液化二酸化炭素の深海搬送用可撓性パイプライン Flexible Pipe for Deep Ocean Disposal of Liquid Carbon Dioxide

石井健一^{*} 福 唯志^{*2} Ken'ichi Ishii Tadashi Fuku

矢木橋清智^{*3} Kiyotomo Yagihashi 安部 智^{*4} Satoshi Abe

概 要 二酸化炭素の深海隔離は地球温暖化対策の有力な手段の一つと考えられており,各種の技術 開発と環境面への影響に関する調査研究が行われている。地球環境産業技術研究機構と古河電工は洋上 基地から垂下させた可撓性パイプラインにより3000m以上の深海底に液化した二酸化炭素を搬送し, 貯蔵するための共同研究を実施している。日常の産業活動により排出される二酸化炭素を回収し液化し て深海まで搬送するためのトータルシステムについて概念設計を行い,その中でも特に重要な要素技術 となる軽量で機械的強度及び耐久性に優れるパイプ構造の開発を進めてきた。今回,第一次試作パイプ の評価試験が進み,基本特性の一部が明らかになったのでこれらについて報告する。

1. はじめに

1997年末京都で開催されたCOP3で地球温暖化防止のため各 国に対する二酸化炭素(CO₂)の排出量規制の具体的数値が定め られた。我が国では2012年までに6%のCO₂排出量の削減を 義務づけられたが従来の経済成長率の続く中でこれを達成する のは大変困難であるとの見方がある。目標が達成できない場合, 排出規制枠に余裕のある他国に巨額の費用を払って過剰分の排 出権利を購入する方策もあるが自国内でそれぞれの削減目標を 達成するのが本来の在り方と考えられる。

CO₂の処理については植物の同化作用で固着させたり,触媒 を用いて化学的に処理する方法等,いろいろ検討されてはいる が毎日の産業活動や民間生活による排出量は極めて膨大な量に 及ぶため,更に大量に効率良く処理する方法を実用化すること が求められている。海洋はこれまでにも多量のCO₂を海水中に 吸収する役割を果たしてきているが特に深海底はCO₂を海水中に 吸収する役割を果たしてきているが特に深海底はCO₂を液状で 大量に安定して貯蔵できる最良の場所として注目されている。 当社では平成9年度から3年間の計画で通産省の助成による共 同研究を地球環境産業技術研究機構 略称:RITE と実施してき ており,一連続長の可撓性パイプラインを用いて液化二酸化炭 素(LCO₂)を深海に搬送するための技術開発を進めている。本 報告ではLCO₂の深海搬送用システムに関する検討結果と深海 搬送用に試作した可撓性パイプラインの設計内容並びに性能評 価結果等について述べる。

2. 基本検討

2.1 液化 CO₂ 搬送用パイプの条件

パイプラインによりLCO2を深海に搬送する対象としては臨 海の火力発電所が地理的条件からもCO2の回収効率の面からも

* 研究開発本部 千葉研究所

*³ 研究開発本部 千葉研究所 エネルギー線路研究室

*4 電力事業部 地中線部 海洋課

有力な候補と考えられる。CO2の海底貯留部までは図1に示す ように沿岸から直接,長距離海底パイプラインで送り込む方法 とLNGタンカーのような輸送船で搬送海域に設置した洋上基地 まで輸送し,ここから垂下したパイプラインで送り込む方法が 考えられる。長距離パイプライン方式の場合は立地条件がかな り限られ,適用可能な場所が一部に限定されるうえ,流体圧損が 大きくなるとパイプ構造が極めて特殊な高圧仕様とす必要性が 出てくるため,洋上基地への輸送方式を標準に考えた。

化石燃料の燃焼による全世界のCO₂排出量は年間200億トン 以上にも達し,日本からは約12億トンが排出されている。その うち火力発電所からのCO₂総排出量は3.3億トン程度と推定さ



図 1 液化二酸化炭素の深海搬送概念図 Conceptual drawing for deep ocean disporsal of LCO₂

^{*2} 電力事業部 電力製造部 電力生産技術課

れる。CO₂の排出量は使用燃料によって異なるが100万kW級 火力発電所からの一日当たりのCO₂排出量については表1のよ うな試算例がある。既存燃料の中ではLNGが最もCO₂の排出 が少ないことから,今後LNG発電へのシフトが予想されるがこ こでは平均的な石油火力による排出量1.2万トン/日を想定し, CO₂の深海搬送用パイプの必要本数を検討した。表2に示すよ うに従来の可撓性パイプとしては最大級の内径300mmのパイ プ数本を用いれば100万kW級石油火力発電所から回収された 1週間分の液化CO₂を2,3日で深海まで搬送することが出来る。 輸送船排水量はおよそ9万トン,長さ約230m,幅45m,深さ 25m,喫水16mの規模となる。

2.2 搬送海域の調査検討

LCO₂の搬送地点としては水深 3000m 以上で広さ 10km × 10km程度,深さ30~40m程度の凹地状の海底地形が望ましい。 文献検索によりこのような海底地形を有し,地質的にも安定した海域の調査を実施した。¹⁾

候補地としては(1)四国海盆東縁 (2)九州 - パラオ海嶺北東

表1 100万kW火力発電所のCO₂排出量

CO₂ discharge from 1000MW thermal power station

発電プラント	1日あたりのCO₂排出量
石炭火力	約1.54万トン
石油火力	約1.19万トン
LNG火力	約0.84万トン
LNG火力コンバインド	約0.66万トン

表 2 LCO₂放流設備 Facilities for LCO₂ discharge

动运口物	ポンプ容量	パイプ内流速(m/s)		
	(m ³ /h)	パイプ2本	パイプ3本	パイプ4本
1	420	6.55	4.36	3.27
2	210	3.27	2.18	1.64
3	140	2.18	1.46	1.09
4	105	1.67	1.09	0.82

表 3 設計用海象条件 Weather conditions for design

項目		単位	通常時	異常時
油油	波高	m	2	10
/反/氏	波周期	sec	6	10
風速		m/sec	7.5	30
潮流		knot	2	5

表4 洋上基地の主要寸法 Demensions of floating vessel

項目	単位	寸法
全長	m	238.0
垂線間長	m	226.0
型幅	m	45.0
型深さ	m	25.0
喫水	m	16.0
排水量	kT	125.000
タンク容量×数	m ³	20000 × 4

方 (3)南海トラフ北縁 (4)奥尻海嶺周辺等が存在することが 分かったが火力発電所からのCO₂排出量が大きい関東,中部,関 西方面からのアクセスを考慮すると太平洋南方が好ましいと考 えた。

そこで,この方面の海象条件について既存の海象データベースを参照して波浪,風速,潮流等の発生状況を調査した。²⁾

その結果,LCO₂の深海搬送用パイプラインや洋上基地の係留 設計条件を表3のように設定した。

2.3 洋上基地の揺動解析

2.3.1 洋上基地構造

海上からパイプラインを垂下させ,LCO₂を深海まで送り込むための洋上基地としては(1)半潜水式浮体(セミサブ)(2)輸送船の兼用(3)船型バージを検討したがセミサブではLCO₂の貯蔵が容易でないこと,輸送船の兼用ではパイプラインの頻繁な取り出しと格納を要すること等が問題となり,最終的には輸送船と同程度の貯蔵能力が有り,海上で定位置に制御出来るダイナミックポジショニング装置を有する舟形バージを選定した。舟型洋上基地の基本構造を検討し,主要寸法については表4のよ







Simulated motion of the vessel in irregular wave

うに定めた。

2.3.2 洋上基地の波浪応答解析

洋上基地の波浪応答解析は比較的簡易で実用実績も多いスト リップ法を用い,規則波中での周波数応答特性及び不規則波中 での運動時系列特性を実施した。³規則波に対する応答解析では 浮体の重心位置における6自由度運動の振幅及び位相特性を求 めた。解析結果の一例を図2に示す。不規則波に対する応答解 析ではISSCスペクトラムを用い,通常時及び異常時の各波高, 波周期条件に対する6自由度運動の時刻歴データを求めた。解 析で得られた時刻歴応答波形の一例を図3に示す。

これら洋上基地の規則波応答解析結果及び不規則波応答解析 結果はパイプラインの海中挙動を解析する際には入力データと して直接インプットされるシステムになっている。

表5 試設計パイプの構造 Structure of the pipes designed on trial

		外装構造		
т	3 CJ	Pipe-1	Pipe-1 Pipe-2	
1	具日	軽量型	普及型	2 重外装
		1 重外装	1重外装	
パイプ	内径	280	280	280
内管	肉厚×外径	20 × 320	20 × 320	20 × 320
座床層	厚さ×外径	2 × 324	2 × 324	2 × 324
	伯乐。木粉	鉄線50本	外 4自100 本	鉄線216本
外装	秋 作里 Q 4 女X	スペ - サ58本	亚大称 100 平	
	線径×外径 9×342 9		9 × 342	9 × 360
座床層	厚さ×外径	4 × 350	4 × 350	4 × 368
仕上り外径		350	350	368
気中重量		62	83	139
水中水	入り重量	24	45	101

径,厚さの単位はmm,重量の単位はkg/m





3. パイプ試設計

3.1基本構造設計

洋上基地からパイプラインを懸垂して実用に供している例と しては海底油田用のフレキシブルライザーが著名であるが現在, ブラジルのCampos Basin沖における最大水深実績でも1800m を超えたばかりであり、LCO2の深海搬送パイプについては更に その2倍にも相当する深さまで懸垂する必要がある。そのため パイプに発生する張力,曲げ,捻れあるいは布設時の側圧等に十 分耐えられる構造とする必要がある。表5はパイプの最適構造 について検討するために試設計した3種類のパイプ構造を示す。 深海布設用パイプについては捻れ防止を重視して通常,トルク バランス型の2重外装構造が採用される。表中のPipe-3はその 例である。3000mを超えるような深海布設の場合にはパイプの 軽量化が特に重要と考え, 捻れ対策は別途検討するものとして 外装構造を1重にして軽量化を試みたものがPipe-2であり,外 装の半分をプラスチック化することにより更に軽量化を試みた 構造がPipe-1である。これらについて図4に示す手順でシステ ム設計を行い、パイプに加わる機械的ストレスや疲労度の比較 評価を行った。

3.2 海中挙動解析

パイプのシステム設計は主に静的挙動解析,動的挙動解析,疲 労解析からなる3つのプログラムを利用して進めた。⁴ 静的挙動 解析は洋上基地の海上移動や潮流等の定常外力によってパイプ に発生する形状変形と各ストレスを予知するために実施する。



図5 疲労解析フロー Flowchart of fatigue analysis

表6 静的挙動解析結果

Results of the static analysis

		Pipe-1	Pipe-2	Pipe-3
		軽量型	1重外装型	2重外装型
張力	最大張力	70,000	157,500	350,000
(kg)	最大張力変化	180	80	40
最小的	由率半径 (m)	14.3	25.6	51.0
最大的	由率変化(1/m)	0.07	0.039	0.020
最大t	さんだん力(kg)	4,900	4,920	5,200

古河電工時報

動的挙動解析は暴風時のような極限状態を想定して洋上基地の 動揺や波浪によってパイプに生じる変動応力やダイナミックな 変形を求める。疲労解析はパイプラインの設置海域における長 期的な波浪発生頻度と洋上基地の各波浪に対する応答特性を統 計的に予測し,パイプの耐久性を評価するために実施する。疲労 解析の手順を図5に示す。表5に示した各パイプ構造について, 洋上からの懸垂長を3500mに設定して静的挙動解析,動的挙動 解析,疲労解析を実施した。

静的挙動解析の結果を表6に示す。曲率や張力変動の点では いずれのパイプ構造についても問題ないが,曲率半径の点では 大きな値が保持できる1重外装型のPipe-2や2重外装型Pipe-3が有利と言える。ただし自重による張力が150トン以上を超 える大きな値となり,外装引張り応力が許容レベルを超えたり, 十分な安全率が確保できなくなる恐れがある。そこで最大張力 が70トン程度に収まる軽量型外装構造のPipe-1が静的挙動面 からは好ましいと考えた。動的挙動解析の結果を表7に示す。最 小曲率半径の点では2重外装型が十分な裕度を有し,曲率変動 も小さくて魅力的ではあるが暴風時の最大張力が約500トンに まで達することから実用上難点が生じる。軽量型パイプは最小 曲率半径が3.4m までに小さくなることから,パイプ上端で曲

表 7	動的挙動解析結果
	Results of the dynamic analysis

		Pipe-1	Pipe-2	Pipe-3
		軽量型	1重外装型	2重外装型
進力	最大張力	198.7	261.0	499.4
(t)	最小張力	2.8	61.5	205.4
(1)	最大張力変化	195.9	199.5	294.0
手体	最大曲率	0.098	0.096	0.072
西平 (1/m)	最小曲率	-0.298	-0.178	-0.111
(1/11)	最大曲率変化	0.396	0.274	0.183
最小曲	由率半径(m)	3.4	5.6	9.0

表 8 疲労解析結果 Results of the fatigue analysis

		Pipe-1	Pipe-2	Pipe-3
		軽量型	1重外装型	2重外装型
引張疲労	年間疲労度	0.0028	0.0020	0.0025
	耐用年数	357	486	392
曲げ疲労	年間疲労度	0.081	0.044	0.017
	耐用年数	12.4	22.7	60.0

表9 試作パイプの構造

Structure of the pipes manufactured on trial

	試作パイプ(a)		試作パイプ(b)	
	仕様	寸法 (mm)	仕様	寸法 (mm)
内管	DE答	内径:280	DES	内径:280
112	LE	外径:320	LE	外径:320
内部座床	PP線	厚さ:2	PP線	厚さ: 2
内圧補強	無	-	SUS帯	厚さ:1.2
从注	鉄線	線径:9	プニフエック頃	娘な・0
71-23	被覆鉄線	線形:9	ノノステック線	NOK 1 I . 7
外部座床	PP線	厚さ:4	PP線	厚さ: 4
気中重量	62.2 kg/m		46.9 kg/m	
水中重量	24.7 kg/m		9.6 kg/m	

げ補強用のベンドスティフナーを設置する必要があるが張力変 動が小さく最も実用的なレベルにある。そこでその後のプロト タイプの試作,評価の対象として軽量型パイプを選定した。

疲労解析の結果を表8に示す。解析に用いた波浪発生頻度予 測表(Wave Scatter Diagram)は2.2章で設定した海域に関す る調査結果によるものとした。張力疲労データ(S-N特性)につ いては外装線材単体でのデータが利用した。曲げ疲労データに ついてはまだ実パイプでの結果が得られていないため類似品 データを基に十分安全サイドに設定した仮データを用いた。張 力疲労については各パイプ構造共に疲労の累積は小さく,長期 使用には問題ない結果が得られた。曲げ疲労については軽量パ イプの耐用年数が12年程度となり,寿命がやや不足する結果と なったが適正なベンドスティフナーを用いれば更に耐久性は向 上させることが出来る。今後,試作パイプでの曲げ疲労特性を評 価したうえで必要な対策について検討するものとした。

3.3試作用パイプ構造設計

LCO₂の深海搬送用パイプについては前述のように3種類の 試設計構造について静的挙動,動的挙動のシミュレーションや 疲労解析を行い,軽量型の一重外装構造を試作用候補として選 定した。また3500mのパイプ全長にわたって同一構造とする必 要は無く,一部には更に軽量なパイプの適用することも考慮し て外装線材はすべて高強度化したプラスチック線材と用いる構 造についても試作評価の対象に加えた。表9に今回の試作対象 とした2種類のパイプ構造を示す。試作パイプ a)については現 在までに各種の評価試験が終了した。試作パイプ b)については 現在,製造まで終了したところであり,今後本格的に評価試験を 実施する予定である。



図6 曲げ剛性測定配置図

Layout for the measurement of bending stiffness



図7 縦剛性測定図

Layout for the measurement of tensile stiffness

表 10 試作パイプ(a)の機械定数 Mechanical constants of prototype(a)

項目	単位	数値
曲げ剛性(EI)	kN• mm ²	1×10^{8}
縦剛性(EA)	Ng	2.5×10^{7}
捻り剛性(GJ)	kN• mm²/deg	1.5×10^{8}



写真1 側圧試験状況 Testing on side wall pressure



写真2 引張り試験状況



写真3 内管捻り試験状況 Testing on torsional strength for inner pipe



写真4 引張り曲げ試験状況 Testing on tensile & bending strength

4. 試作パイプ(a)の基本性能

4.1 機械定数

試作パイプ(a)については機械定数を確認するために曲げ剛 性(EI),縦剛性(EA)及び捻り剛性(GJ)を測定した。曲げ剛性 は図6に示すように試料の両端をチェーンブロックにより引っ 張り,所定の曲率半径(R)になるまで曲げた。このときの引張 り力(F),モーメントアーム(A)を測定し,次式により曲げ剛性 (EI)を求めた。

 $EI=F \cdot A \cdot R$

縦剛性は図7に示すように試料の片端を堅牢な架台に固定し, 他端から大型油圧ジャッキで張力を与えて試料の伸びを精密変 位センサで直接測定し,試料の伸び率と印加張力のリニアな関 係から算出した。捻り剛性については試料の片端を固定し,他端 から油圧ジャッキで回転力を与えて試料両端の捻れ量を径方向 の変位測定値より求め,トルクとのリニアな関係から算出した。 各機械定数の測定結果をまとめて表10に示す。

4.2 側圧特性

パイプを海中に布設する際,その繰り出し速度を制御するた めキャタピラ型のブレーキ装置が設けられ,パイプ断面にはこ れによる側圧が常時加えられる。そこでパイプを上下から挟み つけるブレーキ装置を模擬した冶具を作って写真1に示すよう な耐側圧試験を実施した。その結果50t/mまでの側圧に対して はパイプに何ら異常や損傷が生じないことを確認した。なお,長 手方向の短区間でパイプに集中的な側圧を加えると外装と内部 のパイプ間で剥離や相対ずれを発生する恐れがあるため試験で 得られた側圧特性を十分に吟味してブレーキ装置は複数に分散 して同期させる方法を考える必要がある。

表 11 試作パイプ(a)の捻り試験結果 Torsional strength of prototype(a)

	試料長	捻り座屈角度(deg/m)	座屈時トルク(t/m)
PE内管	3m	22	1.8
≐+#= 18 / - + ()	-	> 14	> 2.45
試作ハイノ(a)	Sm	> 14	3.85 (予想値)

4.3 引張り試験

試作パイプの静的な引張り強度を確認するために縦剛性測定 と同一の試験設備,試験方法で引張り実施した。試験状況を写真 2に示す。試験装置の最大能力100トンまでの張力に対して試 作パイプには特に異常は認められず,試料の伸びと張力はほぼ リニアな関係が保持された。これより水深3000m以上の深海へ の試作パイプの懸垂は静的条件下では十分可能であると判断さ れるが,暴風時の動的荷重の重畳を考慮すると更にパイプ自重 の低減を図ることが望ましい。

4.4 捻り試験

LCO2の深海搬送用パイプでは重量の軽減が極めて重要なた め外装構造はトルクバランス型の2重交互撚り構造を避け,あ えて軽量型の1重外装構造を採用しようとしている。したがっ てパイプ自重による張力でパイプには大きなトルクが発生する ためその捻れ特性が特に重要となる。試作パイプに対して実施 した捻り試験結果をまとめて表11に示す。これに先立ち,ポリ エチレン内管単独で実施した捻れ試験結果からパイプは約 22deg/mで写真3に示すような座屈破壊が生じることを確認し た。外装付きパイプでは試験設備の限界から捻れ角14deg/mま でで終了したが捻れ量とトルクの関係はリニアに保たれ,座屈 破壊が生じないことを確認した。ポリエチレン内管の座屈発生 角度を基に外装付き試作パイプの座屈時トルクを類推すると約 3.9t/m弱となり,パイプ自重によって発生するトルグ(自重70t で約3.1t/m)に対しては多少の裕度が有る。一方,暴風時の変動 荷重に対しては裕度が無く,耐えきれない可能性もある。このた め内管肉厚の増加,外装線の比強度の向上,パイプ上端における トルク低減対策等を検討する必要がある。

4.5 引張り曲げ特性

パイプが布設船から深海に繰り出される際,布設船のシープ 面でパイプに発生する引張り曲げ応力にどの程度まで耐え得る かを確認する必要があり,海底電力ケーブルの評価試験方法に 準じて引張り曲げ試験を実施した。⁵⁾試験状況を写真4に示す。 最大張力30トン,最大側圧7.5トン/mまでのしごきに対して パイプには特に異常が生じることは無く,試験後の試料解体結 果にも特に損傷は認められなかった。これより布設時のシーブ 側圧については大きな問題とならない可能性が高いがシーブ径 の大型化を避けるために布設時のパイプ重量の軽減化が望まし い。

5. 今後の計画及び課題

本研究開発は地球環境産業技術研究機構との共同研究として 進められており,平成11年度末で3年間の共同研究が終了する。 当初からの研究計画に沿って今後,2種類の試作パイプの性能評 価試験を継続して実施する。各試作パイプの評価結果を踏まえ て更に実用的で最適な構造の開発を進める。パイプラインの海 中システムについてはモデル実験等により解析結果との整合性 を高め,実現化を図る。深海へのパイプラインの布設工法につい ては搬送海域が特定されないと具体的な開発が進め難い点はあ るが大水深化に伴う基本的な課題について広く検討を継続して いく。

6. おわりに

最近の調査によると深海にはまだ未知の生態系等も多く,液 化二酸化炭素の深海搬送に対しては環境保全面からの十分な検 討が必要である。これらに関しては大学,官庁等の公的機関に よって既に長期にわたって調査,研究が進められているのでそ の結論を重視し,尊重しながら可撓性パイプラインによる液化 二酸化炭素の深海搬送のための技術開発を進めていく。

参考文献

- 平成7年度・二酸化炭素の隔離技術に関する調査研究報告書: NEDO-GET-9538
- 2) 船舶設計用標準海象データベースの調査研究:シップアンド オーシャン財団
- 3) 小林他;船舶の耐航性に関する理論計算プログラム:三井技報 第82号
- 4) 多田他;フレキシブルライザー設計技術: 古河電工時報第88 号
- 5) Recommendations for Mechanical Tests on Submarine Cables: CIGRE Electra, No.68