

高圧誘導電動機の予防保全技術

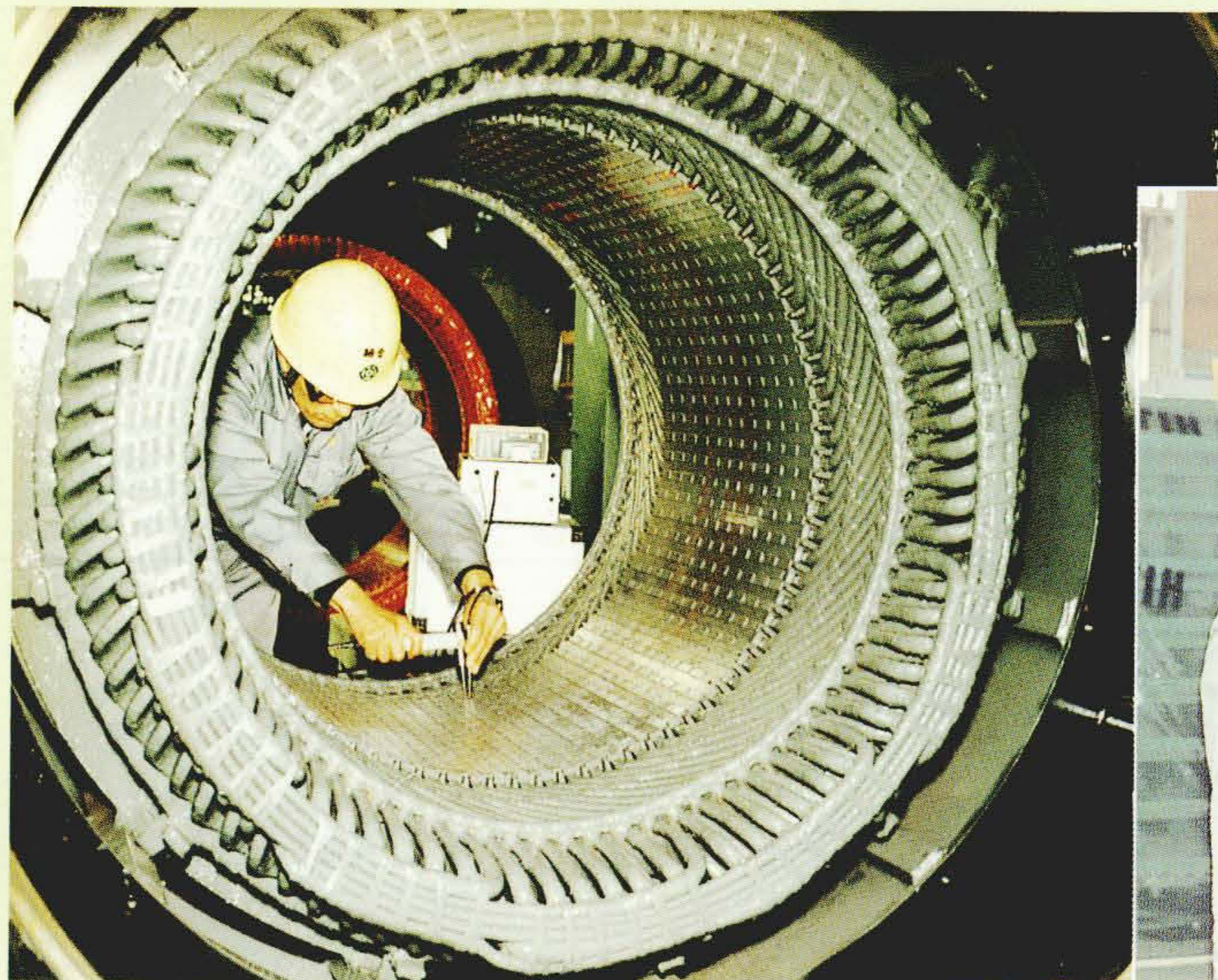
—劣化診断技術—

Preventive Maintenance Technology for High Voltage Induction Motors

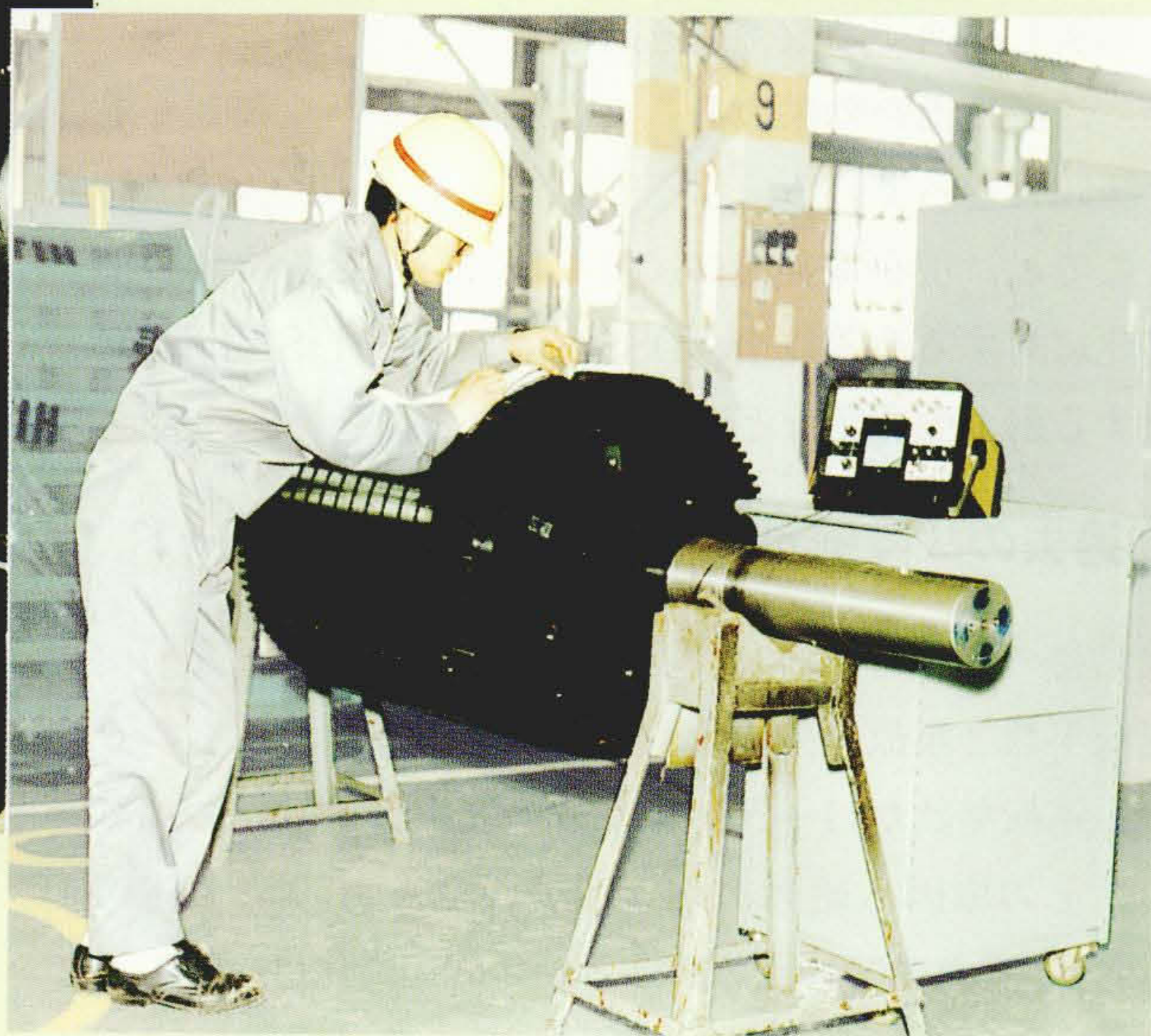
小井戸正之* Masayuki Koido

山竹重雄* Shigeo Yamatake

石川元之* Motoyuki Ishikawa



(a)



(b)

電動機の巻線を支持するウェッジ(a)と回転子の導体棒の緩み診断法(b) 電動機の巻線を支持するウェッジと回転子の導体棒の緩み診断法として打音診断を行っている。また、回転子の導体棒と短絡環の銀ろう付部の健全性を診断するのに、超音波探傷による方法が効果を上げている。

高圧誘導電動機(以下、電動機と略す。)は、ファン、ブロワ、ポンプなどの駆動用として発電所に数多く用いられているが、近年他の設備と同様に老朽化が進んでいる。

電動機の構造は、簡素で堅ろうなかご形がほとんどであるが、多くは直入れ始動である。そのため長い年月の間運転を行うと、始動電流によるジュール熱や電磁振動とその繰り返しによって電動機の劣化が進行する。特に巻線は有機材料を用いた絶縁のため、運転による各種複合ストレスを受けて耐電圧レベルが低下するので、診断によってそのレベルを評価し、対応することが重要である。日立製作所は、

ポリエステル絶縁機についてはすでに寿命評価法を確立し、固定子巻線の更新をほぼ完了している。さらに、エポキシ絶縁機についても、現在寿命期を迎えているので、予防保全の推進のため巻線の寿命評価技術を確立した。回転子については、導体棒の緩み、健全性の確認が重要である。

火力発電設備の運用の多様化に伴い、電動機の高頻度始動・停止が行われるので、それに見合う耐力強化が必要になる。滑り軸受については、定期点検時の検査が重要であり、軸受油の劣化を評価し、軸受の故障診断を実施する方法も研究している。

* 日立製作所 日立工場

1 はじめに

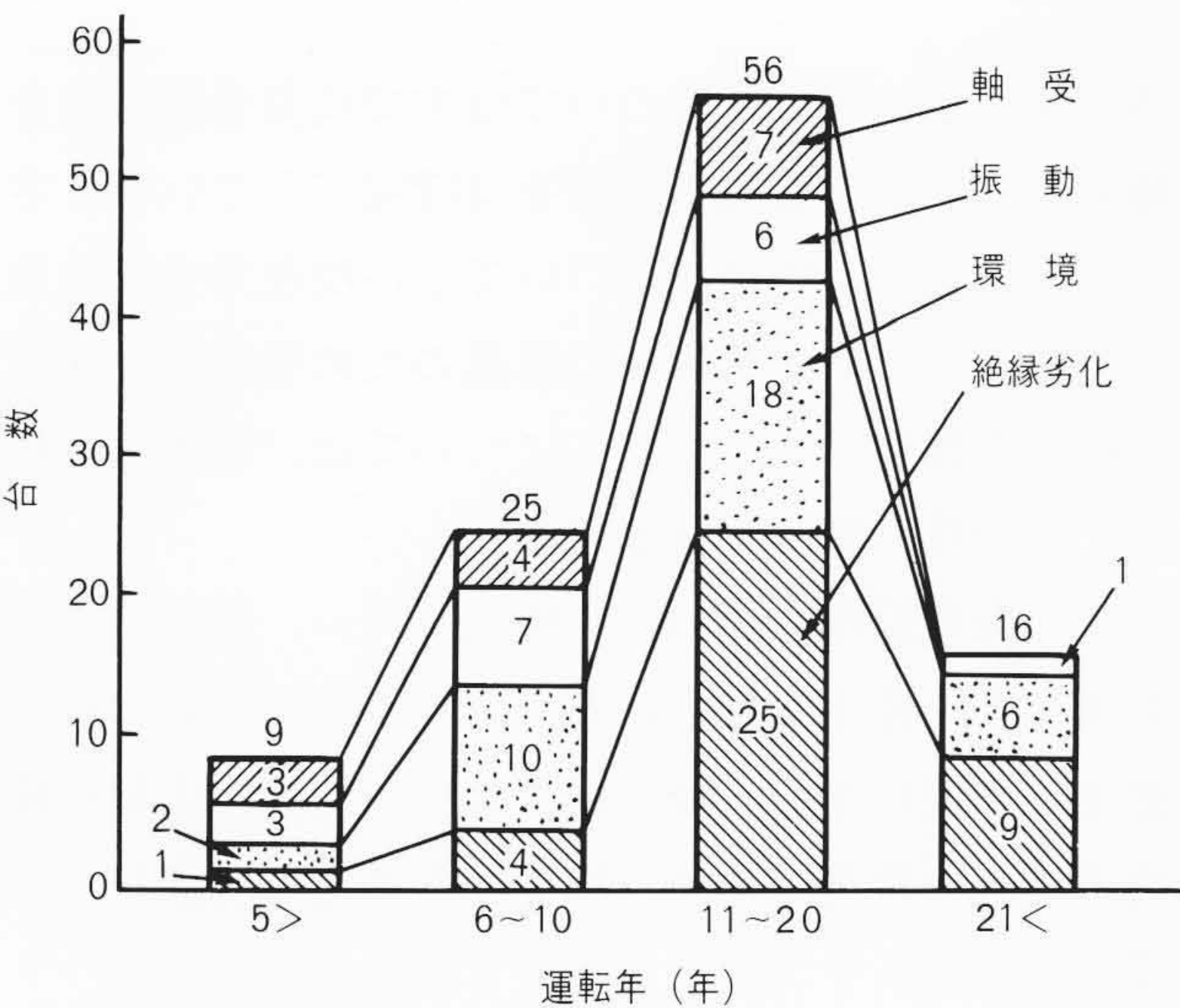
火力発電所では、多くの高圧誘導電動機(以下、電動機と略す。)がファン、ポンプ、圧縮機、ミルなどの駆動用として用いられている。発電プラントの経年化とともに電動機も経年劣化が進行し、絶縁の耐電圧レベルの低下、金属疲労の進行、摩耗の増大などにより、しだいに老朽化が進み寿命域に近づいている。したがって、設備の高信頼性を維持するためには、定期点検あるいは他の点検の機会に合理的な診断方法によって、電動機の劣化度合いを診断し、適切な改善策を講ずることが必要であり、また、診断技術を効果のあるよう運用していくことも重要な課題となっている。

ここでは、現在電動機に適用されている診断技術および劣化に対する改善技術、DSS(Daily Start-Stop)運転に対する耐力強化策などについて述べる。

2 過去の故障例からみた電動機の故障モード

電動機の過去の故障例を図1に示す¹⁾。同図は電動機の運転年数と事故発生台数および原因を示したものである。運転年数が11～20年で事故の発生台数はいちばん高い。その原因も絶縁劣化、環境によるものが全体の80%弱と、それまでの運転による経年的な劣化に起因するものが多いことを示している。続いて多い原因は回転子、軸受などとなっている。

このような経年劣化、摩耗などの発生が考えられる電



出典：電気学会〔絶縁劣化試験法，電気学会技術報告(Ⅱ部)第182号〕

図1 運転年数と事故原因の関係 運転年11～20年で事故発生が増大し、絶縁劣化、環境によるものが全体の約80%を占める。

表1 電動機の故障モード 経年劣化、摩耗などが発生する主要部位とその故障モードを示す。

区 分	主 要 部 位	故 障 モード
固 定 子	固定子コイル	絶縁劣化
		支持部の緩み
		絶縁層表面の割れ
	ウェッジ	ウェッジ緩み
	リード線	絶縁劣化
回 転 子	固定子鉄心	鉄心緩み，変形
		ダクト片緩み，変形
	回転子導体棒	導体棒緩み，摩耗
		ろう付け止端部き裂
	短絡環	サポートとのすきまの摩耗
軸 受	保持環	応力腐食割れ
	回転子鉄心	鉄心緩み，変形
		ダクト片緩み，変形
主 軸	滑り軸受	バビット摩耗，はく離
	軸絶縁	油切り摩耗
主 軸	カップリングはめあい部	絶縁劣化，摩耗
		摩耗，変形

動機の主要部位に対する故障モードを表1に示す。

3 固定子巻線の劣化診断と寿命予知

3.1 絶縁劣化のメカニズム

巻線絶縁の経年劣化のメカニズムについては、長い年月の間に受けたストレスによる絶縁層内のボイドの成長と、部分放電の発生による実効的な絶縁パスの短縮として説明できる。この概念を図2に示す。

巻線の絶縁層は、エポキシワニス真空加圧含浸することによって緻(ち)密に製作され、初期にはボイドはほとんど存在しない。これが電動機の長い年月の運転によって、各種のストレスを受けることにより、絶縁層間に多数の小さなボイドや局部的に大きなボイドが発生する。さらに劣化が進展して寿命期に近づくと、ボイドどうしがつながりを持つようになる。このようにして、絶縁層内にボイドが発生、拡大してゆく過程で高電圧を印加すると、ボイドは部分放電を発生して誘電体となるので、有効な絶縁厚みは短くなり、絶縁破壊電圧は低下する。また、この劣化の進行する過程で、絶縁層に電圧を加えると漏れ電流あるいは放電電荷量などの電氣的諸特性に変化が現れる。このことを利用して、劣化の程度を評価する方法が電氣的絶縁診断法である。

3.2 絶縁診断技術

絶縁診断法としては目視点検、電氣的診断、機械的診断および物理化学的診断が用いられている(表2、3参照)。

目視点検は、電動機の開放状態で特に巻線端部を精密

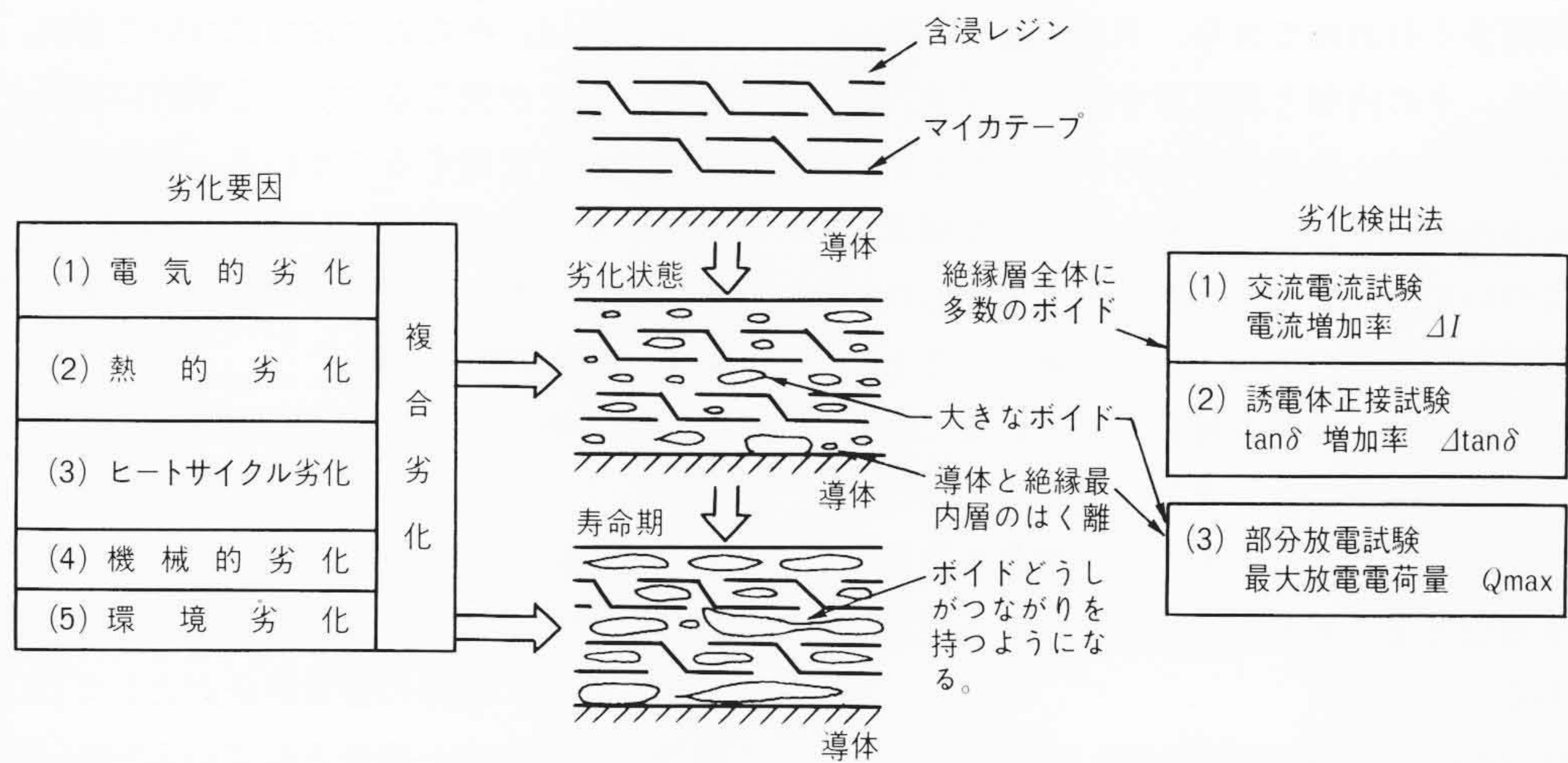


図 2 絶縁劣化のメカニズムと検出法
 絶縁層にさまざまなストレスが加わって劣化が進むと、電気的特性に変化が現れる。

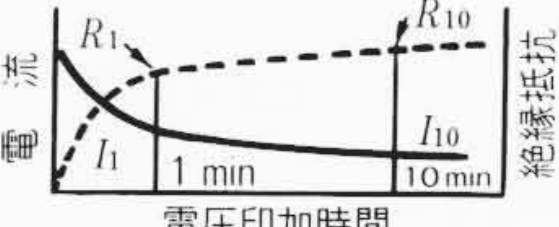
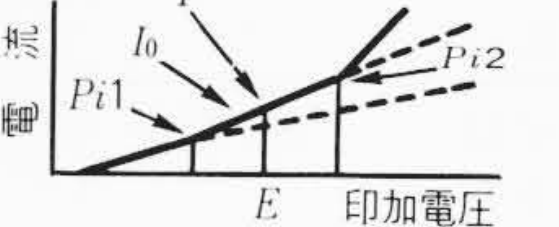
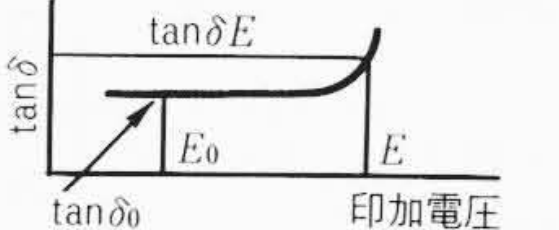
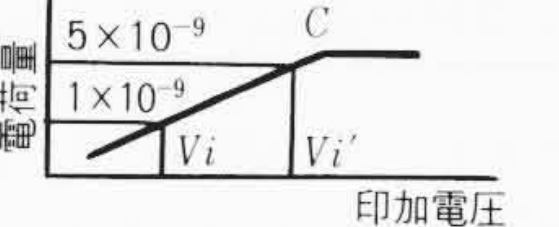
表 2 目視点検，機械的，物理化学的診断項目
 電気的診断のほかに目視，機械的，物理化学的な方法による診断も重要であり，下記項目を実施している。

診断方法	部品，部位	診 断 項 目
目 視 点 検	固定子巻線	ダスト，油分付着度合い
		絶縁損傷，摩耗
		仕上ワニスの変色，はく離
	スロット内・端部 スペーサ，巻線支え リング，結線部 縛りひも	緩み
	リード線	損傷・変形
機 械 的 診 断	鉄心	緩み，開き
物理化学的診断	ウェッジ	緩み(打音診断)
	絶縁層	熱劣化(赤外線吸光分析)

に目視によって点検することである。巻線の固定機構の緩み，表面のきず，微細なクラックの有無，さらには表面の付着物，スロット出口部の状況から不具合発生の予兆を把握することができる。このように，わずかな予兆を把握するには長年の経験と熟練が必要であるが，電気的な診断では見つからないことも発見できる場合があるので，電動機にとっては依然として重要な診断法の一つである。

電気的診断には，絶縁抵抗試験，耐電圧試験，直流電流試験，交流電流試験，誘電正接($\tan\delta$)試験，部分放電試験などがある。その他必要に応じて巻線端部の表面絶縁抵抗の測定などを行う。これらは，現在発電所の定期

表 3 電気的診断項目
 電気的非破壊特性として，下記の試験項目を実施している。

No.	試験項目	目 的	測定項目および定義	試験装置	備 考
1	絶縁抵抗試験	絶縁層の吸湿具合	絶縁抵抗 R_1 (1分値)	絶縁抵抗計 またはメガー	—
2	耐電圧試験	絶縁耐力の確認	—	耐電圧試験器	—
3	直流電流試験	絶縁層の吸湿具合	成極指数 $PI = \frac{I_1}{I_{10}} \left(= \frac{R_{10}}{R_1} \right)$ 	直流試験装置 または 絶縁抵抗計	—
4	交流電流試験	絶縁内部の劣化判定	第一次電流急増点 $Pi1$ 第二次電流急増点 $Pi2$ 電流急増率 $(\Delta I) = \frac{I - I_0}{I_0} \times 100 (\%)$ 	耐電圧試験器 交流電流計	E : 定格電圧(V)
5	誘電正接試験 ($\tan\delta$ 試験)	絶縁層の吸湿具合 絶縁内部の劣化判定	$\tan\delta_0$ $\Delta \tan\delta = \tan\delta E - \tan\delta_0$ 	耐電圧試験器 $\tan\delta$ メータ	E : 定格電圧(V)
6	部分放電試験 (コロナ試験)	絶縁内部の劣化判定	部分放電開始電圧 Vi 	コロナ試験器 耐電圧試験器	—

点検時を利用して数多く行われており、劣化診断の有効な手段となっている。その内容と測定法を表3に示す。

電動機が開放型のように、巻線端部の汚損が甚だしい場合は、いったん洗浄乾燥してから診断することが望ましい。診断結果については、合否の判定基準も定められているが、試験時の印加電圧の違いなども考慮し、さらに電氣的診断、機械的診断、目視点検結果を合わせて総合的な劣化評価をする必要がある。また、絶縁層の劣化とともに特性が変化するため、データの経年変化を管理(トレンド管理)することも、異常の兆候を把握する上では大切なことである。

機械的診断では、ウェッジの打音診断が行われている。ウェッジは、巻線(コイル)を鉄心溝の中に固定する機能を持っている。経年劣化によってなじみ、摩耗が発生し、巻線の溝内への固定機能が低下すると、巻線が鉄心溝の中で電磁力的作用によって振動し、放電劣化などが発生する原因となる。そのため、ウェッジの打音診断によって巻線の緩みを評価する。最近、インパルスハンマの利用などによって、より客観的に精度よく診断することができるようになってきている(図3参照)。

物理化学的診断は、絶縁層の一部を試料として採取し赤外線吸光分析などの手法によって熱劣化の有無を判定するものであり、巻線表面の変色など異常のあった場合に用いる。

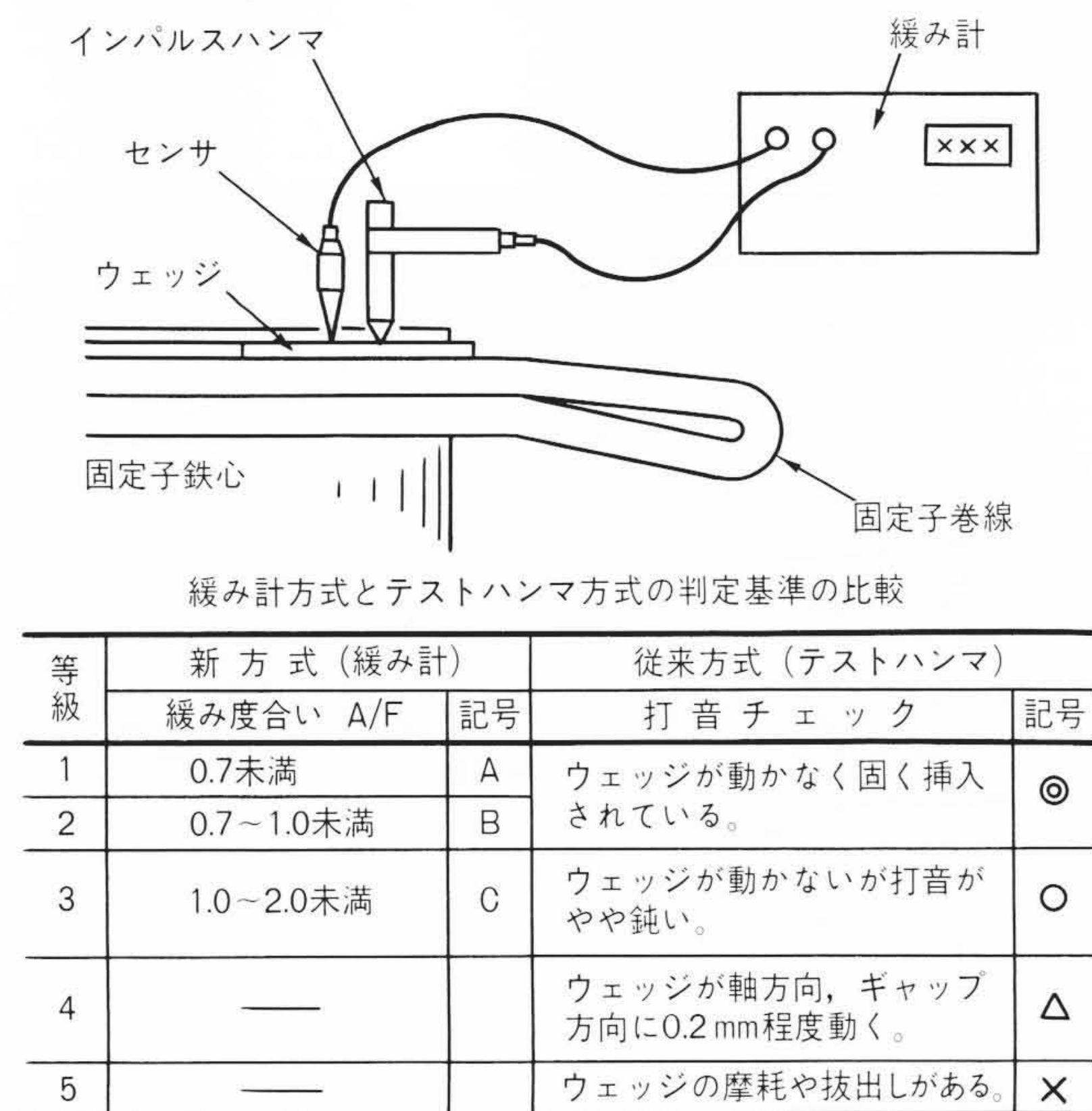


図3 ウェッジの打音診断 従来のテストハンマ方式に比べ、緩み計方式では緩みのレベルを詳細に診断できるようになった。

電動機は、そのおののについて形式、設置環境、運転方法などが異なるので、定期的に診断を実施し、データの傾向を管理することによって前記診断技術の真価を発揮させ、診断を意味あるものにすることができるので、継続的な診断の実施を推奨したいと考えている。

3.3 絶縁寿命の予知

絶縁診断の目的は、診断データから余寿命を推定し、適切なタイミングで対策が実施できるようにすることにある。絶縁の寿命は残存破壊電圧のレベルで決まるので、絶縁診断データからこの残存破壊電圧を推定する必要がある。一方、絶縁の寿命終止点としては、初期値の50%低下点が合理的と推奨されている^{5),6)}。日立製作所製6.6kV級エポキシ一体真空含浸機の経年機では、コイル更新した旧機の巻線の破壊電圧の測定値を解析した結果、部分放電試験によって得られた最大放電電荷量 Q_{max} と残存破壊電圧 V_R の関係に相関性が認められている。この関係を図4に示す。また、電動機稼動年数 Y と残存破壊電圧 V_R の関係を整理すると図5に示すようになる。同図ではいずれも縦軸の残存破壊電圧 V_R は新品の値($\bar{x}-3\sigma$)を100%として示している。

この評価からもわかるように、電動機が同じ年次に製作され、同じ稼動年数を経ても残存破壊電圧 V_R は異なり、経年とともにばらつきが大きくなる傾向にある。このことは、巻線の絶縁劣化が型式、仕様、運転条件、設置環境などによって異なっていることを示している。絶縁寿命では、95%信頼下限で、電動機稼動年数 Y で評価すると18年、最大放電電荷量 Q_{max} でみると12,000 pCが寿命点になるとの結論を得た。今後、稼動後18年を経た電動機はコイル更新の計画を、またその際の優先順位

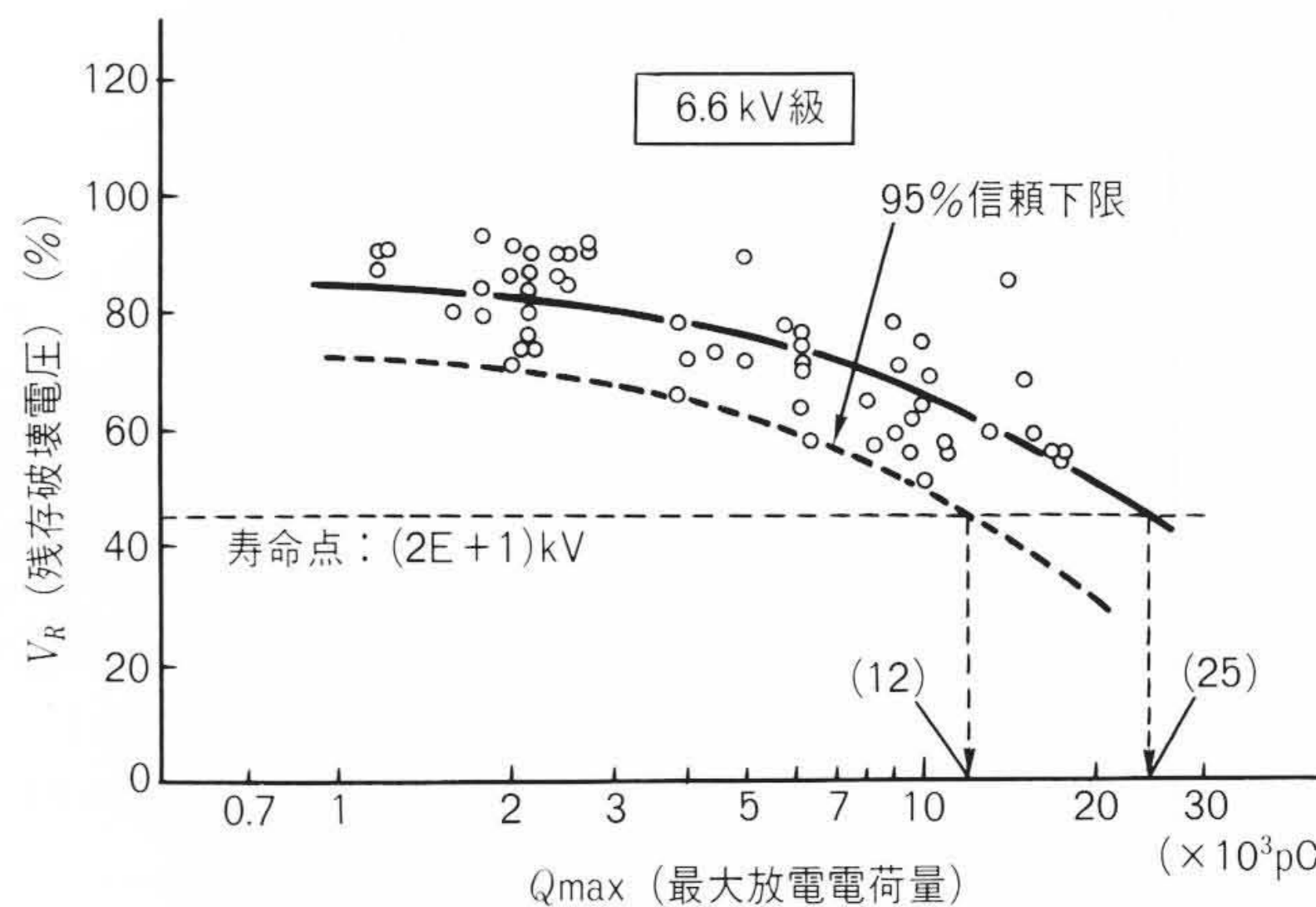


図4 エポキシ絶縁の Q_{max} - V_R 特性 最大放電電荷量 Q_{max} と残存破壊電圧 V_R の間には、相関関係がみられる。この関係を利用して絶縁寿命を推定することができる。

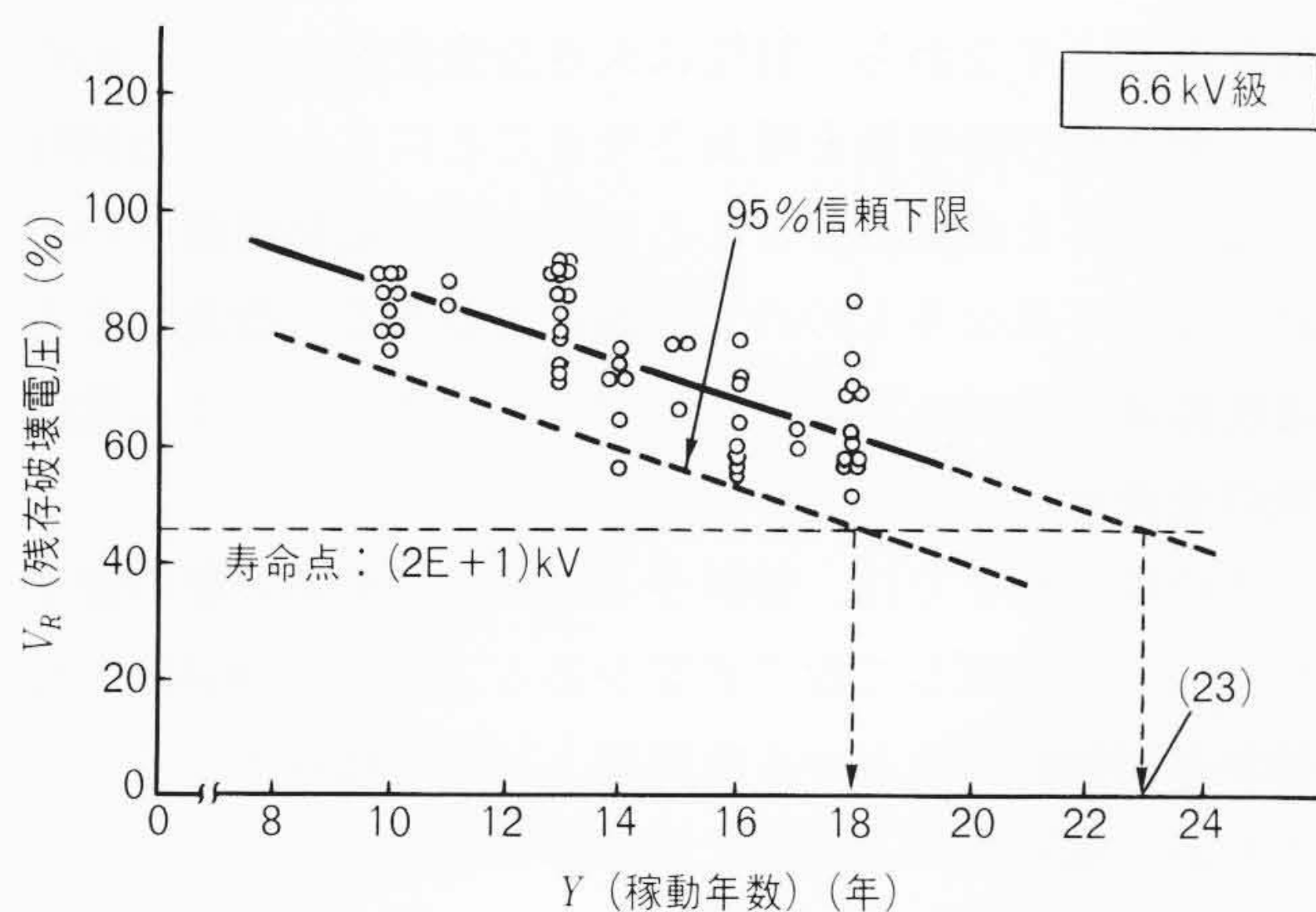


図5 エポキシ絶縁のY- V_R 特性 エポキシ絶縁の寿命を電動機の稼動年で整理すると、平均値で23年、95%信頼下限では18年となる。

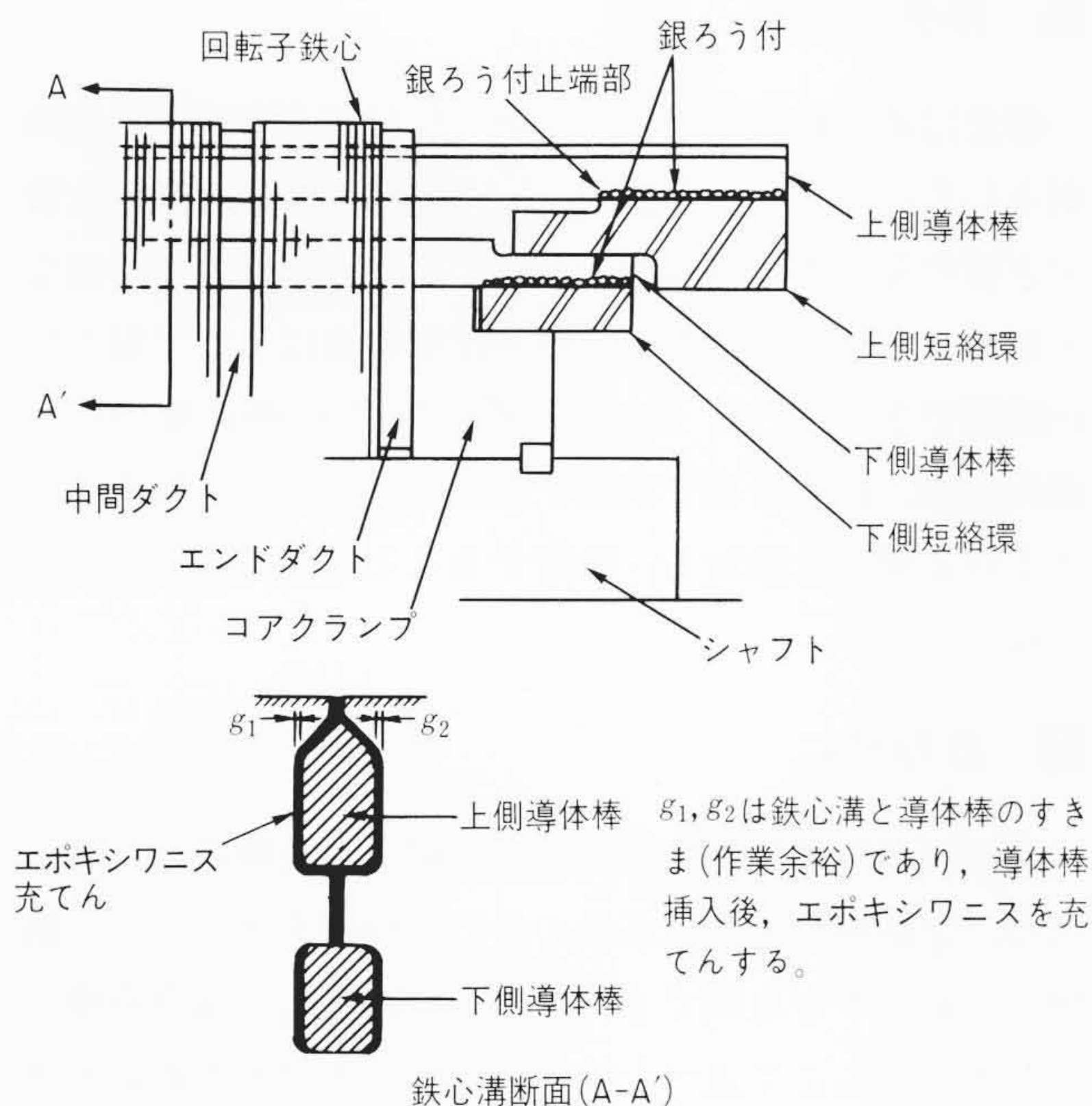


図6 回転子導体棒のエポキシワニス充てん処理 エポキシワニス充てん処理によって、鉄心溝内での電磁振動を防止する。

は、最大放電電荷量 Q_{max} で決めるよう推奨していきたいと考えている。

4 回転子の劣化診断と対策

回転子の導体棒には始動時に大きな電流が流れ、このジュール熱と始動・停止の繰り返しによってヒートサイクルを受けることから、導体棒の緩み、疲労き裂あるいは鉄心の変形、鉄心の支持片の緩みなどの事象に対する診断が必要になる。

4.1 導体棒の緩み診断

導体棒は鉄心溝の中に差し込まれ、その両端を短絡環

で銀ろう付された構造となっている。始動時および運転中に電源周波数の倍サイクルで振動する電磁力の作用を受けるため、鉄心溝と導体棒との間にわずかでもすきまがあると長い年月の運転中に導体棒が振動して摩耗し、力学的に固定部に相当する銀ろう付止端部で応力集中が発生し、場合によってはその部に金属疲労によるき裂が発生することがある。そのため、導体棒を鉄心溝に固定し、振動を抑止する目的で、エポキシワニス処理(図6参照)またはかしめ加工が行われる。両者とも導体棒がヒートサイクルを受け、高温で熱伸縮することを考えると恒久的ではないので、分解点検時に鉄心溝内固定の健全性を確認するため、導体棒の打音による診断が行われる。

従来は、経験の積んだ熟練技術者のハンマリングで診断してきたが、最近はインパルスハンマを用いて応答を定量化した客観的な診断手法が積極的に採用されている。また、銀ろう付部および特にその止端部などの健全性を確認するため、浸透探傷検査が行われている。この検査は、導体棒および短絡環の表面に塗布されたワニス塗膜をはがして実施する必要があるため、検査の作業時間がかかる欠点があったが、最近日立製作所は、この診断に超音波探傷試験を応用することにより、診断の精度向上と工程短縮に効果を上げている。

4.2 鉄心の健全性診断

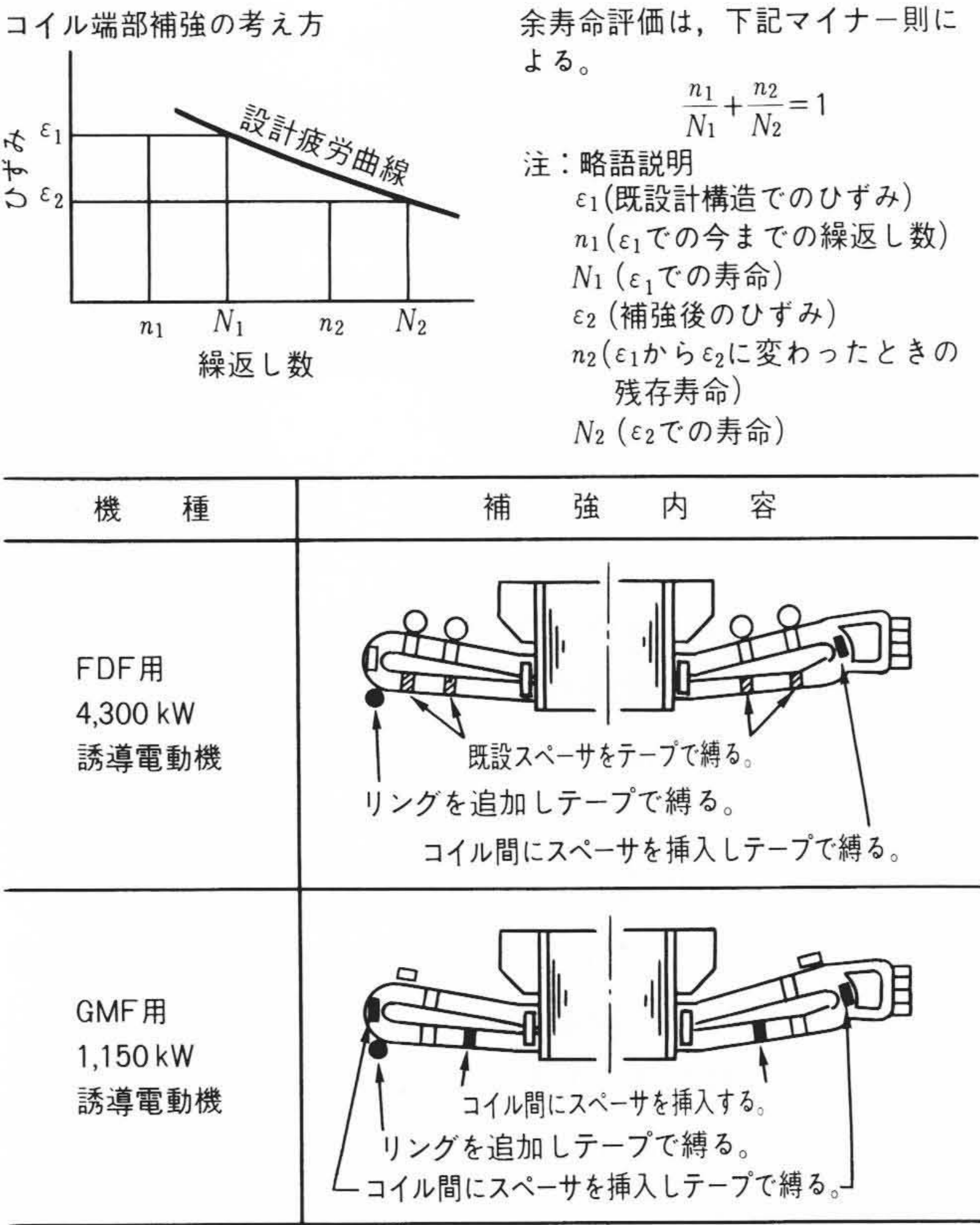
鉄心の健全性は、まず目視によってよく点検することである。そのポイントは変形、変色、さび発生、支持片の緩みなどである。また、長い年月の運転によって鉄心を構成する電磁鋼板表面の絶縁被膜が劣化すると、電氣的に局部短絡を生じ、過熱あるいは鉄損の増加などの不具合が発生する。

診断法としては、鉄心に導線を巻き付けて、誘導加熱によって局所的な劣化を温度分布で判別する方法が手軽なこともあって行われている。

5 電動機の高頻度始動・停止対策

5.1 固定子巻線の耐力強化

火力発電所では、ミドル運用をするのが当然となってきた。もともと連続運転を前提に設計された電動機を、発電所のミドル運用に応じて高頻度始動・停止する場合は、特に固定子巻線の耐力を強化しなければならない。この対策の主眼は、巻線端部の振動抑止構造をいっそう強化して振動に対する耐力強化を図ることである。その具体的な例を図7に示す。この場合、巻線に生じるひずみを計算し、以降の始動・停止の繰り返しを考えて



注：略語説明 FDF (Forced Draft Fan), GMF (Gas Mixing Fan)

図7 巻線の高頻度始動・停止対策 巻線端部に補強を追加し、電磁力に対する耐力向上を図る。

も、十分強度に余裕があるように巻線端部スペーサの追加あるいは巻線支持構造の改善を実施する。

5.2 回転子の耐力強化

始動・停止の頻度が高くなると、導体棒の熱伸縮の頻度が多くなるため、疲労き裂の発生あるいは鉄心の変形などが生じやすくなる。すでに述べた導体棒の鉄心溝内固定は、確実に効果のある状態で維持されなければならず、その健全性確保が重要である。

ファン、ブロワなど重慣性負荷駆動用の場合には、導体棒の熱容量の増加のため、必要に応じて改造を行う場

合がある。すなわち、特性に大きな変化を生じない範囲で、導体棒の熱容量を増加させることによって、始動時の温度上昇を低減させることができる。電動機個々の設計によって異なるものの、実績によるとこの改造による温度低減率は10～20%見込むことができ、そのぶん電動機の長寿命化を図ることができる。

その他回転子では、軸継手と軸とのはめあい部の健全性について評価しておく必要がある。電動機始動時には、軸から振動的で急しゅんな過渡トルクが軸継手へ流入するため、締め代によってこのトルクを伝達できるよう設計することが必要である。既設機については、検討して不十分な場合は十分な締め代を確保できるよう軸継手を改善する。

6 軸受の診断と対策

軸受は滑り軸受の場合についてだけ述べる。主な故障例としては、バビット摺(しゅう)動部の摩耗、微細な疲労き裂の発生あるいは台金とバビット接着面のはく離などがあり、寸法測定および浸透探傷検査によって健全性が確認できる。また、最近は軸受油の劣化(酸化度、粘度、混入異物、色度などで判定する。)によって軸受箱内に生じている異常を検知し、診断することを実用化する研究も行っている。

7 おわりに

最近の高圧電動機の診断技術と耐力向上策について述べた。定期検査または点検の折に、機械を近くでよく観察し、わずかな兆候でも見逃さない心構えで保守点検することは、ここで述べた技術の効果を上げるためにもきわめて重要なことである。また、これらの技術と知見が真に予防保全として役立つためには、今後もユーザーとメーカーとが一体となってこれら技術の向上に努めていくことが大切と考えている。

参考文献

1) 電気学会：絶縁劣化試験方法，電気学会技術報告(Ⅱ部)第182号(昭59-12)

2) 電気学会：特別高圧回転機・ケーブルの絶縁劣化診断技術，電気学会技術報告(Ⅱ部)第267号(昭63-3)

3) 小井戸，外：高圧誘導電動機の予防保全技術，日立評論，72，8，807～814(平2-8)

4) 門谷，外：大形回転電機絶縁の複合劣化と寿命予知，日立評論，66，6，441～445(昭59-6)

5) IEC pub. 2162(1974)

6) 電力中央研究所技術報告 No. W88046(1989)