

# 無人ヘリによる東京電力福島第一原子力発電所から 5 km 圏内の 空間線量率分布の測定

鳥居 建男、眞田 幸尚（原子力機構）

## 1. 調査目的

原子力機構では、福島第一原発事故直後から、無人ヘリコプター（以下「無人ヘリ」という。）を用いた放射線分布の測定手法について研究開発を行っている。無人ヘリは、これまで、福島第一原発の周辺のモニタリング<sup>1</sup>、河川敷のモニタリング<sup>2</sup> 及び除染前後のモニタリング<sup>3</sup> などに活用してきた。無人ヘリは、有人ヘリコプター（以下「有人ヘリ」という。）と比較して低高度で飛行が可能であり、ヘリコプターの軌跡幅（測線間隔）も細かく設定できるため、詳細に（位置分解能の高い）空間線量率分布の測定が可能であることが分かっている。

福島第一原発から 3 km 圏内については、航空法による飛行制限区域（平成 25 年 2 月 5 日までは飛行禁止区域、現在は高度 1,500 m までの飛行制限区域<sup>4</sup>）となっており、有人ヘリによる航空機モニタリングは実施されていない。また、地上での測定結果も限られており、別の手法による全体像の把握が必要であった。そこで、平成 24 年度より航空法による規制を受けない無人ヘリを用いて福島第一原発から 3 km 圏内のモニタリングを開始した。平成 25 年度からは、航空機モニタリングとの比較も考慮し、航空機モニタリングと 2 km 程度オーバーラップするよう約 5 km 圏内についてモニタリングすることとした。福島第一原発周辺は、線量率が高く避難指示区域に設定されていることから、人為的な影響が小さい状況での放射性物質の挙動における知見を得やすいと考えられる。過去 4 回のデータにおける線量率の変化傾向から、無人ヘリモニタリングで確認した線量率の減衰傾向は、放射性セシウムの半減期から計算した変化量よりも大きいことが分かっており、放射性物質の移行挙動解明の観点から、更なるモニタリングが必要である。

ここでは、平成 26 年度に 2 回実施した福島第一原発から概ね 5 km の範囲の空間線量率や放射性セシウムの沈着量を測定した結果と、過去のデータとの比較についてまとめる。

## 2. 調査内容

### (1) 調査場所・期間

これまで実施してきた無人ヘリによる福島第一原発周辺のモニタリングとその期間を表-1 に示す。平成 26 年度のモニタリングは、第 5 回と第 6 回の 2 回実施した。

### (2) 調査機器

測定にあたっては、ヤマハ発動機(株)自律飛行型無人ヘリ RMAX G1 を使用した（図-1）。無人ヘリに専用の放射線測定システムを搭載し、地上からの直達 $\gamma$ 線及び空気による散乱

<sup>1</sup> Yukihiisa Sanada and Tatsuo Torii, Aerial radiation monitoring around the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant using an unmanned helicopter. J. Environ. Radioact., 139, 294-299, 2015.

<sup>2</sup> Yukihiisa Sanada, Atsuya Kondo, Takeshi Sugita, Yukiyasu Nishizawa, Youichi Yuuki, Kazutaka Ikeda, Yasunori Shoji and Tatsuo Torii, Radiation monitoring using an unmanned helicopter in the evacuation zone around the Fukushima daiichi nuclear power plant., Explor. Geophy., 45, 3-7, 2014.

<sup>3</sup> 眞田幸尚, 西澤幸康, 山田勉, 池田和隆, 松井雅士, 土田 清文, 佐藤義治, 平山弘克, 高村善英, 西原克哉, 伊村光生, 石田睦司, 卜部嘉, 志風義明, 杉田武志, 近藤敦哉, 鳥居 建男, 原子力発電所事故後の無人ヘリコプターを用いた放射線測定, JAEA-Research 2013-049, 2013.

<sup>4</sup> 国土交通省 HP, [http://www.mlit.go.jp/report/press/kouku10\\_hh\\_000060.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/kouku10_hh_000060.html) (2015 年 3 月閲覧)

線を合わせた全計数率と $\gamma$ 線エネルギースペクトルを1秒間に1回連続測定した。放射線の検出器は $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  (ランタンブロマイド)シンチレーション検出器(1.5"  $\Phi$  × 1.5" × 3本)を用いた。システムで測定された $\gamma$ 線のデータ(計数率)とエネルギースペクトルは、DGPS<sup>5</sup>で測定した位置情報と合わせて記録した。

### (3) 無人ヘリによる測定でのデータの取得方法

無人ヘリの飛行高度は、安全面及びデータの信頼性を考慮し、対地高度で80mを目安とした。上空で測定される放射線は、無人ヘリ下部の半径80m程度の円内の $\gamma$ 線量を平均化したものであることを考慮し、無人ヘリの軌跡幅(測線間隔)は80mと設定した。無人ヘリの飛行速度は8 m/s (= 28.8 km/h)程度とした。第5回モニタリングと第6回モニタリングのデータ取得のためのフライト条件は、結果の比較のため、全く同じとした。フライトの測線について図-2に示す。

### (4) 無人ヘリで取得された測定データの地上1m高さでの空間線量率への換算

上空で測定された $\gamma$ 線計数率を地上1m高さでの空間線量率の値に換算するための係数を算出するため、警戒区域内において空間線量率の勾配が小さく、平坦な場所をテストサイトとして設定し、NaIサーベイメータを用いて、テストサイトを中心とした半径100mの円内における地上から1m高さの空間線量率の平均値を求めた。次に、テストサイト上空の対地高度80mで無人ヘリをホバリングさせ、この高度(基準高度)で取得された $\gamma$ 線計数率と上述したテストサイト周辺の地上における空間線量率とを比較し、空間線量率換算係数CD(cps/ $\mu\text{Sv/h}$ )を算出した。その後、テストサイト上空の対地高度10mから100mまでを10m毎にホバリングし、各高度における $\gamma$ 線計数率を測定した。測定された高度毎の $\gamma$ 線計数率を基に、対地高度と $\gamma$ 線計数率との関係式を求め、空気による $\gamma$ 線計数率の減弱係数AFを算出した。最後に、実際のフライトで取得された $\gamma$ 線計数率を上述の空間線量率換算係数CDから空間線量率( $\mu\text{Sv/h}$ )に換算するとともに、対地高度と空気による $\gamma$ 線計数率の減弱係数により、高度補正を行った。

なお、対地高度はGPSにより測位した海拔高度から国土地理院が作成した10mメッシュの数値標高モデルDEM(Digital Elevation Model)のデータを差し引くことにより求めた。CD及びAFは平成24年度に取得した約30か所のキャリブレーションデータの平均値を採用した。採用した数値を表-2に示す。なお、平成25年度以降も、同様のデータを取得して数値の妥当性を確認している。

### (5) 無人ヘリで取得された測定データの放射性セシウムの沈着量への換算

警戒区域内で原子力機構が実施したin-situ測定の結果<sup>3</sup>を基に、天然放射性核種(カリウム40、ウラン系列、トリウム系列)による空間線量率の平均値(43 $\pm$ 20 nSv/h: 誤差=標準偏差 $\sigma$ )を評価し、前項で求めた空間線量率からこの値を差し引くことにより、放射性セシウム(セシウム134、137)のみによる空間線量率を算出した。その後、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<sup>6</sup>」に記載されている重量緩衝深度( $\beta = 1.0 \text{ g/cm}^2$ )の場合の地表面における放射性セシウムの沈着量と地上1m高さでの空間線量率の換算係数を使用し、地表面におけるセシウム134及びセシウム137の沈着量を算

<sup>5</sup> DGPS(差分全地球測位システム: Differential Global Positioning System)は、測量等で位置情報が決められている基準局から発信する電波を利用して、GPSの計測結果の誤差を修正して位置(決め)の精度を高める技術。一般的に、GPSの精度が3m程度であるのに対してDGPSの精度は50cm程度とされている。

<sup>6</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)。

出した<sup>7</sup>。

### (5) 無人ヘリを活用した空間線量率を記したマップの作成

視覚的に放射線量の分布を確認するためにマップを作成した。マップは、各測定箇所の測定結果を基に、内挿法（クリギング法）を用いて内挿補間した。

## 3. 結果と考察

第5回及び第6回モニタリングの結果を、図-3に空間線量率、図-4にセシウム137、セシウム134の沈着量マップとして示す。比較的高い空間線量率と放射性セシウムの沈着が、北西、西北西、西、南方向に広がっていることが分かる。

### (1) 妥当性の検証

これらの結果の妥当性を検証するために、無人ヘリの測定結果を測定地点下の地上で測定した結果と比較した。なお、ここで、上述の換算係数を求めたテストサイトとは異なる場所を選定している。地上における空間線量率はNaIサーベイメータ及び電離箱式サーベイメータで、放射性セシウムの沈着量はGe半導体検出器を用いたin-situ測定にて測定した。無人ヘリの測定結果と同地点における地上の空間線量率を比較した結果を散布図にして図-5に示す。第5回モニタリング及び第6回モニタリングの散布図を見ると傾きは1付近であり、今回の結果は概ね地上の測定結果を再現できていたと考えられる。また、0.5～2.0の範囲でばらついており、その原因は上空と地上の測定対象の差にあると考えられる。すなわち、地上での測定は人間が測定するため測定の範囲が検出器を中心とした狭い範囲であるのに対し、無人ヘリは対地高度80mの高さから測定するため、無人ヘリ直下の下向き約45°の円錐の範囲内からの放射線を測定していることから直径約160mの円内から放出された放射線の平均を計測している。よって、局部的に除染を行った場所やホットスポットがある場所のような線量率分布の変動が大きい場所での測定値は上空と地上の測定結果が一致しにくいと考えられる。

### (2) 過去の測定データとの比較

今回の測定と過去第1回からの測定結果を比較するため、継続してデータが得られている3km圏内のマップをまとめて図-6に示す。マップをみると、線量の高い暖色系のエリアが時間の経過と共に小さくなってきていることがわかる。なお、各箇所の測定結果は測定日が異なるため、各測定箇所における地上1m高さの空間線量率及び地表面の放射性セシウムの沈着量の値は、放射性セシウムの物理減衰を考慮し、各モニタリングの最終日に換算している。

また、モニタリング間の結果をより定量的に比較するために、モニタリング区域を5mメッシュに分割し、第1回モニタリングとの相対減衰率を算出した。今回の測定と第1回モニタリングの測定結果を比較した散布図及び相対減衰率を図-7～図-8に示す。図のように散布図は良い相関関係を示し、相対減衰率のヒストグラムはガウス分布に近い。図-9に、相対減衰率の平均値と事故からの経過日数の関係を示す。また、比較のため重量緩衝深度を一定( $\beta = 1$ )として放射性セシウムの沈着量と地上1m高さでの空間線量率の換算係数と放射性セシウムの物理的半減期から計算した線量率の変化(赤実線)を示す。このように、

<sup>7</sup> 過去の調査から、福島第一原発から80km圏内では、平成25年後期の調査で攪乱のない土壌における重量緩衝深度( $\beta$ )が平均2.0g/cm<sup>2</sup>程度と報告されているが、森林や田畑等も測定範囲に含む無人ヘリモニタリングの場合は重量緩衝深度で表現できない場所が多い。今回は、過去の結果との比較するため、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」(p.83-84)に従い、 $\beta = 1.0$ を使用した。

経過日数が長くなるにつれて、物理的半減期から計算した線量率の変化(赤実線)よりも無人ヘリによる実測値は減少率が大きい傾向にあることが分かる。事故後、継続的にスクレーパープレートを用いて土壤中の放射性セシウムの深度分布を調査した結果<sup>8</sup>を見ると、事故後から年々深度が深くなってきていることが報告されている。そこで、この報告結果から重量緩衝深度の変化を考慮し線量率を計算した。重量緩衝深度は、経過時間と一次関数の関係にあると仮定し、平成 26 年度は外挿した。図-10(左)に測定された重量緩衝深度の平均値と事故からの経過日数の関係を示す。線量から放射性セシウムの沈着量への換算する係数は、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」に重量緩衝深度毎に与えられている。与えられた数値間の換算係数については、対数で近似した近似式から推定した。図-10(右)に換算係数と重量緩衝深度の関係及び近似式を示す。これらの条件で計算した線量率の経時変化の結果(青点線)を図-9に示す。このように、無人ヘリの測定結果と計算結果はよく一致することが分かる。この結果は、土壤中への浸透度合いが線量率の変化に大きな影響を与えることを示唆している。しかしながら、無人ヘリによる測定の場合、平坦で攪乱の少ない土壤の場所だけでなく、森林、山林や住宅地なども測定範囲に含むため、単純な重量緩衝深度の考え方が適用できない場所も多い。

### (3) 航空機モニタリングによる測定結果との比較

事故直後より、有人ヘリを用いた航空機モニタリングが実施されている。一方、福島第一原発から 3 km 圏内は、飛行制限区域となっているため航空機モニタリングのデータが取得されていない。ここでは、最新の航空機モニタリング結果(平成 27 年 2 月 13 日時点で減衰補正<sup>9</sup>;以下「航空機第 9 次モニタリング」という。)と第 6 回モニタリング測定結果を重ね合わせた図を示す。図-11 に比較した線量率マップを示す。合わせて、比較のため昨年度実施した航空機モニタリングの結果航空機モニタリング結果(平成 26 年 1 月 7 日時点で減衰補正<sup>10</sup>;以下「航空機第 8 次モニタリング」という。)と第 4 回モニタリングの結果を図-11 に示す。ここで、両結果はそれぞれの無人ヘリモニタリングの最終日に減衰補正を行っている。このように、第 8 次及び第 9 次の航空機モニタリングの測定結果(福島第一原発から 3 km 以遠)と第 4 回及び第 5 回の無人ヘリでの測定結果(約 5 km 圏内)のオーバーラップするところでは、各々のモニタリングの測線間隔が異なるために、若干のずれは生じているものの、航空機モニタリングと無人ヘリモニタリング両者の線量率マップの傾向はよく一致していることがわかる。航空機モニタリングの測線間隔が 600 m であるのに対して、無人ヘリは 80 m 間隔であることから、例えば、データ点数の多い福島第一原発から西方向は無人ヘリの方がより詳細に(より高分解能に)プルーム跡を表している。また、図-11(左)に示した昨年度との結果も同様な結果を示している。比較すると、全体的に線量率が低くなっていることが分かるが、無人ヘリの測定結果の方が航空機モニタリングよりも詳細に測定できているので放射線量の変化についてもより詳細に状況を把握することができる。これらの結果は、無人ヘリモニタリングの有用性を示している。

## 4. まとめ

- 平成 26 年度は、6 月と平成 27 年 1 月に 2 回の無人ヘリによるモニタリングを実施した。
- 解析結果は、地上の測定結果や航空機モニタリングの結果とよく一致した。

<sup>8</sup> 松田規宏, 齋藤公明, 土壤中の放射性セシウムの深度分布調査, “平成 25 年度原子力規制庁委託事業「東京電力(株)福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立」,” pp. 64-69, 2013, <http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat03/pdf06/1-7.pdf> (平成 27 年 2 月閲覧)。

<sup>9</sup> 原子力規制庁 HP, ([http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/11000/10349/24/150213\\_9th\\_air.pdf](http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/11000/10349/24/150213_9th_air.pdf))。

<sup>10</sup> 原子力規制庁 HP, ([http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/9000/8909/24/362\\_20140307.pdf](http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/9000/8909/24/362_20140307.pdf))。

- 過去のモニタリングの結果と比較すると、放射性セシウムの土壌中への浸透具合を考慮した線量率の計算結果とよく一致した。

表-1 福島第一原子力発電所周辺の無人ヘリによるモニタリング

モニタリング名	測定期間	測定場所
第1回モニタリング	H24/8/30~H24/10/20	福島第一原発から3 km 圏内
第2回モニタリング	H25/1/27~H25/3/20	福島第一原発から3 km 圏内
第3回モニタリング	H25/6/6~H25/7/31	福島第一原発から概ね5 km 圏内
第4回モニタリング	H25/11/19~H26/1/7	第3回モニタリングと同一の範囲
第5回モニタリング	H26/6/23~H26/7/22	第3回モニタリングと同一の範囲
第6回モニタリング	H26/11/13~H27/1/15	第3回モニタリングと同一の範囲

表-2 使用したパラメータ

		Parameter*	n
高度補正係数 (AF)	( $m^{-1}$ )	-0.00606 ± 0.00067	32
線量率換算係数	(cps/ $\mu$ Sv/h)	4140 ± 370	33
検出下限値			
	線量率 ( $\mu$ Sv/h)	0.050	
	放射性セシウム沈着量 ( $kBq/m^2$ )	4.0	

\* 誤差は標準偏差( $\sigma$ )で表記

図-1 無人ヘリの仕様



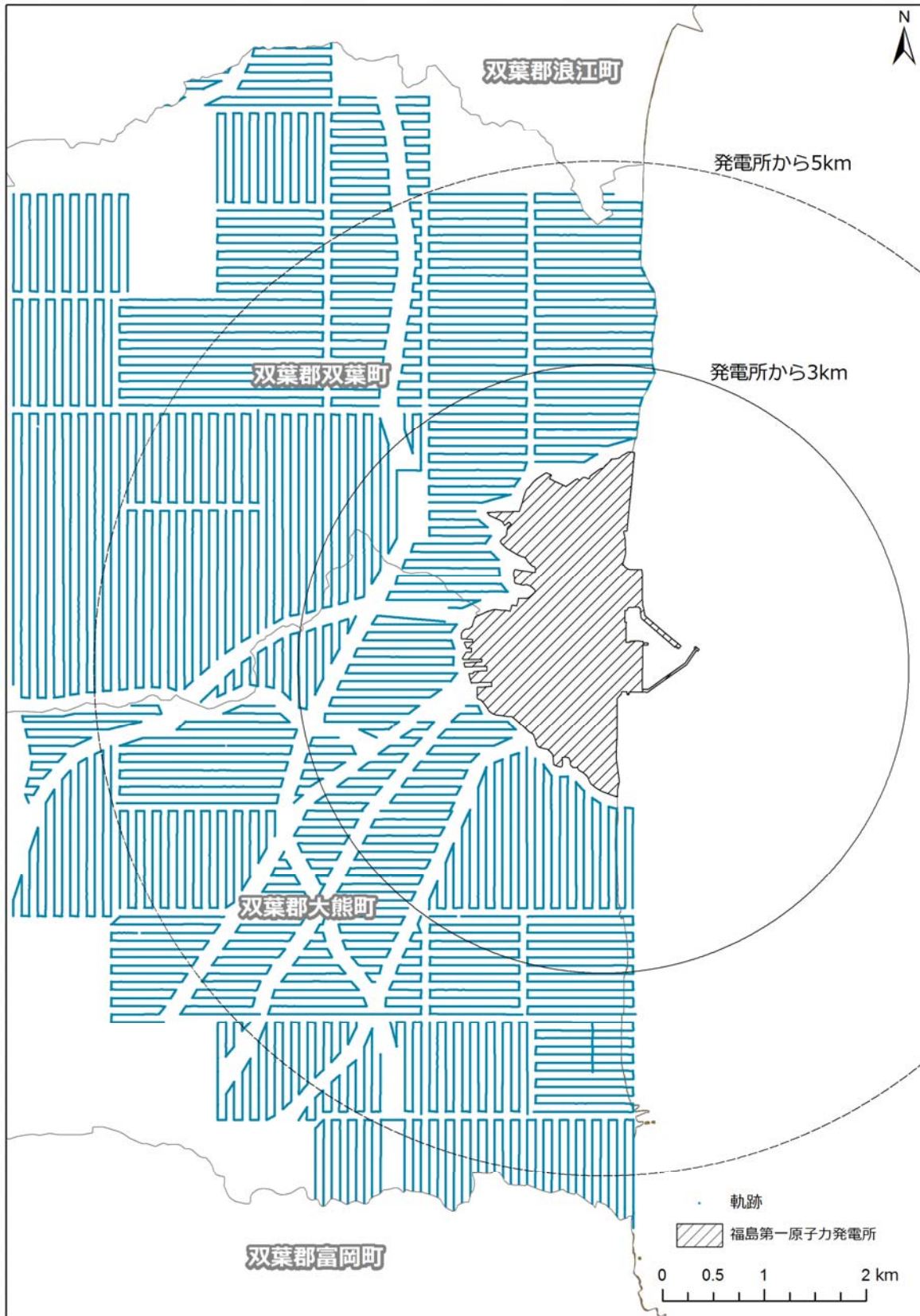


図-2 無人ヘリの飛行軌跡

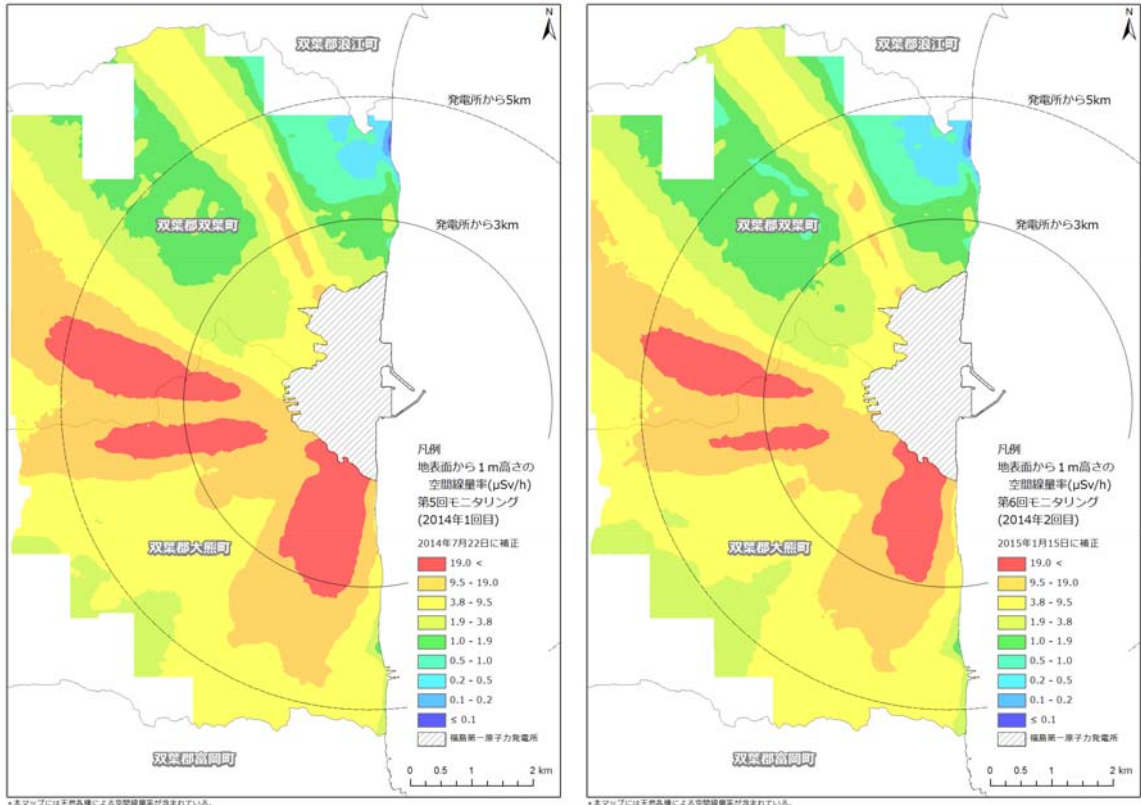


図-3 第5回モニタリング（左）及び第6回モニタリング（右）の線量率マップ

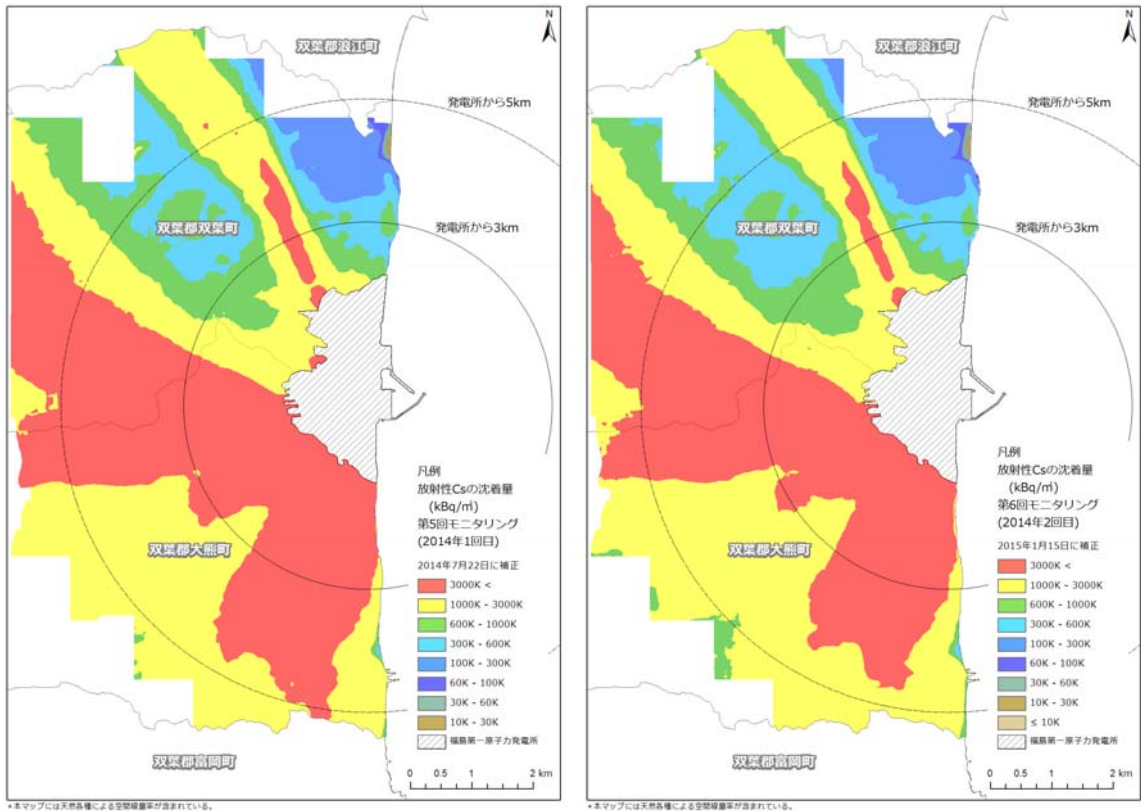


図-4 第5回モニタリング（左）及び第6回モニタリング（右）のセシウム134 + セシウム137沈着量マップ



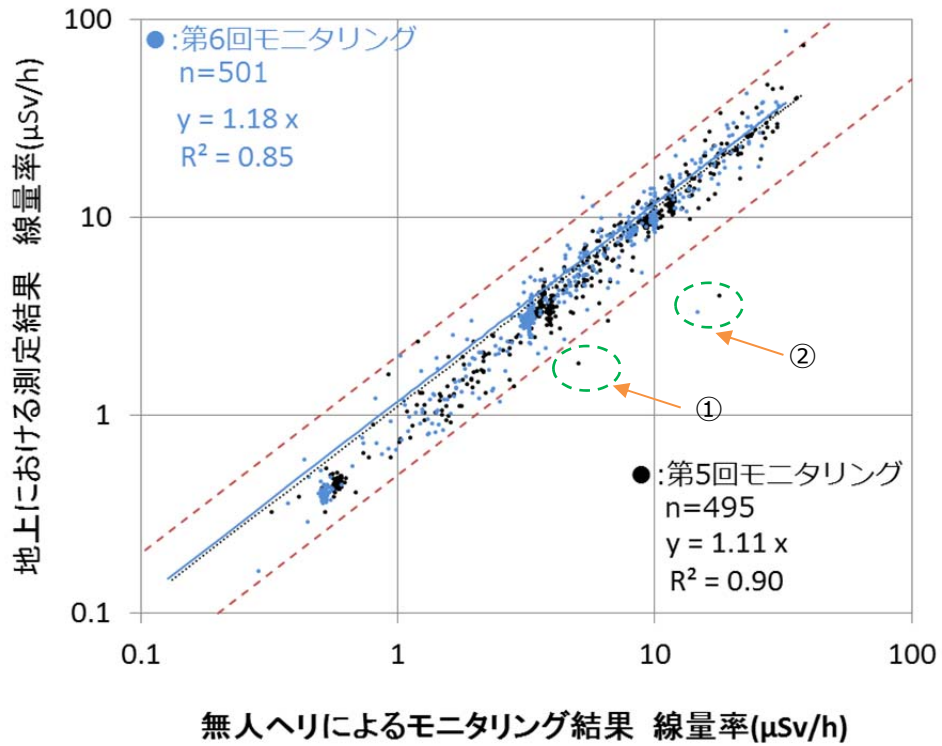
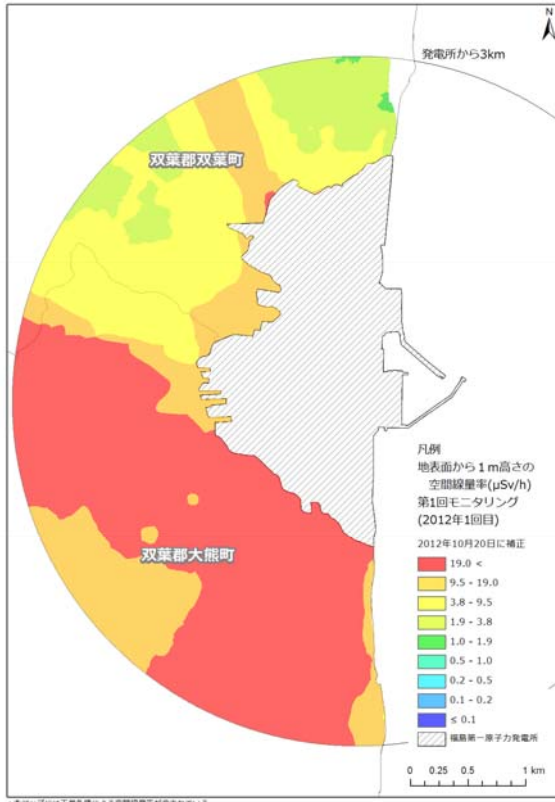
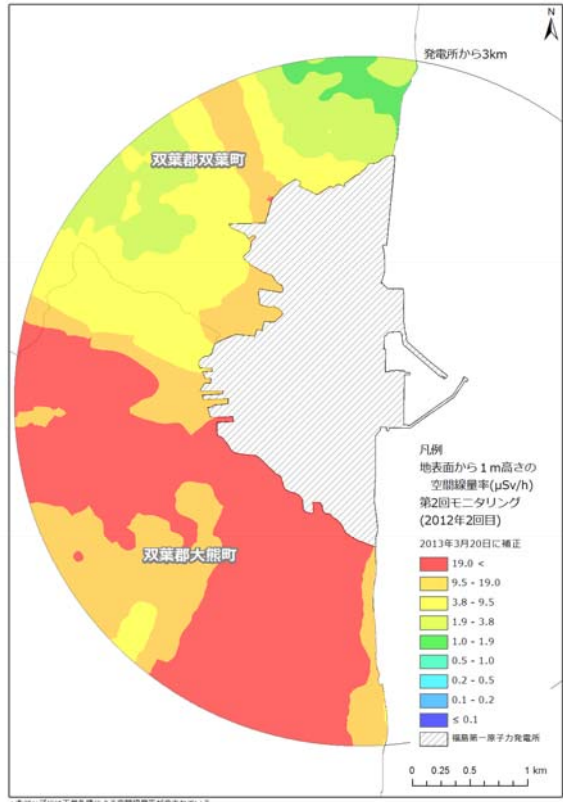


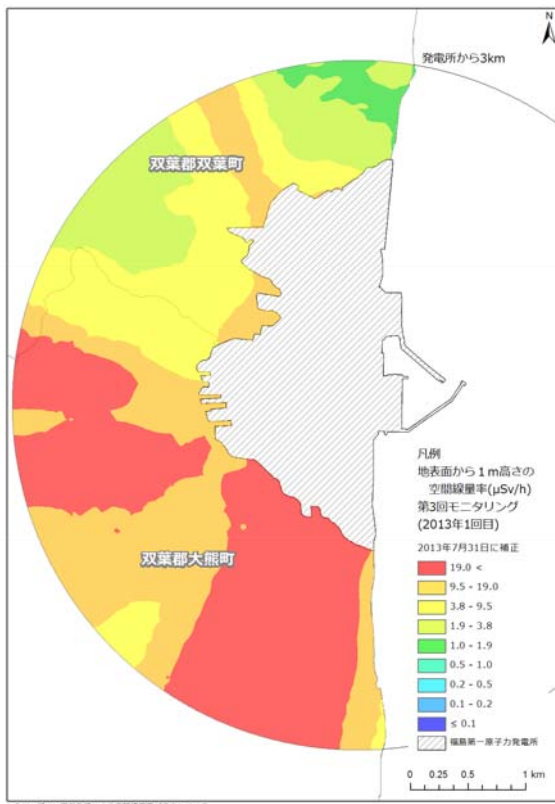
図-5 無人ヘリによるモニタリング結果と地上の測定結果との比較（線量率）  
 (図中の①、②は、局所的に除染が行われた場所（大熊町夫沢地区、双葉町）である)



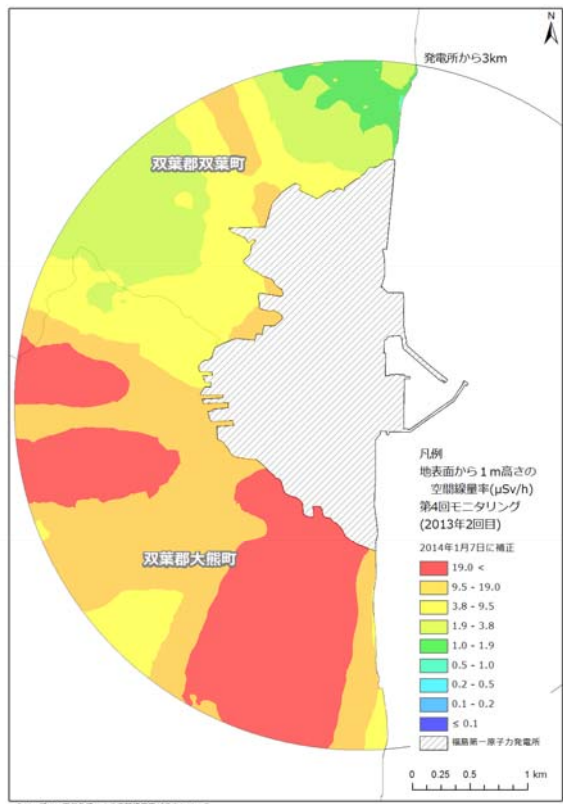
第1回 2012年10月20日に減衰補正



第2回 2013年3月20日に減衰補正

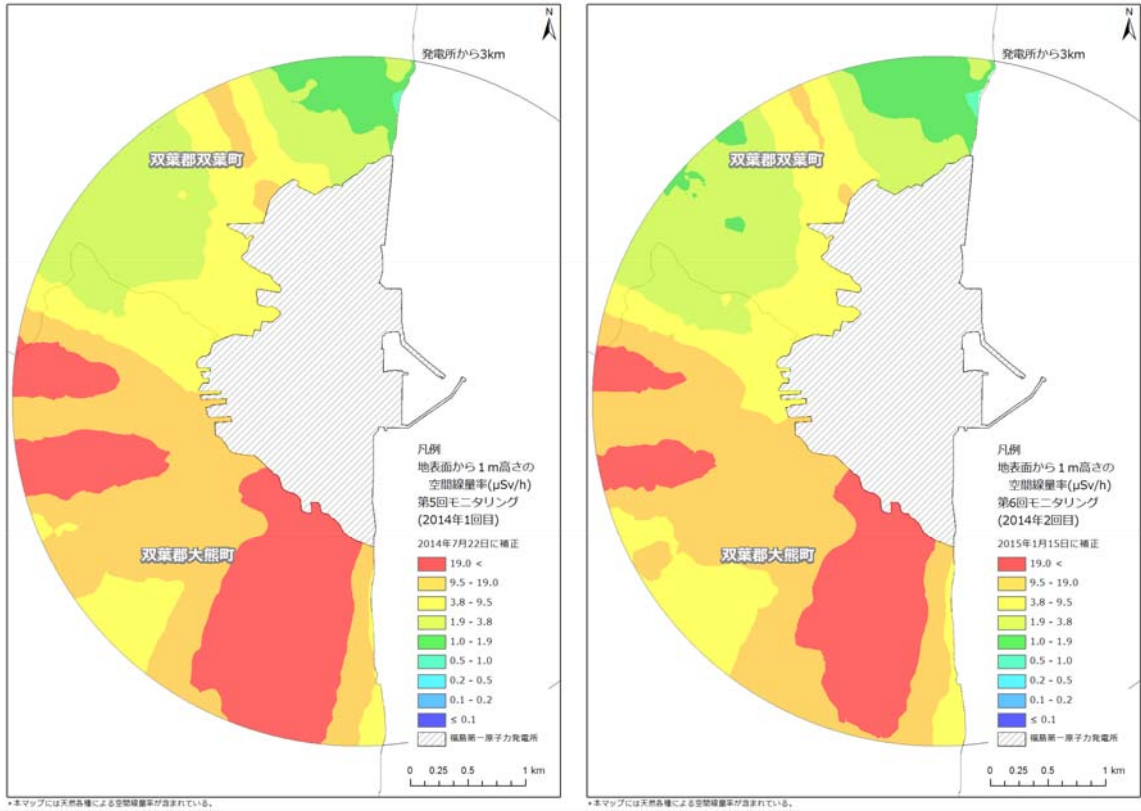


第3回 2013年7月31日に減衰補正



第4回 2014年1月7日に減衰補正

図-6 無人ヘリによる過去の線量率測定結果との比較 (1/2)



第5回(今回) 2014年7月22日に減衰補正 第6回(今回) 2015年1月15日に減衰補正

図-6 無人ヘリによる過去の線量率測定結果との比較 (2/2)

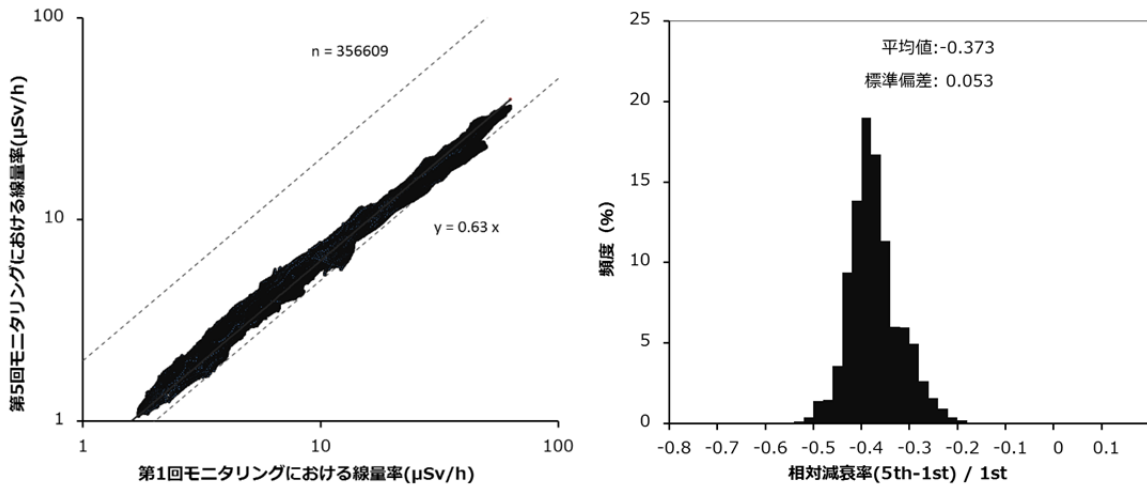


図-7 第1回モニタリングに対する第5回モニタリングの変化傾向

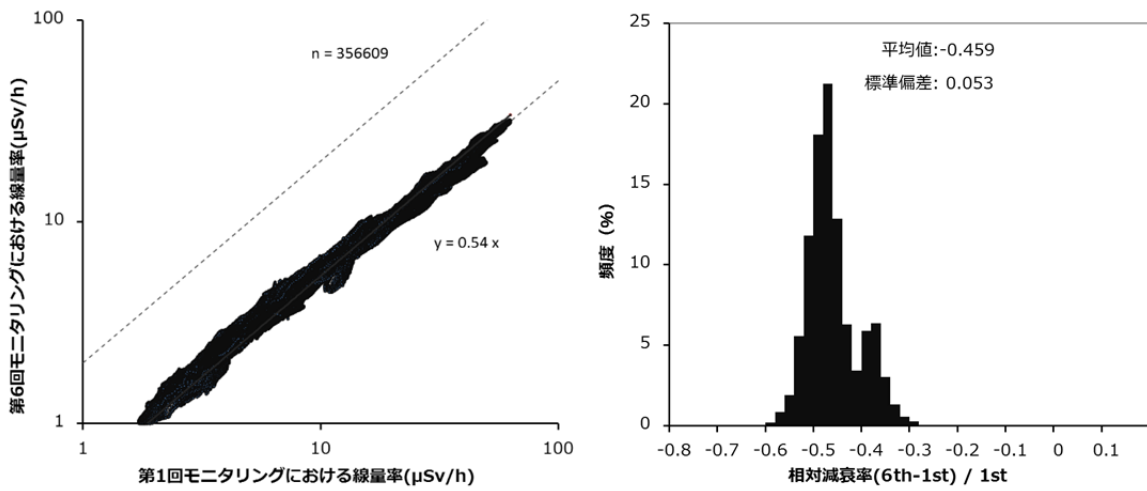


図-8 第1回モニタリングに対する第6回モニタリングの変化傾向

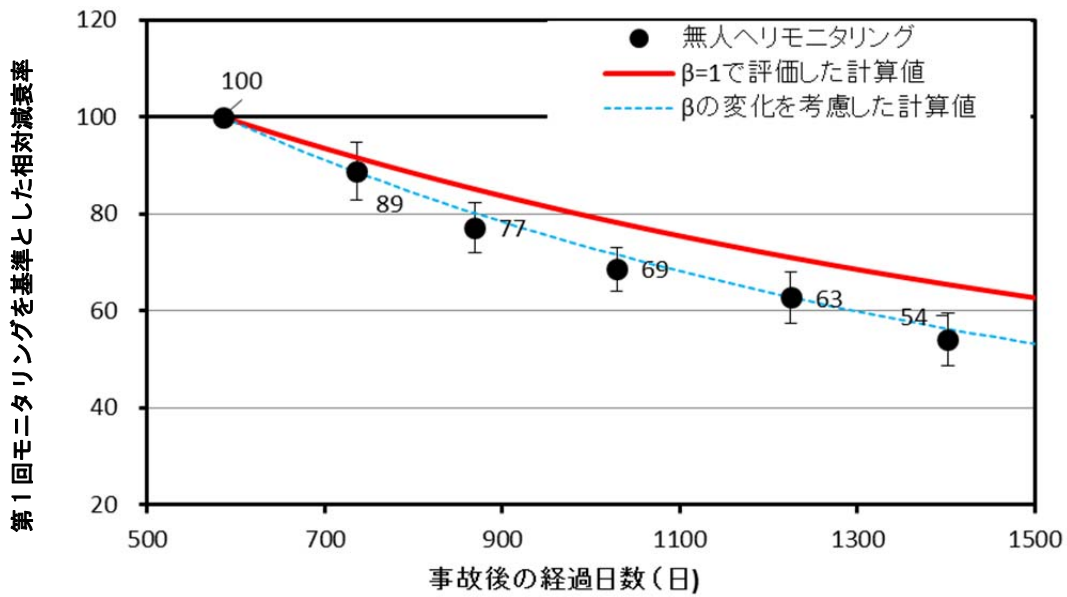


図-9 第1回モニタリングデータを1とした場合のモニタリング時期と線量率の比較  
(標準偏差を誤差棒として表示)

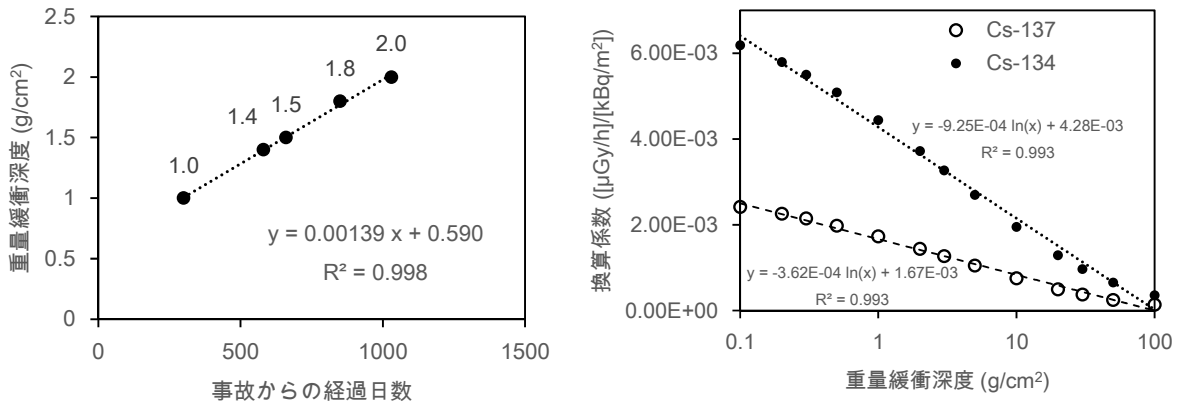


図-10 (左)事故からの経過日数と重量緩衝深度の実測値の関係<sup>8</sup>、(右)重量緩衝深度と換算係数の関係(文部科学省「ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法」(p. 83-84)参照)



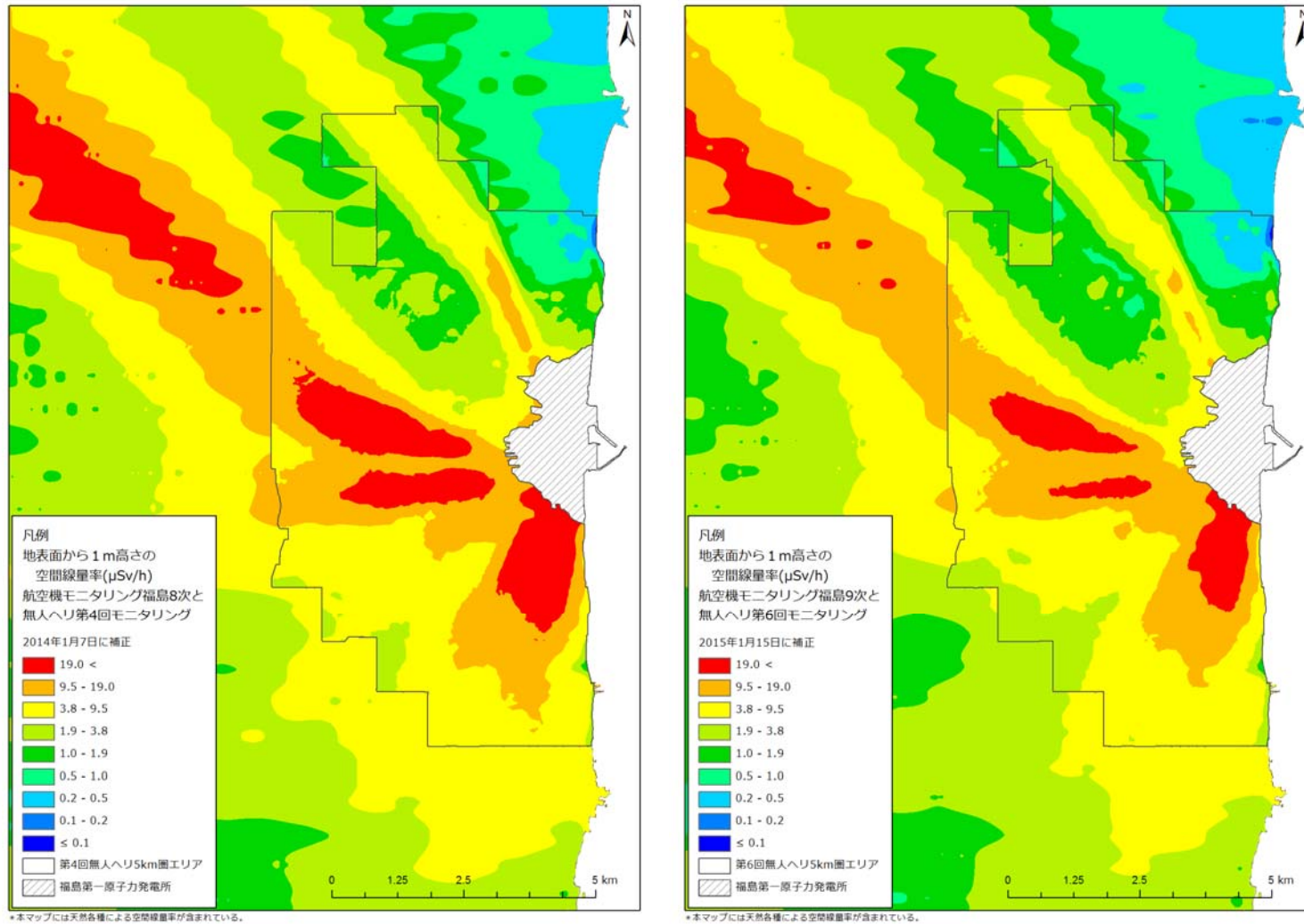


図-11 航空機モニタリングと無人ヘリによるモニタリング結果を重ね合わせた図  
 (左：平成25年度の結果；右：平成26年度の結果)