

炉内点検技術と高経年化プラントへの適用

Inspection Technologies for Reactor Internals of Aged Nuclear Power Plants

株式会社 東 芝	山本 智	Satoshi	YAMAMOTO	Non Member
	平澤 泰治	Taiji	HIRASAWA	Non Member
	大坪 徹	Tooru	OOTSUBO	Non Member
	落合 誠	Makoto	OCHIAI	Non Member
	坂口 正武	Masatake	SAKAGUCHI	Non Member
	亀山 育子	Ikuko	KAMEYAMA	Non Member

The request of the inspection to reactor internals is increasing with application of the Japanese operation and maintenance code to aged nuclear power plants. Toshiba has developed many outstanding under water inspection technologies combined with ultrasonic testing (UT) techniques and remote operated vehicles (ROVs) technologies. Water gap phased array UT technique is capable to apply to all internals including complicated form part such as reactor bottom head penetration weldment. Laser-ultrasonic testing (Laser-UT) technique is applied to the surface examination (crack detection and depth sizing) before preventive maintenance. Moreover, newly developed ROVs realize to deliver the UT sensors and TV camera accurately to the required position in reactor. The outline of inspection technologies for reactor internals and their applications in nuclear power plants are described.

Keywords: Reactor internals, Stress corrosion cracking (SCC), Ultrasonic testing (UT), Phased array ultrasonic testing, Laser-ultrasonic testing (Laser-UT), Remote operated vehicle (ROV)

1. 緒言

原子力プラントへの維持基準の導入により、高経年化プラントの炉内構造物に対する健全性評価のための点検・検査要求が高まっている。東芝では炉内構造物の検査技術開発をいち早く開始し、優れた検査技術を積極的に実機適用している^[1]。近年の炉内構造物検査で適用した検査技術には、BWR プラントのシュラウドや原子炉底部に適用した水浸フェーズドアレイ超音波探傷技術^{[3][4][5]}や、PWR プラントの炉内計装筒管台に対して世界で初めて実機適用したレーザ超音波検査技術^{[6][7]}などがある。

また、高放射線下の水中で実施される炉内構造物検査には遠隔アクセス装置を用いることが必須となる。東芝では、目視検査用 TV カメラや超音波探触子などを精度良く目的の部位に設置し、検査するために、特別に開発した各種の水中遠隔点検装置を使用している。さらに、原子炉底部の高ニッケル合金溶接部など、クラッドの付着が想定される箇所に対しては、水ジェット洗浄技術を適用して検査面の前処理を行うなど、検査精度の向上を図るための技術も導入している。

2. 検査技術

2.1 水浸フェーズドアレイ超音波探傷技術

シュラウド等の炉内構造物や配管に応力腐食割れ (SCC) が発見されており、き裂がある状態で機器構造の健全性を評価するために、超音波探傷によるき裂の深さ測定が必要となっている。東芝では、溶接部表面の凹凸の影響を受けにくい水浸フェーズドアレイ超音波探傷技術を独自に開発し、水中での高い精度の検査を実現している^{[3][4][5]}。アレイ探触子も対象部に応じた多くのタイプを保有しており、これまで超音波探傷が不可能であったシュラウド下部や原子炉底部の高ニッケル基合金溶接部など、材料的に超音波が伝わりにくい複雑形状に対しても、より適切な条件で探傷が可能となった。Fig. 1 に東芝が保有するアレイ探触子の一例 (256ch, 128ch, 64ch) を示す。Fig. 2 にシュラウド下部リング溶接部の探傷イメージと、SCC を探傷した結果の一例を示す。東芝では、更なる水浸フェーズドアレイ超音波探傷技術の高度化、高速化を進めるとともに、検査員の技量向上を図るための教育・訓練プログラムの充実にも注力し、積極的に取り組んでいる。

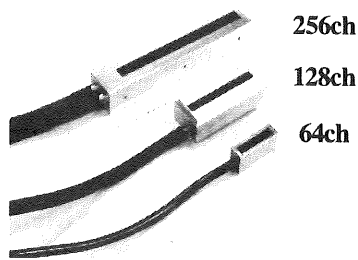


Fig. 1 Example of array UT probes

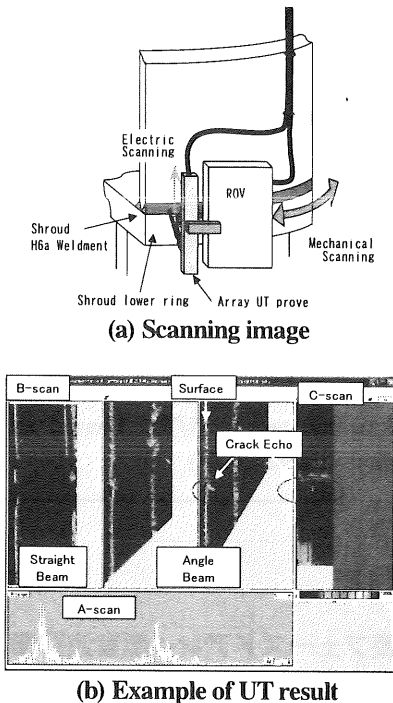


Fig. 2 Application of phased array UT technique to Shroud lower ring

2.2 レーザ超音波探傷技術

レーザ超音波技術とは、送信レーザ光を照射して検査対象表面に超音波を励起させ、対象物中を伝播した超音波を受信レーザ光で検出する技術である。この技術を応用して、表面に開口したき裂からの反射波や、き裂を透過する超音波の周波数特性の変化を感知することで、き裂の検出及び深さ測定が可能である^{[6][7]}。Fig. 3にレーザ超音波探傷技術の原理図を示す^[6]。

この探傷技術には、以下のような特長がある。

- ・探傷ヘッドが小型化でき、複雑・狭隙部の検査が可能
- ・水中、気中など環境条件によらず、非接触で検査が可能
- ・分解能が高く、表面に開口した微小き裂に対する検査精度が高い

Fig. 4に小型探傷ヘッドの一例と、SCCの探傷結果の一例を示す^[1]。本技術は、(財)発電設備技術検査協会殿の確性試験において、深さ0.1mm程度の欠陥でも検出できる能力を持つこと、Fig. 5に示すように深さ約0.5~1.5mmのき裂に対して±0.2mm程度のサイジング精度を有することが確認されている^[6]。

本検査技術は、PWRプラントの炉内計装筒管台内面に対する予防保全工事の施工前検査として、世界で初めて実機プラントへ適用された^{[8][9]}。

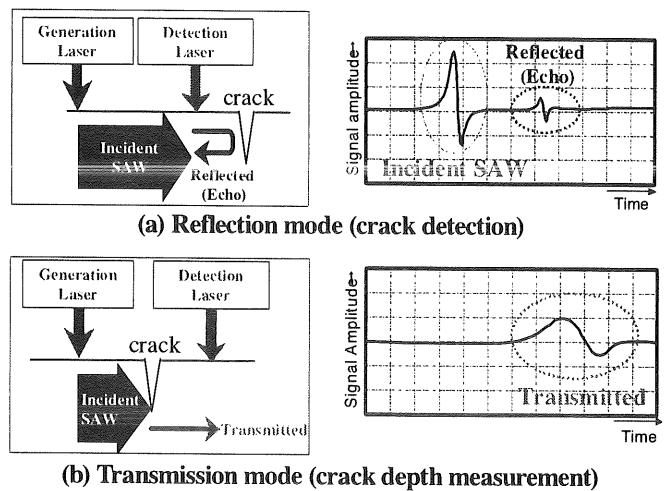


Fig. 3 Schematic illustrations of Laser-UT

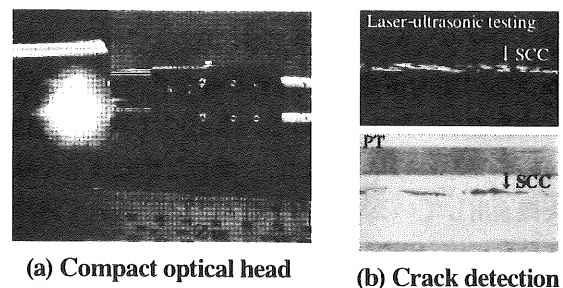


Fig. 4 Example of Laser-UT results

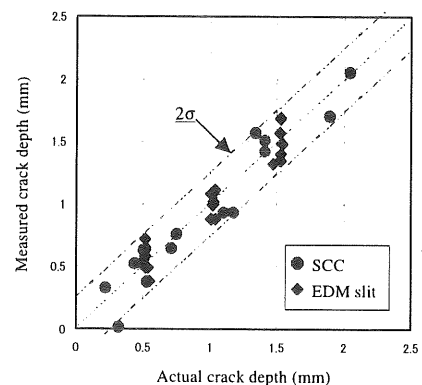


Fig. 5 Crack depth measurement by Laser-UT

3. 遠隔点検装置

3.1 自走型遠隔点検装置

原子炉内部は放射線下の水中環境であることに加え、多種の構造物が設置されて複雑かつ狭隘な空間となっている。特に、シュラウドやシュラウドサポートの周辺、原子炉底部などは、干渉する機器が多く、広範囲に渡る検査が困難であった。この課題を解消するために、東芝では自走式遠隔点検装置（ビークル）を開発し、炉内を遠隔操作で自由に遊泳または走行することにより、炉内構造物へのアクセス範囲を大幅に拡大した。さらに、検査装置の走査精度を確保し、かつ検査の高速化も実現している。

以下に東芝で開発した主なビークルの概要を示す。

(1) フラット型水中ビークル

フラット型水中ビークルは、シュラウドの各溶接線を対象に、広範囲の領域を短時間で超音波探傷あるいは目視検査する目的で開発された^[10]。本装置は、アレイ探触子や水中 TV カメラを搭載して炉内の検査対象部位へ遊泳して接近し、超音波探傷や目視検査を行う際にはシュラウド面に吸着して精密走行する。シュラウド内外面への共用化を図るため、装置の寸法は炉心支持板穴やジェットポンプとシュラウドの隙間の寸法よりも小さい。Fig.6 に装置の外観を示す。

本装置は全体が中性浮力化されているため、検査対象部位に合わせて、アレイ探触子などの検査装置を自由な位置に取り付けられる。また、万一、シュラウド面への吸着力が失われた場合でも、直ちに装置が落下する危険がない。

なお、炉内点検以外にも、本装置の高い走行性能を生かし、プール設備のライニング溶接部目視検査などに利用されている。

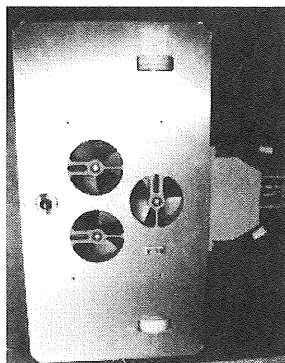


Fig. 6 Flat-type ROV

(2) 小型水中ビークル

小型水中ビークルは、炉内でも比較的障害物の少ない広域な部位や炉底部（シュラウドサポート下部や制御棒駆動機構ハウジング周辺等）にアクセスするために開発された遊泳式の炉内検査装置である^[11]。Fig. 7 に装置の外観を示す^[2]。主な用途は炉内構造物の目視点検や状態観察であるが、寸法が小さく、機動性に優れていることから、炉内に限らず汎用的に使用できる。これまで貯水タンク内部の塗膜検査などにも用いられている。

また、最近では Fig. 7(b) のように、専用の位置決めアームやマーカなどを取り付けることで、特定の検査対象部位に対して高精度で走行したり、ビークル自体の位置を正確に把握することも可能となっている。

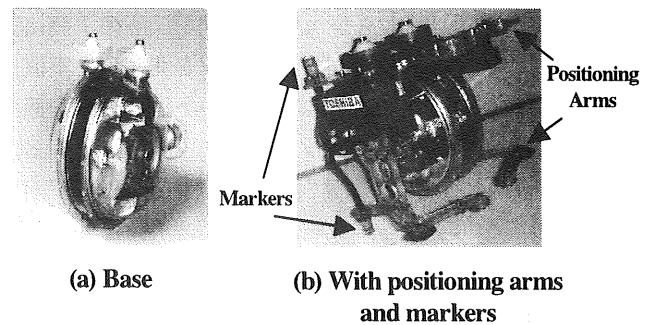


Fig. 7 Compact-type ROV (TIS-30)

(3) 走行式ビークル（クローラ型）

走行式ビークルはシュラウドサポートプレート上の狭隘部を目視検査、吸引清掃するために開発された装置である^[2]。Fig. 8 に装置の外観を示す。本装置は、従来アクセスが困難であったジェットポンプ下端とシュラウド、原子炉圧力容器の隙間においても走行が可能のように、装置の全幅寸法を制限した設計となっている。

ジェットポンプ下端の溶接部に対し、広い範囲で目視検査する場合などには、溶接線よりも上方に配置されている構造物と TV カメラとの干渉が回避できるため、有効である。

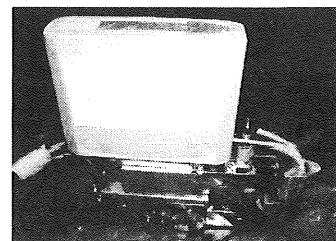


Fig. 8 Crawler-type ROV

3.2 その他炉内点検装置

維持基準の適用は、シュラウド以外にもシュラウドサポート、ジェットポンプ、炉心スプレイ配管などに広く展開されており、今後これらの炉内構造物についても詳細な点検・検査が必要となる。東芝では、これらのニーズに対応できる装置の開発も進めている。

(1) シュラウドサポート洗浄・点検装置

シュラウドサポートは原子炉底部に位置するため、炉心支持板やジェットポンプなどが干渉物となり、原子炉上部からのアクセスが困難である。また、高ニッケル合金製の構造物であるため、溶接部の目視検査を行うためには前処理として付着したクラッドの除去が必要となる。

このようなアクセス性の悪い検査対象部に対して、ジェットポンプを通過してシュラウドサポートの下側にアクセスする洗浄装置及び目視検査装置を開発し、実機点検に適用している^[1]。洗浄には水ジェット洗浄技術を採用し、高効率かつ高速のクラッド除去を可能としている。Fig. 9 に一例として、シュラウドサポートプレート下面用の洗浄装置を示す。

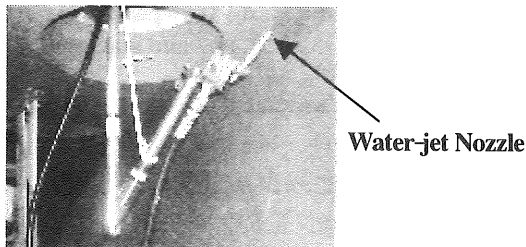


Fig. 9 Cleaning device using water-jet

(2) ジェットポンプ内面洗浄・点検装置

ライザ管を含むジェットポンプ内面の点検を行うため、ジェットポンプ上部の開口から挿入して内面の洗浄、目視点検を実施する装置を開発し、溶接部の目視検査を実施している^[1]。一例として、ディフューザ内面検査装置を Fig. 10 に示す。

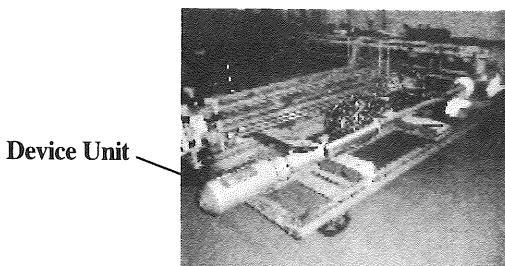


Fig. 10 Jet pump diffuser inner-surface inspection device

4. 結言

近年、炉内構造物にき裂が確認された場合でも、維持基準が適用されるようになり、適切な検査と評価により、き裂の進展を管理しながら運転を継続することが可能となった。高経年化プラントの安全性の確保と安定運転のため、高精度かつ高速の炉内点検技術の必要性はますます高まるものと思われる。

東芝では、このようなニーズを踏まえ、今後もより高精度、高速、広範囲の検査を可能とする検査技術の開発を推進し、原子力発電プラントの安定運転に寄与していきたいと考えている。

5. 参考文献

- [1] 大坪 徹他, 火力原子力発電技術協会「平成 16 年度火力原子力発電大会研究発表要旨集」2004, p.78-79
- [2] 成瀬克彦他, 日本保全学会「第 1 回学術講演会要旨集」2004, p.243-247
- [3] 平澤泰治他, 日本非破壊検査協会「第 8 回超音波による非破壊評価シンポジウム」, 2001, p.131-134
- [4] 平澤泰治他, 日本非破壊検査協会「平成 13 年度春季講演大会講演概要集」2001, p.1-2
- [5] 平澤泰治他, 日本非破壊検査協会「平成 13 年度第 1 回超音波分科会講演概要集」2001
- [6] 落合 誠他, 日本保全学会第 2 回学術講演会 (本会)
- [7] 黒田英彦他, 日本機械学会誌, 24, Vol.104 (No.991, 2001.6)
- [8] M.Tamura et al., 13th International Conference of Nuclear Engineering (ICONE13-50141) (2005)
- [9] 佐伯綾一他, 日本保全学会第 2 回学術講演会 (本会)
- [10] M.Shimamura, et al, "Underwater Remotely Operated Vehicle for Core Shroud Inspection" 10th Robotics & System Mtg. Proceeding, Gainesville, Florida, March 28-31, 2004 p183-190
- [11] M.Kimura et al., "Compact Visual Inspection Submersible for NPP's" Proceedings of ANS Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, Monterey CA, Feb. 1995, p25-31