



洋上風力発電向け非遮水海底ケーブルの水トリー特性

Characteristics of Water Tree in Submarine Cable (Wet-Design) for Offshore Wind Power Generation

伊田 維斗*
Yukito Ida

山崎 智
Satoshi Yamasaki

坂口 恭生
Yasuo Sakaguchi

広田 博史
Hirofumi Hirota

魚住 剛
Tsuyoshi Uozumi

温室効果ガスの削減が世界的に急務となり、洋上風力発電の導入が進んでいる。発電した電力を送電する海底ケーブルに関し、近年、風車の出力増加に伴う高電圧化（66kV級）や大容量化と、製造性、コスト、施工性を改善するために遮水層を省略するケーブル構造（非遮水海底ケーブル）が期待されている。遮水層の省略は、水トリーと呼ばれる絶縁体の劣化による事故リスクを高めるため、当社は耐水トリー性の絶縁体の検討を進め、2018年に制定された遮水層の省略可否を判定する規格（CIGRE TB722）を満たすことを確認できた。また、長期運用や将来の更なる風車の出力増加を見据え、66kV級を超える高電圧下でも使用できる高い耐水トリー性を有する絶縁体の検討にも取り組んでおり、今後の洋上風力発電の導入促進に貢献できるものと考えている。

The reduction of greenhouse gases has become an urgent global issue, and the introduction of offshore wind power generation is progressing. The submarine cables are required to raise the voltage (to 66 kV class) due to the increase in power output from wind turbines and structural changes to the wet design that omits the water-impervious layer to improve manufacturability, cost, and workability. Removing the water-impervious layer increases the risk of accidents due to the insulation deterioration called the water tree. We have been studying water tree retardant insulation and confirmed that our new submarine cables meet the standard (CIGRE TB722) established in 2018 to determine whether the water impervious layer can be omitted. We are also considering highly tree-retardant insulation that can be used under high voltage exceeding 66 kV-class in order to cope with long-term operation and a further increase in power output from wind turbines in the future. This development will contribute to the promotion of the introduction of offshore wind power generation.

キーワード：洋上風力発電、海底ケーブル、水トリー

1. 緒言

近年、温室効果ガスの削減に対する取り組みが世界的な急務となっており、わが国では2020年に「2050年カーボンニュートラル」を宣言している。この宣言に伴うグリーン成長戦略の中では、電力部門の脱炭素化を大前提とし、再生可能エネルギーを最大限導入していく方針となっており、特に洋上風力産業は、2030年に10GW、2040年には30~45GWの導入を目標としている⁽¹⁾。このように洋上風力発電は、今後益々重要性が増してくことは確実であり、発電した電気を送電する電力ケーブルの役割は重要と言える。本論文では、将来の洋上風力発電の動向を見据えた洋上風力発電用の新規電力ケーブルの検討結果を報告する。

2. 洋上風力発電用海底ケーブルの構造変化

洋上風力発電は、海洋上で風力発電を行うため、集電用の電力ケーブルは海底に布設して、陸上の変電所へと送電する。近年、風力発電の技術発展が加速し、図1に示すように風車の大型化と出力増加が進んでおり、それに伴って

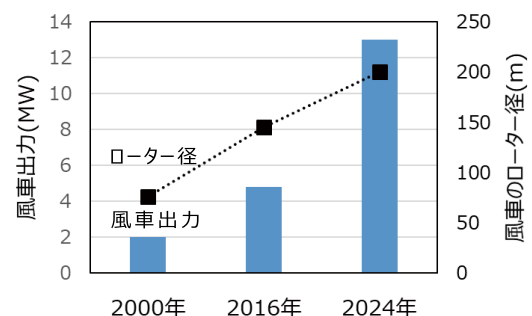


図1 風車の大型化と出力推移⁽²⁾

使用する電力ケーブルの高電圧化や大容量化が進行している。これまで、22-33kV級が主流であったが、近年は66kV級へとシフトしつつあり、高電圧化に伴いケーブルが大型化した影響で、製造性、コスト、施工性等の課題が現れた。これらの課題への対策として、近年、図2に示す従来の構造から遮水層を省略した非遮水構造のケーブル（以下、非遮水海底ケーブル）が市場で期待されている。

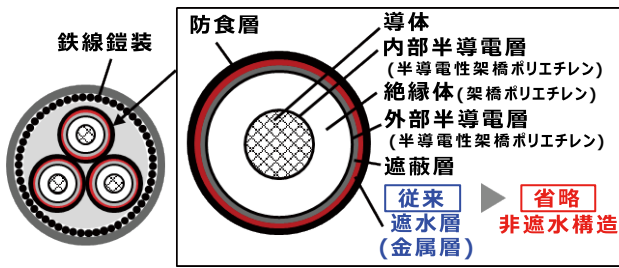


図2 海底ケーブル構造

3. 海底ケーブルの規格

市場におけるケーブルの遮水層の省略の動きを受け、2018年に非遮水海底ケーブル向けの規格 (CIGRE TB722) が制定されている。遮水層を省略することの最大のリスクの一つとして、ケーブルを常時浸水状態で運転することで絶縁体を進行する水トリーと呼ばれる劣化現象（4項にて後述）があり、CIGRE TB722の中にも水トリー特性を評価する浸水課電試験の記載がある。

現在、非遮水海底ケーブルを洋上風力発電用に導入するためには、図3、表1に示す一般的な海底ケーブル規格 (IEC63026) と、前述のCIGRE TB722に記載のある水トリーに対する耐性を評価し、基準を満たす必要がある。

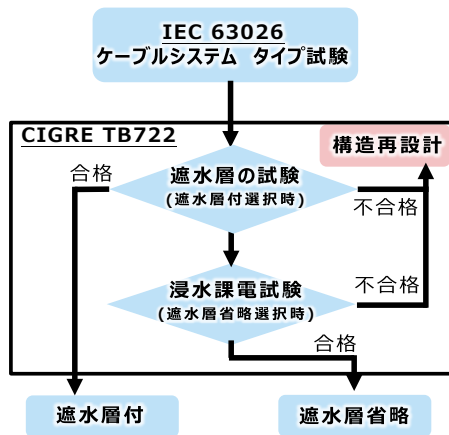


図3 遮水層省略構造の認定評価フロー

表1 非遮水海底ケーブルに要求される試験項目

規格	試験	項目概要
IEC63026	タイプ試験 ①機械試験 ②電気試験 ③材料試験	①巻取り、曲げ引張等 ②部分放電、tan δ AC耐圧 (HC20回) Imp耐圧 (±10回) ③吸水性、引張強さ、 シュリンクバック、ホットセット
CIGRE TB722	浸水課電試験 (RegimeB)	3000hの浸水課電後、残存AC耐圧

尚、CIGRE TB722は66kV級（最高電圧72.5kV）までを対象とした規格であり、現状は66kV級までしか遮水層を省略した構造の適用は認められていない。

4. 非遮水海底ケーブルの水トリー伸展特性

4-1 ケーブル絶縁体の水トリー劣化

ケーブル絶縁体は、実運転下で水分供給状態にある場合、諸説あるが、例えば図4のようなメカニズムにより、絶縁体中に存在する微小異物、ポイド、突起等から水トリーと呼ばれる劣化が伸展する。水トリーが伸展すると、運転電圧でケーブルが絶縁破壊する局所的な欠陥となる。図5に水トリーを起点とした絶縁破壊現象の一例を示す。

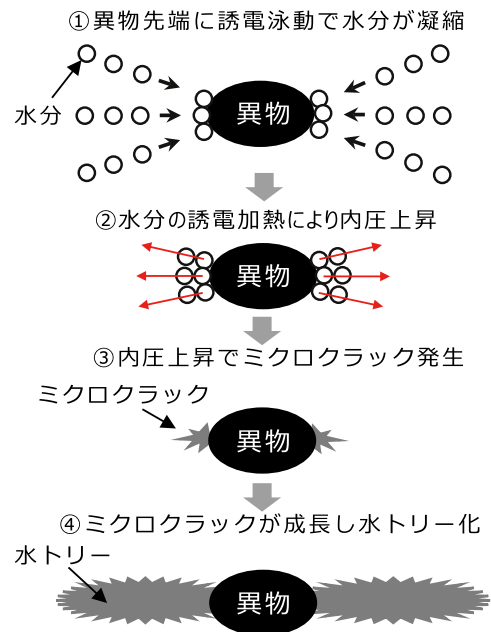


図4 絶縁体の水トリー伸展メカニズム

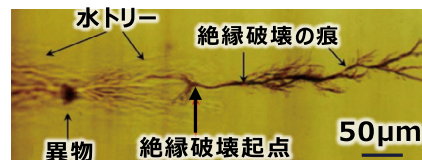


図5 水トリーと絶縁破壊現象の例⁽³⁾

水トリーを原因とした絶縁破壊事故は、これまで多数報告されており、特に国内では、図2の従来構造のように水分の浸入を防ぐ遮水層（金属層）を設けることで、対策をとることが主流である。一方、遮水層を省略した構造の導入が世界的に期待されていることに加えて、風車の出力増

加で、前述の通り電圧階級が66kV級に高電圧化すると予想されており、耐水トリー性の絶縁体の期待は高い。そこで、当社は市場ニーズに応えるため、非遮水海底ケーブル向けに水トリーに強い耐水トリー絶縁体を検討した。

4-2 耐水トリー絶縁体の検討

図4の水トリー伸展メカニズムにおいて、水分の局所的な凝集に着目し、耐水トリー性を向上させる方策の一つとして、絶縁体中の水分の凝集を遅延させる効果を発現する添加剤の評価を行った。候補の添加剤を含む絶縁体のシートサンプルを作製し、浸水課電試験で水トリー特性を評価した。浸水課電試験は、図6のように一般的な電力ケーブルに使用される半導電層材料を絶縁体材料で挟みこんだプレスシートを用いた。サンプルの絶縁体材料には、検討した添加剤を含む候補配合Aと、比較用の当社の汎用絶縁体の2種類を使用した。サンプル端部を浸水した状態で、半導電層材料部に高圧課電（1000Hz、66kV級の運転電界）を行い、課電1000時間毎に最大水トリー長を調査した。調査結果を図7に示す。図7より、汎用的な当社の絶縁体に比べて、候補配合Aは水トリー抑制効果があることがわかった。

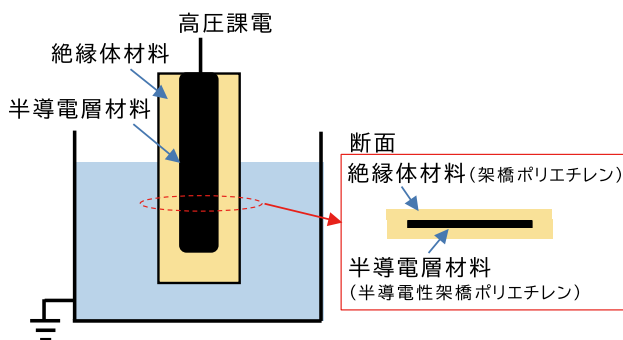


図6 シートサンプルと浸水課電試験系

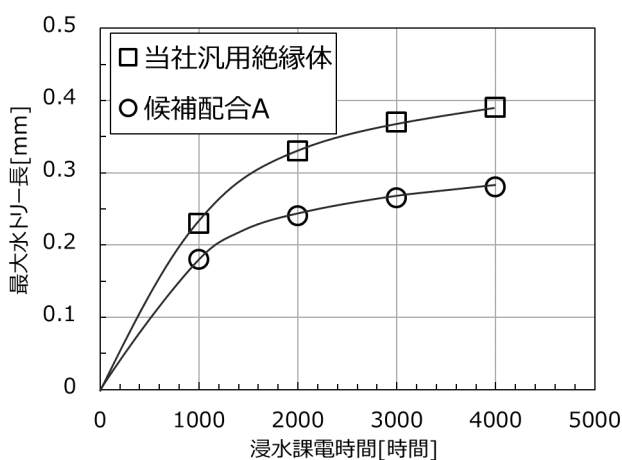


図7 最大水トリー長の継時変化 (シート)

次に水トリー抑制効果のあった候補配合Aを用いてケーブル試作を行い、前述のCIGRE TB722に基づく浸水課電試験を実施した。試験条件を表2に示す。試験は、CIGRE TB722に準拠した導体サイズ150mm²のケーブルを用意して、ケーブルコアを海水に浸水した状態で長期課電し、課電3000時間後に残存性能評価としてAC破壊試験を実施した。試験の結果、浸水課電試験中にケーブルが破壊することはなく、残存AC性能はCIGRE TB722の要求耐圧値に対して十分に余裕があることを確認した。また、本候補配合Aを用いた66kV級のケーブルを試作し、IEC63026に基づくタイプ試験にも合格したことから、非遮水構造として要求される規格を満足する海底ケーブルであることを確認できた。

表2 試験条件 (CIGRE TB722)

試験電界	浸水方法	水温	課電時間
6.4kV/mm (500Hz)	外導側を浸水	40℃一定	3000時間

また、CIGRE TB722では要求されていないが、3000時間の課電完了までの最大水トリー長を調査した結果を図8に示す。図8の通り、水トリーは発生するものの、ほとんど伸展しておらず、良好な結果を確認した。

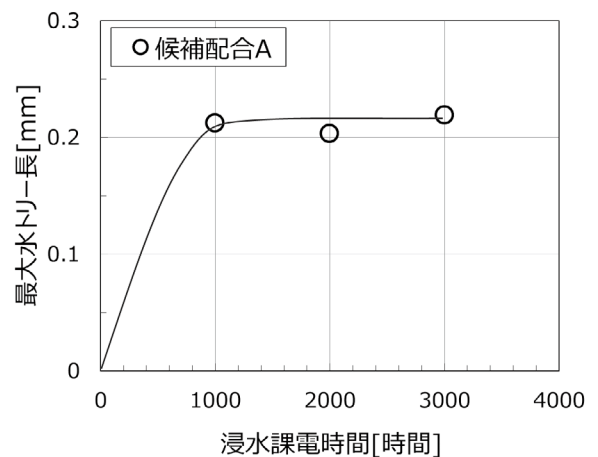


図8 最大水トリー長の継時変化 (CIGRE TB722)

4-3 更なる耐水トリー性向上の必要性

4-2項で検討した耐水トリー絶縁体 (候補配合A) は、CIGRE TB722に合格し、規格を満足する耐水トリー性を確認できたことから、通常の運転条件下では良好な特性が維持できると考えられる。一方で水トリーの成長は、電界、温度、水分量等に影響を受けるので、将来の高電圧化、大容

量化を見据え、過酷試験として、絶縁体への水分供給を過剰に設定するなどした浸水課電試験を実施し、耐水トリー性にどの程度の裕度があるかを評価することとした。

供試ケーブルとして、耐水トリー絶縁体（候補配合A）と、当社の汎用絶縁体を使用した2種類のモデルケーブルを用意した。試験電界は66kV級のケーブル運転電界相当として、浸水課電後に最大水トリー長を調査した。最大水トリー長の調査結果を図9に示す。図9より、シート評価と同様に汎用的な絶縁体材料に比べて、候補配合Aは水トリー抑制効果があることがわかった。一方で、CIGRE TB722の評価結果とは異なり、水トリーが伸展する傾向を確認した。この結果を受けて、候補配合Aを用いたケーブルはCIGRE TB722及びIEC63026の要求性能を満足し、通常運転下では十分な性能を有することが確認できたが、過酷条件下では裕度が小さくなる可能性があると考えた。

過酷な条件を設計に考慮すべきかどうかについては、布設条件、運転条件などを踏まえて、案件毎に慎重に判断すべき事項であるが、我々は過酷条件下でも品質を維持できる安心・安全な性能を有する製品ニーズにも応えられるように、さらなる改良配合についても検討することとした。現時点でCIGRE TB722は66kV級までを遮水層の省略の対象としているが、前述のように風車の出力増加が進めば運転電圧の高電圧化や大容量化が進み、長期的な水トリーの伸展による破壊事故のリスクが高くなると考えられる。以上より、候補配合Aと改良配合として検討した候補配合Bを含めて次項で水トリー長期特性を考察した。

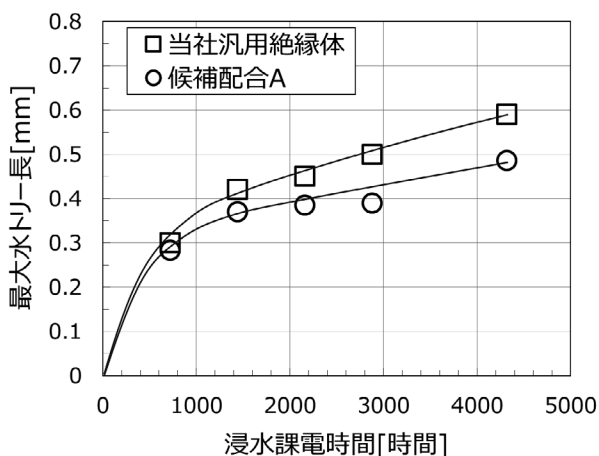


図9 最大水トリー長の継時変化（過酷条件想定）

4-4 非遮水海底ケーブルの長期特性検討

水トリーの伸展特性へ影響を与える因子は、前述の通り、電界、温度、水分量等であるが、非遮水海底ケーブルでは常時浸水環境となるため、長期特性の検討には、水トリー伸展特性に飽和傾向があるかどうか重要である。これま

での試験結果等を整理し、長期特性を検討した一例を図10に示す。図10は、取得した水トリー試験データを基に、初期の絶縁破壊強度を1とした時の性能低下比を、設計寿命を1とした時の試験期間の比で整理した結果である。図10より、汎用絶縁体は、設計寿命に到達する前に所要設計レベルを下回る。また、候補配合A、Bは、共に設計寿命期間において所要設計レベルを満足するが、候補配合Aは裕度が小さい。一方で、候補配合Bは、所要設計レベルに対し裕度があり、性能低下率も飽和傾向を示すことから、安定した長期特性を有すると考えられる。

今後は候補配合Bを用いての実機評価を更に進める予定である。

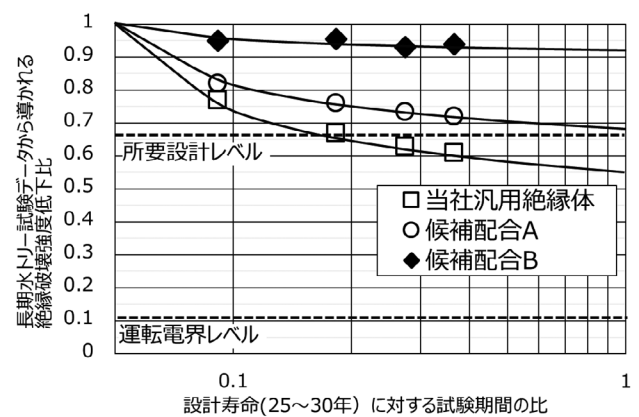


図10 長期特性の検討結果

5. 結 言

国内外で導入が加速している洋上風力発電向けに、製造性、コスト、施工性を改善できる非遮水海底ケーブルを検討した。検討の結果、遮水層省略の最大のリスクである水トリーに強い絶縁体を見出し、ケーブル評価で非遮水海底ケーブルとして要求されるIEC63026及びCIGRE TB722を満たすことを確認できた。また、長期運用や将来的な66kV級を超える高電圧化、大容量化に対応していくため、更なる耐水トリー性の向上への取組みにも着手し、現時点で良好な水トリー特性を確認している。

カーボンニュートラルに向けて洋上風力発電は益々市場が拡大すると推測される。風車の大型化による高電圧化、大容量化に対応できる信頼性の高い絶縁性能の要求に加えて、近年、風車の設置場所に制約の少ない浮体式洋上風力が注目されており、機械的にタフなケーブルのニーズも高まりつつある。市場の期待に応えるケーブルを開発することで、洋上風力発電の導入促進に貢献していきたい。

参 考 文 献

- (1) 内閣官房、「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」、pp.1, 136
<https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005-3.pdf>
- (2) 日経エレクトロニクス、「いきなり洋上風力大国」09号、pp.35-42 (September 2020)
- (3) 片貝、日渡、鈴木、「ボウ・タイ状水トリーからの電気トリー発生メカニズムの検討」、電学論A、139巻、5号、pp.264-276 (2018)

執 筆 者

伊田 維斗* : エネルギー・電子材料研究所



山崎 智 : エネルギー・電子材料研究所
グループ長



坂口 恭生 : エネルギー・電子材料研究所
部長補佐



広田 博史 : エネルギー・電子材料研究所
部長



魚住 剛 : 電力事業部 部長



*主執筆者