

光地震計による水槽の微小地震応答の検知と 設置用専用ロボットの開発

Development of micro-earthquake response detection by optical fiber seismic vibrometer with a water tank and a specially designed robotic system

日本原子力研究開発機構 白山工業	西村 昭彦 森下 日出喜	Akihiko Nishimura Hideki Morishita	Member
日本原子力研究開発機構 白山工業	山田 知典 吉田 稔	Tomonori Yamada Minoru Yoshida	
日本原子力研究開発機構	田川 明広	Akihiro Tagawa	Member

Abstract

For decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, installation of an optical fiber seismic vibrometer using a specially designed robotic system was demonstrated. A water tank with 4.5m diameter and 5m depth was used as a demo-plant of tank type critical assembly. Micro-earthquake response of a water tank was detected by the optical fiber seismic vibrometer. Vibration characteristic of the window of the water tank was monitored by laser Doppler interferometer.

Keywords: Remote Sensing, Robot, Seismic Vibrometer,, Decommission, Optical Fiber, Laser Monitoring

1. はじめに

福島第一原子力発電所(1F)の廃止措置の長期化が避けられない。現在まで炉心への注水が継続され、放射線に起因するラジカルの生成等により、核燃料デブリの溶出と半壊した建屋の風化が進行している[1]。廃止措置作業では、RPV や PCV の長期健全性が重要視されているが、高線量なため、構造健全性の調査を行うことも困難である。そのため、遠隔センシング技術とドローン・ロボット等を組み合わせた対応が不可欠である。しかしながら、1F は高線量に加えて注水による水環境や倒壊物による障害のため、ドローン・ロボットの利用に関しても極めて挑戦的な状況にある。

本研究では、櫛葉遠隔技術開発センターに設置された 5m 水深の水槽を活用して、パルスレーザーを光源とした光地震計の試作機のテストを行なった。また、レーザー遠隔計測により水槽の観測窓の水圧による振動特性の変化を捉えた。ここでは、令和元年より開始した研究開発プロジェクトの可能性について述べる。

2. 高線量下の極限環境の模擬試験

1F の炉心内部には 8 年以上も冷却水が注水されている。

炉心内部を 100°C 以下の状態に冷却した後も冷却水注水が継続され、核燃料デブリからは FP とアクチノイドの溶出が続く。即発性の劣化として、 ^{135}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr からの γ 線と β 線によりロボットに搭載される CPU は動作不良を生じる。ガラスは着色失透する。また、遅発性の劣化として、水分子や窒素分子からは硝酸が生成し、スイッチヤリレーなどの接点は腐食が進行する。さらにゴムやプラスチック類の高分子は徐々に結合が切断され変質してゆく。長期的には FP からの多価イオンによりステンレスの不動態膜にも腐食が生じる。このような過酷な 1F 環境での長期にわたる廃止措置の安全性を向上するため、1) 原子炉格納容器の模擬体、2) 小型・耐食構造の光地震計、3) センサ設置用ロボット等、の 3 つの要素技術の開発を経て総合試験を実施した。

原子力機構は、櫛葉遠隔技術開発センターに設置された水中ロボットの操作技術を開発する試験水槽を活用し、タンク型の臨界試験装置の模擬体とした[2]。水槽の直径は 4.5m、水深は最大 5m であり、水槽本体周囲には内部の様子を観察するための窓が設けられている。原子力機構では震災後直ちに光ファイバの活用を着手した。パルスレーザー発光による 1F 現場での元素分析の有用性を唱え、核不拡散の検証技術として開発を進めていた LIBS 技術と伝熱管内壁の検査補修技術として開発した複合型光ファイバ技術の融合を提唱した。現在では 1F に設

置可能な小型可搬の LIBS 装置を完成させている。さらにパルスレーザーによるプラズマ発生を活用して、燃料デブリの微小量サンプリングや遠隔からの加振とレーザードップラー干渉法による表面振動・変位計測技術の応用を進めている[3]。



Fig.1 Demonstration of an Optical Fiber Vibrometer Installation by a Prototype Robot at a Water Tank of the JAEA-NARAHA Center

また白山工業は、位相をシフトさせた光パルスを干渉させることにより、電子部品を用いない精密な光地震計を開発した[4]。光地震計のセンサ部分は光部品のみで構成され、光ファイバで伝送される光パルスの干渉計測により微小な振動を捉える。センサ本体は密閉され、内部の干渉計を構成するミラーなどの精密部品は雰囲気ガスの腐食から保護されている。電子部品を使用していないため高線量下でも誤動作の懸念はない。京都大学・桜島火山観測所の野外実験では広帯域地震計と同程度のノイズレベルであることが確認されている[5]。さらに光地震計を高線量で障害物のある 1F の現場に、無人で設置するためのロボットの開発も行った。

Fig. 1 にロボットによる光ファイバ地震計の設置試験の様子を示す。ロボットの駆動系は前部と後部の両駆動ユニットが可動リンクで結合された対称構造とし、中央の可動リンク部分に昇降エレベーターを設けて地震計のセンサ部分を設置する方式とした。駆動系前部には光ファイバ収納ドラムを搭載し駆動系後部にはロボット駆動系のモータに給電するための電源ケーブルを収納したドラムが搭載されている。この基本設計により障害物の踏破性能が飛躍的に向上するとともに、光ファイバの敷設と電源ケーブル回収を障害物との干渉を最小限に抑えることが可能となった。

3. 試験結果要点

櫛葉遠隔技術開発センターでの試験実施中の 2019 年 4 月 17 日 2 時 34 分に宮城県沖を震源とする M3.8 の微小地震が発生した。この最大震度 1 の微小な地震による水槽の応答を光地震計は捉えた。また深夜、試験棟の空調機等が停止し最も振動ノイズの無い状態での微動も観測している。これらの結果、水槽上部では、水槽基部より 100 倍から 1000 倍以上も振動が増幅されていることや、微動によっても水槽固有の卓越周波数の抽出が可能なが分かっている。

水槽の観測窓は水位により圧力を受けることでその振動特性が変化する。レーザードップラー干渉法による観測窓の表面振動・変位を測定の結果、観測窓は水位の低い場合は調和振動体として減衰振動するが、水位が 5m では長短 2 つの周波数をもつ減衰振動に変化することが判明した。また、ステンレス製の水槽本体も水位変化の圧力に応じて振動特性が変化するという結果が得られた。

4. 1F への適用

今後の 1F の廃止措置計画に対して本試験結果は示唆に富んでいる。半壊した 1F の原子炉建屋は地震に対して建設時の設計耐力が低下した可能性があり、健全性確認のために高線量下の 1F 建屋への地震計の設置が望まれる。

また、今後の廃止措置において炉心への注水の停止とペDESTAL内部の乾燥処理が必要となる。この際に炉内の水位監視としてレーザー遠隔計測が有用となる。

参考文献

- [1]TEPCO Web Site, <http://www.tepco.co.jp/fukushima/review/>
- [2]JAEA-Fukushima Web Site, <https://naraha.jaea.go.jp/>
- [3]A. Nishimura, T. Yamada, et al., 'Collaborative R and D for advanced remote analysis using pulse laser ablation and related technologies', F-06, HOTLAB2017, 第57回ホットラボ・遠隔操作会議, 17-22 Sep, Mito, Japan, 2017. <http://hotlab.sckcen.be/en/Proceedings>
- [4] M. Yoshida, et al., 'Real-time displacement measurement system using phase-shifted optical pulse interferometry: Application to a seismic observation system', Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 55, No. 2, (2016), 022701.
- [5] T. Tsutsui, et al., 'Feasibility Study on a Multi-Channeled Seismometer System with Phase-Shifted Optical Interferometry for Volcanological Observations', Journal of Disaster Research Vol.14 No.4,2019