技術資料

テーマ特集

構造物の余寿命評価技術

原子力用自動診断ロボット**

宮沢 竜雄**, 木村元比古**, 佐藤 道雄**

Inspection Robots for Nuclear Industry**

by Tatsuo Miyazawa**, Motohiko Kimura** and Michio Sato**

キーワード：原子力，診断，検査，ロボット，超音波

1. はじめに

原子力発電所を始めとする原子力施設においては、万が一の異常事態における公衆に与える影響が大きいために運用期間中にその健全性を保つことは重要な事柄である。そのために設計、製造時の品質管理は勿論運転前検査、供用期間中検査によって、機器や構造物の健全性を確認している。検査の主流は非破壊検査で、目視、超音波探傷、渦流探傷、X線検査などが行われている。原子力施設では放射線や放射能のある場所での検査を行う必要があるため、できる限りの作業線量の低減の観点から検査の遠隔化、自動化が望まれている。また検査の高度化、時間短縮の研究開発も行われている。原子炉圧力容器ノズル部や配管溶接部の超音波探傷は早くから自動化した装置が導入されているし¹⁾、さらに直管部ではなく曲管どうしの溶接部の自動探傷装置の開発も行われた²⁾。新しい技術として従来から医用の分野で実用化されているCTの技術を、配管欠陥の三次元映像化に応用する研究が行われており、成果を上げている³⁾。この研究は発電設備検査技術協会の指導の下に行われており、0.95MeVのX線を用いて300A Sch40までの配管の0.7×0.7×0.1mmの欠陥を目標にしている。図1に装置の写真および得られた映像の一例を示す。

目視検査については通常遠隔で行う場合は、テレビカメラを用いて行っているが、一部ではファイバースコープも使用されている。本稿では超音波探傷の遠隔自動化を目的とした無軌道式の探傷装置と、水中での目視検査

を目的とした水中目視検査装置について紹介する。

2. 無軌道式超音波探傷装置

2.1 電磁超音波探触子を用いた自動探傷装置⁴⁾

(1) 開発の目的

本装置は原子力発電所の配管の超音波探傷検査を自動で行うことを目的として開発された装置であり、非接触式の電磁超音波探触子 (ElectroMagnetic Acoustic Transducer, 以下、EMAT と称する) と、EMAT を走査するための磁気吸着式無軌道型走行機構から構成されている。

従来の超音波探傷装置では、接触式の圧電型超音波探触子を使用している。圧電型超音波探触子を使用して検査を行う場合、接触状態を良好に保つため配管表面の塗装除去、表面研磨等の作業を行い、次に、超音波探触子を走査するための機構を配管に取り付けている。これらの作業は、時間を要する作業であり、放射線環境化で実施されるため、作業の省略化・時間の短縮が望まれていた。このため、本装置では従来の接触式の圧電型超音波探触子の代わりに EMAT を使用して配管表面の塗装除去、表面研磨作業の省略が可能となるようにした。従来の圧電型超音波探触子は、水やグリセリンなどのカプラントを経由して超音波を配管内に送信している。一方 EMAT はローレンツ力を利用して直接配管表面に超音波を発生させるので、非接触で超音波を送受信でき、配管表面の塗装除去作業、研磨作業の省略が可能となる。また、走行機構は磁気吸着式で軌道が不用であるので装置の設置が短時間のうちに行える。

(2) 本装置の概要

図2に本装置のシステムブロック図を示す。配管上に

*原稿受付 平成元年11月1日

** ㈱東芝 Toshiba Corp. Nuclear Engineering Laboratory

図1 X線CT装置とその映像 (Al サンプル)

図2 システムブロック図

走行機構を置き、磁気吸着力を利用して、配管上を走行させる。この走行機構にはEMATを走査するためのスキャナーが設けられている。また、位置検出は、エンコーダ及び光学式のマーク検出器によって行う。制御装置は二系統で、一方はモータドライバ等の走行機構の制御装置を行い、他方はEMATを使用して、超音波の送受信を行う超音波送信器・受信器及び信号処理装置である。

(3) EMAT

図3にEMATの動作原理を示す。この図は、斜角の横

波超音波を発生させる場合の原理図であり、ローレンツ力は被検査材表面の隣接する所で互いに逆方向となるように発生させる。図3でのEMATの動作は次のようになる。永久磁石からでた磁束は被検査材の表面に垂直に入射し、被検査材表面においては垂直の磁場がバイアスされる。次に送信コイルに高周波電流を流すと被検査材表面では高周波の渦電流が誘導される。この高周波渦電流とバイアス磁界の相互作用によりローレンツ力が発生し、このローレンツ力が超音波の音源となって被検査材中に超音波が送信される。図3の場合、超音波の伝搬方向は次の式で与えられる。

$$\theta = \sin^{-1} (v/(2pf)) \text{ (deg)} \quad (2.1)$$

ここで、 v は被検査材の音速度、 p は送信コイルのピッチ、 f は超音波の周波数である。

図4にEMATの外観を示し、図5に、このEMATを使用して行った欠陥の測定例を示す。またこのときの欠陥からの超音波エコーの波形を図6に示す。図6において上の波形は信号処理をしない場合であり、下の波形は信号処理(信号平均化)をした場合である。EMATは従来の圧電型超音波探触子に比べて感度が悪い。信号処理装置は超音波エコーのS/Nの改善をするための処理であり、図2のブロック図に示したシグナル・アベレージャによって行う。図5からわかるように1.0mmのノッチも十分検出できる。

(4) 走行機構

図7に走行機構の外観を示す。走行機構は、寸法が200mm×220mm×140mm、重量は約11kgであり、磁気

図3 EMATの動作原理

図4 EMAT

吸着力は全体で約120kgである。走行機構は、配管周方向に移動し、その移動距離の計測は走行機構後部に設けたエンコーダによって行う。これは、磁気車輪がスリップをおこしても精度よく走行距離を計測できるようにするためである。図-7の走行機構の中心部にあるのがEMATを走査するためのスキャナーである。スキャナーはEMATを左右に駆動するが、その移動距離の計測は走行機構とは別のエンコーダを使用する。走行機構は無軌道で配管上を移動するため、配管上に原点を設定できない。このため本装置においては、配管上にマークを貼り付けこれを光学式的位置検出器によって検出する。光学式位置検出器はスキャナーに設けてあり、EMATを走査しながらマークを検出する。実際には、走行機構は、配管の形状や車輪の形状等のアンバランス等により多少の走行ずれを補正して欠陥の位置を正しく同

図5 EMATの欠陥の測定例

図6 6.25mm ノッチからの超音波エコーの波形

定できる。図8に走行ずれの補正の方法を示す。走行ずれは、動作を開始する前の原点位置と、探傷が終了して戻ってきた時の原点位置との差を求め、これを配管全周にわたって比例配分して補正する。この走行機構の位置決め精度は±2mm以内である。

(5) まとめ

本装置は欠陥の検出精度並びに欠陥位置の位置決め精度とも従来の超音波探傷装置とほぼ同等である。無軌道式の走行機構と非接触式の超音波探触子の採用によって作業時間の短縮と省力化、結果として作業線量の低減に寄与するものと期待される。

2.2 压力容器検査装置

本装置は原子炉压力容器等比較的大い面積を移動しながら体積検査を行う目的で開発された無軌道式超音波探傷装置で、位置検出にレーザービームと超音波を併用することによって高精度で位置の検出が可能である。本装

図7 走行機構

図8 走行ずれ補正方法

置の構成を図9に、全体の写真を図10に示す。マグネット車輪で容器表面を超音波探傷しながら移動するピーグル、ピーグルの位置を測定する位置検出装置と制御装置より構成される。

ピーグルは4個の強力な希土類マグネットの車輪によって車体の保持および走行が可能である。車体はアルミニウム製で操作アームを除いて約15kgと軽量で直流モータによって駆動される。車体の前後のフレキシビリティによって容器の円筒表面もスムーズに移動することが可能である。位置検知は超音波とレーザービームを併用することによって行われる。このために回転レーザービーム変換器と超音波受信器とを搭載している。一方固定局には超音波発信器とレーザービーム方位計があり固定局からの距離は超音波センサで、方位はレーザービームで

図9 装置の構成

図10 システム外観

表1 ピーグルの仕様

Size	680mm(W)×400mm(L)×150mm(H)
Weight	15kg
Driving Speed	40mm/sec(Max)
Driving Direction	Can move in Various Direction
Wheels	Permanent Magnets Total Magnetic Force:240kg

測定され位置が計算される。この方法での位置の測定精度は±0.5mmである。表1にピーグルの仕様を示す。

本装置は試作試験によりその性能が確認され、原子力発電所の供用期間中の検査において作業線量の低減や検査時間の短縮が期待されるほか、その他の産業での適用も考えられている。この装置は石川島播磨重工業が開発したものである。

3. 水中目視検査装置

原子力発電所の原子炉压力容器内や燃料プール、水を張った状態の原子炉ウエル等の点検や、溶接部等の目視

検査は、原子炉上部の作業フロア上または燃料交換機より水中 TV カメラおよび照明具を吊降して行っている。

この作業は水中 TV カメラと対象物との位置決め、照明の位置との連携が必要で熟練の必要な作業である。

本装置は操作が簡単で適用範囲の広い水中を自由に移動できる小型の水中目視検査装置である。従来この様な装置として海洋やダムの検査などに利用されている ROV (Remote Operated Vehicle) があるが、大きさや要求される運動性能・静止性能の点で問題があった。

(1) 適用範囲および仕様

本装置の適用範囲は図 11 に示すように原子炉内のほか、タンクや配管の中等にも適用可能である。表 2 に仕様を示す。現状の技術レベルおよび故障時の回収を考えてケーブルを有する有索式とした。点検対象を考慮して使用深度および寸法を設定した。

(2) システムの構成

図 12 にシステム構成図を示す。本装置は $\pm 70^\circ$ のチルトおよびピント調節機構付き 30 万画素 CCD テレビカメラを搭載した水中ビークル、水中ビークルや TV カメラの制御を行う制御盤、制御盤とビークルを接続するケーブルから構成され、運転はジョイスティックによって行われる。図 13 に試作した水中ビークルの外観を示す。搭載した CCD カメラはモータ駆動のピント調節機構により至近距離から遠方に至るまでピントが合うようになっている。目視検査検査が行える。水中ビークルには 5 個のモータ、スクリュウからなる推進機が設置されており浮上、潜水、旋回、左右横行、前後進が可能である。

上記動作はジョイスティック一本で制御が行えるようになっている。前方には調光可能な二個のハロゲンランプが設置されており TV カメラに必要な照度を得ることができる。精密な検査を行う場合に相手対象物に押付けて静止するための装置として取付け取外しができるビークル固定装置がある。モータによってシャフトの長さを変化し相手対象物との距離を適性に保ちながら静止可能である。このほか深度センサおよび角速度センサを搭載しており、深度一定と水平旋回角度一定の自動制御を行うことができる。図 14 に制御ブロック図を示す。重量は 11kg と軽量であり、一人で持ち運びが可能である。水中ビークルの重心位置の変更により、垂直姿勢も可能である。試作後試験を行い性能の確認を行った。

(3) 性能

①運動性能：浮上、潜水、旋回、左右横行、前後進ともにジョイスティックおよびスイッチで制御可能である。前後進速度は 15m/min 以上であり適用目的から考えて十分と考えられる。ケーブルの剛性の影響を受けるため動きやすい方向と動きにくい方向があるが運転性能は良好である。

②静止性能：目視検査が可能で性能であり、センサによる自動制御でビークル固定装置を使用しなくても、目視検査が可能である。さらにビークル固定装置を使用することによって対象物に対して完全に静止可能である。

図 11 原子炉断面図

表 2 仕様

Type	Submarine Type
Allowable Submerged Depth	30m (Max)
Size	280φ×470L
Weight	11kg (In Air)
Driving Speed	15m/min (Max)
Radiation Resistance	10 ⁴ R (Total)
Water Temperature	10~52°C
Propeller	5-motors (15W)
Stabilizing Mechanism	Rod Extension Type
VT Equipment	30,000 Picture Elements CCD Color Camera. ±70 Degree Tilting Mechanism Focusing Mechanism

図 12 システム構成図

図 13 水中ビークル

図 14 制御ブロック図

③推進機: 適用場所や広さを考慮すれば速度については満足できるものである。

④重心位置の変更により垂直姿勢での制御が可能である。

(4) まとめ

水中目視検査装置は、原子力発電所を始めその他の大型タンク等の健全性の確認のため実プラントへの適用が

検討されている。また更に小型化、運動性能の向上、信頼性の向上等について開発が進められている。

4. おわりに

以上述べたように原子力の分野では早くから検査の遠隔化、自動化のために自動機やロボットの導入が行われてきた、さらに今後検査の高度化、信頼性の向上のため

新技術の開発・実用化、計算機技術の制御や信号処理への応用、人口知能の応用等研究開発が進められよう。

参 考 文 献

- 1) 白岩孝則, ほか: 原子力発電機器の開発, 東芝レビュー, 36, 11, (照 56) pp 960~964
- 2) 大沢敏雄, ほか: 実用発電用原子炉自動検査装置等実証試験, 火力原子力発電, 34, 3, (照 58) pp 61~81
- 3) Sano, Y., et al.: Development of a hinac CT Scanner for Defect Imaging in Steel Piping, Sth Internatinal Conference on Nordestructine Evaluation in the Nuclear Industry (1988) pp601~605
- 4) Sato, M., et al.: Development of Ultrasonic Testing Eguipment Incorporating Electromagnetic Acoustic Transducer, Journal of Nucleur Science and Technology, 26, 5, (1989) pp 536~543
- 5) 木村元比古, ほか: 水中検査ロボットの開発, 第 6 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (照 63) pp 339~340

溶接に関する国際行事の御案内 (1990)

No.	会 議 名	日 時	開 催 地	会議用語	主 催 (連 絡 先)
19	"Pressure Vessels and Piping" Conference	17-21/ JUNE	Nashville (Tennessee) USA	English	Am. Soc. Mechanical Engineers (A. S. M. E.) - 345 E, 47th St., New York-NY 10017-USA
20	Conference: Computers in Welding	JUNE	? UK	English	The Welding Institute-Abington Hall, Abington Cambridge-CB1 6AL-UK
21	6th Symposium "Modernisation of Educational Process in Welding"	JUNE (3 days)	High Tatras CZECHO-SLOVAKIA	German Russian Slovak	Dom Techniky Skultútyho 1832 27 Bratislava CZECHO-SLOVAKIA
22	Congress on "Present and Future Trends in Welding Research"	20-21/ JULY	Montreal CANADA	English	Welding Institute of Canada (WIC) 391 Burnharmthorpe Rd. East-Oakville, Ontario-L6J GC9-CANADA
	Colloquim on "Development in Welding Training and Education"	20-21/ JULY			
	Exhibition on "Advanced materials Technology and Educational program resources"	20-24/ JULY			
23	IIW Annual Assembly	23-27/ JULY	Montreal CANADA	English	Int. Institute of Welding (IIW), General Secretariat, 11/12 Pall Mall, London SW1Y7 5LU-UK
	IIW International Conference "Advance in Joining of newer Structural Materials"	24-25/ JULY			