パーフルオロカーボン液中インパルス沿面放電の進展特性

正員 中尾 好隆 (室蘭工業大学) 学生員 脇本 聖 (室蘭工業大学)
 正員 宮城 克徳 (明電舎) 正員 伊藤 秀範 (室蘭工業大学)
 正員 酒井 洋輔 (北海道大学) 正員 田頭 博昭 (北海道工業大学)

Propagation Characteristics of Impulse Creepage Discharge in Perfluorocarbon Liquid

Yoshitaka Nakao, Member, Kiyoshi Wakimoto, Student Member (Muroran Institute of Technology),
 Katsunori Miyagi, Member (Meidensha Co.), Hidenori Itoh, Member (Muroran Institute of Technology),
 Yosuke Sakai, Member (Hokkaido University), Hiroaki Tagashira, Member (Hokkaido Institute of Technology)

In this paper, the propagation characteristics of a creepage discharge on the surface of a solid insulator with a back electrode in perfluorocarbon liquid under an impulse voltage application are investigated. The propagation process is observed in detail by using a high-speed schlieren optical technique, and simultaneously waveforms of a current and a charge are also measured. Consequently, the polarity effect of the streamer propagation and the positive streamer which propagates stepwise can be seen. The latter is concurrent with the sparse current pulse which corresponds to the charge step-variation. These results are compared with ones obtained in transformer oil.

キーワード：油中沿面放電，パーフルオロカーボン液，シュリーレン法

1. まえがき

都市部における電力需要の増加に伴う変圧器の高電圧・大容量化の要求とともに、都市防災と環境調和の観点から変圧器の不燃化および小型化が強く要求されている。不燃化を目的とした小・中容量変圧器としては、従来の油入変圧器に代わって SF_6 ガス絶縁変圧器が既に開発・実用化の段階にあり、これによって防災、設備の縮小、保守の簡素化等、多くの成果が得られている。しかし、大容量変圧器に対しては、 SF_6 ガスを冷媒とする方式では冷却性能の点で対応できず、依然として油入変圧器が志向されており、例えばパーフルオロカーボン液 (PFC 液) の如き優れた冷媒による液冷却式ガス絶縁変圧器、液浸方式複合絶縁変圧器等の開発研究、試作検討が行われている⁽¹⁻⁴⁾。

PFC 液の絶縁破壊に関する研究は比較的新しく、変圧器油ほど多くの研究が行われていないのが現状である。PFC 液に関するこれまでの研究は主に絶縁破壊特性に重点を置いて行われており、絶縁破壊の進展過程についてはほとんど報告されておらず、PFC 液の絶縁性能、絶縁破壊機構などの詳細については必ずしも明らかにされていない⁽⁴⁻¹¹⁾。従って、PFC 液を変圧器の絶縁・冷却用の媒体として適用するためには、PFC 液自身およびこれと固体絶縁物とが共存する場合の複合絶縁構成における絶縁破壊の進展過程について詳細に把握することが必要である。

著者らはこれまで、フッ素 F の存在に起因すると考えられる特異な物理化学的性質を有する PFC 液を取り上げ、液中に配置した針電極-固体絶縁物-背後平板電極系にお

けるインパルス沿面放電の進展過程について調査し、同条件における変圧器油中沿面放電⁽¹²⁾と比較しながら種々検討を行ってきた^(13,14)。本研究では、高速シュリーレン法による沿面放電の観測および電流・電荷波形の測定を同時に行った。本論文は以上の結果をまとめたものであるが、特に正極性インパルス電圧印加時に顕著に認められるストリーマ状密度変化 (ストリーマ) のステップ進展について詳細に検討されている。

2. 試料液体

実験で用いた PFC 液はパーフルオロオクタン (C_8F_{18} , 分子量 438.06) を主成分とする不活性液体である。表 1 は PFC 液と変圧器油 (JIS 2 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する：(1) 不燃、(2) 沸点が低い、(3) 密度大、(4) 動粘度小、(5) 冷却性能が非常に良い、(6) 平等電界下で変圧器油と同程度の絶縁耐力が得られる、(7) SF_6 ガスを溶解し易い。

これらの性質は F や C-F 結合の性質⁽¹⁵⁾に起因し、特に F の大きなイオン化エネルギーと強い電子親和力は、PFC 液中放電に大きな影響を与えるものと考えられる。

3. 実験装置および方法

図 1 は実験システムの構成を示し、基本的には前報⁽¹⁶⁾と同様である。全ての実験は室温大気圧下で行われ、インパルス電圧発生回路のコンデンサを充電後、トリガ用マニュアルボタン MB を押してキセノンフラッシュ XeF を閃光させることにより開始する。電流 $i(t)$ および電荷 $q(t)$ の

表 1. PFC 液と変圧器油の物性 (25 °C, 1 atm)

Table 1. Properties of PFC liquid and transformer oil

項目	単位	PFC液	変圧器油	変圧器油と比較した PFC 液の特徴
主成分	—	C_8F_{18}	$C_{12}H_{22}$	比較的純粋な液体, F の存在に注目
燃焼性	—	不燃	可燃	不燃変圧器に応用できる
引火点	°C	—	145	高価 (最下行参照) ではあるが, 極端に火気を嫌う用途に好適
燃焼速度	cm/s (JIS)	—	0.52	—
沸点	°C	101	280 ~ 450	高温では加圧が必要 (気化防止)
動粘度	cSt	0.8	14.1	大流速冷却に適し循環系で有効
密度	g/cm ³	1.76	0.86	絶縁物が浮き易い
比熱	cal/g·°C	0.25	0.45	熱容量が同程度
表面張力	dyn/cm	14	46	固体表面を濡らして広がる傾向が強い
破壊電圧	kV (JIS)	65	72	変圧器油と同程度 (平等電界)
体積抵抗	$\Omega \cdot cm$	8.4×10^{15}	7×10^{14}	優れた絶縁性能が期待できる
比誘電率	(1kHz)	1.86	2.37	複合絶縁の際, 液側に電界が集中
流動帯電度	pC/ml	0.2 ~ 0.5	40 ~ 90	大流速冷却に適し循環系で有効
水分	ppm	11	50 ~ 80	優れた絶縁性能が期待できる
空気	ml 気体/100ml 液体	38	10.8	特定の気体に対しては異常なほど溶解するので注意が必要 (脱気・加圧)
SF ₆ ガス	100ml 液体	769	41	—
価格比概略値	対変圧器油	85 ~ 90	1	非常に高価

図 1. 実験システムの構成

Fig.1. Schematic diagram of experimental system

測定 (t は電圧印加後の経過時間) は, それぞれ高電圧側針電極に直列に接続された LED および背後平板電極と接地間に接続されたコンデンサ $C_q = 300$ pF により行った。

図 2 はテストセル内の電極および固体絶縁物の配置を示す。インパルス電圧 (波高値 $V_m = \pm 30$ kV, 波形 1.1 / 225 μ s) が印加される針電極 (タングステン製, 針端曲率半径 $r = 10$ μ m) は固体絶縁物 (150×150×3 mm) の硬質ガラス) 上面に軽く接触している。固体絶縁物下面には酸化インジウム (膜厚 0.2 μ m, 光透過率 80~90 %) が蒸着されておりこれを背後平板電極としている。蒸着膜は真鍮リングに接触し, 真鍮リングは保護抵抗 $R_p = 20$ k Ω ($q(t)$ 測定時は C_q) を通して接地されている。現象の撮影には凹面鏡による垂直型二面对向シュリーレン法を用い, 平行光線は液面に対して垂直に上から下へ透過する。

図 2. 電極および固体絶縁物の配置
Fig.2. Arrangement of electrodes and solid insulator in test cell

4. 実験結果および考察

〈4・1〉 極性効果 図 3 および図 4 は, 針電極にそれぞれ正極性および負極性インパルス電圧を印加した場合の PFC 液中沿面放電の進展過程を示し, (a) はシュリーレンこま撮り写真, (b) は電流波形 $i(t)$, (c) は電荷波形 $q(t)$ である。比較のために同条件で得られた変圧器油中の結果を図 5, 図 6 に示す。なお, (a) のこま速度は, 図 3 (a) が 1×10^6 frames/s (こま間隔 1 μ s, 露出時間 0.2 μ s/frame), 図 4~6 (a) が 5×10^5 frames/s (こま間隔 2 μ s, 露出時間 0.4 μ s/frame) である。

図 3 (a) において正極性沿面ストリーマ (正ストリーマ) の進展形状は, 図 5 (a) のそれと比較して分岐の極端に少ない樹枝状で最終進展長も短い。電圧印加直後に見られる (b) の $i(t)$ におけるパルス A と (c) の $q(t)$ における階段状の増加 A はともにギャップへの充電に伴う変化であり, この段階ではまだストリーマは出現・進展していない。その後, (a) においては少なくとも $t = 2.9$ μ s まで, (b) および (c) においては $t = 3.8$ μ s まで変化が見られないが, 3.8

$t < 4.0 \mu\text{s}$ において、 $i(t)$ におけるパルス B の立ち上がり
と $q(t)$ における階段状の増加 B（これらの B は時間的に
良く一致する）が認められる。従って、(a) #2（露出時間
 $3.7 < t < 3.9 \mu\text{s}$ ）に見られるステップ進展中のストリーマ
は $i(t)$, $q(t)$ の変化 B に対応して進展したことがわかる（一
般に B の発生時刻には μs オーダーのばらつきがある）。
ストリーマは #3 で既に進展を停止しており、以後時間の
経過とともにストリーマの進展経路に沿って複数のショック
波が液中音速（約 $6 \times 10^2 \text{ m/s}$ 一定）で伝播する様子も
認められる。

一方、図 4 (a) に示されるブッシュ状の負極性沿面スト
リーマ（負ストリーマ）は、図 3 (a) の正ストリーマと比
較して進展継続時間が長く最終進展長が短い。また、正ス
トリーマに見られたステップ状の進展や、これに対応する
 $i(t)$ および $q(t)$ の変化は明瞭には認められないが、図 4 (b)
と (c) の比較から、 $i(t)$ におけるパルスの発生と $q(t)$ にお
ける微小な階段状増加との間には良い時間的対応が見られる。
このことから、負ストリーマの場合にも針端近傍の固体絶
縁物表面において、極めて小規模なステップ進展あるいは
枝分かれが生じたものと考えられる。なお、負ストリーマ

図 3. PFC 液中正極性沿面ストリーマの進展 (1) ($V_m = +30 \text{ kV}$)
Fig.3. Propagation of positive streamer on solid insulator in PFC liquid (1)

図 4. PFC 液中負極性沿面ストリーマの進展 ($V_m = -30 \text{ kV}$)
Fig.4. Propagation of negative streamer on solid insulator in PFC liquid

(a) シュリーレンこま撮り写真 (5×10^5 frames/s) Schlieren framing photograph (b) 電流波形 Current waveform $i(t)$ (c) 電荷波形 Charge waveform $q(t)$ 図 5. 変圧器油中正極性沿面ストリーマの進展 ($V_m = +30$ kV)

Fig. 5. Propagation of positive streamer on solid insulator in transformer oil

(a) シュリーレンこま撮り写真 (5×10^5 frames/s) Schlieren framing photograph (b) 電流波形 Current waveform $i(t)$ (c) 電荷波形 Charge waveform $q(t)$ 図 6. 変圧器油中負極性沿面ストリーマの進展 ($V_m = -30$ kV)

Fig. 6. Propagation of negative streamer on solid insulator in transformer oil

図 7. PFC 液中負極性沿面ストリーマの進展特性

Fig. 7. Propagation characteristics of negative streamer on solid insulator in PFC liquid

は針端から全方向均等に進展するとは限らず、図 4 の場合、(a) #4~#8 において針端近傍右側の白い部分にはストリーマが進展していない。図 7 は、負ストリーマおよびショック波の進展長-時間特性を示す。負ストリーマの平均進展速度は 2×10^2 m/s 程度で、これは変圧器油中の $(7.6 \sim 9.2) \times 10^2$ m/s⁽¹²⁾ と比べて著しく小である。

図 5, 図 6 の (b) $i(t)$ において、電圧印加直後に見られる充電電流 A と、比較的滑らかな放電電流のベースレベル C にストリーマの進展に伴う不規則なパルス群 B が重畳している様子が認められる⁽¹²⁾。両図 (a) においてストリーマは連続的に進展しているように見えるが、これは頻繁に多数回生じた微小ステップ進展あるいは枝分かれの総和

(a) シュリーレンこま撮り写真 (2×10^7 frames/s)

Schlieren framing photograph

(b) 電流波形

Current waveform $i(t)$

図 8. PFC 液中正極性沿面ストリーマの進展 (2) ($V_m = +30$ kV)

Fig. 8. Propagation of positive streamer on solid insulator in PFC liquid (2)

であると考えられる。また、両図 (c) において、 $i(t)$ の変化に対応して $q(t)$ が変化している様子が認められる。これに対し PFC 液の場合 (図 3, 図 4) では、 $i(t)$ および $q(t)$ において C に相当する成分が極めて小であり、ギャップ間を流れる放電電流の平均レベルが小さい。

<4.2> 正ストリーマのステップ進展 図 3 に見られるように、PFC 液中正極性沿面ストリーマ (正ストリーマ) の特徴はステップ進展である。図 8 は、図 3 と同条件で、単一電流パルスの立ち上がり時間に対応するストリーマのステップ進展過程をより高速度 (2×10^7 frames/s, こま間隔 50 ns, 露出時間 10 ns/frame) で観測した結果の一例を示す。この場合、電圧印加直後のギャップへの充電時間に正ストリーマが既にステップ進展しており、(b) の $i(t)$ においては、充電電流パルスに正ストリーマのステップ進展に伴う電流パルスが重畳している (図 3 (b) の記号を用いると、充電電流 A に発生時刻が変動する B が重なり、1 つの大きなパルスとして示されている)。また、少なくとも $t = 9 \mu\text{s}$ までは、(b) に示されるパルス以外に $i(t)$ における変化が見られない。

(a) と (b) との比較から、正ストリーマは $i(t)$ のパルス立ち上がり時間 (約 250 ns) 内においてステップ進展し、そのパルスのピーク時刻でほぼ進展を停止している。その後、ストリーマの進展経路に沿って図 3 (a) と同様複数のショック波が発生し、時間経過とともに伝播する様子が確かめられている。正ストリーマのステップ進展に対する平均進展速度は、例えばこの場合、 $(4.8 \sim 5.2) \times 10^4$ m/s となり、他 40 個の実験データに対しても 10^4 m/s のオーダーの値が得られた。これは同条件での変圧器油中における正ストリーマの平均進展速度 $(1.20 \sim 1.30) \times 10^3$ m/s⁽¹²⁾ と比較して著しく大である。

このように正ストリーマのステップ進展と $i(t)$ および $q(t)$ の変化との時間的対応が明確でかつ単純なことから、

PFC 液中における正ストリーマの進展に対して数式によるモデル化および詳細な検討が可能である。ここでは、モデルの複雑化を避けるため図 8 のように電圧の波頭で進展する場合は例外とし、図 3 のように電圧が波高値に達した後の波尾で現象が出現する一般的な正ストリーマの進展を考える。また、正ストリーマが複数回ステップ進展する場合⁽¹³⁾も考慮する。

本実験で用いたインパルス電圧は、沿面放電の進展継続時間においてほとんど減衰しないことからステップ電圧と仮定し、単位ステップ関数 $u(t)$ を用いて $V_m u(t)$ と表すことができる。液浸の針電極-固体絶縁物-平板電極系は、その幾何学的配置および使用した固体・液体絶縁物による固有の静電容量を持つ。これに電圧 $V_m u(t)$ が印加され、電界強度がある限界を超えると針端から部分放電が開始し、媒質である液体の絶縁破壊により固体絶縁物の表面に沿って正ストリーマが進展する。

正ストリーマのステップ進展に伴う $i(t)$, $q(t)$ および後で定義する物理量のうちストリーマのステップ進展に対応する成分に、その発生の順に 1 番目から N 番目まで番号 n を付け、便宜上充電成分を 0 番目とする。 $i(t)$ および $q(t)$ がストリーマの第 n ステップ進展に対応して変化する時刻は実験の結果一致しており (図 3 (b) B), これをステップ進展時刻 t_n ($n = 0, 1, 2, \dots, N; 0 = t_0 < t_1 < \dots < t_N$) と定義する。

時刻 t までに進展したストリーマの屈曲・分岐を考慮した累積放電進展経路長を $s(t)$, $t = t_n$ における $s(t)$ の変化量を Δs_n ($n = 1, 2, \dots, N$) とする。 $s(t)$ が Δs_n ($n = 1, 2, \dots, N$) ずつ階段状に増加することは、放電路と背後電極との間の静電容量 $C(t)$ が ΔC_n ($n = 1, 2, \dots, N$) ずつ階段状に増加することを意味する。便宜上ギャップ固有の静電容量を ΔC_0 とする。同様に $q(t)$ が Δq_n ($n = 0, 1, 2, \dots, N$) ずつ階段状に増加すると、 $q(t)$ 測定用コンデンサ $C_q = 300$ pF の端子電圧が $\Delta V_n = \Delta q_n / C_q$ ($n = 0, 1, 2, \dots, N$) ずつ上昇

するため、針電極-背後平板電極間の電圧 $V(t)$ は V_m から ΔV_n ずつ階段状に降下する。従って、以上の値を理想的な素子の値として扱えると仮定すればステップ進展は

$$\left. \begin{aligned} s(t) &= \sum_{n=0}^N \Delta s_n u(t-t_n), \quad C(t) = \sum_{n=0}^N \Delta C_n u(t-t_n), \\ q(t) &= \sum_{n=0}^N \Delta q_n u(t-t_n) = C(t)V(t) = C_q[V_m u(t) - V(t)], \\ V(t) &= V_m u(t) - \sum_{n=0}^N \Delta V_n u(t-t_n) = V_m u(t) - \frac{q(t)}{C_q} \\ &= \frac{C_q}{C(t) + C_q} V_m u(t), \quad \Delta V_n = \frac{\Delta q_n}{C_q}, \\ \frac{V_m}{q(t)} &= \frac{1}{C(t)} + \frac{1}{C_q}, \quad \frac{V_m}{\Delta q_0} = \frac{1}{\Delta C_0} + \frac{1}{C_q} \end{aligned} \right\} (1)$$

と表せる。ただし、実際の各波形の $t = t_n$ における変化の形状は理想的なステップ関数とは若干異なり、各ステップの立ち上がりには有限の微小時間を要する。図 9 は (1) 式を図式的に示したものである。また、 $n=0$ の各値は用いた装置および条件に依存するものであり、既知数と実験結果を (1) 式に適用すると、本実験の場合はおよそ $\Delta C_0 = 4$ pF, $\Delta q_0 = 120$ nC, $\Delta V_0 = 400$ V となる。(1) 式からストリーマのステップ進展過程は $C(t)$ の階段状増加過程と解釈できる。すなわち、電極を通して外部から注入されるエネルギーによって、複合（固体-液体）絶縁系がその空間的な秩序を維持することができなくなった場合に、誘電率が低い液体側に電界が集中して部分的破壊が生じ、放電路と対電極との間の静電容量が一時的に増加する。それによって外部からのエネルギーを系の内部で保持し、また次々に注入されるエネルギーが放電レベルに達すると、随時この過程を繰り返すものと考えられる。

図 10 は、複数の結果から得られたステップ進展長 Δs (横軸) とそれに対応する電荷量の変化 Δq (縦軸) との比例関係を示し、最小二乗法により得られた図中の直線の傾き $\lambda = \Delta q / \Delta s = 0.86$ nC/mm (比例定数) は 1 回のステップ進展におけるストリーマの単位長当たりの平均電荷量を表す。

大垣氏は、ストリーマを細い管状の導体（半径 r ）と考え、背後電極を持つ固体絶縁物（比誘電率 ϵ_r 、厚さ d ）表面に沿って進展するストリーマについて報告し⁽¹⁷⁾、ストリーマが背後電極との間に持つ単位長当たりの静電容量を $\lambda / V(t) = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r / \ln(2d/r)$ （真空誘電率 ϵ_0 ）と近似している。これに基づき、電荷が $\lambda = 0.86$ nC/mm で全放電経路にわたって均一に分布していると仮定して単純に計算（ $\epsilon_r = 6.1$ （実測値）、 $d = 3$ mm）すると r は 10^{-6} m のオーダーとなり、既報の値（ 5×10^{-6} m 程度）⁽¹⁷⁾ と比べてあまりにも小さすぎる。従って、電荷分布は均一ではなく、常に解離・励起・電離が進行しているストリーマ先端に空間電荷などの電荷が偏在しているのではないかと考えられる。また、 r のオーダーが 10^{-6} m であると仮定すれば、ストリーマ先端の電荷密度 λ は、 0.86 nC/mm よりも大きな $1.1 \sim 1.6$ nC/mm 程度の値となる。これが変圧器油中の残

留電荷量の測定から得られた $1.5 \sim 3.0$ nC/mm⁽¹⁸⁾ と一部異なることは興味深い。この比較で変圧器油中の λ の方が大きいのは、変圧器油中ではストリーマが管状というよりはむしろ放射状に密に分岐しながら進展するため、全体として比較的円板状に近い形状となり $C(t)$ が大きくなるからではないかと考える。実際、図 3 および図 5 に見られるように、変圧器油中に比べ PFC 液中を進展するストリーマの分岐が少なく最終進展長が短いことは、放電により液中に注入される電荷量が少なくなり、特に不平等電界を念頭に置いた PFC 液による絶縁設計に対しては望ましいと考えられる。

図 9. PFC 液中正極性沿面ストリーマのステップ進展モデル
Fig.9. Step propagation model of positive streamer on solid insulator in PFC liquid

図 10. PFC 液中正極性沿面ストリーマのステップ進展特性
Fig.10. Step propagation characteristics of positive streamer on solid insulator in PFC liquid

以上の結果、PFC 液中における正極性沿面放電の進展特性は、変圧器油中のそれと比べて著しく異なることが認められた。これについては、前に述べた PFC 液の主成分であるパーフルオロオクタン C_8F_{18} を構成する F の化学的性質、すなわち (1) 電離および解離に大きなエネルギーを必要とすること、(2) 電離・解離により荷電粒子が生成されたとしても、F の強い電子親和性により周囲の電子に対して非常に大きな吸引作用を及ぼすこと等の原因が考えられ、これらによって、PFC 液中での放電進展特性、特に変圧器油中のそれとの差異について説明することができるのではないかと考えられる。

表 2 は、PFC 液中と変圧器油中における沿面放電の進展特性を比較したものである。PFC 液中では変圧器油中に比べ、両極性ともにストリーマは伸びにくい。

表 2. PFC 液中と変圧器油中における沿面ストリーマの進展特性 ($V_m = \pm 30 \text{ kV}$, 室温大気圧)

Table 2. Propagation characteristics of streamer on solid insulator in PFC liquid and transformer oil

液体	針電極の 電圧極性	沿面ストリーマ			ショック波
		平均進展速度 (km/s)	平均進展長 (mm)	進展形状・特徴	平均進展速度 (km/s)
PFC 液	正	※ 1	5 ~ 15 ※ 2	樹枝状	0.6
	負	0.2	3 ~ 6	ブッシュ状	
変圧器油	正	1.20 ~ 1.30	> 20	フィラメント状	1.37 ~ 1.42
	負	0.76 ~ 0.92	16	フィラメント状	

※ 1) ステップ進展の発生時刻とその間隔, 各ステップにおける進展長により大きく変化する。ステップ進展速度は 10^4 m/s のオーダー。

※ 2) ステップ進展の発生回数, 各ステップにおける進展長により変化する。

5. あとがき

PFC 液中における沿面放電の進展過程を, 針電極-固体絶縁物-背後平板電極系を用いてインパルス電圧条件下において詳細に観測し, 既に得られている変圧器油中における結果と比較検討を行った。以下にその結果を要約する。

(1) PFC 液中沿面放電においても極性効果が認められた。

(2) 変圧器油の場合に比べて, PFC 液中では正極性沿面ストリーマ (正ストリーマ) は枝分かれの極端に少ない樹枝状でステップ進展する。また, 両極性ともにストリーマは変圧器油中より伸びにくく, 放電電流の平均レベルが極めて小さい。

(3) 正ストリーマのステップ進展は, 電流波形における不規則なパルスおよび電荷波形における階段状増加と時間的に対応する。

(4) 正ストリーマのステップ進展における単位長当たりの平均電荷量は 0.86 nC/mm 程度であり, これは従来の結果とほぼ一致する。

最後に, 卒業研究として本実験およびデータ整理に従事された大場満, 菅原克彦の両君に心から感謝する。

(平成 9 年 12 月 1 日受付, 平成 10 年 1 月 28 日再受付)

参考文献

- 電学誌: 109, 604 (平成 7); 109, 929 (平成 11).
- 向山・高木・川嶋・梅根・松垣・遠藤・坂元: 「275kV 100MVA 三相不燃変圧器の実規模試作」平成元年電気学会大会, No.820 (1989).
- 山形・緒志・大久保・寺西・池田・村山・柳父: 「セパレートガス絶縁変圧器の絶縁技術開発」平成元年電気学会大会, No.819 (1989).
- 小林・高木・遠藤・川嶋: 「パーフルオロカーボン液の絶縁特性」平成 2 年電気学会大会, S.2-6 (1990).
- 高木・古川・遠藤・白根・鎌田・檜垣・川嶋: 「パーフルオロカーボン液の絶縁破壊特性」電気学会放電, 絶縁材料共同研究, ED-88-126, EIM-88-104 (1988).
- 高木・古川・遠藤・白根・鎌田・檜垣・川嶋: 「パーフルオロカーボン液及びその液浸複合絶縁系の絶縁破壊特性」第 22 回電気絶縁シンポジウム, III-7 (1988).
- 高木・白根・遠藤・川嶋: 「パーフルオロカーボン液浸絶縁系の絶縁特性」電気学会絶縁材料研究, EIM-90-80 (1990).
- 宮城・堀井・窪田・杉本: 「パーフルオロカーボン液の複合絶縁特性」電気学会静止器研究, SA-90-59 (1990).
- 宮城・堀井・窪田・杉本: 「パーフルオロカーボン液におけるコイル間複合絶縁モデルの雷インパルス特性」電気学会高電圧研究, HV-91-93 (1991).
- 宮城・堀井・杉本: 「液冷却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 (平 7-4).
- 阿部・鶴沢・小出・仲神: 「新不燃液体の絶縁破壊特性」電気学会放電研究, ED-88-127 (1988).

- 中尾・伊藤・岡・空・酒井・田頭: 「油中インパルス沿面放電の進展に伴う密度変化と粉塵」電学論 A, 109, 189 (平成 5).
- 脇本・伊藤・中尾・宮城・酒井・田頭: 「パーフルオロカーボン液中沿面放電の進展 (2)」電気学会放電研究, ED-97-79 (1997).
- 脇本・伊藤・中尾・宮城・酒井・田頭: 「パーフルオロカーボン液中沿面放電の進展 (4)」平成 9 年度電気学会 A 部門総合研究会, 放電研究, ED-97-207 (1997).
- 日本学術振興会フッ素化学第 155 委員会編: 「フッ素化学入門-基礎と実験法-」日刊工業新聞社 (1997).
- 中尾・成瀬・伊藤・鈴木・酒井・田頭: 「油中沿面放電の進展に及ぼす固体絶縁物の厚さ・種類の影響」電学論 A, 116, 849 (平 8-10).
- 大垣・角田: 「油中正極性沿面放電の進展特性」電学論 A, 103, 601 (昭 58-11).
- 大久保・池田・本多: 「油中沿面放電の進展特性」電気学会放電研究, ED-80-67 (1980).

中尾 好隆 (正員) 昭和 12 年 7 月 15 日生。37 年 3 月北海道大学工学部電気工学科卒業。38 年 5 月同大学工業教員養成所勤務。43 年 4 月室蘭工業大学勤務, 現在に至る。工学博士。照明学会, 放電研究グループ会員。

脇本 聖 (学生員) 昭和 48 年 4 月 2 日生。平成 8 年 3 月室蘭工業大学電気電子工学科卒業。同年 4 月同大学大学院工学研究科博士前期課程電気電子工学専攻入学, 現在に至る。

宮城 克徳 (正員) 昭和 32 年 2 月 11 日生。55 年 3 月室蘭工業大学電気工学科卒業。57 年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。

伊藤 秀範

(正員) 昭和 26 年 10 月 26 日生。50 年北海道大学工学部電気工学科卒業。55 年北海道大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年 4 月徳島大学工業短期大学部勤務。59 年 4 月室蘭工業大学勤務，現在に至る。平成 5 年オーム技術賞。工学博士。応用物理学会（プラズマエレクトロニクス分科会），日本物理学会，放電研究グループ会員。

酒井 洋輔

(正員) 昭和 19 年 7 月 28 日生。48 年 3 月北海道大学大学院工学研究科博士課程修了。同年北海道大学工学部勤務。59 年 4 月北海道大学医療技術短期大学勤務。62 年 5 月北海道大学工学部勤務，現在に至る。工学博士。照明学会，日本物理学会，応用物理学会，放電研究グループ会員。

田頭 博昭

(正員) 昭和 8 年 1 月 13 日生。33 年 3 月北海道大学工学部電気工学科卒業。36 年同大学大学院博士課程中退。同年北海道大学工学部勤務。平成 8 年 4 月，北海道工業大学勤務，現在に至る。平成 3 年照明学会論文賞。Ph.D（英国リバプール大学）。工学博士。照明学会，日本物理学会，応用物理学会（プラズマエレクトロニクス分科会），プラズマ核融合学会，溶接学会，放電研究グループ会員。