

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

平成 30 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

福島沖での浮体式洋上風力発電システム実証研究事業 総括委員会について

本委員会の設置趣旨

福島洋上風力コンソーシアムは、経済産業省資源エネルギー庁から委託を受けた「福島沖での浮体式洋上風力発電システム実証研究事業（平成 23 年度～平成 30 年度）」が最終年度を迎えたことから、これまで得られた成果を客観的に総括することを目的に、同コンソーシアムとは独立した立場の委員で組織した総括委員会を設置した。

総括委員会では、平成 23 年度から取り組まれてきた実証研究事業の成果をもとに、浮体式洋上風力発電システムを構成する風車・浮体・送変電設備について、福島沖での事業化を見据えての安全性・信頼性・経済性についての検証結果の総括を行った。併せて本実証研究事業の今後のあり方も検討した。

総括にあたっては、福島洋上風力コンソーシアムに対し、これまでの実証研究事業の成果のうち、安全性・信頼性・経済性に重点を置き、その達成内容と課題について、構成設備別に担当企業からの報告ヒアリングを経て、実証研究事業を総括的に評価するとともに、本実証研究設備を用いた今後の自立的な運用の可能性について検討を行った。さらに、実証研究事業で今後明らかにするべき事項及び、設備の利用にも踏み込んで整理し、報告書として公表するものである。

開催実績

第1回 平成 30 年 6 月 27 日

第2回 平成 30 年 7 月 11 日

第3回 平成 30 年 7 月 23 日

第4回 平成 30 年 7 月 30 日

委員一覧

○ 委員長

永尾 徹 足利大学 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 悅紀 一般社団法人風力発電協会 国際・広報部長

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

原田 文代 株式会社日本政策投資銀行企業金融第 5 部 担当部長

＜目次＞

1. はじめに	1
2. 浮体式洋上風力発電システム実証研究事業の検証の結果	2
2.1 総括	2
2.2 風車	3
2.3 浮体	9
2.4 洋上変電所	12
2.5 送電ケーブル	12
2.6 撤去の検討	14
2.7 発電事業の経済性の検討	14
3. まとめと提言	19

1. はじめに

平成 23 年 3 月に発生した東日本大震災からの復興にあたり、福島県は、「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・雇用の創出を目指しているところである。このうち、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海上に期待が高まつており、日本の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、浮体式の研究開発についても加速していく必要がある。このような状況を踏まえ、本実証研究事業は、福島沖において、世界に先駆けた浮体式海上風力発電所の実現を目指した実証研究を行い、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 2 月にスタートした。

福島海上風力コンソーシアムでは、平成 25 年 10 月に世界初の浮体式海上変電所を設置した後、2MW 風車、当時世界最大級の 7MW 風車、5MW 風車を順次設置し、平成 28 年 2 月に本格的な浮体式海上風力発電所が完成した。その後、福島海上風力コンソーシアムでは、福島沖での実証データを継続して取得し、各設備の安全性・信頼性・経済性の検証を行っているところである。

近年、世界における浮体式海上風力発電の動向は、単基の実証から、大型の風車を用いた複数基の実証の段階に移りつつある。本プロジェクトに続いて、平成 29 年に英国スコットランドにおいて 6MW の風車 5 基による合計 30MW の Hywind Scotland が、世界初の商業規模の浮体式海上風力発電事業として運転を開始した。また、日本においても環境省の実証事業の成果に基づき、複数基の風車による商業規模の事業が計画されている。

このような状況の中、実証研究事業の最終年度にあたる本年度において、福島海上風力コンソーシアムは、本実証研究事業の成果を客観的に検証・評価するため、同コンソーシアムと独立した立場の委員から組織した総括委員会を設置した。総括委員会では、福島海上風力コンソーシアムメンバーに対し個別ヒアリングを行い、本実証研究事業の目的である以下の 3 つの点を踏まえて、それぞれの設備に対する検証結果を総括するとともに、本実証研究設備を用いた今後の自立的な運用の可能性についても検討を行った。

- 世界初の複数基による浮体式海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海上ウインドファームの実現を目指す。
- 福島沖の浮体式海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。

また、検証結果を踏まえ、今後の実証研究事業のあり方について提言を行った。

2. 浮体式洋上風力発電システム実証研究事業の検証の結果

2.1 総括

(1) 実証研究事業の実績

平成 24 年 2 月から開始した本実証研究事業は、前述の目的達成のため、世界初の 3 つの取組と風力関連産業の集積に向けた取組を行ってきた。世界初の 3 つの取組として、図 1 のように、①浮体式として初のウインドファームの実証、②世界最大級の風車の浮体への搭載と実証海域への設置、③浮体式の洋上変電所の設置、を行った。また、風力関連産業の集積等の取組として、①世界最大級の 7MW 風車の組立てを可能とする小名浜港藤原埠頭の地耐力強化、②地元企業による風車タワー及びケーブル用ブイの製造、③風力発電事業と漁業との共存の検証、を実施した。

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。

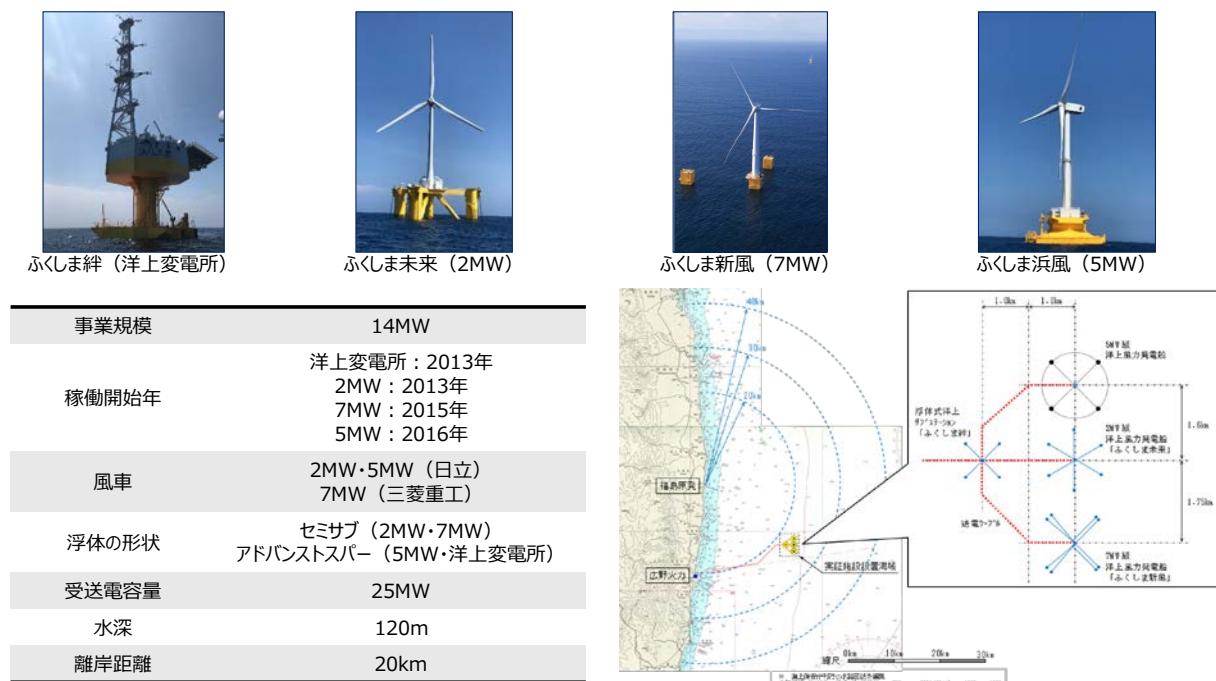


図 1 本実証研究事業の概要

(2) 実証機全般に共通する検証結果

平成 30 年度末まで実証を継続するため、平成 30 年 6 月末時点において、一部のデータが完全には揃っていない状況ではあるが、総括委員会は、事業の総括が可能であると判断した。検証の結果、本実証研究事業の浮体式洋上風力発電システム全体の安全性・信頼性・経済性の検証について、現状は、所期の目的を達成しつつあると結論づけた。以下に、具体的な検証結果の概略を述べる。

まず、安全性については、福島洋上風力コンソーシアムからは、風車・浮体・ケーブル・変電所の設備及び係留索について、静荷重（極値荷重）と疲労荷重（寿命）について評価を行った結果、十分な安全性を有しているとの報告があった。その内容を確認した総括委員会は、静・疲労荷重とも安全性が検証できつつあると判断した。ただし、7MW 浮体は、実証期間中に亀裂が生じ、平成 30 年 7 月に対策工事は完了し

たが、現時点では疲労に対する安全性が確認できておらず、今後の運用結果を受けて、判断するとした。

信頼性については、個別設備によって差異が大きい。2MW 風車は量産商用機を使用したため、洋上においても高い信頼性が確認できた。5MW 風車は 2 基目の実証機であり、設置後 1 年 5 ヶ月といった短い運転期間においては、初期不具合により稼働率が低迷した期間も見られたが、運転時間を蓄積するにしたがって改善しつつあり、今後、信頼性は高くなると見込まれる。7MW 風車は 2 基目の実証機であり、実証期間中に生じた不具合は全て対処しているものの、初期不具合や解決に至らなかった技術的課題等の影響もあり、設置当初から稼働率が低迷し、信頼性が低いと言わざるを得ない。浮体は、7MW 浮体を除いて稼働率がほぼ 100% であり、可用性が高い。また、送電ケーブル・洋上変電所は、100% に近い稼働率を示しており、信頼性は高いと評価できる。

経済性については、福島洋上コンソーシアムから提示された結果をみると、2MW 機及び 5MW 機の組合せと運用方法やコスト構造の見直しにより、将来的には自立的な運用となることが見込める。その実現に向けては、実証機の安定稼動と維持管理費（特に傭船料や保険料等の運転共通費）の低減が急務である。浮体式特有の維持管理として、揺れるアクセス船から揺れる浮体へ作業員が乗り移る必要があり、その成功率は、気象海象条件やアクセス船の設備などが影響する。作業員が容易かつ安全に乗り移り、運転・維持管理作業（O&M）を実施できる日数を改善すること（乗り移り率¹の改善）が、発電設備の稼働率や維持管理費に大きな影響を与えることがわかった。その方策の 1 つとして、アクセス船に動揺防止装置を搭載し、耐波性能を上げる方法とその定量的な効果の検証が有用である。本実証研究事業における風車の稼働率低下の要因としては、実証を通じて初めて把握した風車以外の要因も一定程度存在しており、今後も可能な限り運転を継続し、様々な事例の収集と、本事象研究事業で開発したシステム形態に適した運用方法の検証や見極めが必要である。

以降、各設備における検証結果を整理する。

2.2 風車

本実証研究事業において設置した 3 基の風車の概要を表 1 に示す。

表 1 本実証研究事業の風車の概要

	2MW 風車	5MW 風車	7MW 風車
開発・製造業者	日立製作所	日立製作所	三菱重工業
風車の位置づけ	量産商用機	2 基目実証機	2 基目実証機
増倍速方式	固定ギア式	固定ギア式	可変油圧式
ローター位置	ダウンウインド	ダウンウインド	アップウインド
ローター直径	80m	126m	167m
ハブ高	66.2m	86.4m	105m
運転開始	平成 25 年 11 月	平成 29 年 2 月	平成 27 年 12 月
運転期間 (平成 30 年 6 月時点)	4 年 8 ヶ月	1 年 5 ヶ月	2 年 7 ヶ月

¹ 乗り移り率 = 年間で出航可能な割合（理論値） × 乗り移りが成功した割合（実績値）

= (浮体に乗り移りが可能な日数) / (年間日数)。1 年間を通して、安全上出航しても問題のない海象で、確実に浮体に乗り移り作業できる場合、乗り移り率は 100% となる。

2.2.1 2MW 風車

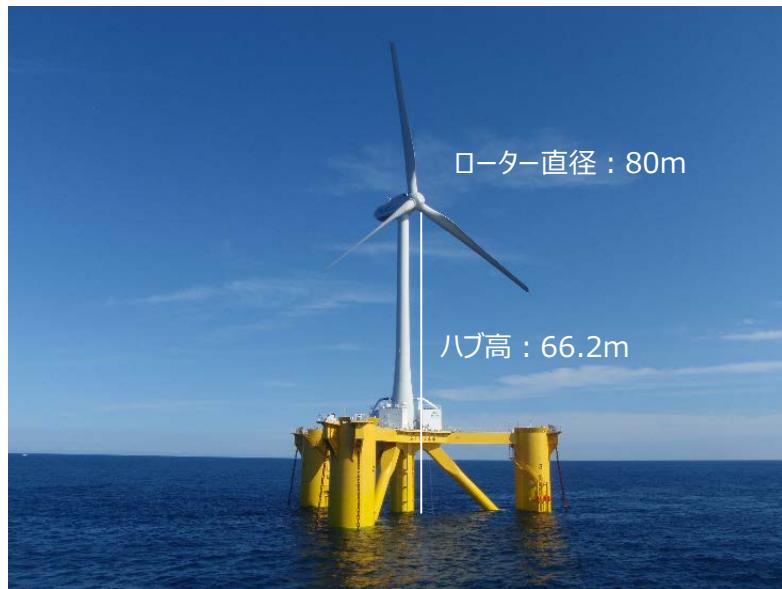


図 2 2MW 風車

(1) 実証研究事業の設備に対する検証

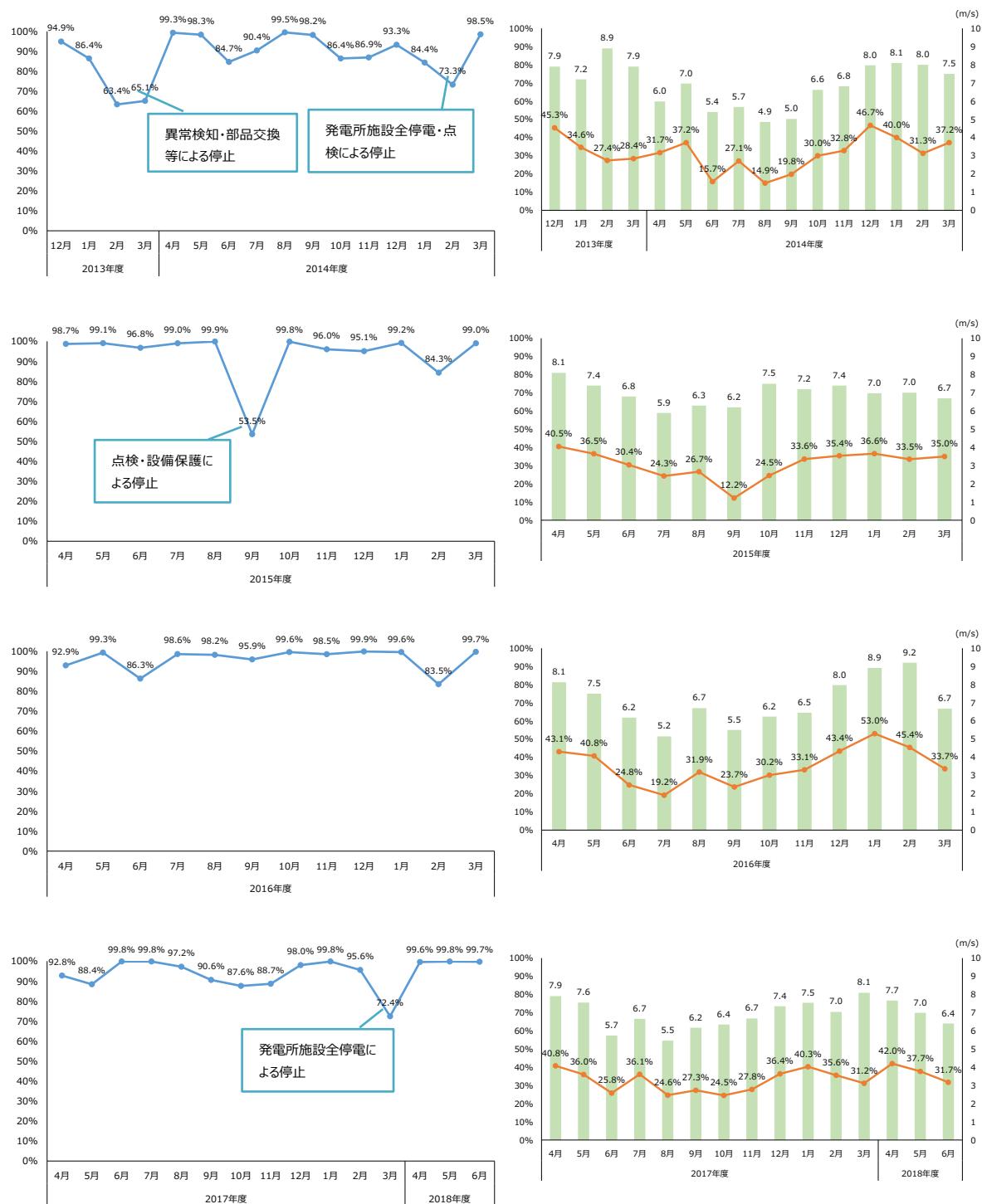
当該風車は、陸上において実績のある量産化された商用機で、ローター直径は 80m、ハブ高さは 66.2m である。平成 30 年 6 月末時点で運転期間は 4 年 8 ヶ月である。開発・製造業者である日立製作所の説明によると、①最終的には風車の性能を表すパワーカーブは、陸上風車と同じで、設計仕様とほぼ変わらないこと、②浮体が安定しているため、陸上風車と同じ制御で問題ないこと、が確認できた。

2MW 風車の稼働率・設備利用率を図 3 に示す。日立製作所によれば、平成 25 年の設置当初は、初期不具合により、浮体の動搖に対する風車の制御が作用せず、部品交換や補修等により、稼働率が低下した期間もあったが、その後の稼働率は概ね 95%以上となっている。稼働率が低下した要因として、平成 27 年 9 月は落雷による設備の点検、更に平成 30 年 3 月は発電所全体の全停電による停止との説明であった。また、設備利用率は、平成 29 年 7 月～平成 30 年 6 月までの平均で 32.9%を達成しており、直近の平成 30 年 6 月は、31.7%となっている。

このことから 2MW 風車の稼働率・設備利用率は概ね商用水準であると判断できる。実証機 3 基の中では、発電量が安定しており収入の基盤となっているが、離岸距離が 20km と遠方で、平均有義波高が 1.41m と海象条件が厳しい海域であり、O&M 作業員が浮体へ乗り移り、年間のうち作業できる日数の割合である乗り移り率は約 70%であった。その結果、本実証研究事業では、単基でみると発電設備容量あたりの浮体式特有の維持管理費が割高になる傾向にある。自立的に運用するためには、傭船料や保険料等の運転共通費をはじめとする維持管理費等の低減が必要である。また、実証研究期間中にその機会はなかったが、発電不調になった発電機や増速機の洋上での交換方法（大規模修繕）について、今後、検討を行う必要がある。

(2) 将来に向けての意見

2MW 風車は、量産化された商用機であることから、本項目に該当する検証は行わなかった。



$$\text{稼働率} = \frac{\text{月間稼働時間}}{24 \text{ 時間} \times \text{月間日数}}$$

$$\text{設備利用率} = \frac{\text{月間発電量}}{\text{定格出力} \times 24 \text{ 時間} \times \text{月間日数}}$$

図 3 2MW 風車の稼働率・設備利用率（緑の棒グラフは平均風速）

※平均風速は風車ナセルの影響を受け、実際の風速と若干異なる可能性がある（2015年1月～12月を除く）。

2.2.2 5MW 風車



図 4 5MW 風車

(1) 実証研究事業の設備に対する検証

当該風車は、累積生産 2 基目の実証機で、ローター直径は 126m、ハブ高さ 86.4m である。平成 30 年 6 月末時点で運転期間は 1 年 5 ヶ月である。初号機は茨城県神栖市の実証風車として陸上に設置されている。開発・製造業者である日立製作所からは、①運転期間が短くデータが不十分であるため、風車の性能を表すパワーカーブの検証を現在も実施していること、②5MW 風車は、陸上風車と同じ制御の 2MW 風車と異なり、浮体の傾斜に応じてブレードのピッチ角度を制御し、浮体動搖の発散を抑制するネガティブダンピング制御をしており、制御の違いが発電量に与える影響について現在とりまとめていること、という説明があり、総括委員会は、今後の運用結果を受けて、改めて判断をする必要があるとした。

5MW 風車の稼働率・設備利用率を図 5 に示す。日立製作所によれば、平成 29 年の設置当初は、風車設備としての電気的・機械的な初期不具合により稼働率が低迷していたが、その要因も特定できており、設備利用率は、平成 29 年 7 月～平成 30 年 6 月までの平均 14.8% から徐々に上向いている。しかしながら、ネガティブダンピング制御の不調により、稼働率は 95% の商用水準に至っていないこと、直近の平成 30 年 6 月は、浮体の係留チェーン検査・補修作業による風車の運転停止の影響を受け、稼働率が 71.9%、設備利用率が 23.0% となっているとの報告があった。

総括委員会としては、初期不具合改善後の設備利用率向上は評価できるものの、運転期間が 1 年 5 ヶ月と短く、2 基目の実証機であるため、風車の完成度は発展途上であると評価した。本年度導入したネガティブダンピング制御システムの確立やメンテナンスの最適化、交換部品のデータ蓄積による信頼性の向上により事業性が高まることが期待されることから、実証運転を継続し、十分な運転期間のもとで信頼性の検証が必要であると判断した。

(2) 将来に向けての意見

本実証研究事業において可能な限り運転を継続し、初期不具合の更なる改善を行いながら、課題となっているネガティブダンピング制御システムの確立やメンテナンスの最適化等を実証し、稼働率 95%の商用化を準の早期実現を期待したい。

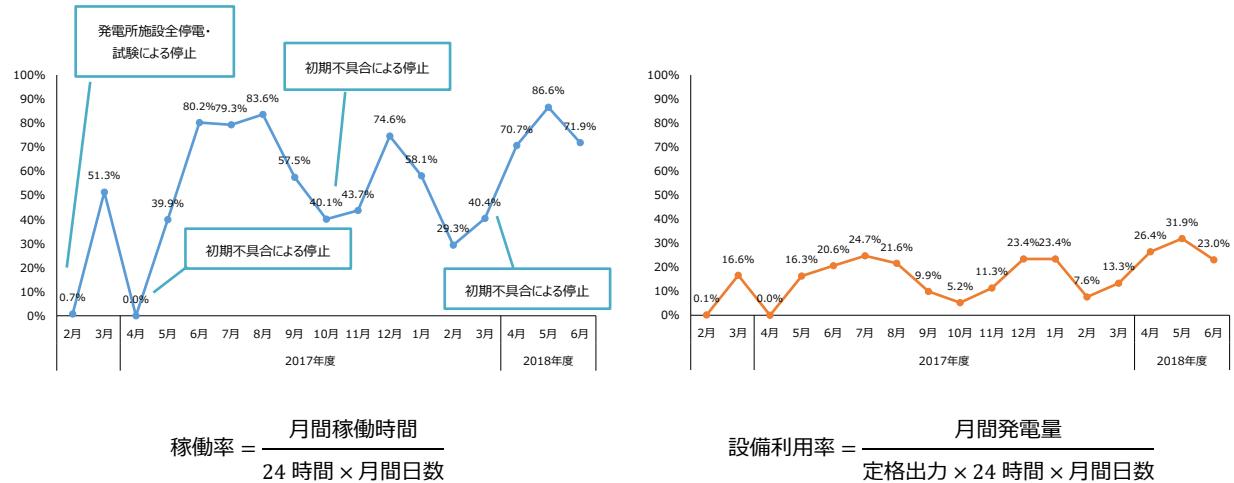


図 5 5MW 風車の稼働率・設備利用率

2.2.3 7MW 風車



図 6 7MW 風車

(1) 実証研究事業の設備に対する検証

当該風車は、累積生産 2 基目の実証機である。風車のローター直径は 167m、ハブ高さ 105m である。平成 30 年 6 月末時点での運転期間は 2 年 7 ヶ月である。この風力発電システムに搭載される世界初の革

新たなデジタル可変容量制御による油圧式ドライブトレインは、従来のギア式ドライブトレインで想定される大型化に伴う様々な課題を解決するとともに、大型化が進む次世代風車への適用が期待できる画期的な技術として開発された。開発・製造業者の三菱重工業では、本実証研究事業において製造するまでに、同様のシステムを用いた 1.5MW の実証機による試験で技術実証を行ったほか、福島に先立って同型の 7MW 風車を英国スコットランドのハンターストーンの陸上に設置し、並行して試験を実施する等、新規技術の持つ課題の抽出と解決に取組んできたものである。

福島沖における 7MW 風車の稼働率・設備利用率を図 7 に示す。三菱重工業からは、福島沖での設置直後から、風車・浮体双方の初期不具合により稼働率が低迷したと報告された。浮体については、平成 30 年の夏に対策工事が完了したため、不具合は解消することが期待される。一方風車は、油圧システムに多大な影響を及ぼすような初期不具合が複数発生したほか、三菱重工業で実施している他の類似メカニズムで部品寿命に影響する無視できない不具合が発生したため、本実証研究事業の 7MW 風車にも遡及対策を実施する等、停止状態が長引いたとの報告があった。

総括委員会として把握している風車の技術的な問題は、以下のとおりである。

- この革新技術の中心的な役割を担い、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。
- 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。
- その他、バルブや油圧ホース等部品に不具合が発生。

三菱重工業としては、これらの不具合に対して、半年かけて当該部品を全て交換したほか、油圧システムにセンサーを取り付けて、異常が発生した場合に遠隔でその現象を検知し、現状では重大事故が起きないように処置を施している。また部品の状態を監視し、気象海象状況を加味しながら、部品交換のタイミングを見極める予防保全にも取り組んできた。しかしながら、設備利用率は、平成 29 年 6 月～平成 30 年 6 月までの平均で 3.7%、平成 30 年 4 月時点で 8.0%（同年 5 月、6 月は、浮体の対策工事のため 0%）と依然低い状況にある。

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、ダント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、今後も安定稼動は難しいと判断した。

(2) 将来に向けての意見

油圧システムの課題が残り、部品の消耗が激しいことに加え、世界に 2 基しかない油圧システムの独自性から個々の部品が特注品で高額なため、維持管理費が高止まりの状況で、維持管理費の低減の見通しも厳しい状況であるとの結論に至った。

なお、三菱重工業によれば、将来における 12～15MW への風車の大型化の際には、油圧システムの技

術が活かされる可能性はあるものの、現時点における事業的側面を見ると、三菱重工業としてはグループ会社である MHI Vestas 社の 9.5MW のギア式風車の販売を開始しているため、同機種を事業の基軸に据えているとの説明があった。したがって、総括委員会としては福島復興に向けた本実証機の商用運転は困難で、今後の見通しも不明であるといわざるを得ない。

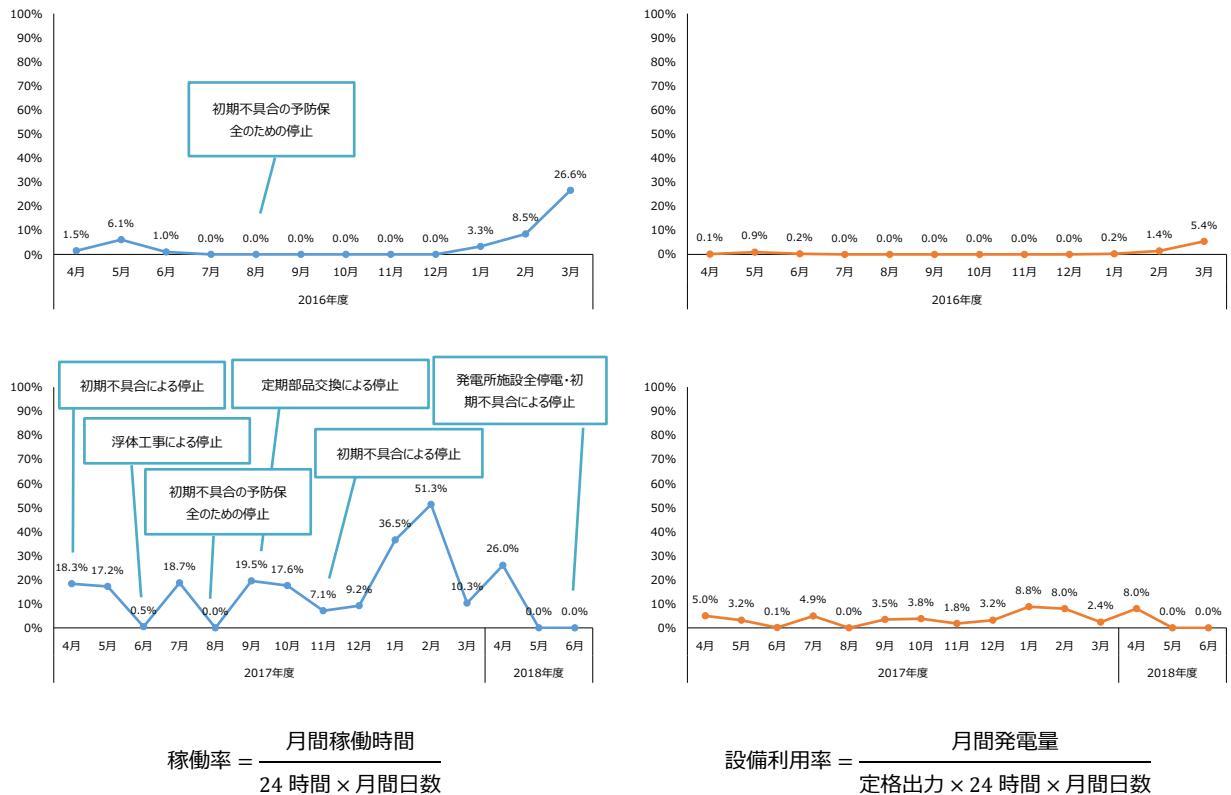


図 7 7MW 風車の稼働率・設備利用率

2.3 浮体

福島沖での気象・海象条件の下で、各浮体の特性を明らかにすることを目的として開発・製造された下記の4基の浮体について各々検証を行った。

表 2 本実証研究事業の浮体の概要

浮体形式	4-カラムセミサブ浮体	アドバンストスパー浮体	V字型セミサブ浮体	アドバンストスパー浮体
搭載設備	2MW 風車	5MW 風車	7MW 風車	洋上変電所
開発・製造業者	三井 E&S 造船	ジャパンマリンユナイテッド	三菱造船	ジャパンマリンユナイテッド
浮体高さ	32m	36m	32m	71m
計画喫水	16m	33m	17m	50m
係留索本数	6 本	6 本	8 本	4 本

2.3.1 4-カラムセミサブ浮体（2MW 浮体）

(1) 実証研究事業の設備に対する検証

当該浮体は、センターカラムとこれを中心とした正三角形の頂点に配置した 3 つのサイドカラムから構成されるセミサブ浮体であり、水線面積が小さいため、波や潮流の影響を受けにくく、揺れや上下動を抑制できることが特徴である。係留索の本数は 6 本である。

開発・製造業者である三井 E&S 造船によると、浮体の稼働率²は、法令上の定期検査等のやむを得ない時間を除くと 100%となり、設計時の目標を達成しているとの報告があった。総括委員会としては、この浮体は可用性に関して商用水準に達していると判断した。

(2) 将来に向けての意見

三井 E&S 造船が本実証研究事業で取得したデータを分析した結果、当該浮体は動搖が小さく、また疲労寿命も長かったことから、同社は現状のカラム数や係留索を減らすなどの小型軽量化が可能であるとしている。この新しいコンセプトによれば、5~6MW 級の風車を搭載する場合、鋼材量は現在の 2MW 風車用と同水準のまま、施工の工夫や量産化により、発電設備容量あたりの資本費は、最大で 1/5 程度へと大幅な低減が見込めると試算している。

2.3.2 アドバンストスパー浮体（5MW 浮体）

(1) 実証研究事業の設備に対する検証

当該浮体は、上部ハルと下部ハルから構成され、後述する洋上変電所と同じアドバンストスパー浮体である。ハルの上下にかかる圧力が打ち消しあうことで浮体の揺れを低減し、浮体の幅と喫水をそれぞれ 50m 程度に抑えることにより、直立状態での建造・輸送を可能にした浮体である。係留索の本数は、2MW 浮体と同じ 6 本である。

当該浮体の安全性については、設置してから 1 年 5 ヶ月と短期間であるため、平成 30 年度末までデータを取得して検証を継続している。開発・製造業者であるジャパンマリンユナイテッドによると、平成 30 年 6 月の浮体の稼働率は、台風により損傷した浮体の艤装品の補強工事で風車を停止したことから 78.8% であるが、それ以外は稼働率 100% である。

この浮体の風車搭載前の沈設施工時に、浮体内にバラスト水を注入する際に、注水制御のバランスが崩れて、浮体が傾斜した状態で停止してしまう事態が発生した。ジャパンマリンユナイテッドは、追加的に浮体に穴を開け、取水場所を作ることで正常な状態に復元した。また、同様の事態がこれ以降発生していないこと、改善策として、浮体のどの方向からも取水が可能な注水路を配置する必要があるという知見を得たと報告した。

(2) 将来に向けての意見

ジャパンマリンユナイテッドからは、実証研究事業で得られた運用データを分析した結果、当該浮体の動搖が設計時の見通しよりも小さいことが判明したものの、鋼材量を多く使用するアドバンストスパー浮体は、セミ

² 浮体の稼働率 = 1 - (浮体が要因で風車が発電を停止した時間 / (24 時間 × 月間日数))。風車の停止した要因が浮体にない場合は、稼働率は 100% となる。

サブ浮体に比べて資本費が高くなると報告があった。しかしながら、維持管理費の大半を占める浮体を浮上しての点検は、浮体の種類によらず 2 年間に一度必要であるため、ジャパンマリンユナイテッドとしては、セミサブ浮体との間で優劣はないと考えていると付言した。将来 10MW 級の風車に採用する場合は、浮体幅の大きいセミサブ浮体が製造時にドックの制約や洋上での接合が容易ではないことが懸念されるのに対し、アドバンストスパー浮体は、浮体動搖が小さい点に加え、標準的（70～80m くらいの長さ）なドックで製造ができるため、コスト的に優位となる可能性があるとの報告を受けた。総括委員会としては、今回の実証研究期間中ににおいては、アドバンストスパー浮体は、5MW 風車には過剰な設計で、セミサブ浮体よりもコスト面での優位性が確認できなかったとした。

2.3.3 V 字型セミサブ浮体（7MW 浮体）

（1）実証研究事業の設備に対する検証

当該浮体は、浮上時の喫水を浅くし、日本の港湾域であれば建造場所を限定しないことをコンセプトに設計された V 字型のセミサブ浮体であり、曲面を少なくしたシンプルな箱型の構造になっている。係留索の本数は 8 本である。

開発・製造業者である三菱造船は、当時、世界最大級の 7MW 風車を搭載するために要求された動搖に対する厳しい設計目標を達成しており、この浮体は、安定した性能を持っていることが確認できたと報告した。浮体の稼働率は、平成 28 年度は 90%、平成 29 年度は 91% であった。浮体の稼働率が下がっている要因は、平成 28 年 4 月に実施した作業員の安全性向上のための改修工事や法令点検による定期検査、平成 28 年 11 月に浮体下部に発生した亀裂への各種対応によるものである。浮体の亀裂の原因は、設計時の係留索の拘束における解析条件の設定相違により、外部荷重が実際と異なっていたこと、及び部材内の応力の見積もりが不十分なために生じた疲労損傷であり、解析条件を見直した上で補修設計を行い、補強材の追加を行った。平成 30 年 7 月に対策工事が完了したとの報告があった。総括委員会としては、対策工事後の浮体の運用実績の結果を待って安全性・信頼性・経済性の最終的な検証が必要と判断した。

三菱造船は、本実証研究事業における当該浮体の風車搭載費用が他の浮体と比べて高い理由として、世界最大級の大型風車搭載のため、巨大なリガーカークレーンを使用したことと、小名浜港藤原埠頭の地耐力強化によるものであり、今後は SEP 船を使うことでコスト低減が図れる可能性があると説明した。

（2）将来に向けての意見

三菱造船は、将来的に当該浮体の経済性を改善するため、対策工事後の実証のデータを取得、解析の結果によっては、浮体の最適化が可能としている。シンプルなコンセプトのままの小型化、風車の動搖制限の緩和、係留作業の効率化を含めた資本費低減の方策が提示されたが、定量的な分析にまでは至っておらず、総括委員会としては、資本費低減の可能性はあるが、定量的に示すには検討が不十分と判断した。

2.3.4 アドバンストスパー浮体（洋上変電所浮体）

（1）実証研究事業の設備に対する検証

当該浮体は、上部ハリ、コブ、中間ハリ、下部ハリの 4 つから構成された世界初のアドバンストスパー浮体であり、上部ハリには気象観測用タワーとヘリポートが、上部ハリ内には、世界初の浮体式洋上変電設備が設置されている。また、垂直状態での建造・曳航を可能とするため、下部ハリにはコンクリートを充填して重心

を低くしている。係留索の本数は4本である。

開発・製造業者であるジャパンマリンユナイテッドによると、①設置から4年8ヶ月経過しているが、稼働率は100%であること、②維持管理費は、気象観測用タワーの部品交換を除くと、同じアドバンストスパー浮体の5MW浮体と同水準になること、③実証研究事業の成果に基づいて、洋上変電所が許容できる加速度や傾斜が緩和されれば、設計の最適化による資本費の低減が可能となる見込みであること、との報告があり、内容を確認した。このことから、総括委員会としては、可用性の高い浮体であると判断した。

(2) 将来に向けての意見

実証研究事業の成果に基づいて、洋上変電所が許容できる加速度や傾斜が緩和されれば、設計の最適化による資本費の低減を見込める。

2.4 洋上変電所

(1) 実証研究事業の設備に対する検証

世界初の浮体式洋上変電所は、66kVガス絶縁装置、22kV真空絶縁開閉装置、25,000kVA主変圧器から構成され、製品化されている陸上の設備に、浮体動搖と塩害への対策を講じたものである。

開発・製造業者である日立製作所によると、浮体の動搖対策としては、浮体の開発・製造業者から提供された動搖の最大予測値を用いて搭載機器の傾斜試験や振動試験を行い、2つの絶縁開閉装置の機器内部の緩み、亀裂、変形が発生しないこと、変圧器の鉄心、巻線に位置ずれが発生して性能が変化しないこと、等を確認した。塩害対策としては、屋内に設置され外気に触れることのない2つの絶縁装置には特別な対策を講じていないが、主変圧器には、補修塗装を施して塗装を厚くすることで、防錆効果を持たせている。日立製作所からは、実証研究期間を通じて機器の異常はなく、設計時に想定した環境条件は妥当であったと報告された。設置後の定期点検としては、①外観点検、②シリコン油漏れ確認、③ガス分析、④開閉試験の4つを実施している。その結果、変電設備としての機能が損なわれている部分はなく、正常に機能していることから、信頼性は高く、陸上変電所同様のメンテナンス方法で問題はないことが確認できた。

総括委員会としては、日立製作所からの報告に対して、追加となる新しい論点の提示はなく、浮体式の洋上変電所としての技術的な検証は満足いくものであると考える。

(2) 将来に向けての意見

日立製作所より、実証研究事業の結果を踏まえたコスト低減の方向性として、動搖対策にて実施した傾斜試験、振動試験の省略の可能性が示された。総括委員会からは、近年の欧州の動向では、洋上風力発電事業の運転期間が20年超の25~30年の運転が想定されているため、事業リスク分散の観点から変電設備やケーブルを2系統にしてロバスト性を持たせるなどの例があり、今後の実用化への拡張に当たっては、考慮の余地があるとの指摘を行った。

2.5 送電ケーブル

(1) 実証研究事業の設備に対する検証

本実証研究事業における送電ケーブルは、既製品を使った架空送電線と海底ケーブル、実証研究事業で開発したライザーケーブルの4つから構成される。

開発・製造業者の古河電気工業からは、①実証研究事業では、海底ケーブルを埋設する深さは漁業への影響を考慮して 1mとしたこと、②埋設した部分については、実証研究事業中の定期確認では海底面に変化は見られず、海面が静穏であるため問題ないと報告があった。

実証研究事業初期に設置した 2MW 風車用のライザーケーブルは、1 年間の実証データを解析の結果、設計寿命 20 年を満たしていることが示された。5MW 風車と 7MW 風車のライザーケーブルについては、より精度の高い検証を行うため、データを蓄積している段階である。古河電気工業からは、平成 25 年度の設置以来、5 MW 風車と 7 MW 風車の海底ケーブル工事期間を除いてケーブルの稼働率³は 100%であり、フジツボ等の除去や調査等の作業中でも送電を続けることができたと報告した。他方で、7MW 風車のライザーケーブル及び中間ブイには、想定を超える海洋生成物が付着したため、ライザーケーブルが沈下、着底して最外層の一部が損傷した。その対応として、平成 30 年 7 月にケーブルの補強が行われた。

総括委員会は、ライザーケーブルの安全性については、① 5 MW 風車及び 7 MW 風車のライザーケーブルの検証結果が得られた時点で改めて検証が必要であること、②ケーブルの稼働率は 100%の実績を示しているため、信頼性は高いケーブルであると認められる、との結論になった。

過去の着床式の洋上風力発電の事故では、ケーブル関係の案件の不具合事例が多いことを踏まえ、古河電気工業に対して本発電システムで将来想定されるケーブルの重大事故とその対処方法について確認したところ、古河電気工業からは、ライザーケーブルの損傷が想定され、その場合の修理には浮いている部分の全取替えが必要になる可能性があることが報告された。短期間で復旧するためには、①事業者がケーブルの予備品を保管していること、②船と人の迅速な手配、が効果的であるとの回答が得られた。上記の実情を踏まえ、総括委員会として日本の周辺海域において、冬場にケーブル事故が生じた場合、最大半年の送電不能となる可能性が高く、経済性へのインパクトが大きい事案となりえることを確認した。



図 8 海洋生成物の付着状況例

(2) 将来に向けての意見

古河電気工業からは、実証研究事業で得た成果と知見により、複数基工事の場合、工事費を中心に建設費を kW 単価で約 1/6 程度まで下げられる可能性があることが示された。

資本費低減項目の内容について確認した結果、①同型浮体の複数基設置、②浮体の移動範囲を狭くする工夫、③工事を平易にするための浮体の側面からのケーブル接続等の工夫等、といったケーブルの立場

³ ケーブルの稼働率 = 1 - (ケーブルが要因で風車が発電を停止した時間 / (24 時間 × 月間日数))。風車の停止した要因がケーブルない場合は、稼働率は 100%となる。

から見た浮体の設計への要望が報告された。総括委員会としては、更なるケーブルのコスト低減や信頼性の向上が見込めるところから、①上記要望の具体的な検討、②海洋生成物を除去するコスト低減の検討、③メンテンスフリーで 20 年間維持できる方法の検討の 3 つを期待するとした。

2.6 撤去の検討

(1) 実証研究事業の設備に対する検討

浮体式洋上風力発電の運転が終了した後は、設備の撤去が必要であり、本実証研究事業の全ての風車・浮体・変電所・ケーブルを撤去する場合の撤去工法及び費用の検討を行った。

本実証研究事業の施工事業者である清水建設が示した本実証研究事業の風車・浮体・変電所・ケーブルを撤去する場合の撤去費は、発電事業の一部として計上した場合、現状では民間事業としては困難な水準であった。その要因として、①本実証研究事業の実証機は、計画・設計時点で撤去工法まで十分に考慮されていなかったこと、②一般的に日本は欧州と比較して洋上施工の経験が乏しいこと、③設置海域の海象条件によって施工可能な期間が限られ、その結果傭船日数が多くなることを挙げている。

総括委員会で清水建設の報告内容を検討したところ、①短期間で提案した今回の撤去工法では、安全性・経済性が十分には考慮されていないこと、②撤去費が高額である要因として、大型の起重機船の使用を含む、傭船単価の高い船団構成に基づいた工法の積算が考えられ、抜本的な撤去費の低減が必要であること、③撤去費は、実績ではなく将来のコスト試算であることから、実施する場合は、複数の事業者から撤去工法や費用についてヒアリングを行い、入札を検討すること、という結論を得た。

また、着床式を含め欧州の事業者は、FIT 制度等の補助対象期間終了後も、継続して事業を行うことを見越して撤去の検討を先送りしている可能性があり、そのために撤去に関する情報が少ないと考えられるが、ベンチマークとして、欧州の撤去事例や国内の洋上や陸上における類似事例の撤去費の水準を調べて比較するなど、撤去費低減に向けた更なる検討が必要である。

(2) 将来に向けての意見

清水建設からは、本実証研究事業で得られた知見として、設計の段階から、施工と同時に撤去についても検討することにより、安全かつ効率的な工法のもとで、撤去費低減が見込めるとの報告があった。

総括委員会としては、撤去費低減のための浮体の設計への要望をまとめるべきであるとの結論に至った。

2.7 発電事業の経済性の検討

(1) 前提条件

本実証研究事業における経済性の検討として、発電事業者の役割を担う丸紅をはじめとする福島洋上風力コンソーシアムからの報告やヒアリングをもとに、総括委員会として将来的に本実証研究設備が自立的な運用が可能かを検討した。検討に当たっては、表 3 に示す 4 ケースを主な評価対象とした。

表 3 経済性の検討を行ったケース

No	検討したケース	内容
①	実証機 3 基ケース	本実証研究事業の現状のまま継続運用を行うケース
②	実証機 3 基改善ケース	「①実証機 3 基ケース」のもとで、洋上変電所用の浮体とケーブルの維持管理費を見直したケース
③	実証機 2 基ケース	「②実証機 3 基改善ケース」のもとで、7MW 機を撤去したケース
④	実証機 2 基改善ケース	「③実証機 2 基ケース」のもとで、保険料、撤去費、5 MW 風車の設備利用率を見直したケース

各ケースにおいて、表 4 に示した費目とその前提条件に基づいて単年の収支を計算した。

表 4 費目と前提条件

費目		前提条件
収入	売電収入	・売電単価は FIT 制度上の洋上風力発電の調達価格である 36 円/kWh。 ・各風車の設備利用率は、稼働率が商用水準の 2MW 風車は直近 2 年間の実績値（33.5%）を、稼働率が商用水準に至っていない 5MW 風車と 7MW 風車は、実証研究事業期間中の最も高い月間の実績値（5MW : 31.9%、7MW : 8.8%）とし、送電ロスを考慮して売電収入を計算。
支出	運転維持費	・変電設備及びケーブルの運転維持費は各風車に発電設備容量に応じて按分。
	固定費	・保険料、傭船料、人件費。保険料の一部を除いた費目は各風車に発電設備容量に応じて按分。
	撤去費	・事業期間終了後、全設備を撤去することとし、変電設備及びケーブルの撤去費は各風車に発電設備容量に応じて按分。 ・事業期間に大きく左右されるため、一般的な発電事業の事業期間とされている 20 年間で等分。

(2) 実証機 3 機ケース

①実証機 3 基ケースの収支は、図 9 のとおり売電収入が 100 に対して支出が 183 となっており、大幅な赤字となることが示された。そのため、「①実証機 3 基ケース」から開発・製造業者へのヒアリングに基づいて、以下のような考え方に基づいて再度検討を行った。

- 学術研究終了後の場合、洋上変電所に併設された気象観測用タワーの維持管理費が除かれ、洋上変電所用の浮体の維持管理費は 5MW 浮体と同水準となること。
- ケーブルの維持管理費は、海洋生成物の除去費用であり、実証研究の成果として 5 年に 1 回で問題ないこと。

上記の考え方に基づいた、「②実証機 3 基改善ケース」における収支を図 10 に示す。「①実証機 3 基ケース」から収入の変動はなく、支出のうちの維持管理費が 83 から 55 と 30% 以上改善されるが、依然として赤字となっている。

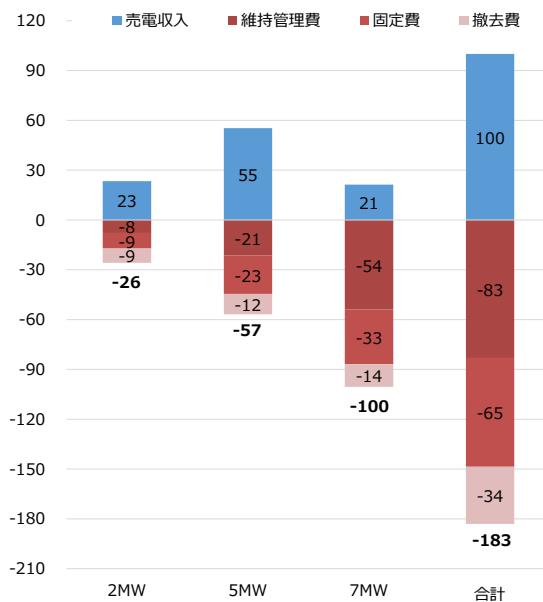


図 9 ①実証機 3 基ケースにおける収支

(数値は「①実証機 3 基ケース」の売電収入を 100 とした場合の指数)

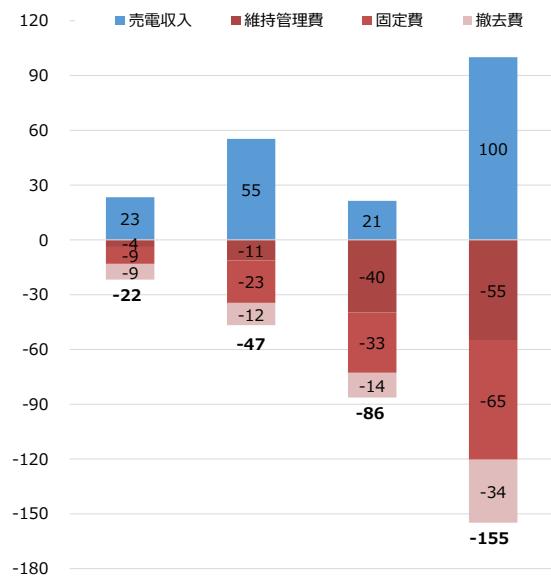


図 10 ②実証機 3 基改善ケースにおける収支

(数値は「①実証機 3 基ケース」の売電収入を 100 とした場合の指数)

※小数点以下を四捨五入しており、支出の各費目の合計が図中の支出の合計と一致しない場合がある。

(3) 実証機 2 基ケース

更なる経済性の改善の方策として、油圧システムの初期不具合等で設置直後から稼働率が低迷し、維持管理費も高額である 7MW 機を撤去した場合の検討を行った。その際、7MW 機の撤去費は、事業性の検討には含めず、別途考慮することを前提条件とした。

「③実証機 2 基ケース」における収支は図 11 のとおりであり、「②実証機 3 基改善ケース」から売電収入が 100 から 79 と 20%程度低減するものの、支出が 155 から 92 と 40%程度低減するため、赤字が 55 から 14 と 75%程度改善した。

更なる収支改善の可能性として、委員会での議論に基づき、以下のように仮定して検討を行った。

- 保険料は、浮体式洋上風力発電における国内・海外の実績が殆どなく、適正な価格が見通せないが、将来的に低減が見込める項目である。ここでは付保の範囲の見直しや競争入札によるコスト低減を実績に基づいて勘案し、20%の低減を仮定した。
- 撤去費は、浮体式洋上風力発電における国内の実績がなく、工法も確立していないため、適正な価格を見通せない。実際に撤去が必要となる将来においては、新たな技術の普及や社会情勢の変化などにより、高い確実性をもってコストの低減が見込める項目である。総括委員会において福島洋上風力コンソーシアムから提案された撤去費は、資本費の 20%程度に相当するが、FIT 制度上の洋上風力の調達価格の前提では、撤去費を資本費の 5%としていることを勘案し、撤去工法の改善や競争入札によるコスト低減を見込み、資本費の 15%に収まると仮定した。
- 5MW 風車の信頼性向上により、2MW 風車と同水準の設備利用率（33.5%）を達成すると仮定した。

上記の仮定に基づく「④実証機 2 基改善ケース」における収支を図 12 に示す。「③実証機 2 基ケース」と比較して、5MW 風車の設備利用率の向上により、売電収入の指数が 79 から 82 に上昇している。支出についても、固定費が 47 から 43 に、撤去費が 26 から 20 に低減したことを受け、全体として 92 から 81 に低減した。結果として、収支が均衡する水準となった。

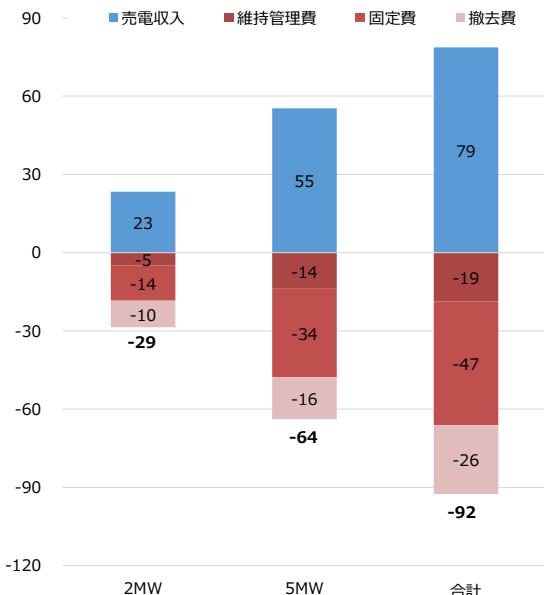


図 11 ③実証機 2 基ケースにおける収支

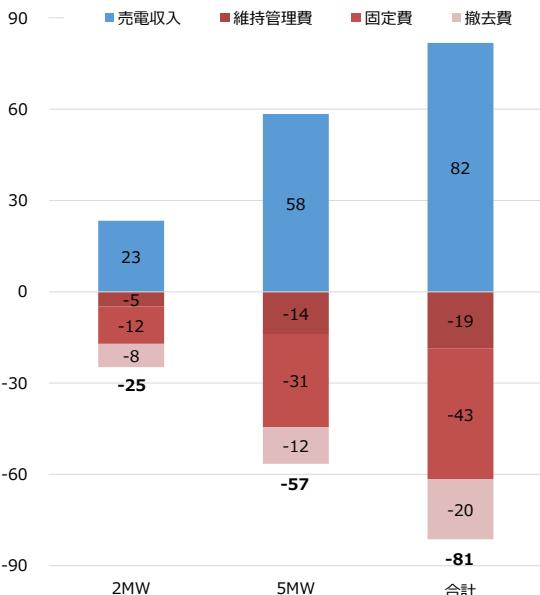


図 12 ④実証機 2 基改善ケースにおける収支

(数値は「①実証機 3 基ケース」の売電収入を 100 とした場合の指数)

※小数点以下を四捨五入しており、支出の各費目の合計が図中の支出の合計と一致しない場合がある。

最後に、各ケースにおける収支の比較を図 13 に示す。「①実証機 3 基ケース」において 83 の赤字であった収支が、洋上変電所用の浮体とケーブルの維持管理費の低減を見込むと赤字は 28 改善して、55 になる。更に、7 MW 機を撤去すると収支は 41 改善して 14 の赤字になり、保険料及び撤去費の低減と 5 MW 風車の設備利用率の向上を見込むと 14 改善し、収支が均衡する。

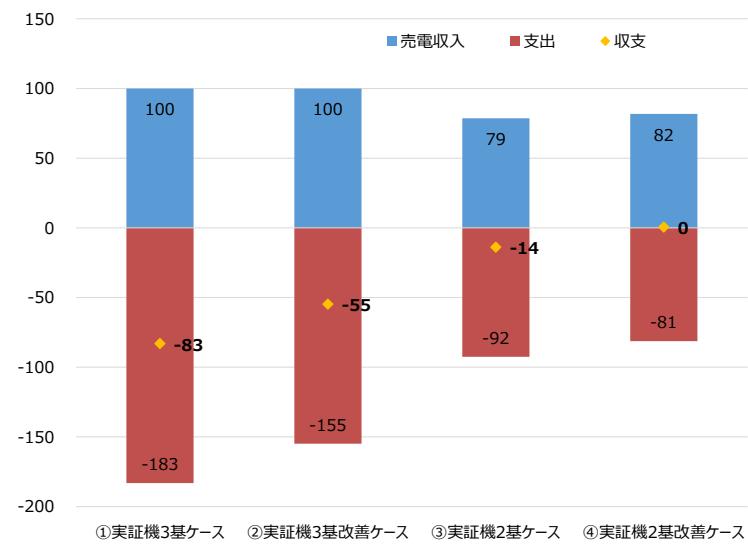


図 13 各ケースにおける収支の比較

(数値は「①実証機 3 基ケース」の売電収入を 100 とした場合の指標)

※小数点第一位を四捨五入しており、売電収入と支出の合計が収支と一致しない場合がある。

総括委員会としては、実証機 2 基（2MW 機及び 5MW 機）の組合せと運用方法やコスト構造の見直しにより、将来的には経済的に自立した運用となることが見込めると評価した。ただし、以下の論点については今後、検討を深めていくことが必要であるとした。

- 保険料と撤去費の低減に関する精度向上
- 傭船料と人件費の運用方法の見直しによる維持管理費低減の可能性

なお、本実証研究事業の送電設備容量である 25MW の範囲内で、7MW 機を撤去し、2MW 機または 5MW 機を増設する場合についても検討を行ったが、増設する風車や浮体等の資本費の低減を前提としており、引き続き精査が必要であるとした。

3.まとめと提言

3.1 まとめ

平成23年度より開始された本実証研究事業では、福島復興のシンボルとして、世界初の複数基の浮体式洋上風力発電の実現のため、実証研究が行なわれてきた。一部の設備においてデータの取得を継続する必要があるが、浮体式洋上風力発電システム全体について、安全性・信頼性・経済性を検証した結果、現状、それらを明らかにするという所期の目的を達成しつつあると判断する。

最後に本実証研究事業の今後のあり方について、総括委員会として以下で提言する。また、本実証研究事業で得られた成果を活かし、浮体式洋上風力発電システムを発展的に運用することについても併せて提言する。

3.2 提言

(1) 発電システム全体への提言

- 経済性の観点では、実証機2基（2MW機及び5MW機）の組合せと運用方法の改善やコスト構造の見直しにより、将来的には自立的な運用となることが見込める。その実現に向けては、実証機の安定稼働と維持管理費（特に運転共通費）の低減が急務であり、併せて、維持管理費への影響が大きい浮体への乗り移り率の改善が必要である。
- 経済性の向上には、地域のニーズや意向を踏まえつつ、洋上変電所の設備容量を最大限活用するなど、新設や撤去も含めた規模の最適化が有効と見込めるが、その検討については、さらなる精査が必要である。

(2) 個別設備に対する提言

- 量産化された商用機を搭載した2MW機は、現状、単基では運転共通費の回収は困難であるが、安定した設備利用率から、現状の売電収入で運転共通費を除いた単年分の維持管理費は賄えている。したがって、5MW機との組合せによる運転共通費をはじめとする維持管理費の更なる低減に向けた取組を継続しつつ、長期間の運転実績の積み重ねによる保険料の低減等、浮体式洋上風力発電の導入を加速する環境づくりの基盤構築の効果も期待し、可能な限り長期間の運転継続が必要である。
- 実証機を搭載した5MW機は、運転期間が1年5ヶ月と短く、設備利用率も上向き始めたところであり、本年度導入したネガティブダンピング制御システムの確立や洋上におけるメンテナンスの最適化、交換部品のデータ蓄積による信頼性向上が期待されることから、実証運転を継続し、十分な運転期間における信頼性の検証と運転実績の積み重ねが必要である。
- 実証機を搭載した7MW機は、現在明らかになっている油圧システムの初期不具合は対処できたものの、同システムの技術的課題が残り、当該実証機による商用運転の実現は困難であり、高額な維持管理費を売電収入で賄うことができない状況にあることから、早急に発電を停止し、撤去の準備を進めるべきである。
- 洋上変電所は、現状の洋上風力発電システム全体を運転していくためには必要不可欠な要素である。しかし、現状の延長線上ではなく、維持管理手法の改善等の中長期的な視点を持って発電システム全体の信頼性の向上を検証することが必要である。

- 送電ケーブルは、実証研究事業において得られた知見を利用して、更なるコスト低減や信頼性向上のため、浮体設計に対する要件、要望を提言として取りまとめ、将来利用できる成果物を作成する必要がある。
- 撤去にあたっては、安全性・経済性を十分に考慮した撤去工法を講じるとともに、撤去費低減につながる浮体設計への要望を取りまとめるべきである。また、撤去費は先行事例に乏しく高止まりしているため、ベンチマークとなる海外の事例を収集し、更なる撤去費の低減策を講じる必要があり、その検討結果は実証事業として位置づけるべきである。
- 経済性について、特にその改善を含めた検討は引き続き実施する必要がある。

最後に、再生可能エネルギーの主力電源化に向けて、導入ポテンシャルの高い浮体式洋上風力発電は、日本にとって重要な位置づけとなり得る。この実証研究事業の経験を踏まえ、浮体式洋上風力発電システムの安全性・信頼性・経済性の更なる向上を図ることにより、将来、福島沖のみならず日本及び海外において浮体式洋上風力発電事業の導入拡大に貢献することを期待したい。