



長期耐水トリ－（TR）性が評価可能な新しい試験方法と長期信頼性の高いTR絶縁体

A New Testing Method for Evaluating the Long-term Water Tree-Retardance and Highly Reliable Tree-Retardant Insulators

深田 和宏*
Kazuhiro Fukada

笠井 淳之介
Junnosuke Kasai

安田 周平
Shuhei Yasuda

山崎 孝則
Takanori Yamazaki

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削減の取り組みが強化され、洋上風力発電の導入が進んでいる。風車で発電した電気を送電する海底ケーブルの製造性、コスト、施工性の課題を解決すべく、これまで当社は、遮水層を省略した構造の海底ケーブルの開発を進めてきた。ケーブル絶縁体に水分が浸入すると、水トリ－劣化が起こるため、遮水層省略には耐水トリ－（TR）絶縁体の使用が必須だが、その適切な評価法もなかった。前回、ヒートサイクルにより絶縁体に生じる過飽和水分量に着目した浸水課電試験を検討した。今回、同試験と各種試験の結果を比較し、同試験では現実的な期間で水トリ－劣化が生じ、実線路30年の長期TR性評価が可能なことを確認した。加えて、TR絶縁体開発にも同試験を用いて30年TR性を評価し、将来の高電圧化に対応可能な高いTR性と低い誘電正接を持つ材料を見出している。引き続きケーブルの開発を進めており、洋上風力発電の拡大に貢献できると考える。

In recent years, efforts to reduce greenhouse gas emissions have intensified globally, leading to the increased adoption of offshore wind power generation. To address the manufacturability, cost, and workability challenges of submarine cables that transmit electricity from wind turbines, our company has been developing submarine cables without water barriers. When moisture infiltrates cable insulators, water tree deterioration occurs. Therefore, the use of water tree-retardant (TR) insulators is essential in the absence of a water barrier; however, there was no appropriate evaluation method for this. We previously proposed a water ageing test focusing on the supersaturated moisture generated in the insulator due to heat cycles. This time, we compared the results of this test with those of various other tests and confirmed that water tree degradation occurs within a practical timeframe and that a long-term TR performance evaluation, equivalent to 30 years, is feasible. Additionally, we applied this test to evaluate the 30-year TR performance in TR insulator development, discovering materials with high TR performance and low dielectric loss suitable for future high-voltage applications. We continue to advance cable development that will contribute to the expansion of offshore wind energy.

キーワード：電力ケーブル、耐水トリ－性、長期信頼性、飽和水分量、浸水課電試験方法

1. 緒 言

近年、世界各国で温室効果ガス削減の取り組みが行われている。わが国や欧州連合では、2050年には温室効果ガスの排出量を実質ゼロにする、「2050年カーボンニュートラル」を宣言している。この宣言に伴うわが国のグリーン成長戦略では、再生可能エネルギーを最大限導入する方針である。その中でも洋上風力発電は、再生可能エネルギーの主力電源化に向けた切り札と位置づけられている⁽¹⁾。

当社はこれまで、洋上風力発電向け海底ケーブルにおける製造性、コスト、施工性の課題を解決するため、遮水構造を省略し（非遮水）、かつ、水トリ－に強い絶縁体を用いたケーブルの開発と⁽²⁾、非遮水構造のケーブルの長期寿命評価のための、浸水課電試験法の構築に取り組んできた⁽³⁾。

今回、この試験法が、非遮水構造のケーブルの実線路30年の寿命評価として妥当であることを確認し、さらに、将来の高電圧化にも対応可能な、高い耐水トリ－（Tree-Retardant, TR）性と低い誘電正接を兼ね備えた材料を見出した。

2. 非遮水ケーブルにおける水トリ－の伸展

非遮水構造のケーブル絶縁体では、課電下で水分が絶縁体に浸入することで水トリ－劣化が進行する（図1）。水トリ－はマイクロボイドの集合体であり、ケーブルコア（内部

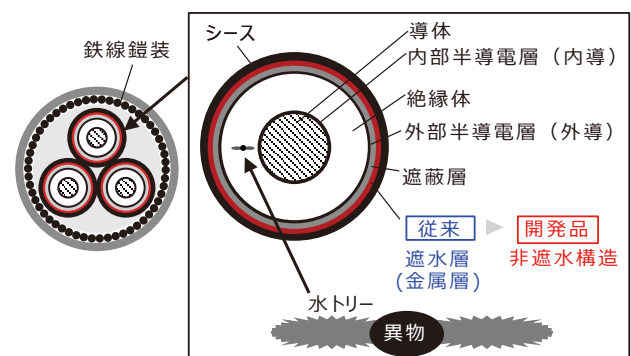


図1 非遮水構造の海底ケーブルと水トリ－

半導電層、絶縁体、外部半導電層）に存在する微小異物、ボイド、突起等から発生、伸展する。水トリー劣化が進行すると、電気絶縁強度が低下し絶縁破壊が生じる場合がある。そのため、水トリーの発生や伸展の程度は、ケーブルの寿命に大きな影響を与える。

当社は、水トリーに強いTR絶縁体を検討するとともに、実線路30年の長期運用を考慮してケーブルのTR性を評価する長期水トリー試験法の検討を行ってきた。

3. 長期TR性が評価可能な新しい浸水課電試験法
(新加速浸水課電ケーブル水トリー試験法)

3-1 試験条件の検討

当社は、長期水トリー試験法の検討の中で、試作ケーブルの各種浸水課電試験を実施し、ヒートサイクル（HC）のある条件（過飽和水分が発生する条件）で水トリーの伸展が顕著になる傾向を確認した⁽²⁾。加えて、前回報告^{(3)~(5)}では、非遮水海底ケーブルの実線路でも過飽和水分が生じることをCAE解析にて確認し、過飽和水分に着目し、現実的な試験期間で30年の長期運用に相当する評価が可能な長期水トリー試験法を検討した。この条件を、「新加速浸水課電ケーブル水トリー試験法」として表1に示す。表1には比較のため、他のケーブル浸水課電試験の条件も併記した。なお、過酷試験は、当社独自に条件設定した浸水課電試験であり、外導および導体を浸水し、外部加熱でHCを与えている。また、導体通電長期浸水課電試験⁽⁶⁾は、長期浸水課電として実態に近い状態を模擬して、外部浸水のみ、導体通電および水温制御によってHCを施したうえで、課電ストレスを3倍程度加えた条件である。

表1 新加速浸水課電ケーブル水トリー試験法とその他のケーブル浸水課電試験の条件

項目	CIGRE TB722		過酷試験	導体通電長期 浸水課電試験 ⁽⁶⁾	新加速浸水 課電ケーブル 水トリー試験法	
	RegimeA	RegimeB				
電界	6.4 kV/mm		4.0 kV/mm	10~15 kV/mm	4.2 kV/mm	
導体サイズ	50SQ以上		150~325SQ	100SQ	150~200SQ	
絶縁厚	5 mm以上		3 mm	6 mm	1~10 mm	
周波数	商用周波	500 Hz	商用周波	商用周波	商用周波	
浸水方法	外導		導体・外導	外部(外導or シース)	導体・外導	
水質	海水		水道水	水道水	海水 (人工海水等)	
加熱方法	外部		外部	導体・外部	外部	
温度 条件	ヒートサイクル		なし	あり	あり	
	試験温度		55℃ 500 hの 前処理後、40℃一定	60℃/8 h ⇔ 常温/16 h	(導体90℃、 外部60℃)/8 h ⇔ 常温/16 h	60~70℃/3日 ⇔ 常温/2日
1サイクルあたりの 過飽和水分発生 (絶縁体内層)			なし	1 ppm以下	約1 ppm	約50 ppm

過飽和水分に着目した試験条件構築には、HC浸水が適すると考えられ、前回報告にならい、拡散方程式を用いた解析を実施した。なお、拡散係数は図2より決定した。海

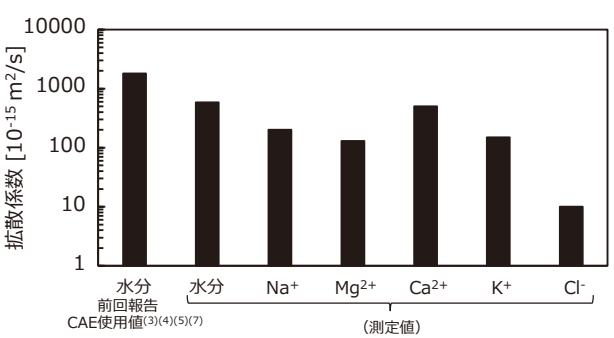


図2 架橋ポリエチレン中での90℃における水分・海水中各イオンの拡散係数

水には種々イオンが含まれるため、それらを実測した結果も合わせて図2に示している。また、一般的管路布設や人孔内溜水にも同イオン源が含まれている。図2より、拡散係数はNa⁺、Ca²⁺、K⁺が比較的水分に近い。

水トリーは、架橋ポリエチレンにおいて温度が60~70℃のときに伸びが最大となるとの報告⁽⁸⁾があることから、HCの高温状態は、60~70℃とした。また、低温状態は常温とし、1サイクルあたりの低温期間は、ケーブルを同時に数十本試験できる水槽の降温に要する期間を考え、2日とした。さらに、絶縁体中で電界が最も高い内層側に水分を供給するために、外導に加え導体も浸水する条件とした。

HCの1サイクルあたりの高温状態での保持時間を1~5日の間で変化させ50日および100日間試験を実施した場合の絶縁体内層側における過飽和水分量を解析により試算すると、表2に示す通りである。長期の試験を行う場合は、高温期間が3日の場合が最も到達水分量が多くなることがわかり、適切なHC条件（表1）であると考えた。

表2 HC条件ごとの過飽和水分量

HC条件	高温期間	1日	2日	3日	4日	5日
	低温期間	2日				
過飽和水分量(絶縁体内層側) [ppm]	50日後	270	380	420	450	440
	100日後	600	850	940	920	830

また、ケーブルの絶縁体厚は、図3より決定した。絶縁体厚が1 mm~20 mmの間で変化させたときに、例として水温65℃の一定温度で浸水し、水分透過により、常温の飽和水蒸気量を超え、数十ppm以上の水蒸気量となる時間を解析した結果が図3である。表1に示す過飽和水分量50 ppm以上を高温状態3日以内に満足するのは、絶縁体厚が1 mm~10 mmのときであり、この程度の絶縁体厚が適切と考えた。

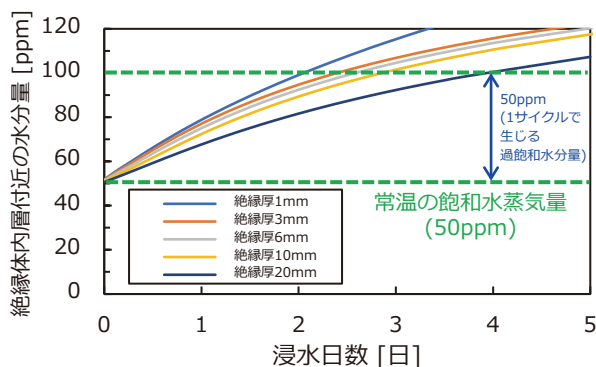
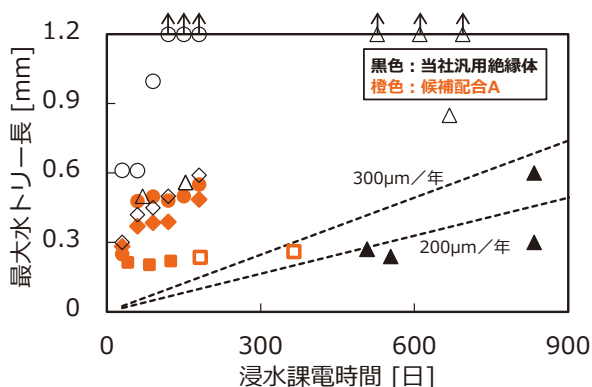


図3 絶縁体内層付近での水分量の経時変化

また、水トリーの発生、伸展には水質も影響し、水道水より炭酸カリウム (K_2CO_3) 溶液、塩化カルシウム ($CaCl_2$) 溶液、塩化ナトリウム ($NaCl$) 溶液が導電率も高くなりやすく、水トリーも伸展しやすいとの報告がある⁽⁹⁾。また、 $NaCl$ 溶液では 0.5 mol/L が水トリー伸展に有効であることが報告されており⁽¹⁰⁾、海水が適している。以上から、非遮水構造のケーブルの長期寿命を評価する上では、水質の影響を考慮すべきと考え、新加速浸水課電ケーブル水トリー試験法では、外導、導体ともに海水で浸水することとした。

3-2 試験結果

当社汎用絶縁体、および、洋上風力向け非遮水ケーブル用に検討している候補配合 A で、新加速浸水課電ケーブル水トリー試験法を実施した。試験では、150SQ アルミ導体、絶縁体厚 3 mm のケーブルを使用し、30 日ごとと 180 日間の水トリー調査を実施した。水トリー調査では、絶縁体内層側で比較的水トリーが長く伸展していた。また、内導トリーも観察され、海水で導体浸水を行った効果も確認された。この時の浸水課電時間と水トリー伸展長の関係を



【試験法の凡例】

○：新加速浸水課電ケーブル水トリー試験法、◇：過酷試験、
△：導体通電長期浸水課電試験（黒塗りはPVCシース外浸水）、
□：CIGRE TB722（白抜きはRegimeA、橙塗りはRegimeB）

図4 各種浸水課電試験の結果

図4に示す。また、表1の他の試験の結果も図4に示した。さらに、実線路の汎用XLPEケーブルでの水トリー伸展速度は200～300 μm/年程度であるとされており、その線を図4中に示した。

図4より、新加速浸水課電ケーブル水トリー試験法が最も短期間で水トリーが長く伸展し、次いで導体通電長期浸水課電試験（外導浸水）と過酷試験となっている。この結果より、過飽和水分の発生有無、発生量や蓄積量も、水トリー伸展に大きく寄与していると考えられる。なお、導体通電長期浸水課電試験（シース外浸水）は実線路状態に近いいため、900日程度では200～300 μm/年の直線に包含されている。また、候補配合 A は新加速浸水課電ケーブル水トリー試験法、過酷試験ともに TR 性が確認できる。

3-3 新加速浸水課電ケーブル水トリー試験法の妥当性検討

新加速浸水課電ケーブル水トリー試験法の結果から長期 TR 性の評価が可能であるかを検証するため、図4に示した当社汎用絶縁体での試験結果を、横軸の浸水課電日数を対数軸として30年が入るようにして図5に示す。図5には、試験結果から長期の水トリー伸展を推定するライン（試験結果の近似線、決定係数 $R^2=0.72$ ）を併記した。また、図5には論文等^{(11)~(13)}で報告のあるケーブル撤去データからの経年水トリー長のほか、当社撤去調査事例として、大小は不明であるが過飽和水分が生じると考えられる HC が加わり、かつ、水場布設環境において14～41年間使用された民需他の66 kV、77 kV ケーブル調査で確認された最大水トリー長を併せて示す。当社汎用絶縁体での180日間の新加速浸水課電ケーブル水トリー試験法の結果は、撤去データの水トリー長の最大値を包含しており、現実的な試験期間で実線路30年の TR 性評価ができることを示していると考えられる。

次に、経年30年の最大水トリー長について考察する。水トリーの有害性を破壊電界の低下の観点から評価し、水トリーの誘電率を複素誘電率で考え、導電率も考慮したモデルで破壊試験等での破壊電界と水トリー長が比較的相关性よく説明できるとの報告⁽⁶⁾を用いた。

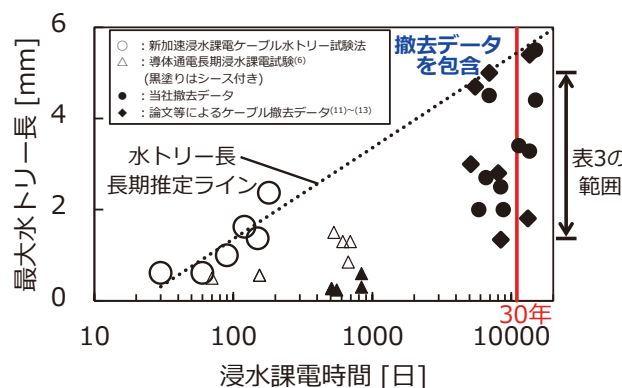


図5 当社汎用絶縁体での各種浸水課電試験の結果

回転楕円体により近似した水トリ－先端の電界 E_i は式(1)の通りである。

$$E_i = E_{r\ BTT\ tip} \cdot k_f \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $E_{r\ BTT\ tip}$ は水トリ－先端位置において、水トリ－がない場合の電界で、

$$E_{r\ BTT\ tip} = V / \{r_{BTT\ tip} \cdot \ln(R_0/r_0)\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

V : 課電電圧 (kV)

$r_{BTT\ tip}$: ケーブル中心と水トリ－先端間の距離 (mm)

R_0 : ケーブル絶縁体の外半径 (mm)

r_0 : ケーブル絶縁体の内半径 (mm)

である。また、 k_f は電界増倍率で、

$$k_f = 1 - (1/\alpha) \{ (1/2) \cdot \ln(\lambda_0 + 1)/(\lambda_0 - 1) - \lambda_0/(\lambda_0^2 - 1) \} \quad \dots\dots (3)$$

$$\alpha = (1/2) \cdot \ln(\lambda_0 + 1)/(\lambda_0 - 1) - 1/\lambda_0 + \{1/(K - 1)\} \{1/\lambda_0(\lambda_0^2 - 1)\} \quad \dots\dots (4)$$

$$\lambda_0 = 1/\sqrt{1 - R/a} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$K = \varepsilon_{r(BTT)} / \varepsilon_{r(XLPE)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

R : 水トリ－先端の曲率半径 (μm)

a : 水トリ－模擬回転楕円体の長軸半径 (水トリ－の長さの1/2) (μm)

$\varepsilon_{r(XLPE)}$: 架橋ポリエチレンの比誘電率 (2.3)

$\varepsilon_{r(BTT)}$: 水トリ－の比誘電率

である。

水トリ－の比誘電率は、複素誘電率 $\varepsilon_{r(BTT)} = \varepsilon'_{r(BTT)} - j/\omega\varepsilon_0\rho$ (ω : 交流電界の角周波数、 ε_0 : 真空の誘電率、 ρ : 水トリ－の電気抵抗率 [導電率の逆数]) で考え、過飽和水分等により水トリ－の電気抵抗率は小さくなっていると考えられることから、**上式**において $\varepsilon'_{r(BTT)} \ll 1/\omega\varepsilon_0\rho$ が成立するとして試算した。

新加速浸水課電ケーブル水トリ－試験法に供試した後のケーブルで、破壊起点となる欠陥を検出する前駆遮断試験を実施した。その際に検出した水トリ－の先端曲率半径は20~50 μm 、また、破壊電界と整合する水トリ－の電気抵抗率は $6.0 \times 10^8 \sim 1.0 \times 10^9 \ \Omega \cdot \text{cm}$ であった。これらから、水トリ－先端の曲率半径は20 μm を用い、水トリ－の電気抵抗率を $6.0 \times 10^8 \ \Omega \cdot \text{cm}$ 、 $8.0 \times 10^8 \ \Omega \cdot \text{cm}$ 、 $1.0 \times 10^9 \ \Omega \cdot \text{cm}$ とした場合の66 kV/77kVの運転電界で破壊する水トリ－長を算出すると、**表3**の通りとなる。

この試算結果は、**図5**にプロットした撤去調査事例の水トリ－長の分布範囲とよく整合する。以上から、今回構築

した新加速浸水課電ケーブル水トリ－試験法で実施した結果の延長線によって実線路30年推定が可能であり、長期のTR性評価が可能と考えられる。

表3 66 kV、77 kVケーブルの運転電界で破壊する水トリ－長

水トリ－の電気抵抗率 [$\Omega \cdot \text{cm}$]	6.0×10^8	8.0×10^8	1.0×10^9
運転電界で破壊する水トリ－長 [mm]	1.4	2.3	5.0

3-4 TR性の判定基準

新加速浸水課電ケーブル水トリ－試験法におけるTR性の合否判定基準は、前節で述べた、ケーブルの運転電界で約25~40年間で破壊する水トリ－長のうち、最も厳しい電気抵抗率での計算結果を閾値 (有害水トリ－長) とするのが妥当と考える。したがって、TR性の合否判定基準は**表4**の通りとした。また、同じ考えに基づき計算した154 kV級での有害水トリ－長も示した。

表4 新加速浸水課電ケーブル水トリ－試験法における有害水トリ－長

電圧階級	66 kV/77 kV	154 kV
有害水トリ－長[mm]	1.4	1.0

4. 洋上風力向けTR絶縁体の開発

4-1 TR絶縁体の開発コンセプト

今回策定した新加速浸水課電ケーブル水トリ－試験法を活用して洋上風力向け非遮水海底ケーブルの絶縁体材料を開発するにあたり、将来の高電圧化を見据えると、材料に要求される性能としては、TR性もさることながら、誘電正接 ($\tan\delta$) が低いことも挙げられる。

電力ケーブルの送電電力と誘電体損の関係例を**図6**に示す。ここでは、誘電正接の値として、電力ケーブルの国際規格であるIEC 60840、および66 kV以下の海底ケーブルの国際規格であるIEC 63026において、絶縁体が架橋ポリエチレンである場合の規格値とされる0.1%、および、66 kVについては、架橋ポリエチレンに添加剤を含む場合の規格値とされる0.5%を採用したときの計算値を示した。誘電体損は、電圧の2乗および誘電正接の大きさに比例する。そのため、高圧化による増容量が図られた場合、その大きさも増加し、特に誘電正接の値が大きいと、その増加は著しい。また、非遮水ケーブルでは浸水課電劣化により誘電正接が増加する場合もあるため、遮水層があるケーブルよりも初期の誘電正接は低く抑えておくべきと考える。

水トリ－の発生源であるケーブル絶縁体中の微小異物を完全に除去することは困難であるため、TR性を付与するには、絶縁体に水トリ－遅延剤を添加することが簡便である。

水トリー遅延剤として使用する添加剤には極性の大小があり、誘電正接に影響するため、よく吟味が必要である。当社は、誘電正接が小さく水トリー遅延効果のある添加剤を見出し、XLPEをベースとする候補配合Bと、非架橋絶縁材料をベースとする候補配合Cを評価した。

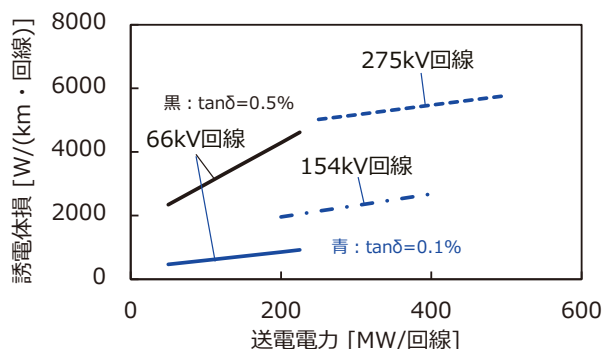


図6 電力ケーブルの送電電力と誘電体損の関係例

4-2 TR絶縁体の検討

(1) シートサンプルでのTR性評価

TR絶縁体の検討では、図7のように、電力ケーブルに使用される半導電層材料を、候補配合の絶縁体で挟み込んだプレス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。新加速浸水課電ケーブル水トリー試験法と同等の過飽和水分を与えるため、サンプルを海水に浸水した状態で水温に60～70℃/3日⇔常温のHCを加えた。高圧側とする半導電層材料部に課電を行い、所定の課電日数が経過するごとに最大水トリー長を調査した。試験電界は、66 kV級の運転電界を想定した4 kV/mmに加え、154 kV級（運転電界：5 kV/mm）や275 kV級（運転電界：7 kV/mm）への適用も見据えた評価として、8 kV/mmでも実施した。

この浸水課電試験を180日間実施し得られた、各候補配合および当社汎用絶縁体での最大水トリー長を表5に示す。一般に、最大水トリー長は電界の大きさによらず一定になるとされており⁽¹⁴⁾、この試験でもそれに従う結果が得られ

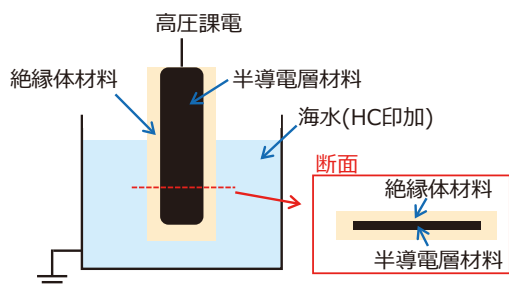


図7 シートサンプルと浸水課電試験系

ている。この結果をもとに、初期の絶縁破壊強度を1としたときの性能低下比を、設計寿命を1としたときの試験期間の比で整理し、長期特性を検討した一例を図8に示す。候補配合Aは、154 kV級に関して所要設計レベルを下回る。一方、候補配合BおよびCは候補配合Aより高いTR性を持ち、154 kV級まで含めて設計寿命期間内で所要設計レベルを満足すると考えられる。

表5 各候補配合での最大水トリー長

試験電界	当社汎用絶縁体	候補配合A	候補配合B	候補配合C
4 kV/mm	0.46 mm	0.43 mm	0.21 mm	0.37 mm
8 kV/mm	0.46 mm	0.39 mm	0.20 mm	0.38 mm

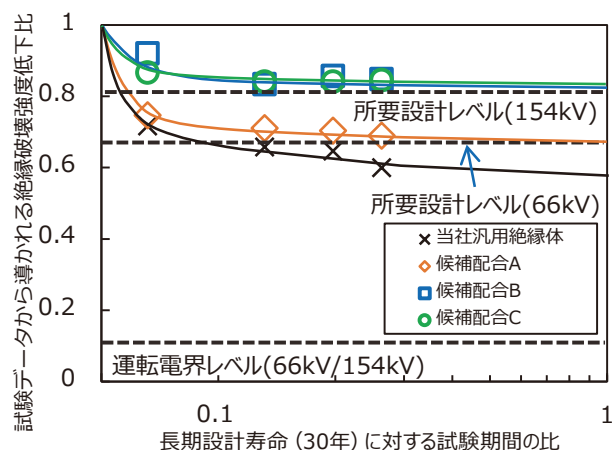


図8 シートサンプルによる長期特性の検討結果

(2) 誘電正接

候補配合の誘電正接は、厚さ0.2 mmのシート試料を用い、測定温度を90℃とし、印加電界を8 kV/mmとして自動シェーリングブリッジによって測定した。結果を表6に示す。候補配合B、Cでは、候補配合Aと比較して誘電正接が低く、良好な結果が得られた。

表6 各候補配合の誘電正接

配合	候補配合A	候補配合B	候補配合C
誘電正接	0.22%	0.05%	0.04%

4-3 新加速浸水課電ケーブル水トリー試験法での評価状況

候補配合Cの試作ケーブルを用いて、新加速浸水課電ケーブル水トリー試験法でのTR性評価を行った。試験電界は66 kV級の運転電界である4.2 kV/mmとし、200SQ銅導体、絶縁体厚3 mmのケーブル、および、左述と異なる導

体サイズ・絶縁体厚のケーブルも供試して試験を行った。浸水課電日数と最大水トリー長の関係、および、そこから推定する長期の水トリー長を図9に示す。試験結果から、候補配合Cの30年後の推定水トリー長は、TR性可否の判定基準である66 kV級の有害水トリー長を下回ることがわかった。また、最大水トリー長は印加電界によらないと考えると、154 kV級の有害水トリー長も下回り、TR性良好と考えられる結果を得られた。

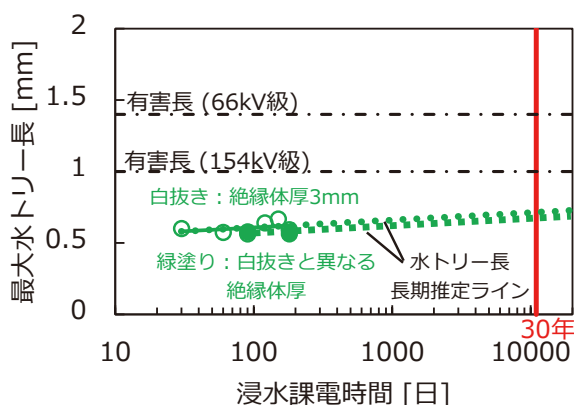


図9 候補配合Cでの新加速浸水課電ケーブル水トリー試験法の結果

候補配合Bについても、4-2節で示したシートサンプルによる水トリー特性評価から候補配合Cと同等に良好な結果が得られると考えるため、試作ケーブルでの新加速浸水課電ケーブル水トリー試験法による評価を今後行っていく予定である。

5. 結 言

国内外での導入が進む洋上風力発電向けに、製造性、コスト、施工性に優れた非遮水構造の海底ケーブルを検討している。今回、新加速浸水課電ケーブル水トリー試験法が、現実的な期間で水トリー劣化が生じ、実線路30年の長期TR性評価が可能な試験条件であることを示したとともに、将来の高電圧化も見据えた、高いTR性と低い誘電正接を備えた材料を見出している。今後、候補配合Bでも新加速浸水課電ケーブル水トリー試験法によるTR性評価を試作ケーブルによって行うとともに、検討した候補配合BおよびC両者について、各種規格でケーブルに要求される諸特性の確認も進めていく。

参 考 文 献

- (1) 内閣官房、「成長戦略会議(第6回) 配付資料2:2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」、pp.1-18
<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、pp.29-33 (2022)
- (3) 伊田維斗、伊田尚馬、安田周平、坂口恭生、西川正利、「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)」、住友電工テクニカルレビュー第203号、pp.52-56 (2023)
- (4) Y. Ida, et al. "Characteristics of Water Trees in Submarine Cables (Wet-Design) for Offshore Wind Power Generation," Jicable' 23, B8-3, Lyon, France (June 2023)
- (5) S. Mashio, et al. "Assessment and asset management of aged 66 kV - 77 kV wet design XLPE cable," CIGRE Paris Session, B1, 11275, Paris, France (August 2024)
- (6) 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 (2019)
- (7) 杣、関井、遠藤、池田、「ガス架橋・水蒸気架橋ポリエチレンケーブルの吸水現象」、日立評論、57巻、pp.897 (1975)
- (8) 速水、「ポリエチレンの水トリーに関するモデル試験」、電学論A、94-A巻、1号、pp.9-16 (1974)
- (9) 山崎、安部、渡辺、平井、「架橋ポリエチレン中の水トリーの分析」、電学論A、127巻、6号、pp.328-334 (2007)
- (10) 宮下、西岡、井上、加藤、「架橋ポリエチレン絶縁体の電気トリー抑制について」、電気学会絶縁材料研究会資料、EIM-87巻、32号、pp.97-106
- (11) 高橋、栗原、足立、「22kV 撤去CVケーブルの絶縁破壊前駆遮断試験と橋絡水トリーの発見」、電気学会電力・エネルギー部門大会論文集、334 (2018)
- (12) 高橋、栗原、岡本、「乾式架橋方式60kV級撤去CVケーブルの絶縁破壊前駆遮断による絶縁性能の経年低下特性と低下要因の把握」、電学論B、140巻、4号、pp.299-304 (2020)
- (13) 杣、「特別高圧CVケーブルの寿命診断」、OHM (1996)
- (14) 速水、「CVケーブル」、pp.56 (1986)

執 筆 者

深田 和宏*：エネルギー・電子材料研究所



笠井 淳之介：エネルギー・電子材料研究所



安田 周平：エネルギー・電子材料研究所
グループ長



山崎 孝則：フェロー
エネルギー・電子材料研究所
博士（工学）



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



*主執筆者