直流油浸絶縁における流動帯電現象

正 員 吉田 良男 (関西電力)

正 員 山地 幸司 (四国電力)

正 員 畑野 雅幸 (電源開発)

正 員 辻 孝誠 (三菱電機)

正 員 長谷川武敏 (三菱電機)

正 員 細川 登 (三菱電機)

正 員 光庵 豊一 (三菱電機)

Streaming Electrification Phenomena in Oil Immersed Insulation under DC Stress

Yoshio Yoshida, Member (The Kansai Electric Power Co., Inc.), Koji Yamaji, Member (Shikoku Electric Power Co., Inc.), Masayuki Hatano, Member (Electric Power Development Co., Ltd.), Kosei Tsuji, Member, Taketoshi Hasegawa, Member, Noboru Hosokawa, Member, Toyokazu Koan, Member (Mitsubishi Electric Corporation)

High voltage DC stress is applied to oil immersed insulation in the AC/DC converter transformers and DC reactors. Understanding of streaming electrification phenomena due to oil flow under DC stress is very important to achieve reliable insulation design for these apparatus. A model duct with a closed oil loop, which simulates a path of the oil flow in the actual shell type power transformer, was constructed. Partial discharge generation by streaming electrification under AC, DC and AC/DC superimposed voltage was investigated by varying the oil temperature, oil flow rate and applied voltage. As a result, partial discharge at lowest oil flow rate was found to occur at the temperature of 70°C. Although the oil flow rate to generate partial discharge shifted toward lower value with the increase of voltage under both AC and DC stress, DC stress showed less effect on the partial discharge generation than AC stress which gave the same oil gap stress. It is concluded that these experimental results give useful knowledge for the insulation design of AC/DC converter transformers and DC reactors.

キーワード：電力用変圧器，変換用変圧器，直流リアクトル，流動帯電，静電気放電，高電圧，絶縁油，油浸絶縁

1. はじめに

大容量変圧器の絶縁性能を向上させるために、絶縁物の乾燥処理、油の精製技術、現地据え付け時の塵埃、水分管理の改善が図られている。この結果、油流による流動帯電現象が顕在化し、あらゆる方面から研究されてきた^{[1]~[3]}。変圧器における流動帯電現象は、高い固有抵抗の油がよく乾燥された絶縁紙上を流れるとき顕著に発生する。この現象により発生した静電気は変圧器内部に蓄積され、あるレベルを超えると部分放電の発生、引いては絶縁破壊を導くことになる。しかし、変圧器における流動帯電は、油流路の改善、流速管理、絶縁油への帯電抑制剤の添加により、現在はほとんど問題になっていない^{[4][5]}。

近年、新規電源立地の遠隔化による送電距離の増大、電力会社間の電力融通量増大等の問題が顕在化しているが、直流送電はこれらの問題を解決する手段として有効である。国内では既に250kVの直流送電が運用されているが、21世紀初頭には、直流500kV送電の運用が計画されている。直流送電では、交/直変換システムの信頼性が重要である。変換システムの主要機器である変換用変圧器、直流リ

アクトルでは、巻線と鉄心、およびタンク間に直流電圧が加わるため、直流現象である流動帯電の助長が考えられる。さらに、直流と交流が重畳された電圧が巻線に加わるので、帯電現象、特に静電気放電発生への影響を明確にすることが機器絶縁開発にとって重要である。本報告では、外鉄形変圧器コイルの絶縁構造を模擬した油流ダクトモデルを用い、流動帯電による静電気放電発生に及ぼす直流、交流、および交流/直流電圧重畳の影響について述べる。最後に、交流及び直流課電時の帯電機構について若干の検討を加えた。

2. 流動帯電実験装置および実験方法

<2.1> 装置の構成 図1は実験に用いた流動帯電実験装置の構成図である。この装置は油ポンプ、ヒータ、クーラと5つのタンクから構成されている。タンク群は油流方向から上流側タンク、外鉄形変圧器コイルの絶縁構造を模擬したダクトモデルが設置されている試料タンク、下流側タンク、コンサバータ、それにストレージタンクである。装置全体は密閉形になっており、装置内を真空脱気した後、約700Lの変圧器油を注入した。また試料タンク上部

図1 流動帯電試験装置の構成図
Fig.1. Schematic diagram of the test apparatus for streaming electrification by oil flow.

図2 流動帯電試験装置の全景
Fig.2. Whole view of the test apparatus.

図3 油流ダクトの構造
Fig.3. Detailed construction of the model duct.

にはモデルに課電するためのプッシングを設けた。図2は本装置の全景である。

<2・2> ダクトモデル 図3は試料タンクに設置しているダクトモデルの構造である。モデルは7枚の厚さ2.4mmの平板プレスボードをアクリルのスペーサを用いて6mm間隔で積み上げ6層の油流ダクトを構成した。アクリルのスペーサは透明で試料タンクの外からダクト内での油流、放電が観察できる。油流ダクトを分離している平板プレスボード片面には、ダクト内での流動帯電を大きくするため、油流の乱れを生じさせる12個の障壁板(厚さ3.2mm)を設けている。ダクト下部には、ダクト内での電荷分離に相当した漏れ電流を測定するため、15個の電極が油流方向に配設してある。一方、ダクト上部には課電用の電極を埋設している。課電電極および漏れ電流測定電極と油流ダクト間の絶縁は、ダクト内での帯電電荷の漏洩を極力少なくするために、プレスボードを32mm積層し、ダクト内での静電

気放電の発生を容易にしている。

<2・3> 計測・制御装置 ダクト内流速の制御には、ポンプモータのインバータ制御と配管に取り付けられたゲートバルブの開閉の併用により行った。ダクト内の平均油流速は最大140cm/sである。障壁板に面した狭小部(2.8mm)では300cm/s程度になっているので、油温条件によっては乱流となる。そのため、狭小部では帯電量が大きくなる。流れの様子を計算機で解析した一例について図4に示す。流路の断面積が変化する前後の部分では一部渦が現れる。このような部分では電荷が下流側に流されにくいいため、帯電量が大きくなることが考えられる。油流の計測は配管の外部からドップラー効果を利用した超音波流量計(Micronics社: Porta-flow Mk II: 0~2000L/min)と上流側、下流側タンクの圧力差を差圧ゲージ(共和電業社: PD-1KA: 0~0.1MPa)で計測する方法を併用した。油の温度はヒータタンク内のヒータ(容量30kW)の制御により室温から80℃

図4 油流ダクト内での流速分布
Fig.4. Visualization of oil flow in the duct by computer simulation.

まで可変できる。油温の測定はヒータタンク、上流側、下流側タンクにそれぞれ設置した熱電対で計測した。

油流により発生した流動帯電現象については、ダクトモデルに設置した15個の測定電極を流れる漏れ電流と上流側、下流側タンク内に設置した平行平板プローブによって油中電荷密度を計測した。なお、上流側タンクに設置した平行平板プローブは油の導電率の計測にも使用した。

課電は図1に示す課電電極に交流、直流電圧をそれぞれ印加した。交流/直流重畳課電は交流側にコンデンサー(10nF)を介し、直流側に抵抗(10MΩ)を介して課電電極に印加した。

流動帯電による部分放電(静電気放電)の計測は、電気的には15個の漏れ電流計測用の測定リードにクランプ型高周波CT(変流器)を用い、中心周波数3MHzの狭帯域増幅器を通して計測した。音響的には超音波信号(AE)を試料タンク上部3箇所(AEセンサー(PAC社: I15I))を設置し、中心周波数150kHzの狭帯域増幅器を通して計測した。電気、音響信号において時間差がある場合のみ部分放電発生とした。なお、部分放電の検出感度は100pCである。図5に部分放電計測回路を示す。

図5 部分放電計測回路
Fig.5. Partial discharge measuring circuit.

以上の計測・制御はすべてコンピュータで処理するとともに、多量のデータの取得と解析を行った。

<2・4> 実験方法 本モデルの流動帯電特性を把握する目的で、無課電時のダクト漏れ電流、油中電荷密度に及ぼす油流速、油温の影響について調べた。さらに、直流課電時のダクト漏れ電流、油中電荷密度について調べた。実験条件は油温が30℃～80℃、ダクト内油流速が30cm/s～140cm/s、直流課電電圧が0～80kVである。使用した油はJIS2号絶縁油である。

流動帯電によるダクト内での部分放電発生に及ぼす交流、直流、および交流/直流重畳課電の影響を油流速、油温をパラメータに計測した。図6に試験プロファイルの一例として、直流課電時の場合を示す。まず、設定電圧の印加後に吸収電流が流れるが、ダクトを流れる漏れ電流がほぼ一定になったところでヒータ、ポンプを動作し、油の流動と昇温を開始した。漏れ電流は昇温とともに単調増加するが、油温が設定温度になると減少し、その後一定値に落ち着く。今回の実験で部分放電の発生が認められたのは、図6に併記したように漏れ電流が最大値を示す前後であり、漏れ電流が定常値を示す領域では部分放電の発生は認められなかった。

図6 試験プロファイル
Fig.6. Test profile for discharge measurement.

3. 実験結果および検討

<3・1> 油の導電率 上流側タンクに設置した平行平板プローブで測定した導電率の温度依存性を図7に示す。一般的に、油の導電率の温度依存性はアレニウスの関

図7 油の導電率の温度依存性
Fig.7. Temperature dependence of oil conductivity.

図8 漏れ電流と油中電荷密度の油流速依存性
Fig.8. Dependence of leakage current and charge density in oil on flow velocity of oil.

図9 漏れ電流と油中電荷密度の温度依存性
Fig.9. Dependence of leakage current and charge density in oil on temperature.

係に従う。図7に示したように、横軸を絶対温度の逆数、縦軸を導電率の対数で表示すると直線関係になる。

<3・2> 漏れ電流・油中電荷密度 ダクト漏れ電流、油中電荷密度に与える油流速の影響について得られた結果を図8に示す。測定条件は無課電、流速40～120cm/s、油温30℃である。漏れ電流は15個の測定電極を流れる総和を示している。本実験で用いたダクト形状、油の動粘性係数、流速条件から計算される最大のレイノルズ数は2500以下となる。したがって図8は層流域での実験結果を示していることになる。漏れ電流、電荷密度とも油流速の1乗で増加している。これはKlinkenbergらがパイプモデルを用いて層流域で測定を行った結果と一致する。図9は漏れ電流、電荷密度の温度依存性である。測定条件は流速100cm/s、無課電である。漏れ電流、電荷密度とも油温70℃で最大値を示す特性である。70℃以下では温度上昇に伴い油中イオン濃度の増加とともに電荷分離によるプレスボードに蓄積される電荷が増加するが、70℃を越えると油、プレスボードの導電率が高くなるため油中、油／紙壁面で緩和される電荷の方が蓄積電荷より大きくなるためである。このような結果は田村ら[3]が測定した結果と同傾向であるが、近年の油の精製技術の向上による導電率等の特性改善によって最大値を示す油温度が高くなっている。

次に、漏れ電流、電荷密度に与える直流課電の影響について説明する。図10は漏れ電流、電荷密度の直流電圧依存性を示したものである。測定条件は流速100cm/s、油温50℃である。漏れ電流は無課電時の負極性電流に対し、負極性電圧を印加すると増加傾向を示すが、正極性電圧では減少傾向を示す。一方、電荷密度は直流電圧の極性効果は

図10 漏れ電流と油中電荷密度の直流電圧依存性
Fig.10. Dependence of leakage current and charge density in oil under DC voltage application.

少なく、課電により増加している。本ダクトモデルは課電電極、測定電極は対称系であるから、電荷密度が課電によって極性効果を示すことは考えられない。したがって、直流課電時の流動帯電現象の指標として、漏れ電流のみで評価を行うことは困難である。

<3・3> 放電発生領域に及ぼす課電の影響 部分放電発生領域に及ぼす直流課電の影響について整理した結果を図11に示す。縦軸は油流速、横軸は油温である。課電条件は無課電、-40kV、-80kVである。無課電時の場合の放電発生領域は油温が70℃で最低流速を与えるVカーブを示す。これは、図9に示す漏れ電流、電荷密度が高温域で電荷緩和が優勢となるためである。このような特性は田村ら¹⁰が行った交流課電下での測定結果と同様の傾向を示す。また、課電電圧の増加に伴い放電発生域全体は低流速域にシフトする。

図11 直流電圧課電時における部分放電発生領域
Fig.11.Dependence of region of velocity and temperature of oil in which the partial discharges are detected under DC voltage application.

次に、交流(60Hz)課電の影響について説明する。ダクトモデルはプレスボードと油の複合絶縁構造であるため、同一課電電圧では、直流と交流では油隙、絶縁紙に加わる電圧が異なる。交流課電では、油隙電界が直流課電時と同一となるように課電電圧を設定した。厳密には直流課電下における油隙電界を求めることは困難であるが、直流課電時の最低流速を与える油温70℃において、油、プレスボードの抵抗率から計算される直流課電時の油隙電界と同一の交流課電電圧を設定した。-80kVの直流課電は3.3kV(実効値)の交流課電に相当する。図12は無課電の特性を基準に、交流3.3kV、6.6kVを課電した場合の結果を示したものである。交流3.3kV課電の最低流速は約70cm/sであり、-80kVの直流課電に比べ放電発生領域を低下させることが分かる。

図13は交流/直流重畳課電時の放電発生領域を示したものである。交流3.3kVに直流-40kV、-80kVを重畳した結果である。ここで、交流/直流重畳課電がそれぞれ単独で課電した場合と比較して特性差があるのかを検討してみる。

図12 交流電圧課電時における部分放電発生領域
Fig.12.Dependence of region of velocity and temperature of oil in which the partial discharges are detected under AC voltage application.

図13 交流/直流重畳電圧課電時における部分放電発生領域
Fig.13.Dependence of region of velocity and temperature of oil in which the partial discharges are detected under AC/DC superimposed voltage application.

図14 部分放電発生最低流速と油隙電界の関係
Fig.14.Relation between oil velocity at 70°C where discharges are observed and electric field in oil gap spacing.

図14は縦軸に油温70℃で現れる最低流速を、横軸に油隙電界で直流、交流単独課電、および交流/直流重畳課電の場合の測定結果をプロットしたものである。直流と交流ではその傾きに差があることが分かる。すなわち、交流課電の方が放電領域を流速の低い方にシフトすることを示している。交流/直流重畳課電の結果をプロットすると交流に重畳した直流電圧の依存性は直流単独の傾きと同じで、交流/直流重畳課電による相互作用はないと言える。

<3・4> 交流課電時及び直流課電時の流動帯電機構

交流課電時の帯電機構を考える。プレスボードと油の流動帯電ではプレスボードが負に、油が正に帯電することが知られている。交流課電時の流動帯電への影響は、プレスボードと油壁面に形成された電気二重層のデバイ長中の油中正電荷が課電周波数により振動し、見かけ上デバイ長が油側に延びるためであると考えられている⁸⁾。図15は課電周波数を変えて測定したダクト漏れ電流の測定結果である。

いま、外部電界が正弦波交流の場合、電界に応答して電荷が移動する場合、その速度は次式で与えられる。

$$v_i = \mu E_0 \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

ここで μ ：正電荷の移動度(m^2/Vs)、 f ：課電周波数、 E_0 ：外部電界(V/m)である。(1)式を積分すると油中電荷の移動距離が計算できる。電荷の移動距離はデバイ長からの距離であるので交流課電時の油中電荷の分布 $\rho(x)$ は次式で表せる。

$$\rho(x) = \frac{Q_0}{\delta} \exp\left(-\frac{x}{\delta}\right) \exp\left[\frac{\mu E_0}{2\pi f \delta} (1 - \cos(2\pi ft))\right] \quad (2)$$

ここで δ ：デバイ長(m)、 Q_0 ：壁面での正電荷密度(C/m^2)、 x ：壁面からの距離(m)である。無課電時の電荷の分布は(2)式中で大括弧内を零として求められる。課電時の無課電時に対する比を時間平均したものを課電効果倍数 γ とし以下の式で表す。

$$\gamma = f \int_0^{1/f} \exp\left[\frac{\mu E_0}{2\pi f \delta} (1 - \cos(2\pi ft))\right] dt \quad (3)$$

漏れ電流はプレスボード/油壁面に帯電した電荷に比例する。図15中の実線は(3)式で効果倍数を計算した結果である。周波数が低くなるにつれて、デバイ長内の油中電荷の振幅が大きくなるため、漏れ電流は斬増現象を示す。この特性を直流電圧まで外挿すると非常に大きな課電効果を示すことになるが、上述の実験結果はこれを否定している。従って、交流課電と帯電機構が異なるものと推察される。

さて、直流課電時の帯電機構を考える。図10に示した漏れ電流は電気伝導によるものと接地電極側での流動帯電による電荷に対応した電流を重ね合わせたものを測定して

図15 漏れ電流に及ぼす電圧周波数の影響
Fig.15. Dependence of leakage current on frequency of applied voltage.

いることになる。図10では計算により求めた導電電流の直流電圧に対する増減に対して、漏れ電流が同様に比例して増減する。つまり、漏れ電流から導電電流を差し引くと課電電圧が増減してもほぼ一定値になる。この結果は低電界の場合、直流課電による流動帯電現象への助長効果がほとんどないことを示している。従って、電気二重層中の電荷密度は漏れ電流に対応しているので電気伝導によるものと、無課電時の流動帯電によるものを重ね合わせた結果となる。油の場合、電荷の移動度は負極性の方が正極性に比べて大きいので⁹⁾、負電荷が荷電粒子(キャリア)となる。いま、ダクトモデルの電極構成は平行平板であるから、中央部付近では電位分布はほぼ平等であると考えられる。負電極側のプレスボード/油壁面では、電気二重層中の負電荷が電界によって油バルク中に流出するため正電荷の電荷密度が増加する。一方、正電極側のプレスボード/油壁面では、電気二重層に油バルク中の負電荷が電界によって流入するため二重層中の正電荷の電荷密度は減少する。いま、電気伝導によって電気二重層のデバイ長内に流れ込むキャリアによる電流は次式で表せる。

$$i_{debye} = en\mu_c E_0 S = \frac{V_{debye} S}{\rho \delta} \quad (4)$$

ここで μ_c ：キャリアの移動度(m^2/Vs)、 S ：電極面積(m^2)、 ρ ：油中での抵抗率(Ωm)、 V_{debye} ：デバイ長内での外部電界による電位差(V)である。

表1は交流課電、直流課電時の流動帯電による壁面近傍での油中電荷量を無課電時に対して比較した結果である。交流課電については油温50℃、周波数60Hz、3.3kV課電時、正電荷の移動度を $10^{-9}\text{m}^2/\text{Vs}$ 、油中電界を14kV/m、デバイ長を 10^{-6}m として(3)式より計算した。直流課電については油温50℃、80kV課電時の条件で V_{debye} を $1.38 \times 10^{-2}\text{V}$ 、抵抗率を $7.5 \times 10^{12}\Omega\text{m}$ 、面積を 0.255m^2 としてデバイ長内に流れる電流を(4)式によって計算し、無課電時の漏れ電流

(実測)との課電による増減量を計算した。壁面近傍での電荷密度の増量は交流課電時のほうが直流課電時における負電極側の電荷密度の増量より約2.1倍大きい。

表1 壁面近傍での電荷密度の比較
Table.1. Estimation of charge density

課電の種類	無課電時に対する電荷密度の増減量
直流課電 (負電極側)	+1.74%
直流課電 (正電極側)	-1.74%
交流課電	+3.81%

図16は無課電時、直流課電時、交流課電時のダクト内での帯電の様子を概念的に示したものである。まず、無課電時について考える。プレスボード/油壁面近傍での流速分布がダクト上流側と下流側で同じであれば、単位時間当たり壁面近傍の油中で発生する正電荷密度は上流側と下流側で同じである。この正電荷に対応してプレスボード壁面中で負電荷が発生する。上流側の壁面近傍の電気二重層中の正電荷は油流によって下流側へ流され、プレスボード

図16 油流ダクト内での電荷分布

Fig.16. Schematic diagram of charge distribution for oil duct.

スボード壁面中の負電荷による電界によって上流部で流さ壁面中の負電荷が取り残される。一方で、下流側ではプレれた正電荷もしくは油流中の正電荷が壁面近傍の電気二重層に戻ってくる。その結果、上流側と下流側ではプレスボード壁面中の負電荷と油中の壁面近傍の正電荷の差異によってプレスボード/油壁面の流れ方向に電位差が生じる。直流課電時では、負電極側で電気二重層中での電荷密度が無課電時に比べて総量が1.74%増加するため上流側と下流側壁面での沿面の電位差が無課電時と比べて増大する。その結果、部分放電発生領域が無課電時より低流速側にシフトすると考えられる。交流課電時では電気二重層中の正電荷密度の増分が直流課電時(負電極側)に比べて約2.1倍になるため上流側と下流側での電位差が直流課電時より大きくなる。その結果、さらに流動帯電現象による部分放電が直流課電時より起こりやすくなると考えられる。

4. まとめ

外鉄形変圧器コイルの絶縁構造を模擬したダクトモデルを用い、流動帯電による部分放電発生領域に与える直流、交流、交流/直流重畳課電の影響について調べた。主な結果は以下のようである。

(1)無課電時の部分放電発生領域をダクト内流速と油温で整理すると、油温70℃で最低流速を与えるVカーブになることが分かった。

(2)交流課電は放電発生領域を低流速域にシフトさせ、課電による流動帯電への影響は大きいことが分かった。

(3)直流課電は交流と同様に放電発生領域を低流速域にシフトさせるが、同一油隙電界で交流課電と比較した結果、直流課電時の流動帯電への影響は交流に比べ軽微であることが分かった。

(4)交流/直流重畳課電による放電発生領域に与える影響は、それぞれ単独で課電した場合の和であることが分かり、交流/直流電圧の相互作用のないことが分かった。

以上の結果は500kV直流変換用変圧器、直流リアクトルの絶縁設計に有用な知見を与えるものと考えられる。

(平成8年11月1日受付、同9年3月31日再受付)

文 献

- [1]菅寿郎・三浦良和・渡辺次男・石井敏次・新田東平:「大容量変圧器における流動帯電現象」, 三菱電機技報, Vol.52, No.12, p.915-919 (1978)
- [2]R.Tamura, Y.Miura, T.Watanabe, T.Ishii, N.Yamada, T.Nitta: "Static Electrification by Forced Oil Flow in Large Power Transformer", IEEE Trans. on Power Appa. & Syst., Vol. PAS-99, No.3, p.335-343 (1980)
- [3]田村良平・栗田健太郎・村田久夫:「大容量変圧器における流動帯電現象」, 電気学会誌, Vol.99, No.10, p.913-920 (昭54-10)

[4]安田正行・後藤清・大久保仁・月岡淑郎・宮本晃男：
「大容量変圧器における流動帯電の一抑制方法について」，電気学会誌，Vol.105，No.3，p.265-272（昭60-3）

[5]宮本晃男・土江基夫・岸章夫・三浦良和：「変圧器の流動帯電に及ぼすBTAの効果」，第22回電気絶縁材料シンポジウム予稿集，Ⅲ-4（1989-10）

[6]T.Tanaka, Y.Yasojima, N.Yamada, A.Kishi, T.Nitta: "Model Approach to the Static Electrification Phenomena Induced by the Flow of Oil in Large Power Transformers", IEEE Trans. on Power Appa. & Syst., Vol. PAS-99, No.3, May/ June, p.1097-1106（1980）

[7]A.Klinkenberg and J.L.Minne: Electrostatic in the Petroleum Industry, (1958) Elsevier Pub.Co.

[8]田中俊秀：「大型変圧器内の流動帯電現象に関する基礎研究」，博士論文（東京大学），1985

[9]大橋朝夫・下川博文・家田正之：「誘電液体の導電現象と帯電現象について」，電気学会研究会資料，ED-83-67（1983）

吉田 良男（正員）1950年2月20日生まれ。1968年3月富山工業高等学校卒業。同年4月関西電力（株）入社。1976年富山大学工学部卒業。現在，電力システム室大電力送電チーム課長。

山地 幸司（正員）1950年2月11日生まれ。1973年3月京都大学工学部電気工学II学科卒業。同年四国電力（株）入社。以来，系統運用，系統計画，変電関係の業務に従事。現在，同社電力部橋湾プロジェクトチーム主査。

畑野 雅幸（正員）1961年4月2日生まれ。1984年3月北海道大学電気工学科卒業。同年4月電源開発（株）入社。以来，交直変換設備の設計，技術検討，北本連係設備増設工事に従事。現在，工務部変電技術課課長代理。

辻 孝誠（正員）1968年12月9日生まれ。1991年3月同志社大学工学部電子工学科卒業。1993年3月同大学大学院電気工学専攻修了。同年三菱電機（株）入社。以来，同社先端技術総合研究所にて油浸絶縁の研究に従事。

長谷川 武敏（正員）1949年5月16日生まれ。1968年3月三重県立津工業高等学校電気科卒業。同年三菱電機（株）入社。以来，同社先端技術総合研究所にて高電圧機器絶縁の研究に従事。現在，同社先端技術総合研究所電機システム技術部主幹。工学博士。

細川 登（正員）1951年1月26日生まれ。1975年3月京都大学電子工学専攻修了。同年三菱電機（株）中央研究所入社。以来，電力変圧器の開発，油浸絶縁変圧器の研究に従事。現在，赤穂製作所外鉄型変圧器製造部外鉄型変圧器開発課参事。

光庵 豊一（正員）1948年5月5日生まれ。1971年3月岡山大学電気工学科卒業。同年三菱電機（株）入社。以来，電力変圧器の研究，開発に従事。現在，赤穂製作所外鉄型変圧器製造部外鉄型変圧器開発課，課長。

電力・エネルギー部門大会座長のコメントと回答

—GJ02 GIS・絶縁—

質 疑

座長 宅間 董

1. 同セッションでの対象論文への質疑応答

(1)

Q：直流課電時と交流課電時の流動帯電機構の違いは何か。

A：交流課電の影響は電気二重層が振動して油側へ移動するためと思われるが、直流課電時のメカニズムはまだ不明であ。

(2)

Q：部分放電が流動帯電によって発生するのは、界面の電荷密度が過大になるためか。

A：そのとおりと思われる。

(3)

Q：図9で漏れ電流や電荷密度が、温度100℃で測定データがないのに大きく低下しているのはなぜか。

A：過去の測定でこの特性にあてはまる曲線が得られているのを適用した。

2. 著者に照会したい座長コメント

直流印加あるいは交流印加の流動帯電あるいは部分放電発生に及ぼす効果をメカニズムのほうから定量化することはできませんか？

油浸絶縁の流動帯電現象について、直流課電の効果を基礎的に調べたもので、交流課電と比べて影響は小さいことを明らかにしたもので、重要なデータと思われる。

応 答

吉田 良男 (関西電力)

山地 幸司 (四国電力)

畑野 雅幸 (電源開発)

辻 孝誠・長谷川武敏 (三菱電機)

細川 登・光庵 豊一

1. 「同セッションでの質疑応答」に対する追加説明

(1) についての補足説明

直流課電時のメカニズムについて座長コメントにもありますように、〈3・4〉節にメカニズムについての検討を行い、本文中に追記しました。

(2) についての補足説明

図16に示しているように、部分放電の発生は油-紙界面における電荷密度に依存しているものと考えています。本文中では〈3・3〉節に、放電領域と電荷密度との関係を記述しています。

(3) についての補足説明

御指摘のとおり、カーブは100℃までの計算値を示しており、誤解を与えております。高温域では電荷の緩和が大きくなり、漏れ電流、電荷密度ともに低下します。本文〈3・2〉節、図9においては計算結果を80℃までのカーブに訂正しました。

2. 「著者に照会したい座長コメント」への回答

流動帯電による部分放電は油-紙壁面での帯電電荷に影響されます。本文中の〈3・4 節〉に直流、交流印加時の流動帯電による油-紙壁面での帯電電荷量の定量化および部分放電への影響についての検討を行いました。