

# 炉内水中遠隔操作ビークル

Underwater Remotely Operated Vehicles for Nuclear Reactor Vessels

湯口 康弘

YUGUCHI Yasuhiro

島村 光明

SHIMAMURA Mitsuaki

木村 元比古

KIMURA Motohiko

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、炉内構造物の溶接部に対する点検の必要性が高まっている。複雑な原子炉内構造物の各部位に対して、遠隔操縦で水中を移動し、効率よく点検や保全などの作業を行うことができる各種の遠隔操作ビークルを開発し、実機に適用している。

This paper describes the development and application of remotely operated vehicles (ROVs) for reactor internals. Stress corrosion cracking (SCC) on reactor internal components have 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 types of ROVs that can inspect and maintain welds in a narrow space underwater.

## 1 まえがき

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、炉内構造物の溶接部に対する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、ジェットポンプなどが内蔵されていて、複雑かつ狭い空間があるため、従来はテレビカメラや超音波探傷プローブなどの各種検査装置の搬送、位置決め、保持が困難な部位が多いという課題があった。これに対して、遠隔操作装置は、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、実機での作業に不可欠である。

遠隔操作装置の開発では、次の要求事項が重要である。

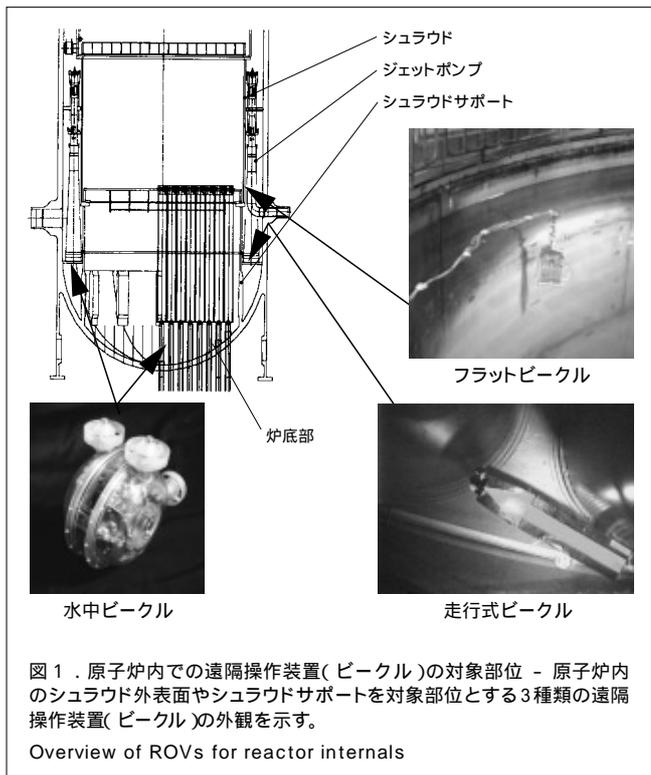
- (1) 準備作業の簡便さ、アクセス速度(遊泳、走行など)
- (2) 行動範囲の広さ(狭い部位、炉底部など、水深30m)
- (3) 検査用としての汎用性の高さ(目視点検(VT)、超音波探傷試験(UT)などの共用化)

以上を考慮し開発及び実機適用されている装置のなかで、代表的な小型自走式の遠隔操作装置(以下、ビークルと言う)の機能、構成、適用効果について述べる。

## 2 フラット型水中ビークル

### 2.1 目的・用途

フラット型水中ビークル(以下、フラットビークルと言う)は、原子炉内構造物(図1)において、特に炉下部のサポートレグやシュラウド外面などの狭い部位を対象として、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<sup>(1)(2)</sup>。



この装置の目標は、各種の作業装置(点検・検査用及び予防保全用エンドエフェクタ)を選択的に搭載して炉内の狭いすき間(幅50mm程度)へ進入し、作業装置の搬送、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は既に実用化している。

### 2.2 構成・機能

この装置は、最小すき間が約50mm程度の狭い垂直面(シ

ユラウド外面など)で作業をするために、厚さ40 mmと薄型に構成され、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。この装置の構成を図2に、仕様を表1に示す。

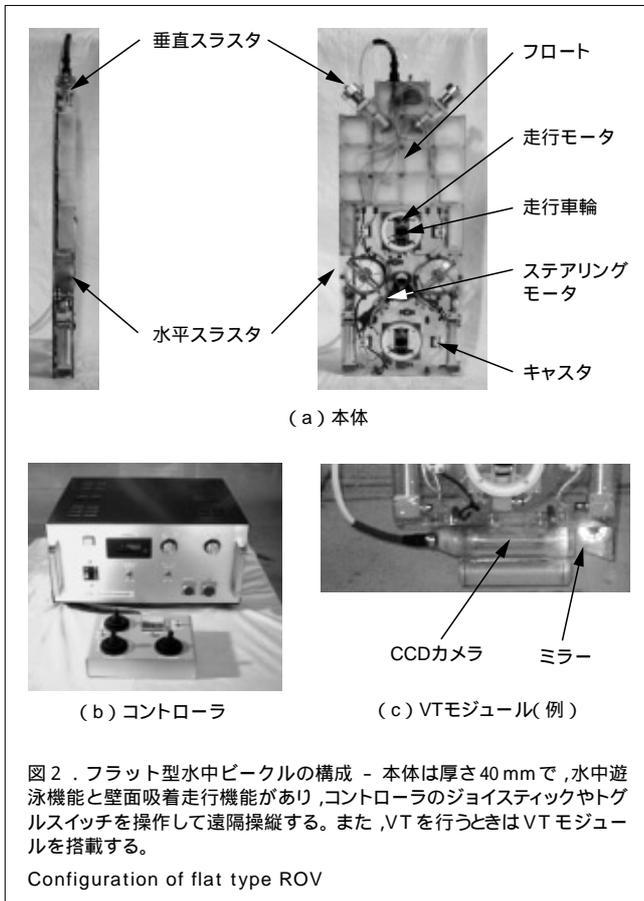


表1. フラット型水中ピークルの仕様  
Specifications of flat type ROV

項目	仕様
寸法	40(D:奥行)×230(W:幅)×570(H:高さ)mm
質量	2.86 kg
遊泳速度	潜航/浮上, 前後進: 0.12 m/s 左右: 0.07 m/s
吸着力	3.1 N(下端部)
走行速度	0.1 m/s以上

水平/垂直方向の四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及び耐放射線性に優れたエンジニアリングプラスチックで構成し、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。小型化と目標とする遊泳速度を両立させ、炉心上方から見通しが利かない炉下部のシュラ

ウドサポート下でも容易に操縦できるようにした。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。

テレビカメラなどの検査装置を最適な位置で保持したり、微少な移動量を調整するため、対象面へ吸着しながら車輪で走行する機能を備えている。走行移動時は水平スラストを作動させることにより対象壁面に吸着し、中央部上下に配置した車輪で壁面上を走行できる。2個の車輪を1個のモータで同時に操舵(そうだ)することにより対象面内の全方向へ走行できる。

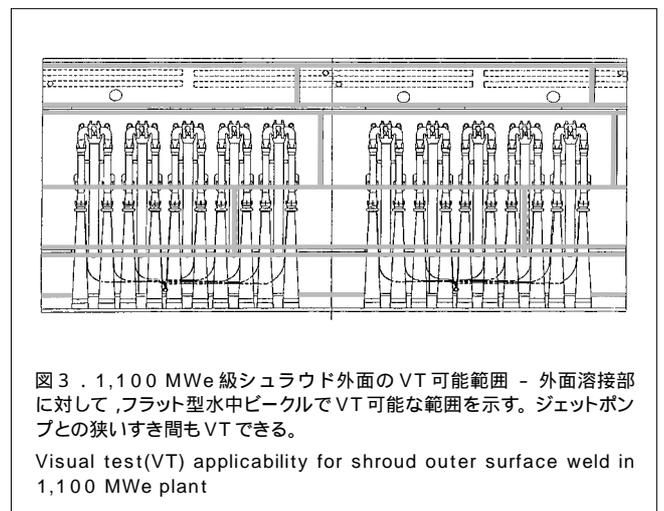
この装置は、CCD(電荷結合素子)カメラ、照明、ミラーを組み込んだVTモジュール(図2(c))を搭載することにより、VTを実施する。また、シュラウドのように、高レベルに放射化されている部位に対しては、耐放射線性カメラを組み込んだVTモジュールを用いる。更に、超音波探傷プローブなどを搭載することにより、体積検査も実施できる。

これらのエンドエフェクタモジュールをフラットピークルの下部や側面などに選択的に取り付けることにより、対象部位形状や周囲のすき間寸法に応じて、最適な形態で適用できる。このときモジュール本体及びケーブルは各々を中性浮力化することで、ピ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

1,100 MWe級プラントのシュラウド外面の展開図に、各溶接部に対してVTが可能な範囲を表わし図3に示す。このように、従来の上からつり下げた水中カメラでは、ジェットポンプとの干渉により50%程度しか検査できなかったが、フラットピークルにより、シュラウド最下部の溶接線の一部を除いて、ほぼ100%の範囲を検査できるようになった。

この装置を用いたVTの所要時間は、シュラウド周長約15mの1周溶接線に対して、最短で約12時間となる。



### 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など)にアクセスするために開発された、遊泳式のビークルである<sup>(2)・(4)</sup>。主な用途はVTや状態観察であるが、最近では、炉内構造物のVTだけでなく、貯水タンク内部の塗膜検査にも用いられている。

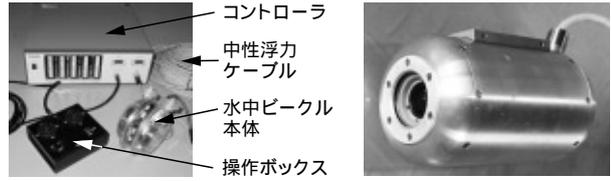
#### 3.2 構成・機能

この装置は、1993年に開発して以来、実機適用を積み重ね、機能の見直しを行って、更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り付け、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。

初期型と最新型の比較を表2に、この装置の性能を表3に示す。また、この装置の構成を図4に示す。

フラットビークルと同様、操作性を高めるため中性浮力化するとともに、4個のスラストで三次元的に遊泳する機能を備えている。

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が内蔵されている。また、高放射線部位に対しては、図4(b)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り付けてVTを行う。



(a)本体及びコントローラなど (b)耐放射線性カメラ

図4. 水中ビークルの構成 - 本体及びコントローラなどから成り、高放射線部位の検査には耐放射線性カメラを使用する。

Configuration of compact ROV

#### 3.3 適用効果

シュラウドサポートプレート下面溶接部(H9)の場合、従来ではVTを行うためには準備などに多大の作業時間を要していたが、この装置では、準備作業を含め全周を約9時間で検査できる。

### 4 走行式ビークル

#### 4.1 目的・用途

従来、原子炉内にたい積するさび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り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って清掃範囲が狭く、更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全面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<sup>(2)・(5)・(7)</sup>。このビークルは、清掃以外にVTにも適用できる。

#### 4.2 構成・機能

この装置は、最小すき間が約60mmの狭い部位(シュラウドサポートプレート上面など)へアクセスするために薄型である。この装置の構成を図5に、性能を表4に示す。

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。

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いすき間を通過し、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。

また、この装置に取り付けられたCCDカメラにより、シュラウドサポートプレート上のVTも可能である。

従来の吸引管による清掃の場合には、シュラウ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、この

表2. 水中ビークルの改良  
Evolution of compact ROV

項目	初期型	最新型
外観		A: 炉内用 B: タンク内面用 
寸法	W : 150 mm L(長さ): 220 mm H : 170 mm	W : 120 mm L : 185 mm H : 185 mm (狭い部位への移動が容易に)
移動	上下, 前後, 左右旋回	上下, 前後, 左右旋回 左右移動(構成可能)
画像	静止映像困難	静止映像取得可能(タイプB)

表3. 水中ビークルの仕様  
Specifications of compact ROV

項目	仕様
質量	1.5 kg
遊泳速度	0.1 m/s(最大)
カメラ	38万画素, チルト動作軸: ±60°
照明	20W x 6個, ハロゲンランプ

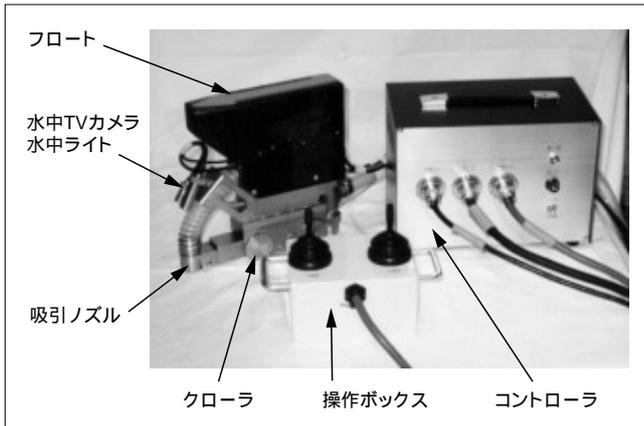


図5. 走行式ビークルの構成 - シュラウドサポートプレート上の清掃に用いられ,VTにも使用することができる。  
Configuration of crawler ROV

表4. 走行式ビークルの仕様  
Specifications of crawler ROV

項目	仕様
寸法	50 (W)×248(L)×250(H)mm
質量	4.6 kg
移動	前後進,左右旋回
走行速度	0.14 m/s(最大)
吸引流量	0.065 m <sup>3</sup> /min(最大)

装置では,ほぼ同じ時間で100%の範囲を清掃できる。

## 5 適用状況と今後の展望

### 5.1 適用実績

以上述べた各ビークルの適用実績を図6に示す。

### 5.2 適用先の拡大

これらのビークルは,今後,炉内構造物の点検だけでなく,以下のような分野への適用先の拡大が期待できる。いずれも狭い空間への適用が可能という特長を活用したもので,これまで寸法上の制約から実施できなかった部位に対して有

ビークル	適用部位(回数)
フラットビークル	・シュラウドVT(1)
水中ビークル	・シュラウドサポートVT(5) ・貯水タンクVT(3)
走行式ビークル	・シュラウドサポートプレート上清掃VT(9)

図6. 各種ビークルの適用実績 - フラットビークル,水中ビークル,走行式ビークルの適用実績を示す。  
Application of ROVs

効なアクセス手段となる。

- (1) プールライニング点検
- (2) 炉内構造物の溶接部に対するファイバレーザピーニング
- (3) プール底部の清掃及び点検

## 6 あとがき

ここでは,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ビークルの構成及び機能,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,更に所要時間を短縮するための改良や適用方法を検討する。これらのビークルを用いた炉内作業の高度化が,プラント稼働率の向上におおいに貢献すると考える。

## 文献

- (1) 木村元比古,ほか. 原子炉用水中目視検査装置の開発. 日本原子力学会誌. 38,10,1996,p.826-823.
- (2) 立石瑞生,ほか. 経年プラントに対する予防保全の取組み. 東芝レビュー. 48,11,1993,p.821-824.
- (3) Kimura, M.,et al. "Compact Visual Inspection Submersible for NPP's". Proceedings of ANS Topical Meeting on Robotics and Remote Systems. Monterey, U.S., 1995-02, p.25-31.
- (4) 島村光明,ほか. "炉内狭隘部移動装置の開発". 日本原子力学会大会予稿集. 2001, p.307.
- (5) Shimamura, M., et al. "Development of Vacuum Cleaning Device in BWR Vessels". Proceedings of ANS Topical Meeting on Robotics and Remote Systems. Augusta, U.S., 1997-04, p.794-801.
- (6) 島村光明,ほか. "炉内洗浄装置の開発". 日本原子力学会年会予稿集. 1996, p.185.
- (7) 島村光明,ほか. "炉内洗浄装置の開発(第2報)". 日本原子力学会年会予稿集. 1997, p.375.
- (8) Kimura, M., et al. "Underwater Remote Handling Equipment for Reactor Internals Maintenance". Proceedings of 10<sup>th</sup> International Conference on Nuclear Engineering. Arlington, U.S., 2002-04. (CD-ROM)



湯口 康弘 YUGUCHI Yasuhiro  
電力システム社 礫子エンジニアリングセンター 原子力機器設計部主務。遠隔駆動機器の開発及び炉内点検計画のエンジニアリング業務に従事。日本原子力学会,日本ロボット学会会員。  
Isogo Nuclear Engineering Center



島村 光明 SHIMAMURA Mitsuaki  
電力システム社 電力・産業システム技術開発センター プラント保全技術担当主務。メカトロニクス機器,自動機器の研究・開発に従事。日本機械学会,日本原子力学会,日本ロボット学会会員。  
Power and Industrial Systems Research and Development Center



木村 元比古 KIMURA Motohiko  
電力システム社 電力・産業システム技術開発センター プラント保全技術担当主査。メカトロニクス機器,自動機器の研究・開発に従事。日本機械学会,日本原子力学会,日本ロボット学会会員。  
Power and Industrial Systems Research and Development Center