

直流OFケーブル用油浸絶縁体の絶縁特性

Insulation Properties of Oil-impregnated Paper for DC Oil-filled Cable

直流ケーブル研究の一環として数種の油浸紙の絶縁抵抗特性を測定した。絶縁抵抗は高温における誘電正接と密接な関係にあり、誘電正接の高い試料は体積抵抗率が低い傾向にあることが分かった。また、絶縁抵抗は温度、電界によって変化し、体積抵抗率の高い試料はその温度、電界係数が小さくなる。これらの測定結果をもとに段絶縁直流ケーブルの電界分布を求め、電界分布に及ぼす体積抵抗率とその温度、電界係数の影響並びに固有熱抵抗の影響について検討した。

油浸紙は吸湿によっても絶縁抵抗が大幅に低下し、破壊電圧も低下するが、交流、インパルスに比べ直流の低下が著しい。

遠藤 桓* Takeshi Endō

沼尻文哉** Fumiya Numajiri

1 緒 言

最近、北海道～本州間を±250kV、600MWの直流で連系する直流送電計画が具体化されつつある。海底ケーブルによる直流送電方式は、よく知られているように交流方式に比べ充電電流が無視でき電圧降下が少ないこと、絶縁厚さを薄くできることなどの特長をもっている。しかし、ケーブルを使用した本格的な直流送電は我が国では初めてのことであり、またケーブル絶縁についてみれば交流絶縁とは異なった難しい問題を抱えている。従来、直流絶縁は交流の3倍の絶縁耐力をもつと言われていたが、現在では必ずしもそのようになるとは限らないことが分かってきた。その理由としては、交流ケーブルの誘電率分担に対し直流絶縁での電位分担は絶縁抵抗分担となり、この絶縁抵抗は電圧印加時間、温度及び電界により、また吸湿劣化などにより大幅に変化することが挙げられる。更に現象を複雑化していることは、絶縁体内への空間電荷の蓄積の影響である。

このように直流絶縁には交流絶縁と異なった重要な問題があり、直流ケーブル開発上直流絶縁紙の材料特性の厳密な把握が不可欠とされる。本稿では直流絶縁に特有な現象について材料的な検討結果を主体として述べる。

2 油浸紙の絶縁抵抗特性

直流ケーブルの絶縁体内電位分担は、電圧印加直後は誘電率分担となるが、課電時間とともにしだいに絶縁抵抗による分担へと移行して行く。この移行に要する時間、すなわち、絶縁体の吸収電流がゼロになり漏れ電流のみになるまでの時間は後述するように温度、電界及び絶縁体の種類などによって異なり、大幅に変化する。ここでは漏れ電流が一定となった、定常時の電位分担を主として検討する。

2.1 油浸紙の絶縁抵抗測定原理

一般に絶縁体は、図1に示すような等価回路で表わされる。ここで、直流矩形波電圧を加えると絶縁体に流れる電流 $I(t)$ は、

$$I(t) = I_c + i(t) + I_R \quad \text{.....(1)}$$

但し、 I_c ：絶縁体の静電容量により流れる変位電流

$i(t)$ ：吸収電流成分を示し、長時間の課電により電流値はゼロになる。

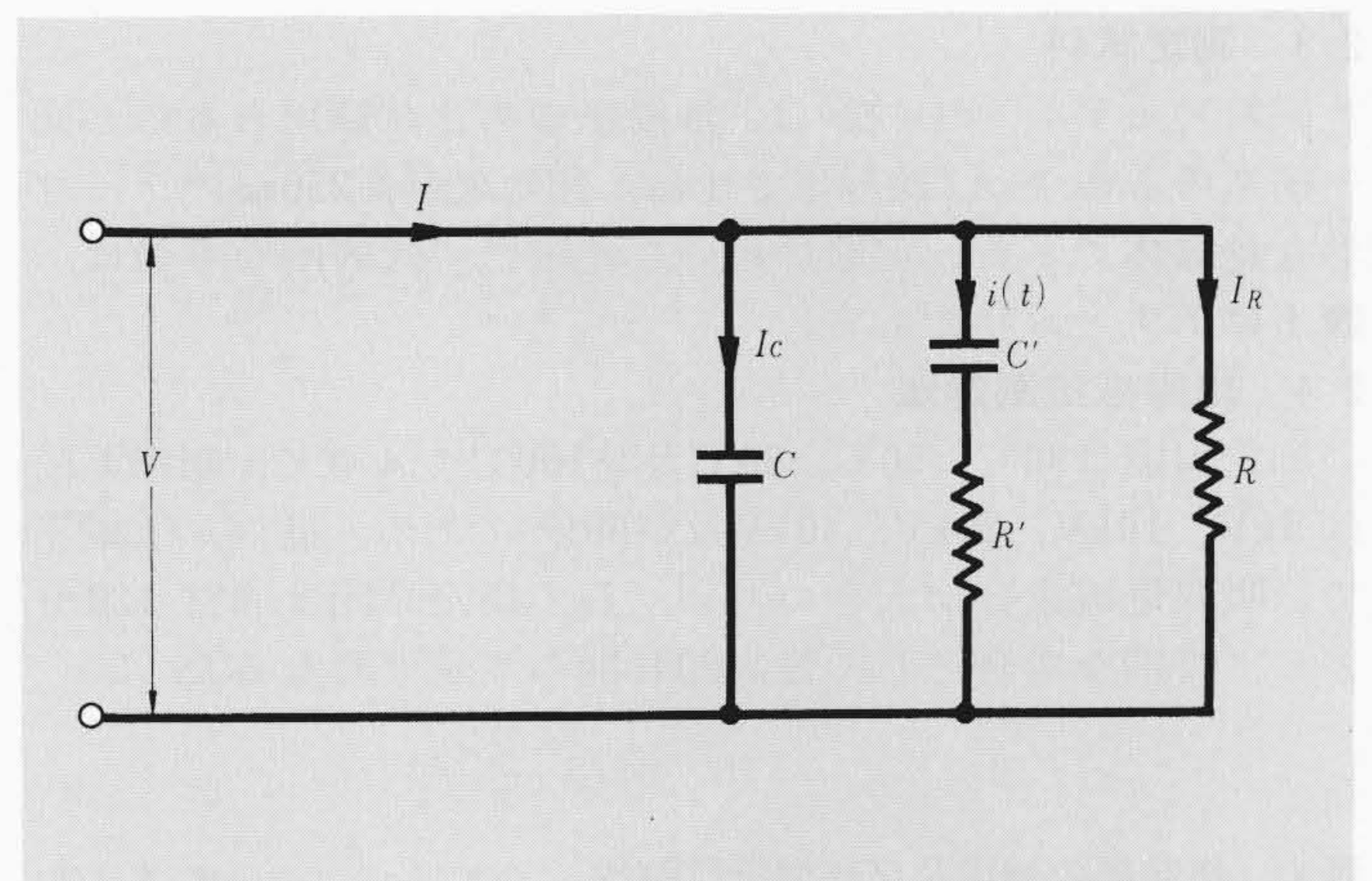


図1 絶縁体の等価回路 吸収電流は、 C' と R' の直列回路に流れる電流として示される。

I_R ：いわゆる漏れ電流で、長時間課電後の電流はこの I_R のみになる。

通常、体積抵抗率(以下、 ρ と略す)測定は課電1分値で示されているが、かなりの吸収電流を含むことがあり、漏れ電流のみによる真の体積抵抗率(ρ_∞)よりかなり低い値になる。しかしこの吸収電流は、特に低温、低電界ではゼロになるまでに非常な長時間を要し、後述するように20日間ぐらい流れることがある。このため測定時間の短縮法がぜひ必要で、F. R. Schleif⁽¹⁾は吸収電流の補正法を提案している。以下その要点について述べる。

(1)式中の吸収電流成分 $i(t)$ は次の実験式で示される。

$$i(t) = a \cdot C \cdot V \cdot t^{-n} \quad \text{.....(2)}$$

いま課電圧を完全な直流とすると、電圧印加後の変位電流 I_c はゼロとなる。ここで最終的な漏れ電流 I_R とある時間後の全電流 $I(t)$ との比を K とすると、

$$K = \frac{\text{最終的漏れ電流}}{\text{時間 } t \text{ 後の全電流}} = \frac{I_R}{I(t)} = \frac{I_R}{i(t) + I_R} \quad \text{.....(3)}$$

となる。なお本実験では $t=30$ 分とした。

また(2)式及び(3)式の関係から次式が得られる。

* 日立電線株式会社研究所 ** 日立電線株式会社研究所 工学博士

$$I(t)/i(30)=(t/30)^{-n}+(K/1-K) \cdots \cdots (4)$$

このように、 n 及び K が30分までの電流の時間特性より求められれば I_R が算出できる。すなわち、条件によっては数日を要する測定が30分間の時間特性より求められる。しかし、誤差が大きくなる場合には 120分若しくはそれ以上測定してから n 、 K を算出し、精度を高めるようにした。

2.2 測定回路

漏れ電流測定において、課電圧が完全な直流であれば I_c はゼロになるが、本実験のように絶縁厚さが1mmでしかも60kV/mmまで測定しようとするれば60kVの電圧が必要であり、電源変動が問題になる。特に低温、低電界での ρ は $10^{17} \sim 10^{18} \Omega \text{ cm}$ もあり、漏れ電流成分はごくわずかである。ここで、電源が正弦波状に10秒周期で変動し、これによる変位電流成分を10%以下にしようとする、変動率は $5 \times 10^{-6} \%$ 以下に抑える必要のあることが分かる。このようなことを考慮し種々検討した結果、図2に示す回路により良好な結果を得た。高圧回路の充放電時定数を極力大きくし、また微小変動の検出とその補正回路を有することが特長である。

2.3 測定試料

試料のモデル ケーブルは、油浸紙の劣化試験用のものと同一構造のもので⁽²⁾、絶縁厚さ1mm、有効測定長250mmのテープ巻き絶縁体である。実験に用いた絶縁紙の代表的なものは、表1に示すとおりである。

2.4 絶縁抵抗測定法

測定温度は30℃、50℃、80℃及び100℃の4点で、測定電圧は5kV、10kV、20kV、40kV及び60kVである。低温、低電界では吸収電流成分が大きいため、 I_R の測定時間は通常 120分とし、特別な場合として最高20日間の測定も行なった。

表1 供試紙の物理及び絶縁抵抗特性 供試紙としては密度、気密度、誘電正接などがかなり異なるものを選んだ。

項 目		試 料	1	2	3	4
厚 さ	(μm)		125	80	125	125
密 度	(g/cc)		0.88	1.08	0.66	0.60
気 密 度	(s/100cc)		480	1,300	1,050	2,300
誘 電 率			3.64	3.98	3.24	3.22
誘電正接	100℃ (%)		0.283	0.340	0.210	0.190
体 積 抵 抗 率 ρ_{∞} (Ωcm)	30℃	10kV/mm	2.8×10^{17}	3.4×10^{17}	4.8×10^{17}	1.2×10^{18}
		20	2.2×10^{17}	1.7×10^{17}	3.6×10^{17}	7.8×10^{17}
		60	6.3×10^{16}	4.7×10^{16}	7.5×10^{16}	2.8×10^{17}
	80℃	10	1.9×10^{15}	1.8×10^{15}	4.6×10^{15}	7.6×10^{15}
		20	1.1×10^{15}	8.7×10^{14}	2.0×10^{15}	5.8×10^{15}
		60	2.6×10^{14}	2.1×10^{14}	4.2×10^{14}	1.9×10^{15}
	100℃	10	2.8×10^{14}	2.3×10^{14}	6.3×10^{14}	1.6×10^{15}
		20	1.6×10^{14}	1.3×10^{14}	3.2×10^{14}	1.1×10^{15}
		60	3.9×10^{13}	3.2×10^{13}	7.2×10^{13}	3.4×10^{14}
	α ($1/^{\circ}\text{C}$)	10kV/mm	0.102	0.105	0.096	0.094
		20	0.103	0.106	0.098	"
		60	0.102	0.104	0.098	0.097
β (mm/kV)	30℃		0.038	0.038	0.035	0.022
	80℃		0.040	0.044	0.042	0.034
	100℃		0.041	0.040	0.040	0.036
$\rho_{0\infty}$ (Ωcm)			9.9×10^{18}	1.16×10^{19}	1.07×10^{19}	2.4×10^{19}

注： $\rho_{\infty} = \rho_{0\infty} e^{-(\alpha T + \beta G)}$

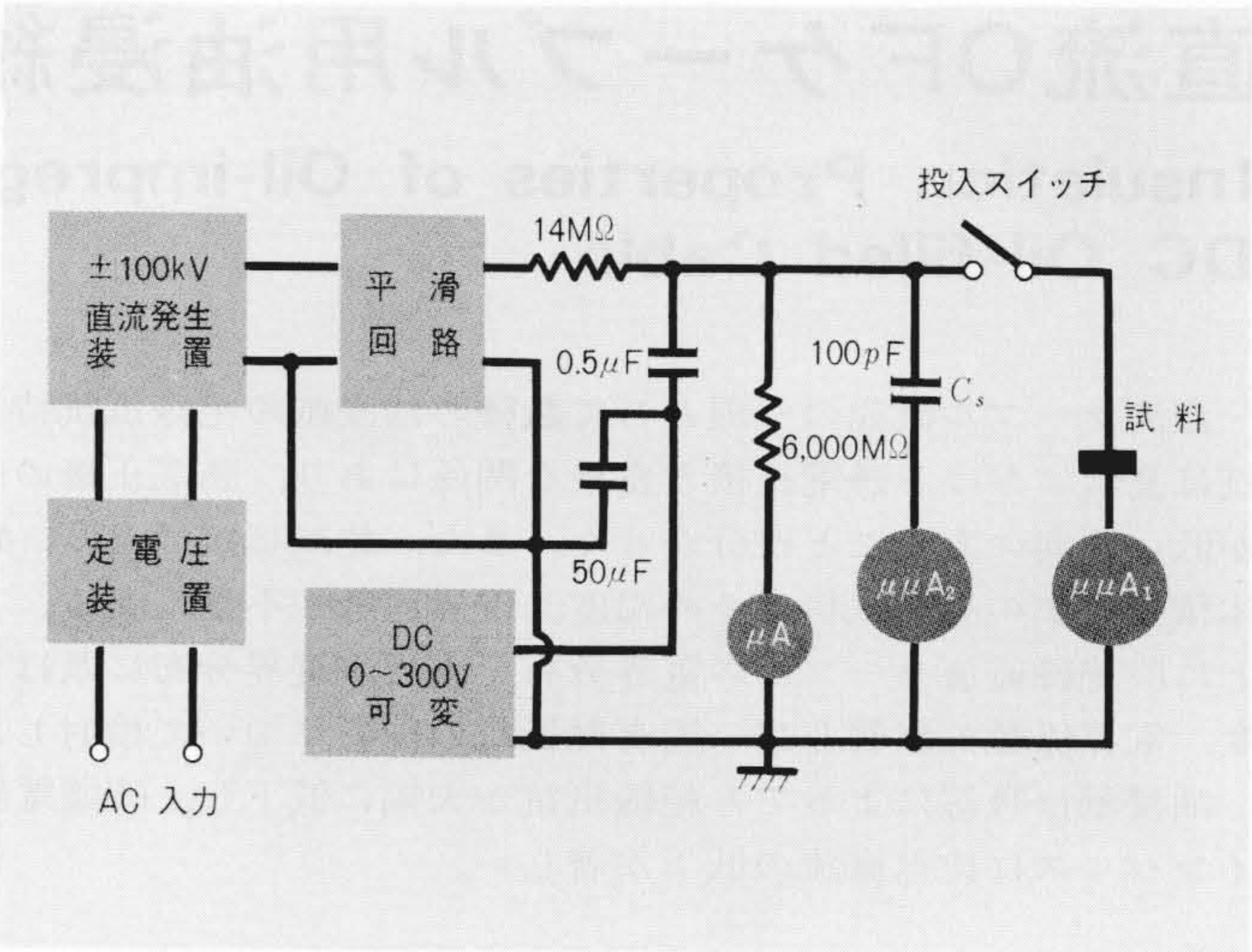


図2 絶縁抵抗測定回路 電圧変動を極力少なくし、また微小変動を補正するようにしている。

一方、高温・高電界では直ちに一定となるため、5分の測定でも I_R を直接求めることができた。

長時間測定中に試料温度が徐々に変化すると、電流の時間特性が変化してくるため、温度制御は $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ とした。

電圧印加は低いほうから始め、ある電圧での測定後直ちに次の測定を行なうと前回測定時の吸収電流により誤差を受けるので、これを放出しなければならない。放出法として交流印加法もあるが効果がなかったため、逆極性の高圧を課電のうへ強制放出し、最終的に次測定での予想漏れ電流の10%以下に吸収電流が低下したならば測定を行なうようにした。

2.5 測定結果

図3は表1に示した絶縁体の50℃、20kV/mmにおける $I(t)$ 特性を示したものである。90分測定後も吸収電流成分により

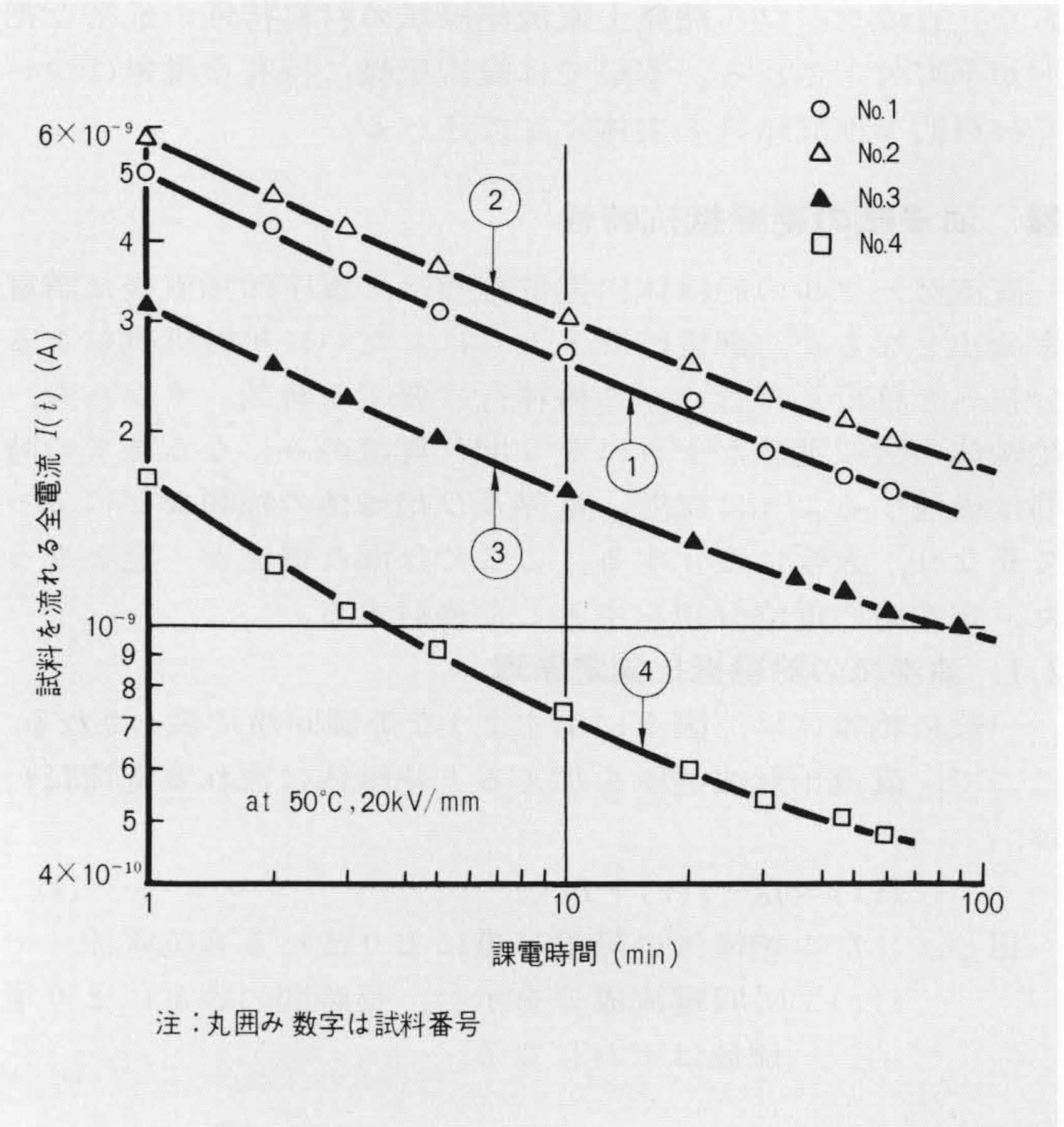


図3 各試料の全電流時間特性 供試絶縁紙により電流値が大幅に異なる。90分課電後も吸収電流が流れている。

$I(t)$ は漸減している。図4は直流ケーブル紙の $I(t)$ 特性の一例を示すもので、30°C、5kV/mmでは電流が一定になるのに約20日間を要する反面、高温・高電界では1分で電流が一定になっている。

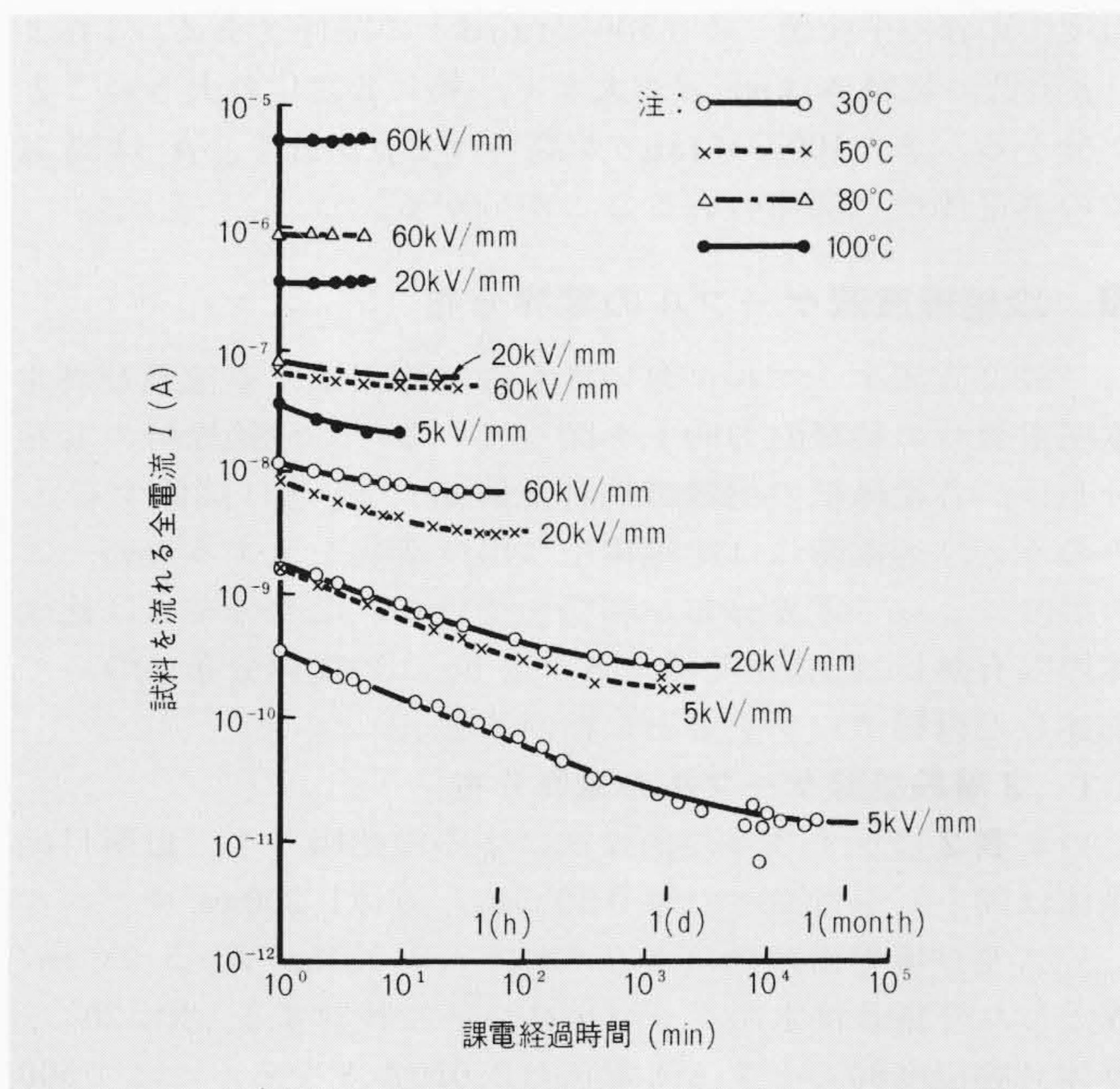


図4 直流ケーブル紙の全電流-時間特性 温度・電界により電流一定になるまでの時間が極端に異なる。

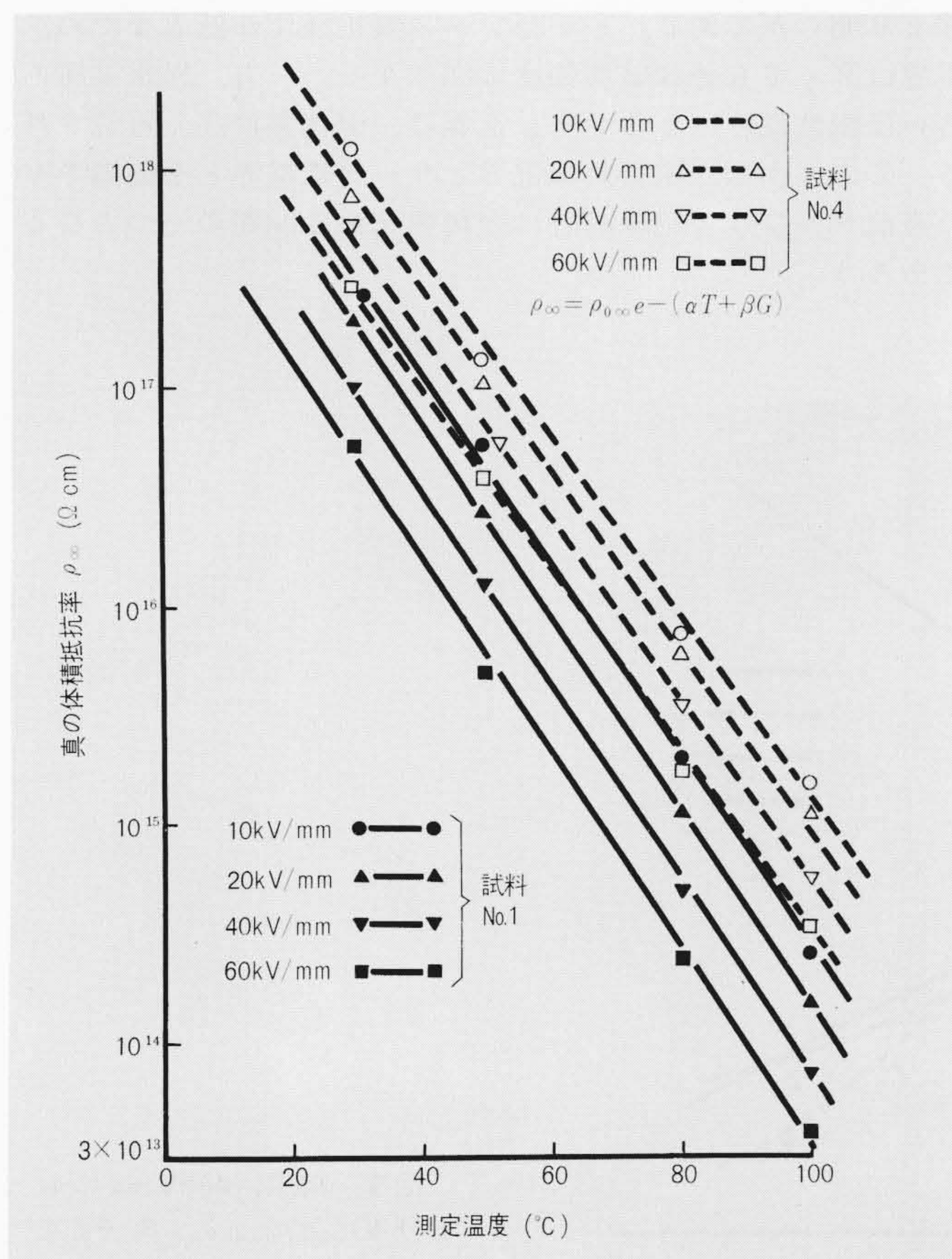


図5 体積抵抗率の温度特性 ρ は温度とともに指数関数的に変化し、温度係数 α は0.1ぐらいである。

これらの測定結果をもとに n 及び K を求め ρ を算出した。図5は、試料No.1, No.4の ρ の温度特性を、また図6は、直流紙の電界特性を1分充電値と比較して示したものである。これより ρ は温度及び電界とともにほぼ指数関数的に変化し、

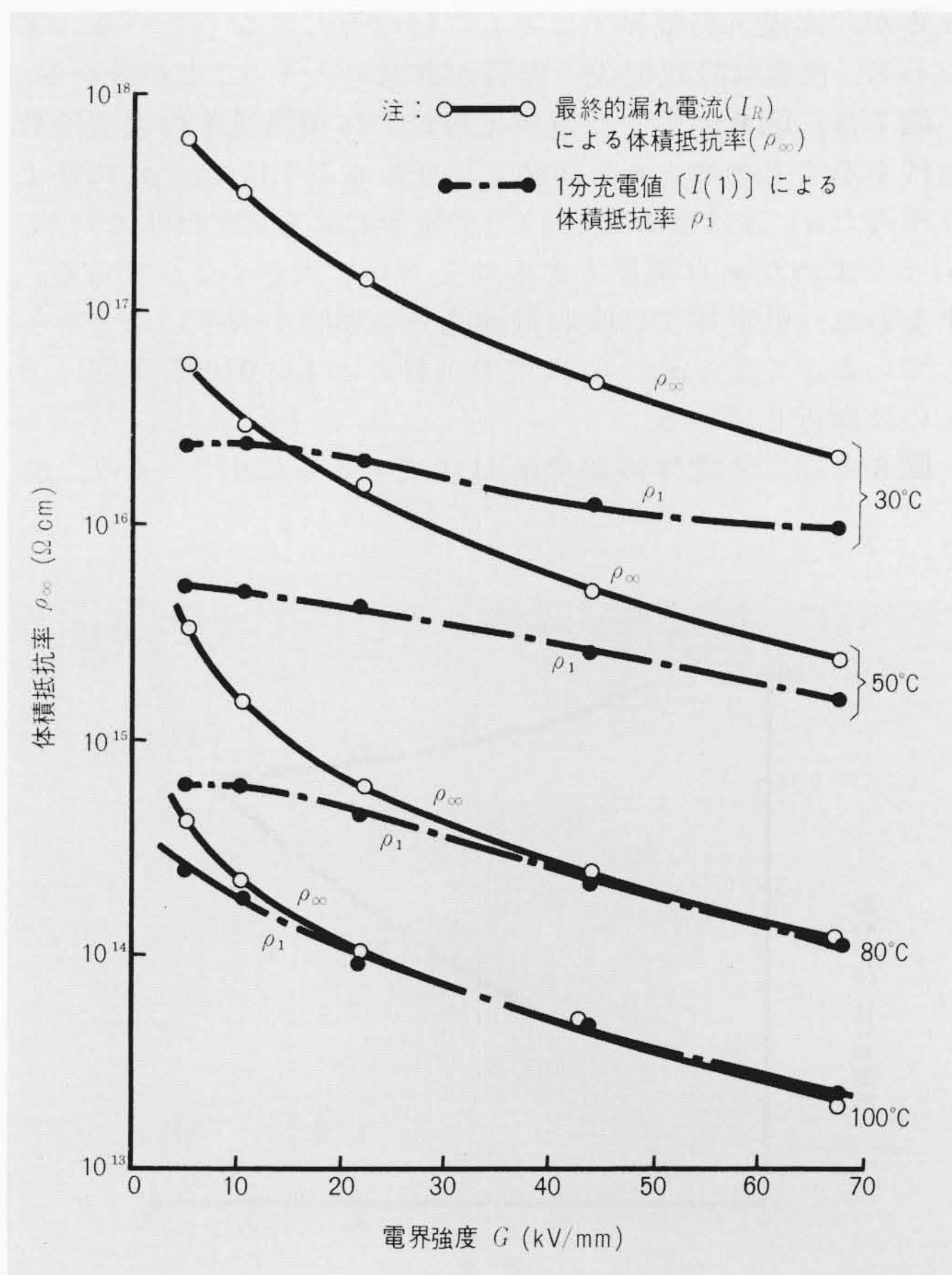


図6 直流ケーブル紙の体積抵抗率-電界特性の ρ_{∞} と ρ_1 による比較 低温・低電界では ρ_{∞} と ρ_1 とが1けた以上異なり、高温・高電界ではほぼ等しい。

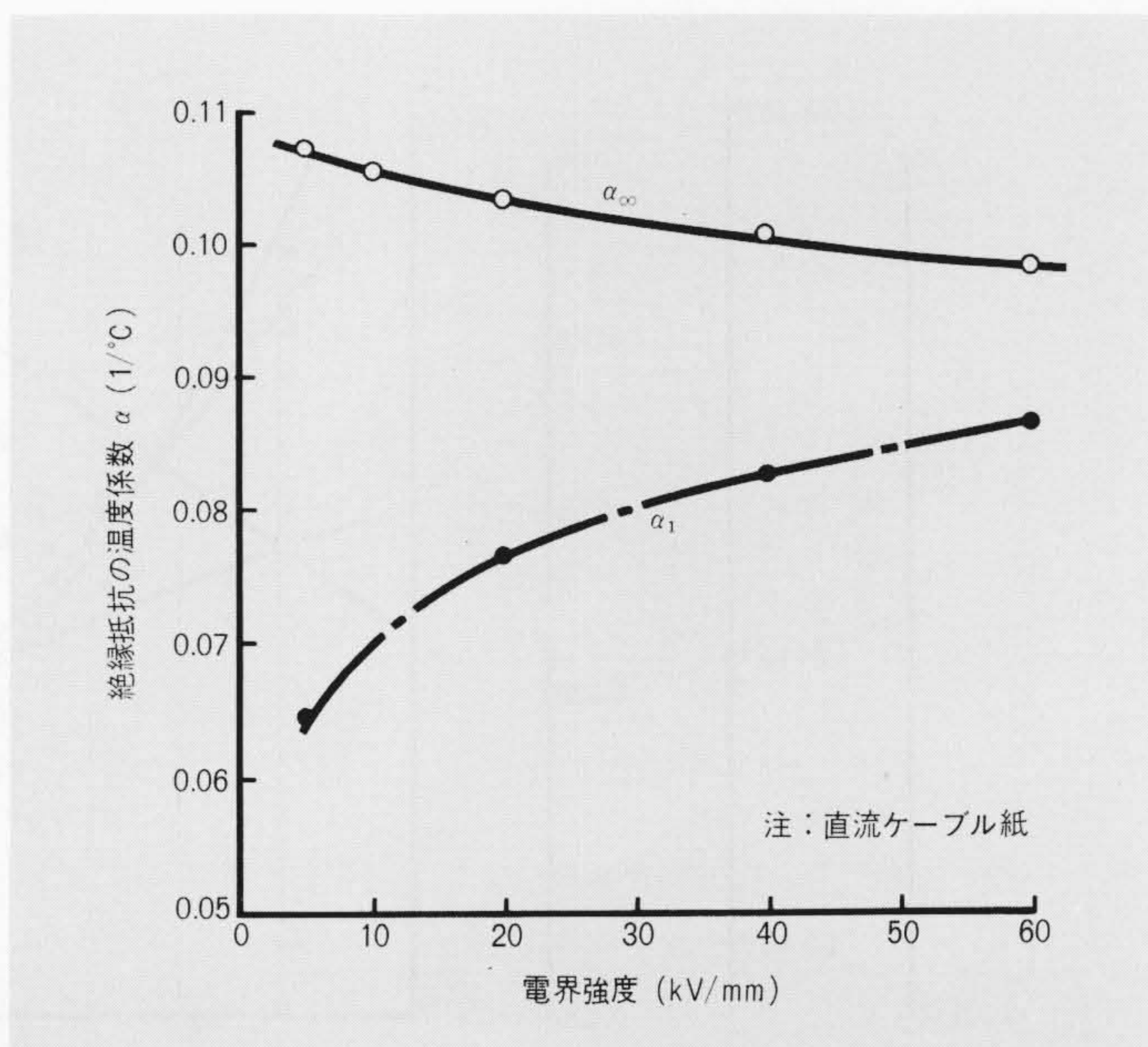


図7 温度係数 α の電界特性 α_{∞} (ρ_{∞} 特性より求めた α)は電界とともに低下し、 α_1 (ρ_1 特性より求めた α)は上昇し、ともに一定値に接近している。

次式で示すことができる。

$$\rho_{\infty} = \rho_{0\infty} e - (\alpha T + \beta G) \quad \cdots \cdots (7)$$

ここに、 $\rho_{0\infty}$ は0℃、0kV/mmにおける ρ_{∞} であり、 α は ρ_{∞} の温度(T)係数、 β は電界(G)係数である。前述した表1にはこれらの値も示してある。

図6で ρ_{∞} と ρ_1 とを比べると低温・低電界では1けた以上異なるが、高温・高電界ではともにほぼ等しくなっている。すなわち、後者は吸収電流の影響が非常に大きいことが分かる。

図7は、図6に示した直流絶縁紙の体積抵抗率の温度係数特性を示すものである。同図より分かるように α_{∞} (ρ_{∞} 特性より求めた α)はほぼ0.10(1/℃)で電界による変化は少ないが、 ρ_1 より求めた α_1 は電界とともにしだいに大きくなっている。すなわち、低電界では吸収電流成分の影響が大きいことを示している。これら α_{∞} 、 α_1 は電界上昇とともに0.095(1/℃)ぐらいに漸近している。

図8は同じく電界係数で β_{∞} は温度とともに小さくなり、 β_1

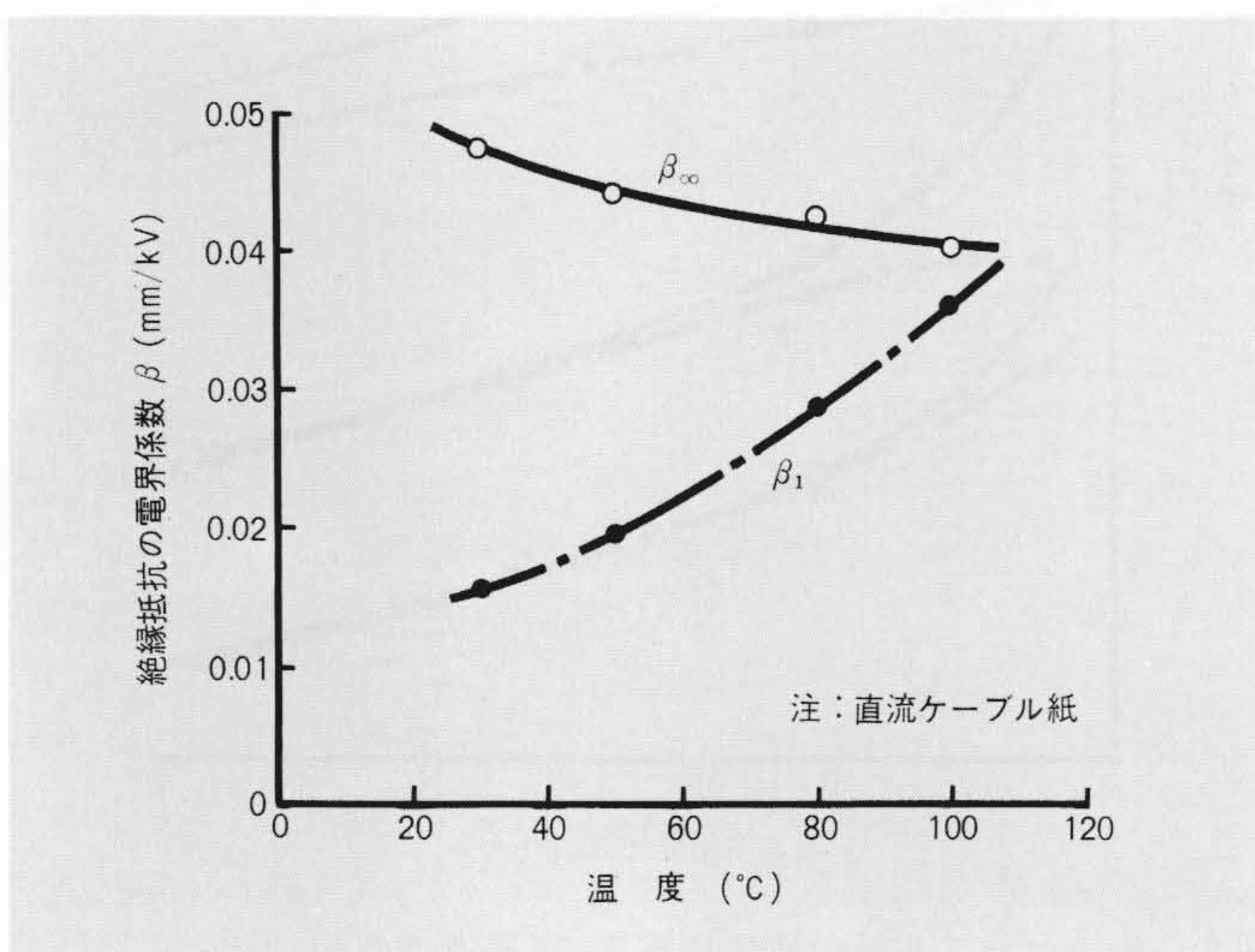


図8 電界係数 β の温度特性 β_{∞} は温度とともに低下し、 β_1 は上昇する傾向にある。

は大きくなっている。この β_{∞} 、 β_1 とも温度上昇により約0.04 mm/kVに漸近している。

これらの関係より ρ_0 を算出した。 ρ_{01} は $2.96 \times 10^{17} \Omega \text{cm}$ で、 $\rho_{0\infty}$ は $6.32 \times 10^{18} \Omega \text{cm}$ であり、その比は21.3であった。

図9はこれまでに測定した種々の油浸紙の80℃、40kV/mmにおける ρ_{∞} と $\rho_{0\infty}$ 、 $\bar{\alpha}_{\infty}$ (各電界での温度係数の平均値)、 $\bar{\beta}_{\infty}$ (各温度での β の平均値)及び100℃tan δ との関係である。これより ρ の低い絶縁体は α 、 β が大きく、特に β 変化の大きいことが分かる。また100℃のtan δ が高いほど ρ が低く、 ρ は高温での誘電体損と関係のあることが分かる。

3 段絶縁直流ケーブルの電界分布

一般に直流ケーブルにおいても段絶縁により直流及び異常電圧重畳時の絶縁耐力向上を図っている⁽³⁾。段絶縁時の電界分布は、各絶縁紙の絶縁抵抗特性値 ρ_0 、 α 、 β に関係する。そのうえ、通電時には絶縁体中に温度変化を生ずるため、この温度によって電界分布が影響を受ける。温度分布には絶縁体の固有熱抵抗 ρ_{th} が関係する。以下、この電界分布について前述した材料データをもとに検討する。

3.1 3層段絶縁ケーブルの電界分布

いま表2に示す3種の絶縁紙による段絶縁(I、III層目絶縁体は同一)を行なった厚さ30.5mm、導体1,200mm²でビニルシース及び境界面熱抵抗とをそれぞれ9.5℃cm/W、5.0℃cm/Wとした管路直接水冷ケーブルについて検討する。水温20℃、導体許容温度80℃とすると電流は2,010Aとなる。ここで500kV課電定常時の電界分布は、図10に示すとおりである。なお、ケーブルの平均電界は16.4kV/mmである。絶縁体中の温度差は60℃あり、導体側の高温によって絶縁抵抗が低下し、直流電界が低くなり、その影響がシース側に及んでいるのが同図より明らかである。しかしシース側絶縁体が低温なため、電界は高くても絶縁破壊強度は高くなる。一方、異常電圧あるいは極性反転によるサージ電界は、導体側に高く重畳される。このように、定常直流電界とサージ性電界とを協調させた直流ケーブルの絶縁設計は今後興味ある問題の一つとなるであろう。

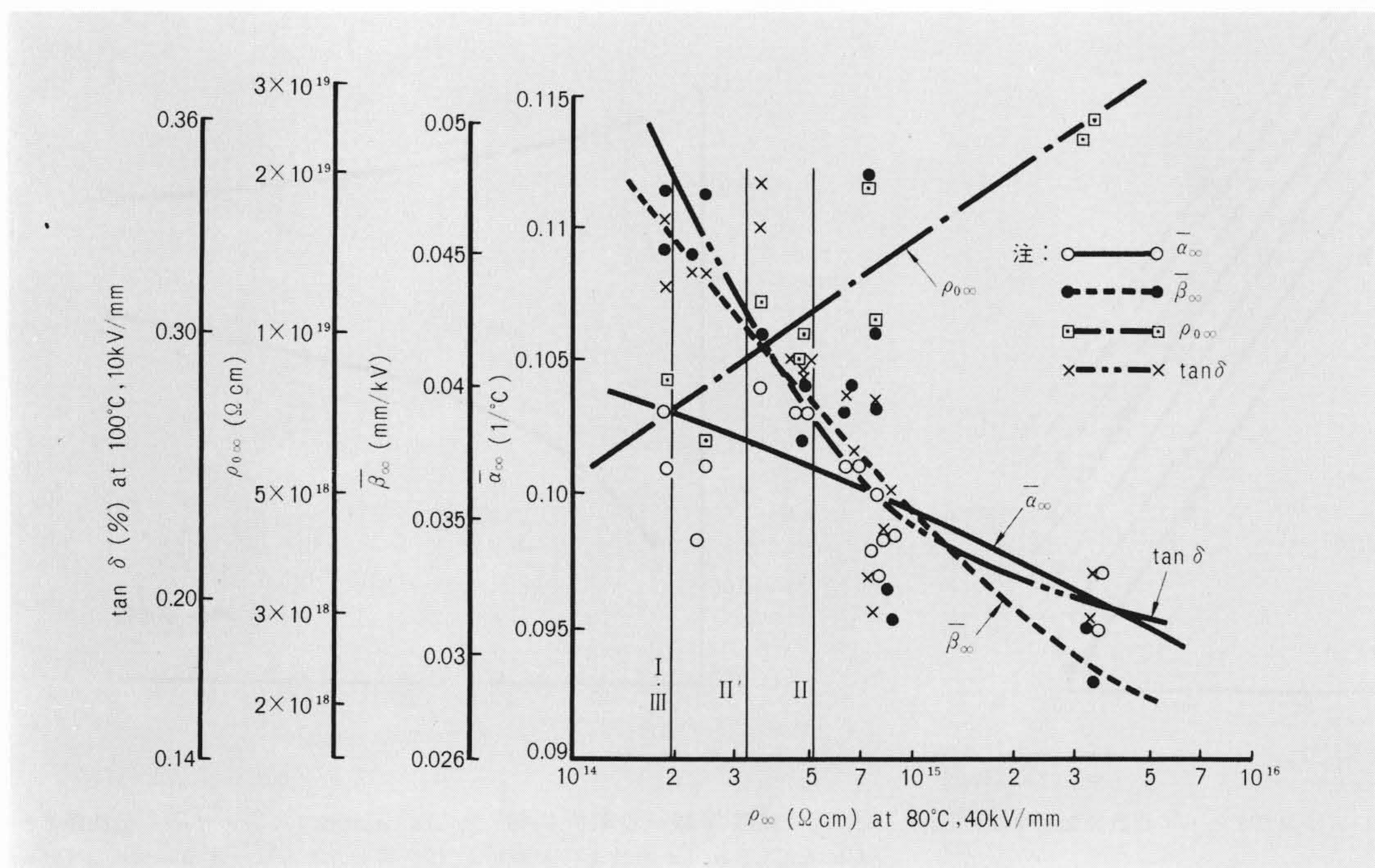


図9 80℃、40kV/mmにおける ρ_{∞} と $\rho_{0\infty}$ 、 $\bar{\alpha}_{\infty}$ 、 $\bar{\beta}_{\infty}$ そしてtan δ (at 100℃)との関係 ρ の高い絶縁紙は、 α 、 β そしてtan δ が小さくなる傾向にある。

表 2 電界分布算出用段絶縁ケーブルの絶縁構成 3 層段絶縁ケーブルで、絶縁体-II の特性を() 内数値に変えたときの電界分布への影響を調べようとするものである。

絶縁体種	項 目	外 径 (mm)	絶 縁 厚 (mm)	ρ_0 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	α ($1/^\circ\text{C}$)	β (mm/kV)	ρ_{th} ($^\circ\text{C} \cdot \text{cm/W}$)	D (g/cc)
導 体 (1,200mm ²)		48.0	—	—	—	—	—	—
絶 縁 体 - I		52.0	2	7.0×10^{18}	0.1030	0.0460	480	1.1
絶 縁 体 - II		105.0	26.5	1.1×10^{19} (9.0×10^{18})	0.1009 (0.1020)	0.0392 (0.0422)	500 (490)	0.90 (1.00)
絶 縁 体 - III		109.0	2	7.0×10^{18}	0.1030	0.0460	480	1.1

3.2 電界分布に及ぼす各パラメータの影響

表 2 において II 層目絶縁体のパラメータを()内数値に変えた場合の段絶縁ケーブルの電界分布も図10に示してある。絶縁体 II の各パラメータが同図中の付表のように変わった場合の電界分布を No. 1 特性と比較検討してみる。

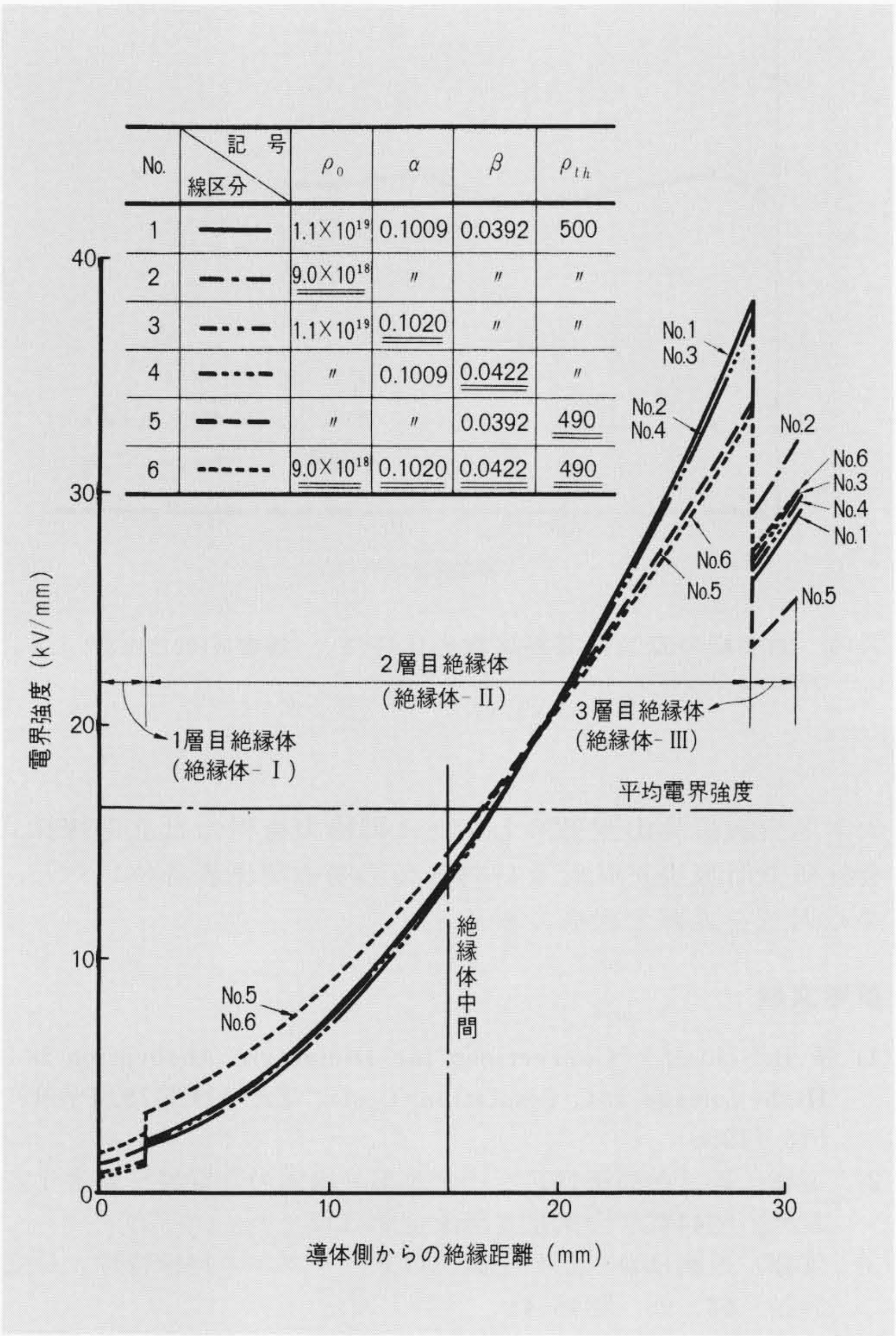


図10 3 層段絶縁DC500kVケーブルの電界分布 導体側の温度が高いため、電界は外側にしわ寄せされている。また、パラメータによっても電界が変化している。

- (1) No. 1 と No. 2 との比較
 ρ_0 低下により全般的に II 層目の電界は低下する(−1.3%) そのしわ寄せが III 層目に及んでいる(+11.2%)。
 - (2) No. 1 と No. 3 との比較
 α が高いため II 層目の内側電界は低下し、外側は上昇している(+0.5%)。双方打ち消し合い III 層目は、+2.8%のみである。
 - (3) No. 1 と No. 4 との比較
 β が高いため II 層目内電界の平坦化が行なわれ、外側−1.6%となっている。このため III 層目はわずか1.8%高いのみである。
 - (4) No. 1 と No. 5 との比較
強制冷却方式のため、熱抵抗低下により導体温度は70℃に低下した。このため II 層目の内側電界は増し、外側は低下している(−10.4%)。同様にまた III 層目も低下している(−12.3%)。
 - (5) No. 1 と No. 6 との比較
熱抵抗低下の効果は大きく、II 層目の外側電界は低下している(−12%)。しかし、 ρ_0 低下によりそのしわ寄せが III 層目に及び電界は2.8%高くなっている。
- 以上の結果より、強制冷却時のこの種ケーブルでは、実用上 α 、 β の影響よりむしろ ρ_0 、 ρ_{th} の影響のほうが大きいことが分かった。

4 絶縁劣化

- 4.1 吸湿紙の絶縁抵抗特性
図11は吸湿紙シートの20℃における ρ_1 特性で、吸湿により ρ_1 は極端に低下している。すなわち、吸湿量 5%以上では絶縁体と言うよりはむしろ半導体に近い値である。これは常温、2.5kV/mm という非常に低温・低電界での特性であり、高温・高電界では ρ_1 がこれらの値より更に低下するものと考えられる。
- 4.2 吸湿紙の破壊特性
図12は吸湿による破壊の低下傾向を示したもので、直流破壊電圧の低下が最も著しくなっている。図13は実用的な吸湿範囲での高温の直流破壊特性を示したもので、0.3~0.5%以上の吸湿により破壊強度が低下してきている。以上の結果より、直流ケーブルでは交流ケーブル以上に吸湿を防ぐようにしなければならないことが分かる。

- 4.3 長期安定性
厚さ 1mm のモデル ケーブルにより、温度90℃、電界40kV/mm での直流課電劣化試験を行なった。絶縁状態は漏れ電流の変化で測定されている。図14は、現在までに得られた結果を示

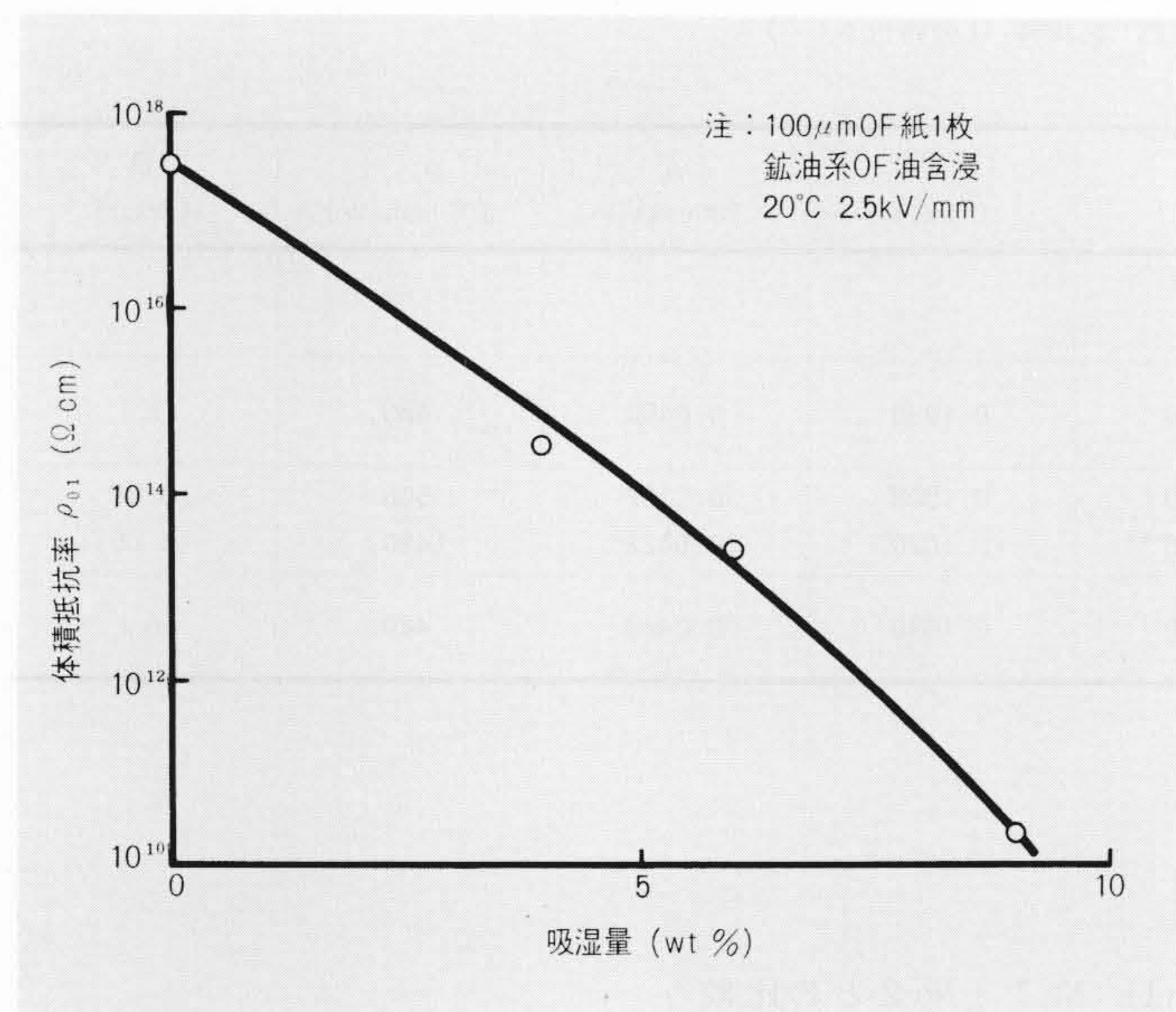


図11 油浸紙の吸湿による体積抵抗率変化 吸湿により体積抵抗率は大幅に低下する。

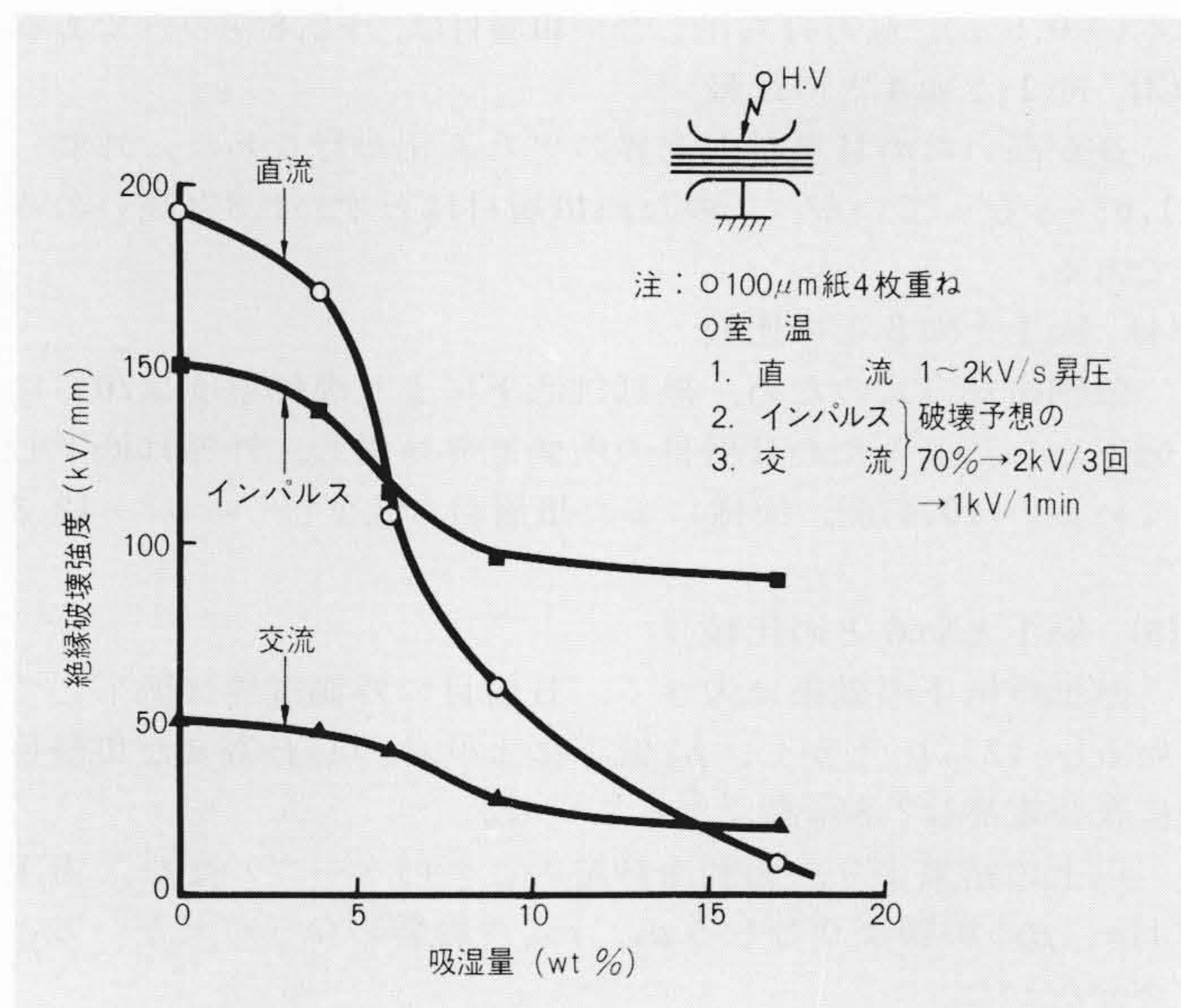


図12 吸湿油浸紙の絶縁破壊特性 吸湿により、直流破壊が最も大きく影響を受ける。

すものである。誘電正接についても定期的に測定しているが、いずれも劣化の傾向はみられていない。

5 結 言

以上、油浸紙の直流絶縁特性について述べたが、これを要約すれば次のようになる。

- (1) 高温での誘電正接が高い油浸紙ほど絶縁抵抗は低く、その温度、電界係数は大きくなる。
- (2) 強制冷却方式の段絶縁直流ケーブルでは、各絶縁紙の絶縁抵抗の温度、電界係数よりむしろ体積抵抗率 (ρ_v) 及び熱抵抗率 (ρ_{th}) の値により電界が大幅に変化する。
- (3) 油浸紙は吸湿により絶縁抵抗が大幅に低下し、破壊電圧も下がるが、交流、インパルスに比べ特に直流の低下が著しい。

終わりに臨み本研究に際し種々御助言いただいた武蔵工業

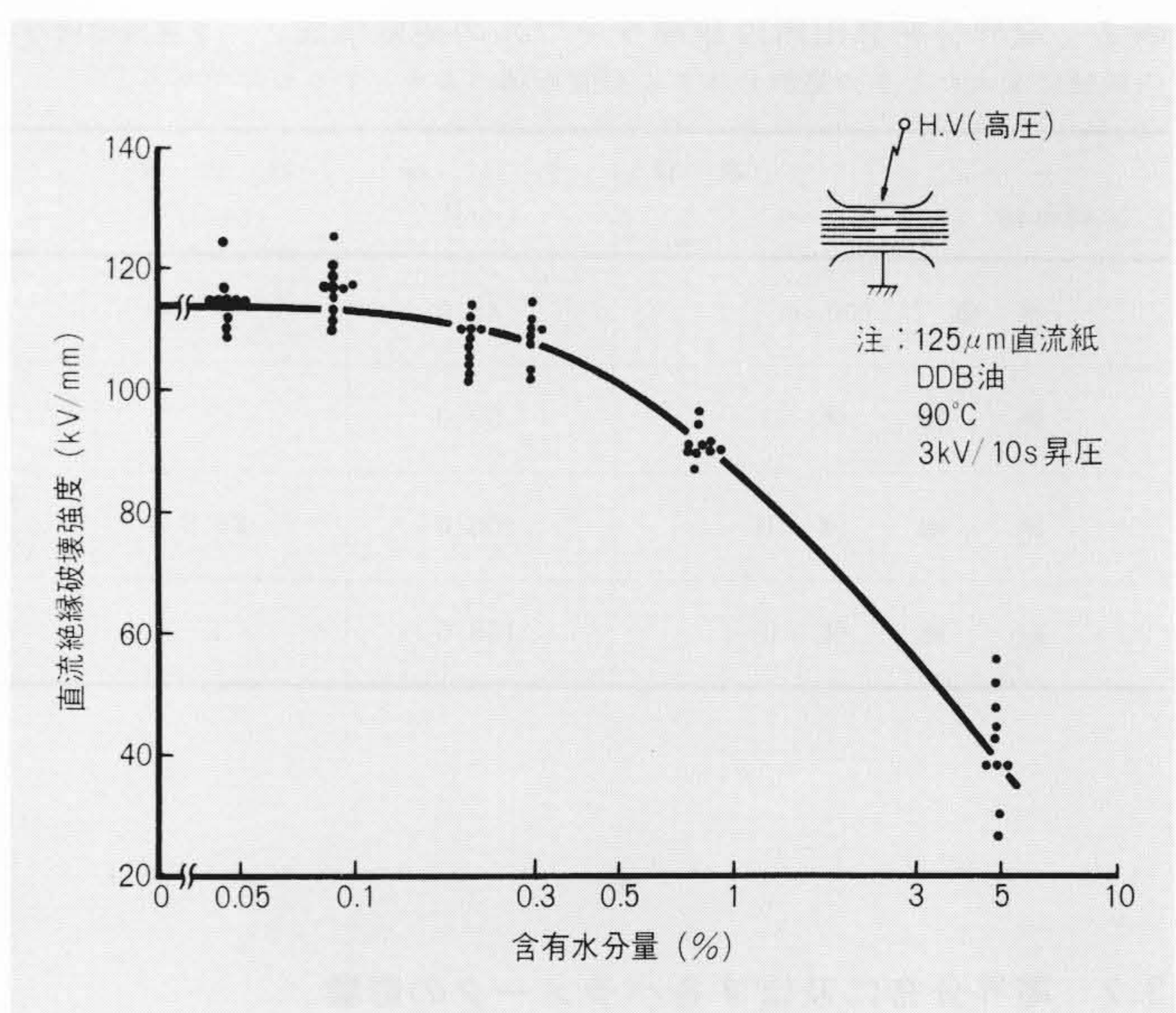


図13 油浸紙の吸湿による直流破壊強度の低下 吸湿量が0.3~0.5%以上になると、直流破壊強度が低下してくる。

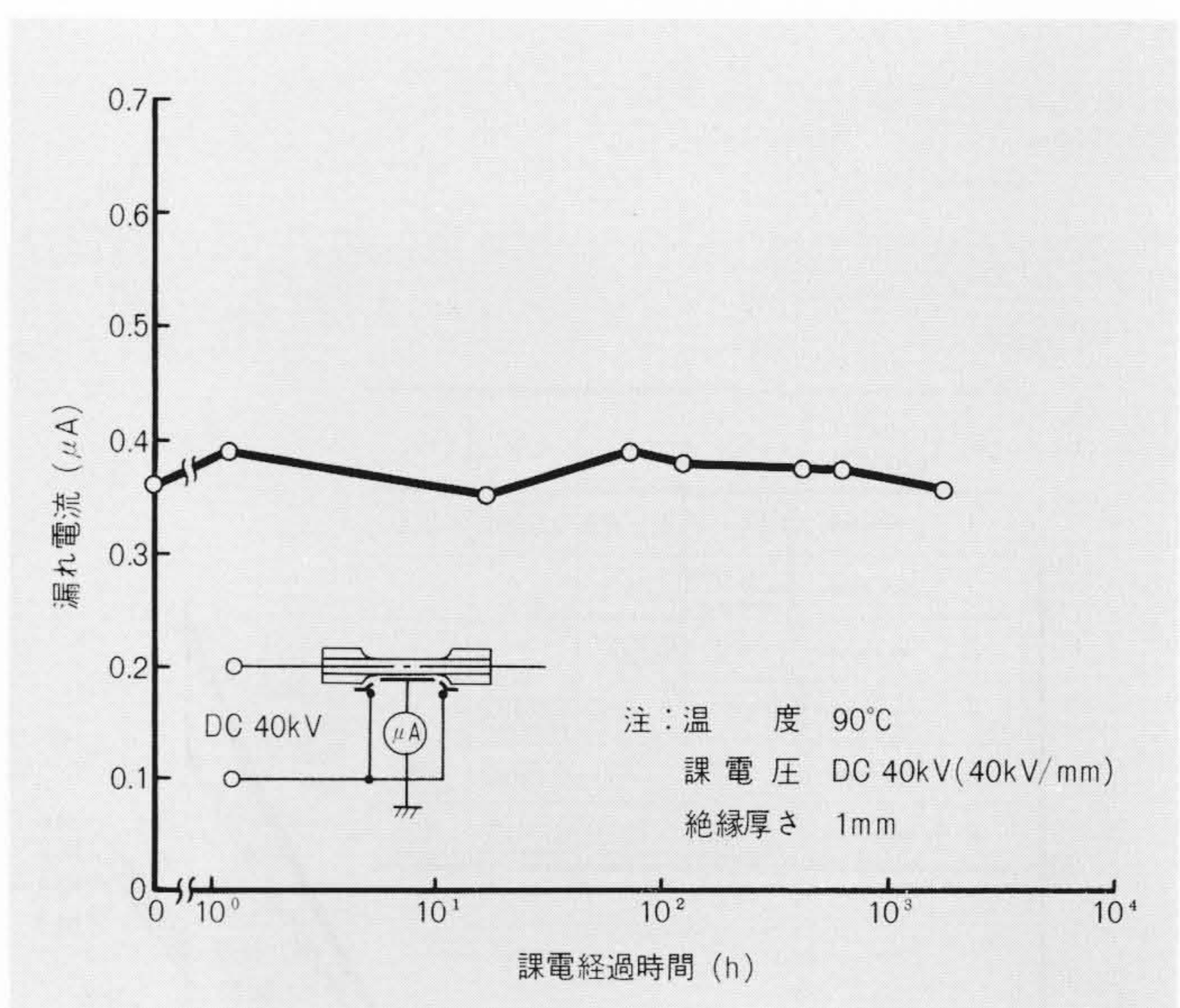


図14 油浸紙の直流高電界課電劣化特性 課電後100日経過したが、劣化の傾向は見られない。

大学名誉教授鳥山四男博士並びに御協力を得た日立電線株式会社研究所坂場正弘氏及び同日高工場の関係者各位に対し、深く謝意を表わす次第である。

参考文献

- (1) F.R.Schleif: "Corrections for Dielectric Absorption in High-Voltage D-C Insulation Tests" Tr. AIEE 75 (Pr III) 513 (1956)
- (2) 遠藤, 岡「超高压 OF ケーブル用絶縁体の高電界長期劣化安定性」昭44電学会東京支部大会 No. 112
- (3) 安藤, 遠藤ほか「超高压直流 OF ケーブルの絶縁特性」日立評論 53, 95 (昭46-4)
- (4) 遠藤「直流ケーブル用油浸紙絶縁体の異常電圧に対する破壊電圧特性」昭46電学会東京支部大会 No. 118
- (5) 遠藤, 沼尻「直流ケーブル用油浸紙絶縁体の極性反転時破壊電圧特性」昭45電学会東京支部大会 No. 322