

■ 展望・解説 ■

二酸化炭素削減・処理技術の紹介とその将来性

Perspective of CO₂ Reduction and Utilization Technologies for Mitigating Global Warming

多喜田 圭 二*

Keiji Takita

1. 温暖化防止でのCO₂削減技術の位置づけ

地球温暖化防止は人類に課された21世紀の最重要課題のひとつであり、しかも豊かさを追求する経済活動の結果としての二酸化炭素の排出を、世界レベルで総体としていかに減少させるかという解決の極めて困難な課題でもある。先の京都會議で先進国が2010年に向けて温室効果ガスの削減目標を合意したのも、その解決に向け歩みだしたほんの第一歩であり、まずは先進各国が率先して目標を達成することが必要であろう。我が国でも、6%削減という数値目標を達成すべく、省エネルギーの推進、エネルギー転換、ライフスタイルの見直し等の対策を具体化しようと官民挙げての努力が始まったところである。

温室効果ガス削減対策では、人為的なCO₂排出の削減が最も大きな位置を占めることになるが、ここで、一国を単位とした場合の、経済活動と二酸化炭素排出量との関係を見ておこう。1国のCO₂排出量をCO₂、エネルギー使用量をE、国内総生産をGDP、人口をPで表現すると、CO₂排出量は、 $CO_2 = (CO_2/E) \cdot (E/GDP) \cdot (GDP/P) \cdot P$ となる。また、その増減量は、 $\Delta CO_2 = \Delta(CO_2/E) + \Delta(E/GDP) + \Delta(GDP/P) + \Delta P$ となる。

このことから、まず、先進諸国と発展途上国の事情が大きく異なることが明確である。先進諸国は既に、人口の伸びが頭打ちであり、経済も成熟している。 ΔP はゼロか国によってはマイナスである。また、1人当たりの国内総生産の伸びもせいぜい2%程度と推測される。 $\Delta(E/GDP)$ に関しては、より成熟した経済の下での成長が見込まれる分野でのエネルギー使用

の高効率化が求められることになる。エネルギー多消費型製造部門の省エネルギー努力の余地がないと言うことであれば、特に、サービス部門でのエネルギー使用の合理化が必要となる。サービス化や情報化で増加したエネルギー使用量に見合ったCO₂量を何かの形で削減しなければならない。次に、 $\Delta(CO_2/E)$ に相当するところは、CO₂排出量の少ないエネルギー源への転換と、CO₂削減技術の普及によるものである。先進国の場合、ある程度の経済成長を維持しながらCO₂排出量をこれまでの実績よりも減少させるとなると、省エネルギーの一層の推進と新規エネルギーの導入の促進に尽力することが必要だが、原子力エネルギー等の不透明性を考えると、どうしても工場等から排出される二酸化炭素を分離・回収し削減するというようなCO₂削減技術を用意しなければならないというシナリオも考えざるを得ない。

発展途上国の場合、今後の人口増加 ΔP と経済成長 $\Delta(GDP/P)$ が大きく、また、エネルギー多消費型の製造業の発展も大いに見込まれることから $\Delta(E/GDP)$ も今後の先進国よりは相当大きいものと思われる。最も有効な対策は、既に先進国で実用化されている省エネルギー型の生産技術等を導入しながらの経済発展を押し進めることであり、技術移転が重要な対策となってくる。実現先進国が技術革新を中心とした $\Delta(CO_2/E)$ が問題となるのに対し、発展途上国はより大きい ΔP 、 $\Delta(GDP/P)$ 、 $\Delta(E/GDP)$ が問題であり、なるべく早い時期にこれらと取り組むべき枠組みに参加して欲しいというところである。

CO₂排出削減は、各国の豊かさの追求と関連した問題であり、総体としては発展途上国の貢献の度合いが大きい問題ではあるが、革新的技術としてのCO₂削減技術に関しては、とにかく先進国を中心に開発・実用化し、広く技術移転を図っていかなければならない技術である。

* 財地球環境産業技術研究機構 地球環境産業技術研究所
主席研究員研究企画部長

〒 619-0292 京都府相楽郡木津町木津川台9-2

2. CO₂削減技術の分類

ここで、CO₂削減技術を概観してみたい。CO₂削減技術は、

- ①対象となるCO₂として、工場などの排ガス中から分離・回収したものとするか、大気中のCO₂を対象とするか。
 - ②CO₂を有用物質等に変換する場合に化学的手法を用いるか、生物的な機能を利用するか、または、物理的に海洋や地中に隔離・貯留してしまうか、の観点で分類される。
- ①については、排ガスからのCO₂を対象とする場合は、化学的手法等を用いた集中的な処理が可能であり、ある特定の有用物質への変換を工業プロセス等で実現する可能性もある。ただし、工場等からの時間当たりのCO₂排出量は膨大で、エネルギー的に安定なCO₂を高いエネルギー準位の有用物質として有効利用するには、そのための高密度なエネルギーをどのように確保するかが問題となる。また、同時に、その結果として生産される有用物質が大量に需要・消費されなければならない。一方、大気中のCO₂を対象とする場合は、現在のところ植物の光合成機能等の自然界の生物機能を利用するより他はなく、CO₂の吸収過程では自然エネルギーしか必要ないが、これらを経済社会のなかでエネルギー源等として循環的に用いる場合には集配等のエネルギーが必要となる。
- ②については、まず、化学的手法を用いる場合は、CO₂との化学反応に必要なエネルギーをどこかで確保しなければならない。CO₂のエネルギーとしての価値はゼロであり、これをエネルギー的に価値のある有用物質に変換するためには、例えば、水素等と反応させてメタノールや炭化水素類を合成することが考えられるが、水素を生産する際のエネルギーを化石燃料から得ていたのでは、その時にCO₂を排出することになり全体としてCO₂削減にならないことにもなり、やはり、太陽エネルギー等の自然エネルギーを利用することを考えざるを得ないのである。このときに、エネルギー密度や供給の不安定性、初期設備投資の回収の問題と整合性を図らねばならないのである。次に、生物的機能を利用する場合には、いわゆるCO₂の固定段階でのエネルギーは太陽光等の自然エネルギーであり、CO₂削減技術としてのエネルギー収支に問題はない。ただ、光合成機能を用

いる場合は、そのエネルギー密度の限界がある。大気中のCO₂を吸収する技術体系では問題とならないが、工場排ガス等のように体位時間当たりの処理量が大きくなると大面積の太陽光を活用する必要があり、装置の大規模化に伴うCO₂削減技術としてのエネルギー収支の問題が浮上してくる。

これまでの検討で、開発中の化学的手法や生物的機能を利用したCO₂の有用物質への変換技術については、CO₂削減技術としてのCO₂収支の問題はクリアしている。問題は、化石燃料をベースとした現在の化学工業で生産される同一の有用物資と比べて生産コストの面で競争力がないということであり、将来において、CO₂削減策の実効性と関連したような何らかの価格体系の変動があったなら十分実用化可能なものとして準備しておくべき技術として位置づけられるものである。なお、化学的・生物的にCO₂をメタノール等の有用物質に変換したとしても、それを燃焼させれば同量のCO₂が排出されるので意味がないという議論があるが、筆者の考えでは、これは誤りである。CO₂が大気中で温暖化を生じさせる前に、もう一度エネルギーを放出して仕事をしたのであり、つまり、上記の $\Delta(\text{CO}_2/\text{E})$ を減少させることになるのである。そのエネルギーはもともと例えば、自然エネルギーであり、 $\Delta(\text{CO}_2/\text{E})$ の項は、エネルギー転換を含んでおり、まさに、例えば化石エネルギーからの自然エネルギーへの転換と同じ意義があるのである。

物理的に、海洋や地中に隔離・貯留してしまうことについては、地球温暖化防止として、省エネルギーの推進や新規エネルギーの導入との関連で、CO₂削減技術をどのように位置づけるかによって賛否両論があるようである。地球環境に配慮した理想的な経済活動は再生可能なエネルギーのみを用いたものであることは言うまでもないが、それが、先進国の今後の約2%成長や発展途上国より豊かな生活の実現と両立するかということである。さらに集中的に大量にエネルギーを必要とする鉄鋼、石油化学、セメント、紙パルプ等の生産と両立するかということであり、省エネルギーや新規エネルギーへの転換を進めたとして、どうしても化石燃料に頼る部分があるとすれば、排出されるCO₂は大気中から隔離しなければならないことになる。その際に、技術的にも見通しが得られ、エネルギー収支等も他の技術に比べて優れた面のある海洋隔離や地中貯留が用意され

てもいいのではないかということである。

3. CO₂削減技術の開発

地球環境産業技術研究機構（RITE）は、1990年に設立されて以来、自ら地球環境再生のシナリオを提示するとともに、その中で位置づけられた温室効果ガス削減という革新的技術の研究開発を主として推進している。地球温暖化対策が国際的な舞台上で具体的に議論を始められ、約10年が経過し、京都会議での具体的な対策の検討により、国際的にも我が国においても問題の緊急性への認識が強くなったと思われる。RITEも同様に、10年間の研究開発で蓄積された知見と京都会議以降の新たな対策の枠組を踏まえ、今後の研究開発課題を再構築しているところである。本稿ではRITEでこれまで実施してきたものと、国において今後実施が予定されている研究開発プロジェクトを紹介し、二酸化炭素削減技術の概略と考え方を述べたい。

二酸化炭素削減技術は、先に分類したように、工場等の排ガスから分離回収した二酸化炭素を対象に化学的あるいは生物的手法を用いて有効利用が可能な物質に変換する技術や、物理的に隔離・貯留する技術、大気中の二酸化炭素を対象に生物の光合成機能等により吸収する技術や、さらにその生成された有用物質を活用する技術に大別されるため、以下、順次紹介することとする。

3.1 化学的手法による排ガス二酸化炭素の有効利用技術

RITEでは、「接触水素化反応利用二酸化炭素固定化・有効利用技術研究開発」として本年度まで10年間

推進してきた。工場等の排煙から二酸化炭素を回収し、自然エネルギーによる電力を用いて製造した水素を添加し、メタノールに変換する技術である。具体的な研究課題としては、

- ①大量の排ガス処理を可能とする二酸化炭素選択性・透過性が高く耐久性に優れた高分子系の分離膜及びモジュールの開発
- ②二酸化炭素と水素からメタノールを高効率に製造する高性能触媒の開発と、これを用いたエネルギー効率の高い工業プロセスの開発
- ③固体高分子型水電解法による高効率で大量に水素を製造する技術の開発

であり、これまでに、

開発されたカルド型ポリイミド膜は、分離性能、透過性能においてそれぞれ目標を達成し、高分子膜では世界最高水準を記録しており、モジュールの性能評価では、50℃の長時間試験において12,000時間以上、分離計数が維持され、CO₂濃縮性能が持続することが確認されている。

水素製造に関しては、水素イオンだけが通過するイオン交換膜に貴金属触媒を接合したセルを重ね合わせることで小型化と大容量化を同時に達成した。こうして電極面積7,500cm²の積層セルを開発、セル当たりの水素発生量は3立米/hと世界最高レベルの生産量を実現した。

メタノール合成触媒に関しては、銅と酸化亜鉛をベースとした多成分固体触媒を開発し、触媒1リットル当たりメタノール生産量が600g/hという高い性能を得た。

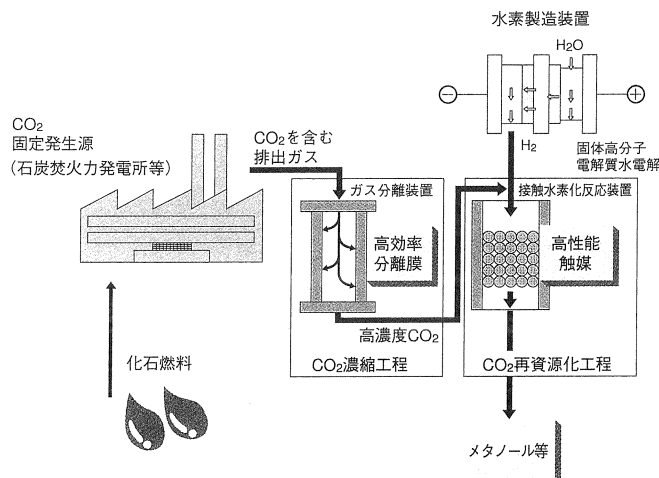


図1 接触水素化反応利用CO₂固定化有効利用技術の概念図

全体の技術イメージは図1のとおりである。

化学的手法によりエネルギー源としては価値のないCO₂を、エネルギーを取り出すことのできる有用物質に変換する場合、その変換のための化学反応エネルギーをどのように確保するかが問題となる。上記技術の場合は、水素との反応により、メタノールを合成しているが、結局は、水素製造のエネルギー源をどこに求めるかという問題と同意である。地球温暖化物質であるCO₂の削減技術として有効であるためには、そのエネルギーは自然エネルギーでなければならない。このような観点から、この技術の実用化をイメージした場合、図2のように、エネルギー消費地と水力等の自然エネルギーの豊富な地域とを結びつけたCO₂グローバルリサイクルシステムが妥当なものとなる。つまり、化石燃料を大量に燃焼、消費している火力発電所や工場の排ガスから大量のCO₂を分離・回収、自然エネルギーの豊富な地域に輸送し、そのエネルギーを用いて生産された水素を添加し、合成されたメタノールをエネルギー需要地に輸送して燃料や化学原料として利用するというものである。このシステムに関してはエネルギー収支及びCO₂収支も1を越えることができ、CO₂削減策の一つのオプションを提示することができたとしている。

やはり、要点のひとつは、水素をいかに安価に製造できるかであり、現在のところ、図3で示すように、本技術でのメタノール製造原価の相当部分を水素製造コストが占めている。

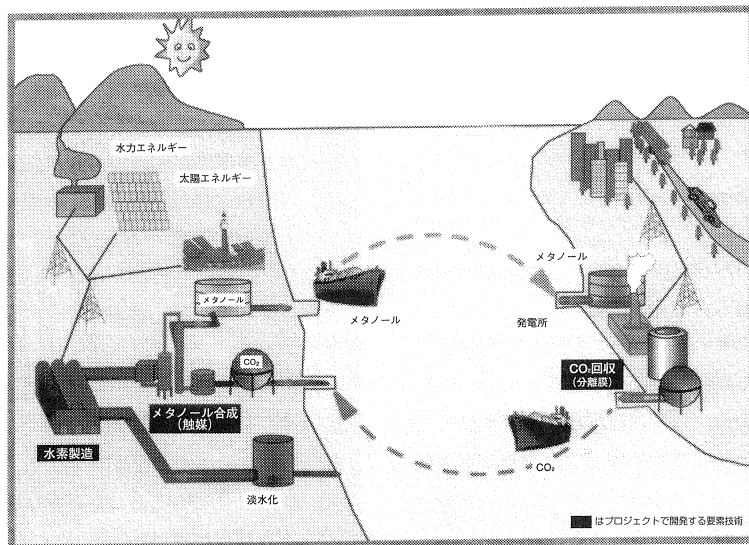


図2 CO₂グローバルリサイクルシステム

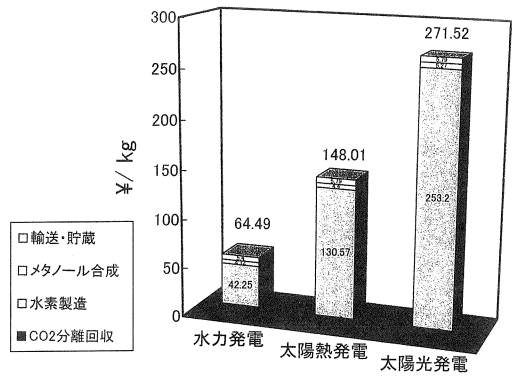
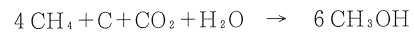


図3 各種電力を用いた場合のコスト比較

平成12年度から開発が予定されているものに、上記の観点を踏襲し、自然エネルギーとして太陽熱を利用し、石炭と天然ガス、それと天然ガスに随伴するCO₂から、メタノールを製造する技術がある。全体として吸熱反応である生産プロセスに必要なエネルギーを太陽熱で賄うという発想であり、石炭、天然ガス、CO₂を、総体として、太陽熱エネルギーを吸収することにより、より高いエネルギーレベルのメタノールに変換するもので、下記の反応式に示すように、全体として10%程度の自然エネルギーの蓄積が可能である。

(総合反応式)



<左辺>

$$4 \times 213 + 94 = 946 \text{kcal/mol}$$

<右辺>

$$6 \times 173 = 1,038 \text{kcal/mol}$$

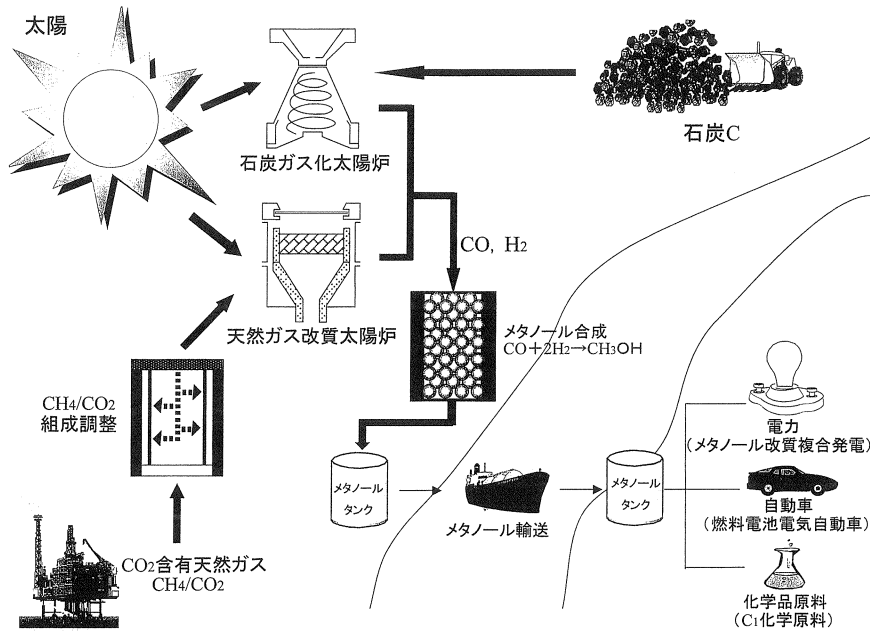


図4 石炭・天然ガス活用型CO₂回収・利用システム

技術の概略は図4のとおりである。

3.2 生物的手法による排ガス二酸化炭素の有効利用技術

RITEでは、「細菌・藻類等利用二酸化炭素固定化・有効利用技術研究開発」として本年度まで10年間推進してきた。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し、有用物質として再資源化することを目的としており、具体的な研究課題としては、

- ①光合成を効率的に行う細菌・微細藻類の探索・育種
- ②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の開発
- ③CO₂の生物的固定によって生成される物質の有効利用
- ④全体システムの構築

である。

まず、火力発電所などの排ガスのCO₂濃度は10～15%と大気中の数百倍もあるので、この条件下での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おり、炭酸泉、湖沼、河川、温泉、土壌、沿岸・外洋海域から光合成細菌、微細藻類を採取し、高CO₂濃度、高温等の条件下で有望株を絞り込んだ。

培養液1リットル当たり1日1グラム以上のCO₂固定能をもつ微生物の育種を行い、その結果クロレラ属

等7株の優良株を得ている。これらの微生物は、燃料や潤滑油となる油、植物ホルモンや建材、コンクリート混和剤などの有用物質を生産する。

バイオリアクタに関しては、パラボラアンテナ状の大型ミラーで太陽光を集めて光ファイバーで容器まで導き、開発した発光担体により、導いた光を容器内で平面上に均一に拡散させ、光合成微生物に効率よく光を伝えることのできるシステムを完成させた。現在、200リットルの大型培養装置を設置し、森林の10倍以上のCO₂固定能力という目標を達成した。

本技術の概念図は図5のとおりである。

微生物等の光合成機能を利用してCO₂を有用物質に変換する場合、自然エネルギーである太陽光エネルギーを利用できる点が利点であるが、火力発電所や工場との大規模発生源からのCO₂を処理する場合、その太陽光エネルギー密度が問題となる。光合成により温帯の森林が一日に取り込むことができるCO₂は1m²当たり5グラムである。本技術でその10倍の性能を達成できたが、それでも1m²当たり50グラムである。大規模火力発電所のCO₂排出量は1時間に数百トンであり、処理速度を高めるには莫大な面積の太陽光が必要となる。ただ、必ずしも排ガスの全量を処理する必要はなく、本技術開発の成果は有意義なものである。例えば、100万kW級のLNG火力発電所の場合、藻類が排出するCO₂の1%を固定したとしても藻体の量は1日に30

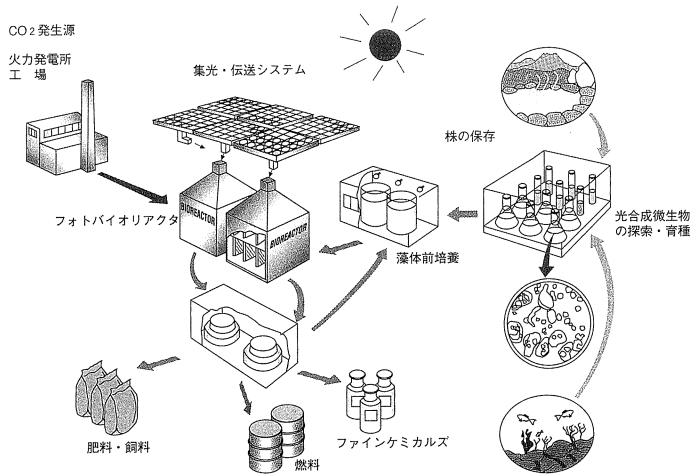


図5 細菌藻類等利用CO₂固定化・有効利用技術の概念図

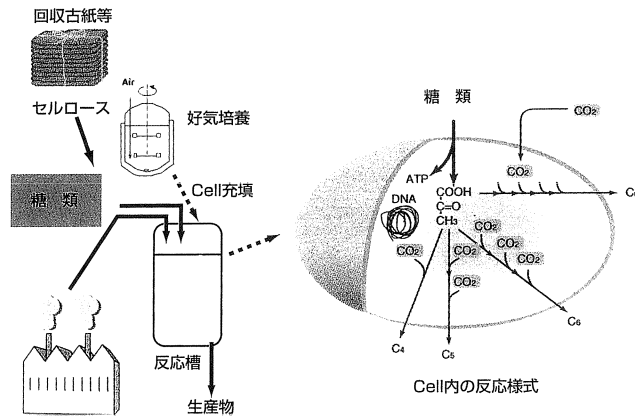


図6 糖類から有機酸を製造するプロセスの概念図

トンにもなる。

平成12年度から開発が予定されているものに、生物の光合成以外の機能を利用して、CO₂を有用物質に変換可能な技術がある。技術概要は図6に示すが、セルロース分解物である糖を、成長抑制型微生物を用いて分解し、その際、微生物内部で得られるエネルギーを利用して、CO₂も併せて原料とし、有機酸等の有用物質に変換するプロセスの開発である。微生物は、嫌気性状態で増殖が抑制され、物質変換に専念することが可能と考えられるコリネ型のものを用いる。

大気中のCO₂を吸収したバイオマスを原料とし、さらに、生物内プロセスでCO₂を固定化・有効利用する技術である(図7参照)。とりあえず、バイオマスとしてのセルロース資源としては古紙が考えられる。

エネルギー密度の低い太陽光ではなく物質変換のエ

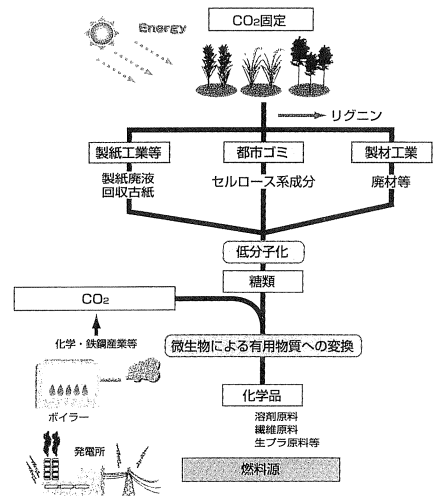


図7 CO₂の吸収・循環

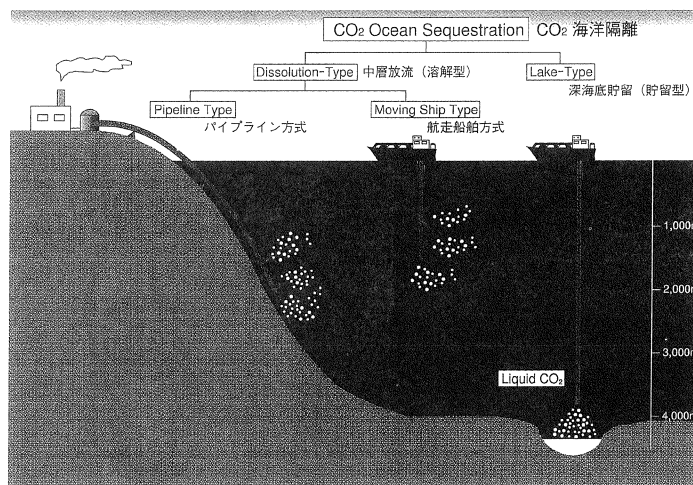


図8 CO₂海洋隔離技術の概念図

エネルギーを用いてCO₂を有用物質に変換するため、高い生産性の実現が可能で、遺伝子組み替え等の手法を用いて生産性の向上を達成した場合、年間数十万トンのCO₂を有用物質に変換するのに、一辺30メートル程度の立方体リアクターで十分だという試算もある。

3.3 海洋隔離及び地中貯留技術

CO₂は大気中に存在することにより地球温暖化効果を発揮するわけで、排ガスからCO₂を分離・回収して海洋や地中に物理的に隔離・貯留するのは、即効的な温暖化防止のための有力な方策である。

海洋に隔離する技術については、RITEでは平成9年度から、「二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術研究開発」を開始している。海洋は地球温暖化対策として十分効果が期待できるほど大量のCO₂の処理が可能だが、海洋に放流されたCO₂の挙動や放流に伴う環境への影響についての技術的・科学的な検討が未だ不十分であり、このため、本研究開発においては、深度1,000～2,000mを対象とした中層放流を中心に、CO₂を溶解させ隔離する技術を確認するため、主として、環境影響を予測するための技術を開発している。

(図8参照)

地中貯留については、平成12年度からの研究開発が予定されている。2010年以降に実用化できる技術を用意するという観点で研究開発が提案されており、状況によっては、最も近い将来に実用化の可能性のあるCO₂削減技術である。

本技術は、火力発電所等から排出されるCO₂を分離・回収した後、パイプライン等で輸送し、日本近海の地中帯水層に圧入・貯留する技術である。我が国として

の貯留対象を近海の地中帯水層とする理由は、圧入作業時の安全性に配慮し、さらに、これまで得られているデータから判断して、日本近海の帯水層でCO₂にして12億トンもの貯留能力があると推定されるからである。これは、20年間にわたって利用したとしても、炭素換算で年間1,500万トンのCO₂の貯留が可能な計算となる。この量は、我が国の年間のCO₂排出量は炭素換算で3億トン程度ということから、その5%近い削減が可能な量である。帯水層としては、もし有望なものが見つければ深度1,000m程度の背斜構造を有するものを想定している。

研究開発項目としては、CO₂の地中への圧入技術と安全性の確立、対象となる地層のCO₂との反応性を考慮した環境影響の把握等のための基礎実験、我が国の帯水層におけるCO₂の挙動を含めたモデルシミュレーション技術の確立と、地質構造のある程度明らかなサイトを使っての安全性確認のための実証実験、長期の貯留を確認するモニタリング技術の開発、地中貯留の対象となる日本近海の帯水層についての地質調査等である。

CO₂の地中への圧入についてのエンジニアリング技術は、ほぼ実用化の域に達していると言われている。ノルウェーのスレイブナーでは天然ガス採掘の際に分離・回収したCO₂を年間100万トン規模で地中に圧入しており、既に実用規模での試験が行われている。本研究開発では、我が国としての地中貯留技術の保持のため、特に、長期貯留に関する安全性の確立を主眼とした研究開発を実施する予定と言われている。