

油入変圧器ターン間雷インパルス 絶縁特性

緒川貴伸^{※1}
Takanobu Ogawa
小松 巖^{※1}
Iwao Komatsu

Dielectric Characteristics of Turn-to-Turn Insulation Models of Oil Immersed Transformer under Standard Lightning Impulse Voltage

This paper deals with the insulation characteristics of partial discharge inception voltage and breakdown voltage at the turn-to-turn insulation models of an oil immersed power transformer in response to standard lightning impulse voltage.

The above partial discharge inception voltage and breakdown voltage was measured in an optical method by use of an image intensifier camera, a still camera, and a photomultiplier tube.

As a result, the partial discharge inception voltage of insulation characteristics and discharge generation mechanism have been clarified. Discharge streamer at the partial discharge inception of turn-to-turn insulation model occurs with oil breakdown at a micro oil gap portion that is generated between winding wires. The present study has enabled the electric field strength evaluation of this micro oil gap portion.

1 はじめに

電力用機器は高電圧・大容量化が進み、変電所の立地条件や輸送条件並びにコスト面などから機器の小形化が要求されている。供給信頼度の面からは機器の高信頼性も要求されている。

この機器の小形化、高信頼性の確保には絶縁、冷却などの技術的検討が重要である。電力用油入変圧器（以下、変圧器という）に使用されている絶縁紙や絶縁油（以下、油という）などの絶縁材料を組み合わせた絶縁破壊メカニズムには未知の点が多くある。

近年、変圧器巻線相互間や巻線とスペーサ間などの微小油ギャップ部分に発生する放電現象が重要視されている。その放電現象と絶縁特性を把握することが必要である。

本稿では変圧器巻線のターン間の微小油ギャップ部分に発生するインパルスコロナ放電（以下、Impコロナという）現象の検出手法、検出レベルや、絶縁特性のワイブル破壊確率、Impコロナ開始電界をイメージインテンシファイアカメラ（以下、I.Iカメラという）、静止カメラ及び光電子増倍管を用いた光学的手法により明らかにした。その結果、従来絶縁評価できなかった微小油ギャップ部分の電界評価を可能にしたので、その概要を紹介する。

2 Impコロナ現象解明の必要性

絶縁設計は絶縁破壊電圧 V_{BD} に裕度を与えて、信頼性

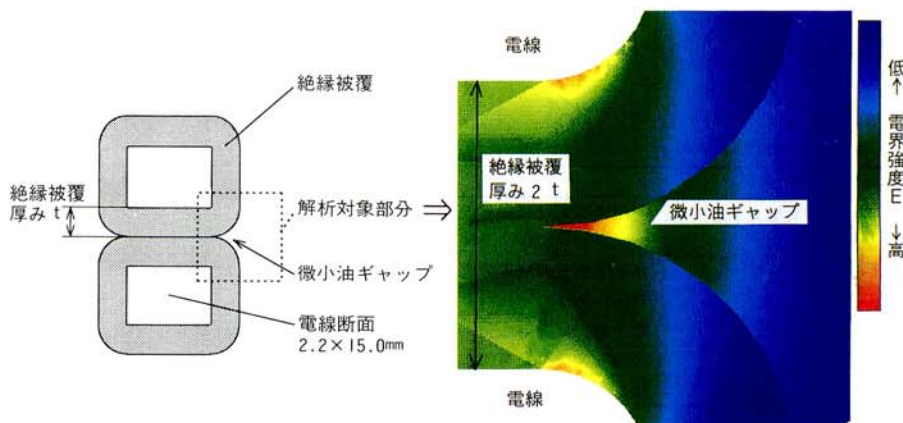


図1 / ターン間絶縁モデルの電界解析結果

Fig.1/Calculated electric field of turn-to-turn insulation model

※1 技術開発本部 開発部

を向上させてきた。最近是小形化や信頼性の厳しい要求から、変圧器巻線の設計電界を大きくする傾向にあり、絶縁材料の微小欠陥部分で発生する部分放電現象が重要視されている。

この部分放電現象は印加電圧波形の種類からACコロナとImpコロナに分けられる。変圧器巻線の絶縁設計ではインパルスに対して厳しい条件となるのでImpコロナ現象を把握する必要がある。

巻線絶縁は、ターン間絶縁及びセクション間絶縁において微小油ギャップを形成するが、今回はターン間絶縁を対象とした。この微小油ギャップ部分では図1に示すように、絶縁被覆と油との誘電率が異なるので油に最大電界が加わり、微小油ギャップ近傍でImpコロナが発生しやすくなる。この微小油ギャップ部分での絶縁破壊現象は不明な点が多くあり、筆者らを含め方々で検討が進められている。

一方、絶縁設計においては電界解析技術の進歩で詳細な設計が可能となっている。この解析結果を評価するには油の破壊電界値、破壊始発点などの基礎データが必要である。

これらを背景に変圧器の小形化を進め、より信頼度の高い絶縁設計を実現させるには、微小油ギャップ部分で発生するImpコロナ現象を把握し、破壊位置、油の破壊電界値などを解明する必要がある。

3 Impコロナ現象

3.1 Impコロナ検出手法

Impコロナ現象では微小発光(以下、コロナ発光という)、微小電流を伴うパルスの放電が局部的に発生する。従来、この放電現象を捕らえるには電氣的検出法で微小電荷などを測定し絶縁評価を行っている。Impコロナ開始時では数100~1000pCという微小な電荷量を測定することが要求され、ノイズとの識別が困難である。また、目視によるコロナ放電の確認、あるいは電圧印加後の絶縁物変化が認められず、Impコロナの発生を判断するのに困難であ

る。このようなことから今回は表1に示すように、Impコロナ現象を視覚的に捕え、詳細に観察できる光学的検出法を選定した。

この光学的検出法には、光電子増倍管、静止カメラ、I.Iカメラによる方法があり、その特徴は次のとおりである。

(1) 光電子増倍管

光電子増倍管は微小な光を光電面にあてて、真空中に電子を放出し、高電界中の二次電子放出効果により電子増倍させ、光の強弱に応じた電気出力信号が得られる。高速応答特性に優れており、紫外光から可視光領域に対して高感度である。電圧波形に対応させ、部分放電開始電圧や消滅電圧観測が可能である。

(2) 静止カメラ

静止カメラはコロナ発光と試料電線を同時に撮影するため、コロナ発光と異なる別の微弱な光を照射させ、接写形レンズを通して、高感度フィルムで記録する。部分放電観測、絶縁破壊経路及び気泡観測が可能である。

(3) I.Iカメラ

I.Iカメラは紫外領域透過性のレンズを通して光電面上に像を結ばせると像の明るさに応じて光電子を放出する。この電子像は高電界の加えられたガラス管内の二次電子放出効果で電子増倍させ、再び蛍光面に光学像が得られる。低ノイズ性、高速応答特性に優れている。紫外光から可視光領域に対して高感度で、静止カメラで測定できない部分放電観測が可能である。

3.2 Impコロナ観測方法

変圧器巻線相互間や巻線とスペーサ間の微小油ギャップ部分では不平等電界分布を示すため、最弱点部を模擬した部分モデルで破壊の詳細を観察することが必要である。今回の試料モデルは変圧器ターン間絶縁の微小油ギャップ部分を詳細に観察できるように、紙巻平角電線を5本束にした部分モデルとした。その絶縁被覆厚み t は、0.4mm、0.6mm、0.8mm、1.0mmの4種類で、各試料数はワイブル統計処理を行うため25個以上とした。図2にターン間絶縁

表1 / Impコロナ検出法

Tab.1/Methods of partial discharge measurement

分類	種類	特徴
電氣的 検出法	・CR※1形検出インピーダンス	定数の時定数により振動を抑制
	・高周波CT※2(直接法)	低インピーダンスで測定回路に挿入可能
	・高周波CT※2(キャンセル法)	電圧印加時の充電電流をキャンセルし、高感度
光学的 検出法	・残留電荷	電圧印加後に得られる電荷量を測定
	・光電子増倍管	電圧波形に対応させ、部分放電開始電圧や消滅電圧観測が可能
	・静止カメラ	絶縁破壊経路及び気泡観測が可能
	・I.Iカメラ	紫外光から可視光領域に対して高感度で、静止カメラで測定できない部分放電観測が可能

(注) ※1 : CR (Capacitor Resistor)
※2 : CT (Current Transformer)

モデルを示す。

図3に実験回路を示す。電圧印加方法は密閉油中試験容器内の試料に正極性標準雷インパルス電圧 $1.2/50\mu s$ をインパルス絶縁破壊電圧 V_{BD} (以下、破壊電圧 V_{BD} という)の40%から5~10kVステップ上昇法で1回ずつ印加した。光学的検出は、I.IカメラでImpコロナ開始電圧 V_{PD} 時の検出レベル及び発光場所を観測、静止カメラで絶縁破壊過程のコロナ発光を観測した。光電子増倍管は発光する時間と電圧の関係を測定した。油は脱気処理し、油中水分量は5~10ppmである。

3.3 Impコロナの検出レベルとその発生機構

(1) 検出レベル

目視で確認できないコロナ発光はI.Iカメラと光電子増倍管出力で観測し、破壊電圧 V_{BD} (以下、図中では V_{BD} と表す)の50%から認められた。

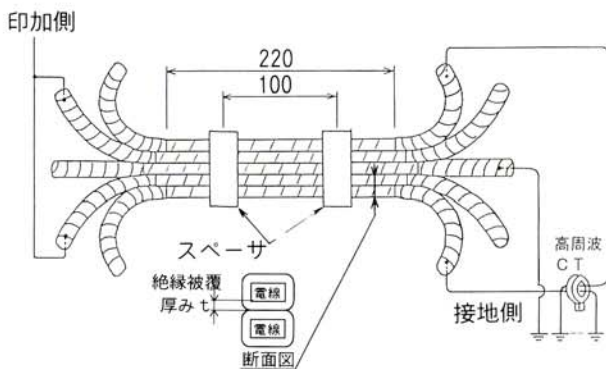


図2/ターン間絶縁モデル
Fig.2/Experimental turn-to-turn insulation model

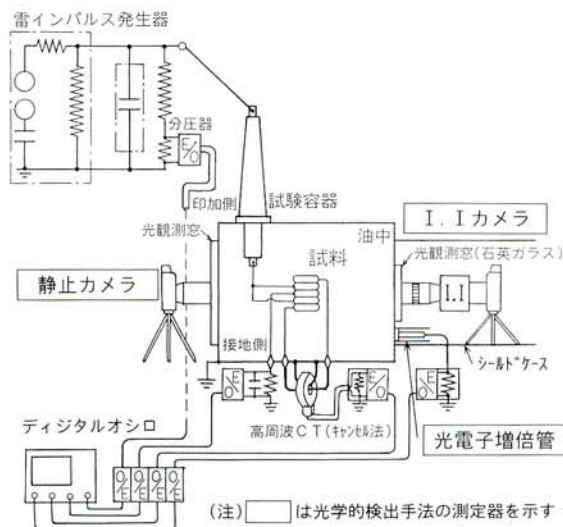


図3/実験回路
Fig.3/Experimental circuit

目視で確認できるコロナ発光は静止カメラで観測し、破壊電圧 V_{BD} の70%から認められた。

図4にターン間絶縁モデルのImpコロナ発光例を示す。

(2) Impコロナ発生機構

電極間に電圧が加わると最大電界を生じる微小油ギャップ部分からImpコロナが発生する。微小油ギャップ間隙 $L=0.1\sim 0.2mm$ の油破壊を起点として正極性、負極性の放電

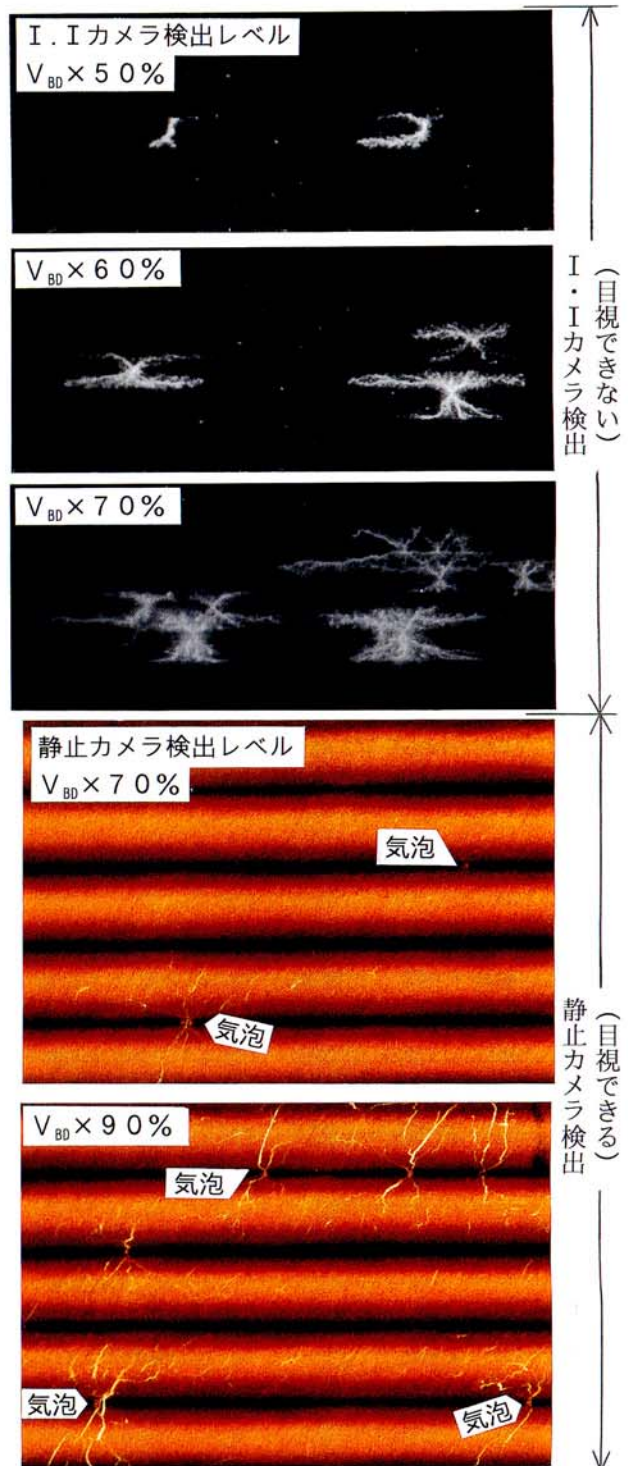


図4/ターン間絶縁モデルのImpコロナ発光例
Fig.4/Examples of partial discharge lights

ストリーマが進展する。放電ストリーマは電圧上昇とともに長くなり、コロナ電流は増大する。このイメージを図5 (a) に示す。

破壊電圧 V_{BD} の70%付近から、コロナ発光が目視で認められ、0.2~0.35mmの気泡が発生する。気泡はコロナ発光エネルギーの増大によって発生すると考えられ、絶縁破壊直前では気泡が微小油ギャップ部分に多く存在する。更に、電圧上昇で気泡放電、気泡付近の電界集中により絶縁破壊に至るものと考えられる。このイメージを図5 (b) に示す。

4 Impコロナ絶縁特性

4.1 Impコロナ消滅電圧と気泡発生電圧

光電子増倍管で測定したコロナ発光特性を図6 に示す。このコロナ発光特性から次のことが分かった。

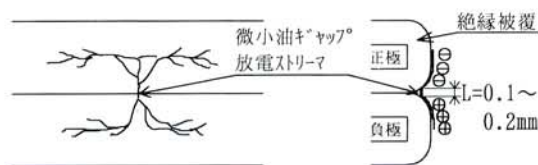
破壊電圧 V_{BD} の50%以上70%未満の電圧を印加した場合 (図6 (a)), コロナ発光は破壊電圧 V_{BD} の40%を越えた電圧で発生する。

破壊電圧 V_{BD} の70%以上の電圧を印加した場合 (図6 (b)), コロナ発光は破壊電圧 V_{BD} の40%以下でも発生する。これは印加電圧 V の関係から静止カメラで確認した気泡による放電現象であると推定できる。Impコロナは気泡放電、気泡付近の電界集中により破壊電圧 V_{BD} の40%以下の低い電圧においてコロナ発光が継続すると考えられる。

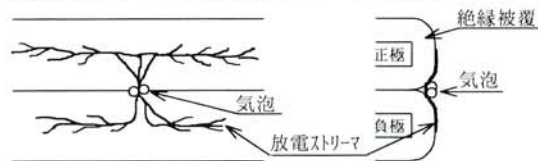
以上のことからImpコロナ消滅電圧は破壊電圧 V_{BD} の40%、気泡発生電圧は破壊電圧 V_{BD} の70%である。

4.2 ワイブル破壊確率

光電子増倍管, I. Iカメラで測定したImpコロナ開始電圧 V_{PD} , 破壊電圧 V_{BD} の評価は、弱点破壊による極値分



(a)微小油ギャップ放電ストリーマの発生



(b)放電ストリーマと気泡発生

図5 / Impコロナ発生機構の考察

Fig.5/Proposed mechanism in partial discharge initiation

布としてワイブル分布関数の次式で表される¹⁾。

$$p(V) = 1 - \exp[-(V/V_1)^m]$$

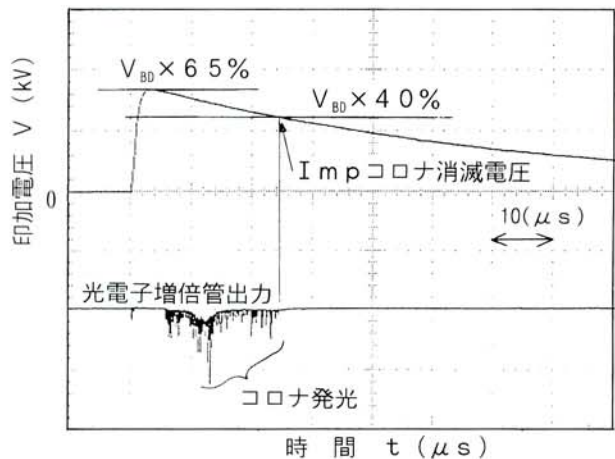
ここに、 $p(V)$: 電圧 V での確率

V_1 : 尺度パラメータ

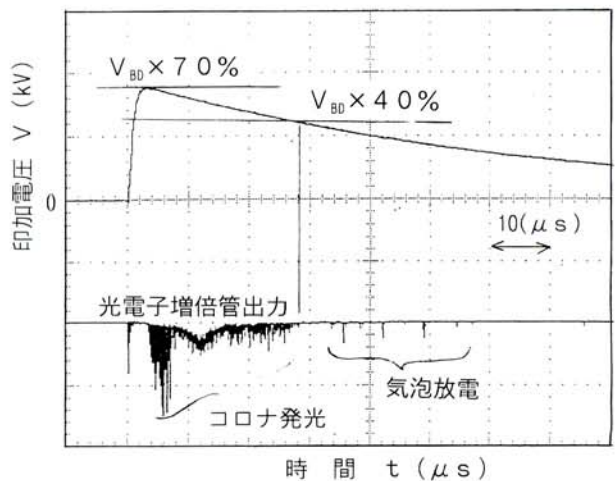
m : 形状パラメータ

V_1 は尺度パラメータ (Scale parameter) で、破壊強度の基準となる電圧を表し、63%確率値と一致する。 m は形状パラメータ (Shape parameter) で確率密度関数の広がりを表し、 m が小さいほどバラツキは大きくなり、 m が大きいほどバラツキは小さくなる。

図7は今回測定したImpコロナ開始電圧 V_{PD} (以下、図中では V_{PD} と表す), 破壊電圧 V_{BD} のワイブル分布を示す。試料数 n は25~31個の範囲で、どのデータもよく直線上に乗っている。この結果から、Impコロナ開始電圧 V_{PD} の m 値は9.8~11.8である。破壊電圧 V_{BD} の m 値は



(a) 破壊電圧 V_{BD} の50%以上70%未満



(b) 破壊電圧 V_{BD} の70%以上

図6 / コロナ発光特性

Fig.6/Examples of partial discharge light waveform

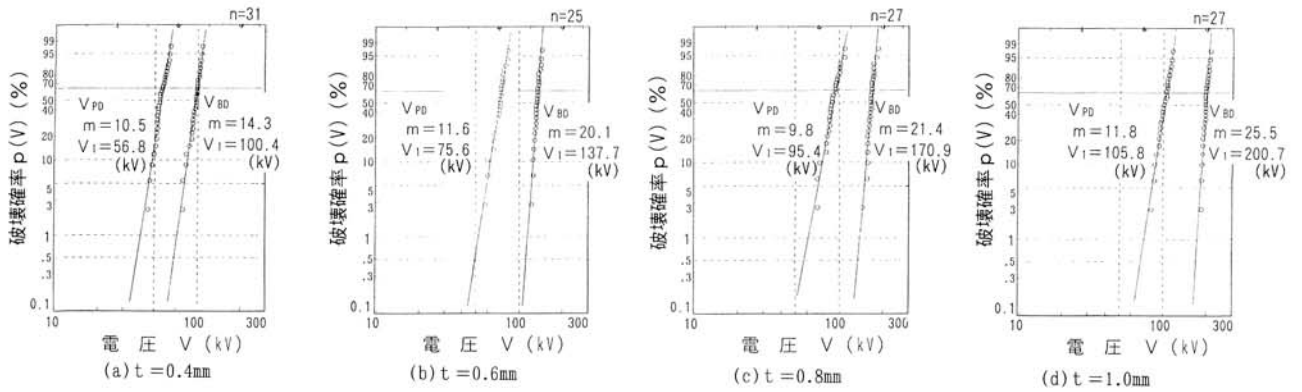


図7 / ターン間絶縁の雷インパルス破壊確率

Fig.7/Breakdown probability distributions due to lightning impulse voltage on turn-to-turn models

14.3~25.5で、絶縁被覆厚み大きいほどm値は大きくなる傾向を示す。これはターン間絶縁破壊の強さは主に絶縁被覆厚みで決定し、被覆厚み大きいほど絶縁破壊値のバラツキが小さくなるためと考えられる。

測定で求めた形状パラメータm, 尺度パラメータ V_I をワイブル分布関数の式に代入することにより、図8に表したターン間絶縁モデルの雷インパルス絶縁破壊特性が得られる。この結果から、破壊電圧 V_{BD} , Impコロナ開始電圧 V_{PD} は絶縁被覆厚みtが増すにつれて、大きくなる。Impコロナ開始電圧 V_{PD} は微小油ギャップ部分のコロナのため、電圧変化はゆるやかである。

4.3 Impコロナ開始電界特性

測定したImpコロナ開始電圧 V_{PD} を用いてターン間絶縁モデル微小油ギャップ部分の電界解析を行うことにより

Impコロナ開始電界Eが求まる。Impコロナ開始電界Eは微小油ギャップ部分における油の破壊電界を表す。微小油ギャップ部分の破壊電界は図9に示すように今回測定した絶縁被覆厚みの範囲ではほぼ一定で、68.5kV/mm前後となっている。

この結果から油破壊を発端とするImpコロナ現象は微小油ギャップ間隙 $L=0.1\sim 0.2\text{mm}$ の平均破壊電界強度が68.5kV/mmに達するとImpコロナ放電が発生すると判断できる。

この結果を用いて絶縁評価を行う場合は微小油ギャップ部分の電界解析を行い、油の平均破壊電界68.5kV/mmを基準にImpコロナに対する評価が可能となる。

5 まとめ

微小油ギャップにおけるImpコロナ現象を光学的検出手法で検証し、次の結果が得られた。

- ① ターン間絶縁で発生するImpコロナ現象は、破壊電圧 V_{BD} の50%から発生する。

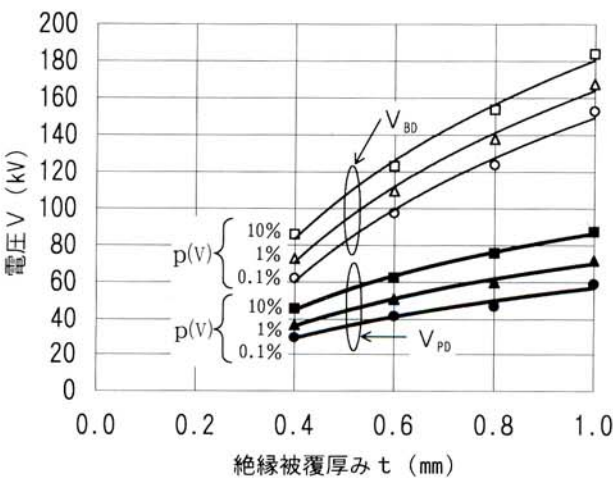


図8 / ターン間絶縁モデルの雷インパルス絶縁破壊特性

Fig.8/Breakdown characteristics of lightning impulse voltage on turn-to-turn insulation models

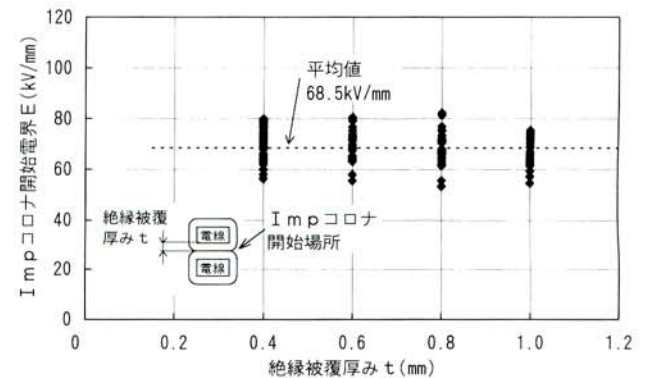


図9 / ターン間絶縁のImpコロナ開始電界特性

Fig.9/Effect of turn-to-turn insulation thickness on partial discharge inception field strength

②微小油ギャップ部分で発生するImpコロナは油ギャップ間隙 $L=0.1\sim 0.2\text{mm}$ の油破壊で始まる。この油部分の破壊電界は電線被覆厚さによらずほぼ一定である。

③破壊電圧 V_{BD} とImpコロナ開始電圧 V_{PD} の関係と、そのバラツキ度を測定し、絶縁被覆厚みと破壊確率との関係を求めた。

今回の測定でImpコロナ現象の把握、油の破壊電界値と破壊位置を測定し、従来絶縁評価できなかった微小油ギャップ部分の電界評価を可能にした。

今後、標準雷インパルス電圧以外の波形に対する油の破壊機構に関する基礎研究を展開する必要があると考えている。

参考文献

- (1) 「絶縁設計における統計的手法」、電気学会技術報告 (II部), No.229 (1986)

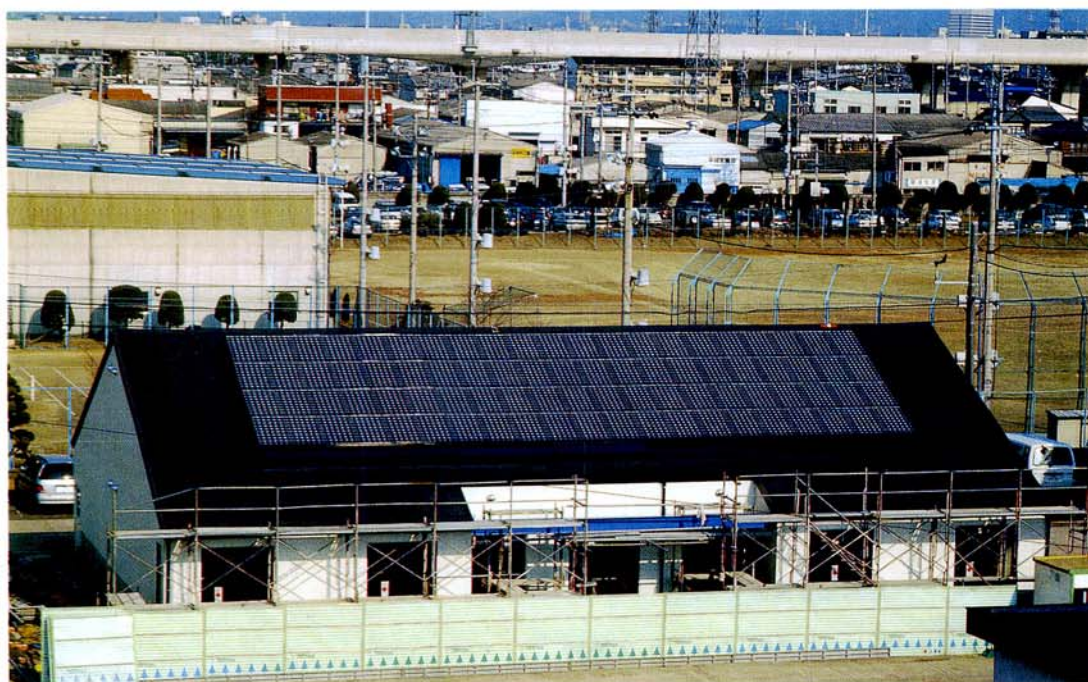
6 あとがき

微小油ギャップ部における絶縁破壊現象を光学的測定手法を用いて視覚的に捕らえ、絶縁破壊の基礎データを蓄積した。

変圧器巻線の微小油ギャップの特定部位に対して絶縁評価を実施し、未知とされてきた絶縁破壊現象の一端を光学的に確認することができた。

トピックス

太陽光発電システム(10kW)建設中



建設中のフレンドリー・プラザ55南屋根に設置の太陽モジュールの全景 (平成9年1月)