

■ 研究論文 ■

CO₂の海洋投入に関する技術的可能性評価Feasibility Study on CO₂ Disposal in the Ocean

石谷 久*・松橋 隆治**・大村 昭士***

Hisashi Ishitani Ryuji Matsushashi Syoji Oomura

島田 荘平****・須鐘 孝彦*****

Sohei Shimada Takahiko Suyari

1. はじめに

いわゆる地球規模環境問題のうち温暖化問題はその影響範囲の大きさと、人類の生生活動にかかせないエネルギー消費そのものが関わる本質的な排出物であるCO₂が主要因であるという意味で、従来の産業廃棄物による汚染とは異なり抜本的な対応が迫られている。従って、CO₂排出の抑制策が極めて重要であるが、これは本質的には、省エネ、燃料転換、排ガスからのCO₂回収投入、あるいは大気中のCO₂固定（植林等）に限定される。これらの方策も現段階では単独で解決できるとは考えられずいずれも重要な検討課題であって、可能性は総て検討の必要がある。筆者らはこの中、エネルギーの安定性、エネルギー利用効率とCO₂回収の効率向上を狙ったIES¹⁾を指向する際、重要なキーとなるCO₂回収とその投入に注目して、その基本概念と技術的な問題点の整理に着手したので、その一部の結果を報告する。

この考え方はそもそもSteinberg²⁾により提唱されて以来多くの場面で議論されており、事実、他の手段に比べて、現在の技術の改良により実現可能であり、CO₂発生を抑制するという超長期的な最終策に至るための当面（100年程度を望む）の対応策としては極めて効果的である。しかしながら、議論は抽象的な評価の域を出ず、排出されるCO₂も極めて多量であり、回収、投入の技術的可能性や経済性、環境影響に関しても未知な部分が多いので、問題の一つずつ解決していく必要がある。

回収についてはアミン回収法など既存の方法をそのまま適用するとかなりの熱損失が避けられないが、こ

れは排熱の利用による効率化など、システム的な検討により改善の余地も残されるので、全体の可能性が確認されてから具体的な効率改善を行うことにより対応が可能である。

本文では更に未知の部分の多い、海洋投入に関する問題点をまず検討する。これはその実現可能性に対する十分条件というよりも必要条件に当たるものであって、ここで提起・検討する問題が解決できても現実に海洋投入が可能であることを示すものではないが、少なくともこれを議論の対象とする以上、全体的なシステムを念頭においたFeasibility Studyが不可欠であり、本文はその最初のステップと位置づけたい。またこのような検討における問題点を明確にするために抽象的な一般論を避けて、特定の地域を対象としてケーススタディを行う。特に発生源の規模と回収の実現性などを考慮したとき比較的有利な火力発電設備からのCO₂回収投入を対象とする。但しこれはあくまでも物理的、工学的な問題点とその量に関する概念を明確にするための仮想的な設定であって、社会経済的な影響までを考慮した最終的な実現可能性を評価するものではない。

2. 海洋投入システムの概念と構成要素

2.1 海洋投入システムの基本概念

CO₂海洋投入の目的は十分深層のCO₂濃度の希薄な海水中にこれを吸収させて大気中のCO₂濃度の増加を抑制することにある。従って、投入したCO₂が短時間で大気に再放出される状況ではその行為は無意味であって、極力海水中、あるいは海底に残留する状況を実現しなければならない。

ちなみに海洋のCO₂の吸収可能量については適当な仮定による試算があり³⁾、海洋のCO₂の溶解可能量は全海洋を利用可能であれば $9.5 \times 10^{22} \text{g}$ である（平均水深3800m, 50気圧, 12℃と仮定）。人類の発生するCO₂（現在、化石燃料からの放出量は $2 \times 10^{16} \text{g/年}$ ）の吸収

* 東京大学工学部資源開発工学科教授

** " " 助手

*** " " 助手

**** " " 助教授

***** " " "

の吸収に関する限り、全海洋を利用可能であれば十分の容量があることは明白である。

このような深海への直接投入の方法としては

- (1) 固化（ドライアイス）、運搬、投入
- (2) 気体（又は液化）圧縮、パイプ直結投入
- (3) 圧縮液化、運搬、投入

の方式が考えられる。(2)、(3)の概念図を図-1に示すが、(1)は海岸からの運搬に関しては(3)と同様であり、適当な地点へドライアイス（又は液化CO₂）を運搬した上で直接海中へ投入するものである。

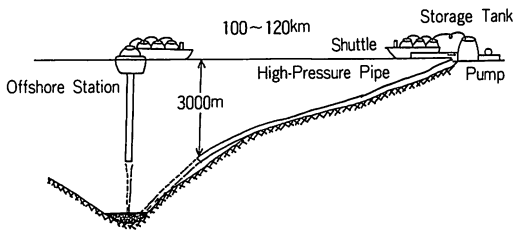


図-1 深海へのCO₂投入方式の概念図

いずれの場合も液体CO₂の比重が海水より大きくなること、拡散で大気に到達するまでの時間を極力小さくなる点を選ぶこと、海底に滞留する場合にはそこに十分の蓄積容量のある場所を選ぶことが重要なポイントである。

図-1に示されるようにCO₂の海洋投入自体は簡単な概念であるが、投入すべき量が莫大なものとなるために実現技術、あるいは設備上の実現可能性、あるいは経済的な負担に関して種々の問題を生ずる。このうちドライアイス投入の方式については既に越後等の考察¹⁾があるので、本文においては後の2方式についての検討を進める。

2.2 海中投入方式と必要な主要施設

船舶輸送方式、あるいはパイプによる直結投入方式いずれにおいても、基本的に図-1に示すような設備を必要とする。すなわち、

- (1) 常圧から液化CO₂までの圧縮機（発生地点毎、あるいは気体常圧パイプにより集約してその拠点毎に必要）
- (2) 各圧縮拠点から海岸の送出地点（港）の貯蔵タンクにCO₂を送るパイプライン網、
- (3) 信頼性向上とCO₂投入負荷平準化のための貯蔵タンク
- (4) 投入地点までの送出パイプ

が必要となるが、タンク容量、パイプ敷設量などは方式によって大きな差を生じる。いずれの場合も液化の

ための圧縮機は共通に必要であり、またCO₂を一時的に蓄積する場合も容積の少ない液化CO₂が有効である。

直結方式では海底に沿ってパイプの敷設工事を行う必要があり、これは投入量からまずパイプ直径が決まり、投入点の状況（距離、深度）によりその技術的可能性が左右されるので具体的なケーススタディにより検討する必要がある。

運搬方式においては長距離のパイプ敷設は必要ないが、投入地点に海上ステーションを設置し、ここから一般には垂直直下にパイプで投入し、更に地上の貯蔵タンクとステーションを往復する液化CO₂圧力タンカーが必要となる。この規模もやはり具体的な排出量を設定した上で適切な量を選定することになるので具体的なケーススタディを基に3.3において検討する。

次に、特に重要なパイプへの投入入口での圧送必要圧力と圧送に要するエネルギーにつき考察する。

2.3 CO₂加圧液化とそれに要するエネルギー

上記の投入システムにおいては、大量に溶解したCO₂が、海水中の溶解度を越えて気化沸騰（フラッシング）を生じることがないようにしなければならない。そのためは、CO₂が投入される地点の温度、圧力条件の下で、CO₂が液体である必要がある。さらにその地点での液体CO₂の密度が周囲の海水の密度より大きいことが望ましい。なぜならば、その場合にはCO₂は海中を落下しながら溶解し、海洋表層に逆戻りする可能性が少なくなるからである。CO₂は圧縮性の物質で、その密度は、圧力により大きく変化する。300kg/cm²以上の圧力下においては、CO₂の密度が周囲の海水密度より大きくなり²⁾、望ましい条件を満たすことになる。

従って、液化CO₂をパイプで3000m以深の海洋中に周囲の水圧に抗して投入する必要がある。しかしながら、CO₂は水と異なり常温では70気圧程度に加圧すると液化し、液化されたCO₂は、パイプ中で深度が増すにつれて、自重で加圧されていく。一方、液化CO₂の比重は圧力が増加すると1/2から次第に増大するので、海中投入に必要な地上圧力は投入深度に依存する。

幸いCO₂はその安定性と普遍性から現在でも石油、原子力関係など工業的に利用価値も高くその物性値についてもかなりよく知られている³⁾。そこでまず物理的な特性からCO₂を海中に排出するために必要な圧力についての検討を行う。

日本近海の海水の温度分布については、詳細なデータが蓄積されているが、表層（温度躍層）を除き500m以上の深度では年間を通じてほぼ安定している。ま

たパイプ内部のCO₂温度は周辺の海水と熱平衡状態にあると考えれば、海水温度分布はそのままCO₂の温度分布となる。これに対するCO₂の密度変化は図-2に示される通りである。以上からCO₂の密度が、同じ温度、圧力条件で、海水の密度より大きくなる3000mにおいて、出口圧力を海水圧と平衡させた場合の液化CO₂と海水の圧力変化を図-3に示す。

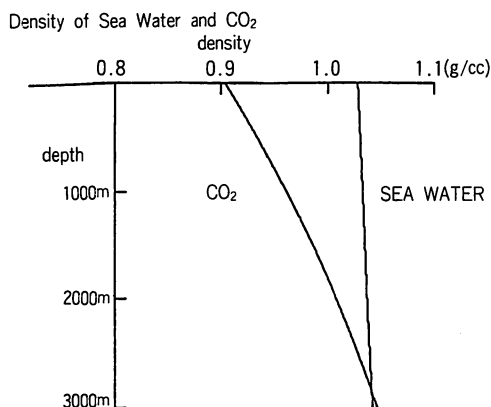


図-2 海水とCO₂の深度による密度の変化

図-3は更にパイプ中の圧力損失を考えない場合の液化CO₂と海水との圧力差を拡大して示しており、これによれば3000m深度の平衡状態では表層においてはCO₂の圧力は海水圧に較べて約15~25気圧高く、その圧力の液体CO₂の状態でパイプに供給すればよいことがわかる。

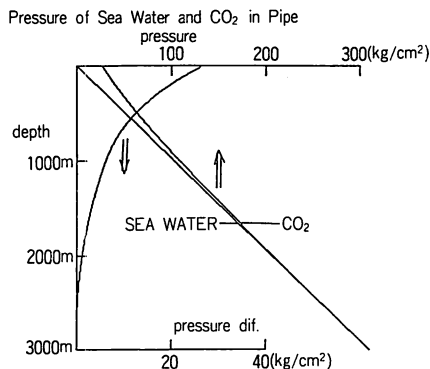


図-3 海水とCO₂の深度による圧力変化とその差(3000m)

現実にはCO₂の臨界圧は約70気圧であって、上記の圧力はこれに満たないために臨界圧は過剰な圧力となる。他方でパイプ入口で流量を制御することにより供給側の圧力が低下して臨界圧以下の気化した状態になると、管内の比量が軽くなるために先端のCO₂圧力が

海水圧に不足して先端からの投入は停止する。従って、現実には臨界圧力を保ちながら2相混合の状態での投入流量に応じた流量制御を行うことになる。すなわち、2相の混合比が変化して、パイプ先端の圧力を周囲の海水とほぼ同じ圧力に保つようなフィードバックがかかり、相変化の速度が流速に較べて十分に速ければ安定である。

同様の投入パイプを3000mより深い地点まで延長した場合にはCO₂の加圧に必要な圧力は更に減少する。図-4は、9000m地点で海水圧と平衡させた場合のCO₂圧力変化を示しており、この場合には海水表面では約5気圧の負圧となる。

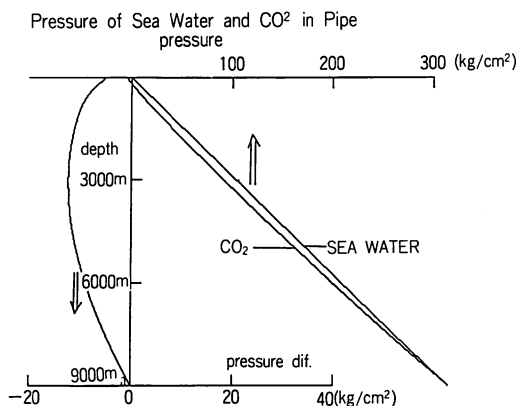


図-4 海水とCO₂の深度による圧力変化とその差(9000m)

以上より3000m以深の海洋投入に関しては、後述の圧力損失が極端に大きくなければ、70気圧の加圧で十分押し込みが可能であってこれ以上の圧縮は不要である。

そこで、CO₂の圧縮に要するエネルギーを評価する。まず理想気体1モルを1→70気圧に圧縮するのに必要な理論最小エネルギーは次式で計算される。

$$W = RT \ln(P_2/P_1) \quad (1)$$

実際の圧縮では、理論最小仕事以外の損失が生じる。この点を考慮した圧縮仕事の値は、断熱効率を0.85とすると、定格で運転する100万kWの石油火力発電所におけるCO₂処理量に対して約7.6万kWとなり、上記理論式で計算された値の約1.6倍で実現可能なことがわかる。これは発電所への一次エネルギー投入量の約2.9%（発電効率を38%とすると）相当となる。

前述のように圧縮された液化CO₂はまず貯蔵タンクに一時的に蓄えられ、直接パイプラインで、あるいは船舶で投入地点上のステーションまで輸送されて、パ

パイプにより3000m以上の適当な深海に圧送され、パイプ先端より深海中に放出される。圧送そのものに、エネルギーを必要とするか否かは、管の圧力損失に依存するが、前述のように余程大きな損失が無ければ基本的には不要であって、むしろ液体としての圧力が過剰になる可能性が強い。

圧力損失は良く知られている様に次式で示されるが、

$$\Delta P = f(Re, e/d) * l/d * \rho * u^2 / 2 \quad (2)$$

f: 摩擦係数, Re: レイノルズ数, e/d: 相対粗さ
d: パイプ直径, ρ: 密度, u: 流速, l: パイプ全長

これは流速とレイノルズ数に依存するので具体的なケーススタディのもとに検討する必要がある、ここではその存在を指摘するにとどめたい。

3. 関東地方を対象としたケーススタディ

3.1 CO₂発生処理量と圧縮に要するエネルギー

ここで各方式の技術的問題点とエネルギー、並びに現在技術における設備、運用コストをより具体的に検討するために特定地域を念頭においたケーススタディを行う。適当な対象規模と地理的な状況理解の利便性を考慮して当面、関東地域のA電力会社の火力発電から排出されるCO₂を対象にして、その回収、海洋投入システムの定量的な検討を行う。現在、A電力会社の火力発電からのCO₂排出は、日本全体の約8%を占めており、そこからのCO₂回収、海洋投入は発生量の規模、回収の可能性などから比較的有效な対象と考えられる。ただし、電力の負荷変動はCO₂の回収、海洋投入においても設備稼働率に影響を与え、更に現在火力はピーク電力負荷に近いところを負担しているためにCO₂発生に付いては一層負荷変動が強調される。従って、ケーススタディでは、その負荷変動を無視できなくなり、貯蔵タンクと海洋投入設備容量に影響を及ぼす。貯蔵タンクについては、CO₂発生量の季節変動分までを吸収するのは容量の面から困難であるが一日内の時間変動についてはタンクによる貯蔵が可能と考えられる。貯蔵タンクによるCO₂投入量の平準化は投入に関わる設備の稼働率を上げるだけでなく、投入点、パイプ内でのクラスレートが発生を防ぐために最低流量を確保するためにも必要である。

対象例の月間変動は図-5に示されるが、これから回収、海洋投入の設備容量を決定する場合に、

(1) CO₂排出量が最小の月に合わせた設備を設けて、それ以上の回収をあきらめる。

(2) CO₂排出量が最大の月に合わせた設備を設けて、排出量が少ない月の稼働率を犠牲にする。

が両極端な限界となる。この中間をとると図-5から夏期に合わせた設備を設けることになる。しかも排出量の時間変動は夏期が特に顕著なので、これに合わせて貯蔵タンクの容量を設定すれば、他の季節の時間変動は吸収しうると考えられる。

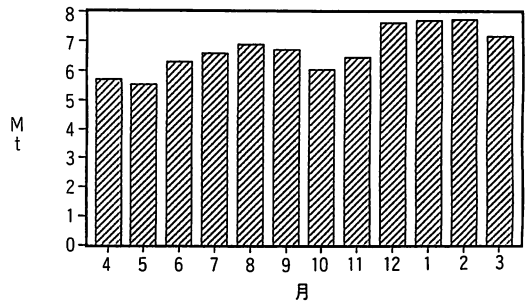


図-5 A電力会社の過去1年の月別CO₂発生量

一方、一日内の時間変動については次のように考える。図-6は、燃料別火力発電電力量から推計されたCO₂発生量の時間変化を示している。図-6より、CO₂発生量の平均値 (2.5t/s) が海中投入設備の設計流量を示し、平均からの余剰分が必要なタンク容量を示すことになる。また、年間の平均値は夏期平均とほぼ同じ2.5t/sであり、以下の議論ではこの数値を目安に諸設備の評価を行う。

まず前述の計算より、この圧縮に必要な電力はA電力会社全体で約160万kWとなる。また両方式ともに最終的にはパイプで圧送することになるが、その流量からパイプ直径と流速はほぼ直径1m、流速3m/s程度が妥当な値となる。前述の(2)式による圧力損失は、パイプの材質にも影響を受けるが、リベットした鋼という相対粗さの大きい(低品位の)パイプを用いた場合

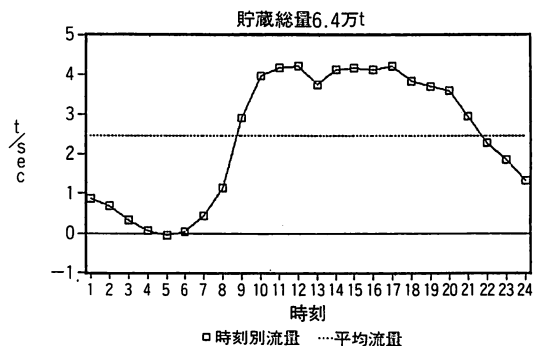


図-6 A電力会社の平成元年7月の時間別CO₂発生量

で、パイプ長100km当り41.5気圧と算定される。しかし、この管損失は、パイプの材質として商用品位の鋼を用いることにより、20気圧程度まで落とすことができる。従って、海上ステーションから垂直パイプでCO₂を投入する場合にはパイプ長は数kmであるから、管損失も数気圧以内であり、2.3で検討したCO₂加圧圧力は、やはり70気圧で十分である。一方、パイプを沿岸から直接海底に敷設する方式では、パイプの敷設長によっては70気圧以上の加圧が必要である。

3.2 投入方式のイメージと技術的問題

(a) パイプ直結方式

本方式では投入パイプの敷設に関する技術的可能性が重大な問題であるが、経済的にも技術的にも特に深度に大きく依存する。

パイプの敷設については現在の実績はS-shape (S-lay) 方式では800m程度が実績の限界であり、J-shape (J-lay) 法でも2000m程度がターゲットとなっているに過ぎない。しかし3000~4000m程度への敷設も直径が小さければ可能性は否定されていない。

3000m深度による投入では、日本近海の深度図による約100kmの長さの圧力パイプ（図-3参照、途中から耐圧は減少可能）が必要である。この方式はクラスレートによる流出閉塞の恐れが無い場合に適用可能である。クラスメート発生のある場合は適当地形の急斜面途中に突き出す形が必要となり、投入点でのモニター、閉塞対策等を考慮する必要がある。

さらに本方式における技術課題としては、以下のようものが考えられる。

- ①海中の安定性：海底敷設の可能性と波浪、海底流等の外乱に関する安全性
- ②安全性：50気圧 * 1 m φ の長距離パイプ敷設の実現可能性と安全性、危険な場合の分割
- ③沿岸アクセスの可能性：安全地帯の広さとその確保の可能性
- ④安全性、疲労などの保守点検可能性
- ⑤クラスレートの生成速度と流出状態の検討。

(b) 液化輸送方式

液化運搬方式では、まず運搬船の容量とその数を検討する必要がある。図-6より22wt/dayのCO₂を15万tのCO₂タンカー2隻で運搬すると仮定する。投入地点までは、8時間で往復し、洋上ステーションと沿岸の係留位置では、各8時間滞留して約3.8t/secの積み卸しを行えば良い。

これには、以下のような問題点が考えられる。

- ①海上基地の問題：保守、点検、定点維持、大深度パイプ接続の安全性、特に高圧パイプの動揺、振動
- ②輸送船舶の問題：タンカーの安全性、航行時間、運用、係留、投入
- ③オペレーションの問題：天候、波浪、係留配管接続、離脱
- ④天候、動揺防止、接続、離脱などの時間、オペレーションなども問題。

4. CO₂の投入後の挙動に関する予備的検討

ここでは、投入されたCO₂の深海中での挙動を分析する。投入されたCO₂が深海中でどのように拡散していき、付近の海洋にどの程度の影響を及ぼすかという問題は本研究の中心課題である。しかしながら、深海におけるCO₂の挙動を分析するためには、未だに究明されていない多くの不確定性が伴う。それらの中のいくつかは実験で解決しなければならないものもあるので、ここではそうした不確定性を列挙するとともにCO₂の挙動分析に関する予備的検討を行う。分析の目的としては、次の二点が特に重要である。

- (1) 投入されたCO₂の深海中での拡散
- (2) 拡散したCO₂が付近の海洋に及ぼす影響

(1)は、CO₂の海洋投入システムの成否を決定する重要部分であり、投入されたCO₂が長期間に渡り、深海にとどまっていることが海洋投入の必要条件となる。拡散方程式を用いて議論を進めるが、CO₂の溶解速度や流れにともなう粘性流など定量化の難しい部分を含んでいる。しかし、これらの要因を除いてもCO₂の海洋投入の技術的可能性とマクロな影響評価という意味では重要な示唆が得られる。

(2)では、拡散したCO₂が付近の海洋のpHをどの程度変化させるかを検討する。この結果が広い海域にわたり、著しい酸性化を招くとすれば、CO₂の海洋投入が海洋生態系に及ぼす影響は無視しえないものとなる。ここでも厳密には、(海洋のpHが現在のpHで安定している原因は完全には解明されていない) 海洋中の様々なイオンの影響を考慮しなければならないが、CO₂が大量に溶け込んだ場合には比較的少数のイオンの平衡を考慮することで十分な近似値が得られると考えて検討を行った。

4.1 CO₂の海洋中での拡散

本項では、三次元の拡散方程式の駆使して深海中におけるCO₂の挙動分析に関する予備的検討を行う。これは、地形を考慮した詳細な分析を行う前の予備的検

討である。この際、基本となるCO₂の深海中での乱流拡散の拡散係数として稲葉らのモデル⁷⁾のものを用いる。深海での海流に関するデータは、特定地点を除いては得られなかった。したがって、本研究の分析には深海流の影響は含めなかった。しかし、深海流は拡散に無視できない影響を及ぼすと考えられるので、これを考慮することは今後の重要な課題である。2.1の図-1に示したようなCO₂投入のモデルにおいてパイプの中心軸を円筒座標の中心としてCO₂の拡散を想定する。円筒座標の半径方向をr, z, 円筒内における角度をsとする。流れを無視すると、拡散は円筒の中心軸から等方的に起こる。この場合の物質収支は、周知のように、

$$\begin{aligned}
 & -D \frac{\partial c}{\partial r} \left|_{r} * 2 \pi r dz + D \frac{\partial c}{\partial r} \right|_{r+dr} * 2 \pi (r+dr) dy \\
 & + D \frac{\partial c}{\partial z} \left|_{z+dz} * 2 \pi r dr - D \frac{\partial c}{\partial z} \right|_{z} * 2 \pi r dr \\
 & = \frac{\partial c}{\partial t} * 2 \pi r dr dz \quad (3)
 \end{aligned}$$

これより、円筒座標系での拡散方程式(4)が得られる。

$$\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial c}{\partial r} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} = \frac{1}{D} \cdot \frac{\partial c}{\partial t} \quad (4)$$

ここでは、パイプの近傍のCO₂濃度をやや詳しく、しかも相当の遠方(水平距離で100km程度)までの拡散を考慮したいので、r方向を次式のように対数変換する。

$$r = 0.5 * 10^{0.5q} \text{ とおく。}$$

$$\frac{dr}{dq} = \frac{1}{4} * 10^{0.5q} * \log 10 \quad (5)$$

結局、変換後の拡散方程式は以下ようになる。

$$\begin{aligned}
 \alpha &= \frac{8}{10^9 \log 10} \text{ とおく} \\
 \alpha \cdot \frac{2}{\log 10} \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial q^2} + \alpha \cdot \frac{\partial c}{\partial q} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} &= \frac{1}{D} \cdot \frac{\partial c}{\partial t} \quad (6)
 \end{aligned}$$

(6)式の左辺を差分の形に展開する。z方向, q方向の刻み幅はそれぞれ200m, 1である。右辺(濃度の時間微分項)の数値積分には誤差を少なくするためルンゲクッタ法を用いる。シミュレーションにおける前提条件は以下の通りである。

(1) 直径1mの垂直パイプで液体CO₂を3000mの深さまでもっていき、そこから真下に液体CO₂を流し出す。

(2) 海底の深さを4000mとし、溶解、拡散しなかったCO₂は海底に蓄積する。

(3) 液体CO₂流がある深さ3000m~4000mでは、CO₂流の外側にCO₂が飽和状態まで溶けた海水の薄い層ができると仮定し、これを境界飽和層と呼ぶことにする。

このような前提の下での100年後の濃度分布を以下に示す。図-7は、投入を始めて百年後におけるr方向の相対的な濃度分布を海洋の深度(z方向)別に表している。

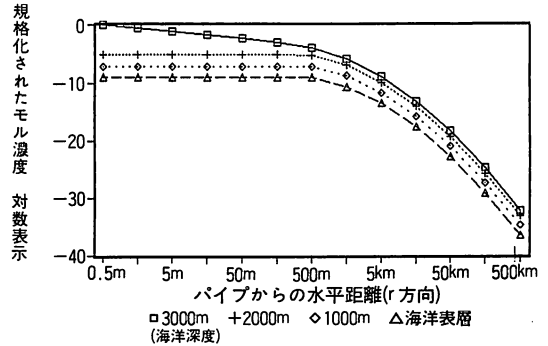


図-7 百年後におけるr方向のCO₂濃度分布

パイプからCO₂が流れ出している3000m以深では、深さにかかわらずほぼ一致した濃度分布を示している。しかも、水平距離とともに濃度は急速に減少し、500m地点では中心濃度の10⁻³程度になっている。3000m以浅では、1000m浅くなる毎に濃度は10⁻²~10⁻⁵に減少している。投入されたCO₂の表層付近への拡散は100年後において10⁻³程度である。一方、パイプ近傍でのCO₂濃度の勾配より、海洋中に拡散するCO₂の流速が計算でき、以下のような値をとる。これは、投入されたCO₂の中、海洋中に拡散していく総量を表しており、投入総量の10⁻²程度である。

$$D * \frac{\partial c}{\partial r} * 10000.0 * 2 \pi r = 25.4 \text{ (kg/sec)} \quad (7)$$

ただし、この分析には以下の問題点がある。

- (1) パイプから流出したCO₂がどの程度クラスレート(水和結晶)化するかが解明されていない。
- (2) 海水の密度が、海水中のCO₂の濃度によりどの程度変化するか定量的なデータが得られていない。
- (3) パイプから流出したCO₂がどのような流れで落下し、パイプ近傍にどのような渦を巻き起こすかが解明されていない。
- (4) (3)において、パイプ近傍に生じ渦によってそこでの拡散が図-7より大きくなる可能性がある。

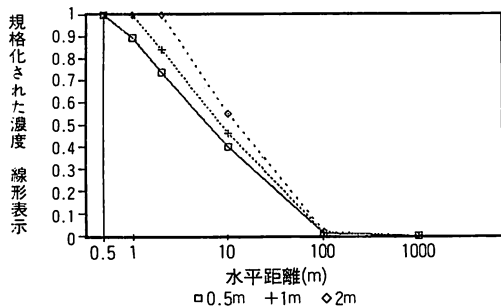
(1)については、シミュレーションでの解明は難しく

実験が必要である。パイプから流れだした後のCO₂は海水と接し、クラスレートが生成する条件となる⁹⁾。すなわち、CO₂が飽和された海水とクラスレートの平衡状態に移行し、クラスレートの生成・分解平衡に規定されながらCO₂が拡散すると考えられる。すなわち、クラスレートにより拡散は抑制される可能性がある。本研究ではこの点を定量的に扱うに至っておらず、今後の重要な研究課題である。

(2)についてはいくつかの研究結果があるが、特に大隅⁸⁾によれば、CO₂を溶解させた海水の密度は、溶解させない場合より大きくなる。これが事実とすると、CO₂を溶解させた海水に下向きの流れが生じ、拡散を妨げることになるが、詳細な定量的データがないので、ここでは定性的記述にとどめることにする。

(3)、(4)の問題はパイプ近傍の流れと拡散の状態には大きな影響を及ぼす。したがって、上の分析でもパイプ近傍の濃度分布の値の信頼性は必ずしも高くない。しかし以下のような理由で、パイプより十分遠方では、この問題が分析の結果に及ぼす影響は大きくないと考えられる。

もし、パイプ近傍に激しい渦が生ずるとその付近でのCO₂の溶解速度が高まる。しかし、その外側にはパイプからのCO₂流にほとんど影響されない層があり、そこではほぼ定常的なCO₂拡散が起こると推測される。従ってパイプ近傍に激しい渦が生ずると、溶解速度と拡散速度のバランスにより、境界飽和層がパイプから遠方にせり出してくることになる。そこで、飽和境界層のパイプ中心からの距離をパラメータとして分析を行ったのが図-8である。図-8によれば、飽和境界層のせり出しによる濃度分布の変化はパイプ近傍では大きいですが、パイプから100m以上離れたとその差は小さくなること分かる。ここでの分析の重点は、パイプ近



(飽和境界層のパイプ中心からの距離をパラメータとした感度分析)

図-8 百年後におけるr方向のCO₂濃度分布

傍の流れの状態やCO₂濃度分布を詳細に知ることでなく、海洋表層を含めた遠方に及ぶ影響を知ることであり、その点では上の分析は有効であると考えられる。

これらの分析より、以下の2点の示唆が得られる。

(1)投入されたCO₂の中、海洋表層にまで拡散してくるものは、100年後においてさえ、無視できるほどわずかである。

(2)拡散により海洋中にしみだすCO₂の総量は、投棄総量の1/100以下であり、大部分はそのまま、海底に達する。

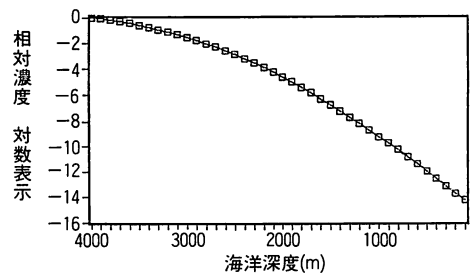
これらより、投入されたCO₂の大部分は海底にたまるので、海底からの拡散を考慮することが重要である。そこで、以下の前提条件で海底からの拡散モデルを構築する。

(1) 4000mの海底にCO₂が湖状に溜っている状況を想定する。これをCO₂溜りと呼ぶことにする。

(2) CO₂溜りの面積は1500m四方の正方形とする。

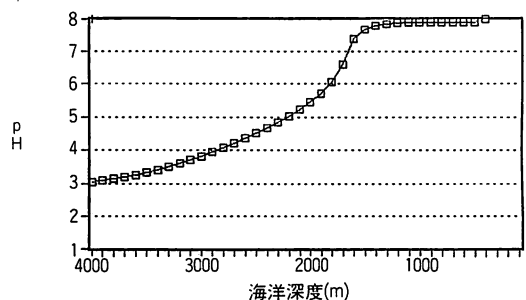
(3) 海底からの拡散では、パイプを考慮する必要がないため、x, y, zによる直交座標系を用い、zを深さ方向とする。海底と並行な平面内のx, y方向の刻み幅を500mとし、z方向の刻み幅を100mとする。

このようなモデルで100年後の鉛直方向の濃度分布



(海底のCO₂溜りからの拡散による濃度分布)

図-9 百年後における鉛直方向のCO₂濃度分布



(海底のCO₂溜りからの拡散によるpH変化)

図-10 CO₂の拡散による付近の海洋のpH変化

を算定した結果を図-9に示す。図はCO₂溜りの中心から鉛直上方にCO₂濃度をプロットしたものである。これにより、海洋表層でのCO₂の濃度はやはり無視できるほど小さいことが分かる。

この場合の付近の海洋のpHを図-10に示す。拡散量は少ないもののpH 5以下の酸性海域が広範にでき、付近の生態系に重大な影響を及ぼす可能性がある。したがって、環境への影響評価としてpHの変化が重要なポイントとなる。

5. むすび

以上、CO₂海洋投入の技術的可能性の評価結果とその結果発生し得る海洋環境への影響分析に関する予備的検討の結果を示した。この結果、技術的にはまだ不確定な部分も残されるが、現在ほぼ確定した技術あるいはその延長により実現可能と考えられる。

表1に、CO₂海洋投入の要素技術毎の課題と可能性についてまとめる。

この中で最も重要な問題は海洋環境、特に海洋生物環境への影響であって、投入地点直下のCO₂貯蔵地点では当然生物の生存は不可能となる。更に予備的検討の結果によれば、長期間に及べば投入地域の周辺かなり広い範囲にわたってCO₂が拡散し、そのpHを下げ、生物の生存環境に影響を及ぼす可能性がある。

このような海洋への環境影響が問題となる場合は、できる限り深い地点にCO₂を投入する必要がある。こ

表1 CO₂海洋投入の要素技術とその課題

システム要素	技術課題	技術的可能性	備考
回収	効率向上	F	* 0
圧縮液化	効率向上	F	* 0
高圧輸送	用地確保 安全性	F	* 0
高圧タンク	用地確保	F	* 0
高圧タンカー	運用, 荒天時 信頼性	F	* 1
海上ステーション	荒天時信頼性	F	* 1
垂直パイプ	荒天時信頼性	F	* 1
海底パイプ	敷設, 維持	UNKNOWN	* 2
パイプ内の CO ₂ 流	閉塞防除	UNKNOWN	結晶化
パイプからの CO ₂ 流	挙動解析 最適深度	UNKNOWN	結晶化 拡散
海底蓄積後の 挙動	挙動解析	UNKNOWN	結晶化

備考中、* 1とあるのは、船舶で海上ステーションまで運搬し、そこから垂直パイプ投入する場合に必要な設備を表す。他方、* 2は、沿岸からパイプを直接海底に敷設して、深海まで直結方式により投入する場合に必要な設備を表す。* 0は両方式に共通に必要な設備を表す。尚、FはFEASIBLEを表す。

の場合、沿岸からパイプを直接深海まで敷設する方式には多くの技術的困難が伴うので、海上ステーションから垂直パイプで投入する方式が有望となる。

また、CO₂投入による環境への影響範囲は高圧、低温下におけるCO₂挙動に関するパラメータに敏感に依存するが、このパラメータには現在かなり不確定性がある。その正確な評価は困難である。従って、この対策を実現するためにはCO₂挙動の基礎的な物性値の研究が緊急に必要とされ、正確な数値によって厳密な影響評価を行うことが不可欠である。但し何れにしてもこの技術はまずエネルギー効率の低下を伴うことと、上記の海洋環境への影響が大きいため現在直ちに実現すべき性格のものではなく、省エネルギー、燃料転換、植林によるCO₂固定などが優先すべき対策であることは論を待たない。これらの対策のみでは対処困難な状況にいたり、しかも温暖化現象による地上の被害が明確に評価できる段階に至った時点で、地上の環境問題と海洋中の環境問題を比較した上で総合的な評価を行って必要と判断されたときに、初めて対策として考えるべき性格のものであることを認識しておく必要がある。本文はその認識のもとに将来必要となった場合に備えて、現在何を検討すべきかを明らかにする目的でその予備的検討を始めたものである。

今後、特に海洋環境の評価の精度を上げることを心がける。これは、さきに述べた、①クラスレート化の問題②CO₂の溶けた海水の密度変化の問題③パイプからの液体CO₂の流れ方の問題、の他に今回データが得られなかった深海流の問題を含んでいる。これらの問題に対し、それを取り扱う方法と結果に及ぼす影響について研究を進めていく予定である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、多大なご助力、ご助言を頂きました三井造船株式会社特機システム事業部大桑義昭課長、財団法人電力中央研究所我孫子研究所環境水理研究室主任研究員大隅多加志氏、東京電力株式会社環境部深谷光世部長に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 松橋, 林, 茅統合型エネルギーシステムの分析と評価, 電気学会論文誌B, 平成二年11月号, ('90/11)
- 2) Steinberg, M. et al "A System Study for the Removal, Recovery, and Disposal of Carbon Dioxide from Fossil Fuel Power Plants in the U. S.", BNL35666 Informal Report (1984).

- 3) 小宮山監修, 地球温暖化問題ハンドブック—対策技術を考える—, アイピーシー
- 4) 越後亮三他, 炭素固定化燃焼によるCO₂排出低減の新しい試み, エネルギー資源, vol.11, No. 4 (1990)
- 5) Tables of the Fluid State, Carbon Dioxide”, Pergamon, Oxford (1976).
- 6) 大隅多加志他, 常温・高圧における液体CO₂・水系の実験的研究, 日本地球化学会年会講演, No. 2 B13, 1990
- 7) 海洋における定常状態での炭素の物質収支—Box Diffusion Modelによる推算—, 稲葉敦, 進藤勇治, 小宮山宏, 化学工学論文集, vol.16, No. 6 (1990)
- 8) Byk S. Sh. and V. I. Fomina ; Russian Chem. Rev. 37(6), 1968.

他団体ニュース

第7回国際ガス研究会議 (1992 IGRC) 論文募集について

1992年11月16日から19日までの4日間, フロリダ州オーランドにおいて開催される第7回国際ガス研究会議 (1992 IGRC) において発表される論文が, 現在募集されている.

この会議は分科会とポスターセッションで構成される. 分科会は専門分野別に複数の会場同時進行方式で研究論文を演壇で発表し, 参加者と質疑応答する会議形式, ポスターセッションは専門分野別に研究論文をパネル展示し, 論文執筆者がパネルを利用して参加者と直接質疑応答する会議形式をとる. 採用論文はすべて事前に配布される予稿集に掲載され, このうち実際に会議で発表された論文が後日作成される会議記録集に収録される. 会議における使用言語は英語または仏語.

・応募要領

1. 内容……オリジナリティーがあり, 当該分野で世界最先端の硏究論文.
2. 論文題目…・天然ガスおよび代替天然ガスの生産, 精製
 - ・輸送, 貯蔵 ・供給 ・家庭用, 商業用利用
 - ・工業用利用 ・基礎研究
 * LNGに関する研究論文は平成4年5月に開催予定のLNG-10において扱われるため, 除外される.
3. 論文要旨…・700~1000語程度.
 - ・グラフ, 図, スケッチを伴う.
 - ・使用言語 英語または仏語
 - ・タイトルは短い程望ましい (90文字以内)
 - ・執筆者は演壇発表, ポスター発表のいずれかを希望できる.
4. 締切り……平成3年7月31日
5. 応募先……1992 International Gas Research Conference c/o Gas Research Institute
Attention : Dan A. Dolenc 8600 West Bryn Mawr Avenue Chicago, Illinois 60631, USA
Telephone : 312-399-8226 Telex : 253812 or 503802
Telefax : 312-399-8170

問い合わせおよび登録用紙送付依頼先

日本ガス協会 国際室

東京都港区虎ノ門1-15-12

TEL 03 (3502) 0116 FAX 03 (3502) 3676