

第17回

千葉県非破壊検査研究会・研究発表会

講演資料

日時 平成15年2月14日(金)
10:30~17:00

場所 幕張テクノガーデン

目 次

I 研究発表

1. モニタリング技術・FSM の紹介 ----- 1
(株)アトラス ○有田圭介, ディーアイジェクト(株) 土井義夫
2. 新製品, 携帯型成分分析計”X L t シリーズ”について ----- 6
(株)リガク ○遠山恵夫
3. θ プローブとその応用 ----- 12
マークテック(株) ○廣島龍夫, 藤本貴司
4. 企業内におけるNDT技術者の訓練・資格認定 ----- 19
(株)日鐵テクノリサーチ ○木村新一郎
5. ソフトプローブとその使用方法の紹介 ----- 26
ジャパンプローブ(株) ○幸崎進, 高橋修, 岩橋充, 福原熙明, 星野充宏
6. 超音波可視化について ----- 33
(株)ジャスト研究所 ○名取孝夫
7. 探傷結果表示の高性能化による圧延ロール微小表面欠陥検出 ----- 37
JFE 川崎製鉄(株) ○高田一, 山本克史, 前田一郎, 杉本良一, 守井隆史

II 特別講演

- 原子力設備と非破壊検査の将来性 ----- 45
(東電問題等と今後の検査の方向性)
講師: 東京工業大学 大学院 教授 小林英男

モニタリング技術・FSM-IT の紹介

Norway Monitoring Technology・FSM-IT

(株)アトラス 有田 圭介

(株)ディーアイジェクト 土井 義夫

1. はじめに

日本国内では原子力発電所の余熱除去系配管破断事故や化学体積制御系再生熱交換器の抽出側連絡配管損傷などの事故が発生している。また、炉心隔壁や再循環系配管などのクラックが発覚、さらにBWRでSCCが検出され材料の早期劣化が原因ではないかと指摘されています。そこで、維持基準の導入が検討され監視装置が不可欠となってきており、軽微なきずが非破壊検査手法等で検出された場合、モニタリング技術などによってチェックすることの重要性が高まってきております。

2000年9月にモニタリング関係を中心に腐食診断装置の維持及び実用新案などを調査した所GOIN27100が907件でした。しかし、日本国内では実用例は少なく実用化が困難なようです。耐久性やノイズ障害などが原因で安定したデータが得られないためです。そこで、原子力プラントや海底油田など厳しいフィールドにおいて非破壊且つオンラインで遠隔操作が可能な優れたモニタリング技術 Norway CorrOcean 社製 FSM-IT について紹介致します。

FSM-IT (Field Signature Method-Inspection Tool: 電氣的指紋照合法)

2. FSMの背景

FSMは、1980年3月に北海油田事故 A.L.Kielland (5脚構造の潜水式リグで、水平支柱と音響測深器取付台の溶接部に亀裂が伝播し破壊、123名の犠牲者)の対策として NORWAY 国策として割れの発生を検出、また進展を監視する技術を開発し 1985/1986年に Center of Industrial Research で特許が取得された。

結果的に遠隔及び近接での測定を可能にし、割れの発生と進展、さらに General corrosion と Localized corrosion を測定可能にしたことが特徴である。

また、法人化され(CorrOcean 社)現在海外現地法人として UK, USA, CANADA, ITALY, AUSTRALIA, MALAYSIA など各地において活動している。

日本においては(株)アトラスが日本総代理店として普及活動を行っている。

3. 原理 (principles)

FSM-IT は、基本的には ER 法を応用し、多数の電極（センシングピン）を立てその間の直流パルス電位差を解析する方法です。

モニタリング対象物の腐食による減肉、応力腐食割れ（SCC）による亀裂、エロージョン・コロージョンによる肉厚の減少などを外面から測定する方法で、直流パルス電流を印加することで得られたわずかな電圧差を求めて、電場パターンをセンシングする方法です。この電場パターンの経時変化を求めることにより実際の腐食状況や腐食速度、腐食傾向並びに亀裂の程度や位置を正確に評価します。

モニターしたいエリアに多数の電極（センシングピン）を設置し、その各々の2極間の測定電圧を、参照電極（温度と電流のゆらぎを補正するための照合電極）の測定値と比較し、さらにモニタリング開始時の初期値＝FS（電場指紋）と比較をすることにより非常に高精度に内部の状態をモニタリングします。

電場指紋係数（FC）は次式により計算されます。

$$FCA_i = (B_s / A_s \times A_i / B_i - 1) \times 1000 (\text{ppt})$$

FCA_i = 時間 i における電極対 A の指紋係数

A_s = 開始時の電極対 A の電圧

B_s = 開始時の照合対の電圧

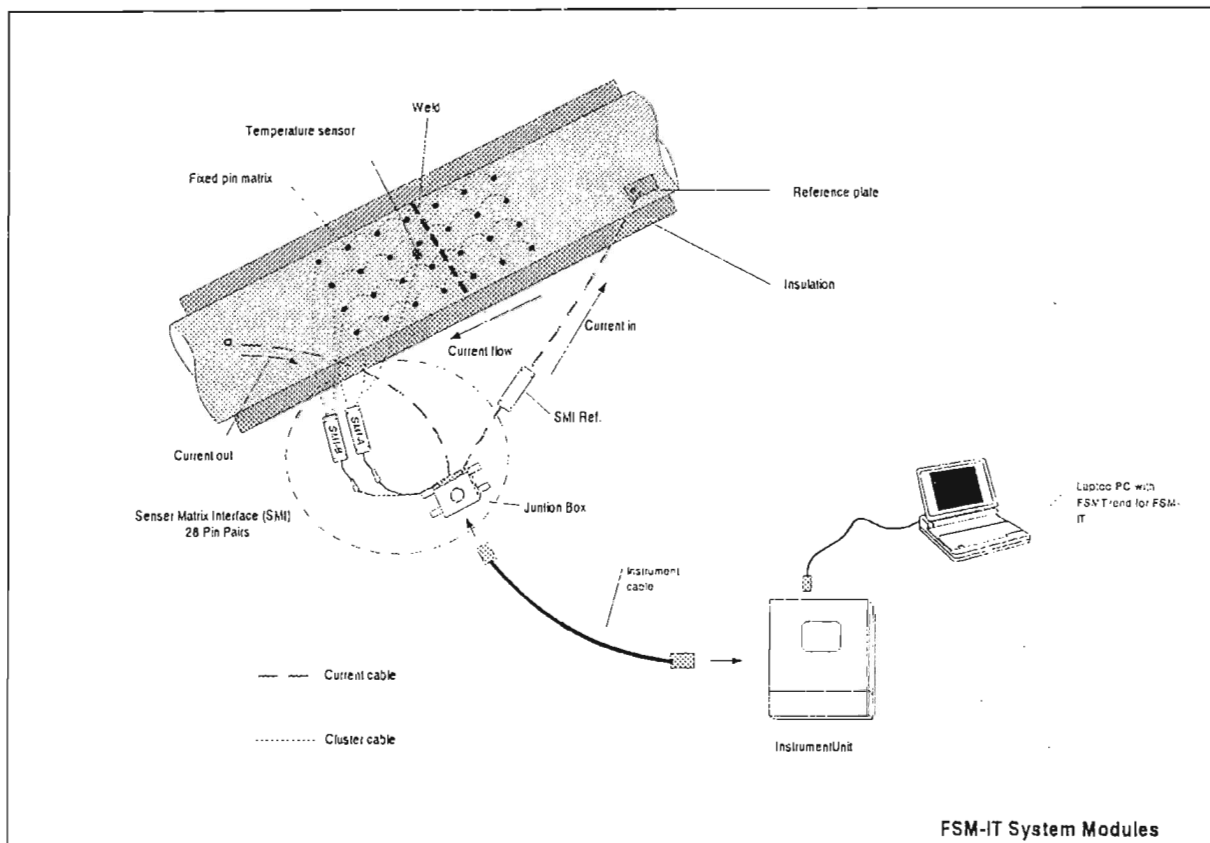
A_i = 時間 i における電極対 A の電圧

B_i = 時間 i における照合対の電圧

ppt = parts per thousand 対象箇所 の千分率

4. システムの概略図を下記に示す。

FSM-IT システム概略図



5. FSM-IT の4大特長

- *高精度** 肉厚の1/1000の精度でモニタリング
検査対象部位の外側にセンシングピンを装着し、内部の状態を高精度にモニタリング
- *測定誤差皆無** 既存の非破壊手法で困難であった部位の腐食・ピット・応力腐食割れ等の変化を人による測定誤差なく正確に検出・モニタリング
- *広い適用箇所** あらゆる形状のパイプ、圧力容器、船舶やタンク類、金属構造物など
流量・スチーム・圧力など検査対象部位の内部環境の影響を受けない
広範囲な温度環境に対応（標準：-20℃～450℃）
高所や人の立ち入りが制限される場所への対応
- *高いコストメリット** プラントの休止運転不要
正確な余寿命診断により保守管理費用の低減

6. 解析データ

検出されたデータは3Dグラフ及びXYグラフによって解析される。
モニタリング期間中の腐食速度（mpy）を算出し、材料の余寿命を推測できる。
3Dバーグラフに表示されたデータは減肉の度合いを示し、ピンはパイプの場合円周方向及び長手方向に取り付けられているので、X軸は周方向、Y軸は長手方向、Z軸は肉厚の減肉度合を表示することになる。

実績データについては当日いくつかの事例を挙げてご説明致します。

7. おわりに

今回紹介したモニタリングシステム(FSM 法)は、海外でRBI/RBMの一環として適用されている技術であり、石油精製、化学プラント、原子力火力発電所、石油掘削用作業台などで実施されております。また原子力関係では英国のBNFL(放射線管理区域の管に設置)やフランスのELFで実際に使われており、日本においては日本原子力研究所などで実証試験中であります。また東京電力では火力発電設備への適用を検討中であります。

日本はリスク評価技術について欧米などと比べてかなり普及が遅れていますが、発電プラントなどの老朽化が急速に進んでおりRBI/RBMの時代が到来したと考えられ、今後の発展が期待されています。

尚、この新しいFSM技術の基本技術自体は高く評価されておりますが、まだ開発されて間もない技術のため各ユーザー殿の仕様に応じて、本体並びにアウトプットデータ等の改良・開発が必要な場合があります。そういう意味において日本市場に十分適合出来るよう皆様方のご意見やご要望を積極的に取り入れて、より高精度で利便性に富んだ完成度の高い製品にして行きたいと思っております。

今後とも皆様方のご協力・ご支援をよろしくお願い申し上げます。

蛍光X線分析法を用いた携帯型成分分析計

理学電機(株) 遠山恵夫

(株) リガク 尾方三知郎

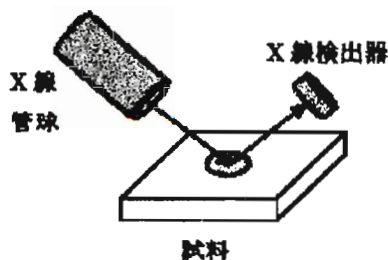
1. はじめに

非破壊検査の命題の一つが、現場で現物を現状のまま計測することであるが、そうした検査目的には携帯型(ハンドヘルド)が望ましい。エレクトロニクスの軽量化が急激に進んだおかげで、分析機器は床据置型から卓上型(あるいは可搬形)へ、そして今や携帯型へとコンパクト化が進んできた。一方、材質の化学組成を分析する手法の中でも、非破壊という面で最も優れた分析法の一つが蛍光X線分析法である。携帯型の蛍光X線分析計としては、励起源として放射性同位元素を用いたタイプが90年代に登場し、推定台数3000台以上が米国を中心とした市場で活用されているが、日本では放射性物質の取扱規制が厳格なこともあり、ごく限られた分野でしか使われていない。

ところが2001年に至って、ミニチュアX線管球の商品化が実現したのを機に、同時に米英の4社が携帯型蛍光X線分析計の製品化計画を発表し、2001年9月に幕張で開催された分析展でも参考出品した。その後、昨年度から商品化が始まり、ようやく日本市場においても携帯型蛍光X線分析装置としての普及活動が開始したところである。放射性同位元素使用の携帯型蛍光X線分析計が普及している欧米にくらべ、日本市場では携帯型分析計に対する知名度は低く、携帯型イコール低機能のイメージが未だに強い。ここでは、Niton社(米国 マサチューセッツ)の携帯型成分分析計XLtシリーズを紹介し、機能と性能について報告する。

2. 蛍光X線分析法

合金に代表される固体金属の元素組成成分を計測する手段としては、アーク放電発光分析法、ICP発光分析法、グロー放電発光分析法、原子吸光分析法などがあるが、程度の差こそあれいずれも破壊試験であり、非破壊分析ではない。蛍光X線分析法(X-ray Fluorescence 略してXRF)は非破壊という面では優れているが、微量(ppmレベル以下)計測に向かないという面で分析機器の発展から取り残され、いわば古典的な分析手法と言われてきた。

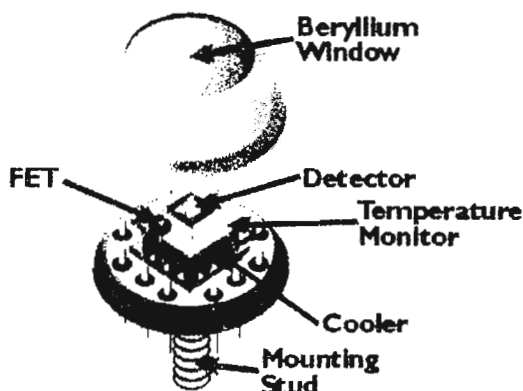


蛍光X線分析法の原理は、励起源としての1次X線を試料に照射し、その励起エネルギーによって発光する蛍光X線(特性X線)を検出するもので、このときの蛍光X線は、試料の組成元素によつての固有の波長(エネルギー値)情報を持ち、各波長ごとの強度が個々の元素の成分値(%)に比例するというこゝに基づく。蛍光X線分析装置は、構造のうえで大別して波長分散型(Wavelength Dispersion

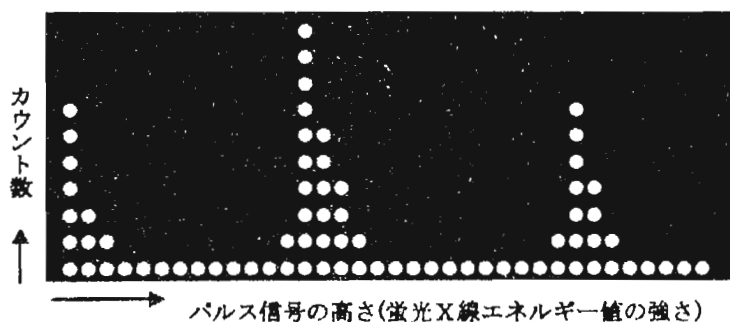
略して **WD**)と、エネルギー分散型(Energy Dispersion 略して **ED**)とに分けられる。現時点では、WD は高分解能 (元素間の相互干渉が少なくすむ) だが大型であり、ED は駆動系がないので小型であるが分解能が悪く、軽元素の感度が悪いという長所欠点を持ち合わせる。

携帯型に限れば、まさに ED-XRF の独壇場であり、その簡便性・スループットの良さは WD-XRF のみならず、他の分析法に勝るものを多く持っている。

ここでは ED-XRF の原理構造についてのみ説明するが、1次 X 線発生源としての X 線管球は 35 kV 程度の高圧発生装置が必要で、高電圧の安定供給とシールドが重要な課題である。検出器としては電子冷熱型シリコン PIN 検知器が一般的で、もっとも扱いやすい。

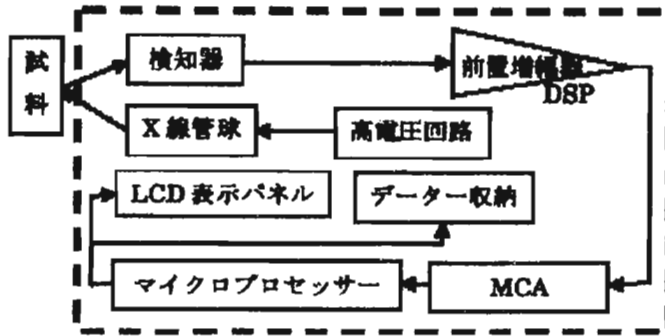


検知器は入射した X 線の波長(エネルギー値)に固有のパルス高さの電子信号を発生する。したがって検知器から取り込んだパルス信号の高さを見れば、どの波長の X 線が入射したかを知ることができる。



すなわちパルスの高さからどの元素から来た X 線かを弁別できることになる。このような役割を果たすのが Multi Channel Analyzer (MCA)で、いわば分光器のプリズムの役目を果たす。各チャンネルに来る信号の数が多ければ多

いほど、そのチャンネルに相当する元素の数(成分)が多いということになる。各チャンネルごとに、単位時間(秒)あたりいくつのパルスを受け付けたかを Count per Second (cps)であらわす。X 線が到達してから MCA で弁別が終わるまでの所要時間が長いと、次の入射 X 線の信号を数え落とししたり、複数の信号を加算してカウントしてしまう恐れがあるので、検知器自身の時定数もさることながら、如何に高速に波形処理をして MCA で弁別するか、いわば前置増幅器の高速波形処理能力が装置全体の性能を左右する。高速化が達成され



れば、その分多量の X 線を取り込めるので、測定精度が向上し、スループットが上がることになる。こうして取り込まれた MCA の全チャンネルのカウント数は、そのまま蛍光 X 線のエネルギースペクトルとなる。同時に各元素の波長(エネルギー値)に相当するチ

ャンネルのピーク高さは試料中の元素成分値 (%) に比例するので、あらかじめ純品の元素成分でできている試料でピーク高さを求めておけば、試料中の成分値を算出することは可能である。ただし、そのためには測定の度ごとに全元素の純品での計測をあらかじめしておかなければならない。こうした不便さを解消したのが Fundamental Parameter Method (FP 法) で、全対象元素の相対強度を読み取り、合計値が 100% となるように計算を繰り返し、最終的に全対象元素の成分値を % で出力する。FP 法では既知濃度の標準試料を用意しなくても済む簡便さがあるが、計算に多量なメモリーを要し、時間もかかる欠点がある。こうした障壁も昨今の超高速マイクロ CPU の普及で、日常の計測においても特別な意識なしに使用できるようになった。

3. 携帯型蛍光 X 線分析計の安全性



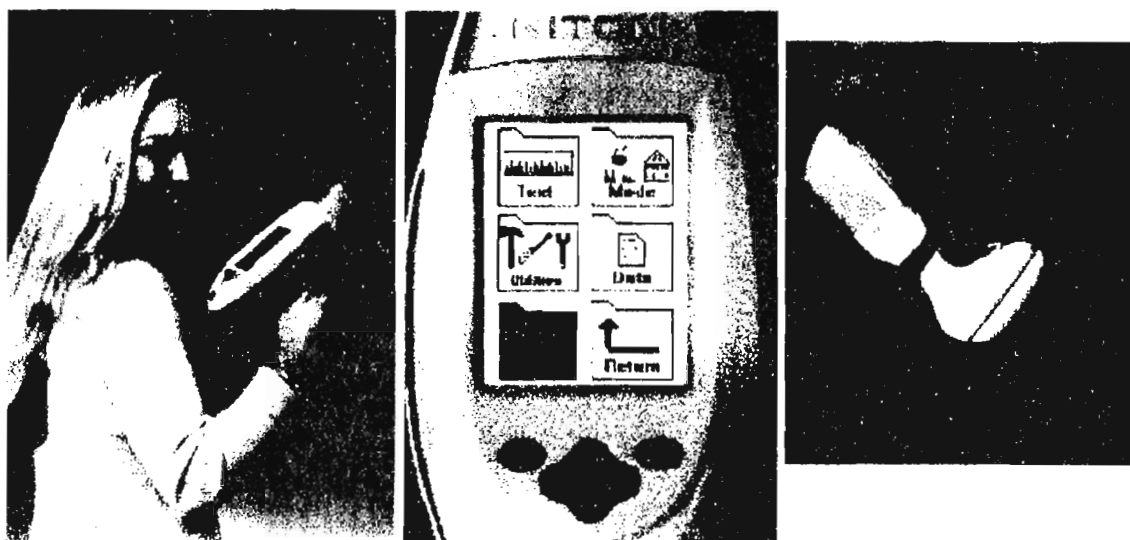
放射性同位元素は使っていないとはいえ、X 線管球タイプでも X 線は使用する。非破壊検査の命題である「現物を現状のまま測る」という目的のためには、被測定片を切り出して X 線シールド室に封じ込めるという従来の発想は通用しない。当然、試料は計測器に拘束されない状態で大気中に存在している。したがって X 線管球から出た励起 X 線は分析計から外部に向けて放射されることになる。計測精度を上げるには強力な励起 X 線が必要だが、被爆の危険性も十分考慮しなければならない。したがって携帯型蛍光 X 線分析計にとっては、どこまで励起 X 線源のパワーを弱くできるかが重要な課題となる。励起 X 線の直接被爆量を減らすことはもちろん、試料にあたった後の蛍光 X 線散乱による被爆量も徹底的に検証しなければならない。

Niton 社の XLt シリーズでは、X 線管球に供給する電力は 35 kV、7 μ A であ

る。直接計測に携わるオペレーターの被爆防止策として、計測窓（X線を放射する窓）部を試料面で完全に覆わないとX線がオンにならないようになっている。複雑な形状の試料面で、完全に覆えない場合は、両手操作でのみX線がオンになるようになっている。X線管球はトリガー（引き金）を引き続けているときのみ電源が供給され、シャッターが開く。

4. XLtシリーズの基本機能

携帯型であるためには、片手での長時間保持が容易なように重量を軽減する必要がある。さらには使用時のグリップ感覚のよさとバランス感覚も重要な項目である。XLtシリー



ズは 1.7kg 内にすべての機能を纏め、バッテリー駆動で、単独使用が可能になっており、外部パソコンなどの接続は一切不要である。屋外での使用を考慮し、操作キーや表示パネルもすべて防塵防水対策がなされている。工場の現場で使うことを想定し、腰にさげて持ち歩く構造にデザインされている。

測定結果を表示するパネルは 57 x 76 mm の大型液晶画面で、タッチパネルになっており、メニューナビゲータに従ってゲーム機感覚で操作ができる。試料名の入力のためにバーコードリーダを標準装備しており、測定結果はいつでも読み出し可能で、もちろん収集したデータを外部パソコンにダウンロードすることも可能であり、汎用レポート形式で報告書を作成することができる。また、その場で結果を印字したい人のためには携帯型プリンターも用意されている。

しかし、現場分析装置としてもっとも重要な課題はスループットのよさである。せっかく現場に計測器を持ち込んでも、1検体あたりの計測時間が数分以上を要するのでは、携帯型である特徴が薄れる。XLtシリーズは、まさに「いきなり試料にあてて引き金を引く」だけの簡易操作ですみ、各元素の成分値が秒単位で直ちに重量%で表示され、同時に計測誤差も表示される。引き金を引き続ければ、成分表は刻々(秒単位)と更新され、測定

誤差が減少してゆく様子を直に目で確かめられ、通常の合金の成分計測では 10 秒程度で安定した結果が得られる。各元素の成分値は直ちに内臓の合金ライブラリーと照合され、現在計測している合金が何かを成分表と共に出力する。このような迅速計測と高速演算とを可能にするため、XLt シリーズでは 10kcps 対応の Si PIN 検知器、電源オン後数分で安定温度に設定する電子冷却回路、20MHz の ASIC DSP による波形処理、4096 チャンネルの MCA、120MHz の日立 SH4 マイコンによる 80 μ 秒の高速演算、5000 個の測定結果(スペクトルも)記憶、500 種までの合金ライブラリーの記憶 などの基本機能を搭載している。

5. XLt シリーズの基本性能

現場での分析を目的とする携帯型分析計では、計測は通常の大気圧で行うことが大前提で

Reading	312	
NomSec	11.6	
Alloy	W/Cu/Zn	
SS316	0.4	
Mo	2.05	0.06
Ni	10.75	0.34
Fe	68.68	0.75
Mn	1.08	0.11
Cr	15.38	0.32

あるが、軽元素の特性 X 線は大気によって吸収され、計測ができないか、または困難になる。XLt シリーズで組成分析が可能な元素はチタン (Ti 原子番号 22) より重い元素に限られる。XLt シリーズでは、その計測目的を合金中の成分分析に絞り、得られる結果として各元素の成分値を%で表示し、同時にその結果に対する確かさを 2 σ 値として併記して表示する。例えば Cr 15.38% 2 σ 0.32% と表示した場合、クロム (Cr) の含有量は重量%で 15.38%であり、15.06%から 15.70%の間にある確率は 95%(2 σ)であるということを示している。

この結果を表示するまでに要する時間は数秒で、同時に内臓の合金ライブラリーの中からもっとも近い合金名も表示する。この間、オペレータはただトリガー(引き金)を引き続けるだけでよく、何もしなくてよい。もし結果が表示された後も、トリガーを引き続ければ、計測結果が数秒ごとに更新されてゆく、確かさ(2 σ 値)が向上(小さくなる)してゆく。従って、オペレータは希望の精度が得られるまで画面の結果を見ながら計測することができる。XLt シリーズでは、通常は 10 秒間、特に精度を要求される場合は 30 秒間(電子音で通知)の計測を行う。X 線を計測する観測窓は幅 1cm、高さ 2cm の矩形をしているが、試料面は観測窓全体を覆う必要はなく、細い線材や小径試料も計測できる。線材では 1mm 径以上、小径試料では 2mm 径以上あれば計測可能であるが、計測時間は 30 秒程度が適切である。試料面と観測窓は接触しているに越したことはないが、湾曲したり振動している試料面には直接押し付けられない。試料面と観測窓の間隙が 10mm になると、検出できる蛍光 X 線強度が 50%に落ちるが、その分計測時間を長くすることがのぞましい。

計測時間の長さ (t) と、計測誤差 (2 σ 値) の関係は、 $2\sigma \propto 1/\sqrt{t}$ となる。

6. XLt シリーズの付加機能

XLt シリーズは、本報告に述べる非破壊計測の目的のほかに、土壌の金属汚染計測、鉱石中の金属含有量計測などの機能もあるが、ここでは合金の成分計測についてのみ述べる。前節で述べた合金中の成分分析と合金名の判定という主目的のほかに、合金の判別 (ID) モードが用意されている。ID モードでは、あらかじめ標本になる合金のスペクトルを幾つか記憶しておき (いわば指紋を登録しておく)、次に未知の合金を計測して、それがどの合金かを判別する目的に使う。この場合、合金の成分計算 (FP 法による) をしなくて済む分、さらに計測時間が短くてすみ、通常は 5 秒程度でどんどん弁別できるようになっている。

XLt シリーズでは、どのような測定条件であろうとも、すべての計測に対して、計測した日時 (分単位)、計測に要した時間 (0.01 秒単位)、入力した試料名、全元素の成分値と確かさ (2σ 値)、それに全領域のスペクトルを記憶しており、外部のパソコンにダウンロードできる。外部パソコンでのデータ取り込みソフトは CD として標準で付属する。また、この CD を用いれば、パソコン上でバーコードを作成したり、パソコン画面で XLt シリーズ本体を遠隔操作したり、本体に内蔵している合金ライブラリーの中身を編集することもできる。さらにはメーカー側が新たに追加した新たなソフト機能を、e-mail で受信し、それをユーザが自分のパソコンからアップグレードするためのツールも提供される。

7. むすび

世界的な分析機器の発表会として知られているピッツバーグ討論会 (Pittcon) は、非破壊検査に限らず、あらゆる分析機器の新しい兆候を知るよい機会である。報告者は過去 10 年以上、継続的にこの Pittcon に参加してきたが、昨年 (2002 年度) は機器の小型化という点できわめて特徴的な動きが見られた。特に、従来のラボ設置型から可搬形 (モバイル) へという過去数年間のトレンドを一気に飛躍して、ハンドヘルド、携帯型へと進化した年度であった。しかも、携帯型に挑戦した分析機器が、従来もっとも小型化が遅れていた (X 線管球使用の) 蛍光 X 線分析装置に集中したことは特筆に値する。Pittcon2002 において同時に発表した 4 社に続き、昨年末に北欧からまた 1 社が名乗りを上げたが、いずれもが蛍光 X 線分析法に集中した主因は、なんと言っても前処理なし・非破壊で迅速計測できる点に市場が注目したからに他ならない。これまで、組成分析の常道であった ICP なども、レーザーアブレーション法などによる固相分析がどんどん普及しているが、非破壊検査、携帯型という課題には今のところ解決策が見出せない。そうした意味で、今回報告した携帯型成分分析計は、非破壊計測という範疇を超えて、広い意味で、分析機器の望まれるスタイルを示唆したものだと言える。

θプローブとその応用

Θ probe and it's application

廣島龍夫 藤本貴司 (マークテック株式会社)

Tatsuo HIROSHIMA Takashi FUJIMOTO (Marktec Corporation)

Keywords: 保守検査 渦流探傷 上置きプローブ リフトオフ

最近、保守検査に関する関心が高まっている。筆者らは鋼構造物の溶接部保守検査を塗膜を剥がすことなく探傷可能で、探傷作業が容易な渦流探傷法の適用を検討している。原理的にリフトオフ信号の影響を受け難いθプローブを実用化し、θプローブの特性、特徴を最大限に生かす渦流探傷装置の開発した。θプローブは従来の渦流探傷用プローブに比べ広いリフトオフの範囲できず検出が可能で、きず深さを信号位相で知ることが可能であることなどの特徴を有し、溶接部の保守検査に適用できると考えられた。高速道路橋脚の現場で実証試験を行い、溶接部保守検査に極めて有効であることが確認された。

1. 緒言

エネルギープラント、高速道路などの保守検査の重要性に関心が高まっている。特に、鋼製橋脚に疲労き裂が発生している事実が発表されて以来、鋼構造物溶接部の保守検査が注目を集めている。現状では溶接部に塗布されている防錆用塗膜を剥がし、磁粉探傷によってきずの有無を検査する方法が一般的に行なわれている。このような鋼構造物の溶接部保守検査に渦流探傷試験を適用すると、塗膜を剥がすことなく探傷ができ、検査速度も速く経済的な効果が大きいと考えられる。我々は、原理的にリフトオフの影響を受け難い新しい渦流探傷用上置きプローブ「θプローブ」⁽¹⁾の実用化を進めると共に、θプローブの特性と特徴を活かした渦流探傷装置を開発した。本報告はθプローブのきず検出特性と新たに開発した渦流探傷装置、道路鋼脚柱への適用実験結果について述べた。

2. θプローブの概要

θプローブは円環状の励磁コイルと励磁コイルの内側に縦置きされた矩形形状の検出コイルからなる上置きプローブである。図1にその基本構造を示す。このプローブを試験体表面に置いた時励磁コイルが作る交流磁界によって試験体表面近傍を流れる渦電流は円環状であり、渦電流によって生じる磁束は

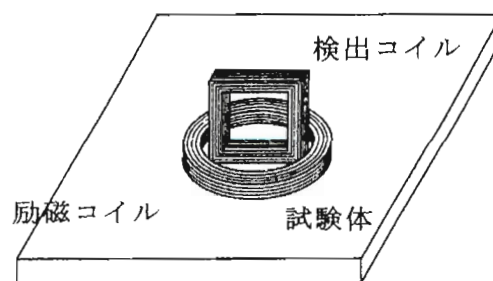


図 1 θプローブの基本構造

検出コイルと鎖交しないため検出コイルに電圧は発生しない。試験体表面にきずが存在する場合には渦電流はきずに沿って流れるため渦電流による磁束は試験体表面に平行に生じ、検出コイルと鎖交するため検出コイルに電圧が発生する。⊖プローブは健全な試験体表面上に置かれても何ら出力は生じない、きずが存在する場合にのみ出力電圧が発生する。そのため、コイル電圧がきず信号位相と考えられ、きず信号位相が容易に測定できる。

3. ⊖プローブの基本特性

(1) きず深さと信号電圧

放電加工きずが加工された試験片を用い、⊖プローブのきず検出能を調査した。図2に周波数25kHz、リフトオフ1.0mmの場合のきず信号検出例を示した。

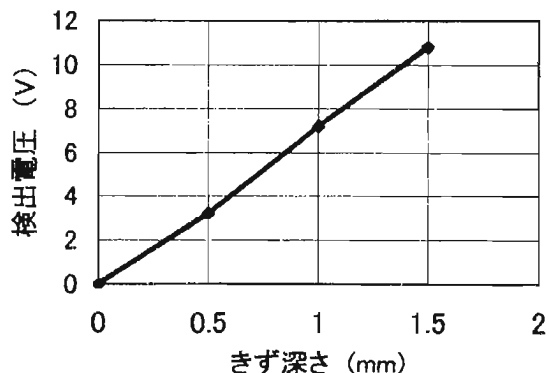


図2 きず深さと検出電圧

(2) きず信号位相の測定

機械加工きずを用いてきず信号位相を測定した結果を図3に示す。結果は50kHz、リフトオフ1.0mmで測定したが、位相角からきず深さを推定することが可能であると考えられる。

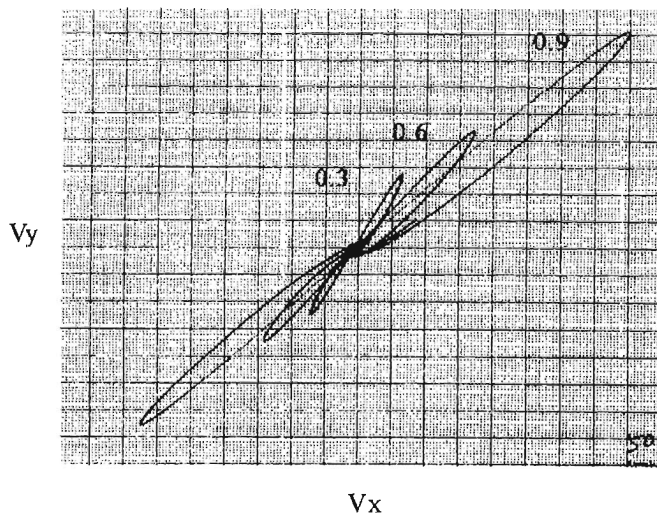


図3 人工きず位相の測定結果

(3) リフトオフときず検出能

図4はリフトオフを変化させた場合のきず検出能測定結果の一例である。リフトオフが3mm程度で十分実用上問題ない結果が得られている。

(4) プローブときずの相対角度と検出能

プローブの検出コイルときずの相対角度が変化した場合の検出能の変化を図5に示した。きずと検出コイルが平行で、きずに対して直角に操作した場合に検出電圧は最大になる。

(5) きずに対する走査方向の影響

きずに対する走査方向を変化させ、きず検出電圧を測定した結果、きずと平行な状態であってもきずが検出できることが判った。

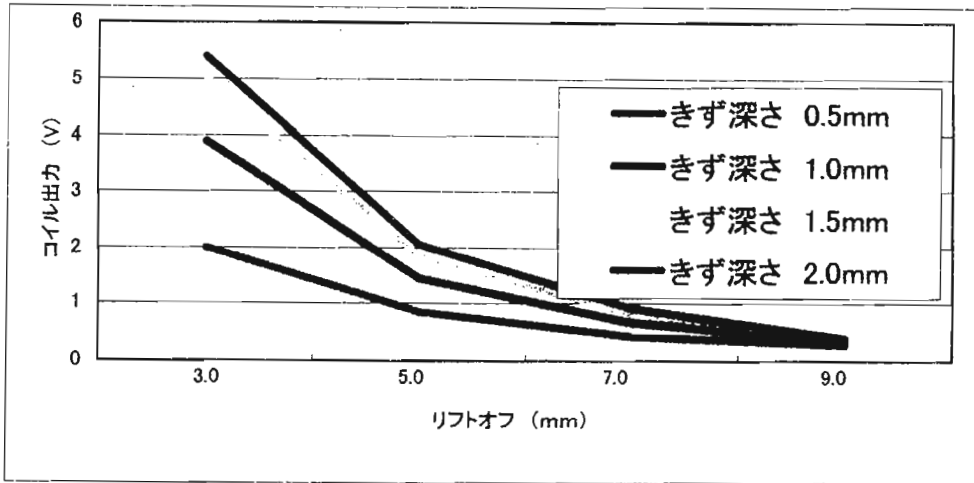


図 4 リフトオフときず検出電圧の関係 (周波数 25kHz)

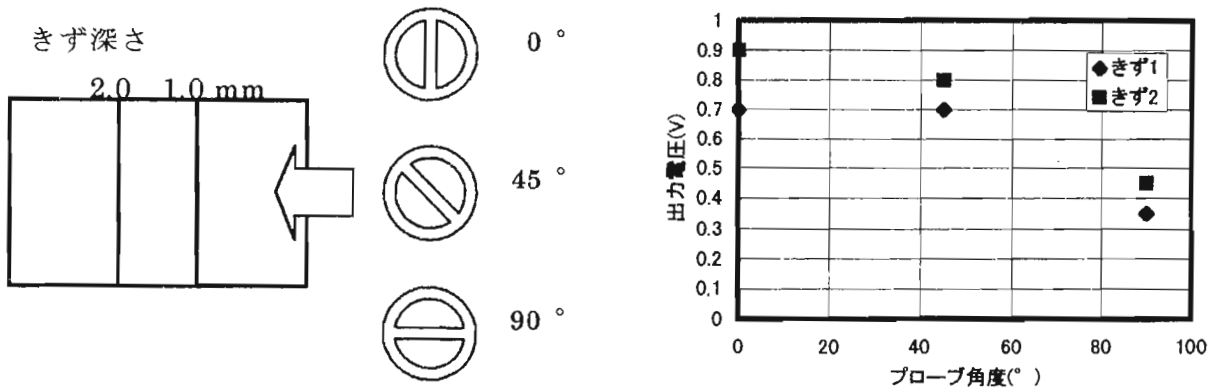


図 5 きずと検出コイルの相対角度ときず検出電圧

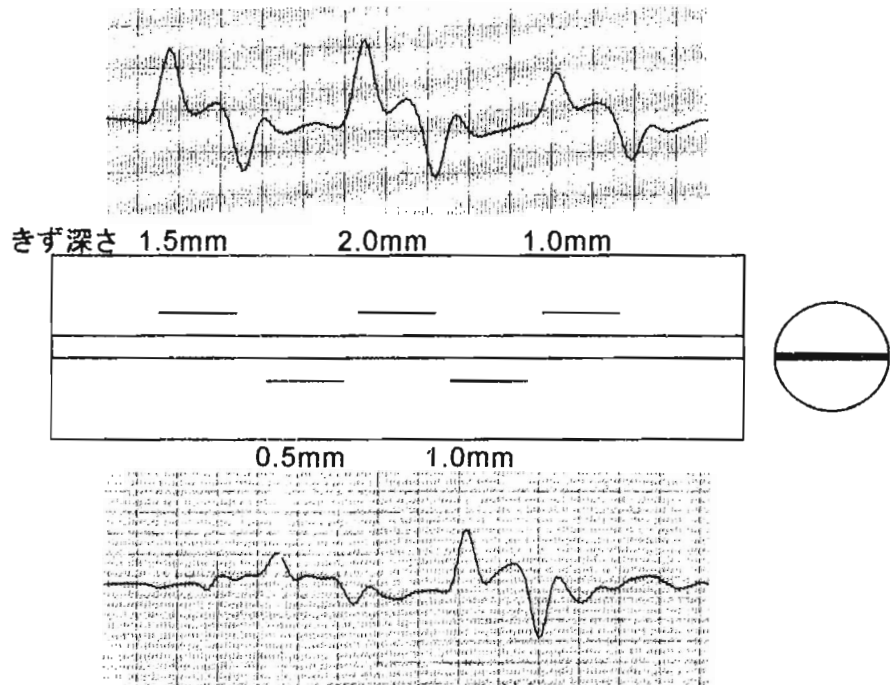


図 6 きず平行走査でのきず検出結果 (周波数: 50 KHz、リフトオフ: 5 mm)

(6) 人工きず、自然きずの検出

図7は自然きずについて磁粉探傷試験の結果と比較を示したが、自然きずに関しても⊖プローブは良好な検出能を示した。

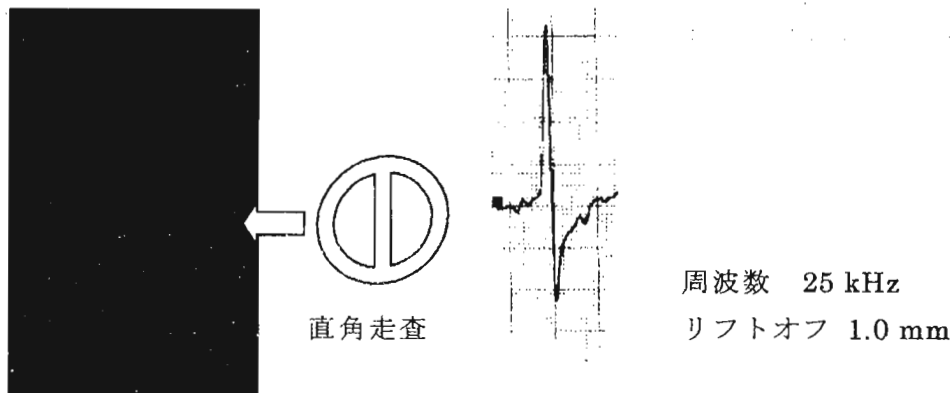
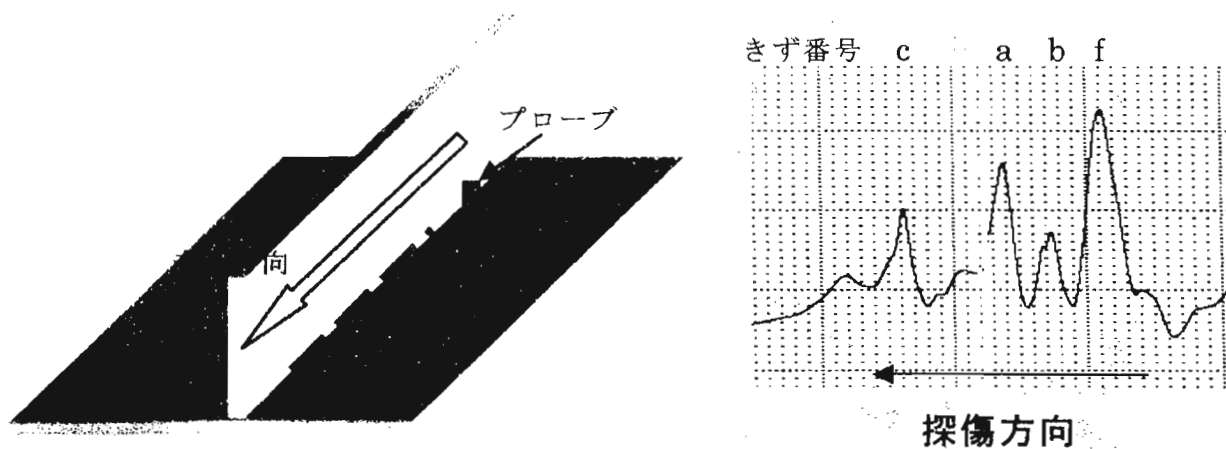


図7 磁粉探傷試験と⊖プローブによる渦流探傷の比較試験（自然きず）

図8に示すような放電加工による人工きずを加工したL型溶接試験片を製作した。この試験片を用い、溶接線に沿って溶接線と平行にプローブを走査して溶接部のきず検出可否を調査した。図8には結果も合わせて示したが溶接ビード始端部に加工した人工きずが良好に検出できた。



a 長さ 5 mm×深さ 1mm×幅 0.2mm、b 長さ 5mm×深さ 2mm×幅 0.2mm
 c 長さ 10 mm×深さ 1mm×幅 0.2mm、f 長さ 20mm×深さ 2mm×幅 0.2mm
 きず f は基準位置からカーとして加工した大きなきずである。

図8 溶接試験片(L型試験片)の探傷結果
 (周波数 25 kHz、リフトオフ 1.0mm)

4. ①プローブ用探傷器の特徴

以上述べてきた①プローブの特性や特徴を活かし、従来にない取り扱い容易な渦流探傷装置を開発した。開発した探傷器の基本回路構成を図2に示す。①プローブを用いているためバランス回路を持たず、バランス調整も不要である点が大きな特徴である。また試験周波数を固定としたため、位相調整が不要となるなど開発目標を達成する探傷器が完成した。

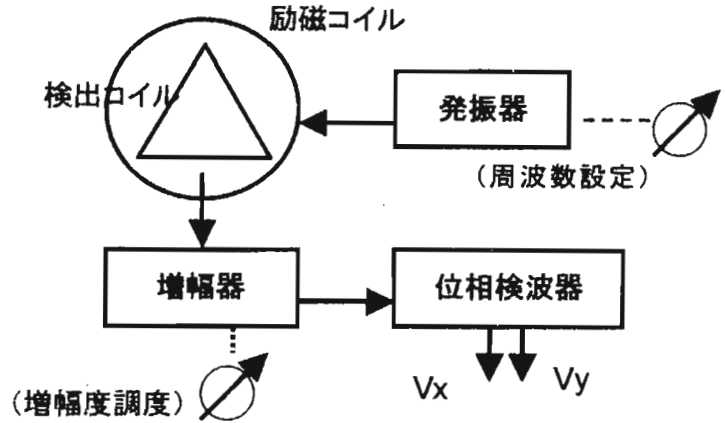


図 2 開発した探傷器の構成

本探傷器の概略仕様を表1に示す。また、写真1にその外観を示した。

表 1 探傷器の概略仕様

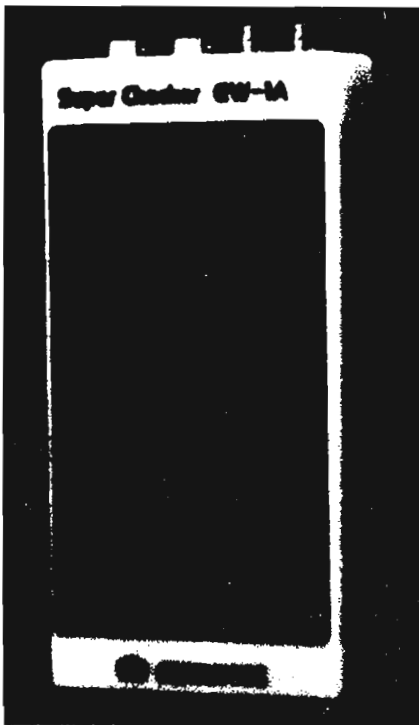


写真 1 開発した探傷器の外観

項目	仕様
周波数	25 kHz(固定)
増幅器	60dB(設定可能)
位相設定	0 ~ 360° (設定可能)
出力	内部表示及び外部出力
表示	5.4 インチカラー LCD
外部出力	アナログ Vx, Vy イベント
電源	内蔵リチウムイオン電池
連続運転時間	5 時間以上
寸法	200 × 105 × 38 mm
重量	920 gr(含バッテリー)

5. 探傷方法

⊖プローブは磁場拡散型であるため走査ラインを溶接部からどの程度離して行なうかが一つの大きなパラメータとなる。そのため溶接ラインからの距離を変えてきず信号を採った結果から、溶接ラインから 25 mm の位置が S/N 比が最良であったため走査ラインとすることにした。安定して走査を行うため木製定規を用いガイドとし、ガイドに沿わせるように探傷を行なった。⊖プローブは検出コイルの向きが探傷性能に大きな影響を与えるが今回の実験では溶接ラインと平行になるように走査させた。試験手法の概略図を図 10 に作業風景を図 11 に示す。

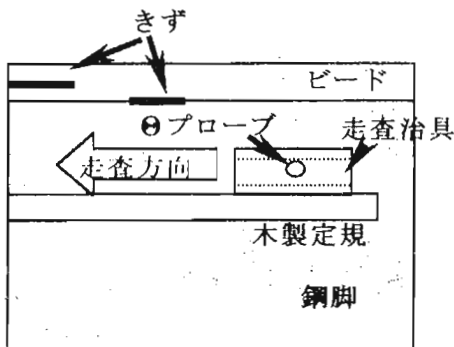


図 10 試験方法



図 11 現場実験状況

5. 実験結果

溶接線に沿って平行走査を行う走査ラインの決定を予備試験で行った。ビード始端から 25mm 離れた所に走査ラインを置いた場合が最も良く、30mm では S/N 比は 2、走査ライン 35mm にすると S/N 比は 1 と低下した。また走査ライン 25mm よりビード側に近づけても S/N 比の向上は見られなかった。きず信号の振幅は大きくなっている事は伺えるが、ビードの形状信号などの外来信号も大きくなり S/N 比ではビード端からの距離 20mm で 2 程度が最良であった。

この状態で探傷した結果を磁粉探傷の結果と合わせて図 12 に示した。

塗膜を剥がす前に渦流探傷試験を行なった結果、何らかの信号が得られた部分を、精密探傷後、磁粉探傷試験を行なった。渦流探傷試験結果、磁粉探傷試験結果を図 13 に示す。磁粉探傷試験の結果では疲労きずは同一線上の 2 個所に指示が見られた。

今回の結果から、本実験方法で塗膜の上からのきず探傷試験が可能であり、溶接部保守検査に充分適応可能なことが確認できた。

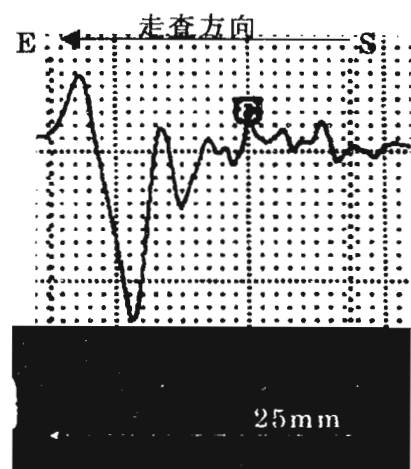


図 7 疲労きずの探傷結果

7. 結言

新しい上置型プローブ、 Θ プローブは高いリフトオフでの探傷を可能にし、きず信号位相を容易に測定できることが判った。

今回、試作した探傷器を用い実鋼橋脚柱での試験を行なった結果、ビード端より 25mm 離れた位置でビードと平行に走査する方法でビード部のきずが良好に検出できることが解った。

また、塗膜がある状態でもきず長さ 2mm 程度のきずが検出でき、磁粉探傷試験との良い対応が確認できた。

(参考文献)

1. 小山、星川、柄沢「リフトオフ雑音の発生しない渦流探傷探傷用上置プローブに関する研究」
非破壊検査 50(2001) No.11、p736

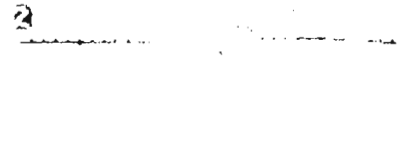
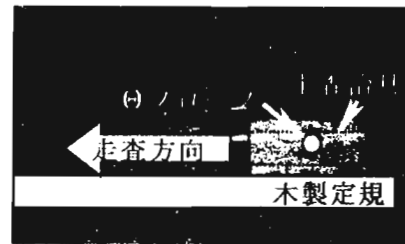


図 13 塗膜上からの自然きずの検出

企業内におけるNDT技術者の訓練・資格認定

NDT Personnel Training, Qualification and Certification in the Company

㈱日鐵テクノリサーチ 木村新一郎

概 要

一貫製鉄所においては日本非破壊検査協会が非破壊試験技術者の技量認定を開始した当初から技能向上を目的にNDT資格の取得を開始した。また、ASMEが非破壊試験技術者の訓練・資格認定方法として、SNT-TC-1Aを採用したことから原子力、石油、海洋構造物などの分野に広く浸透した。

鋼材製造者もお客様対応として、教育・資格認定体制の運用は必須のものとなってきた。

最近、非破壊試験技術者の教育・資格認定に関する二つのISO規格がJIS化され、運用が始まろうとしている。鉄鋼製造者ではこれまでの体制をベースにその対応を整備する必要がある、現状と今後の課題について紹介する。

1. はじめに

鉄鋼製造メーカーでは1970年日本非破壊検査協会（以下JSNDI）が技量認定を開始した当初から技術者の技能向上を目的に技術者の資格取得を奨励してきた。その後、団体規格などで品質保証体制の一環としてNDT資格者の訓練・資格認定の実施、検査の実施・管理を要求するようになってきた。

当初、原子力、石油、海洋構造物などの商取引において、鉄鋼製造メーカーへのNDT資格の要求も米国（SNT-TC-1A）、英国（CSWIP）、北欧（NORDTEST）、カナダなどの制度が要求され、また日本国内ではJSNDI資格も必要であり、全てに対応するのは困難で、NDT資格認定方法の世界統一が切望された。

そのうち、輸出物件ではかなりの部分が米国の「SNT-TC-1A」推奨規格による制度が有効に運用できるようになってきた。原子力、石油、海洋構造物産業では世界的にSNT-TC-1Aが普及してきた。この制度は企業主が推奨規程をベースに「訓練・資格認定マニュアル」を制定して、技術者に必要な教育訓練を行い、認定試験を実施して、資格を認定する。その中で技術的業務はレベルⅢ技術者が企業主の代わって責任をもつ制度である。

上記の制度は、輸出物件に対して品質保証体制の一環として運用するだけでなく、社内全体の技術者のNDT知識の普及、JSNDI技量認定受験者の教育訓練コースとして位置付けて運用している。

さらに日本国内ユーザーへの対応として、JSNDI資格を取得する必要がある。その場合、社内認定資格を有することはJSNDI資格を受験できる要件としている。

平成14年二つのISO規格がJIS Z2305、JIS G0431として制定され、運用が始まろうとしている。今後、鉄鋼メーカーにおいても訓練・資格認定制度をこれら、JIS規格に対応するように変更を行う必要がある。

2. 製鉄所内のNDI検査体制

1) 鉄鋼材料へ適用NDI検査

新日本製鉄㈱君津製鉄所の製造工程内には表1に示すような自動探傷装置が20箇所のほか手動探傷作業箇所が23箇所超音波探傷、放射線探傷、磁粉探傷、渦流探傷、浸透探傷を実施している。この他に、圧延ロールの超音波探傷、渦流探傷、浸透探傷のほか整備部門での非破壊検査作業も行われている。

これら非破壊試験作業は配置要員数およびNDT職場への応援作業人数を含めると約350人が作業にタッチする。

2) 製造工程内NDIの特徴と必要な知識

ISO 9712において特定の工業分野に必要とする知識があることが認識されているが鉄鋼製造工程の非破壊検査の特徴と必要な知識を要約すると以下のようになる。

(1) 鋼管、丸棒、角材など独特の探傷方法がある。

*鉄鋼材料分野特有の探傷技術などがあり、実務上必要な知識である。

(2) 自動化、機械化された専用装置による探傷が多い。

*装置のシステム、検出特性、各種校正方法、結果の見方、精度管理などに関する知識が必要
 (3) 鉄鋼で使用する材料関係のNDI探傷規格など多い。(JIS、ASTM、BS、NF)

*実際に使用する探傷規格とそれを展開した社内標準など実務に必要な知識
 探傷原理、探傷の基本、基本装置のほかに鉄鋼材料分野独特の資術、装置について知識が必要である。

表1 製造工程内で適用するNDI方法

対象	適用するNDI方法	対象きず	手動・自動	機器・作業数
角鋼片・丸鋼片	超音波探傷(垂直・斜角)	内部きず	自動探傷	1
	磁粉探傷	表面きず	自動探傷、自動+目視	9
線材	磁粉探傷(軸通)	表面きず	手動探傷	1
	渦流探傷(貫通式)	表面きず	自動探傷	4
厚鋼板	超音波探傷(垂直)	内部きず	自動探傷、手動探傷	3
	磁粉探傷、浸透探傷	表面きず	手動探傷	2
熱延鋼板	超音波探傷(垂直)	内部きず	手動探傷	1
UO鋼管	超音波探傷(斜角、垂直)	内部きず	自動探傷、手動探傷	4
	放射線透過試験、透視試験	内部きず	手動探傷、自動探傷	5
	磁粉探傷、浸透探傷	表面きず	手動探傷	2
SP鋼管	超音波探傷(斜角)	内部きず	自動探傷	2
	放射線透過試験	内部きず	手動探傷	3
電縫鋼管	超音波探傷(斜角)	内部きず	自動探傷	4
	渦流探傷(貫通式)	表面きず	自動探傷	1
鍛接鋼管	渦流探傷	表面きず	自動探傷	4

注) 材料供給、探傷作業、探傷結果の記録などを自動的に行っている装置を自動探傷とした。

3. NDI資格要求の運用体系

Fig 1に製造メーカーがユーザーからNDT資格認定制度またはNDT資格を要求される背景を示す関連図である。認定制度はユーザーの国籍、引用する探傷規格・品質保証の基本的考え方、これらを包含するユーザー仕様などいろいろの要因で各種の資格認定制度が要求されてきた。

①資格認定制度の要求

過去、資格認定制度の要求はSNT-TC-1A(米国)、CSWIP(英国)、NORDTEST(北欧)、ほかフランス、カナダなどがあり、とても対応困難であった。その後、米国の制度が世界的にも浸透してこの

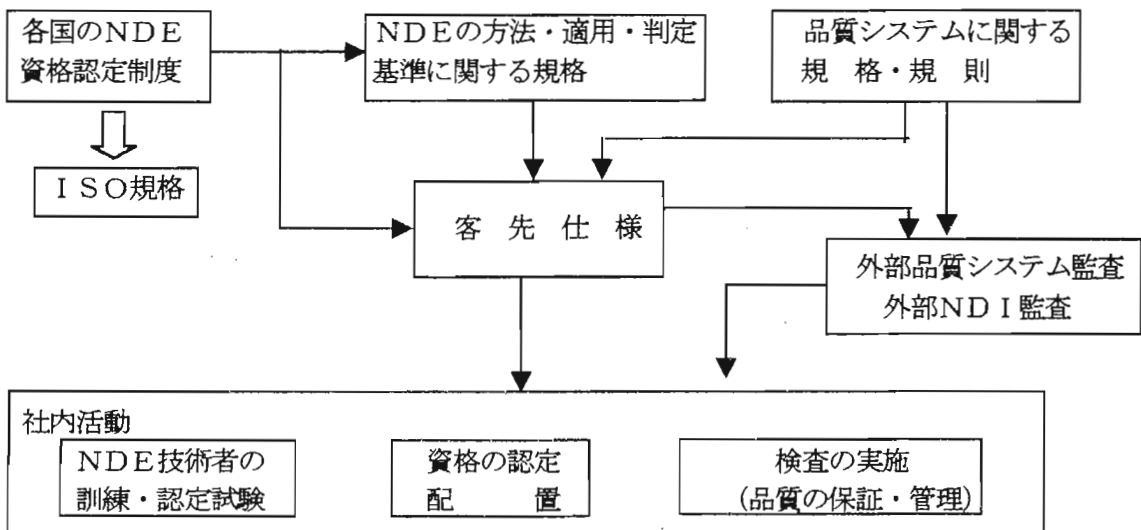


Fig 1 NDT資格認定に関する関連図

制度でかなり対応が可能になったので、社内においてはSNT-TC-1A（雇用者認定方法）の制度を確立して運用するようにした。

また国内においてはSNT-TC-1A認定の資格は通用しないため、JSNDI資格（第三者認定）を取得している。所内においては米国の方式と日本の方式を二本立ての制度を運用している。

最近これら各国の認定規程がISO規格により収束しつつあるが現時点、必ずしも一本化ではない。

②NDE認定制度に対する監査

ISO9000シリーズの品質システムが浸透するまでは、学協会（ASME、APIなど）による監査のほか、各ユーザー毎に品質システムの監査が行われた。最近では品質システムの審査機関によるISO9001に基づく品質システムの監査が行われ、NDE管理の実施状況の監査も品質システム監査の重要な監査項目である。表2に監査項目を示す。NDEの管理に関する監査に対応するのはその業務担当を任命されたレベルⅢ資格者が対応する。

表2 品質システム監査におけるNDT関連のチェック項目

チェック項目	主なチェック内容
①検査員の技量訓練・資格認定	①資格認定マニュアルの制定・実施体制の確立はよいか（SNT-TC-1Aとの整合性など） ②訓練・資格の認定がマニュアル通り実施されているか ③実施記録、維持管理記録がせりりされているか
②NDE試験要領（標準）	①必要なNDE試験要領があるか、必要項目が記載されているか ②試験要領は、必要な資格者によって検閲・承認されているか
③試験作業の管理	①試験作業の必要な資格者の配置がされているか ②試験作業、機器管理、精度管理は規程通り実施されているか ③非正常作業は規定通り資格者におこなったか

大きなプロジェクトのユーザー監査の中には非破壊試験の有資格者によるNDT監査もあり、資格認定だけでなく試験方法、精度管理などに対して厳しいチェックを受けることがあり、実際のサンプルなどによる実施を要求されることがある。

4. 社内におけるNDE訓練・資格認定の実際

1) NDT資格に関わる社内の規程・標準類

NDT技術者の育成、配置、業務責任に関する社内の規程・標準類は表3のようである。

表3 NDT資格者に関連する規定を決めている規程・マニュアル類

分類	規程・マニュアル名称	主な記述項目	備考
所共通	品質管理規程	採用する認定制度、資格者配置数の原則、及び資格者の業務範囲を規定する。	社内認定、NDISを採用
	非破壊試験技術者資格認定規程	資格認定の実施体制、資格者の能力、訓練・認定試験、資格の認定、維持管理等の方法を規定する。	SNT-TC-1Aに準拠
製品別	品質マニュアル	資格認定委員会、レベルⅢ、有資格者の責任権限、資格者による検査などを規定する	
	技術標準（NDT要領に相当）	各試験毎に試験する技術者の技量レベル	
	作業標準（NDT指示書に相当）	（資格）を規定する。	

2) 非破壊試験技術者資格認定委員会

NDT訓練・資格認定は主たる取得者がいる製造部から独立している「品質管理部」内に設けた委員会が実

施する。その機能は以下のようなものである。

- ① 資格認定規程の制改定 ② 年度育成計画（社内認定、J S N D I 資格）の決定
 ③ 資格認定の審議・決定 ④ 資格証明書の発行 ⑤ 実施記録の保管管理

非破壊試験技術者資格認定委員会のメンバーは、表4のようである。

表4 NDT資格認定委員会・メンバーの役割

メンバー	社内役職	業務の役割	
委員長	品質管理部長	資格認定規程、年度育成計画の承認、資格の認定・証明	
委員	担当レベルⅢ	NDT技術者の訓練・認定試験の実施 資格認定規程の作成	外部委託
委員	品質保証企画GL	資格認定規程の作成・維持管理 資格証明書の発行・資格維持管理業務 資格認定実施記録の保管管理・	

3) 教育訓練の実施状況

①社内認定

所内における技術者の訓練・資格認定のやり方はASNT推奨規程の「SNT-TC-1A」に準拠した資格認定規程（マニュアル）に基づいて実施している。

基本的にはNDT基礎知識と工程内のNDT作業を十分にできる専門分野を主に訓練する。すなわち鉄鋼材料のNDI知識・技能を中心に教育し、例えば保守検査、あるいは特殊分野は講義から外すこともある。

その実施体制、内容の概要は表5に示す。

表5 製鉄所内におけるNDT訓練体制の概要

実施体制	主な内容				備考
①訓練場所	10人～15人教育できるNDI研修室（専用化） *人数が多い場合は製鉄所の研修センターほかを活用				
②訓練講師の人数と資格	RT-3種 : 3名	UT-3種、2種 : 5名	MT-3種、2種 : 4名	PT-3種、2種 : 5名	講師は君津在勤のほか他所の在勤者も参加する。
③講習会の実施 (H14年度実施例)	UT-I : 年2回	UT-II : 年2回	MT-II : 年2回	PT-II : 年1回	育成人数 : 60名 (H12年度 : 94名)
④訓練時間	ET-II : 年1回	RT-II : 受講者少数で実施せず			写真参照
	訓練コース	レベルI	レベルII	備考	
	超音波	40	40		
	磁 紛	21		I+II訓練	
	浸 透	14		I+II訓練	
	渦 流	40		I+II訓練	
	放射線	40	40		
*集合教育のほかに現場ではベテラン検査員による導入教育、所共通の放射線安全教育、その他階層別専門分野の訓練などが行われている					今後、左記教育もNDT訓練として記録化が必要となる。

⑤テキスト類	①日本非破壊検査協会の各種テキスト ②日本鉄鋼協会の各種非破壊試験方法 ③社内各種標準書、規格類、装置取り扱い説明書 など	②、③は適時利用
⑥訓練機材	訓練用機材のほか、講習会当日使用しない機材を現場から調達して、実習用に調達する。	写真参照

社内のNDT講習会は検査技術者として技量認定を必要とする者のほか、品質管理、設備の管理、設備の企画を行う者の知識向上のための勉強として受講するものも多くあり、勉強した結果として資格認定を受ける者も多数存在する。 所内NDT講習会の風景を 写真 1、2 に示す。



写真1 超音波探傷講習会

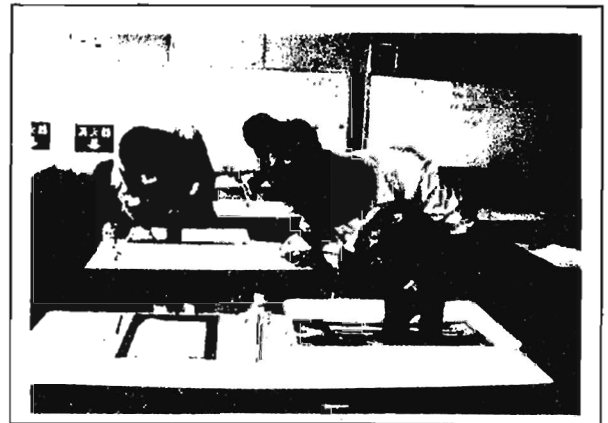


写真2 磁粉探傷講習会

② JSNDI 技量認定

JSNDI 技量認定は原則として社内認定レベルⅡを保有するものに受験させる。JSNDI 資格の取得理由は次のようなものである。

- ① NDT検査立会対応、NDT品質トラブルでの客先訪問など対応
- ② NDT資格者としての一層の意識高揚を図る。
- ③ 知識・技能範囲を広げる、熟練の高度化を促進する。
- ④ 第三者認定資格者による検査要求への対応。

具体的な訓練としては

- ① 一次試験前の模擬試験と回答の添削（3回～4回）
- ② 集合講習会の実施（必要に応じて）
- ③ 二次試験対策実技練習の指導（集合及び個人）
- ④ 個人の繰り返し練習

4) 認定試験の実施

資格認定試験の問題は当初、ASNTの例題集（4者択一問題）とJSNDIの問題集など参照して作成する。最近ではほとんどJSNDIの問題集を参照して担当レベルⅢが作成する。

問題の出題形式は4者択一、穴埋め問題などで問題数はJIS Z 2305のルールとほぼ同じである。不合格者については認定規程に従い、再訓練・再試験を行う。

合格者には認定委員長による資格の認定を受け、証明書を発行する。

5) 資格者育成結果

社内認定者、JSNDI 技量認定者の育成数を平成14年11月と昭和59年時点表6に示す。

表6 社内認定者、JSNDI 技量認定者の育成数

種類	放射線	超音波	磁粉	浸透	電磁誘導	合計
社内認定 (H14)	48	270	142	67	55	587
同上 (S59)	37	198	59	3	17	314
JSNDI認定 (H14)	24	98	23	9	7	161
同上 (S59)	17	166	15	6	19	223

社内認定者数は前述の知識を有していることが望ましい者も含めて、延べ資格数で587資格でS59年時点の1.87倍に増えている。これに対してJSNDI資格者数は昭和59年の223人から161人となり72%に減少している。

6) 資格の認定及び維持管理システム

製造部のNDT職場では 証明書の提示、検査者の資格者リストの提出など求められ、抜き取り的に特定の資格者の認定記録を求められることがある。担当レベルⅢ資格者及び資格認定事務局はこれら製造部へのサービスを行うために証明書の有効期限管理、最新リストの作成など行う。品質監査や製造前ミル審査等の要求にはリアルタイムで対応することも必要である。

これらのサービスを行うために資格者個人のデータをデータベースに収録して、各種必要な記録、リスト集計作業を行うパソコンによりNDE資格管理システムを構築して運用している。このシステムから作成する記録類、リスト類は以下のようなものである。

- ①資格者の個人記録表：氏名、所属、学歴、生年月日のほか保有する資格の業務経験、教育記録、認定試験結果、資格更新履歴（社内資格・JSNDI資格）
- ②有効期限書き換えステッカー：有効期限を書き換えた証明書
- ③各資格者リスト：各部門ごとの最新版資格者リスト
- ④有効期限書き換え者リスト：各職制を通じて証明書の書き換えを行う。
- ⑤各種解析リスト：年齢構成、複数資格保有者その他必要なリストの作成
- ⑥各種集計表：部門別資格者集計表（資格別、課・掛別、など

5. 今後の課題

社内では輸出物件向けの「SNT-TC-1Aに準拠する社内認定」と国内向けのNDIS 0601認定の資格認定制度を運用してきた。この二本立て運用は人的労力、コストともが非常に大きく負担である。これから大幅な認定制度の変更があり、JIS認証資格取得への対応が必要となる。ISOをベースにした世界に通用する資格制度を活用するメリットがあるものの、実際の運用に当たっては次のような課題がある。

- ① 訓練時間の大幅増加への対応
これまでのNDT技術者の訓練にはかなりの時間を費やしているが特に資格者数の半分近くを占める超音波探傷試験では2倍の訓練時間数になる。この対応には集合訓練のみでなく現在いろいろな目的、場所で実施されているNDI関連教育を体系的に記録に残して、教育時間のカウント行う。
- ② JSNDIのJIS認証試験への対応
これまでJSNDIの技量認定試験は合格率が悪いと言われながら、代替試験や春・秋一次試験・試験問題の発行、インスパートなど情報収集の機会があった。認定試験方法の大幅変更で受験者側としては情報なしの状態にあり、受験者指導の要領が判らない。JSNDIからの情報提供を期待したい。
- ③ 認定制度の一本化運用
SNT-TC-1AとNDIS 0601では認定システムが違い過ぎて一本化運用ができなかった。今後のJIS Z2305 (ISO 9712準拠)、JIS G0431 (ISO 11484)、SNT-TC-1Aは 教育訓練の要否、認定試験の形式、実施記録の残し方、資格継続の方法など共通部分も多く、かなりの部分共通的に運用したい。(JIS認証を利用することで社内認定制度への監査対応、実施記録類管理などが軽減できればそれもメリットとなる)

6. まとめ

NDT技術者の訓練・資格認定はかなりの時間・費用を掛けて実施している。今後JIS認証に対応していくことになるがISO/TC135ではさらに別の資格認定制度の検討がなされているとの話もあり、制度の定着までにはまだまだ流動的である。企業内ではNDT資格認定に関して効率的に運用をしていきたい。

ソフトプローブとその使用方法の紹介

ジャパンプローブ株式会社

幸崎 進 岩橋 充 高橋 修
福原 熙明 星野 充宏

概要

探傷面の凹凸になじんで良好な伝達効率を得られる軟質振動子を使用した垂直探触子、ソフトプローブを開発した。これは溶接ビード上からの探傷が可能であるとともにあらゆる曲面からの探傷も可能である探触子の例を紹介する。

1. まえがき

超音波探触子は一般的に平らな振動子材料で作られており、探傷面との間の接触媒質層は薄く一定であることが望まれる。この点、探傷の安定を得るための条件として探傷面は平滑で、かつ面粗さは滑らかであることが必要とされる。従って溶接ビード上からの探傷が不可能である。

新製品であるソフトプローブは、このような問題を解決するために開発された商品で、薄型で柔軟性に飛んでいて、凹凸面になじみ、面の粗さ、傾き具合が多少悪くても面に密着し超音波の伝達が確実に行われ、これまで困難とされていた溶接ビードの上からも探傷できるような特徴を持っている。以下にソフトプローブとその使用方法について紹介する。

2. ソフトプローブの構造

図1はソフトプローブの構造を示したものであり、振動子はポリマー又はコンポジット、前面材はポリイミドフィルムを使用し、背面の吸音材からなっており、いずれも可撓性のある材料から構成されている。

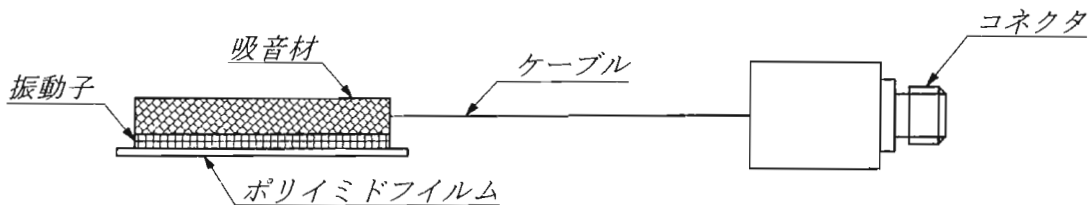


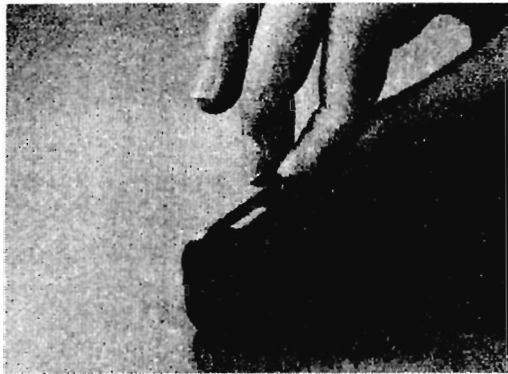
図1 ソフトプローブの構造

3. 使用装置：探傷器 UI-22（三菱電機製）

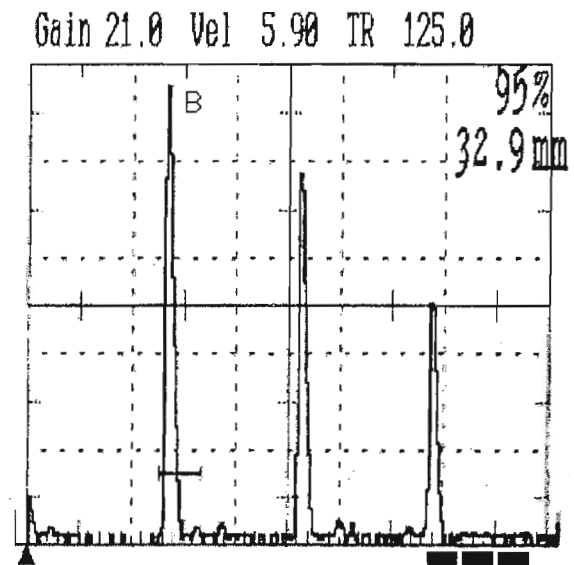
4. 接触媒質：ソニコート

5. 探傷例の紹介

図2はソフトプローブの柔軟性を示す円柱面からの探傷例である。曲面に探触子がなじみ高い底面エコーが得られているのが分かる。



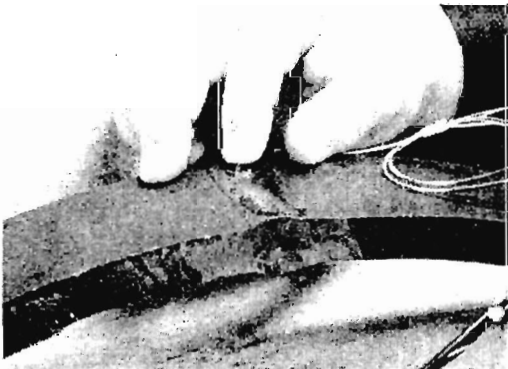
(a) 探傷状況



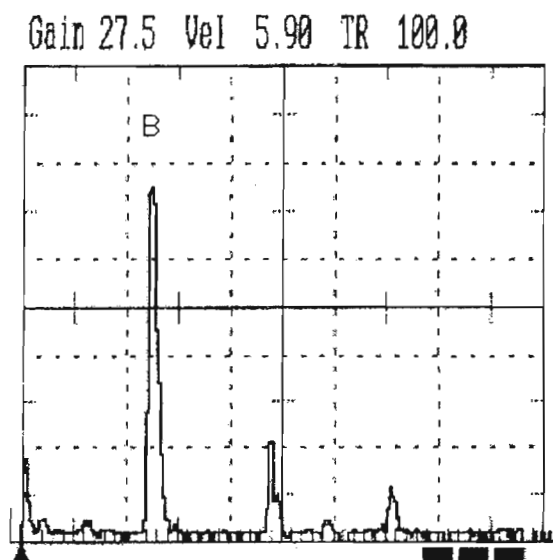
(b) 探傷図形

図2 円柱面からの探傷例

図3は溶接ビード上の健全部からの探傷例である。ビード面に探触子が密着し、安定したエコーが得られている。



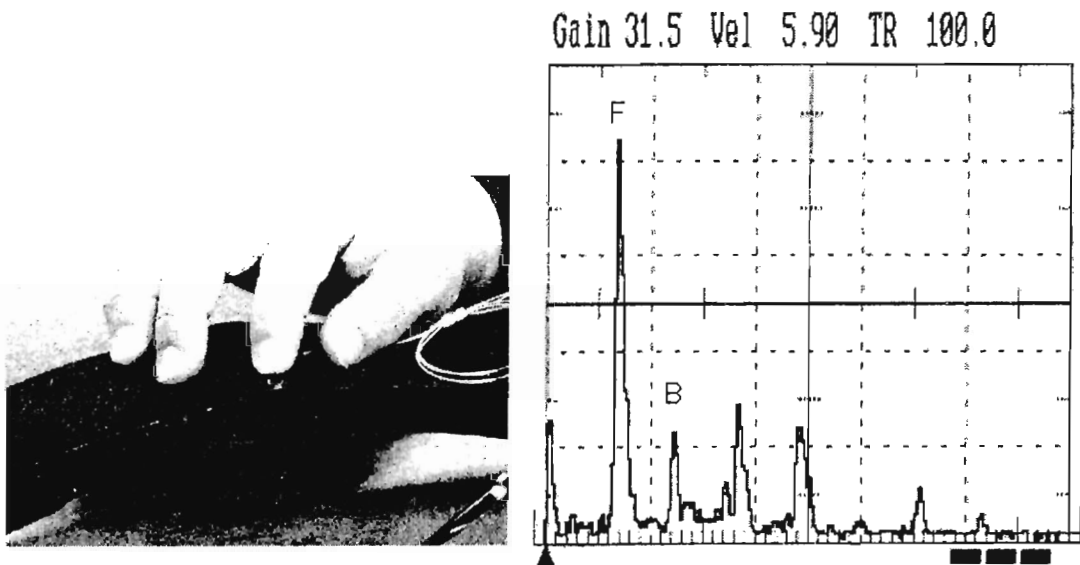
(a) 探傷状況



(b) 探傷図形

図3 溶接ビード上の健全部からの探傷例

図4は溶接ビード上からの人工きず(φ1.5)の探傷例である。ビード面を加工せず探傷可能であることが分かる。

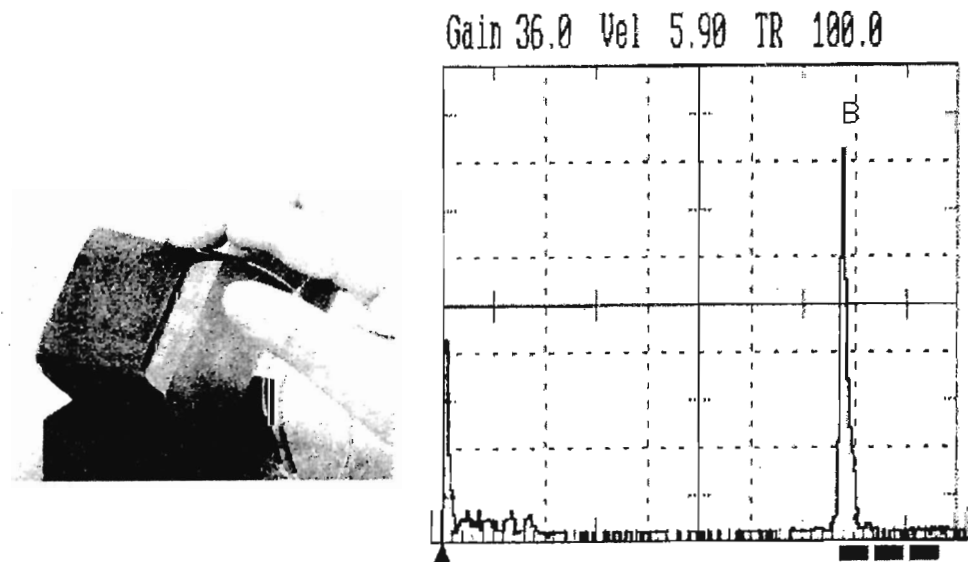


(a) 探傷状況

(b) 探傷図形

図4 溶接ビード上からの人工きずの探傷

図5は凸面(STB-G V3)の健全部からの探傷例である。凸面のコーナーのエコーが明瞭にわかる。

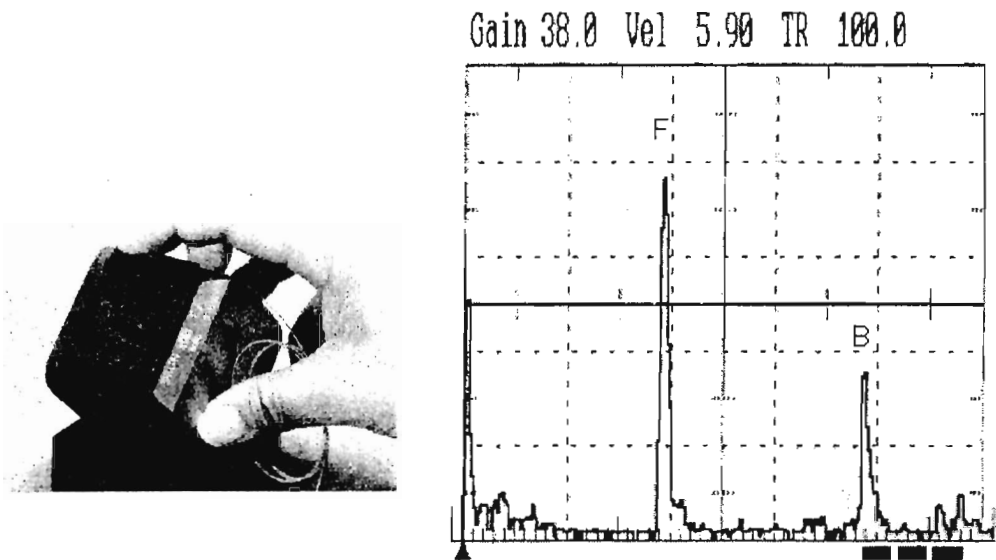


(a) 探傷状況

(b) 探傷図形

図5 凸面(STB-G V3)の健全部からの探傷

図6は凸面（STB-G V3）の人工きず部の探傷例である。きずエコーとコーナーのエコーが明瞭にわかる。

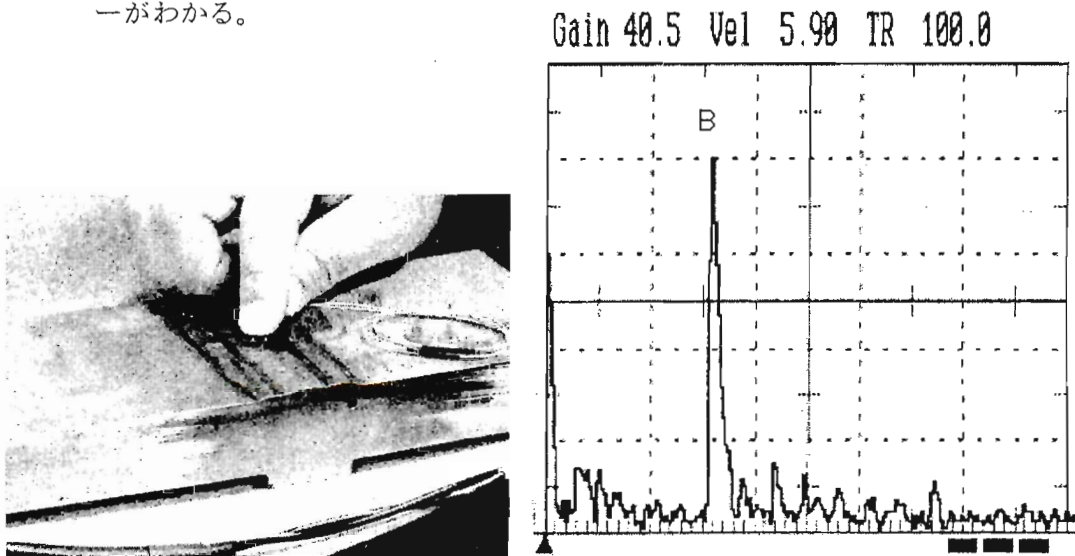


(a) 探傷状況

(b) 探傷図形

図6凸面（STB-G V3）の人工きず部の探傷

図7は溶接部（SUS）ビード面の健全部の探傷例である。健全部からのエコーがわかる。

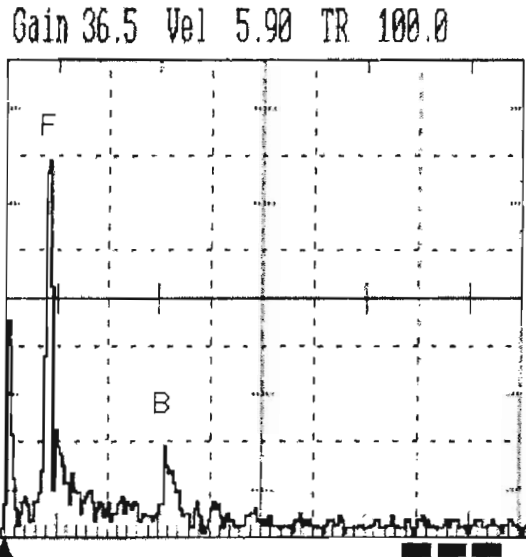
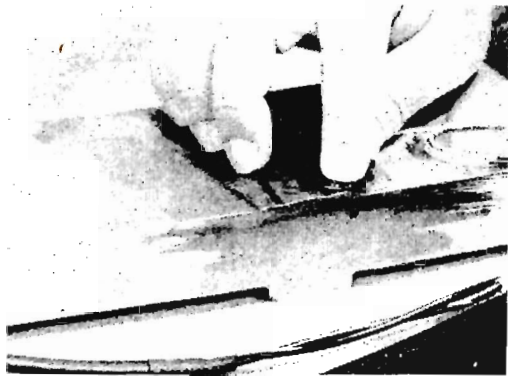


(a) 探傷状況

(b) 探傷図形

図7は溶接部（SUS）ビード面からの探傷

図8は溶接部（SUS）ビード面の人工きず（φ3）の探傷例である。人工きずのエコーが分かる。

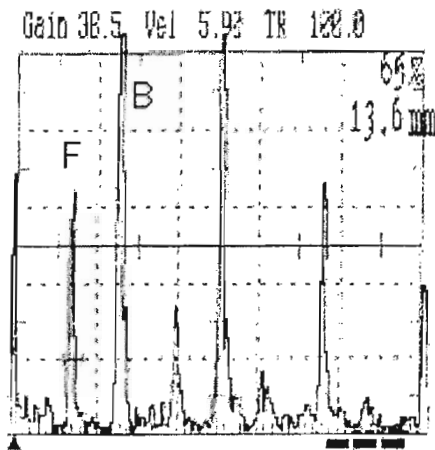
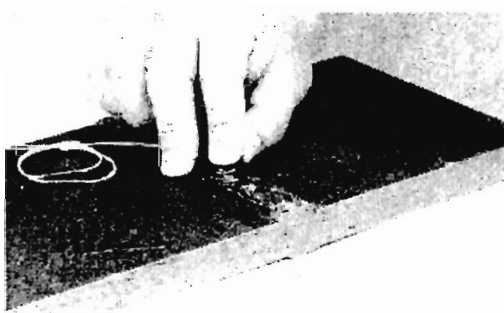


(a) 探傷状況

(b) 探傷図形

図8は溶接部（SUS）ビード上の人工きず部の探傷

図9は突合せ溶接部の溶け込み不良の探傷例である。溶接部ビード上から探傷し、自然きずのエコーがわかる。



(a) 探傷状況

(b) 探傷図形

図9は溶接部ビード面からの溶け込み不良の探傷

図10はソフトプローブのRF波形及びFFTである。反射源はSTB-V 15-2.8で、探触子は5K5Nである。

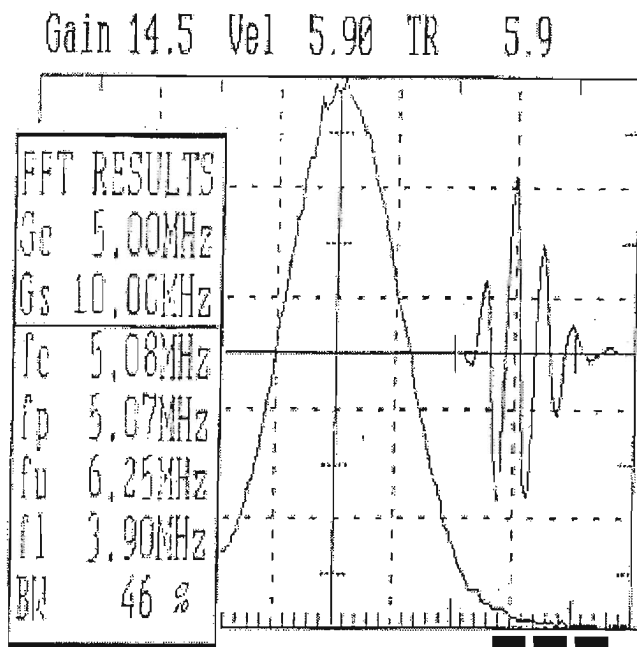
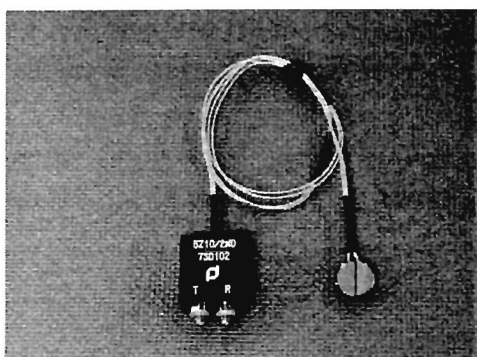


図10 ソフトプローブのRF波形及びFFT

6. ソフトプローブの種類

a) SDタイプ

二振動子垂直ソフトプローブでビード面から探傷に適している。



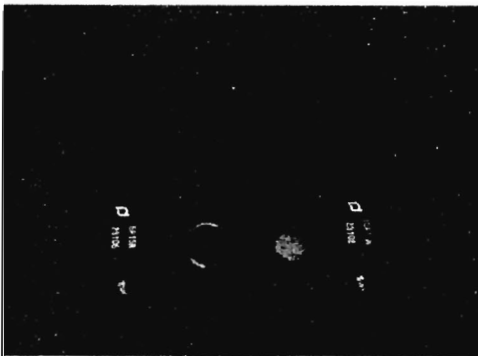
周波数	振動子寸法	型式
5MHz	$\phi 10 / 2$	SD51025
		SD51075
	$\phi 15 / 2$	SD51525
		SD51575

(a) ソフトプローブの外観

図11 二振動子垂直ソフトプローブの例

b) Hタイプ

高感度ソフトプローブである。



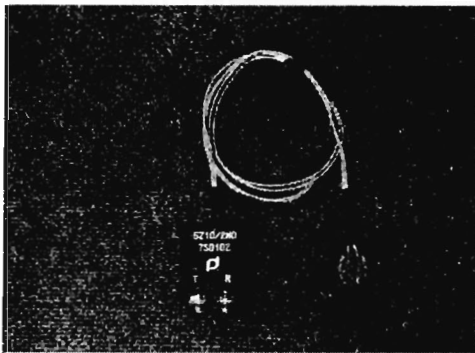
周波数	振動子寸法	型 式
5MHz	φ 5	H5525
	φ 10	H51025
10MHz	φ 5	H10525
	φ 10	H101025

(a) ソフトプローブの外観

図12 ソフトプローブ (Hタイプ)

c) Sタイプ

柔軟で接触面が変形した面に密着した探傷が行える。



周波数	振動子寸法	型 式
5MHz	φ 15	S51525
		S51575
10MHz	φ 10	S101025
		S101075

(a) ソフトプローブの外観

図13 ソフトプローブ (Sタイプ)

7. まとめ

ここに紹介した柔軟性のある探触子、ソフトプローブは凹凸の激しい溶接ビード上から探傷できる画期的なもので、探傷面が必ずしも平らでなくても良い利点を生かし、探傷可能範囲がさらに広がるものと期待される。

超音波可視化について —新製品・実物可視化装置の紹介—

Visualization System for Ultrasonic Wave in a solid

株式会社ジャスト研究所 ○名取 孝夫

概要

(財)発電設備技術協会にて考案された二探触子法を応用し既存の超音波探傷器を用いて、固体内を伝搬する超音波パルスの様子を可視化する手法を商品化した。これは送信用の探触子を試験片側面近くに置き、受信用の探触子を側面に配置して、超音波パルスが固体内を伝搬する際の側面への面外成分を受信することで超音波パルスの伝搬を直接可視化する手法であり、市販のデジタル探傷器、小型スキャナとその制御部と解析用ソフトとパソコンからなる。ここではその構成と使用用途について示す。

キーワード： 超音波可視化，溶接部，二探触子法，商品化

1 はじめに

固体中を伝搬する超音波の様子を可視化することは、超音波探傷においてエコーの経路の把握や選択した探触子が試験目的に合致するか判断をする際に有効な手段の一つとなる。そのため、各種可視化手法が提案されてきている[1, 2]。(財)発電設備技術検査協会では可視化方法の一つとして、二探触子法を応用した簡便な方法を考案し、光弾性法と比較することで有効性を確認してきた[3, 4]。

当社では、当該協会と特許権使用許諾契約を交わし、この可視化手法を商品化した。この新製品・実物可視化装置を使用して各種試験体を伝搬する超音波の様子を可視化することを試みた。

2 測定原理

本測定原理は、図1の測定原理の模擬図に示すように、送信用の探触子を探傷面の側面(X-Z面)に近づけて置き、超音波パルス(送信波)がY-Z面付近を伝搬する時の面外成分(X方向)をY-Z面に配置した受信用の探触子を用いて二探触子法の原理で受信する。そして受信した波形をデジタル探傷器の記録メディアに収録する。この方法で超音波パルスの伝搬を測定したいY-Z面の領域内について受信用探触子を走査しつつ波形を収録する。この収録した波形データを解析用パソコンに移し、あるゲートの範囲について計算機で画像表示することで、ある時間後の超音波の波面を可視化できるようになる。また、ゲートのタイミングをずらすことで、波面が伝搬する様子を表示することができた。

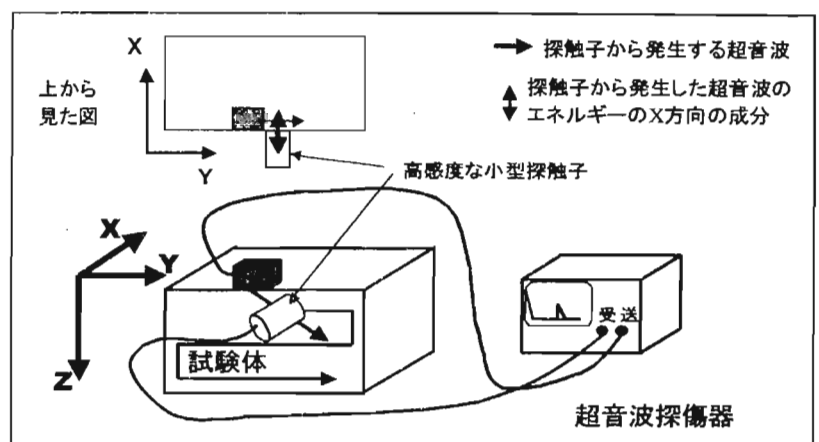


図1 測定原理の模擬図

3 装置の構成

図2に商品化した実物可視化装置の構成図を示す。

本研究では、超音波探傷器に湘菱電子製 UI-23 を用いて、波形収録はサンプリングクロック 50MHz・量子化 8bit の等価サンプリング A/D にて行う。受信用探触子は送信用探触子の試験周波数と近似なものを用い、低いレベルの音場まで観察したい場合は振動子径 $\phi 2\text{mm}$ を用い、それほど低レベルの観察は重要でなく可視化画像の細かさを観察したい場合は振動子径 $\phi 1\text{mm}$ を用いる。受信用探触子の振動モードは、送信用探触子に縦波探触子または横波 (SH波) 探触子を使い、伝搬する SH波と縦波成分のみを観察したい場合は、縦波垂直探触子を使用し、送信用探触子に横波 (SV波) 探触子を使用する場合は、横波垂直探触子を使用する。

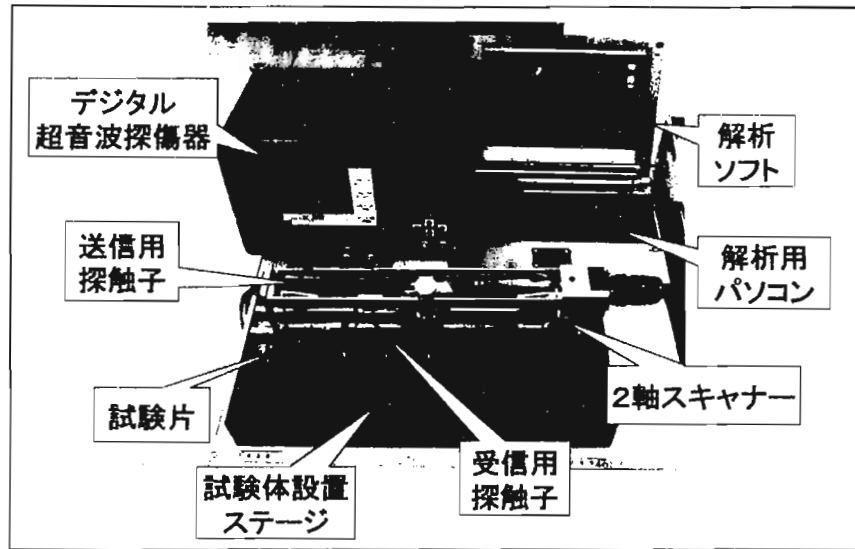


図2 実物可視化装置の構成

4 測定方法

測定方法は、測定する試験片を試験体設置ステージに側面を上にして固定し、音場を測定する送信用探触子を探傷面 X-Y 面 (この設置した状態では横に寝かした方向からとなる) に固定する。Y-Z 面の受信用探触子の走査は、小型の2軸スキャナで行い、試験体設置ステージ上の試験片 Y-Z 面の矩形走査を行いつつ波形収録を行う。走査ピッチは Y 軸, Z 軸ともに 0.2mm, 0.5mm 以降 1mm ピッチで設定可能であり、波長との関係から必要なピッチに設定する。受信用探触子に縦波垂直探触子を使用する場合は、1度の走査回数で良いが、横波垂直探触子を使用する場合は、受信用探触子の振動方向を 0° , 45° , 90° の向きを変えて3回の走査回数を行う。

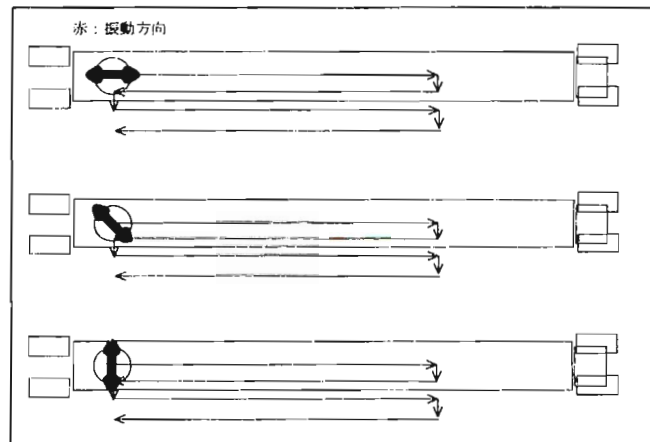


図3 横波探触子の走査方法

入射点
↓

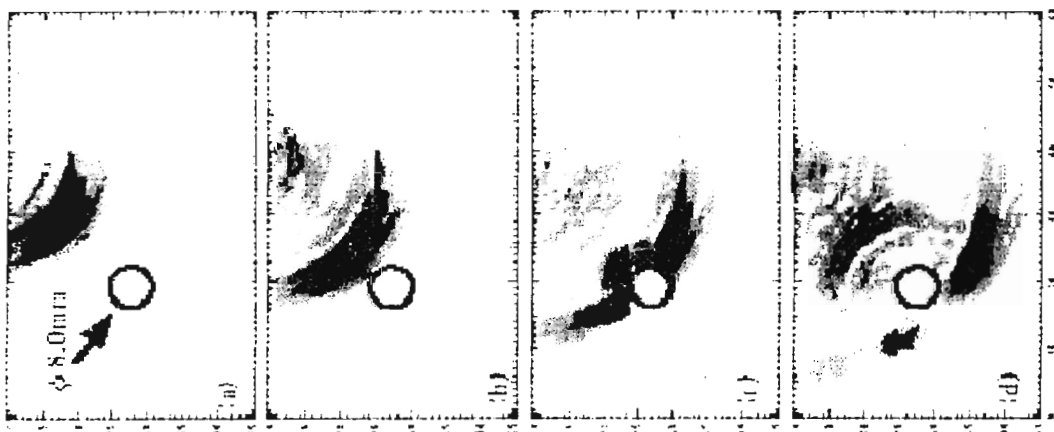


図4 SUS316鋼中を伝播するSH波
(傾斜45度斜角探傷)

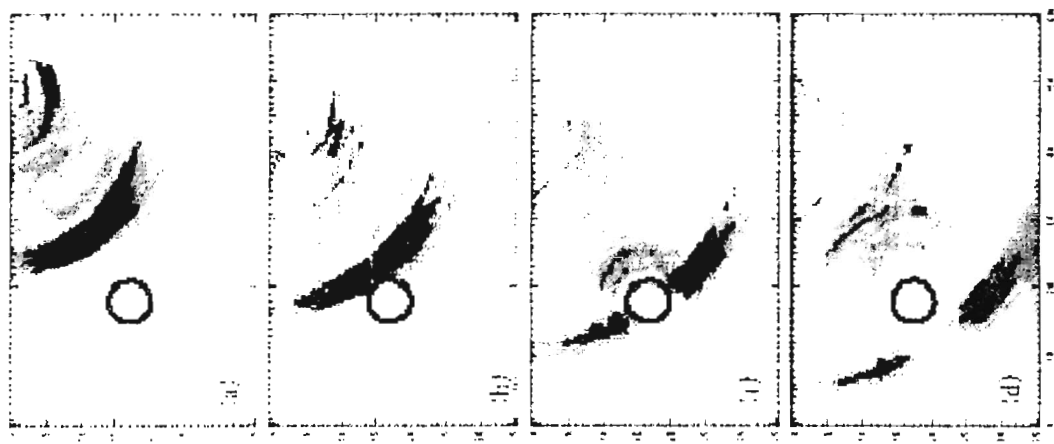


図5 SUS316鋼中を伝播するSH波
(傾斜60度斜角探傷)

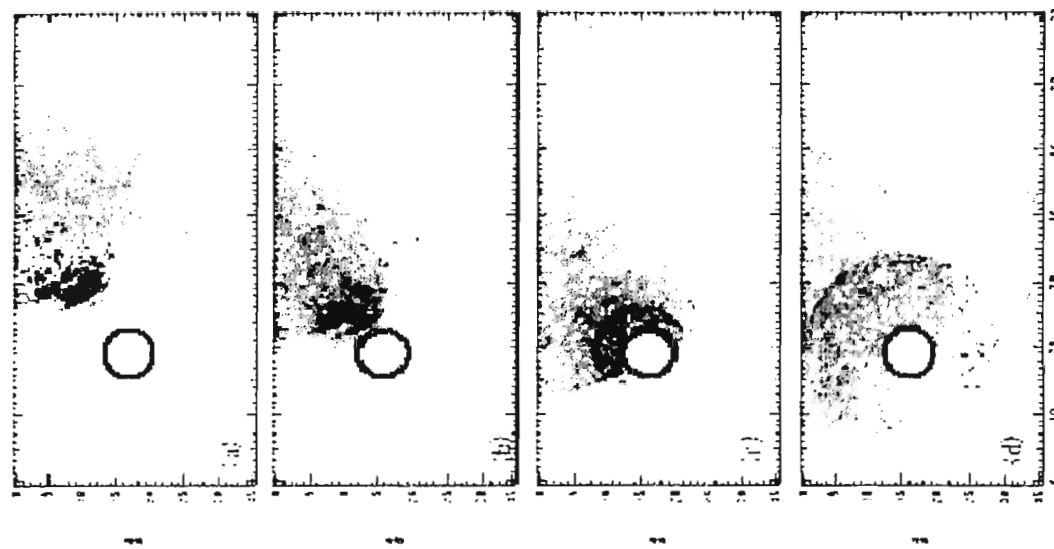


図6 SUS316鋼中を伝播するSH波
(60度斜角探傷)

5 データ解析

データ解析は、表示階調と処理速度の点からデジタル探傷器では行わず、別置きのパソコンを使用して行う。このためデータ解析用及び可視化画像表示用のWindows版ソフトウェアを製品の構成品とした。このソフトウェアでは、可視化画像の表示の他、この画像のムービーファイル化機能を持ち特別なアプリケーションなしで再生可能とした。またこの画像上にマクロ写真などデジタルカメラなどで取り込んだ画像ファイルを貼り付ける機能を有し、あたかもマクロ断面上を超音波波面が伝搬する状態観察が可能とした。

6 測定結果

本手法を用いてステンレス鋼中を伝搬する超音波パルスの様子を可視化した結果を示す。試験片の材質はSUS316で、探傷面から深さ18.5mmの位置にφ8mmの横穴を付与したブロックを用いた。送信用探触子をパルス反射法で最大エコーが得られた位置に配置した。図4および図5は、それぞれ縦波45度および縦波60度斜角探触子を用いて図中の右上から超音波を入射し、左側の横穴に向かって超音波パルスが進行して、横穴で反射する様子を可視化した結果である。図(a)から(d)はそれぞれ伝搬時間を1μsec.ごとのスナップショットを示す。それぞれ、60mm×35mmの領域を測定した結果を示している。図(a)、(b)は横穴へ向かって進んでいる様子を、図(c)、(d)は横穴で反射し、同心円状に反射する波面と、横穴で反射しなかった部分はそのまま通過している波面を示している。図6は、屈折角60度のSH波探触子を用いた結果である。縦波斜角の場合と同様に図の右上から超音波を入射し横穴へ向かって進んでいる様子(図(a)、(b))と、横穴で反射し同心円状に反射波が広がる様子および反射しない部分はそのまま伝搬している様子(図(c)、(d))を示している。光弾性可視化法ではSH波の振動モードは測定が難しいが、本手法ではこの様に波面が可視化できることがわかった。

7 まとめ

既存の超音波探傷器を用いて、二探触子法を応用した簡便な固体内超音波の実物可視化法をもとに、装置化し、発売を開始したので紹介した。次のような利用が考えられる。

- (1) 反射源の推定(妨害エコーの確認)
- (2) 探触子の性能の確認
- (3) 探傷条件(探触子の屈折角、周波数、配置など)の確認
- (4) 超音波探傷試験結果の分析・解析・評価
- (5) 超音波探傷試験の研修・教育用ツール
- (6) シミュレーション結果の評価

謝辞

製品化及び本稿の執筆に当たってご指導、資料提供及び引用を頂いた、(財)発電設備技術検査協会 古川敬氏に謝意を表します。

参考文献

- [1]伊達和博, 島田平八; 非破壊検査, Vol.36, No.9 (1987), P.605
- [2]今出政明, 高坪純治, 岡田三郎, 宮内秀和; 非破壊検査協会 第6回超音波による非破壊評価シンポジウム講演概要集(1999), P.106
- [3]古川敬, 米山弘志, 上杉信夫; 非破壊検査協会 第7回超音波による非破壊評価シンポジウム講演概要集(2000), P.103
- [4]古川敬, 米山弘志, 堀井行彦, 上杉信夫; NDI平成12年度春季大会講演概要集, (2000), P.9

探傷結果表示の高性能化による圧延ロール微小表面きず検出

Detection of small surface flaws in rolling rolls by enhanced mapping method of test results

○高田 一* 山本克史** 前田一郎** 杉本良一** 守井隆史**

Hajime Takada Katsushi Yamamoto Ichiro Maeda Ryouichi Sugimoto Takashi Morii

*川崎製鉄株式会社 技術研究所

Technical Research Laboratories, Kawasaki Steel Corporation

**川崎製鉄株式会社 千葉製鉄所

Chiba Works, Kawasaki Steel Corporation

概要

圧延中の割損の防止を目的とした熱間仕上圧延用ワークロールのロールショップにおける表面探傷において、信号レベルが微小なきずを漏らすことなく表示することが可能な探傷結果の表示方法および装置を開発し、実用化した。探傷結果をロール展開図の形式でマップ表示するに当たり、しきい値を設け、しきい値以下のレベルの信号をレベルに応じてグレースケールで表示し、しきい値以上のレベルの信号をレベルに応じて明るい色でカラー表示する。この方法により、ノイズレベルよりもわずかに大きいだけの微小レベル信号しか得られないきずであっても、その信号のレベルおよびロール上での位置を明瞭に表示することが可能となった。この結果、微小きずまで含めたロールの表面きず管理が可能となり、表面きずによる圧延中のロールトラブル防止に大きく貢献している。

KEYWORDS: Rolling roll, Surface flaw, Surface testing, Mapping

1. 緒言

鋼板の熱間圧延や冷間圧延に使用されるワークロールは、圧延中に絞りなどの事故が起きた場合、表面にクラックが発生することがあり、放置すると、圧延中にクラックが内部まで進展し、ロールが割損することがある。ワークロールは圧延により摩耗したり、表面が荒れたりするため、所定量の圧延に使われた後、砥石による研磨によって表面を平滑に仕上げられ、この後、適当な非破壊検査手段を用いて表面にクラックがないか検査される。クラックが検出されれば、これが除去されるまで研磨が行われる。

熱間仕上圧延用ワークロールの表面検査には渦流探傷法が用いられてきたが、高速度工具鋼(ハイス鋼)がワークロールに用いられるようになってからは、きず検出

能の向上を目的に表面波探傷法が主要な探傷方法になった^{[1],[2],[3],[4]}。しかし、後段スタンドワークロールとしてニッケルグレーン鑄鉄ロールが一部用いられており、このロールの表面きず検出には渦流探傷法が適しているため、両探傷方法が併用されている。

ロール割損事故は、ロール原単位の悪化を招くばかりでなく、復旧作業によるミルの長時間停止のため圧延能率をも著しく損ねる。したがって、探傷を適切に行い、その結果を適切に評価し、しかるべき対応をとることが、トラブルのない操業のため重要である。

ロールの表面検査を精度良く行い、ロール割損事故を防止するには、探傷方法の性能向上とともに探傷結果を利用しやすい形で、かつ、表現力高く表示することが重要である。今回、探傷結果表示の高性能化について

て検討を行い、成果が得られたので、この概要を報告する。

2.表面きず検査方法・装置

表面波による表面きず検出では、図 1 に示すように、表面波探触子によって圧延ロール(以下、試験体ともいう)の円周方向に表面波を伝搬させ、表面きずを検出する。表面波探触子は公称周波数 2MHz のものが用いられることが多い。

図 2 に自動探傷装置の例^[5]を示す。回転する試験体の回転方向とは逆方向に表面波を送信して、表面きずからの反射波を受信しつつ、表面波探触子を試験体の軸方向に走査する(以下、Helical scanning と称する)ことにより、圧延ロール全表面の表面きずの探傷が可能である。

表面波探触子と試験体との音響結合には図 3 に示すように、ギャップ水浸法が用いられ^[5]、ギャップの寸法は約 0.5mm が適当とされている。ギャップ水浸法に用いられた水は、かなりの量が回転する試験体との摩擦によって試験体に付着したままとなる。この水が表面波の伝搬路に入り込むと、表面波の減衰及び雑エコーの発生が起こるため、水切りワイパーによって、これから表面波を伝搬させて表面きずの探傷を行う部分の水を取り除くようになっている。

渦流探傷法による表面きず検出では、図 4 に示すように、励振コイルに高周波電流を通电し、ロール表面に渦電流を誘導する。きずの直上に励振コイルが位置すると、ロール表面での渦電流の流れ方が変化し、検出コイルに誘導される電流も変化する。この変化をとらえて表面きずを検出する。表面波探傷の場合と同様に、Helical scanning によって、ロール表面全体の探傷を行う。今回製作したプローブは検出コイル 5 個がロール軸方向約 20mm を探傷できるように並べられている。

探触子まわりの構造を写真 1 に示す。図 2 の表面波探触子のホルダと同様の構造をもつホルダが 1 個追加されており、これに渦流探傷プローブが取り付けられている。

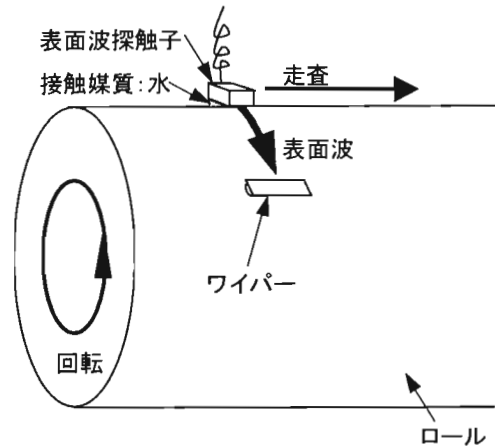


図1.表面波によるロール表面探傷

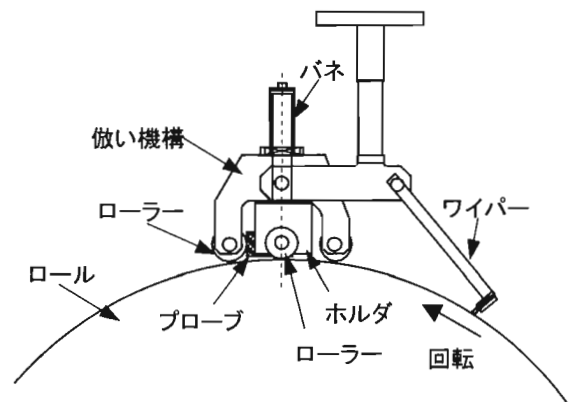


図2.自動表面波探傷のための機構

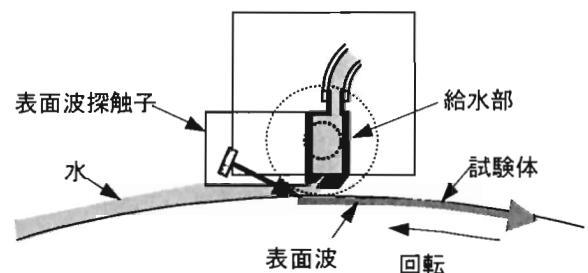


図3.ギャップ法による表面波の送受信

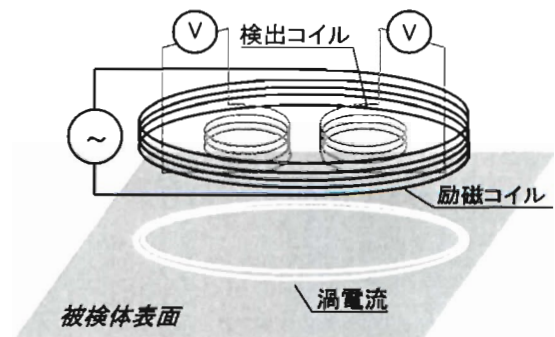


図4.渦流探傷法



写真1. 探触子まわりの構造

探傷システムの例として、川崎製鉄千葉製鉄所第3熱間圧延工場ロールショップに導入された探傷システムの基本的な構成を簡単に図5に示す。各グラインダーに超音波探傷設備(以降UT)と渦流探傷設備(以降ECT)を備えられている。グラインダーからの探傷指示によりマスターCPU盤から各探傷器制御盤に対して、設定条件が出力される。この条件をもとに探傷器は探傷作業を行い、きず信号の大きさをアナログ電圧として、グラインダー制御盤に通信し、グラインダー制御盤の表示画面に探傷結果が表示される。

3. 従来の探傷結果表示方法とその問題点

3.1 従来の探傷結果表示方法

従来のロール表面探傷結果の表示方法には2通りの方法がある。一方は、探傷装置から出力されるきず信号の大きさに比例するアナログ電圧出力を単にレコーダ記録する方法である(以下、アナログチャート式表示)。もう一方は、探傷時にきず信号の大きさをロール上での探傷位置に関連付けて収集・記録し、きず信号を検出

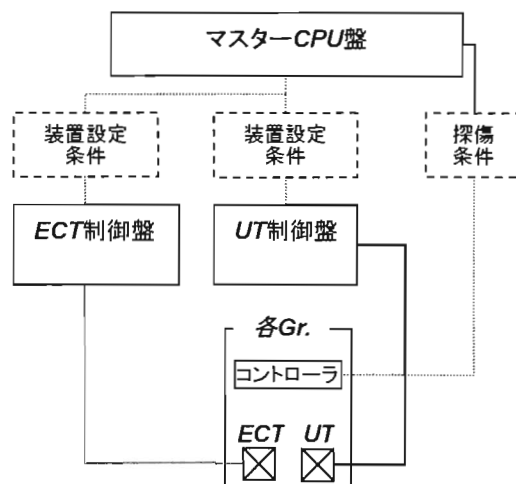


図5. 千葉3HOTロールショップの探傷システムの構成

した位置をロールの展開図上に表示する方法である(以下、マップ表示)。

アナログチャート式の探傷結果の表示例を図6に、マップ表示の例を図7にそれぞれ示す。図6および図7は同一の校正用人工きず入りロールを表面波を用いて探傷した結果である。図6は人工きず部分のみの探傷結果を表示している。探傷を行った時期に違いがあるため、必ずしも結果は一致していない。また、図7において人工きず以外に大きな面積のきずが検出されている。このきずはロール芯材の露出部*の材質的な変化をとらえたものである(以下、地きずと称する)。

*...熱間仕上圧延用ワークロールは径方向に概ね2層構造になっており、外側が圧延に使用する高速度工具鋼やニッケルグレーン鑄鉄等の使用層、内側がダクタイル鑄鉄等の芯材となっている。圧延、研磨の繰り返して使用層が薄くなると、芯材がロール表面に近くなり、表面波探傷によって検出されるようになる。

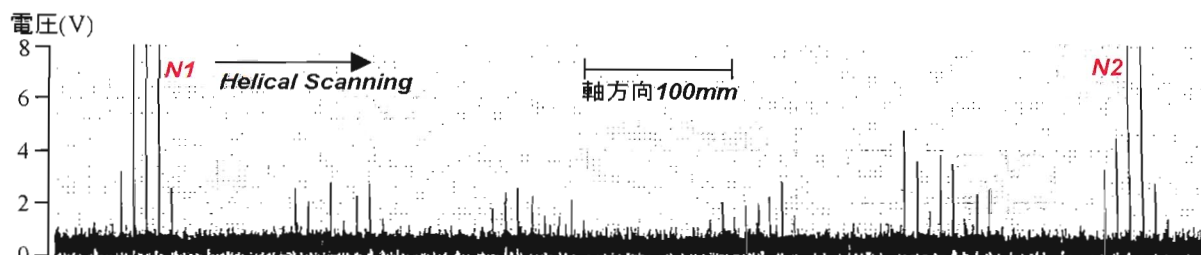


図6. アナログチャート式表示の例
N1, N2: 人工きず(図7参照)

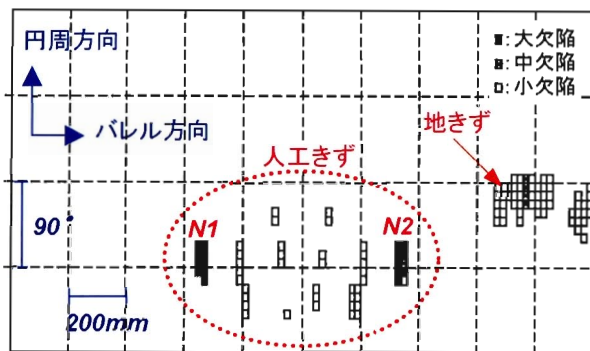


図7.しきい値比較式マップ表示の例

図7ではきず信号の大きさに3個のレベルの異なるしきい値(L,M,H $L < M < H$)を設定し、信号の大きさがしきい値L以上M未満のきずを小欠陥、M以上H未満のきずを中欠陥、H以上のきずを大欠陥として分類して表示している(以下、しきい値比較式マップ表示)。しきい値Lは、検出すべき最小寸法の表面きずから得られる信号の大きさに基づいて決められている。

探傷結果のマップ表示方法には超音波探傷のCスコープ表示法のように、信号のレベルに応じて濃淡や色をつけて表示する方法も考えられる。しかし、ロール表面探傷の場合には、きずが検出された場合、その信号のレベルが所定値以上であれば、きず取り研磨を行う必要がある。したがって、信号のレベルが所定値以上か否かをわかりやすく表示することが重要である。これに対し、一般的なCスコープ表示法では、信号のレベルの把握が簡単ではないので、この表示法の採用は難しい。ロール表面探傷結果の表示には、一般的なCスコープ表示法よりは、図7のようにしきい値と比較し、しきい値を超える信号をマーク表示する方法が適している。図7のマップ表示は川崎製鉄第3熱間圧延工場のロールショップでのロール表面探傷において採用された表示方法である。

なお、アナログチャート式表示を採用している場合でも、所定のしきい値を超えるきず信号が検出された場合、きず取り研磨を行なう。この点は、表示方法に拘わらず、同一である。

表1.従来表示方法の比較

表示方法	利点	欠点
しきい値比較式マップ表示	<ul style="list-style-type: none"> きず位置の把握が容易。 きずの空間的な拡がりや個数を把握しやすい。 	<ul style="list-style-type: none"> しきい値以下のレベルの信号を生ずるきずを表示できない。
アナログチャート式表示	<ul style="list-style-type: none"> 信号レベルの把握が容易。 しきい値以下のきず信号の存在を確認可能。 	<ul style="list-style-type: none"> きずの円周方向での位置の把握が難しい。 きずの空間的な拡がりや個数の把握が難しい。

3.2 従来の表示方法の問題点

表1に従来の2通りの探傷結果表示方法の利点および欠点を対比して示す。ロールの表面探傷は有害な表面きずのロール表面からの除去を目的に実施されるため、きず位置の把握が容易であることが最重要な評価観点である。したがって、2方法のうち、しきい値比較式マップ表示の方が優れている。

反面、しきい値比較式マップ表示には、しきい値以下の信号レベルのきずを全く表示できない問題がある。しきい値Lは検出すべき最小寸法の表面きずから得られる信号のレベルに基づいて決められているが、有害でありながら、検出レベルがしきい値Lに達しない表面きずがあることが、その後の運用で明らかになってきた。しきい値比較式マップ表示はこのような微小レベルの表面きずの表示および管理ができない問題がある。これに対し、アナログチャート式表示の場合には、微小レベルの信号であっても、その存在は確認できる利点がある。

上記問題の対策として、しきい値比較式マップ表示において、しきい値Lを低くすれば検出レベルの低い微小きずの表示漏れを防止できそうである。しかし、下記の問題点があるため、しきい値Lを低くすることは困難である。

- (1) しきい値Lは検出すべき最小寸法の表面きずから得られる信号のレベルに基づいて決められているので、しきい値Lをこれより低くすると過検出が発生しやすい。

(2) 電気ノイズ、結晶組織や表面粗さに起因する林状エコー、およびこれらが重なりあったノイズ^{※2}を誤検出する。

※2...同じ方法で製造されたロールであってもミクロ的な結晶組織の微妙な相違、グラインダーによる研磨後の表面粗さの相違から個々のロールの探傷における林状エコーのレベルにはある程度の差が存在する。また、周囲で稼働している電気機器に起因する外来性の電気ノイズもこれら機器の稼働状況に応じて変化する。林状エコーが高く、電気ノイズも高い場合にこれらが重なりと大きなノイズとなることがある。

なお、プローブ表面の汚れや水量不足による感度低下(表面波探傷の場合)、あるいはセンサーホルダーの機械的劣化などによって、検出信号のレベルが低下すると、きずがある程度大きいものであっても、しきい値比較式マップ表示ではきずとして表示されない可能性もある。ただし、この問題は装置性能の維持管理を綿密に行なうことによって防止できるので、探傷結果の表示に関する本質的な問題ではない。

4. 探傷結果詳細表示方法および装置の開発

4.1 表示方法の検討

下記のポイントを満足する探傷結果表示方法の検討を行なった。

- (1) きず位置やきずの大きさ・個数の把握が容易。
- (2) しきい値を超える欠陥の把握が容易。
- (3) しきい値に達しない欠陥も容易に把握可能。

上記ポイントを満足するにはマップ表示は必要不可欠であるので、マップの表示色を工夫することによって、しきい値に達しない微小レベルの信号も表示できるようにした。グレーとふつうのカラー(赤、緑、青)のような全く色合いの異なる色を組み合わせることで表示に用いると直感的に違いを識別しやすいことに着目して、しきい値L以下のレベルの信号は、そのレベルに応じてグレースケールで表示し、しきい値L以上の信号は、明瞭な明るいカラーで表示することにした(以下、詳細表示法)。図8にしきい値比較式マップ表示と詳細表示法の違いを示す。

4.2 探傷結果詳細表示装置の構成

本装置の構成概要を図9に示す。OSをWindows

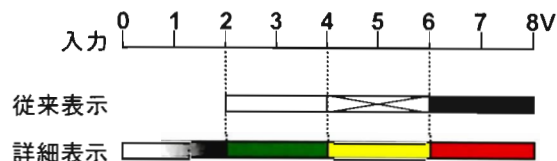


図8.従来表示と詳細表示との表示法の比較
従来表示:しきい値比較式マップ表示

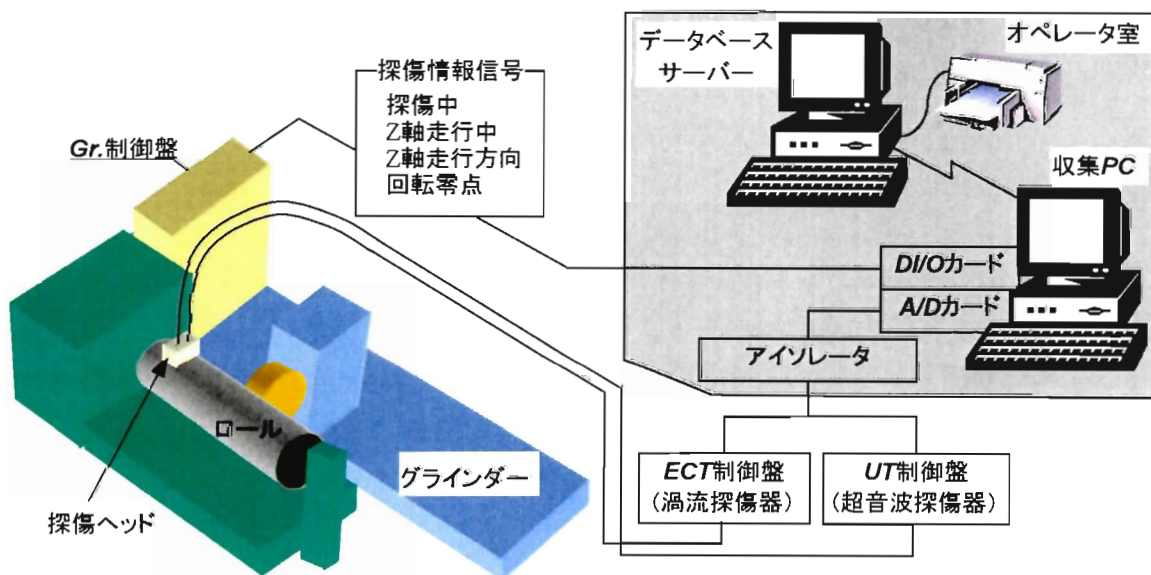


図9.探傷結果詳細表示装置の構成

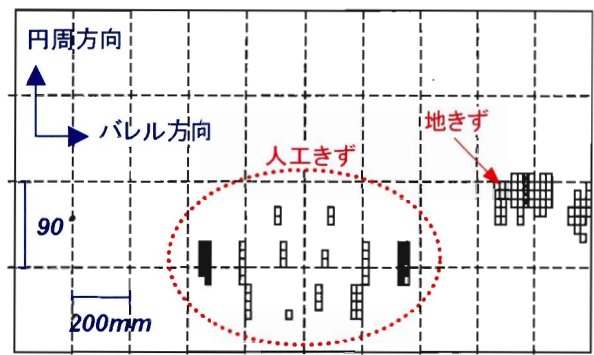
NT4.0 としてパソコンベースの装置である。この装置を川崎製鉄千葉製鉄所第3熱間圧延工場ロールショップに導入した。

1つの装置に2台のパソコンを用いており、1台は探傷データの収集を行い(収集PC)、もう1台はデータ管理・保存および探傷結果表示を行う(データベースサーバー)。超音波探傷器および渦流探傷器が検出したきず信号の大きさに比例したアナログ電圧が収集 PC に備えられた A/D ボードに入力され、きず信号の大きさがデジタルデータとして収集 PC に蓄えられる。収集 PC にはこの他、展開図表示に必要な探傷情報信号が入力される。収集 PC からのデータはネットワーク経由でデータベースサーバーへ伝送され、探傷終了と同時に詳細表示法による探傷結果表示が自動表示される。これに加え、探傷結果における最大きずを自動検出し、その結果(位置、電圧値)を表示することで、オペレータによるロール表面上のきずの確認が容易にできるようにした。

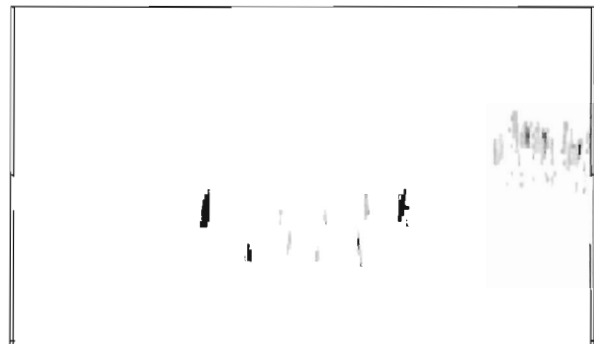
本装置は探傷結果の管理機能も有しており、同一ロールの探傷履歴の検索や探傷結果の比較が容易にできるようになっている。探傷結果はデータベースに保存され、1ロールあたり100回分の探傷データを保存できる。最新の探傷結果と比較して近接範囲内に最大きずを有する探傷履歴がある場合には、「近」マークを表示することにより、同一きずの研磨～ミル投入の複数サイクルにわたる検出も把握できるようになっている。

4.3 探傷結果表示の比較

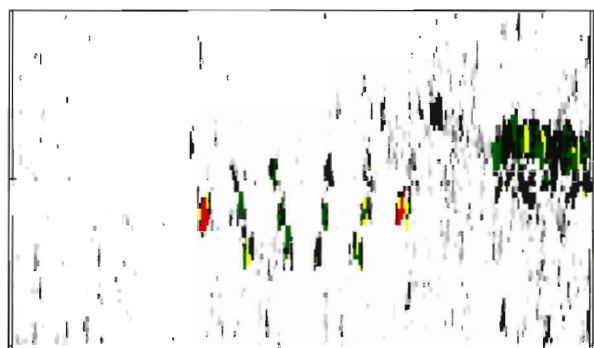
図 10 に校正用の人工きずロールの表面波による探傷結果をしきい値比較式マップ表示法、64 階調の多階調表示法(参考、人の目は最大で 64 階調を識別できるといわれている)、および開発した詳細表示法で表示した結果を対比して示す。しきい値比較式マップ表示法では、問題点において述べた通り、しきい値以下のレベルの信号が全く表示されないため、人工きずのうち、信号レベルが小さい部分が表示されないほか、ロールの他の部分にある地きずも表示されないものが多い。参考に



(a)しきい値比較式マップ表示



(b)多(64)階調マップ表示 (参考)



(c)詳細表示 (開発)

図10.探傷結果表示の比較

示した多階調表示は、低いレベルの信号間のコントラストが低く、判別が難しい。これらに対し、開発した詳細表示法はしきい値 L に満たない低レベル信号についてもコントラスト高く表示でき、そのレベルの把握も比較的容易であることがわかる。

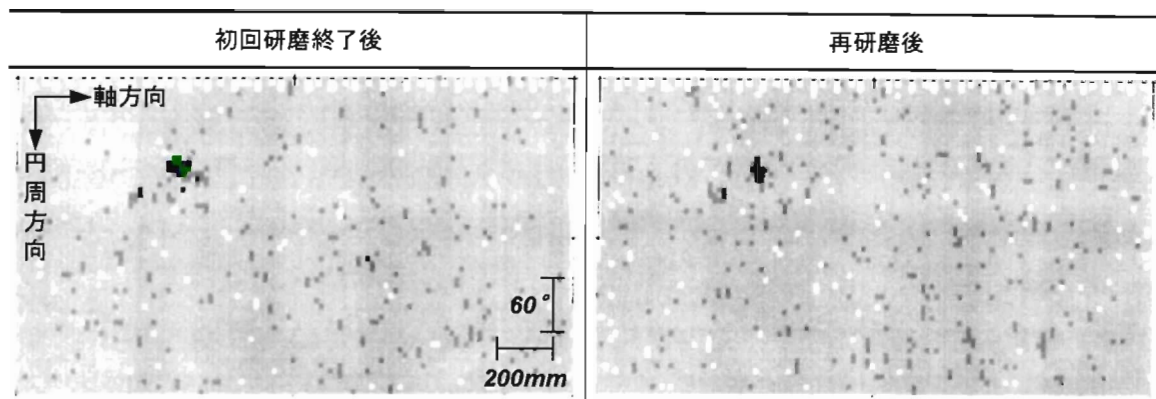


図11. 研磨による探傷結果の変化

5. 探傷結果表示の実例

図11は研磨による探傷結果の変化を詳細表示法によって表示している。この表面きずは仕上後段スタンド用ワークロールに生成された表面きずである。図11において、左側の「初回研磨終了後」は、ロールがミルから引き出されてから1回目の研磨が終了した後の探傷結果を表している。しきい値 L 以上の信号レベルの表面きずが検出されたため、再研磨が実施された。右の再研磨後の探傷結果をみると、再研磨によってしきい値 L 以上の信号レベルの表面きずはなくなったものの、濃いグレーのきず指示が同一の場所に残っていることがわかる。このような表面きずが残ったロールをミルに投入すると、圧延中に表面きずが成長し、場合によってはロールの表面が欠け落ちたり、ロールが割損する危険がある。従来のしきい値比較式マップ表示では、再研磨後に残った表面きずの信号レベルはしきい値 L 以下であるため、マップには何も表示されない。これに対し、開発した詳細表示法では、表面きずの削り残しが明瞭にとらえられている。このように詳細表示法によって、しきい値に達しない微小な信号レベルの表面きずであっても、そのレベルや位置を明瞭にとらえることができるので、ロールの表面きず管理の精度を著しく向上させることができる。

6. 結言

圧延中の割損の防止を目的とした熱間仕上圧延用ワ

ークロールのロールショップにおける表面探傷において、信号レベルが微小なきずを漏らすことなく表示することが可能な探傷結果の表示方法および装置を開発し、実用化した。探傷結果をロール展開図の形式でマップ表示するに当たり、しきい値を設け、しきい値以下のレベルの信号をレベルに応じてグレースケールで表示し、しきい値以上のレベルの信号をレベルに応じて明るい色でカラー表示する。この方法により、ノイズレベルよりもわずかに大きいだけの微小レベル信号しか得られないきずであっても、その信号のレベルおよびロール上での位置を明瞭に表示することが可能となった。この結果、微小きずまで含めたロールの表面きず管理が可能となり、表面きずによる圧延中のロールトラブル防止に大きく貢献している。

参考文献

- [1] 安藤好充, 空野博明, 佐野義一: CAMP-ISIJ, Vol.5(1992), p.515
- [2] 江種俊夫, 小宮善興, 米沢雅弘, 大庭章裕, 村井純一: CAMP-ISIJ, Vol.7(1994), p.358
- [3] 土屋義郎, 大西良弘, 小土井章夫, 白石馨, 増田健一, 沖本一生: CAMP-ISIJ, Vol.6(1993), p.505
- [4] 空野博明, 森野泰司, 佐野義一: CAMP-ISIJ, Vol.9(1996), p.984
- [5] 日本クラウトクレーマー(株): 特開平7-294493

特 別 講 演

原子力設備と非破壊検査の将来性

(東電問題等と今後の検査の方向性)

東京工業大学 大学院
理工学研究科機械物理学専攻
教授 小林 英 男

(財)千葉県産業振興センター
千葉県非破壊検査研究会



東電問題等と今後の検査の方向性

東京工業大学 大学院

小林英男

1. はじめに

いわゆる東電問題等は、原子力発電所の安全性について、社会に大きなインパクトを与えた。それはまた、原子力に関連する技術者のみならず、一般の技術者にとって、わが身に照らして振り返る問題でもある。維持規格と欠陥評価の導入の必要性、それに伴う欠陥の寸法測定 (sizing)、技量認定 (PD)、リスクベース検査 (RBI) 等の非破壊検査の技術とシステムの課題、さらにリスクマネジメントの実行を支える規格と経験のデータベースの重要性を解説し、安全を確保するための今後の検査の方向性を示す。

2. 東京電力の事案

原子力安全・保安院は、平成 14 年 8 月 29 日に、「原子力発電所における事業者の自主点検作業記録に係る不正等に関する調査について」を発表し、東京電力株式会社 福島第一原子力発電所、福島第二原子力発電所、柏崎刈羽原子力発電所において、1980 年代後半から 1990 年代にかけて、GEII 社 (General Electric International Inc.) に発注して東京電力が実施した自主点検作業において、ひび割れとその兆候の発見、修理作業等について、不正な記載等が行われた疑いのある事案を公表した。また、同日、東京電力においても、同様の疑いについて、発表を行った。

本件調査のきっかけは、2000 年 7 月に通商産業省 (当時) に寄せられた申告 (情報提供) である。その後の東京電力と GEII 社の内部調査によって、自主点検記録に不正等の可能性がある 29 件について (東京電力、9 月 17 日、調査報告書公表)、保安院の調査結果がとりまとめられた (原子力安全・保安院、10 月 1 日、中間報告)。

問題があるとされたのは下記の 16 件の事案で、残りの 13 件は特段の問題は見出されな
い事案であるとされた。

(1) 技術基準適合義務等を遵守していなかった可能性のある事案 (6 件)

6 件の事案のうち 5 件は、発見されたシュラウドのひび割れに関して、電気事業法の技術基準に適合しているか否かを確認すべきであったにもかかわらず、その確認及びその進展に関する評価や継続的な監視の記録を適切に行わず放置していた事案であり、技術基準

に適合していたとの確証が得られないものである。すなわち、技術基準に適合すべき義務（当該ひび割れがシュラウドに求められる強度上許容され得る範囲に収まるよう設備を維持すること）を遵守していなかった可能性がある事案である。また、残る1件は、関係法令に定められた書類保存義務を果たさなかった事例である。

(2) 通達等に基づく国への報告を怠ったり、事実と反する報告を行った可能性のある事案
(5件)

5件の事案は、国に対する報告における発見日として事実と異なる日付を記載した事案、国がトラブルへの対策を求め、該当個所の点検を指示した際、事業者が、問題が発生していたことを承知していたにもかかわらず、国に報告しなかった事案である。

(3) 事業者の自主保安の在り方として不適切な事案 (5件)

5件の事案は、シュラウドのひび割れの兆候を発見したが、異常なしと記録し、追加調査を行わないまま放置した事案、原子炉内のアクセスホールカバーのひび割れにつき、請負事業者に依頼した原因分析の結果についてのフォローアップを行わなかった事案、修理記録の不実記載があった事案、水中にあるボルトの締付けについて管理が不十分な事案、炉内での工具の置き忘れの防止及び状況把握が不十分であった事案であり、いずれも、事業者の自主保安の在り方として不適切なものである。

なお、本事案に関する保安院の調査過程の妥当性の評価については、別途「東京電力点検記録等不正の調査過程に関する評価委員会」において検討が行われ、10月28日に中間報告がとりまとめられている。

3. 他の電力会社の事案

保安院は、8月30日、東京電力以外の電力会社を含めた原子力事業者16社に対して、同様の問題が発生していないか総点検を指示した。また、9月6日からは、各原子力事業者から自主点検作業を請け負っている関連事業者に対しても、総点検への協力を要請した。

その後、9月20日に至り、上記東京電力の事案以外に東京電力、中部電力株式会社及び東北電力株式会社の原子力発電所において、国に対して報告がなされていない原子炉再循環系配管におけるひび割れの事案が明らかになった。また、9月25日には、日本原子力発電株式会社の原子力発電所において、国に対して報告がなされていないシュラウドのひび割れの事案が明らかになった。さらに、9月末の新聞報道に端を発して、東京電力福島第一原子力発電所第1号機において、平成3年及び平成4年に実施された第15回及び第16回定期検査期間中に行われた格納容器の漏えい率検査に際して、不正な圧縮空気の格納容

器内への注入などが行われた結果、検査が適正に行われなかったことが明らかになった。

(1) 原子炉再循環系配管のひび割れについて

保安院の中間報告は、9月20日に国に対して報告された原子炉の再循環系配管のひび割れの事案について、立入検査を行うなどして徹底調査を行った結果も含んでいる。これらの事案においては、国の定期検査とは別に、事業者が安全確保の観点から応力腐食割れを対象にした精密調査を行い、ひび割れを発見したものであること、事業者の資料には改ざんなどの事実はないこと、ひび割れの発見後も事業者において安全性評価を行い、安全上問題がないことを確認していたことが明らかとなったとしている。しかしながら、これらの事案は、本来、定期検査の対象ともなり得る部位にひび割れが発生したものであり、中には、応力腐食割れに強いと考えられていた新しいステンレス鋼にひび割れが発生した事例があったので、国民に信頼される安全確保活動を推進するためには安全性に関する技術情報を規制当局と共有することが必要であることから、国に報告することが望ましかったとしている。

(2) 日本原子力発電株式会社 敦賀発電所におけるシュラウドのひび割れの兆候について

保安院は、9月25日に国に対して報告されたこの事例について、報告徴収を行うなど徹底した調査を行っているところである。これまでのところ、当該事案については、安全評価が適正に行われていること、記録が保存されていることが明らかになったが、国に対して適切な情報提供がなされるべきものであった。

(3) 東京電力株式会社 福島第一原子力発電所 1号機における格納容器漏えい率検査の偽装について

東京電力からの報告によれば、平成3年及び平成4年の第15回及び第16回定期検査期間中に行われた格納容器漏えい率試験において、漏えい率を低く見せかけるため、漏えい率測定中に圧縮空気を格納容器に注入し、さらに、平成4年の第16回定期検査中の漏えい率検査に際しては、漏えいが検知された弁について、検査要領書で定められた方法によらない方法で弁の閉鎖も行ったため、両定期検査において正確な漏えい率が確認できない状態で検査を行ったことは事実であったとのことである。ただし、不正操作の具体的な方法等については、未だ判明に至っておらず、引き続き調査を進め、今後判明し次第、保安院に対して追加報告を行うとしている。

この事案は、原子炉の安全機能上極めて重要な部分において意図的な偽装を行うという、これまでに前例のないものであり、加えて、国の定期検査を妨害したという、極めて悪質

なものである。このような事実の確認を踏まえ、国においては、法律上必要な手続きを経て、当該機について1年間の原子炉運転停止という行政処分を行うこととしている。

4. 再発防止策

東電問題等の再発防止策を検討するために、中立的な立場にある学識経験者を中心として、総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 原子力安全規制法制検討小委員会（委員長 近藤駿介 東京大学教授、委員7名）が設置された。第1回（9月13日）から第4回（10月1日）までの小委員会で問題点を整理し、再発防止策をまとめた。中間報告（案）は、パブリックコメントを反映して、第5回（10月31日）委員会で承認された。具体的な再発防止策を以下に記す。

（1）事業者の安全確保活動に対する信頼の確保

- ① 事業者による自主点検の法的位置付けの明確化と国の検査・審査による信頼の確保
- ② 自主検査結果の記録・保存の義務化
- ③ 設備の健全性評価の義務化とその手法の整備

（2）事業者の安全確保活動における品質保証体制の確立

- （3）事業者による法令遵守への取組の強化
- （4）規制制度の運用の明確化及び透明化
- （5）申告制度の運用の改善
- （6）軽微な事象に係る情報の公開と共有化
- （7）安全規制に対する信頼の回復への取組
- （8）安全規制の制度及び運用の点検

5. 再発防止策の具体化

すでに、再発防止策のいくつかは、具体化されている。

（1）申告制度の運用の改善

申告制度の運用の改善については、保安院に原子力施設安全情報申告調査委員会（委員長 佐藤一男 原子力安全研究協会理事長、委員8名）が設置され、10月8日に第1回会議が開催されている。

（2）原子力関係法改正案

保安院は、10月31日に、原子力発電所の不正記録問題に対応するための原子力関係法改正案を提示した。

- ① 電気事業法及び原子炉等規制法の改正

- 定期自主検査（電）
- 保守点検事業者からの報告徴収（電、炉）
- 罰則の強化（電、炉）
- 原子力安全委員会への報告（電、炉）

② 独立行政法人原子力安全基盤機構法の制定

独立行政法人原子力安全基盤機構は、事業者による自主検査の実施に係る体制審査の実施などの役割を担う。

（3）維持規格の採用の検討

東電問題の発生以前に、保安院は維持規格の採用の検討を進めていた。

総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 検査の在り方に関する検討会（委員長 班目春樹 東京大学教授、委員 16 名、専門委員 6 名）が第 1 回（平成 14 年 2 月 12 日）から第 7 回（7 月 22 日）まで開催され、検査制度見直しの方向性を定めた。

方向性は、「あらかじめ決められた施設の健全性を、あらかじめ決められたとおりに確認することを中心とする検査」から「施設の健全性だけでなく、施設の設置のプロセスや事業者の保安活動全般を、抜き打ちの手法も活用し確認する検査」である。

さらに、総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 原子炉小委員会報告（平成 14 年 7 月）の提言、

- 規制基準の性能規定化
- 規制基準における民間規格の活用

を受けて、早急に取り組むべき課題として、日本機械学会の「設計・建設規格」と「維持規格」について、技術的検討を行い、事業者が採用できるよう制度面の整備を行うことを確認した。

維持基準に関する検討が、原子力安全・保安院 基準統括グループで平成 14 年 8 月から開始されており、平成 15 年 3 月までに省令公布、10 月までに施行となる見通しである。

6. 維持規格の必要性

（1）維持規格の位置付け

東電問題等では、発見されたシュラウドのひび割れの処置に関して、維持規格の有無がもたらす結果が、脚光を浴びることになった。もちろん、公的に認められていない維持規格の適用による処置は、不正行為である。しかし、維持規格が公的に認められていれば、いくつかの事案は不正でなかったかもしれないし、たとえ不正があっても技術的な安全性

は立証できたかもしれないことは否定できない。また、一方では、維持規格の適用そのものが、安全性を損うという議論がある。いずれにせよ、維持規格の必要性については、技術的な裏付けと社会的な合意が必要である。

工学・技術の目的はものづくりである。要求される機能を果たすものの作り方の技術には、設計と製造がある。これとは別に、使用中に機能を維持するために、ものの使い方の技術がある。後者が維持または維持管理である。実際には、設計、製造と維持は1体であり、ものづくりの3本柱であることを、まず認識する必要がある。

設計・製造規格の必要性和重要性は、自明の理であり、議論の余地はない。ただし、規格そのものが予測を前提としていることは、強調しておく必要がある。機器の設計では、機能不全または材料の損傷に至る寿命を予測し、耐用期間を予測寿命以下に制限する。予測は自然法則を含めた使用経験と加速試験のデータに基づく外挿法の延長にあり、外挿の範囲が広がるほど予測の精度は低下する。すなわち、予測には限度がある。また、機器の設計・製造の過程では、人の失敗行為などの技術の落度が生ずる。予測の限度と技術の落度によって、不具合が生じ、設定寿命がまっとうされない場合があり、これが実際の事故の大半を占める。

これを救済するのが、維持である。維持では、設計・製造規格の予測結果を、使用の途中で実際に確認する。予測どおりでない場合、予測の限度と技術の落度の原因を究明し、予測の修正を図る。これは、使用の途中における設計・製造の見直し・やり直しにほかならない。そして、維持の情報は、設計・製造へフィードバックされる。維持を適確に実行するために、維持規格が必要である。

すなわち、設計・製造規格と維持規格は、そもそもが相互に補完し合う1対の規格であって、ものづくりにおいて両者ともに欠くことはできない。現行法令の技術基準では、「製造時の性能が維持されなければならない。」として、維持を位置付けている。しかし、「製造時の性能が維持されるはずはない。」のである。機器は機能不全または材料の損傷に至るまでに徐々に性能劣化し、必ずいつかは寿命が尽きるのである。使用可能な性能劣化と寿命を適確に判定する基準が必要で、これを具体的に示すのが、維持規格の目的である。

(2) 維持規格の構成

維持規格は、性能劣化として材料の損傷（割れと劣化）を取り上げ、供用期間中検査で割れと劣化を非破壊的に検出し、使用に耐えるか否かを評価し、さらに使用に耐えない場合の補修・取替えを規定するもので、以下の3つの基準で構成されている。

- 非破壊検査基準
- 割れ・劣化評価基準
- 補修・取替え基準

(3) 割れの寸法の定量的測定

原子力発電所の機器を対象とした場合、割れとしては疲労と応力腐食割れ、劣化としては中性子照射脆化を取り上げる。割れのことを、欠陥ともいう。設計・製造規格の非破壊検査基準では、割れが検出されれば補修または取替えが原則であり、割れの有無という定性的な判定のみが要求される。しかし、維持規格の非破壊検査基準では、割れの有無ではなく、割れの寸法（形状と大きさ）の定量的な測定が要求される。このために、非破壊検査の方法は、設計・製造規格が放射線透過試験中心であるのに対して、維持規格は寸法測定の高い超音波探傷試験中心となる。すなわち、維持規格の非破壊検査基準を適用すれば、設計・製造規格の非破壊検査基準で見逃した割れ（溶接欠陥など）を定量的に検出できる場合がある。逆に言えば、精度が高い故に小さな割れが無数に検出され、処置に困る結果ともなる。後述する割れ・劣化評価基準の適用によって、検出する割れの寸法にしきい値を設定し、しきい値以上の寸法の割れだけを確実に検出することが望ましい。このしきい値を、無条件許容割れ寸法という。

(4) 寿命予測と余寿命予測

設計・製造規格では、応力分類に従い破損モード（破壊モードと変形モード）が設定されている。破壊モードの詳細が損傷のメカニズムであり、損傷のメカニズムを特定し、寿命予測を行う。単純な損傷のメカニズムであれば、使用する材料の短期間の加速試験のデータに基づく外挿であっても、かなり精度よく寿命を予測できる。しかし、実際の損傷のプロセスは複雑であり、複数の損傷のメカニズムが競合する。複数の損傷のメカニズムの競合の結果を正しく評価し、精度よく寿命を評価することはかなり難しく、不具合の原因となる。

そこで、供用期間中検査の非破壊検査で損傷を非破壊的に検出し、この結果に基づき、実際の損傷のメカニズムとプロセスを再評価し、検出した損傷を原点として残りの寿命（余寿命）を予測する。これが余寿命予測である。余寿命予測には、下記の2つの評価が必要である。

- き裂進展評価
- 破壊評価

具体的な例を、図 1 に示す。き裂進展評価では、破壊力学の手法を用いて、き裂進展速度と応力拡大係数の関係から、検出された割れの寸法を起点として割れの進展（割れの寸法と時間の関係）を予測する。一方、破壊評価では、同様に破壊力学の手法を用いて、地震荷重を含めた供用期間中の最大負荷を想定し、応力拡大係数と材料の劣化を考慮した破壊靱性の関係から、破壊に至る限界の割れの寸法を予測する。き裂進展評価の予測割れ寸法が破壊評価の限界割れ寸法に達するまでの時間が、余寿命となる。この評価には、設計・製造規格とは異なる安全裕度を見込む。耐用期間または次回以降の検査時期として余寿命が設定できる場合には、逆に検出された割れが許容できるか否かの判定が可能となる。これを欠陥評価という。許容される割れと許容されない割れの比較を、図 2 に示す。

(5) 破壊力学

破壊力学 (Fracture Mechanics) は 20 世紀の初頭に固体物理学の一分野として芽生え、中期に工学として体系化され、後半に産業への適用が定着した学問である。破壊力学の目的は、機器に材料欠陥、製造欠陥の存在、供用期間中のき裂の発生、進展を想定して、材料のき裂に対する破壊強度を評価することによって、構造設計、材料選択、製造と維持の条件を確立することにある。破壊力学は現在、欠陥評価ばかりでなく、航空機の損傷許容設計、船舶の破壊制御設計、先端材料（セラミックス、複合材料など）の材料設計などに幅広く適用されている。

破壊力学では、立体的かつ複雑形状の欠陥とき裂を、楕円形状の平面き裂にモデル化する。多くの場合、対象となるのは表面欠陥で、半楕円表面き裂にモデル化する。モデル化したき裂の先端は、曲率半径が 0 で、応力が無限大に発散する応力特異点となる。この応力場の強さを、応力拡大係数で表示する。応力拡大係数 K は、次式で与えられる。

$$K = M\sigma\sqrt{\pi a}$$

ここで、 σ は負荷応力、 a はき裂深さ（半楕円の短半径）、 M はき裂深さとき裂長さ（半楕円の長径）の比、き裂と機器の相対寸法比、負荷形式などに依存する無次元補正係数である。 K が同じであれば、き裂先端の応力分布、塑性域寸法、開口変位も同じになる。したがって、試験片の破壊試験の結果を、力学パラメータ K と下記の破壊基準を介して、機器の破壊評価に適用できる。

瞬時破壊（延性破壊と脆性破壊）の場合、破壊基準は次式で与えられる。

$$K = K_c$$

ここで、 K_c は材料の破壊靱性であり、温度に依存する。時間依存形破壊（疲労、応力腐食

割れ、クリープなど) の場合、破壊基準は次式で与えられる。

$$da/dt = CK^m$$

ここで、 t は時間 (疲労の場合には、繰返し数)、 da/dt はき裂進展速度、 K は応力拡大係数 (疲労の場合には、応力拡大係数範囲 ΔK)、 m と C は材料と環境に依存する定数である。

上式を積分すれば、き裂深さ a と時間 t の関係が得られる (図 1 参照)。

余寿命予測の破壊評価とき裂進展評価には、上記の 2 つの破壊基準を適用する。

(6) 補修と取替えの問題点

従来どおり、割れは許容せずに、補修または取替えで完全になくした方がより安全だという議論がある。一般的な補修は、割れを削除し、その跡を溶接補修する。数が多く複雑形状の割れを完全に削除することは難しい。多くの場合、割れは溶接部に生ずる。溶接補修によって溶接の熱影響が繰返され、材料は著しく劣化する。補修部を起点として起きた損傷の事例は、数多い。また、新しく取替えた部材と古い部材の接合は、異種材料の接合同じで、材料特性のミスマッチングが損傷の原因となる。補修と取替えの選択にも、技術的検討が必要である。

(7) 維持規格の現状

原子力発電所の維持規格として、国際規格として認められている ASME (米国機械学会) の圧力容器とボイラー規格、Sec. XI, Div. 1 があり、30 年という実績をもつ。日本機械学会では、発電用設備規格委員会 原子力専門委員会 維持規格分科会が、ASME 規格をベースにして、2000 年 5 月に割れ・劣化評価基準主体の「発電用原子力設備規格 維持規格、JSME S NA1-2000」を発刊し、さらに 2002 年 10 月に、供用期間中検査と炉内構造物 (シュラウド等) 点検評価を加えた改訂版の発刊に至っている。日本機械学会 維持規格分科会の主要メンバーは、同時に ASME Sec. XI 規格委員会のメンバーである。最近の維持規格の改訂と新規制定は、日米両国の協力と同意の上で、同時進行となっている。維持規格に関しては日本の技術力 (人とデータ) が評価されていることを強調したい。

7. 非破壊検査の技術とシステムの課題

我が国では、維持規格がなかった故に、検出された割れの寸法測定 (sizing) の必要がなく、超音波探傷試験の寸法測定技術の開発は、欧米に比較して遅れをとっている。発電設備技術検査協会の維持基準 UT 評価分科会において、超音波探傷試験の欠陥検出性とサイジング精度について、試験研究が実施されている。この成果を早急に、維持規格の非破壊検査基準へ反映させる必要がある。

欧米では、超音波探傷試験の技術と試験員の組合せで、特定の部位に対する探傷を認定する技量認定（PD, performance demonstration）のシステムがある。我が国でも非破壊検査の信頼性の向上のために、技量認定システムを構築する必要がある。

本来、自主検査では、事業者が適確なリスク評価を行い、検査プログラムを策定すべきである。これをリスクベース検査（RBI, risk based inspection）という。維持規格の非破壊検査基準に、リスクベース検査を導入する必要がある。

8. リスクマネジメント

法規制による安全の確保から、自主規制による安全の確保へと変革しつつある現状において、事業者の自主規制による安全の確保は、適確なリスクマネジメントの実行に尽きる。東電問題等の本質的な原因は、リスクマネジメントの欠如である。

図3を参照して、リスクマネジメントの適否を評価する物差しは、社会が共用する技術規格と経験のデータベースである。社会が共有する技術規格と経験のデータベースは、事業者自身が参画して構築すべきである。そして、学協会が共有のための指導的役割を果たし、中立性、公正性、公開性（透明性）の原則を貫き、事業者が中心となる構築の技術的支援を行うとともに、高度化と合理性の追求に寄与すべきである。

9. おわりに

東電問題等は、詰まるところ、人の問題である。技術者倫理、経営者倫理の問題はさておく。技術社会の構成員たる技術者の一生は、リスクマネジメント、技術規格と経験のデータベースの勉強に始まり、リスクマネジメント、技術規格と経験のデータベースの作成への寄与で終わり、その貢献によって社会的な評価と報酬を受けるべきなのである。少なくとも技術者は、東電問題等によって、わが身に照らして振り返る必要がある。

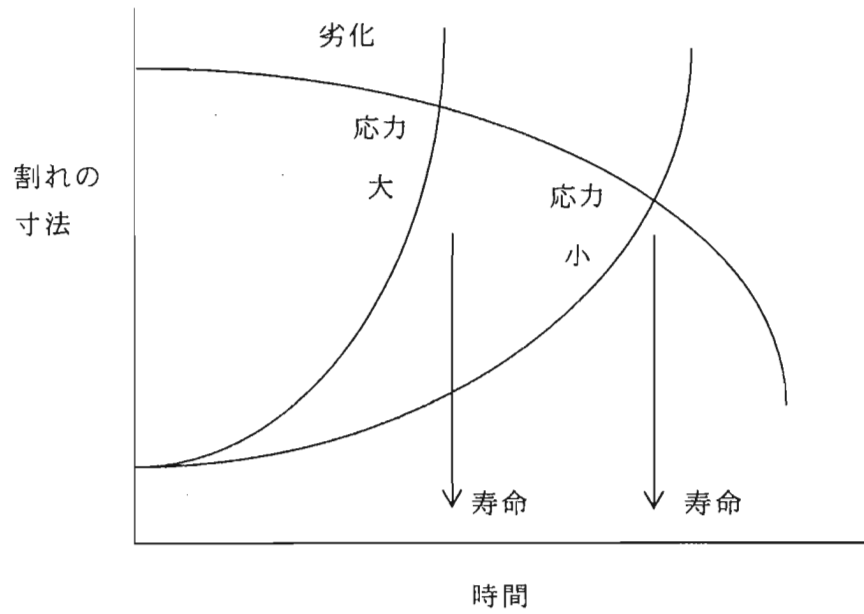


図1 破壊のプロセス（割れの成長と劣化による限界）

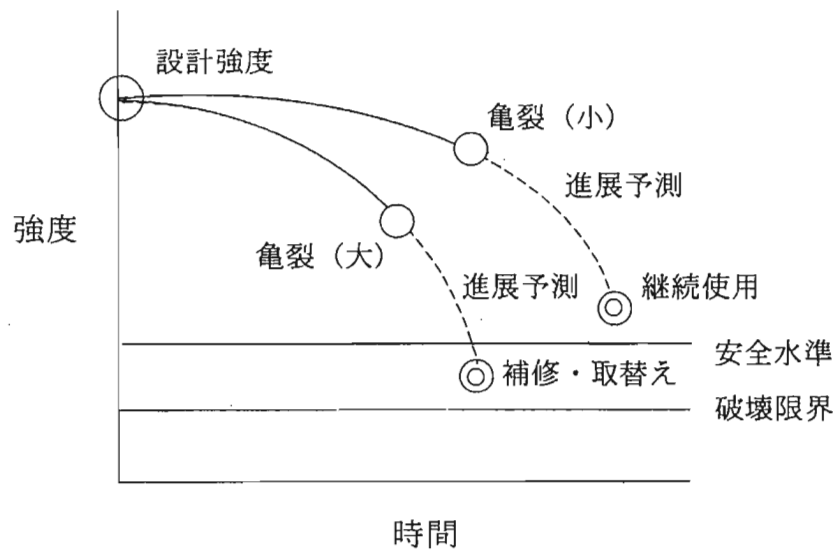


図2 欠陥評価基準

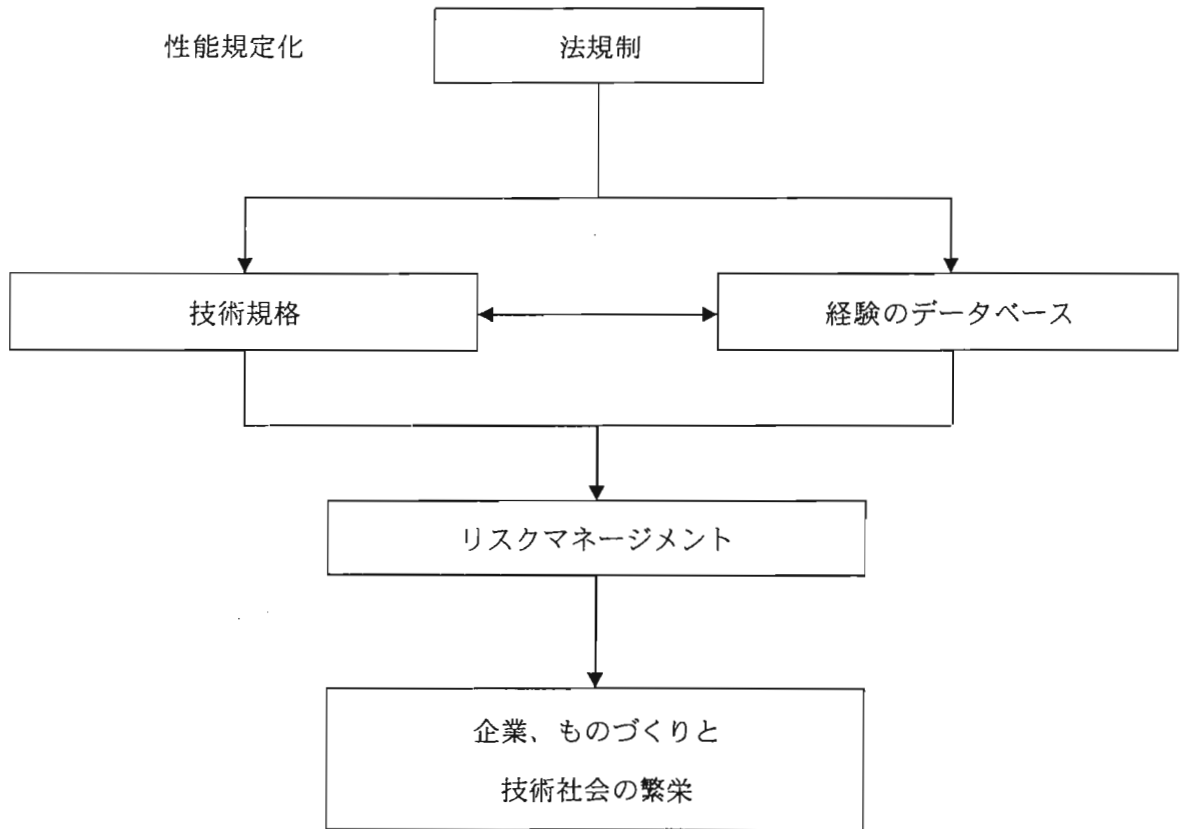


図3 技術規格、経験のデータベースとリスクマネジメントの組み合わせ