解説

原子力発電プラント水中検査用 ROV の開発

Development of Remote Operated Vehicles for Underwater Inspection in Nuclear Power Plants

鈴木 正 憲* (株)日立製作所電力グループ日立事業所メカトロシステムセンタ
Masanori Suzuki* *Hitachi, Ltd. Power Systems Hitachi Works Mechatronics System Center

1. は じ め に

原子炉内構造物の劣化は経済的に大きな影響を及ぼすため、長年にわたって保全技術の開発が進められてきた[1]. この保全技術の一項目である検査技術は、原子力発電プラントの安全性と信頼性を維持するために非常に重要である。原子力発電所には多くの炉内構造物が水中下にあるが、それらは高放射線環境下にあるため検査が困難な場合が多い。

従来、これらの領域の検査は、検査員がロープで吊るしたカメラを巧みに操って目的の検査位置に移動させることで行われていたが、水面下十数[m]と離れた場所の検査では、相当の熟練を要し、位置決めに多大な時間を要していた。時には、構造物の周囲の炉水を排出して人の目で直視して行われたこともあった。最近、これらの検査方法に代わり、いくつかの遠隔操作無人探査機(ROV)が原子力発電所内の水中検査作業に限定された形ではあるが使用されてきている[1][2]。しかし、安定で精緻な映像の確保や、カメラ以外の作業機能の付加など、いくつかの課題を有しており、広く検査に使われるようには至っていない。

本稿では、筆者らがこれらの課題を解決するために開発したいくつかの ROV の概要と、それらを従来の ROV では困難であった原子炉内構造物の検査に適用した事例などについて解説する。

2. 背 景

ROV は、主に海洋開発分野で調査、検査あるいはメンテナンス作業のために開発されてきている[3][4]。これらの ROV は、カメラのほかに、モータとプロペラからなる複数のスラストと浮力を確保するフロートを装備している。多くの場合、これらはフレームに固定されている。これらのタイプの ROV の利点と特徴は次の通りである。

- (1) 水中下での高機動性: ROV は普通の水の中カメラに比べて水中内構造物の調査・検査エリアに容易にアクセス

できる。

- (2) 設置や取扱いが容易: システムの構成要素が単純で、検査エリアに直接設置する必要がないので、検査の準備作業が最小化できる。

- (3) 安全性: 船上から遠隔操作で調査・検査作業が行えるので、ダイバーによる作業に比べて安全性に優れる。

このように、ROV による調査・検査の実施は容易で安全かつコストパフォーマンスが高いが、原子力発電プラントの炉内検査に応用するには、以下に示すいくつかの課題がある。

- (1) 一般に海洋用 ROV は、そのサイズが大きいので、炉内での狭隘部を通過して検査エリアにアクセスするためには、小型化しなければならない。

- (2) 水中内で動作中の ROV は、ROV 自体が浮遊しているために安定した映像を取得しにくい。検査のためには安定した精緻な映像を取得する必要がある。

- (3) 通常、VT(目視検査)が主体であるが、炉内検査作業のためには、一歩踏み込んだ検査等を行うために、ROV の作業機能の充実をはかる必要がある。

これらの課題を解決するために次章に示す小型 ROV の開発が行われている。

3. ROV の 概 要

3.1 S 型 ROV (基本形)

本装置の目的は、原子炉圧力容器内の底部(以下、炉底部と呼ぶ)にアクセスし、炉内構造物の一つであるレグタイプシュラウドサポート(図1)を検査することにある。炉上部から炉底部へのアクセスルートには、取り外し困難な主要炉内構造物である上部格子板と炉心支持板がある。これらの構造物は、約 $\phi 285$ [mm]の狭隘な通過スペースしか有していないので、ここを通過できるように ROV を小型化する必要がある。

そこで、通過断面積 198×228 [mm]を有する S 型 ROV を開発し、上部格子板および炉心支持板の通過を可能にした[5]。その外観を図2に、その主な仕様を表1に示す。

この ROV は、CCD カメラとハロゲンランプを装備し、そのボディはフロート部によって中性浮力化されている。4

原稿受付 2004 年 4 月 28 日

キーワード: ROV, Visual Inspection, Ultrasonic Inspection, Nuclear Power Plant

*〒317-8511 日立市幸町 3-1-1

*Hitachi-shi, Ibaraki

図1 炉内検査の概要

図2 S型 ROV の外観

表1 S型 ROV の主な仕様

項目	仕様
寸法	W198mm×H198mm×L228mm
気中質量	約 3.5kg
カメラ	CCD カラー (38 万ピクセル) ハロゲンランプ ×2 チルト機構: ±90°
耐放射線性	200Gy
水深	0-30m

機のスラスタを装備し、上下、前後、左右、回転のあらゆる方向への動作が可能である。操作者は、ジョイスティックコントローラのジョイスティックバーで速度と方向を調整しながら ROV を自由に操縦できる。

S 型 ROV に搭載された CCD カメラは、距離 200 [mm] の位置で 1 [mil] (2.5 [μm]) のワイヤ映像を取得できる能力を持つ。このカメラは、広い検査エリアをカバーするために、±90° の首振り可能なチルト機構を有する。4 機のスラスタの推進により、0.6 [m/s] までの速度で動作可能である。

S 型 ROV によるシュラウドサポート点検の概要を図 1 に示す。高放射線領域であるコア領域（上部格子板と炉心支持板間）には、ガイドパイプが事前に設置され、ROV をこ

表2 S 型 ROV に装着する UT スキャナの主な仕様

項目	仕様
寸法	φ255mm×H359mm (ROV 含む)
気中質量	約 2.8 kg
ストローク	70mm×100mm
チルト軸動作範囲	90° ~ -90°
超音波探触子	垂直探触子 斜角探触子

図3 UT スキャナを装備した S 型 ROV

のガイドパイプ内を通過させることで、コア領域のスピーディな通過を可能にしている。ROV は、コア領域を通過後、水中下約 20 [m] の炉底部周辺にアクセスし、シュラウドサポート表面の検査を実行する。

3.2 超音波探傷検査用スキャナ

ROV の作業機能の充実の一例として、S 型 ROV に装着できる超音波探傷検査用スキャナ（以下、UT スキャナと略す）を開発した [6]。UT スキャナの仕様を表 2 に、UT スキャナを装備した S 型 ROV の外観を図 3 に示す。

UT スキャナのサイズは、直径 255 [mm] であり、上部格子板、炉心支持板を通過して炉底部にアクセス可能である。

この UT スキャナは、傾斜した壁面に沿うように遠隔操作で傾けることができる。スラスタで ROV を壁に押し続けることで ROV 自体を安定化し、超音波探触子を掃引して壁面の超音波探傷検査を行うことができる。UT スキャナを装備した S 型 ROV は、UT スキャナの傾斜角によらずに安定した姿勢を保持できる。このために、UT スキャナはどの傾斜角においても重心と浮力中心が同じ位置に維持されるように構成されている。UT スキャナには、垂直ビーム超音波探触子と斜角超音波探触子を装備し、一度に 70×100 [mm] を掃引するストロークを有する。

UT スキャナを装備した ROV の検査手順を図 4 に示す。操作者は、ジョイスティック操作により、ROV を検査面にガイドし、表面の角度に沿って UT スキャナを傾け、壁面に対して UT スキャナを押し付ける。UT スキャナに搭載

図4 壁面を UT スキャンする場合の検査手順

(a) 検査対象

(b) 探傷波形

(c) 探傷結果

図5 UT スキャナ付 S 型 ROV によるステンレスライニングの検査例

された超音波探触子ユニットは検査表面を自動的にスキャンする。その探触子ユニットからの信号はデータ収集システムに収集される。スキャン中の探触子は ROV のカメラ映像で確認でき、検査対象への超音波の伝播は垂直ビーム探触子の反射波によって確認できる。

ステンレスライニング壁面の、模擬試験片に対する超音波探傷試験結果の一例を図5に示す。試験は UT スキャナを装備した S 型 ROV を用いて実施され、模擬試験片にはいくつかの異なった人工欠陥が設けられている。最初に UT スキャナを試験片に対して押し付け、その後、超音波探傷検査が実施された。本試験により、本システムが模擬試験片の人工欠陥を検出できることが確認されている。

3.3 レグ機構

本機構は作業機能の充実の他の一例であり、炉底部以外の検査対象に適し、詳細な目視検査を可能にするものである。

本来、ROV は常に浮遊し、ROV 自体では静止できない特性を有するので、詳細で精緻な映像を用いた検査には適していなかった。この問題を解決するために、S 型 ROV に図6に示すレグ機構を装備可能にした。

これは、ROV をレグ機構を介して検査対象の壁に押し付け、その状態を ROV の推進力で保持させることで、ROV 自体を静止させるものである。レグ機構は遠隔操作でレグ先端を傾けるチルト軸を有し、レグの先端が検査対象の壁面に沿って着座できるように構成されている。この機構により、ROV は静止状態で、壁面の安定した映像を取得しながら水中構造物の壁面を検査することができる。

図6 レグ機構付 S 型 ROV

図7 BWR-2 型原子炉下部の構造図

図8 M 型 ROV の外観

3.4 M 型 ROV (超小型 ROV)

M 型 ROV はフローバッフルを有する BWR-2 型原子炉のシュラウドサポートの下面をアクセスするために開発された[5]。BWR-2 型原子炉圧力容器の炉底部の断面を図7に示す。ROV は、フローバッフル下端と圧力容器の内壁下面との狭い隙間を通過できるサイズに小型化する必要がある。この隙間は、非常に狭いので、S 型 ROV では通過できない。そこで、図8に示す超小型の M 型 ROV を開発した。M 型 ROV は、狭い隙間を通過できるように直径

表 3 M 型 ROV の主な仕様

項 目	仕 様
寸 法	W169mm×H162mm×L155mm
気中質量	約 2.1kg
カメラ	CCD カラー (38 万ピクセル) LED ランプ機構 ×2
耐放射線性	200Gy
水 深	0-30m

図 9 1[mil], 0.5[mil] ワイヤの画像例

155[mm]の球形構造とした。小型であっても、より大きな浮力を得るためにシェル構造とし、シェルの材質は、FRP (Fiberglass Reinforced Plastic) を選定することで、軽量化と水圧に耐える十分な強度を確保している。多重通信回路システムを ROV に内蔵することで、信号線数の最小化をはかり、ROV ケーブル直径 5.9[mm] を実現している。

M 型 ROV の仕様を表 3 に示す。M 型 ROV は、CCD カメラと LED ライトと 4 機のスラスタを装備し、上下、前後、左右、回転動作が可能である。CCD カメラは距離 200[mm] で 1[mil] (2.5[μm]) のワイヤの映像を取得できる。さらに ROV が近接すれば、0.5[mil] (1.25[μm]) のワイヤ映像も取得できる (図 9)。カメラはチルト軸を有し、遠隔操作でカメラを ±90° まで傾けることができる。

4. 実機適用例

4.1 壁面検査

S 型 ROV の実機適用例として、原子力発電所の格納容器 (PCV) 内にあるサブプレッションチェンバ (S/C) および復水貯蔵タンク (CST) の水中壁面検査を紹介する。

MARK-I 型原子炉格納容器の S/C 壁面検査に適用した S 型 ROV を図 10、全体システムの概要を図 11 に示す。レグ機構を装備した S 型 ROV を使用し、レグ機構で傾斜壁面に対して静止続けることで、S/C の円柱形の内壁面の下半分 (水面下にある部分) を検査可能にした。このシステムは S 型 ROV、ジョイスティックコントローラ、ビデオモニターと VCR とから構成される。

(a) 垂直壁面への押し付け姿勢 (b) 傾斜面への押し付け姿勢

図 10 サプレッションチェンバの壁面検査用 S 型 ROV

図 11 サプレッションチェンバ点検のためのシステム概要

図 12 CST タンク内の壁面検査を行う改良 S 型 ROV

次に、復水貯蔵タンク (CST) の壁面検査にレグ機構を装備した改良 S 型 ROV を使用した例を示す。この ROV は、各レグの先端に車輪が装着されており、CST 壁面への接触を保持しながら検査面に沿って円滑に並行移動できる。レグ機構を装備した改良 S 型 ROV が CST 検査のモックアップ試験を実施している状況を図 12 に示す。

どちらの S 型 ROV も検査作業を効率良く実行でき、実プラントでの検査に使用することで、その有用性が実証されている。

4.2 シュラウドサポート検査

BWR-2 型原子炉のシュラウドサポート下面の検査に M 型 ROV を適用した例を示す。このシュラウドサポート下面の検査では、全燃料と 1/4 周当たり 1 本の制御棒駆動機構 (CRD) ガイドチューブを取り外すだけで全周の検査が可能である。

図 13 原子炉シュラウドモックアップモデル内にて、炉底部内壁面とフローバッフルの狭い隙間を通過中の M 型 ROV

図 14 モックアップモデルのシュラウドサポート下面に上昇接近中の M 型 ROV

モックアップ試験における M 型 ROV の状況を図 13 に示す。図は、フローバッフルと原子炉压力容器内面の壁との狭い隙間を通過中のものである。この隙間を通過後、M 型 ROV がシュラウドサポート下面に接近中の様子を図 14 に示す。

モックアップ試験により、M 型 ROV が原子炉压力容器下部にあるシュラウドサポート下面へアクセスでき、信頼性のある検査ができることが確認されている。その後、本システムを実プラントへ適用し、0°、90°、180°、270° の炉心位置から ROV を投入することで、BWR-2 型炉心のシュラウドサポート下面の全周検査を供用試験期間中に世界で初めて実現させている。

4.3 各種検査への展開

BWR 型原子力発電所内各種検査への、水中 ROV の展開状況を図 15 に示す。ここで紹介したシュラウド検査、S/C や CST の壁面検査のほか、Y 型 ROV を用いた炉底部検査や原子炉建屋にある燃料プールのライニング面検査などが行われている。Y 型 ROV は、気中質量が約 6 [kg] と S 型 ROV に比べて重い、その幅は 140 [mm] と狭く、炉底部の制御棒ハウジング間の非常に狭い隙間を通過して、その

注) VT:目視検査、UT:超音波探傷検査

図 15 BWR 型原子力発電所内の各種検査への水中 ROV の展開状況

周辺を検査できる点に特徴がある。また、カメラを耐放射線性（集積線量：1 [MGy]）白黒カメラへ交換でき、UT スキャナの装着も可能である。これらの点以外は S 型 ROV と類似の性能を有する。

5. おわりに

経年化した原子力発電プラントの検査は、その安全性と信頼性を確保する上で重要な問題である。本稿では、原子力施設内の水中構造物の検査を実行するために開発されたいくつかの ROV について、実プラントに適用され、従来困難であった構造物の検査が有効に実施されている例を解説した。

参考文献

- [1] 古川，魚住，布施：“原子炉の炉内保全技術の開発と実機への適用”，日立評論，vol.84，no.2，2002。
- [2] M. Kimura, et al.: “Underwater Remote Handling Equipment for Reactor Internals Maintenance,” Proc. of ICON10-22188, Arlington, VA, April 14-18, 2002.
- [3] 浦，高川：海中ロボット総覧。pp.39-88，成山堂書店，1994。
- [4] 曾我：“水中ロボットによる海底ケーブル埋設深度点検システムの開発”，R&D News Kansai，no.371，pp.7-10，1998。
- [5] Y. Mabuchi, Y. Takahashi and M. Suzuki: “The Development of the Underwater Inspection Vehicles for Nuclear Power Plants,” Proc. of ICON11-36557, Tokyo, Japan, April 20-23, 2003.
- [6] 馬淵，菊池他：“超音波探傷検査用スキャナを備えた多機能水中検査装置の開発”，日本原子力学会 1998 春の年会講演会予稿集，G34。

鈴木正憲 (Masanori Suzuki)

1978 年大阪大学工学部修士課程を卒業。同年（株）日立製作所に入社。現在、日立事業所メカトロシステムセンタ・グループリーダ主任技師。原子力関連施設用遠隔保守・点検ロボット（ROV，防災ロボット，マニピュレータ）や国際宇宙ステーション JEM 用マニピュレータの開発業務に従事。日本原子力学会，日本機械学会，計測自動制御学会の会員。