Fukushima FORWARD Projectにおける送電システムの開発

Development of Power Transmission System for Fukushima FORWARD Project

藤井 茂*5 舘野祐二* 富久田晃司 冨永康博*3 Shigeru Fujii Yuji Tateno Koji Tomikuda Yasuhiro Tominaga 中野博史*3 堀口規昭*3 今 博之 Noriaki Horiguchi Hiroshi Nakano Hiroyuki Kon 籠浦 徹*4 山口卓見*5 榊原広幸*5 Takumi Yamaguchi Hiroyuki Sakakibara Tooru Kagoura

概要 世界第6位の排他的経済水域 (EEZ) を誇る我が国の再生可能エネルギーの有力な候補であ る浮体式洋上風力発電を実現化すべく,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。日本を代表する各社がコンソーシアムを組み,当社は送電シス テムを担当している。ここでは浮体式に必須である,高電圧用ダイナミックケーブルの開発を中心に 送電システムの開発状況を述べる。ダイナミックケーブルは,スタティックな海底ケーブルとは異な り,常に波浪などによる海中での揺れを受けており,耐疲労性の向上が開発ポイントであり,実用化 に向けて浮体・風車と同様な寿命を実現することが目標である。

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、浮体式の洋上サブステーションを有し、複数の風車 を浮かべるウィンドファームは世界初の取り組みである。

当社は,全体プロジェクトの中で送電システム(電力,光通信) を担当しており,陸上の自営線と海底ケーブルにより,風車発 電電力を電力会社に系統連系する役割を担っている。本稿では 浮体式に必須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。

本PJは,福島県沖合に実証システムを設置して実証研究を 実施するが,実証結果の展開により,東日本大震災の被害から の復興に向けて,再生可能エネルギーを中心とした新たな産業・ 雇用の創出に結びつけることも目指している。

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)

休式云仙にヘイヤヘ 仅恒平司	研究開発部
----------------	-------

- *2 株式会社ビスキャス 配電事業部 配電技術部
- *3 株式会社ビスキャス 電力事業部 電力技術部
- *4 研究開発本部 パワー&システム研究所
- *5 エネルギー事業部 洋上風力プロジェクトチーム

から構成されており,第1期において2 MW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25 MVA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の自営線を設置す る。

第2期には、7 MW浮体式洋上風力発電設備2基を新設し、 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 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66 kV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。当社は送電に関する部分 を担当している。



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

今回開発するライザーケーブルは、波浪・潮流等の海象状況, 浮体自身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。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)の情報通信を行うため、海底ケーブル・ラ イザーケーブルは、光ファイバを内蔵した光複合電力ケーブル にて設計を行う。

3. ライザーケーブルの開発について

3.1 基本設計

当社は、海底ケーブルのみでなく、海底送油管、深層水取水 管などの豊富な実績があり、ダイナミックな動きが要求される 使用用途における検討実績も豊富に有する。浮体式設備用途で の海底ケーブル実績として、6.6 kV級は、既に1977年の山形 県由良沖での波力発電装置「海明」や1986年の「ポセイドン」を 始め、浮体式原油荷役バースでの実運用実績(1992年〜現在) がある。ダイナミックな動きが要求される用途では、海中浮遊 状態での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。

ライザーケーブルの設計フローを図4に示す。外的条件とし て、適用される海象条件と浮体の動揺条件がまず必要である。 それらと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 計を行う。

今回必要となるライザーケーブルは、実施例のある6.6 kV 級とは異なり、特高圧の22 kVおよび66 kV級で、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。



図3 ポセイドン概要 POSEIDON System.



図4 ライザーケーブル設計フロー Design Flow of Riser Cable.

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必要である。また電気的・機械的な 特性は、JEC-3408¹⁾、CIGRE TB 490²⁾、CIGRE Electra NO.171³⁾を満足することを前提とし、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 Target characteristics.				
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 動摇条件	 ・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5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 撚りを採用している。



5 66 KV ワイリークークル博造図 Structure of 66 kV Riser Cable.

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ごとに行う。

今回の開発では,当初,張力低減のために軽量化を指向し, 該当する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,静的挙動解析を行った。解析に使用した 海象条件を**表2**に示す。

表2	海象条件	
	Wave conditions.	

項 目	採用値
	有義波高 ¹⁾ 11.71 m
泰風仮很時の30 中丹現期付値	有義波周期 13秒
海潮流	1.5 m/s (吹送流含む)

1)ある地点で一定時間(例えば20分間)に観測される波のうち,高い ほうから順に1/3の個数までの波について平均した波高。

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の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の極限まで重量化を図り、 再度解析を行ったが、図6および図7に示すように着底面でキ ンク現象が発生し、キンクは、中間ブイ構造によらず発生し要 求特性を満足しない(〇で囲った部分)。

最終的にはケーブル着底部にWeightを取付け,重量を更に 増加させることで,図8に示すように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が確定した。



図6 着底部でキンクが発生している事例 (モジュラーブイ) Cases the Submarine Cable is kinked (Modular buoy).



図7 着底部でキンクが発生している事例 (ミッドアーチブイ) Cases the Submarine Cable is kinked (Mid arch buoy).



図8 着底部でキンクが発生していない事例(モジュラーブイ) Cases the Submarine Cable is not kinked (Modular buoy).

次に、各浮体のRAO(Response Amplitude Operator)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行った。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 が、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特性を評価し,最終的には疲労解析を行 う予定である。

ライザーケーブルの主な設計諸元を**表3**に示す。

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

表3 ライザーケーブル諸元 Specification of Riser Cable.

3.3 試作·評価

66 kVライザーケーブルの試作を行い,試作品の機械物性値 測定(縦剛性および曲げ剛性)を行った。今後,ライザーケー ブルの挙動解析と実機データを反映させた解析により,海中で の最適ライザーケーブル形状を決定していく予定である。

今後予定している主な評価試験を表4に示す。22 kV試作品 においても同様の評価試験を行い、ライザーケーブルの特性確 認を行う予定である。

表4 評価試験項目 Test items.
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

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,工法検討も合わ せて実施中である。ライザーケーブル施工手順案を図9に示す。

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。

本PJでは、東京大学殿および各社において海洋データや浮 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. 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,現段 階はまだ試作・評価段階である。今後評価試験によるライザー ケーブルシステムの特性確認を行うと同時に,来年度の実工事 に向けた製造を行い,複数の浮体および世界初の浮体式洋上サ ブステーションを有するウインドファームの施工を成功させる べく引き続き検討を行っていく。

参考文献

- JEC 3408「特別高圧 (11 ~ 275 kV) 架橋ポリエチレンケーブ ルおよび接続部の高電圧試験法」(1997)
- CIGRE TB 490 (Recommendations for Testing of Long AC Submarine Cables with Extruded Insulation for System Voltage above 30 (36) to 500 (550)kV
- CIGRE Electra NO.171 (Recommendations for Mechanical Tests on Sub-marine Cables)