

# 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)

正員 浅井 孝 悦\*      正員 尾崎 雅彦\*  
 正員 高倉 理\*\*      正員 末竹 義弘\*\*

Transportation System for CO<sub>2</sub> into Deep Sea (2nd report)

by Koetsu Asai, *Member*      Masahiko Ozaki, *Member*  
 Osamu Takakura, *Member*      Yoshihiro Suetake, *Member*

### Summary

The increasing awareness of environmental problems, especially global warming due to the greenhouse effect by carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions from fossil fuel burning, is accelerating the study of the countermeasures including the suppression of the increase in the atmospheric CO<sub>2</sub>. An alternative among various countermeasures argued is the sending CO<sub>2</sub> into deep sea. In the previous paper, three types of CO<sub>2</sub> transfer system by solid, liquid, and hydrate state, were investigated conceptually referring to the storage and shipping of CO<sub>2</sub> and sending CO<sub>2</sub> into deep sea. Considering the merits and demerits of the three types comparatively, the one for liquid CO<sub>2</sub> was decided to be feasible for further study at present.

In this paper, more detailed transfer system for liquid CO<sub>2</sub> is studied. Feasibility study under specific design conditions is performed on storage tank for the recovered CO<sub>2</sub> on land, liquid CO<sub>2</sub> carrier, ocean platform, and pipe for sending CO<sub>2</sub> into deep sea. As a result, the outline of the possible whole figures of the system is clarified. Furthermore, the influential factors on the system are examined.

### 1. 緒 言

二酸化炭素(以下 CO<sub>2</sub> と略称する)を含む各種温室効果ガスの大気における濃度上昇が観測されて以来、地球温暖化の懸念が高まっている。地球温暖化問題に関する科学的な調査・研究は、ここ数年で飛躍的に拡大してきているが、地球規模の空間的ならびに時間的スケールの大きさに起因して、ある程度以上の確かさで科学的な結論を得るためには、なお時間が必要であるとの認識がされている。

しかしながら一方で、知見を得てから対策を開始するのでは時機を逸することになるかもしれないという懸念があって、産業活動によって大気中に放出される CO<sub>2</sub> の量的拡大を抑制するという当面の対応策の必要性和そのための施策が、先進国を中心とした国際協議の場で真剣に諮られている。人口問題を抱えつつ経済発展を目指す多くの発展途

上国との調整にも関係して、極めて重要な国際政治課題になっている。

エネルギー供給量を維持・拡大しつつ、CO<sub>2</sub> の大気中への放出量を抑制する方策としては、省エネルギーの推進、CO<sub>2</sub> を出さないエネルギーへの転換、CO<sub>2</sub> の回収・固定など様々な考え方にもとづくものがある。対象とする CO<sub>2</sub> の量は莫大であり、かつ緊急性が求められていることを勘案するならば、可能性のあるものは広く検討し、効果の度合や人類の経済活動への負担を定量的に評価していく必要があると考えられる。

以上を踏まえて前報<sup>1)</sup>では、CO<sub>2</sub> の回収・固定の一方策と考えられている深海への送り込みに関し、「港における CO<sub>2</sub> の船舶への積み込み→計画海域までの海上輸送→深海への送り込み」の部分を送り込みシステムととらえ、基本概念の立案と比較検討および考察を行った。その結果、送り込みシステムについては、輸送時における CO<sub>2</sub> の状態が固体、液体、水和物のいずれであっても、開発要素はあるものの技術的には特に重大な障害になる要素はないと思われた。また、評価は前段階の陸上システムおよび後段階の深海における CO<sub>2</sub> の挙動とあわせて総合的に行うべきであ

\* 三菱重工業(株)長崎研究所 船舶・海洋研究推進室

\*\* 三菱重工業(株)長崎造船所 造船設計部

るが、とりあえず液体 CO<sub>2</sub> による送り込みシステムが今後さらに検討を進めていく上での基準になると考えられた。

そこで本報では、液体 CO<sub>2</sub> による送り込みシステムをより具体的に検討する。全体的な基本概念を Fig. 1 に示す。何らかの方法で回収された CO<sub>2</sub> を液体の状態を輸送船により海上輸送し、洋上基地を経由して 3000 m 以深の深海へパイプを用いて送り込むシステムにおいて、陸上における回収・液化後の貯蔵設備、輸送船、洋上基地および送り込み用パイプについて、フィージビリティ・スタディを実施するとともに、液体 CO<sub>2</sub> の取扱い量や輸送時の温度・圧力条件、輸送距離など影響因子について考察を行う。なお前報で述べたように、深度 3000 m 以上の深海における温度・圧力条件では、液体 CO<sub>2</sub> の密度が周辺の海水密度よりも大きくなるので、送り込んだ CO<sub>2</sub> は自然沈降し、少なくとも短期間で大気中へ放出されないと期待される。

## 2. 対象とする液体 CO<sub>2</sub>

### 2.1 取扱い量について

通産省資源エネルギー庁が発表した 1990 年度におけるわが国の「エネルギー需要実績」(速報ベース)によると、一次エネルギー総供給量から試算した CO<sub>2</sub> 総排出量は、暫定値として炭素換算で約 3.2 億トンとなっている<sup>2)</sup>。今後のエネルギー総需要量の伸びを年 2% と低めに設定したとしても、エネルギー供給源の比率が今とあまり変わらないと仮定すると、毎年炭素換算で 640 万トン、CO<sub>2</sub> 重量換算で 2300 万トンの排出量増加が見込まれることになる。CO<sub>2</sub> 削減の重大な困難さは、この莫大な量に大いに起因している。

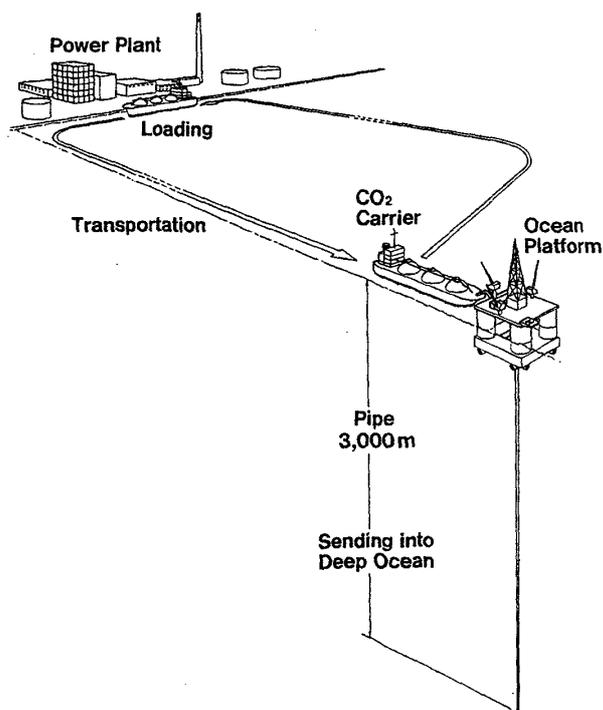


Fig. 1 Conceptual general view of liquid CO<sub>2</sub> transportation system

CO<sub>2</sub> の工業的な回収・固定を考える時、大気中に拡散した低濃度の CO<sub>2</sub> を処理するのは現実的ではなく、発電・製鉄・セメント製造・石油精製など大量の固定発生源を対象とするのが実際的である<sup>3)-4)</sup>。そこで以降では、定格出力運転時に 1 日あたり 1 万 8 千トンの CO<sub>2</sub> を排出する、比較的最新の 100 万キロワット級の石炭火力発電プラントからの回収を想定し、対応するシステムを試算して設備の大きさや取扱い量を把握する。

### 2.2 CO<sub>2</sub> の温度・圧力条件

本研究が検討対象としている送り込みシステムは、輸送船に積み込む手前の、陸上での一時貯蔵を始点とする。その前段階としての、燃焼排ガスからの CO<sub>2</sub> の分離回収・液化については、官・学・電力会社などで現在精力的な技術調査・開発が進められている。分離回収の方式としては、吸収法・吸着法・膜分離法・蒸着法などがある<sup>5),6)</sup> が、アミン系の吸収液を用いる化学的吸収法や、固体吸着剤を用いる PSA (Pressure Swing Adsorption) 法などが、比較的大規模なパイロットテストで性能試験されている状況にある。

CO<sub>2</sub> の分離回収および液化の段階で消費される動力は、経済性の観点から全体システムの中でも重要な検討項目である。したがって、一時貯蔵以降の段階における液体 CO<sub>2</sub> の温度・圧力条件は、前段階と密接に関連する。Fig. 2 は、前報でも示した、温度・圧力に対応した CO<sub>2</sub> 単独の状態を示す図であるが、CO<sub>2</sub> が液体として存在する温度と圧力の条件の組み合わせは、図中に示される範囲内であればどこでもかまわない。しかし実際的には、常温・常圧を基準にして温度差あるいは圧力差の小さい点が適しているので、三重点 (-56.6°C, 5.2 bar) より高温・高圧の、気相と液相の境界線近傍になると考えられる。定性的には温度差のある方が動力消費増に与える影響が大きいため、温度はあまり下げずに昇圧するのが望ましいと思われる。しかしながら、送り込みシステム全体を通じて高圧を維持するには、タンクをはじめとする構造や装置の、製造・保守・操作に

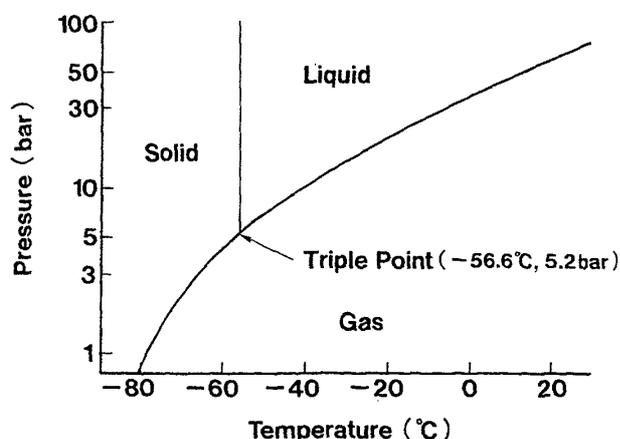


Fig. 2 CO<sub>2</sub> phase diagram

において技術的限界がある。

分離回収直後の温度・圧力状態は方式にも依存し、製造技術等の進展やLNG火力発電であれば燃料のLNGの冷熱の可能性など、最適な温度・圧力条件に言及するには不確定な周辺事項が多いので、現時点ではこれ以上の絞り込みはできない。本研究ではとりあえず、できるだけ低い圧力になる場合として、 $-54^{\circ}\text{C}$ 、6 barを想定することとする。これは、LNGやLPGなどの液化ガスの大量輸送に、低温・常圧条件が採用されている現状に照らして、初期検討条件として妥当と思われる。

### 2.3 送り込みシステムの設計条件

以上にもとづき本報では、次の条件を想定して、液体 $\text{CO}_2$ 送り込みシステム各部の概略試設計を行う。

#### (1) 陸上プラントにおける $\text{CO}_2$ 排出量

前述したように、定格出力運転時に1日あたり1万8千トンの $\text{CO}_2$ を排出する石炭火力発電プラントを対象とする。火力発電所は年間を通じて定格出力運転を行っているのではないので、必ずしもそれに合わせた高い能力を持つ必要はないかもしれないが、それらを含む最適化は今後の課題であってここでは定格出力運転時の排出量を対象としておく。

#### (2) 陸上プラントにおける液体 $\text{CO}_2$ 生成量

分離回収・液化の過程で過度に高い回収率を設定することは、技術的・経済的負担をとともなう。窒素酸化物( $\text{NO}_x$ )や硫黄酸化物( $\text{SO}_x$ )と異なり、 $\text{CO}_2$ はもともと大気中に存在するもので直接有害な気体ではないので、回収率は低くてもさしつかえない。要は、総量として所定の $\text{CO}_2$ を扱えばよいわけである。ただし、投資効果の点で低い回収率には問題がある。ここでは、陸上プラントにおける $\text{CO}_2$ 回収率を90%と想定しておく。したがって液体 $\text{CO}_2$ 生成量は1日あたり16200トンとなる。取扱い時の液体 $\text{CO}_2$ の温度・圧力条件として $-54^{\circ}\text{C}$ 、6 barを想定すると、比重は1.17であり、容積は13900 $\text{m}^3$ となる。

#### (3) 一時貯蔵量

陸上および洋上基地における一時貯蔵は、天候不良や設備補修などで生じる短期的な輸送停止状態に対する緩衝機能を考慮する必要がある。一時貯蔵量の設定には様々な事項が関連して今後の検討課題であるが、ここではとりあえず、陸上プラントからの生成量の3日分、41700 $\text{m}^3$ としておく。

#### (4) 輸送距離

送り込み後の $\text{CO}_2$ がいかなる様相で深海底に滞留するのか、あるいはどのような早さで海水中に溶解・拡散していくのか等については、深海環境下での $\text{CO}_2$ と海水の化学的挙動や、深海底における流況などが明確でないために、現在のところ定量的な判断ができない。したがって送り込むのに適した海域は今のところ特定しがたい。比較的広い範囲にわたって水深3000mを越える海域が選定の対象と

なることのみが、現時点における与件である。わが国周辺の海域で水深3000mを越える深海底は、太平洋沿岸から200km程度以上離れば比較的普遍的にあり、その中で、海底鉱物資源や生物が豊富に存在すると確認・予想される海域、航路が輻輳する海域、湧昇流の発生する海域などを回避して選定することが想像される。ここでは輸送距離として500kmを想定しておくものとする。

## 3. 陸上貯蔵タンク

大容量の低温貯蔵タンクの形式としては、LNG貯蔵等で採用されている平底円筒形式が代表的である。しかしながらこれは、構造上、タンク内圧が略々大気圧に等しい時に成立する方式であり、ここで検討対象としている液体 $\text{CO}_2$ の圧力6 barには対応できない。したがって圧力容器として適当な、球形タンク方式を採用するものとする。

圧力容器としての球形タンクの容量決定には、内圧と板厚の関係からの制限がある。現状の加工能力上無理のない範囲として使用鋼材板厚を50mmと想定すれば、検討対象の6 barに対しては容量20000 $\text{m}^3$ 程度までの球形タンクが可能となる。陸上における一時貯蔵量を41700 $\text{m}^3$ とするためには、2~3基以上のタンクが必要とされることになる。(これが、たとえば液体 $\text{CO}_2$ の温度・圧力条件として、 $-20^{\circ}\text{C}$ 、20 barを対象とするならば、1000 $\text{m}^3$ 程度の小型タンクになり、液体 $\text{CO}_2$ の密度がより小さいことを併せると、約50基以上のタンクが必要となる。)ここでは、1基あたり1日分の生成量に相当する13900 $\text{m}^3$ の液体 $\text{CO}_2$ を貯蔵可能なタンクを3基設けることとする。タンク直径は約30mになる。

タンク材については、 $-54^{\circ}\text{C}$ に耐えるものとして、低温用鋼( $>-60^{\circ}\text{C}$ )を使用する。この種の低温用鋼は、LPG( $-45^{\circ}\text{C}$ )タンクに利用され、多数の実績がある。

球形タンクの支持形式としては、脚柱支持方式とスカート支持方式が一般的である。このうち脚柱支持方式は比較的軽荷重の支持に適しており、支持重量の増加とともに球殻と脚柱との接合部が強度的に厳しくなる。一方スカート支持方式は、球殻の全周を均一に円筒殻で支持するもので、かつ球殻の熱収縮にも追従するため大容量の低温タンクに適していると考えられる。したがってここではスカート支持方式を採用することとする。

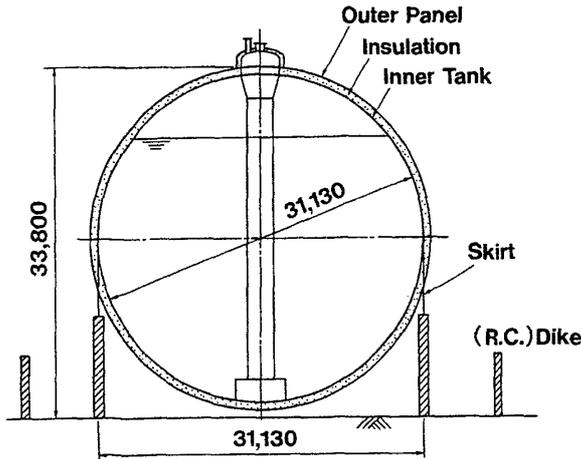
液体 $\text{CO}_2$ 貯蔵における保冷方法に関しては、今回検討対象の温度条件に類似したLPGタンクの方法を参考にすることができる。

以上によって計画した液体 $\text{CO}_2$ 貯蔵タンクの概略を、Fig.3に示す。

## 4. 液体 $\text{CO}_2$ 輸送船

### 4.1 輸送計画

液体 $\text{CO}_2$ 輸送船の主要目を設定するために、まず陸上プ



**Tank Type** : Moss Type Spherical Tank  
(With Skirt Support)

**Contents** : Liquid CO<sub>2</sub>

**Design Temp.** : -55°C

**Design Specific Gravity** : 1.2

**Design Pressure** : 5 kg/cm<sup>2</sup>G

**Storage Capacity (Nominal)** : 13,900 m<sup>3</sup>

**Tank Volume** : 15,800 m<sup>3</sup>

**Filling Ratio** : 90%

Fig. 3 Liquid CO<sub>2</sub> storage tank

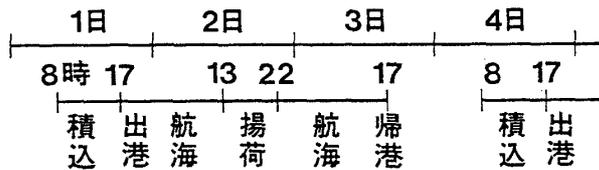


Fig. 4 Service pattern of CO<sub>2</sub> carrier

ラントから洋上基地までの輸送計画を立てる。計画の条件として、陸側の積み出し基地における船の離着棧および液体CO<sub>2</sub>積み込み作業は、昼間(8時から17時)に行うこととし、運航パターンは毎航同じスケジュールの繰り返しとする。この条件下、先に設定した輸送距離500 km(270海里)では1航海あたり2日から3日を1サイクルとする行程が考えられるが、多少の余裕を見て3日サイクルを採用することとする。Fig. 4に運航パターンを示す。すなわち、1日めの8時から17時まで陸上基地におけるCO<sub>2</sub>積み込み作業(9時間)、17時出港、2日めの13時まで往路航海(20時間)、13時から22時まで洋上基地への揚荷作業(9時間)、22時から3日めの17時まで復路航海(19時間)、17時帰港を1サイクルとする。この場合の往復航平均船速は、14ノット程度である。

4.2 所要隻数と載貨容積

今回想定している輸送量程度であれば、海上輸送のみの経済性からは、小型船複数隻よりも大型船1隻の方が有利であるが、陸上の積み出し基地の港湾条件によっては最大船型が制約を受けること、定期検査や不測の不稼働に対する備えなどを勘案して、ここでは所要隻数を2隻とする。

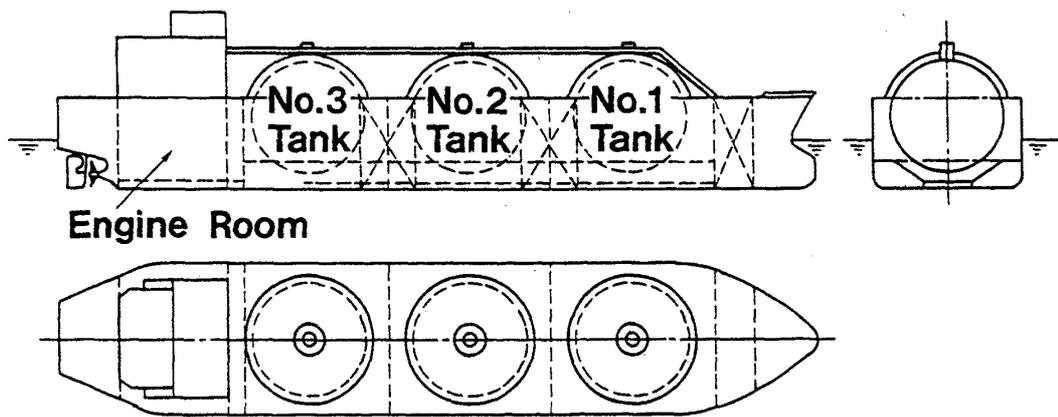
1隻あたりの載貨容積は、次のような算出方法によって22800 m<sup>3</sup>/隻とした。

$$\text{載貨容積} = \frac{\text{液体CO}_2 \text{ 生成量/日}}{\text{揚荷率}} \times \frac{\text{往復日数/回}}{\text{稼働率}} \times \frac{1}{\text{隻数}}$$

ここに、液体CO<sub>2</sub>生成量/日=13900 m<sup>3</sup>/日

揚荷率=0.98

往復日数/回=3日



$$L_{pp} \times B_{MLD} \times D_{MLD} - d_{MLD} = 154 \text{ m} \times 32 \text{ m} \times 18 \text{ m} - 9.5 \text{ m}$$

**Capacity** : 22,800 m<sup>3</sup>

**Design Temp.** : -55°C

**Design Specific Gravity** : 1.2

**Design Pressure** : 5 kg/cm<sup>2</sup>G

Fig. 5 Rough arrangement of CO<sub>2</sub> carrier

稼働率=0.932 (稼働 340 日/年)

隻数=2隻

#### 4.3 液体 CO<sub>2</sub> 輸送船の概略計画

液体ガス運搬船は、そのガスの特性により必要とされる構造要件が SOLAS (IGC コード<sup>7)</sup>) により詳細に規定されている。しかしながら液体 CO<sub>2</sub> に関しては、従来運搬の対象にならなかったために規定がない。そこでとりあえず同じ不活性ガスである窒素 (N<sub>2</sub>) に準ずることとし、船型配置、構造要件として規則で規定される 3G を適用する。なおタンク数については 3 基搭載とした。1 タンクあたり 7600 m<sup>3</sup>、直径約 25 m となる。

貨物タンク設計条件は、圧力 5 kg/cm<sup>2</sup> G、温度 -55°C、液比重 1.2 とする。圧力容器であり、かつ船舶搭載の中圧タンクとしては比較的大容量であることから、球形タンクをスカート方式で支持する、いわゆるモス方式を採用する。とりあえず IGC コードに準拠してタンク設計を行うこととし、設計タンク圧力が比較的高いこと、タンク直径が約 25 m であることから、設計にあたっては圧力タンク設計基準を採用し、規則で規定される TYPE C とした。TYPE C とすることによって、船舶設計上の要求は緩和され、より合理的な設計が可能となる。

タンクの材質としては、低温用鋼を採用する。タンクの外表面には、防熱を施工する。また、ボイルオフガスはベントライザから直接大気へ放出するものとする。

以上にもとづく液体 CO<sub>2</sub> 輸送船の概略配置を Fig. 5 に示す。

### 5. 洋上基地

#### 5.1 洋上基地の基本要件

洋上基地は、3000 m あるいはそれ以上の長さの送り込み用パイプを垂下した状態で計画海域に浮上・待機し、輸送船から液体 CO<sub>2</sub> を受け取り、一時的に貯蔵するとともに、常時パイプを通じて深海へ送り込むことを機能とするものである。また、大気や海上・海中の各種情報の定点観測、送り込んだ後の CO<sub>2</sub> の挙動モニター等を行う拠点としての役割も担うことになると考えられる。

洋上基地の浮体としての要件は、貯蔵能力、位置保持性能、耐候性が挙げられる。まず貯蔵能力は、輸送船の効率的あるいは柔軟な運用のために、洋上基地が輸送船から CO<sub>2</sub> を一時にまとめて受け取り、深海への送り込みをパイプによって連続的に行う上での緩衝機能として必要とされる。貯蔵タンク容量の大小は洋上基地の設計自体に直接影響を及ぼすので、システム全体の効率的な運用を考えて過不足のない容量を選定する必要がある。

次に位置保持性能は、CO<sub>2</sub> を送り込む海域を限定するために必要とされるもので、基地が風や海流・潮流などにより計画海域から逸脱しないようにするための、自航装置あるいは自動定点保持装置の能力によって規定される。洋上

基地の安全に係わるような異常海象時にまで位置保持する必要はないと考えられるが、少なくとも、送り込み作業限界までの海象条件で洋上基地単体の位置を保持する能力、ならびに揚荷作業限界までの海象条件で輸送船を係船した状態のまま位置保持する能力が必要とされる。

耐候性は、暴風時における洋上基地の安全性に係わる項目であり、加えて送り込み用パイプの強度に影響を及ぼす動揺特性の観点からも所定の性能が必要である。荒天が予想される度に 3000 m のパイプを揚降するシステムでは、基地としての稼働率が大幅に低下するので、基本的にパイプは垂下状態のまま荒天状態をやり過ごすものとする。そのためには洋上基地の動揺がパイプに損傷を与えない大ききである必要がある。

浮体形式としては、耐候性にすぐれる半潜水型と、貯蔵能力にすぐれる船型が候補に挙げられる。以下では、北太平洋西域を想定した海象条件にもとづき、必要な貯蔵能力を有する半潜水型ならびに船型の洋上基地の、基本計画例を示す。

#### 5.2 海象条件

洋上基地の基本計画にあたっては、次のような状態に分けて海象条件が設定されることになると考えられる。

- i) 平常状態
- ii) 位置保持状態
- iii) 異常状態
- iv) パイプ揚降状態

i) の平常状態の海象条件には、輸送船を洋上基地へ係船し揚荷作業が可能である限界の条件が設定される。洋上基地の貯蔵能力をたとえば 3 日分とすると、年間を通じて 3 日間以上続けて平常状態でないことがしばしば起きると、洋上基地の稼働率が低下することになる。ii) の位置保持状態の海象条件には、送り込み用パイプを垂下したまま安全に洋上基地を一定範囲内の海域に位置保持するための限界条件が設定される。位置保持用スラストの容量・基数・必要動力を決定するためのものである。iii) の異常状態は、洋上基地の安全性に係わる異常時の海象条件が設定される。iv) のパイプ揚降状態は、初期ならびに保守点検時に送り込み用パイプを設置する過程で一時的に生じるものであるが、パイプの上端と洋上基地とが過渡的に剛結合状態になって曲げモーメントが発生しやすいので、かなり静穏な海象条件下が設定される。

i), iv) は揚荷作業方法やパイプ揚降方法に依存し、作業限界に応じて比較的穏やかな海象条件が設定される。ここでは ii), iii) に対応する海象条件として、それぞれ 1 年再帰程度、100 年再帰程度の条件を設定して検討を進めておく。すなわち、1 年に 1 度ぐらいの海象条件までは位置保持ができ、100 年に 1 度の暴風状態でも遭難しないという条件設定をしておくものである。

まず風速については、次のような台風域内最大風速の経

Table 1 Design condition for ocean platforms

Condition	Service Cond.	Storm Cond.
Return Period	1 year	100 years
Wind Speed	35 m/s	60 m/s
Current Speed	2.5 kt	3.0 kt
Wave Height	25 m	32 m
Wave Period	~ 20 sec	~ 20 sec

驗式<sup>9)</sup>をここでは用いる。

$$V_{\max} = \alpha \sqrt{(1015 - P_{\min})}$$

$V_{\max}$ : 最大風速 (m/s)

$\alpha$ : 係数 (10分間平均風速に対し 5.5~6)

$P_{\min}$ : 最低気圧 (mb)

太平洋沿岸に上陸する台風の上陸時の中心気圧は、弱くて 980 mb, 強くて 920 mb 程度であるから, 上式で  $\alpha$  を 6 とすると, 35.5 m/s~58.5 m/s が得られる。そこで, 位置保持状態に対する風速を 35 m/s, 異常状態に対する風速を 60 m/s としておく。

海流・潮流・吹送流などによる流速については, 海域による差が大きく, ここでは特定できないので, 位置保持状態に対する流速を 2.5 ノット, 異常状態に対する流速を 3 ノットとしておくものとする。

波高については, 船舶通報データにもとづき整理された日本近海の統計資料<sup>9)</sup>から, 一般に厳しいとされている野島崎沖のもの (E 06 S) を選ぶと, 長期超過確率と再現期間の関係より, 位置保持状態に対する最大波高を 25 m, 異常状態に対する最大波高を 32 m と設定することができる<sup>10)</sup>。波周期は 20 秒まで考慮することとする。

以上のように設定された海象条件をまとめたのが, Table 1 である。ただし, いずれも仮に設定してみた値であり, 実際には詳細な現地データにもとづく十分な吟味が必要である。

### 5.3 半潜水型洋上基地の概略計画

半潜水型洋上基地を概略計画した結果を Fig. 6 に示す。浮体形状・諸元の選定は次の要領で行っている。

浮体形式としては, デッキ構造およびそれを支える 4 本のコラム, さらにそれらを支えるポンツーンから成る, プレース構造の無い 4 本コラム半潜水型を考える。風圧面積を小さくすることと満載時の重心を下げ安定性を得るために, CO<sub>2</sub> 貯蔵タンクはコラム内に収納するものとし, ポンツーン内にバラストタンクを配することとする。また CO<sub>2</sub> 貯蔵タンクの形は, コラム内への収納を考慮して, 縦置き円筒型 (上下半球形状) とする。

浮体の全長・全幅については, これらが大きいほど浮体の波浪動揺が小さくなる傾向があるので, 国内の大型建造ドックを考慮し, 96 m とする。ただし洋上接合を行うなどによって, より大型浮体を建造することも不可能ではない。

吃水は, 後述する排水量ならびにコラムとポンツーンの排水量比を確保する上で, あまり小さくはできず, 35 m とする。このうちポンツーン高さの占める分を 15 m, コラムの吃水分を 20 m と設定する。静水面から上のコラム高さについては, デッキ下面が波頂と接触しないように, 静水面からの波面の最大上昇量と浮体上下揺れによるデッキ下降量の合計値を越えるものとして 30 m とする。また, デッキ構造は, 全体強度のための主要構成要素として厚さが必要なので, 内部を居住区や機械室としても利用することとし, 7 m 見込んである。結局ポンツーン底面からデッキ上面までの全高は 72 m となった。

コラム直径は, 液体 CO<sub>2</sub> 貯蔵タンクの大きさから決定される。洋上基地の CO<sub>2</sub> 貯蔵量をここでは陸上プラントからの生成量の 3 日分, 41700 m<sup>3</sup> とすると, コラム 1 本に収納される貯蔵タンクの容量は, 約 10400 m<sup>3</sup> になる。貯蔵タンクの高さをコラム高さの 45 m 以下に抑えることを条件として, 形状・寸法を決定することになるが, ここでは内槽の直径を 20 m, 高さを 40 m とし, 保冷層を 1 m 確保して, 外槽の直径を 22 m, 高さを 42 m とする。したがってコラム直径は 25 m 程度は必要である。

ポンツーンの大きさは, 浮体の上下揺れの固有周期が十分長くなるように, 所要量が策定される。上下揺れに關す

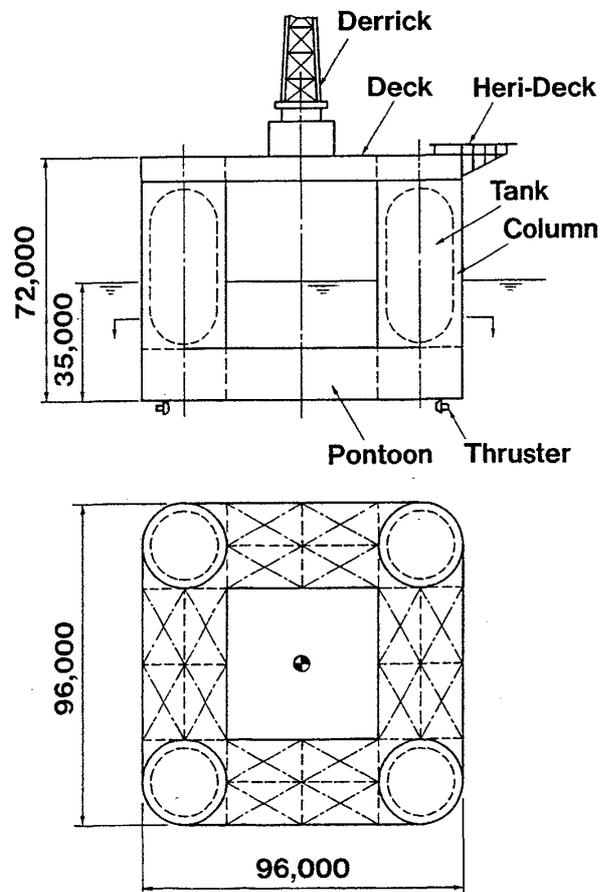
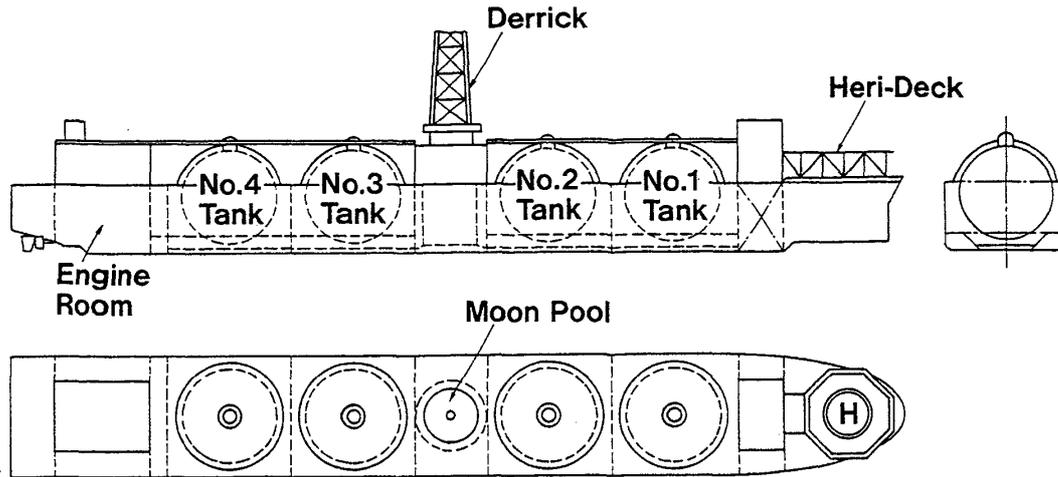


Fig. 6 Rough arrangement of ocean platform of semi-submersible type



$$L_{pp} \times B_{MLD} \times D_{MLD} - d_{MLD} = 240 \text{ m} \times 38 \text{ m} \times 20 \text{ m} - 11 \text{ m}$$

Capacity : 41,700 m<sup>3</sup>

Fig. 7 Rough arrangement of ocean platform of ship type

る静水学的な復原力はコラムの水線面積で決まるから、付加水によるものを含めて見かけ質量を十分大きくとって、上下揺れの固有周期を長く設定する必要がある。これは、送り込み用パイプの動的引張強度に係わる事項として重要である。特異点分布法による付加質量推定計算を、ポンツーンの幅をパラメタとして実施した結果、ポンツーンの幅として25 m以上程度は必要であることが見出された。その結果、Fig. 6のような、コラムとポンツーンを合わせて総排水量約15万トンという、かなり大型の半潜水型洋上基地になることとなった。

以上が、必要貯蔵能力と海象条件を想定して概略的な基本計画を行った結果を、経緯を交えて記述したものである。詳細な検討によって洗練させていく余地は大いにあるが、洋上基地の大きさの規模をほぼ把握することができたと考えらる。

#### 5.4 船型洋上基地の概略計画

船型の洋上基地の計画は、輸送船の計画と類似の方法で行われる。概略計画の結果をFig. 7に示す。

洋上基地のCO<sub>2</sub>貯蔵量を、半潜水型と同じ41700 m<sup>3</sup>とし、球型タンクを4基搭載することとすると、タンク1基あたりの容量は約10400 m<sup>3</sup>であるから、タンク直径は約27 mとなる。タンク的设计にあたっては、輸送船と同様、圧力タンク設計基準のTYPE Cが採用される。材質・防熱構造も同様である。

船型配置、構造要件についても輸送船と同じく、IGCコードに規定される3Gを採用することとする。ただし、船体中央部に送り込みパイプ用の開孔（ムーンプール）を有し、パイプハンドリング用のデリックが配置されることになる。

船型は半潜水型に比べて耐候性にやや難があるが、それは主に横波に対して横揺れなどの波浪動揺が大きくなることに起因している。したがって、常に船首が波に向かうような操船を自動制御で行うことにすれば、荒天回避すべき海象条件をより厳しいものへ改善することが可能である。洋上基地はいずれにしても位置保持のための制御を行うわけであるから、方向の制御を付加することはさほど困難ではないと思われる。そこでここでは、船首部と船尾部に横方向のスラストを設置するものとした。なお、これによって位置保持に必要なスラスト容量・動力が、半潜水型よりも小さくてよいという利点が生じる。

#### 5.5 位置保持性能

洋上基地の位置保持は、風圧力・流れによる抗力・波漂流力に対抗して、スラストにより推力を発生させて行う。位置の検知は、船舶の電波航法の応用でもよいが、静止衛星によるGPS (Global Positioning System) を利用することも可能である。

位置保持状態の海象条件から求められる位置保持性能を、Table 2に示す。ただし船型洋上基地については、風の作用する角度が船首から30°以内になるよう方向制御するものとしている。また波漂流力は比較的小さいものになるので除外した。スラストには、現在供用されている最

Table 2 Plan of thruster/generator for ocean platform

Type of Platform	Semi-Submersible	Ship
Wind Load (for 35 m/s)	440 ton	150 ton
Current Load (for 2.5 kt)	340 ton	210 ton
Thrust Demand	780 ton	360 ton
Thruster	3000 HP × 20 unit	3000 HP × 9 unit
Generator	6000 HP × 10 unit	6000 HP × 5 unit

大級の容量のものとして、1基あたり電動3000馬力、推力40トン进行想定した。発電機は、洋上での保守点検中の合計出力低下の軽減、ならびに出力変動が大きいことを考慮して、大出力のものを少なく設置するのは得策でないと考え、6000馬力程度のもので基数を求めた。

### 5.6 波浪動揺性能

異常状態の海象条件に対する洋上基地の耐候性を検討するために、半潜水型ならびに船型について、波浪応答特性を推定した。推定方法は、流体力係数および波浪強制力を特異点分布法で求めて浮体の6自由度の周波数応答を算定するものであり、半潜水型については三次元任意形状浮体を対象とする境界積分法、船型についてはルイスフォームで各横断面を近似して二次元流体力を重ね合わせるストリップ法(STFM)を適用した。

Fig. 8, 9にそれぞれ浮体重心の水平方向揺れ(前後揺れと左右揺れの合成)、上下方向揺れの計算結果を示す。横軸は波周期であり、縦軸は最大波高の波に対する応答片振幅の有次元値である。ここで最大波高は32mとするが、短周期領域では波高/波長比が最大1/7になるように抑えてある。図中、半潜水型についてはデッキの一辺に平行な方向からの入射波についてのみ示したが、浮体の対称性により方向影響は少ないので他の方向の計算結果は省略した。

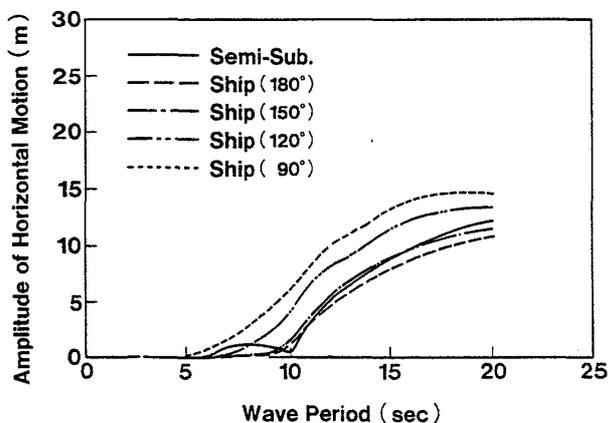


Fig. 8 Horizontal motion of ocean platform

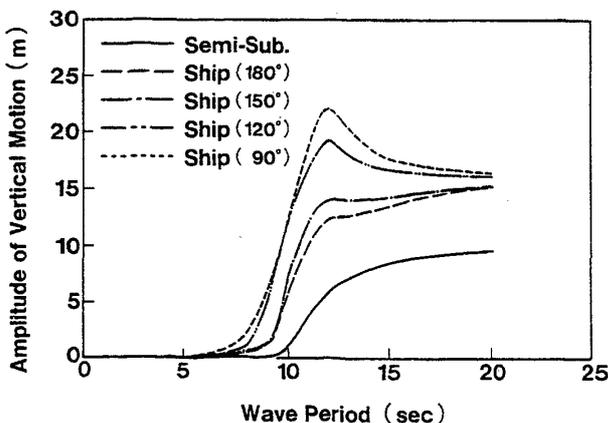


Fig. 9 Vertical motion of ocean platform

9秒以下の波に対しては半潜水型、船型ともに動揺量は小さく、それより長い周期の波に対しては半潜水型の動揺量が比較的小さくなっている。また、波に対して船首が30°以内を向くような操船を行えば、耐航性に対し有効であることがわかる。

## 6. 送り込み用パイプ

### 6.1 送り込み用パイプの概略計画

送り込み用パイプの要件は、液体CO<sub>2</sub>を液体のまま、洋上基地から3000m以深の深海へどこおりに送ることである。重要な留意点のひとつは、洋上基地のタンク内での温度・圧力条件(-54°C, 6 bar)から、深海の温度・圧力条件(2~5°C, 300 bar以上)まで連続的に変化する過程で、圧力が十分高くなる前の昇温による液体CO<sub>2</sub>の気化を防ぐことであり、そのためには送り込む直前あるいは送り込み途中でさらに加圧する等の操作が必要である。これらを含め、送り込む方法の具体的な検討は今後の課題としておき、ここでは、荒天状態で安全にパイプを洋上基地に保持・垂下するという観点からの検討を行う。

パイプの安全性を検討するにおいて、概略の諸元を設定しておく。本報で想定している送り込み量は、1日あたり13900m<sup>3</sup>であり、定常的な送り込みを仮定すると、パイプ内流量は、0.16m<sup>3</sup>/秒となる。流速をたとえば3m/秒以下に抑えたとすると、内径260mm以上が必要であることになる。

ここでは、海洋石油開発に用いられている油井用継目無し鋼管を用いることを想定し、JIS規格3種(STO-J)短ねじケーシングの継目無し鋼管で、呼び径11¾インチを採用するものとする。主要諸元は次のとおりである。

長さ; 3000 m  
 外径; 298.5 mm  
 内径; 279.5 mm  
 ねじカップリング付パイプ重量 (空中); 67.9 kg/m  
 引張強さ; 53 kg/mm<sup>2</sup>

これによると、パイプの水中における自重は177トンであり、許容張力は457トンである。

洋上基地は荒天状態において、風や流れによって漂流し、波によって水平方向、上下方向、傾斜方向へ動揺する。したがって垂下された送り込み用パイプは、流れを受け、かつ上端の保持部が強制的に各方向へ加振されることになる。保持部の曲げ応力を緩和するために、パイプの保持状態はピン結合にするものとする。パイプの自重による張力を支えつつ回転自由になる結合方法としては、TLP(テンション・レグ・プラットフォーム)のテンドンに用いられ実績のある、エラストマジョイントの適用などが考えられる。

結局パイプの強度は、洋上基地の水平方向動揺によるたわみ変形に対する曲げ強度と、上下方向動揺による伸縮変

形に対する引張強度について、検討が必要となる。

## 6.2 パイプの動的挙動解析

下端が自由で、上端がピン結合を介して水平方向ならびに上下方向に強制加振される、送り込み用パイプの動的挙動解析にあたっては、水中線状構造の汎用応答解析法<sup>11)</sup>を用いる。計算に供した数値解析プログラムの主な特徴は次のとおりである<sup>12)</sup>。

- 1) 解析対象は水中線状構造一般の三次元応答であり、張力による弾性伸び、曲げ剛性、大たわみ、流れと波の共存場を考慮することができる。
- 2) 解析法は線形化増分法にもとづく有限要素法であり、Newmark- $\beta$ 法による時間積分法を用いた時刻歴計算ならびに静的平衡状態を中心とした線形化周波数応答解析を行うことができる。
- 3) 外力としては、重力、浮力、潮流力、波力および構造要素の運動による減衰力、付加水の慣性力を取り扱う。
- 4) 端部の境界条件として、自由、ピン、剛結合、ばね結合の中から任意に選択することができる。また任意の方向へ強制加振させることが可能である。

基本的な挙動特性を検討するために、ここでは、パイプ上端を水平方向、上下方向にそれぞれ独立に周期的な強制加振をさせて、挙動解析を行った。結果を Fig. 10, 11 に示す。

Fig. 10 は、パイプ上端を水平方向に周期的に強制加振した場合の曲げモーメントの応答結果である。横軸は加振周期であり、縦軸はパイプ全長にわたって曲げモーメントが最大になる点の、加振振幅あたりの曲げモーメント振幅である。曲げモーメントが最大になる点は、計算範囲の加振周期すべてにおいて、上端部直下約 10 m の箇所が生じていた。応答曲線は単純であり、短周期になるほど大きな応答値を示している。短周期になると上端部の強制加振に対して下部が追従しにくくなり、上端部直下の曲率が大きくなって曲げモーメントを大きくするものと解釈される。

一方、Fig. 11 は、パイプ上端を上下方向に周期的に強制加振した場合の張力変動の応答結果である。縦軸はパイプ全長にわたって最大になる点の加振振幅あたりの張力変動振幅であるが、概ねパイプ上端部で最大値を示した。応答曲線は前述の曲げモーメントのものと類似で、短周期になるほど大きな応答値を示している。ただし、これは 4 秒付

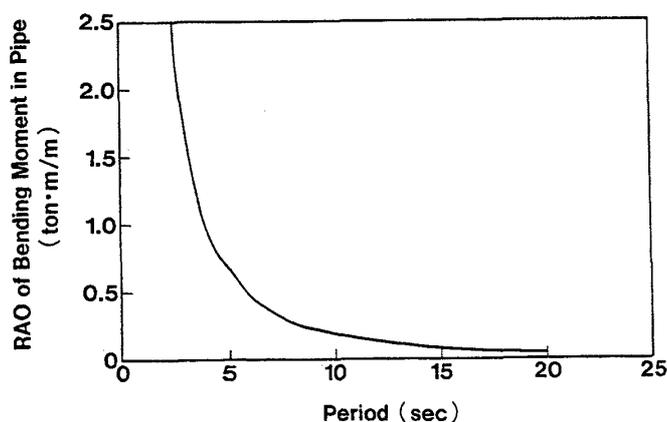


Fig. 10 Bending moment in pipe with horizontal forced motion at top

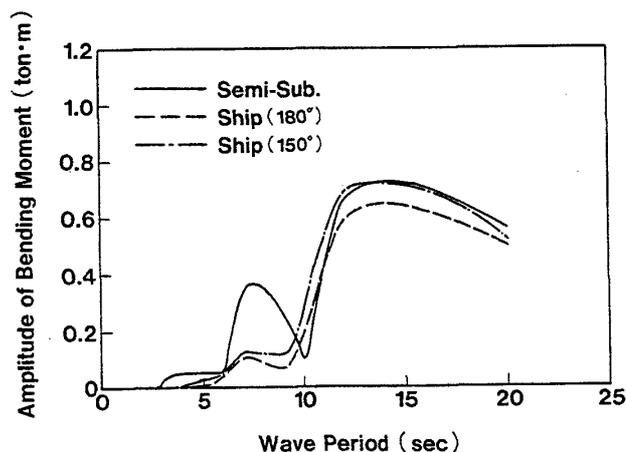


Fig. 12 Bending moment in pipe caused by horizontal motion of platform

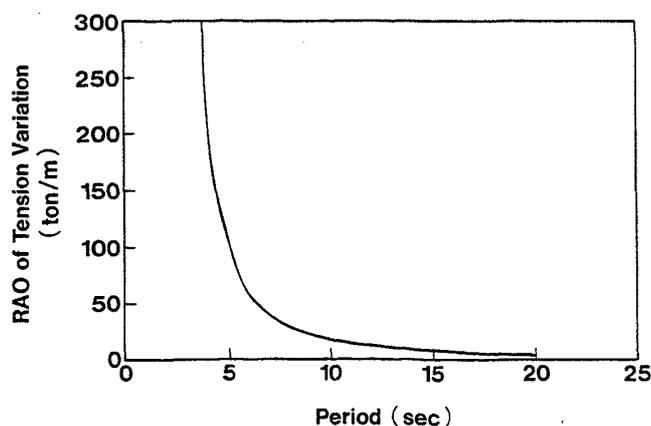


Fig. 11 Tension variation in pipe with vertical forced motion at top

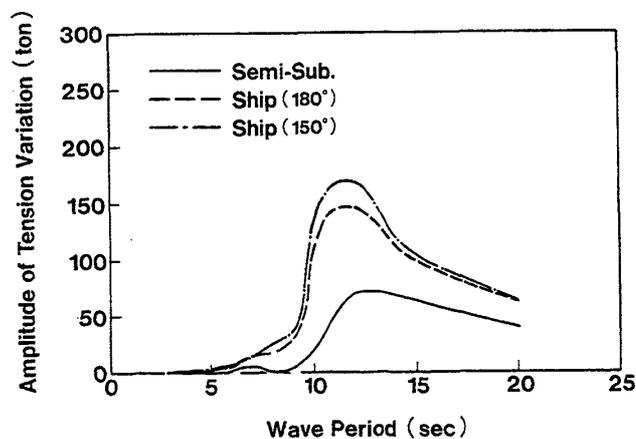


Fig. 13 Tension variation in pipe caused by vertical motion of platform

近にパイプ全体の縦振動の固有周期があるためであり、このことは、パイプ上端にヒープコンベンセイタのようなばねを介したり、軸剛性の低いフレキシブルホースを用いることが、固有周期を長くして波周期領域に近づけることになって、張力変動を低減するのに逆効果になるかもしれないことを示唆するものである。

上述のように、曲げモーメントならびに張力変動の応答は、パイプ上端の強制加振に対して短周期になるほど大きな値を示すことが示された。ところが、Fig. 8, 9で示したように、洋上基地の波浪動揺は長周期領域で大きく短周期領域で小さい。そこで両者を重ね合わせて、洋上基地浮体の動揺特性を考慮に入れたパイプの挙動について示したのが、Fig. 12, 13である。縦軸は、最大波高の波（波傾斜による制限考慮）に対する応答片振幅の有次元値である。なお、船型洋上基地については、波向が船首から $30^\circ$ 以内になるように方向制御されるものとして、対応する角度についてのみ示した。

Fig. 12の曲げモーメントの結果によると、洋上基地の形式によらず、 $0.72 \text{ ton}\cdot\text{m}$ が最大値として得られている。想定しているパイプの断面の諸元より、最大縁応力は $1.2 \text{ kg}/\text{mm}^2$ と評価され、強度的に十分安全であることがわかる。一方、Fig. 13の張力変動の結果によると、半潜水型で最大70トン、船型で最大170トンが得られている。パイプの耐力にもとづく許容張力は457トンであり、水中における自重は177トンであるから、張力変動に対しても安全であることが示された。洋上基地の運動の組合せを考慮に入れ、実際の海洋の波による不規則波中の詳細な解析を行う必要はあるが、洋上基地から送り込み用パイプを垂下したまま荒天状態をやり過ごすことが、技術的に可能であると判断される。

## 7. 設計条件変更の影響

### 7.1 影響因子

以上では、液体 $\text{CO}_2$ の深海への送り込みシステムについて具体的な全体像を描くために、各種設計条件を仮定してきた。本章では、これらの条件が変更される場合の影響について考察を行う。

送り込みシステムの設計条件は、陸上プラントや送り込み後の $\text{CO}_2$ の深海挙動を含めた総合的な検討が進められた上で与えられて設定されるものと、送り込みシステム自体で適切に選べるものとの、大別されよう。前者は1日あたりの液体 $\text{CO}_2$ の生成量や計画海域などであり、後者は航海パターンや陸上・洋上基地における一時貯蔵量などである。また、 $\text{CO}_2$ の温度・圧力条件は、総合的な検討の結果最適化されるべきものであろう。

これらの条件が、送り込みシステムにいかなる感度でどのような影響を与えるかは、これまで示してきたような全体を通した概略計画をパラメトリックに行えば、把握する

ことはできる。しかしながら、現時点では周辺事項に不確定な要素が多く、すべての影響因子について組み合わせて検討を行うことは、時期尚早であると言えよう。

そこで今回計画を行ったシステムを手がかりとして、影響が大きいと考えられる因子と、その影響の方向について、定性的な考察をしておくものとする。

### 7.2 液体 $\text{CO}_2$ 生成量の影響

陸上プラントからの1日あたりの液体 $\text{CO}_2$ の生成量は、送り込みシステム全体に対して最も影響の大きい因子のひとつであろう。生成量が多くなれば、貯蔵や輸送の能力を見合っただけ大きくする必要があり、システムの各部分の姿が変わってくる。

陸上貯蔵タンクは、圧力容器の容量に実質的に上限があるので、基数が変化する。基数が多くなって敷地面積が問題となる場合には、係留浮体を利用する案や、他の陸上プラントと合わせて別途集約基地を造る案などもありえよう。輸送船については、所要隻数、1隻あたりの載貨容積が変化する。洋上基地については、船型ならば輸送船と同様に比較的計画変更が容易であるが、半潜水型の場合は貯蔵タンクの容量・基数を変更するのに柔軟性に乏しい。耐候性の観点から小さな基地は不具合であり、建造方法の観点からあまり大きな基地は難しいからである。送り込み用パイプは、直径の変化で対応させることになるだろうが、大きすぎると自重や抗力が大きくなり、揚降作業や保持方法が困難になる。本数を増やす場合には、相互に絡んだり接触したりしない工夫が必要である。

### 7.3 液体 $\text{CO}_2$ の温度・圧力条件の影響

今回の検討における $\text{CO}_2$ の温度・圧力条件は、圧力ができるだけ低くなるように選定した。これよりも圧力が高い場合の短所は、タンクが小型になることである。3.で試算したように、陸上における一時貯蔵量を $41700 \text{ m}^3$ とした時に、圧力が6 barなら大型タンク2~3基でよいものが、20 barなら小さなタンク50基近く必要ということになる。これは陸上貯蔵のみならず、輸送船のタンク、洋上基地のタンクすべてに関して同様であり、タンクの配置方法のみならず、配管をはじめとする荷役設備・手順が複雑になる。

一方、圧力が高いかわりに温度がそれほど低くなくてよいことで得られる長所は、前段階の液化の過程における動力消費量が比較的少ないこと、パイプによる深海への送り込み時の温度変化差が小さいことが挙げられる。特に前者は、経済性やエネルギー収支の点で重要である。

温度・圧力条件の違いによる得失は、総合的に評価する必要があり、今後の検討課題である。

### 7.4 輸送距離の影響

輸送距離は計画海域に依存し、主に輸送船の計画に影響を与える。往復に要する日数が増えると、載貨容積を増大させるために輸送船が大型化することになり、対応して陸上ならびに浮上基地の一時貯蔵タンクの容量も増大する。

一時貯蔵タンクの容量を増大させないためには、輸送船の所要隻数を増やす必要がある。

このほか、輸送距離の大幅な増大が影響を及ぼす項目として、洋上基地の荒天回避方法、輸送船の消費エネルギーおよび排出 CO<sub>2</sub> による歩留り低下などがある。

## 8. 結 言

液体 CO<sub>2</sub> による深海への送り込みシステムの各部分について、設計条件を仮定して概略計画を行ってみた。初期検討段階ではあるが、ひとつおり具体的な全体像を描くことができたので、技術的な成立性が提示されたと思われる。また、異なる設計条件に対しても同様な検討が可能のように、比較的詳細に経緯を述べた。概略の計画であるので、適用法規・基準や、より適切な計算方法などに関して、不備な点もあると思われるが、検討・評価の出発点に位置づけられれば幸いである。

CO<sub>2</sub> を深海へ送り込む方策による回収・固定の成立性は、陸上における CO<sub>2</sub> の回収、深海への送り込み、CO<sub>2</sub> の深海での挙動、のすべての段階を総合しての評価すべきものである。そのためには、全体を総合しての経済性評価や長期的な効果、深海環境への影響など、今後の課題は多い。本研究が今後の総合評価の一助になれば幸甚である。

## 参 考 文 献

- 1) 浅井孝悦, 尾崎雅彦ほか: 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), 日本造船学会論

- 文集第 170 号 (1991) pp. 369-377.
- 2) エネルギージャーナル社: CO<sub>2</sub> 排出総量協議と '90 年度エネルギー実績の危惧, エネルギーと環境, NO. 1169 (1991) 9, 12, pp. 2-4.
- 3) 山下巖, 赤井誠: CO<sub>2</sub> 回収を考えた燃料システム, 化学技術誌 MOL (1990) 5 月号, pp. 46-50.
- 4) 白田利勝: CO<sub>2</sub> の資源化と化学固定技術, 化学技術誌 MOL (1990) 5 月号, pp. 71-75.
- 5) 藤谷義: CO<sub>2</sub> の分離回収技術, 化学技術誌 MOL (1990) 5 月号, pp. 76-84.
- 6) 瀬間徹: 火力発電所排ガスからの CO<sub>2</sub> 回収技術と深海底貯留技術の開発, ENERGY (1991) 2, pp. 70-73.
- 7) 液化ガスのばら積運送のための船舶の構造及び設備に関する国際規則 (IGC コード), (海上人命安全条約の附属書), 海文堂ほか (1985).
- 8) 岡内功ほか: 耐風構造, 丸善株式会社 (1977) pp. 75.
- 9) 日本造船研究会: 気象海象および船舶の波浪中応答に関する統計解析ならびに実船計測報告書, SR 163 (1981).
- 10) 海洋工学委員会構造分科会: 半潜水式海洋構造物における部材応力の応答関数と長期予測, 第 7 回海洋工学シンポジウム (1984) pp.103-116.
- 11) 吉田宏一郎, 米家卓也ほか: 有限要素法による水中線状構造の応答解析, 日本造船学会論文集第 144 号 (1978) pp. 195-204.
- 12) 宇ノ木賢一, 尾崎雅彦ほか: JOIA TLP 生産用リジッドライザーの挙動解析, 第 9 回海洋工学シンポジウム (1989) pp. 135-142.