洋上から深海への液体 CO₂ 送り込み技術について

正員 尾崎 雅彦* 園田 圭介*
 菊地 洋* 藤岡 祐一*
 正員 塚本 修** 小松 正夫**

Study on Technical Method for Sending CO₂ into Deep Ocean with Pipe from Floating Platform

by Masahiko Ozaki, *Member* Keisuke Sonoda,
 Hiroshi Kikuchi Yuichi Fujioka,
 Osamu Tsukamoto, *Member* Masao Komatsu

Summary

Concerning with the disposal of CO₂ in ocean, technical aspects on sending CO₂ into deep ocean with a long vertical pipe from a floating platform are treated in this paper.

At first, the heat balance of liquid CO₂, pipe, ice on the wall and the surrounding seawater is formulated under the equilibrium condition. In order to estimate the vertical temperature change of CO₂ correctly, it is found that the heat insulating effects of the ice covered on the pipe wall should be taken into account. The validity of the estimation method is confirmed with a laboratory test. A stainless pipe is fixed in a seawater-circulating tank and cold N₂ gas is let flow in the pipe constantly. The temperature change of the N₂ gas and the thickness of ice generated on the pipe wall are measured to be compared with calculated results.

Secondly, case studies are performed on liquid CO₂ recovered from a 1.0 GW-class coal burning power station. Here, the equipments and piping diagram are initially designed under the necessary condition that the temperature and the pressure of CO₂ at the lower outlet are almost the same with those of surrounding seawater.

1. 緒 言

地球温暖化の原因になると言われる大気中の CO₂ (二酸化炭素) 濃度の上昇を抑制する一方策として、燃焼排ガス中の CO₂ を回収して深海へ送り込み、大気から長期にわたり隔離する構想の可能性が検討され始めている^{1)~6)}。

Fig. 1 は、大気中の CO₂ 濃度上昇を抑制する様々な方策の中における本方策の位置づけを示したものであるが、対象となる CO₂ の量は膨大であり、緊急性が求められていることを考え合わせると、方策は広く検討していくべきであり、早急にそれらの有効性や経済負担の度合を定量的に評

価することが重要であると思われる。中でも、CO₂ の工業的な回収・固定については最近、発電所など集中的な発生源を対象として、燃焼排ガスから CO₂ を分離回収する技術の開発が精力的に進められており^{7),8)}、比較的大規模なパイロットテストで性能試験がなされている状況にある。したがって、回収後の大量の CO₂ を固定する技術についても、並行して検討していく必要がある。

本方策の可能性を判断するためには、次のような課題を明らかにしていく必要があると考えられる。

① CO₂ 固定能力 (有効性) の評価

本方策によってどれほどの量の CO₂ をどれほどの期間、大気から隔離できるか。

② 海洋環境影響の評価

CO₂ を海へ送り込むことによって CO₂ がどのように海中に溶解し、広がっていくか。それによって海洋環境にどのような変化がどの範囲で生じるか。

③ 技術的成立性の評価

* 三菱重工業(株)長崎研究所

** 三菱重工業(株)長崎造船所

技術的にどのような方法が可能か。開発課題は何か。

④ 経済負担（コスト）の評価

本方策で生じるエネルギー消費増および経済的な負担増は、どの程度か。

①～④は相互に関連するものであり、並行した幅広い取り組みとそれらの総合的な連係が必要である。

以上のような背景の下、著者らは、技術的成立性ならびに経済性の評価の端緒として、CO₂の深海への送り込みシステムの基本概念の構築を行ってきた^{9),10)}。また、深海の温度・圧力条件を模擬する高圧試験装置を製作し、送り込んだCO₂の深海における挙動予測のための基礎研究に着手している^{11),12)}。

2. CO₂ 送り込み技術の課題

Fig. 2 に、CO₂の深海への送り込みシステムの全体概念図¹⁰⁾を示す。何らかの方法で回収されたCO₂を積み出す手前で一時貯蔵するところを始点とし、液体CO₂を海上輸送し、洋上基地から垂下された長い管により深海へ送り込むところを終点としている。CO₂を送り込むべき深度については、有効性及海洋環境影響に関する研究の進捗にしたがい今後定まってくると考えられるが、ここでは次の知見より3000 mを一つの目安としている。すなわち、約3000 m以深の深海における温度・圧力条件においては、圧縮性の違いによって液体CO₂の密度が周辺の海水密度よりも大きくなることから、高圧試験装置を用いた実験などで確認されている^{9),11)}。したがって、3000 m以上の管を用いて液体CO₂を深海へ送り込めば、CO₂はさらに海底に向かって沈降し、長期にわたってCO₂を大気から隔離できる可能性がある⁴⁾。

本システムの中で主要な開発課題の一つが、長い管による液体CO₂の深海への送り込み技術である。関連する既存の技術分野としては、化学工業の中でも古い歴史を持つCO₂の取扱い、半潜式海洋構造物による海底石油開発などがあるほか、深海底マンガン団塊の採鉱に関する技術開

発が進められているところである。これらの技術を活用することは当然であるが、取り扱うCO₂が大量であること、運用が水深の外洋において連続して長期にわたること、CO₂の回収から深海へ送り込んだ後のCO₂挙動評価までの前後のプロセスと密接に関係すること、などのために新規に開発すべき項目も多岐にわたると予想される。

Table 1 に、現時点で抽出した送り込み技術の課題を示す。これらに加えて、管の挙動・強度や洋上からの管の揚

Fig. 2 Conceptual General View of System for Sending CO₂ into Deep Ocean

Table 1 Technical Subjects to be Solved in CO₂ Injection into Deep Ocean

検討対象	課 題
送り込み定常状態	<ul style="list-style-type: none"> 管内CO₂の温度、圧力、密度の把握 管外面の着氷、着氷の影響 管内CO₂の温度、圧力制御 CO₂、タンクへの置換ガスの供給
送り込み休止状態	<ul style="list-style-type: none"> 管内CO₂温度、圧力の変動 CO₂と海水の接触による水和物の生成
送り込み開始時および停止時	<ul style="list-style-type: none"> CO₂の不用意の気化あるいは固化 CO₂と海水の接触による水和物の生成 低温のCO₂との接触による海水の水結 機器の急激な温度変化
異常状態への対処	<ul style="list-style-type: none"> 管内の水結 管内における水和物生成 管内におけるドライアイス生成 ロールオーバー（CO₂と海水）

Fig. 1 Options for reduction of CO₂

降作業・保持など、管自体に関する課題もあるが、ここでは CO₂ 取扱い技術に焦点をあてた。このように技術課題は広範囲にわたり、最終的には海洋実験による検証が必要であると思われるが、送り込みの定常状態に関する課題がすべての基本になろう。そこで以下では、送り込み技術の開発の第一段階として、定常状態における管内 CO₂ の挙動について推定手法の開発を行い、ケーススタディおよびそれに対応する装置類の基本計画を行う。

3. 管内 CO₂ 挙動推定法

3.1 管内 CO₂ の挙動概念

Fig. 3 は、CO₂ 送り込み時の定常状態における管内の CO₂ の挙動（温度・圧力・密度の変化）の鉛直分布を概念的に示したものである。管入口の CO₂ の温度・圧力は必ずしも確定していないが、液相を保つための必要条件として例えば -55°C, 0.6 MPa が候補となる¹⁰⁾。また水深 3000 m の深海の場合における温度・圧力は、約 2°C, 30 MPa である。

管内の CO₂ 温度は長い管を通る間に周囲の海水からの入熱により昇温する。また CO₂ の圧力は、自重によって洋上で圧力から概ね直線的に増加するものの、出口圧力を周囲の水圧よりも過大とならないよう抑えるため、管上部で温度上昇に起因して CO₂ が気化しないよう圧力を確保するために、途中で圧力調整が行われることになる。CO₂ 密度は、管内の温度・圧力の変化に依存して変化し、管上部においては温度上昇によって密度が減少し、下部においては圧力上昇によって密度が増加する傾向となる。

3.2 基本仮定

管内 CO₂ 挙動を推定するために、次のような仮定を設定しモデル化を行う。

- (1) 液体 CO₂ が管内で相変化しない条件のみを検討対象とする。
- (2) 液体 CO₂ の管内熱流動は一次元定常とする。
- (3) 霜（空中）や氷（水中）は管と同心円状に形成されるものとする。

Fig. 3 Vertical Change of CO₂ Condition in Pipe

れるものとする。

- (4) 管材および霜・氷内の熱移動は鉛直方向の温度勾配が半径方向のそれに比べ極めて小さいと考えられるため、半径方向のみを考慮し、鉛直方向は無視する。
- (5) 霜・氷表面で鉛直方向に発生する空気あるいは海水の自然対流は海流による水平方向の強制対流に比べかなり小さいと考えられるため、ここでは無視する。
- (6) 管には継目無し鋼管の採用を想定する。数十 m 毎にネジ継ぎ手があるが、これを無視して全長にわたって一様な鋼管とみなす。

3.3 管内液体 CO₂ 熱流動支配方程式

管内の熱流動を支配する基礎式は、次のように表現される。なお変数の説明は以降すべて、Appendix でまとめる。

<質量保存則>

$$\frac{\partial}{\partial z} \rho_{\text{CO}_2} V_{\text{ZCO}_2} = 0 \quad (1)$$

<運動量保存則>

$$\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{1}{4} f_M \rho_{\text{CO}_2} V_{\text{ZCO}_2}^2 \frac{1}{R_{\text{IN}}} + \rho_{\text{CO}_2} g = 0 \quad (2)$$

<エネルギー保存則>

$$V_{\text{ZCO}_2} \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{1}{\rho_{\text{CO}_2} C_{V\text{CO}_2}} \left[\frac{2h_0}{R_{\text{IN}}} \times (T_0 - T) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{\text{CO}_2} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] = 0 \quad (3)$$

管摩擦係数の評価には、Colebrook の式¹³⁾を用いる。

$$\frac{1}{\sqrt{f_M}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\epsilon}{291.34 R_{\text{IN}}} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f_M}} \right) \quad (4)$$

ただし、 $Re = 2 R_{\text{IN}} \rho_{\text{CO}_2} V_{\text{ZCO}_2} / \mu_{\text{CO}_2}$

3.4 管外周の着霜・着氷厚さの評価方法

管外周の着霜・着氷は熱伝達を著しく低下させるため、管外からの入熱を評価するためには、これらの影響を適切に考慮に入れる必要がある。

<液体 CO₂ と管内壁の熱伝達>

$$T - T_0 = q_0 / h_0 \quad (5)$$

<管材の熱伝導>

$$T_0 - T_1 = R_{\text{IN}} q_0 \ln (R_{\text{OUT}} / R_{\text{IN}}) / k_P \quad (6)$$

<霜、氷内の熱伝導>

$$T_1 - T_2 = R_{\text{IN}} q_0 \ln (R_{F,I} / R_{\text{OUT}}) / k_{F,I} \quad (7)$$

<霜と空気、氷と海水の熱伝達>

$$T_2 - T_B = q_0 R_{\text{IN}} / h_2 R_{F,I} \quad (8)$$

(5)~(8) 式より、霜あるいは氷の厚さの評価式として次を得る。

$$\frac{R_{F,I}}{R_{\text{OUT}}} \ln \left(\frac{R_{F,I}}{R_{\text{OUT}}} \right) + C_1 \left(\frac{R_{F,I}}{R_{\text{OUT}}} \right) + C_2 = 0 \quad (9)$$

ただし、

$$C_1 = \frac{k_{F,I}}{R_{\text{IN}} h_0} + \frac{k_{F,I}}{k_P} \ln \frac{R_{\text{OUT}}}{R_{\text{IN}}}$$

$$C_2 = -\frac{k_{F,1}}{R_{OUT} h_2} \frac{T - T_2}{T_2 - T_B}$$

また、管内の液体 CO₂ の流れは、低レイノルズ数の乱流域と考えられ、一方、管外の流れでは海流条件によって層流域から乱流域が想定されるため、熱伝達率の評価には次式を用いるものとする。

〈管内液体 CO₂ と内壁の熱伝達率〉

$$h_0 = N_u k_{CO_2} / R_{IN} \quad (10)$$

ただし、

$$N_u = \frac{(f/2)(R_e - 1000)P_r}{1 + 12.7\sqrt{f/2} \cdot (P_r^{2/3} - 1)}$$

$$f = (3.64 \log_{10} R_e - 3.28)^{-2}$$

$$R_e = \rho_{CO_2} V_{2CO_2} R_{IN} / \mu_{CO_2}$$

$$P_r = \mu_{CO_2} C_{P_{CO_2}} k_{CO_2}$$

ここで、 N_u には Gnielinski が低レイノルズ数領域で提案している式¹⁴⁾を用いている。

〈霜と空気あるいは氷と海水の熱伝達率〉

$$h_2 = N_u k_{F,1} / R_{F,1} \quad (11)$$

ただし、

$$N_u = CR_e^2 P_r^{0.37} (P_r / P_{rw})^{0.25}$$

$$1 < R_e < 40 \quad ; C = 0.75, n = 0.4$$

$$40 < R_e < 1 \times 10^3 \quad ; C = 0.51, n = 0.5$$

$$1 \times 10^3 < R_e < 2 \times 10^5 \quad ; C = 0.26, n = 0.6$$

$$2 \times 10^5 < R_e < 1 \times 10^6 \quad ; C = 0.076, n = 0.7$$

$$R_e = \rho_{A,s} U_{BA,s} R_{F,1} / \mu_{A,s}$$

$$P_r = \mu_{A,s} C_{PA,s} / k_{A,s}$$

ここで、 N_u には Zukauskas が推奨している円柱の平均ヌセルト数の式¹⁴⁾を用いている。

3.5 解析フロー

3.3 節、3.4 節で示した式を用いて、CO₂ 送り込み条件および諸物性値から管内 CO₂ の挙動を算出する。解析フローを Fig. 4 に、入出力項目を Fig. 5 にそれぞれ示す。

4. 着氷実験

4.1 実験の目的

3 章で述べた管内 CO₂ 挙動推定法の有効性を検証するために、回流水槽中に設置した管の内部に冷媒を流し、管表面における着氷特性を調べる実験を行う。

4.2 実験装置・方法

実験装置の概要を Fig. 6 に示す。供試体の管を鉛直に立てて回流水槽内に設置し、管内に流量と入口温度を制御した冷媒を供給して、冷媒の温度変化と着氷厚さを計測する。

回流水槽は、約 1700 リットルの塩水もしくは水を室温状態で保有し、試験部分の 300 mm × 500 mm の断面にて最大 0.04 m/sec の一様流れを起こすものを製作した。着氷の状態を外部から観察するために試験部分側面の片側はアクリル材になっており、また自由水面が形成されない構造になっている。流速は循環ポンプの流量計で測定するが、

Fig. 4 Flow Chart of Analysis Code of Vertical Change of CO₂ Condition in Pipe and Ice Generation

Fig. 5 Input and Output of Analysis Code

事前に LDV によって流速分布を測定し、流れの均一性を確認するとともに流速の検定を行った。

供試体の管には、次の要目を有するステンレスの円管を用いている。限られた長さの供試体の入口と出口で冷媒の

Fig. 6 General View of Experimental Apparatus

温度差を得るために、伝熱面積と冷媒の流速を保ちつつ流量を小さくする工夫として、管内に内挿物を設けた。

管外径：30 mmφ，内径：24 mmφ，長さ 500 mm

内挿物直径：20 mmφ，長さ 500 mm

また冷媒には、低温と小さな比熱を得るために、窒素ガスを用いた。

実験は、冷媒の流量および温度が定常状態になった時の、冷媒および管表面の温度分布、ならびに着氷厚さを測定する。温度測定には K 型熱電対を用い、着氷厚さ測定にはビデオによる観察映像を用いる。

4.3 結果の比較・考察

着氷実験結果と管内 CO₂ 挙動推定法による計算結果の比較の一例を Fig. 7, 8 に示す。

実験条件は次のとおりである。

冷媒の入口温度：-75°C

冷媒の流量：0.0143 kg/s

塩水温度：8.3°C

塩水流速：0.035 m/s

計算における窒素ガス、塩水、氷、管材の諸物性値は文献^{15)~17)} 値を参照した。また塩水の凝固点を -1.8°C と仮定した。

Fig. 7 は冷媒温度の管軸方向分布の結果を示すものである。縦軸は管軸方向距離であり、管入口を 0 mm，管出口を -500 mm として示している。冷媒の温度は、塩水側からの入熱により管内を流下するにしたがってほぼ直線的に上昇しており、計算結果は実験結果をほぼ良く説明できている。

一方 Fig. 8 は、管表面に形成される氷の厚さを示すものであるが、冷媒温度の上昇により管下流方向に徐々に薄くなっている様子が実験および計算結果で示されている。

なお、実験において管の断面における冷媒温度は、管周囲の塩水の流況に応じて周方向に分布を持っており、周方向の熱伝達量の違いにより、管の前縁側が高く、後縁側が低くなっている。また氷の厚さは前縁側が薄く、後縁側が

Fig. 7 Comparison of Calculated and Experimental Results of Vertical Temperature Change in Pipe

Fig. 8 Comparison of Calculated and Experimental Results of Ice Thickness on Pipe Wall

厚くなっている。Fig. 7, 8 に示した実験結果は、周方向の値を平均したものであるが、比較的単純な一次元流れの仮定にもとづく推定手法でほぼ評価しうることが示されたと思われる。

5. ケーススタディ

5.1 ケーススタディ条件

管内 CO₂ 挙動推定法を用いて、具体的なケースについて検討を行う。ケーススタディの対象としては、著者らによる CO₂ 深海送り込みシステムの基本計画例¹⁰⁾ で採用した、100 万キロワット級石炭火力発電所から排出される CO₂ を輸送船で海上輸送した後、洋上基地から水深 3000 m の深海へ送り込むケースを扱うこととする。Table 2 に初期検

討用の送り込み条件ならびに周辺環境条件を示す。海水温度および海流速度は、海表面から深度 200 m まで直線的に減じた後、一定値をとるものとして取り扱う。

検討手順としてはまず、CO₂ 挙動のうち最も注目される温度変化を概略計算により求め、影響因子を評価した後、実用可能と考えられる送り込み条件を選定する。概略計算では簡便のため、液体 CO₂ および海水の諸物性値が温度・圧力に依存せず一定として取り扱う (Table 3 参照)。次に、選定された送り込み条件に対し、諸物性値が温度・圧力により変化する条件を織り込んで、管内 CO₂ の温度、圧力および密度変化、ならびに着氷厚さを求める。

5.2 概略計算による管内 CO₂ の温度変化

初期検討用送り込み条件に対する概略計算結果を Fig. 9

Table 2 Preliminary Case Study Condition

CO ₂	Amount of Flow	13,900 m ³ /day
	Temperature at Entrance of Pipe	-55° C
PIPE	Outer Diameter	298.5 mm
	Inner Diameter	279.5 mm
	Length above Sea Surface	40.0 m
	Length below Sea Surface	3,000 m
AIR	Wind Velocity	1.0 m/sec
	Temperature	20.0 ° C
WATER	Current Velocity	Surface : 1.00 m/s -200m~: 0.07 m/s
	Temperature	Surface : 20 ° C -200m~: 2 ° C

Fig. 9 Calculated Results of Vertical Temperature Change in Preliminary Case Study

Table 3 Values of Characteristics of CO₂ and Sea-water in Conventional Calculation

	Density (kg/m ³)	Viscosity (Pa·s)	Thermal Conductivity (W/m·K)	Heat Capacity		Freezing Point (K)
				Const. Volume (J/kg·K)	Const. Press. (J/kg·K)	
CO ₂	1,158.813	2.366×10^{-4}	1.594×10^{-1}	1,062.19	2,100.52	—
Air	1.204	1.81×10^{-4}	2.57×10^{-1}	—	1,000.7	—
Sea Water	1,050.0	1.0026×10^{-3}	5.7×10^{-1}	—	4,000.0	—
Frost	—	—	8.9×10^{-1}	—	—	273.15
Sea Ice	—	—	1.964×10^{-1}	—	—	271.15
Pipe Material	—	—	5.5×10^{-1}	—	—	—

に示す。横軸は管内 CO₂ の温度、縦軸は管の鉛直方向に沿う深度である。図中、管内 CO₂ 挙動を推定するに際して着霜・着氷の影響を考慮した場合としない場合の結果を併記しているが、両者の温度分布には大きな差があることが示されている。

すなわち、着霜・着氷の影響を無視して CO₂ 挙動を算出すると、周辺海水とほぼ同じ温度の CO₂ が管出口から放出されることになるが、影響を折り込むと出口温度は海水温度よりもかなり低くなる。したがって初期検討用送り込み条件では、管出口から放出される低温の CO₂ によって海水が氷結し、例えば、管下端部の着氷が塊となって成長し浮力を発生させる、あるいは氷が生成することで周辺海水の塩分濃度が上昇し密度が上がることによって液体 CO₂ が沈降しなくなる、などいくつかの事項が懸念されることになる。これら为了避免するためには送り込み条件の変更が必要となる。

そこで、初期検討用送り込み条件を基準として、次の各項目を変更した計算を行い、管出口の CO₂ 温度が海水温度と同じになるための要件を検討した。

- ・液体 CO₂ の送り込み量
- ・ 同 入口温度
- ・管径（肉厚一定）
- ・肉厚（内径一定）
- ・海流速度
- ・管の熱伝達率

その結果、有効な手だては、CO₂ の入口温度を前もって上昇させるか、あるいは海流速度をより大きく設定することであるとわかった。このうち海流速度を人為的に上昇させることはできないので、管を曳航して相対流速を与えることで対処することになると思われる。

一方、送り込み量を減らす、管径を大きくする、熱伝達率を大きくする、という方法も効果はあったが、今回のケーススタディでは実際的でない変更を要した。また、肉厚の変更はほとんど影響がないようであった。

5.3 送り込み条件の選定と管内 CO₂ 挙動推定

以上の検討結果より、管入口における CO₂ 昇温、管の曳航、の二つの方法を採用することとする。

管出口の CO₂ 温度および圧力が、周辺の海水の温度・圧力とほぼ同じになるように、また管内上部で液体 CO₂ が気化しないという条件を確保できるように、それぞれの方法につき送り込み条件の変更を試行錯誤によって行った。なお本検討では、装置の基本計画を行うために、液体 CO₂ および海水の諸物性値が温度・圧力により変化する条件を織り込んで管内 CO₂ の挙動推定をあらためて行っている。その際の諸物性値は文献^{15)~17)}を参照した。結果は次のとおりである。

まず昇温してから送り込む方法の場合、条件の変更は入口温度-30°C（25°Cの昇温）、入口圧力 1.87 MPa であり、

管途中に差圧 0.3 MPa の圧力調整弁あるいはオリフィスを 5 個設備することになる。この場合の管内 CO₂ の温度、圧力、密度および着霜・着氷の厚さの推定結果を Fig. 10 に示す。

一方管を曳航する方法の場合、条件の変更は曳航速度 0.5 m/s、入口圧力 1.01 MPa であり、管途中には差圧 0.3 MPa の圧力調整弁あるいはオリフィス 7 個が設備される。この場合の管内 CO₂ の温度、圧力、密度および着霜・着氷の厚さの推定結果を Fig. 11 に示す。

5.4 装置の検討

5.4.1 圧力調整弁

管内の CO₂ の圧力を調整するために、管に圧力調整弁あるいはオリフィスを設ける必要がある。

圧力調整弁としてバタフライ弁を使用することとし、差圧を水頭で、

$$\Delta p = \zeta \times v^2 / 2g$$

と表すこととする。弁板の管軸からの傾きを θ 、その時の弁板による管路の開き面積を A_0 、管路の断面積を A とすれば、円形断面（直径 40 mm）および長方形断面（50×25 mm）のバタフライ弁の損失係数 ζ として Table 4 のような値が得られている¹⁸⁾。ケーススタディの管径は約 300 mm とやや大きいが、同表の値を採用できるとすると、円形バタフライ弁を 70° まで絞ることで約 3 MPa の差圧を得ることができる。0.3~0.4 MPa の圧力調整のためには 60° 程度の絞りとなる。

オリフィスによる圧力調整の場合には、開口比 $A_0/A = 0.135$ （管内径 279.5 mm に対して開口径 102.7 mm）とすれば、約 0.5 MPa の差圧が得られる。

一つの圧力調整弁あるいはオリフィスによって大きな差圧を確保することは、キャピテーションなどの不具合が予想される。また稼働中の各種変動に対する圧力調整を考慮すれば、オリフィスだけによることは実際的ではなからう。今後、具体的に圧力調整弁やオリフィスの性能を試験して配置を検討することになるが、前節では、差圧 0.3 MPa の圧力調整弁あるいはオリフィスを 100 m 間隔で 5~7 個設けることとした。今後の検討のベースとしてこのような設定は一応妥当と判断される。

5.4.2 液体 CO₂ 加熱器

前節で採用を考えた方法の一つは、洋上基地のタンク内の-55°Cの液体 CO₂ を-30°Cに昇温してから送り込むものである。この場合の液体 CO₂ 加熱器が現実的な規模のものになるかどうかを検討してみる。

加熱源としては表層の海水を利用することとする。海水の入口温度を 20°C、出口温度を 10°C とし、液体 CO₂ の加熱器入口温度を-55°C、同出口温度-30°C、流量 580 m³/h（= 13900 m³/day）とすると、必要熱量は 6.78×10⁶ kcal/h、海水量は 694 ton/h である。これより加熱器は、外径 25.4 mm、長さ 8 m のチューブ 330 本を用いたチューブ内流速

Fig. 10 Estimated CO₂ Condition in Pipe and Ice Thickness in Design Case Study with Pre-heating of CO₂

Fig. 11 Estimated CO₂ Condition in Pipe and Ice Thickness in Design Case Study with Pipe Towing

Table 4 Pressure Loss in Pipe with a Butterfly Valve

傾き角 θ°	5	10	20	30	40	50	60	70
面積比 A ₀ /A	0.913	0.826	0.658	0.500	0.357	0.234	0.134	0.060
円形	0.24	0.52	1.54	3.91	10.8	32.6	118	751
長方形	0.28	0.45	1.34	3.54	9.27	24.9	77.4	368

1.3 m/sec 程度のシェル&チューブ型の熱交換器となる。

具体的な加熱器の設計は今後の課題であるが、検討のベースとしてこのような加熱器は一応妥当なものと判断される。

5.4.3 パイピングダイアグラム

洋上基地のタンク内の -55°C、0.6 MPa の液体 CO₂ を、-30°C、1.5 MPa に昇温・加圧して、管を通じて 3000 m の深海へ定期的に送り込む状態に対応するパイピングダイアグラムを Fig. 12 に示す。

図において、タンク内の CO₂ はポンプにより加圧され、加熱器により昇温し、圧力調整弁を有する管を通じて深海へ送られる。タンクから送り出される液体 CO₂ と同量の CO₂ ガスが蒸発器により生成されてタンクに還流される。タンクの左側に描いた配管は、輸送船のタンクから洋上基地のタンクへ液体 CO₂ を受け入れるためのものである。このパイピングダイアグラムには未だ送り込み開始時および終了時や異常事態への対処のための設備は記入されていないが、今後の検討のベースとして作成した。

6. 結 言

地球温暖化対策の一つとして有望視されている CO₂ の深海への送り込みに関し、洋上から長い管を用いて液体 CO₂ を深海へ送り込む技術について検討した。本報の内容は次のようにまとめられる。

(1) 送り込み技術には広範囲にわたる開発課題があるが、基本となる送り込みの定常状態を対象に、管内 CO₂ の挙動推定法を開発した。管内 CO₂ の温度変化を推定するためには、管表面の着霜・着水による断熱影響を適切に取り入れる必要があることが示された。

(2) 回流水槽中に設置した管の内部に冷媒を流し、冷媒の温度変化と管表面における着氷特性を調べる実験を行った。その結果、管内 CO₂ の挙動推定手法の有効性を確認することができた。

(3) 管内 CO₂ 挙動推定法を用いて、100 万キロワット級石炭火力発電所から排出される CO₂ を対象とするケーススタディを実施し、管出口における CO₂ の温度・圧力が、周辺の海水の温度・圧力とほぼ同じになるように放出するための、送り込み要件を選定した。

(4) 選定された送り込み条件に対応した装置の概略の検討を行い、パイピングダイアグラムを作成した。

Fig. 12 Initial Plan of Piping Diagram

終わりにあたり、本研究は多くの方々からのご指導をいただきながら実施したことを付記し、関係の方々に謝意を表します。特に、菱和海洋開発(株)浅井孝悦氏(前三菱重工業(株)長崎研究所)には、貴重な示唆・助言をいただきました。重ねて感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Nozaki, Y.: Feasibility of Dumping Fossil-Fuel CO₂ into the Deep Ocean, J. of the Oceanographical Soc. of Japan, Vol. 47 (1991).
- 2) 石谷久ほか: CO₂ の海洋投入に関する技術的可能性評価, エネルギー・資源 Vol. 12, No. 3 (1991).
- 3) 大隅多加志ほか: 二酸化炭素の深海処分技術(その1)―構想の提示と環境影響評価手法の検討, 電力中央研究所報告 U 92062 (1993).
- 4) Shindo, Y. et al.: New Concept of Deep Sea CO₂ Sequestration, Proc. of the Int. Symp. on CO₂ Fixation and Efficient Utilization of Energy (1993).
- 5) 赤井誠: 二酸化炭素問題と対策技術―CO₂ 回収・処理技術の可能性, 第 47 回筑波混相流・エネルギー談話会資料 (1993).
- 6) 山根健次ほか: 地球温暖化抑制対策としての CO₂ 深海貯留について, 日本造船学会誌第 770 号 (1993).
- 7) 西川信行: CO₂ の分離技術, CO₂ の分離・固定を考える, 資源・素材学会関東支部 (1992).
- 8) 縄田秀夫ほか: 火力発電所排ガスからの CO₂ 分離・回収技術, 三菱重工技報第 29 巻第 4 号 ((1991).
- 9) 浅井孝悦ほか: 二酸化炭素の深海への送り込みシステムについて(その 1), 日本造船学論文集第 170 号 (1991).
- 10) 浅井孝悦ほか: 二酸化炭素の深海への送り込みシステムについて(その 2), 日本造船学会論文集第 171 号 (1992).
- 11) 尾崎雅彦ほか: 深海へ送り込み後の CO₂ 挙動に関する基礎研究, 三菱重工技報第 29 巻第 4 号 (1991).
- 12) Fujioka, Y., et al: Ocean CO₂ Sequestration at

- the Depth Larger than 3700 m, 化学工学シンポジウムシリーズ 38, CO₂ 対策技術と基礎研究, 化学工学会 (1993).
- 13) 生井ほか著: 機械工学基礎講座, 粘性流体の力学, 理工学社 (1978).
- 14) 日本機械学会: 伝熱工業資料 (改訂第4版), 丸善 (1986).
- 15) *ENCYCLOPEDIE DES GAZ, ELSEVIER/L'AIR LIQUIDE* (1976).
- 16) 日本熱物性学会編: 熱物性ハンドブック, 養賢堂 (1990).
- 17) 日本機械学会: 技術資料 流体の熱物性値集, 丸善 (1991).
- 18) 日本機械学会: 管路・ダクトの流体抵抗 (1979).
- k_F : 管材の熱伝導率 [w/m·k]
 N_u : ヌセルト数 [—]
 P_r : プラントル数 [—]
 P_{rw} : 霜, 氷表面温度でのプラントル数 [—]
 p : 液体 CO₂ の管内圧力 [Pa]
 q_0 : 半径方向単位周長当りの熱流束 [w/m²]
 Re : レイノルズ数 [—]
 $R_{F,I}$: 霜あるいは氷の表面半径 [m]
 R_{IN} : 管内径 [m]
 R_{OUT} : 管外径 [m]
 T : 液体 CO₂ の管内温度 [k]
 T_0 : 管内壁温度 [k]
 T_1 : 管外壁温度 [k]
 T_2 : 霜あるいは氷の凝固温度 [k]
 T_B : 空気あるいは海水の温度 [k]
 U_B : 空気あるいは海水の流速 [m/s]
 V_{zCO_2} : 液体 CO₂ 管内流速 [m/s]
 z : 管軸方向座標 [m]
 ε : 管内壁粗さ [m]
 $\rho_{A,S}$: 空気あるいは海水の密度 [kg/m³]
 ρ_{CO_2} : 液体 CO₂ 密度 [kg/m³]
 $\mu_{A,S}$: 空気あるいは海水の粘性係数 [Pa·s]
 μ_{CO_2} : 液体 CO₂ の粘性係数 [Pa·s]

Appendix 変数の説明

- $C_{pA,S}$: 空気あるいは海水の定圧比熱 [J/kg·k]
 C_{pCO_2} : 液体 CO₂ の定圧比熱 [J/kg·k]
 C_{vCO_2} : 液体 CO₂ の定容比熱 [J/kg·k]
 f_M : 管摩擦係数 [—]
 g : 重力加速度 [m/s²]
 h_0 : 液体 CO₂ と管内壁の熱伝達率 [w/m²·k]
 h_2 : 霜と空気, 氷と海水の熱伝達率 [w/m²·k]
 $k_{A,S}$: 空気あるいは海水の熱伝導率 [w/m·k]
 k_{CO_2} : 液体 CO₂ の熱伝導率 [w/m·k]
 $k_{F,I}$: 霜あるいは氷の熱伝導率 [w/m·k]