局所的に絶縁破壊したシリコーンゴムの自己回復性 に関する基礎検討

正員 穂積 直裕* 非会員 西岡 幸治*
 学生員 末松 武志* 正員 村上 義信*
 正員 長尾 雅行* 非会員 坂田 博**

Fundamental Study on Self-healing Insulation Performance of Silicone Rubber Affected by Local Breakdown

Naohiro Hozumi*, Member, Koji Nishioka*, Non-member, Takeshi Suematsu*, Student Member,
 Yoshinobu Murakami*, Member, Masayuki Nagao*, Member, Hiroshi Sakata**, Non-member

Feasibility of self-healing insulation system was studied. A silicone rubber without filler was mounted on a glass substrate with a needle electrode. An ac voltage with 4 kV in rms was applied. The voltage was cut off when the tree had propagated into 150 micrometers in length. After the cut-off, the partial discharge inception voltage was periodically observed. The partial discharge inception voltage had once reduced into as low as 2 kV. However, it gradually increased with time, and finally exceeded the tree inception voltage (4 kV) when 30 - 60 hours had passed. It was also observed by optical microscope that the tree gradually disappeared in parallel with the recovery of the partial discharge inception voltage. The same phenomenon was observed even if 1 kV ac voltage had been continuously applied during the process of the recovery. A simulation using a needle-shaped void was performed in order to clarify the mechanism of the self-healing effect. It was observed that the tip of the needle-shaped void gradually got wet with a liquid material. It would be the result of "bleed-out" of the low molecular component included in the rubber. The tip of the void was finally filled with the liquid, however, the rest of the needle-shaped void stayed without being filled. In this type of tree, it was suggested that the self-healing effect is expected if the diameter of the tree did not exceed ca. 5 micrometers.

キーワード：シリコーンゴム，電気トリー，部分放電，自己回復絶縁

Keywords : silicone rubber, electrical tree, partial discharge, self-healing insulation

1. はじめに

送配電コスト低減対策の一環として，電力機器の信頼性を担う絶縁システムにおいても究極的にはメンテナンスフリー絶縁方式の開発が望まれている。特に，絶縁破壊を起こした，あるいは起こしかかっている場合において絶縁性能を回復できる絶縁系は，高電圧技術者の長年の夢とされている。

薄膜やフィルムに金属電極を蒸着した絶縁系においては，絶縁破壊が発生すると破壊孔付近の電極金属が蒸発して絶縁が回復する現象が観測され⁽¹⁾，キャパシタなどの絶縁系に応用されている。一方，本研究で対象とする厚肉の絶縁系に関しては，水トリー劣化したケーブル絶縁体にシリコーン油を含浸させることにより絶縁性を回復させ，寿命の延伸を図った報告がある⁽²⁾。また，融点を越えたポリエチレン中で電気トリーが発生した場合，条件によってはその一部が時間とともに消失することが報告されている⁽³⁾。電気トリーが生じた絶縁系の自己回復特性についてはパワーモジュールなどの電子回路基板の封止に使用されるシリコーンゲルを対象とした基礎検討が行われている⁽⁴⁾。

このように，厚肉絶縁の自己回復性についてはいくつかの検討がなされているものの，回復特性の詳細な検討はほ

* 豊橋技術科学大学
 〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1
 Toyohashi University of Technology
 1-1, Hibarigaoka, Tempaku, Toyohashi 441-8580
 ** 九州電力(株)
 〒810-8720 福岡市中央区渡辺通 2-1-82
 Kyusyu Electric Power Co., INC.
 2-1-82, Watanabedori, Cyuou-ku, Fukuoka 810-8720

とんど行われていない。理想的には電気トリートメント消失にとともに電気トリートメント発生以前の信頼性をとりもどすことが望まれる。将来電力系統の絶縁に適用することを想定した場合、システムの信頼性回復を評価するための基礎データとして、トリートメント発生後時間とともに絶縁性能がどのように回復するかを知ることは重要と考えられる。

さて、電気トリートメントが直径数 μm 以下の中空の管であることは電子顕微鏡による観察などにより明らかにされている⁽⁵⁾。シリコンゴムのようにマトリクスと低分子量成分を含む材料は、電気トリートメントが発生しても内部の放電が持続しない場合は、低分子量成分がトリートメント管内に浸出し絶縁が回復できる可能性がある。また、ゴム性の材料であるから放電が停止してトリートメント管内の圧力が低下するとトリートメント管の径が小さくなり、放電電圧が上がって絶縁性能が回復する可能性も考えられる。ただし、運転電圧でトリートメントが発生した場合を仮定すると、電圧印加を停止しない限りトリートメントが成長を続けるので、大した絶縁特性の回復は期待できない。そこで、想定するトリートメントの発生は過電圧によるものとする。

すなわち、過電圧によって一旦電気トリートメントが発生しても運転電圧下では部分放電が継続せず、従ってトリートメントの成長は停止するものと期待できる。トリートメント管内は次第に低分子量成分で満たされ、あるいはゴムの弾性のためにトリートメント管が細くなることにより、トリートメントに関連した部分放電開始電圧を回復させることが期待できる。過電圧に対するマージンがトリートメント発生前と同程度にまで回復できれば、絶縁系の寿命延伸を図ることが可能である。

以上より、本研究で検討する自己回復性は、過電圧による局所絶縁破壊痕すなわち電気トリートメント(以下単にトリートメントと呼ぶ)が時間とともに消失し、絶縁性能が回復するというものとする。

2. 試料および実験方法

固体絶縁材料としてある程度の弾性が求められることを考え、シリコンゴムを検討対象とした。微小なトリートメントの観察を容易にするため、フィラーを含まない透明なものを選択した。以上を満たす材料として、2液混合常温硬化型のシリコンゴム(GE-東芝シリコン製 TSE3450)を使用した。

微小なトリートメントを容易に観測できるように、図 1(a)のような顕微鏡用スライドガラスを基板とした試験片を作成した⁽⁶⁾。直径 150 μm のタングステン線を電解研磨して先端半径が約 3 μm の針電極を作製した。スライドガラス上に針電極とアルミニウム箔電極を置き、未硬化のシリコンゴムを塗布した後、カバーガラスで押さえて針電極を埋め込んだ。電極間隔は 1 mm、シリコンゴムの層は約 500 μm とした。同図(b)に測定装置の概略図を示す。常温において 60Hz の交流電圧を印加した。以下交流電圧は実効値で表す。光学顕微鏡でトリートメントの発生状況を観測しながら、30 秒ごとに 1 kV ステップで上昇する電圧を印加した。4 kV 印加中にトリートメントが発生した場合には、トリートメントが 150 μm まで進

図 1 試料と観測システム

Fig. 1. Specimen and observation system.

展するまで電圧をそのまま保持した後電圧を一旦遮断した。4 kV 未満の電圧でトリートメントが発生した場合には、データを棄却した。一定時間経過した後に、200 V/s で上昇する ramp 状の交流電圧を印加し、同調型計器(日本計測器製 CD-5)で部分放電開始電圧を調べた。部分放電の検出感度は約 5pC であった。

3. 実験結果

4kV で発生し、長さ 150 μm まで成長したトリートメントにともなう部分放電電荷量は約 100~130pC であった。図 2 は同一試料のトリートメント画像の時間変化を示す。電圧遮断後 14 時間程度まではトリートメントの長さは大きく変化しないが、画像から判断されるかぎり、枝が細くなっているように見えた。電圧遮断後 20 時間程度ではトリートメント先端部が収縮し、見かけのトリートメント長が短くなっていくことが観察できた。電圧遮断後 52 時間経過したものは、ほとんどトリートメントが消失したように見えた。このようなトリートメントの見かけの消失過程において、適当な時間間隔で部分放電開始電圧を測定した。

図 3 は電圧遮断後の部分放電発生電圧の経時変化を示す。トリートメントが消失していく過程で部分放電測定を実施すると、測定の間わずかにトリートメントが成長するため、部分放電開始電圧の回復が見かけ上遅れる。以下の図の説明において、黒抜き丸(●)は電圧遮断後適当な時間間隔で部分放電開始電圧を測定しながら測定、黒抜き三角(▲)はそれと比較するために途中部分放電測定をせずに 64 時間放置後測定した結果を示す。いずれのケースにおいても、電圧遮断後 64 時間を経た後には、部分放電開始電圧が課電履歴のない試料のトリートメント発生電圧程度以上にまで回復している。途中部分放電測定を実施しない場合は、64 時間放置すると部分放電開始

図2 トリーの光学顕微鏡画像

Fig. 2. Optical microscopies of the tree after cutting off the voltage.

図3 部分放電開始電圧の時間変化 (4kV で発生したトリーを 150 μ m まで成長させ、電圧遮断後適当な時間間隔で部分放電開始電圧を測定。○は平均値、エラーバーの長さは標準偏差の 2 倍、▲は途中部分放電測定をせずに 64 時間放置後測定)

Fig. 3. Change in time of the partial discharge inception voltage: Measured after terminating the propagation of the tree at 150 μ m. The tree was generated by 4 kV voltage. Open circle (○) represents the average. The length of the error bar is twice the standard deviation. Closed triangle (▲) represents the result when no voltage had been applied during the recovery process until being measured at 64 hours.

図4 見かけのトリー長の時間変化 (4kV で発生したトリーを 150 μ m まで成長させ、●は電圧遮断後適当な時間間隔で部分放電開始電圧を測定しながら測定、▲は途中部分放電測定をせずに測定)

Fig. 4. Change in time of the apparent tree length: The same condition as Fig. 2. Closed circle (●) represents the result when partial discharge test had been periodically performed. Closed triangle (▲) represents the result when no voltage had been applied during the recovery process.

図5 トリー長と部分放電開始電圧の関係

Fig. 5. Relation between the apparent tree length and partial discharge inception voltage.

電圧が 6~7kV まで上昇している。このことは、トリーが見かけ上消失した後はトリー発生以前より絶縁性能が向上していることを示唆しているが、長期的安定性については検討を要する。

図4 は見かけのトリー長の時間変化を示す。途中で部分放電測定を実施しない場合、30~60 時間程度でトリーが見かけ上消失している。途中で部分放電測定を実施した場合でも、トリー長は時間とともに低下する傾向を示すが、その低下度合は部分放電測定を実施しない場合に比べて小さい。図5 はトリー長と部分放電開始電圧の関係を示す。見かけのトリー長と部分放電発生電圧の間により相関が見られ、トリーが消失していくことが部分放電特性の回復をもたらしていることが示唆される。

4. 考 察

〈4・1〉 電圧印加下における絶縁回復 実用的な絶縁系を勘案すると、過電圧によってトリーが発生した後、運転状態における絶縁回復を期待することになるため、ある程度の電圧を印加した状態での特性変化を観測した。まず、トリー発生後、 $150\ \mu\text{m}$ に成長した時点で一旦電圧を遮断し、その直後に部分放電開始電圧を測定したところ、平均 2 kV 程度であった。そこで、この電圧よりも十分低い電圧として 1 kV を印加し、部分放電の発生がないことを確認した上で、絶縁回復特性を調べた。

図 6 は部分放電発生電圧の経時変化を示す。図 3 に示した「電圧を印加しない状態での回復特性」と同様の回復特性が見られる。図 3 の場合と同様、電圧遮断後数十時間でトリー発生電圧以上に回復していることがわかる。

図 7 は見かけのトリー長の時間変化を示す。途中で部分放電測定を実施しない場合、電圧を印加しない状態と同様、 $30\sim 60$ 時間程度でトリーが見かけ上消失している。途中で部分放電測定を実施した場合でも、トリー長は時間とともに低下する傾向を示すが、その低下度合は部分放電測定を実施しない場合に比べて小さい。

以上より、部分放電が発生していない状態であれば、電

図 6 部分放電開始電圧の時間変化 (4 kV で発生したトリーを $150\ \mu\text{m}$ まで成長させ、電圧遮断後 $1\ \text{kV}$ を連続的に印加。適当な時間間隔で部分放電開始電圧を測定。○は電圧遮断後適当な時間間隔で部分放電開始電圧を測定しながら測定、△は途中部分放電測定をせずに測定)

Fig. 6. Change in time of the partial discharge inception voltage: Measured after terminating the propagation of the tree at $150\ \mu\text{m}$. $1\ \text{kV}$ was continuously applied after the tree propagation had been terminated. The tree was generated by $4\ \text{kV}$. Open circles (○) represent the result when partial discharge test had been periodically performed. Open triangles (△) represent the result when no test had been performed during the recovery process until being measured at 64 hours.

圧印加した状態であっても無課電と同様の絶縁回復特性を示すことがわかった。

〈4・2〉 絶縁回復のメカニズム 図 8 はトリー発生後電圧を遮断する前後におけるトリーの光学顕微鏡像の一部を拡大したものである。遮断の前後で径が変化している。図 9 に示すように、トリー径は電圧遮断後約 1 秒で一旦小さくなる。これは内圧の低下によるものと見られる。その後径がさらに縮小し、見かけ上消失するまでには $30\sim 60$ 時間を要した。

図 10 はトリーを模擬した針状の空隙を作って 36 時間経過の前後を観察した結果である。空隙は電界研磨したタングステン針をシリコンゴム中に埋め込んだ後、静かに引

図 7 見かけのトリー長の時間変化 (4 kV で発生したトリーを $150\ \mu\text{m}$ まで成長させ、電圧遮断後 $1\ \text{kV}$ を連続的に印加。○は電圧遮断後適当な時間間隔で部分放電開始電圧を測定しながら測定、△は途中部分放電測定をせずに測定)

Fig. 7. Change in time of the apparent tree length: The same condition as Fig. 6. Open circles (○) represent the result when partial discharge test had been periodically performed. Open triangles (△) represent the result when no test had been performed during the recovery process.

図 8 電圧遮断直後のトリー径の収縮

Fig. 8. Shrinkage of the tree observed shortly after cutting off the voltage.

図9 針先端近傍におけるトリー径の時間変化 (○は平均値)

Fig. 9. Change in time of the diameter of the tree in the vicinity of the needle tip: Open circle (○) represents the average.

図10 トリーを模擬した針状空隙の形状変化

Fig. 10. Change in time of the shape of the needle-shaped void simulating the tree.

き抜くことにより形成した。空隙部分は時間とともに短くなるが、詳細に観察すると先端部分に薄い痕跡が残っている。空隙を真空にした後に $10 \text{ mm}^2/\text{s}$ (10cSt) のシリコン油を注入すると同様の痕跡が見えることから、この部分はシリコンゴム中の低分子量成分が bleed out した液体で満たされていると考えられ、これが以下のように絶縁性回復メカニズムの一つとなっていることが示唆される。すな

図11 トリーが見かけ上消失した試料の顕微鏡画像: (a)電圧遮断直後, (b)トリー消失後 (コントラスト強調)

Fig. 11. Optical microscopies of the specimen of which the tree had disappeared: (a) shortly after cutting off the voltage (b) after the tree had disappeared (contrast emphasized).

わち、管状空隙内に bleed out した液体の挙動は拡散力と表面張力の半径方向成分との平衡成立の可否で決まる。拡散力とは、マトリクス中に再びしみ込もうとする力、表面張力は、滲み出した液体の表面積を下げるためにトリー管を液体自体で満たそうとする力と考えてよい。トリーの径が小さい場合は表面張力の半径方向成分が大きく空隙が埋まるが、径が大きくなると表面が濡れるのみで空隙は埋まらない。針状空隙は径が $5 \mu\text{m}$ 程度の部分まで埋められたところで空隙の形状に変化がなくなっており、直径 $5 \mu\text{m}$ 程度までのトリーが発生しても絶縁回復が期待できることを示唆している。

以上より、トリー消失メカニズムとして、内圧の低下によるものと低分子量成分の bleed out によるものがあることが示された。前者は数秒以内で完結するが完全なトリー消失に至らず、後者は数10時間かかって完結し、トリー管内は低分子量成分で満たされることが示唆された。

図2の写真では判別できないが、光学顕微鏡で詳細に目視すると、トリーが消失した部分でも薄く痕跡が残っており、図10に見られたような bleed out した低分子量成分で満たされた領域と類似した様相を示した。図11に示す光学顕微鏡画像は、トリー発生を検知して電圧を遮断した直後およびトリーが見かけ上消失した後のものである。トリーが見かけ上消失しても、コントラスト強調処理を施すと同図(b)のように薄く痕跡が現れる。この薄い痕跡の部分は低分子量成分で満たされているものと思われる。トリー内部が中空となっている場合には、固体部分との屈折率が大き

図 12 トリーの再発生実験：(a)最初のトリー発生，(b)トリー消失後に再発生させたもの
Fig. 12. Regeneration of the tree: (a) first generation (b) second generation after the first had disappeared.

く異なるために明瞭な痕跡が観察できる。この部分を満たす低分子量成分は分子構造が固体部分に類似しており，その屈折率はわずかに固体部分と異なる程度と考えられ，光学顕微鏡では非常に薄い痕跡となって観察されたものと考えられる。

一旦トリーが消失した試料に再び電圧を印加すると再びトリーが発生したが，図 12 に示すように，最初の電圧印加時に発生したトリーの経路とは必ずしも同じ経路を辿らなかった。低分子で満たされたトリー内部は，周囲に比較して電気伝導率が高くなっていると予想され，電圧を印加してもその部分に加わる電界が抑えられるため，再びトリー経路となることが起りにくいものと考えられる。このことはさらに，トリー消失後は針先端の電界が抑制される傾向をもたらすことを示唆する。トリー消失後の部分放電開始電圧，すなわち新たなトリーの発生電圧が最初の電圧印加時に比較して上昇したのは，このことによるものと考えられる。

5. まとめ

シリコーンゴムの自己絶縁回復性を調べた。トリーの成長が 150μm 程度の場合，電圧遮断することにより，常温では 30～60 時間程度でトリー発生前と同程度まで絶縁性能の回復が期待できることがわかった。部分放電が発生しないレベルの電圧を印加した状態でも同様の回復が期待できる。回復メカニズムとしては，短時間領域では電圧遮断後の内圧の低下による管径の収縮が，長時間領域では低分子量成分の bleed out が示唆された。回復が期待できるトリーの管径には限界があり，本実験で用いた試料では直径 5 μm 程度が自己回復性を期待できる限界であることが模擬実験

により示唆された。

以上のように，低分子量成分を含むゴム状材料では微小な局所破壊が生じてでも放電が持続しないかぎり絶縁回復が期待できる。一方，ポリエチレン等に比較してシリコーンゴムはコスト増をもたらすため，大量の使用を前提とする用途に向いているとは言えない面がある。従ってこのような特性を生かすためには，炭化水素系の低コスト材料で同様の特性をもつものを探索するか，あるいは少量で高付加価値の絶縁システムへの応用を検討することが必要である。後者の例としては，接続部や高压エレクトロニクス部品の封止など使用量がある程度限定されていて，かつ高信頼度を要求される部分があげられる。このような高付加価値絶縁においてはシリコーンゴムがもつ自己回復特性を有効に生かした設計が現実性をもちうると考えられる。

謝 辞

本研究は，電力技術産学共同研究連合第 2 フェーズ研究小テーマ「メンテナンスフリー絶縁方式の開発」の一環として実施された。関係各位に謝意を表します。

(平成 16 年 5 月 6 日受付，平成 16 年 8 月 9 日再受付)

文 献

- (1) G. Sawa, K. Arakawa, M. Nagano, and M. Ieda : "Conditions for Complete Self-healing Breakdown in Glow discharge Polymerized Styrene Films", *Thin Solid Films*, Vol.59, pp.131-141 (1979)
- (2) S. Mokry, S.Carter, J.Clemmer, and P.George : "Cable Fault Prevention Using Dielectric Enhancement Technology", Proc. 4-th Int'l Conf. on Insulated Power Cables (JICABLE 95), B.10.2 (1995)
- (3) T. Yamakita : "Temperature Dependence of Superstructure and Electrical Tree Initiation Voltage of Polyethylene", *T.IEE Japan*, Vol.117-A, No.6, pp.621-626 (1997-6) (in Japanese)
山北隆征：「ポリエチレンの高次構造と電気トリー発生電圧の温度依存性」，*電学論 A*, 117, 6, pp.621-626 (1997-6)
- (4) R. Takeuchi and J. Kusakawa : "Electrical Breakdown in Silicone Gel", Proc. of the 32st Symp. on Elct. and Elec. Insu. Mate. and Appl. in Syst., pp.45-48 (2000) (in Japanese)
武内良三・楠川順平：「シリコーンゲルの絶縁破壊」，第 32 回電気学会電気電子絶縁システムシンポジウム予稿集，pp.45-48 (2000)
- (5) N. Hozumi, M. Ishida, T. Okamoto, and H. Fukagawa : "The Influence of Morphology on Electrical Tree Initiation in Polyethylene under ac and Impulse Voltages", *IEEE Trans Elect. Insul.*, Vol.25, No.4, pp.707-714 (1990)
- (6) N. Hozumi, T. Okamoto, and H. Fukagawa : "Simultaneous Measurement of Microscopic Image and Discharge Pulses at the Moment of Electrical Tree Initiation", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.27, No.4, pp.572-576 (1988)

穂 積 直 裕

(正員) 1957 年 4 月 2 日生。1983 年 3 月早稲田大学大学院電気工学専攻博士前期課程修了。同年 4 月(財)電力中央研究所入所。1999 年 4 月豊橋技術科学大学電気・電子工学系助教授。現在に至る。工学博士。主として電気絶縁材料の劣化・破壊現象の解明，電力設備・小型電子部品の絶縁診断および絶縁性能向上，環境・医療診断用機器における信号計測と処理に関する研究に従事。1988 年，1998 年電気学会論文賞受賞。日本音響学会，IEEE 会員。

西岡 幸治

(非会員) 1978年4月25日生。2003年3月豊橋技術科学大学大学院工学研究科電気電子工学専攻修了。同年4月電気技術開発株式会社入社。現在に至る。主として電気鉄道の信号システムに関する設計に従事。

末松 武志

(学生員) 1980年4月15日生。2003年4月豊橋技術科学大学大学院工学研究科電気電子工学専攻入学。現在に至る。電気絶縁に関する研究に従事。

村上 義信

(正員) 1974年4月19日生。2001年4月長野工業高等専門学校・電気工学科助手。2002年3月豊橋技術科学大学大学院工学研究科博士後期課程修了。2003年8月豊橋技術科学大学・技術開発センター助手。現在に至る。博士(工学)。主として、極低温領域から室温領域における絶縁材料中の内部蓄積電荷に関する研究に従事。2000年電気学会優秀論文発表賞受賞。

長尾 雅行

(正員) 1950年4月16日生。1978年3月名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同大学助手を経て1980年4月豊橋技術科学大学電気・電子工学系講師、1985年4月同大学助教授、1998年4月同大学教授。現在に至る。工学博士。主として、高分子の高電界電気物性・絶縁劣化現象に関する研究に従事。1991年電気学会論文賞受賞。応用物理学会、IEEE、CIGRE、低温工学協会会員

坂田 博

(非会員) 1952年3月3日生。1972年3月佐世保工業高等専門学校卒業。同年4月九州電力(株)入社。2002年7月より2004年6月まで同社総合技術研究所勤務。電気絶縁および画像処理に関する研究に従事。現在配電部配電技術試験センター課長。