直流ケーブル用高分子絶縁材料のトリイーイング破壊特性

正員 宮田裕之、正員 中司徹、正員 高橋亨（株式会社フジクラ）

正員 國井久美子、正員 田中毅（東京電力株式会社）

Treeing breakdown characteristics of polymer insulating material for HVDC cable

Hiroyuki Miyata, Member, Tohru Nakatsuka, Member, Tohru Takahashi, Member (Fujikura Ltd.)

Kumiko Kunii, Member, Tsuyoshi Tanaka, Member (Tokyo Electric Power Company)

In order to grasp the degree of harmfulness for conductive contaminants in HVDC polymer cable quantitatively, DC treeing breakdown characteristics of modified HDPE (polymer for HVDC cable) was examined using needle-plane electrodes.

Treeing breakdown voltages become smaller in order of “DC>Imp.>DC+Imp.(reverse polarity)≡DC polarity reversal”, and the scattering of breakdown voltage becomes smaller also in this order. This order agrees with the space charge effect near the needle tip (field relief by homo space charge→field enhancement by hetero space charge). The fact that needle tip radius dependence of treeing breakdown voltage has not been observed until 20-40 μm seems to indicate that a critical range of strong field is necessary for the growth of electron avalanche before tree generation, except the space charge effect. The divergent electric field has the most remarkable influence on the case of DC and DC polarity reversal because of the largest space charge formation. For instance, the breakdown voltage ratio of DC/DC polarity reversal as well as the drop in V-N characteristics of DC polarity reversal are much larger in divergent field (needle-plane sample) than those in uniform field (sheet or cable sample). Consequently, DC polarity reversal seems to require the most severest (smallest) conductive contaminant size in HVDC polymer cable.

キーワード：直流ケーブル、トリイーイング破壊、針端曲率、空間電荷効果、許容異物

1. まえがき

超高压直流送電ケーブルとして現在、油浸絶縁ケーブルのみが使用されている。過去に超高压直流ケーブルへの適用を目的に交流用に汎用されている架橋ポリエチレン（XLPE）を始めとするプラスチック絶縁ケーブルが検討されたが、空間電荷形成などの直流高電圧に対する信頼性の問題が指摘され、直流ケーブル用高分子絶縁材料の実用化に向けての検討が現在も続けられている所である⁽¹⁾。

筆者等は10年以上前からこの検討に着手し、直流特性に極めて優れる新規高分子絶縁材料として、結晶性が高いため材料固有の絶縁破壊特性の優れる高密度ポリエチレン（HDPE）をベースとして、空間電荷特性を制御する目的で側鎖に少量の酸変性基（1%未満）をグラフト化させた変性HDPEを見出している⁽²⁾。変性HDPEケーブルは実用サイズの肉厚ケーブルにおいても優れた直流

性能の発揮が検証されており⁽³⁾⁽⁴⁾、例えば500kV級直流ケーブルを絶縁厚約20mmで設計可能である⁽⁵⁾。

プラスチック絶縁体では、油浸絶縁系での絶縁油による局部破壊の自復性が期待できる場合と異なり、局所的高電界を形成し絶縁破壊の起点となる絶縁体中の欠陥（異物、突起、ボイド）低減の対策が非常に重要である。このことから近々運開予定の交流500kV長距離XLPEケーブルを始めとする交流用超高压XLPEケーブルでは、欠陥の有害性に対する詳細な検討により極めて厳しい管理基準が設けられている⁽⁶⁾。

超高压直流プラスチックケーブル絶縁体に対する欠陥の有害性に関する定量的検討例は殆どない。部分放電劣化が支配的とならない直流ではボイド性欠陥はそれ程有害とは考えられないが、導電性の異物、突起性の欠陥では欠陥先端の電界集中部からのトリイーイング破壊形式となることから、交流、直流に関わり無く有害性を与えると考えられる。事実、筆者等は異物（金属異物、繊維（木綿）異物）を埋込んだ変性HDPEシートの直流及びインパ

ルス破壊特性において、導電性の金属異物では交流の場合同様異物サイズに応じた破壊値の低下が認められるが、中空空隙部を含むが絶縁性の繊維異物では殆ど破壊値を低下させないことを確認している⁽⁷⁾⁽⁸⁾。(交流では木綿のように単繊維中に中空空隙部を持つ繊維では空隙部での部分放電で破壊値が低下し有害異物となる⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。)

そこで本論文では、導電性欠陥(異物、突起)に的を絞り、その有害性を定量的に把握するために変性 HDPE を絶縁材料として針端曲率半径の異なる ($1.5\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$) 針—平板電極系により、直流ケーブルに必要な電圧種である直流(DC)、DC 極性反転、インパルス(Imp)、DC+Imp 重畳についてのトリッキング破壊特性を詳細に検討し、プラスチック直流ケーブルの場合における許容欠陥レベルの支配因子について明らかにした。本論文では変性 HDPE を対象絶縁材料としているが、針端の局所高電界部からの電荷注入及び空間電荷形成が確実にトリッキング破壊特性に影響する高電界領域の現象であることから、XLPE 等の他の高分子絶縁材料であっても程度の差の問題で同様の現象を呈すると考えられる。

2. 実験方法

トリッキング破壊試験試料の作成方法及び形状を図 1 に示す。予め予備成形した 2 枚の変性 HDPE シートでトリッキング針(オグラ宝石製)を挟み溶融プレス融着した後、針端からの距離が 1mm になるようにマイクロトームで対向面を切断し、切断面に導電塗料を塗布して対向電極とした。針端の曲率半径は $1.5\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ 、 $40\mu\text{m}$ 及び $100\mu\text{m}$ であり、針端にマイクロボイド等がないことは顕微鏡下で確認してある。なお、本実験では試料が HDPE ベースであるので不透明性が大きく図 1 の 5mm の厚みではトリッキング観察が困難なことからトリッキング発生電圧ではなく、トリッキング破壊電圧を測定している。そこで、トリッキング破壊電圧とトリッキング発生電圧に近い値になるように針—平板間距離は短い 1mm とした。用いた変性 HDPE の代表特性は表 1 の通りである。(物性の詳細は文献⁽²⁾参照)

トリッキング破壊試験はシリコン油中で行い、試験温度は室温より高温 (90°C) の方が DC 及び Imp 破壊値が低く、空間電荷形成(パルス静電応力法による)も大きいことから⁽²⁾⁽³⁾、より厳しい 90°C とした。印加電圧種は直流ケーブルに必要な電圧として、DC、DC 極性反転、Imp 及び Imp 重畳(逆極性)とし、印加条件は表 2 の通りである。表 2 の印加条件は針端曲率半径 $5\mu\text{m}$ の試料による以下に述べる予備実験の結果から定めた。

すなわち、針電極試料の直流トリッキング発生電圧は針端からのホモ空間電荷注入による電界緩和効果が顕著であることから電圧上昇速度依存性が大きく、ポリエチレンの場合では上昇速度が遅い程トリッキング発生電圧が高くなる⁽¹¹⁾ことが知られている。本試料形状では DC 沿面破壊電圧

図1 試料形状
Fig.1 Shape of specimen

表 1 変性 HDPE 試料
Table1 Modified HDPE sample

項目	変性 HDPE	現用 XLPE(参考)
密度 (g/cm^3)	0.95	0.92
融点 ($^{\circ}\text{C}$)	130	105~110
グラフト酸変性基	1.0%未満	—
添加剤他	フェノール系酸化防止剤 塩酸吸収剤	フェノール系酸化防止剤 架橋剤分解残渣

表 2 電圧印加条件 (試験温度: 90°C)
Table 2 Test condition of voltage applying

電圧種	印加条件
DC(+)*	上昇速度 $1\text{kV}/\text{s}$
DC 極性反転	$2\text{kV}/5$ 分ステップ
Imp(+), (-)	$2\text{kV}/3$ 回ステップ
逆極性 Imp 重畳	前課電 DC: $15\text{kV}/10$ 分、Imp: $2\text{kV}/3$ 回

*DC(-)は $110\sim 120\text{kV}$ 以上沿面

が $110\sim 120\text{kV}$ 程度であり、上昇速度の遅い $2\text{kV}/2$ 分ステップの条件では破壊試験を行うことが出来なかった。DC(+)では $1\sim 6\text{kV}/\text{秒}$ の上昇速度でほぼ一定の破壊電圧となることが確認できたので上昇速度を $1\text{kV}/\text{秒}$ としたが、DC(-)では上昇速度の速い $6\text{kV}/\text{秒}$ でも沿面破壊することから DC(+)のみの試験とした⁽¹²⁾。

DC 極性反転試験は接地を介さず 0.5 秒以内の反転時間で行っており、反転間隔時間は 2 分、5 分、10 分で差が認められなかった⁽¹²⁾、反転間隔時間 5 分とした。

逆極性 Imp 重畳試験は DC 前課電電圧依存性として DC=0,-5,-10,-15kV (前課電時間: 10 分) でのそれぞれの Imp(+)破壊値は 48kV 、 43kV 、 41kV 、 38kV であり、前課電電圧が高い程低下は大きい。また、前課電時間の影響として 1 分、5 分、10 分、30 分では 5 分以上で Imp 破壊値はほぼ一定の傾向であった。以上のことから DC 前課電時間は 10 分としたが、前課電電圧は実際のケーブルの場合の運転電圧に相当する値を明確に出来ない⁽¹³⁾ので、次の理由により 15kV とした。すなわち、変性 HDPE によ

る超高压直流ケーブルを想定した場合の DC 運転電界は ~30kV/mm 程度であり、この値はケーブル破壊電界の約 1/5 程度である⁽⁶⁾。本実験の針—平板電極系での DC 破壊電圧は<3.1>節で後述のように針端曲率半径依存性は小さく、DC(+)で約 75kV であり、この値の 1/5 をとり DC 前課電電圧を 15kV とした。

その他の実験として、一定 DC 電圧 (V) 下で破壊までの繰返し極性反転回数 (N) を求める極性反転 V—N 特性、DC トリー並びに DC 印加後の針端の空間電荷観察をダストフィギュア法により実施しているが、その実験条件等については該当箇所にて記述する。

3. 実験結果

<3.1> DC 及び DC 極性反転トリーイング破壊特性

図 2 に DC(+)及び DC 極性反転トリーイング破壊電圧の針端曲率半径依存性を示す。破壊電圧は 10~20 μ m まではほぼ一定であり、40 μ m ではやや上昇し、100 μ m ではいずれも沿面破壊であった。また、DC の極性効果は 2. で述べたように DC(-)では 110~120kV 以上 (沿面破壊) であり、DC(+)の平均的な破壊電圧~75kV よりかなり高い。DC(+)の破壊電圧から $E \approx 2V/r \ln(1+4d/r)$ (E (kV/mm):針端電界、 V (kV):印加電圧、 r (mm):針端曲率半径、 d (mm):電極間距離)の近似式(Mason の式)⁽¹³⁾によって求まる計算上の針端電界は曲率半径 1.5~10 μ m では固有絶縁破壊強度をはるかに越える 10,000~2,000kV/mm であり (変性 HDPE の 200~300 μ m シートでの DC 破壊強度は 400~500kV/mm(at 90℃)である⁽²⁾)、顕著な電界緩和効果が現れていることが明らかである。

DC 極性反転トリーイング破壊電圧は DC(+)単独破壊電圧の約半分であり、この低下率は平等電界に近いシート及びケーブル試料で得られている DC 単独に対する DC 極性反転破壊の低下率 80~90%⁽²⁾⁽³⁾に比べかなり大きい。また、DC 極性反転トリーイング破壊の特徴として、殆どの試料 (60 試料中 59 試料) で破壊は(-)→(+)の反転直後

図2 DC及びDC極性反転トリーイング破壊電圧の曲率半径依存性

Fig.2 Needle tip radius dependence on DC and DC polarity reversal breakdown voltage

に起こっており、破壊電圧のバラツキは DC 単独に比べ著しく小さい。

不平等性の大きい電界 (針—平板電極系) 下ではシート及びケーブル試料の平等電界に近い場合より極性反転低下率が大きく現れる結果となったので、次に極性反転 V—N 特性 (V :DC 電圧、 N :極性反転回数)を針—平板電極系 (図 1 と同形状、針端曲率 5 μ m) 及びシート試料 (200~300 μ m 厚リセス状シート) について実施した。試験温度は 90℃であり、反転間隔時間は 5 分とした。図 3 に結果を示すように $V^n \cdot N = \text{const.}$ から求まる垂下指数 n は針—平板電極系で $n=6.8$ 、シート試料で $n=20$ であり、電極系の不平等性の影響が大きく現れている。シート試料については図 3(b)に併記してあるように、本実験とはほぼ同様の条件で実施している XLPE については $n=11$ ⁽¹⁴⁾、油浸クラフト紙では $n=50\sim60$ ⁽¹⁵⁾ であり、変性 HDPE はこの中間の n であるが、破壊強度の絶対値はかなり高いのが判る。

(a) 針(5 μ m)-平板試料

(b) シート試料

図3 DC極性反転V—N特性 (90℃)

Fig.3 V—N characteristics of DC polarity reversal (90℃)

図4 Imp及び逆極性Imp重畳トリリーング破壊電圧の曲率半径依存性
Fig.4 Needle tip radius dependence on Imp and Imp+DC breakdown voltage

3.2 Imp 及び Imp 重畳トリリーング破壊特性

図4にImp及び逆極性Imp重畳トリリーング破壊電圧の曲率半径依存性を示す。いずれの場合も針端曲率半径40 μmまで破壊電圧はほぼ一定であり、100 μmでは沿面破壊となった。(正確にはImp(-)及びDC(+)+Imp(-)の場合がImp(+)及びDC(-)+Imp(+)の場合よりやや曲率半径依存性が現れている)Impトリリーング破壊電圧は図2のDCトリリーング破壊電圧よりかなり低く、DCとImpの電圧印加時間の相違による針端の電界緩和効果の違いが最も大きい要因と考えられる。

Impトリリーング破壊の極性効果はDCの場合同様、負極性が正極性より高い値であるが、ポリエチレンの場合のImpトリリー発生電圧の極性効果の差⁽¹¹⁾に比べ小さい。また、逆極性Imp重畳破壊電圧のImp単独からの低下度は正極性の方がやや大きい傾向である。

4. 考察

4.1 電圧種とトリリーング破壊特性 図2及び図4の結果から電圧種によるトリリーング破壊電圧は

「DC(-)>DC(+)>Imp(-)>Imp(+)>逆極性Imp重畳>DC極性反転」の順である。破壊電圧がこの傾向を示すのは「不平等性の著しい針—平板電極系では空間電荷効果が顕著に現れ、針端からのホモ電荷注入時間の長いDCがImpより、DCでは電圧上昇速度が遅い程電界緩和効果によりトリリー発生電圧は高くなり、その傾向は負極性の方が顕著である」とするポリエチレンの場合の報告⁽¹¹⁾⁽¹⁶⁾と同様の現象である。すなわち、変性HDPEの場合でも破壊電圧はDC>Impであり、極性効果はDC、Imp共に負極性>正極性でその程度はDCの方が大きい。また、DCよりもDC極性反転、Impよりも逆極性Imp重畳の破壊電圧が低下するのは前課電により形成された空間電荷が破壊時

の逆極性電圧に対し電界強調となるヘテロ空間電荷として作用するためと考えられる。さらに、DC極性反転で殆どの場合で破壊は(-)→(+)反転直後に生ずることも、負極性の方が空間電荷形成が大きく反転直後の正極性でヘテロ空間電荷としての電界強調効果が大きくなるためと理解できる。

電圧種による破壊電圧値を破壊電圧の低い正極性の場合(負極性でも傾向は同じ)を基準として、そのバラツキを含めて示すと図5となる。バラツキは破壊電圧の順ともほぼ一致し「DC>Imp>逆極性Imp重畳>DC極性反転」の順に小さくなっている。この順は同図中に併記してあるように破壊直前の針端の電界緩和→電界強調の度合の順と考えられ、後述(<4.3>節)する針端からのトリリー発生状況の相違とも関係づけられる。(<4.3>節で詳述)

空間電荷効果は電界の不平等性にも大きく依存することが知られている⁽¹¹⁾。そこで空間電荷効果の最も小さい

図5 電圧種によるトリリーング破壊電圧の特徴
Fig.5 Feature of treeing breakdown voltage for each type of voltage

図6 不平等電界下（針—平板試料）と平等電界下（ケーブル試料）の破壊電圧比（Imp(+)=1.0）
Fig.6 Ratio of breakdown voltage under divergent field (needle-plane sample) and uniform field(cable sample)

と考えられる Imp(+)破壊値を 1.0 に規格化して、本実験結果（針—平板電極系、曲率半径 $10\mu\text{m}$ ）と平等電界に近いケーブル（絶縁厚 $6\sim 9\text{mm}$ の変性 HDPE ケーブル）の場合のデータ⁽⁵⁾を比較して示すと図 6 となる。図から明らかに電界の不平等性の影響は DC 特性で顕著に現れていることが判る。すなわち、DC 及び DC 極性反転では針—平板試料とケーブル試料の間の破壊電圧比の差が大きいのにに対し、Imp 及び逆極性 Imp 重畳では両者間で殆ど差が認められない。DC はホモ空間電荷による電界緩和が最大の場合であり、ヘテロ空間電荷による電界強調は逆極性 Imp 重畳及び DC 極性反転の場合であるが、DC 電圧値の大きい DC 極性反転の場合の方がその影響が顕著に現れると考えられる。このことは図 3 に示した極性反転 V—N 特性に対しても同様であり、針—平板試料とシート試料の場合の V—N 特性の垂下指数 n （針—平板試料 $\rightarrow n=6.8$ 、シート試料 $\rightarrow n=20$ ）の相違の原因と推定される。従って、<4.4>節で述べるように直流ケーブルに対する許容欠陥（異物、突起）の決定にはこの電界の不平等性を考慮した空間電荷効果を反映させる必要がある。

<4.2> 針端曲率半径依存性 図 2 及び図 4 に見られるように針端曲率半径 $20\sim 40\mu\text{m}$ 以下ではトリッキング破壊電圧の曲率半径依存性が殆ど認められず、このことが電圧種に依らないことは注目すべきことである。DC の場合では針端で顕著な電界緩和効果があり、Imp の場合でもある程度の電界緩和効果が考えられ曲率半径依存性の認められなくなる現象を説明できるが、DC 極性反転や逆極性 Imp 重畳ではこのような考え方からは説明し難い。

XLPE の場合でもトリッキング発生電圧に針端曲率半径依存性が認められなくなる現象が知られており、室温及び 90°C 共に AC では約 $10\mu\text{m}$ 、Imp でもやはり約 $10\mu\text{m}$ の値が報告されている⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。その理由として、AC では針端の空間電荷効果および架橋剤分解残渣による電界緩和効果⁽¹⁷⁾、Imp では針端近傍である程度の高電界領域を維持するような電界変化率が関係するとされている⁽¹⁸⁾。放電劣化を伴わない DC や Imp トリッキングは局部的の高電界領域で形成される衝突電離 $\rightarrow$ 電子なだれ破壊が基本となる⁽¹⁸⁾。従って、空間電荷による電界緩和効果で説明し難い DC 極性反転や逆極性 Imp 重畳においてさえ曲率半径依存性が認められないのは、上述の電子なだれの形成に必要な数十 μm オーダの強電界維持長の存在が考えられる。空間電荷の影響が殆ど無視できるナノ秒インパルスにおける高分子のトリッキング破壊に対しても同様の考察がある⁽¹⁹⁾。

図 7(a)は空間電荷の影響が最も少ないと考えられる Imp(+)トリッキング破壊電圧（平均値）を用いて各曲率半径での針端近傍の電界変化を針端を回転双極面体で近似した式⁽¹¹⁾で求めたものである。図 7(b)には針端近傍の電界変化の空間電荷の影響も模式的に示してある。図 7(a)から判るように針端から約 $20\mu\text{m}$ 以遠では曲率半径に依らず同程度の電界となっており、例えば $20\mu\text{m}$ 位置での電界は変性 HDPE のシート試料（ $200\sim 300\mu\text{m}$ リセス状シート）で得られている Imp 破壊強度 430kV/mm (at 90°C)⁽²⁾と同程度である。従って、電子なだれの形成に必要な強電界維持長としてこの程度の値（ $\sim 20\mu\text{m}$ ）が推定さ

(a) 曲率半径効果

(b) 空間電荷効果の模式図

図7 針端近傍電界
Fig.7 Field strength profile near needle tip

れ、この値は針端曲率半径依存性が認められなくなる値と良く一致している。前述のように XLPE ではこの値は 1Imp の場合で $\sim 10\mu\text{m}$ であったが、変性 HDPE ($20\sim 40\mu\text{m}$) との相違は高分子の固体構造 (化学構造、結晶化度など) の差異に起因する「衝突電離→電子なだれ」の形成の難易が関係しているとも考えられる。空間電荷の影響が加わると針端近傍の電界は図 7(b) のようになる。DC のようにホモ空間電荷の影響が顕著な場合は針端から離れた位置に最大電界を生ずる可能性もあり⁽¹¹⁾、この場合 <4.3> 節で述べる DC トリーの形状とも一致する。一方、DC 極性反転及び逆極性 Imp 重畳では破壊直前に針端近傍のヘテロ空間電荷形成領域は電界強調されるので破壊電圧が最も低くなる。図 2 及び図 4 を詳細に見ると、このような場合 (DC 極性反転、DC(-)+ $\text{Imp}(+)$) で曲率半径の小さい 1.5 及び $5\mu\text{m}$ が 10 及び $20\mu\text{m}$ より破壊電圧がやや上昇している様子が伺える。単なるバラツキなのか本質的現象なのかは定かでないが、前述の破壊に対する強電界維持長の存在を示唆している現象かも知れない。(例えば、曲率半径が小さい程空間電荷形成領域も小さいとすると、空間電荷形成領域以内では電界強調されるが、以遠では電界緩和されるので所定値以上の強電界長は短くなる等)

<4.3> DC トリー形状 DC(+)長期課電中に沿面閃絡した試料及び DC 極性反転 V—N 試験の途中打ち切り試料について針端を顕微鏡観察した所、図 8 に示すようにトリー発生起点に違いが見られた。前者 (DC 沿面閃絡試料) ではトリーは針端ではなく針端から $20\sim 80\mu\text{m}$ 程度はずれた位置から発生しているのに対し、後者 (極性反転試料) では例外なく針端を起点としている。トリーが針端から発生することは一般的なことであるが、針端以外から発生している DC 沿面閃絡試料の場合は一種の短絡トリーであり、DC 印加中に発生したトリーとは異なるが、トリー発生起点が閃絡時の最大電界位置とするとその位置は針端以外であり、針端近傍での顕著な空間電荷の影響を意味する。

そこで、DC 課電による針端近傍の空間電荷分布をダストフィギュア法により調べた。図 1 と同形状の試料 (針端曲率半径 $5\mu\text{m}$) について 90°C で予想 DC(+)破壊値の 90% (上昇速度 1kV/s) で課電を停止し、接地後針を引抜

図9 DC(+)課電後の針端近傍のダストフィギュア
Fig.9 Dust figure near needle tip after DC application

き切断してダストフィギュアを形成させて顕微鏡下で観察した。図 9 に示すように針電極端近傍 ($\sim 30\mu\text{m}$) にホモ電荷 (正電荷) が、その周囲にヘテロ電荷 (負電荷) が形成されている。(図 9 の写真では引抜針の中空部を黒く塗りつぶしてある) このような電荷分布であれば針端から離れた位置に最大電界部を生ずることは容易に想像できる。図 7(b) では DC の場合として顕著なホモ空間電荷のみを想定しているが、実際にはその周囲にヘテロ電荷が形成されていることから、その境界付近が最大電界部になると推定される。なお、DC 課電により電界集中部付近で空間電荷がホモとヘテロに分れる同様の現象は半導電突起を埋込んだ XLPE の場合にも認められている⁽²⁰⁾。

図 8(a) は DC 短絡トリーの場合であるが、DC トリーの場合であっても上述ことから針端から離れた最大電界部がトリー発生起点となることは充分想定される。このように考えれば、トリー発生起点の不確実性により図 5 の DC の場合に破壊電圧のバラツキが最も大きくなり、針端の電界緩和→電界強調の順にバラツキが小さくなったと説明できる。

<4.4> 直流ケーブルに対する許容異物の推定

AC 用に汎用されている XLPE ケーブルについては XLPE の針—平板電極系によるトリー発生電界 E_c を用いて次式により導電性欠陥 (金属異物、突起) の許容サイズを求める方法が採用されている⁽²¹⁾。

$$E_c = E_{\max} \cdot k_T \cdot k_m \cdot k_f \cdots \cdots (1)$$

(E_c : トリー発生電界 (kV/mm), $E_{\max}$: 絶縁体運転最大電界 (kV/mm), k_T : 温度補正係数, k_m : 寿命換算係数, k_f : 電界増倍係数) ここで k_f は異物を図 10 に示す回転楕円体 (長軸半径 a 、短軸半径 b 、曲率半径 R) で模擬し、最も厳しい場合で長軸方向が電界方向として異物近傍の平等電界 (E_0) と長軸先端電界 (E) の比 (E/E_0) で与えられ、AC 電圧の場合は異物の誘電率 (ϵ) をパラメータに a/R に対し計

図8 DCトリー形状
Fig.8 Shape of DC tree

図10 異物先端の電界増倍特性

Fig.10 Stress enhancement at the tip of conductive contaminant

算結果が与えられている⁽²¹⁾。導電性異物（金属異物）の場合はACでは $\epsilon=\infty$ 、DCでは導電率 $\sigma=\infty$ に該当し、図10のようにACでもDCでも a/R に対し同じ結果を与える。AC用超高压XLPEケーブルでは R としてトリ発生針端電界の曲率半径依存性が認められなくなる値である前述の $10\mu\text{m}$ 及びその場合のACトリ発生電界 300kV/mm を用いて、例えば絶縁厚 27mm の 500kV 長尺XLPEケーブルの許容異物サイズとして $50\sim 60\mu\text{m}$ が得られている⁽¹⁷⁾⁽²²⁾。

同様の方法を本実験のトリイング破壊電圧の結果を用いて超高压DCケーブルの場合における許容異物サイズについて推定する。各電圧種（DC、Imp、逆極性Imp重畳、DC極性反転）に対するトリイング破壊電圧のバラツキの最低値を用いて針端電界と曲率半径の関係を示すと図11となる。（DC、Imp及び逆極性Imp重畳は破壊値の低い方の極性を用いた）いずれの電圧種に対しても曲率半径依存性が認められなくなるのは約 $40\mu\text{m}$ であるので図10の R として $R=40\mu\text{m}$ を用いる。また、図から明らかなようにDC極性反転及び逆極性Imp重畳が最も低い破壊電界を与え、これらの場合で許容異物サイズが支配されそうであるのは直感的に理解できる。そこで以下には、絶縁厚 20mm の 500kV DC変性HDPEケーブル（導体サイズ $2,000\text{mm}^2$ ）を仮定した場合のDC極性反転及び逆極性Imp重畳から求まる許容異物についてその値を推算する。（因に、DC及びImpに対しては $400\sim 500\mu\text{m}$ 以上の許容異物サイズとなる：表3参照）

（DC極性反転の場合） トリイング破壊試験は高温の 90°C で実施しているので(1)式における $k_T=1.0$ 、図11より $R=40\mu\text{m}$ での $E_c=455\text{kV/mm}$ である。絶縁厚 20mm の 500kV DCに対する平均電界は 25kV/mm であり、変性HDPEケーブルのDC 30kV/mm での長時間課電（最大 $10,000$ 時間）の実験結果では温度勾配下でも空間電荷による絶縁体電界変歪は殆どないことが知られているが⁽⁶⁾、ここではこのような影響（温度勾配、空間電荷）による電界変歪を見込んだ厳し目の数値として仮に $E_{\text{max}}=35\text{kV/mm}$ とする。図3より極性反転V-N特性の垂下指数 n は異物近傍電界を模擬する針—平板電極試料で

図11 破壊最低電圧での針端電界の曲率半径依存性

Fig.11 Tip radius dependence of electrical field at needle tip

表3 各電圧種に対する許容異物サイズ推定値
（変性HDPE（絶縁厚 20mm ） 500kV ケーブルの場合）

Table 3 Estimation of allowable contaminant size for each type of voltage

電圧種	許容異物サイズ(μm)
DC&Imp	400~500以上 ^{*1}
Imp重畳	約 $200 \cdot \alpha^{*1,*2}$
DC極性反転	約 100^{*3}

*1:設計条件にも依存（概略値）

*2: α は逆極性Imp繰り返し課電劣化があったとした場合の不明因子

*3:最も厳しく見積もった場合の概略値

は $n=6.8$ であり、ケーブル使用中の反転回数を仮に $10,000$ 回とすると $k_m=(10000)^{1/6.8}=3.87$ となる。これらを(1)式に代入すると $k_f=3.36$ ($a/R=1.3 \rightarrow a=52\mu\text{m}$)であり、許容異物サイズ $2a=104\mu\text{m}$ となる。

（逆極性Imp重畳の場合） (1)式における k_T （温度補正係数） $=1.0$ 。XLPEケーブルの場合、Imp電圧単独では繰り返しImp課電による劣化は殆ど認められない（ k_m （寿命換算係数） $=1.0$ に相当）ことが知られているが⁽⁶⁾、逆極性Imp重畳ではDC課電で蓄積した空間電荷によりImp重畳時に劣化につながる可能性も否定できない。しかし、Impに重畳されるDCは運転電圧程度であり、前述の実質的にDC電圧による絶縁破壊試験とみなせるDC極性反転V-N特性のような大きい低下はないと推定される。さらに、設計条件にも依存するが、逆極性Imp重畳の要求電圧を仮に $1,300\text{kV}$ （導体上の絶縁体最大電界 $E_{\text{max}}=86\text{kV/mm}$ ）とすると、この値は絶縁厚 20mm 変性HDPEケーブルの逆極性Imp重畳破壊電圧（ 1900kV at 90°C ）⁽⁶⁾の約 70% であり、一般に繰り返し課電電圧の低い方が劣化の垂下特性は緩やかになる。以上のことから、仮に繰り返し逆極性Imp重畳課電による劣化はない（ $k_m=1.0$ ）と仮定した場合、図11より $R=40\mu\text{m}$ におけるトリイング破壊電界 $E_c=379\text{kV/mm}$ である。これらを(1)式に代入すると $k_f=4.41$ ($a/R=2.32 \rightarrow a=93\mu\text{m}$)で

あり、許容異物サイズ $2a=186\mu\text{m}$ となる。この値は前記の DC 極性反転から求めたサイズ ($\sim 100\mu\text{m}$) の約 2 倍となるが、逆極性 Imp 重畳繰り返し課電による劣化が認められる場合はこの値より当然小さくなり、その程度を確認することは今後の課題である。

各々の電圧種に対する許容異物サイズを比較すると表 3 となり、逆極性 Imp 重畳の場合の不明因子 (表 3 の α) を除けば、DC 極性反転の場合が最も厳しい (小さい) 値を与える。その最大の原因は V-N 特性の垂下指数 n が図 3(a) のように、電界の不等性が大きい場合 (針—平板試料) に著しく小さくなるためである。図 3(a) では極性反転繰返し回数として最大 100 回程度までのデータであり、この垂下特性がそのまま外挿できるかどうか実際に確認する必要がある、今後の課題である。仮に約 $100\mu\text{m}$ 程度の許容異物サイズとした場合、前述の超高压 AC ケーブル (長尺 500kV XLPE ケーブル) の場合 (許容異物サイズ: $50\sim 60\mu\text{m}$) より裕度はかなり大きくなる。

5. まとめ

部分放電劣化が支配的とならない直流ケーブルでは導電性欠陥 (異物、突起) の有害性を定量的に把握しておくことは特に重要である。この目的のために直流ケーブル用新規高分子絶縁材料である変性 HDPE を用い、各種電圧 (DC、DC 極性反転、Imp、逆極性 Imp 重畳) 下で針—平板電極系によるトリッキング破壊特性を調べたことが明らかとなった。

(1) トリッキング破壊電圧は「DC>Imp>逆極性 Imp 重畳 $\approx$ DC 極性反転」の順であり、破壊電圧のバラツキもこの順に小さくなる。この順は破壊時における“針端近傍のホモ空間電荷による電界緩和 $\rightarrow$ ヘテロ空間電荷による電界強調”の順と一致する。特に電界緩和効果が最も顕著な DC ではトリッキング発生起点 (最大電界部) が針端から数十 μm 離れた位置である可能性もあり、トリッキング発生起点の不確実性が破壊電圧のバラツキを最も大きくする原因とも考えられる。

(2) 破壊電圧に及ぼす空間電荷効果は電界の不等性が大きいと顕著に現れる。従って、DC (ホモ空間電荷による電界緩和が最大) と DC 極性反転 (ヘテロ空間電荷による電界強調が最大) の場合が不平等電界下 (針—平板電極試料) と準平等電界下 (ケーブル又はシート試料) の破壊電圧の差異が最も大きく現れる。(例えば、破壊電圧の DC 極性反転/DC の比は針—平板試料では約 0.5、ケーブル試料では約 0.9) この電界の不等性の影響は DC 極性反転 V-N 特性に対しても同様である。(V n ·N=const. の垂下指数 n は針—平板試料では 6.8、シート試料では 20)

(3) トリッキング破壊電圧の針端曲率半径依存性は電圧種に依らず曲率半径 $20\sim 40\mu\text{m}$ まではば一定の値となる。この曲率半径以下では見掛けの曲率半径の増大を意味する

が、その原因として針端の空間電荷による電界緩和効果 (DC の場合) 以外にトリッキング発生前駆の電子なだれ形成に必要な数十 μm オーダの強電界維持長の存在を示唆すると考えられる。

(4) 以上のトリッキング破壊特性から直流ケーブルに対する導電性許容欠陥レベルは逆極性 Imp 重畳の場合の不明因子を別にすれば、DC 極性反転特性が最も厳しい条件となる。例えば、500kV 級変性 HDPE ケーブル (絶縁厚 20mm) では最も厳しい場合を見込んで (DC 極性反転のトリッキング初期破壊電圧 455kV/mm (曲率半径 $40\mu\text{m}$)、V-N 特性の垂下指数 $n=6.8$) 許容異物サイズ約 $100\mu\text{m}$ が得られた。

(平成 12 年 2 月 14 日受付、平成 12 年 6 月 27 日再受付)

文 献

- (1) 例えば、平成 11 年電気学会全国大会シンポジウム、S.33 「直流ケーブル技術の現状と将来動向」 (平成 11 年)
- (2) 久保田, 吉藤, 丹羽, 高橋, 宮田: 「直流ケーブル用高分絶縁材料の開発 (その 1)」, 電学論 A, vol112, No3, p215(1992)
- (3) 鈴木, 丹羽, 高橋, 宮田: 「直流ケーブル高分子絶縁材料の開発 (その 2)」, 電学論 B, vol112, No10, p914(1992)
- (4) 田中, 國井, 中司, 飯沼: 「変性 HDPE ケーブルの絶縁破壊特性 (その 2)」, 平成 11 年電気学会電力エネルギー部門大会、No376 (平成 11 年)
- (5) T.Tanaka, K.Kunii, T.Nakatsuka, H.Miyata, T.Takahashi, "High Performance HVDC Polymer Cable", Jicable'99, C9.8 (1999)
- (6) 例えば、神永: 「500kV CV ケーブルの開発動向」, 電学論 B, vol114, No10, p964(1994)
- (7) 板谷, 武田, 中司, 宮田, 高橋: 「直流ケーブル用新種絶縁材料の基礎開発 (その 8) —絶縁破壊強度に与える異物の影響」, 平成 8 年電気学会全国大会、No331(1996)
- (8) 田中, 板谷, 中司, 宮田, 高橋: 「DC 破壊に及ぼす異物の影響」, 平成 10 年電気学会全国大会、No300(1998)
- (9) K.Iinuma, H.Miyata, T.Takahashi, S.Yamamoto, "Factor for Dielectric Strength due to Fibrous Contaminant in XLPE", 1995 Int. Symposium on Elec. Insul. Mat., E-1(1995)
- (10) K.Kaminaga, S.Iida, S.Fukunaga, K.Yatsuka, Y.Inoue, "Influence of Fibrous Contaminants on Dielectric Property of XLPE Insulation", 1992 Int. Symposium on Electrical Insulation, P456(1992)
- (11) 電気学会技術報告、II 部第 237 号: 「有機絶縁材料のトリッキング」 (昭和 61 年)
- (12) 勝田, 板谷, 中司, 宮田, 山本: 「直流材料における直流劣化機構の検討」, 電気学会誘電絶縁材料研究会資料, DEI96-54(1996)
- (13) Mason, J.H: Proc. Instn. Elec. Engers, vol98, Pt I, p44(1954)

- (14)中谷,仲川,村田,中司,田中:「絶縁材料の極性反転特性(その4:XLPE V-n 特性)」,平成 11 年電気学会全国大会, No1757(平成 11 年)
- (15)井上,諫山,飯沼,村田:「絶縁材料の極性反転特性(その 1:油浸紙 V-n 特性)」,平成 11 年電気学会全国大会, No1754 (平成 11 年)
- (16)電気学会技術報告、第 674 号「高分子絶縁材料におけるトリイーイング劣化の基礎過程」(1998)
- (17)小沢,田中,八束,金岡,丹:「CV ケーブルの許容欠陥レベルの評価」、平成 4 年電気学会電力エネルギー部門大会, No335 (1992)
- (18)村田,片貝,金岡:「XLPE のトリイー開始現象の検討」、第 26 回電気絶縁材料シンポジウム, S2-5(1994)
- (19)I.Kitani, K.Arii:「Impulse Breakdown in Polymer Dielectrics in the ns Range under Divergent Fields」、IEEE EI-15, No2, 134(1980)
- (20)神永、鈴木、丹羽、高橋、宮田:「DC 前課電の有無による XLPE 内突起欠陥が絶縁特性に及ぼす影響」、平成 5 年電気学会全国大会, No299 (平成 5 年)
- (21)電気協同研究第 34 巻第 1 号:「特別高圧架橋ポリエチレンケーブル及び接続部の高電圧試験法」(昭和 53)
- (22)神永、市原、神野、田辺、福永、金岡、竹鼻:「500kV CV ケーブルの開発」、平成 6 年電気学会電力エネルギー部門大会、38 (平成 6 年)

宮田 裕之 (正員) 1981 年神戸大学化学科卒業。
1981 年(株)フジクラ入社後、超高圧ケーブル、特に直流ケーブル絶縁材料の研究開発に従事。現在、材料技術研究所材料評価センター長。

中司 徹 (正員) 1958 年 4 月 8 日生。1982 年 3 月山口大学文理学部理学研究科(物理)卒業。1989 年 3 月広島大学大学院理学研究科(物性)修了。同年(株)フジクラ入社。主として、超高圧 CV、直流 OF、固体直流ケーブル絶縁材料の研究開発に従事。2000 年 3 月より超電導発電関連機器・材料技術研究組合(Super-GM)へ出向。理学博士。

高橋 享 (正員) 1974 年北海道大学大学院理学研究科修士課程修了。同年 4 月(株)フジクラ入社。現在、材料技術研究所化学材料開発部勤務。主として、高電圧電力ケーブル絶縁材料の研究開発に従事。1996~1999 年千葉大学工学部非常勤講師。工学博士。

國井久美子 (正員) 1969 年 9 月 2 日生。1994 年 3 月中央大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士前期課程修了。同年東京電力(株)入社。主として、地中電力ケーブルの建設、保守、研究開発に従事。現在、同社電力技術研究所送変電グループ所属。

田中 毅 (正員) 1962 年 1 月 28 日生。1984 年 3 月青山学院大学理工学部電気電子工学科卒業。同年東京電力(株)入社。主として、地中電力ケーブルの研究開発、建設、管理に従事。現在、同社銀座支店港電力所地中送電グループマネージャー。