

ポリエチレンケーブルのボイド放電劣化の検討

A Study on the Degradation of Polyethylene Insulated Cables Caused by Partial Discharges in Voids

関井 康雄* 依田 文吉**
Yasuo Sekii Bunkichi Yoda

要 旨

ゴムプラスチック高電圧ケーブルの開発に際しては、絶縁劣化現象の適確な把握(はあく)と、その結果を勘案しての合理的絶縁設計を行なうことが重要である。本報告ではケーブル中のボイドの大きさや放電量の関係、ボイドを含む絶縁物ならびにケーブルの劣化の様相などについての基礎的検討結果について述べるとともに、ボイド放電劣化に対する無機充てん剤の効果を調べ、無機充てん剤が劣化を有効に抑制できることを明らかにしている。

1. 緒 言

近年、ポリエチレンをはじめとする合成絶縁材料の優秀性が広く認識され、これらを用いた高電圧ゴムプラスチックケーブルの開発が急速に進められつつある⁽¹⁾。

電力ケーブルは他の電気機器と同様に耐用年限が長いので、その間の寿命を保証するためには、使用期間中に起こると予想される劣化の様相をじゅうぶんに把握し、合理的な裕度を見込んだ絶縁設計を行なうことが肝要である。ゴムプラスチックケーブルの絶縁劣化の原因は種々考えられるが、常規運転電圧課電下に起こる経年的劣化の原因のひとつとしてあげられるのが絶縁体内のボイド放電であろう。

ボイド放電劣化の研究は古くから Whitehead 氏⁽²⁾、Howard 氏⁽³⁾、Mason 氏ら⁽⁴⁾によって行なわれてきたが、近年においても安井氏⁽⁵⁾、Kreuger 氏ら⁽⁶⁾の研究があり、ボイド放電による各種絶縁物の劣化の様相や、劣化の進行過程が検討されている。また、最近では電気学会の絶縁材料コロナ劣化専門委員会の下で絶縁材料全般にわたる共同研究が遂行されつつある。本論文はこれらの問題についての筆者らの検討結果をまとめたもので、ケーブル中のボイド放電量の大きさを考察するとともに、ボイド放電による劣化の様相を調べ、劣化に対する無機充てん剤の効果について論及している。

2. ケーブル中のボイド放電量

じゅうぶんに管理された製造工程を経て作られたケーブルは巨視的には“ボイドレス”であるが、物質自体の構造の特徴から高分子絶縁材料には微視的ボイドが必ず存在すると考えられる。絶縁物中にあるこれらの微視的ボイドや製造不良に由来する可視ボイドでは、課電時に部分放電を生ずると考えられるが、部分放電を生ずる課電電圧の大きさや、放電諸量はボイドの大きさ、ボイドの存在個所に依存し、また、材料の劣化とも密接な関連を有していると思われる。ここでは、代表的な構造の 66 kV、および 154 kV ケーブルを一例として取りあげ、ボイドの大きさやその存在する位置と放電開始電圧、放電電荷量の関係を調べてみる。

図 1 に示すように内径 r_0 、外径 R_0 のケーブル絶縁体内部の中心から r の点に半径 a の球形ボイドが存在する場合を考えると、電圧 V が印加されたときの点 A (中心から r) の電界強度 E 、ボイドの放電電圧 V_g 、放電電荷量 Q は安井氏の結果⁽⁷⁾を用いて(1)~(3)式で与えられる。

$$E = V / \{r \cdot \log_e(R_0/r_0)\} \dots\dots\dots (1)$$

* 日立電線株式会社研究所

** 日立電線株式会社日高工場 工学博士

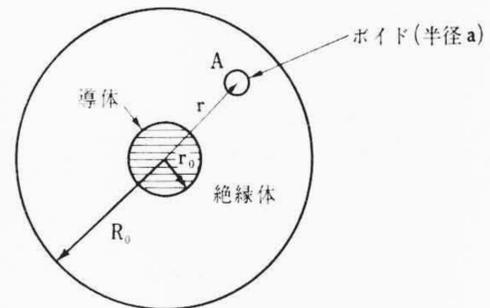


図 1 ケーブルの断面構造

$$V_g = k_1 a V / \{r \log_e(R_0/r_0)\} \dots\dots\dots (2)$$

$$Q = k_2 a^3 V / [r^2 \{\log_e(R_0/r_0)\}^2] \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 k_1, k_2 : 絶縁材料の種類によって定まる定数

ポリエチレンケーブル ($\epsilon_s=2.3$) の場合を考え、放電に関する Paschen の法則を仮定し、しかも、ボイド間隙(かんげき)長と放電開始電圧の間に Hall-Russeck の実験式⁽⁸⁾が成り立つとすると、ボイドが放電を開始するとき、外部から加えられる電圧(いわゆる“コロナ開始電圧”) V_c 、部分放電開始時のケーブル導体上の電界強度 E_{max} および放電電荷量 Q は(4)~(6)式となる。

$$V_c \text{ (kV)} = r \cdot \log_e(R_0/r_0) \cdot (2.16 + 0.224/a) \dots\dots\dots (4)$$

$$E_{max} \text{ (kV/mm)} = (r/r_0) \cdot (2.16 + 0.224/a) \dots\dots\dots (5)$$

$$Q \text{ (PC)} = 2.98 \times 10^2 \cdot [1 / \{r \log(R_0/r_0)\}] \cdot (2.16 + 0.224/a) \cdot a^2 \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 R_0, r_0, r, a の単位は mm

図 2, 3 はこれらの式を用いて表 1 に示す構造のケーブル(66kV、および 154 kV 架橋ポリエチレンケーブル)の V_c, Q を求め、ボイドの大きさとの関係を示したものである。これより、運転電圧で部分放電を生じないため、すなわち運転電圧が“コロナフリー”であるためには、154 kV ケーブルで半径 50μ 、66 kV ケーブルで 80μ 以上のボイドが絶縁体中に存在してはならないことがわかる。ボイド径の減少とともに部分放電開始電圧は上昇し、たとえば、半径 10μ では 190~340 kV となる(以上はすべて内部半導電層の直上にボイドが存在する場合であるが、ボイドの存在位置が導体から離れるにつれて部分放電開始電圧は上昇する)。

図 3 は放電電荷量とボイド径の関係を表わしているが、運転電圧で放電を生ずる大きさのボイドを例にとり(154 kV ケーブルでは半径 50μ 、66 kV ケーブルでは半径 80μ のボイド)、放電量を求める

(*) Hall-Russeck の実験式は次のように表わされる。

$$V = 26.5 p \cdot m + 0.55$$

ただし、 V : 放電開始電圧 (kV)

p : ボイド内の気圧 (気圧)

$m = 2a$: ボイド半径 (cm)

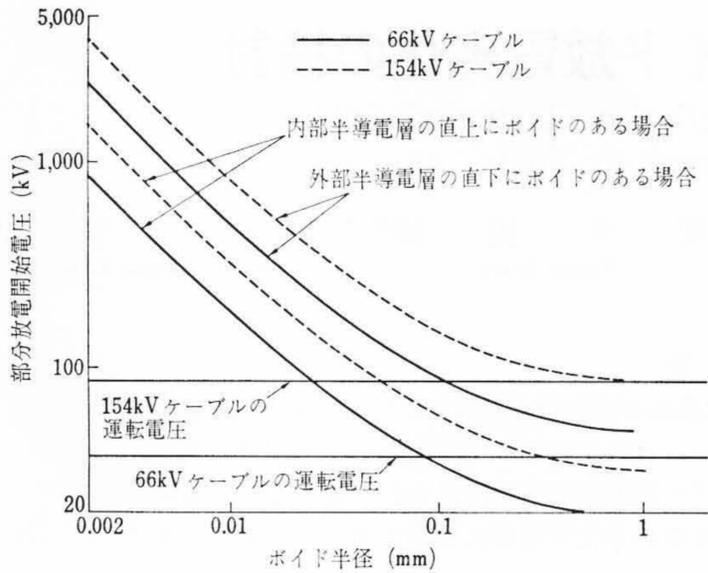


図2 ホイド径と放電開始電圧

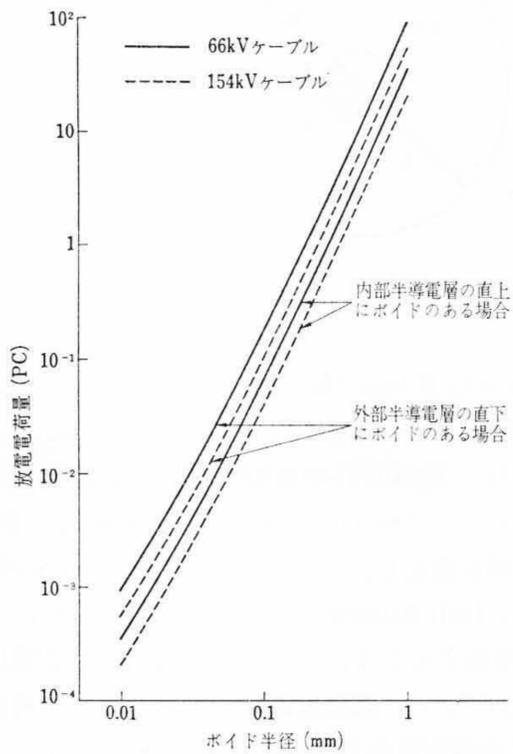


図3 ホイド径と放電電荷量

と、 $7.1 \times 10^{-3} \sim 3.4 \times 10^{-2}$ PC となる。これは現在の測定技術では検出不可能なほど微弱な値である。部分放電が劣化に寄与する度合いは放電の絶対的強度とともに、その放電の局部的集中度が問題である。したがって、このような微弱な放電の有害性を判定するには、部分放電による劣化の進行過程を解明し、劣化と放電に由来する電気的諸量の関係を定量的に把握する必要がある。

3. ホイド放電によるポリエチレンの絶縁劣化

ホイド放電による絶縁劣化の様相を考察するには人工の可視ホイドを含むモデル試料を用いての実験が有効である。このような試料として健全なフィルムに穿孔(せんこう)のあるフィルムを重ねたものを構成し、これについて実験を行なった。

3.1 ホイドを含む重合セフィルムの絶縁破壊強度

ホイドを有する絶縁物の破壊強度は健全な絶縁物に比べて大幅に低下すると考えられる。この破壊強度が材料固有の値に比べてどの程度に低下するかを調べるため、次のような種々の電圧印加方法で絶縁破壊強度を求めて比較した。

- (a) 連続昇圧法 (500 v/s)
- (b) 同一保持時間 10 分の段階昇圧法
- (c) 同一保持時間 30 分の段階昇圧法

表1 試算したケーブルの構造

ケーブル	66 kV 1×100 mm ² 架橋ポリエチレンケーブル		154 kV 1×500 mm ² 架橋ポリエチレンケーブル	
	厚 (mm)	外 (mm)	厚 (mm)	外 (mm)
導 体	—	13.0	—	27.0
半導電性布テープ	0.5	14.0	0.4	27.8
内 部 半 導 電 層	1.0	16.0	0.6	29.0
絶 縁 体	13.5	43.0	23.0	75.0
外 部 半 導 電 層	1.5	46.0	1.5	78.0

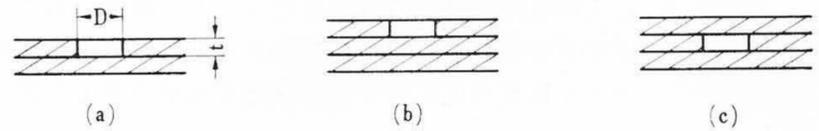


図4 各種の試料構成

(D:ホイド径 t:試料厚)

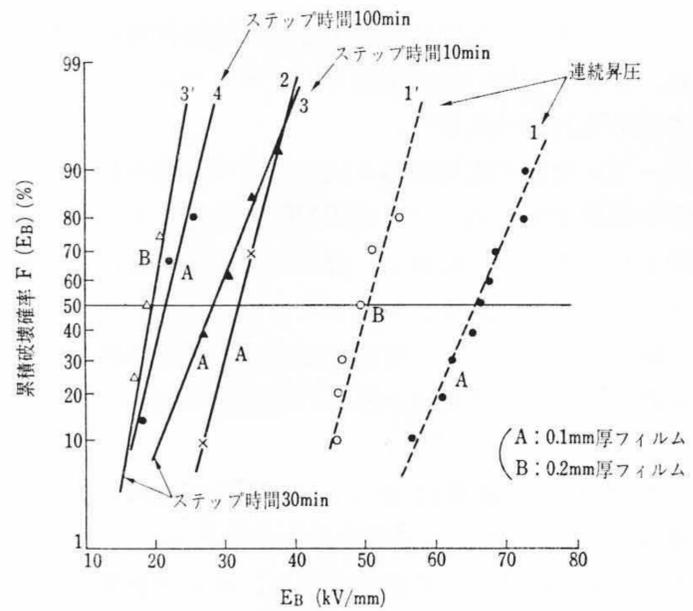


図5 各種課電法による絶縁破壊強度の分布 (正規確率紙上のプロット)

表2 \bar{E}_B の 値

フィルム厚さ (mm)	0.1	0.2
課電ステップ時間		
連続昇圧 (500 V/s)	66 kV/mm	50.5 kV/mm
10 分	32	—
30	28	19.5
100	21	—

(d) 同一保持時間 5 分 (1,000 Hz 電源, 50 Hz 換算時間 100 分) の段階昇圧法

実験に使用した試料は厚さ 0.1 mm および 0.2 mm の低密度ポリエチレンフィルムである。ホイドの構成方法は図 4 に示すような種々のものが考えられるが、最も簡単な構成 (a) で行なった。フィルム間のはり合せにはシリコングリース (Dow Corning 社製高真空グリース) を用いた。

図 5 が実験結果で、各課電方法による破壊強度 E_B の分布を正規確率紙上にプロットして示したものである (この場合の E_B は破壊電圧 V_B を重ね合わせたフィルムの厚さで除して求めてある)。これによると、課電ステップ時間が長くなるにつれて E_B の分布は値の小さい側に位置するが、これは、課電中に部分放電劣化が進行し、破壊強度が低下するためであると考えられる。ちなみに、各試料の部分放電開始ストレスはほぼ 4.5 kV/mm であった。表 2 は各

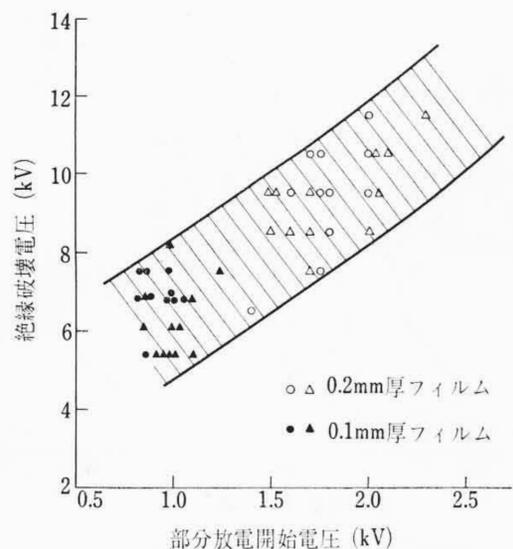


図6 部分放電開始電圧と絶縁破壊電圧の関係

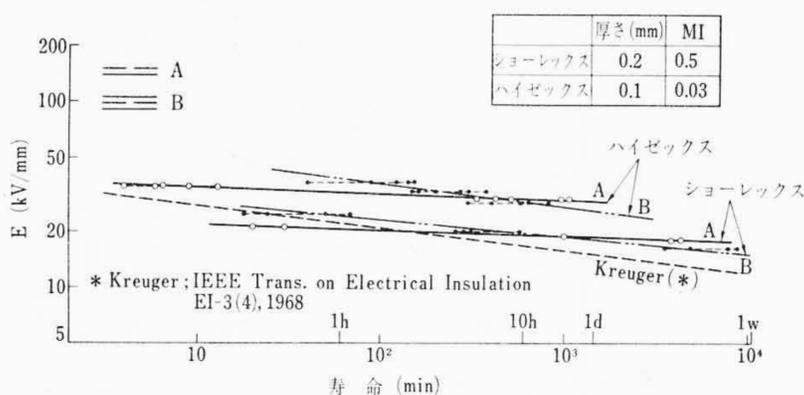


図7 重ね合せポリエチレンフィルムの E-T 特性

課電法で求めた E_B の平均値 \bar{E}_B (図5で $F(E_B)=50\%$ となる E_B の値) を示したものである。ポリエチレン固有の絶縁破壊強度は通常 2×10^5 V/mm 程度と考えられているが、表2によると \bar{E}_B が最大値を示した連続昇圧法の結果でも、ほぼこれより1けた小さい値であり、明らかに破壊強度の低下がみられる。図6は課電法(b), (c)で試験をした全試料の部分放電開始電圧と絶縁破壊電圧の関係を示したものであるが、両者の間に密接な関係があり、部分放電による劣化が絶縁材料の破壊強度を定める大きな要因であることを示している。

3.2 ボイドを含む重ね合せフィルムの E-T 特性

課電ステップ時間とともに E_B が低下する図5のデータはボイド放電による劣化が課電時間とともに進行することを示唆するものである。このことは E-T 特性 (課電寿命特性) という形に明瞭(めいりょう)に現われると考え、2種類の高密度ポリエチレンフィルムを用いて電圧一定としたときの寿命を求めてみた。試料の構成は図4(a), (c)の2通りで、ボイドが絶縁物中にある場合と一方の電極に接する場合の E-T 特性を求めて比較した。

実験の結果は図7に示すとおりである。印加ストレス E と寿命 T の関係は両対数グラフ上で、いずれも直線となり、実験した範囲で周知の実験式(7)を満たしている。

$$E^n T = \text{const} \dots\dots\dots (7)$$

ここで指数 n は劣化を特徴づけるパラメータであるが、図7から求めた値はボイドが電極に接する場合(A)が25、絶縁物中にボイドがある場合が8~11であった。同様な実験を行なった Kreuger氏は n の値9を得ており⁽⁶⁾、また、Oudin氏は健全なポリエチレンケーブルの負荷試験によって、同じような実験式を求め、 n の値8.5を得ている⁽⁹⁾。Kreuger氏の実験ならびに筆者らの実験では、明らかにボイド放電による劣化が進行しており、その結果がOudin氏の得た E-T 特性とほぼ同じ様相を示すのは暗示的であり、交流電圧

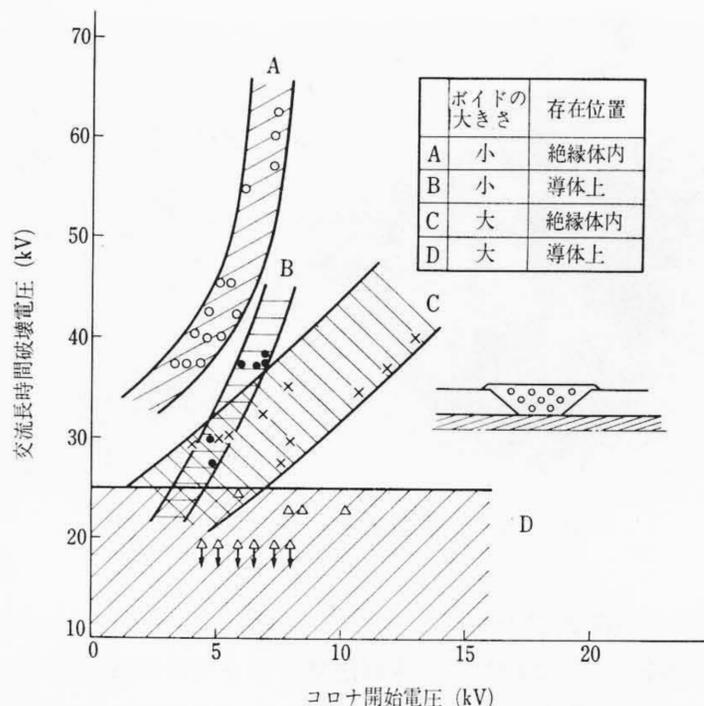


図8 発泡ボイドを有する架橋ポリエチレンケーブルの絶縁破壊特性

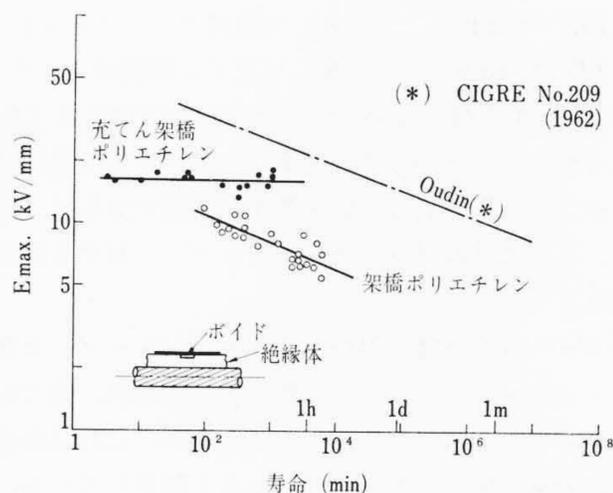


図9 モデルボイドのあるケーブルの E-T 特性

を長期間課電した際に生ずるポリエチレンケーブルの特性の低下がボイド放電劣化に起因することを示唆している。

4. 人工ボイドを有する架橋ポリエチレンケーブルの劣化の様相

ケーブルの絶縁体として利用される固体絶縁物は厚肉のまま押し被覆される。このような構造の絶縁物の劣化はフィルムの場合と異なるはずである。現実のケーブル構造における厚肉絶縁体の劣化の様相を把握するため、健全なケーブルに人工的なボイドを設け、課電時に起こる劣化の状況を考察した。

ケーブル絶縁体のボイド放電劣化は絶縁体内におけるボイドの分布状態に大きく左右されると考えられる。図8は絶縁体の一部に不完全加硫層を形成し、発泡ボイドを分散させた架橋ポリエチレンケーブル(6kVケーブル、絶縁厚4mm)の短尺試料(課電有効長0.8m)を用い、部分放電開始電圧と交流破壊電圧の関係を調べた結果である。絶縁体内の発泡ボイドは複雑な分布状態を呈していたが、絶縁破壊に直接関与したボイドの大きさや存在位置で分類すると、図8のように、部分放電開始電圧と絶縁破壊電圧の間に密接な関係がみられる。絶縁体内に閉じ込められたボイドよりも、導体直上に存在するボイドのほうが劣化に対する寄与が大きいのは、ボイドに加わる電界が大きいうえに、放電によって生じた分解生成物が容易に拡散し、放電が不断に持続するため⁽⁴⁾であろう。

図9はケーブル絶縁体の外部しゃへい層側に円筒形のボイドを設

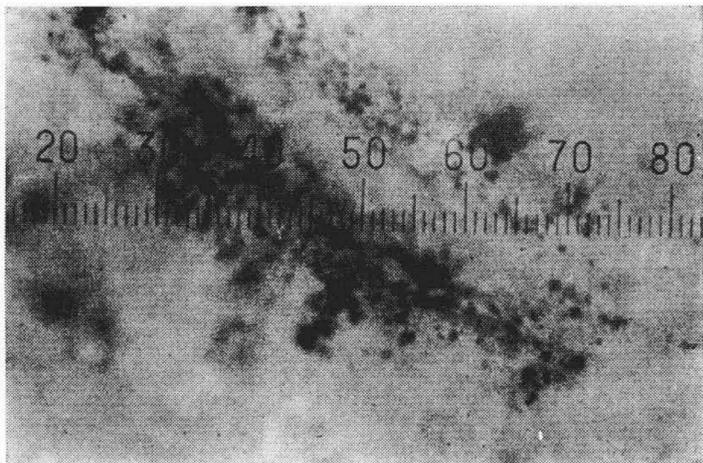


図10 ボイド放電劣化の侵食跡 (400倍)

け、部分放電開始電圧を越える電圧を断続的(10分間印加+10分間しゃ断の繰返し)に印加して絶縁破壊するまでの時間を求めた結果である⁽¹⁰⁾。E-T特性(この場合の寿命Tには累積課電時間をとっている)を表わす実験式は(8)、(9)となり、架橋ポリエチレンケーブルの満す式はその指数nがさきに求めたポリエチレンフィルムの場合、ならびにOudin氏の式にきわめて近い

$$TE^{7.9} = \text{const} \dots\dots (8), \text{ (架橋ポリエチレン)}$$

$$TE^{21.6} = \text{const} \dots\dots (9), \text{ (充てん架橋ポリエチレン)}$$

E-T特性がある傾斜を持つことは部分放電による劣化の存在を示す証拠である。したがって、現実のケーブルでは運転電圧で絶対に“コロナフリー”であるという条件が必須であり、このことからケーブル、とくにゴムプラスチックケーブルに対する部分放電検出の意義が生じてくる。

図9のE-T特性では、架橋ポリエチレンケーブルと充てん架橋ポリエチレンケーブルの直線の傾斜に差がみられ、充てん架橋ポリエチレンケーブルの傾斜がゆるやかであるが、これは後述する無機充てん剤の効果の現われのひとつであると解釈している。

5. ボイド放電劣化の進行過程

従来から、部分放電劣化の進行過程について種々考察されているが、ボイド放電劣化についての検討はMason氏のもの⁽⁴⁾が代表的であり、そこで述べられた考え方には注目すべきものが多い。その要諦とするところは“部分放電にさらされた絶縁材料には局部的侵食が起り、トリーの芽(Mason氏はこれをPitと表現)を生ずる、これがやがてトリーに成長し、究極には絶縁破壊に至る”ということになる。厚肉絶縁物ではとくにこのような過程で劣化が進行すると考えられる。ここで、最も重要なのは部分放電劣化からトリーに移行する過程とその条件の把握であるが、これはトリーの発生機構の解明とともに難問のひとつであり、まだ必ずしも明確ではない。図10は筆者らの実験したフィルム試料にみられた劣化の痕(こん)跡の例であるが、トリー発生の根源となりうる微細な放電による侵食跡が明瞭に観察される。

6. ボイド放電劣化に対する無機充てん剤の効果

絶縁材料の劣化を防ぐには劣化の原因となる欠陥を作らないことが最も重要であるが、同時に材料を積極的に改善し、劣化しにくいものを作り出す努力も怠ってはならない。このような試みの具体例としてトリー劣化を抑制するための電圧安定剤の検討があるが⁽¹¹⁾、筆者らは、それ自身が本来部分放電に対して強固な耐性を有する無機充てん剤、および部分放電劣化しにくい絶縁物として定評のあるEPRを取り上げ、絶縁物(特に架橋ポリエチレン)にこれらを適量配合した場合ボイド放電劣化に対してどのような効果があるかを調べた。

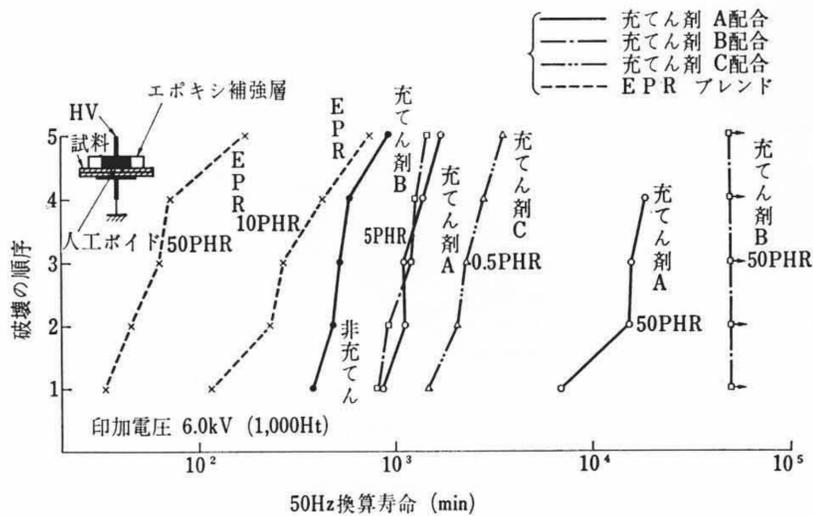


図11 ボイド放電劣化試験による各種試料の寿命特性

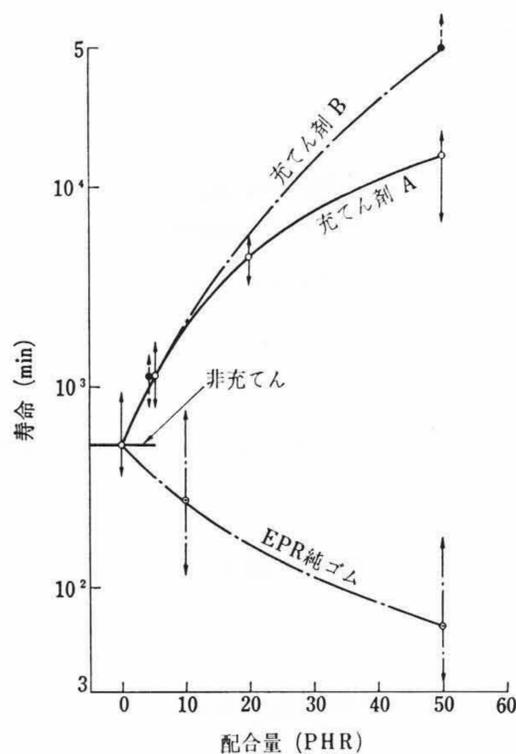


図12 無機充てん剤、EPR純ゴムの配合量と寿命の関係

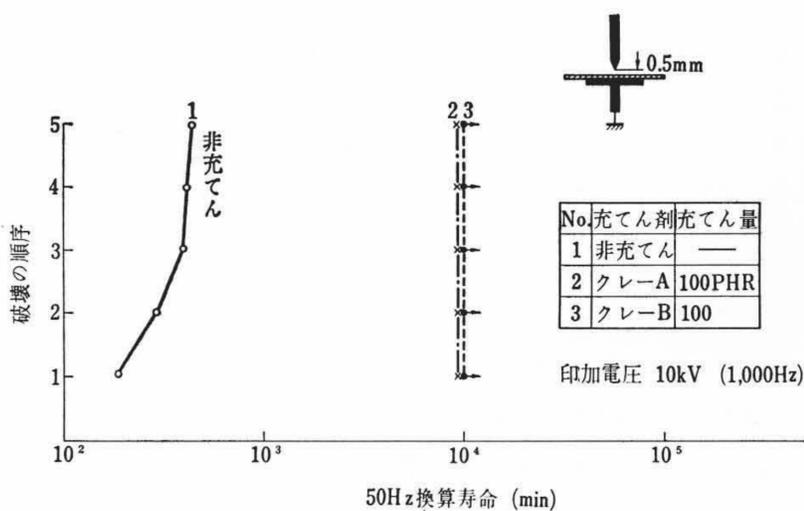


図13 EPRの耐コロナ性に及ぼす充てん剤の効果

実験は3種の無機充てん剤A、B、CおよびEPR純ゴムを適量含む0.3mm厚の架橋ポリエチレンシートを用い、図4(a)の構成で寿命試験を行なった(6kV, 1,000Hz印加)。図11が試験の結果で、横軸に寿命、縦軸に破壊した試料の個数(順序)を示してある。無機充てん剤を含む試料の寿命は充てん剤を含まない試料に比べて例外なく延びている。図12は充てん剤A、Bを含む試料につ

いて充てん剤の配合量と寿命の関係を示したものであるが、配合量が多いほど寿命の延びが大きいことがわかる。一方、EPRを含む試料ではブレンド量が増すに従ってかえって寿命が短くなっている。図13はこの実験と並行して行なった、EPR純ゴムに2種類のクレーを加えた試料の部分放電劣化試験(針対平板電極使用, 10kV, 1,000 Hz 印加の寿命試験)の結果であるが、ここでも無機充てん剤を含む試料の寿命は充てん剤を含まない試料の寿命よりも著しく長くなっている。部分放電劣化しにくい材料といわれているEPRの特性もレジソそのものの特質ではなく、つまりはEPRの実用配合に必ず含まれている無機充てん剤の効果であることを裏書きしている。

このように、架橋ポリエチレン中に含まれている無機充てん剤は部分放電劣化を抑制する働きがあり、その作用機構がどのようなものかが興味深い。すでにゴム分子中に配合された無機充てん剤の作用についてはFisher氏のSpeculation⁽¹²⁾があるが、この点についての明確な回答をうるには詳しい材料物性的な研究が必要である。筆者らは現在この作用機構を定性的に次のようなものと考えている。すなわち、ポリエチレンのような結晶性の高分子では結晶領域における欠陥部とか、結晶領域と不定形領域の界面部が弱点層となっており、部分放電劣化の進行の過程において、これらの部分がトリー進展の経路となる。無機充てん物が配合されると、高分子物質の弱点層および不定形領域内の微視的ボイドに充てんされ、あるものは欠陥を埋め、また、場合によっては高分子物質と強固な結合を構成し、放電による衝撃、あるいはトリーの進展に対する障壁を形成して劣化の進行を妨げる効果を与える。図13に示したように、不定形高分子であるEPRにおいて、無機充てん剤を配合した効果が顕著にみられるのもこのような作用機構に依ると考えている。

7. 結 言

以上、ポリエチレンのボイド放電劣化の様相を考察した結果を述べた。本論文で述べた内容を要約すれば次のようになる。

- (1) 欠陥としてボイドを含むポリエチレンは初期の絶縁耐力、課電下における寿命ともに材料固有の値に比べて著しく低下する。

- (2) ボイド放電劣化に起因する課電寿命特性 ($E-T$ 特性) は次の実験式で表わされる。ここでパラメータ n は劣化の度合いを示すが、ポリエチレンの場合は8~9となり、劣化の8~9乗則を与える。

$$E^n T = \text{const}$$

- (3) ボイド放電による劣化はトリーの発生を経て絶縁破壊に至ると考えられる。
- (4) 絶縁物中に無機充てん剤を配合することによりボイド放電劣化の抑制が可能であり、実際に充てん架橋ポリエチレンケーブルは劣化の度合いが小さい。

ボイド放電が絶縁劣化の大きな原因となる以上、製造時点でケーブルをボイドレスにすることが最も肝要である。また、同様な意味で、品質管理の手段として行なわれる部分放電検出の意義は大きい。現状においては、劣化に直接寄与する放電量が明確に把握されていない。部分放電検出を品質管理の手段としてより有効ならしめるためには、劣化に対して有害か無害かという観点から放電量を分別し、判定の基準を確立することが必要で、これは今後検討すべき最大の課題であると考えている。最後にご指導をいただいた武蔵工業大学鳥山教授ならびに種々ご援助いただいた日立電線株式会社日高工場、研究所の関係各位に深謝する。

参 考 文 献

- (1) たとえば, M. A. Charoy & R. F. Jocteur: IEEE Trans. P. A. S., PAS-90, 777 (Mar./Apr., 1971)
- (2) S. Whitehead: Dielectric Breakdown of Solid (1951, Oxford)
- (3) P. R. Howard: PIEE, 98 pt. II, 365 (1951)
- (4) J. H. Mason: PIEE, 98, pt. I, 44 (1951)
- (5) 安井: 住友電気, 95, 20 (昭42)
- (6) F. H. Kreuger: IEEE Trans. on Electrical Insulation, EI-3, 46 (1968)
- (7) 安井: 住友電気, 94, 36 (昭41)
- (8) H. C. Hall & R. M. Russek: PIEE, 101, pt. II, 47 (1954)
- (9) M. Oudin ほか: CIGRE, No. 209 (1962)
- (10) 依田, 関井: 昭42電学東支 No. 361
- (11) D. W. Kitchin & O. S. Platt, AIEE 81 (2), 112 (1956)
- (12) W. F. Fisher: Wire and Wire Product, 584 (1961)



日立製作所所有の特許(主要特許のみを抜すい)

■ 大型変圧器および付属品

登録番号	公告番号	名 称	登録番号	公告番号	名 称
特 564828	44-4804	誘導電器用円盤巻線	特 559616	44-10969	変圧器短絡試験用模擬装置
特 462690	40-16291	制振遮蔽を有する変圧器巻線	特 444140	39-15905	負荷時タップ切換装置用 切換開閉器
特 555833	44-9921	変圧器用タップ巻線	特 757743	39-18359	変圧器の端子引出装置
特 473892	40-13328	負荷時タップ切換装置用 切換開閉器	特 428507	39-2105	電気炉用変圧器
特 542751	43-23801	変圧器の模形による短絡試験法	特 554599	44-7886	負荷時タップ切換装置用 切換開閉器