ボイド内部分放電劣化に対する水分の影響

正 員 江原由泰 (武蔵工業大学)

学生員 小泉直也 (武蔵工業大学)

学生員 浦野幸治 (武蔵工業大学)

正 員 堺 孝夫 (武蔵工業大学)

正 員 伊藤泰郎 (武蔵工業大学)

Effect of Water on Degradation of Insulating Materials Exposed to Partial Discharge in Void

Yoshiyasu Ehara, Member, Naoya Koizumi, Student-member, Kouji Urano, Student-member,
Takao Sakai, Member, Tairo Ito, Member (Musashi Institute of Technology)

It is already known that partial discharges in a void in insulating materials and between a polymer and a conductor, may lead to degradation of insulating materials, and finally to breakdown of the insulation system. The occurrence of the partial discharge depends on a shape of void and atmospheric condition. The object of this work is to investigate the degradation process of polymeric materials under various humidities in a void.

The characteristics of the gaseous discharge products were analyzed by Fourier Transform Infra-Red Absorption Spectroscopy during the discharge condition. At the same time, the discharge magnitude distribution was measured by a special internal discharge pulse measurement system which could analyze the discharge magnitude according to the phase angle area of the applied voltage. The effect of water on the degradation of insulating materials in void exposed to partial discharge has been investigated by the FT-IR analysis and the measurement of the discharge magnitude distribution in each phase area.

As a results, the time to breakdown for 50% humidity is shorter than at that low and high humidity conditions. The time dependency of carbon dioxide differs from the case of humidity. Carbonyl group increases, and end vinyl group decreases with the discharge deterioration time. Moreover, the discharge magnitude in all phases at 50% humidity is greater than at that low and high humidity condition.

キーワード：ボイド，部分放電，放電電荷，劣化生成物質，水分，湿度

1. まえがき

高分子材料は、電氣的・機械的特性に優れていることから、電力ケーブル、電力機器等の絶縁材料に多く使用されている。しかし、電力ケーブル等に用いられる高分子絶縁材料では、製造過程や過酷な使用条件下で、高分子材料内部または導体との境界面にボイドが形成されると、ボイド内で部分放電が発生し、絶縁材料が劣化し、ついには全路破壊に至る。部分放電により、スパッタ作用のみならず、圧力変化、高分子材料の化学的劣化等が複雑にからみ合っているため、破壊までのプロセスは未だ不明な点がある。特に、部分放電に伴う密閉ボイド内での気体変化および高分子材料表面の放電劣化生成物と放電状態の直接的相関関係は、まだ明瞭にされていない⁽¹⁾。この関係を明らかにするためには、放電劣化生成物と放電電荷分布を同一の試料で同時に計測することが必要である。

また、絶縁材料の特性は、湿度の影響を大きく受けると同時に、自然環境の下でも電力機器、電力ケーブルなどは、水分に対して非常に過酷な条件下で使用されていることが多い。したがって、絶縁材料の劣化は、水分と酸素分子の共存下で生じている。そのため、水分を含むボイド内部分放電劣化機構の解明が重要となる。特に、水分が酸化劣化に対し、どのような影響をもたらすかを知る必要がある。

そこで本研究では、水分を含むボイドの部分放電劣化寿命とそのプロセスを検討対象とした。すなわち、密閉ボイド内での気体放電劣化生成物、ボイド内壁面の放電劣化生成物および放電状態のボイド内湿度に対する依存性を明らかにすることとした。そのため、試料の化学的組成の変化と放電電荷分布とを、同一試料において破壊に至るまで同時測定することが必要である。そこで、ボイド内を赤外光が透過可能となるように、薄く金を蒸着した電極を使用して実験を行った。

2. 実験方法

〈2.1〉 試料および電極構成 本実験に使用した試料および電極構成を図1に示す。試料には、絶縁特性に優れ、電力機器あるいはケーブルなどに広く用いられているポリエチレン（PE）を使用した。本研究ではボイド内で部分放電発生状態下において、ボイド内雰囲気、放電電荷をリアルタイムに計測するため、電極構成は模擬円筒ボイドを有する平行平板電極とした。また、赤外光による分光分析を行うため、電極として、ポリエチレン表面に金を薄く蒸着した金電極を使用した。以下に試料作成手順を示す。

- (1) 厚さ1mmのPE板の中央に、直径10mmの穴を開け、その壁面にバリがあれば取り除く。
- (2) 厚さ50 μ mのPEフィルムの片面に、赤外光が透過可能で電極として使用できる膜厚（約30nm）に、金を真空蒸着する。
- (3) 湿度を調整したデシケータ内で、1mm厚のPE板の両面に、金電極を蒸着した50 μ m厚のPEフィルムを蒸着面を外側にして、シリコングリスで貼り合わせ、模擬円筒ボイドを有する試料を作成する⁽²⁾。

以上のような方法で作成した試料では、電圧を印加した状態で、ボイド空間およびPEの赤外線吸光度スペクトルの時間的变化を測定できる。ボイド内湿度を相対湿度10、30、50、70、90%の5種類調整し実験を行った。

図1 実験試料および電極構成
Fig.1. Sample and electrode

〈2.2〉 実験システム 本実験では、ボイド内雰囲気と放電電荷の測定をリアルタイムで行うため、図2に示す実験システムを使用した。

(1) FT-IRによる分光分析 前述の試料をFT-IR（フーリエ変換赤外線分光光度計）の測定セル内に設置し、ボイド内雰囲気の赤外線吸光度スペクトル（以後IRスペクトルと示す）を電圧印加状態のまま測定する。得られたIRスペクトルから、注目すべき波数における吸光度の経時変化を15分毎に測定する。本研究で着目したボイド内の気体成分としては、従来から放電劣化生成気体の主な成分とされている、二酸化炭素（CO₂）とした。ま

図2 実験システム

Fig.2. Experimental system

た、ポリエチレン表面の化学変化として、酸化劣化の目安となるカルボニル基（>C=O）、および高分子鎖中で最も放電による攻撃を受けやすいとされている末端ビニル基（-CH=CH₂）⁽³⁾ について着目した。ここで、FT-IRの測定条件は積算回数20回、分解能4cm⁻¹とした。

(2) 部分放電計測システム ボイド内で発生する部分放電パルスを、図2に示したC-R並列回路（時定数 $\tau = 5.3 \mu\text{s}$ ）で見掛けの放電電荷に対応した電圧パルスとして検出し、ハイパスフィルタを通して50Hzの電源周波数成分を取り除いた後、部分放電パルス計測システム（検出感度4pC）へ入力した。放電電荷分布の三次元表示や、位相角解析法等は、前報⁽⁴⁾と同様である。

〈2.3〉 実験方法 まず、作成した試料をFT-IRの測定セル内にセットし、電圧印加前のIRスペクトルを測定する。その後、試料に5.6kV、50Hzの高電圧を印加し、IRスペクトルと放電電荷分布の計測を開始する。IRスペクトルは、15分毎にサンプリングした。この測定は、絶縁破壊するまで実験を継続し、寿命の測定も行った。実験終了後、IRスペクトル、放電電荷分布により、ボイド内湿度に対する劣化生成物および放電諸量について相関関係の検討を行った。

3. 実験結果および検討

〈3.1〉 ボイド内湿度と破壊時間 図3にボイド内の湿度を変化させた場合の絶縁破壊時間特性を示す。この結果は、各湿度5回以上の実験値の平均をプロットしたものである。ボイド内湿度10%から湿度が高くなるにつれて、破壊時間は短くなり、ボイド内湿度50%で最も破壊時間は短くなる。さらに湿度が高くなると、再び破壊時間は長くなる。つまり、ボイド内の湿度がポリエチレンの劣化に影響を及ぼしていることは確かであろう。特に、ボイド内湿度50%において、最も短寿命でポリエチレンの劣化が最も激しく起こっている。このような劣化寿命に対するボイド内湿度の特徴的变化について、放電劣化生成気体、放電劣化生成物および放電電荷分布との関連について検討を行う。

〈3.2〉 湿度と放電劣化生成物 ボイド内雰囲気成分とポリエチレンの劣化要素の経時変化を、ボイド内湿度5

図3 湿度に対する破壊時間
Fig.3. Time to breakdown for humidity

図4 吸光度経時変化
Fig.4. Time dependency of absorbance

図5-1 湿度に対するCO₂の生成速度
Fig.5-1. Formation velocity of CO₂ for humidity

図5-2 湿度に対する末端ビニル基の生成速度
Fig.5-2. Formation velocity of end vinyl group for humidity

0%で劣化させた試料を例として図4に示す。気体成分で最も発生量の多いCO₂は、電圧印加直後急増が見られ、ピークを示した後、小さな増減を繰り返しながら変化する。この小さな増減は、局所的劣化が暫時進行することを示している⁽⁴⁾。ポリエチレン分子鎖の末端ビニル基は、時間の経過とともに減少傾向が見られ、ポリエチレンが末端ビニル基から次第に劣化されていることを示している。カルボニル基は、末端ビニル基が時間的に減少するのと対比的に増加していく傾向を示す。これらのことから、初期段階には劣化中期の定常状態に比べて、ボイド内で化学変化が活発に起こっていることが分かる。

CO₂、カルボニル基の生成および末端ビニル基の減少は従来の研究より⁽³⁾ 既知のことであるが、ここでボイド内湿度の違いによる劣化生成物の生成速度を詳細に検討するために、吸光度スペクトルの経時変化を一次近似し、吸光度の時間的傾きを生成物の生成速度として定義して検討する。すなわち、図4のような特性を各湿度条件で求め、各成分の経時変化を直線近似して、その傾きを比較した。生成速度の湿度特性を図5に示す。この生成速度が正なら

増加傾向、負なら減少傾向を表す。CO₂は図4に示すように、その傾きが時間の経過によって大きく異なる。そして、湿度を変化させてもCO₂は劣化時間により増加・減少の二つの傾向を示す。したがって、劣化の進行を次の3段階に区分して表すこととした。

- (1) 電圧印加直後～120分間 (劣化初期)
 - (2) 電圧印加後120分～破壊前120分 (劣化中期)
 - (3) 破壊前120分～破壊直前まで (劣化後期)
- 上記の定義の下、データ処理を施した結果を劣化生成物ごとに、図5-1～図5-3に示す。

まず、図5-1よりCO₂は劣化初期には、いずれの湿度においても生成速度は正で湿度に対して増加しているが、その変化は大きくはない。しかし、ボイド内湿度90%では急増している。劣化中期では、高湿度においては漸増傾向を、低湿度では減少傾向を示している。劣化中期と劣化後期では、CO₂の生成速度は低湿度と高湿度で全く対称的である。

次に図5-2より、末端ビニル基は全ての条件において生成速度が負の値を示しており、末端ビニル基は時間の経

図5-3 湿度に対するカルボニル基の生成速度
Fig.5-3. Formation velocity of carbonyl group for humidity

過とともに、いずれの場合にも減少している。劣化初期では、ボイド内の湿度が高くなるほど、末端ビニル基の減少速度は速くなっているが、劣化中期では、ボイド内湿度50%において、その減少傾向が極大値を示している。

次に図5-3では、カルボニル基は生成速度が常に正の値を示し、カルボニル基が生成されていることを示している。劣化期間によるカルボニル基の生成速度の差は大きくなく、また、湿度70%までの範囲での変化も僅かである。急激な生成速度の変化は90%湿度条件で見られ、劣化初期では増加するのに対して、劣化後期の減少は著しい。このように劣化期間を区分することにより、劣化生成物の湿度による影響が明瞭となった。

〈3.3〉 ボイド内湿度と放電電荷 図6にボイド内湿度10%、50%、90%における放電電荷分布の代表例を示す。各々破壊寿命832、450、847minの場合である。分布から湿度50%の試料では、他の2例に比べ800pC付近の大きな放電パルスが定期的な多数発生している。

各湿度において図6に示したような放電電荷分布を求め、ボイド内湿度に対する放電電荷として図7に示す。前節と

同様に、劣化の進行を3段階に区分して示した。ただし、試料により劣化中期の時間が異なることから、1分当たりの放電電荷で示した。劣化初期および後期では放電電荷のボイド内湿度による差は顕著ではない。劣化初期では、放電が安定しないために、また、劣化後期では、ピットなどの形成により放電パルスが大きくなるためであろう。しかし、劣化中期における1分当たりの放電電荷は、ボイド内湿度50%で最も大きく、電荷量・パルス数ともに最も大きくなる。

放電パルスの大きくなる原因は、放電開始電圧に依存すると考えられる。そこで、図8にボイド内湿度に対する放電開始電圧の特性を示す。劣化が進行すると放電電荷の特性を裏付けるように、ボイド内湿度50%において最も放電開始電圧は低くなる。劣化中期では、放電状態が定常状態になり、放電開始電圧が徐々に低下するため、最もボイド内雰囲気の影響が現れると考えられる。

〈3.4〉 ボイド内湿度と劣化プロセス 高分子絶縁材料の放電による劣化プロセスでは、荷電粒子の衝撃による結合の切断と、放電により生じた化学的活性種による表面の化学構造の変化に依存していると考えられている。本実験のような密閉されたボイド内部分放電では、試料が直接放電にさらされるため、両者を重ね合わせた作用により劣化が進行するものと考えられる。

化学的活性種として良く知られているオゾンは、有機物の中でも不飽和結合を選択的に酸化する。ポリエチレンの二重結合である末端ビニルは次のような経過が従来より確認されている⁽³⁾。

さらに、アルデヒド(RCOH, HCOH)は酸化され

図6 各湿度における放電電荷分布
Fig.6. Discharge magnitude distribution in each humidity

図7 湿度に対する放電電荷

Fig.7. Discharge magnitude for humidity

カルボン酸 (RCOOH , HCOOH) や H_2O , CO_2 になりやすい。

主鎖に対する劣化プロセスは粒子衝撃により $\text{C}-\text{C}$ および CH 結合が切断される過程があり、これに活性酸素原子やオゾンなどの酸素付加反応により、アルデヒドあるいは

ケトンが生じる。アルデヒドは既述のようにカルボン酸、 H_2O , CO_2 となる。

以上の劣化反応を下に、ボイド内の湿度が劣化プロセスに対し、どのような影響があるかを上述の実験結果を中心に考察を試みる。

劣化初期は、ボイド内に多くの酸素が存在し、粒子衝撃と化学的活性物によりポリエチレンの酸化反応が盛んに行われている。図5-2, 3に示されたように、すべての湿度において末端ビニル基は減少、カルボニル基は増加傾向を示す。

オゾンの水への溶解度は 0.57 g/l (20°C) で酸素の約10倍である。オゾンは水中では解離し、フリーラジカル $\text{H}\dot{\text{O}}$ (ヒドロキシルラジカル) を生ずる。このフリーラジカルはオゾンそのものより大きな酸化電位を持ち、ポリエチレンとすぐ反応する。ポリエチレン表面における水の吸着量は、ボイド内の初期相対湿度に比例するものと考えられ、高湿度ほどポリエチレン表面で酸化電位の大きいフリーラジカルが生成する条件にある。したがって、劣化初期では高湿度ほどオゾンによる末端ビニル基の減少、劣化生成物の増加傾向が顕著に見られている。

劣化中期になると、密閉ボイド内に存在する酸素は試料酸化に消費され減少する。劣化酸化物が放電により解離し、酸素を生成するため、酸素は初期濃度より低い値で平衡状態を保つであろう。実験結果において、上述したオゾン酸化による末端ビニル基の減少速度は劣化初期に比べ緩やか

図8 湿度に対する放電開始電圧

Fig.8. Breakdown voltage for humidity

になっている。また、 CO_2 も放電により解離するため、減少傾向を示している。これらのことから劣化中期では酸素濃度の低下により、化学的活性物による酸化劣化は緩やかに推移するものと考えられる。

一方、粒子衝突による劣化では、その主因となる放電自体がボイド内の雰囲気により大きく左右される。放電状態はボイド内気圧およびボイド壁面・表面の抵抗変化が大きく影響する。放電開始電圧は酸素濃度の減少による気圧の低下および試料表面の荒れにより、低下するものと考えられる。

ボイド内の水分はボイド壁面に吸着し、表面抵抗を変化させる。そこで、図9に湿度に対するポリエチレンの表面抵抗を示す。表面抵抗はJIS規格(K6911)に準拠した電極を使用し測定した。この結果は、ポリエチレンフィルムに紙ヤスリ(#200)で傷を付け、模擬的な劣化状態を作り出し、湿度を調整したデシケータ内で測定したものである。図より、表面抵抗は湿度50%付近を境に、低湿度では高く、高湿度になるほど低くなる。したがって、高湿度では部分放電による劣化中の試料表面上に多量の水が付着し、表面抵抗の低下による電界緩和効果により、放電開始電圧が高くなると考えられる。

低湿度から中湿度までは湿度の増加による表面抵抗の減

図9 湿度に対する表面抵抗

Fig.9. Surface resistance for humidity

少はそれほど見られない。また、曾禰氏らは放電劣化を生じさせる要因は、酸素および水分との共存が必要であり、純粋な酸素のみではたとえ放電が生じたとしても劣化し難く、またどちらが少なくとも劣化し難いことを報告している⁽⁵⁾。そして、劣化初期では湿度の増加に伴い劣化し、試料表面を荒らしている。これらのことより、中湿度以下の低い範囲で湿度の増加でボイド壁面抵抗が下がることにより、ボイド内の電界が緩和される効果は大きくない。むしろ、試料表面の水分による劣化が大きく作用し、試料表面を荒らし、放電開始電圧を低下させているものと考えられる。以上のことより、図8に示されるように劣化中期では湿度50%において最も放電開始電圧が低くなるものと考えられる。

特筆すべきは劣化中期では放電開始電圧と放電電荷の湿度特性において、湿度50%でそれぞれ顕著な変化が見られること、また末端ビニル基およびカルボニル基においても同様の傾向が認められることである。したがって、この期間の放電状態、それによる劣化進行が図3に示した寿命を決定する大きな要因となっているものと考えられる。

劣化後期になり破壊が近づくと、ボイド壁面が均一に劣化されている状態から、放電開始電圧の特に低い場所（突起・ピット等）が現れ、そこに放電が集中するようになる。この段階では、放電パルスが大きくなり、劣化の進行が急激になる。湿度の影響はあまり見られなく、荷電粒子の衝撃による劣化が主体となっている。

4. まとめ

本研究では、ボイド放電劣化における放電電荷と放電劣化生成物との関係を調べるため、湿度に着目し実験を行った。その結果、次のようなことが明らかとなった。

(1) ボイド内部分放電劣化の進行は、 CO_2 、放電電荷の経時変化により、初期・中期・後期の3つの段階に区分することができる。

(2) ボイド内湿度50%において、破壊時間が最も短くなることが確認された。

(3) 劣化中期において、最もボイド内湿度による差が、顕著に現れる。破壊時間が短いものほど末端ビニル基の減少、カルボニル基の増加傾向が認められる。

(4) 上記の要因として湿度50%付近の条件では、放電開始電圧の低下、それにより放電電荷が最も大きくなることがわかった。

最後に、卒業研究として本実験に従事された、嵯峨裕文氏、福田誠氏に謝意を表す。

(平成7年7月14日受付、同7年10月18日再受付)

文献

- (1) 電気学会技術報告(Ⅱ部), 第267号
- (2) 伊藤・佐藤・堺・江原:「ポリエチレンのボイド放

電劣化の化学的および電気的諸量の同時測定による解析」, 電学論A, 109, 457(H1)

(3) 例えば, 電気学会技術報告(Ⅰ部), 第74号

(4) 江原・伊藤・岸田・堺・伊藤:「ボイド放電劣化による生成気体と放電電荷分布」, 電学論A, 112, 643(H4)

(5) 曾禰・木原・光井・鳥山:「広気圧範囲の酸素ふんいき中の放電劣化, トリー現象の解析」電学論A, 94, 453(昭49)

江原 由泰

(正員) 1956年9月22日生まれ。1979年3月群馬大学合成化学科卒業。1980年三恵技研工業(株)入社。1984年武蔵工業大学勤務。主として高分子絶縁材料の劣化に関する研究に従事。

小泉 直也

(学生員) 1970年11月20日生まれ。1995年3月武蔵工業大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年横河ヒューレット・パカード入社。現在に至る。

浦野 幸治

(学生員) 1971年3月27日生まれ。1995年3月武蔵工業大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月同大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程入学。現在に至る。

堺 孝夫

(正員) 1931年6月14日生まれ。1968年3月東北大学電気工学科卒業。1958年同大学院修士課程修了。1966年武蔵工業大学教授。1967年英国サルフォード大学客員研究員。1972, 81, 86年電気学会論文賞受賞。主として高分子の伝導・劣化および沿面放電特性の研究に従事。工学博士。

伊藤 泰郎

(正員) 1935年9月30日生まれ。1960年3月武蔵工業大学電気工学科卒業。同年4月同大学に勤務。1982年同教授。1970年4月より1971年4月までクラークソン工科大学研究員。1986年電気学会論文賞受賞。主として高分子絶縁材料の劣化、放電による気体間反応に関する研究に従事。工学博士。