

CO₂ 対策研究の現状

進藤 勇治¹⁾

1. はじめに

CO₂ による地球温暖化の対策法としてはCO₂の固定の他, エネルギー源の転換や省エネルギーの推進などのエネルギー利用面からの対策, さらに産業構造やライフスタイルの変換など多岐にわたる. 本稿ではCO₂の固定法を中心に研究動向を展望する.

さて, CO₂ 等による温暖化の対策法の一つとして, 太陽エネルギーなどの再生可能エネルギーの利用が期待されている. しかし, 現状では再生可能エネルギーの利用は化石燃料の利用に比べてコストが10倍程度高い. このことは実際問題として今すぐにエネルギー源の転換は行えないことを意味する. すなわち, 地球温暖化という緊急事態を認識しつつも, 少なくとも今後半世紀間は世界の主たるエネルギー源として, 石油や天然ガス, 石炭などの化石燃料を人類は使わざるを得ない. 化石燃料の利用と温暖化対策の二つの目的を実現させる唯一の方法が, 発生したCO₂を大気に放出することなく何らかの方法で固定することである.

CO₂の固定法としては, 火力発電所や製鉄所な

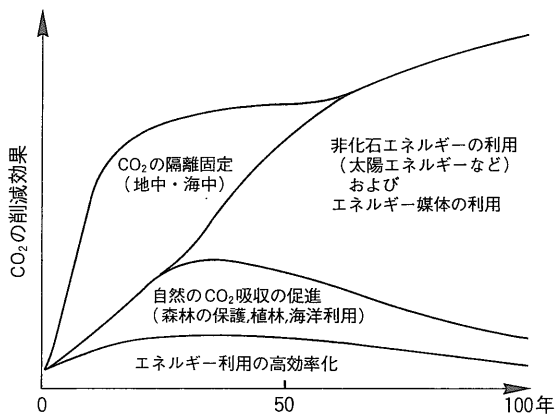
どの煙道ガスのCO₂を分離回収し固定する方法と, 大気中のCO₂を陸上の植生や, 海洋によって吸収固定する方法がある. 後者をCO₂の吸収法と定義する場合もあるが, 本稿ではこれもCO₂固定法の一つと考えた. さて, CO₂対策法は, 将来のエネルギー利用の予測, および開発速度の予測などを行いつつ策定しなければならない. 第1図にCO₂削減のシナリオの例を示した. CO₂の固定法の位置付けや重要性が理解していただけるものと思う.

2. CO₂の地中貯留

CO₂の地中貯留(隔離)は, CO₂固定技術の中でも最も有力な方法である. その大きな理由は, 膨大な量の固定が可能であること, 生態系への影響が極めて少ないと考えられることなどがあげられる. CO₂対策技術の中で一番最初に実用化されるのが本技術であると予測される. 本技術の詳細については本誌の他の稿で述べられているので本稿では省略する. また, CO₂の地中貯留技術(小出, 1990; 小出, 1992; Koide et al., 1992)について, 日本は最も研究の進んでいる国の一つである. 今後地球環境問題の解決において大きな国際貢献を果たすためにも, 研究開発に国をあげての取り組みが期待される.

3. CO₂の海中貯留

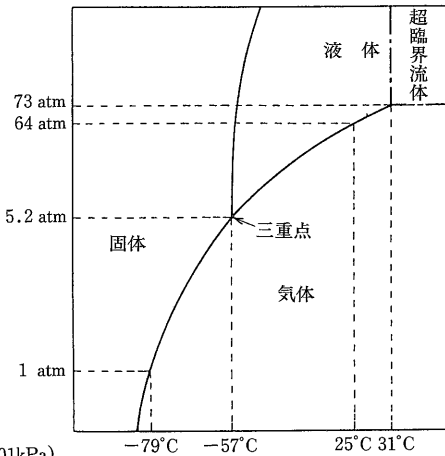
CO₂の海中貯留法としては, 液化したCO₂を3000 m以上の深海に貯留する方法(Steinberg et al., 1985), CO₂を二酸化炭素水和物であるハイドレートとして深海底に貯留する方法(例えば, Saji et al., 1992; Nishikawa et al., 1992), CO₂を浅海で放出し海水に溶解させる方法, CO₂を海底の炭酸カルシウムと中和させる方法, さらに, ドライアイス(密度1.56 g/cm³)として沈降させる方法, などがあ



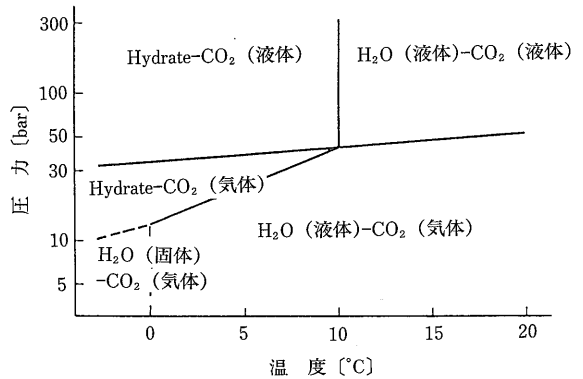
第1図 CO₂削減のシナリオ例

1) 物質工学工業技術研究所 化学システム部

キーワード: 地球温暖化, CO₂固定, CO₂処理



第2図 CO₂の状態図



第3図 CO₂と水の相平衡図

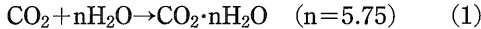
CO₂で覆われた部分の1万倍の広さで、そこから溶出するCO₂を中和できるという研究例が報告されている(大隅, 1992).

第3図の相平衡図からも読み取れるように、CO₂ハイドレートは海洋貯留のいかなる場合にも生成されることが予測される。CO₂ハイドレートは固体であり、これが液体CO₂と海水の接触面に薄膜状に生成すると、CO₂の海水中への溶解を妨げる。CO₂ハイドレートの生成をうまく利用することにより、貯留CO₂による海水の酸性化を抑制したり、生態系への影響を低減できる可能性がある。海洋におけるCO₂貯留において最も重要な研究要素は、CO₂ハイドレートの生成および分解メカニズムの解明である。現在この分野での研究(浅井ら, 1991; 大垣・赤野, 1992)はきわめて少なく、速度論的見地からの定量的な研究が期待される。

さて、日本海やメキシコ湾、ヨーロッパのビスケー湾、地中海、黒海にも3000 mより深い部分が存在する。しかしこれらの海域は複数の国に囲まれるかもしくは隣接しており、このような海域にCO₂を貯留することは国際間で様々な問題が発生する可能性がある。CO₂の貯留可能な海域は太平洋や大西洋などの外洋に限定されるであろう。それでも社会的な同意が必要であろう。日本の場合、3000 mより深い海域を太平洋の近海に見つけるのは容易であるが、他の国では簡単ではない。たとえば、ドイツのハンブルグ港からはノルウェー沖まで1000 km以上も海上輸送しなければならない。中国も旧ソ連、米国中部地域も同様である。さらに内陸部では港までの陸上輸送の負担もある。むしろ、近海に貯留に適した海域を有するのは、日本の太平

る。

約3000 m以下の深海では液体CO₂の比重は海水よりも大きく、安定して貯留できると考えられている。第2図にCO₂の状態図を、第3図にCO₂と水の相平衡図(Song and Kobayashi, 1987)を示す。CO₂は水と式(1)のように反応して、CO₂ハイドレートを生成する。

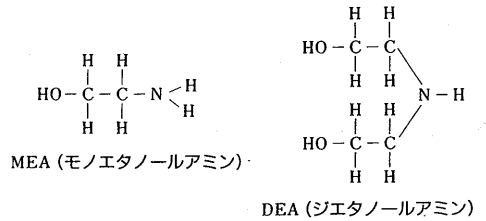


CO₂ハイドレートの安定領域は10.2°C以下、44.5気圧以上であり、密度は1.114 g/cm³である。その結晶構造は、46個の水分子の中に8個のCO₂分子が取り込まれた形をしており、自然界でも発見されている(Sakai et al., 1990)。

CO₂の海中貯留法が最初に提案(Marchetti, 1977)されて以来、現在まで多くの方法が研究されている。例えば、50万kWの火力発電所からの排出されるCO₂処理を想定した海水溶解法において、500 mの浅海で10個の出口より半径1 cmの大きさでバブルもしくは液滴を放出することにより、100 mも上昇しないうちに海水中に溶解するとの研究結果(Liro et al., 1991)が得られている。また、200~400 mの浅海でCO₂を海水に溶解させ、その結果比重が増加した海水の下降流を発生させ、傾斜面にそって深海に移動させる方法が研究されている(Haugan and Drange, 1992)。

炭酸塩(炭酸カルシウム)堆積物が存在する海底に液体CO₂を貯留した場合、拡散したCO₂がCaCO₃と中和反応し、重炭酸イオンの形で海水中に溶解することが予測される。簡単な見積りによれば、液体

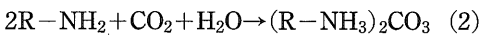
洋側地域、ノルウェー、アイルランド、ポルトガル、米国東海岸・西海岸など限られた地域のみである。従って、大量の CO₂ の貯留場所として海中以外も検討しなければならないが、その有力な場所が前述の地中である。



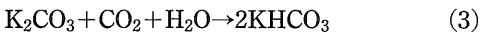
4. CO₂ の分離技術

CO₂ の地中貯留もしくは海中貯留のいずれの場合も、煙道ガスからの CO₂ の回収が重要である。CO₂ の分離法としては吸収法、吸着法、深冷分離法などがあるが、一般に火力発電所などの大量発生源からの CO₂ の分離回収には化学吸収法がすぐれている(例えば、藤谷, 1991)。実際に世界的傾向を見ても、具体的な回収プロセスを想定した上での CO₂ 分離技術の研究の多くは化学吸収法である(例えば, Suda et al., 1992; Yagi et al., 1992; Barchas and Davis, 1992)。

化学吸収法は高い回収率で高濃度の CO₂ 分離が可能であり、また大スケールの分離にも適用しうる。吸収剤としては、アルカノールアミンおよび炭酸カリなどが用いられる。第4図に示すように、吸収剤として使われる MEA, DEA, MDEA, TEA などのアルカノールアミンは、アミノ基と水酸基をそれぞれ1個以上有している。水酸基は吸収剤の水溶性を高めており、アミノ基は次に示すように CO₂ と反応し、これが高い吸収能力を示す。



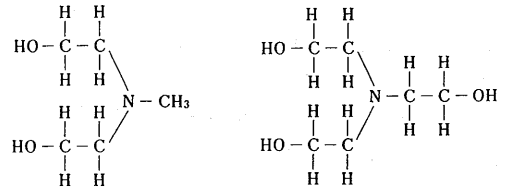
熱炭酸カリ系溶媒を用いた分離プロセスは、次の反応式のように CO₂ を 200℃ 付近で数気圧から数百気圧の高圧下で吸収分離するものである。



このプロセスに DEA を添加することにより吸収の促進が行え、また五酸化バナジウムの添加により腐食を防止できる。

化学吸収法においては、吸収剤による装置の腐食の抑制、吸収剤の酸化による劣化防止、新規の吸収剤の開発などが今後の技術開発のポイントである。

もう一つの有力な CO₂ の分離法として吸着法(例えば、牧田ら, 1993; 太田, 1993)がある。吸着法は活性炭やモレキュラーシーブなどの非常に小さい細孔を多数有する吸着剤に CO₂ を吸着させ分離する方法である。吸着法の具体的プロセスとしては、



第4図 CO₂ の化学吸収剤の構造式

加圧状態で CO₂ を含む混合ガスを吸着剤に接触させ、CO₂ を選択的に吸着させた後、減圧状態でその吸着ガスを脱着させ分離する方法、および低温で混合ガスを吸着剤に接触させ、CO₂ を選択的に吸着させた後、昇温し CO₂ を脱着させ分離する方法がある。

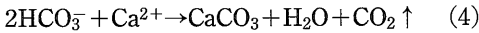
CO₂ の分離法として膜分離法も研究されている。膜分離法は比較的 CO₂ を透過させやすい膜を用いて分離する方法である。CO₂ を選択的に分離する素材としては、高分子のポリイミド、酢酸セルロース等がある。現在の高分子膜における CO₂ の窒素に対する分離係数は 30~40 程度であるが、膜法が化学吸収法と競争しうるためには、今後は現在の高い透過係数を維持しつつ、少なくとも分離係数が 200 以上の膜の開発が必要といわれている (Sluijs et al., 1992)。アミン吸収法のように高い CO₂ 回収率を得るには、実際には分離係数が 1000 以上の膜が必要と思われる。

5. 海洋生物利用による CO₂ の固定

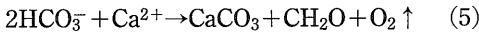
広大な海洋は様々な特長を持っており、CO₂ の固定場所として種々の可能性を有する。その有力な方法の一つが珊瑚礁による固定である。珊瑚は炭酸カルシウム (CaCO₃) を生成して CO₂ を固定する。珊瑚による CO₂ 固定量の推算としては、例えば琉球列島石垣島東海岸の裾礁内礁池では、15 gCO₂ / (m² · 日) の固定速度と推算されている(茅根,

1991).

さて、海水中では多くの炭素は重炭酸イオン (HCO_3^-) の形で溶解している。式(4)に従って、炭酸カルシウムを生成するとともに CO_2 も生成する。



従って、珊瑚は CO_2 の放出であるとの指摘(角皆, 1988)もある。しかし、珊瑚には共生植物が存在し、共生植物は CO_2 を式(5)に示されるように光合成によって生体組織に取り込んでいる。



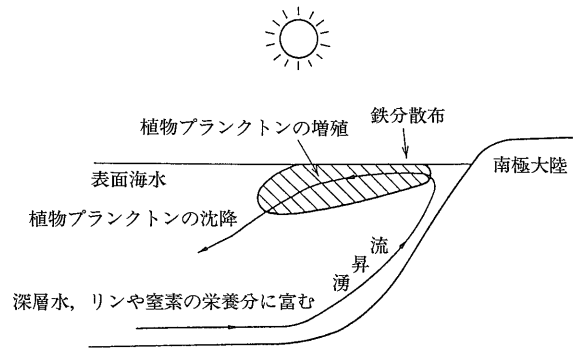
従って、珊瑚礁が棲息しているかぎり CO_2 の固定であると考えらるべきであろう。

珊瑚礁による CO_2 の固定は陸上植物による固定と類似であると考えれば理解しやすい。珊瑚礁による固定法については研究課題が多く残されており、特に炭素のみならずリンや窒素の栄養分の循環も含め、フィールド研究を中心とした総合的な研究が期待される。

さて、海洋表面において大気中の CO_2 が海水中に溶けこむ。海洋表面において植物性プランクトンが増殖し光合成を行い、 CO_2 を生体組織として固定する。その植物プランクトンの死滅により遺骸などが深海中へ沈降する。こうして大気中の CO_2 が平均水深3800 m の海洋全体に吸収固定される。しかし、海面付近ではリンや窒素などの栄養分は生物にほとんど摂取されており、それらの溶存濃度はほとんどゼロに近く、植物プランクトンはこれ以上増加できない状態である。従って、海面にリンや窒素の栄養分を増加させることによって、海洋表層の植物プランクトンの生体数の増加をはかり、 CO_2 の固定を促進することができる。

この方法は、植物プランクトンを増加させ、その分だけ CO_2 の固定量の増加を図るとともに、その遺骸の沈降による CO_2 の海洋への吸収固定を増進させることも行える。具体的には、海洋にリンや窒素の肥料を散布する方法や、人工湧昇流等を利用する方法、さらにリンや窒素の栄養分に富んだ深層水を汲み上げる方法などが考えられる。

さて、南極では湧昇流によって供給された窒素やリンの栄養分の大部分が植物プランクトンの増殖に使われることなく、ほとんどが深海に戻ってしまう。その理由は微量な栄養分である鉄分が不足しているためである。そこで、第5図に示すように南



第5図 南極海鉄分散布による CO_2 吸収法 の概念

極に鉄を散布し、 CO_2 の固定を促進させようという方法(Martin and Fitzwater, 1990)が研究されている。研究結果によれば、20万トンの鉄分を南極海に散布することにより、最大20億トンの炭素を余分に吸収できるという結果が得られている。このための費用は約10億ドルと見積られている。

海藻の中で、特に褐藻には巨大に成長するものがあり、これを利用して CO_2 を固定することが可能である。これは、いわゆる海中森林の育成に相当する。大型褐藻は主に北回帰線以北、南回帰線以南の冷水浅海域に分布している。北米や南米およびオーストラリアの沿岸に分布しているジャイアントケルプは成長速度が非常に速く、数ヶ月で全長が20~60 m に達する。日本沿岸に分布する大型褐藻にも、長さが3~20 m になるコンブ類や、長さが2~10 m になるホンダワラ類がある。さて、海藻の栽培密度は4~9 kg(乾重)/ m^2 が期待でき、この値は陸上植物の最高値であるサトウキビの1.5~4.5 kg(乾重)/ m^2 に比べても数倍の値である。乾燥海藻の50%が炭素と仮定すると、海藻により2~4.5 kg 炭素/ m^2 の固定が期待できることになる。また、このように成長速度の早い海藻は、単に CO_2 固定のみならず、それをバイオマスエネルギーとして使用することによって、化石燃料の使用を削減することもできる。

6. 陸上植物による CO_2 の固定

陸上植物によって CO_2 が炭素換算で約1兆8千億トン固定されている。この量は大気中に存在する炭素換算で約7千億トン CO_2 の2倍以上の値である。陸上植物による CO_2 の固定法としては、植林

や森林の保護、さらに砂漠の緑化などがあげられる。

人類が今後使用すると見込まれる化石燃料の消費から生じる CO₂ を植林によって固定する場合、たとえばヨーロッパ大陸に相当する植林面積(約670万 km²)にアメリカスズカケを植樹すると、人類が放出する毎年50億トンの炭素を今後50年間固定することができるという試算例がある。しかし、実際に植林によって CO₂ を固定するのは困難なことが多い。人口の急増により食糧問題も深刻であり、農地確保と植林は競合することになる。

焼畑農業などの森林の破壊により、毎年世界で九州と四国の面積に相当する森林が破壊されていると試算されている。森林破壊による炭素の放出量は、毎年約16億トンと推定されている。また、森林の土壌中にも多くの炭素が蓄積されている。特に寒冷地の土壌においては、植物体に匹敵するほどの炭素が集積されている。森林が破壊されると、これらの土壌有機物の分解も促進される。焼畑農業などによる森林破壊を防止し、森林を保護することは CO₂ 問題の有力な対策法である。

地球表面の約1/3は乾燥地帯であり、これらの地域は砂漠もしくは砂漠化が著しく進行している土地である。砂漠化の原因には気候的要因よりも人為的な要因が大きいといわれている。人為的要因としては森林の伐採による保水力の減少と地下水の低下、過耕作や過放牧などによる地力の低下、過灌漑による土壌塩分の増加などがある。現在地球では広大な土地が砂漠になっているか、もしくは砂漠化が進行している。例えば、サハラ砂漠の南部では毎年岩手県に相当する面積が砂漠化している。

砂漠化の防止法としては、砂防林や風防林、砂防柵を設けることによって、砂丘からの飛砂を防ぎ、周辺の砂漠化を防止することができる。風防林は風食を防ぎ、土壌水分の保持も併せて期待できる。適度な耕作や牧畜を行うことにより地力の低下を防ぐことも重要である。地下からの塩分の上昇による塩類の蓄積を防ぐために、土壌中にビニールシートやアスファルトの遮水層を作る方法もある。

さて、もし砂漠を大規模に緑化出来たとした場合、たとえば簡単な試算によれば、サハラ砂漠を緑化すると人類の排出する CO₂ の約30年分を固定できる。しかし、砂漠を大幅に緑化した場合は新たな気候の変化が生ずるとも予測されている。

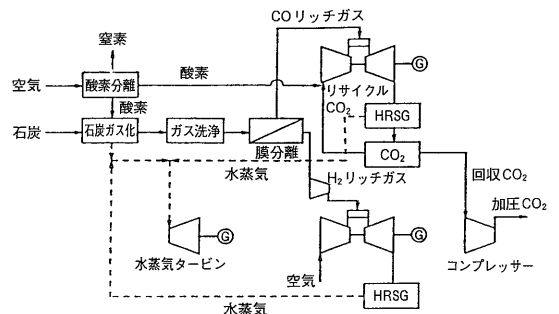
7. 発電サイクルの改善

発電所に関連して、化石燃料の燃焼を純酸素で行い、燃焼後の排ガスを CO₂ と水蒸気のみにして、容易に CO₂ を回収しようという方法が研究されている。燃焼温度を制御するため CO₂ の一部は酸素希釈のためにリサイクルされる。CO₂ 希釈純酸素燃焼法では空気から酸素を分離するプロセスが必要であるが、排ガスから CO₂ をアミンなどで回収する方法と比較して、本法の方が総合的に優れているとの結果が報告されている。

例えば、微粉炭火力発電におけるの研究(Nakayama et al., 1992)によれば、発電効率、設備投資と運転コスト、および必要な設備面積のいずれの点も、CO₂ 希釈純酸素燃焼が優れているとの研究結果を得ている。また、第6図(Hendriks and Blok, 1992)に示すように、100万 kW の石炭ガス化コンバインドサイクル発電プラントにおいて、ガス化によって生成した H₂/CO 混合ガスを分離し、CO に富んだガスは、CO₂ 希釈の純酸素で燃焼させ、H₂ リッチガスは空気で燃焼させるプロセスを提案している。CO₂ の除去コストは1トンあたり16ドルで、発電電力の約25%が CO₂ の除去等に消費されると見積っている。

8. 自動車からの CO₂ の回収

全世界の CO₂ の約30%は火力発電所から排出されているが、輸送部門からも約25%に相当する量が排出されており、その半分以上は自動車からである。自動車からの CO₂ の削減法として、電気自動



第6図 CO₂ 希釈純酸素燃焼石炭ガス化コンバインドサイクル

車や水素自動車の普及が検討されているが、排出される CO₂ の直接回収については極めて困難であるとして、これまでほとんど研究はなされてなかった。

自動車からの回収方法として、金属水素化物 (MgH₂ など) または金属炭化物を利用し、これらを燃料のキャリアーのみならず排出した CO₂ のトラップとして用いようという方法 (Seifritz, 1992) が提案されている。まず、MgH₂ に H₂O を反応させ Mg(OH)₂ と H₂ とし、H₂ はガソリンとともにオートエンジンで燃焼させる。ガソリンの燃焼で生じた CO₂ は、Mg(OH)₂ と吸収させ、MgCO₃ として貯蔵する。こうして、CO₂ を大気に放出しないシステムが可能となる。生じた MgCO₃ は集積センターで回収され MgH₂ に再生される。

さて、ガソリン以外の燃料を用いる自動車は、搭載燃料タンクの重量が問題となる。ガソリン自動車は 400 km 走行するために、平均約 20 kg (満タン時は 40 kg) のガソリンを搭載する。水素自動車の場合に 400 km を走行するため水素合金を平均して 760 kg を搭載していることになる。電気自動車の場合はさらに荷重は大きい。本法の場合は平均 98.3 kg の荷重であり、水素自動車や電気自動車に比べて極めて重量負荷が少ないという利点がある。同様な視点から、LiH と Li₂C₂ の組合せ、および MgH₂ と Mg₂C₃ の組合せのシステムも提案されている。

9. メタン、亜酸化窒素の削減

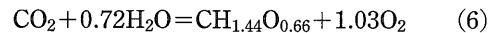
日本の火力発電所から 1 年間に放出される CO₂ (約 22.6 億トン) を微細藻類を用いて固定するためには、700 万ヘクタール (四国の約 4 倍の面積) の受光面積が必要であるとの結果 (嶋ら, 1990) が報告されている。また培養した微細藻類の適切な処理 (固定) 法もみあたらない。仮に、微細藻類を再度燃料として使うためには、その生体組織の 90% 近くが水であるので、乾燥のためのエネルギーが膨大になる。実際問題として、微細藻類の培養は、CO₂ 問題の対策としては極めて効果が少ないと考えられる。さて、温室効果を示すのは CO₂ のみではない。フロンその他、亜酸化窒素やメタンがあり、これらは温室効果の約半分を占める。これらの対策も CO₂ と併せて行っていかなければならないが、この分野の対

策もほとんど研究が進められていない。

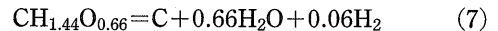
火力発電所から発生する CO₂ を微細藻類で固定し、これを飼料や食糧として用いることにより、CO₂ のみならず耕地などから発生するメタンや亜酸化窒素などの温室効果ガスの削減が図られるとの研究結果 (嶋ら, 1990) が報告されている。飼料として用いることにより、微細藻類により固定される CO₂ の、温室効果換算して 7.1 倍に相当する亜酸化窒素やメタンを、水素細菌の場合は、5.2 倍に相当する量を削減できるとの結果を得ている。食糧需要の増大による森林開拓による耕地拡大を防ぐため、微細藻類を食糧として用いることにより、微細藻類により固定される CO₂ の 208 倍に相当する温室効果ガスの放出が防げるとのことである。このような視点に立てば、微細藻類の培養も温暖化抑制に有効であろう。

10. 炭素の埋め戻し法

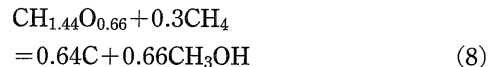
植物の光合成によってまずバイオマス (セルロース) の形で CO₂ を固定し、次に、バイオマスとメタン、石油、石炭などの化石燃料と反応させて炭素とメタノールを製造し、炭素は地中に埋め戻し、メタノールを燃料として使用する方法 (Steinberg, 1990) が提案されている。そのプロセスは次の通りである。植物の光合成による CO₂ の固定は、



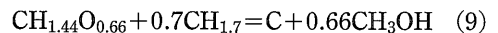
バイオマスからの水素と炭素の製造は、



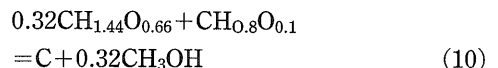
バイオマスとメタンから炭素とメタノールの製造は、



バイオマスと石油から炭素とメタノールの製造は、



バイオマスと石炭から炭素とメタノールの製造は、



と表される。ここでバイオマスの育成に必要なエネルギーはゼロとみなし、また反応の熱効率を 90% と仮定し、エネルギー利用率と炭素固定効果は、第 1 表の通りにまとめられている。以上の方法の特長は、正味量として CO₂ を大気に放出することなく化石燃料を使用することができ、しかも、石

第1表 バイオマスと化石燃料からのメタノール製造プロセスのエネルギー効率と CO₂ 削減量

プロセス	元の化石燃料をベースとした場合の利用可能なエネルギー (%)	生成されたメタノールをベースとした単位エネルギーあたりのCO ₂ 削減量 (ポンドCO ₂ /10 ⁶ Btu)
バイオマス+メタン →メタノール	166	-78
バイオマス+石油 →メタノール	115	-78
バイオマス+石炭 →メタノール	50	0

油、天然ガスではエネルギー効率を高めることができる。

本法ではバイオマスの生産が必要であるが、超短伐期造林では、年平均(乾物)成長量が15トン/haという高い土地利用生産が期待できる。樹種としては、早生樹といわれるポプラ類、ヤナギ類、カンパ類、ハンノキ類、ユーカリ類、アカシア類などである。栽培管理(施肥、灌水、耕耘、薬剤散布)、収穫、搬出経費は収穫の50%が必要と試算されている(丹下・佐々木, 1990)。

11. 人工的地球温度制御法

近似的に取り扱えば、地球大気温度 T は太陽からのエネルギーと地球からの放射エネルギーとの熱収支により、式(11)で表わされる。

$$(1-\alpha)\pi r^2 s = 4\pi r^2 \varepsilon \sigma T^4 (1-\beta) \quad (11)$$

ここで、 α は地球の太陽光の反射率(アルベド)、 r は地球の半径、 s は太陽定数、 ε は放射係数、 σ はステファン-ボルツマン定数、 β は大気中の赤外線吸収率である。現在、我々は大気中への CO₂ の放出を極力低減することによって β の増大を緩め、大気温度 T の上昇を抑止しようとしている。しかし、式(11)から明らかなように、地球のアルベド α を大きくすることにより、大気温度の上昇を抑制することができる。

その具体的な方法の一つとして、ジェット機により亜硫酸ガスを成層圏に散布し、生成したエアロゾルにより太陽光を反射させ、その冷却効果によって温暖化を抑止する方法(ブロッカー, 1988)が提案されている。この原理は亜硫酸エアロゾルは太陽光を反射するが、地球面からの赤外線を反射せず透

過させる性質を持つためである。亜硫酸ガスによる地球の冷却現象は、大規模な火山の爆発による平均温度の低下で、常に人類が経験していることである。

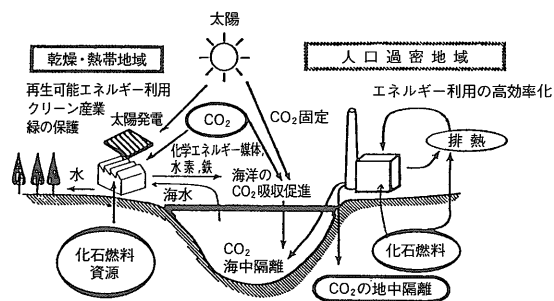
この方法のコスト計算によれば、米国の年間国防費の10分の1以下の費用で、CO₂ 濃度が2倍になった場合におこる温暖化を打ち消すことができるという。本法は技術的・経済的には実現可能であると考えられるが、大気中に莫大な量の亜硫酸ガスを散布した場合に他への影響がないかどうかなど、的確な事前評価が必要である。

その他の人工的な地球温度制御法として、深海冷水汲み上げによる地球大気温度冷却法(高野, 1990)がある。海面の平均温度は約18°Cであるが、水深1000 mでは約4°C以下と大変冷たい。海洋の熱容量は大気の1000倍もあり、海面の温度が1°C下がれば、大気平均気温は3°C下がるであろうと見積られている。CO₂ などの温室効果ガスが大気中に増加しても、海面の温度を現状に保っておけば、大気温度の上昇も抑制できるであろうという考えである。具体的には、海面下数百 m の冷水を汲み上げ、海面を冷却する。海水の汲み上げには動力を必要とするが、海洋に豊富に存在する波力、太陽エネルギーなどの自然エネルギーを利用することが可能である。

ここで紹介した地球温度の制御法を、実用化するためには多大の技術開発が必要である。本法の特長は、まず第一に便利化石燃料を人類が使い続けられることである。もう一つの特長は、本技術はCO₂ 以外のフロン、メタン、亜酸化窒素などの温室効果ガスによる温暖化に対しても有効なことである。

12. おわりに

CO₂ を回収し、炭化水素や炭水化物に転換(再資源化)する方法も提案されているが、再資源化にはエネルギーが必要であり、さらにCO₂ を放出する恐れがある。将来、太陽エネルギーなどの再生可能エネルギーを大幅に導入した場合に、二次エネルギーシステムとして輸送、貯蔵などの技術が必要である。再資源化は、CO₂ の対策法(固定法)と考えるよりも、二次エネルギーシステムのためのエネルギー媒体の合成法と位置付けて考えるべきであろう。



第7図 CO₂削減のための新しいエネルギー・産業システムの例

CO₂等による地球温暖化は、人類の存亡にもかかわる重大かつ緊急性の高い問題である。今後CO₂対策法の研究が進み、第7図(小宮山ら, 1992)に示すようにCO₂の地中貯留法などを中心とした、新しいエネルギー・産業システムが一日も早く実現され、CO₂問題が解決されることを期待する。

文 献

浅井孝悦・尾崎雅彦・村上信明・藤岡祐一(1991)：二酸化炭素の深海への送り込みシステムについて。日本造船学会論文集, 170, 369-377.
 Barchas, R. and Davis, R. (1992): The Kerr-McGee/ABB Lummus Crest technology for the recovery of CO₂ from stack gases. Energy Convers. Mgmt, 33, 333-340.
 ブロッカー, W. S., 斎藤馨児訳(1988)：なぜ地球は人が住める星になったか。講談社, 299p.
 藤谷 義(1991)：燃焼排ガスからのCO₂分離技術の効率化対策。化学工学, 55, 871-874.
 Haugan, P. M. and Drange, H. (1992): Sequestration of CO₂ in the deep ocean by shallow injection. Nature, 357, 318-320.
 Hendriks, C. A. and Blok, K. (1992): Carbon dioxide recovery using a dual gas turbine IGCC plant. Energy Convers. Mgmt, 33, 387-396.
 茅根 創(1991)：地球温暖化とサンゴ礁。地質ニュース, 445, 43-49.
 小出 仁(1990)：地中へのガス状廃棄。地球温暖化問題ハンドブック, アイビージー, 345-347.
 小出 仁(1992)：CO₂の地中貯留について。化学工学, 56, 345-350.
 Koide, H., Tazaki, Y., Noguchi, Y., Nakayama, S., Iijima, M., Ito, K. and Shindo, Y. (1992): Subterranean containment and long-term storage of carbon dioxide in unused aquifers and in depleted natural gas reservoirs. Energy Convers. Mgmt, 33, 619-626.
 小宮山 宏・山田興一・石谷 久(1992)：東京大学地球環境工学研究共同体における検討結果。
 Liro, C. R., Adams, E. E. and Herzog, H. J. (1991): Modeling the release of CO₂ in the deep ocean. MIT-EL91-002.
 Marchetti, C. (1977): On geoeengineering the CO₂ problem. Climat-

ic Change, 1, 59-68.
 Martin, J. H., Fitzwater, S. (1990): Iron in Antarctic waters. Nature, 345, 156-158.
 牧田武紀・平山孝平・桶口康二郎・縄田秀夫・泉 順, 大嶋一晃(1993)：PSA法によるボイラ排ガス中のCO₂除去技術の基礎試験結果。エネルギー・資源, 14, 62-66.
 Nakayama, S., Noguchi, Y., Kiga, T., Miyama, S., Maeda, U., Kawai, M., Tanaka, T., Koyata, K. and Makino, H. (1992): Pulverized coal combustion in O₂/CO₂ mixtures, Energy Convers. Mgmt, 33, 379-386.
 Nishikawa, N., Morishita, M., Uchiyama, M., Yamaguchi, F., Ohtsubo, K., Kimura, H. and Hiraoka, R. (1992): CO₂ clathrate formation and its properties in the simulated deep ocean. Energy Convers. Mgmt, 33, 651-657.
 大垣一成・赤野 徹(1992)：CO₂の日本海溝貯蔵とGAS HYDRATEの利用。エネルギー・資源, 13, 375-383.
 大隅多加志(1992)：深海におけるCO₂の挙動, 第5回海洋工学パネル講演原稿, 1-9.
 太田 啓(1993)：連続流PSA方式炭酸ガス分離プロセスの開発。エネルギー・資源, 14, 67-71.
 Saji, A., Yoshida, H., Sakai, M., Tanii, T., Kamata, T. and Kitamura, H. (1992): Fixation of carbon dioxide by clathrate-hydrate. Energy Convers. Mgmt, 33, 643-649.
 Sakai, H., Gamo, T., Kim, E-S., Tsutsumi, M., Tanaka, T., Ishibashi, J., Wakita, H., Yamano, M. and Oomori, T. (1990): Venting of carbon dioxide rich fluid and hydrate formation in mid-Okinawa Trough Back-arc Basin. Science, 248, 1093-1096.
 Seifritz, W. (1992): Partial and total reduction of CO₂-emissions of automobiles using CO₂-traps. Energy Convers. Mgmt, 33, 451-458.
 嶋 盛吾・渡辺良朋・斉木 博・清野通康(1990)：電力中央研究所報告, U90020.
 Sluijs, J. P., Hendriks, C. A. and Blok, K. (1992): Feasibility of polymer membranes for carbon dioxide recovery from flue gases. Energy Convers. Mgmt, 33, 429-436.
 Song, K. Y. and Kobayashi, R. (1987): Water content of CO₂ in equilibrium with liquid water and/or hydrates, SPE formation evaluation. Society of Petroleum Engineers, 500-508.
 Steinberg, M., Cheng, H. C. and Horn, F. (1985): A systems study for the removal, recovery and disposal of carbon dioxide from fossil fuel power plants in the US. Brookhaven National Laboratory, Report No. 35666, New York.
 Steinberg, M. (1990): Biomass and Hydrocarb technology for removal of atmospheric CO₂. Brookhaven National Laboratory, Report No. 44410, New York.
 Suda, T., Fujii, M., Yoshida, K., Iijima, M., Seto, T. and Mitsuoka, S. (1992): Development of flue gas carbon dioxide recovery technology. Energy Convers. Mgmt, 33, 317-324.
 高野健三(1990)：深海冷水利用技術。地球温暖化問題ハンドブック, アイビージー, 514-517.
 丹下 健・佐々木恵彦(1990)：エネルギーブランテーション, 地球温暖化問題ハンドブック, アイビージー, 288-293.
 角皆静男(1988)：海洋物理科学と生物圏。科学月報, 41, 923-927.
 Yagi, T., Shibuya, H. and Sasaki, T. (1992): Application of chemical absorption process to CO₂ recovery from flue gas generated in power plants. Energy Convers. Mgmt, 33, 349-355.

SHINDO Yuji (1993): Studies on CO₂ removal and reduction.