変圧器油中浮遊粒子数の測定結果と絶縁破壊への影響

正員 池田 正己 (東芝) 正員 井上 保 (東芝)
正員 川口 賢二 (東芝) 正員 森 繁和 (東芝)
正員 萩森 英一 (東芝)

Particles-in-Oil Number Measurements and their Effect on Breakdown Voltages of Transformers Oil
Masami Ikada, Member, Tamotsu Inoue, Member, Kenji Kawaguchi, Member,
Shigekazu Mori, Member, Eiichi Haginomori, Member (Toshiba Corporation)

In order to establish practical measurement method for particles in oil, this paper verifies several problems on the particle counting measurement, e.g. sampling container and its cleaning way, solvent, sampling points, sampling way, previous treatment, particle counting equipment, the method and the calibration.

Based on this established measurement method, authors introduce several results of the particle measurement of the oil sampled from actual transformers under factory test, the transformers in field.

From these results, authors tentatively suggest the concrete classification of oil cleanness in the transformers.

And authors report the data to have been in pursuit of the change of the dielectric oil strength with the filter-circulation. Moreover, authors discuss the relationship between the number of particles-in-oil and the dielectric strength.

キーワード：油中浮遊粒子、粒子測定法、ろ過循環、絶縁破壊電圧、油入変圧器

1. まえがき

電力需要の増大に伴い、限られた輸送制限下でより高電圧・大容量の信頼性の高い変圧器を、製作する必要性に迫られている。それを実現するためには、油入変圧器絶縁技術の占める役割は大きい。

さて、変圧器内の絶縁油は、工業的に可能な限り精製処理がなされ、変圧器製作、組立の段階でも防塵・異物管理が行われているが、油中には微細な固形粒子が混入することは避けられない。たとえば、25～50(μm)の大きさの粒子が100ml中に、数10～数1,000個浮遊している⁽¹⁾。油中粒子の成分は、絶縁物から発生する絶縁性異物、塵埃、カーボン、塗料破片、金属性の異物などが考えられる。品質管理の参考ではあるが、交流1000kVや直流500kV機器開発や現地据付け時の管理データとして、油中粒子数の測定が行われている事は周知のことである。

絶縁油の絶縁破壊特性の体積効果、V-t特性あるいはバラツキを伴う確率的破壊特性は、これら油中浮遊粒子の高電界での挙動が関わっていると考えられている⁽²⁾。従って、油入絶縁で今まで以上の高電界設計を実現するには、油中浮遊粒子数を把握し、その混入を防止したり、除去する技術が重要となる。

浮遊粒子と油中水分量を可能な限り除去した鉱油の絶縁

破壊特性を裸ギャップで調査した栗田氏らの研究がある⁽³⁾。

この動きは世界的な動きで、CIGREのSC-12(変圧器)のWG12-17(Particles in Oil)で世界14カ国の研究機関が参加して、系統だった調査が開始されている⁽⁴⁾。

ところで油中粒子数の測定は、油圧の作動流体の磨耗汚染管理に導入され、ISO5884(1987)にも規格化されている。絶縁油のサンプリングに関してはIEC Pub.475(1974)に規定され、測定に関しては、IEC970(1989)で規定されている。しかし、実変圧器での測定方法や実測データに関する論文は、筆者らが知る限りあまり無い。

本報では、実変圧器について、油中粒子数測定のためのサンプリング法、測定法、実測結果、ろ過による除去効果、現地長期運転の影響、油中粒子数と絶縁破壊特性の関係について述べる。また、絶縁油の清浄化により、実際の変圧器と等価性のある被覆ギャップにおいて、どの程度耐圧を向上できるかを推定する。

2. 油中粒子数の調査方法

<2.1> 油中粒子計数法

油中粒子の計数には、光遮断方式の自動粒子カウンタ(HIAC-ROYCO:PC320)を用い、粒径5～100(μm)の油中粒子数の分布を5チャンネルで測定した。図1に、光遮断方式の粒子計数の説明図を示す。本方式は、検出部の窓から光を当て、

供試油が検出部を通過する際に、油中粒子によって受光面に生じる影像を出力変化として検出し、油中に含まれる粒子の大きさと数を測定する⁽⁶⁾。油中粒子の測定に際しては、供試油 20ml 中の粒子数を3回測定し、その平均値を 100ml 中の粒子数に換算している。

図1 光遮断方式の粒子計数方法

Fig.1. Particle counting method of light-blocking system

粒子計数器は、あらかじめ粒子径分布が既知の微粒子を用いて、粒子径と光電素子との出力電圧の較正を行う必要がある。本計数器では ISO4402 に基づく、ACFTD (Air Cleaner Fine Test Dust) を用い、毎年定期的に較正を行っている。

〈2・2〉 採油容器の選定および処理方法

油中粒子の定量評価を行う上で、採油容器に混入・付着している粒子が測定結果に影響を及ぼすため、その容器の選定は重要である。採油容器に求められる条件としては、外部から汚染要因物を浸透させない、容器自体から汚染要因物が発生しない等が挙げられる。以上の要件を満たすものとして、採油容器にはガラス容器 (容量 200ml) を用い、容器の蓋にはゴム製シールを施したプラスチック製のネジ蓋を用いた。また、採油容器の洗浄溶剤には、NAS 汚損度等級⁽⁶⁾が 00 級である試薬特級 n-ヘキサンを採用し、洗浄後には十分乾燥した後、蓋で密閉して容器を保管した。

洗浄した容器内の最終洗浄後の試薬特級 n-ヘキサン溶剤の粒子数を測定して、25-50(μm)の粒子数は確実に 0 であることを確認している。

〈2・3〉 採油箇所および採油方法

変圧器内部の油中粒子を正確に測定するには、変圧器の絶縁に関わっている油を採油する必要がある。ところが、変圧器の底部では、粒子が局部的に沈殿していたり、逆にタンク上部等では、油がうわずみとなっていることが考えられる。強制送油変圧器の場合は、循環配管途中から採油することが望ましい。しかし、実変圧器では採油できるバルブの場所や数が限られており、採油作業の安全性を考慮して、ポンプ流入部付近の下部ドレインバルブから採油を行った。

また、変圧器から採油する場合、採油口およびバルブに異物が付着している恐れがある。従って、油中ガス分析等の採油を

先行させて、バルブ付近に付着している異物を十分に除去した後に採油するように努めた。また、採油時には、2回程度容器を供試油で共洗い洗浄を行った後で、採油を行った。

〈2・4〉 各種調査の概要

本論文では、以下に示す項目について調査した。

- ① 工場試験と現地運転中の変圧器約 100 台の油中粒子数とその度数分布
- ② 長期運転による油中粒子数の増減
- ③ ろ過循環による油中粒子数の除去効果
- ④ 12,000kVA 変圧器について、ポンプやろ過器運転での油中粒子数の変化推移
- ⑤ 500kV-1,000/3MVA 変圧器について、ろ過循環による油絶縁破壊電圧の変化推移

なお、各具体的調査法は、調査結果の項で記す。

3. 調査結果

〈3・1〉 各種変圧器油中粒子数測定結果

図 2 に、運転中と工場試験中の 6 台の 500kV 変圧器の油中粒子数測定結果を各粒子径ごとに示す。粒子数は、対数目盛り上でほぼ直線関係にある。100(μm)以上の粒子は 0 個が多くて数個である。

ここに紹介した粒子数の一測定データは、総個数と、5種の大きさの各々の個数まで含めると計 6 つの測定数値となり、管理上データ数が多すぎる。そこで、6 つの測定値の合計すなわち総個数で表わしたり、あるいは NAS 等級で表わすケースがあった⁽⁷⁾。本報では、100ml 中の 25-50(μm)の個数で表わすことにする。

従来表示法との関連を示すため、98 例の測定データについて粒子数を総個数で割った百分率を求め、その平均値を表 1 に示す。すなわち、総個数に占める 5-15(μm)の粒子数は 86.8%で、25-50(μm)は 3.1%である。従って、総個数は下式で換算できる。

$$(\text{総個数}) = (25-50(\mu\text{m})\text{の大きさの個数}) / 0.031$$

図2 工場試験中・運転中変圧器の油中粒子数調査結果

Fig.2. Particles-in-oil investigation results of transformers under factory test and in field.

表 1 5(μm)以上の粒子総個数に占める
各大きさの粒子数の構成分布

Table 1. Percentage of the number of particle in each size
against total particles over 5 μm diameter.

総個 数	5*・15** μ m	15*・25** μ m	25*・50** μ m	50*・100** μ m	100* μ m
100%	86.8%	9.6%	3.1%	0.46%	0.05%

(* ; 以上、** ; 未満)

図 3 に、25-50 μm の粒子数の変圧器台数の度数分布を、
運転中と工場試験中に分けて示す。運転中と工場試験中の分
布については、95%信頼度で検定しても有為差がないという検
定結果である。

図 4 に、運転中変圧器の運転期間に対する粒子数の関係を
示す。粒子数は、運転期間の長短に関わらず、200-3,000
(個/100ml)の範囲にあり、運転期間によって粒子数が増加す
る傾向は見られない。

図4 長期運転変圧器の油中粒子数測定結果
Fig.4. Particles-in-oil measurement results for
long-term operating transformers.

図3 油中粒子数測定値のヒストグラム
Fig.3. Histogram of particles- in-oil measurements.

＜3・2＞ 各種変圧器のろ過循環での粒子除去測定結果

各種変圧器について、工場でろ過循環処理の効果を調査し
た。代表的 5 例について、循環前後の 25-50(μm)の粒子数
を比較して、図 5 に示した。循環量は 3 循環としており、採
油は下部ドレインバルブから行った。ここで、3 循環とは、
変圧器油量の 3 倍に相当する油量を循環したことを意味す
る。ろ過循環前は 150-3,000 (個/100ml) であるが、循環に
より、粒子数が 80%も減少するケースと 26%しか減少しな
いケースなどがある。これは、変圧器の油量、ろ過器の送油
量、バルブ出入口位置、油採油箇所などによって影響され
たものと考えられる。

図5 ろ過循環での粒子除去測定結果
Fig.5. Measurement results of particle reduction effect by
filter-circulation.

＜3・3＞ 特定の1台の変圧器での粒子除去詳細追跡調査結果

(1)調査方法 定格 12,000kVA-51kV 変圧器について、
ポンプ運転、ろ過運転、静置などによる油中粒子数の増減を
追跡調査した。1996 年製の工場試験用の水冷強制循環冷却
変圧器で、油量は 10,300(lit)である。図 6 に示すように、冷
却用ポンプの送油量は 500 (lit/min) で、ろ過器の性能は 3
(μm)、処理油量は 333 (lit/min) である。

調査条件を図 7 中に示す。ポンプを 1 ヶ月間停止後、運
転する前に採油し、8 日間運転、その後静置した。その後、
約 3 ヶ月後にろ過器とポンプを 2 循環 (1 時間) 運転し、そ
の後ポンプを停止し、ろ過器のみで、3 循環 (1 時間 30 分)
した。この全期間中に、11 回、下部 A バルブ、上部 B バル
ブから採油し、油中粒子数を測定した。

図6 特定変圧器でのろ過循環による粒子除去追跡調査方法
Fig. 6. Method of tracking investigation of particle reduction by filtering in a transformer.

図7 特定変圧器での粒子除去追跡調査結果
Fig. 7. Results of tracking investigation of particle reduction by filtering in a transformer.

(2) 調査結果 測定結果を図7に示した。結果は以下に述べる現象と考えられる。

長期間静置した後の①では、上部Bはうわずみ油で粒子数は少なく、下部Aバルブはタンク底の沈殿油で、相対的には粒子数が多い。ポンプを8日間運転した後の②は、ポンプの油流により上下とも増加している。これは、攪拌され粒子が吹き上がったためである。ポンプ運転でも変圧器内の油流速は遅いため、上下油が均一になるには至らず、下部Aバルブ

の方が上部Bバルブより粒子数が多い。その後の③④⑤は、徐々に静置効果で沈殿し、ろ過器とポンプを運転した⑥⑦⑧で粒子が減少したのは、ろ過効果である。ところが、その後、ろ過器運転後⑨で再度増加して、その後、ろ過運転期間中の⑩⑪では、まだ減少している。後者の減少はろ過効果であるが、⑨において、一度ろ過で除去したにもかかわらずまた増加したのはA、Bバルブとも同じ傾向であり、ばらつきなど測定の問題ではない。これは、ろ過循環時の変圧器内の油流速はただか数(mm/sec)～数(cm/sec)以下であるので、循環中、変圧器内の隅から隅までの油がまんべんなく流れることはない。変圧器内の一部と外部循環配管の油だけが循環され、ろ過で粒子が除去される。油流路から離れた空間の油は動かない。したがって、循環経路に近い所から採油した油中粒子数は減少するが、静置すると大部分の動かない油と、部分的な循環油が静置時間の経過とともに混ざりあい、結局ほとんど元の粒子数密度に戻ってしまう。

これら一連のろ過循環の実験で言えることは、このような油量の少ない変圧器であっても、変圧器本体内の油中粒子をまんべんなく確実に減少させることは決して容易な事ではないという事である。

しかし、ろ過循環を繰り返せば、徐々に粒子密度は減少するはずである。変圧器ろ過循環効果を高めたり、早めるには、冷却用ポンプで変圧器本体内の油をできるだけ攪拌しながら、ろ過器を循環することが効果的である。

以上が図7の調査結果に関する見解である。

＜3・4＞ ろ過循環での油破壊電圧の変化推移調査結果

(1) 調査方法 変圧器内の絶縁油の破壊電圧が、ろ過循環でどのように変化するかを調査するわけであるが、変圧器内の主要絶縁部の油の破壊電圧を、油ギャップを挿入して調査したいが、それは不可能である。そこで、変圧器内の油を図8に示したように外部配管を介してろ過器で循環させ、循

図8 ろ過循環での油破壊電圧調査試験方法
Fig. 8. Investigation method of the oil breakdown voltage under filter circulation.

環配管内にギャップ長 2.5(mm)の平板電極油ギャップを設け、そのギャップの電界方向に直交するように油を流して、油の破壊電圧を調査する方法をとった。ねらいは、変圧器内の主要絶縁部の油を外部に導き出して、破壊電圧を調べようと試みたわけである。したがって、油はまず油ギャップを通し、その後ろ過器を通過するような循環回路にしている。

電圧は、交流電圧を自動電圧上昇装置で 1(kV/sec)で破壊するまで上昇させ、破壊ごとに 1 分間の休止時間をとった。この 1 分間は、油ギャップタンク内の油が完全に入れ替わるのに十分な時間である。

500kV-1,000/3MVA、油量 81(klit)の単相変圧器と、3 (μm)の性能で処理能力 40(klit/Hr)のろ過器を組み合わせで調査した。冷却用ポンプは運転していない。この試験前後で水分は 7 % 近辺で変化はなかったが、ガス量は多数回放电させたため、0.40 % から 0.65 % に増加した。しかし、それ自体による耐圧の変化はなかったと考えている。

図9 ろ過循環での油破壊電圧変化結果(1)
Fig.9. Change of the oil breakdown voltage under filter-circulation. (1)

図10 ろ過循環での油破壊電圧変化結果(2)
Fig.10. Change of the oil breakdown voltage under filter-circulation. (2)

(2)調査結果 図9にろ過運転循環回数に対する交流破壊電圧の結果の一部を示す。図9をみると、10～30 回おきに、異常に低い破壊電圧が記録されている。

図9は測定点数が多すぎて、傾向をつかみにくいので、30 回ごとの平均破壊電圧、その間の最低値および動係数(標準偏差/平均値; (%)) をプロットしたのが図 10 である。図中に 1 循環ごとの平均破壊電圧を、ろ過循環初期値に対する比 (%) で示した。ろ過 3 循環の間は、破壊電圧は向上し、5 循環になると破壊電圧の上昇は飽和している。

ろ過運転開始前後の破壊電圧はそれぞれ 54(kV)(126%)、43(kV)(100%)で、ろ過循環開始により破壊電圧が約 20% 低下している。ろ過循環の油流により、油ギャップ電極間に粒子の流入があり、破壊電圧が低下したものである。1、2、3 循環でそれぞれ 128、163、181%に上昇し、それ以降は増加がほとんど無い。

図 10 中に、最低値カーブ上に平均破壊電圧に対する比 (%) で示したが、平均破壊電圧の 53～96%の破壊電圧であった。これは極めて低確率ではあるが電極間に大きな粒子が流入し、低い電圧の破壊を引き起こしたものと考えられる。

変動係数は、初期では高い値を示したが、5 循環後は減少した。

4. 検討と考察

<4.1> 油ギャップ破壊電圧の油中粒子数依存特性

裸と被覆の油ギャップの絶縁特性で油中粒子数の関係を調査したものとして、仲神氏らの実測結果がある⁽⁷⁾。50mm 直径の平板電極で、裸電極と被覆電極の 3mm 油道の破壊特性を油中粒子数を変えて求めたものである。その論文の測定プロットから、筆者らは最小自乗法で回帰直線を求めた。その回帰直線を(1)式、(2)式に、グラフを図 11 に示した。その際、横軸を 100ml あたり 5(μm)以上の粒子総個数を 0.031 倍し、25-50(μm)の個数に変換している。

$$\text{裸油ギャップ;} \quad E_P=111.2 \cdot N^{-1/3.76} \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{被覆油ギャップ;} \quad E_B=42.7 \cdot N^{-1/9.94} \dots\dots\dots (2)$$

ここで $E(\text{kV/mm,rms})$; 交流破壊ストレス、
 N ; 25-50(μm)の大きさの粒子個数 (個/100ml)

図 11 でわかるように、裸油ギャップの粒子数依存特性が被覆と比べて大きい。油の清浄化の研究で裸油ギャップで調査した結果をもとに、過剰な耐圧向上を期待しないように注意が必要である。あくまで、実油入変圧器絶縁と等価性のある被覆油ギャップのデータを参考にすべきであろう。

図 11 で 2 本の直線が交差し、 $N=300$ 以下で、 E_P と E_B が逆転してしまう。このように裸油ギャップが被覆油ギャップより破壊電圧が高くなるようなことはありえない。従って図中の二本の回帰直線は点線で示した。

図11 粒子に対する裸と被覆の交流破壊特性⁽⁶⁾
Fig.11. Breakdown characteristics of bare and insulated oil gaps
vs. number of particles-in-oil.

以下、上記被覆油ギャップのデータをもとに、油入変圧器の一般的に適用できる絶縁設計油中粒子数の依存特性を推定してみる。

油の破壊電圧は体積効果に依存することが知られている。電極の面積と油ギャップ長を変えた平等電界油ギャップの電極間の課電油体積 (Stressed Oil Volume、以下 SOV と称す) を変えて、体積効果を調査した結果、その依存式として、 $[E=11.5SOV^{-1/9.5}+2.5]$ が既に発表されている⁽²⁾。このデータは、静止油で通常の変圧器と同等の処理、すなわち同等の油中粒子数、油中水分、油中ガス量の油について調査されたものである。

図 11 で引用した実験における油ギャップの SOV は、 $5.9(\text{cm}^3)$ と少ない。この SOV が実器の SOV 値の $1,500(\text{cm}^3)$ に増加すると、体積効果依存式 $[E=11.5SOV^{-1/9.5}+2.5]$ 式の傾きから、破壊ストレスは $1/1.54$ に低下する。

ここで、 $SOV=1,500(\text{cm}^3)$ という値は、変圧器主絶縁で $1,000\text{ mm } \phi$ で高さ 50 mm 、厚さ 10 mm の高電界部の SOV を想定した値である。高電圧変圧器の一般的な SOV は大体この程度の大きさでと筆者は考えている。

したがって、(2)式を $1/1.54$ 倍した(3)式が、一般的な変圧器絶縁の被覆油ギャップの油中粒子数依存特性になる。

$$\text{被覆油ギャップ; } E_B=27.7 \cdot N^{-1/9.94} \dots\dots\dots (3)$$

この式を図 12 のグラフ中に右下がりの直線で示した。また、油入絶縁でよく知られた油道対破壊特性の(4)式で求めた交流破壊ストレスを斜線範囲で示した。この式は油入絶縁特性の基本式でよく知られている⁽⁸⁾。

$$E=k \cdot d^{-a} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $E(\text{kV/mm,rms})$; 交流破壊ストレス、
 $k=20 \sim 23$ 、 $a=0.30 \sim 0.33$

(4)式で E の範囲を計算すると $13.9\text{-}16.5$ であり、その上下限値と(3)式の粒子数は 172 と 948 で交差する。すなわち約 $200\text{-}1000(\text{個}/100\text{ml})$ が、通常に処理された変圧器内の油中粒子数と考えられる。この粒子数の領域で破壊ストレスは大方の認める交流油道破壊特性とほぼ一致する。また、3.1項で述べた約 100 台の変圧器の測定結果での通常の油中粒子数とも、おおよそ一致している。

図12 被覆油ギャップの破壊特性の油中粒子数依存特性
Fig.12. Particles-in-oil number dependency on
breakdown characteristics of insulated oil gap.

＜4・2＞ 絶縁油の清浄度の区分けの提案

筆者らは、油中粒子数の多くの測定結果の経験から、表 2 のような区分け等級を提案したい。表 2 中には筆者らの約 100 例の測定件数の分布も示した。この中には 1951 年製から現在製作中の変圧器までを含んでいる。

表 2 絶縁油の清浄度の区分とサンプリング台数
Table 2. Classification of cleanness level of dielectric oil and the number of sampling.

ランク	油中粒子数Nの区分	台数	(%)
クリーン油	50 未満	4	4.1
準クリーン油	50-200 未満	21	21.4
正常油	200-1,000 未満	50	51
準正常油	1,000-5,000 未満	22	22.4
準コンタミ油	5,000 以上	1	1

N ; $25\text{-}50(\mu\text{ m})$ の粒子数 (個/100ml)

＜4・3＞ 絶縁油の清浄化による耐圧向上

ここで変圧器絶縁油の清浄化により、どのくらい絶縁縮小化が可能かを考えてみる。普通油からクリーン油の領域まで、変圧器内の油をまんべんなく確実に油中粒子数を低減することは、今回の調査結果などから、よほどのブレークスルー技術を適用しない限り、極めて難しいと筆者らは考えている。

そこで、現実的に手が届く範囲として、準クリーン油まで清浄化が可能とすると、次の試算が可能になる。

正常油の中心粒子数を対数目盛り上の中心 447 とすると、(4)式から、15.0(kV/mm)が求められ、準クリーン油の中心粒子数 100 では、17.5(kV/mm)が得られる。すなわち 16.7%破壊電圧を向上できる。それだけ絶縁縮少が可能であるということである。ただし、図 10 の 255 回にプロットされている 53%という低い破壊電圧が希に記録されることがある。これは、油中空間に浮遊する例外的に大きな異物に起因するものと考えられ、防塵など製造技術で防止すべき現象である。このような異常低確率放電を、これらの対策で防止すれば、約 16~17%の耐圧は向上すると考えてよい。この耐圧向上は、交流破壊電圧に限った話で、雷インパルスは油中粒子数依存特性は少ないので、あまり高耐圧化は期待できないと考えている⁽⁹⁾。

5. むすび

油入変圧器の油中粒子数測定は品質管理の一項目として導入されつつあるが、これまで、系統だった研究報告が少なかった。そこで、採油容器、サンプリング法、測定前処理、測定法を統一し、変圧器約 100 台の油中粒子数の測定をした。それらの結果をもとに、油中粒子数の測定度数分布、ろ過循環による除去効果、特定変圧器についてのポンプやろ過器運転での追跡調査結果、ろ過による油破壊電圧変化推移などの調査結果を述べた。

油破壊電圧に及ぼす油中粒子数の影響について、考察し、通常の絶縁設計で期待されている油中粒子数の範囲を示した。また、変圧器内の絶縁油の清浄度を区分する具体的油中粒子数を提案した。

これらの結果を総合して、油入変圧器の交流電圧に対する耐圧を 16~17%程度高められる可能性のあることを示した。

本研究に関し、協力いただいた東芝重電技術研究所小林茂夫主査、浜川崎工場品質保証部熊谷忠義主査、変圧器部佐々木薫主務に感謝致します。

(平成 10 年 2 月 27 日受付、平成 10 年 6 月 22 日再受付)

参考文献

- (1) S.Palmer, et al., "Electric Strength of transformer Insulation", Proc. IEE, Vol.116, Dec, 1969, pp.2029-2037,
- (2) Murano, et al., "Experimental Extension of Volume Effect on Breakdown Transformer Oil" IEEE C74 236-6
- (3) 栗田、長谷川、木村、「超清浄油の絶縁破壊特性」電学誌 Vol.113-B, No.8, 939(平 7-8)
- (4) C.Vincent, et al., "Consideration on on-site Evaluation of Transformer Oil Quality, IEEE Symp. Montreal, June 1996,
- (5) ISO5884, First edition, 1987-08-15

- (6) NAS1638, Jan 1964
- (7) 仲神、倉橋、「絶縁油の油中塵埃量と絶縁破壊特性」電気学会全国大会、242、昭 56,
- (8) たとえば、H.P.Moser "Transformer-board" Weidmann 1981,8,
- (9) 池田 他、; 「流動油の絶縁破壊特性」電学誌 Vol.99-B, No.10, 635(昭 54-10)

池田 正己 (正員) 1943 年 9 月 14 日生。1962 年神奈川工業高校電気科卒業。同年 4 月(株)東芝入社。同社重電技術研究所において油入絶縁及び高電圧技術開発を担当。82 年浜川崎工場変圧器部に転籍、油入電力用変圧器、ガス絶縁変圧器の開発設計などの業務に従事。電気学会論文賞、進歩賞、工学博士(慶應大学)。

井上 保 (正員) 1949 年 7 月 3 日生。1968 年宮崎工業高校電気科卒業。同年 4 月(株)東芝入社。以来重電技術研究所において主として油入変圧器及びガス絶縁変圧器絶縁の研究に従事。

川口 賢二 (正員) 1970 年 3 月 28 日生。1992 年神奈川大学電気工学科卒業。同年 4 月(株)東芝入社。主としてガス絶縁変圧器、電力用変圧器の設計・開発に従事。

森 繁和 (正員) 1972 年 1 月 18 日生。1996 年名古屋大学大学院電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月(株)東芝入社。同社重電技術研究所において変圧器絶縁の研究に従事。

萩森 英一 (正員) 1940 年 1 月 2 日生まれ。'62 年 3 月東京工業大学電気工学科卒業。同年 4 月東京芝浦電気(株)東芝〔現(株)東芝〕入社。空気遮断器・ガス遮断器開発設計に従事。76 年以降 IEC-SC17A-WG10 および WG21 で IEC の主として遮断試験規格立案。91-96 年東京工業大学寄附講座客員教授。工学博士。IEEE 会員。