逐次ストレス複合劣化試験の加速性評価

正 員 袴 田 武 司 (日 立)

1. 緒 言

IEC 611 の絶縁システムの耐熱性評価試験法⁽¹⁾では、熱ストレス以外の電氣的、機械的、環境的ストレスを診断要因 (diagnostic factor) として扱っている。

環境ストレスの代表である吸湿は絶縁の劣化した部分に作用して、耐電圧試験による良、不良コイルの識別を効果的なものにする。このことは寿命判定値を初期値の 20~30% に設定した定ストレス試験で、劣化が十分に進行した状態において確認されている^{(2)~(4)}。また、吸湿は $\tan \delta$ の増加、絶縁抵抗の低下などをもたらすが、乾燥を行えばこれらの特性は元に戻ってしまう。このように、吸湿は不可逆的な劣化をもたらさないで診断要因と言える。しかし、診断要因として使用した吸湿による水分が、例えばそれに引続き行なわれる熱劣化過程まで残留していると、絶縁を構成する高分子材料は、加水分解などの著しい劣化を呈することがある。従って、吸湿は試験方法によって劣化要因ともなり得る。この効果の確認が一つの課題である。

次に、診断要因としての振動は診断にふさわしいストレスレベルでなければならず、重大な劣化を引き起こしてはならない。しかし、どのレベルまでなら診断要因として機能し、どのレベルから劣化要因として作用するか、これが次の課題である。

また、診断要因としての耐電圧試験は機器の予保全で採用されるレベルの値が望ましい。この値は試験電圧の 60%、そして印加時間は 1 分としている。巻線の破壊電圧はそれを構成する数多くのコイルの中の最弱コイルの破壊電圧に支配される。そこで、通常この破壊電圧は試験電圧の 2 倍以上に設計される。従って、初期値の 30% 程度に低下したときが寿命となる。逆に、初期の段階では巻線は寿命の判定値となる予保全での耐電圧試験値に対して 3.3 倍以上の安全率を

もっており、このレベルの耐電圧試験は劣化要因とはならない。

本論文では、熱劣化→振動→吸湿→耐電圧を繰返し行なう、いわゆるモータレット試験において、振動、吸湿、耐圧が有効な診断要因として機能しているか否か、言い換えれば重大な劣化要因になっていないかどうかを定量的に評価する。

試験データとしては、単独ストレスによる熱劣化の結果および熱劣化→吸湿、熱劣化→振動→吸湿などの逐次ストレス試験の結果が使われる。なお、熱劣化試験における熱ストレス以外の逐次に印加されるストレスの効果を劣化の加速率の観点から定量的に評価した例はない。

2. 試 料

試料は 3kV ないし 6kV 級の交流発電機、誘導電動機および 1.5kV ないし 3kV 級の車両用電動機に使われている絶縁である。絶縁テープは集成マイカとポリイミドフィルムあるいはポリアミドフィルムを、いろいろな比率で組合せたものである。組合せはマイカに対してフィルムの比率が 25~100% の構成であり、かつポリアミドフィルムの比率でみると 0~75% の構成でなるものである。ワニス処理はいずれも無溶剤レジンの真空加圧含浸によっている。

表 1 に試料の絶縁構成を示す。絶縁の耐熱区分は試番 1 が C 種、2~4 は F 種である。

表 1 試料の絶縁構成

Table 1. Construction of insulation systems of test models.

No.	絶 縁 構 成		フィルム比率 (%)	ポリアミド比率 (%)
1	マ イ カ	ポリイミドフィルム	25	0
2	マ イ カ	ポリアミドフィルム	40	40
3	マ イ カ	ポリアミドフィルム	50	50
4	ポリアミドフィルム	ポリイミドフィルム	100	75

Evaluation of Acceleration Factors in Sequential Stress Aging Test. By Takeshi Hakamada, Member (Hitachi, Ltd.).
袴田武司：正員、(株)日立製作所

図 1 試料の外観

Fig. 1. Construction of test models.

図1は試料の外観の一例であり、コイルはいずれも模擬スロットに収められ、さし木で固定された後一体に真空加圧含浸された。

3. 試験法

劣化ストレスの効果を定量化するために三つのストレス法を採用した。以後、これらを Str.-A, B, C と称する。Str.-A は IEC 611 の絶縁システムの耐熱性評価試験法に準拠しており、熱劣化に続いて振動を印加し、更に吸湿を与え、十分に吸湿した状態で耐電圧試験を実施した。Str.-B は第一の方法において振動を省略したものであり、加熱と吸湿よりなる。そして Str.-C は更に吸湿を省いたもので、単なる熱劣化にほかならない。

表に2これをまとめて示し、各々の劣化条件を掲げた。熱劣化の温度は、F 種の想定に対しては $T_1=220^\circ\text{C}$, $T_2=200^\circ\text{C}$, $T_3=180^\circ\text{C}$ とし、C 種の想定に対しては 270°C , 250°C , 230°C とした。

振動の加速度は一般産業用機器に対して 1.5G 、車両用機器に対しては 7G である。そして吸湿は $95\pm 5\%\text{RH}$ で水滴のできる条件とした。すべての試料は表2の劣化サイクルを10サイクル繰返した後、商用周波の交流短時間破壊電圧を測定した。各試料のス

表 2 逐次劣化試験法の1サイクルの構成

Table 2. One cycle of sequential stress aging tests.

ストレス 条件 法	ストレス				
	加 熱	振 動	吸 湿		
1. T_1 , 1 日	1. T_1 , 1 日 2. T_2 , 4 日 3. T_3 , 14 日	$\pm 1.5\text{G}, 7\text{G}$ 3,000 cpm 1 h	40°C 95 ± 5% RH 48h		
2. T_2 , 4 日					
3. T_3 , 14 日					
Str.-A	→○→○→○→○→○→○→○→○→○→○				
Str.-B	→○→○→○→○→○→○→○→○→○→○				
Str.-C	→○→○→○→○→○→○→○→○→○→○				

→○：適用ストレス

トレス法ごと、熱劣化温度ごとの員数はすべて6個である。

4. 試験結果

図2は試験結果の残存破壊電圧のワイブルプロットであり、試番3の例である。(a)図は Str.-A, すなわち加熱-振動-吸湿の劣化サイクル, (b)図は Str.-B, すなわち加熱-吸湿の劣化サイクル, (c)図は Str.-C, すなわち加熱のみの劣化サイクルの結果である。(a)図において、初期の特性はワイブル分布 $F(x)=1-\exp\{-(x/x_s)^m\}$ によって、形状パラメータが $m=6.0$ 、尺度パラメータが $x_s=31.0\text{ kV}$ で表わされる。本論文の意図は、Str.-A, B, C で絶縁の劣化、すなわち加速係数にどのような差が現われるか、その差は絶縁の種類が異なる場合にはどのように変化するかを検討することにある。ワイブル関数を表現する定数は m と x_s であるので、これら定数により検討を進めたい。

さて、 $m=6.0$, $x_s=31.0\text{ kV}$ の初期の破壊電圧の分

図 2 残存破壊電圧のワイブル分布

Fig. 2. Weibull distribution of breakdown voltage at initial condition and after aging.

布は Str.-A の 10 サイクルの劣化によって、劣化温度ごとに 180, 200, 220°C で示す分布まで低下した。図からわかるように、 m は各劣化温度に対して 6.0, 6.5, 7.8 であり、初期値の 6.0 に対してほぼ一定である。また、 x_0 は各劣化温度に対して 13.6, 15.5, 16.5 kV であり、ほぼ初期の 1/2 に低下している。しかし、劣化温度による大きな差はない。これは表 2 の試験法に示す劣化温度と劣化日数の組合せの 1 サイクルが、等加速劣化の条件となっていることを示している。以下、図 2 (b), (c) に対してもほぼ同様の傾向が認められる。

5. 試験結果の考察

〈5-1〉 ストレス法による形状パラメータと特性寿命の比較 Str.-A, B, C の間で各絶縁の劣化にどのような差が生じたかを比較するために、 m と x_0 の値についてまとめたものが図 3 および図 4 である。

図 3 において、各試験、各ストレス法ごとに示す 3

図 3 絶縁システムとストレス法による形状パラメータの比較

Fig. 3. Comparison of shape parameter between insulation systems and stress methods.

図 4 絶縁システムとストレス法による残存破損電圧の比較

Fig. 4. Comparison of breakdown voltage between insulation systems and stress methods.

点の m は劣化温度 3 点に対応するものである。試験 1~4 に共通して、劣化温度 3 点の間の m のばらつきは、その平均値に対して $\pm 10\%$ の範囲内にある。また、試験条件 A, B, C 間の差も劣化温度による差と同程度であり、ともに有意差を認めない。しかし、試験間では明らかな差があり、試験 3 は小さく、試験 2, 更に試験 1 へとマイカ含有率が高く、しかも併用のフィルムがポリアミドよりポリイミドになるにつれて m が大きくなる傾向を示す。これはポリアミドが相対的に耐熱性に劣り、もろく、吸湿しやすいため、ワイブル分布における特性寿命の x_0 の上下に破壊電圧が広く分散したことを意味している。

図 4 は尺度パラメータである破壊電圧 x_0 をその試料の厚さで除して絶縁破壊の強さとし、図 3 と同様に試験ごと、ストレス法ごとに示したものである。試験ごと、ストレス法ごとの絶縁破壊強さのばらつきは、どの試験とストレス法の組合せにおいても、劣化温度 3 点のばらつきはその平均値に対し $\pm 10\%$ の範囲にある。これは図 2 において説明したように、等加速劣化の結果である。一方、Str.-A, B, C 間の差については試験 1, 2, 3, 4 の順に差が大きくなる傾向が認められる。しかも、すべての試験において A, B, C の順に劣化が大きい。この傾向はフィルム含有率の大きい絶縁、つまり試験 4, 3, 2, 1 の順に振動と吸湿の影響を受けやすいことを意味している。

〈5-2〉 熱劣化の加速係数による評価法 図 5 は任意な絶縁を Str.-A, B, C で劣化した場合の特性 x の経時劣化を示すものである。以下の解析では初期の x_0 を x_0 とし、任意時間劣化後の x_i を x とし、 x/x_0 を変数として扱うことにする。温度 T_i ($i=1 \sim 3$) での定ストレス試験によれば、Str.-A, B, C の劣化

図 5 両対数表示による破損電圧の劣化特性
Fig. 5. Deterioration property of breakdown voltage in expression of logarithmic coordinates.

の加速率の相違により、特性が判定値の x_{sp} まで低下する時間は t_{Ai-Ci} と異なった値となり、その先に実働温度 T_r での実寿命 t_{Ar-Cr} が予想される。ところが、今回の試験はすべて 10 サイクル後において残存破壊電圧を強制的に測定した定サイクル試験である。10 サイクルに相当する時間は試験温度 T_i に対して t_i である。そして、 t_i における破壊電圧の分布は Str.-A, B, C に対してそれぞれ尺度パラメータ x_{Ai-Ci} で表わされる。

本節では加速条件の温度 T_i 下での 10 サイクル後の残存破壊電圧である x_{Ai-Ci} から出発して、それが判定値 x_{sp} に低下する時間 t_{Ai-Ci} を求め、更にそれから実稼働の温度 T_r 下での寿命 t_{Ar-Cr} を推定する。この過程で温度、機械、環境、判定の各ストレスがどの程度効果的に作用したかをそれぞれの加速係数で定量的に評価する。

(1) 判定加速係数⁽⁵⁾ 前節で述べたように、10 サイクル後の残存破壊電圧は劣化温度 T_i ($i=1\sim3$) の間ではほぼ等加速劣化し、等しい値となっている。このことは Str.-A $\sim$ C に共通して言える。従って、この残存破壊電圧を一つの判定値とみなすと、試料は Str.-A $\sim$ C により判定値 x_{Ai-Ci} で時間 t_i 後に破壊したこととなる。しかし本来の判定値は x_{sp} であるので、これは判定を厳しくした一種の加速であり、これを判定加速係数 $A_{x_{sp}}$ として評価する。

図5は、劣化特性を両対数表示としているので、 $(x/x_0)^{-1/\gamma} = Kt$ の式^{(6)~(8)}で表わすことができる。すなわち、

$$\ln(x/x_0) = -\gamma(\ln t + \ln K) \dots\dots\dots (1)$$

となる。ここに、 K は反応速度定数であり $K = A \exp(-B/T)$ 、 γ は反応次数 n の置き換えで $\gamma = 1/(n-1)$ ($n \neq 1$) である。(1)式に K を代入すると、

$$\ln(x/x_0) = -\gamma \ln t + \gamma B/T - \gamma \ln A \dots\dots\dots (2)$$

となり、 γ は(2)式より明らかなように図5の曲線のこう配であり、時間軸に沿って、例えば、5, 10, 15 サイクル後の残存破壊電圧を測れば実験的に決まる値である。更に(2)式を t について整理して、 x が寿命の判定値 x_{sp} となる時間 t と劣化温度 T の関係を求めると、

$$\ln t = \{\ln(x_{sp}/x_0)^{-1/\gamma} - \ln A\} + B/T \dots (3)$$

となる。すなわち、 $1/T$ と t の温度-寿命曲線を描くことにより、そのこう配として B が求まる。

さて、Str.-A $\sim$ C の温度 T_i での K の値をそれぞれ $K_{Ai} \sim K_{Ci}$ とすると、 t_i 時間において

$$\ln(x_{Ai}/x_0) = -\gamma(\ln t_i + \ln K_{Ai}) \dots\dots\dots (4)$$

$$\ln(x_{Bi}/x_0) = -\gamma(\ln t_i + \ln K_{Bi}) \dots\dots\dots (5)$$

$$\ln(x_{Ci}/x_0) = -\gamma(\ln t_i + \ln K_{Ci}) \dots\dots\dots (6)$$

であり、また x_{sp} においては

$$\ln(x_{sp}/x_0) = -\gamma(\ln t_{Ai} + \ln K_{Ai}) \dots\dots (7)$$

$$\ln(x_{sp}/x_0) = -\gamma(\ln t_{Bi} + \ln K_{Bi}) \dots\dots (8)$$

$$\ln(x_{sp}/x_0) = -\gamma(\ln t_{Ci} + \ln K_{Ci}) \dots\dots (9)$$

である。(4)式と(7)式、(5)式と(8)式、(6)式と(9)式を連立させて時間について解くと、

$$t_{Ai} = t_i (x_{Ai}/x_{sp})^{1/\gamma} \equiv A_{xA} t_i \dots\dots\dots (10)$$

$$t_{Bi} = t_i (x_{Bi}/x_{sp})^{1/\gamma} \equiv A_{xB} t_i \dots\dots\dots (11)$$

$$t_{Ci} = t_i (x_{Ci}/x_{sp})^{1/\gamma} \equiv A_{xC} t_i \dots\dots\dots (12)$$

となり、判定加速係数 $A_{xA} \sim A_{xC}$ を介して、判定値を x_{sp} としたときの寿命 t_{Ai-Ci} が求まる。

(2) 温度加速係数 寿命 t_{Ai-Ci} は温度 T_i での加速劣化の結果であるから、これを実働温度 T_r での寿命 t_{Ar-Cr} に換算する必要がある。温度 T_r での Str.-A $\sim$ C の反応速度を K_{Ar-Cr} とすると、

$$\ln(x_{sp}/x_0) = -\gamma(\ln t_{Ar} + \ln K_{Ar}) \dots\dots (13)$$

$$\ln(x_{sp}/x_0) = -\gamma(\ln t_{Br} + \ln K_{Br}) \dots\dots (14)$$

$$\ln(x_{sp}/x_0) = -\gamma(\ln t_{Cr} + \ln K_{Cr}) \dots\dots (15)$$

である。(7)式と(13)式、(8)式と(14)式、(9)式と(15)式を連立させて時間について解くと、

$$t_{Ar} = t_{Ai} (K_{Ai}/K_{Ar}) \equiv A_{LA} t_{Ai} \dots\dots\dots (16)$$

$$t_{Br} = t_{Bi} (K_{Bi}/K_{Br}) \equiv A_{LB} t_{Bi} \dots\dots\dots (17)$$

$$t_{Cr} = t_{Ci} (K_{Ci}/K_{Cr}) \equiv A_{LC} t_{Ci} \dots\dots\dots (18)$$

となり、温度加速係数 $A_{LA} \sim A_{LC}$ を介して定格温度での寿命 t_{Ar-Cr} が求まる。ここに、 K_{Ai-Ci} および K_{Ar-Cr} は温度、機械、環境のストレスの反応速度がそれぞれ $K_1 = A_1 \exp(-B/T)$ 、 $K_2 = A_2 S_2^p$ 、 $K_3 = A_3 S_3^q$ の形で表わされるとすると、

$$K_{Ai} = A_1 \exp(-B/T_i) A_2 S_2^p A_3 S_3^q \dots (19)$$

$$K_{Bi} = A_1 \exp(-B/T_i) A_3 S_3^q \dots\dots\dots (20)$$

$$K_{Ci} = A_1 \exp(-B/T_i) \dots\dots\dots (21)$$

および

$$K_{Ar} = A_1 \exp(-B/T_r) A_2 S_2^p A_3 S_3^q \dots\dots\dots (22)$$

$$K_{Br} = A_1 \exp(-B/T_r) A_3 S_3^q \dots\dots\dots (23)$$

$$K_{Cr} = A_1 \exp(-B/T_r) \dots\dots\dots (24)$$

で表わされる。ここに、 S_2 および S_3 はそれぞれ機械と環境ストレスであり、 A_{1-3} および p, q は定数である。従って、(16)~(18)式の $A_{LA} \sim A_{LC}$ は、

$$A_{LA} = A_{LB} = A_{LC} = \exp\{-B(1/T_i - 1/T_r)\} \dots\dots\dots (25)$$

となり、等しい値をとる。

(3) 機械および環境加速係数 環境ストレスである吸湿と機械ストレスである振動の効果は Str.-A, B, C 間の寿命時間の比, すなわち時間軸に沿っての平行移動による曲線の重ね合せの条件であるから, (16)~(18)式より,

$$\ln t_{Cr} - \ln t_{Br} = \ln(t_{Cr}/t_{Br}) = \ln(t_{Ci}/t_{Bi}) \quad \dots\dots\dots (26)$$

$$\ln t_{Br} = \ln t_{Ar} = \ln(t_{Br}/t_{Ar}) = \ln(t_{Bi}/t_{Ai}) \quad \dots\dots\dots (27)$$

となる。 $t_{Ai}-C_i$ は (10)~(12)式で与えられているから, 環境加速係数 A_{Am} および機械加速係数 A_{Me} は

$$A_{Am} = t_{Cr}/t_{Br} = (x_{Ci}/x_{Bi})^{1/r} \quad \dots\dots\dots (28)$$

$$A_{Me} = t_{Br}/t_{Ar} = (x_{Bi}/x_{Ai})^{1/r} \quad \dots\dots\dots (29)$$

として求まる。

〈5・3〉試験結果の評価と考察 前節での検討により, (10)~(12)式の判定加速係数 $A_{xA} \sim x_C$ と (16)~(18)式の温度加速係数 $A_{LA} \sim LC$ を用いると, 加速劣化の時間 t_i から実働条件での寿命 $t_{Ar} \sim t_{Cr}$ を求めることができる。また, 環境, 機械ストレスの加速係数も判定加速係数の内数として (28), (29)式で A_{Am} , A_{Me} で与えられた。

これら加速係数の大きさの比較を試料 1~4 について行なった結果が表 3 である。試番 3 の例は図 2 の残存絶縁破壊と二つの定数 B と γ から算出できる。 B は (3)式の定義に従って $B=15,150$ と求まる。 γ は (1)式の定義より図 5 のこう配であるが, 本実験では

表 3 ストレス法による加速係数および絶縁の推定寿命

Table 3. Acceleration factors caused by stress method and estimated life of insulation systems.

試 番		1	2	3	4	
判 定 加速係数 A_x	$(x_{A-C}/x_{sp})^{1/r}$	A	8.52	6.55	2.57	2.26
		B	11.12	7.04	3.14	2.97
		C	10.95	7.74	3.55	3.23
温 度 加速係数 A_L	$\exp\{-B_d(1/T)\}$	T_1	7.39			
		T_2	29.2			
		T_3	117			
環 境 加速係数 A_{Am}	$x_C/x_B)^{1/r}$	—	1.00	1.09	1.16	1.09
機 械 加速係数 A_{Me}	$(x_B/x_A)^{1/r}$	—	1.32	1.08	1.22	1.33
推定寿命 (年)	$t_i A_x A_L$	A	27.3	21.0	8.2	7.2
		B	35.6	22.6	10.1	9.5
		C	35.1	24.8	11.3	10.4

10 サイクル後の測定しか行っていないので, 表 2 と全く同じ試験法による別の実験結果⁽⁶⁾を用いて, 試番 1 は $\gamma_1=0.44$, 試番 2 は $\gamma_2=0.75$, 試番 3 は $\gamma_3=0.9$, 試番 4 は $\gamma_4=1.3$ とした。

さて, 表 3 を見ると温度加速係数が最も大きいことがわかる。実働温度に対して T_1 の加速は 7.39 倍であり, T_3 では 117 倍にもなる。これに対して判定加速係数は 3~8 倍程度であるが, 試料を特定化すると Str.-A, B, C 間の判定加速係数の差はかなり小さいものであることがわかる。A と B の差, B と C の差がそれぞれ機械加速係数と環境加速係数に対応するものであり, これらの値は極めて小さく, ほぼ 1 倍, つまり劣化の加速にはほとんど寄与していないと言える。

このように, 環境ストレスとしての吸湿には劣化の加速性はない。しかし, 絶縁に作用してその劣化特性を表わすことは確かである⁽⁹⁾。このことから, 吸湿は劣化を加速はしないが, 劣化の検出手段としては有効であり, 診断要因と言える。

吸湿の効果を示す環境加速係数が全く無視できるレベルであるのに対して, 振動の効果を示す機械加速係数はいずれの試料でもそれより大きいことから, 多少の加速効果を認めて良いであろう。特に注目したいのは, 試料 2 より 3, 3 より 4 へと加速係数は大きくなっており, これは絶縁構成中に占めるポリアミドの含有率の上昇に対応し, マイカに対して相対的に, これが熱劣化後の振動に対して弱く, 大きく劣化したことを示している。

今回得た温度ストレスと機械, 環境ストレスの加速率の大小関係が成り立つのは, 図 2 に示すように残存破壊電圧のワイブル分布の形状パラメータ m が初期値に対してほぼ不変の範囲である。著者が既に指摘している^{(2)~(4)}ように, 劣化がある程度以上に進むと, 残存破壊電圧のワイブル分布に折れ曲りが現われ, この折れ曲り点は劣化が進行したもののほど高い破壊確率となる。また, この折れ曲った部分の m もほぼ一定の値となる。図 6 はこの一例である。

この現象は, 絶縁が十分に劣化するとある時点で機械ストレスによりはくりやクラックを生じ, ここに吸湿して急激に破壊電圧が低下することによる。このような不連続的変化が発生した以降の特性については, 劣化の連続性から考察された本論旨の範囲外である。しかし, 折れ曲った部分の残存破壊電圧は, 折れ曲りの発生する当初では予防保全の耐電圧試験値に対して余裕があるとしても, m が小さいので経年の低下率は極めて大きく, 早晚低い破壊電圧となる。従って, 複合ワイブルが現われたら予防保全の処置を急ぐ必要が

図 6 ワイブル直線の経年変化

Fig. 6. Change of Weibull distribution along with aging time.

ある。この意味では、折れ曲り前の m が初期値に対してほぼ不変の範囲について加速性の評価ができれば、目的を果たしたと言える。

また、振動が劣化要因か診断要因かの命題に対しては、ここに述べたように劣化が十分に進行した時点で劇的に作用するようになることから、このときを境としてそれ以前は弱い劣化要因、これ以降は強い劣化要因とするのが妥当であろう。

6. 結 言

加熱、振動、吸湿を逐次に印加する複合劣化試験において、

(1) IEC 611 の推奨する熱劣化のための温度と日数の組合せ条件は、ほぼ等加速劣化の条件を満たしている。

(2) 試験法 A, B, C のいずれにおいても熱劣化後の残存破壊電圧のワイブル分布の形状パラメータは、劣化の過程でほぼ不変に保たれる。

(3) 加熱、振動、吸湿の各ストレスの加速率は加熱>振動>吸湿の順であり、温度は絶縁劣化の主ストレスである。

(4) IEC 611 の診断要因は、有意な劣化を起こさないものとする立場からは、吸湿は劣化の検出には有効であるが、劣化の加速性はないので、診断要因とみなせる。

(5) 機械的ストレスである振動は、絶縁によっては有意な劣化要因となり得る。フィルム主体の絶縁は単なる熱劣化ではマイカ主体の絶縁に比較して、むしろ劣化率は小さい。しかし、熱劣化が進むと振動によって劣化しやすくなる。

以上の結論が成り立つのは、残存破壊電圧のワイブル分布の形状パラメータが初期の値に対してほぼ一定の範囲である。

(昭和 58 年 9 月 6 日受付, 同 59 年 3 月 15 日再受付)

文 献

- (1) "Guide for the preparation of test procedures for evaluation of the thermal endurance of electrical insulation systems", IEC 611 (1978)
- (2) 袴田:「絶縁の耐熱性評価における定ストレス法と定サイクル法の比較」, 電学論 A, 104, 179 (昭 59-4)
- (3) 袴田:「絶縁劣化の診断要因としての吸湿効果」, 電気学会絶縁材料シンポジウム (昭 58)
- (4) T. Hakamada: "Analysis of Weibull Distribution for Electrical Breakdown Voltage of Stator Windings", IEEE Trans. Elect. Insulation, EI-19, 114 (1984)
- (5) 塩見・高木: 信頼性技術一試験と解析 (昭 56) 電機大出版局
- (6) 袴田:「熱を主ストレスとする絶縁破壊電圧の経時劣化特性の直線表示に関する一考察」, 電学論 A, 104, 477 (昭 59-8)
- (7) 三井, 他:「エポキシマイカ絶縁の熱劣化特性」, 昭 57 電気学会全大, 220
- (8) Dakin: "Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomenon", AIEE Trans., 67 113 (1948)
- (9) 袴田・門谷:「予防保全に有効な診断要因と非破壊特性」, 電学論 A, 104, 255 (昭 59-5)