

過酷環境での調査に挑む 遠隔アクセス技術

水中遊泳型遠隔操縦ロボット

福島第一原子力発電所の確実な廃炉に向けた原子炉周辺の状況把握を目指し、さまざまな調査および技術開発が進められている。水中環境にフォーカスし、人が近づけない過酷な環境でのアクセスを可能とする水中遊泳型の遠隔操縦ロボットシステムについて紹介する。

株式会社 IHI
資源・エネルギー・環境事業領域 原子力 SBU
除染廃炉・原燃技術部 森垣 裕治

技術開発本部 総合開発センター
機械技術開発部 高田 昌憲



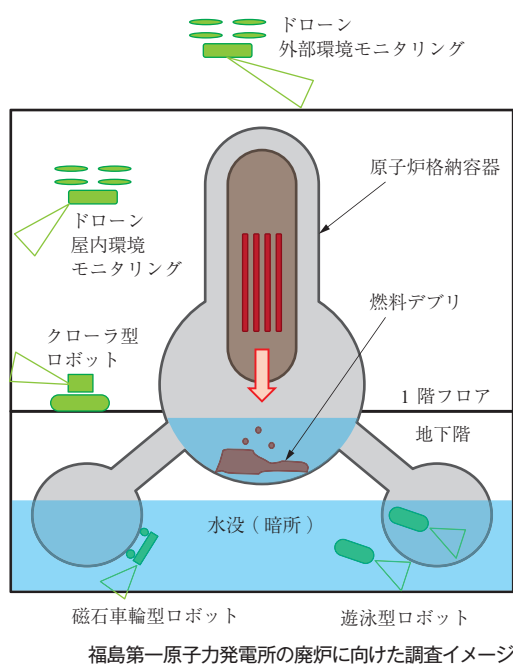
水中遊泳型遠隔操縦ロボット

原子力発電所の廃炉に向けた取り組み

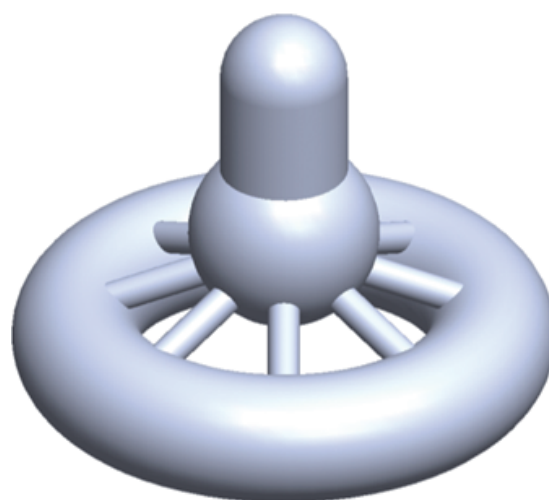
福島第一原子力発電所の廃炉に向けた取り組みは、政府が策定した「東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」に基づいて実施されている。重要な課題の一つとして汚染水対策があり、汚染水中の放射性物質を取り除く処理および貯蔵エリアの確保が現在

も継続して実施されている。最終的には、原子炉圧力容器内に残存、または、原子炉格納容器内に一部溶け落ちているとされる燃料デブリの取り出しを実施しなければならない。これらの諸問題の対応には、中長期的にわたる取り組みが必要であり、調査および技術開発が進められている。

燃料デブリの取り出しや汚染水の流出防止を確実に進めるためには、原子炉格納容器内とその周辺の状況



福島第一原子力発電所の廃炉に向けた調査イメージ



原子炉格納容器

を正確に把握しておく必要がある。徐々にその状況が解明されつつあるが、本格的な作業に向けては、原子炉格納容器の損傷や燃料デブリの状態をカメラで確認し、放射線分布を計測するなどの状況把握が必要とされている。これらの作業の進行を妨げる最大の要因は、燃料デブリなどから放出される有害な放射線である。原子炉格納容器の内部は、場所によって数 Sv/h ～ 数十 Sv/h の非常に高い放射線環境のため、人はもとより電子部品でも数十分から数時間で壊れてしまう環境である。また、無数の配管、各種設備、水没環境も燃料デブリまでのアクセス性において大きな制約となっている。

このような、人が容易に立ち入ることができない過酷な環境では、遠隔操縦で調査ができるロボットの活用が極めて有効である。廃炉に向けた調査作業では、これまでもさまざまな遠隔操縦ロボットが投入されてきた。今後、燃料デブリの取り出しにはさらに高度なロボット技術が必要になる。

燃料の溶け出しが懸念される原子炉格納容器の底部は水がたまった環境にある。また、冷却水配管の損傷部からの漏えい、および建屋外部からの部分的な地下水の流入などにより、事故以降、建屋の地下階も水に浸かった状態となっている。このような環境にアクセスする手段として、水中遊泳型の遠隔操縦ロボットは有力である。

水中遊泳型の遠隔操縦ロボット

遠隔操縦で水中を遊泳するロボットは、一般的に ROV (Remotely Operated Vehicle) と呼ばれる。

遊泳環境は、濁水で見通しがきかないことが予想され、カメラ映像に頼らず操縦する必要がある。しかし、ROV の移動速度や重力方向といった数値情報だけでは、ROV の動作を「直感的に感じる」ことができず、操縦は困難である。このような状態では、目的地がたとえ数 m 先であっても、僅かな操縦感覚のズレで到達困難になる。「方向感覚」は遠隔操縦では特に重要な情報である。

一般的な海や河川で ROV を遠隔操縦する場合においても、ROV の「位置」と「方位」を地図上に表示する仕組みが必要となる。位置情報は GPS を利用して取得するが、GPS の電波は水中に届かない。そのため、ROV を運用する母船などに GPS を搭載し、母船と ROV の相対位置関係を音響センサーで取得することで位置を把握する。また、ROV の方位（向き）は、ROV に地磁気センサーを搭載することで把握可能である。

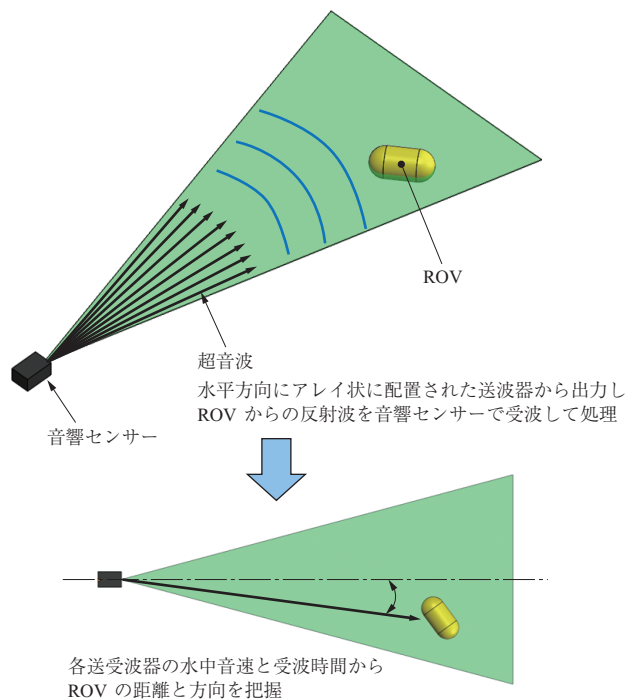
一方、IHI が開発した ROV が挑む環境は、鉄筋コンクリートで囲まれた建屋内であるため、GPS も地磁気センサーも使用できない。また、位置把握に用いられる一般的な音響センサーは、音響的に反射が少ない

広い海の中で数百 m オーダーの広範囲に届くよう設計されている。範囲が限られた鋼構造物内では、音波が減衰せずに多重反射してしまい、使用不可能となる可能性が高い。

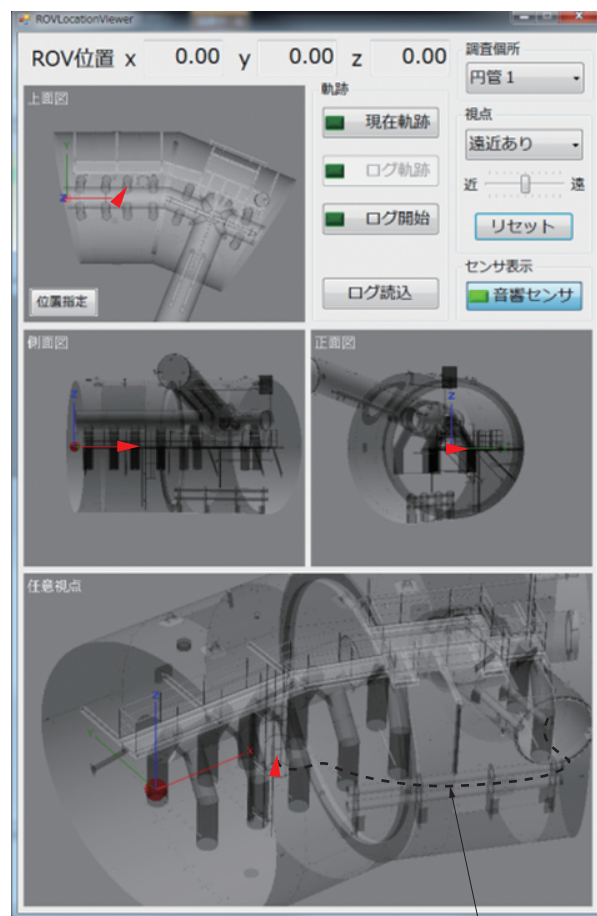
音波は、低周波であるほど水中で減衰しにくく遠方まで信号が届くが、分解能が良くない。これに対し、高周波帯の音波は到達距離が短い、分解能は高いという特性がある。コンクリートや鋼構造物に囲まれた「建屋内」という空間では、前者は音波がいつまでも減衰せずに反射を繰り返す、残響成分がノイズになってしまうという欠点があるため、数百 kHz ~ 数 MHz の高周波帯の使用が適している。加えて、高周波は波長が短いので距離情報の測定において分解能が高いという利点があり、位置精度の向上にも寄与する。

本システムでは、1 MHz 以上の高周波数帯の音響センサーを採用し、既知の場所に位置の基準局として配置した。音響センサーは、水平方向にアレイ状に配置された複数の超音波送受波器で構成されており、音波を送信してから ROV に反射して受波器に到達するまでの時間と、水中での音速の関係から音響センサーと ROV の距離情報を取得する。加えて、ROV から反射した音波が、アレイ状に配置されたそれぞれの受波器に到達する微小な時間差から、基準局からみた ROV の方向（角度）を推定する。なお、遊泳環境には配管などの既設構造物（ROV にとっては障害物）があり、ROV と障害物を区別する必要がある。これは、ROV のみが「動体」であることを利用し、システム上で区別した。また、ROV および音響センサーは、それぞれ深度センサーを搭載している。音響センサーで取得できる情報は、二次元平面空間の情報であるため、深度情報を追加することにより三次元的な位置把握を可能とした。

方位情報（向きの情報）は、ROV に搭載したジャイロセンサーの角速度値を積分して取得する。ただし、長時間の運用ではセンサー情報の誤差が蓄積し、方位の精度が悪くなるため、対策として蓄積された誤差のリセット機能を設けた。これは例えば、ROV に前進指令を出しているにも関わらず、音響センサー情報からのイメージでは正面からずれた方角に移動していることで判別することができる。音響センサーの移動方向と、積分した計算上の方位が一致するように補正することで、精度を担保した。



音響センサーによる自己位置の把握



自己位置・方位の表示例（操縦画面）

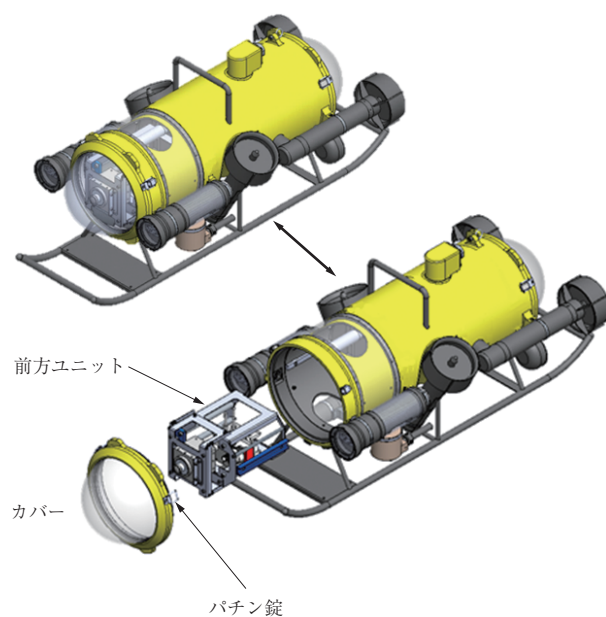
これまでの技術開発で、上述の自己位置・方位技術を具体的な操縦システムとして構築した. ROV の位置と方位を、既知情報である遊泳環境の 3D モデル上に表示することにより、操縦者はカメラ情報に全く頼ることなく、「直観的に感じる」ことで ROV を目的地まで操縦することが可能である.

放射線環境への対応

高放射線環境下であるため、カメラなどの電子部品には耐放射線性が要求される. 放射線の一種であるガンマ線は透過率が高く、遮蔽するには鉄や鉛といった重たい金属で周囲を囲う必要があるが、重い金属による対策は運動性を著しく損ない、得策ではない. そこで、電子部品を ROV 本体から切り離す、もしくは定期的に交換し、消耗品として運用する方法が考えられる. しかし、一度放射性物質に汚染した機器は、洗浄を行ったとしても完全に放射性物質を除去することは難しく、汚染拡散防止の観点から、管理されたエリア外に運び出すことは困難であり、作業性の良くない環境での交換作業が予想される. さらに、作業員への被ばく低減の観点からも交換作業性の向上（短時間化）が要求される.

高い放射線環境への対策として、放射線ノイズの影響を受けやすい電子部品は、できるだけ ROV 本体に搭載しない設計方針とした. そのため、ROV 搭載機器には個別に電気線や信号線をつなぐ必要があり、操縦側（制御装置）と ROV 本体をつなぐ有線ケーブルが太くなるという欠点はあるが、ケーブルの比重を水と同程度にして中性浮力化することで、操縦への影響を最小限にした.

もう一つの対策として、メンテナンス性の効率化を行った. ROV 本体に搭載する電子部品は一定以上の耐放射線性を有するものを選定したうえで、定期的に交換することを前提とし、専用の工具などを用いずに容易に部品交換できる構造とした. 具体的には、交換対象の電子部品を、前方ユニット、後方ユニット、下方ユニットの三つにモジュール化し、ユニット単位で交換する. 例えば前方ユニットの場合、ドーム状のカバー（パチン錠で固定）を外して、内部のモジュール本体を抜き差しするだけのワンタッチ交換が可能である.



ユニット交換作業

今後の展開

人が近づくことができない過酷環境へのアクセスに対応した水中遊泳型の小型無人ロボットを開発してきた. これまでの開発では、位置・方位の特定を中心として、確実に目的地まで行って確実に帰ってくる汎用性の高い遠隔アクセス技術の確立を目指してきた. 一方、今後長く続く廃炉作業で最終的に実施しなければならないことは、「調査」ではなく「作業」である. これまでに前例のない困難な作業となり、部分的な「作業」の結果をフィードバックしながら進めていくことが予想される. 堆積物をサンプリングする、対象物を非破壊検査するといった具体的なニーズに応じた作業の付与を行うことで、ROV の適用範囲を上げていく. さらに、自律制御技術の検討および、水中インフラ設備の保守・メンテナンスなどへの展開を目指していく.

問い合わせ先

株式会社 IHI

資源・エネルギー・環境事業領域

原子力 SBU 除染廃炉・原燃技術部

電話（045）759-2307

<https://www.ihi.co.jp/>