# 放射性セシウム沈着量の面的調査

## 1. 調査目的

福島第一原発から80km圏内において可搬型ゲルマニウム半導体検出器を用いたin-situ 測定を行い、現在の放射性セシウム沈着量の詳細な分布状況を把握するとともに、過去の測 定結果との比較により沈着量の経時的変化を解析する。

## 2. 調査内容

### (1)調査期間

平成 29 年 9 月調査: 平成 29 年 8 月 30 日~10 月 11 日

(2)調査機関

原子力機構、(公財)日本分析センター、(公財)放射線計測協会、(公財)原子力安全技術センター

(3)調査箇所

今回の調査における放射性セシウム沈着量の測定箇所を図-1 に示す。測定箇所について は、福島第一原発から80 km 圏内の地域を5 km×5 kmのメッシュに分割し、福島第一原発 事故以前にも人が居住しなかった地域(非可住区域)を除いて各メッシュ内で公有地を中心 に人為的なかく乱の少ない平坦な開かれた土地である等測定に適した1箇所を選定した。な お、測定予定地点に人為的な変化が認められた場合であっても近傍の変化のない適当な場所 の選定が難しい場合には場所を移動せず測定を実施した。測定箇所までの道路が通行止め等 により測定が困難であった箇所を除いた 384 箇所において測定を実施した。

(4)調査内容の詳細

(a) 放射性セシウムの土壌濃度マップの作成

放射性セシウム沈着量の測定にあたっては、可搬型ゲルマニウム半導体検出器を地表面に 向けて1 m高さに設置してガンマ線スペクトル測定を実施し、スペクトル解析(核種分析) により放射性セシウムの土壌への沈着量(土壌単位面積あたりの放射性核種ごとの放射能量。 単位は Bq/m<sup>2</sup>)を測定した。測定時間は 30 分とした。ただし、天然放射線の測定精度向上を ねらいとして全測定箇所の1割程度は 60 分測定とした。

in-situ 測定は、文部科学省のマニュアル<sup>1</sup> に基づき実施し、解析の基礎データは国際放 射線単位測定委員会のレポート<sup>2</sup> を参照した。また、in-situ 測定によるデータ解析で使用 する重量緩衝深度<sup>3</sup> には、本事業で別途実施している土壌深度分布調査によって導出した実 効的な重量緩衝深度<sup>4</sup>の幾何平均値を用いた。本結果から推定された平成 29 年 10 月時点の 実効的な重量緩衝深度は 3.52 g/cm<sup>2</sup>であった<sup>5</sup>。

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> 原子力規制委員会, "ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法," 放射能測定法シリーズ 33, (平成 29 年 3 月).

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> 国際放射線単位測定委員会(ICRU: International Commission on Radiation Units and Measurements), "Gamma-ray spectroscopy in the Environment," ICRU Report 53, (1994).

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> 放射性セシウムの放射能濃度が指数関数的に減少し土壌表層に比べて 1/e になる深さで、深度分布の形状を表す指標。

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> 実際の放射性セシウムの分布は指数関数に適合しない場合もある。その場合に、指数関数的分布に等価な地上1m高さの 空間線量率を与える重量緩衝深度を実効的な重量緩衝深度という。ここでの実効的な重量緩衝深度は指数関数から求めた 重量緩衝深度と実効的な重量緩衝深度の両者を含む幾何平均値である。

⁵ 本報告書(″平成 29 年度放射性物質測定調査委託費 (東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分

GPS を用いて測定箇所の位置情報を取得し、これらの情報を基に福島第一原発から 80 km 圏内の放射性セシウムの土壌への沈着量を記した土壌濃度マップを作成した。なお、平成 29 年9月調査については同年 10月1日時点の値に補正を行った。

(b) 放射性セシウムの土壌濃度マップの細密化

空間線量率に寄与している人工放射性核種のほとんどが放射性セシウムであるとの仮定 の下、過去の調査において、かく乱の少ない平坦地では土壌への放射性セシウムの沈着量と 空間線量率が良好な直線関係を示すことが確認されている。そこで、in-situ 測定を行った 箇所で NaI (TI) シンチレーション式サーベイメータ(日立製作所製 TCS-171B)を用いて空間 線量率の測定を同時に行い、調査時点における空間線量率と放射性セシウム沈着量との相関 関係を求めることで、放射性セシウム沈着量を直接に測定していない箇所における放射性セ シウムの沈着量を空間線量率<sup>6</sup>から評価した。この放射性セシウム沈着量の空間線量率から の評価結果を基に、(a) で作成した放射性セシウムの土壌濃度マップを細密化し、全体の放 射性セシウム沈着量の可視化を行った。

### 3. 結果と考察

#### (1) 測定結果の信頼性の確認

放射性セシウム沈着量の測定結果については、使用した一部のゲルマニウム半導体検出器 に対して標準線源を用いた校正を実施するとともに、使用するゲルマニウム半導体検出器の 全てを用いて同一箇所で測定を行い、同様の沈着量評価値が得られることを確認した。また、 in-situ測定から求められた空間線量率の評価値と同一箇所でグレイ(Gy)単位(空気カーマ) での出力が可能な NaI サーベイメータ(日立製作所製 TCS-171B)により測定した地表面か ら1 m 高さの空間線量率の測定結果を比較したところ、全体に良く一致した(図-2)。この 結果より、スクレーパプレートにより観察された平均的な重量緩衝深度を用いた in-situ 測 定の妥当性が確認できた。なお、ここでは ICRU Report 53 に従ってμGy/h で表した空気カ ーマ率について比較を行っている。

# (2) 放射性セシウムの土壌濃度マップ

今回の調査における福島第一原発から 80 km 圏内を中心としたエリアの放射性セシウム の土壌濃度マップを図-3 に示す。

放射性セシウムの沈着量を評価する際に重量緩衝深度の幾何平均値を用いたが、重量緩衝 深度の分布に伴う不確かさは最大約46%(90%信頼区間)であった。

(3) 放射性セシウムの土壌濃度マップの細密化

放射性セシウムの土壌濃度マップを細密化するために、今回の調査において空間線量率及 び放射性セシウム沈着量の両方を測定している約 380 箇所における空間線量率と放射性セ シウム沈着量の測定結果の相関関係を調べた(図-4)。比較にあたっては、天然放射性核種 からの空間線量率への寄与が 0.05 μ Sv/h と仮定<sup>7</sup>し、この寄与分を全ての空間線量率の測 定値から一律に差し引いた値を用いた。

その結果、空間線量率とセシウム 134 沈着量、空間線量率とセシウム 137 沈着量との間に

布データの集約)事業 成果報告書)の「土壌中の放射性セシウムの深度分布調査」を参照のこと。

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup>本報告書("平成29年度放射性物質測定調査委託費(東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分 布データの集約)事業"成果報告書)の「人為的なかく乱の少ない平坦な開かれた土地における空間線量率分布測定」を参 照のこと。

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> 日本原子力研究開発機構, "平成 26 年度放射性物質測定調査委託費(東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う 放射性物質の分布データの集約及び移行モデルの開発)事業, "成果報告書, page. 63, (平成 27 年 3 月).

は直線関係が確認された。これはサーベイメータにより測定した空間線量率にはセシウム 134 とセシウム 137 の両方の寄与があるが、これら核種の沈着量の比は一定と考えることが できるので、空間線量率とそれぞれの核種の沈着量は直線関係になるためである。そこで、 同様に人為的なかく乱の少ない平坦地約 6,570 箇所で測定された空間線量率<sup>6</sup> について、 この空間線量率と放射性セシウム沈着量の相関関係を基に放射性セシウム沈着量を評価し た。空間線量率から評価した放射性セシウム沈着量を、in-situ 測定及び土壌採取により直 接に求めた沈着量に加えて記した土壌濃度マップを作成した(図-5)。

本手法による算出結果の妥当性を確認するために、in-situ 測定による結果と最近傍の空間線量率から推定した放射性セシウムの沈着量を比較した。比較は、散布図による比較及び 相対偏差のヒストグラムによる比較を行った。ここで相対偏差は、下記のように定義する。

図-6(a)に示した全データによる散布図を見るとプロットは1:1の直線の周辺に分布し、全体的にはよい相関性が確認できるものの、低い沈着量の領域のプロットのばらつきは大きいことがわかる。一方、相対偏差のヒストグラムを見ると分布の形状は0付近を頂点にした正規分布に近いものの、推定値が測定値の2倍以上を示す点が15%以上確認された。一方、最近傍点が20m以内のデータのみで処理したグラフを図-6(b)に示す。このヒストグラムも全データと大きく傾向が変わらなかったことから、このばらつきは手法の限界であると理解することが出来る。すなわち、空間線量率が低い場所では、天然放射性核種由来の空間線量率を一律で減算している影響及び放射性セシウム沈着量への換算に伴う誤差が大きくなることが示唆される。一方、高線量率の測定結果については、よい相関関係を有している。本手法は、全体を可視化し過去との比較を行う手法としては有効であるため、継続的に本手法を踏襲し、全体のマップを作成する。一方、変化傾向については今までどおり in-situ 測定の結果で議論する。

(4) 放射性セシウム沈着量の長期的変化

平成 24 年 3 月調査から平成 29 年 9 月調査までの 10 の時期のセシウム 134 土壌濃度マッ プを図-7 に、同じくセシウム 137 土壌濃度マップを図-8 に示す。約 79 ヶ月の間にセシウム 134 土壌濃度マップでは赤や黄色で示される比較的高い濃度の測定箇所がほとんどなくなり 沈着量の減少の様子が確認できる。セシウム 137 はセシウム 134 に比べて半減期が長いため 濃度変化は顕著ではない。

平成23年6月調査では、各調査箇所の放射性セシウムの平均的な沈着量を得るため、各 調査箇所の3m四方内から5地点の土壌を採取し、固定式ゲルマニウム半導体検出器で核種 分析した結果の平均値を求めた。しかし、3m四方内の非常に狭い範囲ですら、1箇所で採 取した5試料の放射性セシウムの放射能濃度の変動係数が平均で36%と大きかった<sup>8</sup>。そこ で、放射性セシウム沈着量の経時変化の確認にあたっては、各箇所の平均的な沈着量を測定 可能なin-situ測定を実施した平成24年8月調査と各時期の調査における測定結果の比を 算出し、その平均値を各時期における相対的な放射性セシウムの沈着量として時間変化を考 察する。また、各時期の比の標準偏差を測定値のばらつきとして考察に加える。さらに、測 定値は過去の測定時期において測定場所に除染などの状況変化が確認されたことが一度も 無い場合のデータとすべてのデータについて実施し、人為的なかく乱の放射性セシウム沈着

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> 文部科学省、農林水産省、"平成23年度科学技術戦略推進費 東京電力株式会社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の分布状況等に関する調査研究結果、"放射線量等分布マップの作成等に関する報告書(第1編)(文部科学省), page.1-54, (平成24年3月).

量に及ぼす影響を考察した。

図-9 に平成 24 年 3 月調査から平成 29 年 9 月調査の放射性セシウム沈着量の変化傾向に ついて示す。沈着量の変化の評価にあたっては、空間線量率や沈着量の低減率からの判断で はなく、測定員による現地確認の他、測定箇所の近隣の方や地元自治体への問合せにより情 報が得られた箇所を除染の実施が確認された箇所とした。必ずしもすべての除染実施の情報 が得られたわけではないので、この分類の段階で一定の不確かさが含まれる。なお、除染等 の実施が確認された箇所での測定でも同じ重量緩衝深度を適用し沈着量を評価しているた め、これら地点では実際の沈着量よりも過小評価される<sup>®</sup>。除染箇所を除外した黄色のシン ボルは、放射性セシウムの半減期から計算した理論的な曲線上に一致した。一方、全データ を示す青色のシンボルは半減期の曲線から下方にプロットが位置しており、除染等による放 射性セシウムの沈着量減少が認められた。2015年以降については、t検定により有意差が確 認された。この結果から、事故により沈着した放射性セシウムは除染等人為的かく乱の影響 を除けば物理的半減期に従い減少していることがわかる。

#### (5) 天然放射性核種の評価

可搬型ゲルマニウム半導体検出器による in-situ 測定では、放射性セシウム沈着量の評価 と同時に土壌中に含まれる天然放射性核種濃度の定量も行った。ウラン系列の全核種による 空間線量率のうち鉛 214 (Pb-214) とビスマス 214 (Bi-214) からの寄与が 98%、トリウム 系列に関してはタリウム 208(TI-208)とアクチニウム 228(Ac-228)の寄与が 90%を占め る<sup>10</sup> ため、これらの核種及びカリウム 40 (K-40) からの空間線量率を評価することで天然放 射性核種に起因する空間線量率全体をほぼ評価することが可能であることから、対象核種は ウラン系列から Pb-214、Bi-214、トリウム系列から TI-208、Ac-228、及び K-40 とした。核 種濃度の定量は、Pb-214は352 keV、Bi-214は1765 keV、TI-208は583 keV、Ac-228は911 keV、K-40は1461 keVのガンマ線に着目して実施した。

平成 29 年 9 月調査において in-situ 測定を実施した 384 箇所のうち、上記天然放射性核 種5核種がすべて有意検出された350箇所のデータを対象として、天然放射性核種による空 間線量率を評価した。なお、若干の降雨の中での測定結果も含まれる(全測定箇所の20%程 度)。5 核種について ICRU Report 53 の Table5.2 の換算係数を用いて調査箇所ごとに空気 カーマ率を求めた結果、この 350 箇所の平均値は 0.034 µ Gy/h であった。これは空間線量率 (周辺線量当量率) では 0.04  $\mu$  Sv/h に相当する<sup>11</sup>。前述のように、今回の in-situ 測定で は天然放射性核種起因の全てのガンマ線を評価対象としていないことを踏まえると天然放 射性核種による空間線量率を0.05 μSv/h<sup>®</sup>と仮定したことは妥当である。

5 核種による空気カーマ率の範囲ごとの頻度分布を図-10 に示す。また、各調査箇所での 5 核種による空気カーマ率の合計値を地図上にプロットしたものを図-11 に示す。なお、平 成22年度原子力発電所周辺環境放射線測定結果報告書(福島県、東京電力株式会社)によ ると、震災前の平成 22 年 4 月 1 日から平成 23 年 3 月 10 日までの期間、地上約 3m のモニタ リングポスト(NaI シンチレーション検出器)23 箇所で福島県が測定した空間線量率(期間 平均値)は0.036~0.051μGy/hと報告されており、本結果とも矛盾しない。

## 4.まとめ

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> 日本原子力研究開発機構"平成 28 年度放射性物質測定調査委託費(東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴 う放射性物質の分布データの集約)事業"成果報告書, page 61 (平成 28 年 3 月)

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> K.Saito, P.Jacob, "Fundamental data on environmental gamma-ray fields in the air due to sources in the ground, "JAERI-Data/Code 98-001, (1998 年 2 月). ''ICRP," Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation," ICRP

Publication 74, (1996).

福島第一原発から80 km 圏内を中心に平成29年9月に可搬型ゲルマニウム半導体検出器 によるin-situ測定等による放射性セシウムの土壌への沈着量(土壌沈着量)の測定を384 箇所において実施した。その結果をセシウム134またはセシウム137の土壌濃度マップとし て示した。

得られたセシウム 134 またはセシウム 137 の沈着量と、土壌沈着量測定箇所と同一箇所で サーベイメータにより測定した空間線量率との相関関係から、空間線量率のみの測定が実施 された約 6,570 箇所について放射性セシウム沈着量を評価した。これを in-situ 測定及び土 壌採取により直接に求めた箇所のマップに加えて記すことで細密な土壌濃度マップを作成 した。

放射性セシウム沈着量の経時変化について、過去の測定時期において除染の実施など状況 変化が一度も確認されなかった箇所の評価と全ての箇所での評価を比較した結果、除染に よる沈着量の有意な減少が確認された。また、除染等箇所を除くと、長期的(平成24年3 月から平成29年9月)な変化では、ほぼ物理減衰に従って減少していることが確認でき た。



Part2



図-2 可搬型ゲルマニウム半導体検出器による in-situ 測定の結果を基に求められた空間 線量率(μ Gy/h)とサーベイメータによる空間線量率(μ Gy/h)の相関 (平成 29 年 8 月 30 日~10 月 11 日に測定)

Part2



図-3 可搬型ゲルマニウム半導体検出器による in-situ 測定等を用いた放射性セシウムの沈着量を記したマップ (平成 29 年 10 月 1 日時点:緩衝深度 β = 3.52 g/cm<sup>2</sup>を用いた解析結果。左図がセシウム 134、右図がセシウム 137)



サーベイメータによる空間線量率 (µSv h-1)

図-4 サーベイメータによる地表面から1m高さの空間線量率と 放射性セシウム沈着量の相関

(緑: セシウム 134 との相関 (データ数 n= 377)、青:空間線量率とセシウム 137 との相関 (データ数 n= 380)を示す。緩衝深度 β = 3.52 g/cm<sup>2</sup>を用いた解析結果。平成 29 年 8 月 30 日~10 月 11 日に測定)



図-5 放射性セシウムの沈着量を記した土壌濃度マップ

(直接に測定した沈着量(in-situ測定を口)に空間線量率と放射性セシウム沈着量の相関関係を基に評価した放射性セシウムの沈着量の評価値(O)を追加。左図がセシウム134、右図がセシウム137。平成29年10月1日時点:緩衝深度β=3.52 g/cm<sup>2</sup>を用いた解析結果)



図-6 in-situ 測定によるセシウム 137 沈着量と最近傍点における定点サーベイによる空 間線量率から推定したセシウム 137 沈着量の比較











図-9 平成24年3月調査から平成29年9月調査の放射性セシウム沈着量の変化 (平成24年8月調査を基準とした各調査での測定結果の比の平均値を比較。誤差棒は比の 標準偏差を示す。上段はセシウム134、下段はセシウム137。)



図-10 天然放射性核種による空気カーマ率の範囲ごとの頻度分布 (平成 29 年 9 月調査:平成 29 年 8 月 30 日~10 月 11 日に測定)



図-11 天然放射性核種による空気カーマ率(µGy/h)の分布 (平成 29 年 9 月調査:平成 29 年 8 月 30 日~10 月 11 日に測定)