

## 学位論文題名

## 電力ケーブル用絶縁材料の性能向上に関する研究

## 学位論文内容の要旨

本研究は高電圧電力ケーブルの信頼性確保のために最も重要な構成材料である絶縁材料の性能向上を目的として行われたものであり、超高圧OFケーブルに用いられる「PPラミネート紙に関する研究」、超高圧CVケーブルの絶縁材料設計の指針を与えるための「高分子の固体構造と絶縁破壊特性に関する研究」、浸水で使用される配電CVケーブルの水トリー抑止を目的とした「水トリーの進展機構と抑止方法に関する研究」、従来のOFケーブルに替わる「超高圧直流ケーブル用新種プラスチック絶縁材料に関する研究」を課題として取り上げている。

「PPラミネート紙に関する研究」では、まず、その基礎特性であるPPラミネート紙の製品性能に及ぼす製造加工因子としてPPレジンやラミネート押出加工条件の選定、現用品の短所である紙/PP間の剥離強度の高気密度/低気密度の2重紙を用いる手法等による改善方法、従来のクラフト紙に比した誘電特性、絶縁破壊特性の電気性能の優位性を定量的に明らかにした。また、将来の1000kV級UHV(Ultra High Voltage)ケーブルの絶縁設計に関してPP分率の異なるPPラミネート紙を用いた $\epsilon$ グレーディング(誘電率段絶縁)と併せて、 $\epsilon$ グレーディングの段替わりに生ずる絶縁中層 $E_{max}$ (最大電界強度)が導体直上 $E_{max}$ より高い値を許容できるとする新規の考え方を導入することにより、その設計が可能であることを示した。さらに、PPラミネート紙絶縁層の改善すべき課題であるPP層の吸油膨潤、熱膨張に起因する紙厚増加と絶縁紙層間面圧(絶縁層の縮りにより曲げ特性、油流抵抗に影響)の間の関係式をPP分率、紙巻張力、温度の関数として定量的に明らかにすると共に、この中で最も影響の大きい吸油膨潤対策として膨潤を抑えたLSP(Low Swelling PPラミネート紙)を開発した。

「高分子の固体構造と絶縁破壊特性に関する研究」では、高分子の固有絶縁破壊強度( $E_B$ )を適切に評価できる同一の試験方法(リセスシート電極)を用いて、幅広い分子構造を有する種々の高分子についてその $E_B$ を概観した結果、ケーブル使用温度の常温域では高分子構造と $E_B$ の間には特定の顕著な相関は認められず、HDPE(高密度ポリエチレン)等が比較的良好な $E_B$ を示した。そこで、誘電特性、加工性等の実用性を考慮してPE(ポリエチレン)を中心とする結晶性ポリオレフィンに的を絞り、分子構造・結晶性・添加剤&ポリマーブレンドの効果について詳細に検討を行った所、 $E_B$ に最も影響を与える因子は同一種のPEに対する結晶化条件(冷却条件等)の違いであることが判明した。この結果を踏まえて、HDPEについて種々の条件でケーブルを製造、評価の結果、製造条件(特に押出後の結晶化温度条件)により $E_B$ が大きく変化した。(最適条件では現用XLPEの約1.7倍の $E_B$ の向上)ケーブル絶縁体の結晶構造解析によりPEの結晶厚(ラメラ厚)と非晶厚の最適な存在比率が $E_B$ 向上のための重

要な要因であることが明らかとなり、結晶域、非晶域がそれぞれにのEBの向上因子としても低下因子としても働くためであると推察された。

「水トリーの進展機構と抑止方法に関する研究」では、CVケーブルの未解決の課題として残されているボウタイ状水トリー(BTT)の抑止を目的に、水トリー進展機構から推察した絶縁材料の物性要因として、・親水性付与の効果、・結晶化度の効果、・結晶配向の効果を取り上げ水トリー特性との関係を明らかにした。すなわち、親水性の付与により水トリーは抑制される傾向であり、結晶化度の効果については水トリーは現用XLPE近傍の中間の結晶化度で最も進展し易く、結晶配向XLPEの水トリー進展特性から水トリーは結晶ラメラ間の非晶部に沿って進展し易いことが明らかとなった。これらの知見を基に、低結晶性で、ある程度の親水性添加剤を含む超低密度ポリエチレン(VLDPE)を選定し、ケーブル製造及びその特性評価を行った。VLDPEケーブルは現用XLPEケーブルに比べ極めて優れたBTT抑止能を示し、長期浸水課電後の破壊電圧の低下も非常に小さいことから、浸水下の条件で利用されるケースの多い地中配電ケーブルへの適用に有望であることが示された。

「超高压直流ケーブル用新種プラスチック絶縁材料に関する研究」では、先ず、結晶構造、化学構造の異なる各種高分子群の直流特性の評価により、結晶性の向上は固有絶縁破壊強度を向上させ、酸変性基の導入は空間電荷を制御する傾向を認め、極めて優れた直流絶縁破壊特性を示す新規材料として、この両者の特性を併せ持つ少量の酸変性基を導入した高密度ポリエチレン(変性HDPE)を見出すに至った。次に、変性HDPEの結晶化度、変性基について最適化検討を行い、この最適化された変性HDPEを用いたケーブルの直流絶縁破壊特性の評価を行った結果、初期及び長期特性ともに非常に良好な性能であることが確認された。このことから、変性HDPEの素材としての直流特性がケーブル構造においても、空間電荷の定量的測定(パルス静電応力法による)により両電極近傍に量の少ないホモ空間電荷分布となる結果と併せて、十分に発揮されていることが証明され、超高压直流ケーブルへの適用の見通しを与えた。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 堤 耀 広  
副 査 教 授 大 場 良 次  
副 査 教 授 田 中 啓 司  
副 査 教 授 酒 井 洋 輔

## 学位論文題名

### 電力ケーブル用絶縁材料の性能向上に関する研究

本研究は高電圧電力ケーブルの信頼性確保のために最も重要な構成材料である絶縁材料の性能向上を目的として行われたものであり、超高圧OFケーブルに用いられる「PPラミネート紙に関する研究」、超高圧CVケーブルの絶縁材料設計の指針を与えるための「高分子の固体構造と絶縁破壊特性に関する研究」、浸水下で使用される配電CVケーブルの水トリー抑止を目的とした「水トリーの進展機構と抑止方法に関する研究」、従来のOFケーブルに替わる「超高圧直流ケーブル用新種プラスチック絶縁材料に関する研究」を課題として取り上げている。

「PPラミネート紙に関する研究」では、まず、その基礎特性であるPPラミネート紙の性能に及ぼす製造加工因子として、PPレジジンやラミネート押出加工条件の選定、現用品の短所である紙/PP間の剥離強度の高気密度/低気密度の2重紙を用いる手法等による改善方法、及び、従来のクラフト紙に比した誘電特性、絶縁破壊特性の電気性能の優位性を定量的に明らかにした。また、将来の1000kV級UHV(Ultra High Voltage)ケーブルの絶縁設計に関しては、PP分率の異なるPPラミネート紙を用いた $\epsilon$ グレーディング(誘電率段絶縁)、 $\epsilon$ グレーディングの段替わりに生ずる絶縁中層 $E_{max}$ (最大電界強度)が、導体直上 $E_{max}$ より高い値を許容できる、とする新規の考え方を導入することにより、その設計が可能であることを示した。さらに、PPラミネート紙絶縁層の改善すべき課題であるPP層の吸油膨潤・熱膨張に起因する紙厚増加と、絶縁紙層間面圧(絶縁層の締りにより曲げ特性、油流抵抗に影響)間の関係式をPP分率・紙巻張力・温度の関数として定量的に明らかにすると共に、この中で最も影響の大きい吸油膨潤対策として膨潤を抑えたLSP(Low Swelling PPラミネート紙)を開発している。

「高分子の固体構造と絶縁破壊特性に関する研究」では、高分子の固有絶縁破壊強度( $E_B$ )を適切に評価できる同一条件での試験方法(リセスシート電極)を用いて、幅広い分子構造を有する種々の高分子についてその $E_B$ を概観した。その結果、ケーブル使用温度の常温域では高分子構造と $E_B$ の間には特定の顕著な相関は認められず、HDPE(高密度ポリエチレン)等が比較的良好な $E_B$ を示すことを見出した。そこで、誘電特性、加工性等の実用性を考慮してPE(ポリエチレン)を中心とする結晶性ポリオレフィンに的を絞り、分子構造・結晶性・添加剤&ポリマーブレンドの効果について詳細に検討を行った所、 $E_B$ に最も影響を与える因

子は同一種のPEに対する結晶化条件(冷却条件等)の違いであることが判明した。この結果を踏まえて、HDPEについて種々の条件(特に押出後の結晶化温度条件)下でケーブルを製造・評価の結果、最適条件では現用XLPEの約1.7倍のEB向上が認められた。ケーブル絶縁体の結晶構造解析により、PEの結晶厚(ラメラ厚)と非晶厚の最適な存在比率がEB向上に対し重要な要因であることが明らかとなり、結晶域、非晶域がそれぞれにのEBの向上因子としても低下因子としても働くためであると推察された。

「水トリーの進展機構と抑止方法に関する研究」では、CVケーブルの未解決の課題として残されているボウタイ状水トリー(BTT)の抑止を主目的とし、水トリー進展機構から推察した絶縁材料の物性要因である、親水性付与の効果・結晶化度の効果・結晶配向の効果を取り上げ水トリー特性との関係を明らかにした。まず、親水性の付与により水トリーは抑制される傾向を示した。更に、結晶化度の効果については、水トリーは現用XLPE近傍の中間の結晶化度で最も進展し易く、結晶配向XLPEの水トリー進展特性から水トリーは結晶ラメラ間の非晶部に沿って進展し易いことが明らかとなった。これらの知見を基に、低結晶性で、ある程度の親水性添加剤を含む超低密度ポリエチレン(VLDPE)を選定し、ケーブル製造及びその特性評価を行った。VLDPEケーブルは現用XLPEケーブルに比べ極めて優れたBTT抑止能を示し、長期浸水課電後の破壊電圧の低下も非常に小さいことから、浸水下の条件で使用されるケースの多い地中配電ケーブルへの適用に有望であることが示された。

「超高圧直流ケーブル用新種プラスチック絶縁材料に関する研究」では、まず、結晶構造、化学構造の異なる各種高分子群の直流特性の評価により見出した現象、即ち、結晶性の向上は固有絶縁破壊強度を向上させる、酸変性基の導入は空間電荷を制御する傾向にある、を利用し、極めて優れた直流絶縁破壊特性を示す新規材料として、この両者の特性を併せ持つ少量の酸変性基を導入した高密度ポリエチレン(変性HDPE)が最適であるとの結論に至った。次に、変性HDPEの結晶化度、変性基について最適化された変性HDPEを用いたケーブルの直流絶縁破壊特性の評価を行ったところ、初期及び長期特性ともに非常に良好な性能であることが確認された。さらに、空間電荷の定量的測定は両電極近傍に量の少ないホモ空間電荷分布となることを示すことから、変性HDPEの素材としての直流特性は、ケーブル構造においても十分に発揮されていることが証明され、超高圧直流ケーブルへの適用の見通しを与えた。

これを要するに本論文は高電圧電力ケーブルの主要な分野である超高圧OFケーブル、超高圧CVケーブル、配電CVケーブル、超高圧直流ケーブルにおいて要となる絶縁材料の性能向上及び改善に関して多くの重要な知見を与えており、応用物理学、電力工学の進歩に寄与するところ大である。よって、著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。