

浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業 (報告書概要版)

平成28年3月
福島洋上風力コンソーシアム

< 目次 >

Executive Summary.....	2
1. 浮体式洋上風力発電所の事前調査.....	5
2. 実施海域での気象・海象・浮体動揺の観測と予測技術の開発.....	23
3. 我が国の洋上環境に適した浮体式洋上風力発電システムの開発.....	35
4. 浮体式洋上風力発電所のための変電システムの開発.....	63
5. 浮体式洋上風力発電所の維持管理手法の確立.....	81
6. 環境影響と航行安全性の評価及び漁業等の共存.....	107
7. 浮体式洋上風力発電の共通基盤の整備とマニュアルの作成.....	127
8. 「国民との科学・技術対話」の実施.....	135

浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業の成果概要

【事業の目的】

世界最大級の浮体式洋上風力発電所の実現のため、福島沖で実証し、安全性・信頼性・経済性を評価

世界初の浮体式洋上風力発電所への挑戦
【技術的挑戦】

「再生可能エネルギー先駆けの地」福島県の復興
【社会的挑戦】

福島沖での事業性評価を受け風車産業集積地を目指す福島県の復興に貢献

【実証研究の成果】

世界初の浮体式洋上風力発電所への挑戦

ふくしま絆
浮体式洋上変電所
Advanced-Spar型浮体



世界初

浮体式洋上変電所
5MW級の大型風車搭載
複数基をケーブルでつないだ発電所

1.6km



ふくしま浜風(建設中)
5MW
Advanced-Spar型浮体

1.75km



ふくしま未来
2MW
Semi-Sub型浮体



ふくしま新風
7MW
Semi-Sub型浮体

「再生可能エネルギー先駆けの地」福島県の復興

【県内漁業者との協業】

・漁労設備、技術の維持

漁業協働委員会

漁業との共存WG



【地元企業の活用】

・タワー部品の地元企業
への製造委託
・新規開発した国産ブイの
活用

【インフラの整備】



風車組立工事のため
小名浜港湾の地耐力強化

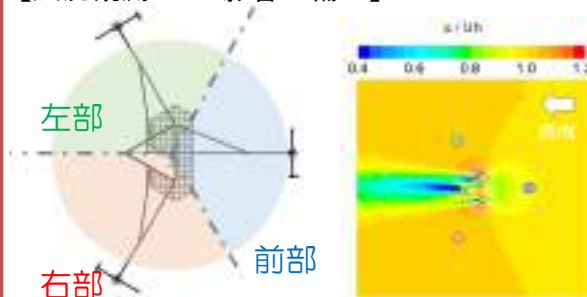
【成果①】世界初の浮体式洋上風力発電所への挑戦

- 福島沖20kmに変電所、2MW、7MW風車からなる浮体式洋上風力発電所を設置。
- 複数の浮体のコンセプトに加え、観測・予測技術の開発や高性能材料の開発も実施。

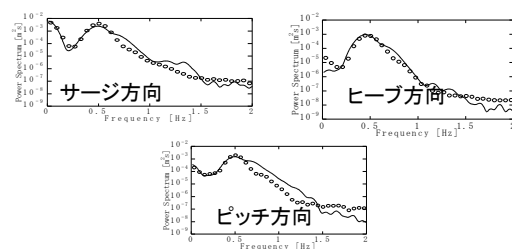


観測予測技術

【風況観測マスト影響の補正】



【モデルによる浮体動揺予測精度の検証】



浮体式風力発電システム

【浮体コンセプト】



ふくしま未来
2MW
Semi-Sub型



ふくしま新風
7MW
Semi-Sub型



ふくしま浜風
5MW
Advanced-Spar型

【高性能材料】



浮体係留用チェーン

【把駐力試験】



把駐力(500トン)試験中

洋上変電所システム



送変電システム概要



66kVライザーケーブル



浮体式洋上変電所

【成果②】再生可能エネルギー先駆けの地福島県の復興

- 漁業協働委員会等を通じて、漁業者との信頼関係し、漁業共存策を検討。
- 風力発電拠点港湾としての小名浜港藤原埠頭の地耐力強化を実施。



浮体式風力発電システム

【小名浜港の地耐力強化】



地耐力を40t/m²に強化。風力発電拠点港湾へ

【地元企業との連携】



新規開発した国産ブイ
(福島県内企業製造品)

漁業との共存

【漁業協働委員会による漁業者との意見交換】

漁業協働委員会



(福島民報より)

【漁業共存策の検討】

ROV調査



海洋観測データの配信

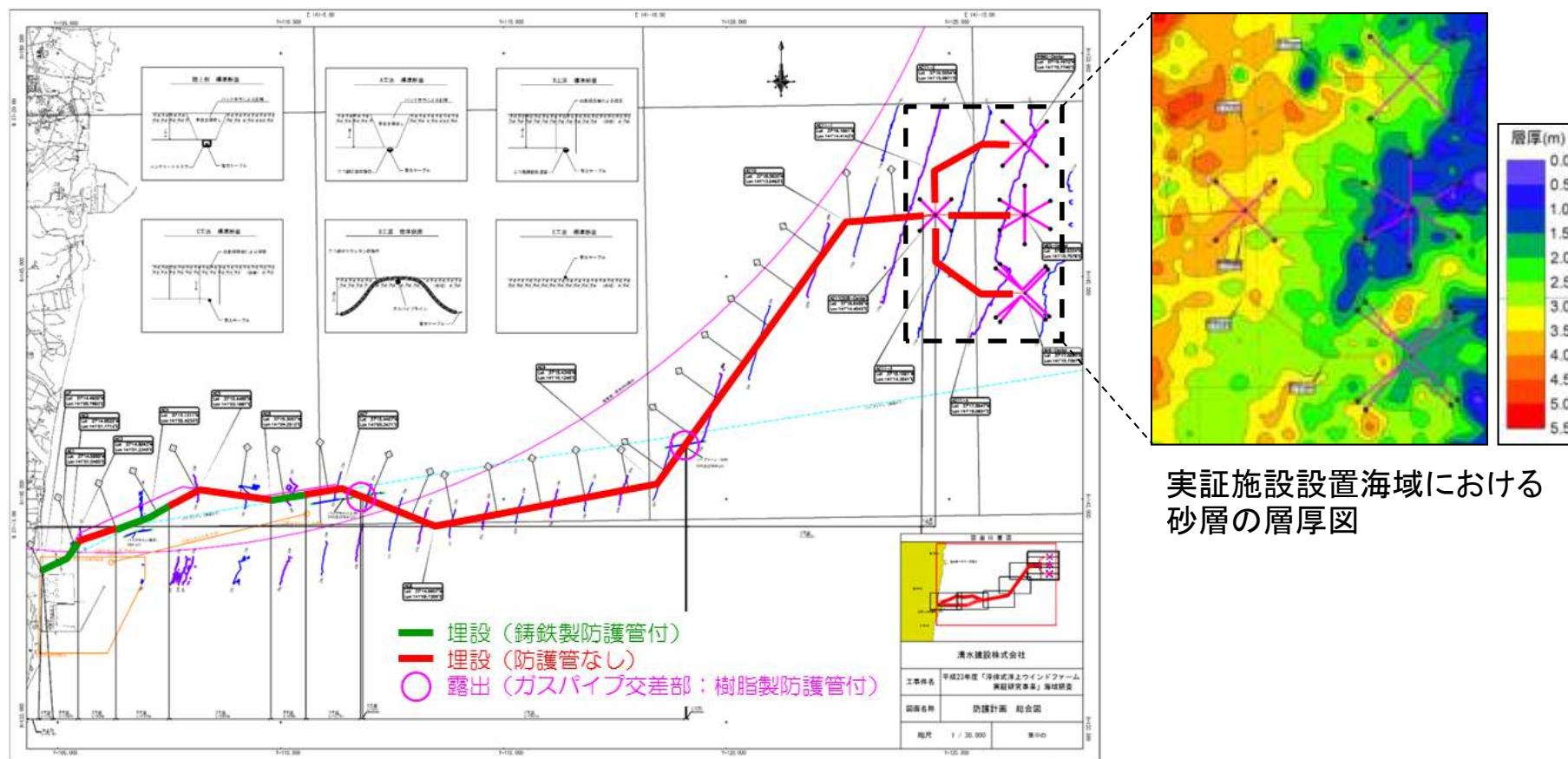


1. 浮体式洋上風力発電所の事前調査

1. 海域調査
2. 事前協議
3. 系統連系に係わる検討
4. 基本設計、実施計画書、工事計画書の作成
5. 事業性評価

【海域調査】 海底地形等を考慮した送電ケーブルルートの選定

- 海域調査を実施し、実証施設の設置に適した海域の絞り込みを実施。
- 海底地形・地質、障害物の有無等を考慮し、送電ケーブルルートを設定。



実証施設設置海域における
砂層の層厚図

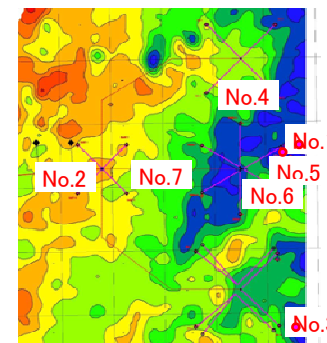
海域調査結果に基づく送電ケーブルルート図

【海域調査】 ドラッグアンカー試験の実施

○実証施設設置海域において係留システムとして想定したドラッグアンカーの適用性を確認する試験を実施。

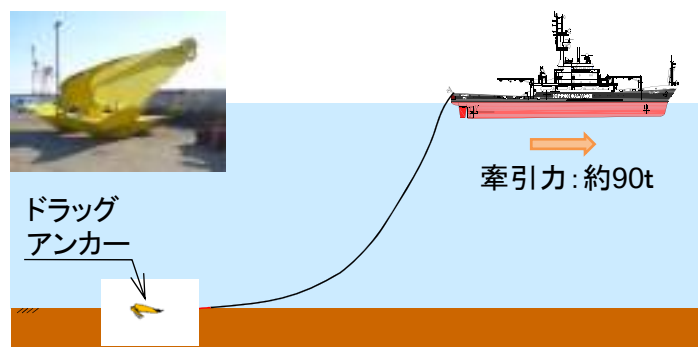
「浮体設置エリアは半固結堆積岩層(第Ⅰ層)と堆積岩層(第Ⅱ層)の2層構造」

⇒ ドラッグアンカーが層の境界面で滑らないか？第Ⅱ層に貫入するか？



実際と同様の仕様のドラッグアンカーによる確認試験を実施

- 90t前後の牽引力で第1層の層厚に関係なくドラッグアンカーは海底に貫入
- 牽引力と同様の把駐力を得ることを確認



No.	第1層の層厚	平均牽引力 ^{※1}	アンカーの移動量 ^{※2}	Shank部の貫入量 ^{※3}	貫入量の計測方法等	牽引後のアンカーの状態	30分間の牽引保持
No.1	0.0～0.5m	90.42 t	13.0m ^{※4}	0.5～1.0m	ROV 画像及び Shank 部マーキングから		OK
No.2	4.0～4.5m	85.67 t	2.7m	2.0～2.5m (ほぼ全没)	ROV 画像及びアンカー寸法から		OK
No.3	0.0～0.5m	90.85 t	4.1m	1.0～1.5m	ROV 画像及びスタックによる検尺		OK
No.4	2.0～2.5m	87.56 t	4.5m	1.5～2.0m	ROV 画像及び前日との比較		OK
No.5	0.5～1.0m	88.27 t	5.2m	0.5～1.0m	ROV 画像及び Shank 部マーキングから		OK
No.6	1.5～2.0m	88.90 t	5.2m	2.0～2.5m (ほぼ全没)	ROV 画像及びスタックによる検尺		OK
No.7	2.5～3.0m	86.28 t	3.4m	2.0～2.5m (ほぼ全没)	ROV 画像及びアンカー寸法から		OK

【事前協議】 開発に必要な許認可手続き

○浮体式洋上ウィンドファームの開発に必要な許認可届出を整理・取得した。

分類	法令名称	対応要否	担当/決裁窓口	備考
一般事項	国有財産法	要	福島県相双建設事務所	一般海域の占用に係る許可申請(後述)
	水産関連法令	要	農林水産省 水産庁	海洋水産資源開発促進法指定海域における行為の届出
	自然公園法	不要	-	特になし
	鳥獣の保護及び狩猟の適正化に関する法律	不要	-	特になし
	国土利用計画法及び国土形成計画法	不要	-	事業実施想定区域の海域に制約を与える計画の情報は既存資料等により現状確認されていない
	文化財保護法	不要	-	史跡名勝天然記念物なし。但し、遺跡発見時は届出が必要
	景観条例等	不要	-	特になし
	民法	不要	-	事業実施想定区域周辺における民法に係る物権、債権等の条件は現状ではその存在を確認できない
	環境基本条例	不要	-	特になし
	港湾法	不要	-	事業実施想定区域周辺には港湾法に該当するエリアは存在しない
	その他の社会的制約条件	要	-	事業開始時、福島第一原発より20km圏内は警戒区域
発電設備	電気事業法	要	関東東北産業保安監督部・東北支部	電気事業に係る認可申請、技術基準への適合、保安規程の届出、電気主任技術者の届出、工事計画の届出、使用前安全管理検査等
	船舶安全法	要	国交省海事局	発電設備のうち浮体式基礎の安全性確認(後述)
	航空法	要	東京航空局	航空障害灯の設置。具体的な設置方法については「航空障害灯/昼間障害標識等に関する解説・実施要領、平成23年7月 国土交通省航空局航空灯火・電気技術室」に基づき実施
	航路標識法	要	第二管区海上保安部	航路標識(AIS含む)の設置に関する許可申請
	電波法	要	総務省	無線局免許申請
調査・設置工事	海上交通安全法	要	福島海上保安部	海域調査及び設置工事に係る作業許可申請及び届出
	水路法	要	第二管区海上保安部	
	福島県漁業調整規則	要		環境影響評価等に係る特別採捕許可申請
	建築基準法	一部要	福島県相双建設事務所	洋上発電設備については船舶安全法及び電気事業法における適用陸上設備のみ準拠
	安全衛生法	要	いわき労働基準監督署	高さ31mを超える工作物の設置
	船舶安全法	要	東北運輸局	浮体曳航作業に係る臨時航行申請
	港則法	要	各港	浮体設備の曳航・係留に係る作業届出
	海岸法(漁港漁場整備法を含む)	要	福島県相双建設事務所	海底ケーブルの設置に係る許可申請
	道路法	要	福島県相双建設事務所、ほか	鉄塔・送電線敷設に係る土地使用許可

【事前協議】 今後期待される許認可手続きの論点

Marubeni

○一般海域の占用ルールは確立されておらず、今後の法整備が望まれる。

論点整理

①規制の方法:

許可基準の明確性や許可手続の円滑迅速性が担保されていれば、海域占用許可制導入は事業者利益と成り得る

②規制の対象:

規制の対象を洋上風力発電の設置に限定したとしても、一般海域の利用調整ルールを設けることは海洋・沿岸域管理法制度全体に大きな影響を与えることに配慮が必要

③規制の主体:

規制主体を決定する際、一般海域の管理権者が誰かという海洋・沿岸域管理法制度における法的問題の考慮必要

④海洋再生可能エネルギー利用促進海域の設定:

国や地方公共団体より海域の選定やステークホルダーとの権利調整を主導するとともに、海洋再生可能エネルギー利用促進海域を設定する制度を整備することも有益。鉱業法上の特定区域制度が参考となる。

本実証研究において要した占用許可申請に係る要求事項(国有財産法のうち公共用財産使用条例等第3条第1項)

要求事項	備考
位置図及び付近見取り図	-
登記所備え付けの地図又はこれに準ずる図面の写し	-
実測平面図	-
求積図及び面積計算書	浮体、アンカー、ケーブルの占用面積
構造図	-
関係市町村の意見書	檜葉町同意書
利害関係人の同意書	福島県漁業協同組合連合会、いわき市漁業協同組合、相馬双葉漁業協同組合
実証研究事業の概要	-
工事工程表	-
航行安全委員会資料	-
その他資料(契約書等)	委託契約書

出所: 第一東京弁護士会「洋上風力発電の法的課題の克服に向けて」

【系統連系に係わる検討】 系統連系協議における陸上送電線のルート

- 海底ケーブル陸揚げ地点、東北電力との連系点、陸上開閉所位置、陸上送電線ルートそれぞれの適地につき比較検討を行い、選定した。
- 海底ケーブルから連系点までの必要設備の配置を決定し、用地の手配を行った。

候補ルート(当時)とそれぞれの課題



陸上送電線ルート(最終版)



【系統連系に係わる検討】 東北電力との系統連系協議の経緯

○浮体式洋上風力発電設備合計3基に対し、一括して東北電力との系統連系協議を実施した。

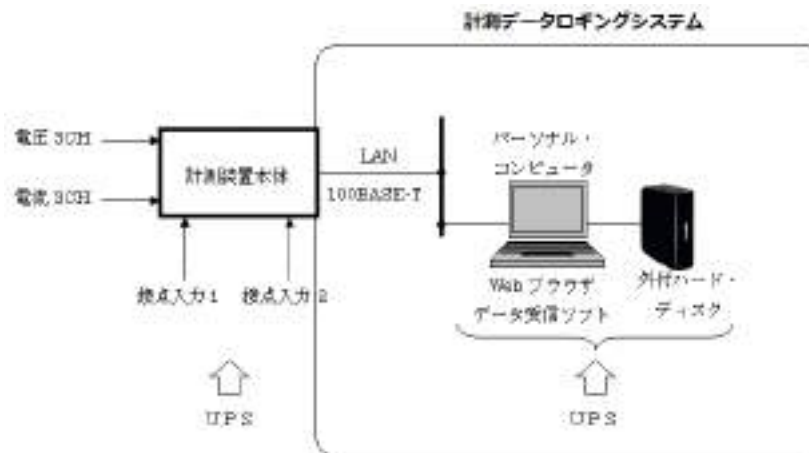
<連系協議経緯>

日付	内容
平成24年6月18日	「風力発電設備の系統アクセス検討申込書[特別高圧連系]」を東北電力へ提出。
平成24年10月16日	「基本協定書」を東北電力と締結。
平成24年11月1日	「系統連系申込書」を東北電力へ提出。
平成24年11月28日	「系統連系承諾書」を東北電力より受領。
平成24年12月14日	「工事負担金契約書」の締結
平成24年12月26日	工事負担金の入金
平成25年1月18日	「系統連系希望日変更申請書」提出
平成25年1月24日	「系統連系承諾書」を東北電力より受領。
平成25年1月31日	「電気使用申込書」を提出
平成25年3月25日	「電気供給承諾書」の受領
平成25年10月29日	「電力受給契約書」及び「試運転期間中における電力需給に関する覚書」の締結
平成25年10月30日	受電開始

【系統連系に係わる検討】 東北電力との系統連系協議を受けての対応

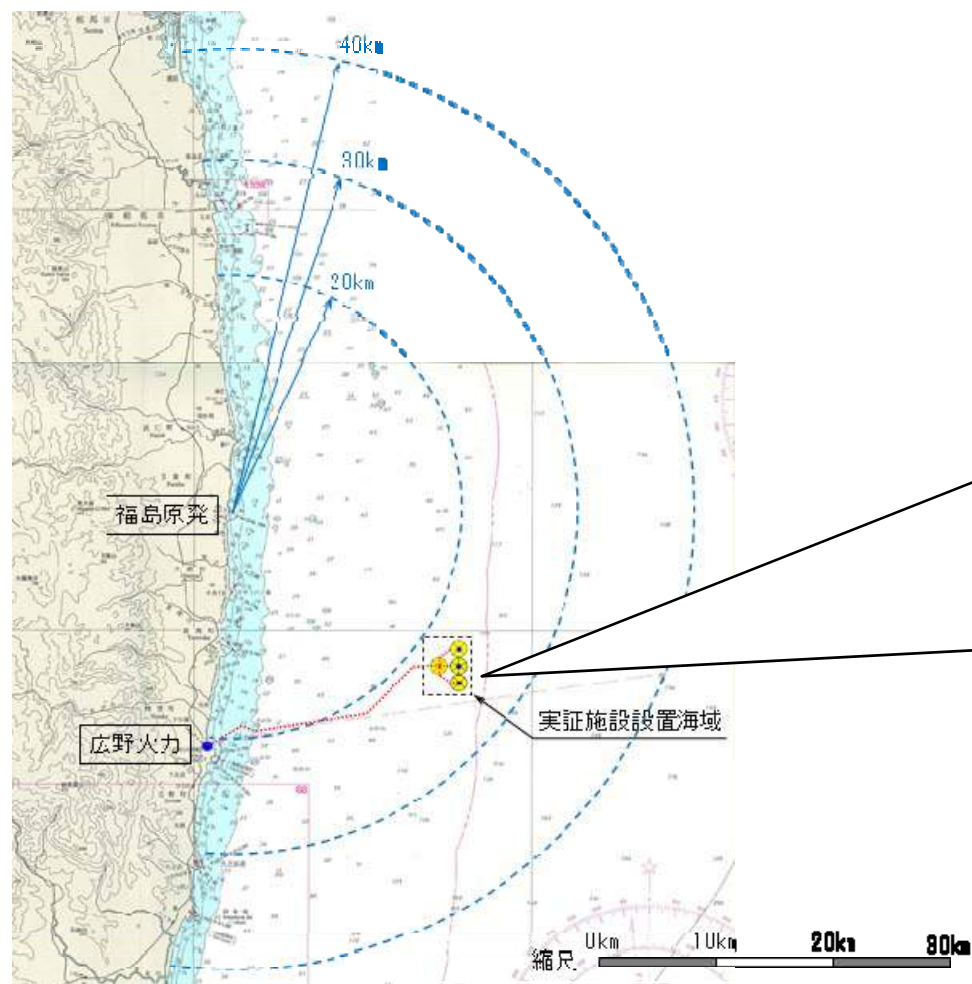
- 電力品質項目の計測、収集、分析のため、陸上開閉所内に計測データロギングシステムを設置した。
- 系統連系協議結果及び設計の妥当性を2MW運転開始後データから確認した。

- ✓ 系統連系協議において論点となった電力品質項目に関し、計測・データ収集・分析を行う為、陸上開閉所内に計測データロギングシステムを設置した。
- ✓ 以下の電力品質項目に関し、2MW機連系・運転開始後、ロギングシステムによる計測・分析を行った。
 - ・並列／解列時における過渡的な電圧変動
 - ・出力変動に伴う定常的な電圧変動
 - ・ケーブルの充電容量による高調波拡大現象
 - ・ケーブルの投入に伴う過渡的な電圧変動
 - ・短絡事故、地絡事故の発生時における電流ゼロ点推移
- 適正範囲からの逸脱は発生しておらず、系統連系協議結果及び設計の妥当性を確認した。

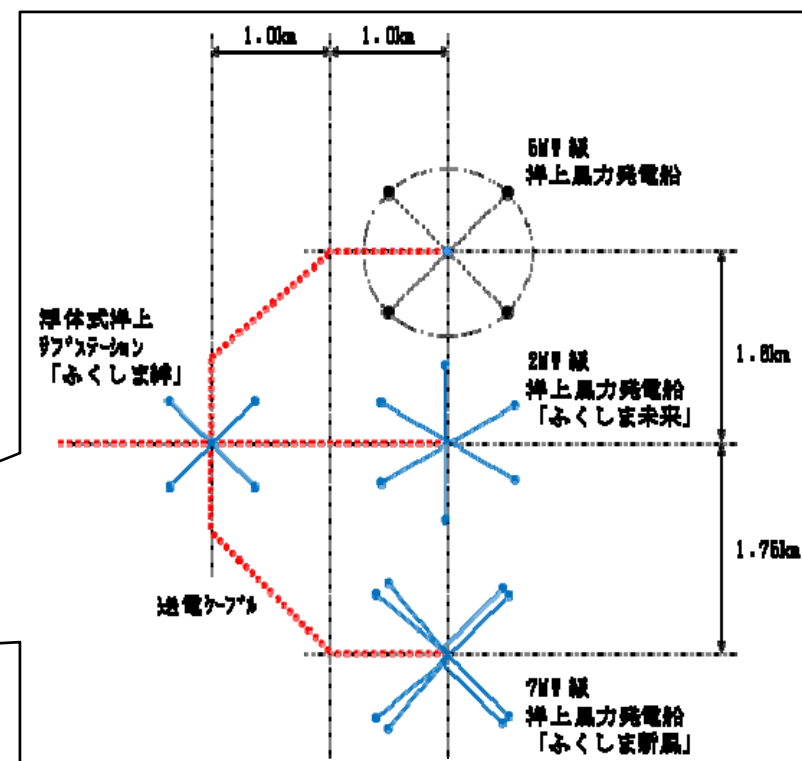


【基本設計、実施計画書、工事計画書の作成】 実証施設の配置計画の検討

○実証施設の設置海域を設定(檜葉沖約20km)し、施設の配置計画を検討。



※ 海上保安庁刊行の水路図誌を編集
水路通報 (W1098) 平成18年(2006)・792・23年(2011)・1200・1386



実証施設の配置計画

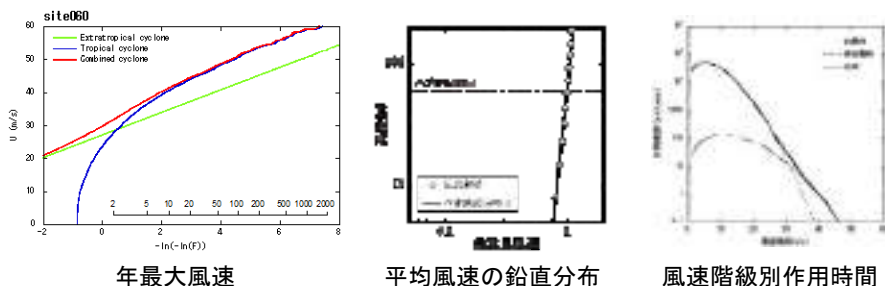
【基本設計、実施計画書、工事計画書の作成】 大臣認定に関わる設計条件設定

設計風速の算定

【**年最大風速の50年再現期待値**】 年最大風速は非台風時と台風時の風速の非超過確率分布を合成して求め、**48.27m/s(h=60m)**を採用。

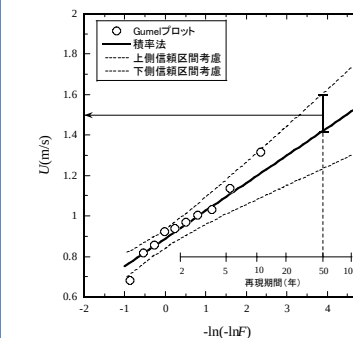
【**風速の鉛直分布**】 風況解析により求めた風速の鉛直分布をべき法則で近似し、べき指数として**0.1**を採用。

【**年間風速階級別作用時間**】 非台風時と台風時の風速階級別作用時間を合計することにより、1年あたりの風速階級別作用時間を算定。

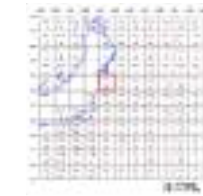


海潮流の算定

海流再解析データ(JCOPE)に基づく極値統計解析と日本海洋データセンターの統計値に基づき**1.5m/s**(50年再現期待値)、**1.0m/s**(1年再現期待値)を採用。



JCOPE再解析データに基づく極値統計解析



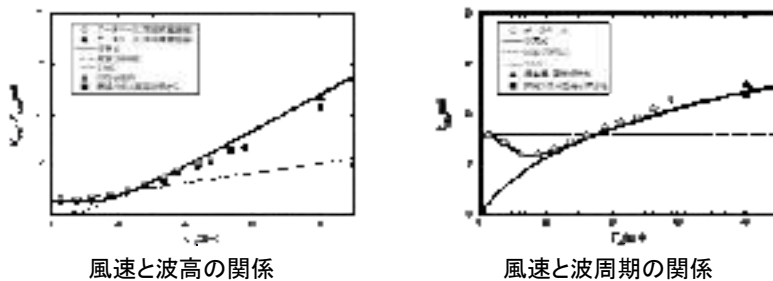
日本海洋データセンターの統計値

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平均	最大
平均流速	kt	0.2	0.3	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.3	0.4	0.2	0.2	0.4
	m/s	0.10	0.15	0.10	0.05	0.10	0.05	0.05	0.10	0.05	0.15	0.21	0.10	0.10	0.21
最大流速	kt	2.4	1.4	2.0	1.5	2.8	1.4	1.9	1.7	1.4	2.5	1.8	1.6	1.87	2.8
	m/s	1.23	0.72	1.03	0.77	1.44	0.72	0.88	0.87	0.72	1.29	0.93	0.82	0.96	1.44
安定度	%	44	65	47	24	35	33	25	35	24	45	67	46	—	—
	度	174	160	173	41	105	142	154	170	179	184	189	163	—	—
最大波向	度	57	190	180	41	60	26	201	210	97	49	227	170	—	—
	サンプル数	67	82	138	82	169	124	125	149	64	137	114	105	—	—

波浪の算定

【**暴風波浪時**】 有義波高と有義波周期の公表値を比較し、50年再現期待値には最も大きい値となった**11.71m**および**13秒**をそれぞれの基本値として採用。

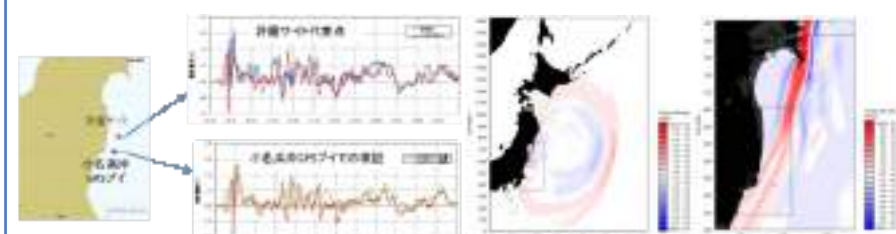
【**発電時**】 観測データに整合するように風波(SMB法)とうねりの割合を調整し、平均有義波高、等価有義波高および調和平均波周期と風速の関係式を提案。



地震と津波の検討

【**地震動**】 水平地震動は建築基準法に、鉛直地震動は土木学会「風力発電設備構造設計指針・同解説」に従い評価。

【**津波**】 2011年東北地方太平洋沖地震津波を想定した非線形浅水長波理論により、最大潮位偏差として**-2m~+3.2m**、最大流速として**0.87m/s**を採用。



潮位偏差(計画サイト, NOWPHAS GPSブイ位置)

潮位偏差の分布

【基本設計、実施計画書、工事計画書の作成】実証海域におけるアンカーの検討

- 各実証施設の基本設計は浮体メーカーを中心に実施。
- 共通化によりメリットがある係留システムはアンカー形式、チェーンリンク形状を統一、アンカー形式はドラッグ式アンカーを選定。

形式	ドラッグ式	重力式	杭式
概念図			
特徴	・ アンカーを吊り下ろして牽引できる施工機械のみで施工可能 ・ 自重/把駐力が小さく、ハンドリングが比較的容易	・ 500tの把駐力を得るため2,000t近くの気中重量となり、設置には大型起重機船が必要	・ 杭やプレートを地中に貫入させるプロセスが伴い、水中ハンマーやサクションプンプなどの専用設備が必要
評価	○	△	△

【基本設計、実施計画書、工事計画書の作成】 工事計画届出書の作成

○電気事業法48条に基づく工事計画届出書を作成。

第1期実証施設(2MW洋上風車～洋上サブステーション～陸上開閉所)
: 発電所名「ふくしま未来洋上風力発電所」として届出、H25/2/22付受理
第2期実証施設(7MW洋上風車): 発電所増設として届出、H26/4/30付受理
第2期実証施設(5MW洋上風車): 発電所増設として届出、H27/6/25付受理

浮体式洋上風力発電所の手続の要点

- 支持構造物(タワー・浮体・係留系)の構造評価
: 建築基準法の大員認定に替わり船舶安全法による設計確認を適用
(日本海事協会による設計確認適合証書を添付)
- 「特殊な風力発電設備」として本省の審査顧問会の受審が必要
- 係留系は支持構造物の一部と理解されており、係留アンカー・索の設置工事が最初の施工プロセスとなる場合、工事計画届出が作業船出航の30日前までに受理されることが必要
(陸上ヤードにおける係留索の敷並べ、作業船への係留アンカー・索の積込等の準備作業は対象工事とは見なされない)



第1期実証施設の
工事計画届出書

【事業性評価】 実証研究に要したコスト

Marubeni

○実証研究に要したコスト^{*0}（資本費）を整理した。

風車・浮体・ケーブル

項目	2MW(百万円)	7MW(百万円)	5MW ^{*3} (百万円)
風力発電機	468	6,923	2,120
風車(設計含)	468	6,923	2,120
発電機基礎部	1,804	3,287	5,798
設計費	271	424	388
浮体設備	842	2,041	4,873
係留系	691	822	537
工事	2,232	6,010	3,326
風車搭載工事 ^{*1}	43	2,417	850
曳航作業	303	746	1,692
チェーン敷設・係留作業	940	1,697	784
把駐力試験	418	370	上記に含む
工事その他 ^{*2}	528	780	上記に含む
小計	4,504	16,219	11,244
単価(万円/kW)	225	232	225
ケーブル(浮体間)	1,116	1,579	1,578
設計費	68	-	-
ケーブル材料費	138	156	155
その他材料費	225	178	178
工事費	685	1,245	1,245
合計	5,620	17,798	12,822

開発費・送変電費

項目	実績(百万円)
開発と許認可	392
許認可取得・事前協議(概算)	100
海域調査	92
環境影響評価(概算)	200
洋上変電所	4,354
変電所	520
浮体設備	1,969
係留系	339
曳航作業	397
係留作業	510
把駐力試験	496
その他付帯設備	125
ケーブル	1,476
設計費	68
ケーブル材料費	668
その他材料費	60
工事費	680
陸上送変電設備	819
系統連系負担金	30
鉄塔・送電線	444
陸上開閉所	325
運転監視員詰所	20
計	7,041
単価(万円/kW)	50

* 小数点以下の端数の関係で合計が一致しない場合がある。

^{*0} 原則委託費ベースで無く実績に基づく、データ観測・解析、漁業共存等の研究費として扱うべき費用を除く

^{*1} 地盤強化、海底マウンド設置等インフラ整備及び現状復旧コストは除く

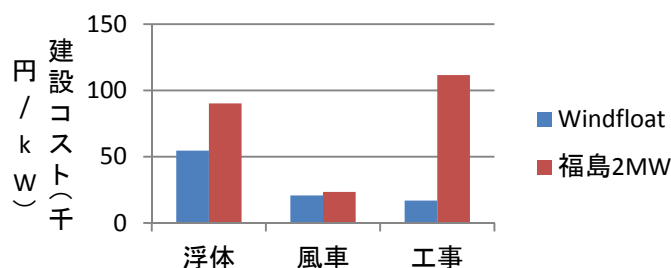
^{*2} 共通仮設費、一般管理費等

^{*3} 発電機基礎部・工事については2016年2月委託費ベース

【事業性評価】 WindFloatプロジェクトとの比較

Marubeni

- 2MW洋上風車とWindfloatプロジェクトの設備・建設コストを比較。
- 日本の海象や施工荷重に対応する作業船を開発すれば、Windfloatと同様な作業船1隻による合理性のある施工を行うことができ、同等の建設コストを実現できる可能性あり。



風車

- 両者とも概ね2MW級風車の相場単価(20万円/kW前後)と一致

浮体

- Windfloatの1.4倍、浮体の鋼材重量及びチェーン条数がコスト差要因と推定

工事

- Windfloatの6倍以上、その差は①工事(曳航、係留、把駐力)を作業船1隻で行うこと、②係留索本数の差、③施工方法の違いによる工程の差 等によると推定

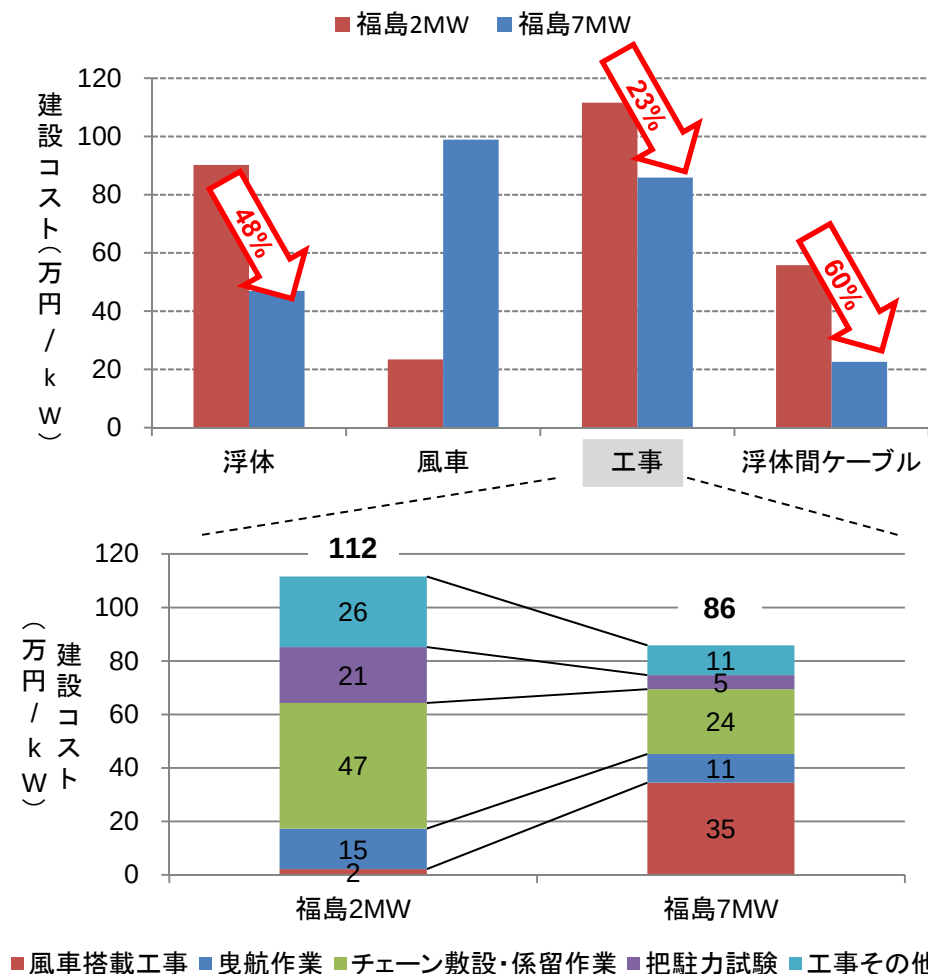
(単位: 百万円)

工種	Windfloat 建設コスト	2MW機 建設コスト	2MW機建設コストを基に各種想定によりコスト削減を検討した結果	
風車搭載		43	43	
係留チェーン積込		172	33	172-122[作業船1隻の稼働費のみとした場合の減額分]-17[係留索4本⇒6本の減額分]
係留アンカー・チェーン設置		467	86	467-359[作業船1隻の稼働費のみとした場合の減額分]-22[係留索4本⇒6本の減額分]
把駐力テスト		418	58	418-345[作業船1隻の稼働費のみとした場合の減額分]-15[係留索2対⇒3対の減額分]
浮体曳航		303	128	303-175[作業船1隻の稼働費のみとした場合の減額分]
浮体係留		301	56	301-221[作業船1隻の稼働費のみとした場合の減額分]-24[係留索4本⇒6本の減額分]
共通仮設・現場管理		528	63	528-237[専用警戒船やヤード等を手配しないことによる減額分]-228[直工比に応じた率による減額分]
			▲84	緊急対応等の計画外の稼働による増加分を控除
合計	339	2,232	384	

差(45)は自然条件等の違いによると考えられ、検討結果はWindfloat と同レベルに到達している

【事業性評価】 2MW基と7MW基の建設コストの比較

- 3種類の浮体式風力発電設備コストおよび工事コストを比較した。
- 風車本体および搭載工事を除き、大型化・効率化により第2期では単価低減を達成。



考察

風車

- 2MW風車は商用機であり市場相場と同等程度なるも、7MW風車は従来のギア式と全く異なる技術を採用した商用化前段階の風車であり、現時点では非常に高額

浮体

- 係留本数(6本(2MW)→8本(7MW))や浮体鋼材重量の増加により絶対額増なるも風車大型化に伴うkW当たり単価大幅減を達成

工事

- 風車大型化および第1期の知見を生かした効率的な施工により第2期(7MW)は総合的な単価低減を達成
- 他方、風車搭載工事費用は2MWと比較し大増、世界最大クレーン使用に伴う単価UPに加え、拘束期間の長期化(7MWは約半年)の影響大、施工を容易にする仕様の検討及び効率的な施工手法の開発が急務
- 曳航費用は曳航距離の増加により大型化・効率化の効果が相殺(2MW:千葉～現地、7MW:長崎～現地)

浮体間ケーブル

- 風車大型化および第1期の知見を生かした効率的な施工により第2期はいずれも単価低減を達成
- 他方、第1期は1回の工事で完工したが、第2期は2回で施工⇒艀装回航費が割高になっているため、施工回数を下げることで更なるコストダウンが見込まれる

【事業性評価】 運転維持費

- 第1期実証研究に要したコスト(運転維持費)を整理した。
- 主なコストドライバーはアクセス船および保険であり今後のコストダウンが望まれる。

第1期実証研究コスト(運転維持費)

大項目	中項目	コスト実績 (百万円/年)
オペレーション	人件費(監視員、主任技術者)	80
	現地事務所諸経費	10
	アクセス船	240
	その他	30
メンテナンス・修繕	風車メンテナンス等	30
	送変電設備保守管理	50
	予備品	-
	大規模修繕等	-
保険	保険料	100
その他	海域使用料	-
	固定資産税・事業税	-
予備費	予備費	-
計		540

※純粋な調査研究に要したコストは除外、税抜

考察

オペレーション

- ・アクセス船が主なコストドライバー
- ・英国におけるアクセス船チャーター料(1.2億円～1.8億円/隻・年)と比較すると20～40%程度割高、理由としては1)国内市場が小さくスケールメリットが効かない2)短期傭船によりチャーター料が割高となること等が考えられる

メンテナンス・修繕

- ・風車メンテナンス費は1)近隣港～現地まで2-3時間を要すること2)作業限界波高に因る低稼働率、および3)一航行当たりの乗員数限界(12名)によるメンテナンス長期化が要因で高額である
- ・送変電設備保守管理費はサブステーションの観測機器やLBT修繕等で高額となった
- ・予備品および大規模修繕は実証期間内では凡そ発生せず

保険

- ・財物保険料率は概ね0.8%(台風は別途特約対応。地震津波は免責)欧州の着床式料率は0.2～0.5%であり、割高である
- ・料率引き下げのためには、案件数増による保険市場の確立はもとより、第三者によるリスクサーベイの実施等が肝要

その他

- ・海域使用料、固定資産税は本実証では減免対象

【事業性評価】 将来のコストダウンの見通しの検証

Marubeni

○資本費について、将来コストダウン見通しを検証した。

○Pre-Commercial時は100万円/kW、商用化時は80万円/kWまでの資本費低減を見込む。

単位：万円/kW

	第1期実証	第2期実証	Pre-Commercial ^{*2}	商用化 ^{*3}
浮体	90	47 設計最適化 ブロック海外生産 係留システム改善	30 量産効果 更なる技術開発	25
風車	23	99 相場価格への収斂	25 量産効果 更なる技術開発	20
工事	112	86 大型クレーン整備 作業船数削減 艀装回航費割掛け	35 更なる施工効率向上	27
小計	225	232	90	72
開発・送変電 ^{*1}	-	-	10	8
計	-	-	100	80

*1 送変電費については実証コストは割愛、将来コストは送変電設備メーカーへのヒアリングによる

また開発費においては風況/海象データ調査費用、各種アドバイザー費用、資金調達費（建中金利含む）等は考慮していない

*2,3 「7MW級風車×10基程度」および「7MW級風車×100基程度」を「本実証海域を想定した環境条件」で開発する前提

【事業性評価】 将来の発電コストの見通し

- 事業化時の前提を整理し発電コストを試算することで事業性評価を行った。
- Pre-Commercial時は43～54円/kWh、商用化時は36～45円/kWhの発電コストとなる。

発電コスト試算前提条件

項目	設定条件	備考
事業(買取)期間	20年間	着床式と同様(2015年度)
設備利用率	32%	本実証海域を想定 (2MW実績は約29%であるが、将来は風車大型化によるハブ高上昇や自家消費率の低減、冬場の稼働時間向上を見込む)
資本費	60～100万円/kW	前述のコスト見通しをベースに感度分析
運転維持費	2.5万円/kW・年	内訳は右表の通り(インフレ考慮せず)
撤去費	建設コストの5%	着床式と同様(2015年度)
固定資産税率	1.4%	-
税前P-IRR	6%～10%	一般的な民間投資基準をベースに感度分析
政策経費(FIT以外)	0円/kWh	

大項目	中項目	kW 単価 (万円/kW)
オペレーション	人件費(監視員、主任技術者)	0.1
	現地事務所諸経費	0.01
	アクセス船	0.3
	その他	0.1
メンテナンス	風車メンテナンス等 (各種保証を含む)	0.7
	送変電設備保守管理	0.1
	予備品	0.1
	大規模修繕等(年平均)	0.5
保険料	保険料(年平均)	0.6
その他	海域使用料	0.01
	固定資産税・事業税(年平均)	別途計算
計		2.5

発電コスト試算結果

単位: 円/kWh

P-IRR (税前)	建設コスト(万円/kW)				
	100	90	80	70	60
10%	53.7	49.2	44.7	40.2	35.8
8%	48.0	44.1	40.2	36.3	32.4
6%	42.8	39.4	36.0	32.6	29.2

Pre-Commercial

商用化

更なる普及拡大に伴うコスト減

出所: 発電コスト検証ワーキンググループ「長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告」

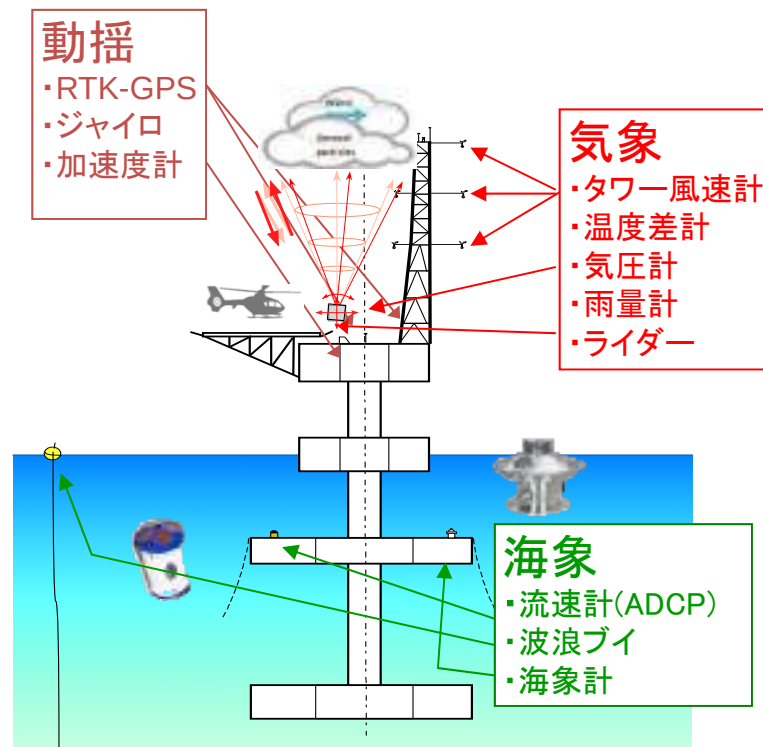
2. 実施海域での気象・海象・浮体動揺の観測と予測技術の開発

1. 気象・海象・浮体動揺の観測技術の開発
2. 浮体動揺の予測技術の開発

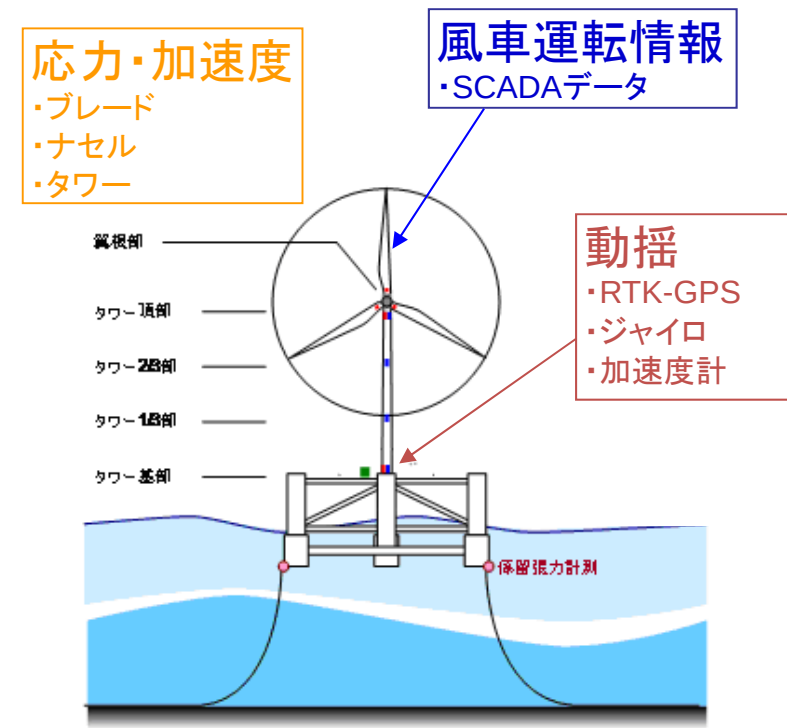
【気象・海象・浮体動揺の観測技術の開発】 観測システムの概要

目的:

- 浮体動揺の観測技術を確立し、浮体動揺特性を明らかにする。
- 浮体を用いた気象・海象観測技術を確立し、福島沖における気象・海象特性を明らかにする。



サブステーション浮体



2MWコンパクトセミサブ浮体

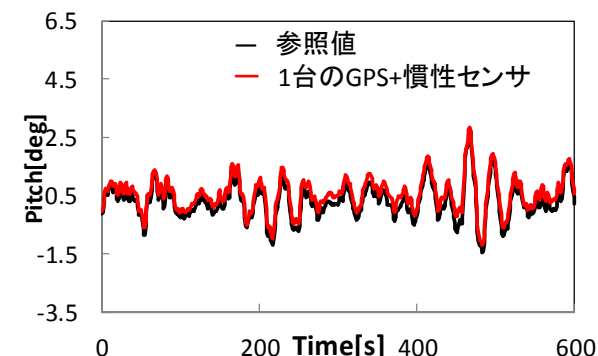
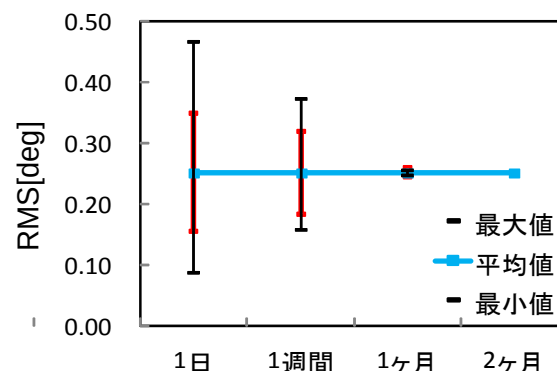
【気象・海象・浮体動揺の観測技術の開発】 浮体動揺観測技術の開発

○1台のRTK-GPSと慣性センサ(ジャイロ・加速度計)を用いて浮体動揺を計測する手法を確立した。

回転成分の補正

ジャイロの0点を求める手法を確立した。

長期間の観測の平均値をジャイロの0点とする。
1ヶ月以上の平均値を0点とすれば、3台のRTK-GPSから求めた参照値とほぼ一致する。



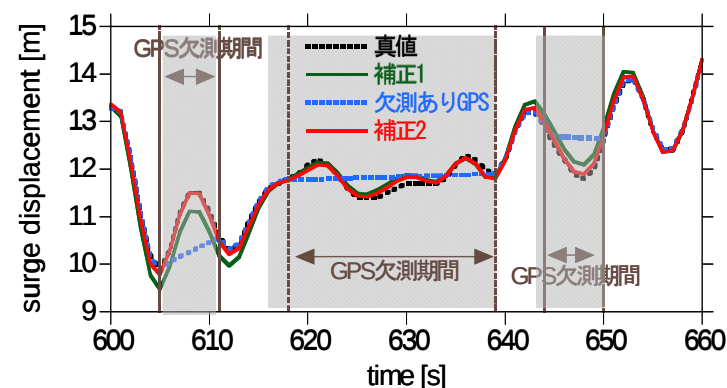
並進成分の補正

RTK-GPSデータに欠測がある場合に加速度を用いて並進成分を補完する手法を確立した。

欠測を含むGPSと加速度計の積分結果を周波数空間で合成する手法を提案

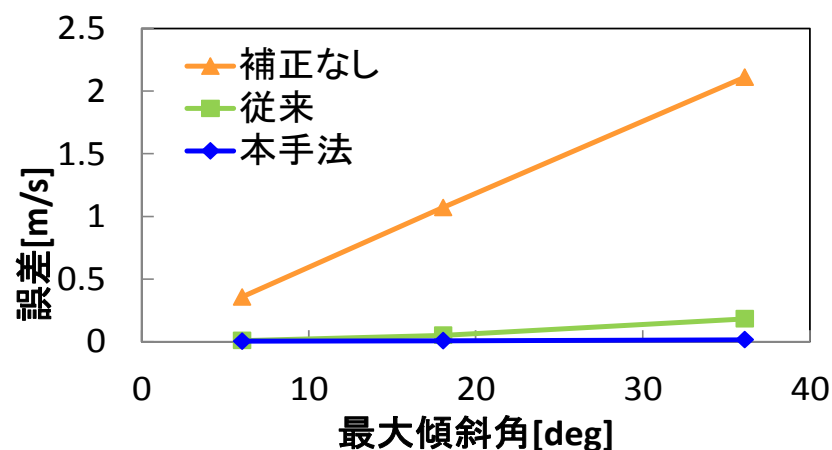
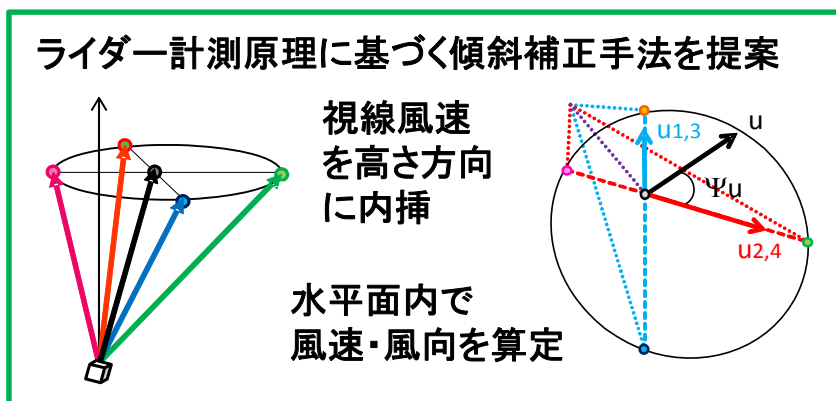
$$S(f) = g(f)S_{\text{GPS}}(f) + [1 - g(f)]S_{\text{acc}}(f)$$

$$g(f) = \begin{cases} 1 & (f \leq f_a) \\ \frac{f - f_b}{f_a - f_b} & (f_a < f \leq f_b) \\ 0 & (f_b < f) \end{cases}$$



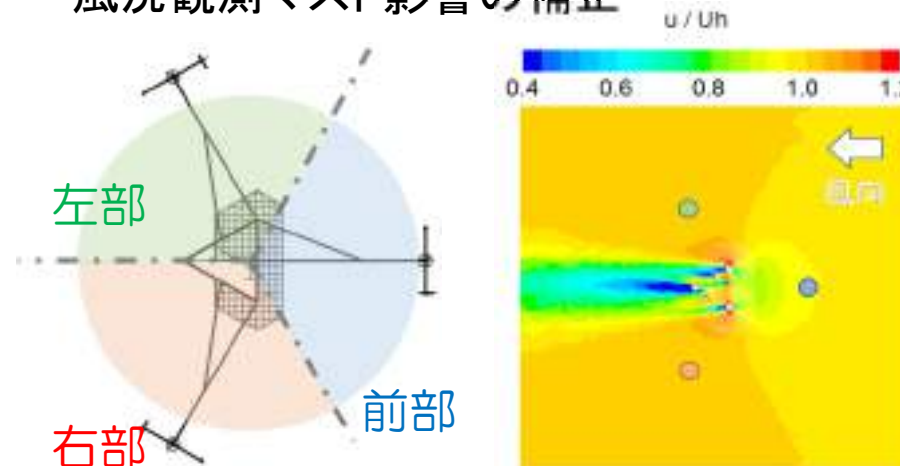
【気象・海象・浮体動揺の観測技術の開発】 気象観測技術の開発

ドップラーライダーの動揺補正

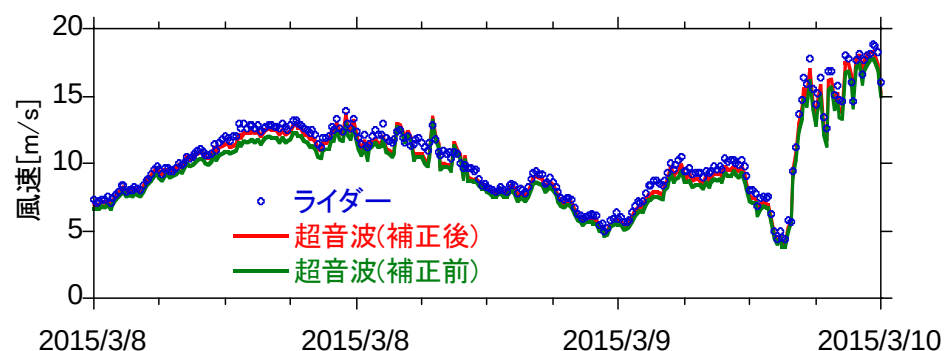


○ 従来手法は、斜角が大きくなるにつれ誤差が増大するが、提案手法は精度よく観測できる。

風況観測マスト影響の補正

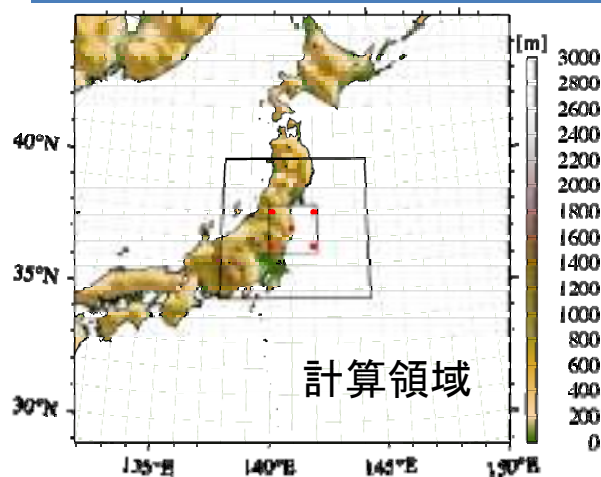


○ 3台の風速計を用い、上流側の風速計のみを用いる手法が提案されているが、上流側も影響を受けるため、CFDを用いて補正係数を求め、補正した。

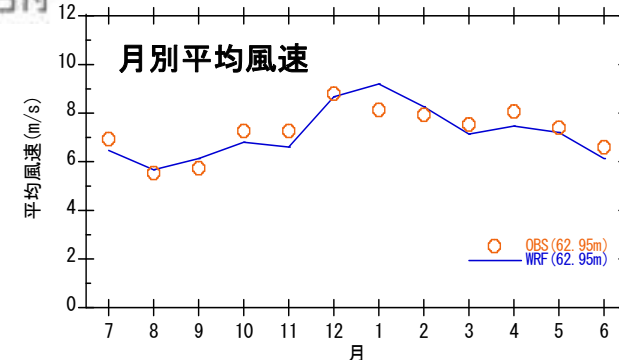
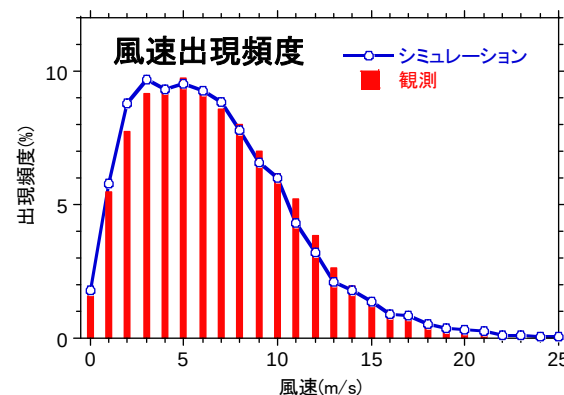
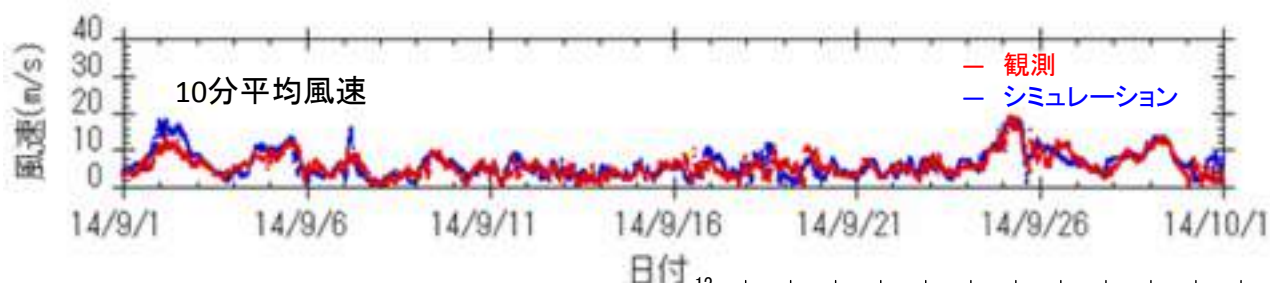


○ 補正により超音波風速計の観測結果はドップラーライダーと一致することを示した。

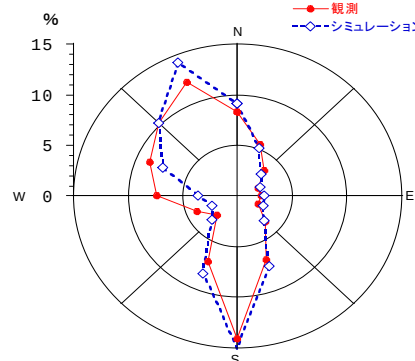
【気象・海象・浮体動揺の観測技術の開発】 福島沖における風況特性



○ 実証研究海域における風況特性を明らかにするために、メソスケールモデルWRFにより気象シミュレーションを実施した。

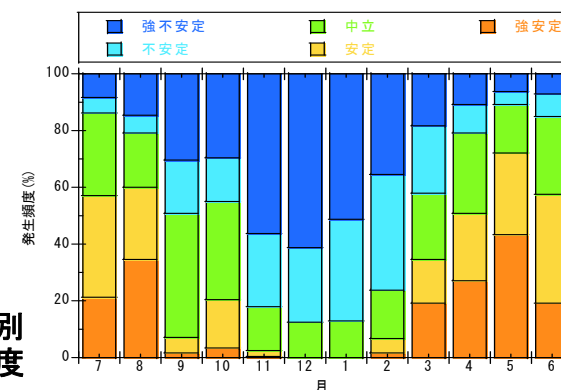


- 観測・シミュレーション結果は一致し、福島沖の主風向は夏季の南風と冬季の北西風であることがわかる。
- 月平均風速は冬季に高く、夏季に低くなる。
- 冬季は海面温度が気温に比べて高くなるため、不安定成層が生じやすくなる。夏季は気温に比べ海面温度が低くなるため、相対的に安定成層状態の出現頻度が高くなる。



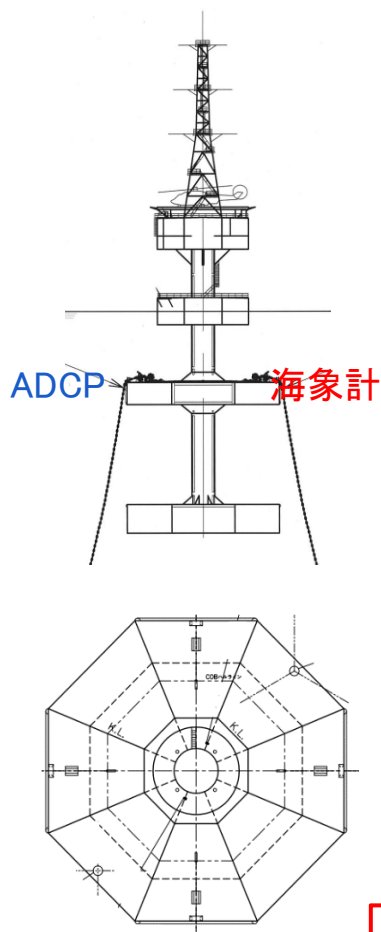
風配図

安定度別出現頻度

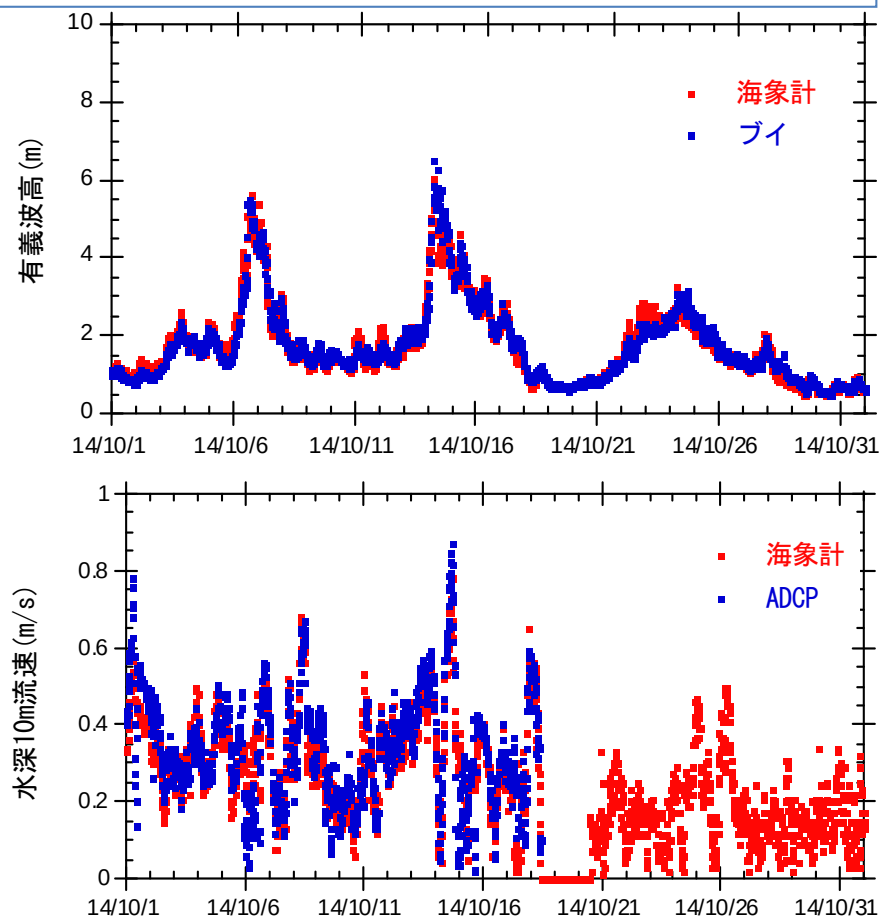


【気象・海象・浮体動揺の観測技術の開発】 海象観測技術の開発

○複数の測定機器で計測した波浪・海流データを相互に検証し、福島沖の海象特性を明らかにする。



	ブイ (波)	海象計 (波・海流)	ADCP (海流)
'14/10	○	○	△
'14/11	○	○	×
'14/12	○	×	○
'15/01	○	×	○
'15/02	○	×	○
'15/03	○	×	×
'15/04	○	×	○
'15/05	○	○	○
'15/06	○	○	×
'15/07	○	○	×
'15/08	○	△	×
'15/09	○	○	×
'15/10	○	○	×
'15/11	○	○	○
'15/12	○	○	○

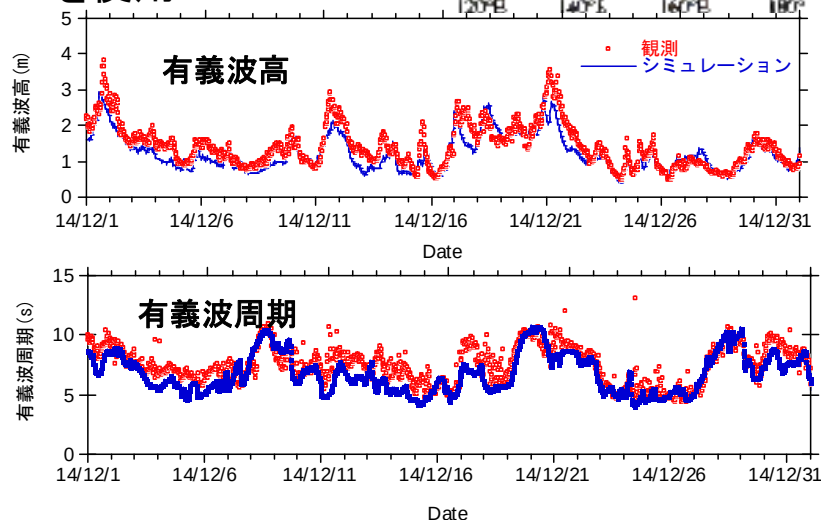
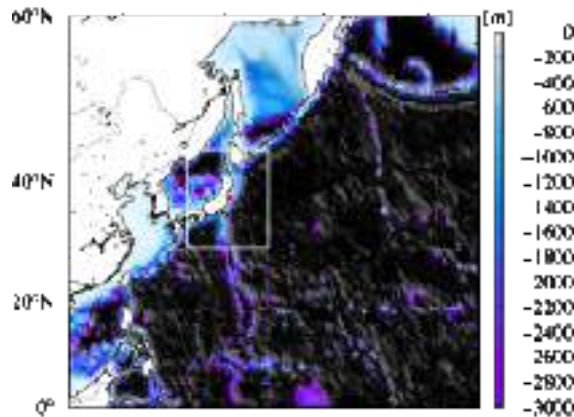


各機器の計測結果を相互検証し、実証研究海域の通年の波浪・海流データセットを作成した。

【気象・海象・浮体動揺の観測技術の開発】 福島沖の海象特性

波浪

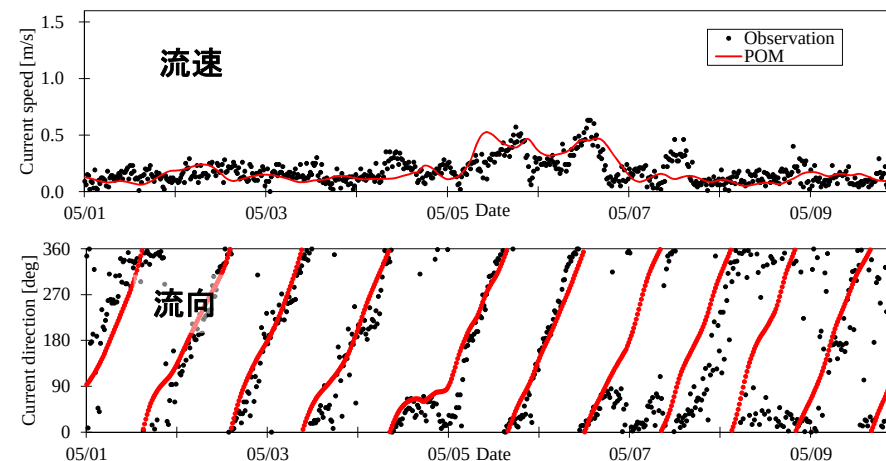
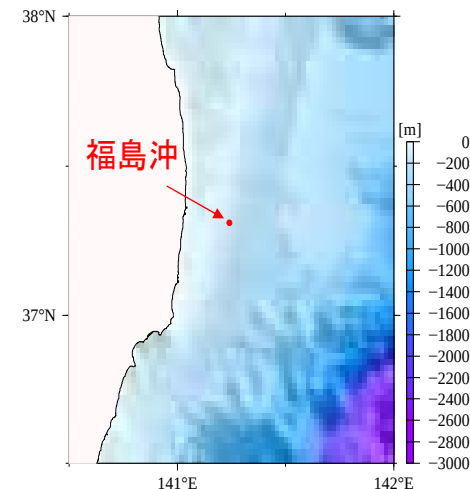
- 波浪推算モデル Wavewatch III により, 1年分の波浪シミュレーションを実施
- 海面境界条件にはWRFの風速を使用



波浪シミュレーションにより有義波高および有義波周期を再現できることを示した。

海流

- 海洋モデルPOMにより1年分のシミュレーションを実施
- 初期値・境界値には海洋再解析値FRA-JCOPE2を使用
- 海面境界条件にはWRFの風速を使用



慣性振動(約18時間周期)や強風による流速の増大を再現できることを示した。

【気象・海象・浮体動揺の観測技術の開発】 浮体式洋上風力発電設備の荷重計測

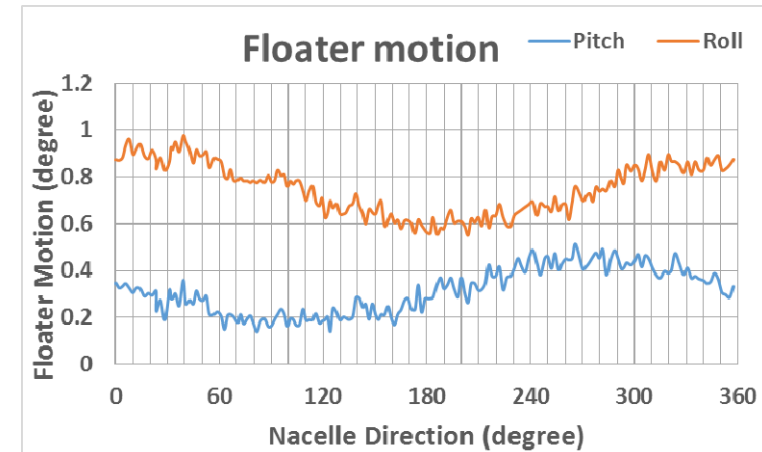
風車タワーはナセルの偏心によるモーメントを常に受けているため、ひずみゲージの0点を推定する必要がある。
陸上/着床式風車の場合には、タワーモーメントはナセル偏心と風荷重によって決まるため、弱風時に風車を停止させ、ナセル旋回試験を実施し、旋回試験中の平均ひずみを0点としている。
浮体式風車の場合には、弱風時のナセル旋回試験中も、波浪・潮海流による平均傾斜が存在する。この平均傾斜は、 p - δ 効果により付加的なモーメントを生じる。
浮体動揺とナセル偏心によるモーメントの理論値を用いて、誤差が最小となるようにひずみゲージ0点を同定した。

$$M_x = \frac{EI((\epsilon_1 - \bar{\epsilon}_1) - (\epsilon_5 - \bar{\epsilon}_5))}{D_{inner}} = f(\theta_x) + g(\theta_N)$$

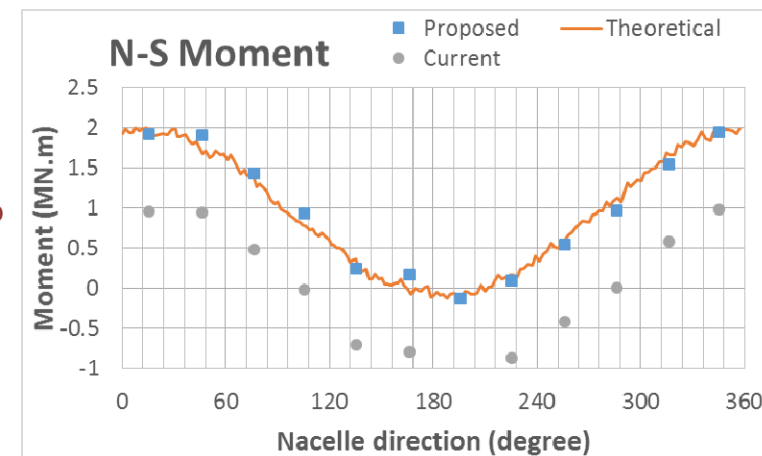
ひずみゲージ 観測値 同定するひずみ ゲージ0点
浮体動揺による モーメント理論値 ナセル偏心による モーメント理論値

従来の手法では計測できなかった浮体傾斜に起因するモーメントが計測できるようになった。

ナセル旋回試験中の浮体動揺



モーメントの理論値と観測値の比較



【浮体動揺の予測技術の開発】 浮体動揺の予測技術開発の必要性

浮体式洋上風力発電の開発

実証研究プロジェクトの設置水深は50mから220mであり、より浅い水深における経済性の高い浮体構造の開発が現在も進められている。最適な浮体・係留設計のために、予測技術が必要である。

Hywind WindFloat GOTO-FOWT Fukushima-FORWARD



出典: Statoil



出典: Wikipedia



出典: GOTO-FOWT



浮体動揺の予測技術の問題点

- 弾性挙動を再現するには、モリソン式による流体力評価が必要であるが、考慮されていない流体力が動揺予測精度に及ぼす影響を評価する必要がある。
- 流体力係数を同定する必要がある。
- 複合外力下での動揺の予測精度を検証する必要がある。
- 風車の制御モデルを考慮し、発電時の動揺予測を行う必要がある。
- 実海域における動揺の予測精度を検証する必要がある。

浮体動揺の予測技術の現状

浮体の弾性モードと非線形波の高次成分の共振を再現し、風車・浮体・係留の弾性挙動を精度よく再現する予測技術が必要とされる。

- FASTは浮体動揺の予測精度が高いが、剛体モデルを用いており、風車・浮体・係留の弾性挙動を再現することができない。
- Bladedは、弾性体モデルだが、モリソン式で考慮されていない流体力が動揺予測精度に及ぼす影響が考慮されていない。
- In-houseコードであるCAsTを高度化することにより、予測技術を開発する。

	FAST(NREL)	Bladed(GH)	CAsT (東大)
動解析モデル	剛体モデル	弾性体モデル	弾性体モデル
水力モデル	ポテンシャル	モリソン式	モリソン式
係留モデル	解析解	解析解	有限要素モデル
特徴	世界標準	世界標準	In-houseコード

【浮体動揺の予測技術の開発】 風車発電時の浮体動揺予測技術の開発

水槽実験の実施



三井造船昭島研究所

風車停止時の浮体動揺の予測を検証するため、福島沖2MW風車搭載セミサブ式浮体の1/50スケールの模型を作成し、水槽実験を実施した。

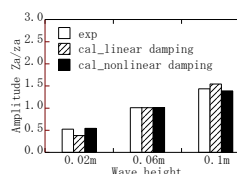
試験ケース

	潮流	波
潮流中	○	
波中		○
複合外力中	○	○

水力モデルの高度化(モリソン式の拡張)

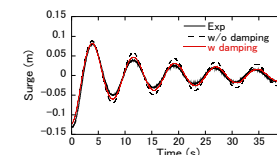
- 軸方向流体力の非線形減衰力の考慮による波高の振幅依存性の再現

従来の線形減衰に対して、非線形減衰力を導入することにより、波高の振幅依存性を再現した。



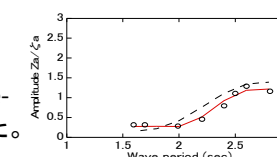
- 造波減衰の考慮による大振幅時の予測精度向上

モリソン式では考慮されない造波減衰を考慮し、大振幅時の予測精度を向上した。ただし、波中では波強制力の影響が上回り、造波減衰の影響は少ない。



- 軸方向流体力のFroude-Krylov力の考慮による予測精度向上

モリソン式では考慮されない部材軸方向のFroude-Krylov力を考慮し、ヒープ方向の予測精度を向上した。



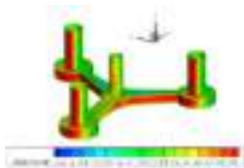
流体力係数の同定手法の提案

- CFDを実施し、流体力係数の同定手法を提案した。

強制動揺試験



ポテンシャル理論



CFD

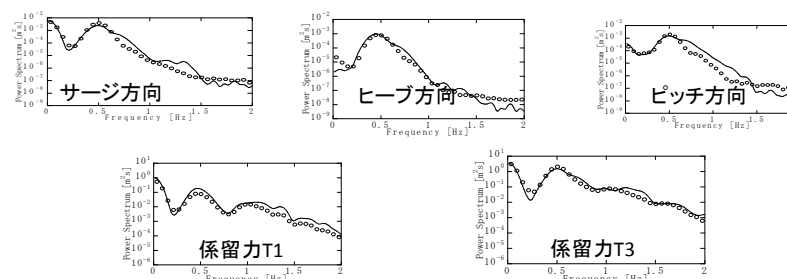


Part	Description	実験より同定	文献	強制動揺	CFD
浮体	軸直交方向付加質量	1.835	2.0	N/A	1.87
	抗力係数 (準静的)	1.05	1.18	N/A	0.87
	抗力係数 (動的)	0.86	1.18	0.84	1.13
	軸方向付加質量	$\frac{4\pi\rho(D/2)^3}{3V_{\theta}}$	$\frac{2.55\pi\rho(D/2)^3}{3V_{\theta}}$	N/A	N/A
	軸方向抗力	4.8	N/A	4.8	N/A
係留索	軸直交方向付加質量	2.0	2.0	N/A	N/A
	軸直交方向抗力	1.2	1.2	N/A	N/A

高度化したモデルによる動揺予測精度の検証

- 動解析モデルを高度化し、複合外力中における浮体の動揺および係留力の予測精度を向上した。
- 高度化したモデルを用い、波と潮流の相互作用および不規則波中における長周期動揺のメカニズムを解明した。

潮流(0.2 m/s) + 不規則波(有義波高 0.15m, 有義波周期 1.98 sec)



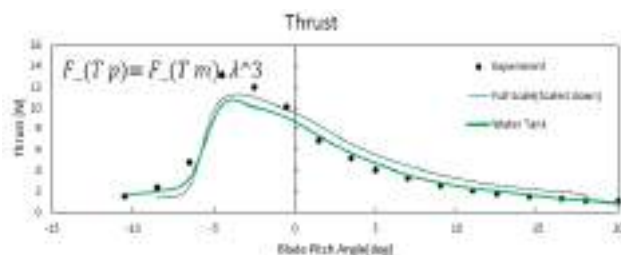
【浮体動揺の予測技術の開発】 風車発電時の浮体動揺予測技術の開発

制御を模擬した風車模型を用いた風洞試験の実施

○ 発電時における相似則の導出し、風洞試験を実施。

$$\text{周速比} \quad \frac{TSR_p}{TSR_m} = \frac{\omega_p L_p}{u_{ap}} \frac{u_{am}}{\omega_m L_m} = 1 \quad \rightarrow \omega_m = \omega_p / \sqrt{\lambda}$$

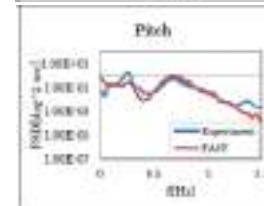
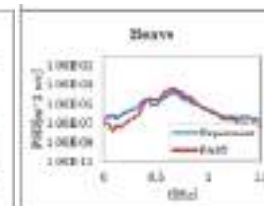
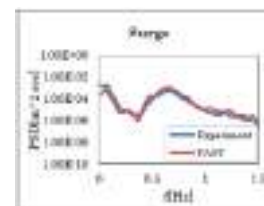
$$\text{スラスト係数} \quad C_{Tm} = C_{Tp} \quad \rightarrow P_p = P_m \lambda^3$$



風洞試験
海上技術安全研究所

制御を考慮した風車発電時の動揺予測精度の検証

○ 風車制御を考慮して、不規則波＋変動風中の浮体動揺を精度よく予測した。



有義波高
Hs=0.12m,
Ts=1.48sec,
風速3m/s



水槽試験
海上技術安全研究所

ピッチ制御と浮体動揺の関係の分析

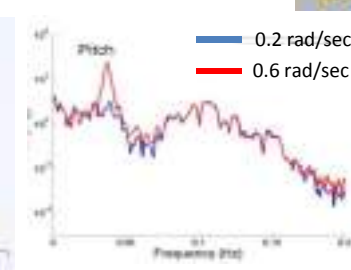
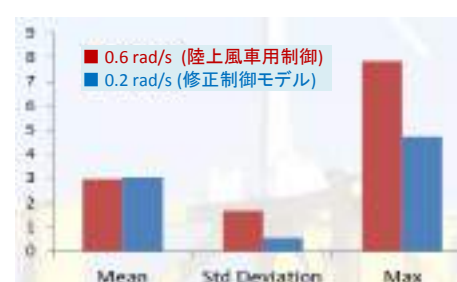
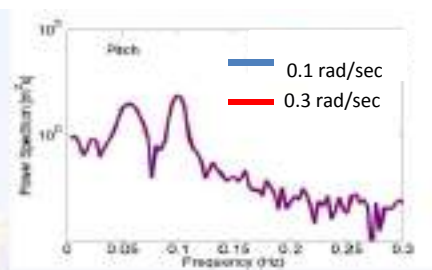
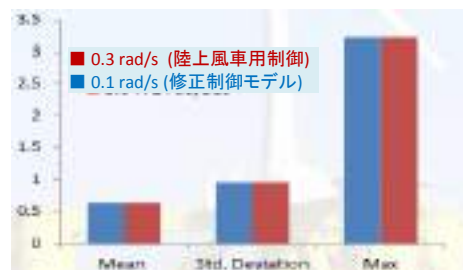
○ 風車の制御においては、定格風速以上では風速が増大すると、スラスト力を下げる方向にピッチ制御が行われるため、浮体のピッチ運動に対して、負の減衰効果が生じることがある。この現象を明らかにするために、一例として2MWセミサブ風車モデルと、OC4 5MW風車モデル*をもちいて、制御パラメータが浮体のピッチ運動に与える影響を調べた。

○ 2MW浮体は、スラスト力に起因する負減衰よりも、浮体が本来持つ構造減衰が大きいため、制御パラメータに関わらず浮体動揺は安定している。



○ 5MW浮体は、構造減衰よりも、スラスト力に起因する負減衰の方が大きい場合、ピッチ制御により、長周期動揺が励振される場合がある。これは制御パラメータの調整によって制振可能である。

*Robertson,
2013



【浮体動揺の予測技術の開発】 実海域での観測データとの比較による動揺予測技術の検証

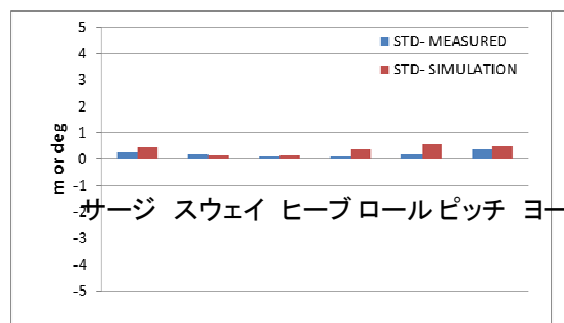
実海域における観測データを用いて、浮体動揺予測の検証を行った。

入力には、平均風速・乱流強度・風向・有義波高・ピーク周期・波向き・流速・流向の観測データを用いた。

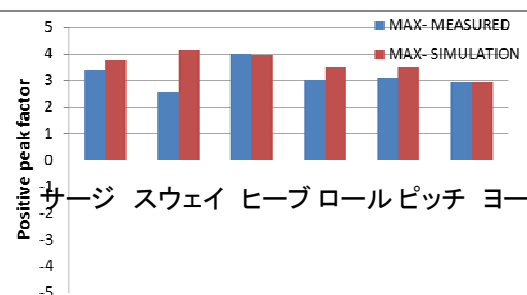
波浪の方向分散性は光易型の方角スペクトルを用いて再現した。

各成分の動揺の標準偏差とピークファクタは観測値とよく一致している。

動揺各成分の標準偏差



動揺各成分のピークファクタ



気象・海象条件

風

平均風速 21.4m/s

乱流強度 7.7%

風向 80度

流れ

流速 0.41m/s

流向 219度

波

有義波高 3.83m

ピーク周期 8.3s

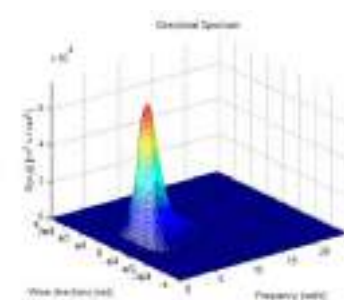
波向 165度

波の方向分散性

$$S(\omega, \theta) = S(\omega) \cdot D(\theta)$$

$S(\omega)$: JONSWAPスペクトル

$$D(\theta) = \frac{\Gamma(s+1)}{2\sqrt{\pi}\Gamma(s+1/2)} \cos^{2s}\left(\frac{\theta}{2}\right)$$



3. 我が国の洋上環境に適した浮体式洋上風力発電システムの開発

1. 風車、浮体、係留の開発
2. 洋上風力発電用浮体の施工技術
3. 大規模浮体式洋上ウィンドファームの建設技術
4. 浮体式風力発電用鋼材の実証研究

【風車、浮体、係留の開発】(2MW風車) セミサブ浮体の設計①

- 2MWダウンウィンド型風車を搭載するセミサブ浮体を用いた発電施設を建造、設置し、実証試験を実施した。実証試験により、その安全性を検証した。
- 2年に渡る実証試験の結果、2MWダウンウィンドを搭載したセミサブ浮体の安全性が確認された。

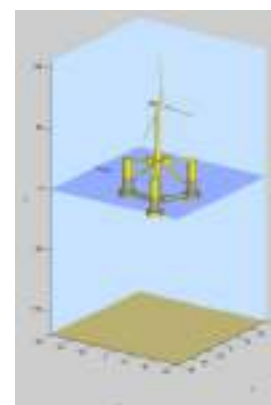
実施項目

1) ダウンウィンド型風車の調達

株式会社日立製作所製2MW風車 (HTW2.0-80)を採用。セミサブ浮体に搭載可能となるように浮体と風車の連成解析を実施。風車の健全性、耐久性を確認し、設計、製作した。タワーは連成解析結果から浮体式用に強化した。

No.	項目	内容
1	メーカー名	株式会社 日立製作所
2	機種名	HWT2.0-80
3	定格出力	2000kW
4	風車型式	水平軸プロペラ型
5	コーニング角	5deg
6	ティルト角	-8deg
7	ブレード枚数	3枚
8	ブレード材料	GFRP
9	ブレードの種類	一体翼
10	ブレード長さ	39m
11	ロータ直径	80m
12	受風面積	4978m ²
13	ハブ高さ	約66m
14	タワー	鋼製モノポール
15	タワー段数	3段
16	増速機の増速比	約1:99
17	カットイン風速	4m/s
18	カットアウト風速 (10分間平均)	25m/s
19	カットアウト風速 (瞬時)	35m/s

ダウンウィンド型風車の主要目



Bladedモデル

連成解析: BLADEDを使用
連成解析の結果を元に風車の健全性及び耐久性を確認した。
タワーを強化した



風車タワーの製作



ナセルの製作

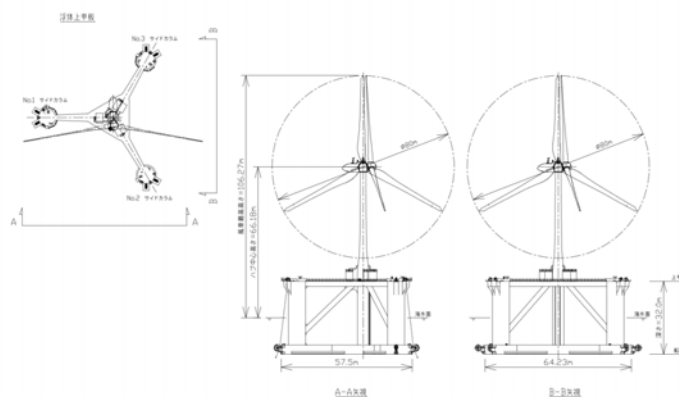


【風車、浮体、係留の開発】(2MW風車) セミサブ浮体の設計②

実施項目

2) ダウンウィンド型風車搭載用セミサブ浮体の設計

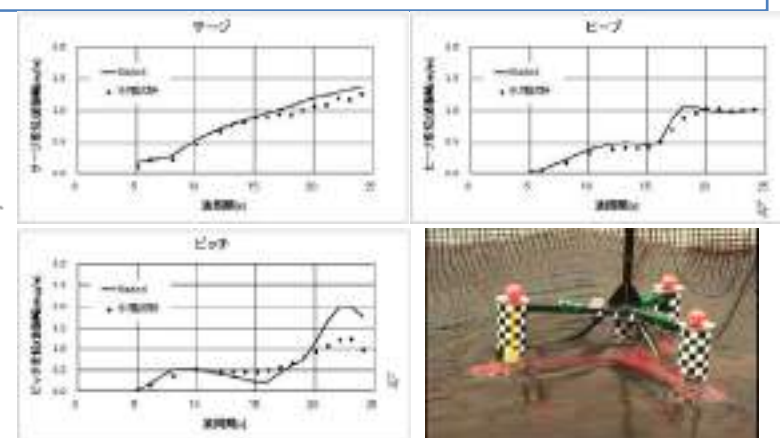
- 浮体設備の安全性については、日本海事協会鋼船規則P編および「浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン」に従い設計。2013年2月1日に設計認証を得た。
- 係留索の健全性把握のため、海中で摩耗を計測できるシステムを開発し、ROVに装着。
- 計測システムを試作し実海域において計測試験を実施、計測可能であることがわかった



浮体外形図



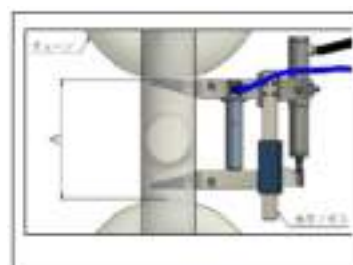
係留配置図



水槽試験

浮体形式	半潜水型の洋上風力発電船
長さ	57.50m
幅	64.23m
深さ	32.00m
計画喫水	16.00m
船級	日本海事協会
設計水深	120m

浮体要目



- ・計測方法: ノギス式
- ・リンク間距離を計測
- ・試作ノギスを既存のROVに装着



ROV



ノギス部



計測状況

【風車、浮体、係留の開発】(2MW風車) セミサブ浮体の建設工事

実施項目

3) 2MW浮体式風力発電用浮体の建造と風車組立て

- 構築したダウンウィンド型風車搭載用セミサブ浮体の建造、浮体上への風車の組立、計測システムの構築を行った。
- 計測システムで実証試験データを取得し、設計手法妥当性検証、モニタリングに活用した。



工場内浮体ブロック建造



ドックにおける浮体建造



風車組立て(タワー)



風車組立て(ナセル)



風車組立て(ブレード)



完成後の出渠



モニタリング装置

分野	計測項目	計測機器	計測目的	計測点数
風車	運転情報	SCADA	風車の運転状態の把握	92
	翼応力	歪計	翼根部の曲げモーメントの計測	12
タワー	変位応答	加速度計	タワー4高度の応答の計測	8
	構造応答	歪計	タワー2高度の曲げモーメント・捻りモーメントの計測	24
浮体動揺	回転運動	ジャイロ	浮体動揺の計測	6
	並進運動	加速度計	浮体動揺の計測	3
	絶対変位	GPS	浮体変位の計測	6
係留	係留張力	歪計	各係留チェーンストッパー基部応力の計測	12
浮体	構造歪	歪計	浮体構造に作用する応力の計測	63

計測システム

【風車、浮体、係留の開発】(2MW風車) セミサブ浮体の曳航と施工

実施項目

4) 2MW浮体式風力発電施設の曳航と設置

- 曳航は「船舶航行安全対策調査委員会」の検討結果を反映し、警戒船配置などを決定した。
- 風車と浮体を一体で曳航、小名浜岸壁着底、アンカーとチェーンの設置、把駐力試験、チェーンと浮体の接続、計測システムの構築を行い、建設完了した。
- 岸壁における着底はセミサブ式浮体の工事モデルとなった。
- 設置工事で得られた知見は第2期工事の効率向上、安全性向上に資することができた。



曳航ルート



曳航状況



岸壁着底



アンカーとチェーンの設置



把駐力試験



チェーンと浮体の接続



設置完了

【風車、浮体、係留の開発】(2MW風車) セミサブ浮体の設計の妥当性検証①

実施項目

実証試験で得られた計測結果を用い、設計で用いている数値解析手法の妥当性検証を実施。強度については風車停止状態、疲労強度については疲労被害度について計測と設計値を比較した。数値解析結果は計測結果より安全側の結果を与えることを確認した。さらに、合理的設計手法を実現するための課題を抽出した。

設計方針

- ・第1期工事であることを考慮し、安全性を十分に確保するよう設計した

	設計	実構造、実海域
浮体運動	減衰係数 C_d (設計) < C_d (水槽試験)	C_d (設計) < C_d (実構造)
波方向分散性	長波頂波(分散性なし)	分散性あり
風波方向 (暴風時強度検討)	最も厳しい方向組合せ	風、波とも方向は変化
風波方向 (疲労検討)	常に最も厳しい方向から波、風が来る	風、波とも方向は変化

- ・設計の数値解析にはBLADEDを使用。数値解析結果を用いて安全率を満足するように設計
- ・評価方法： 実海域の実測気象海象データを入力した数値解析結果と実海域計測データ(計測結果)を比較し、 数値解析結果 > 計測結果 であることを確認する

【風車、浮体、係留の開発】(2MW風車) セミサブ浮体の設計の妥当性検証②

暴風時強度についての検討

2015年12月11日を選定。荒天で風車は待機状態。

数値解析条件

フェザリング荒天待機		風			波高				潮流		発電
日時	時刻	平均 (m/s)	向き (deg)	乱流強度 (%)	有義波高 (m)	有義周期 (sec)	平均周期 (sec)	向き (deg)	平均 (cm/s)	向き (deg)	平均 (kW)
2015年12月11日	11:30 ~ 11:40	27.3	170.4	10.4	4.8	9.2	7.4	65.0	18.0	263.0	0

気象海象条件をBLADEDに入力し、タワーとタワー基部(浮体)において計測結果と数値解析結果を合成モーメントで比較。

最大合成モーメント比較

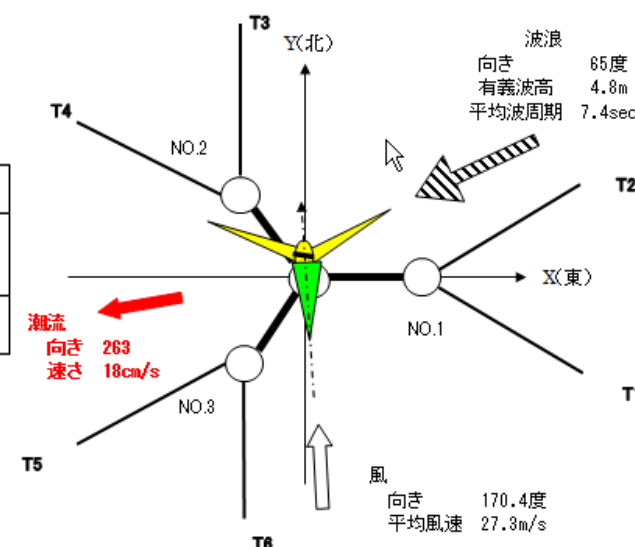
	計測 (N・m)	数値解析 (N・m)	数値解析/計測
タワー	7.49E6	1.27E7	1.64
タワー基部(浮体)	7.38E6	1.19E7	1.61

結果: 暴風時の解析条件とは異なるが、数値解析は計測の1.6倍。

暴風時の数値解析でも、十分安全側の解が得られると考えられる

課題: 数値解析において波方向分散性を考慮すれば、精度の向上を図れる可能性がある。

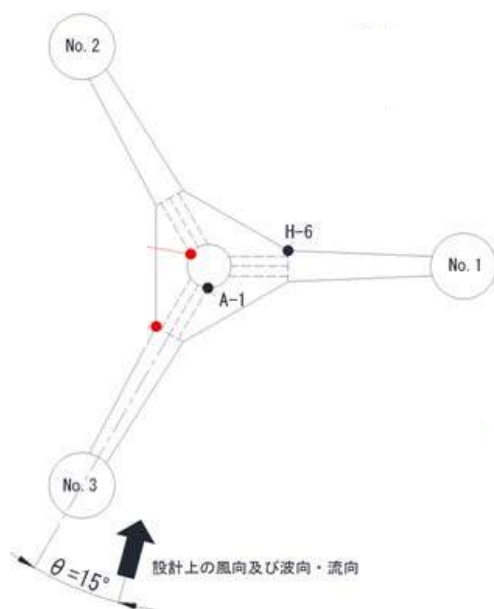
数値解析精度が向上すれば、より合理的な設計が可能となる。



【風車、浮体、係留の開発】(2MW風車) セミサブ浮体の設計の妥当性検証③

疲労強度についての検討

計測結果を用いた疲労寿命推定と疲労設計値を比較し、用いている数値解析手法が安全側の解を与えることを確認した。



・浮体の疲労設計では最も厳しい方向を左図矢印のように15度とし、全ての波風潮流がこの方向から常に来ると仮定し、数値解析を行い、疲労被害度を推定した。

・2年にわたる歪計測から浮体のタワー基部と風車タワーについて累積疲労被害度を計算し、寿命を推定した。

結果:

・タワーについては、計測疲労寿命と設計に用いた解析による疲労寿命の比は0.52(計測／解析、ダメージ等価荷重比)となり、20年の設計疲労寿命を確認

・浮体のタワー基部については、設計疲労寿命30年に対して、計測は229年となり、20年の設計疲労寿命を確認

課題:

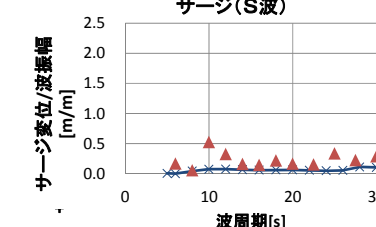
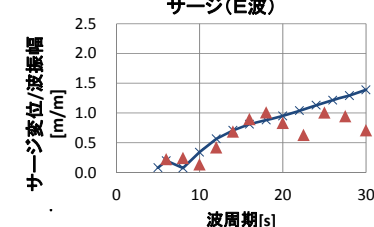
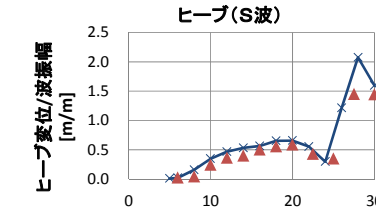
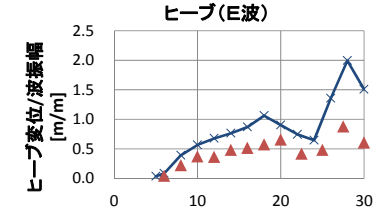
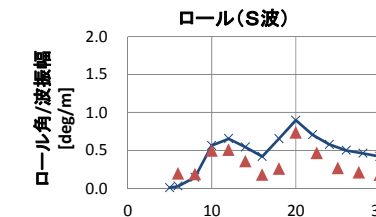
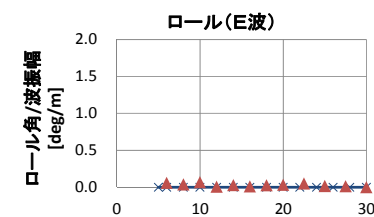
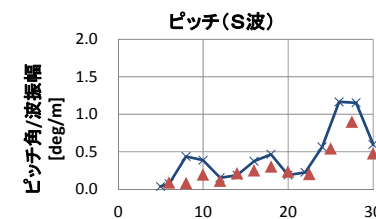
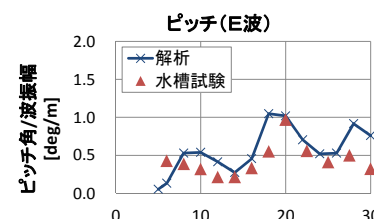
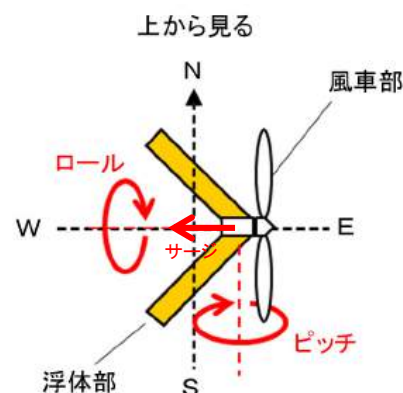
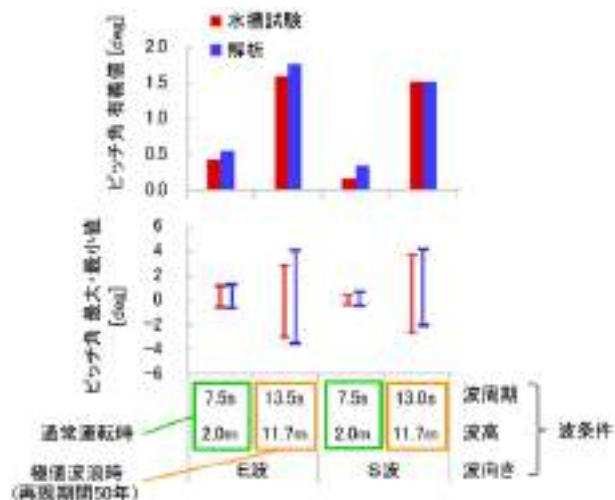
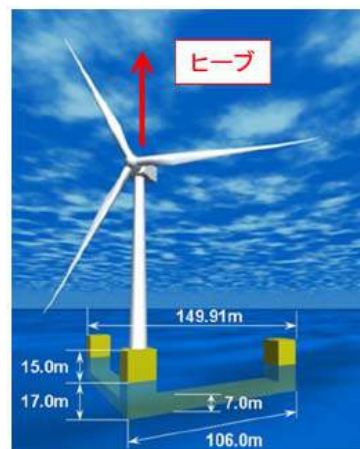
・浮体設計では同一方向から波風潮流を受けると仮定したが、この方法では余裕が大きい。合理的設計のためには波風潮流の方向と大きさを考慮する必要がある。

妥当性検証における成果:

- ・設計で用いられている数値解析手法は安全側の解を与えることを確認
- ・合理的強度設計、疲労設計のためには、波方向分散性と波風潮流の方向分布を考慮する必要がある
- ・現状の2MW浮体は安全余裕度が十分にあり、軽量化できる可能性は高い。

【風車、浮体、係留の開発】(7MW風車) セミサブ浮体の設計と開発

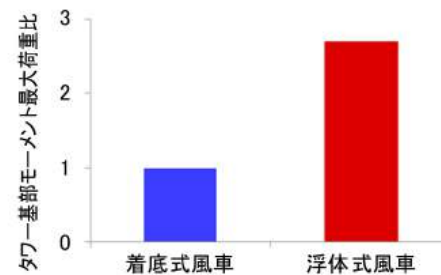
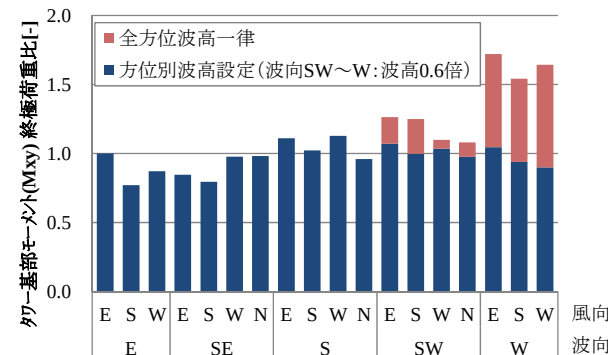
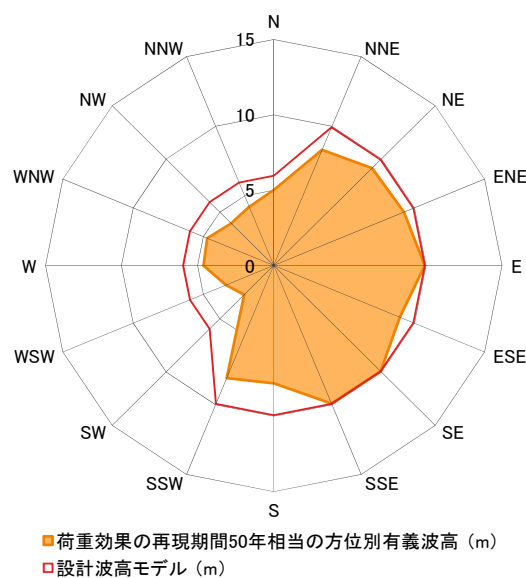
- 大型水槽設備にての縮率 1 / 64 浮体模型を用いた各種波浪中応答試験、有限要素法による構造解析等を実施、また第Ⅰ期工事の経験による改良変更も織り込み、コンソーシアムとしての成果を浮体設計に反映した。
- 波浪中応答試験の結果に基づき荷重設計において必要な浮体・風車連成モデルを構築した。



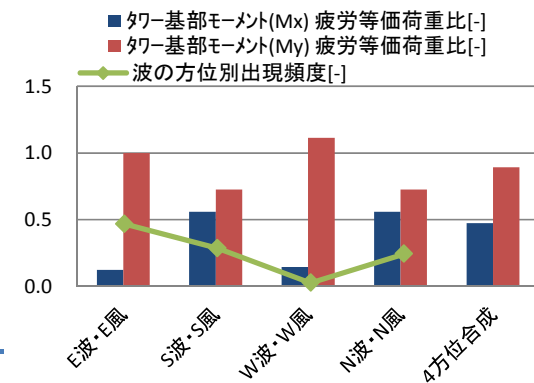
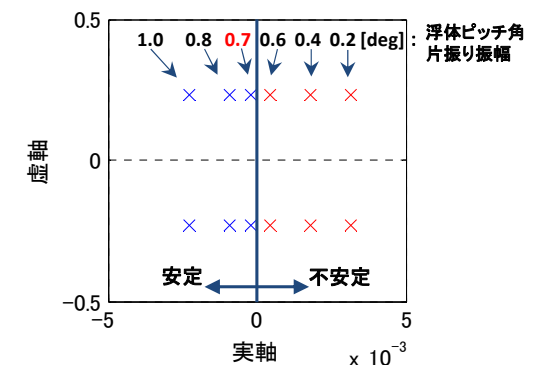
【風車、浮体、係留の開発】(7MW風車) セミサブ浮体の安全性評価の検討

- 水槽試験結果を元に調整・検証した風車浮体連成解析モデルを用い、浮体の応答方位特性と現場海域の波方位特性の両方を加味した荷重評価を実施、本セミサブ浮体が本海域に適合した特性を有することを確認した。
- 浮体動揺による荷重増分(着底式の約3倍)を適切に評価し、タワー設計に反映した。
- 翼ピッチ制御励起振動に関する安定性評価を実施、浮体運動による流体減衰が不安定化力による負減衰を超越し安定化することを示すとともに、疲労及び最大荷重評価において自励振動による影響が十分小さいことを確認した。

最大荷重評価



安定性評価／疲労荷重評価



【風車、浮体、係留の開発】(7MW風車) セミサブ浮体の建設工事

- 大型風車搭載用セミサブ浮体の建造と浮体搭載用7MW級大型風車の製作／組立を実施。斜材を廃止した直線矩形形状の建造施工性効率化及び信頼性向上の確認をした。
- 世界最大級の直径9.7m極厚タワーに関する継手形式および製造要領を検討した。従来と異なる現地での溶接施工となったが、適切な施工管理の下、信頼性の高い浮体用タワーの製作が可能である事を実証した。



【風車、浮体、係留の開発】(7MW風車) セミサブ浮体の曳航と施工

大型風車搭載用浮体の小名浜港までの曳航・係留・着底、係留アンカーの敷設及び把駐力試験、世界最大級のリンガークレーンによる風車搭載、及び浮体・風車の現地海域への曳航・繋留を実施。

○幅広構造物の安定した曳航の実証、着底作業に関わる安定性の確認、チェーンリンク数を管理する新工法の安全性と管理精度の有効性を実証し、世界初となる浮体式大型風車の安全施工を完遂した。

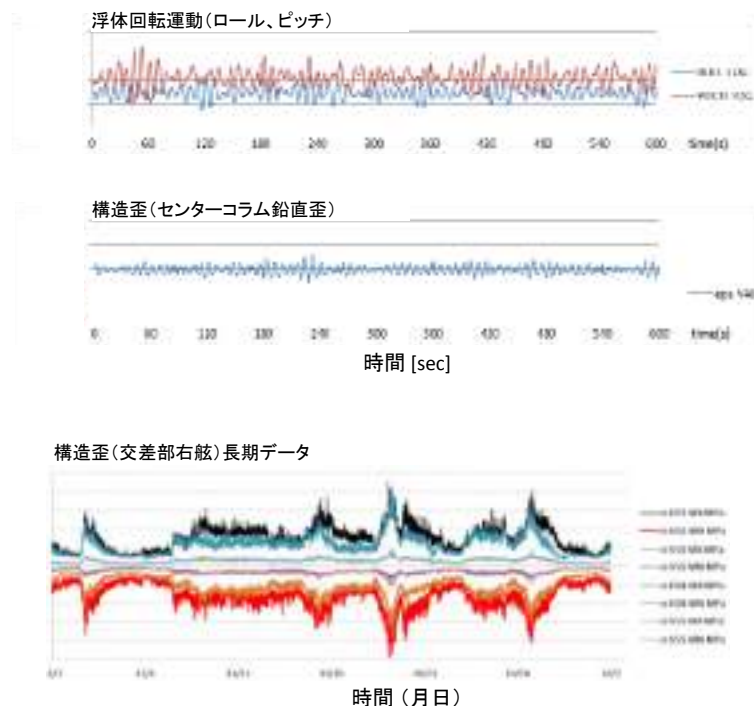
○国内初の大型風車搭載要領を立案し、妥当性の実証を行って、世界最大級の風車搭載工事を完遂した。



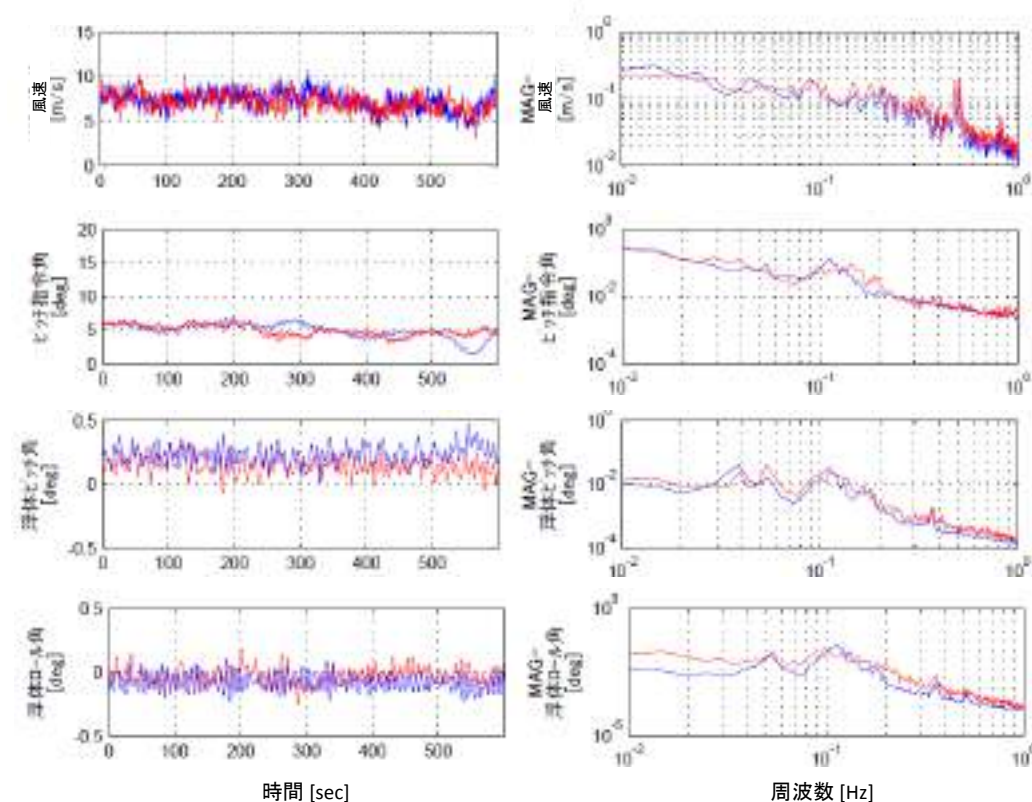
【風車、浮体、係留の開発】(7MW風車) セミサブ浮体の設計の妥当性の検証①

- 実証試験における浮体運動および各部の応力計測の結果、入射波に対する浮体動揺量、構造歪が設計想定通りであることを確認した。
- 低風速域でピッチ制御を発現させ、翼ピッチ制御励起振動による不安定が生じないこと、解析と実機の風車挙動が同一であることを確認した。

浮体運動/歪計測結果(風車停止中)



実測/逆解析比較(平均風速7m/s風車運転中)



ピッチ制御を行った際に、浮体動揺に伴う自励的な振動現象が発生しないことを確認。

【風車、浮体、係留の開発】(7MW風車) セミサブ浮体の設計の妥当性の検証②

世界最大級風車を搭載した浮体式洋上風力発電施設の計画・設計・製造・組立を通じ、設計妥当性検証および経済性評価のための各種データを取得した。

- 浮体を直線矩形形状として斜材を廃止することにより、建造コスト低減と構造建造施工の信頼性向上が可能となった。
- ローワーハルで排水量を担保することにより、曳航や港内で安定した工事が実施可能であり、工事効率化と品質向上に有効であることを実証した。
- コラムをL型配置とし護岸に近接して着底させたことにより、風車搭載の効率および作業性の向上ができた。
- 風車部設計では浮体動揺の影響を適切に考慮することにより、必要十分なタワー増強を行うとともに、着底式風車ナセルの適用が可能であることを示した。



小名浜港内での工事中の遠景と試運転中の風車及び荒天時の監視カメラでの確認

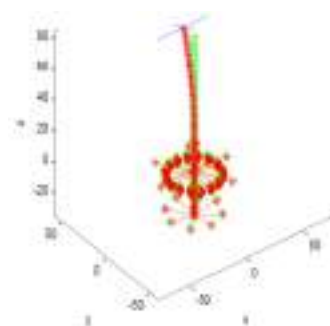
【風車、浮体、係留の開発】(5MW風車) 風車の開発

アドバンストスパー浮体搭載風車の開発

○株式会社日立製作所が開発した5MW風車(HTW5.0-126)をアドバンストスパー浮体に搭載可能となるようにBladedモデルの解析を実施し、風車の健全性、耐久性を確認した。タワーは連成解析結果から浮体式用に強化した。

5MW風車の主要諸元

No.	項目	内容
1	メーカー名	株式会社 日立製作所
2	機種名	HW5.0-126
3	定格出力	5000kW
4	風車型式	水平軸 プロペラ型
5	コーニング角	5deg
6	ティルト角	-8deg
7	ブレード枚数	3枚
8	ブレード材料	GFRP
9	ブレードの種類	一体翼
10	ブレード長さ	約62m
11	ロータ直径	約126m
12	受風面積	約12253m ²
13	ハブ高さ	86.4m
14	タワー	鋼製モノポール
15	タワー段数	3段(ただし1段目は浮体の一部)
16	増速機の増速比	約1:40
17	カットイン風速	4m/s
18	カットアウト風速(10分間平均)	25m/s
19	カットアウト風速(瞬時)	35m/s



浮体風車を模擬した
Bladedモデルを作成し、
連成解析を実施

連成解析の結果を元に風車の
健全性及び耐久性を確認

実証機からタワーの
強化を実施

アドバンストスパーおよび浮体風車
を模擬したBladedモデル

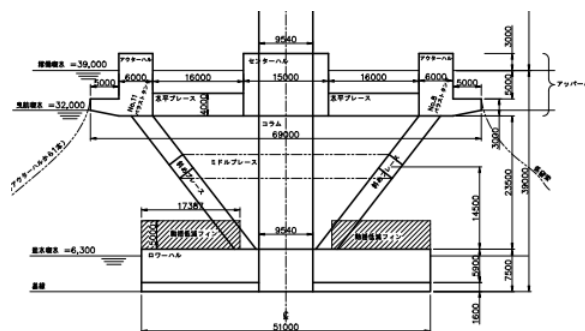
【風車、浮体、係留の開発】(5MW風車) アドバンストスパー浮体の開発

- 大型風車に対応した**世界初のアドバンストスパー型浮体**を開発した。
- 特許技術(動揺低減フィン等)による**最高レベルの低動揺船型**。
 - スパー型に比べ、ピッチ制御励起振動に抗するために必要な**減衰力を確保**しつつ、**喫水を抑えたことにより、施工・メンテナンス性の向上、設置可能海域の拡大を実現**。



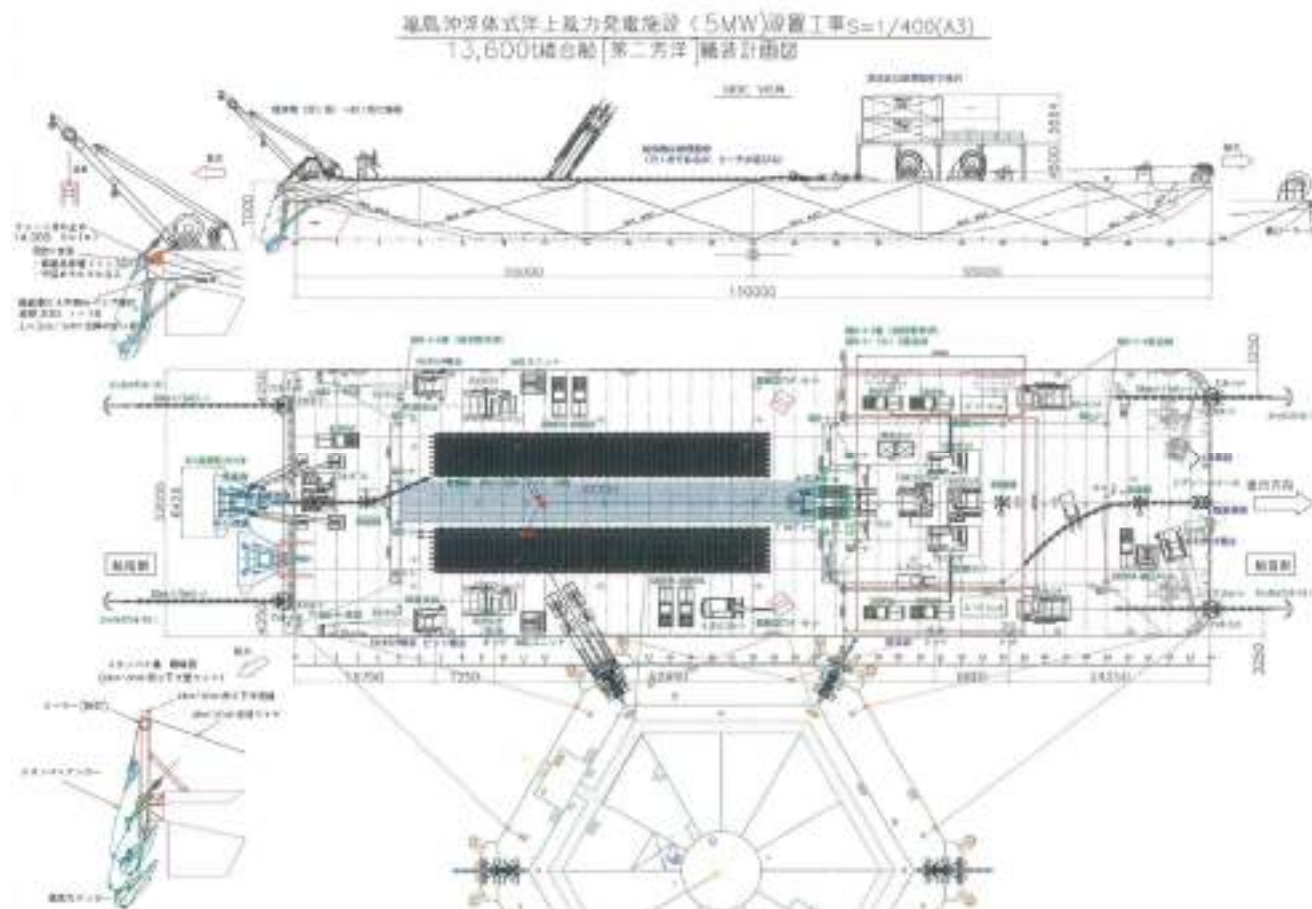
主要目

浮体幅(下部、上部)	51.0 m, 69.0 m
コラム直径	9.54m
高さ(アッパーハルまで)	42.0m
稼働喫水	39.0m
排水量	約31,000 ton



【風車、浮体、係留の開発】(5MW風車) アドバンストスパー浮体の係留システムの工事

○**艀装改造した13,600t積み台船**にて大型風車搭載用浮体の係留系を現地海域に設置、**把駐力試験を実施し、所定の把駐力を確認した。**



アンカーをバージに搭載



アンカー・チェーンを海底に敷設中



把駐力試験中のアンカー埋没状況

把駐力試験は、1組(2本)の試験の実施に少なくとも2日間連続の安定した気象・海象が必要であるが、今期は荒天待機が多く、3組の試験を終了するのに約2ヶ月を要した。

【風車、浮体、係留の開発】(5MW風車) アドバンストスパー浮体の開発

○アドバンストスパー型風車浮体の複数工場でのブロック建造(工期短縮のための工法改良)を採用した。

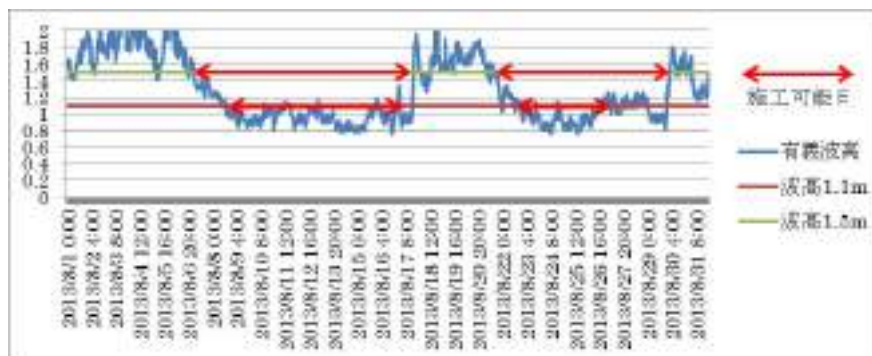


【洋上風力発電用浮体の施工技術】 実施海域での施工実績

○実証海域の海象データおよび施工実績から、作業の稼働率向上のための要件を確認。

作業限界波高の施工実績

	クレーン施工	ウィンチ施工
有義波高	1.1m	1.5m



福島沖NOWPHASデータによる施工可能期間の算定例(2013年8月)

クレーン施工とウィンチ施工の月別・年間稼働率の比較

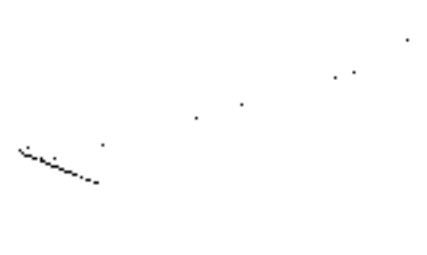
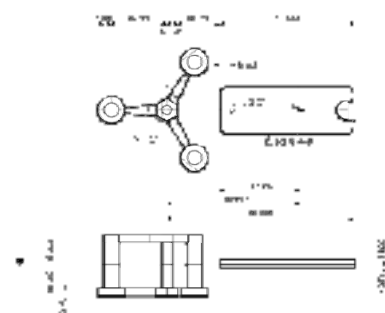
(算定条件: 作業限界を下回る有義波高が5日以上連続)

2013 年	日数 (日)		稼働率 (%)	
	クレーン施工 (有義波高 1.1m 以下)	チェーンウィンチ施工 (有義波高 1.5m 以下)	クレーン施工 (有義波高 1.1m 以下)	チェーンウィンチ施工 (有義波高 1.5m 以下)
1 月	0	0	0	0
2 月	0	0	0	0
3 月	0	5	0	16
4 月	0	0	0	0
5 月	0	6	0	19
6 月	0	6	0	20
7 月	0	15	0	48
8 月	15	21	48	68
9 月	0	13	0	43
10 月	0	4	0	13
11 月	0	3	0	10
12 月	0	8	0	26
年間	15	81	4	22

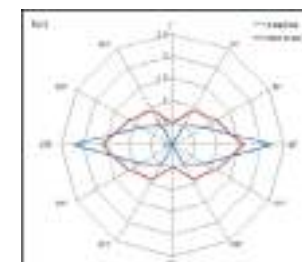
- 浮体係留方法の違いによる稼働率への影響を検討
- チェーンの係留施工方法をウィンチ施工とすることでクレーン施工に比べて稼働率は5.5倍向上

【洋上風力発電用浮体の施工技術】 施工シミュレーションの開発

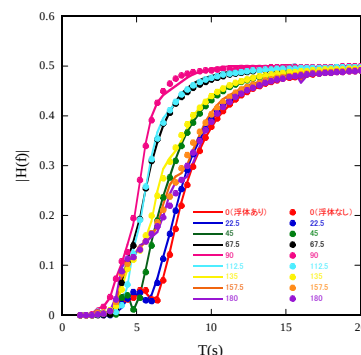
○作業船の波浪応答解析手法を構築、施工時稼働率の推定に有効であることを確認。



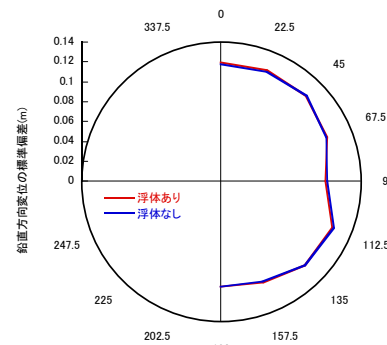
作業船の解析メッシュ



方向分散性の考慮



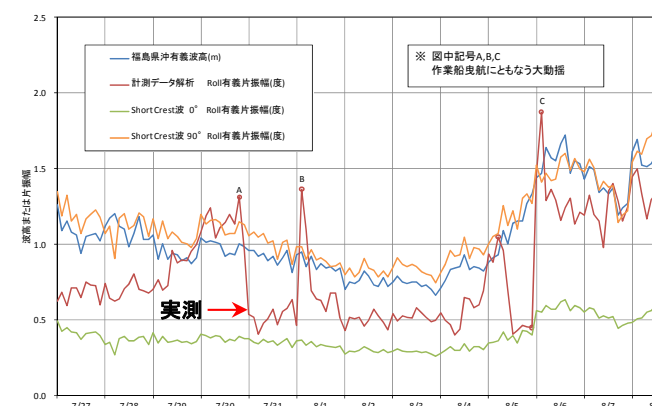
作業船の周波数応答関数(ヒープ)



クレーン位置での鉛直動揺の標準偏差

浮体がある場合と浮体がない場合の作業船の動揺の比較(2MW機)

- 複数浮体を考慮できる動揺解析手法を構築、作業船に及ぼす浮体の影響を検討
- 浮体の影響は小さく、作業船単体でも稼働率予測が可能であることを確認

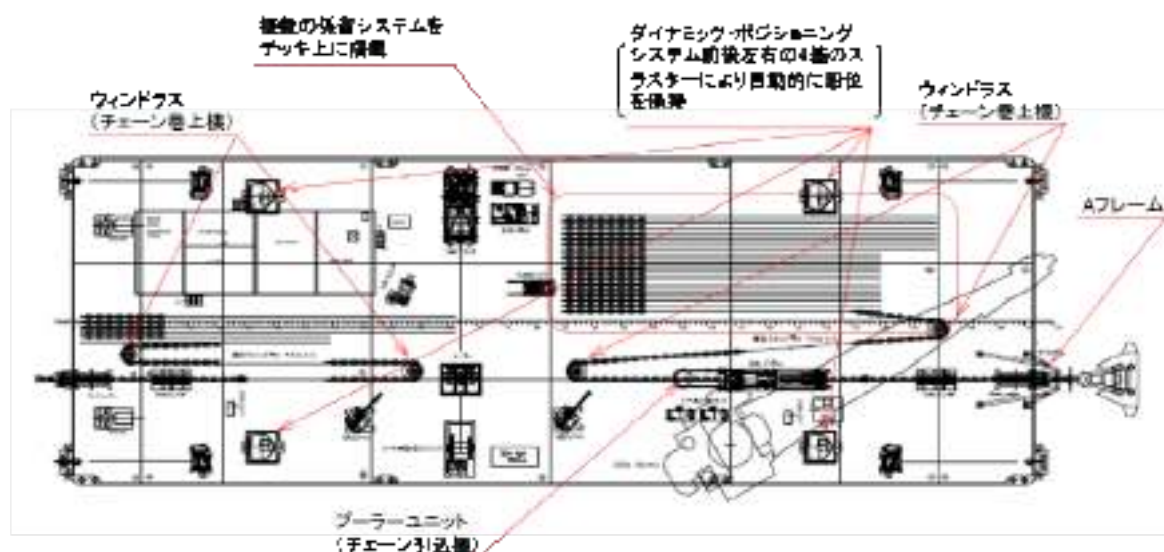


作業船の動揺解析結果と実測値の比較(7MW機)

- 波の方向分散性を考慮することにより作業船の波浪動揺の実測結果を定量的に精度よく評価できることを検証

【洋上風力発電用浮体の施工技術】 作業船に求められる要件

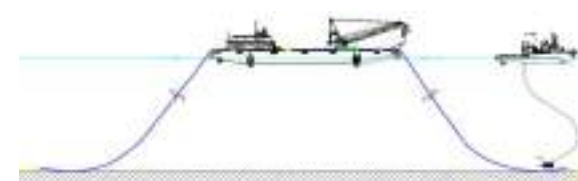
○係留アンカー・チェーン作業のためのチェーンの巻き上げ・吊り下ろしの施工機械や、係留チェーン取付作業のための船上ウィンチやクレーンを備えた作業船やその搭載施工機器のシステムの要件を提案。



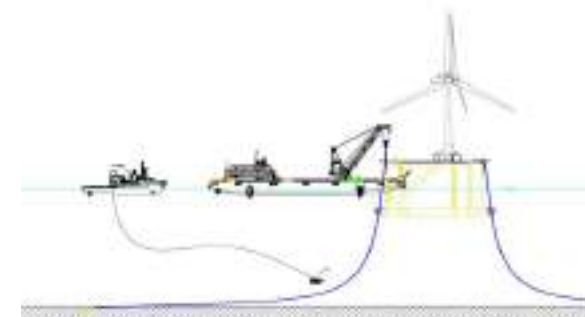
オールインワンの浮体施工機能を備えた施工機器システム



左記システムによる係留アンカー設置



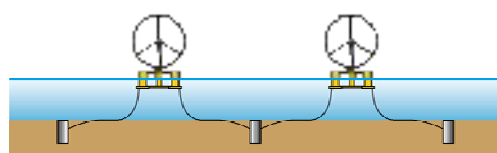
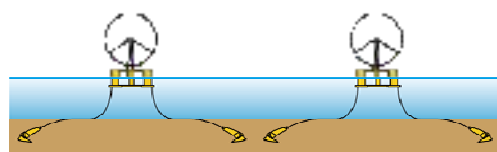
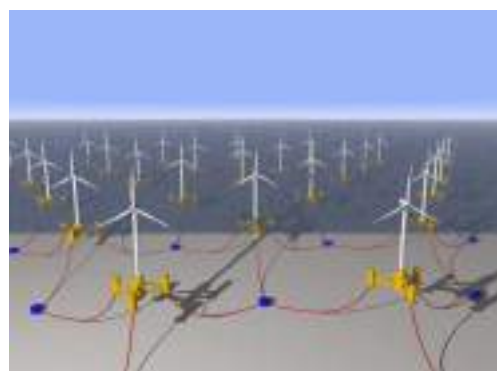
左記システムによる把駐力テスト



左記システムによる浮体係留

【大規模浮体式洋上ウィンドファームの建設技術】 アンカー形式の検討

- 海域への影響範囲縮小とコスト低減を狙い、係留システムを共有化する技術を検討。
- アンカー形式を比較、機能的適応性が高い形式から例として杭式アンカーを検討。
- 社会的適応性などの側面も考慮した場合は他のアンカー形式にも適応可能性あり。



係留システム共有化の概念

ドラッグ式アンカー



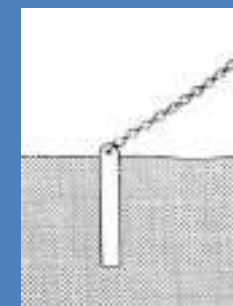
利点

- 設置方法が簡単
- 撤去・再利用が可能

欠点

- 硬い海底面には適さない
- 層が重なった構造の海底では不規則に挙動する

杭式アンカー

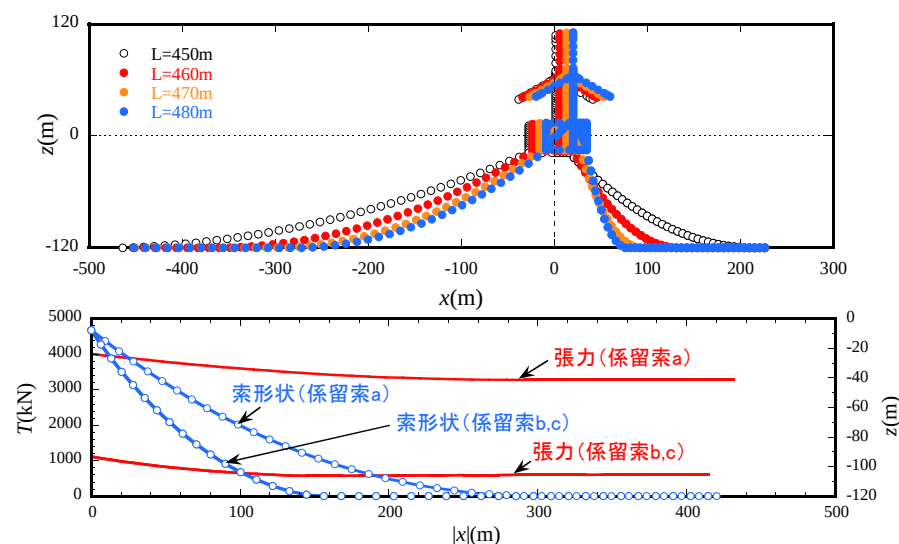
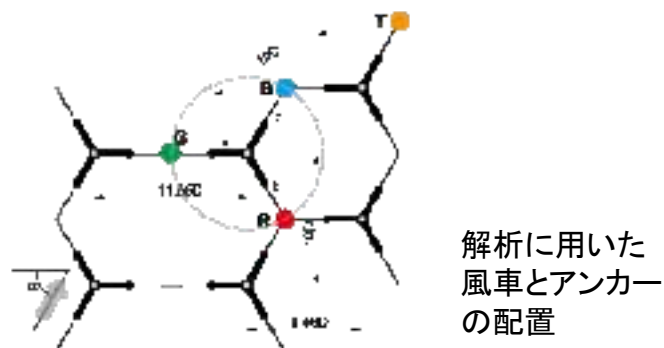


- 幅広い海底条件に適応する
- 垂直或いは水平方向の荷重に対応し、2方向以上の荷重に対しても対応

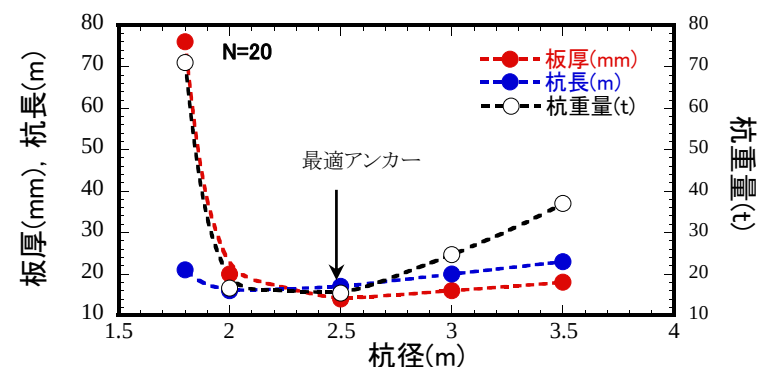
- 打撃杭を軟弱な海底に打ち込む場合は杭長が長くなる

【大規模浮体式洋上windファームの建設技術】 アンカー形式選定の定量化手法

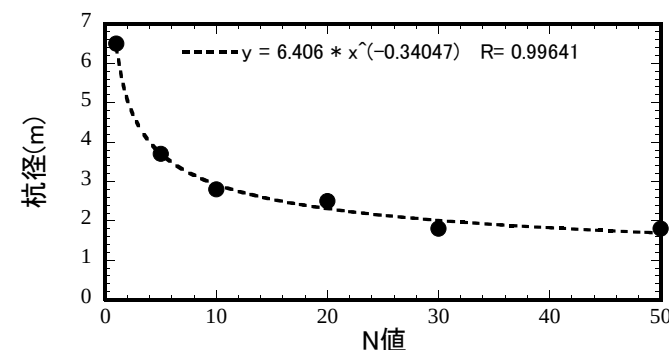
- 複数浮体の係留索から作用する張力を解析、アンカーを試設計。
- 任意のサイト地盤に対して初期検討で適用しうる簡易な杭設計式を作成。



係留索形状と係留張力の解析結果



杭径と板厚、杭長、杭重量の関係 (N=20)



N値と最適杭径の関係

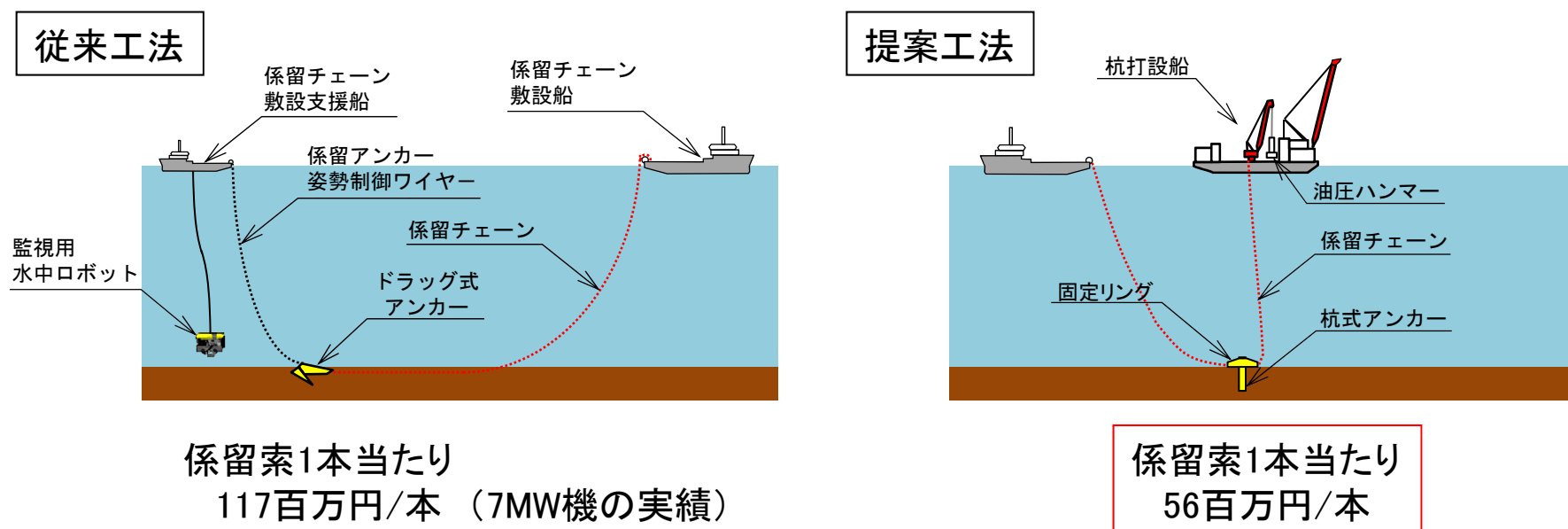
$$y = aN^b$$

y : 最適アンカー諸元(径, 長さ, 板厚, 重量)
 N : 海底地盤の標準貫入試験におけるN値
 a, b : 係数

【大規模浮体式洋上ウィンドファームの建設技術】コストの試算結果

- 杭式アンカーによる共有アンカーの施工コンセプトのコストを試算。
- 杭式アンカーによる共有アンカーの実用化に向けた課題を整理。

浮体式洋上風車10基のウィンドファーム建設における係留アンカー・チェーン設置工のコストを従来工法（ドラッグ式アンカー：7MW機の実績）と提案工法（杭式アンカー）で比較

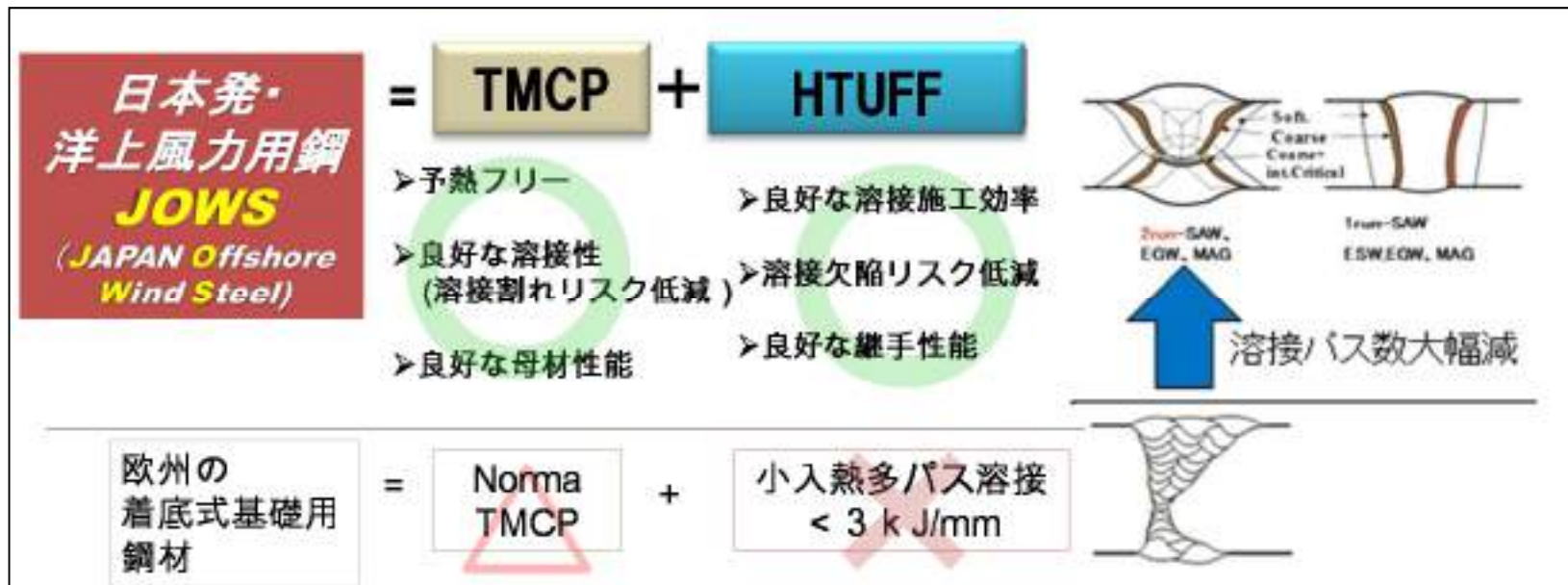


共有アンカーの実用化に向けた課題

- ・ 詳細技術（ガイドパイプ継手や固定リングの構造、固定リング降下の施工要領）の開発
- ・ 施工方法の安全性の向上（施工サイクルの短縮による荒天回避など）
- ・ 撤去の合理性など社会的側面から考慮すべき事項への対応

【浮体式風力発電用鋼材の実証研究】 洋上風力発電用ハイテン鋼の適用

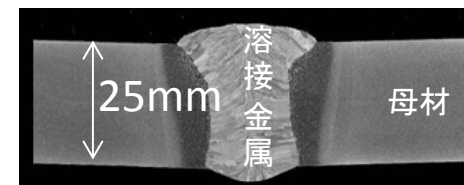
○洋上風力用ハイテン鋼に、大入熱溶接対応TMCP鋼を適用し、浮体基礎構造の施工能率の向上を図った結果、溶接施工能率は7倍以上（アークタイム比）向上した。



HTUFF: 高HAZ細粒鋼靱化技術”HTUFF (Super High HAZ Tuffness Technology with Fine Microstructure Imparted by Fine Particles)



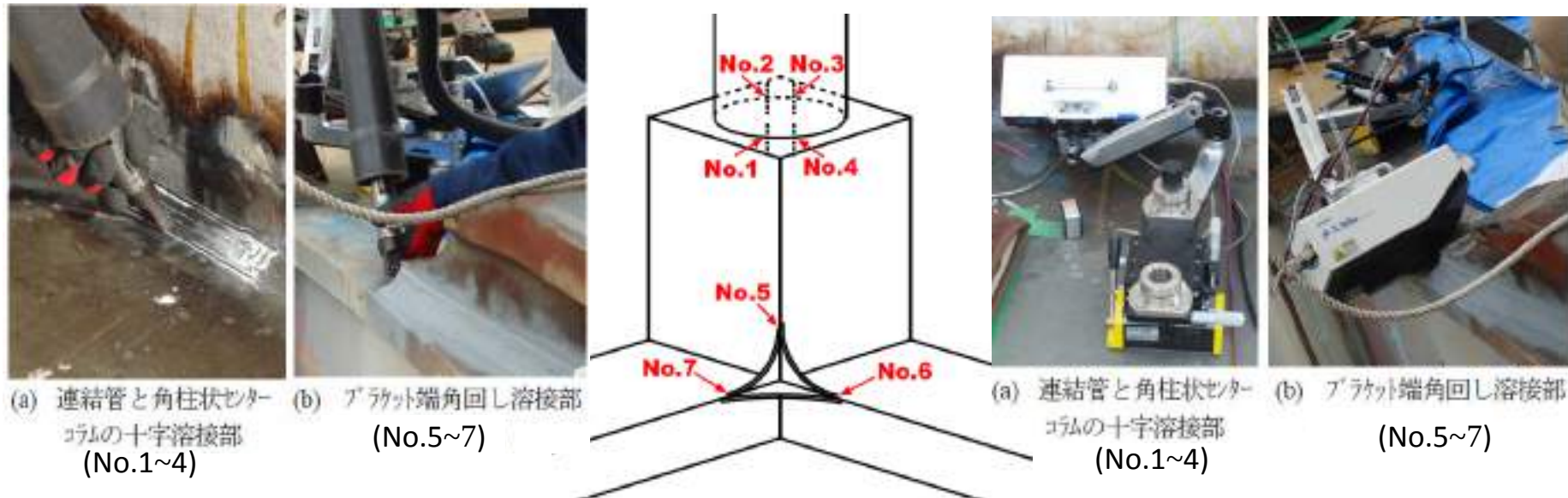
高能率FCB溶接の様子



大入熱溶接継手
断面マクロ

【浮体式風力発電用鋼材の実証研究】 洋上風力発電用疲労対策に向けた素材の施工

○疲労対策技術を浮体式洋上風力発電システムに適用した場合の疲労特性向上効果を明確化し、7MW用大型風力発電システムの軽量化を実現させる要素技術として確立した。



**UIT 技術を実際の洋上風力
発電の浮体に世界初適用**

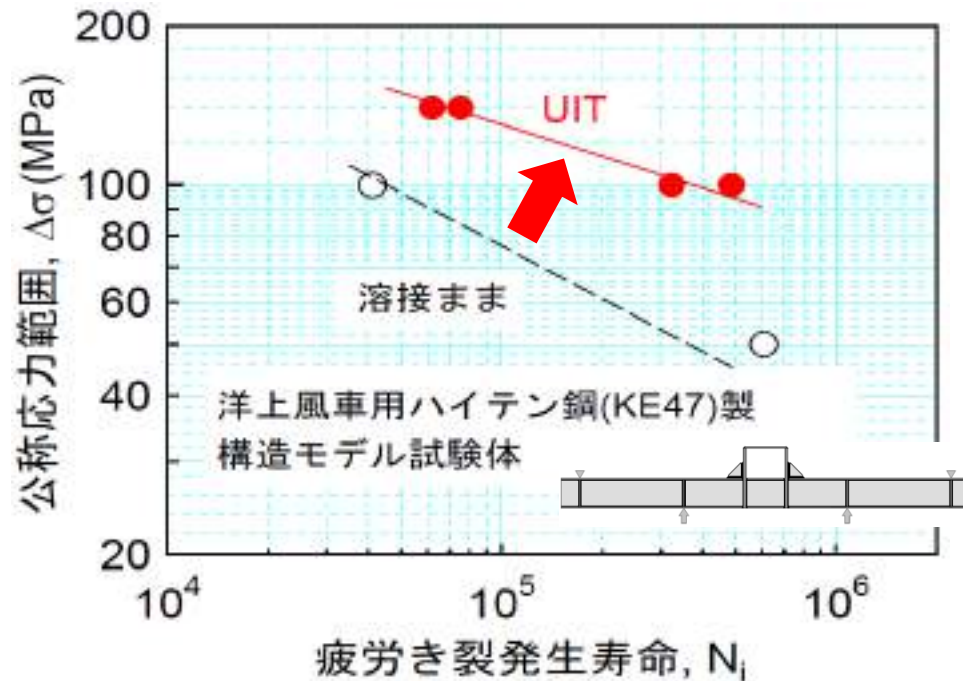
**実浮体構造での
残留応力を実測**

【浮体式風力発電用鋼材の実証研究】 洋上風力発電用疲労対策に向けた素材の検証

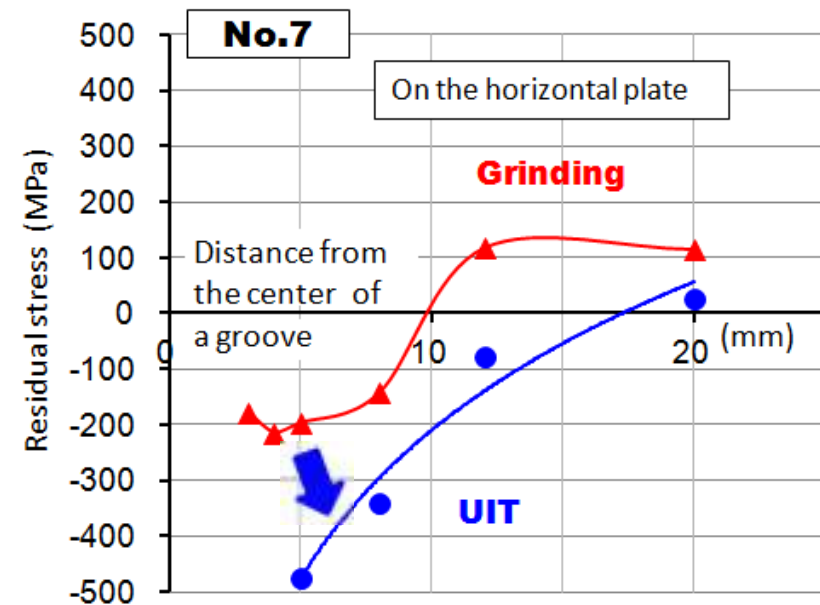
超音波衝撃処理(UIT)を洋上風力用ハイテン鋼に適用し、

○溶接部疲労強度向上の効果を明確化した。

○溶接部止端部の「滑らかな処理形状」と「大きな圧縮残留応力の導入」を確認した。



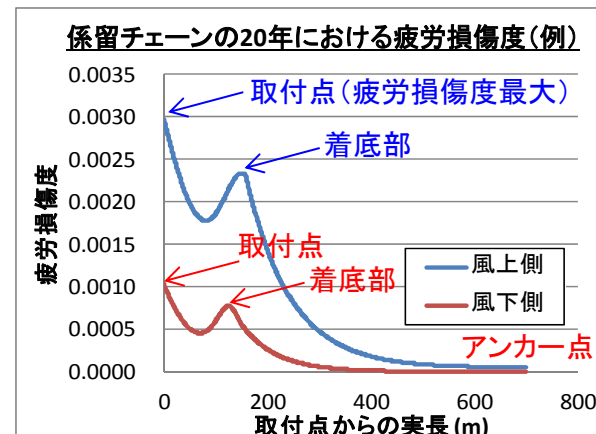
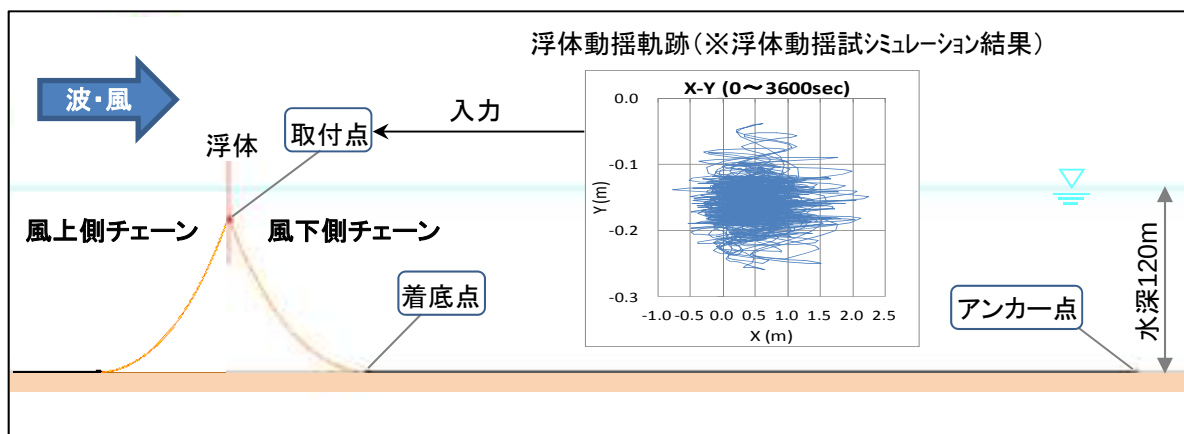
UITで疲労強度が著しく向上。
特に低応力・長寿命域で顕著。



**UITで大きな圧縮残留
応力の導入を確認。**

【浮体式風力発電用鋼材の実証研究】 係留チェーンの寿命評価

- リンクの腐食摩耗、動的影響を考慮した場合の係留チェーンの疲労寿命を算定した。
- 係留チェーンの摩耗メカニズム、摩耗量推定方法を整理した。



➤動揺浮体シミュレーション結果を用いた係留チェーンの動的解析・疲労解析の結果によると、係留チェーンの疲労寿命は20年以上となる。

➤波・風が一方向から作用し続けるという安全側の仮定の下で算定した係留チェーンの腐食摩耗量は文献、基準に示されているものとほぼ同程度となる。

位置		最大摩耗深さ d
風上側チェーン	取付点	2.6mm (0.13mm/年)
	着底点	15.2mm (0.76mm/年)
風下側チェーン	取付点	2.2mm (0.11mm/年)
	着底点	14.8mm (0.74mm/年)



4. 浮体式洋上風力発電所のための変電システムの開発

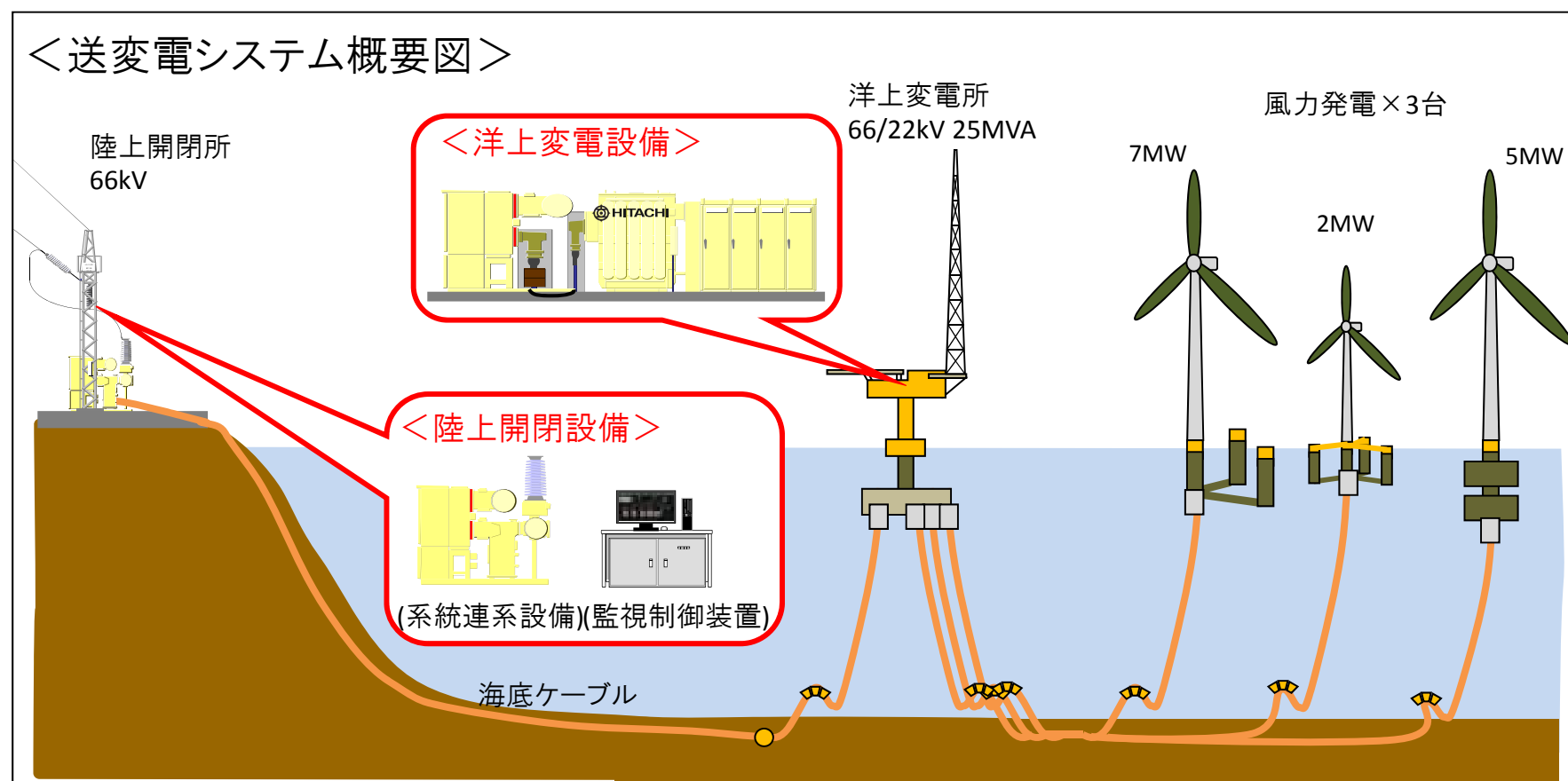
1. 浮体式洋上風力発電所のための変電システム
2. 沖合送電システムの開発
3. サブステーション用浮体の開発

【浮体式洋上風力発電所のための変電システム】 送変電システム概要

- 浮体式洋上ウインドファームの安全性、信頼性、経済性を評価するために、世界初の洋上変電設備※、陸上開閉設備、監視装置を製作し、浮体式洋上変電所に適した設計条件・手法・基準、ならびに、運転・維持管理手法の検証・確立を行った。

※ウインドファーム向けの浮体式洋上変電設備は世界初

＜送変電システム概要図＞



【浮体式洋上風力発電所のための変電システム】 システム構成における想定事象とその対策

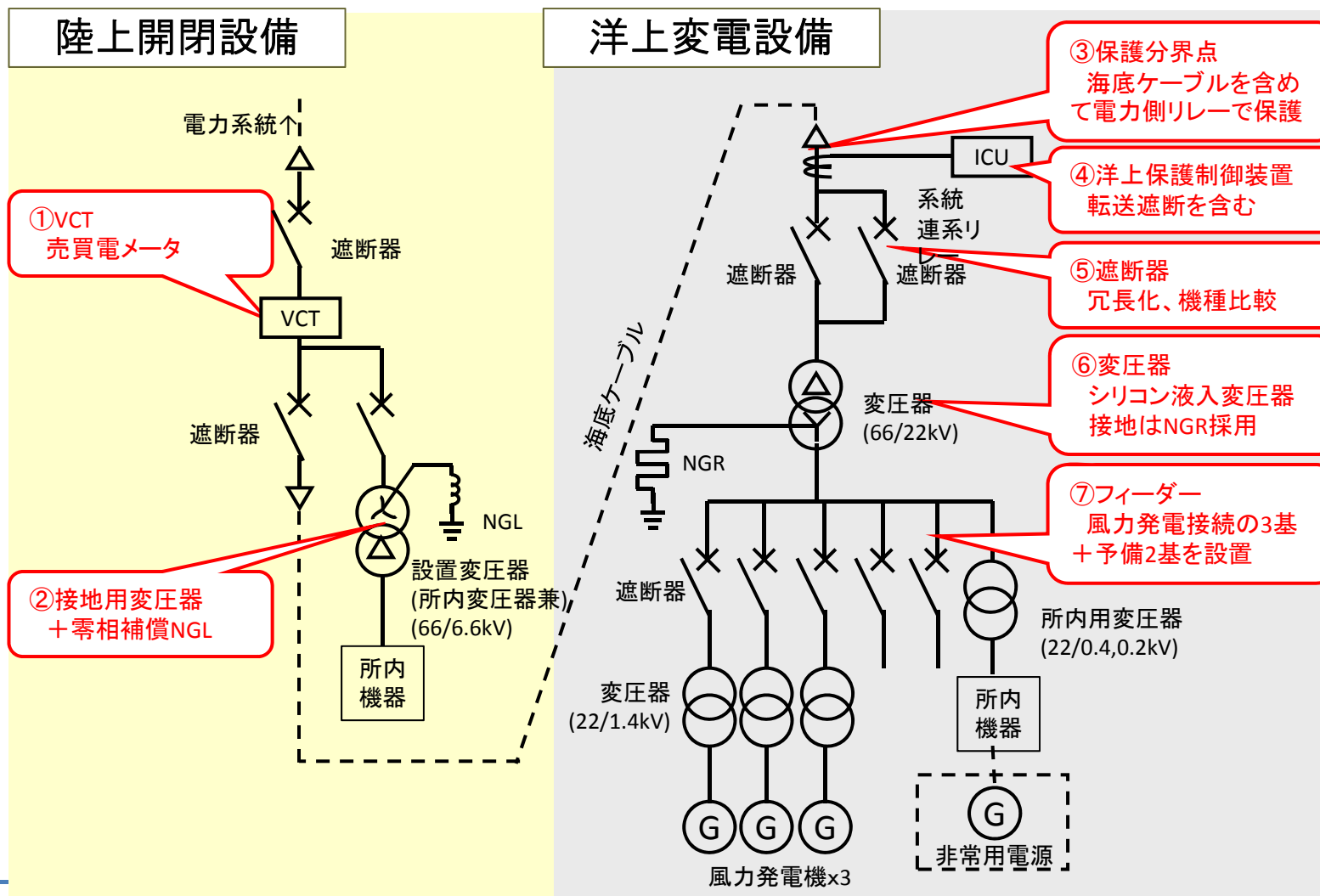
○ 今回、世界初※のウインドファーム向け浮体式洋上変電設備を設置するにあたり、その特徴、想定事象、対策を検討し、設備設計に反映した。

No	特徴	想定事象	対策
1	長距離海底ケーブル (地上一浮体間)	ケーブル充電時及び地絡事故に伴う送電システムへの影響	系統解析を実施し、電力殿との系統連系協議することで、設備選定、仕様を決定する。
2	浮体の動揺、傾斜	破損・動作不良の可能性	振動試験を検討・実施し、合格した機器を納入。また、点検で動作確認を行う。
3	無人変電設備 アクセスが困難	事故時の対応が遅れる可能性	遠隔監視装置への情報内容及び操作範囲を増やす事で、殆どの操作・事故復旧を遠隔操作可能とした
4	浮体上の変電設備所要面積を必要最小限にする	狭小エリア内への機器設置及び設置後の作業場所確保、設備の搬出入が困難となる可能性	充電部の露出が無い構造の機器を採用する事で縮小化を図る。 造船所内で全ての機器据付・試験を実施し、洋上作業は一部の検査のみとした。
5	塩害環境 (常時潮風に曝される)	屋外設置機器(変圧器) 塩分付着による腐食・破損	基本的に屋内設置とし、塩害塗装・鍍金処理の実施し、塩害影響を極小化した。 変圧器は発熱が大きく、空冷の必要があり屋外設置とした。
6	海洋への環境負担 (海の生物への影響)	変圧器絶縁油が漏油し海上へ流出した際の影響	絶縁油は環境影響が小さいものを採用し、かつセンサ、オイルパンの設置等の流出防止策を実施した。

*ウインドファーム向けの浮体式洋上変電設備は世界初

【浮体式洋上風力発電所のための変電システム】 変電システムの構成

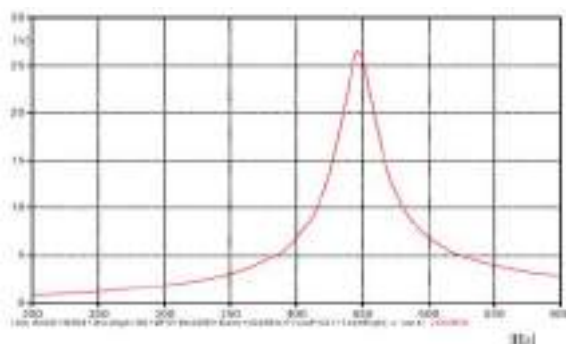
○ ウィンドファームの変電システム構成と特徴を下図に示す。システム構成は東北電力殿との系統協議、系統解析シミュレーションの結果を反映した。



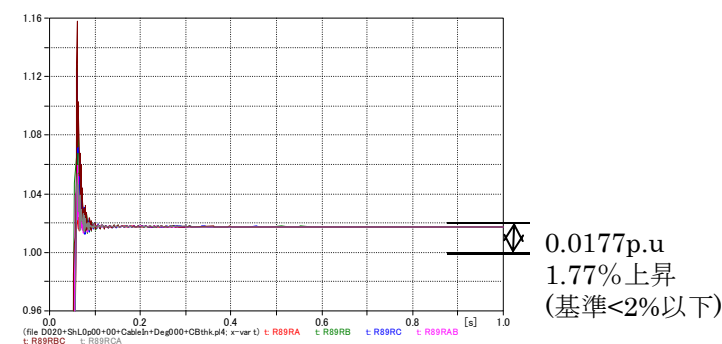
【浮体式洋上風力発電所のための変電システム】 系統解析シミュレーション

- ウィンドファームの系統解析シミュレーションの結果を下記に示す。長距離ケーブルの静電容量補償の対策が必要と判明。
- 風車が3台連系時においてもシミュレーションし、問題ないことを確認した。
- 運開後、トラブルなく運用した。

No.	解析項目	検討結果	対策
1	長距離ケーブル 静電容量の補償	正相補償: 不要 零相補償: 要	零相補償容量はケーブル 静電荷量の100%
2	電流ゼロミス	無し	— (検討の結果、不要と判断)
3	大電荷対策	接地機器に対する熱容量的問題: 無し サージ電圧による絶縁強化若しくはLA容量追加: 無し	— (検討の結果、不要と判断)
4	サージ共振(開閉時)	無し	— (検討の結果、不要と判断)
5	サージ共振(雷時)	無し	— (検討の結果、不要と判断)
6	高調波共振	系統の共振周波数と同じもしくは近い周波数発生源が無い為不要	— (検討の結果、不要と判断)



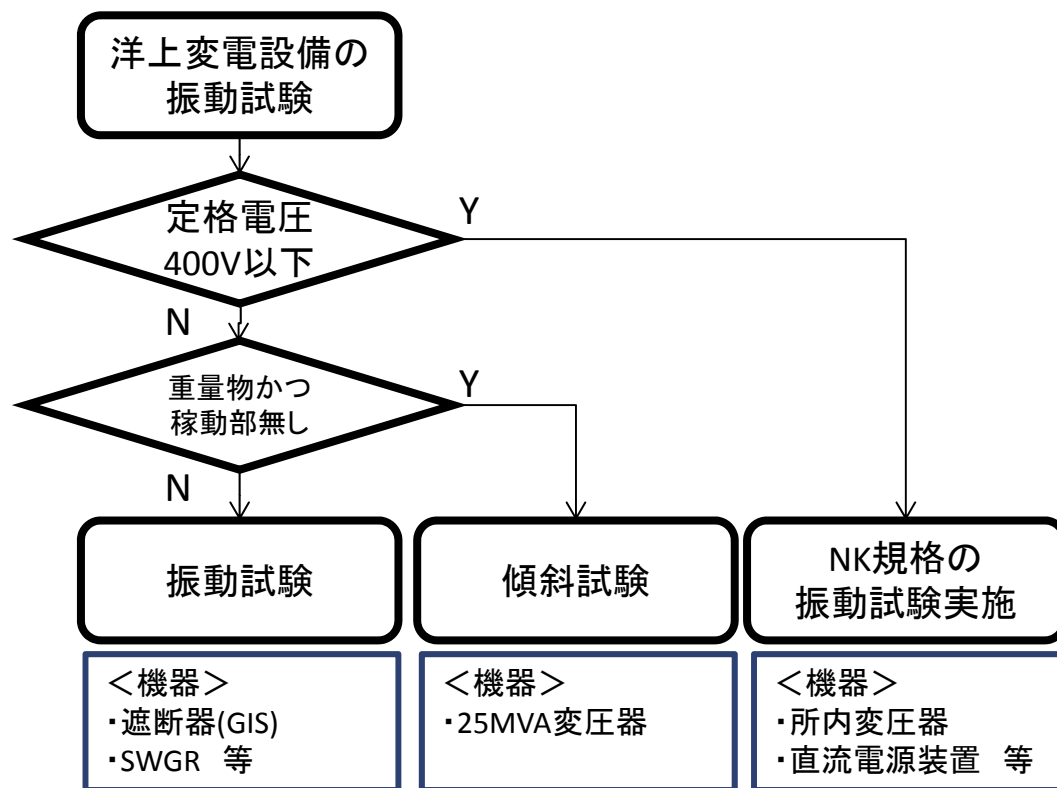
受電点(66KV)での周波数特性(シミュレーション結果)



受電点(66KV)での周波数特性(シミュレーション結果)

【浮体式洋上風力発電所のための変電システム】 浮体変電設備の振動、傾斜試験方針の検討①

- 船舶等の変電設備の試験方針を参考に、本実証試験の試験方針を決定した。
- 試験角度、振動数は安全側の暴風時の浮体動揺特性より決定した。



試験角度、振動数検討

振動試験	傾斜試験		
共振点確認試験を0.14Hz※まで実施。 その結果、傾斜(11.8°)付振動試験(振動数は共振点or1Hz※)	傾斜角度(35.2°)※ ※暴風時浮体傾斜(11.8°)+動揺G換算(23.4°)の合計(35.2°)		
※振動台性能より決定			
変電浮体の動揺特性			
浮体動揺性能	定格	カットアウト	暴風
風速(@10m)	10.7m/s	20.6m/s	51.5m/s
有義波高	3.9m	7.1m	12.0m
有義波周期	7.4 s	9.8 s	13.4 s
	(0.14Hz)	(0.10Hz)	(0.07Hz)
最大傾斜角	2.8°	5.6°	11.8°
上下 動的最大加速度	0.03 G	0.07 G	0.10 G
左右 動的最大加速度	0.12 G	0.22 G	0.36 G

【浮体式洋上風力発電所のための変電システム】 浮体変電設備の振動、傾斜試験方針の検討②

- 振動、傾斜試験にて点検した結果、特に問題は見られなかった。
- 運開後、トラブルなく運用した。

＜GIS、SWGRの振動試験＞



	項目	内容
＜共振点確認試験＞		
1	傾斜角度	0°
2	点検内容	浮体の動揺振動数と設備の共振の確認
＜耐久振動試験＞		
1	傾斜角	11.8° 以上(浮体の動揺角度)
2	振動数	共振点、無い場合は1Hz
3	点検内容	動作試験 (加振中動作確認) 共振点変化確認 (耐久試験前後の共振点) 外観点検 (変形等の有無の確認) 性能試験 (耐久試験後動作確認)

＜変圧器の傾斜試験＞

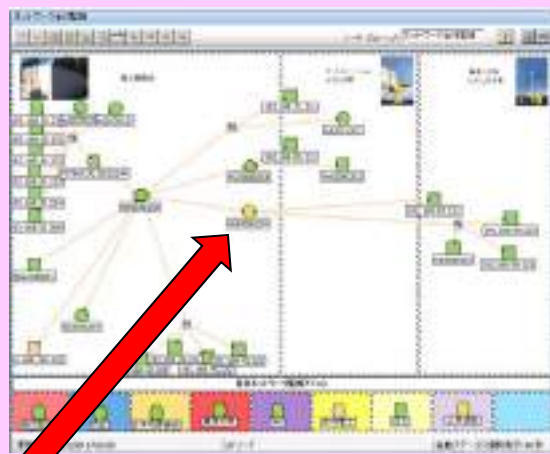


	項目	内容
1	傾斜角度	35.2° ※浮体動揺の角度と加速度から算出
2	傾斜方向	変圧器の前後、左右方向
3	点検内容	外観点検 (変形等の有無確認) 傾斜中検査 (周波数応答解析) 中身検査 (鉄心ズレ等の確認)

【浮体式洋上風力発電所のための変電システム】 ネットワーク監視システム

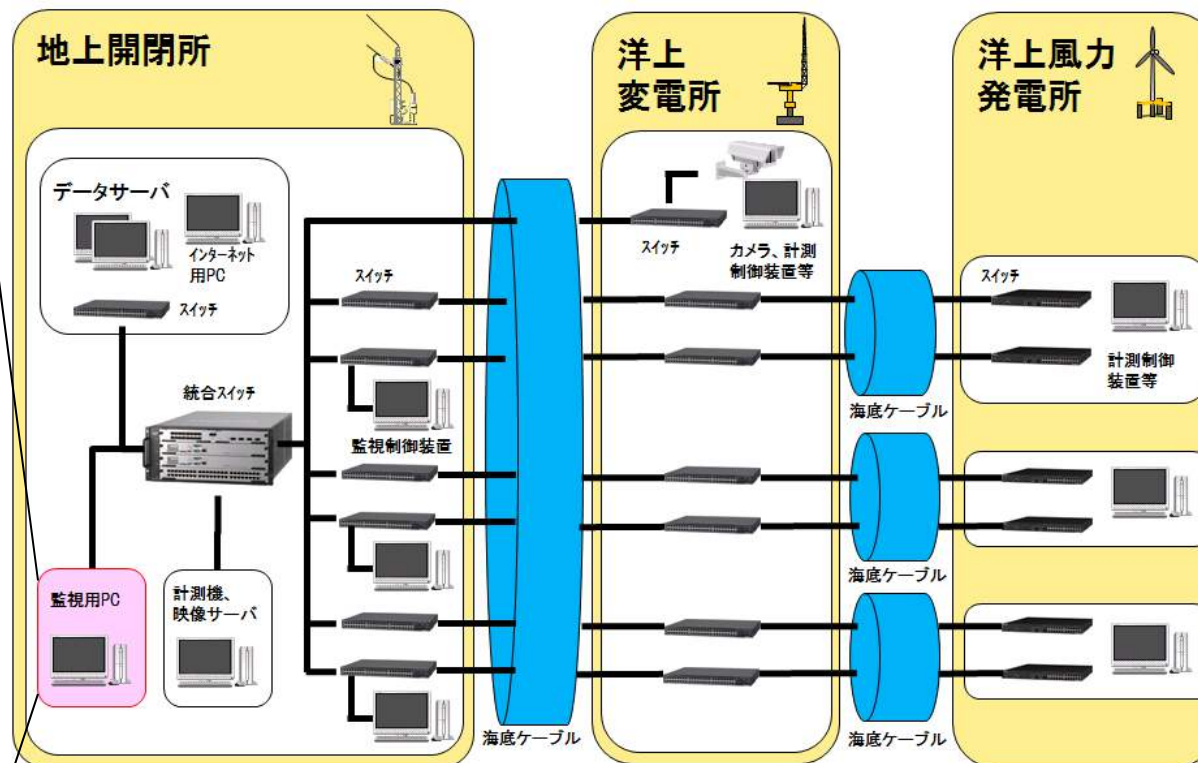
- ウインドファームのネットワークシステムには各社の制御PCやスイッチが多数存在し、また容易にアクセスできないため、ネットワーク監視システムにより故障発生箇所を特定し、早期復旧につなげている。
- 納入後、トラブルなく運用した。

ネットワーク監視用システム



<エラー箇所>

エラーを検出するとアイコンの色が変化。ログ画面にてエラー内容がわかる。



ネットワークシステム(概要)

【浮体式洋上風力発電所のための変電システム】 統合監視システム

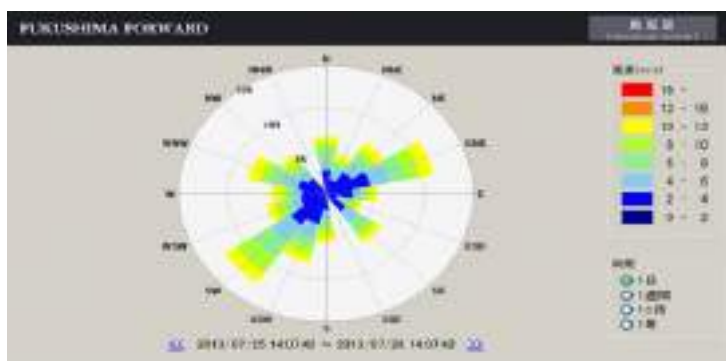
- ウインドファームには各社の制御PCがあり、個別に制御している。そこで統合監視システムで、ウインドファーム全体の発電・風向や各設備の状態を表示し監視する。また、故障情報等をまとめて外部へmail発信する機能も有する。
- 納入後、トラブルなく運用した。



全体運転状況図



時系列データ表示



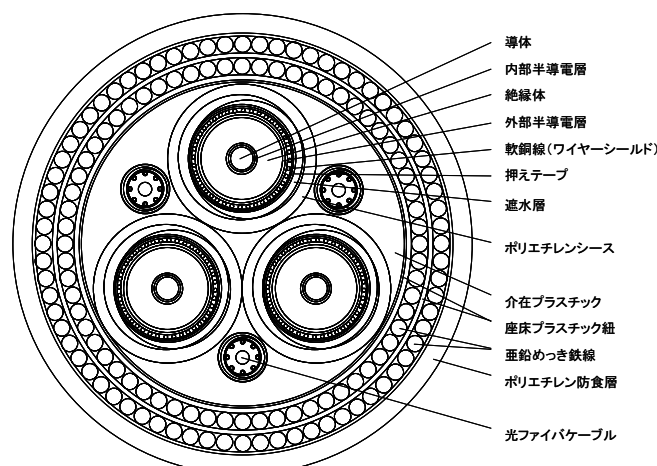
風配置図



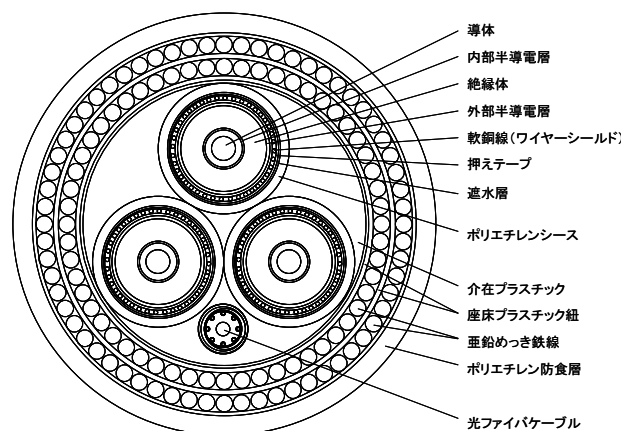
イベントログ、メール送信先設定

【沖合送電システムの開発】 高耐久性ライザーケーブルの開発

- JEC-3408およびCIGREに準拠し、ライザーケーブルの設計(66kV用、22kV用)を実施し、試作評価にて要求仕様を満足することを確認した。
- ライザーケーブルは、波浪、潮流、浮体動揺にダイナミックに追従する必要があり、**金属疲労に強い遮水構造**の採用及び**交互撚り二重鉄線構造**を特徴としている。



66kVライザーケーブル



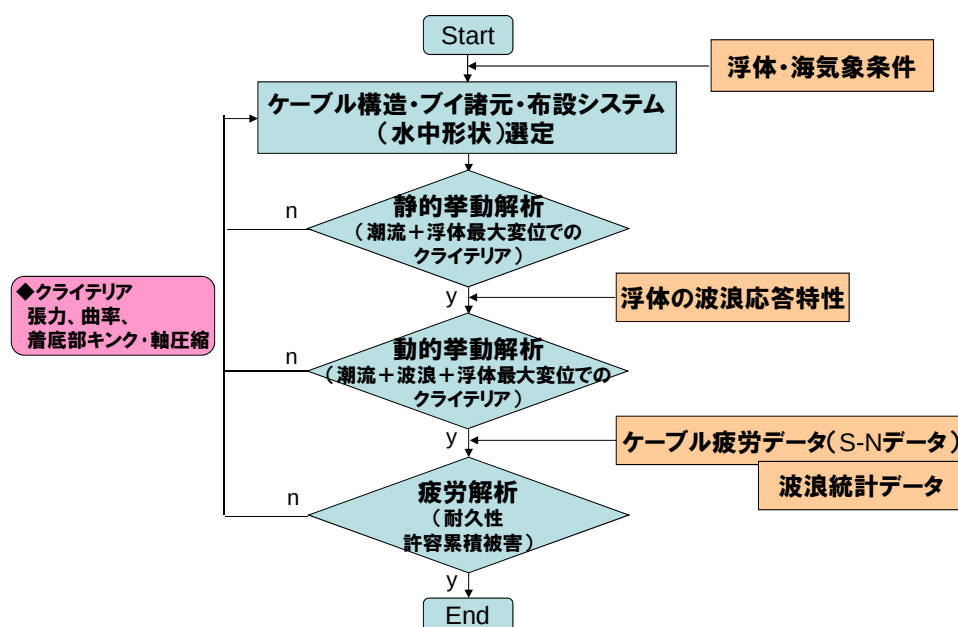
22kVライザーケーブル

ライザーケーブル仕様

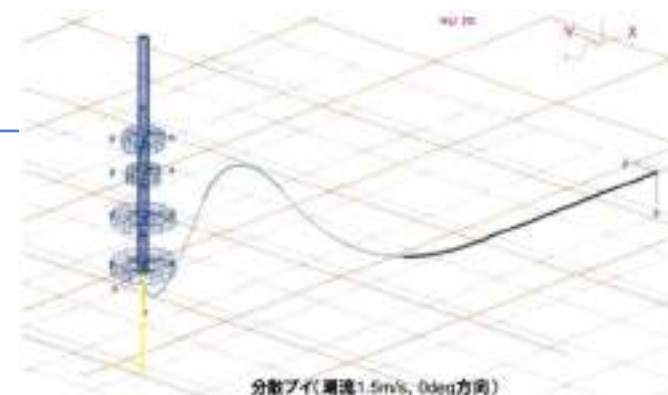
項目	66kV ライザーケーブル	22kV ライザーケーブル
公称電圧	66000V	22000V
電力線心数	3	3
公称断面積	100mm ²	150mm ²
光ファイバ線心数	SM8 芯×3	SM8 芯
がい装	6mm 鉄線2重	6mm 鉄線2重
仕上がり外径	約 175mm	約 147mm
概算質量(気中)	52600 kg/km	43400 kg/km
概算質量(水中)	29300 kg/km	27100 kg/km

【沖合送電システムの開発】 ライザーケーブル用接続部の開発

- 下図フローにて挙動解析を行い、各浮体・ケーブル種類毎にライザーケーブル最適海中形状を決定した(計5種類)。
- 挙動解析の結果にて、必要なライザーケーブル副資材(中間ブイ、補強材、防護材など)の仕様を決定した。
- 新規にライザーケーブルと海底ケーブルの海底ジョイント(66kV用、22kV用)を開発した。



ライザーケーブル設計フロー



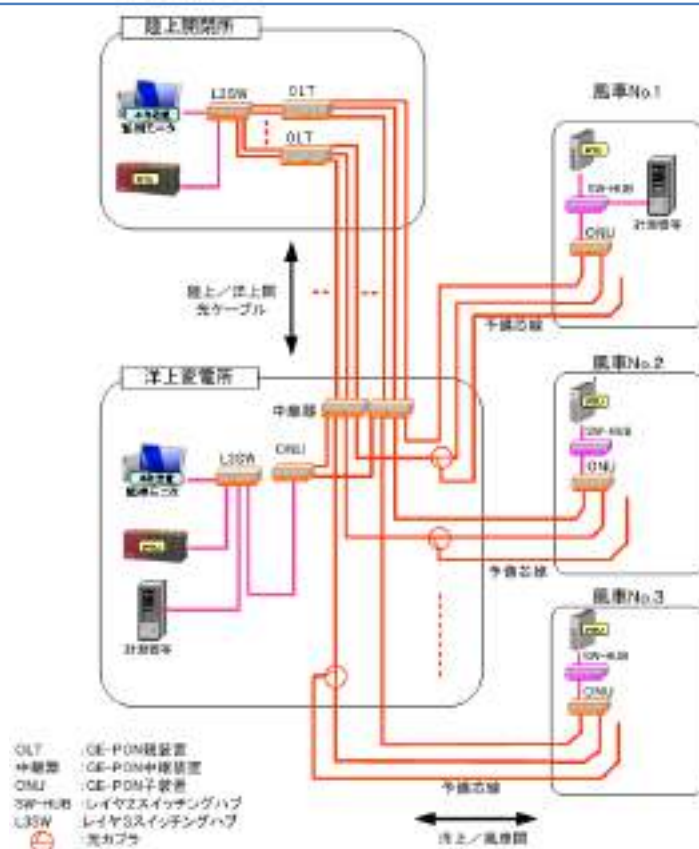
ライザーケーブル挙動解析結果(例)



海底ジョイント

【沖合送電システムの開発】 大規模WFに適した光通信システムの開発

○洋上風力発電では、光ケーブルをループ接続した光通信システムが一般的であるが、本実証では、当社独自の**GE-PON**を使用した**光マルチドロップ方式**を適用した。陸上開閉所～洋上サブステーションを経て各風車までの光通信システムを構築し、洋上風力発電に有効運用出来ることを確認した。



光通信システム構成

・特徴は

- ①光カプラ直接分岐であり、光機器故障による下流への通信影響がない。
- ②バーチャルLANによる論理的領域分割が可能(最大1Gbps)。
- ③冗長性を確保するには2本の光ケーブルを本線・予備線とするが、②との組合せで信頼性を落とさずに光ケーブル削減(コストダウン)が可能。

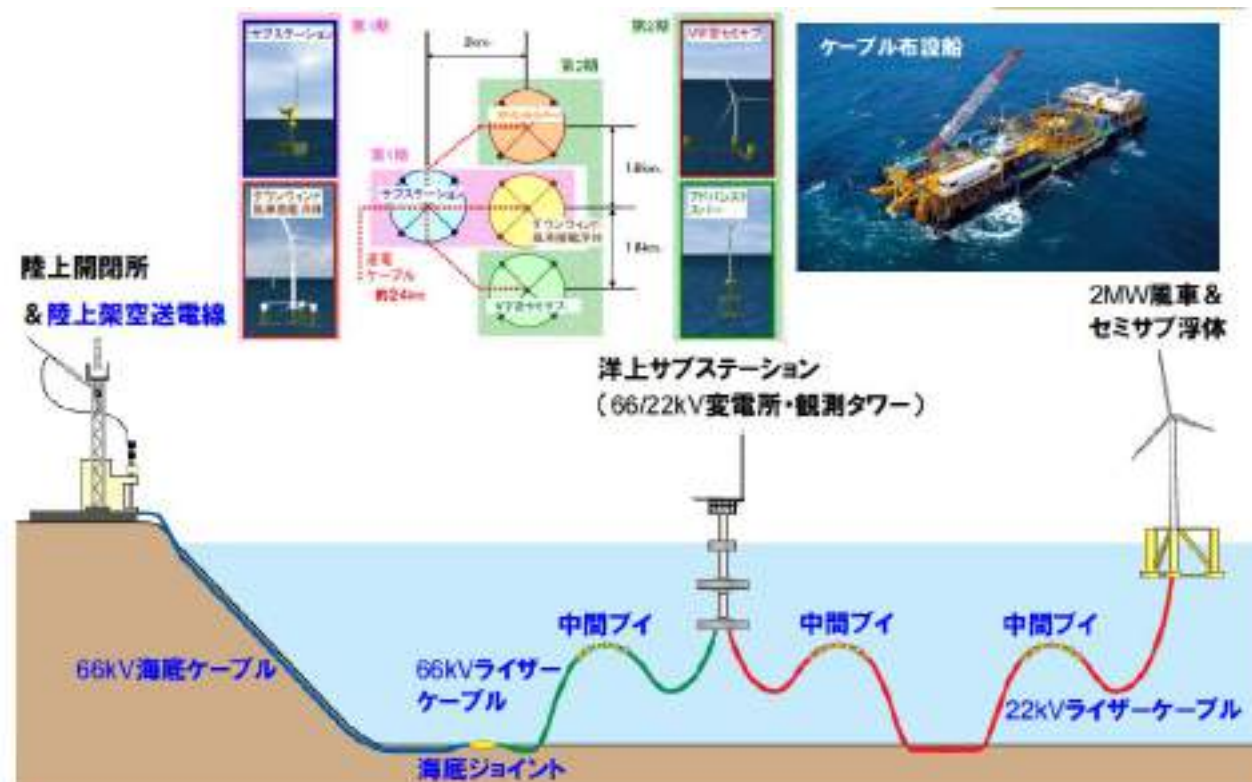
【沖合送電システムの開発】 送電工事

○送電システム全体(陸上架空送電・海底ケーブル送電)の設計を行い、製造・工事を完了した。**浮体同士のライザーケーブル連結を実現したのは世界初**である。

①陸上送電系統、洋上サブステーション、2MW風車浮体：平成25年10月工事完了。

②7MW風車浮体：平成27年9月工事完了。

○平成25年11月の2MW風車の運転開始後、順調に運用した。



送電システム構成



ライザーケーブル海中設置状況



新規開発した国産ブイ
(福島県内企業製造品)

【沖合送電システムの開発】 大容量送電システムの検討

- 本実証では、様々な要因により、送電建設コストが増大した。主要因は、1基/年という非効率な工事スケジュール及び前工程作業遅れによる布設船稼働率の悪化である。
- 事業化検討において、ライザーケーブル建設コストは、実証時の約1/6に出来る見通しを得た。

ライザーケーブル送電建設コスト

項 目	km単価	kW単価
①2MWライザーケーブル	約485百万円/km	約31万円/kW
②7MW・5MWライザーケーブル	約402百万円/km	

- ・事業化にあたっては、ライザーケーブル建設コストを大幅に低減する必要があり、複数基工事/年が実現出来た場合、ライザーケーブル建設コストは約1/6に出来る見通しを得た。検討条件は、7MW機×10基である。
- ・浮体式洋上風力発電では風車の大型化による送電建設コスト低減が非常に有効であり、数百MW～1GWクラスの大規模WFにおいては、HVDC送電による高効率送電方式実現が大いに期待される。

【サブステーション用浮体の開発】 浮体の開発

- 低動揺のアドバンストスパー型で**世界初の洋上サブステーション**を実現した。
- 曳航に先立ち、**東京湾内の深浅測量**を実施し、曳航海域に十分な水深があることを**確認**した。
- フローティングクレーンによる吊り曳航、進水を実施した。

アドバンストスパー型浮体の採用

↓
 $a_z=0.10G$ 以下
 $a_{xy}=0.36G$ 以下
 をクリアする運動性能で
 変圧設備を保護



F/dによる吊り曳航



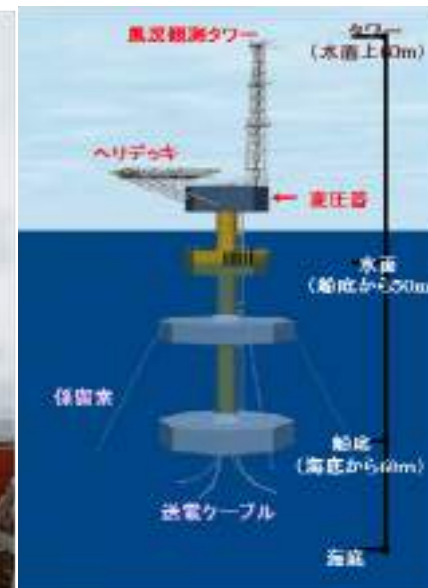
東京湾内を曳航



サブステーション稼働までの概略スケジュール

	H24 4月	7月	10月	H25 1月	4月	7月	10月
設計							
製造							
建造							
曳航・設置・ 現地調査							
実証稼働							

- JMUの既存設備を有効利用したコストミニマムの効率的建造方法およびそのための設計手法を開発

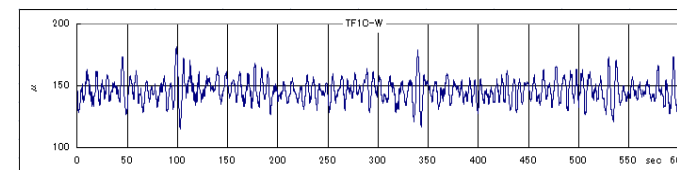


【サブステーション用浮体の開発】 アドバンストスパー浮体における計測システム

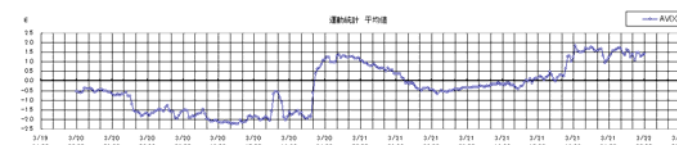
○浮体各部に作用する応力と、各係留系の索張力及び傾斜角を計測するシステムを構築し、計測を開始した。

浮体式洋上風力発電設備における観測項目

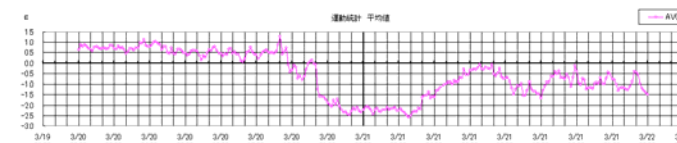
分野	計測項目	計測機器	計測目的
風車	運転情報	SCADA	動解析の際の風車の運転状態の把握
	翼応力	歪計	翼根部の曲げモーメントの計測
タワー	変位応答	加速度計	タワー4高度の応答の計測
	構造応答	歪計	タワー2高度の曲げモーメント・捻りモーメントの計測
浮体動揺	回転運動	ジャイロ	浮体動揺の計測
	並進運動	加速度計	浮体動揺の計測
	絶対変位	GPS	浮体動揺の補正
係留	索張力	ロードセル	索張力の計測
	係留索傾斜	慣性センサー	索傾斜角の計測
浮体	構造歪	歪計	浮体構造に作用する応力の計測



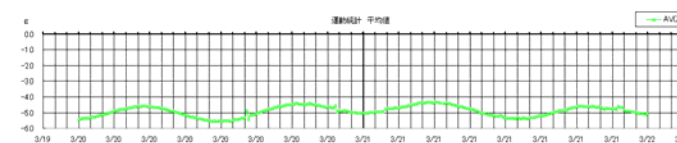
浮体歪データ取得例



浮体移動X方向データ例



浮体移動Y方向データ例



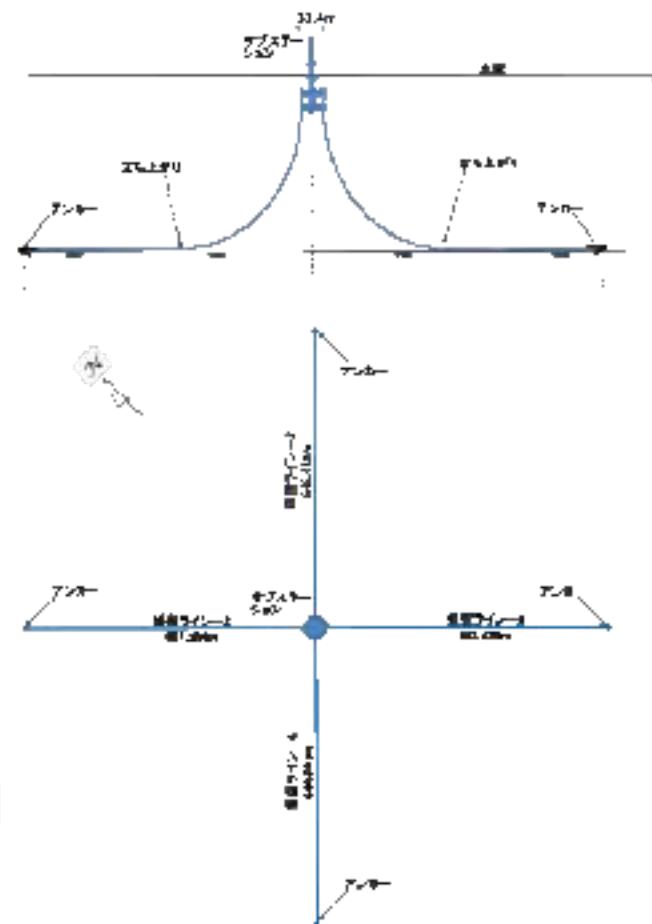
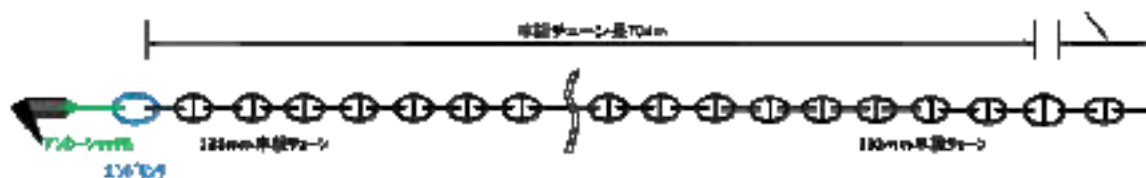
浮体移動Z方向データ例

得られるデータの例(イメージ)

【サブステーション用浮体の開発】係留・設置の開発

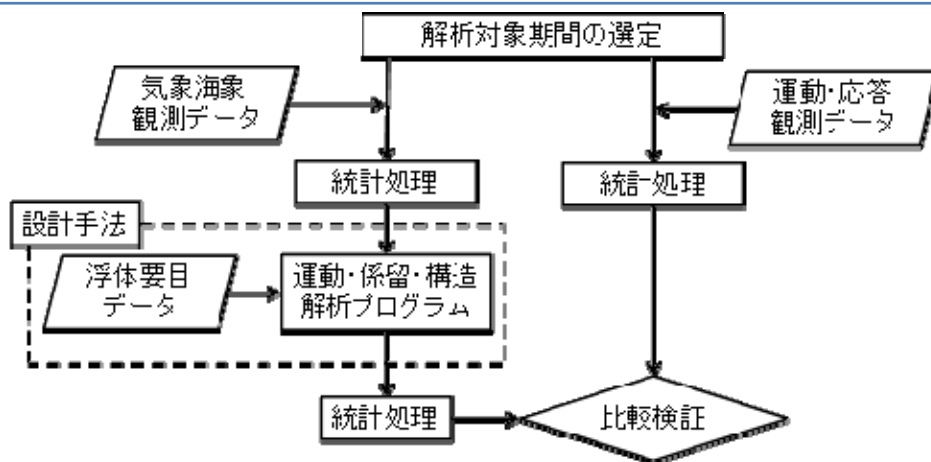
- 水深約120mの海域において4本の係留索を用いるカテナリ係留を採用した。
- 波浪中動揺および長周期動揺に起因する係留索の疲労強度解析を実施し、**係留索の疲労寿命**が設計寿命の20年よりも長くなるよう設計した。

係留索	R3グレード(濱中製鎖工業製)132mmΦ(内腐食代5mm)620m
アンカー	高把駐力型(vryhof製)22.5トン+ウェイト8.8トン
係留金物	チェーンストッパー、シュミットブラケット



【サブステーション用浮体の開発】設計の検証

○運動性能、係留張力、構造応力につき、実機の計測結果と計算結果の比較を行い設計手法の検証を行うとともに、**アドバンストスパー型の信頼性を検証し、両者の結果は良好は一致をみた。**



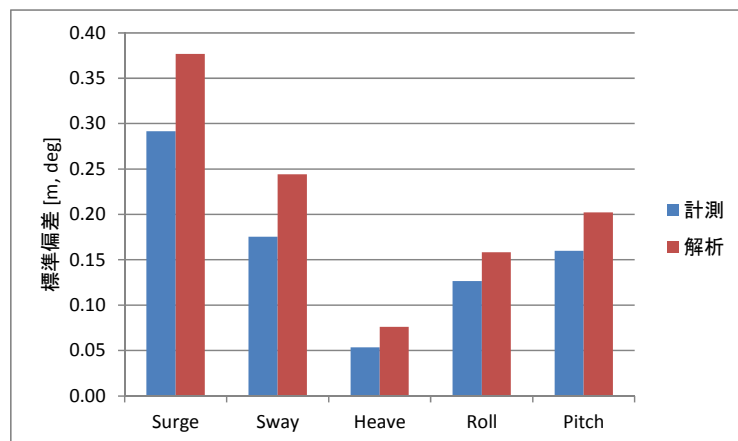
設計の検証に使用した気象海象観測データ一覧

(H25年度事業)

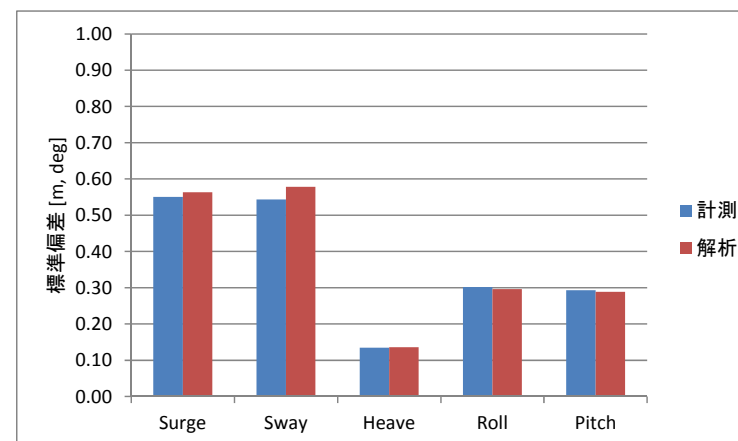
計測項目	計測機器
浮体X,Y,Z 水平変位	GPS
浮体Roll, Pitch	FOG(ジャイロ)
船体歪	歪ゲージ

(H25年度補正事業)

計測項目	計測機器
浮体X,Y,Z 水平変位	RTK-GPS
浮体Roll, Pitch	FOG(ジャイロ)
係留索張力	歪ゲージ
係留索展張角	傾斜計
船体歪	歪ゲージ



2014年5月1日 0:00 ~ 3:00 (H25年度)



2014年10月6日 14:30 ~ 17:30 (H25年度補正)

5. 浮体式洋上風力発電所の維持管理手法の確立

1. 風車、浮体、係留の維持管理
2. 送電システムの維持管理手法開発
3. 変電システムの維持管理
4. 洋上風力発電所の運転・維持管理

【風車、浮体、係留の維持管理】(2MW風車) ダウンウィンド型風車搭載用セミサブ浮体

○ 2年以上にわたり維持管理を実施し、浮体式洋上風力発電を大きな問題なく実現した。

■ ふくしま未来の点検実績

※()内は風車に関するもの

	乗船回数(日)			延べ人数(人)		
	定期点検	トラブル対応	その他	定期点検	トラブル対応	その他
2013年度	7 (7)	4 (4)	0 (0)	49 (42)	14 (14)	0 (0)
2014年度	19 (15)	7 (6)	3 (1)	144 (106)	35 (32)	16 (9)
2015年度	9 (8)	2 (1)	2 (0)	60 (47)	7 (2)	17 (0)

- 稼動1年目は初期不良対応が多くあったが、2年目以降は点検回数が激減
- 現在は3ヶ月ごとの目視点検も実施しているが、今後省略することを検討

【浮体の維持管理事例】
荷揚試験: 装備された荷揚装置の作動を確認した



■ 対雷対策

- ✓ PCSのコンデンサ故障が発生 → 雷被害が原因と推定されたため雷検知器を設置
- ✓ 落雷を検知 → 高所作業でのブレード点検にて問題無いことを確認、発電再開



8月2日 落雷を検知。海象悪く点検は実施できず。
 9月15,16日 半年点検にてブレード後縁部に黒色部を確認。
 9月17日 発電停止
 9月25, 30日 詳細点検
 9月30日 発電再開



【風車、浮体、係留の維持管理】(7MW風車)アップウインド型大型風車搭載用セミサブ浮体－保安装置

- 系統事故等による長時間停電時に風車を運転・監視できる対策として、バックアップ発電機を浮体内に設置した。
- 系統停電復電時に、系統側とバックアップ発電機側との自動切換機能が稼動することを確認した。

■ バックアップ発電機

非常停電時に必要な以下の補機を運転する容量を保有

- ✓ 風車制御監視装置
- ✓ 風車用油圧ポンプ
- ✓ YAWモータ
- ✓ 航空障害灯
- ✓ 航路標識灯

停電時にできること

- ① 風車・浮体の状態監視
- ② 法令で要求される航空障害灯・航路標識灯の灯火類の点灯

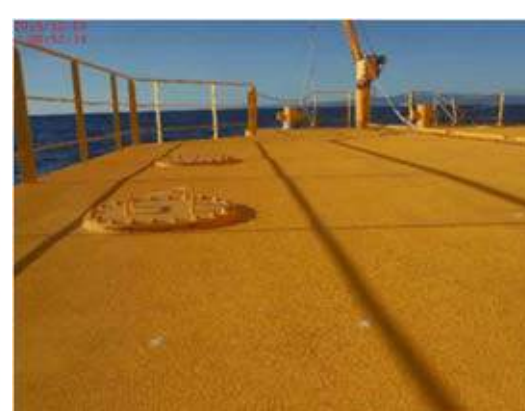
H27年11月4日(水)にふくしま絆サブステーションの保守作業による停電時に、自動起動・復電による自動停止機能を確認した。



バックアップ発電機

【風車、浮体、係留の維持管理】（洋上変電所） アドバンストスパー型浮体

- 目視検査の結果、船体構造部材は設置時の状態を維持しており、変形等は起きていないことを確認した。
- 塗装はほとんど損傷なく、溶接ビート部も健全な状態を保っていることを確認した。
- 消イオン容量型避雷針（落雷抑制装置）を設置、検証中。



【風車、浮体、係留の維持管理】（洋上変電所） アドバンストスパー型浮体 アクセス船への対応

- アクセス船に設けられたアクセス補助装置に対応するため、サブステーション側にバッファチューブを設置した。
- アクセス船接舷時にサブステーション側の梯子部にステムが接触し破損した事故の再発を防止するため、D型フェンダーを取り付けた。



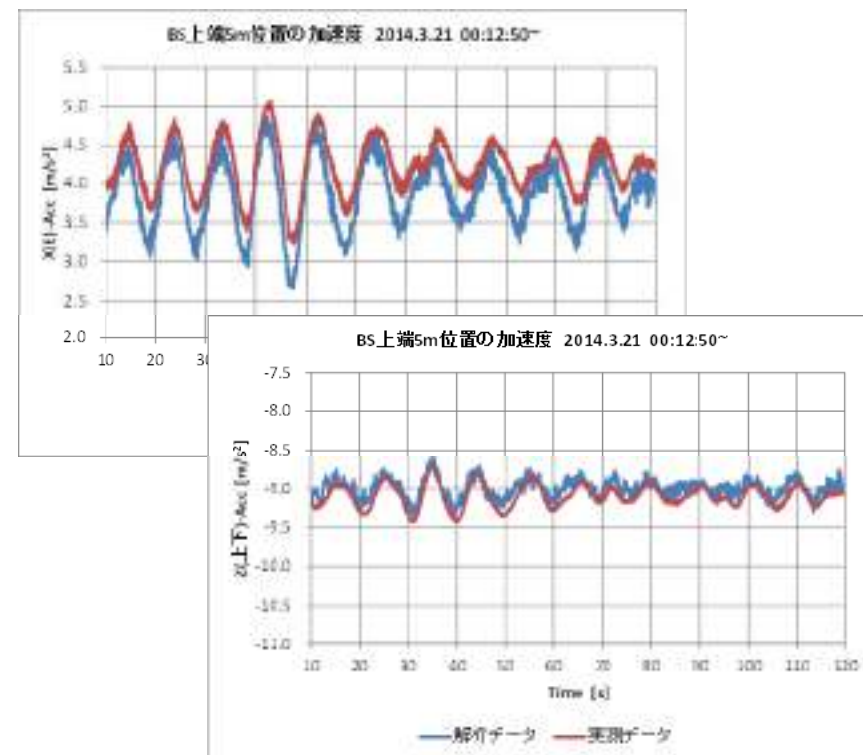
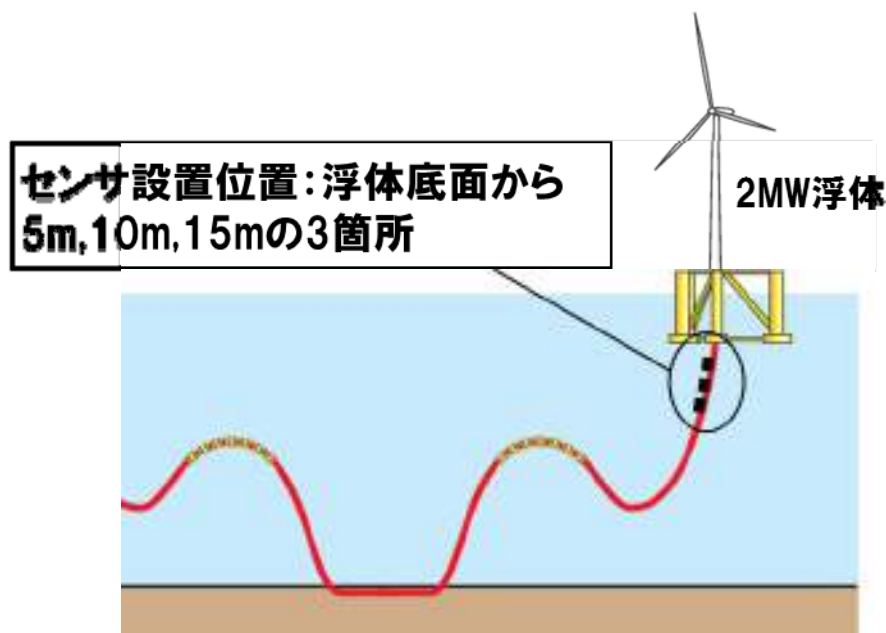
バッファチューブ



D型フェンダー

【送電システムの維持管理手法開発】 挙動計測と疲労解析①

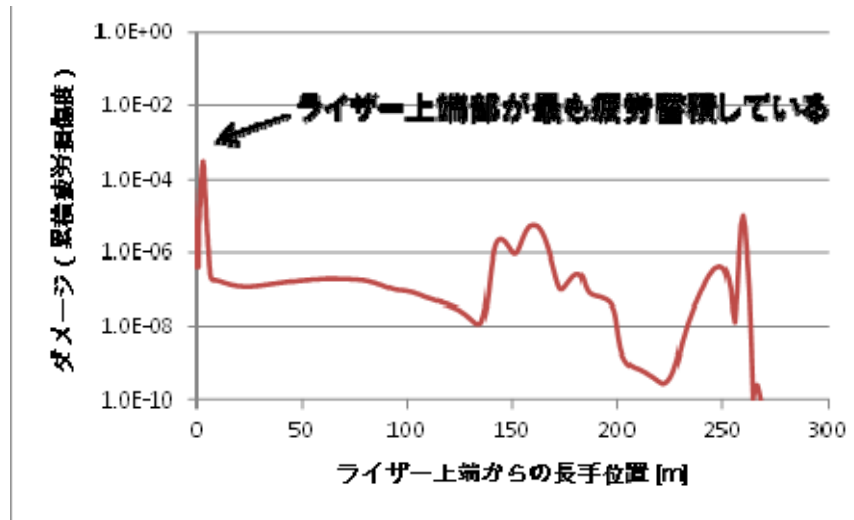
- ライザーケーブル設計妥当性の確認のため、2MW風車に接続されたライザーケーブルに加速度計を設置し、ライザーケーブルの挙動を計測した。
- 計測結果を挙動解析結果と比較し、健全性の確認及び疲労解析により寿命を推定することが目的である。目標寿命は、風車と同じ20年である。
- 実測データと挙動解析の結果は良く一致することが確認出来た。



加速度計設置位置と計測結果(例)

【送電システムの維持管理手法開発】 挙動計測と疲労解析②

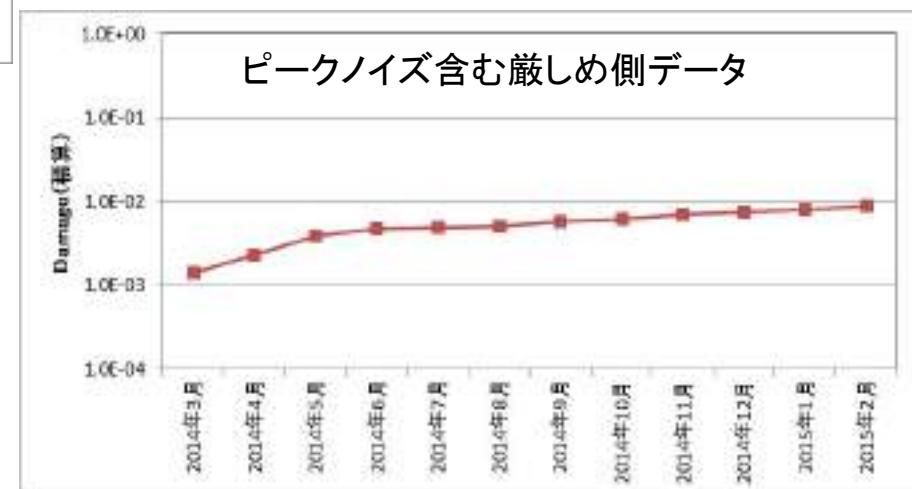
○実証海域における挙動計測結果、海象データ、浮体動揺データ、ライザーケーブルSN特性から疲労解析を実施し、累積疲労損傷度を算出し、寿命推定を実施した。



ケーブル疲労試験

荒天時の挙動解析に基づく疲労解析結果(例)

・データが得られている1年分の疲労解析結果から推定される機械的な寿命は約115年となり、目標寿命を満足することが確認出来た。



累積疲労損傷度(データ1年分)

【送電システムの維持管理手法開発】 既設ケーブル調査

○布設した海底ケーブル・ライザーケーブルの経年変化状況をROVを用いて調査し、経年変化が無いことを確認した。

- ✓ ライザーケーブルでは、海中浮遊部が年を追う毎に少しずつ沈下する傾向が見られた。
 - 中間ブイに相当量の海洋生物の付着が見られ、その影響の可能性があるので、海洋生物除去に関する定期的なメンテナンスが必要と思われる。



ROVによる観察の結果

ケーブル露出の様子



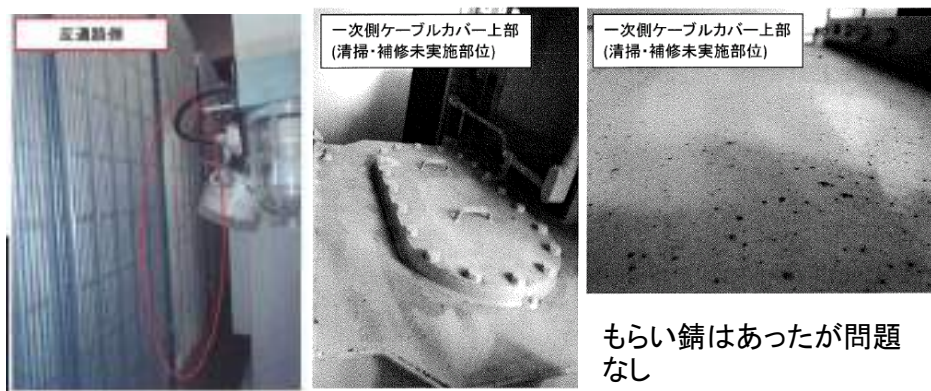
- ✓ OTDRによる光伝送損失測定結果は規格値を満足しており、経年変化のないことが確認出来た。
- ✓ O&Mにおけるケーブル健全性確認は、定期的なOTDR測定が有効と判断できた。(外傷等による影響は光ケーブルが最も受けやすい)。
- ✓ 66kV海底ケーブル陸揚げ部では、大きな台風・低気圧のあとに漂砂により海底ケーブルが露出したため、再埋設を行った。
 - 露出時に再埋設することにより、より深く埋設出来ることを確認した。
 - 計画時に漂砂実績等を事前調査することが肝要である。

【変電システムの維持管理】 ふくしま絆の点検状況

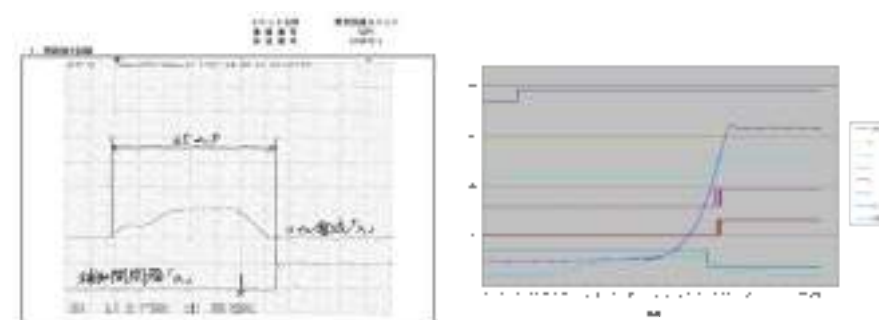
○設計の妥当性と最適設備を検証するために、メンテナンス項目を選定、点検やデータ測定を実施、問題が無いことを確認した。

システム	点検内容	点検結果
全体	外観点検を実施、発錆の有無等確認	一部もらい錆、汚れ等があったが、本体塗装に異常無し
システム全体	遠隔監視システムの検証	データ入出力状況、欠損、安定性を確認
GIS, SWGR (C-VIS)	開閉動作時間の経年変化測定	開閉試験を実施、問題ないことを確認 耐動揺性については問題ないとする
変圧器	液中ガス分析による内部状態の確認	ガス分析実施、基準値内であることを確認

変圧器外観点検結果



開閉装置点検結果

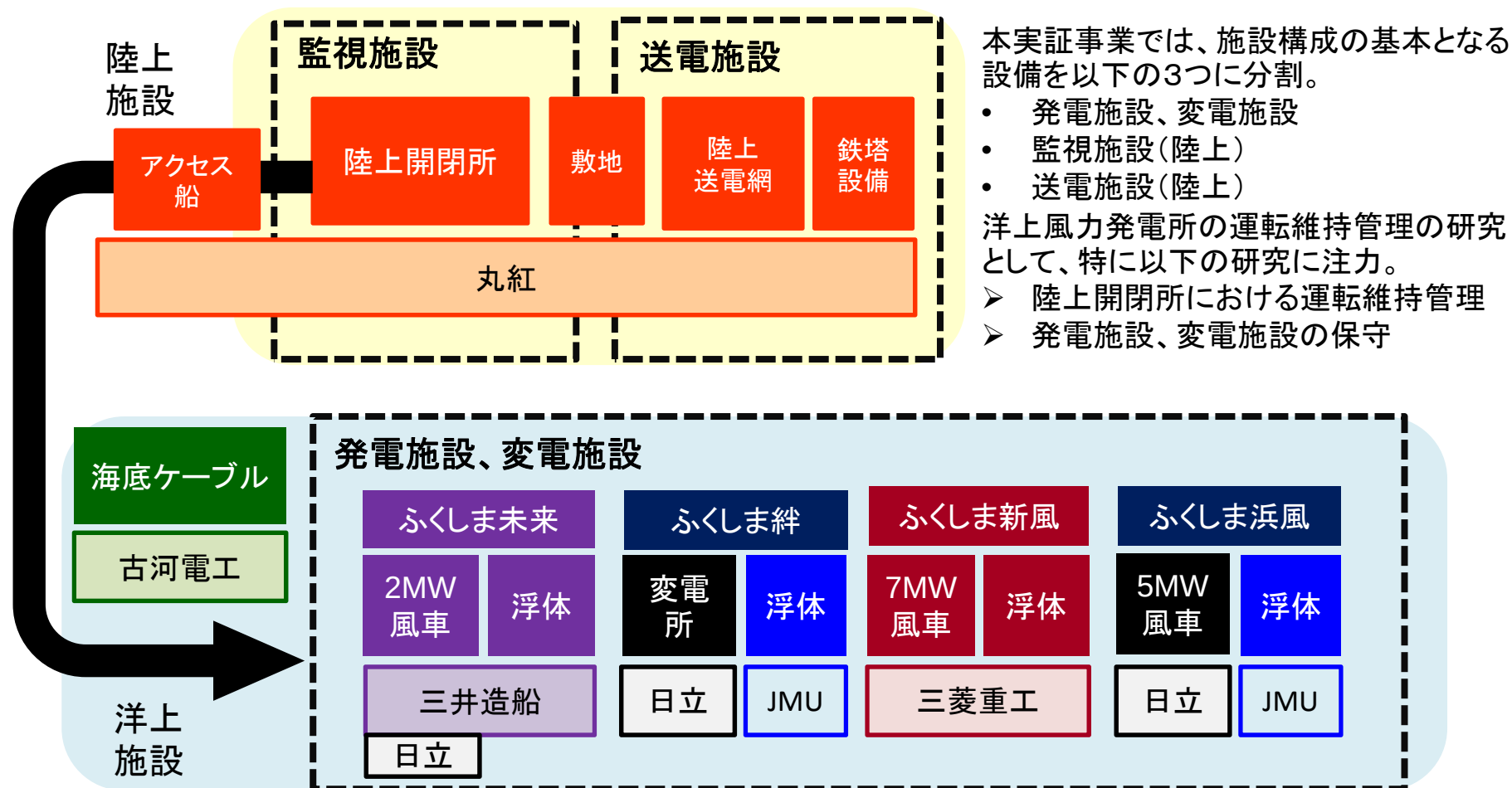


GCB開閉特性試験状況
基準値内で問題なし

閉入特性グラフ
3相共にズレなく投入。問題なし

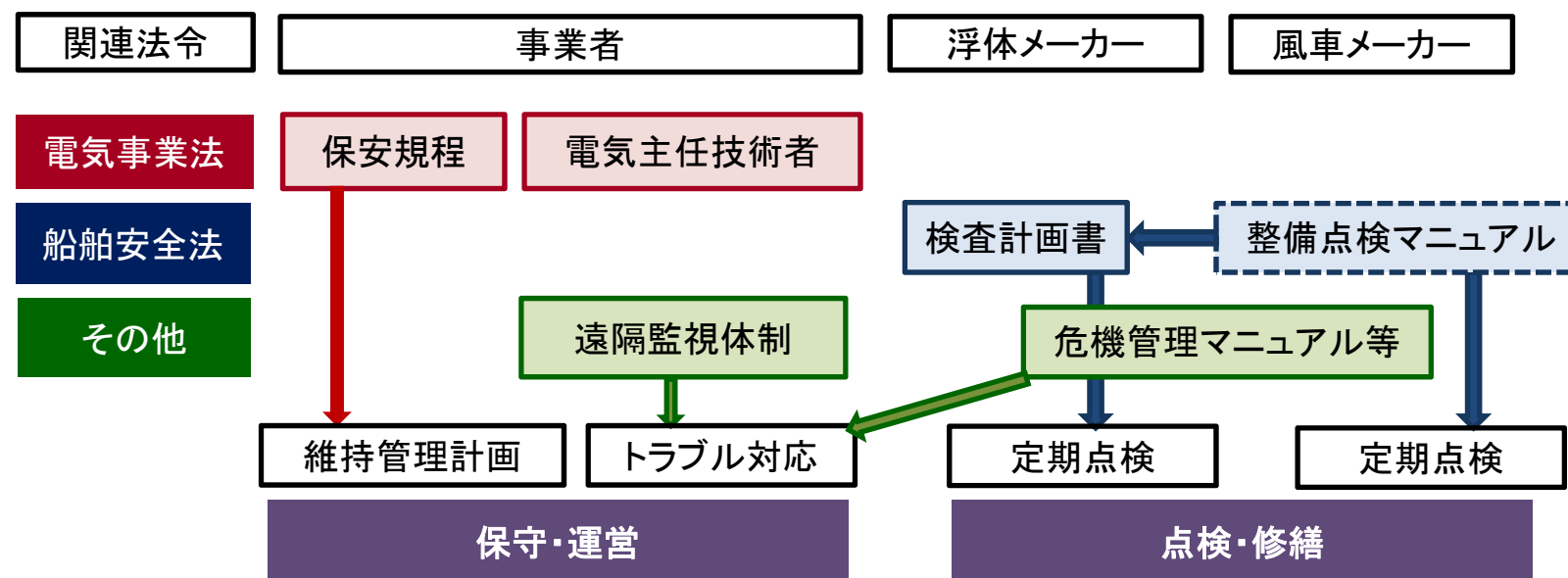
【洋上風力発電所の運転・維持管理】 実施体制

- 発電施設、変電施設の機器メンテナンスと研究を各メーカーが実施した。
- その他の陸上設備の保守と実証設備全体の管理を陸上開閉所にて実施した。



【洋上風力発電所の運転・維持管理】 実施要領

- 実証設備の運転・維持管理は、電気事業法と船舶安全法を満たすプログラムが必要。
- 事業者にて上記を満たす維持管理計画を策定、陸上開閉所にて保守運営とトラブル時の一次対応を実施した。



- ✓ 保安規程に則り維持管理計画を策定
- ✓ メーカーの危機管理マニュアル等を参考に、突発事故の対応マニュアルを策定

- ✓ 各メーカーが検査計画書を策定
- ✓ 各メーカーが定期点検及び故障対応を実施

【洋上風力発電所の運転・維持管理】保守運営の検討課題抽出

- 保守運営体制および手法について、洋上発電所特異の課題を抽出、対策を実施した。
- 浮体式洋上ウィンドファームの保守運営に係る骨子を作成した。

検討項目	検討内容	検討結果および実施内容
陸上監視施設における、保安要員の体制の検討	・ 航行船舶の安全を確保するため、現場海域の状況は、365日、24時間体制の交代制の監視体制が必要 ・ 班人員構成は、一班あたり、2名以上	・ ふくしま未来洋上風力発電所（洋上設備、及び陸上設備）施設は、陸上開閉所施設に設けられた監視室にて、5班体制・3交代による、24時間の監視を実施。
効率的な日常監視方法の確立	・ 日報、週報、月報、及び不具合発生時・速報報告書様式のフォーマット化 ・ 不具合発生事例のデータベース化 ・ 各設備（風車、浮体、変電設備、陸上付帯設備）アラームリストのデータベース化	・ 日報、週報、月報、及び不具合発生時の速報、報告書様式をフォーマット化、逐次関係者へ報告。 ・ 不具合発生時の一次対応および事例の整理 ・ 各設備アラームリストの整備
設備からの不具合発報時の遠隔自動通知システム構築	・ 風車、浮体、変電設備等の不具合発生時における不具合内容の自動通知。 ⇒ 発生した不具合内容を現場到着前に確認することにより、修理対応時間等を短縮。	・ 檜葉町に設置した陸上開閉所・監視室にて、24時間の有人監視を行うこととしたため、自動通知システムの構築は実施せず。 ・ 航路標識に関する遠隔監視装置の導入。
保守要員の洋上における緊急時対応能力の向上（危機管理能力の向上含む）	・ オフショア・サバイバルトレーニング受講（HUET: Helicopter Underwater Escape Training、洋上サバイバル訓練、初期消火訓練、避難要領訓練） ・ 高所からの脱出訓練受講 ・ 高電圧機器、取扱い教育の受講等	・ OPITO認証BOSIET(*)コースをOPITO認証訓練施設にて受講（OPITO: 作業者のサバイバルスキルを向上させる訓練や安全な作業方法の基準を設けるため英国の石油開発業界が設立した組織。基準の合理性が英国以外でも評価されている。） ・ マニュアル等による各設備ごとの取り扱い教育の受講

【洋上風力発電所の運転・維持管理】陸上開閉所とその管理体制

- 24時間監視体制を構築し、SCADA等による発電所の設備監視を実施した。
- 発電機稼働状況、系統稼働状況や浮体設備の稼働状況の常時監視を実施した。
- 保守運営の効率化には、洋上風力発電に即した法規制整備が求められる。

陸上開閉所

所長

常勤員 1名

電気主任技術者 1名(専任)

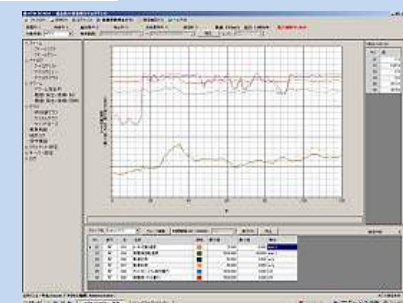
当直員(24時間監視) 5名(3交代制)



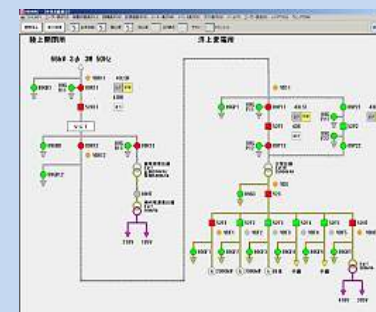
各種データモニタリング



監視カメラ映像



発電設備稼働状況(SCADA)



系統稼働状況

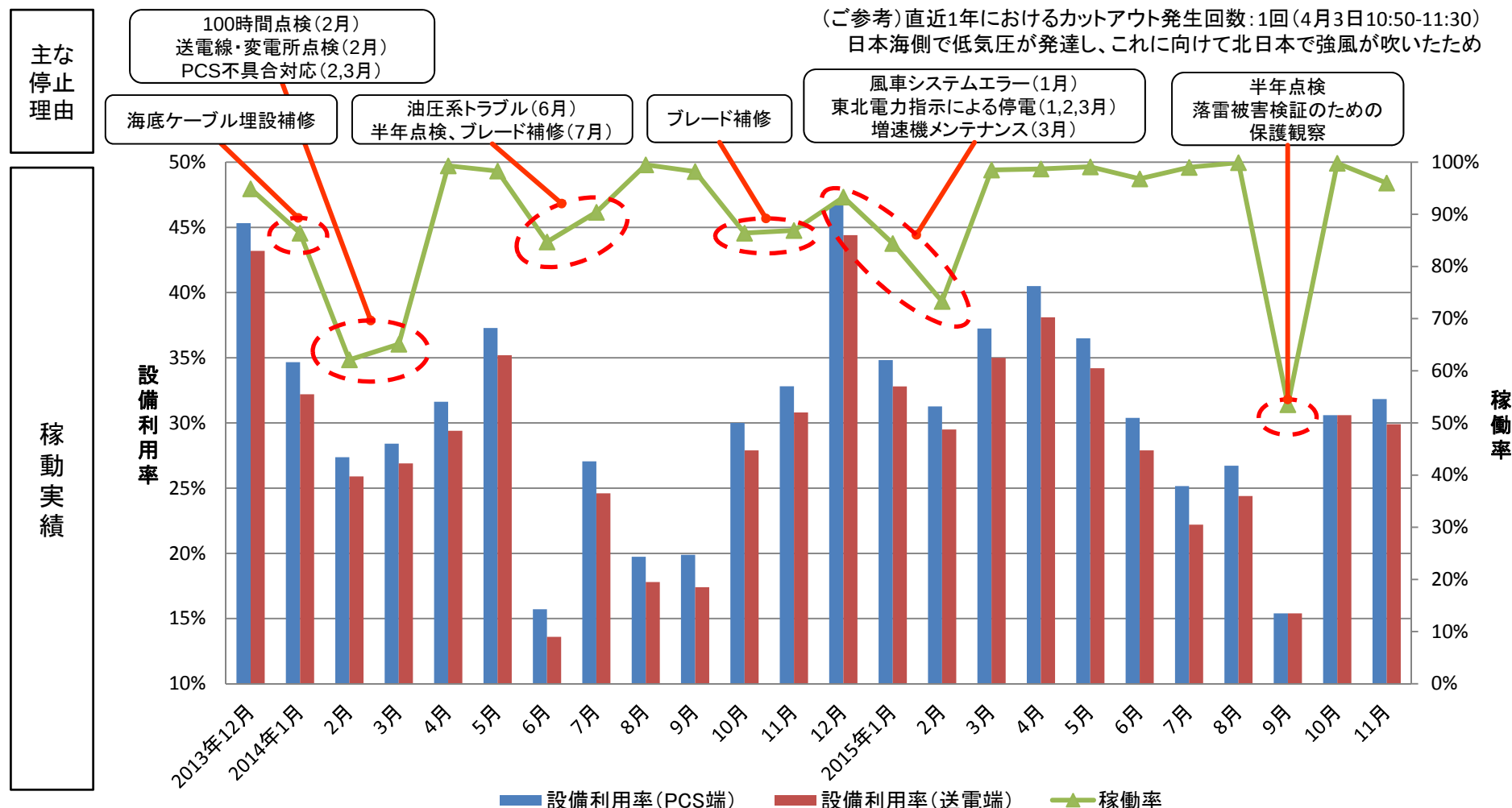


バラスト、航行安全設備稼働状況

- 電気事業法に則り、風力発電設備の点検を月に1回実施した。
- 実施可否が気象・海象に大きく影響され、計画通りに実施することが困難なため、洋上風力発電施設に則した技術基準、各種規定等のルール整備が必要。
- 遠隔監視の活用により、現地における巡視点検間隔を減らし、省力化を図ることが可能。
 - 監視カメラの適正配置、主要箇所への物体通過の検知が可能なセンサー、温度センサー、可燃性気体等の検知センサー等の増設など

【洋上風力発電所の運転・維持管理】稼働実績①

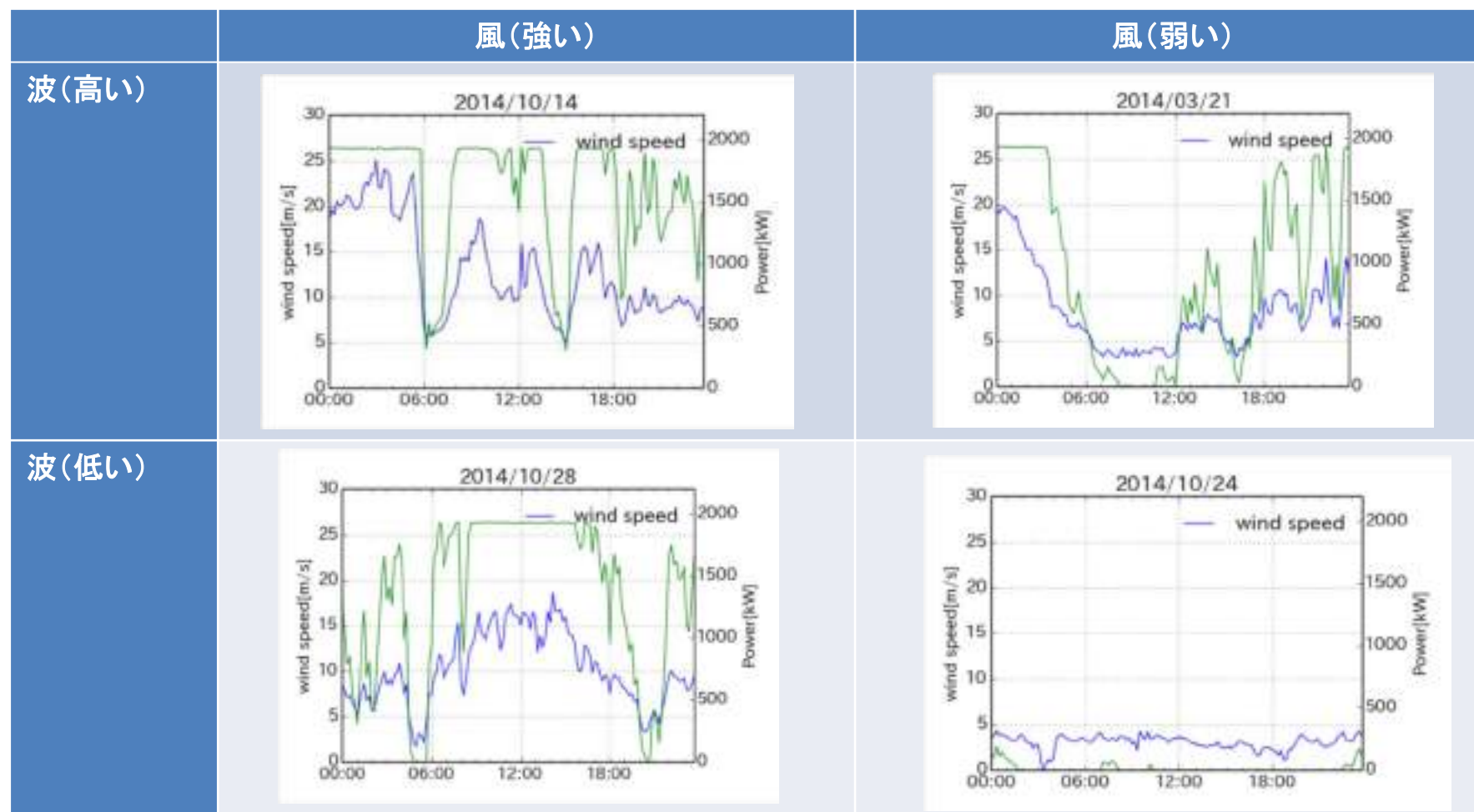
- 2MW風車の平均設備利用率はPCS端で30.7%（送電端で28.7%）。
- 2MW風車の平均設備稼働率は89.4%（東北電力指示による停電を除くと90.9%）。



※2015年9, 10月はPCS端発電量データ欠損のため送電端と同値を使用

【洋上風力発電所の運転・維持管理】稼動実績②

○ 風及び波の条件が異なる4つのケースにおいて、1日の風速と発電量を例示。



【洋上風力発電所の運転・維持管理】 アクセス船の選定

- 発電所の効率的運営の手段として、専用アクセス船の導入した。
- アクセス船の要件について整理し、効果的な船として双胴船を選定した。

■ アクセス船の必要性と要件の検討

発電所の稼働率を高めるためには、効率性・安全性・経済性を満たすアクセス船の導入が必要

効率性

- 風車の早期復旧のため、作業員を短期間で現場へ送ることが必要
- 船速が重要な要素

安全性

- 揺れが少なく船酔いしにくい
- 高波浪でも船の制御が可能
- 浮体接舷時に船体を強く押し付けられる推進力(船体機関馬力等)が必要

経済性

- 固定費(傭船料、燃費)の妥当性
- 発電所の規模や陸からの距離に応じた最適な船の選定が必要

■ 双胴船の導入

漁船、タグボート、単胴船、双胴船につき性能比較した結果、
双胴船が有用と判断

➤ オランダ製カタマラン船の導入を決定



アクセス方法

船首フェンダーを浮体側に押し付け船を安定させ、タイミングを見計らって浮体に移り移る(バンプアンドジャンプ法)

アクセス船『J-CAT ONE』の概要

船体	アルミ合金 Veka Shipbuilding B.V.建造
主要寸法	全長21.3m 幅7.0m 高さ3.23m
総トン数	54トン
機関	MTUディーゼル720kw2基、軽油6,000L
最大速力	27.2ノット(小名浜より約1.5時間)
定員	12名
停泊地	小名浜港
主要装備	レーダー, AIS, GPS, スピードログ, 電子海図, 国際VHF, 風向風速計, 他

【洋上風力発電所の運転・維持管理】 アクセス船運用の向上

- 安全性向上のため、アクセス船にアクセス補助装置を導入した。
- 浮体側にバッファータチューブ、フェンダーを設置し、アクセス船の運用に対応した。

■ アクセス補助装置の導入

浮体乗り移りの安全性、確実性を高めるために、アクセス補助装置を導入

- ✓ 補助装置が浮体側バッファータチューブを掴み、船と浮体を連結することで、船首部の船体動揺を軽減
- ✓ 作業員は補助装置の通路を渡って浮体に移乗
 - 作業員が浮体に移乗する際の安全性が向上



アクセス補助装置『MaXccess T18』

結果

- ✓ 船首部の重量増加により船の操縦性が低下
- ✓ 特に接舷操船の難易度が増したため、浮体側や船首船体部への損傷発生リスクが増加
- ✓ 油圧システムの故障
- 船の初期設計時点で補助装置についても考慮し、各設計要件を満足させることで、性能の最適化を図ることが可能



■ 浮体側の対応

- サブステーション側にバッファータチューブを設置
- アクセス船接舷時にサブステーションの梯子部にステムが接触し破損した事故の再発を防止するため、D型フェンダーを取り付け



バッファータチューブ



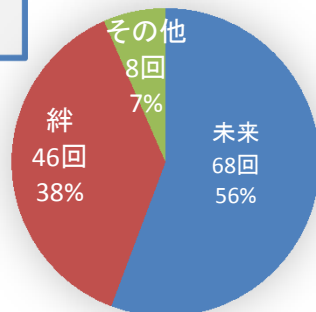
フェンダー

【洋上風力発電所の運転・維持管理】 アクセス船の利用実態の整理①

○2014年度のアクセス目的は、風車・浮体の点検、修繕が大半を占めた。
○2015年度はふくしま新風の新設により、試運転目的のアクセスが増えた。

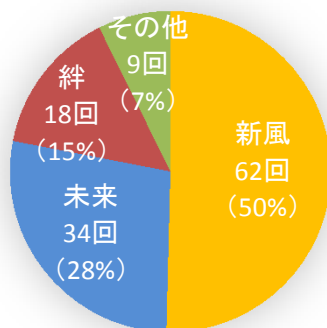
各浮体へのアクセス回数とシェア

2014年度実績
[4月～12月実績]



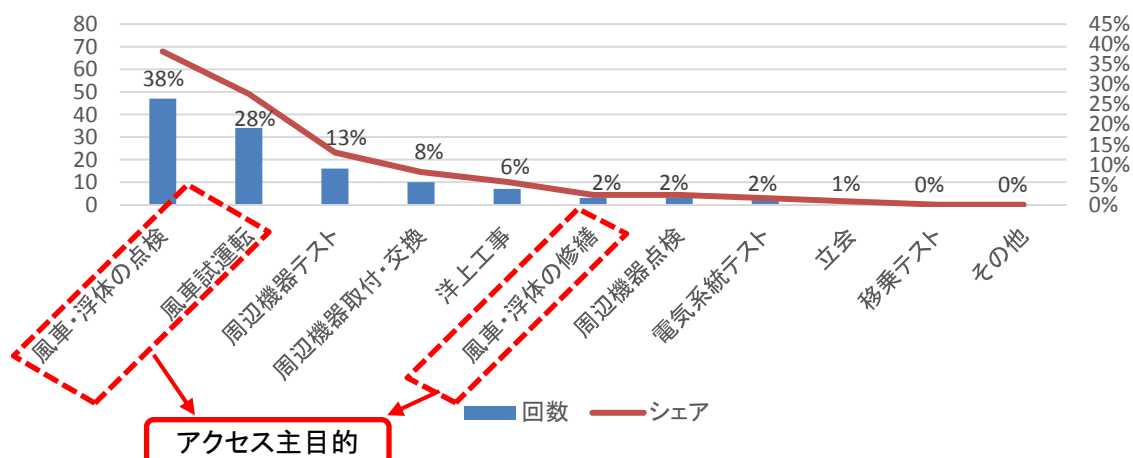
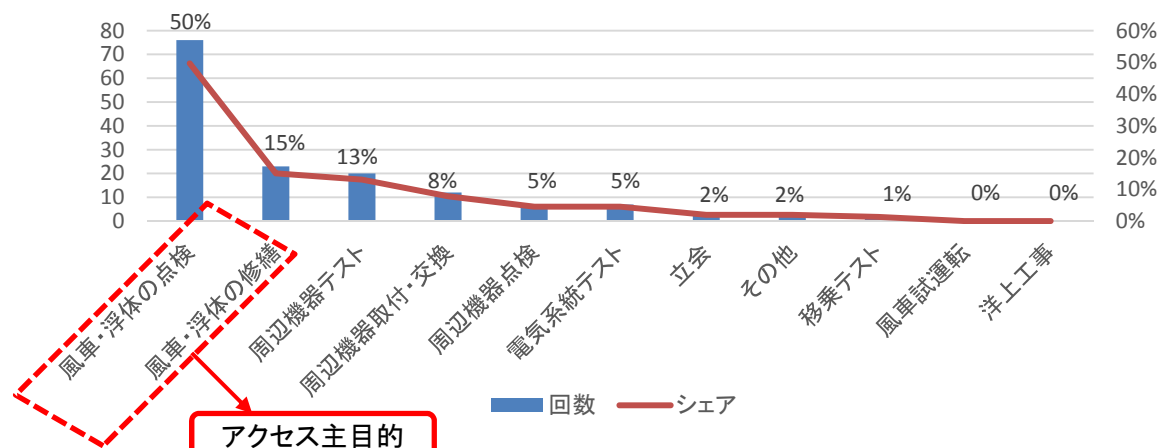
■未来 ■絆 ■その他

2015年度実績
[4月～12月実績]



■新風 ■未来 ■絆 ■その他

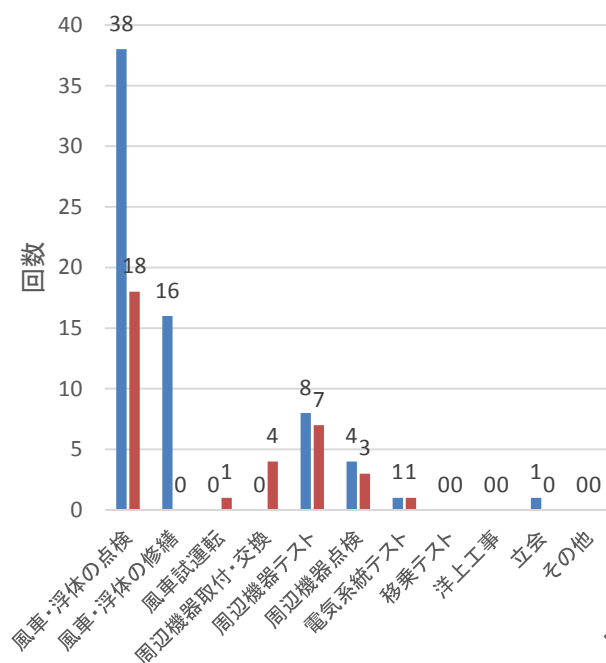
目的別利用実態



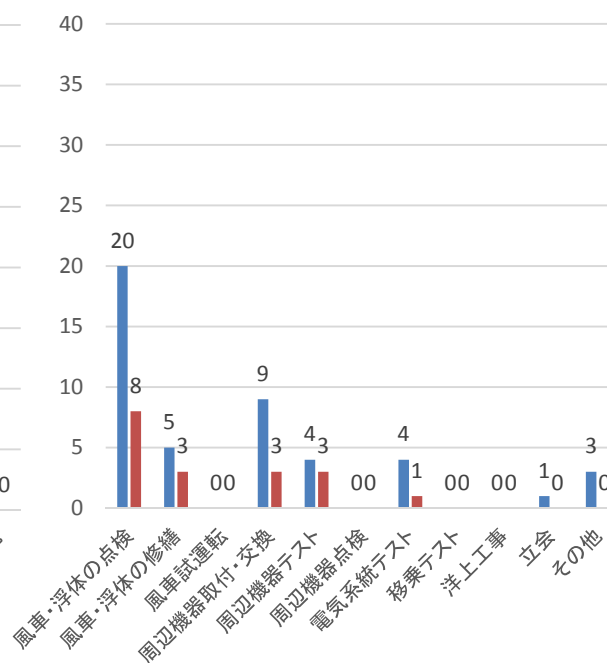
【洋上風力発電所の運転・維持管理】 アクセス船の利用実態の整理②

○未来と絆へのアクセス回数は、2015年度は各々14年度比50%以下と大幅に減少した。
○アクセス主目的であった点検、修繕共に大幅に減少していることが確認できた。

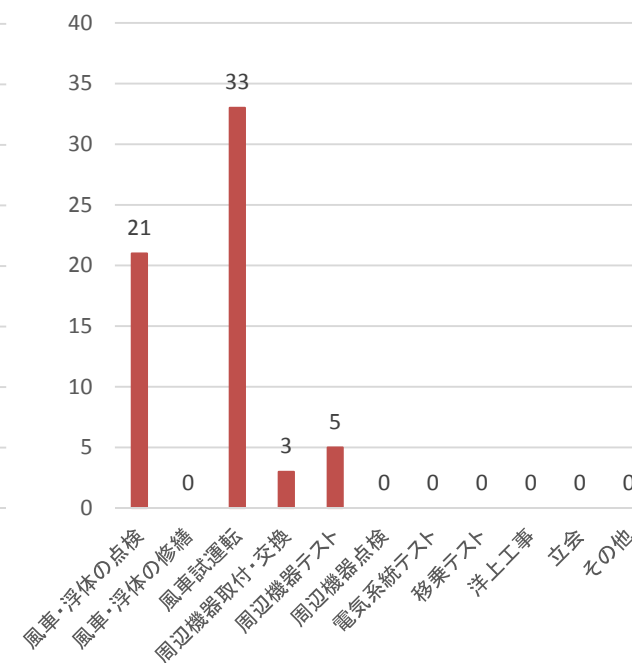
ふくしま未来目的別アクセス実績



ふくしま絆目的別アクセス実績



ふくしま新風目的別アクセス実績

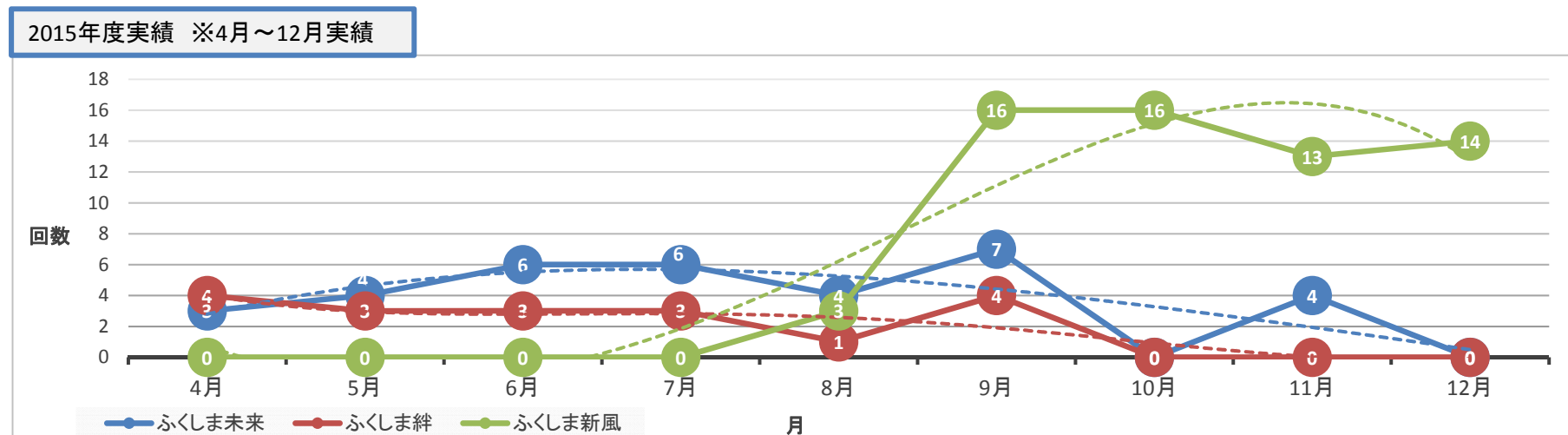
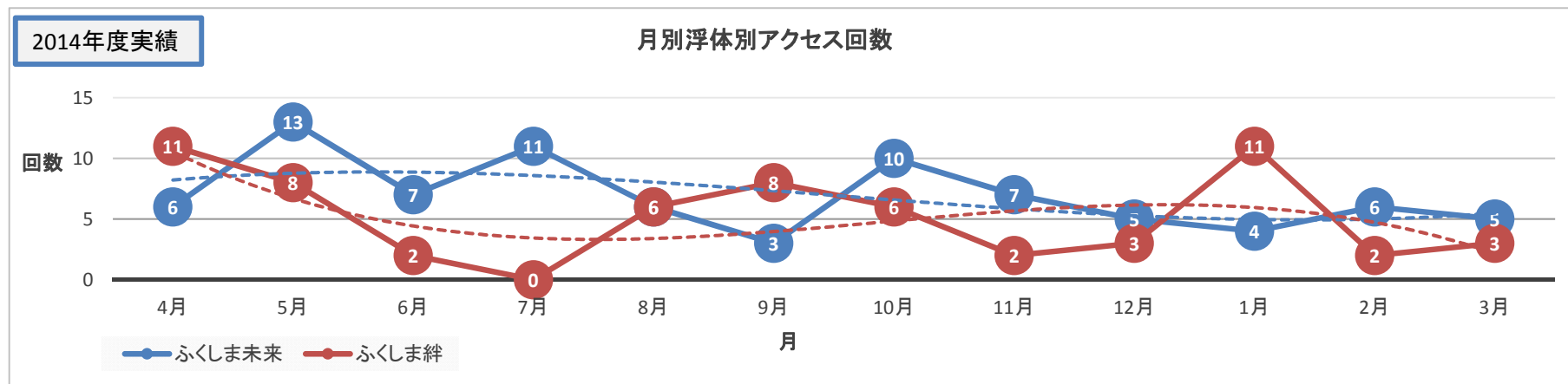


前年度比アクセス回数減少によりメンテナンス効率向上。
同期間の設備利用率(送電端)は26.8%から28.2%へ向上。

■ 2014(4月～12月) ■ 2015(4月～12月)

【洋上風力発電所の運転・維持管理】 アクセス船の利用実態の整理③

○14年度は春から冬にかけてアクセス数が少なくなる傾向が確認され、15年度も新風を除き同様の傾向が確認された。

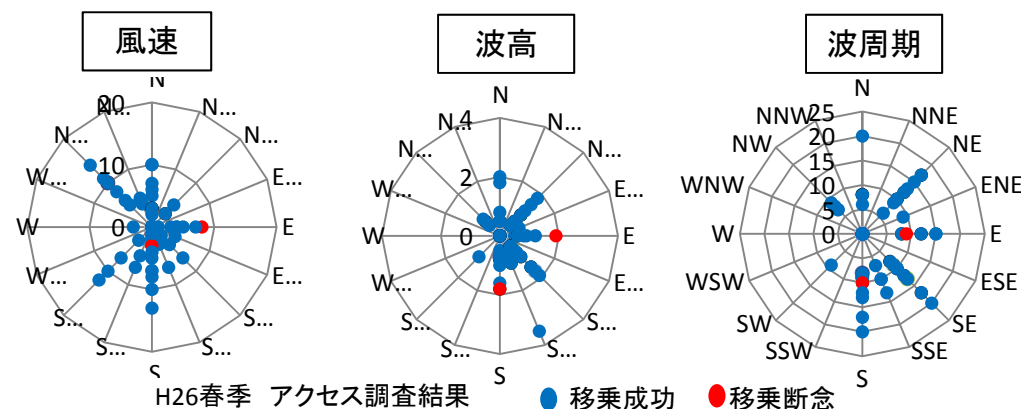


【洋上風力発電所の運転・維持管理】 アクセス性とアクセス船稼働率の検証一

- アクセス性と海象条件の関連性を検証した結果、波高が最も支配的影響をもたらした。
- 稼働する日を海象条件で選択することで、約8割の移乗成功率を達成した。

■ 気象海象とアクセス性の関連性検証

- ✓ 波高、風速、波周期の順にアクセスへの影響力が高い。
- ✓ 特に波高は支配的な影響力があり、有義波高が1.5mを超えるとアクセス成功確率が悪化する。
- ✓ 波周期は、長周期より短周期の方が船の動揺が大きくなる傾向があり、航行に悪影響を与える。しかしこの傾向は船のサイズや重量により変動すると思われる。



■ アクセス船稼働率と移乗成功率

- ✓ 15年度は14年度と比較し稼働率が大きく上昇したが、新設された風車1基の試運転調整に時間を要したためと推測。
- ✓ 海象の穏やかな日を選んでアクセスしているため、高確率(約8割)で移乗に成功している。

	最大通船 可能日(*) A	実稼働日数 B	実移乗成功日数 C	稼働率(%) D(B÷A)	移乗成功率(%) E(C÷B)
2014年度(12ヶ月): 風車1基	195	108	84	55	78
2015年度(9ヶ月間): 風車4-9月1基, 10-12月2基	134	103	81	77	79
2015年度(9ヶ月間)において7MW試運 転によるアクセス日数を控除した場合	134	70	-	52	-

移乗成功率は約8割

- 風車試運転作業により稼働率が上昇

風車試運転を除けば14年度水準の稼働率

* 最大通船可能日数とは1年の内悪天候や船の定期修理などにより物理的に出航できない日や船員を休ませる休航日を控除したもの。

■ 各浮体へのアクセス限界波高

- ✓ 接舷できる限界有義波高実績は、ふくしま未来1.8m、ふくしま絆1.2m、ふくしま新風1.5mと浮体により差があるが、概ね1.5mが目安。
- ✓ アクセス性の差異は浮体の緩衝柱(バッファチューブ)高さやチェーンや歩廊の配置などにより発生する。
- ✓ 風車が増設されアクセス頻度が増すと、海象条件の悪い日に稼働せざるを得ないケースが増え、アクセス移乗成功率が低下する可能性あり。

【洋上風力発電所の運転・維持管理】 アクセス船の課題

○船の運用効率化により、発電設備の稼働率を上げることができることを確認した。

■ 現状の分析結果

- ✓ 港から発電所までの距離が遠く、時間と費用を浪費している。改善には最寄港のインフラ整備が必要
- ✓ 浮体とアクセス船の接合面最適化を設計段階から考慮せねばならない
- ✓ 有義波高1.5m超におけるアクセス成功率の向上が設備稼働率向上に寄与する



定係港	距離 (km)	往復所要時間 (分)	洋上作業可能時間/日	燃油使用料 /日 (ℓ)
小名浜港	59	180	8時間	1000
久ノ浜港	28	105	9時間15分	450

福島沖の有義波高と有義波周期の出現頻度(2014/10～2015/9)

波高階級	周期階級														出現度数	出現率(%)
	0～3	3～4	4～5	5～6	6～7	7～8	8～9	9～10	10～11	11～12	12～13	13～14	14～15	15～		
6.50～															0	0.
6.00～6.50												1			1	0.
5.50～6.00								1		1	1	2		1	6	0.
5.00～5.50								1	4	3	3	7	5	2	25	0.
4.50～5.00								1	8	8	7	13	7	2	46	0.
4.00～4.50							1	23	24	3	13	24	4	12	104	0.
3.50～4.00							10	67	56	40	33	36	5	4	251	1.
3.00～3.50						6	35	127	137	82	44	34	3	4	472	2.
2.50～3.00						41	171	324	227	66	30	9	1		869	5.
2.00～2.50				3	47	218	478	385	205	125	36	2			1499	8.
1.75～2.00				6	99	279	404	301	145	60	8				1302	7.
1.50～1.75			1	36	267	587	567	402	249	44	9	1			2163	12.
1.25～1.50			13	121	433	853	642	548	231	59	5	1			2906	16.
1.00～1.25			40	258	528	1156	993	459	73	8				2	3517	20.
0.75～1.00			92	232	571	909	988	358	37	1		2			3190	18.
0.50～0.75			36	92	203	344	233	73	10						991	5.
0.25～0.50				6	13	16	7	2							44	0.
～0.25													1	2	3	0.
出現度数	0	0	182	754	2161	4409	4529	3072	1406	500	189	132	26	29	17389	
出現率(%)	0.0	0.0	1.0	4.3	12.4	25.4	26.0	17.7	8.1	2.9	1.1	0.8	0.1	0.2		

福島沖で有義波高1.5mを超えない確率は約61%程度、2.0mを超えない確率は81%程度である。

2.0m程度まで安定してアクセス可能となればアクセス成功率が向上し、設備稼働率に好影響を与えることができる。

61.3%

81.2%

【洋上風力発電所の運転・維持管理】 リスクの回避手法

○洋上風力発電の潜在リスクの回避手法として保険について調査を実施した。

■ 本実証における取組み

潜在リスク	解決手段	課題	対応実績	成果
- 海底送電ケーブルの破損 - タワーやモノパイルなど支持構造や基礎構造の欠陥や破損 - ギアボックスの故障 - 落雷や乱流などによるブレード破損 	保険の調達により事業リスクを軽減 	- 引き受けできる国内損保会社が限定的 - 保険料は欧州再保険マーケットに大きく依存 - 欧州では津波、台風など日本固有リスクに慎重 - 浮体式発電所は絶対数が少なく、保険会社にとってもリスクコストを乗せざるをえない	- 保険会社に安全対策や運転状況データ開示 - 欧州の再保険引き受け会社に現場説明会によるポジティブキャンペーン実施 - 欧州最大の再保険マーケットLloydsの保険会社に事業プレゼンテーション実施	- 正式見積りオファーの受領 - 保険料の漸減 - 日本の洋上風力マーケットへの興味を引出し、事業化段階を含め積極的に対話できる信頼関係を構築

洋上風力発電の事故リスク

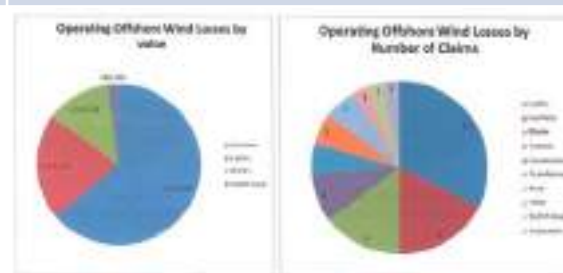
建設中の事故リスク



事故別保険金請求額

事故別発生件数

稼働中の事故リスク



事故別保険金請求額

事故別発生件数

リスクステージ	特徴
建設中	✓ ケーブル事故が件数、金額ともに突出 ✓ 金額で65%、件数で45%を占める
稼働中	✓ 金額ではギアボックスが65%、ケーブルが25%、残り10%がブレード、他 ✓ 件数ではケーブル30%、ギアボックス20%、ブレード18%であり、全体の約70%を占める

【洋上風力発電所の運転・維持管理】 保険調達

- 保険を調達できることを確認した。
- 保険料率は欧州着床式の事例と比較し高水準であるが、低減の可能性を立証できた。

保険内容	付保可能対象設備	財産保険 (Property Damage)	台風特約 (Typhoon)	電氣的・機械的事故特約 (Machinery breakdown)	試運転中の拡張担保 (Testing & Commissioning)	第三者賠償責任保険 (Third Party Liability)
	ふくしま未来(2MW風車)	○	○	○	○	○
	ふくしま絆(変電所)	○	○	—	○	○
	海底ケーブル ライザーケーブル	○	○	—	○	○
	ふくしま新風(7MW風車)	○	○	○	○	○

免責	財産保険	地震・津波	磨耗、経年劣化、 潜在瑕疵	設計上の不良	犯罪行為	戦争・テロ	他
	第三者賠償責任保険	労働災害補償	雇用者責任	契約上の責任	製造物責任	従業員給付	他

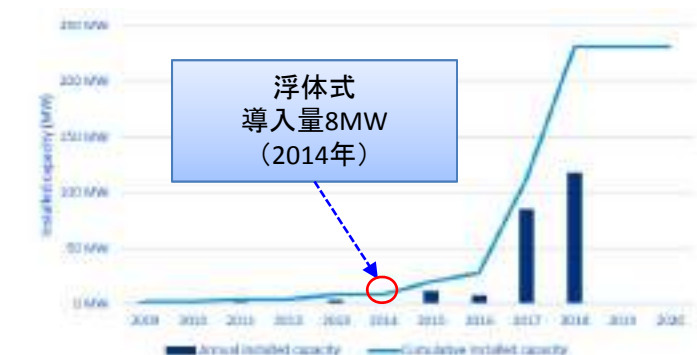
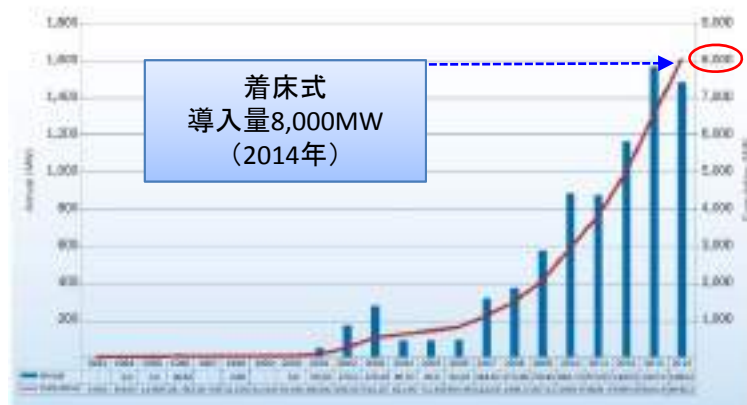
保険料率		平成25年度	平成26年度	平成27年度	【参考】欧州着床式 大規模商業案件
	2MW風車、変電所、海底ケーブル、 ライザーケーブル	0.99%	0.88%	0.82%	0.1%～0.5%
	7MW風車、ライザーケーブル	非該当	非該当	1.04%	

免責額	てん補限度額 に対して	2MW風車	1.70%	【参考】欧州着床式 大規模商業案件
		変電所	1.90%	
		ケーブル	4.02%	
		7MW風車	1.73%	1.0%～2.0%
		合計	2.08%	

【洋上風力発電所の運転・維持管理】 保険料の評価と今後の見通し

○現在の浮体式は、着床式の黎明期と同様であり、今後「規模」と「時間」の実績を積み上げていくことで、料率は着床式レベルまで下がっていくと予想される。

着床式と浮体式の導入量比較



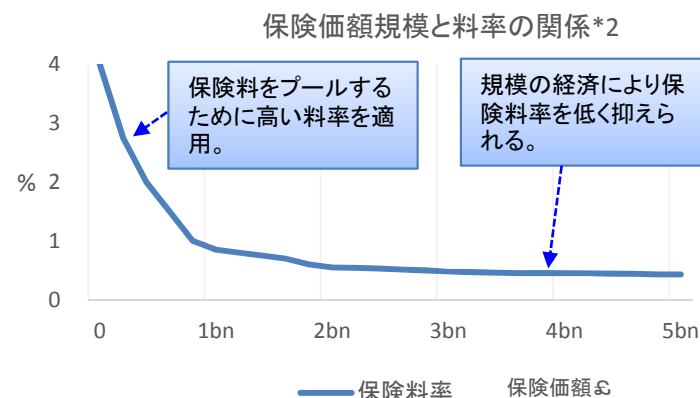
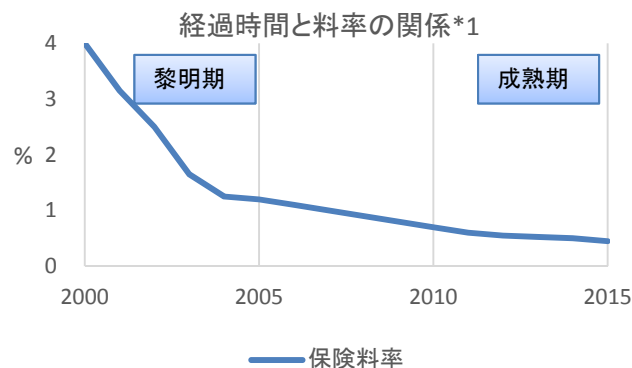
N.B. Only includes more advanced projects. Pipeline beyond 2018 is larger, but will be dependent on the success of these early demonstrations, as well as political factors.

世界における浮体式洋上風力発電導入量推移と今後の見通し

(出典) Carbon Trust Floating Offshore Wind Market and Technology Review

(出典) EWEA 「The European offshore wind industry-key trends and statistics2014」

欧州における保険料率の変遷

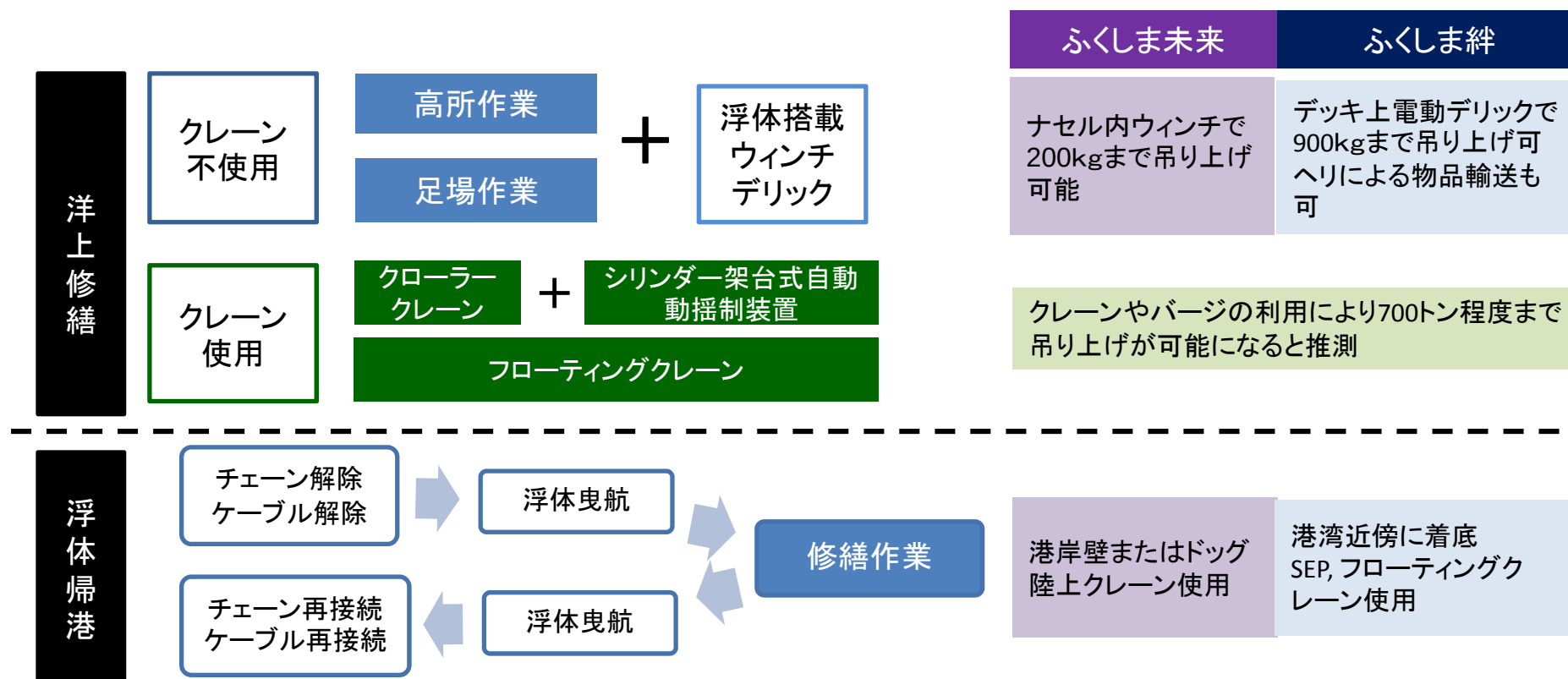


浮体式も導入規模の拡大と時間の経過により料率は漸減していく可能性が高い。

*1,*2 保険ブローカーAon社の資料より日本語で再構成。

【洋上風力発電所の運転・維持管理】 修繕プロセスの検討

○洋上での修繕が可能な場合と不可能な場合において各々の修繕プロセスを検討した。



6. 環境影響と航行安全性の評価及び漁業等の共存

1. 環境影響評価
2. 航行安全性の評価
3. 漁業との共存

【環境影響評価】 環境アセスの手続き①

○アセスの進め方について関係機関と協議し、2事業に区分した上で各々実施した。
○2事業のアセスを並行することで、効率的に手続きを実施した。

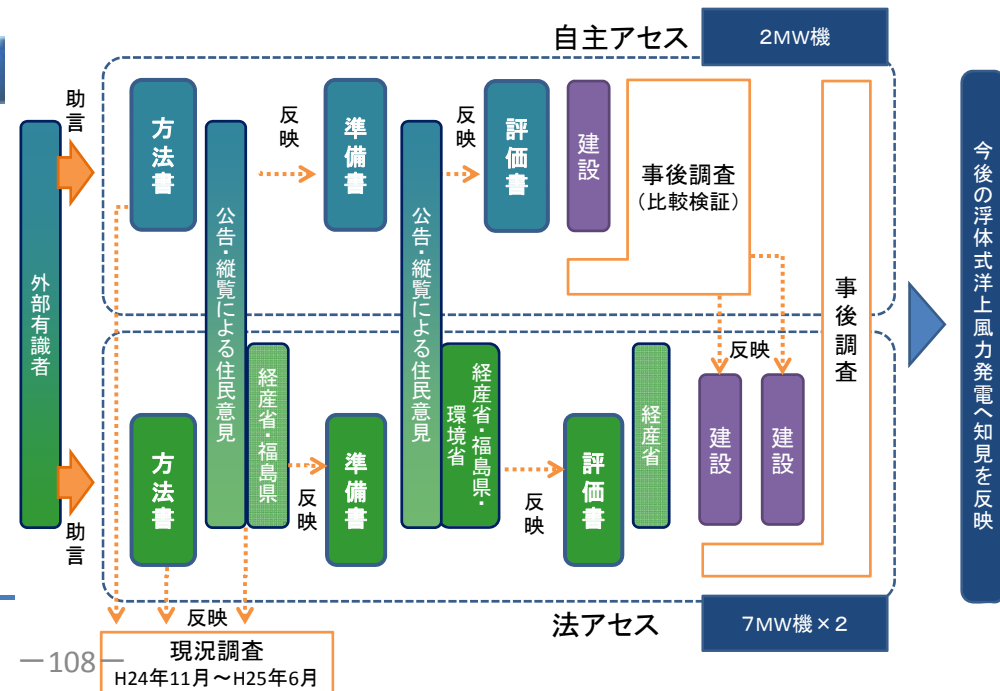
与条件の整理 : アセス上の事業区分

- ・経済産業省、環境省、福島県との協議の結果、2事業に区分、それぞれの事業でアセス手続きを進めることとした。
- ・2事業に区分した理由は、①対象事業の目的、②予算措置が異なるため、の2点である。
- ・2MW基等の事業は、法の対象外だが、浮体式洋上風力発電は国内で例がなく、環境影響も不明であるため、同法に準じた自主アセスを実施することとした。

事業名称	浮体式洋上風力発電機設置実証事業	浮体式洋上超大型風力発電機設置実証事業
設備概要	2,000kW風力発電機1基 浮体式洋上変電所1基 海底ケーブル1式	7,000kW風力発電機2基 (当時)
総発電量	2,000kW	14,000kW
建設予定	平成25年度	平成26年度
環境影響評価法	対象外(自主アセス)	法の対象事業

与条件の整理 : 2事業の環境影響評価の進め方

- ・アセスのための現況調査は、両事業を含むよう実施することや外部有識者からの意見などを取り込み適切に進めていくフローとした。
- ・浮体式洋上風力発電は国内初事例であることから、事後調査を実施することで環境影響の程度の把握に努め、適宜フィードバックするものとした。
- ・先行する自主アセス事業の事後調査の結果を用いて法アセス事業の予測評価に反映(例:工事中の水中音予測)
- ・アセス手続き迅速化のため、現地調査を前倒し(方法書手続きと併行して実施)するなど工夫。



【環境影響評価】 環境アセスの手続き②

○評価書までの手続きを、自主アセス：平成25年12月に、法アセス：平成26年5月に終了
○方法書手続きと併行して現地調査を実施するなどし、手続き期間の短縮をはかった。

アセス手続の短縮化のための工夫点

短縮化のための方策	短縮化のための方策をとった際のリスク	工夫点、解決策等
方法書手続と併行した現地調査の実施	調査方法に関し、審査の過程で追加的な意見が出た場合、手戻りとなる可能性がある。	・国内外の既存の洋上風力等の資料を参照し、手厚めの調査を実施したことで、手戻りリスクが低減できた。 ・外部有識者からの意見を反映したことや、自主アセスにおいて開催した委員会での意見を適宜取り込むことで、リスクが低減できた。 例：海産哺乳類の定点観測調査など ・審査等で委員から追加調査を求める意見が出された際には、すぐに現地調査を実施することで、意見へ対応できるよう工夫した。また、事前質問等を行い、そのような意見の吸い上げを行い対応した。 例：浮魚に係る調査など
各手続での審査期間の短縮	事業者リスクとくになし (行政の事務手続き期間を短縮するため)	・審査機関(経産省、環境省、福島県)が短縮化に協力してくれるよう依頼・協議し、全面的に協力頂けたため、大幅な短縮につながった。

アセス手続きの経過概要

各アセス図書はコンソーシアムHPに掲載し公表中。
<http://www.fukushima-forward.jp/reference/index.html>

◇自主アセス

方法書 縦覧 : 平成25年2月5日～3月4日
準備書 縦覧 : 平成25年8月23日～9月24日
評価書 縦覧 : 平成25年11月11日～12月12日

◇法アセス

・各手続きでの経過は以下のとおり。

手続き		日時
方法書	届出・送付	平成25年 1月22日
	公告・縦覧	平成25年2月5日～3月4日
	経済産業大臣勧告	平成25年 6月25日
準備書	届出・送付	平成25年 9月 6日
	公告・縦覧	平成25年9月6日～10月7日
評価書	経済産業大臣勧告	平成25年12月20日
	届出	平成26年 3月17日
	確定通知受理、評価書送付	平成26年 3月27日
	公告・縦覧	平成26年4月8日～5月9日

【環境影響評価】 調査項目及び予測手法

○浮体式に係る初の影響予測であることから、着床式での事例や有識者のコメント、発電所アセス省令等を踏まえ、調査項目や方法、予測項目等を選定した。

調査・予測項目の整理

調査項目	予測項目	予測手法
水中騒音 (定量的予測)	工事中と風車稼働時の水中音	工事中:2MW工事中の測定結果より予測 稼働時:着床式の事例を参照し予測
水質 (定性的予測)	工事中の水の濁り	海底の底質の状況踏まえ影響を定性的に予測
底質 (定性的予測)	工事中の底質環境 (ケーブル陸揚げ付近対象)	底土の状況踏まえ影響を定性的に予測
漁業無線 (定性的予測)	風車建設後の漁業無線への障害等の有無	現況の電波状況を踏まえ影響を定性的に予測
動物 (定性的/定量的)	工事中と風車稼働後の海鳥、海産哺乳類、魚類、プランクトン等	海鳥の衝突リスクは定量的に予測 その他は着床式の事例や各種の生態的特性を踏まえ定性的に予測
植物 (定性的予測)	工事中と風車稼働後のプランクトン、海藻草類等	工事内容や水質の予測結果を踏まえ定性的に予測
景観 (定性的/定量的)	風車建設後の景観	フォトモンタージュを作成し定量的、定性的に影響を予測
産業廃棄物 (定量的予測)	工事により排出される廃棄物の量	各廃棄物の量から影響を予測

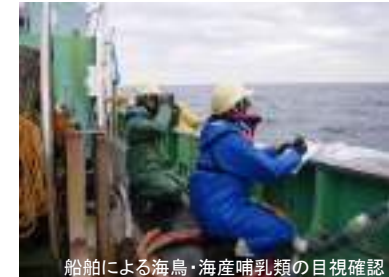
※1 各項目の詳細な内容については、コンソHPにて公表中のアセス図書を参照。

※2 自主アセスと法アセスでは、その対象事業の違いから、調査項目にも一部違いがあるが、ここでは一括して示した。

※3 調査項目の選定には、国内の着床式洋上風力での事例やアセス法での標準項目を参照した。



水中音の測定状況



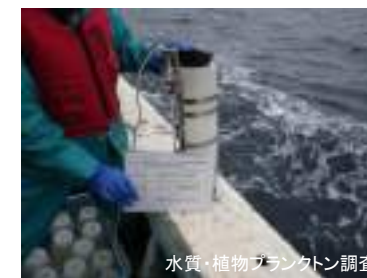
船舶による海鳥・海産哺乳類の目視確認



航空機による海鳥・海産哺乳類調査



底引き網漁による魚類調査



水質・植物プランクトン調査



海藻草類調査

【環境影響評価】 現地調査の結果及び予測・評価

○国内初の事例ということから、特に重要と考えられる項目について事後調査を行い、影響が顕著であれば措置を講じるステップとした。

予測・評価結果と、事後調査項目の選定

- ・予測の結果、各項目において、事業による影響は小さいと予測されたものの、浮体式において環境影響を明らかにした文献等はなく、項目によっては、不明点も残る結果となった。
- ・有識者へのヒアリングや自主的に開催した専門家による委員会等でのコメント、アセスの審査（国、県）での指摘などを勘案し、事後調査を実施する項目を選定した。
- ・その結果、右表のとおり、**水中騒音、漁業無線、海鳥、海産哺乳類、魚類**について事後調査を実施することとなった。



自主アセスで開催した委員会（海鳥及び海生生物等の保全検討委員会）の現地視察の状況

項目 / 小項目	予測・評価結果の概要
水中騒音	・予測の結果、水中音による魚類等へ及ぼす影響は小さいものと考えられた。 ・ただし、浮体式洋上風力発電での測定例はないため、実証事業において工事中と稼働時の水中音の事後調査を実施し、その実態を明らかにする。
漁業無線	・周辺海域において受信レベルも安定していることから、影響は小さいと考えられた。 ・国内の着床式での既往事例でも影響不明であると指摘されておることも踏まえ、事後調査を実施し、影響の有無を確認する。
動物 / 海鳥	・予測の結果、衝突リスクについては、コアホウドリで0.0016羽/年となりリスクは小さいものと考えられるなど、重要な鳥類への影響は小さいと考えられた。 ・ただし、浮体設置後の鳥類の飛翔状況や衝突の実態については不明であることから事後調査を実施し、生息状況を確認する。
動物 / 魚類	・水中音の予測結果から、周辺への影響はわずかであると考えられたこと、既往知見では着床式洋上風力発電由来の騒音は魚類の聴覚能力に対してはほとんど影響を及ぼさないこととされることから、影響は小さいと考えられた。 ・ただし、浮体式洋上風力に関しては知見がないことから事後調査を実施し、生息状況を確認する。
動物 / 海産哺乳類	・水中音の予測結果から、周辺への影響はわずかであると考えられたこと、着床式の既往知見では風力発電機のごく近傍のみで影響があるとされることから、影響は小さいと考えられた。 ・ただし、浮体式洋上風力に関しては知見がないこと、沖合の地点における海産哺乳類の動向は不明点も多いことから、事後調査を実施し、生息状況を確認する。

【環境影響評価】 事後調査の内容及び現時点での結果①

- 水中騒音（工事中、2MW稼働時）、漁業無線に係る事後調査を実施。
- 現時点では顕著な影響は認められていない（漁業無線はほとんど影響がないことが明らかに）。

項目	調査内容	これまでの結果概要・事前の予測との比較・工夫点など	現時点の評価
水中騒音	◇工事中の水中音 対象 2MW浮体工事中と7MW浮体工事中 方法 作業船近傍での水中音を測定	・7MW浮体工事では、チェーンが船体等に当たることによる衝撃性の音は、作業船から約150mの範囲で魚が音源から遠ざかる反応を示すレベルとなると予測された。 ・2MW工事の際は、実測の結果、上記レベルの範囲は約450mと予測された。	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ものと推測される。
	◇2MW稼働時の水中音 対象 2MW機 方法 風車を強制的にON/OFFし、稼働時の状況を把握	・稼働により、水中音のレベル変化が認められた。 ・稼働時の周波数特性としては、10～125Hzで音圧上昇が大きい。 ・出力が500～600kW程度のときは、風車直近でも130dB以下（魚が音源から遠ざかる反応を示すレベル以下）であり、魚類への影響はほとんどないものと考えられる。	
漁業無線	◇無線の受信レベル確認 対象 2MW機、SSの周辺海域 方法 浮体周辺の電波受信レベルを測定	・施工前、施工後で電波受信レベルは同様であった。 ・構造物の陰による受信レベルの低下は認められなかった。	漁業無線への影響はほとんどない。



左：係留アンカー・チェーン敷設作業船
右：2MW浮体に設置した水中音測定機器

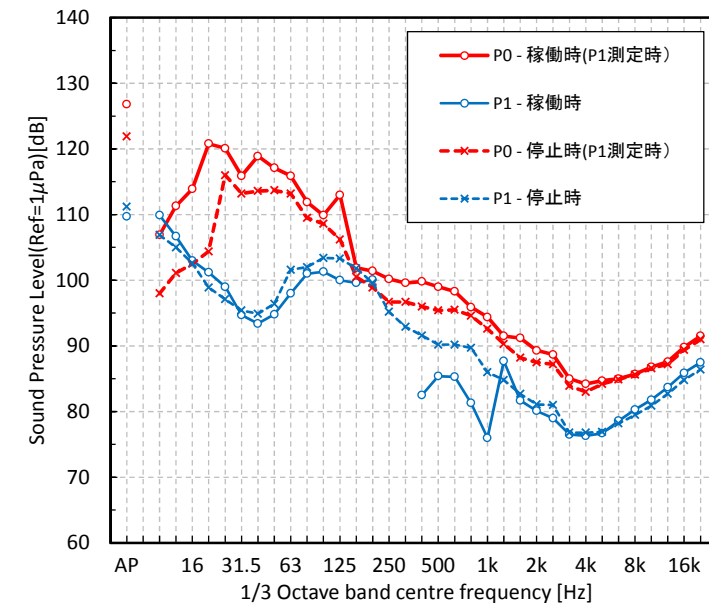
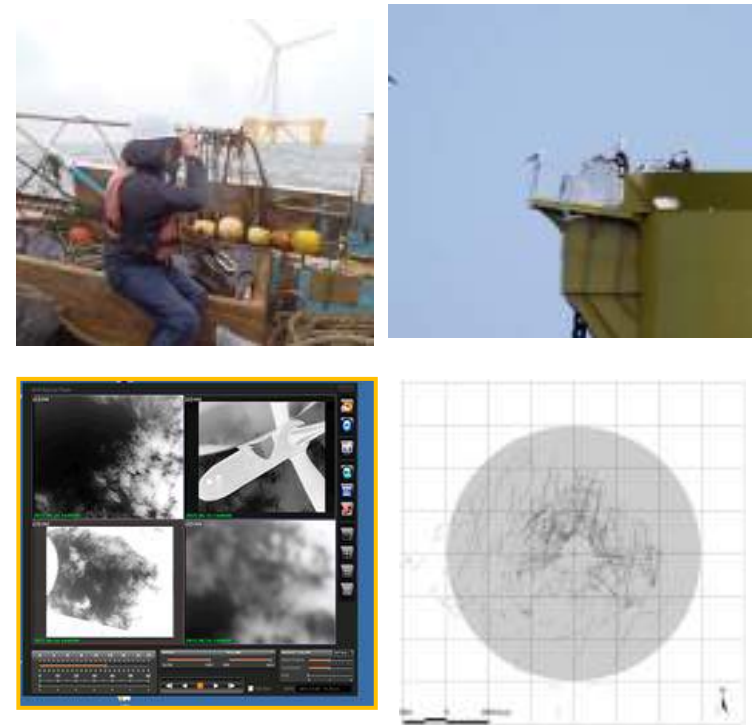


図 2MW稼働時の周波数特性。 P0は風車浮体、P1は200m離れた場所で測定。稼働時にみられる16Hzから100Hzの音圧は距離が離れると大きく減衰している。

【環境影響評価】 事後調査の内容及び現時点での結果②

○海鳥に係る事後調査（目視による生息状況調査、赤外線カメラによる衝突監視、レーダによる飛翔軌跡調査）を実施。
○現時点では顕著な影響は認められていない。

項目	調査内容	これまでの結果概要・事前の予測との比較・工夫点など	現時点の評価
海鳥	◇目視による生息状況調査 対象 周辺海域 期間 平成26年4月～ 方法 船舶からの目視による調査を実施し、種名と個体数等を把握	- 概ね予測内容と整合しており、重要な鳥類への影響は小さいものと考える。 - 特例として、ハヤブサについては浮体を生息場（餌狩り場）として利用している状況を確認。	予測のとおりに、重要な鳥類への影響は小さい。
	◇ブレードへの接近・接触に係る監視 対象 2MW機 期間 平成26年4月～ 方法 赤外線ビデオカメラによる確認	- 現在までのところ、観測できたバードストライクの事例は3例（小鳥類1例、カモメ類2例）。 - 小鳥類は夜間に、カモメ類は昼間に観測。 - ブレード回転域内（ビデオ図画内）の鳥類の自動判別が可能なシステムを構築。全動画を目視で確認した。	
	◇設置後の海鳥の飛翔軌跡調査 対象 周辺海域（レーダはSSIに設置） 期間 平成26年2月～ 方法 船舶レーダを用い、飛翔軌跡を記録・解析	- 時間帯別の鳥類の飛翔頻度の傾向は明瞭ではないものの、午前中が若干多い傾向に。 - 夜間の渡り（春季）についても認められたことから、渡り鳥が本海域を飛翔している可能性がある。 2MW風車付近で急に進路を変えるような軌跡は認められていないことから、風車や浮体を認識し進路を変更している可能性がある。	

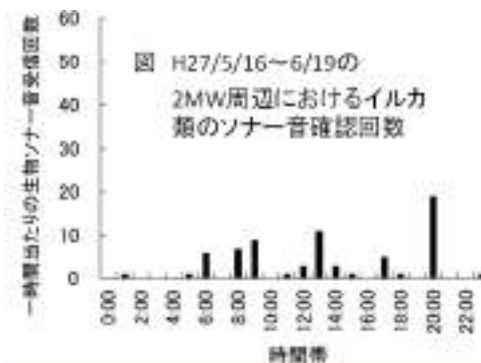


上左：目視による海鳥調査の状況
 上右：2MW浮体を休息場所に利用するカモメ類
 下左：赤外線ビデオカメラによる監視状況
 下右：レーダによる飛翔軌跡の例

【環境影響評価】 事後調査の内容及び現時点での結果③

○魚類(底魚調査、浮魚類定点観察調査)、海産哺乳類(定点音響調査)に係る事後調査を実施。
○現時点では顕著な影響は認められていない。

項目	調査内容	これまでの結果概要・事前の予測との比較・工夫点など	現時点の評価
魚類	◇底魚調査 対象 周辺海域 期間 平成26年4月～ 方法 底引き網漁法により漁獲調査を実施	・カナガシラ、マダラ、ヤナギムシガレイ等が主な漁業生物として確認。事前調査と同様の傾向。 ・事前と事後で、四季を通じて、種類数、平均出現個体数等に顕著な違いは認められないことから、事業実施による底魚への影響は小さいものと考えられる。	予測のとおり、魚類への影響は小さい。
	◇浮魚類定点観察調査 対象 2MW機、SS、対照点 期間 平成26年6月～ 方法 水中カメラによる定点でのインターバル撮影で、撮影された魚類の種類等を解析	・魚類出現比率(出現合計枚数/撮影画像枚数×100)は対照点よりも各浮体で高く、魚礁効果が認められる。 ・浮体の表面には付着生物も多数みられ、今後、魚礁としての機能は高まるものと考えられる。	
海産哺乳類	◇定点音響調査・目視確認調査 対象 2MW機、SS、対照点 期間 平成26年6月～ 方法 A-tag(音響データロガー)を浮体等に設置し、イルカ類の生息状況を確認	・設置後も海産哺乳類が周辺海域を利用していることを確認。 ・浮体周辺では日周性はなく、昼夜問わず利用している(回遊性の種が利用)。冬季はほとんど確認されず、春季に確認数が増加。 ・事前と事後のデータを比較すると、事前の方が確認事例数が多い傾向にある。	海産哺乳類への影響は現時点では小さいもしくは不明。



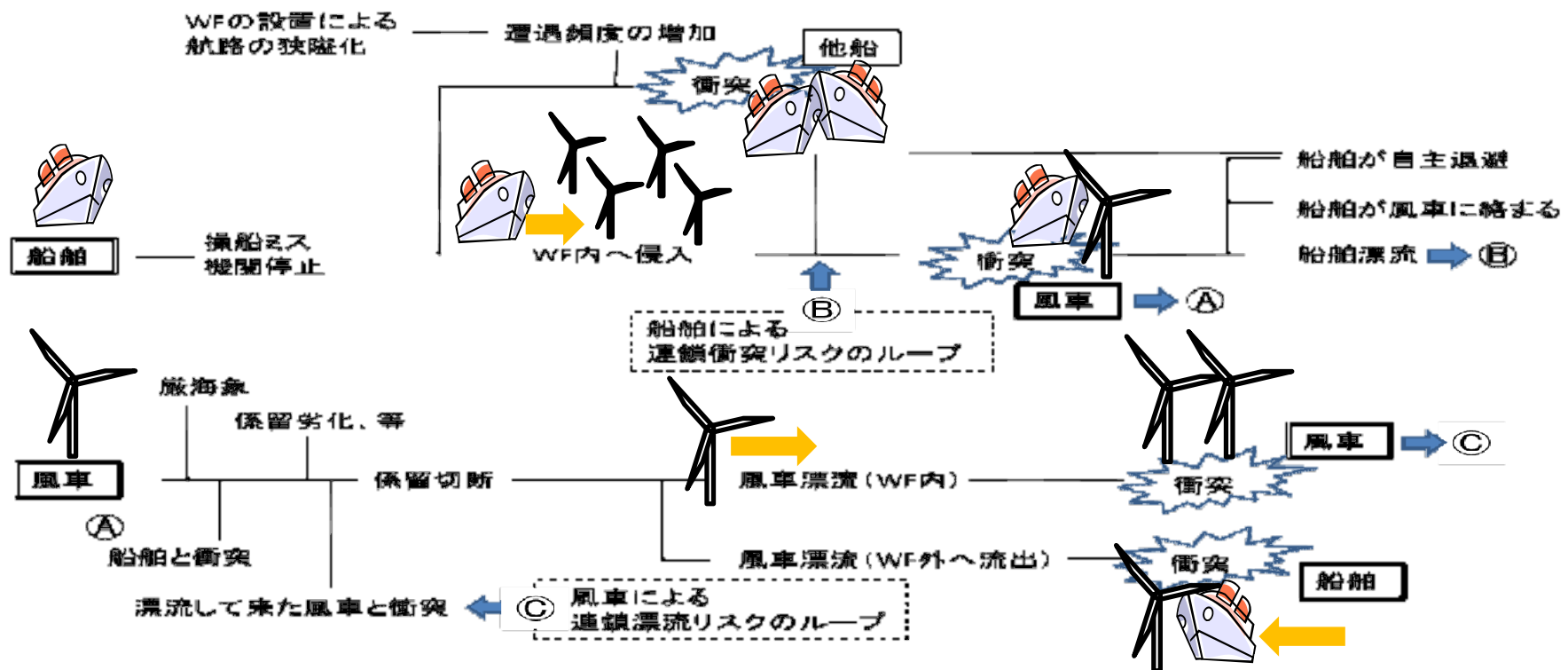
上左:底魚調査の状況
 上右:調査船
 中左:水中カメラやA-tagの設置状況
 中右:カメラ撮影されたブリの群れ

【航行安全性の評価】 衝突リスクと漂流リスクの評価

◆ 開発課題:

大規模浮体式洋上ウインドファームにおける衝突リスクの評価および漂流リスクの評価

■ 衝突・漂流に係る事故シナリオの明確化と定量的評価フローの完成



- 船舶による事象と風車(浮体)による事象をシナリオとして整理し、必要な要素研究を抽出すると共に、全体の検討フローを構築した。

【航行安全性の評価】 衝突リスクと漂流リスクの定式化の例

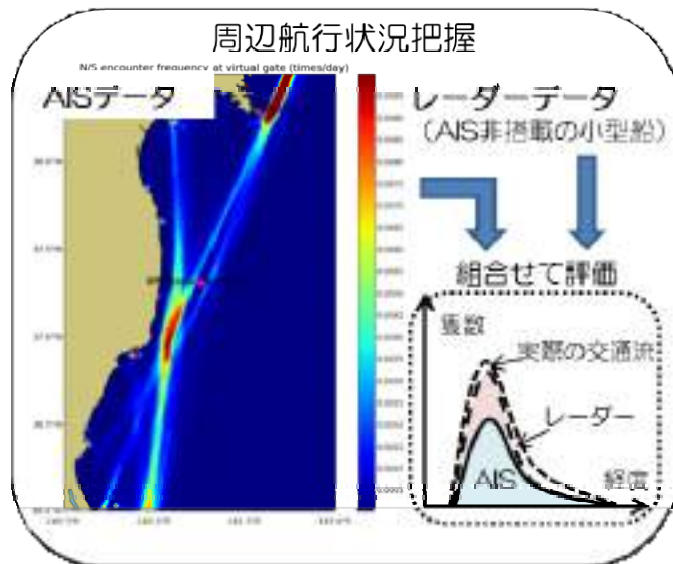
■ 連鎖漂流事故リスク評価式の定式化およびリスク定量的評価の基礎情報取得

$$Risk = \sum_{GT} E_{WT} = \sum_{GT} \left(\iint P_s(\theta_{wind}, v_w) \cdot D_{wt}(\theta_{wind}, v_w) \cdot P_w(\theta_{wind}, v_w) d\theta_{wind} dv_w \times P_d \times T_s \right)$$

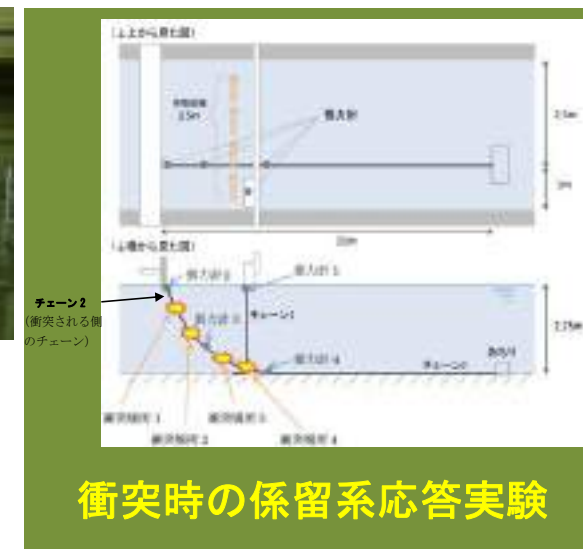
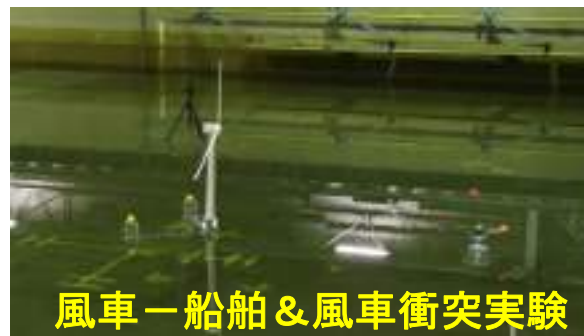
【漂流船舶のWFへの進入数】×【漂流風車の期待数】

θ_{wind} : 風の方角
 v_w : 風速
 $P_s(\theta_{wind}, v_w)$: 漂流船舶一隻の
 WFへの進入確率

$D_{wt}(\theta_{wind}, v_w)$: WFに進入した漂流船舶1隻との
 衝突による漂流風車基数期待値
 $P_w(\theta_{wind}, v_w)$: 風速の発現確率
 P_d : 航行船舶一隻の年間漂流確率
 T_s : 漂流事故リスク評価海域における
 航行船舶一隻あたりの年間交通量



AIS・レーダーを活用した遭遇頻度推定



【航行安全性の評価】 衝突リスクと漂流リスクの解析結果の例

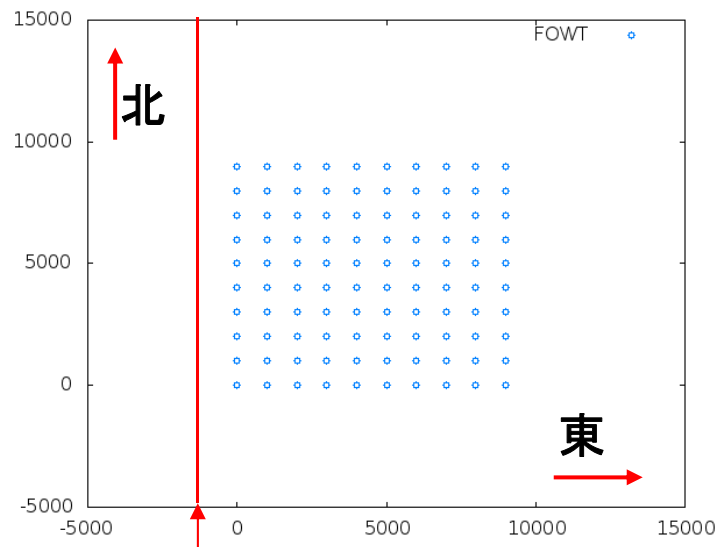
■ 大規模浮体式洋上ウインドファームのリスク解析例

- ・福島沖航行船舶の統計値から漂流船舶の頻度推定
- ・風向・風速の発現確率の設定
- ・ウインドファーム(風車配置6種類)における漂流リスクの評価と検討

漂流リスク: 衝突船舶のトン数に依存

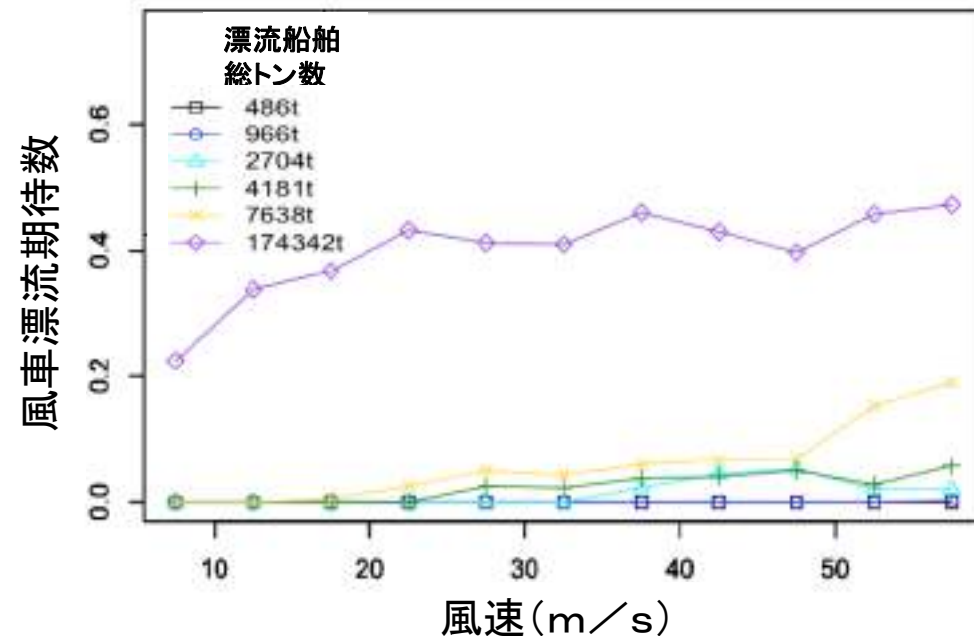
船舶のトン数が風車より大きくなると漂流期待数は急激に増大

中小型船舶の場合は風による漂流運動エネルギーが大きいと増加



$X = -1000 \text{ m}$

(漂流開始ライン、漂流ポイント間隔例: 1 km)



【航行安全性評価】 浮体式洋上ウィンドファームの航行安全対策の整理

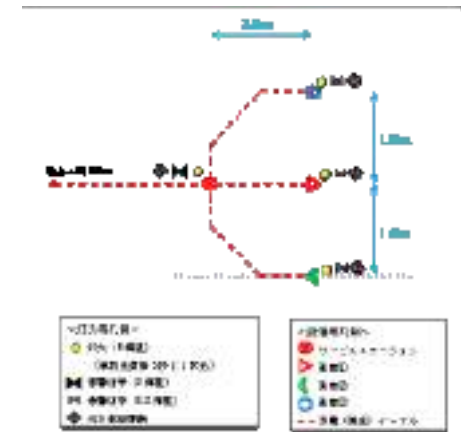
- 本実証研究の実施に当たり、航行安全委員会を開催し航行安全対策を取り纏めた。
- 本実証研究の知見から、浮体式洋上ウィンドファームの航行安全対策を整理した。

工事中の航行安全対策

- 1) 安全管理体制の構築
- 2) 工事作業船等の作業運航管理
 - ① 工事作業船の概要
 - ② 作業運行要領
 - ③ 作業中止基準
 - ④ 気象・海象情報の入手
 - ⑤ 荒天等の対応
- 3) 警戒船の配備・運用
 - ① 警戒船の配置
 - ② 警戒船の性能・装備
 - ③ 警戒船の業務
- 4) 一般船舶等への安全対策の策定
- 5) 情報提供
- 6) 緊急連絡体制の構築
- 7) 一般安全対策の策定

設備稼働中の航行安全対策

- 1) 安全管理体制の構築
- 2) 一般船舶等に対する安全対策の策定
 - ① 風力発電設備を表示する灯火等
 - ② 一般船舶への協力依頼
 - ③ 漁船・プレジャーボートへの協力依頼
 - ④ 風力発電設備との離隔距離
 - ⑤ 風力発電設備の現地据え付け後の対応
 - ⑥ レーダ偽像の対応
 - ⑦ 視界制限時の対応
- 3) 情報提供
- 4) 維持管理体制の構築
 - ① 風力発電設備の維持管理体制
 - ② 緊急連絡体制
 - ③ 地震津波対策



風力発電設備を表示する灯火等



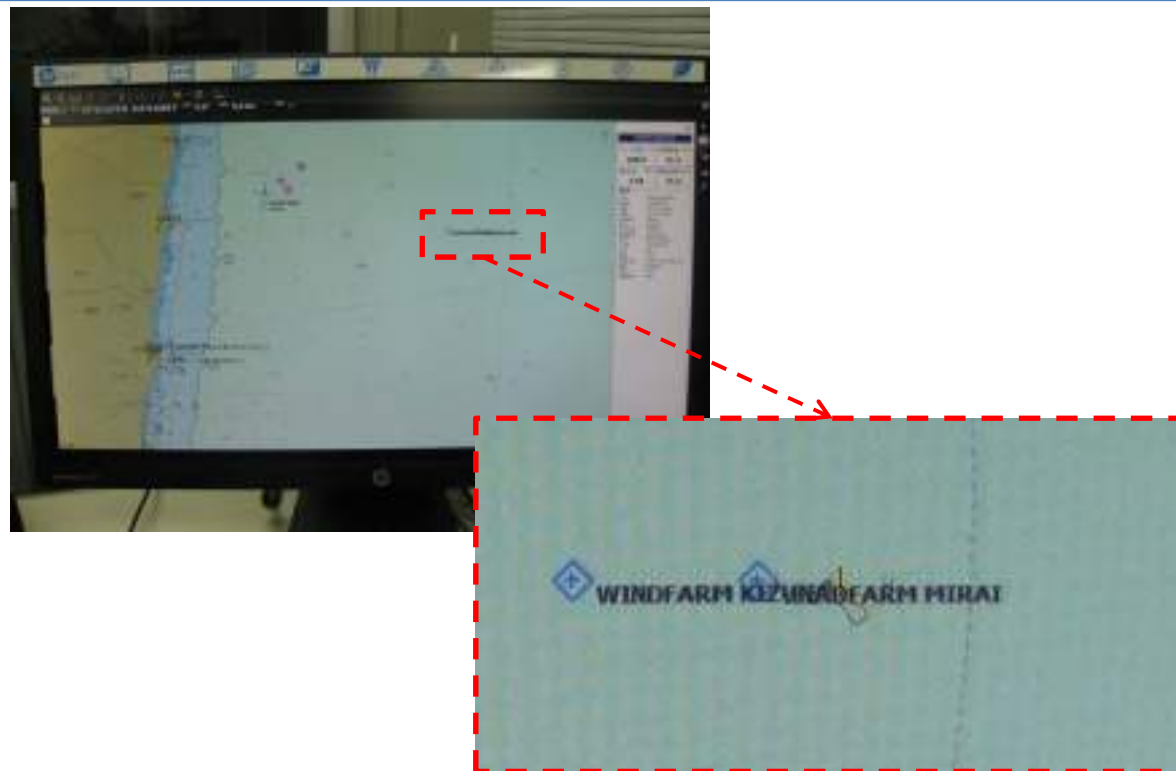
設備稼働中の安全管理体制

【航行安全性評価】 AIS設置

- 航行安全性対策として、各浮体に航路標識用AIS(Automatic Identification System、船舶自動識別装置)を導入した。
- 付近を航行する他の船舶に対して、安全上有用な情報の提供を実施した。
- 導入に当たり、第二管区海上保安部より航路標識用AIS信号所の設置許可を得た。



サブステーションに設置したAISアンテナ



陸上開閉所モニターによる監視状況

【漁業との共存】 実施体制と漁業共存メニューの検討

- 浮体式洋上風力発電と漁業との共存方法を確立することが目的
- 周辺海域環境や漁業への影響を調査し、漁業との共存方法を具体的に検討した。
- 計画策定や調査、傭船等にて漁業関係者に参画頂き、メニューを策定、実施した。
- 浮体式洋上風力施設に対する漁業関係者の理解を醸成した。

実施体制

漁業協働委員会(計10回)

漁業関係者、有識者、福島県、経産省にて構成
 ・漁業者への事業内容の説明
 ・漁業操業の課題や共存策についての議論
 ・漁業との共存策の提案

いわきワーキンググループ(計24回)

いわき市漁協ほかいわき市内の県漁連傘下組合で構成

相馬双葉ワーキンググループ(計21回)

相馬双葉漁協で構成

漁業との共存ワーキンググループ(計7回)

漁業関係者(特に若手を中心)、有識者にて構成
 議題を「漁業との共存」に特化し、
 漁業協働委員会とは独立して議論する場として設立

共存メニュー項目	具体的内容
漁場環境調査	浮体周辺の水質調査、底生生物調査を実施し、漁場環境としての水質ならびに餌料環境を調査
漁獲試験	魚種、漁法、測点ごとの浮体設置後の漁獲量推移を調査
ROV調査	浮体周辺の海中映像をROVで撮影、集魚効果を調査
付着生物調査	浮体の集魚効果調査のため、浮体への付着生物を調査
新たな漁具・漁法の検討	集魚効果が期待される浮体周辺水域で効率的に漁獲できる方法について検討
底曳き網の改良(離底網)	浮体設置による底曳漁業の漁場喪失の対策として、従来の底曳船を活用した離底式の漁法を検討
海洋情報の提供	洋上の海洋観測データをオンラインでリアルタイム配信
放射能測定機器の提供	漁獲物の放射能測定結果を整理し、漁業関係者への公表を実施することで福島の漁業復興に貢献
警戒船業務	実証施設工事中の警戒業務を漁業関係者に委託、漁船活用についての有効性を検証

【漁業との共存】 漁獲試験

- 浮体設備が漁業に与える影響として、海域占有による底曳網漁業等の漁場喪失という物理的な影響がある一方、生物的な悪影響は無いことが確認できた。
- 浮体の集魚効果について、浮魚の集魚が確認された。
- 漁業者との共同作業体制の構築、漁船・漁労設備等や技術の維持に寄与した。

◆目的と役割

- ・ 漁業生産に与える影響について定量的な評価を行う。

◆ 実施概要

- ・ 県内漁業者の船を傭船し、底曳網、刺網、はもかご・はもどう、釣り(曳き釣り、底釣り)の漁獲試験を実施した。
- ・ 漁獲物の種類、重量、体長を計測し、浮体近辺における漁業への影響を評価した。

◆ 結果

- ・ 浮体が海域を占有することにより、底曳網漁業等の操業が制限されることとなり、浮体設備が特定の漁業に与える物理的な影響は有るといえる。
- ・ 底魚類については、施設周辺で漁獲量の増加も低下も無いこと、魚種毎の漁獲量にも大きな増減が無いことから、浮体が魚類行動に変化を与えることは無く、騒音や振動で魚が逃げるなどの生物的な悪影響が無いことが確認出来た。
- ・ 浮魚類については、浮体への集魚が確認され、将来的に漁獲量の増加も期待される結果が得られた。
- ・ 漁獲試験の実施が、漁業者との協働作業体制の構築の基盤となった。
- ・ 漁船、漁労設備、操業技術の維持に寄与した。



【漁業との共存】 ROV調査、付着生物調査

- 浮体に回遊魚が集まっており、浮体の集魚効果が確認できた。
- 集魚機能のほか、隠れ家機能や飼料場としての機能を有すると期待できる。

ROV調査

◆ 目的

浮体周辺において、浮体構造物がもたらす集魚効果を、海中映像を撮影して確認する。

◆ 結果

イシダイ、メジナ、ブリなどの回遊魚の遊泳を観察。(集魚効果)

エゾイソアイナメなどの底魚がアンカー、チェーンの影に隠れている様子を観察。(隠れ家効果)



付着生物調査

◆ 目的

浮体構造物や係留設備に付着する生物の状況を把握し、漁業への影響を評価する。

◆ 結果

浮体およびチェーンにアカフジツボの大量付着が見られた。(将来的な餌料場の可能性)

2年間の観測から、将来の生物付着量の推定を行える体制を構築できた(今後の同調査の実施は不要)。



浮体構造物は集魚機能を有しており、また集魚量の定量的評価が可能であることが示された。
集魚機能のほか、隠れ家機能や餌料場としての機能を有すると期待できる。

【漁業との共存】 底曳網の改良

- 底曳網漁業の漁場喪失の最小化を目的として、離底網の開発調査を実施した。
- 離底網を用いた場合、海底障害物の回避が可能であることが示された。
- 離底した場合、漁獲量は劣るが、魚種選択性と高付加価値化の可能性が認められた。

◆ 目的

底曳網漁業の漁場喪失の最少化を目的とし、離底可能な網による漁業の可能性について検討する。

◆ 実施概要

離底網の設計、製作を行い、網成り調査と漁獲実験を実施した。

◆ 結果

- 船速を変化させることで、着底・離底の操作が可能であることが実証され、**海底の障害物の回避に有効であることが示唆された。**
- 離底した場合の漁獲量は着底時に比べ大きく劣るものの、**ヤリイカを選択して効率的に漁獲できることが示された。**
また、混獲物が少なく、従来の底曳と比較し**品質が大きく向上することが確認出来た。**



離底網の設計(模型実験): 網が離底する様子を確認



着底時: 混獲物が多い。
イカにニホンウロコムシの
剛毛が刺さり、商品価値が
大きく下がる



離底時: 混獲物が無く、釣
りと同品質のきれいなイカ
が漁獲できる

底曳網漁業に対する浮体設備の影響を減少できる可能性が示された

【漁業との共存】 新しい漁具漁法の取組

- いつ、どのような魚が浮体周辺に集まるのかを確認した。
- 浮体近傍における効果的な漁具・漁法の検討を行った。
- 浮体の集魚効果を活用した、新たな漁場創出の可能性が示された。

◆ 目的

浮体近傍の集魚状況について調査し、浮体周辺での実施に適した漁具・漁法を検討すると共に、新たな漁場創出の可能性を調査する。

◆ 実施概要

延縄(立て縄)、流し網、カゴなどの漁具を、漁業者主導にて改良を重ねながら実験を行い、各漁法における操業性と漁獲物の調査を行った。

◆ 結果

- ・ 浮体に集まる魚の種類、時期、場所(水深)を確認した。
- ・ 各漁法が実施可能であることが確認できた。特に曳き釣りや底刺し網で効果的な結果が得られた。
- ・ 高単価のメジマグロやブリ類が漁獲ができたことから、新たな漁場創出の可能性が示された。

月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
実施した漁法	●▲■※◇▽	●■※◇▽	●▲■※▽	○▲■※▽	○▲■※◇▽	○▲■▽	○■※▽
アイリメ	●	※	●		■	■	■
アカメバル	※	※					
アカムツ					▲		
ウルメイワシ	※	※					
エゾイシイリメ	■	●■	▲●■	●■	●■	■	■
カナガシラ		●	●	●			
キハシロウ	●	●					
ケムシカシラ	■						
リハ類	▲※	※	※	△※	▲△○	△○	※
リメガレイ	●						
シイラ		◇	◎	△▽	○		
スルメイカ	※						
ハガツイ					○		
ババガレイ	●■	●	●				
ヒラメ	●	●			●		
ブリ(ワッリ)		◇	◎		◎▽	▽	
ホリボウ				●			
ミアジ		※		※	●		
マアナゴ	■	■	■		■	■	■
マガレイ		●		●	●		
メジマグロ				◎			
マダラ	※						
ミナガレイ		●	●				
ミズダコ	■		■	■		■	
ムシクシ	●			●			
ササギムシガレイ	●	●	●				
エメカサゴ				●			

【凡例】○(延縄)●(流し網)▲(カゴ)※(底刺し網)◇(曳き釣り)▽(底刺し網)
 ●(延縄)▲(流し網)■(カゴ)※(底刺し網)◇(曳き釣り)▽(底刺し網)
 ○(延縄)●(流し網)▲(カゴ)※(底刺し網)◇(曳き釣り)▽(底刺し網)

漁獲カレンダー:実施した漁法と時期を魚種ごとにまとめた



浮体の集魚効果による新たな漁場創出の可能性が示された

【漁業との共存】 海洋観測データの配信

- 洋上施設で観測している海洋データのリアルタイムオンライン配信システムを構築した。
- 水温、風向、風速のデータが操業に役立つことがわかった。

◆ 目的

浮体設備で観測している海洋データを配信することで、操業に寄与する。

◆ 実施状況

- ・ サブステーション水深10mの水温、塩分、放射線量、および水中画像(動画、静止画)のオンライン配信を平成26年8月より開始した。平成27年6月より2MW風車ナセルで観測している風向・風速の配信を追加した。
- ・ リアルタイムデータ、グラフによる変化図、過去データを閲覧可能なサイトとした。
- ・ PCサイトのほか、携帯(ガラケー)専用サイトを構築した。

◆ 評価

- ・ 沖合洋上における継続的なデータ配信システムとして画期的な取組である。
- ・ 漁業者からは、特に水温、風向・風速が操業に役立つとの意見があった。加えて、波高や流速を望む声も多い。
- ・ 現在は本操業が行われていないが、本操業が開始されれば活用が期待される。



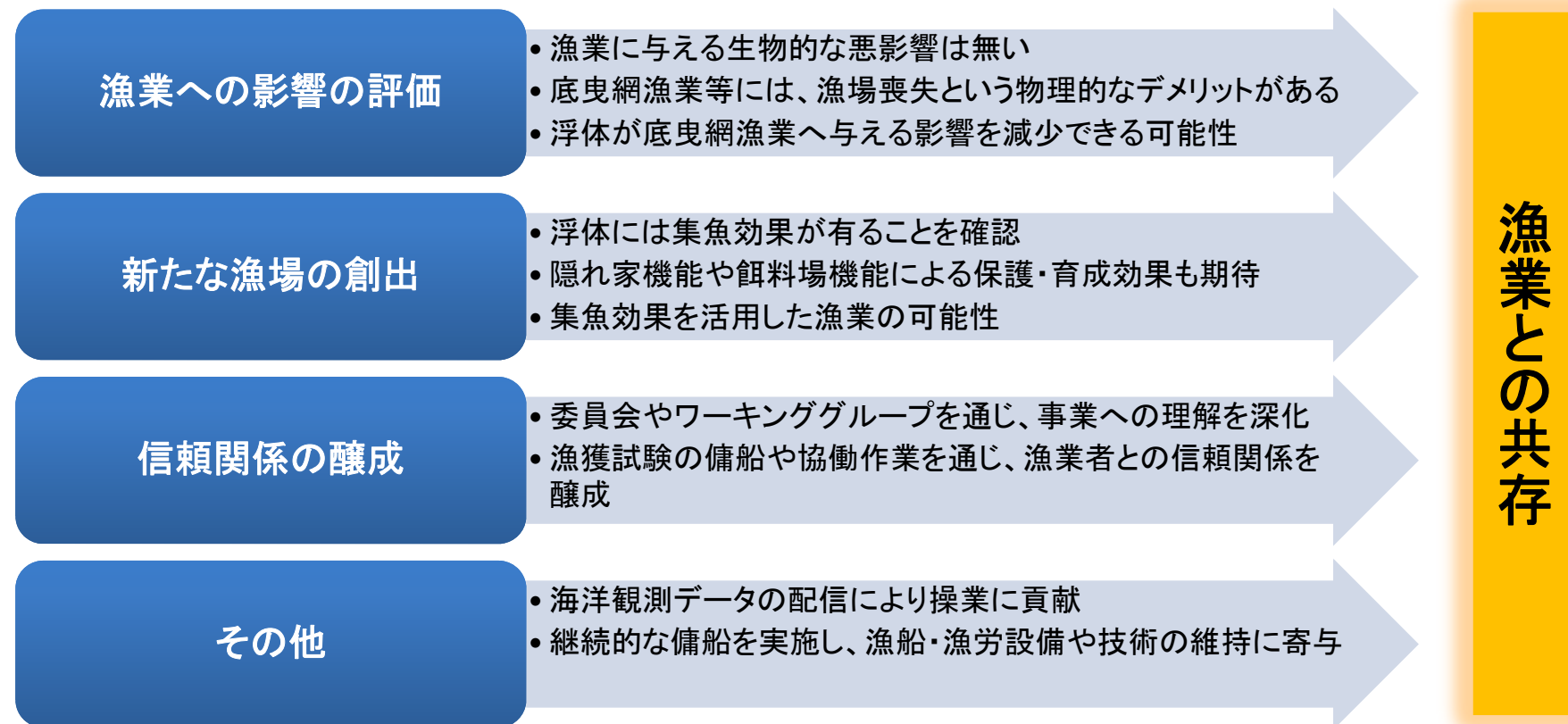
PC用サイト

ガラケー用サイト



【漁業との共存】 漁業との共存の将来性

- 浮体設備が漁業に与える影響として、生物的な悪影響は無いことが確認できた。
- 底曳網漁業等の漁場喪失については、有効な対策について今後も検討が必要である。
- 浮体の集魚効果が確認され、新たな漁場創出の可能性が示された。
- 計画当初から漁業者参画のもと共存について継続的に議論していくことが必要である。



7. 浮体式洋上風力発電の共通基盤の整備とマニュアルの作成

1. 情報基盤の整備
2. マニュアルの作成
3. 委員会の運営

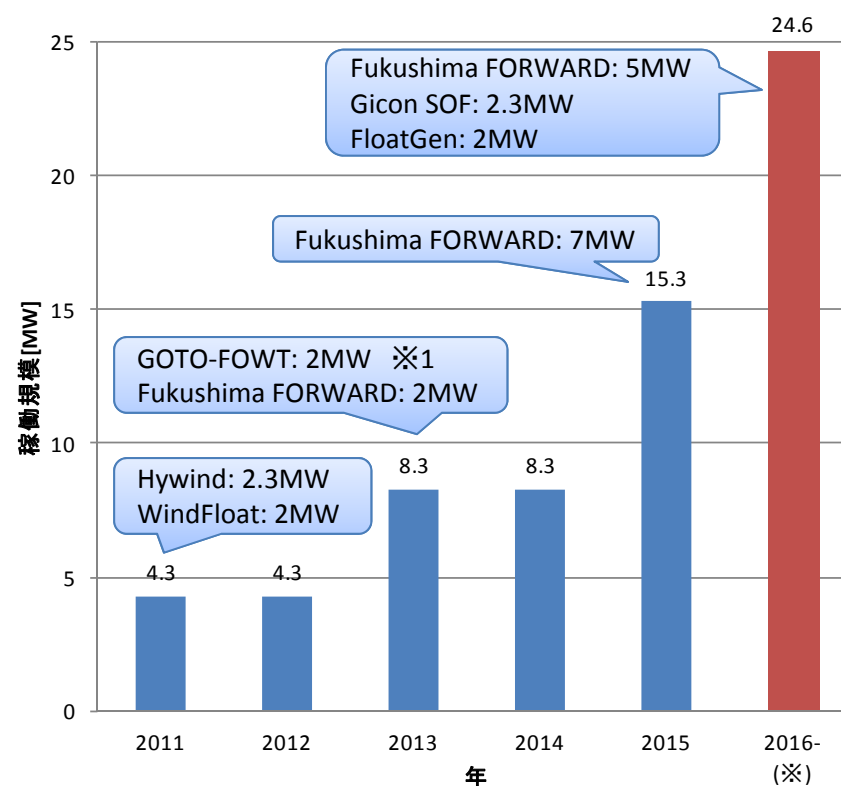
【情報基盤の整備】 プロジェクト動向のリストと稼動状況

○国内外26の浮体式洋上風力発電プロジェクトの動向をまとめ、アップデートを行った。
○2011年から2015年にかけて新規導入された13MWのうち11MWは日本のプロジェクト。

調査対象としたプロジェクトリスト

	プロジェクト名		プロジェクト名
1	HiPRwind	15	Hywind2
2	Gicon SOF	16	Sway
3	Poseidon	17	SeaTwirl
4	Winflo	18	Hexicon
5	SEA REED	19	PelaStar
6	FloatGen	20	VoltturnUS
7	Vertiwind	21	Nautica
8	Inflow	22	WindFloat
9	Blue H	23	WindFloat Atlantic
10	DIWET	24	WindFloat Pacific
11	Trifloater	25	GOTO-FOWT ※1
12	WindSea	26	Fukushima FORWARD
13	W2Power	27	NEDO Floating 1
14	Hywind	28	NEDO Floating 2

浮体式洋上風力発電の稼動状況



※着工しているプロジェクトを追加
(2016年2月時点)

※1 GOTO-FOWTは、環境省浮体式洋上風力発電実証事業を指す。

【情報基盤の整備】 着工・稼働しているプロジェクト一覧

○現在4プロジェクト5基の風車が稼働しており、2016年には3基追加予定。
○HywindとWindFloatは、事業化を見据え複数基のArrayプロジェクトを計画中。

着工開始、もしくは稼働中のプロジェクト概要

	Hywind	WindFloat	GOTO-FOWT※1	Fukushima FORWARD	FloatGen	Gicon SOF
事業規模	2.3MW	2.0MW	2.0MW	14.0MW	2.0MW	2.3MW
実施海域	ノルウェー	ポルトガル	日本	日本	フランス	ドイツ
稼働開始年	2009年	2011年	2013年	2013年/2015年/2016年(予定)	2016年(予定)	2016年(予定)
設置基数	1基	1基	1基	3基	1基	1基
浮体の形状	Spar	Semi-sub	Spar	Semi-sub/Semi-sub/Spar	Semi-sub	TLP
水深	220m	40-50m	100m	120m	30m	-
離岸距離	10km	5km	1km	20km	-	-
総事業費	約4億NOK (約52.8億円)	約2,000万Euro (約25.5億円)	-	-	-	約1,800万Euro (約23.0億円)
うち補助金	約5,900万NOK (約7.8億円)	約700万Euro (約8.9億円)	約83.7億円 ※2	約500億円 ※2	-	約525万Euro (約6.7億円)
風車メーカー	Siemens 2.3MW	Vestas 2.0MW	日立製作所 2.0MW	日立製作所2.0MW/三菱重工業7.0MW/日立製作所5.0MW	Gamesa 2.0MW	Siemens 2.3MW
浮体鋼材量	1,100トン	1,200トン	3,400トン ※3	2,200トン/5,500トン/7,600トン	-	742トン
係留ポイント	3点	4点	3点	6点/8点/6点	3点	8点以上

※1 GOTO-FOWTは、環境省浮体式洋上風力発電実証事業を指す。

(2016年2月時点)

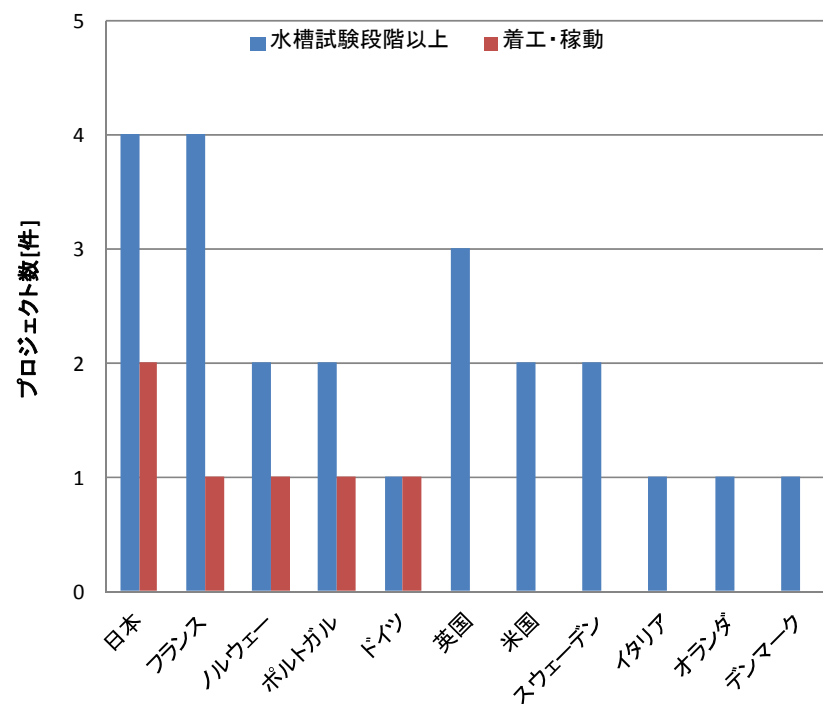
※2 予算関連資料から委託費を推計。

※3 浮体鋼材量ではなく、総重量が約3,400トンである。

【情報基盤の整備】 浮体式洋上風力発電の国別動向調査

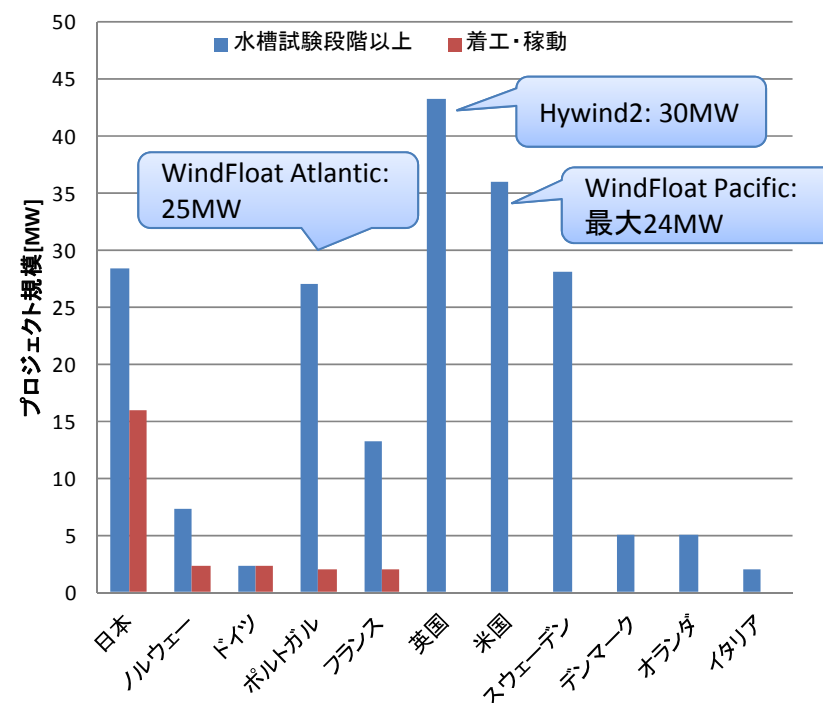
○日本が、着工・稼動したプロジェクト数、規模ともにトップであり、世界をリードしている。
○計画ベースのものまで含めた場合は、Hywind2, WindFloatのような複数基の風車を設置するプロジェクトがある米国やスコットランドで規模が大きい。

プロジェクト数



※本プロジェクトは1件として扱った。

プロジェクト規模

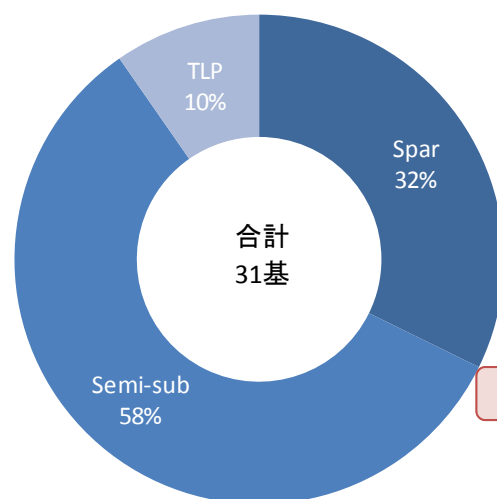


(2016年2月時点)

【情報基盤の整備】 浮体の形状の分析

○Semi-subとSparが基数ベース及びプロジェクト規模ベースでみて主流である。
○この傾向は、着工・稼動しているプロジェクトでも同様の傾向を示している。

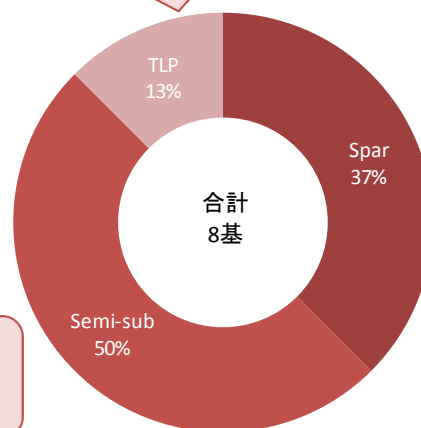
浮体の基数別



水槽試験段階以上

WindFloat: 1
Fukushima FORWARD: 2
FloatGen: 1

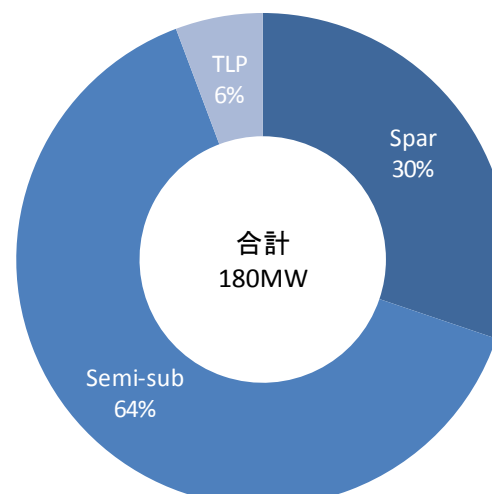
Gicon SOF: 1



着工・稼動のみ

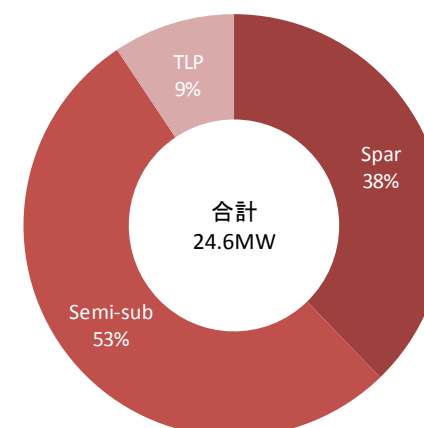
Hywind: 1
GOTO-FOWT: 1 ※1
Fukushima FORWARD: 1

プロジェクト規模



水槽試験段階以上

着工・稼動のみ



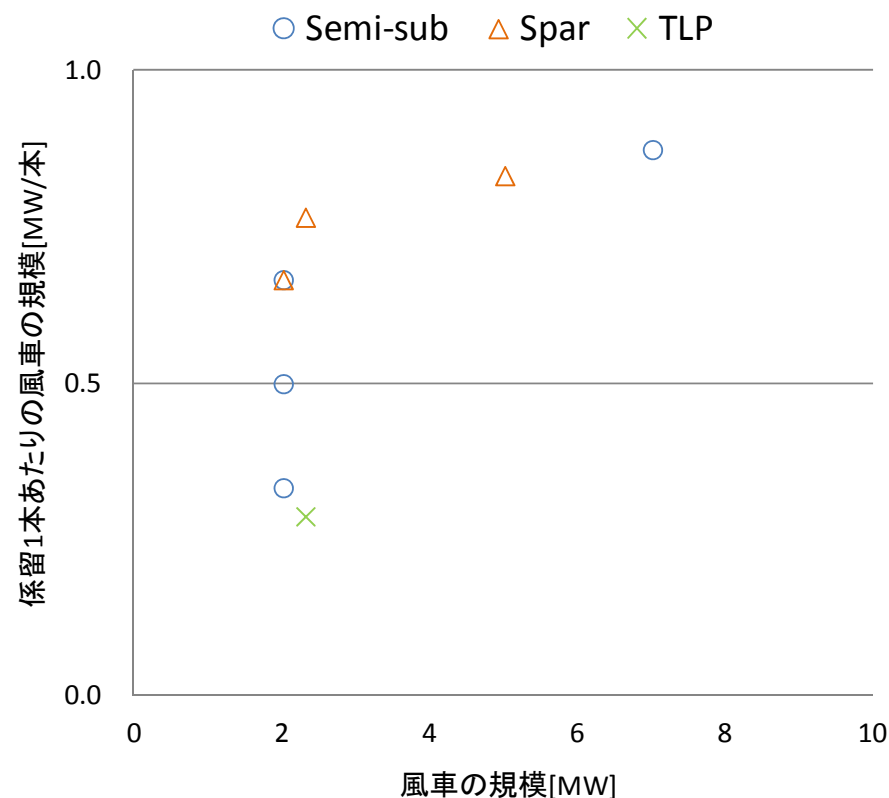
(2016年2月時点)

※1 GOTO-FOWTは、環境省浮体式洋上風力発電実証事業を指す。

【情報基盤の整備】 風車の安全性および研究開発支援動向の分析

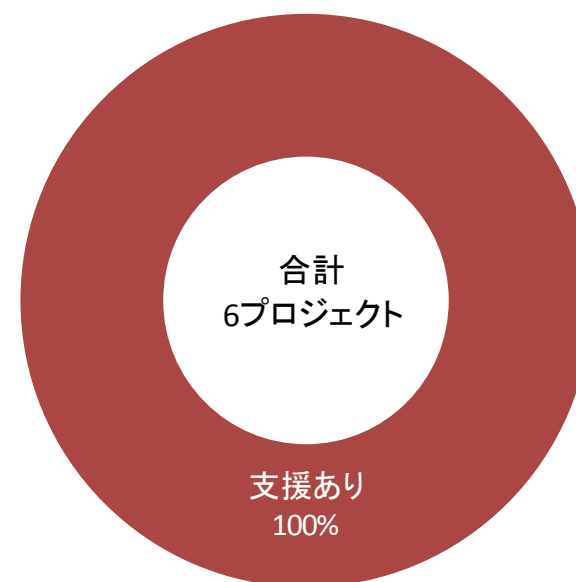
- 係留1本あたりの風車の規模の平均値は、0.7MW/本であり、台風や海象条件の厳しさを受け安全サイドに設計するも諸外国と同水準。更なるコスト低減の可能性を見込む。
- 着工・稼働中のプロジェクトは全て政府等の公的機関から支援を受けている。

風車の規模と係留索の本数との関係



研究開発の支援状況

※着工・稼働のみ



※本プロジェクトは1件として扱った。

(2016年2月時点)

【マニュアルの作成】

- 本事業で得られた経験・ノウハウのエッセンスをまとめたマニュアルを作成。
- 係留・航行安全対策の浮体式の特徴となる項目について手続き論を整理。

マニュアルの目次構成

大項目	中項目	概要
1. 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	定義と種類、ポテンシャル量、エネルギー政策上の位置づけ、技術開発状況
	1.2 諸外国におけるプロジェクト事例	Hywind, WindFloatの事例紹介
	1.3 国内におけるプロジェクト事例	GOTO-FOWT ※1, Fukushima FORWARDの紹介
2. 浮体式洋上風力発電事業の進め方	2.1 手続総論	2.2～2.8までの流れを整理
	2.2 立地海域調査	自然条件、社会条件、事前説明
	2.3 気象・海象調査	風況、波浪・海潮流に関する情報
	2.4 基本設計	風車設置点、規模等の選定、海底地形・地形調査、浮体構造物の選定、経済性の検討
	2.5 環境影響評価	手続き、洋上風力発電の環境影響要因
	2.6 実施設計	設備設計、工事設計、工事計画
	2.7 建設工事	施工計画(航行安全性)、施工、試運転・検査
	2.8 運転保守	運転監視、保守の概要

※1 GOTO-FOWTは、環境省浮体式洋上風力発電実証事業を指す。

【委員会の運営】 外部有識者委員会の開催

- 本プロジェクトの進捗の妥当性や専門的な助言を得るための有識者委員会を運営。
- 委員からのご指導は、本プロジェクトの円滑な運営において重要な役割を果たした。

浮体式洋上ウインドファーム実証研究委員会委員（2015年時点）

役職	氏名	所属
	荒川 忠一	東京大学大学院 工学系研究科 機械工学専攻 教授
	池田 三知子	一般社団法人 日本経済団体連合会 環境本部長
委員長	牛山 泉	足利工業大学 学長
	加藤 政一	東京電機大学 工学部 電気電子工学科 教授
副委員長	木下 健	長崎総合科学大学 学長
	関田 欣治	一般財団法人 沿岸技術研究センター 顧問
	高野 裕文	一般財団法人 日本海事協会 再生可能エネルギー部長
	奈良 宏一	福島工業高等専門学校 名誉教授
	馬場 治	東京海洋大学 海洋科学部 海洋政策文化学科 教授
	前田 太佳夫	三重大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 教授
	渡部 典正	公益社団法人 日本海難防止協会 専務理事

（五十音順、敬称略）

浮体式洋上ウインドファーム実証研究委員会関係省庁等

経済産業省資源エネルギー庁、環境省地球環境局、環境省総合環境政策局、国土交通省海事局、農林水産省水産庁、内閣官房総合海洋政策本部事務局、海上保安庁交通部、福島県商工労働部、産業技術総合研究所、新エネルギー・産業技術総合開発機構

8.「国民との科学・技術対話」の実施

【国民との科学・技術対話】 展示場とホームページの設置

① 常設展示場

・交流センター

全体、2MW,7MW,模型展示

パネル(概要、第1期)展示

映像配信



安倍首相夫人来場

・相馬展示コーナー

説明パネル展示

映像配信



説明パネルと映像

・天神岬展望台

説明版展示

望遠鏡設置



説明板、望遠鏡

- ・交流センター来場者数は開設以来平成27年11月末で約12万6千人(平均152人/日)。
- ・安倍首相夫人、国及び地元各界要人他、地元小中学校の課外学習にも利用され多くの子供たちが来場。

② ホームページ

・情報発信

和文・英文

最新情報発信

訪問者数カウント



和文ホームページ表紙

・コンテンツ

各種パンフレット

映像・フォトギャラリー

海上公告



発電状況映像

・お問い合わせ

プロジェクト情報質疑対応

地元・専門誌コンテンツ依頼提供

インタビュー依頼対応



相双に掲載(JR東日本)

- ・訪問者数が平成27年11月末で日本語版は10万人を超えた。(平均110人/日)
- ・7MW風車の小名浜港から出港前後2週間の訪問者数は平常の約3.5倍であった。

【国民との科学・技術対話】パンフレット等の作成と展示会への出展

③ パンフレット・パネル・映像

・パンフレット・パネル

実証研究概要

第1. 2期施工記録

3展示場



7MW風車曳航

・ポスター

展示場案内(交流センター、

相馬展示コーナー、天神岬展望台)



展示場ポスター

・映像

実証研究CG

発電状況

第1期施工記録



第1期施工記録映像

・各パンフレットは展示場、展示会、説明会で配布し配布総数は約9万部。
・ポスターは県関連施設、学校、鉄道施設等に掲示し配布総数は約970部。

④ 展示会

・福島復興産業フェア

4回出展 平均1520人/回来場

新産業創出、関連企業との連携



内堀福島県知事来場

・WIND EXPO

3回出展 平均7600人/回来場

風力ビジネス、大小風車、部品



ケネディ駐日米大使来場

・再生エネルギー世界大会

2回出展 平均4500人/回来場

新エネルギービジネス創出、技術開発



小泉元首相、細川元首相来場

・全展示会11回の総来場者数は約5万3千人。(平均約4800人/回)
・産業フェア2015展示の実物サンプルは来場者に好評で、特に中間ブイは地元企業生産で多くの人の関心を引いた。