

# 放射性セシウム沈着量の面的調査

三上 智、斎藤 公明（原子力機構）

## 1. 調査目的

福島第一原発から 80 km 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变化を解析する。

## 2. 調査内容

### (1) 調査期間

平成 27 年 9 月調査： 平成 27 年 8 月 24 日～10 月 7 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住民が存在しなかった地域（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。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 382 箇所において測定を実施した。このうち 6 箇所については、空間線量率が高いこと等により in-situ 測定が適切に行えないと判断し、平成 23 年 6 月調査と同様に各箇所 5 地点で土壌を採取して土壌試料を作成し、固定式ゲルマニウム半導体検出器を用いて核種分析を実施した。

### (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エネルギー。単位は Bq/m<sup>2</sup>）を測定した。測定時間は 30 分とした。

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緩衝深度<sup>3</sup> は、本事業で別途実施している土壌深度分布調査の結果を基に決定した値＝実効緩衝深度<sup>4</sup> を用いた。平成 27 年 8 月時点の実効緩衝深度は 2.95 g/cm<sup>2</sup> であった<sup>5</sup>。

<sup>1</sup> 文部科学省，“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 20 年 3 月)。

<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>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>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 1 m 高さの空間線量率を与える緩衝深度を実効緩衝深度という。ここでの実効緩衝深度は指数関数から求めた緩衝深度と実効緩衝深度の両者を含む平均値である。

空間線量率が高い場所では、ゲルマニウム半導体検出器による測定の数え落しが高い頻度で起きるため、この現象が起きる可能性のある6箇所においては、各箇所5地点で表層5 cm、直径5 cmの土壌を採取し、それらを良く攪拌して土壌試料を作成し、実験室でゲルマニウム半導体検出器を用いて核種分析を実施した。

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27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

現在、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り、これまでに実施した調査においても、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(Tl)シンチレーション式サーベイメータ（日立アロカメディカル社製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（変動係数（標準偏差を平均値で割った値）で約5%）。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（日立アロカメディカル社製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、全体に非常に良く一致した（図-2）。なお、ここではICRU Report 53に従って $\mu\text{Gy/h}$ 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平均的な実効緩衝深度を用いたが、10~90パーセントイル値の範囲で実効緩衝深度の分布に伴う不確かさは最大約40%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370箇所における空間線量率と放射性

<sup>5</sup> 本報告書（“平成27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「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>6</sup> 本報告書（“平成27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。

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  $0.05 \mu\text{Sv/h}$  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。ここでは、土壌採取により沈着量を測定した箇所の結果は含めていない。

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 沈着量との間に良好な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、同様に人為的なく乱の少ない平坦地約 6,570 箇所<sup>6</sup> 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）。

#### (4) 放射性セシウム沈着量の短期的変化

平成 26 年 11 月調査と平成 27 年 9 月調査の同一箇所での in-situ 測定による放射性セシウム沈着量の相関及び沈着量の合計値による比較を図-6 に示す。回帰直線の傾きは沈着量の大きなデータの影響を受け易く沈着量全体の変化傾向をうまく表さない場合もあるため、ここでは沈着量を各調査で合計したその比率（以下「合計沈着量比」という。）も算出した。地面の状況変化の有無による区別をしない全体としての評価を行うとともに、除染等の影響のある箇所を除外することにより、除染等の影響以外の要因によりどの程度沈着量が減少したかを評価した。なお、GPS データには 20 m 程度の測位誤差が含まれることを考慮し、空間線量率での評価と同様に、平成 26 年 11 月調査で測定した箇所から 20 m の範囲内にある箇所を同一箇所として扱った。

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い合わ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、この分類の段階で以下の評価に一定の不確かさが含まれる。また、除染の実施が確認された箇所及び地面の状況が変化していると判断された箇所を除染等の影響がある箇所としたが、これら箇所でも同じ実効緩衝深度を適用し沈着量を計算している。除染等影響がある箇所における適切な緩衝深度の取扱いは検討すべき課題であり、一部検討を開始したところである<sup>8</sup>。

平成 26 年 11 月調査と平成 27 年 9 月調査における合計沈着量比は、除染等の影響を含めた場合（図-6 の左図）、セシウム 134 に関しては 0.71（物理減衰により予想される比率は 0.75）、セシウム 137 に関しては 0.92（物理減衰により予想される比率は 0.98）と評価された。

一方、除染等の影響を除いて評価した場合（図-6 の右図）、セシウム 134 に関しては 0.74、セシウム 137 に関しては 0.96 と評価された。つまり、“物理減衰により予想される比率”に対する合計沈着量比の比率はセシウム 134 で 0.99、セシウム 137 で 0.98 であり、セシウム 134、セシウム 137 とともに沈着量の変化率が物理減衰により予想される比率とほぼ同等であることがわかった。

<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）。

<sup>8</sup> 本報告書（“平成 27 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「土壌中の放射性セシウムの深度分布調査」の Appendix-2「深度分布の解析式にのらない深度分布に対する実効的な重量緩衝深度の算出」を参照のこと。

以上の結果から、平成 26 年 11 月と平成 27 年 9 月の間で放射性セシウムが水平方向に移動することによる沈着量の減少はほとんど観察されなかった。

また、除染の実施が確認できた箇所等を含めた評価（図-6 左図）と除外した評価（図-6 右図）とを比較した結果、セシウム 134、セシウム 137 とともに相対比で 5%程度の低減率であり、この期間の比較では除染の有無による明確な差は認められなかった。

#### (5) 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 27 年 9 月調査までの 8 つの時期のセシウム 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 42 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 3 m 四方内から 5 地点の土壌を採取し、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、3 m 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>9</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 3 月調査と今回の調査の放射性セシウム沈着量の結果について比較を行った（図-9）。

前項と同様、全体としての評価に加えて、除染の実施が確認された箇所及び地面の状況が変化していると判断された箇所を除染等の影響がある箇所として、除染等の影響以外の要因によりどの程度減少したかを評価した。

その結果、除染等の影響を含めて評価した場合（図-9 の左図）、平成 24 年 3 月調査から平成 27 年 9 月調査までの約 42 ヶ月間における合計沈着量比は、セシウム 134 に関しては 0.24（物理減衰により予想される比率は 0.29）、セシウム 137 に関しては 0.75（物理減衰により予想される比率は 0.92）と評価された。

一方、除染等の影響を除いて評価した場合（図-9 の右図）、セシウム 134 に関しては 0.28、セシウム 137 に関しては 0.88 と評価された。すなわち、物理減衰により予想される比率に対する合計沈着量比の比率はセシウム 134、セシウム 137 とともに 0.96 であり、測定評価に伴う不確かさを考慮すると、沈着量の減少率は物理減衰とほぼ同等と評価された。

図-10 に平成 24 年 3 月調査から平成 27 年 9 月調査までの放射性セシウム沈着量の変化を示す。除染箇所等を除外するとほぼ放射性セシウムの半減期に従って減少していることがわかる。さらに除染箇所等を除外したうえで避難指示区域内と区域外に分けて評価した場合でも両者に差は無くやはり放射性セシウムの半減期に従って減少してきている（図-11）。

このように地面の状況が変化していない箇所では、長期の評価においても、放射性セシウムが水平方向に移動することによる沈着量の減少は小さい。また、除染の実施が確認できた箇所等を含めた評価（図-9 左図）と除外した評価（図-9 右図）とを比較した結果、セシウム 134、セシウム 137 とともに相対比で 15%程度の低減効果が観察された。

## 4. まとめ

福島第一原発から 80 km 圏内を中心に平成 27 年 9 月に可搬型ゲルマニウム半導体検出器

<sup>9</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）。

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 382 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すべて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、除染の実施が確認された箇所及び地表面の状況が変化していると判断された箇所を除外した評価においては、短期的（平成 26 年 11 月と平成 27 年 10 月）な変化では沈着量の減少はほとんど観察されず（2%程度）、物理減衰とほぼ同等であった。また、長期的（平成 24 年 3 月と平成 27 年 10 月）な変化でも短期的変化と同様に沈着量の減少はほとんど観察されず（4%程度）、物理減衰とほぼ同等であった。

これに対し、除染の実施が確認できた箇所等を含めた評価と除外した評価とを相対比で比較した結果、短期的比較（10 ヶ月）ではセシウム 134、セシウム 137 ともに明確には認められなかったが、長期的比較（42 ヶ月）ではセシウム 134、セシウム 137 ともに 15%程度の低減効果が観察された。なお、除染の実施が確認された箇所及び地面の状況が変化していると判断された箇所を除染等の影響がある箇所としたが、これら箇所でも同じ実効緩衝深度を適用し沈着量を計算している。除染等影響がある箇所における適切な緩衝深度の取扱いは検討すべき課題であり、一部検討を開始したところである。

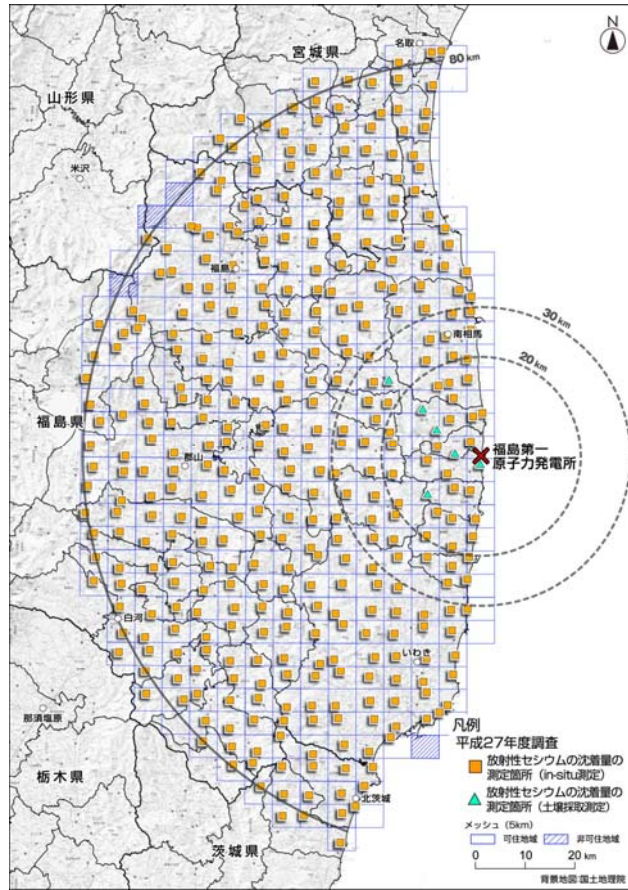


図-1 可搬型ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定等による放射性セシウム沈着量の測定箇所

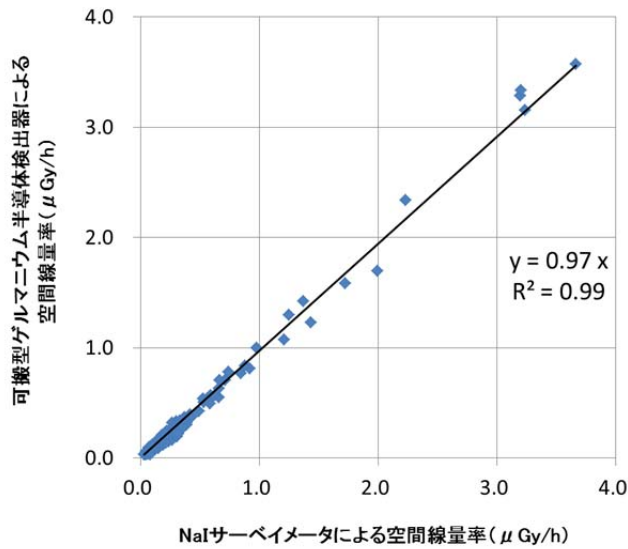


図-2 可搬型ゲルマニウム半導体検出器による in-situ 測定の結果を基に求められた空間線量率 ( $\mu\text{Gy/h}$ ) とサーベイメータによる空間線量率 ( $\mu\text{Gy/h}$ ) の相関 (平成 27 年 8 月 24 日～10 月 7 日に測定)



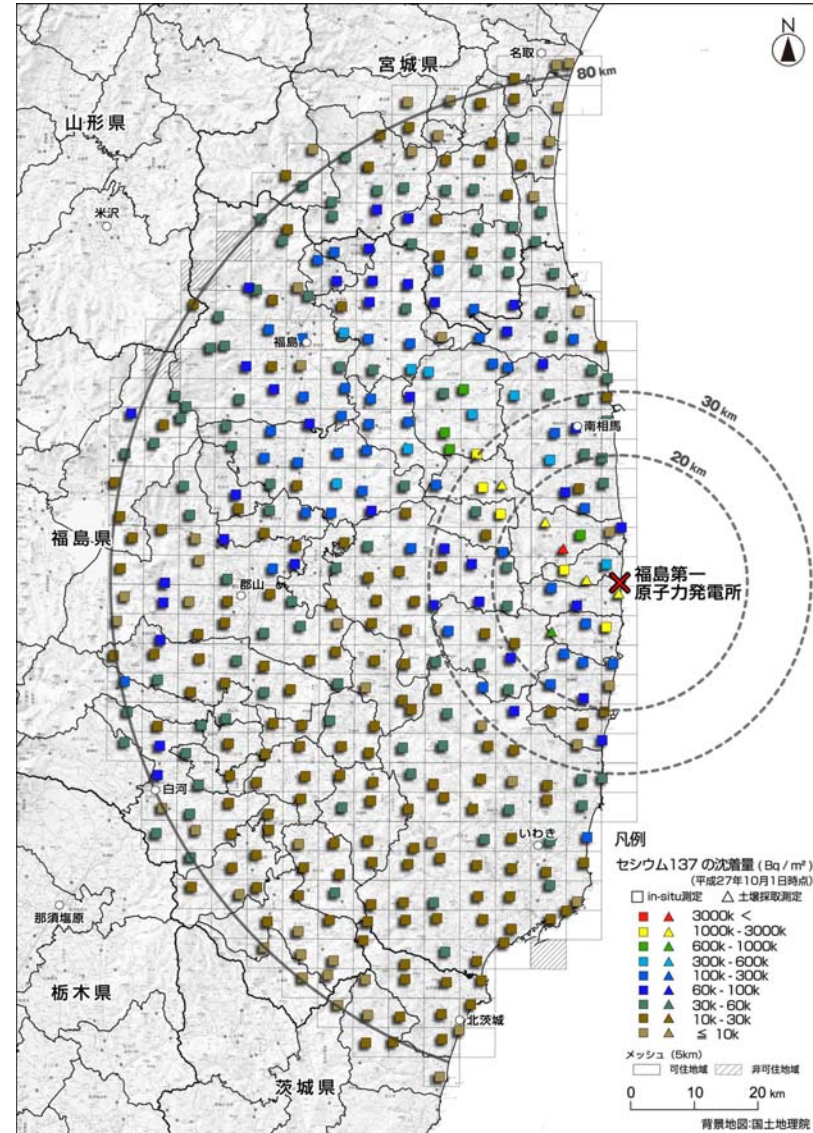
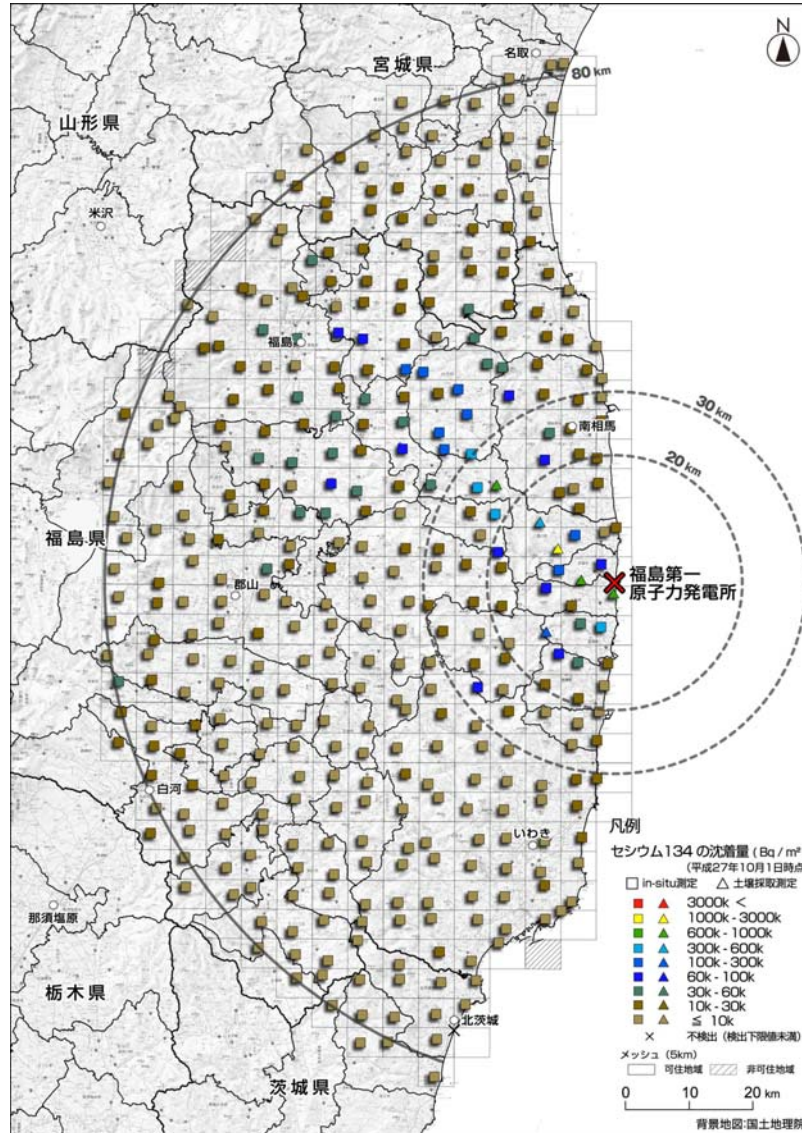


図-3 可搬型ゲルマニウム半導体検出器による in-situ 測定等を用いた放射性セシウムの沈着量を記したマップ  
(平成27年10月1日時点: 緩衝深度  $\beta = 2.95 \text{ g/cm}^2$  を用いた解析結果。左図がセシウム134、右図がセシウム137)

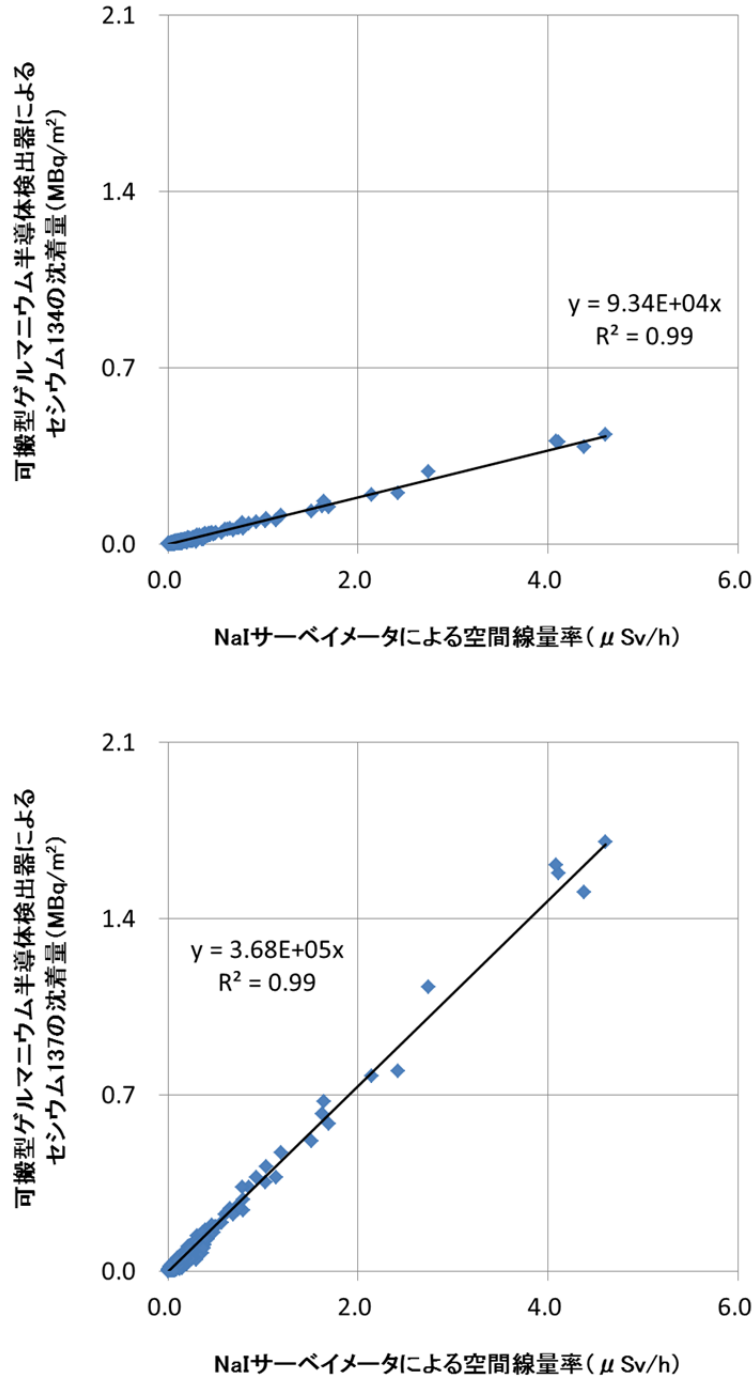


図-4 サーベイメータによる地表面から1 m高さの空間線量率と放射性セシウム沈着量の相関

(上図は空間線量率とセシウム134との相関(データ数 n=375)、下図は空間線量率とセシウム137との相関(データ数 n=376)を示す。緩衝深度  $\beta = 2.95 \text{ g/cm}^2$  を用いた解析結果。平成27年8月24日~10月7日に測定)



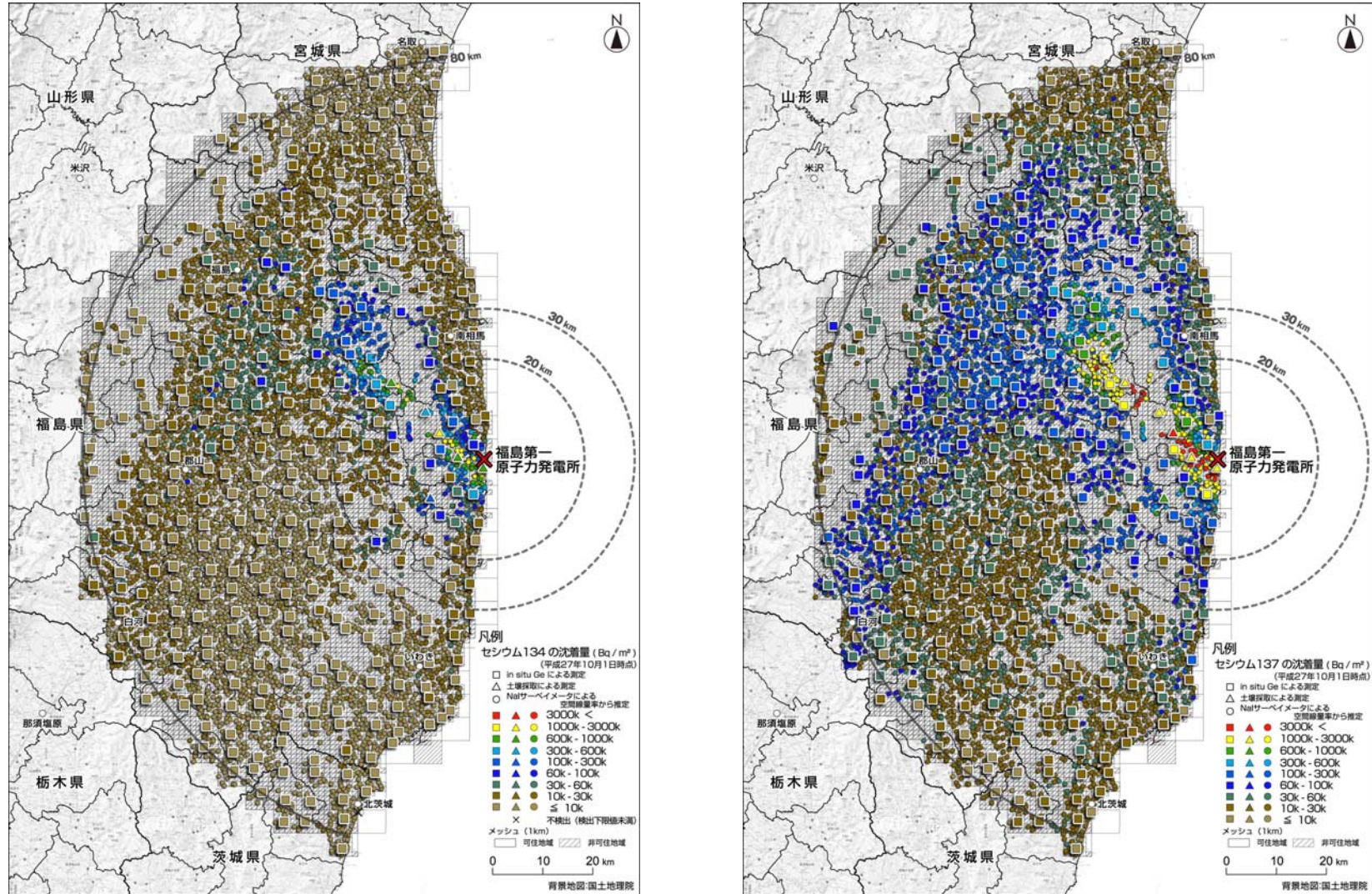
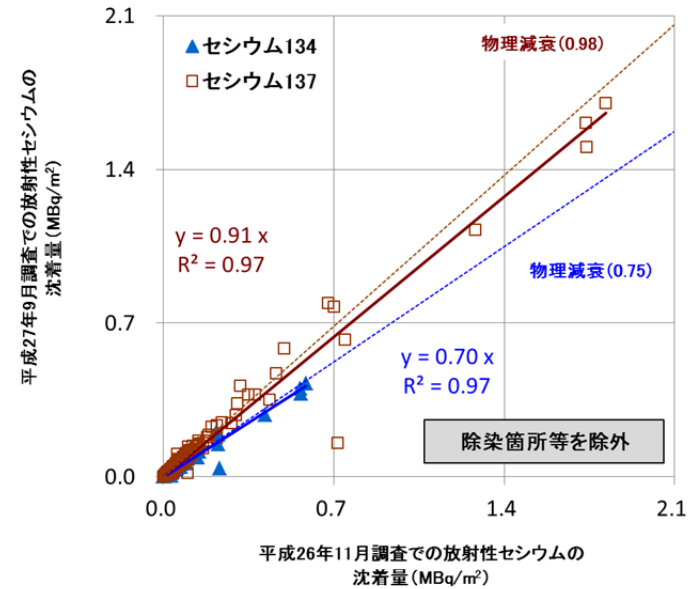
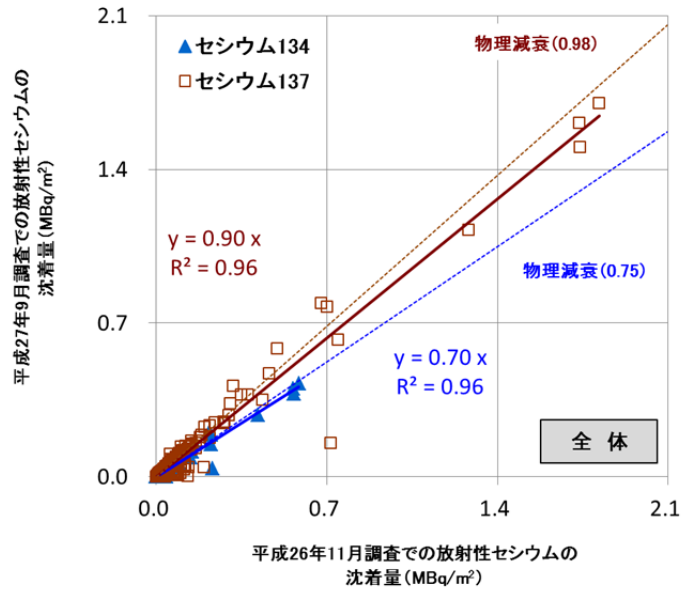


図-5 放射性セシウムの沈着量を記した土壌濃度マップ

(直接に測定した沈着量 (in-situ Ge による測定を□、土壌採取による測定を△) 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 (○) を追加。左図がセシウム 134、右図がセシウム 137。平成 27 年 10 月 1 日時点：緩衝深度  $\beta = 2.95 \text{ g/cm}^2$  を用いた解析結果)



セシウム 134 (データ数 n= 353)

| 調査名           | 平成 26 年 11 月調査との比率 |      |                   |
|---------------|--------------------|------|-------------------|
|               | 合計沈着量比             | 物理減衰 | 物理減衰に対する合計沈着量比の比率 |
| 平成 27 年 9 月調査 | 0.71               | 0.75 | 0.94              |

セシウム 137 (データ数 n= 354)

| 調査名           | 平成 26 年 11 月調査との比率 |      |                   |
|---------------|--------------------|------|-------------------|
|               | 合計沈着量比             | 物理減衰 | 物理減衰に対する合計沈着量比の比率 |
| 平成 27 年 9 月調査 | 0.92               | 0.98 | 0.93              |

セシウム 134 (n= 322)

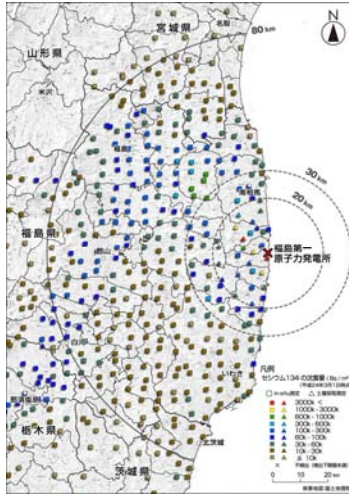
| 調査名           | 平成 26 年 11 月調査との比率 |      |                   |
|---------------|--------------------|------|-------------------|
|               | 合計沈着量比             | 物理減衰 | 物理減衰に対する合計沈着量比の比率 |
| 平成 27 年 9 月調査 | 0.74               | 0.75 | 0.99              |

セシウム 137 (n= 323)

| 調査名           | 平成 26 年 11 月調査との比率 |      |                   |
|---------------|--------------------|------|-------------------|
|               | 合計沈着量比             | 物理減衰 | 物理減衰に対する合計沈着量比の比率 |
| 平成 27 年 9 月調査 | 0.96               | 0.98 | 0.98              |

図-6 平成 26 年 11 月調査に対する平成 27 年 9 月調査の in-situ 測定による放射性セシウム沈着量の変化  
 (左図は平成 26 年 11 月調査以降に除染の実施が確認された 12 箇所及び地面の状況が変化していると判断された 19 箇所を含めて算出。  
 右図はこれら除染箇所等を除外して算出)

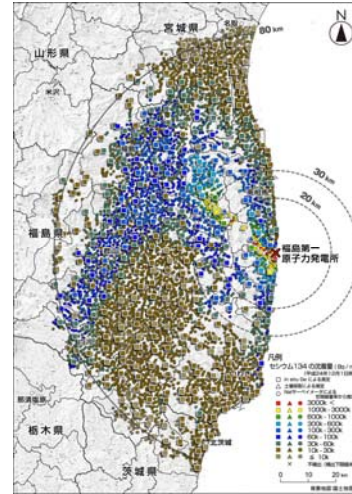




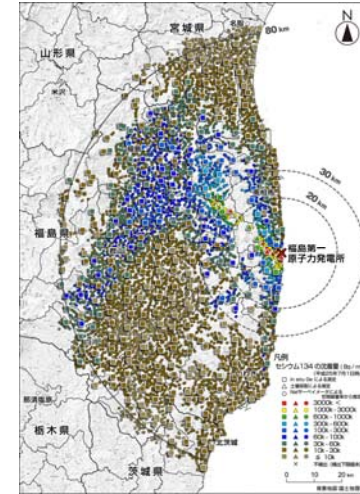
事故 12 ヶ月後  
(平成 24 年 3 月調査)



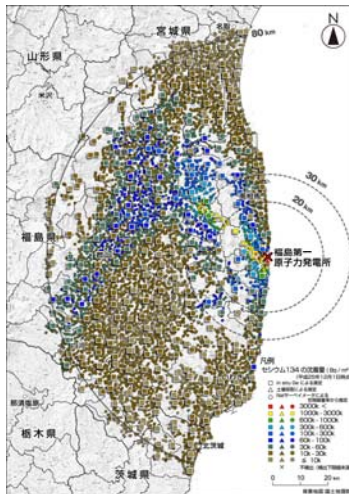
事故 18 ヶ月後  
(平成 24 年 8 月調査)



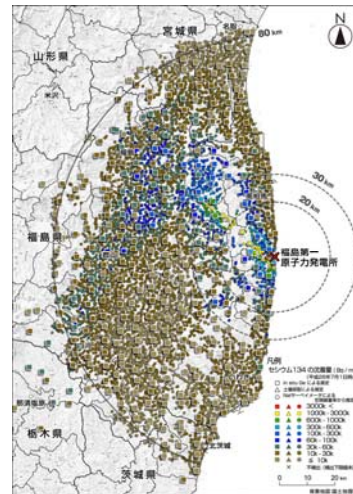
事故 21 ヶ月後  
(平成 24 年 11 月調査)



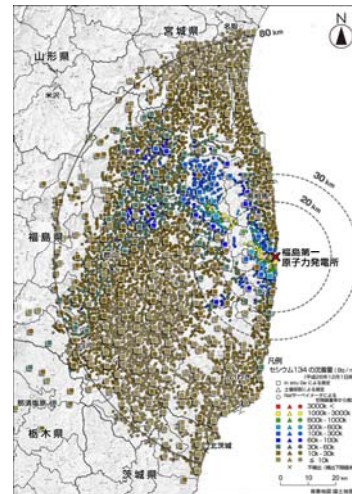
事故 28 ヶ月後  
(平成 25 年 6 月調査)



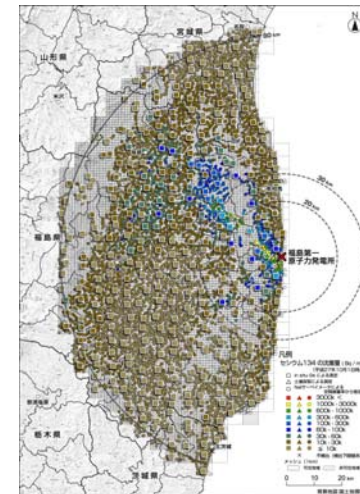
事故 33 ヶ月後  
(平成 25 年 11 月調査)



事故 40 ヶ月後  
(平成 26 年 7 月調査)



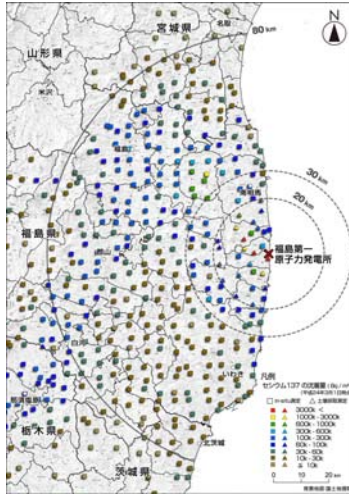
事故 45 ヶ月後  
(平成 26 年 11 月調査)



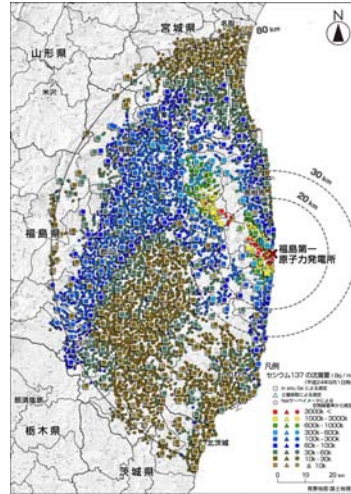
事故 55 ヶ月後  
(平成 27 年 9 月調査)

図-7 8つの時期の土壌濃度マップ (セシウム 134)

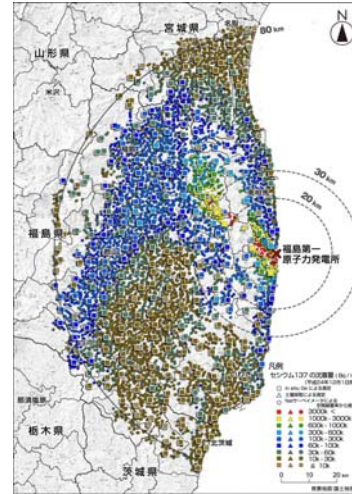




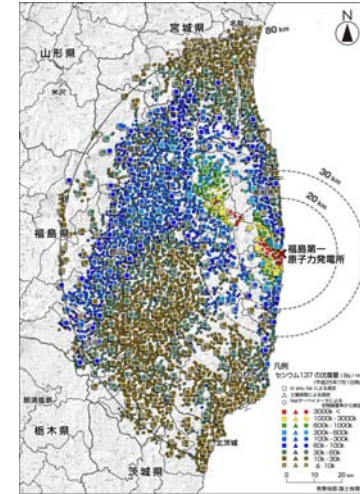
事故 12 ヶ月後  
(平成 24 年 3 月調査)



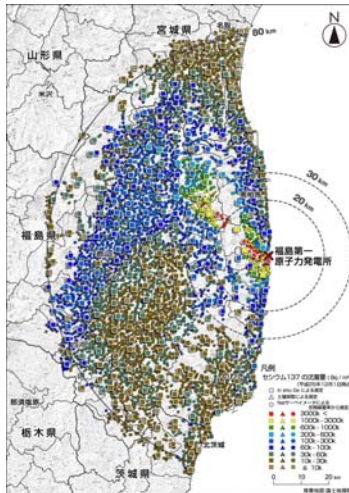
事故 18 ヶ月後  
(平成 24 年 8 月調査)



事故 21 ヶ月後  
(平成 24 年 11 月調査)



事故 28 ヶ月後  
(平成 25 年 6 月調査)



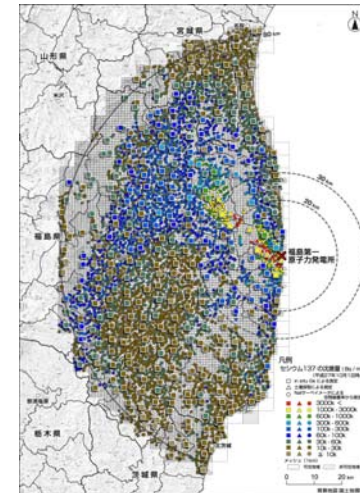
事故 33 ヶ月後  
(平成 25 年 11 月調査)



事故 40 ヶ月後  
(平成 26 年 7 月調査)

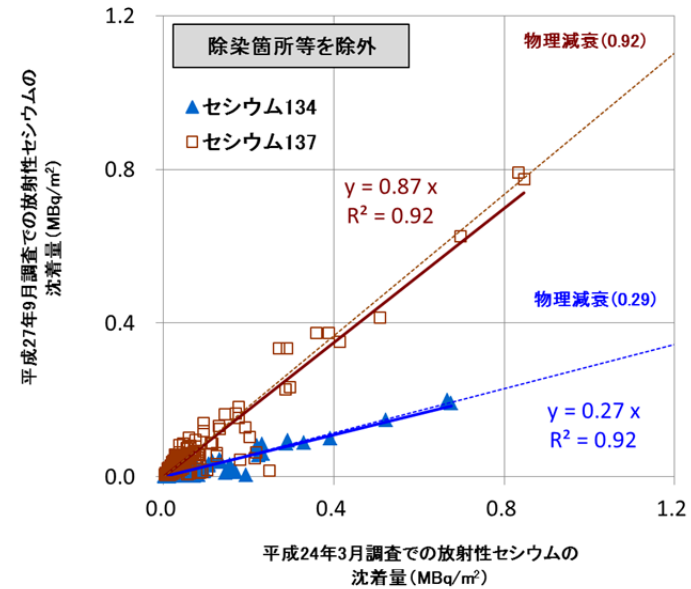
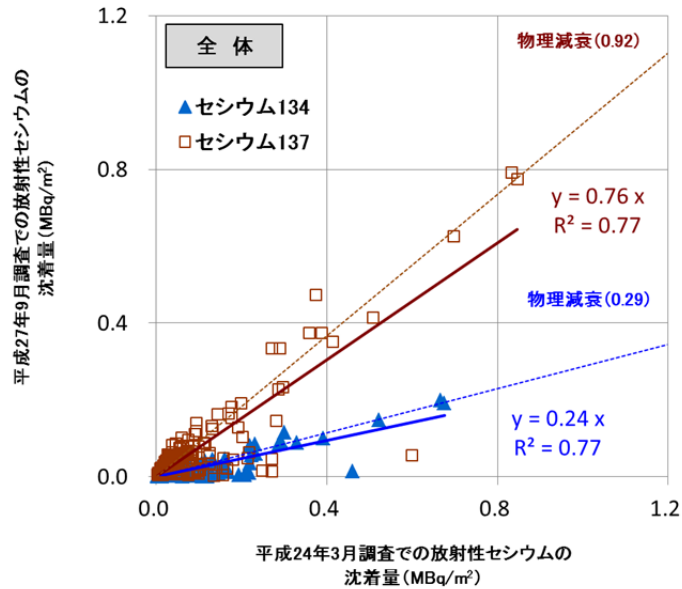


事故 45 ヶ月後  
(平成 26 年 11 月調査)



事故 55 ヶ月後  
(平成 27 年 9 月調査)

図-8 8つの時期の土壌濃度マップ (セシウム 137)



セシウム 134 (データ数 n= 230)

| 調査名       | 平成24年3月調査との比率 |      |                   |
|-----------|---------------|------|-------------------|
|           | 合計沈着量比        | 物理減衰 | 物理減衰に対する合計沈着量比の比率 |
| 平成27年9月調査 | 0.24          | 0.29 | 0.82              |

セシウム 137 (データ数 n= 230)

| 調査名       | 平成24年3月調査との比率 |      |                   |
|-----------|---------------|------|-------------------|
|           | 合計沈着量比        | 物理減衰 | 物理減衰に対する合計沈着量比の比率 |
| 平成27年9月調査 | 0.75          | 0.92 | 0.82              |

セシウム 134 (n= 186)

| 調査名       | 平成24年3月調査との比率 |      |                   |
|-----------|---------------|------|-------------------|
|           | 合計沈着量比        | 物理減衰 | 物理減衰に対する合計沈着量比の比率 |
| 平成27年9月調査 | 0.28          | 0.29 | 0.96              |

セシウム 137 (n= 186)

| 調査名       | 平成24年3月調査との比率 |      |                   |
|-----------|---------------|------|-------------------|
|           | 合計沈着量比        | 物理減衰 | 物理減衰に対する合計沈着量比の比率 |
| 平成27年9月調査 | 0.88          | 0.92 | 0.96              |

図-9 平成24年3月調査に対する平成27年9月調査の in-situ 測定による放射性セシウム沈着量の変化  
 (左図は平成24年3月調査以降に除染の実施が確認された10箇所及び地面の状況が変化していると判断された34箇所を含めて算出。  
 右図はこれら除染箇所等を除外して算出)



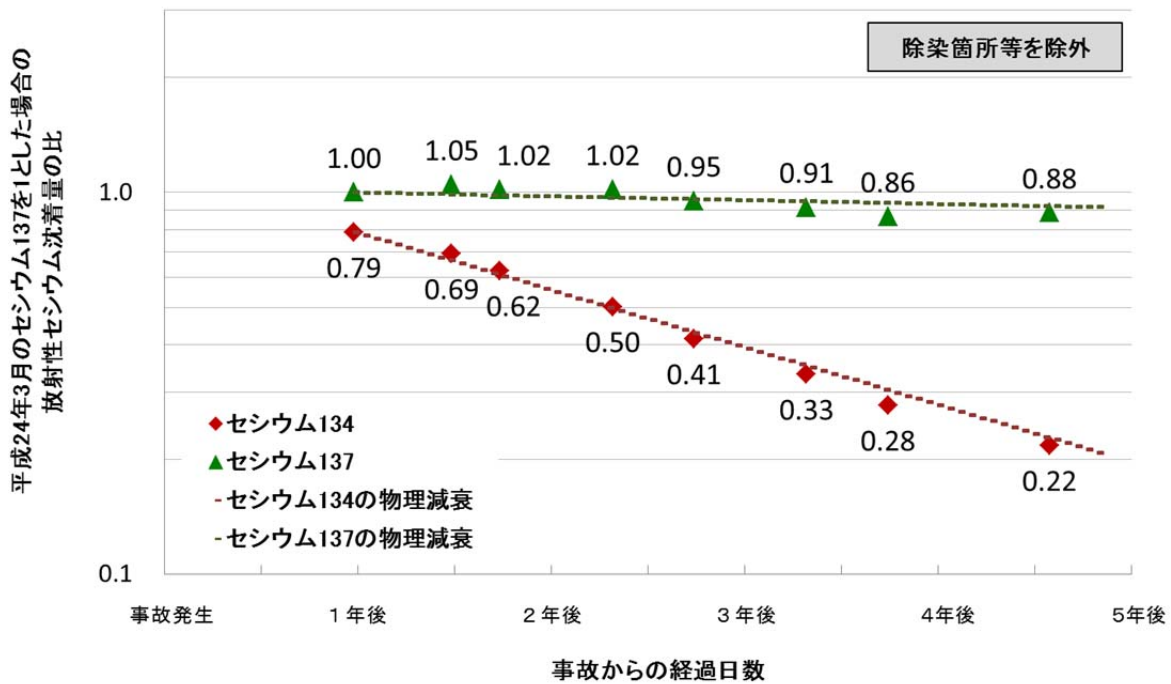
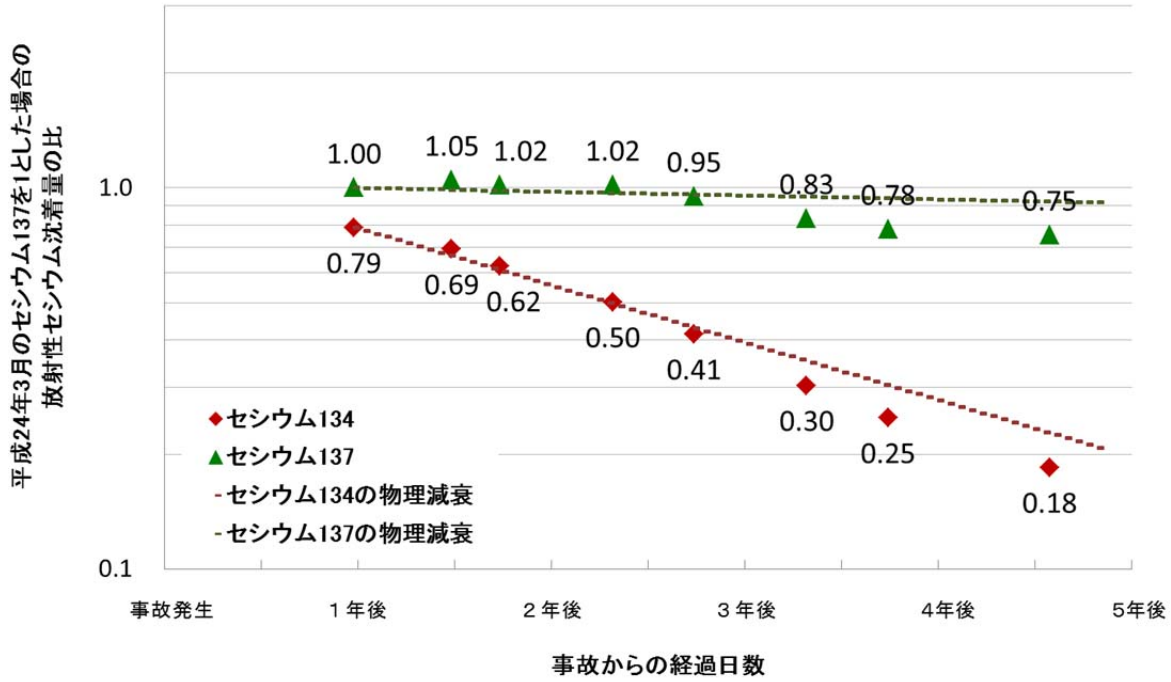


図-10 平成24年3月調査から平成27年9月調査の放射性セシウム沈着量の変化

(平成24年3月調査を基準とした各調査での合計沈着量比を比較。上段は平成24年3月調査以降に除染の実施が確認された箇所及び地面の状況が変化していると判断された箇所を含めて評価した結果、下段はこれら除染箇所等を除外して評価した結果を示す)

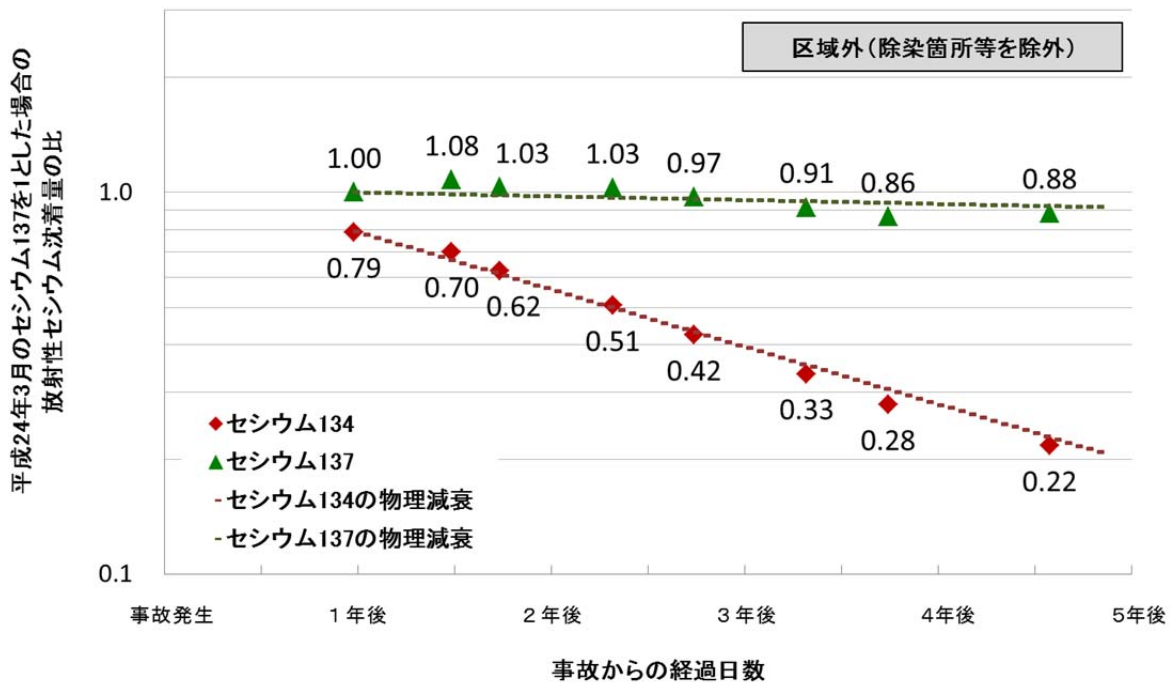
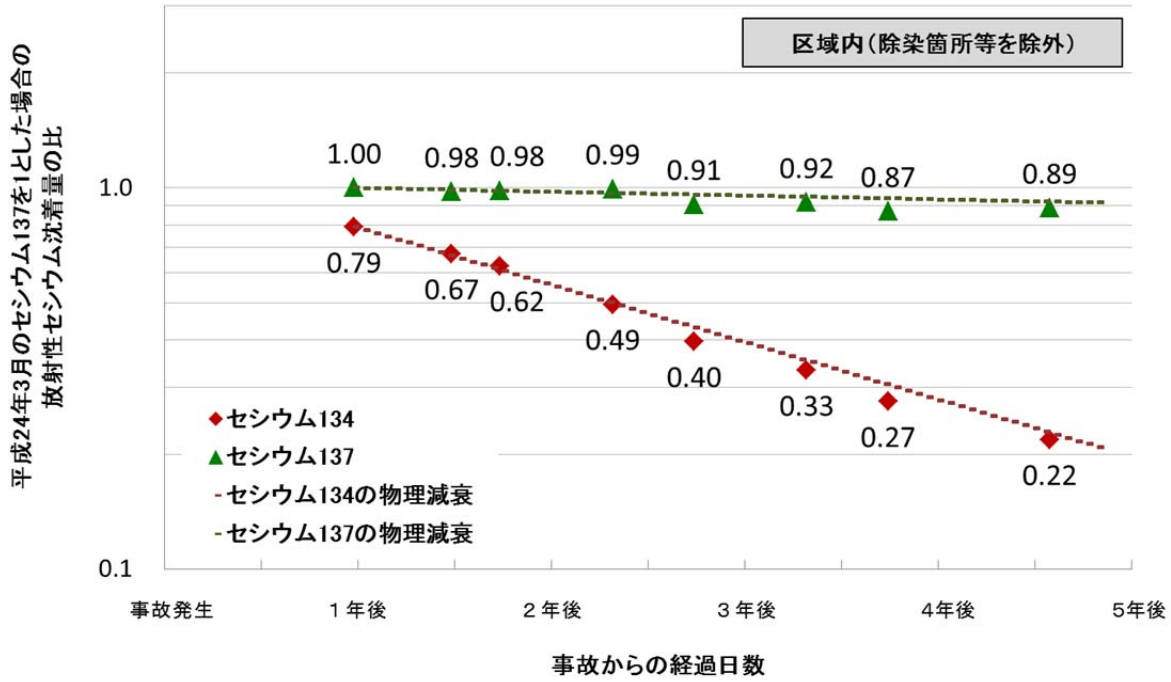


図-11 平成24年3月調査から平成27年9月調査の放射性セシウム沈着量の変化(避難指示区域内外)

(平成24年3月調査を基準とした各調査での合計沈着量比を比較。平成27年9月5日時点の避難指示区域に基づき区域内外に分けて、除染の実施が確認された箇所及び状況が変化した判断された箇所などを除外して評価した結果。上段は避難指示区域内、下段は区域外の評価結果を示す)