

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.12

グリーンイノベーション基金事業／ 洋上風力発電の低コスト化／ 浮体式基礎製造・設置低コスト化技術開発事業／ 15MW級大型風車に対応した低コスト型ハイブリッド スパー浮体量産システムの開発

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

発表者名 酒井 賢太

*団体名 戸田建設(株)

(太平洋セメント(株)、日本ヒューム(株)、(株)横河NSエンジニアリング、アジア海洋(株))

問い合わせ先 戸田建設株式会社 keishi.nishiyama@toda.co.jp(西山) kenta.sakai@toda.co.jp(酒井)

事業概要



1. 目的

本事業は、15MW級大型風車に対応した低コスト型ハイブリッドスパー浮体量産システムの開発のために、①プレストレストコンクリート（以下、PC）部軽量化技術の開発、②鋼製部設計最適化技術の開発、③係留の開発、④礫質土対応杭式アンカー打設工法の開発を実施した。

2. 期間

2022年3月 ～ 2024年3月

3. 目標（最終）

世界で未だ実現していない、世界最大級となる大型風車に対応した、量産化に対応した低コスト浮体を開発することを目標とした。

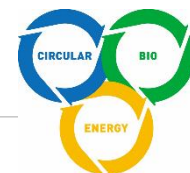
4. 成果・進捗概要

①PC部軽量化技術の開発：PC部重量を従来工法より低減する見通しがついた。

②鋼製部設計最適化技術の開発：補剛形式と建造方法の組合せを考慮した設計により従来の建造コストより低減する見通しがついた。

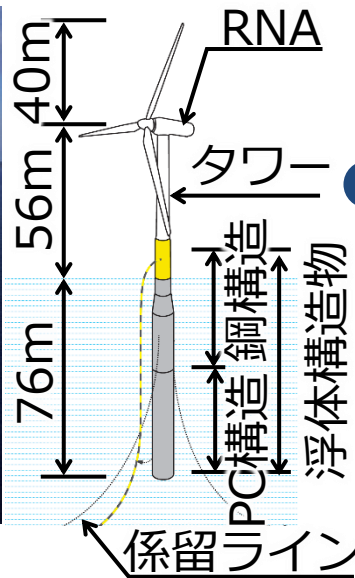
③係留の開発：係留範囲を従来より低減できる見通しがついた。

④礫質土対応杭式アンカー打設工法の開発：礫、貝殻などを含む地盤に対応した手法を開発した。

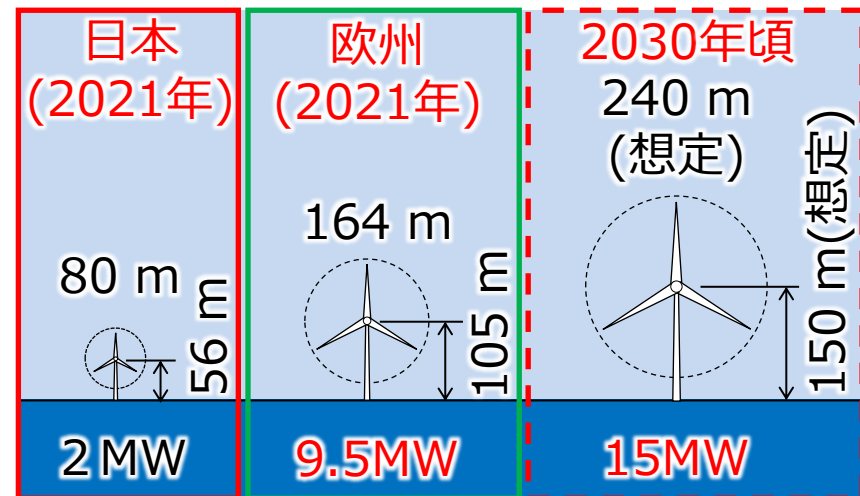


1. 背景および目的

国内の浮体式洋上風力発電事業の現状



2030年頃の浮体式洋上風車の規模



2030年頃の浮体施設への要求事項

- 15MW級風車への適応
- 量産化にともなう低コスト化

要求事項を満足する浮体施設の開発が必要

本研究開発の目的

15MW級大型風車に対応した低コスト型
ハイブリッドスパー浮体量産システムの
開発

2. 開発目標・開発項目・実施内容

開発項目

15MW級大型風車に対応した
低コスト型ハイブリッドスパー
浮体量産システムの開発

実施内容

- ① PC部軽量化技術の開発
- ② 鋼製部設計最適化技術の開発
- ③ 係留の開発
- ④ 礫質土対応杭式アンカー打設工法の開発

開発目標

世界で未だ実現していない、世界最大級となる大型風車に対応した、量産化に対応した低コスト浮体の開発。

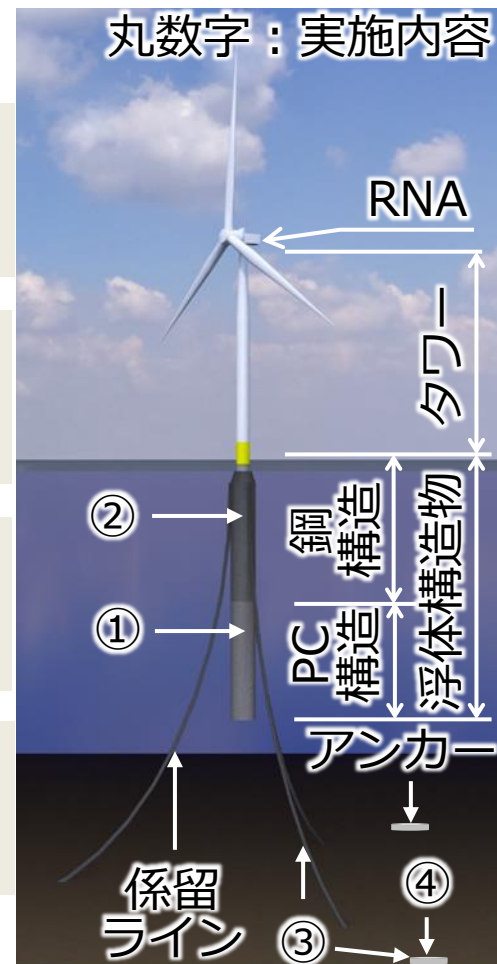
KPI

大型浮体におけるPC部セグメント重量を従来工法より低減

大型浮体において鋼製部建造単価を従来より低減

係留範囲を従来より低減

礫、貝殻など、サクション方式が困難な日本の地盤に対応した工法を実証



2. 開発目標・開発項目・実施内容

実施内容	KPI	現状	達成レベル	解決方法
1 PC部軽量化技術の開発	大型浮体におけるPC部重量を従来工法より低減	当該材料の効果が予想されている (開始時TRL 3)	実大規模の実験を実施 (TRL 6)	超高強度コンクリートの採用
2 鋼製部設計最適化技術の開発	大型浮体において鋼製部建造コストを従来より低減	設計が建造コストを考慮していない (開始時TRL 3)	量産化設計と実大要素試験を実施 (TRL 6)	鋼製部設計の最適化
3 係留の開発	係留範囲を従来より低減	静穏海域で要素試験を実施 (開始時TRL5)	実海域での要素試験を実施 (TRL 6)	セミトート係留の採用
4 礫質土対応杭式アンカー打設工法の開発	礫、貝殻など、サクション方式が困難な地盤に対応した手法を開発	適応水深が浅い (開始時TRL 4)	大水深に対応した工法を実証 (TRL 6)	陸上・浅海域用杭打ち機の大水深対応



2. 開発目標・開発項目・実施内容

実施内容

解決方法

課題

1 PC部軽量化技術の開発

超高強度
コンクリートの採用

- ・自己収縮に起因したひび割れの発生防止
- ・温度応力に起因したひび割れの発生防止
- ・製作部材の品質ばらつきの低減

2 鋼製部設計最適化技術の開発

鋼製部設計の最適化

- ・建造手法を考慮した鋼製部の設計最適化
- ・溶接の省人化
- ・板厚が厚い鋼板の突合せ溶接継手部の品質確認

3 係留の開発

セミトート係留の採用

- ・セミトート係留の有効性検証
- ・杭式アンカーの設計方法の確立

4 礫質土対応杭式アンカー打設工法の開発

陸上・浅海域用杭打ち機の大水深対応

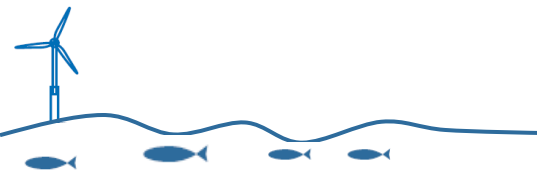
- ・バイブロハンマーの耐水耐圧構造の設定
- ・深海仕様のバイブロハンマーシステムによる杭式アンカーの打設、撤去

※**赤字**：成果報告会での報告事項



3. 研究スケジュール

実施内容	2021年度					2022年度					2023年度				
	3	4	7	10	1	4	7	10	1	3	4	7	10	1	3
① PC部軽量化技術の開発		軽量化検討		要素試験			小型モックアップ製作								まとめ
							実大組立試験						コスト算定		
② 鋼製部設計最適化技術の開発		最適化設計					建造システム検討								まとめ
							実大組立試験						コスト算定		
③ 係留の開発		セミトート係留の机上検証					杭式アンカーの設計						実証		まとめ
④ 礫質土対応杭式アンカー打設工法の開発		バイブロハンマーの選定					耐水耐圧構造等の検討					深海仕様のバイブロハンマーシステムの製作		実証	まとめ



4. 研究成果 – ①PC部軽量化技術の開発 –

自己収縮に起因したひび割れ防止対策の検討

(1) 背景 (課題)

コンクリートの種類	普通コン	超高強度コン
水結合材比	大きい	小さい
単位結合材量	少ない	多い
自己収縮量	小さい	大きい
自己収縮ひび割れ発生リスク	低い	高い

自己収縮ひび割れの発生に影響を与えるPC部の要因

- ・ シース
- ・ インサート
- ・ 円筒構造 など

リスクが
更に高まる

課題
自己収縮
ひび割れの
発生防止

(2) 目的

超高強度コンクリートを採用したPC部の自己収縮ひび割れの発生防止

(3) 実施項目

- ① 小型角柱試験体(100×100×400mm)を用いた自己収縮ひずみ低減効果の確認
 - ・ 収縮低減剤の添加方法と添加量（配合に内割：2、4kg/m³、配合に外割：2～24kg/m³）をパラメータに材齢48時間までコンクリートひずみを測定
- ② 小型モックアップ部材の製作による自己収縮ひび割れ防止対策の検証
 - ・ 円弧形状の小型モックアップ部材を製作し、ひび割れの発生状況を確認することでひび割れ防止対策を検証
- ③ 実大部材の製作による自己収縮ひび割れ防止対策の検証
 - ・ 実大円弧形状部材を製作し、ひび割れの発生状況を確認することでひび割れ防止対策を検証

4. 研究成果 – ①PC部軽量化技術の開発 –

(4) 研究成果

① 小型角柱試験体を用いた自己収縮ひずみ低減効果の確認

- ・収縮低減剤の添加量を $4\text{kg}/\text{m}^3$ 以上とすることで自己収縮ひずみが低減できることを確認

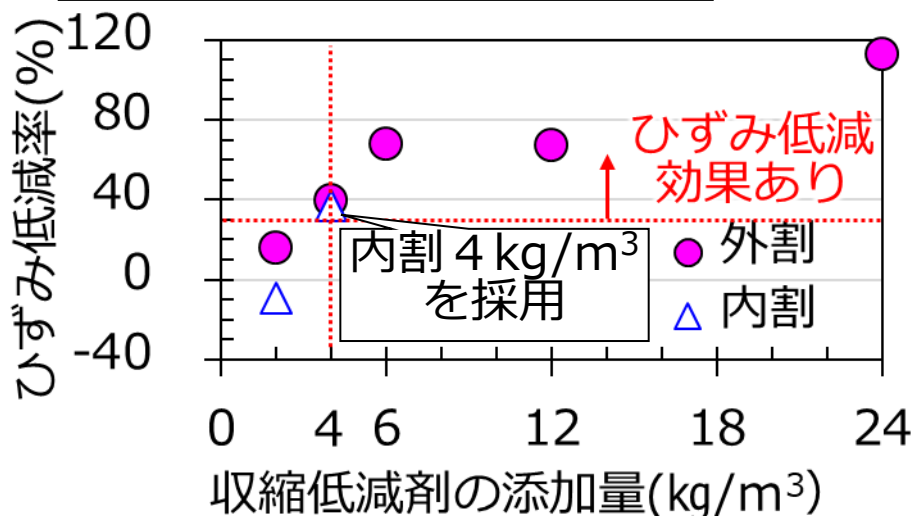
② 小型モックアップ部材の製作による自己収縮ひび割れ防止対策の検証

- ・ひび割れの発生がないことを確認

③ 実大部材の製作による自己収縮ひび割れ防止対策の検証

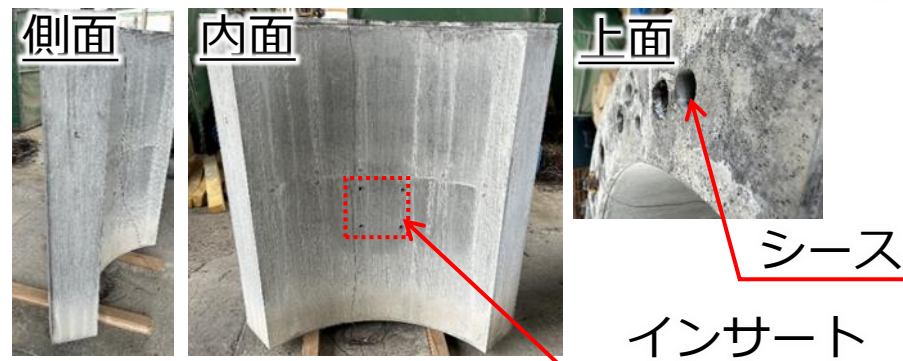
- ・ひび割れの発生を確認。ただし、部材全面にひび割れが発生していないため収縮低減剤の添加は、一定のひび割れ発生リスクの低減効果があったと想定。

ひずみ低減率※と添加量の関係



※無添加の配合における収縮ひずみに対する収縮低減剤の添加により低減した収縮ひずみの割合

小型モックアップ部材の外観 **ひび割れなし**



実大部材の外観



ひび割れあり
※左写真の赤線

4. 研究成果 – ②鋼製部設計最適化技術の開発 –

板厚が厚い鋼板の突合せ溶接継手部の品質確認 方法の検討

(1) 背景 (課題)

岸壁付近のヤード内で実施する板厚が厚い突合せ溶接継手部の品質確認試験に対する課題

試験法	課題
放射線透過試験 (以下、RT)	- 試験装置の大型化 - 試験期間の長期化
超音波探傷試験 (以下、MUT)	- 省人化が図りにくい - 計測データが電子データとして記録不可

解決策： 先進的非破壊試験法の適用

- 自動超音波探傷試験
(以下、AUT)
- フェーズドアレイ超音波探傷試験 (以下、PAUT)
- Time of Flight Diffraction
(以下、TOFD)

新たな課題

曲げ加工 + 板厚が厚い鋼板
(以下、曲げ鋼板) に先進的
非破壊試験法が適用できるか
不明

(2) 目的

完全溶け込み溶接を適用した曲げ鋼板の突合せ継手部に対する先進的非破壊試験法の適用

(3) 実施項目

① 曲げ鋼板の突合せ継手部におけるMUT、AUT、PAUT、TOFDの適用可能性の確認

- 実大試験体 (右表参照) の溶接継手部に対し非破壊試験を実施
- 各試験方法で検出された内部きずの長さ、位置個数を比較

実大試験体の諸元

母材	KE32	
板厚	80 mm	
溶接長	3.2 m/継手	
溶接方法	CO ₂ 自動	EGW
試験対象の継手数	2	1

4. 研究成果 – ②鋼製部設計最適化技術の開発 –

(4) 研究成果

① 曲げ鋼板の突合せ継手部におけるMUT、AUT、PAUT、TOFDの適用可能性の確認

- 曲げ鋼板に**AUT**を適用する場合、**装置の工夫が必要**
- **実用化**に向けて、**意図的に内部きずを付けた試験体**を用いて**検出精度の評価**が必要。得られた結果に基づいて非破壊試験法を選定。

比較試験の様子



試験結果の比較と適用可能性の評価

試験方法	探傷範囲 (mm)	内部きずの計測結果			適用可能性
		長さ (mm)	板厚方向位置 (mm)	検出数 (個)	
MUT	9600	2~24	40~60	49	○
AUT	1000	16	40	1	-
PAUT	9600	2~210	15~65	136	○
TOFD	9600	1~499	40~70	76	○

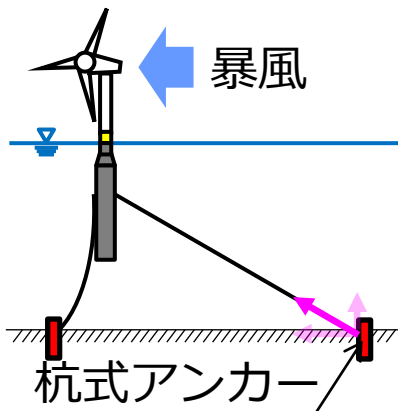
1.6倍

2.8倍

4. 研究成果 – ③係留の開発 –

セミトート係留における杭式アンカーの設計方法の検討

(1) 背景 (課題)



暴風時のみ係留ラインの全長が離底

係留方式	カテナリー	セミトート
アンカーへの係留力の作用方向	水平	水平 + 鉛直(暴風時)
係留半径	大	小
コスト	高	低

課題

杭式アンカーに対する設計方法の確立

鉛直方向の分力に抵抗可能な杭式アンカーを採用

(2) 目的

杭式アンカーの設計方法の確立

(3) 実施項目

① 杭式アンカーに要求される把駐力の評価方法の検証

- ・ 実海域での海底地盤調査
- ・ 杭式アンカーの設計 (FEMによる、**把駐力** 4 t (安全率1.0) と設定)
- ・ 実海域で杭式アンカーに対する把駐力試験の実施
- ・ 設計値 (解析値) と実測値の比較、評価

本検証の把駐力の定義は、杭径の10%の杭頭変位となる荷重

設定根拠

中谷ら※は、鉛直載荷試験では杭径の10%、水平載荷試験では杭径の15%の杭頭変位を極限支持力と定義

※中谷 昌一, 白戸真大, 横幕清: 杭の軸方向の変形特性に関する研究, 土木研究所, 土木研究所資料第4139号, 2009年3月。

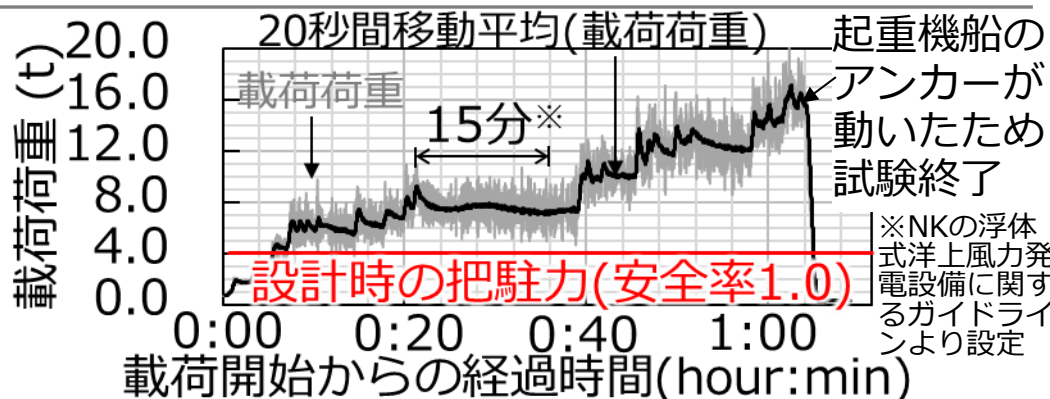
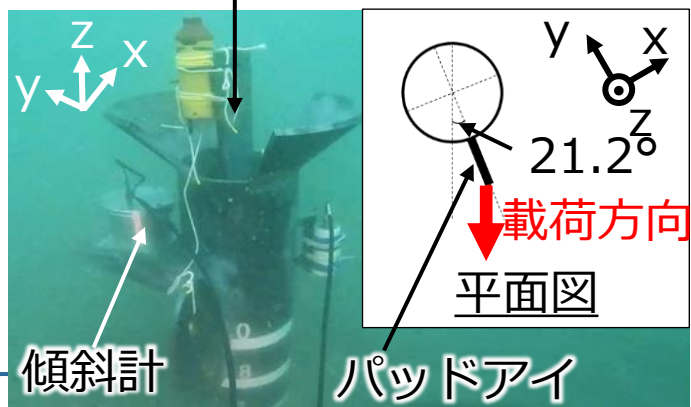
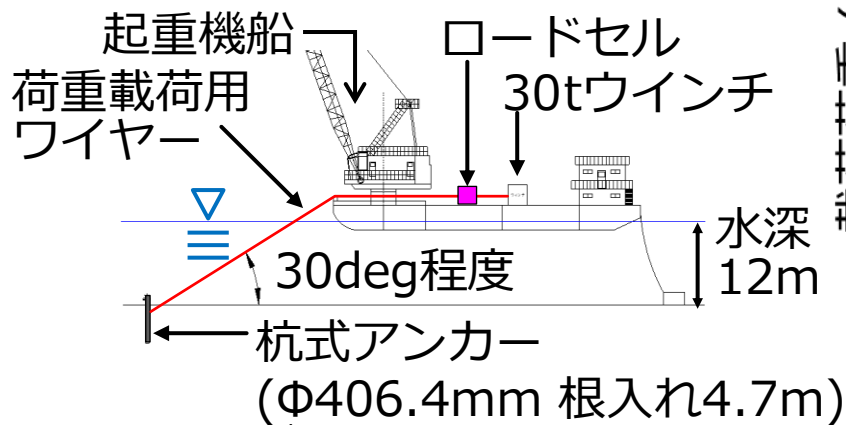
4. 研究成果－③係留の開発－

(4) 研究成果

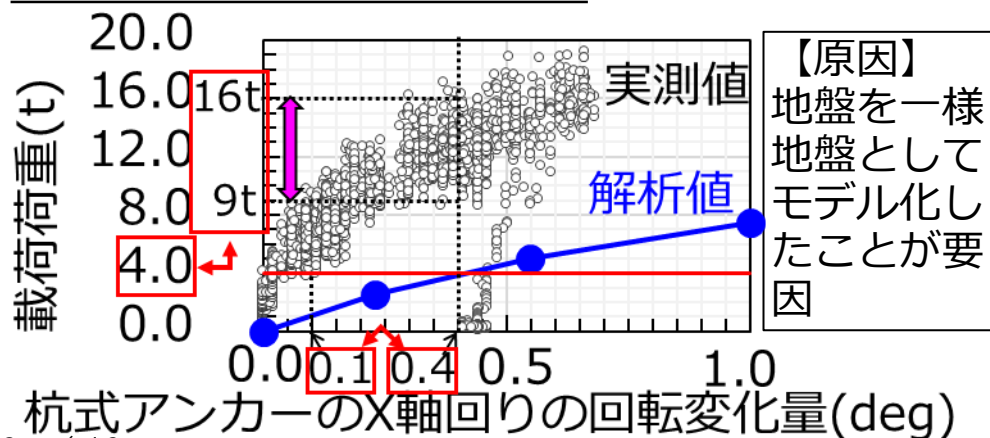
① 杭式アンカーに要求される把駐力の評価方法の検証

- **FEM解析**による解析値は、把駐力試験結果の実測値と比較して同荷重に対する傾斜角度の変化量が大きく、**把駐力を過小評価**することを確認
- **経済的な杭式アンカーの設計**のためには、FEM解析における**地盤条件のより厳密な設定が必要**。

把駐力試験の概要と試験結果



FEM解析値と実測値の比較



4. 研究成果 – ④礫質土対応杭式アンカー打設工法の開発 –

深海仕様のバイブロハンマーシステムによる杭式アンカーの打設、撤去

(1) 背景 (課題)

杭式アンカーの打設工法に関する当社の既往成果



- 透水性の高い砂地盤に対し、サクションアンカーは打設、運用、撤去が可能であることを実証
- 打設時にサクション圧が限界サクション圧を超えたため、ポンプ能力を調整し、目標貫入速度より低い速度でアンカーを打設

↓
日本の海底地盤は、透水係数が高い礫質地盤や貝殻層が多い

↓
課題：洋上施工の長期化にともない、**施工コストが増大**

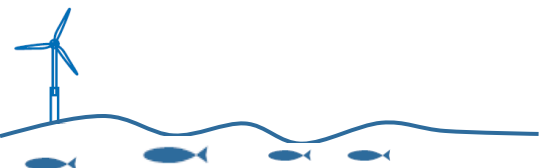
(2) 目的

礫、砂、粘土地盤に杭打ちが可能な深海仕様のバイブロハンマーシステムを用いた杭式アンカーの打設工法の開発

(3) 実施項目

① 深海仕様のバイブロハンマーシステムによる杭式アンカーの打設、撤去試験

- 貝殻混じりの粘性土質砂の海底地盤に対し、水中バイブロハンマーシステムにより、杭式アンカーの打設、撤去を実施

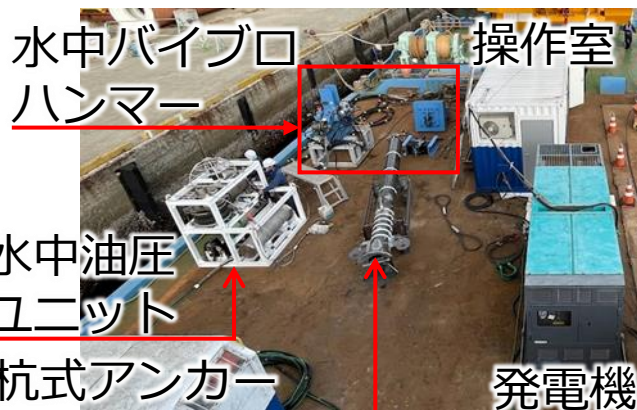


4. 研究成果 – ④礫質土対応杭式アンカー打設工法の開発 –

(4) 研究成果

- ① 深海仕様のバイブロハンマーシステムによる杭式アンカーの打設、撤去試験
- ・ 実海域で深海仕様のバイブロハンマーシステムによる杭式アンカーの打設、撤去が可能であることを実証

深海仕様のバイブロハンマーシステムの全景



深海仕様のバイブロハンマーシステムによる杭式アンカーの打設、撤去試験



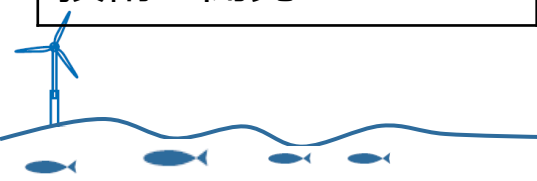
5. 今後の技術課題

- ・ 成果報告会での報告事項に対する主な技術課題と解決の見通しは下記のとおり。

実施内容	主な技術課題	解決の見通し
① PC部軽量化技術の開発	・ コンクリート部材製作時のひび割れ発生防止対策の確立	・ 収縮低減剤の添加量の増加
② 鋼製部設計最適化技術の開発	・ 板厚が厚い鋼板の突合せ溶接継手部の品質確認が可能な非破壊試験法の選定	・ 意図的に内部きずを付けた試験体を用いた検出精度の評価
③ 係留の開発	・ 杭式アンカーの把駐力評価方法の確立	・ 海底地盤の土質と杭式アンカーの把駐力の実測値の蓄積
④ 礫質土対応杭式アンカー打設工法の開発	・ 実大規模の杭式アンカーの打設、撤去への対応	・ 複数のバイブロハンマーの同調運転にともなう起振力の増加



コストミニマムを実現する風車一括搭載技術の開発	・ スパー型浮体施設への大型風車の搭載技術の確立	・ (課題解決に向けて様々な検討や実験を実施予定)
-------------------------	--------------------------	---------------------------



6. まとめ

実施内容

KPI

達成レベル

本研究開発の成果

1 PC部軽量化技術の開発

大型浮体におけるPC部重量を従来工法より低減

実大規模の実験を実施

⇒達成



PC部重量を従来工法より低減する見通しがついた

2 鋼製部設計最適化技術の開発

大型浮体において鋼製部建造コストを従来より低減

量産化設計と実大要素試験を実施

⇒達成



鋼製部建造コストを従来より低減する見通しがついた

3 係留の開発

係留範囲を従来より低減

実海域での要素試験を実施

⇒達成



係留範囲を従来より低減する見通しがついた

4 礫質土対応杭式アンカー打設工法の開発

礫、貝殻など、サクシヨン方式が困難な地盤に対応した手法を開発

大水深に対応した工法を実証

⇒達成



サクシヨン方式が困難な地盤に対応した手法を開発することができた

浮体施設の建造と風車搭載・係留の施工をあわせた**次世代型のスパーを開発**し、浮体式洋上風力を**国際競争力のあるコストで商用化**できる段階まで引き上げ、**2050年カーボンニュートラルの実現に貢献**していきます。