

特集 >>> インフラ

福島沖に浮体式の洋上ウインドファーム実証施設を設置

浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業 第1期研究開発の取り組み

堀 哲 郎・山 下 篤・白 枝 哲 次

昨年11月、経済産業省資源エネルギー庁が推進する浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業の一環として福島沖に設置された浮体式洋上風力発電所の実証施設が運転を開始した。浮体式洋上風力発電設備の実証機は世界でも例が少なく、サブステーションを備えた浮体式ウインドファームの実証は初めての試みである。

世界でも有数の厳しい海象で知られる福島沖において行われた実証施設の建設工事について、2MW級洋上風力発電船と送電ケーブルの施工を中心に紹介する。

キーワード：浮体式洋上風力、浮体式サブステーション、ふくしま未来、ふくしま絆、ライザーケーブル

1. はじめに

我が国の洋上風力開発については、銚子沖や響灘など着床式プロジェクトが本格的に始動したばかりであるが、島国である我が国では着床式に適した遠浅の海底地形は意外と限られており、洋上風力の将来を見据えると浮体式の洋上風力発電システムの開発が不可欠と考えられている。我が国では早くからその必要性に着目して研究開発が進められており、平成23年度より経済産業省資源エネルギー庁から民間企業10社と東京大学で構成する「福島洋上風力コンソーシアム」が浮体式洋上風力発電設備による洋上ウインドファームの研究開発事業を受託し、実証機建設を含めた研究開発を推進している。昨年はその一環として、浮体式サブステーション、2MW級浮体式洋上風力発電船、それらをつなぐ送電ケーブルにより構成される第1期のウインドファーム実証施設を福島県沖に建設し、昨年11月より運転を開始した。

ここでは、今後の海洋空間におけるインフラ開発の一助になることを祈念し、特定建設共同企業体を構成して施工した2MW級洋上風力発電船の曳航・据付工事と送電ケーブルの敷設・埋設工事の概要について、以下に記述する。

2. 浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業の概要

本事業は経済産業省資源エネルギー庁から平成23

年度に公募され、平成24年3月に福島洋上風力コンソーシアムが受託した。平成23年度から平成27年度までに、福島県の沖合に実証施設を建設して各種データを収集し、浮体式洋上風力発電設備によるウインドファーム実用化に向けた研究開発を推進するものである。その成果により福島県を再生可能エネルギーの先駆けの地とすることで、復興に貢献することを狙いとされている。

(1) 実施体制とスケジュール

本事業を受託した福島洋上風力コンソーシアムは、民間企業10社と東京大学で構成されている。各構成員はそれぞれ表-1に示す研究開発項目及び本事業を推進するために必要な実施項目を推進する役割を担っている。

事業は平成23年度から始まった第1期実証研究と平成25年度から始まった第2期実証研究に分かれている。表-2に各ステージにおける実施内容と、建設する実証施設の概要を示す。

(2) 設置する実証施設の概要

本事業では浮体式洋上ウインドファームの実証施設を設置する。実証施設の設置海域は、楢葉町の海岸線から沖合約18km、水深約120mの海域に設定された(図-1)。

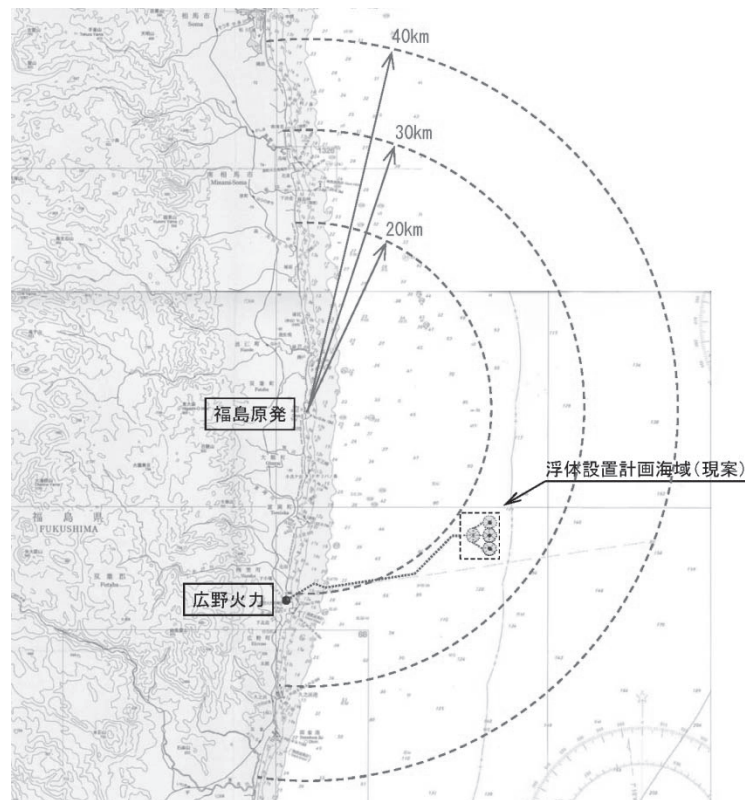
ウインドファームの実証施設は、浮体式の洋上サブステーション1基、2MW級1基と7MW級2基の計3基の浮体式洋上風力発電船、合わせて4基の浮体で

表一 福島洋上風力コンソーシアムの構成員と主な役割

コンソーシアム構成員	主な役割
丸紅株式会社【プロジェクトインテグレーター】	事前協議・許認可, 維持管理, 漁業との共存
国立大学法人東京大学【テクニカルアドバイザー】	観測予測技術, 航行安全性, 国民との科学・技術対話
三菱商事株式会社	系統連系協議, 環境影響評価
三菱重工業株式会社	V字型セミサブ浮体 (7MW)
ジャパン マリンユナイテッド株式会社	アドバンストスパー浮体, 浮体サブステーション
三井造船株式会社	コンパクトセミサブ浮体 (2MW)
新日鐵住金株式会社	高性能鋼材の開発
株式会社日立製作所	洋上変電所の開発
古河電気工業株式会社	大容量ライザーケーブルの開発
清水建設株式会社	海域調査, 施工技術
みずほ情報総研株式会社	浮体式洋上風力発電に関する情報基盤整備

表二 実証研究のスケジュールと実施内容

ステージ	時期	内容
第1期実証研究	平成23年度～	2MW級ダウンウィンド型浮体式洋上風力発電設備, 浮体式サブステーション, 海底ケーブルの設置と実証研究
第2期実証研究	平成25年度～	7MW級浮体式洋上風力発電設備2基の設置と実証研究

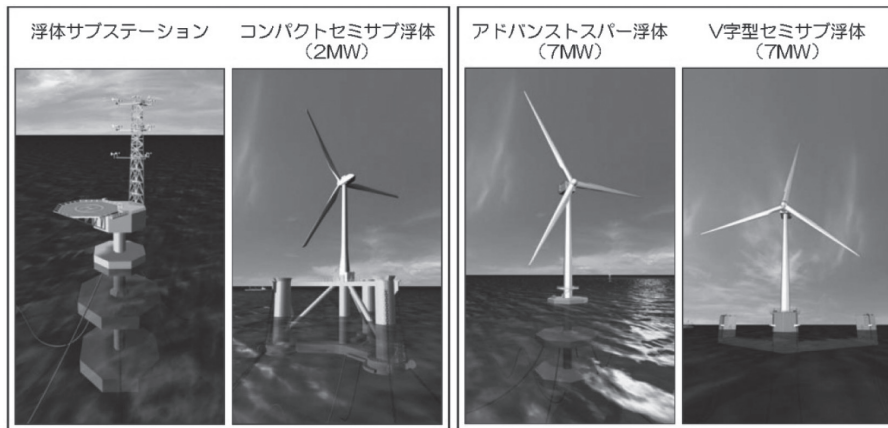


※海上保安庁刊行の水路図誌を利用して編集
 水路通報 (W1098) 平成18年(2006)・・・792・・・23年(2011)・・・1200・・・1386

図一 浮体式洋上ウィンドファーム実証施設の設置海域

構成される (図一2, 表一3)。風車2形式と浮体3形式の多様な組み合わせにより, 我が国の気象・海象や地勢等に対する各形式の適性や課題を確認することを狙っている。設置海域における各施設の配置計画を

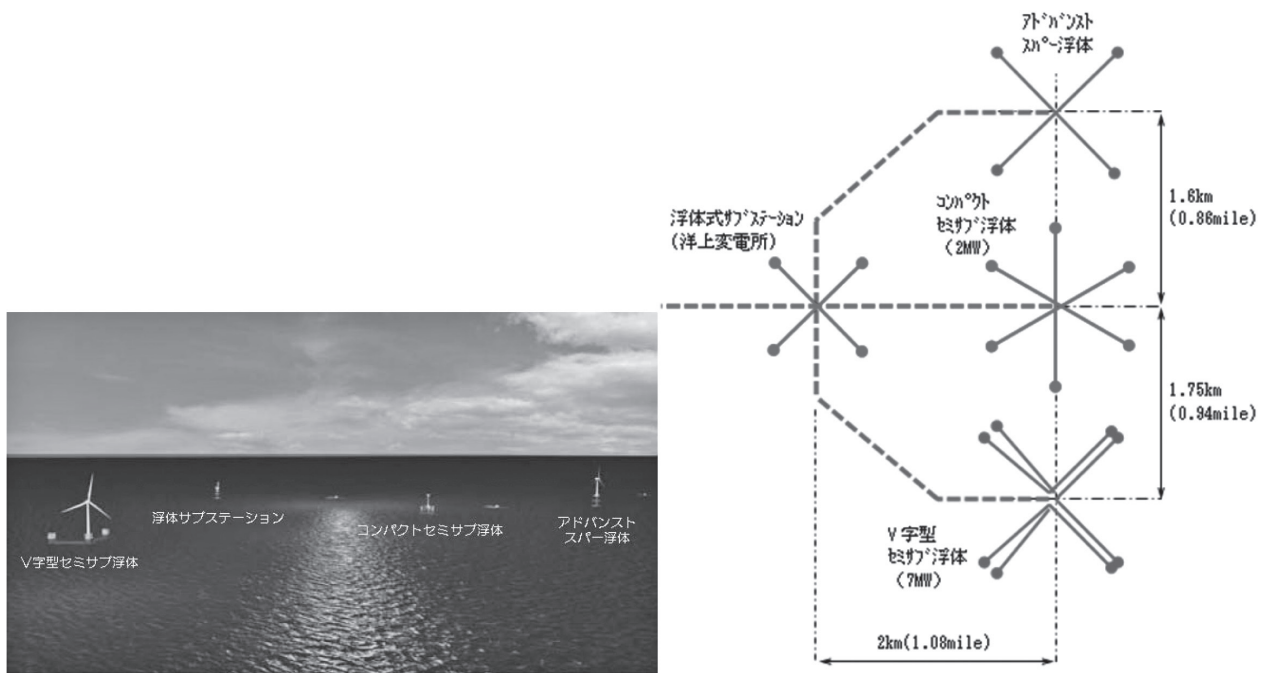
図一3に示す。なお, 浮体式洋上風力発電設備は法律上, 船舶として位置づけられ, 浮体式サブステーションは「ふくしま絆」, 2MW級洋上風力発電船は「ふくしま未来」と命名されている。



図一 2 風車・浮体のイメージ

表一 3 風車・浮体の仕様

設備名称	規模	風車型式	浮体形式	設置時期
浮体式サブステーション	25MVA 66kV	—	アドバンストスパー	第 1 期
コンパクトセミサブ浮体	2MW	ダウンウインド型	4 コラム型セミサブ	第 1 期
V 字型セミサブ浮体	7MW	油圧式ドライブ型	3 コラム型セミサブ	第 2 期
アドバンストスパー浮体	7MW	未定	アドバンストスパー	第 2 期



図一 3 浮体式ウィンドファーム実証施設の配置計画

3. 施工フロー

第 1 期実証研究における実証施設の施工フローを 図一 4 に示す。浮体式サブステーションはジャパンマリンユナイテッド株式会社の下で施工された。2MW 級洋上風力発電船は三井造船株式会社の千葉事業所に

て浮体の製作及び風車の組立が行ってから小名浜港に曳航し、小名浜港内で風車内の電気工事を施工した後、設置海域へ曳航した。浮体式サブステーションと同様、事前に海底に設置しておいた係留チェーンと接続する施工手順である。

これらの浮体の曳航・据付工事の工程に合わせて、

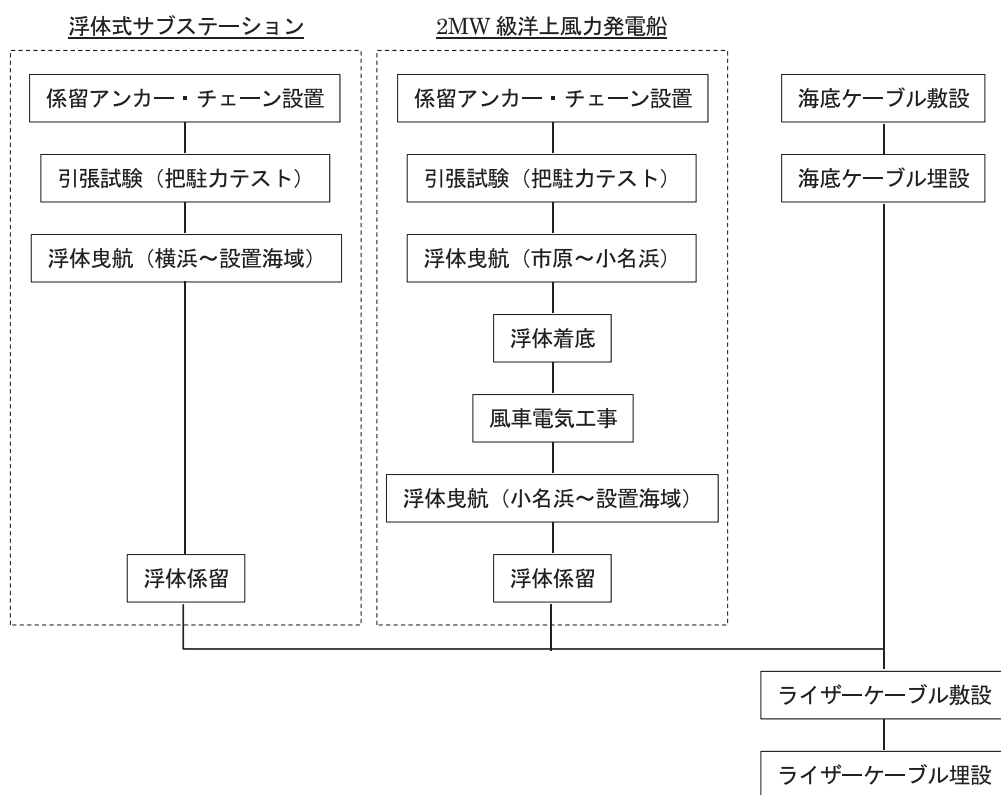


図-4 施工フロー

海底ケーブルの敷設及び埋設の工程を組み込んだ。浮体の係留作業を終えると同時に、速やかにケーブルの端末を浮体内に引き込むよう、現地では施工者間の工程の調整が行われた。

4. 2MW 級洋上風力発電船「ふくしま未来」の曳航・据付工事の概要

ここで、2MW 級洋上風力発電船「ふくしま未来」の各施工プロセスについて概説する。福島沖に設置するこの洋上風車の水面からの高さは 106 m、浮体の幅は 66 m である。係留アンカーは高把駐力アンカーと呼ばれる形式で、係留チェーンに張力を作用させるとアンカー自体が地中に潜り込み、周囲の地盤の耐力によりアンカーが地盤をつかむ力、把駐力を確保する。今回の係留には、自重 35 t の特殊アンカーを用いた。係留チェーンは国内で製造されている中で最大の断面径 $\phi 132$ mm のチェーンを使用し、本設チェーンの長さは 750 m に及ぶ。

(1) 係留アンカー・チェーン設置

洋上風力発電船は設置海域において、6 条のチェーンで係留される。浮体が現地の設置海域に到達する前に、これらの 6 条の係留アンカー・チェーンを設置海域の海底に設置した。

係留アンカー及び係留チェーンは小名浜港の 3 号ふ頭に水切りされた。係留チェーンは 3 号ふ頭のエプロンにおいて展張し、設置時にねじれが残らないよう整理して並べた。整理したチェーンは、専用の釣り天秤を使用して 500 t 吊クレーン台船「第 50 幸神丸」により吊り上げ、係留アンカー・チェーンの敷設船「新潮丸」に積み込んだ(写真-1)。係留アンカーは爪(フック)、胴体(シャンク)に分割して搬入され、水切りした小名浜港 3 号ふ頭にて組み立てた(写真-2)。

敷設船とともに支援船「新世丸」も設置海域へ回航し、アンカーの端部に支援船から下ろしたワイヤーを接続してアンカーの姿勢を調整しながら係留アンカーを設置した(写真-3)。続けて、敷設船に艀装したウィンドラス(チェーン専用の巻上げ機械)によりチェーンを船上から送り出し、海底に設置した。設置後の係留アンカー及びチェーンの状況は、支援船に搭載した ROV (Remotely Operated Vehicle: 水中ロボット)により確認した。

(2) 引張試験(把駐力テスト)

引張試験(把駐力テスト)とは係留アンカーの効き具合を確認する試験のことで、日本海事協会が策定している「浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン」に基準が示されている。それによれば、係留アンカー・チェーンに作用する最大設計張力を作用させ、

15分間その状態を維持することを確認することとされている。

日本海事協会が要求する試験荷重を考慮し、国内最大の600tプラーユニット(写真-4)を新規に設計・製作し、作業台船「海島」上に艀装した。

向かい合う1対の係留チェーン末端を作業台船上に引き上げ、片側をチェーンストッパーに固定し、他方をプラーユニットにセットして牽引した(写真-5)。試験後においてもアンカーの移動量はいずれも



写真-1 500t吊クレーン台船による敷設船への係留チェーン積込状況



写真-2 係留アンカー組立状況



写真-3 係留アンカー・チェーン設置状況



写真-4 600tプラーユニット



写真-5 引張試験の状況

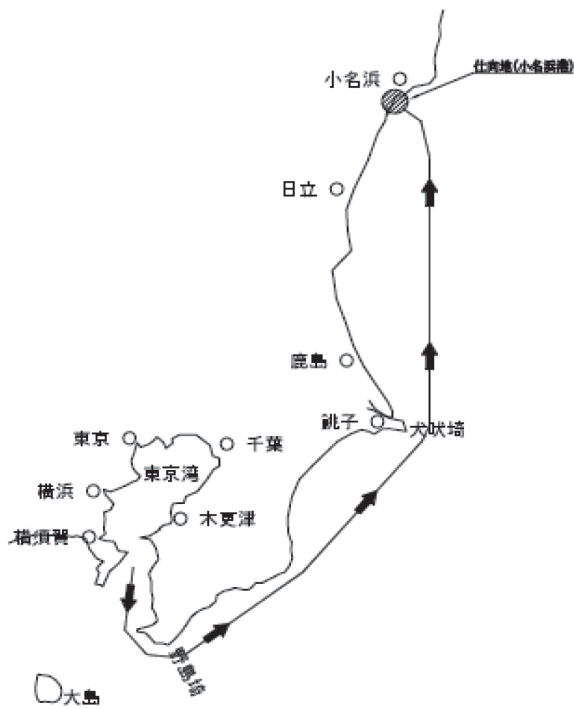
計画値内であった。

(3) 浮体曳航

係留アンカー・チェーン設置、引張試験の完了に合わせて、洋上風力発電船の曳航を計画した。曳航ルートを図-5に示す。

洋上風力発電船の浮体部は千葉事業所のドックにおいて製作され、同ドック内で風車の組立も行われた。平成25年6月27日に洋上風力発電船はドックを出渠し、5,000PS級の曳航船2隻、4,000PS級の曳航船2隻、3,600PS級の警戒船2隻の計6隻の船団により6月28日に小名浜港へ向けて曳航を開始した(写真-6)。海上保安庁の船舶の先導の下、無事に東京湾を通過することができた。

洋上風力発電船は曳航ルートを順調に進み、小名浜港に平成26年7月1日に予定通り到着した。着岸する岸壁の前面の海底に事前に準備したマウンドの上に洋上風力発電船を誘導し、バラストに注水して着底させた。



図一5 曳航ルート（市原～小名浜）



写真一6 2MW級洋上風力発電船の曳航状況



写真一7 500t吊クレーン台船による係留チェーン引上げ作業の状況



写真一8 設置完了後の2MW級洋上風力発電船の状況

(4) 浮体係留

洋上風力発電船を着底させた状態で三井造船株式会社が風車内の電気工事、清水・新日鉄住金エンジJVは浮体係留の準備作業を行った。これらの作業を終え、平成25年7月28日に洋上風力発電船を再び浮上させ、設置海域へ曳航した。

洋上風力発電船が設置海域に到着後、曳航船2隻で洋上風力発電船の位置を保持しながら500t吊クレーン台船を洋上風力発電船の近傍に配置し、チェーンストッパー上側のチェーンを引き上げ、クレーン揚程分毎にチェーンを切断しながらチェーンに設計の張力が作用するまでこの作業を繰り返した（写真一7）。洋上におけるクレーン作業は、波浪による台船の動揺に伴いクレーンフックが振れるため、海象の影響を受ける。また、福島県沖の海域の特徴である濃霧に悩ま

れる場面もあった。そのため、洋上において待機を余儀なくされることもあり、難易度の高い作業であったが、台風が襲来するシーズンを迎える前に全6条の係留チェーン接続を終えることができた（写真一8）。

5. 送電ケーブルの敷設・埋設工事の概要

楢葉町の連系点から浮体式サブステーションをつなぐ66kV海底ケーブルの敷設作業は、洋上風力発電船の設置作業と平行して施工した。また、海底ケーブルと浮体式サブステーションをつなぐ66kVライザーケーブル、浮体式サブステーションと洋上風力発電船をつなぐ22kVライザーケーブルは浮体式サブステーション及び洋上風力発電船の係留後に引き続き行っ

た。ライザーケーブルとは、遮水性を高めた特殊なケーブルの一部に浮力体を取り付けてS字型の形状に設置するもので、浮体の移動に合わせてS字型のケーブル形状が変形するように設計されている(図-6)。

海底ケーブルの敷設ルートは砂層の海底地盤を選び、設定された。送電ケーブルの着底部は敷設後に埋設する仕様となっている。砂層がない岩地盤ではケーブルに防護管を取り付ける仕様となっている。

(1) 海底ケーブル・ライザーケーブル積込

66 kV 海底ケーブルは長さ 23.7 km, 66 kV ライザーケーブルは長さ 0.9 km, 22 kV ライザーケーブルは長さ 2.3 km である。敷設台船「開洋」を事業所の積出岸壁に係留し、台船上に艀装したターンテーブル(ケーブル搭載用の設備)に、工場から送り出されたケーブルの全線を巻き取った。

ケーブル積み込み後、敷設台船は小名浜港へ向けて曳船「俊鷹丸」に牽引されて回航した。

(2) 海底ケーブル陸揚げ・敷設

敷設台船は小名浜港3号ふ頭で準備を行い、最初の施工プロセスである陸揚げが可能な海象となるまで機を待った。連系点のある榑葉町に近い広野火力発電所の北側に位置する岩沢海水浴場が海底ケーブルの陸揚げ地点である。陸揚げルートにはローラーやケーブル牽引用のウィンチなどを設置しておいた。

平成25年6月5日の早朝、波高が下がるのを待って陸揚げ作業を開始した。敷設台船から海底ケーブルの端末を引き出し、陸揚げ地点に向けて引き込んだ(写真-9)。ケーブル端末が陸揚げ地点に到達した後、敷設台船がケーブルを送り出しながら沖に向けて移動し、計画のルートに沿って敷設を行った。

海底面が岩盤である場所に設置したケーブルには、敷設時に台船上で防護管を取り付けたり、あるいは敷設後にダイバーにより取り付けたりした(写真-10)。



写真-9 海底ケーブルの陸揚げ状況



写真-10 ケーブル敷設時における防護管の取り付け状況

(3) ライザーケーブル敷設

各浮体の係留完了後、敷設台船を浮体近傍に配置してからケーブル端末を引き出し、浮体側のケーブル引き込み管に引き込んだ。その際、設計上必要なケーブルの部位に台船上で浮力体を取り付けた。ライザーケーブルの浮遊部の敷設が終わり、敷設作業が着底部に移行してからは海底ケーブル敷設と同様の施工要領を実施した(写真-11)。

66 kV ライザーケーブルは、66 kV 海底ケーブルと

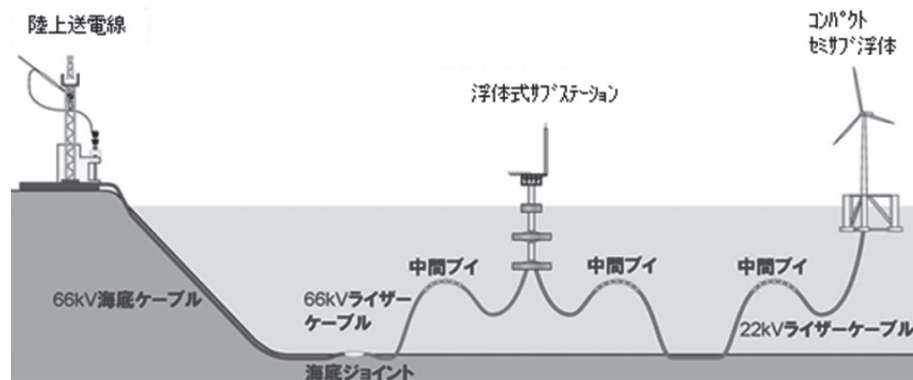


図-6 海底ケーブル及びライザーケーブルのイメージ



写真-11 敷設台船からのライザーケーブル送出しの状況



写真-13 ケーブル埋設仕様のROV投入状況

つながるため、ケーブル敷設が終了する際に66 kV海底ケーブルと66 kVライザーケーブルの各端末を敷設台船上に引き上げ、ジョイントボックスで接続してから海底に戻した(写真-12)。

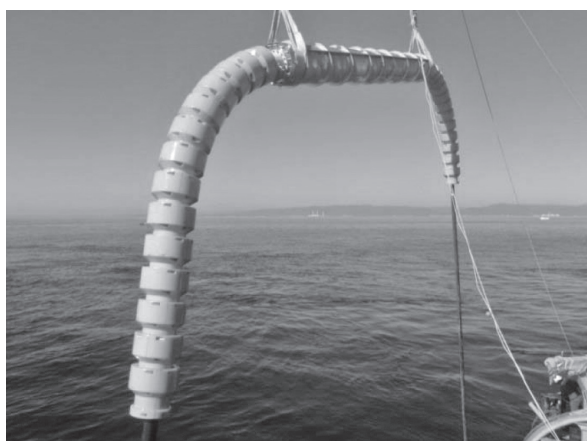


写真-12 ジョイントボックスの設置状況

(4) ケーブル埋設

海底ケーブル、ライザーケーブルとも、着底部は埋設を行っている。埋設はROVにウォータージェットを噴出するノズルを取り付け、ケーブル周辺の海底面をウォータージェットで緩ませることによりケーブルの自重で沈み込ませる要領で行った(写真-13)。

1回の施工によりケーブルが沈み込む深さは20 cm前後であり、複数回にわたりこの作業を繰り返すことにより、十分な埋設被りを確保している。

6. おわりに

ここまでで紹介した各工事の施工において使用した船舶のほとんどにDPS(Dynamic Positioning System)またはこれに準じたシステムが搭載されており、厳し

い海象条件においても高い精度で位置の保持が可能であった。また、今回使用した施工船舶は、それぞれの用途において先端の仕様であった。このような高性能な機械を最大限活用する施工計画であったからこそ、安全を確保しつつ、様々な技術的な課題を乗り越えられることができたと考えている。しかし、これらの施工船舶は洋上風力発電船の施工を想定したものではなく、作業の合理化や効率化においては改善の余地がある。我が国の浮体式洋上風力を発展させ、事業化に至らせるためには、このような改善を進めて経済的な施工ツールを整備し、実績を積み上げていくことが必要である。

なお、本事業では漁業との共存もテーマの一つとなっている。今、浮体の下やケーブルの周りには様々な魚類が集まっている(写真-14)。このような側面においても具体的な効果が表れており、浮体式洋上風力発電の技術的成果とともに、今後の福島の復興において意義ある成果が得られる可能性がある。本事業が多面的に貢献することが大いに期待される。



写真-14 浮体の下に集まった魚類

謝辞

洋上風力発電船の曳航・設置工事の発注者である三井造船株式会社、海底ケーブル・ライザーケーブル敷設工事の発注者である古河電気工業株式会社には、多大なるご協力をいただき、多くの困難を乗り越えることができた。ケーブルの接続作業を共同施工した株式会社ビスキャス、富士古河 E&C 株式会社とは、共に協力して詳細な検討を重ねたことで、確実な施工ができた。また、地元の漁業者や小名浜港利用業者を始め、船舶関連の全国団体、関連諸官庁・自治体など、様々な立場の方々からご支援をいただくことができ、工事の進捗に大変なお力添えをいただいた。この場を借りて、皆様に感謝の意を申し上げたい。

JCM/A

《参 考》

・福島洋上風力コンソーシアム ウェブページ

【筆者紹介】

堀 哲郎（ほり てつろう）

清水建設㈱

エンジニアリング事業本部 新エネルギーエンジニアリング事業部
事業部長



山下 篤（やました あつし）

新日鉄住金エンジニアリング㈱

海洋鋼構造事業ユニット プロジェクト部
部長



白枝 哲次（しろえだ てつじ）

清水建設㈱

エンジニアリング事業本部 新エネルギーエンジニアリング事業部
グループ長

