



洋上風力発電向け非遮水海底ケーブルの水トリー特性(長期水トリー試験法の考察)

Characteristics of Water Tree in Submarine Cables (Wet-Design) for Offshore Wind Power Generation –Consideration of long-term water tree testing method–

伊田 維斗*
Yukito Ida

伊田 尚馬
Shoma Ida

安田 周平
Shuheii Yasuda

坂口 恭生
Yasuo Sakaguchi

西川 正利
Masatoshi Nishikawa

近年、世界各国で温室効果ガスの削減に対する取り組みが行われており、洋上風力発電に注目が集まっている。発電した電力を送電する海底ケーブルは、風車の大型化と出力増加の影響による高電圧化、大容量化に伴い大型化が進んでおり、製造性、コスト、施工性等が課題となっている。当社はこれらの課題を解決するため、遮水構造の無い海底ケーブルの開発を進めてきた。海底ケーブルの運転寿命は未解明な点が多く、特に浸水状態ではケーブル絶縁体中で水トリーと呼ばれる劣化が進行するため、ケーブル寿命を推定することは難しい。当社は非遮水構造のケーブル寿命を評価するため、ケーブル絶縁体中の過飽和水分量の継時変化を解析することで、現実的な試験期間で実線路30年の長期運用を模擬可能な長期水トリー試験法を検討した。今後、検討した試験法を用いて実線路での長期運用や更なる高電圧化に対応可能な耐水トリー性を有するケーブルの開発を進める。

As wind turbines grow in size and output capacity, submarine cables transmitting the generated electric power face challenges related to manufacturability, cost, and workability. To overcome these challenges, we have been developing submarine cables without the impervious structure. However, it is difficult to estimate cable life due to the progression of water tree deterioration in flooded cable insulation. To evaluate the cable life of non-impermeable structure, we examined a long-term water tree test method capable of simulating 30 years of operation. By analyzing the time variation of supersaturated moisture content in cable insulation, realistic test periods can be achieved. Future endeavors involve the development of water tree-resistant cables to withstand long-term operation and high pressures on actual lines, utilizing the test method.

キーワード：耐水トリー性、凝集水分、飽和水分量、長期寿命、浸水課電試験方法

1. 緒言

近年、世界各国で温室効果ガスの削減に対する取り組みが行われている。欧州委員会では、温室効果ガスを2030年までに1990年比で55%削減することを目標としている。また、我が国では2030年度時点で温室効果ガスを2013年度対比で46%削減することを目標とし、更に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「2050年カーボンニュートラル」を宣言している⁽¹⁾。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、中でも洋上風力発電は大きな役割を担っている。このように洋上風力発電は、今後益々重要性が増していくことは確実である。

当社は、前述の洋上風力発電の将来の動向を見据え、発電した電気を送電する電力ケーブルの重要性が高まることは必至と考えている。そのため、これまで洋上風力発電向けの海底ケーブルの課題となっている製造性、コスト、施工性を解決できる新規電力ケーブルとして、遮水構造を省略し水トリーに強い絶縁体を用いたケーブルの開発を進めてきた⁽²⁾。

一方で、海底ケーブルの運転寿命に関しては未解明な点

が多く、特に遮水構造がなくケーブルが浸水した状態では、後述する水トリーと呼ばれる劣化が進行するため、ケーブル寿命を推定することは難しい。しかし、電力インフラを担う電力ケーブルの新製品を開発する上で、製品寿命を見積もることは重要である。そこで、今回当社は遮水構造のない海底ケーブルを対象に、実線路での長期運用を想定した寿命評価のための試験法を構築したので、結果を報告する。

2. 非遮水海底ケーブル中の水トリー伸展

遮水構造を省略して非遮水となる海底ケーブルの絶縁体は、常時浸水状態となり、ケーブル絶縁体中で水トリーと呼ばれる劣化現象が進行するため(図1)、長期の水トリー耐性を評価することは重要である。

水トリーの発生、伸展のメカニズムには諸説あるが、一般的にはケーブルが運転電圧下で水分供給状態にある場合に、絶縁体中に存在する微小異物、ボイド、突起等から伸展する⁽²⁾。絶縁体中で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⁽³⁾。そこで、当社は水トリーに強い耐水トリー絶縁体を検討することで、非遮水海底ケーブルの開発に取り組んできた。

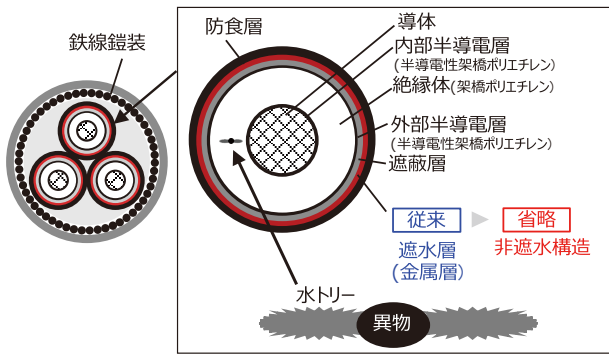


図1 非遮水海底ケーブルと水トリー

3. 長期水トリー試験法の検討

当社は耐水トリー絶縁体の検討の中で、試作ケーブルの各種浸水課電試験を実施することで、水トリー特性評価を進めてきた。例えば過去には、表1に示す CIGRE TB722 RegimeB に準拠した浸水課電試験及び当社独自に条件設定した過酷試験と称する試験を実施している。図2に同種の絶縁体を有するケーブルを用いて、表1の各試験を実施して確認した最大水トリー長と試験時間の関係を示す。図2の通り、試験条件によって水トリー伸展長の傾向が変わることがわかっている⁽²⁾。

表1 浸水課電試験条件

項目	CIGRE TB722 RegimeB	過酷試験
電界	6.4kV/mm (500Hz)	4kV/mm (50Hz)
水質	海水	水道水
浸水条件	浸水方法	外導浸水
	温度印加方法	外部加熱
	55℃/500hの前処理後、40℃一定	RT⇔60℃の1日毎のヒートサイクル
課電時間	125日	180日

浸水課電試験の試験条件は、様々な条件が存在するが、ケーブルの長期の耐水トリー性を評価する上では運用する実線路条件を想定した条件となることが最も望ましいと考えられる。一方で、実線路における長期的な水トリーの伸展挙動は解明されていないことが多くあり、表1中の試験を含めて、実線路での長期運用が評価できる試験法は現状確立されていない。

ここで、前述の過酷試験では、一般的に水トリーの伸展が絶縁体中の水分量と相関があることを踏まえて、水トリー伸展に厳しい条件として絶縁体への水分供給が多くなるように設定しており、想定通り CIGRE TB722 RegimeB よりも伸展長が長くなる傾向を確認している。絶縁体中の水分には、絶縁体中の湿度に基づく水蒸気とヒートサイクル等により水蒸気が過飽和となった際に発生する凝集水分（以下、過飽和水分を呼ぶ）が存在すると考えられるが、過飽和水分が存在すると水トリーが助長されるとの報告がある⁽⁴⁾。液体状態の過飽和水分は、絶縁樹脂中の結晶サイズレベルの微小領域で発生していることは考えにくい、絶縁体中のボイド内で発生することは容易に想像できる。例えば、一般的な電力ケーブルの絶縁体に用いられる架橋ポリエチレンのシート中にボイドを作製し、浸水下でヒートサイクルを印加すると、写真1のようにボイド内に過飽和水分の発生を確認できる。

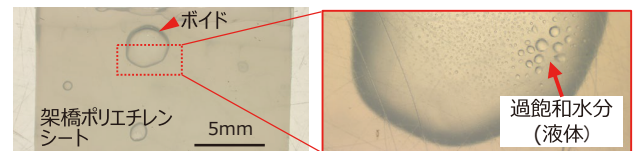


写真1 架橋ポリエチレン中のボイド内の過飽和水分

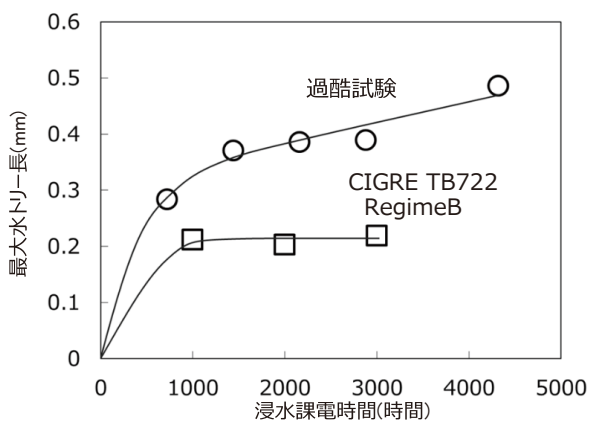


図2 浸水課電試験条件と最大水トリー伸展長の関係

このことは、マイクロボイドの集合体と考えられている水トリー中に過飽和水分が発生し蓄積している可能性を示唆しており、また水トリーの伸展と水分量に相関があることと整合性がある。また、図2に示すように、ヒートサイクル条件を設けた過酷試験で水トリー伸展が顕著に見られたこととも一致する。従い、水トリーの伸展特性の差異は、絶縁体中の過飽和水分量の差が支配的な影響因子になっている可能性が考えられる。

以上を踏まえて、今回は絶縁体中の過飽和水分量に着目し、実線路における長期運用を模擬できる長期水トリー試験法を検討することとした。

3-1 絶縁体中の水分量解析：実線路条件

当社は、試験時の過飽和水分量を実線路で長期の経年劣化が加わったケーブル中の過飽和水分量と同等量とできれば、実線路を加速模擬したものと評価できると考えた。そ

ここで、まず想定される実線路条件において、絶縁体中の過飽和水分量の継時変化を CAE 解析した。解析は CAE 解析ソフト (COMSOL Multiphysics) を使用し、66kV 級のケーブルが非遮水構造で浸水していることを前提に、実線路条件の一例として表2の条件で解析した。尚、解析は拡散方程式を用い、ケーブルの断面形状を考慮して行った。また、今回は、ケーブル運用時に電界が最も大きくなり、耐水トリー性にとって厳しい状態となる絶縁体の内層側を解析した。

表2 アレイケーブルの実線路条件の一例

ケーブル 導体温度	風力発電の風況による負荷変動に伴いケーブルの導体温度が60℃~90℃で変化するとし、それぞれ1週間で交互に変動するヒートサイクル条件とする。
ケーブル 周囲温度	アレイケーブルから離れた海水温度は一定 (基底温度25℃) と考えるが、ケーブル近傍の海水温は負荷変動に応じて変化する。
その他	風車等の点検等による運転停止期間は無負荷状態 (導体温度が基底温度まで低下) とする。

解析結果を図3に示す。図3では、導体温度のヒートサイクルに伴い変化する絶縁体の飽和水蒸気量 (絶縁体が含まうる最大の水蒸気量)、絶縁体の内層側に浸透してくる水蒸気量の継時変化を示しており、運転状態によっては、内層側の水蒸気量が飽和水蒸気量を超え過飽和水分が生じることがわかる。

また、図3の結果を元に過飽和水分量のみを30年解析した所、表2の実線路想定条件では、年間数十~100ppmの発生量となる結果を得た。ただし、長期の経年変化が加わった実線路のケーブルの水トリー発生数は、過酷な布設状態であっても飽和傾向を示すため、水トリーに蓄積する過飽和水分の量は限界値があると考えられる。

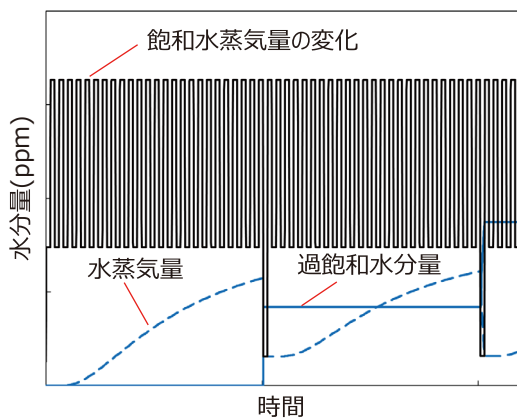


図3 絶縁体内層側の過飽和水分量：実線路条件

3-2 絶縁体中の水分量解析：各試験条件

次に、表1の各種試験について、表中の浸水条件と各試験ケーブル構造 (CIGRE TB722 RegimeB：11kV級、過酷試験：6.6kV級) を基に、試験中の過飽和水分量の継時変化を解析した。CIGRE TB722 RegimeBの試験における解析結果を図4に示す。図4より、試験期間中に水蒸気量は増加するものの、過飽和水分が発生しないことがわかる。これは、試験条件にヒートサイクルが含まれていないためである。

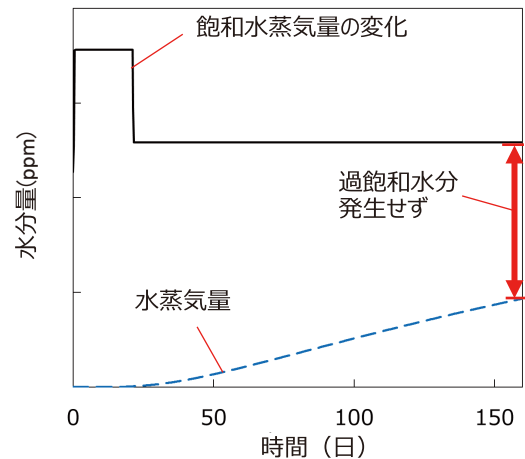


図4 絶縁体内層側の過飽和水分量：CIGRE TB722 RegimeB

次に過酷試験条件の解析結果を図5に示す。過酷試験条件では、表1に示す通りヒートサイクルが印加されるため、過飽和水分が発生する (試験終了時点で約40ppm)。この総量は、前述の実線路想定条件の1年で発生する量の下限側に近く、実線路条件を適正に模擬できていないと考えられる。これは、ヒートサイクルの条件が過飽和水分発生に対して適しておらず、高温状態時間が短いことが影響したためと考えられる。

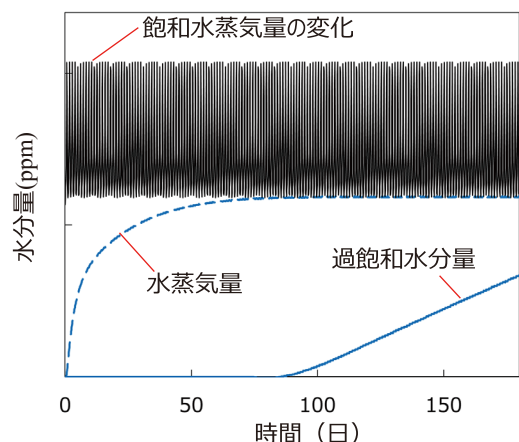


図5 絶縁体中内層側の過飽和水分量 (過酷試験)

以上の解析結果より、実線路条件の方が各試験条件よりも過飽和水分の蓄積量が多くなり、過飽和水分の影響による水トリーの伸展には厳しい条件であることが考えられる。

3-3 長期水トリー試験法の条件

前述の通り表1の各試験は、水トリー伸展に対して実線路条件を適正に模擬した試験条件となっていない可能性がある。そこで、当社は実線路30年の長期運用を模擬する長期水トリー試験法として、過飽和水分量が実線路条件と同等となる試験条件を検討した。

実線路のケーブル絶縁体は有限な体積であり、架橋ポリエチレンでは、炭素、水素等からなる分子鎖が存在し、水分子としても絶縁体のフリーボリュームに存在できる程度である。過飽和水分量は液体状であるため、絶縁体内で存在できる場所はさらに限られたものとなることから、過飽和水分量には蓄積限界値が存在すると考えられる。前述の通り、過飽和水分は水トリー部のマイクロボイドに蓄積されるため、浸水状態の実線路で30年の長期運用をしたケーブル絶縁体中の水トリー発生密度から過飽和水分量を推定すると、200~600ppmとなる（当社調査の実績値）。従って30年運用を想定した場合に蓄積限界量は600ppm程度と考えられる。今回、試験条件を検討する上では、上述の30年運用の実線路で推定される過飽和水分量約600ppmに裕度（1.5）を見て900ppmを蓄積限界量とした。そして、試験条件として現実的な試験期間で900ppmの過飽和水分を発生できるヒートサイクル条件を解析により検討した。

検討した試験条件、実線路条件及び表1の試験条件で、限界量900ppmに到達する時間を整理した結果を図6に示す。表1の試験条件においては、前述の通りCIGRE TB722 RegimeBでは過飽和水分は発生せず、過酷試験条件では限界量に到達していない。また、実線路条件では約11年で限界量に到達することがわかった。一方で、今回検討した条件では、約90日で限界量に到達する。本結果は、過飽和水分量が水トリーの伸展に支配的に影響すると考えた場合、ヒートサイクル条件を適切に設定すれば、比較的短時間で実線路条件を模擬した評価ができることを示唆している。

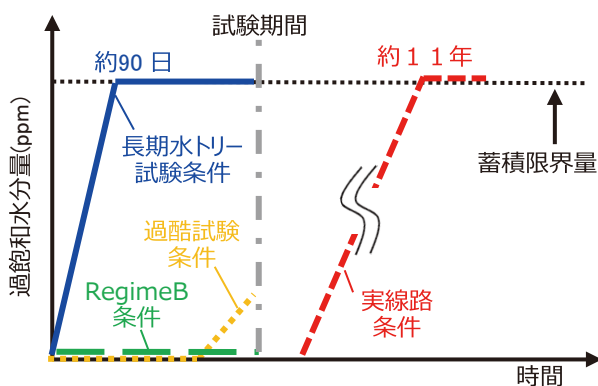


図6 過飽和水分の蓄積限界量到達時間

従って、本長期水トリー試験法を用いれば、現実的な試験期間内に、実線路における30年運用を模擬した評価が可能と考える。

4. 結 言

世界的に注目が集まっ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ている。電力インフラを担う電力ケーブルの新製品を開発する上で、製品寿命を見積もることは重要であることから、今回、非遮水海底ケーブルを対象に実線路での長期運用を想定した試験法を検討した。検討の結果、ケーブル絶縁体中の過飽和水分量の継時変化を解析することで、現実的な試験期間で実線路30年の長期運用を模擬可能な長期水トリー試験法を構築した。今後、本手法を用いた実機での試験評価を行い、実線路での長期運用、更なる高圧化に対応可能な耐水トリー性を有するケーブルの開発を進める。

・COMSOL、COMSOL MultiphysicsはCOMSOLABの商標または登録商標です。

参 考 文 献

- (1) 内閣官房、「成長戦略会議（第6回）配付資料1：2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」、pp.1-19、<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/seicho/seichosenryakukaigi/dai6/index.html>
- (2) 伊田維斗、山崎智、坂口恭生、広田博史、魚住剛、「洋上風力発電向け非遮水海底ケーブルの水トリー特性」、住友電工テクニカルレビュー第200号（2022）
- (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）
- (4) 隈、祉、坂口、「ボウタイ状水トリーの発生機構とその抑止」、電学論A、103巻、10号、pp.569-576（1983）

執 筆 者

伊田 維斗* : エネルギー・電子材料研究所



伊田 尚馬 : 解析技術研究センター



安田 周平 : エネルギー・電子材料研究所
グループ長補佐



坂口 恭生 : エネルギー・電子材料研究所 部長



西川 正利 : 電力プロジェクト事業部 グループ長



*主執筆者