

安全・安心に貢献する放射線管理ソリューション

Radiation Management Solutions Contributing to Safety and Security

前川 修 MAEKAWA, Osamu

阿部 洋平 ABE, Yohei

富士電機は、放射性物質を取り扱う施設やその自治体に対して、安全・安心に貢献する放射線管理ソリューションを提供している。東日本大震災の復興支援に活用された環境放射線モニタでは、伝送機能の多様化により災害時の監視継続能力を改善したモニタリングポストや、検出の精度と安定性を向上させたリアルタイム線量率計を開発した。放射線量などの測定データを収集して画面表示する環境放射線監視テレメータシステムでは、顧客ニーズに合わせて拡張が可能なプラットフォームを、 α 線ダストモニタでは、ノイズ低減と高分解能化により α 線の測定性能を向上させた検出器を開発した。

Fuji Electric provides facilities and local governments that handle radioactive materials with radiation management solutions to contribute to safety and security. In environmental radiation monitors, which were proved useful to support the recovery from the Great East Japan Earthquake, we have developed monitoring posts that use diversified transmission functions to improve continuous monitoring capability during disaster and real-time dosimeters with improved detection accuracy and stability. For environmental radiation monitoring telemetering systems, which collect measurement data, including radiation doses, and display them on the screen, we have developed a platform that can be expanded to meet customer needs. In addition, we have developed the detector for alpha-ray dust monitors that improves alpha-ray measurement performance by reducing noise and increasing resolution.

① まえがき

地球温暖化に起因する気候変動は、持続可能な社会の実現を脅かす重要な問題の一つであり、世界各国では、この問題を克服するためにさまざまな施策が実行されている。一方、昨今の世界情勢の急激な変化により、エネルギー安定供給において大きなリスクが露呈した。特に、エネルギー資源の乏しいわが国においては、燃料費の高騰など、国民生活や企業活動に甚大な影響を及ぼし始めている。このような状況の下、日本政府は化石燃料主体の社会・産業構造をクリーンエネルギー中心に移行するグリーントランスフォーメーション（GX：Green Transformation）の推進を表明し、脱炭素社会とエネルギー安定供給の実現に向けて大きな政策転換を図っている。

GXにおいては、化石燃料への過度な依存からの脱却はもちろんのこと、脱炭素効果の高い原子力エネルギーの活用が含まれており、強靱（きょうじん）なエネルギー需給構造に転換していくと表明している。

原子力エネルギーの活用においては、安全性評価を終えた原子力発電所の再稼動を軸として、既存の設備を最大限活用する方針が示されている。福島第一原子力発電所で起きた事故を教訓として、安全性を最優先し、地域住民との共生によりこれを実現する計画となっている。

富士電機は、総合放射線計測機器メーカーとして、さまざまな放射線測定器や放射線を管理するためのシステムを開発して納入しており、原子力施設の安全稼動に貢献してきた。

東日本大震災以降、富士電機は、福島地区の復興支援を目的としたリアルタイム線量率計の納入や災害に強い放射線モニタの開発、伝送路の強化に取り組んできた。本稿では、安全・安心に貢献する放射線管理ソリューションにつ

いて述べる。

② 放射線管理ソリューションの概要

放射線管理に使われる機器は、“個人被ばくモニタ”“表面汚染モニタ”“環境放射線モニタ”“所内・放出放射線モニタ”に分類される。これらのモニタは放射線監視盤や計算機システムと連携し、測定値が管理される。放射線管理システムの概念図を図1に示す。

各モニタの特徴と代表的な検出器を次に示す。

(1) 個人被ばくモニタ

個人被ばくモニタは、原子力施設や関連施設で作業に従事する作業員の外部被ばくと内部被ばくを測定するモニタである。外部被ばくとは体外からの放射線による被ばくであり、内部被ばくとは体内に入った放射性物質から出る放射線による被ばくである。代表的なモニタには、個人被ば

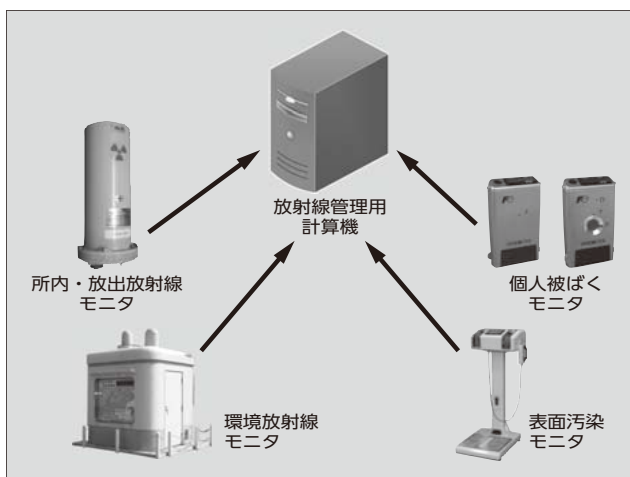


図1 放射線管理システムの概念図

く線量計やホールボディカウンタが挙げられる。

(2) 表面汚染モニタ

表面汚染モニタは、作業員や物品に対する放射性物質による汚染の有無を測定するモニタである。原子力施設には、放射線被ばくを適正に管理する放射線管理区域と呼ばれる区域があり、作業員がこの区域から退域するときや物品を持ち出す際に表面汚染の有無を測定している。代表的なモニタに体表面モニタやサーベイメータが挙げられる。

(3) 環境放射線モニタ

環境放射線モニタは、主に原子力施設周辺における空間線量を測定するためのモニタである。代表的なモニタにリアルタイム線量率計やモニタリングポストが挙げられる。

(4) 所内・放出放射線モニタ

所内・放出放射線モニタは、原子力施設内の空間放射線量や施設から放出される放射性物質の濃度を測定するモニタである。代表的なモニタにエリアモニタ、ガスモニタ、ダストモニタが挙げられる。

近年では、原子力関連施設の境界や周辺における放射線モニタリングのニーズが増えてきており、**3章**以降では、最新の環境放射線モニタとそれを監視するための環境放射線監視テレメータシステムのソフトウェアプラットフォームについて述べる。また、原発再稼働に向けて強化が進む所内・放出放射線モニタについても述べる。

3 環境放射線モニタ

3.1 モニタリングポスト

(1) 概要

モニタリングポストは、環境中の空間線量を測定するモニタである。モニタリングポストの外観を図2に示す。モニタリングポストは、検出器と計測部、外部筐体（きょうたい）から構成されている。モニタリングポストの設置環境はさまざまであるが、富士電機のモニタリングポストは、放射線計測部と演算部が一体化したタイプと分離したタイプがあり、顧客の要求に柔軟に対応できる。検出器には、NaI（よう化ナトリウム）シンチレーション検出器を採用している。NaI シンチレーション検出器は、NaI シンチレータと光電子増倍管で構成されており、放射線が検出器に入射するとシンチレータ内部の電子が励起し、励起され

た電子が基底状態に戻るときに発光する。この光を光電子増倍管で増幅させ電気信号として検出することで放射線を測定している。計測部で処理された測定値は、原子力施設や中央省庁および各自治体が管理する放射線管理システムに伝送され、遠隔で監視される。モニタリングポストの仕様を表1に示す。

(2) 特徴

(a) エネルギー補償と温度補償機能

NaI シンチレーション検出器の測定結果は、 γ 線のエネルギーや周囲温度に依存するが、 $G(E)$ 関数加重演算方式⁽¹⁾により測定結果を補正している。温度依存に対しては、検出器内部に温度計を設置し、温度変化による出力の変化を補償している。これによりエネルギー特性を $\pm 10\%$ 以内（100 keV ～ 3MeV、137Cs 基準）、温度特性を $\pm 5\%$ 以内（ $-10 \sim +45^{\circ}\text{C}$ ）としている。

(b) ゲイン変化に対する自動補正機能

NaI シンチレーション検出器を長期間使用すると構成部品の長期ドリフトによりゲインが変化し、測定結果に誤差が出る可能性がある。この問題に対して、富士電機の検出器は、自然環境中に存在する 40 K のピークチャンネルを基準チャンネルとして、自動でゲインを補正できるようにしている。

(c) 検出器および計測部の一体化

従来のモニタリングポストでは、検出器と計測部が別々であったが、今回のモニタリングポストでは、検出器内部に計測部の機能を内蔵し、小型化を実現している。NaI シンチレーション検出器を図3に示す。従来の計測部に実装していたマルチチャンネル波高分析機能は、継続して実装しており、 γ 線のエネルギー解析ニーズに対応している。関連規格〔環境 γ 線連続モニタ：JIS Z 4325（2019）〕および放射能測定法シリーズ No.17 にも準拠している。

(d) 伝送機能の多様化

モニタリングポストは、災害発生時にその役割がより重要になることから、伝送機能の多様化に対応していることが重要となる。伝送機能の多様化への要求は、東日

表1 モニタリングポストの仕様

項目	内容
測定線種	空間 γ 線
検出器	温度補償型 2" $\phi \times 2$ " NaI (TI) シンチレーション検出器
測定範囲	BGLレベル～100 $\mu\text{Gy/h}$
エネルギー範囲	50 keV ～ 3 MeV
線量率特性	$\pm 10\%$ (Cs-137基準)
エネルギー特性	50 ～ 100 keVにおいては $\pm 20\%$ 以内 100 keV ～ 3 MeVにおいては $\pm 10\%$ (Cs-137基準)
エネルギー分解能	10%以下 (Cs-137フォトピークの出力波高値に対して)
検出器温度特性	$-10 \sim +45^{\circ}\text{C}$ に対して $\pm 5\%$ 以内
電源	AC 100 V $\pm 10\%$ 、50/60 Hz

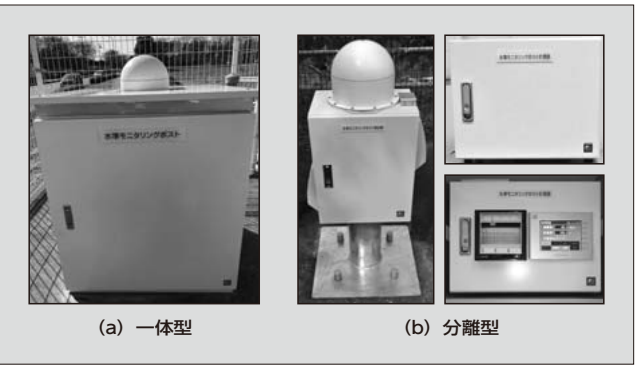


図2 モニタリングポスト



図3 NaIシンチレーション検出器

本大震災以降、増加傾向にあり、富士電機では引き続き対応している。モニタリングポストでは、有線回線や携帯電話網に加えて、衛星通信網への対応を可能としており、一般回線の輻輳（ふくそう）や遮断発生時においても継続監視を可能としている。

3.2 リアルタイム線量率計

(1) 概要

モニタリングポストが、施設起因の環境放射線量の変動の測定を主な目的として原子力施設周辺に設置されるのに対し、リアルタイム線量率計は、主に学校や公園、役所などに設置され、住民に安全と安心を提供する役割を担っている。リアルタイム線量率計を図4に示す。

本装置は、放射線検出器、計測部、伝送部、ソーラーパネル、バッテリーおよび線量表示器で構成されており、環境放射線の測定、通信、線量率表示機能を持っている。電源は、商用電源からの供給に加え、ソーラーパネルと内蔵バッテリーからの供給も可能であり、停電時も連続して測定することができる。リアルタイム線量率計の仕様を表2に示す。

(2) 特徴

- (a) 半導体検出器の検出性能の改善と安定性強化
リアルタイム線量率計には、新たに開発した半導体検出器⁽²⁾を搭載している。この半導体検出器は、従来品から



図4 リアルタイム線量率計

表2 リアルタイム線量率計の仕様

項目	内容
測定線種	空間γ線
検出器	半導体検出器
測定範囲	BG レベル～99.99 μSv/h
エネルギー範囲	50 keV～3 MeV
相対基準誤差	±20% (60 keV～1.25 MeV Cs-137基準)
エネルギー特性	±25% (60 keV～1.25 MeV Cs-137基準)
動作環境	全天候型、FANレス
電源	AC 100 V±10%、50/60 Hz

検出面を拡大すると共に検出面の配置も最適化することで、測定精度の向上を実現している。また、電磁シールドを強化し、耐ノイズ性も向上することで、さまざまな電磁波からの影響を低減し、測定の安定性に寄与している。

(b) 耐環境性の向上

放射線検出器、計測部、伝送部は、強化プラスチック製の筐体に収納されているが、荒天時に雨水や湿気の浸入により電子機器への悪影響が懸念されていた。そこで、筐体に内蔵するこれらの電気部品、電子機器を機能ごとに防湿防水処理の施された小型ボックスに収納することで、湿気から保護し、故障率低減と長寿命化を図っている。

4 環境放射線監視テレメータシステムの新ソフトウェアプラットフォーム

(1) 概要

原子力施設から放出された放射線や放射性物質は、モニタリングポストを代表とする放射線モニタにより24時間365日測定が行われており、これらのモニタで測定されたデータは、原子力施設や中央省庁および各自治体が管理する環境放射線監視テレメータシステムにより収集され、監視業務に活用されている。原子力施設の近隣住民に対しては、役所などに設置された大型ディスプレイでリアルタイムに表示することに加えて、インターネットを介して広く公開されている。富士電機は、放射線モニタの開発・製造だけでなく、このようなシステムの納入にも深く関わってきた。本システムでは、昨今の顧客要求の多様化に応じるために、クラウド化やインターフェース標準化に対応した新たなソフトウェアプラットフォームを開発した。

(2) 特徴

- (a) システムのクラウド化
従来のシステムは、顧客自身がサーバなどのインフラ設備を保有・管理するオンプレミスが主体であったが、BCP（事業継続計画：Business Continuity Plan）やシステム規模拡張性の観点から、近年、クラウドシステムの導入計画が増加している。新ソフトウェアプラットフォームでは、今後主流となることが想定されるホスティングクラウドに適合するよう、オープンソースのデータベースやミドルウェアを採用し、初期導入費およ

び維持費の抑制を実現した。

(b) 多様な監視方法の提供

システム画面は、地域の放射線量を管理する担当者が測定データを監視するために使用する画面である。従来のシステムでは Internet Explorer^{〈注 1〉} を標準ブラウザとして設定しており、また、画面構成もシングルウィンドウで不便であった。新プラットフォームは、HTML Living Standard^{〈注 2〉} ベースで開発することで、Microsoft Edge^{〈注 3〉} や Google Chrome^{〈注 4〉} などの現在主流であるブラウザへの対応に加え、スマートフォンやタブレットでの表示も可能とした。また、操作画面をマルチウィンドウ対応とし、監視業務の効率を改善した。図 5 に新プラットフォームにおける JavaScript を使った画面表示を示す。フロントエンドのブラウザ画面開発においては、従来、JSP/Java Applet^{〈注 5〉} を採用していたが、新ソフトウェアプラットフォームでは JavaScript を採用することで、動画やグラフィックなど、多彩な表現が可能な HTML Living Standard をベースとしたブラウザを採用することができる（図 6）。

(c) システムの高拡張性

環境放射線監視テレメータシステムの更新において、セキュリティ強化や操作性の改善、機能拡張や改造を求められることがあるが、運用の連続性の観点から既設システムの資源流用を求められることが多く、容易に拡張できない点が問題であった。新ソフトウェアプラットフォームでは、プロセス間のインタフェースに JSON

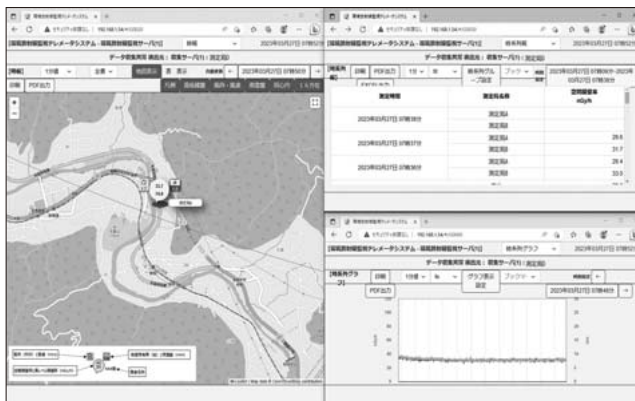


図 5 新プラットフォームにおける JavaScript を使った多彩な画面表現

〈注 1〉 Internet Explorer : Microsoft Corporation の商標または登録商標

〈注 2〉 Microsoft Edge : Microsoft Corporation の米国およびその他の国における商標または登録商標

〈注 3〉 Google Chrome : Google LLC の商標または登録商標

〈注 4〉 JavaScript : Oracle Corporation およびその子会社、関連会社の米国およびその他の国における商標または登録商標

〈注 5〉 Java : Oracle Corporation およびその子会社、関連会社の米国およびその他の国における商標または登録商標

(JavaScript Object Notation) を採用し、プロセス間の通信を統一することで、顧客ニーズに合わせた拡張機能の選択が容易となった。また、JSON は多くのプログラミング言語に適合するためのライブラリが提供されており、既設資源、機能の踏襲が必要なシステムにも柔軟に対応することができる。

5 α線ダストモニタ

(1) 概要

原子力発電所では、ウランの核分裂により発生したエネルギーを用いて発電を行っているが、核分裂の過程では人工放射線核種であるプルトニウムが生成される。使用済核燃料には、燃料として再利用できるウランやプルトニウムが残っており、この燃料を再処理してウランとプルトニウムを抽出し混合したものが MOX（混合酸化物：Mixed Oxide）燃料と呼ばれている。

エネルギー資源の乏しいわが国は、この MOX 燃料を通常の原子力発電所で利用するプルサーマルの実現に向けて取り組んでいる。プルトニウムを安全かつ有効に利用するためには、プルトニウムから放出される α 線の測定強化が重要であり、富士電機はより精度よく測定する α 線ダストモニタを開発した。図 6 にダストモニタ構成図と α 線ダストモニタを示す。α 線ダストモニタは、サンプリングした空気中の粉じんを集じん器にセットしたろ紙に吸着させ、α 線を測定する。

(2) 特徴

(a) ノイズ低減

従来のダストモニタは、放射線検出器から測定したパルス信号を別に設置される計測部に送信していたが、この方法だとパルス信号にノイズが混入する可能性があった。α 線ダストモニタは、検出器と計測部を一体化し、伝送路におけるノイズ混入を低減した。計測部以降は、デジタル伝送方式を採用し、ノイズ影響を軽減している。

(b) 高分解能化

検出器は集じん器にセットしたろ紙の上部に配置し、α 線を測定しているが、α 線はろ紙の吸着面からさまざまな角度に放出され、検出器の入射までの飛程距離が異

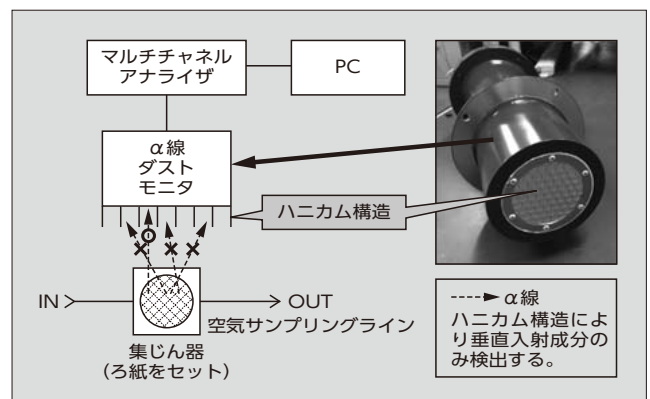


図 6 ダストモニタ構成図と α 線ダストモニタ

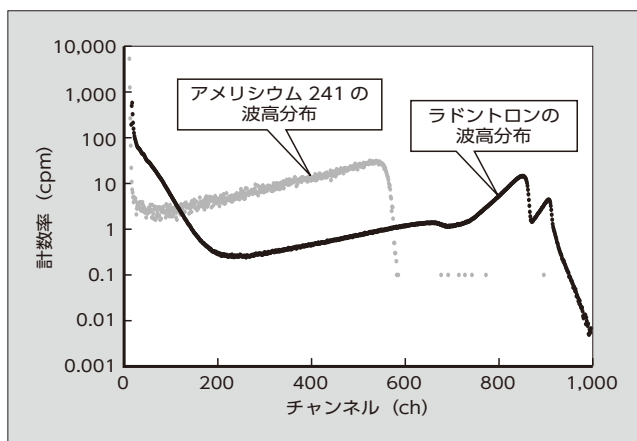


図7 アメリシウム 241 とラドン、トロンの測定結果

なるため、測定エネルギーにばらつきが生じてしまう。これは分解能が低くなることを意味し、天然に存在する自然放射性核種であるラドン、トロンとの弁別が難しくなる。そこで新しい検出器では、 α 線入射部をハニカム構造とすることで、ろ紙から斜めに入射する α 線を遮断し、垂直に入射する α 線のみを検出できるようにしている（図6）。これにより検出器に入射する α 線の飛程はほぼ同じとなるため、測定エネルギーのばらつきが減り、高い分解能を実現した。図7は、 α 線放出核種であるアメリシウム 241（ ^{241}Am ）と天然放射性核種であるラドン（Rn）、トロン（ ^{220}Rn ）の測定結果である。天然放射性核種であるラドン、トロンと区別してアメリシウム 241 を測定できていることが分かる。

6 あとがき

安全・安心に貢献する放射線管理ソリューションについて

て述べた。脱炭素社会の実現とエネルギーの安定供給には、原子力エネルギーの活用が必要である。富士電機は、放射線検出器からシステムまで一括して提供できる総合放射線計測機器メーカーとして、原子力施設の安全稼働に貢献するために、今後も絶えず技術革新を推進していく所存である。

参考文献

- (1) 堤正博ほか. 実効線量当量単位に対応したNaI (TI) シンチレーション検出器のG (E) 関数 (スペクトル-線量変換演算子) の決定. JAERI-M.1991, p.91-204, <https://jopss.jaea.go.jp/search/servlet/search?2075510>, (参照 2023-01-27)
- (2) 前川修ほか. 安全・安心に貢献する放射線管理サービスソリューション. 富士電機技報. 2020, vol.93, no.1, p.66-71.



前川 修

原子力関連施設の放射線計測システムのエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレインダストリー事業本部社会ソリューション事業部放射線統括センター副センター長。



阿部 洋平

原子力関連施設の放射線計測システムのエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレインダストリー事業本部社会ソリューション事業部放射線統括センター放射線システム部課長補佐。工学博士。





＊本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。