

水車ステーベーンの超音波フェーズドアレイ法の適用

船戸 一寛 *
Kazuhiro Funato

引地 達矢 **
Tatsuya Hikichi

水力発電所の水車ケーシング・ステーベーンは製造年代が古く長期間（昭和初期～現在）にわたって使用されているものが多く、予防保全的に設備更新が行われてきた。

しかし水車ケーシング・ステーベーンなどはほとんどが建屋基礎に埋設されているため設備更新も大規模な工事となり負担も大きい。

このため、関西電力株式会社殿と当社は共同でステーベーンに代表される水車部材の残存寿命評価法の改良に取り組んできた。本稿では、残存寿命評価精度の向上をはかるため別項に紹介する当社独自の余寿命解析の初期条件となる欠陥情報を精度良く測定する目的で実施している、フェーズドアレイ法の水車実機工事への適用状況を紹介する。

キーワード：水車ステーベーン、NDI、超音波探傷、フェーズドアレイ、欠陥、延命化

1. はじめに

水力発電所の多くは山間部に設置されていて、ダムなどの貯水池より導かれた水の力を電気に変えるため効果的で、かつ経済的な水車の型式が採用されている。水車の型式は衝動水車と反動水車に分類され有効落差や水量によりペルトン水車、フランシス水車、カプラン水車などがある。ペルトン水車は、衝動水車の代表的な型式で高落差の水力発電所に適しており、その構造は他の2種類と異なり水をノズルから噴出させ、その勢いでバケット（水車）を直接、回転させる形式である。

フランシス水車、カプラン水車は反動水車でランナー（羽根車）の形状は異なるが水を導くケーシングやガイドベーン（案内羽根）を用いる方法は同様である。一般的にフランシス水車は中落差、カプラン水車は低落差に採用されることが多いようである。この中でもフランシス水車は国内水力発電所 1863 ヶ所（建設中は除く）のおよそ7割で採用されている最も一般的な型式で当社で受注している点検工事もすべてこの型式である。図1に水力発電所の構造概要を示す。

水車主要部位のケーシングやステーベーン（整流羽根）の劣化は、水中に含まれる土砂や水滴に

* 検査事業部 技術部 NDE技術グループ 課長

** 検査事業部 技術部 NDE技術グループ

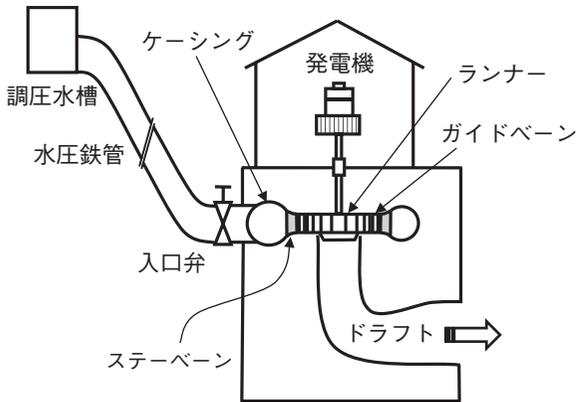


図1 水力発電所の構造概要

よる衝撃、起動停止による応力の変動などにより表面きずや内在欠陥が起点となって進展する可能性が懸念されている。

水車の健全性を確認するために数年毎に磁粉探傷検査 (MT)、超音波探傷検査 (UT)、金属組織観察 (SUMP による) などの非破壊検査を実施し、電気学会技術報告 II 308 号の解析方式により残存寿命を評価しているが、この解析方式は複数欠陥であっても 1 個の欠陥として保守的 (安全側) に評価するため余寿命は短くなる傾向がある。

これを改善し欠陥情報を精度良く測定し、残存寿命評価精度の向上をはかる目的で従来から行なわれている UT (パルス反射法) をフェーズドアレイ法に変えて実機検査への適用拡大を展開しており、その適用状況を紹介する。

2. 水車ステーバーンの検査

水車主要部位のステーバーンは水圧鉄管よりケーシングへ導かれた水圧からケーシングを保護するための補強および水の整流の役割を担っている。ケーシングやステーバーンの固定部分は製造後 50 年以上供用されているものも多い。昭和初期に製造された鋳鋼製水車ステーバーンは、製造当時としては最新の技術で製造されているものの不純物や欠陥を含むものが多く材料の粒子が粗大

であったり、成分も不均一であり、現在生産されているものに比べて低品質の材料である。

一般的に応力が集中し、き裂が発生しやすいステーバーン付根部分の非破壊検査には、磁粉探傷検査 (MT)、超音波探傷検査 (UT)、金属組織観察 (SUMP) などが適用されているが、UT を適用する場合、形状が複雑で材料の成分が不均一なため検出性 / 識別性や探傷感度の設定が困難である。

これらの課題を改善し、残存寿命評価精度の向上を図るために欠陥全体像の描写性に優れ、欠陥情報を精度良く測定できるフェーズドアレイ法を適用した。図2「水車非破壊検査の概要」に示すとおり表面検査は、MT を実施して検出された欠陥の代表部についてき裂深度計による深さ測定と SUMP による進展性調査を行なう。内在欠陥に適用する UT は、当初は波形だけで判断する A スコープ UT であったが、近年は描画機能を持つ B スコープ UT を実施してきた。さらに描写性に優れ欠陥情報を精度良く測定可能なフェーズドアレイ法の適用拡大を推進している。

3. フェーズドアレイ法と装置の概要

フェーズドアレイ法は、医療分野で結石や胎児の診断に使われているエコーという技術を工業分野に応用したものであり、その原理は超音波の振動子を複数 (16 ~ 128Ch) ならべて配置した探

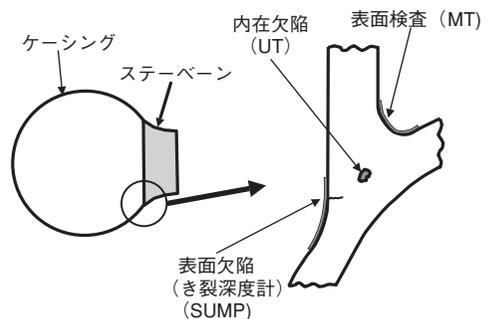
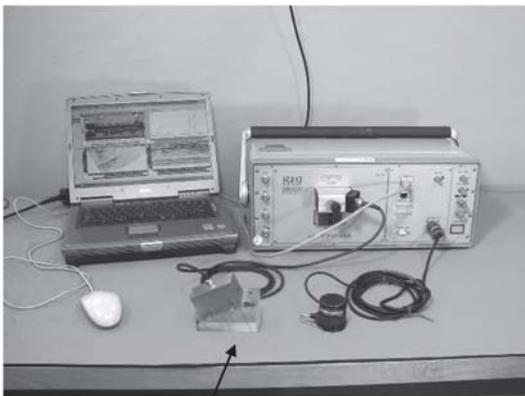


図2 水車非破壊検査の概要

触子に電子制御で時間差をつけて電圧をかけることによりビームの向きを制御し、受信した信号を画像化するもので、原子力配管の溶接部欠陥サイジング、その他構造物の検査などで能力や精度は実証済である。本試験では当初（平成 14 年）、図 3 に示すフェーズドアレイ探傷器の普及器である R/D Tech 社製 TomoscanFocus を使用していたが、装置が幅 500mm × 高さ 200mm × 奥行き 400mm × 約 35Kg と大きく重く PC も必要であり、現地ではマンホールから搬入しなければならない制約もあるため平成 15 年度に図 4 に示す小型で汎用性に優れた R/D Tech 社製 OmniScan を導入した。OmniScan は幅 350mm × 高さ 200mm × 奥行き 150mm × 約 5Kg ありコンピュータ技術の



従来型64ch (100L × 50W)

図 3 従来型フェーズドアレイ装置および探触子

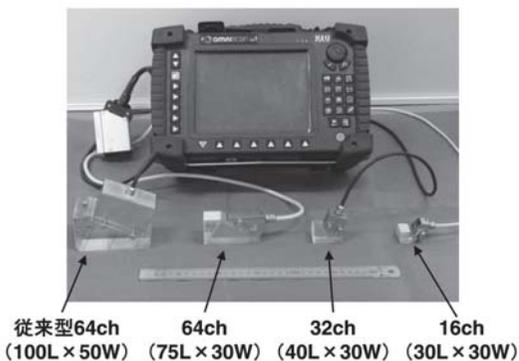


図 4 新型フェーズドアレイ装置および各種探触子

進歩で、フェーズドアレイ探傷装置も従来装置と同等以上に小型化しており、かつ装置単体でデータ処理まで可能である。図 5 にステーパーン断面の通常 UT と比較してフェーズドアレイ法のセクタ走査方法を模式的に示している。

欠陥の大きさを測定する場合、通常 UT できずを画像化するには探傷範囲を矩形走査するための XY スキャナーが必要でステーパーンなどの複雑形状では形状に合わせたスキャナーが必要となる場合もある。

当時の鋳物の材質は、肉厚変化などで大きく結晶粒度が異なり、表面の粗さも均一でない場合もあり、超音波の伝達や減衰の度合いが場所により異なる。その内部には、ざく巢のような隣接した複数の小さなきずが多く、従来の平板振動子を用いた探触子では、材料中を超音波が伝播するに連れて超音波ビームは拡散してビーム幅が広くなるため、きずを測定したとき探傷画像がぼける。このため、高感度の探傷を行うと隣接するきずを分離できずに大きな一つのきずと評価する場合も起こり、これにより寿命評価すると不必要に寿命が短くなる。

また、従来の通常の探傷感度での探傷では、選定した固定屈折角での探傷のため、きずの傾きによっては十分な反射エコーがえられず、また材料の減衰のばらつきの影響を大きく受けて過小評価

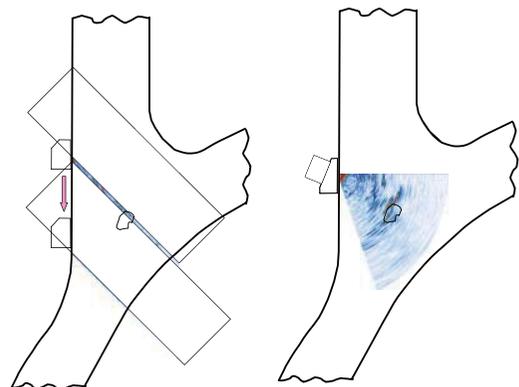


図 5 通常 UT とフェーズドアレイ法の比較

となることも多い。測定精度改善策の一つとして集束探触子を用いて鮮明なきずの像を得る方法もあるが、従来方法では超音波ビームの集束する深さは一定のため、発生したきずの深さによって用いる探触子を変える必要があり、探触子毎に探傷感度の校正が必要なために探傷に極めて多くの時間を要する。

これに対して、フェーズドアレイ法ではビーム角度を電子制御したセクタスキャンと左右走査の組み合わせで画像化するので一軸のエンコーダなどを用いるだけでよく、装置が簡易になり、かつ複雑な鋳物形状に対しても対応が可能になる。ダイナミックフォーカシングを用いるので、きずの深さに対して最も超音波ビームが細くなる条件で探傷し、きずの鮮明な像を短時間に得ることができる。従って、隣接するきずの分離が容易になり、欠陥全体像の把握が可能で正確な寿命診断に寄与できる。

図6～図8に示すとおり、同じ試験体を使用した画像比較で、従来法 UT に比べてフェーズドアレイ法ではきずの実態をよく把握できおり、また欠陥の深さ方向の測定では従来法 UT が 18.1mm に対しフェーズドアレイ法が 37mm と検出性に大きな差があることが良く分かる。

4. 水車実機への適用

水車ステーベーンのフェーズドアレイ法による欠陥測定は、すべてのステーベーンについて行なうのではなく、まず表面検査 (MT) を実施して過去の検査記録などと照合して余寿命評価すべきステーベーンを数枚選定する。選定したステーベーンの代表部について板厚測定、翼断面形状測定、付根部の R 形状測定、ケーシングの R 形状測定、ステーベーンの長さ×幅など全体的な寸法測定、探触子走査の基準位置の設定を行なう。これらは欠陥の位置を特定し断面上の位置関係を明

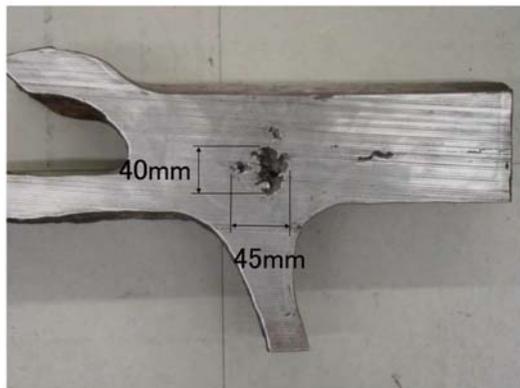


図6 フェーズドアレイ法と従来法 UT の比較試験体

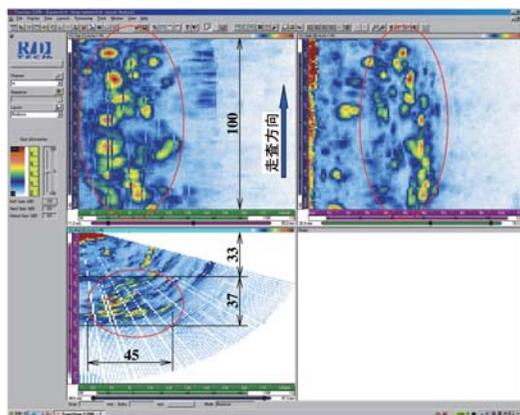


図7 フェーズドアレイ法データ解析

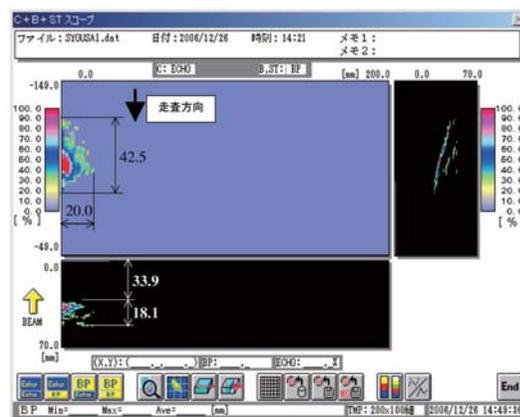


図8 従来法 (B スコープ) UT データ解析

確にすると共に後に行なう余寿命解析の初期条件となる重要な測定である。

フェーズドアレイ法の感度設定は、通常 UT と同様に JIS RB-4 に準拠した鋳造品の試験片に設けられた横穴からの反射エコーを 80% CRT に設定して試験片と実機の減衰率を補正し、これを探傷感度とする。探触子にはエンコーダを接続して UT データと位置データを同時に採取する。図 9 に実際の作業状況を、図 10 に探傷後に得られる生データの部分サンプルを示す。データは探傷部位の A スコープ（波形表示）、B スコープ（側面画像）、C スコープ（平面画像）、D スコープ（断面画像）で生成される。これを詳細に解析して断面上の分布、欠陥の大きさをまとめたものが図 11 の記録である。これら表面欠陥と内在欠陥の

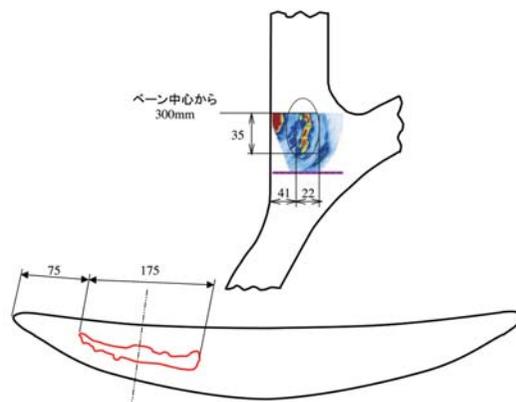


図 11 UPA データ解析結果記録例

長さや深さ、全体の分布、相関位置と事前に測定した寸法形状測定結果を初期条件として余寿命解析を行なう。

5. 今後の改良および展開

現在まで数プラントについて残存寿命評価精度の向上をはかるため超音波フェーズドアレイ法を実機水車へ適用してきたが、客先よりフェーズドアレイデータを見易いものにして欲しいとの改善要望があった。具体的な問題点としては検査の結果、得られた A、B、C、D スコープを解釈するためには専門知識が必要であり、専門家の説明を必要とすることである。これについてフェーズドアレイ法をさらに展開するため検査画像データを実機形状データ（CAD など）と合成して立体表示が可能か検討中である。図 12 はフェーズドアレイデータと 3D CAD データを試験的に手動合成したものであるが、このように視覚的な形で表示できれば内在する欠陥の大きさや位置関係を誰が見ても理解し易いものとなるので開発中である。また、従来手法でその測定値の誤差が大きいとされている、き裂深度計による表面欠陥の深さ測定に超音波法を代替可能か検討中である。平板単純形状試験体ではその効果が確認できたので



図 9 スターベーンの検査状況

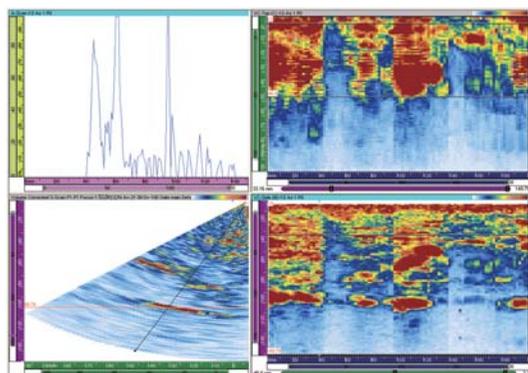


図 10 水車実機の探傷結果例

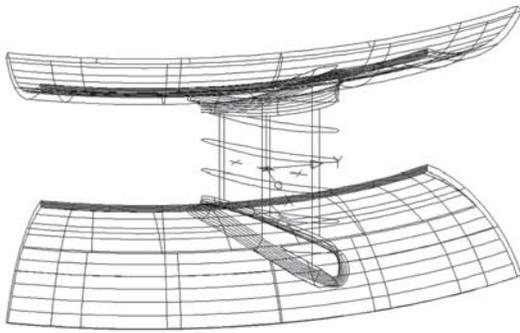


図 12 水車ステーベンのフェーズドアレイデータ
3D表示化

実機試験体による検証試験を行ない、将来的にはフェーズドアレイデータと表面欠陥測定データと合成し、これを立体表示が可能にできるよう開発中である。

6. まとめ

水力発電所の主要部位である水車ステーベンの検査に超音波フェーズドアレイ法を用いて余寿命解析の初期条件となる欠陥情報を精度良く測定することにより残存寿命評価精度の向上が図れ

た。これにより水力発電所主要部位の設備更新時期の延伸ができ、発電原価の低減に寄与できるものと期待している。

7. 謝 辞

本稿で紹介した残存寿命評価法の改良は関西電力株式会社殿との共同研究により取り組んできましたが、ご指導を賜った関西電力株式会社殿の多くの関係者の方々に心より深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 青山順、奥出邦夫、中山英治、飯田伊佐務、水力発電設備における水車主要部位の新しい残存寿命評価手法の開発、ターボ機械 第34巻第6号（2006年）
- 2) 水車発電機器の劣化評価調査専門委員会、水力発電設備の現状と劣化診断技術－水車および水車発電機の主要部位について－、電気学会技術報告（Ⅱ部）、第308号（1989年）



検査事業部
技術部 NDE 技術グループ
課長
船戸 一寛



検査事業部
技術部 NDE 技術グループ
引地 達矢