SF₆ガス溶解パーフルオロカーボン液の 平等電界における絶縁破壊特性

正員 宮 城 克 徳 (明電舎)

正員 各 務 謙 二 (明電舎)

正員 杉 本 俊 郎 (明電舎)

Breakdown Effects of Dissolved SF₆ Gas on Uniform Field in Perfluorocarbon Liquid
Katsunori Miyagi, Member, Kenji Kagami, Member, Toshiro Sugimoto, Member (Meidensya Corporation)

Non-flammable large-capacity and liquid-cooled transformers have been developed. The transformers are used perfluorocarbon (PFC) liquid and SF₆ gas for the cooling and insulating systems.

This paper describes the uniform breakdown characteristics in PFC liquid with the solubility of SF₆ under AC and lightning impulse voltages. The breakdown strengths of the PFC liquid with dissolved SF₆ have been effected the PFC vapor and SF₆ gas pressure above the liquid. Further, the breakdown voltage decreases extremely in existence of gas bubbles in the liquid under AC.

キーワード：パーフルオロカーボン液，SF₆ガス溶解，気泡，絶縁破壊

1. はじめに

近年，発熱量・発熱密度の高い電力機器や電子機器などの小形化にともない，不燃性でかつ冷却特性の優れたパーフルオロカーボン（以下，PFCと略記）液の採用が検討・実用化されている。また，PFC液は絶縁用の液体としても優れた性質を有しており，これが電子・電気機器に応用されるもう一つの理由である。例えば，PFC液を用いた大容量変圧器の絶縁・冷却方法としては，散布方式や液漬方式など⁽¹⁾が考えられており，いずれの方式もSF₆ガスとPFC液を分離，混在しているのが特徴である。これまで，筆者らはセミプール液浸方式による液冷却式不燃変圧器巻線の絶縁特性について検討を進めてきた⁽²⁾。

一方，PFC液とSF₆ガスが接触した場合，PFC液中にSF₆ガスが溶解し，変圧器容器内のガス圧力の低下が想定される。このためPFC液の沸点が下がり，巻線の温度変化によってPFC液が沸騰し，気泡を生ずる可能性がある。このような状態において，PFC液がどのような絶縁特性を示すかは機器の絶縁信頼性上，重要な問題となる。しかし，PFC液の絶縁特性に関する研究は比較的新しく，PFC液にSF₆ガスが溶解した場合の絶縁特性におよぼす影響についての報告はきわめて少ない⁽³⁾⁽⁴⁾。

本論文ではSF₆ガスとPFC液の接触を想定し，SF₆ガスが溶解したPFC液について，平行平板電極を用いて

行った交流および雷インパルス絶縁特性に関する基礎的な実験結果を報告する。

2. 試料および実験方法

〈2・1〉 PFC液のSF₆ガス溶解性 実験で用いたPFC液は，C₈F₁₈O，C₈F₁₈を主成分とする不活性液体である⁽⁵⁾。表1にPFC液と変圧器油（JIS2号）との物性比較を示す。PFC液は一般的に次のような特徴を有している。：(1)引火点がない，(2)密度が大きい，(3)動粘度が低い，(4)流動帯電度が低い，(5)SF₆ガスの溶解性が大きい。これらの性質はF分子やC-F結合に起因し，フッ素化合物とはよく混ざり合う。一般的に，PFC液へのSF₆ガスの溶解度は(1)式のHenry則で表される。

表1 PFC液の物性値(25℃, 1atm)
Table1. Typical properties of PFC liquid.

項 目	PFC液	変圧器油
引 火 点 (℃)	なし	145
沸 点 (℃)	101	280~450
密 度 (g/cm ³)	1.76	0.86
動 粘 度 (cSt)	0.8	14.1
比 熱 (cal/g℃)	0.25	0.45
比 誘 電 率	1.86	2.2~2.4
流動帯電度 (pC/ml)	0.2~0.5	40~90
N ₂ ガス溶解量 (ml/ml)	0.42	0.08
SF ₆ ガス溶解量 (ml/ml)	7.7	0.4

図1 PFC液/SF₆ガス溶解のHenry曲線
Fig.1. Henry's parameter for PFC / SF₆ solutions.

$$X_g = H(T) \cdot P_g(T) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、X_g: SF₆ガスが溶解したPFC液の
モル分率、1/H(T): Henry定数(torr)、P_g(T):
SF₆ガスの分圧

一般に、X_gは(2)式で定義される。

$$X_g = \frac{G_{mol}}{L_{mol} + G_{mol}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、L_{mol}: PFC液のモル数、G_{mol}: 溶解した
SF₆ガスのモル数

また、H(T)は図1の溶解特性⁽⁹⁾から、(3)式で表されて
いる。

$$1/H(T) = 1.41 \cdot 10^{-12} \cdot T^{6.43} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、T: 絶対温度(°K)

さらに、P_g(T)はガス密度が一定の場合、およそ(4)式
の状態方程式にしたがって求められる。

$$P_g(T) = (\rho/M) \cdot R \cdot T \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、ρ: SF₆ガス密度(g/l)、M: SF₆ガ
スのグラム分子量(146.06g/mol)、R: 気体定数
(0.0821l·atm/°K·mol)

したがって、PFC液中に溶解したSF₆ガスの溶解量S_g
は、(5)式で求められる。

$$S_g = G_{mol} / (\rho/M) \quad \dots\dots\dots (5)$$

このように、SF₆ガスとPFC液におけるSF₆ガスの溶
解量は、SF₆ガスの分圧と温度から求めることができる。

〈2.2〉 SF₆ガスとPFC液混合系の平衡 密閉タン
ク内において、SF₆ガスとPFC液混合系が温度Tで平
衡状態に達した時のタンク内部の圧力(全圧力)P(T)は、
(6)式のDalton則で表される。

$$P(T) = P_{\pi}(T) + P_g(T) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、P_π(T): PFC液の蒸気圧

P_π(T)はPFC液の蒸気圧特性⁽⁷⁾から温度Tにおける蒸
気圧を求めることができる。

多量のPFC液を使用する場合、SF₆ガスはPFC液
への溶解性が大きく、実際には温度変化によりガス密度が
変化する。このため、P_g(T)はSF₆ガスの溶解特性を考
慮する必要がある、SF₆ガスとPFC液混合系(密閉系)
において、初期平衡状態からの温度変化時における圧力平
衡を図2のフローで考えることができる。ここでのポイント
は、PFC液へのSF₆ガス溶解量がSF₆ガス自身の分
圧に左右される点であり、計算で求める場合はSF₆ガス
の分圧と溶解量が平衡に達するまで反復する必要がある。

〈2.3〉 実験方法 実験の電極系は直径100mm、端部
半径10mmの平行平板電極とし、材質は絶縁破壊時の損傷
が比較的少ない黄銅金属を鏡面仕上げしたものを用いた。
電極を収納する実験用タンクは内容積が150lのタンクを用
い、タンクの側面にはアクリル製観測窓、圧力計および温
度センサーを取り付けた。また、PFC液の加熱には定格
が220V、2kWのヒータをタンク下部に設置し、その入力電
源を調整して用いた。

本実験装置の構成を図3に示す。実験方法は次のよう
である。タンク内部を0.1torr以下で1時間の排気を行った
後、脱気装置にて0.01ml/ml(PFC液1ml中のガス含
有量)以下に脱ガスしたPFC液をゼオライト、および濾
過フィルタ(0.5μm)を経て、実験タンク内に真空注液(12
l)した。次に、SF₆ガスの封入、およびヒータによる加
熱をしながらPFC液の循環(タンク→ゼオライト→濾過
フィルタ→タンク)を繰り返し行い、全圧力および温度が

図2 PFC液とSF₆ガス混合系の圧力平衡フロー
Fig.2. Pressure equilibrium flow of PFC / SF₆ mixture.

図3 実験装置の構成
Fig.3. Schematic of test equipment.

所定の値に平衡するまで SF₆ ガスを溶解させた。また、SF₆ ガス溶解量は、PFC 液 100 ml 中の溶解ガス量をガスクロマトグラフィーにて測定した。なお、電極間のギャップ長 d は 3 mm とした。

絶縁破壊の実験は、SF₆ ガスと PFC 液混合系について、(i) 実器を想定するために、初期平衡状態 (温度 20℃、全圧力 0.15 MPa) から、変圧器運転時の平均温度範囲 (20～80℃) で温度を変化させたタンク内部平衡モデル、および破壊に及ぼす温度・圧力因子の影響を調査するために、(ii) 温度を 30～70℃ と変化させ、全圧力を 0.15 MPa で平衡するよう SF₆ ガスの溶解量を調整した温度因子モデル、(iii) 温度を 30℃ で一定とし、SF₆ ガスを溶解させて全圧力を 0.1～0.3 MPa で平衡させた圧力因子モデルについて検討した。

(ii) および (iii) のモデルでは平衡状態における条件のほかに、実器でのホットスポットを想定するため、PFC 液をヒータで過熱して核沸騰状態にし、局部的に気泡が発生した条件での絶縁現象も検討した。なお、電極間に達した気泡の最大サイズは静止写真および目視観測から、直径 2 mm 程度である。

また、実験条件として、① PFC 液中に気泡のない平衡状態を純液相、② PFC 液を核沸騰させて気泡の発生した状態を気泡相、とに区分した。

電圧印加方法は交流では 3 kV/sec の上昇法により、雷インパルス (+1.2/50 μs) は予想破壊電圧の 50% から 3～5% のステップアップ法により絶縁破壊するまで行った。なお、実験回数は各実験とも 5～8 回である。

3. 実験結果

〈3.1〉 タンク内部平衡モデル 実験系の初期平衡状態 (温度 20℃、全圧力 0.15 MPa、SF₆ ガス溶解量 80%) からの圧力-温度特性 (20～80℃)、および PFC 液の SF₆ ガス溶解特性を併せて図 4 に示す。ここで、各温度 T における SF₆ ガス溶解量 S_g 、PFC 蒸気圧 P_π 、および全圧力 P

は測定値である。また、SF₆ ガスの分圧 P_g は (6) 式から求めた。図 4 から T の上昇にともない S_g は減少し、 P_π 、 P および P_g はそれぞれ増加することが認められた。すなわち、 T が 20℃ から 80℃ で平衡状態になると、PFC 液 100 ml 中の S_g は 720 ml から 250 ml に減少し、 P は 0.15 MPa から 0.3 MPa に増加した。これは温度上昇により、PFC 自身の蒸発、および PFC 液中に溶解していた SF₆ ガスが気相中へ発散したためである。

各温度の平衡状態における PFC 液の絶縁破壊特性を図 5 に示す。なお、横軸には実験系の温度および全圧力を併記した。図 5 から、温度 T の上昇にともない全圧力 P が増加した結果、雷インパルス破壊電圧は高くなるが、交流破壊電圧は平坦なことがわかる。また、絶縁特性の指標を表すインパルス比 (雷インパルス破壊/交流破壊の波高値) は 1.5～1.8 程度であり、SF₆ ガス溶解油の実験結果⁽⁶⁾ と同程度である。

しかし、この結果からは SF₆ ガス溶解 PFC 液の絶縁破壊が温度、圧力、あるいはガス溶解量によってどのように

図4 タンク内部平衡モデルの圧力-温度特性および SF₆ ガス溶解量-温度特性

Fig.4. Pressure-temperature and dissolved SF₆ gas -temperature curves of the tank inner equilibrium model.

図5 タンク内部平衡モデルの絶縁破壊特性
Fig.5. Breakdown voltage of the tank inner equilibrium model.

図7 温度因子モデルの絶縁破壊特性
Fig.7. Breakdown voltage of the temperature factor model.

影響を受けるのかは分離できない。

〈3・2〉 温度因子モデル SF_6 ガス溶解PFC液の絶縁破壊に及ぼす温度の影響を調べるために、PFC液が所定の温度 T (30, 50, 70°C)で平衡するよう SF_6 ガスを封入した。ここで、PFC液面上の平衡圧力(全圧力) P を0.15 MPaで一定とした。図6は実験系におけるそれぞれの T に対する SF_6 ガス溶解量 S_g 、PFC蒸気圧 P_π および SF_6 ガス分圧 P_g の値である。図6から、 T が上昇すると P_π は増加し、 S_g および P_g は減少する。例えば、 T が30°Cおよび70°Cの S_g は、それぞれ680 mlおよび310 mlになった。

各温度におけるPFC液の純液相および気泡相の絶縁破壊特性を図7に示す。図7から、純液相において交流および雷インパルスともに、温度変化によって破壊電圧はほとんど変わらない⁽⁹⁾。この結果から、 SF_6 ガスの溶解量は

PFC液の破壊特性にあまり寄与しないと考えられる。また、気泡相における破壊電圧も温度による差は認められないが、純液相の破壊電圧に対し、交流では35~45%、雷インパルスでは65~70%程度となり⁽¹⁰⁾、交流における破壊の低下が顕著であった。

さらに、気泡相における破壊電圧のばらつきは気泡の状態によって影響されるため、純液相よりも若干大きい。この特性は気泡の挙動に関連しており、〈3・4〉項に述べる。

〈3・3〉 圧力因子モデル 絶縁破壊におよぼすタンク内部圧力(全圧力) P の影響を調べるために、 P が所定の値(0.1, 0.15, 0.2, 0.3 MPa)になるよう SF_6 ガスの封入圧力を調整した。ここで、平衡する温度 T を30°Cで一定とした。図8は実験系における P に対する SF_6 ガス溶解量 S_g 、PFC蒸気圧 P_π および SF_6 ガス分圧 P_g の値である。ただし、 P_π は37 torrで一定である。これから、 P が増加すると P_g も増加するが、 S_g はあまり増えない。例えば、 P が

図6 温度因子モデルの圧力-温度特性および SF_6 ガス溶解量-温度特性
Fig.6. Pressure-temperature and dissolved SF_6 gas temperature curves of the temperature factor model.

図8 圧力因子モデルの圧力-ガス溶解特性
Fig.8. Pressure-dissolved gas effects of the pressure factor model.

図9 圧力因子モデルの純液相における絶縁破壊特性

Fig.9. Breakdown voltage of the pressure factor model in liquid phase.

図10 圧力因子モデルの気泡相における絶縁破壊特性

Fig.10. Breakdown voltage of the pressure factor model in bubble phase.

0.1MPaから0.3MPaになると、 P_g もおおよそ0.1MPaから0.3MPaに上昇するが、 S_g は660m^lから755m^lと若干増える程度である。これは S_g が圧力よりも温度変化に大きく影響するためである。

純液相における絶縁破壊特性をN₂ガス溶解PFC液(PFC液100m^l中のN₂ガス溶解量が10~20m^l)における絶縁特性⁽¹¹⁾と併せて図9に示す。また、気泡相における絶縁破壊特性をSF₆ガス単体の絶縁特性と併せて図10に示す。

純液相において、SF₆ガス溶解液の破壊特性は、交流では圧力の影響があまりみられないが、雷インパルスでは圧力依存性を示し、0.1MPaの破壊電圧に比べて0.3MPaの破壊電圧は約1.4倍高くなる。また、全圧力 P が0.2~0.3MPaにおけるSF₆ガス溶解液の破壊強度は、N₂ガス溶解液とほぼ同程度である。 P が0.2MPa以下においてSF₆ガス溶解液の破壊強度はN₂ガス溶解液よりも低下しており、 P が0.1MPaでは交流で5%、雷インパルスで15%程度低下している。これは液温が一定の場合、圧力が低くなるとPFC液への加圧が低下し、PFC液中溶解ガスへの加圧も低下する。一方、PFC液の溶解ガス量は全圧力 P にあまり影響せず、SF₆ガスの溶解量はN₂ガスのおおよそ50倍である。このため、全圧力 P が0.2MPa以下におけるSF₆ガス溶解PFC液では特に雷インパルスの破壊強度への影響が大きく現れたものと考えられる。

このようなガス溶解PFC液の破壊機構として、交流破壊は圧力よりも、液中に存在する不純物などの微粒子が交流電界によって電極間を往復移動しながら集合し、これらの微粒子運動により破壊が支配されるものと考えられる。

一方、雷インパルス破壊は、電極表面に付着した液中溶存ガスなどが電界によって液中へ放出され、ここで形成される電界が破壊に起因するため、圧力の影響が顕著になった

図11 気泡相における絶縁破壊の様相

Fig.11. Breakdown behavior in bubble phase.

と考えられる⁽¹²⁾。

気泡相において、交流破壊強度は圧力が増加すると破壊電圧も高くなるが、その破壊強度はSF₆ガス単体の破壊強度とほぼ同程度である。また、〈3・4〉項で述べるように、破壊が気泡内部で生じていることから、気泡の主成分はSF₆と考えられる。一方、雷インパルス破壊電圧はSF₆ガス単体の強度まで低下することなく、圧力が増加するほど、純液相の破壊強度に近づく傾向にある。したがって、破壊強度のインパルス比は2.5~3.5となり、純液相よりも大きくなる。ただし、破壊電圧のばらつきは気泡の大きさ

等の状態が一定でないことから、純液相よりも若干大きい。

〈3・4〉 破壊に及ぼす気泡の挙動 気泡相の実験において電極間に存在する気泡の挙動は、交流と雷インパルスでは図11のような差が認められる。交流の場合、電極間を浮遊する気泡((a)図)が集積および合体し、電極間に長く引き延ばされて変形((c)図)した後、電極間を破壊する((d)図)。一方、雷インパルスでは、電圧印加後、破壊に至るまで高周波CTにより検出した電流パルス波形に変歪が観測されないことから、気泡の変形を生じていないものと推定される((b)図)。

このような気泡の変形過程の相違は、液体窒素などの極低温液体中の現象と類似して説明できる⁽¹²⁾。交流では電界の静電力によって電極間の気泡が振動・合体し、蒸気柱を形成して橋絡する。絶縁破壊はこの蒸気柱で起きるため、破壊電圧は極度に低下する。一方、雷インパルスに対しては印加電界の時間領域が μsec と極めて短く、気泡に作用する時間が短いため、蒸気柱を形成する機会がほとんどない。したがって、絶縁破壊は変形のない気泡と液体の複合系で起きると考えられる。このため、気泡が存在しても破壊電圧は交流ほど大きく低下しない。

4. ま と め

密閉系において、PFC液中に溶解したSF₆ガスが交流および雷インパルスの絶縁破壊特性に及ぼす影響について、平行平板電極系を用いて検討を行った。その結果を要約すると、次のようである。

(1) PFC液に溶解したSF₆ガス量は、本実験のような圧力の下ではPFC液の絶縁特性にあまり影響しない。

(2) SF₆ガスが溶解したPFC液に圧力を加えると、雷インパルス破壊強度は上昇するが、交流破壊強度は雷インパルスほど影響しない。

(3) SF₆ガス溶解PFC液中に気泡が存在すると、交流ではSF₆ガス単体の絶縁強度まで低下する可能性があることを示した。

最後に、本論文をまとめるにあたり、有益なご教示を賜った室蘭工業大学 中尾好隆教授に深く感謝の意を表す。

(平成10年5月28日受付, 平成10年11月4日再受付)

文 献

- (1) 「不燃性・難燃性変圧器の現状とその動向」, 電気学会技報, No. 459 (平5)
- (2) 宮城克徳・堀井重信・杉本俊郎: 「液冷却式不燃変圧器における液体-固体絶縁物の絶縁特性」 電学論B, 115, 312~319 (平7)

- (3) 高木 勲・古川貞夫・遠藤 馨・白根 隆・鎌田 謙・檜垣 勝・川島啓三郎: 「パーフルオロカーボン液の絶縁破壊特性」, 電気学会放電・絶縁材料合同研資, ED-88-126, EIM-88-104, 99~108 (昭63)
- (4) 宮城克徳・堀井重信・杉本俊郎・斉藤善治: 「SF₆ガス溶解パーフルオロカーボン液の絶縁破壊特性」, 平2電気学会全大, No. 859
- (5) 迫立俊郎・戸川安信・平井久之・後藤 清・山崎 隆: 「セパレート式ガス絶縁変圧器用冷却媒体の化学組成」, 昭62同上, No. 378
- (6) H. Jaster & P. G. Kosky: "Solubility of Sulfur Hexafluoride in Fluorocarbon Liquids", *J. Chem. Eng. Data*, 21, 66 (1976)
- (7) A. H. Sharbaugh & P. K. Watson: "Breakdown Strengths of a Perfluorocarbon Vapor (FC-75) and Mixtures of the Vapor with SF₆", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-83, 131 (1964)
- (8) 児島 健・米山幹雄・井内利明: 「SF₆ガス溶解絶縁油の破壊特性」, 昭和電線電機レビュー, 19, 13 (1969)
- (9) 茂木 茂・寺西常治・大久保 仁・柳父 悟: 「フロロカーボン液体の絶縁破壊特性」, 電気学会放電・絶縁材料合同研資, ED-87-139, EIM-87-120 (昭62)
- (10) 各務謙二・曲 第二・斉藤善治: 「SF₆とフロロカーボン混合系の絶縁破壊特性(その2)」, 昭60電気学会全大, No. 68
- (11) 宮城克徳・堀井重信・杉本俊郎: 「パーフルオロカーボン液複合絶縁系におけるバリヤ効果の評価法」, 電気学会静止器研資, SA-94-32(平6)
- (12) 「液体の絶縁破壊に及ぼす界面の効果」, 電気学会技報, (II部), No. 454 (平5)

宮城 克徳

(正員) 1957年2月11日生まれ。80年3月室蘭工業大学工学部電気工学科卒業。82年3月同大学大学院工学研究科修士課程修了。同年(株)明電舎入社, 現在に至る。主として, 変圧器の絶縁技術・開発および高電圧計測に関する業務に従事。

各務 謙二

(正員) 1958年7月20日生まれ。81年3月幾徳工業大学工学部電気工学科卒業。同年(株)明電舎入社, 現在に至る。主として, 変圧器の設計に関する業務に従事。

杉本 俊郎

(正員) 1949年1月31日生まれ。71年3月名古屋大学工学部電気工学科卒業。同年(株)明電舎入社, 現在に至る。主として, 変圧器の絶縁技術・開発および高電圧計測に関する業務に従事。