

報告番号 ※ 乙 第 3083号

主論文の要旨

題名 高分子絶縁材料の直流トリッキング破壊と
空間電荷に関する研究

氏名 河村 英昭

主 論 文 の 要 旨

| 報告番号 | ※第 乙 | 号 | 氏名 | 河 村 英 昭 |
|---|---------|---|----|---------|
| <p>合成高分子材料は電氣的、機械的に優れた性能を有し、電力機器・電力ケーブルの絶縁材料として広く利用され、これらの超高電圧化・小型化に大きく貢献してきた。</p> <p>最近、長距離大電力輸送を目的として直流送電が注目されている。このため直流高電界における高分子絶縁材料の絶縁性能、とりわけ空間電荷に関連した様々な新しい問題が提起されており、それらを解決するための多くの検討が行なわれている。</p> <p>各種電力機器、電力ケーブルなどの比較的肉厚の絶縁層における絶縁破壊は樹枝状に進展する、いわゆるトリッキング破壊の形態をとることが知られている。直流電圧においても交流電圧の場合と同様にトリッキング破壊が観察されるが、そのトリッキング破壊現象に関する研究は緒についたばかりであり、これらのトリッキング破壊の発生・進展過程についてはほとんど明らかにされていない。従って、高分子絶縁材料を絶縁体として用いた直流用電力機器の絶縁設計を行なうための基礎的資料として、直流トリッキング破壊を現象面から詳細に明らかにする必要がある。更に、直流トリッキング破壊の発生・進展過程に影響を及ぼす空間電荷の挙動を究明することは工学上極めて重要である。</p> <p>本論文は以上の観点から、電力ケーブルの絶縁材料として広く利用されているポリエチレンを主な研究対象材料として用い、その板状試料に挿入した針電極に直流電圧、インパルス電圧及びこの両者を組み合わせた様々な波形の電圧（極性反転など）を印加し、このとき針電極先端近傍に生じたトリッキング破壊を実験的に解明したものである。更に、トリッキング破壊試験に用いたものと同じ針対平板電極系試料を用いて不平等電界における熱刺激電流の測定をも試み、直流トリッキング破壊に及ぼす空間電荷の影響についてそれらの定量的な検討を行なっている。本論文の内容は8章から構成されている。</p> <p>第1章は緒論であり、今まで国内外で行なわれてきたトリッキング破壊に関する研究経過の概略、本研究を実施した背景とその目的及び本研究の概要を記述している。</p> | | | | |

主論文の要旨

| 報告番号 | ※第 乙 | 号 | 氏名 | 河村英昭 |
|--|---------|---|----|------|
| <p>第2章では針電極を挿入した低密度ポリエチレン試料を用い、直流トリー発生電圧を求めると共に、この電圧値を基礎として直流電圧を前課電し、その後電極間の短絡によって生じたトリー（短絡トリー）の性状について調べた。そして、このトリーイング破壊に及ぼす空間電荷の効果について検討している。直流トリー発生電圧は、印加電圧の上昇速度を遅くするほど高くなる。また、同一の上昇速度における直流トリー発生電圧は、正極性より負極性の方が大きい極性効果を示した。その結果から、針電極先端近傍には同極性の空間電荷が形成され、針電極先端の電界が緩和されることが明らかになった。更に、この空間電荷の形成には課電時間効果のあることも明らかとなった。短絡トリーの伸び長さは直流電圧の印加時間が長くなるにつれて大きくなるが、ある時間で飽和する特性を示した。この飽和伸び長さは印加電圧の大きさによって変化し、印加電圧の大きさで決まる定常的な空間電荷の形成に至るまでには長時間を要することが明らかとなった。また、針電極を負極性とした場合の短絡トリーの伸び長さは仕事関数の小さい針電極ほど大きな伸びを示すことから、負極性の空間電荷形成は、基本的には負極性の針電極から電界注入された電子が電界によって移動し、電子の飛程近傍に存在するキャリア・トラップに捕獲され、更にこの電子のデトラップ、リトラップによって時間的、空間的に変化するものと考察した。</p> <p>第3章では低密度ポリエチレンにあらかじめ直流電圧を前課電したのち、これと異極性のインパルス電圧を印加して極性反転を行ない、あるいは同極性のインパルス電圧を印加することによって生じたトリーイング破壊の性状について調べ、この破壊に及ぼす空間電荷の効果について検討した。極性反転トリーの伸び長さは直流前課電々圧 V_{dc} の増加と共に大きくなるが、V_{dc} と同極性のインパルス電圧 V_{imp} を印加して生じたトリーの伸び長さは逆に小さくなる。このとき生じたトリーの伸び長さ L は、V_{dc} と極性反転などに用いたインパルス電圧 V_{imp} との差電圧 ($V = V_{dc} - V_{imp}$) に関係し、$L = k \cdot \exp(nV)$ の実験式を得た。更に、極性反転トリーの伸び長さは直流前課電々圧を遮断した後、極性反転を</p> | | | | |

主論文の要旨

| 報告番号 | ※ 第 2 号 | 氏名 | 河村英昭 |
|---|------------------|----|------|
| <p>行なうまでの待ち時間が長くなると共に小さくなる。この結果から極性反転トリートの伸び長さに及ぼす空間電荷の消滅時間を、負極性の空間電荷で約50分、正極性のそれは約27時間と評価できた。また、極性反転トリートの伸び長さは試料温度によっても著しく変化する。低密度ポリエチレンのガラス転移温度付近の温度(-30℃)より低い領域では、極性反転トリートの伸び長さは試料温度によらず一定の伸びを示し、直流前課電による空間電荷の影響をほとんど受けないことが明らかとなった。これに対して-30℃以上の高い温度領域では、極性反転トリートの伸び長さは試料温度の上昇と共に大きくなり、しかも直流前課電による空間電荷の影響を著しく受けることが明らかとなった。以上の結果、負極性の空間電荷の形成過程は、負極性の針電極から電界注入された電子が固体中のキャリア・トラップに捕獲されることによることを再確認した。一方、正極性の空間電荷の形成過程は前者と異なり、針電極先端近傍の高電界部分において固体中の自由電子が抽出される際、衝突電離に伴って生じた主鎖あるいは側鎖に直結した正イオンが空間電荷として形成されるものと考察した。また、空間電荷の形成は固体のマイクロブラウン運動や結晶融解などの材料物性が密接に関係していることも明らかとなった。</p> <p>第4章ではトリートング破壊試験に用いた針対平板電極系試料を用いて、これまでほとんど報告がなされていない不平等電界における熱刺激電流(TSC)の測定を試み、直流トリートング破壊に関連した空間電荷効果の定量的な検討を行なった。TSCは放電々流と同じ方向に流れ、約50℃にピークを持つ典型的な山形を示した。このTSCピークに対応する活性化エネルギーとしては、負極性の空間電荷に対して約1.5eV、正極性のそれに対しては約3.4eVが得られた。更に、TSCのコレクティング電圧特性から、負極性の空間電荷の総電荷量を概算した。正極性のそれはコレクティング電圧の極性、大きさに関係なく一定の値が得られた。</p> <p>第5章では化学架橋ポリエチレン(XLPE)とこれを真空中で加熱乾燥した熱処理XLPE(HT-XLPE)試料を用い、それぞれの直流トリートング</p> | | | |

主論文の要旨

| 報告番号 | ※第 乙 | 号 | 氏名 | 河村英昭 |
|--|---------|---|----|------|
| <p>破壊の性状について調べ、これらのトリッキング破壊に及ぼす空間電荷の効果とこれに及ぼす架橋剤分解残査の影響について検討を行なった。得られた主な結果を要約すると次のようである。</p> <p>(1) XLPE の直流トリッキング発生電圧は HT-XLPE 試料のそれより著しく高い。</p> <p>(2) TSC 曲線の取り囲む面積から概算される見かけの空間電荷量は、架橋ポリエチレンより HT-XLPE 試料の方が約 1/3 小さい値を示した。</p> <p>(3) 約 45 °C 付近に存在する TSC ピークに対応する活性化エネルギーは、XLPE で約 1.8eV、HT-XLPE 試料で約 1.5eV と評価できた。</p> <p>(4) XLPE と HT-XLPE 試料の相違を赤外吸収 (IR) スペクトルから比較するとき、XLPE を真空中で加熱乾燥することによって XLPE 中に存在する架橋剤分解残査 (主としてアセトフェノン) の消失が確認された。</p> <p>以上の結果、XLPE 中の架橋剤分解残査はキャリヤ・トラップとして作用し、そのトラップ深さは約 1.8eV であることが明らかとなった。</p> <p>第 6 章ではエチレン-酢酸ビニル共重合体 (EVA) の直流トリッキング破壊の性状について調べ、このトリッキング破壊に関連する空間電荷の効果とこれに及ぼす酢酸ビニル (VA) 含量の影響について検討した。正極性のインパルストリッキング発生電圧から概算したトリッキング発生電界は材料固有の絶縁破壊の強さにほぼ等しく、しかも VA 含量の増加と共に直線的に小さくなる。これに対して負極性のインパルストリッキング発生電圧、直流トリッキング発生電圧 (正、負) から概算したそれぞれのトリッキング発生電界は前者のそれより大きく、しかもこれらトリッキング発生電界は VA 含量の増加と共に低下し、VA 含量が 16.5wt% で最小の値を示した後、再び大きくなる V 字特性を示した。一方、TSC 曲線の取り囲む面積から概算した見かけの空間電荷量 Q_{TSC} は VA 含量の増加と共に増大し、その値を同一の VA 含量で比較するとき、$(Q_{TSC})_{-V_f} > (Q_{TSC})_{+V_f}$ の関係を示す極性効果が得られた。以上の結果、EVA 試料の直流トリッキング破壊は、VA 含量の増加と共に小さくなる材料固有の絶縁破壊の強さと固体中に形成される空間電荷とが相互に関連し合い、相対的には後者の空間電荷の影響を大きく受けながら変化することが明らかとなった。特に、VA 含量が</p> | | | | |

主論文の要旨

| 報告番号 | ※第 乙 | 号 | 氏名 | 河村英昭 |
|--|---------|---|----|------|
| <p>16.5wt%以上になると空間電荷の影響が一層顕著となることを指摘した。</p> <p>第7章では低密度ポリエチレン(LDPE)にイオン性共重合体のアイオノマをブレンドした試料の直流トリッキング破壊の性状について調べ、このトリッキング破壊に関連する空間電荷の効果とこれに及ぼすアイオノマのブレンド量の影響について検討した。アイオノマ・ブレンド試料固有の絶縁破壊の強さはアイオノマのブレンド量に関係なく一定の値を示し、その値はベース試料のLDPEのそれに等しいことが明らかとなった。空間電荷効果が最も顕著な負極性の直流トリッキング発生電圧はアイオノマのブレンド量の増加と共に低下し、この傾向はTSC曲線の取り囲む面積から概算した電荷量のアイオノマのブレンド量依存性に類似している。以上の結果、アイオノマ・ブレンド試料の直流トリッキング破壊に及ぼす空間電荷効果は、アイオノマのブレンド量の増加と共に小さくなることが明らかとなった。この空間電荷抑制効果はアイオノマ中に含まれている金属イオンM^+とカルボキシレートイオンCOO^-に起因することを指摘した。</p> <p>第8章は総括であり、第2章から第7章にわたる研究成果をまとめると共に、本研究から得られた知見と工学的意義について述べている。</p> | | | | |