

浮体式 CO<sub>2</sub> 分離回収・液化・一時貯蔵・荷役施設における  
陸 - 浮体間流体輸送に関する技術構想研究

Technical Feasibility of Mass Fluid Transportation between Power Plant on Land and  
Floating CO<sub>2</sub> Capture, Liquefaction, Storage and Offloading Plant

学籍番号 47126683 村田 直紀  
指導教員 尾崎 雅彦 教授

(平成 26 年 2 月 4 日発表予定)

Keywords: CCS, FCLO, 浮体動揺, クランク型パイプ, 重力軽減

Keywords: CCS, FCLO, Floating Structure Motion, Crank-Shaped Pipe, Reduction of Gravity Effect

## 1. 序論

### 1.1 背景

東日本大震災以降、エネルギー確保と二酸化炭素削減の両立策として期待されていた原子力発電の動向が不明確になり、火力発電と二酸化炭素回収・貯留 (CCS) の組み合わせに期待がかかりつつある。CCS は日本でも長岡や苫小牧で実証実験が行われているが、陸上や沿岸付近に貯留サイトの適地が少ないこと、パイプライン敷設に伴う問題などの理由から実展開への道は容易ではない。これらの課題を解決する方法の一つとして、船舶輸送方式を用いた沖合 CCS が提案されている[1]。しかし、船舶輸送方式を用いることで分離回収プラントに加えて液化施設、一時貯蔵用タンクも必要になると、発電所付近での土地の確保が困難となる。

### 1.2 浮体式 CO<sub>2</sub> 分離回収・液化・一時貯蔵・荷役施設

本研究は、日本で船舶輸送方式を用いた CCS を実現するために CO<sub>2</sub> の分離回収・液化・一時貯蔵・荷役施設を一体化した浮体式プラント (Floating CO<sub>2</sub> Capture, Liquefaction, Storage, and Offloading Plant, 以下 FCLO と呼ぶ) の可能性を検討するものである (Fig.1)。FCLO には主に 3 つのメリットがある。

- ① 火力発電所付近での CO<sub>2</sub> の分離回収・液化・貯蔵用スペースの確保
- ② プラント・貯蔵・荷役間の短距離化による効率向上
- ③ 曳航移設による再利用の可能性

FCLO の建造に必要なとされる大型浮体の製造・係留技術は洋上石油備蓄基地などで実績があり、CO<sub>2</sub> の分離回収や液化に関する要素技術もすでに確立しつつある。しかし、陸-FCLO 間の大量の流体輸送については参考にできる前例がないため、今後検討すべき課題である。

### 1.3 研究目的

本研究では、陸-FCLO 間の流体輸送手段として、大口径鋼管を用い、そのルート形状の工夫などで FCLO の変位に対して強度が確保されるアイデアを探索的に調べる。

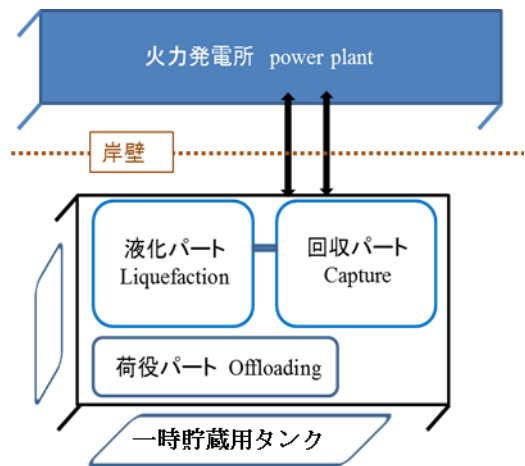


Fig 1 Image of FCLO

## 2. FCLO の条件設定

### 2.1 浮体寸法

FCLO の形状・寸法を Fig.2 のように設定した。軽荷時喫水は 10m, 喫水変動は 1m である。

### 2.2 潮位

気象庁 HP[2]より日本の火力発電所付近の港の過去 50 年の最高潮位と月毎の最低・最高潮位を調べた。台風や高潮時といった異常時における潮位上昇を 2.3m, 高潮を除いた通常時の最大潮位変動量を 1.5m とする。

### 2.3 波浪条件

波浪条件は全国港湾海洋波浪情報網 (ナウファス) [3] の海象データを使用するとともに、うねりの抑えられた港内を想定し、有義波周期は 12 秒までの範囲で検討し、

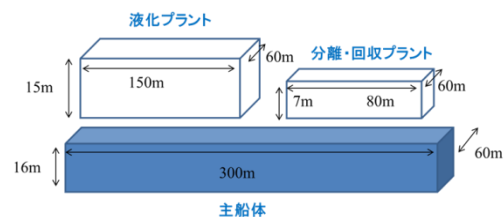


Fig 2 Size of FCLO

有義波高に関しては台風など高潮が警戒される場合 1.9m, それ以外では 1.0m とする.

## 2.4 風速, 風荷重

基準風速とは, 日本の各地域における過去の台風の記録に基づき風害の程度その他の風の性状に応じて 30~46 [m/s] の範囲内において国土交通大臣が定める風速のことを言い[4], 本研究では 36 [m/s]とした. FCLO に作用する風荷重を(1)式で計算した.

$$P = \frac{1}{2} \rho C_d V^2 A_n \quad (1)$$

なお,  $P$ : 風荷重[N],  $A_n$ : 面積[m<sup>2</sup>],  $\rho$ : 空気密度[kg/m<sup>3</sup>],  $C_d$ : 抵抗係数,  $V$ : 高さ補正後の風速 [m/s] である.

その結果, Fig 3 に示すように浮体の幅方向に 5838kN, 長さ方向に 1622kN が最大値になった.

## 2.5 係留の初期計画

大型浮体の係留に実績のあるドルフィン係留を適用する. ドルフィン用フェンダーとして定反力型防舷材を使用することを考える. まず, 風荷重による静的なフェンダーの圧縮量 (変位量 [%]) がフェンダー高さの 10%以内に収まるようにサイズと個数を計画した. フェンダー配置図を Fig.3, ドルフィンに使用されるフェンダーの変位特性を Table 1[5]に示す.

また, 係留計画の際, FCLO の固有周期と有義波周期が十分離れることが重要である. Fig 3 のような配置で, surge 方向の固有周期が 31~33 秒, sway 方向の固有周期が 20~21 秒, yaw 方向の固有周期が 20~21 秒と固有周期より十分長いことが分かった.

## 2.6 浮体の動揺

既存の 3 次元境界要素法プログラム[6]を用いて波入射角度の応答関数 RAO (Response Amplitude Operator) を求め, 多方向不規則波中の動揺量を短期予測手法にて評価する. 有義波高 1.9m, 有義波周期 12 秒までで検討した結果, 両振幅の有義値が最大で surge 方向に 0.25m, sway 方向に 0.77m, heave 方向に 1.2m となった.

## 2.7 まとめ

風・波・潮位の条件下で喫水差の影響も加えて, 推定した水平・鉛直方向の変位の結果を Table 2 に示す. なお, バラスト調整は基本的に行わず, 大きな鉛直変位が生じると予想される場合にのみ満載時と同じ喫水になるようバラスト調整するものとした.

## 3. 流体輸送手段の検討

陸・FCLO 間の流体輸送手段の検討を行った. 変位に対して, 柔軟性を持つローディングアームやフレキシブルホースといった輸送方式はコストが高い, 口径が小さいことから使用せず, 本研究では鋼管を使用することにする. また, 輸送手段には大口徑, 高温・高圧への耐久性, 強度が求められるため, X100 グレード (降伏応力: 690MPa) で口径 1.0m, 肉厚 30mm の UOE 鋼管を使用する.

## 4. 陸・FCLO 間の輸送手段の形状評価

### 4.1 直線パイプ

FCLO が想定するドルフィン係留では潮位差による鉛直方向の変位を抑えることができず, その変位量は水平方向変位と比較しても特に変位が大きい. そこでまずパイプの形状を直線として, パイプの一端が上へ 3.5m 変位した際のパイプの強度解析を実施し, 検討の基準とする.

Table 1 Performance Characteristics of Fender

SUC2500H-RO		
係留計画変位量	10%	0.3m
反力	2000kN	
SUC3000H-RO		
係留計画変位量	10%	0.3m
反力	3000kN	

Table 2 Movement of FCLO

	風	波浪	喫水差	total
x方向	0.2	0.25	0	0.45
	風	波浪	喫水差	
y方向	0.3	0.77	0	1.1
平常時	潮汐	波浪	喫水差	
z方向	1.5	0.6	1	3.1
異常時	潮汐	波浪	喫水差	
z方向	2.3	1.2	0	3.5
				単位:m

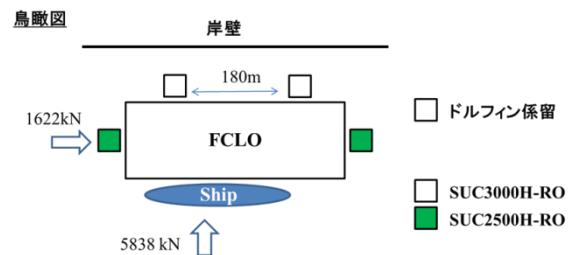


Fig 3 Mooring System of FCLO

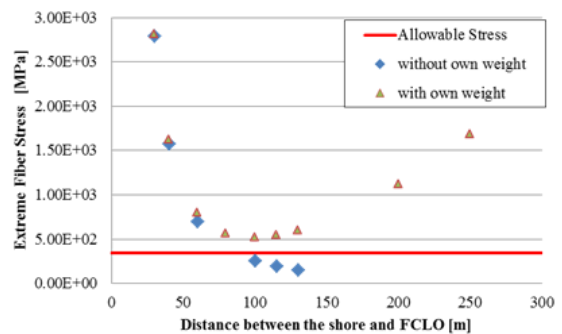


Fig 4 Examination of Straight Pipe

パイプの自重を考慮する場合、考慮しない場合の最大応力を比較したのが Fig.4 である。Fig.4 より自重を考慮しない場合は長さに反比例して縁応力が減少するのに対し、自重を考慮する場合は距離を伸ばすと自重の影響が増大するようになる。仮に自重の影響を打ち消す策があったとしてもパイプ長さ（岸壁と浮体の距離）は 100m を越えることが分かった。また、直線パイプでは浮体の幅方向変位に対応できない。

## 4.2 アイデア検討

### 4.2.1 検討手法

3次元の形状評価手法として、Altair 社開発の Hyperworks (3次元有限要素法) を利用する。多方向からの荷重を一軸の応力に投影したスカラー値であるミーゼス応力を許容応力と比較することで3次元の形状評価を行う。

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{1}{2}\{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\}} \quad (4)$$

なお、 $\sigma_m$  : ミーゼス応力、 $\sigma_1$  : 最大主応力、 $\sigma_2$  : 中間主応力、 $\sigma_3$  : 最小主応力である。

### 4.2.2 角度自由化モデル

端部の角度を自由化するため、パイプのジョイントを調査した。その結果、(株)水研が開発したダクティル鋳鉄製ボール型可撓伸縮管のフレキシベンダーに適用可能性が認められた。フレキシベンダーは 7° の角度自由度を持っている。直線パイプにとりつけて解析した結果、端部応力が軽減された。しかし、フレキシベンダーは埋設管のジョイントであるため、ジョイントの構造要素としての強度に不確かさがある。

### 4.2.3 ルート形状工夫

直線パイプの場合、破断の原因であった端部応力をパイプの形状に3次元工法を施すことで軽減した。試行錯誤の結果、最終的に到達した「クランク型」は局所的な曲げをパイプのねじりで分散させることで応力が分散・緩和する。クランク型の応力分布の例を Fig.5 に示す。

### 4.2.4 クランク型の感度解析

クランク型に関して①クランク型の水平距離の長さ、②陸 - FCLO 間の距離をパラメータとして感度解析を実施した。①、②の場合に共通して、パイプの総長が長いとパイプにかかるせん断応力が軽減され許容応力に近づくが、長くしすぎると自重による負荷が軽減効果を越えてしまうことが分かった。また、直線パイプ、クランク型など全てのモデルに共通して、自重の影響が大きかったため、次に重力影響を軽減する方法を考えることとした。

### 4.2.5 重力影響軽減策

重力軽減策として、パイプの下に支持材を設置し、重力による影響の軽減を試みた。しかし、パイプの長さに沿って、分布的に支えようとする、支持材がパイプを変形させてしまうという事態が発生し、パイプにかかる負荷が逆に大きくなってしまった。そこで、パイプ全体を広く支えるのではなく、例えば、中央の一点で重力を分担する策をとった。クランク型に対し、Fig.8 のように両端から最も遠い

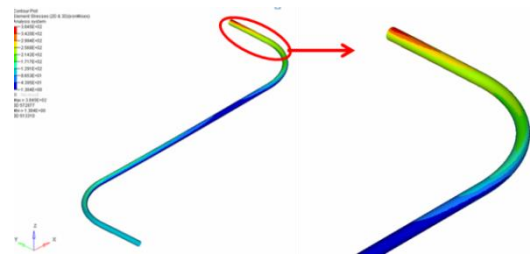


Fig 5 Von Mises Stress of Crank Type Model (z-axis displacement)

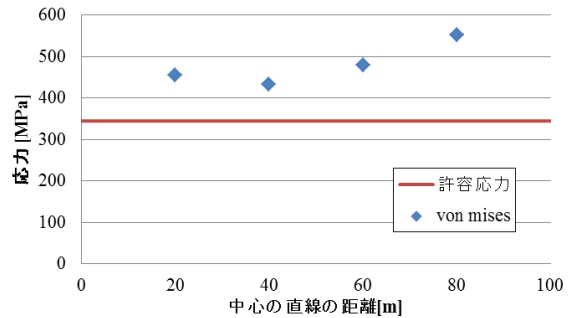


Fig 6 Comparison of Pipe Stress (Parameter: ①Horizontal Distance of Crank Type)

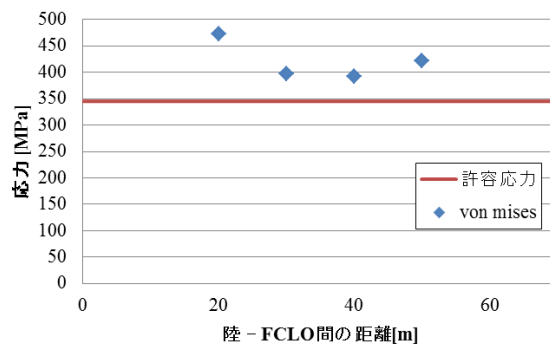


Fig 7 Comparison of Pipe Stress (Parameter: ②Distance between FCLO and shore)

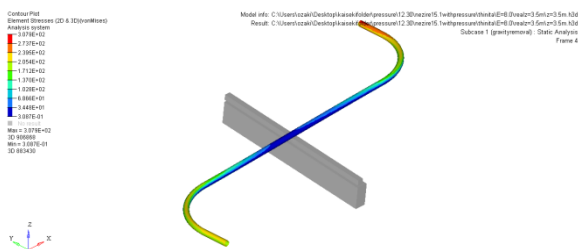


Fig 8 Gravity Reduction Model

中点付近のみを支持材で支えた結果、重力影響の軽減に成功した。このクランク型モデルは陸・FCLO間の距離が30m、直線部の距離が60m、総長が81mのパイプであった。

#### 4.6 他方向への変位の影響

このクランク型モデルに対し、浮体の長さ方向、幅方向への変位を与えて、強度をチェックした。その結果、長さ方向の変位による端部への影響が大きく、陸・FCLO間が30mのクランク型では許容できないことが分かった。鉛直方向への変位の場合、最大応力は端部の上面に生じていたが、長さ方向への変位の場合、Fig 9のようにパイプの端部の側部に生じる。この端部応力を軽減する策として、陸・FCLO間の距離を伸ばすことで対処した。その結果をFig 10に示す。距離を伸ばすとミーゼス応力が軽減され、陸・FCLO間の距離が36m、直線部の距離が60m、総長が88mのモデルが全方向の所定の変位に耐久可能であることが分かった。

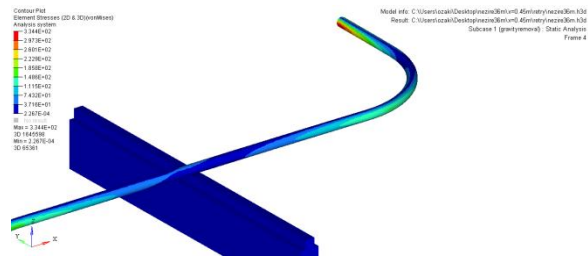


Fig 9 Von Mises Stress of Crank Model (x-axis displacement)

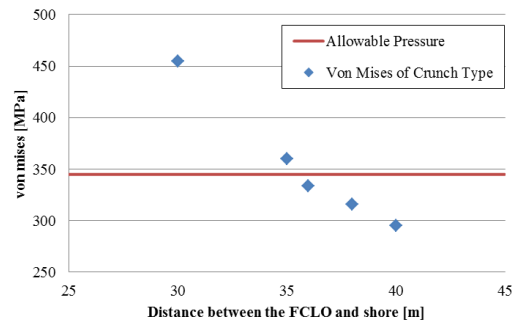


Fig 10 Von Mises of Crank Model (Parameter: Distance between the shore and FCLO)

## 5. 結論

### 5.1 まとめ

本研究では、日本で船舶輸送方式を用いた CCS を実現するために、浮体式分離回収・液化・一時貯蔵・荷役プラント用の流体輸送手段の技術的成立性を検討した。FCLO の係留の初期計画を行い、風、波浪、潮汐、浮体の喫水変化による水平、鉛直方向の変位の程度は以下のように推定された。

- ・ x 軸 (surge 方向) に 0.45m
- ・ y 軸 (sway 方向) に 1.1m
- ・ z 軸 (heave 方向) に 3.1m (通常時)
- ・ z 軸 (heave 方向) に 3.5m (異常時)

流体輸送手段は口径 1m、肉厚 30mm、X100 グレードの UOE 鋼管を使用することとした。理由としては、比較的安価に大口径、高温・高圧に耐久性のある輸送手段が製造できるからである。

陸-FCLO間の流体輸送手段の検討を行った結果、直径 1m の鋼管で陸・FCLO間の距離を 36m、直線部の距離 60m、パイプの総長が 88m、両端固定端としたクランク型が有望であることが分かった。全てのモデルに共通して、自重の影響が大きかったため、重力軽減策を行った。パイプの中点を一点で下から支えることで重力の影響を軽減することができた。その結果、風・波浪・潮汐による長さ方向、幅方向、鉛直方向、全方向の変位を与えても安全率 2 以上で許容応力内に収まること分かった。

### 5.2 今後の課題

本研究は係留計画、陸・FCLO間の流体輸送手段の形状評価をオーダー的に実施したため、各要素の詳細な検討はされていない。FCLO に関して、浮体のサイズや形状、係留計画の詳細検討、パイプの形状評価に関して、x, y, z 軸方向の複合的変位、傾きの考慮、パイプの疲労強度などが今後の課題である。

## 参考文献

- [1] M. Ozaki, T. Ohsumi, CCS from Multiple Sources to Offshore Storage Site Complex via Ship Transport, Energy Procedia 4. (2011)
- [2] <http://www.jma.go.jp/jp/choi/>
- [3] <http://nowphas.mlit.go.jp/nowphasdata/sub300.htm>
- [4] <http://www.kyowa-kb.co.jp/documents/doc/06.php>
- [5] [http://www.bridgestone.co.jp/business/dp/construction/fender\\_beam/supercell/suc3000h.html](http://www.bridgestone.co.jp/business/dp/construction/fender_beam/supercell/suc3000h.html)
- [6] 海洋工学委員会編, 「実践浮体の流体力学. 前篇-動揺問題の数値計算法」