

環境放射線センシング技術

西沢博志* 藤田和彦**
猪又憲治*
田室 勝**

Environmental Radiation Sensing Technologies

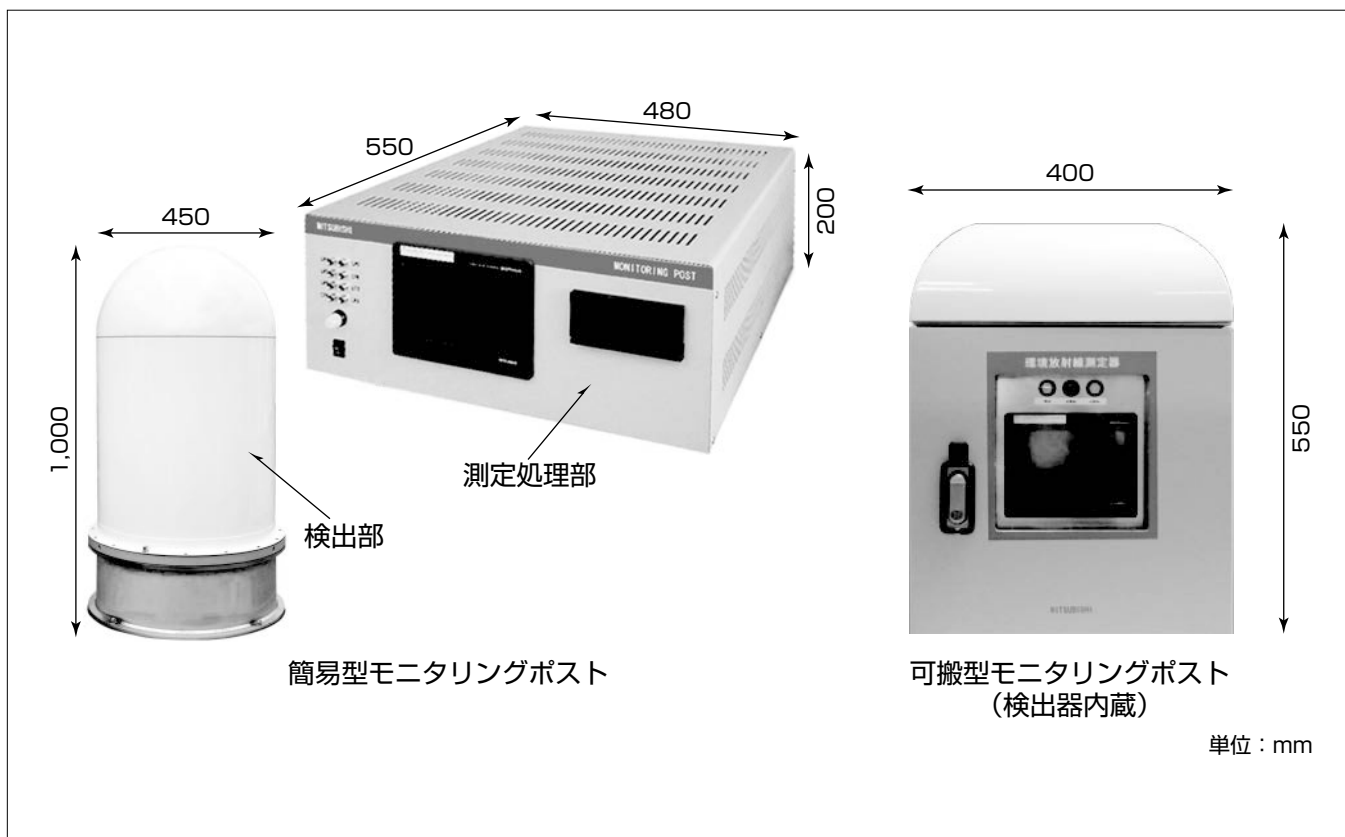
Hiroshi Nishizawa, Kenji Inomata, Masaru Tamuro, Kazuhiko Fujita

要 旨

東日本大震災に伴う福島原発事故後、国民全体に放射線に対する関心が高まっている。放射線に対する安全・安心を得るために、環境中の放射線量を正確に測定することが求められている。三菱電機は長年、原子力・放射線関連施設向けの放射線監視システムを手がけてきており、正確かつ迅速で信頼性の高い測定を行うための技術を開発してきた。震災後、小型化・軽量化、短納期(短い開発期間)、リーズナブルな価格といった様々なニーズ浮かび上がっている。これらに対応するため、従来行ってきたシミュレーション技術を駆使した設計手法を更に改善し、高精度化する試みを行っているほか、解析設計技術を適用して新たな環境放射線測定システムを開発している。

当社の環境放射線測定システムには、従来の据置き型モニタリングポストのほかに、新たに開発した簡易型や可搬型のモニタリングポストがある。これらは環境放射線をバックグラウンドレベルから正確に測定し、環境変動に対しても安定な出力を得るための技術を盛り込んでいる。また、迅速な情報提供のためにネットワークシステムへの接続も可能となっており、放射線の測定値と共に位置情報も伝送することで、各地点の環境放射線レベルの状況を即座に把握することができる。

本稿では、これらを実現する放射線センシング及びシステム技術について述べ、それを応用した環境放射線測定システムの例について述べる。



簡易型及び可搬型環境放射線モニタリングポスト

環境放射線の線量率を連続的に監視する装置である。簡易型モニタリングポストは専用建屋が不要なシステムで、可搬型モニタリングポストは仮設用のシステムであり、いずれも従来のモニタリングポストに比べて低コストで設置できる。ネットワークシステムへの接続が可能で、GPS (Global Positioning System) による位置情報と併せて線量率情報を上位システムに伝送することもできるため、各地点の放射線量の状況を即座に把握することができる。

1. ま え が き

2011年3月11日に発生した東日本大震災に伴う原発事故後、国民の放射線に対する関心が高まっている。放射線測定は、従来は被曝(ひばく)線量管理によって放射線作業従事者の安全を確保することが主な目的であったが、今回の事故後は一般公衆の安全を確保するだけでなく、被曝を可能な限り低く抑え国民一人ひとりの安心を得ることも重要な要素となってきている。

当社は1970年代から、国内に24基ある加圧水型原子力発電所の放射線監視システムを始め、燃料取扱施設や放射線取扱施設向けの放射線モニタ・システムを担ってきた。原子力発電所の運転において、空間線量率や発電所内外の空气中・水中の放射能レベルを測定することは、公衆・作業従事者の保護やプラント異常の早期発見の観点から非常に重要である。そのため、当社は正確かつ迅速で信頼性の高い測定を行うための技術を開発してきた。最近では、これらの技術を環境放射線モニタリングポストなどへも展開しており、既に自治体などに設置されている。

福島原発事故後、放射線測定に対する様々なニーズが浮かび上がってきた。生活環境における線量レベルを測定する環境放射線モニタリングだけでなく、除染作業で発生した廃棄物やその保管区域の監視、食品や飲料水の放射能測定のほか、農業再生に向けた土壌の放射能測定等に対するニーズが、事故以前に比べて格段に高まっている。当社はこれらのニーズに応えるため、正確かつ迅速に放射線を測定し、その測定結果を遠隔地まで迅速に伝達する装置をリーズナブルな価格で提供できるように、製品開発を継続している。

本稿では、当社の放射線計測技術を述べ、その技術を応用した環境放射線測定システムの例を述べる。

2. 当社の放射線計測技術

2.1 放射線センシング技術

2.1.1 放射線の種類

放射線にはいろいろな種類がある。身近にあるものでは主に α 線・ β 線・ γ (X)線がある。例えば環境中には自然放射線があり、大地に含まれるウランやラジウム・ラドン等の放射性核種からは α 線・ β 線・ γ 線が放出されているほか、宇宙に飛来する高エネルギー粒子が大気中の原子核と衝突して様々な種類の放射線が地上に降り注いでいる。一方、人工放射線では医療診断に用いられるX線が代表的であるが、工業用途でも非破壊検査や厚さ計に γ 線や β 線が使われる例がある。原子力発電所は主にウランを燃料としているが、ウランからは α 線や γ 線が放出され、さらに、ウランの核分裂によって中性子が放出される。また、核分裂してできた核種(核分裂生成物)からも β 線や γ 線などの放射線が放出される。

2.1.2 放射線検出器

放射線を測定するための検出器には、電離箱、GM(Geiger-Müller)管、半導体検出器、シンチレータ等、様々な種類がある。これらはいずれも、放射線特有の電離作用と励起作用を利用して、放射線のエネルギーを電気信号に変換することで測定するものである。電離箱は、空気などのガスを充填した検出器に放射線が入射すると内部のガスがイオン化する電離現象を利用したものであり、電圧がかけられた電極間のガスが放射線によってイオン化すると、微弱な電流が流れることを利用する。GM管は電離箱と構成が似ているが、電極に高電圧(数kV)がかかっていることが電離箱と異なる点であり、放射線が入射するごとにスパークのような現象が起こることを利用したものである。半導体検出器は、半導体に放射線を照射すると電気信号が流れる電離現象を利用している。シンチレータは結晶状の蛍光物質であり、放射線が入射すると励起作用によって微弱な光を発光する現象を利用したものである。

2.1.3 放射線検出器の選定と設計

実際の放射線の測定では、測定対象の種類や強度に応じて最適な放射線検出器が選定される。例えば、原子力発電所では、プラントの健全性確認と放射性廃棄物の放出監視を行うために、水やガスといった流体中の放射能レベルを測定しているほか、作業員や公衆の放射線防護を目的として、空間線量率や空气中の放射能濃度、物品表面の放射性物質の密度を測定・監視している。これらを測定する放射線検出器も様々なタイプがあるが、原子力発電所の放射線監視システムは様々な測定対象に応じて適材適所で検出器タイプを選定している⁽¹⁾⁽²⁾。例えば、空間の γ 線の線量率を測定するエリアモニタは、 γ 線測定に適した半導体検出器やGM管といったタイプの検出器が適用されている。また、気体状の放射性物質のレベルを測定するガスモニタは、主な対象核種が核分裂生成物である ^{85}Kr や ^{133}Xe 等の希ガスである。これらは β 線を放出するため、 β 線に対して高感度なプラスチック製のシンチレータを用いている。液体状の流体を測定する水モニタは、測定対象が ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 等で、計測対象は γ 線である。 γ 線を高感度に検出するにはヨウ化ナトリウム(NaI)の結晶でできたシンチレータを用いる。また、空气中に浮遊する粒子状の放射性物質を測定するダストモニタは、気体をサンプリングして移動る紙上に捕集して放射線を測定する方法としている。これも計測対象は γ 線であり、高感度を要求されるためNaIシンチレータを用いている。また、一般公衆を対象とした環境放射線モニタリングの測定対象は γ 線であるが、自然放射線程度の低い線量レベル(バックグラウンドレベル)から事故時を想定した比較的高い線量レベルまで、精度良く測定することが求められる。低い線量レベルを測定するためには高感度である必要があるため、検出器は γ 線

を高感度に検出できるNaIシンチレータが用いられる。

これらの検出器は、測定対象線種と必要とされる感度や応答時間を考慮して、検出器タイプとその大きさ・配置・計測回路系が最適になるように設計される。最適な設計を行うため、当社ではシミュレーション技術を駆使している。

2.2節にその詳細を述べる。

2.2 放射線検出器感度解析技術

2.2.1 放射線・光連成解析手法

放射線検出器や測定システムは、2.1節で述べたとおり正確かつ高い信頼性を持った測定結果が得られるように設計、製造することは当然であるが、小型化・軽量化、短納期(短い開発期間)、リーズナブルな価格等といった、様々なニーズに応じていくことも重要である。当社では開発期間を短縮するため、従来、設計にシミュレーション技術を適用しているが、さらに高度な要求に対応するためシミュレーション精度の向上に取り組んでいる。その一つに、放射線解析と光学解析を融合した“放射線・光連成解析手法”を確立し、この手法を用いて高精度な設計を行っている。

例えばシンチレーション式放射線検出器の原理は、放射線の入射によってシンチレータで発光した光を、光電子増倍管などの光検出器で検出するというものである。従来の放射線検出器の解析では、放射線(γ 線・ β 線やそれに伴う相互作用で発生したX線・電子等の二次粒子を含む)の挙動だけを考慮し、放射線から変換された光の挙動は考慮していなかった。そのため、精度がさほど要求されない場合は特に問題にはならなかったが、高感度・高精度な検出器を設計する場合は問題が生じる。検出器を高感度化する一般的な方法は、検出器の体積を大きくすることである。しかし、検出器を大きくすれば、シンチレータで発光した光が光検出器に到達するまで長い経路を通ることになる。その間、光が減衰するので、放射線が持っていたエネルギーの情報を正しく光検出器に伝達できなくなり、検出器の出力を正確に模擬できなくなる。そこで当社は、放射線の軌跡と、放射線から変換された光の軌跡の両方を追跡する手法(連成解析)を確立した。

2.2.2 連成解析手法の適用例

図1は高感度 β 線計測を行う大口径プラスチックシンチレータに連成解析を適用した例である⁽³⁾。放射線・光連成解析手法では、放射線解析コードEGS5⁽⁴⁾による β 線挙動解析によって検出器への付与エネルギー及び反応位置を算出し、反応位置ごとのシンチレーション光の集光効率を光線追跡によって算出する。この計算を入射 β 線ごとに、検出器内部での挙動に沿って行うため、検出器の形状による集光効率への影響を高精度で評価することが可能となる。

また、図2にNaI(Tl)(タリウム活性化ヨウ化ナトリウム)シンチレータの連成解析の例⁽⁵⁾を示す。図に示すように、 γ 線がシンチレータに入射して発光すると、発生した

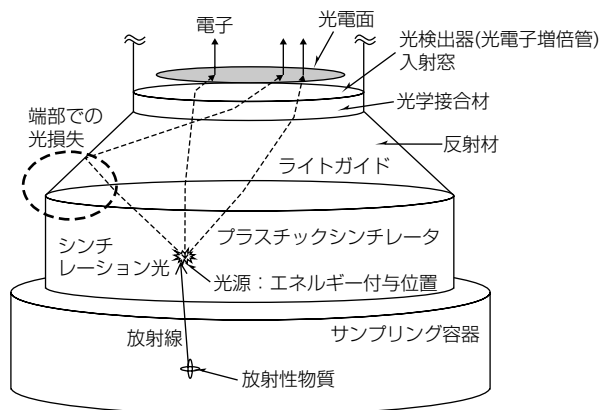


図1. 大口径プラスチックシンチレータの解析モデル

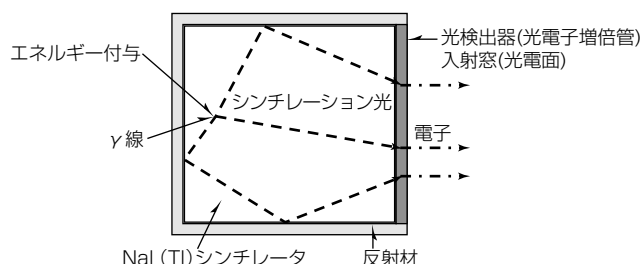


図2. NaI(Tl)シンチレータの解析モデル

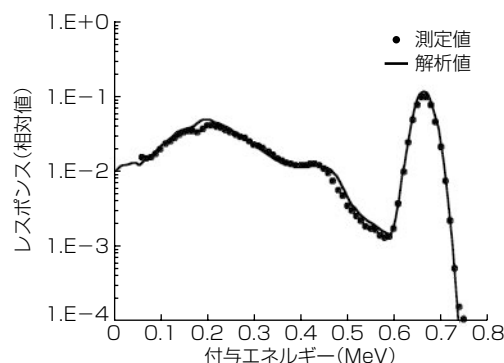


図3. NaI(Tl)シンチレータの出力波高分布の解析

シンチレーション光はシンチレータ内で伝播(でんぱ)・反射を繰り返す。最終的には光検出器(光電子増倍管)に入射する。発光位置によって光検出器まで到達する経路が大きく異なるので、光の減衰割合も様々になる。図3は連成解析技術を用いて、大型NaI検出器から出力される波高分布を模擬した例であり(横軸のエネルギーはパルスの高さに比例する)、¹³⁷Cs線源を用いた測定結果と、それに相当する解析結果を比較したものであるが、両者は互いに良く一致しており、高精度な解析ができていることを示している。

3. 環境放射線測定システム

これまでに蓄積してきた放射線計測や設計・解析技術、及びデータ収集システム技術を応用し、新しい環境放射線測定システムを開発した。一例として、図4に簡易型モニタリングポスト、図5に可搬型モニタリングポストを示す。



図4. 簡易型モニタリングポスト



図5. 可搬型モニタリングポスト

簡易型モニタリングポストは専用建屋が不要なシステム、可搬型モニタリングポストは仮設用のシステムであり、いずれも従来の環境モニタリングポストに比べて低コストで設置できる。従来の技術をベースに、次に述べる計測精度・耐環境性能向上・保守点検容易化といった課題を解決し、製品ラインアップの拡充を図っている。

3.1 計測精度向上

計測精度については、放射線パルスの数え落とし抑制とエネルギー特性確保という2つの課題がある。まず、放射線パルスの数え落としを抑制するために、検出器パルスデータのリアルタイム監視を行っている。検出器からの放射線パルス信号は信号処理回路で信号振幅の解析を行い、振幅の大小に応じて信号レベルに区分けする。区分けしたデータはメモリに格納し線量率演算を行う。従来技術では、演算処理部で一定時間内に検出器パルスをメモリに格納し線量率演算処理していたが、処理能力を超える多数の検出器パルスが入力された場合には数え落としが生じ、精度と応答性が悪くなってしまふ課題があった。対策として、信号処理回路のメモリを複数分割し、演算処理中に同時にデータを格納することでリアルタイムに検出器パルスを処理可能とした。その結果、数え落としによる誤差がほとんどないシステムとなっている。一方、エネルギー特性については、従来は低エネルギー領域で誤差が大きくなるという課題があった。この原因は、単位エネルギー当たりのパルス波高に非直線性があるためである。この非直線性を解析設計で考慮し、低エネルギー領域に補正を加えることでエネルギー特性を改善した。

3.2 耐環境性能向上

耐環境性能の向上については、温度や経年劣化に対しても安定した出力を得るために、検出器ゲインの安定化対策を施している。環境モニタリングポストは屋外で使用されるため、昼夜及び季節によって設置環境の温度が大きく変化する。また、検出器は経年劣化による波高値の変動によって、感度特性が変化し線量率の値に影響を及ぼす。これらの対策として補償機能を備えている。温度変化に対する補償では、あらかじめ検出器の温度特性を関数化しておき、検出部温度をモニタリングして補償量を算出して温度補正を行うことで、温度変化による変動を抑制している。

また、検出器劣化補償機能では、天然放射性核種からの一定の放射線エネルギーを検出し、定期的に基準値と比較してゲインを自動調整することによって、劣化による波高値の変動を抑制している。

3.3 保守点検の容易化

放射線検出器は定期的な保守や点検が不可欠である。保守操作を容易にするために演算処理部本体に接続可能なタッチパネルディスプレイを適用し、表示メニューやデータフォーマットを標準化している。例えば、初期設定画面では、放射線演算部の初期設定内容を抽出して一元管理を行っている。線源校正画面では、現場でテスターやオシロスコープなど、専用機器を用いずに保守・点検ができるようにしている。データ管理画面では、他設備へのデータ出力を行うデータ管理を一元化し標準化している。これらの標準化や共通プラットフォーム化は、多岐にわたるユーザーのニーズを迅速に反映し、タイムリーな製品供給も可能にするという効果もある。製品によってはGPSを搭載して位置情報を検知したり、FOMA^(注1)通信ユニットを搭載することで携帯電話網を利用して線量率情報を上位システムに伝送するものもあるが、これらのハードウェア・ソフトウェアを共通化することで短期開発を実現している。

(注1) FOMAは、^(株)NTTドコモの登録商標である。

4. む す び

環境放射線を正確かつ高い信頼性を持って測定する技術と、その応用製品について述べた。震災直後の緊急を要する状況からは幾分落ち着きを取り戻しているものの、環境放射線の測定は、安全・安心を得るために今後も重要であることは間違いない。当社は今後も放射線計測に対する様々なニーズに対応するため、新たな技術及び製品開発を行っていく。

参 考 文 献

- (1) 茂木健一, ほか: 新型放射線管理システム, 三菱電機技報, **75**, No.5, 356~359 (2001)
- (2) 西沢博志: PWRプラントの放射線計装の最新技術, 応物学会放射線分科会, 第12回「放射線夏の学校」テキスト, 51~63 (2000)
- (3) 林 真照, ほか: 放射線・光連成解析を用いた大口径シンチレータの小型化, 日本原子力学会「2012年春の年会」予稿集, O21 (2012)
- (4) Hirayama, H., et al.: The EGS5 Code System, SLAC-R-730 and KEK Report 2005-8 (2005)
- (5) 林 真照, ほか: アンフォールディングによるNaI(Tl)シンチレータを用いた放射能分析手法の研究, 研究会「放射線検出器とその応用」(第27回)要旨論文集, 63~64 (2013)