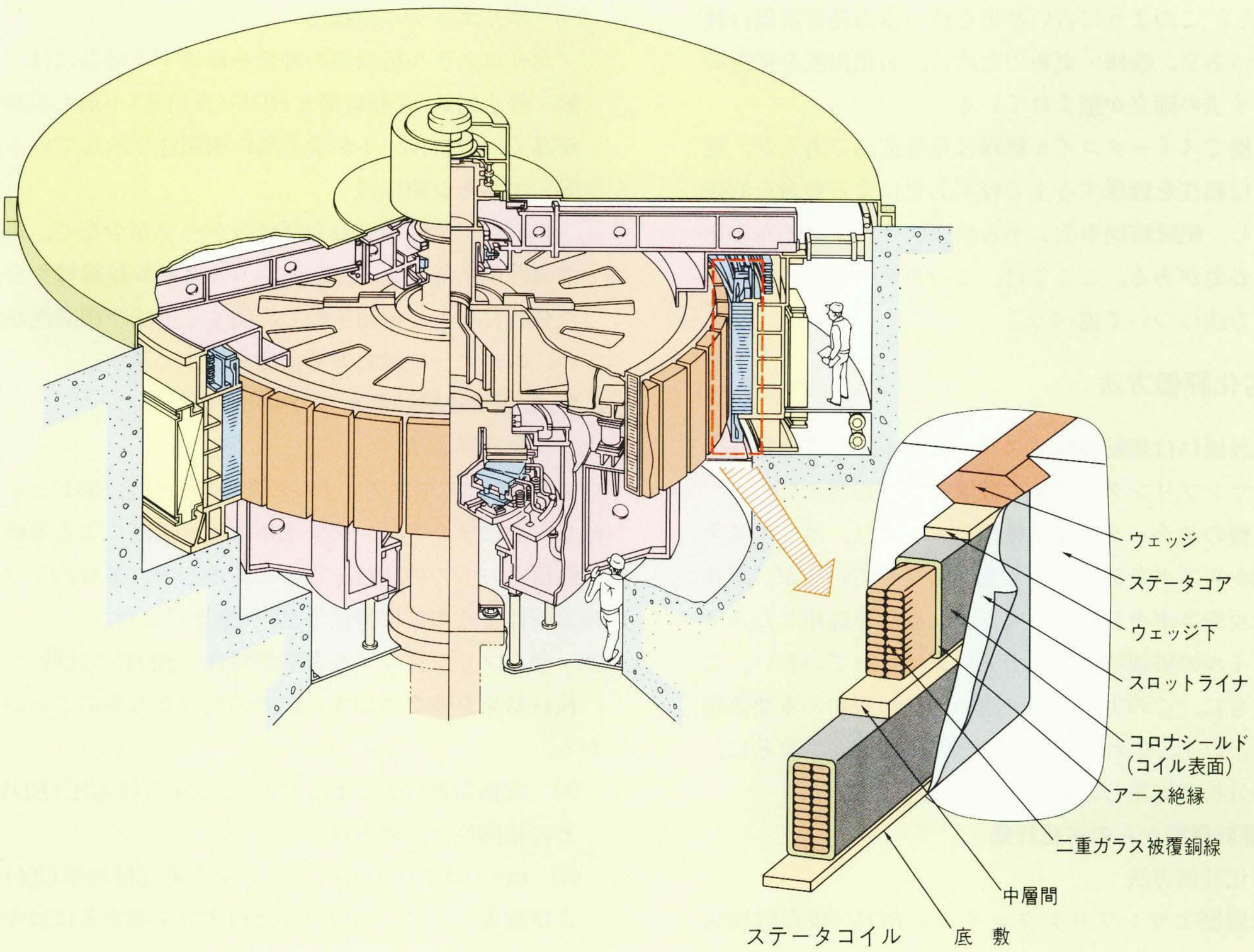
水力発電機の絶縁劣化診断技術

—ステータコイルの劣化評価法—

Life Evaluation of Stator Coil Insulation for Hydroelectric Generator

小沢幸司* *Kôji Ozawa*
八坂保弘* *Yasuhiro Yasaka*
後藤和夫* *Kazuo Gotô*
臼井　崇* *Takashi Usui*



水車発電機合成レジン絶縁ステータコイル　ステータコイルは発電機の重要部分であり，その絶縁の良否がコイルの信頼性を評価する。

わが国の水力発電の歴史は古く，明治25年(1892年)に電力供給を開始して以来約1世紀の間，運転されてきた。

経年化した設備は，改修による近代化・活性化の計画が増加しつつある。今後設備の改修・更新を効率的かつ経済的に行うためには，機器の劣化程度を評価する必要がある。

合成レジン絶縁ステータコイルを採用した水車発電機も，寿命に至るものが増加すると予想される。合成レジン絶縁の経年劣化評価手法の開発は現在の重要課題であり，まだ十分な精度が得られていない。

日立製作所は，これらの課題への技術開発に鋭意取り組んでいる。

* 日立製作所 日立工場

1 はじめに

わが国では，明治時代から大正時代にかけて小規模な水力発電所が開発された。その後，電力需要の増加とそれにこたえるように進歩した水車・発電機の技術により，水力発電所は大容量化されていった。さらに，豊富な水力資源が積極的に開発され，電力の安定供給および負荷調整用として大いに寄与している。

しかし，このように古い歴史を持つ水力発電設備は経年化つつあり，改修・更新のために，劣化程度を把握評価する手法の確立が望まれている。

発電機でステータコイル絶縁は重要部品であるが，運転での信頼性を確保する上で経年劣化による寿命を的確に予測し，絶縁破壊事故に至る前にステータコイルを更新する必要がある。ここでは，このステータコイルの劣化評価方法について述べる。

2 劣化評価方法

劣化評価には運転履歴・ステータコイル非破壊特性のほかにサンプリングコイルの破壊特性が必要となる。

発電機のステータコイル絶縁システムは，ポリエステル絶縁からエポキシ絶縁へと変遷してきているが，ポリエステルやエポキシなど合成レジン絶縁を採用したステータコイルの破壊特性は，十分に集積されていない。これとともに，この劣化評価方法の開発は現在の重要課題である。以下，これまで集積できた実機データを基に，種々の分析を実施した結果について述べる。

2.1 運転履歴からの劣化評価

(1) 劣化評価方法

運転履歴とサンプリングコイルの*BDV*(残存破壊電圧)の関係を中心に，劣化評価方法について検討した。主な検討項目は次のとおりである。

(a) 運転年数と*BDV*の関係(年劣化率)

(b) 運転時間と*BDV*の関係

(c) 起動・停止回数と*BDV*の関係

(d) 運転時間，起動・停止回数と*BDV*の関係

(2) 検討結果の評価

検討結果を**表1**に示す。

(a) ポリエステル絶縁機

ポリエステル絶縁機の寿命を評価する場合には，起動・停止回数，運転時間と*BDV*(重回帰)が最も相関性が高く，分析No. 4が最も高い相関性を示している。

(b) エポキシ絶縁機

エポキシ絶縁機の寿命評価はデータが少なく，単独では評価不能であるため，ポリエステル絶縁機を含めた分析No. 1の運転年数で評価する方法が相関性が高い。エポキシ絶縁の寿命曲線を**図1**に示す。

2.2 非破壊絶縁診断からの劣化評価

(1) 劣化評価方法

まず，サンプリングコイルの非破壊特性と*BDV*とを比較し，次にサンプリングコイルと絶縁診断による非破壊特性値そのものの比較を行った。そして，最終的には絶縁診断による非破壊特性と*BDV*を比較した。

(2) サンプリングコイル非破壊特性と*BDV*の比較

検討結果を**表2**に示す。同表の内容から次のことがわかる。

(a) 成極指数(*PI*)，tanδ(δ_0)と絶縁破壊電圧(*BDV*)との相関性は認められない。

(b) tanδ(Δ1)，tanδ(Δ2)，交流電流増加率(ΔI)および放電パラメータ(Δ)は高精度で予測するにはやや

表1 運転履歴からの劣化評価回帰分析結果 運転履歴とサンプリングコイルの*BDV*の関係につき検討した結果をまとめたものである。相関係数が最も高い値を示しているのは分析No. 4の始動・停止回数運転時間と*BDV*の関係である。

分析No.		1	2	3	4
分析条件	絶　縁	ポリエステル	ポリエステル	ポリエステル＋エポキシ	ポリエステル
	始動・停止回数	等価換算	等価換算	等価換算	等価換算なし
運転年数と*BDV*		◎(−0.8738)	◎(−0.9020)	◎(−0.9041)	−(相関係数<0.6)
始動・停止回数と*BDV*		○(−0.6025)	○(−0.6509)	○(−0.6475)	◎(−0.8964)
運転時間と*BDV*		◎(−0.8473)	◎(−0.9054)	◎(−0.8460)	−(相関係数<0.6)
始動・停止回数運転時間と*BDV*		◎(0.8490)	◎(0.9093)	◎(0.8573)	◎(0.9200)

注：判定方法 ◎(相関係数 R>0.8，非常に強い相関がある。)
○(相関係数 0.8≧R>0.6，かなり強い相関がある。)

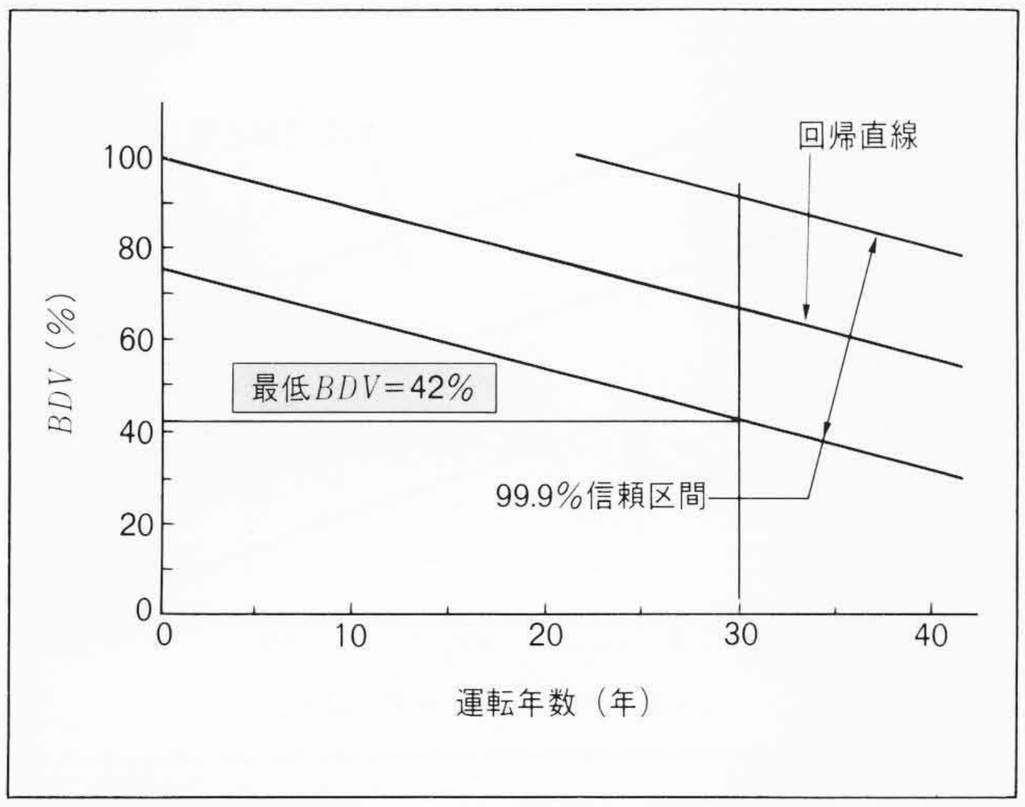


図1　運転履歴からの絶縁寿命曲線(エポキシ絶縁)　エポキシ絶縁機での運転年数から*BDV*を推定したものである。

不十分ではあるが，比較的高い相関性が認められる。特に交流電流増加率(ΔI)の相関係数が最も高くなった。

(c)　対象機を限定した場合には，最大放電電荷量(Qmax)で非常に高い相関性が得られた。

(3)　サンプリングと絶縁診断非破壊特性値の比較

サンプリングコイルと絶縁診断という異なる状況での非破壊特性値を比較した結果では，$Pi1$，ΔIの評価が低い。これは，絶縁診断での試験電圧($1.25\times E/\sqrt{3}$)で$Pi1$が現れにくいことによる。また，Nq値(Qmaxの傾き)が2を超えるものでは，Qmaxの評価が低い。これは，外部放電，回路上の減衰などによるものと考えられる。

(4)　絶縁診断試験結果と*BDV*の比較

全体的には$\Delta 2$，$\Delta 1$，Δなどが寿命評価に有効であり，対象機を限定した場合にはQmaxが有効である。

(5)　絶縁診断結果からの推定値と実測値の比較

サンプリングコイルの分析結果から，*BDV*との関係式を用いて各機の絶縁診断結果から*BDV*を推定した。$Pi1$が検出されなかったものについてはΔIを仮定して計算した。この結果，絶縁層の全体的(平均的)な劣化を示すもので相関係数の評価の高いものは，Δ，$\Delta 2$，$\Delta 1$，ΔI，$Pi1$の順であった。

絶縁層の局部的な劣化を示すQmaxは，Nq値が2以下の機械では相関係数の評価が高く，有効であると考えられる。

以上，いずれの特性でも99%信頼区間の下限値を考慮することで最低値を推定することが可能であり，精度の面から放電パラメータΔと最大放電電荷量Qmax(Nq値が2を超える場合)が適切であると考えられた。

以上をまとめ，絶縁診断後どのようにデータを整理し，絶縁破壊電圧を推定するかをフローチャートとして**図2**に示す。ここでは，Δ，Qmaxでの評価方法としては先に求めたサンプリングコイルの非破壊特性と*BDV*の関係

表2　サンプリングコイル非破壊特性と破壊電圧の相関関係分析　サンプリングコイルの非破壊特性と*BDV*を比較したものである。

分析No.	対象コイル	項目	*PI*-*BDV*	δ_0-*BDV*	$\Delta 1$-*BDV*	$\Delta 2$-*BDV*	*Pi*1-*BDV*	ΔI-*BDV*	Δ-*BDV*	Qmax-*BDV*
1	全数コイル	相関係数	0.1263	0.4982	0.6739	0.6287	0.6485	0.7492	0.7447	0.1570
		判定	×	△	○	○	○	○	○	×
2	ポリエステルコイル全数	相関係数	0.1710	0.4441	0.7142	0.6053	0.5612	0.7146	0.7056	0.1541
		判定	×	△	○	○	△	○	○	×
3	対象機を限定した全数コイル	相関係数	0.3119	0.4144	0.5409	0.6611	0.3759	0.6465	0.7084	0.8596
		判定	×	△	△	○	×	○	○	◎
4	対象機を限定したポリエステルコイル	相関係数	0.3340	0.3514	0.5909	0.6718	0.1700	0.5539	0.6531	0.8527
		判定	×	×	△	○	×	△	○	◎

特性値の定義

R	絶縁抵抗1分値	*Pi*1	交流電流第一次急増電圧
PI	成極指数：*R*10分値/*R*1分値	ΔI	交流電流増加率 (IE値$-I_0$)/I_0
δ_0	tanδ　2kV値		
$\Delta 1$	tanδ　$E/\sqrt{3}$ 値－tanδ　2kV値	Qmax	最大放電電荷量 $E/\sqrt{3}$ 値
$\Delta 2$	tanδ　E値－tanδ　2kV値		
E	定格電圧	*BDV*	絶縁破壊電圧(測定値/初期値)
$E/\sqrt{3}$	常規電圧	Δ	放電パラメータ($\Delta 2+\Delta 1$)

判定基準

判定	判定基準
◎	相関係数　$R\geqq 0.8$
○	相関係数　$0.8>R\geqq 0.6$
△	相関係数　$0.6>R\geqq 0.4$
×	相関係数　$0.4>R$

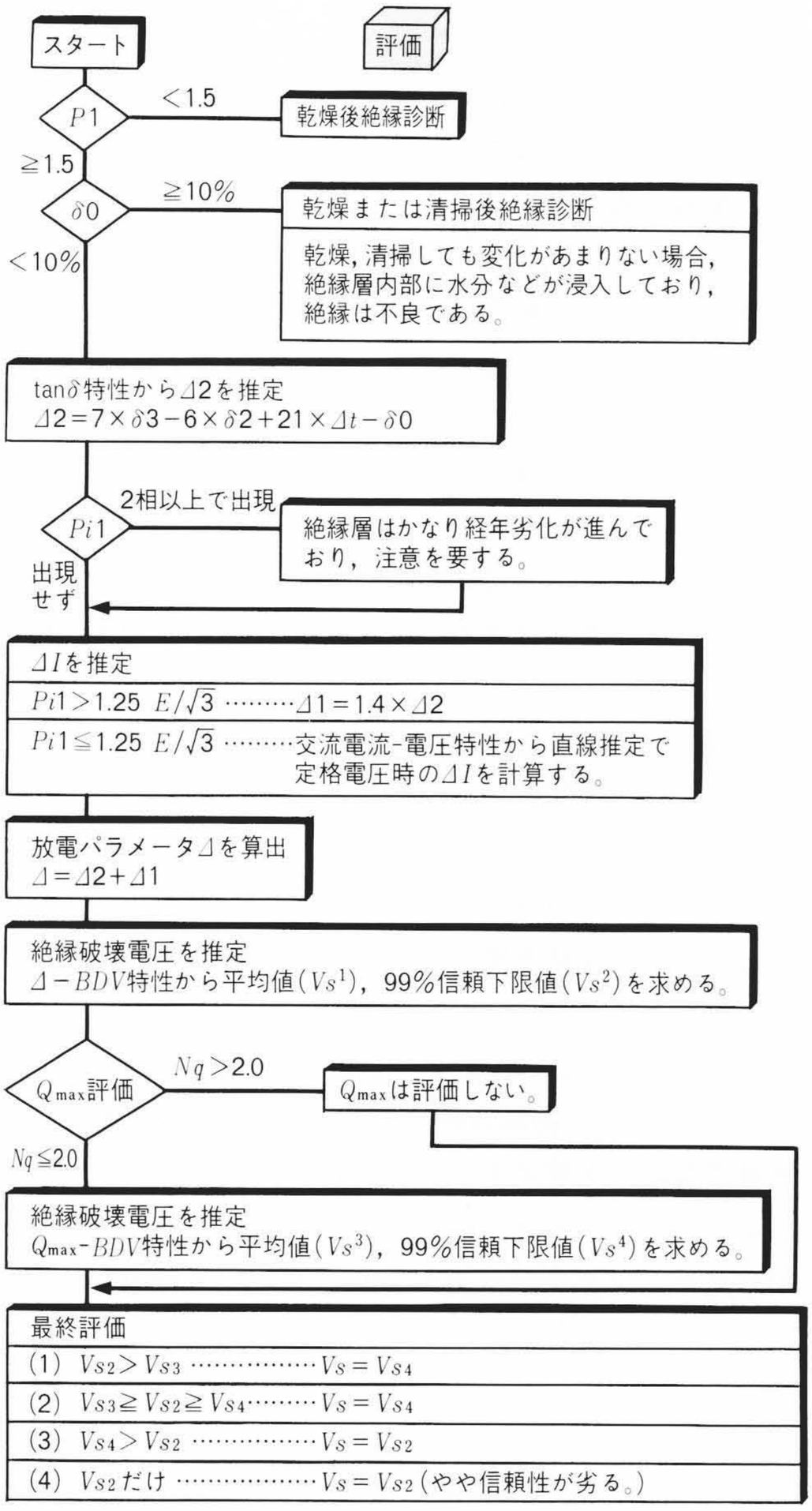


図2 絶縁診断による余寿命評価 絶縁診断(非破壊試験)結果により，*BDV*が推定できる。

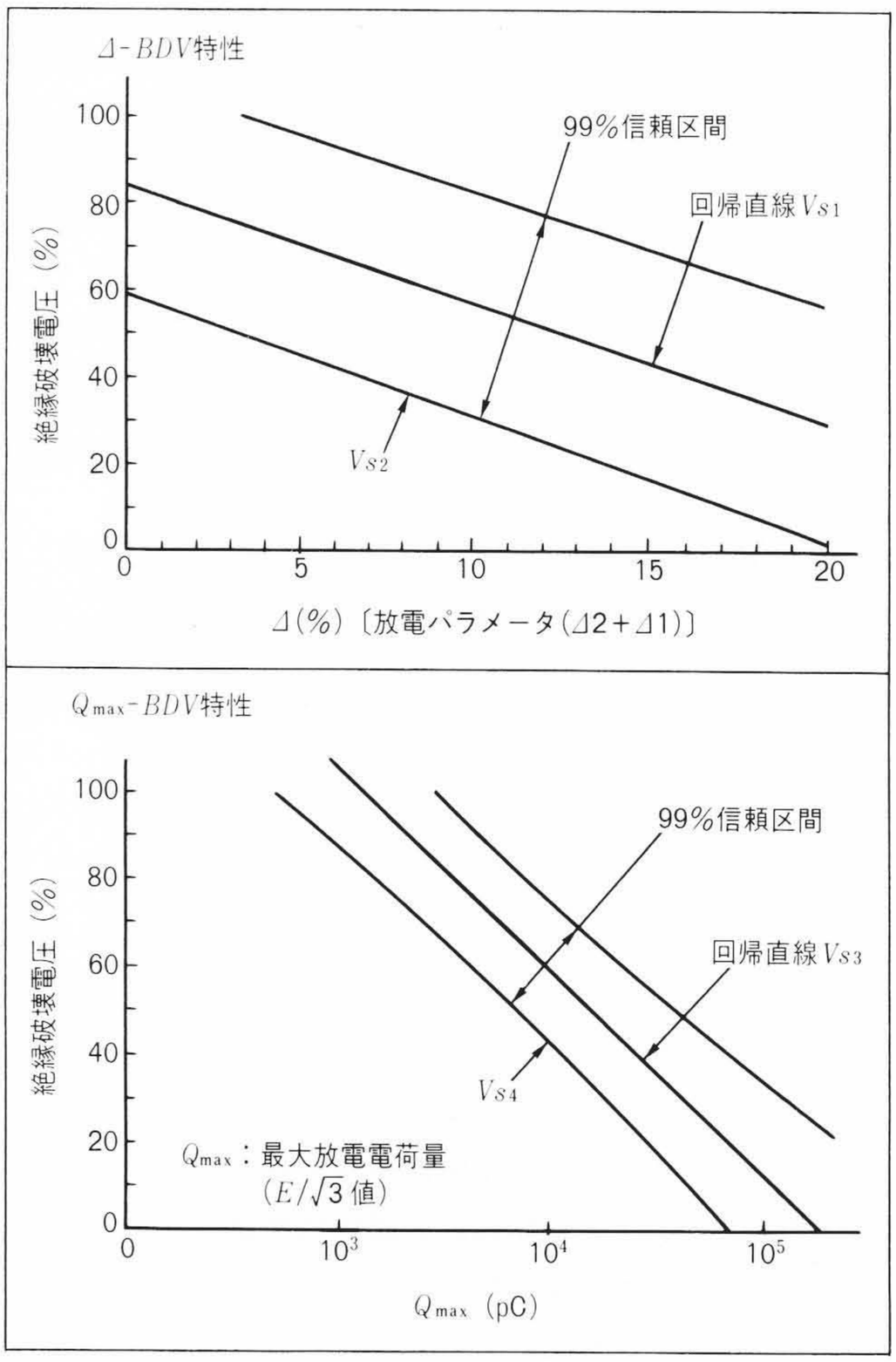


図3 絶縁診断からの絶縁寿命曲線(エポキシ絶縁) ⊿，Qmaxから*BDV*を推定したものである。

から得られた絶縁寿命曲線を使用している。エポキシ絶縁機の寿命曲線を**図3**に示す。

3 おわりに

ここでは，発電機のステータコイルの劣化評価方法について述べた。運転来歴および絶縁診断によって絶縁破壊電圧を推定できるが，周期的な絶縁診断実施により，トレンドとして値の管理することが必要である。また，今後さらにデータの積み上げ，検討を実施し，この評価の信頼性向上を図っていくことが必要である。

参考文献

1) 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，電力中央研究所報告，研究報告No. 67001 (1967-4)
2) 池田，外：最大放電電荷-電圧特性の傾き*Nq*による発電機巻線の劣化判定法，電力中央研究所報告，研究報告No. 176023(1976-11)
3) 池田，外：合成レジン絶縁発電機巻線の絶縁劣化判定基準，電力中央研究所報告，研究報告W88046(1989-6)
4) 松延，外：水車発電機における寿命評価，昭和61年。電気・情報関連学会連合大会5-3(1986-9)