

# 既設水力発電設備の予防保全

## Preventive Maintenance Technology for Old Hydroelectric Power Generation Equipment

現在、我が国で運転されている水力発電設備のうち、70%近くの設備が建設以来40年以上経過しているが、全面改修されたものはそのうちまだ20%程度にすぎない。最近日立製作所では、老朽化した水車ケーシングや発電機の改修時期を合理的に順位づけする手法を提案し、各ユーザーに評価されつつある。本論文では最近日立製作所が提案しているこれらの手法を、具体的実例を交えながら紹介する。

和田 毅彦\* Yukihiro Wada

山梨 孝\* Takashi Yamanashi

### 1 緒言

我が国での水力発電の歴史は、明治25年(1892年)に供給を開始した琵琶湖疎水工事が最初であったと記録されている。以来約一世紀、国内での発電所総数は、1,600箇所以上、総出力でも3,500万kWを超え電力の安定供給及び負荷調整用として大いに寄与している。

最近では古い水力発電設備の全面改修や最新技術を導入した大幅な総合的改修による既設設備の近代化、活性化の計画が増加している。これは運転されている水力発電設備のうち70%近くの設備が運開以来40年以上を経過しており、老朽化や信頼性の低下を来した水力発電設備については、もはや部分的な改修や単なる部品交換では発電所の維持そのものが困難となり、保安上も問題が残るなどの理由によるものと考えられる。

もし、偶発的な要因にせよ運転中にステーパーなどの機械部品の破壊や固定子コイルの絶縁破壊に至った場合、その復旧に多大な工程と労力を要するのは明らかであり、事故に至る前に老朽化した部品の余寿命を、より精度よく把握し適切な処置を行うことが電力の安定供給の面から非常に大切である。

以上にかんがみ本稿では、水車及び発電機の寿命診断技術に対する最近の動向を述べるとともに、その予防保全実施例について紹介する。

### 2 老朽水車の寿命診断

水車の寿命診断については当然全部品がその対象となるが、単純に部品を取り替えるだけで済むものも相当数ある。しかし、いわゆる水車の寿命診断という意味では、(1)簡単に部品の交換ができないもの、(2)その強度評価に高度の技術を要し、簡単にはできないもの、(3)万一それに起因する事故が発生した場合、他に重大な影響を及ぼすもの、などを満たすものがその対象となると考えられる。そのような意味で老朽水車の寿命予測の対象部品は、ランナベーン、案内羽根及びステーパーの付根部に限られると言っても過言ではない。

以下、簡単に部品の交換ができないものとしてステーパーの付根部を代表にとり、水車の寿命診断の概要について紹介する。老朽水車のステーパー付根部には、上記(1)~(3)の条件が当てはまるとともに、高応力部であるにもかかわらず、**図1**にその一例を示すようにかなり大きな内在欠陥が存在している例が多いからである。同図は某発電所のもので、老朽化のため新製品と交換し旧品を浸透探傷法で検査したものであるが、同図から分かるように内在欠陥が出やすく、しかも従来の表面だけの探傷方法では内部の欠陥はすべて把握できないことが分かる。

さて、寿命診断のフローを要約して言えば、**図2**に示すようにBスコープに代表される最近の超音波探傷技術を適



図1 ステーパー付根部の内在欠陥例 黒い部分が内在欠陥であり、予想以上の内在欠陥が隠されていることが分かる。

\* 日立製作所日立工場

用して、ステーパー付根部の内在欠陥を断面表示して検出し、次にステーパーにかかる繰返し水圧力を実測あるいは計算によって求め、最後にこれらのデータに対して、最近急速に進展している破壊力学的検討を加えることによって内在欠陥の進展度を予測し、水車の余寿命を予測するものである。

2.1 最近の超音波探傷技術

最近の超音波探傷技術の進歩は目をみはるものがあり、多種多様なものが考案されている。しかし、ごく限られた条件下で大きな威力を発揮するものがほとんどであり、老朽水車の寿命診断用として実用化されているものは、先にも述べたように被検体の内在欠陥を縦断面で示すBスコープ方式が主である。

実物のステーパー付根部を想定したT形R付き試験片で、内在欠陥の表面粗さや、欠陥の寸法、探像方法、試験片の材質などを変化させて探傷確認試験を行い、実物水車で欠陥

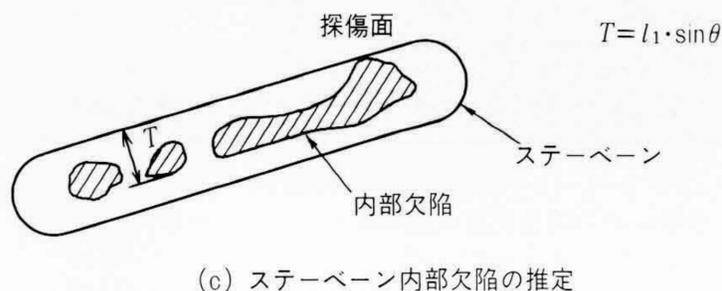
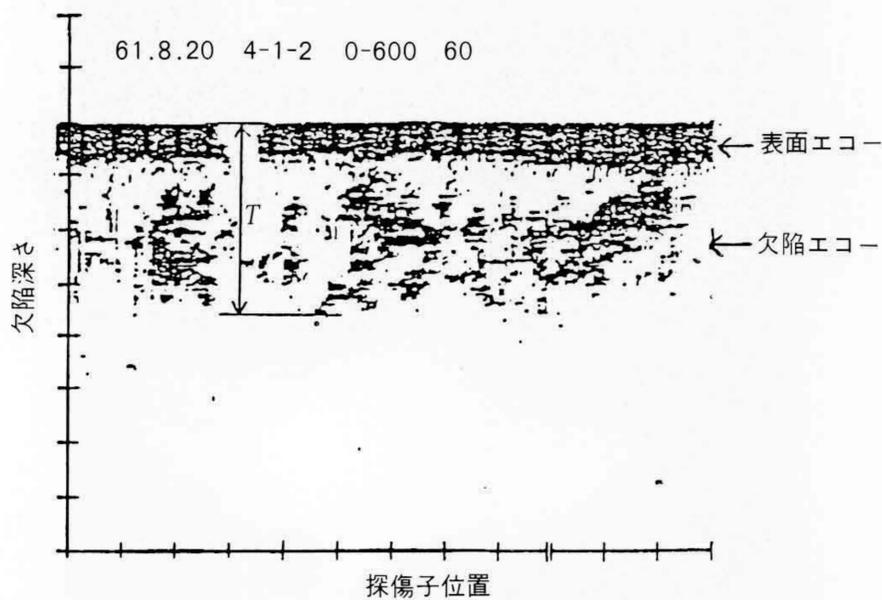
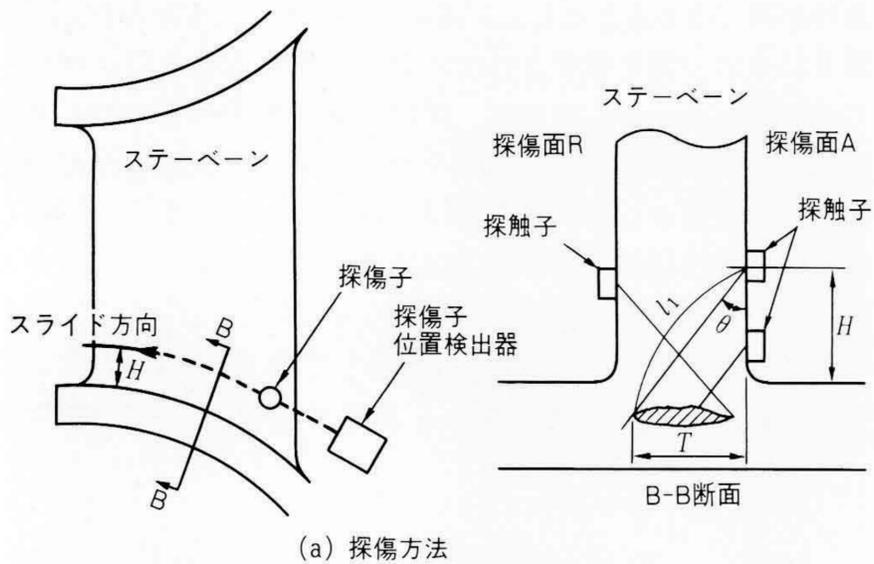


図2 ステーパー付根部の探傷例 ステーパー付根部をBスコープ表示することによって、内在欠陥をリアルに推定することができる。

検出精度の向上に努めている。

2.2 き裂に対する破壊力学的評価

破壊力学的検討は、次の(1)式で示される応力拡大係数Kを定義することから出発している。

$$K = \sigma \cdot \sqrt{\pi a} \cdot F \dots\dots\dots(1)$$

ここに  $\sigma$  : ステーパーに作用する応力

$\pi$  : 円周率

$a$  : き裂の長さ

$F$  : き裂形状によって決まる定数(形状係数)

一方、応力の繰返しごとに進展するき裂の進展量  $da/dN$  は上記の応力拡大係数Kと密接に関連しており、(2)式で表される。

$$da/dN = C_0 \cdot (\Delta K)^m \dots\dots\dots(2)$$

ここに  $N$  : 繰返し数

$\Delta K$  :  $K_{max} - K_{min}$

$C$  : き裂進展係数 } .....材料定数

$m$  : き裂進展指数 }

これを模式化して表したのが図3である。ここで  $\Delta K_{th}$  は「しきい値」と呼ばれ、これ以下の  $\Delta K$  ではき裂は進展しない。一方  $\Delta K_{ic}$  は、破壊じん(靱)性値と呼ばれ、これ以上の  $\Delta K$  ではき裂の進展は急激に進展し、いわゆるぜい(脆)性破壊を起こすことになる。

この  $\Delta K_{th}$  と  $\Delta K_{ic}$  との間が安定的にき裂が進展する領域であり、上記(2)式で表されることになる。実際の寿命予測は図3上に示すように、現状欠陥  $a_i$  から  $\Delta K_{ic}$  に相当する欠陥  $a_f$  まで

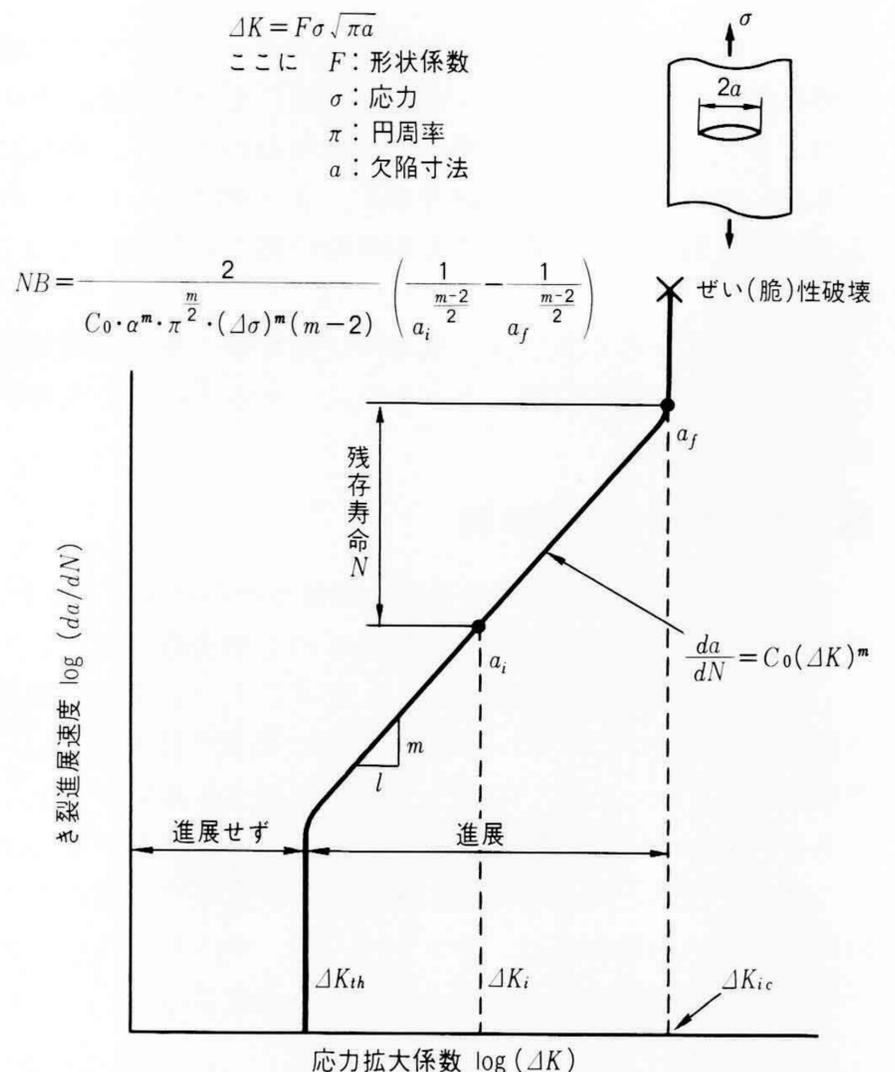


図3 破壊力学による欠陥の残存寿命  $\Delta K_{th}$  と  $\Delta K_{ic}$  の間が安定的にき裂が進展する領域である。

達するのに要する応力の繰返し数 $NB$ を次式によって計算することで行われる。

$$NB = \frac{2}{C_0 \cdot \alpha^m \cdot \pi^{\frac{m}{2}} \cdot (\Delta\sigma)^m (m-2)} \left( \frac{1}{a_f^{\frac{m-2}{2}}} - \frac{1}{a_i^{\frac{m-2}{2}}} \right) \dots (3)$$

ここで $\alpha$ は $a_i$ から $a_f$ までの $F$ の積分値である。

さて、この破壊力学による評価のもとになるき裂進展カーブは、高強度の圧延材については種々発表されているが、鋳鉄、鋳鋼についてはほとんどそのデータがなく、現在き裂進展試験を行いデータを取得中である。一方、形状係数 $F$ については種々の形状に対する計算結果が多数発表されている。

### 2.3 コンポーネント試験と実物水車への適用例

A発電所は、最近の超音波技術及び破壊力学を応用した寿命診断に基づき発電所全体が改修された昭和2年運開し、最大出力1万2,500 kW、有効落差151.7 mの立軸フランシス水車である。まず、改修前に行ったBスコープによる結果の一例を図4に示す。この結果から、内在欠陥は図1に示すものと同様に、その範囲も反作用面付根を中心に全断面に及び、予想以上の欠陥であることが分かる。

Bスコープによって予測された内在欠陥寸法、及び実測された実働応力を使用して寿命予測を行い、この発電所では、最も内在欠陥が大きいステーパーンは約7年の寿命であることが予測された。

次に、これらのスピードリング～ステーパーンを工場に持ち込み破断試験を行った。破断面の状況を図5に示すが、Bスコープによる予測結果よりも多くの内在欠陥が存在しているように見える。この原因については、Bスコープでは表示を便

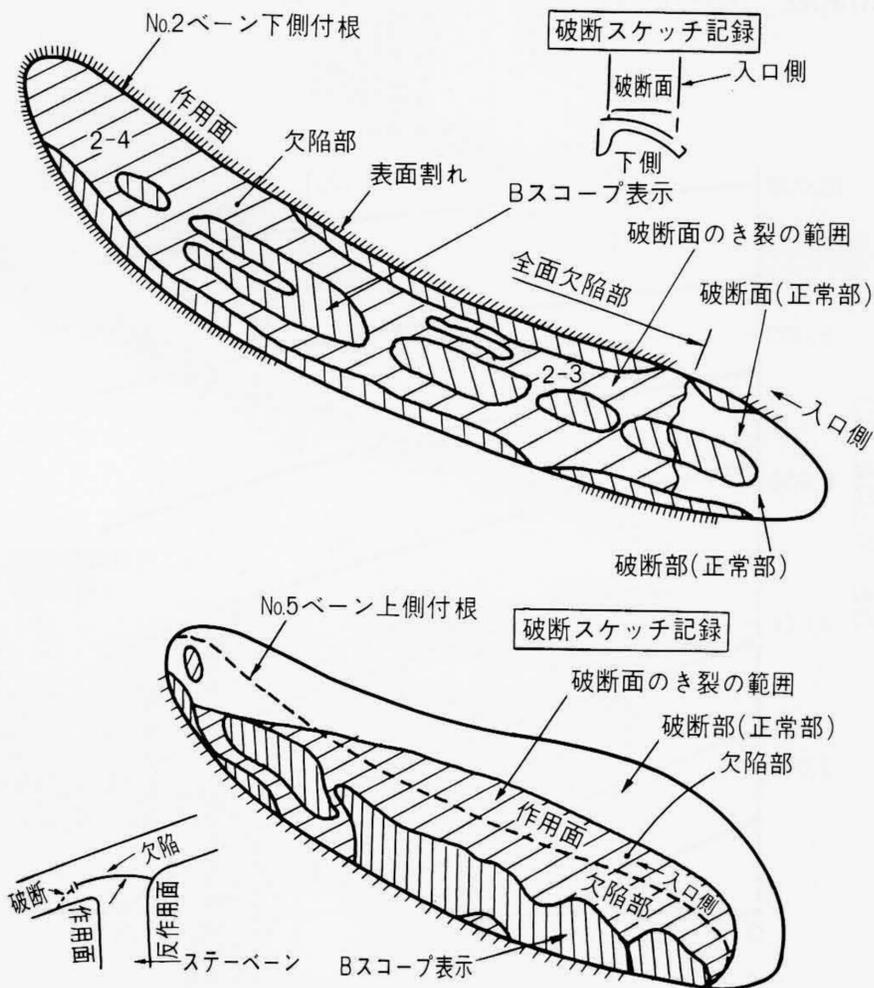
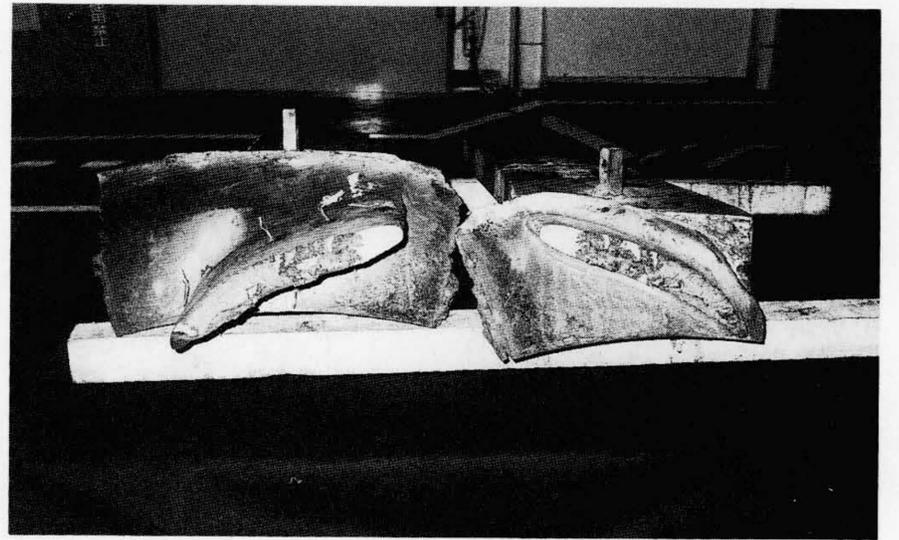


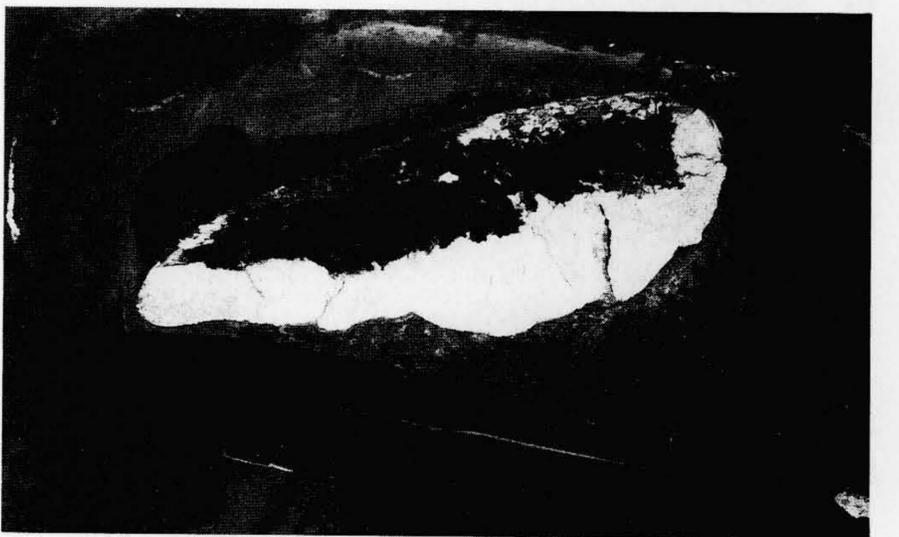
図4 画像表示による超音波探傷試験結果 細かい斜線部が破断試験前にBスコープによって推定した欠陥部で、粗い斜線部が破断面上での欠陥部である。



(a) No.2ステーパーン



(b) No.4ステーパーン



(c) No.5ステーパーン

図5 ステーパーン破断面の状況 白い部分が健全部、黒い部分が欠陥部を示す。欠陥部が広範囲にわたっていることが分かる。

宜上一平面で表しているため、破断面の高低差によるものと推測されている。

上記のA発電所の例は鋳鋼製ステーパーンの例であるが、鋳造性が良いため古い水車には鋳鉄製ステーパーン(ケーシング、スピードリング)を持った発電所も多い。鋳鉄製のステーパーンに対する寿命診断も何件か行ったがその場合の主な問題点は、

(1) 鋳鉄は一般にグレんサイズが大きく、超音波の透過性が悪いものが多い。

日立製作所の経験では、鋳鉄に対しては探傷周波数を0.5～1.0 MHz程度に落とす必要があった。

(2) 一般に鑄鉄製ケーシングの場合にはステーボルト併用方式が多いが、日立製作所の経験ではステーボルト穴の周辺にき裂が発生し、かなりのスピードで進展したものがあつた。などである。

以上述べたようなBスコープを主体とした水車寿命診断を既に二十数件行つてきているが、それらの経験から得られた事項をまとめて以下に述べる。

(1) 先のA発電所のところでも述べたように、ステーベーンが破断する場合は、単純に同一平面で破断するわけではなく、各欠陥をつないだいちばん弱い箇所で破断する。したがつて、実際の破断面での欠陥はBスコープ表示に比べて多いのが普通である。

(2) 破壊力学の検討では、Bスコープによって予測された内在欠陥をいかに実情に合った形でモデル化するかがポイントとなる。また、実働応力はできれば実測することが望ましい。

(3) 水車寿命に影響を与えるような大きな欠陥は、内在欠陥としただけにとどまっていることはほとんどなく、先の図1にも示したように、通常表面欠陥につながつてることが多い。これは内在欠陥の進展及び流水面からの摩耗による肉厚の減少によるものと思われる。したがつて、一般的には寿命診断用に超音波探傷を実施する場合、磁粉探傷検査などで表面欠陥の多いものを基準に数枚を行えば概略の方向づけをすることは可能である。

### 3 水車発電機の寿命診断

近年、水力エネルギーの見直しにより、水力発電の利用方法も起動・停止頻度の多い過酷な運転パターンに変化している。

このため、製作当時考えていなかった疲労、摩耗などの問題が無視できなくなり、各発電機部品に対する寿命評価技術が要求されるとともに、最新技術による信頼性の向上、省力化、高効率化といった運転上、経済上の見地からの改良要求も高まっている。ここでは、水車発電機の主要部品の寿命評価技術及び予防保全実施例について述べる。

#### 3.1 固定子コイル絶縁の寿命評価

大形回転機の絶縁システムは、構成材料の進歩とともに当初のアスファルトコンパウンドから不飽和ポリエステル樹脂へ、更にエポキシ樹脂へと変遷してきており、合成樹脂絶縁が適用されて既に約30年を経過した。初期のアスファルトコンパウンド絶縁については、電力中央研究所技術報告No.67001「発電機巻線絶縁劣化判定基準」が広く運用され、ほとんどのコイルが絶縁更新されたが、合成樹脂絶縁については公的判定基準がなく、現在、電気学会及び電力中央研究所が検討を開始している。

ここでは、固定子コイル絶縁の寿命推定法<sup>1)~3)</sup>を幾つか紹介する。

##### (1) 運転履歴からの寿命評価

絶縁劣化の要因を電氣的劣化、熱劣化、環境劣化及びヒートサイクル劣化に分類すると、この中で前三者は運転時間Yに、またヒートサイクル劣化は起動・停止回数Nに比例する劣化と考えられる。つまり、絶縁層の複合劣化は運転履歴に関係し、複合劣化による残存破壊電圧 $V_R$ は、次式で表される。

$$V_R = (1 - D_1)(1 - D_2)(1 - D_3)(i=1 \sim 4)(1 - D_4) \times 100(\%) \\ = (1 - aY)(1 - bN) \times 100(\%) \dots\dots\dots(4)$$

ここで  $D_i$  : 各種の劣化損耗率  
 $a$  : 年次損耗率  
 $b$  : 起動・停止損耗率  
 $Y$  : 運転年数  
 $N$  : 起動・停止回数

開発時及び実機データから実験的に係数 $a$ 、 $b$ を求めると、  
 $a = 8 \times 10^{-5}$  : 起動・停止回数1,000回当たり8%  
 $b = 7 \times 10^{-3}$  : 運転時間1年(24時間×365日)当たり0.7%となり、これらを(4)式に代入し、起動・停止回数Nと運転時間Yを軸として残存破壊電圧 $V_R$ をプロットしたものが図6である。この手法は、「NYマップ法」と呼ばれている。

##### (2) 非破壊試験からの寿命評価

絶縁劣化は絶縁層内のボイド量が増加する形となり、一般的にボイド量が多いほど、また局部的に大きなボイドが存在するほど絶縁破壊電圧は低下する。これらのボイドの状態を把握する有効な試験法としては、平均的なボイド量の検出法として、交流電流試験法の電流増加率 $\Delta I$ 及び誘電体正接試験法の $\Delta_2$ の評価法がある。また、局部的なボイドの検出法としては、部分放電試験法の最大放電電荷量 $Q_{max}$ の評価法がある。これらから残存破壊電圧 $V_R$ は絶縁層の平均的な劣化度を表す放電パラメータ $\Delta = \Delta_2 + \Delta I$ と局部的な劣化度を表す $Q_{max}$ の関数で表せると考え、モデルコイル及び実機コイルによる試験から次の実験式が得られている。

$$V_R = 100 - 1.8(\Delta - 0.8) - 37.5 \log \frac{Q_{max}}{1.5 \times 10^{-9}}(\%) \dots(5)$$

図7は(5)式を図示したものであり、この手法は「Discharge Map法」(略称Dマップ法)と称されている。

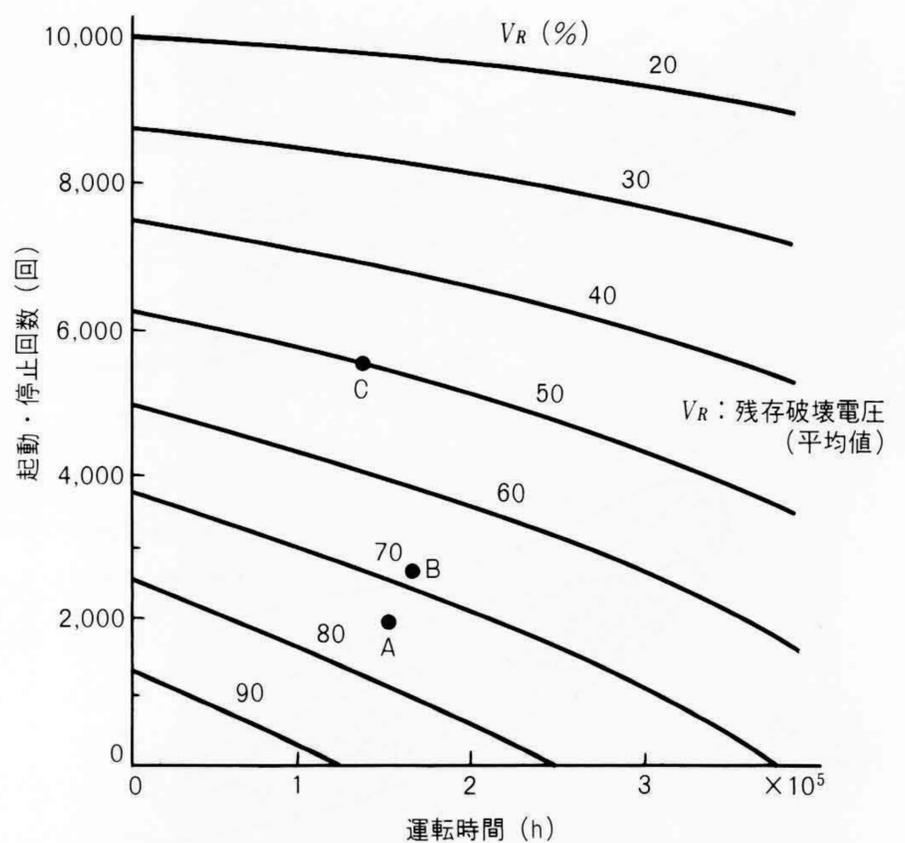


図6 NYマップ 運転時間と起動・停止回数から残存破壊電圧 $V_R$ を求める図を示す。曲線は初期値(100%)に対する $V_R$ のパーセントで本文中の(4)式を図示したものである。

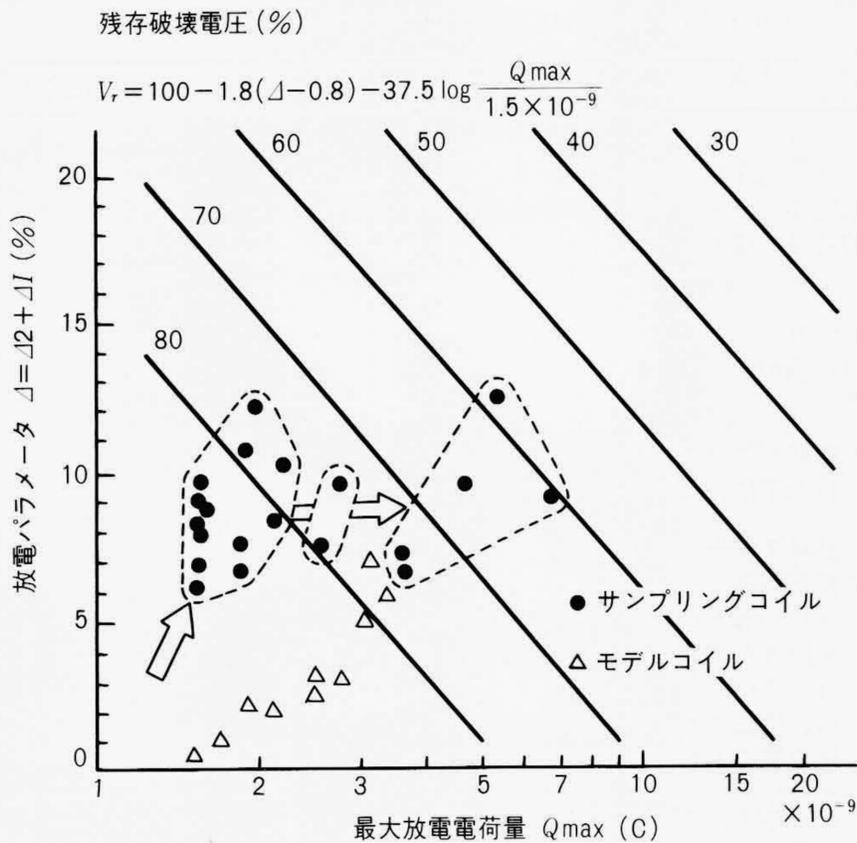


図7 Dマップ 最大放電電荷量及びΔからコイルの残存破壊電圧V<sub>r</sub>を求めるグラフであり、本文中の(5)式を図示したものである。

(3) 絶縁寿命点

国際基準(IEC-216)では、絶縁物の寿命点を「絶縁破壊電圧で初期値の50%低下点」と定義している。一方、国内(電力中央研究所)では、試験電圧相当の(2E+1)kV程度の残存破壊電圧を持つことを推奨しており、製作初期の破壊電圧は大略4~5E程度確保されているので、パーセント表示では初期値の40~50%相当になる。以上のことから、寿命の管理値を予想される最低残存破壊電圧値が50%になるときを寿命点とし、40%に到達したときを運転の限界点として管理すれば、信頼性の高い運転管理ができると考えている。

3.2 界磁コイル絶縁の寿命評価

界磁コイルのレイヤー絶縁は起動・停止に伴う導体の温度変化によって軸方向及び幅方向に伸縮を受け、接着レジンや絶縁材料の劣化によってはく離し、レイヤー絶縁のずれ出しが生じる。これによりレイヤー間短絡が発生すると、導体の損傷や異常振動発生の原因になる。また一般に、界磁コイル導体は低電圧であり冷却性の面から裸の場合が多く、ポールコアと導体間にアース絶縁を施している。このアース絶縁は熱的、機械的に劣化が進むとメグ低下の現象が現れ、遂には界磁接地事故に至る場合がある。界磁コイルの絶縁劣化判定法のフローチャート例を図8に示す。

3.3 機械部品の寿命評価

発電機的主要な機械部品としては、シャフト、スパイダ、固定子枠、ブラケット、軸受などがある。製品は種々のファクタを考慮し十分な余裕を持っているが、部品ごとに故障発生率が異なり、疲労や偶発などで故障に至る場合もある。そこで定期点検などでき裂や欠陥など故障、破壊に結びつく要因が発見されたときは安全裕度の検討を行い、事故を未然に防止する予防保全が不可欠とされている。

強度評価フローチャートを図9に示す。き裂あるいは欠陥

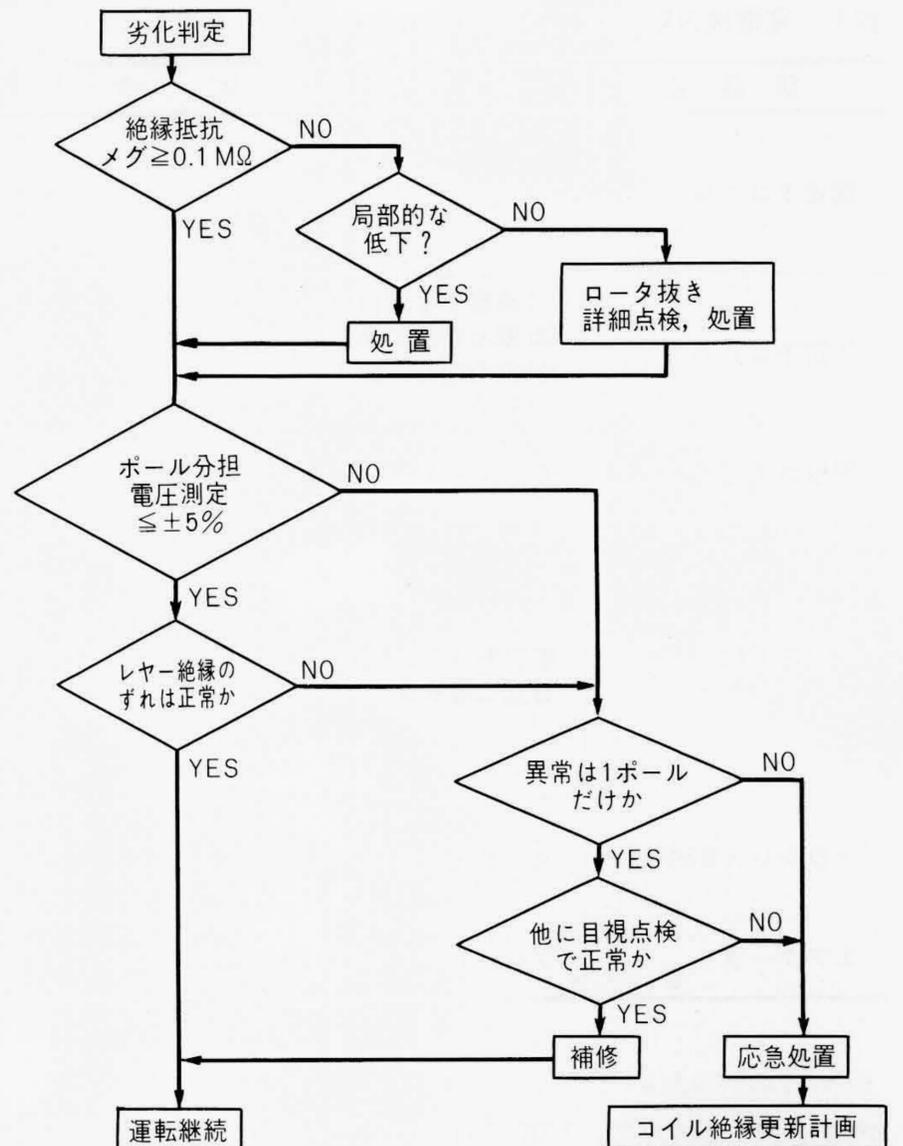


図8 界磁コイルの絶縁劣化判定法 界磁コイルの絶縁劣化を判定する方法を示すフローチャートである。

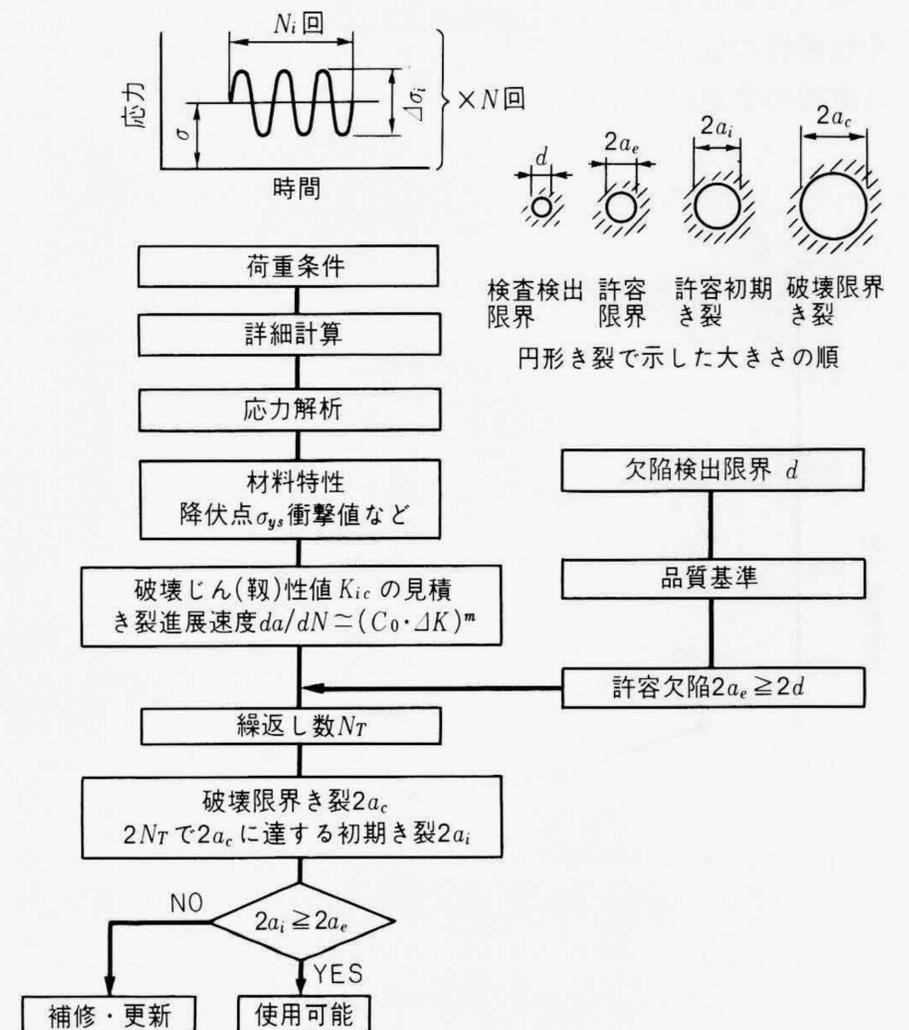


図9 強度評価フローチャート き裂・欠陥の大きさや形状、荷重条件、材料特性から破壊力学的に欠陥の進展度を判定し、使用可否を判定する方法を示すフローチャートである。

表1 発電機の新技術 予防保全に伴う改修時に採用されている発電機新技術の適用部位、特長及び更新実績を表にまとめて示す。

| 部 品 名     | 適 用 技 術  | 特 長   | 改修実績(昭51~62年) |
|-----------|--|---|---------------|
| 固定子コイル    | エポキシレジン絶縁システム  | (1) 機器がコンパクト<br>(2) 誘電正接—電圧特性が優れている。<br>(3) 耐熱安定性、ヒートサイクル特性が優れている。<br>(4) 機械的特性が優れている。  | 96台           |
| 固定子コア     | (1) 高級ケイ素鋼板の採用<br>(2) 鉄心寸法の適正化<br>(3) 鉄心端部の段落とし<br>(4) 鉄心端部のスリット切り | (1) 鉄損の低減<br>(2) 漂遊負荷損の低減   | 83台           |
| 界磁コイル     | 新絶縁方式  | (1) 優れた絶縁材による信頼性の向上<br>(2) 絶縁抵抗低下防止策の採用   | 98台           |
| スラスト軸受    | 日立ピボットスプリング形スラスト軸受<br>整流形スラスト軸受<br>日立二層式スラスト軸受                     | (1) 構造が簡単で保守が容易である。<br>(2) 荷重調整が不要<br>(3) 各シューに加わる荷重アンバランスが少ない。<br>(4) シューの傾きが容易で、油膜形成能力が高い。<br>(5) 可とう性が高い。<br>(6) 気泡停留が防止され、焼損の危険性が少ない。<br>(7) 軸受面圧を高くとれ、小形・低損失である。 | 82台           |
| ブラシレス励磁装置 | 交流励磁機及び回転整流器   | (1) ブラシが不要で、点検保守が容易である。<br>(2) カーボン粉による機内汚損がない。<br>(3) 制御機器の据付面積の低減   | 56台           |
| エアクーラ     | プレートフィン形エアクーラ  | (1) 冷却効果の向上<br>(2) 耐振性の向上   | 10台           |

が発見された時点で、破壊の様式(低サイクル疲労、高サイクル疲労、応力腐食割れなど)を明らかにし、破壊力学的解析で残存寿命を推定することによって、継続使用可否の判定及び補修・更新の計画を検討するのが一般的である。

### 3.4 発電機の予防保全実施例

水力発電設備は歴史が古いだけに、長期運転による老朽化や信頼性の低下を来したものも多く、保守や信頼性の見地から改善の余地は多く残されている。このため、前述の寿命診

断結果を踏まえオーバーホール時などタイミングの良い時期に合わせて新技術を導入することによって、信頼性向上、性能向上及び保守省力化を目指した総合的改修が行われている。表1に主な新技術及び特長を示す。これらの新技術を適用した改修に伴う性能向上の例として、50 MVA級の発電機についてコイルだけ更新する場合、コイル及びコア共更新する場合の効率向上の予想値を図10に示す。同図から分かるように、コイルだけでなくコアを更新することによって効率向上の効果は大きくなる。

## 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、改修の技術的裏づけとなる寿命診断技術はますます重要になる。機器の寿命診断としては、オーバーホールや定期点検を利用して精密点検や簡易点検を計画的に実施し、特に運開後20年以上を経過するものについては、機械部品の非破壊試験によるき裂・欠陥の検出による寿命評価、また固定子コイルの絶縁に対しては、絶縁診断試験やコイルのサンプリング試験による寿命評価を行い、水力発電設備の信頼性確保を図ってゆくことが大切である。

### 参考文献

- 1) 松延, 外: 大型回転機コイルの絶縁劣化診断技術, 電気学会絶縁材料研究会, EIM-86-41(昭61-5)
- 2) 谷口, 外: 絶縁劣化と寿命予知テクニック, 電気計算, Vol.53, No.15, 電気書院(昭60-11)
- 3) 白井, 外: 大形回転機コイルの寿命診断技術, 第17回信頼性・保全性シンポジウム, 財団法人日本科学技術連盟(昭62-6)
- 4) 発電機巻線絶縁劣化判定基準技術研究報告 No.67001, 財団法人電力中央研究所技術研究所(昭和42-4月)

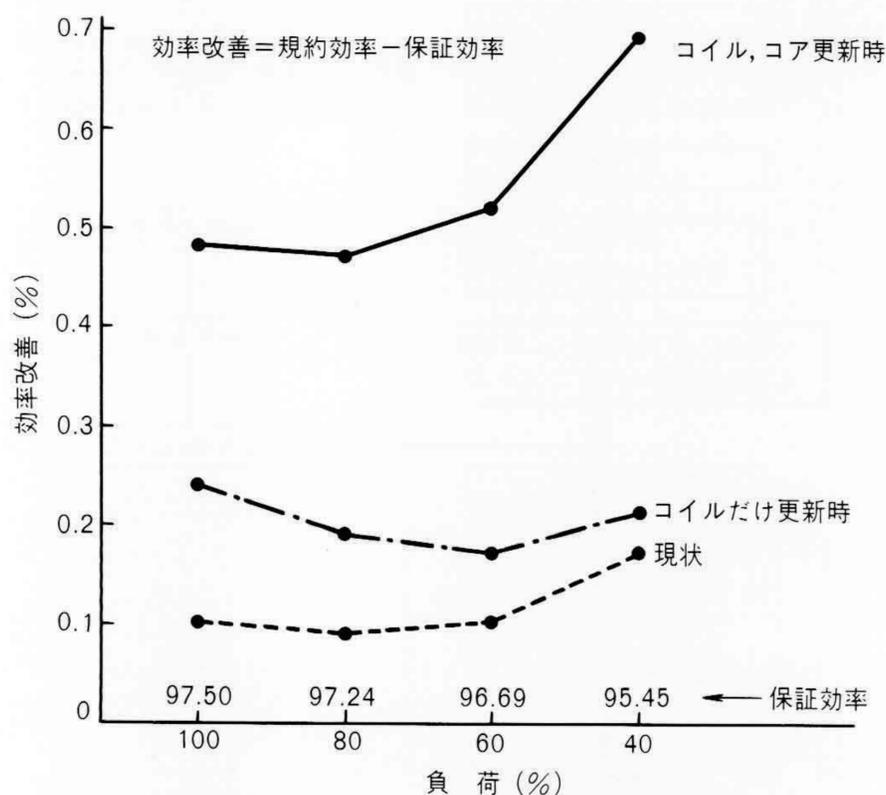


図10 改修後の効率向上例 改修に伴いどの程度発電機効率が向上したかを示すグラフである。コイルだけ更新した場合に比べて、コイルとコアを同時に更新するほうが効率向上の効果が大きいことが分かる。