



微生物によるCO₂固定の可能性を検証 見えてきた再資源化への道筋

RITEでは、工場などの固定発生源を主な対象としてCO₂を回収・再利用する「生物的CO₂固定化プロジェクト」を1990年から展開してきた。ここでは、今年度で終了するこのブ

プロジェクトの技術成果と将来展望をレポートする。RITE・生物的CO₂固定化プロジェクトの池上雄二技術部長に話を聞いた。

研究開発の枠組み

生物的CO₂固定化プロジェクトは、火力発電所や工場などの固定発生源から大量に放出されるCO₂を、細菌や微細藻類を利用して固定化するとともに、有用物質として再資源化することを目的としている。




そのため同プロジェクトでは、生物的CO₂固定化 = 光合成を効率的に行う細菌・微細藻類の探索・育種、光合成機能を最大限に発揮させるための高密度大量光培養リアクタ（バイオリアクタ）の開発、CO₂の生物的固定によって生成される物質の有効利用、全体システムの構築という枠組みで研究が進められた。

1万点をサンプリング、有望藻類3種を発見

探索した光合成細菌、微細藻類の数は1万点にのぼった。火力発電所などの排ガスのCO₂濃度は10～15%と大気の数百倍もあるので、この条件下のCO₂固定には高等植物よりも高い光合成能力と耐環境性をもつ微生物が適している。光合成微生物はさまざまな環境に適合して生息しているので、可能な限り多様な場所（炭酸泉、湖沼、河川、温泉、土壌、沿岸・外洋海域など）からサンプルを採取。「サンプリングは文字どおりの人海戦術だった」という。採取した微生物は、予備培養の後、高CO₂濃度、高温などの条件でスクリーニング、有望株を7つまで絞り込んだ。この中で

特にCO₂固定速度が速い、培養が容易という特徴を示したのが、【図1】の4株である。

図1 探索・育種された高効率光合成細菌と微細藻類

	<i>Rhodospseudomonas palustris</i> No.7 光合成細菌 高い光合成能力、赤外領域を利用
	<i>Chlorella</i> sp. UK001 緑藻 真核光合成微生物としては最も速い生育速度
	<i>Synechococcus aquatilis</i> SI-2 ラン藻 UK001株と同等のCO ₂ 固定能力
	<i>Botryococcus braunii</i> SI-30 緑藻 石油類似の炭化水素蓄積

ついで、これらの4株の最適培養条件を確立するとともに、遺伝子操作や細胞融合などのバイオテクノロジー技術も用い、CO₂固定能力の向上、有用物質生産能力の強化・付加も図った。そして、これまでになく高い安定したCO₂固定能力を示す藻類3株を以下に述べるリアクタ試験に採用したのである。

森林の約10倍のCO₂固定能

一方、これらの微生物の光合成機能を最大限発揮させるために、太陽光培養リアクタの研究開発も進めてきた。

リアクタの設計においては、次の3つの方式が考案された。



直接太陽光を受ける「直接受光方式」、太陽光を集光し光ファイバを介して発光担体を送る「集光伝送方式」、さらに集光伝送方式では利用できない散乱光も効率的に活用するための「ハイブリッド方式」が考案された。

これらのリアクタに同定された3つの藻類を植え付け、実験を重ねた結果が、【表1】である。

プロジェクトでは、「このバイオリアクタを用いたCO₂固定能の達成目標値を、地表の植物、特に数十年生の森林との比較で検討」した。むろん、ひと口に森林といっても、地域差や樹齢によって違いがある。プロジェクトでは、温帯地方の森林（落葉樹林）における年間平均の有機物生産量から算出したCO₂固定能=5g-CO₂/m²/dayの10倍、つまり50g-CO₂/m²/dayを目標値として設定した。もうひとつ、光のエネルギーをどれくらい利用できたかという視点からも検討し、森林の光合成有効放射利用率を約1%として、やはりその10倍を目標値として設定した。

【表1】からわかるとおり結果的に、直接受光方式、ハイブリッド方式で森林の約10倍のCO₂固定能を達成した。集光伝送方式では光の集光ロス（ミラーの反射ロス）や伝送ロス（光ファイバーでのロス）があり目標の約半分となったが、光合成有効放射利用率では森林の10倍を上回った。また、バイオリアクタの実用化に向けて、20リットルと200リットル規模のプラントデータをベースに、スケールアップに必要な藻体の増殖シミュレーションプログラムを作成。シミュレーション結果と実験結果がほぼ一致し、バイオリ

表1 プロジェクト開発のフォトバイオリアクタの性能

リアクタ形式	適用藻類	リアクタ性能		適用
		CO ₂ 固定能 (g-CO ₂ /m ² /d)	光合成有効放射利用率(%)	
直接受光方式 パネル型	<i>Synechocystis aquatilis</i> SI-2 <i>Botryococcus braunii</i> SI-30	51(太陽光) (64×太陽光)	6.8	-CO ₂ 大量固定
光導入型	<i>Chlorella</i> sp. UK001	47(太陽光)	8.7	-CO ₂ 大量固定
ハイブリッド方式 二重壁ドーム型 平板式 チューブ 平板式 パネル型	<i>Chlorella</i> sp. UK001	50(実績+清水データ) 50(シミュレーション) 50(シミュレーション)		-CO ₂ 大量固定 -CO ₂ 大量固定 -CO ₂ 大量固定
集光伝送方式 平板式(200L)	<i>Chlorella</i> sp. UK001 <i>Synechocystis aquatilis</i> SI-2	25(人工光) 26(人工光)	11.4* 11.7*	-高付加価値物質の 光合成生産
内部照射・攪拌式 (1,100L)	<i>Chlorella</i> sp. UK001	23(シミュレーション)	11.0*	-特殊藻類(付着性) の培養

注) 自然林: 1.1%/5g-CO₂/m²/d

*: 光分散体から放射された可視光を基準とした値
他は太陽光全体の中の可視光を基準とした値

アクタの設計ツールとなり得ることを確認した。

その結果「森林の10倍のCO₂固定能、つまり森林の1/10の面積で森林と同じCO₂固定化が可能なりアクタをつくることができる」という見通しを得たのである。

CO₂固定生成物・6つの有効利用分野

例えば100万kW級のLNG火力発電所の場合、仮に藻類が排出CO₂のわずか1%を固定したとしても、藻体の生成量は1日約30tにもなる。「このCO₂固定による生成物を再生資源として利用しない手はない。加えて、CO₂固定生成物の有効利用は、在来製品の代替による化石燃料の節約につながり、それにとまなうCO₂の発生を抑制できるという大きな意味をもっている」のである。

表2 CO₂固定生成物の有効利用

有用物質	プロジェクト供試株	有用性(効果)	単位製品重量当たりのCO ₂ 排出量	従来製品生産品
1. 燃料 ・抽出油 ・固形燃料	<i>Chlorella</i> sp. UK001 <i>Botryococcus braunii</i> SI-30	燃料としての実用性 確認	0.06kg-CO ₂ /kg重油	74百万kL/y(H9)
2. 飼料	<i>Chlorella</i> sp. UK001	飼養試験により産卵鶏 への給与により生産性、 卵黄色向上効果確認	1.21kg-CO ₂ /kg飼料 (トウモロコシ)	飼料:25百万t/y(H7)
3. 肥料	<i>Chlorella</i> sp. UK001	植物栽培試験により施肥 効果をj確認	0.42kg-CO ₂ /kg飼料 (化成肥料)	複合飼料:2百万t/y (H9)
4. 建材	<i>Chlorella</i> sp. UK001 <i>Botryococcus braunii</i> SI-30	PVCとしての成形性、 実用性確認 HDPE成形体も実用 性確認	2.83kg-CO ₂ /kg可塑剤 (ジオクチルフタレート)	PVC:2百万t/y PE:3百万t/y(H9)
5. コンクリート 混和剤	<i>Cyanotece halobia</i> <i>Prasinococcus capsuratus</i>	コンクリート分離低減 効果確認	7.85kg-CO ₂ /kg多糖 (カドラン)	セメント:91百万t/y 生コン:134百万t/y (H9)
6. 生理活性物質 その他 ・二次カロチノイド ・植調物質	<i>Scenedesmus</i> sp. <i>Botryococcus braunii</i> SI-30	生理活性は既知 SI-55:トマトの糖度向上 効果確認 SI-52:化粧品基剤への 適用	2.59kg-CO ₂ /kgアスタ キササンチン	トリアコタンノール: 商業生産されていない

プロジェクトでは、この有効利用の分野として、飼料、肥料、建材、コンクリート混和剤、燃料、植物生長調節剤の6分野で実用性を検証した(【表2】参照)。以下はその成果概要である。



クロレラ乾燥品

飼料: クロレラを鶏の飼料に配合し、鶏卵の生産量と品質の試験を実施。鶏卵の生産量増加や黄身の色彩、形状でプラスの効果を確認。



CO₂リサイクル その可能性と未来

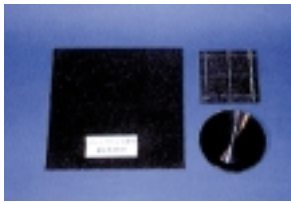
REPORT 1

生物的CO₂固定化プロジェクトの成果と展望



クロレラコンポスト

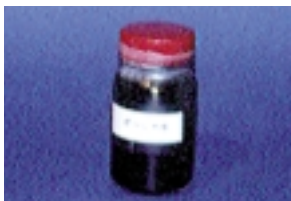
肥料：オガクズを副材料としてクロレラをコンポスト化し、有機肥料とする。小松菜などの栽培で生長促進効果を確認。



PVC/クロレラ混合 建材用成形体

建材：クロレラを高密度ポリエチレンとポリ塩化ビニルに添加し、内装タイルなどのプラスチック建材として利用できることを確認。

コンクリート混和剤：プラシノコッカス属などから抽出される多糖類をコンクリートに混入させることにより、セメントと骨材の分離を低減させる効果が生まれる。既存の市販品と同等以上の増粘性、骨材分離低減性をもつことを確認。



ポツリオコッカス油

燃料：基本的にはどの藻体でも利用可能だが、ポツリオコッカス属の炭素含有量は70%を超えており、燃料への利用に適している。藻体から抽出した油の熱量はC重油相当であり、硫黄分が少なくクリーンな燃料としても有効であることを確認。

植物生長調節物質：一般に植物ホルモンと呼ばれる物質と同様の効果をもつもので、プロジェクトでは、ポツリオコッカス属から抽出されるトリアコントロールがトマトの糖度を向上させる効果があることを確認。

植物生長調節物質：一般に植物ホルモンと呼ばれる物質と同様の効果をもつもので、プロジェクトでは、ポツリオコッカス属から抽出されるトリアコントロールがトマトの糖度を向上させる効果があることを確認。

全体システムの構築

微細藻類による高濃度CO₂の光合成固定化システムは、CO₂ガスを大量に排出する場所で直接処理できるため、火力発電所や製鉄所、セメント工場などでの実用化が期待されている。しかし一般的には、システムのエネルギー源である太陽光はエネルギー密度が小さく、微細藻類の光合成速度や光エネルギーの利用効率は低い。実用化という点からはこの問題が非常に重要な位置を占める。そこでプロジ

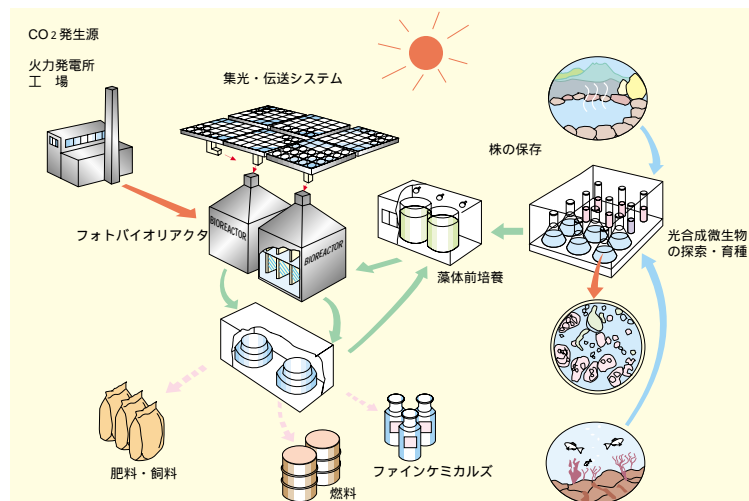
エクトでは「全体システムを構築した上で、エネルギー収支、CO₂収支の両面から検討を加えた」という。

全体システムの構築では、光合成微生物として、培養が容易であり、大型のリアクタや野外培養に適しており、生産された藻体の有効利用の検討も多く行われたクロレラ属UK001を想定。リアクタとしては、構造が簡単で経済的にも有利、光利用効率に関してもよい結果が得られたパネル型リアクタ。システムを設置すべきCO₂固定発生源としては、100万kW規模のLNG火力発電所を想定した。LNGは排ガスに有毒物質を含まないクリーンな石油代替エネルギーとして注目されており、CO₂を固定して得られた生産物の有効利用に有利だからである。パネル型リアクタは発電所の建屋の屋根に設置、設置面積は約3,000m²としている。

エネルギー収支とCO₂収支

システムの有効性を評価するには少なくとも、「エネルギー収支」と「CO₂収支」の検討が必要である。

「エネルギー収支」は、排ガスの供給、クロレラ属UK001の培養、分離・濃縮などプラントの運転に必要な電力を発電する際に発生するCO₂の量と、実際に固定されたCO₂の量とを比較し、実質的にCO₂を固定するシステムであるかどうかを評価する。



生物学的CO₂固定化・有効利用システム

例えば、前述の約3000m²のパネル型リアクタの場合、一日に固定できるCO₂量が約150kgになるのに対して消費動力は75kWh。この電力を得るために発生するCO₂量は38kg（LNG火力発電の場合のCO₂発生量を0.51kg/kWhと想定）であるので、CO₂固定量は排出量の約4倍になり、構築したシステムが実質的にCO₂を固定しているシステムであることがわかる。

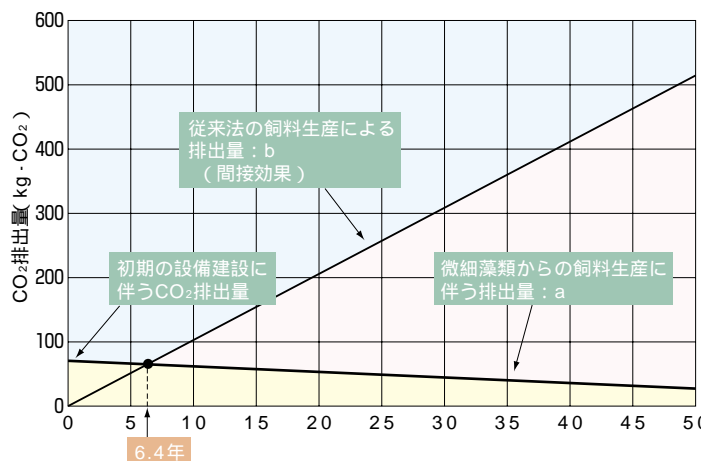
「CO₂収支」では、この設備をつくる際に必要な材料の生産や建設作業にともなって排出されるCO₂、つまり初期CO₂発生量を考慮に入れて収支を評価する。これは、太陽電池の「エネルギー・ペイバックタイム」という考え方を導入したものであり、LCA-CO₂と呼ばれることもある。

ここでのペイバックタイムは、藻体のCO₂固定量にそれを飼料として既存飼料に代替させた時の間接的CO₂削減量を加えた値が、プラントの初期CO₂排出量とその後の運転に必要な電力に伴うCO₂排出量をたした値と同等となる年数を算出したもの。【図2】から6.4年でペイバックできることがわかる。太陽電池の場合には火力発電所に代替させることを想定するとペイバックタイムは7~8年という試算がある。生物的CO₂固定の本システムもCO₂収支の点で採算が合うことを示している。



パネル型リアクタによるCO₂固定実験（MBI分室・釜石市）

図2 パネル型リアクタシステムのペイバックタイムの試算例



「パネル型リアクタシステムのペイバックタイム計算法」
 実際の排出量はa - bで表せるのでa - b = 0となる時がペイバックタイムとなる。
 間接効果とは：飼料作物栽培に伴う残渣と肥料の分解等による温暖化効果がなくなること。

火力発電所排出CO₂の4.6%を削減可能

では、このシステムでどれくらいのCO₂固定化が実現できるのだろうか。池上技術部長は次のように答える。

「100kWのLNG火力発電所に設置面積1km²のプラントを設置した場合、年間約18,000 tのCO₂固定が可能で、飼料の間接的CO₂削減効果を計算に入れると、火力発電所が排出するCO₂量の約4.6%を削減することができる」

また、CO₂を再資源化するという視点からは経済的に成り立つのだろうか？

「例えば飼料として有効利用を考えた場合、現状では、その製造コストは125円/kg、市販の飼料価格が20~40円/kg。コスト面から飼料の製造プラントとしては成立しない。しかし高付加価値物質を抽出し、その残渣を利用するなどの工夫で、製造コストの一部を回収することは可能である。さらには、現在、炭素税導入の動きがあり、すでに北欧では90年代初頭に150米ドル/tという高率な炭素税が導入されている。プラントのスケールアップ、炭素税導入などを視野に入れれば、将来、経済的にも成り立つシステムになる可能性はある」。池上技術部長はこう締めくくった。