

| | |
|-----------|--|
| 氏名 | たか だ たつ お 高 田 達 雄 |
| 授与学位 | 工 学 博 士 |
| 学位授与年月日 | 昭和50年9月10日 |
| 学位授与の根拠法規 | 学位規則第5条第2項 |
| 最終学歴 | 昭和38年3月 武蔵野工業大学工学部卒業 |
| 学位論文題目 | コロナ帯電法による絶縁材料の電荷注入に関する研究 |
| 論文審査委員 | 東北大学教授 麻生 忠雄 東北大学教授 八田 吉典 東北大学教授 長尾 重夫 東北大学教授 池田 拓郎 東北大学教授 柴田 幸男 |

論 文 内 容 要 旨

1 はじめに

我国経済界の飛躍的發展に伴い電気事業者はその電源の大量確保に迫られている。更に最近の環境公害問題のため発電所建設用地を取得することは困難となり、大型の火力発電や原子力発電は大都市から遠く離れた僻地にその用地を求めようになって来ている。この大容量電力を600Km以上離れた僻地から大都市周辺まで輸送するためには、現在建設されつつある500KV級の超高圧交流送電方式では送電安定度の観点から困難であるとされている。この電力輸送対策として、超々高圧交流送電(750KV~1,000KV)か、あるいは超高圧直流送電とすることになって来る。我国の電力系統は本州と九州、四国間は架空線路で結び、交流連系で運転されているが、残された北海道一本州間の連系は目下計画進行中である。この連系は送電効率のよい超高圧直流送電方

式で津軽海峡を海底ケーブルで連系することがほぼ決められている。そこで、交直変換装置の開発はもちろんのこと、超高圧直流送電海底ケーブルの開発が急務となって来た。

従来の交流絶縁材料の性能評価は絶縁破壊強度、誘電損失、電気抵抗率等が主であったが、直流絶縁材料は電荷注入による空間電荷の形成が大きな問題となって来ている。この空間電荷は絶縁層内の電界分布を著しく乱だし、絶縁強度の設計を極めて困難にしている。また研究的に行われている直流高電界下の絶縁材料の電気特性実験は、良く洗滌された材料に真空金属蒸着した電極を使っている。その電流値は極めて小さいものであり、理想に近い絶縁特性を示している。しかし、実用の電気絶縁は金属導体と絶縁物が直接に接しており、その界面には水分、気体分子、他の不純物等が吸着しているのが現実である。従って、はだか電極で絶縁物に電圧印加すれば、その観測電流値は金属蒸着電流よりもはるかに大きく、空間電荷の形成も容易である。これまでの絶縁材料の基礎的研究手法から離れ、実用絶縁の研究手法に近づける考えで、本研究は気中コロナ放電で発生した電荷を直接に絶縁物表面に帯電させ直流電圧を印加する新しい方法を取り上げた。

この新しい帯電電荷法は次のような特徴がある。金属電極法と違って、帯電電荷法は真電荷が直接に絶縁材料表面に堆積しているために、いわゆるオーミック接触している状態と同じである。従ってキャリアの注入が容易であり漏れ電流値も大きいので、空間電荷の形成が容易となる。このように空間電荷が形成された絶縁物の電気的特性の研究に都合よい。

本研究の目的。 以上のような特徴を生かし、次のような研究目的で絶縁材料の電気的特性を調べた。

- (1) 帯電電荷法を使った直流高電界下の絶縁材料の電気特性、例えば電荷注入特性、キャリア移動度、極性反転時の破壊電圧等の新しい測定法を確立すること。
- (2) この測定法を使って、電荷注入機構を解明し、逆に電荷注入阻止の方法を見出すこと。またその結果にもとづき絶縁材料の分子設計の基礎的な考え方の方向を見出すこと。
- (3) 空間電荷が形成された絶縁材料の絶縁破壊機構を解明し、超電圧直流ケーブルの開発研究に役立たせる。

2 電荷注入の判定とその分布の推定

直流絶縁材料の電気特性には電圧印加により電荷が注入し、空間電荷を形成しているか否かを判定する必要がある。もちろんChild則のように、電流が電圧の二乗に比例するかを測定して空間電荷の有無を判定してもよいが、ここでは、より簡単な方法を考案した。すなわち、電圧印加後、変位電流も含む測定電流を時間積分して電荷量 Q を求める。この電荷量 Q が試料の静電容量 C_s と表面電位 V_s の積と等しいか、あるいは大きいかにより、電荷の注入の判定が容易にでき

る。例えば、 $Q=C_s V_s$ となれば、電荷の注入が起きておらず、空間電荷は形成されていない。また、 $Q>C_s V_s$ となれば電荷の注入があり、空間電荷の形成があると判定できる。次に注入された電荷の分布を推定した。考え方は次の通りである。

電荷が体積中に分布しているとき、同じ表面電位を得ようとすれば、 $C_s V_s$ で与えられる電荷量より多くの電荷量を供給しなくてはならない。すなわち等価的に平均的電荷分布の位置が試料厚さよりうすくなったものとみなせ、静電容量が大きくなったのと等価になる。このことは次式で表わされる。 $Q_0 = \beta C_s V_s$ ここで Q_0 は試料内にある全電荷量、 β は静電容量を補正する係数である。電荷分布モデルに対するこの β の補正係数の値をあらかじめ計算しておく。ところで、この β を実験的に求めるには次の帯電時の電流（(1)式の右辺）と電位減衰開始電流（同式の右辺）との同値性の式より求められる。

$$I_0 = -\beta C_s \left(\frac{dV_s}{dt} \right)_{t_d=0} \quad (1)$$

I_0 は帯電停止直前の電流値であり、電流計により測定され、 dV_s/dt は電位減衰開始時の電位減衰の割合であるので、 β は容易に求められる。そして、ある分布を仮定してあらかじめ計算された β の値と比較し、注入電荷の分布を推定するものである。

3 電荷注入の特性

実用の高分子絶縁材料について、電荷注入の判定と、その分布の推定をした結果を述べる。ポリエチレンテレフタレート（PETP）は $2 \times 10^8 \text{ V/m}$ の高電界でも電荷注入が困難な特性を示すのに対し、ポリエチレン（PE）の負帯電は大体 $2 \times 10^6 \text{ V/m}$ の印加電界から、正帯電は $2.5 \times 10^7 \text{ V/m}$ の印加電界から電荷の注入が開始している。各種高分子フィルムの電荷注入開始電界 E_c と電荷分布を推定する静電容量補正係数 β をまとめて分類すると次のようになった。PETPと同様に電荷注入が困難な特性をもつ高分子は、ポリカーボネート（PC）、ポリメタクリル酸メチル（PMMA）、テフロン（PTFE）があり、PEと同様に電荷注入が認められた高分子はポリプロピレン（PP）、ポリスチレン（PS）がある。

以上の結果から電荷注入の困難な条件をまとめると次のようになる。

(1) 高分子材料が自由体積の少ないガラス状態にあること。例えば、ゴム状態にあるPEの温度を下げてガラス状態に持っていくと、電荷注入が阻止されるが、逆にガラス状態にあるPETPの温度を上昇させゴム状態に持っていくと、電荷注入が起る。

(2) 基本構造式の中にカルボニル基のように大きな双極子モーメントの極性基を有すること。

PETP, PC, PMMAはこのような極性基を有するが、PE, PP, PSは有していない。次に無極性高分子であり、電荷注入の容易なPEをオゾン酸化させ、表面に双極子モーメントの大きいカルボニル基等を生成させると電荷の注入が困難となる。

以上の結果から電荷の注入及び移動には電荷（イオン粒子）が移動できる自由体積と、その電荷と強い相互作用を及ぼす極性基の双極子モーメントのクーロン場が強く関係していることが明らかとなった。

4 キャリア移動度

高分子絶縁物中のキャリア移動度の測定はこれまで多く報告されている。例えば、X線パルス、電子線パルスを使ったTime of Flight法等がある。これ等はキャリア電子を励起させたときの移動度であり、実用絶縁物にみられるような不純物イオンの移動度の測定はあまり見られない。そこで、帯電電荷法を使ってイオン粒子の移動度を表面電位減衰から測定した。表面電位減衰から求める移動度の算出式は次式で与えられ、これは真の移動度 μ_0 と θ の積として測定される。

$$\mu = \mu_0 \theta = -\frac{2}{\beta} \left(\frac{a}{V_{s0}} \right)^2 \left[\frac{\Delta V_s}{\Delta t} \right]_{t_d=0} \quad (m^2/V \cdot sec) \quad \text{但し } \theta = \frac{n_c}{n_c + n_t} \quad (2)$$

ここで n_c はキャリア濃度、 n_t はトラップ濃度であり、 θ は全電荷濃度に対するキャリア濃度の比である。また真の移動度 μ_0 はキャリアが途中でトラップされ休止している時間が全く無いたときのキャリアの移動度である。PEの μ の測定例を次に示す。測定された移動度は帯電時間により著しく変化している。すなわち、帯電時間が $10 \mu sec$ では大体 $10^{-9} m^2/V \cdot sec$ と大きく、逆に $10^4 sec$ では $10^{-15} \sim 10^{-10} m^2/V \cdot sec$ と小さく、極めて広範囲の測定値が得られた。以上の結果より次の事が明らかとなった。

(1) 気体分子と同程度の大きさのイオン粒子が移動しているものと考え、真の移動度 μ_0 を気体の拡散係数から算出すると $\mu_0 = 3 \times 10^{-9} m^2/V \cdot sec$ の値が得られる。また帯電時間が $10 \mu sec$ のときの移動度もこれに近い値が得られている。この結果より、イオン粒子も気体分子の透過と同じ程度の移動度を持つことが期待される。また、この値は油中のイオン移動度より一桁小さい値くらいである。

(2) この μ_0 を仮定すると、帯電時間 $10^3 \sim 10^4 sec$ のとき $\theta = 10^{-6} \sim 10^{-7}$ となる。これは全注入電荷量のうち $1/10^6 \sim 1/10^7$ のキャリアが移動していることになる。そして、ほとんどの電荷がトラップされ静止状態にあると言える。この測定値は次に述べる極性反転時破壊電圧に及ぼす反転速度と空間電荷の移動との討論をするときに使われる。

5 極性反転時の絶縁破壊

直流送電ケーブルは送電の潮流を変えるとき極性の反転が行われるが、この際、破壊電圧の低下があると報告されている。この原因として直流電圧が印加されていると絶縁体中に電荷の注入

が起り空間電荷が形成され、この空間電荷の電界と反転電界とが重畳され絶縁破壊が起るものと考えられている。そこで帯電電荷法により絶縁体中に電荷注入を行った後、その絶縁破壊特性と、反転速度と破壊電圧の回復現象を調べた。

電荷注入の容易なPEにコロナ帯電により電荷注入を行い（表面電位は V_{s0} ）、注入電荷と逆極性のインパルス電圧を印加すると破壊電圧 V_s が著しく低下している。そして次のような実験式が得られた。

$$a E_c = V_B + V_{s0} \quad (3)$$

ここで E_c は破壊電界強度である。但しこの実験式が成立する場合は極性反転時定数が $1.7 \mu\text{sec}$ と短い場合である。解析の結果からも反転時間内に電荷分布に変動がないときは(3)式が得られる。しかし、反転時定数が長くなり分布電荷が逃げ消滅していくと、破壊電圧の回復がみられた。他方PETPのように電荷注入の困難な材料は以上のような極性反転電圧を印加しても V_B の低下はみられなかった。

6 本研究の工学的応用

本研究を通して得られた結果は次のような工学的応用ができる。

- (1) 直流絶縁材料の電気特性には抵抗率、耐破壊電圧等があるが、その他に空間電荷形成の有無を判別する必要がある。すなわち電荷注入特性を電気特性に加える必要がある。
- (2) PEは安価でこれまで広く使用されているが、本研究の結果では電荷注入が一番容易であった。この電荷注入阻止の対策として、双極子モーメントの大きな極性基を持った高分子保護膜をもうけることが考えられる。この考え方は直流送電ケーブルの極性反転時の破壊電圧低下の対策として有用であろう。

審査結果の要旨

海底ケーブル等による長距離大電力輸送には、超高圧直流方式が採られており、直流高電界における絶縁耐力の問題は高電圧工学における重要研究課題の一つになっている。直流高電界における絶縁材料の性能は、絶縁破壊の臨界強度やその前駆現象によって評価されるが、初期電流段階の電気伝導現象も重要である。すなわち高電界下では絶縁物中に電荷注入を生じて電気伝導が増大し、空間電荷を形成して絶縁耐力が低下する現象がある。

本論文は主として高分子絶縁材料を対象にコロナ帯電法によって電荷注入、空間電荷形成の様相を追跡し、さらにキャリアの移動度を推定すると共に、極性反転時における空間電荷の絶縁破壊に及ぼす効果を指摘したもので、全編7章より成る。

第1章は序論で、本研究の歴史的展望と目的および研究成果の概要について述べている。

第2章では、実験手法としてのコロナ帯電法についてその特長を概説し、従来の金属電極法との差異を論じている。第3章では、絶縁材料のコロナ帯電過程および電位減衰過程の測定結果から電荷注入、空間電荷分布およびキャリア移動度を判定する解析法を示している。

第4章では、各種高分子絶縁材料についてその電荷注入特性を系統的に論じ、電荷注入時の空間電荷分布を推定すると共に、電荷注入を阻止する条件として、双極子モーメントをもつ極性基と移動障壁の高いガラス状態とを指摘し、さらに表面処理による極性基生成を加味した新材料開発について指針を与えている。これらは絶縁材料の性能評価に関する重要な知見である。

第5章では、高分子絶縁材料におけるキャリアの移動度に関し、コロナ帯電時間に応じて極めて広範囲の値を採る現象を解明している。これは従来の数多い測定値に対して総括的解釈を与えたもので、本研究のすぐれた成果の一つである。

第6章では、電荷注入下の絶縁材料における極性反転時の絶縁破壊電圧低下について論じると共に、これを定量的に実 検証して、キャリア移動度との関連から適正な極性反転速度について実用的提案を行っている。

第7章は結論である。

以上要するに、本論文は高分子絶縁材料の高電界下における電荷注入、空間電荷形成およびキャリアの挙動を解明して、超高圧直流用電力ケーブルの基礎絶縁設計に重要な指針を与えたもので、高電圧工学ならびに電気絶縁材料学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。