油浸 PPLP の交流絶縁破壊機構に関する一考察

正員 村田 正男 (長岡技術科学大学)

学生員 西村 政信 (長岡技術科学大学)

非会員 白瀬 光章 (長岡技術科学大学)

非会員 佐藤 利明 (長岡技術科学大学)

非会員 松浦 光夫 (長岡技術科学大学)

A Consideration on AC Breakdown Mechanism of Oil-Impregnated PPLP System.

Masao Murata, Member, Masanobu Nishimura, Student Member, Mitsuaki Shirase, Non-member, Toshiaki Sathou, Non-member, Mitsuo Matsuura, Non-member (Nagaoka University of Technology)

PPLP is a prominent insulating material with high dielectric breakdown strength and low dielectric loss, which has been in practical use for OF cables in EHV/UHV transmission system. Nevertheless, the dielectric breakdown mechanism of oil-impregnated PPLP system has not been cleared sufficiently.

This paper demonstrates that the relationship between the ac partial discharge properties and the dielectric breakdown mechanism of an oil-impregnated PPLP can be clarified by using a needle-plate electrode system. In this paper, we came to the conclusion that the ac partial discharge properties of an oil-impregnated PPLP can be roughly divided into five types which are caused by the dielectric breakdown of each part in the oil-impregnated PPLP system : oil layer part, kraft paper part and PP-film part.

キーワード：油浸 PPLP, 針対平板電極, 部分放電, パターン分け, モデル化

1. はしがき

PPLP は、超高電圧ならびに超々高電圧電力ケーブル用ポリプロピレンラミネート紙 (Polypropylene Laminated Paper) の略であり、2枚のクラフト紙間にポリプロピレン (以下、PP と略記する) を押し出し成形した、従来のクラフト紙に代わる新合成紙である⁽¹⁾。

優れた電気特性を有する PPLP は、実用化されて日が浅いため、特性解析の面では不明な点が少なくない。例えば、積層油浸 PPLP 系の絶縁破壊を例にとると、油浸クラフト紙ならびに油浸 PP 単独使用の場合からは、到底推察しえない PPLP 系特有の破壊現象が発生する。

しかしかかる現象の発生機構については、現在までのところ、未解明の部分が少なくない。その主な理由は、PPLP がクラフト紙と PP フィルムの単なる積層物ではなく、PP のラミネート紙であること、すなわち、クラフト紙中の繊維間に PP が深く食い込み、クラフト紙と PP フィルムが密着構造を形成しているためである⁽²⁾。

先般来、筆者らは、油浸 PPLP 系の雷インパルス絶縁破壊について、PPLP のラミネート構造に注目して雷インパルス絶縁破壊に対する系内弱点部の除去対策を検討してきた^{(3)~(5)}。なお、そこで提唱した弱点部除去の基本対策は、800kV(AC) 用ならびに 500kV(DC) 用の電力ケーブルに適用され、目下、実用化に向けて諸準備が進められている。

本論文では、油浸 PPLP の交流絶縁破壊について、部

分放電の開始から絶縁破壊に至るまでの部分放電波形をパターン化することによって、破壊機構解明の糸口とするとともに、油浸 PPLP の交流絶縁破壊におよぼす PPLP ラミネート構造の効果についても、併せて言及している。なお、部分放電波形については、それを一目見ただけで、どこまでがクラフト紙で、どこからが PP フィルムに関わる部分であるかを直ちに確定することは、一般には至難であるが、針対平板電極を用いることで、その識別が可能となることを本論文は実証している。

2. 実験方法

<2・1> 実験装置 本文で使用した実験装置を図 1 に示す。実験装置は、操作盤、変圧器、アナライジングレコーダ、パーソナルコンピュータ、部分放電測定器で構成されている。外部雑音の低減を図るため、実験装置付近から導電率の高いものを取り除き、またケーブルを架空にすることにより、接続端子以外での接触を避けた。その結果、外部雑音による放電電荷の影響は実験を通して数 pC 以下となることを確認した。

<2・2> 電極構成 本文で使用した電極を図 2 に示す。上部電極には、先端曲率半径 $5[\mu m]$ の針状電極、材質：硬質ステンレス (sus-304)、硬度：ビッカース HV-650~750 を使用した。上部電極をリード線用の皮膜で覆うことにより、電極の先端付近以外での放電を防止した。下部電極に

図 1 部分放電測定系の概略図

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental system for partial discharge pulse measurement.

は、直径 75[mm] の平板電極（真鍮製）を使用した。図中の上部電極－アクリル間に挿入した真鍮円盤は絶縁破壊時に衝撃が生じて上部電極を固定しておくためのもりとして使用したものである。またアクリルは、真鍮と上部電極の間での放電を防ぐためのものである。上部電極－試料間ギャップの長さをストップの調節により 0.5[mm] 一定とした。これは電界の集中を図り、また上部電極が試料に刺さらないようにするためである。

図 2 試料および電極構成

Fig. 2. Sample and electrodes configuration.

<2・3> 実験方法 試料の作成にあたっては、厚さ 125 μm 、PP 分率 42% の PPLP を 120 $^{\circ}\text{C}$ で 12 時間真空乾燥した後、脱気脱水した DDB（ドデシルベンゼン）を室温で 24 時間含浸した。実験時の油圧は、ゲージ圧で 0[kg/cm 2] とし、試料が破壊に至るまで商用周波数 50[Hz] を 0.7 ~ 0.8[kV/sec] の定速度で昇圧、印加した。なお、部分放電測定器で検出された部分放電波形のデータは、アナライジングレコーダを経てパーソナルコンピュータへ転送した。

本文の実験手順は、つぎの 3 つに大別される。

- (1) 油浸 PPLP の交流絶縁破壊過程における部分放電発生機構を解明すべく、パーソナルコンピュータによるオンライン化を図り、印加電圧の各サイクル毎に放電電荷発生数、最大放電電荷およびアンバランスパラメータを求めるシステムを開発し、そのデータ処理結果を概観することにより、油浸 PPLP で発生する部分放電パターンを概括的にとらえる。
- (2) アナライジングレコーダの結果をもとに、電圧印加直後から絶縁破壊に至るまでの部分放電波形を詳しく観

察し、PPLP 1 枚の場合の部分放電波形をパターン化する。これと併せて、油層のみ、クラフト紙 1 枚、PP フィルム 1 枚の部分放電波形をそれぞれパターン化し、上記のパターンと対比する（但し、油層：電極構造によって生じる油隙、クラフト紙：厚さ 47.5 μm のケーブル絶縁用クラフト紙、PP フィルム：厚さ 125 μm の PPLP より両面のクラフト紙を剥離したもの（約 73 μm 厚）、である。）。

- (3) 油浸 PPLP で発生する部分放電波形の各パターンについて、その発生機構をモデル化する。

3. 部分放電パルスの統計的検討

本文で開発した計算システムを、図 3 に示す。このシステムの特徴は、周期分割プログラムを開発したことである。すなわち同プログラムを使用することで、連続的に記録した部分放電波形のデータを印加電圧の周期毎に分割し、必要時刻の一周分を取り出し可能にしたことである。なお、本文では一周分の統計量として、以下に示す 2 つの統計的パラメータを求めた。

- (1) アンバランスパラメータ⁽⁶⁾ : U

- (2) 最大放電電荷 : Q_{max}

これらは、印加電圧位相との関係を明らかにするため同電圧一周分の位相を 10 等分し、各位相区間 ϕ_i ($i =$

図 3 部分放電波形解析システム

Fig. 3. Partial discharge pulse data analyzing system.

(a)正サイクル時の各位相におけるアンバランスパラメータ

(b)負サイクル時の各位相におけるアンバランスパラメータ

図4 アンバランスパラメータ U の変化

Fig. 4. Transition in the unbalance parameter: U . (a)Positive cycle. (b)Negative cycle.

1, 2, ..., 10) におけるそれぞれの値を算出した。また、アンバランスパラメータの算出にあたっては、穂積氏⁽⁶⁾ らによって提案された式を拡張した下記の式 (1) を使用した。

$$U_i = \frac{\sum \phi_i q^+ + \sum \phi_i q^-}{\left| \sum \phi_i q^+ \right| + \left| \sum \phi_i q^- \right|} \dots\dots\dots (1)$$

(ここで、 $\sum \phi_i q^+$ および $\sum \phi_i q^-$ は、それぞれ位相区間 ϕ_i における正または負の放電電荷の総和を表している。)

図4にアンバランスパラメータ、図5に最大放電電荷の算出結果の一例を示す。この両図から分かるように、油浸PPLP一枚におけるアンバランスパラメータおよび最大放電電荷は、とりわけ、位相区間 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 および ϕ_6, ϕ_7, ϕ_8 に

(a)正サイクル時の各位相における最大放電電荷

(b)負サイクル時の各位相における最大放電電荷

図5 最大放電電荷量 Q_{max} の変化

Fig. 5. Transition in the maximum discharge amount. (a)Positive cycle. (b)Negative cycle.

注目し、その変化を概観すると、つぎの様な特徴があげられる。

- (1) 印加電圧が1 [kV] 前後にて、位相区間 ϕ_1, ϕ_7, ϕ_8 および ϕ_4, ϕ_5 では、アンバランスパラメータが負から正に変化する(例: 図4 ϕ_1 中、矢印(1)参照)。このとき、最大放電電荷に大きな変化は見られない。
- (2) 印加電圧が約1[kV]~13[kV] にかけては、アンバランスパラメータは、正負どちらかの極性を維持し、最大放電電荷も、電圧の上昇にもかかわらず、小さな値を維持している(例: 図4 ϕ_1 , 図5 ϕ_1 中、矢印(2)参照)。
- (3) 印加電圧が約13[kV] を越えたあたりで、注目の位相区間において(但し、 ϕ_1 のみ遅れて約13.5~14[kV] から)、両パラメータは大きな変化を見せる。アンバラ

ンスパラメータは、その極性を正負に激しく変化しはじめ、最大放電電荷は、急激な増加を示した（例：図 4 ϕ_2 、図 5 ϕ_2 中、矢印 (3) 参照）。ただし、最大放電電荷の増大傾向は、正負のサイクルで明らかに異なる。正および負のサイクルについて、最大放電電荷を比較すると、正のサイクル ($\phi_1 \sim \phi_3$) に比べて負のサイクル ($\phi_6 \sim \phi_8$) の方が明らかに小さい。また、その後の電圧上昇に対する増加傾向にも相違が見られる（例：図 5 ϕ_6 中、矢印 (4) 参照）。

なお、図 4 および図 5 に示した印加電圧については、測定試料によって多少異なるものの、各パラメータの変化は時系列的に見て、全ての試料を通して共通している。このことから本研究を始めるにあたり、油浸 PPLP 1 枚が絶縁破壊に至るまでに発生する部分放電の波形には、一定の放電パターンが存在し得ることを確信した。そこで、アナライジングレコーダの測定結果をもとに、記録された部分放電波形について、逐一詳細な検討を試み、次のようなパターン分けを行った。

4. 部分放電波形のパターン化

図 6 (A)~(E) は、油浸 PPLP 1 枚における部分放電波形を、印加電圧の上昇に伴ってパターン分けした結果の一例である。なお、同図では、部分放電の発生状態と印加電圧の位相との関係を明示するため、印加電圧と同位相の sin 波を部分放電波形と重ねて示した。また、図中 (E) の後半部に見られる試料破壊時の短絡現象によって発生したものとと思われる波形については、今回のパターン化、分類の対象外とした。以下に各パターンの特徴を示す。

パターン 1 印加電圧の正負に関係なく、周期的で小さな部分放電が観測される（図 6(A) 参照）。

パターン 2 印加電圧の正負に関係なく、パルス状の部分放電波形がパターン 1 に重畳して観測される（図 6(B) 参照）。

パターン 3 印加電圧が正サイクルの時に限り、大きなパルス状の部分放電波形が散見される（図 6(C) 参照）。

パターン 4 印加電圧が正のサイクルではパターン 3 と大差はないが、負のサイクルにおいても、小さな部分放電パルスの群発が観測される（図 6(D) 参照）。

パターン 5 印加電圧の正負に関係なく、多くの部分放電パルスが観測されるが、特に、負のサイクルにおける放電が非常に活発となる（図 6(E) 参照）。このパターンの発生後、油浸 PPLP は全路破壊に至る。

ここで、正負サイクルにおける部分放電パターンの違いに注目すると、パターン 1 から 5 は、次のように大きく 3 つの過程に分類される。

過程 1 (パターン 1・2) 過程 1 では、両者の形状は異なるものの、正負のサイクルにおいて、同じ様な部分放電パターンが見られる。

過程 2 (パターン 3・4) 過程 2 では、正サイクルにおいて単発で大きなパルスが見られるものの、負サイク

図 6 部分放電波形の分類

Fig. 6. Classification of partial discharge waveforms.

ルでは、放電パルスが見られないか、見られてもその大きさは正サイクルのそれに比べて大変小さい。

過程 3 (パターン 5) 過程 3 は、絶縁系の全路破壊に至る最終段階であり、印加電圧の極性に関係なく、放電パルス数は増大する。

また、これらの過程および詳細なパターンに対する再現性は、試料を替えて実験回数を重ねることで、十分実証された。さらに、試料に対する乾燥および含浸条件を変えることにより、パターン 2 またはパターン 3 の欠落などが見られるものの、過程 1 から 3 への流れ自体については何等の変化もないことを確認している。なお、前処理条件の違いによる詳細なパターンの違いについては、紙面の都合上、別の機会に譲りたい。

そこで次に、各パターンの発生位置とその要因を究明し、油浸 PPLP 交流絶縁破壊機構解明の糸口を得るため、前述の油浸 PPLP における実験方法に従って、複合絶縁系である油浸 PPLP の構成要素、クラフト紙、PP フィルム、および電極構造によって生じる油層、の 3 つの試料について部分放電波形をそれぞれ測定してパターン化し、油浸 PPLP 1 枚のそれと対比した。その対比結果を表 1 に示す。なお、表 1 では、すべての試料について全路破壊時の短絡現象と思われる波形（例えば、図 6(E) 後半部の波形）に関しては、油浸 PPLP 1 枚の場合と同様、今回の分類および検討対象からは除外した。

表 1 各試料における部分放電波形パターンの対比
Table 1. Comparison of PD-patterns among PPLP, oil layer, Kraft paper and PP film.

同表から分かるように、各構成要素における部分放電波形は、油層のみの場合はパターン 1、クラフト紙 1 枚の場合はパターン 1 およびパターン 2、また PP フィルム 1 枚の場合はパターン 1 の後、パターン 3～5 が検出された。

その結果から、過程 1（パターン 1、2）は主に油浸クラフト紙層の絶縁破壊と、また過程 2 および過程 3（パターン 3～5）は油浸 PP フィルム層の絶縁破壊と、それぞれ密接に関連しているものと推察される。そこで次章では、油

浸クラフト紙層および油浸 PP フィルム層にわけて、過程 1 から 3 との関連を究明すべく、それぞれにおける部分放電発生メカニズムについて検討を加えた。

5. 油浸 PPLP 交流絶縁破壊過程のモデル化

<5・1> 油浸クラフト紙層 油浸クラフト紙の絶縁破壊に関しては、一般に次のようなことが知られている。絶縁油の誘電率が油浸紙のそれに比べて小さいことから、電界は油浸紙を構成する油膜部分に集中する。また、絶縁油の絶縁耐力は油浸紙のそれに比べて低いことから、絶縁破壊は先ず油膜部分から始まり、油中部分放電が発生する。さらに、純粋な絶縁油における破壊前駆現象は、絶縁油の液層中に発生するのではなく、液層が気層に相転移を起こした後に発生することが明らかとなっている⁽⁷⁾。

ここで、我々の実験における過程 1（油層および油浸紙層）での部分放電発生を、生成された気層によるものと仮定すると、気層生成に対し次の 3 つの要因が考えられる。

- (1) 油中の吸蔵ガスや溶解ガス、および電極表面に付着しているガス。
- (2) 乾燥および含浸処理工程において、PP から油中に溶出した微量の低分子量分子の相変化。
- (3) 高電界下での、液体分子の解離によるガス化

これらの気層発生要因から、表 1 に示した過程 1（パターン 1 およびパターン 2）の部分放電発生機構は、次のように考察される。極めて低電界から観測されるパターン 1 では、上記 (2) の低分子量分子の相変化や上記 (3) の液体分子の解離は期待できず、上記 (1) の電圧印加以前から油中および電極表面に存在した微少な気相によるものと考えられる。また、パターン 2 の発生電圧においても、DDB の CH 結合（結合エネルギー 98.7kcal/mol）を解離させ気相を生成する為に十分なエネルギーは得られていないものと考えられる。しかし、前述の乾燥および含浸条件を変えた別の実験において、OF ケーブル製造過程に習い含浸処理後、絶縁油を新しいものと交換すると、このパターン 2 の発生が抑制されたことから、パターン 2 の発生は上記 (2) の要因に強く依存するものであると言えよう（前述のように、この実験に関する詳細な報告は別の機会に譲る）。

図 7 片面剥離試料の構成

Fig. 7. Sample configuration of one side peeled PPLP.

ここで、パターン 2 の発生領域（発生層）を確定するために、PPLP より片面のクラフト紙を剥離した試料を、油浸 PPLP の場合と同様に、乾燥含浸し、図 7 に示すように、その上下を変えて、部分放電波形を測定した。その結果、上部針電極側のクラフト紙を剥離した図中 (A) の場合には、パターン 2 は観測されなかった。しかし、表裏を逆にし、上部針電極側にクラフト紙が存在する図中 (B) の場合には、パターン 2 が観測された。このことから、過程 1 におけるパターン 2 の発生は、上部針電極側の油浸クラフト紙層に大きく起因するものと解される。

図 8 は上部針電極側のクラフト紙表面について、パターン 2 発生前後における油浸クラフト紙表面の走査電子顕微鏡写真を対比したものである。同図から分かるように、パターン 2 に属する部分放電によってクラフト紙中の毛状の微細繊維が破壊され、繊維の一部が遊離状態にあることが観察される。一般に、絶縁紙中の微細繊維の形状を大別すると、毛状のものと薄膜状のものに分けられる⁽⁸⁾。この両者について、筆者の一人は、油浸紙の交流短時間絶縁破壊に及ぼす微細繊維の効果を対比し、薄膜状の微細繊維の方が毛状のものに比べて、はるかに効果が大きいことを実証した⁽⁸⁾。それは、図 8 に示した毛状の微細繊維から破壊する、という実験結果とよく符合する。

なお、本実験の試料作成条件、すなわち 120℃、 10^{-2} Toor のもとで真空乾燥し、絶縁油を油圧 0 で含浸する程度では、絶縁紙シートを形成している繊維の構成が破壊されたり、繊維自身を膨潤させるような現象は全く起こらないと考えて差し支えない。

上部針電極側のクラフト紙は、パターン 2 の部分放電によって短絡状態に達するとは考えにくい。もし、この油浸クラフト紙層が絶縁破壊し短絡状態に達しているとするれば、油中における正負ストリーマの発生状況に違いがあるように、部分放電波形にも、それに対応する何らかの変化が見られるものと推察される。よって、最終的な油浸クラフト紙層の絶縁破壊は、後述する油浸 PP フィルム層における破壊と併せて進行するものとするのが妥当であろう。

<5・2> 油浸 PP フィルム層 前述の表 1 から分かるように、過程 2 および過程 3 では、油浸 PP フィルム層における部分放電が重畳しているといえる。

PE（ポリエチレン）、PP 等の結晶性高分子材料に対するトリ－発生およびその成長機構については、これまでに多くの研究が成されており、以下のようなことが明らかにされている^{(6),(10)~(15)}。(1) PP フィルムのような結晶性高分子材料において結晶部分である球晶では、ラメラ（板状結晶）が密に集合して結晶性が高いが、その反面、球晶の界面はラメラの配列が不規則で、ミクロボイドや空隙ができやすく、不純物や非晶質が多く含まれているため、キャリアがトラップされやすいと考えられている⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。(2) トリーの通路としては、PP フィルム内の球晶に沿って非晶質部分を縫うように進むことが多い⁽¹⁴⁾。(3) トリー発生の当初は、負電荷がトリ－内壁の表面電気伝導によって PP 内に注入され、トリ－先端部の非晶質部分に蓄積されやす

(a) 発生前

(b) 発生後

図8 パターン2発生前後におけるクラフト紙表面のSEM写真の対比

Fig. 8. Comparison of SEM photographs of PPLP surface between before and after the generation of Pattern 2.

(a) Before the generation of Pattern 2. (b) After the generation of Pattern 2.

いと考えられている⁽⁶⁾。

また PPLP の製造工程は2枚のクラフト紙を熔融押出 PP にて接着するというものであるが、その成形工程において延伸による PP 結晶構造への影響が考えられる。しかし PPLP では、絶縁油含浸時の膨潤率を押さえる目的で、高温に加熱後徐冷し結晶性を高める、いわゆるアニーリング (annealing) が施されている⁽¹⁶⁾。そのうえ、油浸 PPLP 作成時の乾燥および含浸の工程においても、PP は再び高温に加熱後徐冷されることにより、結晶性が高められると共に、不純物や低分子量分子が油中に溶出し、結晶構造がさらに改善される⁽¹⁶⁾。

そこで本研究では、延伸による PP 結晶構造への影響は無視でき得る程度のものであると考え、表1に示した過程2のパターン3およびパターン4、ならびに過程3のパターン5について、前記の研究結果をもとに、以下のような考察を加えた。

まず、表1に示した過程2のパターン3に注目すると、印加電圧が正のサイクルの場合には、 ± 1000 [pC] 以上の針状の部分放電が散見されるものの、負のサイクルでは、部分放電が停止の状態となっている。これは、トリー発生の当初、負電荷がトリー内壁の表面電気伝導によって PP フィルム内に注入され、トリー先端部の非晶質部分に蓄積されることに起因する現象とみなされる。多くの油浸 PP フィルムにおける研究では、正のサイクルでは正極性のみ、負のサイクルでは負極性のみ部分放電パルスしか観測されておらず、この点、我々の観測とは大きく異なる。しかし、現在、その解明に十分なデータは持ち合わせていないが、この点が油浸クラフト紙と油浸 PP フィルムとの複合絶縁物であるために生じた相違点であると考えられ、油浸クラフト紙層の全路破壊と大きく関係するものと推察される。これはまた、複合絶縁系であるが故の複雑な空間電荷の蓄積

形態を示唆するものであり、今後の課題として注目したい。

パターン4についてもパターン3と同様、油浸 PP フィルム単体における現象に準拠させて考えるならば、印加電圧が正サイクルのとき、蓄積された負電荷により電界が強調され、トリーパス先端で部分放電が発生し、印加電圧が負のサイクルでは、非晶質部に蓄積された負の電荷によりトリー先端の電界が緩和されるものと推察される。

過程3におけるパターン5の発生についても、油浸 PP フィルムにおけるトリー進展機構を適用すると、次のようである。パターン5では、PP フィルム中でのトリーの成長に伴い、トリーが球晶を回り込むように枝分かれするため、トリー先端部の非晶質部分に蓄積される空間電荷密度が低下し、負のサイクルにおけるトリー先端部の電界緩和効果が減少するためと考察される。

<5・3> 油浸 PPLP PPLP のラミネート構造に注目し、ラミネートの有無によって生じる部分放電波形を対比した。

図9は、油浸 PPLP のラミネート構造の有無における過程2初期の部分放電波形である。同図(A)では、パターン3に加えて油膜に蓄積された電荷による部分放電波形が重畳している。一方、同図(B)では、パターン3のみであり、油膜に起因する部分放電は見られない。ここに、ラミネート構造の優位性が示唆される。また、同図(A)について、印加電圧が負極性の場合の放電波形に注目すると、 ϕ_6, ϕ_7 で大きな放電パルスが発生している。この点、大きな放電パルスが主として ϕ_8 に集中している、油浸 PPLP にて発生のパターン4およびパターン5とは、大きく異なる。このことは、実用上の観点から言えば、油浸 PPLP ケーブル内でのラミネート紙の剥離状態の有無を検出するのに応用できうことを示唆している。

図 9 PPLP ラミネート構造の効果

Fig. 9. The effect of polypropylene laminated configuration.

(A) Non-laminated. (B) Laminated (PPLP).

図 10 は、 $\langle 5 \cdot 1 \rangle$ 、 $\langle 5 \cdot 2 \rangle$ 、および $\langle 5 \cdot 3 \rangle$ の考察結果に基づいて、油浸 PPLP の交流絶縁破壊過程を系統化し、モデル化したものである。同図を見て分かるように、油浸 PPLP の交流絶縁破壊を左右する要因は多岐に亘っている。しかし、図 10 を用いることにより、それらの要因が系統化され、要因除去対策の検討も大分簡略化されよう。

今後、図 10 で示した考え方は、油浸 PPLP にかかわる材料研究のみならず、OF ケーブルの製造にあたり、乾燥・含浸という、従来ともすれば技術者の経験と勘に頼りがちな技術分野に対しても、本研究の手法を適用することにより、製造技術の高度化を進めることが可能と目される。

6. むすび

油浸 PPLP の交流絶縁破壊過程において、部分放電の開始から絶縁破壊に至るまでの部分放電波形を一目見ただけで、どこまでがクラフト紙で、どこからが PP フィルムに関わる部分であるかを直ちに確定することは、一般には至難である。しかし、針対平板電極を用い、統計的な解析を加えることによって得られた知見をもとに、そこで発生する油浸 PPLP の部分放電波形を分類した結果、次に示す 3 つの過程、詳細には 5 つのパターンに分けられることを確認した。

- (1) 過程 1 (パターン 1 および 2) は、針電極に近い上部針電極側クラフト紙層における毛状微細繊維の破壊。
- (2) 過程 2 (パターン 3 および 4) および過程 3 (パターン 5) は、油浸 PPLP の絶縁破壊につな

図 10 油浸 PPLP 交流絶縁破壊過程のモデル化

Fig. 10. Modelling of ac breakdown process of oil-impregnated PPLP.

がる PP フィルム内でのトリの発生と進展の過程。

さらに、このパターン分けを用いて、油浸 PPLP の交流絶縁破壊進展の各過程を明確化し、破壊機構を解明するための糸口を得た。これにより、油浸 PPLP にかかわる材料研究のみならず、OF ケーブルの製造技術について、その高度化をはかる上からもさらなる進展が見込まれる。なお今後の課題としては、平板電極のように異なる放電源が同時に存在する場合について、さらなる研究と考察が強く求められよう。

最後に、試料を提供していただいた、住友電気工業株式会社電力事業部技術部長 畑 良輔 氏に心からお礼申し上げます。また、実験にあたって御協力を賜りました、長岡技術科学大学教務職員 斎藤 和夫 氏に感謝いたします。

(平成 7 年 6 月 15 日受付、同 7 年 12 月 11 日再受付)

文 献

- (1) 畑, 広田, 中浦:「油浸複合絶縁材料としての PPLP OF ケーブルの技術開発」, DEI-91-93.
- (2) 村田:「油浸紙の絶縁破壊機構に関する研究」, 電気学会・絶縁材料研究会資料, DEI-91-89-102 [49-52] (1991)
- (3) K.Saitoh, Y.Kawakami and M.Murata: "The Effect of Polypropylene Film on the Impulse Breakdown Strength of Laminated Paper", IEEE Conference Record of the 1992 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, PP.209-212, (1992-6).
- (4) K.Saitoh, Y.Kawakami and M.Murata: "The Effect of Polypropylene on the Impulse Breakdown Mechanism of Laminated Oil-Impregnated PPLP", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, PP.242-247, (1992-11).
- (5) 村田, 畑, 廣瀬, 斎藤, 川上:「油浸 PPLP のインパルス絶縁破壊に関する基礎的研究」, 電学論A, 114, 173, (平2).
- (6) 穂積, 岡本, 今城:「ポリエチレン中の初期電荷トリートの成長に及ぼす空間電荷の影響」, 電学論A, 111, 341 (平3).
- (7) 石川, 山下, 天野:「絶縁油中における破壊前駆密度変化の経時変化」, 電学論A, 101, 293, (昭56).
- (8) 村田, 中田:「電気絶縁紙の油中部分放電開始電圧におよぼすパルプ叩解の効果」, 電学論A, 95, pp.9-16, (昭50).
- (9) 寺瀬:「非破壊絶縁試験法」, オーム社, pp.167-168, (昭39).
- (10) 穂積, 岡本, 石田, 深川:「ポリエチレンの高次構造と電気トリートの発生現象」, 電学論A, 108, 535, (昭63).
- (11) 北川, 沢, 家田:「ポリエチレン薄膜の球晶とその境界における絶縁破壊」, 電学論A, 109, 37, (平元).
- (12) 伊藤, 伊藤, 堺, 江原:「ボイド放電劣化における破壊予知」, 電学論A, 110, 773, (平2).
- (13) 岡本, 田中:「ポリエチレン中のトリート成長に伴う非破壊性放電パルス」, 電学論A, 104, 613, (昭59).
- (14) 山北, 有安:「ポリエチレンの高次構造とトリート劣化」, 電学論A, 110, 817, (平2).
- (15) 山北, 有安:「ポリエチレンの高次構造と初期トリート」, 電学論A, 112, 145, (平4).
- (16) 久保, 笹島, 宮崎, 松田, 桑原, 深町:「超高压および超々高压電力ケーブル用ポリプロピレンラミネート紙に関する研究」, 電学論A, 97, 403, (昭52).

村田 正男

(正 員)1931年2月27日生。1959年3月東京都立大学大学院理学研究科修士課程修了。宇都宮大学教育学部教授を経て、1990年4月長岡技術科学大学電気系教授、1992年4月同系系長、現在に至る。工学博士。油浸絶縁材料、制御情報工学の研究に従事。IEEE, システム情報制御学会会員。

西村 政信

(学生員) 1971年4月16日生。1994年3月長岡技術科学大学工学部電気電子システム工学課程卒業。同年4月同大学大学院工学研究科修士課程電気電子システム工学専攻入学、現在に至る。

白瀬 光章

(非会員) 1973年1月19日生。1995年3月長岡技術科学大学工学部電子機器工学課程卒業。同年4月新潟三洋電子(株)入社、現在に至る。

佐藤 利明

(非会員) 1972年10月24日生。1995年3月長岡技術科学大学工学部電子機器工学課程卒業。同年4月東北発電工業(株)入社、現在に至る。

松浦 光夫

(非会員) 1972年7月14日生。1995年3月長岡技術科学大学工学部電子機器工学課程卒業。同年4月立山科学工業(株)入社、現在に至る。