

**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**

**令和3年3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、令和 2 年度をもって運転実証を終えることから、これまで得られた取組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、同コンソーシアムに対して個別にヒアリングを行い、本実証事業の実績、それを踏まえた検証結果をとりまとめたものである。

令和元年度及び令和 2 年度では、平成 30 年度の本委員会の提言を受け、実証研究事業の最終段階として、発電システムの全体の追加的なデータの取得や、さらなるコスト低減の促進、漁業との共存の検討等を実施した。なお、実証研究事業全体の総括は、令和 3 年度にて改めて実施するものとする。

## 開催実績

### 令和元年度

- 第 1 回 令和元年 7 月 4 日
- 第 2 回 令和元年 12 月 4 日
- 第 3 回 令和 2 年 2 月 13 日

### 令和 2 年度

- 第 1 回 令和 2 年 10 月 22 日
- 第 2 回 令和 3 年 2 月 22 日

## 委員一覧 ※役職名は令和 2 年度当時

### ○ 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

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(令和 2 年度※)

原田 文代 株式会社日本政策投資銀行 ストラクチャードファイナンス部長

※令和元年度は、池田 三知子環境エネルギー本部長（当時）が参加

## < 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 .....	3
2.1	総括 .....	5
2.2	風車 .....	10
2.2.1	2MW 風車 .....	10
2.2.2	5MW 風車 .....	20
2.2.3	7MW 風車 .....	30
2.3	浮体 .....	37
2.3.1	2MW 浮体 .....	37
2.3.2	5MW 浮体 .....	45
2.3.3	7MW 浮体 .....	54
2.3.4	洋上変電所浮体.....	63
2.4	洋上変電所 .....	71
2.5	送電ケーブル .....	76
2.6	係留チェーン・鋼材 .....	84
2.7	撤去の検討 .....	91
2.8	発電事業の自立的運用に向けた検討.....	93
2.9	発電設備の運転保守 .....	103
2.10	関係行政機関の調整・地元及び漁業との共存 .....	109
2.11	導入マニュアル .....	116
2.12	国民との科学技術対話.....	119
2.13	研究実施体制 .....	124
2.13.1	プロジェクトインテグレーター .....	124
2.13.2	テクニカルアドバイザー .....	126
2.13.3	委員会運営.....	129
3.	まとめ.....	130
3.1	令和元年度及び令和2年度の総括委員会のまとめ .....	130

## 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洋上に期待が高まっている。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洋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とし、平成 24 年 2 月にスタートした。

実証研究事業の最終年度にあたる平成 30 年度において、福島洋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総括するため、同コンソーシアムとは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、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、福島洋上風力コンソーシアム各者に対し個別ヒアリングを行い、実証研究事業の実績、検証結果に加え、事業化を見据えた本実証研究事業の今後のあり方を提言した。

- 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ィ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。

平成 30 年度は、本実証研究事業における実施項目を 2 つに分けて検証を行った。

### 実施項目 1：浮体式洋上風力発電システムの建造・設置・運転の実証

本項目では、2MW 風車・浮体、5MW 風車・浮体、7MW 風車・浮体、洋上サブステーション・変電設備、送電ケーブル、係留チェーン・鋼材の安全性、信頼性、経済性の検証を行った。また、本実証設備の自立的な運用のあり方も対象とした。

### 実施項目 2：発電設備の運営を含むその他の取組

本項目では、発電設備の運転保守や関係機関との調整・地元及び漁業との共存、施工計画・撤去計画、導入マニュアル、学術研究・国民との科学技術対話に加え、本実証研究事業の推進体制についても併せて検証を行った。

令和元年度及び令和 2 年度事業では、本実証研究事業の最終段階として、以下の 3 つについて検証を行った。

### 実施項目 1：平成 30 年度の提言を踏まえた進捗の確認

本項目では、平成 30 年度の「2MW 風車及び 5MW 風車の 2 基での自立的な運用を目指すべく、更なるコストダウンに向けた実証の継続する」という提言をうけ、発電システムの全体の追加的なデータの取得や、

さらなる維持管理コスト低減の促進、漁業との共存の検討等の福島洋上風力コンソーシアムの取組について、総括委員会を開催して、進捗や成果の確認を行った。

#### 実施項目 2：実証研究事業において得られた技術的な知見の整理

本項目では、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、経済性を明らかにするという点で、平成 30 年度の検証したものも含め、各設備の設計の妥当性を示す、シミュレーションによる解析と実際の挙動を比較した結果等について検証を行った。

#### 実施項目 3：実証研究事業においてコンソーシアムが獲得したノウハウ（学び）の整理

本実証研究事業の最終段階として、将来の浮体式洋上風力発電の導入に向けての課題を明らかにするため、獲得した学び（教訓）について、福島洋上風力コンソーシアムからの報告を受け、検証を行った。

なお、本実証研究事業の成果の総括については、令和 3 年度事業に実施するものとする。

## 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

本実証研究事業の浮体式洋上風力発電システムの概要と稼働実績を表 1 に示す。4 つの浮体に対して、規模の異なる 3 基の風車と変電所を搭載して、発電システムを構成している。

- 2MW 風車・浮体は、セミサブ型の浮体に、商用機水準の 2MW 風車を搭載し、平成 25 年 11 月に運転を開始した。7 年 4 カ月の運転期間のうち、平均稼働率は 88.6%、平均設備利用率は 31.1%となった。
- 5MW 風車・浮体は、アドバンストスパー型の浮体に、風車としては 2 基目となる 5MW 風車を搭載し、平成 29 年 2 月に運転を開始した。4 年 1 カ月の運転期間のうち、平均稼働率は 51.6%、平均設備利用率は 17.4%となった。
- 7MW 風車・浮体は、セミサブ型の浮体に、風車としては 2 基目となる 7MW 風車を搭載し、平成 27 年 12 月に運転を開始した。平成 30 年度の総括委員会の提言を受けて、平成 30 年 8 月に運転を停止した。2 年 8 カ月の運転期間のうち、平均稼働率は 9.2%、平均設備利用率は 1.9%となった。
- 洋上変電所・浮体は、アドバンストスパー型の浮体に、商用機水準の変電設備を搭載し、平成 25 年 11 月に運転を開始した。7 年 4 か月のうち、令和元年度に設備の故障が発生し、3 か月間停止したが、対策を講じて復旧し、平均稼働率は 97.8%となった。

表 1 本実証研究事業のシステムの概要と実証期間中の稼働実績

	2MW 風車・浮体	5MW 風車・浮体	7MW 風車・浮体	洋上変電所・浮体
<b>風車諸元</b>				
開発・製造業者	日立製作所	日立製作所	三菱重工業	日立製作所
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	—
ロータ位置	ダウンウィンド	ダウンウィンド	アップウィンド	—
ロータ直径	80m	126m	167m	—
ハブ高	66.2m	86.4m	105m	—
ナセル重量 (ハブ・ブレード部分を含む)	130 t	352 t	586t	—
ブレード長さ	39m	62m	81.5m	10m (変圧器の最大幅)
運転開始	平成 25 年 11 月	平成 29 年 2 月	平成 27 年 12 月	平成 25 年 11 月
運転期間 (令和 3 年 3 月時点)	7 年 4 ヶ月	4 年 1 ヶ月	2 年 8 ヶ月	7 年 4 ヶ月
運転期間中の稼働率	88.6%	51.6%	9.2%	97.8%
運転期間中の 設備利用率	31.1%	17.4%	1.9%	—
落雷実績	2 回	0 回	3 回	0 回 (建屋内設置)
<b>浮体諸元</b>				
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	A 字型セミサブ浮体	アドバンストスパー浮体

	2MW 風車・浮体	5MW 風車・浮体	7MW 風車・浮体	洋上変電所・浮体
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
浮体深さ	32m	36m	32m	71m
計画喫水	16m	33m	17m	50m
運転期間中の稼働率 <sup>1</sup>	99.8%	98.9%	86.1%	100%
浮体排水量	5,287トン	30,576トン	約 26,000トン	12,966トン
係留索本数	6本	6本	8本	4本
アクセス率 <sup>2</sup> (令和元年度、2年度)	87.7%	86.9%	94.9%	90.1%
曳航ルートと曳航日数	市原～小名浜 (3日)	南本牧ふ頭～福島沖 (3日)	長崎港～小名浜港 (12日)	淡路島洲本～福島沖 (8日)
係留の敷設日数	38日	12日	16日	43日
接岸の可否	可能	不可能	可能	不可能

コンソーシアム各社からの報告をもとに作成

実証研究事業の最終段階として、平成 30 年度の総括委員会の提言の進捗確認、実証研究事業全体を通じて得られた技術的な知見、事業化にあたり明らかになった課題認識と教訓の整理、風車の停止要因の分析結果にもとづいて、自立的な運用に向けた収支について、試算を行った。

<sup>1</sup> 浮体の稼働率 = 1 - (浮体が原因で風車の運転が停止した時間 / (24 時間 × 月間日数))

<sup>2</sup> アクセス率 = (浮体へのアクセス成功回数) / (浮体へのアクセスを試みて出船回数)

## 2.1 総括

### (1) 平成 30 年度の総括委員会の提言の進捗確認

平成 30 年度に提言した内容を受けて、令和元年度及び令和 2 年度の実証研究事業にて、実施した成果についてフォローアップを行った。令和 3 年 1 月時点において、福島洋上風力コンソーシアムからの報告内容により、令和 2 年度時点における進捗の確認の結果を表 2 に示す。

表 2 平成 30 年度総括委員会の提言に対する進捗状況の確認結果

設備等	平成 30 年度総括委員会の提言	令和 2 年度における進捗の確認
2MW 風車浮体	更なる維持管理費の低減に向けた取り組みを継続しつつ、長期の運転実績の積み重ねによる保険料の低減等、導入を加速する環境づくりの基盤構築としても運転の継続が必要。	運転を継続してデータの取得を行った。維持管理費の低減に向けた方策として、Web カメラの利用や点検項目の削減を提案した。
5MW 風車浮体	本年度導入した制御システムの検証、稼働データの長期取得、メンテナンス最適化のため、十分な運転期間における実証の継続が必要。	浮体の動揺に起因するピッチシステムの不具合など、開発の初期段階の不具合の対応を行いながら、運転を継続してデータの取得を行った。また、定期点検の回数削減やピッチ情報の遠隔取得などコスト低減の方策について実効性を確認できた。
7MW 風車浮体	油圧システムの課題が残り、当該実証機による商用運転の実現は困難である。維持管理費も高額なことから、早急に発電を停止し、撤去の準備を進めるべき。	令和元年度から撤去に向けた準備を行い、令和 2 年度にて撤去作業を完了させた。
洋上変電所	変電所を継続して運転し、中長期的な視点で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。	令和元年度に初めて不具合が発生し、3 か月間停止したが、原因を特定し、再発防止策を講じたことにより、その後は安定稼働を続けている。
ケーブル	得られた知見からケーブルの更なるコスト低減や信頼性向上のため、浮体設計への要望を提言するべき。	令和元年度実施したケーブルの恒久対策工事の効果を検証したところ、ライザーケーブルの沈降が抑えられており、その有効性が確認できた。
撤去の検討	安全性・経済性を十分に考慮した撤去工法を講じることと、撤去費の低減につながる浮体設計への要望を提言するべき。さらに、ベンチマークとなる海外事例を収集し、さらなる撤去費の低減策を講じる必要がある。	(令和 3 年度実証で検証)

個別の進捗の確認を踏まえ、平成 30 年度の総括委員会の提言については、令和元年度及び令和 2 年度の実証事業において、確実に実施できていることを確認した。

(2) 実証研究事業を通して得られた技術的な知見や教訓の整理の検証

平成 29 年 2 月の 5MW 風車の運転開始から、約 4 年間、国内初の浮体式洋上風力発電システムの運転をしてきている。令和 2 年度にて、総括委員会としては、福島洋上風力コンソーシアムに対して、これまでの事業内容を振り返り、本実証研究事業を通じて明らかとなった浮体式洋上風力発電の事業化に向けた課題と、得られた教訓を整理するよう要請を行った。福島洋上風力コンソーシアムからの報告の概要を表 3 に整理した。

表 3 実証事業を通じて確認した学びの整理（総括）

設備	運転維持の観点から設計運用に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
2MW 風車	波が高い時のアクセスが難しい	有義波高 1.5m を超えると、ほぼアクセスできない。特に冬の期間は厳しい。トラブル発生時にすぐに対応できない。停止期間を最小限にするには、2-3m の波でもアクセスできるようにしたい。	高い波でもアクセスできる装置や船の開発が必要である。欧州ではアンペルマンという装置があるが、大きな船にしか搭載できない。
2MW 浮体	今回は、単機の実証事業ということもあり、開発サイクルを最適化していないため、構造設計に人的なリソースと工数がかかった。	船舶の設計経験のある専門人材を加えても、シミュレーションや実験など開発・設計サイクルを効率的に運用することができない。	事業・商用化を前提とした場合、より安く建造できる浮体、係留系を設計するため、開発・設計サイクルを早く回すための設計方法の標準化を進める。
5MW 風車	波が高い時のアクセスが難しい	有義波高 1.3m を超えると、ほぼアクセスできない。特に冬の期間は厳しい。トラブル発生時にすぐに対応できない。停止期間を最小限にするには、2-3m の波でもアクセスできるようにしたい。	高い波でもアクセスできる装置や船の開発が必要である。欧州ではアンペルマンという装置があるが、大きな船にしか搭載できない。
5MW 浮体	当初計画と異なる風車を搭載することになり、船体構造が大きくなった。	浮体の大きさに比例する鋼材量、塗料、アノード等の防錆材も過大となった。	事業者、風車メーカーとのコミュニケーションを密にして計画を随時見直す。
7MW 風車	浮体式風車のタワー基部モーメント荷重は、着床式風車に比べ数倍大きくなる。7MW 風車のタワー基部の構造は、直径 10m x 板厚 80mm となり、厚板曲げ加工が可能な製造設備が限定され、タワー製造組立における横持移動が多く効率的ではなかった。 また 7MW 風車の拠点港での組立には、世界に数台しかない大型クレーン重機を必要とし、その調達制約があり経済的ではなかった。	経済的な浮体式風車とするために、風車の大型化が重要であるが、風車組立には巨大な重機を必要とし、大容積のタワーでは製造組立までの横持を極力減らす必要がある。現在の市場で、着床式風車が 10MW 超級へシフトしている状況下、将来の浮体式風車の仕様に見合った拠点港での風車組立が可能な重機、大型タワー製造のインフラ整備が必要である。または、将来のインフラに見合った浮体式風車の仕様を見極める必要がある。	近い将来、浮体式洋上風車が相当数設置されると予想されるが、経済的な設備とするためには、風車仕様・タワー基部の仕様と整備可能な組立重機・製造インフラのバランスを見極めながら、最適点を見出すことが重要である。
7MW 浮体	浮体曳航時に台風遭遇、駿河湾に避航した	大型浮体を長距離にわたり曳航することを避けるために、現地建造に	ふくしま新風のボックス構造を活用した浮体形式は、量産に適した設計

設備	運転維持の観点から設計運用に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
		適した構造様式とする	思想であり、さらなる改善を行うことで現地建造も可能となる
洋上変電所	常時発生する動揺による機器の故障	遮断器や変圧器が故障した場合洋上での交換が不可能なため陸地までの輸送が必要。かつ代替品の準備に短い製品で6か月以上必要のため1年以上の設備停止となり経済性に多大な影響がある。	実際の動揺を想定した振動試験、傾き試験を実施した上で運用を行った結果懸念されていた故障およびその傾向はみられず振動、傾き試験が効果あることを確認した
洋上変電所浮体	開発時点の変電所の許容加速度が実際より小さかった。	浮体の大きさに比例する鋼材量、塗料、アノード等の防錆材も過大となった。	変電設備メーカーとのコミュニケーション、情報共有、設計時からの機器メーカーの参加による最適設計が必要
送電ケーブル	海洋生物の付着によるケーブルの沈下	実証海域でのデータがなく、欧州での事例をベースに設計したため、ライザーケーブルを浮上させるために追加コストが発生した。	各海域で実際にブイ等によって海洋生物の付着状況を実測し、設計に反映させることで、最適な浮力設計を行うことが可能である。
係留チェーン・鋼材	浮体式風車は沖合に設置され、多数リンクからなる係留チェーンによって多点係留されていること、浮体上のスペースが限られていることを鑑みると、点検作業自体のハードルが高い。また、ウィンドファームは多数の風車で構成されることから、点検・保守の頻度を低減、簡素化する取組が必須である。	点検保守頻度を減らすには耐久性の信頼を向上させる必要がある。実物大の試験結果、腐食摩耗、疲労、及び相互影響について科学的根拠を示し、認証基準に反映させることが必要である。そのためには推定精度の高い摩耗量・疲労推定法の確立が必要である。	実物大の R3S 鋼材片を用いた疲労試験(RCA)・摩耗試験により、比較的安価に疲労・摩耗特性と既往基準との整合を確認できた。更に新しい素材に対しても適用できる疲労・摩耗推定手法を構築できた。 今後、実証実験で使用したチェーン摩耗量の計測結果と構築した推定手法を照合することで摩耗推定手法を確立することができる。 特にフェアリーダー部、海底着底部について摩耗分担を精査しておくことが安全確保に重要である。一方、それ以外の大多数のリンクではほとんど摩耗が生じていない算定結果であり、確認できれば点検・保守を行う対象リンクを限定し、点検・保守を簡素化できる可能性がある。
施工	小名浜港にて、浮体上に風車を据え付けるため、既存のインフラ設備を用いて浮体を岸壁に係留する計画としたところ、非常に多くの係留索が必要となり、他船の港湾利用に支障が生じたため、着底せざるを得なかった。	着底ができるように浮体底面の強度をあげるような構造を考えること、また、港湾の底面の凹凸を整えるための工夫が必要である。本事業では捨石や古タイヤを積み上げてマウンドを作った。	着床式のように設計を終えてから施工計画を検討するという流れではなく、設計の初期段階から施工計画のコンセプトを織り込む必要がある。

設備	運転維持の観点から設計運用に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
プロジェクトインテグレーター	本実証においては主要利害関係者の整理を行い、概ね適切な対応が出来たが、当初網羅しきれていない団体もあり、調整に時間を要することとなった。	調整期間が長期化することによる事業スケジュールの遅延が発生する可能性がある。	発電事業を行う上で、地元利害関係者の数が増える傾向にある為、漁業関係者等を含む利害関係者との調整にあたっては、当該利害関係者と調整した上で、先方窓口の一本化が肝要となる。また、複数の法令が関係しステークホルダー整理が困難であるため、国主導の制度整理が肝要。
テクニカルアドバイザー	商用風車でないプロトタイプを本実証事業で採用した結果、稼働率の低下が発生した。	浮体式洋上風力発電に搭載する風車は大型機が前提となるが、本実証の開始段階で主流となる風車の定格出力は2MW程度であった。計画段階では当該機のみが選択候補となり、実証機として採用したが、大規模な損壊の可能性が否定できなかったため、ハーフロードの運転が続いた。	プロトタイプを採用した場合、不具合等の発生要因が複雑化するため、複数の技術実証は同時並行して進めるべきでは無い。一方で、大型風車を採用することによって、浮体側の実証は十分に実施できた。

総括委員会としては、設計、施工、維持管理の各段階において、得られた技術的な知見や、教訓が今後の浮体式洋上風力発電の導入に向けた重要な示唆であると結論づけた。そして、本報告書における設備及び各企業の役割ごとに、得られた技術的な知見及び教訓を記載することとした。

### (3) 自立的な運用を想定した収支の分析

平成 30 年度の総括委員会の提言では、2MW 風車及び 5MW 風車の 2 基での自立的な運用を目指すという方針であった。この提言を受けて、福島洋上風力コンソーシアムでは、令和元年度及び令和 2 年度において、前提条件を設定して、事業の収支計画について分析を行った。

総括委員会としては、福島洋上風力コンソーシアムから報告された収支の分析は、前提条件に不確実性が多く、実証研究事業の特性からプロジェクトコストとして計上するはずの資本費を加味しないなど、妥当性の判断が難しいとした。他方において、本実証研究事業の趣旨である技術実証の点から、2MW 及び 5MW の風車の停止要因を分析し、稼働率改善の見通しを定量的に示すことを要請し、以下の内容について確認を行った。これをもって、収支の分析についての検証は行わないこととした。

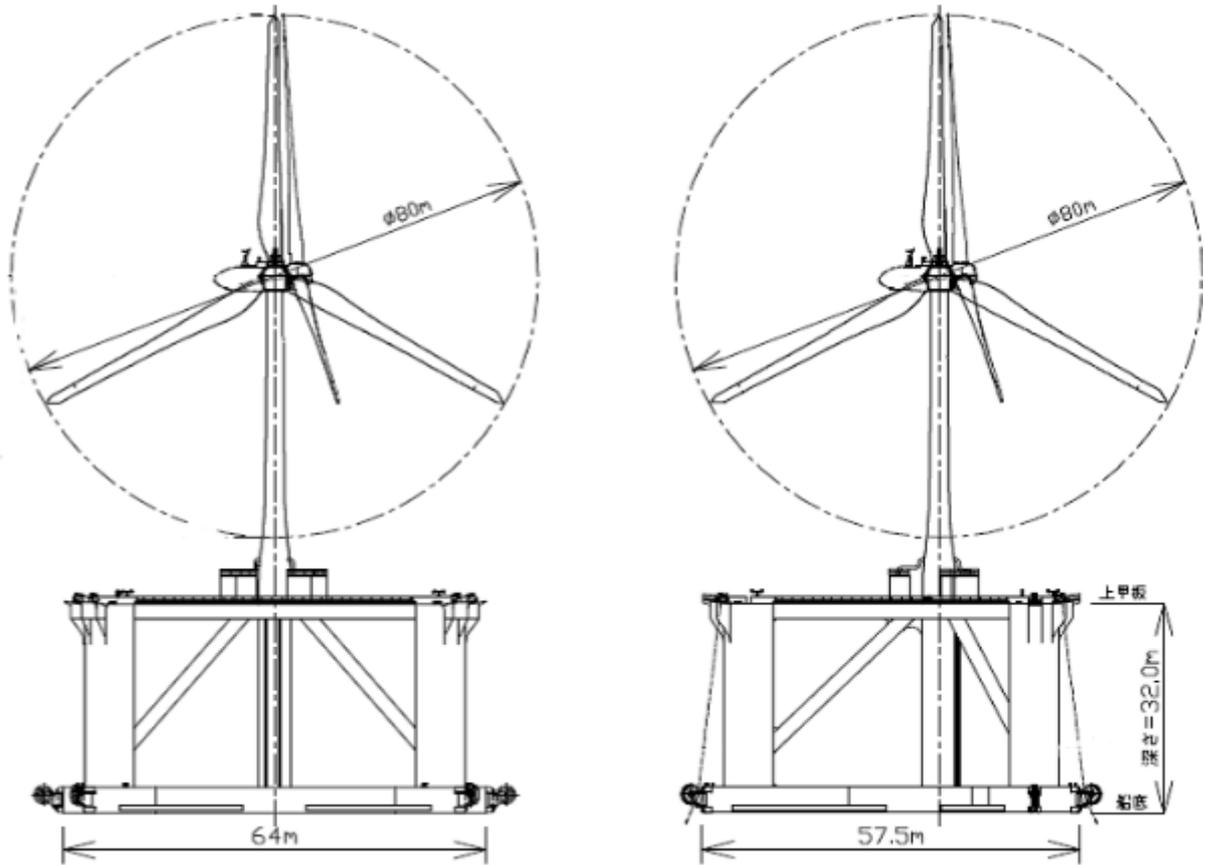
- 2MW 風車の停止時間のうち、約 50%が変電設備の故障や一般送配電事業者からの要請による計画停止などの外部要因であり、風車の不具合に起因するものは、28%であったこと。その原因は、浮体式固有の自然環境に由来するものはなく、初期不具合は 9%程度であり、稼働率は 86.3%から 93.4%まで向上することが示唆されたこと。
- 5MW 風車は、風車の不具合に起因するものは 75%あり、そのうち、浮体式洋上風力発電固有で発生する停止が 47%であった。初期不具合に該当するものが 21%であり、この不具合と外部要因の改善が期待できれば、稼働率は、57.6%から 80%まで向上することが示唆されたこと。

## 2.2 風車

### 2.2.1 2MW 風車

#### (1) 平成 30 年度事業における総括委員会の内容

本実証研究事業にて設置した 2MW 風車の概要図を図 1 に示す。



日立製作所にて作成

図 1 2MW 風車の概要図

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、ロータ直径は 80m、ハブ高さは 66.2m のダウンウインド型風車である。ブレード長さは 39m、ナセル重量はハブ、ブレードを含み 130t になる。令和 3 年 3 月末時点で運転期間は 7 年 5 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 8 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、浮体の動揺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%を達成していることを平成 30 年度の総括委員会で確認している。

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 81.5%（令和 2 年度実績値）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、備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) 令和元年度及び令和 2 年度における総括委員会の内容

### ①進捗の確認

福島洋上風力コンソーシアムでは、平成 30 年度の総括委員会の提言を踏まえ、更なる維持管理費の低減に向けた取り組みを行った。維持管理費の低減に向けた取り組みを表 4 に、令和元年度及び令和 2 年度の事業期間中において計画外に生じた維持管理項目を表 5 に、計画時点を 100 とした時の維持管理費の変動要因を図 2 に示す。

2MW 風車の維持管理を担当している日立製作所が報告した内容は以下のとおりである。

- 計画外の維持管理の項目（表 5）は、変電所の長期間停止に起因する追加的なメンテナンスであり、浮体式固有のもの、陸上設備でも発生するものであったこと。
- 令和元年度の維持管理費は計画時点を 100 とすると 98 となり、これは計画外で発生した維持管理費が計画値に含まれている予備費を下回ったためであること。
- 令和 2 年度の維持管理費は、計画時点を 100 とすると 88 となり、これは令和元年度同様に、計画外で発生した維持管理費が計画値に含まれている予備費を下回ったためであること。

表 4 維持管理コスト低減に資する取組

番号	年度	項目	検証のステイタス <sup>3</sup>	評価 <sup>4</sup>
1	R1	ボルトの増し締め効率化	机上検討	△
2	R1	Web カメラ活用	机上検討	△
3	R1	常駐員による定期点検	机上検討	△
4	R1	巡視による点検項目削減	机上検討	△

<sup>3</sup> 検証のステイタスは、以下の 3 つの区分にて整理する。

机上検討：コスト低減が理論上可能であるもの

スケールモデル：水槽試験、工場内試験等、スケールモデルを用いて検証を終えているもの

実海域：福島沖の実証設備にて検証が確認できているもの

<sup>4</sup> 評価については、以下の 2 つの区分にて整理する。

○：効果が確認できている

△：詳細な分析・検証が必要なもの

表 5 計画外に生じた維持管理項目

番号	年度	項目	原因 <sup>5</sup>	実施した対策/検討される対策案	要因 <sup>6</sup>
1	R1	遮断機盤内 UPS 枯渇	陸上	遮断器盤内 UPS バイパス回路を経由せず直接電源接続とする応急対策をし、バッテリー入荷後に交換を行った。 電源供給が長期停止となると、風車側の UPS も電力が枯渇することは避けられない。対策案として、変電所側の二重化が洋上において有効と考えられる。また、現地へのアクセス率を高める方策が必要となり、浮体形状や、より安全にアクセスできる船から浮体への昇降の工夫が必要となる。	クラス B
2	R1	増速機フィルタ目詰まり	陸上	増速機フィルタの交換及び下部受け皿清掃を実施及びオイルの成分を分析し、オイル自体に問題ないことを確認した。対策案として、長期停止後は増速機フィルタのエア抜き対策実施とオイル成分の定期検査による増速機故障の予兆を判断すること。	クラス B
3	R2	ナセル下部漏油センサ感知	陸上	水は感知せず、油のみを感知するセンサへ交換を実施した（誤動作が無い事を設置時に確認）	クラス B

<sup>5</sup> 原因の項目は、浮体式固有、洋上一般、陸上、共通の4つの区分で整理することとし、その定義は以下のとおり。

浮体式固有：浮体式洋上風力発電設備であるために発生

洋上一般：着床式を含め洋上風力発電設備で一般的に発生

陸上：陸上風車を含む一般的な風力発電設備で発生

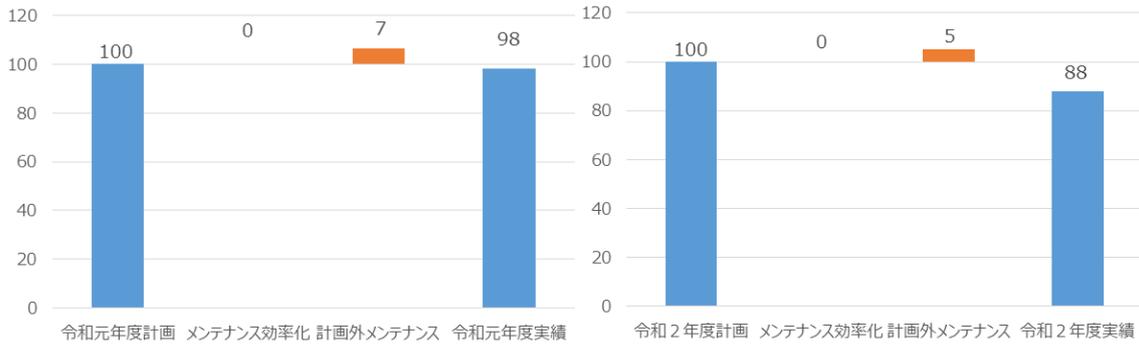
共通：上記での分類が困難であるもの

<sup>6</sup> 要員の項目は、不具合の発生要因を、クラス A、クラス B、クラス C の3つの区分で整理し、その定義は以下のとおり。

クラス A：導入初期に発生しうる（設計時点に対応すべきだったもの）

クラス B：成熟しても起こりうる（運用で改善すべきもの）

クラス C：共通（クラス A および B の切り分けが難しいものであり、運用で改善すべきもの）



日立製作所からの報告をもとに作成

図 2 計画時点を 100 とした時の維持管理費の変動要因（左:令和元年度、右:令和 2 年度）

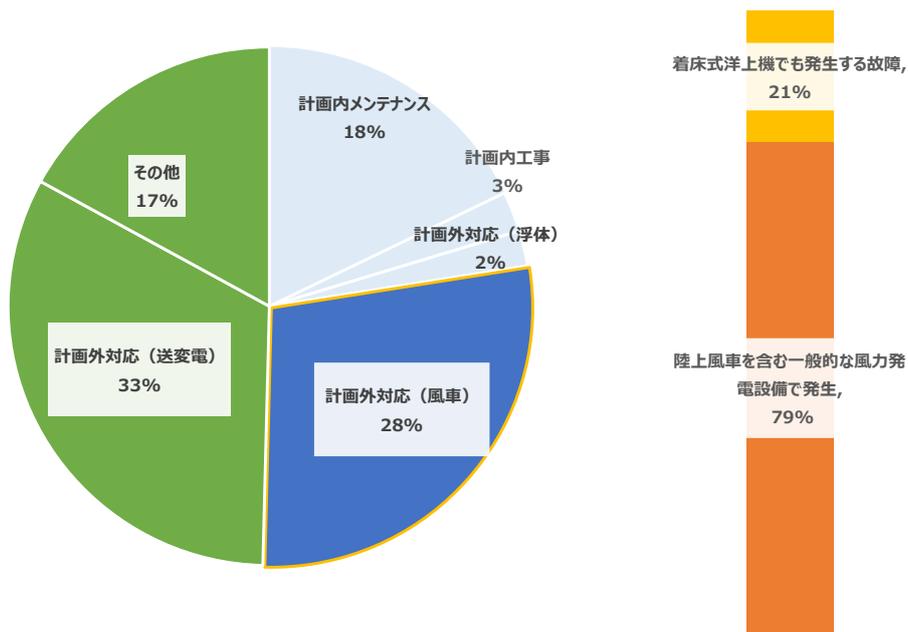
年度計画：当該年度の定期点検費及び想定した不具合費の合計  
 メンテナンス効率化：本実証で検証されたコスト削減費  
 計画外メンテナンス：計画時に想定していた以外の不具合対応費  
 年度実績：当該年度の定期点検費用及び不具合対応費の合計

平成 29 年度から令和元年度における、2 MW 風車の停止原因及び分析結果について、日立製作所からの報告は以下のとおりである。

- 2MW 風車の停止時間の内訳について、図 3 に示す。これによると、風車そのものに起因する停止が 28%、一般送配電事業者による停止事由や洋上変電による外部停止要因が 50%を占めている。
- 上記停止事由のうち、風車そのものに起因する停止原因の内訳について詳細な分析を行った。具体例を図 3 に示す。これによると、陸上風車で発生しうる停止が 79%、洋上風力発電（着床式を含む）で発生しうる停止が 21%となった。この停止要因について、習熟度別に発生する故障を分類したところ、風車に起因する停止のうち、91%が成熟しても発生する故障となり、風車の初期不良に伴う停止は 9%となった。
- また、2MW 風車の総停止時間の作業区分のうち、浮体アクセスの計画時における荒天待機による停止が全体の 50%を占め、停止時間の長期化への影響が大きいことが明らかとなった。（図 4）

日立製作所からの報告を受け、総括委員会として 2MW 風車についての評価を以下のとおり行った。

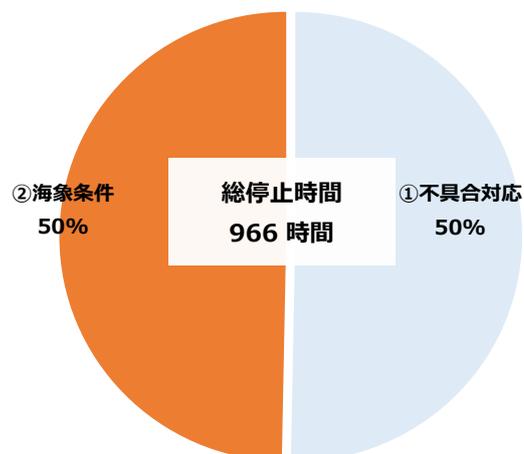
- 2MW 風車に関しては、浮体式固有の停止要因がなかったこと、停止要因のほとんどが「成熟しても発生する停止項目」となっていることより、風車そのものの習熟度が浮体式洋上風力発電においても、高い水準であることが確認された。



	導入初期に発生しうる故障 (クラスA)	成熟しても起こりうる故障 (クラスB)	共通 (クラスC)
陸上	ナセル制御盤の通信異常	・SCADAサーバー故障 (UPS枯渇) ・発電機エンコーダ故障 ・増速機フィルタ目詰まり	—
洋上風力一般	—	・ナセルカバー油漏れ検出 (暴風雨でナセル内侵入した水を油と誤検出)	—
浮体固有	—	—	—
共通	—	—	—

日立製作所からの報告をもとに作成

図 3 2MW 風車の停止要因の分析 (平成 29 年度～令和元年度)



日立製作所からの報告をもとに作成

図 4 2MW 風車の総停止時間における作業区分の内訳 (平成 29 年度～令和元年度)

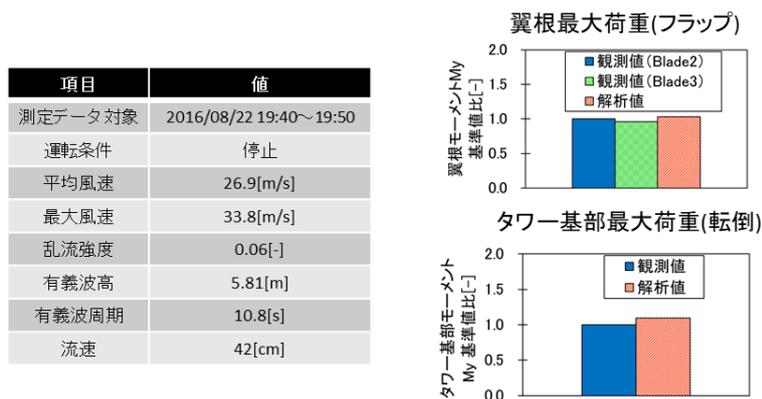
## ②技術的な知見の整理

実証事業を通じた設備の安全性の検証について、以下の結果が得られた。

- 平成 28 年の台風接近時におけるタワー・ブレードへの最大荷重を実測値・解析値で比較した結果、実測値と解析値は良好に一致し、且つ解析結果が安全側であることが確認できたことから、設計の妥当性が検証できた。(図 5)
- 20 年間のタワーにおける損傷度について、実証事業で得られた気象・海象データを用い、数値解析を行った解析値と、実証機の動揺や歪ケージのデータをベースとした測定値を比較・検証した結果、タワーの各セクションにおいて解析値は安全側の評価となることを確認した。(図 6) また、タワーの損傷度をもとにした疲労寿命について、実測値から換算した結果、タワー部の疲労寿命は 708 年となり、設計寿命を十分に満足することが分かった。

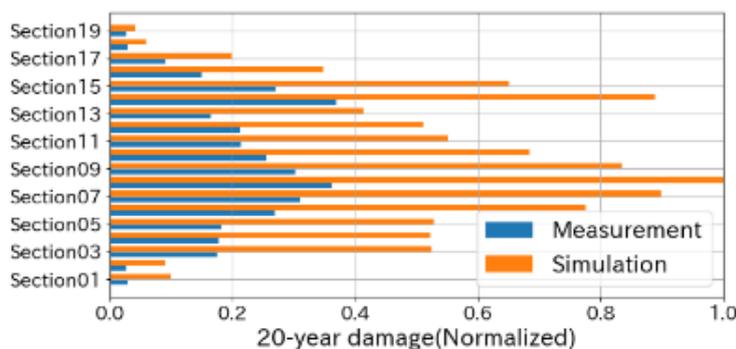
実証事業を通して得られた実績について、以下の結果が得られた。

- 図 7 に 2MW 風車の風速及び出力の実測データ及びビン平均風速のデータを示す。風速については、洋上変電所における風況観測データをもとにしてプロットしたものを示している。



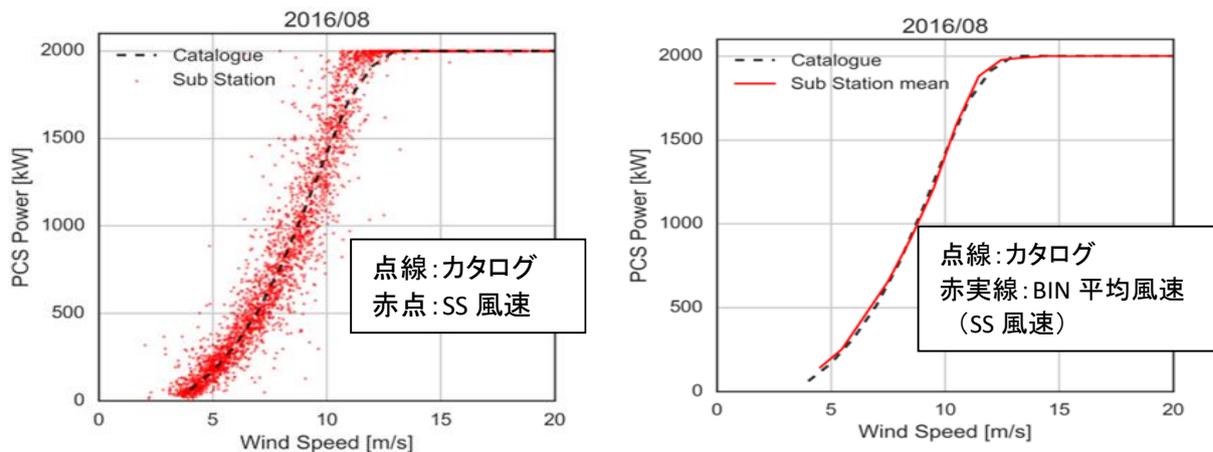
平成 29 年度福島沖での浮体式洋上風力発電システムの実証研究事業報告書 概要版より抜粋

図 5 2MW 風車のタワー・ブレード強度の比較 (観測値・実績値)



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 概要版より抜粋

図 6 2MW 浮体のタワー損傷度の解析データ



日立製作所にて作成

図 7 2MW 風車の出力実測結果

③課題認識における教訓（学びの整理）

これまでの実証研究事業を通じて確認した学びについて、日立製作所から表 6 のとおり報告を受けた。

表 6 実証事業を通じて確認した学びの整理

段階	運転維持の観点から設計に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
全般	波が高い時のアクセスが難しい	有義波高 1.5m を超えると、ほぼアクセスできない。特に冬の期間は厳しい。トラブル発生時にすぐに対応できない。停止期間を最小限にするには、2-3m の波でもアクセスできるようにしたい。	高い波でもアクセスできる装置や船の開発が必要である。欧州ではアンペルマン <sup>7</sup> という装置があるが、大きな船にしか搭載できない。
	安全教育が必要	海外では GWO <sup>8</sup> (Global Wind Organisation)の安全教育を受講していない人は CTV <sup>9</sup> (Crew Transfer Vessel) にすら乗れない。このプロジェクトにおいてはこうした安全に関わる取り決めやルール化が不十分であった。乗り移りの際に落下や挟み込みの危険を伴う。	こうした教育訓練を義務化しておくべきである。
	落下防止の安全ブロックが必要	浮体の梯子は安全ブロック（リール式の落下防止装置）がない。船の世界ではそうしたものをつける習慣が	国が主導して、洋上風車の安全ルールを制定すべきである。

<sup>7</sup> アクセス船から浮体風車に人が安全に乗り移れることを目的とした装置

<sup>8</sup> 欧州の風力発電設備所有者や風力タービンメーカーから構成される非営利組織を指す。風力発電業界における安全な作業環境の実現を支援する狙いで設立。GWO 規格は、風力発電業界における基礎安全訓練の要求事項について規定している

<sup>9</sup> 洋上風力発電アクセス船を指す。

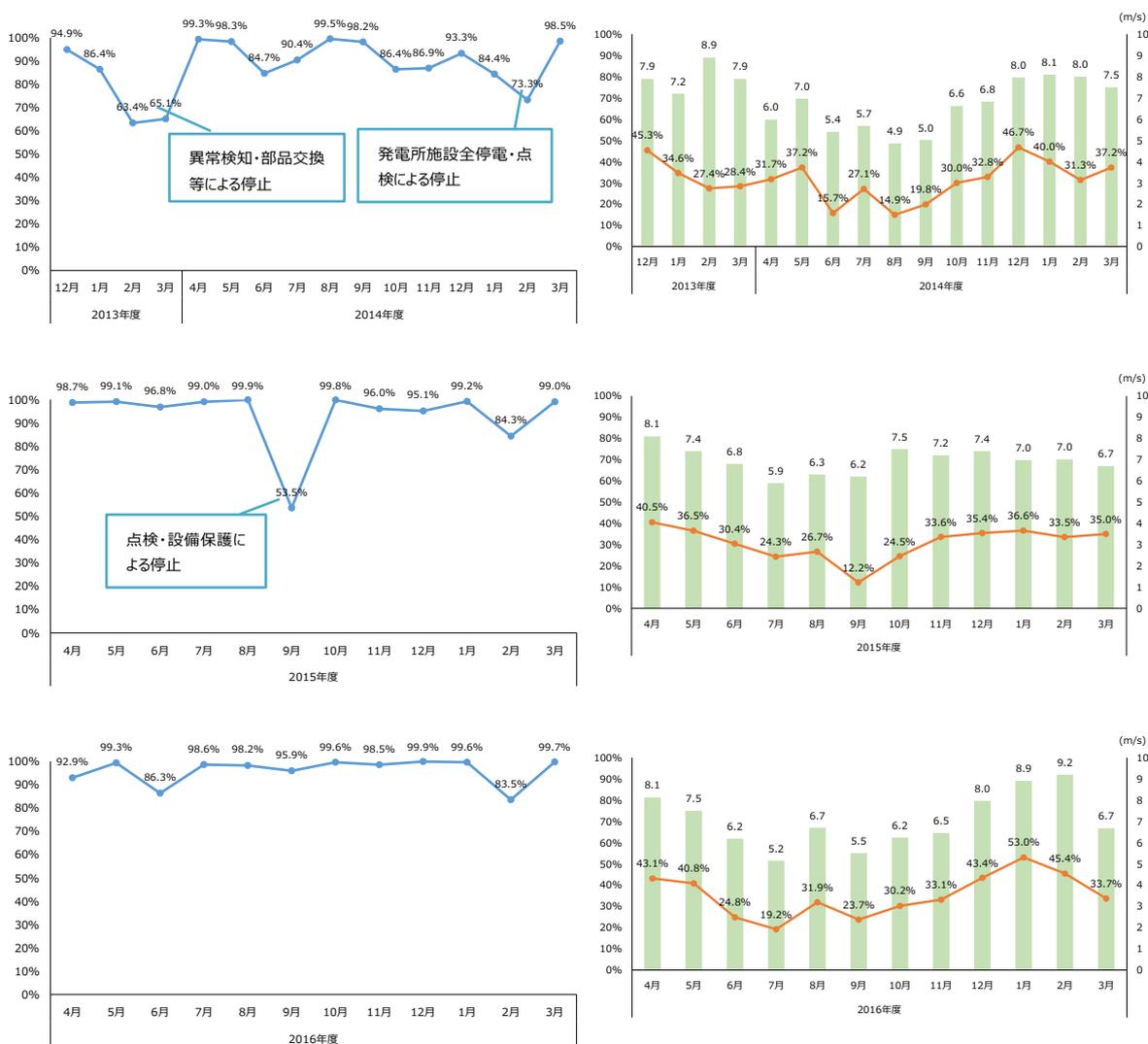
段階	運転維持の観点から設計に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
		ないからかと思うが、風車の世界の常識からは乖離しているようである。	
	CTVの航行時間が長時間化した。	小名浜港からは1.5時間、久ノ浜港からは40分であるため、もっと近い港を確保すべきであった。	サイトにより近い港の確保が燃料費の削減や緊急対応もしやすくなる観点から重要である。
設計段階	浮体と風車の連成解析の検討が必要である	Bladedの連成解析モデルを用いたチューニングを複数回実施した。	①連成解析を行う前に、風車と浮体メーカーと一緒に浮体と風車を再現した3次元FEMモデルを作成し、固有振動数を厳密に求める。 ②浮体と風車の連成解析は解析ケースが少なく必要に応じて実機実測とのモデルのチューニングを実施する。
	浮体風車のタワー強化が必要	浮体風車は浮体特有の振動により、陸上風車に比較してタワーの曲げモーメントが大きい。	陸上機や着床機に比べ、浮体風車のタワーは振動及び角度成分の荷重が大きいので、入り口の補強を含むタワーの強化が必要である事がわかった。
	ヘリデッキの必要性の検討	O&Mの運用または緊急時のレスキュー用のヘリデッキがない。	法令の整備が急務であると同時にヘリ業者の準備が必要である。
	電気機器のコンテナへの収納の検討	不具合を見込み電気機器はすべてコンテナに収納する設計としたが、配線が複雑になるデメリットがあった。	機器の信頼性は実証されたので、今後はタワー内配置でも問題ないと考える。
施工段階	施工場所の検討が必要	2MWはドックで風車組立をし、小名浜港で試運転の多くを実施することができたので、洋上試験は最小限にすることができた。小名浜港で高圧電源をとれたことで試運転が可能となった。	ドックまたは埠頭にて風車の搭載とほとんどの試運転を完了してから現地に運ぶべきである。
	施工期間の短縮化	ドックでの船用大型クレーン使用については、前もった計画日程通りでなければならず、風の影響等で作業ができないで延期された場合でも使用不可となるリスクがあった。	ドックでの組立が望ましいが、クレーンについては代替手段も検討しておく必要がある。
運転・維持段階	浮体機の大物部品交換が難しい	浮体機はSEP <sup>10</sup> × <sup>4</sup> が使えない事から大物部品交換は困難となり長期停止化してしまう。	浮体を港に曳航して建設時と同じようにナセル他を交換する事になるため、あらかじめ事業リスクとして考えておく必要がある。落雷等によるブレード破損が少ないブレード設計を選択するのも必要。

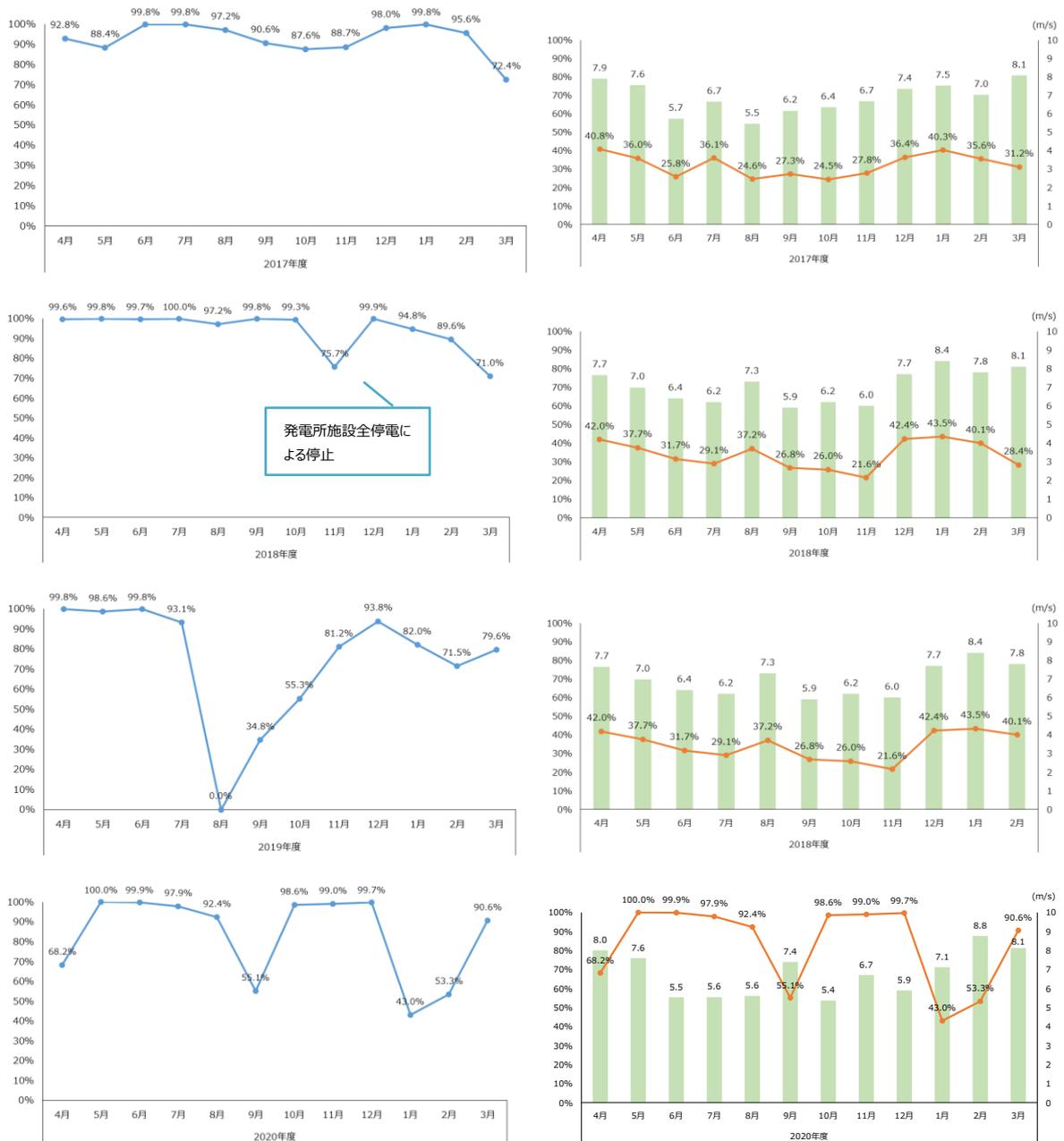
<sup>10</sup> 自己昇降式作業台船

段階	運転維持の観点から設計に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
	浮体機との通信システムが不安定である。	浮体機は港湾からの距離があり、無線による作業者との連絡や、Webカメラ、各種センサのデータ通信は困難であった。	光通信ケーブルによるデータ通信のシステム設計が必要であることがわかった。

### (3) 2MW 風車の設備利用率・稼働率のトレンド

2013年度から設置している2MW風車の設備利用率と稼働率の実績の推移を図8に示す。ただし、設備利用率については、発電端ベースであり、一般送配電事業者からの計画停止など、風車の故障以外に起因する停止時間も含まれていることに留意する必要がある。





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

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

丸紅からの報告をもとに作成

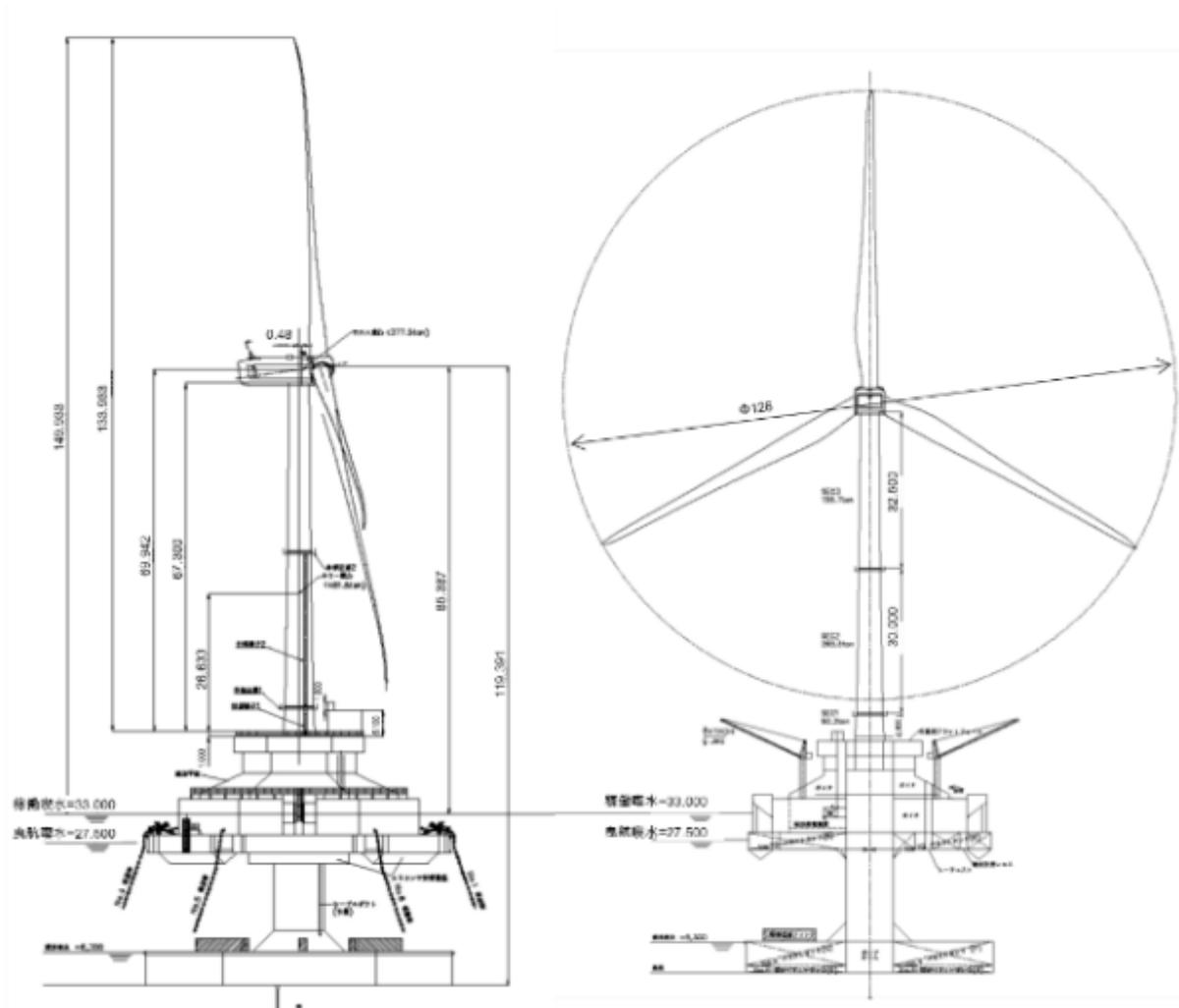
図 8 2MW 風車の稼働率・設備利用率 (緑の棒グラフは平均風速)

令和 2 年 4 月～令和 3 年 3 月までの直近 1 年間の稼働率と設備利用率は、それぞれ 83.1%、27.4%である。ただし、本発電設備に起因しない要因（浮体設備や送変電設備の影響）で停止した時間を除いた場合は、それぞれ 94.2%、31.5%である。

## 2.2.2 5MW 風車

### (1) 平成 30 年度事業における総括委員会の内容

本実証研究事業にて設置した 5MW 風車の概要図を図 9 に示す。



日立製作所にて作成

図 9 5MW 風車の概要図

当該風車は、累積生産 2 基目の実証機で、ロータ直径は 126m、ハブ高さ 86.4m のダウンウインド型風車である。当該風車のブレード長さは 62m であり、ナセル重量はハブ、ブレードを含むと 352t になる。令和 3 年 3 月末時点で運転期間は 4 年 2 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、浮体動揺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 15 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氣的・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、平成 30 年 6 月は、浮体の定期検査・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。平成 30 年度に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、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) 令和元年度及び令和 2 年度における総括委員会の内容

### ①進捗の確認

福島洋上風力コンソーシアムでは、平成 30 年度の総括委員会の提言を踏まえ、更なる維持管理費の低減に向けた取り組みを行った。維持管理費の低減に向けた取り組みを表 7、令和元年度及び令和 2 年度の事業期間中において計画外に生じた維持管理項目を表 8、計画時点を 100 とした時の維持管理費の変動要因を図 10 に示す。

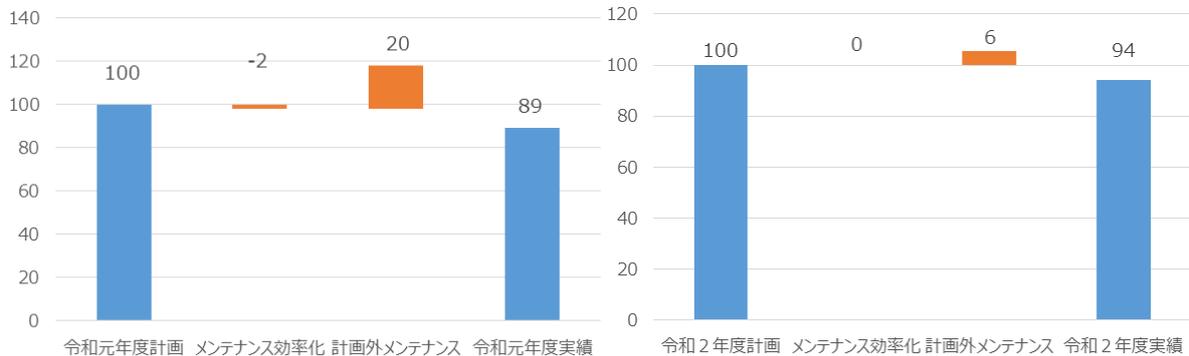
表 7 維持管理コストの低減に資する取組

番号	年度	項目	検証のステイタス	評価
1	R1	定期点検の回数削減	○	○
2	R1	ボルトの増し締め効率化	机上検討	△
3	R1	常駐員による定期点検	机上検討	△
4	R1	巡視による点検項目削減	机上検討	△
5	R1	ピッチ情報の遠隔取得	○	○

○：効果を確認、△：詳細な分析・検証が必要

表 8 計画外に生じた維持管理項目 (5MW 風車)

番号	年度	項目	原因	実施した対策/検討される対策案	要因
1	R1	コンテナ内エアコン不具合	浮体固有	電磁弁センサの交換を実施した。 センサの経時劣化による（なお、電気室用のコンテナは福島機特有構造）	クラス B
2	R1	ピッチシステム不具合 (ケーブル不完全断線)	浮体固有	断線部位である H1 コネクタケーブルの交換を実施した。対策としては、風車制御による共振回転数をスキップする制御ほか、振動を抑制する制御を実施した。	クラス A
3	R1	PCS ファンモータ故障	洋上一般	モータ本体を交換及び端子箱のケーブルグラント部(コネクタ)をコーキング処理し海水の侵入をしないようにした。	クラス A
4	R2	ピッチシステムモーターカバー 固定部不具合	浮体固有	モーターカバーボルトの再締め付け及びロックタイト塗布を実施、既設エンコーダケーブル同士を再接続した	クラス A
5	R2	ピッチシステム MPC 制御電源ケーブル端子の接触不良	浮体固有	MPC とケーブルを再接続し、接続近傍部のケーブルを固縛した	クラス A
6	R2	SCADA 通信断	陸上	不具合機器を交換し、当該品の予備品化を実施した	クラス B



日立製作所からの報告をもとに作成

図 10 計画時点を 100 とした時の維持管理費の変動要因 (左：令和元年度、右：令和 2 年度)

年度計画：当該年度の定期点検費及び想定した不具合費の合計  
 メンテナンス効率化：本実証で検証されたコスト削減費  
 計画外メンテナンス：計画時に想定していた以外の不具合対応費  
 年度実績：当該年度の定期点検費用及び不具合対応費の合計

5MW 風車の維持管理を担当している日立製作所が報告した内容は以下のとおりである。

- コスト低減に資する取組 (表 7) は、点検回数の削減やデータの遠隔取得を実施し、コスト低減の検証ができた。
- 計画外の維持管理の項目 (表 8) は、実証機ゆえの初期故障によるものが多く、着床式でも想定されるものと、浮体式であるために発生したものの両方があったこと。
- 令和元年度の維持管理費は、計画時点を 100 とすると 89 となり、ほぼ計画どおりとなった。(図 10)

- 令和2年度の維持管理費も、計画時点を100とすると94となり、ほぼ計画どおりとなった。

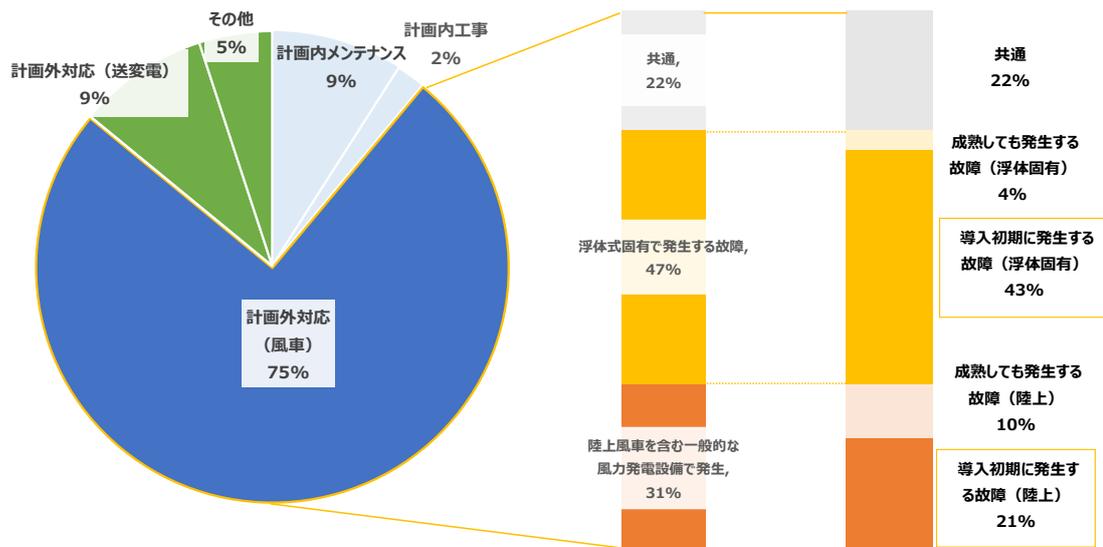
日立製作所からの報告を受けて、本委員会としては、点検回数やメンテナンス体制の見直しにより維持管理費の低減を確認した。

平成29年度から令和元年度における、5MW風車の停止原因及び分析結果について、日立製作所からの報告は以下のとおりである。

- 5MW風車の停止原因の内訳（図11）によると、停止時間全体における風車そのものに起因する停止が75%を占めていること。
- 上記停止事由のうち、風車そのものに起因する停止原因の内訳について詳細な分析を行ったところ（表9）、陸上風車で発生しうる停止が31%、浮体式洋上風力発電固有で発生する停止が47%、どの設備にも共通しておこり得る停止が22%となっていること。
- これらについて、習熟度別に発生する故障を分類したところ、導入初期に発生する故障は風車由来の停止時間の64%を占めていること。
- また、5MW風車の総停止時間の作業区分のうち、浮体アクセスの計画時における荒天待機による停止が全体の26%を占め、停止時間の長期化への影響が大きいことが明らかとなった。（図12）

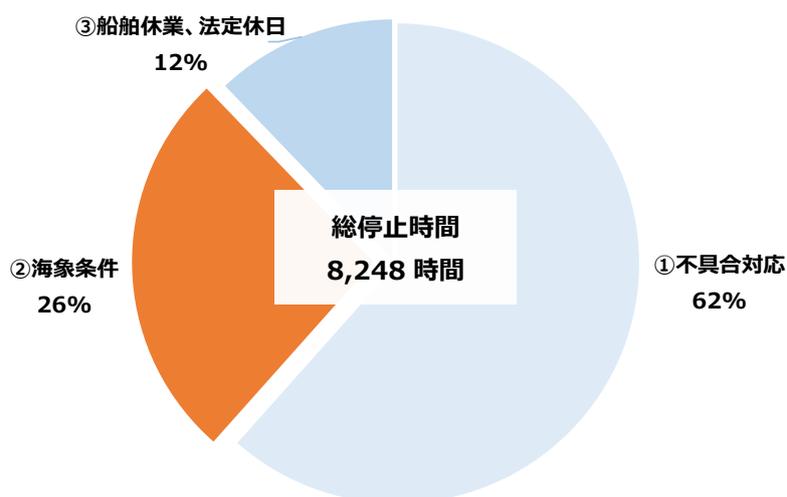
日立製作所からの報告を受け、総括委員会として5MW風車についての評価を以下のとおり行った。

- 5MW風車は、風車の成熟度が十分に得られなかったことによる初期不良に伴う停止要因が多くを占めており、風車停止時間の増加に繋がっている。
- 具体的には、浮体式固有の揺れに伴い発生した、PCSファンモータの地絡や各種ケーブルの断線等が技術的課題として挙げられ、風車としての習熟度が不足していたため、停止時間の増加に繋がった。



日立製作所からの報告をもとに作成

図 11 5MW 風車に起因する停止原因の割合（平成29年度～令和元年度）



日立製作所からの報告をもとに作成

図 12 5MW 風車の総停止時間における作業区分の内訳（平成 29 年度～令和元年度）

表 9 5MW 風車で発生した不具合例（平成 29 年度～令和元年度）

	導入初期に起こりうるもの （設計で対応すべきもの）	成熟しても起こりうるもの （運用で改善すべきもの）	共通 （運用で改善すべきもの）
陸上風車を含む一般的な 風力発電設備で発生する 故障	<ul style="list-style-type: none"> <li>・電線管ボルト脱落</li> <li>・増速機油漏れ（増速機配 管の補修）</li> <li>・VCB サポート破断<sup>※1</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・MPC ファン不具合<sup>※1</sup></li> <li>・ナセルセンサ加速度異常</li> <li>・ピッチエラー<sup>※3</sup></li> </ul>	—
着床式を含め洋上風力発 電設備で一般的に発生す る故障	—	—	—
浮体式固有で発生する故 障	<ul style="list-style-type: none"> <li>・カップリングスペース改良作業</li> <li>・PCS ファンモータ地絡<sup>※1,2</sup></li> <li>・ブレード角度を制御するピッチ 電源ケーブルの不完全断線</li> <li>・ピッチコントロールキャビネット に接続する電源ケーブルの不 完全断線<sup>※3</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・傾斜角大に伴う運転停止</li> <li>・コンテナエアコン故障<sup>※2</sup></li> </ul>	—
共通	—	—	・リセットまでの待ち時間

※1 VCB：真空遮断器， MPC：パワーコントローラー， PCS：パワーコンディショナー

※2 福島は「コンテナ式」に起因する。電気品をタワー外のコンテナ（電気品収納箱）に収納した。

※3 ピッチ：風車のブレードを回転させるシステム

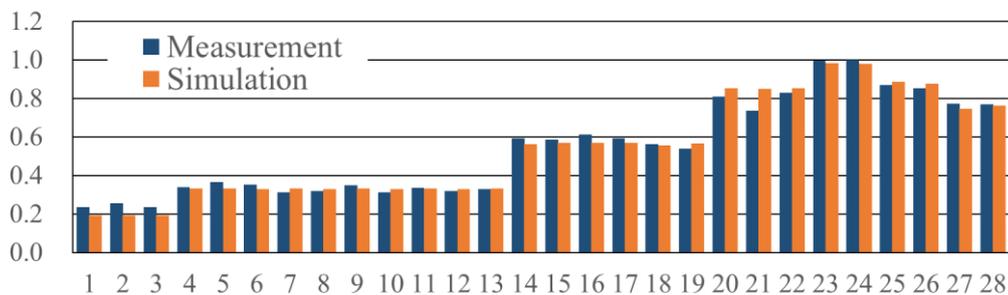
②技術的な知見の整理

また、実証事業を通した設備の安全性の検証について、以下の結果が得られた。

- タワー基部における平均転倒荷重について、実測値による風況・海況データを踏まえた解析と設計値を比較した結果、荷重はすべての解析ケースにおいて概ね一致しており、設計手法の妥当性を確認することが出来た。(図 13)
- 実証事業により得られた実証機周辺の環境（風況・海況）データをもとに、風車の損傷度を推定し、予想寿命を算出した結果、タワー基部（第 2 踊場）にて 31 年、タワー頂部（第 5 踊場）では 5736 年となり、設計寿命を満足することを確認した。

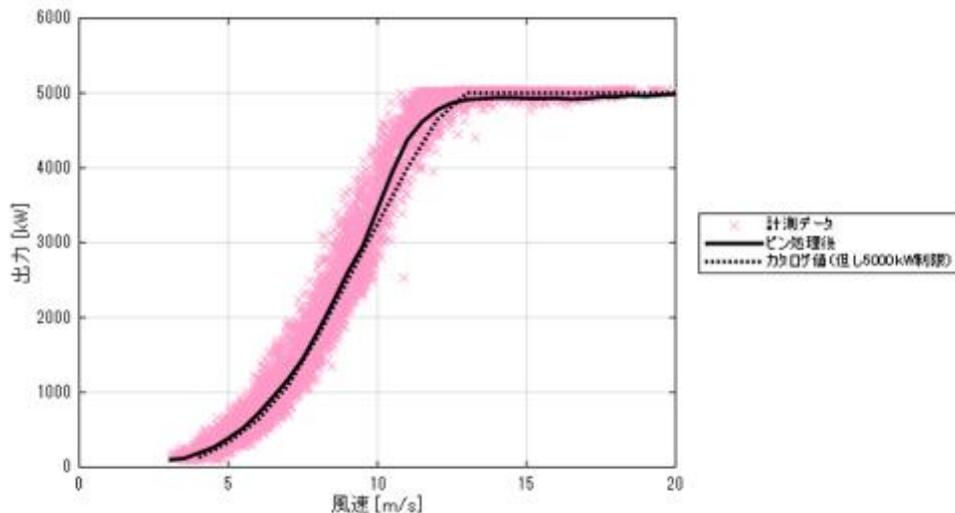
実証事業を通して得られた実績について、以下の結果が得られた。

- 図 14 に 5MW 風車の風速及び出力の実測データ、及びビン処理した出力データを示す。実測値は補機電力分を差し引いた結果であり、風速は LiDAR により風速を計測したものである。



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 概要版より抜粋

図 13 5MW 風車のタワー基部の平均転倒荷重の解析・測定値の比較



日立製作所にて作成

図 14 5MW 風車実証機の出力実測結果

③課題認識における教訓（学びの整理）

これまでの実証研究事業を通じて確認した学びについて、日立製作所から表 10 のとおり報告を受けた。

表 10 実証事業を通じて確認した学びの整理

段階	運転維持の観点から設計に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
全般	波が高い時のアクセスが難しい	有義波高 1.3m を超えると、ほぼアクセスできない。特に冬の期間は厳しい。トラブル発生時にすぐに対応できない。停止期間を最小限にするには、2-3m の波でもアクセスできるようにしたい。	高い波でもアクセスできる装置や船の開発が必要である。欧州ではアンペルマン <sup>※3</sup> という装置があるが、大きな船にしか搭載できない。
	安全教育が必要	海外では GWO <sup>※1</sup> (Global Wind Organisation)の安全教育を受講していない人は CTV <sup>※2</sup> (Crew Transfer Vessel) にすら乗れない。このプロジェクトにおいてはこうした安全に関わる取り決めやルール化が不十分であった。乗り移り時に1件の骨折事故が発生した。	こうした教育訓練を義務化しておくべきである。
	落下防止の安全ブロックが必要	浮体の梯子は安全ブロック（リール式の落下防止装置）がない。船の世界ではそうしたものをつける習慣がないからかと思うが、風車の世界の常識からは乖離しているようである。	国が主導して、洋上風車の安全ルールを制定すべきである。
	CTV の運用について	小名浜港からは 1.5 時間、久ノ浜港からは 40 分である。もっと近い港から往復できたら楽であった。	サイトにより近い港の確保が必要である。燃料費の削減や緊急対応もしやすくなる。
設計段階	浮体と風車の連成解析の検討が必要である	浮体と風車の固有振動数が 3 P（約 0.6Hz）に共振し、角度リミット（約 5 度）に達し即時停止する事象が発生した。	①連成解析を行う前に、風車と浮体メーカーと一緒に浮体と風車を再現した 3 次元 FEM モデルを作成し、固有振動数を厳密に求める。 ②浮体と風車の連成解析は解析ケースが少なく必要に応じて実機実測とのモデルのチューニングを実施する。
	ハブ内の機器固定が必要	浮体風車特有の振動及び即時停止する動作により陸上風車と比較して、ハブ内機器の固定に関係する不具合が発生した。	浮体風車のハブ内機器のボルト部は原則ロックタイトし、ケーブル部固定はルーズ部と固定部の切り分けが必要。

段階	運転維持の観点から設計に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
設計段階	浮体機の振動対策が必要	浮体風車では陸上風車では見られない振動が発生する。	着床機と異なり浮体機は振動対策制御が必要であり、福島機でも3つの制御を導入し有効性を確認した。 ① FVC(Floating Platform Vibration Control)タワー振動制御 定格風速以上でのスラスト力のマイナス傾き（ネガティブダンピング）に起因する浮体特有の振動制御 ② FF(Feed Forward) ピッチ制御 ③ Quick Pass（共振ジャンプ）制御
	浮体風車のタワー強化が必要	浮体風車は浮体特有の振動により、陸上風車に比較してタワーの曲げモーメントが大きい。	陸上機や着床機に比べ、浮体風車のタワーは振動及び角度成分の荷重が大きいため、入り口の補強を含むタワーの強化が必要である事がわかった。
	ヘリデッキの必要性について	O&M の運用または緊急時のレスキュー用のヘリデッキがない。	法令の整備が急務であると同時にヘリ業者の準備が必要である。
	電気機器のコンテナへの収納について	不具合を見込んで、電気機器はすべてコンテナに収納する設計としたが、配線が複雑になるなどのデメリットがあった。	機器の信頼性は実証されたので、今後はタワー内配置でも問題ないと考える。
	塩害対策が必要	洋上という環境を考え風車内に外気が循環しない正圧化を導入した。	風車内を外気が循環しない冷却システム及び正圧化を導入し有効性を確認した。又、他の方法としては、湿度制御するシステムの導入や、風車内を外気が循環する冷却システムの場合は塩分を遮断するフィルタ等が必要であることがわかった。
施工段階	施工場所の検討が必要	2 MW はドックで風車組立をし、小名浜港で試運転の多くを実施することができたので、洋上試験は最小限にすることができた。5 MW は日程の問題があり、ほとんどの試験を洋上でする必要があったので、長い日数が必要となってしまった。	ドックまたは埠頭にて風車の搭載とほとんどの試運転を完了してから現地に運ぶべきである。
	施工期間の短縮化について	洲本沖での 5 MW 風車の工事は 2 か月もかかった。	着床式と同じように、港にてタワー一式を組立するなどの工夫が必要である。浮体機の場合、浮体と風車の合体組立所(港湾等)確保のため、港湾のインフラ整備が必要。

段階	運転維持の観点から設計に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
施工段階	施工方法の検討が必要	起重機船での 5MW 風車の組立は実施できたが、リスクもあった。	SEP 船の使用や、ドックでの施工をしないと量産化は難しい。
運転・維持段階	陸上機と違う浮体機特有トラブルについて	5 MW機は実証機を浮体機とした為、初期不良とアクセス率の低下を考慮した上で対策する必要性が出た。	CMS や Web カメラ利用に加え、専任エキスパートによる予防保全計画の必要性と、予備品の余裕を見た保有も必要である事がわかった。量産機対応では選任エキスパートは不要、最低限の CMS 仕様、誤認識が少ないセンサが必要。
	傾斜角閾値の検討が必要	5 MW はサイトの環境条件のシミュレーションでの最大傾斜角を閾値としたが閾値を超え即時遮断する事象があった。	傾斜角閾値設定の考え方（海象条件のクラスなど）を決定する必要がある。
	浮体機の大物部品交換が難しい	浮体機は SEP ※ 4（Self-Elevating Platform）が使えない事から大物部品交換は困難となり長期停止化してしまう。	発電機や増速機などの大物部品がナセル内で交換出来る構造が有効である。ただしブレード、ハブ、ヨーベアリングなどを交換する場合はナセル交換と同等の作業が必要となり、浮体を港に曳航して建設時と同じようにナセル他を交換する事になるため、あらかじめ事業リスクとして考えておく必要がある。落雷等によるブレード破損が少ないブレード設計を選択するのも必要。
	浮体機との通信システムについて	浮体機は港湾からの距離があり、無線による作業員との連絡や、Webカメラ、各種センサのデータ通信は困難であった。	光通信ケーブルによるデータ通信のシステム設計が必要であることがわかった。
	浮体の接岸について	5MW 風車の接岸場所は北と南側に 2 か所あるが、潮の流れやうねり、風の方向により接岸が困難となることを経験した。	気象により接岸位置を変えられるよう接岸追加や形状の変更が必要である。

※ 1 GWO:欧州の風力発電設備所有者や風力タービンメーカーから構成される非営利組織を指す。風力発電業界における安全な作業環境の実現を支援する狙いで設立された。

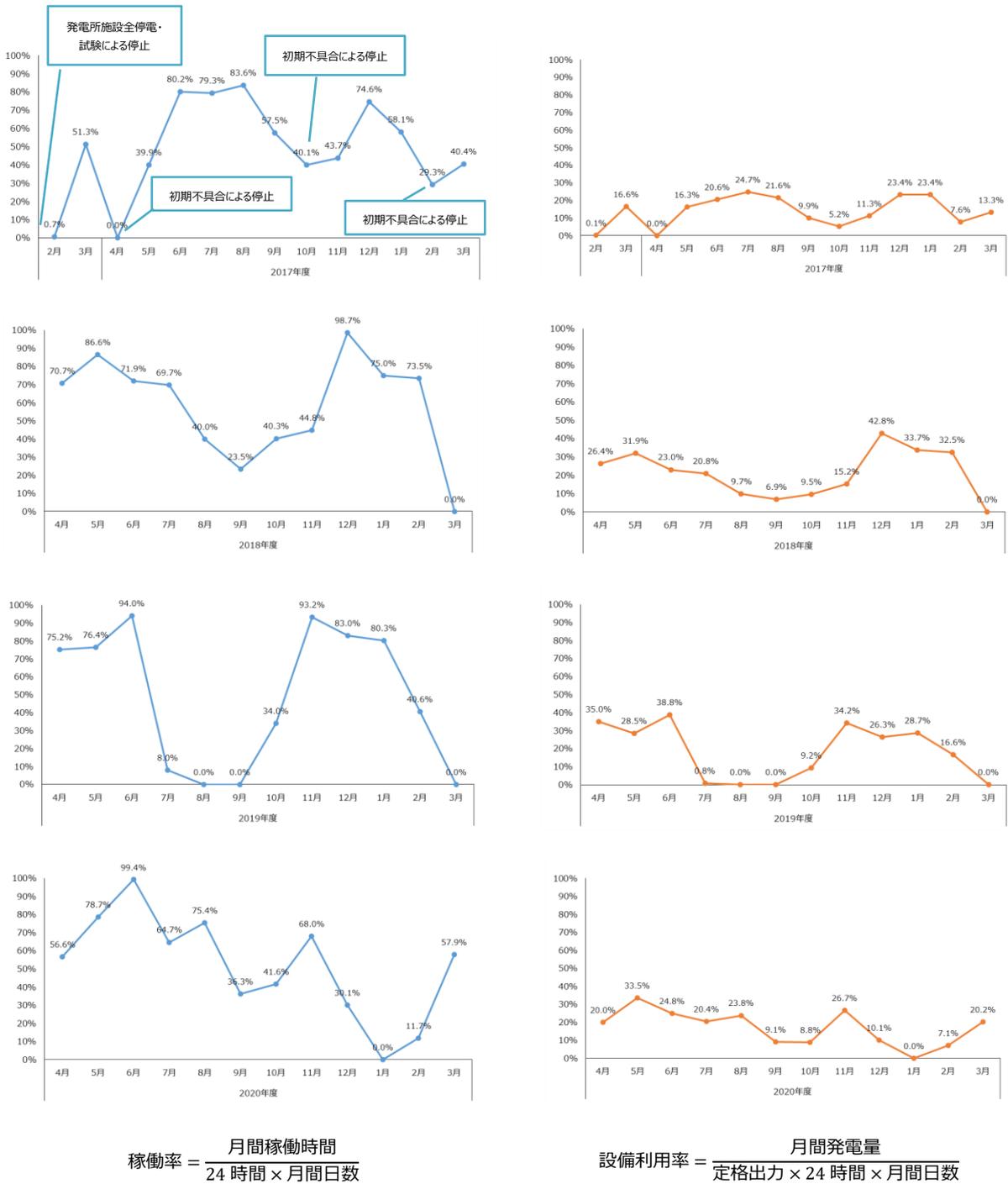
GWO 規格：風力発電業界における基礎安全訓練の要求事項について規定している。

※ 2 CTV:洋上風力発電アクセス船を指す。

※ 3 アンペルマン：アクセス船から浮体風車に人が安全に乗り移れることを目的とした装置。

※ 4 SEP：自己昇降式作業台船。

### (3) 5MW 風車の設備利用率・稼働率のトレンド



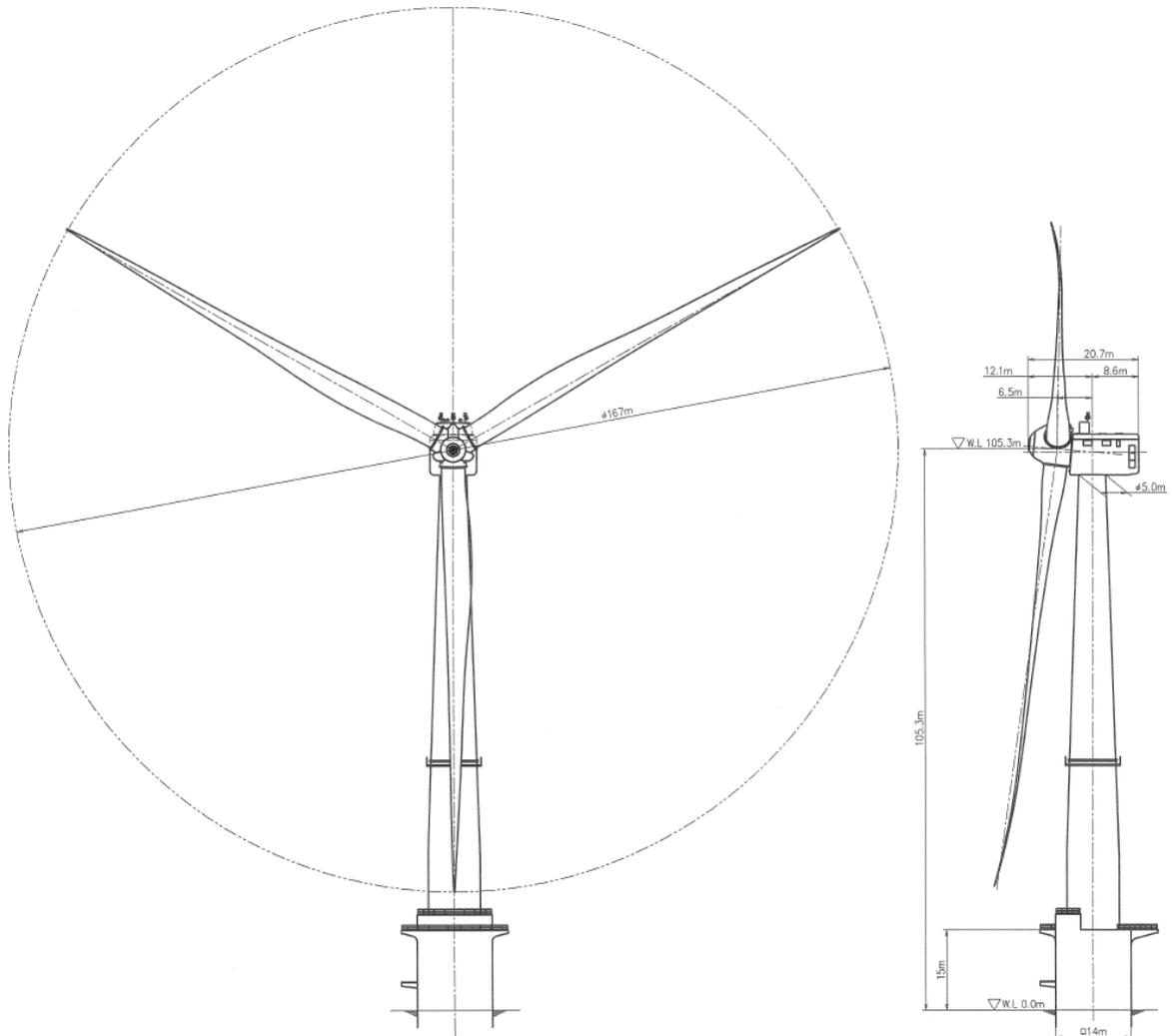
丸紅からの報告をもとに作成

図 15 5MW 風車の稼働率・設備利用率

令和 2 年 4 月～令和 3 年 3 月までの直近 1 年間の稼働率と設備利用率は、それぞれ 56.6%、17.9%である。ただし、本発電設備に起因しない要因（浮体設備や送変電設備の影響）で停止した時間を除いた場合は、それぞれ 72.2%、22.8%である。

## 2.2.3 7MW 風車

### (1) 平成 30 年度事業における総括委員会の内容



三菱重工業にて作成

図 16 7MW 風車の概要図

当該風車は、累積生産 2 基目の実証機である。風車のロータ直径は 167m、ハブ高さ 105m のアップウインド型風車である。平成 30 年 6 月末時点で運転期間は 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的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り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 20 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。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実施したものの、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。

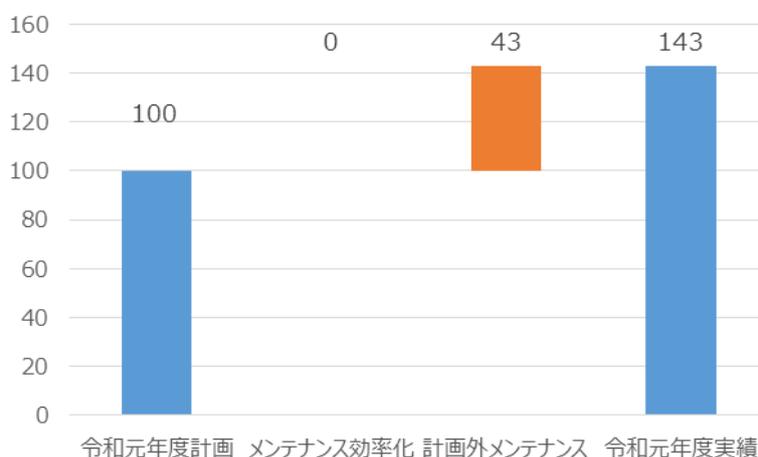
(2) 令和元年度及び令和2年度における総括委員会の内容

①進捗の確認

7MW 風車は、平成30年度の提言を踏まえ、平成30年8月末に発電を停止している。そのため、福島洋上風力コンソーシアムでは、令和2年5月の撤去工事開始までの期間において必要最低限の安全対策を行った。令和元年度の事業期間中において計画外に生じた維持管理項目を表11に示し、計画時点を100とした時の維持管理費の変動要因を図17に示す。

表 11 計画外に生じた維持管理項目（7MW 風車）

番号	年度	項目	原因
1	R1	長期停電中の風車の維持管理	洋上設備であるために発生する
2	R1	定期安全管理審査関連対応	洋上設備であるために発生する



三菱重工業からの報告をもとに作成

図 17 令和元年度の維持管理費の計画と実績（7MW 風車）

7MW 風車の維持管理を担当している三菱重工業が報告した内容は以下のとおりである。

- コスト低減に資する取組は、必要最低限の安全対策のみを行っているため、令和元年度は検討をしていない。
- 計画外の維持管理の項目（表11）は、変電所の停止に伴う長期停電中の風車の維持管理や安全管理審査の前倒しのために発生したものであったこと。
- 令和元年度の維持管理費は、計画時点を100とすると143となり、これは、計画外の維持管理費の増加によるものであること。また、今後の見通しは、来年度の撤去を見据えて設定をしていないこと。

（図 17）

三菱重工業からの報告を受けて、本委員会としては、平成30年度の総括委員会の提言を受け発電を停止し、安全管理のみを実施したことを確認した。

## ②技術的な知見の整理

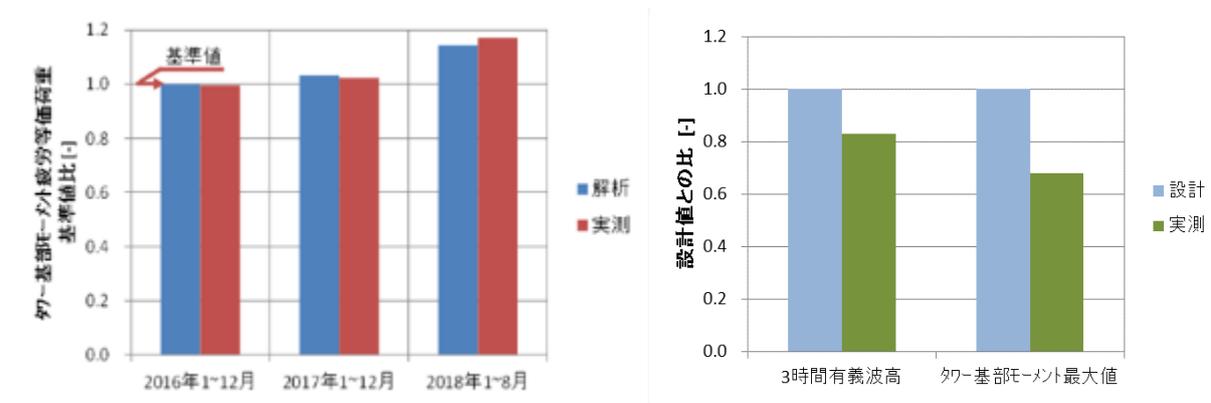
実証事業を通じた設備の安全性の検証について、以下の結果が得られた。

- 実証事業を通じて取得した 7MW 風車の疲労荷重と最大荷重の実測値について、設計段階にて使用した解析値を用いて比較した結果、解析値が実測値を上回ったことから、設計値が安全側の評価であり、風車の仕様（タワー基部）が妥当であることを確認した。（図 18）

実証事業を通して得られた実績について、以下の結果が得られた。

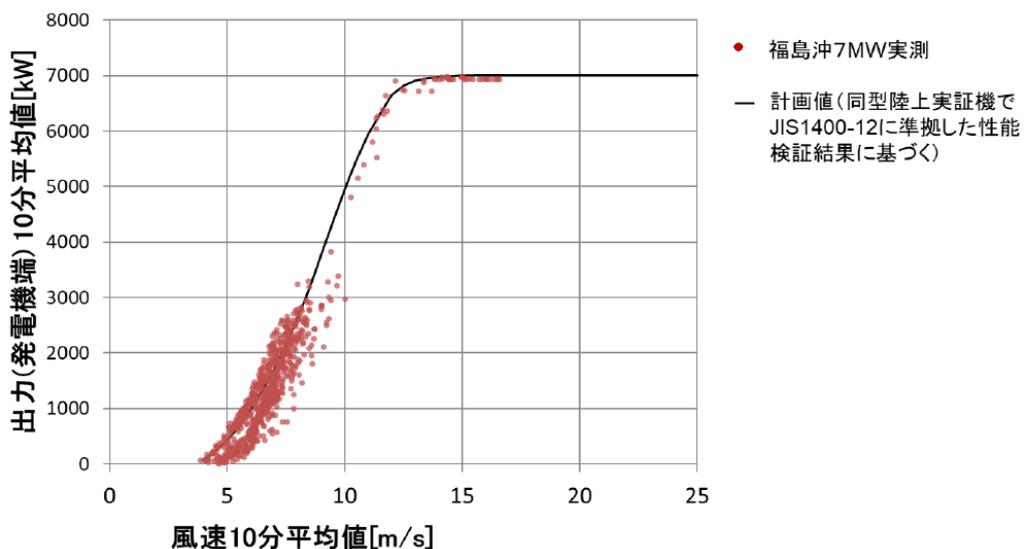
- 図 19 に 7MW 風車の風速及び出力の実測データを示す。風速については、ナセル風速計実測値を補正<sup>※</sup>したものである。

※ ナセル風速計の計測値精度を向上するために、同型陸上実証機を用いた性能計測（JIS1400-12 準拠）において得られた風車流入風速とナセル風速計実測値の相関を用いて補正した。



平成 28 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 概要版より抜粋

図 18 疲労・最大荷重の計測値と解析値の比較



三菱重工業にて作成

図 19 7MW 風車実証機の出力実測結果の検証

③課題認識における教訓（学びの整理）

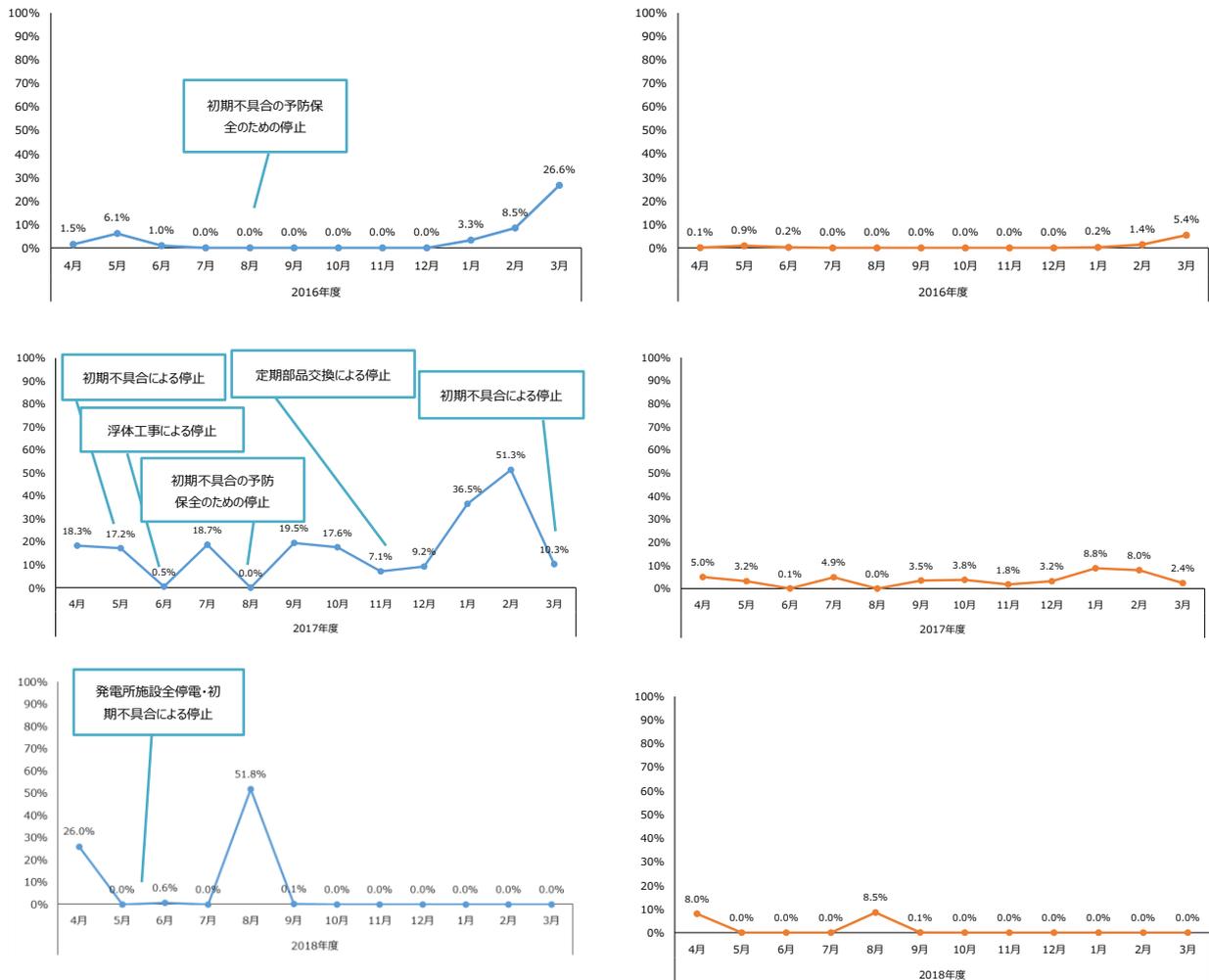
これまでの実証研究事業を通じて確認した学びについて、三菱重工業から表 12 のとおり報告を受けた。

表 12 実証事業を通じて確認した学びの整理（7MW 風車）

段階	運転維持の観点から運用に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
開発段階	浮体式風車のタワー基部モーメント荷重は、波浪の影響度合いが少ない着床式風車に比べ数倍大きくなり、7 MW 浮体式風車のタワー基部の構造では、直径 10m x 板厚 80 mmと相当の大径厚肉となった。そのため、タワー素材の厚板曲げ加工が可能な製造設備が極めて限定された。また、強度上の理由から、組立が容易なフランジ接合が適用できず、現地溶接となった。	浮体式風車のタワー仕様は、同出力の陸上や着床式風車のタワーと異なり大口径・厚肉化する為、製造設備の制約(加工できる工場に限られるなど)で、タワー製造・組立における国内長距離横持移動が多くなったり、その大きさのあまり、タワー組立時の溶接接合が必要になり、コスト増要因となる。従い、開発段階からその点を留意すべきである。	大型浮体式風車の仕様決定の際には、タワー基部仕様とその設備制約に十分留意すべき。（大きさ、加工設備等）
設計段階	着床式風車と異なり、SEP 船が使用できない浮体式風車では、現地でのナセル内主要機器などの大物部品の交換工事は難しく、係留を外して拠点港へ曳航して保守せざるを得ず工事費用が高むリスクがある。そこで、主要機器が現地で部品交換できるよう、定期交換部品の小型化設計、タワー下からナセル内所定場所への移動ルート設計等色々と工夫を凝らしたが、そのために機器設計を複雑にしてしまった。 また、実際に大物保守作業を実施したが、ナセルの揺動と低アクセス率が相まって、作業環境も悪く、現地工期が長くなってしまった。	大物部品が、風車サイトで交換可能となる技術改善は重要ではあるが、機器を複雑にし、逆に保守性を悪化することは避けなければならない。 一方で風車の 20 年間の運用中には、大物部品（ギア、大物軸受、発電機や翼）の不慮の損傷は不可避。着床式風車と異なり揺動する環境下での長期保守作業は困難故、安価に拠点港へ曳航し、風車保守ができるよう、風車・浮体・係留の設計段階からの工夫・配慮が必要である。	大規模修繕を前提とした設計、仕様決定が必要。 安価に拠点港へ戻して大物交換工事が実施できるような工夫として、浮体係留脱着性向上・ナセルトップの簡易開閉機能等、開発段階で、安価な大物部品交換工事を念頭に置いた機機の設計が重要。
施工段階	小名浜港湾に着底させた浮体上に、当時世界最大級の大型風車（ロータ径 167m、タワートップ重量約 600ton、ナセル高さ 105m）を、陸上重機で浮体上に組み上げた。国内既存の一般的な岸壁（埠頭）の地耐力では国内に無い大型重機（超大型クレーン）を配置することが困難であった為、多用途に利用中の公共岸壁を占有し、部分的に地耐力強化することが必要となった。	多用途に利用中の公共岸壁を用いて、当該作業を実施し、一定期間埠頭を占有することは、他の埠頭利用者の合意取得が重要かつ困難と言える。一方、長期間にわたり、同じ埠頭を使用して効率的に仮組・出荷することは想定されない（係留海域に近い埠頭を使用することが効率的）ことから、埠頭整備は最小投資とすることが求められる。	浮体式洋上風車を真に経済的に製造、組立、曳航、係留・据付及び撤去・解体ができる拠点港インフラ整備のルール化が不可欠。 （現在の着床式洋上風力でも仮組立埠頭の地耐力強化が課題であることは一般的になっているが、本PJでその重要性を頭出しした。）

段階	運転維持の観点から運用に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
運転維持段階	<p>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。そのうえ、直後の現地点検の結果、特に保守する事無く運転可能となるケース（誤警報）があり、離岸距離 25 kmと遠洋でアクセス率が悪い事と相まって、無駄に風車停止期間を長引かせる事で、稼働率を下げることになった。</p>	<p>左記の稼働率向上策の対策として、監視カメラを 10⇒22 台へ増設し、画像異常検知システムを追設したことで、改善効果を得たものがある一方、作動油状態・機器動作状態監視においては、誤検知・誤警報により、結果としては不必要な運転停止と現地アクセスが幾度となく繰り返された。</p>	<p>遠洋風車の稼働率向上の為には、風車遠隔監視システムの機能として、誤検知レスまたは冗長性が必要で、運転継続可否を適正に判断できるシステムの搭載が重要。</p>
運転維持段階	<p>数か月に及ぶ長期停電を経験した際、浮体内に装備した非常用ディーゼル発電機（容量 2 週間分）が正常作動したことにより、航空障害灯等各種保安装置が正常に動作することができた。しかし、停電が長期に及んだ結果、想定を超える発電機作動時間となり、燃料切れに至った。停電時でも必要な航路標識灯、航空障害灯、風車設備の結露防止装置が使用できず、想定外の燃料補給や頻度の高い現地アクセスを余儀なくされた。</p>	<p>航路標識灯は、小容量故、太陽光発電と補機バックアップ設計で対処可能だが、常時点滅する大容量の高光度航空障害灯や結露対策（昼夜の温度差が大きく湿度の高い浮体上では不可欠である。例えば、結露防止ヒータや換気ファン）は、それに見合う容量の非常用電源確保・選定は難しい。</p>	<p>風車浮体設備の設計要件として、長期停電が発生した場合の対処方法・ルールづくり・必要設備の配慮が必要である。</p>
運転維持段階	<p>風車保守実績として、予想外の海象気象急変により、浮体から CTV へ乗移りの安全確保ができず、浮体へ止む無く宿泊することを経験した。</p>	<p>その経験後、同様な非常時を想定し、浮体内に保守人員を考慮した数日分の非常食・簡易宿泊設備を設置し、緊急時の保守員の安全を確保した。更に、荒天時でも確実に乗り移り可能な設備を検討してみたが、良い施策が無く、浮体内の緊急避難設備に頼らざるを得ない状況であった。</p>	<p>左記のような事象を想定し、風車にアクセスする保守員/技術員の安全・衛生を維持する専門的なルール（法規）、訓練・教育及び保安機材が不可欠。</p>
撤去段階	<p>撤去の際、福島沖より長期間曳航することとなった。その際、曳航船の曳航能力の制限より、浮体を浮上させ曳航することになったが、元々、浮体を浮上させ長期間その状態を保持することを想定していなかった為、例えば海外への長距離曳航の回避、曳航時期の制約が入った。</p>	<p>着床式風車と異なり、浮体式風車は WF サイトへの曳航が可能であることが特徴だが、解体サイトへの曳航時の風車・浮体荷重が、構造強度へ影響する可能性がある。しかしながら、それらの DLC(設計荷重条件) は、未だ、IEC や JIS の浮体式風車基準には明記されていない。</p>	<p>撤去時など浮体喫水を変更して長期間曳航するような場合には、風車・浮体設計条件で適正に考慮すべき。</p>

### (3) 7MW 風車の設備利用率・稼働率のトレンド



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

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

丸紅からの報告をもとに作成

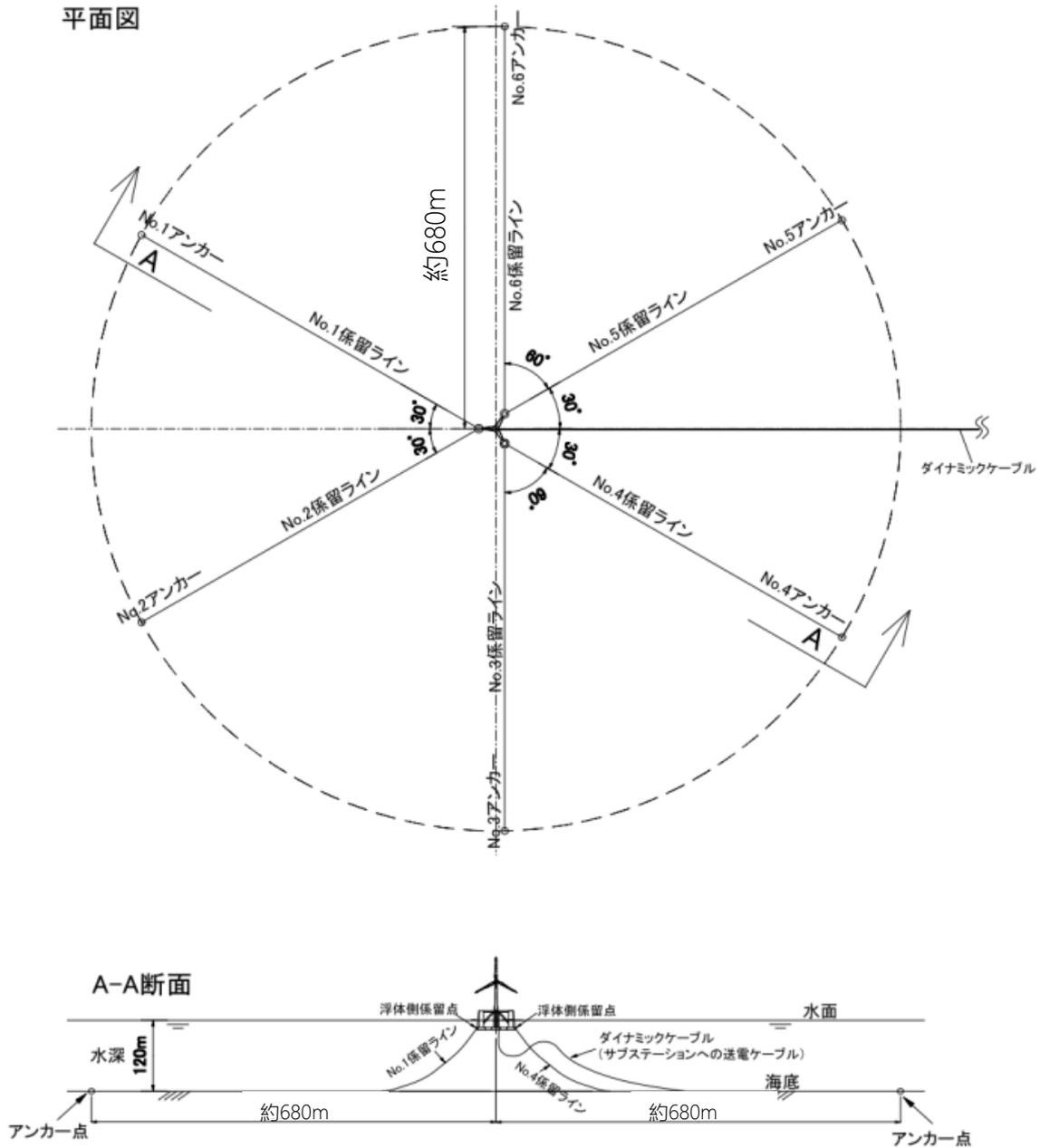
図 20 7MW 風車の稼働率・設備利用率

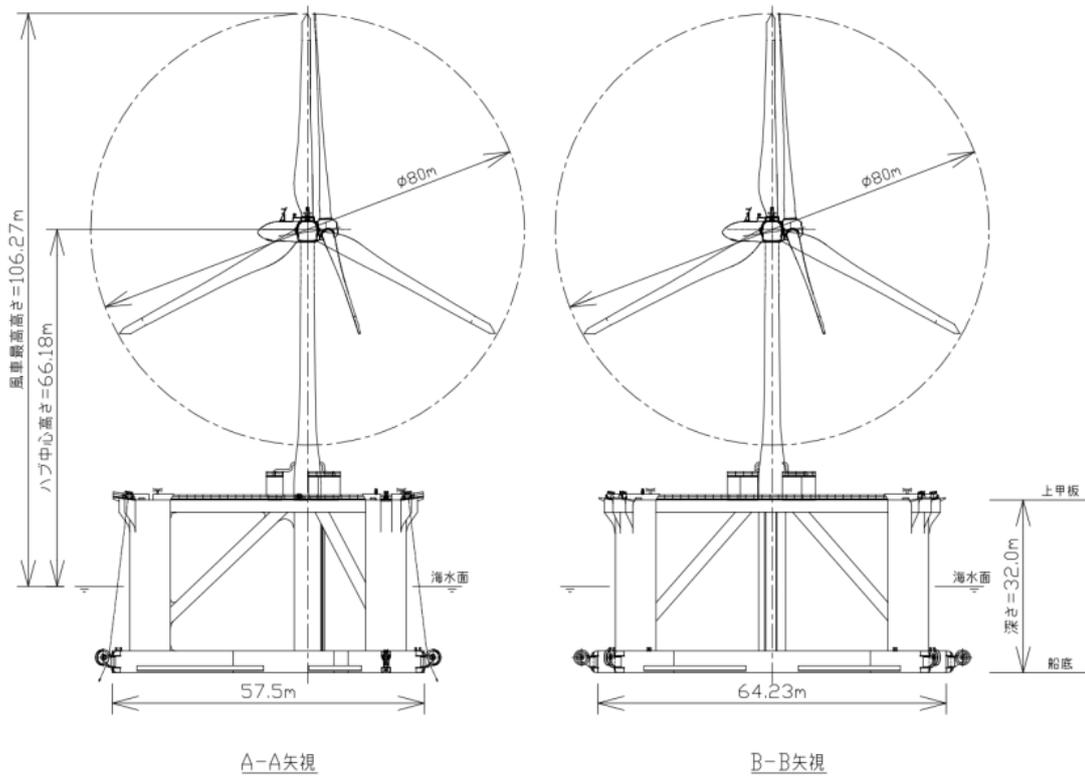
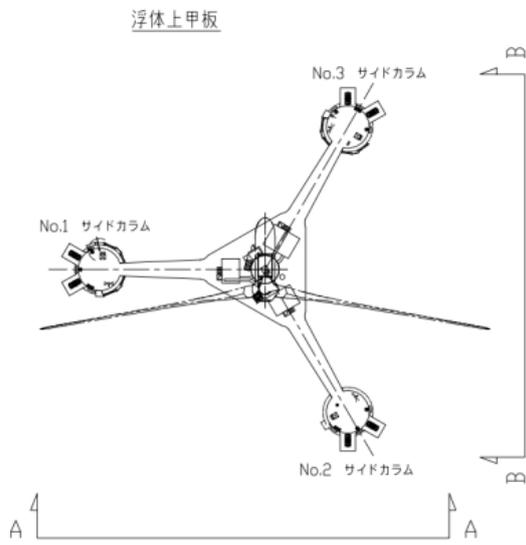
## 2.3 浮体

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。

### 2.3.1 2MW 浮体

#### (1) 平成 30 年度事業における総括委員会の内容





三井 E&S 造船にて作成

図 21 2MW 浮体の概要図

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本であり、設置半径は約680m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) 令和元年度及び令和2年度における総括委員会の内容

### ①進捗の確認

福島洋上風力コンソーシアムでは、平成30年度の総括委員会の提言を踏まえ、更なる維持管理費の低減に向けた取り組みを行った。維持管理費の低減に向けた取り組みを表13、令和元年度及び令和2年度の事業期間中において計画外に生じた維持管理項目を表14、計画時点を100とした時の維持管理費の変動要因を図22に示す。

表 13 維持管理コスト低減に資する取組（2MW 浮体）

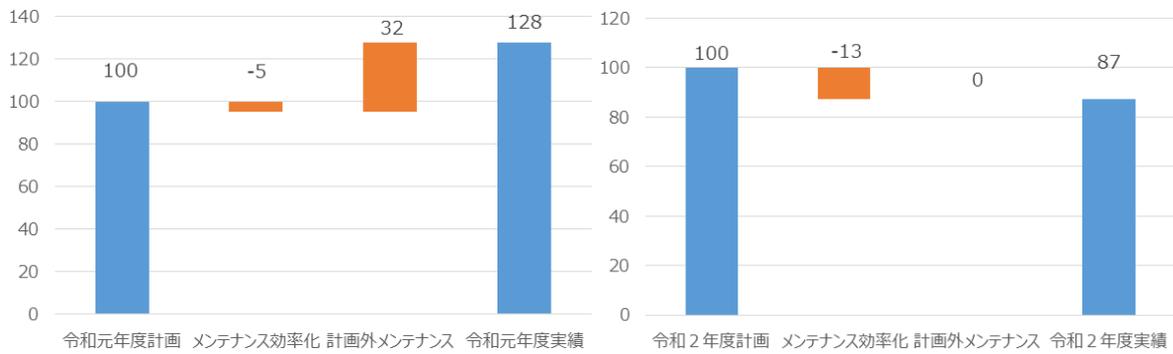
番号	年度	項目	検証のステータス	評価
1	R1	浮体年次検査 点検費	○	○
2	R1	浮体中間検査 点検費	未実施	△
3	R1	浮体定期検査 点検費	未実施	△
4	R2	浮体年次検査 点検費	○	○
5	R2	浮体中間検査 点検費	△	△
6	R2	浮体定期検査 点検費	未実施	△

○：効果を確認、△：詳細な分析・検証が必要

表 14 計画外に生じた維持管理項目（2MW 浮体）

項目	年度	項目	原因	実施した対策/検討される対策	要因
1	R1	データ収録装置用無停電電源装置	陸上	本機からバッテリー交換表示・ブザーが発出されたため、バッテリーの寿命と判断し、無停電電源装置を更新した。メーカー記載のバッテリーの標準的な寿命は4～5年で、今回の交換は6年経過しており、標準的な寿命の後であった。今後、設置後3年以降は、3か月毎に寿命の目安になるバックアップ時間を測定することで、より正確にバッテリー寿命を判定すると共に、予防保全の導入を考えたい。	クラス B
2	R1	データ収録装置の異常警報	陸上	浮体上のデータ収録装置と通信している陸上の管理 PC から、リモートでメーカー点検を実施し、原因を特定した	クラス B

項目	年度	項目	原因	実施した対策/検討される対策	要因
3	R1	データ収録装置の通信基盤	陸上	メーカー点検の結果、電子部品（データ収録 PC 内増設ボード）に損傷等は確認されず、設置後 6 年間で不具合がなく初期不良もないことから、電子部品の寿命と判断し交換した。メーカーの交換推奨年数はないが、一般的な電子部品の寿命が 7~9 年で、今回の交換は 6 年経過しており、一般的な寿命の前であった。今後、電子機器の交換頻度の低減のために、浮体室内の環境の改善策として、エアコンの設置や室内壁面の断熱材の施工を考えたい。	クラス B



三井 E&S 造船からの報告をもとに作成

図 22 維持管理費用の実績と見通し (2MW 浮体 左：令和元年度、右：令和 2 年度)

2MW 浮体の維持管理を担当している三井 E&S 造船が報告した内容は以下のとおりである。

- コスト低減に資する取組（表 13）は、令和元年度に実施した年次検査及び令和 2 年度に実施した中間検査において、回数の削減効果の検証が実施できた。
- 計画外の維持管理の項目（表 14）は、令和 2 年度に交換する計画であったが、不具合が 1 年早く令和元年度に発生した追加的なメンテナンスであり、部品の寿命に起因するものであることから、陸上設備でも発生するものであったこと。令和 2 年度においては、計画外メンテナンスは発生していない。
- 図 22 の令和元年度のメンテ効率化の指数は、コスト低減に資する取組で新たなメンテナンス体制の構築を行ったことによる、浮体年次検査の点検費の削減結果を示す。上述の計画外のメンテナンス費用が削減効果よりも大きいため、計画に比べて実績の指数が増えた。
- また令和 2 年度については、浮体中間検査時に実施するバラストタンクの点検方法の効率化が点検費の削減に寄与した。また、計画外メンテナンスは発生せず、実績の指数は計画に比べて約 20%低減した。

これまでの実証研究事業を通して検証した結果を以下に示す。

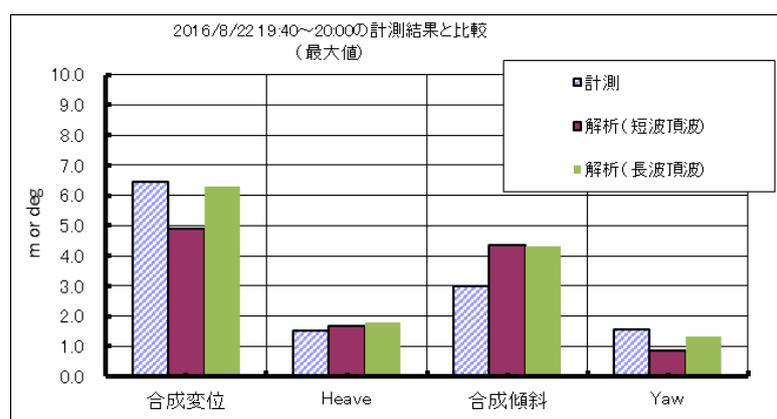
- これまでの稼働率が 95%程度で、浮体式洋上風力発電システムとして、一定水準の運用ができており、技術的に大きな課題はない。
- メンテナンス業務のマニュアル化・体制集約化により、維持管理費の低減効果が一定程度確認できている。
- 更なる稼働率向上には、荒天時のアクセス率低下の課題を解決するための、予防保全システム等の高度化を図る必要がある。

## ②技術的な知見の整理

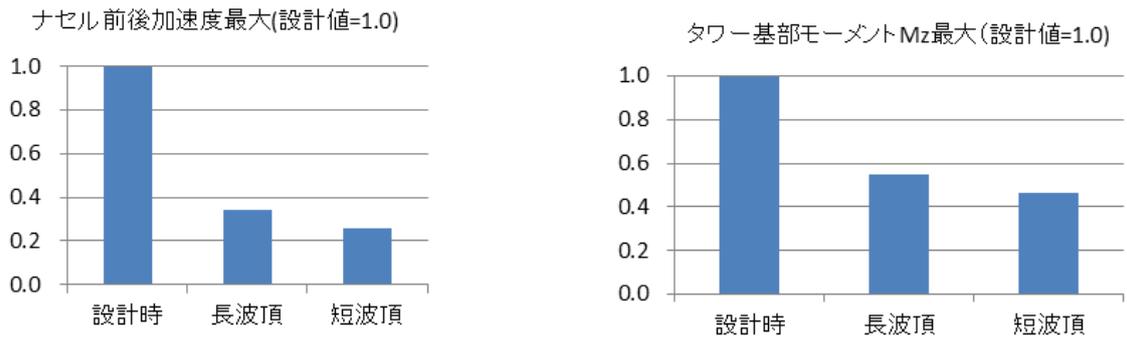
三井 E&S 造船が本実証研究事業で取得したデータを分析した結果、当該浮体は動揺が小さく、また疲労寿命も長かったことから、同社は現状のカラム数や係留索を減らすなどの小型軽量化が可能であるとしている。この新しいコンセプトによれば、5～6MW 級の風車を搭載する場合、鋼材量は現在の 2MW 風車用と同水準のまま、施工の工夫や量産化により、発電設備容量あたりの資本費は、最大で 1/5 程度へと大幅な低減が見込めると試算している。

実証事業を通じた設備の安全性の検証について、以下の結果が得られた。

- 実証事業を通して得られた気象・海象データを用いて、設計値と数値解析モデルを確認した結果、概ね数値は一致しており、数値解析モデルの妥当性を確認することが出来た。(図 23)
- また、ナセルの加速度、タワー基部のモーメント最大値について、設計時の想定と数値解析モデルによる解析値を比較した結果、解析値が設計値を下回ることから、設計値は安全側になることを確認した。(図 24)
- 平成 26 年 1 月～平成 30 年 12 月までの期間の浮体計測データをもとに、累積疲労被害度から算定した疲労寿命について、最も短いものはタワー基部における西北西方向に該当する 1,030 年であり、設計寿命の 20 年を満足する結果が得られた。(図 25)

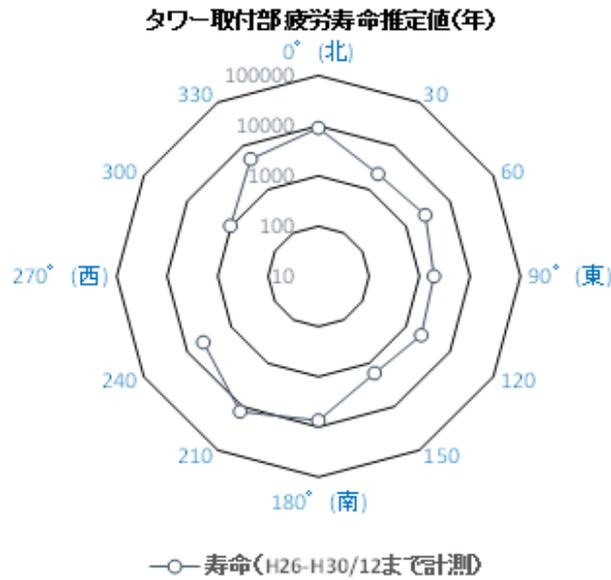


平成 29 年度福島沖での浮体式洋上風力発電システムの実証研究事業報告書 概要版より抜粋  
図 23 2MW 浮体の計測値・解析値の比較



平成 29 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 概要版より抜粋

図 24 2MW 浮体の設計・解析における加速度・タワー基部モーメントの最大値比較



平成 28 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 概要版より抜粋

図 25 2MW 浮体の疲労寿命解析データ (方角別)

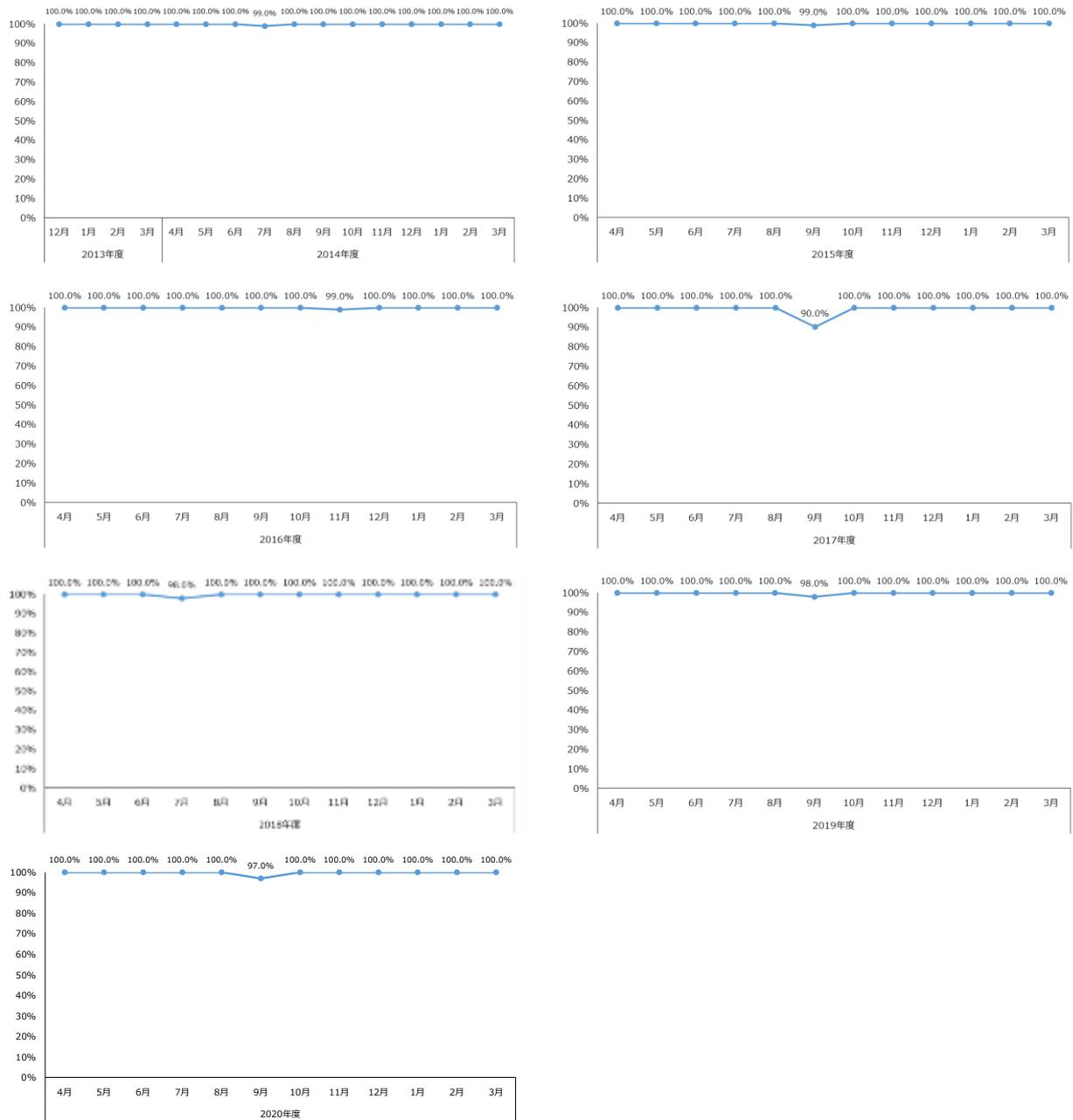
③課題認識における教訓（学びの整理）

これまでの実証研究事業を通じて確認した学びについて、三井 E&S 造船から表 15 のとおり報告を受けた。

表 15 実証事業を通じて確認した学びの整理（2MW 浮体）

段階	運転維持の観点から運用に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
全般	今回は、単機の実証事業ということもあり、事業化のためには評価・設計サイクルの標準化が必要だが、初めての浮体設計のため標準化はされておらず、評価・設計に人的なリソースと工数がかかり、短期間で浮体の最適化を十分に進めることができなかった。	更なる工数の削減や浮体の最適設計を目指すならば、評価・設計サイクルの標準化が望まれる。	事業化、商用化を前提として、評価・設計サイクルの標準化に向けて、設計手順の洗い出しや評価の基準の整理を進める。
運転・維持段階	波浪が大きな時には、通船と洋上浮体との乗り移り時の船の上下動により、ステージに足をかけた状態で船が上に動くと、船とステージの間に足が挟まれそうになる。	洋上浮体特有の環境への対策、波高が高い時でも安全に乗り移れる工夫がある	通船が接触するポートフェンダーと浮体のステージの間に十分なクリアランスを設けることで、波による上下動があっても船とステージの間に挟まれない
	浮体内部に携帯電話の電波や無線が届かないので、陸上のように意思疎通ができない。	リアルタイムにメーカーや陸上開閉所など複数の場所との意思疎通が可能となるように、浮体内部の通信インフラの改善	陸上からの LAN 回線を確保し、点検時には必要な場所まで LAN ケーブルを引き入れ接続することで、携帯電話、PC のビデオ通話など活用を図る
運転・維持段階	重量物を浮体上に積み込む際に使用するダビッドの吊り重量	ダビッドの安全使用荷重は風車交換部品の重量を基に決めており、浮体機器で最も重いバラストポンプについては交換部品ごとに分解して積み込む想定になっていた	浮体への機器搬入の設備は、風車だけでなく浮体機器の最も重いバラストポンプの交換も想定した使用荷重にすることで、将来的なメンテナンス効率化につながる。
	作業員の負傷等の緊急時に、梯子を使わずに浮体から下りる手段がない	作業員の負傷等の緊急時に、安全に浮体から下りる備品の整備	浮体に担架等を用意し、ダビッド等の機器搬入の設備を用いて担架等を下すことで、緊急時に対処できる。

### (3) 2MW 浮体の稼働率のトレンド



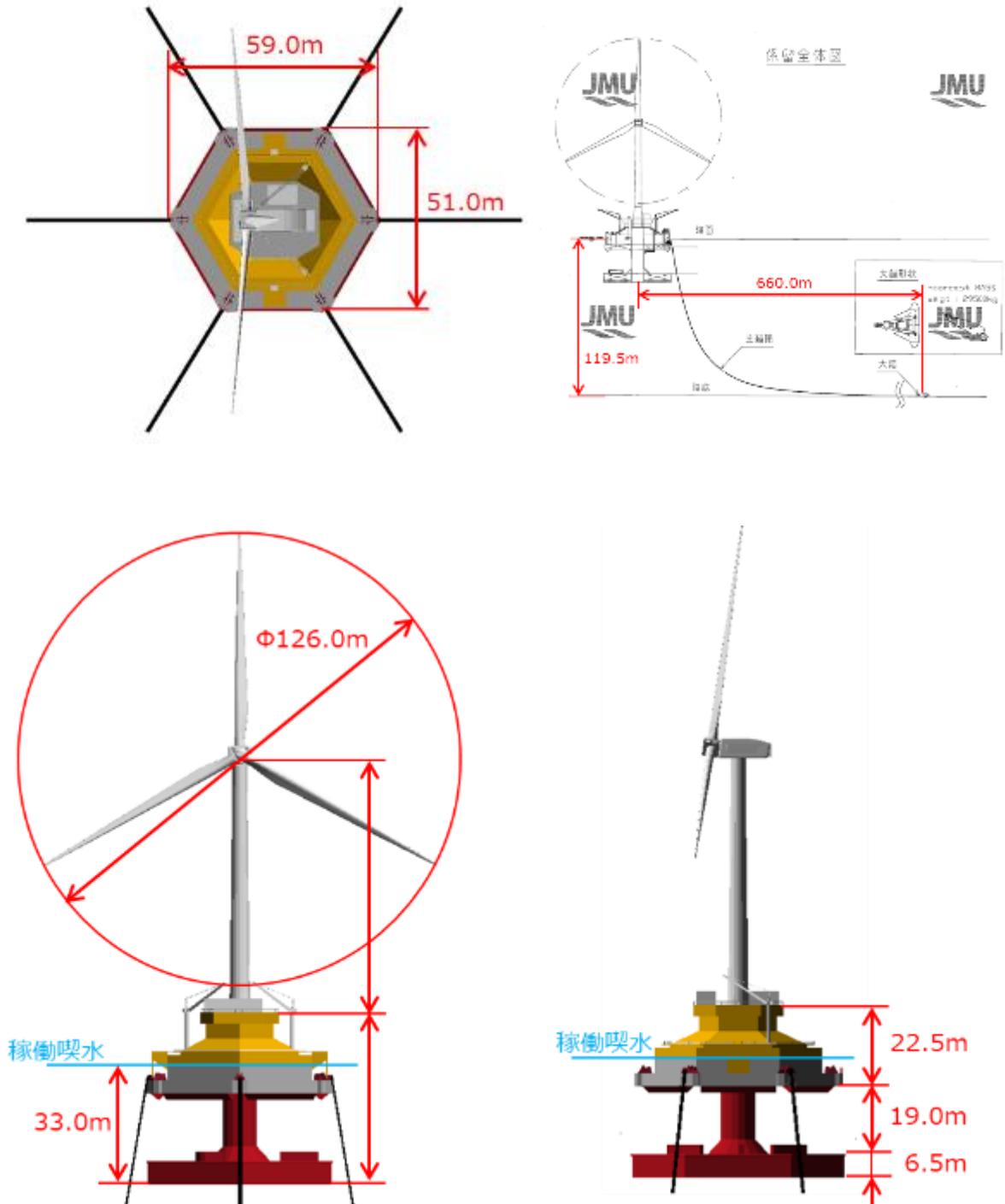
$$\text{稼働率} = 1 - \frac{\text{浮体が要因で風車が発電を停止した時間}}{24 \text{ 時間} \times \text{月間日数}}$$

丸紅からの報告をもとに作成

図 26 2MW 浮体の設備稼働率

## 2.3.2 5MW 浮体

### (1) 平成 30 年度事業における総括委員会の内容



ジャパンマリユナイテッドにて作成

図 27 5MW 浮体の概要図

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 本であり、中心からの半径は 660m、水深は 119.5m である。

開発・製造業者であるジャパンマリ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艀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て、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) 令和元年度及び令和 2 年度における総括委員会の内容

### ①進捗の確認

福島洋上風力コンソーシアムでは、平成 30 年度の総括委員会の提言を踏まえ、更なる維持管理費の低減に向けた取り組みを行った。維持管理費の低減に向けた取り組みを表 16、令和元年度及び令和 2 年度の事業期間中において計画外に生じた維持管理項目を表 17、計画時点を 100 とした時の維持管理費の変動要因を図 28 に示す。

表 16 維持管理コスト低減に資する取組（5MW 浮体）

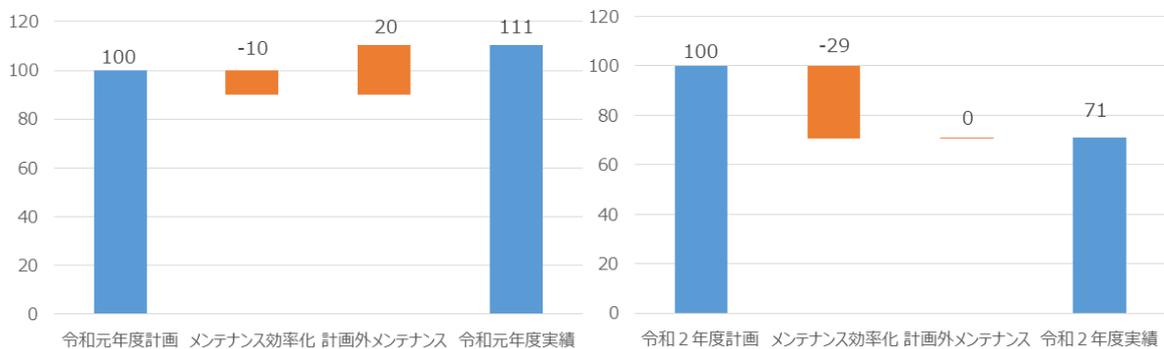
番号	年度	項目	検証のステータス	評価
1	R1	消耗品の点検・交換周期の見直し（一部）	○	○
2	R1	航路標識用の AIS 設備の交換周期の見直し（一部）	○	○
3	R1	補助発電機に関連する点検・交換の見直し	未実施	△
4	R1	消耗品の点検・交換周期の見直し（1を除く）	未実施	△
5	R1	航路標識用の AIS 設備の交換周期の見直し（2を除く）	未実施	△
6	R2	通風機軸受	未実施	△
7	R2	パッケージエアコン フィルタ	未実施	△
8	R2	トイレユニット消耗品	未実施	△
9	R2	電動バタフライ弁（60 個）駆動部注油	未実施	△
10	R2	波止弁（3 個）	○	○
11	R2	雑用空気圧縮機部品	未実施	△
12	R2	トランシーバ用電池	未実施	△
13	R2	補助発電機用原動機	○	○
14	R2	補助発電機用原動機	○	○
15	R2	補助発電機用原動機	未実施	△
16	R2	補助発電機用原動機	未実施	△
17	R2	補助発電機用原動機	未実施	△
18	R2	非常遮断弁部品交換（10 年毎）	未実施	△
19	R2	1 号ビルジポンプ定期点検、部品交換（5 年毎）	未実施	△
20	R2	補助発電機室給気通風機軸受交換（3 年毎）	未実施	△
21	R2	雑用空気圧縮機定期点検、部品交換（5 年毎）	未実施	△
22	R2	補助発電機関連 3 ヶ月点検 経費	○	○
23	R2	航路標識用 AIS ヒューズ 7A	○	○
24	R2	航路標識用 AIS パッキン U1685L	○	○
25	R2	航路標識用 AIS 充電制御器 SVC14-5A	未実施	△
26	R2	航路標識用 AIS 太陽電池パネル ZK36M530B	未実施	△
27	R2	航路標識用 AIS 蓄電池 NP65-12	未実施	△

○：効果を確認、△：詳細な分析・検証が必要

表 17 計画外に生じた維持管理項目（5MW 浮体）

番号	年度	項目	原因	実施した対策/検討される対策	要因
1	R1	手摺の損傷	洋上一般	必要最小限の箇所は修理済み。今後は、暴露部の交通装置（手摺など）については、通常無人であることから、倒立式やスタンションなど、作業者が乗船した場合のみ使用する型式に変更することで、メンテナンス費の削減が可能になるものと考えられる	クラス A

番号	年度	項目	原因	実施した対策/検討される対策	要因
2	R1	信号灯制御盤の故障	洋上一般	バッテリーを交換した。メーカー記載のバッテリーの標準的な寿命は4～6年で、今回の交換は設置時期から4年が経過しており、標準的な寿命程度の時期であった。今後の対応として、設置後3年以降は、3か月毎に寿命の目安になるバックアップ時間を測定することで、より正確にバッテリー寿命を判定すると共に、予防保全の導入を考えたい。	クラス B
3	R2	スイッチング電源の交換	洋上一般	予備品と交換し、予備品を補充した。	クラス B



ジャパンマリユナイテッドからの報告をもとに作成

図 28 維持管理費の計画と実績（5MW 浮体 左：令和元年度、右：令和2年度）

5MW 浮体の維持管理を担当しているジャパンマリユナイテッドが報告した内容は以下のとおりである。

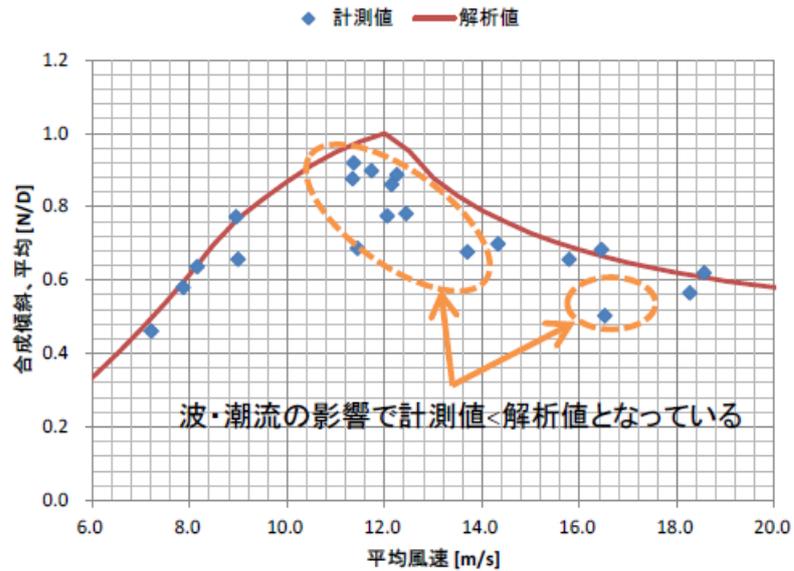
- コスト低減に資する取組（表 16）は、法定点検以外の点検や交換作業の見直しについては効果が確認できているが、補助発電機については、必要時に外部からの持ち込みで代替できるものの、点検周期のタイミング等の問題もあり、検証ができていないこと。
- 計画外の維持管理の項目（表 17）は、台風の被害に影響するものが多く、手摺については、通常無人であることを考えて、作業時のみ立て起こすなどの修繕を考えていること。
- 令和元年度の維持管理費は、計画時点を 100 とすると 111 となり、コスト低減による取組以上に、計画外の維持管理が生じたためであること。
- 令和2年度の維持管理費は、計画時点を 100 とすると 71 となり、法定点検以外の点検及び交換作業を取りやめることで、維持費の大幅な削減効果が確認できたこと。

## ②技術的な知見の整理

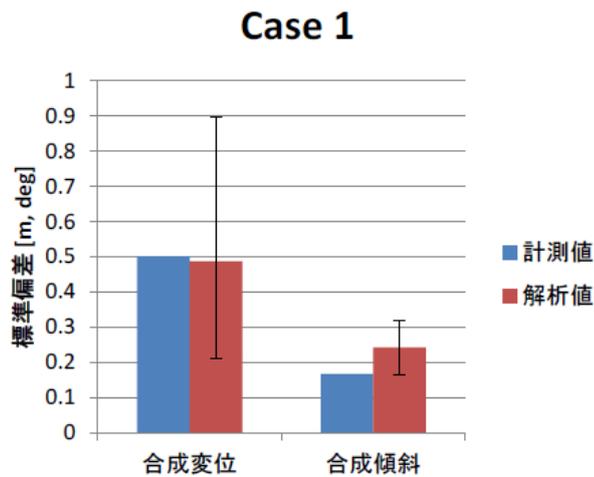
実証事業を通じた設備の安全性の検証について、以下の結果が得られた。

- 風車運転時の静的な傾斜角（10 分間平均）の、計測値と解析値を風速帯域ごとに比較した結果、計測値と解析値は概ねよく一致しており（図 29）、傾向として解析値が安全側にあることを確認した。

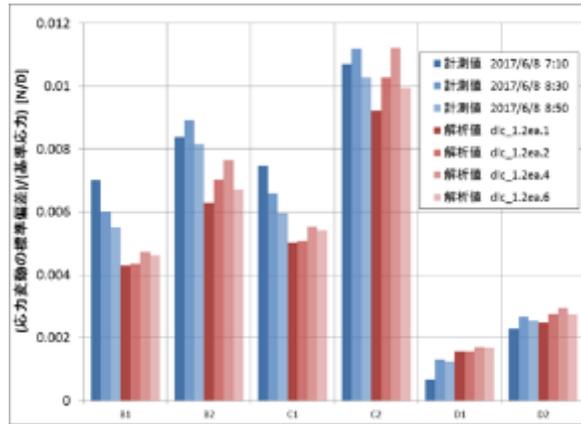
- 浮体設計時に用いた連成解析コードと解析モデルを用いて、計測された気象・海象条件のもとでの浮体の動的挙動を意味する変位と傾斜について、計測値と解析値の標準偏差を比較した結果、両者は概ねよく一致しており（図 30）、設計が安全側になっていることを確認した。
- 実証海域の気象・海象条件を解析モデルに入力した際の応力変動と、ひずみゲージにて計測された応力変動を比較すると、解析値と計測値で概ねよく一致しており、ケース間のばらつきも計測値、解析値で同程度であったため（図 31）、設計手法の妥当性を確認することができた。



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 概要版より抜粋  
 図 29 準静的傾斜角の計測値と解析値の比較



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 概要版より抜粋  
 図 30 浮体の動的影響の計測値と解析値の比較



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 概要版より抜粋

図 31 構造応力変動の計測値と解析値の比較

③課題認識における教訓（学びの整理）

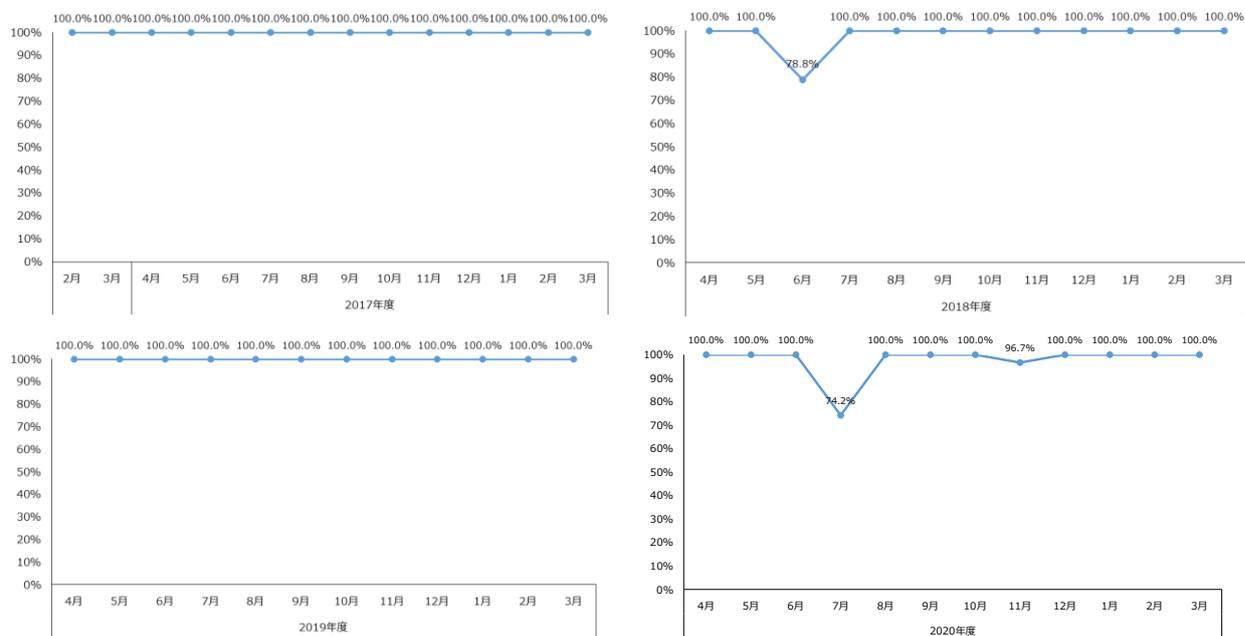
これまでの実証研究事業を通じて確認した学びについて、ジャパンマリンユナイテッドから表 18 のとおり報告を受けた。

表 18 実証事業を通じて確認した学びの整理（5MW 浮体）

段階	運転維持の観点から設計に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
全般	当初計画と異なる風車を搭載することになり、船体構造が大きくなった。	浮体の大きさに比例する鋼材量、塗料、アノード等の防錆材も過大となった。	事業者、風車メーカーとのコミュニケーションを密にして計画を随時見直す。
施工段階	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、沈降途中の不安定動揺が危惧され、クレーン無しの自由沈降を実施したところ、予想通りの傾斜方向とはならず、取水口が中空に出てしまい、沈降が中断した。	クレーン船による沈降を前提とした浮体であっても、自由沈降するケースを考慮した配管設計は必要。	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考慮した最適な配管設計を行う。
運転・維持段階	現在の通船についている乗り込み装置がセミサブ型浮体に適したタイプであり、アドバンススパーの場合、乗り込もうとしている位置が、波の向きによっては、渦ができて乗り込みづらいとの意見あり。	アドバンススパーの場合、乗り込もうとしている位置が、波の向きによっては、渦ができて乗り込みづらいとの意見あり。	乗り込み口を2か所から4か所に増やすなど、乗り込み装置のタイプに関わらず、アクセス率を向上させる工夫が必要。
	J-CAT One に設置した乗り込み装置の特性上、アクセスする場所が、波の向きによっては、渦ができて乗り込みにくい。	アクセス船から浮体への乗り移りがしにくく、アクセス率が低下し、メンテナンスの効率が悪くなる。	
	陸上監視所で浮体の姿勢変化を発見できず、浮体内に水が浸入した。	風車運転時は傾斜することが正常のため、浮体の傾斜の変化が緩やかであっても、異常状態に気づくためには長期のデータ監視が必要。	

段階	運転維持の観点から設計に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
運転・維持管理段階	<p>浮体の艀装品に作用した局所的荷重により、艀装品取付部の外板にクラックが発生し、海水が流入し、浮体の傾斜が生じた。</p>	<p>浮体の傾斜に伴い、安全確認を行うまで、風車運転を停止したため、稼働率の低下に繋がった。運用段階で発生した場合の亀裂等について、進展を防止する対応が必要となる。</p>	<p>早期発見、早期補修が必要であり、具体的方策を以下に記載する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・異常を早期に発見できるよう、風車の運転状態を考慮したうえで、浮体状態の健全性を判断可能な浮体状態監視システムを装備する。</li> <li>・浮体の安全性に係る最低限の項目は、監視員の監視対象とする。（マニュアル化）</li> <li>・シミュレーションにより、き裂伝播が周辺構造及び全体強度に及ぼす影響を確認し、要すれば直ちに補修工事を行う。</li> </ul>
	<p>浮体の艀装品に作用した局所的荷重により、艀装品取付部の外板にクラックが発生し、海水が流入し、浮体の傾斜が生じた。</p>	<p>浮体の傾斜に伴い、安全確認を行うまで、風車運転を停止したため、稼働率の低下に繋がった。浮体艀装品に関するルール整備が必要である。</p>	<p>具体的方策は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・水面付近に配置する艀装品を可能な限り削減するか、非使用時には格納できる艀装品を採用する。</li> <li>・水中艀装品に対する荷重の推定方法を確立する。</li> <li>・艀装品に関するルールの在り方を日本海事協会と相談する。</li> <li>・設計時に、第三者を交えた浮体構造、艀装品に関するデザインレビューを実施する。</li> </ul>

### (3) 5MW 浮体の稼働率のトレンド



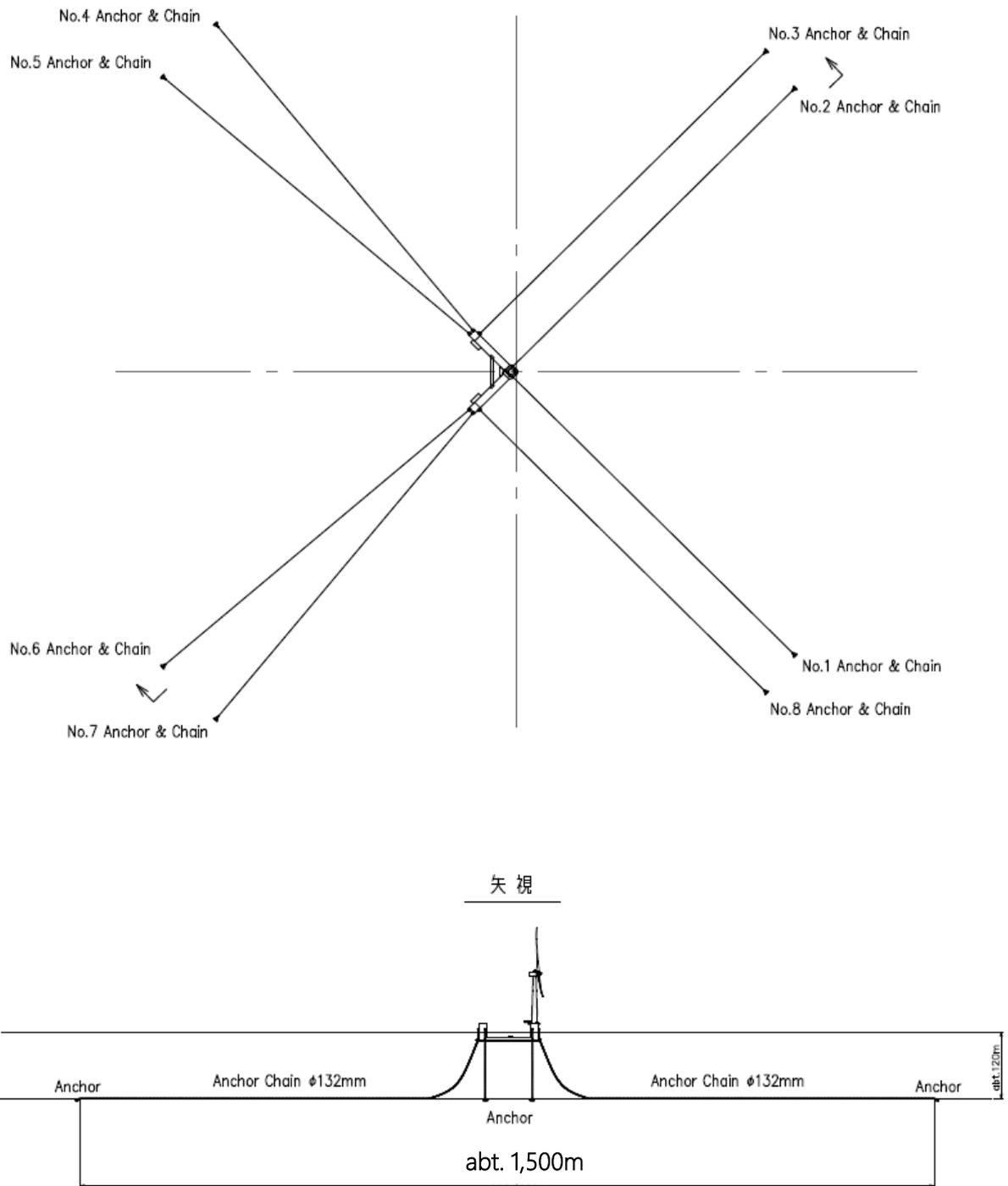
$$\text{稼働率} = 1 - \frac{\text{浮体が要因で風車が発電を停止した時間}}{24 \text{ 時間} \times \text{月間日数}}$$

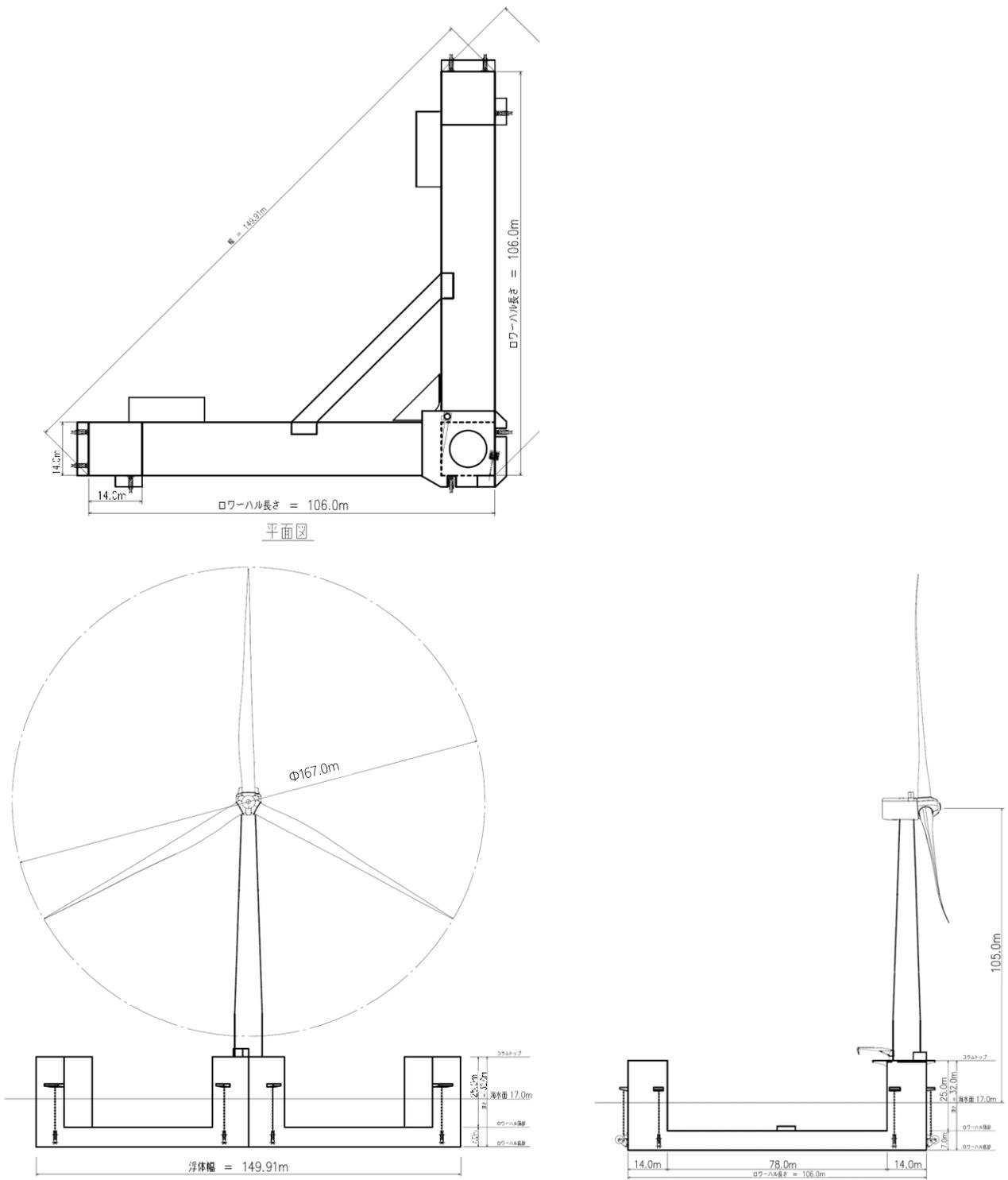
丸紅からの報告をもとに作成

図 32 5MW 浮体の設備稼働率

### 2.3.3 7MW 浮体

#### (1) 平成 30 年度事業における総括委員会の内容





三菱造船にて作成

図 33 7MW 浮体の概要図

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 本であり、中心からの半径は 750m、水深は 120m 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揺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・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) 令和元年度及び令和 2 年度における総括委員会の内容

### ①進捗の確認

7 MW 浮体は、平成 30 年度の提言を踏まえ、平成 30 年 8 月末に発電を停止している。そのため、福島洋上風力コンソーシアムでは、撤去までの期間において必要最低限の安全対策を行った。維持管理費の低減に向けた取り組みを表 19、令和元年度及び令和 2 年度の事業期間中において計画外に生じた維持管理項目を表 20、計画時点を 100 とした時の維持管理費の変動要因を図 34 に示す。

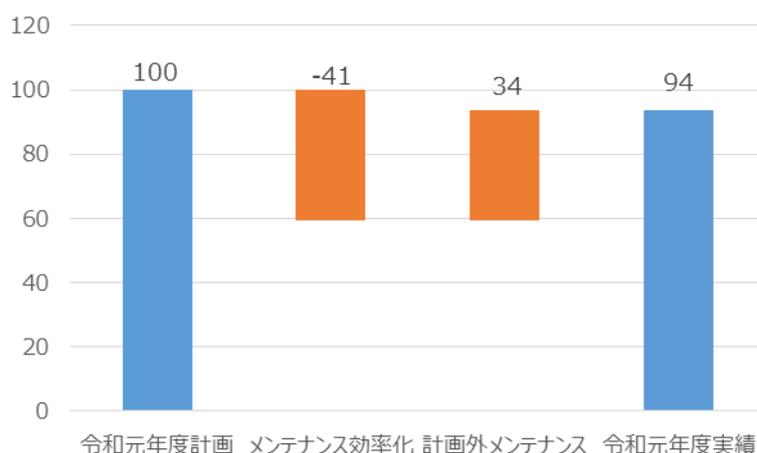
表 19 維持管理コスト低減に資する取組 (7MW 浮体)

番号	年度	項目	検証のステータス	評価
1	R1	定期点検回数の見直し	○	○

○：効果を確認、△：詳細な分析・検証が必要

表 20 計画外に生じた維持管理項目 (7MW 浮体)

番号	年度	項目	原因
1	R1	海洋生物付着防止装置の故障	浮体式であるために発生する



三菱造船からの報告をもとに作成

図 34 令和元年度の計画時点を 100 とした時の維持管理費の変動要因（7MW 浮体）

7MW 浮体の維持管理を担当している三菱造船が報告した内容は以下のとおりである。

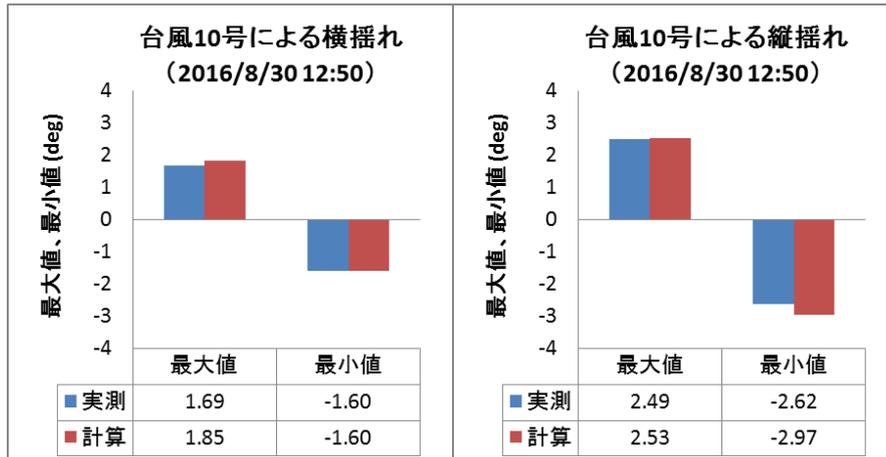
- コスト低減に資する取組（表 19）は、定期点検の回数を見直した結果であること。
- 計画外の維持管理の項目（表 20）は、海洋生物付着防止装置の故障による点検・保守作業であること。
- 令和元年度の維持管理費は、計画時点を 100 とすると 94 となり、コスト低減による取組が計画外の維持管理よりも上回ったためであること。

また、三菱造船からの報告を受けて、本委員会としては、総括委員会の提言を受け安全管理のみを実施したことを確認した。

## ②技術的な知見の整理

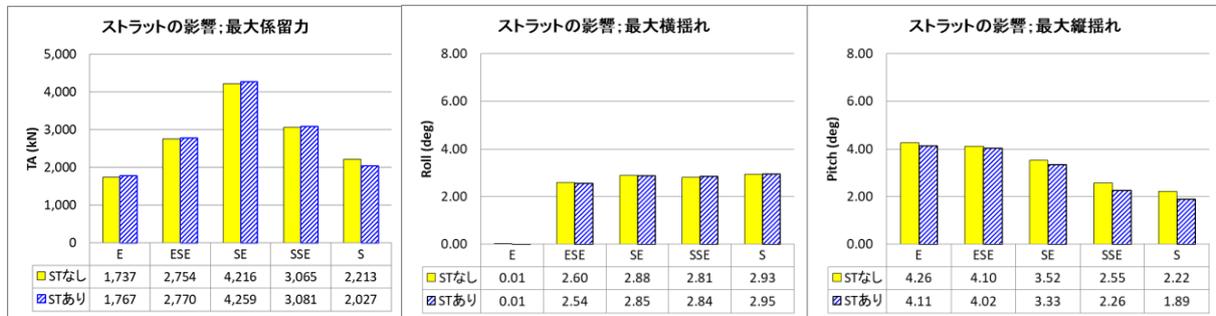
実証事業を通じた設備の安全性の検証について、以下の結果が得られた。

- 平成 28 年の台風 10 号による横揺れ・縦揺れの最大値について実証事業を通じて得られた気象・海象データを用いて解析を実施した結果、解析値は浮体の揺れの実測値と比較して安全側であったため、浮体設計が安全側であることを確認した。（図 35）
- 本実証設備では、浮体の恒久対策としてストラット構造を追加する工事を実施した。ストラット構造の有無について、浮体の動揺・係留力データを比較検証した結果、工事の前後で大きな変化が無いことを確認した。（図 36）
- また、ストラット構造を追加後のローハルの応力実測値を比較した結果、約 50%減の効果が得られることを確認した。（図 37）
- 係留力について、実証事業を通じて取得した浮体観測データをもとに準静的解析・動的解析を実施した結果、日本海事協会が定める安全率を満足していることがわかった。（図 38）
- また係留力について、レインフロー解析及び頻度解析を行い係留索の余寿命を推定した結果は（表 21）のとおりとなり、設計寿命である 20 年を各係留索で十分に満足することを確認した。



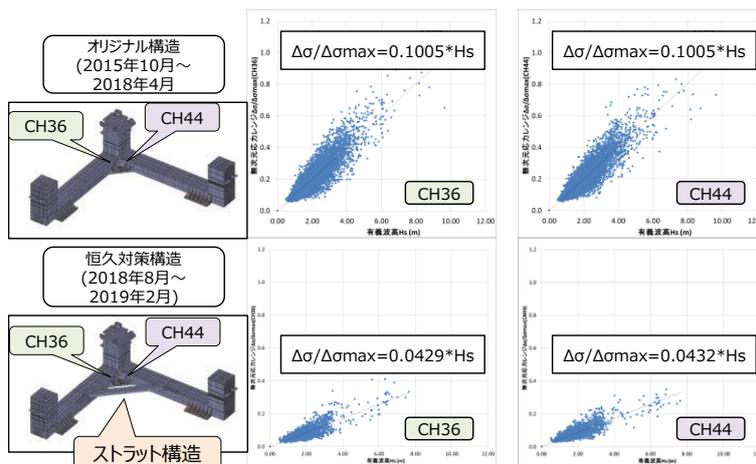
平成 29 年度福島沖での浮体式洋上風力発電システムの実証研究事業報告書 概要版より抜粋

図 35 浮体ピッチの計測値と解析値の比較



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 概要版より抜粋

図 36 ストラット構造の有無による最大係留力・浮体動揺の比較

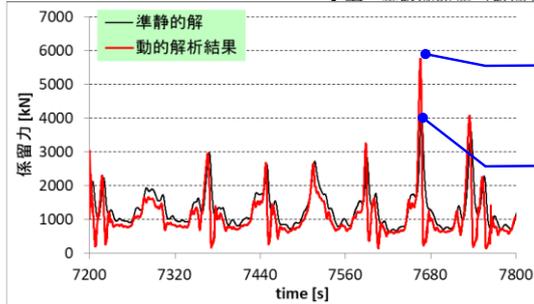


平成 30 年度福島沖での浮体式洋上風力発電システムの実証研究事業報告書 概要版より抜粋

図 37 ストラット構造の有無によるローワーハル応力の比較

係留索の安全率  
(NKガイドライン)

状態	安全率
	チェーン及びワイヤロープ
非損傷時	
動的解析を行う場合	1.67
準静的解析を行う場合	2.00
単一索破断状態 (破断後の平衡状態)	



動的解析 ; 5,754kN  
(安全率 : 2.12 > 1.67)  
準静的解 ; 4,216kN  
(安全率 : 2.90 > 2.00)

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 概要版より抜粋

図 38 係留力の動的解析結果

表 21 係留索の疲労被害度と寿命推定

係留索ID	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
疲労被害度	0.0082	0.0102	0.0076	0.0073	0.0077	0.0082	0.0105	0.0082
余寿命(年)	271.2	216.9	293.0	306.6	288.6	269.7	211.6	271.6

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 概要版より抜粋

③課題認識における教訓（学びの整理）

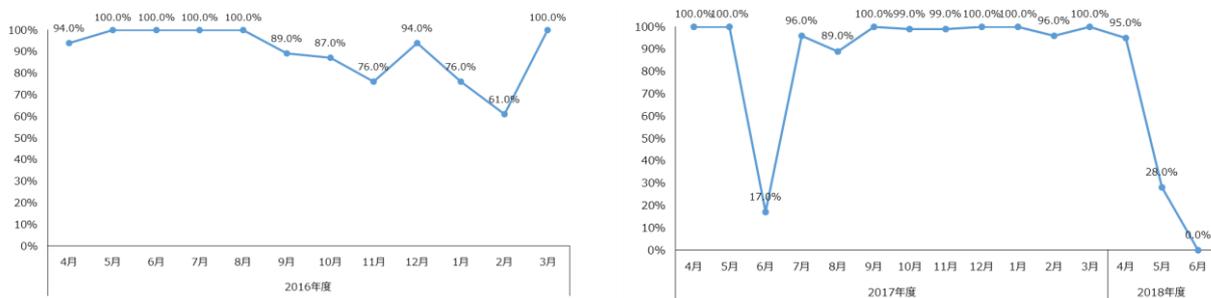
これまでの実証研究事業を通じて確認した学びについて、三菱造船から表 22 のとおり報告を受けた。

表 22 実証事業を通じて確認した学びの整理（7MW 浮体）

段階	運転維持の観点から運用に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
全般	浮体曳航時に台風に遭遇、駿河湾に避航した	大型浮体を長距離にわたり曳航することを避けるために、現地建造に適した構造様式とする	ふくしま新風のボックス構造を活用した浮体形式は、量産に適した設計思想であり、さらなる改善を行うことで現地建造も可能となる
開発段階	P/Sコラム接舷設備の改修	舳（へさき）のある小型船ではP/Sコラムへのアクセスが制限されており、作業工程に悪影響	アクセス船の形状を調査し、接舷方法に適した構造とする。Cコラム、P/Sコラムを同等の仕様とする
設計段階	定期点検要点検個所の削減	ローハル上に残置した艀装品シートと船体の溶接部は定期点検での検査対象となるため、検査箇所が増える	点検個所削減の為、工事用等の浮体運用に直接不要な施設は撤去する
	ポンプ室内結露の対策	特に春先であるが、船体内部結露により区画内にビルジがたまり、頻繁な排水が必要となる	ビルジウェルを大きくして排水頻度を減らすと共に、床面に傾斜をつける等でビルジの回収を容易にする
	ポンプ室内への搬入装置	ポンプ室内への機器搬入のためのリフティングデバイスが無いため、作業を人力に頼ることとなり、作業員への負担が増える	可搬式／組み立て式のリフティングデバイスを装備する
設計段階	バラストタンク内防食性	塗膜不良に起因する No.5 UPP/LWR タンクに設置している喫水計元弁用油圧管フランジ部発錆	アルミアノードを追加設置し、塗膜不良に対する部分的な防食性能を向上させる
	ローハルからコラムトップへのアクセス確保	定期点検時のローハル構造確認のための実施要領として、浮体を浮上させてハッチからタンク内へアクセスすることが安全であるため、施工要領の改善を行った。このため、浮上した状態でのローハルからコラムトップへのアクセスが必要となるが、工事用に設置した昇降設備しかなく、安全性・利便性に欠ける	工事用に設置した昇降設備を一部流用したアクセスルートを改修設置する事により、安全性と作業員の利便性を向上させる
	ローハルへの着船／乗下船設備	上述の定期点検要領の改善に伴い、ローハルへの直接乗船が必要となるが、曳航作業用に設置した設備しかなく、安全性・利便性に欠ける	縄梯子をアルミ製の梯子に改修する等の改良を実施し、耐久性のある設備として安全性・利便性を向上する
	ローハルからコラムトップへのアクセス確保	アクセスハッチ位置（浮体の低い位置から浮体内に入るハッチがあれば、アクセス時の安全性が向上）	波浪に強い外部アクセス（昇降梯子、歩廊）設計を行う

段階	運転維持の観点から運用に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
施工段階	海底ケーブルの引き込み作業が改善必要	海底ケーブル引き込み方法として、設置時のみ使用する専用ウインチの代わりに、浮体・風車用揚荷装置利用の工夫が必要	浮体の係留や浮体上への送電ケーブルの引き込み方法を、専用機器を使用せずに行う方法を確立する
	係留チェーンの引き込み、初期張力調整作業のために海上クレーンを使用すると、フックの触れ回り等が発生し、危険が伴う。	P/S コラム上に専用ウインチを仮設したが、浮体の係留終了後の撤去が必要であり、この作業も危険を伴う	FC 船や、専用ウインチを使用しないチェーン引き込み方法を立案する
	浮体を着底させてタワー・風車を設置する場合、船底アノードが着底の障害にならない配置・船底構造が必要	着底／再着底時にアノードの着脱作業が必要で作業効率が低下	アノードのレセス化、又は外部電源防食（ICCP）により、船体外板の突起物をなくす
	運開前の調整作業員の作業環境改善	トイレや休憩にアクセス船を利用することにより、作業効率が低下	簡易トイレや空調など休憩が取れるスペースを設置する
	同上	同上	運開後の検査及び保守作業員の作業効率の改善も期待できる
運転・維持段階	コラム間アクセス性の改善	C/P/S コラム間の移動の都度通船待ちが生じ、作業効率が低下	ロワーハル内にアクセストラックを設置する。電路・管路を兼ね、タンクへのアクセスも可能とすることにより検査・点検の利便性も向上する
	クレーン位置とアクセス位置の改善	重量物搭載時、クレーンと浮体諸設備との干渉による制限がある	使用する船舶を想定して、事前検討を実施すると共に、初期段階から浮体諸設備とのマッチングを図る
	バラストポンプ容量／配管の適正化	設置時及び定期検査時浮体の浮上／沈下に時間が掛かり非効率、作業者の負担大	夜間（日没から日の出まで）にバラスト調整作業が終了するようなポンプ容量／配管とする
	バラストタンク定期点検要領の改善	ダイバーによる検査は危険を伴うと共に、コストアップの要因となる	浮体を浮上させ、タンク内の海水を排水して検査する（NK 検査時に試行して有効性を確認済み）
	通船出港前のアクセス可否判断	浮体アクセス位置での波浪状況が把握できない為、アクセス可否判断の確実性に欠け、作業工程に悪影響	アクセスポイントにウェブカメラを設置し、直接アクセス位置の状況を画像で判断することにより可否判断の確実性を向上させる
	バラスト排水監視	バラストポンプの遠隔運転時、海水の排水が確認できず、空運転等による作業効率の低下・作業員の負担増・機器への悪影響が発生	排水口からの排水状況を目視できるウェブカメラを設置し、排水状況を確認しながら作業を行う事により、左記問題を解決する

### (3) 7MW 浮体の稼働率のトレンド



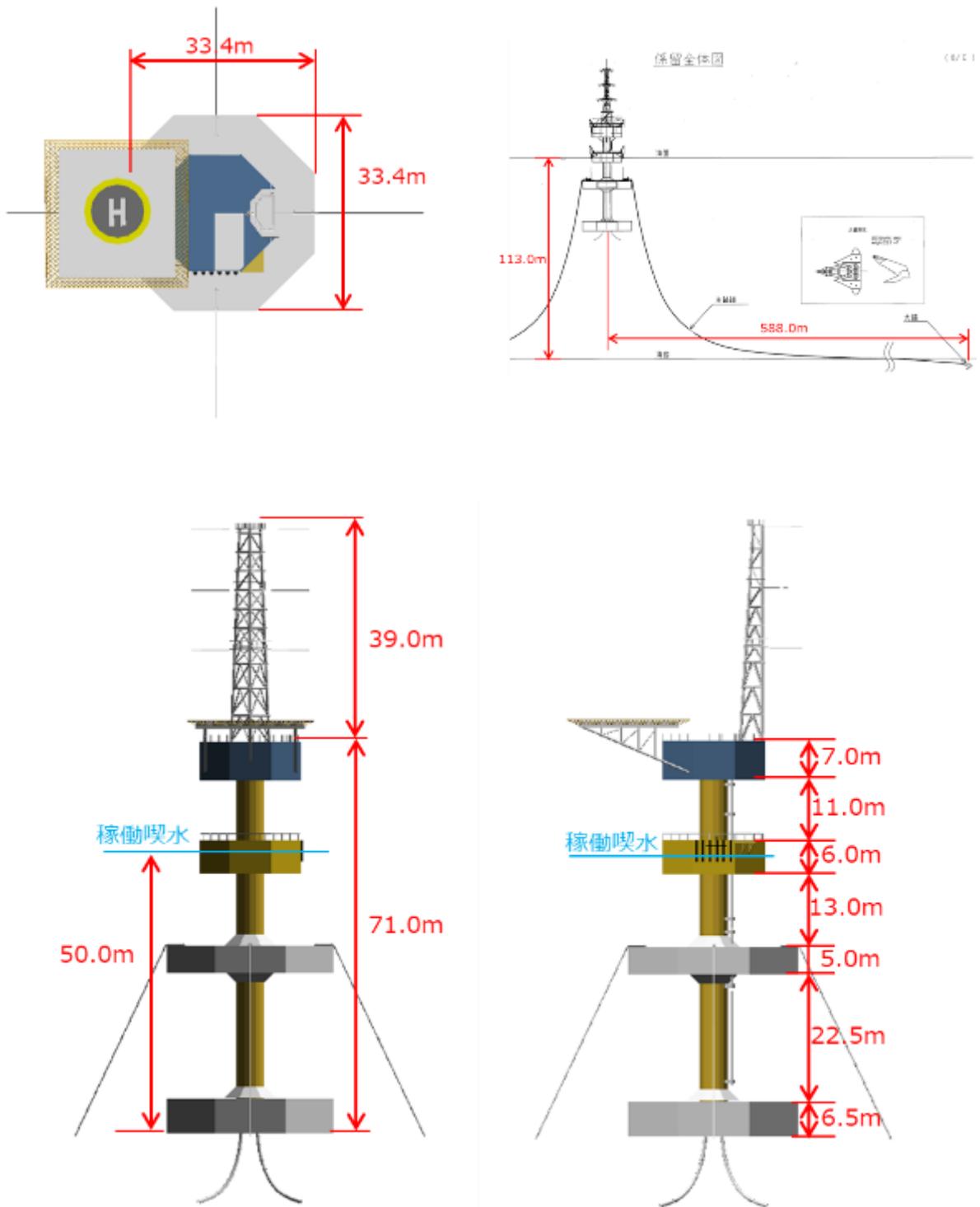
$$\text{稼働率} = 1 - \frac{\text{浮体が要因で風車が発電を停止した時間}}{24 \text{ 時間} \times \text{月間日数}}$$

丸紅からの報告をもとに作成

図 39 7MW 浮体の設備稼働率

### 2.3.4 洋上変電所浮体

#### (1) 平成 30 年度事業における総括委員会の内容



ジャパンマリユニテッドにて作成

図 40 洋上変電浮体の概要図

当該浮体は、上部ハル、コブ、中間ハル、下部ハルの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、上部ハルには気象観測用タワーとヘリポートが、上部ハル内には、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、下部ハル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本であり、中心からの半径は588m、水深は113.0mである。

開発・製造業者であるジャパンマリ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) 令和元年度及び令和2年度における総括委員会の内容

### ①進捗の確認

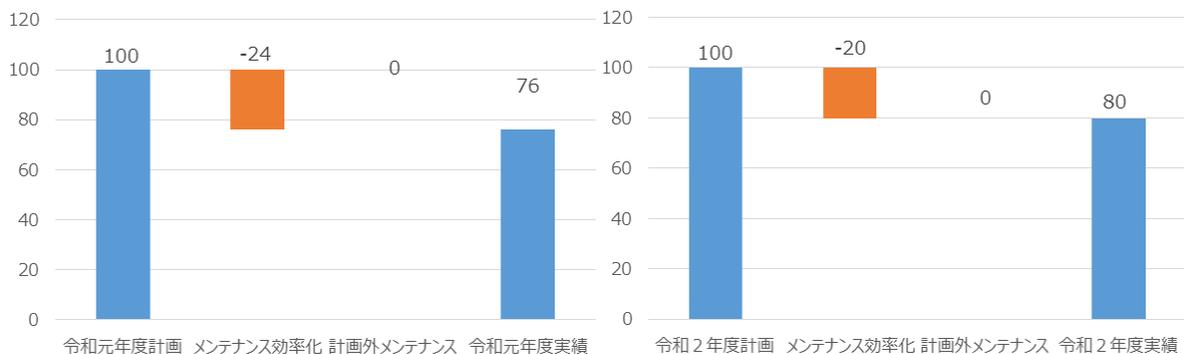
福島洋上風力コンソーシアムでは、平成30年度の総括委員会の提言を踏まえ、更なる維持管理費の低減に向けた取り組みを行った。維持管理費の低減に向けた取り組みを表23、計画時点を100とした時の維持管理費の変動要因を図41に示す。洋上変電所浮体は、令和元年度及び令和2年度の事業期間中において計画外に生じた維持管理項目はなかった。

表 23 維持管理コストの低減に資する取り組み (SS浮体)

番号	年度	項目	検証のステータス	評価
1	R1	消耗品の点検・交換周期の見直し(一部)	○	○
2	R1	気象・海象観測装置の点検・交換周期の見直し	○	○
3	R1	補助発電機に関連する点検・交換の見直し	未実施	△
4	R1	消耗品の点検・交換周期の見直し(1を除く)	未実施	△
5	R1	航路標識用のAIS設備の交換周期の見直し	未実施	△
6	R2	アノード COBハル側面、デッキ底面(5年毎) CA-NH-50	未実施	△
7	R2	アノード 制鎖器(5年毎) CA-9C	未実施	△
8	R2	アノード バラストタンク内(5年毎) CA-Y20-20B	未実施	△
9	R2	アノード マンホール開閉(パッキン新替)	未実施	△
10	R2	アノード関係経費	未実施	△
11	R2	パッケージエアコン フィルタ	未実施	△
12	R2	トイレユニット消耗品	未実施	△
13	R2	電動バタフライ弁(37個) 駆動部注油(2年毎)	未実施	△
14	R2	ポンプ室までのハッチ開放(6枚)	未実施	△
15	R2	パッキン新替	未実施	△
16	R2	補助発電機用原動機	○	○
17	R2	補助発電機用原動機	○	○
18	R2	補助発電機用原動機	○	△
19	R2	補助発電機用原動機	未実施	△
20	R2	補助発電機用原動機	未実施	△
21	R2	補助発電機用原動機	未実施	△
22	R2	補助発電機用原動機	未実施	△

番号	年度	項目	検証のステータス	評価
23	R 2	補助発電機用原動機	未実施	△
24	R 2	補助発電機用原動機	未実施	△
25	R 2	補助発電機関連 3ヶ月点検 経費	○	△
26	R 2	航空障害灯用蓄電池盤	○	○
27	R 2	航空障害灯	○	○
28	R 2	気温湿度計（プローブ）湿度計用フィルタ交換	○	○
29	R 2	超音波海象計防食亜鉛板交換	○	○
30	R 2	GPS ブイ式波高計バッテリー、係留システム交換及びデータ回収	○	○
31	R 2	流速プロファイラーリング交換	○	○
32	R 2	流速プロファイラーオーバーホール	未実施	△
33	R 2	AIS 関連費用	○	○

○：効果を確認、△：詳細な分析・検証が必要



ジャパンマリンユナイテッドからの報告をもとに作成

図 41 維持管理費用の実績と見通し (SS 浮体 左：令和元年度、右：令和2年度)

洋上変電設備を搭載した浮体の維持管理を担当しているジャパンマリンユナイテッドが報告した内容は以下のとおりである。

- コスト低減に資する取組（表 23）は、法定点検以外の点検や交換作業の見直しと、浮体の年次検査にて必要となる観測データの代用に伴う観測装置の点検や交換作業の見直しについては効果が確認できている。しかしながら、補助発電機やその他消耗品については、点検周期のタイミングの点もあり検証ができていないこと。
- 計画外の維持管理の項目は、令和元年度及び令和2年度は発生していないこと。
- 令和元年度の維持管理費は、計画時点を 100 とすると 76 となり、コスト低減による取組の効果がでていること。（図 41）
- 令和2年度の維持管理費は、計画時点を 100 とすると 80 となり、令和元年度と同様、コスト低減による取り組みの効果が出ていること。

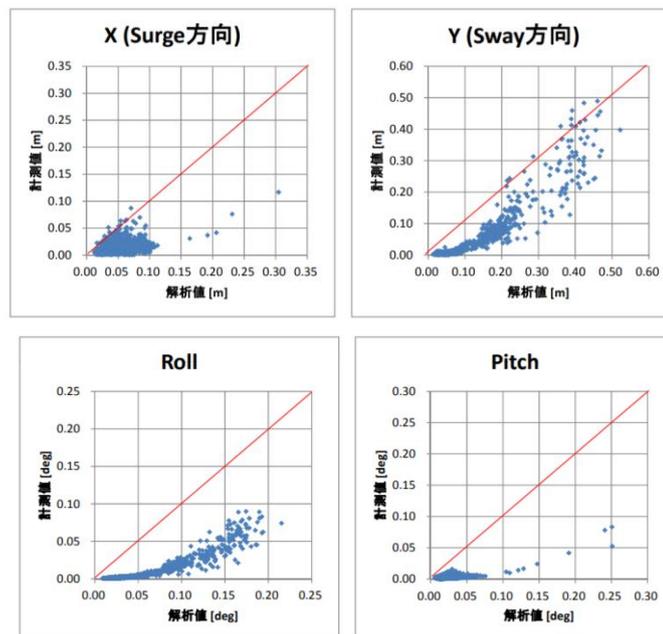
ジャパンマリユナイテッドからの報告を受けて、本委員会としては、観測データの代用や簡略化により維持管理費を削減したことを確認した。

- 世界初の浮体式の洋上変電所と観測タワーであり、浮体の動揺がある環境下でも、陸上変電所と同じ維持管理手法で概ね異常なく稼働することが確認できた。
- 令和元年 8 月に設置後初めて大きな故障が発生し、風車の稼働率にも影響したが、現在では原因が特定され、再発防止のための改善策が講じられた。洋上変電所固有の維持管理手法として今後も活用可能な成果となり得る。

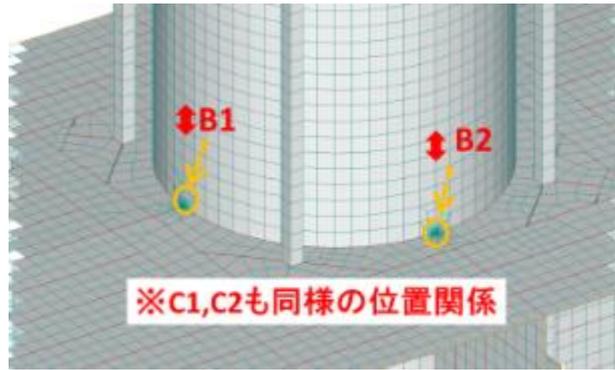
## ②技術的な知見の整理

実証事業を通じた設備の安全性の検証について、以下の結果が得られた。

- SS 浮体の運動の計測値及び解析値を比較・検証した結果、すべての運動において解析値が計測値より安全側に分布していることより、解析値の妥当性を検証することが出来た（図 42）。また、設計時想定以上の低動揺性能を SS 浮体が有していることを確認した。
- 図 43 の 4 箇所（B1、B2、C1、C2）において解析・評価を実施した結果、推定疲労寿命はそれぞれ 394 年、189 年、142 年、85 年となり、いずれの評価箇所においても設計寿命である 20 年を大幅に上回ることが分かった。



平成 28 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 概要版より抜粋  
図 42 準静的傾斜角の計測値と解析値の比較



平成 28 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 概要版より抜粋

図 43 疲労寿命解析の解析該当箇所

③課題認識における教訓（学びの整理）

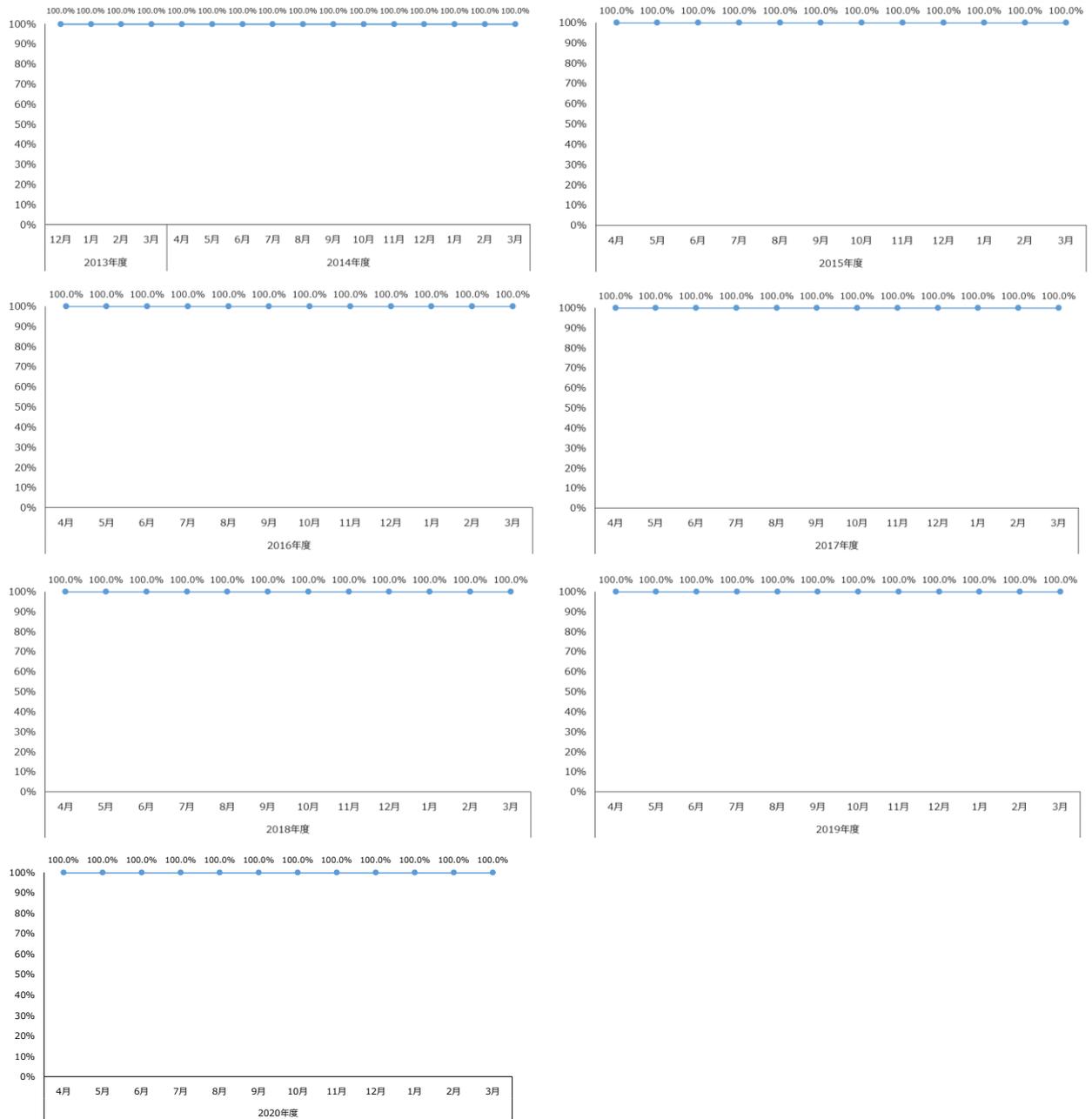
これまでの実証研究事業を通じて確認した学びについて、ジャパンマリンユナイテッドから表 24 のとおり報告を受けた。

表 24 実証事業を通じて確認した学びの整理（SS 浮体）

段階	運転維持の観点から設計に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
全般	開発時点で設定した変電所の許容加速度が実際に対応可能な値より小さかった。	浮体の大きさに比例する鋼材量、塗料、アノード等の防錆材も過大となった。	変電設備メーカーとのコミュニケーション、情報共有、設計時からの機器メーカーの参加による最適設計が必要
設計段階	設計時にアクセス補助装置を装備したアクセス船の使用を想定していなかったため、バッファチューブの後付けが必要になり、海上で工事を行った。	乗移り船の想定仕様が設計時点で決定していなかったため、海上での後付け工事が追加的に必要になった。	設備運用方法等について、事業者とのコミュニケーションのもと、最適な設計をすることが必要
運転・維持段階	強風により、想定よりも短時間で、調達のリードタイムが長く即時入手が困難なウインドソックが破損した。	交換品の手配が間に合わない場合、操縦者が着船時の安全確認を行えなくなるため、ヘリデッキが使用できなくなる。	破損しやすく安価だが手配に時間がかかる交換用品は常に用意しておく。
	令和元年台風 15/19 号の際に暴露部手摺が複数変形または破損した。	手すりの破損は、作業員の安全性の確保に支障をきたす可能性があるため、海上での補修工事が必要になる。	乾舷の低いデッキ上の艀装品は頑丈にするか、可倒式の手摺を採用する。
	当初の想定と比べて、消耗品の交換が早かった。 ①浮体内の蛍光灯、②外板部アノード、③手持ち消火器、④泡消火装置の溶液	点検及び交換回数が増加する。	消耗品は、交換作業回数を極力少なくすることを第一に考えて装備する（寿命や使用期間の長いものを採用する等）。運用にあたっては、例えば電灯については退船時には浮体内の電灯消灯を確認するなど、作業員への周知も重要。
	監視カメラの補修・交換が必要になった。	暴露部のカメラは故障頻度が高く、信号コネクタ部の強度も不足し、点検及び交換回数が増加する。	ヘリデッキ監視カメラ、風車監視カメラ等、台数を最小限とし、必要な場合は耐候性の高いものを採用
	海洋付着生物など、水面付近特有の環境により、乗降梯子のグレーチングが腐食、破損した。	はしごの破損は、作業員の安全性の確保に支障をきたす可能性があるため、海上での補修工事が必要である。	実際には乗移りに使用した船舶の乾舷と SS の乾舷がほぼ同一であったので、梯子を使用せず直接 COB デッキに乗移りができ、結果的に不要であったことが判明した。事業者と密にコミュニケーションを取り、使用予定の船舶等運用構想の変更を随時設計に反映できるようにする。
浮体内部の通信設備がなかったため、作業員同士の連絡ができなかった。	コラム内やポンプ室にいる作業員とバラスト制御室にいる作業員の連絡手段がなく、作業効率が悪化した。	浮体内部で無線や Wifi など通信可能とする。	

段階	運転維持の観点から設計に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
運転・維持段階	風向風速計が損傷した際、交換作業用台車ごとデッキ上に墜落することが複数回あった。	交換作業用台車を再製作し、設置するための追加的な費用が発生した。	陸上用と同等よりも耐久性の高い台車を設置する。または使用後は格納保管可能な設備とする。
	電源及び接続部の不具合が原因で、潮流速計測装置が4回故障した。	潮流観測装置を再度設置するための追加的な費用が発生した。	使用環境に対応した耐候性能の高い機器を選定
	燃料不足、信号不具合による燃料ポンプの誤作動の発生	サービスタンクへのバルブが閉じていたこと（人的ミス）及びサービスタンクの液面計が壊れていた。	操作要領の確認 複数の液面計を設置しておく
	浮体内での計測データ記録のための、NAS電池が短期間で消耗した	耐候性能が不足したものであり、取得データが記録できなくなる可能性がある。	洋上で無人の状態を使用することを考慮して耐候性能の高い機器を選定するとともに、予備品【1個】の確保が必要。
	信号線周りの耐候性不足により、放水銃のバルブ操作信号をうけつけない状態になっていた	ヘリコプター着船時に火災が発生した場合、手動での消火活動となる可能性がある。	耐候性能の高い機器を選定し、ヘリデッキ保守に関する機器なので、ヘリデッキ要否の検討もする。

### (3) 洋上変電所浮体の稼働率のトレンド



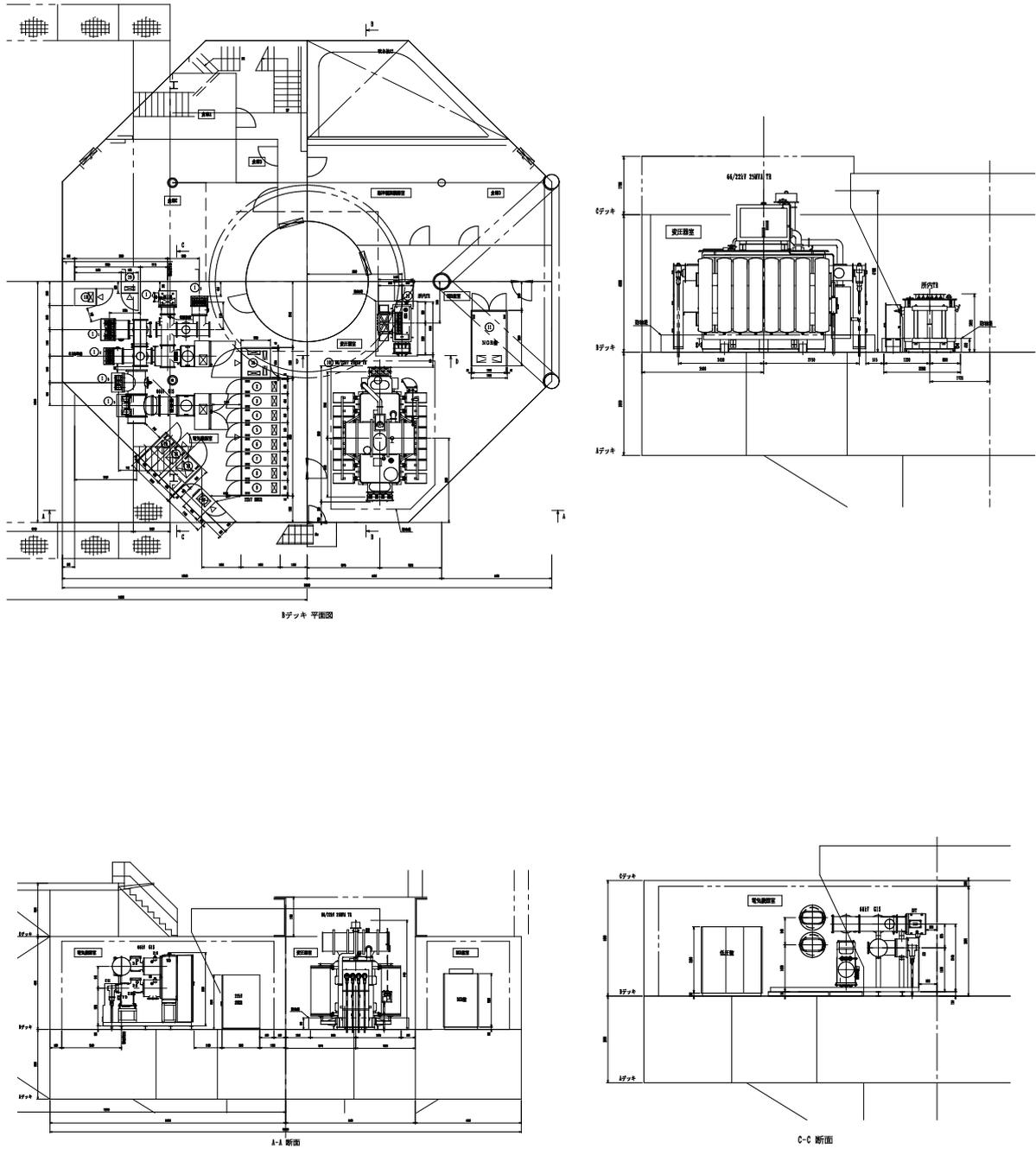
$$\text{稼働率} = 1 - \frac{\text{浮体が要因で風車が発電を停止した時間}}{24 \text{ 時間} \times \text{月間日数}}$$

丸紅からの報告をもとに作成

図 44 SS 浮体の設備稼働率

## 2.4 洋上変電所

### (1) 平成 30 年度事業における総括委員会の内容



日立製作所にて作成

図 45 変電設備の概要

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、浮体動揺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、浮体の動揺対策としては、浮体の開発・製造業者から提供された動揺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ということが確認できた。

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。

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、動揺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) 令和元年度及び令和2年度における総括委員会の内容

### ①進捗の確認

福島洋上風力コンソーシアムでは、平成30年度の総括委員会の提言を踏まえ、更なる維持管理費の低減に向けた取り組みを行った。維持管理費の低減に向けた取り組みを表25、令和元年度及び令和2年度の事業期間中において計画外に生じた維持管理項目を表26、計画時点を100とした時の維持管理費の変動要因を図46に示す。

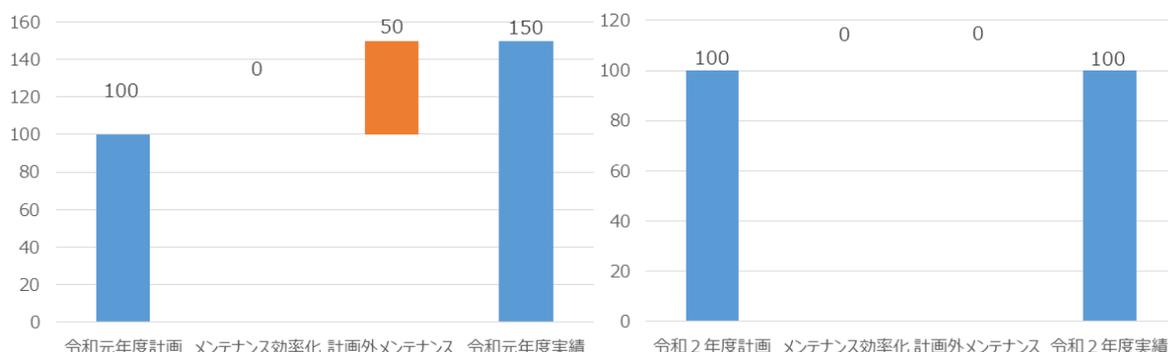
表 25 維持管理コスト低減に資する取組（洋上変電所）

番号	年度	項目	検証のステータス	評価
1	R1	GIS（ガス絶縁開閉装置）点検周期の見直し	未実施	△
2	R1	SWGR（スイッチギア）の点検周期の見直し	未実施	△
3	R1	監視装置の点検周期の見直し	未実施	△

○：効果を確認、△：詳細な分析・検証が必要

表 26 計画外に生じた維持管理項目（洋上変電所）

番号	年度	項目	原因	実施した対策/検討される対策案	要因
1	R1	直流電源装置の故障	陸上	AVR ユニットの交換を実施した。対策案としては故障が発生した場合でも運用に影響が無いよう2重化を行う。	クラス B



日立製作所からの報告をもとに作成

図 46 維持管理費用の実績と見通し（洋上変電所 左：令和元年度、右：令和2年度）

洋上変電設備を維持管理している日立製作所が報告をした内容は以下のとおりである。

- 計画外の維持管理の項目（表 26）は、通常の点検では確認ができなかった直流電源装置の故障への対応であること。
- 令和元年度の維持管理費は、計画時点を 100 とすると 150 となり、コスト低減による取組の効果が未確認の中で直流電源装置故障による計画外メンテナンス費が増大したことによるものである。
- 令和2年度の維持管理費は、計画費用とおりのとなった。

日立製作所からの報告を受けて、本委員会としては、夏に故障が発生したが、原因と今後の対応策が得られることを確認した。

## ②技術的な知見の整理

実証事業を通じた設備の安全性の検証について、以下の結果が得られた。

- 暴風時の浮体動揺特性により試験角度、振動数を設定し、動作・共振点変化の確認、外観点検、性能試験等を実施した結果、特に問題は発生しなかった。（図 47）
- また、浮体の動揺があり過酷な外部環境においても、陸上変電所と同じ維持管理手法で異常がなかったが、令和元年 8 月に設置後初めて変電設備に大きな故障が生じた。当該故障について、原因の特定および再発防止の取組により、洋上変電所固有の維持管理手法の提言に繋がった。具体的には洋上変電所を設置する際、変電所へのアクセス効率を考慮し、アクセス率が悪いと想定される場合はバッテリーや一部制御機器などは 2 重化した設備を納入し、部品故障時、即設備停止に至らない構成とする必要があることが挙げられる。



日立製作所にて作成

図 47 変電浮体の設備の動揺試験

③課題認識における教訓（学びの整理）

これまでの実証研究事業を通じて確認した学びについて、日立製作所から表 27 のとおり報告を受けた。

表 27 実証事業を通じて確認した学びの整理（洋上変電所）

段階	運転維持の観点から設計運用に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
設計段階	<p>常時発生する動揺による機器の故障</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・遮断器高速開閉時に破損</li> <li>・内部破損による変圧器故障</li> </ul>	<p>遮断器や変圧器が故障した場合洋上での交換が不可能なため陸地までの輸送が必要。かつ代替品の準備に短い製品で6か月以上必要なため1年以上の設備停止となり経済性に多大な影響がある。</p>	<p>実際の動揺を想定した振動試験、傾き試験を実施した上で運用を行った結果懸念されていた故障及びその傾向はみられず振動、傾き試験が効果あることを確認した</p>
	<p>変圧器の発錆による液漏れ等の故障</p>	<p>発錆は小規模であれば現地補修塗装で対応可能だが進行しすぎると穴あきが発生してしまう。その場合陸地まで輸送が必要な場合があり長期間の設備停止となり経済性に多大な影響がある。</p>	<p>屋外機器の変圧器に対し耐塩塗装(0.35mg/cm<sup>2</sup>)及びラジエータ部に溶融亜鉛メッキを使用し発錆への効果があることを確認した</p>
運転・維持段階	<p>バッテリー故障による変電所電源喪失</p>	<p>故障発生時、すぐ代替品を準備し交換作業の段取りを行ったが、洋上へアクセスできない期間が生じ結果的に数週間の設備停止となった</p>	<p>今後新たに洋上変電所を設置する際、変電所へのアクセス効率を考慮し、アクセス率が悪いと想定される場合はバッテリーや一部制御機器などを2重化した設備を納入するよう検討する必要があることを知見として得た。</p>
	<p>ガス回収、変圧器液体回収等の大掛かりな作業は洋上での実施が難しい</p>	<p>部品故障等でガス回収等が必要となった場合港まで帰港する必要があるが生じ長期間の停止及び高額な費用が発生するといった影響がある。</p>	<p>今後新たに洋上変電所を設置する際、部品交換や機材搬入が容易にできる配置や備え付けのクレーンを変電所に備えておく必要があることを知見として得た。</p>

## 2.5 送電ケーブル

### (1) 平成 30 年度事業における総括委員会の内容

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の報告があった。

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。



古河電気工業にて撮影

図 48 海洋生成物の付着状況例

(2) 令和元年度及び令和 2 年度における総括委員会の内容

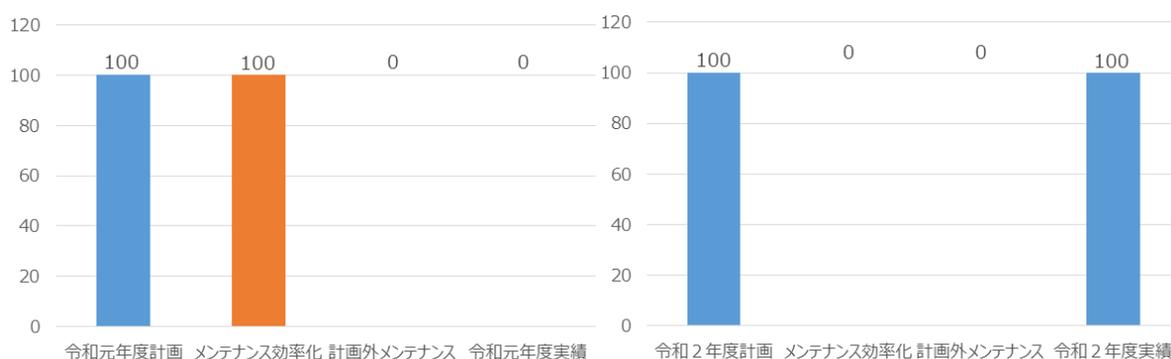
①進捗の確認

福島洋上風力コンソーシアムでは、平成 30 年度の総括委員会の提言を踏まえ、更なる維持管理費の低減に向けた取り組みを行った。維持管理費の低減に向けた取り組みを表 28、計画時点を 100 とした時の維持管理費の変動要因を図 49 に示す。送電ケーブルは、令和元年度及び令和 2 年度の事業期間中において計画外に生じた維持管理項目はなかった。

表 28 維持管理コスト低減に資する取組（送電ケーブル）

番号	年度	項目	検証のステイタス	評価
1	R 1	ライザーケーブルに付着する海洋生物への恒久対策	検証済	○
2	R 1	ライザーケーブルに付着する海洋生物への追加の恒久対策	検証済	○

○：効果を確認、△：詳細な分析・検証が必要



古河電気工業からの報告をもとに作成

図 49 維持管理費用の実績と見通し（送電ケーブル 左：令和元年度、右：令和 2 年度）

送電ケーブルを維持管理している古河電気工業が報告をした内容は以下のとおりである。

- コスト低減に資する取組（表 28）は、ライザーケーブルに付着する海洋生物の恒久対策の実施であり、これ以降の追加対策は必要ないということ。
- 計画外の維持管理の項目は、令和元年度及び令和 2 年度において発生していないこと。
- 本年度の維持管理費は、計画時点を 100 とすると恒久対策の効果によって 0（メンテナンスフリー）になり、今後も続くこと。（図 49）

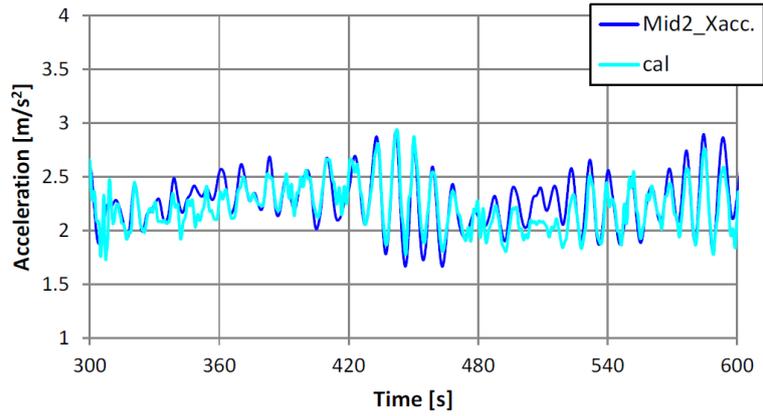
古河電気工業からの報告を受けて、本委員会としては、ケーブルに付着した海洋生成物を除去する費用が掛からないようにするための恒久対策工事が完了したことを確認した。また、これまでの実証研究事業を通じた成果を検証した結果について以下に示す。

- 海域の特性上、設計時の想定以上に海洋生成物がケーブルに付着した結果、ケーブルが海底に沈下・接触し損傷したため、補強を行った。さらに、海底への接触を防ぐための恒久対策（ケーブル保持方法の改善）を実施し、工事後半年は問題がないことを確認。
- 設計段階から、より低コストで確実な海洋生成物の付着・沈降対策やメンテナンスフリー化についての検討の必要性が確認された。

## ②技術的な知見の整理

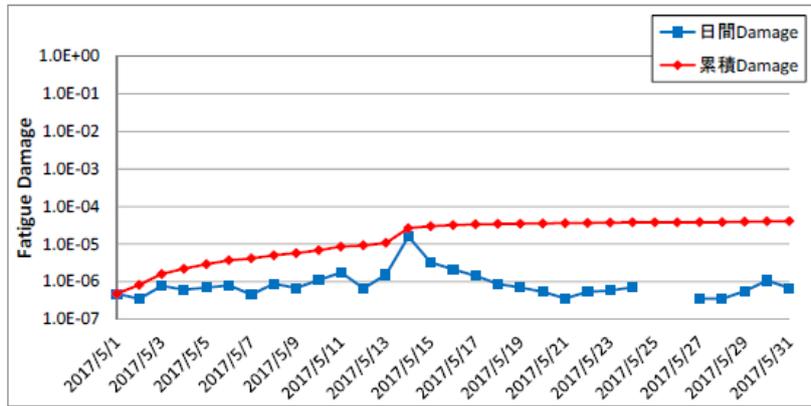
実証事業を通じた設備の安全性の検証について、以下の結果が得られた。

- 5 MW 浮体の運動データによるケーブル挙動解析とケーブル挙動計測データ（図 50）について、荒天条件の平成 29 年 1 月 9 日、平成 29 年 3 月 15 日の 2 期間（いずれも 1 時間のデータを抽出）して検証を行った結果、いずれも挙動計測データと解析結果は良く一致していたため、挙動解析の妥当性を検証できた。
- 福島沖における 1 年間の実証海域での海象条件を用いて疲労解析を行った結果、疲労寿命は 7 MW では 232 年、5 MW では 170 年となった。また、福島沖の 1 年間の統計データ（波高、周期、波向）を用いた疲労解析の結果、7 MW で 165 年、5 MW で 157 年となり、いずれの結果においても、設計寿命である 20 年を満足することから、ケーブルの安全性が検証できた。
- 海洋生物の付着量が設計時の想定以上となったことを受けて、ケーブルの恒久対策として、7MW を除く 6 本のライザーケーブルに大型ブイ+チェーン取付を実施した。（図 52） これにより、従来実施していた大型 ROV（Work クラス）を使用した維持管理を不要とすることで維持管理コストの極小化の見通しが得られた。
- また、小型 ROV を使用し、ライザーケーブルの線形調査を実施することで、恒久対策の有効性を調査した結果、ライザーケーブルの沈降が抑えられており、大型ブイ+チェーンの有効性が確認できた。（図 53、図 54）
- なお、小型 ROV によるライザーケーブルの点検は、送電ケーブル単独での実施の必要性がないため、浮体・係留点検時に同時に実施することで、送電ケーブルとしての維持管理費用の極小化が可能であることを確認している。



平成 29 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 概要版より抜粋

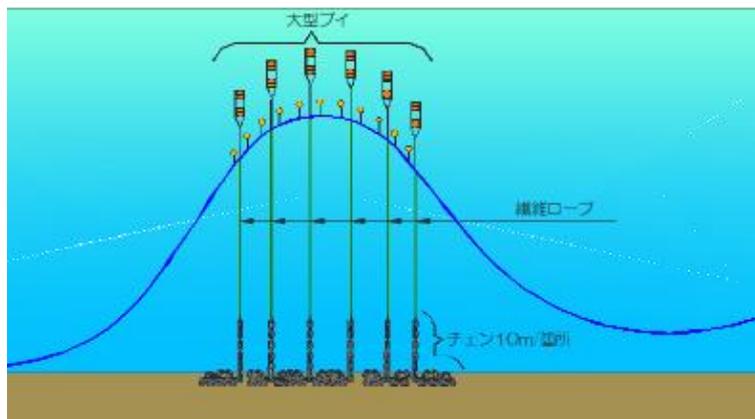
図 50 5MW ライザーケーブルの挙動解析・挙動計測データ



※当該解析は 1 年分（平成 28 年 10 月～平成 29 年 9 月）の浮体運動データを用いて実施、グラフは平成 29 年 5 月を例としている。

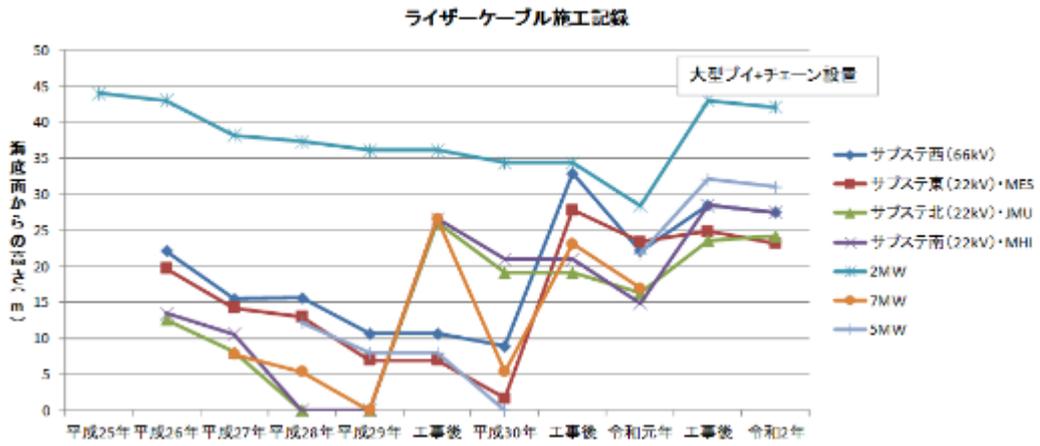
古河電気工業にて作成

図 51 7MW ライザーケーブルの疲労解析データ



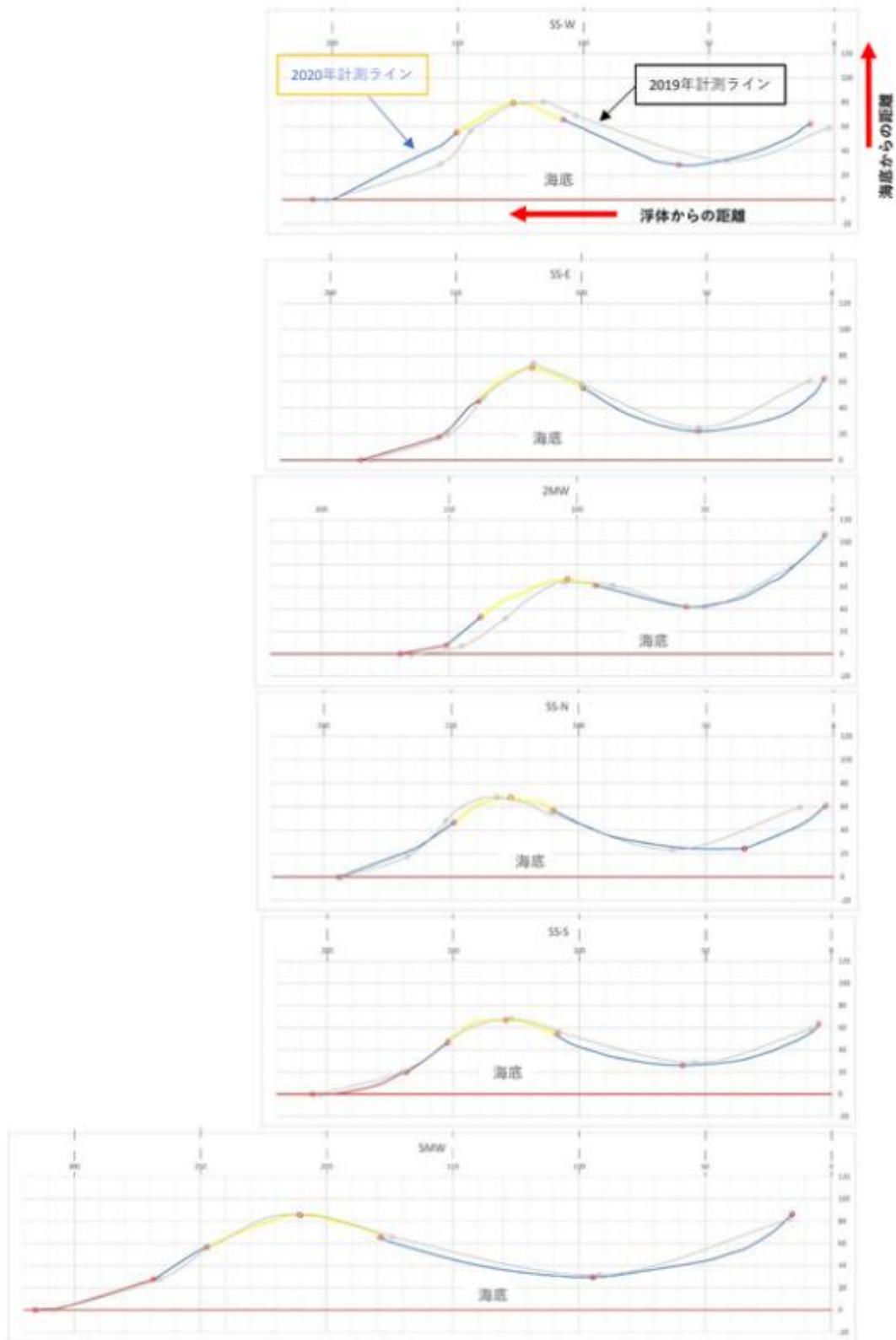
古河電気工業にて作成

図 52 大型ブイ+チェーンによる恒久対策



古河電気工業にて作成

図 53 ライザーケーブルの線形経年記録



古河電気工業にて作成

図 54 ライザーケーブル線形（令和元年及び令和2年における比較結果）

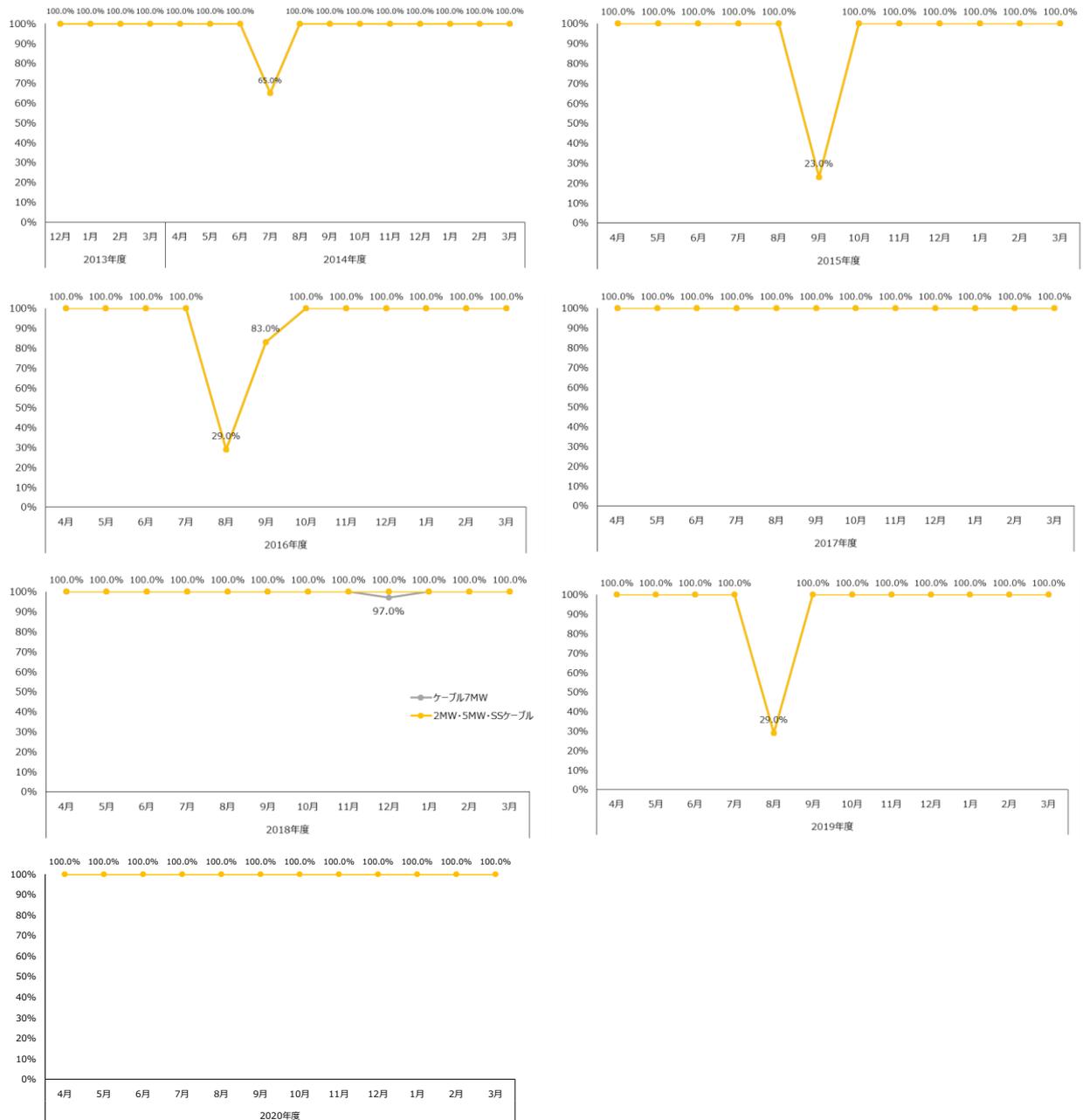
③課題認識における教訓（学びの整理）

これまでの実証研究事業を通じて確認した学びについて、古河電気工業から表 29 のとおり報告を受けた。

表 29 実証事業を通じて確認した学びの整理（送電ケーブル）

段階	運転維持の観点から設計に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
全般	海洋生物の付着によるケーブルの沈下	実証海域でのデータがなく、欧州での事例をベースに設計したため、ライザーケーブルを浮上させるために追加コストが発生した。	各海域で実際にブイ等によって海洋生物の付着状況を実測し、設計に反映させることで、最適な浮力設計を行うことが可能である。
開発段階	浮体設計を優先したために、ケーブルの設計自由度が不足していた。	浮体の設計が決まっていたため、ケーブルの設計自由度が無く、立ち上げや引込が困難な構造になっている。	海洋生成物の付着に対応した、十分な浮力をケーブルにつけられず、ケーブルが沈下した。これらの追加対策工事について、対象物が施工しにくい構造であったため、施工に時間を要した。
設計段階	浮体側発電機の使用計画の未把握・故障時のリスクの未検討	発電機故障による停電状態となった場合に考えうる影響の推察・検討が不足していた。	発電機故障による停電状態となった場合、洋上に発電機を改めて設置する必要があり、追加コストがかかる
	敷設機材の事前設置等準備の検討未実施	ケーブルを引き込む際に必要な重量の大きな器具を、陸上にて設置できず、洋上で人力で乗せたこと。	施工時において追加の作業が発生することになり、工事の遅延につながった。
施工段階	1年に風車1基ベースでの施工の実施	1年に1基の施工になるため、施工船等のチャーター費用が高額化する。	将来のWF化を見据えた場合、工期の短縮化を行わなければコスト低減につなげることができないため、海外の最新事例を含めた各設備（浮体、係留、ケーブル）間の詳細な工程設計の実施による、円滑な施工計画の立案。
	浮体へのケーブル揚収時における、交通船及び浮体間の乗り降り	浮体に到達しても浮体に移ることができず、工期が延長する	浮体へのアクセス船について、接舷を前提とした構造設計が必要。
運転・維持段階	電気や通信ケーブルの不具合の発生場所が特定できず、浮体にアクセスする必要となった	陸上で原因が特定できればよかったが、洋上の点検のため荒天待機もあり、追加的なコストが発生	浮体アクセスの頻度低減が維持管理コスト低減に有効
	浮体へのケーブル揚収時における、交通船及び浮体間の乗り降り	浮体に到達しても浮体に移ることができず、工期が延長する	昇降設備における冗長性の確保

### (3) ケーブルの稼働率のトレンド



$$\text{稼働率} = \frac{\text{ケーブルが要因で風車が発電を停止した時間}}{24 \text{ 時間} \times \text{月間日数}}$$

丸紅からの報告をもとに作成

図 55 ケーブルの設備稼働率

## 2.6 係留チェーン・鋼材

### (1) 平成 30 年度事業における総括委員会の内容

係留チェーン・鋼材を担当した日本製鉄へのヒアリングにより、本実証研究事業の実績として明らかになったことを以下に示す。

- 図 56 に示した摩耗試験・疲労試験等を行い、係留チェーンの摩耗量と疲労強度から寿命を算定する方法を構築。
- 洋上風車向けの高張力鋼をマクロ試験、引張試験、衝撃試験等を経て 7MW 浮体に適用。
- 7MW 浮体の溶接部に UIT（超音波衝撃処理）を適用し、圧縮残留応力を実測。
- 6 種類のスチレンス薄板材を実証研究設備の飛沫帯に設置、回収して腐食量を測定。



日本製鉄にて撮影

図 56 摩耗試験・疲労試験の様子

上記の実績を踏まえ、総括委員会における検証の結果を以下に示す。

- 構築した係留チェーンの摩耗量と疲労損傷度の算定方法の結果を定期検査に適用することで、維持管理費用の低減につながる可能性がある。
- 洋上風車における UIT 及び高張力鋼の適用性を確認した。

(2) 令和元年度及び令和2年度における総括委員会の内容

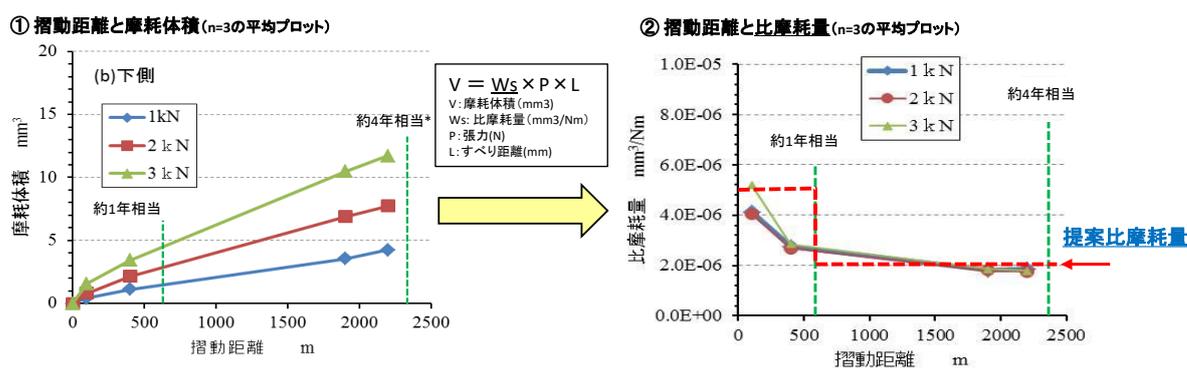
①進捗の確認

係留チェーン・鋼材は、平成30年度総括委員会において、本実証研究事業の中で追加的に取り組むべき提言はなかったため、進捗の確認は行っていない。

②技術的な知見の整理

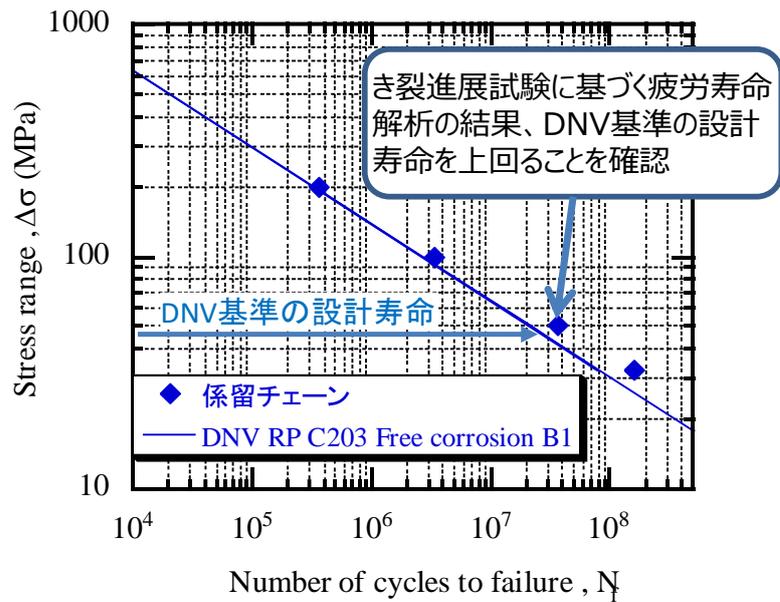
実証事業を通じた設備の安全性の検証について、以下の結果が得られた。

- 人工海水中摩耗試験機を用いて実チェーンから切り出した鋼材サンプルの摩耗試験を行い、摺動距離と比摩耗量の関係を特定した。その結果、比摩耗量は摩耗初期に最も高く、摺動距離の増加とともに一定値に近づくことが分かった。(図57)
- 海水環境を仮定したき裂進展特性から疲労設計線図を予測し、疲労寿命解析を行った結果、想定される環境下において、実チェーン材が設計寿命内で破断する可能性が極めて低いと推定された。(図58)
- 浮体の動揺観測データから算出された応力履歴から係留チェーンのき裂進展解析を非常に厳しい条件下(初期き裂8mm、20年間でのチェーン設計腐食摩耗量の2倍の仮定)にて実施した結果、60年後のき裂深さは最大10.2mmであり、直径132mmのチェーンに対し十分安全性を確保できると推定した。(図59)
- また係留チェーンの摩耗量・疲労損傷度について、5MW・SS浮体の動揺観測データをもとに評価を実施した。摩耗量については、着底部の近傍で大きくなり、20年経過時の摩耗深さは5MW浮体の係留チェーンで5.3mm、SS浮体の係留チェーンでは8.2mmとなり、他の設備の係留チェーンと同程度の傾向となっている。(図60)
- また、疲労損傷度については、20年経過時の最大値は0.00576であり、許容値の0.33(安全率:3)を大幅に下回ることから、十分な疲労強度を有していることがわかった。(図61)

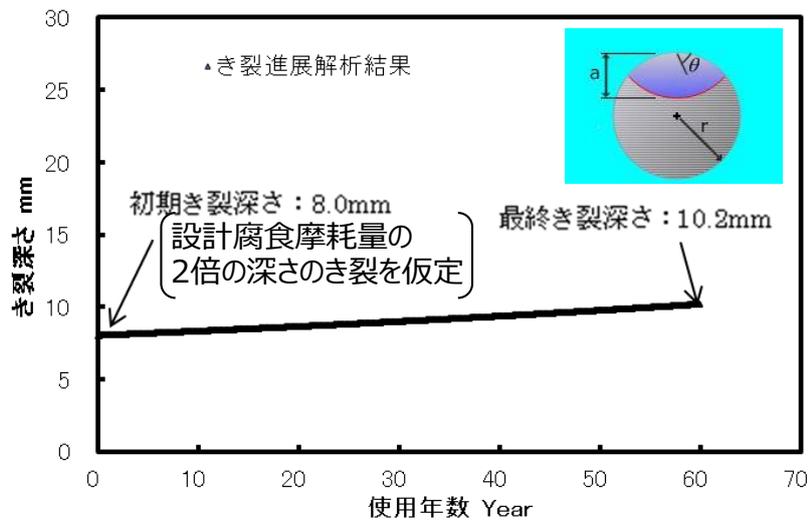


平成29年度福島沖での浮体式洋上風力発電システムの実証研究事業報告書 概要版より抜粋

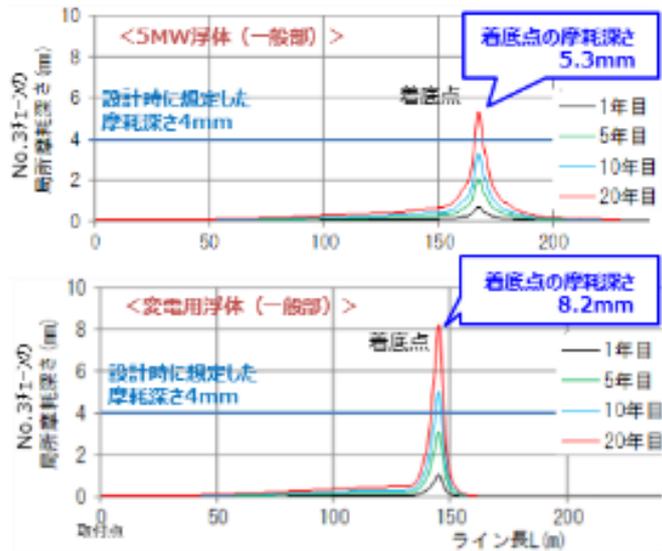
図57 摺動距離と比摩耗量の関係



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 概要版より抜粋  
 図 58 疲労設計線図 (DNV RP) との寿命比較

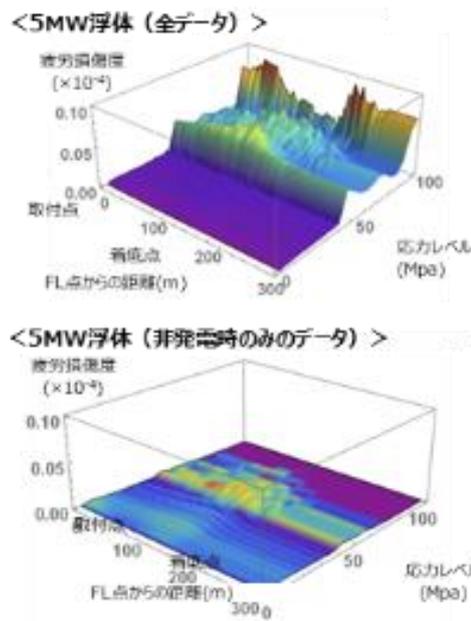


平成 30 年度福島沖での浮体式洋上風力発電システムの実証研究事業報告書 概要版より抜粋  
 図 59 き裂進展解析の結果



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 概要版より抜粋

図 60 係留チェーンの摩耗深さ



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 概要版より抜粋

図 61 係留チェーンの疲労損傷度

③課題認識における教訓（学びの整理）

これまでの実証研究事業を通じて確認した学びについて、日本製鉄から表 30 のとおり報告を受けた。

表 30 実証事業を通じて確認した学びの整理（係留チェーン）

段階	運転維持の観点から設計に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
設計段階	<p>浮体式風車は沖合に設置され、多数リンクからなる係留チェーンによって多点係留されていること、浮体上のスペースが限られていることを鑑みると、点検作業自体のハードルが高い。また、ウィンドファームは多数の風車で構成されることから、点検・保守の頻度を低減、簡素化する取組が必須である。</p>	<p>点検保守頻度を減らすには耐久性の信頼を向上させる必要がある。実物大の試験結果、腐食摩耗、疲労、及び相互影響について科学的根拠を示し、認証基準に反映させることが必要である。</p> <p>そのためには推定精度の高い摩耗量・疲労推定法の確立が必要である。</p>	<p>実物大の R3S 鋼材片を用いた疲労試験(RCA)・摩耗試験により、比較的安価に疲労・摩耗特性と既往基準との整合を確認できた。更に新しい素材に対しても適用できる疲労・摩耗推定手法を構築できた。</p> <p>今後、実証実験で使用したチェーン摩耗量の計測結果と構築した推定手法を照合することで摩耗推定手法を確立することができる。</p> <p>特にフェアリーダー部、海底着底部について摩耗分担を精査しておくことが安全確保に重要である。一方、それ以外の大多数のリンクではほとんど摩耗が生じていない算定結果であり、確認できれば点検・保守を行う対象リンクを限定し、点検・保守を簡素化できる可能性がある。</p>
	<p>設計認証取得時の根拠となる各種基準において点検、保守頻度と腐食摩耗代の設定が一体となって要求事項が構成されている。</p>	<p>浮体式風車特有の課題に応じた点検保守頻度について、摩耗対策の度合に応じた点検・保守頻度の設定が可能かについて認証機関と協議が必要である。</p>	<p>実証実験、研究を通じて摩耗、疲労に関する知見が得られたので、認証機関と協議を進める。</p>

段階	運転維持の観点から設計に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
設計段階	<p>浮体構造物のチェーン係留においてフェアリーダー接続部、着底部のリンク接続部に著しい摩耗が生じるがそれ以外のリンクはほとんど摩耗腐食していない。</p> <p>（摩耗が生じる特定部位にのみ摩耗対策を施すことによって10年間メンテナンスフリーで外洋で供用している事例もある。）</p>	<p>全リンクに均一の腐食摩耗代、点検頻度を設定することは運転維持費の高止まりにつながり、経済的合理性を損なう。</p>	<p>摩耗推定手法により、摩耗が大きくなるリンクを特定でき、他の大多数のリンクはほとんど摩耗しないとの算定結果となった。特定リンクへの集中投資は以下の具体的方策で可能。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・摩耗代を考慮した摩耗対策を設計段階で施す。</li> <li>・フェアリーダー部のリンクはチェーンストッパー等を使用する等、容易に点検、交換できる構造とする。</li> <li>・使用時の動揺観測によって摩耗進展量を把握する。</li> <li>・海底部の特定したリンクについてはROVによる寸法計測を行う。また該当箇所には予めマークを付け、点検を容易にし、施工前に寸法を計測しておくこと。</li> </ul>
	<p>海象、浮体形式、施工方法によっては係留チェーンへの衝撃が発生する可能性があり、製品に初期不良があった場合には、全体安全性に影響する。</p>	<p>製品出荷前の認証に則った検査によって初期不良ないことが前提となる。</p> <p>加えて張力推定精度、疲労・摩耗推定法が一体となり、係留安全性を確保することができる。</p>	<p>今回の動揺観測では浮体の水平面内の揺れの周期が長く、ライン長さの動的影響による衝撃が生じる範囲でないと推定できた。</p> <p>また、発電の有無が係留ラインの発生張力や耐久性（疲労、摩耗）に及ぼす影響は大きくないことがわかった。</p>
	<p>使用年数につれて係留チェーンの摩耗が急速に進展し、さらに摩耗部に応力が集中することによって疲労破壊が促進されることはないか。</p>	<p>設計時に摩耗及び疲労の使用年数による変化を予測、あるいは使用時の動揺観測・ROV(遠隔操作探査機)による状態の把握ができれば適切な点検頻度や要領を設定できる。</p>	<p>素材試験と動揺観測によって、設置後1年程度の間には摩耗が急速に進展するが、リンク間の接触面がなじむ効果により面圧が低下し、摩耗の進展は漸いに緩やかになることがわかった。</p> <p>一度目の点検結果に応じて、次回の点検インターバルを設定することで、点検頻度を減らすことができる。</p>
	<p>係留チェーン破断による漂流可能性を点検などで事前に検知したい。</p>	<p>リスクに対応するためには係留チェーン全リンクを確認する必要があり、運転維持費の増加につながる。一方、1ライン破断後に漂流しないことを設計要件とすること、さらに各係留チェーン各リンクに生じる摩耗、疲労損傷度の均一性がないことから、各リンクの状況に応じた点検・保守方法を選択する余地がある。</p>	<p>各係留チェーンに生じる摩耗量、疲労損傷度は各ライン毎に異なり、均一でないことから複数係留ラインが同時に破断に至る可能性は低く、1ライン破断を浮体の傾斜等により検知することによって流出に対する安全性を確保できる。</p>

段階	運転維持の観点から設計に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
施工段階	長期間の海洋環境下でのチェーン係留を行った場合、フェアリーダー部や着底部のチェーンのリンク間に異常衰耗が発生する。	チェーンリンクの異常摩耗は、使用開始後の数年間で生じ、その量は数mm／年とわずかであるものの、ROV によるモニタリングを実施して、摩耗の進展度合を把握しておく必要がある。	設計で想定していない異常衰耗が生じる場合、面圧が大きい初期の数年で進むと考えられる。摩耗量は使用前後のチェーン径の差分により算定されるため、チェーンの形状や径などの初期値を記録しておくことが重要である。特にフェアリーダー部や想定される着底部など、摩耗量が大きくなると予想される部位の初期値が重要である。
維持管理段階	長期間の海洋環境下でのチェーン係留を行った場合、フェアリーダー部や着底部及びチェーンのリンク間に異常衰耗が発生する。	チェーンリンクの異常摩耗は、使用開始後の数年間で生じ、その量は数mm／年とわずかであるものの、ROV によるモニタリングを実施して、摩耗の進展度合を把握しておく必要がある。	フェアリーダー部や着底部のように摩耗進展が大きい箇所には余裕を持った肉厚を用いることによって、運転・維持段階での交換リスクを低減できる。

## 2.7 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。

(3) 実証事業全体における気づきと改善点

これまでの実証研究事業を通じて確認した学びについて、清水建設から表 31 のとおり報告を受けた。

表 31 実証事業を通じて確認した学びの整理（施工・建設）

段階	運転維持の観点から設計に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
施工段階	小名浜港にて、浮体上に風車を据え付けるため、既存のインフラ設備を用いて浮体を岸壁に係留する計画としたところ、非常に多くの係留索が必要となり、他船の港湾利用に支障が生じたため、着底せざるを得なかった。	着底ができるように浮体底面の強度をあげるような構造を考えると、また、港湾の底面の凹凸を整えるための工夫が必要である。本事業では捨石や古タイヤを積み上げてマウントを作った。	着床式のように設計を終えてから施工計画を検討するという流れではなく、設計の初期段階から施工計画のコンセプトを織り込む必要がある。
	2MW 風車の浮体上への据付は、ドックで行うことができたが、7MW の風車を小名浜港で組み立てる際には、国内の陸上クレーンの揚程が不足した。	本事業では、当時欧州で2つしかない、世界最大級のリングクレーンを持ちこんで施工したが、商用化の段階で、同様の施工方法では高コストになる。	コストを低減するためには汎用性のある既存の設備を最大限活用するという観点が必要である。例として、陸上に構台を設けて陸上クレーンの揚程を上げる方法がある。
	2MW 風車の施工にあたり、海底にある係留チェーンと浮体をつなぐ浮体係留作業では、起重機船を用いたため、稼働率が低かった。	起重機船は、船体の揺れに連動してフックが揺れるため、安全の確保の点から、稼働できる海象条件に限られる。そのため、稼働率が低くなり、施工コストが高くなってしまった。	稼働率が低い起重機船を用いない方法に変更すれば稼働率が向上し、コストの低減が期待される。
	2MW での教訓を受けて、7MW では浮体デッキ上に搭載した仮設のチェーンウインチで海底の係留チェーンをつりあげた。起重機船と比較すると稼働率が改善し、工期が約半分になった。	仮設チェーンウインチを用いたことにより、起重機船と比べて稼働率は改善したが、仮設チェーンウインチを撤去するために、クレーン船が必要となり、稼働率による工程への影響は完全には排除できなかった。	稼働率による工程への影響を排除するために、起重機船等の作業船を一切必要としない係留策の引込工法を考える必要がある。
	今回は、外洋での施工経験に基づいた実現性のある施工計画を立てて進めたが、浮体の係留は初めての経験であり、試行錯誤をしながら進めざるを得なかった。	外洋施工の経験のある国内の技術者は限られており、石油・ガス関連施設建設等の類似工事の知見を有する技術者は限られていたことから、最適化された計画まで到達せず、欧州と比較して、施工期間とコストがかかってしまった可能性がある。	今回の実証事業の経験により、国内で初めて浮体を係留する施工技術の獲得と、施工経験のノウハウ・技術を有する人材を育成することができ、今後の人材開発の礎が構築できた。

## 2.8 発電事業の自立的運用に向けた検討

### (1) 平成 30 年度における総括委員会の内容

本実証事業の自立的運用に向けた経済性の検討について、丸紅より経済性評価分析の報告を受けた。ここでの経済性評価の分析は、実証事業にて用いた設備ではなく、将来の浮体式洋上ウインドファームの商業的運転に向けた、コストの削減効果の検証を前提とし、運転実証を通じてコスト削減の項目の洗い出し、収益の改善の程度を定量化する目的で実施された。

経済性評価は、本実証事業の 2MW 風車及び 5MW 風車が、FIT の売電期間である 20 年運転することを想定して前提条件（表 32）を設定している。

表 32 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 33 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 33 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。
		・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。
支出	固定費	・保険料、備船料、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。

### ①実証機 3 基ケース

実証機 3 基ケースの収支は、図 62 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 63 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。

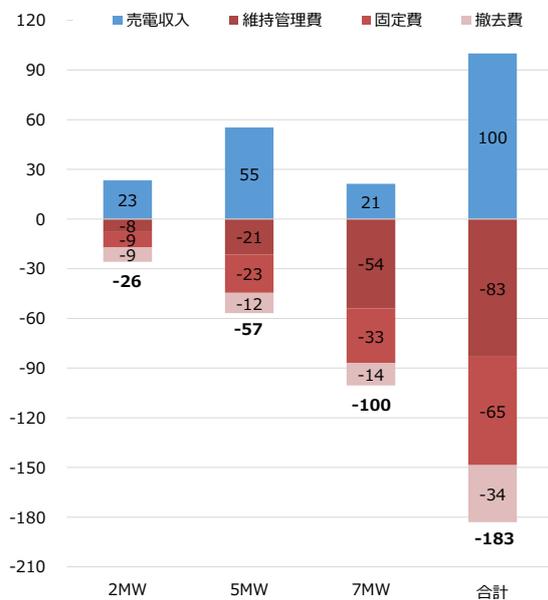


図 62 ①実証機 3 基ケースにおける収支

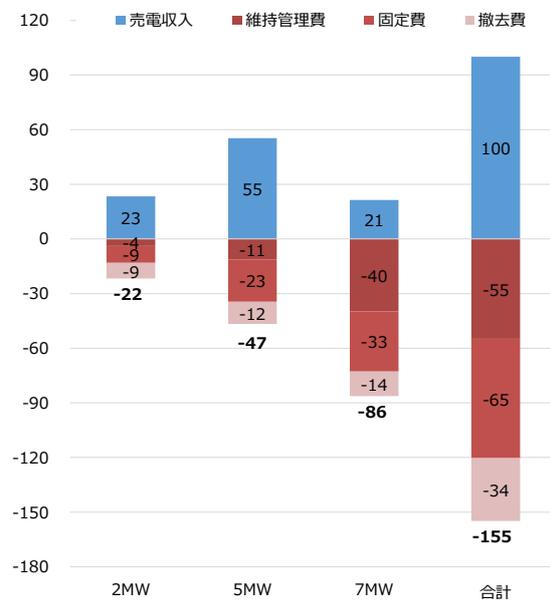


図 63 ②実証機 3 基改善ケースにおける収支

(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。

丸紅からの報告をもとに事務局にて作成

## ②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 64 のとおりであり、7MW 機の撤去により、「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 65 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。

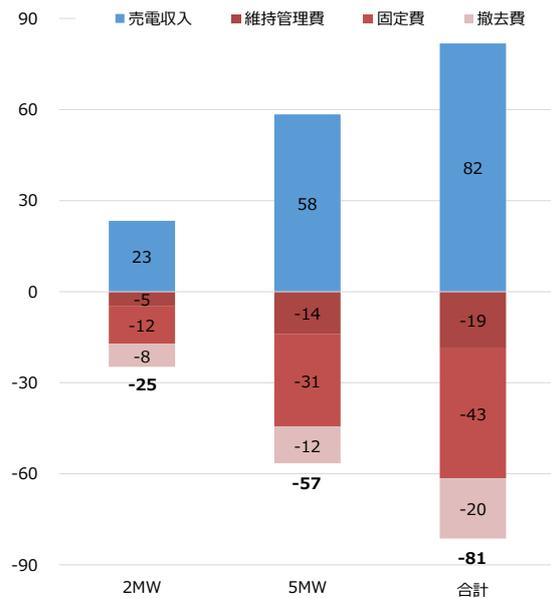
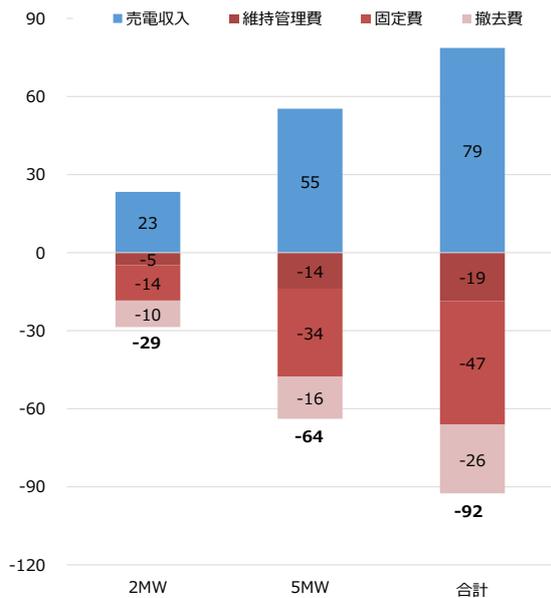


図 64 ③実証機 2 基ケースにおける収支

図 65 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。

丸紅からの報告をもとに事務局にて作成

最後に、各ケースにおける収支の比較を図 66 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。

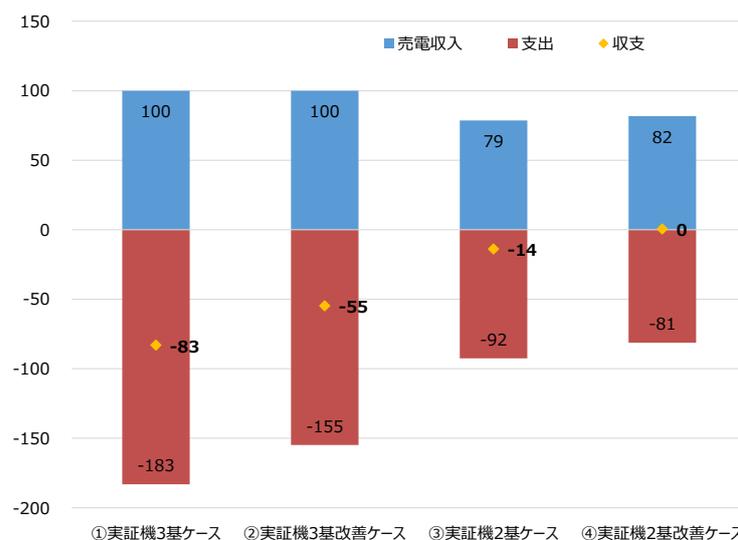


図 66 各ケースにおける収支の比較

(数値は「①実証機 3 基ケース」の売電収入を 100 とした場合の指数)

※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。

丸紅からの報告をもとに事務局にて作成

## (2) 令和元年度及び令和 2 年度における総括委員会の内容

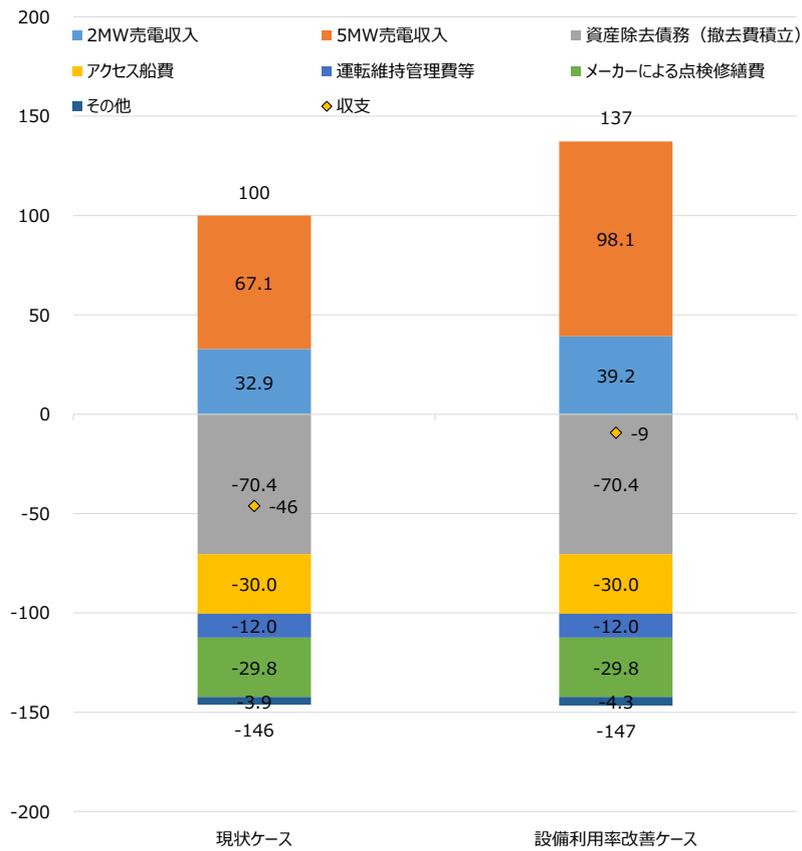
平成 30 年度の総括委員会の提言である、「実証機 2 基（2MW 機及び 5MW 機）の組合せと運用方法やコスト構造の見直しにより将来的には自立的な運用となることが見込める」を受けて、令和元年度及び令和 2 年度において、丸紅において運転実績の情報を更新して、経済性の検討を実施した。

丸紅は、「自立的な運用」を、売電収入と支出の差が黒字になることと定義し、令和元年度では、表 34 における前提条件の下で、収支差の計算を行い、総括委員会に対して以下のような報告を行った。

表 34 令和元年度の収支分析の前提条件

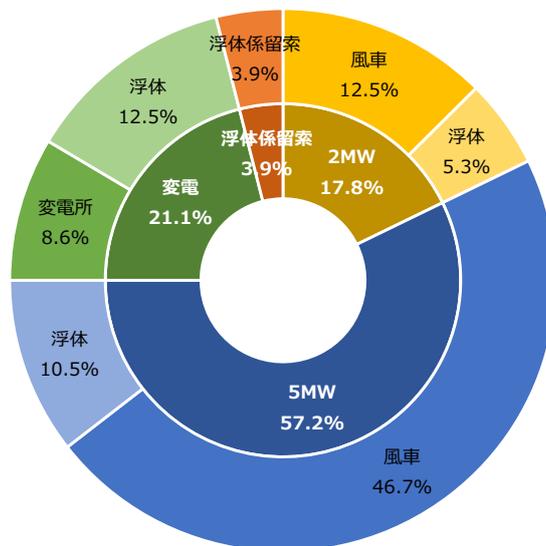
項目	前提値		設定の根拠
容量	7MW		2MW 風車 + 5MW 風車の計 7MW
事業期間	12 年		2MW の運転開始(2013 年)を事業開始とし、2021.4.1~2033.3.31 の FIT12 年間と想定。
設備利用率	2MW	28.4%	2019.01~2019.12 の 2MW 平均発電端設備利用率の実績値
	5MW	23.2%	2019.01~2019.12 の 5MW 平均発電端設備利用率の実績値
売電価格	36 円/kWh		FIT の売電価格を想定
割引率	想定しない		—
大規模修繕	想定しない		—
水域占用料	想定しない		—
系統工事費負担金、関連設備費	東北電力からの接続要否検討の回答に基づき設定。		
撤去費	撤去工法の検討結果値を採用。		
アクセス船費	双胴船のみ使用を想定。燃料費、気象情報料含む。		
保険料	第三者賠償責任保険のみ。財物保険を含まない。		
維持管理費	運転監視員費や事務所諸経費、その他維持管理費を含む。		
メーカーメンテナンス費	12 年の事業期間に掛かる各社のコスト検証結果平均値。		
漁業振興金	1 百万円/MW/年と仮設定。		

- 経済性評価の結果（図 67）、2MW 風車と 5 MW 風車の売電収入合計を 100 とすると、支出が 146 となり、収支は-46 と赤字になること。特に、現状ケースの支出 146 のうち、資産除去債務（撤去費積立）が 70.4（48%）が最も大きく、次いで、アクセス船費（20.5%）、メーカーによる点検修繕費が 29.8（20.4%）となっていること。
- メーカー修繕費の内訳（図 68）は、5MW 浮体式洋上風力発電設備が全体の 57.2%であり、そのうち、5MW 風車が 46.7%の点検修繕費を要していること。次いで、浮体式洋上変電設備が 21.1%、2MW 浮体式洋上風力発電設備が 17.8%を占めていること。
- 上記とは別に、2MW 風車が平成 30 年度の 1 年間で記録した平均発電端設備利用率 33.9%で、2MW 風車及び 5MW 風車が発電した場合（設備利用率改善ケース）では、収入 137 に対し、支出が 147 となり、収支は-9 まで改善するものの、依然として赤字であること。



丸紅の報告をもとに事務局にて作成

図 67 令和元年度における収支の分析結果



丸紅の報告をもとに事務局にて作成

図 68 メーカーによる点検修繕費の詳細

丸紅からの報告を受けて、総括委員会としては、収支計算の内容を確認したうえで、以下の点について、前提条件を含めて、言及した。

- 実証機 2 基による継続運用の可能性を検討した結果、5MW 風車の技術が途上であることから 2 基の売電収入で維持管理費を賄うには過大な運転共通費の負担があり、加えて現状で想定される撤去費が高額であるため、経済的に自立した運用は難しいこと。
- 実証事業の成果としての収支の分析は、これまでのコスト低減の取組やノウハウを反映した形で維持管理を行うはずであり、前提条件としては、資産除去債務の期間を設備の余寿命の 12 年ではなく、20 年の運転期間としたうえで、本来あるべき姿と実績との乖離の分析を行うことが重要であること。

令和元年度の結果を受けて、丸紅は、令和 2 年度では、当該年度にて検証された維持管理費用低減の効果や風車の最新の稼働状況にアップデートしたうえで、表 35 に示した条件に基づく年間平均収支結果の分析を実施し、事業期間 20 年の年間平均収支は 44 百万円/年となる見込みであることを示した。

表 35 令和 2 年度の収支分析の前提条件

項目	前提値	設定の根拠
容量	7MW	2MW 風車 + 5MW 風車の計 7MW
事業期間	20 年	FIT20 年間と想定
設備利用率	30.9%	FY2017~FY2019 の 2MW 平均発電端設備利用率
売電価格	36 円/kWh	FIT の売電価格を想定
割引率	想定しない	—
大規模修繕	想定しない	—
水域占用料	想定しない	—
系統工事費負担金、関連設備費	東北電力からの接続要否検討の回答に基づき設定。	
撤去費	撤去工法の検討結果値を採用。	
アクセス船費	双胴船のみ使用を想定。燃料費、気象情報料含む。	
保険料	第三者賠償責任保険のみ。財物保険を含まない金額を想定。	
維持管理費	運転監視員費や事務所諸経費、その他維持管理費を含む。	
メーカーメンテナンス費	20 年の事業期間に掛かる各社のコスト検証結果値を採用。	
漁業振興金	1 百万円/MW/年と仮設定。	

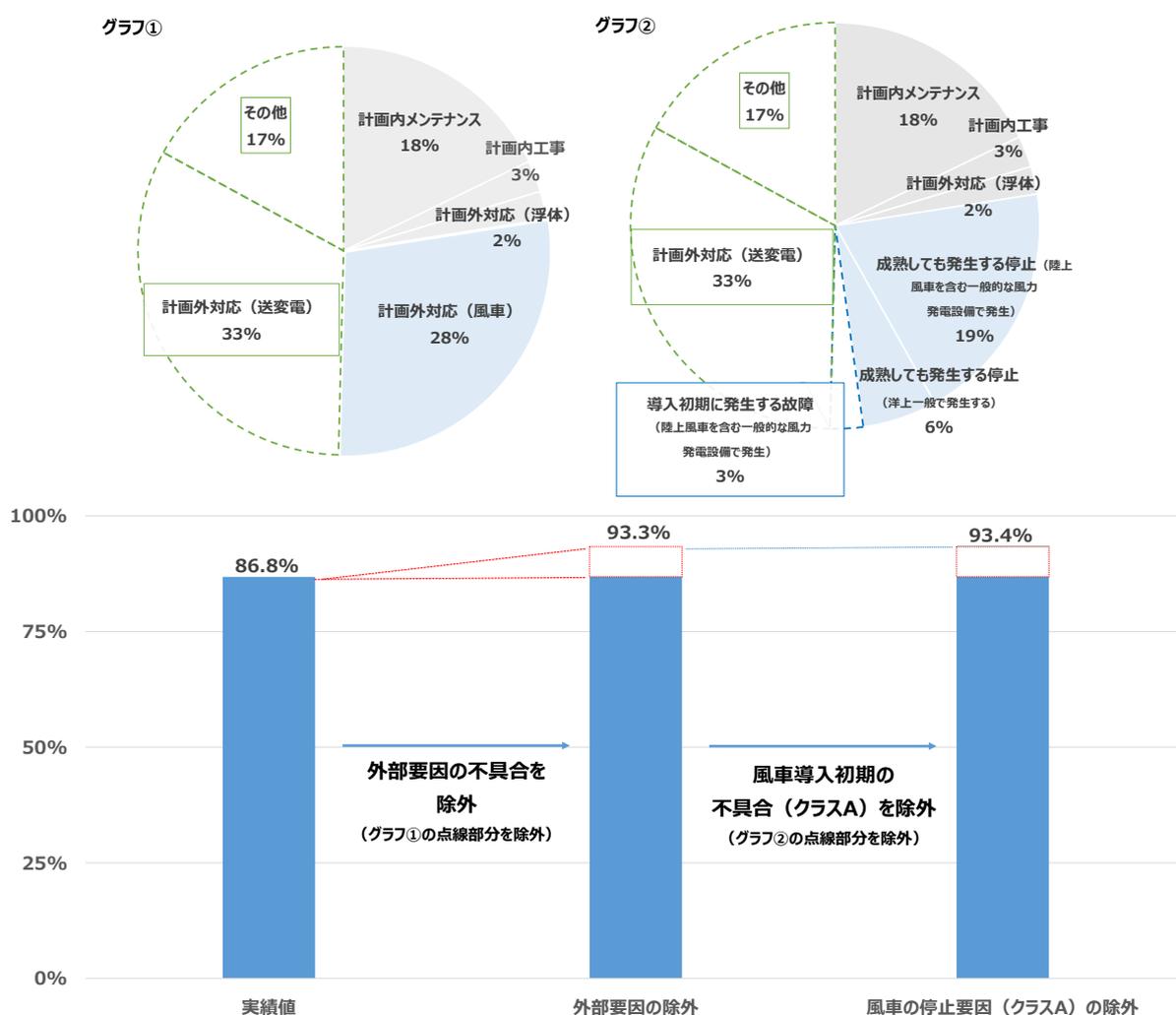
令和元年度における指摘事項への反映方法として、総括委員会は、福島洋上風力コンソーシアムに対して、実証研究事業としての成果として、2MW 風車及び 5MW 風車の停止の要因を分析し、その結果を踏まえた稼働率向上の見通しを明らかにするよう要請をした。

この要請を受けて、日立製作所からの故障要因に関する分析報告を踏まえて、丸紅にて、将来的な稼働

率の向上に資する分析を行った。その結果の概要は、以下のとおりである。

- 2MW 風車の停止時間のうち、一般送配電事業者からの要請に伴うものが 17.0%、洋上変電所の直流電源装置の不具合が 32.6%を占めている。これらの外部要因を除いた稼働率は図 69 のとおり 93.3%まで改善する見込みである。
- 前者の停止は本実証海域特有の一次的なものであり、恒常的に発生するものではなく、後者は、予備部品のストック等の対策を講じることにより改善の可能性がある。
- 日立製作所によるの停止要因分析の結果を踏まえ、風車由来の停止要因のうち、導入初期に発生する不具合（クラス A）に分類されるものを除いた場合、風車の稼働率は 93.4%に向上する見込みである。

丸紅からの報告を受け、総括委員会としては、2MW 風車の停止時間のうち、送変電等の外部要因による停止時間の影響が大きく、稼働率も準商用水準に近いことを確認した。



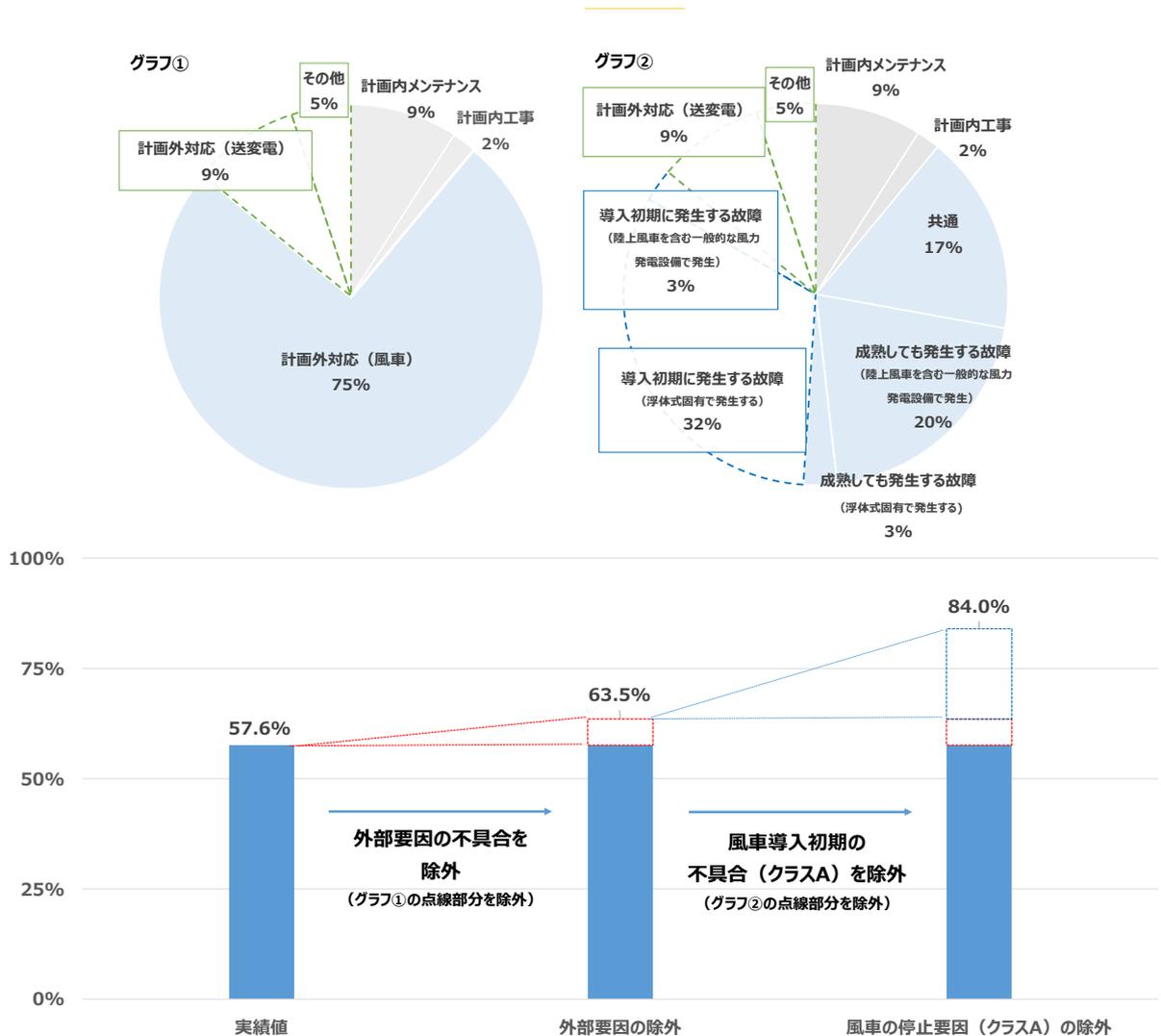
日立製作所・丸紅からの報告をもとに作成

図 69 2MW 風車の停止要因分析による稼働率向上の推移

また、5MW 風車の停止要因について分析を行った丸紅の報告結果を以下に示す。

- 5MW 風車の停止時間のうち、一般送配電事業者からの要請に伴うものが 5%、洋上変電所の直流電源装置の不具合が 9%を占めている。これらの外部要因を除いた稼働率は、図 70 のとおり、57.6%から 63.5%に改善すること。
- 日立製作所による要因分析の結果によると、風車の計画外対応による停止割合が全停止時間の約 75%を占めている。その結果、風車由来の不具合のうち導入初期に発生する不具合に分類されるものを除いた場合、稼働率は 84.0%まで改善する。

丸紅からの報告を受け、総括委員会としては、5MW 風車の停止時間について、風車に起因する計画外対応の時間が多く、その一部に、未だ原因の特定が実施できていないものもみられる。一方で、本実証研究事業期間において、浮体式固有の浮体の動揺に起因する停止もあり、その原因の一部が特定できていることから、浮体式洋上風車としての信頼性向上につながる知見が獲得できているとした。



日立製作所・丸紅からの報告をもとに作成

図 70 5MW 風車の停止要因分析による稼働率向上の推移

## 2.9 発電設備の運転保守

### (1) 平成 30 年度における総括委員会の内容

#### ①実証研究事業の成果

発電設備の運転保守を担当している丸紅へのヒアリングにより、本実証研究事業の実績として明らかになったことを以下に示す。

- 浮体式洋上風力発電システム全体の運営管理、保安管理、備船管理を実施。
- 専用船として高速の双胴船を導入。浮体への乗り移り率<sup>11</sup>は約 90%と高い水準。
- 風車点検を発電事業者が自身で実施したことによって、メンテナンスコストを低減。

また、以下に実績の詳細を示す。

#### 1) 発電設備の運転実績

平成 30 年度の 2MW 風車、5MW 風車、7MW 風車の運転実績として、稼働率と設備利用率の月別実績をそれぞれ、図 71、図 72、図 73 に示す。併せて、稼働率の低下の要因についても記載した。ただし、7MW 風車は、上期の本委員会の提言を受けて平成 30 年 8 月末をもって発電を停止している。



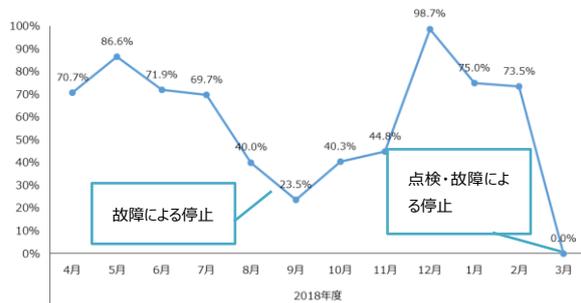
$$\text{稼働率} = \frac{\text{月間稼働時間}}{24 \text{ 時間} \times \text{月間日数}}$$

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

図 71 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。

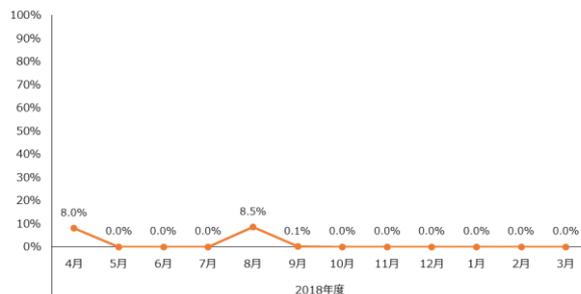
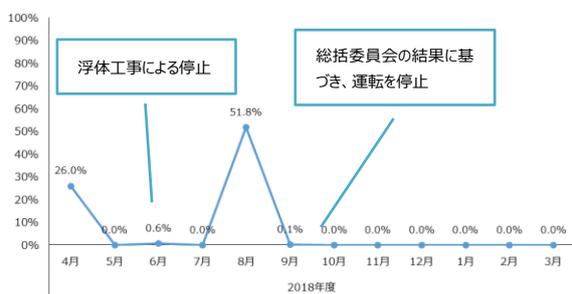
3: (成功回数) / (出航回数) にて定義。



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

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

図 72 5MW 風車の稼働率・設備利用率



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

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

図 73 7MW 風車の稼働率・設備利用率

## 2) 発電設備の運営体制

本実証研究事業の設備の運営体制を図 74 に示す。実証研究の特性上、発電施設、変電施設の機器のメンテナンスを各メーカーが実施しているため、丸紅の所掌は、陸上施設の保守と実証設備全体の管理を陸上開閉所にて実施することであり、保安規程に沿って維持管理計画を策定した。

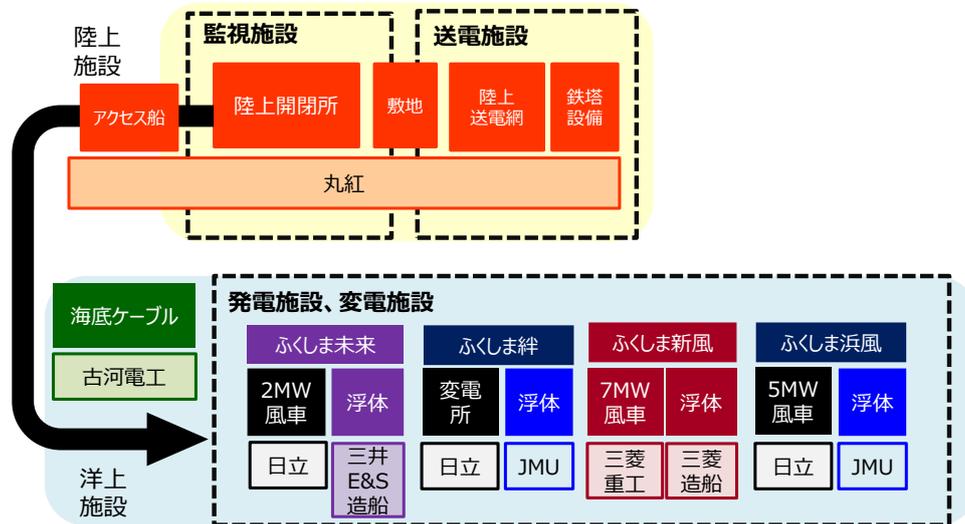


図 74 本実証研究事業の設備の運営体制

## 3) アクセス船の選定・検討

丸紅へのヒアリングにより、アクセス船の選定・運用実績について明らかになった項目を以下に示す。

- 漁船、タグボート、単胴船、双胴船の4つの性能を比較した結果、双胴船を採用したこと。
- アクセス船の乗り移り率の向上のため、アクセス船補助装置やバッファチューブ等を設置することにより、船首部の浮体の動揺が低減し、浮体への乗り移り率は90%を超えたこと。
- 浮体へのアクセスに影響が大きい気象・海象要素は、波高、風速、波周期の順であり、限界有義波高の実績は、約1.5mであること。
- 浮体の種類（水面下の構造）によって乗り移り率に違いが認められたこと。

上述の実績のもと、発電設備の運転保守に関する検証結果を以下に示す。

- 専用船を含む運転共通費や維持管理マニュアルに基づく各設備の定期点検にかかる費用を、事業化を想定した水準にまで低減させる必要がある。
- 本実証研究事業で備船している双胴船は、実証海域に短時間でアクセスでき、浮体への乗り移り率も高水準である。ただし、本実証研究事業の規模と離岸距離を考えると経済性については、引き続き検討が必要である。
- 陸上開閉所における「24時間陸上常時監視」を、通常の「随時巡回方式」への見直しに向け、関係者を含めた広範囲な検討が必要である。

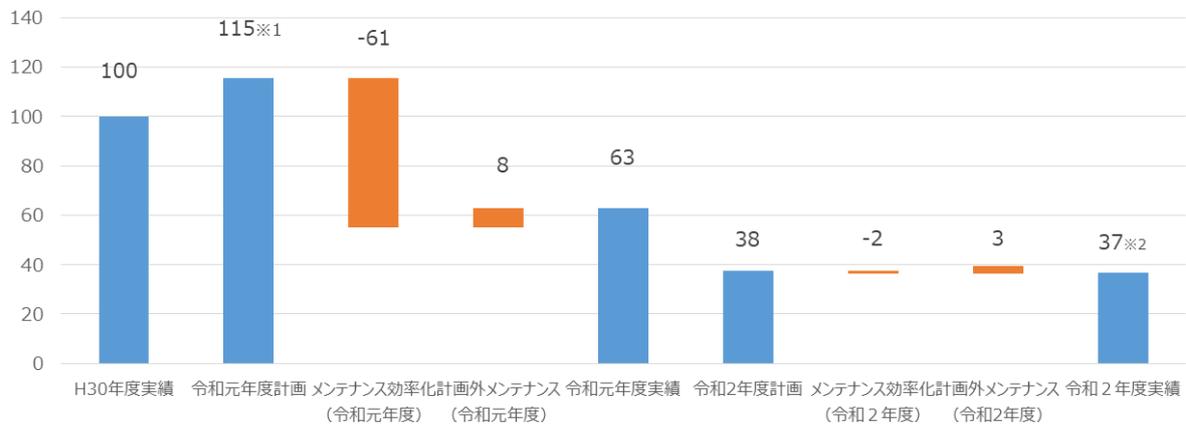
## ②将来に向けての意見

上期の提言である 2MW 風車と 5MW 風車の 2 基の自立的な運用を目指すため、各設備の維持管理手法や陸上開閉所の監視体制を見直すことにより、維持管理費用の低減を行うべきである。

## (2) 令和元年度及び令和 2 年度の総括委員会の内容

### ①進捗の確認

福島洋上風力コンソーシアムでは、平成 30 年度の総括委員会の提言を踏まえ、更なる維持管理費の低減に向けた取り組みを行った。各設備における取り組みを踏まえた実証研究設備全体における計画時点を 100 とした時の維持管理費の変動要因を図 75 に示す。



※1 令和元年度計画値はケーブルの恒久化工事のため、平成30年度実績を上回る水準となっている。

※2 2MW・5MW風車では、年度計画の際に予備費用を積算しており、令和2年度は予備費用の実績が計画を下回ったため、設備全体の実績値も計画値を下回っている。

コンソーシアム各社からの報告をもとに作成

図 75 令和元年度および令和 2 年度の維持管理費用

福島洋上風力コンソーシアムからの報告を受けて、本委員会としては、各種取り組みにより維持管理費の低減を確認した。

### ②技術的な知見の整理

技術的な知見は、各設備にて記載されているため、ここでは対象としない。

③課題認識における教訓

これまでの実証研究事業を通じて確認した学びについて、丸紅から表 36 のとおり報告を受けた。

表 36 実証事業全体における気づきと改善点（運転維持）

運転維持の観点から設計に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
<p>浮体は船舶法に定める定期検査（2.5 年毎の中間検査、5 年毎の定期検査）が必要になるが、浮体の完工時期を基準に夫々中間検査、定期検査の実施を各メーカーが行った為、効率が悪かった。</p>	<p>各浮体で一括して検査を実施していなかったため、効率が悪く、高コスト化する。</p>	<p>全浮体の検査を同じ年度に揃えることにより、浮体の中間検査、定期検査を全浮体同時期に行うことで費用削減を行った。</p>
<p>複数浮体のメンテナンスが必要になる際に、アクセス船の取り合いとなり、アクセス船の予約ができない、または必要な作業時間が確保できないなどの問題が生じた。</p>	<p>各設備のメンテナンス計画がバラバラで立てられていたため、設備全体の効率的な計画の立案により低コスト化の余地がある。</p>	<p>維持管理段階においては事業者である丸紅からメーカーへ維持管理を発注することで、最適計画の構築、及びコスト低減を図る事が可能であったと考える。</p>
<p>不具合時に海象条件によって浮体にアクセスが出来ず、それによって迅速にメンテナンスを行うことが出来なかったことがあった。</p>	<p>アクセス率低下に伴いメンテナンスの実施が遅れ、風車等の不具合に迅速に対応できず、稼働率が低下する。</p>	<p>厳しい海象条件下において通航可能な船を手配する、また、CTV の性能も考慮した浮体設計を行う等の対応が必要。</p>
<p>一般送配電事業者事由により計画的な施設全停電となる日が年に数回発生する。復電作業は洋上作業となる為、作業時の気象・海象の荒天は、復旧作業に遅れが発生し、風車稼働時間が損なわれてしまう。</p>	<p>アクセス率低下に伴い復電作業の遅れが発生し、稼働率が低下する。</p>	<p>洋上設備へ向かえなくとも、陸上施設からの遠隔操作により復旧が行えるようなシステムとすることで、海象条件の悪化による設備停止時間の増大による遺失利益の発生を抑える事が出来る。</p>
<p>浮体での作業や工事により浮体を浮上させる際には、航行船舶からの仰角、視認が変わることから、都度周知を行っているが、周知の方法はメールと Fax となっており、漏れの無い周知が行われているか懸念が残る。</p>	<p>浮体浮上時等のイレギュラーな対応発生時、網羅性を担保した上での周知効率化</p>	<p>平時の一般航行船舶への影響としては、海図への記載、AIS 等によりその存在を周知でき、安全面で大きな問題なく影響は限定的といえる。浮体浮上時等のイレギュラーの通知は、より効率的・網羅的な通知方法を整備する必要がある。</p>

<p>運転維持の観点から設計に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）</p>	<p>安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題</p>	<p>得られた教訓（学び）</p>
<p>24 時間監視体制については、航路標識法上の明確な規定はないものの、当時の航行安全委員会にて航路標識監視の観点から関係者より 24 時間での監視体制が望ましいと求められたことから同体制を取る事となった。</p>	<p>24 時間の監視体制構築による、追加コストの発生。</p>	<p>左記の通り、航路標識法上の明確な規定は無いため、航行安全委員会にて、24 時間監視体制に換わる、安全性を前提とする監視方法を説明出来れば同体制は廃止出来ると考える。具体的には①霧笛の自動化、②風車の自動再稼働、③緊急時の即時対応を可能とする体制構築などが必要。①については軽微なシステム変更により実現可能、②については風車によって異なるものの、商用化されているような風車であれば自動再稼働は可能、③については既存の転送システムを組み合わせることにより故障発生のアラームを監視員の携帯へ転送させることが可能と考える。</p>
<p>変電所浮体にヘリポートを搭載したものの、国土交通大臣の許可を得なければ航空機を飛ばすことが出来ず、許可取得に時間を要する事が発覚した。</p>	<p>変電所へのアクセスに時間を要することよって、非常時における対応が迅速に実施できない可能性がある。</p>	<p>現行法における許認可ではヘリ使用は緊急時対応に適さないが、今後の導入に向け改善を期待する。</p>

## 2.10 関係行政機関の調整・地元及び漁業との共存

### (1) 平成 30 年度における総括委員会の内容

#### ①実証研究事業の成果

関係機関との調整や地元及び漁業との共存を担当した丸紅へのヒアリングにより、実証研究事業の実績及び検証結果として明らかになったことを以下に示す。

- 関係機関と協議・調整を進めながら、浮体式洋上風力発電システムとしての環境影響評価や航行安全対策等の必要な各種手続きを実施した。
- 実証研究事業当初から、地元の漁業関係者との意見交換を行い、漁獲試験や海洋データの提供、備船における漁船の活用など共存策の実証、先行する優良事例の視察等を通じ、実証研究事業への理解の醸成を図った。

以下に実績の詳細を示す。

#### 1) 環境影響評価手続き

環境影響評価において、表 37 に示した事後調査の対象となった5つの項目の結果をみると、浮体式洋上風力発電が、周辺の環境に顕著な影響を与えていることは確認できなかった。

表 37 環境影響評価の事後調査

項目	調査方法	評価
水中騒音	2MW 風車稼動時の水中音	浮体付近に魚類が生息していることも確認されていることから魚類への影響は小さいと考えられる
漁業無線	無線の受信レベルの確認	漁業無線への顕著な影響は見られなかった
海鳥	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 目視による生息状況調査</li> <li>● ブレードへの接近・接触に係る監視</li> <li>● 設置後の海鳥の飛翔奇跡調査</li> </ul>	重要な鳥類への影響は小さい
魚類	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 底魚調査</li> <li>● 浮魚類定点観察調査</li> </ul>	漁業への影響は小さい
海産哺乳類	目視確認調査	海産哺乳類の影響は小さい

## 2) 航行安全対策

本実証研究設備の設置に伴う船舶交通への影響や、工事中及び設備稼働中の航行安全対策を議論する委員会を運営した丸紅へのヒアリングにより、航行安全委員会にて決定した安全対策の主な項目を表 38 に示す。

表 38 工事中及び設備稼働中の航行安全対策

工事中の航行安全対策	設備稼働中の航行安全対策
①安全管理体制の構築	①安全管理体制の構築
②工事作業船等の作業運行管理	②一般船舶等に対する安全対策の策定
③警戒船の配備・運用	③情報提供（海域利用者への周知が目的）
④一般船舶への安全対策の策定	④維持管理体制の構築
⑤情報提供（海域利用者への周知が目的）	
⑥緊急連絡体制の構築	
⑦一般安全対策の策定	

## 3) 地元及び漁業との共存

実証研究当初から地元の漁業者との意見交換や漁業との共存策の検討のために、漁業関係者や有識者、福島県、経済産業省で構成される漁業協働委員会を設置、運営してきた丸紅へのヒアリング結果により、平成 30 年度の実績として明らかになったことを以下に示す。

- 委員会のほか、下部組織のワーキンググループを含め 5 回開催したこと（表 40 を参照）。
- 事業内容の説明や漁業操業の課題、漁獲試験や海洋データの提供、備船における漁船の活用など共存策の実証をしたこと。
- 国内外の先行事例の視察等を通じ本実証研究事業への理解の醸成を図ったこと。

表 39 漁業協働委員会の開催状況

開催日	会議名
平成 30 年 6 月 15 日（金）	● 相馬双葉ワーキンググループ ● いわきワーキンググループ
平成 30 年 9 月 14 日（金）	● 相馬双葉ワーキンググループ ● いわきワーキンググループ
平成 30 年 11 月 30 日（金）	● 漁業協働委員会
平成 31 年 2 月 1 日（金）	● 相馬双葉いわき合同ワーキンググループ
平成 31 年 3 月 22 日（金）	● 相馬双葉ワーキンググループ ● いわきワーキンググループ

## ②将来に向けての意見

関係機関との調整や地元漁業者との意見交換を引き続き実施し、本実証研究事業を円滑に進めるべきである。また、地元企業や漁業者との更なる協業・共生を進めることが望ましい。

## (2) 令和元年度及び令和2年度における総括委員会の内容

### ①進捗の確認

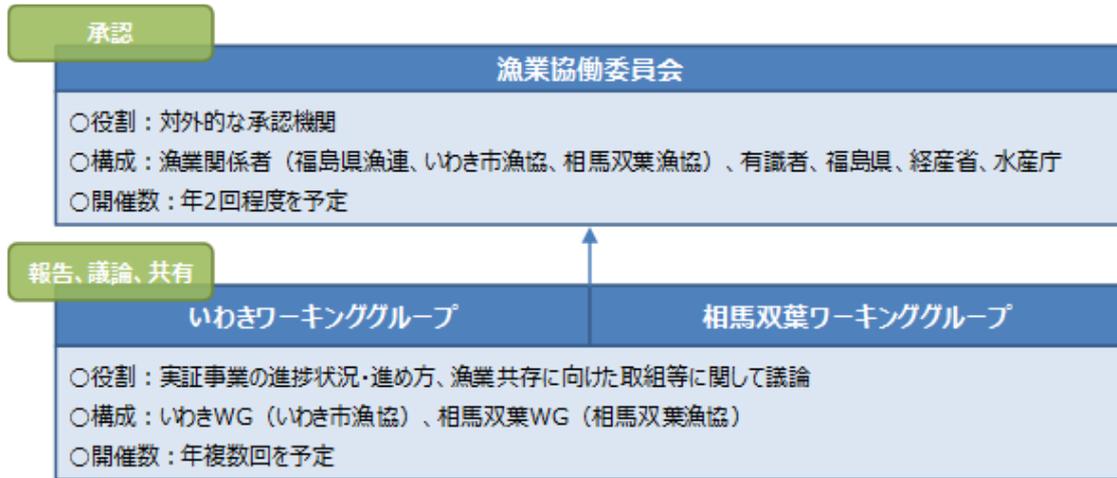
平成30年度の総括委員会の提言である「引き続き、関係機関との調整や地元漁業者と意見交換を継続し、実証事業を円滑に進めるべきである。また、地元企業や漁業者との更なる協業・共生を進めることが望ましい。」を受け、令和元年度及び令和2年度事業にて報告された丸紅の取組実績の詳細は以下のとおりである。

#### 1) 関係行政機関との調整

行政機関ではないものの、事業化の際に必要な系統連系費用について、改めて連系先の東北電力と協議した。その結果、「N-1 電制」の適用により、期間系統の増強分が不要となったため、費用及び工期が過去の想定よりも大幅に削減できたことを確認した。

2) 地元及び漁業との共存

漁業者との対話の場として、漁業協働委員会とワーキンググループの2つの会議体を設け（図 76）、表 40 のとおり開催した。これらの場で、事業の進捗の説明や、漁業との共存策の状況と評価について討議を行い、実証研究に関する漁業関係者の十分な理解のもと、事業を進めた。



丸紅にて作成

図 76 漁業との共存のための検討体制

表 40 漁業協働委員会の開催状況

開催日	会議名
令和元年 7 月 3 日（水）	● 相馬双葉ワーキンググループ ● いわきワーキンググループ
令和元年 7 月 16 日（火）	● 漁業協働委員会
令和元年 9 月 3 日（火）	● いわきワーキンググループ ● 相馬双葉ワーキンググループ
令和元年 9 月 25 日（水）	● いわきワーキンググループ ● 相馬双葉ワーキンググループ
令和元年 11 月 5 日（火）	● 相馬双葉・いわき合同ワーキンググループ
令和元年 11 月 21 日（木）	● 漁業協働委員会
令和 2 年 2 月 27 日（木）	● 相馬双葉ワーキンググループ ● いわきワーキンググループ
令和 2 年 12 月 16 日（水）	● 漁業協働委員会

漁業との共存の取組について、得られた成果は以下のとおりである。

- 浮体周辺の海域にて、漁業者による漁獲試験を行った。その結果、浮体への集魚効果が確認でき、本実証事業において発電設備が水産生物に影響はないことを確認した。
- 浮体に集まる回遊性の魚類をターゲットとした漁業が経済的・技術的に成立するのかを検証したところ、技術面では、一定の効果は得られたものの、魚価の影響により、漁業として経済的に成立するま

での立証には至らなかったことを確認した。

- デメリットに関する調査として、平成 25 年度から令和 2 年度に渡り、地元の底曳網漁船等にて浮体周辺で操業を行い、底魚類の漁獲量について継続的に調査、解析した結果、この間、浮体施設に起因すると思われる底魚類の分布の偏りなどの悪影響は確認されなかった。
- メリットを増強する取組として、平成 28 年度～令和 2 年度の間、漁業者が主体となり、浮体施設の浮魚礁的な機能を検証する実験的な操業を計画、実施した結果、操業結果には好・不良があり、常に実益性を確保することは難しいものの、新たな漁場の創出というべき浮体施設の浮魚礁的な機能の発現と、それへの漁業者の期待を確認した。

丸紅からの報告を受けて、本委員会としては、地元の漁業関係者との共存策の検討にあたり、漁業協同委員会等を継続的に開催し、漁獲調査や漁場活用調査を継続して実施し、理解促進に努めていることを確認した。

## ②技術的な知見の整理

本テーマにおいて技術的な要素は含んでいないため、ここでの記載は省略する。

③課題認識における教訓

平成 23 年度事業からスタートしてきた関係行政機関との調整や地元及び漁業者の対話を通じて、今後の浮体式洋上風力発電の導入のために、必要となる経験等を丸紅へのヒアリングした結果を表 41 に示す。

表 41 実証事業をとおして確認した学びの整理（関係行政機関、地元及び漁業との共存）

段階	運転維持の観点から設計に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
関係行政機関との調整	本実証においては主要利害関係者の整理を行い、概ね適切な対応が出来たが、当初網羅しきれていない団体もあり、調整に時間を要することとなった。	調整期間が長期化することによる事業スケジュールの遅延が発生する可能性がある。	発電事業を行う上で、地元利害関係者の数が多くなる傾向にある為、漁業関係者等を含む利害関係者との調整にあたっては、当該利害関係者と調整した上で、先方窓口の一本化が肝要となる。また、複数の法令が関係しステークホルダー整理が困難であるため、国主導の制度整理が肝要。
	水域占有許可の対象は浮体風車の投影面積及び海底ケーブルとなっており、現行法上では残置は想定されていないこと。	事業終了時に海底ケーブルも全て完全に撤去する必要があり、サイトの離岸距離が遠いほど撤去費用が大きくなることが想定される。（仮に撤去しない場合は半永久的に占有料の支払いを続ける必要があり事業計画で見積もることが困難。）	事業計画策定時に撤去費用を算定する際に、離岸距離を加味した算出が必要。一方、一般的には海底ケーブルが残置されている例も見受けられ、法律上の整理が必要と思われる。
関係行政機関との調整	環境アセスメント事後調査において、水中カメラ等を潜水作業で浮体へ装着、回収を行っていたが、浮体の形状によって乱流があり潜水士が潜れない状況になることがあった。	乱流発生によって、潜水士のアクセスが困難となり、環境アセスメント事後調査の工期が長期化する。	浮体（海中）への機器装着は浮体建設時に行い、装着機器のメンテナンスが困難になる可能性も踏まえた機材の選定を行う必要がある。
漁業共存	浮体に回遊魚が集まる集魚効果があることが確認できたが、集魚効果を考える場合、設備への近接（離隔距離）に関するルールをどのように制定するかが困難であった。	現行法においては、海域占有許可の範囲は設備設置部に限られ、設備への近接に関し法的な効力はないため、関係者と対話にて離隔距離に関して依頼するという対応方法に限られる。	浮体設備は航行船舶の多い海域に設置されると予測されるため、設備の離隔距離について今後の法制度整備が必要となる。

段階	運転維持の観点から設計に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
	<p>浮体ではチェーン・アンカーが浮体を中心に数百m伸びていることにより、着床式と比較し1ユニットが占有する範囲が非常に広範となる。</p>	<p>漁業者の操業に影響を与える可能性が大きく、浮体に集魚効果がみられる一方で、浮体への近接は安全上極力配慮してもらいたいため、水域占有する範囲以上に影響が大きいことを考慮しなければならない。</p>	<p>サイトの場所決定の段階以前から前広に、漁業者の操業実態もよく踏まえた上で設備の影響を検証し、関係者と協議を行いながら検討していく必要がある。</p> <p>漁業との共存の理想形として発電所の設備に漁礁や養殖設備を設置するアイデアもあるが、発電に無関係の設備を発電設備に設置することはメーカーの設計及び担保責任上非常にハードルが高いこと、また発電所を運営維持管理する立場からは関係者以外は安全上発電設備に近寄らせないことが大原則であることについても留意すべきである。</p>

## 2.11 導入マニュアル

### (1) 平成 30 年度における総括委員会の内容

#### ①実証研究事業の成果

導入マニュアルを作成した事業者であるみずほリサーチ&テクノロジーズへのヒアリングにより、実証研究事業の実績及び検証結果として明らかになったことを以下に示す。

- 今後の浮体式洋上風力発電の導入を検討する事業者のため、本実証研究事業の成果や得られた知見、学びを導入マニュアルとしてまとめた。
- 導入マニュアルの構成は表 42 のとおりである。マニュアルの主たる部分である浮体式洋上風力発電の導入の流れ（図 77）については、本実証研究事業の実績に基づいて許認可・手続きをまとめ、汎用性の高い内容については、可能な限り一般的な手続として整理した。
- 浮体式洋上風力発電特有の許認可・手続きに重点を置き、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が作成している「着床式洋上風力発電導入ガイドブック」、「浮体式洋上風力発電技術ガイドブック」と相互補完できる内容とした。

表 42 導入マニュアルの構成

第 1 章 浮体式洋上風力発電の概要
1.1 浮体式洋上風力発電とは
1.2 諸外国におけるプロジェクト事例
1.3 国内におけるプロジェクト事例
第 2 章 浮体式洋上風力発電事業の進め方（図 77 参照）
2.1 立地環境調査
2.2 海域・気象・海象調査
2.3 基本設計
2.4 実施設計
2.5 建設工事
2.6 運転保守
2.7 撤去・解体
2.8 環境影響評価
第 3 章 浮体式洋上風力発電の資金調達の方法
3.1 ファイナンス
3.2 保険
3.3 認証



## ②技術的な知見の整理

本導入マニュアルには、浮体式洋上風力発電の導入に向けた一般的な手続きと本実証研究事業の実績をまとめたものであり、技術的な知見は、各設備にて記載されているため、ここでは対象としない。

## ③課題認識における教訓

本テーマについては、浮体式洋上風力発電の導入に資する取組ではないため、記載の対象とはしない。

## 2.12 国民との科学技術対話

### (1) 平成 30 年度における総括委員会の内容

#### ①実証研究事業の成果

本実証研究事業における東京大学の役割は、学術研究と国民との科学技術対話である。ヒアリングにより、明らかになった実績及び検証結果を以下に示す。

- 気象・海象条件の分析、風車・浮体・係留の動的解析の研究を行い、成果を国内外の学術論文や国際機関へ発信する等、国際的なプレゼンス向上に貢献した。
- 展示場の設置やホームページの開設、シンポジウムへの参加を通じた情報提供により、浮体式洋上風力発電に対する社会受容性の向上に貢献した。

以下に実績の詳細を示す。

#### 1) 学術研究

学術研究のテーマは、①気象海象予報の分析・評価、②風車・浮体・係留の動的解析と構造計算手法の評価、③日本海事協会への再委託として実施した設計認証手法の確立及び汎用化の 3 つである。主な研究成果の実績は、以下のとおりである。

- サブステーション上方にある風況観測タワーに設置しているドップラーライダー風速計と超音波風速計や、海象計等の測定値と気象・海象のシミュレーションの結果を比較し、再現性を確認。
- 数値流体解析の精度を向上させる手法を提案し、水槽実験や 2MW 浮体の実測値との比較を行い、再現性を確認。
- 解析結果から得られる断面力を用いて浮体構造の強度評価を行う手法を確立し、最終的にはガイドライン化の準備をしていること。
- 研究成果は原著論文や国内外の学会発表や、浮体式洋上風力発電の設計に関する国際規格 IEC の改訂に貢献。

#### 2) 国民との科学技術対話

本実証研究事業の社会受容性を高めるために情報発信を行っており、その実績を以下に示す。

- 小名浜港に隣接する観光物産センターでは、当該実証機の全体模型を設置しており、家族連れの来訪や、地元及び県外からの再生可能エネルギーの課外学習の場として利用された。
- ホームページを日本語と英語で開設し、本実証研究事業の最新情報や観測データ、各種パンフレット等の情報発信を行った。航行安全対策の情報発信も本ホームページにて周知を行った。
- 福島産業フェアや WIND EXPO への展示会の出展を継続しており、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もあった。

#### ②将来に向けての意見

ホームページ等の様々な媒体を通じた本実証研究事業の成果の共有、及び情報発信を継続しながら、浮体式洋上風力発電に対する一層の理解促進を図るべきである。

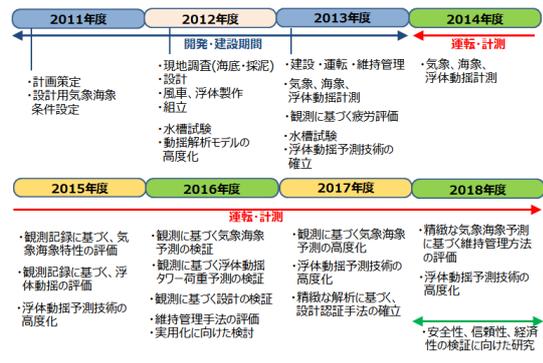
## (2) 令和元年度及び令和2年度における総括委員会の内容

### ①進捗状況の確認

平成30年度の総括委員会からの提言である、「引き続き情報発信を継続しながら、浮体式洋上風力発電に対する一層の理解促進を図るべきである」を受けて、東京大学において令和元年度に実施した内容について以下の報告があった。

- 過年度までと同様に、常設展示場の運営、ホームページの運営、展示会への出展したこと。
- 常設展示場では、いわき市小名浜の福島洋上風力交流センターと天神岬展望台の運営を継続して行った。特に、交流センターでは、夏休みにおける課外活動の一貫で地元の小中学生が多く訪れた。来場者は令和元年10月時点で約36,000人であったこと。
- ホームページによる情報発信についても、技術資料の公開や研究論文の公開を行った。特に技術資料については、実証事業期間中に得られた風車、浮体、係留、送電線に関する成果をわかりやすく整理した。
- 第8回ふくしま再生可能エネルギー産業フェアに出展し、福島洋上風力コンソーシアム展示ブースには2日間で約1,300人が来場したこと。

## 2. コンセプトの開発経緯



(a) コンセプトの開発経緯

## 4. 運転と維持管理

### 発電状況

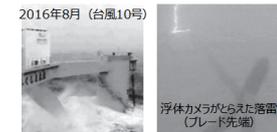
2013.12~2016.6

年	月	発電量	発電率	備考
2013	12	205.1	89.3	
2014	1	205.1	89.3	
2014	2	205.1	89.3	
2014	3	205.1	89.3	
2014	4	205.1	89.3	
2014	5	205.1	89.3	
2014	6	205.1	89.3	
2014	7	205.1	89.3	
2014	8	205.1	89.3	
2014	9	205.1	89.3	
2014	10	205.1	89.3	
2014	11	205.1	89.3	
2014	12	205.1	89.3	
2015	1	205.1	89.3	
2015	2	205.1	89.3	
2015	3	205.1	89.3	
2015	4	205.1	89.3	
2015	5	205.1	89.3	
2015	6	205.1	89.3	
2015	7	205.1	89.3	
2015	8	205.1	89.3	
2015	9	205.1	89.3	
2015	10	205.1	89.3	
2015	11	205.1	89.3	
2015	12	205.1	89.3	
2016	1	205.1	89.3	
2016	2	205.1	89.3	
2016	3	205.1	89.3	
2016	4	205.1	89.3	
2016	5	205.1	89.3	
2016	6	205.1	89.3	

### 2018.07.11 研究通信 Vol.9

項目	数値	単位	備考
2018年7月	46.7%	%	運転率
2018年8月	35.4%	%	運転率
2018年9月	35.2%	%	運転率
2018年10月	42.8%	%	運転率
2018年11月	37.7%	%	運転率

・2013年11月の発電開始から、風車、浮体とも大きなトラブルなく現在に至る。  
 ・2013年12月から2018年6月までの平均設備利用率は32.5%、最高設備利用率は2017年1月の53.0%、その月の平均風速は8.9m/s。  
 ・2014年3月から2016年3月までに経験した最大波高、最高風速などは以下のとおり  
 最高風速 44.0 m/s (ナセル風速計)  
 最高有義波高 7.2 m (ナワフラスター)  
 最大傾斜角 6.5 度(ナセル上・風車停止時)  
 ・2016年8月の台風9号で、風速46m/s、有義波高9.6mを経験しているが、点検後異常なし。  
 ・2015年に落雷を検知するも、点検後異常なし。

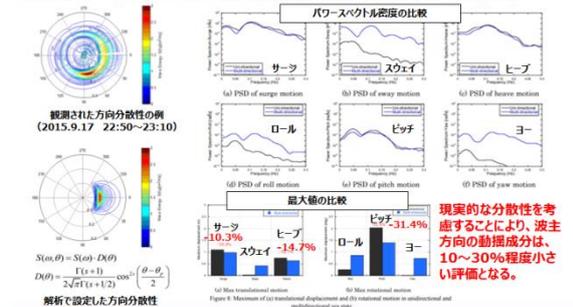


(c) 運転と維持管理

## 6. 観測記録のシミュレーション解析

### 波の方向分散性

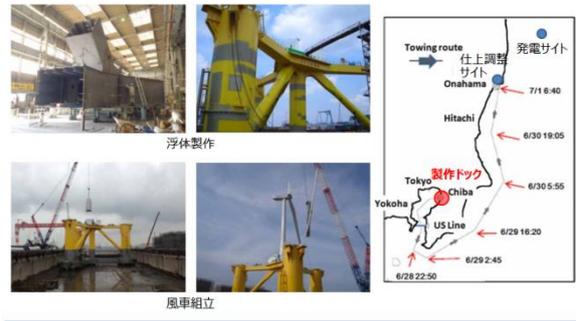
自然の波は完全に一方向から入射するのではなく、方向分散性を有している。方向分散性を考慮した解析を行い、方向分散性の影響を考慮した解析としない解析の浮体動揺応答の違いを評価した。



(e) 観測記録による評価

## 3. 建設工事

### 製作・組立 (千葉ドライドック)

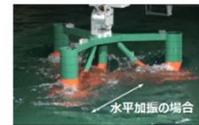
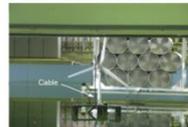


(b) 建設工事

## 5. 試験と解析による評価

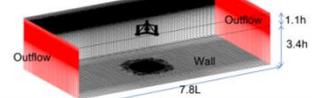
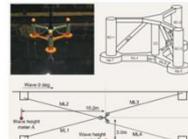
### 実施した水槽試験、解析

- 水槽試験：風波・潮流を作用させた係留試験 (波は規則波、不規則波)
  - 目的： 動揺、係留強力の評価
- 水槽試験：水中での強制加振試験
  - 目的： 浮体の流体力係数の評価



### (3) CFD解析

目的： 水槽試験の補完、代替



(d) 試験と解析による評価

## 7. 事業化に向けた技術的方策

2012年から2018年までの運転実績に基づき、安全性、信頼性、経済性の3点から実証機の検証に向けた研究を行うとともに、事業化に向けて達成可能な技術的改善方策を立案した。

### ① 安全性の検証に向けた研究

検証した項目	検証結果
浮体の疲労寿命	疲労寿命 1030 年
風車タワーの疲労寿命	疲労寿命 798 年
係留チェーンの疲労寿命	厳しい初期き裂、摩耗を想定しても60年安全

### ② 信頼性の検証に向けた研究

検証した項目	技術的方策
年次点検	点検方法の合理化

### ③ 経済性の検証に向けた研究

検証した項目	技術的方策
浮体の安全性	浮体物量削減
風車タワーの安全性	タワー物量削減 (地上タワー並みまで)
風車の故障予知	故障予兆検知によるメンテナンス削減

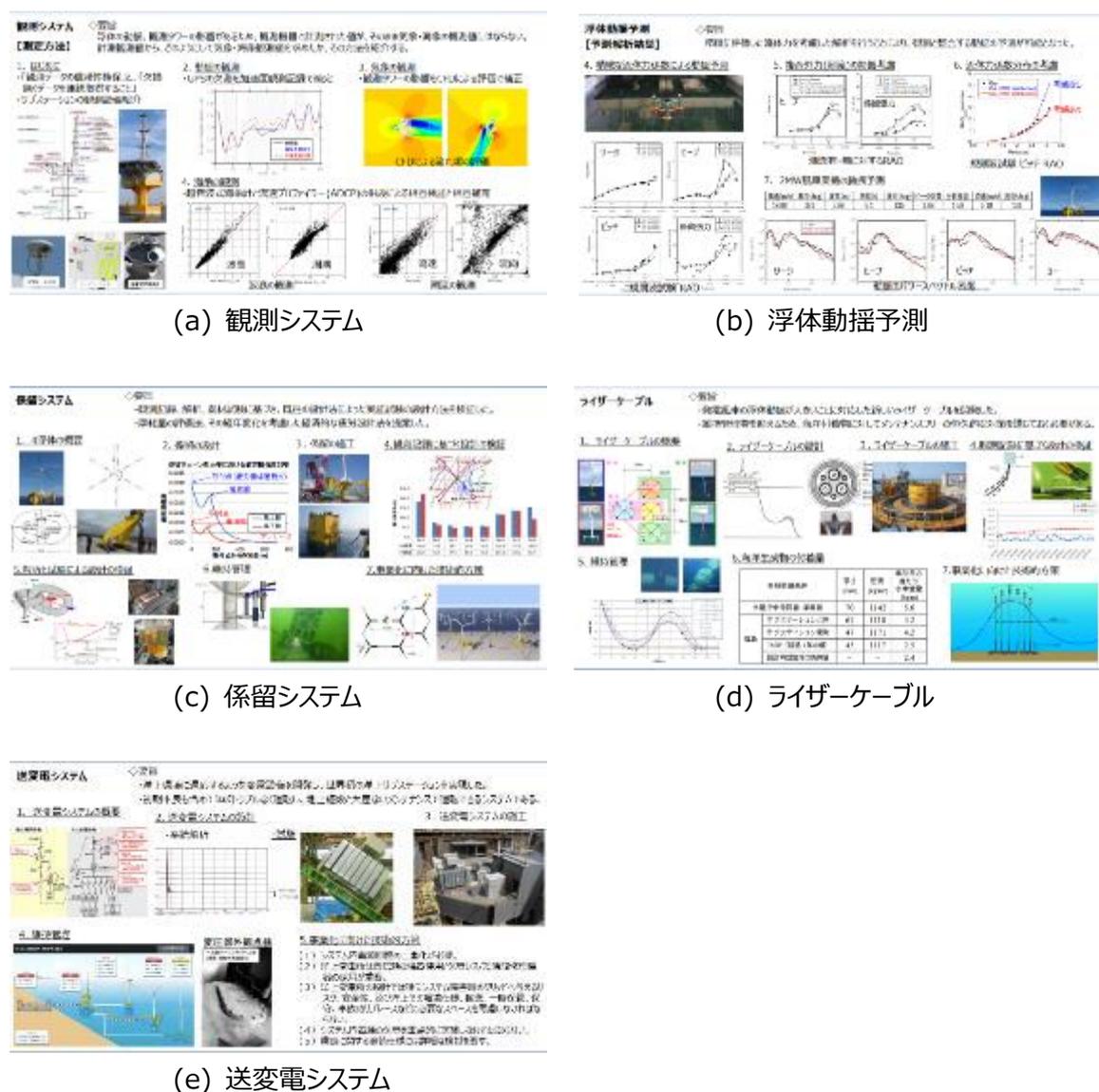
(f) 事業化に向けた技術的方策

東京大学にて作成

図 78 技術資料の記述内容抜粋 (2MW の例)

また、令和2年度の取組についても、以下の報告がなされた。

- ホームページでは研究報告を中心とした情報発信を行い、訪問者数は、日本語及び英語総数約 23.5 千人(78 人/日)であったこと。
- 技術資料は、「観測システム」、「浮体動揺予測」、「係留システム」、「ライザーケーブル」、「送変電システム」の 5 項目について、実証事業期間中に得られた成果をわかりやすく整理した。例として各項目の概要の一部を図 77 に示す。



東京大学にて作成

図 79 令和2年度に作成した技術資料の記述内容抜粋

東京大学からの報告を受けて、総括委員会としては、平成30年度の提言の内容が着実に進行していることを確認した。その一方で、観測データをはじめとする各種データの取扱いや、実証研究事業の成果の発信については、媒体も含めて、引き続き検討をすることとした。

### ②技術的な知見の整理

本テーマにおいて得られた技術的な知見は、学術論文及び技術資料として取りまとめられており、ここでの記載は省略する。

### ③課題認識における教訓

本テーマは、実証研究事業の成果の発信方法として位置づけられたものであり、今後の浮体式洋上風力発電の事業化に向けた課題認識に該当するものはないため、記載を省略する。

## 2.13 研究実施体制

### 2.13.1 プロジェクトインテグレーター

プロジェクトインテグレーターを担当した丸紅へのヒアリングにより、本実証期間中の実績を表 43 に示す。

表 43 実証期間中のプロジェクトインテグレーターとしての実績

事業期間	プロジェクトインテグレーターの実績
平成 23～27 年度事業	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 事業を円滑かつ確実に履行するため、丸紅・東京大学・三菱商事・清水建設・みずほ情報総研から構成される幹事会において、事業計画及び研究開発の計画を立案し、コンソーシアム全社が参加する全体会議にて合意を取る方法で運営を行った</li> <li>● コンソーシアム内に事業化・工事管理委員会を設置し、許認可手続きを含む関係者との調整をコンソーシアムの代表として主導した</li> </ul>
平成 28～30 年度事業	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 設備の運用保守の責任者として、陸上の開閉所で運営管理を実施するとともに、24 時間常時監視及び保安規程に基づいて保安管理を実施した</li> <li>● 備船管理表の作成と連絡網を構築し、コンソーシアム各社からの備船依頼を取りまとめ、確実な備船の運用を行った</li> <li>● 東北電力との系統連系手続きを実施した</li> </ul>
令和元～2 年度	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 発電事業者として、各メーカーに対してコスト目標及び、計上するべき項目を設定した。</li> <li>● 各メーカーから提供された維持管理費とその将来見通しについて、内容及び妥当性の確認を行った。</li> </ul>
実証期間共通	<ul style="list-style-type: none"> <li>● コンソーシアム内の情報共有の場である全体会議の運営や、コンソーシアム内の予算配分を担当した</li> </ul>

また、これまでの実証研究事業を通じて確認した学びについて、丸紅から表 44 のとおり報告を受けた。

表 44 実証事業全体における気づきと改善点（技術面）

運転維持の観点から設計に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
大規模修繕の実施時にはチェーン・アンカーを外し、浮体を作業ヤードのある基地港まで曳航、バースで修繕作業を行うと想定されるため、喫水が深いアドバンストスパー型では条件に合致しない可能性がある。	基地港までの曳航の容易性、作業ヤードに特殊な条件を必要としないことが大規模修繕の費用を抑える要点となり、これらを満たさない場合にコストがかさむ可能性が高い。	浮体の形状は、基地港までの曳航がしやすいこと、作業ヤードに極力特殊な条件を必要としないことが望ましい。また、基地港がサイトの近くにあることもサイト場所と浮体の形状検討時に重要なポイントとなる。
浮体設置後、CTV にて浮体へアクセスする際に、浮体緩衝材が上手く合わなかったことにより、CTV の安定性を保つことが出来ず、海面の上下動変化に伴い、交通船がせり上がる、またはその逆の下降する動きのため、渡る着地点を失いヒヤリとした経験をした。	本実証事業では浮体設計時に CTV によるアクセス性を加味していなかったため、CTV のアクセスに最適な浮体緩衝材を追加で製作する事になり、追加コストが発生した。 また、CTV にアクセス補助装置を搭載の上、アクセス運用検証を実施、浮体の形状によっては一定のアクセス性向上が見られたが、浮体によって Gangway と相性が悪い、また故障しやすいなど課題があった。	浮体設計時に CTV アクセス性（補助装置の必要有無や形状含む）や、採用する CTV のスペックを加味したアクセス緩衝材の検討を行うことでアクセス性を高めることが出来ると思う。

<p>運転維持の観点から設計に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）</p>	<p>安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題</p>	<p>得られた教訓（学び）</p>
<p>台風時に浮体に搭載している外装柵が破損した。</p>	<p>台風到来時に何度も外装品が破損し、追加コストが発生した。（風車・浮体の運転に対しての影響は無し）</p>	<p>外装品に至っても設計時に必要十分な強度を確保すべく、基準を見直す必要がある。台風等の影響を加味し、外装柵については折り畳み式にする等の工夫をする事で予期せぬ修繕コストを抑える事が出来ると考える。</p>
<p>浮体への乗り移りの際に使用する垂直はしごは体力が必要となる為、人によっては危険が伴う。実証においてもバランスを崩して落ちかける等の事案が発生した。</p>	<p>浮体への乗り移り時の容易性の確保。</p>	<p>垂直はしごを使わず乗り移りの可能な浮体設計等の検討が必要。</p>

## 2.13.2 テクニカルアドバイザー

テクニカルアドバイザーを担当した東京大学へのヒアリングの結果、実証期間中の役割は、コンソーシアム各者に対する技術的なアドバイスと研究指導、関係省庁及び自治体に対する技術的な観点からの説明の実施であり、具体的な実績を表 45 に示す。

表 45 実証期間中のテクニカルアドバイザーとしての実績

事業期間	テクニカルアドバイザーの実績
平成 23～27 年度事業	● 本事業の統一性を図るために、気象・海象条件等の設計条件の設定を行った
平成 28～30 年度事業	● 不具合が発生した際には、技術的な観点から原因究明と再発防止について努めた ● (7 MW 風車搭載浮体の不具合、5 MW 風車施工時のトラブル、ライザーケーブルの海洋生成物付着による沈下などの問題の解決)
令和元～2 年度事業	● 2MW 風車の不具合の解決に向けた技術的なアドバイスをした。 ● 5MW 風車及び浮体の不具合の解決に向けた技術的なアドバイスをした
実証期間共通	● 各社の研究課題の整理を行うとともに、優先順位の決定についてアドバイスをした ● 各社の実施内容および研究成果を分かりやすく説明できるように明確化した ● 関係省庁、自治体及び報道機関等に技術的な観点から本事業の説明を実施した ● 台風による観測機器の損傷に対する原因究明と再発防止策を講じた

また、表 46 に示したとおり、実証研究事業の総合的な成果として各風車の成熟度（実証段階、実用化段階、商用段階）と設備利用率との関係を明らかにしたことにより、商用化の際の風車選定指針を与えたという報告を受けた。

表 46 風車の成熟度と設備利用率との関係

	2MW 風車	5MW 風車	7MW 風車
技術段階	商用段階	実用化段階	実証段階
認証取得状況	型式認証取得	設計認証取得	プロトタイプ認証取得
運転期間中の設備利用率	31.0%	18.3%	1.9%

これまでの実証研究事業を通じて確認した学びについて、東京大学から表 47 のとおり報告を受けた。

表 47 実証事業を通じて確認した学びの整理（技術全体）

設備	運転維持の観点から設計に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
2MW 風車・5MW 風車	漏油センサの誤検知による風車の停止が発生した。	風車の停止により稼働率が減少した。また浮体のアクセス自体を減らすため、海象の影響をうけないよう取り付け付けたセンサが雨水にも反応し、稼働率の低下をもたらした。	センサ取り付けの際には風車本体と一体で設計をする必要があることを助言した。

設備	運転維持の観点から設計に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
5MW 風車	スパー型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	スパー型浮体は動揺しやすいこと、また浮体・風車の連成解析が実施できなかったため、共振が発生し浮体動揺が大きくなった。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、稼働率の低下をもたらした。	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	商用風車でないプロトタイプを本実証事業で採用した結果、稼働率の低下が発生した。	浮体式洋上風力発電に搭載する風車は大型機が前提となるが、本実証の開始段階で主流となる風車の定格出力は2MW程度であった。計画段階では当該機のみが選択候補となり、実証機として採用したが、大規模な損壊の可能性が否定できなかったため、ハーフロードの運転が続いた。	プロトタイプを採用した場合、不具合等の発生要因が複雑化するため、複数の技術実証は同時並行して進めるべきでは無い。一方で、大型風車を採用することによって、浮体側の実証は十分に実施できた。
5MW 浮体	浮体の艀装品に作用した局所的荷重により、艀装品取付部の外板にクラックが発生し、海水が流入し、浮体の傾斜が生じた。	浮体の傾斜に伴い、安全確認を行うまで、風車運転を停止したため、稼働率の低下に繋がった。運用段階で発生した場合の亀裂等について、進展を防止する対応が必要となる。	浮体の設計は造船の規定に従っており、このような艀装品についての審査・基準が無かったため、国として安全審査を整備する必要がある。
	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、沈降途中の不安定な動揺が危惧されたため、クレーン無しの自由沈降を実施したところ、予想通りの傾斜方向とはならず、取水口が中空に出てしまい、沈降が中断した。	クレーン船による沈降を前提とした浮体であっても、自由沈降するケースを考慮した配管設計は必要。	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考慮した最適な配管設計を行う。
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。	応急対策工事・予防保全対策を実施したことにより、追加費用が発生した。また恒久対策工事の実施期間中は、風車の運転を停止する必要があるため、稼働率が低下する。	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うけてL型浮体にストラット構造を追加するA型浮体への構造の転換を提言した。またA型浮体構造では、十分に発生応力を低減させることを確認している。

設備	運転維持の観点から設計に反映すべき事例（ヒヤリハットなど）	安全性を前提としたうえで信頼性と経済性の向上に資する課題	得られた教訓（学び）
洋上変電所	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による回路不良による直流電源装置のAVRユニットが故障した。 （AVR：変動する入力電圧に対して、電圧を一定に保持する機能により、電圧変動を抑制し、出力電圧を安定化する機能。）	変電所の故障により送電ができなくなった。また、海外製の部品の調達に時間がかかり、数か月間、送電ができなかった。	交換時期が想定より早まったことをうけて、欧州におおける洋上変電所の陸上との対応方針の違いの確認（部屋の開け閉めを含めた対策）を助言した。
SS浮体	台風により、艀装品である手すりが倒壊した。	手すりの修繕費用が追加で発生し、コストの増加につながった。	NEDOの浮体実証等で手すりは倒立式で取り付けられていることを示唆し、今後の検討方針の一つとして提示した。 また現在の浮体の審査は造船の規定に従っているため、艀装品も含めた審査・基準の整備の必要性について言及した。
ケーブル	海洋生物がライザーケーブルに付着することによる沈降・着底が発生した。	着底した場合にケーブル被覆が損傷する可能性があり、漏電のリスクとなる。また、これに伴う海洋生物の除去に要するコストが高い。	海洋生物の除去ではなく、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の対策を実施した。実施した施策の場合、海洋生物の付着量の不確かさに対応しており、一定の成果を上げることが出来た。

### 2.13.3 委員会運営

本実証研究事業では、外部有識者による専門委員会・ワーキンググループを設置しており、実証研究に対する助言、専門的な知見を取り込みながら、遂行してきた。みずほリサーチ&テクノロジーズへのヒアリングの結果、専門委員会・ワーキンググループの運営実績を表 48 に示す。

表 48 実証期間中の専門委員会・ワーキンググループの実績

事業期間	専門委員会・ワーキンググループ名
平成 23～27 年度事業	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 技術委員会（実証研究全般に対する助言）</li> </ul>
平成 28～30 年度事業	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 技術委員会（実証研究のうち、研究開発要素に対する助言）</li> <li>● 事業化委員会（実証研究のうち、事業化を見据えた検討内容に対する助言）</li> <li>● 導入マニュアル検討ワーキンググループ（導入マニュアルの策定）：平成 29～30 年度</li> <li>● 総括委員会（実証研究事業を第三者の立場で総括する）：平成 30 年度</li> </ul>
令和元～2 年度事業	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 運転実証委員会（追加的なデータ取得、コスト削減の推進）：令和元～2 年度</li> <li>● 第三者評価委員会（実証研究事業を第三者の立場で総括する）：令和 2 年度</li> </ul>
その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 風車の制御に関するワーキンググループ：平成 27 年度</li> <li>● 海洋生成物が付着したライザーケーブルの維持管理手法の検討ワーキンググループ：平成 30 年度</li> </ul>

### 3. まとめ

#### 3.1 令和元年度及び令和2年度の総括委員会のまとめ

##### (1) 総括

本実証研究事業では、規模の異なる風車と形状の異なる浮体を組合せた、世界初の浮体式洋上風力発電所として平成25年度から令和2年度に至る8年間運転して、適用した技術の実証を行うほか漁業との共存の在り方などの検討を行ってきた。

令和元年度及び令和2年度には、平成30年度の総括委員会の提言を受けて、追加のデータ取得を継続し、さらに維持管理費用低減を確認した。

##### (2) 本事業の成果

本実証研究事業では、風車、浮体、変電設備、ケーブルなどの浮体式洋上風力発電設備を構成する要素技術の実証、それらを1つの発電設備として組み上げ、運転・維持するための手法の開発、気象・海象データの観測データの測定手法の開発を含む、それら技術実証を裏付けるためのデータの取得を実施した。令和元年及び2年度の実証研究事業を通じて得られた主な成果は、以下のとおりである。

- 5MW 実証機では、定格風速以上でのスラスト力のマイナス傾き（ネガティブダンピング）に起因する浮体特有の振動制御を行う FVC(Floating Platform Vibration Control)タワー振動制御や FF(Feed Forward) ピッチ制御、Quick Pass（共振ジャンプ）制御を導入し、浮体式風車特有の振動対策制御としての有効性を確認した。
- 洋上変電所では、塩害等の浮体特有の過酷な外部環境に起因し、令和元年8月に設置後初めて大きな故障が生じた。当該故障について、原因の特定および再発防止の取組により、対応すべき具体的方策を検討した。洋上変電所を設置する際、変電所へのアクセス効率を考慮し、アクセス率が悪いと想定される場合はバッテリーや一部制御機器などは2重化した設備を納入し、部品故障時、即設備停止に至らない構成とする必要があることが対策として挙げられる。
- 海洋生物の付着量が設計時の想定以上となったことを受けて、ケーブルの恒久対策として、7MWを除く6本のライザーケーブルに大型ブイ+チェーン取付を実施した。これにより、海洋生物付着によるケーブルの沈降が抑制され、従来実施していた大型 ROV（Work クラス）を使用した維持管理を不要とすることで維持管理コストの極小化の見通しが得られた。
- 2MW 風車の故障要因を分析した結果より、浮体式固有で発生する停止要因はなく、停止要因のほとんどが成熟しても発生する停止項目となっていることを確認した。このことから、風車そのものの習熟度が浮体式洋上風力発電においても、高い水準であることが確認された。
- 5MW 風車の故障要因を分析した結果より、風車の成熟度が十分に得られなかったことによる初期不良に伴う停止要因が多くを占め、風車停止時間の増加に繋がっていることを確認した。具体的には、浮体式固有の揺れに伴い発生した、PCS ファンモータの地絡や各種ケーブルの断線等が技術的課題として挙げられ、風車としての習熟度が不足していたため、停止時間の増加に繋がった。

このような成果は、学術論文、对外発表としての研究成果に加えて、福島洋上風力コンソーシアムのホームページにおいて、技術資料として公表している。今後は、現在進行中の7MW 風車浮体の撤去実証や、撤去後の漁業影響調査、気象・海象データの取扱いを含む成果の発信をより深めることが重要である。そのためには、本実証研究事業の成果が対外的に広く認知されるよう努め、今後の浮体式洋上風力発電の技

術開発及び政策への起点となるような成果の取りまとめが求められ、これらは令和3年度事業で実施予定である。

### (3) おわりに

本年度は、本実証研究事業の最終段階の取組として、発電システム全体の追加的なデータの取得や、さらなるコスト低減の促進、漁業との共存の検討、に加えて実証研究事業を通じて獲得した技術的な知見や、学び（教訓）によって獲得した知見について検証を行った。

発電システム全体の追加的なデータ取得については、2MW 風車・5MW 風車の稼働率・設備利用率のデータの取得を行った上で、各設備での風車停止時間を詳細に分析することで、外部環境に起因する停止や風車そのものに起因する不具合の発生による停止等のフィルタリングを行い、浮体式洋上風力発電の稼働率は風車の習熟度に大きく依存することを確認した。

並びに令和元年度、2年度事業では平成30年の総括委員会からの提言を受け、維持管理コストの最適化を果たすため、安全性を確保した上で、コスト削減に資する取り組みを検証した。その結果、平成30年度の維持管理費を100とした場合、令和2年度は37の水準までコスト削減を達成した。

今年度を持って本運転実証事業は終了となるが、撤去実証、漁業との共存、国民との対話（情報発信の在り方）の総括および浮体式洋上風力発電導入マニュアルの更新については、令和3年度事業において本実証事業全体の成果の総括と併せて実施する予定である。