

変圧器絶縁材料の動向

The Trend of Insulating Materials for Transformers

鈴木敏夫^{※1}
Toshio Suzuki

Traditional insulating materials used in transformers were the petroleum-based insulating oils and cellulose-based insulating materials. For special applications, synthetic non-inflammable fluid insulating materials are used, and with the advent of molded transformer and SF₆-gas-insulated transformer, synthetic insulating materials have also come into use. In particular, low dielectric constant and heat resistant materials are beginning to be used in SF₆-gas-insulated transformers to improve their voltage and heat resistance.

Conventional methods for performing insulation material diagnosis on oil-filled transformers include the analysis of gases dissolved in the oil. In addition, a diagnostic method employing analyses of the furfural created as a result of deterioration of insulating paper is being investigated. Thus, in the area of SF₆-gas-insulated transformers, efforts are also continuously made to establish a diagnostic technique employing analyses of the gases created as a result of deterioration of materials.

1 まえがき

新材料、新素材の言葉が使われるようになってから、多くの材料が市販されている。しかし変圧器の世界では新しい材料が急激に使われることはない。他の材料との適合性や、長期間の使用での信頼性の確認などに長い時間を要したり、高価すぎる材料は使えないなどのためである。

一方民生用電気製品のハイテク化や情報関連装置の普及などのため、電力の安定供給が強く望まれる。機器には環境に優しいこと、都市中心部の狭隘な場所に適すること、メンテナンスフリーであることなどが求められる。このため機器の設計、製造、運用などの面での技術の向上改良が計られている。この状況下にあって新しい材料の適用も少しずつではあるが進んでいる。以下に主に電力用変圧器に関する新材料適用と、材料に関係した診断技術の最近の動向について述べる。

2 油入変圧器

変圧器は1885年にハンガリーのGanz社とアメリカのStanley社で製作され、1891年には油入変圧器が製作された。日本ではそれから遅れること3年、1894年に第一号が製作された。変圧器の絶縁材料としては絶縁紙、プレスボード等のセルロース製品と絶縁油を主体とし、部分的に木材、強化木、レジン積層材、ガラス繊維などが使

われてきた。

2.1 液体絶縁材料

絶縁油は絶縁材料であるとともに冷却性能があり、しかも含浸性があることから、変圧器、電力用ケーブル、コンデンサ、油入遮断器に使われてきた。変圧器用絶縁油が持つべき性質には次にあげるものがある。①絶縁破壊電圧が高く、誘電損失が低いこと。②冷却性が良いこと。③化学的に安定であること。④低粘度であり、広い温度範囲で流動性があること。⑤入手が容易であること。⑥毒性がないこと。⑦引火点が高いことなどである。現在変圧器に使われている絶縁油は引火点を除いてはすべての条件を満足している。

古くから鉱油が使われ、国内では添加物なしという考え方が一般的であり、JISにも長い間添加剤の規定がなかった。1970年代になり、500kVの変圧器で流動帯電の問題が起こった。この現象は変圧器の絶縁物の間を絶縁油が流動すると帯電するという現象であり、帯電電荷が蓄積されると閃絡に至る程になるというものである。

流動帯電現象に影響を与える因子としては温度、絶縁油の体積固有抵抗、流速などがある。この現象を抑制するために流速の調整が行われたが、古くから金属不活性化剤として知られる1, 2, 3-ベンゾトリアゾル(BTA)が帯電抑制の効果を持つことが分かり、BTA添加絶縁油の使われることが多くなっている¹⁾。

これを機にJIS C2320⁽²⁾, C2101⁽³⁾の1988年版でBTA添加絶縁油及びBTA定量方法が規定された。欧米では添加剤入りの絶縁油は特殊なものでなく、ASTM D3487⁽⁴⁾, IEC Publ.296⁽⁵⁾に酸化防止剤添加油の規定がある。

欧州では最近になって流動帯電現象に関心が高まり、幾つかのコンファレンスで特定テーマに取り上げられている。CIGREではSC-15内のタスクフォースで絶縁油と絶縁材料との系での帯電の検討がなされるとともに、実器での流動帯電による絶縁破壊の例が紹介されている。

鉱油の中でもナフテン系絶縁油が主体であったが、入手難の懸念から1970年代後半からパラフィン系絶縁油の適用が検討された。パラフィン系絶縁油は流動点が高いという欠点があるが、エチレンプロピレンコーポリマー(EPC)をはじめとする流動点降下剤の添加やアルキルベンゼンなどの添加で対策可能であり⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾, かつ電気的特性や長期安定性がナフテン系に遜色がないことから実用に供されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

ただし、同じ流動点でも流動点降下剤を添加した絶縁油の挙動が添加のない絶縁油と異なり、流動点に至る前に流動しにくくなる場合がある。このため流動点降下剤添加油にとっては流動性の評価が必要となり、1993年版の絶縁油のJIS⁽¹¹⁾には低温流動性の試験方法が規定されている。

変圧器用絶縁油が持つべき性質の一つとして、引火点が高い、あるいは難燃、不燃であることなどがあるが、これが実現できれば理想的である。とくに車両用、地下変電所用の変圧器には難燃性、不燃性が望まれる。しかし、かつて不燃変圧器や不燃コンデンサに使われたPCBほどの特性を持つものは今の所ない。難燃性についてアメリカには燃焼点が300℃以上の絶縁油を対象にしてFMR(Factory Mutual Research)で行っている認定制度がある⁽¹²⁾。日本にはこのような制度はないが、ガラステープを使った燃焼性の評価方法がJIS C2102⁽¹³⁾の通り、IEC規格⁽¹⁴⁾にも取り入れられている。

難燃性絶縁油としては合成油が多く、とりわけシリコン油は良く知られている。この油は引火点が高く、自己消火性を持つのが特徴である。国内では車両用としてよく使われ、アメリカでは2500kVA以下の配電用変圧器に使われた例もある。

このほかにポリオールエステル油も難燃性ばかりでなく、熱的に安定な絶縁油として使える。Midel 7131, Enviro Temp100(商品名)として知られ欧米で変圧器油としての実績がある⁽¹⁵⁾。フレオン112と四塩化エチレンの混合絶縁油が英国でFormel.NF(商品名)として開発され、配電用として使われたといわれる⁽¹⁶⁾。混合油は国内でも紹介されたが、この絶縁油は環境上の問題があり、あまり検討されていない。表1に主な変圧器用絶縁油の特性を示す。

表1 各種変圧器絶縁油の特性

Tab.1/Characteristics of insulating oils for transformers

項目	鉱油	シリコン油	エステル油	フレオン112・四塩化エチレン混合
誘電率 25℃	2.2	2.7	3.2	2.36
tan δ%	25℃	0.01	—	0.1
	100℃	0.09	0.24(80℃)	—
引火点 ℃	150	314	242	なし
燃焼点 ℃	160	360	304	なし
発火点 ℃	332	—	415	なし
比熱 J/kg・K	2.09×10 ³	1.42×10 ³	1.76×10 ³	—
比重 25℃	0.89	0.96	0.98	1.62
動粘度 m ² /s	25℃	16×10 ⁻⁶	50×10 ⁻⁶	76×10 ⁻⁶
	100℃	7×10 ⁻⁶	16×10 ⁻⁶	31×10 ⁻⁶
流動点 ℃	-57	-55	<-45	-33

2.2 固体絶縁材料

主たる絶縁材料は絶縁紙、プレスボードなどのセルロース製品である。このほか木材、強化木、レジンなどが使われているが、巻線絶縁、口出し部の絶縁には絶縁紙が使われる。口出し部などで温度が高くなる場所には耐熱絶縁紙が使われる場合がある。シリコン油を使う車両用変圧器には絶縁紙に対応するものとしてアラミド繊維を使った合成絶縁紙が使われる。

油入変圧器の主たる絶縁構成は固体絶縁物である油浸されたセルロースと液体絶縁物である絶縁油との複合構造である。複合絶縁構造の場合、高い電界が固体絶縁物にかかることが望ましい。

電極間に固体絶縁物と絶縁油の構成でそれぞれの厚さが d_1 , d_2 , 誘電率が ϵ_1 , ϵ_2 で、これらが直列に接続されている系とする。ここで添字1の材料を固体絶縁物とすると、絶縁油にかかる電界は次の式に比例する。

$$1 / [(\epsilon_2/\epsilon_1) d_1 + d_2]$$

したがって、固体絶縁物の誘電率 ϵ_1 を低くすることによって絶縁油にかかる電界は低くなり、絶縁構成上有利となる⁽¹⁷⁾。

しかし実際には絶縁油、油浸絶縁紙、油浸プレスボードそれぞれの誘電率が2.2, 3.3, 4.2~4.6である。単純に固体絶縁物と絶縁油が直列になっているとすれば、容量分圧となり誘電率の低い絶縁油に高い電界がかかってしまう。もし各々の絶縁材料の誘電率を少しでも近づける(例えば固体絶縁物の誘電率を下げる)ことができれば、前述のとおり絶縁油の電界を低減することができ、小型化にもつながる。

セルロースのままでは誘電率を下げることはできない。この課題を解決する方法として耐油性のよい高分子の繊維あるいはフィブリルとクラフトの混抄の考えが生まれる。ポリメチルペンテン繊維15%とクラフトパルプ85%混抄のプレスボードが開発され油浸で誘電率3.5を実現す

ることができた¹⁶⁰⁷⁾。表2に各プレスボードの代表的な特性を示す。

クラフト紙絶縁の導体でこのプレスボードをサンドイッチした構成で通常のプレスボードを使った場合に比べて30%の絶縁破壊電圧の向上をみている。しかし、高分子繊維を混抄した場合には機械的強度が低下し、圧縮強度が85%程度になる。この性質を念頭に入れた設計が必要となろう。

表2／ポリメチルペンテン混抄プレスボードの特性
Tab.2/Characteristics of the pressboard of mixture of kraft and polymethyl pentene

項目	混抄プレスボード	通常のプレスボード
比誘電率 20℃	3.49	4.70
tan δ (%) 80℃	0.33	0.48
圧縮強さ (MPa) 80℃	122	172
圧縮弾性係数 (MPa) 80℃	853	1177
剪断強さ (MPa) 80℃	43	72
熱膨張率 (%) (厚さ方向)	100℃	0.36
	120℃	0.53

3 ガス絶縁変圧器

前述したように絶縁油は引火点が低いのが欠点である。鉱油の引火点が120℃から130℃であるため、油入変圧器の内部で閃絡が起こった場合に火災になる可能性がある。このため都市部では特に変圧器の難燃性、不燃性が望まれ、モールド変圧器やガス絶縁変圧器が注目される。

ガス絶縁変圧器は1950年代にアメリカで開発され、138 kV、40MVAクラスまで製作された。国内では1967年にはじめて製作され、以降配電を中心に市街地、ビル内、地下変などに多く設置されてきた¹⁶⁾。最近では275kV300MVAのものも開発されており¹⁶⁾、いずれ都市部の500kV系統にまで導入されるであろう。

ガス絶縁変圧器では、SF₆ガス及びパーフロロカーボンが絶縁媒体または冷却媒体として使う。表3に示すように幾つかの方式に分類される¹⁶⁾。

表3／ガス絶縁変圧器のタイプ

Tab.3/Types of SF₆-gas-insulated transformers

項目	特徴	冷却媒体	絶縁媒体
ドライタイプ	ガスで絶縁と冷却	SF ₆ ガス	SF ₆ ガス
プールタイプ	液体で絶縁と冷却	パーフロロカーボン	パーフロロカーボン
スプレタイプ	ガスと液体の蒸気で絶縁、液体で冷却	パーフロロカーボン	SF ₆ ガス
セパレートタイプ	ガスで絶縁、液体で冷却	パーフロロカーボン	SF ₆ ガス

3.1 流体絶縁材料

ドライタイプでは絶縁・冷却ともSF₆を使うが、他のタイプでは絶縁にSF₆ガスを使い、冷却にパーフロロカーボン(C₈F₁₆O)を使う。冷媒としてはフロンがよく知られているが、化学的安定性、環境問題などの関係からパー

フロロカーボンが優れており、一般に使われる。

この液体は化学的、物理的には安定しているが、高価であること、浸透性が良いことから一部の材料を膨潤させる可能性があること、体積抵抗率が高いことによる流動帯電現象への影響など注意すべきである。表4にパーフロロカーボンの一般特性を示す。

表4／パーフロロカーボンの特性

Tab.4/Characteristics of perfluorocarbon

項目	特性
沸点 ℃	102
流動点 ℃	-93
比重	1.76
動粘度 m ² /s	0.8×10 ⁻⁶
絶縁破壊強度 kV/mm	55
体積抵抗率 Ωm	10 ¹¹
誘電率 20℃	1.86

3.2 固体絶縁材料

油入変圧器では新しい材料を採用しようとする場合、耐油性が問題になるケースが多い。ガス絶縁変圧器では材料をSF₆ガス中で使う限りこの障壁が少なく、多くの新しい材料を適用する余地がある。変圧器では特異な分野といえよう。

シリンダ、スベーサなどのように、従来からのセルロース系材料を使う部分もあるが、高耐熱性の材料を使って耐熱性の高い絶縁システムを構成するというのがガス絶縁変圧器の一つの考え方であることから、多くの耐熱性の高分子材料が使われる。素線絶縁には耐熱性がよく、寸法安定性も良いポリエステルフィルム(PET: ポリエチレンテレフタレート)が最もよく使われる。特に温度が高い部分にはアラミド紙、ポリイミド系フィルム(PI)、特殊エンジニアリングプラスチックの一つであるポリフェニレンサルファイド(PPS)が使われる場合もある¹⁷⁰⁸⁾。

最近ではPETよりも耐熱性が高く、耐加水分解性もよいポリエチレンナフタレート(PEN)フィルムがガス絶縁変圧器の絶縁の主材料として検討されている¹⁷²³⁾。またポリエステル繊維とアラミドフィブリルの混抄プレスボードが耐熱ボードとして検討されている²⁰⁾。表5に各種のフィルムの代表特性を、表6にポリエステル-アラミド混抄ボードの一般特性を示す。

油入変圧器と同様に使われている絶縁材料の誘電率を絶縁油の誘電率に近づけることは、絶縁設計上有利である。前述のポリエステル-アラミド混抄のプレスボードは、現状のプレスボードより誘電率が低くこの条件に合っている。

通常の変圧器用としてのクラフトパルプのプレスボードの誘電率を下げる努力が払われた。考え方は

油入変圧器の場合と同様であり、クラフトパルプとアラミドパルプの混抄と密度をやや下げることで誘電率の低下を実現した。

表5/各種フィルムの特性

Tab.5/Characteristics of plastic films

項目	フィルム				
	PET	PEN	PI	PPS	アラミド
密度 kg/m ³	1.40	1.36	1.42	1.35	1.50
引張強度 MPa	250/270	280/270	180/180	300/250	600/
引張伝播抵抗 kg/m	780	600	310	200	—
吸湿率 %	0.4	0.3	2.2	0.05	1.5
絶縁破壊強度 kV/mm	300	340	275	250	300
体積抵抗率 Ωm	1 × 10 ¹⁶	1 × 10 ¹⁶	1 × 10 ¹⁶	5 × 10 ¹⁵	5 × 10 ¹⁵
誘電率 (1 kHz)	3.3	3.0	3.5	3.0	3.0
誘電正接 (1 kHz)	0.002	0.005	0.003	0.0006	0.025

引張強度 (MD/TD)

表6/アラミド-ポリエステル混抄
プレスボードの特性

Tab.6/Characteristics of the pressboard of mixture of aramid and poly-ester

項目	特性
密度 kg/m ³	1.24
引張強度 MPa	46/54
破断伸び %	28/30
圧縮強度 MPa	217
誘電率 20℃	2.7
体積抵抗率 Ωm	2 × 10 ¹⁴
AC絶縁破壊電圧 kV/mm	21

引張強度、破断伸び (MD/TD)

表7にクラフト-アラミド混抄のプレスボードの一般特性を示す。このプレスボードはアラミドの耐熱性を反映し、耐熱性はE種以上である²⁹⁾。しかし全クラフトのプレスボードより機械強度が低い。これは高分子と混抄の場合の特徴で致し方ない。この点を考慮し良好な特性が反映されるような設計が必要である。

ガス絶縁変圧器の中では、静電シールドと詰め物の接触部、コイルとスペーサの接触部に楔型のガスギャップができる。このギャップはガスよりも誘電率の高い材料に囲まれており、絶縁上極めて厳しく耐電圧低下をまねかかぬ。詰め物及びギャップに誘電率の低い熱可塑性のエラストマーを充填して耐電圧の向上がはかられている³⁰⁾。

静電シールドの詰め物をプレスボード (誘電率約3.0) とした場合、高電圧電極と詰め物の間に楔型ギャップができるが、ポリエステル系エラストマー (誘電率ε = 4.5) で詰め物と楔部分を一体にただけでもガス圧0.45MPaでのインパルス絶縁破壊電圧が約25%向上する。さらにオレフィン系エラストマー (ε = 2.6)、ポリメチルペンテン (ε = 2.1) を使うとインパルス絶縁破壊電圧はそれぞれ75%、114%向上する³⁰⁾。

表7/アラミド混抄プレスボードの特性

Tab.7/Characteristics of the pressboard of mixture of kraft and aramid

項目	混抄プレスボード	通常のプレスボード
密度 kg/m ³	1.0	1.16
引張強度 MPa	69	131
破断伸び %	8.6	9.3
誘電率 20℃	2.7	3.6
体積抵抗率 Ωm	1 × 10 ¹⁴	1 × 10 ¹⁴
AC絶縁破壊強度 kV/mm	38	24
Imp絶縁破壊強度 kV/mm	132	110

4 モールド変圧器

乾式変圧器は1945年代に開発され、1960年代後半にはエポキシ樹脂を使ったモールド変圧器が開発された。この変圧器は吸湿が少ない、絶縁性が良いなどの特徴があるが、冷却などくに媒体を持たないので高電圧化、大容量化などには限度がある。現在では33kV、60MVAまでである³¹⁾。

エポキシ樹脂は絶縁材料であるとともに構造材料として使われる。モールド変圧器の場合は耐クラック性が望まれること、さほどクリープ強度が必要ないということもあり、構造材料よりややガラス転移温度の低いものが使われる。

5 絶縁材料の劣化と絶縁診断

油入変圧器においては油中ガス分析による絶縁診断が行われている。通常の運転でも絶縁油から水素と炭化水素が、絶縁紙とプレスボードからは一酸化炭素 (CO)、二酸化炭素 (CO₂) が発生する。絶縁紙及びプレスボードの引張り強度及び平均重合度残率がCO、CO₂の生成量とよい相関があることが知られている。異常時には発生量が多くなるとともに異常の種類により独特の発生パターンを示す。例えば放電の場合には、H₂、C₂H₂が生成されるのが特徴である。過去の経験から幾つかのパターンに分類され、電協研の基準としてまとめられている³²⁾。

最近国内でこの基準に合わないデータが散見されるようになり、それらのデータの特徴について石油学会で整理された。局所過熱に関して幾つかの特徴的なパターンが見つけられている。

油中ガス分析による診断は、ヨーロッパが早く手掛けたが、変圧器の異常を判定する基準は国によりまちまちである。このためCIGRE WG15-01内のタスクフォースで共通基準のまとめの作業が行われている。

1984年CIGREにおいて、セルロース系絶縁材料の劣化により生ずるフルフラールが、材料の劣化程度と相関があると指摘された³³⁾。油中ではフルフラール、5-ヒドロキシメチル-2-フルフラール、2-フロイック酸、5-

メチルフルフラール、フルフリルアルコール、2-アセチルフランが検出される。この内図1に示すフルフラールがより多く検出され、セルロース系絶縁材料の劣化程度と相関があるというものである。

それ以来分析法、絶縁診断に関係する幾つかの研究結果が発表され、実験室的にはフルフラール生成量と材料劣化の間には良い相関関係があることが確かめられている⁹⁾。分析法はIECで規格化される予定であり、国内では石油学会にて分析法のガイドがまとめられている。変圧器の経年劣化とフルフラール生成量の関係については、CIGRE WG15-01内のタスクフォース、石油学会などで検討されている。

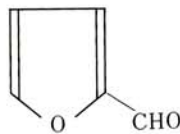


図1 / フルフラール

Fig.1/Furfural

ガス絶縁変圧器の主な絶縁材料はPETとプレスボードであるが、広い温度範囲で絶縁材料から発生するCO、CO₂アセトアルデヒドの生成量と絶縁材料の特性変化とは良い相関がある⁹⁾。図2にPETと絶縁紙の平均重合度残率とCO、CO₂の生成量の関係を示した。250°C以上の高い温度では、プレスボードからさらにケトン、フルフラール類が発生する。一般ガスの発生量の異常な増加と、絶縁材料に独特のガスの発生を検知することにより温度の異常を知ることができる。

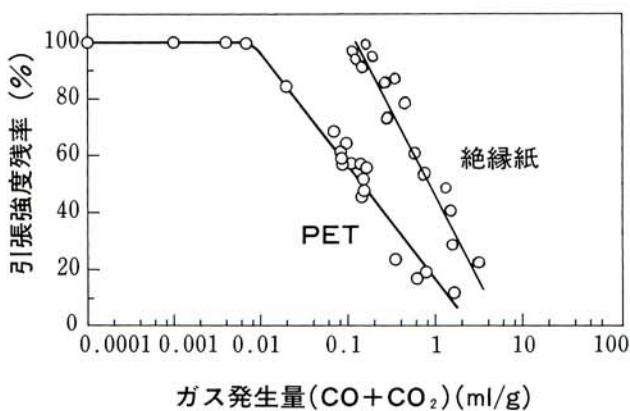


図2 / PETフィルムと絶縁紙の引張強度残率とガス発生量の関係

Fig.2/Relation between amount of gas (CO+CO₂) and retention of tensile strength of PET film and insulating paper

温度の異常に金属が関与した場合には、SF₆も分解する。鉄系の場合、200°C前後で二酸化硫黄が、多くの金属で400°C近辺で弗化チオニル (SOF₂) が生成される。放電の場合は金属が関わっている時は、アーク、スパーク、コロナいずれの場合も弗化チオニル (SOF₂) が生成され、微少な放電になるほどこのほかに弗化スルフリル (SO₂F₂) が多くなる。有機物が放電に関わる場合は四弗化炭素 (CF₄)、CO、CO₂が生成される¹⁰⁾。ドライタイプのガス絶縁変圧器では、油入変圧器中でのC₂H₂のように特別な現象のインジケータとなるようなガスはないが、幾つかのガスの組み合わせを整理することにより異常の分別が可能である¹⁰⁾。

一方パーフロロカーボンは一アーク放電ではCF₄、C₂F₆などが生成され、部分放電ではCF₄が生成される。パーフロロカーボン蒸気をSF₆とともに絶縁に使うタイプのガス絶縁変圧器においては、SF₆ガスの分解、絶縁材料からの生成ガスも考慮して、SF₆、CF₄、COの成分比で異常の形態を知ることができる¹⁰⁾。

6 あとがき

電力用変圧器を中心に絶縁材料及び絶縁診断に関する幾つかの話題を述べた。電力用変圧器は成熟している部分が多く、また機器の性格から新しい材料をすぐさま適用することもできない。しかし、安定な電力供給のため良好な絶縁を求めて緩やかではあるが新材料の適用検討が行われており、実用器に反映されている。これからの地道な努力が続けられるであろう。

参考文献

- (1) 矢成, 栗野: 「変圧器の現状と将来」, 第7回石油学会絶縁油分科会研究発表会, 1,1987.
- (2) 日本標準調査会: 「日本工業規格 電気絶縁油」, JIS C2320,1988.
- (3) 日本標準調査会: 「日本工業規格 電気絶縁油試験方法」, JIS C2101,1988.
- (4) American Society for Testing Materials: "Standard Specification for Mineral Insulating Oil Used in Electrical Apparatus" ,ASTM D3487,1982.
- (5) International Electrotechnical Commission: "Specification for Used Mineral Insulating Oils for Transformers and Switchgear" ,IEC Publ.296,1982.
- (6) 卜部, 増田, 倉橋: 「パラフィン系絶縁油の熱劣化特性」, 昭和52年電気学会全国大会, No.297,1977.
- (7) 石岡, 小山: 「流動点降下剤入りパラフィン系絶縁油の熱劣化特性」, 昭和58年電気学会全国大会, No269,1983.

- (8)増永,高野:「パラフィン系絶縁油の動向」,日石レビュー, Vol.26,85,1984.
- (9)W.A.Fessler,G.H.Kaufmann and T.O.Rouse:
“Accelerated Aging Studies of Distribution Transformers Containing Naphthenic and Paraphenic Mineral Oils” ,IEEE Intern. Symp. Elect. Insul. Mater. ,279,1978.
- (10)石油学会編:「電気絶縁油ハンドブック」,講談社,1987.
- (11)日本標準調査会:「日本工業規格 電気絶縁油」,JIS C2320,1993.
- (12)日本標準調査会:「日本工業規格 電気絶縁油試験方法」,JIS C2101,1993.
- (13)Factory Mutual Engineering Corp.,“Loss Prevention Data” ,5-4/14-8s,Out,1979.
- (14) International Electrotechnical Commission:
“Insulating liquids-Linear flame propagation-Test method using a glass-fiber tape” ,IEC Publ.1197,1993.
- (15)吉田,鎌田:「絶縁材料の将来への展開:3絶縁材料技術の将来への展開」,昭和62年電気・情報関連学会連合大会」,11-3,1983.
- (16)H.Tsukioka,E.Ohe,Y.Kamata,M.Majima,M.Nozaki and K.Hyodo:“Development of low dielectric constant press board” ,The 21th Symp.on Electr. Insul. Mater. of IEEEJ,J-1,311,1988.
- (17)鎌田,井上:「特集:絶縁材料技術—その新しい側面— III,絶縁材料の機器・ケーブルへの応用 第2章 変電機器絶縁」,電気学会誌, Vol.110,No.5,369,1990.
- (18)塩野,池田,川嶋:「特集解説:ガス絶縁変圧器の現状と動向」,電学論 B,Vol.110-B,No.7,522,1990.
- (19)高橋,伏見,田中,浜田,戸田,小林,池田,寺西,稲葉:「275kV 300MVAガス冷却式ガス絶縁変圧器の完成」,平成6年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.585,1994.
- (20)遠藤,上野,大沼,植村:「新アラミド絶縁紙による変圧器巻線の高耐電圧化」,平成5年電気学会電力・エネルギー部門大会 I-50,293,1993.
- (21)吉田,三井,鈴木,後藤,見城:「応用・開発研究から見た将来展望,機器絶縁技術」,昭和58年電気学会全国大会, S.4-4,1988.
- (22)能田,齊藤:「ガス絶縁変圧器用プラスチックフィルムの耐熱性」,平成6年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.588,1994.
- (23)遠藤,白根,伊賀,平石,藤田,齊藤:「ガス絶縁変圧器用プラスチックフィルムの絶縁特性」,平成6年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.593,1994.
- (24)山田:「ガス絶縁変圧器の異常診断システムおよび診断装置の試作・試験」,電気学会静止器研究会, SA-93-34,1993.
- (25)T.Suzuki,Y.Ishioka,S.Isaka,M.Ikeda and T.Ichioka:
“Characteristics of Low Dielectric Constant Transformer Board” Joint Conf.:1993 Intern.Workshop on Elect.Insul.and 25th Symp.on Elect. Insul. Mater. of IEEEJ,10-2,1993.
- (26)T.Inui,T.Inoue,T.Teranishi,H.Murase and I.Oshima:
“Dielectric Characteristics of Static Shields for Coil End of Gas-insulated Transformer” ,IEEE.Trans.on El. ,El-27,No.3,572,1992.
- (27)稲葉:「小特集:電力ピンチに応える, III. 都市への大電力輸送をどう守る, 第3章 変電機器の小形化と不熱化」,電気学会誌, Vol.113,No.5,365,1993.
- (28)電気協同研究:「油中ガス分析による油入機器の保守管理」, Vol.36,No.1,1980.
- (29)P.J.Burton et al.:“Recent Development by CEGB to Improve the Prediction and Monitoring of Transformer Performance” ,CIGRE,12-09,1984.
- (30)張替,後藤,太田,月岡:「フルフラールによる油入変圧器の経年劣化診断の研究」,電学論 A,Vol.112,No.6,589,1992.
- (31)T.Suzuki,Y.Ishioka and T.Kobayashi: “Thermal Degradation of Insulating Materials of SF6 Gas Insulated Transformers” Joint Conf.:1993 Intern.Workshop on Elect.Insul.and 25th Symp.on Elect. Insul. Mater. of IEEEJ,9-5,1993.
- (32)鈴木,石岡:「ガス絶縁変圧器の絶縁材料の熱劣化特性」,電気学会静止器研究会, SA-93-39,1993.
- (33)高木,石原,工藤,細川,牧野:「ガス絶縁変圧器の各種内部異常による主要な分解生成物」,平成2年電気学会電力・エネルギー部門全国大会, No.95,559,1990.
- (34)長谷川,別井,大西,牧野,林,宮本:「大容量液冷却式ガス絶縁変圧器の異常診断法」,平成2年電気学会電力・エネルギー部門全国大会, No.93,553,1990.