

平成 28 年度原子力施設等防災対策等委託費
(航空機モニタリング運用技術の確立等) 事業

報告書

平成 29 年 3 月

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

本報告書は、原子力規制庁による平成 28 年度原子力施設等防災対策等委託費「航空機モニタリング運用技術の確立等」事業の成果をとりまとめたものである。

目次

1. はじめに.....	1
2. 航空機モニタリングシステム	4
2.1. 航空機モニタリングシステム	4
2.2. ヘリコプターの選定.....	6
2.3. RSI システムの保守	8
3. データ取得および解析方法	11
3.1. データ取得方法	11
3.2. キャリブレーションフライト方法	15
3.3. 解析のフロー	19
3.4. 空間線量率への換算方法.....	20
3.4.1. バックグラウンド (自己汚染および宇宙線).....	20
3.4.2. 高度補正係数の算出方法	22
3.4.3. 空間線量率への換算係数の算出方法.....	22
3.4.4. 空間線量率への換算方法	22
3.5. 検出下限値	23
3.6. 不確かさ	23
3.7. マッピング	24
3.8. 空気中のラドン子孫核種の弁別手法	25
3.8.1. ラドン子孫核種.....	25
3.8.2. ラドン弁別手法の理論	27
3.8.3. GI の高度補正方法.....	29
3.9. 天然放射性核種の濃度換算手法	31
4. モニタリング結果と考察	34
4.1. 換算パラメータ	34
4.2. 地上値との比較	39
4.3. 空間線量率	43
4.4. 天然の放射性核種濃度.....	48
4.5. ラドン弁別法の適用結果.....	57
4.5.1. パラメータ (GI および RI) の決定.....	57
4.5.2. 従来手法との比較.....	59
4.5.3. ラドン弁別手法の適用	60
4.6. 放射性セシウムの沈着量.....	65
5. まとめと緊急時モニタリングに資する知見の整理	66
謝辞.....	67
参考文献	67

Table list

Table 1-1 原子力災害対策指針における OIL.....	2
Table 3-1 キャリブレーションフライトの一覧.....	16
Table 3-2 機体とシステムの組み合わせと平均的な自己汚染による計数率および採用した CR- index.....	21
Table 3-3 ラドン子孫核種の放出する γ 線.....	26
Table 3-4 天然の放射性核種濃度に換算するためのパラメーター一覧	33
Table 4-1 本事業で取得した AF データー一覧.....	37
Table 4-2 本事業で取得した CD データー一覧	37
Table 4-3 使用したパラメータのまとめ	38
Table 4-4 GI および RI の一覧	57

Figure list

Fig. 1-1 地殻中に存在する元素の濃度分布から空間線量率を計算で求めた結果.....	3
Fig. 2-1 RSI システムのブロック図	4
Fig. 2-2 RSI システムの写真	5
Fig. 2-3 ヘリコプター機底に燃料タンクのない機体一覧	6
Fig. 2-4 大飯・高浜原子力発電所周辺のモニタリングに使用した機体 (Bell 412 JA9584).....	7
Fig. 2-5 伊方原子力発電所周辺のモニタリングに使用した機体 (Bell 430 JA05TV)	7
Fig. 2-6 システムの半値幅および Gain の変動 (大飯・高浜 RSI-3)	9
Fig. 2-7 システムの半値幅および Gain の変動 (伊方 RSI-3)	10
Fig. 3-1 予定したフライトの測線 (大飯・高浜)	12
Fig. 3-2 予定したフライトの測線 (伊方)	13
Fig. 3-3 フライトイメージ.....	14
Fig. 3-4 上空からの測定範囲イメージ	14
Fig. 3-5 テストラインフライトのイメージ.....	16
Fig. 3-6 テストラインおよびテストポイントの場所 (大飯・高浜)	17
Fig. 3-7 テストラインおよびテストポイントの場所 (伊方)	17
Fig. 3-8 テストポイントフライトのイメージ	18
Fig. 3-9 宇宙線フライトのイメージ.....	18
Fig. 3-10 Rn 影響フライトおよび BG フライトのイメージ	18
Fig. 3-11 解析のフロー	19
Fig. 3-12 RSI システムにおける地上で取得した γ 線スペクトルと海上でのスペクトル例	21
Fig. 3-13 海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例	21
Fig. 3-14 IDW に入力するパラメータとマップの関係	25
Fig. 3-15 ウラン系列およびトリウム系列	26
Fig. 3-16 ラドン用航空機モニタリング機器とヘリコプターへの搭載状況	28
Fig. 3-17 大気中のラドン子孫核種と地上からの放射線のイメージ	29
Fig. 3-18 計算体系のイメージ	30
Fig. 3-19 計算体系のベンチマーク	30
Fig. 3-20 シミュレーションによる測定高度と GI の関係.....	31
Fig. 3-21 天然の放射性核種によるピーク解析例.....	32
Fig. 3-22 天然の放射性核種別の高度と計数率の関係 (EGS5 によるシミュレーション).....	32
Fig. 4-1 対地高度と計数率の関係例.....	34
Fig. 4-2 地上測定データ (大飯・高浜)	35
Fig. 4-3 地上測定データ (伊方)	36
Fig. 4-4 地上における測定点 (大飯・高浜)	39
Fig. 4-5 地上における測定点 (伊方)	40
Fig. 4-6 地上における空間線量率測定結果との比較 (大飯・高浜 散布図).....	41

Fig. 4-7 地上における空間線量率測定結果との比較（大飯・高浜 相対偏差）.....	41
Fig. 4-8 地上における空間線量率測定結果との比較（伊方 散布図）.....	42
Fig. 4-9 地上における空間線量率測定結果との比較（伊方 相対偏差）.....	42
Fig. 4-10 大飯・高浜原子力発電所周辺の空間線量率マップ.....	44
Fig. 4-11 伊方原子力発電所周辺の空間線量率マップ.....	45
Fig. 4-12 大飯・高浜原子力発電所周辺の空間線量率マップの比較.....	46
Fig. 4-13 伊方原子力発電所周辺の空間線量率マップの比較.....	47
Fig. 4-14 大飯・高浜原子力発電所周辺の K-40 濃度マップ.....	49
Fig. 4-15 伊方原子力発電所周辺の K-40 濃度マップ.....	50
Fig. 4-16 大飯・高浜原子力発電所周辺の U 系列濃度マップ.....	51
Fig. 4-17 伊方原子力発電所周辺の U 系列濃度マップ.....	52
Fig. 4-18 大飯・高浜原子力発電所周辺の Th 系列濃度マップ.....	53
Fig. 4-19 伊方原子力発電所周辺の Th 系列濃度マップ.....	54
Fig. 4-20 大飯・高浜原子力発電所周辺の放射性核種濃度測定結果と地球化学図比較.....	55
Fig. 4-21 伊方原子力発電所周辺の放射性核種濃度測定結果と地球化学図比較.....	56
Fig. 4-22 陸上における NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係.....	58
Fig. 4-23 陸上における NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係.....	58
Fig. 4-24 ラドン影響フライトから求めた NaI RSI システムのバックグラウンド計数と同日にフラ イトしたデータにラドン弁別手法を適用し求めたラドン子孫核種の計数率の平均値の比較..	59
Fig. 4-25 ラドン影響弁別手法適用後の大飯・高浜原子力発電所周辺における空間線量率マップ	61
Fig. 4-26 ラドン影響弁別手法適用後の大飯・高浜原子力発電所周辺における空気中のラドン子孫 核種起源の計数率マップ.....	62
Fig. 4-27 ラドン影響弁別手法適用後の大飯・高浜原子力発電所および伊方原子力発電所周辺空間 線量率マップ.....	63
Fig. 4-28 大飯・高浜原子力発電所モニタリングにおける従来法とラドン弁別法を用いた空間線量 率換算結果と地上測定値との比較.....	64
Fig. 4-29 伊方原子力発電所モニタリングにおける従来法とラドン弁別法を用いた空間線量率換算 結果と地上測定値との比較.....	64
Fig. 4-30 原子力発電所周辺の放射性セシウム沈着量マップ.....	65

1. はじめに

日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）では、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に起因した東京電力福島第一原子力発電所事故の周辺環境における放射性物質の分布調査を行うために、有人のヘリコプターを用いた航空機モニタリング技術の開発を行っている。事故から6年経過し、継続的な航空機モニタリングを実施しつつ、手法の改善および体制の整備を行ってきた¹⁻⁷⁾。

今回の東京電力福島第一原子力発電所事故における教訓を踏まえ、原子力防災のツールとして航空機モニタリングを生かすために、事故時の対応における位置づけ、機器の恒久的な管理体制の維持および技術の継承等の課題があると考えられる。事故後整備された原子力災害対策マニュアルには、航空機モニタリングに関し下記のように定められている⁸⁾。

第2 関係省庁における対応要領

第1 編事態毎の組織・応急対策業務

第4 章全面緊急事態

(1) 緊急時モニタリングの実施業務

② 緊急時モニタリングの実施・支援

「ERC チーム放射線班は、原子力事業所周辺以外の広範囲にわたって事故の影響が懸念される場合には、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構と連携して航空機モニタリングを実施するとともに、必要に応じてモニタリングカーによる測定や環境放射能水準調査の結果等を活用して、汚染の状況を把握する。自衛隊等の関係機関は、航空機モニタリングに対して ERC チーム放射線班からの調整があった場合には、必要に応じて、対応可能な範囲内で、航空機によるモニタリング支援を行う。」

一方、実際の原子力災害を想定した場合に、フライトするタイミングやフライトする体制等事故前に決定しておく必要がある。特にフライトするタイミングについては、原子力災害対策指針に定められている防護措置の実施の判断基準（OIL: Operational Intervention Level）を踏まえて位置づけられることが望ましい⁹⁾。Table 1-1 に原子力災害対策指針における OIL について示す。また、機能的・効率的にフライトするには、事前に想定される地域を訓練として実際にフライトし、地域的な特性（飛行場から原子力発電所までの距離および事故発生、フライト開始までの最短時間評価および地形等フライト時の懸念事項）を抽出しておくことが望ましい。さらに、航空機モニタリングのデータを解析して情報を公表するまでの時間についてもシミュレーションしておく必要がある。

現在、東京電力福島第一原子力発電所事故の周辺環境で行っているモニタリングは、周辺環境に沈着した放射性セシウムから放出されるγ線の測定を目的としている。放射性セシウムの影響が天然放射性核種からの影響に比べて比較的高い場所を測定する場合には、天然放射性核種は無視できるが、東京電力福島第一原子力発電所事故よりも比較的小さな事故を想定した場合は、天然放射性核種の影響を考慮しなければならない。事故以前に測定・推定された天然の

放射性核種由来の空間線量率分布をみると、西日本で高い傾向にあり、最大 $0.13 \mu\text{Gy/h}$ 程度の場所もあるとされている¹⁰⁾。地質学会のホームページに掲載されている、地殻中に存在する元素の濃度分布から空間線量率を計算で求めた結果について Fig. 1-1 に示す¹¹⁾。例えば、このようなバックグラウンドは、Table 1-1 に示した OIL 6 を実施するための基準となる $0.5 \mu\text{Sv/h}$ を測定する場合には、無視できない大きさである。バックグラウンドは、 γ 線エネルギースペクトルから除去する手法が考えられるが、スペクトル弁別には計数を一定程度蓄積する必要があり、一般的に時間がかかる。一方、事前にバックグラウンドを調査しておくこと、実際の事故時に迅速かつ正確にバックグラウンドを減算することができる。また、事前にフライトすることによって、地域特有の航空管制の情報、空港の使用法および山間部等のフライト上の危険個所の抽出等緊急時に資する情報をあらかじめ取得しておくことは重要である。

平成 27 年度 (2015 年度) には、鹿児島県にある九州電力川内原子力発電所周辺の 3～80 km 圏内について航空機を用いたバックグラウンドモニタリングを実施し、フライト時の地域特性を踏まえた注意点を抽出した。また、天然の放射性核種の評価手法等について確立した。

平成 28 年度 (2016 年度) には、福井県にある関西電力大飯・高浜原子力発電所および愛媛県にある四国電力伊方原子力発電所周辺 3～80 km 圏内におけるバックグラウンドモニタリングを実施したので報告する。

Table 1-1 原子力災害対策指針における OIL

	基準の種類	基準の概要	初期設定値		
緊急防護措置	OIL1	住民等を数時間以内に避難や屋内退避等させるための基準	空間線量率 $500 \mu\text{Sv/h}$ (地表面から1m高さ)		
	OIL4	除染を講じるための基準	(β) $40,000 \text{ cpm}$ 皮膚から数cm, 入射窓 20 cm^2 (β) $13,000 \text{ cpm}$ 1月後の数値		
早期防護措置	OIL2	住民等を1週間程度内に一時移転させるための基準・地域生産物の摂取を制限	空間線量率 $20 \mu\text{Sv/h}$ (地表面から1m高さ)		
飲食物摂取制限	OIL3 (飲食物に係るスクリーニング基準)	飲食物中の放射性核種濃度測定を実施すべき地域を特定する際の基準	空間線量率 $0.5 \mu\text{Sv/h}$ (地表面から1m高さ)		
	OIL6	飲食物の摂取を制限する際の基準	核種	飲料水等 (Bq/kg)	食物等 (Bq/kg)
			放射性ヨウ素	300	2,000
			放射性セシウム	200	500
			ウラン	20	100
			プルトニウム	1	10

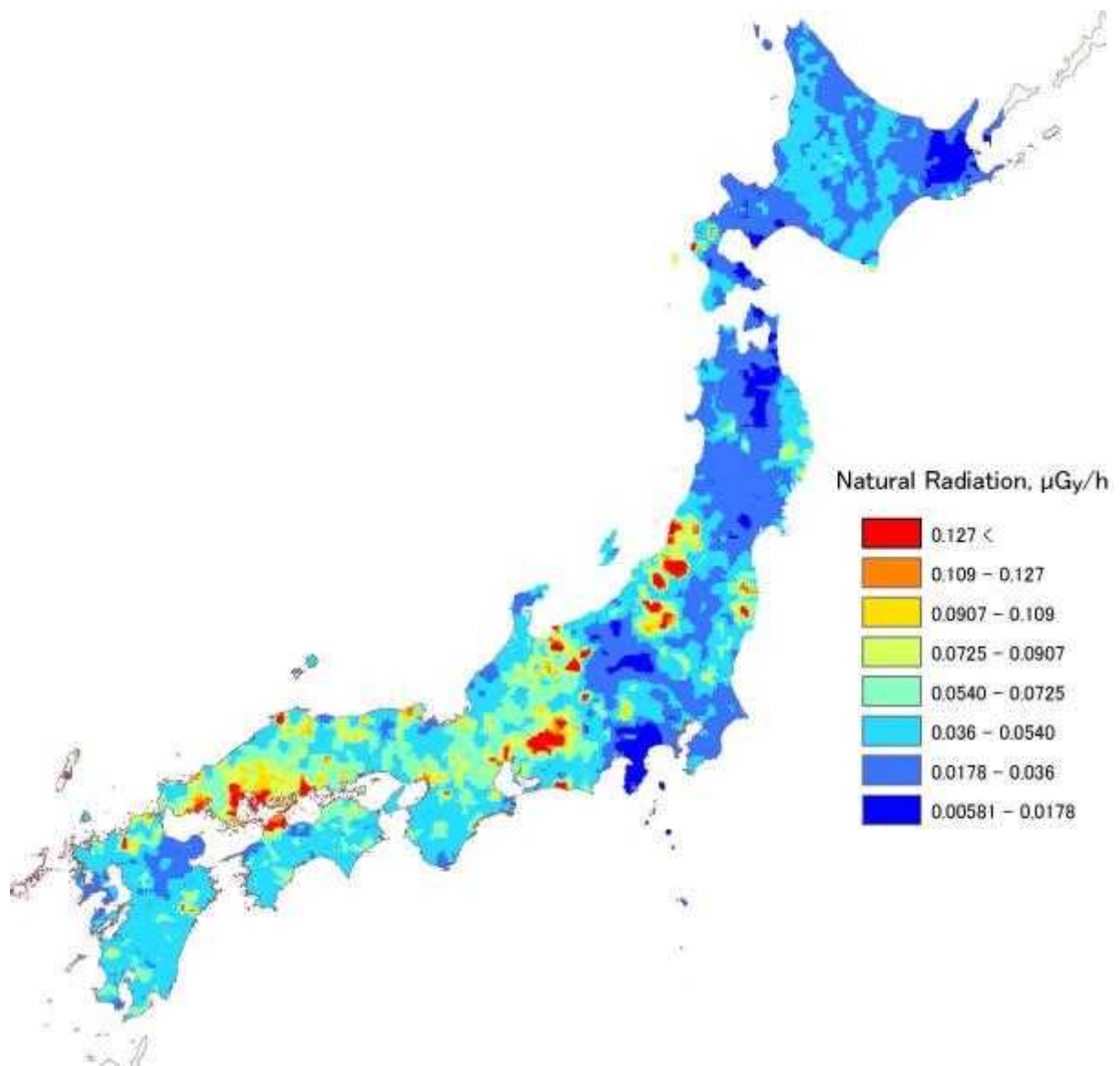


Fig. 1-1 地殻中に存在する元素の濃度分布から空間線量率を計算で求めた結果
(地質学会ホームページより¹⁰⁾)

2. 航空機モニタリングシステム

2.1. 航空機モニタリングシステム

一般的に、航空機モニタリングシステム (Aerial Radiation Monitoring System: ARMS) には、大型の NaI シンチレーション検出器を用いたスペクトル測定型の放射線検出器の情報と GPS (Global Positioning System, 全地球測位網) による位置情報をリンクしてデータ保存するシステムが用いられる。

今回のモニタリングで使用したシステム (以下、RSI システム) は、原子力規制庁の所有する、機内に装着するタイプの Radiation Solution Inc. (RSI, Canada) 製航空機モニタリング機器を使用した。RSI システムのブロック図を Fig.2-1 に示し、外観を Fig.2-2 に示す。検出部 (Detector) には、2" x 4" x 16" の NaI シンチレーション検出器 3 本を組み込んだ検出器のユニットを 2 台使用している (合計: 12.6 L)。検出器で計測した 1,024 ch の γ 線のスペクトルは 1 秒毎に同期する GPS による位置データとともに、RS701 と呼ばれる検出器上部に取り付けてあるデータ収集装置に保存される。検出器 2 台のデータは RS501 という装置で統合される。RS501 は PC と接続でき、PC にインストールされている専用のソフトウェア (RadAssist) を使用することによって GPS による位置情報や γ 線の計数率情報をリアルタイムに確認出来る。また、全体は外付けのバッテリーで駆動し、完全充電で 5 時間の稼働が可能である。

現在、原子力規制庁が所有する機器は 4 システムあり、福島で主に使われている 2 システム (RSI-1, 2) と区別するため、本報告書では RSI-3 と表記する。

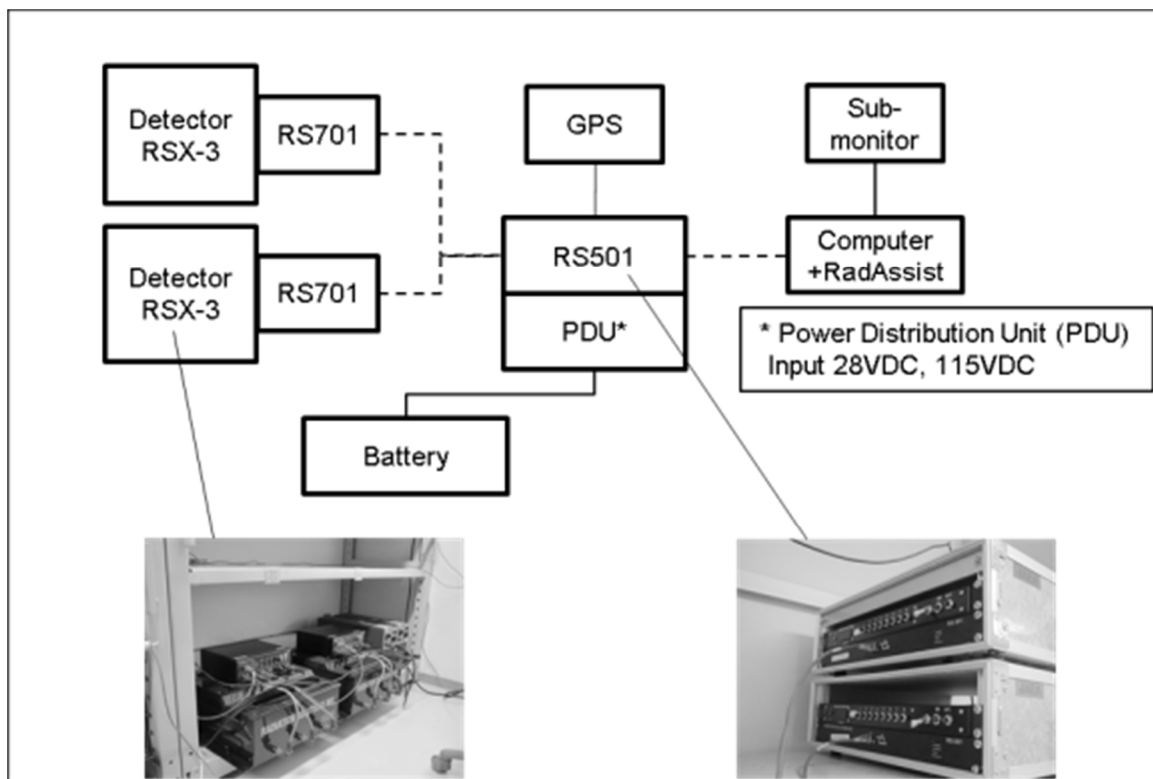


Fig. 2-1 RSI システムのブロック図



Fig. 2-2 RSI システムの写真

2.2. ヘリコプターの選定

RSI システムは、機内に搭載するタイプであるため、機体（ヘリコプター）を選ばないというメリットはあるが、ヘリコプターの機底に燃料タンクがある場合、燃料タンクの材料および燃料による放射線の遮へいを無視できず評価が難しくなる。そこで、その評価に伴う誤差の導入を避けるため RSI システムを使用できる機体は、機底に燃料タンクのない機種に限定している。使用できる機体について、Fig. 2-3 に示す。今年度は、機体繰りの都合から、Bell 412 および Bell430 の 2 機種を使用した。Fig. 2-4、Fig. 2-5 に使用した機体について示す。



Bell 430
ベル・ヘリコプター・テキストロン社製



Bell 412
ベル・ヘリコプター・テキストロン社製



AS 332
アエロスパシアル社製



S 76
シコルスキー・エアクラフト社製

Fig. 2-3 ヘリコプター機底に燃料タンクのない機体一覧



Fig. 2-4 大飯・高浜原子力発電所周辺のモニタリングに使用した機体 (Bell 412 JA9584)



Fig. 2-5 伊方原子力発電所周辺のモニタリングに使用した機体 (Bell 430 JA05TV)

2.3. RSI システムの保守

RSI システムの健全性をチェックするため、RSI システムに組み込まれているプログラムにより、フライト前に 1 日 1 回、以下の事項を確認した。

- ・RSI システムの接続チェック：データ収集装置 (RS701 および RS501) に表示されるエラーランプチェック
- ・チェックプログラムによる検出器の特性確認（環境中に存在する ^{208}Tl の 2,614 keV のピークの半値幅 (Full Width at Half Maximum: FWHM) と信号増幅回路 (Amplifier: アンプ) の振幅利得 (gain: ゲイン) をチェック)

ピークの半値幅については、メーカーから保守の推奨値として 6 %以下とされている。日常の点検で常に数値を確認し、この推奨値を超えた場合には、高圧電源の電圧を変更するなど再調整を実施し、また、アンプのゲインについては 0.8 を下回る場合に再調整を行うが、今回は再調整を行う必要はなかった。本事業における FWHM とアンプのゲインの推移について Fig. 2-6、Fig. 2-7 に示す。図中の RSI-3 以降の枝番は 3 台配置してある検出器番号である。アンプのゲインは大きな変動はなかった。使用日数が長くなるにつれ若干上昇傾向にある場合があり、これは、気温の低下により検出器の信号が小さくなることに起因する。このことから、気温の低い時期のモニタリングの際には注意が必要であり、ヘリコプターの機内はなるべく気温が下がらないように対策を講じることが望ましい。これらのデータは RSI システムの保守を行う際に参考となる。

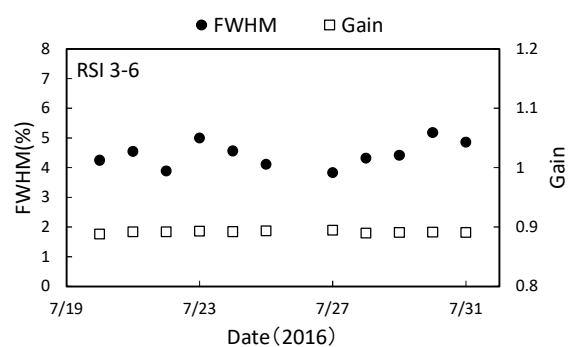
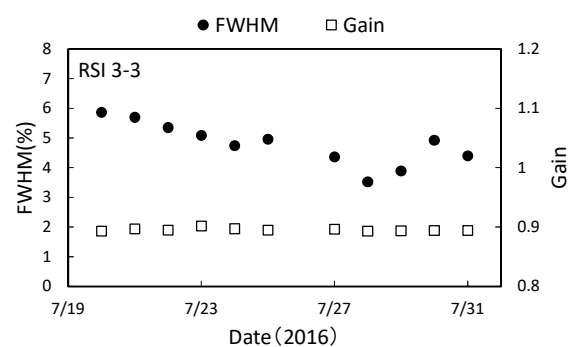
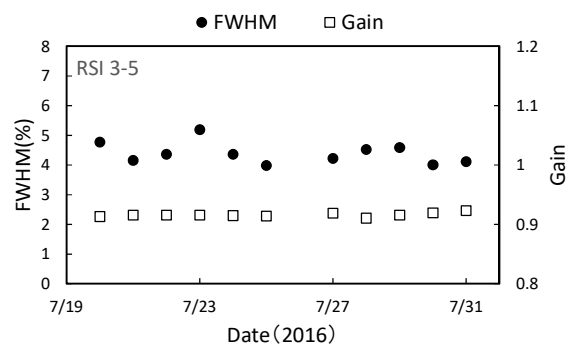
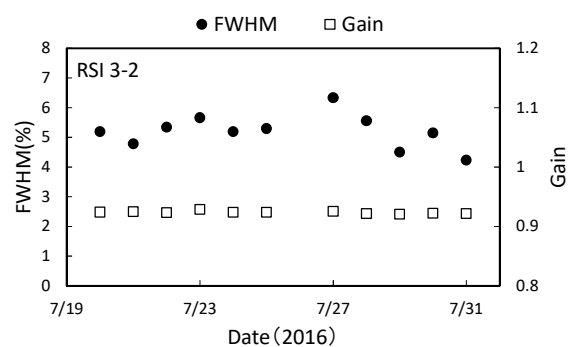
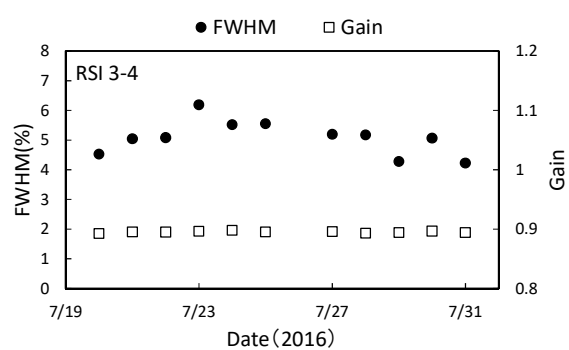
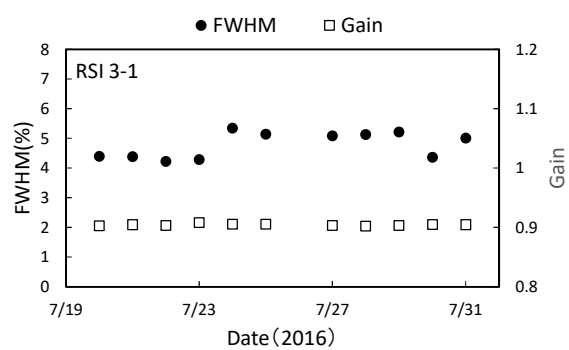


Fig. 2-6 システムの半値幅および Gain の変動 (大飯・高浜 RSI-3)

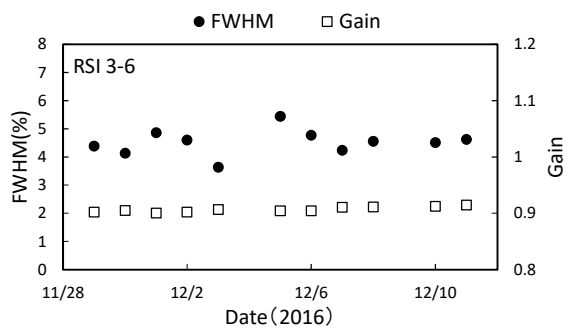
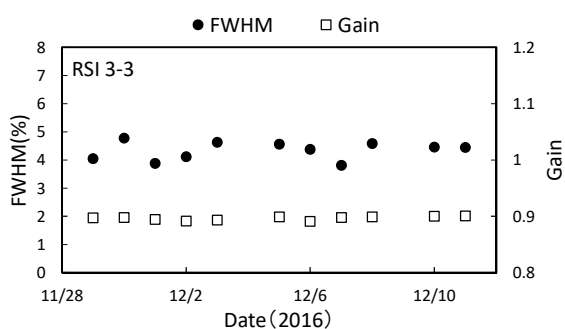
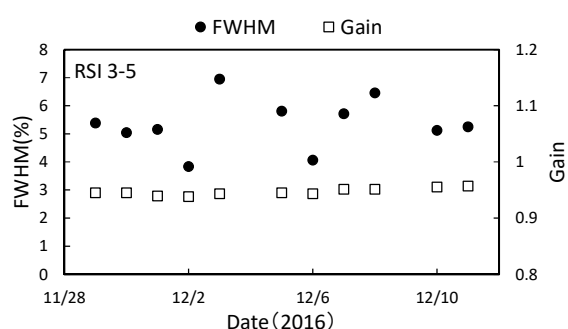
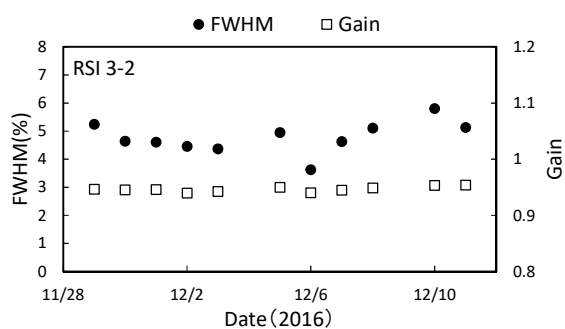
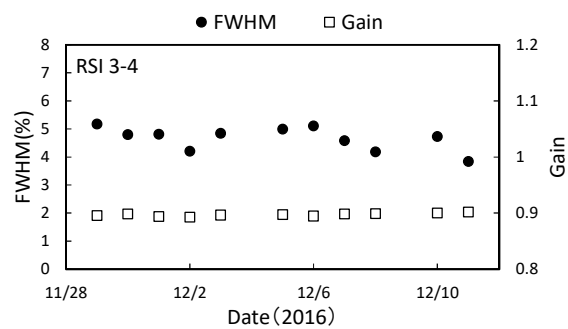
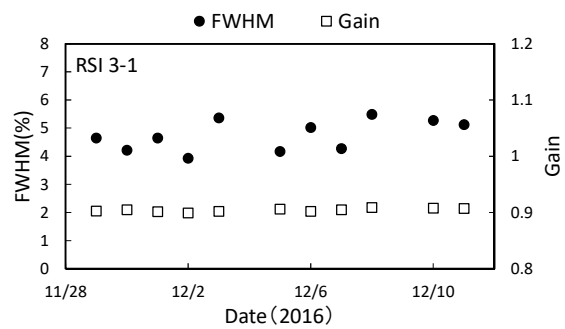


Fig. 2-7 システムの半値幅および Gain の変動 (伊方 RSI-3)

3. データ取得および解析方法

3.1. データ取得方法

データは、下記のようなフライト条件で取得した。このフライト条件は、気象条件や地形の高度勾配によって若干変化する。測定データは、1 秒ごとに GPS の位置情報と検出器の γ 線のスペクトルを記録した。Fig. 3-1（大飯・高浜）、Fig. 3-2（伊方）にフライトの予定測線について示す。Fig. 3-3 にデータ取得のイメージを示す。

以降、本報告書で使用する背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用した。

[フライト条件]

- 速度：130～180 km/h (=70～95 knot)
- 対地高度：300 m (=1,000 ft)
- 測定間隔：5 km

なお、上空から地上の放射線を測定する基本的な考え方は、以下のような仮定に基づいている。

- 上空で測定されている計数値は、上空を頂点とし、対地高度を高さとした円錐の底面部分に該当する地上の放射線の平均値とする。
- 測定対象となる地表は、平坦かつ放射線の分布は一様とする。

測定範囲のイメージについて Fig. 3-4 に示す。

- フライトに要した期間

○大飯・高浜原子力発電所：平成 28 年 7 月 20 日～8 月 1 日（のべ 22 フライト）

○伊方原子力発電所：平成 28 年 11 月 29 日～12 月 11 日（のべ 18 フライト）

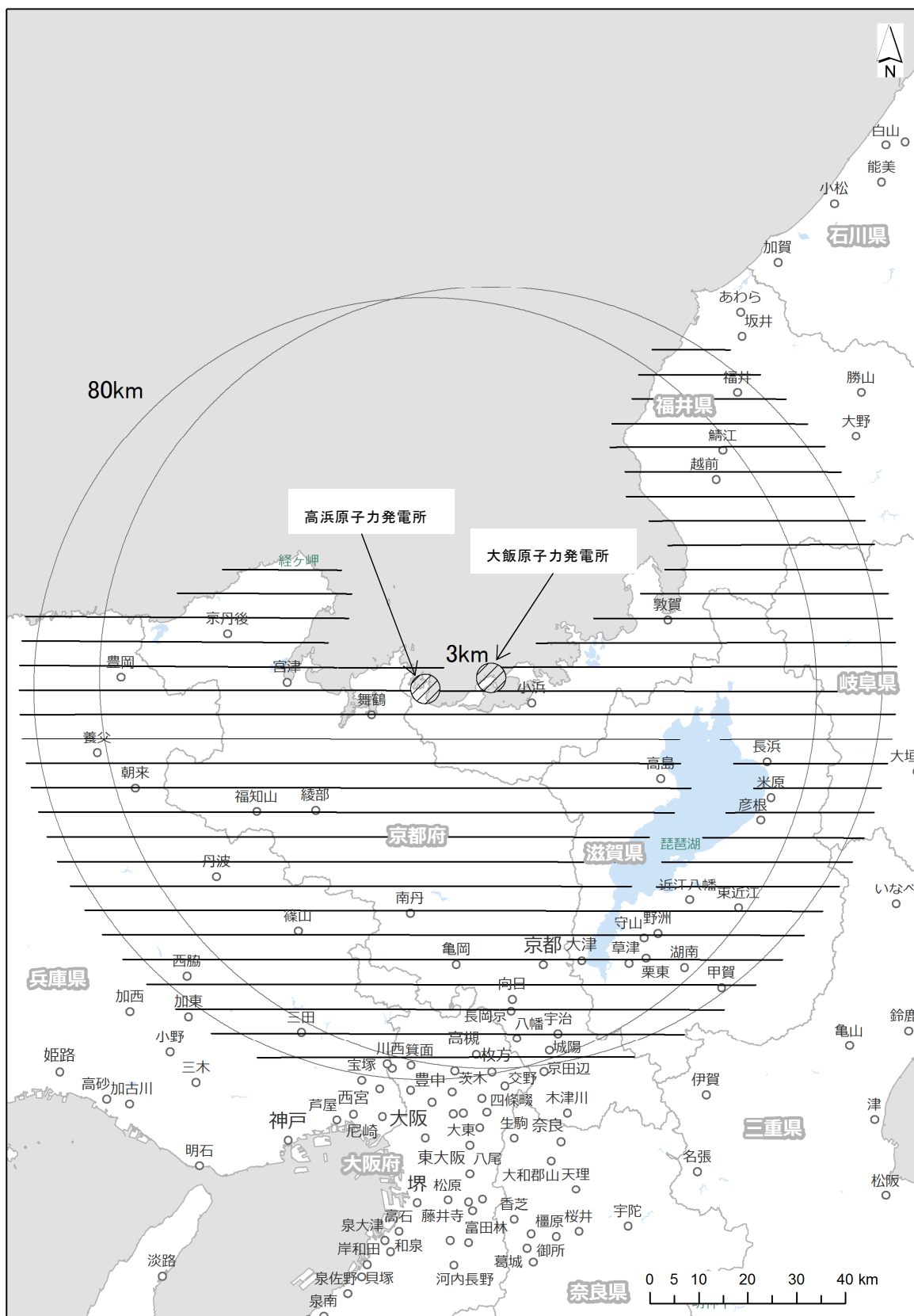


Fig. 3-1 予定したフライトの測線(大飯・高浜)

(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

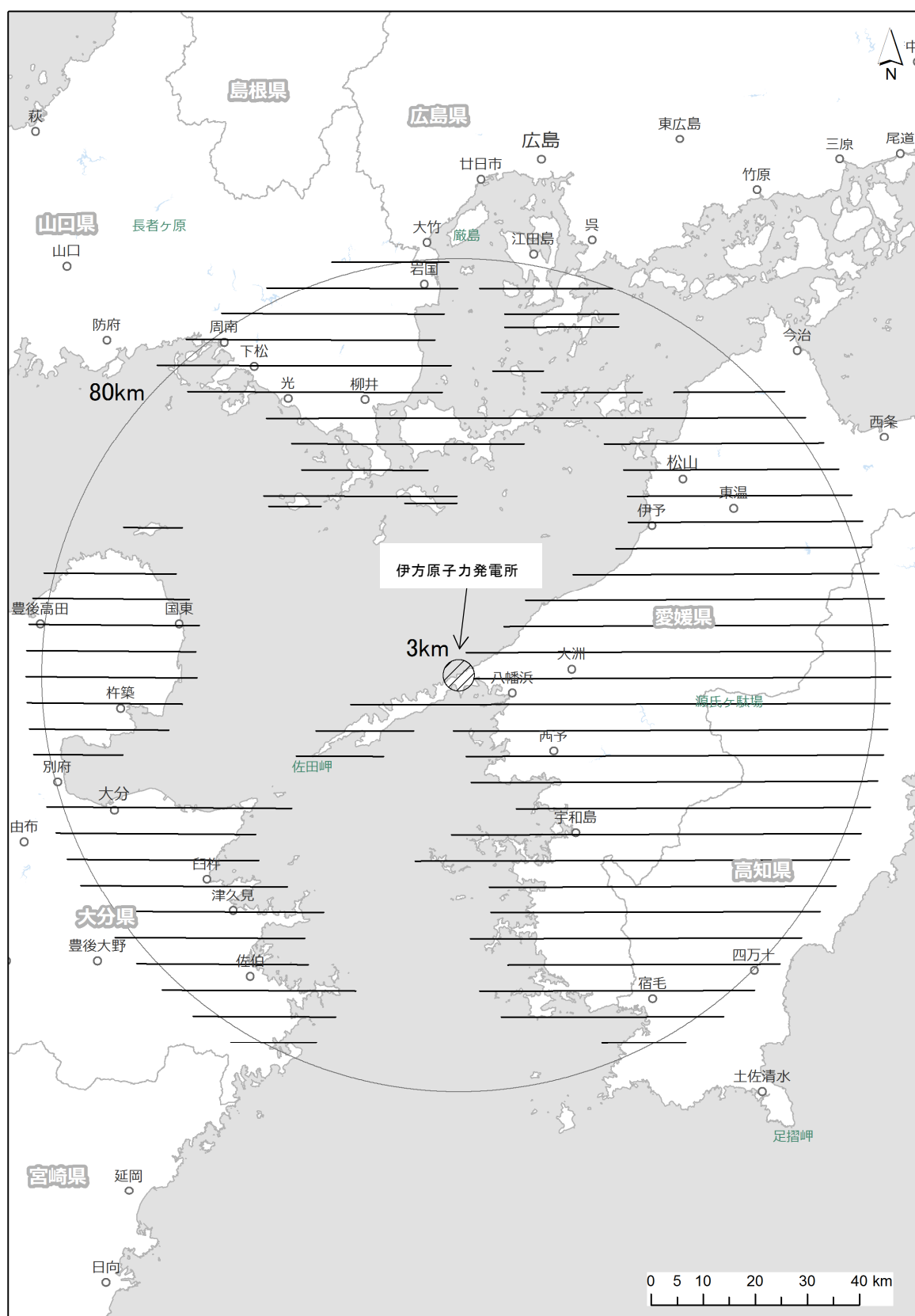


Fig. 3-2 予定したフライトの測線(伊方)

(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

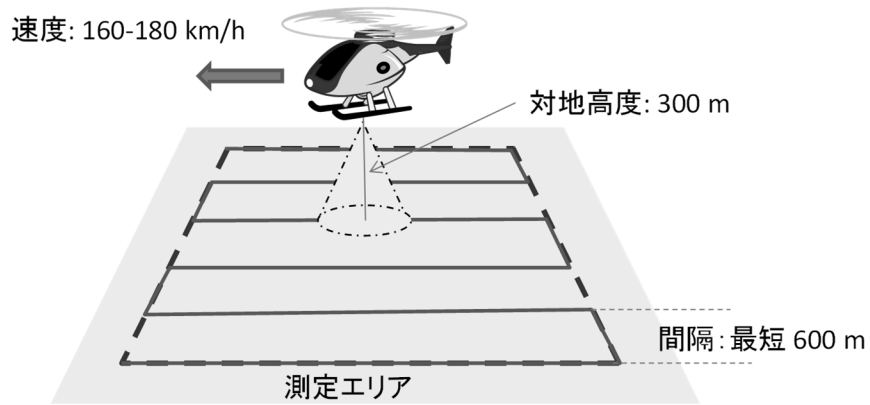


Fig. 3-3 フライトイメージ

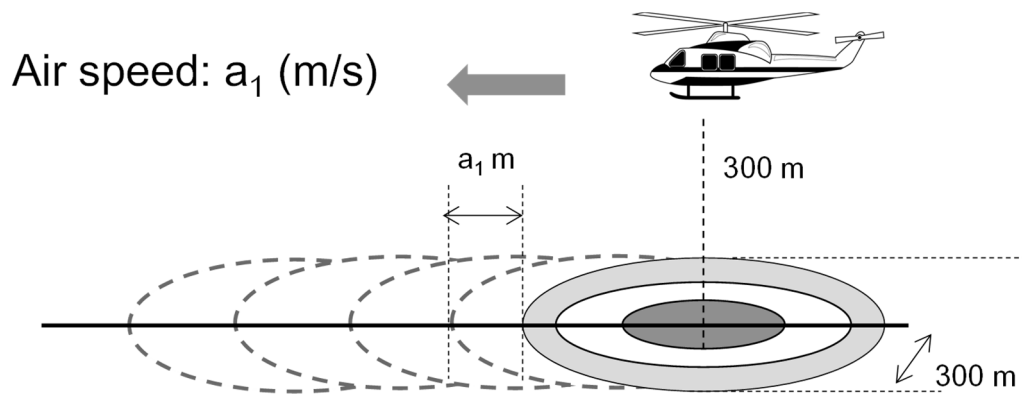


Fig. 3-4 上空からの測定範囲イメージ

3.2. キャリブレーションフライト方法

上空で取得したデータを、地上 1 m 高さにおける放射線量や地表面の放射性セシウムの沈着量に換算するため、パラメータについては、昨年度までのデータを基に数値を決定している。今年度は、決定したパラメータの妥当性を確認する目的で、キャリブレーションフライトを行った。キャリブレーションフライトの種類と目的について Table 3-1 に示す。

○テストラインフライト

高度を補正するため、実効的な空気減弱係数 (Attenuation Factor、 m^{-1} : 以下、「AF」という。) を求めるためのフライトである。本フライトは、線量や地形の変化が少ない約 3 km のラインを設定し、その上空において高度を変化させながら (300 m、450 m、600 m、750 m、900 m、1,500 m) フライトを実施する。得られたデータは高度ごとに平均化し、高度と計数率のグラフを作成し、指数近似の傾きによって、高度を補正する。テストラインフライトのイメージを Fig. 3-5 に示す。また、テストラインとして選定した場所について Fig. 3-6 (大飯・高浜)、Fig. 3-7 (伊方) に直線で示す。

○テストポイントフライト

半径 1,000 m の範囲内で、空間線量率の勾配が小さい場所および地形の平坦な地点を選定し、地上の空間線量率を測定した場所の上空をフライトし、基準高度 (300 m) における地上の空間線量率換算係数 (Conversion factor of Dose-rate、 $cps/[μSv/h]$: 以下、「CD」という。) を求めるためのフライトである。テストポイントでは人手により、NaI シンチレーション式サーベイメータ (日立製作所社製 TCS-172B) を用いて、半径 1,000 m の範囲内で 60 ポイントを目安に 1 m 高さの空間線量率の測定を行う。また、テストポイントとして選定した場所を Fig. 3-6 (大飯・高浜)、Fig. 3-7 (伊方) に半径 1,000 m の円で示す。なお、これまでの航空機モニタリングの経験から、ホバリングで同一の場所にとどまることは非常に難しいことから、高度を変えたフライトの相互比較から算出する実効的な空気減弱係数をテストラインで実施し、地上で測定した空間線量率との比較する空間線量率換算係数を算出するフライトは、テストポイントで実施する。テストポイントフライトのイメージを Fig. 3-8 に示す。

○宇宙線フライト

宇宙線の影響を差し引くために、海上を約 300～2,500 m まで上昇し、データを取得するものである。宇宙線フライトのイメージを Fig. 3-9 に示す。フライト場所は、陸地から十分に離れた海上であれば場所は問わないので、天候等を見ながら海上の適当な位置で実施する。

○Rn 影響フライト

大気中に存在するラドン子孫核種の影響を考察するために、決められた場所の上空において対地高度約 450～1000 m までを直線的に上昇しデータを取得する。

○BG フライト

地上からの放射線の影響のない場所において対地高度約 1,000 m に保ち、約 3 分のフライトを継続してデータを取得することにより、機体および検出器のバックグラウンドデータを取得する。Rn 影響フライトおよび BG フライトのイメージを Fig. 3-10 に示す。

Table 3-1 キャリブレーションフライトの一覧

名称	目的	方法	頻度
テストラインフライト	空気減弱係数を算出	指定のテストライン上で高度を変化させてフライト	測定期間中に 2 回
テストポイントフライト	空間線量率換算係数を算出	指定の地点上で、300 m 高度で 3 分	測定期間中に 2 回
宇宙線フライト	宇宙線の影響を調査	海上を 300-2,500 m まで上昇	測定期間中に 2 回
Rn 影響フライト	Rn の影響を調査	フライト前に拠点近くの測線上を 450-1,000 m まで直線的に上昇	毎日
BG フライト	機体のバックグラウンドを調査	1,000 m を 3 分 (Rn 影響フライト後に実施)	毎日

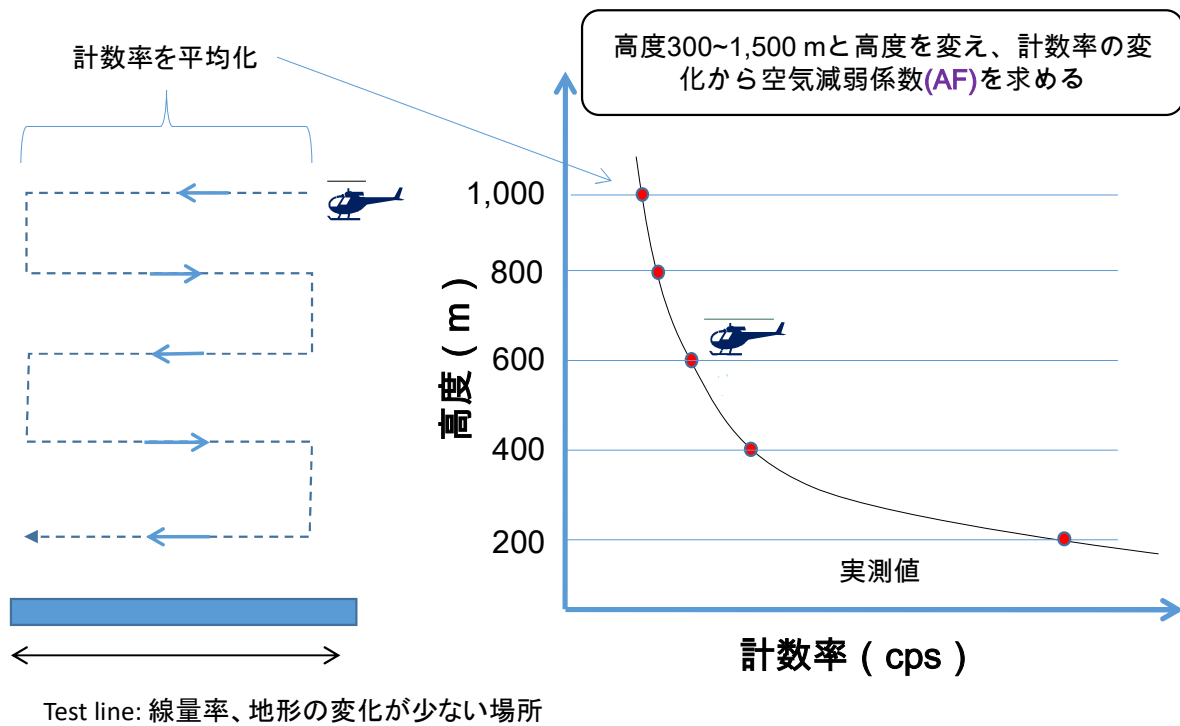


Fig. 3-5 テストラインフライトのイメージ

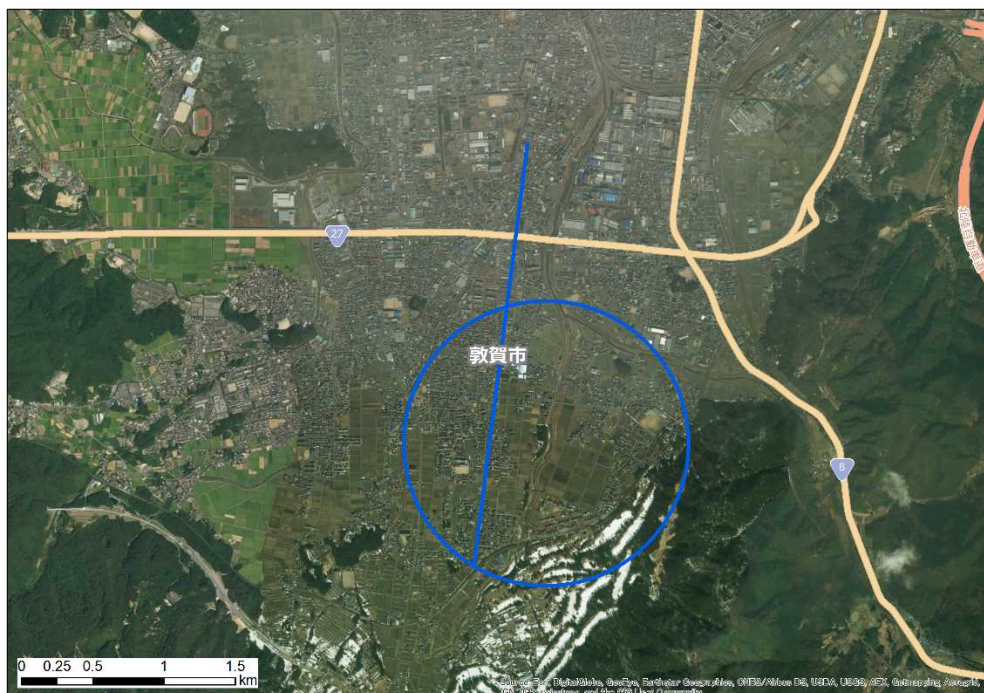


Fig. 3-6 テストラインおよびテストポイントの場所(大飯・高浜)
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

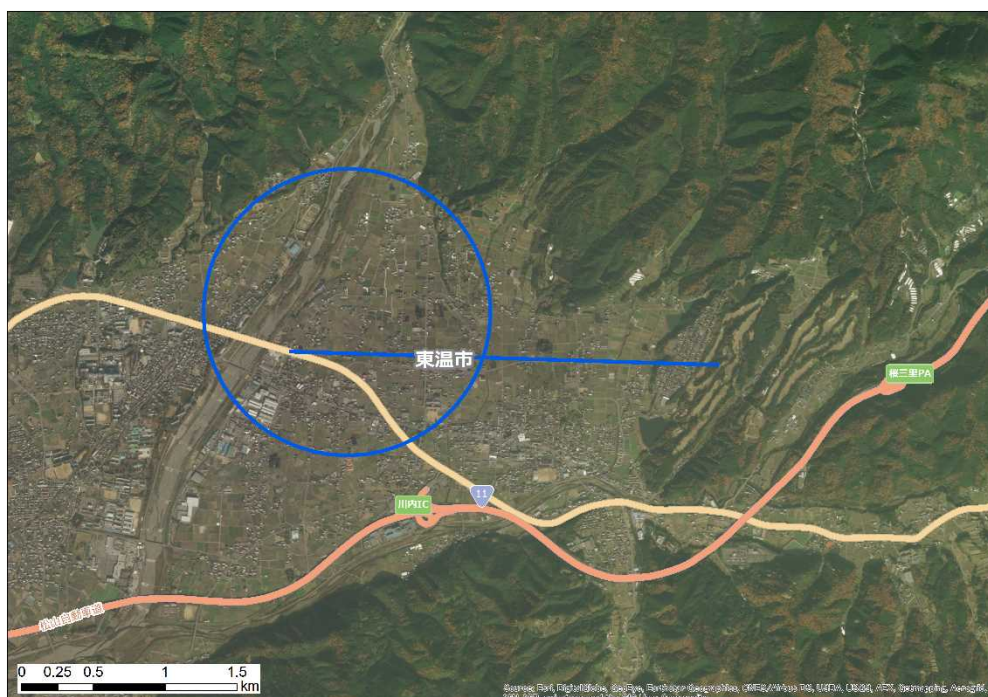


Fig. 3-7 テストラインおよびテストポイントの場所(伊方)
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

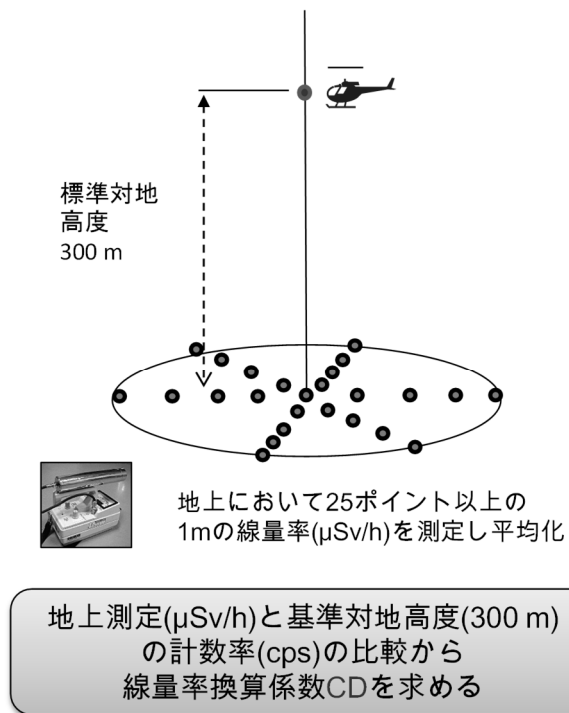


Fig. 3-8 テストポイントフライトのイメージ

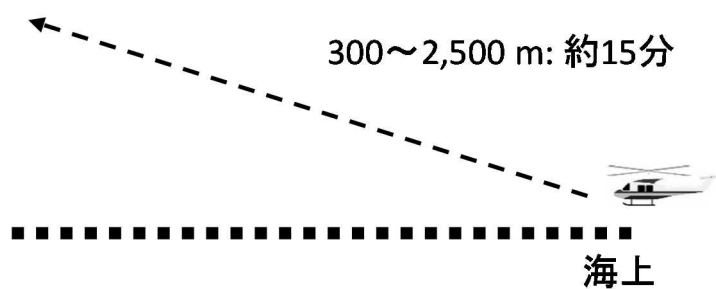


Fig. 3-9 宇宙線フライトのイメージ

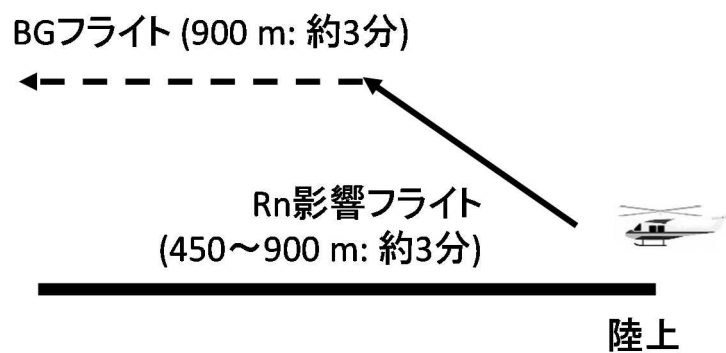


Fig. 3-10 Rn 影響フライトおよび BG フライトのイメージ

3.3. 解析のフロー

本測定法により、計数される放射線は主に以下の4種類に分けられる。

- ① 天然の放射性核種からの γ 線
- ② 自己汚染
- ③ 宇宙線
- ④ 放射性セシウムの γ 線

本地域において、放射性セシウムの影響は無視できるため、②および③起源の計数率を減算する必要がある。これらを考慮した解析のフローを Fig. 3-11 に示す。なお、本章以降の空間線量率とは、周辺線量当量率 (1 cm 線量当量率) を意味する。

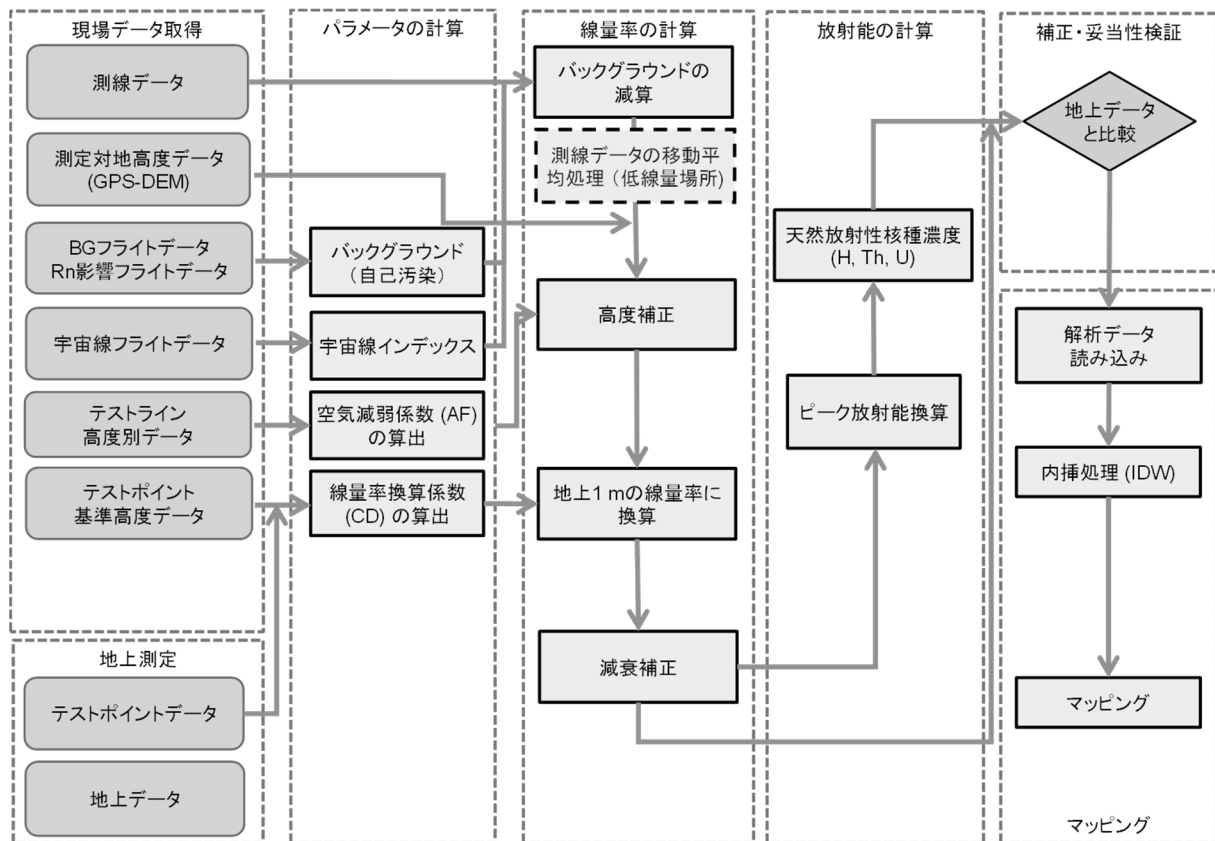


Fig. 3-11 解析のフロー

3.4. 空間線量率への換算方法

上空での計数率から地上への空間線量率へ換算する手順は、大まかに以下の手順となる。

- ① 全計数率からバックグラウンド計数率 (自己汚染および宇宙線由来の計数率) 減算
- ② 高度補正 (フライト高度の基準高度からのずれを補正)
- ③ 空間線量率換算係数により地上空間線量率に換算
- ④ スペクトル分析から天然の放射性核種濃度算出

以下、上記項目の詳細について述べる。

3.4.1. バックグラウンド (自己汚染および宇宙線)

航空機モニタリングにおいて、自己汚染および宇宙線はバックグラウンドとなる。これらの減算方法について示す。自己汚染については、BG フライトとして実施した地上からの放射線が届かないと考えられる 1,000 m 以上のフライト (もしくは海上でフライトした際のデータ：宇宙線フライト) を用いる。地上で測定したスペクトルと海上で取得したスペクトルの例を Fig. 3-12 に示す。また、平均的な自己汚染の計数率を Table 3-2 に示す。

これまでの経験から海拔高度が上昇すると宇宙線起因の計数率が上昇することが分かっている。宇宙線起因の計数率は、RSI システムが測定している全エネルギー範囲 (50~3,000 keV) で計数されるが、2,614 keV の Tl-208 が放出する γ 線の影響により、2,614 keV 以下の計数は弁別が難しい。そこで、宇宙線の影響だけを計数していると考えられる 2,800 keV 以上の計数に着目する。なお、RSI システムにおいて、3,000 keV 以上の計数は最終チャンネル (1,024 ch) に積算される。Fig. 3-13 に海拔高度と宇宙線の計数率の関係例を示す。この例は、沖縄と北海道での海上において、50 m~2000 m の高度で取得したデータの 2,800 keV 以上の計数率をプロットしたものである。このように、海拔高度と計数率は指数の相関関係にあり、緯度に依存する。なお、日本のような中緯度地域では時間帯による変化は少ない。また、2,800 keV 以上の計数率と 2,800 keV 以下の計数率の比 (CR-index) は、高度に依存せず一定の数値を示すことから、CR-index を機体と検出器の組み合わせごとに設定した。その後、実際に測定したスペクトルの 2,800 keV 以上の計数率から CR-index を用いて全エネルギーにおける宇宙線起因の計数率を算出し、全計数率から差し引いた。実測したデータを基に CR-index について Table 3-2 に示す。これらのパラメータを実際の解析に使用し、バックグラウンドの減算を行った。

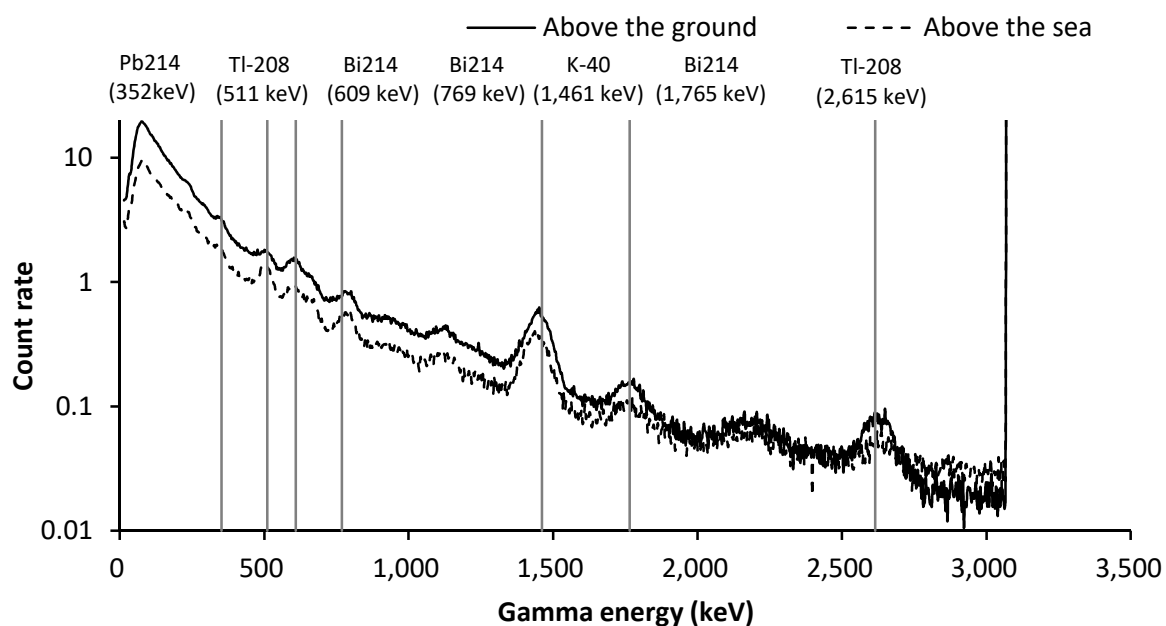


Fig. 3-12 RSI システムにおける地上で取得した γ 線スペクトルと海上でのスペクトル例

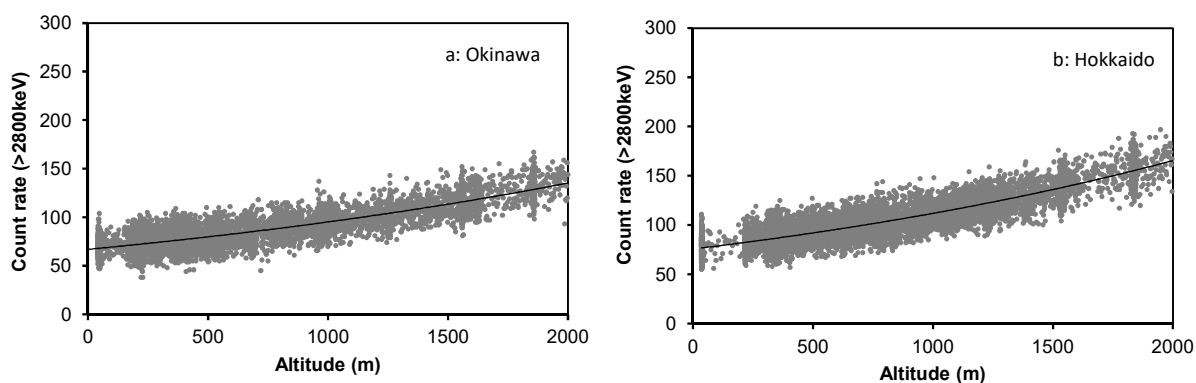


Fig. 3-13 海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例

(a: 沖縄海域, b: 北海道海域)

Table 3-2 機体とシステムの組み合わせと平均的な自己汚染による計数率および採用した CR-index

Measurement area	Fiscal year	System	ヘリコプター	自己汚染計数率	CR-index	
Fukui	2016	RSIシステム3	Bell 412 (JA9584)	AAC	414	3.63
Ehime		RSIシステム3	Bell 430 (JA05TV)	NNK	409	4.18
Fukushima	2016	RSIシステム1	Bell 430 (JA05TV)	NNK	538	2.93
		RSIシステム2	S 76 (JA6901)	AAC	495	3.83
			Bell 412 (JA6767)	NNK	518	2.97
			Bell 412 (JA9616)	AAC	586	2.97

3.4.2. 高度補正係数の算出方法

測定点における対地高度の補正を行うために、テストラインであらかじめ取得したデータを基に、実効的な AF を求めた。高度補正に必要な補正係数 HF は、計算式 [1] を用いて算出できる。

$$HF = \exp(AF \times (H_{sd} - H_a)) \quad [1]$$

ここで、

HF: 高度補正係数 (Height correction Factor; 以下、「HF」)

H_{sd} : 基準高度 (300 m)

H_a : 対地高度 (GPS 高度 - DEM - ジオイド高)

対地高度の算出には、GPS で記録した楕円対地高度から、公開されている 10 m メッシュの数値標高モデル(DEM: Digital Elevation Model) ¹²⁾ およびジオイド高を差し引いて求める*¹。対地高度と対応する計数率データは、Microsoft Excel 上で散布図としてプロットし、指数関数フィッティングを行った近似曲線の傾きを AF とする。実際に使用した換算パラメータについては、4.1 章に詳述する。

3.4.3. 空間線量率への換算係数の算出方法

地表面から高さ 1 m における空間線量率に換算するために設定する換算係数 (線量率換算係数: CD [$\text{cps } \mu\text{Sv}^{-1} \text{h}$]) は、テストポイントの地上における測定点の平均値とその上空 300 m をフライトした計数率の平均値の比を取って求める。RSI システムは、機体の中に搭載するため、ヘリコプターの機底の遮蔽により、CD は変化すると考えられることから、ヘリコプターの機種ごとに数値を設定する。CD は、テストポイント上でホバリングした航空機モニタリング機器でのデータおよび地上測定値の比から求める。実際に使用した換算パラメータについては、4.1 章に詳述する。

3.4.4. 空間線量率への換算方法

これまで求めたパラメータを用いて空間線量率に換算する方法について以下に示す。また、計算式を式 [2], [3] に示す。

- ① 測定で得られた γ 線スペクトルから以下の領域の計数率を計算する。
 - (1) 全計数率 (C_{all})
 - (2) 2,800 keV 以上の計数率 (C_{cos})
- ② 式(2)のように、 C_{cos} に CR-index (I_{cos}) をかけて全エネルギーの宇宙線のバックグラウンド計数率 (BG_{cos})を計算
- ③ BG フライトで取得したデータを自己汚染による計数率 (BG_{self}) とする
- ④ C_{all} から BG_{cos} と BG_{self} を差し引いた計数率を C_{net} とし、CD および HF を用いて地表 1 m における空間線量率 D を算出

*¹ GPS で測定される高度は、世界測地系で使用している楕円体表面からの高さになっており、標高 (飛行体の場合は対地高度) を求める場合には、測地学的に定義されている海水面からの高さ (ジオイド高) を差し引く必要がある。ジオイド高は、地域によって異なるが、日本においては 30~40 m である。

$$D = \frac{C_{\text{net}} \times HF}{CD} \quad [2]$$

ここで、

$$C_{\text{net}} = C_{\text{all}} - BG_{\text{cos}} - BG_{\text{self}}$$

$$BG_{\text{cos}} = C_{\text{cos}} \cdot I_{\text{cos}}$$

および式 [1] を代入すると

$$D = (C_{\text{all}} - BG_{\text{self}} - BG_{\text{cos}}) \times \frac{1}{CD} \times \exp(-AF \times [H_{\text{std}} - H_{\text{m}}]) \quad [3]$$

となる。ここで定義した各記号の凡例を改めて以下に示す。

D: 空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)

C_{all} : 全計数率 (cps)

BG_{self} : 機体の汚染 (cps)

CD: 空間線量率換算係数 (cps/ $\mu\text{Sv/h}$)

AF: 空気減弱係数 (m^{-1})

H_{std} : 基準高度 (m)

H_{m} : 測定高度 (m)

BG_{cos} : 宇宙線起源の計数率 (cps) ($=C_{\text{cos}} \times I_{\text{cos}}$ [C_{cos} : >2800 keV の計数率; I_{cos} : CR index])

3.5. 検出下限値

検出下限 (Limit of detection) と信頼性について評価を行った。まず、式 [3]に示した航空機モニタリングにおける空間線量率への換算方法の評価式を基に、検出下限値を計算する。式に示すように、空間線量率の検出下限値は BG_{self} と BG_{cos} に依存する。 BG_{cos} はこれまでの測定結果を見ると 200-500 cps の範囲となり、 BG_{self} は約 400 cps であることから、ここでは、標準的な検出下限値を求めることを目的とし、 $BG_{\text{self}}+BG_{\text{cos}}=900$ cps として評価を行う。

一般的に、検出下限値を求める際には、バックグラウンド計数率 (N_B) の標準偏差 (σ) を式[4]に示した Currie の式¹³⁾ に当てはめ、検出下限値 (N_D) を算出する。

$$N_D = 4.653\sigma_{N_B} + 2.706 \quad [4]$$

ここで、 N_B を 900 cps とすると、 N_D は 142 cps となる。これに、RSI システムの標準的な CD (12,800 cps/ $\mu\text{Sv/h}$) から空間線量率を計算すると、0.012 $\mu\text{Sv/h}$ となる。

3.6. 不確かさ

航空モニタリングの手法において、不確かさの要因としては、式 [1] から、以下の事項が挙げられる。

- ・ 検出器の計数誤差：一般的に、計数率に対して統計的な誤差が生じる。
- ・ CD の選択：キャリブレーションのためのデータ取得には、測定条件により 20 %程度の誤差が生じる。本測定の経験を重ねてきた現在では、その不確かさは小さくなってきている。
- ・ 高度補正係数の選択：CD と同様に、キャリブレーションのためのデータ取得の状況によ

り係数の選択時の不確かさが生じる。

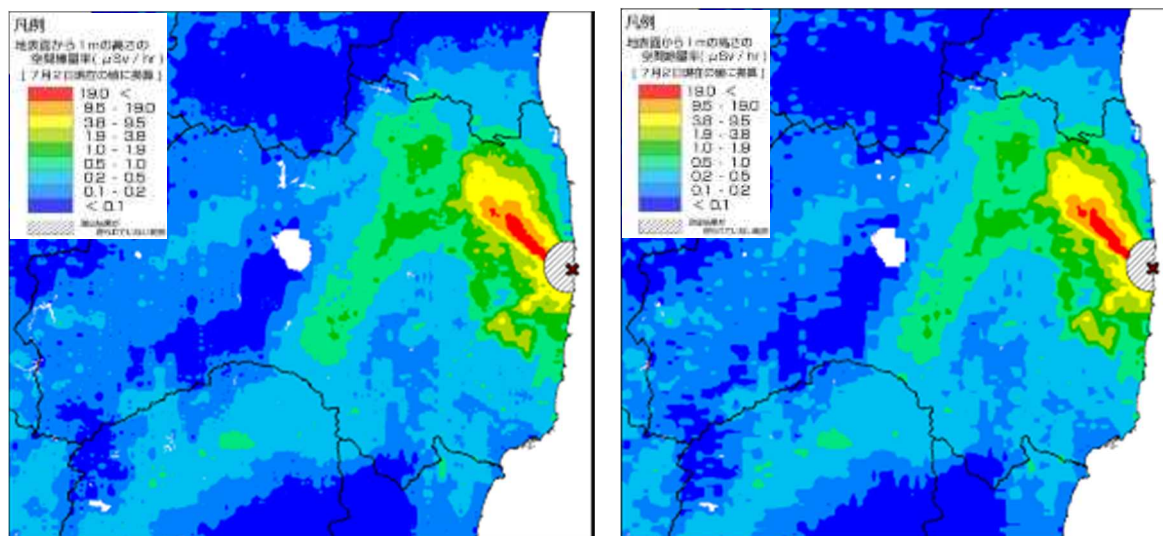
- ・ 測定高度の誤差：現在使用している GPS (Global Positioning System) には、衛星の位置等の状況により最大 30 m 程度の誤差がある。海拔高度の測定は GPS で実施しており、その誤差による不確かさが存在する。本誤差については、検証にまで至っておらず、今後の課題である。

3.7. マッピング

空間線量率や放射性物質のマッピングについては、IAEA から標準的な方法が示されている¹⁴⁾。補間方法には、IDW (Inverse Distance Weighted : 逆距離加重法)、クリギング (Kriging)、スプライン (Spline)、Natural Neighbor 等の多くの方法が存在する。福島第一原子力発電所周辺の航空機モニタリングでは、2011 年 4 月 6 日～29 日にかけて実施された第 1 次の解析を担当した DOE が用いた IDW を踏襲している。IDW は、補間する地点の近傍にある複数の地点の測定値を平均し、推定する方法である。IDW とは、補間点からサンプル点までの水平距離の逆数の二乗を重みとした平均であり、以下の式 [5] で得られる。

$$\tilde{Z} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{e_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{e_i^2}} \quad [5]$$

ここで、 $\tilde{Z}$ は補間点における推定地表高度である。また、 e_i は補間点からサンプル点までの水平距離であり、補間点から近傍 n 点をサンプル点としたものである。補間する条件として「測定地点からの距離が遠くなるにつれて、影響が小さくなること」が前提になる。そのため、各地点の測定値が局所的影響をもち、推定する（平均）値は、対象となる測定値の最高値より小さくならず、最低値より小さくならない。また、IDW には複雑なパラメータ設定が不要である。必要となるのは、距離に応じて影響度を制御する乗数と内挿処理の対象となる地点数の 2 つである。本事業では、乗数 2.3、対象となる地点 400 を採用した。ちなみに、第 3 次航空機モニタリングの空間線量率の RMS 誤差 (Root Mean Square: 二乗平均平方根) は 0.208 であった。Fig. 3-14 にパラメータ設定の異なる場合の空間線量率マップを示す。一般的に、乗数が大きいくほど、近傍データの影響力が大きくなり、推定値の詳細度が高くなる。Fig. 3-14 の a) と b) を比べると、両者の分布傾向は概ね一致しているが、線量のレンジの境界をみると a) の方がなめらかになっていることが分かる。



a) 乗数 2.3 対象地点数 180

b) 乗数 2 対象地点数 12

*第3次航空機モニタリングの測定結果を使用

Fig. 3-14 IDWに入力するパラメータとマップの関係

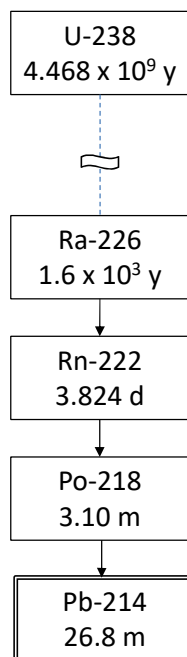
3.8. 大気中のラドン子孫核種の弁別手法

3.8.1. ラドン子孫核種

地殻中に存在するウランやトリウムの変遷系列には、気体であるラドン (Rn) が存在し、ラドンの一部は大気中に散逸する。Fig. 3-15 に主な天然の放射性核種系列であるウラン系列とトリウム系列について示す。大気中に散逸したラドンは、Po、Pb および Bi などの核種 (ラドン子孫核種) に壊変し、大気中の微粒子に吸着して大気中を浮遊する。航空機モニタリングによる測定高度である対地 300 m 付近においては、ラドン子孫核種濃度は測定されていないものの、地上におけるラドン濃度は広く測定されており、日本の屋外における濃度レベルは 6 Bq/m³ 程度となっている¹⁵⁾。これらのラドンの濃度レベルは低いものの、航空機モニタリングにおいては、ヘリコプターの周辺に存在するため検出器との距離が近く、一定の影響があると考えられる。また、日単位や季節単位で濃度が変動することが知られており、航空機モニタリングへの影響も一定ではない¹⁶⁾。これまでの航空機モニタリングの経験においても、ラドン子孫核種の影響により、航空機モニタリングの地上換算時に過大評価となる例が報告されている^{5,6,7)}。

ラドン子孫核種の放出するγ線は、地殻にも同じ核種が存在するので、地上からの放射線とのγ線スペクトル上で弁別が難しい。また、放射性セシウムの放出するエネルギーに似ているため、福島原子力発電所事故の近傍ではなおさらである。Table 3-3 にラドン子孫核種の放出するγ線エネルギーについて示す。これらのラドン子孫核種の影響を除去し、航空機モニタリングによる空間線量率への換算を高精度化する検討を平成 27 年度に実施した。平成 28 年度は、開発した手法を大量のデータに適用できるように既存の航空機モニタリング解析システムに組み込んだ。また、製作した解析プログラムを使用して平成 28 年度に実施した東日本第 7 次のデータを解析し、大気中のラドン子孫核種の影響について考察した。以下、大気中のラドン子孫核種の影響の除去手法を「ラドン弁別手法」と表記する。

ウラン (^{238}U) 系列



トリウム (^{232}Th) 系列

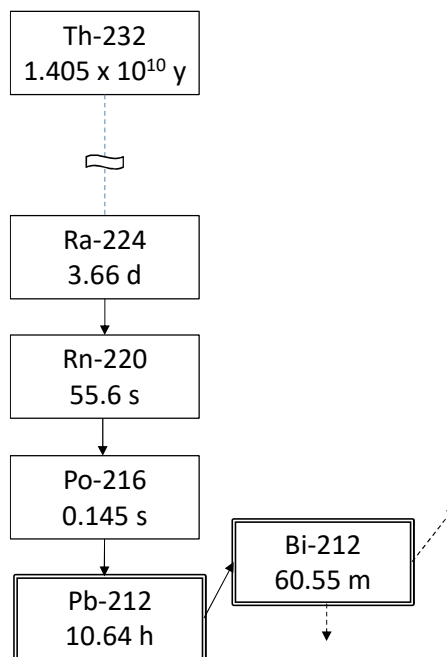


Fig. 3-15 ウラン系列およびトリウム系列

Table 3-3 ラドン子孫核種の放出する γ 線

Nuclide	Series	Gamma energy (keV)	Blanching ratio (%)	Note
Pb-212	Th	239	43.3	
Pb-214	U	352	37.6	
Tl-208	Th	583	84.5	Cs-134: 569 keV (15.4 %)
Bi-214	U	609	46.1	Cs-134: 605 keV (97.6 %)
Bi-214	U	768	4.94	Cs-134: 796 keV (85.5 %)
Bi-214	U	1,120	15.1	
Bi-214	U	1,765	15.4	
Tl-208	Th	2,615	99.2	

3.8.2. ラドン弁別手法の理論

前述したように、ラドン子孫核種は空気中だけでなく、地表面および地殻にも存在することから、 γ 線のエネルギーによって空気中のラドン子孫核種の影響と地上のラドン子孫核種の影響を区別することは難しい。また、 ^{134}Cs と ^{214}Bi は放出する γ 線エネルギーが似通っているため、福島原子力発電所事故の影響を受けた地域ではさらに困難である。航空機モニタリングにおけるラドン子孫核種の影響を弁別する方法として、航空機モニタリング用の検出器以外にラドン子孫核種用の検出器を搭載し、その比較からラドン子孫核種の影響を弁別する方法が知られている¹⁷⁾。

今回、ラドン子孫核種の影響を弁別する手法を検討するため、RSI (Radiation Solution Inc.) 社製 LaBr₃ シンチレータ (3 インチ ϕ ×3 インチ H) を用いた航空機モニタリング機器 (以下、LaBr RSI システム) を採用し、フライトデータの取得および換算パラメータの最適化を行った。採用した LaBr RSI システムをヘリコプター内に搭載した状況について Fig. 3-16 に示す。写真のように、地上からの放射線を遮蔽することを目的とし、通常用いている NaI シンチレーション検出器 (NaI RSI システム) の上方に配置した。

手法の理論としては、空気中のラドン子孫核種からの放射線と地表面からの放射線の距離の差に着目する。Fig. 3-17 にヘリコプター内の放射線検出器と線源の位置関係のイメージについて示す。このように、空気中のラドン子孫核種と検出器の位置は近いため、検出器内に搭載した検出器は地上の放射性核種からの γ 線と比較して検出されやすい。また、 γ 線は検出器に等方から放射され、LaBr RSI システムの下方に置いた NaI RSI システムの遮蔽としての影響は小さい。一方、地上から LaBr RSI システムに到達する γ 線は下方からの照射となるため、NaI RSI システムに遮蔽されやすい。すなわち、空気中のラドン子孫核種を計測した NaI RSI システムの計数率に対する LaBr RSI システムの計数率の比 (LaBr RSI システム/NaI RSI システム)は、地上の放射性核種起源の計数率の比よりも大きくなると考えられる。

実際には、地上の影響のない海上で取得したデータからラドン子孫核種起源の NaI RSI システムの計数率に対する LaBr RSI システムの計数率の比を求めておき、この数値をラドンインデックスと定義する。一方、ラドン子孫核種の影響が無視できるほど地上からの影響が大きなエリアにおいて、取得したデータから地上の放射性核種起源の求めた NaI RSI システムの計数率に対する LaBr RSI システムの計数率の比を求めておき、この数値をグラウンドインデックスと定義して、この2つの定数の差を利用してラドン子孫核種の影響を弁別する。これらを数式で表すと式 [6] で表すことができ、ここに式 [7] を代入してラドン子孫核種の影響を弁別した NaI RSI システムの全計数率 (N_g) について解くと、式 [8] が導かれる。

$$N_g = N_{all} - N_r \quad [6]$$

$$N_r = RI \cdot L_r \quad [7]$$

$$N_g = \frac{GI \cdot N_{all} - GI \cdot RI \cdot L_{all}}{GI - RI} \quad [8]$$

ここで、

N_g : ラドン子孫核種の影響を除去した NaI RSI システムの全計数率

L_g : ラドン子孫核種の影響を除去した LaBr RSI システムの全計数率

Nr: ラドン子孫核種のための NaI RSI システムの計数率

Lr: ラドン子孫核種のための LaBr RSI システムの計数率

GI: グラウンドインデックス: 陸上における対地高度 300 m における NaI RSI システムと LaBr RSI システムの測定データにおける近似曲線の傾き

RI: ラドンインデックス: 海上における海拔高度 300 m における NaI RSI システムと LaBr RSI システムの測定データにおける近似曲線の傾き

L_{all}: LaBr RSI システムの全計数率

N_{all}: NaI RSI システムの全計数率

である。

ここでの重要なパラメータである GI および RI については、機体の遮蔽状況により異なるため、陸上や海上で実際にデータを取得し設定した。使用したパラメータについては、4.5.1.項に詳述する。

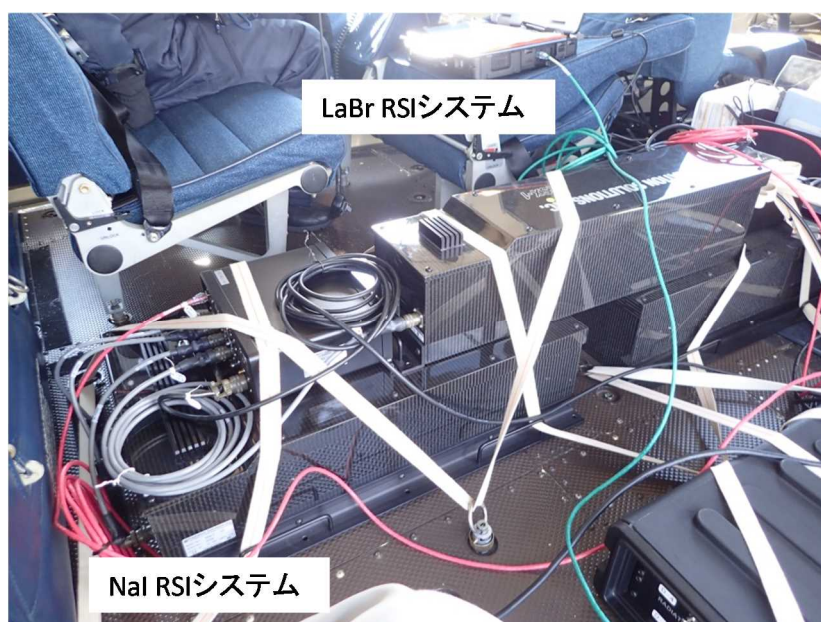


Fig. 3-16 ラドン用航空機モニタリング機器とヘリコプターへの搭載状況

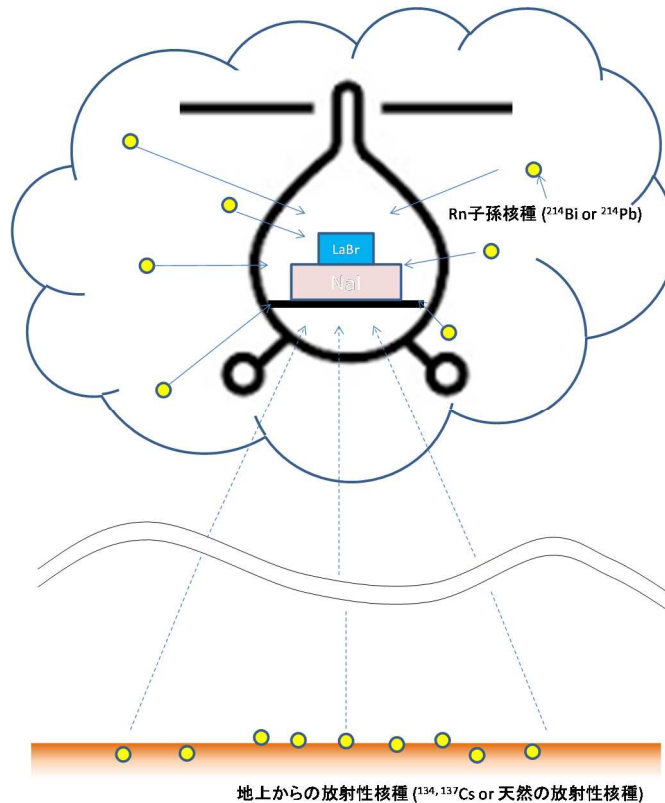


Fig. 3-17 大気中のラドン子孫核種と地上からの放射線のイメージ

3.8.3. GI の高度補正方法

GI については、平成 27 年度に実施した予備的な調査により、対地高度に依存して数値が変化することが分かっている。しかしながら、実測のデータではラドン子孫核種の寄与がないデータを取得することは不可能であるため、計算シミュレーションにより実際の測定体系を模擬し、GI の高度補正手法について検討した。

シミュレーションに用いた計算コードは、モンテカルロ計算コードの一種である電磁カスケードモンテカルロコード EGS5 とし、ヘリコプター内の検出器の体系を簡易的に Fig. 3-18 のように模擬した。計算体系の妥当性については、正面および横の周辺からの点線源を模擬した場合の検出器のレスポンスを計算した結果と、実際に有人のヘリコプターに検出器 (NaI RSI システム) を搭載した状態で、点線源 (^{137}Cs) を照射することによって求めた検出器のレスポンスの結果を比較してベンチマークとした。Fig. 3-19 に計算結果と実測結果の比と線源の照射方向の関係について示す。このように概ねよく一致している。一部値が外れている部分は、計算体系に考慮されていない局所的な構造物が影響していると考えられるが、全体として構築した体系は検出器のレスポンスを再現するのに十分な精度を有する。本体系に対し、地上の無限平板線源を模擬し、距離を変化させることにより GI の測定高度との関係を計算した。なお、実際の計算では NaI RSI システムと LaBr RSI システムを別で実施した。LaBr RSI システムの計算時には、下部の NaI RSI システムを体系に加えた。線源の模擬体系は、以下の条件を設定した。土壌中の天然放射性核種濃度は、全国的な地上における測定結果から平均値を採用した¹⁸⁾。

- ・ 空気 ($1\text{ km} \times 1\text{ km} \times 1.3\text{ km}$) と土壌 (深さ 1 m , 密度 $\rho: 1.6\text{ g cm}^{-3}$)

- ・山等の地面の凹凸を再現せずに地面は平坦
- ・地面中の自然放射性核種（ U 系列、Th 系列、 ^{40}K ）は一様分布
- ・地面中の人工放射性核種（ ^{134}Cs と ^{137}Cs ）表層から深さ方向に指数関数的な分布（緩衝深度 $\beta = 3 \text{ g/cm}^2$ ）
- ・土壌中の放射性核種濃度 ^{40}K : 500 Bq/kg、U 系列 : 20 Bq/kg、Th 系列 : 10 Bq/kg、 ^{134}Cs : 50 kBq/m²、 ^{137}Cs : 200 kBq/m²

検出器と線源の距離（測定高度）と GI の計算結果を Fig. 3-20 に示す。このように測定高度と GI は正の相関関係にある。この結果における近似直線の傾きを採用し、測定高度ごとに GI を補正した。

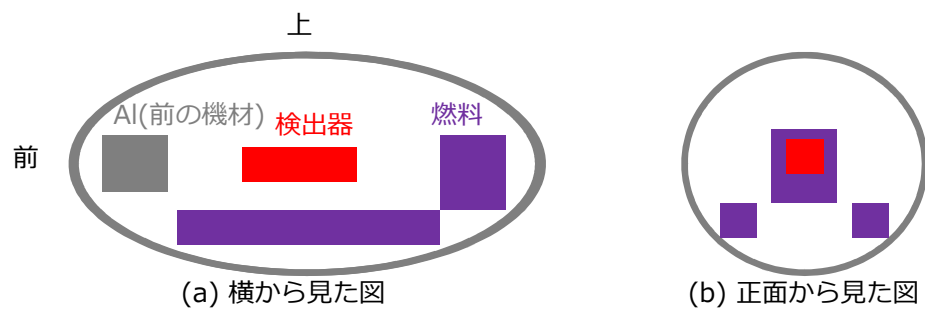


Fig. 3-18 計算体系のイメージ

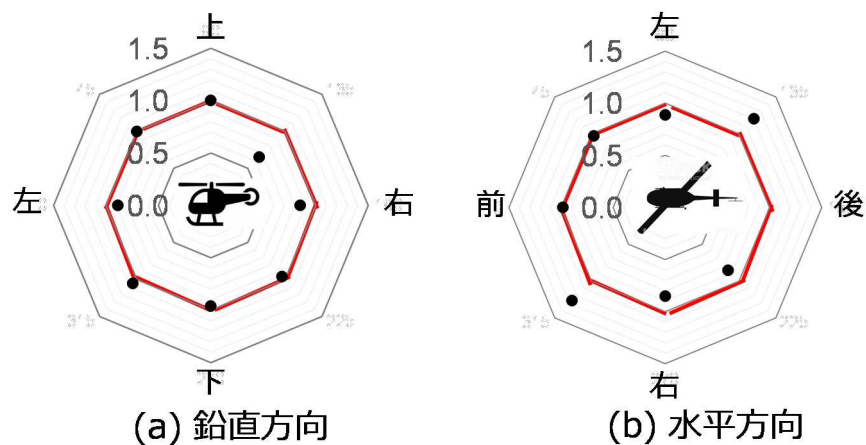


Fig. 3-19 計算体系のベンチマーク
(計算結果と実測結果の比)

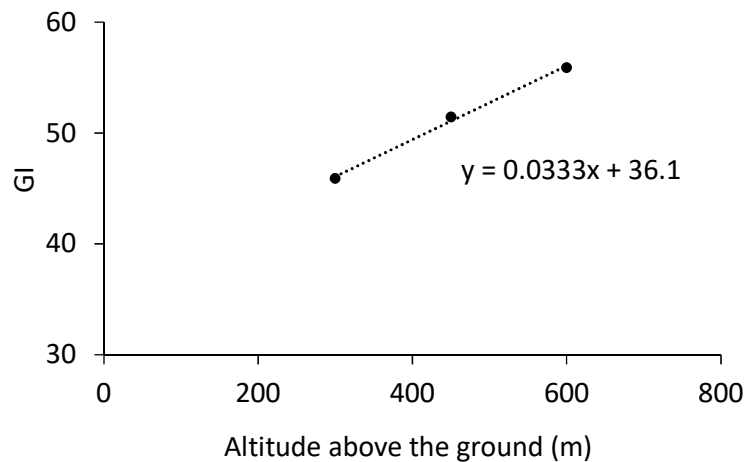


Fig. 3-20 シミュレーションによる測定高度と GI の関係

3.9. 天然放射性核種の濃度換算手法

一般的に、 γ 線スペクトルを利用して放射性核種を核種ごとに定性・定量する手法が用いられている。航空機モニタリングにおいても、 γ 線スペクトルが利用できることから、天然の放射性核種ごとに定量可能である。Fig. 3-21 に対地高度 300 m で取得できる典型的な γ 線スペクトル例を示す。このように、散乱線の影響の少ない高エネルギー側のエネルギーである K-40 (1,461 keV)、U 系列 (U-series: Bi-214: 1,765 keV、2,204 keV) および Th 系列 (Th-series: Tl-208: 2,615 keV) が検出される。1,000 keV 以上の比較的高エネルギーの γ 線は低エネルギー側と比較して検出効率が悪いため、スペクトルが識別できるまで測定時間をかける必要がある。航空機モニタリングにおける線量率の測定には、スペクトルの全エネルギーの計数率を利用するため、1 秒毎に取得したデータを使用しているが、天然放射性核種の濃度換算では計数率の誤差を考慮し、ここでは 20 秒のデータを積算した γ 線スペクトルを使用して目的のエネルギーにおけるピークの計数率を求めた。スペクトルのピーク解析のイメージを Fig. 3-21 に示す。

地上の濃度に換算するために、パラメータの設定が必要である。前述のように、航空機モニタリングでは、濃度換算係数と高度補正係数が必要となり、スペクトル解析ではエネルギーピークごとにその数値を決定する必要がある。まず、濃度換算係数 (CC: Conversion factor for natural nuclide Concentration) は、テストライン上における地上測定値について、上空での測定値との比較が必要である。ここでは、Fig. 3-6 (大飯・高浜)、Fig. 3-7 (伊方) で示した測定する原子力発電所ごとに設定したテストライン上の 5 地点において in-situ Ge 検出器による 30 分間の測定を行い、K-40、U-series および Th-series の濃度を測定し、その平均値を地上の測定値とした。テストライン上では、測定高度である 300 m 上空で移動しながら測定した検出器の計数率データを取得し、地上の in-situ Ge 検出器との比較から CC を求めた。また、高度補正係数 (AF) については、EGS5 シミュレーションの結果を利用した。計算には、無限平板を模擬した半径 2,000 m の線源を仮定し、その上空 50 m、100 m、150 m、200 m、300 m、400 m および 500 m の計数率を計算した。計算した高度と計数率の関係について、上空 50 m で得られた結果を 1 に規格化し、Fig. 3-22 に示す。このように指数関数の関係となり、その指数近似の傾きをそれ

ぞれの AF とした。実際の CC と AF の数値について Table 3-4 に示す。

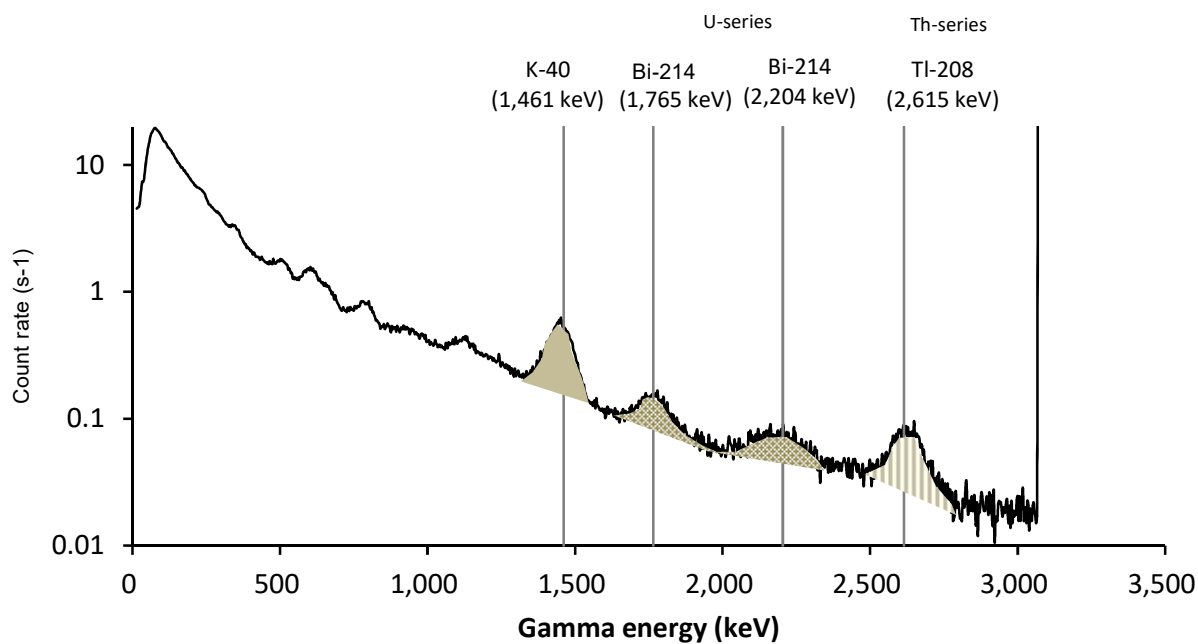


Fig. 3-21 天然の放射性核種によるピーク解析例

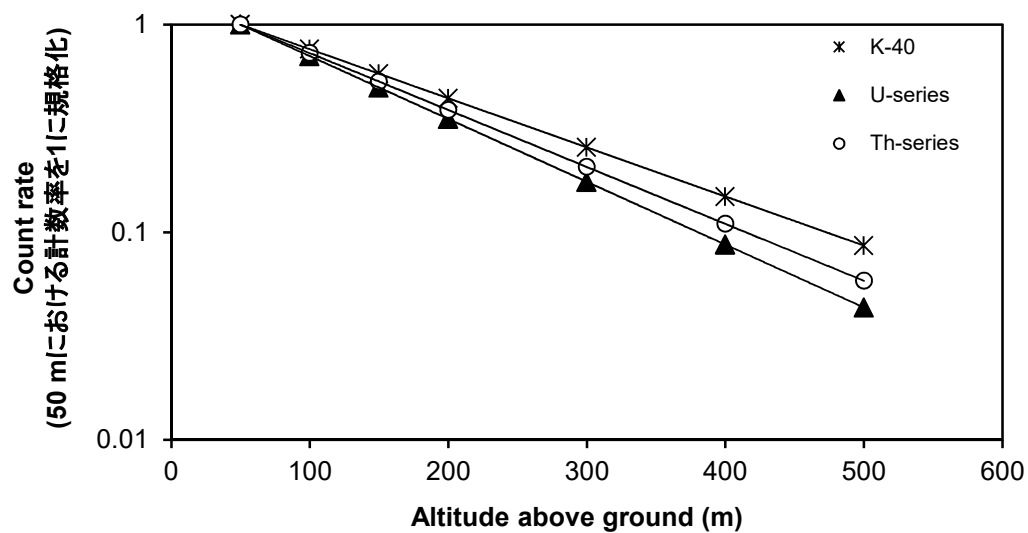


Fig. 3-22 天然の放射性核種別の高度と計数率の関係 (EGS5 によるシミュレーション)

Table 3-4 天然の放射性核種濃度に換算するためのパラメーター一覧

		K-40	U-series	Th-series
Ooi_Takahama	CC (cps/Bq/kg)	0.027	0.11	0.11
	AF (m^{-1})*	-0.0054	-0.0070	-0.0063
Ikata	CC (cps/Bq/kg)	0.036	0.28	0.14
	AF (m^{-1})*	-0.0054	-0.0070	-0.0063

* EGS5 によるシミュレーション結果より

4. モニタリング結果と考察

4.1. 換算パラメータ

3.4.2 項で示した方法により、AF を求めた。Fig. 4-1 に対地高度と計数率の関係の例について示す。AF の数値は、テストラインで測定したデータを使用した。測定したデータの詳細を Table 4-1 に示す。同表には比較として福島におけるモニタリングで使用している数値を記載した。このように、放射性セシウムが存在する福島におけるデータと同等の数値であり、測定対象となる γ 線エネルギーによる依存性は小さいと言える。

3.4.3 項で示した方法により CD を求めた。本事業で取得したデータの詳細について、Table 4-2 に示す。また、地上にテストポイントにおける CD 算出のための地上測定結果について、Fig. 4-2、Fig. 4-3 に示す。なお、図に示した空間線量率には、サーベイメータの読み値を比較対象にしているため、天然核種による空間線量率が含まれる。これらの測定結果を基に解析に使用したパラメータについて Table 4-3 に示す。

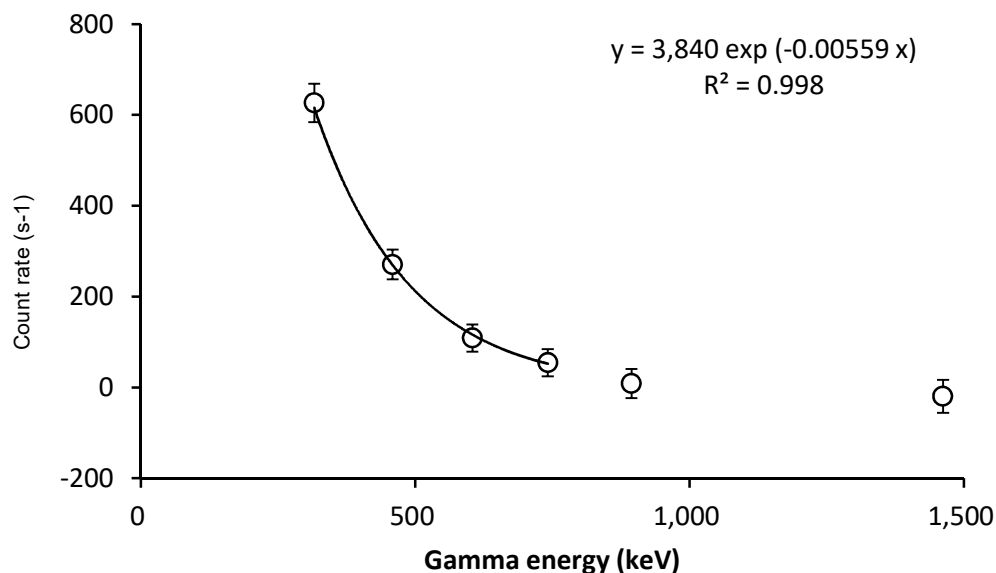


Fig. 4-1 対地高度と計数率の関係例
(誤差は 1 秒ごとのデータの標準偏差, Bell 412 JA6928, 2016/2/2 実施, Test line)

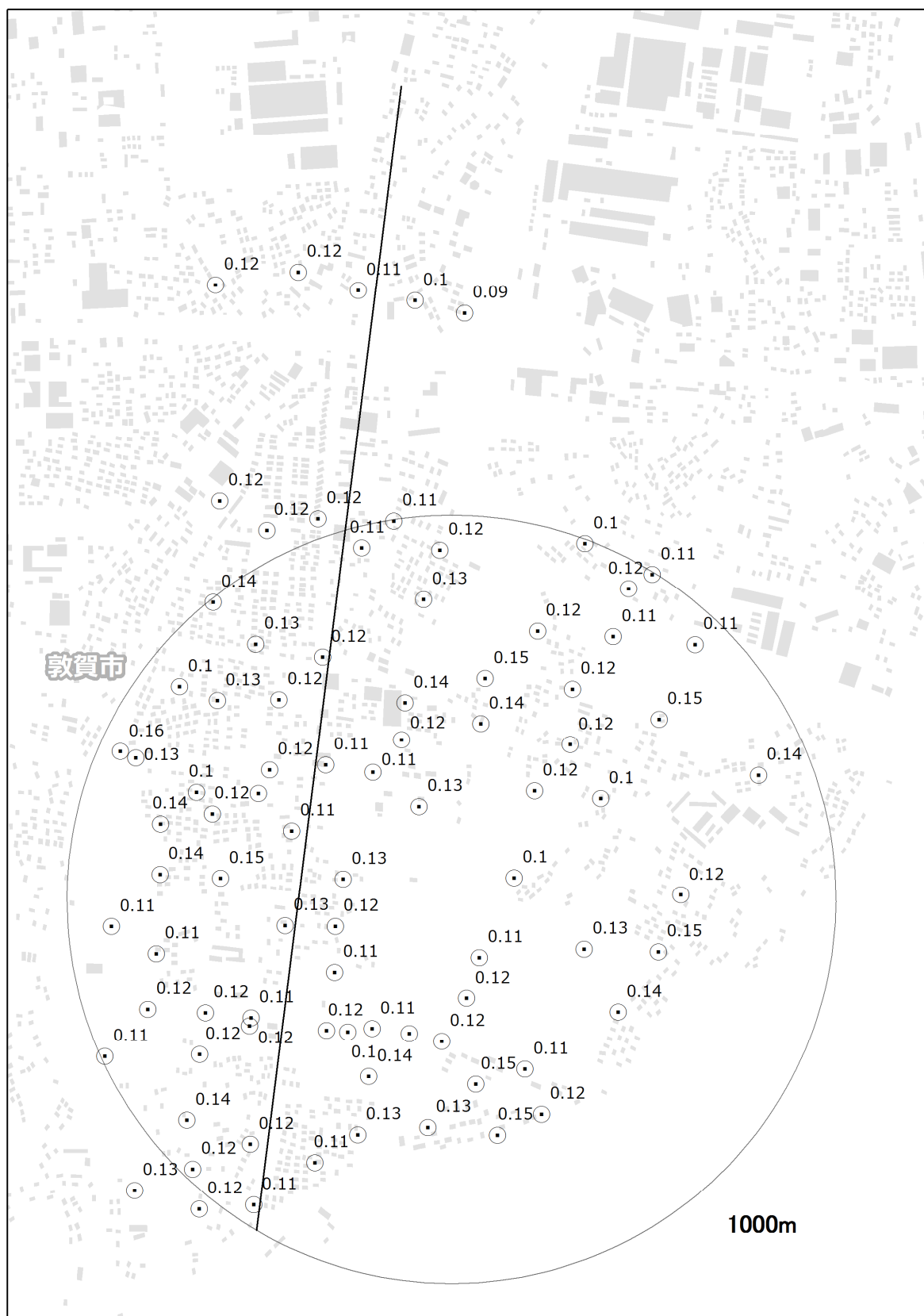


Fig. 4-2 地上測定データ(大飯・高浜)

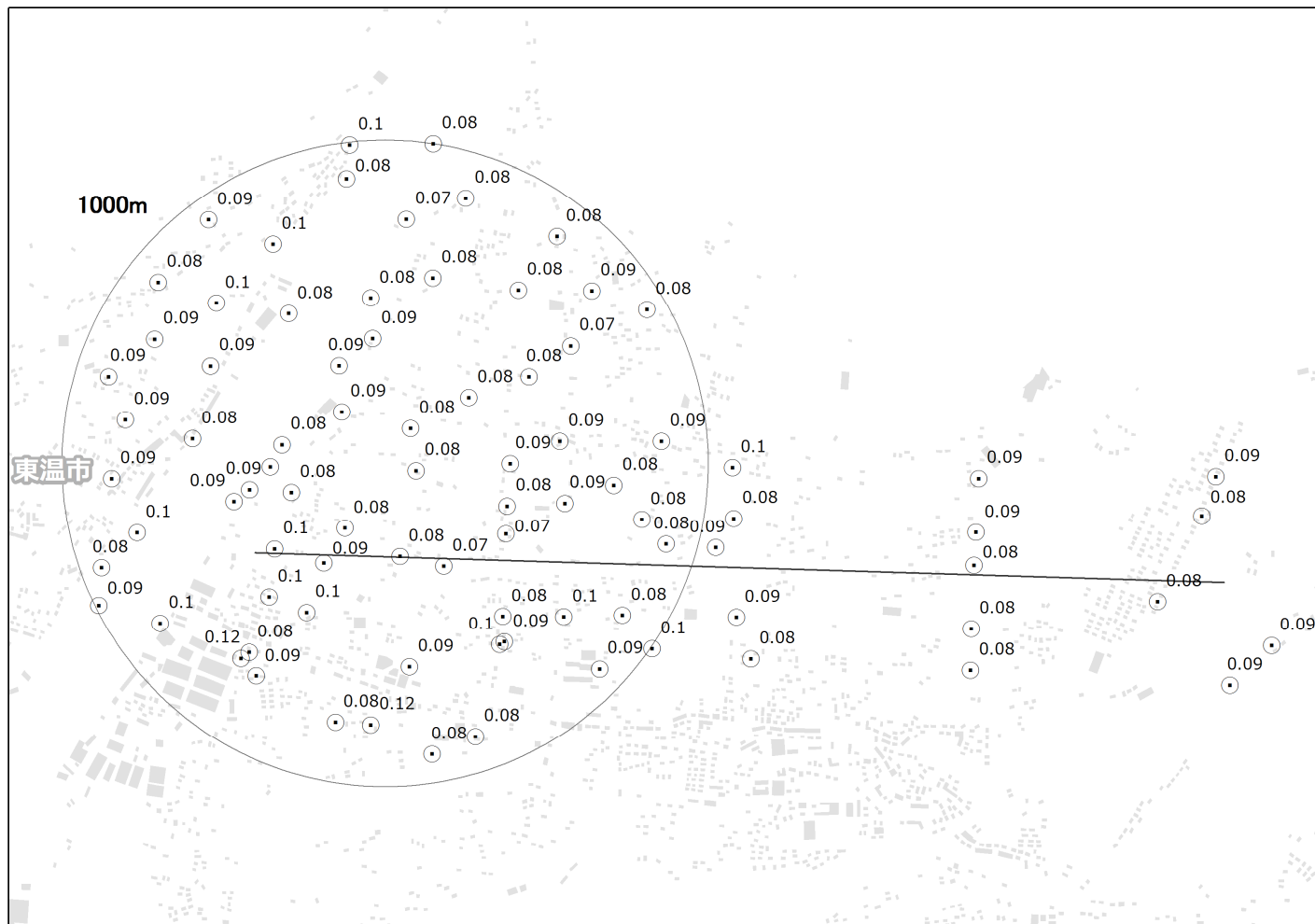


Fig. 4-3 地上測定データ(伊方)

Table 4-1 本事業で取得した AF データー一覧

Monitoring No	System (Device Serial)	Helicopter	Body No	Operarion campany	Location	Date	AF	
							$\mu(m^{-1})$	R^2
Ooi_Takahama	5090	Bell412	JA9584	AAC	Tsuruga_TestLine	2016/07/21	-0.00648	1.00000
Ooi_Takahama	5090	Bell412	JA9584	AAC	Tsuruga_TestLine	2016/07/28	-0.00620	0.99967
Average							-0.00634	
Ikata	5090	Bell430	JA05TV	NNK	Toon_TestLine	2016/11/29	-0.00604	0.99992
Ikata	5090	Bell430	JA05TV	NNK	Toon_TestLine	2016/12/07	-0.00604	0.99883
Average							-0.0060	

* R²: 近似した指数関数曲線の決定定数

Table 4-2 本事業で取得した CD データー一覧

Body No	Helicopter	Operarion campany	location	Date	Ground data (Nal survey)			AMS data			AGL (m)		CD (cps[μSv/h] ⁻¹)	
					Survey (uSv/h)	Stdev (2σ)	Stdev (%)	AMS data (cps)	Stdev (2σ)	Stdev (%)	AGL (m)	Stdev (2σ: %)		Stdev (%)
JA9584	Bell412	AAC	Tsuruga_TestPoint	2016/7/21	0.12	0.031	25	2606	242	9	1005	51	5	16,200
JA9584	Bell412	AAC	Tsuruga_TestPoint	2016/7/28	0.12	0.028	23	2599	289	11	986	98	10	15,000
Average														15,600
JA05TV	Bell430	NNK	Toon_TestPoint	2016/11/29	0.08	0.012	14	1989	234	12	1011	77	8	12,800
JA05TV	Bell430	NNK	Toon_TestPoint	2016/12/7	0.08	0.015	18	1816	110	6	1071	30	3	16,000
Average														14,400

* Survey: 地上でのサーベイメータによる測定結果, Stdev: 標準偏差, AMS data: RSI システムの計数率, AGL: フライト高度

Table 4-3 使用したパラメータのまとめ
(誤差は測定結果の標準偏差(σ))

		Bell412		Bell430		S76	
		Value	Number	Value	Number	Value	Number
Ooi_Takahama	AF (m-1)	-0.0063	2				
	CD (cps/ μ Sv/h)	16200	2				
Ikata	AF (m-1)			-0.0060	2		
	CD (cps/ μ Sv/h)			12800	2		
Fukushima	AF (m-1)	-0.0072 $\pm$ 0.00047	21	-0.0072 $\pm$ 0.00040	35	-0.0072 $\pm$ 0.0005	2
	CD (cps/ μ Sv/h)	10900 $\pm$ 2100	42	12800 $\pm$ 2800	65	15400 $\pm$ 4000	4

4.2. 地上値との比較

測定対象区域から、ヘリコプターの測線下の点を選定し、地上において、1m 高さの空間線量率を NaI サーベイメータ（日立製作所社製 TCS-172B）を用いて空間線量率の測定を行った。測定した地上の測定点について Fig. 4-4、Fig. 4-5 に示す。

航空機モニタリングによる換算値と地上測定値との比較を Fig. 4-6、Fig. 4-7、Fig. 4-8 および Fig. 4-9 に示す。比較は、それぞれ散布図および航空機の換算結果と地上の測定結果の差の地上の測定結果に対する相対偏差のヒストグラムで比較した。散布図を見ると、測定結果はファクター0.5～2.0 の間に入り、概ね、地上の測定値と正の相関関係にあることが分かった。ヒストグラムの形状は正規分布に近く、相対偏差の平均値は、0 付近となり、両者はよく一致しているといえる。

なお、地上の測定結果との比較については、以下のような要因を考慮しなくてはならない。

- ① 測定の範囲の違い：空中からの測定値は、上空を頂点とし対地高度を高さとした円錐の底面部分に該当する地上の放射線の平均値となる。地上における測定は、地上 1 m 高さでの測定においても、測定範囲は半径 30 m 程度の円の平均値となる。よって、特に、地上の空間線量率の分布は均一でない場所では、測定結果が合わない可能性がある。
- ② 辺からの影響：測定場所の近傍に、大きな建物や森林等がある場合には、建物や木自身に沈着している放射線が地上測定に影響する場合や、上空で測定する場合には、地表面に沈着している放射線を遮蔽するため、単純に比較できない場所がある。



Fig. 4-4 地上における測定点(大阪・高浜)

(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)



Fig. 4-5 地上における測定点(伊方)
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

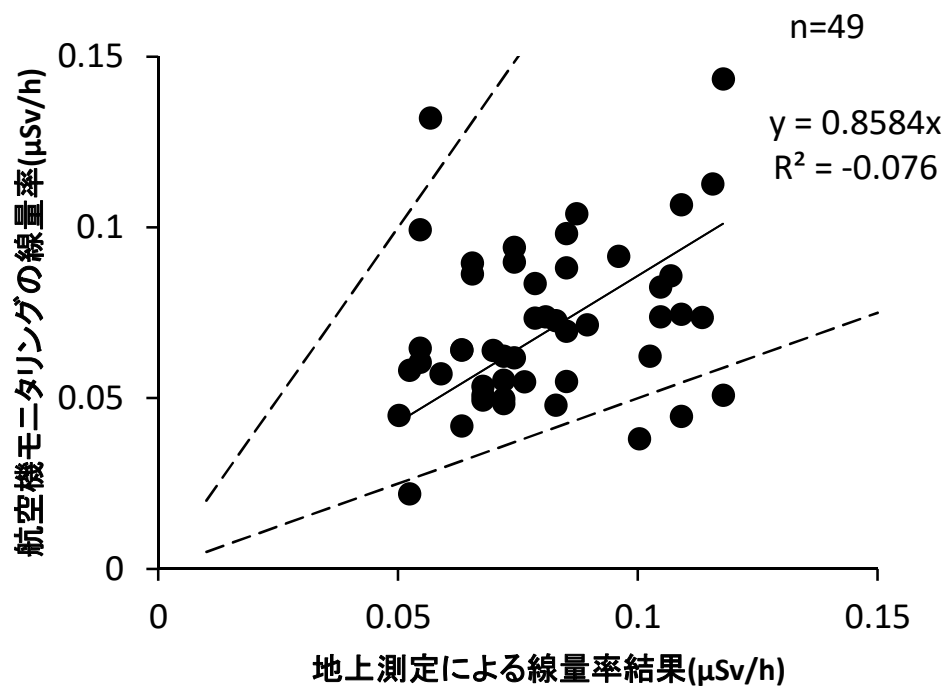


Fig. 4-6 地上における空間線量率測定結果との比較 (大飯・高浜 散布図)

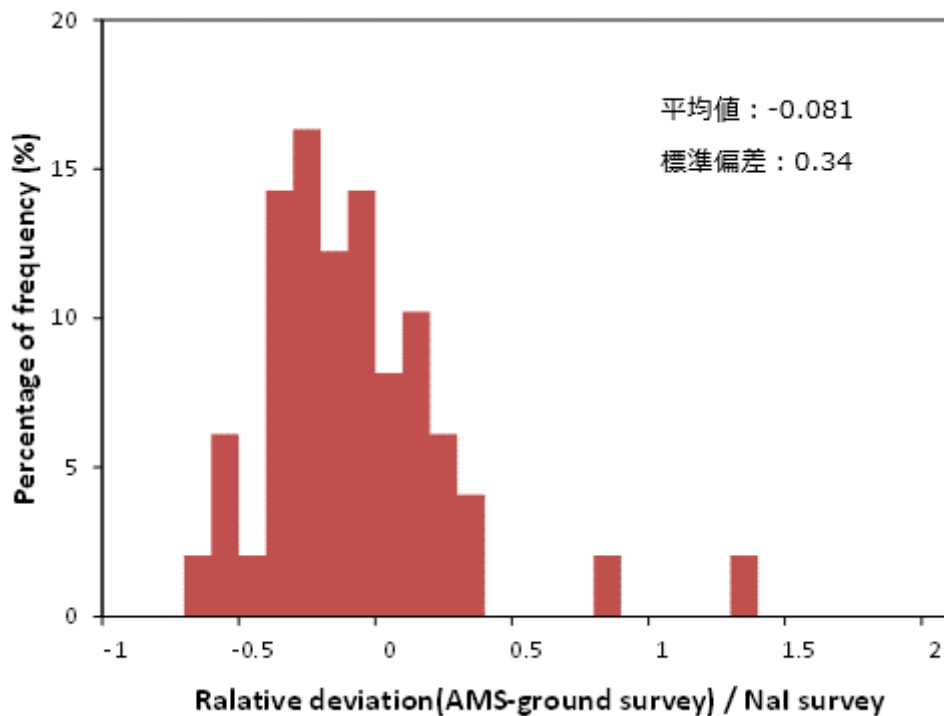


Fig. 4-7 地上における空間線量率測定結果との比較 (大飯・高浜 相対偏差)

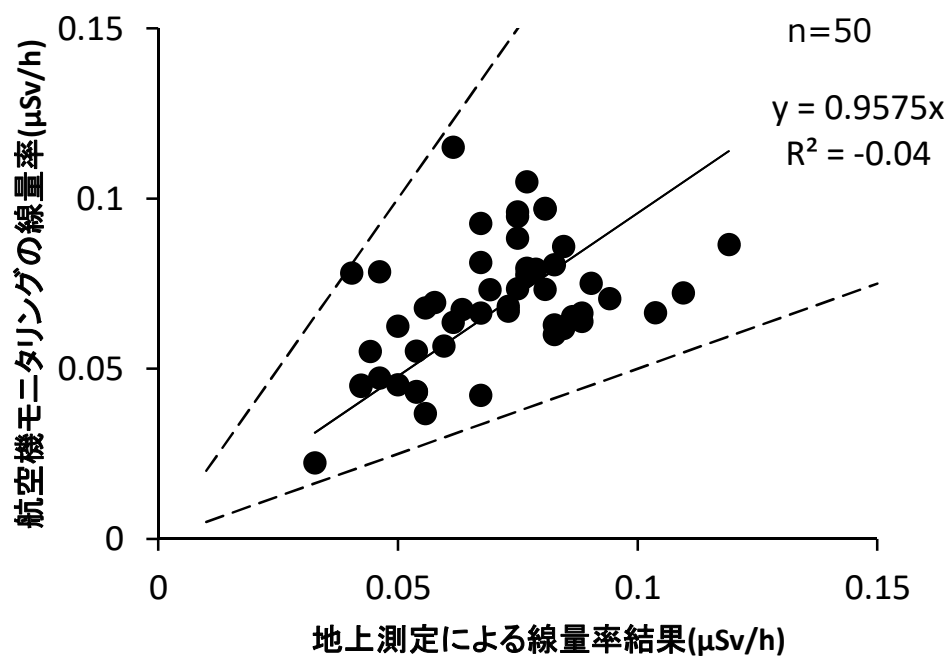


Fig. 4-8 地上における空間線量率測定結果との比較 (伊方 散布図)

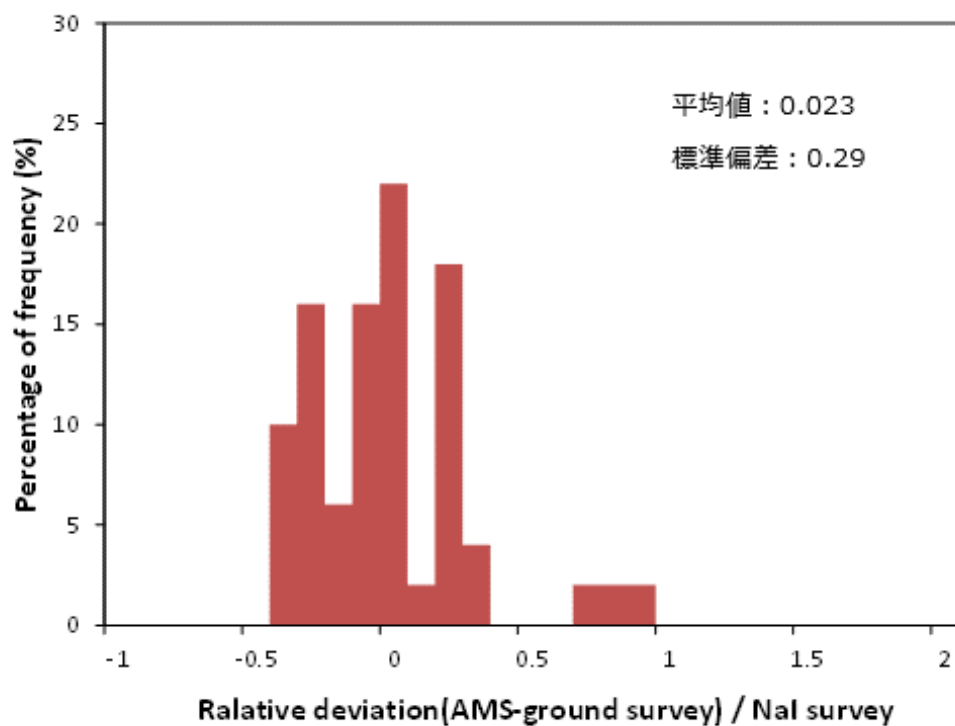


Fig. 4-9 地上における空間線量率測定結果との比較 (伊方 相対偏差)

4.3. 空間線量率

航空機モニタリングの測定結果を基に、地上 1 m 高さの空間線量率の分布状況を示した「空間線量率マップ」を Fig. 4-10、Fig. 4-11 に示す。なお、空間線量率マップの色合いについては、福島で行っている航空機モニタリングの手法に準じた。空間線量率の分布は、大飯・高浜原子力発電所のバックグラウンドモニタリングで取得された最大 $0.14 \mu\text{Sv/h}$ であった。

Fig. 1-1 に示した地質学会のホームページに掲載されている、地殻中に存在する元素の濃度分布から空間線量率を計算で求めた結果¹⁹⁾と、航空機モニタリングで測定した空間線量率マップの結果を Fig. 4-12（大飯・高浜）、Fig. 4-13（伊方）に比較した。大飯・高浜原子力発電所および伊方原子力発電所の両モニタリング結果とも、全体の空間線量率の分布傾向はよく似通っていることが分かる。大飯・高浜原子力発電所の結果で、比較的空間線量率の高かった琵琶湖の南部と西部については、花崗岩の分布と一致しており¹⁹⁾、その影響であると考えられる。伊方原子力発電所の結果において、比較的空間線量率の高かった愛媛県の北部および山口県東部についても花崗岩の分布と一致しており²⁰⁾、その影響であると考えられる。

今回、航空機モニタリングで測定した結果は、Fig. 4-6、4-7、4-8、4-9 で示した地上測定結果や過去に実施された元素の濃度実測結果から求められた空間線量率分布とよく一致したことから、地上の空間線量率分布をよく再現できていると考えられる。なお、地質学会のホームページに掲載されている空間線量率マップは、大地のウランとトリウムとカリウムの濃度から計算によって求める方法で作成されており、大地のウランとトリウムとカリウムの濃度実測結果がない場所については、内挿補間で色付けされている。結果の比較にはこの点を考慮に入れる必要がある。

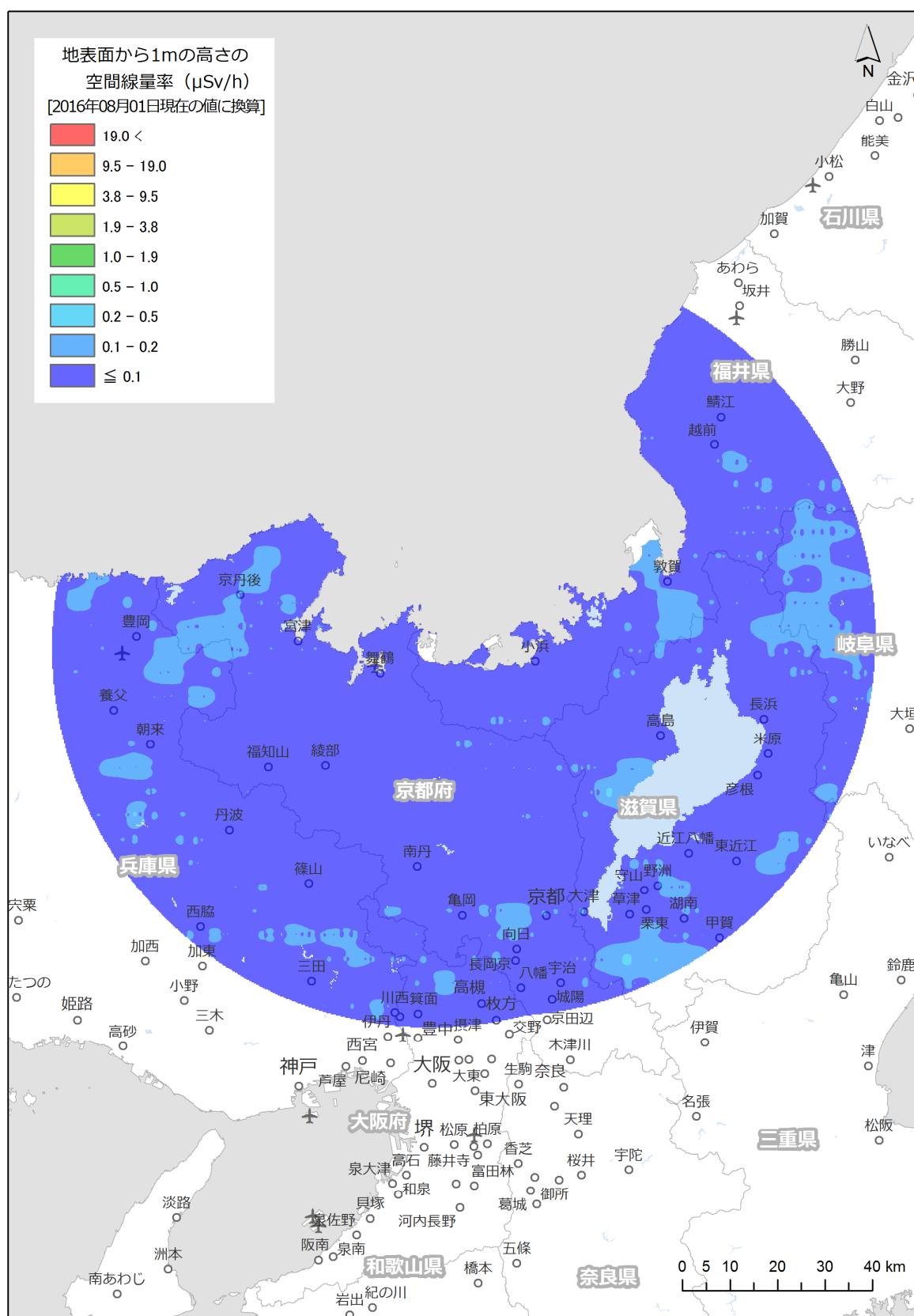


Fig. 4-10 大飯・高浜原子力発電所周辺の空間線量率マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

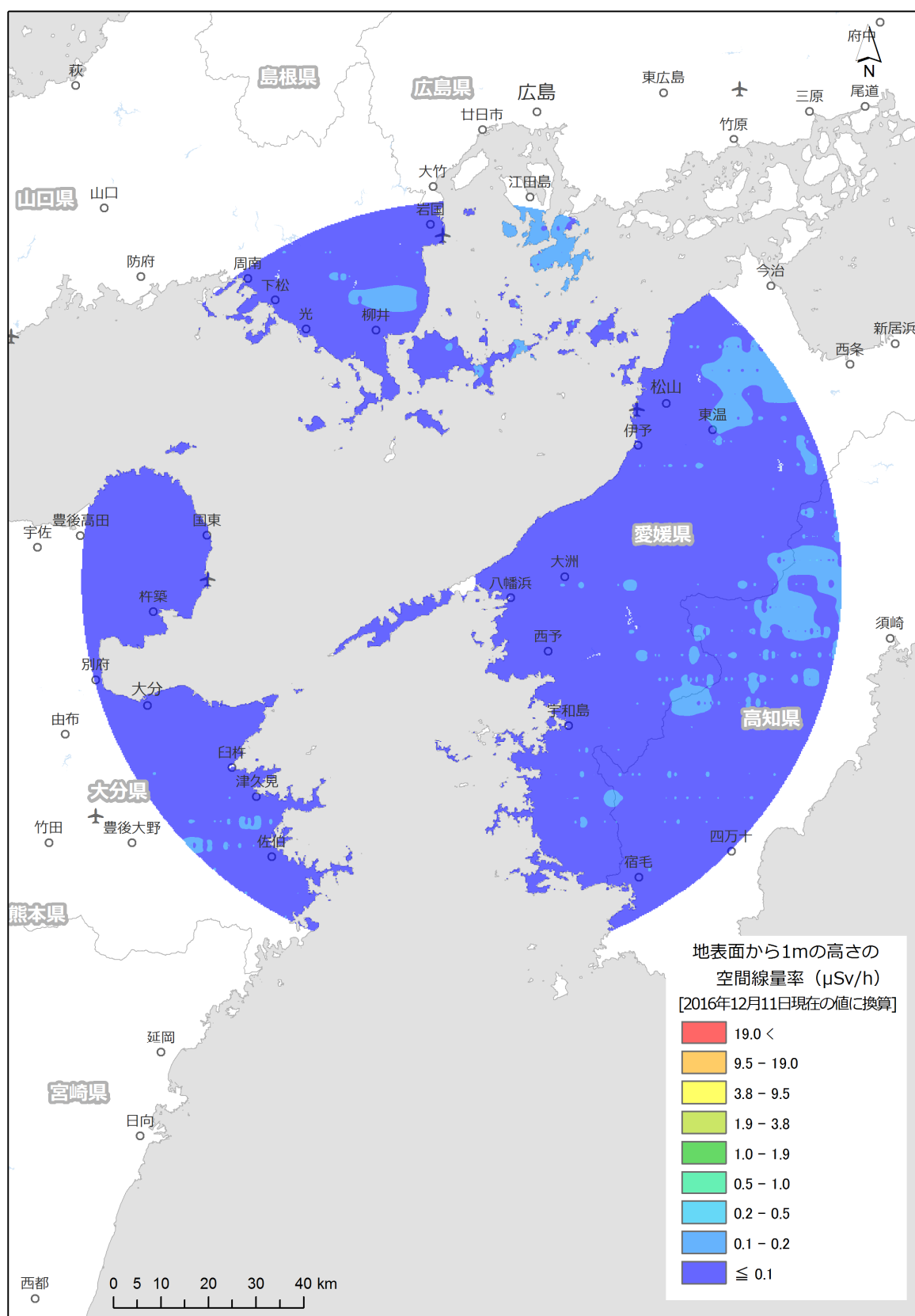


Fig. 4-11 伊方原子力発電所周辺の空間線量率マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

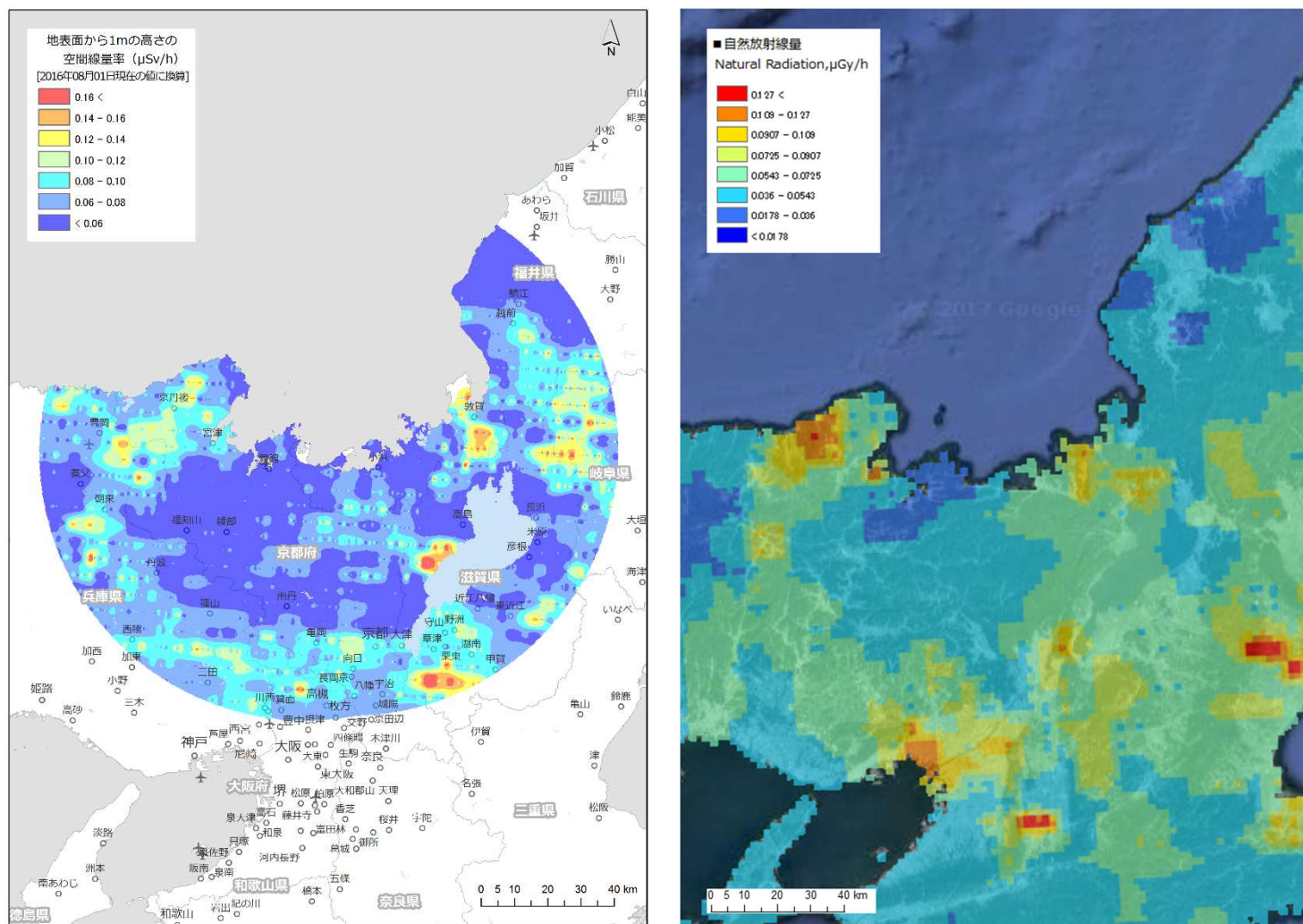


Fig. 4-12 大飯・高浜原子力発電所周辺の空間線量率マップの比較

(左: 背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用, 右: 背景地図は、Google map を使用)

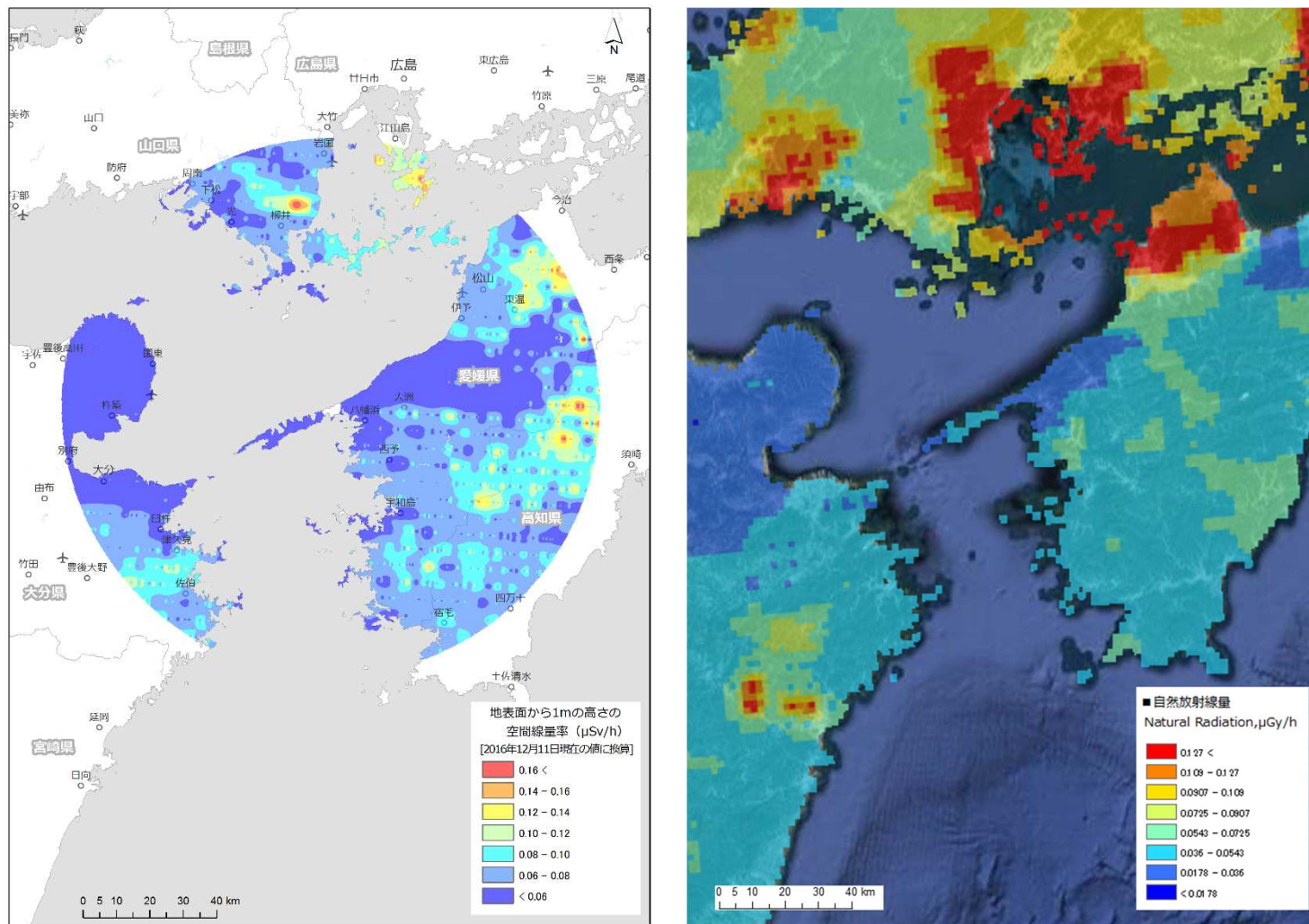


Fig. 4-13 伊方原子力発電所周辺の空間線量率マップの比較

(左: 背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用, 右: 背景地図は、Google map を使用)

4.4. 天然の放射性核種濃度

前述したパラメータを利用し、地上値に換算し内挿してマップ化した結果を K-40、U-series および Th-series について、それぞれ Fig. 4-14、4-15、4-16、4-17、4-18 および 4-19 に示す。各最大濃度を見ると K-40、U-series および Th-series は、500 Bq/kg、45 Bq/kg および 25 Bq/kg となった。一般的に、日本におけるそれらの核種の濃度は、K-40、U-series および Th-series について 100～700 Bq/kg、10～50 Bq/kg および 7～50 Bq/kg と言われており²¹⁾、濃度のレベルは概ね整合する。

それらの分布マップの妥当性を検証するために、産業技術総合研究所地質調査総合センターホームページに公開されている海と陸の地球化学図²¹⁾を利用した。Fig. 4-20、Fig. 4-21 にそれぞれの元素濃度と天然放射性核種マップを比較する。なお、元素濃度は土壌の分析を基に内挿して作成されており、山間部等のデータは少ないので注意が必要である。この地球化学図は元素の濃度であり、単純な比較は難しいが、傾向はよく一致しているように見える。ただし、大阪府の北における K-40 の測定結果のように、地球化学図データと一致しない場所がみられた。現時点で原因の特定は難しいが、今後もデータを蓄積し、検証することが望ましい。全体的には、本手法で一定の信頼性のある天然の放射性核種濃度のマップ作成が可能であると考えられる。

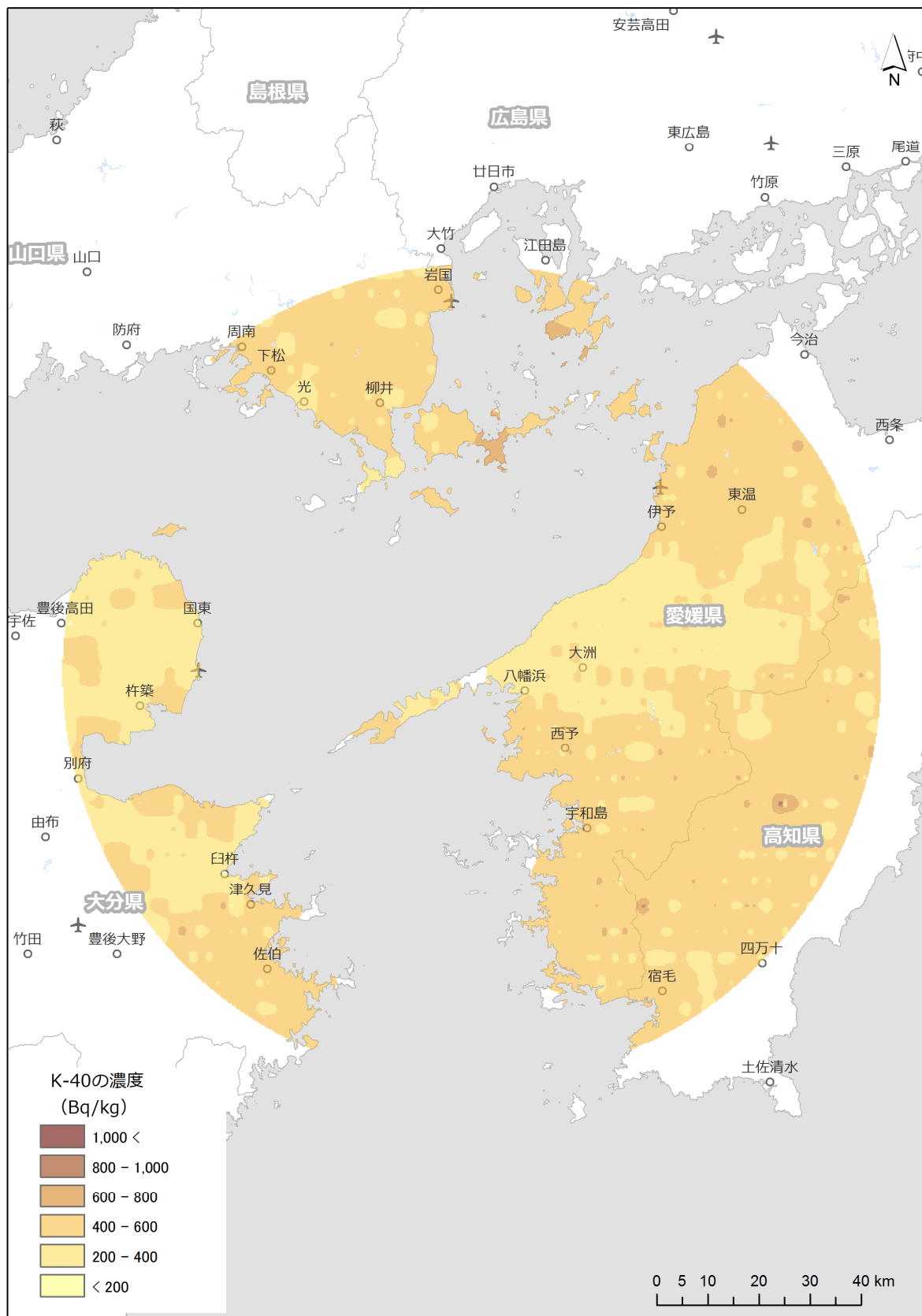


Fig. 4-15 伊方原子力発電所周辺の K-40 濃度マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

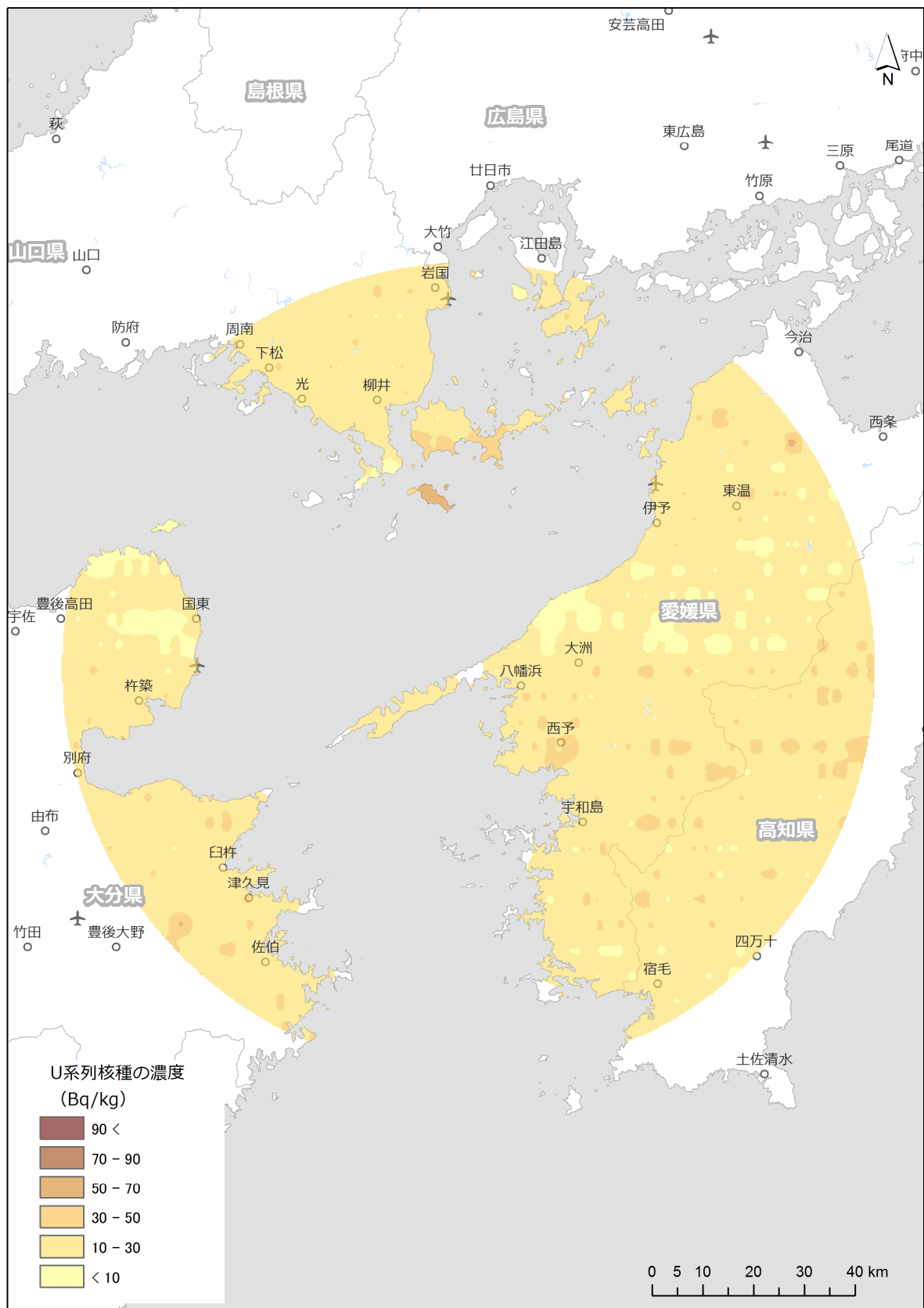


Fig. 4-17 伊方原子力発電所周辺の U 系列濃度マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

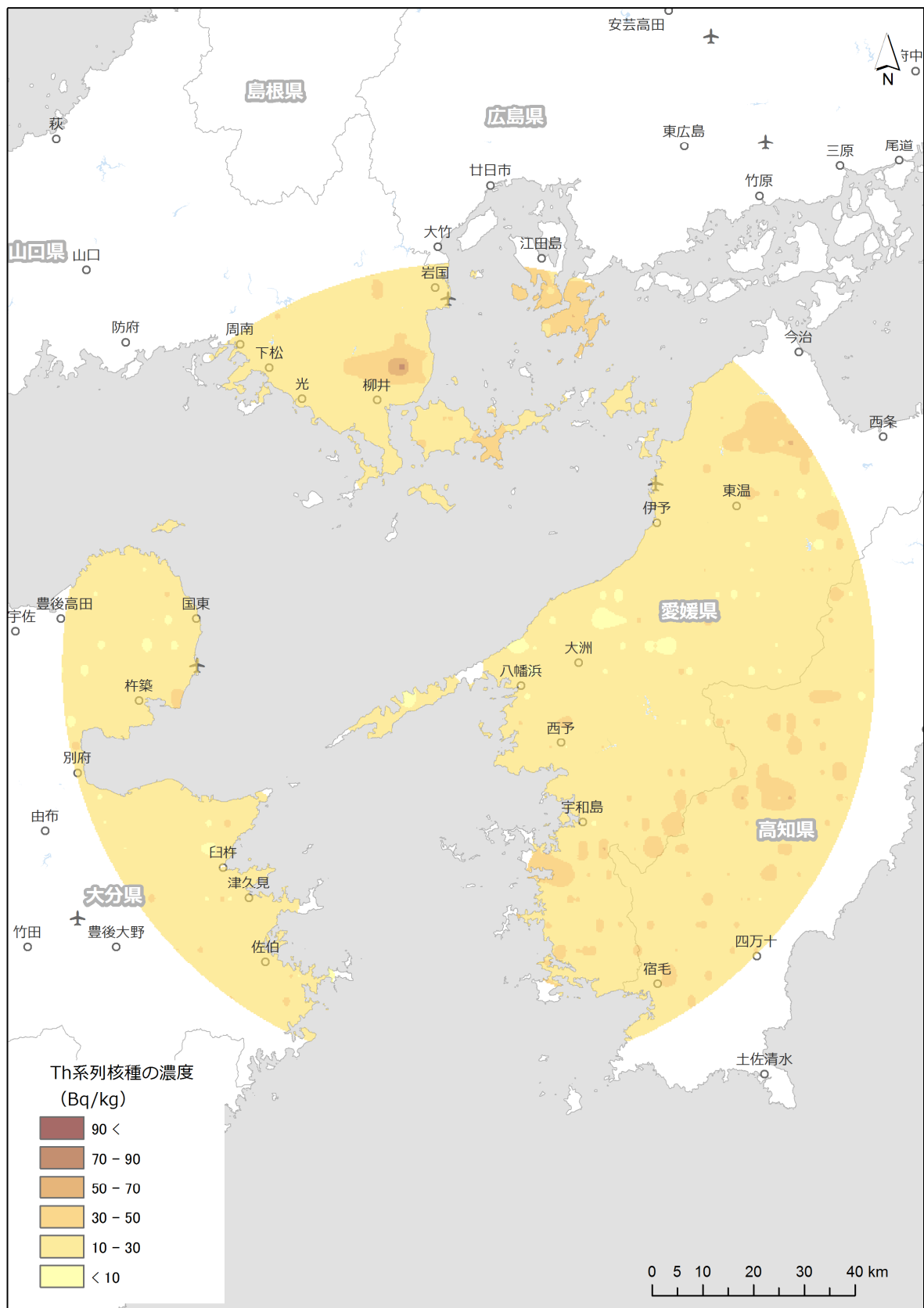


Fig. 4-19 伊方原子力発電所周辺の Th 系列濃度マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

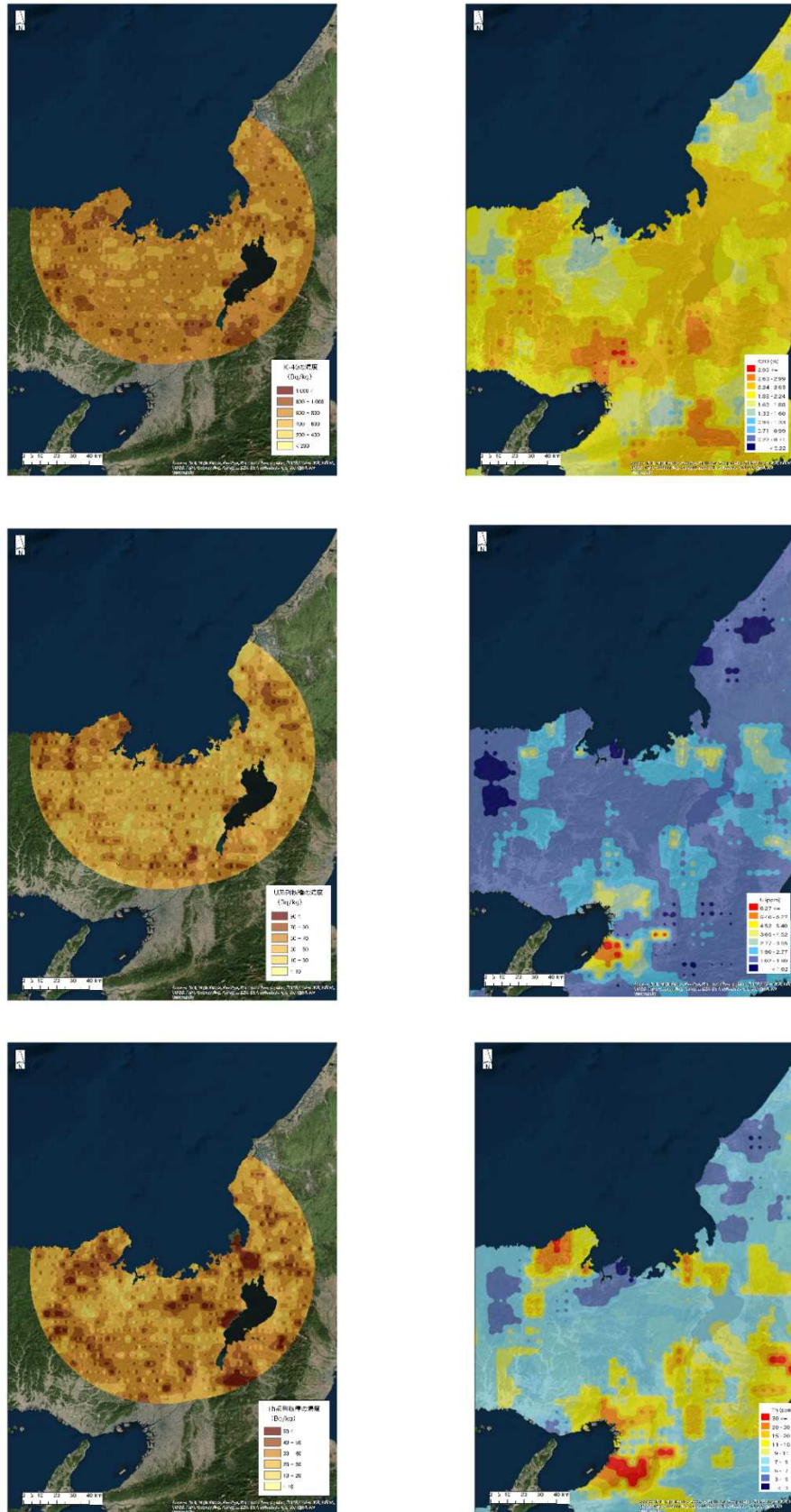


Fig. 4-20 大飯・高浜原子力発電所周辺の放射性核種濃度測定結果と地球化学図比較
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

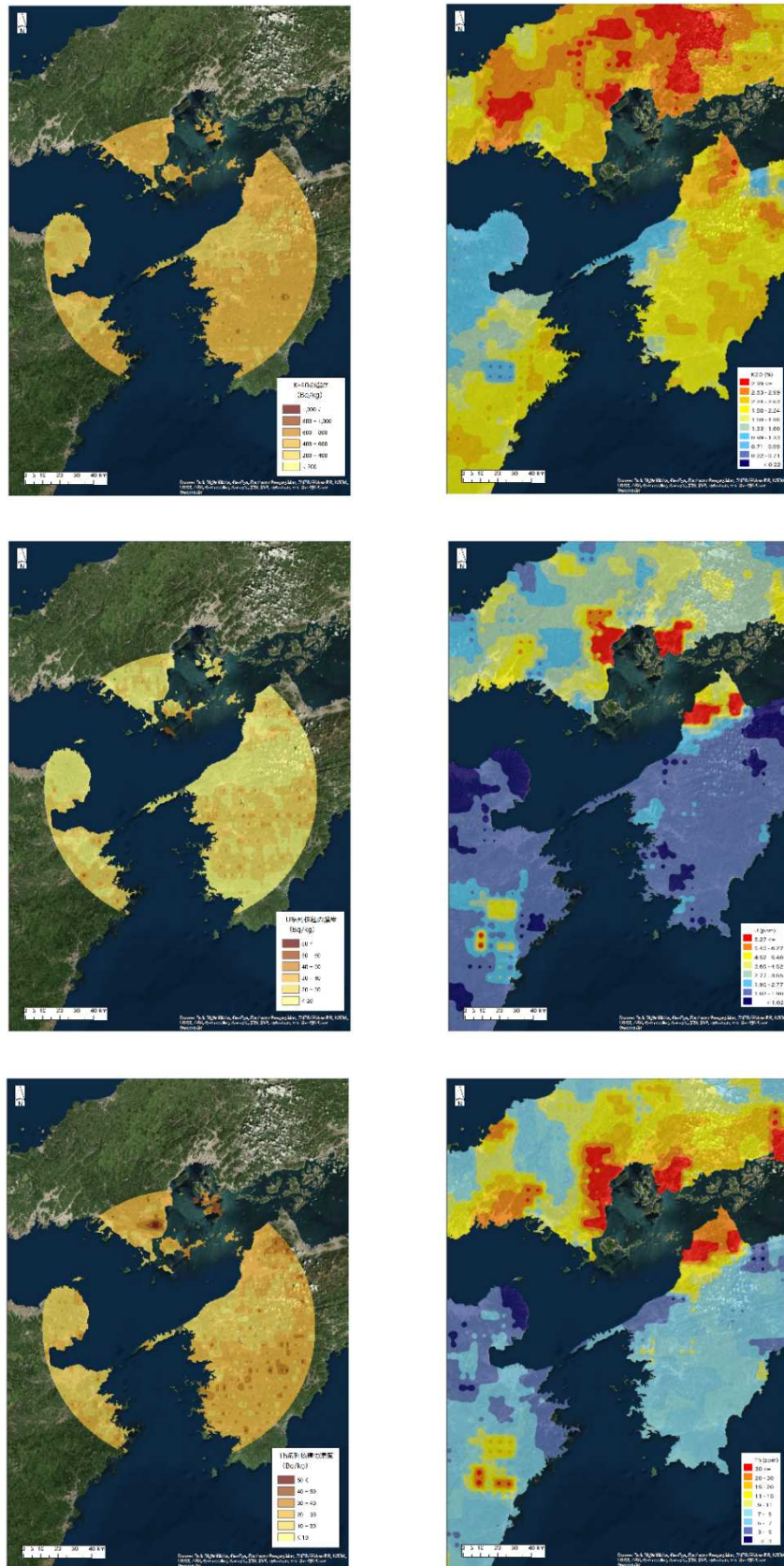


Fig. 4-21 伊方原子力発電所周辺の放射性核種濃度測定結果と地球化学図比較
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

4.5. ラドン弁別法の適用結果

4.5.1. パラメータ (GI および RI) の決定

前述したように、ラドン子孫核種と地上からの寄与を弁別する信頼性は、GI と RI の設定に依存する。GI と RI については、ヘリコプターの遮蔽によって変化するため、各バックグラウンドモニタリング場所で使用したヘリコプターごとに実測データから数値を決定した。測定データは 40 秒ごとに取得した計数率を積算した。積算したデータから宇宙線および自己汚染の寄与分を差し引き GI の算出に使用した。また、GPS データは 40 秒で得られたデータの間中値を採用した。

大飯・高浜原子力発電所で取得した地上から高さ 300 m 位置 (実際のフライトの対地高度が 290~320 m のデータ) における NaI RSI システムの計数率と、LaBr RSI システムの計数率の関係を Fig. 4-22 (a) に示す。また、伊方原子力発電所で取得した NaI RSI システムの計数率と、LaBr RSI システムの計数率の関係を Fig. 4-22 (b) に示す。なお、大飯・高浜原子力発電所では Bell 412 (JA9584) を、伊方原子力発電所では Bell 430 (JA05TV) をそれぞれ使用している。これらのデータにはラドン子孫核種の影響が含まれているが、完全にラドン子孫核種の影響のない環境でのデータ取得は困難であること、多くのデータを取得し平均化していることから、地上からの放射線の計数と比較してラドン子孫核種の影響が小さいと仮定する。両発電所における散布図は、よい相関関係を示し、近似した直線の傾きをそれぞれの測定体系 (ヘリコプター) における GI と定義する。

一方、RI については、海上の 300 m 位置 (実際のフライトの対地高度が 290~320 m のデータ) で取得したデータを抽出し、GI と同様に宇宙線および自己汚染の寄与分を差し引いた計数率データを用いた。大飯・高浜原子力発電所及び伊方原子力発電所で使用した各ヘリコプターにおける NaI RSI システムの計数率と、LaBr RSI システムの計数率の関係を Fig. 4-23 (d), (e) に示す。本散布図の近似直線の傾きを RI と定義した。なお、数値の比較のため、昨年度川内原子力発電所で取得した NaI RSI システムの計数率と、LaBr RSI システムの計数率の関係を比較として Fig. 4-22 (c)、Fig. 4-23 (f) に示す。大飯・高浜原子力発電所及び伊方原子力発電所で取得したデータと同様により正の相関を示すことが分かる。また、傾きの違いはヘリコプター等を含む検出器の遮蔽状況の違いによるものと考えられる。Table 4-4 に解析に使用した GI および RI の一覧、過去のデータについて示す。

Table 4-4 GI および RI の一覧

モニタリング名	開始日	終了日	RI	GI	ヘリコプター機種	
伊方BGモニタリング	2016/11/29	2016/12/11	22.3	30.5	BELL430	JA05TV
東日本7次モニタリングB班*	2016/10/31	2016/11/18	26.1	32.4	BELL412	JA9616
	2016/10/15	2016/10/30			BELL412	JA6767
東日本7次モニタリングA班	2016/10/15	2016/11/17	26.1	30.7	BELL430	JA05TV
大飯高浜BGモニタリング	2016/7/20	2016/8/1	23.1	32.6	BELL412	JA9584
川内BGモニタリング	2016/2/1	2016/2/7	29.8	34.0	BELL412	JA6928
福島試験フライト	2016/1/26	2016/2/21	28.7	33.5	BELL412	JA6928

* 同機種であるため同じ数値を使用

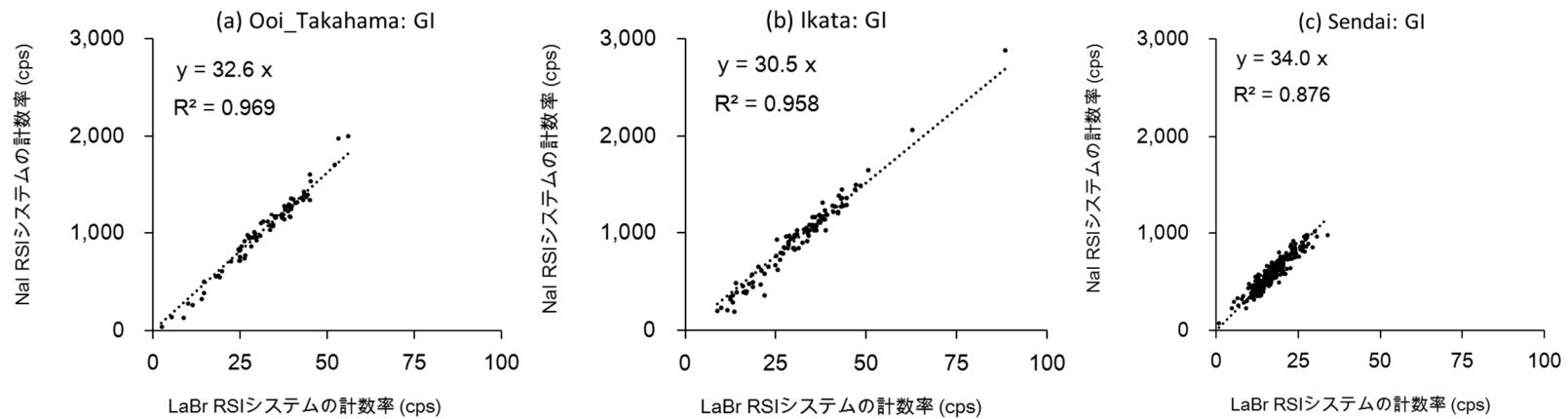


Fig. 4-22 陸上における NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係
(1 次近似曲線の傾きを GI と定義)

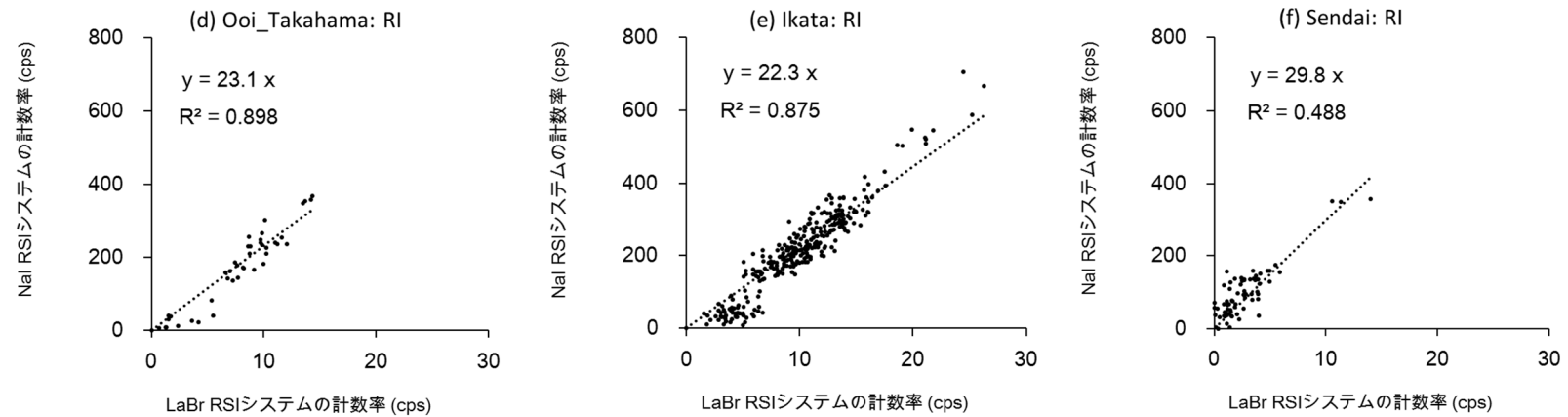


Fig. 4-23 陸上における NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係
(1 次近似曲線の傾きを RI と定義)

4.5.2. 従来手法との比較

従来の手法においても Rn 影響フライトとして測定日ごとに測定前に拠点近くの測線上を 450-900 m まで直線的に上昇して得られたデータをバックグラウンドとして差し引いているため、ある程度のラドン子孫核種の影響は弁別されていると考えられる。従来手法によるラドン子孫核種弁別の効果と上記の新たなラドン弁別手法の有効性を評価するために、フロー図で示した従来手法の空間線量率マップとラドン弁別手法を適用し、比較を試みた。従来法で求めた測定日ごとのバックグラウンド計数率と同日における新たなラドン弁別手法で求めた計数率の平均値の比較を Fig. 4-24 に示す。図には比較のため、放射性セシウムが存在する H28 年度に実施した福島第 1 原子力発電所から 80 km 圏外のモニタリング結果 (第 7 次東日本モニタリング) に適用した結果についても示している。第 7 次東日本モニタリングでは、2 種類のヘリコプターを用いており、図中では E7th_A および E7th_B と表記する。このように一定の正の相関関係にあるものの、ばらつきが大きいことが分かる。プロット自体は、放射性セシウムの有無に関わらず同様なばらつきを示しており、従来手法でもラドン子孫核種の弁別はある程度できることが示唆される。しかしながら、従来手法は必ず目的の測線のデータ取得の前にラドン影響フライトを行わなければならないという手間があること、空気中のラドン子孫核種濃度が 1 日を通して測定範囲で一定である場合のみ効果があることを考慮すると、本弁別手法によりコストに関係するフライト時間の短縮やラドン弁別の精度が向上することが期待できる。

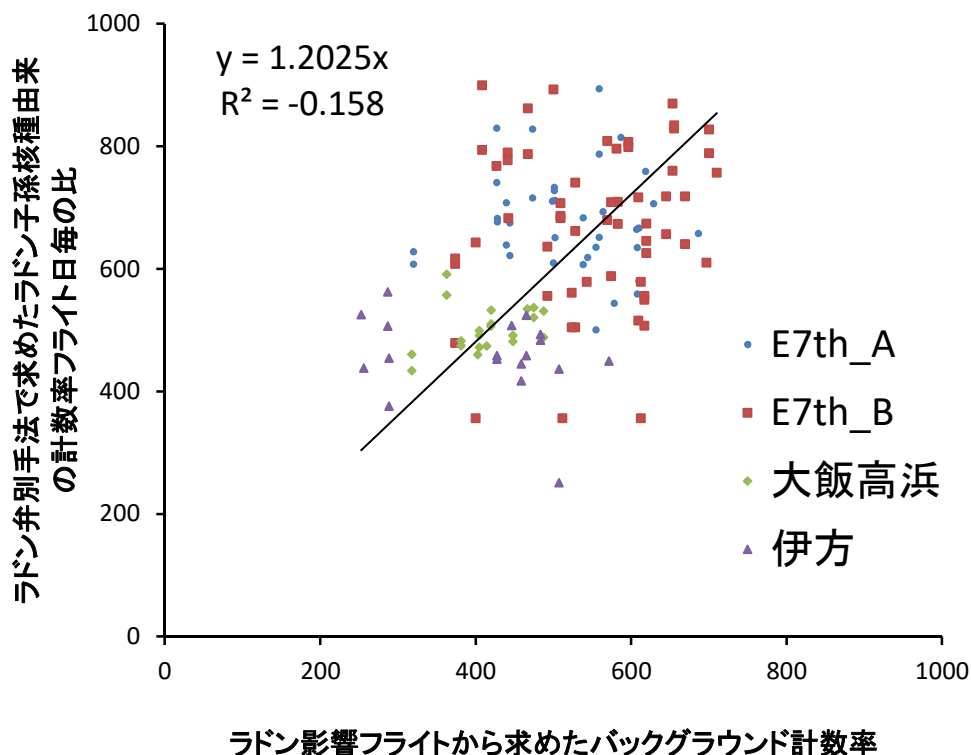


Fig. 4-24 ラドン影響フライトから求めた NaI RSI システムのバックグラウンド計数と同日にフライトしたデータにラドン弁別手法を適用し求めたラドン子孫核種の計数率の平均値の比較

4.5.3. ラドン弁別手法の適用

ラドン弁別手法を今年度の測定結果に適用した。本手法は GI の数値により大きく変化すると考えられるため、Table 4-4 に示したヘリコプターごとの GI の数値 (± 0) に、-1 および -2 した場合についても解析した。解析の結果は、地上における測定結果 50 点と比較し、その妥当性について考察した。なお、3 章で示した従来の空間線量率換算法においては、これまでの経験から Table 3-1 で示すように、Rn 影響フライトとして測定日ごとに実際の測定前に拠点近くの測線上を 450-900 m まで直線的に上昇して得られたデータをバックグラウンドとして差し引いているため、ある程度のラドン子孫核種の影響は弁別されていると考えられる。本手法の検証には、Rn 影響フライトで取得したバックグラウンドを減算せずにラドン弁別手法を適用する。よって、ラドン弁別なしの空間線量率マップは Fig. 4-10 および Fig. 4-11 で示したマップとは異なる。

Fig. 4-25 に GI の数値が変化した場合の影響を調査するため大飯・高浜原子力発電所の結果を例にラドン弁別手法を適用した結果について示す。傾向としては、GI の数値が大きいくほど空間線量率は低くなる傾向があることが分かる。さらに、ラドン子孫核種の影響の高い地域について考察するために、ラドン弁別手法で減算した NaI RSI システムの計数率を抽出し、計数率マップを作成した。また、本マップは測定の時間が場所により異なるので、瞬間的な空気中のラドン子孫核種の影響が時間的につぎはぎ状でマップとして表現されている。Fig. 4-26 に大飯高浜の測定結果から計算した空気中のラドン子孫核種由来の計数率のマップを示す。このように、ラドン子孫核種の検出されたエリアは、測定場所の東側の福井県と岐阜県の県境等の比較的標高の高いエリアであることが分かる。一方、標高の低い琵琶湖沿岸部ではほとんど検出されていない。ラドン子孫核種の起源としては、中国大陸からの輸送と地殻からの放出が考えられ、後者由来のものは濃度の時間変化が小さいと考えられる。ラドン子孫核種の検出された標高の高いエリアは、地質的に地殻由来のラドン子孫核種濃度が高いとすると、この結果は矛盾しない。

大飯・高浜原子力発電所および伊方原子力発電所周辺における従来手法とラドン弁別手法 ($GI=\pm 0$) を適用した空間線量率のマップを Fig. 4-27 に示す。図のように、大飯・高浜原子力発電所の測定エリアの東側および伊方原子力発電所の測定エリアの東側の線量率が減っていることが分かる。結果の妥当性を評価するために、地上値との比較を行った。比較結果を Fig. 4-28 (大飯・高浜)、Fig. 4-29 (伊方) に示す。結果を見るとラドン弁別手法を適用しない場合と適用した場合を比較すると、大きな変化は見られないが、別事業で行った福島第 1 原子力発電所から 80 km 圏外で行った検証では有意に地上値に近づくことが分かっている。Fig. 4-25 に示すように、本地域の空間線量率は低いので一概に地上値との比較でラドン弁別手法の有効性は確認できなかったが、本手法には高度補正の手法や GI の数値決定方法に若干の不正確さが残っているため、今後もこのような解析経験を積み上げ、最適化を行っていくことが必要である。

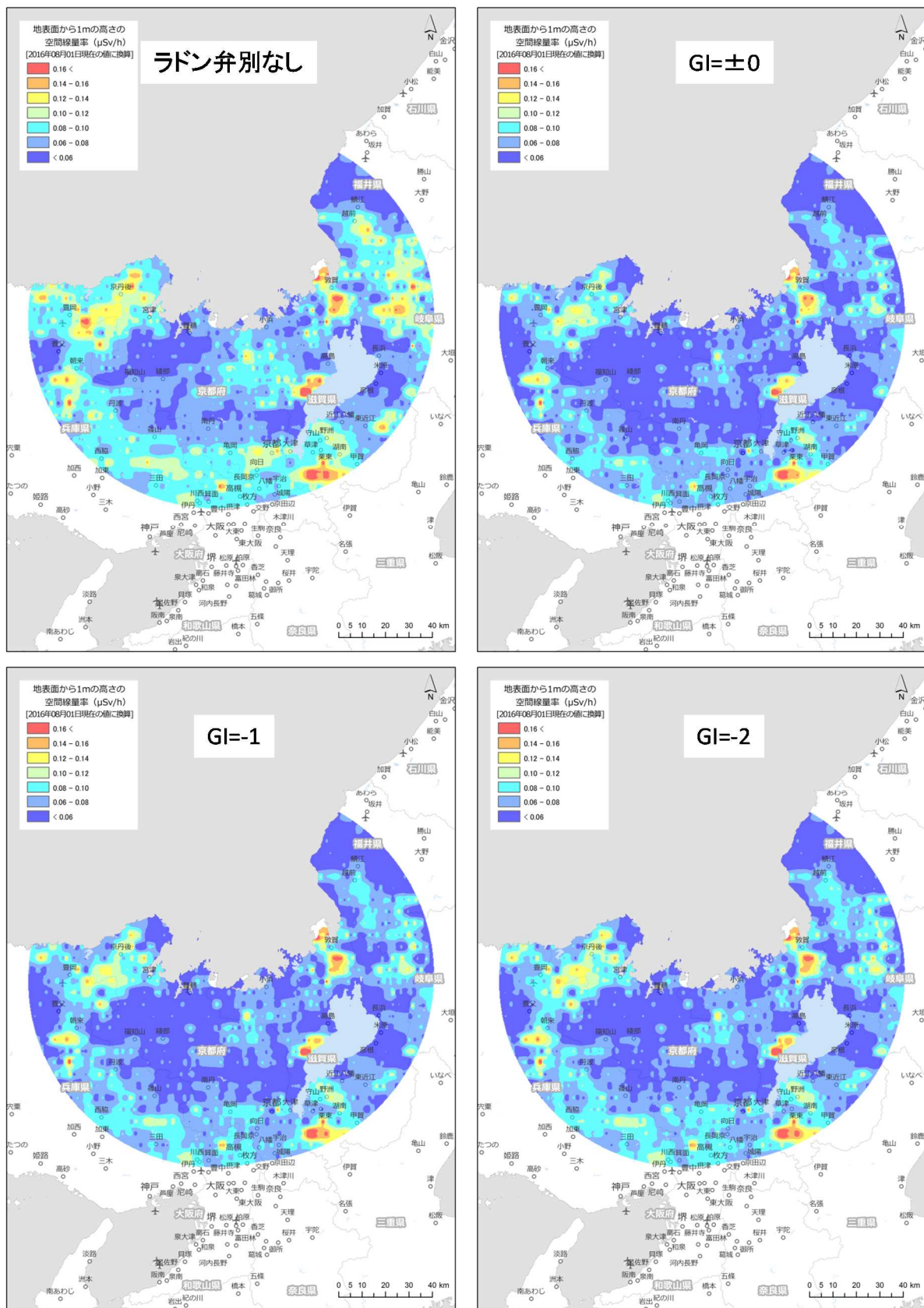


Fig. 4-25 ラドン影響弁別手法適用後の大飯・高浜原子力発電所周辺における空間線量率マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

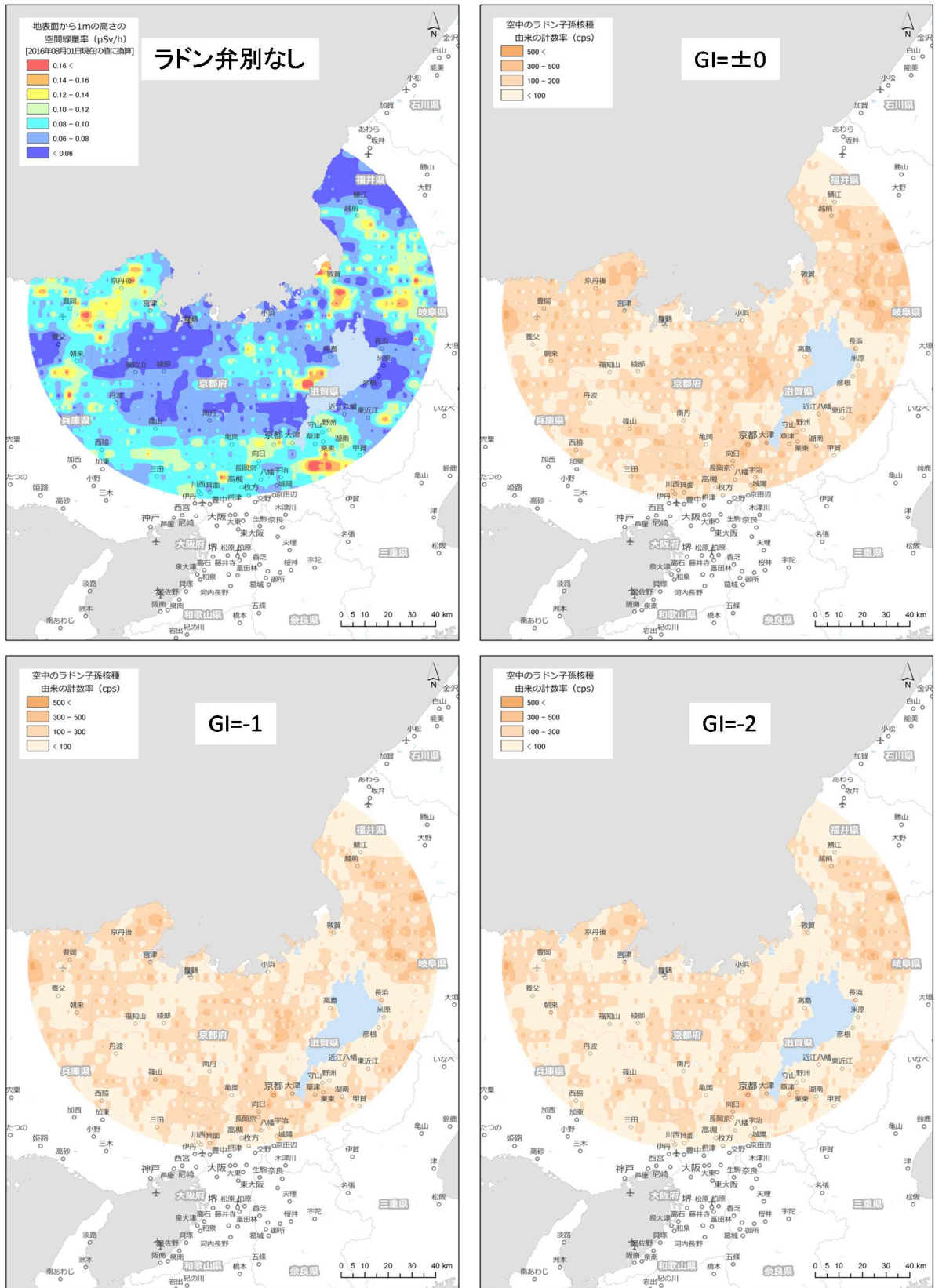


Fig. 4-26 ラドン影響弁別手法適用後の大飯・高浜原子力発電所周辺における空気中のラドン子孫核種
起源の計数率マップ

(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

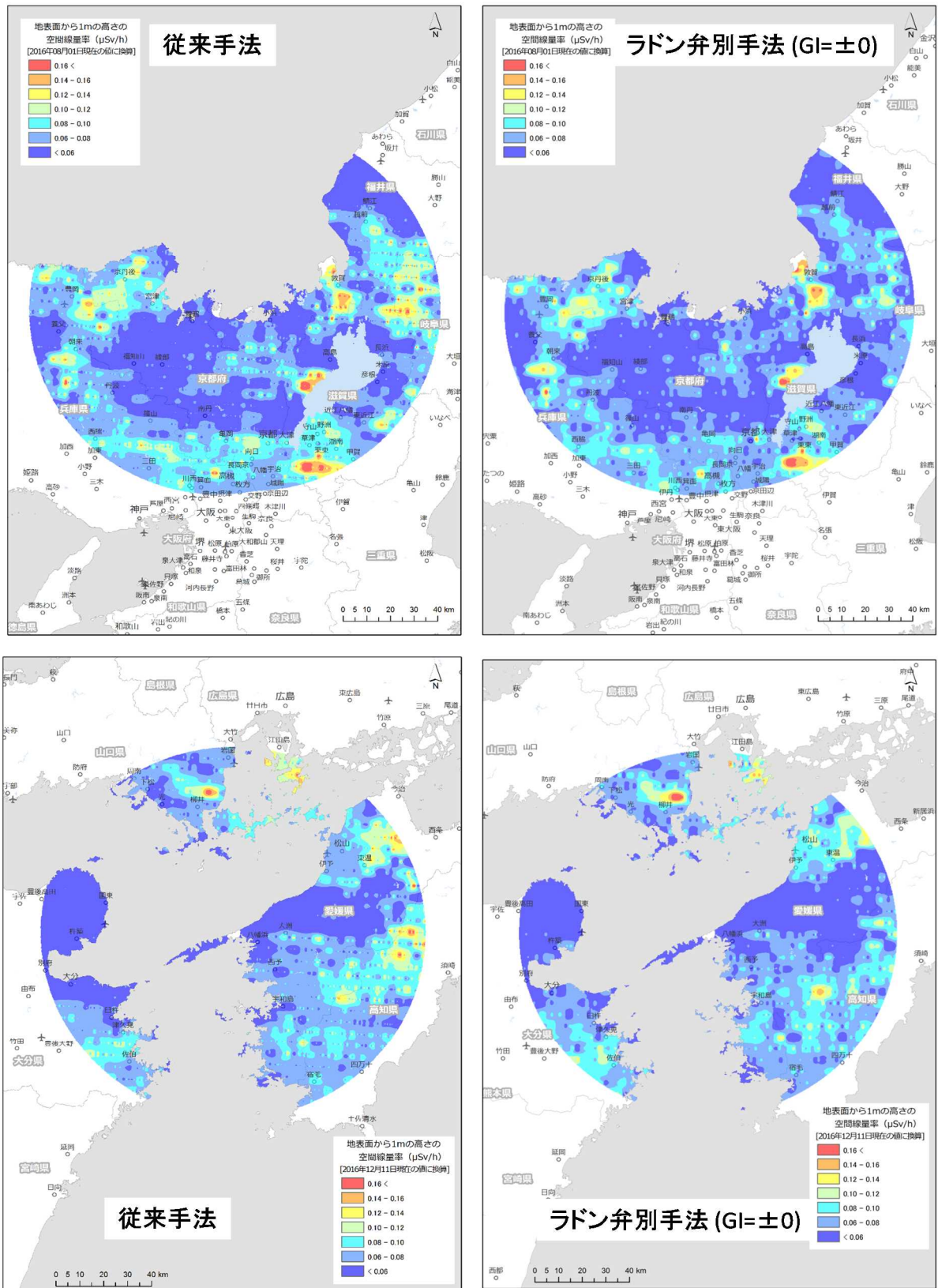


Fig. 4-27 ラドン影響弁別手法適用後の大飯・高浜原子力発電所および伊方原子力発電所周辺空間線量率マップ

(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

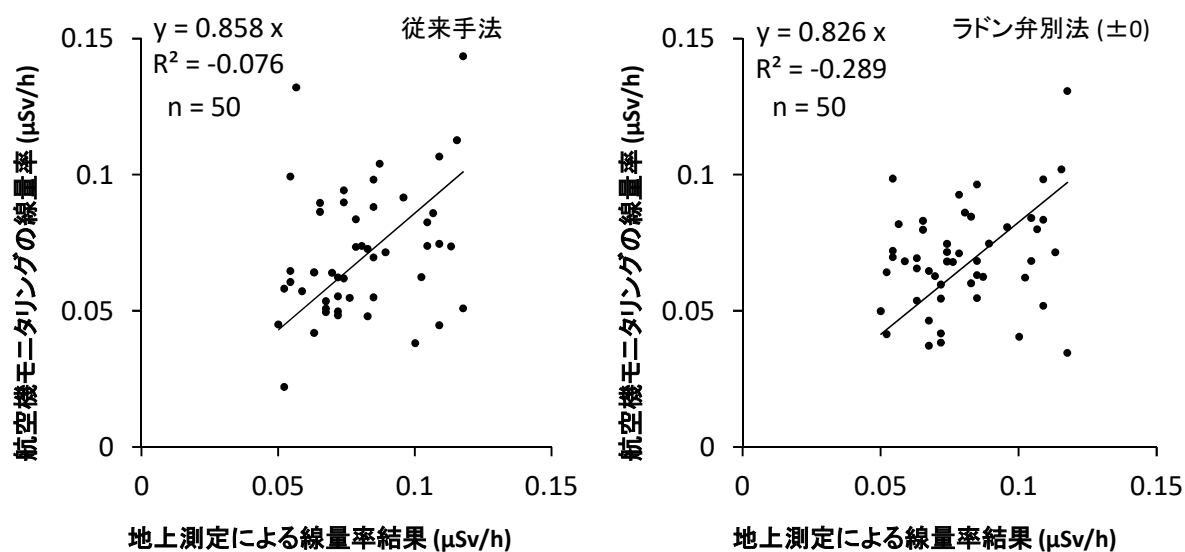


Fig. 4-28 大飯・高浜原子力発電所モニタリングにおける従来法とラドン弁別法を用いた空間線量率換算結果と地上測定値との比較

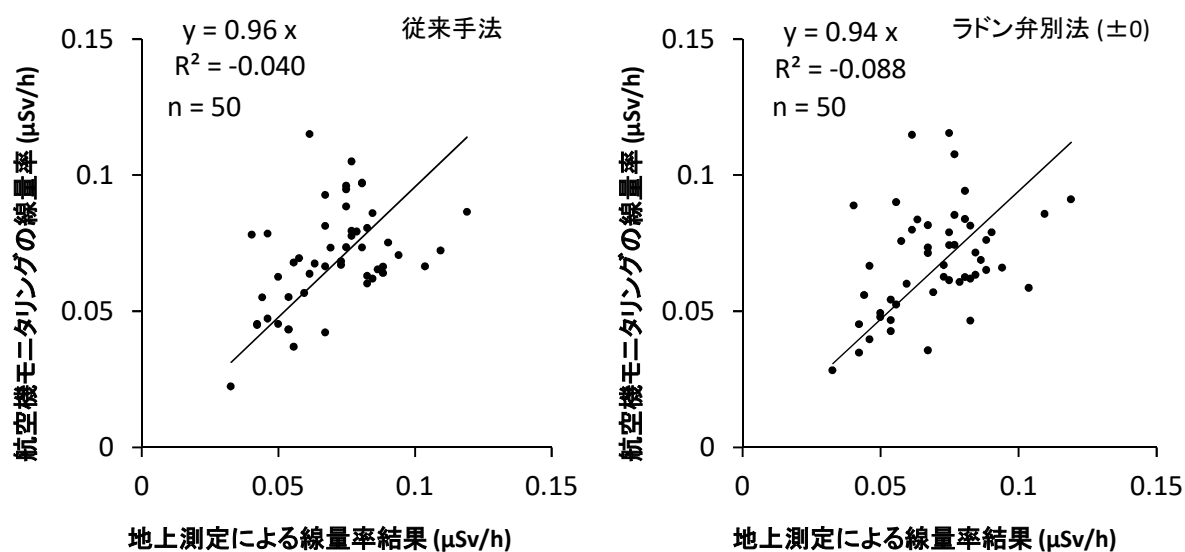


Fig. 4-29 伊方原子力発電所モニタリングにおける従来法とラドン弁別法を用いた空間線量率換算結果と地上測定値との比較

4.6. 放射性セシウムの沈着量

大飯・高浜および伊方原子力発電所周辺における航空機モニタリング結果から、放射性セシウムの沈着量の算出を行った。放射性セシウムの沈着量マップを Fig. 4-30 に示す。このように、すべての地点において検出下限値以下となり、本測定エリアにおいて放射性セシウムは検出されなかった。なお、放射性セシウムの沈着量の計算手法については、福島で行っているモニタリング手法に則った。

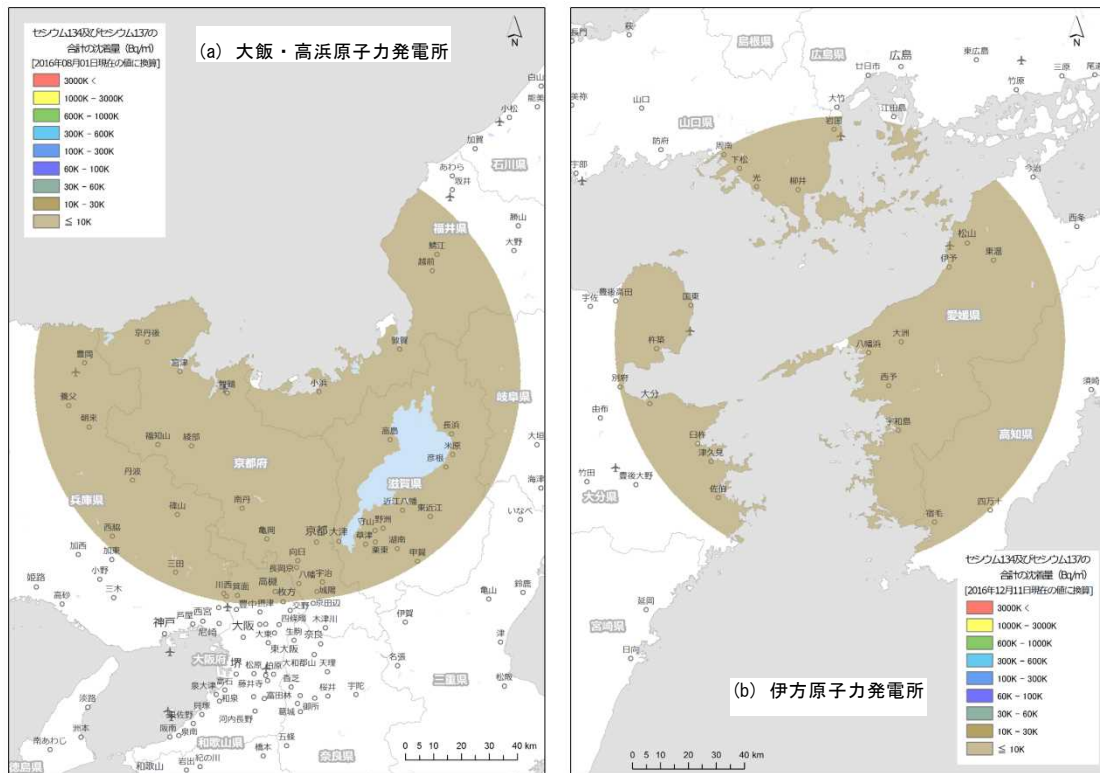


Fig. 4-30 原子力発電所周辺の放射性セシウム沈着量マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

5. まとめと緊急時モニタリングに資する知見の整理

今年度得られた成果を以下にまとめる。

- ・測定結果について

大飯・高浜原子力発電所および伊方原子力発電所について、3～80 km 圏における天然の空間線量率および核種別濃度マップを作成した。作成したマップの信頼性については、地上の測定データと比較することで確認を行った。

- ・測定の日程について

測線として5 km メッシュの東西方向に設定した。測定の期間は、大飯・高浜原子力発電所が平成28年7月20日～8月1日（のべ22フライト）の13日間を要した。期間中に、天候不良で2日間フライトができない日があった。伊方原子力発電所では、平成28年11月29日～12月11日（のべ18フライト）の13日間を要した。期間中に、天候不良で3日間フライトできない日があった。

- ・手法について

天然の空間線量率および核種別濃度の換算手法について確立した。本手法に用いているパラメータについては、今後もデータを蓄積し、最適化する必要がある。

- ・RSIシステムの保守方法について

原子力規制庁所有のRSIシステムについて、月例保守の方法を定型化し、確実に実施した。実施の結果、特に異常は見られなかった。

- ・測定エリアの特徴について

大飯・高浜原子力発電所を中心とする80 km圏内の測定エリア内に空港は所在しないが、測定エリア北東に位置する福井空港、南に位置する大阪国際空港（以下、伊丹空港）の管制圏の一部、及び舞鶴ヘリポート（自衛隊）の管制圏が含まれている。管制圏内を飛行する際は、事前に航空管制機関と調整をする必要がある。福井空港については定期航空路線が存在しないので、フライトに関して特段の制限がかかる事はないが、福井空港では滑空機の運用が多く周辺空域の測定においては注意すべきである。伊丹空港では相当数の定期航空路線を有することから、管制圏内へ進入するタイミング、飛行時間に制限が加えられる事が多いので、効率的な測定を行なう上で障害となる場合がある。舞鶴、美山周辺には自衛隊の訓練空域が設けられているので、空域内を飛行する際は自衛隊との事前調整が必要である。測定エリア外ではあるが、丹後半島北端に位置する経ヶ岬に米軍のレーダーサイトがあり、海上に向けて強力な電磁波が放射されている。そのため、レーダーサイト周辺は飛行制限区域に指定されており、近傍を測定するには注意が必要である。また、測定エリア南側は関西圏の自家用小型機の基地となっている八尾空港が近く、小型機の実在に留意すべきである。

伊方原子力発電所を中心とする80 km圏内の測定範囲内には、松山空港、大分空港、岩国基地が所在し、管制圏が含まれている。また、伊予灘の海上及び豊後水道から高知県側にかけて、訓練空域が設けられているので、航空管制機関及び自衛隊との事前調整が必要である。

謝辞

本調査研究は、「原子力規制庁による平成 28 年度原子力施設等防災対策等委託費「航空機モニタリング運用技術の確立等」事業」の成果をとりまとめたものである。原子力機構、応用地質(株)により 30 余名が、航空機に搭乗しての測定、地上での空間線量率測定、さらにデータ解析とそのマップ化に取り組んだ。航空機の運航は、朝日航洋(株)、中日本航空(株)が行った。ここに本モニタリングに参加された皆様に謹んで謝意を表します。

参考文献

- 1) 鳥居建男, 眞田幸尚, 杉田武志, 田中圭: 航空機モニタリングによる東日本全域の空間線量率と放射性物質の沈着量調査, 日本原子力学会誌(ATOMOZ), Vol. 54 No. 3, pp. 160-165, 2012.
- 2) 眞田幸尚, 近藤敦也, 杉田武志, 鳥居建男, 航空機モニタリングによる放射性セシウムの汚染分布, 放射線, 38 (3), pp. 137-140, 2012.
- 3) 眞田幸尚, 日本全域における航空機モニタリング, FB news, 432, pp. 7-11, 2012.
- 4) 鳥居建男, 眞田幸尚, 杉田武志, 近藤敦哉, 志風義明, 高橋昌樹, 石田睦司, 西澤幸康, 卜部嘉, 広域環境モニタリングのための航空機を用いた放射性物質拡散状況調査, JAEA-Technology 2012-036, 2012, 182p.
- 5) 眞田幸尚, 西澤幸康, 卜部嘉, 山田勉, 石田睦司, 佐藤義治, 平山弘克, 高村善英, 西原克哉, 伊村光生, 土田清文, 石橋聖, 前島正道, 結城洋一, 鳥居建男, 平成 25 年度福島第一原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Research 2014-014, 2014, 110p
- 6) 眞田幸尚, 森愛理, 石崎 梓, 宗像雅広, 中山真一, 西澤幸康, 卜部嘉, 中西千佳, 山田勉, 石田睦司, 佐藤義治, 平山弘克, 高村善英, 西原克哉, 伊村光生, 土田清文, 石橋聖, 吉田真美, 前島正道, 結城洋一, 鳥居建男, 平成 26 年度福島第一原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Research 2015-006, 2015, 81p
- 7) 眞田幸尚, 宗像雅広, 森愛理, 石崎梓, 嶋田和真 廣内淳, 西澤幸康, 卜部嘉, 中西千佳, 山田 勉, 石田睦司, 佐藤義治, 佐々木美雪, 平山弘克, 高村善英, 西原克哉, 伊村光生, 宮本賢治, 岩井毅行, 松永祐樹, 豊田政幸, 飛田晋一郎, 工藤保, 中山真一, 平成 27 年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Research 2016-016, 2016, 131 p.
- 8) 原子力防災会議幹事会, 原子力災害対策マニュアル, 平成 27 年 6 月 19 日一部改訂
- 9) 原子力規制委員会, 原子力災害対策指針, 平成 27 年 8 月 26 日全部改正
- 10) 湊進, 日本における地表 γ 線の空間線量率分布, 地学雑誌, 115, 87-95, 2006.
- 11) 地質学会ホームページ, 日本の自然放射線量
<http://www.geosociety.jp/uploads/fckeditor/hazard/2011/daishinsai/20110412imai/Radiation-m2.gif>
(2017 年 3 月 1 日閲覧).
- 12) 国土地理院ホームページ, <http://www.gsi.go.jp/kibanchizu/kibanchizu60004.html> (2017 年 3 月 1 日閲覧).
- 13) Currie, L. A., Limits for qualitative detection and quantitative determination. Application to

- radiochemistry., Anal. Chem, 40, 586, 1968.
- 14) IAEA, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA-TECDOC-1363, 2003.
 - 15) Oikawa S., Nobuyuki, K., Sanada, T., Ohashi, N., Uesugi, M., Sato, K., Abukawa, J. and Higuchi, H. A nationwide survey of outdoor radon concentration in Japan. J. Environ. Radioact., 65, pp. 203-213, 2003.
 - 16) 西川嗣雄, ラドン族(2) -自然放射線環境, 福井大学地域環境研究教育センター研究紀要「日本海地域の自然と環境」, 5, pp. 83-94, 1998.
 - 17) IAEA, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA-TECDOC-1363, 2003.
 - 18) 分析センターホームページ, 環境放射線データベース,
<http://search.kankyo-hoshano.go.jp/servlet/search.top?pageSID=19119433> (2017年3月1日閲覧).
 - 19) 太田洋子, 成瀬敏郎, 田中眞吾, 岡田篤正, 日本の地形 6 近畿・中国・四国, 東京大学出版会, 2004
 - 20) 町田洋, 太田洋子, 河名俊男, 森脇広, 長岡信治, 日本の地形 7 九州・南西諸島, 東京大学出版会, 2007
 - 21) 産業技術総合研究所地質調査総合センターホームページ, 海と陸の地球化学図,
<https://gbank.gsj.jp/geochemmap/> (2017年3月1日閲覧).



Appendix 1

航空機モニタリング及び NEAT 内緊急時対応訓練実施報告書

平成 28 年 8 月 9 日

航空機モニタリング及び NEAT 内緊急時対応訓練実施報告書

原子力機構 原子力緊急時支援・研修センター

1. 訓練の概要

地震発生により関西電力高浜原子力発電所において放射性物質の放出が発生したと仮定し、原子力規制庁が航空機モニタリングの必要性があると判断して JAEA に航空機モニタリングの実施要請があったことにより資機材及び測定要員の輸送及び原子力緊急時支援・研修センター（NEAT）内の緊急時対応訓練を行うものである。

2. 訓練想定事象・規模

想定事象：原子力施設立地県において震度 6 弱以上の地震が発生し、放射性物質放出して沈着後に緊急時モニタリングを要請。資機材及び測定要員を現地に派遣し、各種放射線モニターの測定状況からプルームの放出がないことが確認された後、緊急時の航空機モニタリングを実施する（ただし、フライトにおける個人被ばく線量計の積算値が 0.5mSv に達したら測定のためのフライトを中止し帰還するものとする）。

規 模：当該原子力発電所を中心に、半径 30km-80km の範囲(測線間隔は 5km)で測定することを想定する。

3. 訓練の目的

- ・緊急時における航空機モニタリング資機材及び測定要員搬送の際の流れを確認する。
- ・原子力発電所事故時における航空機モニタリングを実施する上で、ヘリの駐機位置からの離陸から検出器の搭載、NEAT を出発するまでの時間を確認する。
- ・航空機モニタリングの派遣検討から現地または途中の駐機位置に到着までの間における問題点を抽出する。

4. 訓練実施日時

平成 28 年 7 月 19 日（火） 9：00～15：00

5. 訓練実績・結果

- ・訓練のための連絡等は概ねシナリオ通りに実施できた（シナリオと実績について別紙 1 に示す）。
- ・NEAT ヘリポート（場外離発着場）における離発着申請（to 航空局）：2 週間前
- ・東京ヘリポートから NEAT までの所要時間：38 分

- ・ヘリ到着から機材積み込み・離陸までの所要時間：65 分
- ・NEAT から若狭ヘリポートまでの所要時間：3 時間 25 分（静岡ヘリポートで 1 回給油）
- ・訓練実施時は天候に恵まれたため、最短の移動状況を確認。

6. 訓練で確認された課題

- ・NEAT 総括班の体制整備：規制庁等とのやり取りを行う総括班には航空機モニタリングに関して熟知している航空機モニタリング支援準備室職員が残る必要があるが、緊急時に同室職員 2 名が測定で現地に派遣されると NEAT 内で対応する人員が不足することになり、同室以外からの要員増強が必要である。
- ・NEAT 運営班の体制整備：資機材の用意等を行う運営班では、航空機モニタリング資機材等の積み込み手順等を整理して情報を共有することが必要である。
- ・航空機の調達：緊急時には規制庁がヘリコプター（自衛隊機または民間航空機）を調達することになるので、それに従った訓練が必要である。
- ・保険：航空機モニタリングで測定する職員の保険加入の考慮が必要である。
- ・モニタリングの中止：モニタリングを実行できない状況になった場合の中止手順が必要である。
- ・交替要員：緊急時の航空機モニタリングには長期の対応を要するため、測定の交替要員を増強する必要がある。

7. まとめ

- ・民間ヘリを用いた航空機モニタリングの際の所要時間を確認できた。
- ・事故発生からモニタリング実施までの ERC 及び NEAT の連絡の流れを確認できた。
- ・今後の訓練時における NEAT ヘリポートの使用許可に関わる手続きを確認できた。
- ・今回の訓練により対応すべき課題が抽出された。

以上

原子力規制庁主導による航空機モニタリング及び NEAT 内緊急時対応
訓練シナリオと実績

想定事象：原子力施設立地県において震度6弱以上の地震が発生し、原子力施設から放射性物質が放出となり、緊急時モニタリングの実施検討が要請される。

規 模：当該原子力発電所を中心に、半径 30 km～80 km の範囲(測線間隔は 5 km)で測定
 すること
 を想定する。

経過時間 (時刻) (実績)	訓 練 内 容	担 当	備 考
0:00 (9:00) (9:00)	(地震発生(福井県震度6強)後、支援体制立ち上げ済み。) ・→当直長又は総括班長:ERC 放射線班から NEAT 緊急時 IP 電話【885-370】へ航空機モニタリング実施検討依頼の連絡及びFAX (原子力規制庁からのモニタリング実施検討依頼をもって訓練開始)	当直長又は総括班長 (電話受け)	訓練開始 原子力規制庁より FAX 受信(検討依頼)
0:03 (9:03) (9:03)	・当直長→総括班長連絡。総括班長→センター長または副センター長連絡。 ・センター長または副センター長:空モニ室長にモニタリングの実施体制が可能であるかを確認指示。総括班長、運営班長等に派遣準備支援指示。		
0:10 (9:10) (9:08)	・空モニ室長→:ヘリ会社(朝日航洋) 【小澤:090-3226-2099】へ、ヘリコプター運航の実施検討を依頼。NEAT 緊急時電話 029-264-2681 に返事いただくよう連絡。	空モニ室長 (電話)	
	・ヘリ会社(朝日航洋)へ発信 : FAX『03-3522-0631』 (発信内容) ・年 月 日:平成28年7月19日9時8分 ・宛 先 : 朝日航洋株式会社 (ヘリ会社) ・件 名 : 緊急時モニタリングにおけるヘリコプター運航実施検討依頼 について ・連絡内容 : 地震発生により関西電力高浜発電所にて原災法 10 条事象が発生し、施設敷地緊急事態となったため、原子力規制庁より航空機モニタリングの実施について検討依頼があった。今後、派遣依頼があった場合には朝日航洋殿にヘリコプターの運航ができるかどうか判断願いたい。 ・ヘリ会社(朝日航洋) →: NEAT 緊急時電話【029-264-2681】へ実施可能と連絡(訓練では、上記でかけたときに受ける)。	空モニ室長→ 総括班長→当直長 (FAX)	外部発信文書の送信 状況を電話で連絡 『090-3226-2099』
0:15 (9:15)	・総括班長→:ERC 放射線班【703-325 大平様(or080-6551-3007)】へ条件付きで緊急時モニタリングが実施可能であると回答。	総括班長 (電話)	

経過時間 (時刻) (実績)	訓 練 内 容	担 当	備 考
(9:12)	・原子力規制庁へ第1報発信 : FAX『ERC放射線班 03-3560-9719』 (発信内容) ・年 月 日 : 平成28年7月19日9時12分 ・宛 先 : ERC放射線班 ・件 名 : 緊急時モニタリング実施検討結果について ・連絡内容 : 30-80km 圏内、気象条件、ブルームがないこと、上空での累積被ばく線量が 0.5mSv に達したらフライト中断する等のフライト条件が合意できる場合には、航空機モニタリングを実施することは可能。	空モニ室長→ 総括班長→当 直長 (FAX)	外部発信文書の送信 状況を電話で連絡 『 703-325(or080- 6551-3007)大平様』
0:30 (9:30) (9:30)	・→当直長又は総括班長:ERC放射線班からNEAT緊急時IP電話【885-370】へ航空機モニタリング派遣依頼の連絡(FAX受信) (※第1報の連絡内容の条件で派遣依頼) ・当直長→:総括班長へ連絡。総括班長→空モニ室長へ連絡。	当直長又は総 括班長 (電話受け) (FAX受け)	原子力規制庁より FAX 受信(派遣依頼)(遅れ る可能性有り)
0:40 (9:40) (9:43)	・空モニ室長→:ヘリ会社(朝日航洋) 【小澤:090-3226-2099】へ、ヘリコプター派遣を依頼。ヘリが9:19に 離陸の連絡受け ・ヘリ会社(朝日航洋)へ発信 : FAX『03-3522-0631』 (発信内容) ・年 月 日 : 平成28年7月19日9時43分 ・宛 先 : 朝日航洋株式会社(ヘリ会社) ・件 名 : 緊急時モニタリングにおけるヘリコプター派遣依頼について ・連絡内容 : 30-80km 圏内、気象条件、ブルームがないこと、上空での累積被ばく線量が 0.5mSv に達したらフライト中断する等のフライト条件で、現地へのヘリコプター派遣を依頼する。	空モニ室長 (電話) 空モニ室長→ 総括班長→当 直長 (FAX)	外部発信文書の送信 状況を電話で連絡 『090-3226-2099』
0:50 (9:50) (9:19)	・NEATに向けてヘリコプター離陸 ・空モニ室長→:ヘリ会社(朝日航洋) 【小澤:090-3226-2099】へ、ヘリの離陸を確認(訓練時省略)		
0:55 (9:55) (9:55)	・総括班長→:ERC放射線班【703-325 大平様(or080-6551-3007)】へ 緊急時モニタリングの派遣を回答。	総括班長 (電話)	

経過時間 (時刻) (実績)	訓 練 内 容	担 当	備 考
	- 原子力規制庁へ第2報発信：FAX『ERC放射線班 03-3560-9719』（発信内容） - 年 月 日：平成28年7月19日9時55分 - 宛 先：ERC放射線班 - 件 名：緊急時モニタリングにおけるヘリコプター派遣について - 連絡内容：航空機モニタリングのため、現地へヘリコプターを派遣する。駐機位置(9:19 離陸済み)から JAEA 原子力緊急時支援・研修センターヘリコプターを空輸し、機材を積み込んで現地へ出発する予定。 - 総括班長→：当直へ航空機モニタリング訓練が実施される旨の全館放送を依頼(支援棟前の車両の移動依頼)。 - 総括班長→：モニタリング準備室員に測定機材の積み込み準備を指示。 (センター長から) 総括班長を経由で→：運営班長に防護資機材の準備を依頼。	空モニ室長→ 総括班長→当直長 (FAX)	外部発信文書の送信状況を電話で連絡 『 703-325(or080-6551-3007) 大平様』
1:00 (10:00) (9:47)	当直長→：「本日、航空機モニタリング訓練が実施されることになりました。ヘリコプターが離着陸しますので、支援棟前に駐車する車両は研修棟等の駐車場に移動して下さい」の全館放送。	当直長 (全館放送)	
1:30 (10:30) (9:55)	○ヘリコプターNEAT 到着(着陸)。 - 総括班長→：ERC放射線班【703-325 大平様(or080-6551-3007)】へ JAEA 原子力緊急時支援・研修センターにヘリが到着したと連絡。 - モニタリング準備室員、測定機材積み込みを開始。 - 運営班員、防護資機材積み込みを開始(ヘリコプター近くまで持ち込むがヘリへは積まない)。	総括班長(電話) 空モニ室員 運営班員	
1:35 (10:35) (9:57)	- 原子力規制庁へ第3報発信：FAX『ERC放射線班 03-3560-9719』（発信内容） - 年 月 日：平成28年7月19日9時57分 - 宛 先：ERC放射線班 - 件 名：ヘリコプターNEAT 到着について - 連絡内容：東京ヘリポートを 9:19 に離陸したヘリコプターが NEAT に 9:55 に到着した。現在、資機材を積み込み中。	総括班長→当直長 (FAX)	外部発信文書の送信状況を電話で連絡 『 703-325(or080-6551-3007) 大平様』
2:10 (11:10) (11:00)	- 機材積み込みを完了。 ○ヘリコプター若狭ヘリポートに向けて出発(離陸)	工藤、佐藤	
2:15 (11:15) (11:02)	総括班長→：ERC放射線班【703-325 大平様(or080-6551-3007)】へ JAEA 原子力緊急時支援・研修センターから若狭ヘリポートへ向け離陸したと連絡。	総括班長 (電話)	

経過時間 (時刻) (実績)	訓 練 内 容	担 当	備 考
	・原子力規制庁へ第4報発信 : FAX『ERC放射線班 03-3560-9719』 (発信内容) ・年 月 日 : 平成28年7月19日 11時02分 ・宛 先 : ERC放射線班 ・件 名 : 緊急時モニタリング実施検討結果について ・連絡内容 : 11:00、JAEA 原子力緊急時支援・研修センターから若狭ヘリポートへ向け離陸した。 ・添付資料 : フライト計画書	総括班長→当直長 (FAX)	外部発信文書の送信状況を電話で連絡 『 703-325 (or 080-6551-3007) 大平様』
4:00 (13:00) (12:13)	○ヘリコプター給油のため静岡ヘリポートに到着(着陸) ・JAEA 測定員 (080-1274-0286 or 090-4720-3059)→NEAT 緊急時電話【029-264-2681】へ給油のため静岡空港に着陸した旨の連絡。 ・当直長→: 総括班長へ連絡。規制庁へ連絡しなくて良いと判断。	当直長 (電話受け)	13:03 静岡ヘリポート離陸
6:00 (15:00) ×	○ヘリコプター給油のため名古屋空港に到着(着陸) ・JAEA 測定員→NEAT 緊急時電話【029-264-2681】へ給油のため名古屋空港に着陸した旨の連絡。 ・当直長→: 総括班長へ連絡。規制庁へ連絡しなくて良いと判断。	当直長 (電話受け)	燃料に余裕があったため実施せず
7:00 (16:00) (14:25)	○ヘリコプター若狭ヘリポートに到着(着陸) ・JAEA 測定員→NEAT 緊急時電話【029-264-2681】へ若狭ヘリポートに着陸し、モニタリングは翌日 9:00 より開始する旨の連絡。 ・当直長→: 総括班長へ連絡。 ・総括班長→: ERC放射線班【703-325 or 080-6551-3007 大平様】へヘリコプターは若狭ヘリポートに到着(着陸)し、モニタリングは翌日 9:00 より開始する旨連絡。	当直長 (電話受け) 総括班長 (電話)	
7:05 (16:05) (14:35)	・原子力規制庁へ第5報(最終報)発信 : FAX『ERC放射線班 03-3560-9719』 (発信内容) ・年 月 日 : 平成28年7月19日 14時35分 ・宛 先 : 原子力規制庁 長官官房放射線防護グループ 監視情報課 ・件 名 : 若狭ヘリポート到着及び航空機モニタリングの実施について ・連絡内容 : 14:35、ヘリコプターは若狭ヘリポートに到着(着陸)した。なお、航空機モニタリングについては、準備の関係上、翌日 9:00 より開始する。	総括班長→当直長 (FAX)	外部発信文書の送信状況を電話で連絡 『 703-325 (or 080-6551-3007) 大平様』
	訓練終了		

Appendix 2

原子力規制庁および防衛省による航空機モニタリング合同訓練
実施報告書

平成 28 年 11 月 9 日

原子力規制庁および防衛省による航空機モニタリング合同訓練実施報告書

原子力機構 原子力緊急時支援・研修センター

1. 訓練の概要

原子力発電所において放射性物質の放出が発生した場合の航空機モニタリングに備え、原子力規制庁と防衛省により合同訓練を実施した。訓練の実施においては、実働上の課題等を抽出することを目的とした。

2. 訓練の目的

- ・緊急時における航空機モニタリング資機材および測定要員搬送の際の流れを確認する。
- ・実際に基本的な測定フライトを実施し、ヘリコプター操縦上および測定上の課題を抽出する。

3. 訓練実施日時

平成 28 年 11 月 7 日（月） 6:30～17:00

4. 訓練対応人数

原子力規制庁：3 名

防衛省（陸上自衛隊）：4 名

防衛省（統合幕僚監部）：3 名

JAEA：現地対応：2 名，（データ解析：3 名）

○使用機体：CH-47（図 A1 機体写真）

6. 訓練実績

6:30 飛行決心連絡（防衛省→原子力規制庁・JAEA）

7:00 JAEA 移動開始（from ひたちなか市）

9:30 JAEA, 規制庁 木更津駐屯地到着

11:00-12:30 航空機モニタリング機器機体搭載（搭載写真：図 A2）

12:30-12:45 ブリーフィング

14:15-15:53 フライト

16:00-16:20 デブリーフィング

16:20-17:00 機材撤収

7. フライトプラン

- ・測定フライト：木更津駐屯地周辺の 20 km 測線 4 本
- ・宇宙線フライト：浦賀水道海上（300-1500 m）

- ・キャリブレーションフライト：富津館山道路上空 (300 m, 450 m, 600 m, 750 m)

○フライトの軌跡：図 A3

8. 課題抽出

①輸送

- ・ JAEA NEAT (規制庁航空機モニタリング保管場所)～木更津駐屯地：2.5 時間

②機材搭載

- ・ 器材の固縛に 1.5 時間ほど要した→簡便な固縛方法の検討 (JAEA)

③フライト

- ・ 測線の追従性：良好
- ・ 測定フライトにおける対地高度 1000 ft 維持：良好（再フライトの目安である 1750 ft を超える場所なし）

○フライト高度の解析結果：図 A4

- ・ 宇宙線フライト：データ良好（高度と計数率の相関性確認：図 A5）
- ・ キャリブレーションフライト：データ良好

（高度と計数率の指数関数的な関係確認：図 A6）

- ・ 線量率マップ：図 A7（地上測定は実施していないため、2011 年に実施した航空機モニタリングの結果を基に線量率換算係数を推定）

9. まとめ

- ・ 福島原子力発電所事故後、初めてとなる原子力規制庁および防衛省による航空機モニタリング合同訓練を実施した。
- ・ 機材搭載時における簡便で時間のかからない固縛方法の検討
- ・ フライト時におけるモニタリング機器操作員とヘリコプターパイロットとの事前の打合せの必要性を再確認（フライト場所およびフライト時における Call out 等）
- ・ 原子力規制庁の検討しているリアルタイムデータリンク機材の導入時には、EMI（妨害電磁波影響）試験等の考慮が必要
- ・ 緊急時において、上空における搭乗員の被ばく線量限度、退避線量限度等の設定についての整理が必要

以上



図 A1 使用機体 (CH-47)

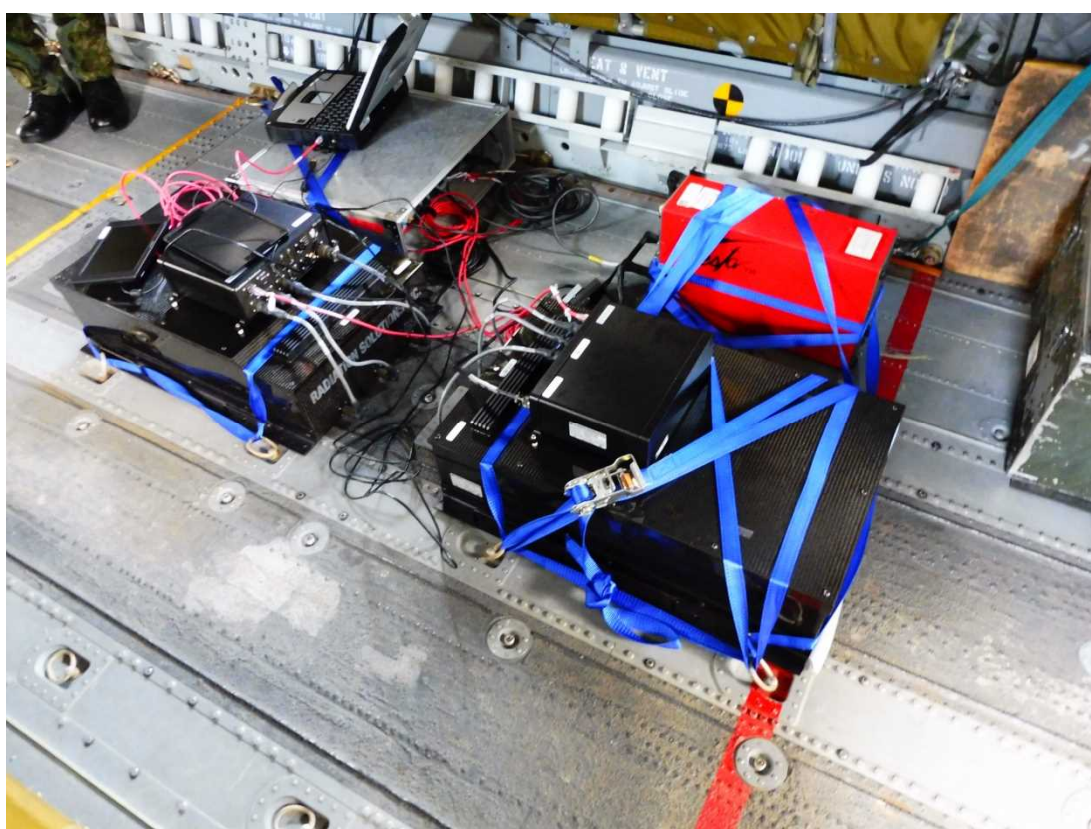


図 A2 航空機モニタリング機材搭載状況

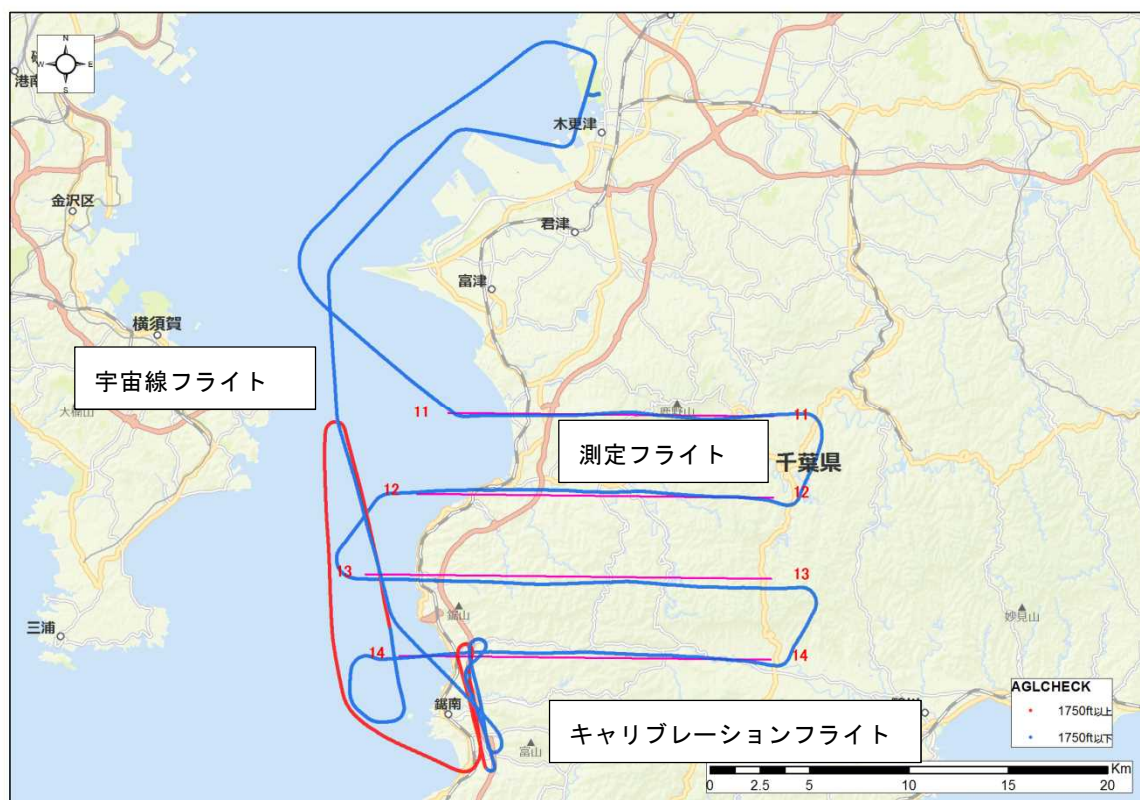


図 A3 フライト軌跡

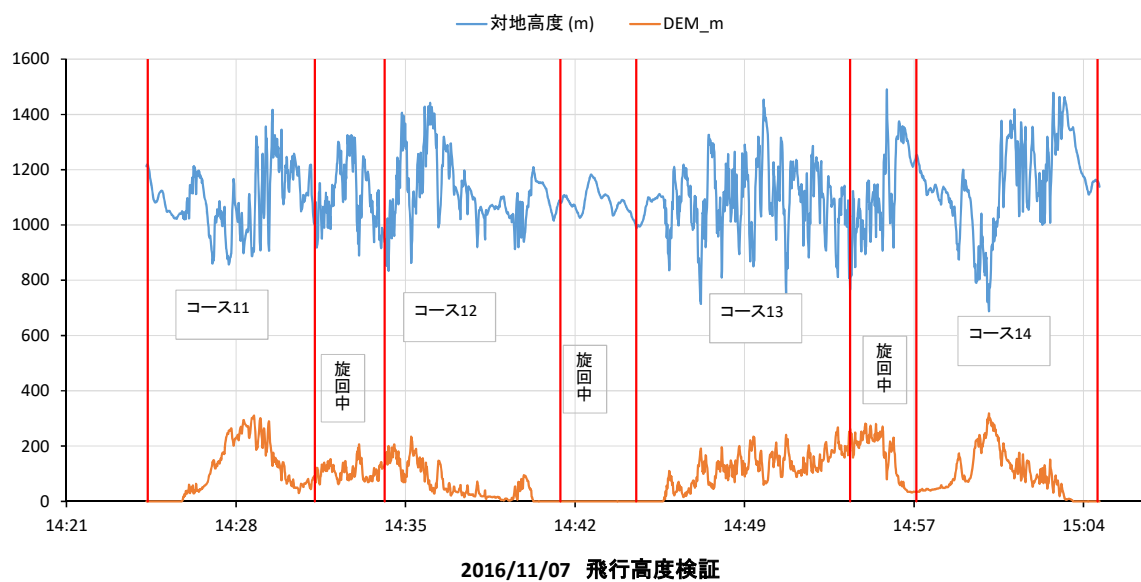


図 A4 対地高度の解析結果

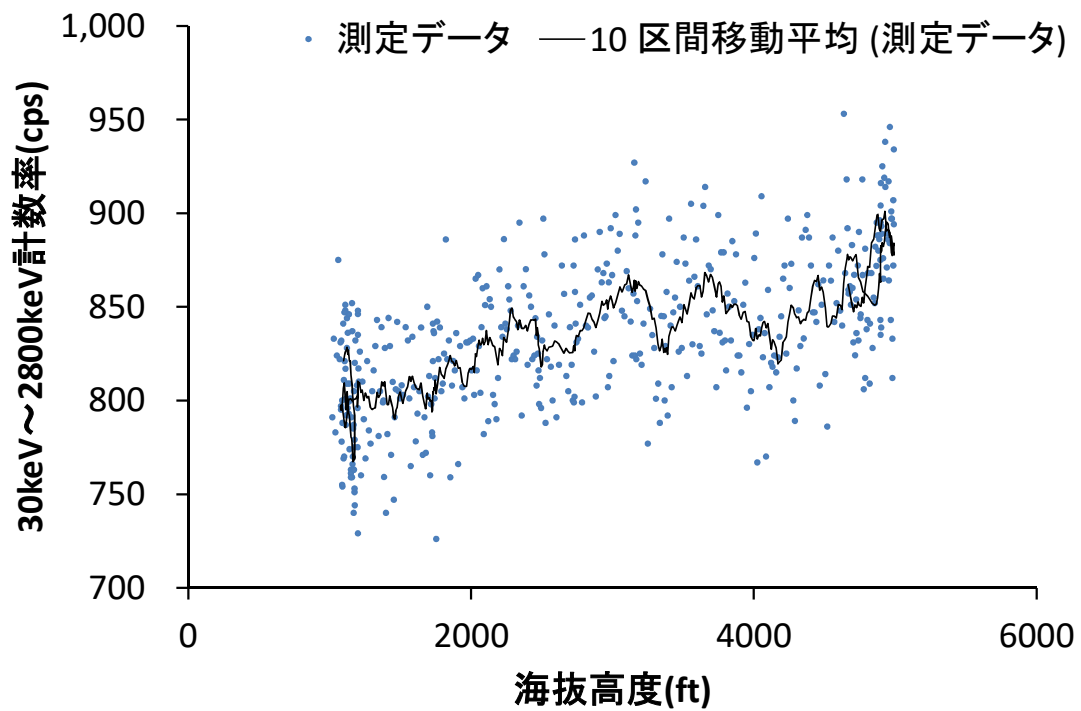


図 A5 宇宙線フライト解析結果

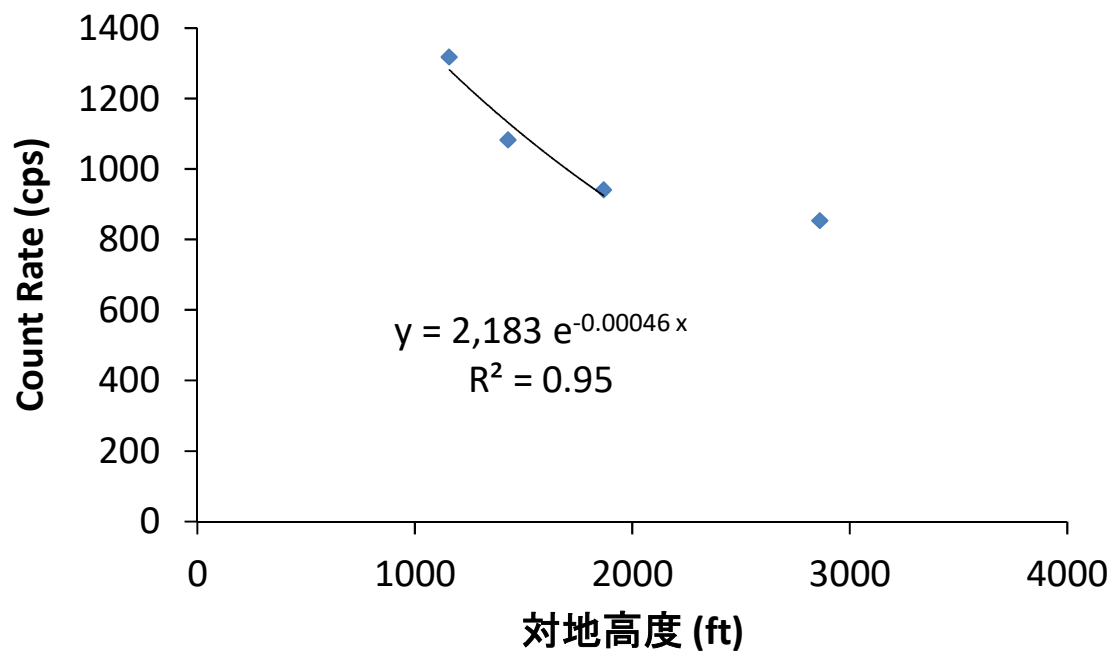


図 A6 キャリブレーションフライト解析結果

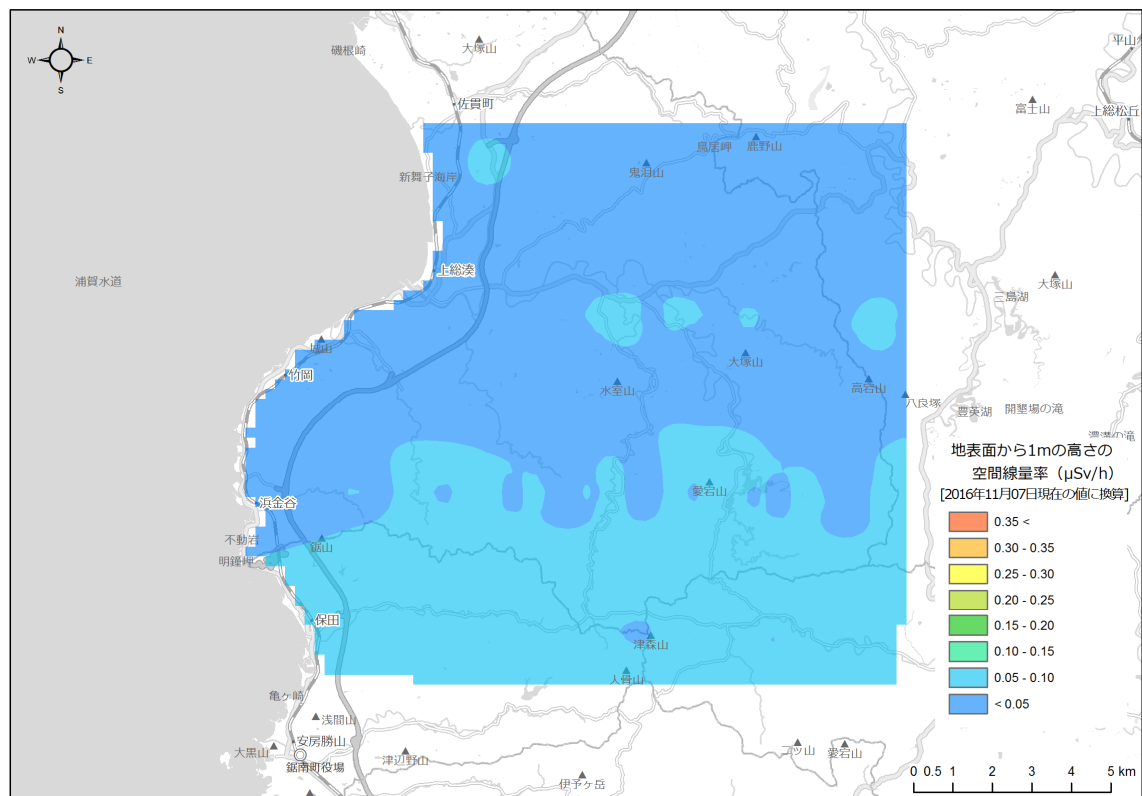


図 A7 線量率マップ（地上測定は実施していないため、2011 年に実施した航空機モニタリングの結果を基に線量率換算係数を推定）