

福島沖での浮体式洋上風力 発電システム実証研究事業

総括委員会最終報告書 概要版

令和4年8月

**福島沖での浮体式洋上風力発電システム実証研究事業
総括委員会**

Contents

1. 福島浮体式実証研究事業の総括委員会について
2. 実証概要（実証背景・目的・実証設備概要・福島洋上風力コンソーシアムについて）
3. 実証成果検証結果 サマリー
成果検証結果①：社会受容性を含む技術実証の視点から ～ 安全性・信頼性・経済性 ～
成果検証結果②：設備利用率を含む社会実装に向けた課題整理の視点から
成果検証結果③：福島における産業集積に向けた視点から
4. 成果詳細①：実証成果で得られた技術・ノウハウ
成果詳細②：気象・海象データの取得
成果詳細③：浮体式洋上変電所の設置・運転
成果詳細④：漁業との共存
成果詳細⑤：国内の設計基準への反映・国際基準への提案
成果詳細⑥：浮体式洋上風力発電導入マニュアルの策定
5. 実証経緯と課題
6. 実証計画の見直しと主な動き
7. 提言

1. 福島浮体式実証研究事業の総括委員会について

- これまでの実証事業の総括を第三者の立場で検証し、その結果を取りまとめるため、**外部有識者からなる総括委員会を設置**
- 総括委員会において、これまでの報告書等について第三者の立場で検証し、その結果について取りまとめを実施

氏名	役職
永尾 徹（委員長）	足利大学大学院工学研究科 特任教授
石井 雅也	太陽有限責任監査法人 シニアパートナー・公認会計士
上田 悦紀	一般社団法人日本風力発電協会 国際部長
宇都宮 智昭	九州大学工学研究院海洋システム工学部門 教授
清宮 理	一般財団法人沿岸技術研究センター 参与
高野 裕文	一般財団法人 日本海事協会 副会長
長谷川 雅巳	一般社団法人日本経済団体連合会 環境エネルギー本部長
原田 文代	株式会社日本政策投資銀行 執行役員（GRIT担当） 兼 経営企画部サステナビリティ経営企画室長
松本 真由美	東京大学 教養学部附属教養教育高度化機構（KOMEX） 環境エネルギー科学特別部門 客員准教授
松山 優治	東京海洋大学 名誉教授

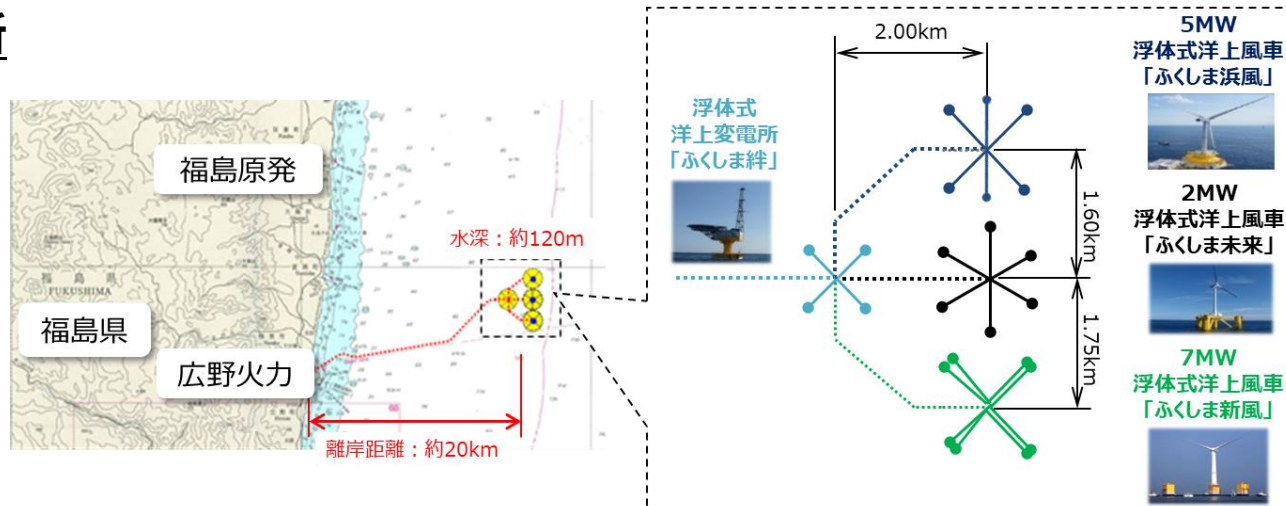
○総括委員会の開催実績（計4回）

第1回：令和3年11月21日、第2回：令和3年12月21日、第3回：令和4年2月9日、第4回：令和4年3月10日

2. 実証事業の概要①：実証背景・目的

- 東日本大震災等を契機とした再エネの重要性や福島県の復興等を背景とし、世界最大級の浮体式洋上風力発電所実現のため、福島県沖で浮体式洋上風力発電システムの実証研究事業を立ち上げ
- 以下の3つの目的を掲げ、実証研究事業を実施
 - ① 世界初の複数基による浮体式洋上風力発電システムの実証を行い、安全性・信頼性・経済性を明らかにする。
 - ② 発電事業が見通せるような設備利用率を達成し、県や民間主導による本格的な浮体式洋上ウィンドファームの実現を目指す。
 - ③ 福島沖の浮体式洋上風力発電システムの実証と事業化により風力発電関連産業の集積を期待

実証実施場所



2. 実証事業の概要②：福島浮体式実証研究事業における実証設備

- 様々なコンセプトに基づく風車と浮体の特性を明らかにするため、発電方式や規模、浮体の形状等を組み合わせ、**変電所 1 基と風車 3 基との計 4 基**を設置

ふくしま絆

浮体式洋上変電所
平成25年11月運転開始
(令和3年撤去)



- 変電所：日立製作所
- 浮体：ジャパン マリンユナイテッド (アドバンストスパー浮体)

◎ 水面から上部の観測タワーまでの高さ：60m
◎ 喫水部分(*)：50m
※ 水面から船底の長さ
◎ アンカー・チェーン数：4式

ふくしま未来

コンパクトセミサブ浮体 (2MW)
平成25年11月運転開始
(令和3年撤去)



- 2MWダウンウィンド・ギア式風車：日立製作所
- 浮体：三井E&S造船

◎ 風車ブレード長さ：40m
◎ タワーの高さ：66m
◎ 浮体の高さ：32m
◎ 喫水部分：16m
◎ アンカー・チェーン数：6式

ふくしま新風

V字型セミサブ浮体 (7MW)
平成27年12月運転開始
(令和2年撤去)



- 7MWアップウィンド・油圧式風車：三菱重工業
- 浮体：三菱造船

◎ 風車ブレード長さ：82m
◎ タワーの高さ：105m
◎ 浮体の高さ：32m
◎ 喫水部分：17m
◎ アンカー・チェーン数：8式

ふくしま浜風

アドバンストスパー浮体 (5MW)
平成29年2月運転開始
(令和3年撤去)



- 5MWダウンウィンド・ギア式風車：日立製作所
- 浮体：ジャパン マリンユナイテッド

◎ 風車ブレード長さ：63m
◎ タワーの高さ：86m
◎ 浮体の高さ：48m
◎ 喫水部分：33m
◎ アンカー・チェーン数：6式

2. 実証事業の概要③：福島洋上風力コンソーシアムについて

- 丸紅をプロジェクトインテグレータとする11の企業・研究機関がコンソーシアムを組成

福島洋上風力コンソーシアム構成メンバーの変遷（平成23年度当時の法人名）

法人名	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	R1	R2	R3
丸紅※1											
芙蓉海洋開発※2											
東京大学											
海上技術安全研究所											
三菱商事											
三菱重工業※3											
アイ・エイチ・アイマリンユナイテッド※4											
三井造船※5											
新日鐵住金※6											
新日鐵住金エンジニアリング※7											
日立製作所											
古河電気工業											
清水建設											
みずほ情報総研※8											

※1：令和3年度は海洋エンジニアリングの外注先として参画
※2：平成26年11月に社名を海洋エンジニアリングに変更。令和2年度までは丸紅の外注先として参画
※3：平成30年1月に船舶部門は三菱造船に分社化して、浮体の研究開発は三菱造船にて承継
※4：平成25年1月に社名をジャパン マリンユナイテッド（JMU）に変更
※5：平成29年4月に造船部門は三井E&S造船に分社化して、本開発に係る事業は三井E&S造船に承継

※6：平成31年4月に社名を日本製鉄に変更
※7：平成31年4月に社名を日鉄エンジニアリングに変更
※8：令和3年4月に社名をみずほリサーチ＆テクノロジーズに変更

3. 実証成果検証結果サマリー

- 当時、世界初となる3基で構成された浮体式洋上風力ウィンドファームを設置。
- 建設、運転、撤去まで一気通貫で実施することにより、ライフサイクル全体にわたってシステムを安定的に運用するための技術や、漁業との共存等のノウハウを獲得し、組織や担当者に定着。
- 成果は、導入マニュアル策定のほか、研究成果として出版した70件の学術論文は国内外で合計153件（国内：85件、海外：68件）の論文に引用され、また、31件の特許を取得。

<実証研究事業を通じて得られた成果>

①安全性

- 当時世界に先駆けた取組であったが、人命、財産に影響を与えるような事故を起こすことなく事業を完遂
- 設備の余寿命を推計し、20年間の設計寿命を満たし得る設計手法を確認

②信頼性

- 開発・製造した設備が、当初の設計通りに安定して運用できることを確認
- 予期せぬ故障や不具合の発生時に、原因特定及び再発防止策を提案

③経済性

- 世界初の浮体式洋上風力発電システムのライフサイクルでのコスト分析を行い、海外の事例と比較して、妥当性を検証
- 将来の浮体式洋上ウィンドファームの実現に向け、コスト低減の要素を特定し、その方向性と課題を提案

<社会実装に向けた成果>

- **浮体の開発・製造への参入環境の整備**：気象・海象、浮体の応答特性等をまとめた論文の公開により、浮体の開発・製造への参入環境の整備に貢献
- **国内の設計基準への反映等**：実証での経験や成果の派生として、浮体式洋上風力発電施設技術基準及び同安全ガイドライン、浮体式洋上風力発電設備に関するガイドラインの改訂に貢献
- **国際基準への提案に貢献**：上記国内基準への改訂に加えて、洋上風力発電の国際基準IEC61400-3-2 Design Requirements for floating offshore wind turbines（IS案）のAnnexへの提案に貢献

実証事業は、浮体式洋上風力の社会実装に向けて多数の成果をあげた一方で、技術的に開発段階である風車を用いたため、長期安定運転が困難となり、発電事業としての運転継続にはつながらなかった。

3. 成果検証結果①：社会受容性を含む技術実証の視点から ～ 安全性・信頼性・経済性 ～

- 当時世界に先駆けた取組であり、洋上作業を含むものであったが、台風の直撃・落雷など受けながらも人命、財産に影響を与えるような事故を起こすことなく事業を完遂できたことを確認
- 国内の海洋構造物に関する基準や欧州での基準等をもとに、開発・製造した設備の設計の技術的な妥当性及び安全性を確認
- 設備の余寿命を推計し、20年間の設計寿命を満たし得る設計手法であることを確認

<安全性に関する主な研究テーマと成果>

実施内容	得られた主な成果	社会実装に向けた主な成果
浮体式洋上風力発電用の風車の開発	・ 実証を通じ、細部において設計上、運用上の課題が明確化 ・ タワー、ブレードへの最大荷重について、開発した動的解析モデルを用い解析値と実測値を比較し、基本となる設計が妥当であることを確認	・ 本実証研究事業にて直面した不具合の対応、設計の見直しで、風車の安全性・信頼性が向上。特に5MW風車は、台湾の洋上風力の案件に寄与
浮体式洋上風力発電用の浮体の開発	・ 設計の妥当性と20年間の設計寿命を満たし得る浮体であることを確認 ・ 浮体や付帯設備等に係る設計見直しの必要性が明確化	・ 従来のガイドラインでは予見できなかった事案への対応により、同ガイドラインの見直しの契機とした。

3. 成果検証結果①：社会受容性を含む技術実証の視点から ～ 安全性・信頼性・経済性 ～

- 開発・製造した設備が、当初の設計通りに安定して運用できることを確認
- 予期せぬ故障や不具合の発生時には、原因を特定し再発防止策を提案したことを確認

<発生した不具合と再発防止策の例>

設備	発生した不具合・故障	原因	再発防止策
5MW風車	漏油センサの誤検知によって、風車の停止が発生	海象の影響を受けないよう取り付けたセンサが雨水にも反応	風車本体の設計の際に、センサ取り付けも含めた、一体的な設計の必要性を把握
5MW浮体	昇降装置部分に想定を超える衝撃荷重が発生したことにより亀裂が生じ、漏水によって浮体の傾斜が観測	浮体設計は造船の規定に基づき行われており、艀装品について十分な設計評価手法が整備されておらず	浮体設計の艀装品等を含む安全審査・基準の見直しの必要性を明確化
洋上変電所	変電所の故障により送電が停止	ドックヤードでの塵埃(塩害・鉄粉)の発生およびサビの引き込み	アクセス率が厳しい環境下では、バッテリーや一部制御機器などの設備を二重化
ケーブル	当初設計以上にライザーケーブルに貝類などの海洋生物が付着し、一部が海底面との摩擦で損傷	設計時点の想定以上に、海洋生物が付着	海洋生物の除去ではなく、ライザーケーブルの浮力を恒久的に維持するため、大型ブイとチェーンの取り付けにより線形維持対策を実施し、効果を確認。

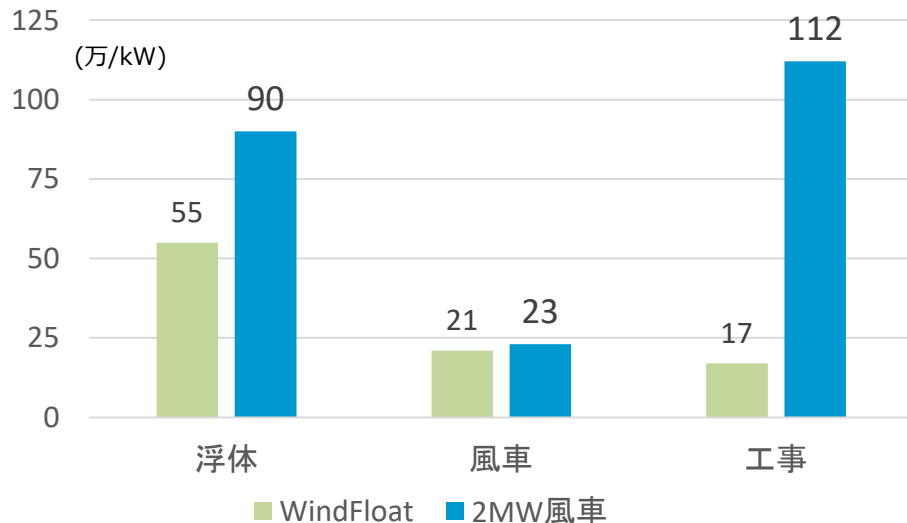
3. 成果検証結果①：社会受容性を含む技術実証の視点から ～ 安全性・信頼性・経済性 ～

- 世界初の浮体式洋上風力発電システムのライフサイクルでのコスト構造を明らかにし、海外の事例などと比較した妥当性及びコストの差の要因を分析
- 将来の浮体式洋上ウィンドファームの社会実装に向け、コスト低減が期待される要素を特定し、その方向性と課題を提案

海外事例とのコスト比較

- ・海外事例(WindFloat)とのコスト比較分析を実施
- ・浮体/工事費の資本費の差異につき、海象条件等の自然環境の差異による工法の違い等によるものと分析

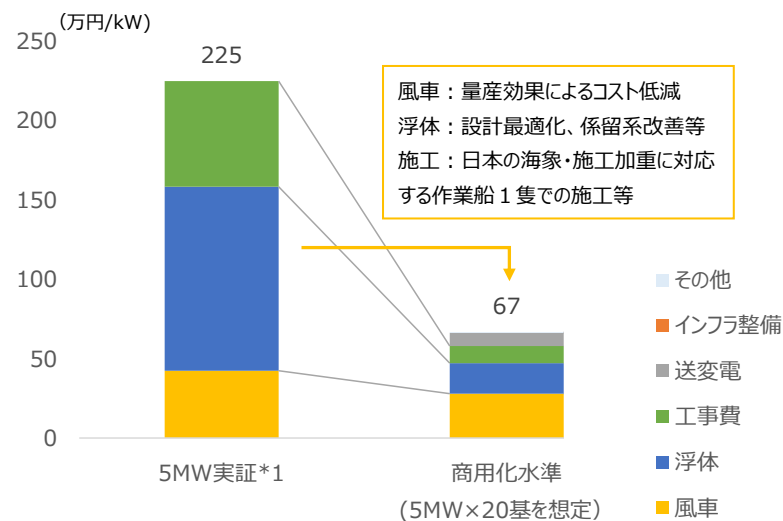
<2MW風車とWindFloatの資本費の比較>



経済性向上に向けたコスト低減要素

- ・5MW基×20基による浮体式WFを想定し検証
- ・浮体の設計最適化や係留本数の削減、日本の海象に対応した作業船の開発等により大幅低減が示唆

<商用化に向けた資本費の見通し>

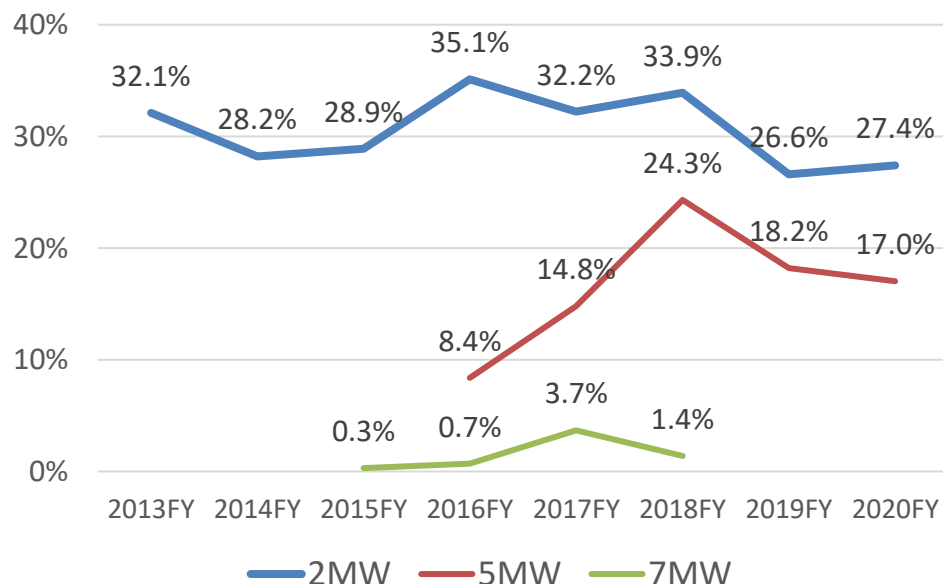


*1 内訳には送变电設備等は含んでいない

3. 成果検証結果②：設備利用率を含む社会実装に向けた課題整理の視点から

- 商用水準の風車(2MW)の設備利用率は33.2%と、目標値である35%を概ね達成したが、実証機である5MW風車の設備利用率は26.2%、7MW風車は1.9%と、いずれも商用水準には至らなかったと判断。
- 停止時間の50%を占める荒天待機時間の最小化のため、予兆診断技術の実証やアクセス船の運用見直しを行ったことを確認。加えて、社会実装に向けたさらなる技術開発が期待される要素技術を整理

＜各機における設備利用率の推移＞



＜稼働率向上のために期待される研究開発の方向性＞

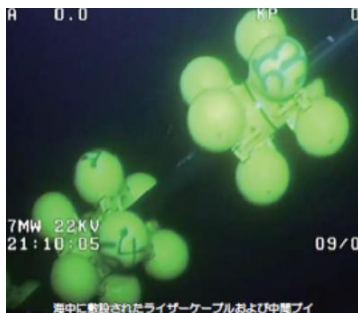
- ・沖合での厳しい海象条件下にて、運転を継続するためのメンテナンスのタイミング、予兆診断技術
- ・アクセス船の乗り移り率を高めるための取組
- ・発電設備として確立した風車と浮体の最適な組合せ
- ・維持管理及び撤去にあたり作業しやすい最適な浮体・ケーブルの設計
- ・低風速帯でも発電ができる日本の気象・海象条件に適合した風車の開発
- ・波浪に強い渡船橋等のインフラ整備

3. 成果検証結果③：福島における産業集積に向けた視点から

- サプライチェーン形成の浸透など、直接的な効果を生むまでの成果には至らなかったが、以下の実施により福島県の実情に合わせた取組を後押しし、**風力関連産業の集積に向けた基盤の整備につながった**と評価。

洋上風力発電システム部品の県内調達

- ・ライザーケーブルの一保持のためのブイを福島県内企業から調達



地元漁船の傭船

- ・警戒船業務や調査などで地元の漁船を傭船



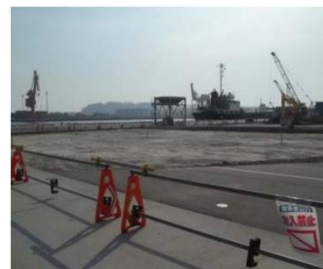
維持管理を担う人材育成

- ・地域に密着した発電事業とするべく、発電事業の維持管理を担うための人材育成の取組を実施



小名浜港の地耐力の強化

- ・地耐力を40t/m²に強化



4. 成果詳細①：実証成果で得られた技術・ノウハウ

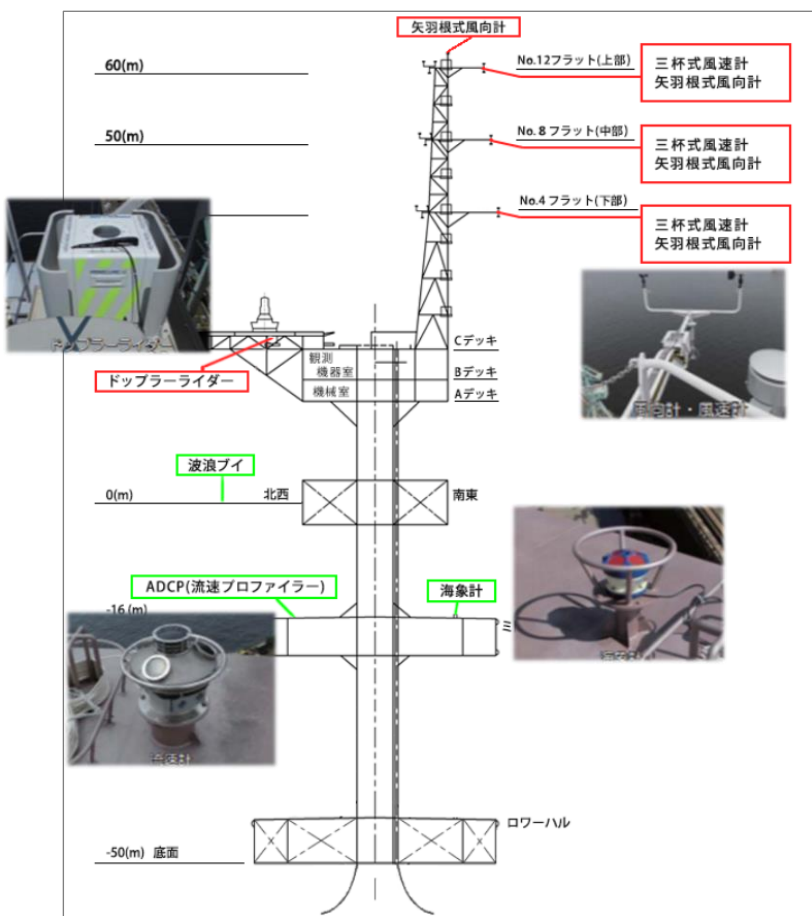
- 浮体式洋上風力発電システムを実現するために必要な、観測技術、風車、浮体、送変電システムの開発技術、施工技術、運転維持管理技術等を含む、要素開発技術を実証（研究テーマは以下のとおり）

番号	研究テーマ	実施者	実施期間
1	気象・海象・浮体動揺の観測と予測技術の開発	東京大学	H23～H30
2	浮体式洋上風力発電用の風車の開発	日立製作所、三菱重工業	H25～H30
3	浮体式洋上風力発電用の浮体の開発	三井E&S造船、三菱造船、ジャパンマリンユナイテッド	H23～H30
4	浮体式洋上風力発電の施工技術の開発	清水建設、ジャパンマリンユナイテッド	H23～H30
5	材料の開発	日本製鉄、日鉄エンジニアリング	H23～H30
6	浮体式洋上風力発電所のための送電システムの開発	日立製作所、古河電気工業	H23～H30
7	航行安全性の評価	東京大学、海上技術安全研究所	H23～H27
8	浮体式洋上風力発電所の維持管理手法の開発	三井E&S造船、日立製作所、古河電気工業	H25～R2
9	浮体式洋上風力発電システムの撤去に関する技術	吉田組、ジャパンマリンユナイテッド 日揮、日本風力開発、大成建設（R3のみ）	R1～R3
10	漁業との共存	丸紅	H23～R2

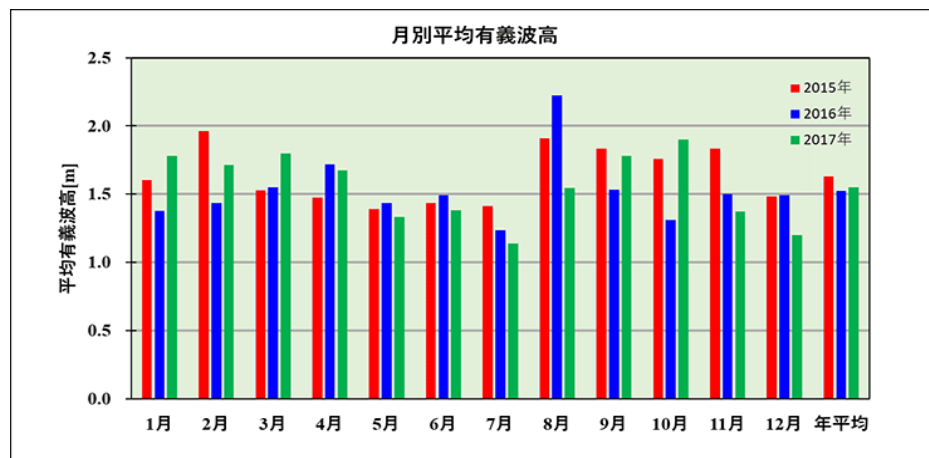
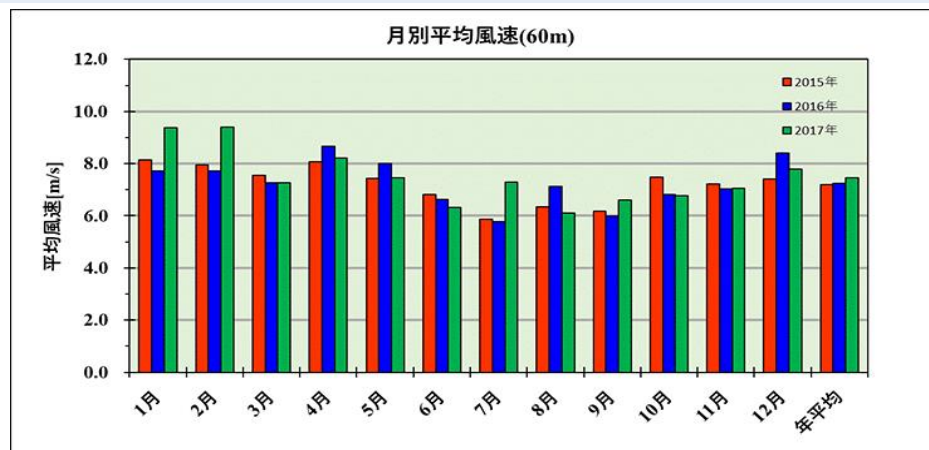
4. 成果詳細②：気象・海象データの取得

- 浮体式サブステーションを用いて福島沖での気象・海象に関するデータを取得。福島沖での気象・海象の特性を明らかにし、観測結果をH Pで公表していることを確認。
- 浮体の応答特性を正確に測定する方法や、浮体の設計に必要な動的解析モデルの精緻化といった学術論文の成果は事業者等に引用されることで、浮体の開発・製造への参入環境の整備に貢献していると判断。

サブステーション模式図



風況・波浪データ(一例・2015年～2017年)



4. 成果詳細③：浮体式洋上変電所の設置・運転

- 世界初となる浮体式洋上変電所に求められる耐動揺性・耐久性に優れた変電設備を開発、振動試験、傾斜試験による性能評価を実施したことを確認。
- また、耐疲労性に優れた遮水構造の大容量ライザーケーブルシステムを実証した結果、**20年間福島県沖で発電を続けられる設計技術、疲労や応力等を評価できる動的解析モデルの予測技術を獲得**できたと判断。

浮体式洋上変電所の性能試験



大容量ライザーケーブルの性能試験



4. 成果詳細④：漁業との共存

- 漁業関係者との間で、実証研究事業の進捗報告、疑問点等に関する対応・説明、共存の在り方等について議論・報告する場として、漁業協働委員会・WGを設置したことを確認。
- 漁業関係者の漁獲量の減少などの不安に対し、エビデンスとなるデータを取得して払拭するとともに、漁業者と協調・共生していくため、①周辺海域での海洋調査、保守・点検、警戒船として参画（漁船利用）、②施設周辺での新たな漁法の開発などの枠組みを構築し、事業者と漁業者の信頼関係の醸成につながったと評価。

漁業関係者との共存の場の設置

- ・若手の漁業者を主体とし、漁業との共存ワーキンググループを設置。水産・海洋研究分野の専門家を交え、共存のあり方と具体策を検討・実践。
- ・新しい試みとして、離底網実験と漁具・漁法実験を提案した。



漁業との共存ワーキンググループ



漁具・漁法の実験

漁業者の実証事業への参画

- ・漁獲試験により、浮体施設がもたらす漁業への影響を評価し、影響は見られないことを確認。
- ・漁獲試験や警戒船業務など、漁業者の積極的な事業参画を促すことで、漁業者と協調・共生していくための仕組みを構築。



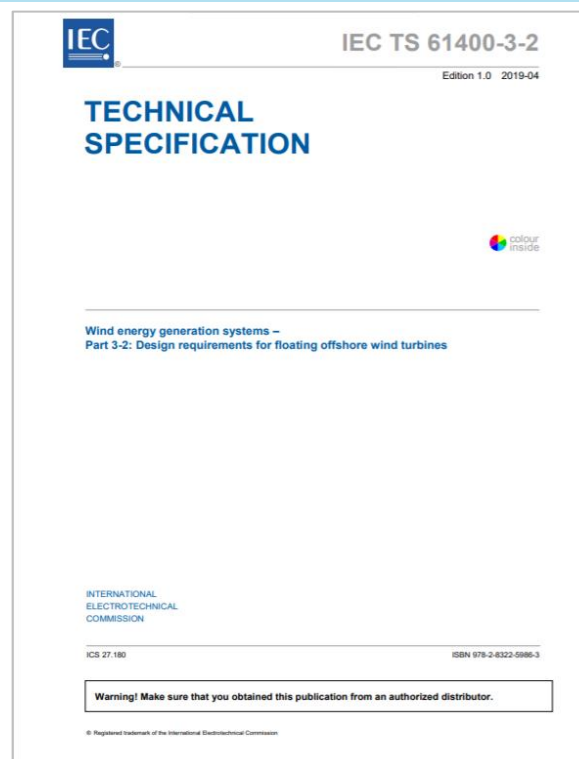
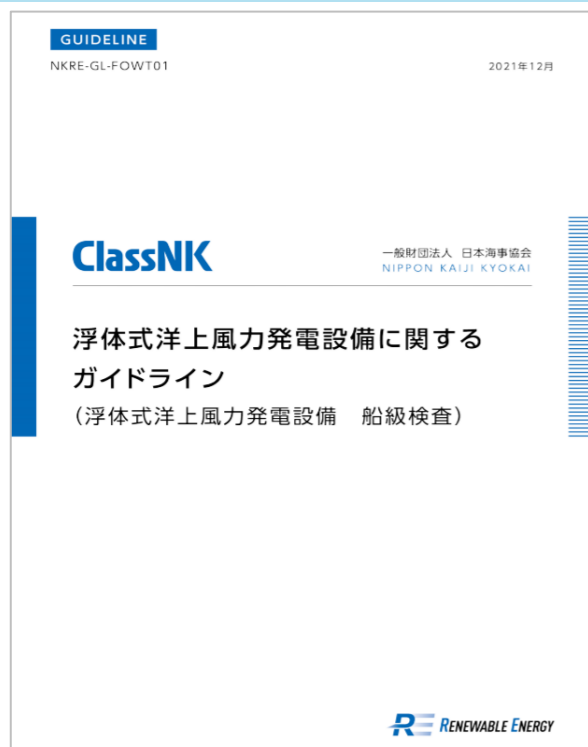
漁獲試験の実験



警戒船業務に際しての講習会

4. 成果詳細⑤：国内の設計基準への反映・国際基準への提案

- 実証での経験や成果の派生として、浮体式洋上風力発電施設技術基準及び同安全ガイドライン（国交省）、浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン（日本海事協会）の改訂に貢献したと判断。
- また、浮体式洋上風力発電の**国際規格である「IEC61400-3-2 (IS案)」**において、**本実証を踏まえた日本からの提案が盛り込まれた**（Annex R（方向拡散関数）, U（損傷時復原性）, T（うねりの影響を受けた海域におけるピーク周波数と有義波高の関係））ことを確認。
- 本国際規格のとりまとめにおいて、**日本は本実証の経験から実機を踏まえた具体的な提案を行い、意思決定における中心的な役割を果たし議論を主導した**ことを確認。



4. 成果詳細⑥：浮体式洋上風力発電導入マニュアルの策定

- 今後の浮体式洋上風力発電の導入を検討する事業者のため、本実証研究事業の成果や得られた知見、学びを導入マニュアルとしてとりまとめたことを確認（2019.3）。
- 浮体式洋上風力発電の導入の流れや撤去・解体、資金調達について、一般的な手続として整理

浮体式洋上風力発電導入マニュアルの目次

第1章 浮体式洋上風力発電の概要

- 1.1 浮体式洋上風力発電とは
- 1.2 諸外国におけるプロジェクト事例
- 1.3 国内におけるプロジェクト事例

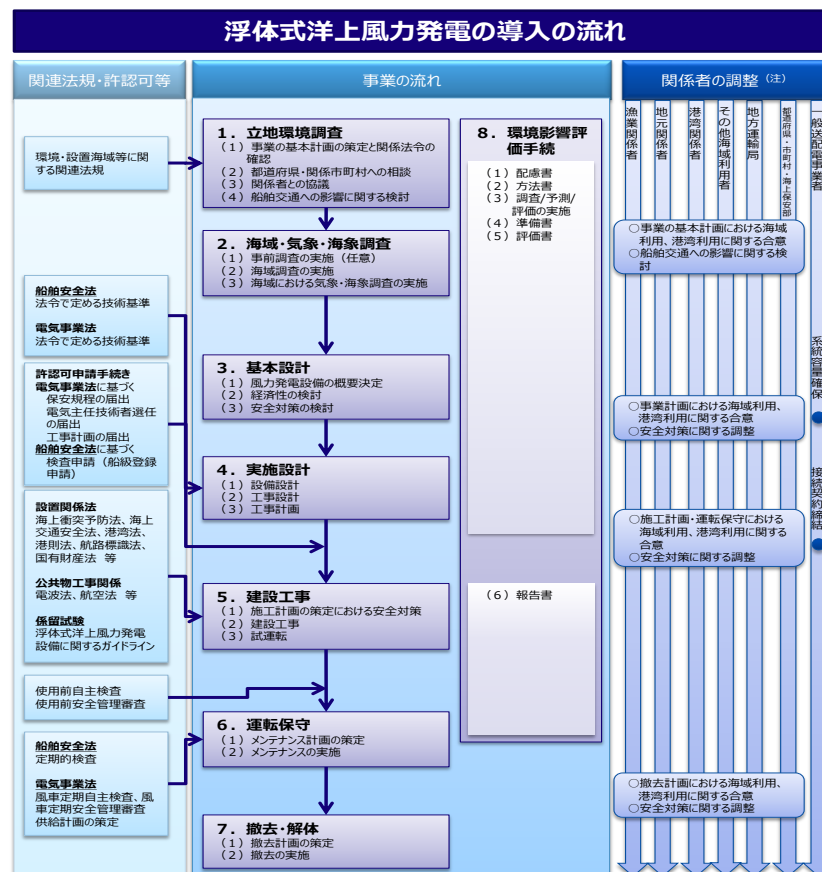
第2章 浮体式洋上風力発電事業の進め方

- 2.1 立地環境調査
- 2.2 海域・気象・海象調査
- 2.3 基本設計
- 2.4 実施設計
- 2.5 建設工事
- 2.6 運転保守
- 2.7 撤去・解体
- 2.8 環境影響評価

第3章 浮体式洋上風力発電の資金調達の方法

- 3.1 ファイナンス
- 3.2 保険
- 3.3 認証

浮体式洋上風力発電導入の流れ



5. 実証経緯と課題

- 平成24年3月の事業開始以降、風車の仕様変更などによる計画の遅れが発生し、計4回の計画変更を実施。令和3年度までの10年超で、総計669億円の事業費を投入（うち、撤去費65億円）
- 実証機である5MW、7MW風車はいずれも開発段階だったことから、設備利用率はそれぞれ26.2%、1.9%と商用水準には至らず。
- この主な要因として、浮体動揺の影響に対して風車の制御が十分に対応できなかったこと（5MW）、世界で初めて採用した油圧式の技術な課題（7MW）により風車内部のセンサや油圧システム等に不具合が頻発したことが挙げられる。
- 7MW風車についてはH30年度総括委員会において、「研究・開発段階を脱しておらず、安定稼働が困難」と判断し、撤去の準備を進めるべきと提言。これを受け、エネ庁にて撤去を決定。
- 残余の2MW・5MW風車についてはデータ取得に向け運転を継続するも、経済的に自立した運用は困難と評価。これを受け、エネ庁にて実証機の第三者譲渡に係る需要調査を経て撤去を決定。
- 結果、技術的に開発段階である風車を用いたため、長期安定運転が困難となり、発電事業としての運転継続にはつながらず。

6. 実証計画の見直しと主な動き

年度	計画変更		主な動き	各年度予算（億円） 総額：669億円
	計画	実績		
H23			・実証事業開始	125
H24			・海底地盤調査を受け、 把駐力試験を追加実施	
H25	■ 2MW ■ 7MW×2基設置	■ 2MW ■ 7MW設置	・2MW風車・洋上変電所運転開始(11月)	95（当初） 280（補正）
H26	■ 2MW ■ 洋上変電所設置	■ 2MW ■ 5MW開発・設置		
H27	■ 2MW ■ 洋上変電所設置	■ 2MW ■ 7MW維持管理	・7MW風車運転開始(12月) ・風車調達の遅れによる風車構成の変更 （7MW風車2機→7MW風車、5MW風車各1機）	
H28	■ 3基の維持管理・事業化検討	■ 3基の維持管理	・5MW風車運転開始(2月)	40
H29		■ 7MW撤去		24
H30		■ 全設備撤去	・総括委員会設置 ・7MW風車の停止と撤去を決定(8月)	21
R 1			・7MW風車の撤去開始(12月) ・総括委員会において、 実証機の自立的な運用は困難と評価 （3月）	11
R 2			・実証設備の需要調査を実施(8月) ・ 全実証研究設備の撤去を公表 (12月) ・2MW風車・5MW風車・洋上変電所の撤去開始(2月) ・7MW風車撤去完了(3月)	25（うち撤去19）
R 3			・実証研究設備の撤去完了 ・総括委員会最終報告（3月）	48（うち撤去46）

7. 提言

- 福島洋上風力コンソーシアム構成員においては、本実証研究にて獲得したデータ・ノウハウを活用し、今後の社会実装や浮体式洋上風力の産業化に向けて積極的に貢献すべき。
- 今後洋上風力事業に参画する事業者においては、
 - ✓ 海域の先行利用者である漁業者に対し、協議の場などを通じて信頼関係構築に向けた取組を継続すべき。
 - ✓ 撤去について、開発・建設当初から解体コストの抑制や最大限のリサイクルを念頭に置いた設計を考慮すべき。また、海外事例を参考とし適切な撤去工法を選択すべき。
- 国においては、
 - ✓ 本実証研究事業にて取得した各種データにつき、その有効活用に向け開示に関わるルールを定めたうえで速やかに公表すべき。
 - ✓ 今般改訂を行う「導入マニュアル」につき、本実証研究において獲得したノウハウを今後の社会実装に向けて伝承できるよう、公表すべき。
 - ✓ 本実証研究において実海域での実証まで至っていない予兆診断技術及び遠隔での維持管理技術をはじめ、風車や浮体、電気システム等の低コスト化を目指し、グリーンイノベーション基金等を通じた研究開発を進めていくべき。