

## 福島復興事業における放射線の計測と可視化技術の開発

—GPS モニタリングシステム、線量予測システム Dose3DMap、LED シンチレーションファイバー検出器—

中尾 徳晶      小迫 和明      木下 哲一      川口 正人  
(技術研究所)      (技術研究所)      (技術研究所)      (技術研究所)

## Development of radiation monitoring and visualization systems for Fukushima

—GPS monitoring system, Dose3DMap system, and LED-coupled scintillating fiber detector—

Noriaki Nakao, Kazuaki Kosako, Norikazu Kinoshita and Masato Kawaguchi

福島第一原子力発電所の事故に伴い放出された放射性物質に汚染された土壌等の除染作業が行われており、その廃棄物の保管のために中間貯蔵施設の建設が計画されている。そこで、広範囲な位置情報と空間線量情報を迅速に計測記録可能な GPS モニタリングシステムの開発と、その計測結果を地図上に線量マップとして表示させ、除染後の予測線量分布を解析できるシステムを開発した。これらのシステムは、除染による線量低減のための計画検討や低減効果の評価に利用されている。また、中間貯蔵施設における放射線量率のリアルタイム可視化ツールとして、LED シンチレーションファイバー検出器を開発した。全長最大 50m の検出器上に 10cm 程度の間隔で直接空間線量率を色別表示し、リアルタイムに放射線量率の見える化を実現した。本検出器は放射線量率の変化を視覚的に監視可能であり、迅速な安全対策および作業員や周辺住民とのリアルタイムリスクコミュニケーションが可能となる。

Lands that were contaminated with radioactive elements following the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident in 2011 have been decontaminated, and the construction of an interim storage facility for radioactive waste is planned. A GPS monitoring system was developed to concomitantly determine a location and measure the radiation level at the location. Moreover, a mapping system that produces radiation maps at the measurement locations and also predicts post-decontamination radiation maps using the compiled Monte Carlo simulation program was constructed. These systems were used for decontamination planning and estimation of the decontamination effect. An LED-coupled scintillating fiber detector was developed for visually monitoring radiation in real time at the interim storage facility. The LEDs display different colors corresponding to different radiation levels at the measurement locations along the fiber detector, the maximum length of which is 50 m. Thus, the radiation levels at all positions along the length of the detector can be visually monitored in real time. Moreover, it is useful for radiation safety and for risk communication with radiation workers and residents close to the site.

### 1. はじめに

2011 年 3 月の東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故で放出された放射性物質により、福島県内外の広範囲の地域が汚染された。復興再生を行うべく、これまで福島を中心とした広い範囲で除染活動が行われて来ており、発生した土壌等の除染廃棄物は容器に入れて一時的に仮置き場に保管されている(図-1)。福島県内で発生した廃棄物に関しては、仮置き場から双葉町と大熊町に建設が計画されている中間貯蔵施設に移送される予定になっている。ここでは汚染土壌等が搬入され、汚染可燃物は焼却により減容化される計画である<sup>1)</sup>。平成 25 年

12 月に環境省より発表された中間貯蔵施設内の設備配置図を図-2 に示す<sup>2)</sup>。この地域は空間放射線量率数十  $\mu\text{Sv/h}$  の高線量地域が多くを占めており、建設作業員の被ばくリスクを低く抑えて安全に建設工事を進めるために事前の除染作業が必要とされる。この広範囲における大規模な除染、建設および運営においては、空間放射線量率や表面汚染分布を常に把握し、放射線による被ばくや放射性物質による汚染の拡大を可能な限り低く抑える必要がある。そのため、放射線計測により得られる大量なデータ処理の自動化と高速化、およびその可視化による作業員とのリアルタイムリスクコミュニケーションが重要な課題となる。また減容化施設では、濃縮されて高

濃度の放射性物質を含む灰が発生するため、遮蔽や放射線管理の計画を綿密に準備する必要がある。

最初に、広範囲な位置情報と空間線量率情報を迅速に計測記録可能なGPSモニタリングシステムと、その計測結果を地図上に線量率マップとして表示させて除染後の予測線量率分布を解析できるシステムの開発に関して紹介する。これらのシステムは除染工事や中間貯蔵施設建設にあたり、線量率低減のための計画検討や低減効果の評価にこれまでも利用されており、今後もこれらの工事に大いに貢献することが期待される。

次に、中間貯蔵施設に向けた様々な放射線計測の検討のうち、線量率分布の可視化を実現したLEDシンチレーションファイバー検出器の開発に関して紹介する。中間貯蔵施設の放射線管理区域や建物の内部、敷地境界等に設置することにより、線量率分布のリアルタイム見える化で迅速な作業環境の把握を可能とし、作業員の被曝リスクを低減して安心感を与え、周辺住民とのリスクコミュニケーションの円滑化等に寄与することが期待できる。



図-1 福島県内の除染廃棄物の保管の流れ  
(※背景図は文献より引用)

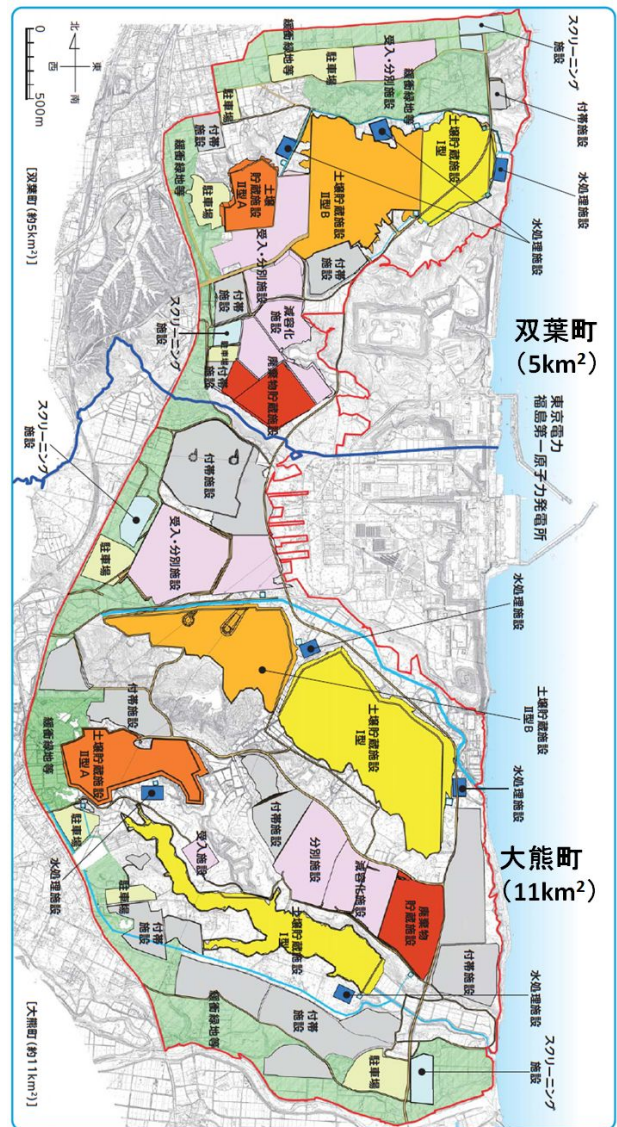


図-2 中間貯蔵施設候補地内における設備配置図<sup>2)</sup>

## 2. GPSモニタリングシステムとDose3DMap

### 2.1 概要

放射線測定器による線量率情報とGPSによる位置情報を同時に計測してパソコン上に記録できるモニタリングシステムを開発した。また、この線量率測定値を基にした線量率マップ作成と除染後の線量率予測マップ作成が可能な「空間線量マップ予測システムDose3DMap」を開発した。

現在福島県内の除染現場において、これらのシステムは、除染前の空間線量率の測定やその測定結果を用いた線量率マップ作成および除染後の予測線量率マップ作成に用いられており、除染作業の計画検討やその効果の評価に大いに利用されている。

## 2.2 GPS モニタリングシステムと線量率測定

GPS モニタリングシステムは、放射能で汚染された地域の道路や農地、家屋等を対象に、迅速な線量率モニタリングを可能とする。システム構成を図-3に、車両に搭載した際のシステム一式の写真を図-4に示す。ガンマ線の線量計である NaI シンチレーションサーベイメータからの電気出力信号は、アンプにより増幅された後、ADC (Analogue to Digital Convertor) で数値情報に変換され PC に記録される。それと同時に GPS で測定された位置情報が記録される。この位置と線量率の同期されたデータが、設定した時間間隔や任意のタイミングで記録される。

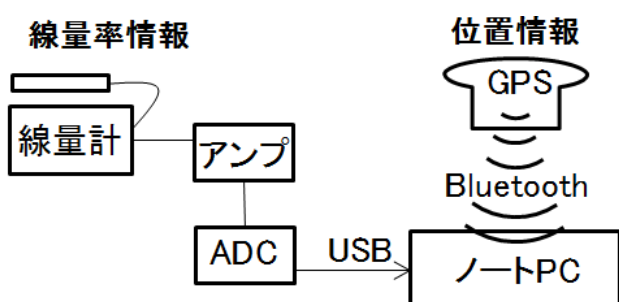


図-3 GPS モニタリングシステムの機器構成



図-4 GPS モニタリングシステム機器一式の写真

このGPS モニタリングシステムは、図-5に示すように以下の4つの機能がある。

- (1) 車両に搭載し、速度 20km/h 以下で走行しながら線量率と位置を連続的に測定・記録。
- (2) 車両に搭載し、一つ前の測定位置から次の位置までGPSの誘導で移動し、停止して線量率と位置を測定・記録。
- (3) 農耕地などを対象に、設定した格子上の測定場所までGPSの誘導で歩行移動し、止まって線量率と位置を測定・記録。
- (4) 家屋などを対象に、任意の場所に止まって線量率と位置を測定・記録。

これらの機能を目的に応じて選択する。

この装置を用いて、実際に福島県内の除染対象地域における除染前の空間線量率を測定した。GPS モニタリングシステムを車両に搭載し、住宅地内を走行モニタリングした結果の例を図-6に示す。車両が走行した経路に沿って測定された空間線量率が段階別カラーで地図上にプロットされ、位置と線量率レベルが一目で分かるようになっている。

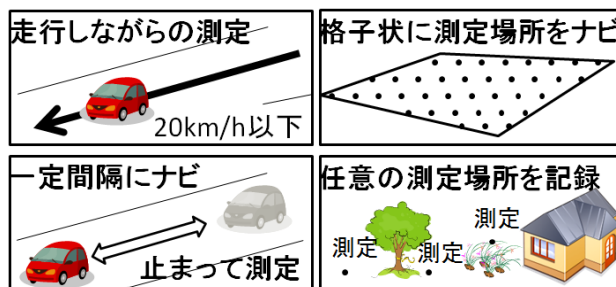


図-5 GPS モニタリングシステムの機能の選択



図-6 車両に搭載したGPSモニタリングシステムにより福島県内の住宅地域で線量率を測定した結果

### 2.3 空間線量マップ予測システムとその機能

空間線量マップ予測システム Dose3DMap は、測定値に基づく線量マップの表示と除染により低減した予測線量率マップの作成・表示が可能な Windows ソフトウェアである。

本システムによる一連の作業の流れを図-7 に示す。まず、前述の GPS モニタリングシステムにより測定した除染前の線量率をマップ上に表示させる(図-6)。指定した領域をメッシュ化すると、その範囲内で測定値のない場所も自動的に内外挿により補間が行なわれて平面図線量率マップが作成される(図-8 上段)。これが除染前の線量率マップとなり、同時に面線源データが自動的に作成される。次に、図-8 中段に示したようにメッシュ毎に除染効果を数値化した値である除染係数(DF)を与える。画面上のセルをマウスで選択することで除染係数を簡単に設定することができる。それにより除染後の線源条件が設定され、放射線輸送解析が行われる。ここで得られた結果が図-8 下段に示す除染後の予測線量率マップとなる。一方、除染後に同様な測定が行われた場合、この除染後の線量率マップと予測線量率マップとの比較を行うことができ、予測精度の検証も可能である。

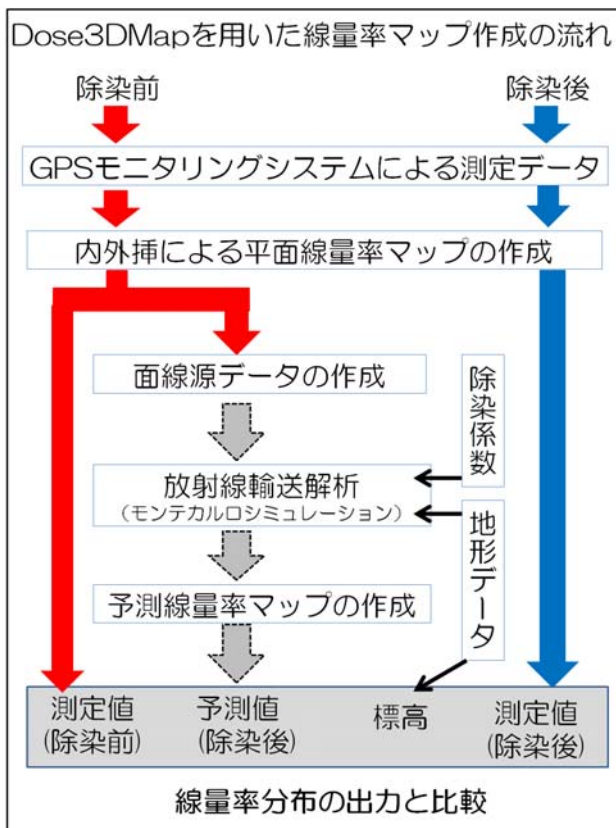


図-7 Dose3DMap による線量率マップ作成の流れ

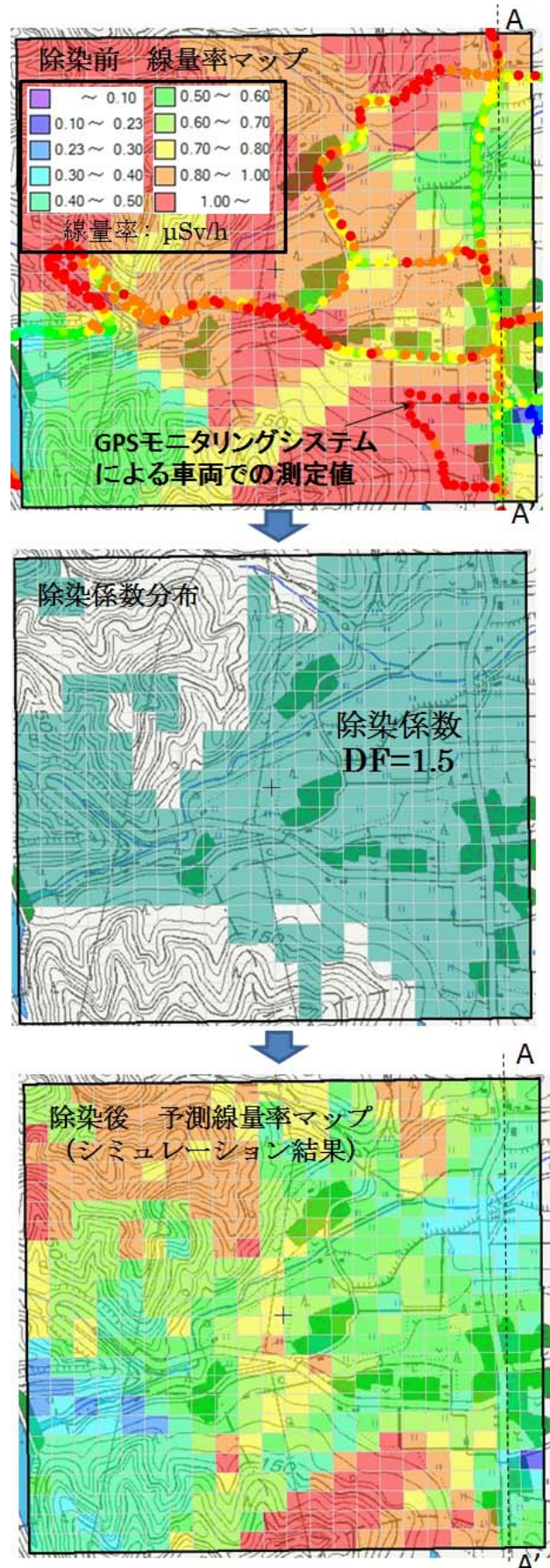


図-8 Dose3DMap による空間線量率マップと除染係数を用いた除染後の予測線量率マップ

このシステムには、放射線輸送解析を行う三次元モンテカルロ解析プログラムのMCNP5コード<sup>3)</sup>が組み込まれている。図-9に示すように、地表に蓄積した放射性セシウムからの放射線(ガンマ線)は、直接線や空気による散乱線(スカイシャイン)、地形による散乱線により様々な場所から届く。そのため、対象地域のみを除染しても線量率が下がらない場合があり、除染後の線量率はこれらの影響を考慮したシミュレーションにより精度の良い予測を行う必要がある。このシステムでは高度な知識を必要とせずシミュレーションを簡便に実行できる。計算時間を2分、5分、10分または任意時間から選択し統計精度を変更することができる。

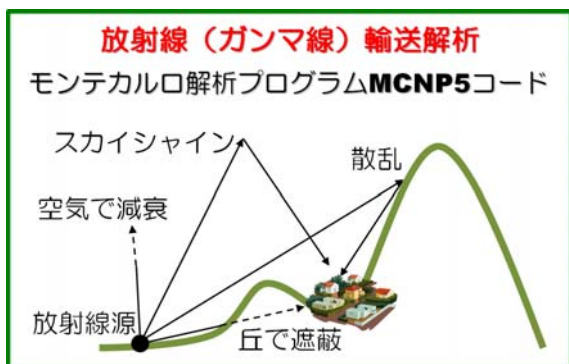
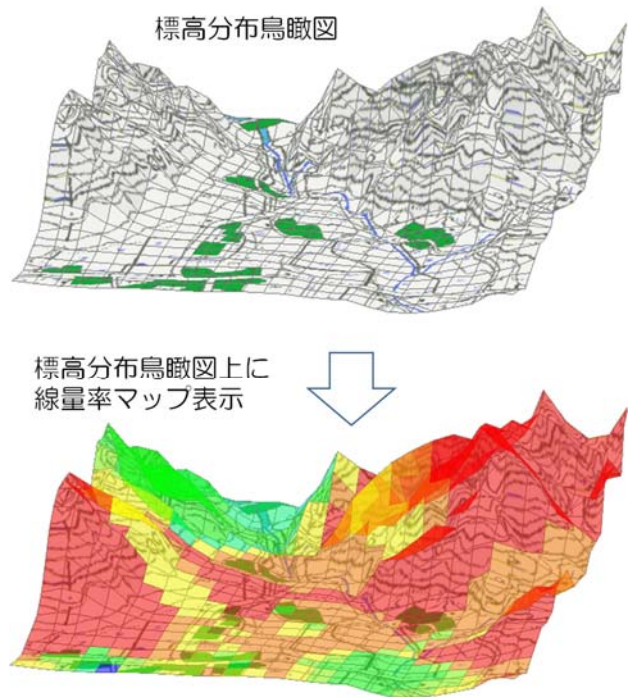


図-9 ガンマ線の直接線やスカイシャイン、散乱線を考慮した放射線解析の概念図

次に、本システムの結果を利用して、マップを標高や地形データに基づいた三次元で表示ができ、図-10上段に示すように地形の鳥瞰図を得ることができる。さらに、図-10下段に示すように、その地図上に線量率マップを重ねることができ、標高や地形に応じた線量率分布を観察することが可能である。

また、平面マップ上の任意の直線に沿った標高分布や除染前後の線量率分布を表示させることも可能である。図-8の平面線量率マップ上の直線A-A'に沿った分布を図-11に示す。横軸は直線に沿った位置が始点からの距離[m]で示されている。標高分布が緑色の直線で示されており、除染前の測定値に基づく線量率分布は赤プロット、除染後の予測線量率分布は黒丸白抜きプロット、除染後の測定値に基づく線量率分布は青プロットで示している。このグラフから、除染後の予測値と測定値の比較が定量的に比較可能である。さらに、図-11下段に、除染前後の線量率の比を線量低減率として示した。除染後の線量率として予測値又は測定値を用いた場合で比較を行い、この例では20%程度の範囲で両者の一致がみられた。



※標高と線量率の関係が容易に把握できる。  
図-10 鳥瞰図による地形と線量率マップの出力

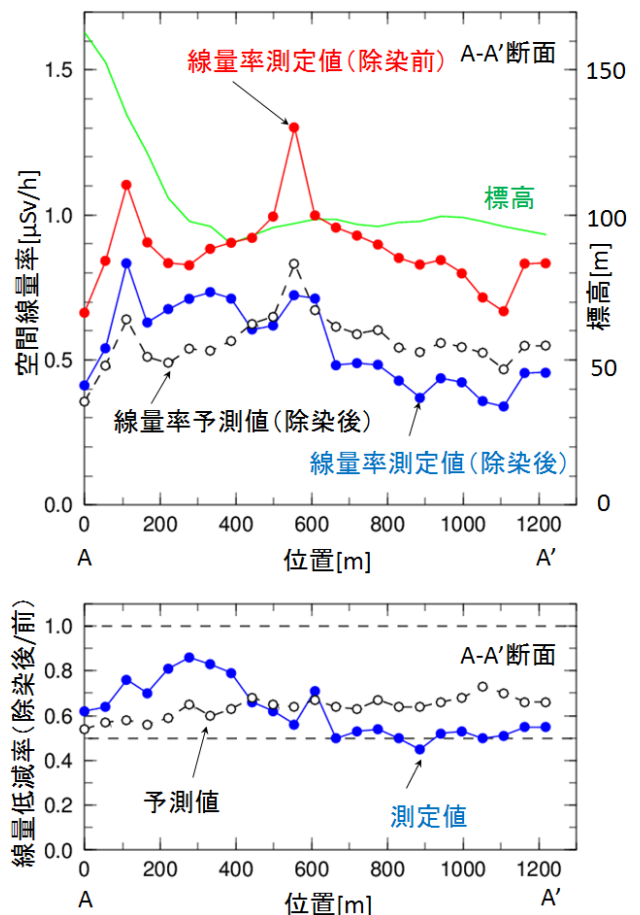


図-11 A-A'断面に沿った線量率と標高の分布(上)および線量低減率の分布(下)

### 3. LED シンチレーションファイバー検出器

#### 3.1 概要

プラスチックシンチレータは放射線が入射して反応すると蛍光を発する。これを光ファイバーの素材としたものが図-12 に示したプラスチックシンチレーションファイバーであり、放射線検出器の材料として広く利用されている。図-13 に示すように、蛍光による光は全反射によりファイバー内を伝播し、その両端に受光部（光電子増倍管）を設置することでその蛍光を検出することができる<sup>4)</sup>。10m 程度の距離があると発光点から端に達するまでに両端で数ナノ秒から数十ナノ秒の時間差が生じるため、その時間差を測定することで放射線が入射した位置を確定することができる。

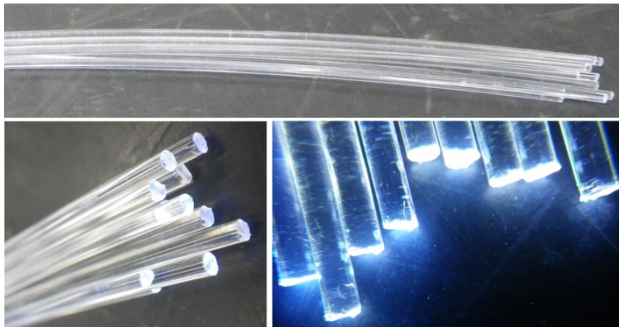


図-12 プラスチックシンチレーションファイバー

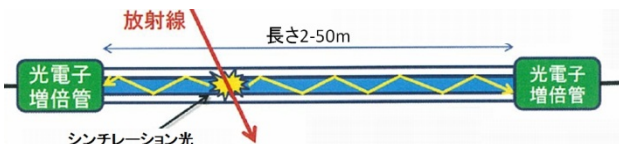


図-13 プラスチックシンチレーションファイバー内での放射線による蛍光の発生と光の伝播<sup>2)</sup>

図-14 に本検出器のシステム構成を示す。ファイバー両端に到達した光は光電子増倍管により電気信号として増幅される。この2つの信号は時間波高変換器(TAC)により、信号到着時間差を入射位置情報とした波高信号に変換される。次に、デジタル信号変換器(ADC)で波高信号が位置情報のデジタル信号に変換され、次のチャンネル分析器(MCA)により位置に相当するチャンネル毎の信号数が計数されて行く。図-14 に示すようにこの計数の位置分布が表示されるが、検出効率等の補正係数により放射線量分布に変換される。さらに、線量率（時間当たりの線量）を算出するため、計数率の高低により蓄積

時間を可変にできるように、それを決定するパラメータである時定数を数秒から数十秒に設定可能とした。

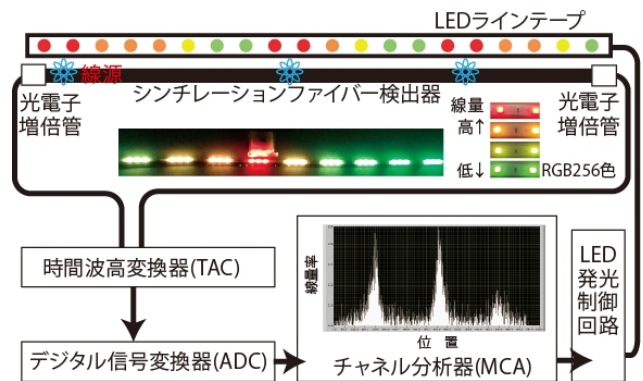


図-14 LED シンチレーションファイバー検出器のシステム構成

線量率の色表示には LED ラインテープを用い、シンチレーションファイバー検出器に並べて設置した。MCA で得られた計数率分布を当該位置の LED の発光色に対応させるため、LED 発光制御回路及びその制御ソフトを開発し、その場所の線量率に応じたりアルタイムでの LED の色表示を実現した。図-15 に10m 仕様の LED シンチレーションファイバー検出器を示す。RGB256 色表示の LED を用いているが、線量率の高い方から赤、オレンジ、黄、緑の4色で高低を表現している。図-16 に示すように、線源を置いた付近が赤く光っており、線量率の高低に従った色表示がされていることがわかる。

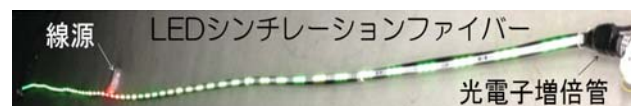


図-15 LED シンチレーションファイバー検出器の全景(10m 仕様)



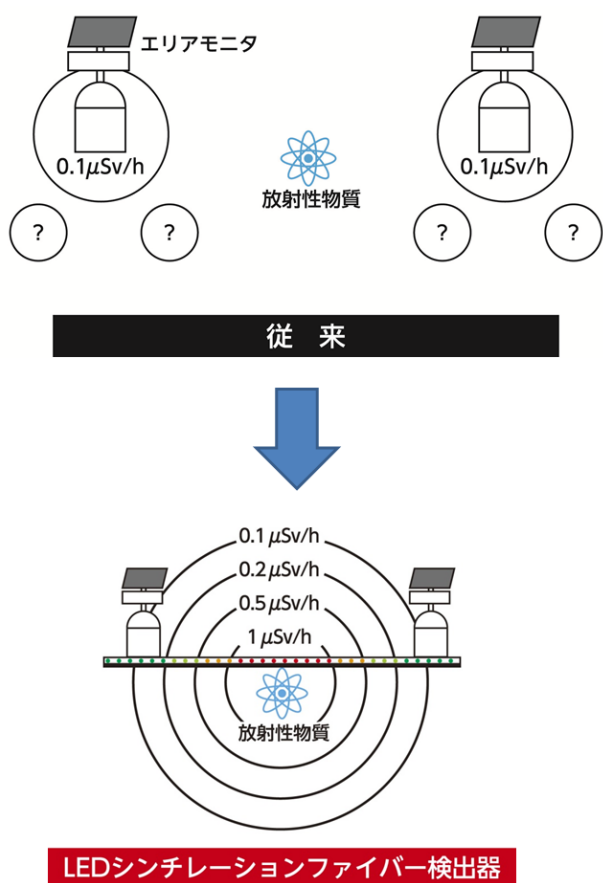
図-16 線源による LED 色表示の例

#### 3.2 特徴と拡張性

従来のシンチレーションファイバー検出器は、設置エリアの線量率を線的かつ連続的に一括測定し、PC 画面上にその結果表示をするが、高線量率を感知しても当該部位や場所の特定に専門的な知識と時

間を要するという課題があった。また、**図-17**に示すようにエアリモニター等の線量計を用いる測定方法もあるが、測定場所が点でありそれがカバーするエリアが非常に限定的で、連続的な測定は現実的でない。一方、本検出器は、設置エリアの線量率分布を見落としなく連続的かつリアルタイムに可視化でき、広範囲を一度に測定が可能である。本体の長さは1ユニットで最長50mまで適用が可能である。また、データを遠隔で監視かつ記録を行なう事も可能であるため、複数のユニットを連続配置することで長距離に亘って設置し、ネットワークを介した総合的な線量率の監視と異常の検知を行なうことが可能である。

本検出器は屈曲可能であるため、曲がった経路や複雑な形状に沿った設置と測定が可能である。また、耐水性と耐候性に優れているため、屋外での使用が可能である。さらに、線量率が数mSv/hまで精度良く測定可能であり、現在の除染活動や中間貯蔵施設予定地においても十分適用可能な測定レンジを有している。

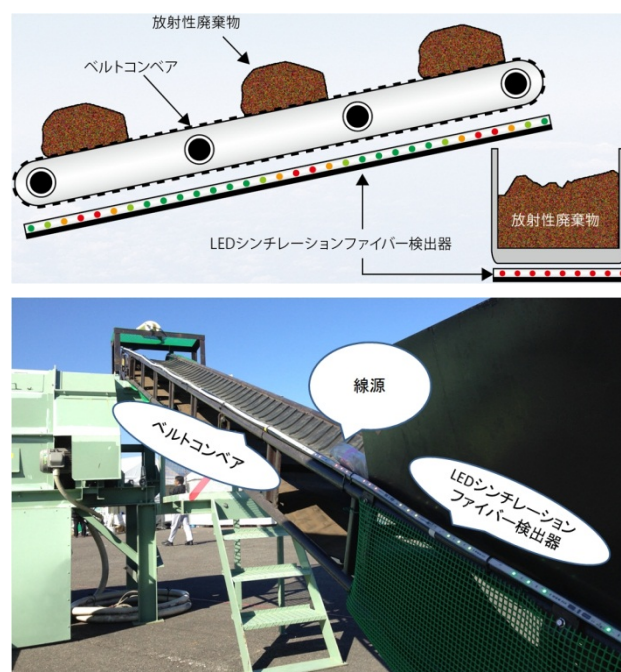


**図-17** LEDシンチレーションファイバー検出器と従来品との線源位置特定の違い

### 3.3 想定する適用事例

放射線従事者および一般人が受ける放射線被ばく量の許容限度は法律で定められている。それを超えないために、放射線施設では管理区域境界や敷地境界において、一般的に空間線量率の監視や個人線量計による管理が行なわれている。ここでは、想定される本検出器の適用事例に関して述べる。

廃棄物は、選別や破砕、運搬等を行なう処理施設内において、ベルトコンベア等で自動移送される場合がある。様々な放射能濃度の廃棄物が移動し、線量率分布も時々刻々と変化する中、**図-18**に示すようにベルトコンベア等の移動装置に沿った本検出器の設置により、作業時やメンテナンス時に作業者が設備付近の線量率を視覚的に把握し、安全対策を講じることが可能になる。



**図-18** 処理施設ベルトコンベア等でのLEDシンチレーションファイバー検出器の適用イメージ

貯蔵施設内では、高濃度の放射能を含む土壌や焼却灰等が容器に収納され保管される。**図-19**に示すように、本検出器を施設内の廃棄物周辺や壁沿いに設置することで、貯蔵容器から放射性物質の漏洩等が発生した場合、線量率の上昇による近傍のLED表示の変化から、迅速な発見と位置の特定を行なうことが可能となる。

本検出器を施設や敷地の境界に連続的に設置することで、**図-20**に示すように施設内外で移動する放射性廃棄物によるその場所の線量率の変化を視覚的に監視可能である。また、作業者が常に周囲の線量

率を把握することが可能である。図-21に、中間貯蔵施設の施設内設備周辺と敷地境界において長距離に亘り本検出器の配置した例を示した。このように敷地境界への設置により、一般人にも空間線量率が視覚的に把握できることが可能となり安心感の醸成と共に周辺住民とのリスクコミュニケーションの円滑化が期待される。

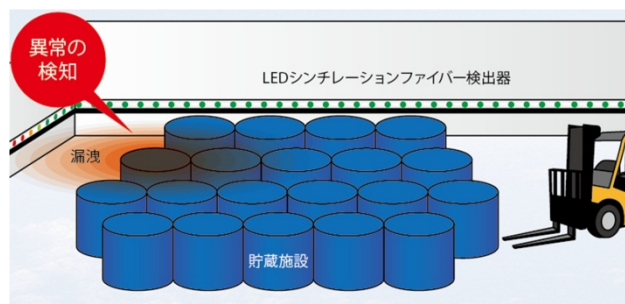


図-19 LEDシンチレーションファイバー検出器による貯蔵施設等における漏洩の検知イメージ



図-20 施設や敷地の境界におけるLEDシンチレーションファイバー検出器の適用イメージ

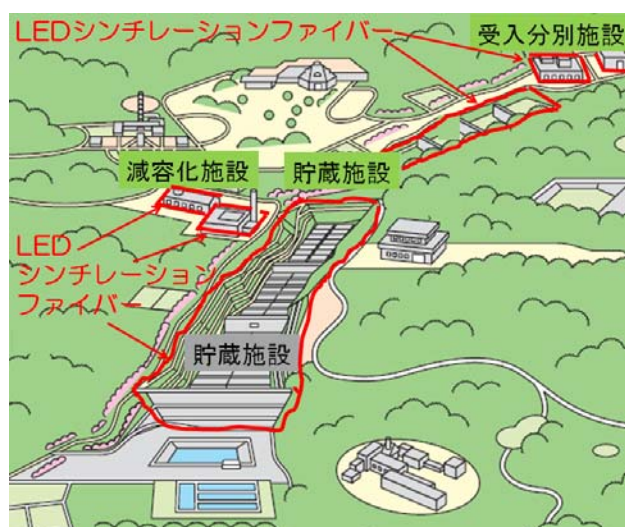


図-21 中間貯蔵施設におけるLEDシンチレーションファイバー検出器の配置イメージ  
(背景図は文献リより引用)

#### 4. まとめ

東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故からの福島復興再生を目指して大規模な除染活動が現在まで行われて来ており、除染廃棄物を貯蔵する中間貯蔵施設の建設も間近となっている。眼に見えない放射線を計測して可視化する技術は、作業員や周辺住民の安心と安全を確保するために非常に重要となってきた。

今回、線量率と位置の情報を同時に計測してパソコン上に記録できるGPSモニタリングシステムを開発し、この線量率測定値を基にした線量率マップ作成と除染後の予測線量率マップ作成が可能なソフトウェアである空間線量マップ予測システムDose3DMapを開発した。また、LEDシンチレーションファイバー検出器を開発し、線状に配置したLED群の色別表示で空間線量率レベルのリアルタイム可視化を実現した。

線量率の計測情報や解析情報を効率良く可視化が可能になったことにより、線量率調査に関わる作業や事務処理に対し大きく効率化が図られ、作業員や周辺住民との放射線リスクコミュニケーションの円滑化に大きく寄与すると考えられる。また、今後の除染作業や中間貯蔵施設建設にあたり、工事計画の検討や被ばく線量の事前評価に大いに役立つことが期待される。ここで紹介したシステムが福島の復興再生および住民の安心安全に役立てば幸甚である。

#### 謝辞

GPSモニタリングシステムの開発にあたり、ジオサーフ株式会社の協力を得た。ここに御礼申し上げます。Dose3DMapの開発にあたり、株式会社計算力学研究センターの協力を得た。ここに御礼申し上げます。LEDシンチレーションファイバー検出器の開発にあたり、日本放射線エンジニアリング株式会社、株式会社アクティオの協力を得た。ここに御礼申し上げます。

#### <参考文献>

- 1) “中間貯蔵施設の調査について(パンフレット)”, 環境省除染情報サイト (<http://josen.env.go.jp/index.html>).
- 2) “除染土壌などの中間貯蔵施設について(パンフレット)”, 環境省除染情報サイト
- 3) “X-5 Monte Carlo Team, MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5”, LA-UR-03-1987, Los Alamos National Laboratory (LANL) (2003).
- 4) “高速炉開発で培われた光ファイバー型測定器”, JAEA ニュース第50号, 独立行政法人日本原子力研究開発機構.