

4 大容量を目指す洋上風力発電技術

送電技術：世界最大規模のダイナミックケーブルシステム開発

古河電気工業株式会社 電力事業部門 洋上風力プロジェクトチーム 藤井 茂

1. はじめに

浮体式洋上風力発電は、世界第 6 位の排他的経済水域を誇り、着床式洋上風力発電に最適な遠浅の海岸が少ない我が国において、有望な発電方式である。世界においても取り組み事例はまだ少なく、日本を代表する各社がコンソーシアムを組み、経済産業省からの委託事業として Fukushima FORWARD Project (以下、本 PJ) を進めている。浮体式の洋上サブステーションを有し、複数の浮体式風車を浮かべるウインドファームは世界初の取り組みである。

当社は、本 PJ の中で大容量送電システム開発(電力、光通信)を担当しており、洋上風力発電所にて発電された大容量の電力を効率よく送電し、既設送電系統に連系する重要な役割を担っている。本稿では浮体式に必須技術であるダイナミックケーブルシステムの開発状況を中心に報告をする。

2. プロジェクトの全体概要について

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 2MW のダウンウィンド型浮体式洋上風力発電設備 1 基と世界初となる 25MVA 浮体式洋上サブステーションを 1 基建設する。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自営送電線を設置する。

第 2 期には、7MW 浮体式洋上風力発電設備 2 基を新設し、合計で 16MW の発電量となる。当社は、7MW 浮体から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う。全体概要を図 1 に示す。



図 1. プロジェクトの全体概要

2.2 送変電システムの概要

風車発電容量は、2MW および 7MW 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 22kV を選定している。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ルート長で 20km 強あり、22kV 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、66kV に昇圧し、陸上へ送電することとしている (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 66kV 架空送電線に接続し、系統連系を行う。

送変電システム概要を図 2 に示す。当社が担当しているのは、送電に関する部分である。

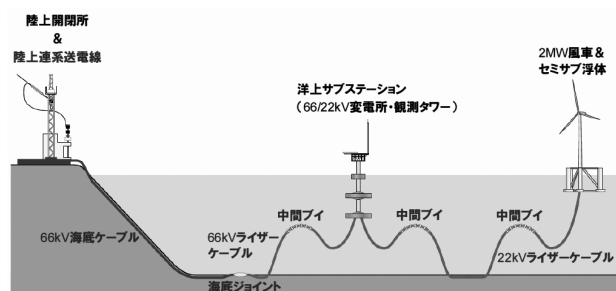


図 2 送変電システム概要

浮体に接続されるライザーケーブルは、波浪・潮流等による海象状況、浮体そのものの動揺による影響を受けて、ダイナミックな動きが要求されるため、今回新たに開発するものである。本 PJ では、風車・浮体の制御や各種計測データ (洋上サブステーションに併設される観測タワーや各浮体での計測データ、画像など) の通信を行うため、海底ケーブル・ライザーケーブルは、光ファイバーを内蔵した光複合電力ケーブルにて設計を行う。

22kV、66kV 級の光複合ダイナミックケーブルは、洋上風力発電用として世界最大級となり、将来的な大容量洋上風力発電実現には必要不可欠な技術である。

3. ライザーケーブルの開発について

3.1 基本設計

ダイナミック用途では、海中浮遊状態でのケーブ

ル挙動をシミュレーションする解析技術が重要であり、海中浮遊形状の十分な検討が要求される。適用される海象条件と浮体の動揺条件およびライザーケーブルの諸元・形状を合わせて、静的挙動解析、動的挙動解析、疲労解析という順番で、解析・フィードバックを繰り返し、最適な海中形状・ライザーケーブル詳細設計を実施していく。

今回必要となるライザーケーブルは、弊社でも過去実施例のある 6.6kV 級とは異なり特別高圧の 22kV および 66kV 級となっている。このためケーブル外径、重量も大きく、電気的なストレスも厳しくなるため電力ケーブルとして耐疲労特性に優れた構造が求められる。

海底ケーブルとしての基本構造は、「電気設備技術基準」第 127 条「水上電線路および水底電線路の施設」に定められており、それを満足することが基本である。ダイナミックケーブルとしてさらに要求される特性を表 1 にまとめる。

表 1. 要求特性

項目	目標特性
設置場所の海象条件	・浮遊状態での許容張力、最小曲げ半径を満足すること
浮体動揺条件	・浮遊部のケーブルが海底に接触しないこと ・ケーブルがキンク（ねじれ）を起こさないこと
設計寿命	・風車・浮体と同様であること

ライザーケーブルは、これまでの知見を基に図 3 に示す構造とした。がい装は、ケーブル捻回力に対応するため、2重交互捻りを採用している。

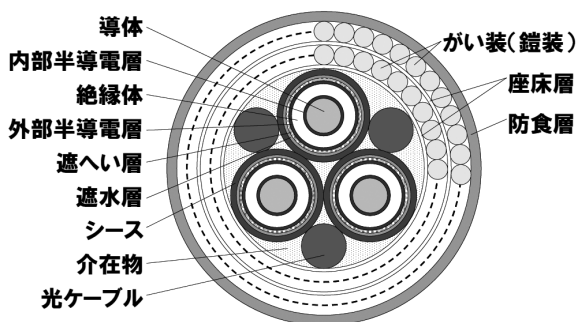


図 3 66kV ライザーケーブル構造図

3.2 詳細設計および挙動解析

3.2.1 挙動解析

今回、ライザーケーブルが接続される浮体は構造、大きさの異なる 3 種類となり、それぞれ動揺特性も

異なることから、挙動解析はそれぞれの浮体毎に実施する必要がある。

今回の開発では、当初、ケーブル張力低減のための軽量化を指向し、ライザーケーブル基本設計において、海象条件と浮体動揺条件を適用して、静的挙動解析を実施した。解析に使用した福島沖海象条件を表 2 に示す。

表 2 海象条件

項目	採用値
暴風波浪時の 50 年再現期待値	有義波高 11.71m
	有義波周期 13 秒
海潮流	1.5m/s (吹送流含む)

その結果、ライザーケーブルが潮流により大きく流される現象が生じることが判明し、本 PJ の厳しい海象条件では、当初指向したライザーケーブル軽量化設計は適用できないことが明らかとなった。

そこで、ライザーケーブルは構造上極限までの重量化を図り、再度解析を実施したが、図 4 に示すように着底面でのキンク（ねじれ）現象が発生し、要求特性を満足しない結果となった（○で囲った部分）。

最終的には着底部のケーブル重量を更に増加させることで、ようやく、要求特性を満足する海中浮遊形状およびライザーケーブル構造の確定が行えた。

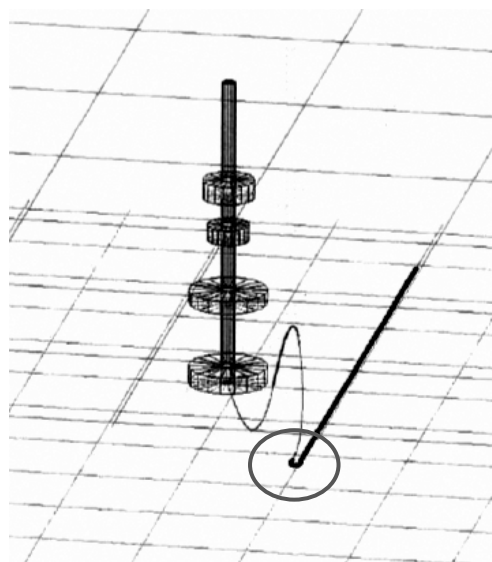


図 4 着底部でキンクが発生している事例

次に、各浮体の RAO データをもとに動的挙動解析を行い、最も厳しい条件下における、発生張力と曲げ半径について評価を実施した。その結果、発生張力および曲げ半径共に特に問題となる部位は確認

されなかった。しかしながら、ライザーケーブルを浮体内部で固定している部分で最大張力が発生するため、この部分でのがい装引き留め装置の設計にあたっては、十分裕度のある設計とする必要がある。

今後、ケーブル SN 特性を評価することで、最終的には疲労解析を実施する予定である。

ライザーケーブルの主な設計諸元を表 3 にまとめる。

表 3 ライザーケーブル諸元

	22kV 用	66kV 用
外径	約 ϕ 150mm	約 ϕ 180mm
質量(気中)	約 45kg/m	約 55kg/m
内蔵光ケーブル	1 本	3 本
中間ブイ	モジュラー型	

3.3 試作・評価

66kV ライザーケーブル試作を行い、試作品の機械物性値測定(縦剛性および曲げ剛性)を実施した。得られた実機データを反映させた挙動解析により、実際の海中での最適ライザーケーブル形状を決定した。

実施した評価試験を表 4 に示す。22kV 試作品でも同様の評価試験を行い、ライザーケーブルの特性に問題のないことを確認した。

表 4 評価試験項目

①引張試験、引張曲げ試験
②ねじれ試験
③側圧試験
④繰り返し曲げ疲労試験
⑤上記試験後の解体調査
⑥引き留め部引張試験
⑦海底ジョイント耐水圧試験



図 5 66kV ライザーケーブル

また、各浮体構造が異なるため、ライザーケーブルの浮体への引き込み方法も浮体毎に検討が必要であり、施工方法も非常に重要な検討要素である。

3.4 実証試験に向けて

実証試験においては、ライザーケーブル布設時に加速度センサを取付け、実機での挙動計測を実施する予定である。海洋データや浮体動揺データの実測も合わせて行われるため、それらとライザーケーブル実測データをリンクさせた解析を行い、机上での検討結果、工場実測データ、実機実測データを総合的に判断した疲労解析を行い、最終的に維持管理手法の確立を目指す予定である。

4. 工事概況

今年度実施したライザーケーブル布設工事の概況を以下に示す。



図 6 ライザーケーブル布設船



図 7 サブステーションへのライザーケーブル布設



図 8 浮体内でのライザーケーブル固定状況



図 12 2MW 風車浮体へのライザーケーブル布設



図 9 海底ジョイント沈設作業



図 10 浮体下部におけるライザーケーブル補強材

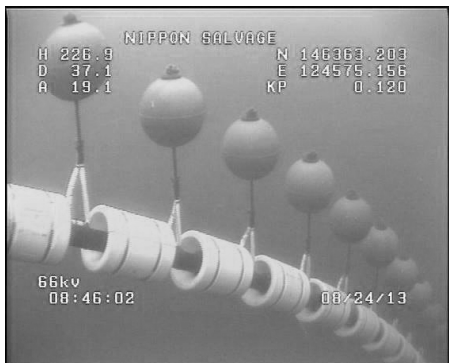


図 11 中間ブイ

工事終了後に、布設した 66kV 海底ケーブル/66kV ライザーケーブルおよび 22kV ライザーケーブルの竣工耐電圧試験を行い、問題なく施工が実施されている確認を行った。

表 5 竣工耐電圧試験

対象	試験仕様
66kV 系	DC151.8kV × 10 分
22kV 系	DC57.5kV × 10 分

5 おわりに

本 PJ は非常にタイトなスケジュールで実施しており、また、太平洋側沖合という厳しい海象条件の中で工事を行ったため、ライザーケーブル工事は非常な苦勞を伴った。浮体係留工事が長引いたことにより、ライザーケーブル工事は太平洋側の海洋工事では海象が厳しくなり不向きとされる 8 月後半から開始し、複数の台風来襲に見舞われる中、約 1 ヶ月という短期間で世界初の工事をやり遂げた。

今後は、まず 2MW 風車の発電開始と様々なデータ取りが予定されており、来年度以降において 7MW 風車加わることで、世界初の浮体式洋上 Wind Farm としての運用を行って行くこととなる。

当社としても更なる Wind Farm 大規模化への対応として、ライザーケーブルの高電圧・大容量化を進め、期待される大容量洋上風力発電の実現へ貢献していく所存である。