

Fukushima FORWARD Projectにおける送電システムの開発 (その2)

Development of Power Transmission System for Fukushima FORWARD Project (2)

榊原 広幸 *1
Hiroyuki Sakakibara

籠浦 徹 *2
Tooru Kagoura

織戸 寿 *1
Hisashi Orito

藤井 茂 *1
Shigeru Fujii

木村 貴史 *3
Atsushi Kimura

館野 祐二 *4
Yuji Tateno

〈概要〉

経済産業省委託業務、福島復興・浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業において、筆者らはケーブル送電システムを担当している。このたび世界最大級の7 MW級浮体式洋上風車へのライザーケーブル設計を行い、その工事が完了したので報告する。

1. はじめに

近年、海洋エネルギー利用技術として洋上風力発電システムをはじめとして海流、潮流、波力発電や海洋温度差発電等の再生可能エネルギーに関する研究開発が産官学にて推進されている。そのうち、洋上風力に関しては遠浅の沿岸海域が少ない我が国の特徴から、エネルギーポテンシャルの高い沖合での浮体式洋上風力発電の実証研究が進められている。当社は、経済産業省より福島復興・浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業 (Fukushima FORWARD (Fukushima Floating Offshore Wind Farm Demonstration Project) Project, 以下、Fukushima PJ) を委託事業として受けており、ケーブル送電システム (電力および光通信) を担当している¹⁾。

第1期工事 (2013年) では、陸上から洋上変電所までの66 kVケーブル接続工事および洋上変電所から2 MW級洋上風車への22 kVケーブル接続工事を実施した²⁾。このたび、第2期工事 (2014～2015年) として、洋上変電所から浮体式では世界最大級の7 MW級洋上風車への22 kVケーブル接続工事が完了し、受電を開始した。

2. Fukushima PJの概要

2.1 全体概要

本PJは、第1期 (2011～2013年) と第2期 (2014～2015年) から構成されており、第1期において2 MW級のダウンウインド型浮体式洋上風力発電設備1基と世界初となる25 MVA浮体式洋上サブステーションを1基建設した。当社は、それら浮体同士を結ぶダイナミックケーブル (以下ライザーケーブルと称

す) と陸上までの長距離海底ケーブルおよび陸上の関係線を設置した。

第2期には、7 MW級浮体式洋上風力発電設備を新設し、当社は洋上サブステーションまでのライザーケーブル布設を行った。図1にプロジェクトの全体概要を示す³⁾。



図1 プロジェクトの全体概要
Project Overview.

2.2 送変電システムの概要

風車発電容量は、2 MWおよび7 MWであり、洋上サブステーションまでの送電ケーブル (Inter Array ケーブル) は22 kVを選定した。陸揚げ予定位置から風車設置予定位置までは海底ケーブル長で約25 kmあり、22 kVでは送電ロスが大きいため、本PJでは、洋上にサブステーションを設け、66 kVに昇圧し陸上へ送電することとした (Exportケーブル)。陸揚げ後は、途中に開閉所を設け、最も近傍となる電力会社殿の既設66 kV架空送電線に接続し、系統連系を行っている。図2に、送変電システムの概要を示す。なお、図2に示す洋上サブステーションからは最終的に3基の風車が接続されるが、図中では、7 MW級風車を代表として示した。

*1 電力事業部門 電力エンジニアリング部

*2 研究開発本部 情報通信・エネルギー研究所

*3 古河電工パワーシステムズ株式会社 配電事業部 地中配電技術部

*4 株式会社ビスキャス 研究開発部

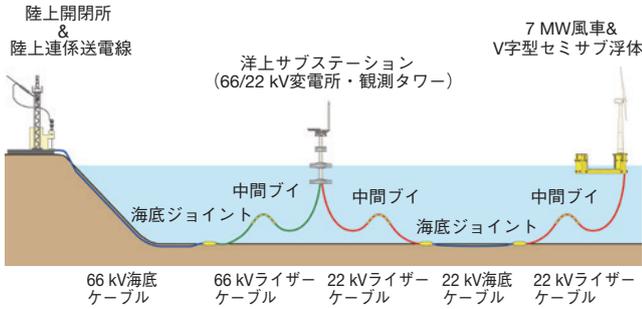


図2 送変電システム概要
Transmission and Substation System.

3. ライザーケーブルシステム設計

3.1 ケーブルシステムの設計

ライザーケーブルは浮体(変電所, 風車)より海中に懸垂設置される。そのため, 従来のStaticな海底ケーブルと異なり浮体の動揺, 潮流等の影響を受け海中の線路形状がDynamicに変化し, 繰り返し曲げによる機械疲労を受ける。

そこで, 耐疲労特性に優れた構造に関して検討した。ケーブル設計は, 「電気設備の技術基準の解釈」第127条「水上電線路及び水底電線路の施設」の構造規定を基本とし, ケーブルの各構成材料を見直し, 高耐久性を有する構造とした。電気的, 機械的特性は, JEC-3408, CIGRE TB 490, CIGRE Electra No.171を満足することを条件とした。

ライザーケーブルシステム設計では, 海象条件, 浮体動揺特性や浮体係留設計条件などを基にライザーケーブルの海中挙動をシミュレーションによって予測し, 機械強度や曲率半径, 耐久性等を満足させるライザー形状や必要なアクセサリー(ライザー上端部の曲げモーメントに対応する部材: ベンドステイフナー, ブイ, 着底部における海底との摩擦に対応する部材: 防護管)を検討した。具体的には図3に示すライザーケーブルシステム設計フローに従ってライザー形状を選択し, 浮体最大移動量に対する静的挙動解析, 浮体最大動揺に対する動的挙動解析を行ってその成立性を確認し, 最終的に疲労解析まで行って最終的なシステムを決定した。

以上の設計フローを基に, ケーブル基本構造を決定, 試作を行い, 基礎機械特性, 疲労特性, 遮水性試験等の種々評価を行った⁴⁾。一例として, 最終的に決定したライザーケーブルの諸元を表1に, 22 kVライザーケーブルの構造を図4に示す。

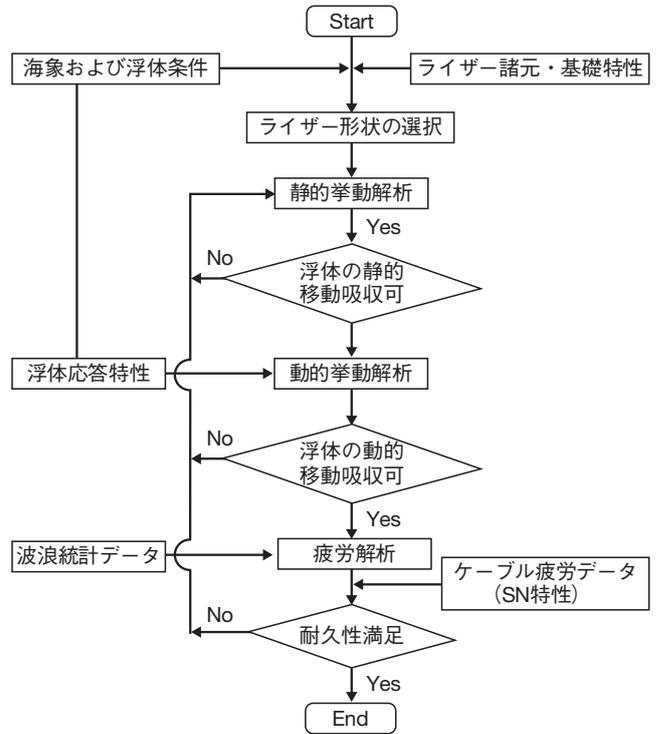


図3 ライザーケーブルシステム設計フロー
Design Flow of Riser Cable System.

表1 ライザーケーブルの諸元
Structure of Riser Cable.

項目	66 kV ライザーケーブル	22 kV ライザーケーブル
公称電圧	66000 V	22000 V
電力線心数	3	3
公称断面積	100 mm ²	150 mm ²
光ファイバ線心数	SM8芯×3本	SM8芯×1本
がい装	6 mm 鉄線2重	6 mm 鉄線2重
仕上がり外径	約175 mm	約147 mm
概算質量(気中)	52600 kg/km	43400 kg/km
概算質量(水中)	29300 kg/km	27100 kg/km
最大導体抵抗(20℃)	0.197 Ω/km	0.121 Ω/km
最小絶縁抵抗(常温)	4000 MΩ・km	2000 MΩ・km
最大静電容量	0.16 μF/km	0.30 μF/km

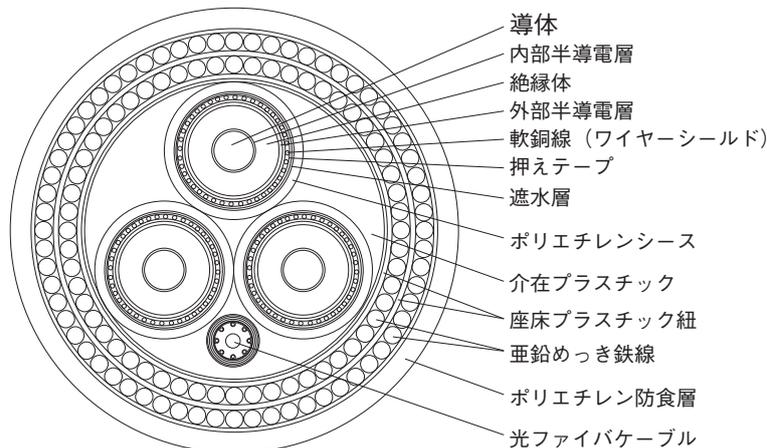


図4 22 kV ライザーケーブルの構造
Structure of 22 kV Riser Cable.

3.2 海底ジョイントの設計

ライザーケーブルと海底ケーブルの異種接続部(海底ジョイント)を開発した。本ジョイントに求められる仕様は、表2の通りである。

表2 海底ジョイント目標特性
Target characteristics.

項目	要求仕様
接続	海底ケーブルとライザーケーブルを接続可能なこと
絶縁強度	22 kV用接続部 商用周波耐電圧 57 kV・3時間(常温) 雷インパルス耐電圧 -230 kV・3回(常温) 66 kV用接続部 商用周波耐電圧 130 kV・3時間(常温) 雷インパルス耐電圧 ±485 kV・3回(常温)
耐外水圧	最大水深130 mに耐えること 22 kV用接続部のみ 透湿度 1×10^{-7} [g・(cm/cm ²)・day・mmHg]以下
機械特性	沈設張力約93.1 kNに耐えること
施工	台船上で組立可能なこと

海底ジョイントは22 kV用ジョイントは長さ約4 mの保護管内に電力線心接続部を3個、光接続部を1個組み込む構造、66 kV用ジョイントは長さ約7 mの保護管内に電力線心接続部を3個、光接続部を1個組み込む構造とした。保護管の機能については、埋設などで電力線心および光接続部が損傷しないよう耐外傷性を求めるものまでとし、防水はケーブル構造同様に接続部に期待する設計とした。

特に22 kV用ジョイントでは、後述するように、海底ジョイントをカタナリー状で沈設する方法と海底ジョイントを水平に吊って沈設する方法の2種類を実施するため、両方式でも耐えうる機械特性とすることを設計条件に入れた。

電力線接続部に関しては、22 kVはテープ巻き絶縁、66 kVはゴムブロックとし、接続部保護銅管に水密構造を施す構造とした。また、海底ジョイントの端部は海底ジョイント沈設作業においてケーブルに過度な曲げが生じないように抑制装置(ベンドリストラクター)を施した。

以上の様に設計を行った接続部の試作を行い、1.3 MPa下の耐水圧および透水性試験を行い、問題の無いことを確認した。

現場組立後の22 kV用海底ジョイント写真を図5に示す。



図5 22 kV用海底ジョイント外観
Photo of Submarine Joint.

4. ケーブル布設工事

4.1 布設手順

図6に第2期工事での布設手順を示す。まず、ライザーケーブルを浮体に引込み、ケーブルを繰出しながらモジュラーパイ等ケーブルアクセサリを取り付ける。その後、ケーブルタッチダウン点を確認、ケーブルを所定位置まで繰出した後、台船上で海底ジョイントを組立てる。海底ジョイントをカタナリー状に沈設させ、着底状態を確認した後、海底ケーブルを浮体係留位置近傍の所定位置まで布設し、端部にマーカーパイを取り付ける。

次に、風車浮体に変電所への引き込みと同様な手順でライザーケーブルを引込み、所定位置までライザーケーブルを布設した後、海底ケーブルを台船に揚収し、海底ジョイントを組立てる。海底ジョイントを天秤棒を用いて水平に吊り、沈設作業を行い海底に着底させる。必要な埋設作業を各年度に行い、布設作業完了とする。

布設作業後には、ROV (Remotely operated vehicle) によるケーブル埋設、布設後のライザーケーブル線形及び布設状態確認を実施した。

また、電力線心には直流耐電圧試験、光線心にはOTDR測定を実施し、それぞれ問題が無いことを確認した。

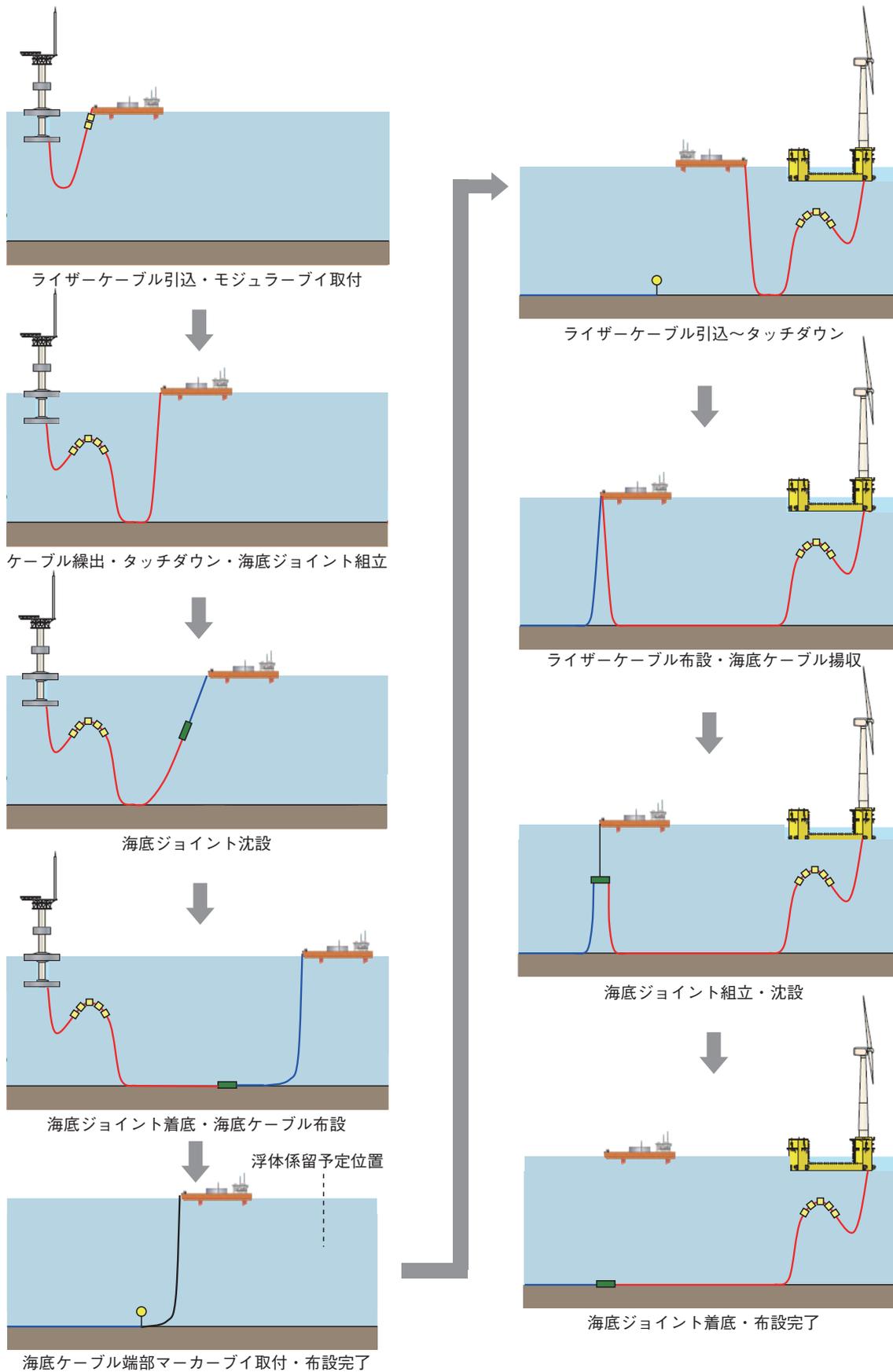


図6 22 kVライザーケーブルおよび海底ケーブルの布設手順
Installation Procedure of 22 kV Riser Cables and Submarine Cables.

4.2 布設工事

これまで、布設工事は3ヵ年実施している。各年度の工事概要を表3に示す。

表3 各年度の工事概要
Installation works in each period.

期間	工事概要	備考
2013年度	陸上関係線工事 陸上開閉所～洋上変電所間66 kVケーブル布設 洋上変電所～洋上風車(2 MW)間 22 kVケーブル布設	2 MW 風車運開
2014年度	洋上変電所～洋上風車(7 MW) 浮体係留予定位置間 22 kVケーブル布設(2条)	
2015年度	洋上風車(7MW) 浮体への22 kVケーブル布設(1条)	7 MW風車 運開予定

布設作業には、ターンテーブルを装備し、Dynamic Positioning System (DPS)で作動するケーブル布設専用台船「開洋」を使用した。ケーブル及び資機材を積み込んだ布設船の写真を図7に示す。布設船「開洋」には、ライザーケーブルおよび海底ケーブル、モジュラーブイなどのアクセサリを積み込んだ。ケーブル布設中の様子を図8に示す。



図7 布設台船「開洋」
Laying vessel (KAIYO).



図8 風車へのケーブル布設(7 MW級風車)
Riser cable laying at 7 MV windmill.

海底ジョイントは「開洋」上で組立てた後、図9に示す様に布設船のシューターから海中へとカタナリー状に沈設布設する方法、および図10に示す様に天秤棒を用いて、クレーンおよびウインチで海中へと沈設布設した。海底ジョイントの着底時はROVでケーブル曲率等を観測しながら注意して作業を行った。図11に海底ジョイント着底時のROV写真を示す。



図9 海底ジョイント沈設作業
Submarine Joint Laying.



図10 海底ジョイント沈設作業
Submarine Joint Laying.

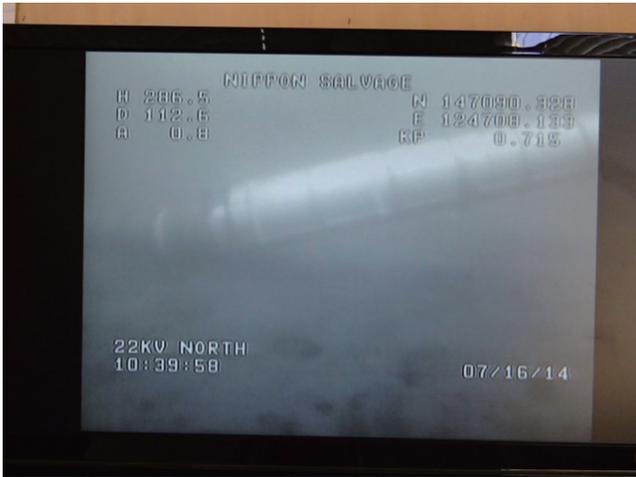


図11 海底ジョイント着底
Submarine Joint on the Sea Bed.

布設作業後に、電力線心には直流耐電圧試験、光線心にはOTDR測定を実施し、それぞれ問題が無いことを確認した。

また、ROVで布設後のライザーケーブル線形及び布設状態を確認し、主要点の位置を確認、設計値と遜色無いことを確認した。図12に一例として、モジュラーブイの確認時の写真を示す。



図12 ROVでの線形確認
Linear confirmation by ROV.

5. おわりに

このたび、Fukushima PJにて世界最大級の浮体式7 MW級洋上風車へのケーブル接続工事が完了した。本送電線は、2015年9月24日に風車への受電作業が完了し、今後コミッショニング作業を経て、運用が開始される予定である。

浮体式発電システムの送電システムとして必要なライザーケーブルは世界でもまだ十分な実績があるとは言えないが、本PJにて得られる知見を活かして最適システム設計や維持管理手法の確立を目指す予定である。

なお、この研究は、経済産業省の福島復興・浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業として実施されており、関係者には感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 藤井 茂 他:「Fukushima FORWARD Projectにおける送電システムの開発」, 古河電工時報, Vol.131, p.44-48 (2013).
- 2) Yuji Tateno et al: "Dynamic Cable Installation for Fukushima Floating Offshore Wind Farm Demonstration Project", CIGRE AORC Meeting, (2014).
- 3) 福島洋上風力コンソーシアム
- 4) 籠浦 徹 他:「海洋エネルギー送電システム」, 日本船舶海洋工学会誌 KANRIN, 第62号 (2015).