

**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**

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

目次

1. はじめに	2
2. 調査の概要	3
3. 本実証研究事業の概要	5
3.1 本実証研究事業の目的	5
3.2 実証設備の概要	5
3.3 実証研究事業の振り返り	6
3.4 福島洋上風力コンソーシアム構成メンバーの変遷	8
4. 実証研究事業の成果	9
4.1 社会受容性を含む技術実証の視点からの検証	10
4.1.1 検証結果の総括	10
4.1.2 成果を裏付けるエビデンス	11
4.2 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の検証	67
4.2.1 検証結果の総括	67
4.2.2 成果を裏付けるエビデンス	67
4.3 産業集積に向けた視点からの検証	72
4.3.1 検証結果の総括	72
4.3.2 成果を裏付けるエビデンス	72
5. 結論と提言	75
5.1 結論	75
5.2 提言	79
参考資料 1 論文リスト	82

1. はじめに

経済産業省資源エネルギー庁は、平成 23 年度に「世界初の浮かぶ洋上風力発電所、浮体式洋上ウィンドファーム」を設計、製造、運営する実証研究事業を立ち上げた。事業の背景としては、①東日本大震災における原子力災害を契機に注目された再生可能エネルギーの導入、②福島県の復興、③我が国固有の地理的条件においてポテンシャルの高い「浮体式」洋上風力発電の研究開発の必要性、の 3 つがあった。

同事業は、丸紅と東京大学を中心とした福島洋上風力コンソーシアムが受託し、世界初の浮体式洋上ウィンドファームの実現のための要素技術を国内企業が設計・開発からマネジメントを含む運用までを実証し、その安全性、信頼性、経済性を明らかにすることを目的に平成 24 年 3 月より実施された。

同コンソーシアムは、平成 25 年に 2MW 風車と世界初の浮体式洋上変電所を設置し、先行する欧州のプロジェクトに技術的にも追いついた後、平成 27 年には、当時世界最大級の 7MW 風車を、平成 28 年には 5MW 風車を設置して、ウィンドファームとしての運転・保守を開始し、世界をリードするプロジェクトになった。

本委員会は、平成 30 年度より福島洋上風力コンソーシアムに対して第三者的な立場から事業内容を確認、評価し、よりよい成果を得るための助言や提言を実施してきた。最終年度である令和 3 年度の検証対象は、浮体式洋上風力発電の外部環境の変化を踏まえつつ、令和 2 年度までの運転実証事業の取組に加えて、漁業との共存、設備の撤去の実証に係る成果を含めた全体とし、社会実装に向けた成果について評価を行ったものである。

令和 4 年 8 月
福島沖での洋上風力発電システム実証研究事業
総括委員会

2. 調査の概要

委員会の設置趣旨

本委員会は、経済産業省資源エネルギー庁が、福島洋上風力コンソーシアムに委託した令和3年度福島沖での浮体式洋上風力発電システムの実証研究事業（実証事業の総括に係るもの）（以後、本事業と表記）において設置されたものである。本委員会は、以下の役割を担っている。

- 本事業における進捗を管理し、よりよい成果となるように助言を行うこと。
- 福島沖での浮体式洋上風力発電システムの実証研究事業（以後、本実証研究事業と表記）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こと。

委員構成

本委員会の委員長を含む委員は、風力発電、海洋工学、財務・ファイナンス、地域、プロジェクト評価の各分野に関する10名で構成されている。

委員長

永尾 徹 足利大学大学院工学研究科 特任教授

委員

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

事務局

福島洋上風力コンソーシアム

経済産業省資源エネルギー庁 新エネルギー課 風力政策室

検証の考え方、対象範囲等

本委員会は、本実証研究事業にて福島洋上風力コンソーシアムが作成した報告書及び提供資料に基づいて検証を行った。また、本事業と関連する令和2年度福島沖での浮体式洋上風力発電システムの実証研究事業（7MW 風車及び浮体等の撤去実証に係るもの）及び令和3年度福島沖での浮体式洋上

風力発電システムの実証研究事業（風車及び浮体等の撤去実証に係るもの）（以後、両事業を合わせて撤去実証事業と表記）の内容は、経済産業省資源エネルギー庁を通して、各事業の実施主体からの提供資料に基づいている。

また、第三者評価としての客観性を高めるため、福島洋上風力コンソーシアム及び撤去実証事業の実施主体に対して独自にヒアリングを行った。

上記の方針のもとで、本実証研究事業の成果の検証、及びそれを踏まえた今後の社会実装に向けた提言を第三者の立場で行い、報告書を作成した（表 1）。

表 1 本実証研究事業及び撤去実証事業に関する報告書の名称と本報告書における表記

番号	報告書名	本報告書における表記
1	浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業（報告書概要版） ¹	平成 23～27 年度報告書
2	平成 28 年度福島浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業報告書概要版 ¹	平成 28 年度報告書
3	平成 29 年度福島浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業報告書概要版 ¹	平成 29 年度報告書
4	平成 30 年度福島沖での浮体式洋上風力発電システムの実証研究事業報告書概要版 ¹	平成 30 年度報告書
5	平成 30 年度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報告書 ²	平成 30 年度総括委員会報告書
6	平成 30 年度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（下期）報告書 ²	平成 30 年度総括委員会報告書（後期）
7	令和 2 年度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報告書 ²	令和 2 年度総括委員会報告書
8	令和 2 年度福島沖での浮体式洋上風力発電システムの実証研究事業（7MW 風車及び浮体等の撤去実証に係るもの）報告書	令和 2 年度撤去実証報告書
9	令和 3 年度福島沖での浮体式洋上風力発電システムの実証研究事業（風車及び浮体等の撤去実証に係るもの）報告書	令和 3 年度撤去実証報告書

委員会開催実績

本委員会は、全 4 回開催したほか、撤去実証事業の実施主体との意見交換場として、実証設備の解体現場の視察を行った。

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
現地視察	令和 3 年 12 月 27 日

¹ 平成 23 年～平成 30 年度：技術委員会・事業化委員会での報告を踏まえて取りまとめ

² 平成 30 年度～令和 3 年度：総括委員会での報告を踏まえて取りまとめ

3. 本実証研究事業の概要

本章では、平成 24 年 3 月から開始した本実証研究事業の概要として、目的、事業計画、実証設備の概要を整理し、本委員会における検証内容を明確化する。

3.1 本実証研究事業の目的

本実証研究事業の公募が開始された平成 23 年 12 月当時の再生可能エネルギー政策に関する外部環境として、東日本大震災及び福島第一原子力発電所における事故を契機に、地域経済活動を支える基盤強化としての再生可能エネルギーの重要性³、東日本大震災及び原子力災害からの福島県の復興⁴、浮体式洋上風力発電の研究開発の加速化⁵といったことがあげられる。

これらを踏まえて、経済産業省資源エネルギー庁は、世界最大級の浮体式洋上風力発電所を実現するため、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、浮体式洋上風力発電所の安全性・信頼性・経済性を明らかにするとともに、浮体式洋上風力発電の共通基盤を整備することを目的とした事業が開始した。本実証研究事業を受託したのは、丸紅をプロジェクトインテグレータ、東京大学をテクニカルアドバイザーとする福島洋上風力コンソーシアムであった。

本実証研究事業の実施に際し、上記目的を含めて、以下の 3 つの目的が掲げられた。

- 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。
- 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インドファームの実現を目指す。
- 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。

3.2 実証設備の概要

本実証研究事業の概要を図 1 に示す。本実証研究事業では、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、単一の種類の風車と浮体を複数基設置するのではなく、発電方式や規模、浮体の形状等を組み合わせ、最終的に風車 3 基と変電所 1 基の合計 4 基が設置された。

離岸距離が約 20km、水深が約 120m の海域に 2MW 風車、7MW 風車、5MW 風車をそれぞれ 1 基設置し、これらの設備で発電した電気は、浮体式洋上変電所を介して陸上に送電されている。

³ 地域経済活動を支える基盤の強化として、エネルギー源の多様化・分散化、地球温暖化対策、新規産業・雇用創出などの観点からの再生可能エネルギーの重要性。

⁴ 「再生可能エネルギー先駆けの地」を掲げ、再生可能エネルギーを中心とした新たな産業の集積・雇用の創出を目指す福島県の復興。

⁵ 風力発電は、適地が限定的な陸上から、風況が良く導入ポテンシャルが高い洋上に期待が高まっているが、日本では、急峻な海域の特性上、世界的に導入が進んでいる浅海域に適する着床式のみならず、浮体式洋上風力発電の研究開発の加速化が必要。



ふくしま絆（洋上変電所）



ふくしま未来（2MW）



ふくしま新風（7MW）



ふくしま浜風（5MW）

事業規模	14MW
稼働開始年	洋上変電所：2013年 2MW：2013年 7MW：2015年 5MW：2016年
風車	2MW・5MW（日立） 7MW（三菱重工）
浮体の形状	セミサブ（2MW・7MW） アドバンストスパー（5MW・洋上変電所）
受送電容量	25MW
水深	120m
離岸距離	20km

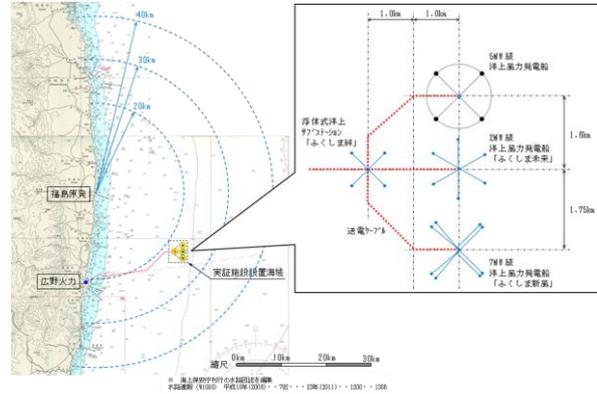


図 1 本実証研究事業の概要

（出典 平成 30 年度総括委員会報告書）

3.3 実証研究事業の振り返り

本実証研究事業は、平成 24 年 3 月に開始され、本年度まで約 10 年間実施した。

図 2 は、本実証研究事業の事業計画の変遷、主なイベント、研究内容、基準・ガイドラインの状況を時系列にて整理したものである。この図を用いて、本実証研究事業を振り返る。

年度	計画の変遷					本実証研究事業の動き	基準・ガイドラインの状況	研究内容	各年度予算(億円) 総額：669億円
	計画	変更1	変更2	変更3	実績				
平成23年度						・実証事業開始	IEC 61400-3-2の検討開始（2010～）		125
平成24年度	■ 2 M / 7 W / 7 M / 7 W / 2 基 / 2 基 / 2 M / 7 W / 7 M / 7 W / 2 基 / 2 基	■ 2 M / 7 W / 7 M / 7 W / 2 基 / 2 基	■ 2 M / 7 W / 7 M / 7 W / 2 基 / 2 基	■ 2 M / 7 W / 7 M / 7 W / 2 基 / 2 基	■ 2 M / 7 W / 7 M / 7 W / 2 基 / 2 基	・海底地盤調査を受け、抗撓力試験を追加実施	・浮体式洋上風力発電施設技術基準公表【国土交通省】（4月） ・浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン公表【日本海事協会】（7月）	1. 気象・海象・浮体動揺の観測と予測技術の開発 2. 浮体式洋上風力発電用の風車の開発	
平成25年度	■ 7 M / 7 W / 2 基 / 2 基	■ 7 M / 7 W / 2 基 / 2 基	■ 7 M / 7 W / 2 基 / 2 基	■ 7 M / 7 W / 2 基 / 2 基	■ 7 M / 7 W / 2 基 / 2 基	・2MW風車・洋上変電所運転開始(11月)	・浮体式洋上風力発電施設技術基準安全ガイドライン公表【国土交通省】（3月）	3. 浮体式洋上風力発電用の浮体の開発 4. 浮体式洋上風力発電の施工技術の開発	95 (当初) 280 (修正)
平成26年度	■ 2 M / 7 W / 2 基 / 2 基	■ 2 M / 7 W / 2 基 / 2 基	■ 2 M / 7 W / 2 基 / 2 基	■ 2 M / 7 W / 2 基 / 2 基	■ 2 M / 7 W / 2 基 / 2 基	・7MW風車運転開始(12月) ・風車運送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)		5. 材料の開発 6. 浮体式洋上風力発電のための送電システムの開発	1 1 0 1 .
平成27年度	■ 7 M / 7 W / 2 基 / 2 基	■ 7 M / 7 W / 2 基 / 2 基	■ 7 M / 7 W / 2 基 / 2 基	■ 7 M / 7 W / 2 基 / 2 基	■ 7 M / 7 W / 2 基 / 2 基	・5MW風車運転開始(2月)		7. 航行安全性の評価	漁業 と航 路の 共 調 存 整
平成28年度	■ 3 基の維持管理	■ 3 基の維持管理	■ 3 基の維持管理	■ 3 基の維持管理	■ 3 基の維持管理				40
平成29年度	■ 3 基の維持管理・事業化の検討	■ 3 基の維持管理・事業化の検討	■ 3 基の維持管理・事業化の検討	■ 3 基の維持管理・事業化の検討	■ 3 基の維持管理・事業化の検討				24
平成30年度	■ 3 基の維持管理・事業化の検討	■ 3 基の維持管理・事業化の検討	■ 3 基の維持管理・事業化の検討	■ 3 基の維持管理・事業化の検討	■ 3 基の維持管理・事業化の検討	・総括委員会設置 ・7MW風車の停止と撤去を決定(8月)		8. 浮体式洋上風力発電所の維持管理手法の開発(当初計画にはない、維持管理上の課題に対する検討)	21
令和元年度	■ 3 基の維持管理・事業化の検討	■ 3 基の維持管理・事業化の検討	■ 3 基の維持管理・事業化の検討	■ 3 基の維持管理・事業化の検討	■ 3 基の維持管理・事業化の検討	・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確認と評価(3月)			11
令和2年度	■ 3 基の維持管理・事業化の検討	■ 3 基の維持管理・事業化の検討	■ 3 基の維持管理・事業化の検討	■ 3 基の維持管理・事業化の検討	■ 3 基の維持管理・事業化の検討	・実証設備の必要調査を実施(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)	・浮体式洋上風力発電施設技術基準、安全ガイドラインの改訂【国土交通省】（3月） ・洋上風力発電設備に関する技術基準の統一の解説（3月）		25 (55撤去19)
令和3年度	■ 3 基の維持管理・事業化の検討	■ 3 基の維持管理・事業化の検討	■ 3 基の維持管理・事業化の検討	■ 3 基の維持管理・事業化の検討	■ 3 基の維持管理・事業化の検討	・実証研究設備の撤去完了 ・総括委員会最終報告	・浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン改訂【日本海事協会】（12月）	9. 浮体式洋上風力発電システムの撤去に関する技術	48 (55撤去46)

図 2 実証研究事業の動きと基準・ガイドラインの策定状況、研究内容の変遷

事業計画の変遷と主要イベント

本実証研究事業は、研究内容の背景と目的、優先度、期待される成果を含む事業計画を、外部環境を含めて年度ごとに策定し、外部有識者からの助言・提言を踏まえて最適化を図ってきた。しかしながら、計画段階では、予期できない事象が発生し、計画の見直しを行っている。その概要を以下に示す。

当初計画：

平成 24 年度に洋上変電所と 2MW 風車の運転を開始し、平成 27 年度までに 7MW 風車 2 機を設置したうえで、平成 28 年度から 3 基の洋上ウインドファームとしての維持管理を開始する計画であった。

計画変更 1：把駐力試験の追加

平成 24 年度に実施した海底地盤調査の結果、係留システムの把駐力の確認が必要となり、把駐力試験を追加した。このため、当初計画よりも数か月程度の遅れが発生した。

計画変更 2：風車の仕様変更

7MW 風車 2 基の調達遅延により、うち 1 基を開発中の 5MW 風車を使用することに変更した。これにより、当初計画より 1 年程度の遅れが発生し、平成 29 年 2 月に 3 機の設置が完了した。

計画変更 3：実証機である 7MW 風車の不具合による撤去の決定

実証機である 7MW 風車について、平成 30 年度の総括委員会より、油圧ドライブの不具合により安定した連続運転の見通しが立たなくなったため、発電を停止するべきとの提言を受け、経済産業省資源エネルギー庁は、同風車について開発から撤去に至るまでの発電事業全般に関する検証を行うこととして設備の撤去を決定した。また、実証研究事業については、追加のデータ取得及び漁業との共存の深化を目的に、2MW、5MW 風車の 2 基での 2 年間の事業継続を決定した。

最終計画：実証設備の全撤去を決定

実証機である 5MW 風車を含む実証設備について、経済産業省資源エネルギー庁は、実証研究の最終年度を迎えるに当たり、国有財産である実証設備の活用・処分の方針について検討を行うため、事業者の意向について調査した。調査の結果、設備の利用終了後の撤去責任等に係る承継の前提条件を満たす事業計画は提出されなかったため、実証設備の撤去を決定し、全設備について開発から撤去に至るまでの発電事業全般に関する検証を行うこととして設備の撤去を決定した。

基準とガイドラインとの関係

平成 24 年 3 月の契約を受けて、4 月に浮体の設計基準が公表、7 月に施設審査の基準となるガイドラインが公表されるなど、設計と設計基準を技術開発という結節点によりシンクロさせながら、急ピッチで本実証事業はスタートを切った。本実証研究事業にて取得した気象・海象データ、そのときの浮体の応答特性等のデータ等は、設計時点での想定と実績を比較することにより、設計時点での想定の妥当性を確認することができた。また、運転・保守の経験により、当初の維持管理計画の課題も明らかになった。これらの知見は、浮体式洋上風力発電の共通基盤の整備の成果として、設計基準やガイドラインの更なる見直しにも貢献している。

研究内容との関係

本実証研究事業では、開発段階、施工段階、維持管理段階といった事業の各ステージで生じる課題解決に資する、図2に示す研究開発要素を含む10のテーマ（詳細は、表4を参照）について取り組んだ。また、計画見直しや通常の運転・保守以外に生じた予兆診断技術やライザーケーブルの恒久対策の検討等技術課題解決への対応についても、追加的な対応を行ってきた。

3.4 福島洋上風力コンソーシアム構成メンバーの変遷

本実証研究事業は、丸紅をプロジェクトインテグレータ、東京大学をテクニカルアドバイザーとする11の企業・研究機関がコンソーシアムを組成して実施した。このコンソーシアムは、福島洋上風力コンソーシアムと命名され、事業実施体の総称として使用されている。同コンソーシアムに参画した企業を表2に示す。ただし、表中の法人名は、平成23年度当時のものである。

表2 本実証研究事業の福島洋上風力コンソーシアム構成メンバーの変遷

法人名	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	R1	R2	R3
丸紅 ⁶											
芙蓉海洋開発 ⁷											
東京大学											
海上技術安全研究所											
三菱商事											
三菱重工業 ⁸											
アイ・エイチ・アイマリンユナイテッド ⁹											
三井造船 ¹⁰											
新日鐵住金 ¹¹											
新日鐵住金エンジニアリング ¹²											
日立製作所											
古河電気工業											
清水建設											
みずほ情報総研 ¹³											

本報告書では、本委員会が当初目標に照らした成果とその達成度及び、プロジェクト運営を対象として、福島洋上風力コンソーシアムとは独立した立場で検証を行ったものを取りまとめている。取りまとめに当たっては、本実証研究事業に関する表1の報告書を参考にした。

⁶ 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

⁷ 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

⁸ 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した。

⁹ 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

¹⁰ 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造船に承継した。

¹¹ 平成31年4月に社名を日本製鉄に変更

¹² 平成31年4月に社名を日鉄エンジニアリングに変更

¹³ 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

4. 実証研究事業の成果

本章では、前章に記載した目標の達成状況、プロジェクト運営等を含む実証研究事業の成果について、提供資料、報告書に基づいて検証を行った。浮体式洋上風力発電システムの社会実装に向けた基盤となる技術やノウハウを、太平洋側でうねりの大きい福島沖での実証を通じて獲得できたこと、技術レベルの向上というハードの面に加えて、社会受容性を高めるためのコミュニケーションの醸成、海洋土木及び造船分野における人材育成といったソフト面の成果も確認できた。他方で、引き続き社会実装に向けて、開発が必要な要素技術や、事業の運営ノウハウの課題についても言及した。

当初目標に対する成果

第3章にて掲げた本委員会が検証対象としている内容及びその成果、達成状況を表3に示す。

表3 本実証研究事業の検証項目・目標・成果及び達成状況

番号	検証項目	目標	成果	ページ
1	社会受容性を含む技術実証の視点	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。	浮体式洋上風力発電システムを実現するために必要となる開発から撤去までの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に必要となる技術や漁業との共存等のノウハウを獲得した。また、ライフサイクルでのコストの分析を行い、将来のウィンドファーム実現に向けたコスト低減の要素を特定し、その方向性と課題を明らかにした。	11～65
			70件の学術論文の引用や31件の特許の取得により、浮体の設計・開発に係る新規参入の促進や、国内外の浮体設計の基準の改訂提案等、今後の浮体式洋上風力発電の導入の加速化に資する取組が進行中。	
2	設備利用率を含む社会実装に向けた課題整理の視点	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。	商用機水準の風車の設備利用率は33.2% ¹⁴ と目標値である35%を概ね達成し、地震や台風、落雷による破損や長期停止せず運転を継続できた。本格的な浮体式洋上ウィンドファームの実現に向けて、浮体への乗り移りを高めること、できる限り長く運転を継続するために必要な維持管理手法に関する課題を明らかにした。	66～71
			本格的な浮体式洋上ウィンドファームの実現に向けて、停止時間の約50%を占める荒天待機の時間を最小化するため、予兆診断技術やアクセス船の運用の見直しを行った。また、社会実装に向けた更なる技術開発が期待される予兆診断技術等の要素技術を提案した。	
3	産業集積に向けた視点	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。	福島沖での実証研究事業の実施を通じて、福島県が策定した福島県再生可能エネルギー推進ビジョンの達成に必要な浮体式洋上ウィンドファームの要素技術やノウハウを獲得したことにより、福島県を「再生	71～73

¹⁴ 分析にあたっては、平成29年度から令和元年度までの3年間の平均値を採用している。

番号	検証項目	目標	成果	ページ
			可能エネルギー先駆けの地」とする取組に積極的に貢献した。本実証研究事業においては、福島県内企業よりライザーケーブルの位置保持のためのブイを調達するなどの取組を進めた。サプライチェーン形成の浸透など、本実証研究事業による直接的な効果を生むまでの成果には至らなかったが、福島県の取組を後押ししたことで、風力関連産業の集積に向けた基盤の整備へとつながった。	
			漁獲試験等で収集したデータをもとに、漁業者との対話にて議論した漁業との共存策は、福島県が福島県再生可能エネルギー推進ビジョンで掲げた 2030 年に向けて漁業との共存等を前提とした洋上風力の活用検討の取組に貢献できる成果を獲得できた。	

4.1 社会受容性を含む技術実証の視点からの検証

本実証研究事業の主目的である浮体式洋上風力発電システムの技術的な成果に加えて、同システムを実現するために必要となる社会受容性について検討を行った。社会受容性の検討においては、地域における洋上風力発電に関する理解の醸成として、先行事業者である漁業との共存、周辺航路との調整、国民との科学技術との対話の一環での県内イベントの参加や展示会への出展等を実施した。ここでは、主として漁業との共存や周辺航路との調整にてまとめた航行安全対策について記載する。国民との科学技術対話の成果は、令和2年度の報告書¹⁵を参考にされたい。

なお、設計寿命の評価については、当時の設計基準や事業環境等により、20年間での評価としている。

4.1.1 検証結果の総括

目標、実証で得られた成果、社会実装に向けた成果

目標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。

目標に対する成果①：

浮体式洋上風力発電システムを実現するために必要となる開発から撤去までのライフサイクル全体にわたって経験したことにより、システムを安定的に運用するために必要となる技術や漁業との共存に関するノウハウを学び、組織や担当者に定着した。

- 安全性：当時世界に先駆けた前例のない取組であったが、人命、財産に影響を与えるような事故を起こすことなく実証を終えた。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した。また、設備の余寿命を推計し、20年間の設計寿命を満了し得る設計手法であることを確認した。
- 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、5 MW 風車

¹⁵ 令和2年度総括委員会報告書（p.121～125）

のケーブルの断線によるピッチシステムの不具合など、予期せぬ故障や不具合が生じたときには、その原因を特定して再発防止策を提案した。

- 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、妥当性の検証を行った。また、将来の浮体式洋上ウインドファームの実現に向け、コスト低減が期待できる要素を特定し、その方向性と課題について提案した。

社会実装に向けた成果①：

学術論文の公表により、浮体の設計・開発の新規参入の促進、国内外の浮体設計の基準の改訂の提案等、今後の浮体式洋上風力発電の導入の加速化に資する取組が進行中。

- 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した。
- 国内の設計基準への反映状況：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：上記国内基準への改訂に加えて、国際基準である IEC 61400-3-2 Design Requirements for floating offshore wind turbines の Annex に提案。

4.1.2 成果を裏付けるエビデンス

(1) 実証研究事業で得られた技術・ノウハウの考え方

実証研究事業における研究テーマ、実施者及び実施期間を表 4 に整理した。この他、福島洋上風力コンソーシアムとしては、実証研究事業の実務を通じて環境アセスメントや工事計画届の作成等も行っているが、これらの取組は、浮体式洋上風力に限った知見ではなく、一般に発電事業においても求められるものであるため、本委員会としては、獲得した技術の検証対象からは除外した。

表 4 本実証研究事業の研究テーマと実施者一覧

番号	研究テーマ	実施者	実施期間	ページ
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	13～15
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	16～18
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、JMU	H23～H30	19～20
4	浮体式洋上風力発電の施工技術の開発	清水建設、JMU	H23～H30	21～22
5	材料の開発	日本製鉄、日鉄エンジニアリング	H23～H30	23
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	24～25
7	航行安全性の評価	東京大学、海上技術安全研究所	H23～H27	26～28
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	29～32
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、JMU 日揮、日本風力開発、大成建設 (R3 のみ)	R1～R3	33～37

10	漁業との共存	丸紅	H23～R2	38～53
----	--------	----	--------	-------

まず、実施した各研究テーマについて、①背景・目的、②実施内容、③わかったこと、得られた成果、④社会実装に向けた成果、波及先について、本委員会にて過去の報告書や福島洋上風力コンソーシアムからの提供情報をもとに振り返りを行う。その後、本実証研究事業の目的である浮体式洋上風力発電システムの安全性・信頼性・経済性を検証する。

①気象・海象・浮体動揺の観測と予測技術の開発

本研究は、東京大学が平成 23 年度～平成 30 年度までに実施したものである。特に、平成 29 年度及び平成 30 年度は、実証結果を踏まえたガイドラインの改訂案を作成するため、日本海事協会に対して再委託を行った。テーマは、気象・海象の予測技術の開発と浮体動揺の予測技術の開発であり、各テーマの成果を表 5 と表 6 に整理した。

気象・海象の予測技術の開発

表 5 気象・海象の予測技術の開発に関する成果

①背景・目的	<ul style="list-style-type: none"> ● 浮体式の設計にあたって必要となる風・波・海流、浮体の揺れのデータを正しく測定する方法は、浮体の動揺の影響等もあり、データの補正の方法も含め確立していない。加えて、気象・海象条件の高精度予測手法も確立されていない。 ● 浮体式サブステーションを用いて、気象・海象・浮体動揺の計測技術を開発する。
②実施内容	<ul style="list-style-type: none"> ● 風、波、海流を複数の機器を使って測定し、それぞれの機器の特性、長所と短所を整理したうえで、データを補正する方法を明らかにする。 ● 浮体の動揺をジャイロ・方位計・GPS 等の組合せで測定。 ● 気象・海象の予測モデルの開発・高度化。
③わかったこと、得られた成果	<ul style="list-style-type: none"> ● 浮体動揺補正アルゴリズムを開発し、複数の観測方法からデータを補完し、気象・海象データを正しく測定する方法を提案した。¹⁶ ● 福島沖での気象・海象の特性を明らかにし、観測結果をホームページに公表¹⁷。 ● 気象、海象条件の高精度予測手法を確立。
④社会実装に向けた成果、波及先	<ul style="list-style-type: none"> ● 学術論文として成果を公表。 ● IEC 61400-3-2 の Annex R、T として提案。 ● 観測データは、新規で浮体を設計する事業者がシミュレーション上で、浮体の動揺や挙動を再現可否の検討に使われている。

¹⁶ 平成 23～27 年度成果報告書概要版 (p.26、28)

¹⁷ 福島洋上風力コンソーシアムホームページ : <http://www.fukushima-forward.jp/deta/index.html>

浮体動揺の予測技術の確立

表 6 浮体動揺の予測技術の開発に関する成果

①背景・目的	<ul style="list-style-type: none"> ● 最適な浮体・係留設計のために、予測技術が必要である。 ● 浮体の弾性モードと非線形波の高次成分の共振を再現し、風車・浮体・係留の弾性挙動を精度よく再現するモデルを開発する。 ● 浮体式洋上風力発電設備の設計ガイドラインの整備が必要。
②実施内容	<ul style="list-style-type: none"> ● 風車・浮体・係留の連成解析モデルと浮体の動揺を考慮した風車の制御モデルの開発。 ● 水槽実験と実観測データとの比較検証による予測モデルの高度化。 ● 実証結果を踏まえた改訂版設計認証手法に基づくガイドライン（案）の提案。
③わかったこと、得られた成果	<ul style="list-style-type: none"> ● RTK-GPS、加速度計、ジャイロセンサ、コンパスを用いた浮体動揺の高精度計測手法を開発。 ● 水槽実験と実観測データを使った浮体動揺の予測を行い、モデルが現実を再現できていることを確認。¹⁸ ● 安全性の向上と合理的な設計を実現可能とする手法を提案し、設計認証手法に係るガイドライン（案）を整備¹⁹。
④社会実装に向けた成果、波及先	<ul style="list-style-type: none"> ● 学術論文として成果を公表。 ● IEC 61400-3-2（IS案）のAnnex R、Tとして提案。 ● 成果の一部は浮体式洋上風力発電施設ガイドラインにも反映されている。

本委員会は、本研究にて風況・波浪・海流の3つの観測項目について、表 7 に示した観測装置を用いて測定し、観測結果をホームページで公表している¹⁷ことを確認した。その一例を図 3～5のとおり例示する。他方において、今後の浮体式洋上風力発電の研究開発をさらに進めるためにも、より細かい精度でのデータの開示が重要であることを確認した。情報発信・開示の在り方の詳細は、第 5 章の提言にてまとめることとする。

表 7 風況・海象データの取得状況

項目	測定機器	データ	計測時間	観測位置・層	評価時間
風況	三杯式風速計	風速	H27～H29	40、50、60m	10分
	矢羽根式風向計	風向	H27～H29	40、50、60m	10分
	トッパーライダー	風速・風向	H27～H29	60m～310m（12m）	10分
波浪	波浪ブイ	有義波高・有義波周期	H27～H29	海面	60分
	海象計	有義波高・有義波周期	H27～H29	海面	60分
海流	海象計	流速・流向	H27～H29	水深 6.5m、8.5m、11.0m	60分
	ADCP （流速プロファイラー）	流速・流向	H27～H29	水深 5.5m、7.6m、11.8m	60分

（出典 福島洋上風力コンソーシアムホームページ）

¹⁸ 平成 23～27 年度成果報告書概要版（p.32、33）

¹⁹ 平成 30 年度成果報告書概要版（p.101、102）

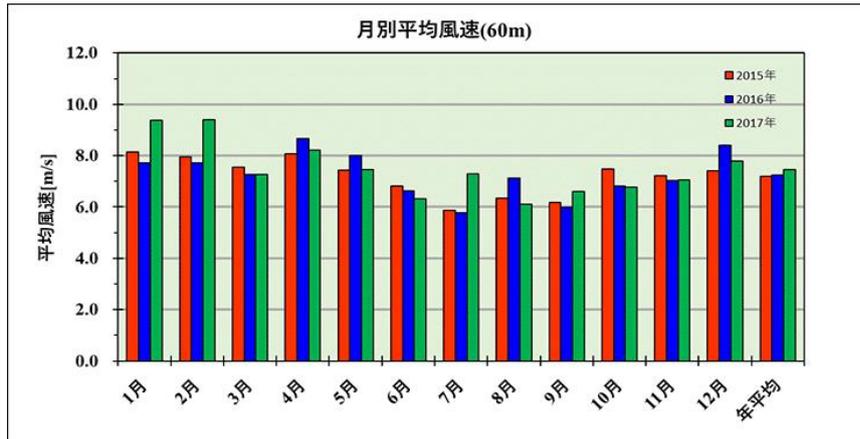


図3 月別平均風速（風況データの一例）

年平均風速は、7.2m/s～7.5m/s の範囲である。1 月における月平均値は 2016 年が 7.7m/s、2017 年が 9.4m/s と 1.7m/s の差異があり、他の月と比較すると差異が大きい。

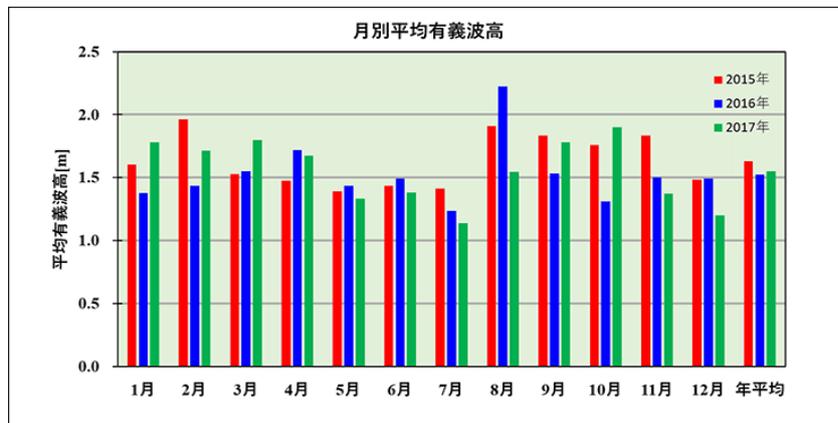


図4 月別平均有義波高（波浪データの一例）

月別平均有義波高は 1.20m～2.22m の範囲にある。



図5 月別平均流速（海流データの一例）

2015年8-10月は2016年に比べて流速が約2倍高く、2016年12月は2015年に比べて流速が約2倍高い。2015年8月は黒潮の北上が抑えられ、南向の流れが卓越し、2016年12月は黒潮が北上したため、福島沖で北東向の強い流れが卓越した。

本委員会は、社会実装に向けた成果として判断したものは以下の取組である。

- 成果は、学術論文として公表され、より多くの事業者に動的解析モデルの構築を可能とし、浮体の開発・製造への参入環境の整備に貢献していること。
- 上記取組と並行する形で、「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）や IEC TS 61400-3-2 に対して浮体の設計手法を提案し、Annex に取りまとめられていること。

【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）】²⁰

3.1 一般

3.1.1 一般

-2 前-1. に示す荷重を適切に算定するために、浮体施設及びタワーに RNA を加えたモデルに対して時間領域での連成解析を行わなければならない。解析は、荷重を正確に把握するために十分なシミュレーション時間を確保しなければならない。

3.4 シミュレーションに関する要求事項

3.4.1 一般

-1 浮体施設の荷重及び荷重効果の算定では、構造動力学モデルを利用した動的シミュレーションを用いなければならない。また、ある特定の荷重ケースには、対応した確率論的な風や波の情報を入力する。これらのケースでは、特性荷重効果の推定結果の統計的信頼性を確保するために、荷重データの時間は十分に長くしなければならない。一般には、応答解析で考慮するそれぞれの風車ハブ高さでの平均風速及び海況に対しては、原則として10分間の確率論的シミュレーションを6個以上（又は連続1時間を1個）実施しなければならない。

-2 荷重及び荷重効果の算定を行うシミュレーションについては、以下に掲げる規格を参照すること。

(1) IEC TS 61400-3-2:2019 7.5.6

(2) IEC 61400-1:2019 7.5.6

-3 動的シミュレーションについては、適用するモデル及びその結果の妥当性が十分に確認されなければならない。この妥当性の検証については、水槽試験による実測データや実証機等での実測データとの比較により行われるものとし、複数の異なるモデルによる動的シミュレーションによる結果を組み合わせる場合は、適用するそれぞれのモデル単体での妥当性検証結果に加えて、異なる動的シミュレーションの間での結果の比較による検証も行わなければならないことに留意すること。

²⁰ 浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン（p.19、26-27）

(https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/authentication/renewableenergy/ja/classification/NKRE-GL-FOWT01_December2021_Jpn.pdf)

【IEC TS 61400-3-2 Design Requirements for floating offshore wind turbines】

- Annex R 方向拡散関数
- Annex 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

注) Annex R, Annex T は IEC TS 61400-3-2 を IS に改訂する案に提案され原案に記載されている段階

②浮体式洋上風力発電用の風車の開発

本研究の実施者は、日立製作所と三菱重工業で、平成 23 年度～平成 30 年度まで実施したものである。本実証研究事業では、陸上での多くの実績を有する商用機である 2MW 風車（日立製作所製）と、同風車の技術の延長で開発した 5MW 風車（日立製作所製）、当時世界最大級の出力であり、かつ油圧による動力伝達という革新技术を採用して大型化を目指した 7MW 風車（三菱重工業製）の 3 つの風車を採用した。各風車の維持管理は、各風車の設計・製造メーカーが担当した。

2MW 風車は、陸上運用で実績を積んだ商用機、7MW 風車は、革新的な動力伝達システムを有する実証機、5MW 風車は、中間規模の国内にて開発中の実証機である。本テーマの成果を表 8 に整理した。

表 8 浮体式洋上風力発電用の風車の開発に関する成果

①背景・目的	<ul style="list-style-type: none"> ● 3 種類の風車を異なる浮体に搭載し、浮体式洋上風車としての性能を明らかにする。
②実施内容	<ul style="list-style-type: none"> ● 調達した風車を安全性を確保したうえで浮体に搭載する。 ● 浮体動揺における発電量の影響を小さくするための制御技術を開発。 <ul style="list-style-type: none"> ✓ ネガティブダンピング抑制のための浮体動揺制御。 ✓ フィードフォワード制御。
③わかったこと、得られた成果	<ul style="list-style-type: none"> ● 実証海域にて取得したデータと、設計時に使用したデータを比較して、安全側に働いていた（全設備共通）。 ● 細部において、実証を通じて設計上、運用上の課題が明らかになった（全設備共通）。 ● 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。また、タワーの損傷度を算出し、設計寿命（20 年）を満たし得ることを確認した²¹（2MW 風車、5MW 風車）。 <ul style="list-style-type: none"> ✓ ネガティブダンピング抑制のための浮体動揺制御の動作の確認²²（5 MW 風車）。 ✓ フィードフォワード制御の動作の確認（5 MW 風車）²³。 ● 油圧動力伝達システムの耐久性の課題が残った。（7MW 風車）
④社会実装に向けた成果、波及先	<ul style="list-style-type: none"> ● フィードフォワード制御は、FS 段階のものであり、実証設備への投入に向けた研究開発が課題である。 ● 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、ハブ内機器固定の方法や塩害対策の冷却システムの導入などが、台湾の洋上風力の案件に活かされた。

令和 2 年度の総括委員会報告書によると、実証海域にて取得したデータと、開発をした動的解析モデルを用いることで、2 MW 風車及び 5 MW 風車は、設計の妥当性と 20 年の設計寿命を満たし得る風車であることが報告されている。また、風車の性能評価としてパワーカーブの検証についても合わせて実施していることを確認した。合わせて、以下の取組が社会実装に向けた成果であると結論付けた。

- 浮体式洋上風力発電の動揺による発電量の損失を最小化するため、フィードフォワード制御を導入し、その効果を確認できたこと。一方で、実運用を通じての性能評価は今後の課題である。
- 本実証研究事業を通じて、各風車にて直面した不具合や故障への対応ノウハウ、その原因の特定と再

²¹ 令和 2 年度総括委員会報告書（2MW 風車：p.15、16、5MW 風車：p.26、7MW 風車：p.34）

²² 平成 29 年度成果報告書概要版（p.59）

²³ 平成 29 年度成果報告書概要版（p.60）、平成 30 年度成果報告書概要版（p.68）

発防止策の策定、実施により実証期間中に同一の不具合等は発生せず、風車の安全性・信頼性が向上した。特に、5MW は、台湾での洋上風力発電事業に 21 基が採用された。

③浮体式洋上風力発電用の浮体の開発

本研究の実施者は、三井 E&S 造船、三菱造船、JMU で平成 23 年度～平成 30 年度まで実施したものである。2MW 風車を搭載する浮体を三井 E&S 造船、7MW 風車を搭載する浮体を三菱造船、5MW 風車及び洋上変電所を搭載する浮体を JMU が設計から製造、維持管理までを担当した。

本実証研究事業では、水槽実験による最終検証のみならず、動的解析モデルを開発し、風車・浮体・係留の連成解析などを実施し、発電時及び暴風時における浮体の動揺と荷重を求め、関連する基準と比較して、浮体設備の安全性を評価した。本テーマの成果を表 9 に整理した。

表 9 浮体式洋上風力発電用の浮体の開発に関する成果

①背景・目的	<ul style="list-style-type: none"> 船舶安全法に基づいた技術基準の下、20 年間福島沖で運転を維持することができる浮体を開発する。
②実施内容	<ul style="list-style-type: none"> 3 種類の風車に適合した浮体の開発・建設。 定期点検を行いながら、データを取得し、安全性・信頼性・経済性を検証。
③わかったこと、得られた成果	<ul style="list-style-type: none"> 実証海域にて取得したデータと、開発をした動的解析モデルを用いることで、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²⁴。 多点の係留チェーンを設置した国内の先行事例の 1 つである。 浮体下部に亀裂が発生したが、強度を確保するため設計を見直し、洋上にて強度を確保する恒久対策工事を実施し、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。(7MW 浮体) 台風等により、はしごなどの付帯設備が破損したため、必要な時に立ち上げる倒立式での取付など設計の見直しの必要性が明らかになった(5MW 浮体及び洋上変電所浮体) 稼働喫水で水面下に位置する乗降装置取り付け部のデッキ面にクラックが発生し、浸水した。バラストコンディションの変更により対処したものの、艀装品に関する設計の見直しの必要性が明らかになった(5MW 浮体)
④社会実装に向けた成果、波及先	<ul style="list-style-type: none"> 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きっかけとなった。 <ul style="list-style-type: none"> 設計時では想定できなかった溶接部の亀裂の事象を受けて、NK のガイドライン 5.4.2 において疲労強度の評価の見直しにつながった。(7MW 浮体) はしごなどの損傷、クラックの発生を受け、付帯設備についても、浮体本体と同等の外部条件を考慮して構造設計を行うことになった。(5MW 浮体及び洋上変電所浮体) 稼働喫水で水面下に位置する付帯設備が荒天時に水中で受ける波浪荷重についても配慮することとした(5MW 浮体)。 実測データと周辺海域のデータの比較及び観測装置の故障により、浮体上での気象・海象データの観測が継続できない状況が発生したことを踏まえ、定期検査時に求められる浮体施設の環境条件に係るデータについては、周辺海域のデータで代替が認められるよう審査機関に提言した。(5MW 浮体及び洋上変電所浮体) 本実証設備の設計評価の考え方は、「浮体式洋上風力発電ガイドブック(NEDO)」に盛り込まれ、公表済。

令和 2 年度の総括委員会報告書において、恒久対策工事实施後の 7MW 浮体を含むすべての浮体設

²⁴ 令和 2 年度総括委員会報告書(2MW 浮体 : p.42、43、5MW 浮体 : p.49～51、7MW 浮体 : p.58～60、洋上変電所浮体 : p.67、68)

備について、実証海域にて取得したデータと、開発をした動的解析モデルを用いることで、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が報告されている。

本委員会では、実証で得られた以下の経験やノウハウが福島洋上風力コンソーシアムのみならず、設計基準やガイドラインへの反映にも貢献している点をもって社会実装に向けた成果であると結論付けた。

- 実証期間中に発生した浮体の溶接部の亀裂や浮体施設の破損は、その原因を特定した。その一部は、日本海事協会のガイドラインの見直しにも活用されていること。
- 定期検査にて記録が求められる気象・海象データの取得にあたり、周辺にてデータが取得できる場合は、浮体施設ごとの観測装置の据え付けを不要とする提案を行い、その内容が浮体式洋上風力発電設備に関するガイドラインに反映された。
- 本実証研究事業における浮体の設計に関する考え方が、浮体の設計者を対象とする「浮体式洋上風力発電技術ガイドブック」(NEDO) に盛り込まれていること。

【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）】²⁵

5.4 疲労強度

5.4.2 一般

- 3 疲労強度を検討する際は、8章に規定する定期的検査が実施可能であるか、もしくは検査のために個々の構造部材に近づきやすいかどうかも考慮し、検査の実施が困難な場合は安全率を増すなどの特別な対応を行わなければならない。
- 4 疲労強度評価は、線形被害則に基づく累積疲労損傷度を算定することにより評価しなければならない。なお、疲労強度評価に用いる手法の適用の妥当性とS-N線図や板厚効果などに関わる係数など適用したパラメータの設定の妥当性を示さなければならないことに留意すること。

5.6 その他設備の構造設計

5.6.2 はしご・手すり・その他

- 1 浮体施設の暴露部において、移動や点検・検査用のはしごや手すりを設置する場合、2章に規定する外部条件に基づいて、はしご・手すりに対して想定される荷重を適切に算定しなければならない。
- 2 前-1により想定される荷重に対するはしご・手すり自体の構造健全性に加えて、はしご・手すりが浮体施設に取り付けられる部位についても構造健全性の検証を行い、必要に応じて浮体施設の構造部材の補強を行うこと。
- 3 その他、浮体施設の暴露部において、2章に規定する外部条件に基づく過剰を受ける可能性がある付帯設備についても、同様の検討を行わなければならない。

8.1 一般

8.1.1 一般

- 1 浮体施設には、浮体施設の設計条件である環境条件（主として、風況条件、海況条件等）を監視できる装置（風向・風速計、波高計・流速計等）を備え付けなければならない。ただし、浮体施

²⁵ 浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン（p.30、32、45）

(https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/authentication/renewableenergy/ja/classification/NKRE-GL-FOWT01_December2021_Jpn.pdf)

設の設置場所近くの海域の環境データが得られる場合には、浮体施設ごとに監視装置を備え付ける必要はない。

④浮体式洋上風力発電の施工技術の開発

本研究の実施者は、清水建設と JMU で平成 23 年度～平成 28 年度まで実施したものである。2MW 風車及び 7MW 風車の施工を清水建設、5MW 風車及び洋上変電所の施工を JMU が担当した。浮体式洋上風力発電システムの海洋土工事の不確実性を減らし、関係者の理解と合意のもと、安全に施工するための手続きと既存技術を組み合わせた施工に取り組んだ。

本テーマの成果としては、①施工計画立案のための航行安全対策の検討、②3種類の風車の搭載方法の検証、③国内固有のルールである把駐力試験への対応、④洋上でのチェーンの引き込みがあり、それぞれの成果を表 10～表 13 に整理した。

施工計画立案のための航行安全対策の検討

表 10 施工計画立案のための航行安全対策の検討に関する成果

①背景・目的	<ul style="list-style-type: none"> ● 複数基の浮体式洋上風力発電システムは、世界でも導入実績がないため、船舶交通に与える影響に関する知見がない。 ● 曳航、係留作業を含む海洋工事が、地域関係者へ周知した上で、確実に履行されるように安全対策を検討する。
②実施内容	<ul style="list-style-type: none"> ● 航行安全対策委員会を立ち上げて、洋上風力発電が船舶交通に与える影響を評価。 ● 工事中、運転期間中の安全対策の取りまとめ。
③わかったこと、得られた成果	<ul style="list-style-type: none"> ● 本実証研究事業にて講じた安全対策により、福島沖においては浮体式洋上風力発電所が船舶交通に与える影響を小さくすることができる。 ● 他の海域においても、海域利用者、海域を管理している自治体、海上保安部等を含めた有識者委員会にて議論することで、安全対策を策定できる可能性がある。
④社会実装に向けた成果、波及先	<ul style="list-style-type: none"> ● 施工の概要や取りまとめた航行安全対策は、実績の一例として浮体式洋上風力発電導入マニュアル（以下、「導入マニュアル」という。）に取りまとめで公表。 ● 2MWと洋上変電所、7MWの経験を踏まえ、5MWの施工時には、航行安全対策委員会の開催は不要になった。

3種類の風車の搭載方法の検証

表 11 3種類の風車の搭載方法の検証に関する成果

①背景・目的	<ul style="list-style-type: none"> ● 3つの風車の搭載方法に必要な施工技術を獲得する。
②実施内容	<ul style="list-style-type: none"> ● ドックにおいて風車と浮体を組み立てて曳航（2MW 風車・浮体）。 ● 風車と浮体を小名浜港にて、世界最大級のリンガークレーンを用いて組み立てて曳航（7MW 風車・浮体）。 ● 淡路島沖の静穏海域にて、起重機船を用いて風車を浮体に搭載し、曳航（5MW 風車・浮体）。
③わかったこと、得られた成果	<ul style="list-style-type: none"> ● 現状考えられる風車と浮体の組み立ての施工技術を実証し、メリットとデメリットを整理できた。
④社会実装に向けた成果、波及先	<ul style="list-style-type: none"> ● 将来の風車の大型化によりドッグ内での組み立てが困難となること、港湾での組み立てにおいては大型のクレーンが必要となり施工費用が大きくなることを踏まえると、静穏海域の洋上での組み立てが現実的である。

国内固有のルールである把駐力試験への対応

表 12 国内固有のルールである把駐力試験への対応に関する成果

①背景・目的	<ul style="list-style-type: none"> ● 日本海事協会にて発行している浮体式洋上風力発電設備に関するガイドラインにて、係留ポイント全点に対して把駐力試験を行うことになった。
②実施内容	<ul style="list-style-type: none"> ● ガイドラインに基づいて把駐力試験を実施する。
③わかったこと、得られた成果	<ul style="list-style-type: none"> ● 海域調査時点で、アンカーがしっかり係留できることを確認した上で把駐力試験を実施したことにより、厳しいうねりがある海象条件下にも関わらず確実に全点成功した。
④社会実装に向けた成果、波及先	<ul style="list-style-type: none"> ● チェーンやアンカーの運搬、施工方法の工夫で 7MW 風車及び 5MW 風車施工時には 1 本当たりの工期が 10 日程度短縮された。

洋上でのチェーンの引き込み

表 13 洋上でのチェーンの引き込みに関する成果の整理

①背景・目的	<ul style="list-style-type: none"> ● 洋上での安全なチェーンの引き込み作業の検討。
②実施内容	<ul style="list-style-type: none"> ● クレーン船のクレーンでチェーンを引き上げる方法（2MW 風車・浮体）。 ● 浮体にウインチを載せて引き上げる方法（7MW 風車・浮体）。
③わかったこと、得られた成果	<ul style="list-style-type: none"> ● 洋上で船と浮体の両方が動揺する難しい条件の中、チェーンの引き込み作業を確実に実施した。
④社会実装に向けた成果、波及先	<ul style="list-style-type: none"> ● より安全な施工方法として、7MW 風車・浮体ではウインチを搭載して、引き上げる方法を採用した。

本委員会としては、太平洋側で長周期のうねりが発生する海象条件の厳しい海域において、実証設備を安全かつ確実に施工できたこと、将来の大型風車の導入を見越して、複数の風車の搭載方法に挑戦し、それぞれの長所と短所を明らかにできたことは重要な点であるとした。

また、実証で得られた経験やノウハウの定着等の観点から、社会実装に向けた成果と判断したものは以下のとおりである。

- 先行して実施した 2MW 風車及び洋上変電所の施工に関する課題解決策を後続の 7MW 風車及び 5MW 風車の施工に活かし、施工期間の短縮を実現したことや安全対策の策定プロセスを見直した
- こと。
- 海象条件の厳しい沖合での経験を通じて、施工会社の組織及び従事者の技術レベルの向上、リスクの特定と評価スキルの向上等の海洋土木工事の経験値が大きく向上したこと。
- 一般海域での着床式洋上風力発電でも求められる航路との調整方法や、航行安全に関する考え方と具体的な対策をまとめ、導入マニュアルにおいて先行事例として公表されていること。

⑤ 材料の開発

本研究は、日本製鉄及び同社から委託を受けた日鉄エンジニアリングが平成 23 年度～平成 30 年度まで実施したものである。テーマは、浮体の製作コストの低減と長寿命化による維持管理コスト削減に資する浮体式洋上風力発電に適した鋼材の開発と係留チェーンの耐久性に関する研究であり、各テーマの成果を表 14 と表 15 に整理した。

浮体式洋上風力発電に適した鋼材の開発

表 14 浮体式洋上風力発電に適した鋼材の開発の成果

①背景・目的	<ul style="list-style-type: none"> ● 浮体の製作コストの低減、長寿命化によるメンテナンスコスト低減に向け、浮体に使用される鋼材及び疲労、腐食に関連するソリューションの実証研究を行う。
②実施内容	<ul style="list-style-type: none"> ● 洋上風車用ハイテン鋼の適用に関する実証研究。 ● 疲労ソリューションの適用に関する実証研究。 ● 耐食鋼ソリューションの実証研究。
③わかったこと、得られた成果	<ul style="list-style-type: none"> ● 溶接施工能率は 7 倍以上（アークタイム比）向上²⁶。 ● 超音波衝撃処理（UIT）を洋上風力用ハイテン鋼に適用し、溶接部疲労強度向上の効果を確認²⁷。
④社会実装に向けた成果、波及先	—

係留チェーンの耐久性に関する研究

表 15 係留チェーンの耐久性に関する成果

①背景・目的	<ul style="list-style-type: none"> ● 浮体式洋上風力発電の係留チェーンの摩耗算定、及び摩耗が疲労に及ぼす定量的指標に関する基準はなく、海外のオフショアの基準を採用して設計したが、その基準の妥当性は検証されていない。 ● チェーンの寿命を同様観測実測のデータを用いて評価する方法は確立されていない。
②実施内容	<ul style="list-style-type: none"> ● 係留用チェーンの適用に関する実証研究。
③わかったこと、得られた成果	<ul style="list-style-type: none"> ● 人工海水中摩耗試験によって比摩耗量が妥当であることを確認²⁸。 ● 実証研究事業で取得したチェーンの動揺等のデータを用いて、疲労損傷度と摩耗量を提案²⁹。 ● 人工海水中のき裂進展速度試験による設計基準の妥当性を確認、観測データ、及び開発した動的解析モデルを用いることで、20 年の設計寿命を満たし得るチェーンであることを確認³⁰。
④社会実装に向けた成果、波及先	—

鋼材の開発の成果は、平成 30 年度の総括委員会にて検証を終えている。また、令和 2 年度の総括委員会報告書には、係留チェーンの耐久性に関して、人工海水中における摩耗試験及び、疲労試験による設

²⁶ 平成 23～27 年度成果報告書概要版（p.59）

²⁷ 平成 23～27 年度成果報告書概要版（p.61）

²⁸ 平成 29 年度成果報告書概要版（p.71、72）

²⁹ 平成 29 年度成果報告書概要版（p.71、72）

³⁰ 令和 2 年度総括委員会報告書（p.87～89）

計基準の妥当性を確認していることに加えて、観測データ及び開発した動的解析モデルを用いることで、20年間の設計寿命を満たし得るチェーンであることが報告されている。

⑥浮体式洋上風力発電所のための送電システムの開発

本研究は、日立製作所と古河電気工業が平成 23 年度～平成 30 年度まで実施したものである。テーマは、世界初の浮体式洋上変電所を日立製作所、浮体式洋上風力発電特有の海底ケーブル（ライザーケーブル）を古河電気工業が設計から製造、維持管理まで実施したものであり、各テーマの成果を表 16 と表 17 に整理した。ただし、ライザーケーブルの維持管理手法の検証については、⑧浮体式洋上風力発電所の維持管理手法の開発を参照のこと。

送電システムの開発（浮体式洋上変電所）

表 16 送電システムの開発（浮体式洋上変電所）に関する成果

①背景・目的	<ul style="list-style-type: none"> ● 世界初の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し、振動試験、傾斜試験を実施して性能評価する。
②実施内容	<ul style="list-style-type: none"> ● 変電設備の設計・試験・運転。 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 動揺特性下の設計条件の設定 ✓ 振動試験・傾斜試験の実施 ● 原則、屋内設置とし、塩害塗装・鍍金処理を実施し、塩害影響を極小化³¹。 ● 変圧器は発熱が大きく、空冷の必要があり屋外設置した。
③わかったこと、得られた成果	<ul style="list-style-type: none"> ● 実証海域にて観測された振動や傾斜角は、設計時の陸上試験で想定した振動や傾斜角よりも小さいものであり、設計条件が妥当であったことを確認³²。 ● 令和元年度に変電システムが故障により停止したが、アクセスが厳しい環境下であったため、復旧まで 1 か月強の期間を要することになり、設計の見直しの必要性が明らかになった。
④社会実装に向けた成果、波及先	<ul style="list-style-type: none"> ● 洋上変電所へのアクセス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の二重化が重要。 ● 部品交換や機材搬入が容易にできる配置や据付のためのクレーンを洋上変電所に備えておくことが必要。

送電システムの開発（海底ケーブル）

表 17 送電システムの開発（海底ケーブル）に関する成果

①背景・目的	<ul style="list-style-type: none"> ● 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開発、挙動解析を実施しケーブルの最適化を行う。
②実施内容	<ul style="list-style-type: none"> ● 高耐久性ライザーケーブルの開発。 ● ライザーケーブル接続材料の開発。
③わかったこと、得られた成果	<ul style="list-style-type: none"> ● 実証海域にて取得したデータと、開発をした動的解析モデルを用いることで、設計の妥当性と 20 年の設計寿命を満たし得るライザーケーブルであることを確認³³。
④社会実装に向けた成果、波及先	<ul style="list-style-type: none"> ● 先行して製造した 2MW 風車及び洋上変電所向けに開発、設置した経験を、後続の 7MW 風車及び 5MW 風車のライザーケーブルの設計に活かしている。

³¹ 平成 23～27 年度報告書（p.65）

³² 令和 2 年度総括委員会報告書（p.75、76）

³³ 令和 2 年度総括委員会報告書（p.80～83）

令和2年度の総括委員会報告書において、洋上変電所、海底ケーブルともに設計の妥当性の検証、20年間設備を安定的に運用するための維持管理手法や設計寿命を満たし得る設備であることが報告されている。

本委員会では、社会実装に向けた成果と判断した取組は以下のとおりである。

- 洋上変電所固有の維持管理手法として、バッテリーや一部制御機器などの設備の二重化や、部品交換や機材搬入が容易にできる配置やクレーンの設置などを提言できたこと。
- 先行して実施した2MW風車及び洋上変電所のライザーケーブルの設計や施工上の課題を後続の7MW風車及び5MW風車の設計に反映したこと。

⑦航行安全性の評価

本研究は、東京大学及び同大学から委託を受けた海上・港湾・航空安全研究所 海上技術安全研究所が平成 23 年度～平成 27 年度まで実施したものである。テーマは、浮体式洋上風力発電所への船舶の衝突リスク、漂流リスクを定量化する手法の研究であり、その成果を表 18 に整理した。

表 18 航行安全性の評価に関する成果

①背景・目的	<ul style="list-style-type: none"> ● 本実証海域近辺での船同士の衝突、船と風車・浮体の衝突のリスクや暴風時に係留系の切断が発生した場合を想定し、風車・浮体が漂流したり、漂流風車が船舶と衝突するリスクを定量的に評価する。
②実施内容	<ul style="list-style-type: none"> ● 衝突リスクの定量化。 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 航行船舶調査及び航行シミュレーションによるリスクの定量評価とリスク低減対策の検討。 ✓ 現地周辺航行船舶の観測（事前調査及び常時観測）及び過渡応答時の基礎パラメータの取得。 ● 漂流リスクの定量化。 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 実機観測により長周期動揺、波周期応答、高周波数応答等の発生状況の確認と解析法評価。 ✓ 風車-浮体-係留系まで考慮した漂流に関わる動的一体解析法を開発してシミュレーションを行い漂流リスクを評価。
③わかったこと、得られた成果	<ul style="list-style-type: none"> ● 衝突・漂流に係る事故シナリオの明確化と定量的評価フローを完成させた。 ● 連鎖漂流事故リスク評価式の定式化およびリスク定量的評価の基礎情報を取得した。³⁴ ● 大規模浮体式洋上ウインドファームのリスクを定量的に評価した³⁵。
④社会実装に向けた成果、波及先	<ul style="list-style-type: none"> ● 学術論文として成果を公表。 ● この成果を発展させる形で、浮体式洋上風力発電施設技術基準の改訂に貢献した。 ● 特に損傷時復原性については、浮体式洋上風力発電施設ガイドラインや IEC 61400-3-2 の Annex U の IS 化に向けた改訂に貢献した。

本委員会は、社会実装に向けた成果として、国内の技術基準、IEC への提案を行うことで、浮体式洋上風力発電の基盤整備に貢献した点を評価した。判断したものは以下の取組である。

- 成果は、学術論文として公表され、その後の研究成果も踏まえて、国土交通省海事局が公表している「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」の改訂に貢献していること。
- 損傷時復原性維持のため、浮体への衝突があっても転覆しないよう、浮体内部の浸水防止区画に仕切りを設ける際、船舶通航量を加味した船舶衝突の確率を織り込むことが、「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）や IEC TS 61400-3-2 の IS に向けた改訂案の Annex U に反映されていること。

³⁴ 平成 23～27 年度成果報告書概要版（p.116）

³⁵ 平成 23～27 年度成果報告書概要版（p.117）

【浮体式洋上風力発電施設技術基準安全ガイドライン（国土交通省海事局）】³⁶

- 付録 3 損傷時復原性要件のための水槽試験
- 付録 5 周辺を航行する船舶の衝突による構造全損の確率の評価方法
- 付録 6 浮体施設の漂流挙動の推定手法（浮体式洋上風力発電施設技術基準外の検討）
- 付録 7 浮体施設の連鎖衝突の確率評価法（浮体式洋上風力発電施設技術基準外の検討）

【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）】³⁷

7.3 損傷時復原性

7.3.1 一般

-5 浮体施設の設置海域における航行状況や区画への浸水を防止するための措置等を考慮して、本会が適当と認める場合にあっては、本会は-1.から-4.の規定と異なる方法を認めることがある。

【IEC TS 61400-3-2 Design Requirements for floating offshore wind turbines】

- IEC TS 61400-3-2 の IS に向けた改訂案の Annex U 損傷安定性基準の適用

³⁶ 浮体式洋上風力発電施設技術基準安全ガイドライン 付録
(<https://www.mlit.go.jp/common/001331294.pdf>)

³⁷ 浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン (p.43)

(https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/authentication/renewableenergy/ja/classification/NKRE-GL-FOWT01_December2021_Jpn.pdf)

詳細説明 1 : IEC 61400-3-2 の取りまとめにおける日本の役割

浮体式洋上風力発電の国際基準は、2010 年に韓国の提案により議論が開始された。当時、洋上風力発電の実証事業はノルウェーの Hywind のみであったことから、基準の必要性を疑問視される状況であったが、2011 年に米国が WindFloat の実証の経験から基準の制定に前向きになり、日本、米国、欧州で検討が開始された。

日本や米国は、**自国内の実証事業の経験から基準制定のための議論を主導**することができた。一方で、国際基準の策定の提案を行った韓国は、自国の案件を有していないことから、全体の取りまとめは困難と判断し議長を降りることとなった。

米国は、石油・ガス産業と国内政治の関係から、開発初期の事故の発生を懸念し、船舶が衝突した際の転覆・沈没を避けるように、浮体内部に区画を設けるように要望した。他方で欧州は、浮体は船舶とは異なり事故が発生した際の人命へのリスクはないとの考えからコスト削減を重視しており、浮体内部に区画を設ける必要はないと主張した。**日本は中間の立場をとり、水面付近の船舶や流木が衝突する可能性の高い部位や、係留を引き出すフェアリーダ部等の荷重がかかる部位については区画を設けるという案を提案した。**

現在 TS（技術仕様書）を IS（国際規格）へと変更する方針が決定しており、2021 年 5 月～7 月の Document review meeting や 8 月～9 月の Document review finalization meeting において議論がなされた。浮体内部の区画については、区画を設けるべきとする米国の提案を基本としつつ、区画を不要とするための立証方法を日本から提案した（Annex U）。その他にも、方向拡散関数（Annex R）、うねり（Annex T）の項目についても規格に盛り込むことを日本から提案し反映されている。**Annex R、T、U については、本実証研究における成果による貢献**が大きい内容となっている。

IEC61400-3-2 の取りまとめにおける議論の議長はアメリカ、副議長は韓国が担っていた。**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うことができたことから IEC 内での発言力も高く、意思決定における中心的な役割を果たしており議論を主導**することができた。



※赤枠で示す参加国は意思決定における中心的な役割を果たした国

IEC 61400-3-2 の取りまとめにおける審議体制

⑧浮体式洋上風力発電所の維持管理手法の開発

本研究は、通常の発電設備の運転・保守ではなく、実証期間中に生じた浮体式洋上風力発電の固有の維持管理上の課題を解決するための技術開発を追加的に実施したものである。実施主体は、日立製作所（2MW 風車・5MW 風車）、三井 E&S 造船（2MW 浮体）、古河電気工業（ライザーケーブル）であり、平成 28 年度～令和 2 年度まで実施した。

本委員会では、アクセスが制限される洋上風力の維持管理において、特に重要となる予防保全技術の基礎となるような、故障を未然に防ぐ取組として予兆診断のアルゴリズムの開発や、定期点検で検査をするチェーンの摩耗量の計測システムの開発、海洋生物の除去システムの開発について、それらの成果を表 19 に整理した。

表 19 浮体式洋上風力発電所の維持管理手法の開発に関する成果

<p>①背景・目的</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 浮体式洋上風力発電システムの維持管理において、実証期間中に明らかになった課題について、設備を 20 年間安定的に運用していくために必要な技術を実証する。 ● 陸上設備とは異なり、荒天待機による発電損失を最小限にするため、故障を事前に感知し、修繕する予兆診断システムの開発が必要。 ● 係留チェーンが 20 年間の設計寿命を満たし得るかを検証するため、摩耗量を実測できるシステムの開発が必要。 ● ライザーケーブルのメンテナンスフリー化の実施。
<p>②実施内容</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 予兆診断システムの実装に向けたアルゴリズムの開発（2MW 風車/5MW 風車/2MW 浮体）。 ● チェーンの摩耗量を計測するシステムの開発（2MW 浮体）。 ● 小型 ROV を用いた海洋生物の除去（2MW 浮体）。 ● ライザーケーブルのメンテナンスフリー化に向けた対策の検討（ライザーケーブル）。
<p>③わかったこと、得られた成果</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 予兆診断のアルゴリズムを開発した。 <ul style="list-style-type: none"> ✓ KNIME プラットフォームを選定（風車との連携を考慮）し、浮体挙動推定式を作成し、異常度を評価できることを確認した。（2MW 浮体）³⁸ ✓ 主成分分析に基づく故障予兆検知アルゴリズムを実装し、正常データの異常度が小さくなることを確認した。また、本システムの導入により年間約 2,000 万円の維持管理費用の低減が期待できることを示した。（2MW 風車）³⁹ ✓ Maharanobis-Taguchi 法を用いた故障予知アルゴリズムを改良して、予兆診断の精度が向上した。2MW 風車と同様、本システム導入に伴う年間の維持管理費用の削減額は、約 2,000 万円であることを示した。（5MW 風車）⁴⁰ ● 実海域で小型 ROV を用いて係留チェーンのリンク間を数 mm 程度の水準で計測することができるシステムを開発した。（2MW 浮体）⁴¹ ● 小型 ROV を用いた付着した海洋生物の除去に取り組んだ結果、海洋生物の除去作業は可能だが、フジツボのような強固に付着したものの除去は困難であ

³⁸ 平成 29 年度成果報告書概要版（p.56）

³⁹ 平成 29 年度成果報告書概要版（p.116）、平成 30 年度成果報告書概要版（p.62）

⁴⁰ 平成 29 年度成果報告書概要版（p.82）、平成 30 年度成果報告書概要版（p.66）

⁴¹ 平成 29 年度成果報告書概要版（p.79）、平成 30 年度成果報告書概要版（p.31）

	<p>ることを確認した。(2MW 浮体)⁴²</p> <ul style="list-style-type: none"> ● ライザーケーブルが当初の想定以上に付着した海洋生物の影響により、20 年間運用が困難になったため、恒久対策として大型ブイ+錘方式を採用した。平成 30 年度の恒久対策工事後、令和 2 年度時点でも効果は継続していることを確認した。(ライザーケーブル)⁴³
<p>④ 社会実装に向けた成果、波及先</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 洋上風力発電の社会実装に必要な予兆診断技術に注目し、アルゴリズムを開発したこと。 ● ROV の目視点検にて取得した画像を参照画像と比較することで、20 年間の設計摩耗量 (4mm) 以下であれば点検頻度の見直しを提案したこと。 ● ライザーケーブルの位置保持を大型ブイ+錘方式におけるライザーケーブルのメンテナンスコストを低減したこと (ライザーケーブル)。

本委員会としては、実証期間中に生じた維持管理上の課題に関して、追加的な実施した対応策について、限られた期間内で実施されたものであるにもかかわらず、所期の課題を解決する方策が見通せていると判断した。特に、社会実装に向けた成果としてとして、以下の点が重要であると評価した。

- 洋上風力発電を安定的に運営していくためには、風車や浮体に限らず、予兆診断システムの確立は必要不可欠なテーマである。海外の風車メーカーは商用ベースでデジタルツインの運用が進んでいる中、アルゴリズムの開発というシステムの基盤となる技術を開発し、デジタルツインへの基礎技術の一つを実証したこと。今後はデータ管理の高度化を進める必要がある。
- 材料の開発の成果において、係留チェーンの設計の妥当性は検証できているが、画像診断技術を使った摩耗量の推定による水中点検の合理化に関する提案を行ったこと。
- 欧州の基準に基づき想定した海洋生物の付着量よりも多量の付着が発生したことから、本海域のみならず日本においては欧州基準が適用できないと推察され、外部有識者を交えて、ライザーケーブルの維持管理手法について総括を行ったこと。(詳細は詳細説明 2 を参照) 具体的には、
 - 付着した海洋生物の種類と量が設備の場所によって異なり、それぞれの生物の種類と付着量を測定したこと。
 - 実証期間中に取り組んだ対策とその効果を確認するとともに、設計段階及び維持管理段階における恒久対策の洗い出しを行ったこと。
 - 恒久対策工事後の数年間ではあるものの、フォローアップを行い効果が継続できていること。

⁴² 平成 29 年度成果報告書概要版 (p.56)

⁴³ 平成 30 年度成果報告書概要版 (p.49、50、52、53、54、55)

詳細説明 2 : ライザーケーブルの維持管理手法の検討推移

本実証研究にて開発・製造したライザーケーブルの設計にあたり、海洋生物の付着量は欧州の基準の2倍を想定しても位置保持ができる前提であった。

しかしながら、設置後に想定以上の海洋生物が付着してしまい、ライザーケーブルが海底面に着底した。また、浮体の移動により表面がすれてしまい、破損部分の修繕工事を行った。



図6 7MW 浮体のライザーケーブルの補修の様子

その後、ライザーケーブルの設計寿命である20年間使用できるように、海洋生物の除去、塗料の塗布、ネットの装着などを行ったが、決め手となる効果が得られなかったため、外部有識者を交えたワーキンググループを設置して検討を行った。

付着した海洋生物は、浮体の種類とその方向によっても特徴があることが確認できた。また、H25年はフジツボが少なく、H26年以降は明らかにフジツボがメインとなり、付着質量が増加していること、方向性の観点では、潮流が南北方向メインであることから、南北への付着が東西より相対的に多いと推定された。

設置箇所・方向	施工時期	フジツボ推定質量
① 2 MWライザー (東西方向)	H25	藻のような種類がメインで、フジツボ系は少ない。 フジツボ推定質量： 0.3~0.6kg/m
② 洋上変電所ライザー (東西方向)		
③ 洋上変電所ライザー (南北方向)	H26	H26年施工からは明らかにフジツボがメインとなった。 フジツボ推定質量： 0.6~1.1kg/m (フジツボ除去区間は1.5~1.75kg/mと倍程度に質量が上がる。)
④ 7 MWライザー (東西方向)	H27	
⑤ 5 MWライザー (東西方向)	H28	

ワーキンググループにおいて、これまでに実施した対策

についての検証も行った。その結果を表20に示す。今回は、新規ではなく維持管理段階のため、ケーブルを張りなおすことはせず、大型ブイと錘を使ってケーブルの位置を保持する工法を採用した。

この工法の仕組みは、フジツボが付着しケーブルが沈降すると錘も着底していき、その分の浮力が回復し、ケーブルが浮上する。また、フジツボが自然落下した場合は、着底した錘が引き上げられ、その分の浮力が失われると言う形で、錘により上下のバランスが保たれ、ライザーケーブルの線形が維持できる。

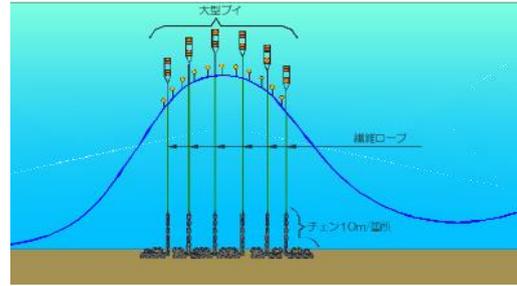


表 20 ライザーケーブルの対策の変遷

対策方法	結果	現状への適用	
①再浮上対策	沈着・着底を回避するためには、フジツボ除去及びフイ追加が必要。	技術的に除去可能であることが確認でき再浮上させたが、除去部へフジツボが再付着し、頻繁なメンテが必要。	定期的な除去のみでは 20 年持続不可。
②追加対策 1	シリコン系防汚塗料の塗布（初期効果）。	追加部位およびケーブルにてフジツボ付着防止効果が確認できた（2 年）。	追加フイへの適用は可能だが、既設への適用は不可。
③追加対策 2	・ネット装着（恒久的効果を期待）。 ・新型防汚塗料（自己研磨型）。	・追加フイにてフジツボ付着防止効果が確認できた（1 年）。 ・新塗料は 20 年効果が理論的に可能。	②との併用により既設フイへの適用も可能。
④追加対策 3	大型フイ+錘式。	事業期間も含めて、メンテナンスフリーを実現できる見通しが得られた。	最も有効性が高い。
⑤自然落下	自重による自然落下を期待。	本 PJ では未だ確認できず（5 年経過）。	-

令和 2 年度の総括委員会報告書において、ライザーケーブルの海底面からの高さの時系列のグラフをみると、ケーブルの沈降スピードが緩くなっており、効果が確認できている。

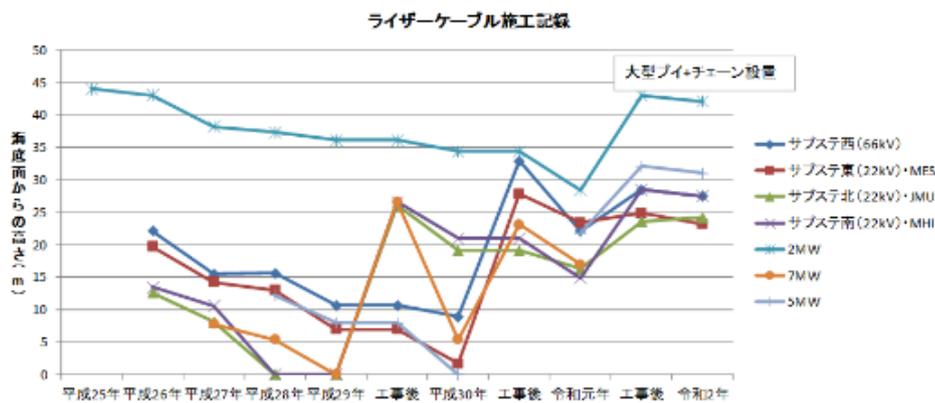


図 7 ライザーケーブルの海底面からの高さの推移

⑨浮体式洋上風力発電システムの撤去に関する技術

本研究の実施者は、吉田組を幹事会社とするコンソーシアムで令和元年度～令和3年度まで実施したものである。7MW 風車・浮体の撤去・解体は、吉田組とJMU、残りの実証設備の撤去・解体は、吉田組とJMU に加えて、日本風力開発、大成建設、日揮が担当した。施工と同様、安全を担保した撤去工法を策定し、浮体式洋上風力発電システムの海洋土工事の不確実性を減らし、関係者の理解と合意のもと、安全に施工するための手続きと既存技術を組み合わせた撤去方法を策定した。

本テーマの成果としては、①撤去計画立案のための航行安全対策の検討、②係留解除・曳航、③風車・浮体の解体があり、それぞれの成果を表 21～表 23 に整理した。

撤去計画立案のための航行安全対策の検討

表 21 撤去計画立案のための航行安全対策の検討に関する成果

①背景・目的	<ul style="list-style-type: none"> ● 曳航、係留作業を含む海洋工事を地域の関係者に周知の下、確実に履行できるように安全対策を検討する。 ● 複数基の浮体式洋上風力発電設備の撤去の実施海域、撤去手法を検討する。
②実施内容	<ul style="list-style-type: none"> ● 航行安全対策委員会を立ち上げ。 ● 工事中の安全対策の取りまとめ。
③わかったこと、得られた成果	<ul style="list-style-type: none"> ● 長距離曳航や輻輳海域曳航のための調整を完了。 ● 策定した安全対策を確実に履行し、マリンワランティサーバイを実施し適切な安全対策がとられたことを確認。 ● 関係者への周知による船舶衝突災害の防止など、本実証研究事業の安全対策で得られた教訓を整理。
④社会実装に向けた成果、波及先	<ul style="list-style-type: none"> ● 撤去工事に関して策定・合意した航行安全対策は、導入マニュアルに反映し、公表。 ● 7MW 風車の解体工事の経験から、長距離曳航に伴う工事計画の不確実性やコスト増加を避けるため、解体場所を東京湾に変更。 ● 7MW 風車の解体工事の経験から主曳船の速力や警戒船削減の見直しを行い、コスト削減につながった。 ● 現実的な曳航距離は、気象予報の精度の点から最大で5日程度の見通し。

係留解除・曳航

表 22 浮体式洋上風力発電システムの係留解除・曳航に関する成果

①背景・目的	<ul style="list-style-type: none"> ● 浮体式洋上風力発電設備の撤去に必要な施工技術を獲得する。
②実施内容	<ul style="list-style-type: none"> ● 安全性を確保したうえで係留解除・曳航を実施。 ● 鹿児島湾までの長距離曳航実施。(7MW 風車) ● 輻輳海域の曳航を実施。(2MW 風車、5MW 風車、洋上変電所) ● 曳航の計画と実績の乖離の分析を実施。
③わかったこと、得られた成果	<ul style="list-style-type: none"> ● 7MW 風車の解体工事が完了。 ● 残り設備についても東京湾までの曳航、ドックにおける解体工事が完了。 ● 計画と実績の乖離の主な要因は、荒天待機による遅延、船の確保、航行安全委員会での合意形成の遅れ、コロナの影響など。 ● 撤去後試料の分析から、設計時との比較を行い、設計の妥当性を検証した。 ● 撤去作業にあたり設計の改良点を整理。

④ 社会実装に向けた成果、波及先	<ul style="list-style-type: none"> ● 撤去工事の概要は、導入マニュアルに反映し公表。 ● 7MW 風車の解体工事の経験から、2MW 風車、5MW 風車、洋上変電所の解体工事では、チェーンの切断直後に浮体を曳航することで、従来工法と比較して曳船拘束日数を削減できた。
-------------------------	--

風車・浮体の解体

表 23 浮体式洋上風力発電システムの風車・浮体解体に関する成果

① 背景・目的	<ul style="list-style-type: none"> ● 浮体式洋上風力発電設備の撤去に必要な施工技術を獲得する。
② 実施内容	<ul style="list-style-type: none"> ● 鹿児島湾での風車・浮体解体を実施。(7MW 風車) ● 東京湾内での風車解体を実施。(5MW 風車、洋上変電所) ● ドック内での浮体解体を実施。(2MW 風車、5MW 風車、洋上変電所) ● 計画と実績の乖離の分析を実施。 ● メーカー各社により撤去後試料の分析を実施。
③ わかったこと、得られた成果	<ul style="list-style-type: none"> ● 7MW 風車の海上での解体工事が完了。 ● 浮体設備等についてドック内での解体工事が完了。 ● 撤去後試料の分析から、設計時との比較を行い、設計の妥当性を検証した結果、想定以上の風や波による応力が発生していないことが分かった。 ● 一方で、防食用アノードについては、係留チェーンに電流が流れた場合には、想定以上の減少が発生することが分かった。 ● ドックでの解体のメリット・デメリットを整理した。
④ 社会実装に向けた成果、波及先	<ul style="list-style-type: none"> ● 撤去工事の概要は、導入マニュアルに反映し公表。

計画と実績の乖離の分析

令和 2 年度撤去実証報告書によると、7MW 風車・浮体撤去は、潮流の少ない静穏な海域であること、航行船舶量が少ないこと、作業船の調達が可能であること等の理由から、鹿児島湾で実施した。また、当初計画では、令和 2 年 7 月下旬の撤去工事終了を予定していたが、①台風や海象条件の悪化による荒天待機、②大型起重機船の確保不足等、③コロナの対応等工程の遅延等が発生し、撤去工事終了は 9 月下旬となったと報告されている。

また、令和 3 年度撤去実証報告書によると、2MW、5MW 風車、サブステーションの撤去は、浮体底面のコンクリートの海洋投棄を避けるためドックで解体を実施することとし、令和 2 年度事業からの経験により、不確実性とコスト低減の両面から長距離曳航を回避するため、東京湾内でのドックでの解体を行った。また、当初計画では、令和 3 年 12 月末での撤去工事終了を予定していたが、①台風や海象条件の悪化による荒天待機、②東京湾の曳航に向けた調整の長期化、③風車の不具合による工程の変更等の影響で、工程の遅延が発生し、撤去工事終了は令和 4 年 2 月中旬となった。

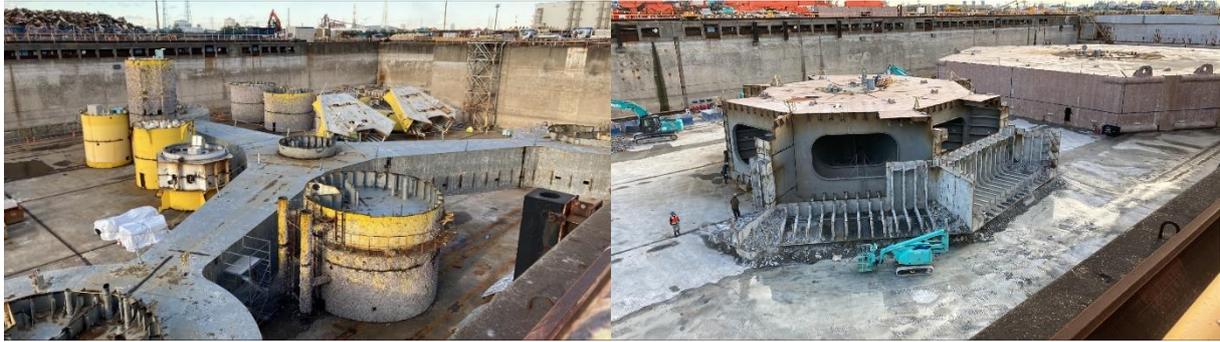


図8 ドックにおける解体の様子（左から 2MW 浮体、洋上変電所浮体、5MW 浮体）

解体作業における設計の見直しに関する検証

令和 2 年度事業の報告書では、撤去を実施した経験を踏まえ、以下のような設計へ反映すべき事項が報告されている。

- 浮体に設置してある既存の曳航ピースの強度不足のため、曳船の最大出力を發揮できなかった。曳航ピースの強度増加や、後方から押航できる構造が望ましい。
- 5MW、サブステーションのようにジョイントのないチェーンは回収効率が高く一本物のチェーン構成とすることが望ましい。
- 2MW、5MW 浮体は、CTV 以外での乗り移りができない構造のため、稼働率が気象・海象条件に大きく影響された。稼働率向上のため、現場海域の作業船からの乗り移りができる設計が望ましい。

試料分析による設計の見直しに関する検証

また、令和 2 年度及び令和 3 年度事業では、メーカー各社により撤去後試料の分析を実施し、設計の妥当性の検証により、以下の成果が報告されている。

- 5MW 浮体、サブステーション浮体の防食用アノードの減量を検証したところ、外板に設置されたアノードで想定以上の消耗が確認された。これは、係留チェーンへも電流が流れたことが原因と考えられており、設計の際には係留チェーンも防食対象として考慮する必要がある。
- 5MW 浮体、サブステーション浮体バラスタックにおいては、アノードの減量はほとんど確認されず、条件の緩和が可能と考えられる。



図9 すり減ったアノードの様子

- 浮体撤去時のカキガラ処分総重量は242tであった。各浮体に付着するカキガラの厚みは3～8cm程度であり、各浮体の浸水面積から1m²あたり14.4kgのカキガラが付着していたと推定される。



図10 浮体に付着した海洋付着生物の様子

最後に、令和2年度事業及び令和3年度事業を通じて、2MW、5MW、サブステーション解体の経験から、ドックでの解体のメリットやデメリットを表24に整理した。

表24 ドックを利用した解体のメリットとデメリット

メリット	デメリット
<ul style="list-style-type: none"> ● ドックの排水機能を利用し、安全かつ円滑な浮体の着底が可能。 ● ゴライアスクレーンの使用により大ブロックでの解体が可能。 ● ドックゲートを開放することで起重機船での解体が可能。 ● 海象の影響の回避可能。 ● 陸上機械を使用可能。 ● 騒音などの第三者への影響が少ない。 ● ドック渠底の耐荷重が高く、重量物へも対応可能。 ● バラストコンクリートの研り、撤去が可能。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 造船工程に影響を受ける可能性がある。 ● 場外搬出のために部材を30t程度以下まで解体が必要。 ● 搬出工程が律速となる。 ● 大型風車・浮体になると入渠ができない。 ● ドック開閉構造により、浮体がゴライアスの揚程に干渉する。 ● 廃業中のドックを用いる場合、付属設備の復旧が必要。 ● 係留設備が乾舷5m以上を対象としているため、台船係留の際には手摺や防舷材の干渉の考慮が必要。

設計の見直しに関する検証

- 鋼材へコンクリートを充填した構造の解体に時間を要したため、コンクリートで間詰めるのではなく、コンクリートブロックを浮体の内部に設置する等の方法が望ましい。

海洋生物の付着に関する検証

- 撤去され、陸揚げされた施設の解体現場にあっても、浮体に海洋付着生物が大量に着いていた。海上で近距離に位置する浮体間でも、付着生物の付き方が異なること、例えば、一方の浮体にはフジツボが大半を占めるが、他方にはカキガラなど二枚貝が大半を占めていたことが報告されている。

- また、浮体とケーブルでカキガラの付着量も異なり、形状や材質によって海洋生物の付着しやすさや種類に差がある可能性がある。

本委員会では、これらの取組は、撤去コスト低減にもつながる社会実装に向けた成果であると評価した。

⑩ 漁業との共存

この研究の実施主体は丸紅であり、平成 23 年度から令和 2 年度まで実施されたものである。洋上風力発電事業を行う場合には、様々な先行利用者との協議・調整が不可欠であり、その一つに漁業が挙げられる。漁業関係者との協議・調整のための考え方・方策が洋上風力発電事業と漁業との共存（共存策）である。本実証研究事業では、洋上風力発電事業と漁業との共存に関し、漁業関係者との対話と協働作業のもと、いくつかの共存策の具体が示された。

ここで、洋上風力発電事業と漁業との共存を考える場合、漁業種によりその取り組むべき方向性が異なる場合があることに注意しなければならない。福島県では、数トンから数十トンの漁船で行われる底曳網漁業のほかに、10 トン未満の漁船で行われる釣り漁業や、刺網漁業、シラスやコウナゴなどの船曳網漁業、かご・どう漁業などが行われている。そこで、ここでは、「全漁業者」、「底曳網漁業者」、及び「釣り・刺網・その他漁業者」、の 3 つの対象に区分して、平成 23 年度から取組まれてきた各種の共存策（主な実施項目）について、背景・目的、実施内容、得られた成果、及び漁業者の反応を整理した。

(ア) 全漁業者を対象とした実施項目

漁業者との協議や調整などの対話を目的とし、実証研究事業の進捗の報告、疑問点・不安点に関しての対応・説明、共存の在り方等について、議論・報告・承認する場として、2 つの会議体が設置された。

ひとつは、漁業協働委員会で、委員長及び委員には外部有識者を招へいし、福島洋上風力コンソーシアムからの実証研究事業に係る協議事項について、漁業関係者、経済産業省資源エネルギー庁、福島県による承認機関の役割を持たせた。

もうひとつは、いわき・相馬双葉ワーキンググループで、漁業者の代表者が座長として就き、福島洋上風力コンソーシアムからの報告や協議事項などについて、審議・承認する役割を持たせた。

このような役割分担のもと、平成 24 年 12 月 3 日に第 1 回の漁業協働委員会が開催され、その後、令和 2 年度までの間、漁業協働委員会・ワーキンググループとも、毎年、定期的に行われてきた（表 25）。

漁業協働委員会・ワーキンググループ

表 25 漁業協働委員会・ワーキンググループ成果等⁴⁴

①背景・目的	<ul style="list-style-type: none"> ● 漁業者との協議や調整、意見交換、進捗報告などの場として設置。
②実施内容	<ul style="list-style-type: none"> ● 実証研究事業の協議事項に係る承認機関として、漁業協同組合・福島県漁連からの要職者・代表者と、外部の専門家、経済産業省資源エネルギー庁や福島県などの関係機関で構成される漁業協働委員会を設置、委員長に外部の専門家を招へいし、事業期間中において計 17 回開催した。 ● また、より具体的な調整・協議を行う場として、いわきと相馬双葉でそれぞれ十数名の漁業者で構成されるワーキンググループを設置、座長として漁業者の代表者が就き、事業期間中において両ワーキンググループの合同開催含めいわきで計 38 回、相馬双葉で計 35 回を開催した。
③得られた成果	<ul style="list-style-type: none"> ● 実証研究事業に関する疑問点・不安点などに対して、膝詰めで十分に説明・

⁴⁴ 平成 23～27 年度成果報告書概要版（p.120）、平成 29 年度成果報告書概要版（p.5）、平成 30 年度成果報告書概要版（p.74）

	議論することで、漁業関係者も参画する形で、円滑に実証研究事業が進められた。また、漁業者と事業者との信頼関係の醸成を図ることができた。
④漁業者の反応	● 漁業協働委員会・ワーキンググループとも、積極的な発言があり、様々な意見、要望が出された。

漁業協働委員会・ワーキンググループでは、組織の要職・役職に就いている漁業者が主たる参加者となるが、他方、今後の福島県の漁業を担っていく若い漁業者の意見こそが重要であるとの考えから、若い漁業者を主体として、それに水産研究分野、海洋研究分野の専門家らも交え、共存の在り方とその具体を検討、実践する場として漁業との共存ワーキンググループが設置された（表 26）。

漁業との共存ワーキンググループ

表 26 漁業との共存ワーキンググループの成果⁴⁵

①背景・目的	● 若手の漁業者を主体とし、それに水産研究分野、海洋研究分野の専門家らも交え、共存の在り方とその具体策を検討、実践する場として設置。
②実施内容	● 若手漁業者との計 7 回にわたる議論、また先進地視察等を通じて、洋上風力発電事業と漁業との共存に向けた新しい取組を検討した。
③得られた成果	● 議論の結果、漁業との共存に向けた新しい取組として、離底網実験と漁具・漁法実験が提案され、実施された。
④漁業者の反応	● 漁業者の積極的な参画により、離底網実験、及び漁具・漁法実験が実施され、自らによる評価もなされた。

そのほか、全漁業者を対象とする取組として、海洋観測データの配信といった漁業活動に有益となる情報の提供（表 27）、また、実証研究事業における工事警戒船への傭船が行われた（表 28）。

海洋観測データの配信

表 27 海洋観測データの配信の成果⁴⁶

①背景・目的	● 漁業活動に有益となる海象情報の配信システムの構築とその運用。
②実施内容	● サブステーションに取り付けた水質計のデータや、2MW 風車ナセル上に取付けられた風向風速データを、リアルタイムでスマートフォンやパソコン、携帯電話で閲覧できるシステムが構築され、運用された。
③得られた成果	● 漁業者への周知や維持管理等に課題は残されたが、漁業との共存策の具体の一つとなった。
④漁業者の反応	● 洋上を映すライブカメラなど、より低コストでの実施についての提案があった。

⁴⁵ 平成 23～27 年度成果報告書概要版（p.120）

⁴⁶ 平成 23～27 年度成果報告書概要版（p.125）、平成 30 年度成果報告書概要版（p.77）

警戒船業務等

表 28 警戒船業務等の成果⁴⁷

①背景・目的	● 洋上の工事警戒船業務等への地元漁業者の協力依頼（備船）による実証研究事業への参画。
②実施内容	● 浮体の設置工事などにおける警戒船業務を地元漁業者に協力を依頼し、実施された。
③得られた成果	● 平成 25 年度から令和 3 年度 12 月までの間、地元漁業者より延べ約 1,400 隻の警戒船業務等が依頼・備船された。
④漁業者の反応	● 福島洋上風力コンソーシアムが企画し、福島海上保安部による「警戒船業務講習」には、ほぼ全漁業者の参加があった。

本委員会としては、これまでの間、事業者・漁業関係者間で、円滑に実証研究事業が進められてきたことは、漁業協働委員会・ワーキンググループ等において、漁業関係者と十分な対話・調整が果たせた結果と判断した。そのことを含め、以下の点が重要であると評価した。

- 漁業協働委員会やワーキンググループでの会合を開いて、十分な意見交換が行なわれたこと、特に漁業関係者に有識者を交えて意見交換し、それを踏まえて現場実験を行なったこと。
- 漁業との共存ワーキンググループにおいて、専門家との意見交換を行いつつ、漁業者との議論の中で離底網実験と漁具・漁法実験といった新たな取組が行われたこと。
- 海洋観測データ配信は、漁業者に一定の活用がされたものの、今後の共存策としては、漁業者にとってより必要なデータを確認して、提供することが望ましい。
- 警戒船業務は、工事に関わる際、漁船が洋上の警戒に当たり、かつ漁業者が洋上工事の現状を確認することができ、実証研究事業への理解が進み、漁業との共存のひとつの姿として実証されたこと。

⁴⁷ 平成 28 年度成果報告書概要版（p.10）、平成 29 年度成果報告書概要版（p.5）

(イ) 底曳網漁業者を対象とした実施項目

福島県の主力漁業種は底曳網漁業である。本実証研究事業の実施にあたり、底曳網漁業者が懸念したのは、浮体及びその係留施設が漁業の障害となり、底曳網漁業が操業できなくなる場所が生じること、漁獲高の減少などの影響が発生することであった。懸念事項が実際に発生するか確認するため、漁獲試験や撤去後の海底地形調査を実施された。また、懸念事項が発生した場合の軽減策の検討のため、離底網実験が実施された。

漁獲試験は、平成 25 年度 5 月から、浮体撤去後の令和 4 年 2 月まで、底曳網漁業者による浮体施設周辺でのサンプリング調査として行われた。漁獲量の記録は底曳網漁業への影響の解析に供され、その結果は、随時、ワーキンググループ等で漁業関係者に報告された（表 29）。

漁獲試験（底曳網）

表 29 漁獲試験（底曳網）の成果⁴⁸

①背景・目的	● 底曳網漁業が漁獲対象とする魚介類に対し、浮体施設がもたらす影響の有無の確認と評価（漁業者の不安・懸念事項の確認とその報告）。
②実施内容	● 漁業者による浮体周辺での漁獲試験（サンプリング調査）が実施された。
③得られた成果	● 漁獲量を解析した結果、悪影響はみられなかったことが示され、漁業者に報告された。
④漁業者の反応	● 漁業者の実感としても、風車の悪影響を指摘する声はなかった。

その結果、年や魚種により、いくつかの変動はみられるものの、数年にわたる解析結果を考察した結論として、底曳網漁業に対する悪影響はないものと推察され、これを漁業関係者に報告し、理解が得られた（この解析方法の詳細は詳細説明 3 を参照）。

この他に、前述した漁業との共存ワーキンググループにおいて、底曳網漁業を行う若い漁業者からの提案により、離底網実験が実施された（表 30）。

離底網実験

表 30 離底網実験の成果⁴⁹

①背景・目的	● 若手の底曳網漁業者からの希望をもとに、海底の障害物を回避することのできる新しい底曳網漁具の開発と洋上での実証。
②実施内容	● 新しい底曳網（離底網）を製作し、漁業者による洋上での実証実験が行われた。
③得られた成果	● 漁業者との協働作業により、付加価値のあるヤリイカを漁獲できることが実証されたとともに、底曳網漁業者の操業技術の向上に寄与した。
④漁業者の反応	● 底曳網漁業者の全面的な協力が得られた。

また、底曳網漁業者から操業の障害となる可能性が指摘されたアンカーチェーンやアンカーの引き揚げにより生じる海底面の凹凸の有無の調査が行われた（表 31）。

⁴⁸ 平成 23～27 年度成果報告書概要版（p.121）、平成 28 年度成果報告書概要版（p.11）、平成 29 年度成果報告書概要版（p.6）、平成 30 年度成果報告書概要版（p.76）

⁴⁹ 平成 23～27 年度成果報告書概要版（p.123）

撤去後の海底地形の確認調査

表 31 撤去後の海底地形の確認調査の成果

①背景・目的	<ul style="list-style-type: none"> ● 浮体施設の撤去により、底曳網漁業の障害の可能が指摘される海底面の凹凸の有無の確認。
②実施内容	<ul style="list-style-type: none"> ● 浮体施設の撤去後、音波を用いて海底地形（水深）と反射強度（底質の性状）を計測。
③得られた成果	<ul style="list-style-type: none"> ● 海底地形の計測の結果、凹凸面は確認されなかったが、反射強度の計測の結果、浮体直下で反射強度が異なる結果が示された。 ● この要因は、別途観察した結果、浮体から剥離、海底に落下したカキやフジツボ類であることがわかった。
④漁業者の反応	<ul style="list-style-type: none"> ● この結果を漁業者に説明し、理解が得られた。

本委員会としては、福島県の主力漁業種の一つである底曳網漁業に関して、漁業者による協働作業のもと、デメリットの有無が確認されたこと、また、離底網実験によって、デメリットの低減の可能性が示されたことは重要であると判断した。また、浮体の直下の海底に、浮体から剥離、落下したカキ・フジツボ類が堆積していることが明らかになったが、それらを含め、以下の点が重要であると評価した。

- 漁業者と連携協力しながら、底曳網による漁獲試験調査や施設周辺（底曳網漁業の不可能な海域）での新たな漁法の開発に努めてきたことは高く評価される。
 - 平成 25 年度～令和 3 年度に、漁業者の協力を得て漁獲試験を実施し、多くのサンプルを取得した。これらのデータから漁獲量の変化を定量的に評価し、漁業者に理解しやすいよう工夫しながら説明している。（詳細説明 3 を参照）
 - 底曳網の操業不可能な発電施設周辺で、新たな漁法の適用を試みている。特に海底ケーブルに接触しないよう配慮した離底網の作成と実験を行い、付加価値のあるヤリイカの集群を捕獲している点は評価される。
- 底曳網漁業への影響について、科学的なデータ解析を行うとともに、それを漁業者はもちろん関係者が理解できる方法で分かりやすく伝えることが重要であること。

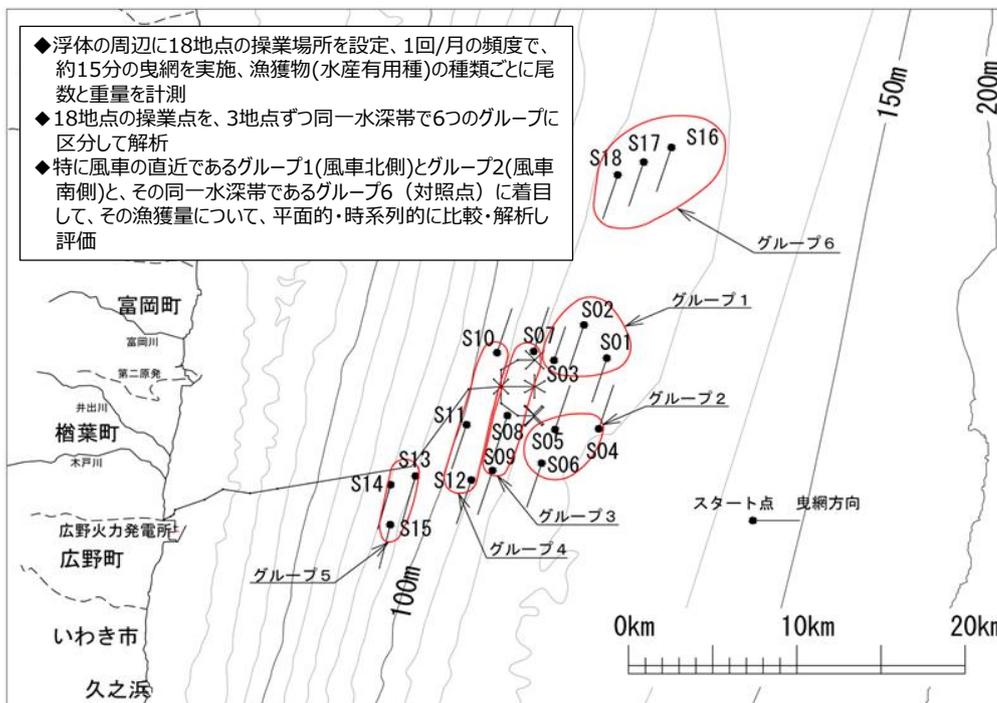
詳細説明 3 : 底曳網漁業への影響に関する考察・評価

底曳網漁業の漁獲試験では、浮体施設が底曳網漁業に与える影響の有無を検討した。ここでは、底曳網漁業の主要な漁獲対象種であるヒラメ・カレイ類などを対象とした（ここでは「底魚類」と称した）。

本試験の実施目的として、①浮体施設の周辺（＝底曳網漁業の操業ができない場所）に底魚類が集まらない、②浮体施設の周辺から底魚類がいなくなる、ということを検証、確認することにおいた。この検証を進める方法として、対照実験として操業地点の配置等の設計をした。

漁獲量変化の評価として、本実験で試みた手法は 2 つある。ひとつは洋上風力施設の影響を直接受けないとして選ばれた対象地点（グループ 6）を基準にして、影響を受けると考えられる地点（グループ 1～グループ 5）との漁獲量や種類の空間変化の比較である。もう一つは、海域全体の各年の漁獲量の比較である。

対照実験のいわゆる実験区は、浮体施設の周辺に操業地点を設け、また、対照区は浮体施設から離れた場所に操業地点を設けた。図に示すように、操業地点番号 S01～S03（グループ 1）と、S04～S06（グループ 2）を実験区とし、これと同じ水深帯（120～130m）である操業地点番号 S16～S18（グループ 6）を対照区とした。なお、これら操業地点のほかにもグループ 3～5 の操業地点を設けているが、これらは対照区とは水深が異なること、すなわち、水深が異なれば、生息する底魚類の種や量も異なるため、この解析においては実験区としての対象から除いた。これらのグループ 3～5 は、別途実施した底魚類の分布水深の季節的変化の確認に用いた。



実際の解析方法は、実例を挙げると以下のとおりである。

平成 30 年度の漁獲試験の結果を例に挙げる。当年は 5 月に開始され、途中、休漁月である 7 月と 8 月を除き、10 月～12 月まで、毎月 18 地点での操業が行われた。この時、各月のヒラメの漁獲量について、実験区であるグループ 1 の漁獲量と、対照区であるグループ 6 の漁獲量は、以下のとおりであった。なお、操業結果の比較が可能になるよう、漁獲努力量（1 隻の漁船が 1 時間の操業で漁獲した総量）に換算して表記している。漁獲努力量の単位は（kg/隻/時）。

実施月	ヒラメの漁獲量 グループ 1	ヒラメの漁獲量 グループ 6
5 月	26.0	137.1
6 月	8.6	33.1
10 月	99.3	28.3
11 月	79.0	49.4
12 月	73.2	9.6

このようなデータセットを用い、平成 30 年度におけるヒラメの漁獲量について、実験区と対照区との有意差を調べた。

通常、ここで取扱った底魚類を含む水産資源は、水温、海流などの漁場環境や餌料環境により、変動する。そこで、このような要因を除くため、対照点との比較において、漁獲量の比に着目することとした。また、生物の分布は、正規分布・等分散とは考えにくいことから、対数に変換する方法を採用した。ここでは、漁獲量比（R）は以下のように求めた。

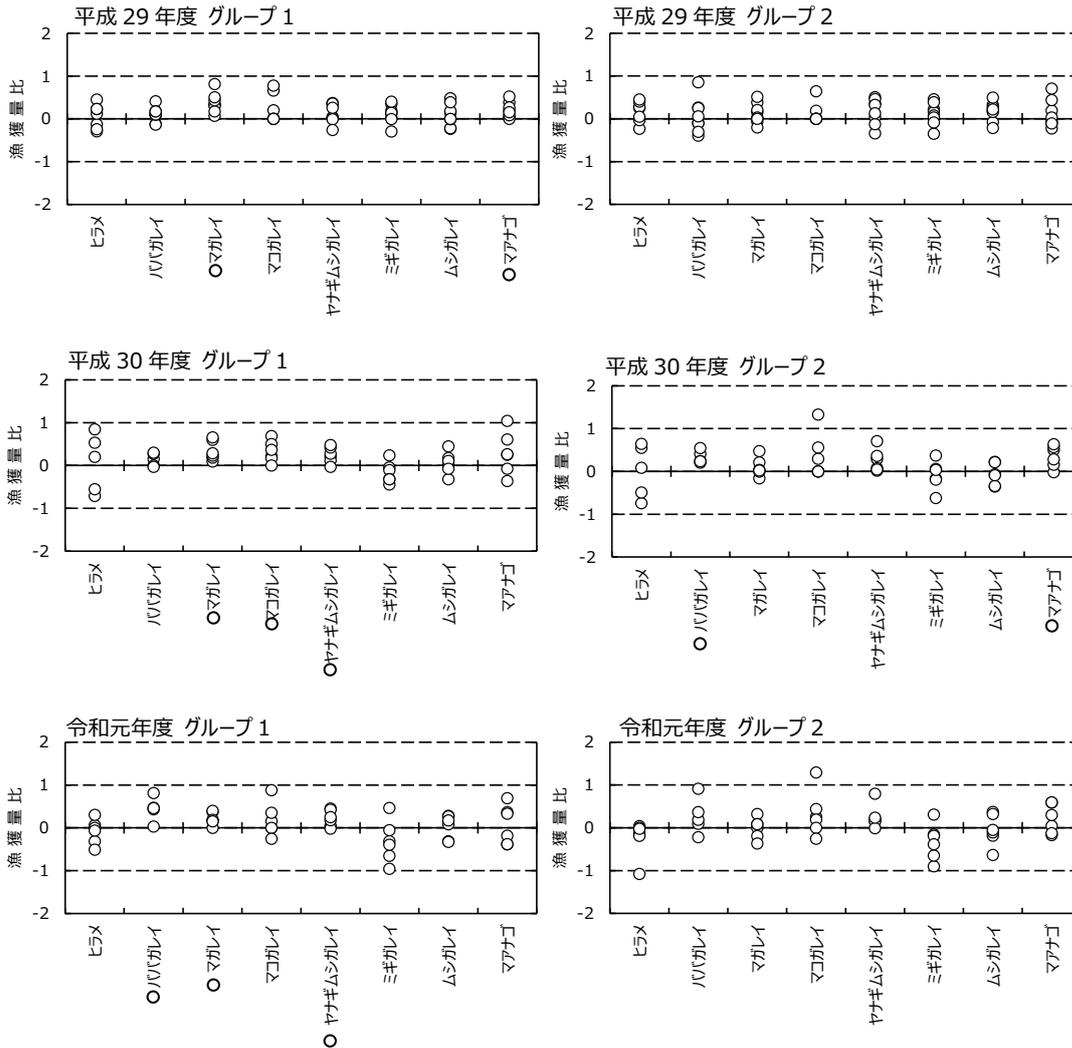
$$R = \log \left(\frac{Fe+1}{Fc+1} \right) = \log (Fe+1) - \log (Fc+1)$$

Fe：実験区の漁獲量、Fc：対照区の漁獲量

この方法を用いると、前掲のデータから得た漁獲量比は次のようになる。

実施月	グループ 1 の漁獲量	グループ 6 の漁獲量	漁獲量比 (R)
5 月	26.0	137.1	-0.709
6 月	8.6	33.1	-0.552
10 月	99.3	28.3	0.535
11 月	79.0	49.4	0.201
12 月	73.2	9.6	0.845

実験区（グループ 1）より対照区（グループ 6）の漁獲量が多い場合、漁獲量比はプラスになり、逆に対照区で多い場合にはマイナスになる。このデータからのプラスの場合は実験区、すなわち浮体施設の海域の方が漁獲量が多く、マイナスの場合は浮体施設の方が少ないという評価になる。浮体近傍に底魚

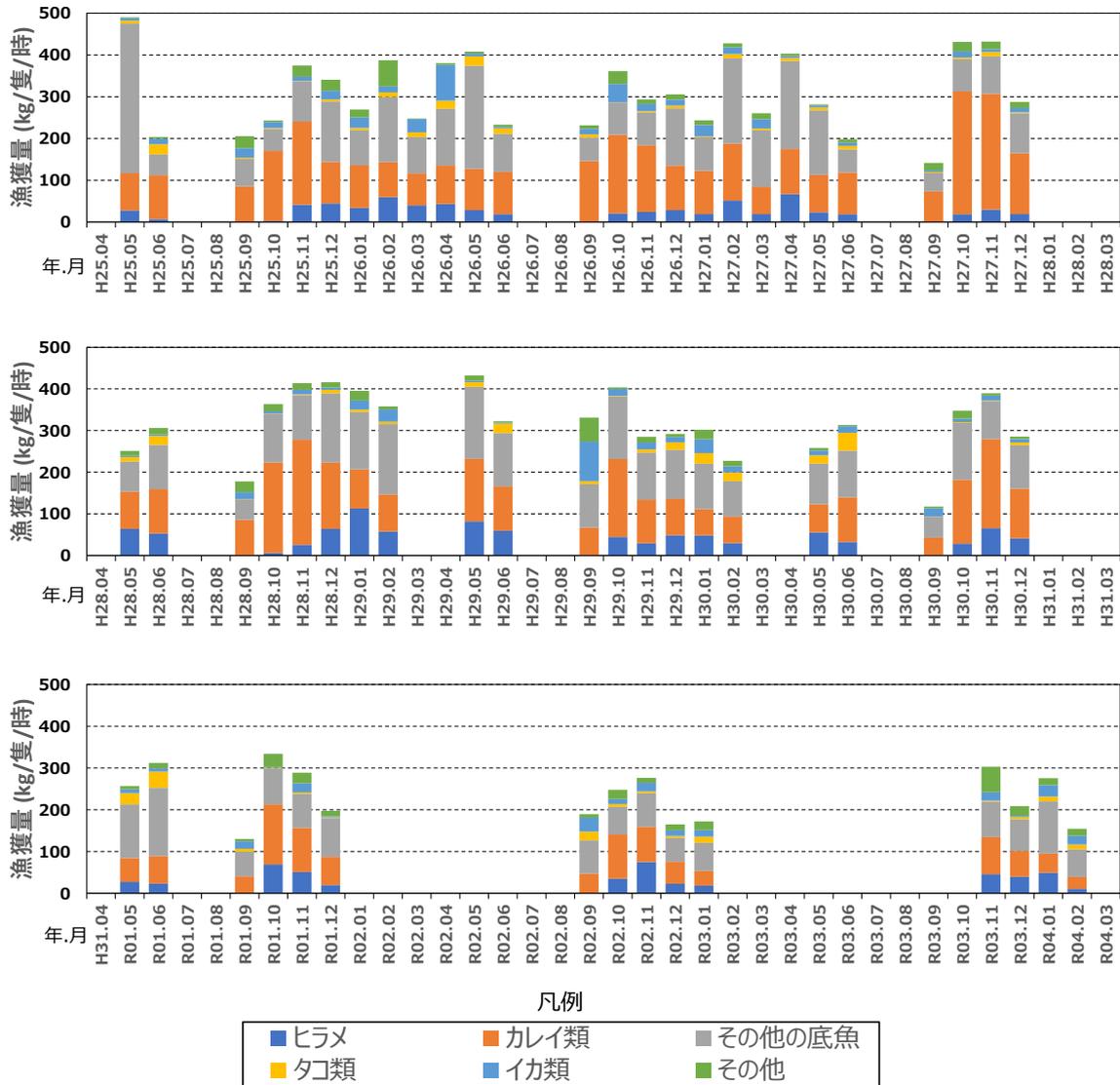


上図で、浮体周辺に集まった魚種（プラス）については、横軸の魚種名に丸印を付した。洋上風力発電施設が設置され稼働した平成 25 年度～令和元年度の 7 年において、年や魚種により差異はある。浮体の近傍であるグループ 1、グループ 2 において、対照区であるグループ 6 との比較で、ある特定の底魚類が集まる、もしくはなくなる、といった傾向は認められない。したがって、洋上風力発電施設が周辺海域の底魚曳き漁業の漁獲高に影響を及ぼしてはいないと判断できる。

次に、浮体等の発電施設の設置工事が開始される直前の平成 25 年 5 月から、全ての発電施設の撤去が完了した後の令和 4 年 2 月までの期間、底曳網漁獲試験を実施した。そこで、この期間を通して、発電施設の設置が漁獲高の変動に影響したか否かを、各年度の漁獲努力量から調べる。

図は各調査期間に得られた漁獲高を主要魚種に分類し、表示した。各年度、各月により漁獲量は変動している様子が見える。全体の期間の漁獲量の努力量の平均値は、295kg/時/隻である。図からは、調査の前半の期間に比べて漁獲量は少ないが、後半の令和 2 年～令和 4 年の期間は平均を下回る事が多いことが分かる。漁獲高の減少の要因については、①比較的に狭い地域性のものか、あるいは②広域性のものかは判断しがたい。ただ、発電施設が稼働していた時期は毎年、安定した漁獲があった

が、7MWの発電施設の撤去が開始された令和2年から減少が始まり、他の施設の撤去が終わるまで継続している。このことから、発電施設が漁獲減少に影響しているとは考えられない。



漁獲試験（底曳網）による漁獲量（漁獲努力量・kg/隻/時）の推移 平成25年5月～令和4年2月（毎年の年度末始と休漁月の7月・8月は未実施。また、令和2年度と令和3年度は撤去工事等のため9月以降に実施。）

詳細説明 4 : 離底網実験で漁獲された付加価値のあるヤリイカ

ヤリイカは福島県の底曳網漁業における主要な漁獲対象種の一つであるが、底曳網という漁法の特徴のため、通常は他魚種と混獲される。このとき、網の中で様々な漁獲物・混獲物が混ざり合うことで、ヤリイカに混獲物の一つであるニホンウロコムシ（環形動物の仲間）の剛毛がイカの体に刺さることが多く、釣りで漁獲されるイカよりも商品価値は低い。

そこで、離底網の特徴を生かし、海底上に遊泳するヤリイカのみを選択して漁獲することを試みた。その結果、混獲が極めて少ない状態でヤリイカを選択的に漁獲することに成功し、きれいな付加価値のあるヤリイカを漁獲できることが実証された。



ヤリイカと様々な生物との混獲



ヤリイカに刺さったニホンウロコムシの剛毛



底曳網を海底から浮かす(離底させる)ことによりヤリイカを選択して漁獲



傷がほとんどないヤリイカ
(釣りによる漁獲と同品質)

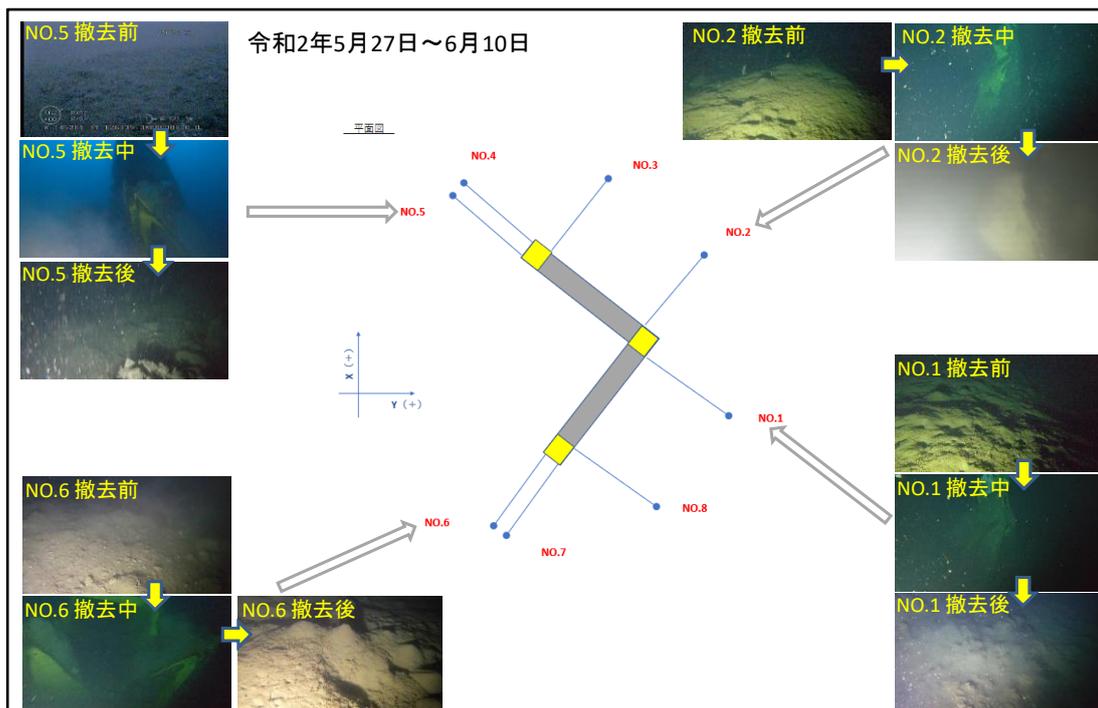
詳細説明 5 : アンカー撤去直後の海底面の状況

令和2年に7MW風車浮体の撤去実証が行われた。この撤去作業の際、アンカー引き揚げ時の状況がROVで観察された。7MW風車浮体は、全部で8つのアンカー・アンカーチェーンで係留されており、全てのアンカー・アンカーチェーンが回収されたが、そのうち、4つのアンカーの引き揚げ時の状況を示す。

アンカーが撤去された直後は、アンカーを掘り起こしたために海底面に凹凸面が生じた。これをROVで観測した結果、数十cm程度の高低差が観察された。この高低差は、8つの平均値で約60cmであった。

この撤去作業の5か月半後の令和2年11月に、マルチビームエコーサウンダー（測深方向のレンジ分解能1~2cm）で海底地形を計測した。その計測の結果、アンカーがあった場所での高低差は観測されなかった。このことから、アンカーを引き揚げた直後は、海底面に凹凸が生じるが、時間が経過することにより、海底面の凹凸は消滅することがわかった。

なお、底曳網漁業は海底面の凹凸面が操業の障害になる場合があり、そのことを漁業者は指摘する。このことに関しては、アンカーの引き揚げにおいて一時的に凹凸が生じるものの、時間の経過により、もとの状態に戻ることが漁業関係者に説明され、理解が得られた。



詳細説明 6 : 浮体の直下海底で見られたカキやフジツボ類

音波による調査の結果について、浮体撤収後の海底地形図（水深図）からはアンカーチェーンやアンカーの引き揚げによる海底面の凹凸は確認されなかった。一方、サイドスキャンソナーで得た海底面の反射強度を解析した結果、浮体の直下海底は、周囲と比較して反射強度が異なっていることが分かった。

そこで、ROV（遠隔型水中ロボット）で観察した結果、浮体の直下の海底面には、多くのカキやフジツボ類がみられ、これらが反射強度の異なる原因と考えられた。このカキやフジツボ類は、浮体から剥離、落下したものと推察された。

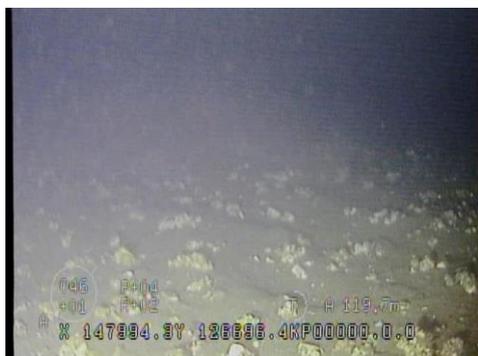
カキガラなどの堆積が極めて大量であった場合には、貧酸素水や底質の硫化物の生成など、水質や底質の悪化が懸念される。今回の実証実験は数年の短期間であること、外洋域であること、海底面でも数cm/秒の流れが確認できること、また、多様な生物の生息が確認されていることから、現状では水質や底質の悪化は殆どないと判断される。



2MW 浮体下・タコ類の遊泳を確認



7MW 浮体下



5MW 浮体下



サブステーション浮体下

(ウ) 釣り・刺網・その他の漁業者を対象とした実施項目

釣り・刺網・その他の漁業を対象とした実施項目では、浮体が有すると考えられる浮魚礁的な機能による回遊性魚類の新たな漁場の創出といったメリットの実証に着目した取組が実施された。

そのうち、魚類等観察調査では、浮体施設の浮魚礁的な機能（集魚機能）の確認のため、ダイバーによる魚類の目視観察や付着生物の観察と採取、及び種の同定が行われた。また、海底面の観察には、ROVが用いられた（表 32）。

魚類等観察調査（ROV、ダイバー）と付着生物調査

表 32 魚類等観察調査（ROV、ダイバー）と付着生物調査の成果⁵⁰

①背景・目的	● 浮体施設が有すると期待される、浮魚礁的な機能（集魚機能）の確認と生物の生息状況の確認。
②実施内容	● ROV やダイバー潜水による浮体施設の海中の観察、付着生物の種の観察、撮影。
③得られた成果	● 浮体の周辺には様々な魚類が遊泳し、また、多様な付着生物も観察され、浮魚礁的な機能による新たな漁場の創出が期待された。
④漁業者の反応	● 漁業者は、集魚効果があることを予測し、期待していた。

この一環として実施された取組には、漁業との共存ワーキンググループにおいて提案された漁具・漁法実験があり、浮体の周辺に、いつ、どのような種の魚類が分布するかについて、漁業者の様々な工夫のもと、実験的な取組が行われ、その結果は魚種カレンダーとしてまとめられた（表 33）。

漁具・漁法実験

表 33 漁具・漁法実験の成果⁵¹

①背景・目的	● 浮体の集魚効果を確認するため、様々な漁具・漁法により、いつ、どのような種の魚が浮体周辺にて漁獲されるかを確認。
②実施内容	● 漁業者らの発案により、漁具の製作や改良・工夫がなされ、浮体周辺にて操業が行われた。
③得られた成果	● 月ごとに各漁法で漁獲された魚種の一覧がまとめられた。
④漁業者の反応	● 集魚に係る継続的な調査の実施が要望された。

この漁具・漁法実験の結果を受けて、引き続き漁業者が主体となり、浮体が有すると期待される浮魚礁的な機能と、その付加価値を検証するため、比較的単価の良いマグロ類やカツオ、ブリ類を漁獲対象とした実験的な操業が実施された。

上記操業の指標として、漁獲量の目標値を設定したが、平成 28 年度から令和 2 年度の 5 か年にわたる操業の結果、漁獲量は目標値の 70%に留まった。しかしながら、作業部会（この実験を実施した漁業者約 20 名で構成される）において、毎年、議論した結果、最終年度には、『回遊性の魚類の漁獲量は、海象に大きく左右されることは周知であり、また、浮体の浮魚礁的な機能が発現するまでにはある程度の時間を要することを踏まえても、浮体の浮魚礁的な機能がもたらす新たな漁場の創出の可能性はある。』と結論づけ

⁵⁰ 平成 23～27 年度成果報告書概要版（p.122）、平成 30 年度成果報告書概要版（p.76）

⁵¹ 平成 23～27 年度成果報告書概要版（p.124）

られた(表 34)。

漁場活用の実験調査

表 34 漁場活用の実験調査の成果⁵²

①背景・目的	● 漁具・漁法実験の成果を受けて、新しい漁場としてその付加価値性を検証した。
②実施内容	● 浮体に集まると考えられる回遊性の魚類のうち、比較単価の良いマグロ類、カツオ、ブリ類を対象として、実験的操業を行った。
③得られた成果	● 漁獲量は目標値を下回ったが、漁業者に浮魚礁的な機能を否定する意見はなく、漁業との共存の在り方の一つとなり得ることが示された。
④漁業者の反応	● 漁業者からは、散水装置や集魚灯など、浮魚礁的な機能を補強するアイデアも出された。

また、平成 30 年 8 月に、福島県の漁業者数名とで長崎県五島の浮体式洋上発電施設の視察見学会が企画され、地元漁業者との意見交換会が行われた。この時、地元漁業者においても、浮体の浮魚礁的な機能の発揮と、そこに発電事業との共存を期待していることがわかった。⁵³

このように、浮体の浮魚礁的な機能を期待する漁業者は多いと想像され、洋上風力発電事業と漁業との共存の具体の一つとなり得ることが判断された。このことを含め、本委員会としては、以下の点が重要であると評価した。

- 魚類等観察調査では、浮体には集魚効果やシェルター効果があることは確かだが、浮体周辺が漁場となる可能性については、釣りや・刺し網等のある特定の漁法に限られる点に留意する必要があること。
- 漁具・漁法実験では、実験結果に基づき、各時期に各漁法で漁獲された魚種が記入されている。これらの実験を通して、浮体は一定の集魚効果があり、今後、さらに検討を加えることで、施設周辺で新たな漁業が行われる可能性が示されている。
- 漁具・漁法実験では、実験的に延縄、刺し網、籠網漁などの取組が行われ、さらに、今後、漁業としての付加価値があるかの検討のため、漁場活用の実験調査が行われたこと。
- 集魚効果を高める設計等について検討を深めることも重要。

⁵² 平成 28 年度成果報告書概要版 (p.11)、平成 29 年度成果報告書概要版 (p.6)、平成 30 年度成果報告書概要版 (p.76)

⁵³ 平成 30 年度成果報告書概要版 (p.75)

詳細説明 7 : 浮体周辺で観察された生物 (魚類等観察調査)

浮体周辺で観察された生物は、魚類ではベラ科の仲間、イシダイ、カンパチ、ヒレナガカンパチ、タカベ、メジナ、メダイ、イシガキダイ、オヤビツチャ、キタマクラなどや、イガイやマガキ、ムラサキイガイ、フジツボ類、カイメンなどの固着性の付着動物、また、ウニ類やヒトデ類、イワガニ類などの匍匐性の付着動物が観察された。また、海底においては、タコ類のほか、カレイ類、アイナメ、エゾイソアイナメなどが観察された。

浮体には集魚効果があることを示しており、メリットとして評価できることが明らかになった。



平成 27 年 10 月 18 日・2MW 風車
ブリ類、イシダイ



平成 27 年 10 月 19 日・サブステーション
イシダイ



平成 27 年 10 月 19 日・サブステーション
メダイの仲間



平成 27 年 11 月 30 日・7MW 風車
タコ類



平成 30 年 10 月 23 日・7MW 風車
ヒレナガカンパチ、イシダイ



平成 30 年 10 月 23 日・5MW 風車
イシダイ

(2) 安全性の検証の詳細

本委員会では、平成 30 年度総括委員会報告書の考え方を基礎として、本実証研究設備の安全性の評価・検証の視点を以下のように設定した。

視点 1：人命、財産に影響を与えるような事故を起こすことなく実証を終えているか。

視点 2：開発・製造した設備の設計の妥当性を確認し、20 年間の設計寿命を満たし得るか。

【視点 1 の検証】

本委員会は、本実証事業に関する工事において、建設工事期間中 3 件、撤去工事期間中 1 件の労働災害が発生したが、身体障害等級⁵⁴に該当する障害はない旨、本実証研究事業の主幹事である丸紅、維持管理を担当した日立製作所、実証設備の施工を担当した清水建設、撤去実証事業の主幹事である吉田組から報告を受けた。本実証は洋上作業を含むにも関わらず、労働災害の発生状況は総合工事業の強度率の範囲内となることから⁵⁵、人命、財産を棄損するような事故を起こすことなく実証を終えたと判断した。

【視点 2 の検証】

本委員会では、令和 2 年度総括委員会報告書において、風車、浮体、洋上変電所、海底ケーブル、係留チェーンの浮体式洋上風力発電システムを構成する要素について、以下の点から設計の妥当性を確認し、20 年間設備を運転できる寿命を有していると判断した。

- 動的解析モデルを用いたシミュレーションの結果と実証設備での位置や動揺等の実測データを比較して、シミュレーション上で挙動を再現していること。
- 浮体式洋上風力発電設備のタワー等にかかる応力等の実測のデータと設計値を比較し、概ね設計値が安全側であること。また設計値よりも上回っている場合もあったが、現在の運用の範囲では安全であることが確認できたこと。
- 実証設備の位置や動揺等の実測データを用いて、設備の余寿命を試算し、20 年の設計寿命を満たし得ること。

本委員会は、視点 1 と視点 2 における本浮体式洋上風力発電システムの安全性は、確保できると判断した。また、本実証研究にて得られたデータや成果を最適な設計基準の改訂に使われた事例についても確認しており、安全性については、社会実装に向けて着実に前進していると評価する。

⁵⁴ 労働者災害補償保険法施行規則 別表第一 障害等級表

⁵⁵ 厚生労働省の労働災害動向調査における過去の総合工事業の強度率は 0.05～0.61 ポイントであり、本実証事業期間中の強度率を以下に示す。

・建設工事期間：0 ポイント（労働損失日数となる労災の発生なし）

・維持管理期間：0.06 ポイント

・撤去工事期間：0.44 ポイント

（参考）過去の総合工事業の強度率：0.05～0.61 ポイント（労働災害動向調査、厚生労働省）

(3) 信頼性の検証の詳細

本委員会では、平成 30 年度総括委員会報告書の考え方を基礎として、本実証研究設備の信頼性の評価・検証の視点を以下のように設定した。

視点 1：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。

視点 2：予期せぬ故障や不具合が生じたときは、その原因を特定して再発防止策を提案できていること。

【視点 1 の検証】

本委員会が福島洋上風力コンソーシアムのテクニカルアドバイザーに対してヒアリングを行ったところ、令和 2 年度の報告書より、実証期間中における風車、浮体、洋上変電所、海底ケーブルの運転状況の中で、当初予期せぬ不具合が発生していることを確認した。

- 風車：
 - 2MW 風車：漏油センサの誤検知によって、風車の停止が発生した。
 - 5MW 風車：
 - ◇ 浮体動揺の影響を受けたケーブルの断線によるピッチシステムの断続的な不具合が発生した。
 - ◇ 漏油センサの誤検知によって、風車の停止が発生した。
 - 7MW 風車⁵⁶：
 - ◇ 油圧作動油の圧力と流量を制御する重要部品であるオリフィスの摩耗が激しく、交換のほか設計変更が必要となった。
 - ◇ 高い油圧の連続運転によりオリフィスが脱落し、その巻き込みにより他の重要機器が破壊する恐れがあり、当該部位の抜本的設計変更が必要となった。
 - ◇ その他、バルブや油圧ホース等部品の不具合が発生した。
- 浮体：
 - 7MW 浮体：浮体のローワーハルとコラムの鉛直ブラケットの先端部、および直交部・交差部において浮体の亀裂・漏水が認められた。
 - 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された。
 - ◇ 風車搭載前の浮体沈降作業の際、クレーン船で懸垂させながらの沈降を試みたが、クレーン無しの自由沈降を実施したところ、取水口が中空に出てしまい、浮体が傾斜した。
 - ◇ 台風により、艀装品である手すりが倒壊した。
- 洋上変電所：設置後から安定的な運用をしていたが、変電所の故障により送電ができなくなった。アクセスが厳しい環境下であったため復旧まで 1 か月強かった。
- 海底ケーブル：当初の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たため、その一部は、海底面との摩擦で損傷し洋上で修繕した。

【視点 2 の検証】

⁵⁶ 平成 30 年度総括委員会報告書 (p.8)

視点1の検証を受けて、本委員会では、令和2年度報告書及び福島洋上風力コンソーシアムのテクニカルアドバイザーへのヒアリングを実施したところ、各設備に発生した不具合や故障については、原因を特定できしており、再発防止策を講じたこと、また設計・施工段に関わる事象については再発防止策を提案していることを確認した。

表 35 各設備にて発生した不具合・故障の原因と再発防止策

設備	発生した不具合・故障	原因	再発防止策
2MW 風車	漏油センサの誤検知によって、風車の停止が発生した。	海象の影響をう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、一体的な設計をする必要がある。
5MW 風車	漏油センサの誤検知によって、風車の停止が発生した。	海象の影響をう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、一体的な設計をする必要がある。
5MW 風車	浮体の動揺の影響を受けたケーブルの断線によるピッチシステムの断続的な不具合が発生した。	浮体・風車の厳密な連成解析が実施できなかったため、共振が発生した。その結果センサの保持具が損壊し、ケーブルがよれて断線した。	浮体・風車の固有振動数の影響がシビアに動揺に繋がることを実証によって得た成果である。一方で、ケーブルは一時的な保持方法で取り付けるのではなく、クイックパスで応力を回避する等の対策が必要である。
7MW 風車	実証運転中に発生した油圧風車機器不調兆候・煙検知・油漏れ等の警報発生に対し、遠隔監視で運転継続可否の判断ができず、風車を停止せざるを得ない事を幾度と経験した。	油圧作動油の圧力と流量を制御するオリフィスの摩耗が激しく、交換のほか設計変更が必要になった。高い油圧の連続運転によりオリフィスが脱落し、その巻き込みにより他の重要機器が破損する恐れが出た。その他、バルブや油圧ホース等部品の不具合。	商用運転の実現は困難であり、維持管理費も高額なことから、本実証研究事業では、再発防止策を講じず、撤去することとした。
5MW 浮体	風車搭載前の浮体沈降作業の際、クレーン船で懸垂させながらの沈降を試みたが、クレーン無しの自由沈降を実施したところ、取水口が中空に出てしまい、浮体が傾斜。	浮体内タンクに注水時、各タンク間における流量が厳密に一致はしないため、一時的に不安定な状態となる。	沈降作業では吊り荷重に十分余裕のあるクレーン船または相吊りのための複数のクレーン船を用意する。また、浮体は自然沈降させることを前提とする場合は、水槽試験を行い、挙動を確認する。
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された。	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いなかった。	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が明らかになった。
5MW 浮体	台風により、艀装品である手すりが倒壊した。	洋上変電所浮体も造船の規定に基づき設計されており、艀装品について十分な設計評価手法が整備されていなかった。	手すりは倒立式で取り付けするなど、今後の設計検討事項の一つとした。
7MW 浮体	浮体のローハルとコラムの鉛直ブラケットの先端部、および直交部・交差部において浮体の亀裂・漏水が認められた。	設計段階で喫水面より15m以上深部において、波による応力の発生が無いとして設計を行ったが、フローターに水平方向の応力を受け、亀裂が発生した。	解析条件の見直し（弾性挙動を踏まえた連成解析）、またその解析結果を受けてL型浮体にストラット構造を追加するA型浮体への構造に転換した。

設備	発生した不具合・故障	原因	再発防止策
洋上変電所	変電所の故障により送電ができなくなった。アクセスが厳しい環境下であったため復旧まで1か月強かった。	ドックヤードでの塵埃（塩害・鉄粉）および発生サビの引き込み。	搭載時の品質確保の徹底。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する。
洋上変電所浮体	台風により、艀装品である手すりが倒壊した。	造船の規定に基づき設計されており、艀装品について十分な設計評価手法が整備されていなかった。	手すりは倒立式で取り付けするなど、今後の設計検討事項の一つとした。
ケーブル	当初の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たため、その一部は、海底面との摩擦で損傷し洋上で修繕した。	設計時点の想定以上に、海洋生物の付着が生じた。	本実証研究事業では、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、効果を確認した。

本委員会は、視点1と視点2の観点からは、本浮体式洋上風力発電システムは、信頼性を確保できる見通せる水準に至っていると判断した。本実証研究にて得られた経験やノウハウがグリーンイノベーション基金を含む社会実装に向けた実証事業に活かされ、定着することを期待したい。

(4) 経済性の検証の詳細

本委員会では、経済性の評価・検証の視点を以下のように設定し、福島洋上風力コンソーシアムからの提供資料を基に、資本費、維持管理費、撤去・解体費に分けて検証を行った。

視点1：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、妥当性を検証すること。

視点2：将来の浮体式洋上ウインドファームの実現に向け、コスト低減が期待できる要素を特定し、その方向性と課題を示すこと。

【視点1の検証】

(資本費)

本実証研究事業における浮体式洋上風力発電システムの資本費のコスト構造を図11に示す。この図から、風車が23%、浮体が31%、洋上工事費が31%、ケーブルが14%となっている。

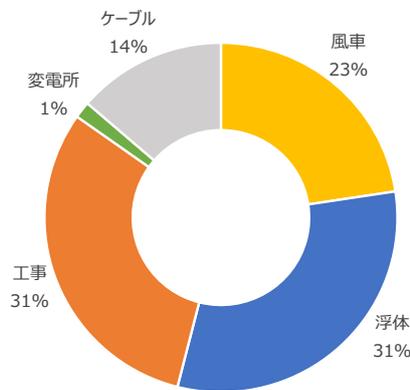


図11 実証設備の資本費のコスト構造

3つの種類の風車のkW単価のコスト構造を図12に示す。この図より、本委員会としては、3つの風車を比較すると、以下の示唆が得られると判断した。

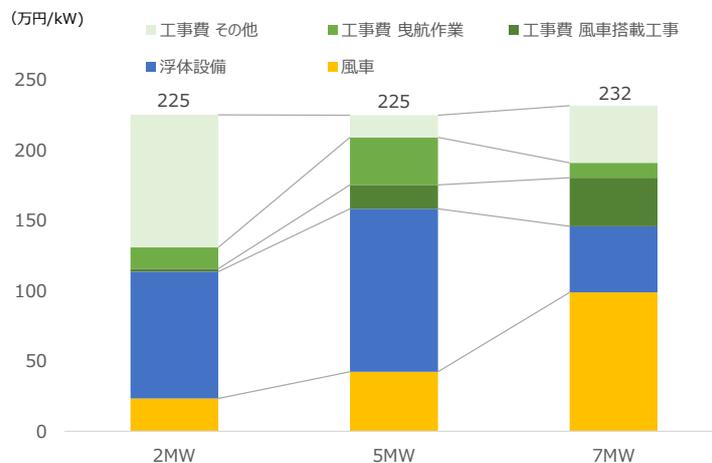


図12 実証設備にて用いた3つの発電設備における資本費のコスト構造

- 資本費の kW 単価：225 万円/kW～232 万円/kW（洋上変電所等の共有設備を除く）であり、令和 3 年度の浮体式洋上風力の買取価格の前提である kW 単価コストの 56.5 万円/kW の約 4 倍の水準である。この背景には、3 種類の風車をそれぞれ 1 機ずつ設置しているため、スケールメリットが働かないこと、安全性に力点を置いた設計や施工を行っていることがある。
- 風車：2MW 風車は商用設備であり市場相場と同等の水準であるが、7MW 風車及び 5MW 風車は、商用前の 2 機目の実証機であるため、高額になっている。特に、7MW は油圧式とよばれる革新的な技術を搭載しており、資本費に占める風車の割合が約 4 割になっている。
- 浮体：2MW 浮体と比較して、7MW 浮体は係留本数が 8 本と 2 本増、鋼材量も多いものの、大型化に伴い kW 単価は大幅に削減した。5MW 浮体は、係留の本数が 6 本と変わらないが、風車の調達の遅れにより、搭載する風車が 7MW から 5MW に変わったため、kW 単価も高額になっている。
- 工事：風車の大型化や 2MW 風車や洋上変電所の経験による効率的な施工により、7MW、5MW ともに kW 単価の工事費は大きく減少。風車の搭載方法は、ドック内で搭載した 2MW が最も安く、次いで静穏海域での洋上での組み立てを実施した 5MW、小名浜港の地耐力を増強し、世界最大のリంగాークレーンを採用した 7MW が最も高額になった。

（WindFloat との比較）

また、平成 27 年度の報告書にて、商用水準にある 2MW 機と WindFloat プロジェクト（Vestas 製の 2MW 風車をセミサブ浮体に搭載）の資本費のコスト構造を風車・浮体・工事別に比較した（図 13）。それぞれの項目における価格差分析結果は以下のとおりである⁵⁷。

- 風車：両者とも商用水準の風車であり 2MW 級風車の相場単価（20 万円/kW 前後）と一致
- 浮体：2MW 浮体の kW 単価は、WindFloat プロジェクトの約 1.4 倍の水準。これは、浮体の鋼材重量及びチェーンの係留本数の差（2MW 機：6 本、WindFloat プロジェクト：4 本）が要因であると考えられる。
- 工事：2MW 機の工事の kW 単価は、WindFloat プロジェクトの 6 倍以上の水準。これは、海象条件などの自然環境の差異による、①施工方法の違い、②チェーンの係留本数の差による施工期間の差、③工事（曳航、係留、把駐力）を作業船 1 隻で行うことによる差にあるものと考えられる。特に、③については、把駐力試験を含むチェーンの係留作業、浮体の曳航、浮体の係留を作業船 1 隻で行った場合、工事の kW 単価は、ほぼ同水準になることを確認している。

⁵⁷ 平成 23～27 年度成果報告書（p.18）

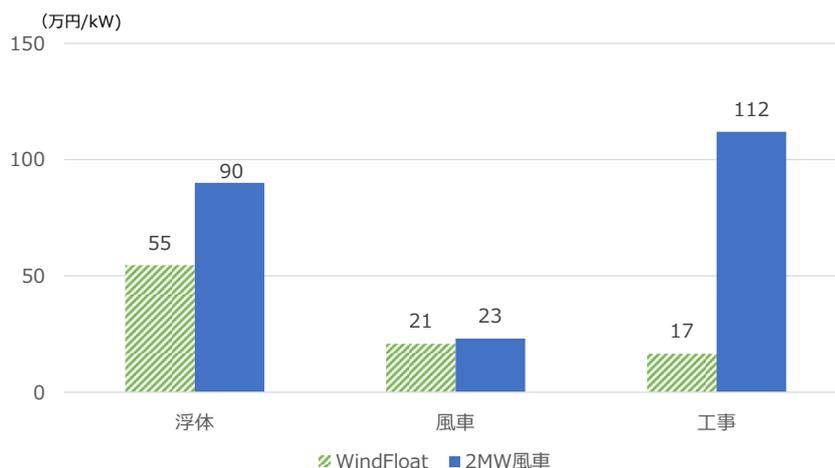


図 13 本実証の 2MW 風力発電設備と WindFloat の資本費の比較

(出典) 平成 23～27 年度成果報告書

(維持管理費)

平成 29 年度から令和 2 年度までの浮体、風車、洋上変電所、ケーブルに分けて積み上げた維持管理費用の推移を図 14 に示す。図の赤線は、発電事業者が設定した適正な運用水準での維持管理費用を意味しており、2017 年度から 2020 年度にかけて、維持管理費用は年間 4.0 万円/kW の水準であったものが、最終的に年間 1.5 万円/kW の水準まで費用を削減することができた。これは後段の【視点 2 の検証】に示す平成 29 年度報告書において、福島沖で浮体式洋上風力発電所を開発する上での発電コストの将来目標値とした 36 円/kWh を達成する水準である、年間維持管理費 1.9 万円/kW を下回っている。特に浮体、ケーブル設備のコストの比較から、本委員会では以下の示唆が得られると判断した。

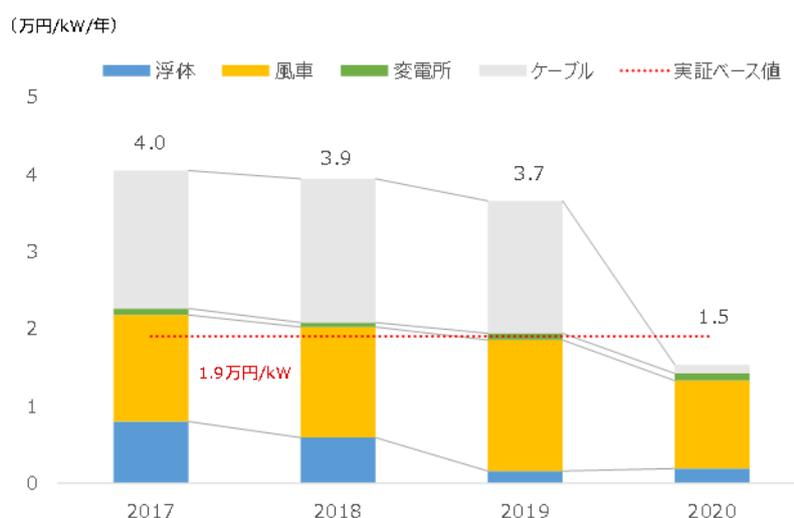


図 14 実証設備の維持管理費のコスト構造

- 浮体：当初は 2MW 浮体・5MW 浮体・7MW 浮体・洋上変電所浮体の各浮体で、認証機関の

定期検査のタイミングを揃えたことに加え、点検項目の見直しおよび消耗品の交換頻度の見直しによって、大幅なコスト削減を確認した。

- ケーブル：ライザーケーブルの海洋生物付着によって、ケーブルが沈降、海底に着底した事象を受けて、メンテナンスフリー化のための恒久対策を2019年に実施した。（⑧浮体式洋上風力発電所の維持管理手法の開発）これにより、2020年度には大幅に維持管理費が減少し、ケーブルの線形が維持されていることを確認している。

（撤去費）

平成29年度に清水建設にて実施した、発電設備の撤去手法の検討結果に基づく撤去費試算結果および令和元年度から2年度にかけて行われた撤去実証における撤去費用の実績値について図15に示す。撤去手法検討の段階における撤去費用は71.5億円、実績値は64.8億円となり、事前検討の値より小さいことが示された。

なお、参考までに撤去費用の実績値である64.8億円は、資本費全体の13%に相当するが、実証設備については、本実証研究事業用に安全側に設計していること、施工会社にとっても経験のない、安全を最優先とした洋上での本格的な工事であることから、資本費が高額であることに留意する必要がある。

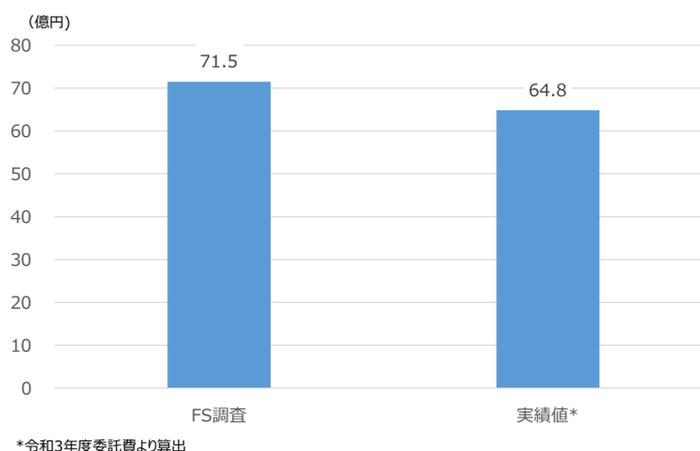


図15 実証設備全体の撤去費の試算結果と実績値の比較

【視点2の検証】

（資本費）

平成30年度報告書において、福島沖において5MW基を20基による浮体式windfarmを想定した場合の資本費⁵⁸を、公開データの文献参照値をベースにして、資本費の将来的な低減可能性を検討した。

平成30年度の資本費の将来価格低減の検証について、5MW設備の資本費である225万円/kWから、66万円/kWの水準まで、価格低減の可能性が示唆された。コスト削減に向けた検討結果について、以下に示す。

- 風車：本実証で5MW風車は実証2機目であったことにより、商用化水準と比較して高額になっている。商用機体およびwindfarm化によるスケールメリットの獲得によって、コスト低減が見込まれる。

⁵⁸ 平成30年度報告書 (p.126~127)

また、ラーニングカーブの経過に伴う生産効率改善やサプライチェーンの構築によるコスト低減が期待される。

- 浮体：本実証では視点1の検証にて記載のとおり、鋼材量の増加や調達風車の変更によって高額になっているが、搭載風車に応じた設計最適化、係留チェーン本数の削減等によって、大幅なコスト低減の可能性が示唆された。
- 工事：日本の海象条件、また浮体式洋上風力に応じた施工荷重に対応する作業船を開発した場合、大幅にコスト低減が可能であるとしており、加えて係留チェーン本数の削減でも、低減の影響が見込まれている。

本委員会では、上記の報告に加えて、米国における浮体式洋上風力ウィンドファームのコスト検討の研究事例で、8MWを125基設置する1GWの浮体式ウィンドファームのコストを⁵⁹比較した（図16）。ただし、ウィンドファームの規模に応じて資本費の絶対値は大きく変わるため、kW単価によって比較をしている。将来の社会実装に向け最新の研究成果と比較すると、発電事業の規模によるスケールメリットの効果を除いても、以下の点で、さらなるコスト低減の余地があると判断した。

- 不確実性やリスクへの過剰な対応がコストに反映されている点があり、本実証研究事業を通じて抽出できた不確実性やリスクを適切に評価すること。
- 作業船の効率化のみならず、陸上（港湾）での作業量、作業員の習熟等、欧州や米国との条件の違いを分析し、今後の港湾整備と港湾地域における作業量、作業員の習熟及び中期的な現地リソースの活用等を通じ、欧州のインフラにキャッチアップしていく事によるコスト低減も期待される。
- 周辺海域（EEZ内、領海内、港湾区域など）での船舶法におけるカボタージュ規制に関する要件を明確化し、様々な国籍の作業船、船員、作業員の活用可否を整理すること。

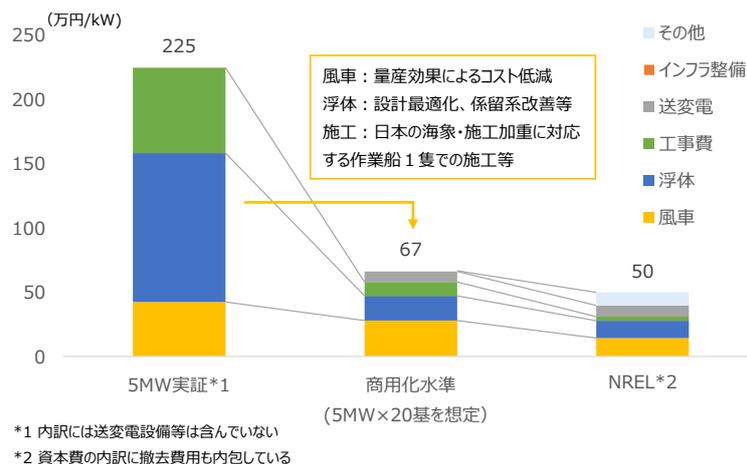


図16 商用化に向けた資本費の見通しについて

⁵⁹ NREL, The Cost of Floating Offshore Wind Energy in California Between 2019 and 2032 (2020)

(維持管理費)

平成 29 年度報告書において、福島沖で浮体式洋上風力発電所を開発する上での発電コストの将来目標値とした 36 円/kWh を達成するために、必要となる維持管理費の削減案⁶⁰を検証した。

平成 29 年度の維持管理費の将来価格低減について、本実証研究事業における 5MW 設備の維持管理費用である 4.3 万円/kW/年から 1.9 万円/kW/年まで削減可能性があることが示唆された。検討結果については以下のとおりである。

- 作業効率化および風車メーカーで行っていた運転維持管理を発電事業者にて内製化することで、メンテナンス費用を削減できること。
- 洋上の施工技術を改善することで、大規模修繕費用の削減ができること。
- 今後、浮体式洋上風力の案件増加に伴う適切なリスク評価による保険料削減。
- 新造の単胴船を採用した場合の費用削減。

また、本委員会において、資本費と同様に、米国における 1GW の浮体式windfarm を想定した維持管理費について、比較したものを図 17 に示す。将来の社会実装に向けて、1.4 万円/kW/年という NREL 試算値の水準を達成にするためには、サプライチェーン構築によるサプライヤー間の競争やインフラ整備が求められると判断した。

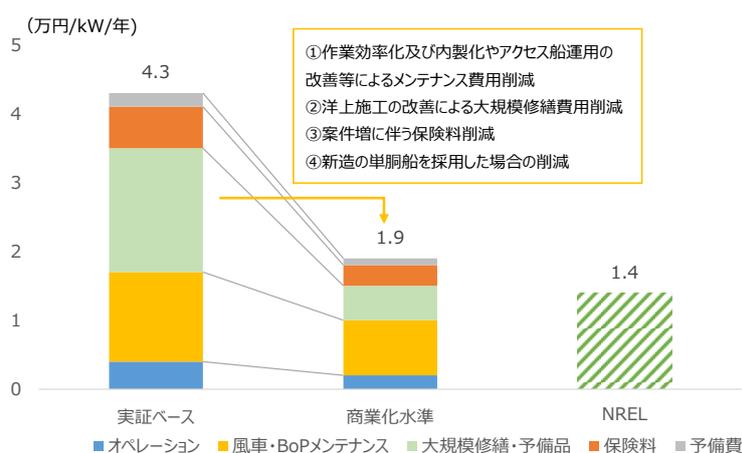


図 17 商用化に向けた維持管理費の見通しについて

(撤去費)

平成 30 年度報告書において、発電設備の撤去手法の将来的な撤去費用の見通し⁶¹について、清水建設が整理を行った。現状の 2MW 機の撤去費用および将来的な 5MW×20 基の撤去を想定した費用を図 18 に示す。

価格低減の見通しとして、以下の改善点を実現することにより、将来の事業として求められる撤去費用の達成水準を確認した。

⁶⁰ 平成 29 年度報告書 (p.118~121)

⁶¹ 平成 30 年度報告書 (p.117~121)

- 浮体設計の最適化・改善による係留索の減少。（現状 6 条であるものを 3 条に削減する）
- チェーン回収の作業船の高性能化。
- 曳航作業の作業船の高性能化。（本実証で、浮体曳航時に進行方向前方に 3 隻、後方に 1 隻を配備して曳航したが、前方・後方に 1 隻ずつ配備する）
- 多目的作業船の利用による、作業船の共通化。
- スクラップ買取価格の上昇。
- ウィンドファーム単位による施工での共通仮設・回航費用の合理化。

本委員会としては、撤去費の削減にあたっては、不確実性やリスクを適切に評価することや作業の歩掛の見直し、更には様々な国籍の作業船、船員、作業員の活用可否を整理することも重要であると判断した。また、撤去費に関する先行事例の水準が確認できなかったことを受け、本実証が設備撤去までのコスト情報を収集した検証した初の事例であることを確認した。

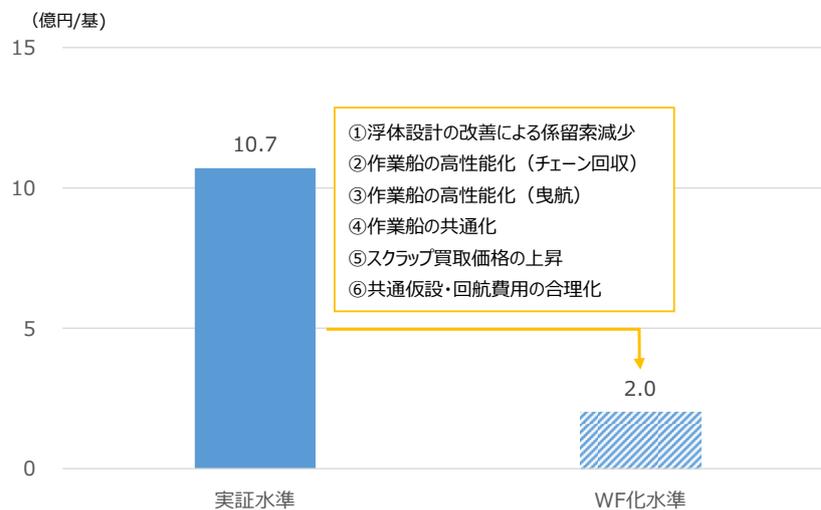


図 18 ウィンドファーム化に向けた撤去費の見直しについて

4.2 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の検証

本実証研究事業における発電実績の成果として、稼働率及び設備利用率の実績並びに風車の停止要因における設備利用率の改善の見通しについて検証を行った。さらに、将来の社会実装に向け、開発が必要な要素技術及び運用上の課題に関する評価も行った。

4.2.1 検証結果の総括

目標、実証で得られた成果、社会実装に向けた成果

目標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インドファームの実現を目指す。

目標に対する成果②：

商用機水準の風車の設備利用率は、33.2%¹⁴と目標値である35%を概ね達成し、地震や台風、落雷による破損や長期停止せず運転を継続できた。

- 2MW 風車・浮体：商用風車を使っており、発生した不具合は、対応策を講じることで、33.2%¹⁴の設備利用率を達成できた。浮体に起因する風車の停止時間は、定期点検以外になかった。
- 5MW 風車・浮体：2基目の実証機であり、浮体動揺の影響に対して風車の制御が対応できず、不具合が頻発した。これは共振による影響であることを特定し、周波数の調整のため、ネガティブダンピングに対する浮体固有の振動制御等の対応策を検討・導入し、有効性を確認した。これにより設備利用率は26.2%¹⁴まで向上するも、商用水準には至っていない。
- 7MW 風車・浮体：2基目の実証機であり、将来の大型化を見据えた革新的な技術である油圧式を採用した。油圧式の技術に課題が残り、商用水準には至っていない⁶²。

社会実装に向けた成果②：

本格的な浮体式洋上ウインドファームの実現に向けて、停止時間の約50%を占める荒天待機の時間を最小化するため、予兆診断技術やアクセス船の運用の見直しを行った。また、社会実装に向けた更なる技術開発が期待される要素技術を提案。

- できる限りメンテナンスの頻度を減らすような部品選定や予兆診断技術の高度化。
- 厳しい海象条件下においても、浮体に確実に乗り移ることができるようアクセス船の運用の高度化。

4.2.2 成果を裏付けるエビデンス

(1) 目標に対する成果

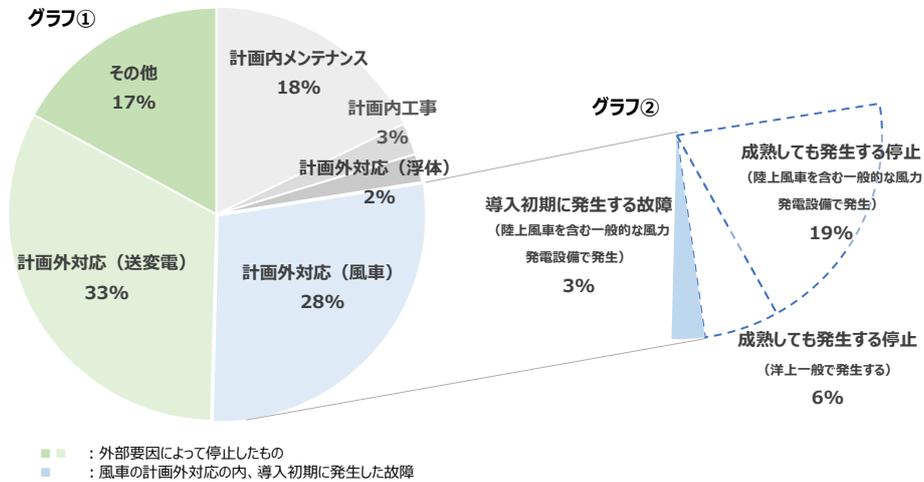
【2MW 風車の発電実績】

2MW 風車は、平成25年11月から運転を開始し、3つの風車の中では最も長い7年4カ月の運転実績を有している。実証期間全体（平成25年11月～令和3年3月）の稼働率は88.6%、設備利用率は31.1%である。ここでは、令和2年度の運転実証報告書における成果を引用する形で報告する。

欧州での着床式でも確認されている設置当初の不具合の影響を除き、本実証研究事業における維持管理の

⁶² 令和2年度総括委員会報告書（p.32）

経験や学習効果を可能な限り反映した直近3年間（平成29年度から令和元年度まで）の2MW風車の停止要因の分析結果は、図19のとおりである。⁶³ 図19によれば、2MW風車の停止時間の約50%が風車以外の要因で発生していることがわかる。また、導入初期に発生する不具合に起因する停止時間は、3%である。



(出典：令和2年度総括委員会資料報告書)

図19 2MW風車の故障の要因分析

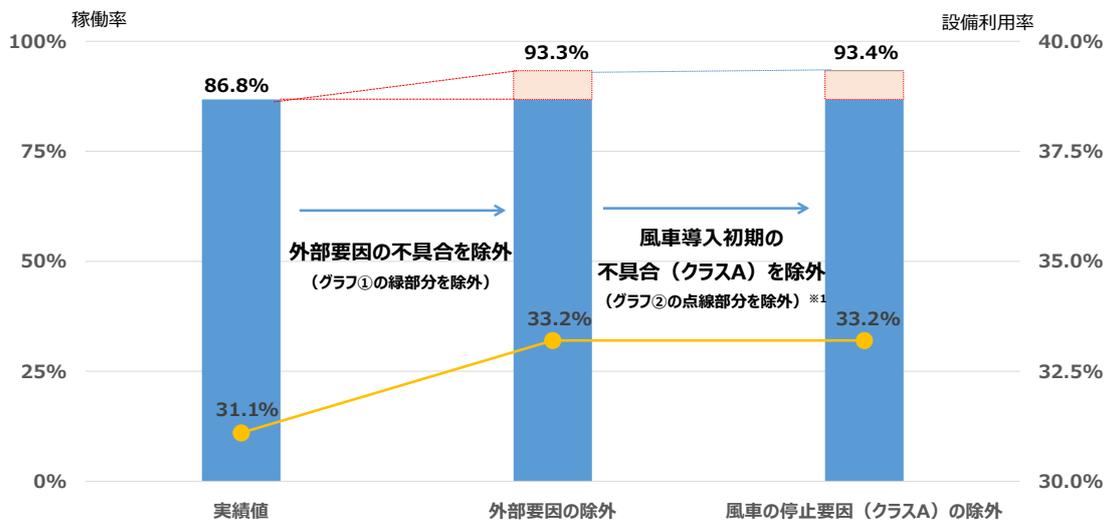


図20 2MW風車の稼働率及び設備利用率の改善の見通し

この結果を稼働率と設備利用率に換算すると、図20に示したとおり、平成29年度から令和元年度までの3年間の稼働率の実績値86.8%は、風車以外の要因と導入初期に発生する不具合を除くと93.4%まで、同期間の設備利用率の実績値31.1%は、33.2%まで改善することになる。

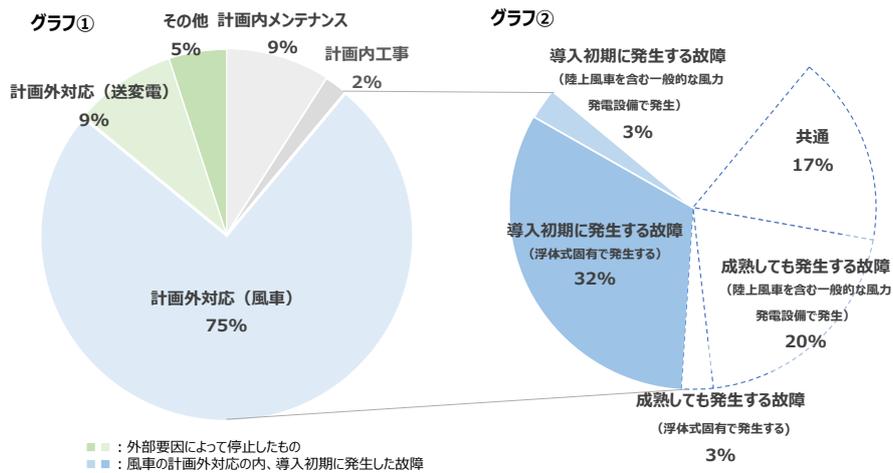
上記の結果をもって、本委員会としては、2MW風車は、商用機水準の風車であり、その設備利用率は33.2%と目標値の35%をおおむね達成していると評価した。

⁶³ 令和2年度総括委員会報告書 (p.14)

【5MW 風車の発電実績】

5MW 風車は、平成 29 年 2 月から運転を開始し、4 年 1 カ月の運転実績を有している。実証期間全体（平成 27 年 2 月～令和 3 年 3 月）の稼働率は 51.6%、設備利用率は 17.4%である。

2MW 風車と同様に平成 29 年度～令和元年度までの 5MW 風車の停止要因の分析結果は、図 21 のとおりである。⁶⁴この図 21 によれば、5MW 風車の停止時間の約 14%が風車以外の要因で発生していることがわかる。また、導入初期に発生する不具合に起因する停止時間は 35%である。



(出典：令和 2 年度総括委員会資料報告書)

図 21 5MW 風車の故障の要因分析

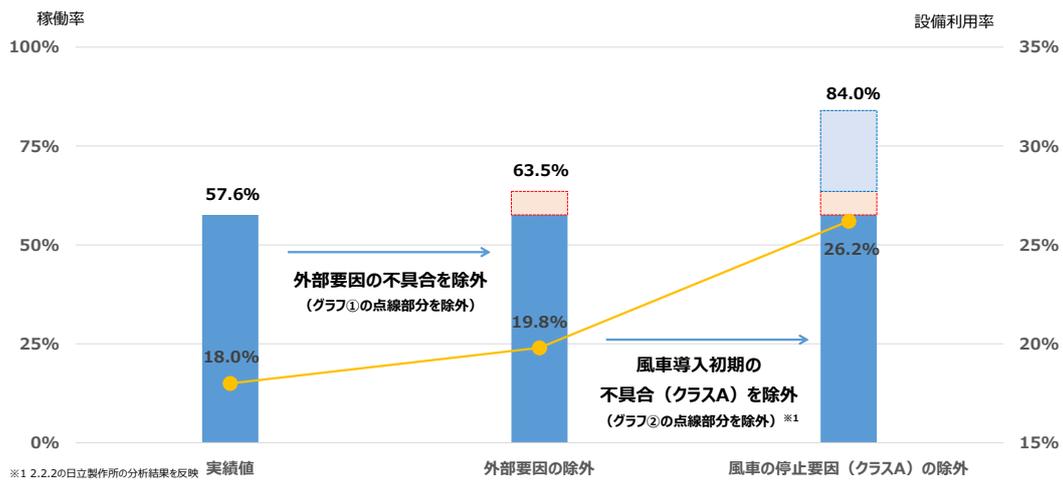


図 22 5MW 風車の稼働率及び設備利用率の改善の見通し

⁶⁴ 令和 2 年度総括委員会報告書 (p.24)

この結果を稼働率と設備利用率に換算すると、図 22 に示したとおり、平成 29 年度から令和元年度までの 3 年間の稼働率の実績値 57.6%は、風車以外の要因と導入初期に発生する不具合を除くと 84.0%まで、同期間の設備利用率の実績値 18.0%は、26.2%まで改善することになる。

上記の結果をもって、本委員会としては、5MW 風車は、2 基目の実証機であり、設備利用率は 26.2%まで向上するも、商用水準には至らなかったと評価した。

【7MW 風車の発電実績】

7MW 風車は、平成 27 年 12 月から運転を開始し、2 年 8 カ月の運転実績を有している。実証期間全体の稼働率は 9.2%、設備利用率は 1.9%であり、採算性の観点からも商用運転が難しい状態が続いていた。平成 30 年度の総括委員会報告書においてすでに下記のとおり検証を終えている⁶⁵。

総括委員会としては、①短時間ではあるが 7MW の定格出力での連続運転も行っており、油圧式の可変速システムとしての検証は実施できていること、②知財面でも関連特許の出願を行っていること、③沖合での洋上メンテナンスを想定し、ダウンタイム低減や乗り移り率向上に資する監視カメラの設置等の取組により、維持管理費の低減を定量的に示すなど、実証研究として一定の成果は出ていると判断した。

しかしながら、現在は油圧システムにセンサーを取り付けて、異常を検知し、重大事故が起きないように対処はしているが、各部品の寿命の分析・予測までには至っておらず、未だ長寿命化の目途が立っていないほか、定格出力による安定した連続運転の実現には到達しておらず、研究・開発段階を脱していない状況であり、今後も安定稼働は難しいと判断した。

(出典：平成 30 年度総括委員会報告書)

(2) 社会実装に向けた成果

本委員会では、本格的なウィンドファームの実現に向けて、本実証研究事業で得られた将来の社会実装に向けた成果を踏まえて今後の稼働率向上のために期待される研究開発の方向性について提言をする。

- 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（アクセス船の性能向上及び乗組員・作業員の習熟等）
- 発電設備として確立した風車と浮体の最適な組み合わせ
- 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
- アクセスが困難であることを前提に、調達に時間がかかる予備品の確保
- 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

上記のうち、アクセス船乗り移り率を高める取組については、本実証研究事業においても検討されており、風車の停止時間の要因分析とともに簡単な紹介を行う。詳細については、報告書をご確認いただきたい。

⁶⁵ 平成 30 年度総括委員会報告書 (p.8)

【稼働率の実績と今後の課題】

令和2年度総括委員会報告書では、図23に示したとおり、2MW風車の総停止時間の分析を行い、海象条件による荒天待機が全体の50%と不具合対応と同水準であり、大きなウエイトを占めていることが明らかになった。その結果、本実証海域においては、できる限り運転を継続するための、メンテナンス時期の最適化や事前に故障や不具合を検知する予兆診断技術が重要な役割を果たすと考えられる。

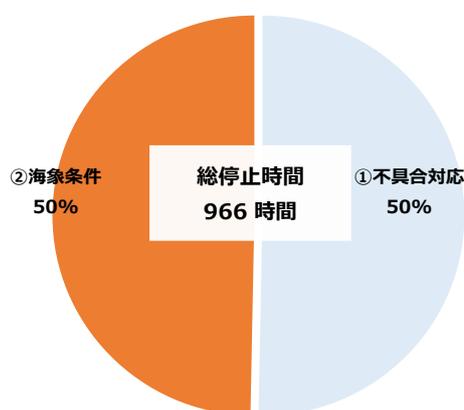


図23 2MW風車の停止時間の要因分析

(出典：令和2年度総括委員会資料報告書)

本実証研究事業においても、2MW風車、2MW浮体、5MW風車については予兆診断技術のアルゴリズムの開発を行い、過去の実績データを用いた故障の再現まで確認できている。今後は、風車メーカーと連携してデータを蓄積し、商用の風車を用いた予兆診断技術の高度化が期待される所である。

【アクセス船の乗り移りを高める取組】

平成23～27年度の成果報告書では、アクセス船と浮体側に補助設備を設置することによるアクセス船の運用面の向上や運用上の課題について記載されている⁶⁶。

アクセス船の運用面について、浮体乗り移りの安全性、確実性を高めるために、アクセス補助装置を導入し、補助装置が浮体側のバッファチューブを掴み、船と浮体を連結することにより、船首部の浮体動揺を低減することができた。しかしながら、船首部の重量増加により、船の操縦性が低下し、接舷操船の難易度が増したため、浮体や船首船体部への損害発生リスクが増加した。浮体側には、サブステーションにバッファチューブを設置し、アクセス船接舷時にD型フェンダーを取り付け、アクセス船の運用に対応した。

アクセス船の課題として、浮体とアクセス船の接合面の最適化を設計段階から考えることが必要であること、本実証海域では、有義波高2.0mまで安定してアクセス可能な船であれば、発電設備の稼働率を上げることができると報告している⁶⁷。

本委員会では、アクセス船の性能向上と乗組員、作業員の習熟により、浮体へのアクセス時間短縮の可能性を確認した。

⁶⁶ 平成23～27年度成果報告書概要版 (p.97、102)

⁶⁷ 平成23～27年度成果報告書概要版 (p.102)

4.3 産業集積に向けた視点からの検証

福島復興の観点から、福島県が推進している再生可能エネルギー推進ビジョンの達成や風力関連産業の集積に向けて、本実証研究事業が果たした役割について、検証を行った。

4.3.1 検証結果の総括

目標、実証で得られた成果、社会実装に向けた成果

目標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。

目標に対する成果③：

福島県再生可能エネルギー推進ビジョンの達成に必要な浮体式洋上ウインドファームの要素技術やノウハウを獲得できた。これにより、福島県を「再生可能エネルギー先駆けの地」とする取組に積極的に貢献した。サプライチェーン形成の浸透など、本実証研究事業による直接的な効果を生むまでの成果には至らなかったが、福島県の取組を後押ししたことで、風力関連産業の集積に向けた基盤の整備へとつながった。

- 福島県再生可能エネルギー推進ビジョン（平成 24 年改訂）にて掲げた 2020 年 1GW の導入目標実現のために必要となる浮体式洋上風力発電システムの実証を行い、要素技術やノウハウを獲得できた。
- 本実証研究事業において、県内企業からの部品調達、発電事業の維持管理を担うための人材育成、漁業関係者の協力の下で実施した備船管理、将来の大型風車の拠点港湾化にも活用できる小名浜港の地耐力の強化など、産業集積の基盤となる取組が実施されていることを確認した。
- 県内企業を中心とする浮体式洋上風力発電のサプライチェーンの形成など、本実証研究事業による直接的な効果を生むまでの成果には至らなかった。しかしながら、風力発電事業の維持管理における人材育成の取組など、風力関連産業の集積に向けた基盤の整備へとつながったと判断した。

社会実装に向けた成果④：

漁業者との対話にて議論した具体的な事例を通じて、福島県沖での洋上風力と漁業との共存の在り方を提案することにより、福島県再生可能エネルギー推進ビジョンの実現に向けて貢献できる成果を獲得できた。

4.3.2 成果を裏付けるエビデンス

(1) 目標に対する成果

本実証研究事業は、福島県が平成 24 年に策定した福島県再生可能エネルギー推進ビジョンとの関連が強い。同ビジョンには、福島県の復興との関連で洋上風力発電の位置づけと産業集積に向けた取組として以下の記述がある。

- 浮体式洋上風力発電の実証研究等の世界に先駆けるプロジェクトを契機として、県外からの関連産業企業の誘致をしつつ、県内において新規産業の育成や既存産業の再構築を図り、雇用を創出。
- 風力発電分野の産業集積に向けて、以下の取組を実施する。

- ①**継続的な市場の創出と高い導入目標の設定**：洋上風力の導入目標として 2020 年 1GW、2030 年 2GW という野心的な目標の設定。
- ②**大規模風力発電所建設のための環境整備**：小名浜港の地耐力強化、大規模風力発電所建設のための出荷拠点の整備。
- ③**研究開発拠点と試験・認証機関の整備**：将来のコストダウンに向けた研究開発拠点の整備、大型風車の試験設備・実証サイトの整備及び認証機関の誘致を行う。
- ④**復興特区を活用した優遇措置及び規制緩和の実現**：福島県が主体になって、陸上・洋上風力のゾーニング及び環境影響評価と許認可手続きの迅速化を図る。

(出典：福島県再生可能エネルギー推進ビジョン（平成 24 年改訂版）)

本委員会としては、本実証研究事業において以下を実施したことにより福島県の取組を後押しし、また、その後福島県においても、風力発電事業の維持管理における人材育成の取組などが進んでいることから、本実証研究事業の成果が産業集積の基盤を創出し得るものと判断し、サプライチェーン形成の基盤となる取組であると評価した。

- ライザーケーブルの位置保持のためのブイを福島県内企業から調達
- 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
- 漁業関係者の協力の下で実施した備船管理（延べ約 4,900 隻が参加）
- 大型風車の拠点港湾化にも活用できる小名浜港の地耐力の強化



図 24 産業集積に向けた取組の例（地元企業からの部品調達、人材育成）

(出典：パンフレット（第 2 期）)

(2) 社会実装に向けた成果

福島県再生可能エネルギー推進ビジョン 2021 は、2040 年再エネ 100%の達成に向けて、2021 年 12 月に策定された。その中で、2030 年に向けて洋上風力の効果的な活用は重要であることを打ち出すとともに、その実現には、漁業との共存を前提に、技術動向を注視しながら課題の整理と解決策を関係者で一体となって進めることが示されている。

- 2030 年に向けての取組
 - ①洋上風力発電の重要性：2040 年再エネ 100%の目標達成のためには、更なる導入が必要不可欠であり、**洋上風力についても効果的に活用していくことが重要。**
 - ②2030 年に向けては、**漁業との共生等を前提**に、国による実証事業の取りまとめ結果のみならず、風車設備の大型化や効率化などの技術動向等を踏まえつつ、**関係者が一体となって、課題の整理と解決法の模索などを進める**とともに、本県沖における洋上風力の活用を検討。
- 風力関連産業の育成・集積：
洋上風力発電については、これまで福島沖で浮体式洋上風力発電の実証研究が国主導で進められてきたが、その成果や課題の共有をもとに、技術開発の動向や地元関係者等の意向を踏まえつつ、国内におけるサプライチェーン構築に本県企業が参画できるよう、国を始めとした関係機関と連携しながら、関連産業の育成を図る。

(出典：福島県再生可能エネルギー推進ビジョン 2021 (令和 3 年度))

本委員会としては、4.1 にて評価したとおり、漁業者との対話にて議論した具体的な事例を通じて、福島県沖での洋上風力と漁業との共存の在り方を提案できており、その取組が、福島県再生可能エネルギー推進ビジョンの実現に向けて貢献できる成果を獲得したと評価する。

5. 結論と提言

本章では、本実証研究の開始から撤去に至るまでのライフサイクルでの成果の検証結果と、事業の終了を受けての社会実装に向けた提言について報告する。

5.1 結論

本実証研究が開始した平成 23 年 3 月当時、浮体式洋上風力発電のプロジェクトとしては、世界では平成 21 年に運転を開始した 2.3MW 風車を 1 基設置したノルウェーの Hywind プロジェクトのみであった。また、浮体式に関する国際基準の検討が同時に進められたところである。一方、国内のエネルギー政策に目を向けると、東日本大震災及び福島第一原子力発電所の事故などを背景とした再生可能エネルギーの導入に対する機運の高まり、福島の復興、浮体式洋上風力発電の技術開発の必要性が求められていた。

このような状況の中、平成 23 年 4 月に示された浮体式洋上風力発電の技術基準が公表された。また、同年 7 月には施設の設計審査の基準となるガイドラインが公表された。こうした動きと合わせて、2MW 風車、7MW 風車、5MW 風車の 3 基で構成された世界初の浮体式洋上風力ウインドファームを設置し、運転・保守、撤去を行い、浮体式洋上風力の社会実装に向けた要素技術等を実証した。開発から撤去までのプロジェクトのライフサイクル全体にて必要となる要素技術について、設計・開発からマネジメントを含む運用までの概ね全ての工程において、国内企業が完遂したこと、施工会社の組織及び従事者の技術レベルの向上、リスクの特定と評価スキルの向上等の海洋土木工事の経験値が大きく向上したことにより、我が国の産業競争力強化にも貢献した。

他方、本実証研究事業の途中で、国内風車メーカーの市場からの撤退が発表されたことは、効率的な維持管理や風車の商用化への取組に加えて、洋上風力発電の産業集積の観点から極めて残念である。また、実証期間中においては風車、浮体、洋上変電所、海底ケーブルの運転状況の中で多くのトラブルが発生し、原因を特定して再発防止策を講じたものがある一方、再発防止策を講じることなく撤去を決定したものもある。

しかしながら、浮体の設計技術、観測技術を中心として、発電施設とその構成要素、設計や維持管理に関するノウハウが本実証研究事業により福島洋上風力コンソーシアムをはじめ我が国に広く定着しつつあり、また、設計に関連する各種基準、ガイドラインの見直しに当たり、本実証研究事業の成果が活用されている点は評価できる。

(1) 実証研究事業を通じて得られた成果

第 4 章にて検証したとおり、本委員会としては、本実証研究事業の当初の目的である「浮体式洋上風力発電システムの安全性、信頼性、経済性を明らかにすること」については、将来の社会実装につながる成果も含めて、総体として達成しているとの結論に至った。

- 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し、それぞれの技術開発にて設定した目的を達成していること。
- 浮体式洋上風力発電システムの安全性、信頼性、経済性の検証における成果は以下のとおり。

安全性：本実証研究事業期間中の労働災害の強度率について検証した結果、洋上作業を含むにも関わらず、強度率は一般的な総合工事業の範囲内となり、人命や財産に大きな影響を与える事故を

起こすことなく実証を終えたこと。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し、設計の妥当性の検証ができたこと。

信頼性：遠隔での維持管理や予兆診断技術、アクセス船の運用向上の稼働率を高める取組によって実証や、予期せぬトラブルが発生しても原因を特定し、商用運転の実現が困難であった 7 MW 風車は撤去することとなったが、他の設備については再発防止策を講じることができたこと。また設計・施工段に関わる事象については再発防止策を提案していること。

世界初の浮体式洋上変電所は、令和元年に故障が発生したものの、設置後 6 年間安定的に稼働したこと。

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、妥当性の検証を行ったこと。また、将来の浮体式洋上ウインドファームの実現に向け、コスト低減が期待できる要素を特定し、その方向性と課題について提案したこと。

他方において、現有設備を使った発電事業を前提としたウインドファームとしての実証や事業化、産業集積に向けた取組については、実証機を使った 5MW 風車や 7MW 風車は技術開発段階であったことや、国内風車メーカーの撤退などの外部環境の変化の要因もあり、期待水準までは到達できなかったと判断した。

- 発電実績の成果である設備利用率は、商用機を使った 2MW 風車で 33.2%と目標値である 35%を概ね達成できたことに対し、実証機を使った 5MW 風車や 7MW 風車は、要素技術の開発と実装、データ取得による検証、それに基づいた改善という技術開発段階であったため、目標水準までは至っていない。現有の実証設備を使った複数機による浮体式洋上ウインドファームの運転実証は達成されたものの、技術的に開発段階である風車を用いた長期安定運転は困難であったため、前提としていた発電事業につなげることはできなかった。
- 福島の復興の観点からは、県内企業からの部品調達など一部連携した取組を進めたものの、県外からの関連企業の誘致や新規の産業育成による雇用の創出を含むサプライチェーンの形成の浸透など、本実証研究事業を通じた直接的な効果を生むまでの成果には至らなかった。他方、本実証研究事業を通じた福島県の「再生可能エネルギー先駆けの地」とする取組を積極的に後押ししたことで、福島県においていわき市と東京大学が進める CENTER for Wind Energy プロジェクトのような風力発電事業の維持管理における人材育成の取組や、県内企業の風力関連産業分野への新規進出などが進んでおり、風力関連産業の集積に向けた基盤の整備に貢献できたと判断した。例えば、福島産業フェアや WIND EXPO への展示会の出展等で、地元の子供や高校生の来場者も多く、その中には再エネ関連企業への就職を希望する声が出てきたことも、基盤整備の貢献として評価に値するものである。

(2) 社会実装に向けた成果

浮体式洋上風力発電の国内外の動向をみると、事業開始当時は、2MW 規模の風車の単機の実証事業が主であったが、令和 4 年 3 月時点では、欧州での着床式の洋上風力発電事業にて用いられている 6MW~9.5MW 規模の風車が導入されるなど、風車の大型化が進んでいることに加えて、複数基で数十 MW 規模の案件が徐々に立ち上がっている状況である。

欧州で主流の着床式洋上風力発電は、コストダウンが進み商用フェーズに到達している。他方において、急深な地形が広がる日本においてはその適地が少ないことから、2050 年のカーボンニュートラルの実現に向けた洋上風力発電の導入のためには、浮体式洋上風力発電の技術開発を加速化し、国内のみならず、急

成長が期待されるアジア市場への展開が期待されているところである。

そのような中、我が国においても、令和2年12月に「洋上風力産業ビジョン（第1次）」が策定され、令和3年4月には洋上風力産業の競争力強化に向けて必要となる要素技術を特定・整理した「洋上風力の産業競争力強化に向けた技術開発ロードマップ」を策定するなど、洋上風力発電の導入拡大と、これに必要な関連産業の強化と国内産業集積及びインフラ環境整備等の、相互の好循環を実現するための検討が進んでいる。また、令和2年12月に「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が策定され、洋上風力発電についても、「グリーンイノベーション基金（洋上風力発電の低コスト化）」を通じた研究開発支援が行われている。その中でも、「サプライチェーンの形成等を通じて競争力を高めつつ、将来的に、気象・海象が似ており、市場拡大が見込まれるアジアへの展開を目指すことが重要である。（中略）将来のアジア市場展開を見据え、国際標準化や政府間対話等により、官民が連携して海外展開の下地づくりを進めていく必要がある。⁶⁸」という社会実装に向けた計画が立ち上がっている。

本実証研究事業は、水槽試験を経てフルスケールの設備を設置してウインドファームとしての維持管理を行わない、撤去まで実施した国内唯一の事業であり、本実証研究事業を通じて浮体式洋上風力発電システムを構成する要素技術は大きく進展した。このことから、浮体式洋上風力発電は、フィジビリティ・スタディー（FS）のフェーズを終え、社会実装のフェーズに移行しつつある。そのような外部環境の変化を踏まえつつ、本実証研究事業における社会実装を見据えた有意義な取組や成果について報告する。

- 浮体の設計技術：水槽試験による検証だけではなく、風車・浮体・係留の連成解析を実施できる動的解析モデルを開発し、気象・海象データに対する浮体の挙動と比較して、精度を確認。さまざまな自然の条件下において、浮体の応答をシミュレーションで再現でき、将来、他の海域での浮体設計の基盤となる技術とノウハウを獲得したこと。
- 観測技術：気象・海象、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、これから浮体の研究開発を行う研究機関やゼネコン等に引用されている。そのため、研究成果の前提となっている観測・取得したデータは、将来、国内外で導入される浮体の設計の基盤としての価値ある情報であるといえる。
- 実証成果の設計基準・ガイドラインへの反映：本実証研究事業の学術的な成果である気象・海象・浮体動揺の予測技術や、航行安全性における船舶との衝突、漂流のリスクの定量化の成果の一部は、設計基準及びガイドラインといった浮体式上風力発電の基盤整備に貢献している⁶⁹。
- 漁業との共存：海域の先行利用者である漁業者への配慮を優先して考えるべきであり、施設の設置について漁業者は、①漁獲量の減少、②漁場環境の悪化、③魚種交代（漁業対象物の変化）、④漁業被害、などを危惧する。これらの不安について、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・共生していくための仕組み、例えば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、このような枠組みを構築できたこと。
- 世界を牽引する研究成果：本実証研究事業は、以下の点から、浮体式洋上風力発電の社会実装

⁶⁸ 「洋上風力発電の低コスト化」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画（令和3年10月）

⁶⁹ 例えば、国土交通省 海事局 浮体式洋上風力発電施設技術基準（令和2年3月）、日本海事協会 浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン（令和3年12月）、国際電気標準会議（IEC）61400-3-2 Wind energy generation system Part 3-2: Design requirements for floating offshore wind turbines

に向けたさきがけとなるプロジェクトとして世界に認知されている事業であったと判断できる。

- 本実証研究事業の成果で出版した 70 件の学術論文は、国内外で合計 153 件（国内：85 件、欧州、米国、アジアを含む海外：68 件）の論文に引用されていること⁷⁰。
- 本実証事業にて取得した特許の数は 31 件であったこと。
- 我が国や韓国が本実証研究事業のように浮体式洋上風力発電への投資を進めていることを意識したうえで、ETIP（EU Technology & Innovation Platform）が欧州各国に対して、サプライチェーンを形成し地域経済の波及効果を高めるためにも日本・韓国のように浮体式洋上風力発電へ投資することを働きかけていること⁷¹。
- 地元福島への示唆：更に、本実証研究事業を行った福島県においても、実証海域における風況や気象海象などの詳細なデータが蓄積されたことから、将来、本実証海域を含む周辺での発電事業または技術実証を計画する事業者にとっては、本実証研究事業にて取得したデータを活用することで、設計の精緻化、社会受容性への深い理解により、計画の熟度を高めることにもつながる。

⁷⁰ Google Scholar 上で引用数を集計したもの（令和 4 年 1 月時点）

⁷¹ ETIP Wind Road map（令和 2 年）

5.2 提言

最後に、本実証研究事業を終えるにあたって、浮体式洋上風力発電の社会実装に向けて将来取り組むべき事項等について本委員会として以下を提言する。

(1) 福島洋上風力コンソーシアム構成員への提言

- 福島洋上風力コンソーシアム構成員の一員として本実証事業に参画した企業、大学は、本実証研究事業にて獲得したデータ、ノウハウを積極的に活用し、今後の社会実装に向けて適正な設計基準等の策定に貢献するとともに、浮体式洋上風力の産業化に向けてサプライチェーン形成やノウハウ提供などで積極的に貢献していくべき。

(2) 今後の洋上風力事業に参画する事業者への提言

- 海域の先行利用者である漁業者に対しては、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していくべき。漁獲資源の保持、生態系の維持、環境保全等に向けて、透明性をもって漁業者と連携・協力し、漁業者が安心して漁業が遂行できるよう万全を期すことが必要である。
- 撤去について、商用水準となれば、一度に多数の撤去・解体を行う必要があるため、開発、建設当初から、解体コストの抑制や最大限リサイクルすることを念頭に置いた設計等を考慮に入れるべき。
- また、海外における海洋構造物の撤去においては、ドックを利用しない撤去工法も採用されており、ドックありきではなく、海外の事例も参考とした上で、適切な撤去工法を選択することが望ましい。

(3) 国への提言

- 本実証研究事業にて取得した風況、波浪、潮流データや海底地盤のデータ、漁獲試験等、漁業との共存、周辺航路への影響等の情報は、当該海域にて事業を計画する事業者にとっては貴重なデータである。福島県においては、2021年12月に策定された「福島県再生可能エネルギー推進ビジョン2021～持続可能な社会を目指して～」において、「洋上風力発電については、漁業との共生等を前提に、実証事業の成果や技術動向等を踏まえ、活用を検討していく。」としており、本データがその検討に有効に活用できるよう、開示に関わるルールを定めたくうえで速やかに公表をしていくべき。
- 今般改訂を行う「導入マニュアル」は、浮体式洋上風力発電事業における一般的な手続きに加え、留意すべきポイント、実証を通じて得られた経験やノウハウをまとめている。今後の社会実装に向けてしっかりと伝承できるよう、マニュアルを公表するべき。
- 今回の実証研究事業にて、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は、浮体式洋上風力発電の商用化に際して信頼性及び経済性向上に資するものである。本実証研究事業で得られた成果も踏まえつつ、風車や浮体、電気システム等についての低コスト化を目指し、グリーンイノベーション基金などを通じた研究開発・実証を進めていくべき。

表 36 福島洋上風力コンソーシアム各社の本実証研究事業以降の浮体式洋上風力関連の取組例

企業名	動向・研究開発内容
丸紅	<ul style="list-style-type: none"> ● 英国・スコットランド政府の世界最大級の浮体式洋上風力発電事業の開発に関する海域リース権益の落札 ● 秋田港及び能代港における洋上風力発電事業の開発
東京大学	<ul style="list-style-type: none"> ● 北九州浮体式洋上風力発電実証における施設の安全評価手法検討 ● IEC 61400-3-2 Design requirements for floating offshore wind turbines への本実証研究事業の成果の反映に向けた活動 ● NEDO 浮体式洋上風力発電低コスト化技術開発への参画 ● NEDO 次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究（要素技術実証）への参画 ● NEDO・GI 基金事業への参画
三菱商事	<ul style="list-style-type: none"> ● ポルトガル沖で実施している WindFloat Atlantic に出資参画
日立製作所	<ul style="list-style-type: none"> ● 台湾の洋上風力発電事業への 5MW 風車の販売成功 ● 浮体式洋上風力発電所向け変圧器の提供を開始
三菱造船	<ul style="list-style-type: none"> ● 15MW 級風車に対応した改良 A 型セミサブ型浮体の開発
三井 E&S 造船	<ul style="list-style-type: none"> ● セミサブ型洋上風力浮体基礎の量産化・低コスト化の研究
ジャパン マリンユナイテッド	<ul style="list-style-type: none"> ● 12MW 級の大型風車用セミサブ型浮体の設計・開発 ● NEDO・GI 基金事業（浮体式洋上風力発電の量産化及び低コスト化：セミサブ型浮体）への参画
古河電気工業	<ul style="list-style-type: none"> ● 英国・Carbon Trust 社から浮体式洋上風力発電設備用の超高压ダイナミック海底ケーブルの開発業務を受注 ● NEDO・GI 基金事業への採択（浮体式洋上風力発電低コスト化技術検証事業（TLP）、海底ケーブル敷設専用船開発プロジェクト、低コスト浮体式洋上風力発電システムの共通要素技術開発（ダイナミックケーブル・洋上変電所・変換所））
清水建設	<ul style="list-style-type: none"> ● 世界最大級の自航式 SEP 船の建造

本実証研究事業は、複数基としては当時世界初の本格的な実証研究として実施した。当時世界最大級の 7MW 風車や、洋上変電所などの先端技術を使った浮体式洋上風力発電の安全性、信頼性、経済性の検証を行うとともに、うねりの大きい太平洋での気象海象や台風の影響データの取得など、要素技術の大宗が福島沖にて実証・検証されたことで、多くの技術・ノウハウの獲得や、国内外の技術基準及びガイドライン等の改訂等へ貢献した。また、技術的知見のみならず、海域の先行利用者である漁業者と協調した事業運営モデルを提案できたことは、今後の浮体式洋上風力発電の社会実装に向けて、大きな成果と言える。

他方、近年、風車の大型化が進んでおり、商用規模のウィンドファームでは海域管理や施工、撤去など、本実証研究事業の成果以上に、技術面、マネジメントの観点からより高度化・複雑化することが見込まれる。今後は、本実証研究事業の成果が、商用時の運用に合わせて深化されることを通じて、浮体式洋上風力発電事業の検討が加速化し、再生可能エネルギーの主力電源化に貢献することを期待したい。

参考資料 1 論文リスト

1. 観測システム

1. Yamaguchi, T. Ishihara: Numerical prediction of Normal and Extreme Waves at Fukushima Offshore Site, Journal of Physics: Conference Series 1037 (4), 042022, 2018
2. Yamaguchi, S. Taki:, T. Ishihara, Metocean measurement at Fukushima offshore site, Grand Renewable Energy 2018, 2018
3. Yamaguchi, T. Ishihara : The effect of met mast on wind speed measurement and its correction by using computational fluid dynamics, Offshore Wind Energy 2017, 2017
4. Yamaguchi, T. Ishihara: A new motion compensation algorithm of floating lidar system for the assessment of turbulence intensity, Journal of Physics: Conference Series 753(7), 2016
5. 石原孟、種本純、山口敦：福島沖における通常流況と極値流速の予測に関する研究、日本風力エネルギー学会論文集、Vol.40、No.3、pp.35-42、2016.
6. Yamaguchi, T. Ishihara : Floating offshore wind measurement system by using LIDAR and its verification, EWEA2015, 2015
7. 山口敦、石原孟：GPS と慣性センサを利用した浮体動揺観測システムの開発と検証、第 37 回風力エネルギー利用シンポジウム、pp.225-228、2015
8. 若林蘭、川東龍則、山口敦、石原孟：6 自由度の動揺を考慮した浮体式ドップラーライダーの計測に関する研究、第 36 回風力エネルギー利用シンポジウム、pp.329-332、2014
9. 川東龍則、山口敦、石原孟：福島県沖浮体式洋上ウインドファームの気象・海象・浮体動揺の観測について、第 36 回風力エネルギー利用シンポジウム、pp.197-200、2014
10. T. Ishihara, K. Shimada, A. Imakita:Metocean design condition for "FUKUSHIMA FORWARD" project, Grand Renewable Energy 2014, 2014
11. 川東龍則、石原孟、若林蘭：浮体式ドップラーライダーの動揺補正に関する研究、第 35 回風力エネルギー利用シンポジウム、pp.355-358、2013

2. サブステーション

12. H. Yoshimito, C. Wright, R. Wada, K. Takagi : Prediction of an advanced spar's horizontal motions, validated by full scale observation data, Journal of Physics: Conference Series, 1618:052035, 2020
13. S. Zhang, T. Ishihara, Numerical study of distributed hydrodynamic forces on a circular heave plate by large eddy simulations with volume of fluid method, Ship and Offshore Structures, pp.1-13, 2019
14. S.Zhang, T.Ishihara: Numerical study of hydrodynamic coefficients of multiple heave plates by large eddy simulations with volume of fluid method, Ocean Engineering, Vol.163, pp.583-598, 2018
15. H. Yoshimoto, H. Yoshida, K. Kamizawa: Validation of Applicability of Low Frequency

- Motion Analysis Theory Using Observation Data of Floating Offshore Substation, ASME 2018 37th International Conference on Ocean, 2018
16. 北小路 結花 : 福島復興・浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業(3) : 一洋上サブステーション浮体の構造と曳航・設置について一、マリンエンジニアリング、No.50、Vol.1、 p24-29、日本マリンエンジニアリング学会 2015
 17. R. Matsuoka, H. Yoshimoto: Verification of Precision Concerning the Design of Advanced Spar Type Structure,Conference Proceedings The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.20, 2015S-OS1-1, 2015
 18. H. Yoshimoto, Y. Awashima, Y. Kitakoji : Development and Construction of Floating Substation, Grand Renewable Energy 2014, 2014
 19. H. Yoshimoto, Y. Awashima, Y. Kitakoji, H. Suzuki: Development of floating offshore substation and wind turbine for Fukushima FORWARD, Proceedings of the International Symposium on Marine and Offshore Renewable Energy, 2013
3. 2MW 浮体式洋上風力発電システム
20. N. Namura, K. Muto, Y. Ueki, R. Ueta, N. Takeda, Fatigue Damage Monitoring of Wind Turbine Blades by Using the Kalman Filter, AIAA Journal, 2021
 21. Y. Liu, T. Ishihara, Numerical Study on Sectional Loads and Structural Optimization of an Elastic Semi-Submersible Floating Platform, Energies, MDPI, 14, 182, 2021
 22. T. Ishihara, Y. Liu, Dynamic Response Analysis of a Semi-Submersible Floating Wind Turbine in Combined Wave and Current Conditions Using Advanced Hydrodynamic Models, Energies, MDPI, 13, 5820, 2020
 23. J Pan, T. Ishihara : Numerical prediction of hydrodynamic coefficients for a semi-submersible platform by using large eddy simulation with volume of fluid method and Richardson extrapolation, Journal of Physics Conference Series, 1356:012034, 2019
 24. Y. Liu, T. Ishihara : Prediction of dynamic response of semi- submersible floating offshore wind turbines by a novel hydrodynamic coefficient model, Journal of Physics Conference Series, 1356:012035,2019
 25. T. Ishihara and S. Zhang: Prediction of dynamic response of semi-submersible floating offshore wind turbine using augmented Morison's equation with frequency dependent hydrodynamic coefficients. Renewable Energy, Vol.131, pp.1186-1207, 2019
 26. J. Pan, T. Ishihara: Nonlinear wave effects on dynamic responses of a semisubmersible floating offshore wind turbine in the intermediate water, Journal of Physics: Conference Series, 1037 (2), 022037, 2018
 27. D. Subanapong, A. Yamaguchi, T. Ishihara: Estimation of fatigue load on floating offshore wind turbine at tower base during power production, Grand Renewable Energy,2018, 2018

28. H. Yamaguchi., A. Imakita. : Learning from field test regarding damping of a floater motion - 2MW FOWT "Fukushima Mirai"-, Grand Renewable Energy 2018
29. 今北 明彦 : 2MW 浮体式洋上風力発電施設 “ふくしま未来” : 日本船舶海洋工学会誌 (81) 2018-11 P.34-37
30. 今北 明彦、長 拓治、神永 肇 : 福島沖 2MW 浮体式洋上風力発電施設実証事業の成果、三井造船技報、平成 29 年 7 月、第 219 号、p.6-11、2017
31. 今北 明彦 : 福島沖 浮体式洋上風力発電の現状、第 20 回海洋教育フォーラム 2016
32. S. Zhang, T.Ishihara: Effects of multidirectional sea states and flexible foundation on dynamic response of floating offshore wind turbine system, Proc. Of First International Symposium on Flutter and its Application, pp.729-738, 2016
33. 堀 哲郎、山下 篤、白枝 哲次 : 「特集 持ち上げる 先端技術研究 1 海の上で吊り上げる – 浮体式洋上ウインドファームの建設 –」、土木技術 69 巻 8 号、2014.
34. 堀 哲郎、山下 篤、白枝 哲次 : 「福島沖に浮体式の洋上ウインドファーム実証施設を設置」、建設機械施工 Vol.66 No.6 June 2014
35. T. Ishihara, K.Kagaya and Y. KikuchiI: Dynamic analysis of floating offshore wind turbine system considering combined hydrodynamic loadings, OFFSHORE2013, 2012
4. 5MW 浮体式洋上風力発電システム
36. 角谷啓、吉田茂雄、杉野淳一、石原孟 : 「ダウンウインド型浮体式洋上風車のためのナセル風速を利用したフィードフォワード制御法の研究」、日本風力エネルギー学会論文集、Vol.45, No.2, pp.31-39, 2021
37. H. Yoshimoto, T. Natsume, J. Sugino, H. Kakuya, R. Harries, A. Alexandre,D. McCowen: Validating Numerical Predictions of Floating Offshore Wind Turbine Structural Frequencies in Bladed using Measured Data from Fukushima Hamakaze, DeepWind2019
38. 清木 莊一郎、坂本 潔、角谷 啓、佐伯 満 : 「5MW ダウンウインド風力発電システムの実証とスマート運転制御への展開」、日立評論、2017
39. 清木 莊一郎、坂本 潔、稲村 慎吾、飛永 育男、佐伯 満、横山 和孝 : 「5MW ダウンウインド風車および洋上風力用浮体式変電設備の開発」、日立評論、2015
5. 7MW 浮体式洋上風力発電システム
40. 小松正夫、森英男、宮崎智、太田真、田中大士 : 7 MW 洋上風車浮体の技術.V 字型セミサブ浮体の開発、日本船舶海洋工学会誌 (81) p38-43、2018
41. M. Komatsu, H. Kumamoto, H. Mori, M. Ohta, K. Karikomi, H. Ishii : Comparison between measured value and simulated value of motion and mooring force in Mitsubishi floating offshore wind turbine, Grand Renewable Energy 2018
42. K. Karikomi, T.Koyanagi, M.Ohta, A.Nakamura, S.Iwasaki, Y.Hayashi, A.Honda: Wind Tunnel Testing on Negative-damped Responses of a 7MW Floating Offshore Wind

Turbine, EWEA Offshore 2015

43. 太田真ほか、超大型風車を搭載する浮体構造物に関する技術検討 その2 浮体式風車の各種模型試験、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第20号、2015
44. 田中大士：浮体式洋上風力発電の現状 ～福島沖 7MW 浮体式洋上風車の紹介～、第19回海洋教育フォーラム、2015
45. 太田真、他：超大型風車を搭載する浮体構造物に関する技術検討 その1 浅海域向け浮体式風車の概念設計、日本船舶海洋工学会講演会論文集 第19号 p505-508、2014
46. 中村昭裕、林義之、松下崇俊：7MW V字型セミサブ浮体式洋上風車の荷重計算、日本風力エネルギー学会論文集、Vol.38 (3)、2014
47. 本田 明弘、太田 真、石井 秀和：洋上風力発電設備における波の設計条件に関する方位性の導入、風力エネルギー学会 論文集 37 巻 2 号、2013
48. M. Ohta, M. Komatsu, H. Ito, H. Kumamoto: Development of a V-shaped Semi-submersible Floating Structure for 7MW offshore Turbine, World NAOE Forum 2013 & International Symposium on Marine and Offshore Renewable Energy, 2013

6. 係留システムと鋼材

49. 大久保寛、小泉飛鳥、大嶽敦郎、菅野雅彦、林伸幸、鈴木三樹雄、八木健太郎：福島浮体式洋上ウインドファームの係留システムについて、日鉄エンジニアリング技報 Vol.13、pp20-38、2022
50. K. Shimada, T. Shiroeda, H. Hotta, Pham van Phuc and T. Kida : An Emprical Design Formula of a Shared Pile Anchor for a Floating Offshore Wind Turbine, Grand Renewable Energy 2018 Proceedings, June 17-22, 2018, Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan, O-We-12-2, 2018
51. 鈴木英之：浮体式洋上風車用浅海係留の静的係留特性の最適化、日本船舶海洋工学会論文集 第22号、2015
52. P.V.Phuc, T. Ishihara, K. Shimada, T. Shiroeda: Dynamic tension analysis of a slack mooring for a floating offshore wind turbine, Grand Renewable Energy 2014, 2014
53. 萱森陽一、井上健裕、大川鉄平、西村誠二、坪内宏樹、横山博昭、中山伸、石原孟：疲労ソリューションの7 MW洋上風車V字セミサブ浮体への適用、第36回風力エネルギー利用シンポジウム、pp309-312、2014
54. Y. Kayamori, T. Inoue, T. Okawa, S. Nishimura, T. Ishihara: Applicability of fatigue solutions to floating wind turbine structures, International Symposium on Marine and Offshore Renewable Energy 2013

7. 送電線と変電所

55. 籠浦 徹、藤井 茂、榊原 広幸、佐々木 隆博、村田 雅彦、田口 悠嘉：福島浮体式洋上風車向けライザーケーブルの疲労寿命推定-その2、日本船舶海洋工学会講演会論文集 2018
56. 籠浦 徹、藤井 茂、榊原 広幸、佐々木 隆博、村田 雅彦、田口 悠嘉：福島浮体式洋上風車向けライザーケーブルの挙動解析、日本船舶海洋工学会講演会論文集 2016

- 57. 籠浦 徹、藤井 茂、榊原 広幸、佐々木 隆博、村田 雅彦、田口 悠嘉：福島浮体式洋上風車向けライザーケーブルの疲労寿命推定、日本船舶海洋工学会講演会論文集 2016
- 58. 藤井 茂：送電技術：世界最大規模のダイナミックケーブルシステム、JWEA 107 号、2013
- 59. Shigeru Fujii, Hideo Tanaka：Power transmission system for "Fukushima FORWARD Project" -- Power cable system for offshore floating type wind farm pilot plant--, Sub C in 2013 Fall ICC Meeting

8. 環境影響評価と航行安全性

- 60. Eiji Hirokawa, Hideyuki Suzuki, Shinichiro Hirabayashi, Minon Muratake：ESTIMATION OF RISK OF PROGRESSIVE DRIFTS IN A WIND FARM CAUSED BY COLLISION OF DRIFT SHIP, OMAE2015-41473, 2015
- 61. 河島園子、伊藤博子、木村新太：交通流解析に基づく洋上発電設備への衝突危険性の検討、日本航海学会論文集 第 136 巻 第 134 回講演会にて講演
- 62. 伊藤博子、石村恵以子、柚井智洋、工藤潤一：AIS 非搭載船舶を含む船舶通航量の推定について、日本船舶海洋工学会講演会論文集 第 19 号 論文番号 2014A-GS6-5
- 63. 伊藤博子、石村恵以子、工藤潤一、森 有司：沿岸海域における衝突海難と海上交通流の分析、日本船舶海洋工学会講演会論文集 第 18 号 論文番号 2014S-GS10-2
- 64. 工藤潤一、伊藤博子、森 有司、西崎ちひろ：AIS を用いた航行制限の影響の調査、日本船舶海洋工学会講演会論文集 第 17 号、論文番号 2013A-GS11-3
- 65. 工藤潤一、伊藤博子、森 有司、西崎ちひろ：AIS 及び ARPA を用いた海上交通流の取得手法、日本船舶海洋工学会講演会論文集 第 16 号、論文番号 2013S-GS2-6
- 66. 工藤潤一、伊藤博子、石村恵以子、西崎ちひろ、森 有司：船舶の衝突 r 頻度定量化のための交通量調査と解析、海上技術安全研究所報告 第 13 巻 第 4 号 特集号基調論文、2013

9. プロジェクト紹介

- 67. 北小路 結花：浮体式洋上変電所「ふくしま絆」および浮体式 5MW 風車「ふくしま浜風」アドバンストパー型浮体ふたつの実機建造 日本船舶海洋工学会誌 (81) 2018-11 p. 44-47
- 68. Tomofumi Fukuda, Satsuki Gugai, Rentaro Hosoya, Shunsuke Sato and Shinji Sugiura: EXPERIMENTAL STUDY OF FLOATING OFFSHORE WIND FARM (FOWF) IN FUKUSHIMA, Grand Renewable Energy 2014,2014
- 69. ジャパンマリンユナイテッド株式会社、三井造船株式会社：福島浮体式洋上風力発電施設建設工事、作業船、No315、p9-14 作業船協会、2014
- 70. T. Ishihara, A. Yamaguchi, S. Taki: The challenge to the world's first floating wind farm, Grand Renewable Energy 2014, 2014
- 71. A. Yamaguchi, T. Ishihara: Current status of research activity on floating offshore wind turbine in Japan, OFFSHORE2013, 2013