

主論文の要約

論文題目 光ファイバセンサを用いた光子飛行時間および波長分解分析に基づく放射線分布測定法に関する研究
(Study on radiation distribution sensing method using an optical fiber sensor based on photon time-of-flight and wavelength-resolving analysis)

氏名 寺阪 祐太

論文内容の要約

本論文は、福島第一原子力発電所廃炉作業環境における放射線分布測定への適用を目指した光ファイバを用いた新しい放射線分布測定法の研究についてまとめたものである。

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に起因する津波により、東京電力HD福島第一原子力発電所(1F)から放射性物質が外部環境に大量放出される事故が発生し、1Fサイト内外に深刻な汚染をもたらした。事故を起こした原子炉建屋近傍およびその内部では、事故から10年が経過した現在でも空間線量率が数百 $\mu\text{Sv/h}$ から数 mSv/h の環境が珍しくなく、局所的には数百 mSv/h の環境も残っており、1F廃炉を行う上での大きな障害となっている。このように汚染レベルが非常に高い環境の放射性物質分布・線量率分布を把握することは、作業員の線量低減および効率的な除染計画立案の観点から極めて重要である。これまでサーベイメータやガンマカメラを用いた線量率分布測定・放射線源可視化が1F原子炉建屋内外で多く実施されてきたが、面的な汚染強度評価や原子炉格納容器貫通部等の狭隘空間への適用が困難であること、測定対象がガンマ線放出核種に限られること等、様々な制約が存在する。

本論文ではサーベイメータやガンマカメラがカバーできない測定アプリケーションに適用可能なセンサとして光ファイバに着目し、1F廃炉作業環境への適用のための光ファイバ型放射線検出器について検討した。光ファイバ型放射線検出器は光ファイバ自体を放射線

センサとすることでファイバに沿って「線」状に放射線分布を測定することができること、形状をフレキシブルに変えることが出来ること、センサ次第ではベータ線に対しても感度を有することから、測定面の汚染強度評価・狭隘空間への挿入・純ベータ核種の検知等に適用可能であることが期待される。本論文では 1F 廃炉作業環境の高線量率・狭隘空間等における放射線分布測定という課題解決のため、ファイバ両端への光の到達時間差から放射線位置を決定する飛行時間分析 (TOF) 法の高度化とファイバ片側のみからの信号読み出しにより放射線位置を推定する新方式波長分解分析法の開発の 2 種のアプローチを行った。

本論文は 5 章から構成されている。以下に各章の要旨を示す。

第 1 章：序論

本章では 1F 廃炉作業環境における放射性物質分布測定の必要性を論じ、これまで多くの測定例のあるサーベイメータ及びガンマカメラを用いた線量率分布・放射性物質分布測定法では評価困難な狭隘部の線量率測定や純ベータ核種等の分布測定に光ファイバが適用できる可能性に着目した。光ファイバ型放射線検出器に関する先行研究についてレビューを行い、本研究で検討する一次元光ファイバセンサを高放射線環境に適用するために解決すべき課題について述べた。

第 2 章：小口径光ファイバを用いた飛行時間分析型放射線分布測定法の検討

本章では数 mSv/h～数百 mSv/h の高線量率下において高い位置分解能で測定対象汚染面の放射線強度分布を測定可能な光ファイバセンサの実現を目指し、小口径光ファイバを用いた飛行時間分析型 (TOF 型) 光ファイバセンサについて検討した。その結果、チェレンコフ光の検出に基づく石英光ファイバを用いた場合で線源分布を測定可能であることを本研究で新たに確認し、その位置分解能は 10 m ファイバで約 18 cm と、従来型のプラスチックシンチレーションファイバ (PSF) の 49 cm～108 cm と比較して非常に優れることを明らかにした。さらに、PSF は小口径のファイバほど位置分解能が劣化したのに対し、石英光ファイバは口径に依存せず位置分解能を維持できるという、高線量率環境へ適用する上で有望な特徴を明らかにした。小口径 PSF で位置分解能が劣化する機構について、発光の減衰時定数、ファイバ端へ到達する光子数の簡易モデル計算による見積もり、ファイバ端信号の波高分析結果から説明した。さらに、石英光ファイバの高線量率環境での動作特性をガンマ線照射場での照射試験を通して評価し、小口径の石英光ファイバで偶然同時計数を抑制できること、数百 mSv/h の高線量率環境下でも高い位置分解能で放射線分布測定が可能であること、石英光ファイバが高い放射線耐性を有することを示した。以上のように、本章では石英光ファイバの高位置分解能特性・検出効率・高線量率特性等についての包括的評価を通して本センサが原子炉格納容器内を除く 1F 廃炉作業環境のほぼ全域の線量率範囲をカバーできることを示し、高線量率環境下での汚染強度分布測定に適用する上で十分な性能を有することを確認した。さらに、石英光ファイバが低エネルギーガンマ線に対して感

度を有しないこと・ベータ線に対して感度が高いことから、散乱線が支配的な 1F 廃炉作業環境における汚染強度分布面的測定への有効性および高濃度の純ベータ核種のモニタリングに有効であることが示唆された。

第 3 章：新方式波長分解分析法の開発

本章では光ファイバの片側のみからの信号読み出しにより放射線位置検出が可能なセンサの実現を目指し、光ファイバの片側から波長スペクトルを読み出し、ファイバ内での光減衰量の波長依存性を利用して放射線分布を逆推定する「波長分解分析法」を提案し、放射線位置検出法としての確立を試みた。従来パルス波高分布からエネルギースペクトルを逆推定する際に使用するスペクトルアンフォールディング法を波長スペクトルから放射線分布を逆推定する手法に適用することを提案し、GRG 法に基づく最適化計算をベースとした波長スペクトルアンフォールディング法を新たに考案した。PSF、石英光ファイバ、高感度ポータブル分光器から構成されるプロトタイプ検出器を構築し、UV 光、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ベータ線源、ガンマ線照射場、モックアップデータを用いて放射線位置分布推定精度の検証を行った。その結果、位置推定精度に位置依存性および分布依存性が存在するが基本的な位置推定が可能であること、3 Gy/h の高線量率で放射線分布を逆推定可能であること、片側読み出しによる測定自由度向上により高線量率の測定対象を非放射線環境から遠隔測定可能であることが示された。さらに、位置推定に必要な波長スペクトルの信号対雑音比 (S/N) は約 1500、検出下限線量率は照射範囲 20 cm の条件で約 21 mGy/h と評価された。

第 4 章：波長分解分析法の高度化に向けた検討

本章では第 3 章で提案した波長分解分析法の位置推定精度向上および高感度化に関する検討を行った。位置推定精度向上については異なる発光波長の PSF を直列に接続するハイブリッドセンサを用いることで複雑な線源分布に対して位置推定精度が向上する可能性を示した。高感度化についてはポータブル分光器に代わりバンドパスフィルタとフォトンカウンティングヘッドを用いて分光を行う波長計数計測法により十分な高感度化が達成できることを示し、線源位置推定も可能であることを示した。さらに、高感度化を図った波長計数計測法要素センサを福島県帰還困難区域屋外環境に適用した。100 $\mu\text{Sv/h}$ 以下のホットスポットに対して十分な感度を有することが確認され、ホットスポット位置を大まかに逆推定可能であることを確認した。このことから、本手法が実環境の汚染に対しても放射線位置検出法として適用可能であることが示された。

第 5 章：結論

本章では本研究の結論と今後の展望について述べた。本研究では小口径石英光ファイバを用いた TOF センサおよび新しい原理に基づく片側読み出し式放射線位置検出法の開発を通じて光ファイバを用いた放射線分布測定法の高度化を図ることが出来た。これらの成果

は、今後デブリ取り出しの進展により高放射線環境における放射性物質の分布測定技術がますます重要になると考えられる 1F 廃炉作業環境での応用が期待される。