

地球温暖化と CO₂固定の技術



森林破壊と化石燃料の使用によって、
大気中に放出された大量のCO₂は、
本来、地球外に放射されるはずの赤外線を吸収し、
地球全体の平均気温を引き上げつつあるといわれる。
海面を上昇させ、農業に打撃をあたえる
大気中CO₂の急激な増加を食い止める手段はあるのだろうか。
さまざまな研究例から、その可能性を探ってみる。

海洋処理、化学固定、生物固定、砂漠緑化…… さまざまに模索されるCO₂固定のノウハウ

COP3では、2050年頃をピークに化石燃料の使用を半減させ2300年頃までに大気中のCO₂濃度を550ppmで安定させるという努力目標が示された。シミュレーションによれば、その目標が達成できたとしても平均気温は2～3℃上昇することになっている。COP3の目標を達成できたとしても地球温暖化は続く、というものである。そうした背景のもと、排出削減努力に加えて、固定という発想が生まれ、さまざまな角度から研究が始められている。今回はそれらCO₂固定のテクノロジーに目を向けてみる。

将来の目標濃度は550ppm

世界から170以上の国と機関の代表が集まった昨年の京都会議（気候変動枠組条約第3回締約国会議／COP3）では、地球温暖化をもたらすもっとも主要な物質である二酸化炭素（CO₂）の大気中濃度を、将来550ppmで安定化させることを目標に置いた。現在の濃度は約360ppm。産業革命当時（1760年頃）のCO₂濃度は約280ppm程度だったことが南極の氷柱の気泡を調べた結果分かっており、200年少々で60ppm分のCO₂濃度が上昇しているということである。

550ppmという目標値は、化石燃料の使用を今の半分にできてやっと達成できる目標値とされており、目標年限は300年先の話とはいえ、さまざまな困難が予想される数字である。もし550ppmに安定できた場合でも、地球の平均気温は2～3℃上昇する。3℃というたいした数字ではないように見えるが、平均気温でこれだけ上昇するというのは、かなり大きな変化である。数世紀前にあったといわれる小氷期でも平均では1℃低い程度で、それでも農作物にはかなり深刻な影響が出ている。削減努力をせずにCO₂排出量がこのまま増えていった場合、2100年に大気中の濃度は1000ppmをこえるとの予想もあるようだ。

化石燃料使用への危機感が高まる一方で、最近の研究ではCO₂の排出源の第一のものは化石燃料ではないという見方も出てきた。CO₂の発生源については、炭素の同位体比をしらべることで特定できるが、ある研究では大気中のCO₂を調べたところ、植物起源と考えられる炭素の比率がきわめて多いという結果が出た。だとすると、森林破壊、つまり熱帯雨林の破壊と砂漠化こそが温暖化の元凶だということになる。もしそうならCO₂削減へのシミュレーションは、COP3とはもう少し形の違うものになりうる可能性も出てくる。

化石燃料からCO₂として排出される炭素の量が約55億t/年（炭素換算）であるのに対し、植物の世界では大気との間に約1000億t/年以上の炭素の交換があるとされている。地球上の

全植物がかかわっている炭素の量は、人類のあつかう化石燃料の炭素の量とはふたケタちがうというわけだ。炭素の循環には、さまざまなメカニズムが交錯しているうえ、まだ分かっていない部分もあるため、この分野での研究の進展が待たれる。

技術でCO₂を固定するという発想

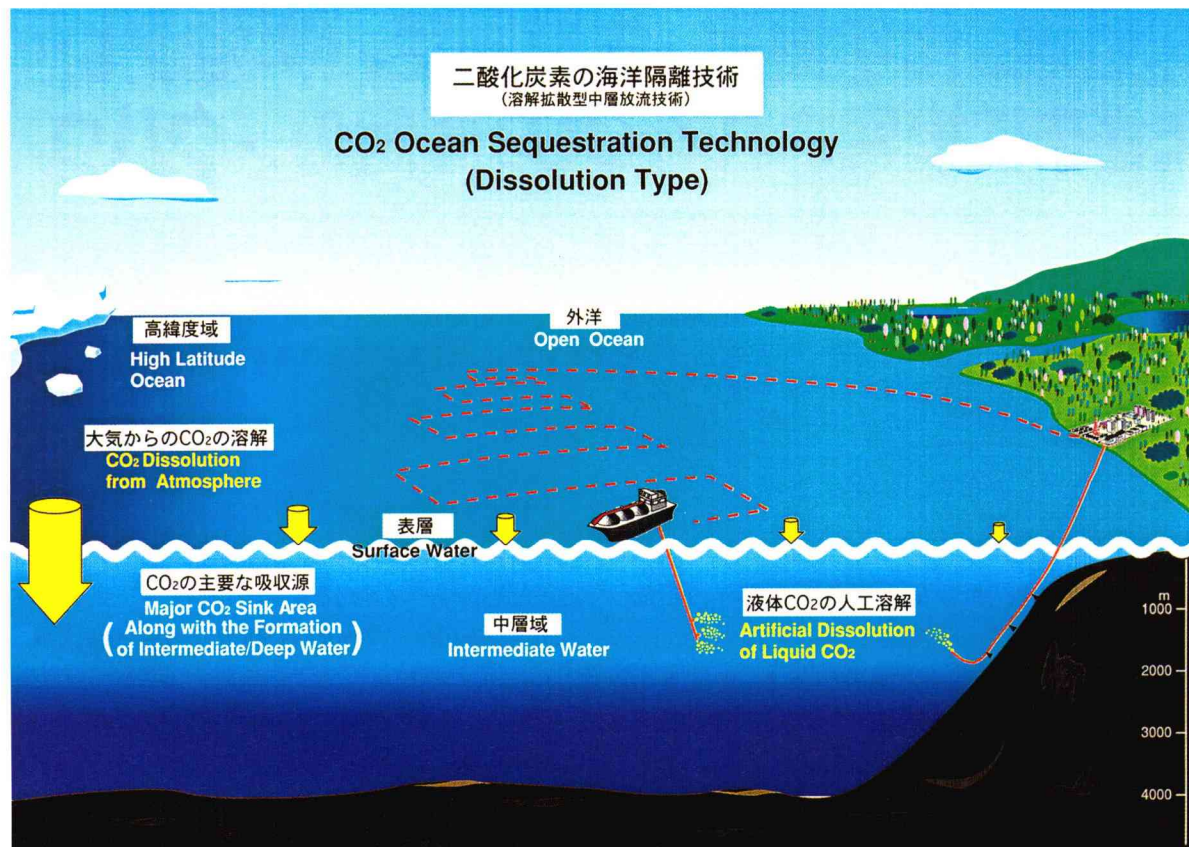
日本のCO₂総排出量は、95年度で3億3,200万t（世界の約5%）と計算されている。COP3を受けて日本はこの数字を2000年までに1990年なみの2億9200万tまで削減することを目標とした。COP3では欧州も削減目標を掲げたが、米国は削減努力をしても20%は増加するとこたえ、カナダやオーストラリアも削減が難しいとしている。足並みがなかなか揃わない中で、2050年代をピークとして化石燃料の使用量を半減させてゆこうというシミュレーションをもとに合意されたのが550ppmという目標値である。

CO₂を出さないようにするという目標は、経済的な落ち込みに苦しむ今の日本にとって、さらに大きな足枷となる可能性は否定できないだろう。2000年までに原子力発電所を16基増やして対応しようという案もあるが、これとて容易ではない。

もし排出源を削ることに限界があるとすれば、技術的に固定してゆく方向が模索されるのも必然的なことである。そうした社会的な背景の中で、今、CO₂固定技術に注目が集まっていると考えられるだろう。

陸にCO₂を固定する技術的方法としては、地中の帯水層に圧入し封じ込めるというやり方がある。北海にあるノルウェーのスレイブナーウエスト・ガス田では、採掘した天然ガス中に含まれる10%のCO₂を分離し、海底の帯水層に入れている。もともと天然ガス輸送ではパイプラインのメンテナンス上CO₂の分離が必要なうえ、ノルウェーでは炭素税がすでに導入されており、そのため地中処理が積極的に導入されることになった。

これにきわめて近い技術に老朽油田にCO₂を吹き込むことで、可採量を増やす技術がある。枯渇したと思われる油田でも埋蔵量の6割近く残っているケースもあり、ここにガスを



海洋処分のイメージ。

入れると残った石油をさらに取りだせるようになるという。水蒸気や天然ガスを吹き込むこともあるようだが、CO₂を使用したほうが効果が高い。

こうした地中処理技術は既存のものだが、いずれも「生産工程で必要」な処理として導入されている。したがってもし純粋にCO₂の処理だけを目的に行うとすると、はたして産業として成立するのかが難しい。またサイト・スペシフィック（特殊な立地条件）な問題もある。スレイブナーウエストの場合、CO₂の発生場所のすぐ近くに処理可能な地層があり、周囲が海であることから、投棄後あやまって吹き出したとしても、問題は深刻にはなりにくい。もしいたるところに人が住んでいる日本で考えるとすると、住宅地に吹き上がってしまうようなことがあっては問題である。特定の処理場まで運ぶとすれば、そこでまた燃料が消費される。輸送は現状でも日本のCO₂排出量の約20%を占めている。候補地には真水の帯水層は水資源として確保しておきたいことから塩水層を選ぶことになるが、候補地をしぼるのが難しいことも予想される。

以上のようなことが十分に議論されているわけではないが、日本ではむしろ「海洋処分」が研究の中心になっている。海洋処分には、いくつかの方法があるが、NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）の委託研究という形でRITE（地球環境産業技術研究機構）が中心となり、工業技術院の

機械技術研究所と資源環境技術総合研究所、電力中央研究所などの協力で研究が行われている。

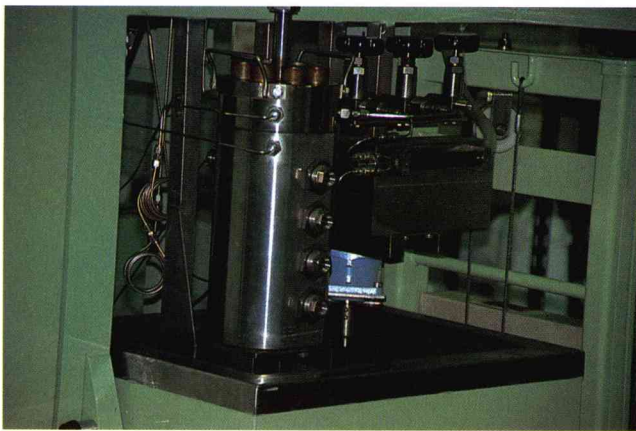
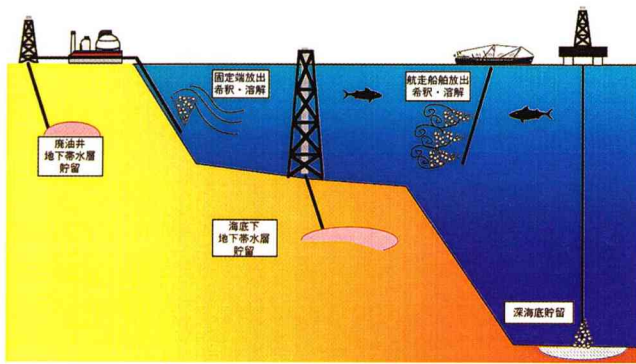
海洋に吸わせる手段の模索

「海洋がCO₂を受け入れるキャパシティは、大気の50～60倍はあるんです」液化CO₂の海中での挙動を研究している機械技術研究所の西尾匡弘氏は、海洋処理の可能性をそんなふうに解説する。「しかし海にはフタがあって、なかなか自然の状態では溶け込みにくい。このフタの下に入れる必要があるんです」という。

海の水は大部分の海域で層になっていて（成層構造）、CO₂を溶かしにくい表層水がフタの作用をするため下の層までおりてゆくのに時間がかかる。大気で増えたCO₂は、いずれは海に吸収され大気と海のCO₂濃度は平衡に近づいていくと考えられるが、それには1000年単位の時間が必要とされるという。そこで人為的に中層以下の海中にCO₂を入れてやろうというのが海洋処分の発想である。

入れ方として、海水に溶かし込む方法と、液化して深海底の窪地に溜めておくという方法が検討されている。

海水に溶かし込む方法としては、第1にパイプラインを使って深層に気体または液化したCO₂を圧力をかけて吹き込むというものがあげられる。西尾氏は、生物への影響を緩和・低



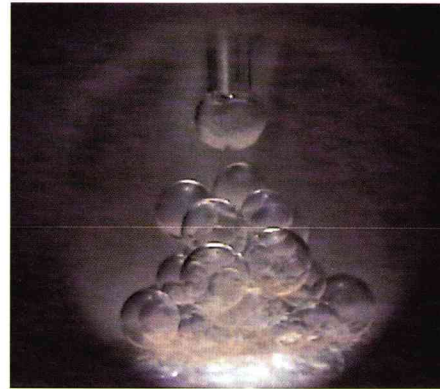
深度7000mの海洋環境を再現する装置。液化したCO₂を滴下して挙動観察を行う。CO₂液滴の表面に膜状のハイドレートができる様子を観察できる。(機械技術研究所)。

減する意味で、船で移動しながら海中に吹き込んでいくムービング・シップ方式を検討している。

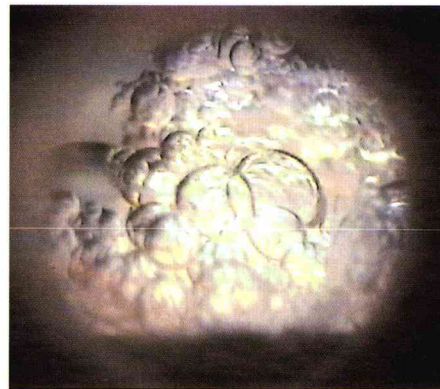
海水に溶かし込む場合、心配されるのは海水の酸性化による生態系への影響である。CO₂は水に溶けると酸性となる。いずれは拡散していくが局所的にはpHが大きく下がる可能性も出てくる。pHが7を切ると生物に影響が現れるとされており、5を切るとかなりの生物が生存できなくなる。したがって海洋処分する場合には、そうした生態系への影響を十分に調査したうえで行う必要があると考えられている。稀釈するのか、あるいは拡散させるのか。または液化して深層に投入した場合、海水との間にハイドレート（水和物）の膜ができるが、その膜を利用して溶け込む速度を制御しうるのは、そうした基礎研究が機械技術研究所では深度5000mの深海の環境を再現できる実験装置を使って行われている。

液化CO₂を海底に貯留する方法は、海底に諏訪湖くらいの大きさの窪みを見つけ、そこに流し込もうというもので、深海（3000m以深）では海水よりもCO₂の比重が重いため窪地に溜まって上がってこなくなる。またCO₂と海水との界面にはハイドレートの膜ができるため、CO₂の海水への溶け出しが抑制できるといふ。

CO₂の海洋溶解実験は、2000年にハワイで日米ノルウェー他の共同によって開始される計画が立てられており、そこで得



深度4,800mの深海条件に液化したCO₂を滴下した挙動観察の一例。CO₂液滴の表面に膜状のハイドレートができ、ブドウ状にたまる様子が観察された。(機械技術研究所)



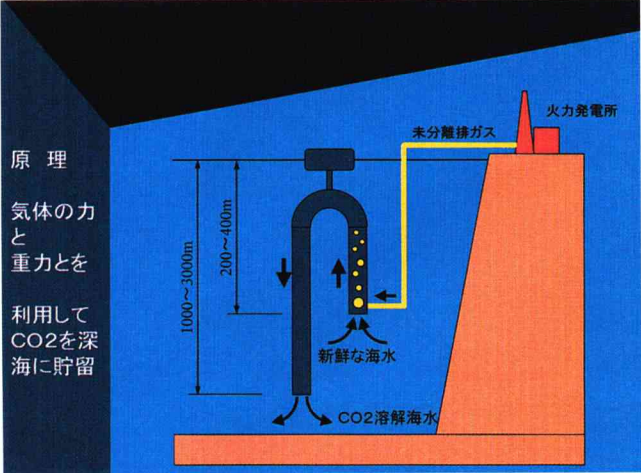
深度4,000mの深海条件に液化したCO₂を噴出した観察例。細かいCO₂の液滴のまわりにハイドレートが生成されてたまる様子が観察された。(機械技術研究所)

られるデータに期待がかけられている。

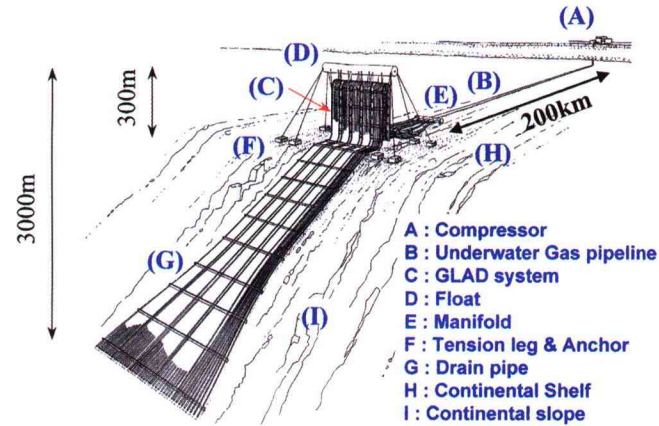
もっとローコストで？

資源環境技術総合研究所の斎藤隆之氏は海洋溶解技術の研究を進める過程で、よりローコストで合理的にCO₂を処理するノウハウを追究しGLADというシステム（Gas Lift Advanced Dissolution System）を考案し、日米特許をすでに取得した。「鉄鋼のような国際競争力が必要とされる産業ではCO₂処理がコスト負担になっては、きわめて不利になるはずだ。多くの産業ではできるだけお金をかけずにCO₂を処理する必要があります」（斎藤氏）。GLADは気体のCO₂を溶解パイプの中で浮上させ、その流れをパイプをターンさせることで下向きに変え、CO₂の溶け込んだ海水を深層まで流し込もうというものである。こうしたガスリフト方式は、石油の移動などではすでに利用されているもので、しくみとしては観賞魚の水槽でエアーの浮上運動によって水を上げる方法によく似ている。GLADでは、CO₂がパイプを上昇する間に海水に溶け込んでいく点に特徴がある。ガスの浮上流を下方向の運動に変えて降下させた後、CO₂が溶け込んで比重の重くなった海水は自重で深海まで降りていく計算だ。いわばガスの本来もっていたエネルギーを流し込みの動力に使うことで、液化や圧入のためのエネルギー・コストを節約しようというシステムである。

GLADシステムは現在、資源環境技術総合研究所と大阪大学、徳島大学のネットワークで研究が行われ、ケーススタディ



GLAD システムの原理。



GLAD システムのイメージ。

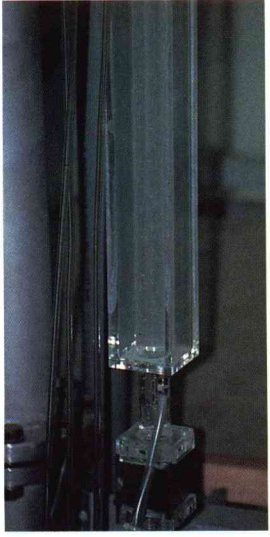
を住友金属工業が担当しているという。液体CO₂の直接溶解に比べて酸性化の問題は緩和されるというが、実用化までには、生物への長期的影響が十分に調査される必要があるという。

海水のpHを下げてしまうCO₂だが、海底に沈殿している炭酸カルシウムが溶け出したアルカリ性の水溶液と反応することによって、中和作用も期待できるかもしれないという。「炭酸カルシウムの層は海の3分の1以上の面積（おもに大西洋）にわたり、数100mの厚さで積もっています。その上の10cm分の厚さを使用するだけで、全化石燃料分のCO₂水溶液を中和できる計算です。しかし中和にかかる時間が十分に速いかどうかという問題もあります」（電力中央研究所・大隅多加志氏）。「各種金属イオンの溶け込む比率は、ほぼ一定ですから、どの程度が中和に働くかは、その他の金属の量とも関係してくるでしょう」（前出・西尾氏）。

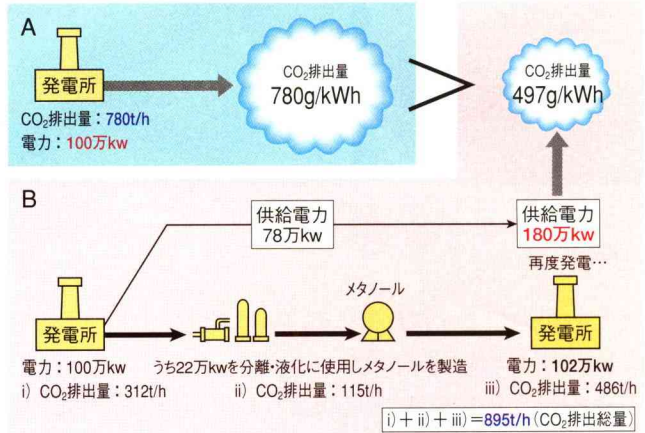
海洋処分で心配される生物影響を避ける方法として海底の地層、しかもメタンハイドレート層にCO₂を入れてしまおうという研究もある。大阪大学基礎工学部の大垣一成助教授らが研究している技術で、メタンよりもCO₂のほうがハイドレートになりやすい性質をもつため、メタンハイドレート層に液化



GLAD システムの実験設備（資源環境技術総合研究所）。



実験設備によるガスリフトの様子。CO₂の泡がだんだんに溶けて小さくなっていく様子が分かる。



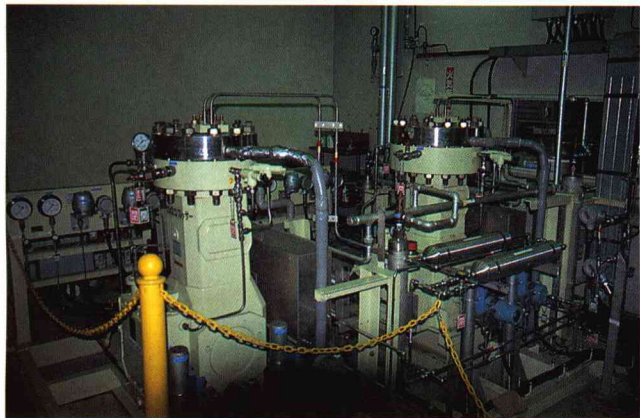
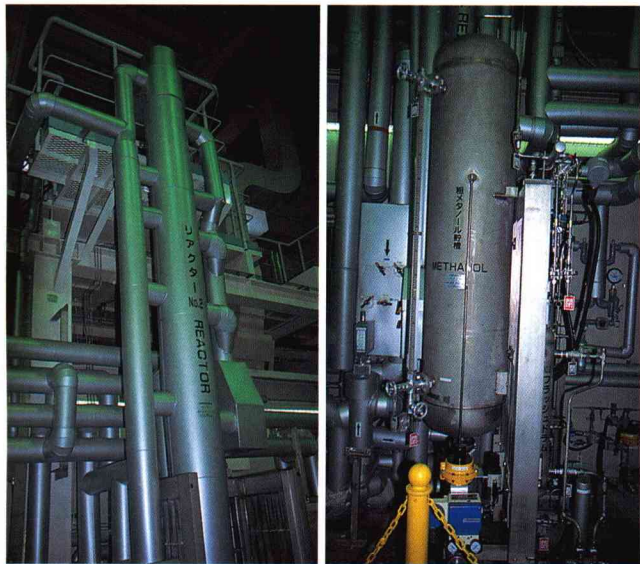
Bのメタノールを有効利用する方法では、供給電力あたりのCO₂排出量を抑えることができる。鍵は水素製造ノウハウに……

CO₂メタノール化のメリット。

CO₂を注入してメタンと置換させ、メタンガスを資源として取り出そうという。現状、CO₂とメタンの置換速度の問題や、メタンハイドレートがある深海底での掘削技術など、解決されねばならない問題が多くどちらかといえば将来へ向けての夢の技術といえそうだ。またメタンハイドレート層の掘削過程で崩落が起こった場合など、大量のメタンが放出される可能性を危惧する声もある。メタンの温室効果はCO₂以上であるため、これはこれで慎重さが必要とされる技術のようである。

メタノールに変えて再利用

NEDOのプロジェクトでは、CO₂をメタノールに変えて有効利用してゆこうという研究がRITE（地球環境産業技術研究機構）の化学的CO₂固定化研究室への委託という形で進んでいる。これは水力や太陽の電力を使って水素を製造し、その水素と排気から分離したCO₂を反応させて（接触水素化反応）

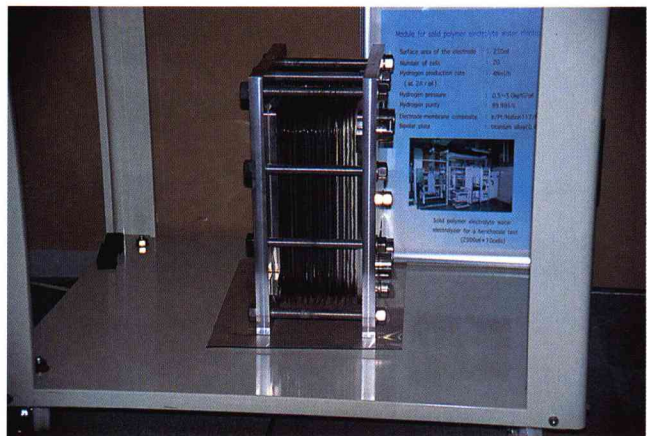


CO₂からメタノールを製造できる世界最大級の実験装置（地球環境産業技術研究機構）。

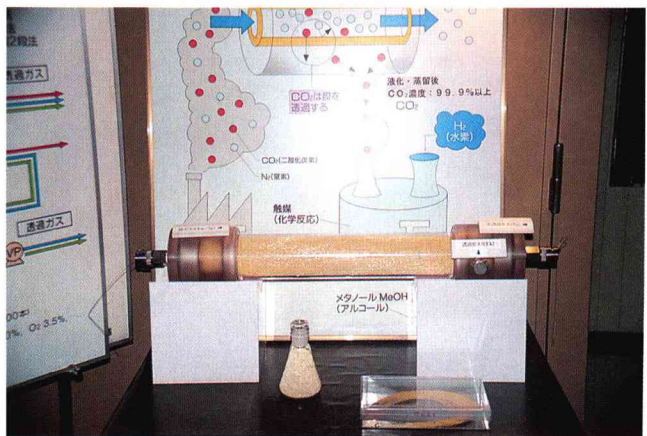
メタノールを製造しようというもので、製造されたメタノールは、再度燃料として使用する。せっかく固定したものをまた燃やすのでは固定の意味がないようにも思えるが、トータルとして1kWhあたりのCO₂排出量を減らすことができるという。「実用化にあったって水素をいかに安くつくれるかがポイントになります。メタノールは通常は天然ガスからつくられますが、太陽電池で水を電気分解して水素を得ると、現状では約10倍のコストがかかります」（RITE化学的CO₂固定化研究室・丹羽宣治氏）。メタノール変換は、むしろ水素エネルギー技術の一部といっていいのかもしれない。

水素を効率的に製造するために同研究室では固体高分子電解質を用いた水素製造技術も研究している。水素は水から電気分解によって得られるが、通電時の熱としてロスされるエネルギーをどう抑えるかが重要なテーマになっており、そのひとつの答えとして固体高分子電解質や、光触媒による水素製造技術の開発に期待がかかっているという。

その他にもここでは、CO₂の新たな分離技術として膜分離法の研究も行われている。これまでCO₂の分離にはアミンなどの化学薬品を用いた吸収法が主流だったが、ここでは、より環



水素製造用固体高分子電解質エレメント。



中空糸膜によるCO₂分離フィルター。

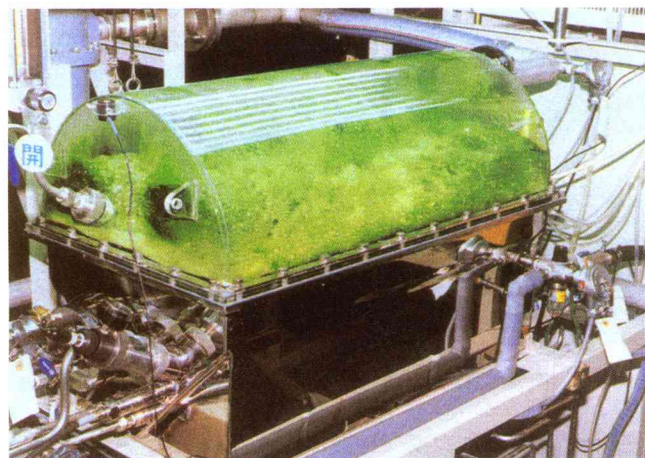
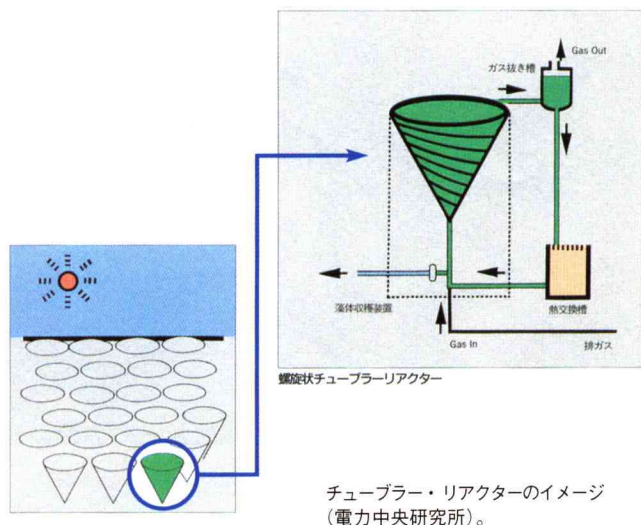
境負荷の小さい中空糸膜のフィルターを使って分離するノウハウが研究されており、性能的には満足できるものができつつあるという。

CO₂の分離技術としては、この他に活性炭に吸着させる物理吸着法といわれるものがあり、新日本製鐵が実用化に成功している。

緑藻類で高濃度CO₂を固定

RITEでは化学的固定とは別に生物的固定のプロジェクトも進行している。光合成細菌や藻類のはたらきを利用して固定を行うというものだ。「いま発電所などでは積極的に緑化推進に取り組んでいますが、樹木の光合成というのは、面積あたりの効率では、それほど高いとはいえません。しかも高濃度のCO₂を一度拡散させてから固定をしようとするわけですから、この点でも効率が悪いですね。」（RITE生物的CO₂固定化研究室・池上雄二氏）。

活発に光合成を行う細菌や藻類をチューブラー（螺旋状の透明なパイプ）に通し、くまなく太陽光をあてることで効率のよい光合成が行えるはずだと池上氏はいう。このチューブの中



リアクターによる緑藻類の培養実験（地球環境産業技術研究機構）。

の微生物にどんどん光合成をさせ、収穫していく。立体形状にすることによってオープンポンド（平地池）に比べ、空間を有効に利用でき、通常の森林の約10倍の効率で光合成をさせることができるという。「たとえば発電所の樹木の10列中1列をこうした立体的リアクターにするという方法も考えられると思います。建物の屋上部分に置いてもいいでしょう」（池上氏）。同様のチューブラー・リアクターは電力中央研究所でも研究が進められており、緑藻類を使う方法が生物固定の中心になっている。

藻類による光合成のひとつの方法としては太陽光を集光装置で集め光ファイバーでリアクターに供給する方法も研究されているが、伝送ロスの改善と光ファイバーで送りにくい曇りの日の光（散乱光）の利用技術併用が今後の課題となっている。

光合成リアクターでできた細菌や藻類の用途も考えられている。第一には飼料や肥料としての農業利用で、ウシやニワトリのエサあるいは有機肥料の原料として使えるという。これまでクロレラなどの緑藻類は従来は細胞壁が厚く飼料向きではないと考えられてきたが、最近では育種・探索の過程でより細胞



藻類からとった多糖類を混ぜたコンクリート。

壁の薄いものを見つげられている。既存の穀物飼料にこの緑藻類を混入してニワトリにあたえた実験では、卵の黄身の色や割った時の盛り上がりのポイントが上がったという。穀物飼料を減らせるということは、間接的に（化学肥料を減らせるという意味で）CO₂削減に結びつく。「太陽電池のペイバック・タイムと同様に、生物的固定もLCA（ライフサイクル評価）で考えて欲しいと思っています」（池上氏）。同様にこの緑藻類は有機肥料として使用することもできるという。

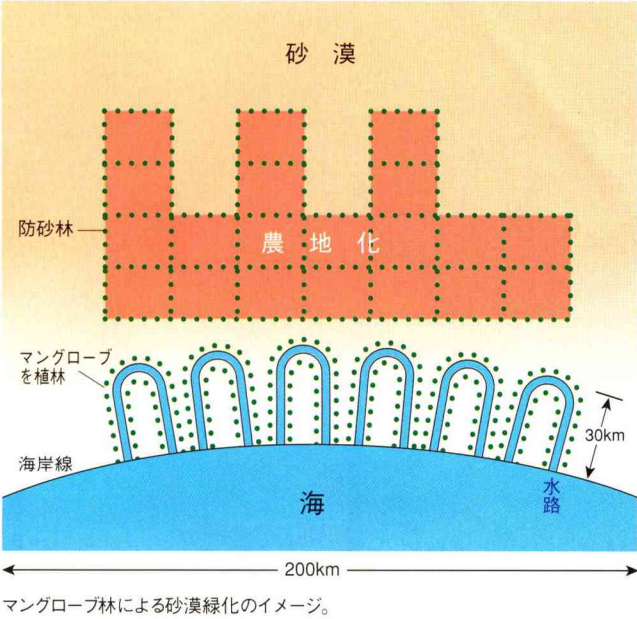
緑藻類の第二の用途としては、建設資材の分野がある。たとえばコンクリートの粘性を調整する増粘剤には通常多糖類が使われているが、これに近いものを微細藻類から精製することが可能だという。経済的にそろばんが合えばコンクリート構造物中に糖類の形で炭素固定ができることになる。プラスチックやビニール壁材にも混入が可能で、人工構造物中に炭素固定をする道が開けるかもしれないという。

第三の用途としては、燃料としての可能性があがる。ある種の藻類ではC重油なみの油脂生産能力をもつものがあり、それを燃料に使うことができるという。

「いろいろと用途は考えられていますが、もし仮に発電所が排出するCO₂をすべて処理するとすると、膨大な量の緑藻類が収穫されることになります。この藻類のバイオマスとしての利用方法として、たとえば廃坑に埋めて嫌気発酵して発生するガスを利用するなど、CO₂のリサイクルの考え方もあると思います」（池上氏）。

マングローブによる砂漠緑化案

東京大学工学系研究科の小宮山宏教授は、CO₂のリサイクル利用に対して厳しい意見をもっている。「CO₂をなんらかの形で固定しても、それをまた使ってしまうのなら固定にはなりません。固定とは大気にあるCO₂を海か陸に移してとどめておくということですから」という。こうした視点に立つならメタノール化も、飼料化も、太陽エネルギーを利用することによって発生



マングローブ林による砂漠緑化のイメージ。

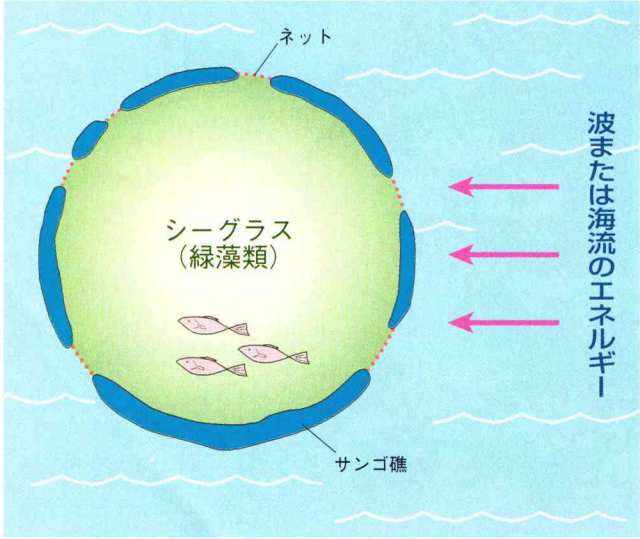
量抑制につながる可能性はあるものの、最終固定にはならない。

小宮山教授はこうした最終的な固定技術のひとつとしてマングローブの植林による砂漠の緑化技術を提案する。マングローブとは、海水で育つ植物の総称で、一般にも知られるとおり、生物種の宝庫といわれるほどに多種の生物を養う力をもっている。このマングローブを、砂漠沿いの200kmの海岸線に奥行き30kmのU字型の水路を掘って植林していき、その背後に防砂林などを格子状に植え、森林の間隙を農地化していくというのが小宮山教授案である。U字型水路は、日本が得意とする土木技術で造成したらいいというわけだ。

CO₂固定技術のネックは、見返りのないコスト負担が生じがちな点にあるが、この方法ではマングローブ林を漁場として活用し、背後に新たな農地を創出していくことで、経済効果をも期待することができそうである。冒頭で紹介したようにもし森林や生態系の破壊に、より大きなCO₂増加の原因があるとするれば、砂漠の緑化という方向性は理にかなっているといえるだろう。

RITEでは、化学的固定、生物的固定のプロジェクトの他に、遺伝子組み替えによる砂漠環境に強い植物の育種研究が行われているが、こうした技術が将来統合され、本誌Vol.2 No.4にも取り上げたような砂漠工学の技術が進展していくことで、食糧生産地と適度なCO₂濃度の両方を手に入れることができるのかもしれない。

小宮山研究室からは、マングローブによる緑化の他にサンゴ礁を利用したCO₂固定のアイデアも生まれている。サンゴ礁の生成過程そのものは、サンゴが大量の炭酸カルシウムからなるわりには、むしろ大気にCO₂を放出する作用もあることが分かっているのだが、CO₂固定能の高い藻類と組み合わせること



サンゴ礁とシーグラスによるCO₂固定のイメージ。

で、効果が期待できるという。

ひとつの案としては、人工サンゴ礁と波によって海水の流れを導入し、そこにシーグラスといわれる藻の一種を繁殖させることが考えられる。サンゴが育つ過程ではCO₂の放出と固定の両方が起こるが、シーグラスの光合成効果により、全体として大きな固定となる。シーグラスはそれ自身炭素固定を行うとともに微生物や魚類などの生態系を養い、やがて微生物は炭素を抱き込んで海底に沈んでいく。

CO₂固定型サンゴ礁のひとつのイメージとしては、環礁状にサンゴを育成し、ところどころに隙間をあけて海流が出入りできるようにしたものと考えられるという。円環のまん中でシーグラスを育てるとともに、隙間にはネットを張って、環礁内を漁場としていく。人工湧昇流などと組み合わせると一種の海洋牧場としていくことも可能かもしれない。

「CO₂問題に関しては、たくさんの人が知恵を融合してシナリオをつくることが不可欠でしょう。要素技術だけで対処しようとしても無理なはず。また最終的にCO₂を固定するためには太陽にせよ波にせよ、自然のエネルギーを使って行うことが基本でしょうね」(小宮山教授)。

問題の究極的解決には、やはり人が壊してしまった生態系を再生していく方向を選択することが自然なものといえるのだろうか。とはいえ、対象が地球全体におよぶマクロスケールなものだけに、単一の方法に頼るよりは、あらゆるノウハウを動員してあたる必要があるのかもしれない。

取材協力：新エネルギー・産業技術総合開発機構、
機械技術研究所、資源環境技術総合研究所、
(財)地球環境産業技術研究機構、
(財)電力中央研究所