

CO₂海洋処理法の基礎研究

綾 威雄*、山根 健次**

Basic Study on CO₂ Sequestration in the Ocean

by

Izuo AYA*, Kenji YAMANE**

Abstract

This report consists of two Parts. Part I deals with a bibliographical survey concerning methods of CO₂ sequestration in the ocean. In chapter 1, the background of the earth warming issue and the authors' position on this matter are discussed. In chapter 2, two basic measures of CO₂ treatment in the ocean, that is, the ways to dissolve CO₂ in the ocean and to store CO₂ in the ocean basin, are introduced, and unsolved problems in both of the methods are explained.

Part II treats in detail the results of various kinds of experiments conducted by using two high-pressure-loop tanks which simulate the pressure and temperature of the ocean at 700 meters and 3000 meters deep respectively. In chapters 3, the dissolution rate and ascending velocity of a single CO₂ droplet in the condition of about 500 meters deep ocean are discussed and the maximum diameter of CO₂ droplets permitted in the dissolution method is estimated.

In chapter 4, the results of several experiments indispensable to the assessment of CO₂ storage method in the ocean basin, such as the temperature dependence of dissolution rate of a CO₂ droplet covered with CO₂ hydrate film and the stability of stratified CO₂-rich water layer appeared above a stored CO₂ lake, are explained. In chapter 5, pH numbers of CO₂-rich sea water at 30 MPa which represent the impact of the acidification around a CO₂ storage site on the ocean environment are treated.

* 原子力技術部

** 大阪支所

原稿受付 平成7年9月19日

目次

まえがき	2
第I部 CO ₂ 海洋処理法に関する調査	3
第1章 地球温暖化について	3
1.1 大気中CO ₂ 濃度の変遷	3
1.2 CO ₂ 対策の緊急性	4
1.3 炭素循環から見た地球温暖化	5
1.4 温暖化の程度と影響	5
1.5 地球温暖化問題解決の困難さ	6
1.5.1 技術的困難さ	6
1.5.2 社会的困難さ	7
1.6 エネルギー問題・人口爆発との関わり	7
1.7 光合成への期待	7
1.8 第1章のまとめ	8
第2章 CO ₂ 海洋処理法	8
2.1 CO ₂ 海洋処理研究の経緯	8
2.2 海洋のCO ₂ 処理能力	8
2.3 海中におけるCO ₂ の状態	8
2.4 CO ₂ 海洋処理の分類	10
2.5 溶解法の特徴と問題点	10
2.5.1 気体溶解法	10
2.5.2 液体溶解法	10
2.6 深海貯留法	11
2.6.1 必要水深	11
2.6.2 閉じこめ型	11
2.6.3 中和反応型	11
2.6.4 窪地型貯留	12
2.6.5 置換型	12
2.6.6 クラスレート貯留型	12
2.6.7 深海貯留法の特徴と問題点	12
2.7 ドライアイス法	13
2.8 関連技術	13
2.8.1 CO ₂ 回収技術	13
2.8.2 輸送方式	13
2.8.3 注入方式	13
2.9 クラスレートについて	14
2.10 第2章のまとめ	15

第II部 CO ₂ 海洋処理法に関する基礎実験	16
第3章 液体溶解法の検討	16
3.1 実験装置	16
3.2 CO ₂ 液泡の上昇速度	16
3.3 CO ₂ 液泡の溶解速度	17
3.4 上昇中CO ₂ 液泡の溶解特性	18
3.5 許容最大液泡径	19
3.6 実海域適用時のシナリオ	19
第4章 深海貯留法に関する実験	19
4.1 CO ₂ 深海貯留模擬実験装置	19
4.2 CO ₂ クラスレートの生成特性	21
4.2.1 生成形態に及ぼす注入法の影響	22

4.2.2 注入速度の影響	22
4.2.3 CO ₂ 温度の影響	22
4.2.4 水の履歴の影響	23
4.2.5 不純物の影響	23
4.2.6 クラスレートの析出	23
4.3 クラスレート生成率と貯留深度	24
4.4 クラスレート膜の成長速度と引っ張り強度	24
4.4.1 クラスレート膜の成長速度	25
4.4.2 クラスレート膜の引っ張り強度	25
4.5 クラスレートの溶解性	25
4.5.1 静止水中CO ₂ 液泡の溶解速度	26
4.5.2 流水中CO ₂ 液泡の溶解速度	26
4.5.3 高濃度CO ₂ 水中のCO ₂ 液泡の溶解速度	27
4.5.4 CO ₂ 貯留法の限界界面積	29
4.6 CO ₂ 溶解海水の密度	29
4.6.1 小濃度溶解実験	29
4.6.2 小濃度溶解実験における密度変化	29
4.6.3 CO ₂ 溶解水の沈降性	30
4.6.4 高濃度溶解実験	31
4.6.5 低濃度・高濃度溶解実験の比較	32
4.7 深海貯留模擬実験	32
4.7.1 クラスレート生成域におけるCO ₂ 溶解度 (飽和濃度)	33
4.7.2 溶解度の温度依存性	34
4.7.3 角型ビーカーからのCO ₂ 溶解実験	34
4.7.4 密度成層を横切るCO ₂ 溶解速度	35
4.7.5 実海域への適用	35
第5章 CO ₂ 溶解水のpH計測と若干の考察	36
5.1 CO ₂ 溶解水のpH計測	36
5.2 炭酸カルシウムの溶解	37
第6章 第II部のまとめ	38
6.1 第II部の成果	38
6.2 今後の重要課題	38
謝辞	43
文献	43

まえがき

1987年に国連から 'OUR COMMON FUTURE' と題した報告書が提出されたのを契機に、大気中に存在する二酸化炭素 (CO₂) などの温室効果ガス濃度の増加による地球温暖化がマスコミを中心に社会的に大きく取り上げられるようになった。著者らは、かつて船舶用消火剤としてCO₂を取り扱った経験があり、大気中のCO₂による地球温暖化に注目した。そして、船舶機関からの排ガスに含まれるCO₂を海洋の表層水に吸収させることはできないかと考え、平成2年度に一般研究「二酸化炭素の海中溶散技術に関する基礎研究」として検討を行った。その結果、表層海水のCO₂濃度は大気中CO₂濃度とほぼ釣り合っており、排ガス中のCO₂を表層海水に溶解除去できたとしても、溶解CO₂のほとんどは速やかに大気へ

環流するため、余り意味のないことが判明した。一方、上述の国連報告の数年前に、人為起源のCO₂を深海で処理するアイデアが米国の研究者らにより提案されており、マスコミもCO₂固定化として海洋処理法に期待を寄せる論調が続いた。

このような背景の下に、CO₂海洋処理法評価のための基礎データを得ることを目的として、平成3～5年度に重点基礎研究「高圧海中の二酸化炭素固定化技術に関する基礎研究」を実施した。本報告は、主としてこの重点基礎研究において得られた結果をとりまとめたものであり、第I部で調査研究の結果について、第II部で調査研究を踏まえた基礎実験の結果についてそれぞれ述べる。

第I部の調査研究の結果は以下の通りである。

(1) CO₂海洋処理法は、CO₂を深度1000m～2000mの中層海域に溶解拡散させる「溶解法」と、CO₂を深海底の特定場所に集める「貯留法」とに分類することができる。

(2) CO₂溶解海水は濃度とともに密度が増すことを考慮すれば、深海貯留の必要深度は、CO₂が飽和CO₂溶解海水より重くなる3500m以上となる。

(3) これらのCO₂海洋処理法は、いずれも海洋環境に悪影響を及ぼす可能性があるため、影響評価を適正に行うことが重要である。

(4) 両処理法の影響評価を行うには、深度500～1000m以深の海中で生成する包接化合物の一種であるCO₂クラスレートの性質についてのデータが不可欠である。

第II部では、深度700mと3000mの深海圧力と温度を模擬できる二つの実験装置を製作し、CO₂クラスレートの溶解速度の測定や貯留模擬実験等を行い、以下の成果を得た。

(5) CO₂液泡の上昇速度と液泡径の関係から、CO₂液泡が単位距離上昇する間の溶解量は液泡径によらずほぼ一定となる。これは、処理海域のCO₂濃度もほぼ一定になることを意味しており、CO₂溶解法にとって望ましい性質である。

(6) 液体溶解法における初期液泡径を上昇速度と液泡径の関係から試算し、深度1000mから500mまで上昇する間に溶解する初期液泡径として7.2mmを得た。

(7) CO₂固定化法として期待されていたCO₂クラスレートは、CO₂-(海)水界面上に膜状として生成されるが、深海条件下で徐々に溶解することが判明した。その溶解速度は、低温ほど遅くなり、1～2℃では液体CO₂の1/3程度となる。

(8) CO₂クラスレートの溶解性を前提として、深海底の窪地の途中までCO₂を貯留するという新貯留法を提案した。この新貯留法では、液体CO₂の上面と窪地との間にはCO₂を溶解した密度成層が形成されるが、下方ほど溶解濃度が高くなり高密度となるため、密度成層自身は安定化する性質がある。

(9) この密度成層を不安定化させる要因である深海流やクラスレート生成熱の影響を調べるための模擬実験の

結果を、リチャードソン数を基に実海域に適用したところ、密度成層の厚みが100m以上あれば、流速0.66m/sまでの深海流に対して安定であると予測された(ほとんどの深海底における流速はこの限界流速より小さいと考えられる)。

(10) 安定な密度成層を上方に通過するCO₂フラックスは、分子拡散程度となり、事実上窪地外への溶解はないと考えられる。

(11) 以上の他、貯留法評価に必要なCO₂溶解水の密度とpH数及びクラスレート膜強度の計測を行った。クラスレート膜強度については十分なデータが得られておらず、今後に残された重要課題となっている。

第I部 CO₂海洋処理法に関する調査

第1章 地球温暖化について

1.1 大気中CO₂濃度の変遷

地球表面上の水はほとんどが液体である。水が液体である温度・圧力条件は、蒸気表からも明らかなように極めて限られている。このことを、天文学的には、地球の軌道が少しでも太陽に近くても遠くても地球上に液体としての水は存在し得ないと説明されている。この液体の水が地表の70.8%をおおっており、地球上に生命を育む

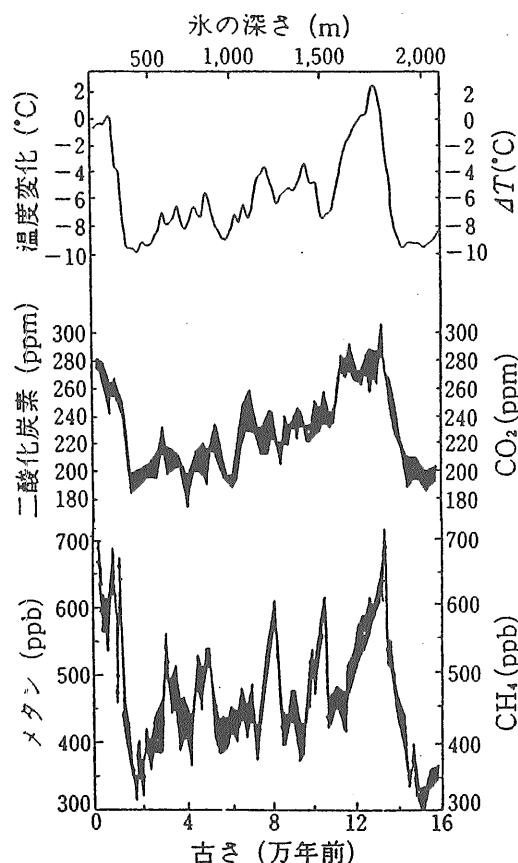


図1 南極の氷床コア中に残された16万年前までの大気中CO₂メタン濃度と気温の変動⁽²⁾

穏和な環境を創成してきた。ところが、近年、この微妙な地球表面温度に異変が起こっており、しかもその原因が人間の活動に起因するのではないかとの懸念が広がっている。

その異変とは、二酸化炭素 (CO₂) やメタンなど、温室効果ガスの大気中濃度の増加による地球温暖化現象である。大気中の温室効果ガスの内、濃度の高いCO₂の影響が最も大きく、1880年からの100年間の全温度上昇幅0.79℃の71%に当たる0.55℃の地表温度上昇をもたらしている¹⁾。

ところで、原始大気の約97%はCO₂であり、その分圧は30気圧にも達していた²⁾が、サンゴなどの生物活動を通してゆっくりと炭酸カルシウム等として固定化が進み、新生代では数100ppmまでに減少した。図1³⁾は、南極のヴォストーク基地の氷床コア分析から明らかにされた16万年間までの大気中CO₂濃度、メタン濃度と気温の変動を示したものであるが、これらに強い相関のあることが分かる。この図から、沖積世におけるCO₂濃度は、氷期(2~8万年前)には200ppm程度、後氷期(1万年前以降と12万年前後)では270ppm程度であったことが分かる。氷期と後氷期との全球平均温度差は約5℃(極地の約半分)とされているが、この温度変化幅は、70ppmのCO₂濃度差から予想される1~2℃の温室効果からは説明できないため、「何らかの原因で気温の変化が起こり、正のフィードバック効果としてCO₂濃度が変化した」と考えられている⁴⁾。氷期や後氷期といった気温変化の原因は不明であるが、図1の気温と温室効果ガス濃度との相関の良さが、「今回の地球温暖化現象も、たまたま地球が温暖化時代に入ったことが真相で、CO₂濃度の増加は結果である」とする考えの一つの拠り所となっている。

しかしながら、図2⁵⁾に示されるごとく、数千年にわたり270~280ppmで安定していた大気中CO₂濃度が、産業革命にともない森林伐採がヨーロッパ全土で盛んに行われるようになった19世紀初頭と時を同じくして増加を始めたことは、今回の大気中CO₂濃度の増加が人為起源であることを示す分かりやすい証拠である。産業革命以降は、化石燃料消費の急増も加わり、人為起源CO₂排出量の増加とともに、大気中CO₂濃度も加速度的に増加し、既に350ppmに達している。CO₂濃度は、図3⁶⁾に示されるように、現在も、1.5ppm/年の割合で増え続けている。

図3は、ハワイのマウナロア山での観測例であるが、恒常的な大気中CO₂濃度の増加に周期変動が重なっている。この変動は、陸生植物の光合成の季節変動によるものである。大陸から遠く離れた所にまで、季節による植物活動の違いがCO₂濃度の変化となって現れていることが分かる。南半球におけるCO₂濃度の季節変化は、北半球と逆位相になっているが、その振幅は南半球に植物が少ないこともあり、数分の1程度となっている⁶⁾。

1.2 CO₂対策の緊急性

現在の大気中CO₂濃度の増加は人為起源であるとする意見が、大方の専門家の見方であるが、上述したように、一部の専門家は、現在のCO₂濃度増加は氷期-後氷期サイクルからくる温暖化により、例えばツンドラ地帯の土壌からCO₂やメタンがなどの温室効果ガスが大気に供給される結果であると考えている。しかし、地球が温暖化傾向にあることと大気中CO₂濃度が増加を続けていることは事実である。また、CO₂は温室効果ガスであり、その濃度低下は温暖化抑制に有効であることも事実である。従って、温暖化傾向が人類にとって不都合な現象である

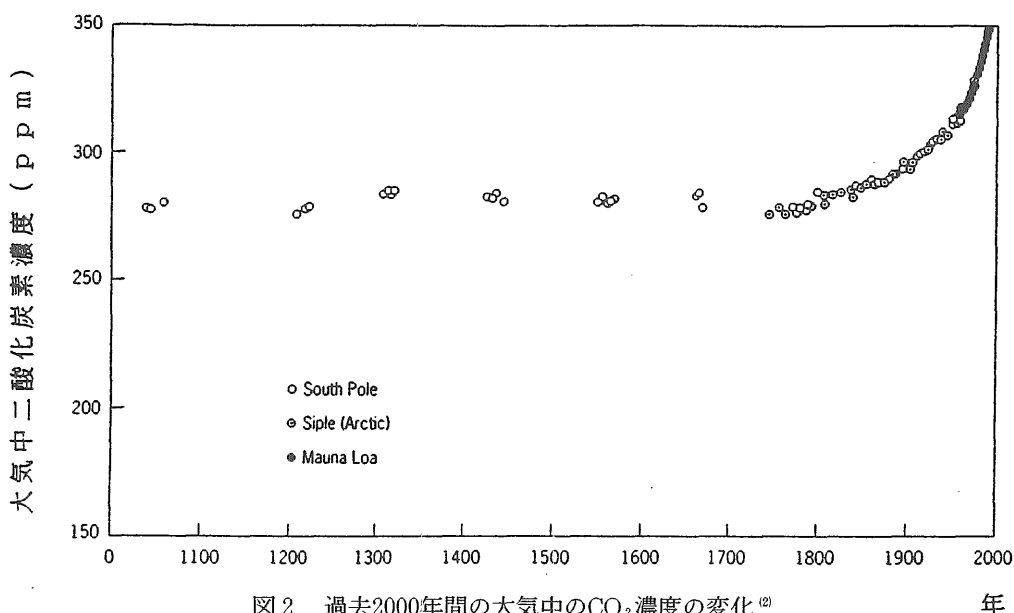


図2 過去2000年間の大気中のCO₂濃度の変化⁵⁾
(1958年以前は氷床コア中のガス分析による)

以上、その原因が人為起源であるか否かにかかわらず、CO₂濃度増加を人工的に抑制することは意味のあることと言える。

ところで、大気中のCO₂総量は 732×10^{15} g であるがその大気滞留時間は190年程度と考えられている⁽⁹⁾。これは、CO₂の人為起源放出量を現状で固定しても当分は直線的に大気中CO₂濃度は増加し、ある時点で完全にCO₂の排出を0としても、CO₂濃度が産業革命以前の自然平衡値に戻るには同程度の時間を要することを意味している。

一方、平均地表温度は大気と海洋が熱平衡に達したときの温度であるが、現在のように温暖化が進行している場合には、海洋の熱的時定数を考慮しなければ真の平衡温度は求められない。海洋の熱的慣性が大きいため、平衡温度に達するまでには数十年を要すると考えられている⁽⁹⁾。

以上のことから、温暖化がより顕在化してから、或いはそのメカニズム及び影響の程度と範囲が解明されてから対策を立てるのでは手遅れとなる可能性が高い。

1.3 炭素循環から見た地球温暖化

ここで、地球表層の炭素循環を考えてみる。図4⁽¹⁰⁾は、産業革命以前と現在(1980-1989年)の炭素循環を示している。この図によると、産業革命以前は、大気から見れば収支は釣り合っており、大気中の蓄積量、すなわちCO₂濃度が一定に保たれていたことが分かる。ところが、現在(1980-1989年)では、化石燃料(Fossil Fuel)の燃焼と森林消失(Deforestation)という人為起源CO₂の約半分が大気に蓄積され、CO₂濃度の増加をもたらしている。残りの半分は、陸生生物(主として植物)

と海洋へそれぞれ同程度流れている。

海洋中の循環については、産業革命以前は流入と流出量のバランスが保たれていたが、現在では、表層域から中層・深層域へ差し引き162億トン/年の炭素の流れが存在する。本研究の課題であるCO₂の海洋処理はこの表層域から中層・深層域への自然循環を人工的に促進することに相当すると言える。

なお、海面におけるCO₂濃度は平均すると大気中のCO₂分圧とほぼバランスしているが、局所的には海面温度や大気中濃度の違いにより、中緯度で吸収が、赤道付近で放出が行われている⁽⁴⁾。また、海洋-大気-土壌-河川間にも小さな循環があり、この循環では、土壌に2億トン/年の炭素が蓄積されている。

中層・深海のCO₂蓄積量は大気の51倍程度もあり、しかも溶解CO₂濃度は飽和からはるかに低いレベルにあることから、海洋の持つ潜在的CO₂処理能力の大きさが理解できる。

海洋と土壌に蓄積されたCO₂量が大気中の蓄積量より大きいことと、これらの間を移動するCO₂総量(差し引きではない)が人為起源CO₂量の十数倍であることが、「現在のCO₂濃度増加は人為起源ではない」との考えが生まれる一つの背景となっている。これに対し、人為起源説に賛成する側は、「人為起源CO₂量は、全炭素循環量から見れば多くはないが、産業革命以前には数千年にわたってバランス(平衡)していた循環をアンバランス(非平衡状態)にしている」と考えている。

1.4 温暖化の程度と影響

CO₂など温室効果ガスの大気中濃度増加による地表気温の変化予測については、IPPC(International Panel

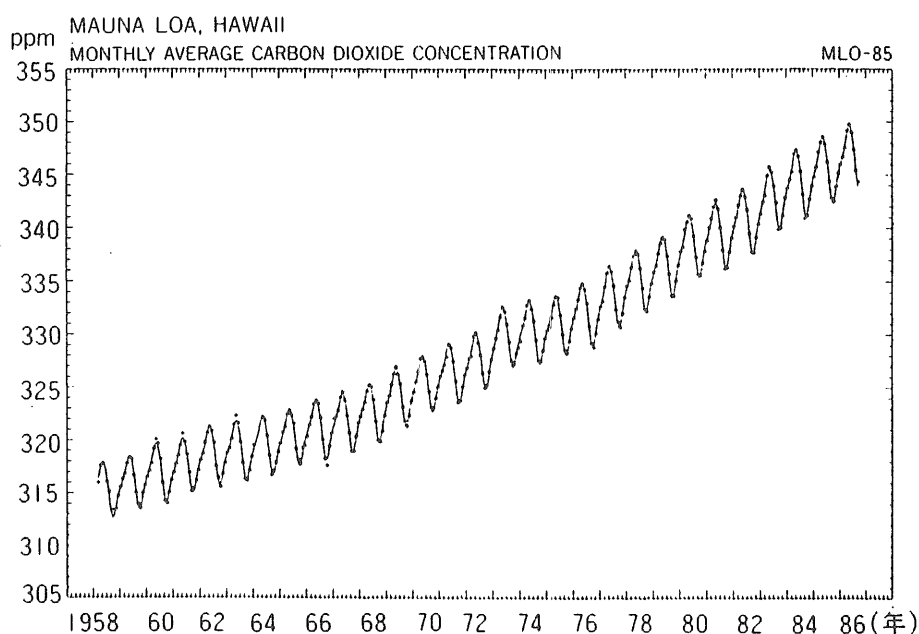


図3 ハワイマウナロア観測所における大気中CO₂濃度の推移⁽⁴⁾

a) 産業革命以前の炭素循環

b) 現在 (1980-89年) の炭素循環

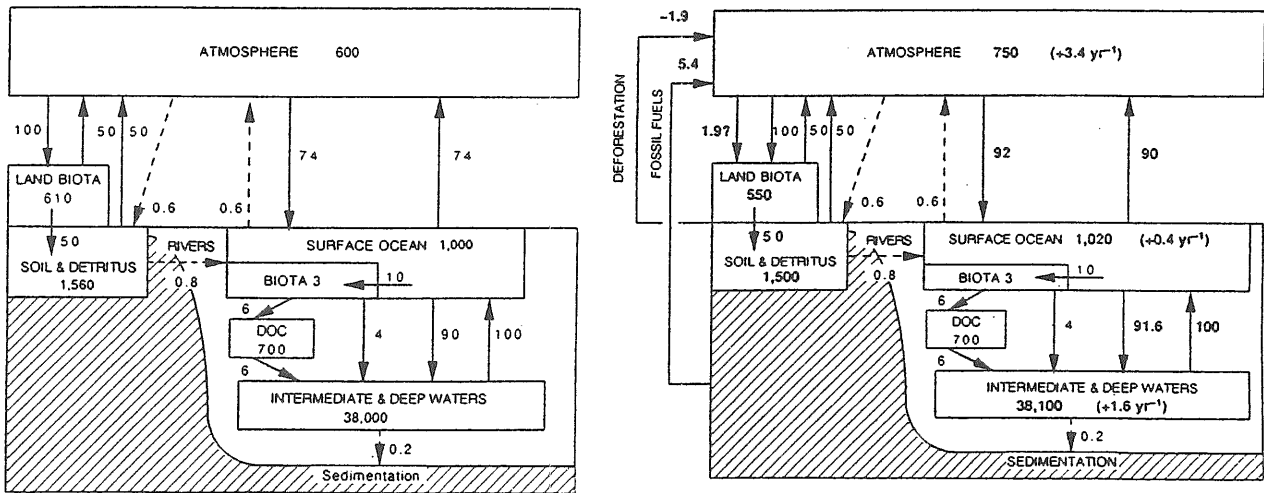


図4 産業革命以前と現在の地球規模の炭素循環²⁾
(単位はギガトン/年 [1ギガトン=10億トン])

表1 大気循環モデルCO₂ 2倍増、4倍増による
気温および降水量変化¹⁾

研究者名 (論文発表年)	CO ₂ の増加 (2: 2倍増、4: 4倍増)	気温変化 [°C]	降水量変化 [%]
Getes, et al. (1981)	2	0.20	-1.5
	4	0.46	-3.3
Mitchell (1983)	2	0.16	-2.5
	2	2.25	5.2
Mitchell and Lupton (1984)	4	4.7	7.5
Manabe and Stouffer (1979,1980) and Manabe, et al. (1981)	4	4.1	6.7
Wetherald et al. (1984)	4	4.8	10.0
Hansen, et al. (1984)	2	4.2	11.0
Washington and Meehl (1984)	2	3.5	7.1
Wetherald and Manable (1986)	2	4.0	8.7

for Climate Change : 気象変動に関する政府間パネル) を初めとして、多くの組織や研究者が発表している。表1¹⁾は、CO₂濃度が2倍あるいは4倍になった場合の地表平均温度と降水量の変化予測例を示している。この表から明らかなように、大気循環モデルの違いにより、気温変化に最大10倍もの差があることが分かる。最近では、従来考慮されていなかった雲の影響を入れるなど、大気循環モデルの改良が進められている。ただ、いずれのモデルにおいても、温暖化傾向は地球全体で平均的に生じるのではなく、極に近いほど顕著に現れるという特徴がある。これに関連する事実として、氷河期と後氷河期と

の地表気温差は平均で5°Cであったが、南極では約10°Cであった²⁾とされる(図1参照)。

地表温度の上昇がもたらすと考えられている現象として、極地方の一部氷河の融解と海水温度上昇による海面上昇、降水量変化、光合成の活発化³⁾などがある。

1.5 地球温暖化問題解決の困難さ

地球温暖化問題の解決がいかに困難なものであるかを、技術的側面と社会的側面から考察する。

1.5.1 技術的困難さ

図4に示される大気中炭素の増加速度 34億トン/年をCO₂量に換算すると、125億トン/年となる。この数値は人間が処理する量としては極めて大量である。具体的に示すと、日々の処理量は20万トントanker-171隻分に相当する。全世界の4.7%の人為起源CO₂を排出するわが国だけでも、毎日8隻分ものCO₂を回収・処理しなければならない。この大量性が、地球温暖化ガスとしてのCO₂を大気から隔離する際の技術的困難さをもたらす。従来の公害物質にはなかった性質である。言い換えれば、人類はこれほど大量のCO₂を大気に排出し続けているのである。

これまでに、CO₂の回収・処理を目指した、化学的、光化学的、電気的、生物的、物理的手法に基づく様々なアイデアが発表されているが、上述の大量処理の条件を満足するものは少ない。もっとも、困難な地球温暖化問題の解決に当たっては、一つの方法のみに頼らず、法的・行政的手段も含め総合的に対処しなければならないことは当然だが、採用される方法は、大量性に適してい

ることが望ましく、本研究の対象であるCO₂の海洋処理は大量性に適している。このように、地球温暖化抑制策としてCO₂処理を考える際には、大量性という条件を常に念頭に置かなければ、誤った検討を行う危険性がある。

例えば、珊瑚礁によりCO₂を固定化させる場合、100万kWクラスの火力発電所から排出される1.8万トン/日のCO₂処理には200km²もの広大な珊瑚礁が必要になるとの報告⁷⁾がある。上述の1日当たり20万トン級タンカー8隻分のCO₂は100万kWクラスの発電所の89倍に相当することを考えると、珊瑚礁の育成による解決は非現実的であることが容易に理解できる。珊瑚礁がCO₂の固定化に有効であったのは、地質的年代という人類の活動時間の何桁も長い時間を通してゆっくりと行われてきたからである。言い換えれば、今の大気中CO₂濃度の増加速度は、珊瑚礁の固定速度から見れば、急速に過ぎるということである。

ところで、CO₂は、化学的にはエネルギーを取り出した後の抜け殻であり、化学ポテンシャルは低く、新たな物質に変換するには、エネルギーが必要となることが多い。そのような中、高分子錯体を利用する方法⁸⁾は、原理的には廃熱レベルの低エネルギーが利用でき、大量性にもある程度適している。

1.5.2 社会的困難さ

本報告は、現在の温暖化傾向を「地球及びそれを共有する全生命にとって望ましくない現象」との前提で執筆している。しかし、自然現象か人為CO₂起因かといった温暖化の原因はともかく、温暖化抑制対策に余り熱心でない大国がある。地球温暖化の抑制は、全世界の国々が一致協力して対処しなければ、ほとんど無意味であるにもかかわらず、この問題について国際的なコンセンサスは得られていない。

人為起源CO₂の排出量を減少させることは、地球温暖化問題の解決法として、直接的で分かりやすく、地球環境に対して何の副作用ももたらさない。そのため、温暖化による海面上昇の被害を真っ先に受ける恐れが高いと考えているオランダ等を中心に、CO₂排出に対して税金をかける「炭素税」という考えが浮上してきた。しかしこれもまた、各国間で意見に大きな隔たりがあり、その差は埋まりそうにない。例えば、わが国政府は、時期尚早との立場をとっている。

1.6 エネルギー問題・人口爆発との関わり

ほとんどの人為起源CO₂は化石燃料の燃焼、即ちエネルギーを取り出した後の廃物として大気に捨てられている。従って、地球温暖化問題はエネルギー問題であるとも言える。

当然のことながら、エネルギー消費を少なくできれば、その分CO₂排出量を少なくすることができる。その方法として、省エネルギーの推進が挙げられる。例えば、わ

が国では、石油ショック時代は石油消費量を少なくすることを目的に、又、最近はCO₂排出量の低減を目指した様々な開発・工夫が検討されている。その結果、工業先進国の中では、国民一人当たりのエネルギー消費量は少ない方である(例えば、米国の1/2.5⁹⁾)。しかしながら、単なる省エネルギーのみでは、大幅なCO₂排出量の低減は望めそうにない。やはり、CO₂排出の少ない既存及び新エネルギーのシェア拡大に努めることが効果的である。なお、残念なことであるが、脱石油の一環として進められている火力発電所の石炭化は、地球温暖化傾向の抑制という立場からは望ましくないことである。

もう一つのエネルギー問題として、南北格差の是正がある。先進工業国との比較において、発展途上国の国民一人当たりのエネルギー消費量は相当少ないレベルにあるが、経済発展の著しい地域では、急速に上昇している。それ以外の国でも、エネルギー消費の増大を願っているところが多い。このような傾向が続けば、わが国など先進工業国で行っている省エネルギー努力は、地球温暖化抑制から見れば、ほとんど無意味化する危険性がある。

さらに深刻な問題として、多くの発展途上国で人口爆発が起こっている。人口爆発は、砂漠化とともに、人道に見えぬことのできない悲惨な状況を各地で作り出しているが、増加を続ける人々のために新たな薪炭エネルギーが必要となり、それが森林を消失させ、CO₂排出を加速させるという悪循環をもたらす。

このように、エネルギー問題や人口爆発といった解決困難な問題が、地球温暖化問題と表裏一体をなし、問題解決を一層困難なものとしている。

1.7 光合成への期待

無尽蔵な太陽光をエネルギー源とし、CO₂と水を原料に、固体有機物を生産する光合成は、人為起源CO₂の十数倍という大量のCO₂を一時固定化している。そのため、マスコミを始め多くの人々から、地球温暖化抑制対策の主役としての期待が寄せられている。しかし、図4を注意深く見ると、陸生植物が取り込むCO₂量と、土壌経由を含め植物から放出されるCO₂量は釣り合っている。これは、植物が固体有機物に変換したCO₂は、石炭にならない限り、やがて腐食して大気に戻ることを意味している。つまり、光合成は完全にCO₂を固定化しているのではなく、一時(50~数100年)固定化しているバッファの働きがあるのである。そのため、上述の文章で、'一時'固定化という形容詞を付したのである。従って、光合成にCO₂の完全な固定化を期待するのは行き過ぎである。

光合成は炭素循環のバッファであるという事実は、民間研究機関が1993年に行なったアンケート調査において、「CO₂対策技術」としての森林再生への期待度が、一般回答者で高かったのに対し、専門家では余り高くなかった¹⁰⁾ことと符合する。

しかしながら、CO₂の大きなバッファーである森林が人間の都合（薪炭源）と公害（酸性雨）により消失が続いていることは、地球温暖化に拍車をかける結果をもたらしており、容認できることではない。

1.8 第1章のまとめ

以上、現在の地球温暖化問題の背景と技術的・社会的問題点を考察してきた。その解決のためには、人為起源CO₂の排出量を産業革命以前のレベルに引き下げることが安全で分かりやすい。しかし、当時と比較して人口が数倍に膨れ上がり、なお加速度的に急増を続けている。一方、一人当たりのエネルギー消費を当時のような低い水準に逆戻りさせることは、世界の経済・政治状況が許すとは考えられない。つまり、人為起源CO₂の排出量を産業革命以前のレベルに引き下げることが事実上不可能であると言わざるを得ない。従って、温室効果ガスの大気中濃度増加による温暖化傾向を抑制するには、人為起源CO₂排出量の相当部分を何らかの方法で回収し、工学的或いは生物学的手法により大気から隔離する措置を執る必要がある。処理しなければならないCO₂の量が極めて膨大となるため、大量処理に適したあらゆる方法の成否を予め検討し、我々及び我々の子孫に、できるだけ多くの有望なオプションを準備しておくことが緊急かつ重要である。

回収したCO₂の大量処理には海洋処理が有望と考えられる。次章でその研究の現状と問題点を述べる。

第2章 CO₂海洋処理法

2.1 CO₂海洋処理研究の経緯

海洋のCO₂処理能力に着目した気候制御法⁽¹⁾が、1980年に米国の研究者らにより提案された。この提案は、現在のCO₂海洋処理研究の原型をなすものであるが、当初は注目されるまでには至らなかった。ところが、1988年の米上院における気候学者の「地球温暖化傾向に関する証言」⁽²⁾をきっかけとして、CO₂海洋処理が、基本的には困難な新技術の開発を不要とするところから、にわかに大きな関心を集めるようになった⁽³⁾。このように、本格的なCO₂海洋処理研究は緒についたところである。

CO₂海洋処理に期待が高まる一方、海洋環境を犠牲にするものではないかとの批判も相次いだ⁽⁴⁾。そのため、CO₂海洋処理研究は、海洋環境への影響解明を最大の課題として進められている。

2.2 海洋のCO₂処理能力

化学反応は分子間で行われるため、微量物質の濃度は、質量割合ではなく、分子数で比較の方が合理的である。そこで、大気と海洋の総分子数を比較してみる。空気と水の平均分子量はそれぞれ 28.8と18である。大気の質量はほぼ10mの厚みの水に相当するのに対し、海洋の平均水深は3795mで、70.8%の地表を占有している⁽⁵⁾ので、

海洋と大気の数値比は、 $(28.8/18) \times (3795 \times 0.708) /$

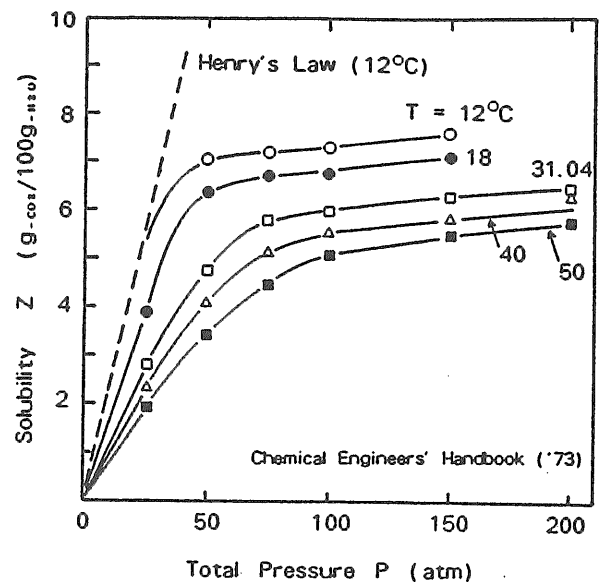


図5 純水中へのCO₂の溶解度
(文献(16)のデータから作図)

$10=430$ となる。つまり、海洋は大気の430倍もの分子数を有するのである。

図5（文献16のデータから作図）は、純水中へのCO₂溶解度を示している。水深500mに相当する50atm（約5MPa）辺りまでは、溶解度はヘンリーの法則に従って圧力に比例して増大するが、それ以上の圧力では飽和状態に近づく。また、溶解度は温度が低いほど大きくなり、水温2～3℃の深海では8～9質量%の溶解度が期待できる。この溶解度は、大気圧下の約40倍にも当たる。

海洋の水の分子数の多さと深海水の溶解度の大きさから、海洋のCO₂溶解能力は極めて膨大である。ちなみに、海洋の溶解度を平均5%と見積ると、溶解可能なCO₂量は 9.59×10^8 億トン⁽⁷⁾となり、これを前述の大気中CO₂の増加速度125億トン/年で除すと、767万年になる。

2.3 海中におけるCO₂の状態

図6は水（純水）-CO₂の相平衡図⁽¹⁷⁾を示している（水中に溶解したCO₂はH₂O(l)の中に含まれる）。CO₂は'hydrate'と表示された領域において、水と反応してクラスレート・ハイドレート（Clathrate-Hydrate：以降単にクラスレートという）と呼ばれる包接化合物を生成する。クラスレートは水素結合で結ばれた結晶構造をした固体であることから、一時期、有望なCO₂の固定化としてマスコミを中心に大いに関心が持たれた⁽¹⁸⁾。4本の曲線が集まっている点で、いわゆる4重点（Quadruple Point: Q₂）で、水-クラスレート-液体CO₂-気体CO₂の4相が共存できる点である。Q₂の圧力と温度は、1971年のデータによれば、それぞれ、4.468MPa, 10.15

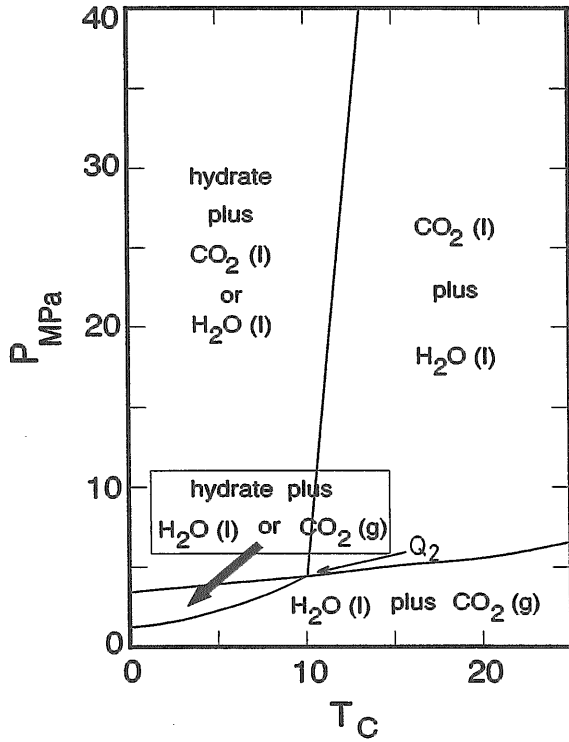


図6 水(純水)-CO₂の相平衡図⁽¹⁷⁾

°Cである⁽¹⁹⁾。なお、CO₂の3重点は0.511MPa、-56.5°Cである⁽²⁰⁾。

CO₂の海洋処理において重要な境界線は、4重点Q₂から上方へ伸びる線で、この線上では水-クラスレート-液体CO₂が平衡状態として存在し得る。つまり、この平衡線より高温側では、クラスレートは生成できず、低温側では生成可能である。この平衡線は圧力に非常に鈍感で、25MPaの圧力上昇に対する温度上昇は2°C程度と僅かである。また、4重点Q₂やそこから出る平衡線は、異物質の溶解により低温側へシフトする。シフト量は、(水の凝固点降下)×(水の融解熱)/(クラスレート分解熱)で求められる⁽¹⁹⁾。この関係を海水に適用すると、温度降下は1.3°C程度となる。なお、Kimuroらの人工海水を使った実験⁽²¹⁾によると、温度降下は1.5°C程度と若干大きくなっている。

海水による温度降下を1.3°Cとし、深度を圧力と見立ててCO₂の相図を描き直すと図7のようになる。図7には、海洋の鉛直温度分布の例が記載されている。この鉛直温度分布は、太平洋と大西洋の南北断面等温線図⁽²²⁾から、代表的な2地点を選んで著者らが曲線として描いたものである。海水温度は場所によりかなり異なり、北大西洋の方が、わが国近海の北太平洋より、深度600mと1000mでそれぞれ8°Cと3°C程度高くなっている。

CO₂は、飽和線(Saturation Line)より下方の温度・圧力条件で液体となるので、北太平洋では450m以深で、北大西洋では520m以深で液体となる。そして、北太

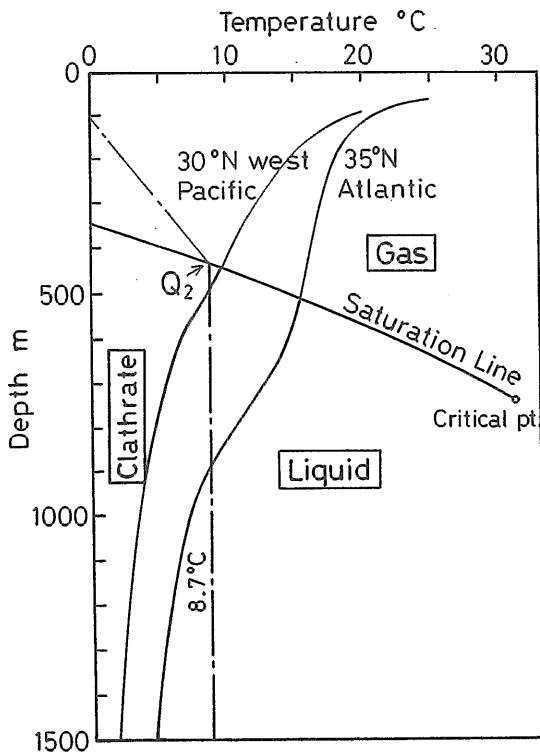


図7 深度相当圧力におけるCO₂の状態と代表的地点の鉛直温度分布⁽⁴¹⁾

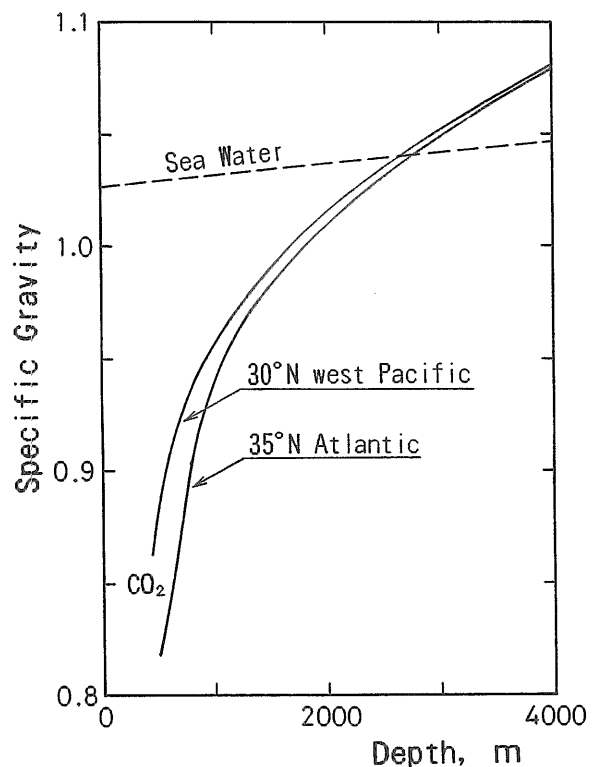


図8 CO₂と海水密度の深度依存性⁽⁴¹⁾

洋では500m以深で、北大西洋では900m以深で、クラスレートが生成可能となる。また、 Q_2 （飽和線と $T=8.7$ °Cの交点）からの斜め左にのびた一点鎖線と飽和線で囲まれた三角形領域は、 CO_2 ガスからのクラスレート生成域を示しているが、実際の海水温度はこの領域を通らないので、 CO_2 ガスからクラスレートが生成される深度は存在しない。

CO_2 の状態ばかりでなく、海水との密度差も、液化 CO_2 の海洋処理を分類する上での重要な要素である。図8は、深度に換算した圧力下における海水と CO_2 の密度（比重）の変化を示したものである。ここでは、密度計算には、圧力ばかりでなく図7に示される温度分布も考慮した。そのため、 CO_2 の密度曲線は海洋の場所により異なるが、海水の密度は、図7で示される程度の温度差ではほとんど差がないため、ほぼ一本の線となる。

2.4 CO_2 海洋処理の分類

処理する海域、深度により温度・圧力が異なり、 CO_2 の状態が気体、液体あるいはクラスレートに分かれる。そこで、 CO_2 の海洋処理法は、クラスレート化を目指した深海貯留法とクラスレートを利用しない溶解法（非クラスレート化）とに大きく分類することができる。以下、それぞれの処理法の特徴と問題点（研究課題）を整理する。

なお、海洋中ではドライアイスが安定して存在する領域が存在しないので、ドライアイスを利用する方法は、 CO_2 の最終形態からは、溶解法と貯留法を含むこととなるが、それらの割合は、主として投入されるドライアイスの大きさに依存する。

2.5 溶解法の特徴と問題点

溶解法は、文字通り CO_2 をできるだけ速やかに溶解拡散させる方法であって、「大気の430倍もの分子数を有する海洋に均質に溶解させれば、海洋中 CO_2 濃度の増加は僅かであり、海洋環境への影響もほとんどないであろう」という考えをその基本理念としている。

2.5.1 気体溶解法

気体溶解法は、 CO_2 ガスを図7で示す飽和線より浅い海域で放出させ、 CO_2 気泡が海面に達するまでに溶解させるものである。 CO_2 が溶解した海水は回りの海水より比重が大きくなるため、海底へと沈降することが期待⁽²³⁾できる。気体溶解法における放出水深は数百mの浅海であるため、他の海洋処理法と比較して経済的に有利と考えられている。しかし、以下の未解決課題が存在する。

(1) CO_2 溶解海水は酸性を呈する。処理海域におけるpH値と溶解 CO_2 の拡散過程が処理海域とその近傍の海洋環境にどのような影響を与えるか。

(2) 大規模な CO_2 気泡上昇ブルームに誘起される海水の上昇流が、 CO_2 溶解海水の沈降性にどのような悪影響

を及ぼすか。もし、 CO_2 溶解海水が海面まで達すると、 CO_2 を再放出する可能性が高い。

(3) 海面に達するまでに溶解が完了する最大気泡径はいくらか。

(4) CO_2 溶解海水が拡散沈降する場合であっても、下方の高密度低温海水と密度がバランスする水深で水平に広がる。そのバランス水深が500m程度と言われる自由対流圏⁽²⁴⁾より浅い場合には、比較的早期に溶解 CO_2 が海面まで達する可能性がある。

(5) 深度450~500mの飽和線上での気体 CO_2 の容積が液体 CO_2 の6~5倍⁽²⁵⁾であるため、液体として扱う他の海洋処理法より大規模な設備を必要とする可能性がある。

上記の課題の内、この方法の成否を決定づけると考えられる課題(2)の解明に向け、わが国とノルウェーとの共同研究が始められようとしている⁽²⁶⁾。

2.5.2 液体溶解法

液体溶解法は、液体状態で溶解させる方法と一時的にクラスレートの生成を許す方法がある。 CO_2 がクラスレートを生成しないという条件を付ければ、図7からその適用可能範囲は、北太平洋ではほとんどなく、北大西洋でも900~500mの狭い領域に限られる。

一方、クラスレートは、クラスレート生成域においても安定ではなく、徐々に溶解することが本研究の予備実験⁽²⁷⁾やそれに続く確認実験⁽²⁸⁾から明らかにされた。また、クラスレート生成域であっても CO_2 は必ずしもクラスレートになるとは限らない⁽²⁹⁾ことも判明した。従って、図7の飽和線より下方で、 CO_2 が海水より軽い2千数百m以浅という広い領域で液体溶解法が適用できる可能性が出てきた。その結果、わが国においても、液体溶解法が見直され、大量の CO_2 液泡が中層（600m）に放出された際の混合・溶解過程を明らかにするための模擬実験⁽³⁰⁾や CO_2 液泡溶解実験が行われるようになった。

液体溶解法は、気体溶解法より深い海域に放出させる必要があることから、経済的に不利ではないかとも考えられるが、処理容積が気体溶解法の数分の1で済むため、設備の小型化に結びつくという利点もある。また、処理水深が自由対流圏より深いことは、 CO_2 溶解海水が海面まで上昇し、 CO_2 を大気へ逆流させる可能性が低いことを意味している。

この液体溶解法にも、気体溶解法と同様、海洋環境への影響や液泡上昇ブルームの影響などの他、以下のような未解決課題がある。

(1) 飽和線まで上昇する間に完全溶解する許容最大液泡径。

(2) 液化 CO_2 の生産コストと耐圧輸送容器製作の面からは、1 MPa、-40°C程度が経済的であろうと言われている⁽³¹⁾。海中の放出地点では、1000m以上の相当長い注入パイプを通しての熱交換により CO_2 温度はある程度上昇するが、なお、氷点以下であると考えられる。このよ