UDC 621.315.616.96.015.51
537.528

論 文

47-A 48

固体絶縁物の表面を滑走する部分油中放電
による分路貫通破壊

名城大学 縄 田 正 人

名城大学 河 村 英 昭

名古屋大学 家 田 正 之

1. ま え が き

最近、電気絶縁材料としての高分子の進出は目ざましいものがある。特に電力需要の増大は、電力系統および関連電気機器の高電圧化に拍車をかけるとともに、負性ガスおよび高分子の発展を背景として、機器の小形化の傾向も助長されつつある。このような状況下においては、絶縁構成のなう電位の傾きは一段と高くなり、電気絶縁に対して新しい多くの問題が提起されてきた。

一般に、高分子絶縁材料は周辺効果などを除去したとき、それらが本質的にもつ絶縁破壊の強さは、室温付近において数 MV/cm 以上を示している。⁽¹⁾ このように電気絶縁材料として基本的にすぐれた性質をもっている、実用の機器に適用した場合、その性能をじゅうぶんに発揮できるとは限らない。事実、比較的肉厚の固体絶縁物においては、前述の基本的絶縁破壊の強さより約 1/10 以下に見かけの絶縁破壊の強さが低下し、かつ厚さを増しても比例的に破壊電圧は上昇しないことが知られている。⁽²⁾ このような原因の一つに、部分放電とそれに伴う劣化があり、内外で活発な研究が行なわれている。

筆者らの一人は、フィルム状の高分子を用いて気中および油中のコロナ放電を経由した高分子の絶縁破壊

について検討し、コロナ放電による不平等電界の確立と、これが電子の注入によって形成される高分子内の空間電荷によって変調されるという機構を提案した。⁽³⁾ 井関氏らは⁽⁴⁾ 油中コロナの有害性からみた油中コロナのふるまいについて検討を行なっている。しかし、肉厚の固体絶縁系に関するこのような研究は、実用上重要であるにかかわらず、まだじゅうぶんに明らかにされていないようである。Dronsek 氏ら⁽⁵⁾ は固体絶縁物に凹部を設けてそう入した棒電極と平板電極の間に交流電圧を印加して、試料の表面に油中沿面コロナを滑走させた場合の絶縁破壊現象を観察している。対象となる試料が比較的抵抗率の大きい均質固体絶縁物 ($10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上) であれば、Nebendurchschläge (本文では分路貫通破壊という) と称する形態の全路破壊が生じることを明らかにした。このような特殊な破壊形態を示す分路貫通破壊の生成機構については、いまだじゅうぶんにその解析が行なわれていないようである。

以上の観点から、筆者らは実用機器に適用されるような比較的肉厚の高分子絶縁材料を対象として、たとえば埋設された半球棒対平板電極系において、全路破壊が起こるまでに観察される分路貫通破壊の生成過程を調べ、これらと油中の沿面コロナ放電との関係を明らかにし、油中沿面コロナによる固体表面の局部浸食から沿層および厚さ方向の樹枝状模様の破壊を経て、分路貫通破壊が完成される一連の現象について報告を行なってきた。^{(6)~(9)}

本論文は、これらの結果をまとめたものであり、油浸複合絶縁系における絶縁設計の基礎資料を提供するだけでなく、油中コロナによる局部破壊から究極の

Side path Puncture Breakdown (Nebendurchschläge) Caused by Partial Oil Discharge along Surface of Solid Insulators. By M. NAWATA, Member, H. KAWAMURA, Member (Faculty of Science and Technology, Meijo University) & M. IEDA, Member (Faculty of Engineering, Nagoya University).

縄田正人：正員，名城大学理工学部電気工学科助教授

河村英昭：正員，名城大学理工学部電気工学科助手

家田正之：正員，名古屋大学工学部電気工学科教授

第1図 電極配置図

Fig. 1. Electrode assembly.

全路破壊へ推移する機構を考察するうえにおいても、きわめて有意義であると思われる。

2. 試料と実験方法

試料としてはポリエチレン(PE), ポリカーボネート(PC), ポリスチレン(PS), ポリ塩化ビニル(PVC), フェノール樹脂(基材が紙および布の2種)を用いている。これらの試料はいずれも板状(100×100×(厚さ)3~5mm)であり、第1図に示すような電極~試料系となっている。分路貫通破壊が生じやすい電極系としては棒-平板電極が望ましく、棒電極の直径(ϕ)が $0.2\text{mm} \leq \phi \leq 4.0\text{mm}$ の大きさにおいて生じると報告された結果もある。⁽⁵⁾

筆者らは試料の凹部と平板電極間ではできるだけ平等電界を形成することを目指して、半球棒電極($\phi=5\text{mm}$, 先端曲率: $2.5r$ ステンレス鋼製)を用いた。したがって、試料の中央部には半球棒電極がそう入できるように同じ形状の凹部を設けている。この凹部作成時の機械的ひずみを極力除去するため約 100°C で熱処理を行なった。また、試料厚さを測定するためマイクロメータに直結した電極系を用いた。その後、試料の凹部には銀ペイント(DuPont社製)を塗付している。

実験に際しては、第2図の実験回路に示すように電極-試料系を変圧器油(絶縁耐力: $20\text{kV}/2.5\text{mm}$)を満たしたガラス容器に入れて、交流電圧(60Hz)を 1kV/s の上昇速度で印加した。そして、次のような諸特性について実験を行なった。

(I) 試料の凹部最小厚さ(d)を変化させ、次のような絶縁破壊現象の観察。

(i) 棒電極直下の直接貫通破壊より分路貫通破壊が先行する電圧の測定。

(ii) 分路貫通破壊を生じるときの高電圧側の電

第2図 実験回路

Fig. 2. Experimental circuit.

圧の極性。

(iii) 棒電極直下の直接貫通破壊電圧特性。

(2) 油中沿面コロナの放電特性。

(3) 分路貫通破壊の生成過程の観察。

(3) 項の実験においては、(1) 項の実験結果をもとにして分路貫通破壊が先行する電圧を V_{bc} として、その電圧値に対応する試料の凹部最小臨界厚さ(d_c)を求め、 d_c の1.5倍の凹部最小厚さの試料に V_{bc} の60~90%の一定電圧を印加して観察している。これらの実験に用いた変圧器油は、使用中の劣化および不純物の混入を極力避けるため、試料ごとに真空ろ過を行ない、一定の耐電圧を有するものと取り換えている。

3. 実験結果

〈3・1〉 分路貫通破壊現象の観察 第1図に示すような試料-電極系のもとで交流電圧を印加すると、試料の幾何学的形状によって凹部直下で絶縁が破壊する場合と分路貫通破壊が生じる場合とがある。このとき分路貫通破壊が先行する試料形状(このときは板状の形状厚さ D を一定とし、凹部最小厚さ d を変化させる)の関係を求めた。

第3図は D が 5mm の試料に 1kV/s の電圧上昇速度で交流電圧(60Hz)を印加した場合の結果で、 d がある限度厚さに達するまでは油中沿面コロナが発生しても半球棒電極の直下を破壊している。すなわち、PE, PS, PVC, PC 試料では d が約 $(1/10)D$ より大きな値を示すようになると、半球棒電極より離れた試料表面から貫通破壊を生じるようになる。いわゆる、分路貫通破壊が直接貫通破壊より先行する。このような現象は後述の油中沿面コロナの放電特性からも推察できるように、活発な油中の沿面コロナが主要な因子として強力に作用している。試料が油中沿面コロナにさらされると試料表面は徐々に侵食され、印加電圧が油中コロナ発生電圧の約2倍以上になると樹枝状模様のこん跡が沿面方向に生成する。このようなこん

第 3 図 試料の凹部最小厚さ (d) と貫通破壊電圧 (V_b) との関係

Fig. 3. Relation between minimum thickness (d) in recessed part of samples and puncture breakdown voltage (V_b).

跡が油中コロナの集中により局部的に炭化する、その部分にシンチレーション模様の放電（輝点の発生）が観察されるようになる。その後、わずかの電圧上昇で分路貫通破壊が完了する。

第 4 図は分路貫通破壊が生じた直後に電源をしゃ断し、試料表面に生じたこん跡に沿って切断し、その破壊通路を顕微鏡で観察した PE 試料の横断面図の一例である。この結果、分路貫通破壊は沿層方向と厚さ方向の二つの破壊過程をもつことが明らかになった。

〈3・2〉 分路貫通破壊電圧と輝点および破壊孔の相互位置ならびに電圧極性 分路貫通破壊は試料表面に輝点が発生して後に完成される。この輝点発生位置と分路貫通破壊の完了後に平板電極側に生じた破壊孔は試料の材質によって異なっている。第 5 図は半球棒電極の中心より輝点発生位置までの距離を a （複数の場合は最遠点）、破壊孔までの距離を b とした場合の PE、PC 試料の結果である。印加電圧が大きいほど電極より遠い点で輝点および破壊孔が生じている。また、同じ電圧でも PE のほうが PC よりそれらの位置が電極に近づくことがわかった。⁽⁷⁾

次に印加電圧の極性に関して、分路貫通破壊が完成する最終段階は、半球棒電極に印加電圧の正波が課電されたときに全路破壊にいたる確率が高く、試料の約 95% がいずれも正波の最大値近傍で生じている。第 6 図は分路貫通破壊前の油中沿面コロナ放電の一例で、正波における効果を明らかに示している。⁽⁸⁾

〈3・3〉 油中沿面コロナの放電特性 分路貫通破

第 4 図 ポリエチレンの分路貫通破壊の形態

Fig. 4. Shape of side path puncture breakdown in polyethylene.

第 5 図 分路貫通破壊における輝点と破壊点の位置
Fig. 5. Distances of bright spot and breakdown point from the electrode center in the side path puncture breakdown.

壊の生成には、試料表面を滑走する油中沿面コロナが強力に作用していることが前項までの実験結果で明らかである。同様な実験条件で印加電圧に対する油中沿

第 6 図 貫通破壊前の部分放電オシログラム

Fig. 6. Oscillogram of partial oil discharge before puncture breakdown.

面コロナの最大放電電荷 ($Q_{\max}$) の関係を測定した。すなわち、印加電圧を段階昇圧するとき電圧が約 20 kV に達すると、試料表面に接する棒電極の部分から初めて不規則ではあるが油中コロナが発生する。(この電圧を以後コロナ開始電圧と呼ぶ) この不規則油中コロナは約 30 kV までは、その放電電荷はほぼ一定で約 1×10^3 pC を示した。さらに印加電圧が上昇し、コロナ開始電圧の約 1.5 倍以上の電圧になると油中コロナは試料面を規則的に滑走するようになる。その一発の放電電荷は印加電圧の増加とともに大きくなる。この場合、正波に対する放電電荷と負波のそれとの比は約 2 対 1 を示している。また、印加電圧がコロナ開始電圧の 2 倍をこえるようになると、非常に輝度の高い規則性沿面コロナに移行する。この放電範囲においてはコロナの発生ひん度はサイクルごとに正波で 2~3 発、負波で 1 発の発生を示した。第 7 図は試料として PE を用いた場合の結果である。⁽⁸⁾

〈3.4〉 分路貫通破壊の生成過程の観察 分路貫通破壊の生成過程を明らかにするため、試料の幾何学的形状が $d = (1.5/10) D$ の関係を有する試料を用い、〈3.1〉 節の実験で観測した V_{bc} の 60~90% の一定電圧を印加し、全路破壊にいたる時間的経過を測定するとともに、分路貫通破壊の生成過程を微視的に観察した。たとえば、PE 試料ではその印加電圧が 60% V_{bc} の場合は油中沿面コロナは不規則に発生し、120 分印加後においても試料表面には炭化したような樹枝状のこん跡は生成せず、わずかな侵食が観察されるのみである。前述のようなシンチレーション模様の放電(輝点の発生)は認められない。しかし、印加電圧を 70% V_{bc} 以上にすると、油中沿面コロナがサイクルごとに規則的に発生するようになる。段階昇圧(1 kV/s)における場合の現象と同様に、試料表面は侵食から樹枝状のこん跡へと次第に変化し、輝点の発生を経て分路貫通破壊に発展した。第 8 図は PE, PVC 試料の $V \sim \log t$ 特性である。このように輝点の発生および引き続き貫通破壊が完成されるまでの時間 (t) は、いずれも大きな電圧依存性を示しており、次のような実験式で与えられる。

$$t = A \exp(-nV) \dots\dots\dots (1)$$

第 7 図 印加電圧に対する油中コロナの放電特性
Fig. 7. Applied voltage vs. partial oil discharge characteristics.

第 8 図 分路貫通破壊の電圧依存性

Fig. 8. Voltage dependences on the times to form the bright spot and to complete the side path puncture breakdown for PE and PVC.

ただし、 A, n : 定数

電圧印加から輝点の発生および分路貫通破壊が完成するまでの時間は、印加電圧と負の指数関数の関係を示している。また、この期間中に固体試料の内部では次のような局部破壊現象が生じている。すなわち、試料を取りだし表面の損傷に沿った横断面を顕微鏡で観察した結果、第 9 図のような現象が観察できた。(a) 図は輝点発生のみられなかった 60% V_{bc} 、120 分印加後の試料を観察した結果である。固体中を沿層方向へ約 0.2 mm 位の深さまでクリープした樹枝状の放電管路が進展している。(b) 図は 70% V_{bc} 印加において輝点が発生した後の試料を観察した結果である。試料表面下に樹枝状の放電管路が (a) 図のように進

(a) 輝点発生前

(b) 輝点発生後

第9図 輝点発生前後における局部破壊径路の状況
Fig. 9. Partial breakdown paths before and after appearance of the bright spot.

展するだけでなく、試料表面に生じた輝点の直下付近から厚さ方向（電界方向）へ向かって深く進展する樹枝状放電管路が観察できた。このように輝点の発生前後で固体中における局部破壊の様相が変化することが明らかになった。

4. 考察およびまとめ

周辺効果などを極力除いた電極-試料系における試料の厚さ（ d ）と絶縁破壊電圧（ V_b ）の関係は、一般に次のような実験式が与えられている。

$$V_b = k d^n \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 k , n : 定数

筆者らの用いた電極-試料系においては、第3図の実験結果に見られるように試料の凹部最小厚さに対する破壊電圧特性は、同様に（2）式の実験式で示すことができる。第1表はこの特性曲線の傾きから求めた絶縁破壊の強さ（ $E_b = V_b/d$ ）と（2）式の定数を示す。 E_b は各試料とも直流電圧で得られ、基本的絶縁破壊の強さ（ E_f ）として知られている値の約 0.2 倍

第10図 フェノール樹脂の油中コロナによる浸食
Fig. 10. Erosion of phenol resin due to partial oil discharge.

第1表 試料の（1）式における定数

Table 1. Constants in equation (1) for test specimens.

試料	PE	PC	PS	PVC	フェノール	
					紙	布
$k (\times 10^3)$	13.0	8.3	10.0	10.0	3.7	1.9
n	1.0	1.0	1.0	1.0	0.89	0.55
$V_b/d (\text{MV/cm})$	1.3	0.83	1.0	1.0	—	—

程度を示している。また、（2）式の定数は PE, PS, PC, PVC 試料においては分路貫通破壊が先行するようになる最小臨界厚さ（ d_c ）までは $n=1$ を示している。フェノール樹脂においては基材によって定数（ n ）は変化し、かつ $n < 1$ の関係を示している。しかも、その絶縁破壊の形態は油中沿面コロナによる試料表面への影響が著しいにもかかわらず、（第10図参照）凹部の半球棒電極直下における直接貫通破壊を示すのみで分路貫通破壊は生じなかった。また d が大きくなれば、その破壊電圧は分路貫通破壊を生じる PE などの試料よりも逆に高い値を示すという興味ある結果を示している。その原因については、油中コロナの集中性などと関係するものと思われるが、詳しいことはわかっていない。

次に、試料凹部の半球棒電極直下における直接貫通破壊よりも分路貫通が先行する電圧（ V_{bc} ）は $\text{PVC} \approx \text{PC} < \text{PS} < \text{PE}$ の順で大きくなっている。（第3図参照）これは油中沿面コロナに対する高分子の性能を示す一つの傾向と考えられる。このような油中沿面コロナによる分路貫通破壊の生成過程は、第9図の顕微鏡による観察結果からも明かなように、油中コロナによるトリッキング破壊を示唆している。輝点の発生から分路貫通破壊が完成するまでの課電時間から推定すると、樹枝状破壊が試料の厚さ方向へ進展する速度は 10^{-2} mm/s のオーダーとなる。このように試料表面において、いったんシンチレーション模様の放電が発生すると分路貫通破壊がきわめて容易に完成されることがわかった。

以上のように、油浸状態にある肉厚の有機固体絶縁物の絶縁破壊現象を微視的観察により検討した。その結果を要約すると次のようである。

（1） PE, PS, PC, PVC 試料では、第1図に示した実験条件のもとで d が $(1/10) D$ 以上の厚さになると分路貫通破壊を生じる。この分路貫通破壊が直接貫通破壊よりも先行する電圧 V_{bc} は $\text{PVC} \approx \text{PC} < \text{PS} < \text{PE}$ の順で大きくなり、油中沿面コロナに対する一つの性能を示している。

（2） 分路貫通破壊は固体中を沿層方向と厚さ方向

の二つの破壊過程を経て完成する。その最終段階は半球棒電極に正波が加わったとき生じる確率が高い。

(3) 油中沿面コロナは印加電圧が約 20 kV に達すると不規則に発生し、約 30 kV 以上になると規則的に発生する。その場合、正波で数発、負波で 1 発のコロナが生じる。その放電電荷の大きさは電圧とともに増大するが、正波に対する放電電荷と負波のそれとの比は約 2 対 1 である。

(4) 油中沿面コロナにより分路貫通破壊が完成されるまでの時間は、印加電圧と負の指数関数の関係を示す。

(5) 分路貫通破壊の生成過程は、油中沿面コロナの集中に起因したトリッキング破壊を示唆している。試料表面にいったんシンチレーション模様の放電（輝点）が発生すると、きわめて容易に分路貫通破壊が完成する。

最後に、試料作成にご援助いただいた日本高压電気(株)技術研究所の梶田年男、志知美昭両氏に謝意を表します。この研究の一部は文部省科学研究助成(試験研究) 代表者 名古屋大学 家田正之教授の援助で行なった。

(昭和 46 年 7 月 28 日受付, 同 46 年 12 月 20 日再受付)

文 献

- (1) たとえば、電気学会：放電ハンドブック 276 (昭 33-8)
- (2) たとえば、W. G. Oakes: Proc. Instn Elect. Engrs **95**, 36 (1948)
- (3) 家田・沢・宮入・篠原：電学誌 **90**, 956 (昭 45-5)
- (4) 井関：昭 46 電気学会全国大会シンポジウム S2
- (5) G. Dronsek & D. Kind: ETZ-A **86**, 636 (1965)
- (6) 縄田・河村・家田：昭 43 電気四学会東海支部連大 9a-G-2
- (7) 縄田・河村・家田：昭 44 電気四学会東海支部連大 3a-D-5
- (8) 縄田・河村・家田：昭 45 電気四学会連大 107
- (9) 縄田・河村・家田：第 4 回電気絶縁材料シンポジウム I-5 (昭 46-9)