既設水力発電設備の予防保全

Preventive Maintenance Technology for Old Hydroelectric Generation Equipment

わが国の水力発電所建設の歴史は古く,30年以上の長期にわたって稼動している設備が多い。今後設備の改修・更新を効率的かつ経済的に行うために,機器の劣化程度を的確に把握・評価する必要がある。水車ではコンクリートに埋設されているため,点検が難しいケーシングの超音波探傷結果を三次元表示する装置を開発し,欠陥形状を正確に把握した。さらに,経年材料の破壊力学に関する材料特性を収得して,残存寿命の評価を行うことを可能にした。発電機については,固定子コイルの寿命診断エキスパートシステムを開発し,正確で迅速な絶縁診断を可能にした。

森口一夫* Kazuo Moriguchi 八坂保弘* Yasuhiro Yasaka

□ 緒 言

わが国の水力発電所は、明治から大正にかけて小規模な発電所が建設されてきた。その後、水車・発電機の製作技術の進歩と電力需要の増加を背景に、豊富な水力資源の開発が積極的に行われ、約1,200か所の発電所を数えるに至っており、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。

このように古い歴史を持つ水力発電所ではその設備が老朽化しつつあり、30年以上の長期にわたって稼動しているものが多い。そのため設備の改修・更新を効率的かつ経済的に行うために、機器の劣化程度を的確に把握評価する手法の確立が望まれている。

水車ケーシングは、コンクリートに埋設され、その取り替えは水車一式を更新するような大規模な改修となり、これに要する費用も多大なものとなる。このケーシングの超音波探傷法と、破壊力学による残存寿命評価法について述べる。

発電機の主要部品の寿命評価などについては種々既述されているが、固定子コイルの寿命診断に、多くの熟練者の知識や経験を組み込んだエキスパートシステムについて論述する。

2 水車の寿命予測

水車部品のうち、ランナ、主軸、案内羽根などは、摩耗、キャビテーション壊食、疲労によるき裂の発生・進展などによって使用限界に達しても取り替えが可能であり、対応が比較的容易である。しかし、コンクリートに埋設されているケーシング、ステーベーンについては非破壊検査が困難であることから損傷程度の判断はきわめて困難であるばかりでなく、

その取り替えは水車一式を更新する大規模な改修となり、これに要する費用も多大なものとなる。一方、長期間使用されてきた老朽水車ケーシングは、鋳鉄・鋳鋼製のものが大部分であり、製作当時の鋳造技術・非破壊検査技術の未確立により、肉厚の急変部、すなわちステーベーン付け根付近に鋳造欠陥を残したまま運転されている場合が多いものと推定される。このようなケーシングに、始動・停止、負荷遮断などの変動応力が加わると、鋳造欠陥を起点として疲労き裂が進展し、ケーシング破壊に至ることが懸念される。このような事故を未然に防止するためには、欠陥の形状・寸法、変動応力によるき裂進展量を正確に把握し、ケーシングの余寿命を推定する必要があるり。

このため、ステーベーン付け根付近の欠陥を超音波により探傷し、その結果を三次元表示する探傷法(以下、3Dスコープと呼ぶ。)を開発するとともに、経年水車材料の破壊力学的材料特性を収得し、残存寿命算出法の見通しを得たので、以下に欠陥検出法、残存寿命算出について述べる。

2.1 3 Dスコープの開発

ケーシングの残存寿命を決定する要因である内在欠陥を検出する方法としては、超音波探傷が最適である。従来の反射波の強さと欠陥までの路程を表示するAスコープによる超音波探傷は、記録性に劣ること、欠陥形状の判定が技術者の技量によって左右されることなどの欠点を持っていた。これらの欠点を克服するため、探傷結果を平面表示する「Bスコープ表示」などの方法が用いられていたが、寿命の予測精度を左右

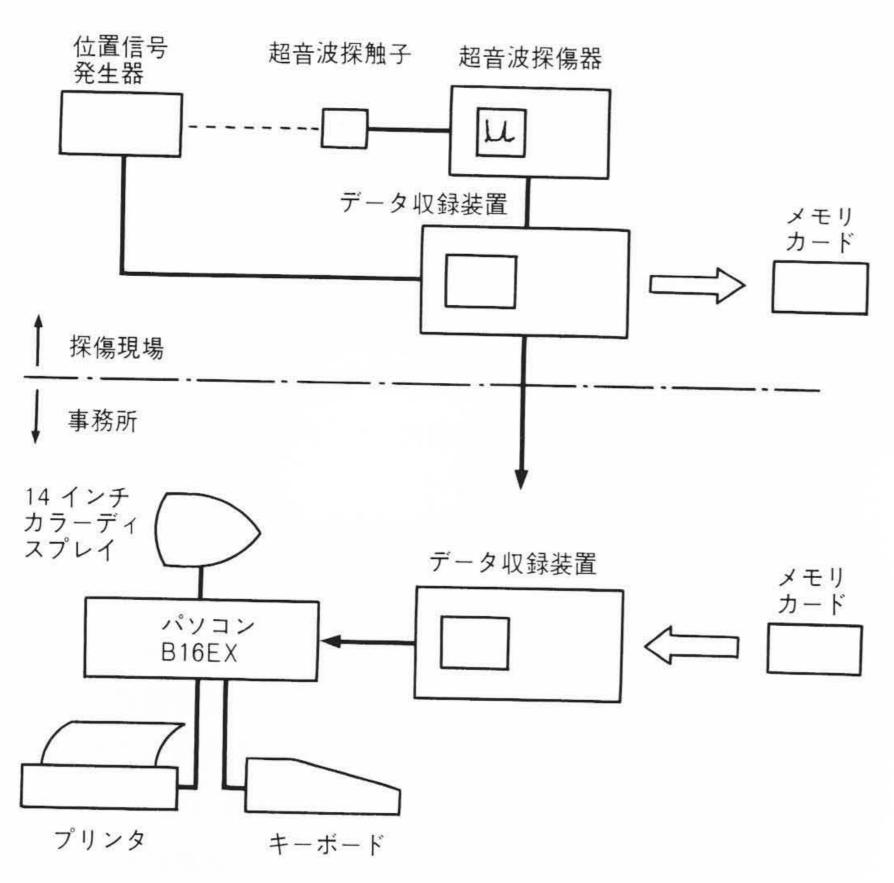
^{*} 日立製作所 日立工場

する欠陥の全体形状,存在位置に関する情報は得られなかった。この欠点を解消するため,探傷結果を三次元表示する「3Dスコープ」を開発した。

(1) 3 Dスコープの概要

「3Dスコープ」では、経年水車の種々のステーベーン形状に対応しやすいように探触子を手動で走査する。図1に示すように、探触子の位置を検出する位置信号発生器と、超音波探傷器からのビデオ信号と、探触子の位置信号を取り込んで高速に処理し、メモリカードに収録するデータ収録装置、およびメモリカードの欠陥情報から欠陥形状を三次元表示するパーソナルコンピュータ(以下、パソコンと略称する。)日立B16 EX II で構成している。この装置では、探傷現場で探傷結果の欠陥情報をデータ収録装置によってメモリカードに収録後、メモリカード上の欠陥情報をデータ収録装置によってメモリカードに収録後、メモリカード上の欠陥情報をデータ収録装置によって再生し、パソコンに取り込んで欠陥形状を三次元表示する。データ収録装置は、水車ケーシング内に設置する必要があるため、図2に示すように、φ400 mmのマンホールを通過できるように小形化している。

鋳造欠陥の発生しやすいステーベーン付け根の探傷法と、探傷データの取込法を図3に示す。探触子はガイドなどを用いて手動で流水方向に、ステーベーン主板からある一定寸法Hを保たせて走査する。この寸法Hおよび探傷角度 θ は、データ収録装置のキーボードから入力するが、探触子位置信号Dおよび探触子から欠陥までの路程lおよびエコー高さEは自動的に取り込まれ、メモリカードに書き込まれる。このメモリカー



注:略語説明 パソコン(パーソナルコンピュータ)

図 I 3 Dスコープの構成 欠陥情報および探触子の位置信号を収録するデータ収録装置,ならびに欠陥位置を表示するパソコンで構成している。



図2 3 Dスコープ装置 データ収録装置とパソコンで構成している。

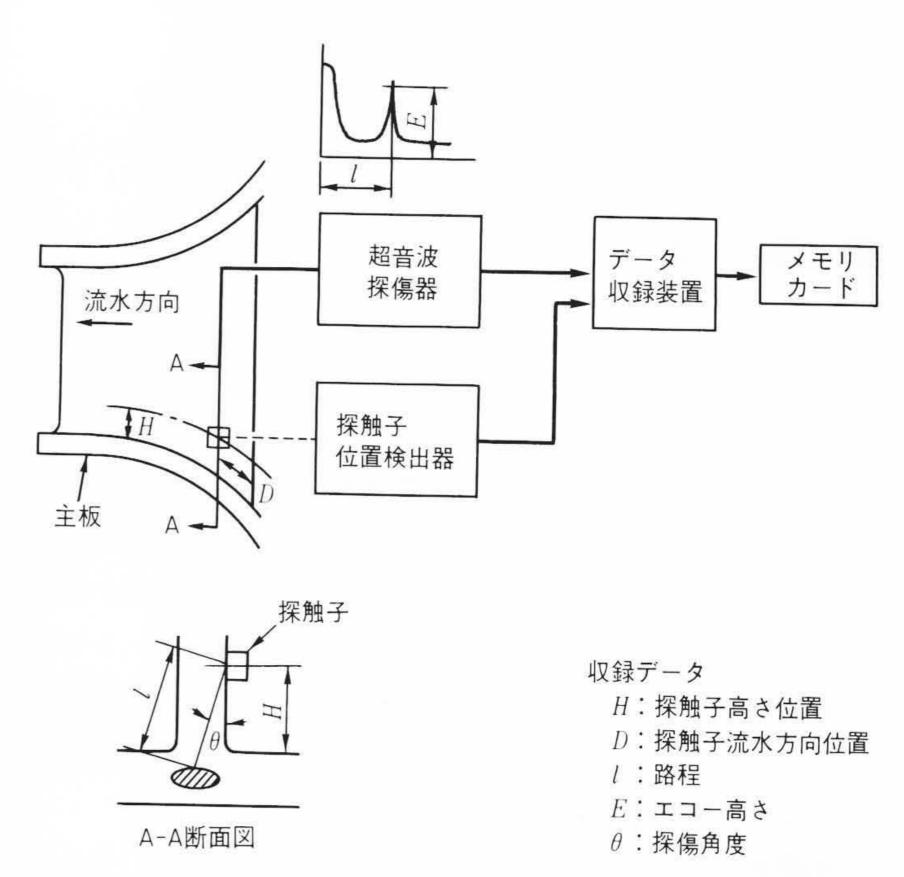
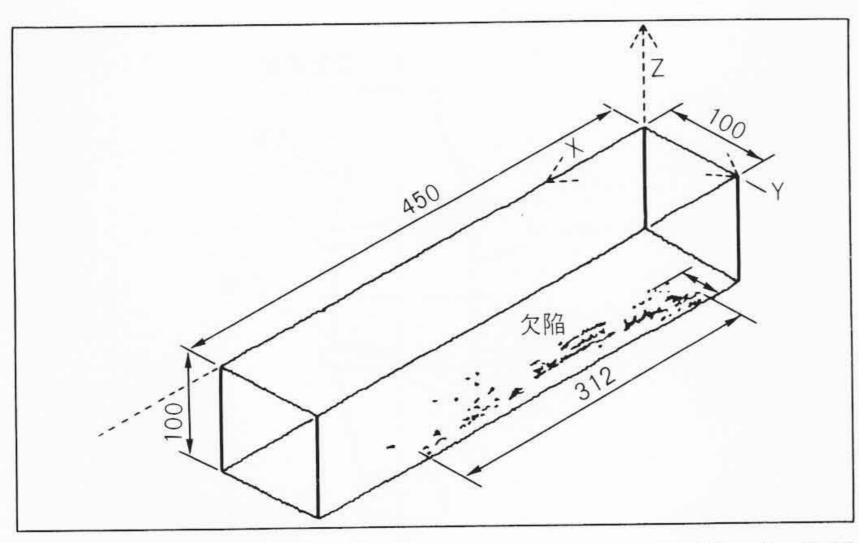


図3 ステーベーン付け根の内部欠陥検出法 探触子を手動で走査し、欠陥情報と探触子の位置信号をデータ収録装置によってメモリカードに記録する。

ドは256 kバイトの容量を持つLSIと電池で構成されており、約2万4,000点の欠陥データを4年間保存することができる。さらに欠陥データは、パソコンのハードディスク上に書き込むことによって半永久的に保存することが可能である。

(2) 3 Dスコープによる探傷試験結果

3Dスコープによる鋳造欠陥を持つステーベーンの探傷結果を図4に示す。同図は、X=1、Y=1、Z=1の視点からの画像を示している。視点は自由に変えることができ、視点を変えた場合の表示も高速演算ボードを使用しているのでほとんど瞬時に行うことができる。あらゆる方向からの欠陥形状の確認を短時間に行うことが可能である。また、欠陥全体の表示ばかりでなく、指定された断面での表示も可能である。実体欠陥の断面形状と探傷結果の断面表示の比較を図5に示す。



スケール=0.77

図 4 欠陥を持つステーベーン 探傷結果の三次元表示X=1, Y=1, Z=1 の視点から見た欠陥像で、あらゆる方向から欠陥像を見ることができる。

探傷欠陥形状は実体欠陥形状をよく表しており、欠陥形状・ 寸法を把握するのに有効な探傷法であることが確認できた。

2.2 破壊力学による欠陥材の寿命評価法

(1) 破壊力学による残存寿命評価法

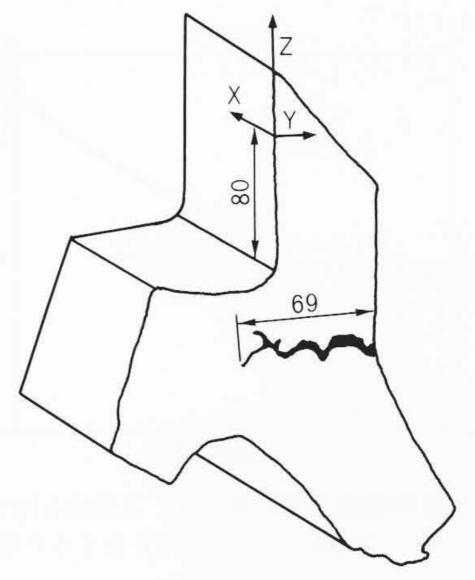
3 Dスコープで検出された欠陥から対象部材の寿命評価を行うには、破壊力学を用いる。破壊力学は、従来の材料力学で取り扱うことのできなかった欠陥・き裂を持つ材料の破壊強度を評価する力学であり、脆性破壊、疲労破壊などの損傷現象の定量的評価、あるいは機器の寿命評価に大きく役立っている。破壊力学では、き裂先端の応力場を一意的に表す応力拡大係数 K_i を用いる。この応力拡大係数 K_i は作用する変動応力とき裂の大きさによって定まり、図6に示すように、き裂の進展が況および脆性破壊を生ずるか否かを評価できる重要なパラメータである。

進展性欠陥を持つケーシングに、始動・停止による変動応力が加わる場合の寿命評価は27に示すように行う。すなわち、初期欠陥 a_i が変動応力を受けて成長し、脆性破壊を生じる寸法 a_{cr} に至るまでの繰返し回数 N_R が、そのケーシングの寿命である。

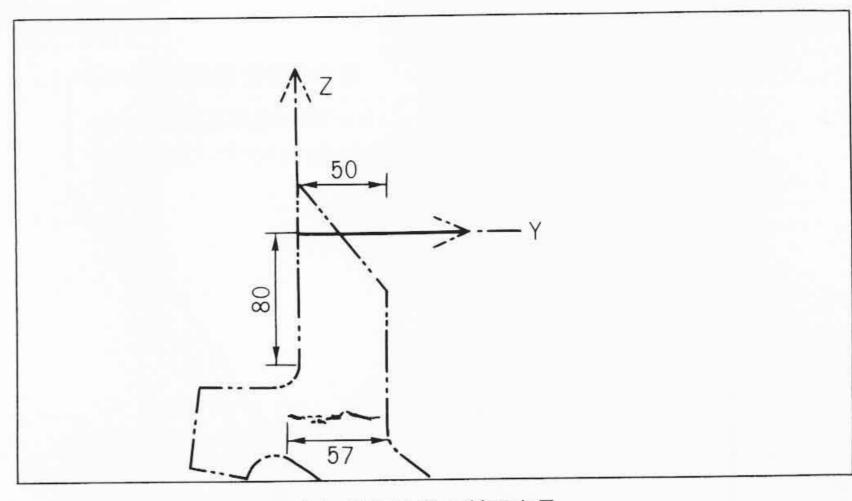
これらの寿命評価を行うためには、き裂が進展するか否かの限界を示すき裂進展限界 ΔK_{th} 、き裂の進展特性を示すき裂伝搬特性、脆性破壊を生ずる限界を示す破壊靱性値 K_{IC} を求める必要がある。これらのデータはSC (鋳鋼材) の経年水車材を用いて収得した 2 。き裂進展限界 ΔK_{th} は6.8 MPa· \sqrt{m} ,破壊靱性値 K_{IC} は49.6 MPa· \sqrt{m} と求められた。また、き裂伝搬特性は、図 8 に示すように $da/dN=1.58\times10^{-10} \cdot (\Delta K)^{4.4}$ と求められ、今後、経年水車ケーシングの残存寿命評価に際し貴重なデータが得られた。

(2) 残存寿命の試験結果

これらの破壊力学的材料値をもとに、幅400 mmの板に初期き裂 $2 a_i \epsilon 100 \text{ mm}$ から250 mmまで変化させた貫通き裂を持つ



(a) ステーベーンの欠陥断面



(b) 探傷結果の断面表示

図5 実体欠陥の断面形状と探傷結果の比較 ステーベーンから切り出した欠陥断面と探傷結果の断面表示は、ほぼ一致していることが確認された。

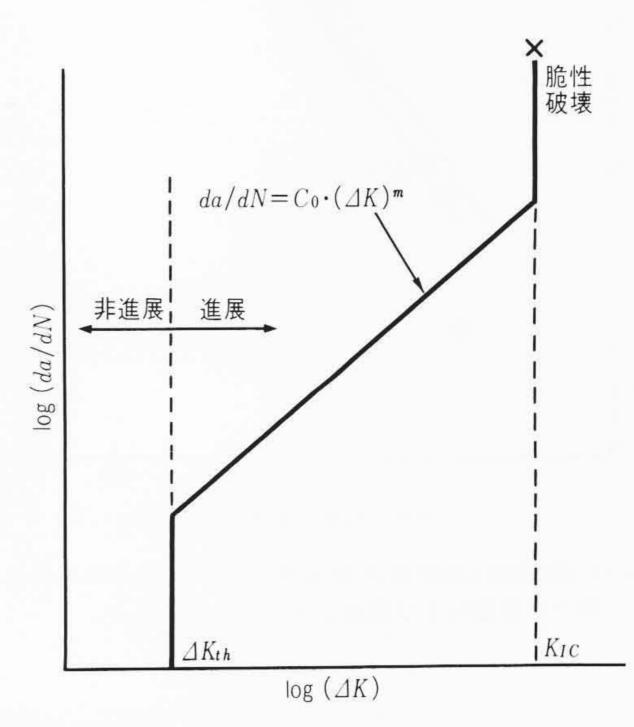


図6 き裂進展の挙動 応力拡大係数 ΔK によって、き裂の進展の有無、き裂の進展状況、脆性破壊を生ずるか否かを評価できる。

部材の寿命と変動応力の関係を**図9**に示す。同一の変動応力の場合、初期き裂寸法が小さいほど寿命は長くなり、同一寿命の場合初期き裂寸法が小さいほど、変動応力は大きくとれ

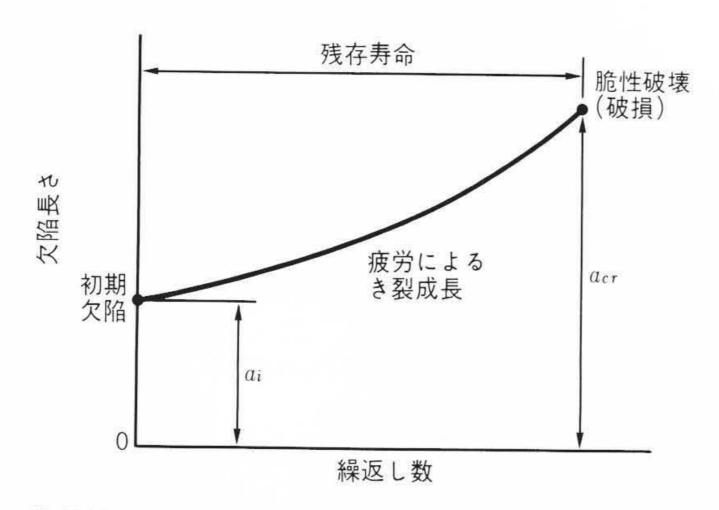


図 7 進展性き裂の破損までの挙動 進展性を持つ a_i の初期欠陥は 応力の繰り返しによって進展し、脆性破壊を生ずる寸法 a_{cr} で破損する。

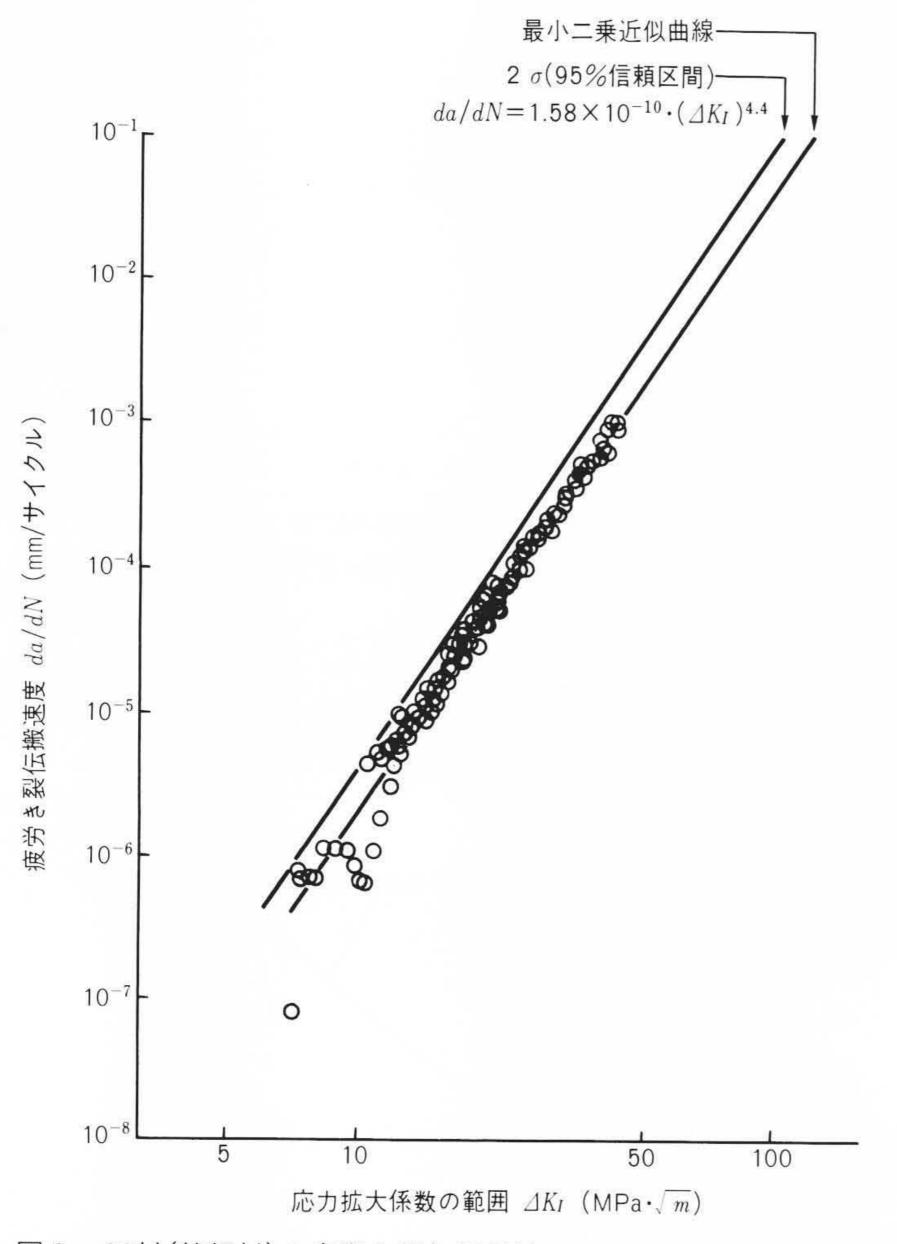
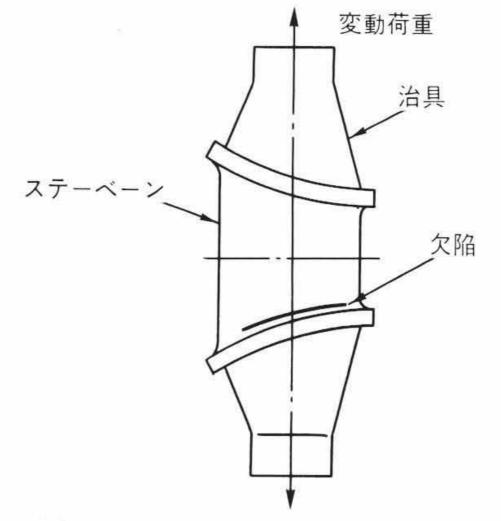
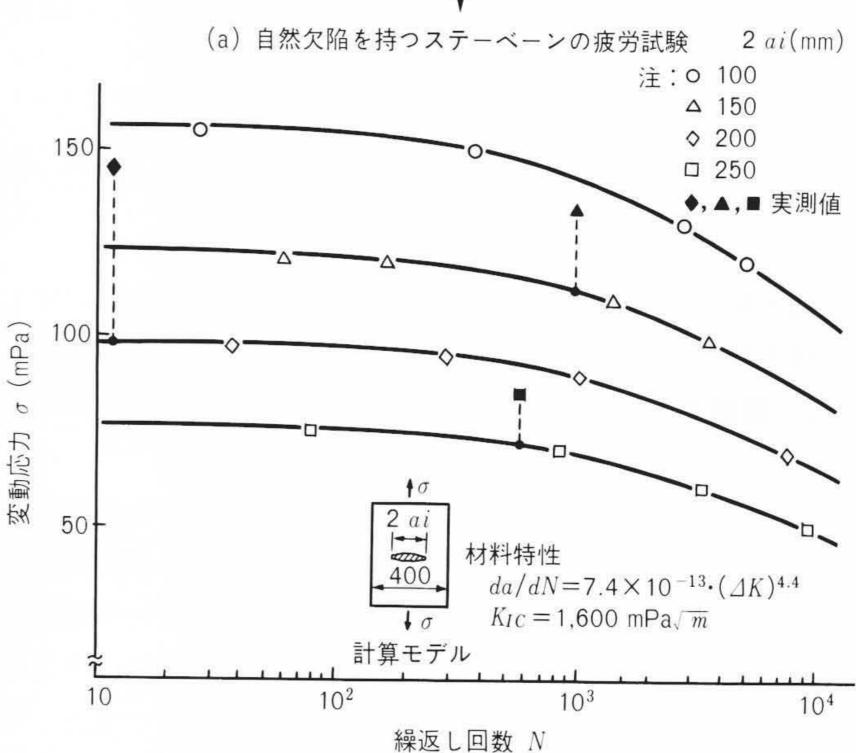


図 8 SC材(鋳鋼材)の疲労き裂伝搬特性 経年水車材を用いた試験結果を,最小二乗法により直線近似したものである。

る。また、経年水車から採取した貫通した鋳造欠陥を持つステーベーンの疲労試験結果を同図上に示す。この疲労試験結果と寿命計算結果とを比較すると、計算結果は試験結果の変動応力よりも小さくなっており、安全側の結果となる。この差の原因は、寿命計算が欠陥をき裂として取り扱っているのに対し、実際の鋳造欠陥先端には多少の曲率半径を持ってい





(b) 残存寿命計算結果と疲労試験の比較

図 9 実機ステーベーンの疲労試験と寿命計算結果の比較 改修水車から自然欠陥を持つステーベーンを切り出して疲労試験を行い,残存寿命計算と比較した結果,計算は安全側の結果となる。

ること、また寿命計算では、単純な貫通き裂としてモデル化 しているのに対し、実際の鋳造欠陥は、かなり複雑な形状を した貫通き裂であるなどが考えられるが、今後ともデータの 蓄積を行い、残存寿命予測精度の向上を図る必要がある。

3 発電機の寿命診断

発電機の主要部品の寿命評価技術および予防保全実施例については種々紹介されているが、ここでは、固定子コイルの寿命診断エキスパートシステムについて述べる。

発電機の固定子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た。近年、発電機の大容量化および高電圧化とともに、始動・停止頻度の多い過酷な運転パターンとなっており、これらを考慮したエポキシ絶縁の寿命診断技術の開発が重要視されている。また、これらの診断精度の向上とともに多くの熟練者の知識や経験を組み込んだエキスパートシステムの開発も望まれている。ここでは、最近開発された絶縁診断エキスパートシステムの概要につい

て述べる。

3.1 絶縁診断フロー

絶縁診断は非破壊試験データや運転履歴をもとにしたDマップ(部分放電試験などによる推定法)やNYマップ(始動・停止回数および運転年数による推定法)によって破壊電圧残存率を求め、それに目視点検を加え総合的に診断を行う必要がある³)。そのようなことを踏まえたエキスパートシステムの絶縁診断フローを図10に示し、その特徴を以下に述べる。

- (1) 非破壊絶縁特性測定支援部分および運転履歴から余寿命 を推定するアルゴリズムもシステムに組み込まれており、よ り精度の高い寿命予測が可能である。
- (2) 測定結果判定部分により、個人差のない正確な判定が可能である。
- (3) レポート出力部分により、一定のフォーマットのレポートを迅速に得ることができる。
- (4) 目視点検を入力でき、点検漏れや各種総合判断のためのデータを総合的に画面上で見ることができる。

以下に, それぞれについての概要を述べる。

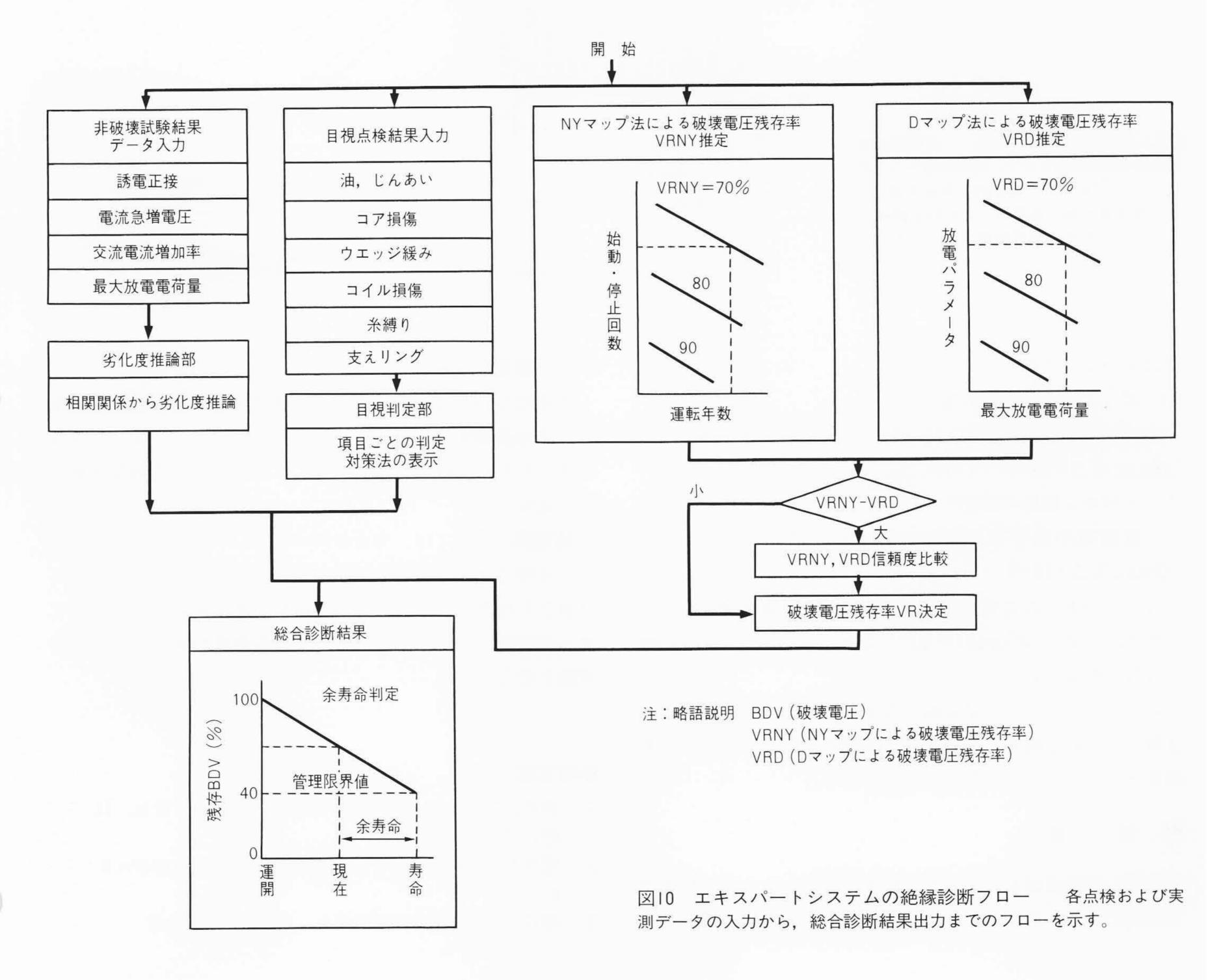
3.2 非破壊試験支援および目視点検評価

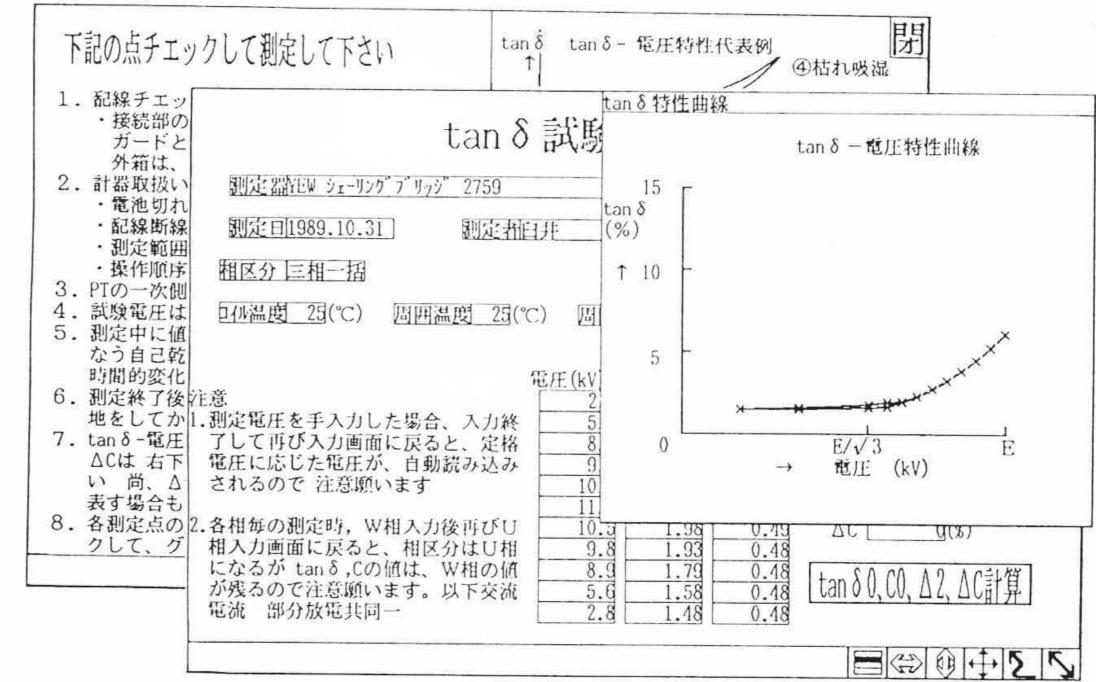
非破壊試験支援としての一例を**図11**に示す。これは、測定 前の注意事項、特性代表例などを画面表示し、また試験結果 を入力し計算させることで特性曲線が表示され、測定ミスの 発見がすぐにできる。さらに非常識な値の場合は、コメント を出力して再チェックを促し、正確な測定の支援が可能であ

また,目視点検については,各部の点検項目に対して,画 面で点検結果を選び,各項目ごとに判定を行うと同時に対策 法の表示も行う。

3.3 寿命評価

寿命の判定基準としては、運転履歴をもとにした判定法(NYマップ)」や、非破壊試験により得られたデータである誘電正接、電流急増電圧、交流電流増加率および最大放電電荷量をもとにした絶縁診断技術の判定基準知識ベース^{1),3)}によって寿命評価を行う。このなかで、非破壊試験結果をもとにしたDマップ法ではポリエステル絶縁とエポキシ絶縁に対する相関関数が用意されており、それによる破壊電圧残存率を求める式





図川 非破壊試験支援画面(例:tan&試験) 測定前の注意事項などを画面表示し、また試験結果を入力することによって特性曲線が表示され、測定ミスがあると再チェックを促して正確な測定支援を行う。

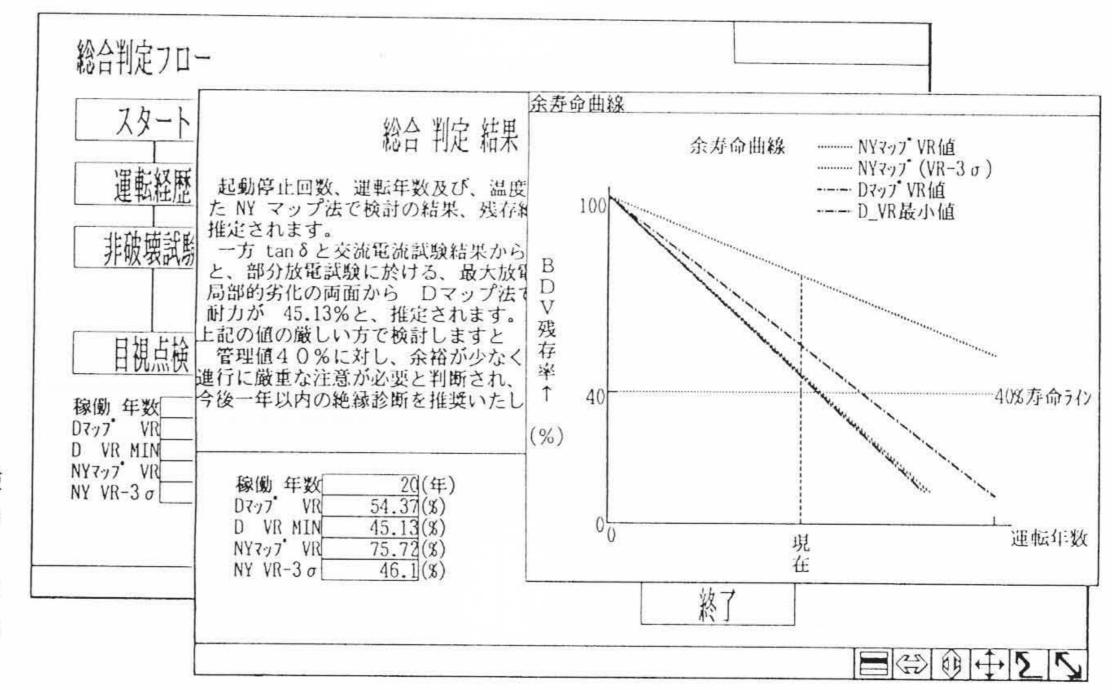


図12 総合判定出力画面 非破壊試験 結果から求めたDマップ,運転経歴から求め たNYマップをもとに総合的な寿命予測を, また非破壊試験の各項目ごとの判定結果コ メント,目視点検判定結果コメントを出力 する。

は以下のようになっている。

(1) ポリエステル絶縁の場合1)

破壊電圧残存率(%) $V_R = 100 - 1.8(\Delta - 0.8) - 37.5 \log$ (Qmax/ 1.5×10^{-9})

(2) エポキシ絶縁の場合3)

破壞電圧残存率(%) $V_R = 100 - 1.8(\Delta - 0.8) - 27.4 \log$ ($Q\max/1.5 \times 10^{-9}$)

となっている。ここで、 Δ は誘電正接と交流電流増加率から計算される量 $(=\Delta(\tan\delta)+\Delta I)$ 、 $Q\max[C]$ は $E/\sqrt{3}$ での最大放電電荷量である。

以上のような,非破壊試験の各項目ごとの判定結果と目視点検による判定結果を総合して,図12に示すように総合判断結果として寿命評価を行うことができる。

4 結 言

今後, 更新時期を迎える水力発電設備は, ますます増加する傾向にあり, 計画的, 効率的な改修を行うための寿命評価

技術は重要となる。

水車については、ケーシングの鋳造欠陥の超音波探傷結果 を三次元表示する「3Dスコープ」を開発した。それらの探傷 結果をもとに、破壊力学を適用し、定量的な残存寿命評価手 法を提案した。

発電機については、寿命診断エキスパートシステムを開発し、正確で迅速な絶縁診断が可能になった。このシステムは 今後とも知識ベースの改良の継続が必要であるが、このシステムの実機への適用によって、より信頼性のある予防保全が 可能となる。

参考文献

- 1) 和田,外:既設水力発電所の予防保全,日立評論,**88**,8,827~832(昭63-8)
- 2) 電気学会技術報告:水力発電設備の現状と劣化診断技術(平1-9)
- 3) 神谷,外:発電機の予防保全,日立評論本特集号