

近年の UT 診断技術の進展

Recent Developments in UT Diagnostic Technology

松本 智敏 MATSUMOTO Chitoshi JFE スチール 西日本製鉄所 (福山地区) 設備部設備技術室 主任部員 (係長)

要旨

JFE スチール西日本製鉄所 (福山地区) では設備の健全性評価を目的として、超音波探傷検査の技術を用いたギヤカップリングの摩耗診断技術と煙突鉄皮の診断技術を開発した。ギヤカップリングの摩耗診断技術は、カップリング外筒から歯面の摩耗量を定量的に精度よく診断できる技術である。また煙突鉄皮診断技術は、煙突の表面を無線式の検査台車で自在に走行し肉厚を測定できる技術である。開発した診断技術を実用化し現場で有効活用することで、設備の安定操業に貢献している。

Abstract:

JFE Steel West Japan Works (Fukuyama) developed wear diagnostic technology for gear coupling using ultrasonic flaw detection technology and diagnostic technology for chimney iron skin for the purpose of soundness evaluation of equipment. The wear diagnostic technology of the gear coupling enables quantitative and accurate diagnosis of the wear amount of the tooth surface from coupling outer cylinder. In addition, the chimney diagnosis device can freely travel on the surface of the chimney with a wireless inspection dolly and measure the wall thickness. We contributed to the stable operation of the facility by making practical use of developed diagnostic technology and making effective use at the site.

1. はじめに

JFE スチール西日本製鉄所 (福山地区) では、製鉄設備を構成する各部材のメンテナンスにあたり、非破壊検査を用いて健全性や安全性を評価している。具体的には、溶接部や軸部材の UT (Ultrasonic Testing) 検査を行い、内部に発生している欠陥の有無により異常評価を行っている。また、近年では TOFD (Time of Flight Diffraction) 法によるタンク類の溶接部検査やフェーズドアレイ法による軸段付き部の亀裂検査など新しい探傷方法も実用化されている。

しかし、ギヤカップリングをはじめとする分解して検査を行う設備や煙突等の巨大設備は、時間と費用がかかるため、非破壊検査を実施できていなかった。そこで、UT 検査を応用し厚さを測定することにより設備の状態を検査できる技術を開発した。

本報では、ギヤカップリングの歯先厚みを測定する摩耗診断技術と、煙突鉄皮厚さを自由に測定出来る装置の開発について報告する。

2. ギヤカップリング摩耗診断技術の開発

2.1 超音波の特性と測定原理

超音波の反射特性について図 1 に示す。試験体中に縦波

の超音波を入射した場合、探触子から垂直方向に進んだ超音波が底面で反射する底面エコーと、拡散した超音波が遅れて検出される遅れエコーとに分かれる。遅れエコーは、入射時に拡散された縦波が壁面で反射し横波にモード変換し、更に反対の面で反射する際に縦波へモード変換するということを繰り返し、探触子へ戻るまでに底面エコーに対し遅れが生じたものである。底面エコーと遅れエコーのビーム路程差を ΔWn とすると、 ΔWn は式 (1) で表すことができる。

$$\Delta Wn = \frac{n \cdot d}{2} \sqrt{\left(\frac{C_L}{C_S}\right)^2 - 1} \dots\dots\dots (1)$$

ここで d は試験体の厚み、 C_L は試験体中の縦波音速、 C_S

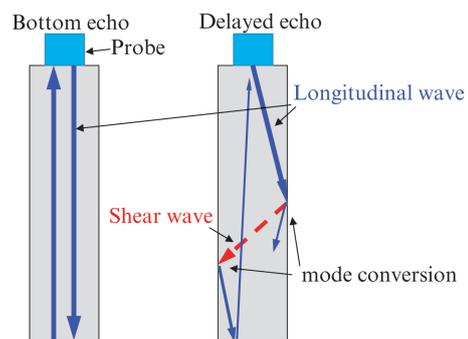


図 1 超音波入射時の反射ルート

Fig. 1 Reflection route at ultrasonic incidence

2019 年 3 月 19 日受付

は試験体中の横波音速, n は試験体中の幅を横切った回数で、底面エコーから数えて n 番目に現れるエコーを意味する。式 (1) から試験体中の厚み n と ΔWn は比例関係にあるので、 ΔWn を計測することで試験体の厚み d を求めることが可能である。上記の説明は面が長方形の場合であるが、ギヤカップリングやスプラインカップリング等の歯部のように台形の場合も、モード変換現象は同様に起こり遅れエコーが発生する。

2.2 実寸モデルによる反射ルート検証

上記遅れエコーの反射ルートと歯先厚みとの関係を **図 2** に示す歯先検証用モデル (モジュール 6, 圧力角 20 度) を用い検証する。試験片上部端面 (歯先の反対側) から歯先に向けて超音波を入射すると、入射された超音波は探触子と超音波の特性により、ある指向角を持って拡散する。拡散する超音波の指向角 ϕ_0 は次式 (2) で求められる。

$$\phi_0 \approx 70 \frac{\lambda}{D} = 70 \frac{C}{Df} \text{ (度)} \dots\dots\dots (2)$$

このとき D は円形振動子の直径, λ は超音波の波長, C は音速, f は周波数である。指向角は振動子直径に半比例し、波長に比例することがわかる。探触子を小さくし指向角を大きくすることで、歯面による反射が起き、遅れエコーが発生する。この時の A スコープ画像を **図 3** に示す。

検出された超音波の振幅を縦軸にし、時間を横軸に取ると底面エコーに遅れて遅れエコーが検出されることがわかる。この底面エコーと遅れエコーのビーム路程差が ΔWn である。**図 4** に歯先に超音波を入射した際の超音波反射ルートと強さを示す。底面エコーの反射ルートは歯先の端面で反射する最短ルートとなり、端面が十分に広い場合、反射の強さは 1 となる。一方遅れエコーのルートは無数に考えられるが、遅れエコーのルートのうちで底面エコーから最も近く、かつ音圧が最も高いルートをシミュレーションで求めた。

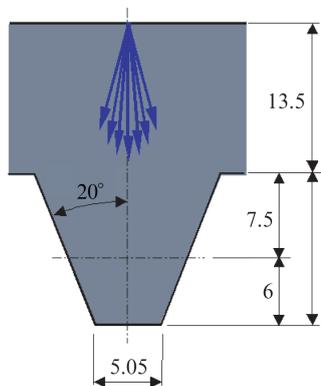


図 2 検証用モデル (モジュール 6)
Fig. 2 Verification model (module 6)

このルートでは、まず歯先先端近傍の一方の側面で反射し、そこで横波にモード変換が起き 0.85 まで減衰する。続いて歯先先端面で正反射し、更に歯先先端近傍の他方の側面で縦波にモード変換し、0.68 まで減衰して探触子に戻る。このように検出されたエコーにより、歯先の厚みを測定することができる。

次に **図 5** に歯先厚に対する底面エコーと遅れエコーのビーム路程差の関係を示す。歯先厚の厚い A の状態では、底面エコーと遅れエコーのビーム路程差は大きい。摩耗により歯先が薄くなるに従い B から C へと移行し、底面エコーと遅れエコーのビーム路程差は小さくなる。この歯先厚とビーム路程差の関係は幾何学的に計算可能であり、歯先厚とビーム路程差を幾何学的に求めた換算テーブルの例を **図 6** に示す。

モジュールや圧力角の歯形寸法によって直線の傾きは異なるものの、歯先厚とビーム路程差は一次線形の関係にある。なお **図 6** の換算テーブルはモジュール: 8, 圧力角: 20, 歯型: 並歯, リム厚: 27 mm, 歯数: 71 の歯形寸法の場合である。このテーブルを用いて同寸法のギヤカップリングを測定することで、摩耗状態を評価できる。

2.3 装置構成

ギヤカップリングの超音波探傷イメージを **写真 1** に示す。装置構成は、探傷器はフェーズドアレイ法の画像が得られ

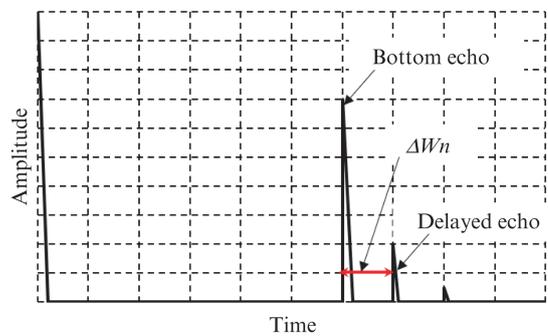


図 3 A スコープ画像

Fig. 3 A scope inspection image

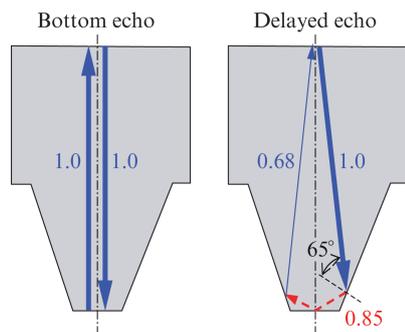


図 4 超音波反射ルート

Fig. 4 Ultrasonic reflection route

るオリンパス製のエポック 1000, 探触子はフェーズドアレイ探触子 5L16 とした。

2.4 試験片測定による精度検証

試験片はモジュール 4, 6, 8 の 3 種類を用いて検証した。それぞれの試験片の諸元より換算テーブルを作成し、外径面に探触子を当ててビーム路程差 ΔWn を測定した。表 1 は各試験片に対する測定結果を整理したものである。グラフ

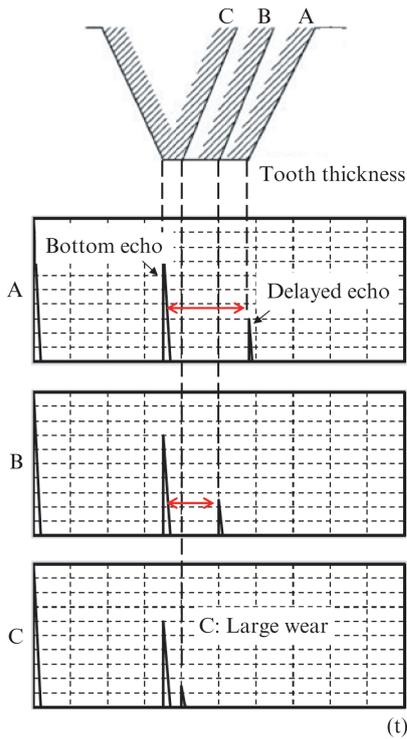


図 5 歯先と遅れエコーの関係

Fig. 5 Relationship between the bottom echo and delay echo

は横軸に実歯厚, 縦軸に測定結果を示す。

測定結果から分かるように実歯先厚が 2 mm より大きい場合には精度良く測定できている。2 mm 以下で精度が落ちるのは、歯先が細いため、超音波の特性（周波数・拡散損

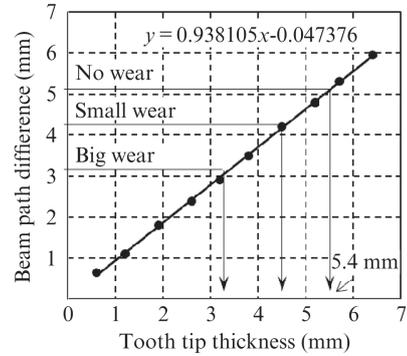


図 6 歯先厚とビーム路程差の換算テーブル

Fig. 6 Conversion table of tooth tip thickness and beam path difference

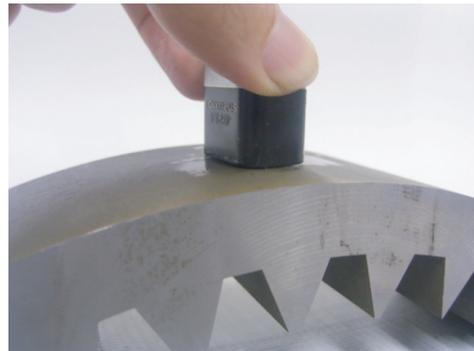


写真 1 探傷イメージ

Photo 1 Flaw detection image

表 1 測定結果

Table 1 Test piece measurement result

Outside diameter	Φ148	Φ282	Φ960
Module	4	6	8
Number of teeth	32	40	80
Tooth depth	Full depth tooth		Stub tooth
Pressure angle	20	20	30
Thickness of rim	14	27	164
Measurement result			
	Error of measurement $2\sigma=0.38$ *Exclude less than 2 mm	Error of measurement $2\sigma=0.27$ *Exclude less than 2 mm	Error of measurement $2\sigma=0.37$ *Exclude less than 2 mm

失等)により底面エコーと遅れエコーが分解出来ないことが原因と推定される。2 mm 以下を外した測定精度は $2\sigma=0.34$ mm であった。なお 2 mm 以下まで摩耗すると歯先の底面エコーが小さくなっていくことから、摩滅寸前かどうかは判定できる。

2.5 実機精度検証

実機で使用されているギヤカップリングを分解し、実際の摩耗量と測定値を検証した結果を図 7 に示す。

実際の摩耗量は歯先厚をノギスで測定し、同一部位を超音波探傷で測定したものと比較検証した。横軸はノギス実測値、縦軸は超音波による測定結果である。相関度は 0.9851 と良好であり測定精度は $2\sigma=0.51$ mm となっている。前述の試験片測定結果より若干精度が悪くなっているが、これは実機歯面形状の影響と推定される。

2.6 ギヤカップリング診断実機適用

現場のギヤカップリング診断作業では、外筒表面を超音

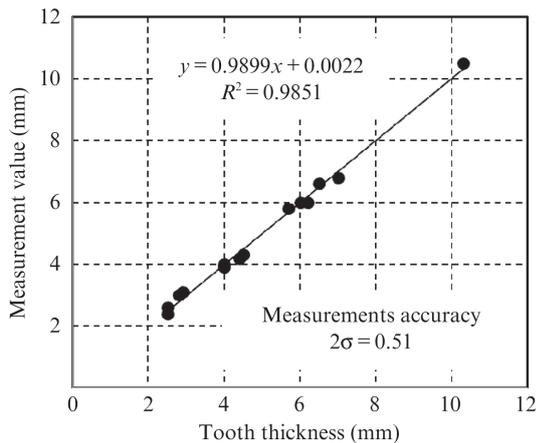


図 7 本測定装置の精度 (検証)

Fig. 7 Accuracy verification of the measuring equipment

波探傷が可能な程度まで清掃を行い、歯筋方向に全幅探傷する。基本的に歯面は全周どの歯も同様に摩耗していると考えられるため全周の測定は必要なく、数歯の測定で評価が可能である。なお、異常が見られた場合は全ての歯を測定するものとする。これにより検査時間を大幅に短縮することができ、現在の測定時間はギヤカップリングの大小に関係なく、1 個あたり約 30 分である。

3. 煙突診断装置の開発

3.1 鋼製構造物の検査

JFE スチール西日本製鉄所 (福山地区) では 2006 年に架空配管腐食診断装置「Scan-WALKER[®]」を開発し、配管をはじめとする鋼製構造物の腐食減肉を診断している。今回この技術を応用し、さらなる強化を図った。Scan-WALKER は台車・センサ共に有線であったため移動に制約があり、またセンサ部は電磁誘導により腐食量を推定する装置であった。煙突等の塔構造物の診断には、遠距離からの測定が可能であること及び鋼構造物の任意の場所を自在に移動し肉厚を測定できることが必要である。

3.2 煙突診断装置の主な構成

煙突診断装置の構成を図 8 に示す。肉厚測定を行う探傷器、遠方時でも動きか確認できる前後のカメラ、装置の傾き状態を測定する傾斜センサ、煙突の表面温度を測定する温度センサ、超音波探触子に接触媒質を供給する供給装置、車輪を駆動させる駆動ユニット、これらの機器をコントロールするための制御装置、外部と通信を行う無線通信機器を台車上に搭載し、遠方から操作装置によって各操作を行う。操作装置は可搬性を考慮しノート PC とした。

3.3 タイヤ型探触子の活用

煙突鉄皮表面を探傷面とする超音波探触子はタイヤ型探

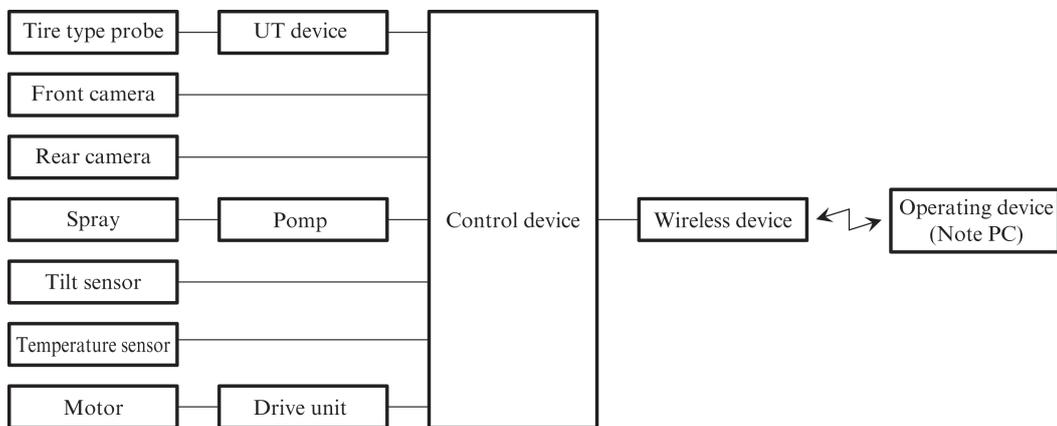


図 8 煙突診断装置構成概略図

Fig. 8 Schematic diagram of chimney diagnostic equipment

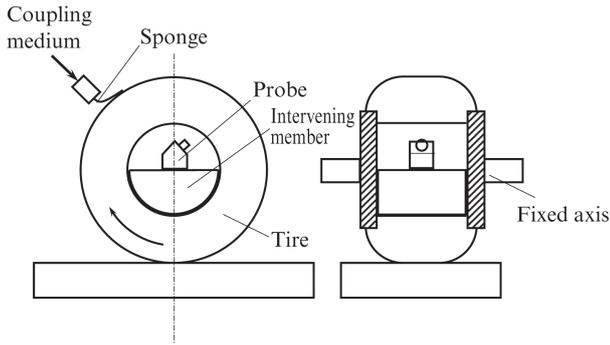


図9 タイヤ型探触子構造
Fig. 9 Structure of tire type probe

触子を用いる。タイヤ型探触子は、常に煙突表面に接し移動に伴って回転することにより、探触子の摩耗を防ぐことができる。

タイヤ型探触子の構造を図9に示す。探触子は介挿部材を介しタイヤと接触している。探触子と介挿部材は回転しない固定軸により台車に固定し、タイヤ部分だけが回転する構造となっている。そのため探触子は常に探傷面と垂直の状態に維持される。タイヤはゴム製で接触媒質に馴染みやすく、表面が湿る程度のわずかな接触媒質で肉厚測定できる。従って、台車に搭載する接触媒質のタンクも小型化できる。通常の超音波探傷では接触媒質はホースで外部から供給し垂れ流しになるほど使用されるためタンクが重くなるが、少量の媒質で測定可能になったことでタンクの軽量化・小型化が実現できた。

3.4 磁輪を用いた駆動装置

煙突診断装置の駆動車輪はネオジム磁石による強力な磁力を帯びている。図10に磁輪の構造を示す。吸着力を上げるため、円環状の車輪板で円環状のネオジム磁石を挟む構造となっている。図11に下から見た煙突診断装置概略図を示す。4個ある車輪の全てが磁輪の駆動車輪である。台車は左右の駆動装置に分かれており、それぞれ車輪が2個ずつ組み込まれている。左右の車輪で別々の回転操作が可能な構造であり、前進、後退に加え、左右の回転方向を逆にすることでその場で旋回することもできる。またエンコーダにより回転を検出しているため、左右の回転差をもたせたまま走りさせ、前進、後退しながら左右に曲げることも可能である。

磁輪は非常に強力な吸着力があり、そのまま人力で取り外すことが困難である。取り外し時は磁輪と鉄皮間にゴム板等を挟み、吸着力を弱めて取り外す必要がある。

煙突筒身は一定の大きさの鋼板を溶接して組み立てられており、継部には必ず溶接ビードが存在し起伏が生じている。また板厚が変わることにより段差も生じる。この溶接ビードや段差に乗り上げて乗り越える際には磁輪との接触面積

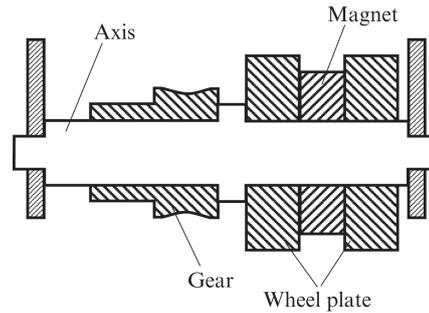


図10 磁輪の構造
Fig. 10 Structure of magnet wheel

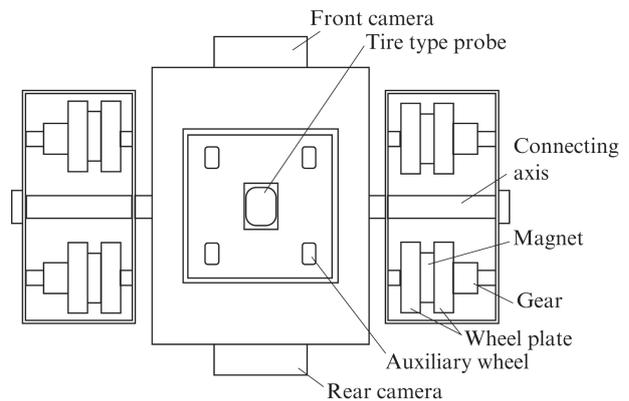


図11 煙突診断装置概略図
Fig. 11 Schematic diagram of a chimney diagnostic device

が減少し、車輪吸着はがれによる落下の危険もあるため、磁輪には強力な吸着力が必要である。

3.5 傾斜センサによる姿勢制御

台車本体に傾斜センサを搭載し、台車が煙突表面で上下左右どの角度に向いているのかを常時計測している。計測された信号は制御装置に入力される。目視確認用に前後にカメラを搭載しているため大まかな姿勢は見てとれるが、細かな角度は傾斜センサでなければ分からない。傾斜値は遠隔操作用ノートPCの画面に常に表示されている。

傾斜センサを用いることで、指定された角度を維持するように制御しながら計測することができる。これにより手操作で台車の挙動を調整する必要がなく、位置ズレのない精度の良い測定が可能となった。

3.6 無線遠隔操作による自在操作

煙突診断装置は全て無線で制御するため、Scan-WALKERと比較して自由度が大幅に高まっている。

有線の場合、ケーブルが常につきまとうため、いろいろな問題点が生じる。第一の問題点はケーブル重量である。電源供給用と通信用のケーブルが使用されるため、移動距離が長いほど使用されるケーブルの重量が増し、ケーブル重

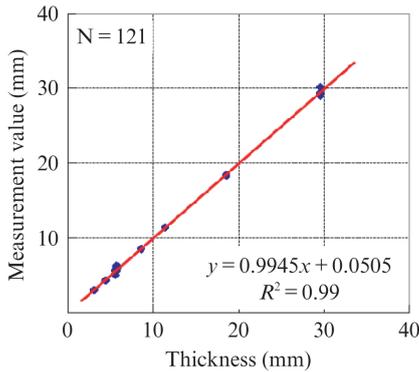


図 12 本測定装置の精度 (検証)

Fig. 12 Accuracy verification of the measuring equipment



写真 2 煙突を診断する本開発装置

Photo 2 Developed chimney diagnostic system

量が台車にかかる。この問題は接触媒質を供給するホースにも同じことが言える。外部から水もしくは油等の接触媒質をホースで供給する場合、接触媒質がホースに充填するため、非常に重くなる。第二の問題点は行動を阻害されることである。円周方向に移動する場合はケーブルやホースが巻きつく形となる。この場合ケーブルやホースが煙突鉄皮と接触し、摩擦抵抗により引張力が生じる。

無線の場合は行動を阻害する物がないことから自由に行動できる。円周方向に一定角度を保持して螺旋状に連続的に測定することも可能になった。

3.7 試験片測定による精度検証

試験片を用いた測定結果を図 12 に示す。板厚の違う試験片 9 種類 3 mm～30 mm を複数回繰り返し 121 回測定した結果、相関値 0.999、測定精度 $2\sigma = \pm 0.34$ mm、と高い精度で測定できることを確認した。

3.8 煙突診断実用機

開発された実用機を写真 2 に示す。煙突診断装置の走行速度は約 1 m/min であり煙突の上下のデッキ床間の距離は約 30 m のため、1 往復測定するための所用時間は約 1 時間である。煙突診断装置はバッテリー駆動であり満充電状態から 2 時間連続使用可能であることから、予備バッテリーを複数個所持すれば一日中連続して測定することができる。また不注意による電池切れを発生させないため、遠隔操作用ノート PC の画面には電圧が表示されており、電圧が下限まで低下したら警報が表示される。接触媒質は一日に 500 ml あれば十分である。なお、落下の恐れがあるため、上部のデッキから安全ロープを台車に接続し、不測の事態にも対応した。

4. おわりに

超音波探傷試験 (UT) 技術を使い、ギヤカップリングの診断技術と煙突等の塔構造物の診断装置を開発した。本技術は JFE スチール西日本製鉄所 (福山地区) だけでなく各地区に適用され、設備の健全性評価と設備トラブルの未然防止に大きく貢献している。

参考文献

- 1) 植上武克, 横山康雄, 明智吉弘, 壁矢和久, 卯西裕之. 設備の健全性評価技術—架空配管・埋設配管の診断—. JFE 技報. 2006, no. 11, p. 23-28.
- 2) 吉本松男, 村上弘一, 中村正治. 高温 TOFD 法による鋼構造物の遠隔亀裂診断技術の実用化. JFE 技報. 2011, no. 27, p. 4-8.



松本 智敏