触れた  
その先にあるものは…

藤川 茂紀

九州大学  
カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 教授

CO<sub>2</sub>は地球を温暖化させる「温室効果」を持つため、“悪者”扱いされがちです。しかし、本当にそうでしょうか？CO<sub>2</sub>をコントロールし、資源として循環させることができれば、資源=資産にもなり得ます。野菜はその産地によって、水は汲み上げられた土地によって、ブランド価値を与えられています。しかし、野菜や水の産地は気にしても、炭酸水に含まれるCO<sub>2</sub>や農作物の光合成に使われたCO<sub>2</sub>がどこから来たか、なんて気にしたことはありますか？この研究の真髄は、CO<sub>2</sub>に新たな価値を与える社会インフラの構築。“ビヨンド・ゼロ”のその先にも注目です！

## 家でも学校でも会社でも CO<sub>2</sub>を極薄膜で分離しマルチに活用

### >> 極薄膜でCO<sub>2</sub>を効率よく分離

大気中からCO<sub>2</sub>を回収する分離膜と、回収したCO<sub>2</sub>を資源へ変換する装置。これらを連結し「DAC-U(Direct Air Capture-Utilization)システム」として実装することを目指しています。これまでの膜分離装置は回収できるCO<sub>2</sub>量のごくわずかで実用性を欠いていました。しかし、植物の細胞膜に倣い“薄さ”に着目して研究を重ねた結果、食品用ラップの300分の1という極薄スケールで、従来の20倍の量のCO<sub>2</sub>回収を実現。格段に効率がアップしました。

### >> CO<sub>2</sub>を生かす社会へ

回収したCO<sub>2</sub>は装置によって変換し、メタンガスや都市ガス、工業製品の材料(化成品)として活用されるほか、光合成の材料として農業へ活用したり、濃縮したCO<sub>2</sub>を使って一般家庭で炭酸水を作ったりすること



も可能です。DAC-Uシステムは設置場所の条件に応じて、ソーラーパネルのように自在に組み合わせて様々な規模で使用できるため、家庭から公共施設、公園やオフィスビルまで、場所を選ばずCO<sub>2</sub>の回収と資源化を実現します。大気中の炭素資源を地産地消する、**炭素資源循環型社会**の構築に貢献するシステムです。

#### KEYWORD

### 炭素資源 循環型社会

回収したCO<sub>2</sub>のエネルギー変換や、濃縮後の直接利用により、回収と利用の循環構造が生み出されます。CO<sub>2</sub>の回収だけではなく再利用までも可能にすることで、カーボンニュートラルな社会の実現を目指します。

2025

未来への歩み

# FUTURE VISION

#### DAC-Uシステム登場

実際に稼働するDAC-Uシステムの製作を目指しています。



2027

#### 試作機の実証

DAC-U装置の用途はたくさんあります。いろんな目的・用途にあったDAC-U装置のプロトタイプを製作し、実証試験を行います。



2029

#### 暮らしを賄うまでに成長

次第に性能を向上させ、2029年度中にはより効率的に、具体的には1日に2kg(4人家族の1日分のエネルギーを賄える量)程度のCO<sub>2</sub>を回収できるようにすることが目標です。

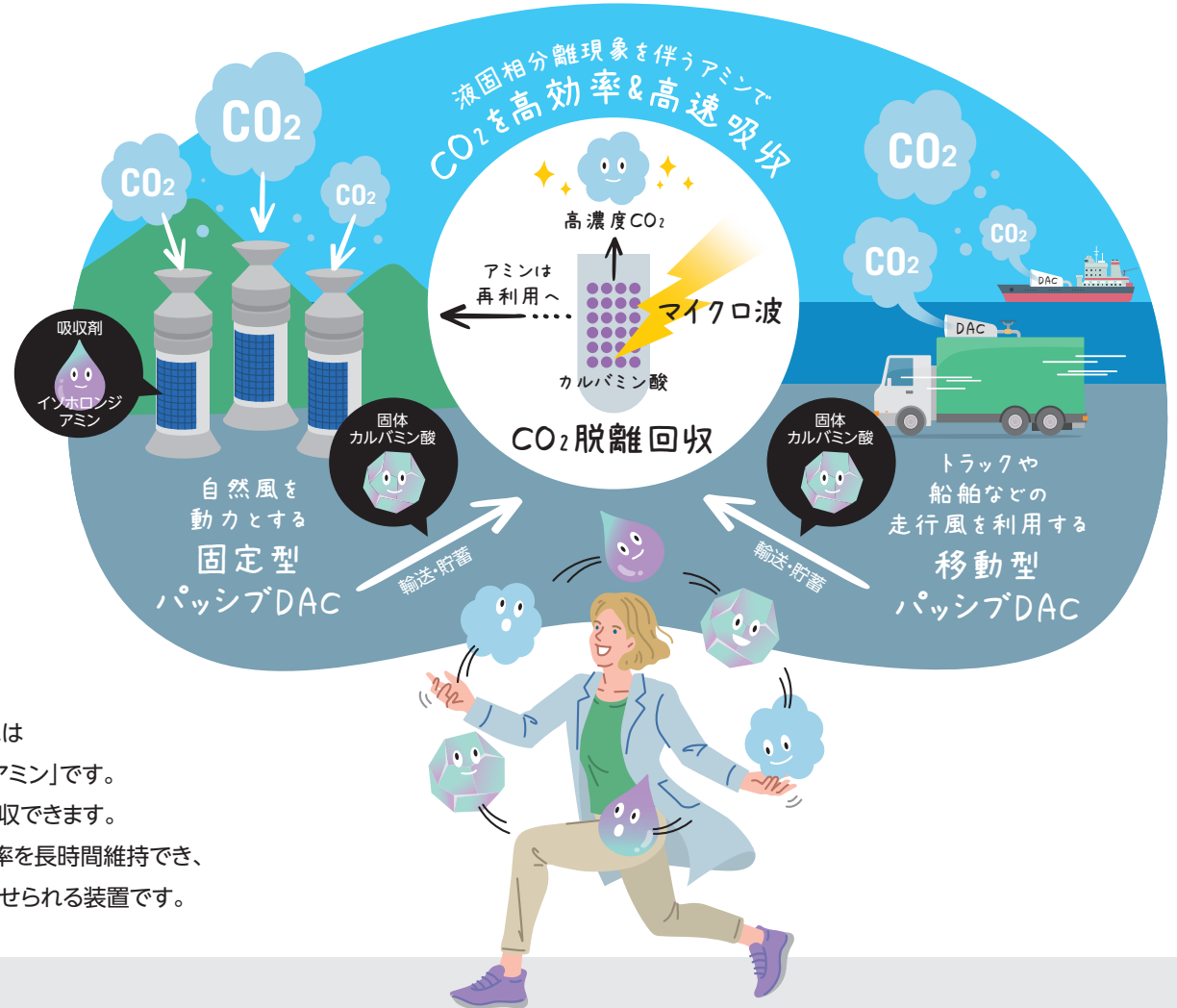


# 05 PROJECT

## 世界最速級のスピードで 自然の風からCO<sub>2</sub>を回収 将来的な利用で 炭素循環型社会へ

### パッシブDAC技術の研究開発

大気中のCO<sub>2</sub>を直接回収(DAC:Direct Air Capture)できたら  
これほど有効な地球温暖化対策はありません。これまでは「効率よく直接捕まえるにはCO<sub>2</sub>の濃度が低い」とされてきました。この常識をくつがえす物質が「イソホロンジアミン」です。  
DAC装置に吸収剤として用いれば、低濃度の二酸化炭素も簡単に“固体化”して回収できます。  
この研究で開発中の「パッシブDACシステム」は、送風動力なしで高いCO<sub>2</sub>吸収効率を長時間維持でき、CO<sub>2</sub>吸収・放出しても吸収剤は繰り返し利用可能です。実用化への大きな期待が寄せられる装置です。



運命的だった、  
CO<sub>2</sub>回収のカギを握る  
化合物との出会い。

山添 誠司  
東京都立大学  
大学院理学研究科 化学専攻 教授

はじめは触媒を使ったDACの研究をしていたのですが、偶然ともいえる巡り合わせでイソホロンジアミンにたどりつき、触媒なしでCO<sub>2</sub>を吸収・固体化させる方向へと舵を切りました。まずは固体化して効率よく集めるまでが当面の目標ですが、私たちが思い描いているのはさらに一歩進んだ未来です。固体になったCO<sub>2</sub>は長期保存と安定輸送が可能で必要なときに取り出せるため、将来的な利用により従来の化石資源に変わる存在として炭素循環型社会を支えていけるはず。大気中から得られる炭素資源なので、SkyCarbon®と呼んでいます。

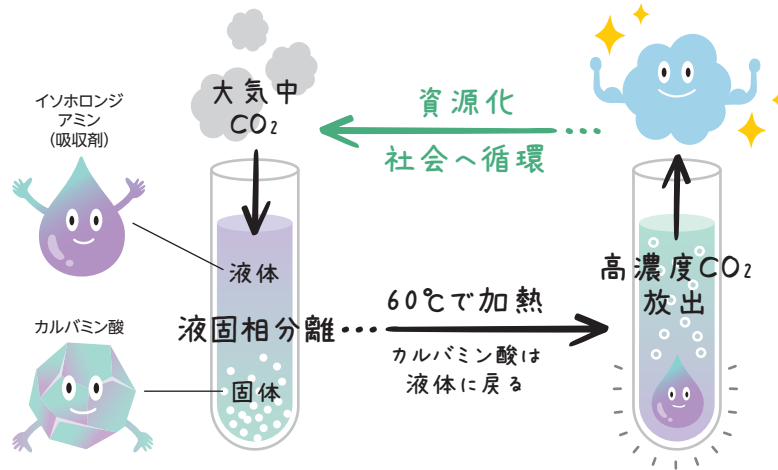
## 世界最速級のスピードで自然の風からCO<sub>2</sub>を回収 将来的な利用で炭素循環型社会へ

### >> CO<sub>2</sub>吸収剤の適役登場

パッシブDACシステムは、エネルギーを使わず自然の力のみであらゆる方向から風を集めるため、送風コストいらずでCO<sub>2</sub>を回収可能なすぐれものです。これまで使われてきたCO<sub>2</sub>吸収剤は吸収速度・効率がネックでしたが、「イソホロンジアミン」を吸収剤に使い「**液固相分離**」の仕組みを活用すれば、高効率で回収したCO<sub>2</sub>を固体として集め、安定に貯蓄したり輸送したりできることがわかりました。その回収スピードは、なんと世界最速レベルです。

### >> この世の空気は資源の宝庫

電子レンジと近い波長の「マイクロ波」は、電力で生み出せて、対象物をピンポイントで効率的に加熱できる特長を持ちます。回収されたCO<sub>2</sub>は、マイクロ波によって加熱されると吸収剤と離れ、ほぼCO<sub>2</sub>のみを回収



できます。回収した高濃度CO<sub>2</sub>はエネルギーやプラスチック材料などに換えられて第二の人生を歩み始めます。CO<sub>2</sub>と分離した後の吸収剤も再利用できるため、このシステムが完成すれば、炭素循環型社会が実現します。ちなみにこのDACシステムは、街などに設置して全方向から風を集められるだけでなく車や船に載せて使うこともできるため、未来社会のいたるところで目にするようになるはずです。

#### KEYWORD

### 液固相分離

ドレッシングが水と油に分かれるように、混ざっていたものが分離すること。この現象により液体の吸収剤がCO<sub>2</sub>を吸収してできた固体と分離することで、吸収剤にはCO<sub>2</sub>をさらに取り込む余力が生まれ、低濃度の大气中CO<sub>2</sub>をどんどん回収できるのです。

2025

未来への歩み

## FUTURE VISION

### 知見を結集して 試験装置製作

プロジェクトに関わる大学や企業のさまざまな技術を集約し、まずは試験装置を製作します。

2027

### ツインタワーで効果実証

吸気塔と排気塔の2本のタワーを備え、中規模サイズの固定型パッシブDACで性能を検証します。この時点で、カーボンニュートラルもしくはカーボンネガティブ達成へのめどをつけることが目標です。

2029

### DACのある風景が日常に

吸気塔と排気塔の二つの機能を一体化して「シングルタワー」化し、一ヶ月あたり100kgのCO<sub>2</sub>を回収できる装置が完成予定。大学敷地内にDACを設置します。

委託先

東京都立大学、(株)大気社、(株)パンタレイ、  
長岡技術科学大学、小島プレス工業(株)、  
九州大学

プロジェクト  
紹介動画

[https://www.youtube.com/watch?v=VUMyw0rL\\_MM&list=PLZH3AKTCrVsW02NDqRxLnSvVc5zqVDFAT](https://www.youtube.com/watch?v=VUMyw0rL_MM&list=PLZH3AKTCrVsW02NDqRxLnSvVc5zqVDFAT)



# 06 PROJECT

## CO<sub>2</sub>の固定から エネルギーの生産まで 海洋の褐藻が大活躍

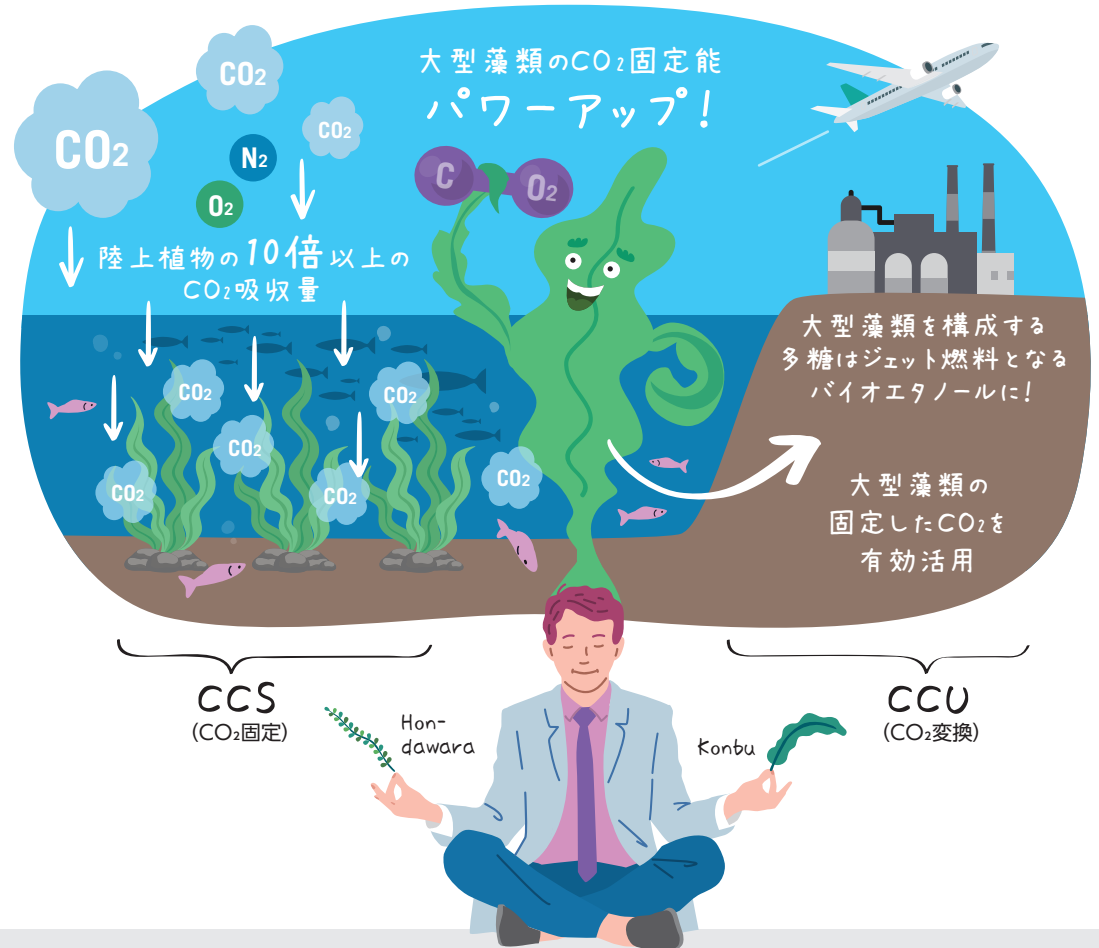
### 機能改良による高速CO<sub>2</sub>固定大型藻類の創出と その利活用技術の開発

“Blue Gold”と聞いて、何を連想しますか?Blueは海を、Goldは貴重な資源を表します。この研究が目指すのは、海の恵みによって地球環境の回復と物質生産を両立する、究極の資源循環システムの実現。コンブなどの大型藻類が持つCO<sub>2</sub>固定能力の向上や、未利用資源として藻類をバイオエタノールに変換し、燃料などへの利活用を図ります。藻類の養殖場には魚が産卵して成育するため、漁業への好影響も見込まれます。海に囲まれた日本ならではの取り組みです。



大型藻類をどんどん育て、  
CO<sub>2</sub>資源化テクノロジーで  
世界をリードする海洋立国へ。

植田 充美  
京都大学  
成長戦略本部 特任教授



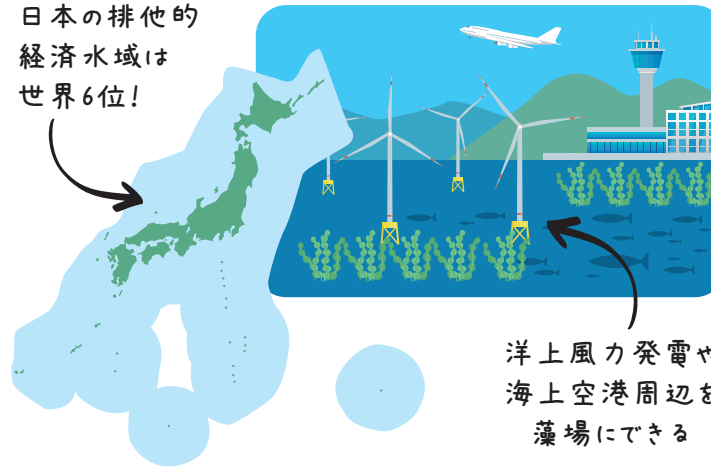
今まで世界のどこでもできていなかった大型藻類の養殖技術。そこからバイオエタノールを作るという技術も世界初です。この二つの技術の融合により、化石燃料の石油に代わって生物由来のバイオエタノールが普及すれば、地球環境にとって大きなプラスになります。日本は周囲を海に囲まれた国ですから、この二つの技術の社会実装に適した環境にあるといえます。エネルギーの多くを他国に依存している日本ですが、この技術によって今度は日本が世界に貢献できるようになりたいと考えています。

## CO<sub>2</sub>の固定からエネルギーの生産まで 海洋の褐藻が大活躍

### >> 知られざる大型藻類の 卓越した特技

植物は光合成によってCO<sub>2</sub>を固定しますが、一方、海中に生息する大型の藻類は、地上の植物に比べて圧倒的に優れたCO<sub>2</sub>固定能力を持っています。そのためコンブの食用にならない部分や、食用とされることの少ないホンダワラなどを利用すれば、食料生産とも競合することなく藻類を活用できます。大型藻類がさらに効率よくCO<sub>2</sub>を固定できるよう、品種改良を中心に遺伝子の研究を重ねた結果、全ての大型藻類を養殖できるようになりました。現在、海上空港の周辺や洋上風力発電基盤からEEZ(排他的経済水域)領域内で養殖場の拡大を計画し、同時に国内の様々な港湾で実証実験を進めています。CO<sub>2</sub>を固定するだけでなく、エネルギー生産や漁業にも貢献する大型藻類。それは、青い海に広がる金のように貴重な資源として、“Blue Gold”とも讃えられる、地球環境再生と保全の救世主的存在です。

日本の排他的  
経済水域は  
世界6位!



### >> 大型藻類の燃料で飛行機が飛ぶ!?

光合成によって大型藻類を構成する多糖をエタノールに変換し、飛行機のジェット燃料などのエネルギーとして活用できます。これには、糖の分解プロセスを効率化する、新発明の「**アーミング酵母**」が一役買っています。

#### KEYWORD

### 「アーミング 酵母」

表面にまるで腕(arm)のように酵素が付いている酵母。この酵母によって化学変化を促進することで、分解が難しい糖を含む未利用資源もスムーズに分解できるようになり、エタノールを手に入れやすくなりました。

2025

未来への歩み

## FUTURE VISION

### 新技術を融合した システムスタート!

独自に開発した大型藻類の養殖技術と、エタノール生育酵母の技術を融合した新しいシステムを稼働させます。

2027

### 輸出大国への転身を目指して

環境を保全・再生し、エネルギーについて化石燃料依存度を低下させ、資源の乏しい輸入大国からの脱出を目指せるかもしれません。

2029

### 航空エネルギー自給に貢献する時代へ

年間で藻類の生産性を1ヘクタールあたり210トン、CO<sub>2</sub>の固定量を1m<sup>2</sup>あたり8~10kg-CO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>固定量比を陸上植物の200倍まで向上させることを目指しています。2030年には、大型藻類由来の燃料で航空エネルギーの自給に貢献することが目標です。

委託先

京都大学、京都工芸繊維大学、三重大学、  
Green Earth Institute(株)、  
関西化学機械製作(株)

プロジェクト  
紹介動画

<https://www.youtube.com/watch?v=umbFEWeb0Ik&list=PLZH3AKTCrVsW02NDqRxLnSvVc5zqVDFAT>



# 07 PROJECT

## CO<sub>2</sub>を高速に固定し 炭素の収支も正確に 風化促進技術の進化形

### 岩石と場の特性を活用した 風化促進技術“A-ERW”の開発

地球上のほとんどの炭素が、岩石や堆積物の中に炭酸塩として存在していることをご存じでしょうか？

つまり、植物のCO<sub>2</sub>固定量より多いのです。

また、植物が枯れると固定されたCO<sub>2</sub>は土壌で微生物に分解されて大気中に放出されますが、岩石の固定は、長い年月にわたる風化の過程で行われ半永久的です。この岩石の「風化」を人工的に促進し、CO<sub>2</sub>を効率的に回収・固定化するA-ERW (Advanced-Enhanced Rock Weathering: 高度な岩石風化促進)に、ネガティブエミッションを牽引する技術として期待が寄せられています。



日本ならではの風化促進技術で  
地産地消のCO<sub>2</sub>固定を実現し、  
新たな価値を生み出します。

中垣 隆雄  
早稲田大学  
理工学術院 教授

地震大国・火山大国とも称される日本は、プレートの沈み込み帯に位置しています。そのため、CO<sub>2</sub>の吸収に適した岩石が地表に露出しているため入手しやすく、土地ごとの特性に合ったA-ERWの開発に有利です。これは、CO<sub>2</sub>排出源の一つにもなっている酸性緩和のための石灰散布の問題を解決する手立てをはじめ、様々な問題の対処や土壌の有効活用に必要なデータを収集できる好環境ともいえます。だからこそ、この技術と同じ火山帯の島しょ国であるアジアの国々でも役立てられるよう、日本がリーダーシップを発揮していきたいと思っています。

## CO<sub>2</sub>を高速に固定し炭素の収支も正確に 風化促進技術の進化形

### >> 自然のチカラをもっともっと

大気中のCO<sub>2</sub>は雨粒に吸収され、炭酸水となった雨粒が岩石に落ちると、岩石に含まれるカルシウム(Ca)やマグネシウム(Mg)などとの反応により炭酸塩として半永久的に固定されます。A-ERWは、岩石を粉砕し表面積を拡大したうえで、散布場の特性と組み合わせることで、このプロセスを人工的に加速させる風化促進技術です。自然な風化によって大気中から除去されているCO<sub>2</sub>は、すでに年間3億トンにのぼるとみられることから、A-ERWの介入によるCO<sub>2</sub>固定量のさらなる拡大は、脱炭素に向けた魅力的なインパクトといえます。

### >> 多様なデータと高度な計算が要!

我々は、「CO<sub>2</sub>鉱物化ハウス」による実証事業と並行し、様々な地域で粉砕した岩石を散布し、A-ERWの検証を重ねています。耕作地への散布



では、農作物の育成状況や収量、土壌の改良効果や炭素貯留量、天然の肥料として作用するカルシウムなどの残量、休廃止鉱山への散布では、酸性度の高い廃水の中和効果、さらには近海のアルカリ化、CO<sub>2</sub>固定量や海洋生物への影響までも含め、実測データと収支計算に基づく正確な**炭素会計**を示すことで、A-ERWの社会実装モデルを具現化します。

## KEYWORD

# 炭素会計

事業活動において、温室効果ガスをどれだけ排出・削減したか、炭素の収支を定量化するプロセス。炭素会計の測定・報告・検証の透明性は、クレジット化\*のために不可欠です。

\*温室効果ガスの排出削減量=「排出権」と見なし企業間で売買できる仕組み。企業努力で削減しきれない温室効果ガスは、入手したクレジットにより相殺できます。

2025

未来への歩み

# FUTURE VISION

## 正確なデータ収集

鉱物化ハウスや農地、森林傾斜地、休廃止鉱山など、各散布場での試験的な散布で炭素会計のデータ収集とともに、計測や検証のルール整備も進めます。



2027

## CO<sub>2</sub>固定以外にも期待

炭素会計の正確性を向上するとともに、作物栽培への好影響や鉱山廃水の中和など、副次的に得られる効果も検証します。



2029

## 着実に実用化へ

鉱物化ハウスでのCO<sub>2</sub>固定によるクレジット化を本格的に開始します。また正確な炭素会計を確立して、農地への岩石散布の効果を実証します。

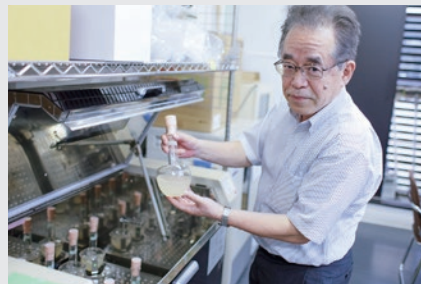
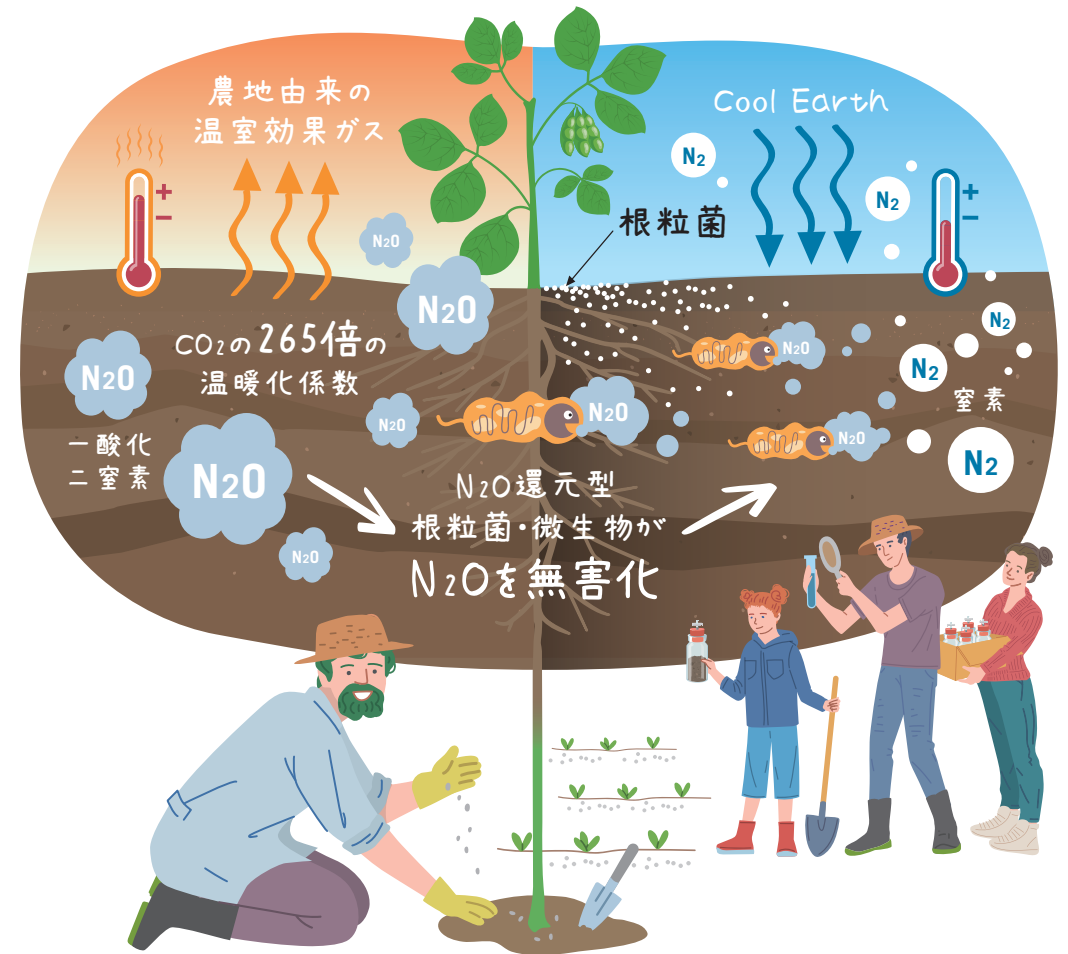


# 08 PROJECT

## 土の中に潜む 小さな生き物が 温室効果ガスを抑制!!

### 資源循環の最適化による 農地由来の温室効果ガスの排出削減

温室効果ガスといえば、一般にCO<sub>2</sub>が広く知られていますが、さらに温室効果の高いN<sub>2</sub>O（一酸化二窒素）というガスをご存じでしょうか？  
大気中の濃度はCO<sub>2</sub>よりも低いのですが、温室効果はCO<sub>2</sub>の265倍です。  
農業分野は最大の人為的N<sub>2</sub>O排出源であり、その約6割は農耕地の土壌から発生しています。  
人口増に伴う食料増産で化学肥料の使用量が増えれば、N<sub>2</sub>Oも増え続けます。食料を確保し、地球環境も守るためには、農業から排出されるN<sub>2</sub>Oを減らすことが喫緊の課題です。



あなたの集めてくれた土が、  
新たな可能性を  
導いてくれました。

南澤 究  
東北大学  
大学院生命科学研究科 特任教授

一般の方にもN<sub>2</sub>Oについて知ってもらい、地球温暖化問題に対する当事者意識も高めるため、「市民科学」というサブプロジェクトを立ち上げました。このプロジェクトでは、N<sub>2</sub>Oを分解する微生物を探すため、一般の方々から土の提供とガス採取実験をお願いしています。ここで見つかった微生物や、その微生物が生息する土壌の団粒構造をヒントに、人工団粒を開発しました。そして、窒素肥料由来のN<sub>2</sub>O削減にも部分的に成功しました。農業由来のN<sub>2</sub>Oの削減を通じて、Cool Earthに貢献します。

土の中に潜む小さな生き物が  
温室効果ガスを抑制!!

## >> 豆と菌の出会いが生んだ 最強タッグ

農作物の育ちを良くするための肥料には窒素化合物が含まれています。この窒素化合物は、土の中で微生物やカビなどにより分解され、 $N_2O$ となって大気中に放出されます。この $N_2O$ を減らす微生物として、マメ科の植物の根に共生する“根粒菌”という微生物の中から、世界で初めて $N_2O$ の分解力が高い種類を特定しました。そして、この“根粒菌”を実際の農地で使用したところ、 $N_2O$ の発生を3割削減することができました。我々は、このように $N_2O$ を削減する微生物を「地球冷却微生物」と呼んでいます。

## >> 「地球冷却微生物」を探せ!

実は“根粒菌”は、マメ科の植物の根でしか $N_2O$ を分解できないことが



日本中から  
土壌と空気を  
収集!

欠点です。そのため、全ての農業由来の $N_2O$ を削減するためには、マメ科の植物に依存しない微生物を探す必要がありました。そこで、我々は「市民科学」を始めました。これまで寄せられた土のサンプルからは、幾つかの地球冷却微生物の候補も見つかり、研究に手応えを感じています。こうした地球冷却微生物を農業に適用することで、農業由来の $N_2O$ 削減を目指しています。

### KEYWORD

## 人工団粒

土を構成する粒子を人工的に結合させて団子状の塊にしたもの。内部は $N_2O$ を分解する微生物が生息しやすい構造にデザインされており、肥料のように撒くことで、 $N_2O$ を排出しない土壌の形成が期待されます。

2025

未来への歩み  
**FUTURE  
VISION**

### 実用化に向けてデータ収集

根粒菌を国内外で技術展開するための根拠となる、実証データの取得を目指します。実用化に向けて、根粒菌・人工団粒・人工担体それぞれの研究を着実に進めていきます。



2027

### 根粒菌、人工団粒、 社会へ飛び立つ

根粒菌は商品化に漕ぎつけることが目標です。まずは国内、将来的には海外での活用も視野に入れています。



2029

### 夢は窒素半減社会

根粒菌の国内外への本格普及、人工団粒・人工担体の普及へ着手し、 $N_2O$ の発生を半分程度にまで減らせる実績を目指します。研究の根幹をなす「土壌微生物の働きの解明」で成果を上げ、技術と学術の両面において進歩を示します。

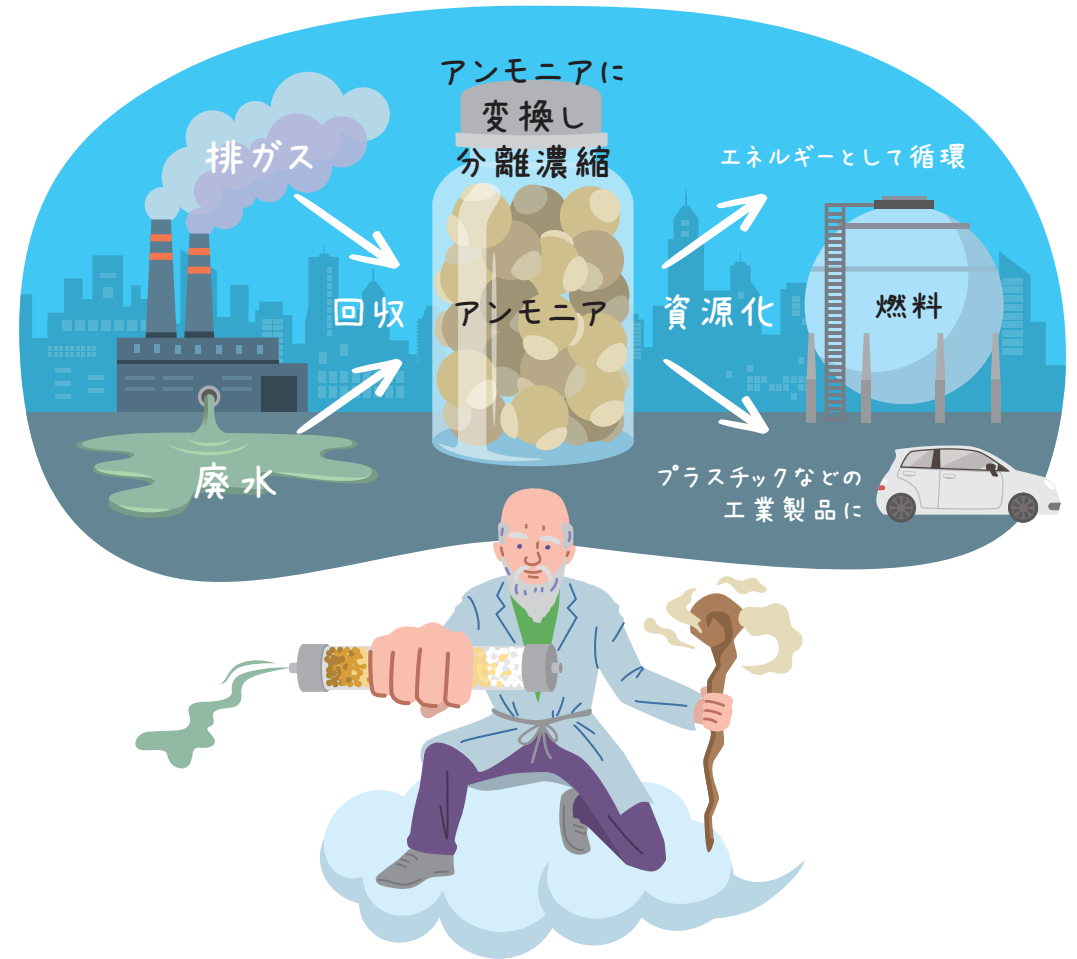


# 09 PROJECT

## 迷惑者を資源に！ リサイクル技術で 窒素循環型社会を実現

### 産業活動由来の希薄な窒素化合物の循環技術創出 —プラネタリーバウンダリー問題の解決に向けて

豊かさ引き換えに地球環境は悪化し、特に窒素廃棄物による環境汚染は、地球が許容できる臨界点(プラネタリーバウンダリー)に近いといわれます。化学肥料などの原料であるアンモニアは、私たちの生活に必要な窒素化合物ですが、排ガスや廃水として放出されると、窒素廃棄物として環境問題を引き起こし、その処理にも多くのエネルギーを要します。よって、地球環境再生と産業活動の両立には、**窒素管理**の下で窒素廃棄物をアンモニア資源に変換し、循環させる技術の確立が必要です。



北斎も愛した  
「プルシアンブルー」が、  
アンモニア吸着のカギでした。

川本 徹

産業技術総合研究所  
材料・化学領域 ナノ材料研究部門 首席研究員

浮世絵文化を代表する作品として世界的にも知られる、葛飾北斎の「富嶽三十六景」。用いられた顔料は、「プルシアンブルー」といって現代も使用されています。私たちは、この顔料がアンモニアの吸着に最適な物質であることを発見しました。実証試験では、頻回の使用でも吸着力が低下しないことや、吸着したアンモニアを取り出し資源として再生できることも確認しました。この優れた成果に基づき実用化のシナリオも生まれ、プルシアンブルーが彩る未来に期待が膨らみます。

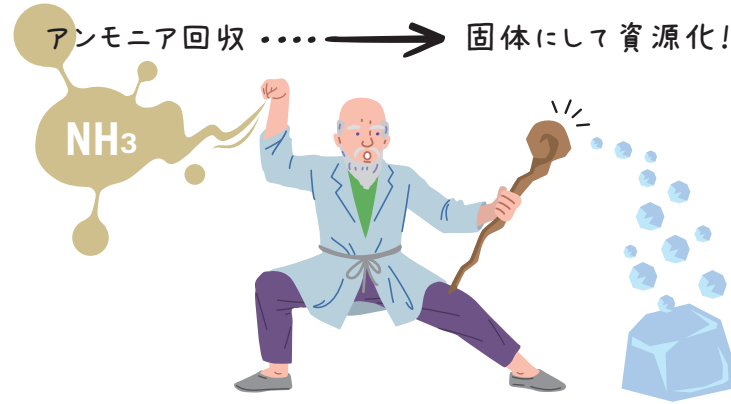
## 迷惑者を資源に! リサイクル技術で窒素循環型社会を実現

### >> 窒素資源循環への道

プルシアンブルーは、原子レベルで組成を変え、排ガス用と廃水用に吸着材を作り分けて、アンモニアを選択的に回収します。しかし、回収だけでは窒素資源の循環は実現できないため、排ガス中や廃水中に含まれる窒素廃棄物をアンモニア資源として利用できる形に変換する技術が必要です。そこで私たちは、排ガスでは触媒を使い、窒素廃棄物であるNOxなどを無害化し、アンモニアに変換するNTA(NOx to Ammonia)技術、廃水では生物反応を使い、アンモニウムイオンをアンモニアに変換する技術開発に取り組んでいます。

### >> 技術がもたらす光明

窒素廃棄物から変換されたアンモニアは、膜や吸着材を利用し濃縮します。濃縮したアンモニアは、プラスチックの原料や燃料などとして実



用化が可能です。特にアンモニア燃料は、CO<sub>2</sub>を排出しない脱炭素燃料であり、社会的ニーズの高いエネルギー資源の一つです。こうした変換・分離濃縮のプロセスを組み合わせた生産システムのプラント化により、窒素廃棄物を資源として役立てる「窒素循環型社会」の構築を目指すことは、環境汚染から地球を守るという大きな目標を達成に導くと信じています。

#### KEYWORD

### 窒素管理

窒素廃棄物による地球環境の汚染が深刻化している状況から、2022年の国連環境総会では、大気・水・土壌の汚染状況を調査・検討する、持続可能な窒素管理の必要性が確認されました。

2025

未来への歩み

## FUTURE VISION

### できたものから発売

まずは研究室での技術開発に注力。試行錯誤を繰り返し、実用化に向けた実験を進めます。工場での廃水再利用を目的に、アンモニウム吸着材の一部は販売を開始します。

2027

### 実用化まであと一歩

企業と連携してパイロット試験を開始します。窒素循環型社会の実現を見据え、大規模工場や下水処理場での廃水再利用システム構築を目指して課題を一つずつクリアします。

2029

### 目指せ窒素循環型社会

パイロットプラントを使用し、窒素廃棄物の回収から資源化までの一連のプロセスが、システムとして実現可能であることを示します。社会実装も見えてきます。

委託先

産業技術総合研究所(AIST)、東京大学、早稲田大学、東京農工大学、神戸大学、大阪大学、山口大学、キリンホールディングス(株)、(株)アストム、東洋紡エムシー(株)、(株)フソウ

プロジェクト  
紹介動画

<https://www.youtube.com/watch?v=IRgipqd6kZM&list=PLZH3AKTCrVsW02NDqRXLnSvVc5zqVDFAT>



# 10 PROJECT

## 強さとやさしさを 兼ね備えた “海に還る新素材”

### 非可食性バイオマス为原料とした海洋分解可能な マルチロック型バイオポリマーの研究開発

2050年までに海中のゴミの量が魚の量を上回るとの警鐘が鳴らされるなど、プラスチックゴミによる海洋汚染が深刻です。解決への取り組みの一つに、生物の働きで自然に分解される「生分解性」を持つ素材の開発があります。すでに実用化されたものもありますが、**生分解性プラスチック**では、強靱性と分解性の両立が課題となってきました。このプロジェクトでは、実用に耐え得る強度を持ちながら、特定の条件がそろったときにのみ分解される高分子材料(ポリマー)を研究しています。



思わぬ来訪者から、  
温かいメッセージが  
届きました。

伊藤 耕三

東京大学 特別教授  
物質・材料研究機構 フェロー

これまで非常に強靱なポリマーの開発に成功してきた私たちは、強靱性と分解性の両立を実現するために挑戦を重ねています。海中における分解性ポリマーの世界最大規模の実証試験では、実験用サンプルにイカが産卵するという、思いもよらぬ微笑ましいエピソードがありました。これは、自然界に歓迎されたということかな…と、生物が宿した新たな生命の息吹から、テクノロジーと自然が融合する未来への手応えを感じました。

## 強さとやさしさを兼ね備えた “海に還る新素材”

### >> 強くてやさしいは難しい

釣具や漁網、肥料の被覆材など、流れ込むプラスチックによる海への悪影響が懸念されています。微生物の働きにより自然に分解される「生分解性」はこれまでも研究されてきましたが、実用に耐え得る強靱性と分解性はトレードオフの関係になっています。理想的な生分解性機能とは、釣具や漁網などが意図せず海洋ゴミとなりその役割を終えたときにだけ、素早く完全に分解する機能です。

### >> 目標を達成に導くカギを発見

この研究では、生物由来の原料（バイオマス）を利用し、強靱性と分解性を両立したプラスチック製品や漁具の実用化を目指しています。転機は新素材の発見でした。ポリマー同士を繋ぐ結合部分に動的な仕



組みを取り入れ、外部からの力の集中を緩和することで強靱性が向上。一方、海の中で熱・酸素・水・酵素・微生物・触媒など、複数の刺激が同時に加えられたときのみ結合が外れ、分解開始のスイッチが入る「マルチロック機構」も備えることで、強靱性と分解性の“二刀流”を実現します。この新素材が普及すれば、地球環境問題の解決に大きく貢献できます。

#### KEYWORD

## 生分解性 プラスチック

素材のポリマーが微生物の働きで分解され、CO<sub>2</sub>と水になって自然へ循環していくプラスチックです。

2025

未来への歩み

## FUTURE VISION

### 具体的な最終製品の絞り込み

現在、環境面で世界的に大きな課題となっていて、実用化された場合には大きな社会的インパクトが期待できることを基準に、これまでアカデミアが開発してきた新しい素材や技術を組み込む製品分野を、参画企業と相談しながら具体的に絞り込みます。



2027

### 材料として必要な目標値の達成

各企業において、具体的な最終製品に必要な強靱性と分解性それぞれの数値目標について、材料レベルでの達成を目指します。また、「食用に適さないバイオマス」を原料に使用して製作するための技術も開発します。



2029

### 最終製品の試作と評価

強靱性と分解性を両立した具体的な最終製品の試作品を製作し、その性能を製品レベルで評価します。また量産化や低コスト化など商業化技術の確立に集中的に取り組み、プロジェクト終了後の速やかな実用化を目指します。

委託先

東京大学、三菱ケミカル(株)、(株)ブリヂストン、(株)クレハ、九州大学、名古屋大学、山形大学、(公財)地球環境産業技術研究機構、産業技術総合研究所(AIST)、愛媛大学、東京科学大学

プロジェクト  
紹介動画

<https://www.youtube.com/watch?v=NkzDwsgghNg&list=PLZH3AKTCrVsW02NDqRXLnSvVc5zqVDFAT>





PROJECT

# 釣り具も 丈夫な漁業資材も 海底で生分解

## 生分解開始スイッチ機能を有する 海洋分解性プラスチックの研究開発

釣り糸が切れたり漁業資材が海底に沈んだりすると、数百年、数千年の間、分解されずに海底に残ってしまいます。近年、それらのプラスチックを海洋生物が飲み込む被害や、細かく砕けた「マイクロプラスチック」による生態系への悪影響、さらにはそれらの海洋生物を捕食する人類に及ぶリスクも報告されています。海から聞こえるSOSに対し、この研究では、海中で素早く分解して無害化される新しいプラスチック素材の開発を目指しています。



海辺に散乱している  
釣り具を見たら、  
放っておけませんでした。

粕谷 健一  
群馬大学  
大学院理工学府 教授

釣りを趣味とする方は多いと思います。実は私もそのひとりです。釣りが好きで海を愛するがゆえ、釣り糸やルアーなどが海洋ゴミとなり散乱しているのが気になります。「何か手を打たなければ…」そんな思いで開発を続けているのが、海洋環境中でタイミング良くスイッチが入り、完全に生分解する素材です。様々なデータに基づき積み上げた研究が完成に近づき、潮騒の奏でが澄み渡る気配を感じています。

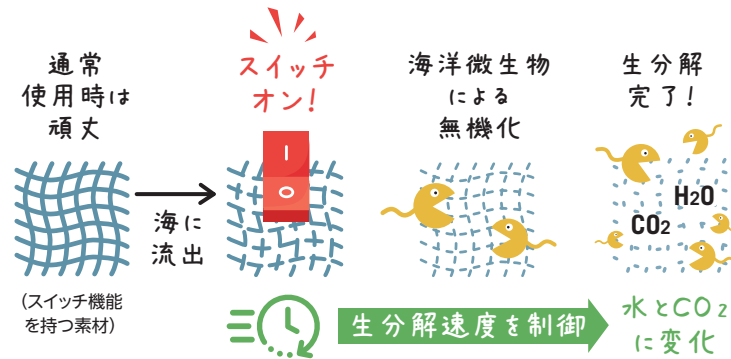
## 釣り具も丈夫な漁業資材も 海底で生分解

### >> 海底に着いたらスイッチ・オン

生分解性を持った素材は、使用する度に強度が下がり実用的とはいえません。一方、実用に耐え得る素材は、生分解しにくいという問題があります。この相反する性質をうまく利用したのが「環境に応答するスイッチ機能」で、酸素の有無がカギとなるスイッチ機能はその一例です。海洋表面や海洋中など、酸素の多い環境では高分子のまま強度が保たれ、海底の泥の中など酸素のない環境に入ると、それを合図に分解開始のスイッチが入り、低分子へと分解される仕組みです。

### >> 海のことは 海に聴け!

低分子化したプラスチックは、微生物が作る酵素の働きでより小さく分解され、さらにそれを微生物が食べることで生分解が完了します。



この研究では、あらゆる条件下で試験を行い、プラスチック周辺の微生物の群れ(プラステイスフィア)について、数、種類、生産する酵素、代謝の仕組みなどを「次世代シーケンサー」という装置により遺伝子レベルで解析。深海を含む広い海域の検証で構築したデータベースは、「微生物に食べられやすい」プラスチック作りに役立っています。スイッチ機能を持つプラスチックから漁業資材を実用化し、海洋汚染問題の解決に貢献します。

## KEYWORD

### プラステイスフィア

微生物はなんらかの基盤に付着する性質があり、中でもプラスチックを基盤とした微生物の群れを「プラステイスフィア」と呼びます。生分解プロセスを進めるためには、プラステイスフィアをうまく制御することが重要です。

2025

未来への歩み

## FUTURE VISION

### スイッチ機能の組み込み準備

5種類以上の分解スイッチ機能を実証します。3種類以上のスイッチ機能を組み込むことができる、バイオマス由来の生分解性基盤樹脂の合成技術を確立します。

2027

### 次々に機能を確立し社会実装へ

スイッチング技術が狙い通りに機能する、新しい生分解性ポリマー素材の合成技術を9種類以上確立します。また企業と協力し、プラステイスフィア構造を制御する2種類の物質の試作を進め、研究データに基づく社会実装を推進します。

2029

### 機能向上へ探究は続く

スイッチング機能の発現後、30℃の海水において半年で90%生分解される新たなプラスチック材料を3種類以上開発し、深海を含む海洋での生分解性を実証します。バイオマス、CO<sub>2</sub>を原料とする材料で、これらの機能を持った4種の試作品を完成させます。

委託先

群馬大学、東京大学、東京科学大学、  
理化学研究所、海洋研究開発機構 (JAMSTEC)

プロジェクト  
紹介動画

<https://www.youtube.com/watch?v=FJauUV9fMQg&list=PLZH3AKTCrVsW02NDqRXLnSwVc5zqVDFAT>

