

炉内検査装置の開発及び実機適用

Development and Application of In-Vessel Inspection Equipments

株式会社 東芝	成瀬 克彦	Katsuhiko NARUSE	Member
株式会社 東芝	湯口 康弘	Yasuhiro YUGUCHI	Non-Member
株式会社 東芝	島村 光明	Mitsuaki SHIMAMURA	Non-Member
株式会社 東芝	亀山 育子	Ikuko KAMEYAMA	Non-Member

Abstract This paper describes development and application of remotely operated vehicles (ROVs) for reactor internals. Stress Corrosion Cracking (SCC) on reactor internal components has become one of the most important issues in recent years, and demand for the inspection of reactor internals is increasing. Toshiba has developed and applied several kinds of ROVs, which can inspect and maintain the welds in a narrow space underwater. Particularly, Toshiba succeeded in the development of UT Vehicle, which can implement the inspection smoothly. This paper describes experiences, applications and effectiveness when the UT Vehicle and two types of the other ROVs have been used for inspection.

Keywords: In-vessel Inspection, Reactor Internals, Remotely Operated Vehicle, Visual Inspection, Ultrasonic Test.

E-mail: katsuhiko.naruse@toshiba.co.jp

1. 緒言

近年、原子力発電プラントの炉内構造物に対して、応力腐食割れ(SCC)の発生が報告され、炉内構造物の点検の必要性が高まっている。

原子力プラントの原子炉圧力容器は、シュラウド、ジェットポンプ等が内蔵されていて、複雑かつ狭隘な空間があるため、従来はテレビカメラや超音波探傷プローブ等の各種検査装置の搬送、位置決め、保持が困難という課題があった。これに対して、炉内検査装置（以下、ビークル）は、各種検査技術の適用範囲の拡大、工期短縮に大きく寄与し、実機での作業実施に不可欠である。ビークルの開発においては、次の要求事項が重要である。

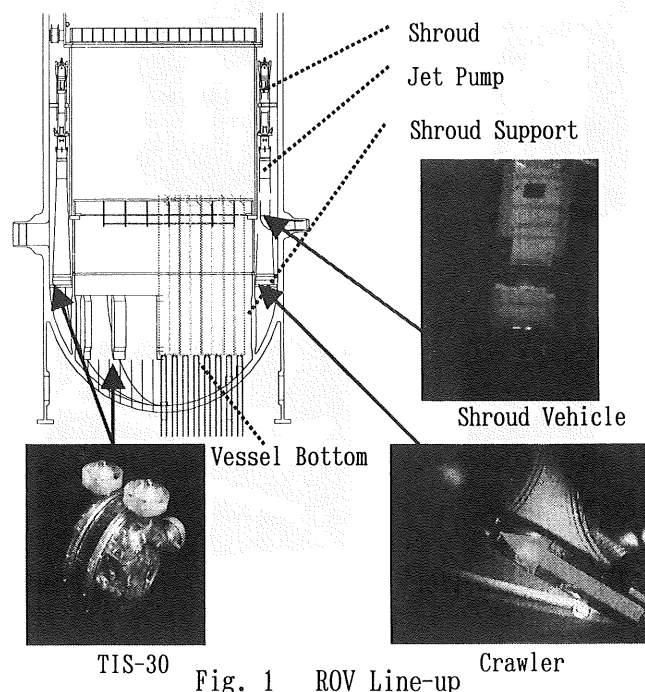
- (1)検査可能範囲（狭隘部、炉底部等、水深 30m）
- (2)検査用として汎用性の高さ（目視点検(VT)、超音波探傷試験(UT)等の共用化）
- (3)準備作業の簡便さ、速さ（遊泳、走行等）

東芝は 90 年代より上記要求を満足する小型、汎用かつ広範囲に炉内構造物にアクセスできるビークルの開発と適用を行い、Table 1 に示す検査能力を持つに至った。本稿では、Fig.1 に示す代表的なビークルの機能、構成及び適用効果、適用実績について述べる。

Table 1 Capability of In-Vessel Inspection

Internals	VT	Cleaning	UT*
Shroud	◎	◎	◎
Shroud Support	◎	◎	○
Jet Pump	◎	◎	○
Core Spray	◎	◎	○
CRD Stub Tube	◎	◎	◎

◎:Applied, ○:Developed, *:Accessibility



2. シュラウド用ビークル

2.1 目的/用途

シュラウド用ビークルは、原子炉内構造物 (Fig.1 参照) において、特にシュラウドを対象として、短時間で広範囲の検査や予防保全作業ができるように開発された[1]。本装置の目的は、各種の作業装置 (検査、予防保全用ツール) を選択的に搭載して炉内の狭隘な対象部位へ接近し、作業ツールの搬送、位置決め、保持を行うことである。これらの要求機能のうち、VT 検査及び UT 検査は既に実用化している。

2.2 構成及び機能

本装置は、シュラウド内外面の検査用に開発され、目標へのアクセス性を向上するために遊泳機能と壁面走行機能を併せ持たせている。Fig. 2,3 に本装置の本体およびコントローラの外観を、Table 2 に本装置の仕様を示す。

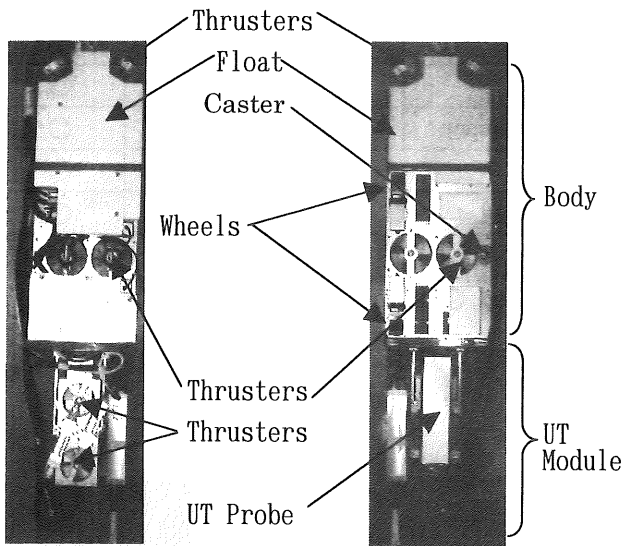


Fig. 2 Shroud Vehicle

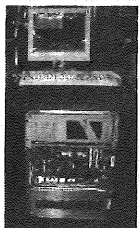


Fig. 3 Controller

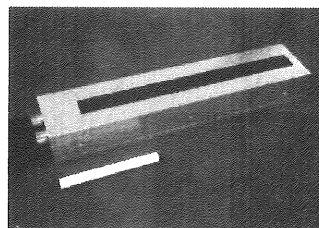


Fig. 4 Phased Array UT Probe

Table 2 Specifications of Shroud Vehicle

Dimensions	W230mmxH650mmxT90mm*1
Mass	10kg(in air)
Motion	Swim:Up,Down,Forward,Backward, Turn left & right, Wheel drive: Horizontally
Speed	0.3-20mm/s

*1:Body Dimensions for Access from Shroud ID

(1) 遊泳機能

本装置は、水平/垂直方向の4つのスラストで浮上/潜航、左右、前後進、旋回の各方向に遊泳できる。水中の高放射線環境下で使用されるため、主要な構成部品を耐水性および耐放射線性に優れたエンジニアリングプラスチック等で構成し、水中重量の軽量化を図り、水中重量と浮力をほぼ等しく (以下、中性浮力化という) している。また、上下の姿勢が常に一定に保たれるように、浮心を重心より上にするため上部にフロートを配置している。

(2) 壁面走行機能

UT を実施するためには、UT プローブを対象面に対して一定の距離を保って支持できること、一定間隔で探傷データを取得することが求められる。本装置は、周溶接線に対する探傷を効率よく実施するため、水平方向に駆動する車輪を上下に2個配置し、その各々の車輪近傍における走行距離を計測する回転センサを設けた。また、ボールキャスタを配置し、水平スラストを作動させることで車輪とボールキャスタで対象面に接触し、回転センサでの速度計測値をフィードバックして、一定速度での走行速度制御を行う。

(3) 操縦方法

遊泳移動の場合には、ハンディコントローラによって操縦する。対象面への吸着後には、パソコン操作画面のコンソールから姿勢角調整、速度制御を行う。

(4) 検査機能

本装置は、超音波探傷プローブ (Fig.4 参照) 等を搭載することにより、超音波探傷試験等のその他の検査を実施できる。さらに、CCD カメラ、照明、ミラーを組み込んだ VT モジュールを搭載することにより、目視検査を実施する。

また、シュラウドのように、材料の放射化が顕著な部位に対しては、耐放射線性カメラを組み込んだ VT モジュールを用いる。VT 前にクラッド除去が必要な場合でもブラッシングによるクリーニングができる。また、位置計測機能として、長さ約 2000mm の計測対象物に対して、標準偏差 12mm 未満で寸法計測することができた。さらに、これらのエンドエフェクタモジュールを本装置の上部、下部あるいは側面などに選択的に取付けることにより、対象部位形状や周囲の隙間寸法に応じて、最適な形態で適用できる。このときモジュール本体およびケーブルは各々を中性浮力化することで、ビークル自体の姿勢安定性や運動性能は維持される。

2.3 適用効果

Fig.5 に 1,100MWe 級プラントのシュラウド展開図中に各溶接部に対する UT 可能範囲を示す。溶接部内面の UT 可能範囲は全溶接線長に対して約 65%、外面は約 70%である。

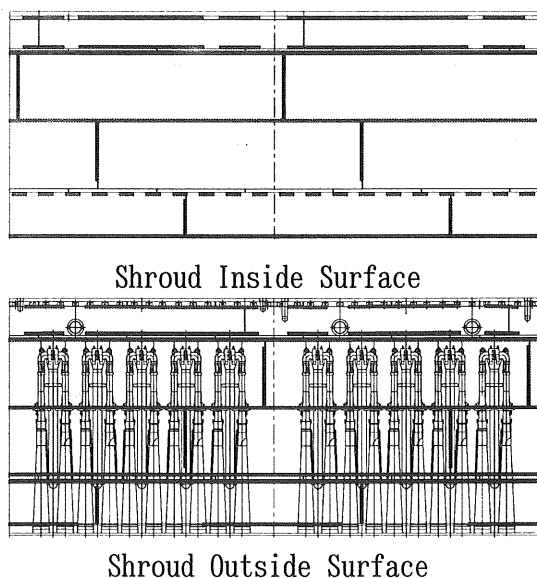


Fig.5 Shroud UT Coverage

3. 水中ビークル

3.1 目的/用途

水中ビークルは、炉内の障害物のない広域な部位や炉底部（シュラウドサポート下部等）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[2],[3],[4]。主な用途は目視点検や状態観察であるが、最近では、炉内構造物の VT のみならず貯水タンク内部の塗膜検査にも用いられている。

3.2 構成及び機能

本装置は、1993 年に開発して以来、実機適用を積み重ね、機能の見直しを行い、さらに小型化と信頼性が向上した。また、姿勢安定性を高めるため、外部に受動車輪を取付け、水中ビークルを対象面に対して一定の距離、角度を保つことができるタイプが貯水タンク内面点検に用いられている。Table 3 に本装置の性能を示す。Fig.6 に本装置の本体およびコントローラの外観を示す。

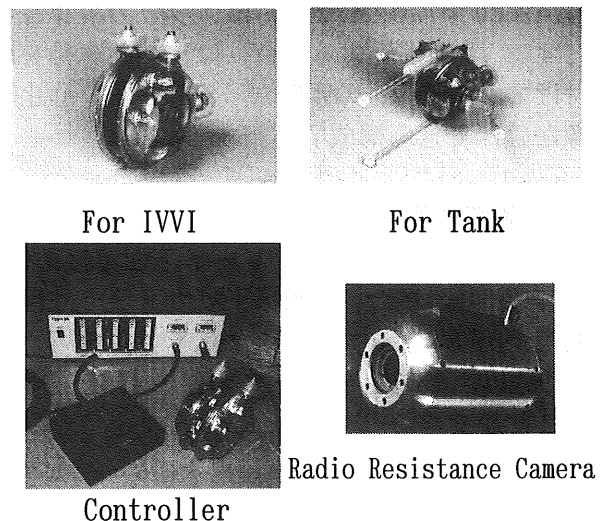


Fig.6 Compact ROV (TIS-30)

Table 3 Specifications of TIS-30

Dimensions	W120mm x L185mm x H185mm
Mass	1.5kg
Motion	Up/Down, Forward/Backward, Turn Left/Right
Speed	Max. 0.1m/s
Camera	380,000 Pixel color CCD Tilt Angle: ±60deg
Lights	Type A: 20W×6sets, Halogen Lamps Type B: Arranged White LEDs

(1)遊泳機能

シュラウド用ビークル同様、操作性を高めるため、中性浮力化するとともに、4個のスラストで3次的に遊泳する機能を備えている。

(2)操縦方法

操縦システムは、操作ボックス、コントローラ、カメラ制御器、ライト調光器から構成される。装置本体は、ジョイスティック2本により一人で操縦できる。

(3)点検・検査機能

本体には上下にチルトが可能な CCD カメラと照度が調整できるハロゲンランプあるいは白色 LED が内蔵されている。また、高放射線部位に対しては、Fig.6 に示す中性浮力化された耐放射線性カメラを水中ビークルの下部に取付けて目視検査を行う。0.025mm 幅及び 0.0125mm 幅のワイヤ或いはノッチの視認性を有する VT を実施する場合には、補助車輪を取付けて、対象面との距離が一定に保ち、静止映像が確保できる構成で実施する。

3.3 適用効果

シュラウドサポートプレート下面溶接部(H8、H9 溶接部)の場合、従来吊下げカメラでは目視検査が困難な部位であったが、本装置を用いれば 95%以上の範囲を上記視認性で VT を実施することができる。

4. 走行式ビークル

4.1 目的/用途

従来、原子炉内に堆積する錆状の沈殿物の吸引清掃作業は、上方から見通せる部位に対し、先端に吸引ノズルを取付けた吸引管を用いて遠隔作業で行われていた。この方法でシュラウドサポートプレート上を清掃する場合、ジェットポンプが障害物となり清掃範囲が狭く、さらに吸引ノズルの位置決めが困難であるため、作業員の技量による所要時間のばらつきが大きいという問題があった。この課題に対して、シュラウドサポートプレート上を清掃するための走行式ビークルを開発し、実用化している [2],[5],[6],[7]。本装置は、清掃以外に目視検査にも適用できる。

4.2 構成及び機能

本装置は最小隙間が約 60mm の狭隘な箇所（シュラウドサポートプレート上面等）へアクセスするために薄型であり、1 対のクローラにより平面上を移動可能である。Fig.7 に本装置の本体およびコントローラの外観を示す。Table 4 に本装置の性能を示す。

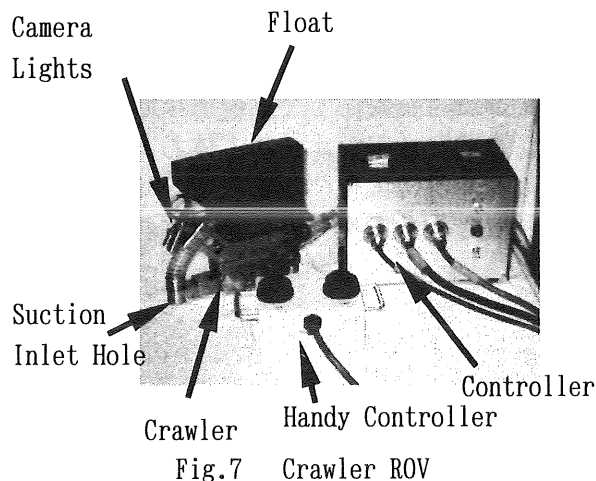


Table 4 Specifications

Dimensions	W50mmxL248mmxH250mm
Mass	4.6kg
Motion	Forward/Backward, Turn Left/Right
Speed	Max. 0.14m/s
Vacuum Flow	Max. 0.065m ³ /min

(1)走行機能

DC モータ駆動の一对のクローラを備えており、遠隔操縦により、前後進、左右旋回できる。

(2)操縦方法

操縦システムは、前述の水中ビークルと同様に、操作ボックス、コントローラ、カメラ制御器、ライト調光器から構成される。装置本体は、ジョイスティック2本により一人で操縦できる。

(3)清掃機能

スリムな形状をしているため、シュラウドとジェットポンプディフューザの狭隘な隙間を通過し、ジェットポンプ直下へ進入できる。前後に吸引ノズルとブラシを備え、吸引ホースは回転自在のジョイントで本体に接続されてい

る。また上部にフロートを備え、浮力により転倒を防止する。万一故障した場合でも、吸引ホースを引っ張ることで容易に回収できる。

(4)検査機能

本装置に取付けられた CCD カメラにより、シールドサポートプレート上を 0.0125mm 幅ワイヤあるいはノッチの視認性で VT できる。

4.3 適用効果

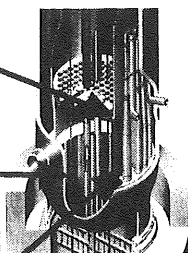
従来の吸引管による清掃の場合には、シールドサポートプレート上の約 20%の面積に 24 時間を要していたが、本装置の場合、ほぼ同じ時間でアクセスホールカバー近傍の一部を除くほぼ全域の吸引清掃と VT を実施できる。

5. 適用実績

以上述べた各種ビークルの適用実績を Table 5 に示す。

Table 5 Field Experience

ROV	Internals/Number of Times
Shroud Vehicle	Shroud, UT/16
	Shroud, VT/2
	Pool Liner, VT/1
TIS-30	Shroud Support, VT/7
	Tank Inner Wall, VT/4
	Bottom Head, VT/4
Crawler ROV	Shroud Support Plate, Cleaning/11
	Shroud Support, VT/2



6. 結言

本稿では、従来のアクセス手法では点検できなかった炉内構造物の部位に対して、アクセス範囲を拡大し、かつ、より短時間で点検などの作業を行うための炉内検査装置の構成および機能、適用効果について述べた。

今後も実機適用を通じたフィードバックと研究開発によって、さらに所要時間が短縮化するための改良、適用方法を検討する。これらの炉内検査装置を用いた炉内作業の高度化が、プラント稼働率の向上に大いに貢献すると考える。

参考文献

- [1] 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
- [2] M. Kimura, et al, "Underwater Remote Handling Equipment for Reactor Internals Maintenance" Proceedings of 10th International Conference on Nuclear Engineering Arlington VA Apr. 2002
- [3] 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
- [4] 木村元比古, 他. 日本原子力学会誌 原子炉用水中目視検査装置の開発 38,10 1996 p.826..823
- [5] M. Shimamura et al., "Development of Vacuum Cleaning Device in BWR Vessels" Proceedings of ANS Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, Augusta GA Apr. 1997, p794..801
- [6] 島村 光明他 日本原子力学会年会予稿集 炉内洗浄装置の開発 1996年春 p.185
- [7] 島村 光明他 日本原子力学会年会予稿集 炉内洗浄装置の開発(第2報) 1997年春 p.375

