PS-27　福島第一原子力発電所廃炉に向けた燃料デブリ探査技術の開発

海洋リスク評価系　＊鎌田　創，西村　和哉，加藤　道男

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災によって発生した東京電力ホールディングス福島第一原子力発電所（以下 1F）事故は，大量の放射性物質が外部に放出し，人体への健康被害への懸念を大きく残すものとなった．現在も事故炉の一般公衆，環境に対するリスクは大きく，「事故によって発生した放射性物質に起因するリスクを継続的に下げること」を基本方針[1]として，東京電力，国内外の原子力メーカー，研究機関が一丸となって 1F の廃止措置に取り組んでいる．特に，原子炉格納容器(以下 PCV)内に残存する燃料デブリは重大なリスク源であり，その取り出しは喫緊の課題である．原子炉格納容器内の燃料デブリは，冷却水の注入等の暫定措置によって比較的安定な状況にあることがPCV内でのXe-153ガス濃度監視結果からわかっている．しかし，PCV 内が Cs-137，Co-60 など大量の放射性物質で汚染されており，作業者が容易に近づけないため，内部状況を知ることが非常に困難である．加えて，地震や津波による構造材の損傷具合がわからないこともあり，不確定要素が非常に大きいため，中長期的な観点から早急に取り出し作業に取り掛かるべきものである．作業員が燃料デブリを安全に取り出すためには，PCV 内の燃料デブリの分布状況と炉内線量率分布を把握し，それを踏まえた工程を策定することが最も重要である．そこで，本研究では，燃料デブリの分布状況を把握するために，水中音響技術，遠隔操作技術を駆使した探査システムを開発することを目的として，ソナーを用いた炉内の燃料デブリの探査技術並びに，ROV を用いた遠隔操作支援を開発した．

2. 水中デブリ探査手法

2. 1　SBP を適用したデブリ堆積物探査システム

2017 年 3 月に実施された東京電力による 1F の PCV 内部調査において，砂礫の堆積層や岩塊の存在が確認された[2]．そのため，SBP（Sub Bottom Profiler）を用いた堆積物分布測定への適用を検討した．今回の SBP システムの音源には，水中スピーカ（UETAX 社製），反射波の受信にはハイドロホン（アクアサウンド社製 AQH-020 型）を使用した．音源には，ファンクションジェネレータで時間形状を定義しアンプで増幅した矩形波形状のパルス電圧を印加させて音波を発生させた．SBP システムの性能試験を，日本原子力研究開発機構の楢葉遠隔技術開発センターのロボット試験用水槽で実施した．性能試験では，電源に印加する電圧パルスの時間幅をファンクションジェネレータで変化させて，測定パラメータを調査した．試験使用した供試体は，燃料デブリの模擬としてステンレスブロック密度 7.9 g/cm^3，15 cm x 10 cm x 5 cm）を選定した．これは，ステンレスブロックの固有音響インピーダンスが TMI 事故での燃料デブリの固有音響インピーダンスに近い[3]ことを考慮したためである．また，デブリを覆う堆積物の模擬にはコンクリート製レンガ(密度：2.0-2.4 g/cm^3 と推定，20 cm x 10 cm x 6 cm)を用いた．これらを図１のように積み上げて試験で用いる供試体とした．

一般的に周波数が大きくなるにつれて空間解像度は向上する傾向にあることを踏まえ，本研究では，スピーカに印加する矩形パルス電圧のパルス幅の変化が音波の周波数スペクトルへどう影響するかを調べ，得られたパラメータを用いて SBP で供試体の断層図を取得した．パルス波形は，発振周波数を 4 Hz(周期 250 ms)に固定し，パルス幅を 1 ms，0.333 ms，83.3 μs，16.7μs と変化させた．

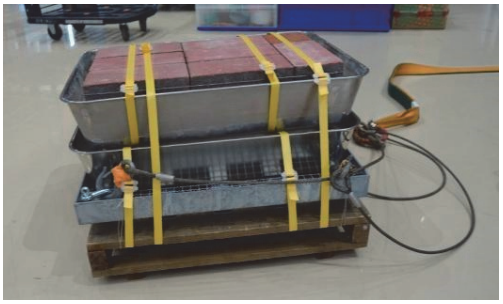

図１　模擬デブリ供試体

2. 2　ROV を適用したデブリ堆積物探査システム

本研究では冠水した燃料デブリにアクセスするために ROV を適用する．そこで，比較的小型で安価な ROV(BlueRobotics 社製 BlueROV2)にセンサー類を搭載した．本研究では，海上技術安全研究所（海技研）が開発するソナー以外にも，共同研究機関である高エネルギー加速器研究機構（高エネ研）と物質・材料研究機構（物材研）が開発する放射線検出器を ROV に搭載するため，それらの複合センサーが連動して動作するための通信・制御回路を併せて製作した．また，原子炉格納容器（PCV）内部調査や燃料デブリ取り出し時に設定される遠隔操作場所（プラットフォーム）は、例として 1F の 1 号機 X-2 ペネトレーション(以下 X-2 ペネ)に近接する低線量エリア（約 0.03 mSv/v～0.1 mSv/h）に設置することが検討されている[4]．PCV 中心から、少なくとも 20 m 以上距離が離れている場所で，広角カメラで撮影する二次元画像を見ながらの ROV の運転操作，複合センサーの計測・制御も可能だが，PCV 内部の落下物，堆積物の状況や燃料デブリの広がり等の情報を正確に把握するためには，三次元画像を見る方が作業の正確性や効率性の観点から効果的である．そこで，VR を利用した遠隔計測技術開発について検討した．

3. 試験結果と検討

3. 1 SBP を適用したデブリ堆積物探査システム

ハイドロホンで受信した波形データをパワースペクトルに変換した．この結果，パルス幅 83.3 μs，パルス幅 16.7μs のそれぞれのスペクトルについて SBP 測定で有効である 20 kHz から 50 kHz の周波数帯の積分値と周波数全体の積分値の比をとったところ，それぞれ 50%と 18%でありパルス幅 83.3 μs の方が SBP に有効な周波数成分（20 kHz 程度）が多く含まれている．図２に示すような断層図を描くためにハイドロホンの受信波を設定した周期（今回は 50 kHz）でサンプリングした．パルス幅については上記の結果を踏まえ，20 kHz 周辺の周波数の割合が最も高くなる 83.3 μs を採用した．これらからコンクリートブロックとステンレスブロック境界面が，明確に識別できていることを示した．

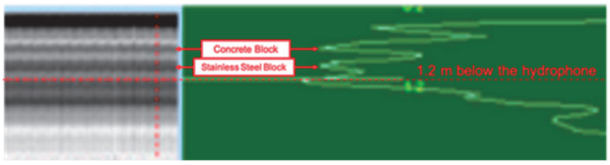

図２ SBP による断層図(左)，SBP 測定で取得した波形（右）

3. 2. ROV を適用したデブリ堆積物探査システム

図３に，本研究で使用した ROV の写真を示す．一連の性能試験から水中における前進，後進，及び左右方向とも操作者の運転通り推進できることを確認した．また，複合センサーの通信・制御も問題なく行えたが，探査中はスラスターによるノイズ発生を避けるためホバリングは行わず，浮力材を用いて ROV を静止状態にする方が効率的であることがわかった．このため ROV 上部に浮力材を搭載し，その個数を変えることで浮力調整することにした．

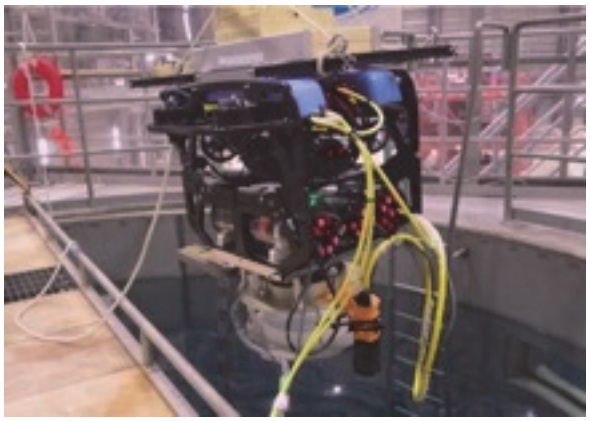

図３ 複合センサーを搭載した ROV

複合センサーによる計測や，構造物，機器，落下物等の障害物を避ける操作には，即時性が要求される．今回は，ROV に搭載した広角カメラで撮影した２次元画像を三次元画像に変換し，即時に対応できるか調べた．今回は，広角カメラで 25 fps で撮影した二次元画像を変換ソフト[6]を用いて三次元変換に要する時間を調べたところ，撮影時間の約 1/4 程度の時間を要した．そのため VR 機器で見ながら同時に遠隔操作を行うことは難しいことがわかった．代わりに，1F の PCV 内部の VR コンテンツデータと測定データを Head Mounted Display (HMD)型の表示装置に投影して操作することとした．この VR コンテンツデータは PCV 内部の構造や機器に関する設計データをもとに，日本原子力研究開発機構で作成されたものを借用できる．また当該 VR コンテンツデータを VR 表示装置で閲覧できるように Unity で整備した．これによって VR コンテンツ視聴時に立体的に描画できる．配置を行う際，原子炉の軸方向の確認，PCV 内部の底の高さ等を調べ，妥当性を確認した．なお，これらの検討の様子は，実際の原子炉情報が含まれていることから安全保障上ここでは公開できないため割愛する．

4. まとめ

ロボット試験水槽で SBP システムの測定パラメータ影響を調べ，SBP システムの断層図の解像度を向上させるための有用な情報を得た．パルス幅については上記の結果を踏まえ，20 kHz 周辺の周波数の割合が最も高くなる 83.3 μs を採用した．これらからコンクリートブロックとステンレスブロック境界面が，明確に識別できていることを示した．

PCV 中心から離れたプラットフォームにおいて、ROV を遠隔計測することを目指して，複合センサーを構成する中性子センサープローブの製作，音響探査装置の小型化検討、及び配置検討を実施した．さらに，ソナーデータの収録と通信、広角カメラ映像の通信，及び中性子センサープローブの模擬信号を用いた動作確認等，一連の試験を通して問題ないことを確認した．また，VR を利用した遠隔計測技術の開発について、HMD 型の表示装置に PCV 内部の VR コンテンツデータを投影して操作する方法を提案した．また，ROV の位置情報と VR コンテンツデータの位置情報から，それらを VR 機器に投影するための連動ソフトを作成し，動作確認できた．

謝辞

本研究は，JAEA 英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業 JPJA18P18072031 の助成を受けたものです．

参考文献

1) 中島健，日本原子力学会誌，Vol.56, No.4, 2014, pp.230-234
2) IRID, TEPCO, 3 号機原子炉格納容器　内部調査について, 2017.
3) Uetsuka, H., Fumihisa, F., Proc. of Three Mile Island Reactor Pressure Vessel Investigation Project Open Forum, 1994, pp.269-280.
4) IRID, TEPCO, 1 号機 X-2 ペネトレーションからの原子炉格納容器内部調査-アクセスルート構築作業について-, 2019.
5) https://www.leawo.org/jp/video-converter/