

博士論文(要約)

Doctor Thesis

固体誘電体の界面および内部における絶縁劣化現象

(Electrical Insulation Degradation

inside and at Interface of Dielectric Materials)

指導教員 日高 邦彦 教授

Supervisor Kunihiko Hidaka

平成 29 年 12 月 1 日提出

1st Dec. 2017

東京大学大学院 工学系研究科 電気工学専攻

37-157076 中村隆央

Takahiro Nakamura

論文の内容の要旨

論文題目

固体誘電体の界面および内部における絶縁劣化現象

(Electrical Insulation Degradation

inside and at Interface of Dielectric Materials)

中村隆央

高電圧が用いられている電力機器の長期運用のためには、絶縁信頼性を高めることが重要である。中でも有機固体絶縁は最も絶縁耐力が高く、環境調和性が良いといったメリットから多くの電力機器で使用されている。しかしながら、固体絶縁物の劣化現象には不明な点が多く、現在でも解明に向けて研究が行われている。有機固体絶縁物の電氣的なストレスにおける弱点部は、電界が集中する接地終端部における絶縁物内部における異物や空隙および固体絶縁の界面である。本論文ではこれら2つの弱点部における劣化現象を対象に研究を行った。

絶縁物内部における異物や空隙からは電気トリーと呼ばれる劣化現象が進展することが知られている。電気トリーは絶縁物内部を樹枝状に進展し、最終的に全路破壊に至る。しかし、電気トリーの発生・進展のメカニズムはトリーの発見から50年間以上に渡る研究が行われているにも関わらず、明らかになっていない部分が多い。これはトリーはチャンネルの直径がサブ μm ~10 μm オーダーである、固体に密閉された構造である、3次元的な広がりをもつといった理由から、その構造や組成を正しく把握するのが難しいためであると考えられる。本研究では、充填剤入りエポキシ樹脂中における電気トリーの観察を行い、充填剤とトリーの相関について検討を行った。

不透明なマイクロコンポジットエポキシ中のトリーは可視光により観測が不可能なため、X線位相イメージングを用いて行った。X線を照射したまま高電圧が印加可能なシールドボックスを構築し、トリーの経時変化を可能としている。また、充填剤入り樹脂をX線で観測すると、シリカ粒子がX線を吸収するためトリーコントラストを観測することが難しい。そこで、電圧

印加前の画像と印加後の画像の差分を取得することで、シリカ粒子の影響を低減した。本手法により、X線画像におけるグレーバリューの標準偏差を1/3以下に低減することができ、充填剤入りエポキシ樹脂中のトリーの観測を実現した。最小検出感度は波動シミュレーションによる検討の結果 $3.5\mu\text{m}$ であることがわかっている。本装置を用いて、平均粒径 $5\mu\text{m}$ のシリカ粒子が10wt%から20wt%が添加されたエポキシ樹脂中のトリー観測を行った。その結果、トリーは進展と停止を繰り返して進展していることが明らかとなった。

近年注目されているナノコンポジットエポキシは透明なため、高解像度顕微鏡を用いて観測を行うことができる。本研究では平均粒径12nmのシリカ粒子が5wt%、10wt%添加されたエポキシ樹脂を用いて実験を行った。トリー進展の観測を行った結果、10wt%添加されたエポキシ樹脂では進展が大きく抑制されるが、5wt%添加されたエポキシでは進展抑制効果が小さいことが明らかとなった。部分放電電流および発光の観測により、10wt%添加されたエポキシ中のトリーは導電率が低いことが示唆された。また、それについて実験的に実証するため部分放電で劣化させたエポキシ樹脂の表面の導電率測定を行った。その結果、ナノコンポジット樹脂では部分放電で劣化しても導電率が低いままであることが明らかにした。これらの結果より、ナノコンポジット中のトリー進展においてはトリー内部の導電率が低いことにより進展が抑制されると考えることができる。

接地終端部における固体絶縁の界面の電界集中現象は高電圧の印加された導体が同心円上に接地で覆われている構造に見られる。このような構造の電力機器としては高電圧ケーブルやモータコイルなどが例として挙げられ、接地の終端部において電界が集中する絶縁物と接地の界面が存在する。近年では、インバータ駆動機器の増加によりこの界面に高周波の高電圧が印加されることがあるが、時間分解能の十分な電位分布測定装置が存在せず、先行研究では有限要素法による解析が主に行われていた。本研究では、モータコイルの絶縁をモデルケースとしてポッケルスセンサを用いた電位分布測定および光電子増倍管を用いた部分放電観測を行うことにより電界集中現象について検討を行った。

高圧モータにおいては鉄心付近の絶縁劣化特に問題となる。鉄心付近の絶縁は、低抵抗層であるコロナ防止層(Corona Armor Tape: CAT)と半導電層である電界緩和層(Stress Grading Tape: SGT)を合わせた電界緩和システムからなる。立ち上がり250nsの繰り返しインパルス電圧下においては、波頭部ではコロナ防止層、波尾部ではコロナ防止層と電界緩和層の界面で電界が集中していることが明らかとなった。さらに立ち上がり時間と電界が集中する長さを、等価回路モデルを用いることで定量的に記述した。これにより、立上り時間により電界が集中する長さを見積もることが可能となった。また、電界および発熱を緩和する最適なCAT, SGTの厚さ、長さについて有限要素法を用いて検討を行った。検討の結果により、CAT, SGTの厚さ、長さの変化による電界および発熱の影響が定性的に明らかとなった。光電子増倍管を用いた部分放電発光の観測結果からは、部分放電発生は表面の最大電界のみならず、電界維持時間および最大電界幅に影響をうけることが明らかとなった。