U.D.C. 621.313.13.004.5:658.581

高圧誘導電動機の予防保全技術

Preventive Maintenance Technique for High Voltage Induction Motors

小井戸正之* Masayuki Koido
石川元之* Motoyuki Ishikawa
山竹重雄* Shigeo Yamatake
柏村吉清* Yoshikiyo Kashiwamura

発電プラントなどに数多く用いられている高圧誘導電動機の予防保全の観点から，過去に発生した不具合例の分析，最近の劣化診断技術，コイルの余寿命推定法，高頻度始動・停止対策，さらに日立製作所が最近開発した電動機予防保全システムの概要について述べる。高圧誘導電動機では，固定子コイル，回転子，軸受は経年劣化や摩耗などが発生する弱点部位と言える。固定子コイルについては，絶縁の寿命評価法が確立しており，寿命点では更新が必要となる。回転子については，導体棒の電磁振動防止策など診断結果によるメンテナンスが，また軸受では，摩耗やき裂の傾向管理が重要である。これらの診断データ，寿命推定，点検実施項目を総合管理する予防保全システムの開発により，計画的な保全の実施をもとに，既納設備のいっそうの信頼性向上を図る体制を確立した。

1 緒　言

電力発電プラントなどには，大小さまざまな高圧誘導電動機(以下，電動機と略す。)がそれぞれ重要な動力源として稼動しており，発電設備の不可欠な構成要素として，おのおのその任務を担っている。

最近，火力発電プラントでは，経年設備の増加に加え，既設設備のミドル運用への移行により，高圧電動機でもDSS(Daily Start and Stop)運転，WSS(Weekly Start and Stop)運転が必要になり，経年劣化も考慮した信頼性確保が非常に重要な課題となっている。

この問題に的確に対応するためには，既設機の診断による劣化レベルの正確な把握と余寿命の推定および耐力向上による長寿命化対策の実施が不可欠である。加えて，重要な点は，診断および対策の実施時期の適切さであり，機械が不具合を発生する前に対策を講じて事故を未然に防止する，予防保全，予測保全としての対応が重要になる。

本稿ではこれらの観点から，まず高圧電動機の過去での不具合発生事例について分析し，その結果明らかになった弱点部位に対する最近の劣化診断技術，余寿命推定法について述べ，さらにDSS運転移行に伴う既設機の高頻度始動・停止対策と耐力向上策について説明する。

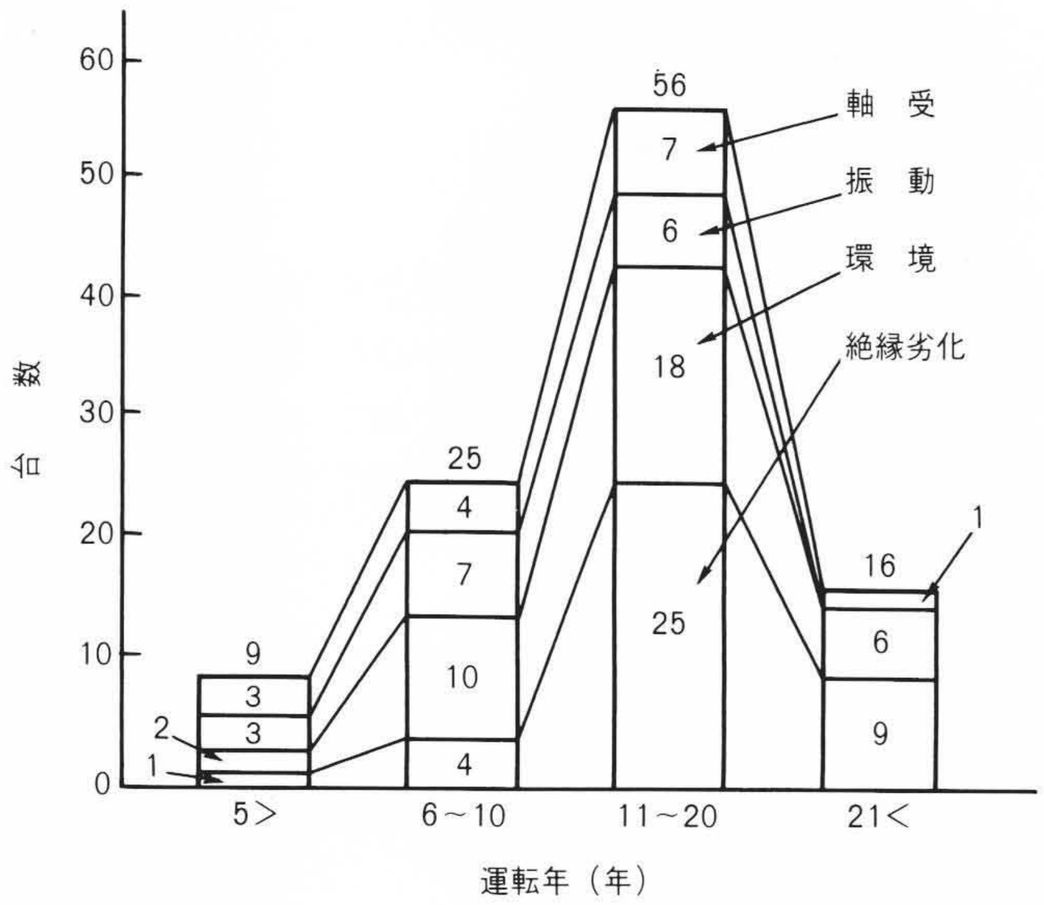
さらに，過去の修理来歴，定期検査，点検，診断情報の一括管理および次回定期検査時に実施すべき項目の自動出力，過去の不具合発生状況や不具合の水平展開を図るのに必要な情報の自動出力などを目的として，最近開発した電動機予防保全システムの概要についても述べる。

2 事故分析と診断技術の概要

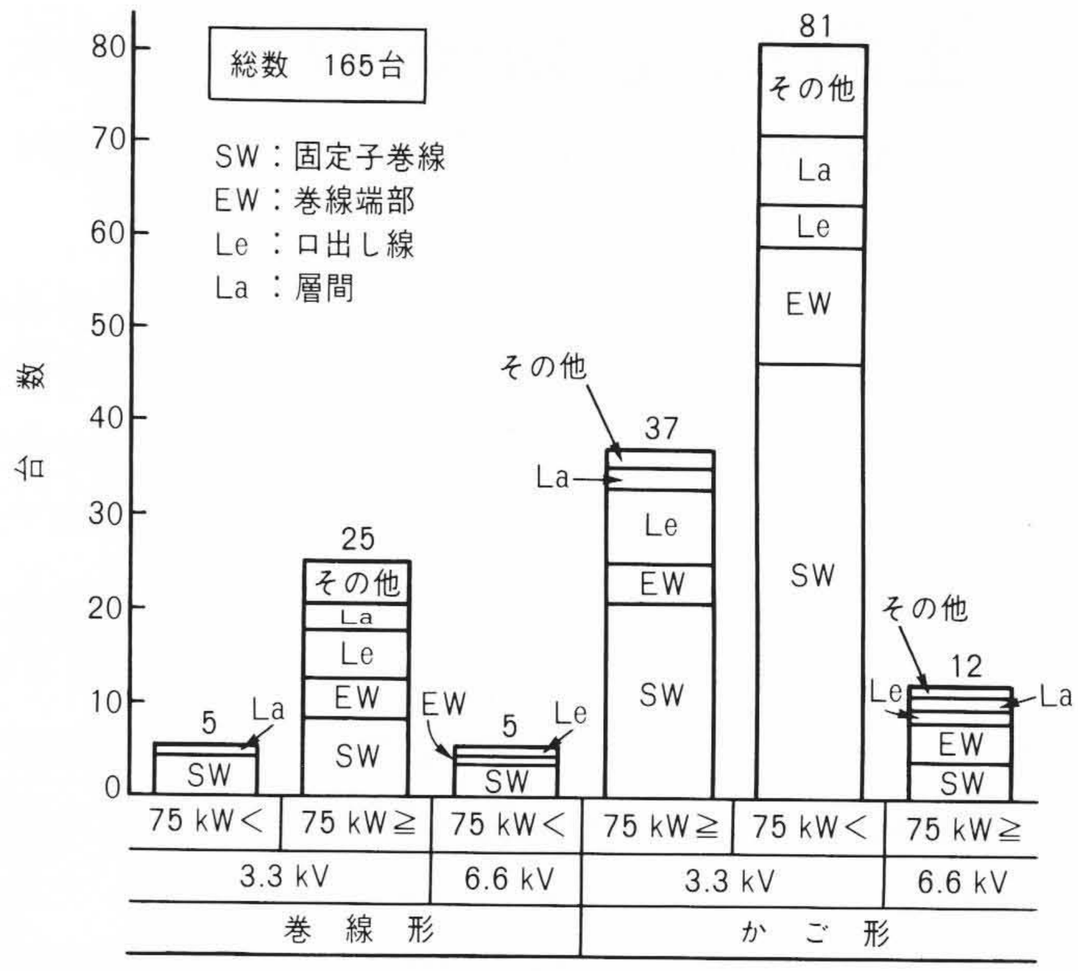
電動機に発生する事故を最近発行された電気学会技術報告[1]の資料をもとに概括すると，不具合の発生しやすい部位，多く発生する不具合の形態，原因，時期などが明確になり，対策のポイントを知ることができる。

図1(a)は，電動機の運転年数と事故発生の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。また，これらの事故がどのような場所(部位)に生じているかを分析した結果を同図(b)に示す。巻線形よりもかご形のほうが事故発生台数は多いが，これはかご形は直入れ始動が多く，巻線形に比べて始動時に受けるストレスが大きいためと考えられる。しかも，その事故の発生部位では70%がコイルに集中している。かご形の場合，始動電流，電磁振動などのコイルに与える影響がいかに大きいかを示していると言える。また，発生する事故の内容をみると，地絡，焼損が大半を占め，絶縁破壊によるものであることがわかる。事故の発生時期については，同図(c)に示すように定常運転時や始動時が多く，全体の25%が始動時に生じていることは注目される。また同図(d)には，このような事故発生時に特記された事象が示されているが，水滴，湿度，

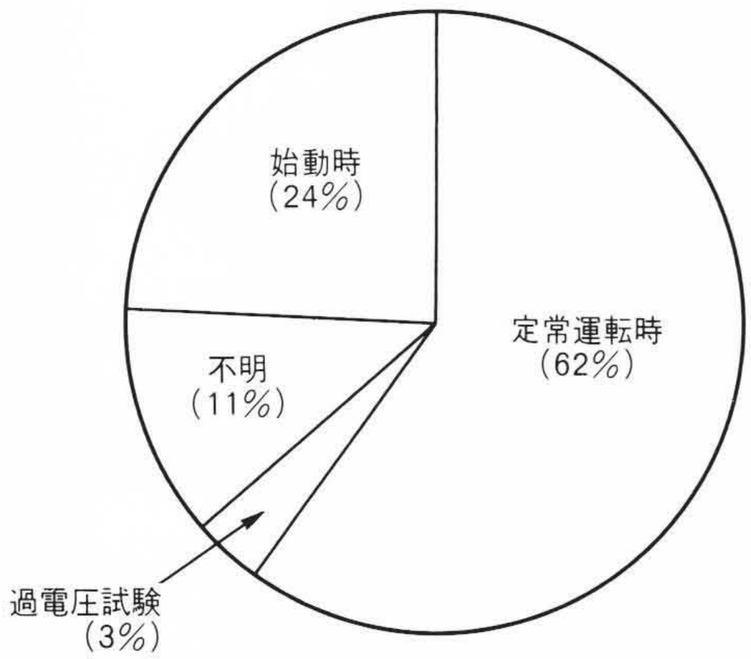
* 日立製作所 日立工場



(a) 運転年数と事故原因の関係



(b) 事故発生部位別分類



(c) 事故発生時の状態

要因	事故発生時	
	運転中	始動時
水滴	21	2
湿度	11	4
汚染	5	1
腐食性ガス	3	4
過電圧	3	0
不注意衝撃	1	1
長期間停止	—	4
計	44	16

(d) 事故発生時に特記された経歴

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(昭59-12)〕

図1 電動機の事故分析 運転年11～20年で事故発生が増大し，かご形ではコイルの事故が多く，吸湿，汚染などが原因している。

汚染など絶縁にとって問題となる要因が多く，これが劣化の進展を早め，不具合発生の直接的な原因となっている場合も多いと考えられる。

以上をまとめると，電動機では運転後11～20年を経て経年化の進展とともに事故が増加する傾向にあり，その発生部位はコイルに多く，続いて回転子，軸受などとなっている。特にコイルに関しては，汚染や吸湿などに注意しなければならないと言える。

このような経年劣化，摩耗などの発生が考えられる電動機の主要部位に対する日常あるいは定期検査時の保守管理項目，劣化要因，診断方法さらに予防保全対策を**表1**に示す。

現在，これらの診断技術は，定期検査，点検の際に実際に現場で採用されているが，これらのうち特に重要なコイル，回転子の診断技術について次に述べる。

3 固定子コイルの絶縁診断，余寿命推定技術

固定子コイルは，絶縁に有機材料を用いているため，運転中に受ける熱的，電気的，機械的，環境的な諸条件によって複合的なストレスを受け，絶縁劣化が進展し，初期に持っていた耐圧値のレベルがしだいに低下し，ついには運転に必要な限界まで近づくことになるので，その途中で絶縁診断を実施し，余寿命を管理して適切な時期でのコイル更新を計画する必要がある。劣化を生じさせる各種ストレスとその劣化要因およびそれによって生じる劣化現象に関しては，変化しやすい絶縁特性があり，これを見極める必要がある。

絶縁診断とは，この劣化現象と絶縁特性変化の相関を利用して，劣化による残存破壊電圧を推定評価する方法である。

3.1 コイルの絶縁劣化診断

コイルの非破壊特性試験として，絶縁抵抗試験，耐電圧試

験，直流試験，交流電流試験，誘電正接試験(tan δ試験)，部分放電試験(コロナ試験)を実施している。これら試験の目的と測定方法，試験装置をまとめて**表2**に示す。実機での診断としては，まずコイル端部の外観目視による精密点検を実施する。電動機に関しては，コイル端部の精密な目視点検はきわめて重要で，できれば絶縁に関する専門技術者による点検が望ましい。診断要領を**図2**に示す。

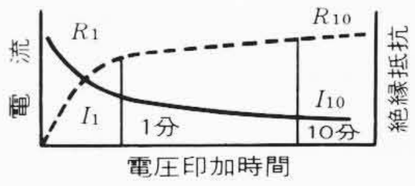
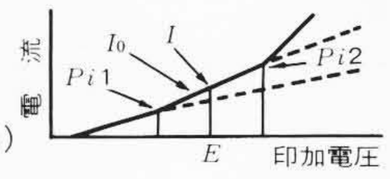
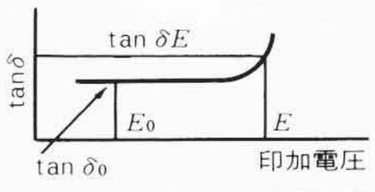
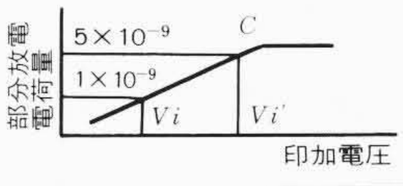
非破壊特性試験に入る前に，コイルの汚損度を点検し汚損がひどい場合は洗浄する必要がある。その後，直流試験その他の電気的非破壊特性試験を実施するが，このうち交流電流試験と部分放電試験特性は，主絶縁層の劣化度を示す指標と考えられている。いずれにしても，電動機の絶縁劣化診断の評価は目視点検結果と電気的非破壊特性を合わせて総合判定することが望ましく，その一方の評価が欠けても十分な判定とはなり得ないことに注意する必要がある。

表1　電動機の主要部位の診断技術　　高圧電動機の主要な部位の劣化要因，診断法および予防保全の具体的方法を示す。

区　分	主要部品，部位	保守管理項目	診断方法	劣化要因	予防保全方法
固定子	固定子コイル	絶縁劣化	ID，VI	運転時間，始動頻度，温度累積，振動	余寿命評価，コイル更新
		支持部の緩み	HT，VI		スペーサ，リング追設し支持強化
		絶縁層表面状況	ID，VI	汚損，湿潤	洗浄，ワニス処理
	ウェッジ	ウェッジ緩み	HT，VI	温度累積，振動	ワニス固着，ウェッジ更新
	リード線	絶縁劣化	DT，VI	温度累積，汚損(油分)	リード線更新
	固定子鉄心	鉄心緩み，変形	DT，VI	始動頻度，温度累積，振動	ワニス固着
		ダクト片緩み，変形	DT，HT，VI		スペーサ追設し固定強化
回転子	回転子導体棒	導体棒緩み	HT，VI	始動頻度，温度累積	ワニス充てん固着
		ろう付け止端部き裂	PT，UT		ろう付け補修，回転子導体棒更新
	短絡環	サポートとのすきま	DT	始動頻度	サポート更新
	保持環	応力腐食割れ	PT，UT	湿　気	き裂削除，保持環更新
	回転子鉄心	鉄心緩み，変形	DT，VI	始動頻度，温度累積	ワニス充てん固着
		ダクト片緩み，変形	DT，HT，VI		溶接補強し固定強化
軸　受	滑り軸受	バビット摩耗，はく離	DT，PT	運転時間，始動頻度，振動	補修，メタル更新，バビット詰め替え
		油切り摩耗	DT		油切り歯入れ替え，油切り更新
	軸絶縁	絶縁劣化，摩耗	HT，VI	運転時間，振動	補修，更新
主　軸	カップリングはめあい部	摩耗，変形	DT，VI	トルク脈動，振動	主軸補修，カップリング更新

注：略語説明　UT(超音波探傷検査)，ID(絶縁診断)，PT(染色浸透検査)，DT(寸法検査)，VI(目視点検)，HT(打音検査)

表2　電動機の絶縁診断項目　　電気的非破壊特性試験として，この診断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　$R1$(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 (tanδ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 tanδ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	—

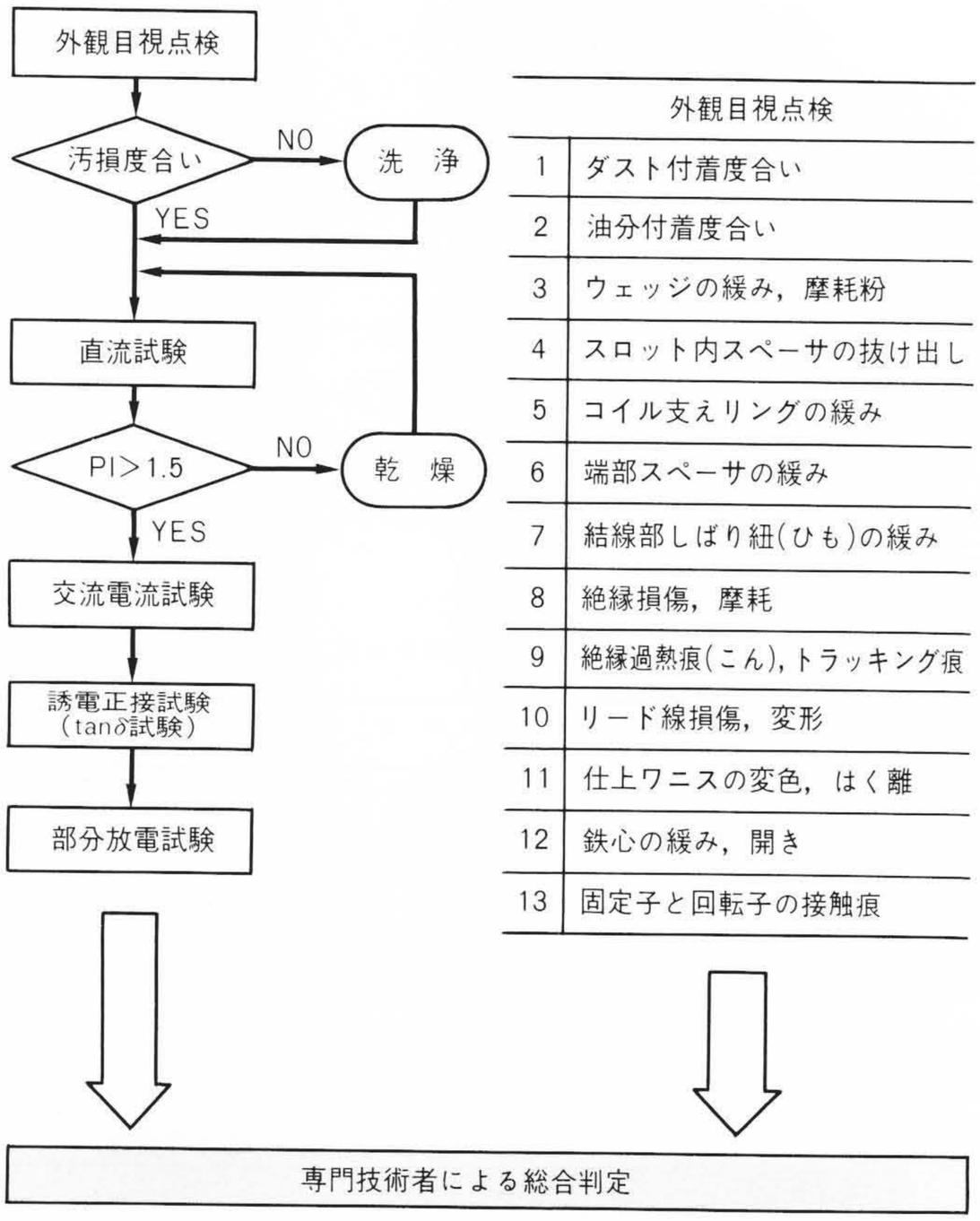
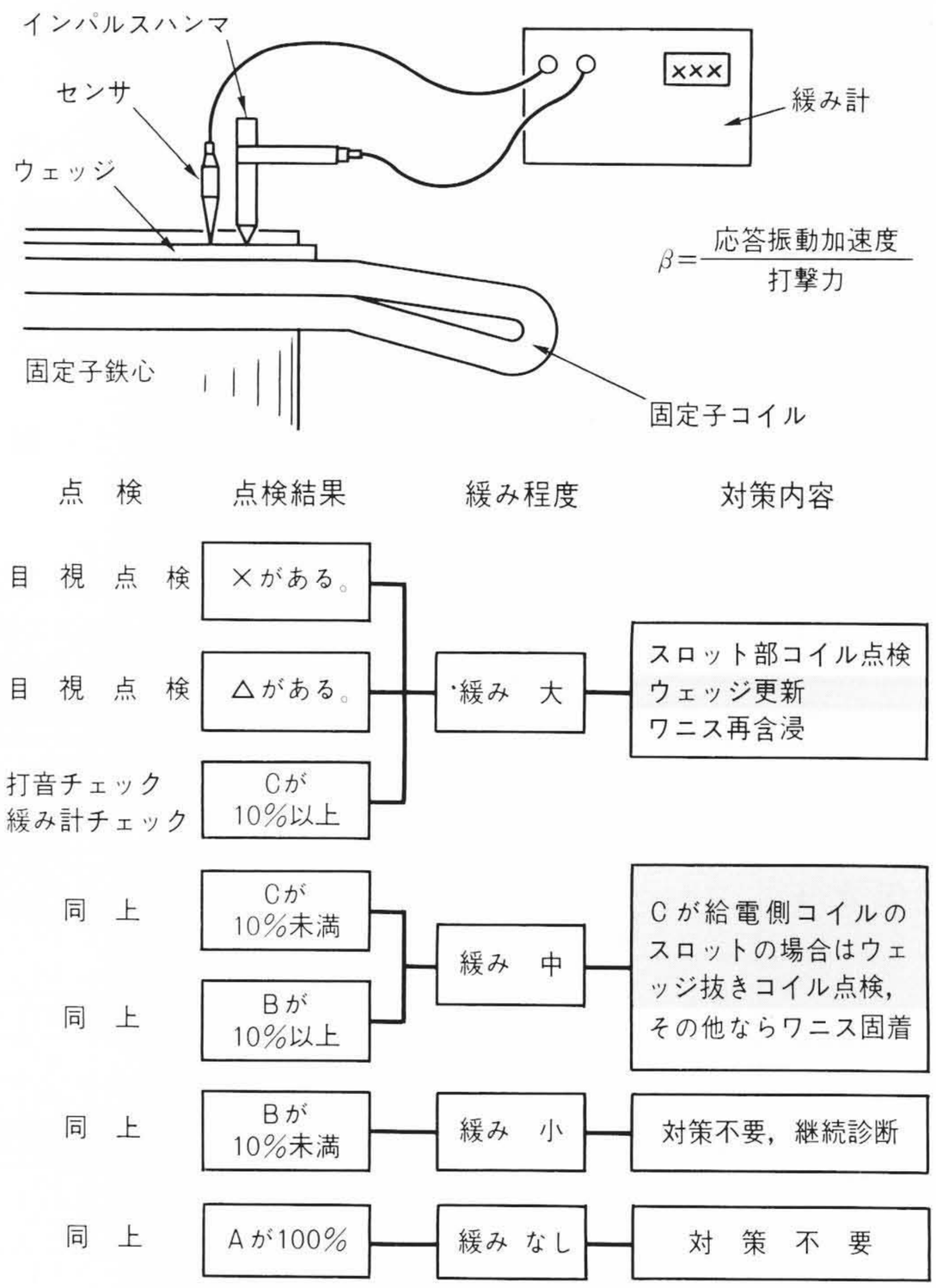


図2　絶縁劣化診断の要領　目視点検と電気的非破壊特性試験結果の総合判定で評価する。



注：A (β=0.7未満)，B (β=0.7～1.0)，C (β=1.0～2.0)
×：手で簡単に動く。
△：軸方向またはギャップ方向に0.2 mm程度動く。

図3　ウェッジの診断と緩み発生品の対策　ウェッジの緩みの程度に応じて対策を決めている。

3.2 ウェッジの緩み診断

スロット内のコイルを固定するウェッジは，その経年的ななじみ，熱収縮によって緩みが発生する。この状態で運転を継続すると，スロット内でコイルが電磁振動をして絶縁層やウェッジの摩耗が生じ，絶縁破壊に進展することがある。このため，電動機の開放点検時に従来ウェッジの打音診断を実施してきたが，さらにいっそうの精度向上と測定データの定量化のため，インパルスハンマによる緩み診断を推進している。これは，インパルスハンマの打撃による応答振動量をセンサによって拾い，応答振動加速度を打撃力によって除した値を単位当たりの緩み量として評価するもので，従来の打音による診断に比べて熟練が不要で個人差がなくなり，客観的，定量的評価が可能である。この診断によってウェッジの緩みが生じていると判断された場合は，その程度に応じて**図3**に示す対策を実施する必要がある。

3.3 固定子コイルの寿命推定

コイルの余寿命は，残存破壊電圧の推定結果から得られる。この方法として，電動機の稼動年数から従来実績をベースに残存破壊電圧を推定する方法，絶縁診断結果から得られた主絶縁の劣化を示す指標から推定する方法(Dマップ法)の二つを用いている。また，DSS運転など始動・停止頻度が高い場合は，これにコイル端の疲労寿命評価を加えて，総合的に判断することになる。特にコイル端については，今後高頻度始動・停止運転の増加により，この部位の負担が増大し，弱点部として顕在化すると予想されるので，この部位については，劣化要因ごとの寿命残存率を運転条件を考慮して評価し，複合劣化の考えを入れて寿命を推定している。

ポリエステル絶縁コイルでの稼動年数と残存破壊電圧(3相一括)の関係から寿命評価した結果を**図4**に示す。稼動年の経過とともに，残存破壊電圧が確実に低下することは明らかであるが，さらにその特徴を把握するためワイブル解析によって統計的な処理を加えた結果，稼動後17年を過ぎるとほかの電動機に比較して急速劣化する機種が現れることがわかった。このような電動機を見逃すことで事故が発生することを考えれば，この点を管理するのが合理的であるとの考えから，同図に示すようなコイル更新管理限界を定めた。電動機の負荷によってこの管理限界への到達年数は異なるが，6.6 kV級では15～20年がコイル更新の目安であると言える。従来，ほとんどの電動機で過去の運転時間，始動・停止回数の正確なデータが不明であることを考えれば，このようなマクロ的な評

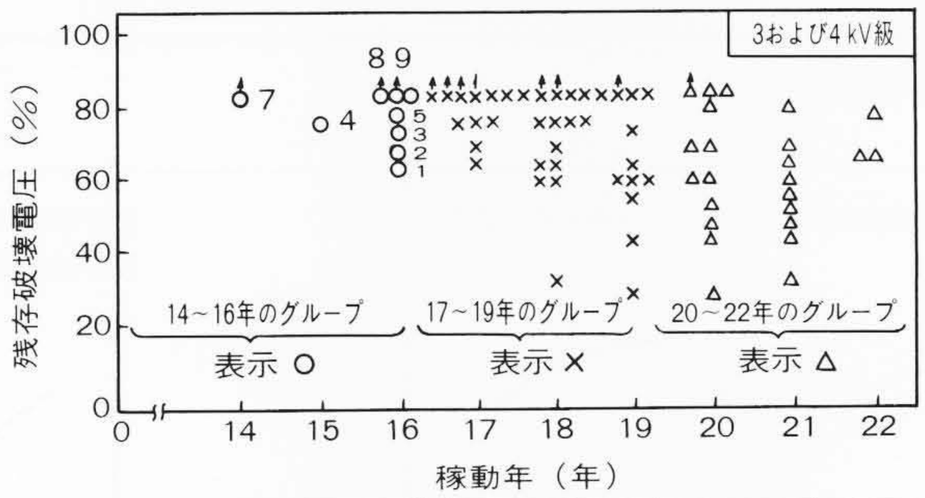
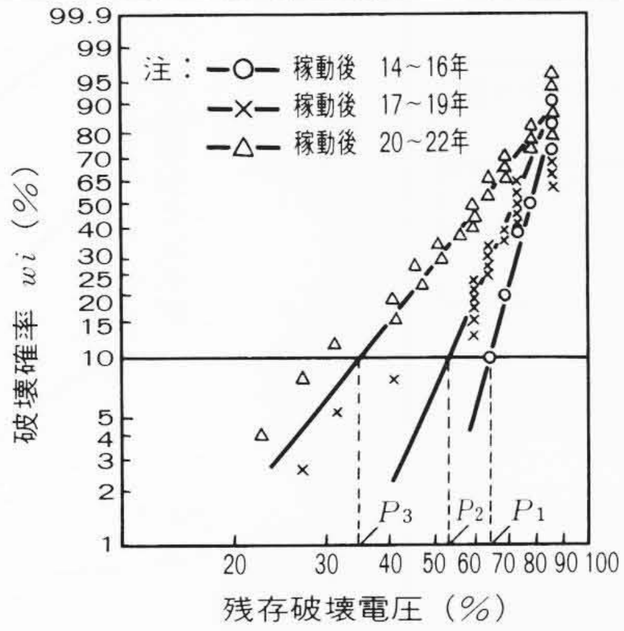
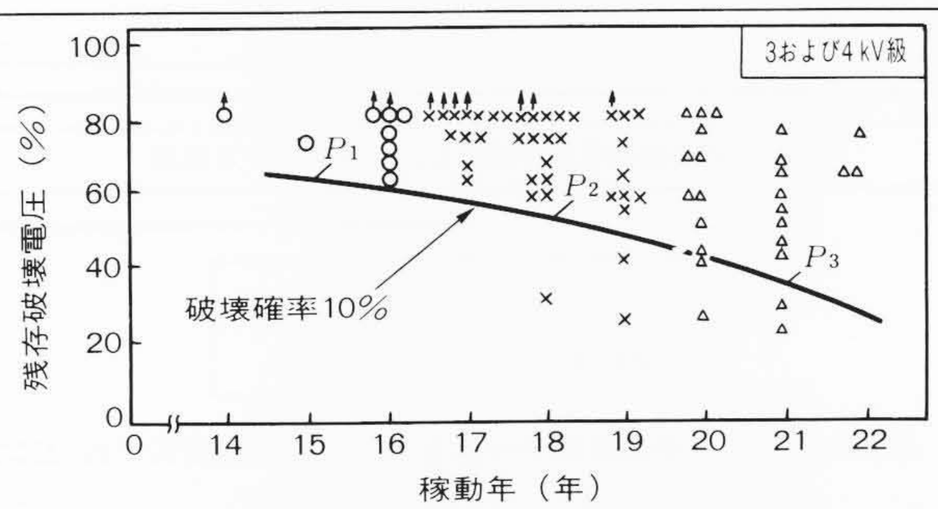
ステップ		残存破壊電圧と稼動年数の解析	説明
1	ファン，励磁機用電動機のコイル更新実績と残存破壊電圧		既納電動機約200台について残存破壊電圧を測定し，稼動年数ごとにプロットした。
2	稼動年数3年間ごとでみた破壊確率	 破壊確率 $wi(E)=\frac{1}{n+1}$ ただし，データ数を n，アース間破壊電圧を Ei とし Ei の小さい順から1番目とする。	上記を稼動経過年3年ごとのグループに分け，ワイブル分布を用いて解析した。直線分布から外れ出す機種が現れ始めるのは，破壊確率10%のライン上であると判断される。
3	稼動年でみた破壊確率10%の分布		上記で破壊確率10%線上での破壊電圧を P_1，P_2，P_3 として結んで，コイル更新管理限界線とした。
4	コイル更新管理限界到達稼動年数	管理限界到達稼動年数 機種／用途 3および4 kV級電動機　6.6 kV級電動機 ファン，励磁機用　18.5年　15.5年 ボイラ給水ポンプ用　20年　17年 ポンプ用　22年　20年	以上の解析結果を基に，推定残存破壊電圧が初期値の50%に低下する稼動年数を求めた。

図4　ポリエステル絶縁機のコイル寿命評価　　多くの破壊電圧の実績値から，統計処理によってコイル更新管理限界を設定している。

価はそれなりに重要であり，ポリエステル絶縁機は，この基準でほぼ全機のコイル更新を完了している。

エポキシ絶縁機は，これから寿命期を迎える段階にあるが，DSS運転への移行など今後の運用の変化も考慮し，前記方法に加え，すでに述べたDマップ法および複合劣化評価法を併用して，寿命推定の精度向上を図り，タイムリーなコイル更新の時期を提示していくことで進めている。具体的なDマップによる残存破壊電圧の推定例を**図5**に示す。今後，さらにデータの数を増すことで精度向上を図るため，ユーザーにいっそうの実機サンプリングを要望したいと考えている。

4　回転子，軸受の診断技術

4.1　回転子の診断技術

回転子の主な診断部位は，回転子導体棒の緩み，ろう付けおよびろう付け止端部に生じる疲労き裂，ダクト片の緩み，保持環の応力腐食割れ検査などである。回転子導体棒の緩み検査については，すでに述べたインパルスハンマの打撃法により，まったく同様な要領で診断することができるので詳細は省略する。

回転子導体棒のろう付け部およびろう付け止端部に発生する疲労き裂の診断については，従来，浸透探傷検査を実施していたが回転子導体棒の仕上ワニスの除去，再塗装に多くの

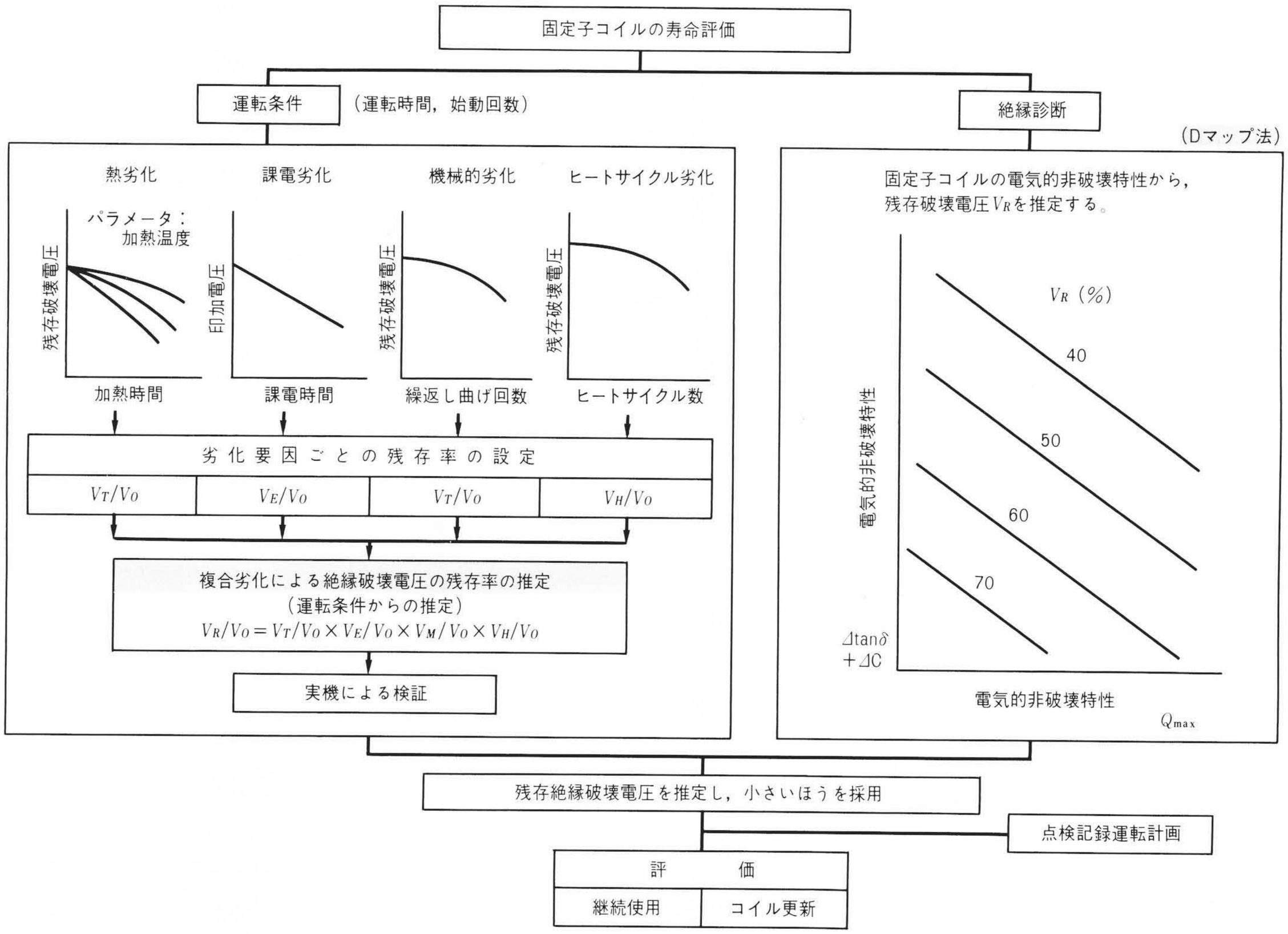


図5 エポキシ絶縁機のコイルの寿命評価　運転条件および絶縁診断データをもとに，電動機おのおのについて残存破壊電圧を推定する。

時間を要するため，最近，ワニス塗膜上から超音波探傷で精度よく診断する方法を開発し，現地での点検工数の大幅な低減を実現した。

ダクト片の緩みは，開放点検時に外観を目視点検することで診断する。ボイラ給水ポンプなどの大容量・高速機では，回転子導体棒の外周に保持環が付いて遠心力による導体棒の変形を抑止している。保持環には，7Mn-8Ni-4.5Cr鋼が用いられているが，応力腐食割れに対する感受性が高く，浸透探傷検査または超音波探傷検査によって検査する必要がある。最近は，長寿命材料への切換を推奨し，順次取り替えが始まっている。

軸受については，運転による摩耗，台金とバビット間のはく離によって，バビットの改鋳または台金の新替が必要になるが，点検後に修理の要否が決まるため納期上いろいろ問題が生じる場合もあったので，**図6**に示すように摩耗，はく離のトレンド管理を導入して余寿命を推定し，十分な修理期間の余裕を持って修理の推奨ができるように進めている。

5 高頻度始動・停止対策

電動機の高頻度始動・停止対策として，特に重要なコイル端部の耐力向上，回転子導体棒の電磁振動防止対策，カップリングはめあい部のトルク伝達能力の向上策について述べる。

5.1 コイル端部の耐力向上

始動時に発生する定格電流の5～6倍の始動電流とこれに伴う大きな電磁力の作用により，特にコイル端部の機械的強度の耐力向上が重要である。具体的には，この電磁力に対するコイル端部の疲労強度計算を行い，必要な場合には補強の追加，振動抑制構造への改造を実施する。コイル端部の機械的な耐力は，基本的にコイル端部の疲労寿命によって決まるので，補強あるいは改造によって始動時に発生するひずみの量を小さくし，許容繰返し数を延ばすことが対策の基本的考え方である。この説明を**図7**に示す。

5.2 回転子導体棒の電磁振動防止対策

始動時に発生する大電流は，電動機の二次側でも同様で，回転子導体棒に大電流による加熱，電磁振動が発生する。二重かご形回転子では，始動時には上側導体にほとんどの電流が集中して流れる現象となるため，これによって生じるスロット内での回転子導体棒の電磁振動防止は，高頻度始動・停止対策として不可欠なものである。この対策が不十分な場合

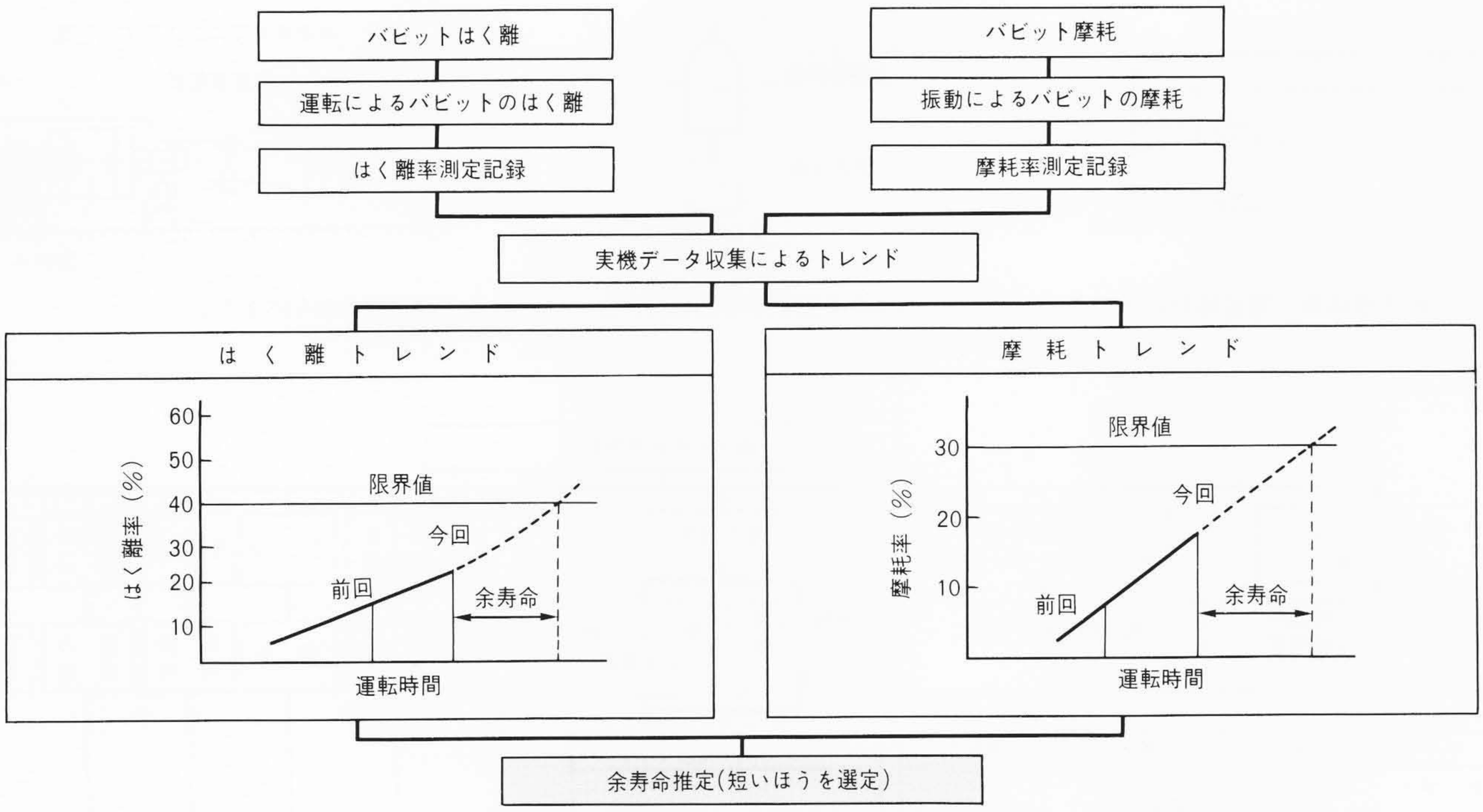
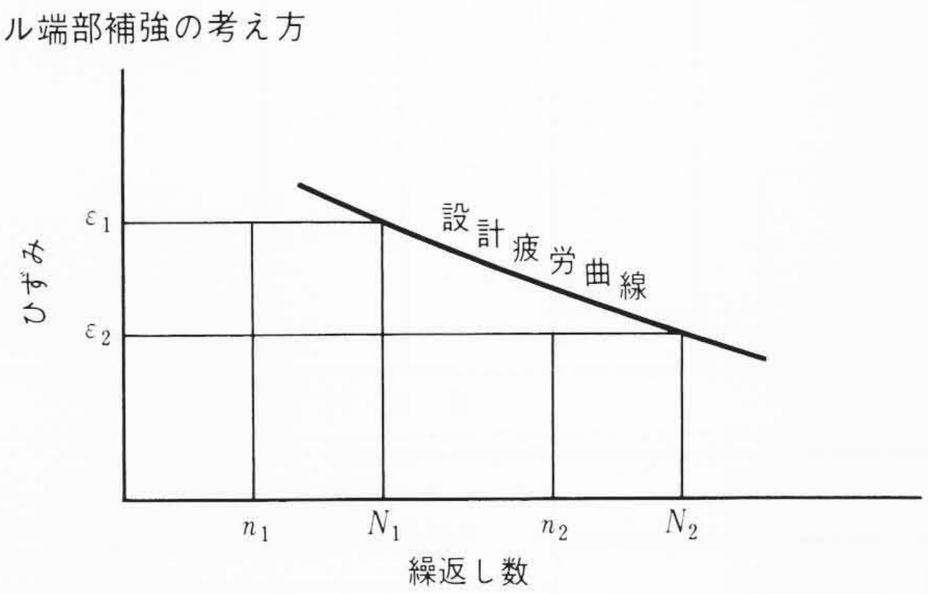


図6　滑り軸受の余寿命推定法　　はく離と摩耗のトレンド管理により，余寿命を推定する。



余寿命評価は，下記マイナー則による。

$$\frac{n_1}{N_1}+\frac{n_2}{N_2}=1$$

注：略語説明

ε_1（既設計構造でのひずみ）　ε_2（補強後のひずみ）
n_1（ε_1での今までの繰返し数）　n_2（ε_1からε_2に変わったときの残存寿命）
N_1（ε_1での寿命）　N_2（ε_2での寿命）

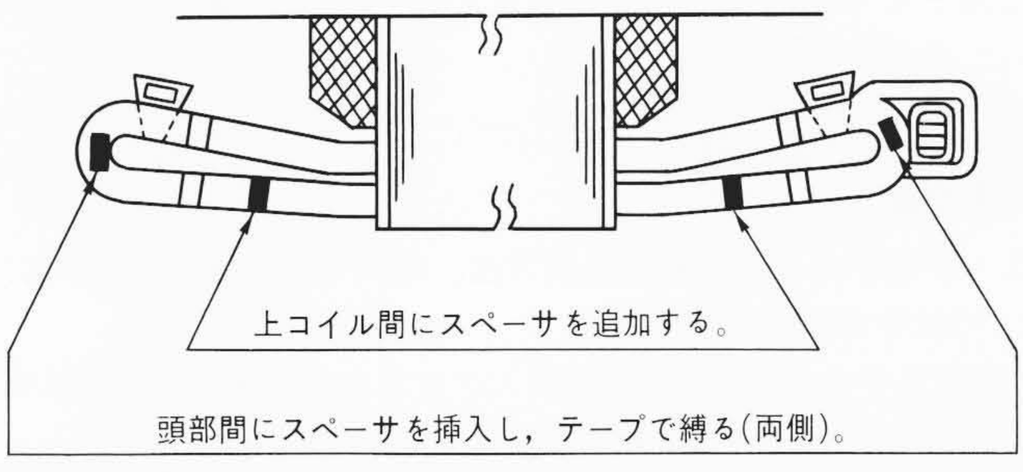


図7　コイルの高頻度始動・停止対策　　コイル端部に補強を追加し，耐力向上を図る。

には，スロット内での回転子導体棒の摩耗の進展，短絡環とのろう付け止端部からの疲労き裂発生，さらには回転子導体棒の折損へと進むことが十分考えられる。

日立製作所は，このスロット内での電磁振動防止策として，エポキシワニス処理の実施によって十分な効果を上げてきた実績がある。この処理は，あらかじめ回転子を加熱乾燥した後，回転しながら外周からエポキシワニスを塗布し，加熱硬化させるもので，現地でも簡単に作業可能であることから，DSS対策として必ず実施を推奨している。その要領を**図8**に示す。

5.3　カップリングはめあい部のトルク伝達能力の向上

電動機軸と負荷を直結する軸継手部では，トルク伝達は軸とカップリングのはめあい部で行われている。既設機では，このトルク伝達をキーと若干の締め代によっているが，始動時に発生する脈動過渡トルクに対しては十分でないものが多い。事実，長年運転した電動機のカップリングを引き抜いてみると，キー溝の拡幅，キーの変形などが生じている。この場合，基本的には締め代を付与してトルクを締め代で伝達する方式に変更する必要がある。

6　電動機予防保全システム

日立製作所が過去に製作納入し，現在発電所で運転されている電動機は2,000台弱に及んでいる。これらについて計画的な予防保全を行っていくためには，データベース，システムの構築が不可欠であるとの認識から，主機および他の補機との連係も図った電動機予防保全システムを開発した。電動機1台1台の仕様，定期検査記録，診断記録など予防保全情報の

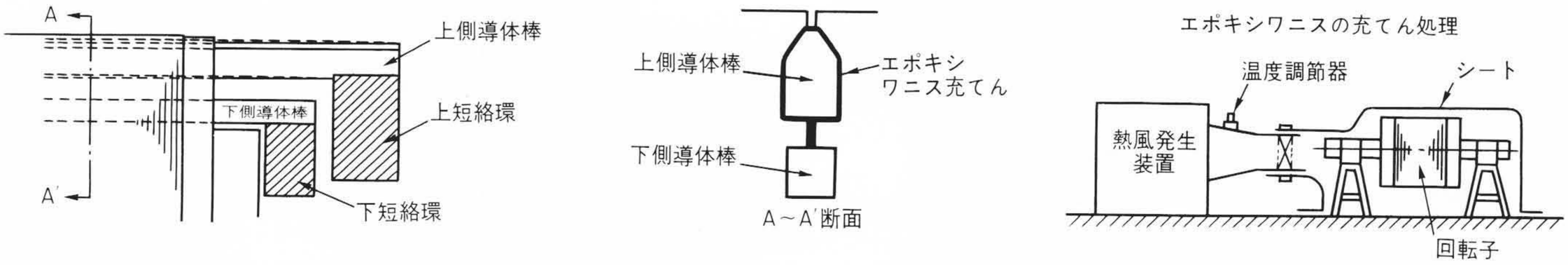


図8　回転子導体棒の電磁振動防止対策　　エポキシワニスの充てん処理によって，スロット内での電磁振動を防止する。

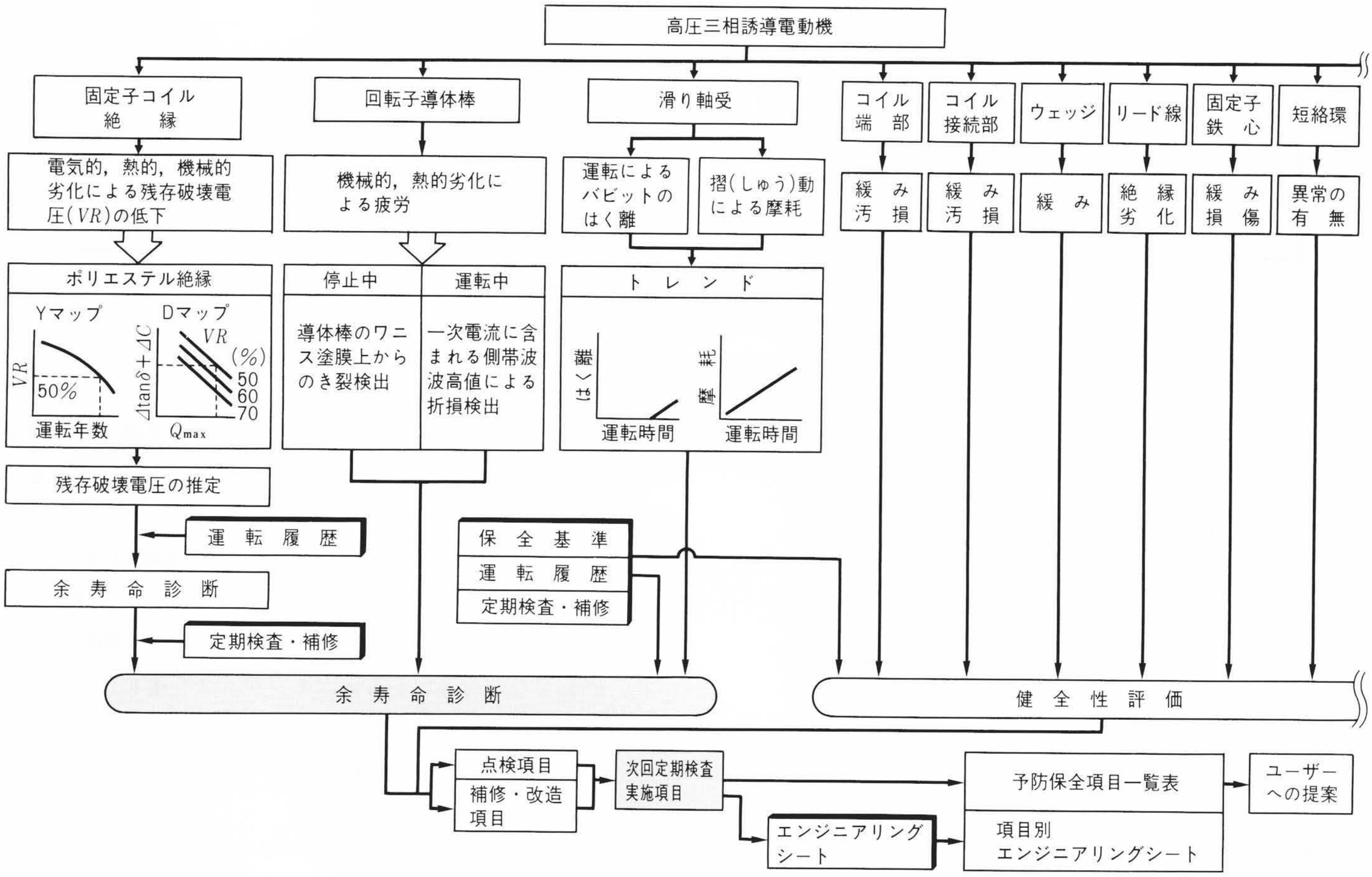


図9　電動機予防保全システム　　部品の余寿命推定，点検，定期検査情報を管理し，設備の的確な保守を行うシステムである。

一元管理を図り，余寿命診断，次回定期検査での保守項目，保守計画資料の自動出力などにより，既納機のいっそうの信頼性向上を目的としている。そのシステム概要を**図9**に示す。

このシステムが，真に有効に利用されるためには，入力データの正確さと情報のたゆまぬ更新，さらにユーザーからの情報の反映も必要であり，ユーザーの指導も受けながらさらに実効あるものに発展させたいと考えている。

7　結　　言

高圧電動機の診断技術，寿命評価，高頻度始動・停止対策，予防保全システムなどについてその概要を述べた。電動機はその多用途，多機種また設置環境の多様性，始動時のつらさなどいずれをみても保守する側にとっては難問が多いが，診断データをきめ細かく管理，検討することによって機械が発している声なき声を聞くことができると確信している。そのためには，ここで述べた技術が真価を発揮し，また発展向上していくために，今後よりいっそうユーザーの指導も受け，充実させていかなければならないと考えている。

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)　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)