



2050年カーボンニュートラルに向けた電力事業部門の取り組み ～ TLP 浮体式洋上風力向けダイナミックケーブルシステムの開発と大水深海底ケーブルの開発～

Initiatives of the Power Cable Division Toward Carbon Neutral by 2050 – Development of Dynamic Cable Systems for TLP Floating Offshore Wind Power and Deep Water Submarine Cable –

大竹 陽介 ^{*1}
Yosuke Otake

富井 櫻子 ^{*2}
Sakurako Tomii

籠浦 徹 ^{*1}
Toru Kagoura

岸田 寛 ^{*1}
Yutaka Kishida

榊原 広幸 ^{*2}
Hiroyuki Sakakibara

小板橋 拓斗 ^{*3}
Takuto Koitabashi

茂森 直登 ^{*1}
Naoto Shigemori

高際 清彦 ^{*5}
Kiyohiko Takagiwa

藤井 茂 ^{*4}
Shigeru Fujii

尹 栄徳 ^{*2}
Youngduk Yoon

丸山 悟 ^{*1}
Satoru Maruyama

堀口 規昭 ^{*1}
Noriaki Horiguchi

〈概要〉

2050年カーボンニュートラル実現に向けた取り組みが活発となっており、エネルギー構造の変革に注目が集まっている。中でも洋上風力発電は、発電量を大幅に引き上げる将来目標が政府より掲げられており、それに伴う海底電力ケーブルの需要が高まっている。また、再生可能エネルギーの主力電源化と電力ネットワーク強靱化のため、直流海底ケーブルを使用した広域連系システムのマスタープランが示されるなど、海底電力ケーブルの重要性はこれまでよりも増している。当社ではこれらの需要に応えるべく技術開発を行っており、本稿では、TLP (Tension Leg Platform) 浮体式洋上風力向けダイナミックケーブルシステム開発と大水深海底ケーブル開発について述べる。

1. はじめに

2020年10月、我が国は2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、カーボンニュートラルを目指すことを宣言した。この達成には、エネルギー・産業部門の構造転換、大胆な投資によるイノベーションの創出といった取り組みを大きく加速することが必要で、経済産業省が中心となり、関係省庁と連携して「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」¹⁾が策定されるなど、国を挙げての取り組みが進んでいる。この2050年カーボンニュートラル達成に向けて、再生可能エネルギーの大量導入は必要不可欠である。その中でも、四方を海に囲まれ、世界第6位の排他的経済水域 (EEZ) の広さを持つ我が国において、洋上風力発電は非常に高いポテンシャルを秘めており、重要な役割を果たすと期待されている。図1に将来的な導入目標、地域別の導入イメージを示す。2030年に1000万kW、2040年には3000万～4500万kWの導入目標が示され、洋上風力発電の更なる増加が期待される。また、洋上風力発電の導入ポテンシャルが高い地域は、北海道や東北、九州地方であり、首都圏など電力の大需要地とは離れている。そのため、発電地域と需要地とをつなぐ、直流送電網の整備計画 (広域連系システムのマスタープラン²⁾) が策定されるなど、海底電力ケーブルの需要は現在よりも大幅に増加することが予想される。

当社としてはこれらの期待に応え、2050年カーボンニュートラル実現に貢献するべく、多方面から海底電力ケーブルの開発を行っており、本稿では「TLP浮体式洋上風力向けダイナミックケーブルシステムの開発」と「大水深海底ケーブルの開発」について述べる。

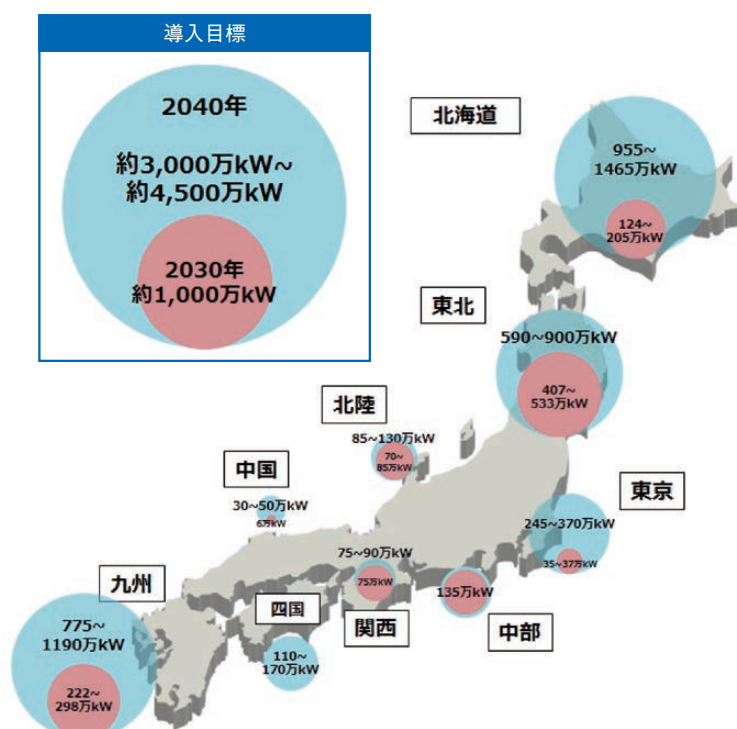


図1 地域別の洋上風力発電導入イメージ³⁾
Image of regional offshore wind power deployment.

^{*1} 電力事業部門 技術開発部

^{*2} 電力事業部門 電力技術部

^{*3} 電力事業部門 新エネルギーエンジニアリング部

^{*4} 電力事業部門 電力プロジェクト統括部

^{*5} エネルギーインフラ統括部門 事業戦略室

2. TLP浮体式洋上風力向けダイナミックケーブルシステムの開発

2.1 TLP浮体の特徴

TLP (Tension Leg Platform：緊張係留式プラットフォーム) は洋上風力発電の浮体形式の一つであり、緊張係留により海底地盤に強固につながり、他の浮体形式(セミサブ、スパー型)に比べ、波浪・潮流に対する動揺が少ないこと、および海域の専有面積が小さく、漁業に与える影響を最小限にとどめることを特徴とする(図2)。

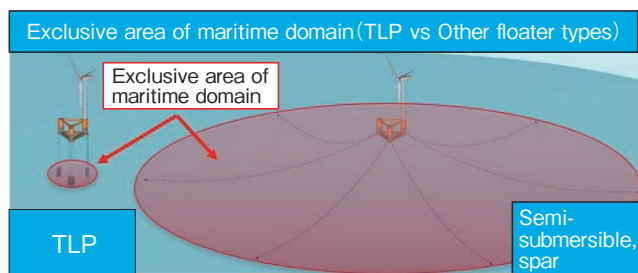


図2 洋上風力用浮体の比較
Comparison of the floater types.

2050年カーボンニュートラル達成に向けたプロジェクトであるグリーンイノベーション基金の下、2022年度から2023年度にかけ、古河電工を含む4社にて、浮体式洋上風力発電の低コスト化を目標としたTLP浮体の要素技術検討^{4)～6)}を行った。具体的には、石狩湾沖を想定したTLP浮体、係留、係留基礎、およびダイナミックケーブルの開発である。本稿では古河電工が担ったダイナミックケーブルシステムの開発の要点について述べる。

2.2 ケーブルシステム設計の最適化

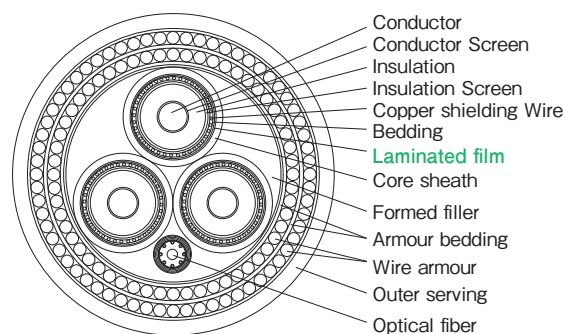
浮体動揺が他の浮体形式と比べ小さいというTLPの特徴を活かし、低コスト化を目標とし、ダイナミックケーブルシステムを「ケーブル構造」および「線形設計」の観点から最適化した。

(1) ケーブル構造の最適化

従来、架橋ポリエチレン(XLPE)などの固体絶縁材料を用いた電力ケーブルは、ケーブル絶縁体内に水分が侵入した状態で課電されると水トリーと呼ばれる変質部分が生じ、絶縁性能が劣化する現象が発生する。対策として、水の侵入を防ぐために金属遮水層が設けられる。ダイナミックケーブルの場合、水中で常時揺動するため、疲労耐性を考慮した遮水層として金属被を適用する場合、歪みを緩和させやすいコルゲート形状のものが採用される場合がある。

TLPは浮体動揺が小さいという観点からより簡易的な構造でも疲労および機械的特性を満足する可能性があることから、図3に示すSemi-dry⁷⁾と呼ばれる遮水層にステンレスコルゲートなどの代わりとしてアルミニウムラミネートフィルムを適用するケーブル設計を採用した。

(a) Semi-dry design



(b) Cable system configuration

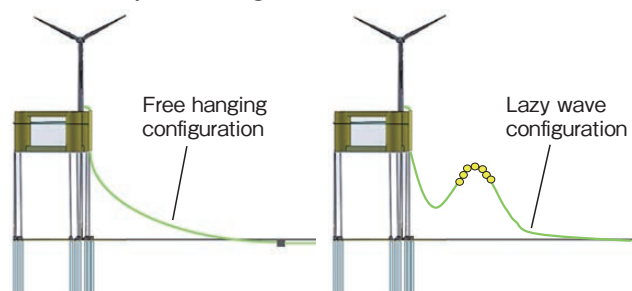


図3 (a) Semi-dry構造, (b) ケーブル線形構成
(a) Semi-dry design, (b) Cable system configuration.

(2) フリーハンギング線形の採用

浮体形式におけるダイナミックケーブルの布設は、海象条件や浮体の設計条件を考慮し、ケーブルが動的挙動に耐え得る形状を取る必要がある。一般的に他の浮体形式においては、ダイナミックケーブル中間部にブイを設けることで、浮体挙動によるケーブルへの歪みを緩和させるようなLazy-wave方式の線形を取る。一方でTLPは浮体動揺が小さいため、歪みの吸収代がなくとも動的挙動に耐え得る可能性があることから、ブイを用いないフリーハンギング線形を採用した。

(1)および(2)の最適化を行うことで、遮水層設計およびブイを用いた線形形状設計に対してコスト低減効果が見込まれる。

2.3 挙動解析

Semi-dry設計かつフリーハンギング線形を用いたダイナミックケーブルが、対象海域における海象条件、浮体動揺などに基づく海中挙動に耐え得るかを、海洋システムの挙動解析に広く使用されているソフト、OrcaFlexによる挙動解析にて確認した。ケーブル諸元を表1に示す。

表1 ケーブル諸元と設計許容値
Specifications of cable and design criteria.

Property	Unit	Value
Outer diameter	m	0.142
Weight of 1 m cable in air	kg/m	40.6
Submerged weight of 1 m cable	kg/m	24.3
Allowable tension	kN	160
Allowable axial compression force	kN	16
Allowable minimum bending radius	m	2.85

(1) ULS解析 (Ultimate Limit State analysis：極値解析)

ULS解析では、極度に厳しい海象条件を想定した場合のケーブルシステムの成立性を確認した。具体的には、50年に一度

起きるような再現条件を想定し、ケーブルに加わる張力、軸圧縮力、曲率が表1に示す許容値に収まるようなケーブル延線方向を解析で絞り込んだ。

浮体や浮体係留の制約条件からケーブルを延線可能な14方向を選定し、卓越波向き⁸⁾5方位に対して解析を実施した結果、図4に示すように7方向(北東(NE)、東北東(ENE)、東南東(ESE)、南東(SE)、南南東(SSE)、南(S)、南南西(SSW))に絞り込まれた。

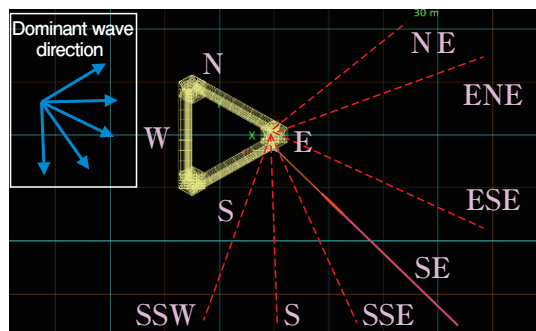


図4 ULS分析によるケーブル敷設方向の絞り込み
Candidates of the cable laying direction narrowed down by ULS analysis.

(2) FLS解析 (Fatigue Limit State analysis: 疲労解析)

FLS解析では、実際の波浪条件を想定した場合に、ULS解析で絞り込んだ7つの延線方向についてシステムの長期信頼性を確認した。具体的には、北海道石狩湾沖におけるピーク周期および波方位ごとの有義波高⁸⁾の発現頻度データから、全ての波浪条件(全ロードケース)による挙動解析を行って遮水層と鉄線がい装の疲労寿命を推定した。

FLS解析結果を表2に示す。遮水層の疲労寿命において、南東方向が41年と最も長く、想定される使用年数20年にに対し、2倍以上の裕度が見込まれた。

表2 FLS解析結果
FLS analysis results.

Cable laying direction	SE	S	SSW
Fatigue life of the water barrier layer	41 years	26 years	24 years
Fatigue life of the armor layer	>1000 years		

(1)および(2)の解析結果より、Semi-dry設計およびフリーハンギング線形を採用したダイナミックケーブルシステムの設計において、対象海域の条件下の挙動に耐え得ることを確認した。

2.4 軸圧縮試験

想定される軸圧縮力が実際にケーブルに作用した場合のケーブル異常の有無を軸圧縮試験により確認した。ケーブルを部分的に曲げたサンプルおよび直線部のサンプル、各々に対し、表3に示す試験条件下にて400サイクルの繰り返し軸圧縮試験を行った。

400サイクル繰り返し後も、歪み-軸圧縮力特性に異常なデータは確認されず、図5に示すようにケーブルがい装の外観異常も観察されなかった。以上より、実ケーブルにおいても想定される軸圧縮特性を満足し得る結果となった。

表3 試験条件
Test conditions.

Sample Length	2 m
Sample	(1) Bending sample ($R = 10 \text{ m}$) (2) Straight sample
Axial compressive force	(1) 30 kN, 50 kN (2) 75 kN
Cycle	400 cycles

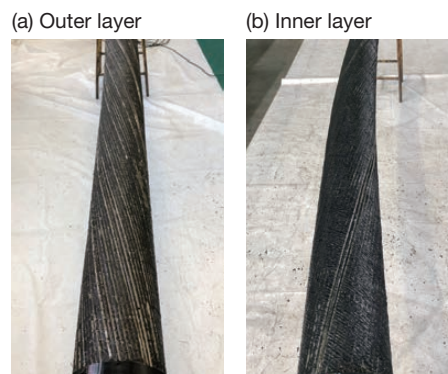


図5 サンプル(1)試験後の鉄線がい装：(a)外層、(b)内層
The armor layer of sample (1) after test completed:
(a) outer layer, (b) inner layer

2.5 まとめ

浮体式洋上風力発電の低コスト化を目標としたTLP浮体の要素技術検討において、ダイナミックケーブルにSemi-dry設計およびフリーハンギング設計を採用することで、コスト低減に貢献した。さらに、コスト最適化されたケーブル構造および線形がTLP浮体に適用可能なことを挙動解析および機械試験により確認した。

3. 大水深海底ケーブルの開発

3.1 大水深海底ケーブルの開発の背景

我が国の排他的経済水域(EEZ)は水深が深い箇所が多く、大水深に対応可能な海底電力ケーブルを開発することによって、布設ルートの最適化(ルート短縮)に貢献することができる。

図6に直流連系で想定される海底ケーブル布設ルートの一例を示す⁹⁾。福島県沖や千葉県沖で発電された電力を神奈川県に

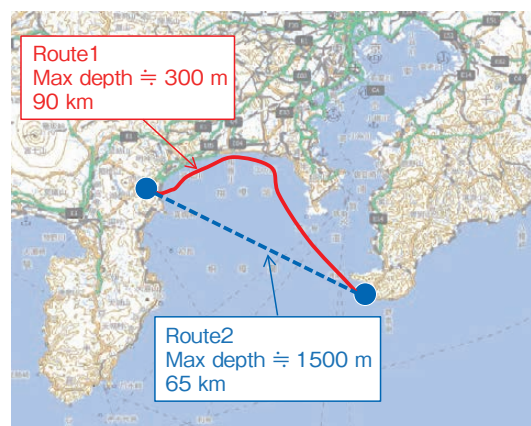


図6 DC海底ケーブル布設ルート例
Assumed route of DC interconnection line.

陸揚げ，連系するプロジェクトプランとなっている。この千葉県沖から神奈川県までの布設ルートを選定した時，水深300 mまでのルートであれば約90 kmとなるが，水深1500 m級のルートを選定できると約65 kmと短縮することができる。このように広域の海底ケーブル直流連系として，水深の深いルートの増加が見込まれている。一方，国内では水深300 m程度までの適用実績に過ぎないのが現状である¹⁰⁾。そこで，大水深に適用可能なケーブルを開発することで，ルートの短縮が可能となり，送電ロスの低減や工期短縮を図ることができる。

水深1000 m以上で布設された大水深直流ケーブルは海外で数例あるが，いずれもMIケーブル（MI：Mass Impregnated＝高粘度の絶縁コンパウンドを絶縁紙に含浸した絶縁を有するケーブル）である。MIケーブルはXLPEケーブルと比較すると運転時の導体許容温度が低く，送電容量を確保しにくいことと，絶縁コンパウンドが充填されていることから事故があった場合に海洋汚染の可能性もある。そこで筆者らは，新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託事業として，導体許容温度が高くとることができ，海洋汚染の懸念がない固体絶縁であるXLPEケーブルにて，1 GW級の送電容量を有する，水深1500 m級の大水深に布設可能な単芯直流500 kVの海底ケーブルの開発を実施してきた。本研究では大水深布設に適用しうるプロトタイプケーブルを試作し，機械特性・電気特性の評価を行ったので，その成果を示す。

3.2 ケーブル構造

3.2.1 ケーブル構造の選定

ケーブル構造を選定する流れについて，まず送電容量から電圧階級，導体サイズ，布設条数が検討され，併せて布設海域の水深，ルート調査によってケーブル長やケーブル布設張力が推定される。また，ケーブル構造は布設船の仕様にも左右されることがあるため，ケーブル布設張力や出荷長の検討と並行して，布設船の選定や艀装の検討も行う。

本研究ではルート調査の実施や布設船の選定など，いくつかのプロセスは省略しつつ，布設船の仕様による制約がないと仮定し，送電容量と電圧階級，水深条件からケーブル構造の検討を行った。

3.2.2 導体構造

水深1500 m級の大水深にケーブルを布設する場合，1500 m分のケーブル自重が常に張力として布設船上のケーブルに加わる（図7）。そのため大水深ケーブルの開発にはケーブルを軽量化することが不可欠である。陸上と海底を問わず，一般的に送電用電力ケーブルの導体には，断面積を小さくするために導電率の高い銅が用いられている。一方で，ケーブル重量を軽くするためには比重の小さいアルミニウムが適しており，導体に適用する検討を行った。アルミニウムは銅に比べ導電率が低いため，導体断面積は大きくなる，すなわち外径は大きくなる傾向にある。そのためケーブルががい装部の重量は増える傾向にあるが，ケーブル体積の大きい方が水中でより浮力を受けるため，本研究では水中重量に対して有利なアルミニウム導体を適用した。

交流送電においては導電の表面のみを電流が流れようとする表皮効果が生じるため，大電流を流すためには分割導体の採用や，素線を絶縁するなど工夫が必要となる。一方，直流は表皮

効果がないので素線径を太くすることが可能で，かつ占積率の向上が効果的である。丸素線の場合，撚っても空隙が生まれるので，ブロック状の素線を撚り合わせて占積率を向上させたキーストーン導体を検討した。占積率を向上させることで導体径を小さくすることが可能で，がい装を含めたケーブル全体重量を低減することができる。

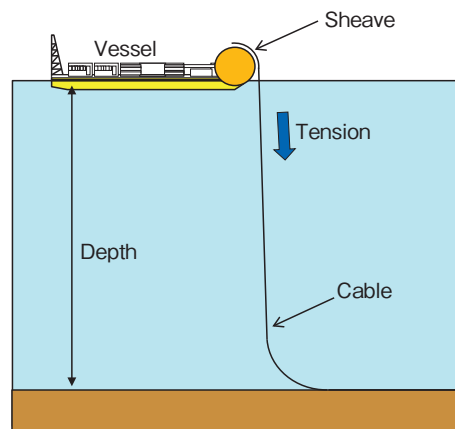


図7 海底ケーブル布設イメージ
Cable installation model.

3.2.3 がい装構造

布設時にケーブルに加わる張力については主にがい装が分担することとなる。水深1500 mに布設する際，ケーブル自重による静的張力に加え，波浪等による動的張力の影響も考慮した布設張力に耐えられることが重要となるため，がい装はトルクバランスを考慮した交互撚りの二層構造が適している。がい装の材料には機械的な特性や価格面を考慮して鉄系材料を適用した。ケーブル輸送量の向上，布設時のケーブル張力の低減のためには，がい装を含めたケーブル重量は小さい方が望ましい。がい装構造の候補としては，丸線構造および，占積率の向上を図るために，平角構造を対象とし，導体と同様に形状，本数，構成等について検討した。

一般的な海底ケーブルに適用されるφ8丸線構造（Case1）と，占積率を向上できる平角線がい装構造3種類（Case2，Case3，Case4）について比較した（表4）。なお，がい装より内側のケーブル構造は共通とした。ケーブル重量のみで比較すると，がい装の断面積の小さくなるCase4が最も軽量であるが，本研究の試作にあたっては製造の汎用性を考慮し，JIS規格で購入可能なφ8鉄線が適用できるがい装構造Case1を選定し，機械的・電気的評価により基礎データを収集することとした。

表4 がい装構造によるケーブル重量の比較
Comparison of cable weight varied by armour structure.

No.	Unit	Case1	Case2	Case3	Case4
Armour (Height x Width)	mm	Round wire φ8	Flat wire H6.1 x W10	Flat wire H4 x W16	Flat wire H3 x W10
Outer diameter	mm	169	162	153	149
Weight of 1 m cable in air	N/m	721	709	573	503
Submerged weight of 1 m cable	N/m	495	503	388	328

3.3 ケーブル特性評価

3.3.1 プロトタイプケーブル

アルミニウムキーストーン導体1200 mm²、DC500 kV二重鉄線がい装ケーブルを試作した(図8, 表4-Case1)。表5に仕様を示す。プロトタイプケーブルを用いて大水深用途で確認すべき機械応力について評価した。また、引張曲げ試験後のサンプルについて、電気試験(長期課通電・耐インパルス)を行った。

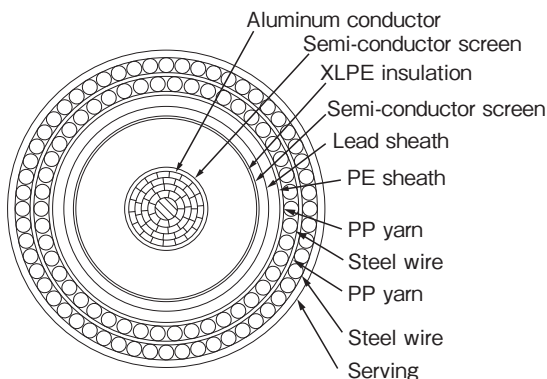


図8 DC500 kV 大水深向けプロトタイプケーブル
Prototype DC500 kV submarine cable for deep water.

表5 プロトタイプケーブル仕様
Specifications of prototype cable.

Conductor	Aluminum keystone 1200 mm ²
Insulation	XLPE
Water barrier	Lead alloy
Sheath	Polyethylene
Armour	φ 8 mm double steel wire
Outer diameter	φ 169 mm
Weight of 1m cable in air	721 N/m
Submerged weight of 1 m cable	495 N/m

3.3.2 引張特性

布設時、ケーブルには自重による静的張力と波浪等による動的張力が加わり、水深1500 m級における大水深への布設の際は、ケーブルに加わる張力は非常に大きいものとなる。張力印加時に、ケーブルに異常(破断や変形など)が生じないか評価するため、プロトタイプケーブルを用いて引張試験を行った。張力を求める計算式については、CIGRE TB 623¹¹⁾を参考とした。水深500 mを超える場合、張力はケーブル重量(表4)と水深(1500 m)から求まる静的張力に加え、布設船の動きに基づく動的張力を考慮する必要がある。しかし、そのためには布設海域や布設船の情報が必要であり、ここではCIGRE TB 623で示されているSardinia Island - Italian Peninsula (SAPEI) 直流連系線の値(シーブ垂直動揺 $bh = 3$ m, 周期 $Tp = 8$ sec)を適用することとし、CIGRE TB 623の試験張力計算式によって得られた約1000 kNにて試験を実施した。試験ではケーブルサンプルを2本用意し、ケーブル全体の張力と、導体に加わる張力を測定した。

図9に引張試験の様子を示す。図10にケーブル全体に加えた張力に対する軸剛性を示す。応力解析プログラムLAYCAL¹²⁾にて計算した値と比べて、実験値は小さくなった。要因として、

ケーブル内部の層間の隙間や、PPヤーンやテープなどのクッション層の潰れ、水平に引っ張ったことによるケーブルの弛みの影響が考えられる。図11に導体分担率の推移を示す。ケーブル全体に加わる張力に対して、導体分担率は8～12%の間を推移した。LAYCALにより計算される導体分担率は8%であり、グラフより試験結果>計算値となった。計算ではケーブル内部の層間の隙間や、PPヤーンやテープなどのクッション層の潰れなどによる、がい装の径方向への動きを考慮していないことが影響したと考えられる。試験後のサンプルの外観、がい装に異常はなく、がい装より内側のシース、鉛被にも変形や外傷は確認されなかった。

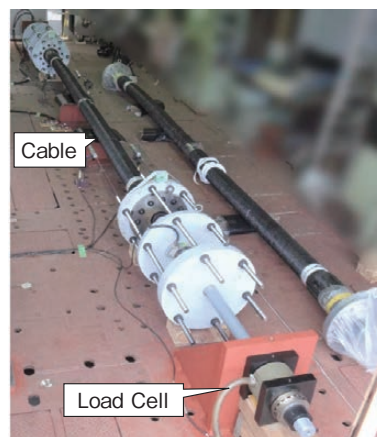


図9 引張試験
Tensile test.

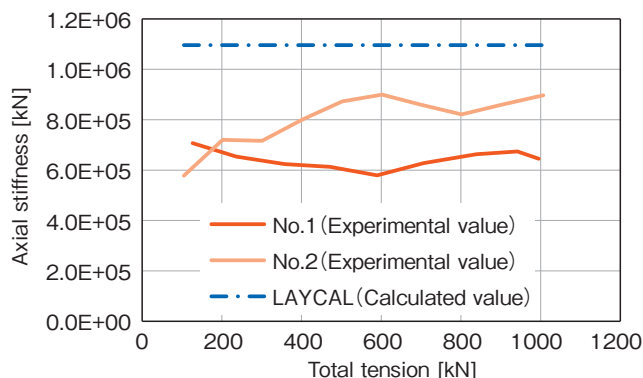


図10 ケーブル張力と軸剛性の関係
Relationship between axial stiffness and cable tension.

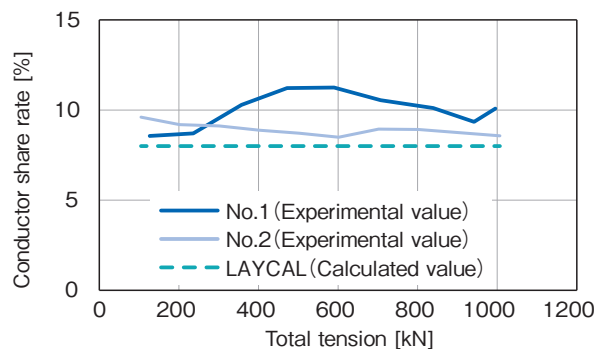


図11 ケーブル張力と導体分担率の関係
Relationship between load sharing ratio of conductor and cable tension.

3.3.3 引張曲げ試験

ケーブルを海底へ布設する時のケーブルの自重による張力や、布設船のシーブにより加わる側圧を模擬した力を与える、引張曲げ試験を実施した。試験方法はCIGRE TB 623¹¹⁾を参考とし、ケーブルサンプルに試験張力を加えつつ、ドラムを回転させて、ケーブルサンプルを1.5往復(ドラムを合計3回通過)させた。表6に試験条件を示す。水深1500 m相当の引張特性については、前述の引張試験にて確認し、本試験では側圧影響評価を目的とした。シーブ径について、想定される布設船のシーブ直径は10 mと考えているが、厳しめの評価を行うこと、および側圧影響を評価するため2条件(ϕ 8 m, ϕ 5 m)行った。

表6 引張曲げ試験条件
Conditions of tensile bending test.

Item	Unit	Test conditions	Requirements
Test tension	kN	732	989
Sheave diameter	m	ϕ 8 / ϕ 5	ϕ 10
Sidewall pressure	kN/m	183 / 293	198

図12に試験の様子を示す。表7に結果を示す。シーブが動いている間、試験張力以上を維持した。試験後のケーブルNo.1～No.3に外観異常はなく、鉄線およびシースや鉛被に偏平や変形は確認されなかった。ケーブルNo.3については試験後、長期課通電試験に供試した。

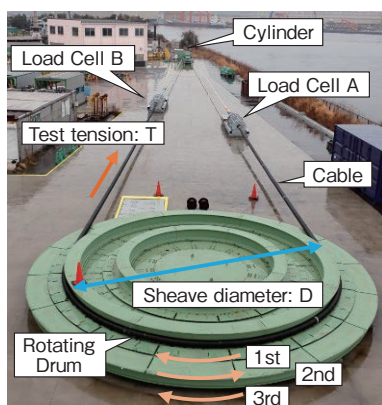


図12 引張曲げ試験
Tensile bending test.

表7 引張曲げ試験結果
Test results of tensile bending test.

No.	Condition	Result
1	ϕ 8m sheave	good
2	ϕ 5m sheave	good
3	ϕ 5m sheave (for electrical test)	good

3.3.4 電気試験

引張曲げ試験後のケーブルの鉄線がい装を除去して、長期課通電試験を実施した。試験条件はCIGRE TB 496¹³⁾を参考とした(表8)。図13に試験状況を示す。表8に示す試験条件にて、課通電を合計30日間実施し、良好に試験を終了した。

表8 長期課通電試験条件
Conditions of long term load cycle test.

$$(U_T = 1.85U_0, U_0 = 500 \text{ kV}, T_{cond} = 90^\circ\text{C}.)$$

DC Voltage [kV]	Cycle	Condition	Result
- 925	12cy	90℃ × 24 hr/cycle	good
0 (Earthing)	-	Rest period (24 hr<)	good
+ 925	12cy	90℃ × 24 hr/cycle	good
+ 925	3cy	90℃ × 48 hr/cycle	good

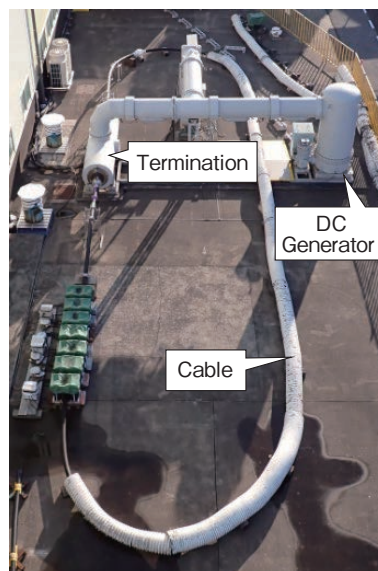


図13 長期課通電試験
Long term load cycle test.

長期課通電試験後に残存性能を評価するため、試験線路を組み直し、耐インパルス試験を実施した。耐電圧レベルについて、ストレスが最も高くなるDC重量逆極性雷インパルスを想定し、バーダー係数を考慮して設定した。バーダー係数とは、ケーブルに対して直流電圧を加えつつ、逆極性インパルス電圧を重畳したときの破壊電圧における、直流電圧の寄与率である¹⁴⁾。バーダー係数はケーブル絶縁体の空間電荷の蓄積に関係するため、材料による程度の差はあるが、十分に厳しい値として $K=1$ と設定した。表9に示す試験条件にて耐インパルス試験を実施し、良好に試験を終了した。試験後に、引張曲げ試験においてしごきを加えた箇所の解体調査を行った結果、シース・鉛被・外導に変形・外傷は見られなかった。

表9 インパルス試験条件
Conditions of impulse voltage test.

$$U_T = K \cdot U_0 + U_{PI} \quad (U_0 = 500 \text{ kV}, U_{PI} = 2.1 U_0)$$

Voltage [kV] U_T	Times	Condition	Result
- 1550	10	$T_{cond} = 90^\circ\text{C}$	good
+ 1550	10	$T_{cond} = 90^\circ\text{C}$	good

3.4 まとめ

大水深直流ケーブルの布設ルート短縮化を目指して、水深1500 m級の単芯ケーブルを想定し、導体部はアルミニウムキーストーン導体、がい装は ϕ 8二重鉄線がい装のプロトタイプケーブルを試作し、評価した。

試作したプロトタイプケーブルは、水深1500 m級の布設を考慮した機械性能、および直流500 kV送電に対する電気性能に対して十分な性能を有していることを確認した。

4. おわりに

本稿ではTLP浮体式洋上風力向けダイナミックケーブルシステム開発と大水深海底ケーブル開発について述べた。

電力事業部門として、今後も需要が拡大することが予想される洋上風力発電向けを含めた、海底ケーブルの開発に注力しつつ、需要に応えるため、工場の生産能力・工事施工能力の向上を進めている。工場への設備投資として、海底線用大型ターンテーブル(7000 ton)の稼働など長尺海底線製造能力の増強、工程改善を進めており、工事能力としては、協力会社との提携拡大や布設工法の改善、新規布設船の開発¹⁵⁾などに取り組んでいる。

2050年カーボンニュートラル達成に向けて、洋上風力発電の拡大は必要不可欠であり、この需要に応えるべく部門一丸となって取り組みを進めている。

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「多用途多端子直流送電システムの基盤技術開発/直流深海ケーブルの開発(単芯水深1500 m級)」に係る委託事業(JPNP20001)、および「グリーンイノベーション基金事業/洋上風力発電の低コスト化/浮体式基礎製造・設置低コスト化技術開発事業/低コストと優れた社会受容性を実現するTLP方式による浮体式洋上発電設備の開発」に係る助成事業(JPNP21015)の結果得られたものである。

参考文献

- 1) 経済産業省>ホーム>政策について>政策一覧>エネルギー・環境>温暖化対策>2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略
https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/index.html (参照日：2024年12月13日)
- 2) 電力広域的運営推進機関(OCCTO)>広域系統長期方針・整備計画>広域系統長期方針>広域系統長期方針(広域連系系統のマスタープラン)の策定について
https://www.occto.or.jp/kouikikeitou/chokihoushin/230329_chokihoushin_sakutei.html (参照日：2024年12月13日)
- 3) 「洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会」第2回(2020年12月15日)資料から
- 4) MODEC 三井海洋開発株式会社HP>ホーム>ニュース&メディア>2022年のニュース>TLP方式による浮体式洋上風力発電 低コスト化技術検証事業の採択について(2022年1月21日)
https://www.modec.com/jp/news/2022/20220121_pr_TLP_OffshoreWindTurbines.html (参照日：2024年12月13日)
- 5) 東洋建設株式会社HP>HOME>トピックス> TLP方式による浮体式洋上風力発電 低コスト化技術検証事業の採択について(2022年1月24日)
<https://www.toyo-const.co.jp/topics/technicalnews-15734> (参照日：2024年12月13日)
- 6) 株式会社Jera HP>TOP>ニュース>プレスリリース>2022>TLP方式による浮体式洋上風力発電 低コスト化技術検証事業の採択について(2022年1月21日)
https://www.jera.co.jp/news/information/20220121_827 (参照日：2024年12月13日)
- 7) Leszek Resner, et al., “Radial Water Barrier in Submarine Cables, Current Slutions and Innovative Development Directions”, Energies 2021, 14 (10), pp2761.
- 8) 気象庁HP>ホーム>知識・解説>波浪情報の解説>外洋波浪図及び沿岸波浪図の解説>沿岸波浪図の見かた
https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/wave/comment/chart/pn_example.html (参照日：2024年12月13日)
- 9) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, 「次世代洋上直流送電システム開発事業」事後評価報告書, 2021
- 10) 経済産業省>ホーム>審議会・研究会>エネルギー・環境>長距離海底直流送電の整備に向けた検討会>第1回 長距離海底直流送電の整備に向けた検討会>資料6 国内の海底直流送電による地域間連系, pp4.
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/chokyorikaitei/pdf/001_06_00.pdf (参照日：2025年1月24日)
- 11) CIGRE Technical Brochure 623, “Recommendations for mechanical testing of submarine cables”, B1.43, 2015
- 12) 高橋一比古他:「積層管の剛性・応力・疲労解析プログラムLAYCAL」, 海上技術安全研究所報告, 第15巻(2016年), 第4号, pp.101-107
- 13) CIGRE Technical Brochure 496, “Recommendations for Testing DC Extruded Cable Systems for Power Transmission at a Rated Voltage up to 500 kV”, B1.32, 2012
- 14) 寺島一希他:「直流CVケーブルの絶縁設計手法に関する一考察」, 電気学会論文誌B, 1999年, 119巻, 2号, pp. 212-222
- 15) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構HP>ホール>事業紹介>電力ネットワーク>多用途多端子直流送電システムの基盤開発>基本計画
<https://www.nedo.go.jp/content/100923832.pdf> (参照日：2024年12月13日)