

2. 技術の適用可能性の検討

2.1. シャトルシップ輸送・貯留技術検討

2.1.1. シャトルシップ輸送・貯留に関する基本条件の整理

2.1.1.1. 検討にあたって

2.1.1.1.1. 検討の目的

シャトルシップ洋上圧入方式 CCS については、オーストラリア連邦政府が設立した GCCSI(Global CCS Institute)の資金援助を受け、2011年(Phase-1)、2012年(Phase-2)の2カ年に渡って概念設計を実施し、特段のブレイクスルー技術を要することなく、技術的に成立することを確認した。また、2011年には、AIST((独)産業技術総合研究所)の委託を受けて、上記 Phase-1 の概念設計結果を基に、CO₂ 輸送量・輸送距離を変えたコスト試算を実施し、妥当なコストで輸送・圧入できることを確認した。

しかしながら、実際にシャトルシップおよび関連設備を建造し、運航・運転するためには、事前に検討すべき課題あるいは概念設計では検討しなかった事項があり、それらを解決する必要がある。

本業務では、これらの課題・未検討事項を抽出すると共に、その課題を解決・検討するための方法・試験等について、計画・仕様、工程、コスト試算等を行うことを目的とする。

1)シャトルシップ輸送・貯留に関する基本条件の整理

上記の概念設計業務で未検討であった、運用計画(CO₂ 輸送量・輸送距離・港湾制約条件等)に基づくシャトルシップ基本設計、定期運用・条件変動に対する輸送フレキシビリティ、不稼働時・緊急時の対応方法他の検討方針・工程などを統合して取りまとめる。

2)ピックアップ・オペレーション試験

貯留サイトに到着したシャトルシップは、人為的にピックアップブイをピックアップし、ウィンチを用いて連結するワイヤーをシャトルシップ上に巻き上げた上で、フレキシブ

ル・ライザー・パイプをシャトルシップ搭載の圧入配管と嵌合させる(後掲図1-2参照)。この作業は、毎日のように行う必要があり、シャトルシップ建造前に検討すべき課題の内、もっとも重要な課題である

本試験は、代替船舶あるいは台船を利用して行うことを原則とし、最終的には、将来シャトルシップ造船後に統合した試験を実施することを前提として、仕様、工程、コスト試算を行う。

また、シャトルシップ関連資器材でピックアップ作業に必要な資材の内、開発が必要なものについても、開発に必要な仕様、工程、コスト試算を行う。

3)シャトルシップ輸送・貯留技術の実現へ向けた検討課題

前述 1)、2)以外のシャトルシップおよび関連設備についての課題を抽出・整理する他、現時点での概略解決方針を検討する。

2.1.1.1.2. 検討の経緯

本業務の内容を理解するために、コスト評価を除いた技術的内容について GCCSI の Phase-1[1], Phase-2[2]の検討結果概要を記す。

1)シャトルシップ・洋上圧入方式 CCS のコンセプト

シャトルシップ・洋上圧入方式は、東京大学 尾崎雅彦教授が提唱されている方式[3]である。同方式の全体概要を図 2-1 に示す。

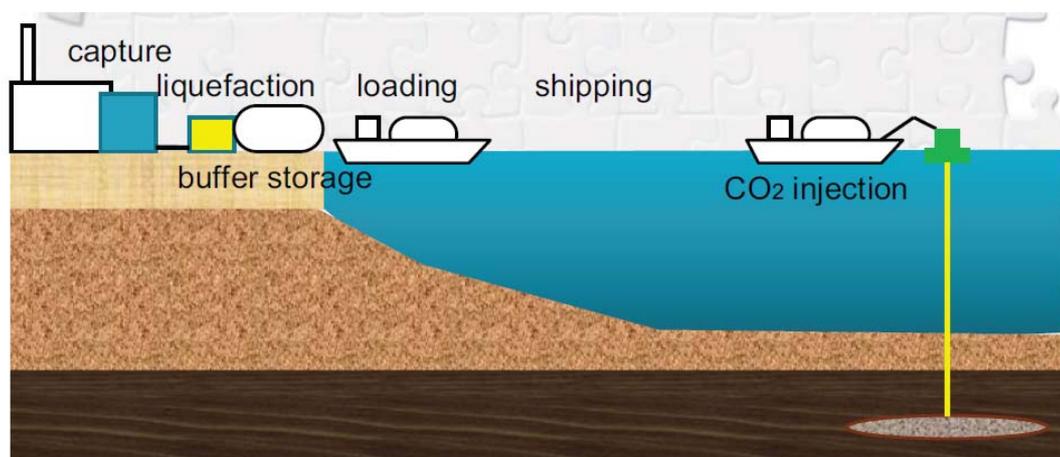


図 2-1 シャトルシップ・洋上圧入方式説明図

液化 CO₂ を積載量 3,000t 級のシャトルシップを利用して、排出源近傍の港から貯留サイトまで輸送し、貯留サイトでは、シャトルシップに搭載した昇温・昇圧設備を用いて、直接圧入するシステムである。輸送距離 200km で圧入時間を 1 日以内とした場合、シャトルシップ 2 隻で年間約 100 万 tCO₂ の輸送・圧入が可能となる。

このシステムの長所・短所は、以下の通りである。

(1)長所

- ①Source-Sink matching 条件を大幅に緩和
- ②圧入ラインを用いることにより水深の制限を緩和
- ③特段のブレイクスルー技術不要
- ④洋上一時貯蔵設備不要
- ⑤計画変更に対する柔軟性有り(スケールメリット→ユニット化)
- ⑥撤去容易、移設・再利用可能、冗長性確保容易

(2)短所

- ①最適化されたパイプライン輸送と比べ、コスト高
- ②海象の影響を受ける
- ③船舶燃料消費による CO₂ 排出有り

2)主要部分の機器構成

GCCSI プロジェクトでは、下記 2 条件を基に概念設計を行った。

- ・積載量 3,000t CO₂ のシャトルシップ輸送方式とし、100 万 t-CO₂/年を輸送・洋上圧入する。
- ・洋上設備は、無人運用とする。

シャトルシップ洋上圧入方式 CCS の全体説明図を図 2-2 に示し、上記基本条件を基に行った概念設計成果を要約し、以下に記す。

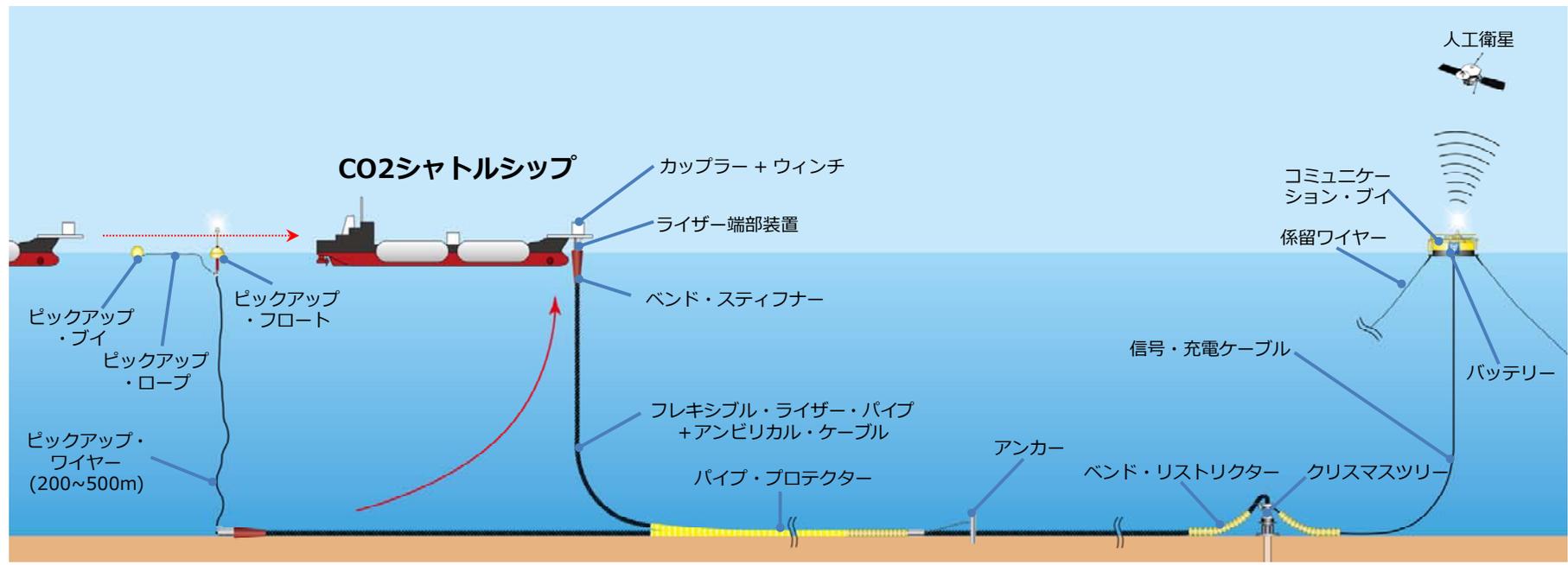


図 2-2 シャトルシップ洋上圧入方式 CCS の全体説明図

(1)シャトルシップ

シャトルシップの形状、機械装置等を表 2-1 に、全体配置を図 2-3 に示す。

①カーゴタンク

タンクは、容量約 1,500m³ のバイローブ型のタンクを 2 基(計 3,000m³)設置することとする。

②主要な機械装置

FRP (Flexible Riser Pipe)のピックアップ時および FRP を用いた CO₂ 圧入時には、シャトルシップの位置を自動制御する必要があることから、DPS(Dynamic Positioning System)を搭載することとし、年間の稼働率 90% 以上を目標として、その能力を検討した。

検討の結果、1,150 kW のサイドスラスト 2 基、3,000 kW のアジマスプロペラ 1 基を設置することとし、それらの動力源として、3,500 kW の発電機 2 基を設置することとした。

表 2-1 シャトルシップの形状、機械装置

Hull	L (over all)	94,200 mm		
	L (pp)	89,600 mm		
	B (mould)	14,600 mm		
	D (mould)	6,900 mm		
	d (design)	5,600 mm		
Machinery	Side thruster (variable pitch)	1,150 kW	2 sets	
	Azimuth propeller	3,000 kW	1 set	(Main propulsion)
	Power generator (Diesel driven)	3,500 kW	2 sets	
Ship speed	NSR (90%)	15.0 knot		

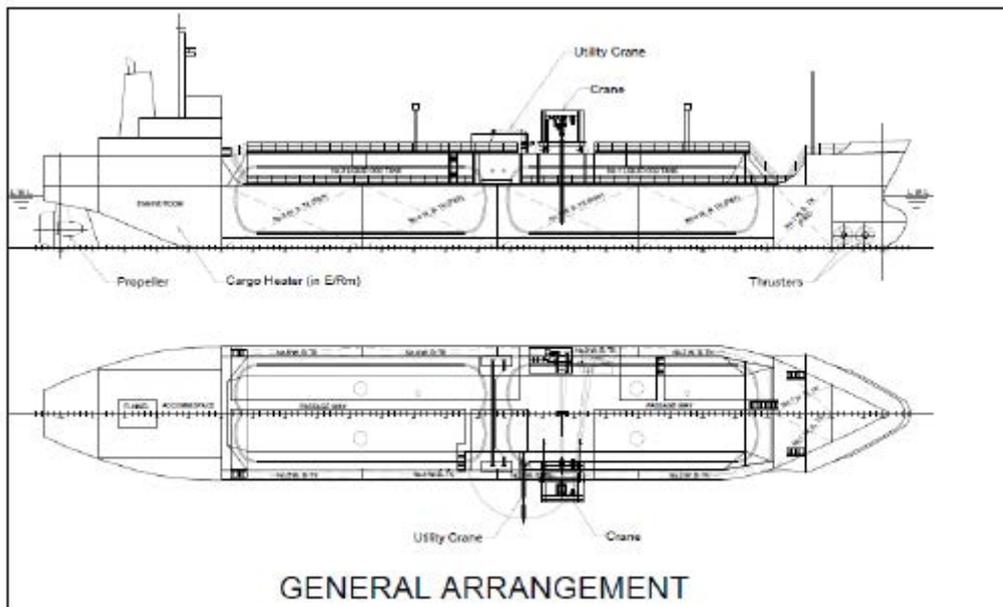


図 2-3 シャトルシップ全体配置

(2)CO₂ のローディングシステム

CO₂ のローディングシステムを図 2-4、図 2-5 に示し、以下にその概要を記す。

①一時貯留タンク

排出源から積出港近傍に輸送されてきた CO₂ は、液化後に積出港近傍の一時貯留タンクに貯留される。一時貯留タンクでは、シャトルシップ・カーゴタンクと同じ温度・圧力条件で液化 CO₂ を貯蔵することとし、シャトルシップ 2 隻分の貯留容量とした。タンクには、BOG(Boil Off Gas、気化ガス)クーラーを設置する。

②ローディングポンプ

能力 250 t/h のポンプを 3 台(内 1 台は、予備)設置する。

③ローディングアーム

500 t/h の液化 CO₂ をローディング出来るアームを 1 セット設置する。

ローディングアームのセットには、ローディングアーム、積載時にシャトルシップのタンクの液面上昇に伴うガスを戻す均圧パイプ、及び予備のアームから構成されている。

④ベントスタック

非常時に CO₂ を大気放散させるためのベントスタックを設置する。

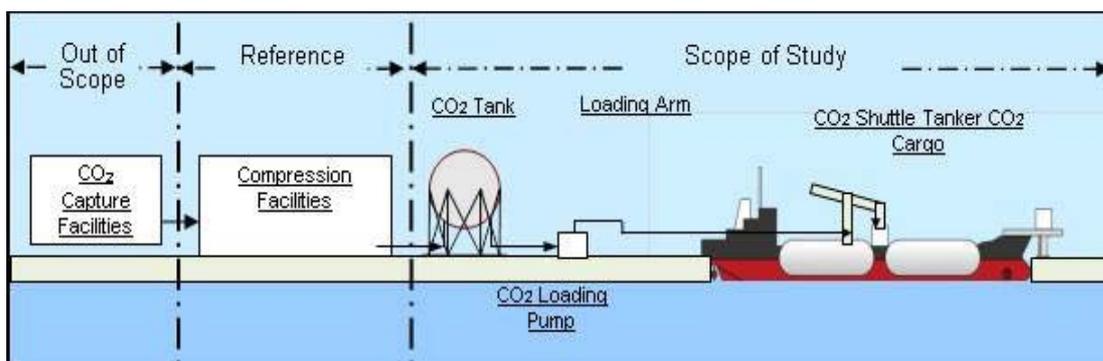


図 2-4 CO2 ローディングシステム

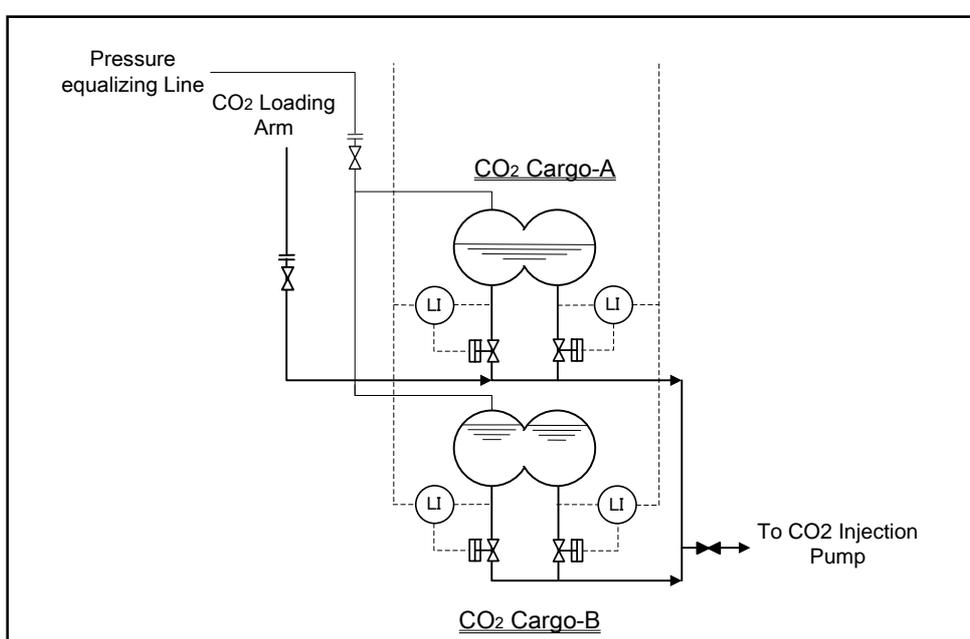


図 2-5 カーゴタンクへの CO2 ローディング

(3) シャトルシップ上の昇圧、昇温設備

CO2 圧入の流れを図 2-6 に示し、以下に昇圧・昇温設備概要を記す。

①昇圧装置(圧入ポンプ)

液化 CO2 輸送圧力から 10 MPa に昇圧する。貯留層の深度・性状が未定のため、10 MPa は仮の数値。

能力 150m³/hr, 450kW のポンプを 1 基設置する。

②昇温装置

液化 CO2 輸送温度から 5°C に海水及び発電機の排熱を利用して昇温する。

③制御システム

圧入ポンプの駆動時・停止時コントロールシステム、圧入レート・圧力・温度コントロールシステム他を設置する。

これらの設備は、船首部に設置することとし、およその配置図を図 2-7 に示す。

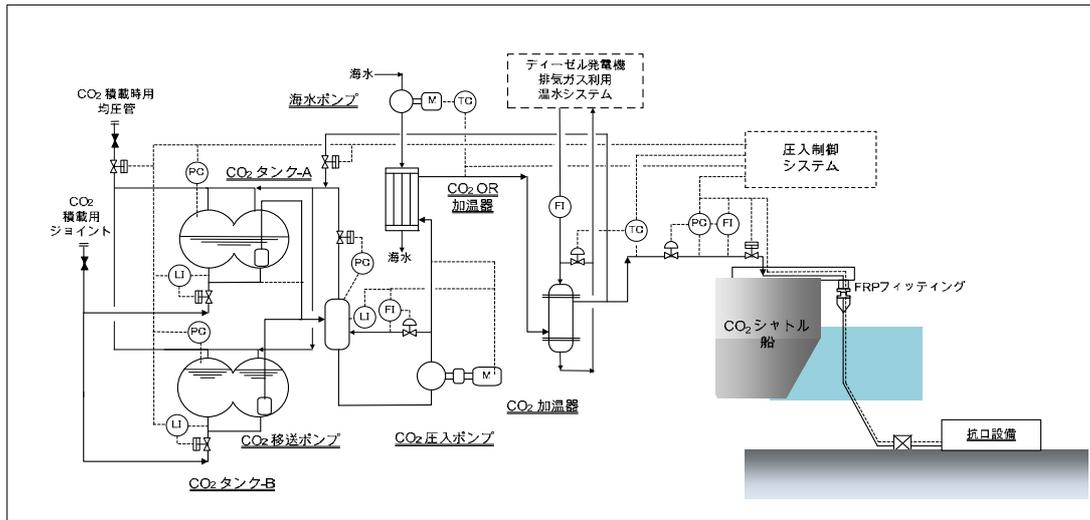


図 2-6 CO2 圧入の流れ(Phase-2 の場合)

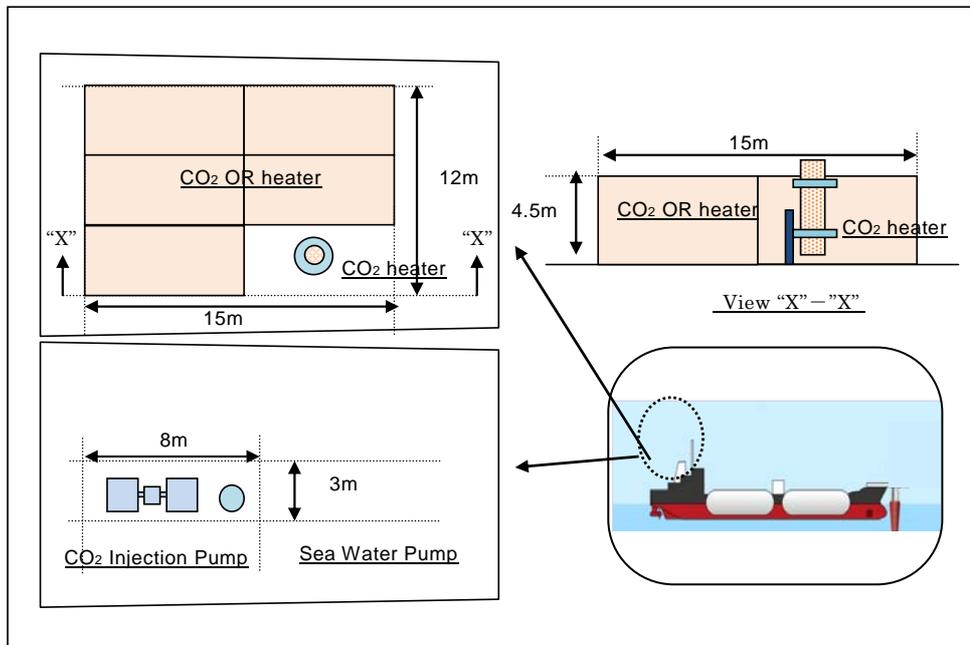


図 2-7 昇温・昇圧設備配置図(Phase-2 の場合)

(4)フレキシブル・ライザー・パイプ

シャトルシップから圧入井坑口までは、フレキシブル・ライザー・パイプを利用して、CO₂を圧入することとした。同パイプの設計条件は、下記とした。

- ①CO₂の流量：3,000 m³/16hr (52 L/sec)
- ②CO₂流速：3m/sec
- ③ライザーパイプの内径：0.16m
- ④ライザーパイプの設計圧力：20 MPa (Working pressure: 10MPa)

フレキシブル・ライザー・パイプの形状を図 2-8 に示す。

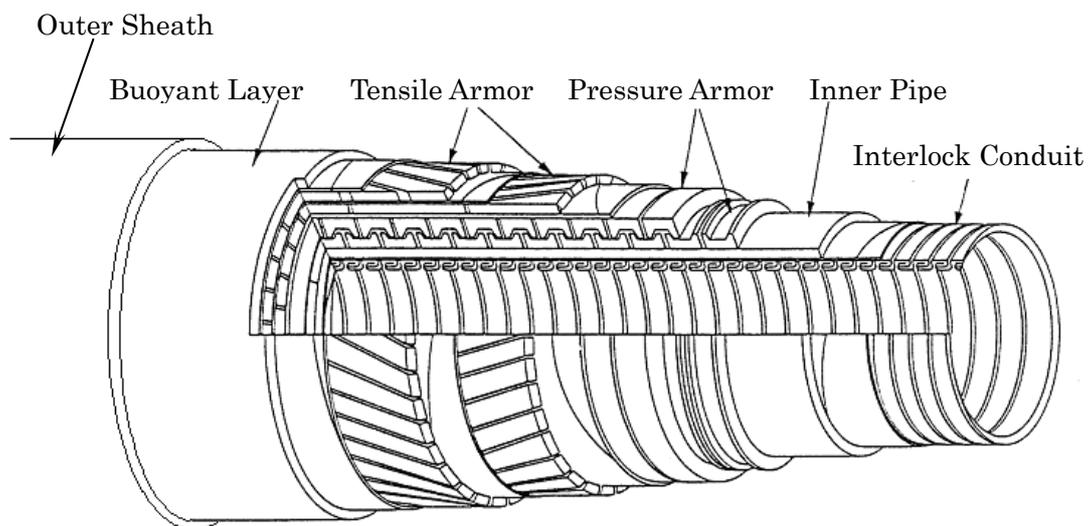


図 2-8 フレキシブル・ライザー・パイプの形状

(5)フレキシブル・ライザー・パイプのピックアップシステム

シャトルシップへのライザーパイプ嵌合図を図 2-9 に、ピックアップブイとピックアップフロートを図 2-10 に示し、以下にピックアップシステムの概要を記す。

ピックアップシステムは、下記の部分から成る。

- ①ピックアップブイ
- ②フローティング・合成繊維ロープ
- ③ピックアップフロート

- ④ピックアップ・ワイヤー
- ⑤フレキシブル・ライザー・パイプ

貯留サイトに到着したシャトルシップは、人為的にピックアップブイをピックアップし、上記②～⑤の順にウィンチを用いてシャトルシップ上に巻き上げた上で、フレキシブル・ライザー・パイプをシャトルシップ搭載の圧入配管と嵌合させる。

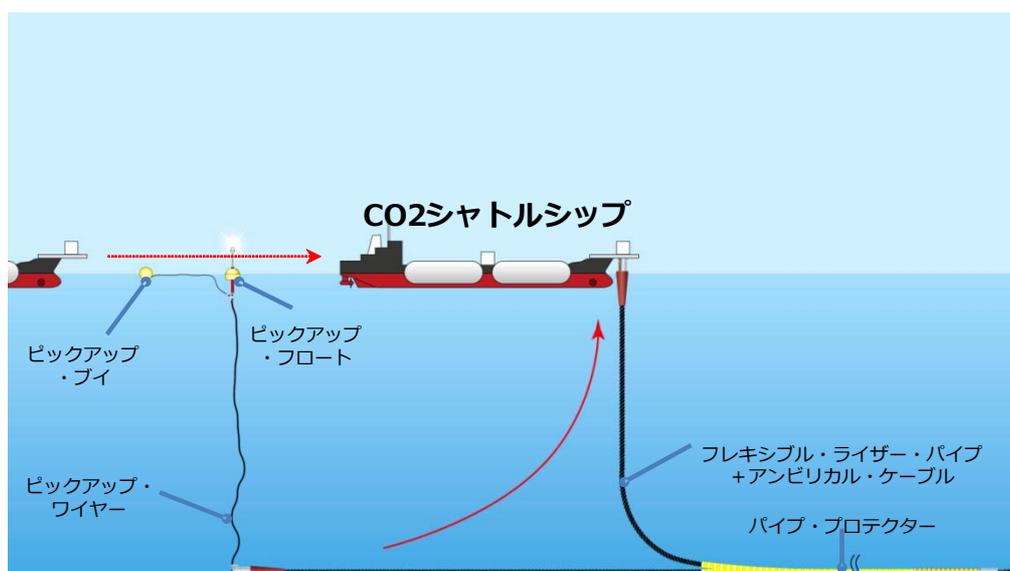


図 2-9 シャトルシップへのライザーパイプの嵌合

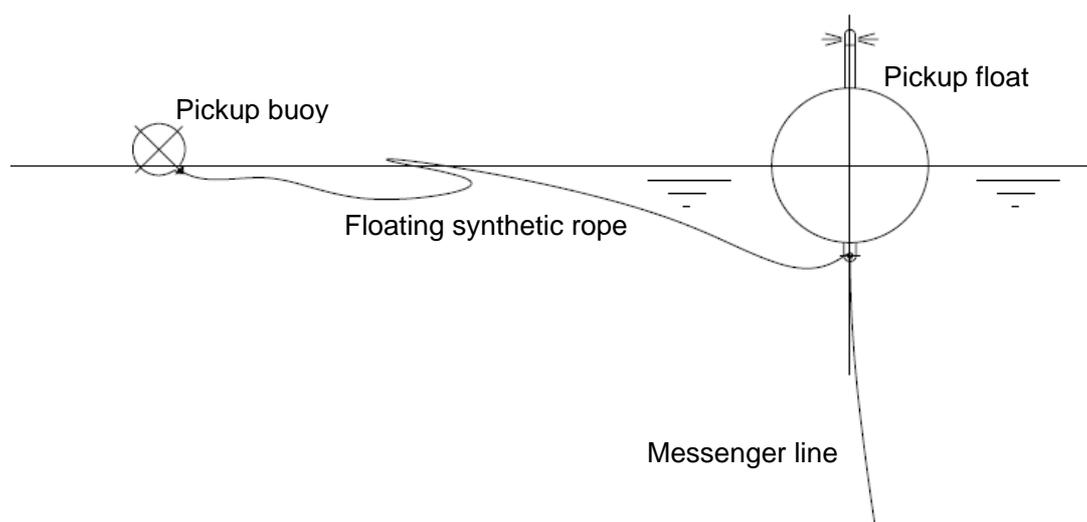


図 2-10 ピックアップブイとピックアップフロート

シャトルシップとフレキシブル・ライザー・パイプが嵌合されると、シャトルシップは、DPSにより位置制御され、CO₂の圧入が開始される。

次に、Phase-1、Phase-2では、いくつかの条件を変えた検討を行った。主要な検討条件の変更内容と検討結果概要を以下に記す。

Phase-1,2では、液化CO₂の輸送温度・圧力、貯留サイト(海流・海水温の変化)を変えて、検討を行った。

表 2-2 Phase-1、Phase-2 の検討条件

	Phase-1	Phase-2
液化CO ₂ の温度圧力	2.65 MPa -10°C	1.97 MPa -20°C
貯留サイト	南西日本	東北日本
海流・海水温	1.46 knots 19°C	1.94 knots 8°C

液化CO₂が相対的に低温・低圧になると、主として下記の長所・短所がある。

- ・陸域での液化、シャトルシップでの昇温に、より多くのエネルギーが必要となる。
- ・陸域での一時貯留タンク、シャトルシップ・カーゴタンクの素材の肉厚が薄くなるが、場合によっては、素材をニッケル鋼等に変化させることになる。また、-10°C以下の場合カーゴタンクの焼どん(heat treatment)が必要となる。

検討した2貯留サイトの海流変化では、DPSの性能を変化させる必要はないが、海水温の低い東北日本サイト(Phase-2)では、昇温のために海水利用の他、発電機の排熱利用が必要となった。また、両サイトの海象条件では、稼働率90%以上を確保できることを確認した。

Phase-1では水深500mについて、Phase-2では水深100mの場合について、FRPの耐用年数の検討を行った。水深が浅くなるとFRPの耐用年数が低下することが明らかとなった。

2.1.1.1.3. 検討の背景

1) シャトルシップ机上検討

実際にシャトルシップを建造し運航するためには、前述した概念設計成果だけでは不十分であり、事前に検討する必要がある課題として抽出した事項、未検討事項は、下記のとおりである

(1)輸送計画に基づく CO2 輸送船基本設計

- ①CO2 取扱量・輸送距離・港湾制約条件などの具体化
- ②運航会社・造船会社・船級協会の参加による試設計と CO2 輸送船特有の技術的・法的課題の整理

(2)船舶輸送定期運用・条件変動に対するフレキシビリティ検討

- ①気象や積載量の変動を考慮した年間運航シミュレーション
- ②CO2 輸送実験船を用いた、積込み・輸送・荷降し・BOG の処理等の実証

(3)シャトルシップからの CO2 圧入に関する基本条件

- ①FRP
- ②DPS

(4)不稼働時の海底機器仕様

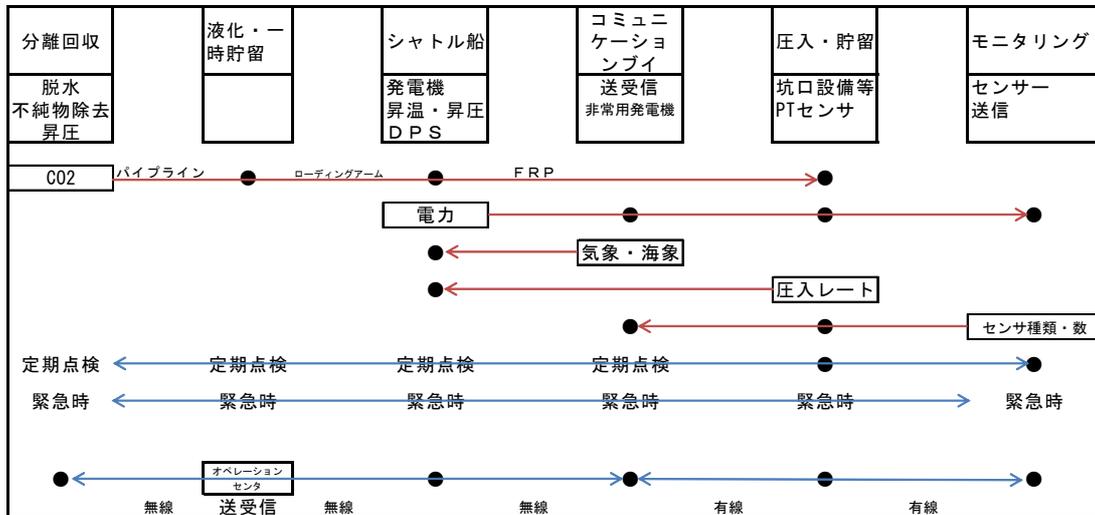
- ①逆流防止システムの試設計
- ②遠隔モニタリングシステムの運用計画

(5)緊急時離脱方法の検討

これらの事項について、現時点で検討できる事項については、仕様・工程・コスト試算を行い、本章に記述する。

上記の検討項目の内、CO2 排出源・貯留サイト未定のため、具体的な検討ができない事項がある。このような事項については、検討方針・方法を記すことに留めることとした。

分離回収～輸送～圧入貯留～モニタリング関係図



PTセンサ：坑口・坑底の温度・圧力センサ
 海象条件：海水温・海流・波高・水深・（海底状況）
 モニタリング：微小地震・自然地震、PT（観測井）、環境モニタリング他（反射法・検層・試料採取等は、別途実施）

図 2-11 分離回収～輸送～圧入貯留～モニタリング関係図

具体的な検討ができない理由他を説明するために、図 2-11 に分離回収～輸送～圧入貯留～モニタリング関係図を示し、以下に項目別に概要を記す。

(1)CO2

- ①排出源近傍に設置される基地で分離回収された CO2 は、脱水・不純物除去・昇圧され、距離が短いなどの条件が満足されれば、PL(パイプライン)を經由して積出港近傍まで輸送され、液化・一時貯留後、ローディングアームを經由してシャトルシップ・カーゴタンクに積載される。
- ②シャトルシップにより貯留サイトに輸送された CO2 は、シャトルシップ上で昇圧・昇温後、FRP（フレキシブル・ライザー・パイプ）を經由して圧入井から貯留層に圧入される。
- ③現時点では、排出源・貯留サイトが未定のため、シャトルシップ輸送距離等が決定できないため、輸送計画・基本設計については、検討していない。

(2)電力

- ①シャトルシップ搭載の発電機から FRP を經由して、圧入井およびコミュニケーションパイプに電力は供給される。

②圧入井のクリスマスツリー・坑口設備に対する必要電力量は、それらの仕様
が未定のため、現時点では検討不可能である。さらに圧入井が複数となった
場合にはそれらのクリスマスツリー・坑口設備の他、それらを連結し制御す
るためのマニユールドにも電力を供給すると想定されるが、それらへの電
力供給は、シャトルシップ以外から供給する方法を考える必要が生ずる可能
性がある。

③コミュニケーションブイには、所定の蓄電池が設置される他、非常用に小規
模の太陽光あるいは潮力発電機が設置され、シャトルシップが貯留サイトを
離れている間のモニタリング用電力がブイ本体・圧入井・周辺海域のモニタ
リング設備に供給される。

(3)モニタリング

洋上あるいは海底で連続して観測・モニタリングする項目として、下記が想定され
る。

①コミュニケーションブイ：気象、海象、位置情報

②圧入井：注入 CO₂ の温度・圧力

③海底：微小地震・自然地震、環境モニタリング

これらのモニタリング情報は、コミュニケーションブイまで有線で送信され、そこ
から 1.3.10 に後述するコントロールセンターに送信される。さらに、コントロー
ルセンターから、分離回収基地・液化一時貯留基地・シャトルシップに送信される。
モニタリングの項目・数量についても未定であり、現時点では詳細な検討はできな
い。

(4)定期点検、非常時対応

①定期点検

図 2-11 の最上段に記した基地・設備の内、有人の基地・設備では、定期点検
を実施すると想定され、その時期や点検中のその他設備への影響・対応方法を
今後検討する必要がある。

②非常時対応

図 2-11 の最上段に記した各基地・設備における非常事態に対し、そのリスト
アップと対応方法の検討が今後必要である。

2.1.1.2. 輸送計画に基づく CO2 輸送船基本設計に向けた検討方針

図 2-12 にシャトルシップ運航計画を例示する。

同図は、排出源と貯留サイトを約 1 日で到着できる距離を想定し、シャトルシップが 1 隻の場合と 2 隻の場合を比較し作成したものである。1 隻の場合には、高い圧入レートで圧入できることが要求され、2 隻の場合と比較して圧入井の数を増加させることが必要になる場合がある。

以下に輸送計画に影響する基本的条件を箇条書きする。

	1日目		2日目		3日目	
1 隻	圧入	*	帰港	払出し	サイトへ出港	*
2 隻	圧入					*
	帰港	払出し	港で待機	サイトへ出港	*	

*: 海域作業の交替時間

図 2-12 シャトルシップ運航計画(例示)

- ①輸送量
- ②輸送距離・輸送時間
- ③港湾制約条件：着岸・ローディング作業禁止時間の有無等
- ④圧入レート：1 坑当りの圧入レート(主として貯留層の浸透率等で定まる)*圧入井の数の数
- ⑤排出源近傍港湾でのローディング時間、貯留サイトでの FRP(フレキシブル・ライザー・パイプ)嵌合時間と離脱時間
- ⑥シャトルシップの数：上記①～⑤により定まる。圧入井の数とコスト比較も必要。

2.1.1.3. 船舶輸送定期運用・条件変動に対する輸送フレキシビリティ

CCS における CO2 の船舶輸送においては、単位期間あたりの平均輸送量、輸送距離、荷役に必要な時間、圧入に必要な時間、稼働率などが与えられれば、船の仕様(搭載可能

量・速力)、隻数、陸上に必要な一時貯蔵量の基本計画が可能になる。従来の経済性評価は概ねそのような基本計画にもとづくものである。しかしながらより実際に即した計画のためには、

- ・分離回収プラントにおける CO2 回収量の変動(月～季節変動)
- ・荒天による輸送・洋上オペレーションの休止とその後の挽回(日～週変動)
- ・圧入流量の計画値との誤差

といった変動要因や不確実性を考慮し、輸送システムにできるだけ過不足のない余裕能力を持たせるとともに、定期運用時と能力増大運用時のスムーズな切り替えに関する戦略が必要になる。また、輸送・圧入の稼働率が低くなると、年間圧入量確保のために必要な坑井数の増加につながることも十分な配慮が必要である。

このような輸送システムのフレキシビリティに関する検討は、1 source to 1 sink の技術実証プロジェクトのシステム計画・運用計画においても必要であるが、将来的には複数のプラントと複数の貯留地点を対象とする CCS チェーンのネットワーク構築にとって重要な基盤となる。

(1)検討方針・検討内容

- ①船舶を用いた沖合 CCS のための物流シミュレータの開発
- ②洋上オペレーション計画のための海象指標の策定
 - ・長期海象時刻歴データにもとづく作業限界海象と連続不稼働日数の関係の調査
 - ・日本周辺海域でのマッピング
- ③定期運用時と能力増大運用時の切替戦略の検討

(2)工程

	1 年目	2 年目	3 年目	4 年目
船舶を用いた沖合 CCS のための物流シミュレータの開発	■■■■			
洋上オペレーション計画のための海象指標の策定	■■■■			
定期運用時と能力増大運用時の切替戦略の検討	■■■■			

2.1.1.4. シャトルシップからの CO2 圧入に関する基本条件

シャトルシップで CO2 を輸送し、貯留サイトでシャトルシップから FRP⁴をピックアップ、嵌合して、CO2 を地中に圧入する場合の基本条件を整理する。

ここでは、貯留サイトの海域における水深を 200m と仮定し、現在想定される FRP の物性を基に試算された数値を用いて説明する。

水深 200m の海域において、シャトルシップに FRP を嵌合した際に、FRP にかかる荷重を分散するのに十分なカタナリー(懸垂曲線)を描かせるには、FRP の長さを 500m にする必要がある。これに伴い、ピックアップ地点は、坑口から 500m 離れた地点になる。

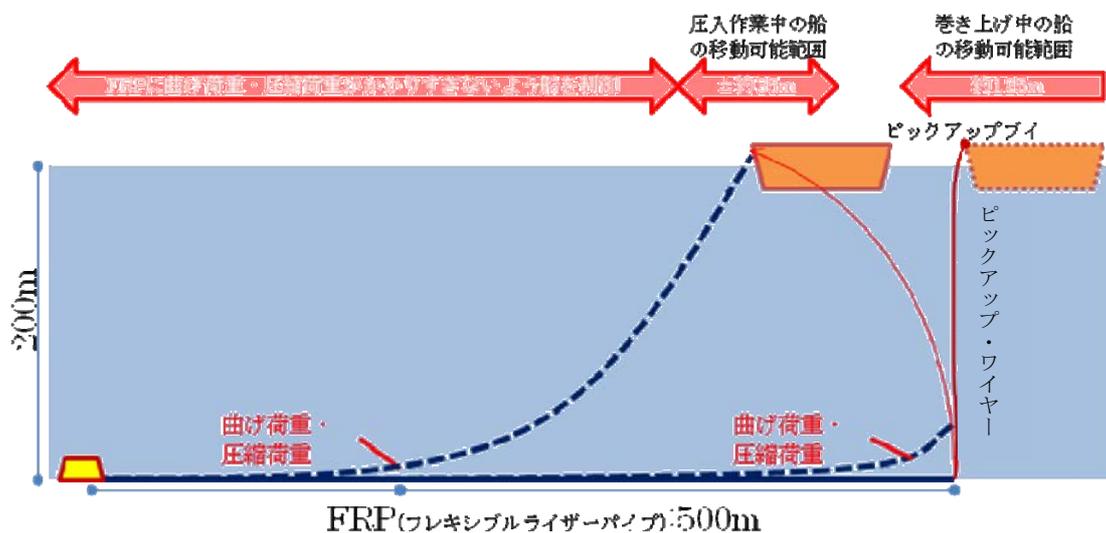


図 2-13 FRP ピックアップ・オペレーションにおける制約事項

ピックアップ後、メッセンジャーラインを巻き上げながら船体を坑口方向に 125m 近づけていく。巻き上げ時の船体の移動速度は、メッセンジャーラインの巻き上げ速度に応じる必要がある、そのための DPS⁵の開発が求められる。

メッセンジャーラインを巻き上げる際、船体がピックアップ地点に留まってしまうと、FRP に無理な張力がかかり、FRP・坑口設備の破損を招く。また、FRP の嵌合地点(ピックアップ地点から 125m坑口方向に近づいた地点)に先回りしてメッセンジャーラインを巻き上げると、FRP に過剰な曲げ荷重・圧縮荷重がかかり、FRP の破損・座屈を招く。

⁴ FRP : フレキシブル・ライザー・パイプ(Flexible Riser Pipe)

⁵ DPS : 自動船位保持システム(Dynamic Positioning System)

CO2 圧入中は、ピックアップ地点から 125m 坑口方向に近づいた地点から半径 35m 以内に船体の位置を保持する必要がある。船体がそれよりも坑口に近づくと、FRP に過剰な曲げ荷重・圧縮荷重がかかり、FRP の破損・座屈を引き起こす。船体がそれよりも坑口から離れると、FRP に過剰な張力がかかり、FRP または坑口設備の破損を引き起こす。また、FRP 上端の入水角度(図 2-14 参照)が大きくなり、嵌合設備だけでなく船体に対する水平方向の応力が増大するため、安全に作業することが困難になる。

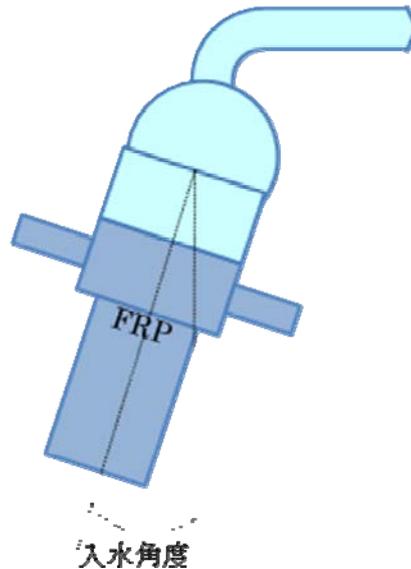


図 2-14 シャトルシップからの CO2 圧入時の FRP の入水角度

CO2 圧入終了後は、メッセンジャーラインを巻き下しながら船体を元のピックアップ地点に近づけていく。巻き下し時の船体の移動速度は、メッセンジャーラインの巻き下し速度に応じる必要がある。

上記の制約から、本オペレーションに使用される DPS には、微細な船体位置の制御が求められる。ただし、本オペレーションに使用される DPS の開発に成功した場合でも、海上で船体を毎回同様に制御することは困難である。本オペレーションに使用される FRP には、ある程度の粗雑なオペレーションにも耐え得る性能が期待される。従来の FRP は毎日の着脱を要求される条件で使用されることはないため、本オペレーションで使用される FRP には技術開発が求められる。さらに、FRP の巻き上げ、巻き下しだけでなく、CO2 圧入中も FRP の位置は固定されることはないため、海底に接触する部分の摩擦も考慮する必要がある。

また、液化 CO2 は急激な減圧により一部が気化せず固体(ドライアイス)になるという性質を有している。FRP 離脱時(海底安置時)でも FRP 内の圧力を一定に保つだけでなく、

CO2 の性状への対応も今後の検討によっては求められる可能性がある。

表 2-3 シャトルシップからの CO2 圧入時の基本条件

技術	基本条件
DPS	<ul style="list-style-type: none"> ● FRP の巻き上げ・巻き下し速度に応じた速度での船位制御 ● CO2 圧入中における嵌合地点から想定半径以内の船位制御
FRP	<ul style="list-style-type: none"> ● 毎日の着脱時の曲げおよび圧縮荷重への耐久性 ● CO2 の性状への対応

2.1.1.5. 不稼働時の海底機器に関する基本条件

2.1.1.5.1. FRP の逆流防止条件

FRP の逆流防止は、FRP の上端(シャトルシップ搭載の圧入配管との嵌合部)と FRP の下端(圧入井のクリスマスツリー・坑口設備との連結部)に必要な設備と想定している。前者については、1.2.5 に後述する。後者については、圧入井のクリスマスツリー・坑口設備に設置が予定される逆流防止装置の設計性能により、設置の要否を検討することとする。

2.1.1.5.2. モニタリング条件

前掲図 1-11 に示したように、洋上あるいは海底で連続して観測・モニタリングする項目として、下記が想定される。

- ① コミュニケーションブイ：気象、海象、位置情報
- ② 圧入井：注入 CO2 の温度・圧力
- ③ 海底：微小地震・自然地震、環境モニタリング

これらに必要な電力は、下記 2 項目を想定している。

- ① コミュニケーションブイに設置する蓄電池：主としてシャトルシップから FRP を経由して供給され蓄電される、
- ② 太陽光・波浪発電設備：非常用。荒天等でシャトルシップからの電力供給が受けられない期間が長い場合を想定。

現時点では、モニタリング項目・数量が不明であり、また、必要電力量も不明のため上記を記すに留める。

2.1.1.6. 緊急時離脱に関する基本条件

2.1.1.6.1. 緊急離脱の必要性

FRP が嵌合装置によってシャトルシップに接続されている時間は、現在の想定では一回の圧入について約 16～20 時間強に及ぶ。この間は海象・気象に対抗して船位を一定の範囲内に保つ必要があるが、何らかの原因によりそれが困難となった場合は嵌合を切り離して FRP を海底に戻す必要がある。

気象・海象の悪化はある程度予見できるので、通常の手順で対応が出来る。しかし、原因の中には通常の手順で FRP を切り離して海底に戻すような時間的余裕の得られない、緊急性のある事態も予想して対策を考える必要がある。

具体的には制御機器の故障(センサー故障・制御プログラムの不具合・暴走等)で DPS が制御範囲を超えて船位を大きく移動させてしまう Drive Off 状態や、機械系の故障(焼き付き・損傷等)によって船位を保てなくなるなど突発的な故障が考えられる。結果、FRP を介してシャトルシップを圧入井坑口設備に係留してしまう状態となる。FRP は数百 kN の引張力に耐えるが、嵌合装置も坑口設備もこのような大きな力には耐えられない。そうした大きな力が掛かる前に、シャトルシップから FRP を切り離す必要がある。圧入中はシャトルシップ上の昇温設備で液化 CO₂ の温度を上昇させ、ポンプで最大 10MPa に昇圧して送液中であるから、これらの設備運転を緊急に停止し、嵌合装置部で FRP を切り離す(離脱)こととなる。昇温設備側の対策は別途検討するものとし、嵌合装置の離脱手順と必要となる機構を検討する。

2.1.1.6.2. 想定原因

想定される緊急離脱要件としては、以下のように多岐に亘る要因が考えられる。今後嵌合装置の開発に当たって、下記を含むあらゆる故障・事故を拾い上げて、対処方法を検討するものとする。

- (1)急激な気象・海象の変化
- (2)制御系の故障
- (3)電源の故障

- (4)機械系の故障
- (5)油圧系の故障
- (6)他船との衝突等

なおこうした要因を事前に発見したり、避けたりする対策は別途講じられなければならない。しかし、それでも緊急離脱が必要となった場合の対応を検討するものとする。

この対処方法検討においては、通常の切り離しを迅速に行えるようにしておくことも選択肢の一つである。更に進んで FRP を海底にゆっくり巻き下ろすことが出来ず、事実上切り離して放棄するような方法も検討する必要があるかもしれない。その場合 FRP は損傷して再使用は不能になることもあり得るので、この場合は坑口設備または船体付き嵌合装置を守る為に FRP を犠牲にすることになる。再開にあたっては深海での FRP の回収、新 FRP の設置が必要となる。

こうした緊急時に対応する為に、嵌合装置およびピックアップ・ワイヤー巻込み機構等にどのような付加的装備が要るのかを検討する。

2.1.1.7. 検討コスト

2.1.1 項に記した事項に関する検討コストを下表に記す。

表 2-4 2.1.1 項のコスト一覧表

章節	名称	単位:千円				計
		Phase-1		Phase-2		
		H26	H27	H28	H29	
2.1.1.	シャトルシップ輸送・貯留に関する基本条件の整理					
2.1.1.2.	輸送計画に基づくCO2輸送船基本設計に向けた検討方針					
2.1.1.3.	船舶輸送定期運用・条件変動に対する輸送フレキシビリティ					
2.1.1.4.	シャトルシップからのCO2圧入に関する基本条件					
2.1.1.5.	不稼働時の海底機器に関する基本条件					
2.1.1.5.1	逆流防止条件					
2.1.1.6.	緊急時離脱に関する基本条件					
2.1.1.6.1	緊急離脱の必要性					
2.1.1.6.2	想定原因					
		15,000	15,000	0	0	30,000

2.1.2. ピックアップ・オペレーション試験

2.1.2.1. 試験の目的と概要

本試験は、シャトルシップ概念設計段階で抽出された最も重要な課題を解決するための現地試験を含む試験である。

ピックアップ・オペレーション試験概念図を図 2-15 に示す。

シャトルシップ・洋上圧入方式では、液化 CO₂ を積載したシャトルシップが、無人の貯留サイトに到着すると、下記手順で FRP(フレキシブル・ライザー・パイプ)を海底から巻上げ、シャトルシップ上の注入配管と嵌合する。更に、嵌合・CO₂ 圧入後、シャトルシップ到着前の状態に戻す。

- ①貯留サイト海面に浮かんでいるピックアップブイをシャトルシップからエアガン方式のピックアップツールを用いて船上に拾い上げる。
- ②ピックアップブイに連結されているピックアップ・ワイヤーを高速ウィンチで船上に巻上げる。
- ③ピックアップ・ワイヤーに連絡されている FRP をシャトルシップ上の注入パイプと嵌合する。
- ④嵌合後、所定の温度・圧力・圧入レートで FRP・圧入井を通じて貯留層へ CO₂ を圧入する。
- ⑤シャトルシップ積載 CO₂ を全て圧入後、上記③⇒②⇒①の順序で、シャトルシップ到着前の状態に戻す。

これら①～⑤の作業をほぼ毎日、出来るだけ短時間(①～③は 2～3 時間、圧入時間を除く)で、安全に遂行する必要がある。これらの検討条件は、類似事例の無いものである。さらに洋上での荒天下作業、高圧での嵌合に配慮する必要もある。

ピックアップ・オペレーション試験の主要な検討課題を表 2-5 に示し、主要な事項を以下に記す。

- ①FRP の巻上げ時には、シャトルシップ搭載の DPS(Dynamic Positioning system)を用いて、FRP に過剰な負荷が働かないようにシャトルシップを制御する必要がある。

②カップラーは、高圧(10Mpa)で嵌合する必要があり、付随する逆止弁等と共に、新たに開発する必要がある。

③緊急時には、出来るだけ短時間で、FRP を離脱する必要がある。

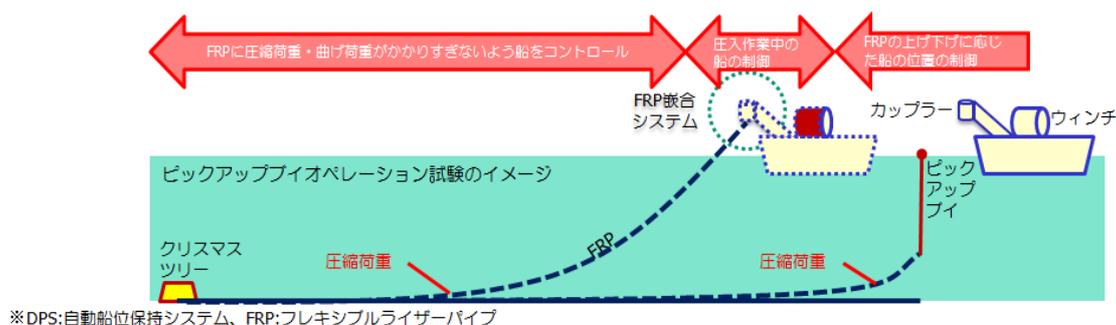


図 2-15 ピックアップ・オペレーション試験概念図

表 2-5 ピックアップ・オペレーション試験の主要検討課題

主要な要素技術		技術的な検討課題
シャトル シップ	DPS	FRP 着脱に合わせて微細に船体の位置を制御する機構
FRP 嵌合 システム	システム全体	海底から FRP を引き上げ、できるだけ人手による作業を介在させず安全に嵌合する機構、緊急離脱時の機構
	ウィンチ	500m 以上の FRP を高速で巻き上げ、かつ毎日上げ下ろしするオペレーションへの対応
	カップラー	液化 CO ₂ の性状に対応した素材の選択と機構の開発
	ピックアップ ブイ	現段階では課題が特定できていない
	FRP	毎日の上げ下ろしと緊急離脱への対応

図 2-16 にオペレーション試験検討方針説明図を示し、以下に概要を記す。

- ①当初、実規模 FRP を用いた試験を検討していたが、下記理由により困難であると判断した。
- FRP の製造コストが高く、貯留サイトが未定であると、製造した FRP を実証試験に転用することが困難。
 - FRP を海底に固定するためのツール設置、FRP の可動部では若干の整地作業

を伴うことが想定され、模擬試験場所での実施は困難。

②そのため、数値実験と模擬 FRP を用いた現地試験を実施することとし、本報告書では、両者の計画・工程・コスト算定を行うこととした。

③②に記した数値実験および現地試験結果により、必要に応じ追加の現地試験等を行い、必要が無ければ、シャトルシップ造船後の試運転により所定の目的を果たすこととし、これらについては、方針を記すだけに留める。

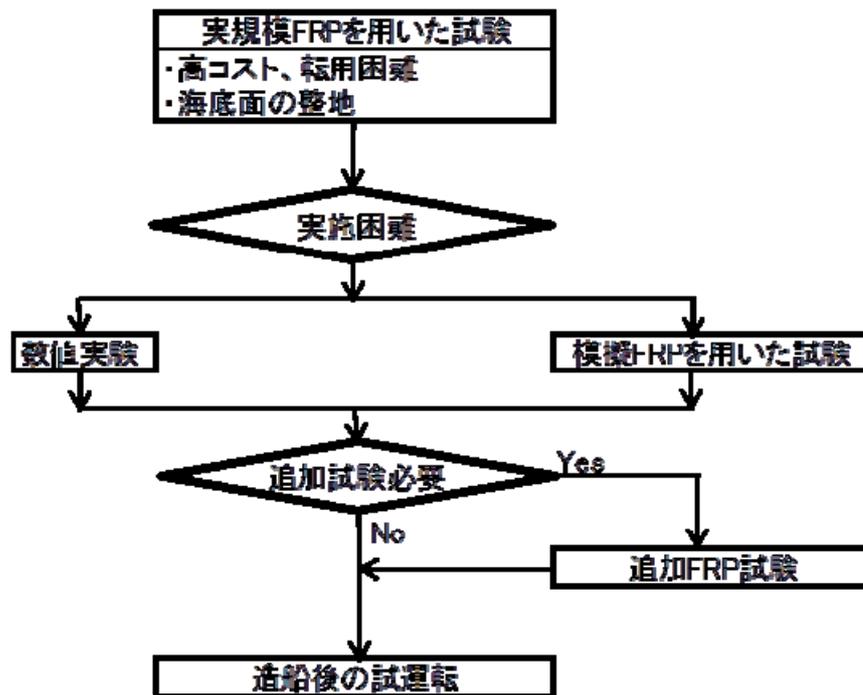


図 2-16 オペレーション試験検討方針説明図

本章では、ピックアップ・オペレーション試験の計画およびピックアップ・オペレーションに関し、開発が必要な資材の開発計画について記す。

また、ピックアップ・オペレーション試験計画は、4年間で行うこととした。

2.1.2.2. 試験仕様の検討・計画策定

2.1.2.2.1. 実施体制の確立

実証試験の実施にあたっては、技術的検討のみならず実施海域の選定・試験機器の設計と製作・試験船の備船・試験船への試験機器の搭載据付・試験後の解装返却・海上運転時

の運用者の選定・安全対策・近隣対策など多岐に渡った仕事を、多くの関係者が予算を管理しつつ適時に行っていく必要がある。このためには指揮命令系統と所掌を明確にした組織作りが最も重要である。

2.1.2.2.2. 試験の概要

試験海域は、実証試験に使用する船舶の選定と合わせて来年度以降選定するものとするが、水深 200m を想定して計画する。試験に際しては主として以下の 3 点を確認することを目的とする。

- 1) 荒天下におけるブイの拾い上げ
- 2) 200m 水深からの FRP 巻き上げおよび巻き下し
- 3) 嵌合装置の確認と離脱の確認および圧力負荷試験

試験に際しては以下の構成の模擬 FRP を 200m の海底に沈設し、図 2-17 に示すように FRP 頂部から鋼索を海面まで立ち上げ、海面のブイに接続しておき、更にブイからは水に浮く浮遊繊維索数十mでピックアップブイを流しておく。

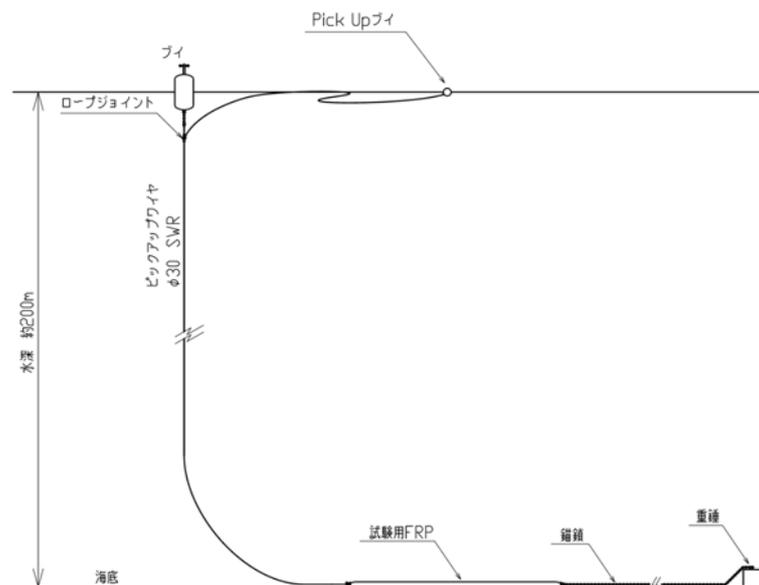


図 2-17 実証試験の全体全体配置

試験船からフックを浮遊繊維索の向こう側に投げ込み、ピックアップブイを引き上げ、浮遊繊維索を巻き上げることでブイを吊り上げる。(図 2-18 および図 2-19 参照)

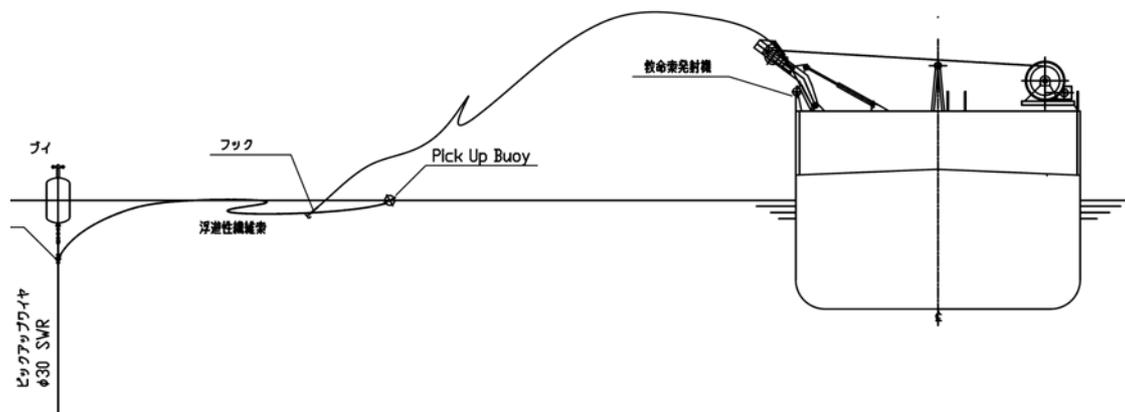


図 2-18 フック投げ込み

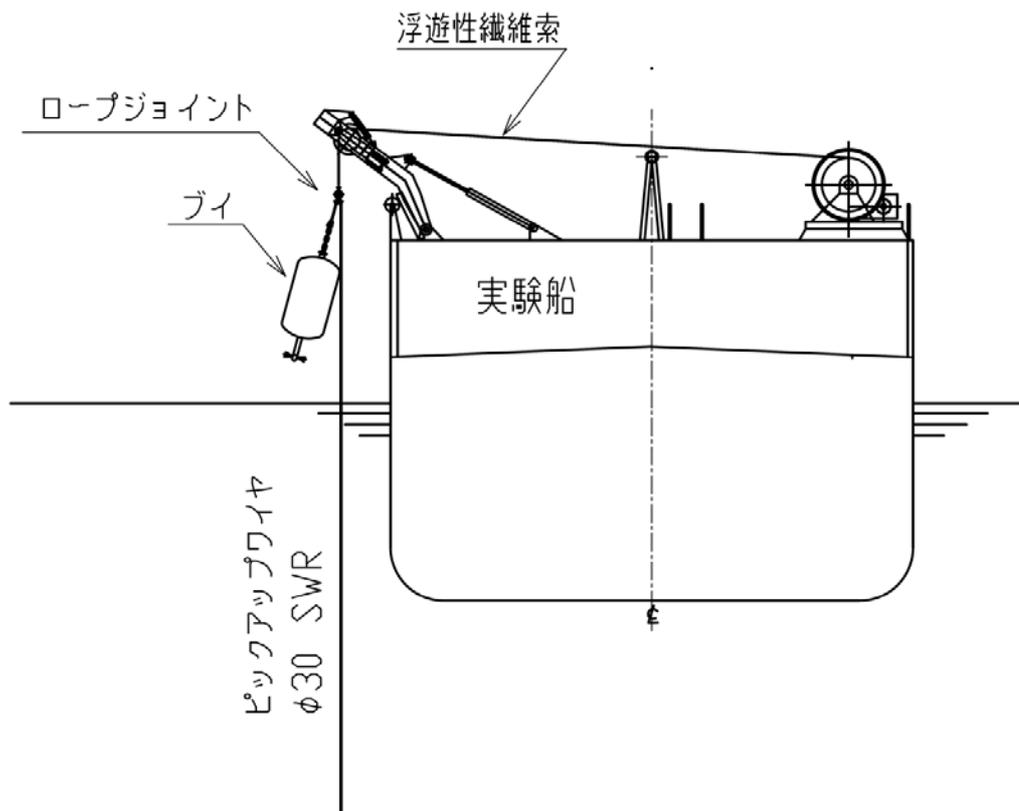


図 2-19 ブイの引き上げ

この状態で A フレームを船内に引き入れてブイを甲板に取り込む。ロープジョイントからピックアップ・ワイヤーを外して試験船のウィンチにつなぎ、海底の FRP を巻き上げる。その際試験船のウィンチが使用できればよいが、既存のウィンチが使用できない場合

は、別途試験用のウィンチを据え付けるものとする。FRP 頂部が嵌合海面上に引き上げられたら、嵌合装置を作動させ嵌合させる。(図 2-20 参照)

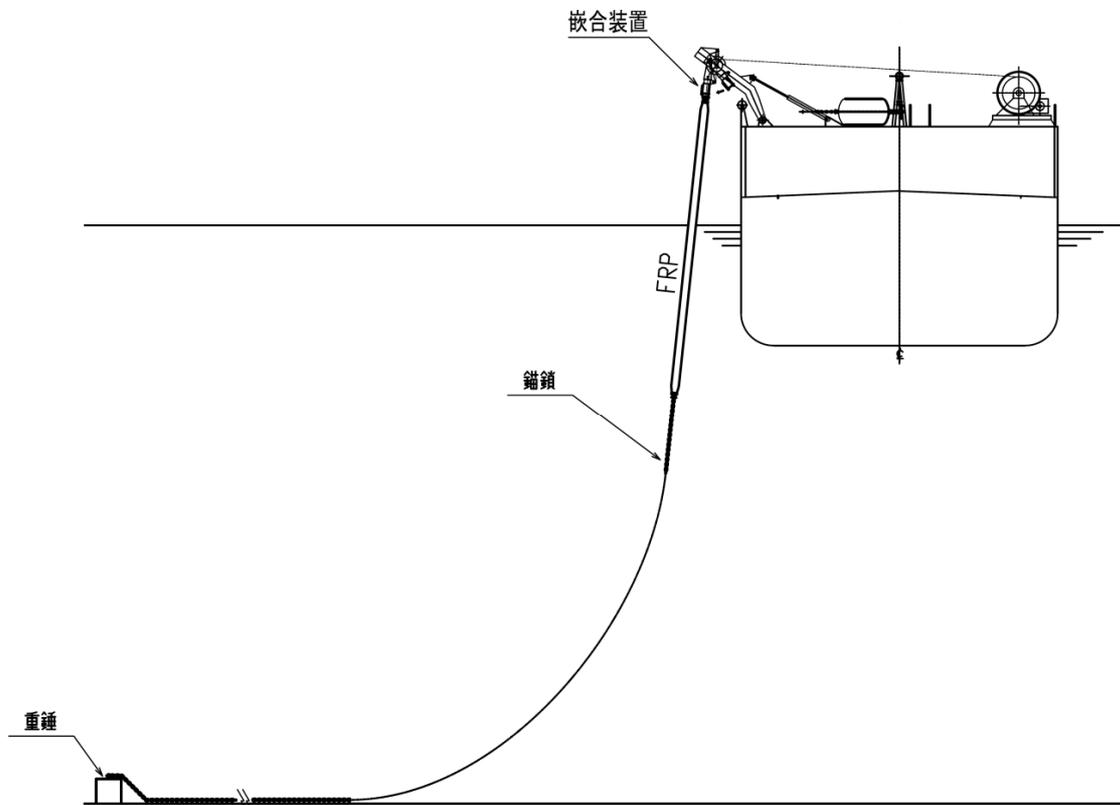


図 2-20 嵌合試験

嵌合状態で FRP に海水による圧力負荷試験を行う。その後、圧抜き・離脱を行い、FRP を海底まで巻き下す。

この試験を数回繰り返し、不具合の無いことを確認する。

2.1.2.2.3. 試験海域の選定

試験海域は 200m 程度の水深があり、海底に FRP および重量調整用錨鎖と重錘を沈設出来る場所という条件が成り立つ場所を探す。海底の状態としては砂地が最も適しており、ヘドロ・軟泥・岩場は避ける。

2.1.2.2.4. 実験船の選定と傭船契約

試験船は A フレームを装備したもので、船位をかなり自由に調整できる機能が要求される。また、今後開発する嵌合装置を A フレームに装備することも条件となる。φ30 程度のワイヤーを 300m 程度巻くことの出来るウィンチが装備されていれば、試験用にウィンチを製作せずにする。

傭船期間は今後の試験用機器の規模にもよるが、前準備(機器据付工事)・試験・機器解装を含めて 3~4 ケ月と思われる。

2.1.2.2.5. 傭船

試験では、模擬船舶あるいは台船を傭船して利用する。

ここでは、JAMSTEC((独)海洋研究開発機構)の研究船を傭船することを想定し、同機構にヒヤリングした結果を以下に記す。

本試験に利用可能な研究船として、かいよう・かいいい・みらいが候補となる。これらの研究船の緒元を表 2-6 に示す。いずれの場合も他の研究活動との調整が必要となり、この内、DPS (Dynamic Positioning System)が装備され、双胴船で作業スペースが広く、また、3 研究船の中では最も小型となる海洋調査船かいよう(図 2-21 参照)が最有力候補となる。

想定される試験時の作業について、JAMSTEC 研究船乗組員との作業分担は、およそ表 2-7 に示す通りとなる。

傭船期間は、事前準備(試験設備の設置)、試験、試験後の設備解体・撤去が含まれることになるが、長期間(例えば3カ月)の傭船は困難となる。事前準備・解体撤去期間を検討するためには実際の傭船を下見する必要もある。

現段階では、JAMSTEC 研究船を所定期間傭船できるものとしてコスト試算することとし、オペレーション試験の詳細が明確になったとき、あるいは傭船事前予約が必要になる時期に、傭船先・傭船期間を最終決定する。

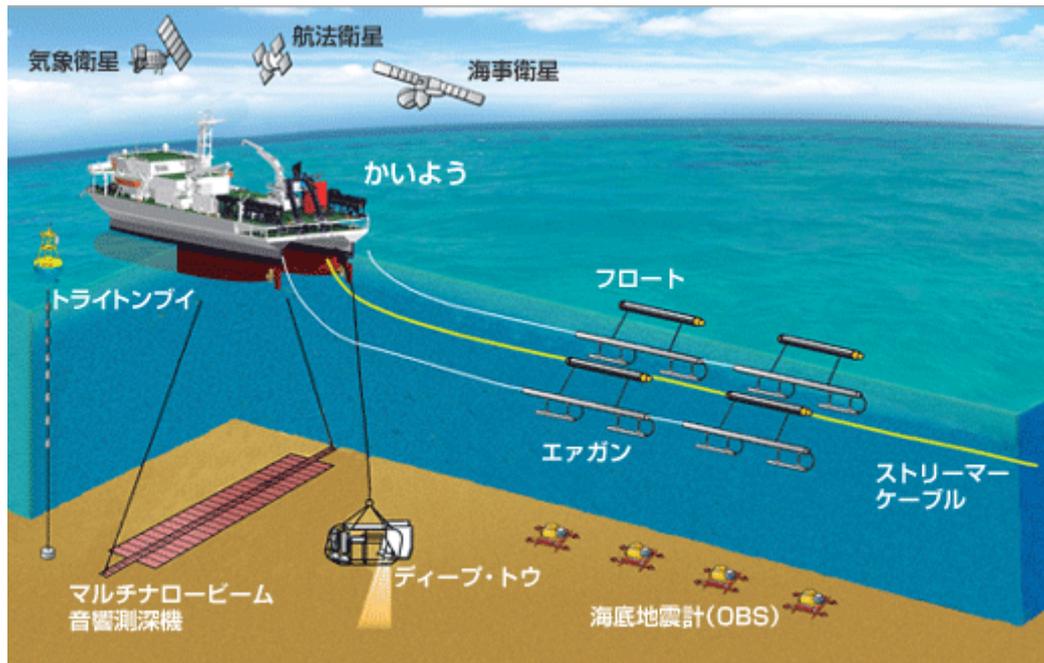


図 2-21 海洋調査船かいよう説明図

(出典) 独立行政法人海洋研究開発機構[4]

表 2-6 JAMSTEC 研究船の諸元

船名	海洋調査船 かいよう	深海調査研究船 かいいい	海洋地球研究船 みらい
全長	61.5m	106.0m	128.5m
幅	28.0m	16.0m	19.0m
深さ	10.6m	7.3m	10.5m
喫水	6.3m	4.7m	6.9m
国際総トン数	3,350 トン	4,517 トン	8,687 トン
航海風力	約 13 ノット	約 16 ノット	約 16 ノット
航続距離	約 6,200 マイル	約 9,600 マイル	約 12,000 マイル
定員	60 名(乗組員 29 名/ 研究者等 31 名)	60 名(乗組員 38 名/ 研究者等 22 名)	80 名(乗組員 34 名/ 研究者 46 名)
主推進機関	ディーゼル機関 1,250kw×4 基	ディーゼル機関 2,206kW×2 基	ディーゼル機関 1,838kW×4 基
	誘導電動機 860kw×4 基		推進電動機 700kW×2 基
主推進方式	可変ピッチプロペラ ×2 軸	可変ピッチプロペラ ×2 軸	可変ピッチプロペラ ×2 軸
A フレーム	有	有	有
DPS	有	無	無

(出典) 独立行政法人海洋研究開発機構[5]

表 2-7 作業分担

	JAMSTEC	シャトルグループ
マーカークイのピックアップ作業	○	
Aフレームの操作	○	
フレキシブルライザー巻き上げ・下げのウィンチ操作	○	○
クイックカップリングの遠隔操作		○
高圧弁の操作		○
緊急離脱操作		○

2.1.2.3. 実証試験と並行すべき技術の解析的検討

2.1.2.3.1. FRP の検討

FRP は海洋石油開発分野では 30 年以上の実用実績があり、現在も北海・メキシコ湾・西アフリカ沖・ブラジルのリオ沖等で大量に使用されている。一般的な FRP の構造を図 1-22 に示す。FRP の最内部には外水圧に対する補強のため、ステンレス製の帯鋼を螺旋状に成形したインターロック管を用いる。インターロック管は液密構造ではないため、その外部にプラスチックの押し出し被覆層(プラスチック内管)を設け、流体通路とする。プラスチック内管材料には原油輸送用の場合は耐油性に優れるナイロン樹脂を使用するが、CO₂ 輸送用には素材の長期安定性と押し出し成形性に優れる高密度ポリエチレンが適していると考えられる。CO₂ の注入圧力でプラスチック内管が破裂しないよう、プラスチック内管外部には内圧補強層が必要であり、通常は C 型断面に成形した金属補強条を上下一対でコイル巻きした補強構造を用いる。また、FRP の懸垂自重と内圧による軸方向伸びを防止するため軸力補強層が必要であり、これには平型或いは丸型断面の線材を用いて内圧補強層の上部断面を隙間無く埋め尽くすようにロングピッチで螺旋巻きする。螺旋巻き方向は上下 2 層を互いに逆向きとする事によって FRP に発生する捩れを防止する。FRP の最外部にはプラスチック内管材料と同様に耐水性にも優れる高密度ポリエチレン管を外部シースとして適用する。

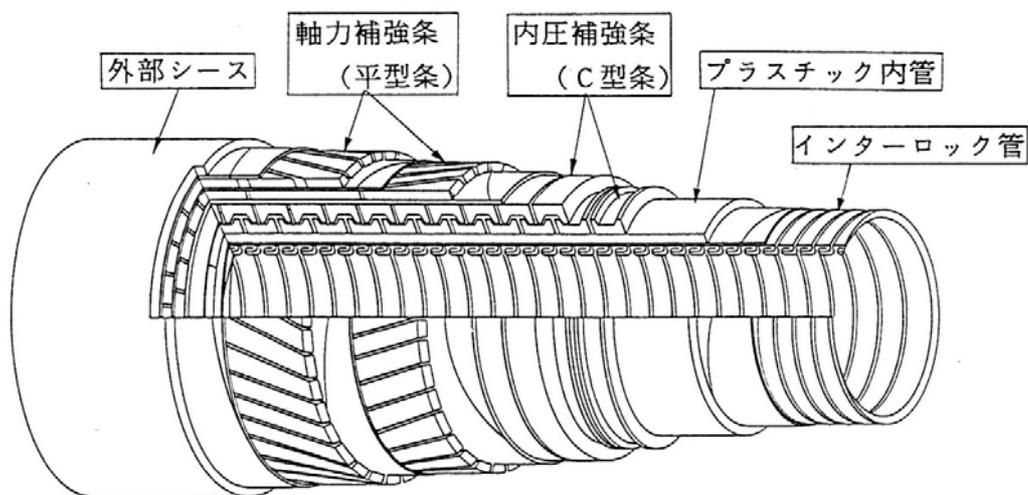
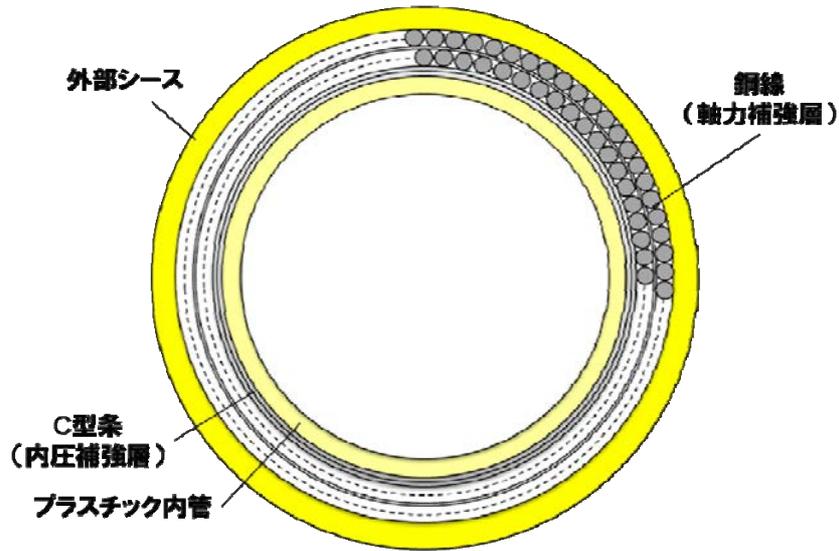
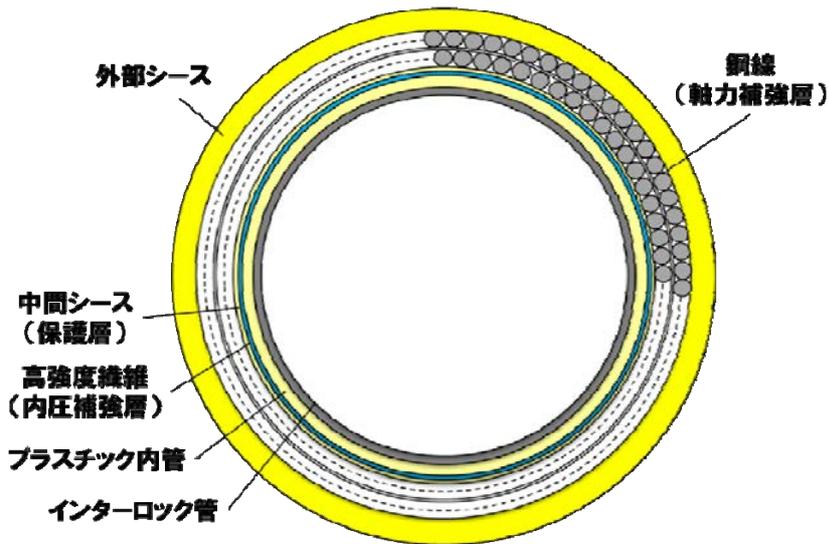


図 2-22 FRP 基本構造

CO₂ の圧入用 FRP では海底に延線した FRP の引き揚げや吊り下げを頻繁に繰り返すため、その設備規模や作業性を考慮すると FRP を出来るだけ軽量化する必要がある。そのため、図 2-22 の FRP 基本構造で重量面での大きなウェイトを占める金属部材を一部減らし軽量化する案が推奨される。その一案としてインターロック管を省略して耐外圧強度(耐側圧強度)については内圧補強条が耐内圧性と合わせて分担出来るよう設計するコンセプトが考えられる。別案は内圧補強条をアラミド繊維のような軽量で高強度の繊維補強材に変更するコンセプトである。いずれのコンセプトについても石油開発用のように高い内圧強度(35～70MPa)を必要としないため選択可能な構造である。CO₂ 圧入用 FRP の構造を図 2-23 に示す。



構造 A：インターロック管省略型



構造 B：内圧繊維補強型

図 2-23 CO2 圧入用 FRP 構造

FRP の設計フローを図 2-24 に示す。まず初めに各コンセプトにおける FRP の構造設計を行い、対象海域の水深、内圧等に適した各層の構造を決定する。次に、構造設計に用いた材料物性値や機械定数を検証するため、部材検討として FRP を構成する各部材の評価を行う。部材単体での評価に加え、小スケールパイプモデルを用いた検討も実施する。性能評価については、実規模に近い FRP を試作し、基本特性の確認と本システムにおける課題や問

題点に対する FRP の耐久性を確認する。評価試験以外にも構造解析や数値解析による検討を行い、本システムを成立させるための手法を確立する。

ピックアップ・オペレーション時や作業時の FRP 海中挙動に関する数値解析を行い、要求される FRP の性能やハンドリング条件を選定し、FRP システムを設計する。各検討結果は FRP の構造設計に反映し、構造の再検討と設計フローを繰り返し、最終的な FRP 構造を確定する。

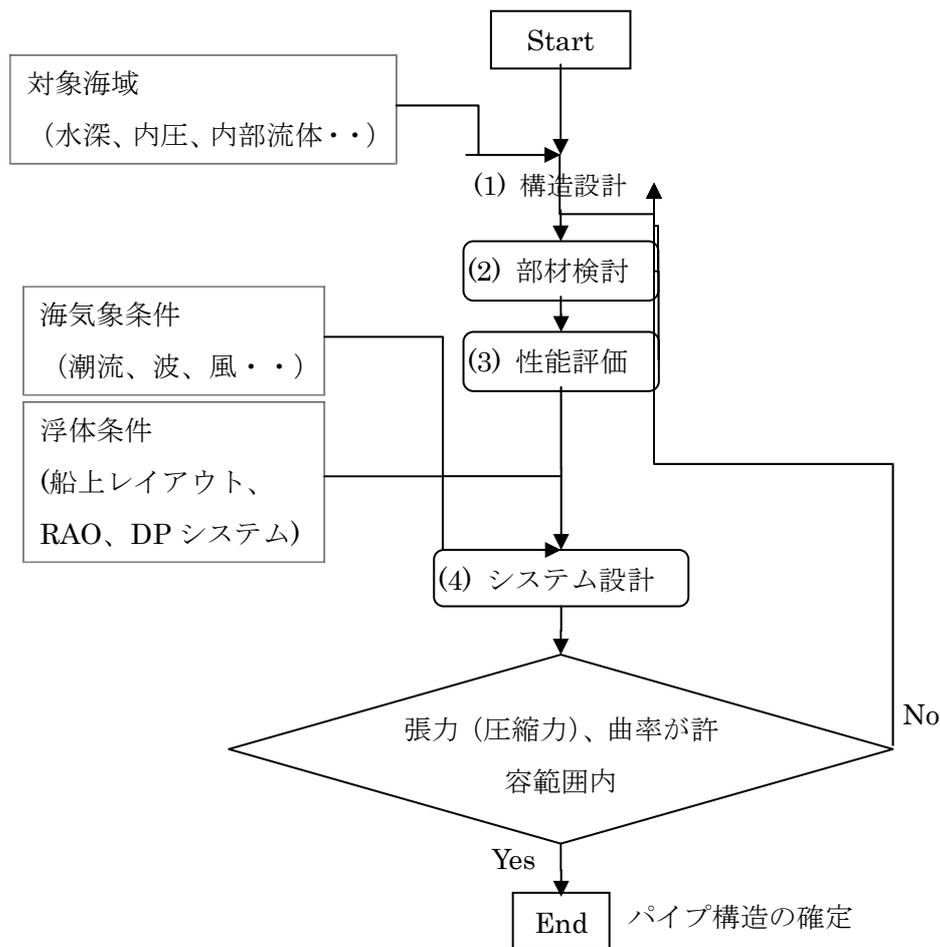


図 2-24 FRP 設計フロー

1) 構造設計

設計条件を以下として FRP 構造の試設計を行った。

- ・ 内径：150mm
- ・ 内圧：10MPa
- ・ 水深：500m
- ・ LCO₂ 密度：1030kg/m³（-20℃/2MPa 条件）

構造 A、構造 B の試設計結果を表 2-8、表 2-9 に示す。水中重量は 23～24kg/m 以下となる。今後、FRP 上端に発生する最大張力や変動張力、曲率変化については海気象条件や浮体運動条件に基づいて挙動解析を実施し、FRP 構造の詳細設計を検討する必要がある。

表 2-8 FRP 構造案 A

主要層 諸元	プラスチック内管厚さ	mm	7.5
	プラスチック内管外径	mm	165
	内圧補強層厚さ C 型条	mm	4
	軸力補強層 鋼線径	mm	7
	外部シース厚さ	mm	10
	パイプ外径	mm	約 227
重量	気中重量(内部空)	kg/m	約 47
	海水中重量(内部空)	kg/m	約 5
	海水中重量(CO ₂ 含む)※	kg/m	約 24
性能	許容張力	kN	330
	許容側圧	kN/m	49
	最小曲げ半径 静的/動的	m.	2.5/3.8

表 2-9 FRP 構造案 B

主要層 諸元	インターロック管外径	mm	162
	プラスチック内管厚さ	mm	7.5
	プラスチック内管外径	mm	179
	内圧補強層厚さ 高強度繊維材	mm	2
	中間シース厚さ	mm	3
	軸力補強層 鋼線径	mm	7
	外部シース厚さ	mm	10
	パイプ外径	mm	約 241
重量	気中重量(内部空)	kg/m	約 48
	海水中重量(内部空)	kg/m	約 2
	海水中重量(CO ₂ 含む)※	kg/m	約 23
性能	許容張力	kN	326
	許容側圧	kN/m	39
	最小曲げ半径 静的/動的	m.	2.5/3.8

2) 部材検討

FRP の重量は、金属部材(インターロック管、内圧補強層、軸力補強層)の割合が大部分を占め、軽量化を達成するためには金属部材の樹脂化(高強度繊維材の適用)、高強度化を検討する必要がある。また、要求特性に応じて層構造を減らし簡易構造とすることも有効な手段といえる。

図 2-23 に示す構造 A：インターロック管省略型、構造 B：内圧繊維補強型に用いる部材検討に加え、更なる FRP の軽量化を検討する。

外水圧によって変形が生じない高い圧縮強度を持つ樹脂テープを FRP 外周部に巻き付けることで、海水中の FRP には浮力が発生し、海水中重量を小さくする方法も考えられる。FRP の外径が大きくなることで流体抗力も大きくなるため、浮力材に用いる部材検討に加え、挙動解析による検討も必要と考えられる。検討を行う部材を表 2-10 に示す。これらの部材は内部流体である LCO₂ への耐性も考慮しなければならない。

表 2-10 FRP 検討部材

FRP 層構造	機能	一般部材	検討部材
インターロック管	外圧補強 側圧補強	SUS 製インター ロック管	(省略検討)
内圧補強層	内圧補強 (側圧補強)	炭素鋼製 C 型条	高強度繊維材
軸力補強層	軸力補強	炭素鋼製平型条	高強度鋼線+樹脂線 繊維強化プラスチック
浮力材	水中重量の 軽減	—	樹脂テープ

FRP 本体の軽量化に加え、端末のコンパクト化・軽量化についても重要な検討課題である。FRP は複層構造パイプであるため、両端に取り付ける端末には、各層を固定し引き留める機構が必要となる。一般的な FRP の端末構造を図 2-25 に示す。FRP 端末の中で比較的大きなスペースを占めるのは、軸力補強層の引き留め構造である。軸力補強層の引き留め構造について、モデル試験や構造解析を行い、端末のコンパクト化、軽量化を目指した検討を行う。

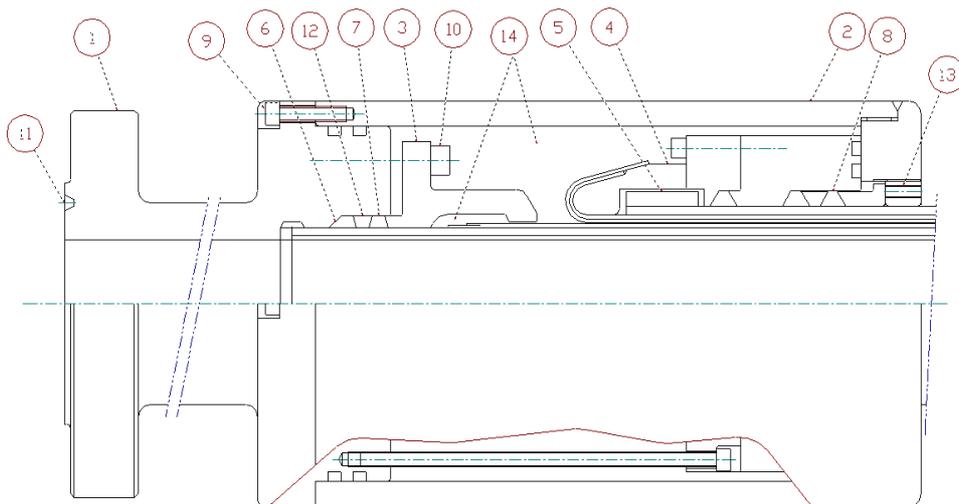


図 2-25 FRP 端末構造

3) 性能評価

CO₂ 圧入用 FRP の性能を評価するため、評価試験、解析的検討を実施する。性能評価の目的は、引張特性や曲げ特性など FRP の基本的な特性を確認することと、今回のシステムにおける FRP の耐久性を評価することである。性能評価としては表 2-11 に示す諸項目が挙げられる。これらの中から必要な項目を選択し、ピックアップ・オペレーション試験と並行し検討を進める。

表 2-11 FRP の性能評価項目

FRP 性能評価項目例	引張評価
	曲げ評価
	側圧評価
	内圧評価
	繰り返し曲げ疲労特性評価
	曲げ座屈評価
	摩耗評価
	軸圧縮評価
	曲げ軸圧縮評価

4) FRP システム設計

・基本システム案

CO₂ 圧入用の FRP システムを設計する場合、シャトルシップ不在期間には FRP を海底或いは海中でどのような形状に保持しておき、シャトルシップ到着時にはこれを、どのようにピックアップするかが重要なポイントとなる。このシャトルシップ不在期間中における FRP の最適な海中保持形状については圧入海域の水深が大きく関係するものと考えられる。

例えば圧入海域が 100～500m 程度の中水深海域である場合、ピックアップ前の FRP は海底に直線状に延線しておき、ピックアップ時には FRP の先端を直接シャトルシップに引き上げ、圧入時には図 2-26 に示すようにフリーハンギング状に FRP を懸垂して使用する案が最もシンプルで最適と考えられる。

一方、例えば水深が 500m を超える大水深の場合、深海底に FRP を延線したのではこれを洋上まで引き上げるために長時間を要して限られた圧入作業時間に減らす上、シャトルシップについては FRP ピックアップのために大規模な設備が必要となる可能性が高

い。そのため、図 2-27 に示すように、シャトルシップ不在期間は海中に係留した大型ブイで FRP 先端を適当な高さに支持して、シャトルシップ到着時にはここから洋上まで FRP を吊上げ・吊降しする海中懸垂方式を適用する案が有力と考えられる。

逆に水深が 100m 以下の浅海の場合、水深に対してシャトルシップの揺動が相対的に大きくなるため、圧入作業中の FRP をフリーハンギング形状で保持したのではシャトルシップの移動量を十分吸収しきれずに FRP の損傷を招く恐れがある。そこで図 2-28 に示すように FRP の一部区間に小型ブイを分散して取り付けて FRP の弛み区間を作り、その形状変化で浮体移動を吸収出来る様にしたレイズィウェイブ形状を適用する必要があるものと考えられる。

CO₂ の圧入海域の選定にあたっては FRP 形状が最もシンプルなフリーハンギング方式の適用出来る中水深海域が望ましい。

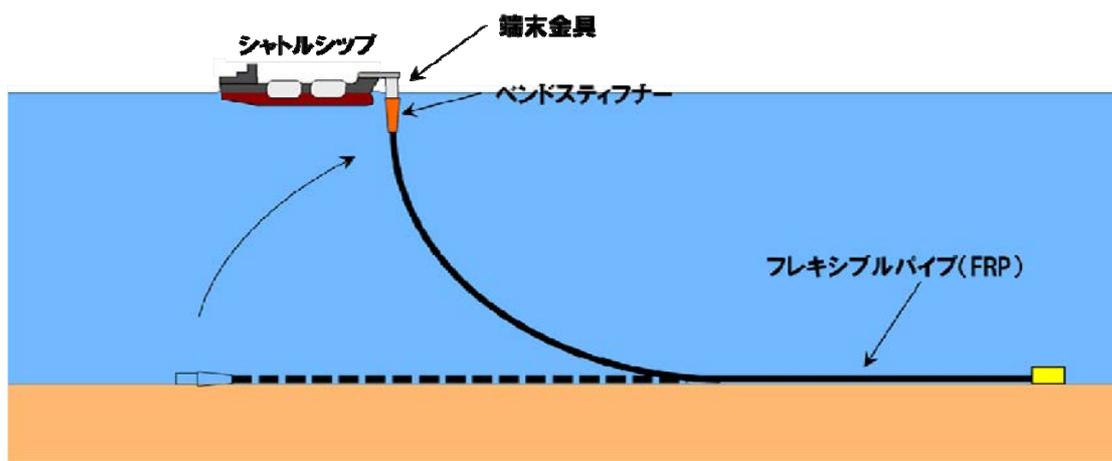


図 2-26 フリーハンギング形状

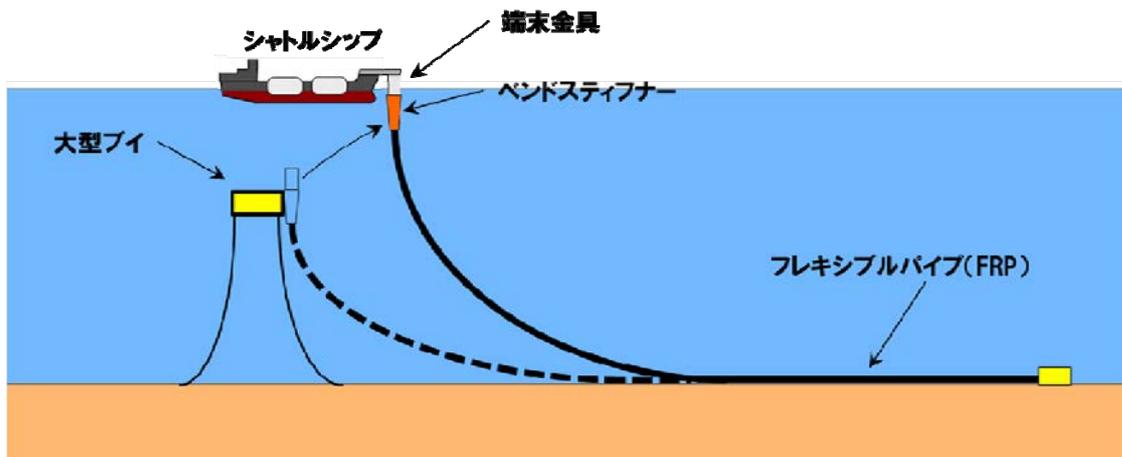


図 2-27 海中懸垂方式

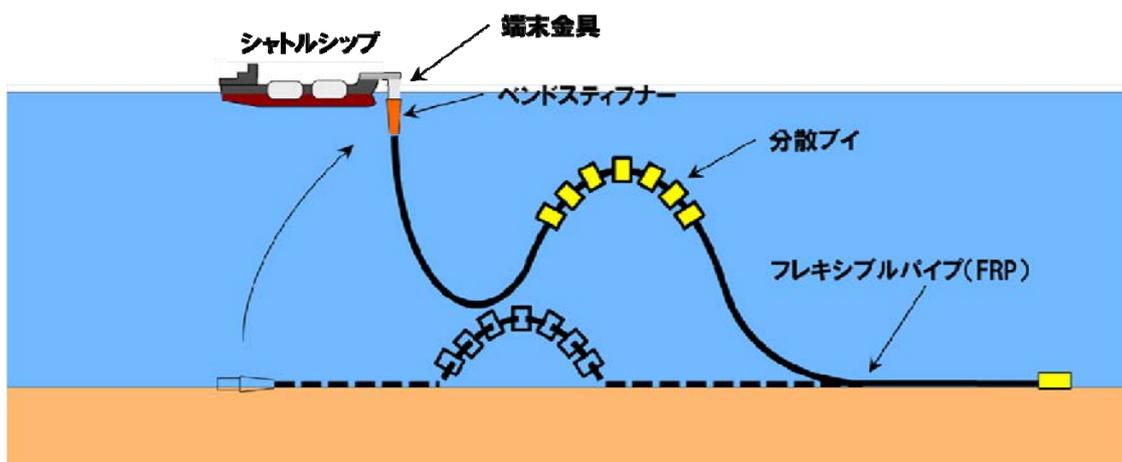


図 2-28 レイズィウェイブ形状

・ FRP 形状解析

今後のピックアップ試験計画策定のため、FRP のピックアップ時及びシャトルシップ洋上移動時の形状解析を行った。検討対象海域は中水深の 200m であり、CO₂ 圧入時の FRP 形状についてはフリーハンギングとし、圧入待機時には FRP を海底に直線状に延線してするものとした。

(A)検討条件

主な検討条件は以下の通りとした。

- ・ 圧入海域水深：200 m

- FRP 長：500 m(海底坑井～ピックアップ端)
- FRP 内径：約 150 mm (6 インチ管)
- FRP 水中重量：23 kg/m(内圧繊維補強型)
- FRP 曲剛性：15000 Nm²
- FRP 縦剛性：1E5 kN
- シャトル上下揺動量：±2.0m

FRP ピックアップシステムの想定図を図 2-29 に示す。図のようにシャトルシップ不在時の FRP(500m 長)は海底に直線状に置かれ、ピックアップ側端末とは逆の端末は海底圧入坑井口と接続し、固定するものとした。ピックアップ側端末についてはシャトルシップが先ず、ピックアップブイを取り込んだ後、吊りワイヤー巻き取りながら徐々に海中から引き上げる。この間、シャトルシップ(CO₂ タンカー)は洋上を坑井側に向かって航行し、圧入の定位置で FRP を船尾からフリーハンギング形状で懸垂して作業を行う。

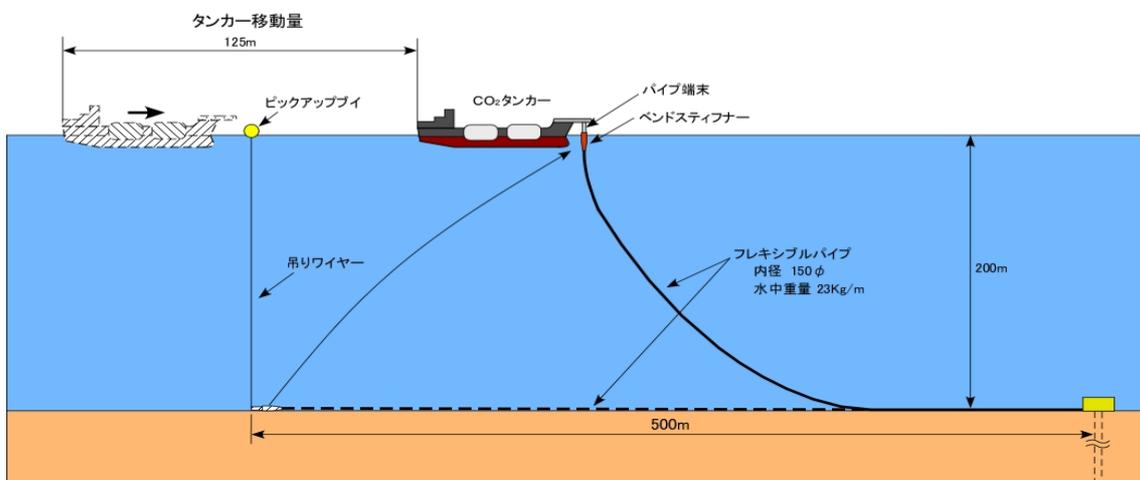


図 2-29 FRP ピックアップシステム図

図 2-30 は CO₂ 圧入作業中の FRP 形状図である。シャトルシップは風や潮流によって洋上を移動するが、過度の移動によって FRP が損傷しないよう、DPS を用いてシャトルシップの洋上移動量を許容範囲内に保持する必要がある。

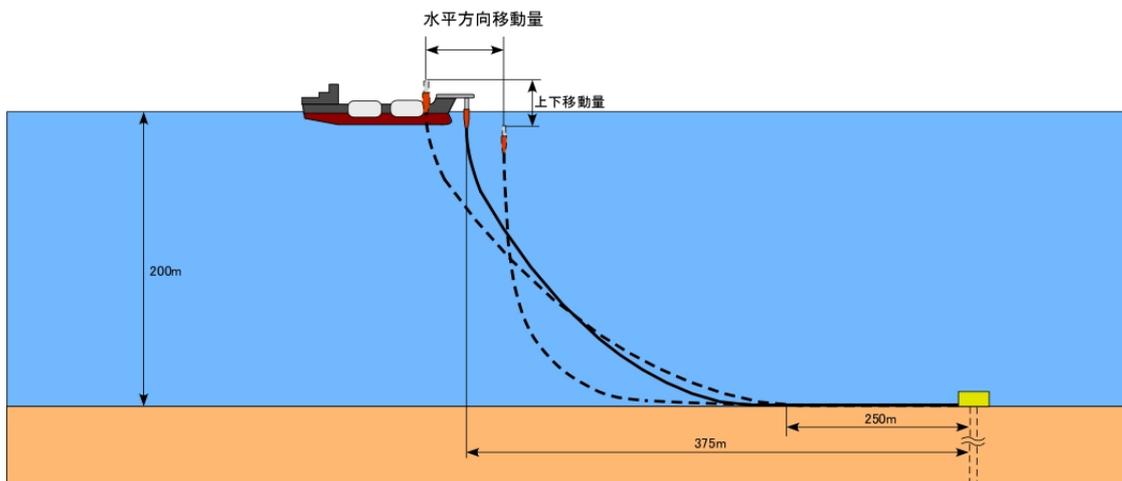


図 2-30 圧入作業中の FRP 形状図

(B)制約条件

圧入作業中にシャトルシップが遠方、近接のいずれの方向にも過度に移動すると FRP の一部に損傷が生じる恐れがある。これを防ぐためシャトルシップ移動量に関して以下の制約条件を加えた。

・遠方移動時の制約条件

遠方移動時の制約としては第 1 に FRP 上端に設置する緊急切り離し装置の張力および支持可能角度の限界を考慮する必要がある。シャトルシップの遠方移動と共に FRP の上端部の張力や入水角度が徐々に増加していくが、これらが緊急切り離し装置の許容張力や許容支持角度を超えない範囲に保持する必要がある。また、緊急切り離し装置の制約範囲内であっても、シャトルシップの遠方移動で FRP の着底点が固定点(圧入坑井口)近傍まで浮上して来ると FRP 張力が急激に上昇して破断する恐れがある。

現段階では緊急切り離し装置の張力、支持角度の許容値が明確でないため、シャトルシップの遠方最大移動量は FRP 上端張力が急激に上昇するまで許容するものとした。

・近接移動時の制約条件

近接移動時の制約条件は FRP の着底部の状況に支配される。シャトルシップの近接移動と共に FRP 着底部の曲率半径と水平張力が徐々に低減していくが、これらを許容範囲に止める必要がある。FRP の許容曲率半径については最小曲率半径(曲げ座屈限界値)に対して適正な安全率を考慮する必要があり、本検討では安全率として 2 倍を考慮し、具体的な許容曲率半径は 5m とした。

一方、FRP をフリーハンギング状に形状保持するためには着底部では少なくとも水平張力が必要であり、これがシャトルシップの近接移動によって圧縮力に変わると、FRP の曲げ圧縮座屈が発生する恐れがある。このためシャトルシップの近接移動時の第 2 の制約条件として、FRP 着底部軸力が圧縮力にならない事を加えた。

(C)FRP 形状解析結果

シャトルシップの遠方移動時の FRP 特性について解析した結果を表 2-12 に示す。シャトルシップが中心位置から水平方向への遠方移動量(上下方向には 2m 遠方移動)が 30~60m 直前まで諸数値は一様に自然な増減を示すが、60m では上端張力の急上昇傾向が生じ、これ以上の移動量では収束計算が不可となる。これよりシャトルシップの遠方移動量の限界は約 60m までとする必要がある。なお、本解析ではシャトルシップが定位置(中心位置)時の FRP 初期形状として FRP 自身の曲剛性バランス計算から最も自然なフリーハンギング状に収束した形状を選定したが、今後、解析結果も考慮して更に適正な初期形状に修正することも考えられる。

表 2-12 遠方移動時解析結果

	単位	シャトル 中心位置	遠方移動量(水平方向)					
			30	40	50	58	59	60
上端張力	kN	57.8	77.4	87.3	102.9	119.9	122.3	131.0
上端入水角度	deg	12.7	24.2	28.1	33.9	38.5	39.0	40.2
カテナリー 区間長	m	250	312	340	380	419	425	—
着底区間長	m	250	188	160	120	81	75	—
下端水平張力	kN	12.6	31.3	42.1	57.4	72.2	77.0	85.0
下端曲率半径	m	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞

上下方向移動量：+2m

シャトルシップの近接移動時の FRP 特性について解析した結果を表 2-13 に示す。

シャトルシップが中心位置から水平方向への近接移動量(上下方向には 2m 近接移動)が 30~60m 直後までの諸数値は一樣に自然な増減を示すが、67m 以降では FRP 下端軸力が張力から圧縮力に変わり、カテナリー状のフリーハンギングを維持出来なくなる。また、シャトルシップ移動量 70m で FRP 着底部の曲率半径は許容値 (5m) 以下になる。これよりシャトルシップの近接移動量の限界は約 60~70m までとする必要がある。

表 2-13 近接移動時解析結果

	単位	シャトル 中心位置	近接移動量(水平方向)					
			30	40	50	60	67	70
上端張力	kN	57.8	48.9	47.8	46.2	45.2	44.7	44.5
上端入水角度	deg	12.7	5.1	3.3	1.9	0.7	0.1	0
カテナリー区 間長	m	250	219	212	208	204	203	202
着底区間長	m	250	281	288	292	296	297	298
下端水平張力	kN	12.6	4.3	2.8	1.5	0.6	0	-2.2
下端曲率半径	m	∞	20	14.3	11.1	7.7	5.8	5.0

上下方向移動量：-2m

FRP の検討項目とその工程を表 2-14 に示す。

表 2-14 FRP 検討項目と工程

	1 年目	2 年目	3 年目	4 年目
構造設計	■	■		■
部材検討	■			
性能評価		■		
ピックアップ・ オペレーション 試験用 FRP			■	■
システム設計	■	■	■	■

2.1.2.3.2. DPS の検討

1) 検討方針・検討内容

ピックアップ・オペレーション試験と並行すべき技術の解析的検討として、シャトルシップの位置保持性能評価(DPS(Dynamic Positioning System)の検討)が重要である。ピックアップブイ方式によるシャトルシップ DPS の要件として、LCO2 圧入時を想定した通常の位置保持に加えて、FRP (Flexible Rizer Pipe)のシャトルシップへの着脱時に FRP が損傷しないようにシャトルシップの制御位置を変化させていく新しい DPS ロジックが必要となる(図 2-31 参照)。そこで、新 DPS の制御システム開発と試設計されたシャトルシップ向けのシステム設計に大別した性能評価を実施する。なお、DPS 制御設計の主な流れは図 2-32 に示す通りである。

(1) 新 DPS 制御ロジックの構築

DPS シミュレーションに FRP の挙動を考慮できる機能を追加して、複合外乱下におけるシャトルシップの動揺がワイヤーを介して FRP に伝達して、FRP の軸力や曲げモーメント及び曲率を計算して、DPS 制御位置を移動しながらブイを巻き上げるシミュレーション手法を開発する。

(2) 新 DPS 制御ロジックの検証試験

開発する新規 DPS シミュレーション手法の検証データを取得するために水槽試験を実施する。機能を追加する FRP の挙動検証用の基礎試験と、DPS と FRP の連成状態でのデータを取得する DPS 検証試験の二段階に分けて行う。

(3) シャトルシップ向け DPS の試設計

シャトルシップの設計が進展し主要目が確定して、加えて FRP の仕様が決まった段階で、DPS 試設計を実施する。DPS 設計に必要な風抗力係数の算定には風洞試験或いは CFD(Computational Froude Dynamics)を実施する。

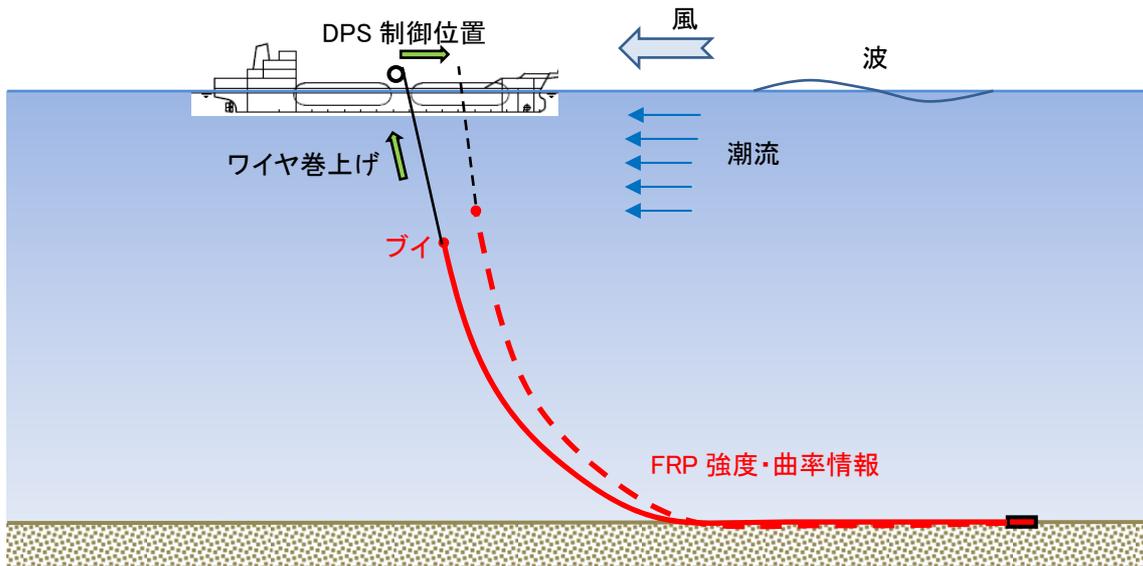


図 2-31 FRP 着脱時を想定した DPS のイメージ

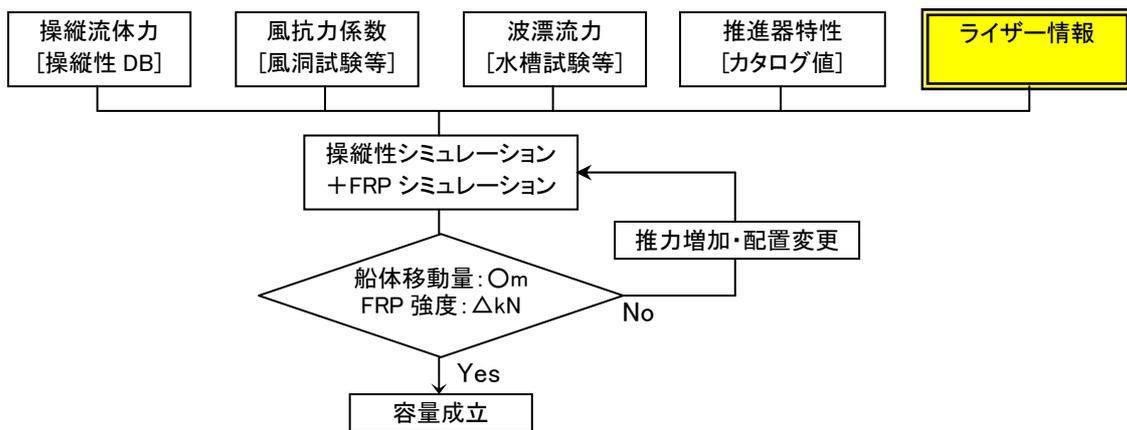


図 2-32 DPS 制御設計の主な流れ

- 流体力微係数の推定 ; 要船体主要目/船型
水槽試験 DB に基づき、シャトルシップの船型を考慮した流体力微係数を決定
- 風抗力係数の推定<風洞試験・CFD 計算> ; 要基本設計(水面上形状)
シャトルシップに作用する風荷重を推定するための抗力整数を風洞試験或いは CFD により算定し決定
- 推進機器の選定及び仮配置 ; 要推進器配置
- DPS シミュレーションによるゲイン設定<稼働限界> ; 要環境条件・稼働条件
開発した DPS ロジックを用いて、FRP を嵌合した状態での限界条件を確認

- DPS シミュレーションによる性能評価<ブイ着脱時> ; 要着脱時限界条件
FRP を嵌合まで或いは切離すまでの FRP 強度および DPS 性能の確認
- 水槽における複合外力下の検証試験
図 2-33 に示すような風・波・流れを模擬した DPS 性能の検証データを取得

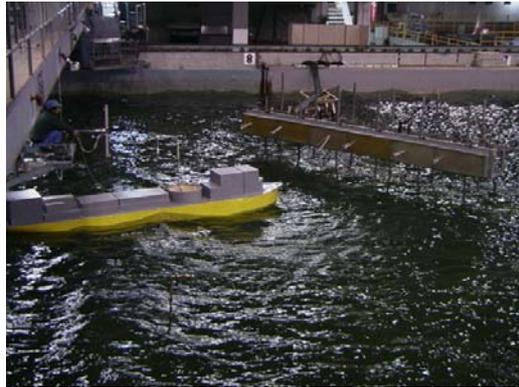


図 2-33 DPS 確認試験のイメージ

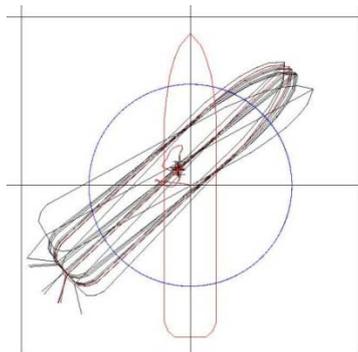


図 2-34 DPS シミュレーションの出力例

2)工程

DPS の検討の工程案を表 2-15 に示す。

表 2-15 DPS 検討の工程案

項 目	1 年目	2 年目	3 年目	4 年目
新 DPS 制御ロジックの構築				
新 DPS 制御ロジックの検証試験				
シャトルシップ向けの DPS の制御設計				
シャトルシップ向けの DPS の確認試験				

2.1.2.4. ピックアップ機構の検討

2.1.2.4.1. 圧入中に嵌合装置に加わる外力の推定

実船における嵌合作業時と圧入時の嵌合装置に作用する荷重の概略推定を行った。

前提条件

水深	200m
FRP 水中質量 ω	23kg/m
FRP の全長 L_{total}	500m

諸値の定義

L_{total}	: FRP の全長	m
L	: 浮き上がっている FRP 長さ	m
L_g	: 海底を這っている長さ	m
	$\therefore L_{total} = L + L_g$	
T	: 海面に於ける FRP の張力	N
T_h	: T の水平成分	N
T_v	: T の垂直成分	N
	$\therefore T = \sqrt{T_h^2 + T_v^2}$	
X	: $T_h = 0$ の地点からの水平移動量	m
ω	: FRP の水中質量(kg/m)	kg/m

水中の FRP 形状は図 2-35 のようになる。

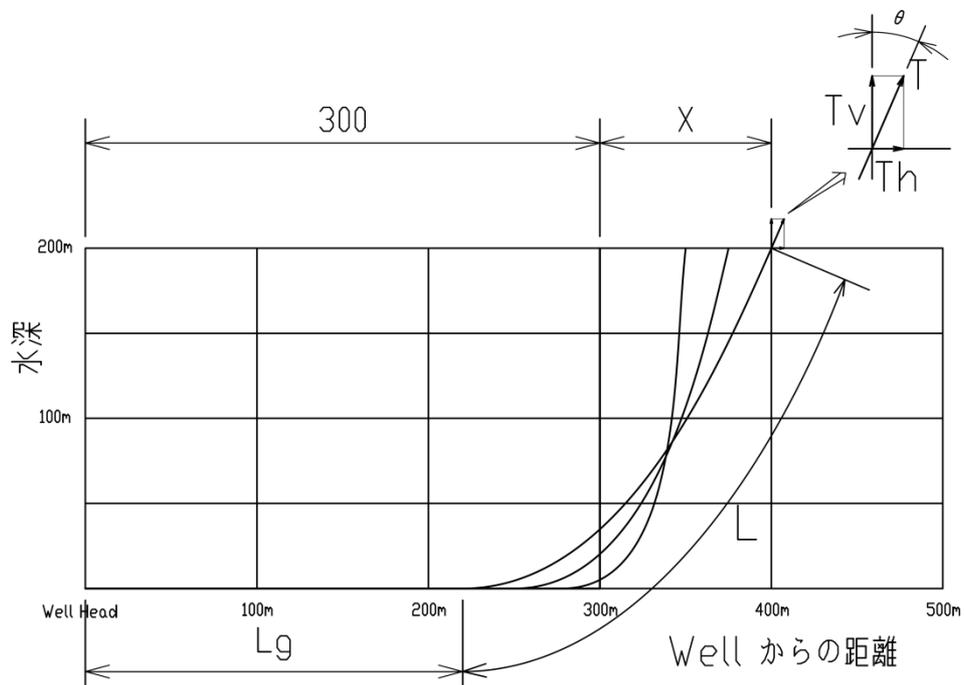


図 2-35 係留の基本形状

ここで圧入井坑口(Well Head)から 500m の FRP は海底に這っているが、先端が圧入井坑口から 300m の海面に引き上げられたとすると、 $T_h=0$ で $T_v=7000\text{kgf}$ (水深 200m x 35kg/m)。この点から海面上で X 移動すると図に示すように懸垂曲線に従った形状で FRP の全長 500m のうち L だけ懸垂され、残る L_g だけが海底に這うことになる。

$X=0$ の時には鉛直に下った FRP は海底部で折れ曲がらざるを得ず、曲り内側が座屈変形してしまう心配があり、この部分の曲率半径を一定以上に保つために、圧入中の全工程に亘って一定の X を保つ必要がある。

また、シャトルシップが圧入井坑口から離れて X が大きくなると T が増大し、L が大きくなり、 L_g は減少する。ある時点で $L_g=0$ となるが、この点を超えて X が増加すると、T はそれまでに比べて急激な増加をする。この状態をシンカー係留状態と呼ぶ。この X-T の様子を示すと図 2-36 となる。

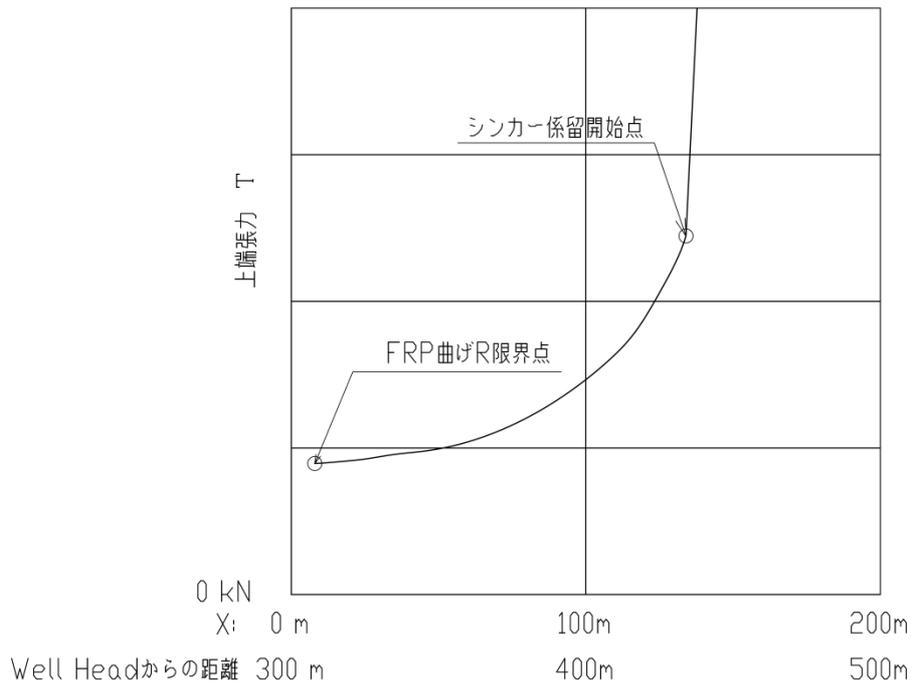


図 2-36 概略係留特性図

シンカー係留状態になった後は、少量の移動でも T は数百 kN または千 kN のオーダーに容易に増加する。圧入井坑口設備も嵌合装置もせいぜい $200\sim 300kN$ 程度が限界で、 $1000kN\sim 2000kN$ の張力 T に耐えることは不可能と考えられる。

DPS の位置保持が + 方向の (Well Head から遠ざかる) 場合は T が増加、 L_g が減少するので、 L_g がゼロにならないかが判定基準となる。

DPS の位置保持が - 方向の (圧入井坑口に近づく) 場合は T が減少、 L_g が増加するが、FRP の海底接地部近傍の曲げ半径が減少し FRP の座屈曲がり判定基準となる。

更に波による船体動揺も加味して係留特性図を描いたものが図 2-37 である、ここで中央の係留特性に対して上の線は上に波高分浮き上がった場合であり、下の線は波高分沈んだ場合である。有義波高 $2m$ の場合であれば、最大でシャトルシップの上下変位は $\pm 2m$ 程度と考えられる。但し船首であれば Pitching の影響で更に大きな上下動を考慮する必要がある。いま DPS の船位保持範囲を $\pm Dm$ と仮定した場合を考えると図 2-37 の斜線の中を移動することになる。ここで中心位置とした点は DPS の制御中心位置のことである。

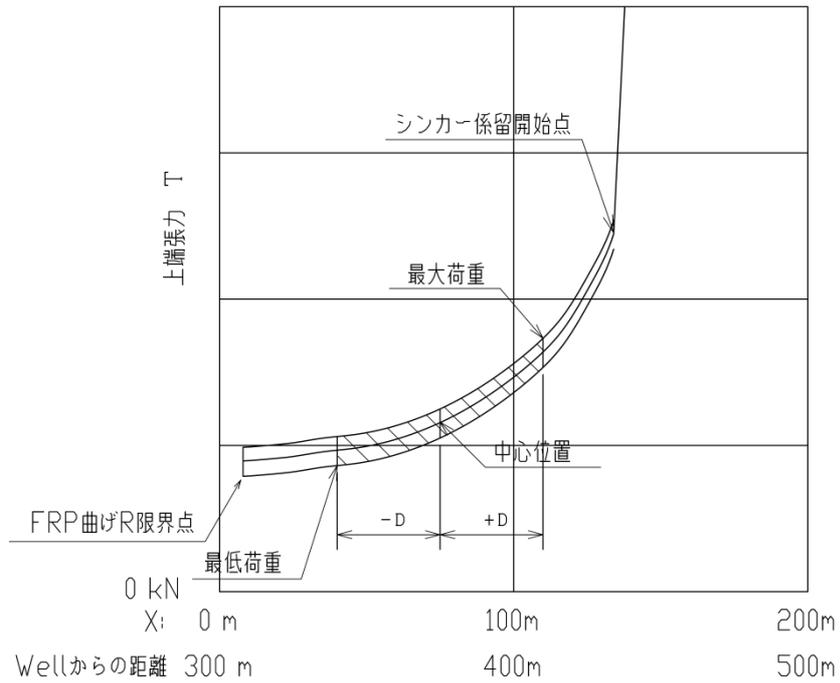


図 2-37 船体動揺を考慮した係留力の変化

2.1.2.4.2. ピックアップ用索投げ機

ピックアップブイの引き上げは、現在 JAMSTEC の観測船等で図 2-38 に示すようなフックを手で投げることで、ブイにつながる浮遊繊維索を引っ掛けて手繰り寄せることを有義波高 3m 程度の波浪中に行っている。



図 2-38 ブイ Pick Up 用フック

観測船等に比べて乾舷が大きくなることが予想されるシャトルシップでは、手で投げる方法ではせいぜい20~30m程度の海面までしか投げることは出来ず稼働率が低くなると考えられるので、船舶でもやい索を岸壁に投げる際に使用されている図 2-39 のようなものを利用することで、数十m遠方に投げるものとする。これは圧搾空気でゴム製円筒形のサンドレッドを射出するだけであり、今回はこれにフックを取り付けなくてはならない。今後、既製品を一部改造して使用することを検討する。

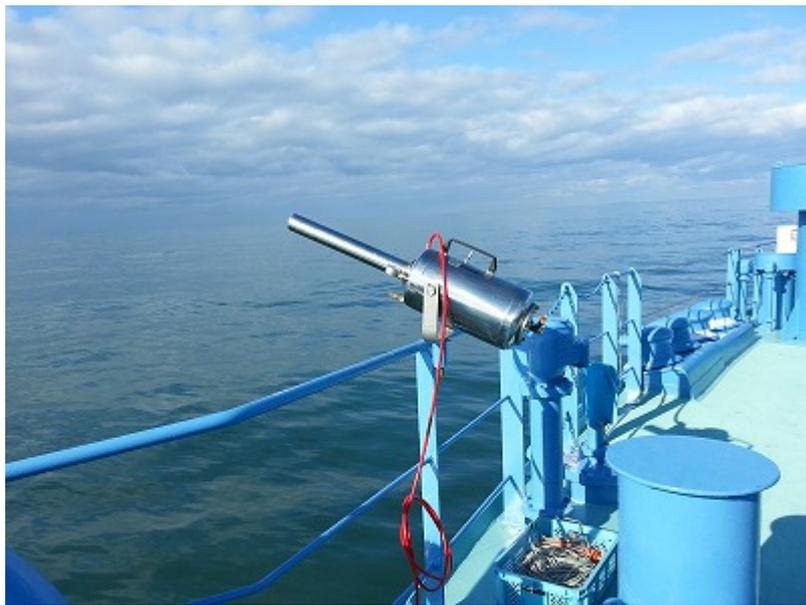


図 2-39 もやい索発射器の例

2.1.2.5. 嵌合機構の検討

船体動揺のある中、安全に嵌合・離脱が出来る装置を開発する必要がある。本装置に似たものとしては北海油田などで多数使用されている **Bow Loading System** がある。(図 2-40 参照)



図 2-40 Bow Loading System の例

(出典) EMSTEC[6]

しかし、これは作動圧力がせいぜい 1MPa 程度で今回のような 10MPa の高圧仕様のもは現存しないようである。

本装置には以下のような仕様が要求される

- 設計温度 5℃の液化 CO₂ を液漏れなく流せること
- 安全な嵌合と離脱
- 最大作動圧 10MPa
- 船体動揺による FRP と船側嵌合装置の角度変化を吸収する機構を持っていること
- FRP 頂部は海底に沈設されるので、腐食や海底との干渉等によって機能を損なわれないこと
- 液化 CO₂ および FRP の重量および船体動揺・波浪外力に耐えること

こうした条件を備えた装置を今後開発する。

2.1.2.5.1. 嵌合装置

1) 検討項目

シャトルシップ方式 CCS 技術の実現には、FRP と船上配管を安全、迅速、合理的に着脱可能で、かつ、気密性を有した嵌合機構が必要となる。この嵌合機構の実現のために必要な検討項目を以下に示す。

(1) システム構成・オペレーションフローの検討

- ① 着脱時
- ② 圧入時
- ③ 緊急離脱時
- ④ 嵌合部の閉止キャップの要否と仕様、着脱方法
- ⑤ 残液パージ、圧抜き方法
- ⑥ 遮断弁、逆止弁などの要否、配置、仕様

(2) プロセス・配管設計(P&ID その他)による設計条件の設定

- ① 配管口径
- ② 設計圧力
- ③ 設計温度
- ④ 設計流量
- ⑤ 緊急停止時の水撃の有無
- ⑥ 液封時のボイルオフガスなどによる異常圧の有無

(3) 懸架荷重の解析

- ① 着脱時
- ② 圧入時
- ③ 緊急離脱時
 - ・ モーメント
 - ・ 軸力
 - ・ せん断力
 - ・ ねじり

(4) 構成要素の設計・試作・検証試験

- ① 嵌合装置(カップリング)および同自動調心機能
- ② 自在装置(スィベルジョイント)および同姿勢制御装置

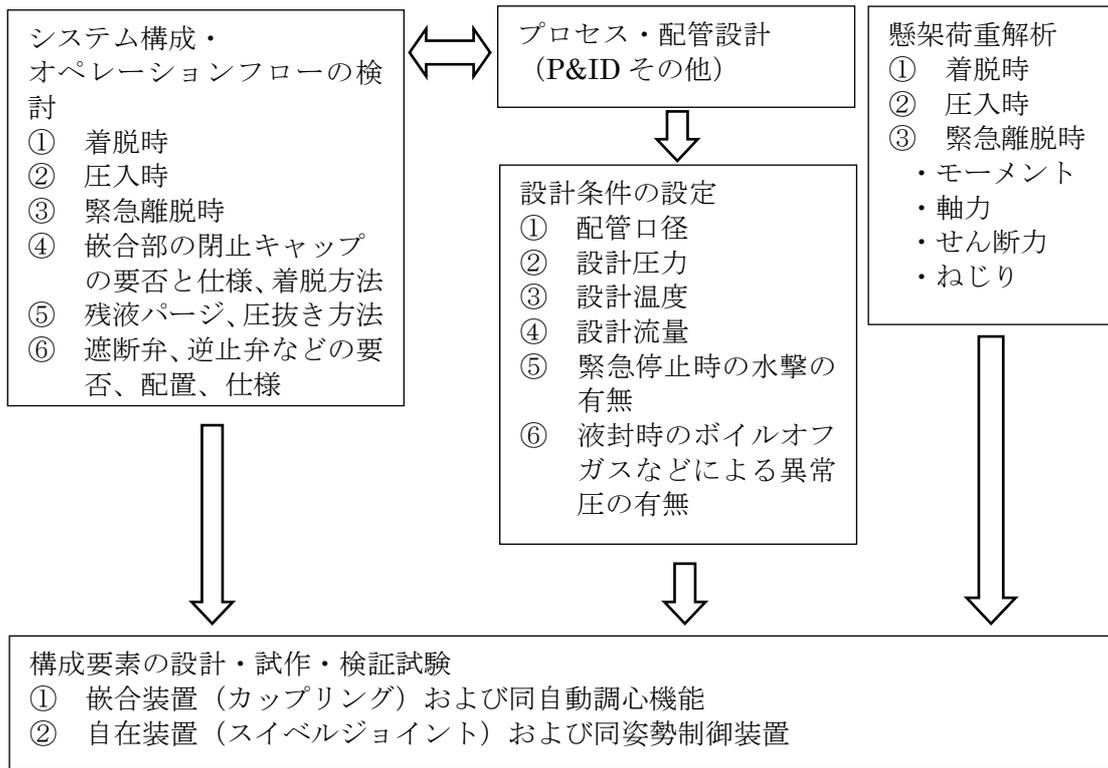


図 2-41 嵌合機構の検討フロー

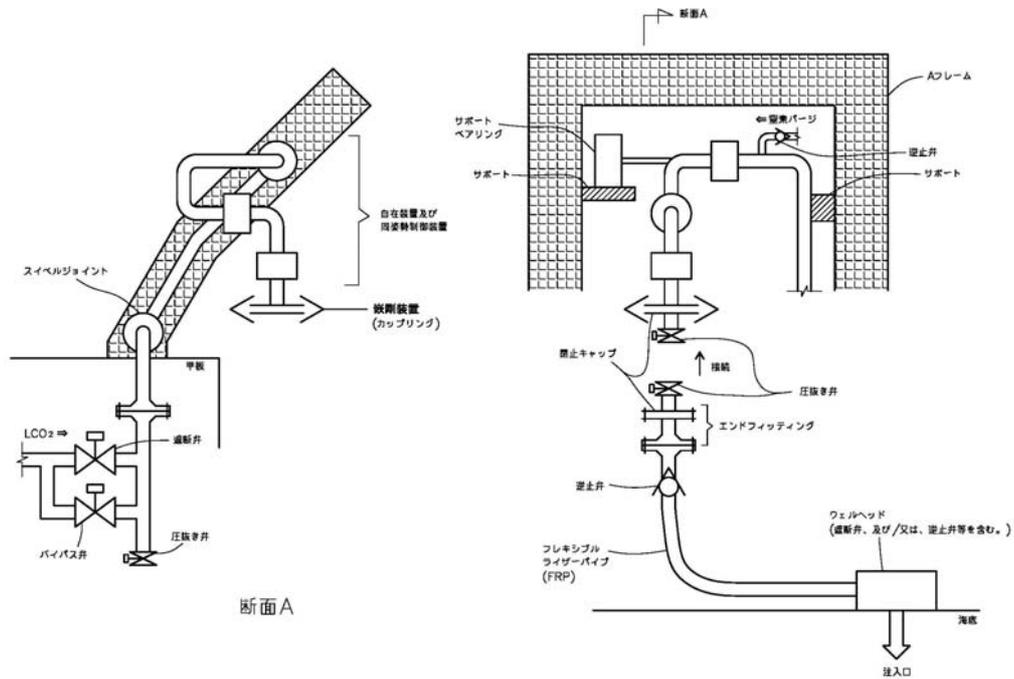


図 2-42 嵌合機構及び周辺装置の参考例

2)工程

(1)初年度(開発設計)

- ①第 1 四半期にシステム構成・オペレーションフローの検討、プロセス・配管設計(P&IDその他)による設計条件の設定、懸架荷重解析を完了させ、構成要素の設計条件を整える。
- ②残り第 2 四半期～第 4 四半期で構成要素の構造検討、強度検討の後、基本設計を完成させる。

(2) 第 2 年度(詳細設計)

- ①構成要素の詳細設計を行う。

(3)第 3 年度(試作・工場内試験)

- ①構成要素の試作機の製作、工場内試験を行う。

(4) 第 4 年度(海洋実証試験及び実現に向けた検討)

- ①前半に海洋実証試験を行う。
- ②後半に実現に向けた検討を行う。

表 2-16 嵌合装置の検討工程表

項目	初年度				第 2 年度				第 3 年度				第 4 年度			
	1 Q	2 Q	3 Q	4 Q	1 Q	2 Q	3 Q	4 Q	1 Q	2 Q	3 Q	4 Q	1 Q	2 Q	3 Q	4 Q
I.開発設計																
1.システム構成・オペレーションフローの検討	■															
2.プロセス・配管設計,設計条件の設定	■															
3.懸架荷重の解析	■															
4.構成要素の基本設計		■	■	■												
II-1 構成要素の詳細設計					■	■	■	■								
II-2 同上試作・工場内試験									■	■	■	■				
III.海洋実証試験													■	■		
IV.実現に向けた検討															■	■

2.1.2.5.2. FRP 逆止弁

1)検討方針・検討内容

(1)設備の概要

急激な大波など、シャトルシップと FRP の嵌合が維持できないような非常時には嵌合機構により、FRP は自動的に離脱される。シャトルシップ側嵌合部及び FRP 側嵌合部は緊急遮断により、液化 CO₂ の流出を防ぐ必要がある。シャトルシップ側嵌合部は緊急遮断弁により遮断することができるが、FRP 側嵌合部は緊急遮断弁を作動させる動力が無いため、緊急遮断弁の代わりに逆止弁を設置し、FRP 内の液化 CO₂ の圧力で弁が閉鎖することにより、液化 CO₂ の流出を防止する機構とする。

(2)検討方針

上記逆止弁は、通常のプラントで一般的に設置されている機器であり、使用圧力、使用温度領域も実績があることから、開発要素は殆ど無いと想定される。従って、本検討では机上検討により、以下に示す項目を検討するものとする。なお、検討の過程で新たな開発や試験が必要となった場合は、検討の中で提案するものとする。

①本設備に適合した逆止弁の形式の選定

②離脱した FRP 内の圧力低下の検討

離脱した FRP はピックアップ・ワイヤーでシャトルシップに固定されているため、FRP 内の圧力を超す、深海に落下する恐れは無い。しかしながら、FRP 端に設置されている圧抜弁を閉じるまでの時間が長い場合、FRP 内の圧力(背圧)が低下し、液化 CO₂ の流出の可能性がある。従って、FRP 離脱後の背圧の変化について検討する。

③離脱した FRP 内の圧力低下の場合の対応方法の検討

(3)検討方法

①逆止弁の形式の選定

FRP 離脱後の FRP 内の圧力、温度等の条件を検討した上で、逆止弁製造企業を調査し、適切な形式の逆止弁を選定する。

②離脱 FRP 内の圧力低下の検討

FRP 離脱後、圧抜弁を閉じるまでの時間を設定し、FRP 内の圧力(背圧)変動についてシミュレーションを行い、液化 CO₂ 流出の可能性を検討する。

③離脱した FRP 内の圧力低下の場合の対応方法の検討

上記②項の検討で、液化 CO₂ 流出の可能性のある場合は、新たな遮断機構の検討と開発の必要性が生じるため、別途、提案するものとする。

2)工程

表 2-17 FRP 逆止弁の検討工程

検討項目	1 年目				2 年目				3 年目				4 年目			
	1Q	2Q	3Q	4Q												
① 逆止弁の形式の選定		■	■													
② 離脱 FRP の圧力低下の検討			■	■	■	■										
③ 圧力低下の場合の対応方法(提案)						■	■	■								

2.1.2.6. ピックアップ・オペレーション実証試験の工程および検討コスト

これまで、ピックアップ・オペレーションに関わる技術について、個別に検討内容を整理した。ここでは、ピックアップ・オペレーション実証試験に向けた主要な技術の検討工程をまとめる。また、2.1.2 項に記した事項に関する検討コストをまとめる。

表 2-18 ピックアップ・オペレーションの検討工程

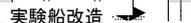
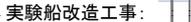
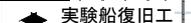
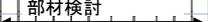
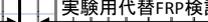
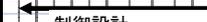
検討項目	1年目			2年目			3年目			4年目													
	4	5	6	7	8	9	4	5	6	7	8	9	4	5	6	7	8	9	4	5	6	7	8
1 ライザーピックアップ 海洋実験基本計画 ①実施体制の検討 ②実験対象項目の検討 ③実験項目毎の評価基準の検討・作成とその実施方法の検討 ④実験海域の設定 ⑤使用する台船の選定 ⑥実験期間中の借用機器の検討	 ライザーピックアップ 海洋実験基本計画: 10か月間																						
2 ライザーピックアップ 装置詳細設計 ①Pick Up作業の手順の検討とそれを実施できる機構(Aフレーム・ウィンチ・嵌合装置等)の検討 ②Aフレームの設計 ③Pick Upウィンチの設計 ④嵌合機構(Aフレーム付の部分とRiser頂部付きの部分)の設計 ⑤油圧駆動源・制御バルブユニットの設計 ⑥配管系統図の設計	 ライザーピックアップ 装置詳細設計: 9か月間																						
3 実験装置製作 ①10MPa Coupling装置 ②Aフレーム ③巻き上げウィンチ ④油圧システム・操作弁 ⑤電気制御盤 ⑥ライザー頂部・逆止弁 ⑦模擬ライザーチェーン ⑧ピックアップブイ ⑨ピックアップライン射出機	 嵌合装置の基礎設計						 嵌合装置の詳細設計																
	 ライザーピックアップ 装置製作:8か月間																						
4 実験船備船・改造・復旧工事 ①実験船の備船 ②実験船の造船所までの回航 ③実験船の改造計画 ④改造工事 ⑤実験船の実験海域までの回航 ⑥実験船の造船所までの回航 ⑦復旧工事 ⑧実験船の借用地までの回航	 実験船用船期間: 4か月間																						
5 海洋実験 ①実験作業 ②実験期間中の機器借用(発電機、海水ポンプ、空気圧縮機等) ③実験期間中の作業船借用(通船、曳船、警戒船等)	 実験船の備船契約																						
	 実験船改造計画: 8か月間						 実験船改造工事: 1.5か月間																
6 実験結果取り纏め ①実験結果の解析・評価 ②報告書作成	 実験船復旧工事: 1.5か月間																						
	 実海域実験: 1か月間																						
解析的検討 ①FRP ②DPS	 部材検討			 性能評価			 実験用代替FRP検討			 確認試験													
	 ロジック構築						 制御設計																

表 2-19 2.1.2 項のコスト一覧表(1) ピックアップ・オペレーション試験

項目	検討項目	Phase-1				Phase-2		計
		H26	H27	H28	H29			
1	ライザーピックアップ海洋実験基本計画 ①実施体制の検討 ②実験対象項目の検討 ③実験項目毎の評価基準の検討・作成とその実施方法の検討 ④実験海域の設定 ⑤使用する台船の選定 ⑥実験期間中の借用機器の検討	7,200	7,100	10,000	10,000		34,300	
2	ライザーピックアップ装置設計 ①Pick Up作業の手順の検討とそれを実施できる機構(Aフレーム・ウインチ・嵌合装置等)の検討 ②Aフレームの設計 ③Pick Upウインチの設計 ④嵌合機構(Aフレーム付の部分とRiser頂部付きの部分)の設計 ⑤油圧駆動源・制御バルブユニットの設計 ⑥配管系統図の設計	3,000	27,500	0	0		30,500	
3	実験装置製作 ①10MPa Coupling装置 ②A フレーム (A フレーム付の船を備船) ③巻き上げウインチ ④油圧システム・操作弁 ⑤電気制御盤 ⑥ライザー頂部・逆止弁 ⑦模擬ライザーチェーン ⑧ピックアップパイプ ⑨ピックアップライン射出機	50,400	17,400	67,400	18,960		154,160	
4	実験船用船・改造・復旧工事 ①実験船用船費用(含む船員費) ②改造工事・復旧工事(約3か月) ③実験船の回航	0	0	15,000	1,098,400		1,113,400	
5	海洋実験 ①実験作業員費用(実験期間:1か月) ②実験期間中の借用機器経費(発電機、海水ポンプ、空気圧縮機等) ③実験期間中の作業船借用費用(通船、曳船、警戒船等)	0	0	0	74,700		74,700	
6	実験結果取り纏め ①実験結果の解析・評価 ②報告書作成	5,000	5,000	10,000	20,900		40,900	
	合計	65,600	57,000	102,400	1,222,960		1,447,960	

表 2-20 2.1.2 項のコスト一覧表(2) FRP/DPS の検討

項	検討項目	Phase-1		Phase-2		計
		H26	H27	H28	H29	
2.1.2.3.1	FRP の検討	31,800	71,200	76,900	3,600	183,500
2.1.2.3.2	DPS の検討	27,320	37,590	18,180	0	83,090
合計		59,120	108,790	95,080	3,600	266,590

2.1.3. シャトルシップ輸送・貯留技術の実現に向けた検討課題

本章では、2.1.1 項および 2.1.2 項に記した課題以外に継続検討の必要な技術について、その課題を整理し、その解決方法・工程・コスト等について記す。

2.1.3.1. 圧縮・脱水設備およびパイプライン輸送設備

1) 検討方針・検討内容

(1) 設備の概要(図 2-43)

火力発電所の排ガスから CO₂ 分離・回収設備で分離・回収された CO₂ は、発電所近傍に設置される CO₂ 圧縮・脱水設備で、CO₂ パイプライン輸送圧力まで昇圧される。CO₂ ガス中の水分は、脱水装置で脱水触媒により所定の露点まで、吸着脱水される。脱水触媒は、水分吸着と高温 CO₂ ガスによる再生を、時間切り替えにより交互に行う。昇圧・脱水された CO₂ は港湾施設近傍に設置される液化設備まで、パイプライン輸送される。パイプライン輸送では安全性確保のため、漏洩検知システムが設置される。

(2) 検討方針

本設備で使用する技術及び本設備を構成する装置・機器類は、一般的にプラントで使用実績のある技術ならびに装置・機器類であり、多くは CO₂ ガスでの実績がある。実績のないものも新たな開発要素は殆ど無いと想定される。

従って、検討項目は以下に示す通りで、机上検討及び現地調査となる。

① 設備設計条件の設定

- 設備能力、年間稼働日数
- CO₂ 分離・回収設備との取り合い条件
- 設備に必要なユーティリティの供給
- 適用法規、適用規格・基準
- 設備設置場所の諸条件(気象条件及び地質データ等)

② 設備費・運転費の検討

- 設備費・運転費の試算
- CO₂ ガスパイプライン輸送圧力の検討
- 設備費低減・省エネルギー化の検討

③ 緊急時及び気象条件による不稼働時の対応方法の検討

④ CO₂ ガスパイプライン輸送の調査・検討

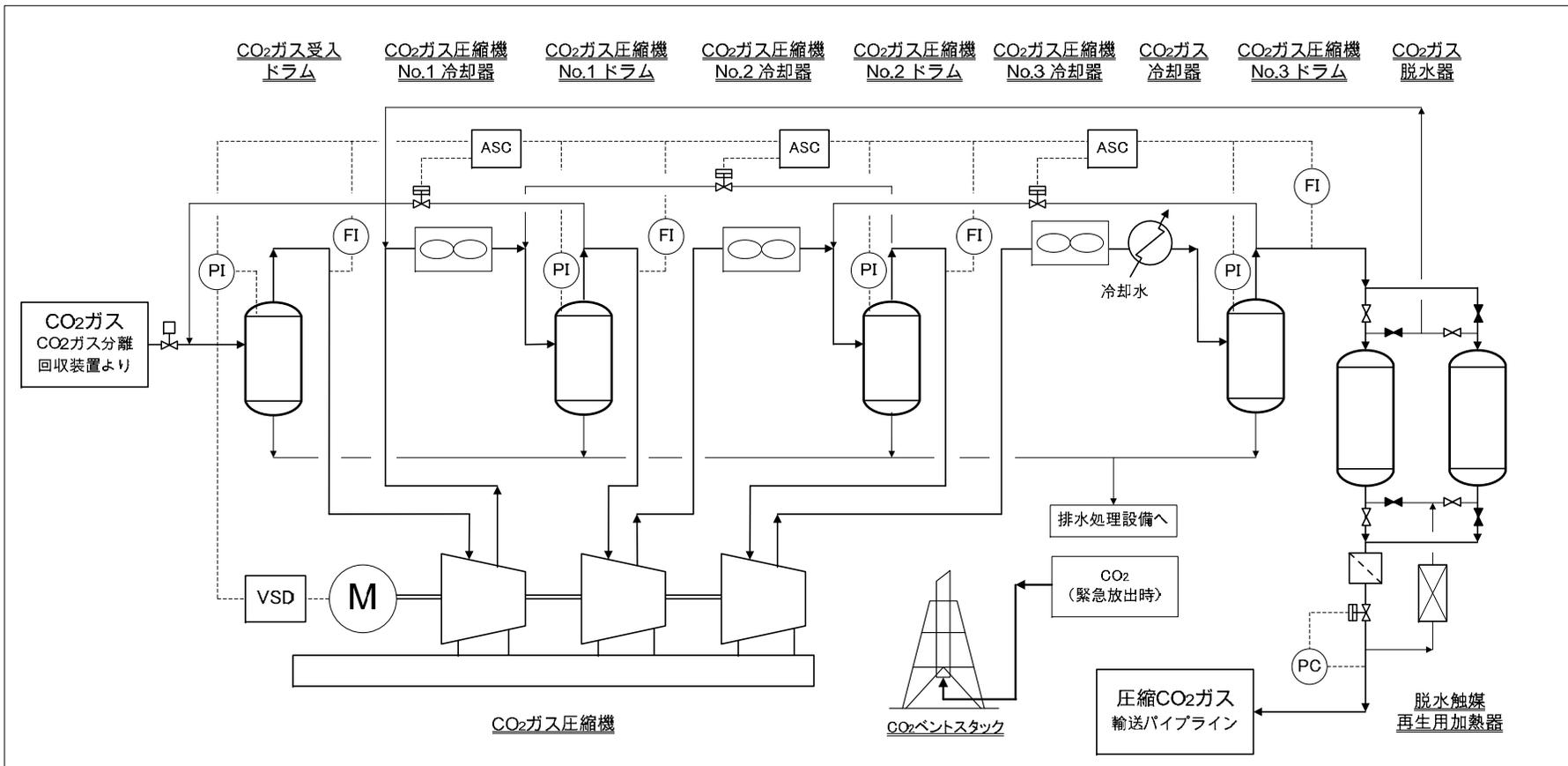


図 2-43 CO2 圧縮・脱水設備概略フローシート

(3)検討内容

①設備設計条件の設定(机上検討)

本設備の上流設備である CO2 分離・回収設備担当企業及び発電所より、下記情報を受領し、検討するものとする。

a. CO2 ガス受入量： ton/日(CO2 として)

事前の検討では 1,000 ton/日と仮定したが、その確認を行う。

b. 平均年間稼働日数：日/年

石炭焚火力発電所の定修は一般的に、数年サイクルで定められており、毎年の定修期間は異なるので、サイクル期間、毎年の定修期間の情報を受領し、本設備で適用可能か検討する。

上記で定まる稼働可能日数及び圧入地点洋上の気象・波高条件から定まる圧入日数から、シャトルシップ CCS の年間平均圧入量(処理量)を検討する

c. 受入 CO2 条件：

下記データを受領し、括弧内は参考として示す一般的条件と比較検討し、検討条件として設定する。

- 温度： (40℃)
- 圧力： (0.01MPaG 以上)
- 組成：(dryvol%)
 - CO2： (99.9 dryvol%以上)
 - 水分： (飽和)
 - 硫黄分： (1dryvol ppm 以下)
 - その他： (0.1 dryvol ppm 以下)

不純物がある場合、不純物の除去をする必要性を検討し、必要がある場合は除去方法を検討する。

d. 設備に必要なユーティリティの供給

本設備では、下記のユーティリティを必要とする。これらが、上流設備である CO2 分離・回収設備及び発電所から供給可能であれば、利用し、供給不可であれば、設備内に供給施設を設置することを検討する。

➤ 電力：供給可能電力の種類

特に、本設備では特別高圧(66kV)の電力を必要とすることから、特別高圧(66kV)の電力が受電可能かを確認する。

- 冷却水(CW)：供給可能量、供給/戻し温度及び圧力
供給不可又は不足する場合は、設備内に冷却水供給施設の設置を検討する。
 - スチーム：供給可能量、供給温度及び圧力
脱水触媒再施用の熱源として、高温スチームが受領可能であれば利用し、供給不可場合は他の方法で再生することを検討する。
 - 工業用水(IW)：供給可能量、供給温度及び圧力
 - 窒素(N₂)：供給可能量、供給温度及び圧力
運転開始時に必要となるが、必要量が供給不可の場合は、窒素コンテナによる供給を検討する。
 - 計装用空気(IA)、プラント空気(PA)、飲料水(PW)
本設備内に供給施設の設置を検討する。
- e. 適用法規、適用規格・基準
CO₂ 分離・回収設備の適用法規及び適用規格・基準を受領し、本設備の適用法規及び適用規格・基準の設定の参考とする。
- f. 気象条件
気象条件は、近傍の発電所及び CO₂ 分離・回収設備と同じ条件が望ましいため、下記の気象データを受領し設定する。なお、気象条件については、気象庁の地域別データから設定する方法もある。
- 気温(℃)：年間平均温度、最高温度、最低温度、空冷式熱交換器用夏季設計温度
 - 湿度(%)：年間平均湿度
 - 風速(m/s)：最大瞬間風速、最大風速
 - 降水量：日最大(mm/日)、時間最大(mm/hr)、設計基準降水量(mm/hr)
 - 降雪量：最大降雪深(cm)、年間降雪日数(日)、設計基準降雪深(cm)
- g. 地質データ
地質データは実測の必要があるが、検討段階では近傍のデータを参考値として設定する方法とするため、以下のデータを受領し、検討する。なお、設計基準面は、EL = GL ± 0 とする。
- GL よりの深度範囲(m)、N 値

②設備費・運転費の検討(机上検討)

将来の実証設備建設に向け、設備の概略設計を実施し、以下の点を検討する。

a. 設備費・運転費(CO₂ 処理費)の試算

GCCSI の報告書では、CO₂ 圧縮・脱水設備はスコープ外で、参考値として、CO₂ 圧縮・液化設備の概略設備費・運転費が報告されているため、本設備の範囲に合わせて、概略設備費・運転費の試算を実施する。

b. CO₂ ガスパイプライン輸送圧力(液化 CO₂ の圧力)の検討

GCCSI の報告書では、液化 CO₂ の圧力・温度条件は、 -10°C 、2.65 MPa(GCCSI Phase-1 報告書)及び -20°C 、1.97 MPa(GCCSI Phase-2 報告書)の2点について検討されているが、概略運転費からはほぼ同一である。本検討とは設備の範囲が異なること、及び CO₂ ガスパイプライン輸送が範囲に追加されていることから、検討の必要性がある。

実証装置の液化温度・圧力決定のため、本検討では両者の条件に合わせて、概略設備費・運転費の比較・検討を行う。

c. 設備費低減・省エネルギー化の検討

第(2)項で示したように、本設備で使用する技術及び本設備を構成する装置・機器類は、一般的にプラントで使用実績のある技術ならびに装置・機器類であるが、個々の技術、機器、システムとしての設備には、設備費低減・省エネルギー化或いは安全性向上の可能性があるため、設備の概略設計を通して、検討する。

③緊急時及び気象条件による不稼働時の対応方法の検討(机上検討)

a. 緊急時の対応方法

緊急時としては、本設備の異常や事故による場合と上流・下流設備の緊急停止による場合との2種類がある。本設備の対応としては、以下に示す本設備の緊急停止又は待機条件での運転継続が想定される。

- 本設備の緊急停止：緊急停止時の設備内の CO₂ ガスの排気方法及び必要な機器の検討
- 待機条件での運転継続：待機条件及び必要な機器の検討

b. 圧入地点の気象条件による不稼働時の対応

緊急時では無いため、①b 項「待機条件での運転継続の検討」に含める。

④CO₂ ガスパイプライン輸送設備の調査・検討(机上検討、現地調査)

CO₂ ガスパイプラインは、公道に埋設されるものと想定される。従って、以下の点を検討する。

a. CO₂ ガスパイプラインのルート

検討対象地が決定された後、埋設ルート、距離、付近の状況等の調査、及び CO₂ 分離・回収設備担当企業より関連する情報を受領し、建設方法を検討する。

b. 漏洩検知システムの調査・検討

国内の天然ガス輸送パイプラインに適用されている漏洩検知システムについて調査し、本設備への適用を検討する。

c. 公道に埋設されるガスパイプラインに関する認可等

ガスパイプラインを、公道に埋設される場合、通常、省庁及び自治体の認可が必要である。同様な認可、手続きが必要か調査・検討するとともに、認可取得までの実施事項、工程を検討する。

2) 工 程

検討工程は、平成 26 年度第 2 四半期までに、CO2 分離・回収設備担当企業が決定し、必要な情報が受領できる前提で、検討した。

表 2-21 圧縮・脱水設備及びパイプライン輸送設備検討工程

検討項目	1 年目				2 年目				3 年目				4 年目			
	1Q	2Q	3Q	4Q												
CO2 分離・回収設備 担当企業決定・ 情報受領	■	■														
①設備設計条件の設 定			■	■												
②設備費・運転費の 検討			■	■	■	■	■	■								
③緊急時及び気象条 件による非圧入時 の対応方法の検討					■	■	■	■								
④CO2 ガスパイプ ライン輸送設備の調 査・検討			■	■	■	■	■	■								

3) 設備費

圧縮・脱水設備及びパイプライン輸送設備の概略設備費及び設備敷地面積は、GCCSI の報告書を参考に試算すると、以下に示す通りとなる。

(1) 設備費

- ①圧縮・脱水設備： 約 1,300 百万円
- ②パイプライン輸送設備： 約 300 百万円 (漏洩検知システムを含む)

(2) 設備敷地面積

- ①圧縮・脱水設備： 約 30m x 40m (1,200m²)

上記は、参考値であり、平成 26 年度以降の設備費・運転費(CO2 処理費)の試算で、変更することがある。

2.1.3.2. CO₂ 液化・一時貯留・ローディング設備

1) 検討方針・検討内容

(1) 設備の概要

CO₂ 圧縮・脱水設備よりパイプライン輸送された CO₂ は、港湾設備近傍に設置される CO₂ 液化設備にて冷凍設備で製造する冷媒にて所定温度で液化され、液化 CO₂ 一時貯留タンクに貯留される。貯留された液化 CO₂ はローディング設備によりシャトルシップの CO₂ タンクに積載され、日本近海の圧入地点まで船舶輸送される。

シャトルシップの CO₂ タンクに液化 CO₂ を積載する時には、積載液化 CO₂ により押し出される CO₂ ガスをローディング設備(均圧管)により、液化 CO₂ 一時貯留タンクに戻し、シャトルシップの CO₂ タンクの圧力上昇及び液化 CO₂ 一時貯留タンクの圧力低下を防止する。

液化 CO₂ 一時貯留タンクで外部入熱により発生する CO₂ ガス(BOG : Boil Off Gas)は、冷媒にて再液化し、タンクに戻される。

(2) 検討方針

本設備で使用する技術及び本設備を構成する装置・機器類は、一般的にプラントで使用実績のある技術ならびに装置・機器類である。多くは CO₂ ガス又は液化 CO₂ での実績があることから、開発要素は余り無いと想定される。

従って、検討項目は以下に示す通りで、机上検討となる。

- ① 設備設計条件の確認
 - 設備能力、稼働率
 - 設備に必要なユーティリティの供給
 - 適用法規、適用規格・基準
 - 設備設置場所の諸条件(気象条件、地質データ等)
- ② 設備費・運転費の検討
 - 設備費・運転費の試算
 - CO₂ ガス液化圧力、液化用冷媒の検討
 - 設備費低減・省エネルギー化の検討
- ③ 緊急時及び気象条件による不稼働時の対応方法の検討

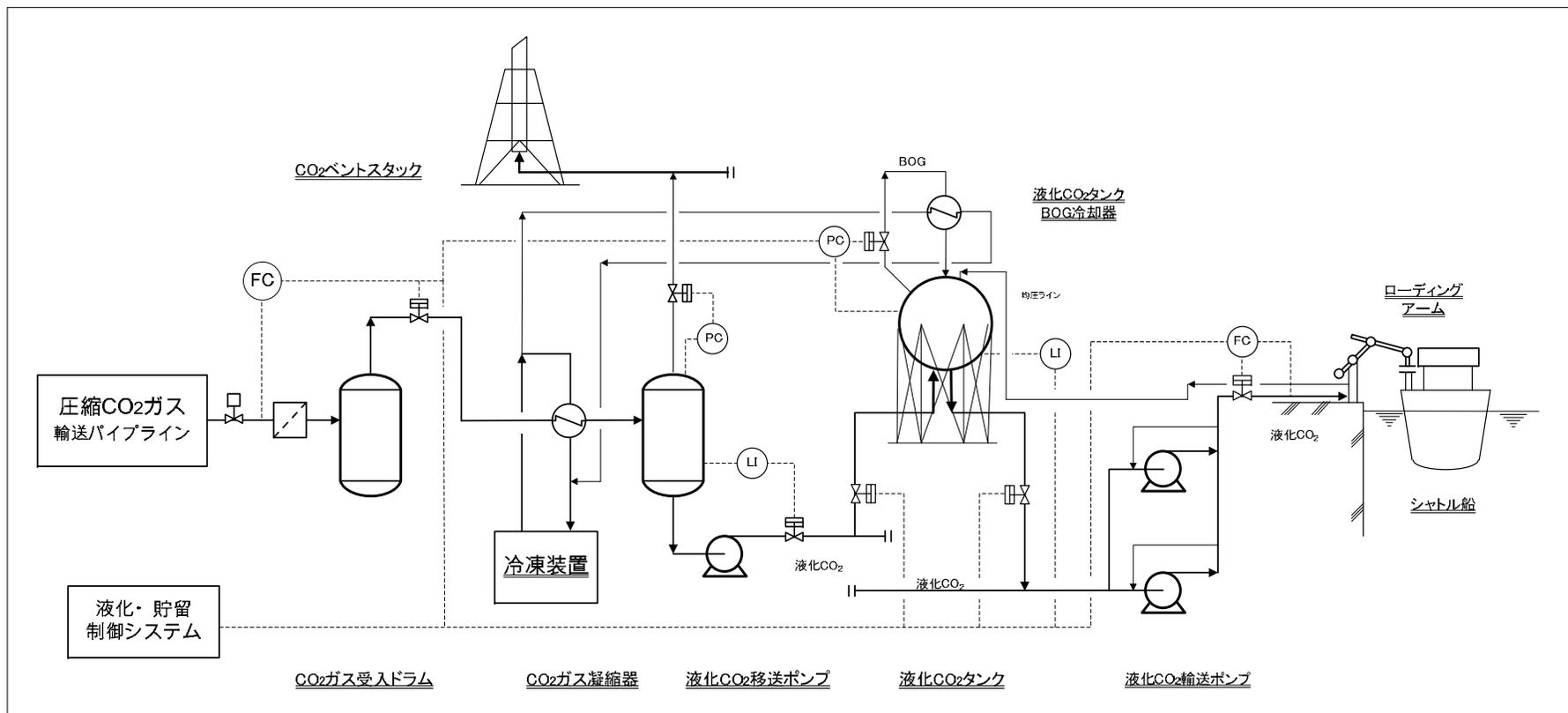


図 2-44 CO₂ 液化・一時貯留・ローディング設備概略フローシート

2)検討内容

(1)設備設計条件の設定(机上検討)

本設備の設備設計条件は、上流設備である圧縮・脱水及びCO₂ガスパイプライン輸送設備と基本的に同じとなる。「圧縮・脱水設備およびパイプライン輸送設備」で示したように、担当企業及び発電所より、下記情報を受領し、検討するものとする。

- ① CO₂ガス受入量： ton/日(CO₂として)
圧縮・脱水設備及びCO₂ガスパイプライン輸送設備と同じとする。
- ② 平均年間稼働日数：日/年
圧縮・脱水設備及びCO₂ガスパイプライン輸送設備と同じとする。
- ③ 受入CO₂条件：
圧縮・脱水設備のCO₂送出条件及びCO₂ガスパイプライン輸送設備の設計条件より、圧力損失、温度低下を算出し、検討条件として設定する。
 - 温度： °C
 - 圧力： MPaG
 - 組成：(dryvol%)
圧縮・脱水設備及びCO₂ガスパイプライン輸送設備と同じとする。
- ④ 一時貯留条件：
 - a. 温度、圧力：「圧縮・脱水設備およびパイプライン輸送設備」1)(3)②bの検討結果とする。
なお、GCCSIの報告書では、液化CO₂の圧力・温度条件は、-10°C、2.65 MPa(GCCSI Phase-1 報告書)及び-20°C、1.97 MPa(GCCSI Phase-2 報告書)の2点について検討される。
 - b. 貯留能力：GCCSIの報告書に基づき、2日分(6,000ton)を初期値とするが、2.1.1.3「船舶輸送定期運用・条件変動に対するフレキシビリティ」の検討と合わせて、貯留日数を検討する。
- ⑤ ローディング条件：
 - a. 温度、圧力：「圧縮・脱水設備およびパイプライン輸送設備」1)(3)②bの検討結果とする。
 - b. 積載時間：GCCSIの報告書に基づき、接岸から出航までの時間を初期値、8時間(積載6時間、ローディングアーム接続/脱着、給油等2時間)とするが、前項同様、2.1.1.3「船舶輸送定期運用・条件変動に

対するフレキシビリティ」の検討と合わせて、積載時間を検討する。

⑥ 設備に必要なユーティリティの供給

本設備では、下記のユーティリティを必要とする。これらについては、設備内に供給施設を設置することを検討する。

- 電力：本設備では特別高圧(66kV)の電力を必要とすることから、特別高圧(66kV)電力の受電のため、以下について調査・検討する。
 - 特別高圧電力の接続地点及び距離
 - 特別高圧電力引込のための手続き、申請から受電可能までの期間
- 冷却水(CW)：冷却水として海水の利用の可能性の調査・検討。利用不可の場合は、設備内に冷却水供給施設の設置を検討する。
- 工業用水(IW)：工業用水の利用の可能性及び接続地点の調査・検討。
- 窒素(N₂)：窒素は運転開始時に必要となるため、必要量を窒素コンテナによる供給として、検討する。
- 計装用空気(IA)、プラント空気(PA)、飲料水(PW)
本設備内に供給施設の設置を検討する。

⑦ 適用法規、適用規格・基準

本設備は他の設備とは離れた独立の設備とし、適用法規及び適用規格・基準を検討する。圧縮・脱水設備及びCO₂ガスパイプライン輸送設備の適用法規及び適用規格・基準を参考する。

⑧ 気象条件

気象条件は、圧縮・脱水設備及びCO₂ガスパイプライン輸送設備とは余り離れていないことを想定し、同じ条件として検討する。

- a. 気温(°C)：年間平均温度、最高温度、最低温度、空冷式熱交換器用夏季設計温度
- b. 湿度(%)：年間平均湿度
- c. 風速(m/s)：最大瞬間風速、最大風速
- d. 降水量：日最大(mm/日)、時間最大(mm/hr)、設計基準降水量(mm/hr)
- e. 降雪量：最大降雪深(cm)、年間降雪日数(日)、設計基準降雪深(cm)

⑨ 地質データ

地質データは実測の必要があるが、検討段階では近傍のデータを参考値と設定する方法とするため、以下のデータを受領し、検討する。なお、設計基準面は、EL = GL ± 0 とする。

- GL よりの深度範囲(m)、N 値

(2)設備費・運転費の検討(机上検討)

将来の実証設備建設に向け、設備の概略設計を実施し、以下の点を検討する。

① 設備費・運転費(CO₂処理費)の試算

GCCSI の報告書では、参考値として、CO₂ 圧縮・液化設備の概略設備費・運転費が報告されているため、本設備の範囲である CO₂ 液化設備と一時貯留設備に合わせて、概略設備費・運転費の試算を実施する。

② CO₂ 液化温度・圧力の検討

GCCSI の報告書では、液化 CO₂ の圧力・温度条件は、 -10°C 、2.65 MPa(GCCSI-1 報告書)及び -20°C 、1.97 MPa(GCCSI-2 報告書)の 2 点について検討されているが、概略運転費からはほぼ同一である。本検討とは設備の範囲が異なること、及び CO₂ ガスパイプライン輸送が範囲に追加されていることから、検討の必要性がある。

実証装置の液化温度・圧力決定のため、本検討では両者の条件に合わせて、概略設備費・運転費の比較・検討を行う。

③ 設備費低減・省エネルギー化の検討

第(2)項で示したように、本設備で使用する技術及び本設備を構成する装置・機器類は、一般的にプラントで使用実績のある技術並びに装置・機器類であるが、個々の技術、機器、システムとしての設備には、設備費低減・省エネルギー化或いは安全性向上の可能性があるため、設備の概略設計を通して、検討する。

(3)緊急時及び気象条件による不稼働時の対応方法の検討(机上検討)

① 緊急時の対応方法

緊急時としては、本設備の異常や事故による場合と及び上流・下流設備の緊急停止による場合との 2 種類がある。本設備の対応としては、以下に示す本設備の緊急停止又は待機条件での運転継続が想定される。

a. 本設備の緊急停止：緊急停止時の設備内の CO₂ ガスの排気方法及び必要な機器の検討

b. 待機条件での運転継続：待機条件及び必要な機器の検討

② 圧入地点の気象条件による不稼働時の対応

緊急時では無いため、前 a 項「待機条件での運転継続の検討」に含める。

3)工程

検討工程は、平成 26 年度第 2 四半期までに、CO2 分離・回収設備担当企業が決定し、必要な情報が受領できる前提で、検討した。

表 2-22 CO2 液化・一時貯留・ローディング設備検討工程

	1 年目				2 年目				3 年目				4 年目			
	1Q	2Q	3Q	4Q												
CO2 分離・回収設備担当企業決定・情報受領	■	■														
①設備設計条件の設定			■	■	■	■										
②設備費・運転費の検討				■	■	■	■	■								
③緊急時及び気象条件による非圧入時の対応方法の検討						■	■	■								

4)設備費

液化・一時貯留・ローディング設備の概略設備費及び設備敷地面積は、GCCSI の報告書を参考に試算すると、以下に示す通りとなる。

(1)設備費

① 液化設備： 約 1,300 百万円

② 一時貯蔵・ローディング載設備：

液化 CO2 の温度・圧力により異なる。Case-1 を -10°C 、2.65 MPa、Case-2 を -20°C 、1.97 MPa とすると、以下に示す通りとなる。

➤ Case-1： 約 5,700 百万円

➤ Case-3： 約 5,100 百万円

なお、上記金額には土地代は、含んでいない。

(2)設備敷地面積

① 液化設備： 約 30m x 30m (900m²)

② 一時貯留・ローディング設備：

➤ Case-1： 約 55m x 90m (4,950m²)

➤ Case-2 : 約 55m x 75m (4,125m²)

上記は、参考値であり、平成 2 年度以降の設備費・運転費(CO₂ 処理費)の試算で、変更することがある。

2.1.3.3. シャトルシップ本体

1)検討方針・検討内容

(1)設備の概要

陸上で発生した CO₂ を液化して貯留するタンクから本船に積み込み、貯留サイトまで輸送する。タンク容量 1500m³ のパイロブタンクを 2 個有する船で、3000 トンの CO₂ を輸送する。

貯留タンクから -10℃～-20℃で積み込み、圧入時には 5℃、10MPa まで昇温・昇圧する。

(2)検討内容および方針(机上検討)

関連する装置の仕様が確定した後、装置の性能、操作を満足できるような船とする。検討すべき項目としては次のとおり。

- ①海底へ圧入するフレキシブル・ライザー・パイプとの嵌合位置および操作クレーンの設置場所
 - ・中央部船側か船首部か
 - ・クレーンの力量、ピックアップロープ巻き込みドラムのサイズ
 - ・安全な機器操作のために設けるプラットフォームの場所およびサイズ
- ②CO₂ 昇温・昇圧装置の設置場所
 - ・必要な機器のサイズ
 - ・それらの機器の設置場所(機器サイズが決まらなると設置場所の検討ができない)
 - ・船首部(ボースンストア)に配置すると、デッキ高さが高くなる。見透しの問題があればブリッジの位置を上げる必要あり
- ③カーゴタンク
 - ・CO₂ タンクの試設計を実施。
- ④適用法規・船級規則
 - ・適用法規・船級規則の調査。最新の海外動向も含む。

- ・国土交通省、日本海事協会と調整して法規・規則を整備する。
- ・本船に必要な法規・規則要件を整理して、仕様に織込む。

⑤設計要件

- ・複数の圧入海域を想定した必要船速、航続距離等を設定。
- ・輸送中の船舶より発生する CO2 排出量の妥当な目標レベルを設定。

⑥基本設計

- ・上記で設定した要件を満たすシャトルシップの計画設計、電力等計算、配置設計を実施。
- ・設計要件の見直しを実施しながら、主寸法・主要目を決める。
- ・複数の圧入海域に対応できる仕様も検討。

⑦概算見積

- ・シャトルシップ建造に必要な費用を概算見積

2.1.3.4. シャトルシップ上の昇圧設備

1)検討方針・検討内容

(1)設備の概要(図 2-45)

圧入地点でシャトルシップと CO2 フレキシブル・ライザー・パイプ(FRP: Flexible Riser Pipe)が嵌合される。シャトルシップで輸送された液化 CO2 は、所定圧力まで昇圧された後、海水及びシャトルシップの発電機の排気ガスから熱回収した温水により所定の温度まで昇温され、FRP を通して海底に設置される抗口設備に送られる。液化 CO2 圧入によるタンク内の圧力低下を防止するため、圧入液化 CO2 の一部が気化され、タンクに戻される。

本設備の範囲はタンクに設置される CO2 移送ポンプから嵌合部手前までとする。また、発電機排気ガスの温水による熱回収システム系は、発電機の機器の一部として、本設備の範囲外とする。

(2)検討方針

本設備で使用する技術及び本設備を構成する装置・機器類は、一般的にプラントで使用実績のある技術ならびに装置・機器類である。液化 CO2 での実績が無い機器類もあるが、他流体での実績は多く、信頼性も高い。従って、システム化の検討は必要ではあるが、開発要素は殆ど無いと想定される。

従って、検討項目は以下に示す通りで、机上検討となる。なお、検討の過程で新たな開発や試験が必要となった場合は、検討の中で提案するものとする。

- ① 設備設計条件の設定
 - 設備能力
 - 圧入条件
 - 設備にユーティリティの供給方法
 - 適用法規、適用規格・基準
- ② 設備費・運転費の検討
 - 設備費・運転費の試算
 - CO₂ 液化温度・圧力の検討
 - 圧入液化 CO₂ ガスの昇温方法、設備費低減の検討
- ③ 緊急時の対応方法の検討

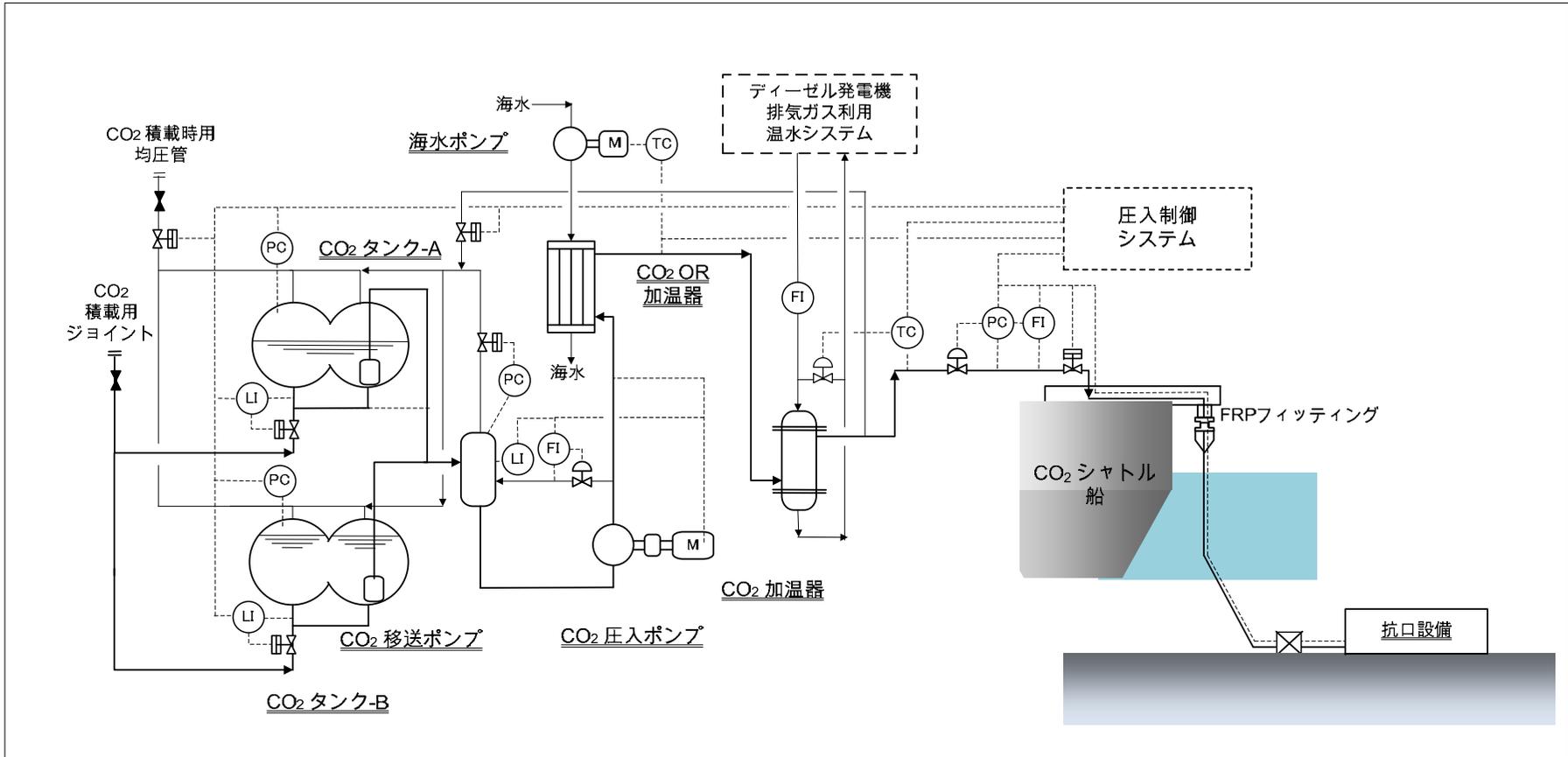


図 2-45 シャトルシップ上の昇圧設備概略フローシート

(3)検討方法

① 設備設計条件の設定(机上検討)

a. 設備能力

- 圧入量：3,000ton/シャトルシップとする
- 圧入時間：圧入は 24 時間(1 日)とするが、この時間にはピックアップブイのピックアップ、FRP の嵌合/脱着の時間を含んでいる。GCCSI の報告書では、ブイのピックアップ、FRP の嵌合/脱着の時間を 2 時間とし、圧入時間を 22 時間としている。設備能力としては、どの程度の余裕を持つかを検討する。最終的には、1.2 に示されている「ピックアップ・オペレーション試験」の結果を反映するのとする。

b. 圧入条件

シャトルシップ CCS の基本条件と同じとする。

- 圧力： 10MPa

c. 温度： 5℃ 設備に必要な用役の供給方法

- 電力：シャトルシップのディーゼル発電機より受電するものとして、受電設備を検討する。
- 海水：海水温度は圧入地点で異なるため、予想される圧入地点の海水温度を調査・検討し、3 ケースを選定する。
- 温水：ディーゼル発電機排気ガスから熱回収した温水として、受領温度/戻し温度を検討する。

d. 適用法規、適用規格・基準：船舶に適用される適用規格・基準の適用を検討する。

② 設備費・運転費の検討(机上検討)

将来の実証設備建設に向け、設備の概略設計を実施し、以下の点を検討する。

④ 設備費・運転費(CO₂ 処理費)の試算

GCCSI の報告書では、船上の昇圧設備が報告されているが、CO₂ 液化温度・圧力、圧入地点の海水温度で異なっている。本検討では、第(1)③a 項の海水温度と CO₂ 液化温度・圧力を組合せ、ケーススタディを行い、概略設備費・運転費の試算を実施する。

⑤ CO₂ 液化温度・圧力の検討

GCCSI の報告書では、液化 CO₂ の圧力・温度条件は、-10℃、2.65 MPa(GCCSI Phase-1 報告書)及び -20℃、1.97 MPa(GCCSI Phase-2 報告書)の 2 点について検討されているが、概略運転費から

はほぼ同一である。本検討では他の設備と合わせて、実証装置の液化温度・圧力決定のため、概略設備費・運転費の比較・検討を行う。

⑥ 圧入液化 CO₂ ガスの昇温方法、設備費低減の検討

昇温方法は、海水温度が最低 19℃の GCCSI Phase-1 報告書と最低 8℃の GCCSI Phase -2 で異なり、GCCSI Phase -1 では通常の管式熱交換器による昇温方法、GCCSI Phase -2 ではオープンラック方式の熱交換器とディーゼル発電機排気ガスから熱回収した温水による通常の管式熱交換器の組合せの昇温方法を採用している。本検討では、GCCSI Phase -2 の昇温方法を基に、出来るだけ広い範囲の海域で使用可能な昇温方法を検討する。また、設備費低減と小型化も同時に検討する。

なお、第(2)項で示したように、本設備で使用する他の技術及び本設備を構成する装置・機器類は、一般的にプラントで使用実績のある技術並びに装置・機器類であるが、個々の技術、機器は、設備費低減・省エネルギー化或いは安全性向上の可能性があるので、同時に検討する。

③ 緊急時の対応方法の検討(机上検討)

本設備の緊急停止時の設備内の液化 CO₂ の排出方法及び必要な機器を検討する。

2) 工 程

表 2-23 シャトルシップ上の昇圧設備検討工程

検討項目	1 年目				2 年目				3 年目				4 年目			
	1Q	2Q	3Q	4Q												
① 設備設計条件の設定			■	■	■											
② 設備費・運転費の検討				■	■	■	■	■								
③ 緊急時の対応方法の検討					■	■	■	■								

3) 設備費

船上の昇圧設備の概略設備費及び設備概略サイズは、GCCSI の報告書を参考に試算す

ると、以下に示す通りとなる。

- (1) 設備費： 約 840 百万円。
- (2) 設備概略サイズ： 幅 12m 奥行 15m 高さ 4.5m

上記は、参考値であり、平成 2 年度以降の設備費・運転費(CO2 処理費)の試算で、変更することがある。

2.1.3.5. FRP

1) ピックアップ・オペレーション試験と並行して検討を進めるべき項目

①浮体動揺(動的挙動)および潮流による FRP の変形、ストレスの検討

ピックアップ・オペレーション時、操業時、FRP は海水中に懸垂された状態のため、シャトルシップの動揺や潮流等により、変動荷重を受けることになる。対象海域の海象条件によっては、FRP に発生する変形やストレスが大きく、FRP 構造や FRP システムの改善が必要となる可能性も考えられる。FRP の動揺を挙動解析により評価し、FRP および FRP システムの適正を評価するべきであると考えられる。

- ・ 工程：8ヶ月

2) ピックアップ・オペレーション試験後から実用化までに検討すべき項目

①FRP 構造

CO2 圧入用 FRP 構造の検討課題としては軽量化が重要であり、特に圧入海域の水深が深くなると軽量化の必要性が更に高まる。1.2.3.1 に述べたように現在でも軽量化の案は図られているが、今後も素材の調査、開発等を進めて更に軽量化を進める事が望ましい。

海底からの引き揚げや吊り下げを頻繁に繰り返すため耐屈曲疲労性も重要であり、今後 FRP 試作の際には繰り返し屈曲疲労性を十分に把握し、更にその性能向上を図る必要がある。海底面の状態によっては外部シースの摩耗が進行し、FRP に深刻なダメージを与える可能性がある。外部シースの摩耗設計で対応できる可能性もあるが、必要に応じて防護管を取り付け、摩耗に対する対策を検討する必要がある。また、FRP の海底着底部や上部端末との境界部では局部的に大きな曲率変化が発生することも考えられ、FRP の可撓性の向上も重要である。更に大水深海域や高波浪の海域での圧入作業時には浮体の揺動によって FRP の海底着底点で過大な圧縮力が発生する可能性があり、圧縮強度の把握とその特性向上についても考慮する必要がある。

②FRP ピックアップシステム

圧入口から海底に直線状に延線した FRP 先端をシャトルシップがどの位置でピックアップするかが重要な検討課題となる。シャトルシップが圧入口から遠過ぎる位置でピックアップすると、その後の圧入作業時間中にシャトルシップの揺動で FRP 上端部の張力や入水角度が許容範囲を超える恐れがある。シャトルシップが圧入口に近過ぎる位置でピックアップすると、シャトルシップの動揺で FRP 着底部の曲率半径が許容値以下になる事や FRP 着底部で過大な圧縮力が生じて座屈破壊を招く事がある。圧入海域の水深や FRP の海底延線長等を考慮して最適なピックアップ位置を検討する必要がある。

③圧入作業時の FRP 形状維持

圧入作業中のシャトルシップが風や潮流に洋上を移動する場合、その移動可能量に関しては遠方、近接のいずれの方向についても限界が存在することは先に述べた。更にシャトルシップが波浪に応答してダイナミックに揺動する移動分についても十分に配慮する必要がある。海中に懸垂された FRP 区間では潮流による発生力や変形も考慮する必要がある、特に横方向潮流で FRP 着底区間に大きな捩れ変形やキンクが発生しないよう対策検討が必要と考えられる。

④モニタリングシステム

安全で安定的なオペレーションを長期間維持するためには、FRP の状態検知用モニタリングシステムが必要と考えられる。FRP の位置情報や破損状態を検知するセンサーを FRP に組み込む、もしくは外部に取り付ける構成が挙げられる。

⑤コスト

実際の FRP コストは周辺部材も含めて 3 億円程度と見積もられる。この値は対象海域によって異なり、変動幅は決して小さくない。

⑥FMECA

本システムにおける FRP の全ての故障モードを列挙し、その重要性を評価、対処方法を検討し FRP の設計に反映することが望まれる。現時点ではすべての故障モードを列挙できておらず、事業化に向けて未実施の課題が残らないよう検討を進める必要がある。

2.1.3.6. アンビリカルケーブル

(1) ピックアップ・オペレーション試験と並行して検討を進めるべき項目

①要求定義検討

アンビリカルケーブルは海底設備と環境モニタリングセンサーへの電力供給、センサー信号受信用としての適用が検討されている。海底設備やモニタリングシステムの仕様に適したアンビリカルケーブルを設計する必要があり、設備、システムの仕様確定後、アンビリカルケーブルの設計を滞りなく進められるよう、要件定義に必要な情報を整理するべきであると考えられる。

- ・ 工程：6ヶ月

(2) ピックアップ・オペレーション試験後から実用化までに検討すべき項目

①線芯配置

通常、アンビリカルケーブルは複数の電力線、信号線、液圧ライン等で構成される。これらの線芯の断面配置によってアンビリカルケーブルの強度や耐久性が大きく左右されるので線芯の配置設計には十分な検討を要する。基本的にはケーブルの中央付近に電力線のような伸縮吸収し難い線材が配置され、外側に液圧ラインのようにラセン巻きによってケーブル伸縮に対応可能な線材が配置されるが、各線材の材質、強度、線径等についても十分配慮して最適配列を検討する必要がある。

②布設システム

アンビリカルケーブルはシャトルシップから圧入井まで FRP と同様の布設経路を辿るので FRP と複合させて一本化する構造案も考えられる。但し、両端部でアンビリカルケーブルを構成する各線芯を FRP 本体から分岐させる構造が複雑化する上、仮にアンビリカルケーブルの一部線芯が先に損傷した場合でも FRP を含む全体を引き換える必要が生じるので複合構造は良策とは言えない。2 者は別々のラインとして製造し、ピックアップ作業や吊り下げ作業時には一体物として扱えるような新工法を検討する必要があるものと考えられる。

③端末構造

CO₂ 圧入用 FRP の上部側端末はシャトルシップ側とは頻繁に接続、脱着を行う必要があり、アンビリカルケーブルの端末については多数の線芯をワンタッチで一括接続が可能な構造とする必要がある。また、端末を海中に放置する期間も長いのでアンビリカルケーブル端末部ではシール不足等による電力線及び通信線内への水

分浸入の防止方法について十分に検討する必要がある。

④遮水対策

アンビリカルケーブルを構成する電力線と通信線はいずれも水分によって大きな性能劣化を招き易い。特に高電圧の電力線ではプラスチックの被覆層や絶縁層を通して侵入する湿気によっても絶縁性能が低下し、長期間水中で使用すると 10 年程度の間には水トリーが発生して絶縁破壊を招く恐れがある。このため、アンビリカルケーブルを長期にわたって使用する場合は絶縁層の外部に金属材を用いた遮水層が必要となる。また、金属材はケーブルの繰り返し曲げ変形で疲労破壊し易いため、その疲労防止対策についても十分な検討を要する。

2.1.3.7. ピックアップ機構

1)巻き上げウィンチ

巻き上げ力は今後 FRP および頂部嵌合装置の詳細が決まらなないと判らないが、1.2.4.1 で述べたような張力は概算で最大荷重は 100kN 程度になると思われる。しかし最大荷重はあくまでシャトルシップが圧入井から離れた時で、多くの場合は中心位置の荷重に余裕をみて約 60～80kN とと思われる。

FRP 頂部につながるワイヤー(Pick Up Wire)を巻き上げて FRP 頂部を嵌合部に引き寄せる必要がある。ピックアップ・ワイヤーの長さは水深の 1.5 倍は必要であるから、水深 200m であれば 300m 程度を巻き上げる必要がある。作業時間を短くするためには巻き速度を 40～50m/分程度の高速にすることが望ましい。長尺のワイヤーを巻き込む為には、ドラム上に複数層巻く必要があるが、荷重によって上のワイヤーが下の層に食い込むことは(乱巻と呼ぶ)、ワイヤーの損傷につながるのを避けねばならない。また、ピックアップ・ワイヤーと船内ウィンチから出てきたワイヤーを結合する必要があるが、その結合にシャックル等を使用する必要がある。このシャックル等をウィンチに巻き込んで、更に何百mかのワイヤーをその上に巻込めば乱巻になることを避けられず、ドラムを二つに分けておき、結合部を巻き込んだあと、二つ目のドラムにピックアップ・ワイヤーを巻き込むなど、何らかの工夫が必要と思われる。

こうした条件を満たすウィンチを開発する必要がある。

2)嵌合装置近傍への巻き上げ技術

嵌合装置の近傍まで FRP を巻き上げ、嵌合装置が FRP 頂部を掴みとることを可能にする必要がある、この部分は嵌合装置設計とピックアップ装置設計の協力が必要である。

3) 嵌合装置の設置場所

海底の FRP は圧入井坑口から一定の方向に敷設される。波方向・潮流方向・風方向は常に変わると考えざるを得ない。ピックアップ作業時とその後の圧入時に DPS によって船位を一定の範囲内に停船させておくが、船の方向は波方向に向けたいであろう。その場合にピックアップ装置の設置位置は船首が良いのか、船体中央部が良いのか検討する必要がある。

一般には船首でピックアップしている例が多いが、船首は Pitching による上下動が大きい。また、船首には Windlass などの甲板機械が多く設置されており、ピックアップ装置を設置するためにはかなりの配置検討が必要となる。

一方、船中央はもっとも動揺が少ないという利点もあり、スペースの面からも船首よりは自由度がある。今後、こうした長所・短所に加えて操船方法とも合わせて検討する必要がある。

4) FRP 巻き上げ中心位置と DPS 制御範囲の最適化検討

本年度は DPS 制御中心位置(以下、中心位置)を圧入井から 375m、DPS 制御範囲を±25m、±35m、±45m とした場合を検討した。中心位置を圧入井に近づければ上端張力は小さくなり、嵌合装置に作用する外力も小さくなる。また、DPS 制御範囲が大きければするほど簡易な DPS で制御が可能となりシャトルシップの建造費ならびに運航費を小さくすることが出来る。

今後 FRP の挙動解析を行って中心位置と DPS 制御範囲の最適化を図る必要がある。

5) もやい索発射器の改良

既存品を改造してゴム製サンドレッドに浮遊索を引っ掛けるフックを取り付けることを検討する必要がある。

6) 大水深(1000m まで)の対応

今回は 200m 水深について検討を行ったが、この方式で 1,000m 程度まで水深が深くなった場合に、同じ方法で実施できるのかを検討する必要がある。大きな問題点としては、

- (1) ピックアップ・ワイヤーを巻き込む時間が長くなる。
- (2) ピックアップ・ワイヤーを巻きだして FRP を海底に寝かせる作業中の DPS 制御時間が長くなり操船の困難性が増す。
- (3) 水深が深くなる分、引き上げる FRP の長さが増大し、ピックアップに要する引き力が増大する。現在 200m 水深で 100kN 程度のウィンチを想定しているが、水深が 1000m になれば単純計算でも 500kN になる。
- (4) 現在のワイヤーはφ30(破断荷重 500kN 程度、SUS)を考えているが、荷重が 5 倍になればφ70 程度にはなる。

(5)φ70mmのワイヤーを高速(40~50m/分程度)で1500m程度(水深の1.5倍と仮定)巻き取る大型ウィンチが必要だが、かなり大きなものとなる。

(6)ワイヤー重量を支えるブイの大型化を招き、船上への引き上げ作業が困難になる。などが考えられる。今後これらに対する対応策を検討する必要がある。

2.1.3.8. 嵌合機構

海洋実証試験において、どの範囲まで試験を行うのか未定であるが、本試験において確認出来ない項目(緊急離脱、残液パージ、圧抜き、閉止キャップの着脱などを仮定する)に関し、実現に向けた課題の抽出と対策を検討する。また、本試験において、性能が不十分であった機能があった場合について、対策を検討する。

2.1.3.9. コミュニケーションブイ

平成25年度検討では、洋上コミュニケーションブイの設置目的、必要となる基本的機能、平成26年度から3カ年の検討項目、その工程と費用の検討を行う。

1)検討方針

洋上のコミュニケーションブイは、海底地盤上の液化CO₂圧入井の状態、圧入井海域の気象及び海象条件を収集し、衛星を介してそれらを地上局へ送ることを目的として設置する。

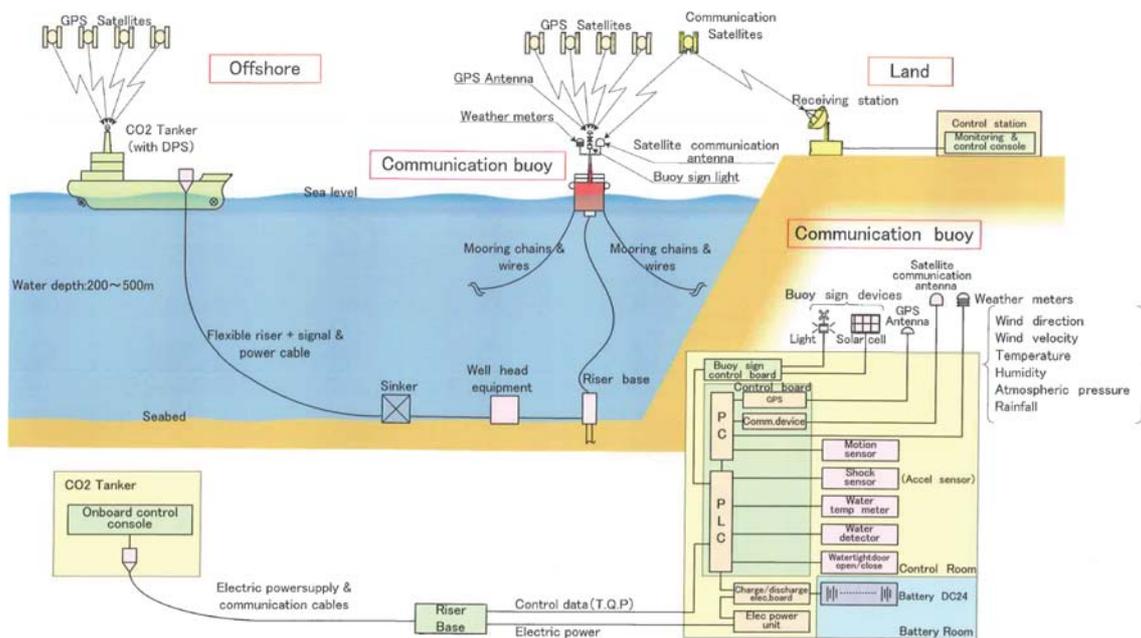


図 2-46 コミュニケーションブイ全体概念図

(出典) GCCSI (2011) [1]



図 2-47 コミュニケーションブイ本体

(出典) FLOATEX [7]

2)必要となる機能と検討項目

(1)ブイとしての基本性能

ブイは設置地点の波浪、風、および潮流等の自然条件に左右されることなくデータを集録、伝達する性能が要求される。特に海洋上のブイではこれらの自然条件のうち、波浪および風に対して転覆することなく安定であることが最も要求される。

(2)モニタリング項目

洋上ブイの想定されるモニタリング項目を以下に示す。

- ・ 注入井に関するデータ：液化 CO₂ 温度・流量・圧力、地震(震動)
- ・ 海象データ：波高、波向、海水温
- ・ 気象データ：風向、風速、気温、湿度、気圧、雨量
- ・ ブイに関するデータ：位置(GPS/座標)、動揺(X,Y,Z)

(3)ブイ本体

ブイ本体の検討項目を表 2-24 に示す。既往検討(GCCSI Phase-1)ではブイの外径を 6.0m と設定した。係留索本数は 3 本としたが、ブイ本体重量、搭載する機材とその重量、設置水深等から本数の増加も考えられる。

表 2-24 想定されるコミュニケーションブイ諸元

検討項目	諸元(既検討)	検討要因
有人・無人	無人	遠隔操作方法
ブイ外径	6.0m	搭載機材、メンテナンス
喫水線から上甲板まで	1.5m	波浪条件、搭載荷重、自重
喫水線からアンテナ上端まで	8.0m 以上	通信機材
係留索本数	3 本	ブイ寸法、波浪条件
電源	- 直流 24 ボルト - シャトルシップから充電	ブイへの供給方法 必要電力量
管理機材	- 昇降用梯子 - プラットフォーム - アンテナ - ライト、ブイ標識	メンテナンス方法 メンテナンス頻度 モニタリング項目と量

(4)ブイ搭載機材

ブイ本体の検討項目を表 2-25 に示す。

表 2-25 コミュニケーションブイ関連機材

検討項目	計測項目	検討要因
GPS 関連機材	- GPS アンテナ - GPS レシーバー	- 搭載機材の寸法、重量等諸元 - 受送信方法
液化 CO2 注入データ	液化 CO2 注入井とライザー内 - 温度 - 圧力 - 注入量	- 海底からの受信方法 - 地上基地への送信方法
大気測定	- 風向、風速 - 温度、湿度 - 気圧 - 降雨量	- 計測方法 - 搭載機材の寸法、重量等諸元 - 送信方法
電源	- 受電システム - 注入井センサーへの送電	- シャトルシップ経由 - ライザーパイプ経由 - 太陽光/波浪発電等
ブイモニタリング	- ブイの動揺 - 衝撃 - 海水温、流向	- 計測方法 - 搭載機材の寸法、重量等諸元 - 送信方法

(5)係留方式、位置保持方式、電源等

- ・ 係留方式：カタナリー係留、Tension Leg 方式

- ・ 位置保持：許容移動量
- ・ 電源：シャトルシップ経由、自家発電方式等

3)2014 年度以降の工程

2014 年度からの 4 カ年の検討項目とその工程を表に示す。

表 2-26 4 カ年の検討項目とその工程

検討項目	1 年目	2 年目	3 年目	4 年目
1) モニタリング項目の検討	■			
2) 必要機材の検討(ブイ上)		■		
3) 地上基地との伝達システム検討		■		
4) ブイ本体と必要機材の設計諸元の検討			■	
5) 係留方法、電源等の検討			■	
6) 性能確認実験計画立案			■	

2.1.3.10. コントロールセンター(陸上)

コントロールセンターは、下記の事項を遂行することを目的に設置する

- ①シャトルシップ・コミュニケーションブイからの輸送・圧入・モニタリングに関する送信情報を受信する。
- ②①の情報と貯留層等の予測評価解析結果を比較し、異常の有無を検討する。
- ③①②および分離回収基地・液化一時貯留基地からの情報を基に、シャトルシップに所定の指示を発信する。

コントロールセンターとシャトルシップ・コミュニケーションブイシステムとの関係をオペレーションシステム概要図、概要表として図 2-48 と表 2-27 に示す。

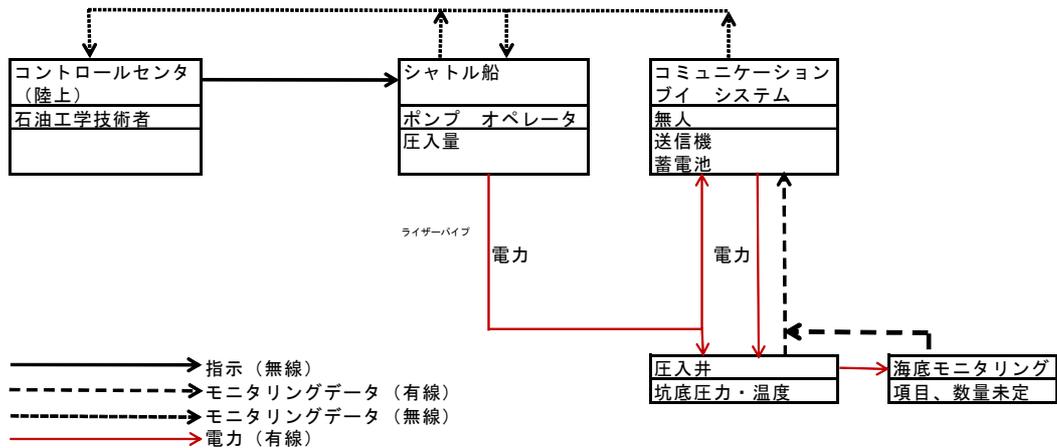


図 2-48 オペレーションシステム概要図

コントロールセンターは、海域にあるシャトルシップ、コミュニケーションパイプからの情報(圧入井・海底モニタリング情報)を受信・検討し、海域の有人設備であるシャトルシップへの情報発信基地となる。

コントロールセンターは、分離回収基地・液化一時貯留基地・貯留サイト至近陸域のいずれかに設置すると想定されるが、設置場所により必要設備等が異なってくるため、それらが定まった段階で必要資材等を検討し、コスト試算することとしたい。

表 2-27 オペレーションシステム概要表

	コントロールセンター*1	シャトル船	コミュニケーションパイプ	圧入井*2	海底モニタリング
有人・無人	有人：石油工学技術者他	有人：ポンプオペレータ他	無人	無人	無人
受信	シャトル船送信情報 コミュニケーションパイプ送信情報 分離回収・液化・貯留設備稼働状況	坑底圧力・温度 センターからの指示	坑底圧力・温度 モニタリングデータ 坑口設備稼働状況 送信機コントロール		
送信	シャトル船への指示 坑底圧力・温度 送信機コントロール 事業主体本部への情報	圧入量・注入圧・温度 位置情報	坑底圧力・温度 海底モニタリングデータ 坑口設備稼働状況 気象・海象・位置情報	坑底圧力・温度 坑口設備稼働状況	モニタリングデータ*3 ・微小地震・自然地震 ・環境モニタリング
受電	電燈線または発電機	発電機	シャトル船/ライザーパイプ	シャトル船/ライザーパイプ コミュニケーションパイプ	圧入井
送電		圧入井 コミュニケーションパイプ	圧入井 (坑口設備、センサ)	海底モニタリング設備	
モニター画面	圧入量 坑底圧力・温度 モニタリングデータ 予測評価解析結果 坑口設備稼働状況 その他	圧入量 坑底圧力・温度 予測評価解析結果 その他			

*1コントロールセンターは、分離回収基地、貯留サイト近傍沿岸、事業主体本部のいずれかに設置。
 *2観測井の設置も不可欠であるが、位置関係が未定のため、その電力供給・モニタリングデータ送信については、別途検討することとする。
 *3モニタリングには、反射法・検層・試料採取等が含まれるが、これらについては、本システムには含めない。

2.1.3.11. 運転費(CO2 処理費)

1)検討方針・検討内容

シャトルシップ CCS 計画では、計画の各段階で、シャトルシップ CCS のコスト対効果を確認しながら、計画を遂行して行く必要がある。このためには、構成する技術、機器類・各設備の開発・確立とともに運転費(CO2 処理費)が重要な要素となる。

上記に基づき、以下の項目について、検討する。

(1)運転費の表示方法

以下の 2 種類の表示を検討する。

①運転費：百万円/年

②CO2 処理費：円/kg-CO2

価格は、現在価格基準の計算を検討する。

なお、CO2 処理費については、ユーティリティ消費による CO2 発生量を差し引いた「差引圧入量当たりの CO2 処理費」の算定を検討する。

(2)運転費算定の設備範囲

本検討では、「圧縮・脱水設備およびパイプライン輸送設備」に示される設備を運転費算定の設備範囲として検討する。上流側の CO2 分離・回収設備及び下流側の坑口設備、圧入井は、別途、運転費算定を行い、全体としてシャトルシップ運転費を算定する必要がある。

(3)CCS の使用年数(運転費評価期間)

実設備の使用年数及び実証設備の使用年数について検討する必要がある。GCCSI の報告書では、それぞれの設備について、以下に示すように使用年数、法定償却年数を検討し、全体として実設備の使用年数を 30 年としている。

①CO2 圧縮・液化装置

使用可能年数：30 年以上、 法定償却年数：10 年

②一時貯留タンク、ローディング設備

使用可能年数：30 年以上、 法定償却年数：10 年

③シャトルシップ(搭載する昇温設備を含む)

使用可能年数：15 年、 法定償却年数：10 年

④洋上圧入設備(ピックアップブイ、FRP、アンビリカルケーブル、コミュニケーションブイ等)

使用可能年数：30 年以上、 法定償却年数：10 年

(4)洋上輸送距離

輸送距離は、液化 CO₂ 積出港と洋上圧入地点の距離で定まる。両方の候補地が決定されれば、それに基づき設定できるが、候補地決定前は輸送距離のケースを設定し、検討する必要がある。

GCCSI-2 の報告書では、以下に示す輸送距離を選定し、ケーススタディを行っている。

- ①200km：運行 2 日
- ②400～800km(試算は 800km について実施)：運行 4 日
- ③1,600km：運行 6.7 日

(5)年間圧入量

CO₂ 分離・回収設備の年間稼働日数、圧入地点での稼働日数及び 1 日当たり圧入量から検討する。

(6)運転費(CO₂ 処理費)の計算方法

運転費(CO₂ 処理費)の算定には、種々の方法がある。一般的には次式で検討される。

運転費＝資金関連費用＋利益＋管理関係費＋運転関係費

- 資金関連費用：設備費等の借入金の利息返済費、減価償却費
- 利益：
- 管理関係費：保守点検費、保険料、固定資産税、運転管理費、一般管理費、事業税等
- 運転管理費：運転員人件費、ユーティリティ費、触媒・薬品等消耗品費

シャトルシップ CCS 実証試験計画は営利事業ではないので、利益及び事業税は考慮する必要性は無い。

主要費目については、以下の通り検討する。

①利息返済費

借入金返済の内、利息返済費のみ計上する。返済方法は元利均等返済とし、利率はプライムレートを採用する。

②原価償却費：設備費を法定償却年数(n 年)で均等償却する。償却後の残余価格は 0%とする。

③保険料：設備費の年間 0.3%とする

④保守費：設備費の年間 3%とする。

⑤運転員人件費及び管理費：調査検討する。

なお、GCCSI-2 報告書では、以下の人件費で検討されている。

- a. 陸上設備 運転員人件費： 8.0百万円/人

- b. シャトルシップ運行クルー人件費：9.0百万円/人
- c. CO2圧入クルー人件費： 8.0百万円/人
- d. 管理費：陸上設備は人件費の150%、シャトルシップ及び圧入クルーは人件費の100%

⑥ユーティリティ費

- a. 電力：陸上設備候補地の電力料金を調査し、設定する。
- b. A重油：(財)日本エネルギー研究所 石油製品価格(東京都・都市内需要家指定場所)の過去1年間の平均価格を調査し、設定する。
ユーティリティ消費に伴うCO2発生量は、環境省「算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧」に基づき、検討する。

⑦港湾使用料：候補地決定後、調査し設定する。

⑧通信衛星使用料：調査し設定する。

2) 運転費の試算例

GCCSI Phase-2 の報告書に基づき、0～10年及び30年平均の運転費及びCO2処理費の試算例を表 2-28 及び表 2-29 に示す。

【条件】

- (1)CCS 使用年数：30年
- (2)液化CO2 温度/圧力：-20℃、1.97MPa
- (3)設備費算定年：平成24年(2012年)。2013年では約10%上昇している。
- (4)プライムレート：1.25%(平成24年9月長期プライムレート)
- (5)電力単価、燃料(A重油)単価：10円/kWh、70,300円/kL
- (6)CO2排出量：電力 0.561kg-CO2/kWh、燃料：2.71kg-CO2/kL-Oil
- (7)CO2圧縮液化設備及びユーティリティ消費量：定期点検・保全期間(20日間)には、別の設備から液化CO2を受け入れることを前提とし、設備費の20%分、20日間のユーティリティ消費量を追加している。

表 2-28 シャトルシップ CCS 運転費試算例(0～10年)GCCSI Phase-2 報告書

項目	単位	200km	400～800km	1,600km	
CO2 圧入量	トン/年	1,000,000	1,000,000	1,000,000	
年間稼働日数	日/年	334	334	334	
設備費	CO2 圧縮液化	百万円	4,560	4,560	4,560
	LCO2 貯蔵積載	百万円	3,000	3,000	3,000
	シャトルシップ	百万円	7,078	14,155	22,648
	圧入設備	百万円	900	900	900
	合計	百万円	15,538	22,615	31,108
用役消費量	電力	MWh/年	154,309	154,309	154,309
	燃料(A 重油)	kL/年	4,471	6,524	9,261
運転員/クルー数	名	26	56	92	
CO2 排出量	CO2 圧縮液化	トン/年	86,300	86,300	86,300
	LCO2 貯蔵積載	トン/年	173	173	173
	シャトルシップ	トン/年	1,854	7,432	14,897
	圧入	トン/年	10,263	10,263	10,263
	合計	トン/年	98,590	104,168	111,633
差引 CO2 圧入量	トン/年	901,410	985,832	888,367	
資本関連費	支払利息	百万円/年	108.8	158.3	217.8
	減価償却費	百万円/年	1,553.8	2,261.5	3,110.8
	資本関連費合	百万円/年	1,662.6	2,419.8	3,328.6
管理関係費	保険料	百万円/年	54.4	79.2	108.9
	固定資産税	百万円/年	217.5	316.6	435.5
	保守費	百万円/年	466.1	678.5	933.2
	通信費	百万円/年	1.6	1.6	1.6
	管理関係費合	百万円/年	739.7	1,075.8	1,479.2
運転関係費	電力費	百万円/年	1,543.1	1,543.1	1,543.1
	燃料費	百万円/年	314.3	314.3	314.3
	クルー費	百万円/年	268.0	472.0	778.0
	運転関係費合	百万円/年	2,125.4	2,473.7	2,972.1
運転費計	年間	百万円/年	4,527.6	5,969.3	7,779.9
	対圧入量	¥/kg-CO2	4.53	5.97	7.78
	対差引圧入量	¥/kg-CO2	5.02	6.66	8.76

表 2-29 シャトルシップ CCS 運転費試算例(期間平均)GCCSI Phase-2 報告書

項目	単位	200km	400~800km	1,600km	
CO2 圧入量	トン/年	1,000,000	1,000,000	1,000,000	
年間稼働日数	日/年	334	334	334	
設備費	CO2 圧縮液化	百万円	4,560	4,560	4,560
	LCO2 貯蔵積載	百万円	3,000	3,000	3,000
	シャトルシップ	百万円	7,078	14,155	22,648
	圧入設備	百万円	900	900	900
	合計	百万円	15,538	22,615	31,108
用役消費量	電力	kWh/年	145,309	145,309	145,309
	燃料(A 重油)	kL/年	4,471	6,524	9,261
運転員/クルー数	名	26	56	92	
CO2 排出量	CO2 圧縮液化	トン/年	86,300	86,300	86,300
	LCO2 貯蔵積載	トン/年	173	173	173
	シャトルシップ	トン/年	1,854	7,432	14,897
	圧入	トン/年	10,263	10,263	10,263
	合計	トン/年	98,590	104,168	111,633
差引 CO2 圧入量	トン/年	987,137	901,410	985,832	
資本関係費	支払利息	百万円/年	36.2	52.7	72.5
	減価償却費	百万円/年	517.4	753.1	1035.9
	資本関係費合	百万円/年	553.6	805.8	1,108.4
管理関係費	保険料	百万円/年	54.4	79.2	108.9
	固定資産税	百万円/年	217.5	316.6	435.5
	保守費	百万円/年	466.1	678.5	933.2
	通信費	百万円/年	1.6	1.6	1.6
	管理関係費合	百万円/年	739.7	1,075.8	1,479.2
運転関係費	電力費	百万円/年	1,543.1	1,543.1	1,543.1
	燃料費	百万円/年	314.3	314.3	314.3
	クルー費	百万円/年	268.0	472.0	778.0
	運転関係費合	百万円/年	2,125.4	2,473.7	2,972.1
運転費計	年間	百万円/年	3,418.7	4,355.3	5,559.7
	対圧入量	¥/kg-CO2	3.42	4.36	5.56
	対差引圧入量	¥/kg-CO2	3.79	4.86	6.26

2.1.3.12. 海底設備

圧入井のクリスマスツリー・坑口設備(以下坑口設備等と略記する)について、国産品を利用することを想定して、陸上の坑口設備等制作会社T社にヒヤリングを行った。その結果概要を以下に記す。

1)石油・天然ガス生産井の坑口設備等(海底も同じ)の制作には、API 6A(American Petroleum Institute)の資格取得が必要である。国内の有資格会社は、T社とK社(地熱坑井対応専門)の2社のみ。

石油・天然ガス生産井の坑口設備等を制作している会社は、T社1社で、それも陸上設置用のみ。

2)陸上の坑口設備等は、国内のマーケットが小さくなっており、新たな会社の参入は期待できない。

3)陸上設置用と海底設置用は、ほとんど異なる制作物であり、研究開発を含め、依頼されてもT社では受託は困難。海外で設計図を作成し、T社が制作することも困難。

最近、日本海で設置された海底坑口設備等も海外の石油・天然ガスのサービスカンパニー(日本支社あり)が、制作を担当した。

4)陸上のCO₂圧入井の坑口設備等であれば、T社で制作可能。

MH(メタンハイドレート)・海底熱水鉱床・海底レアアース等、最近、海洋の資源開発に関する研究開発が盛んになってきており、これらの研究開発品を利用できる可能性もあり、その動向を調査することも重要と考えている。

2.1.3.13. モニタリング

沖合域の環境モニタリングについて、ヒヤリング他により情報収集した結果概要を以下に記す。

1)沿岸(浅海域)と沖合域(相対的に深海域)では、海洋環境の基本的な考え方が異なると想定されるが、沖合域の環境モニタリングの在り方を、まず、整理・検討する必要がある。

2)連続かつ自動計測するためのセンサー(pH,pCO₂ など)についても、まだ、発展途上にあると認識され、今後とも、改良が必要と考えられる。

3)また、耐用年数についても、実証試験のように相対的に短期間であれば、現状セン

サーで対応可能と想定されるが、商業規模 CCS のように長期間の観測が必要になれば、長期耐久性のあるセンサーの開発が必要になる。

- 4) モニタリング情報の送受信は、現状では、圧入井至近に設置予定のコミュニケーションパイプまで有線で送信し、そこから無線でコントロールセンター等に送信することを考えている。しかしながら、圧入井から離れた位置に設置されるセンサーについては、それへの電力供給、情報の送受信方法を別途検討することになる。

AUV(無牽海中ロボット)に所定のセンサーを搭載してモニタリングし、シャトルシップで AUV を回収することも即戦力かつ現実的なモニタリング方法になると考えられる。この方法では、連続測定はできなくなるが、センサーの耐用年数とモニタリング信号の送受信に関する課題は解決できることになる。AUV を用いた研究事例を図 2-49 に示す。



図 2-49 各種現場型化学センサー搭載 AUV

(出典) 電力中央研究所[8]

連続かつ自動計測するモニタリング項目には、環境モニタリングの他、微小地震・自然地震、圧入井・観測井での温度・圧力等が想定されるが、これらについても、3)・4)の課題を解決する必要がある。

2.1.3.14. 検討体制

本業務でシャトルシップによる CO₂ 輸送・貯留システムを検討するにあたっては、前提条件が未確定であるために、検討の範囲が限られる場合があった。例えば、貯留サイトが未確定であれば海域や水深などが想定できない。また、貯留サイトなどの下流工程だけで

なく CO2 輸送量など上流工程の未確定要素も検討上の制約になる。

今後、シャトルシップによる CO2 輸送・貯留システムを具体的に検討していくためには、未確定要素に柔軟に対応できるよう、各分野の専門家の参画が望まれる。以下に今後のシャトルシップ方式の詳細検討に必要な体制を提案する。

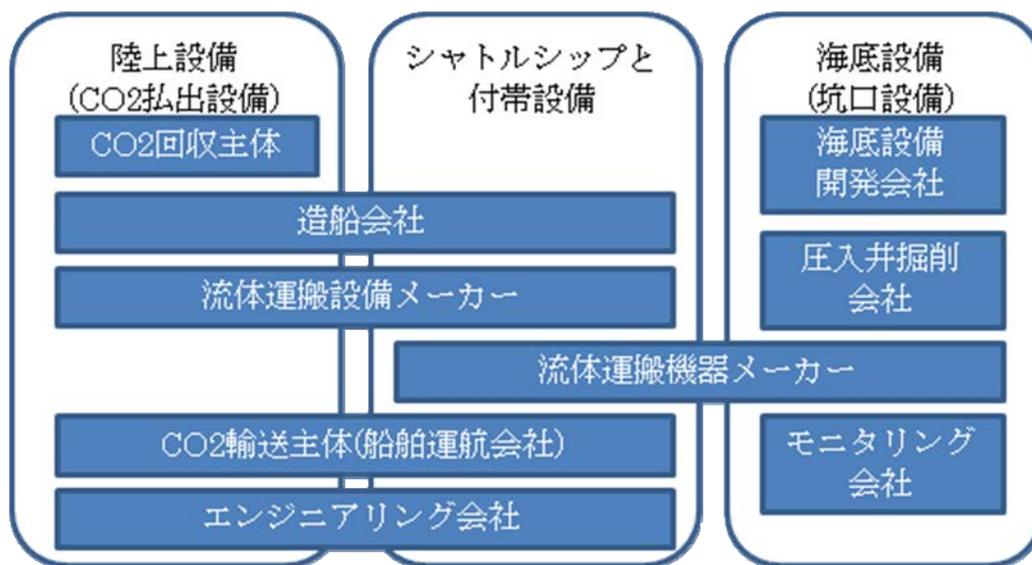


図 2-50 今後のシャトルシップ方式の詳細検討体制 [例]

上記のうち本業務に含まれていなかったのは、以下の主体である。

- CO2 回収主体となりうる会社
- CO2 輸送主体(シャトルシップの運航主体)となる船舶運航会社
- 海底設備の開発会社
- モニタリングの専門家

特に海底設備は、それによって規定される条件が多く、その影響が大きいことから、今後の検討には海底設備の開発会社と圧入井掘削会社の参画が望まれる。

モニタリングは、主に CO2 の漏洩監視と海底設備の異常検知の 2 点を目的とする。そのための測定の項目、間隔、頻度などの測定条件は、コミュニケーションバイ、コントロールセンターの詳細検討に不可欠である。

2.1.3.15. 検討コスト

2.1.3 項に記した事項に関する検討コストを下表に記す。

表 2-30 2.1.3 項のコスト一覧表

単位:千円

章節	名称	Phase-1		Phase-2		計
		H26	H27	H28	H29	
2.1.3.	シャトルシップ輸送・貯留技術の実現へ向けた検討課題 および概算費用					
2.1.3.1.1.	圧縮・脱水設備およびパイプライン輸送設備					
2.1.3.1.2.	CO2液化・一時貯留・ローディング設備					
2.1.3.1.3.	シャトルシップ本体					
2.1.3.1.4.	シャトル船上の昇圧設備					
2.1.3.1.5.	FRP					
2.1.3.1.6.	アンピリカルケーブル					
2.1.3.1.9.	コミュニケーションパイ					
2.1.3.1.10.	コントロールセンタ(陸上)					
2.1.3.1.11.	運転費(CO2処理費)					
2.1.3.1.12.	海底設備					
		26,260	26,930	2,680	0	55,870

2.1.4. 補足 A) CO2 船舶輸送・貯留の海外事例

シャトルシップによる CO2 輸送・貯留の検討に資するべく、諸外国の CO2 船舶輸送・貯留の事例について調査した。

①CO2 船舶輸送・貯留プロジェクト “CINTRA” (オランダ)”の事例

オランダ・ロッテルダムの CCS ネットワークにおいて、CO2 船舶輸送と CO2 ハブ設備が検討されている。火力発電所、水素プラント等の排出源からの CO2 を CO2 ハブに集積し、北海の EOR サイト(サイト選定中)まで輸送する計画である。当初計画では、2015 年に運用開始予定(輸送能力：約 150 万 t-CO2/年)とされていた。[9]

本業務において CINTRA 関係者へ問い合わせた結果、ETS 市場の低迷や不安定な欧州政府の支援体制から、CINTRA を含む多くの CCS プロジェクトが保留または中止になっているとのことだった。

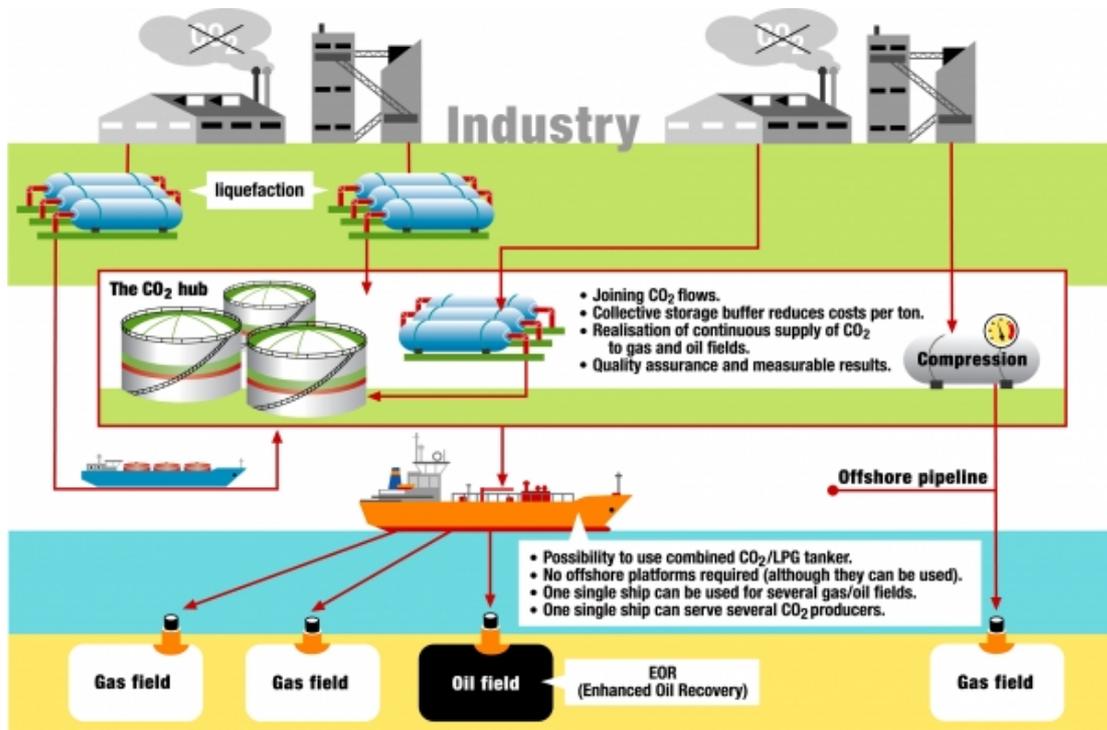
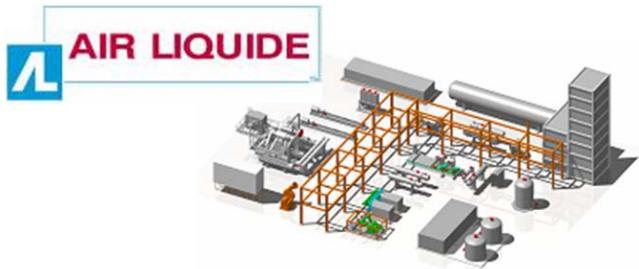


図 2-51 CINTRA プロジェクト概念

CINTRA プロジェクトには、Air Liquide、Gasunie、Vopak、Anthony Veder の 4 社が参画している。それぞれの参画企業の役割分担を表 2-31 に示す。

表 2-31 CINTRA プロジェクトの参画企業と役割

	参画企業	役割
Air Liquide		<ul style="list-style-type: none"> ● 排出源または CO2 ハブにおける CO2 液化
Gasunie		<ul style="list-style-type: none"> ● 陸域および海域のパイプライン ● CINTRA 以外へのアクセス
Vopak		<ul style="list-style-type: none"> ● CO2 の一時貯留 ● 船舶への払出し/船舶からの払出し ● 取引用計量
Anthony Veder		<ul style="list-style-type: none"> ● 海域の貯留サイトへの液化 CO2 の輸送 ● 海域圧入施設(ブイ)との接続 ● 船上における圧入条件への昇温・昇圧

CINTRA の正式名称は、「Rotterdamse Cintra Maatschappij B.V.」であり、Maatschappij は、オランダ語で「会社」「合弁会社」を指す。Vopak 社、Gasunie 社の年次報告書[10][11]は、CINTRA への出資比率(25%)が明記されている。これらのことから、CINTRA は単なるコンソーシアムではなく、Vopak, Anthony Veder, Air Liquide, Gasunie の 4 社が出資する法人であると考えられる。

CINTRA プロジェクトでは、オランダのロッテルダム市内の複数の石炭火力発電所、水素プラント等から CO₂ を回収、液化、一時貯留し、CO₂ タンカーへ払い出した後、CO₂ タンカーでデンマークのダンフィールド油田に輸送し、船上から直接またはプラットフォーム経由で CO₂ を圧入、貯留することが計画されている。

表 2-32 CINTRA の立ち上げスキーム

<p>基本スキーム</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● CO₂: 年間 150 万トン ● 排出源: Rotterdam (オランダ) ● 貯留サイト: Dan Field(デンマーク) ● 貯留目的: Enhanced Oil Recovery(EOR) ● 船舶: 積載量 12,000m³+圧力・温度調整設備搭載の船舶 2 隻 	
<p>貯留サイト</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 稼働中の油田 ● 水攻法を使用 ● 過密な坑井間隔 ● 圧入テスト予定 ● 追加プラットフォームモジュール 1 基 ● STL ブイ 2 基 ● 水深 40m 	
<p>スケジュール(当初)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● LOI (基本合意書): 2011 年 Q4 ● FID (最終投資判断): 2012 年 Q4 ● RFO (運転準備完了): 2015 年 Q4 	

しかし、CINTRA 関係者への問い合わせから、ETS 市場の低迷や不安定な欧州政府の支援体制から、多くの CCS プロジェクトが保留または中止になっており、CINTRA プロジェ

クトも動きがないとのことだった。

CINTRA プロジェクトでは、表 2-33 のように CO₂ 船舶輸送について 2 つのケースが検討されている。ケース A では貯留サイト側に STL ブイ(後述)が 2 基装備され、船舶 2 隻が交代で輸送・貯留にあたる。ケース B では、貯留サイトに固定プラットフォームが設けられ、船舶 1 隻で輸送・貯留にあたる。

表 2-33 CINTRA の CO₂ 船舶輸送の概要

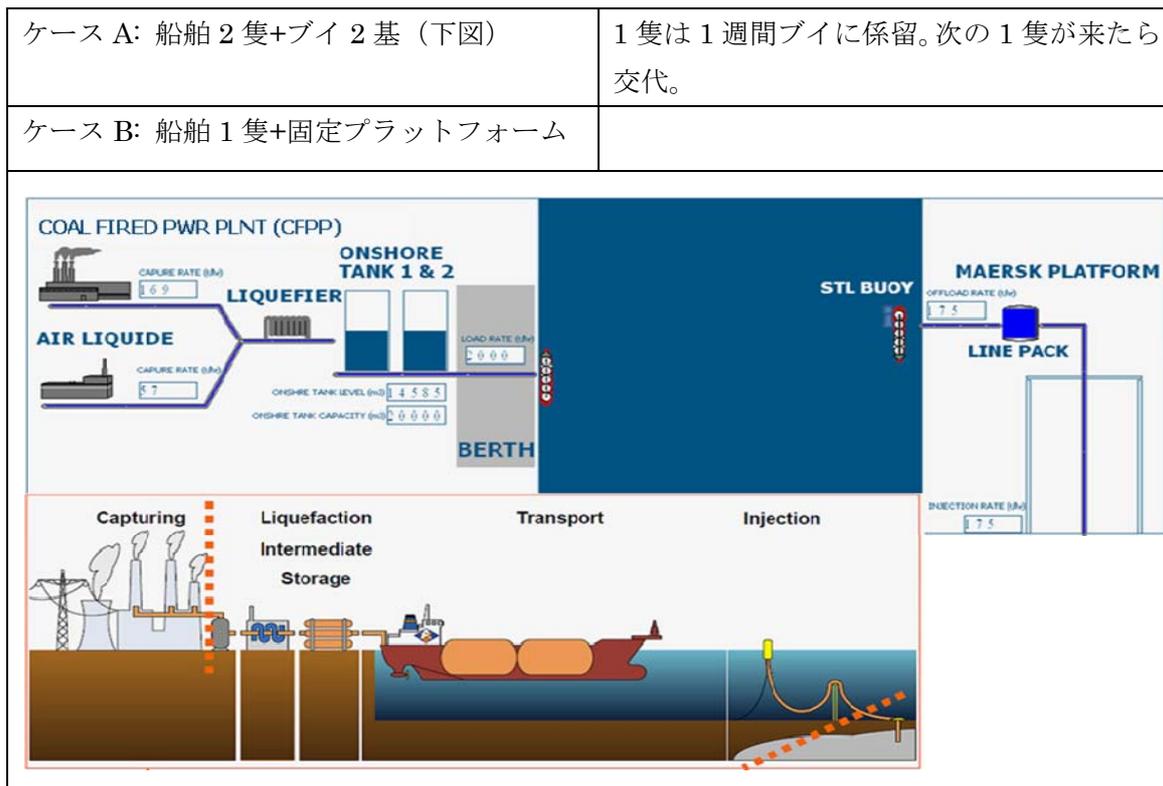


表 2-33 には「STL ブイ」の記述がある。しかし、図中のブイの形は「STL ブイ」のものではない。「STL ブイ」は、船底に嵌合する一点係留ブイである(表 2-34)。このことから、CINTRA プロジェクトでは、船上からの CO₂ 圧入についての具体的な運用面および技術面の検討までなされていない可能性が考えられる。

表 2-34 STL ブイの概要

<ul style="list-style-type: none"> ● APL 社が開発した一点係留ブイの一種 ● ブイ内に FRP、アンビリカルを装備可能 ● 非使用時は海中で待機 	 <p>STL ブイの断面イメージ[12]</p>
<ul style="list-style-type: none"> ● 船底に STL 嵌合口を装備した FSO*から STL ブイをピックアップ・嵌合 ● FSO は STL により係留される ● FSO 係留中、STL ブイは船の向きに応じて 360°回転 ● STL ブイは技術的に確立されており、世界各地に実績がある 	 <p>FSO と嵌合する STL ブイのイメージ[12]</p>
<p>*Floating Storage and Offloading system: 浮体式海洋石油・ガス貯蔵積出設備</p>	

②その他の事例

CINTRA プロジェクト以外にも世界では船舶輸送による CCS プロジェクトが計画されている。その他の船舶輸送 CCS の事例を表 2-35 にまとめる[13]。

表 2-35 船舶輸送 CCS の海外事例

プロジェクト名	概要	進捗状況	国	年間CO2量	運転開始年	排出源	回収タイプ	輸送距離	貯留タイプ
Korea-CCS 1	このプロジェクトは、循環流動層燃焼 (CFBC) 複合発電所から年間約 100 万トンの CO2 を回収し、深部塩水帯水層に貯留する計画。	評価	韓国	1 Mt	2017	発電所	燃焼後	251 - 300 km	海域の地下帯水層
Korea-CCS 2	このプロジェクトは、酸素燃焼または IGCC 発電プラントから年間 100 万トンの CO2 を回収する構想。回収した CO2 は船で輸送し、深部塩水帯水層に圧入する予定。	構想	韓国	1 Mt	2019	発電所	未定	251 - 300 km	海域の地下帯水層
Dongguan Taiyangzhou IGCC with CCS Project	東莞市電力燃料有限公司は、東莞市太陽洲に 800 MW の IGCC プラントで年間最大 100 万トンの CO2 を回収し、深部塩水帯水層に貯留する構想。(当初は陸域の枯渇した油田とガス田に貯留する構想だった。)	構想	中国	1 Mt	2019	発電	燃焼前 (ガス化)	201 - 250 km	海域の地下帯水層
Sargas Green Power Plant Malta	Sargas AS 社は、マルタで年間約 120 万トンの CO2 を回収する発電所の新設を構想。本プロジェクトは 2017 年稼働開始予定。当初は、デンマークヘタンカー輸送、タンカーは韓国の大宇造船海洋製の計画。その後、計画が縮小された末に打ち切られた。	構想	マルタ	1.2 Mt (当初)	2017	発電所	燃焼後	351 km -	EOR

2.1.5. 参考文献

- [1] GCCSI. "Preliminary Feasibility Study on CO2 Carrier for Ship-based CCS". 2011. Phase-1:<http://www.globalccsinstitute.com/publications/preliminary-feasibility-study-CO2-carrier-ship-based-ccs>
- [2] GCCSI. "Preliminary Feasibility Study on CO2 Carrier for Ship-based CCS". 2012. Phase-2:<http://www.globalccsinstitute.com/publications/preliminary-feasibility-study-CO2-carrier-ship-based-ccs-phase-2-unmanned-offshore>
- [3] 尾崎雅彦. "我が国で CCS を実展開するための課題と方策". 二酸化炭素船舶輸送ビジネス協議会. <http://blog.canpan.info/co2ship/img/3/ccsozakie.pdf>
- [4] 独立行政法人海洋研究開発機構. "海洋調査船「かいよう」". <http://www.jamstec.go.jp/j/about/equipment/ships/kaiyo.html>
- [5] 独立行政法人海洋研究開発機構. "研究船・施設・設備". <http://www.jamstec.go.jp/j/about/equipment/ships/index.html>
- [6] EMSTEC. "Tanker Loading System". <http://www.emstec.net/oil-field/tanker-loading-system.php>
- [7] FLOATEX, <http://www.floatex.com/modular-buoys/catamaran-mooring-buoy-cat-43-50.html>
- [8] 一般財団法人電力中央研究所. "海底下地層貯留における貯留 CO2 漏洩の検知・モニタリング技術の提案". <http://criepi.denken.or.jp/jp/kenkikaku/report/detail/V09034.html>
- [9] Vopak. "Reliable cost effective CO2 shipping through statistical modeling". <http://www.slideshare.net/jhjsmits/modeling-the-co2-hub-terminal-concept>
- [10] Vopak. "Annual Report". http://www.vopak.com/fileadmin/pdf/Newsroom/Vopak_Annual_Report_2012.pdf
- [11] Gasunie. "Annual Report". <http://www.gasunie.nl/uploads/bestanden/45068045-6862-4efa-ab5b-6883b8747800>
- [12] APL. "STL (Submerged Turret Loading)". http://www.offshoremoorings.org/moorings/PDF/stl_0408.pdf
- [13] GCCSI. "Large-scale Integrated CCS Projects (LSIPs)". <http://www.globalccsinstitute.com/data/status-ccs-project-database>