

2024年度NEDO再生可能エネルギー一部成果報告会 プログラムNo.10

洋上風力発電の低コスト化プロジェクト
浮体式基礎製造・設置低コスト化技術開発事業
セミサブ型浮体・ハイブリッド係留システムに係る技術開発及び施工技術開発

発表日：2024年12月18日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

発表者： ジャパンマリンユナイテッド(株) 岩本 昌樹
ケイライン・ウインド・サービス(株) 道嶋 紘靖
東亜建設工業(株) 川又 義徳

実施者：ジャパン マリンユナイテッド(株)(幹事企業)、日本シップヤード(株)、ケイライン・ウインド・サービス(株)、東亜建設工業(株)

問い合わせ先：

ジャパンマリンユナイテッド(株) <https://www.jmuc.co.jp/contact/>

ケイライン・ウインド・サービス(株) E-mail: KWS-staff@klws.co.jp / TEL: 050-3821-1521

東亜建設工業(株) <https://inquiry.toa-const.co.jp/form/pub/toa/tech> /TEL:03-6757-3870

1. 目的

2030年までに浮体式洋上風力を国際競争力のあるコスト水準で商用化するため、セミサブ型浮体・ハイブリッド係留システムに係る技術開発及び施工技術開発を行い、そのコスト低減効果を検証する。

2. 期間

2021年3月 ~ 2024年3月

3. 目標（2030年目標）

一定条件下でのウィンドファーム（ベースラインウィンドファーム）における


発電単価(LCOE)	: 11.2円 /kWh
国内経済波及効果	: 約724億円
CO2削減量	: 約20.8万トン

4. 成果・進捗概要

期間内にて、研究開発を完了し、目標の達成の見通しを示すことができた。

● コンソーシアムメンバー

幹事企業  ジャパン マリンユナイテッド 株式会社

 日本シップヤード株式会社

共同提案者  ケイライン・ウインド・サービス株式会社

 東亜建設工業
TOA CORPORATION

● 研究開発内容 と 実施企業

1. 浮体基礎の最適化

KPI：浮体基礎製造コスト

2. 浮体の量産化

KPI：生産能力、量産能力

3. ハイブリッド係留システムの最適化

KPI：浮体係留コスト

4-1. 低コスト施工技術の開発

「風車浮体設置」

KPI：風車浮体設置のコスト

4-2. 低コスト施工技術の開発

「風車搭載」

KPI：風車搭載のコスト

 東亜建設工業
TOA CORPORATION  

最適化設計手法の確立

【背景・目的】

浮体基礎の大幅なコスト削減のため、デザインスパイラルを高速・高度化する設計手法が必要

【研究開発内容・成果】

① 2段階最適化システムの構築

- 風車浮体の形状・寸法を最適化するシステムを構築
- 異なる浮体コンセプト性能の横並び比較と浮体の寸法最適化を可能にした

アーキテクチャ最適化システム(AOS*)

浮体や係留の概略仕様の最適化

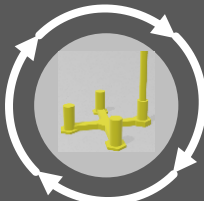
*AOS: Architecture Optimization System

解析手法

- 単純化した環境外力下での挙動・荷重解析
- 簡易的な製造検討、コスト解析

アウトプット

- 浮体の形状 (概略寸法)
 - 係留方式、概略仕様
- 高速に最適化



【インプット】
概略浮体
形状・寸法

ストラクチャ最適化システム(SOS*)

風車や浮体構造の詳細な最適化

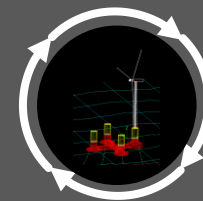
*SOS: Structure Optimization System

解析手法

- 任意の環境外力下の挙動・荷重・発電量解析
- 振動数解析、部材ごとの応力評価
- コントローラを考慮した風車荷重
- シミュレーションベースの製造性、コスト解析

アウトプット

- 浮体の寸法
 - 浮体構造 (スカントリング)
 - 風車のタワー、コントローラ
- 高速に最適化



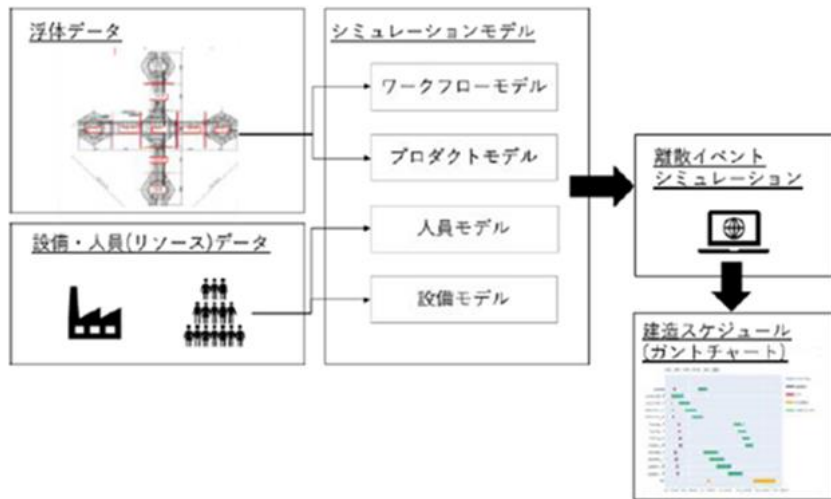
サイトごとに最適化された浮体基礎の設計

② 風車制御パラメータの影響検討

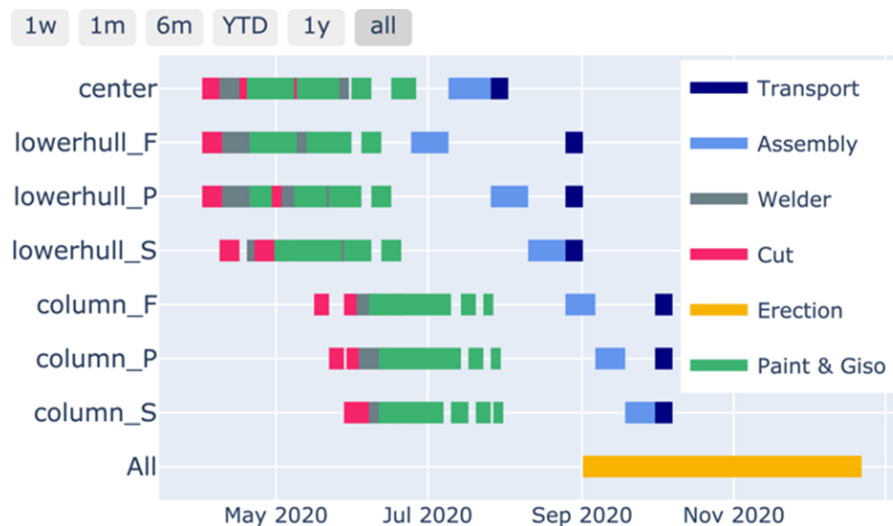
- 風車制御影響を考慮した浮体運動の時刻歴解析を実施し、風車部制御が浮体動揺に及ぼす影響を確認。最適化設計に制御影響の考慮を含めることを可能にした

③ 浮体建造シミュレーション検討

- 必要十分な基数の風車浮体を建造する計画に最適な浮体の設計、設備の組み合わせの検討を目的に、海上技術安全研究所との共同研究を実施
- 建造計画・スケジュールを出力するシミュレーションを開発
- 輸送手法の変更・複数造船所の並行作業等により建造期間の短縮が可能であることを確認



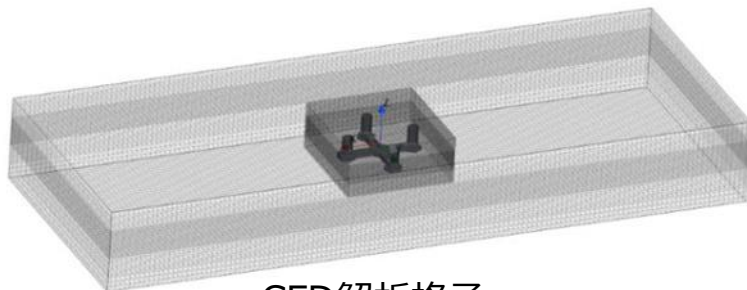
建造シミュレーション概要



建造シミュレーションアウトプット例

④ 最適化設計手法の精度検証

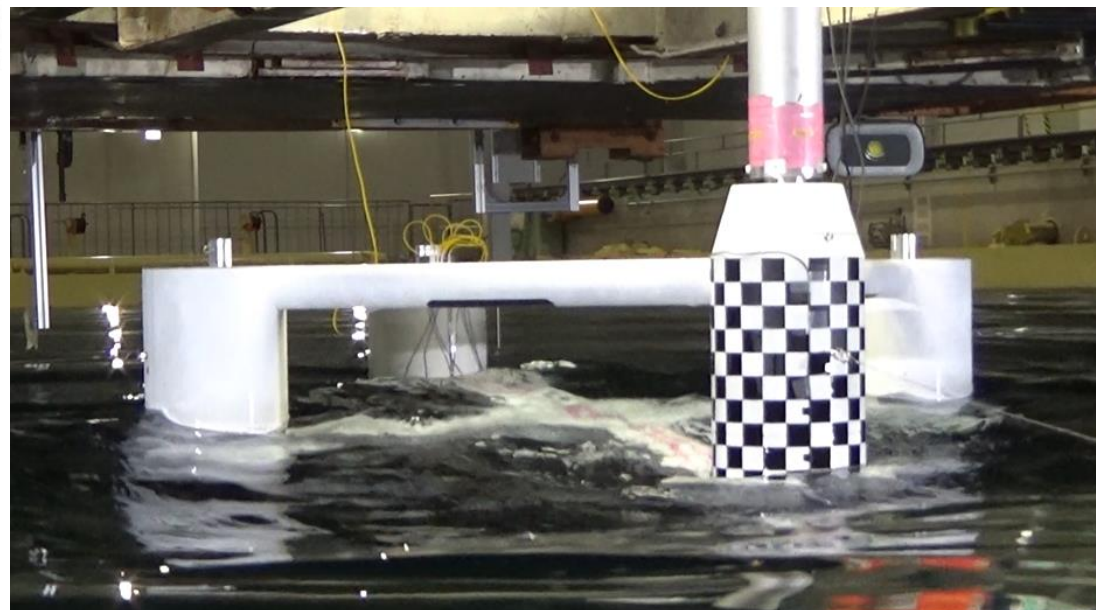
- 開発システムの検証及び高精度化を目的に、CFD計算・連成解析・水槽試験を実施
- 検証結果を最適化システムにフィードバックし、改修・改善を実施



CFD解析格子



連成解析モデル図



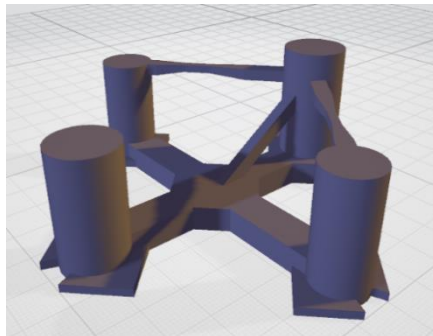
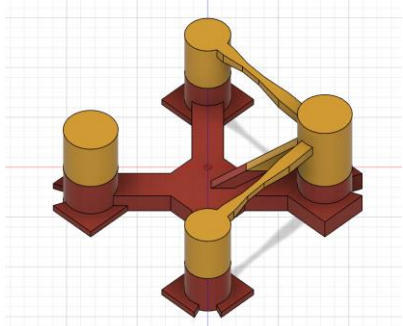
水槽試験の様子

【研究開発内容・成果】

⑤ 最適浮体の開発

- 開発した2段階最適化システムにより、12MW風車を搭載する浮体コンセプトを設計
- 開発浮体に対し初期構造解析を実施し、**性能・構造上成立する最適化コンセプトが完成**

浮体の3Dイメージ



⑥ ベースラインウィンドファーム対応浮体のコンセプト設計及びコスト算出

- 12MW風車搭載浮体形状をベースに、**15MW風車搭載浮体の開発設計**を実施
- 浮体の製造コスト算定を行い、従来技術による場合と比較。**浮体製造コストの削減効果が目標を達成**できていることを確認

【残された課題】

- 浮体詳細設計及び実機での検証
- 風車のさらなる大型化を念頭に、最適化システムを大型風車に対応するものとする

⇒GI基金フェーズ2で解決に取り組む

洋上接合技術

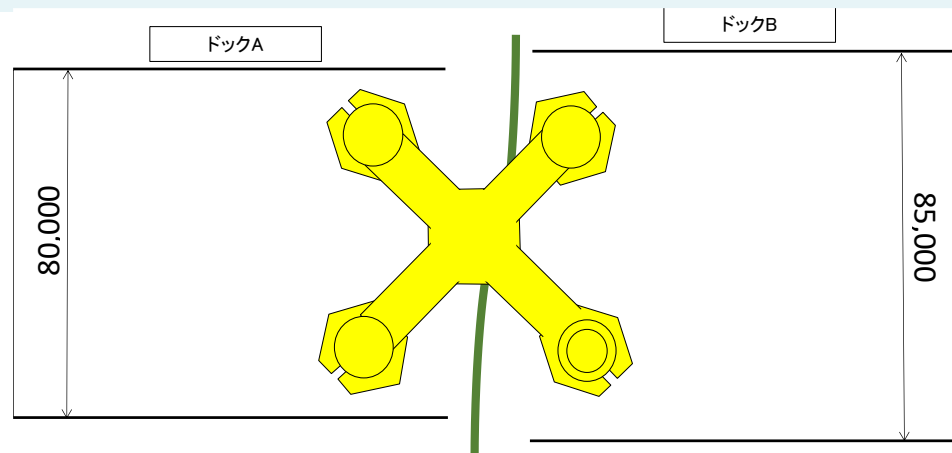
【背景・目的】

浮体建造には造船所ドックを活用することが考えられるが、大型化傾向にある浮体に適した大規模ドックは国内でも限定的なため、将来の大量・高速建造の実現に向けドックサイズに依存しない浮体の大量生産技術を確立する

【研究開発内容・成果】

① ドック内一体型建造時の最適化検討

- 浮体の少量生産時を想定して、ドック内で浮体を完成させるケースを対象に基本的な建造要領・課題を整理
- 一般商船の建造にて使用する3Dモデル等の各種ツール群を利用した詳細検討を、量産体制に関する検討に対して活用できる状態とした。



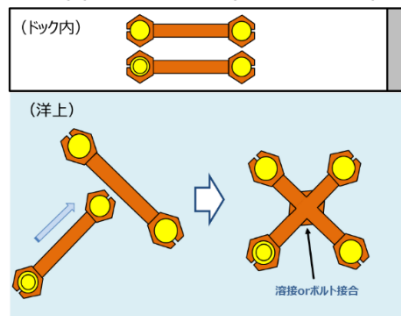
ドック内一体建造を可能とする最大ドック幅の検証例

② 洋上接合技術の検討

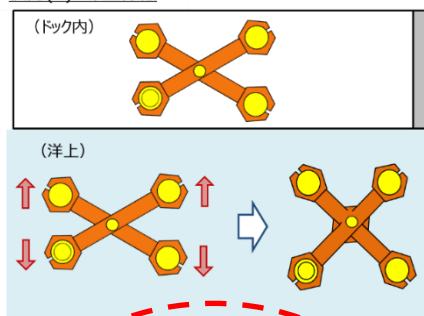
- 中小規模の造船ドックでも建造できるようなサイズの浮体ブロック（浮体ハーフボディ）をドック建造後進水させ、洋上で浮体ハーフボディ同士を溶接接合して浮体を完成させる工法を検討
- 凹型でトンネル状のダクト構造(チャンバー)を接合面喫水線以下の浮体側部から海水を排水することで期中空間を創出する工法「**突き合わせチャンバー方式**」を立案した

洋上接合アイデア検討

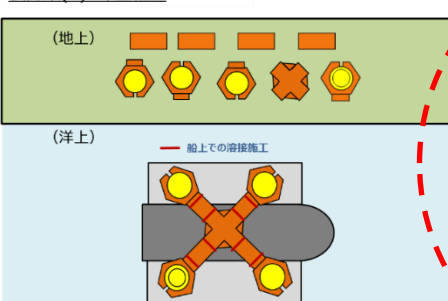
検討案(1) 洋上大規模接合(溶接orボルト接合)



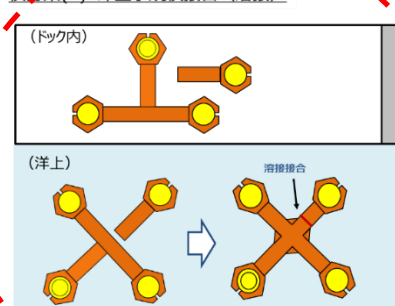
検討案(2) 洋上伸縮



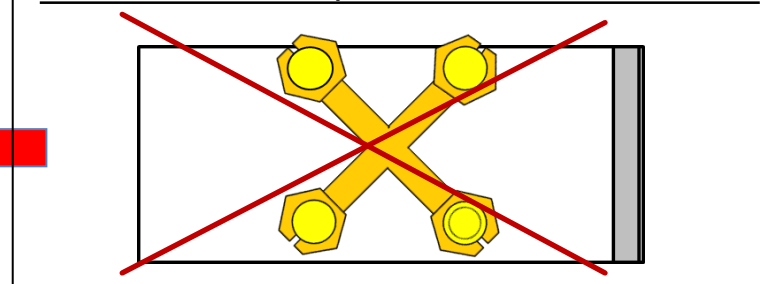
検討案(3) 洋上組立



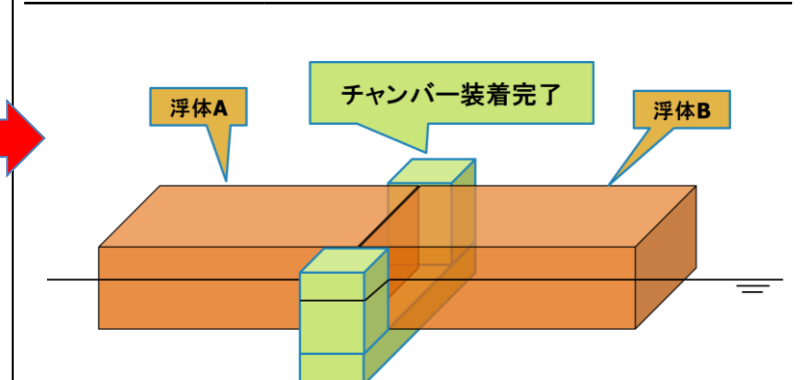
検討案(4) 洋上小規模接合(溶接)



浮体がドック幅に入らず建造不可



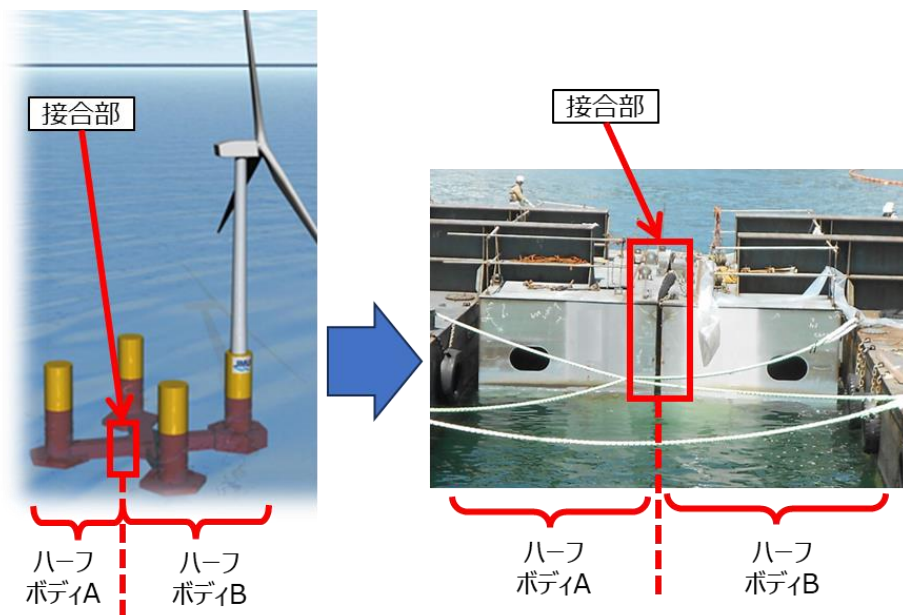
突き合わせチャンバ方式のイメージ



③ 洋上接合工事を想定したモックアップ試験の実施

- 2浮体のハーフボディを模したモックアップ2基および、プロトタイプ版チャンバーを製作して突き合わせチャンバー方式による洋上接合工事の検証実験を実施。工法に大きな問題はなく、実機適用への実現性に目途をつけることができた
- 検証実験を踏まえ洋上接合の作業手順書を作成

浮体モックアップ モデル化要領



洋上接合検証実験の様子



④ 浮体建造最大基数シミュレーション

- ベースラインウインドファームを想定し、大規模ドックでのみ浮体建造（洋上接合技術が確立前）する場合と、中規模ドックも併用して浮体建造（洋上接合技術の確立後）する場合とで、建造基数を比較試算
- 洋上接合技術の確立により、**浮体建造基数の増加目標を達成**できることを確認

中規模ドックでの洋上接合を用いた量産イメージ



【残された課題】

- 洋上接合の実浮体での検証/チャンバー装着方法の改良
- 洋上接合工事時の省人化・短期間化
- 造船所、製作所間での協力体制の整備によるサプライチェーンの構築

⇒GI基金フェーズ2で解決に取り組む

ハイブリッド係留システムの最適化

【背景・目的】

- 係留設備は風車部、浮体部に次ぎコスト比率が高い。従来の鋼製チェーンは高コストなため、合成繊維策を用いたハイブリッド係留システムの研究により、低コスト化を図る必要がある
- ナイロンロープは特に浅海域で高いコスト削減効果が期待されているが、技術レベルの向上と長期耐久性の検証が必要

① ナイロンロープの開発

- 浅海域(50~100m)用の**ナイロンロープを開発**
 - 既存技術を組み合わせた海面・海底面付近での使用を想定
- 研究開発用ロープを試作し、実海域で検証を実施

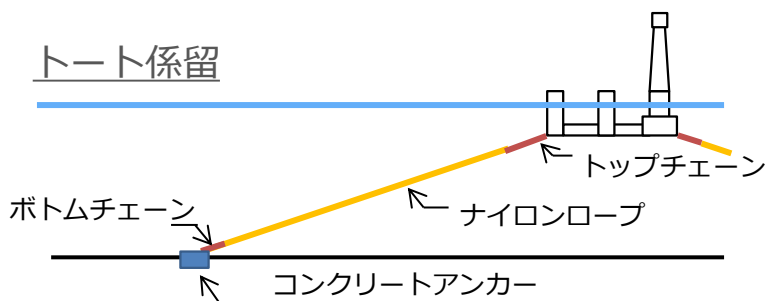
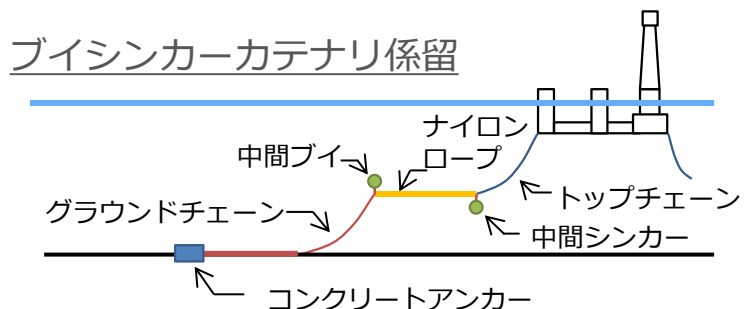
試作ロープ

- 粒子侵入保護用の**サンドフィルターの2重化**
- 生物付着を低減する**防汚塗料を塗布した外装 (ジャケット)**
- 海底面との接触による摩耗を防ぐための**積巻ロープ**

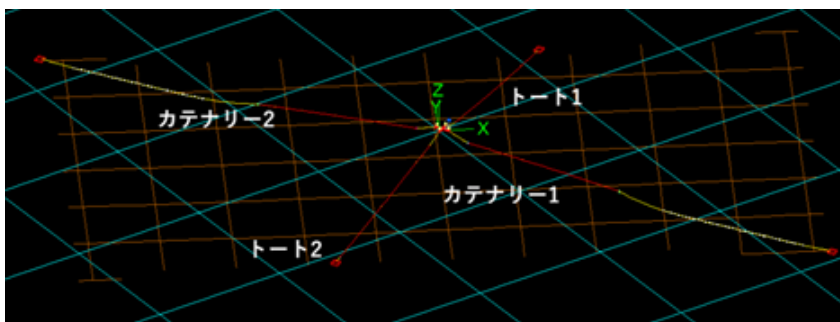


① 実海域試験の実施

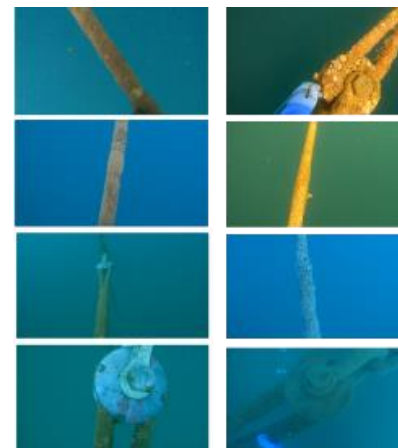
- 試作した**ナイロンロープ**を実海域に設置し、2種類の係留方式で検証
- 実海域使用データを収集・解析し、**長期適用性に大きな問題がないことを確認**



浮体スケールモデル設置



実海域試験用の係留システム



ナイロンロープの水中検査

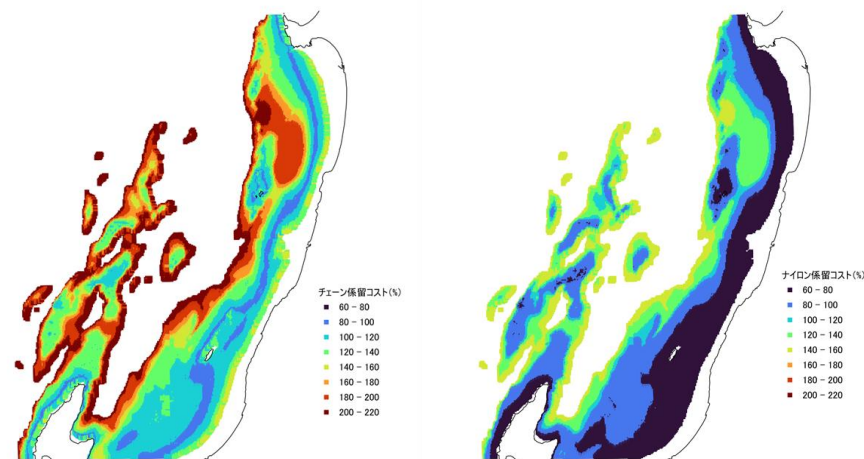
② 開発計画用係留コストマップの作成

- 開発初期段階から適切な係留システム選定・概略コスト推定をすることが必要
 - 水深条件や素材質等によるコスト変動が大→多ケースの事前詳細検討は困難
- 環境条件や浮体情報をインプットすることで、**海域ごとに適した係留システムと概算コストを簡易的・高速に探索するシステム**を構築
- 上記システムを活用し、コストを可視化する**係留コストマップ**を作成

③ ハイブリッド係留によるコスト削減効果

- ハイブリッド係留を用いてベースラインウインドファーム浮体用の係留設計およびコスト算定を実施
- 従来のチェーンカテナリ係留と比較し、**ハイブリッド係留の適用によりコスト削減目標を達成可能**であることを確認

作成した係留コストマップ



左：チェーンカテナリ係留 右：ナイロンハイブリッド係留

【残された課題】

- 大型風車浮体におけるハイブリッド係留の実証
- 実プロジェクトを通じたコストマップの精度検証

⇒GI基金フェーズ2で解決に取り組む

～風車浮体の係留施工作業の低コスト化～

① 浮体式洋上風車向け係留施工技術の検証

- ・ AHTS(Anchor Handling Tug Supply vessel)を起用した作業手順書策定
- ・ ガイドライン策定/公表による社会実装の促進

② 日本国内の関連法規の調査と国際展開見据えた対応

- ・ 海外製AHTSの日本籍化を見据えた改造スペックの準備
- ・ 日本国内での運航を見据えたISO9001に則ったマニュアル類の整備

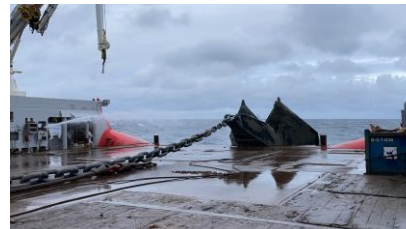
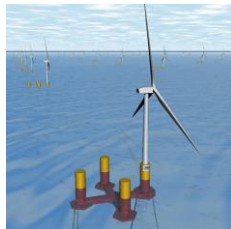
③ 浮体式洋上風車向け専用船の構想

- ・ 専用船コンセプトデザインのAiP認証取得 (Approval in Principle)

浮体式洋上風車向け係留施工技術の検証

係留施工作業のシミュレーションを実施

仮想プロジェクトに基づく作業手順書並びに作業工程を策定



係留施工に関するガイドラインを策定と公表

シミュレーションから得られた知見をClassNKの監修の元にガイドラインとして整理



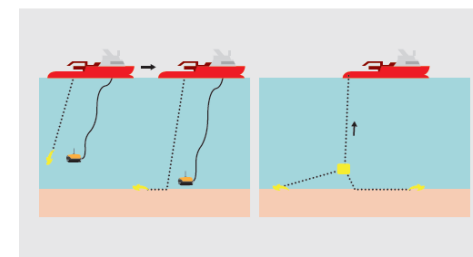
<安全で効率的な工事計画・遂行に寄与>



- 海域情報 (Site information)
- 浮体や係留システム (Floater and Mooring system)
- 使用可能な船舶 (Available vessels) など



- ガイドラインの有効活用による、係留施工方法の検証並びに作業手順書の準備 (Engineering on a method of mooring and its SoW in accordance with Guideline)



- 作業手順書に基づく係留作業の遂行 (Carry out mooring work in accordance with SoW)

浮体式洋上風車向け専用船の構想

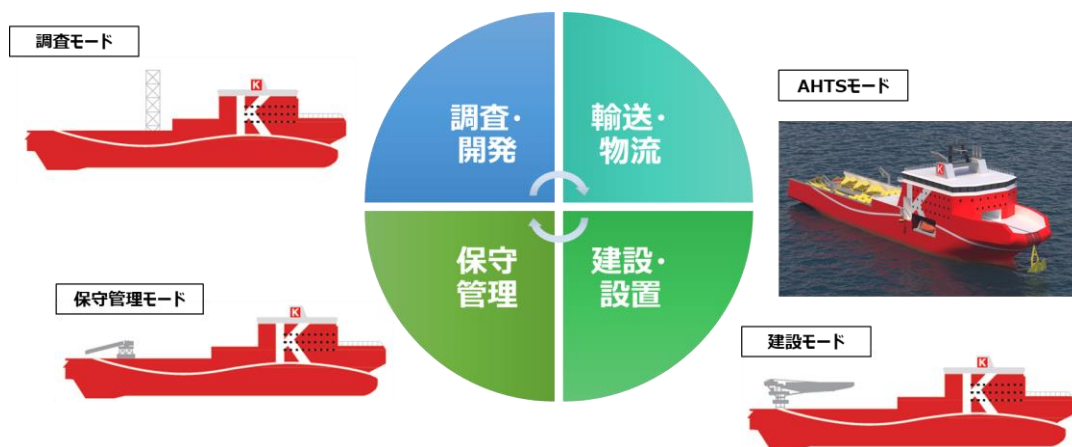
専用船コンセプトデザインのAIP認証取得

商用化を見据えて、係留施工技術の更なる効率化を目指す



主要目表 (Particular)	
主要寸法 (Main Dimension)	Loa: 133.8m / B: 28.0m / Draft: 8.5m
把駐力試験 (Anchor tensioning)	Abt. 900 ton
チェーンロッカー容量 (Chain Locker)	Abt. 2,140m ³
デッキ面積 (Deck Area)	Abt. 1,500m ²
居住区定員 (Accommodation)	船員 (Crew): 20P / その他 (Others): 70P

係留施工技術に留まらず多種・多様な作業ニーズに応える多機能性



条件整理と検討STEP

【条件整理】

- 風車搭載に関する施工検討の条件を整理し、検討対象とする風車仕様やセミサブ型浮体の形状寸法、風車搭載場所を設定した。
(場所は秋田船川港)

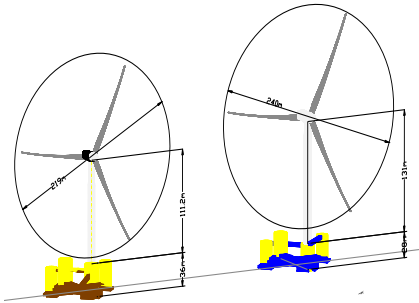


図1 風車の比較 (左12MW 右15MW)

【STEP 1】

- GE社製12MW級風車を対象にセミサブ型浮体への風車搭載方法を検討し搭載に必要な陸上クレーンおよびSEPのクレーン能力を設定した。
- 陸上クレーンは、大重量・高揚程に適応可能なリングリフトクレーン (RLC) の試設計をIHI運搬機械にて実施した。
- SEPによる搭載では、SEP柏鶴(1250t吊)の吊り揚程確保のため、レグの延長による改造対応を検討した。JMU/NSYにて改造設計を実施し、Class NKのAIPを取得した。

【STEP2】

- 15MW級の風車を対象として、陸上クレーンまたはSEPの機種選定・工程 (タクトタイム) ・施工費 (発電コスト単価) を検討した。
- 浮体搭載の専用作業SEPの新造を検討した。
- 施工の効率化を図るため、タワー搭載治具に関する検討として模型実験を行った。またタワー立て起こし装置の試設計をTWD Japanにて実施した。

【STEP3】

- 風車搭載工程を確保するため、作業基地の設備レイアウトを最適化して各工程の効率化、サイクルタイムの短縮を図った。
- ケース毎の比較評価を行った結果、水上構造物 + SEPによる風車組立工法が最も優位となった。

【STEP 1】の成果

12MW級風車の搭載機器に関する検討（陸上RLC案と海上SEP案）

陸上クレーンは800t吊RLC（リングリフトクレーン）、
海上SEPは柏鶴改造（レグ延長）をそれぞれ試設計のうえ採用した。

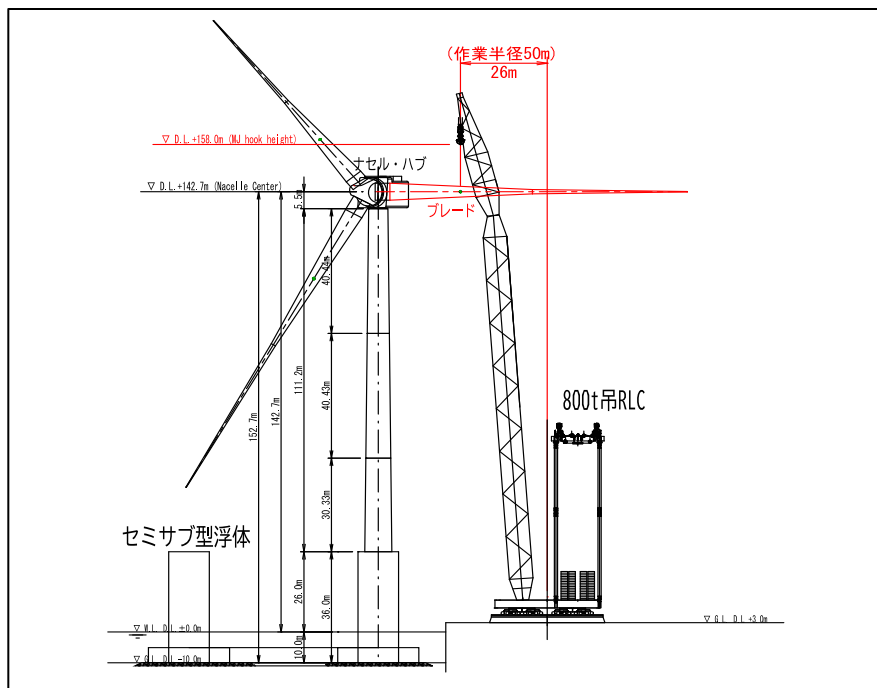


図2 800t陸上RLCにて風車を搭載するイメージ

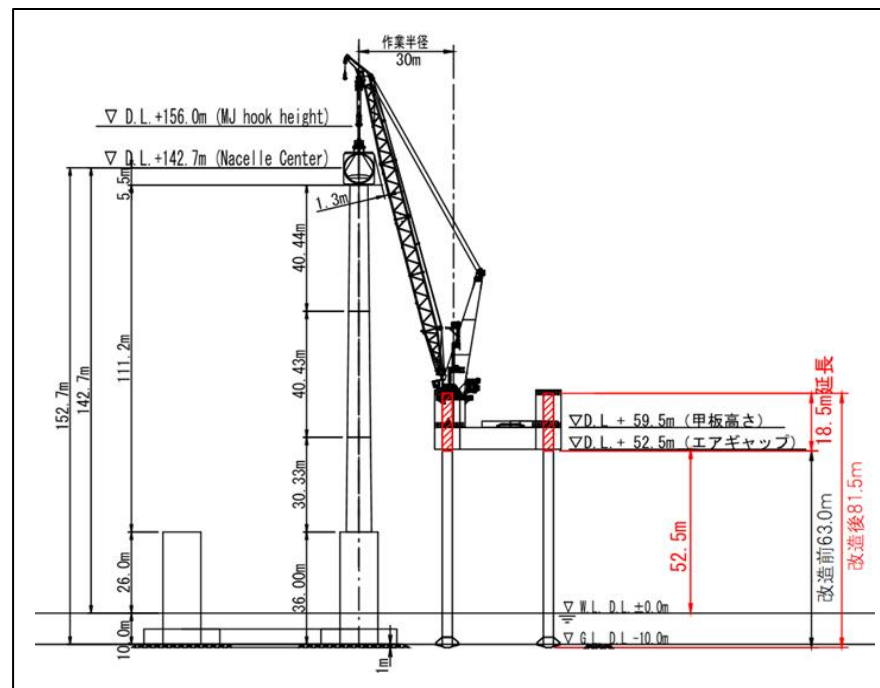


図3 海上SEPにて風車を搭載するイメージ (AiP認証取得済み)

【STEP 2】の成果

タワー搭載治具に関する検討（動揺制御装置模型実験）

＜実験の目的と成果＞

- ・ 浮体基礎に見立てた模型2基のうち、1基のコラムに対して、水平動揺制御治具を取り付け、タワー搭載を行った。
- ・ 波浪と浮体の動揺量を同時に計測した結果、6自由度と波浪の相関関係が得られた。またZおよびYaw以外は治具による動揺制御効果が確認された。
- ・ 平面移動量とタワー搭載時間との相関関係が得られた。

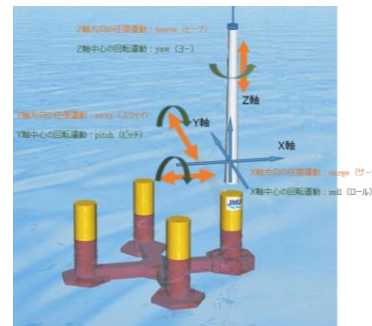


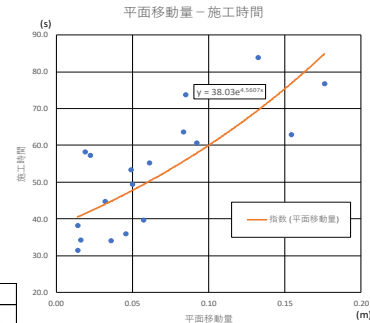
図4 模型実験概要・実験状況動画（右奥が制御装置あり）

表1 模型実験の各種結果

有義値の6自由度系における相関係数

	1/3	1/10	平均
X	0.609	0.552	0.697
Y	0.574	0.575	0.704
Z	0.774	0.656	0.859
Roll	0.702	0.594	0.777
Pitch	0.782	0.709	0.843
Yaw	0.736	0.742	0.656

平面移動量とタワー搭載時間との相関



各自由度系に対する動揺制御効果 (B/A)

	X	Y	Z	Roll	Pitch	Yaw
B/A (全体の平均値)	0.403	0.251	0.615	0.418	0.446	0.688

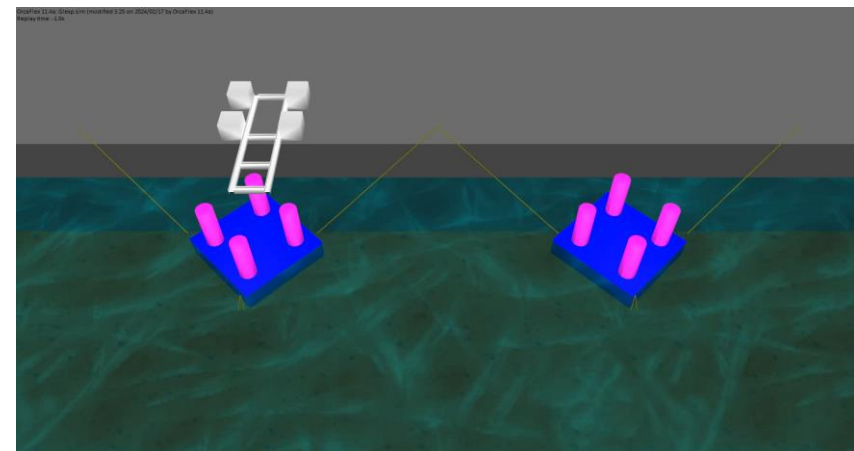


図5 動揺制御実験アニメーション動画（左が制御装置あり）

【STEP3】の成果①、② 【作業基地設備レイアウトの最適化】

① 基地港岸壁 + 大型RLC1,000t : 陸上RLC + 港内浮体仮置き場の配置イメージ

利用インフラ：岸壁延長 約500m、
ヤード10ha、前面水域5ha、
浮体仮置き水域9ha、地耐力35t/m²以上

施工のポイント：RLCにて最大2基ずつ
浮体に風車搭載を行う。浮体は仮置き
水域と岸壁をピストン輸送する。

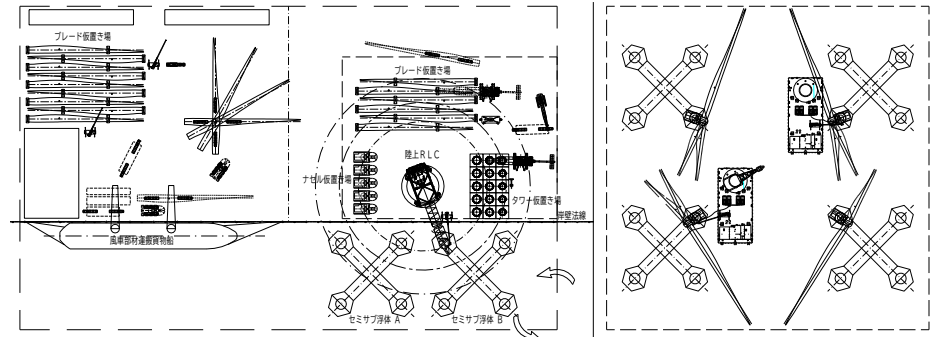


図6 陸上RLC+港内浮体仮置き場のイメージ

② 基地港岸壁 + 専用作業SEP工法：岸壁前面にSEPと浮体配置のイメージ

利用インフラ：岸壁延長 約800m、
ヤード8ha、前面水域12ha、
地耐力10~25t/m²程度

施工のポイント：SEPが移動しながら、
岸壁上の風車部材を岸壁前面の浮体に
直接搭載する。タワー立て起こし装置を使用する事で、地耐力の低減が可能。

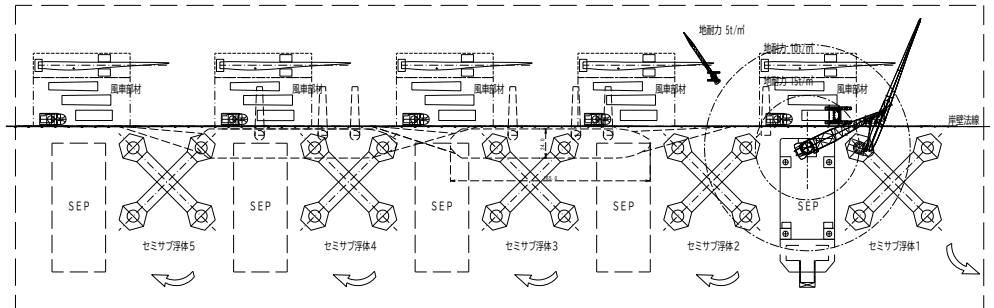


図7 岸壁前面にSEPと浮体配置のイメージ

【STEP 3】の成果③ 【作業基地設備レイアウトの最適化】

③水上構造物 + 専用作業SEP工法：仮設栈橋 + 専用作業SEPの配置イメージ

利用インフラ：岸壁、ヤード不使用、港内静穏水域24ha
 仮設栈橋3ha、栈橋の上載荷重10~20t/m²

施工のポイント：

- SEPが水上構造物の周囲を移動しながら風車を搭載しプレコミッショニング後、現場に曳航する。浮体基礎移動後新たな風車部材の搬入・浮体基礎の仮置きを行うことで風車搭載を連続して施工。またタワー立て起こし装置を使用することで、栈橋上載荷重の低減が可能。

※当該工法は国内外への特許出願中

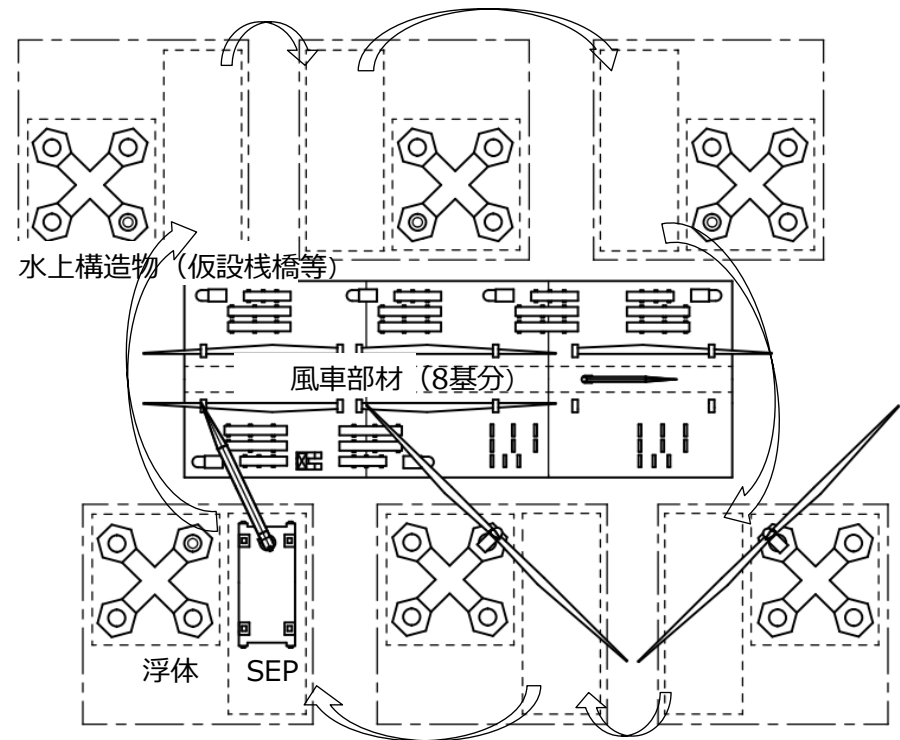


図9 仮設栈橋 + 専用作業SEPの配置イメージ

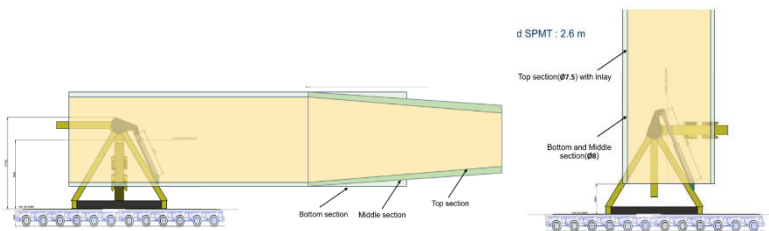


図8 自走式タワー立て起こし装置のイメージ

全体の研究成果・今後の技術課題

従来工法と新工法（水上構造物+SEP工法）の優位性比較

表2 従来工法と新工法の優位性比較表

種別	番号	工法 単位	基地港湾インフラストラクチャ					実現可能性	タクトタイム (基/月換算)	備考
			岸壁	陸上面積	水上面積	水上構造物	最大上載荷重			
			m	ha	ha	ha	t/m ²			
従来	(1)	基地港岸壁 +大型RLC1,000t	500	10	14	—	35以上	△	2.5	岸壁延長確保が課題
	(2)	基地港岸壁+専用作業SEP1,300t	800	8	12	—	10~25	△	3.6	岸壁延長確保が課題
新	(新)	水上構造物+専用作業SEP1,300t	0	0	24	3	(10~20)	○	4.2	港湾内の水域を利用
整備済み基地港湾の標準的な仕様			200	8	3	—	35	—	—	基地港湾のあり方検討会(R4.2国土交通省)より※

上表より、浮体式洋上風車の量産化について、従来工法では**岸壁延長の不足**が最大の課題となっている。また基地港湾は主に着床式洋上風力事業およびO&Mに使用されるため、これを補完しながら浮体式洋上風力事業の促進を図るためには、**水上構造物+SEP工法を用いた大型風車組立の高速化**が急務であると判断し、これを今後当社のフェーズ2研究開発でのメインテーマとして取り組み、更なる生産の高速化と低コスト化の達成を目指す。

※ 出典：2050年カーボンニュートラル実現のための基地港湾のあり方検討会～基地港湾の配置および規模（令和4年2月 国土交通省港湾局）

まとめ

研究開発内容	KPI	達成状況
1.浮体基礎の最適化	浮体基礎の製造コスト削減	2段階の浮体最適化システムを構築。浮体コンセプトのコスト削減効果を確認。
2.浮体の量産化	生産能力、量産能力の増大	浮体の洋上接合技術の実現性を検証。浮体量産能力の増大実現性を確認。
3.ハイブリッド係留システムの最適化	浮体係留のコスト削減	ハイブリッド係留設計手法を最適化。ハイブリッド係留によるコスト削減効果を確認。
4-1.低コスト施工技術の開発 • 風車浮体設置	風車浮体設置のコスト削減	風車設置専用船を開発。専用船による浮体設置コスト削減効果を確認。
4-2.低コスト施工技術の開発 • 風車搭載	風車搭載のコスト削減	水上構造物 + SEPによる風車搭載工法を開発。同工法により風車搭載コストの削減を確認。

上記の研究成果により、一定条件下でのウィンドファーム（ベースラインウィンドファーム）における以下の**目標を達成**できることが確認された。

- 発電単価(LCOE) : 11.2円 / kWh
- 国内経済波及効果 : 約724億円
- CO2削減量 : 約20.8万トン