技術報告

286. 原子炉用水中目視点検装置の開発

木村元比古*, 石川正朗**,
岡野秀晴*, 尾崎 脩*

Visual Inspection Submersible for Nuclear Power Plant

By Motohiko KIMURA, Masaaki ISHIKAWA,
Hideharu OKANO and Osamu OZAKI

Remote Operated Vehicle (ROV) is currently applied for visual inspection inside the reactor pressure vessel (RPV). To inspect wide area of the RPV and structures, compactness is required for the inspection vehicle as well as good driverability.

This report describes the development of visual inspection submersible which was manufactured based on the gap between structures inside RPV and applied with the support system. It was proved to be very efficient measure to make the inspection period short. Also, radiation tolerant camera and manipulator for the vehicle has been developed.

KEYWORDS : *visual inspection, remote handling equipment, remote operated vehicle, robots, underwater, television cameras, in-service inspection, pressure vessels, reactor internal structures, nuclear power plants, reactor maintenance*

I. ま え が き

原子力発電所では法律に基づいて、1年に1回定期検査が行われており、安全性、信頼性が確保されている。定期検査ではポンプやバルブ等の機器の分解点検のほか、原子炉圧力容器の溶接線や構造物の健全性の検査も行われている。この作業は、作業員の放射線防護の観点から、圧力容器内は満水状態で行われる。検査は主に、水中で使用可能な専用のテレビカメラを使用した目視点検と、超音波の反射を利用した体積検査(傷検出)である。原子炉の健全性の確保と稼働率の維持向上のために、検査の質の向上と時間短縮が望まれている。

II. 開発のニーズ

沸騰水型原子炉(BWR: Boiling Water Reactor)の炉内目視点検は従来、原子炉上部に設置されている燃料交換機から、作業員が水中テレビカメラと照明具を目標位置まで吊り降ろして行っている(Fig. 1)。BWRの場合には通常、定検時に取り外すドライヤ、セパレータや燃料の一部のほかにも、取り外すことのない上部格子板、炉心支持板、ジェットポンプ、燃料支持金具、制御棒案内管その他の炉内構造物が残っているため、通過断面積が非常に狭い部分や上部から見通せない部分がある。そのため検査を行うのに、検査対象部位の炉内の機器を取り外したり、特別な装置を使用する必要があり、検査前の準備作業に時間が掛かるという問題があった。

そこで、炉内のあらゆる部位に容易に移動して、目視点検の可能な小型の水中目視点検装置の開発を行った。

III. 開発の目的と課題

テレビカメラを搭載し、水中を移動しながら検査や作業を行う装置は、遠隔操縦ビークル(ROV: Remote Operated Vehicle)として主に海洋開発用に使われている⁽¹⁾。海洋向けのROVは潮流のある海中を高速に移動可能な推

Fig. 1 Schematic view of BWR structure and size

* (株)東芝 原子力技術研究所(Toshiba Corp.)

** (株)東芝 原子力第一システム設計部(Toshiba Corp.)

(1996年 4月1日 受理)

進力もち、深海まで潜れる潜航深度が重要視されるが、大きさの制限がないため、小型のものでも大きさが数10 cm程度、質量は数10 kgと原子炉内に適用するには大型である。しかも狭い場所へ移動する運動性能、検査としての目視性能を満足するものではなかった。また環境条件として、原子炉内の放射線環境を考慮した設計はされていない。このため原子力用として小型の水中目視点検装置を開発してきた。開発の課題としては、装置の小型化、運動性能の確保、環境条件への対応および信頼性の確保である。

またROVのみならず、原子炉環境を考慮した実機適用のためのシステム化が必要である。

開発は、Fig. 2に示すように、適用範囲別に3段階に分けて行ってきた。ステップ1は炉上部、ステップ2は炉心部まで適用可能である。ステップ3では炉下部およびアニュラス部まで、すなわち炉内全域に適用可能な装置とした。Table 1に各ステップの設計仕様を、Photos. 1(a)～(c)にそれぞれのステップで試作した水中点検ロボットを示す^{(2)～(4)}。

IV. 課題解決への取組み

1. 小型化の検討

一般的にROVは水中で浮きも沈きもしない中性浮力とし、何らかの方法で力を与えて移動するのが普通である。

Fig. 2 Division of BWR

(a) Step 1 ($\phi 280 \text{ mm} \times 480 \text{ mm}$)

(b) Step 2 ($\phi 225 \text{ mm} \times 480 \text{ mm}$)

(c) Step 3 ($\phi 150 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$)

Photo. 1 Underwater vehicle

Table 1 Design specification

Items	Step 1	Step 2	Step 3
Applied area	Upper Core	Up to core	Up to bottom, annulus (anywhere)
Size	$\phi 280 \text{ mm} \times 470 \text{ mm}$	$\phi 225 \text{ mm} \times 480 \text{ mm}$	$\phi 150 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$
Mass	11 kg	13 kg	1.7 kg
Movement	Up, down, forward, backward, slide, rotation	Forward, backward, slide, pitch	Up, down, forward, backward, rotation
Attitude change	Preset (vertical or horizontal)	Change with pitch	Remote control (balance weight)

このため水中での浮力 F と重力 W を釣り合わせなければならない。浮力は水の排除容積で決定されるため、本体を小型化すると搭載可能な質量が減るので、部品の軽量化や削減を行う必要がある。そのために運動性能や機能の低下を招くという矛盾が生じるので、最適な設計を行う必要がある。さらに安定的に運動するためには、目標とする水平姿勢のときに浮心と重心が鉛直線上にあり、かつ浮心が上になければならない(Fig. 3)。したがって部品の配置による質量バランスにも配慮が必要となる。

(1) 本体構造

ステップ1では既存の部品と浮力材を組み合わせ、配置の工夫により小型化を図った。ステップ2では水中ビークルを水密構造とし、排除容積を増加することにより浮力材を削減し、ステップ3では、形状を直径150mmの球形とし体積を有効に活用する等の方策により、小型軽量化を達成した(Table 2)。外形寸法は幅150mm×高さ170mm×長さ200mmであり、炉下部の制御棒駆動機構用のハウジング間(Fig. 1)を移動し検査が可能な大きさである。

Fig. 3 Balance of underwater vehicle

Table 2 Measure for compactness

	Step 1	Step 2	Step 3
Body	Buoyant material Partly waterproof vessel	○Cylindrical Waterproof vessel	◎Spherical Waterproof vessel
Materials	○Aluminum Iron bearing	○Aluminum Iron bearing	◎Polycarbonate ◎Plastic bearing
TV camera	CCD camera 300,000 pixcells Separate CCU Type	CCD camera 380,000 pixcells All in one type (0.53 kg)	◎CCD camera 380,000 pixcells All in one type (0.1 kg)

○Effective for compactness

◎Remarkably effective for compactness

Step 1 : Upper core, Step 2 : Up to core, Step 3 : Up to bottom and annulus

(2) 構成材料

本体の主要構成材料はステップ1, 2では主にAlを用いたが, ステップ3においては熱可塑性合成樹脂であるポリカーボネートを主とし, Alを併用した。また軸受やプロペラにもプラスチックを使用するなどして小型軽量化を進めた。

(3) テレビカメラ

テレビカメラには小型化の観点から, 撮像管方式よりは耐放射線性能は劣るが, 要求目視性能を満足するCCD (Charge Coupled Device)カメラを採用している。ステップ1では, CCDカメラのコントロールユニット(CCU)は, 質量, 寸法の点で水中ビークル本体には搭載せずに, 制御装置とカメラの間は専用ケーブルで連結する構成とした。ステップ2から民生用のカメラ技術の進歩に合わせてCCU一体のカメラを採用し, 水中ビークルに搭載した。CCUを搭載することにより, ケーブル芯数を削減でき, 結果的に運動性能の向上に貢献している。ステップ2では画素数30万で質量0.53kgのカメラを使用した。ステップ3では画素数38万で質量約0.1kgまで性能向上ならびに小型軽量化している。

ステップ1, 3はカメラ自身のチルト(鉛直面内の回転)機構を備えている。ステップ2ではビークル本体のピッチング(上下の首振り)でこの機能を代替している。なお炉内は照明が不十分であるので, カメラに必要な照度を得るためハロゲンランプを搭載した。

(4) ケーブル

水中で信号および電源を無線で送ることは, 原子炉内のような複雑な構造を考慮すると現状では困難であるのでケーブルを使用するが, ケーブルが水中ビークルの動作を妨げないようにする必要がある。そのためステップ1ではケーブルの比重は1(浮きも沈みもしない: 中性浮力)を目指し, 芯線に軽量のAlを, ケーブル外皮にプラスチックを使用した。しかし柔軟性に問題があったため, ステップ2では通常のケーブルに浮きをつけることで見掛けの比重を1とした。外径13mmで芯数12対のケーブルに, 1mあたり0.19kgの自重を補償するために約1.5mおきに浮きを取り付けて中性浮力とした。

ステップ3では本体の小型化により必要とする電力が大幅に低減し, 細線化の見通しが立ったため再び中性浮力化を図り, 芯線間に浮力材を組み込んだφ7mm, 17芯柔軟中性浮力ケーブルを開発した(Fig. 4)。

2. 推進機の検討

水中を移動するためには推進機が必要である。推進機には制御の容易なモータとプロペラの組合せを採用している。推進機は移動に十分な推力を持つ必要があるが, 流体中を速度 v で移動するのに必要な推力は次式で表される。

Fig. 4 Cross section of buoyant cable (17 wires, φ 7 mm)

$$F = \frac{1}{2} C_d v^2 S$$

ここで, F : 推力(N)

C_d : 抵抗係数

v : 速度(m/s)

S : 水中ビークルの断面積(m²)

ステップ3の場合の速度と必要推力の関係をFig. 5に示す。推進機の試作を行い推力を測定した結果, ピッチ角30°, 6枚羽のプロペラで静止流水中で最大推力1.2Nであった。形状やケーブルの影響を考慮しても仕様値0.17 m/sに対して十分な値であり, 本推進機を実機に採用した。

またモータは気中, プロペラは水中であるのでその間にシールが必要であるが, 水中ビークルにとって漏洩は致命的になるので, シールの信頼性が求められる。ステップ1では回転軸のシールにテフロンシールを用いたが, 回転数が1,000rpm以上と高いこともあり, ステップ2以降は漏洩の心配のないマグネットカップリングを採用し, シールレス構造とした。Fig. 6に円筒磁石を2個使用したマグネットカップリングの構造を示す。ステップ3では磁力の強いサマリウムコバルト磁石を採用し軽量化を図った。モータトルクを伝達するために必要なマグネットの強さは以下の式により表される⁽⁵⁾。

$$\tau = \frac{p \nu_g}{2 \mu_0} B_s B_r, \quad \text{ただし} \quad \nu_g = 2 \pi r_g l_g l_i$$

ここで, τ : トルク (Nm)

μ_0 : 透磁率 (H/m)

B_s, B_r : それぞれの磁石の磁束密度 (Wb/m²)

p : 磁極数

r_g : ギャップの平均半径 (m)

l_g : ギャップの隙間 (m)

l_i : 磁石の長さ (m)

である。ここで,

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}, \quad B = 0.3, \quad p = 2,$$

$$r_g = 9.3 \times 10^{-3}, \quad l_g = 1.4 \times 10^{-3},$$

$$\tau = 0.0176$$

として計算し, $l_i = 3.0 \times 10^{-3}$ とした。

Fig. 5 Relation between thrust force and velocity

Fig. 6 Magnet coupling (Illustration)

3. 運動性能

(1) ステップ1

複雑な構造物のない炉上部での使用を目的として開発した。このため水中で水平姿勢を保つ中性浮力の水中ビークルを、前後(2台)、左右(2台)、上下(1台)に貫通する5個の推進機で、Fig. 7に示すように、前後、左右、旋回、浮上潜航の動作の組合せで目標位置まで移動する方式とし

た。ケーブルの影響が大きいため詳細な検査が必要な場合は、本体下部に設置した伸縮する支持棒を検査対象物に突っ張り、水中ビークルの前進力で固定・停止する方法を採用した。

その結果、運動性能、停止精度、検査性能など基本的には使用可能であることがわかった。

(2) ステップ2

適用範囲を広げるためにはさらに小型化し、姿勢の変更を水中で可能にすることが必要である。炉心部まで点検することを目的としたステップ2では直径を225mmと小型化し、浮力を効率的に得るために水中ビークルを密閉構造とし、部品をその中に配置する構造とした。上部格子板を通過する必要があるため、後部に正3角形に配置した3個の推進機の回転方向を制御することにより前進、後進、旋回および本体の首振り(ピッチング)機能を持たせた。さらに水中ビークル胴部を貫通する推進機による横移動を加えて4個の推進機による3次元移動を達成した。この機能を使用して鉛直下方を向くことが可能となり、上部格子板の潜り抜けが実証され、炉心部の点検まで可能となった。

(3) ステップ3

炉底部まで侵入し点検できることを目的とした。さらに狭隘な箇所を通過する必要があるため、ピッチング動作では不十分なため垂直方向2個、水平方向2個計4個の推進機による前進、後進、浮上、潜航、旋回移動方式とした。さらに対象箇所毎に点検しやすい姿勢をとるために、最外部に水中ビークルの姿勢を変更するためのバランスを設けており、上向き姿勢から下向き姿勢まで自由に変更可能とした。Fig. 3に示すように、X, Y座標系において、浮心の位置を(X_f , Y_f)、バランスの重心を(X_b , Y_b)、バランスを除く水

Fig. 7 Underwater vehicle movement

中ビークルの重心を (X_v, Y_v) 、全体の質量を m 、バランスの質量を m_b 、バランスを除く水中ビークルの質量を m_v とすると全体の重心 (X_g, Y_g) は

$$X_g = \frac{m_v X_v + m_b X_b}{m}, \quad Y_g = \frac{m_v Y_v + m_b Y_b}{m}$$

と表わされる。

水中ビークル本体の姿勢は

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{X_f - X_g}{Y_f - Y_g} \right)$$

となり、バランスの回転により変化する。

Fig. 8 に、 $(X_f, Y_f) = (0, 0)$ 、 $(X_v, Y_v) = (2, 0)$ とした時のバランスの回転角度に対する本体の姿勢角度の変化を示す。バランスの回転により本体の姿勢ならびにカメラの視線を 180° 制御可能であり、カメラ自身の 180° の回転機能と合わせて、様々な姿勢での点検が可能になった。

Fig. 8 Relation between balance weight and vehicle

4. 環境条件への対応

原子炉で使用する ROV の環境条件で、まず考慮しなければならない項目は放射線に対する影響である。水圧については水深がせいぜい 30 m であり、特に技術的には問題ないが、沈没した場合の影響が大きいので漏洩に対する信頼性が要求される。一方、水質については、純水を使用しているためロボットにとって、一般の条件より有利であるといえる。ただしクラッドと呼ばれる錆が沈積していることがあるため、舞上がりによる視界不良および ROV 本体やケーブルへの付着に注意する必要がある。

耐放射線に関しては、放射線劣化を起さない材料部品を選定するのはもちろんであるが、被ばくを最小限にする 3 原則(時間を短く、遮蔽する、距離をとる)に則って、設計製作、運用を行うこととした。放射線的に一番弱いのは半導体であるので、できる限り半導体を使用しない方がよいが、小型化の観点から、テレビカメラは半導体である CCD を選定した。製品によって異なるが、CCD カメラの耐放射線性能は積算で数 100 Gy といわれており、劣化時点で交換することで対処する。Photo. 2 に、ステップ 3 で使用した CCD カメラの照射前と 200 Gy 照射後の映像を示す。特に劣化の兆候は現れておらず、200 Gy まで十分使用可能であった。

一方、放射線線量率の高い炉心部の検査の場合には、CCD カメラでは映像にノイズがのり、検査が行えないため撮像管式のカメラが用いられる。しかしながら撮像管式のカメラの場合には、ケーブル本数が多くケーブルの剛性が高くなるため、水中ビークルに搭載すると水中ビークルの運動が制約されてしまうという欠点があった。このため柔軟中性浮力ケーブルを採用した水中ビークル搭載用の耐放射線カメラを開発した。Fig. 9 に、このカメラを搭載した水中ビークルを示す。

Image before radiation test

Image after radiation test (200 Gy)

Photo. 2 Radiation test result (CCD camera)
(No significant change)

Fig. 9 Underwater vehicle with radiation tolerant camera

V. 実機適用への方策

実際の原子炉へ適用する場合には、Fig. 2 に示す原子炉の上部など広くかつ見通しのよい部位については水中ビークルの単体での適用が適切であるが、炉下部のような複雑な環境下においては、ケーブルの処理、万一の場合の回収性を考慮する必要がある。

Fig. 10 Support system for bottom area

そこで炉内に支援装置を設け、そこから発進し移動する方法を採用した。支援装置の例をFig. 10に示す。この装置はBWR炉下部のCRDハウジングの林立した部位に適用するための支援装置で、①水中ビークルを短時間に炉下部まで移動する、②ケーブルの送出し巻戻しを行う処理装置により水中ビークルの運動を補助する、③故障時の回収を容易にする、等を目的としている。

制御棒案内管と相似の収納容器に、水中ビークルの保持機構、収納監視用テレビカメラおよび照明、ケーブルを挟み込んで回転するプーリとモータで構成したケーブル処理機構を設けた。この装置はすでに実際の原子炉炉底部の点検に使用され、点検時間の大幅な短縮が達成された。

Fig. 10は炉底部を対象とした支援装置であるが、他の

Fig. 11 Underwater vehicle with small manipulator

適用場所についても評価を行い、最適な支援システムを構築して使用する。さらに、点検だけでなく異物の回収やレーザを使用した作業工具を搭載することにより、応用範囲を広げることも試みている。Fig.11に軽作業用として開発した小型マニピュレータを搭載した例を示す。

なおこれらの装置は原子力のみでなく、一般のタンクや配管内の点検等にも広く適用が可能な装置である。

VI. ま と め

原子炉内で使用する目的で、テレビカメラを搭載し水中を自由に移動できる水中目視点検装置の開発を段階的に進め、炉内全域をカバーすることのできる、外形寸法幅150mm×高さ170mm×長さ200mmの装置を完成した。支援装置と組み合わせて実際の原子炉における点検作業も行い、検査時間の大幅な短縮に寄与することを実証した。今後もさらに検査から作業装置への展開、自動移動制御方法の開発やさらなる小型化等、高機能化を目指して開発を進

めていく所存である。

ここにご支援を頂いた電力会社の関係者の方々に感謝いたします。

— 参 考 文 献 —

- (1) 山本喜多男：水中テレビロボット，ロボット誌，13〔6〕，(1995)。
- (2) 木村元比古，他：原子力用自動診断ロボット，溶接誌，59〔3〕，(1990)。
- (3) Kimura, M., *et al.* : Compact visual inspection submersible for NPP, ANS Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, Moterey CA, Feb., 1995.
- (4) Kimura, M., *et al.* : Visual inspection submersible for nuclear power plant, ASM 13th Int. Conf. on NDE in the Nuclear Pressure Vessel Industries, Kyoto, May, 1995.
- (5) 山川和郎，他：“永久磁石磁気回路の設計と応用”，総合電子出版社，(1979)。
- (6) 大阪ニュークリアサイエンス協会：耐放射線性機器・材料データベース研究委員会調査報告書，(1989)。

科学技術者100万人集会

◇第6回「基礎研究の振興と科学技術教育」◇

シンポジウム

—21世紀へ向かっての人材育成—

主 催 日本工学会，日本工学教育協会，協 賛 日本工学会加盟91学協会

会 期 1996年12月20日(金) 13:30～17:00

会 場 野口英世記念会館(東京都新宿区大京町)

プログラム

開会の辞 日本工学会会長 石川六郎

基調講演 国家目標と科学技術基本計画

—科学技術創造立国を目指して

科学技術会議議長 大澤弘之

講演(1) 科学技術創造立国の初等中等教育

—生きる力と創造への教課の在り方

日本学術会議会員・科学技術教育研連委員長 坂元 昂

報 告 技術資格の国際調整への動き

—WTO, APEC等をめぐる各国事情

日本工学教育協会専務理事 原田耕作

講演(2) 経済大競争時代の産・学協力の在り方

—知識の創造と技術者の育成

経団連副会長・経済政策委員長 青井舒一

講演(3) 歴史的転換期に対応した大学改革

—国民のメッセージとしての国費投入に応える

日本工学教育協会会長・東大総長 吉川弘之

閉会の辞

日本工学会副会長 三井恒夫

懇親会(17:30～19:30) 野口英世記念会館(会費8,000円)

参加申込 往復ハガキに氏名・勤務先・同住所・同電話番号・所属学協会名・会員番号・懇親会参加の有無を明記した上，返信ハガキ表に通信先住所・氏名を必ずご記入下さい。(FAXでのお申込みは受け付けません)

申込締切 12月10日(火) 必着

参加費 2,000円

申込・問合せ先 (〒107)東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3階
(株)日本工学会 (TEL 03-3475-4621; FAX 03-3403-1738)

日本保健物理学会

円卓討議「放射線生物影響における閾値無しの直線仮説を考える」

会 期 1996年11月27日(水) 13:30～16:55

会 場 日本電機工業会館JEMA ホール(首相官邸と日商岩井の間)
(東京都千代田区永田町)

プログラム

1. 直線仮説に関する問題提起の現状 (放医研)小林定喜
2. 疫学に基づくリスク評価の立場から (放影研)馬淵清彦
3. 最近の放射線生物影響研究から (電中研)田ノ岡 宏
4. 直線仮説の放射線防護上の意味あい (東大)小佐古敏荘
5. 総合討論 (コメンテータ)松平寛通, 草間朋子, 丹羽太貫

参加費 1,500円(保物会員1,000円)

連絡先 藤元憲三(放医研)(TEL 043-251-6089)

福塚直也(日立)(TEL 03-5295-5127)