

## 論 文

## パーフルオロカーボンの流動帶電特性

檜 垣 勝\*, 平 石 清 登\*\*, 上 野 善 人\*\*, 遠 藤 馨\*\*\*

(1993年10月27日受理)

## Static Electrification Characteristics of Perfluorocarbon

Masaru HIGAKI,\* Kiyoto HIRAISHI,\*\* Yoshito UWANO\*\*

and Kaoru ENDOO\*\*\*

(Received October 27, 1993)

We have been developing a new type of non-flammable transformer in which windings and iron core are immersed in perfluorocarbon and insulated by it. Since the fluid flow in the windings may experience static electrification in transformers because of its very low kinematic viscosity, but static electrification characteristics of an insulating fluid like perfluorocarbon have not been well understood, so we have studied these characteristics of perfluorocarbon. Using a static charge density measuring apparatus for insulating oils, the influence of molecular structure and impurities on the static charge density of insulating liquids and perfluorocarbon was investigated and clarified. After examining the streaming current characteristics of the perfluorocarbon which flowed through an insulation pipe, velocity dependence of the streaming current and the influence of solid materials and the fluid temperature on the streaming current were clarified. Finally, the static electrification test of a perfluorocarbon-immersed, prototype transformer was carried out, and it was clarified that the leakage currents from windings to the ground were very small, and no partial discharge occurred during the test.

## 1. まえがき

絶縁性の液体が固体と接して流れると静電気が発生する。この現象は流動帶電として從来からよく知られている現象であり、特に石油工業における原油などの輸送時における問題としてよく調べられてきている<sup>1)</sup>。油入変圧器においても、巻線の冷却のために絶縁油を流しており、流動帶電現象が起きている。近年の油入変圧器の高電圧・大容量化にともなって、大容量油入変圧器でこの流動帶電現象が一時クローズアップされたが、各所で変

圧器内の流動帶電現象を解明する研究が進められた結果、変圧器内での現象の特徴がかなり明らかになり、油入変圧器ではその対策がほぼ確立されてきている<sup>2-7)</sup>。

一方、近年都市防災の観点から、都市の変電所に設置される電力機器の不燃化の要求が高まってきている。比較的小容量の変圧器では、乾式、モールド、あるいはSF<sub>6</sub>ガス絶縁などの変圧器が用いられつつあるが、最近はパーフルオロカーボンを用いた新しいタイプの変圧器がコンパクト化の点でメリットがあることから、その開発が各所で進められている。パーフルオロカーボンは、C<sub>8</sub>F<sub>18</sub>、あるいはC<sub>8</sub>F<sub>16</sub>Oを主成分とし、塩素基を含まない液体である。不燃性で、粘度が低く、熱伝導率も大きいという冷却媒体として優れた特性を持つだけでなく、高い絶縁性能も有している<sup>8)</sup>。パーフルオロカーボンの特性を変圧器油と比較して表1に示す。

これまでに、冷却媒体にパーフルオロカーボンを用い、絶縁にはSF<sub>6</sub>ガスを用いる構造のSF<sub>6</sub>ガス絶縁変圧器が開発されており<sup>9,10)</sup>、また変圧器全体をSF<sub>6</sub>ガス絶縁とし、その中にパーフルオロカーボンを散布、あるいは滴下させて冷却する構造のSF<sub>6</sub>ガス絶縁変圧器も開発されている<sup>11,12)</sup>。我々はパーフルオロカーボンの特徴を

キーワード：パーフルオロカーボン、変圧器油、変圧器、流動帶電、帯電度

\* 九州共立大学工学部電気工学科 (807 北九州市八幡西区自由ヶ丘 1-8)

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu Kyoritsu University, 1-8 Jiyugaoka, Yahatanishi, Kitakyushu, 807 Japan

\*\* 株式会社日立製作所国分工場 (316 日立市国分町 1-1-1) Kokubu Works, Hitachi Ltd., 1-1-1 Kokubu-cho, Hitachi, 316 Japan

\*\*\* 株式会社日立製作所日立研究所 (319-12 日立市大みか町 7-1-1)

Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd., 7-1-1 Omika-cho, Hitachi, 319-12 Japan

表 1 パーフルオロカーボンと変圧器油の特性の比較

Table 1 Characteristics of perfluorocarbon and transformer oil.

Item	Perfluorocarbon (at 0.1 MPa)	Transformer oil
Flash point (°C)	none	134
Boiling point (°C)	100	280-450
Density (g/cm³)	1.76	0.87
Kinematic viscosity (cSt at 25°C)	0.8	7.5
Specific heat (cal/gK at 25°C)	0.25	0.45
Specific dielectric constant	1.86	2.2
Dielectric strength (kV/2.5 mm)	>60	>60

生かして巻線と鉄心をこの液体に浸し、その外側を SF<sub>6</sub> ガスで絶縁する複合絶縁構成の新しい SF<sub>6</sub> ガス絶縁変圧器の開発を進めてきた<sup>13)</sup>。この複合絶縁変圧器の構造を図 1 に示す。巻線と鉄心は絶縁筒内に納められ、その中にパーフルオロカーボンが満たされている。絶縁筒とタンクとの間には SF<sub>6</sub> ガスが充填され、この間の絶縁を保持する。パーフルオロカーボンは、ポンプにより冷却器を介して変圧器内を循環し、巻線と鉄心を冷却する。

パーフルオロカーボンは、動粘性係数が変圧器油に比べて 1/10 以下と低く、巻線内で流動しやすいこと、体積抵抗率が高いことなどから、変圧器内での流動帶電現象が懸念されるが、この種の液体の流動帶電特性についてはこれまでほとんど調べられていない。筆者らは、パーフルオロカーボンが今後各種の電気機器の冷媒として用いられることを考え、パーフルオロカーボンの流動帶電特性と帶電のしやすさを明らかにすることを試みた。

まず、絶縁液体の帶電度を測定する装置を用いて、絶縁油の帶電のしやすさに影響する絶縁油成分について調べ、パーフルオロカーボンを含む各種絶縁液体と各種の絶縁紙、フィルムとの間での帶電のしやすさの傾向を明らかにする。さらに、絶縁筒内をパーフルオロカーボンが流動するときの帶電特性を調べ、流速や液温の影響、固体材質の影響などを明らかにする。最後に、図 1 に示した絶縁構造の実規模変圧器を試作し、流動帶電試験を実施した結果を報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1 絶縁液体の帶電度測定装置

実験に用いた絶縁液体の帶電度測定装置を図 2 に示す。この装置は、各種の絶縁油と絶縁紙との間の帶電度を調べるために開発したものであり<sup>14)</sup>、今回これをパーフルオロカーボンにも適用した。装置は、電荷緩和容器、電荷発生容器、集電容器、絶縁台、微小電流計、記録計などから構成される。電荷発生容器は、その外側を

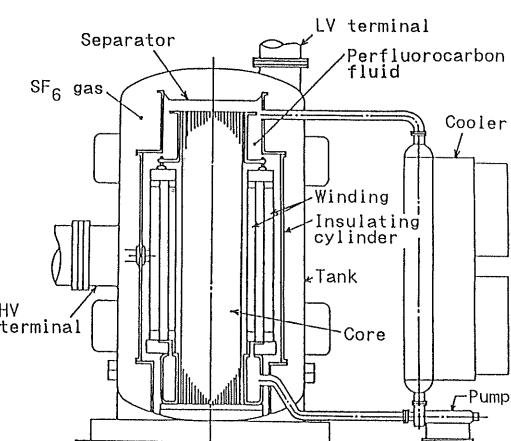


図 1 大容量不燃変圧器の概念構造

Fig. 1 Structural concept of large capacity, non-flammable transformer.

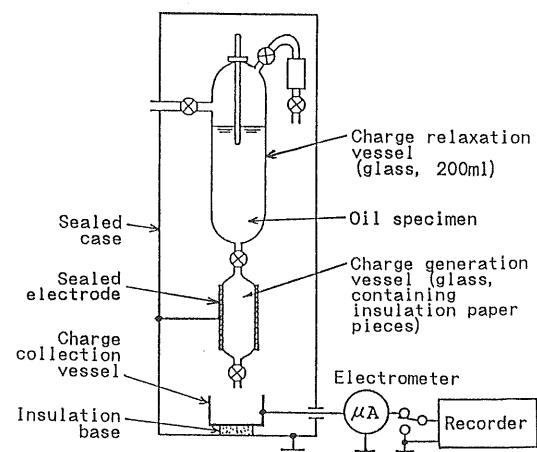


図 2 帯電度測定装置の構成

Fig. 2 Schematic of charge density measuring apparatus.

接地されたアルミニウム箔で覆われている。供試体となる絶縁紙、あるいは絶縁フィルムを  $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  角のチップに切り、これらを予め十分に乾燥させた後電荷発生容器内に充填し、供試液を含浸させる。次に電荷発生容器内で供試液をゆっくりと ( $0.3 \sim 0.8\text{ ml/s}$  で) 流下させ、そのときに帶電した供試液を集電容器に受け、集電容器から対地への漏れ電流を測定する。チップにした絶縁紙などを用いたのは、少量の供試液でも比較的大きな対地漏れ電流を得ることができるためである。電荷緩和容器、電荷発生容器とも使用前に十分に洗浄し、乾燥させたものを用いた。

集電容器の対地漏れ電流は電荷発生容器内で供試液が帶電したときの電流であり、供試液を流し始めてから  $1 \sim 2$  分後に対地漏れ電流がほぼ一定に落ち着いたときの電流  $I_s [\text{pA}]$  と、そのときの平均流量  $Q [\text{ml/s}]$  を測定する。このとき、供試液の帶電電荷量  $\sigma [\text{pC/ml}]$  は、

$$\sigma = I_s / Q \quad (1)$$

として求められる<sup>14)</sup>。

絶縁紙あるいはフィルムと供試液との界面での液体の帶電電荷量  $\sigma_p$  は、電荷発生容器内に絶縁紙あるいはフィルムチップを充填していない状態での供試液の帶電電荷量  $\sigma_0$  を同様にして求めた後、

$$\sigma_p = \sigma - \sigma_0 \quad (2)$$

として求めた。以下ではこの帶電電荷量  $\sigma_p$  を供試液の帶電電荷量あるいは帶電度とする。測定は各ケース 3 回実施し、その平均値をもってそのときの帶電度とした。

## 2.2 絶縁筒内の液流动モデル

ペーフルオロカーボンが絶縁筒内を流动するときの流动電流特性を調べる実験に用いた絶縁筒モデルと、その実験装置の構成を図 3 に示す。絶縁筒モデルは、変圧器でよく使われるプレスボード、あるいはポリエチレンテレフタレート（以下 PET）からなるもので、内径 12 mm、長さ 1 m のパイプとし、外側電極（内径 15.8 mm のステンレス管）の内側に巻き込んだものである。絶縁筒は、試験装置に組み込む前に十分に乾燥させたも

のを用いた。

この実験装置で、リザーブタンク内の供試液はポンプにより絶縁筒モデル内に流れ込み、そこで帶電した後下流の緩和タンクに流れ込む。絶縁筒モデルは四ッ化エチレン製のフランジを介して大地から絶縁され、絶縁筒の外側電極から対地への漏れ電流を測ること、および緩和タンクを大地から絶縁し、緩和タンクから対地への漏れ電流を測ることの両者で絶縁筒内での流动電流を求めた。絶縁筒外側電極からの対地漏れ電流と緩和タンクからの対地漏れ電流とは、極性は逆であるが、ほぼ同じ大きさであることから、ポンプでの電荷発生は無視できるほど小さい。また、緩和タンクからの対地漏れ電流の方が、絶縁筒外側電極からの対地漏れ電流に比べて安定して測定でき、再現性もよいことから、本論文では、緩和タンクからの対地漏れ電流を絶縁筒内での流动電流の値として用いた。

供試液として脱気・脱水処理したペーフルオロカーボンを用い、絶縁筒内の流量は流量計を用いて測定された。絶縁筒内の平均流速は、変圧器で想定される  $0.2 \sim 2.0\text{ m/s}$  と変化させ、またリザーブタンク中の液体の温度を変えて流动電流に及ぼす液温の影響を調べた。

## 3. 実験結果と検討

### 3.1 各種液体の帶電度に及ぼす要因

#### 3.1.1 固体材料表面積の影響

絶縁紙やフィルムの種類が変わると、図 2 の帶電度測定装置で電荷発生容器に充填される絶縁チップの全表面積が変わることが考えられ、表面積が変わったときの相対評価ができる必要がある。全表面積の増加に比例して帶電度も直線的に増加すると考えられるが、この点について実験的に確認してみた。

供試液として帶電度が比較的大きい変圧器油を用い、同じセルロース系のプレスボード（厚さ  $0.8\text{ mm}$ ）、クラフト紙（厚さ  $0.15\text{ mm}$ ,  $0.25\text{ mm}$ ）、クリープ紙（厚さ  $0.15\text{ mm}$ ）を供試絶縁紙として用いた。そのときの各試料チップの全表面積と変圧器油の帶電度との関係について実測した結果を図 4 に示す。なお、全表面積にはチップの厚み部分の面積も含まれている。

図 4 から、変圧器油の帶電度は供試チップの全表面積にはほぼ比例して変化することがわかる。したがって、供試材料の全表面積が変わっても、ある一定のチップ全表面積を基準にして表面積で換算することにより、供試材料の間の相対評価ができるといえる。これまでには、変圧器油とプレスボードとの間での帶電度についてよく調べられていることから、以下ではプレスボードチップの全表面積  $380\text{ cm}^2$  を基準の全表面積とした。

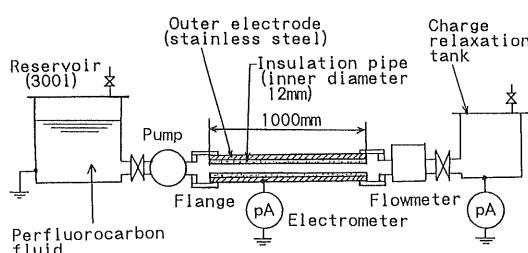


図 3 絶縁筒中の流動帶電の実験回路

Fig. 3 Fluid flow circuit with insulation pipe.

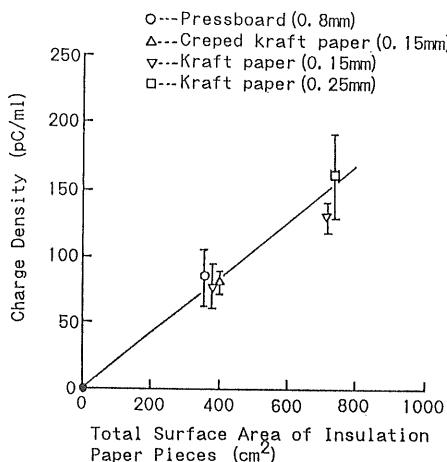


図4 絶縁チップの全表面積と変圧器油の帯電度との関係

Fig. 4 Relationship between total surface area of insulating paper pieces and charge density of transformer oil.

### 3.1.2 各種絶縁液体の帯電度比較

供試絶縁物としてプレスボード（厚さ 0.8 mm）を用い、図2の帶電度測定装置により各種の絶縁液体の帶電度を調べ、それらを比較した結果を図5に示す。供試液として変圧器油のほかに、 $\alpha$ -オレフィン重合油、流動パラフィン、*n*-ヘキサンなどの鎖状の飽和成分からなる絶縁液体、アルキルベンゼン、ドデシルベンゼンなどの芳香族成分からなる液体を用いた。変圧器油は JIS 1種2号の無添加絶縁油、その他はいずれも市販の合成油と試薬である。試験に際しては、供試液を 0.22  $\mu\text{m}$  のフィルタでろ過した後、脱気、脱水処理を行った。各種液体の水分、体積抵抗率は表2のとおりであった。

図5から、飽和成分からなる液体は帶電度がいずれも非常に小さいこと、芳香族成分からなる液体では、比較的体積抵抗率が高いドデシルベンゼンでも帶電度がかなり大きく、しかも負極性に帶電することがわかった。すなわち、分子構造が帶電のしやすさに大きく影響を与えていることがわかる。変圧器油は種々の化合物からなり、鎖状化合物を多く含む液体であるが、帶電度は他の液体に比べてかなり大きい。変圧器油の場合には含まれる不純物の影響が大きく、図5のような分類だけで帶電度を評価することはできないようである。

### 3.1.3 変圧器油での帶電度に及ぼす成分の影響

一般に、変圧器油の組成は飽和成分と不飽和成分に大別される。そのうちでも不飽和成分は、芳香族成分（硫黄化合物と非硫黄化合物）とレジン成分（塩基性窒素化合物と非塩基性窒素化合物）に分けられる。このような成分が変圧器油の帶電度に与える影響を調べるために、こ

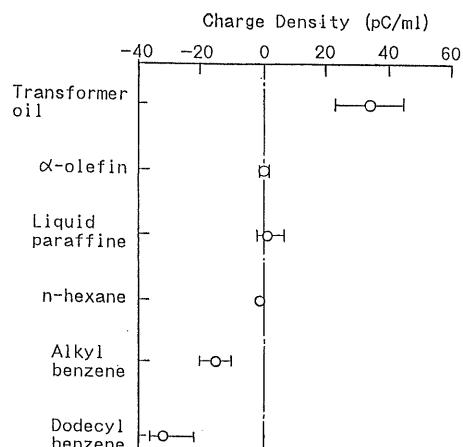


図5 各種絶縁液体の帯電度の比較

Fig. 5 Charge density of insulation liquids.

表2 供試絶縁油の水分と体積抵抗率

Table 2 Moisture content and resistivity of sample oils.

Sample oil	Moisture content (ppm)	Resistivity ( $\Omega\text{-cm}$ )
Transformer oil	12.0	$7.4 \times 10^{14}$
$\alpha$ -olefin	6.3	$3.6 \times 10^{16}$
Liquid paraffine	10.3	$1.5 \times 10^{16}$
<i>n</i> -hexane	8.3	$4.6 \times 10^{15}$
Alkyl benzene	8.5	$7.8 \times 10^{14}$
Dodecyl benzene	12.1	$1.5 \times 10^{16}$

これらの成分比を変えた変圧器油を作り、図2の帶電度測定装置によりその帶電度を調べてみた。供試絶縁物はプレスボードである。その結果を表3に示す。このうち、供試油AとBが通常使われている変圧器油である。

表3から、次のようなことがわかった。

- (1) レジン成分が多くなるほど帶電度も大きくなる傾向がある。供試油Hのように、レジン成分が少なくて芳香族成分が多いと帶電度も大きい。
- (2) 芳香族成分中の硫黄化合物が多いと帶電度も大きい。
- (3) 硫黄化合物やレジン成分が少ないと帶電度は非常に小さくなり、負極性の傾向を示すようになる。供試油Iのように飽和成分 100% で帶電度が非常に小さいことは、図5の傾向ともよく一致する。
- (4) 芳香族成分中の非硫黄化合物は、帶電度にほとんど影響を与えない。

これらより、芳香族成分中の硫黄化合物、およびレジン成分が変圧器油の帶電度に大きな影響を与えているこ

表 3 各種変圧器油の成分と帶電度との関係

Table 3 Relationship between content of transformer oil and charge density of the oil.

Sample oil	Content of oil						Charge density of oil (pC/ml)	
	saturated (%)	aromatics (%)		resin (ppm)				
		sulfur compound	non-sulfur compound	basic nitrogen compound	non-basic nitrogen compound			
A	70.0	0.32	29.7	3.2	0.6	68		
B	71.6	0.32	28.1	<1	2.0	34		
C	71.0	0.34	28.7	<1	<1	22		
D	71.0	0.34	28.7	<1	10	41		
E	71.0	0.34	28.7	10	10	81		
F	71.0	0.34	28.7	20	10	71		
G	71.0	<0.01	25.0	<1	<1	-4		
H	37.0	0.74	62.3	<1	<1	66		
I	100	<0.01	<1	<1	<1	-6		

ことがわかる。

### 3.2 パーフルオロカーボンの帶電度

パーフルオロカーボンとして 2 種類の液体を実験に用いた。主成分として直鎖状の飽和成分である  $C_8F_{18}$  を多く含むものを PFC-A、主成分として環状の不飽和成分である  $C_8F_{16}O$  を多く含むものを PFC-B と呼ぶ。精製度の違いにより PFC-A は不純物をほとんど含まず、PFC-B は微量の不純物を含んでいる。しかし両者とも一般的な特性は表 1 のとおりであり、 $\tan \delta$  は 0.001% 以下、体積抵抗率も  $6.0 \times 10^{18} \Omega \cdot m$  以上であり、液中水分も 5~8 ppm と小さかった。

固体絶縁材料としては、不燃変圧器に用いられる予想される材料であるプレスボード（厚さ 0.8 mm）、PET（厚さ 0.04 mm）、四フッ化エチレン（厚さ 0.4 mm、以下 PTFE）、芳香族ポリアミド紙（アラミド紙、厚さ 0.05 mm）を選んだ。帶電度測定においては、これらの材料を 5 mm × 5 mm 角に切り、供試材料とした。パーフルオロカーボンは比重が 1.76 と非常に大きいため、これらの材料を図 2 の電荷発生容器に入れると絶縁チップの方が浮き上ることがあり、容器一杯に供試絶縁チップを入れて試験した。

パーフルオロカーボン（PFC-A, B）を供試液とし、プレスボード、PET、PTFE、アラミド紙との間での流動帶電により生ずる集電容器の対地漏れ電流の実測結果を図 6 に示す。PFC-A は、どの固体材料でも漏れ電流は小さく、バックグラウンドノイズレベルに近い微小電流であった。この場合、電荷発生容器内に固体材料を入れないブランク状態での漏れ電流は負極性であったため、固体絶縁物との間では正極性に帶電しやすいといえる。

一方 PFC-B の場合、PFC-A に比べて対地漏れ電流はプレスボードで 1 衍近く大きく、PET、PTFE などの高分子フィルムでは 2 衍近く大きくなり、流動帶電しやすいこと、液は全体的に負極性に帶電する傾向があることがわかった。変圧器油の場合には、ポリエチレンやポリスチレンのような無極性高分子では、セルロース絶縁紙に比べて流動電流は極めて小さいことが報告されているが<sup>15)</sup>、パーフルオロカーボンの場合にはこの傾向が逆になつた。

集電容器からの対地漏れ電流より帶電度  $\sigma_p$  [pC/ml] を求めた結果をまとめて表 4 に示す。表 4 の値は基準表面積 380 cm<sup>2</sup> での帶電度に換算した値である。直鎖状の飽和成分を多く含む PFC-A が帶電度が小さく、環状の不飽和成分を多く含む PFC-B の方が帶電度が大きい傾向にある。このような傾向は前記の図 5 とよく合っている。また、元素分析した結果によれば、PFC-A 中には不純物としての全塩素成分は検出できなかったが、PFC-B 中には 0.07% 程度の全塩素成分を不純物として含んでいた。このような分子構造の違いや、不純物の影響などにより帶電度に差がでてきたものと考えられる。

### 3.3 絶縁筒内の流動電流特性

図 7 は、図 3 のプレスボード製の絶縁筒内をパーフルオロカーボン（PFC-B）が流動したときの流動電流の流速依存性を示し、図 8 は PET 製の絶縁筒内の流動電流の流速依存性を示す。いずれも、液温をパラメータとしている。1 pA オーダーの流動電流はバックグラウンドノイズレベルに近い微小電流である。比較のため、変圧器油がほぼ同じような寸法のプレスボード筒中を流動したときの特性<sup>14)</sup>を図 7 中に記載した。図 7 より、パー-

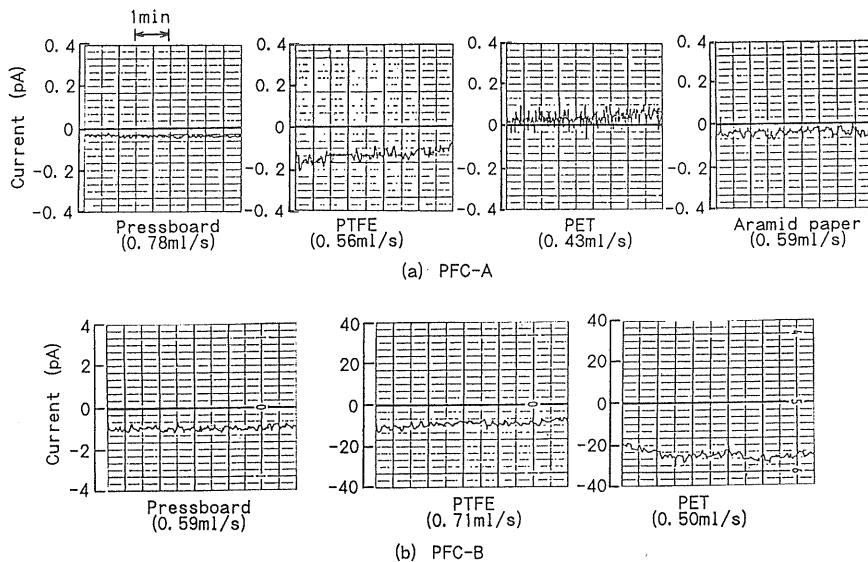


図 6 集電容器からの対地漏れ電流の特性

Fig. 6 Time dependence of the leakage currents from the charge collection vessel to the ground.

表 4 各種固体絶縁物に対するペーフルオロカーボンの帶電度

Table 4 Charge densities of perfluorocarbon flowed through solid materials.

Solid material	Charge density (pC/ml)	
	PFC-A	PFC-B
Pressboard	0.14	0.18
PET	<0.01	-3.0
PTFE	0.06	-5.5
Aramid paper	<0.01	-

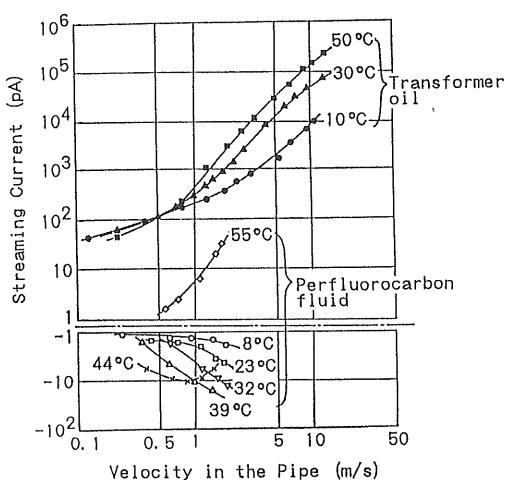


図 7 プレスボード筒内の流動電流の速度依存性

Fig. 7 Velocity dependence of streaming current in the insulation pipe made of pressboard.

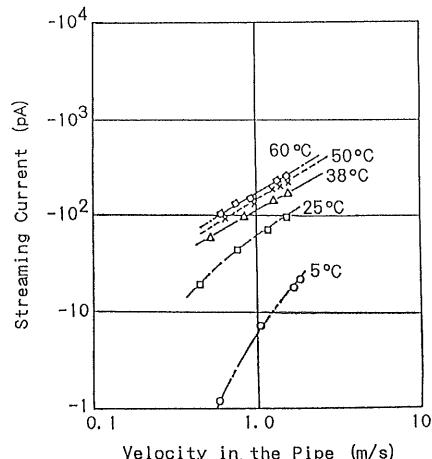


図 8 PET 筒内のペーフルオロカーボンの流動電流の速度依存性

Fig. 8 Velocity dependence of streaming current of perfluorocarbon in the insulation pipe made of PET.

ルオロカーボンは、変圧器油に比べて流動電流が1~2桁小さく、非常に帶電しにくいことが分かる。また、図7、8から、バーフルオロカーボンがPETやプレスボードと接して流れるときには、液体が負極性に帶電しやすいことがわかる。また、PETと接して流動するときの方が、プレスボードの場合よりも流動電流が約1桁近く大きいことがわかる。このような傾向は、前項での帶電度測定結果ともよく合っている。

図9は、温度と流動電流との関係をプロットしたもので、(a)がプレスボードの場合、(b)がPETの場合である。温度が高くなるにつれて流動電流も大きくなり、ある温度で極大値を持つような特性を示すが、プレスボードの場合には、40°C近くで流動電流が極大値を示した後、さらに温度が高くなると流動電流の極性が逆転するような特性を示した。しかも、流速が速い方が流動電流が極大を示す温度が低くなる傾向がある。このような温度依存性は、バーフルオロカーボン中のイオンに対するプレスボードのイオン選択吸着能が温度により変化したことによるものと考えられる。このような流動電流の極性逆転現象は、パイプ内の絶縁油の流動帶電においてはあまり見られず、変圧器用クーラーで変圧器油を流動させたときに一部見られた程度である<sup>4)</sup>。

#### 4. 実規模変圧器での流動帶電試験結果

最初に述べたように、バーフルオロカーボンを適用した図1の構造の超高压大容量の不燃変圧器の開発を進めている。今回の実験により、バーフルオロカーボンは変圧器油に比べて帶電しにくいことがわかったが、実際の変圧器では液体の流路構造は単純ではないため、実変圧

器構造でも流動帶電に対して十分に信頼性があることを検証しておく必要があり、今回 275 kV 100 MVA 実規模三相変圧器を試作し<sup>13)</sup>、流動帶電試験を実施した。

この変圧器では、巻線絶縁にアラミド紙、内部構造物にプレスボードが主として用いられ、バーフルオロカーボンとしては今回の実験でこれら材料に対して帶電度が非常に小さいと評価されたPFC-Aを使用している。図10は試作した実規模三相変圧器の試験姿である。

本試作器の流動帶電試験では、ポンプ運転台数は定格流量相当の2台とし、変圧器は無負荷・無課電とした。

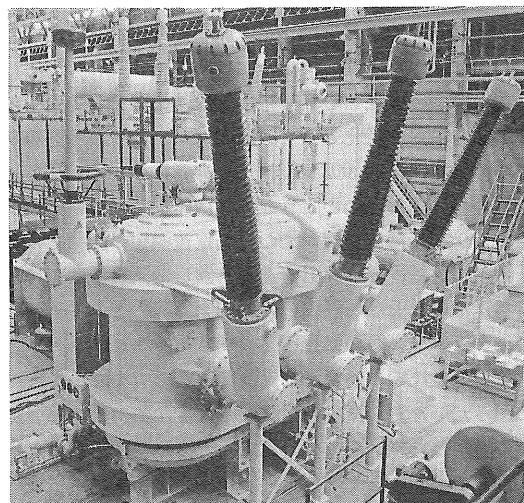
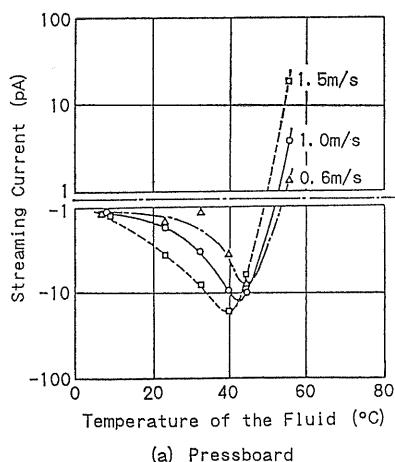
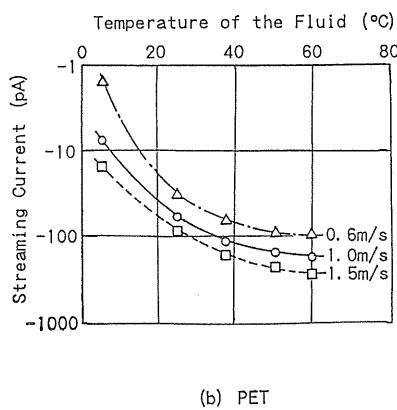


図10 275 kV 100 MVA 実規模三相不燃変圧器の外観

Fig. 10 Exterior view of a prototype 275 kV 100 MVA three-phase non-flammable transformer.



(a) Pressboard



(b) PET

図9 絶縁筒内でのバーフルオロカーボンの流動電流の温度依存性

Fig. 9 Temperature dependence of streaming current of the perfluorocarbon in the insulation pipes.

表 5 実規模不燃変圧器での巻線からの対地漏れ電流

Table 5 Leakage currents from windings in the prototype non-flammable transformer.

Liquid temperature (°C)	Leakage currents from windings (μA)	
	primary	secondary
36.5	-0.002	-0.0016
50.0	-0.002	-0.0017

1回の試験に要した時間は約5時間である。試験では変圧器の一次および二次巻線からの対地漏れ電流と、内部部分放電発生の有無を調べた。試験回路は油入り変圧器での試験回路<sup>4)</sup>と同じである。

表5はこの変圧器の流动帶電試験結果をまとめたものである。液温を変化させて試験したが、いずれも巻線からの漏れ電流は0.002 μA以下と非常に小さく、極性は負極性であった。このような特性は、前項での帶電度測定、および絶縁筒モデルでの流动電流測定の結果とほぼ一致している。ほぼ同じ構造の内鉄形油入変圧器では、定格送油量における巻線の対地漏れ電流は0.1~1 μAのオーダーであるのに比べると<sup>4)</sup>、パーカーフルオロカーボン液浸型変圧器の巻線漏れ電流はきわめて小さいことがわかった。なお、流动帶電試験中は変圧器内部で部分放電の発生はなく、静電気帶電に対して十分な信頼性があることが確認されている。

## 5. む す び

絶縁性液体の帶電度測定器を用いて、変圧器油などの絶縁液体や、不燃変圧器に用いられるパーカーフルオロカーボンの帶電度を測定し、分子構造の違い、不純物の影響、絶縁材料の影響などを調べた。飽和成分からなる絶縁液体は帶電度が小さい傾向にあり、芳香族成分からなる液体の方が帶電度が大きく、負極性に帶電する傾向にあることがわかった。このうち変圧器油については、芳香族成分中の硫黄化合物、およびレジン成分が帶電度に大きな影響を与えることがわかった。パーカーフルオロカーボンについては、直鎖状の飽和成分を多く含むPFC-Aが帶電度が小さく、環状の不飽和成分を多く含むPFC-Bの方が帶電度が大きい傾向にあることがわかった。PFC-B中には0.07%程度の全塩素成分を不純物として含んでおり、不純物の影響も含まれる。

絶縁筒中のパーカーフルオロカーボン(PFC-B)の流动帶電では、変圧器油に比べて流动電流が1~2桁くらい小さく、液体が負極性に帶電する傾向があること、PETに比べてプレスボードとの間の方が帶電しにくいこと、プレスボードとの間では流动電流の温度特性において極

性の逆転があることなどが明らかになった。

最後に、パーカーフルオロカーボンを適用した実規模の三相275 kV 100 MVA 不燃変圧器を試験し、巻線の対地漏れ電流は0.002 μA以下と非常に小さく、内部部分放電の発生もなく、静電気帶電に対しても優れた性能を有することを検証できた。今後は、不燃変圧器の初回実用器である275 kV 250 MVA 三相変圧器について、長期的な信頼性を検証することを予定している。

本研究を進めるに当たり、ご指導、ご協力いただいた中部電力(株)の関係各位に深謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) A. Klinkenberg and J. Minne: *Electrostatics in the Petroleum Industry*, Elsevier Publishing Company, Amsterdam (1958)
- 2) 田村良平、栗田健太郎、村田久夫: 電気学会誌, 99 (1979) 913
- 3) M. Yasuda, K. Goto, H. Okubo, T. Ishii, E. Mori and M. Masunaga: *IEEE PES Winter Meeting*, 82 WM 179-2, New York (1982)
- 4) M. Higaki, Y. Kako, M. Moriyama, M. Hirano, K. Hiraishi and K. Kurita: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-98 (1979) 1259
- 5) S. Shimizu, M. Murata and M. Honda: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-98 (1979) 1224
- 6) R. Tamura, Y. Miura, T. Watanabe, T. Ishii, N. Yamada and T. Nitta: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-99 (1980) 335
- 7) T.V. Oommen and S.R. Lindgren: *IEEE PES Transmission and Distribution Conference*, 89 TD 399-7 PWRD, New Orleans (1989)
- 8) T. Takagi, M. Higaki, K. Endoo, T. Shirone, K. Hiraishi and K. Kawashima: *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3 (1988) 1809
- 9) W.J. McNutt, W.H. Rathbun, J.P. Slocik and J.P. Vora: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101 (1982) 2171
- 10) H. Muramoto, T. Yamazaki, Y. Murakami, T. Yanari, M. Ikeda, H. Okubo and Y. Togawa: *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3 (1988) 1067
- 11) Electric Power Research Institute: *Gas/Vapor and Fire-Resistant Transformers*, EI-1430, Palo Alto (1980)
- 12) Y. Harumoto, Y. Kabayama, K. Kuroda, Y. Yoshida, H. Kan, Y. Miura, E. Tamakai and T. Hakata: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-104 (1985) 2501
- 13) Y. Mukaiyama, F. Nonaka, I. Takagi, M. Higaki, K. Endoo, T. Sakamoto, K. Hiraishi and K. Kawashima: *IEEE Transactions on Power Delivery*, 6 (1991) 1108
- 14) 檜垣 勝、堤 泰行、大谷弘容、月岡淑朗: 電気学会論文誌A, 104-A (1984) 329
- 15) 菅 寿郎、石井敏次、宮本晃男、山田直也: 日石レビュ-, 23 (1981) 15