

高圧回転機コイルの絶縁診断と寿命予知

Insulation Diagnosis and Life Evaluation of High-Voltage Coils for Large Rotating Machines

大形回転機に合成レジン絶縁が採用されて既に四半世紀が経過した。それ以前のコンパウンド絶縁に比較して、絶縁の耐久性が飛躍的に向上しているとはいえ、運転開始後20年以上になる発電機、電動機に対して、起動・停止の頻度が増加するなどの、より過酷な稼動条件が強いられている。そのため、適切な絶縁劣化診断により、巻線の残存絶縁耐力を推定し、事故に至る前により優れた絶縁方式に更新することが重要になってきている。

そこで、本稿はレジン絶縁巻線の絶縁劣化判定に有効な、新しい絶縁劣化診断の手法(D. Map法)を紹介するとともに、回転機の運転経歴(運転年数及び起動・停止回数)から巻線の残存絶縁耐力を予想する手法(N Y Map法)について述べる。

門谷建蔵* *Kenzo Kadotani*
谷口正俊** *Masatoshi Taniguchi*
安芸文武** *Fumitake Aki*
松延謙次*** *Kenji Matsunobu*

1 緒 言

近年、絶縁技術の進歩は目覚ましく、大形回転機の高電圧固定子コイルの絶縁は、構成材料及び製造方式の両面で著しい改良がなされた。¹⁾ すなわち、絶縁層の電氣的・機械的性能の向上には、レジンの改良が有効であった。²⁾ 図1は、大形回転機絶縁の推移を生産高で示したものである。レジンにアスファルトを用いるコンパウンド絶縁は、熱硬化性レジン絶縁の開発により、日立製作所では約20年前から製造を中止している。これらの機器は、その後ほとんどがレジン絶縁に更新されている。ポリエステル絶縁が採用されるようになってからは20年以上が経過し、その後特性的に優れたエポキシ絶

縁が登場したことにより、ポリエステル絶縁は既に10年前に日立製作所では製造をやめている。しかし、現在稼動中の大形回転機の約30%はポリエステル絶縁であり、エポキシ絶縁への更新はあまり進んでいない。

図2は、大形回転機の累積生産高(昭和23年以前の分は省略する。)と累積事故率を示すものであるが、生産高が急速に増加しているのに対し、事故率のほうは激減している。これは、主として絶縁層の電氣的・機械的性能がレジンの改良によって著しく向上したことによるが、²⁾ 一方で適切なタイミングで絶縁の更新がなされてきたためでもある。

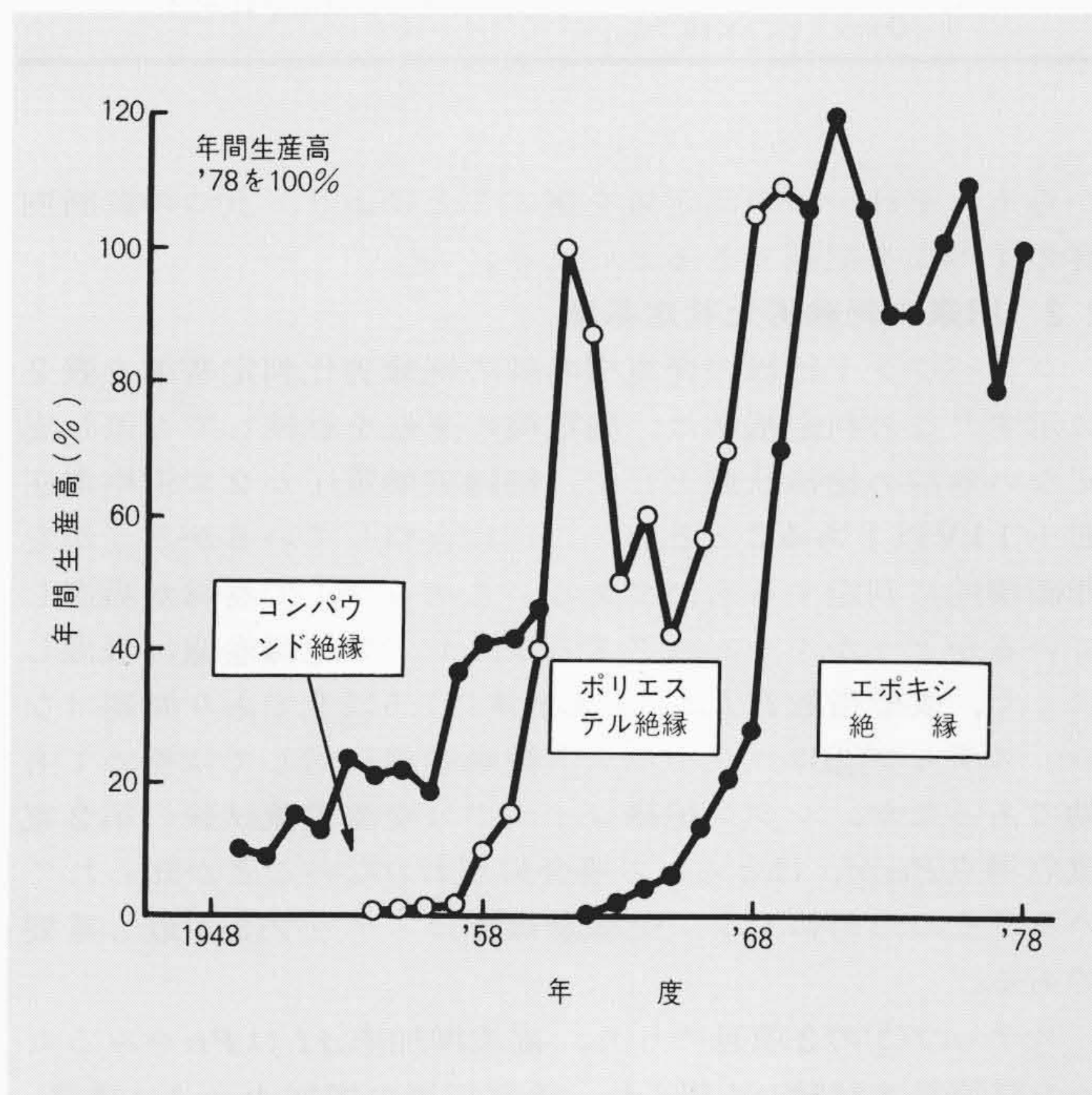


図1 大形回転機絶縁の推移 10MVA以上の電動機及び発電機の生産台数の推移を示す。ポリエステル絶縁が登場してから20年以上が経過した。

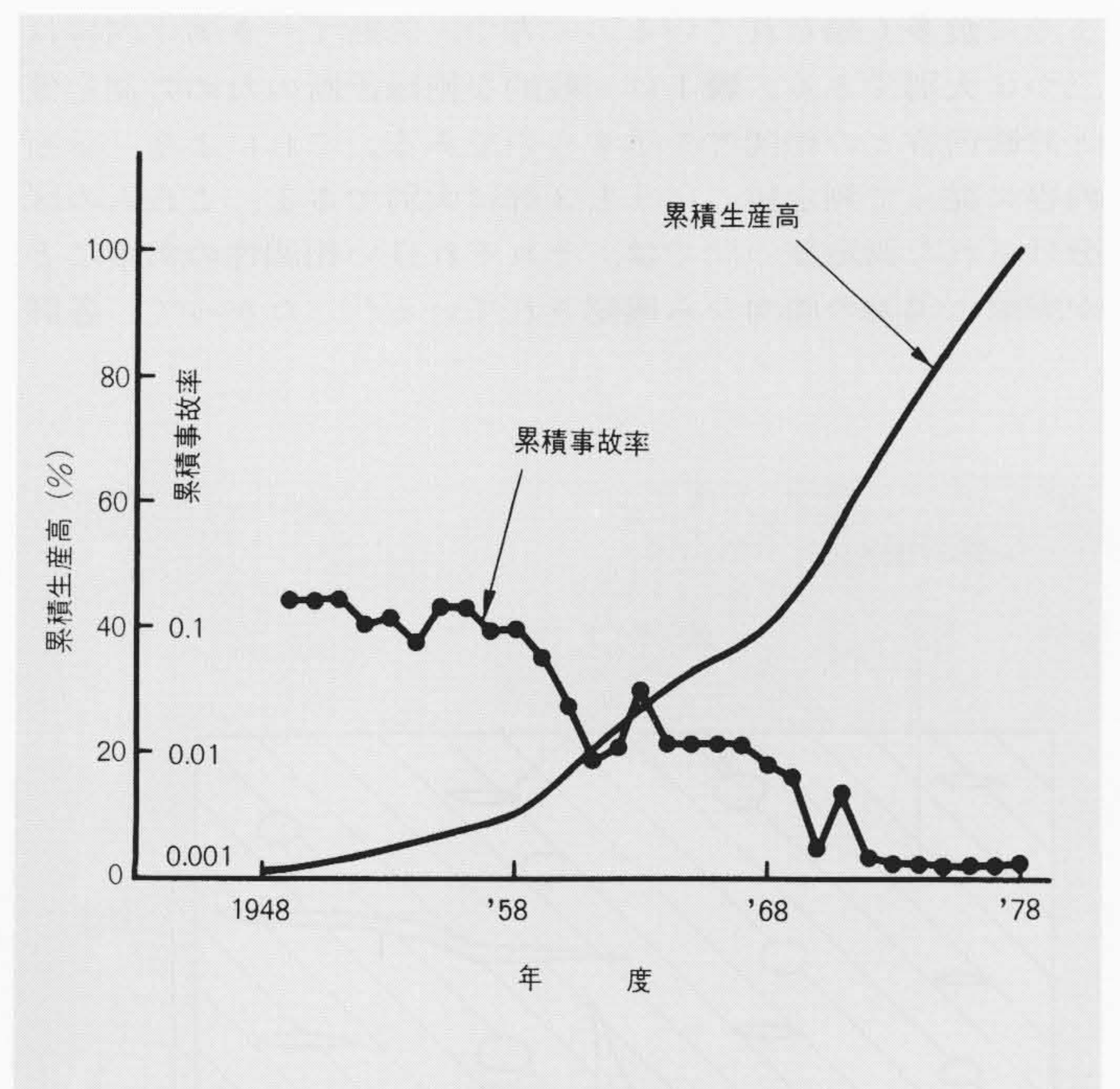


図2 大形回転機の累積生産高と累積事故率 累積事故率は、1950年代には0.1%であったのが、1960年代には0.01%、更に1970年代には0.001%に激減した。

* 日立製作所日立研究所 ** 日立製作所日立工場 *** 日立製作所日立工場 工学博士

コンパウンド絶縁巻線には、電力中央研究所が中心となり昭和42年に作成した「発電機巻線絶縁劣化判定基準」³⁾があり、絶縁更新のタイミングを知るのに極めて有効であった。ところが、運転開始後20年以上になるレジン絶縁巻線の劣化判定に有効な方法がいまだに確立されておらず⁴⁾、有効な方法がないままに先の基準を準用してきた。レジン絶縁がいかに優れており、その絶縁耐力の年次低下率が小さいとはいえ、より過酷な複合ストレス下で運転され続けている以上、劣化は絶えず進行し、いずれは絶縁の更新が必要になるであろう。その更新のタイミングをできるだけ正しくとらえるのに、先のコンパウンド絶縁巻線の判定基準とは違った方法が必要であると考える。

本論文は、稼動中の大形回転機レジン絶縁巻線の絶縁更新タイミングを知るための、非破壊絶縁診断に基づく新しい劣化判定基準案と、運転経歴から余寿命を推定する手法についての考え方を紹介する。

2 新しい絶縁劣化診断方法

2.1 絶縁劣化と非破壊測定

マイカテープとレジンから成るコイル絶縁層が、様々な熱・機械・電気複合ストレスを受けたときに発生する劣化を、モデル的に示したのが図3である。レジンの熱劣化、微小ボイド、吸湿などは、絶縁層の全体にわたり均一に生ずる「定常劣化」である。これらの劣化をあらかじめ考慮して絶縁層の厚さを決めている。課電に伴う部分放電、ないしは起動・停止に伴う熱応力などにより、微小ボイドがき裂や層はがれに発展する。これはストレスが特に大きい部分に局所的に生ずる。この著しい劣化も、現在では考慮のうえそれなりに絶縁厚さを十分にとっているが、それらの劣化が全く起こらなければ更に薄くできる、という意味では「異常劣化」と称してよい。

絶縁劣化を診断するための非破壊試験での測定値は、現在までに数多く知られている。一方で、診断すべき劣化内容は三つに大別できる。表1は一般的な絶縁診断のための測定値と診断内容との相関性を示すものである。これにより、診断内容に従って測定値のほうも3群に大別できる。これらの区分けされた測定値の間では、それぞれ良い相関性のあることが実験と理論の両面から確認されている。⁴⁾したがって、各群

表1 絶縁診断のための測定値 診断内容との相関性は、○：かなり良い、△：ある、空白はほとんどない。診断内容と診断の可能性について、測定値を3群に分けることができる。

一般的な符号	一般的な定義	診断内容と相関性			
		吸湿、レジンの劣化	微小ボイド	局所劣化	所常化
$\tan \delta_0$	ベース(普通2kV)の誘電正接	○			
C_0	ベースの静電容量	○			
R	絶縁抵抗	○			
PI	成極指数	○			
$\Delta \tan \delta$	定格電圧 E の $\tan \delta E - \tan \delta_0$		○		
$\Delta C/C_0$	静電容量増加率 $(C_E - C_0)/C_0$		○		
V_i	$1 \times 10^{-9} C$ の部分放電発生電圧		△		△
P_{i1}, P_{i2}	交流電流試験の電流急増点		○		
ΔI	電流増加率、 $\approx \Delta C/C_0$		○		
m, γ	AIA(自動絶縁特性解析装置)の値		○		△~○
Q_{max}	常規電圧 $E/\sqrt{3}$ の最大放電電荷		△		○
ΣQN	累積放電量		○		△

表2 旧来の絶縁劣化判定基準 コンパウンド絶縁発電機巻線(定格電圧6.6kV)に対する基準である。

ステップ	測定値	判定基準値
①	PI	< 1.5 ならば吸湿しているので、乾燥し、 ≥ 1.5 にしてから②へ。
②	P_{i2}	$< E$ ならば不合格、 E 以下に現われなければ③へ。
③	$\Delta \tan \delta$	3項目のうち2項目パスすれば合格とする。(つまり、絶縁破壊電圧は $2E + 1kV$ 以上であると推定される。)
	ΔI	
	Q_{max}	

からそれぞれ一つの測定値を選ぶことにより、三つの診断内容のすべてを把握できるといえる。

2.2 旧来の絶縁劣化判定基準

コンパウンド絶縁の発電機巻線の絶縁劣化判定基準を表2に示す。³⁾この判定基準は、発電機の運転を継続しても差し支えない巻線の絶縁状態として、絶縁破壊電圧が $2 \times$ 定格電圧 $E + 1kV$ 以上あることとし、これに合格しているかどうかを非破壊的に判定するものである。ステップ①で巻線が吸湿しているかどうかをチェックするが、レジン絶縁巻線は吸湿しにくく、成極指数 PI はほとんど常に1.5以上であり問題はない。ステップ②はコンパウンド絶縁巻線に対しては極めて有効であったが、レジン絶縁コイルでは交流電流試験の第2電流急増点 P_{i2} が、ほとんどの場合に現われないことが知られている。⁴⁾そのためにレジン絶縁巻線ではステップ③が最も重要である。

ステップ③の3項目のうち、電流増加率 ΔI は P_{i2} をみるための交流電流試験から得られ、誘電正接の増加 $\Delta \tan \delta$ は誘電正接試験でのシェリングブリッジの測定値から得られる。シェリングブリッジからは静電容量増加率 $\Delta C/C_0$ も得られ、これは ΔI とほぼ等しいので、代わりに用いることができる。また $\Delta \tan \delta$ と $\Delta C/C_0$ の間には極めて良い相関関係($\Delta C/C_0 \approx 1.4 \times \Delta \tan \delta$)があるので、⁵⁾これを一つにまとめて、新たに $\Delta (= \Delta \tan \delta + \Delta C/C_0)$ を用いてもよいであろう。常規電圧($E/\sqrt{3}$)

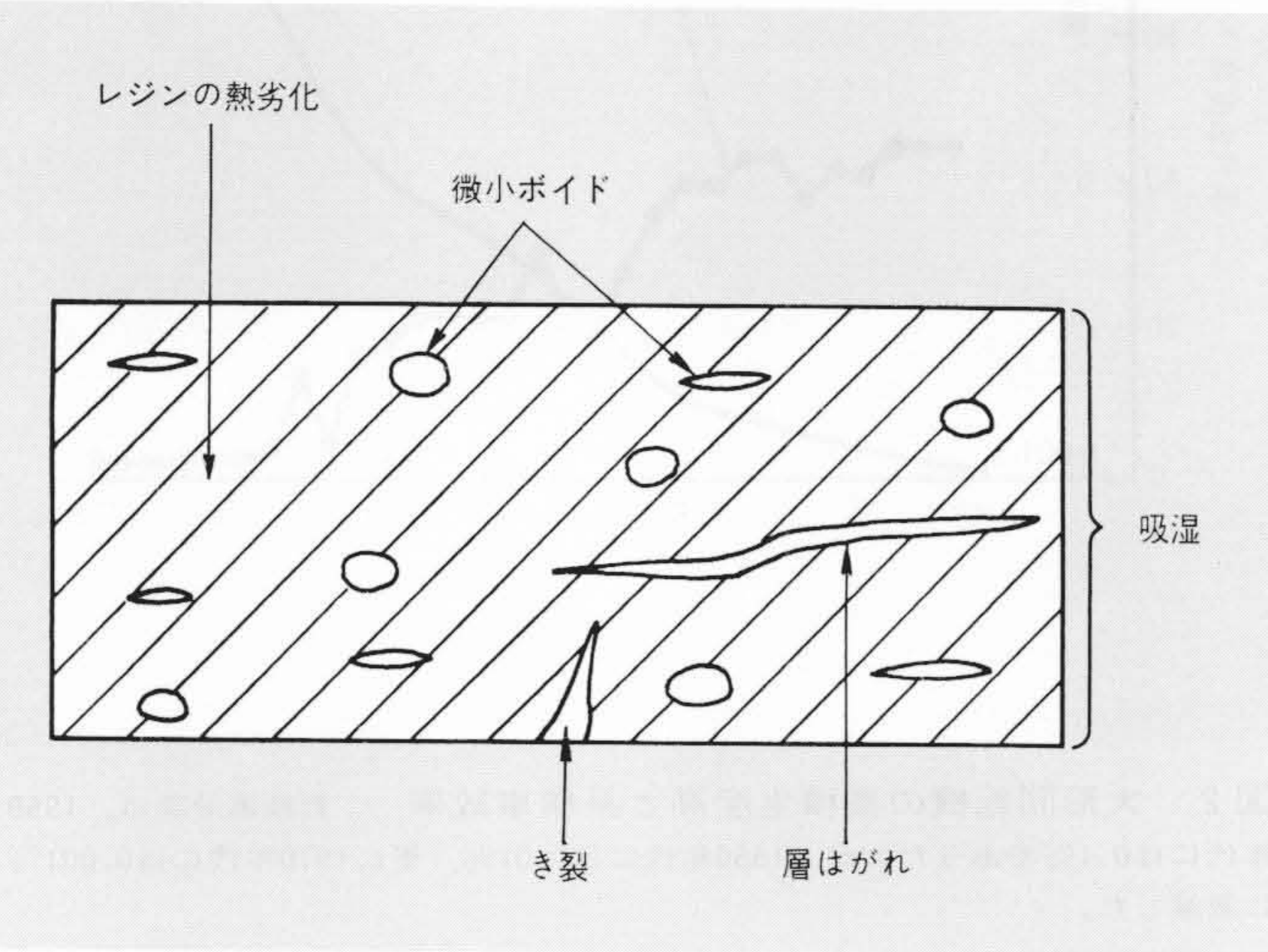


図3 マイカレジン絶縁層のモデル レジンの熱劣化、微小ボイド及び吸湿は絶縁層全体に均一に生ずる「定常劣化」で、層はがれ、き裂は局所的に生ずる「異常劣化」である。

での最大放電電荷 $Q_{\max}$ は部分放電試験から得られる。表2の旧来の判定基準をレジン絶縁巻線に流用する場合には、究極的には、① $\Delta \leq 15\%$ 及び② $Q_{\max} < 1 \times 10^{-8} \text{C}$ (クーロン)の二つの判定基準により、共にパスした場合には合格ということになる。

2.3 絶縁破壊電圧 V_R と Δ , $Q_{\max}$ の関係

新しい劣化判定基準を決めるのに先立ち、劣化コイルの絶縁破壊電圧 V_R (初期値を100として%で表わす。)と、 Δ 及び $Q_{\max}$ の関係をみる。供試コイルとしては、運転歴10年の10MVA、6.6kV水車発電機のコイル20本と、運転歴16年の950kW、6.6kV誘導電動機のコイル50本を取り上げた。これらは、いずれもフレークマイカポリエステル絶縁である。更に追加データを得るためモデルバーコイル10本を用いたが、これは現在製造中の絶縁方式による11kV級のフレークマイカエポキシ絶縁である。このモデルコイルには、熱・曲げ応力・課電の複合ストレスを与え、強制劣化した。⁵⁾非破壊試験はコイルのエンドコロナシールドの付け根にガード電極を設けて、エンド部の沿面放電の影響が測定値に加わるのを防止した。⁵⁾

図4に、 V_R と Δ の関係をプロットして示す。ここでは水車発電機コイル20本と、誘導電動機コイル50本のうち30本についてまとめた。同図から、経年コイルの大多数にはほぼ下記(1)式が当てはまり、強制劣化コイルと誘導電動機コイルには、むしろ(2)式がマッチすることが分かる。

$$V_R = 100 - 2(\Delta - 0.8) \dots \dots \dots (1)$$

$$V_R = 100 - 6(\Delta - 0.8) \dots \dots \dots (2)$$

図5に、強制劣化コイルについて V_R と $Q_{\max}$ の関係をプロットして示す。同図から強制劣化コイルには次の(3)式がマッチするといえる。

$$V_R = 100 - 100 \log \frac{Q_{\max}}{1.5 \times 10^{-9}} \dots \dots \dots (3)$$

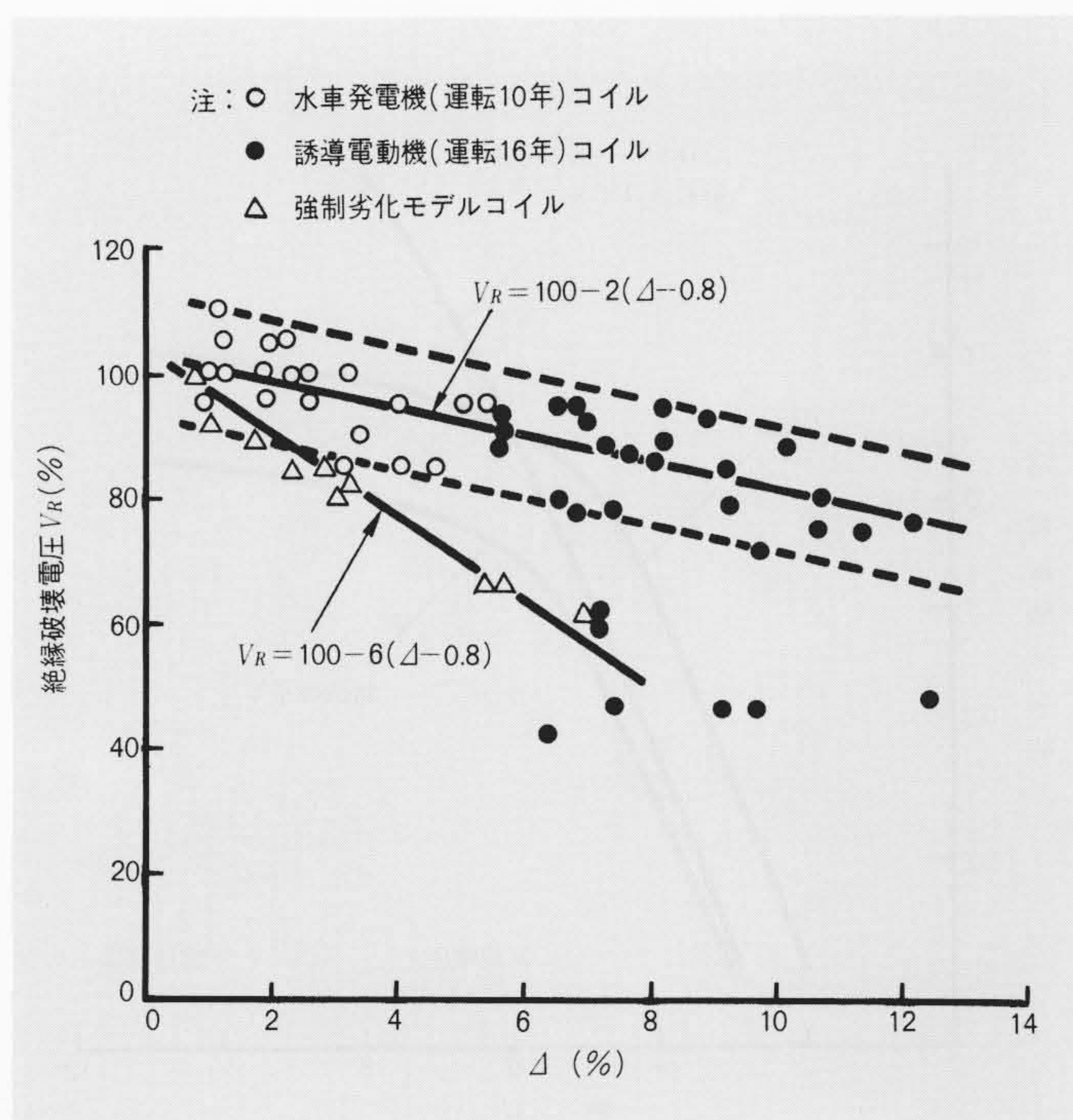


図4 各種劣化コイルの絶縁破壊電圧と Δ の相関 Δ は $\Delta \tan \delta + \Delta C/C_0$ を表わす。誘導電動機コイルの一部と強制劣化コイルは、少し外れた直線にマッチする。

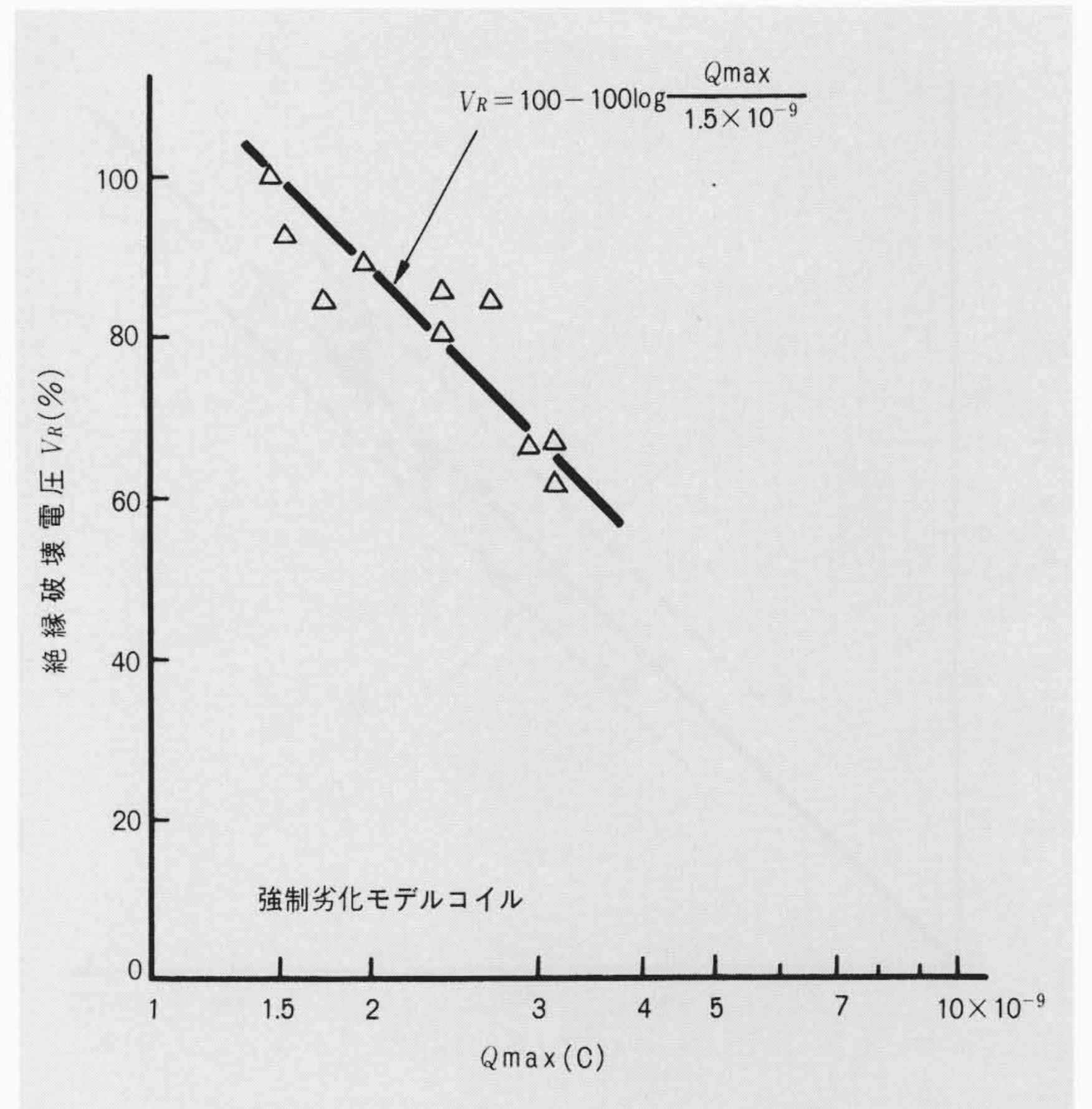


図5 強制劣化コイルの絶縁破壊電圧と $Q_{\max}$ の相関 $Q_{\max}$ を対数(log)で表示すると直線で近似できる。

先に(1)式で近似できたコイル群は、定常劣化に属すると考えられ、 $Q_{\max}$ はその初期値 $1.5 \times 10^{-9} \text{C}$ からほとんど増大していないと思われる。そこで、(1)式の代わりに次の(4)式をとっても、定常劣化コイル群にはマッチするであろう。

$$V_R = 100 - 2(\Delta - 0.8) - k \log \frac{Q_{\max}}{1.5 \times 10^{-9}} \dots \dots \dots (4)$$

次に、(4)式が定常劣化コイル群から外れた、すなわち局所異常劣化を含むと思われる、(2)式及び(3)式にマッチするコイル群も包括できるように、係数 k を決める。それにはこれら3式を連立方程式として解き、 $k = 67$ を得る。すなわち、次の(5)式は全コイルにマッチするはずである。

$$V_R = 100 - 2(\Delta - 0.8) - 67 \log \frac{Q_{\max}}{1.5 \times 10^{-9}} \dots \dots \dots (5)$$

図6は誘導電動機コイルの残り20本と強制劣化コイルについて、 V_R の実測値と(5)式による計算値をプロットしたが $\pm 10\%$ の精度で良く一致している。

2.4 新しい表示方法(D. Map)

X軸に $\log Q_{\max}$, Y軸に Δ を目盛ったX Y座標を用い、測定点をプロットしたのが図7である。(5)式での V_R にある予想値を設定すると、同図に例示したように斜めの直線で表わされる。劣化したコイルは、同図中のN方向に向かう定常劣化コイル群と、P方向に向かう異常劣化コイル群とに大別される。⁵⁾供試コイルの測定点の位置により、絶縁劣化の傾向と、絶縁破壊電圧の推定値 V_R が一目で分かることになる。 Δ も $Q_{\max}$ も、共に部分放電(Partial Discharge)に関連する値であるから、同図の表示をD. Map(Discharge Map)と名付けることにした。

絶縁の更新が必要となるのは、コイルの絶縁設計に応じていくぶん異なるが、例えば V_R が30%に低下したときに設定されるとする。このラインと旧来の判定基準を比べると、異常劣化を含むP方向のコイルに対してはほぼ一致するが、N方向のコイルに対しては新基準のほうが緩い。

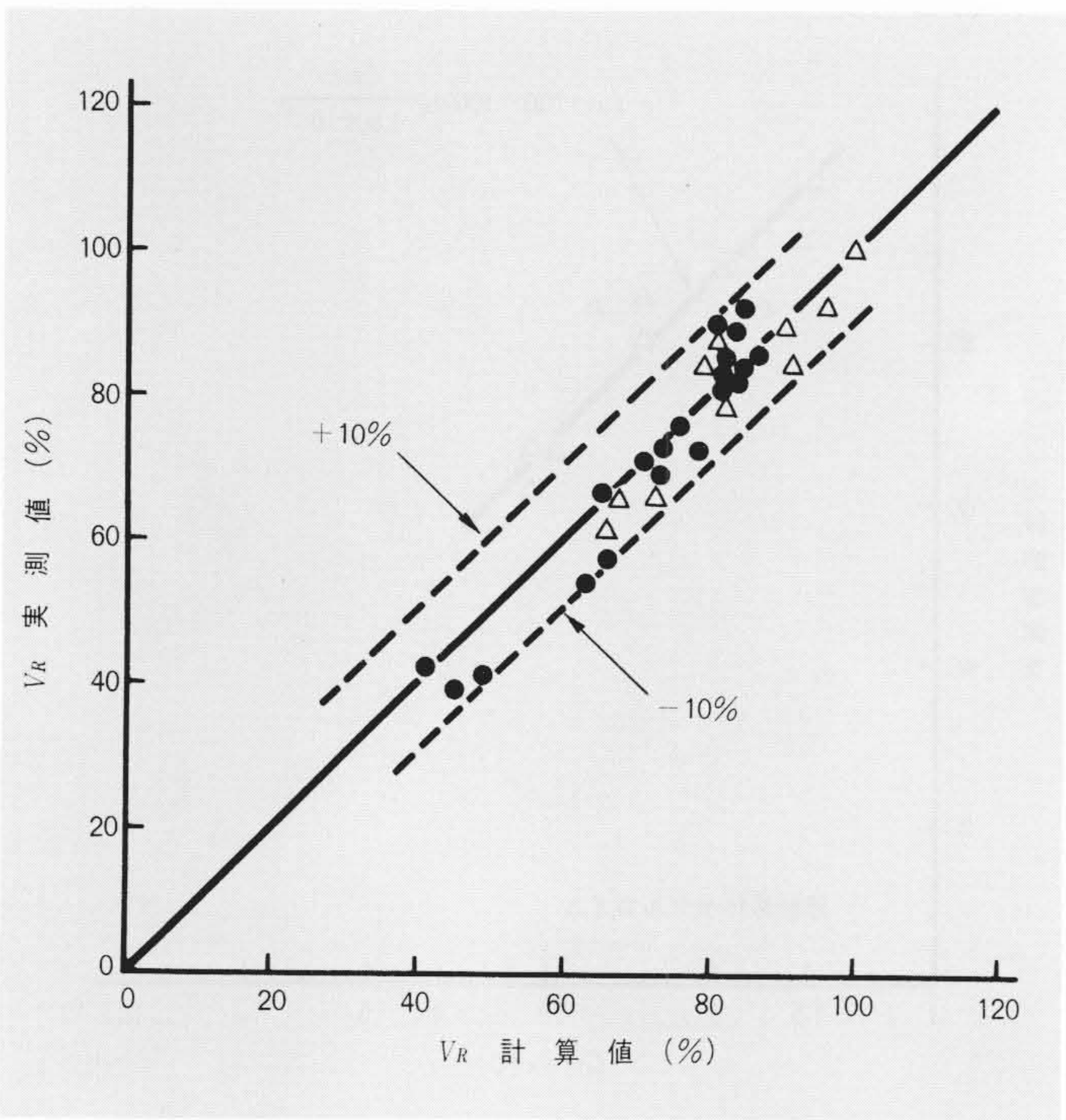


図6 絶縁破壊電圧 V_R の実測値と計算値 $\pm 10\%$ の精度で良く一致する。

2.5 D.Mapの巻線への適用

以上は単独コイルについて実験して得られた結果であり、回転機の巻線に適用する場合について以下に考察する。図7にプロットした誘導電動機(運転16年)のコイル20本をN群(定常劣化コイル13本)、P群(異常劣化コイル5本)及びX群(N群からP群へ移行中のコイル2本)に分ける。 Δ の平均値はN群8.8%、P群9.2%であり、全コイルでは8.9%となる。また

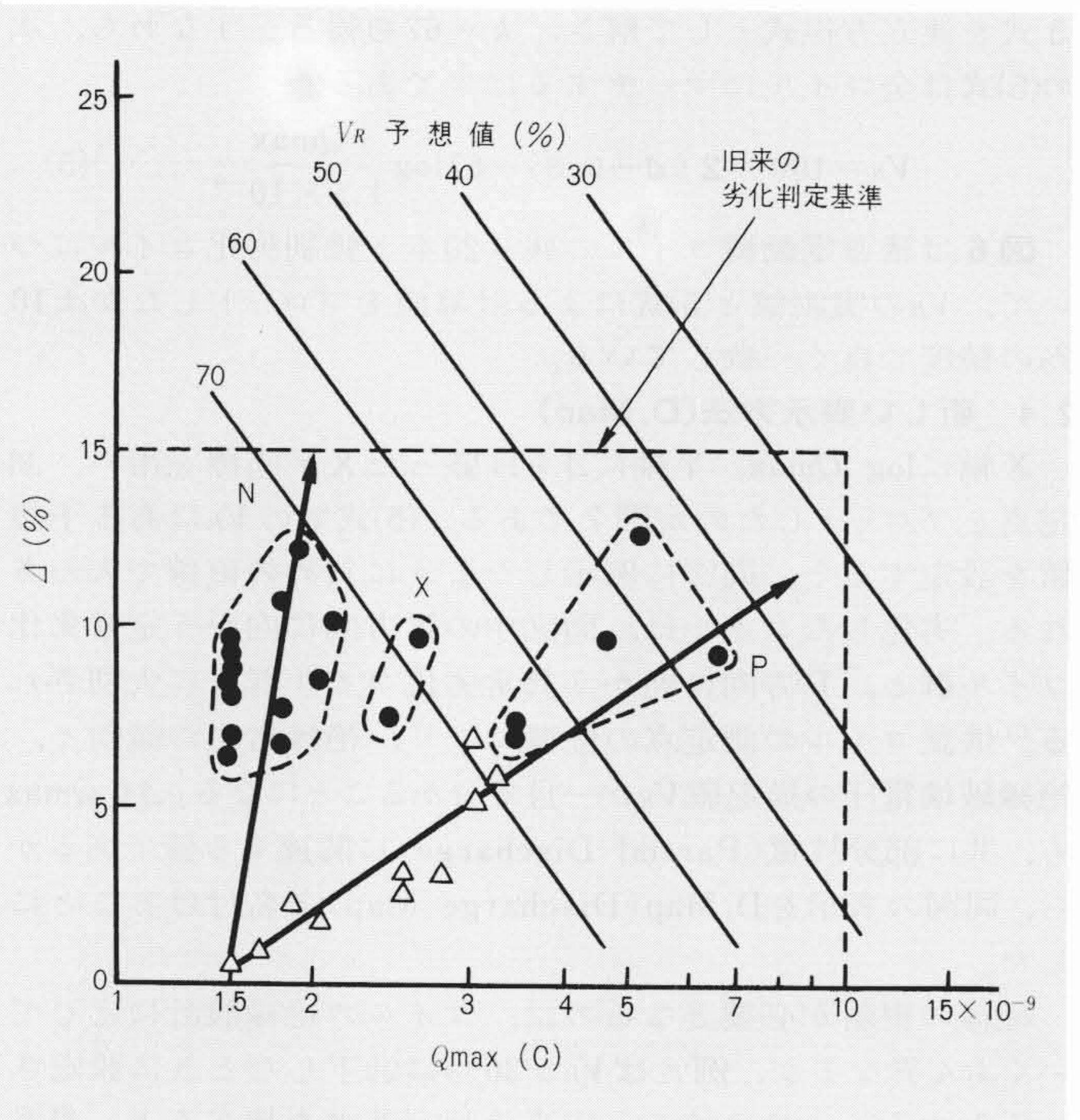


図7 D.Mapの測定点プロット Nは定常劣化の方向、Pは異常劣化の方向を表す。XはNからPへ移行中のコイルである。

Q_{max} の最大値はN群 $2.0 \times 10^{-9} \text{C}$ 、P群 $6.6 \times 10^{-9} \text{C}$ であり、全コイルではP群のそれと同じである。全コイルをまとめて巻線として測定する場合には、 Δ は平均値(8.9%)が、また Q_{max} は最大値($6.6 \times 10^{-9} \text{C}$)がでる。これらの値を(5)式に入れて巻線としての V_R 予想値を計算すると46%になる。

一方で巻線の絶縁耐力は、最悪のコイルの絶縁耐力で決まる。 V_R の実測値が最も低いコイルは、 Δ が9.4%、 Q_{max} が $6.6 \times 10^{-9} \text{C}$ で V_R 実測値が40%、また V_R 計算値が45%であった。⁵⁾これらの V_R の値は、先の巻線としての予想値46%とかなり良く一致している。このことから、巻線として Δ と Q_{max} を測定すれば、巻線に含まれる最悪のコイルの V_R (つまりは巻線の V_R)を予想できそうである。

2.6 コロナシールドと沿面放電の影響

D.Mapに適用する Δ と Q_{max} は、コイルの絶縁層自体の値でなくてはならない。ところが、コイルエンドに施されたコロナシールドの影響で、 Δ と Q_{max} の実測値が変わることがあり、適切な補正が必要となる。

コロナシールドが不良になり、コイルエンドで沿面放電が生ずる場合がある。測定値としては、この沿面放電と絶縁層内の部分放電との、大きいほうの最大放電電荷だけが Q_{max} としてでてくる。そのため、 Q_{max} がどちらに起因するかを識別する必要がある。一つの方法としては、図8に示すように最大放電電荷の電圧特性の傾向から判別できる⁶⁾。

次に、コロナシールドがシリコンカーバイド塗料のような、非線形シールド⁷⁾で構成されている場合は、コロナシールドの非線形特性に起因する Δ が発生するので、 Δ の実測値からその影響分を引いて補正する必要がある。⁶⁾図9はコイルの電極長と Δ の実測値との関係を示す。電極長(つまりは回転機の固定子鉄心の長さ)に応じて Δ を補正すればよい。カーボン塗料ないしは含鉄アスベストテープなどの線形抵抗シールドでコロナシールドが構成されている場合には、 Δ の補正は不要である。

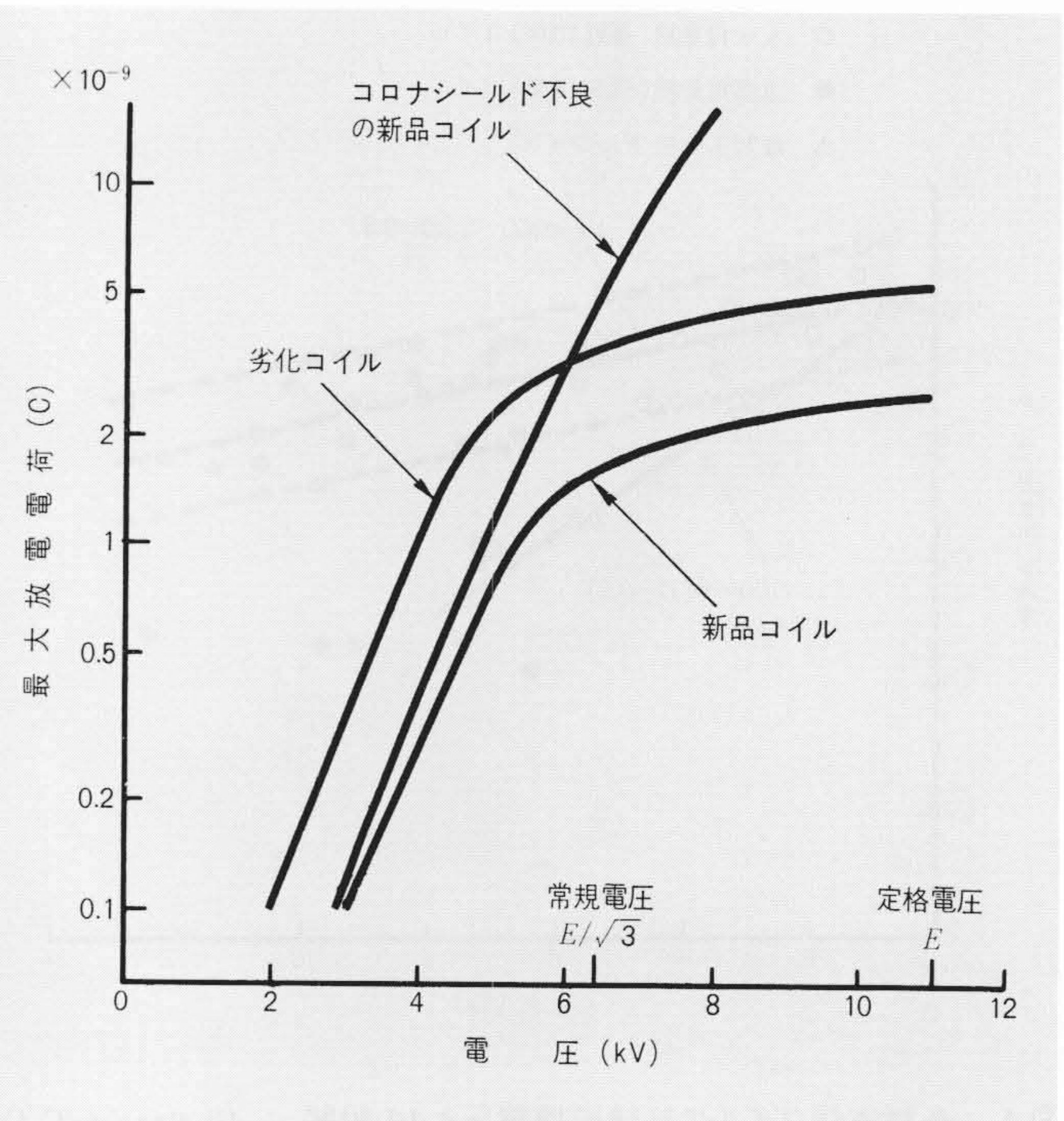


図8 最大放電電荷の電圧特性 劣化コイルでの絶縁層内部放電と、コロナシールド不良の新品コイルでの沿面放電とは、特性の傾斜から判別できる。

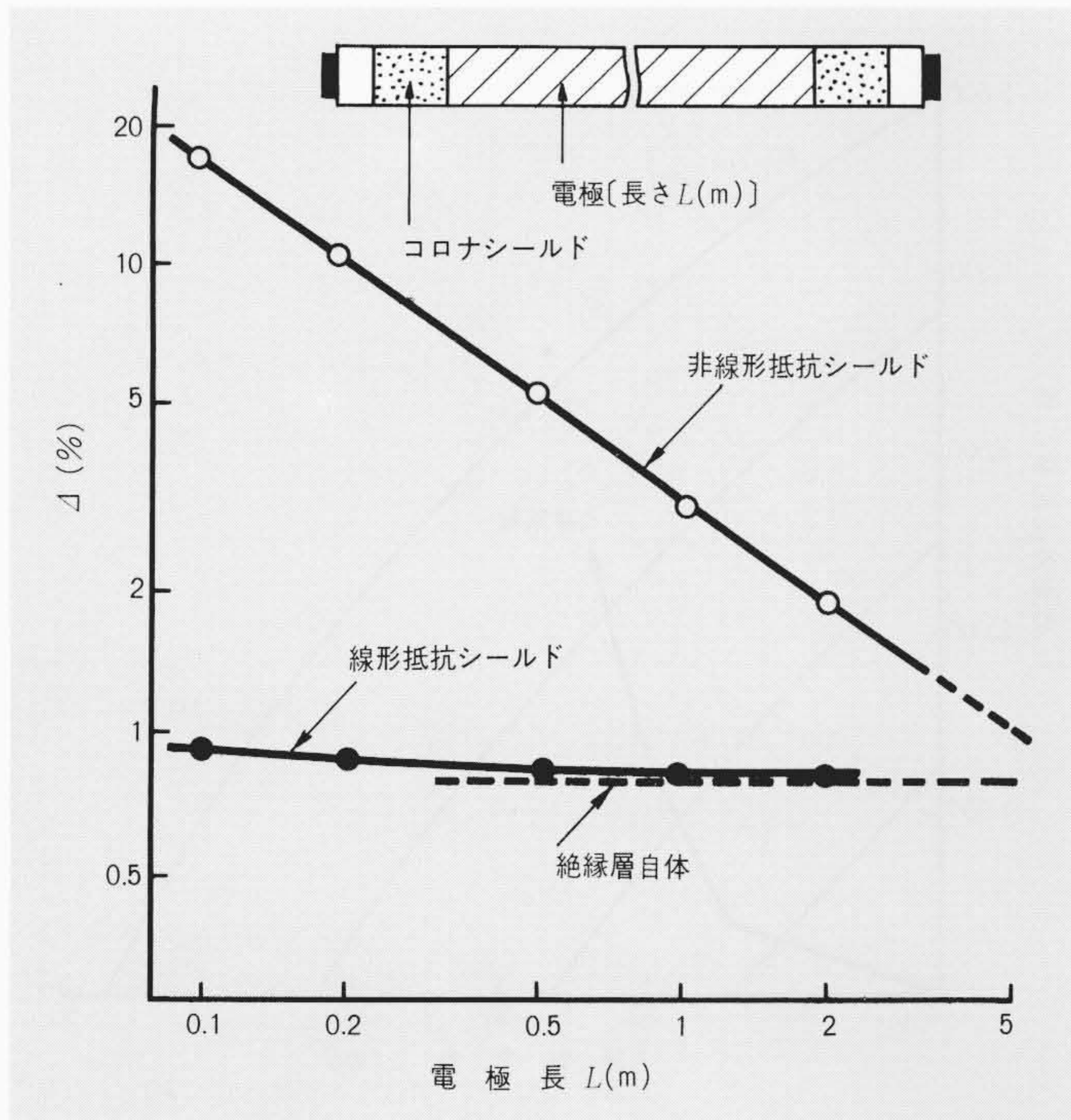


図9 コイルの電極長と Δ コロナシールドが非線形抵抗シールド(シリコンカーバイド塗料)の場合には、コイルの電極長に応じて Δ の補正が必要となる。

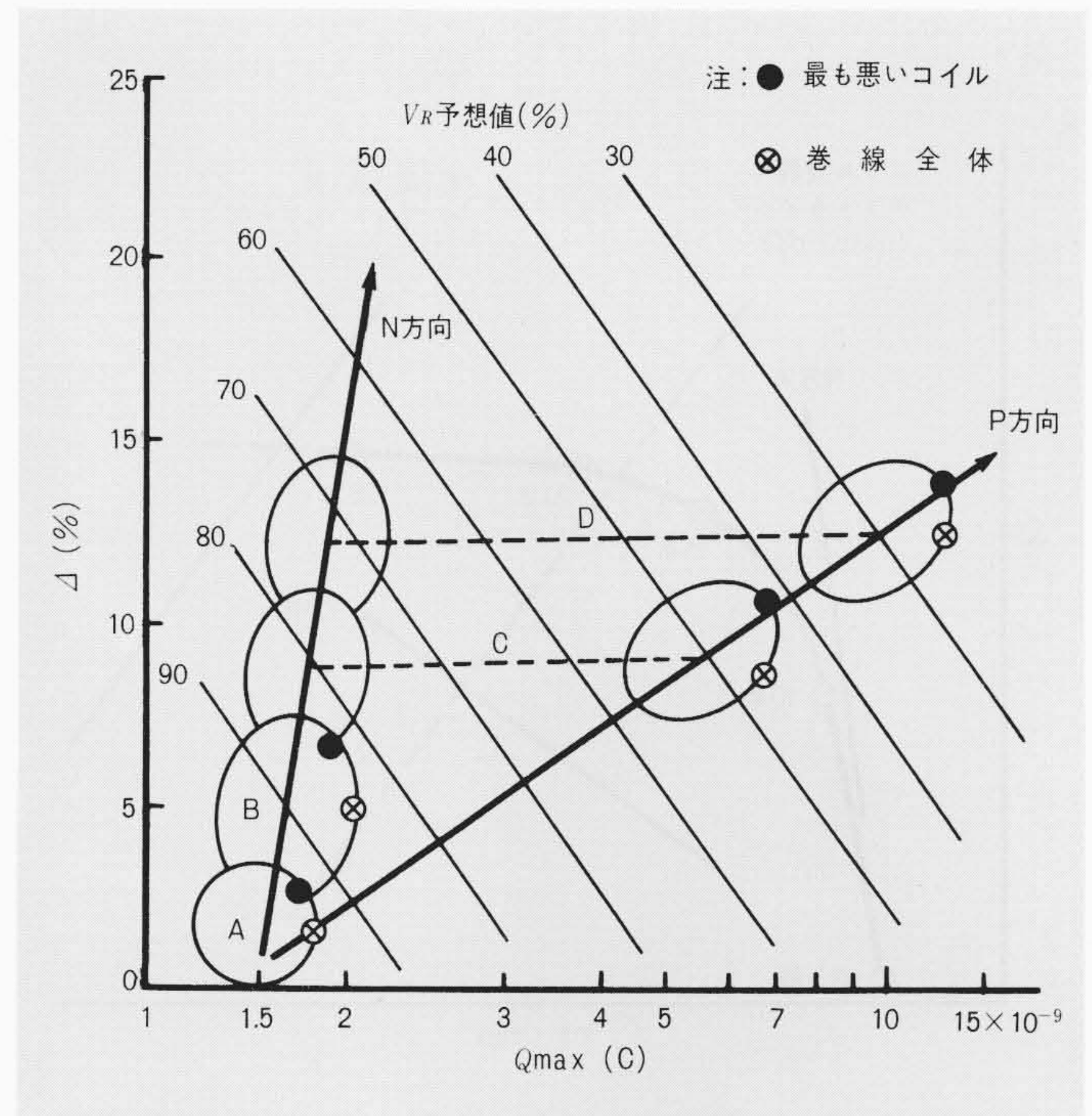


図10 巻線の絶縁劣化の傾向 A→Dへと絶縁劣化が進むにつれて、まず定常劣化(N方向)が進み Δ が増大する。定常劣化があるレベルに達すると、巻線のなかに異常劣化(P方向)が発生する。Cは図7の誘導電動機コイルを模擬している。

2.7 絶縁劣化判定基準案

レジン絶縁巻線に適用できる新しい絶縁劣化判定基準案を提出するに先立ち、マイカレジン絶縁に特徴的な劣化の傾向について考察する。以上の検討結果から図10に示すような傾向が推定される。運転開始後の年数が経過するにつれ、AからDへと絶縁劣化が進む。このとき、まず定常劣化(N方向)が進行して Δ が増大し、あるレベルに達すると巻線のなかに異常劣化(P方向)が発生し、しだいにその箇所が増えるとともに劣化が激しくなると考えられる。

そのため、 Δ が約12%になった巻線では、もし巻線のなかに異常劣化がなければ V_R は約70%であるが、異常劣化があると V_R は30%以下になり絶縁の更新が必要になる。これを絶縁耐力のばらつき範囲でとらえると、例えば先の図7で、N群、P群のそれぞれの群での V_R のばらつきは約±10%であるが、全コイル群では約±22%に広がる。そこで劣化の進行につれてばらつきが拡大するため、最低値を常に考慮して決めることになる。

表3には、以上の考察をもとにして作成したレジン絶縁巻線の絶縁劣化判定基準案を示す。まず、ステップ①で Δ の測定を実施し、定常劣化の程度をみる。 Δ が12%以上の場合には、ステップ②として Q_{max} の測定を実施し、異常劣化の程度をみる。 $Q_{max} \geq 1 \times 10^{-8} \text{ C}$ で、かつそれが絶縁層内の部分放電で

あると識別されたときは、ステップ③の抜取りコイルの診断を実施し総合的な判定を行なう。コイルエンドの沿面放電ないしは外部雑音のために Q_{max} が測定できないが、 $1 \times 10^{-8} \text{ C}$ 以上である疑いが残されている場合にも、やはりステップ③を実施すべきである。

定期点検のときに絶縁診断を実施し、 Δ と Q_{max} を正しく測定できている場合には、図11の例で示すようにD.Map上に経年表示すると、絶縁劣化の傾向と早さ、及び巻線更新のタイミングをとらえるのに便利である。

3 運転経歴から絶縁破壊電圧の推定方法

3.1 絶縁耐力損耗量

次に、絶縁診断を行なうことなく、回転機の運転経歴から V_R 予想値を知る方法を述べる。絶縁耐力を低下させる劣化要因には、課電劣化(損耗率 D_V)、熱劣化(D_T)、ヒートサイクル劣化(D_H)及び環境劣化(D_E)が考えられ、これらが複合された場合での残存絶縁耐力 V_R は次式で表わせるであろう。

$$V_R = 100(1 - D_V) \cdot (1 - D_T) \cdot (1 - D_H) \cdot (1 - D_E) \cdots (6)$$

ここで D_H は起動・停止回数 N に比例し、他の3項は、これらをまとめて実運転年数 Y に比例すると考えると、結局次式で表わすことができる。

$$V_R = 100(1 - aY) \cdot (1 - bN) \cdots (7)$$

表3 絶縁劣化判定基準案 ステップ1から3の順に診断試験を進め、四つのケースに対応して判定を下す。

ステップ	診断対象	診断内容	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
①	巻線	Δ の測定	$\Delta < 12\%$	$\Delta \geq 12\%$		
②	巻線	Q_{max} の測定	不要	$Q_{max} < 1 \times 10^{-8} \text{ C}$	測定不可のとき	$Q_{max} \geq 1 \times 10^{-8} \text{ C}$
③	抜取りコイル	Δ, Q_{max} の測定, 絶縁破壊試験	不要	抜取りコイルの診断内容による総合的な判定		
判定			運転を続行してもよい。			巻線更新を勧める。

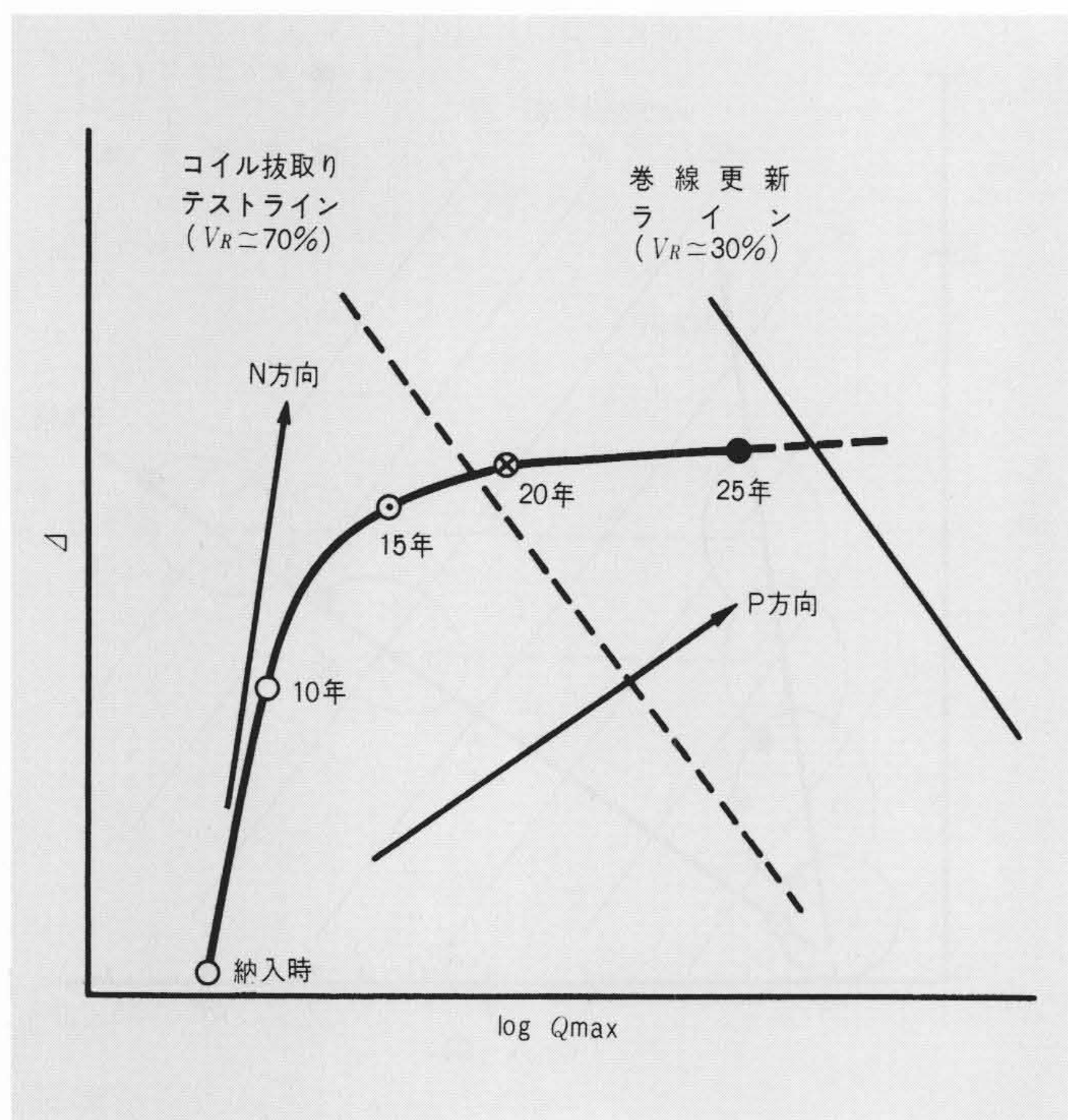


図11 D. Map上の経年表示の例 絶縁劣化の傾向と早さ、及び抜取りテストと更新のタイミングが分かる。10年、15年などは運転年数を示す。

現在までにコイル抜取りテストを実施した数台のポリエステル絶縁タービン発電機のデータをもとに、(7)式の係数 a (年次損耗率に相当する。)及び b (起動・停止損耗率)を求めると、次式が得られる。

$$V_R = 100(1 - 7 \times 10^{-3} Y) \cdot (1 - 8 \times 10^{-5} N) \cdots \cdots (8)$$

これは少数のデータから出した式であり、今後更に多数の発電機のコイル抜取りテストの結果を入れて、係数 a 及び b の値を正確なものにしてゆきたい。

3.2 NY Map

コイル抜取りテストが必要となるタイミングを知るのに、運転経歴(N , Y)を用いることもできる。先のD. Mapに相当する新しい表示法としてNY Mapを創案した。図12にその一例を示すが、(8)式の V_R にある予想値を設定すると、斜めの曲線で表わされる。ここで V_R 予想値が約70%のラインが、2.5節で述べたようにコイル抜取りテストが必要となるタイミングである。このラインを越えたら、局所異常劣化の発生を詳しく監視する必要があり、また巻線の絶縁更新計画について考えるべきである。発電機の稼動条件(つまりは起動・停止の頻度)によって、このラインを越える運転年数は非常に違ってくる事が分かる。

4 結 言

以上、レジン絶縁巻線のコイル抜取りテスト、更には絶縁更新のタイミングを知るための二つの方法について紹介した。

(1) NY Map法

回転機の運転経歴(起動・停止回数 N と運転年数 Y)をもとにして、残存絶縁耐力 V_R を推定する手法であり、 V_R 推定値が70%(初期を100%とする。)以下になったら、コイル抜取りテストを行なうべきである。

(2) D. Map法

非破壊絶縁診断試験を行ない、部分放電(Discharge)の大

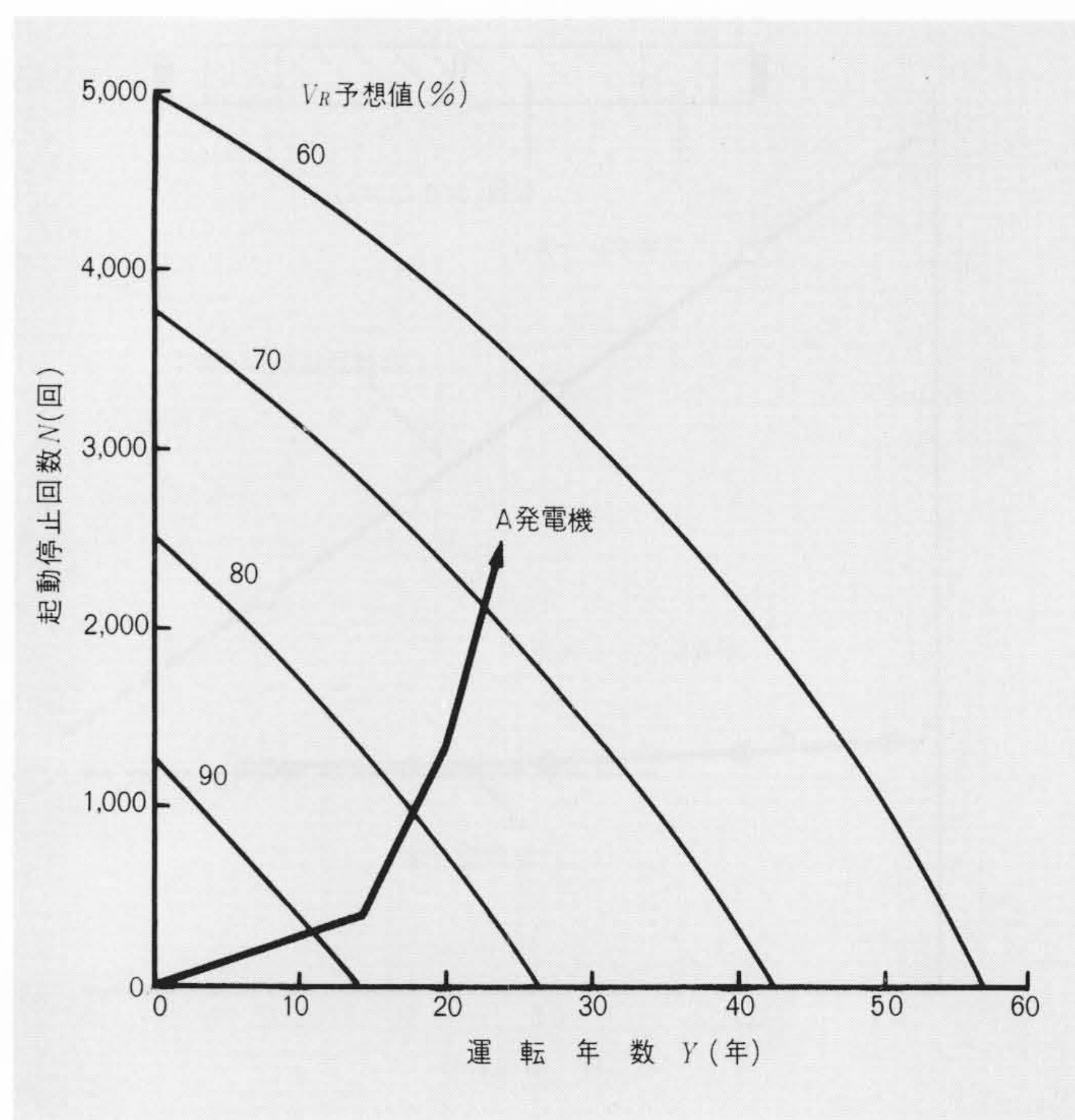


図12 NY Map表示の例 V_R 予想値70%のラインを越えたら巻線の絶縁更新計画を考えるべきである。A発電機は運転年数とともに稼動条件(起動・停止の頻度)が変わった場合の例である。

きさを表わす二つの測定値(Δ と Q_{max})をもとにして V_R を推定する手法である。 Q_{max} の測定が不可能な場合には、 Δ が12%以上になったら、コイル抜取りテストを行ない、より詳細な診断を行なうべきである。

運用に当たっては、二つの方法を併用して総合的な判断をするのがよい。

なお以上の二つの方法は、いずれもまだ少数の事例をもとにして導かれた方法であり、今後は運転中の大形回転機の絶縁劣化診断に際して、これらの方法によってデータの整理を行ない、その適用性を確認してゆきたい。また絶縁劣化診断に必要な測定値を迅速に測定し、かつ解析する自動絶縁診断装置を現在開発中であり、次の機会に紹介したいと考えている。

参考文献

- 1) 安芸, 外: 大形回転機絶縁の動向, 日立評論, 58, 865~870 (昭51-11)
- 2) 松延, 外: Reliability Study of High Voltage Windings for Large Rotating Machinery, IEEE Conf. Rec. 1980 Inter. Sym. Elect. Insu., 65~67 (June 1980)
- 3) 発電機巻線絶縁劣化判定基準委員会: 発電機巻線絶縁劣化判定基準, 電力中央研究所技術研究所報告, No. 67001 (昭42-4)
- 4) 東村, 外: 回転機巻線の絶縁劣化診断, 電気学会絶縁材料研究会資料, EIM-78-74 (昭53-12)
- 5) 門谷: 回転機マイカ・レジン絶縁コイルの絶縁劣化診断方法の一考察, 電気学会論文誌A, 100, 528~534 (昭55-9)
- 6) 門谷, 外: An Approach for Insulation Diagnosis of Mica-Resin Coils, IEEE, PES, 1981 Winter Meeting, 184-1 (Feb. 1981)
- 7) 門谷, 外: 回転機マイカ絶縁の最近の進歩, 日立評論, 61, 355~360 (昭54-5)