

ミル用直流機の絶縁診断と寿命予知

—鉄鋼用電気品の最新の設備寿命診断技術—

Insulation Diagnosis of Mill DC Motors

—An Advanced Insulation Diagnosis of Electrical Machines in Steel Plants—

一般にミル用直流機は、過酷な負荷及び悪環境のもとに使用され、巻線の絶縁耐力が低下し、ついには絶縁破壊に至って機能を停止する。このため、寿命を延長して故障を未然に防止する目的で、電動機の保全管理が行なわれ、定期点検による絶縁診断が適用されているが、定量的絶縁劣化度の推定は困難である。このような現状から、ミル用直流機(特に大形)の非破壊的な、定量的絶縁寿命推定法の開発が重要課題となっている。

巻線の絶縁物は電氣的熱劣化、機械振動劣化及び環境劣化の複合によって、経年的に絶縁劣化が進行し、ついには絶縁破壊に至る経過をたどる。

このたび対象直流機の使用履歴・運転条件及び環境条件をベースとして、電機子巻線の非破壊的な定量的絶縁寿命推定法(予知法)を提案した。また、本方法の実証試験を新日本製鐵株式会社所有の実機直流発電機で日立製作所と共同して実施した。その結果、本推定予知法とほぼ一致することが確認された。

登古大敬* *Taikei Toko*
街道芳弘* *Yoshihiro Kaidō*
松延謙次** *Kenji Matsunobu*
林 秀美*** *Hidemi Hayashi*
門谷建藏**** *Kenzo Kadotani*

1 緒 言

近年、設備の省エネルギー化、高効率化のため信頼性向上・予防保全が重要になっている^{1),2)}。ミル用直流機の巻線は運転負荷や使用環境が厳しく、金属酸化物やカーボンドスト、ガス、湿気などにさらされることが多い。これらの条件下で巻線は熱的、機械的、環境的にストレスを受け、絶縁耐力が経年的に低下する、いわゆる絶縁劣化を生じる。したがって、その進行を把握し適切な時期に予防保全診断やワニス処理、絶縁更新などを行なうことによって、寿命を延長して故障を未然に防止し、運転効率を上げ保全費の低減を図ることができる。

絶縁劣化を推定する方法の一つに、非破壊的な絶縁診断試験、目視点検などを実施して機器の状態を知る方法がある。もう一つは、機械の運転条件や過去に受けた劣化(履歴)を考慮して、劣化を推定する方法である。実際には、機器の劣化状態を正しく把握することはかなり難しく、両者の方法にも一長一短がある。本報告では、機器の運転条件、履歴と非破壊絶縁試験による定量的な総合的診断方法¹⁾について述べる。

2 絶縁劣化の推定

一般に直流機の絶縁はマイカ、ガラス、合成樹脂から成る固体複合絶縁物であり、その絶縁耐力を低下させる要因として絶縁物内に経年的に発生し、成長するボイド、はく離、き裂などの欠陥と、絶縁物に付着する水分、酸、アルカリ、油、ダストなどの環境的要因がある。

2.1 残存絶縁耐力

先に述べた種々の劣化要因によって絶縁耐力が低下することを、損耗率 $D(\%)$ で表わす。また、経年劣化巻線の現時点での残存絶縁耐力を $V_R(\%)$ で表わし、初期状態を100%とすると次式のようになる。

$$V_R(\%) = 100 - D(\%) \quad (1)$$

各々の劣化要因による損耗率を次のように表わす。

- (1) 熱劣化損耗率： D_T
- (2) 振動劣化損耗率： D_V
- (3) ヒートサイクル劣化損耗率： D_H
- (4) 環境劣化損耗率： $D_E (=10P$ で表わす。)

ここで熱的劣化、振動劣化、ヒートサイクル劣化は非可逆的に経年とともに進行するものであり、環境劣化は水分やダストなど、ある程度洗浄処理や環境条件によって回復できるものであるから、残存絶縁耐力 V_R を次式のように表わすことにする。

$$V_R(\%) = 100(1 - D_T)(1 - D_V)(1 - D_H) - 10P \quad (2)$$

2.2 劣化損耗率

(1) 熱劣化損耗率 D_T

コイルの熱的絶縁劣化は、基本的にはアレニウスの法則に従うと考えられ、次式のように表わす。

$$D_T(\%) = k_1 \cdot t = a \cdot \exp\left(-\frac{b}{T}\right) \cdot t \quad (3)$$

この(3)式に、表1の直流機コイルの加速熱劣化試験結果を入れると、

$$D_T = 2.5 \times 10^8 \exp\left(-\frac{11,000}{T}\right) \cdot t \quad (4)$$

ここに k_1, a : 定数, t : 運転時間, T : 運転温度K となる。コイル導体温度(B種130°C)よりも絶縁物が10°C低いと考えると、次式のようになる。

$$D_T(\%) = 1.8 \times 10^{-4} \cdot t \quad (5)$$

(2) 振動劣化損耗率 D_V

圧延材のかみ込時に巻線には最大25G程度の振動が加わり、

表1 B種直流機絶縁の熱劣化特性 絶縁物は、熱と時間によって絶縁耐力がしだいに低下してくる。

No.	熱劣化条件	絶縁耐力損耗率 D_T
1	180°C 30日	5.1%
2	190°C 20日	5.8%

* 新日本製鐵株式会社君津製鐵所

** 日立製作所日立工場 工学博士

*** 日立製作所日立工場

**** 日立製作所日立研究所

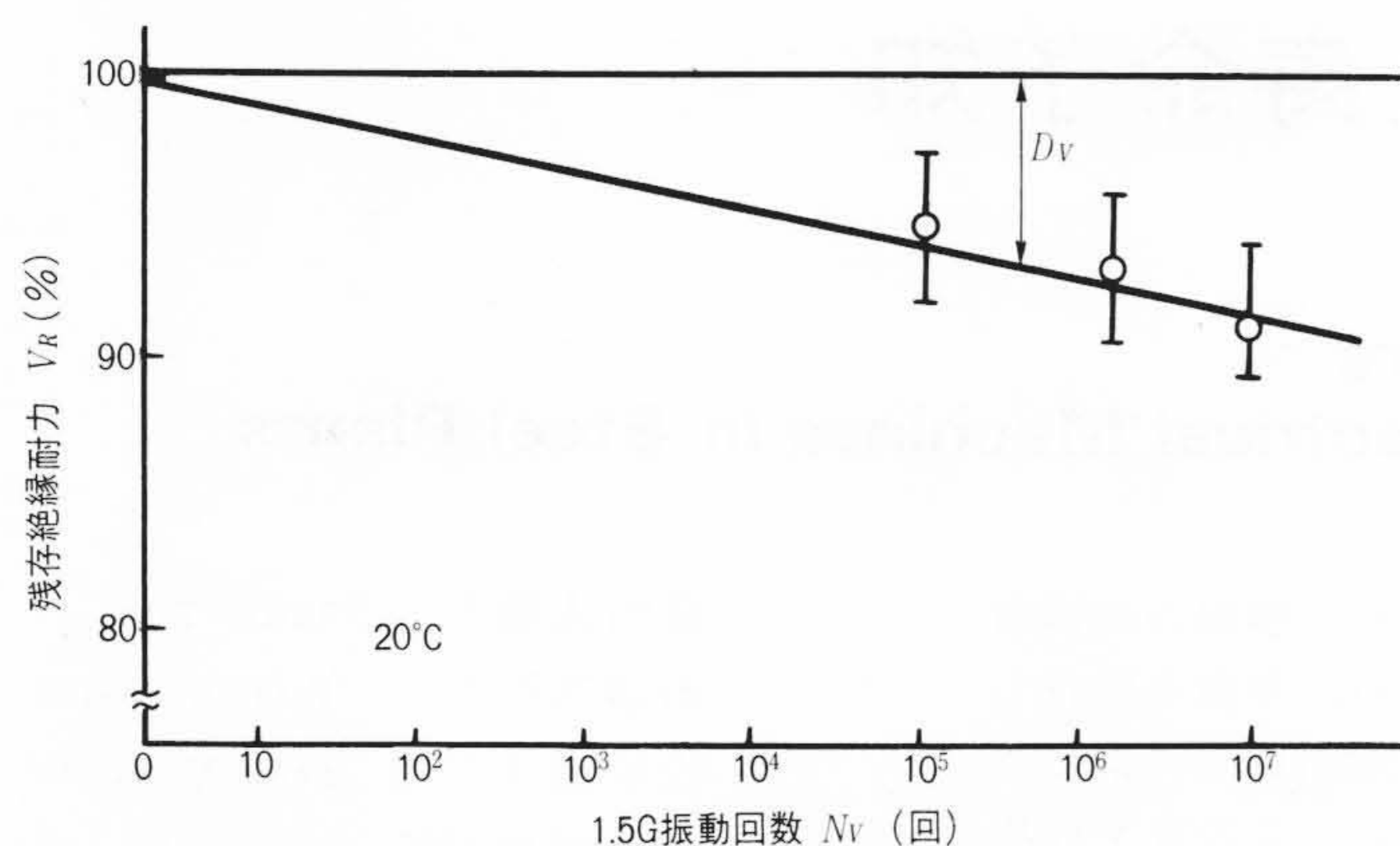


図1 B種直流機絶縁の振動疲労特性 絶縁物に加わる繰返しの振動によって、絶縁耐力はしだいに低下してくる。

しだいに減衰する。1回のかみ込みで1.5Gの振動が約50回生じるので、圧延かみ込み累積回数 n 回では振動累積回数 N_V は $50n$ となる。図1はB種直流機絶縁巻線を模擬鉄心に組み込み、1.5Gの振動疲労特性を測定したものであるが、これから損耗率 D_V を次式のように表わす。

$$D_V(\%) = 1.3 \log N_V = 1.3 \log 50n \quad (6)$$

ただし、 n は次のようにして求める。

$$n(\text{回}) = \text{インゴット毎圧延回数} \times \text{累積総生産量}(\text{t}) \div 1 \text{回インゴット量}(\text{t})$$

(3) ヒートサイクル劣化損耗率 D_H

直流機の起動停止に伴い、巻線絶縁は繰返しの熱応力を受ける。このとき、絶縁層にはせん断応力が繰返し加わり、絶縁耐力を低下させる。劣化損耗率はせん断応力と起動停止累積回数 N_H に比例すると考えられ、更にせん断応力は、温度上昇 ΔT と鉄心の長さ $l_c(\text{m})$ に比例すると考えられるので、次式で表わせる。

$$D_H(\%) = k_2 \cdot \Delta T \cdot l_c \cdot N_H \quad (7)$$

実機モデルテストにより、表2のヒートサイクル試験を実施した結果から定数 k_2 を決定すると、次式のようになる。

$$D_H(\%) = 0.015 \cdot l_c \cdot N_H \quad (8)$$

ただし、室温平均 20°C とし、 $\Delta T = 110^\circ\text{C}$ とした。

ヒートサイクル劣化は起動停止だけでなく、負荷変動でも生じる。一方で直流機の負荷が100%以下の場合には、導体温度が 130°C に達しないため、条件としては楽になる。ここでは、この両者を相殺することにして扱った。

(4) 環境劣化損耗率 D_E

ミル用直流機は交流発電機などに比較すると、より過酷な環境下におかれているため、巻線の汚れが激しく、また高湿度雰囲気での吸湿による絶縁低下が生じやすい。劣化した巻線について、吸湿下で絶縁耐力を測定すると表3に示すようになり、吸湿によって20～30%の低下がみられる。環境による劣化は従来からの経験も入れると、極端な場合には50%に及ぶこともあり、試みに環境劣化度に対応する損耗率を5段階に分けて表4のようにした。環境劣化度は非破壊絶縁診断

表2 B種直流機絶縁コイルのヒートサイクル劣化 電動機の起動、停止の繰返しによるヒートサイクル劣化は V_R の重要な要因となる。

モデル仕様	ヒートサイクル条件	絶縁耐力損耗率 D_H
実機コイルを鉄心組込み ($l_c = 1.5\text{m}$)	$140^\circ\text{C} \rightleftharpoons 40^\circ\text{C}$ (0.5h) $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ $N_H = 500$ サイクル	10.0%

表3 吸湿時の残存絶縁耐力 絶縁物は吸湿時には絶縁耐力が低下する。ダストや異物なども同じように環境的劣化要因となる。

No.	コイル劣化処理	吸湿時(30℃ 95% RH 24h)の $V_R(\%)$	吸湿による V_R 低下分: $D_E(\%)$
1	熱劣化(表1のNo.1)	69.3	25.6
2	ヒートサイクル劣化(表2)	61.5	28.5
3	なし(未劣化)	80.2	19.8

表4 環境劣化度 P 環境劣化は非破壊テストデータと汚損、目視結果から総合判断して決められる。

絶縁抵抗 P_1	成極指数 P_2	HIT局部異常 P_3	汚損程度 P_4	目視点検異常 P_5
$\geq 100\text{M}\Omega$	0	> 1.5	0	0
$\geq 10\text{M}\Omega$	1	1.5～1.3	2	2
$\geq 1\text{M}\Omega$	3	< 1.3	4	4
$< 1\text{M}\Omega$	5		5	5

$$P = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5}{5}$$

ただし、 $P_1 \sim P_5$ のうち、測定できない項目がある場合、例えば P_3 が不可の場合は、

$$P = \frac{P_1 + P_2 + P_4 + P_5}{4}$$

のように行なう。

試験と外観目視点検によって決めることになるが、できるだけ真値に近い評価を行なうように、同表のような総合的判定を行なうことにした。

2.3 運転履歴からの残存絶縁耐力推定式

(2)式に(5)式、(6)式及び(8)式と表4の環境劣化損耗率を入れると、次の(9)式が得られる。

$$V_R(\%) = 100(1 - 1.8 \times 10^{-6} \cdot t)(1 - 1.3 \times 10^{-2} \log 50n)(1 - 1.5 \times 10^{-4} \cdot l_c \cdot N_H) - 10P \quad (9)$$

ここに

t : 累積稼動時間(h), n : 累積かみ込圧延回数(回)

l_c : 鉄心長(m), N_H : 累積起動停止回数(回)

P : 環境劣化度(0～5)

2.4 絶縁劣化判定基準

上に述べた残存絶縁耐力推定式(9)式をみると、右辺第1項は熱的、機械的要因によって生じる基本的絶縁劣化を示し、これは非可逆的に進行する。人間の年齢による老化に相当する。第2項環境劣化度 P に依存する項目は、巻線の汚れ、ダスト、水分、カーボンなどを洗浄によって完全に除去すれば、もとの状態に復帰できる。またワニス処理などの方法によっては、それ以上に回復させることもできる。(9)式によって算出した V_R が50%になったならば、巻線の洗浄、ワニス処理などの予防保全を施す必要がある。 V_R が30%になったならば絶縁の更新が必要と考えられる。

以上の診断方法をモデル的に示すと図2のようであり、直流機絶縁の故障を来す前に絶縁診断→対応策実施を行なうことになり、機械の寿命を延長できる。

3 2,500kW直流機による実証試験結果

運転履歴による基本的絶縁耐力低下と、絶縁診断による環境劣化度とによって機械の実際の残存絶縁耐力を推定し、予防保全を行なう方法の実施例として、17年間使用した2,500kW直流発電機(ミル電動機用イルグナー発電機)について実証試験を行なった。

3.1 直流発電機仕様

供試機の電機子巻線の絶縁は、マイカ基材とワニスから成

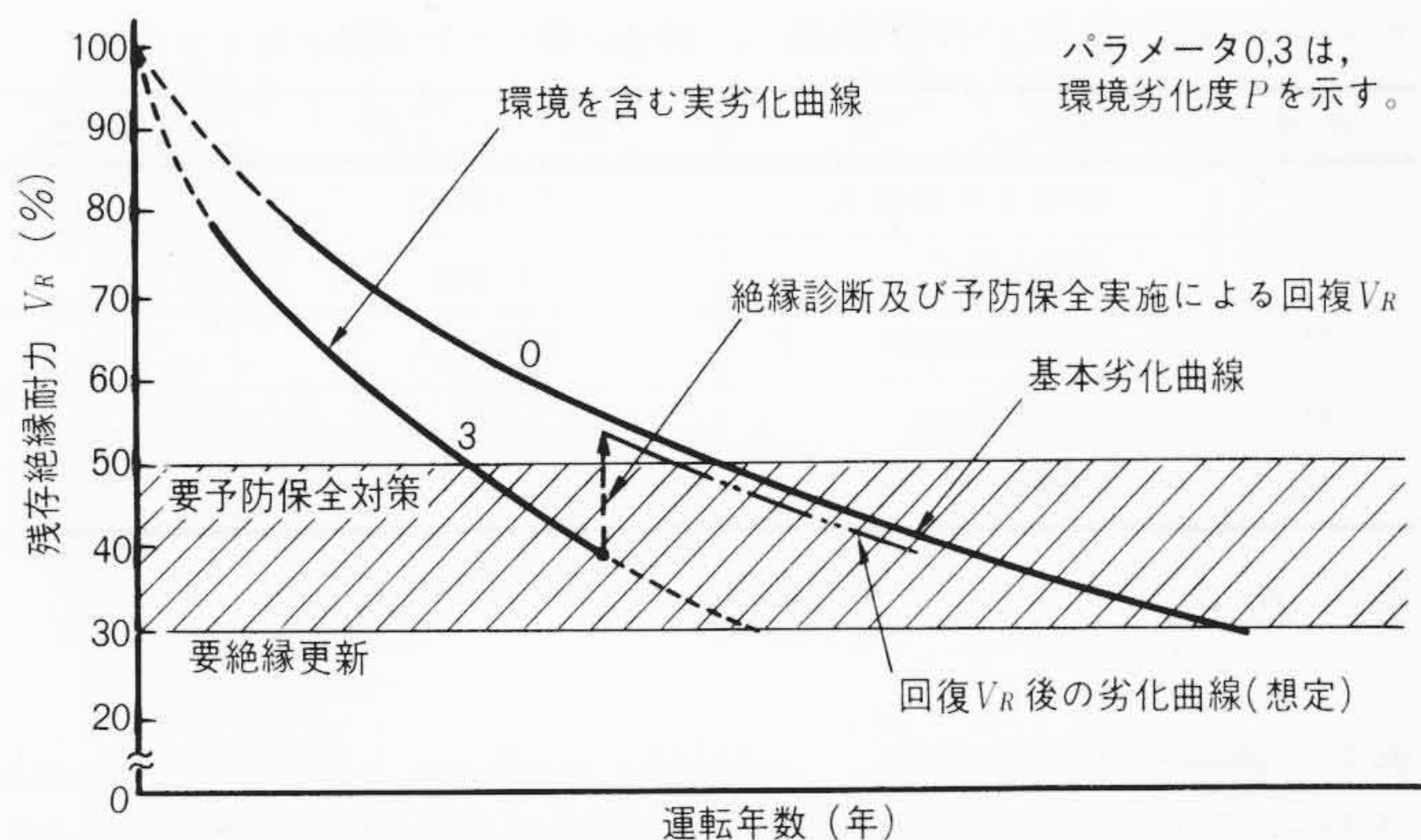


図2 経年絶縁劣化曲線と予防保全 残存絶縁耐力 V_R は、熱、機械振動、ヒートサイクル劣化に起因する基本的劣化分と環境劣化度 P による分から構成される。

る固体複合絶縁であり、前述のように17年間の使用履歴をもつもので、主な仕様を記述すると下記ようになる。

- (1) 定格：2,500kW
- (2) 電圧：750V
- (3) 電流：3,333A
- (4) 極数：14P
- (5) 絶縁種別：B種
- (6) 用途：分塊水平ミル用

製作：日立製作所 1964年（1981年から休止）

3.2 非破壊絶縁診断結果

残存絶縁耐力推定法に対する破壊実証試験に先立ち、(1) 目視点検、(2) 絶縁抵抗試験、(3) HIT803絶縁診断試験、(4) 電磁ハンマテストなどを実施したが、ここでは(2)、(3)の結果について結果を述べる。なお、(4)についても異常はみられなかった。

(1) 絶縁抵抗試験及びPI（成極指数）

結果を表5に示す。

(2) HIT803絶縁診断試験

本法では、電機子巻線の対地間及び層間について、絶縁性状及び弱点の有無を測定するもので、結果は図3に示すとおりである。層間及び対地間絶縁についても、ばらつきの範囲内で均一な絶縁性状を示していることが分かる。すなわち、絶縁抵抗が低いにもかかわらず、層間及び対地間の絶縁性状が均一であるということは、ダスト付着による表面リークが増え絶縁そのものとしては、まだ健全な状態にあるものと考えられる。したがって、対策としては洗浄、ワニス処理などによって、絶縁特性を回復させることができる。

3.3 絶縁破壊試験結果

電機子一括対地絶縁破壊試験とコイル単体対地絶縁破壊試験を実施した。

(1) 電機子一括の場合

2,500Vでライザ部にリークが発生し、目的を達するに至らなかった。

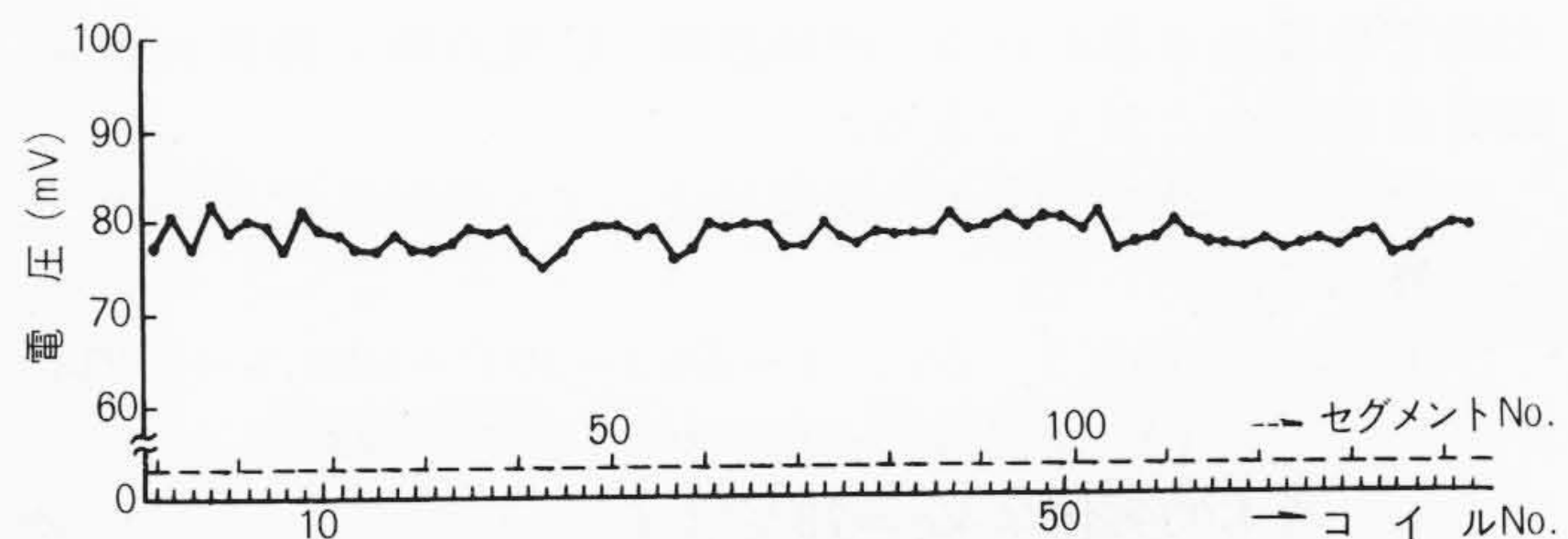
(2) コイル単体の場合

サンプルコイル40本について破壊試験を実施したが、うち

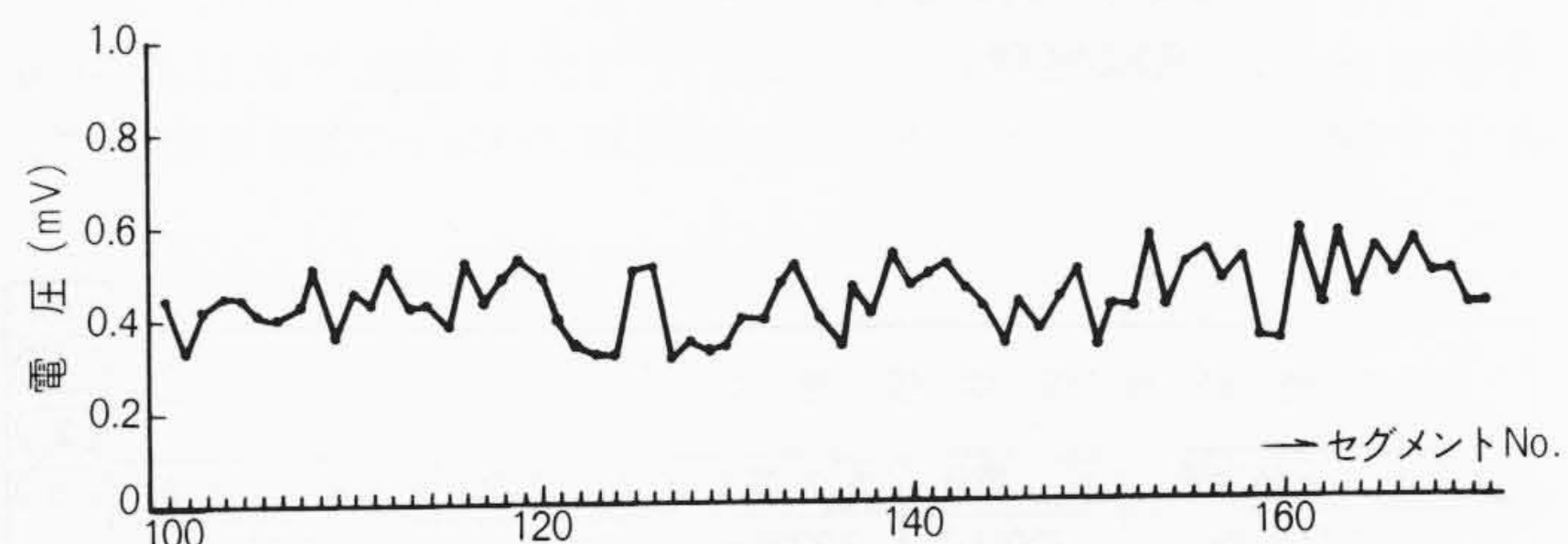
表5 絶縁抵抗及びPI（成極指数） 絶縁抵抗値0.12MΩ、PI 0.983と低い数値を示しており、環境劣化の促進を意味している。

時間	20s	40	60	90	-----	10min	PI(成極指数)
絶縁抵抗	0.120MΩ	0.120	0.119	0.118	-----	0.118	0.983

注：条件（9℃、20%RH、晴）



(a) 層間絶縁特性



(b) 対地絶縁特性

図3 HIT-803絶縁試験 層間、対地絶縁とも局部的弱点はなく、絶縁性状は均一である。測定周波数は5.0MHzである。

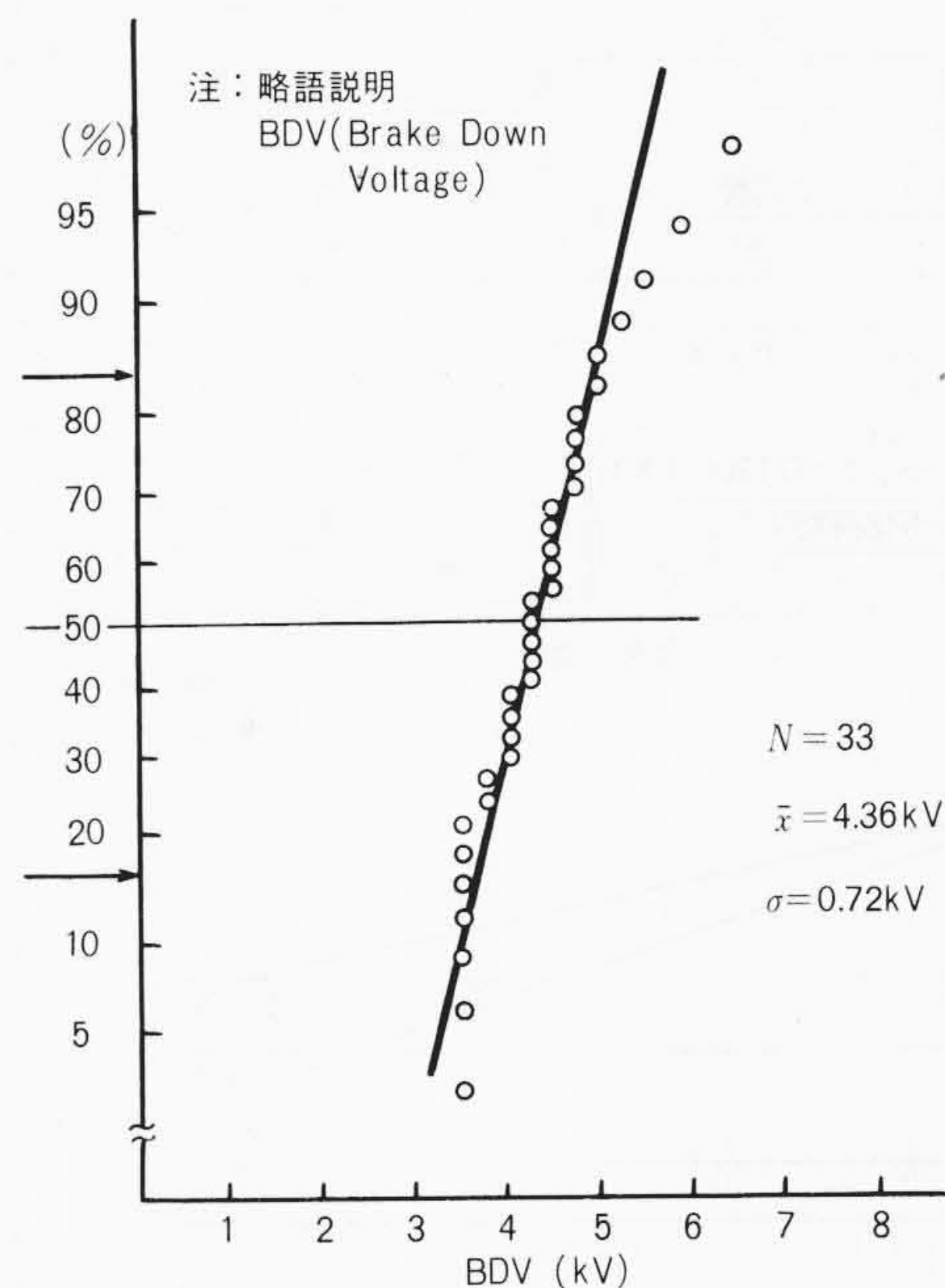


図4 コイル単体絶縁破壊電圧正規分布図（kV-%） 絶縁耐力はほぼ確率曲線ののり、正規分布を示す。

7本は絶縁にコイル揚げ時のきずがあるため除いた。残り33本の絶縁コイルについての絶縁破壊値は、最小3.5kV、最大6.5kV、平均4.36kVで、ばらつき0.72kVであった。図4にサンプルコイルの絶縁破壊電圧確率曲線を示す。曲線はほぼ正規分布に近く、絶縁劣化状態は均一であると考えられる。

コイル絶縁破壊箇所はコア内中心部から反整流子側に多くみられ、コイル断面でいえばコーナー部に集中する傾向であった。

なお、レヤー間破壊電圧は2.5～4.75kV（ $\bar{X}$ =3.16kV）で正常と考えられた。

3.4 運転履歴からの残存絶縁耐力推定結果

2章に述べた方法の実施例として、前述の2,500kW直流機について実証を行なった。運転履歴によって稼動状態及び劣化損耗率が直ちに計算される。絶縁診断及び目視点検による環境劣化 P は、診断結果に基づいて $P=3$ となった（表6参照）。本機はカーボン粉や海辺の設備のため、ダスト中に硫酸分や塩素イオン分を含むと思われる、絶縁抵抗値0.12MΩ、成極指数0.98と絶縁性状が低下しており、環境分による10 P （=30%）

の低下は妥当と思われる。絶縁診断，目視点検の結果は表6，図5に要約のとおりである。

すなわち，(2)式と図5の結果によって，振動劣化率 D_V 12%は除外して，

$$V_R(\%) = 100(1 - D_T)(1 - D_H) - 10P = 100(1 - 0.214)(1 - 0.067) - 10 \times 3 = 73 - 30 = 43(\%)$$

となる。基本的劣化は $V_R = 73\%$ (1.6%/年)の低下であり，更に環境により30%(1.7%/年)の低下を受けていることになる。巻線の洗浄，絶縁処理によって予防保全を実施すれば，環境劣化分30%を回復できるとして，対策後の $V_R = 73\%$ を考えて，

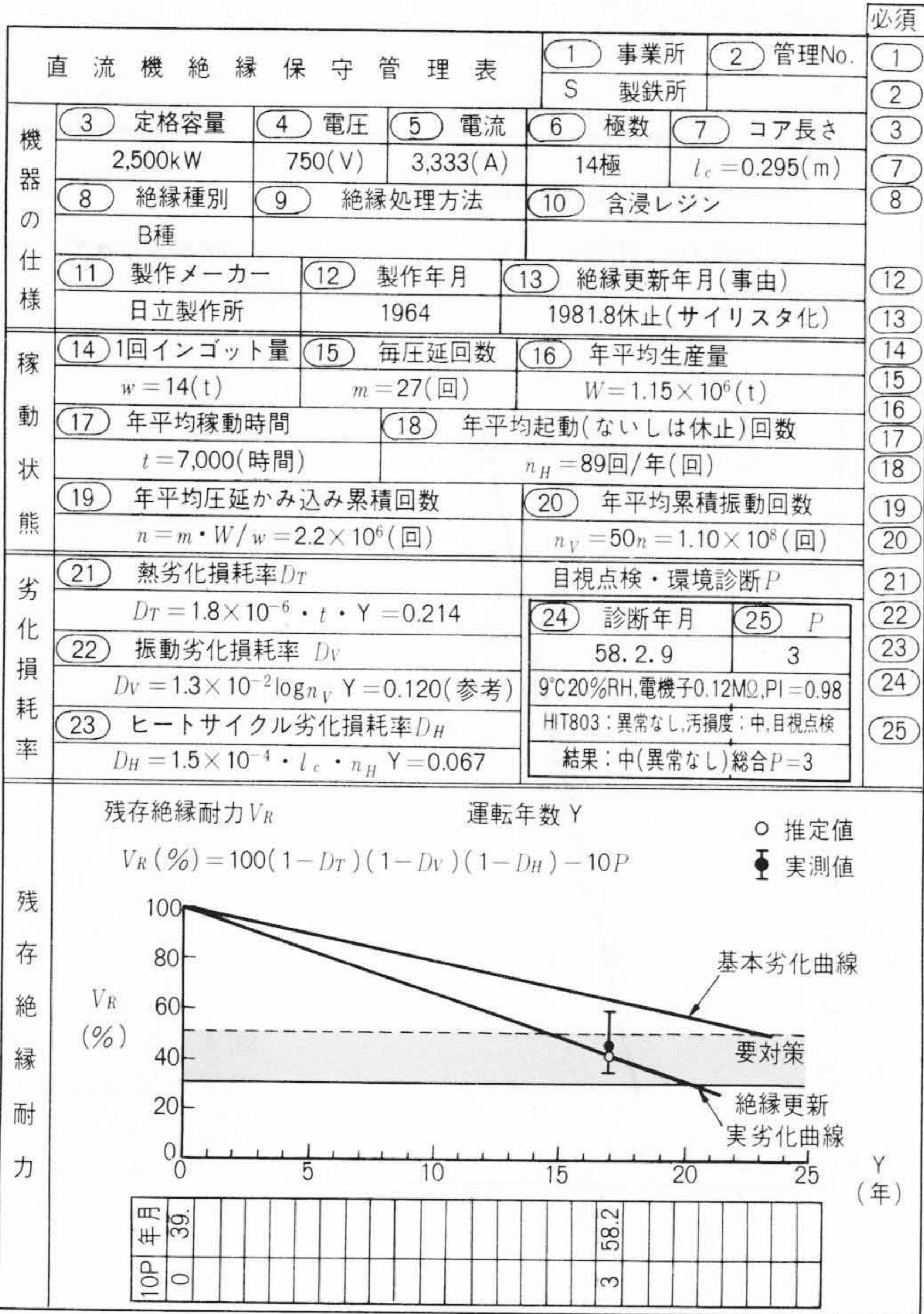


図5 直流機絶縁保守管理表 電動機の仕様，稼働状態から劣化損耗率が決められる。環境劣化度は絶縁診断の結果から決められ，残存絶縁耐力を推定する。

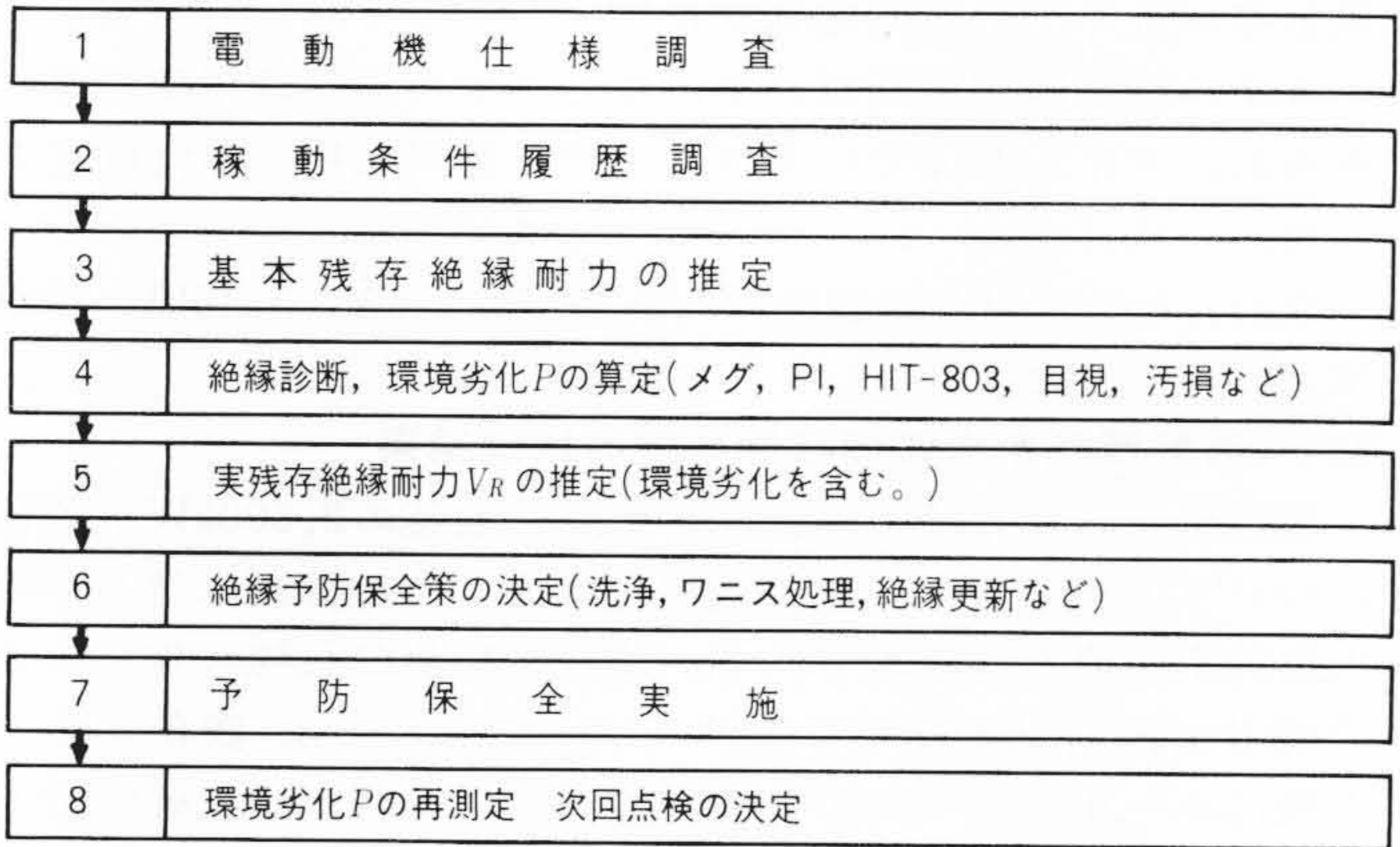


図6 絶縁診断手順表 個々の電動機はその仕様，運転履歴環境により適切な予防保全を実施する。

表6 環境劣化度 P の評価値 実情に即した評価値と考えられる。

種別	種類	結果	評価値
P_1	電機子絶縁抵抗	0.12MΩ	5
P_2	成極指数	0.983	5
P_3	HIT803診断	異常なし	1
P_4	環境汚損度	中	2
P_5	目視点検	中	2

注: $P = \frac{5 + 5 + 1 + 2 + 2}{5} = 3$

表7 絶縁耐力試験結果 劣化要因と使用年数から推定した残存絶縁耐力 V_R は，実測した結果とよく一致している。なお， V_R 100%は10kVとしてある。

No.	項目	V_R (kV)	備考
1	計算値 V_R	4.3kV(43%)	振動劣化損耗率は除く。
2	実測値 V_R (サンプリングコイル)	4.36kV(43.6%)	解体時損傷コイル7本を除く33本の平均値
3	実測値 V_R (電機子一括)	—	2.5kVでライザ部でクリープし測定不可のため，コイル解体しサンプリング。

次の予防保全実施まで約10年の寿命を延長できると考えられる。ただし環境劣化が大きいので，環境対策も併せて行なうことが重要である。

以上の結果により(9)式を用いて残存絶縁耐力 V_R を計算し，かつ絶縁破壊試験結果をまとめると表7のようになる。計算値4.3kVに対し，実測値4.36kVと非常に近い一致を示している。なお，本機は直流発電機であるために振動劣化損耗率を除外した。振動実測の結果，電動機ではGレベルの振動が出るのに対して，発電機では無視できる程度に低い10mGレベルであった。振動劣化損耗率12%を考慮すると V_R は3.4kVとなるが，電動機ではこの分だけ条件が厳しくなる。

また，今回のHIT803形診断装置による試験では，層間，対地絶縁とも局部的異常のないことが分かった。すなわち，電機子巻線は環境，熱，ヒートサイクルによって，全体的劣化が進展している状態にあることが分かった。局部的欠陥がある場合はその対策を実施して，劣化度の均一化を図る必要がある。

4 結 言

ミル用直流機の電機子巻線の絶縁寿命劣化度を定量的に推定する方法を開発することによって，適切な時期に直流機の診断と保全策を実施して寿命を延長し故障を未然に防止し，機械の稼働率と信頼性の向上を実現することができる。本方法はまだ実績は少ないが，これから保全期に入るミル用直流機の保全管理法として，有効な手段であると考えられる。手順をまとめると図6のようになり，運転履歴と現状診断を併せて対策を実施する手順となる。今後更に実績を積み重ねて，本保守管理法の推定精度を上げていく必要がある。エンドユーザーを含む関係方面の賛同と協力が得られれば幸いである。

最後に，本研究は新日本製鐵株式会社所有の2,500kW直流発電機を被試験機として，日立製作所と共同により実証試験を行なったもので，御指導，御協力をいただいた関係各位に対し厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 圧延機用電気品設備更新マニュアル(その1)，MEC-L，日立製作所版(S56.4)
- 2) 登古：大形電動機の保守，製鐵研究，305号，p.85~95(1981)