

平成 29 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 30 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 29 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	12
3.1.	データ取得方法	12
3.2.	キャリブレーションフライト方法	17
3.3.	解析のフロー	22
3.4.	空間線量率への換算方法.....	23
3.4.1.	バックグラウンド (自己汚染および宇宙線).....	23
3.4.2.	高度補正係数の算出方法	25
3.4.3.	空間線量率への換算係数の算出方法.....	25
3.4.4.	空間線量率への換算方法	25
3.5.	検出下限値	26
3.6.	不確かさ	26
3.7.	マッピング	27
3.8.	大気中のラドン子孫核種の弁別手法	28
3.8.1.	ラドン子孫核種.....	28
3.8.2.	ラドン弁別手法の理論	30
3.8.3.	GI の高度補正方法.....	32
3.9.	天然放射性核種の濃度換算手法	34
4.	モニタリング結果と考察	37
4.1.	換算パラメータ	37
4.2.	地上値との比較	43
4.3.	空間線量率	47
4.4.	天然の放射性核種濃度.....	54
4.5.	ラドン弁別法の適用結果.....	67
4.5.1.	パラメータ (GI および RI) の決定.....	67
4.5.2.	従来手法との比較.....	69
4.5.3.	ラドン弁別手法の適用	70
4.6.	放射性セシウムの沈着量.....	80
5.	緊急時モニタリング用ラックの製作.....	81
5.1.	目的.....	81
5.2.	ラックの外観	81
5.3.	強度計算	82
6.	衛星通信を利用したリアルタイムデータ通信システムの設計.....	83

6.1. 目的と背景	83
6.2. 災害救援航空機情報共有ネットワーク (D-NET)	83
6.3. システム概要	84
6.4. RSI システムとの接続の検討.....	85
6.5. ハードウェアの設計.....	85
6.6. ソフトウェアの設計.....	87
6.7. 今後の展望	88
7. まとめと緊急時モニタリングに資する知見の整理	89
謝辞.....	90
参考文献.....	91

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.....	18
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.....	24
Table 3-3 ラドン子孫核種の放出する γ 線.....	29
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	36
Table 4-1 本事業で取得した AF データー一覧.....	41
Table 4-2 本事業で取得した CD データー一覧	41
Table 4-3 使用したパラメーターのまとめ	42
Table 4-4 GI および RI の一覧	67
Table 5-1 機器搭載後のラック重量.....	82
Table 5-2 各機器の慣性力.....	82
Table 6-1 サーバのスペック	86

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 泊発電所周辺のモニタリングに使用した機体 (Bell 412 JA6767).....	7
Fig. 2-5 柏崎刈羽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 玄海原子力発電所周辺のモニタリングに使用した機体 (S76 JA6655).....	7
Fig. 2-7 システムの半値幅および Gain の変動 (泊 RSI-3).....	9
Fig. 2-8 システムの半値幅および Gain の変動 (柏崎刈羽 RSI-4)	10
Fig. 2-9 システムの半値幅および Gain の変動 (玄海 RSI-3)	11
Fig. 3-1 予定したフライトの測線 (泊)	13
Fig. 3-2 予定したフライトの測線 (柏崎刈羽)	14
Fig. 3-3 予定したフライトの測線 (玄海)	15
Fig. 3-4 フライトイメージ	16
Fig. 3-5 上空からの測定範囲イメージ	16
Fig. 3-6 テストラインフライトのイメージ	18
Fig. 3-7 テストラインおよびテストポイントの場所 (泊)	19
Fig. 3-8 テストラインおよびテストポイントの場所 (柏崎刈羽)	19
Fig. 3-9 テストラインおよびテストポイントの場所 (玄海)	20
Fig. 3-10 テストポイントフライトのイメージ	21
Fig. 3-11 宇宙線フライトのイメージ	21
Fig. 3-12 Rn 影響フライトおよび BG フライトのイメージ	21
Fig. 3-13 解析のフロー	22
Fig. 3-14 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	24
Fig. 3-15 海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例	24
Fig. 3-16 IDW に入力するパラメータとマップの関係	28
Fig. 3-17 ウラン系列およびトリウム系列	29
Fig. 3-18 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	31
Fig. 3-19 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	32
Fig. 3-20 計算体系のイメージ	33
Fig. 3-21 計算体系のベンチマーク	33
Fig. 3-22 シミュレーションによる測定高度と GI の関係.....	34
Fig. 3-23 天然の放射性核種によるピーク解析例.....	35
Fig. 3-24 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).....	35
Fig. 4-1 対地高度と計数率の関係例.....	37
Fig. 4-2 地上測定データ (泊)	38

Fig. 4-3 地上測定データ（柏崎刈羽）	39
Fig. 4-4 地上測定データ（玄海）	40
Fig. 4-5 地上における測定点（泊）	43
Fig. 4-6 地上における測定点（柏崎刈羽）	44
Fig. 4-7 地上における測定点（玄海）	44
Fig. 4-8 地上における空間線量率測定結果との比較（泊）.....	45
Fig. 4-9 地上における空間線量率測定結果との比較（柏崎刈羽）.....	45
Fig. 4-10 地上における空間線量率測定結果との比較（玄海）.....	45
Fig. 4-11 地上における空間線量率測定結果との比較（全データ）.....	46
Fig. 4-12 地上における空間線量率測定結果との比較（川内）.....	46
Fig. 4-13 地上における空間線量率測定結果との比較（大飯高浜）.....	46
Fig. 4-14 地上における空間線量率測定結果との比較（伊方）.....	47
Fig. 4-15 泊発電所周辺の空間線量率マップ	48
Fig. 4-16 柏崎刈羽原子力発電所周辺の空間線量率マップ	49
Fig. 4-17 玄海原子力発電所周辺の空間線量率マップ	50
Fig. 4-18 泊発電所周辺の空間線量率マップの比較	51
Fig. 4-19 柏崎刈羽原子力発電所周辺の空間線量率マップの比較.....	52
Fig. 4-20 玄海原子力発電所周辺の空間線量率マップの比較.....	53
Fig. 4-21 泊発電所周辺の K-40 濃度マップ	55
Fig. 4-22 柏崎刈羽原子力発電所周辺の K-40 濃度マップ	56
Fig. 4-23 玄海原子力発電所周辺の K-40 濃度マップ.....	57
Fig. 4-24 泊発電所周辺の U 系列濃度マップ	58
Fig. 4-25 柏崎刈羽原子力発電所周辺の U 系列濃度マップ	59
Fig. 4-26 玄海原子力発電所周辺の U 系列濃度マップ	60
Fig. 4-27 泊発電所周辺の Th 系列濃度マップ	61
Fig. 4-28 柏崎刈羽原子力発電所周辺の Th 系列濃度マップ	62
Fig. 4-29 玄海原子力発電所周辺の Th 系列濃度マップ.....	63
Fig. 4-30 泊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.....	64
Fig. 4-31 柏崎刈羽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	65
Fig. 4-32 玄海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	66
Fig. 4-33 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.....	68
Fig. 4-34 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.....	68
Fig. 4-35 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..	69
Fig. 4-36 ラドン影響弁別手法適用後の泊発電所周辺における空間線量率マップ	71
Fig. 4-37 ラドン影響弁別手法適用後の柏崎刈羽原子力発電所周辺における空間線量率マップ ...	72
Fig. 4-38 ラドン影響弁別手法適用後の玄海原子力発電所周辺における空間線量率マップ	73
Fig. 4-39 ラドン影響弁別手法適用後の泊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	74
Fig. 4-40 ラドン影響弁別手法適用後の柏崎刈羽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	75
Fig. 4-41 ラドン影響弁別手法適用後の玄海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	76
Fig. 4-42 ラドン影響弁別手法適用後の発電所周辺空間線量率マップ	77
Fig. 4-43 泊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	79
Fig. 4-44 柏崎刈羽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	79
Fig. 4-45 玄海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	79
Fig. 4-46 発電所周辺の放射性セシウム沈着量マップ	80
Fig. 5-1 製作したラックの写真	81
Fig. 6-1 規制庁所有衛星データ通信端末	83
Fig. 6-2 リアルタイムデータ通信システムイメージ	84
Fig. 6-3 動態管理システムに表示されるデータのイメージ	85
Fig. 6-4 ネットワーク接続図	86
Fig. 6-5 ソフトウェアの構成イメージ	87
Fig. 6-6 リアルタイムデータ通信システムと D-NET との接続イメージ	88
Fig. 7-1 各地区の空域	90

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7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。

平成 29 年度 (2017 年度) には、北海道にある北海道電力泊発電所、新潟県にある東京電力柏崎刈羽原子力発電所および佐賀県にある九州電力玄海原子力発電所周辺 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	

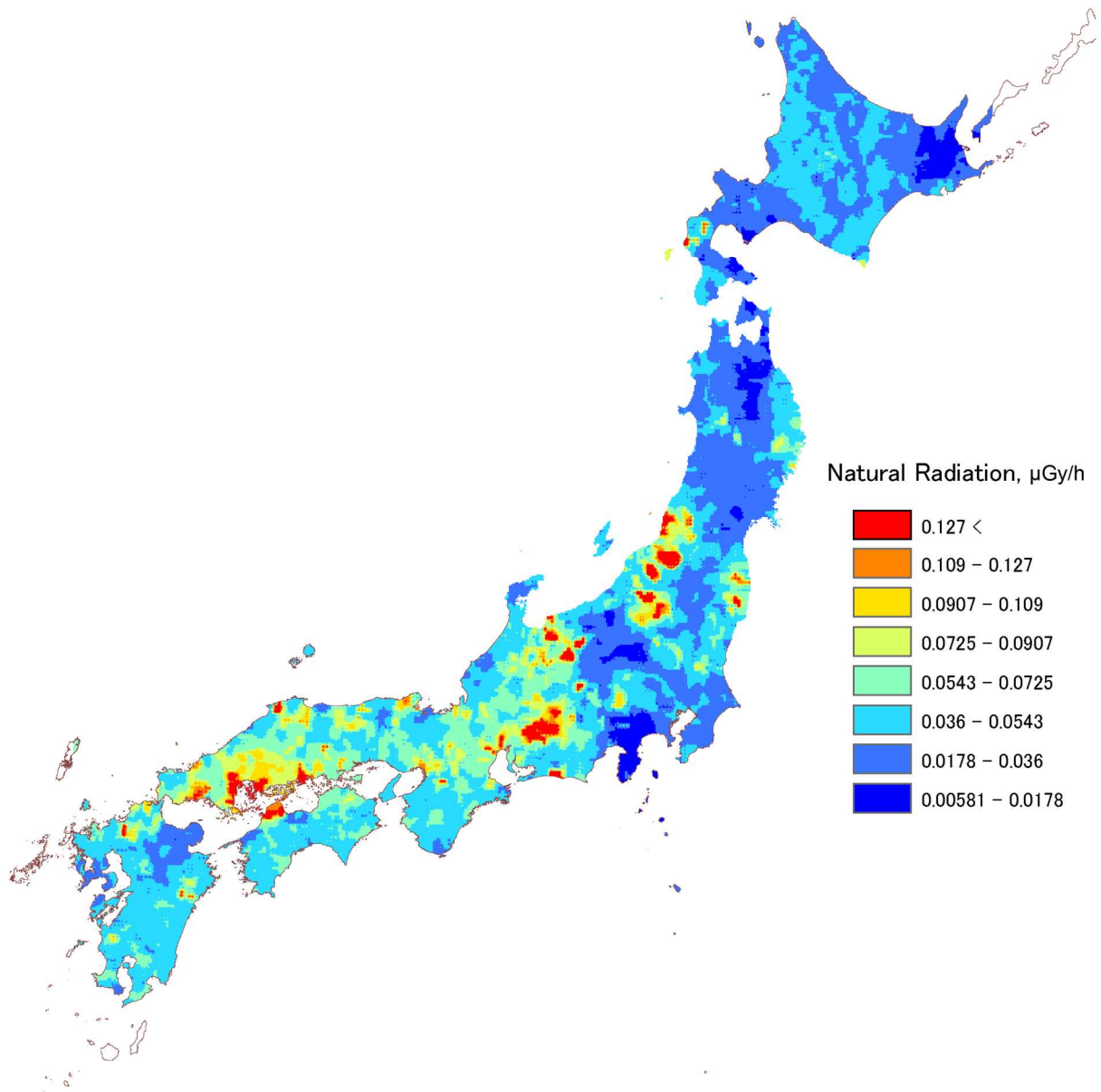


Fig. 1-1 地殻中に存在する元素の濃度分布から空間線量率を計算で求めた結果
(地質学会ホームページより¹⁰⁾)

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、RSI-4 と表記する。

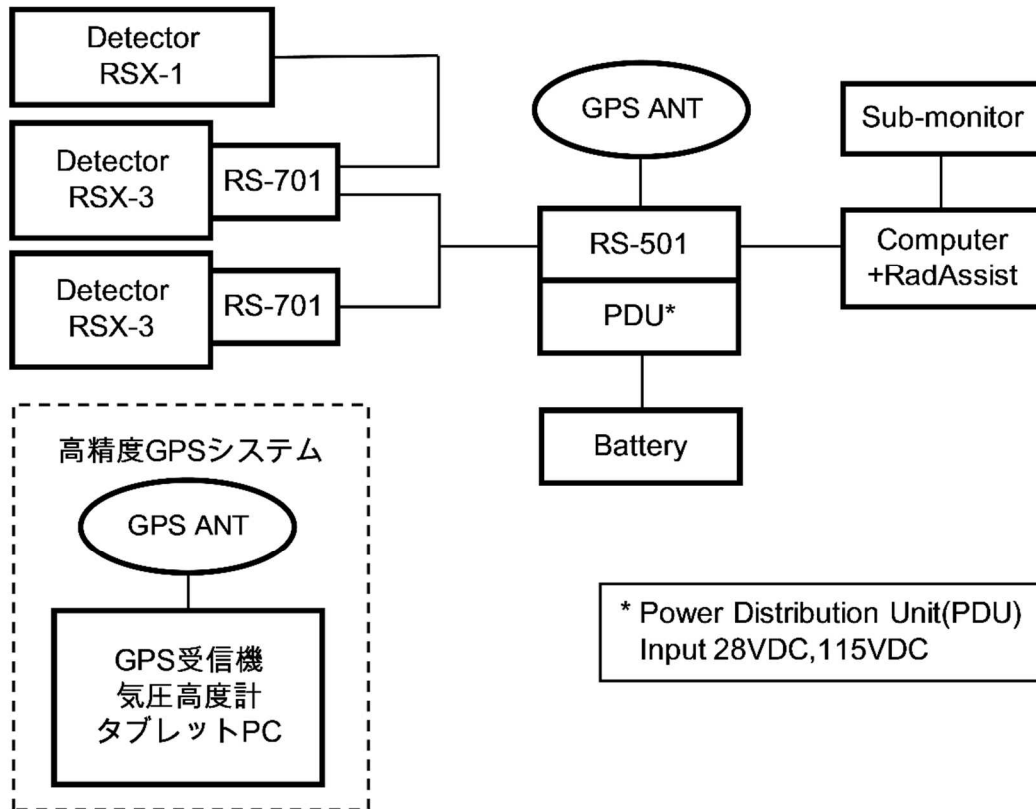


Fig. 2-1 RSI システムのブロック図

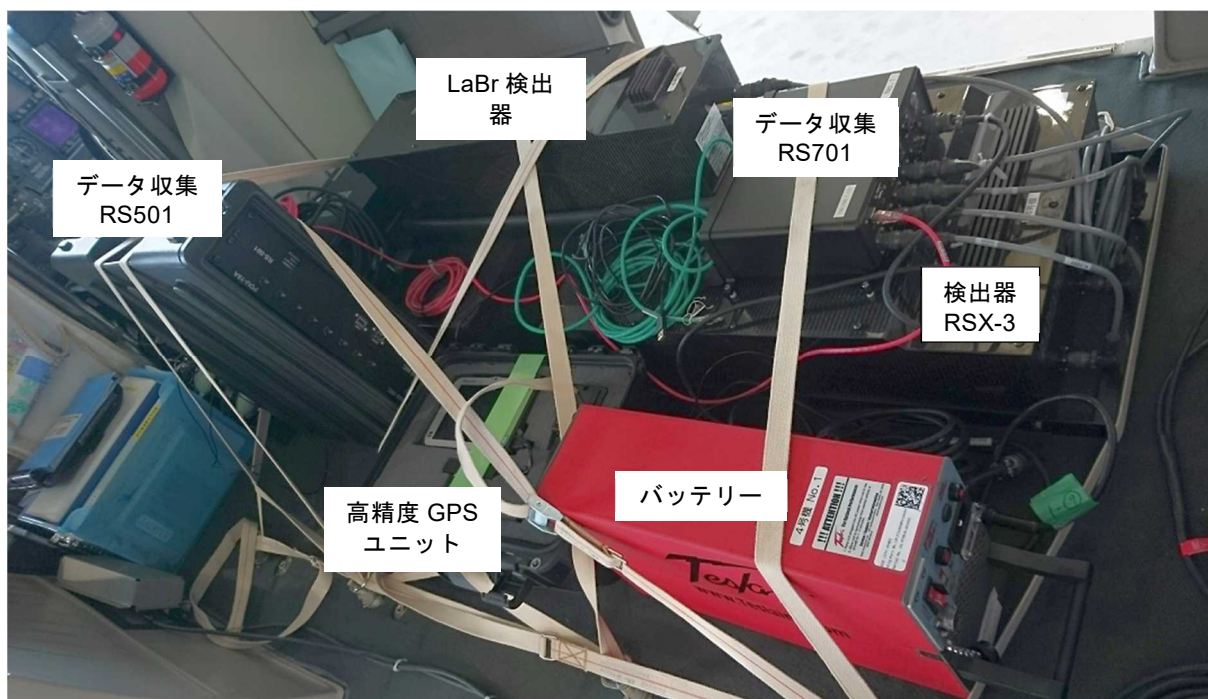


Fig. 2-2 RSI システムの写真

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、Bell430及びS76の3機種を使用した。Fig. 2-4、Fig. 2-5、Fig 2-6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 泊発電所周辺のモニタリングに使用した機体 (Bell 412 JA6767)



Fig. 2-5 柏崎刈羽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)



Fig. 2-6 玄海原子力発電所周辺のモニタリングに使用した機体 (S76 JA6655)

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. 2-7、Fig. 2-8、Fig 2-9 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。

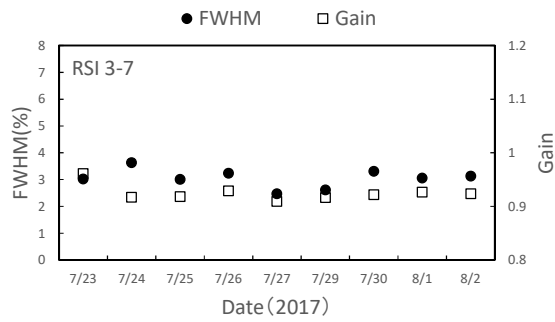
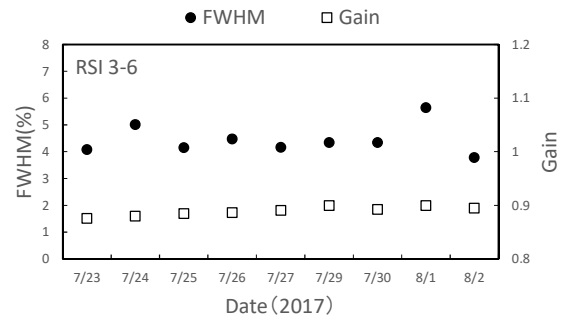
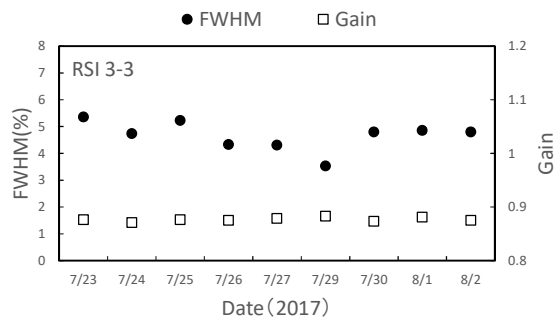
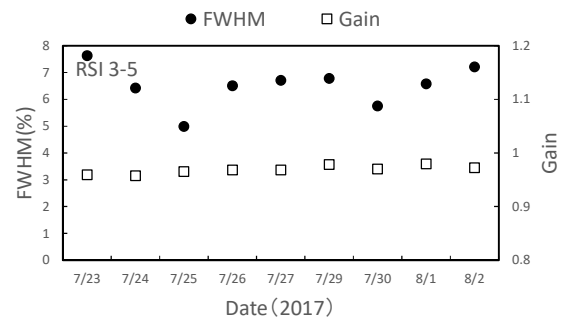
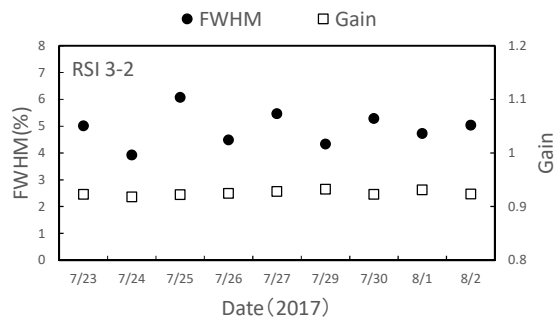
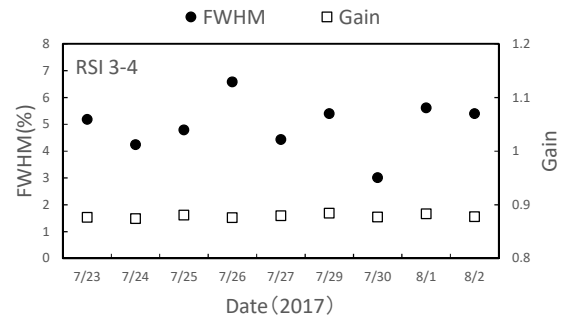
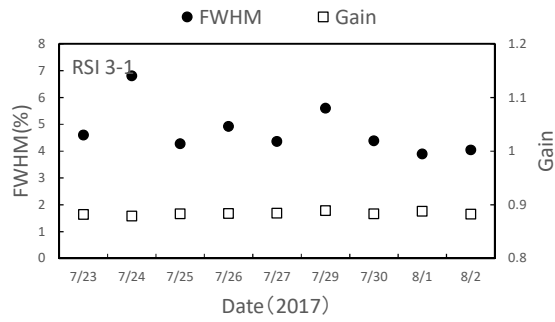


Fig. 2-7 システムの半値幅および Gain の変動 (泊 RSI-3)

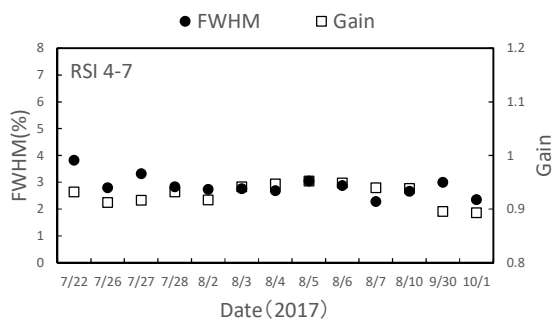
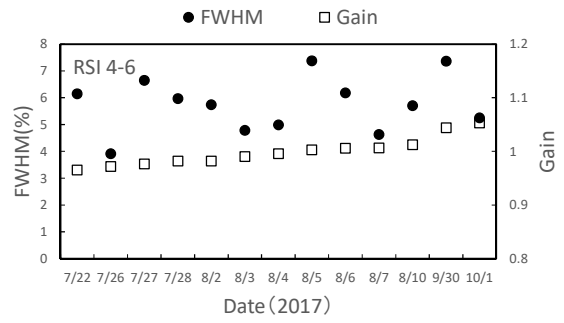
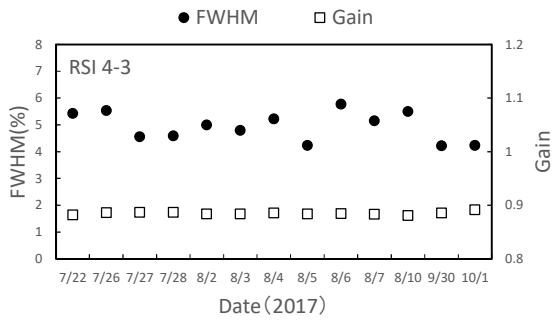
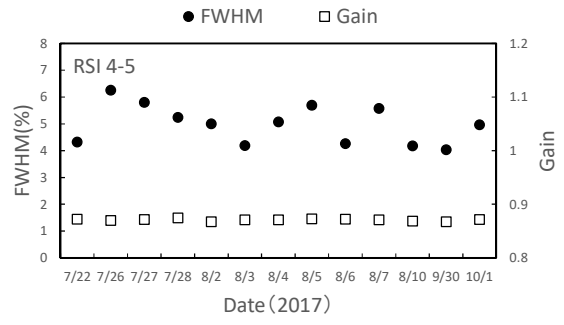
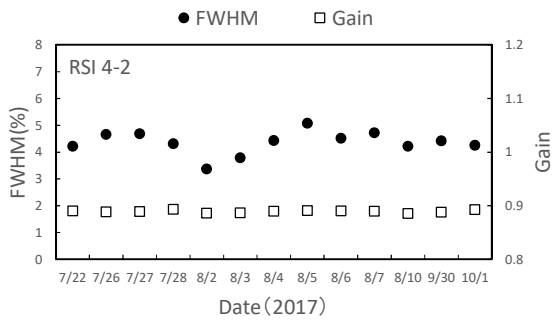
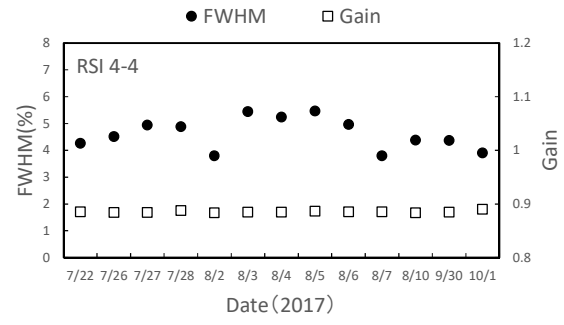
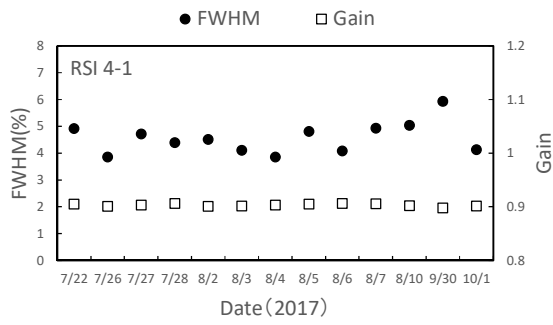


Fig. 2-8 システムの半値幅および Gain の変動 (柏崎刈羽 RSI-4)

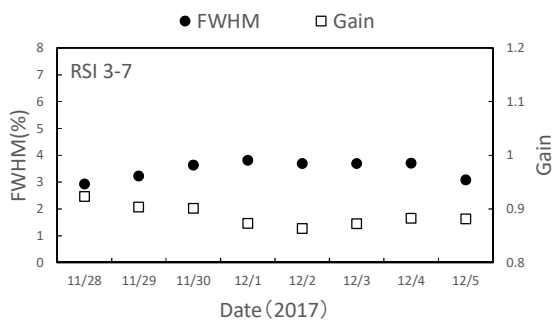
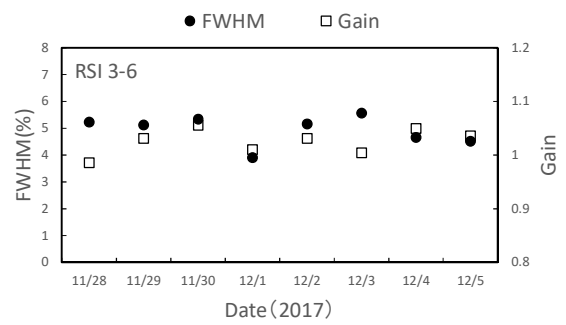
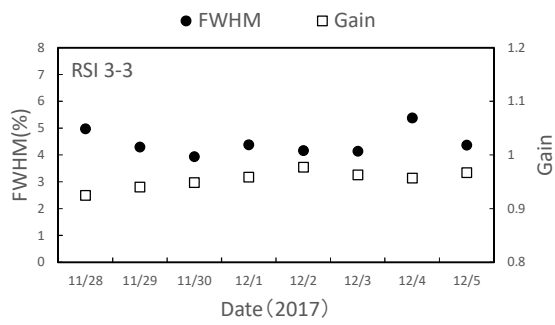
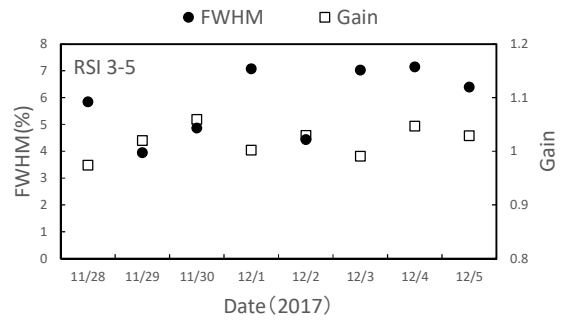
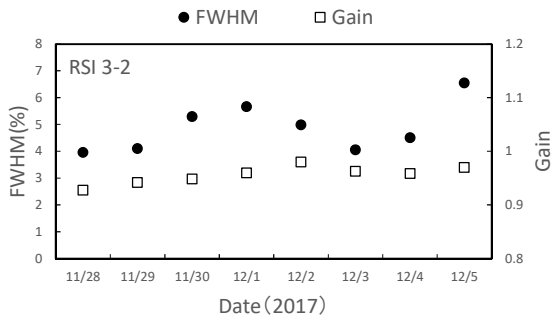
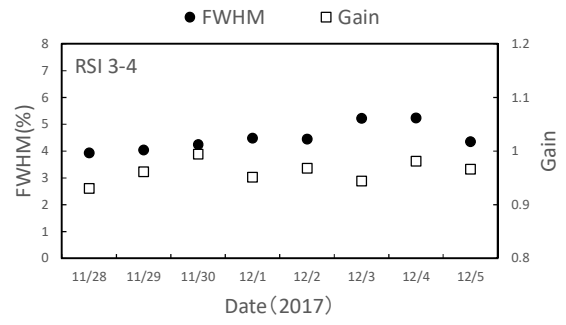
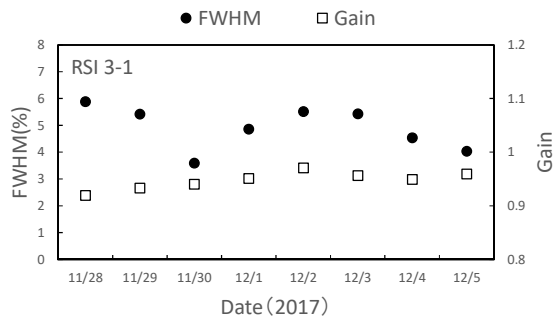


Fig. 2-9 システムの半値幅および Gain の変動 (玄海 RSI-3)

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（泊）、Fig. 3-2（柏崎刈羽）、Fig 3-3（玄海）にフライトの予定測線について示す。Fig. 3-4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. 3-5 に示す。
- フライトに要した期間
 - 泊発電所：平成 29 年 7 月 24 日～8 月 2 日（のべ 14 フライト）
 - 柏崎刈羽原子力発電所：平成 29 年 7 月 26 日～8 月 10 日
平成 29 年 9 月 30 日～10 月 1 日（のべ 21 フライト）
 - 玄海原子力発電所：平成 29 年 11 月 28 日～12 月 5 日（のべ 11 フライト）



Fig. 3-1 予定したフライトの測線(泊)
 (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)

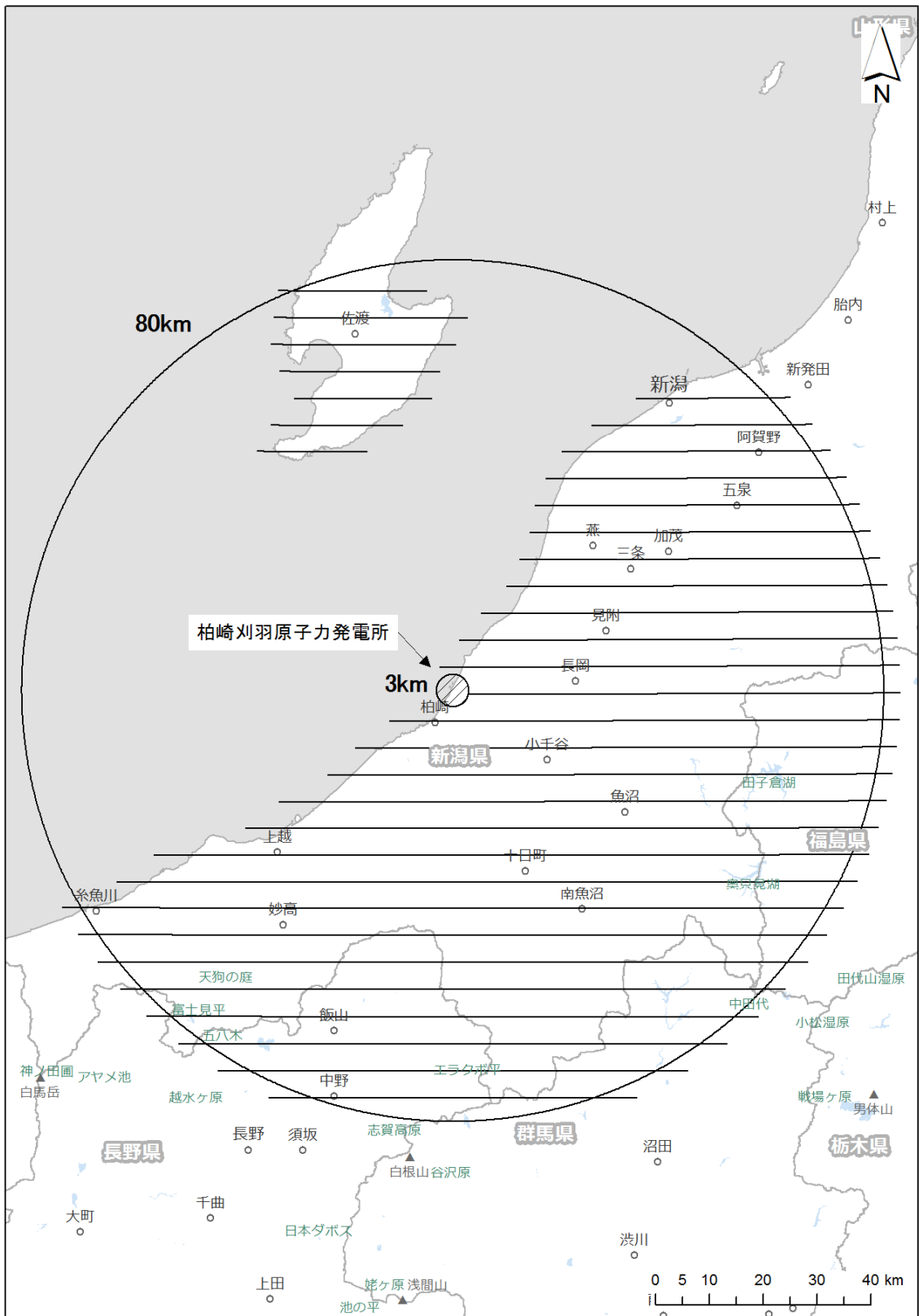


Fig. 3-2 予定したフライトの測線（柏崎刈羽）

(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)

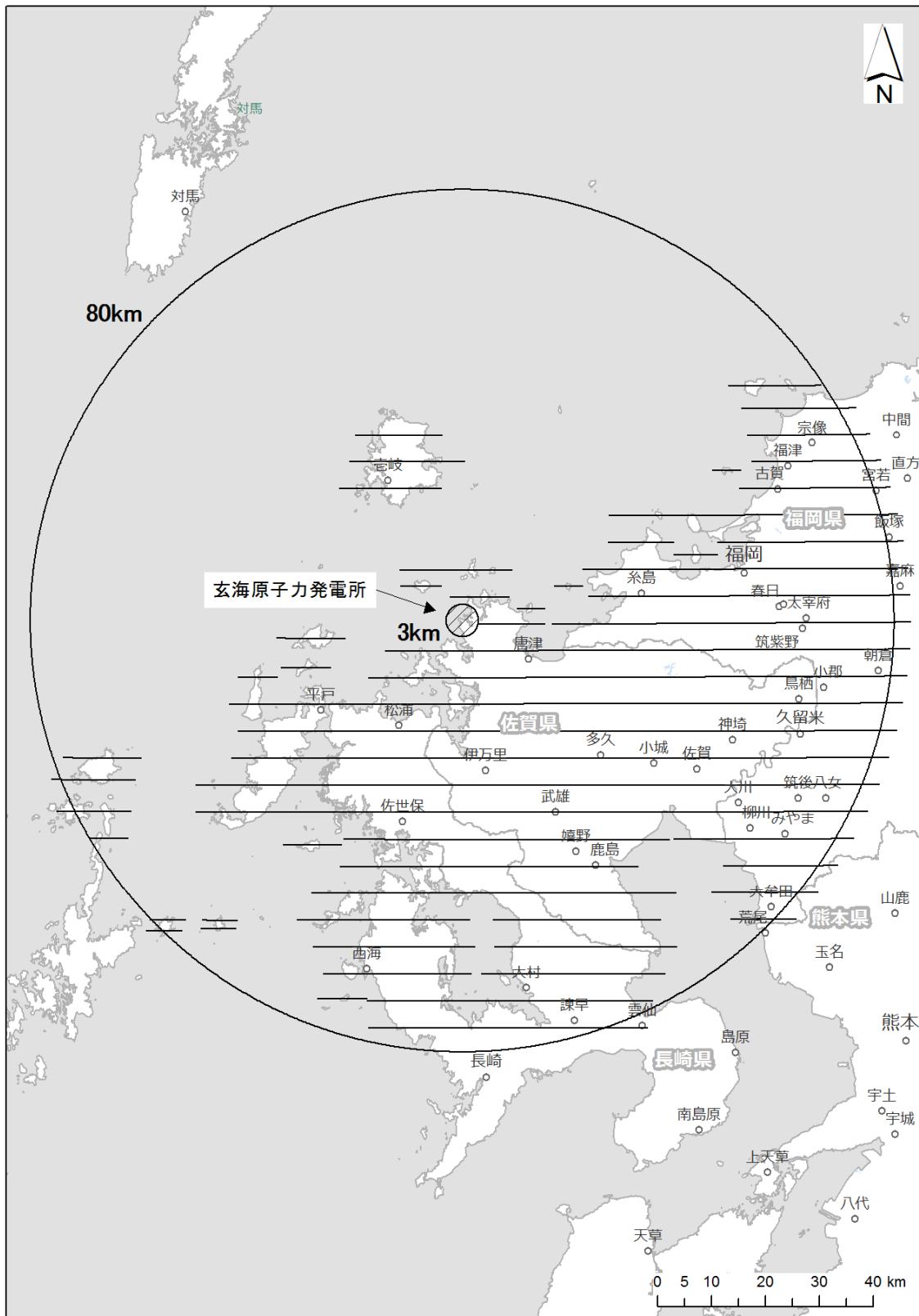


Fig. 3-3 予定したフライトの測線(玄海)

(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)

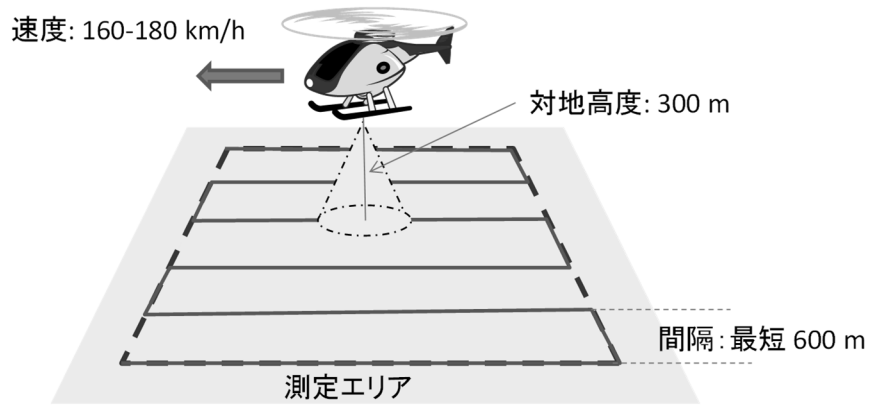


Fig. 3-4 フライトイメージ

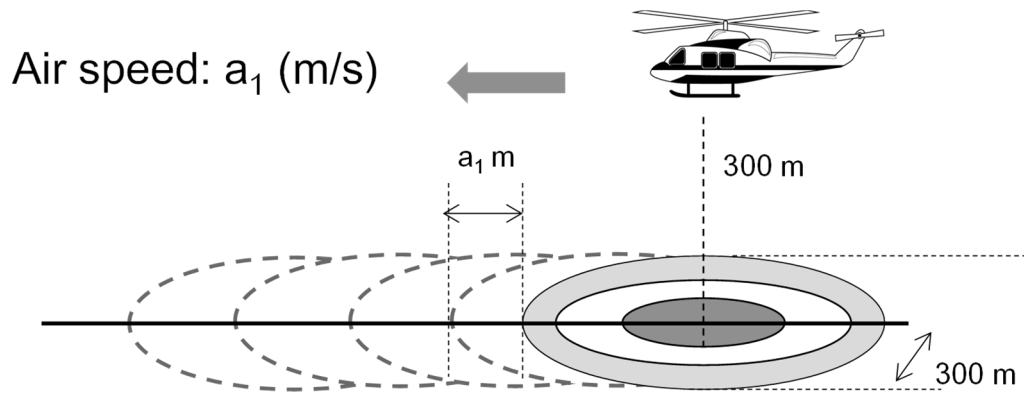


Fig. 3-5 上空からの測定範囲イメージ

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. 3-6 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. 3-7 (泊)、Fig. 3-8 (柏崎刈羽)、Fig 3-9 (玄海) 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、 $cps/[\mu Sv/h]$: 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. 3-7 (泊)、Fig. 3-8 (柏崎刈羽)、Fig 3-9 (玄海) 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. 3-10 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. 3-11 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. 3-12 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

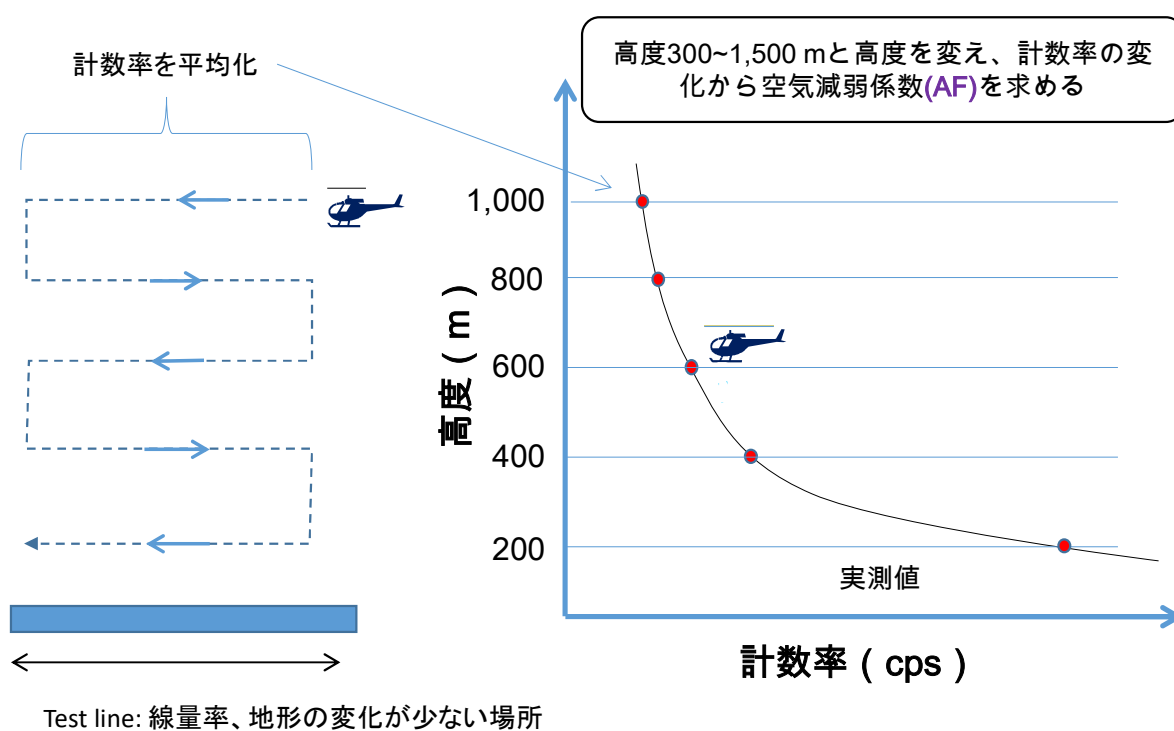


Fig. 3-6 テストラインフライトのイメージ

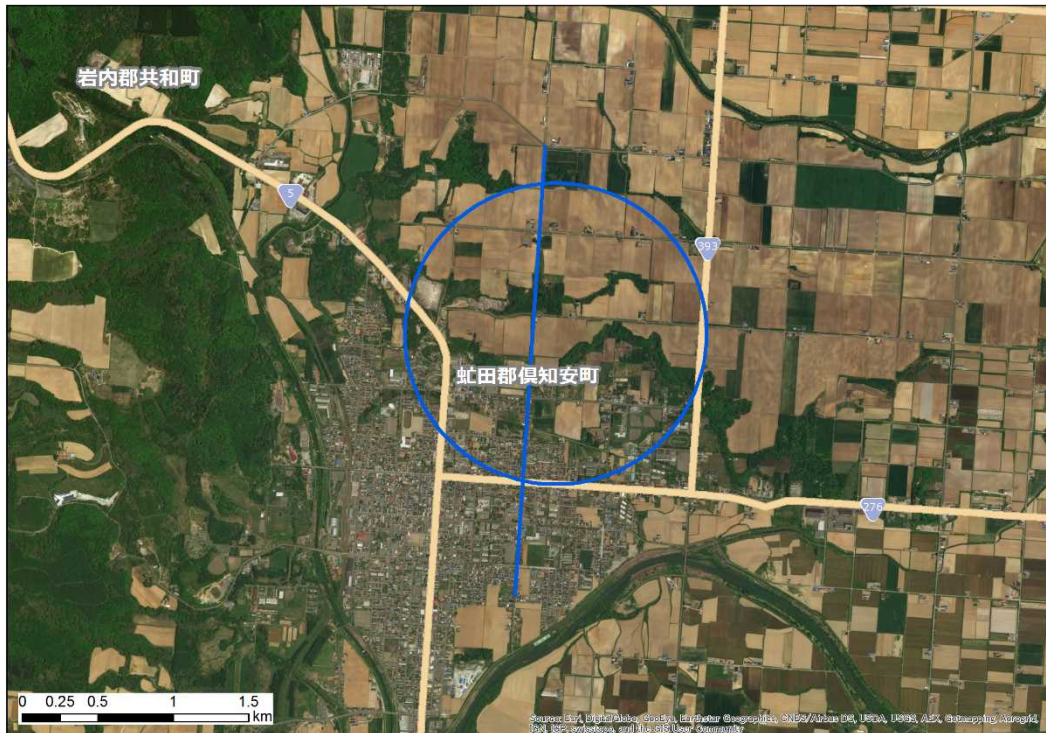


Fig. 3-7 テストラインおよびテストポイントの場所(泊)
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

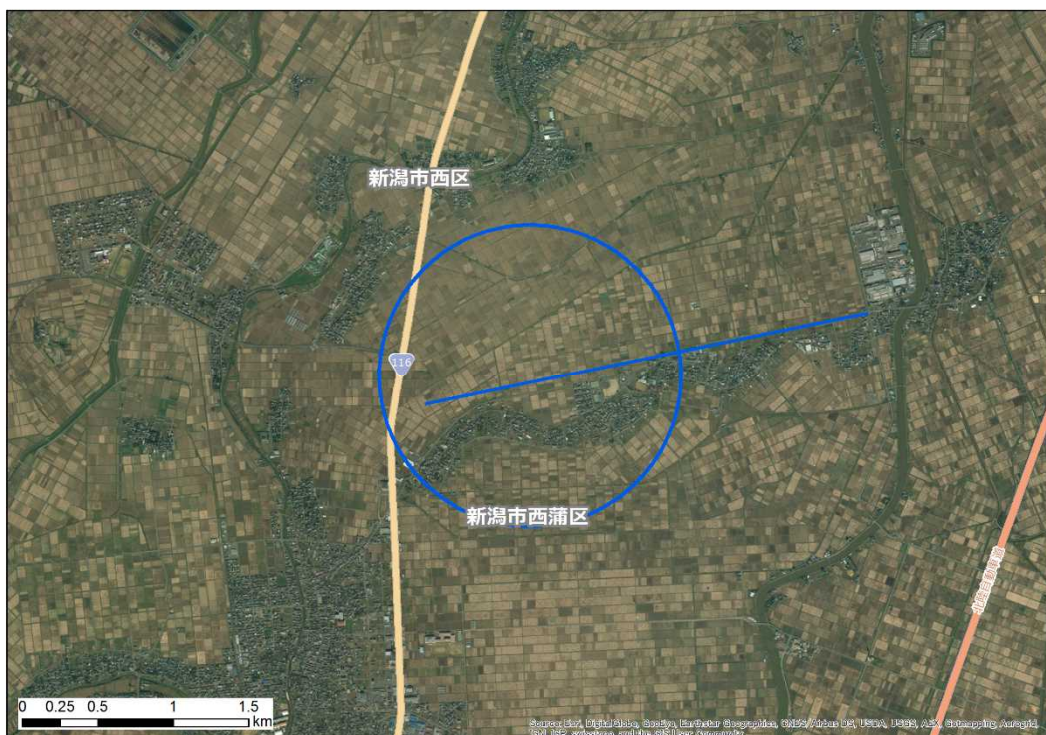
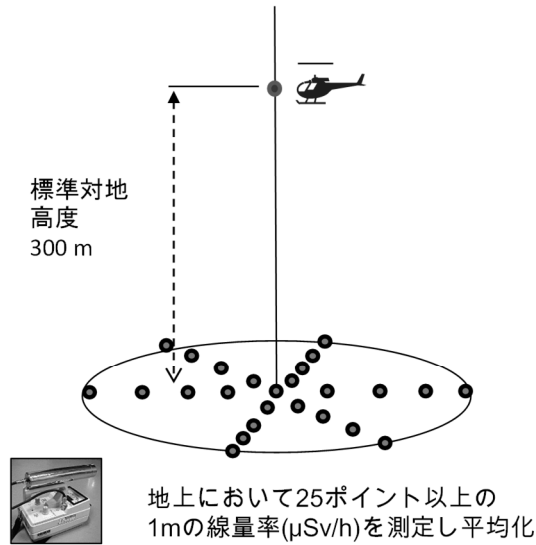


Fig. 3-8 テストラインおよびテストポイントの場所(柏崎刈羽)
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)



Fig. 3-9 テストラインおよびテストポイントの場所(玄海)
(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)



地上測定($\mu\text{Sv/h}$)と基準対地高度(300 m)の計数率(cps)の比較から線量率換算係数CDを求める

Fig. 3-10 テストポイントフライトのイメージ

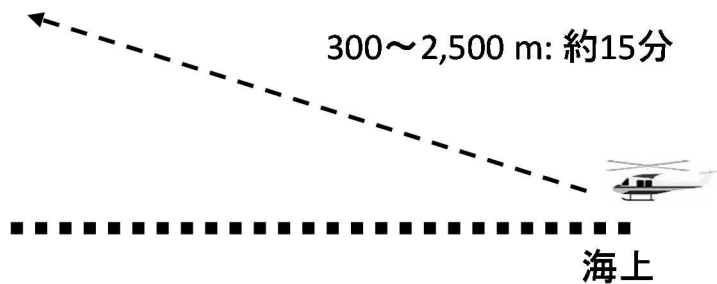


Fig. 3-11 宇宙線フライトのイメージ

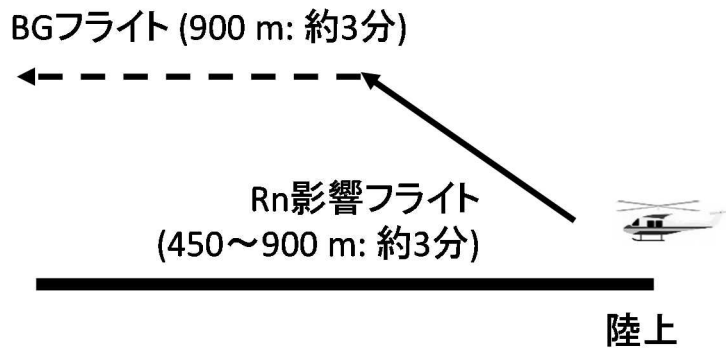


Fig. 3-12 Rn 影響フライトおよび BG フライトのイメージ

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はある。これらを考慮した解析のフローを Fig. 3-13 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。

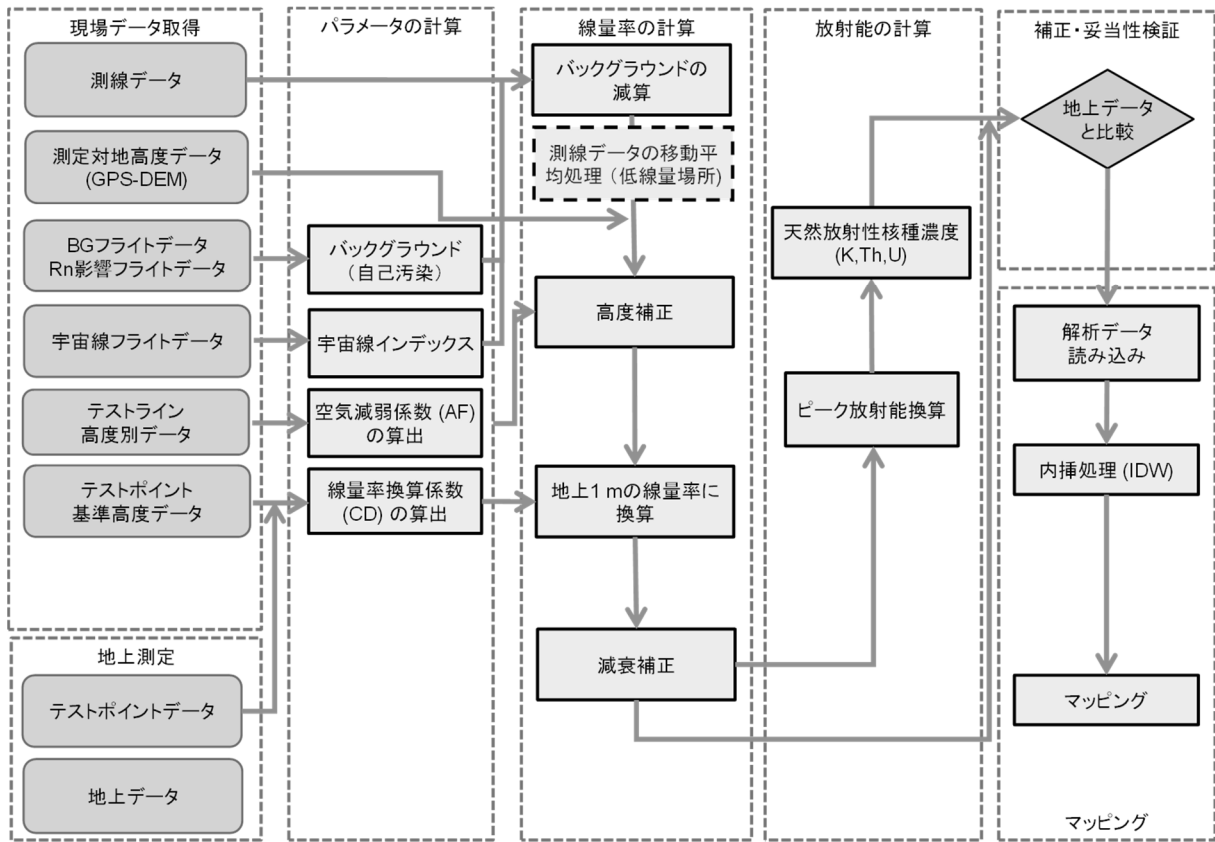


Fig. 3-13 解析のフロー

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. 3-14 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. 3-15 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。

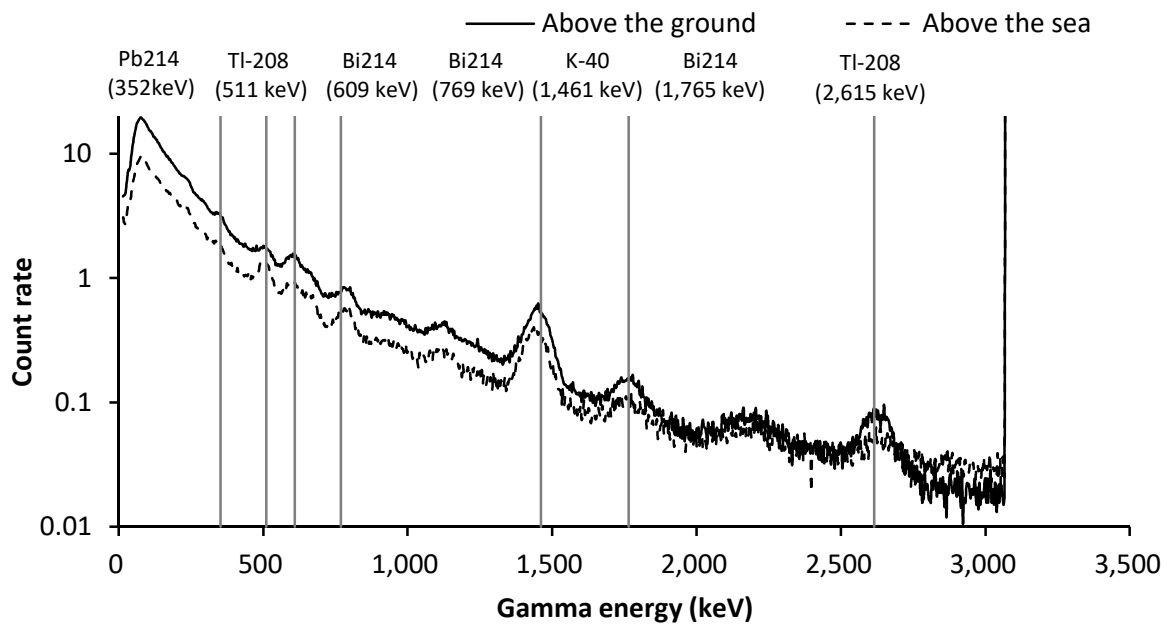


Fig. 3-14 RSI システムにおける地上で取得した γ 線スペクトルと海上でのスペクトル例

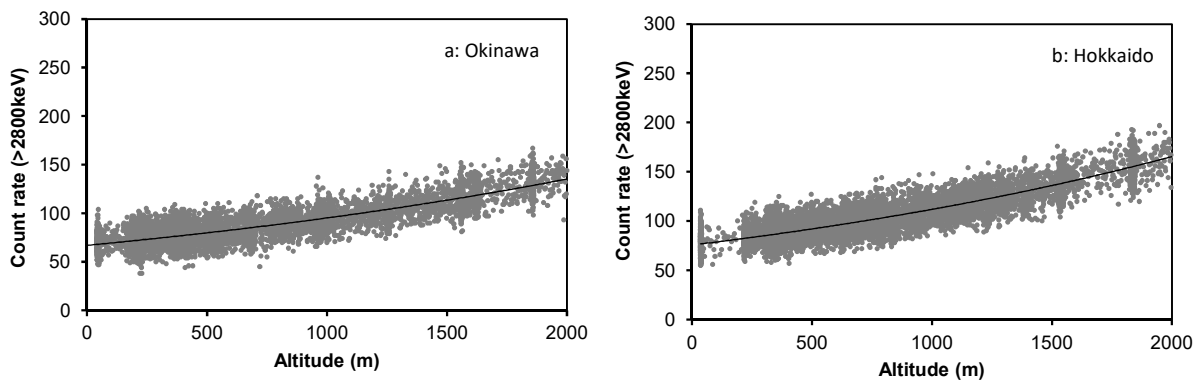


Fig. 3-15 海拔高度と2,800 keV 以上の計数率の関係の例

(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	
Hokkaido	2017	RSIシステム3	Bell 412 (JA6767)	NNK	506	2.61
Niigata		RSIシステム4	Bell 430 (JA05TV)	NNK	454	3.00
Saga		RSIシステム3	S 76 (JA6655)	AAC	562	3.32
Fukushima	2017	RSIシステム1	Bell 430 (JA05TV)	NNK	510	2.93
		RSIシステム2	Bell 412 (JA9616)	AAC	500	2.97
			Bell 412 (JA6767)	NNK	484	2.97
			Bell 412 (JA6928)	AAC	472	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 [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。

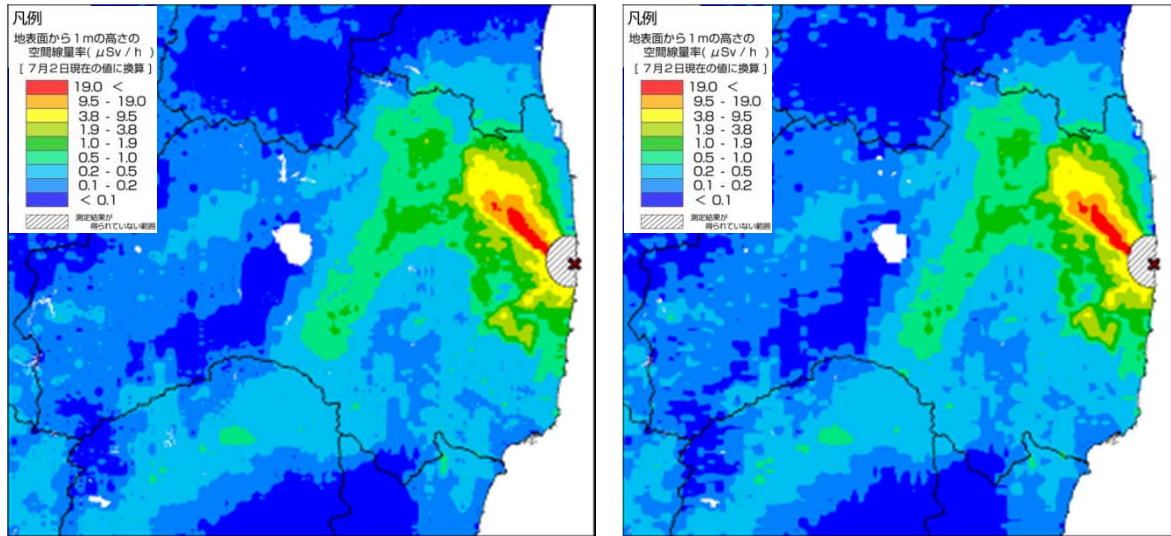
- ・ 測定高度の誤差：現在使用している GPS (Global Positioning System) には、衛星の位置等の状況により最大 30 m 程度の誤差がある。海拔高度の測定は GPS で実施しており、その誤差による不確かさが存在する。本誤差については、検証にまで至っておらず、今後の課題である。

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大きくなり、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. 3-16 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. 3-16 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. 3-16 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. 3-17 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/m^3 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 年度に実施した発電所周辺のデータを解析し、大気中のラドン子孫核種の影響について考察した。今年度は引き続き各原子力発電所周辺のデータについて適用した。以下、大気中のラドン子孫核種の影響の除去手法を「ラ

「ドゥン弁別手法」と表記する。

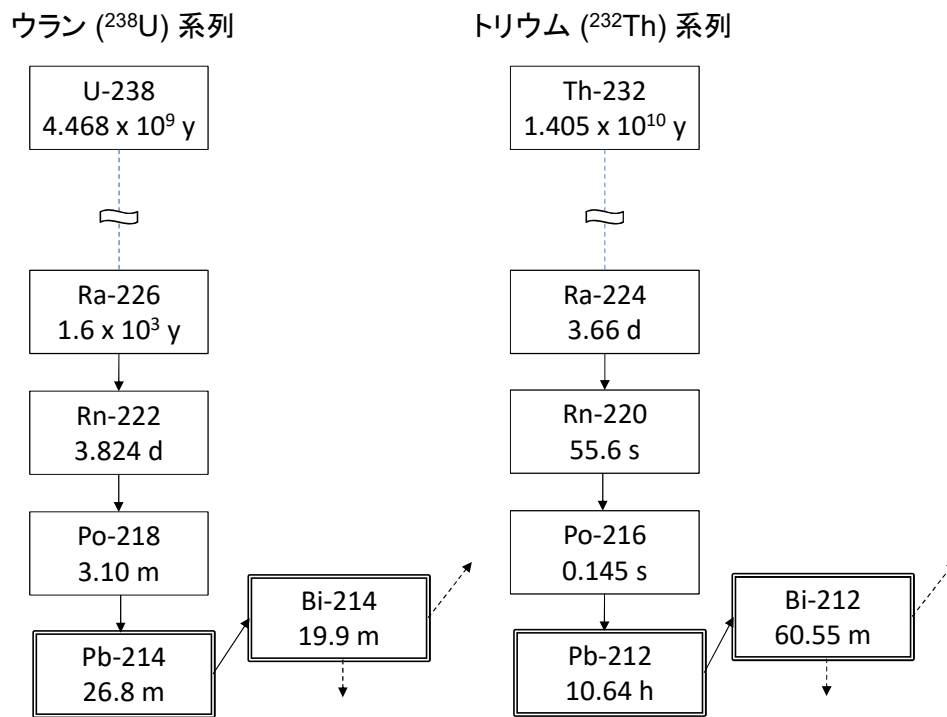


Fig. 3-17 ウラン系列およびトリウム系列

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. 3-18 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. 3-19 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、ヘリコプター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。

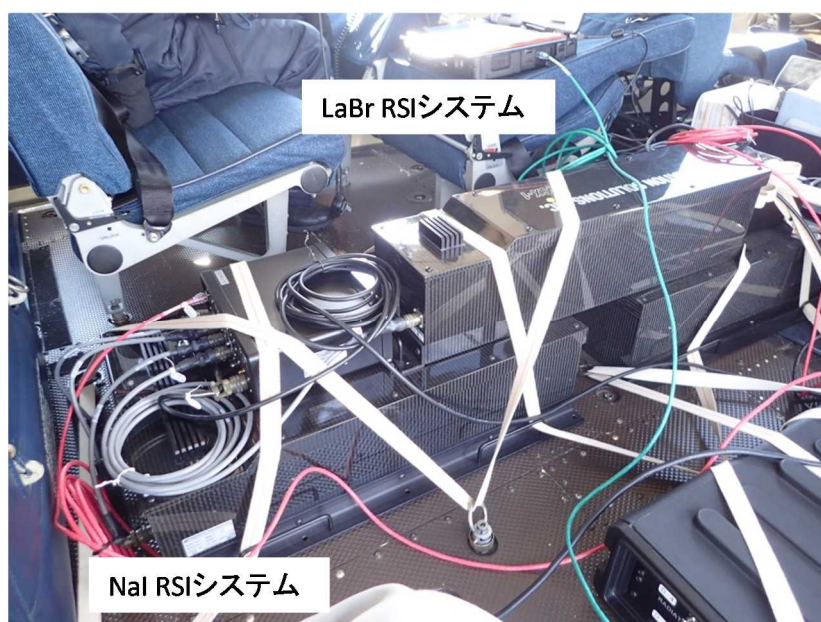


Fig. 3-18 ラドン用航空機モニタリング機器とヘリコプターへの搭載状況

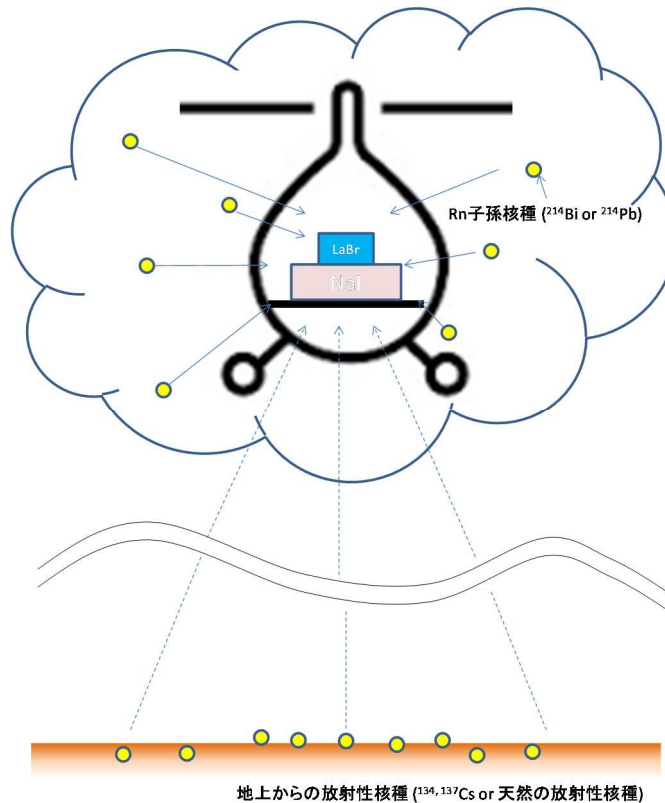


Fig. 3-19 大気中のラドン子孫核種と地上からの放射線のイメージ

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. 3-20 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. 3-21 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 km×1 km×1.3 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/m 2 、 ^{137}Cs : 200 kBq/m 2

検出器と線源の距離（測定高度）と GI の計算結果を Fig. 3-22 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。

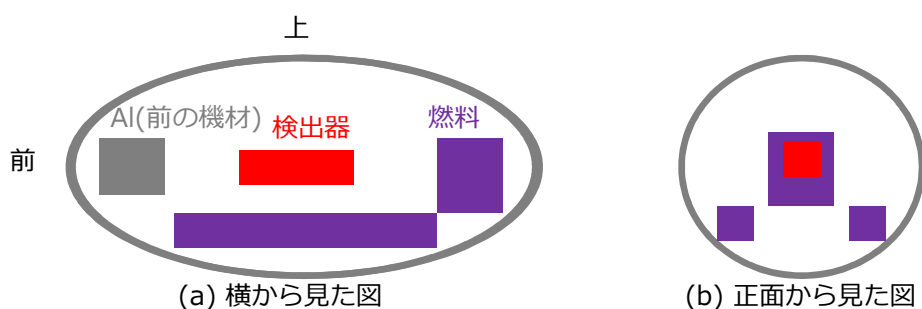


Fig. 3-20 計算体系のイメージ

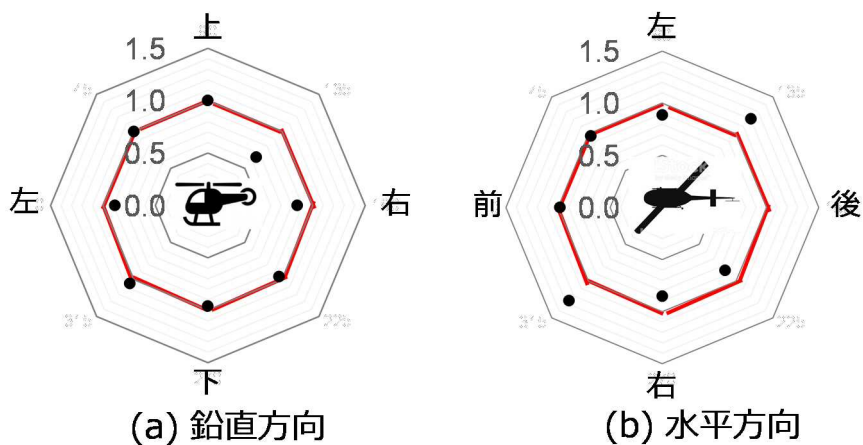


Fig. 3-21 計算体系のベンチマーク
(計算結果と実測結果の比)

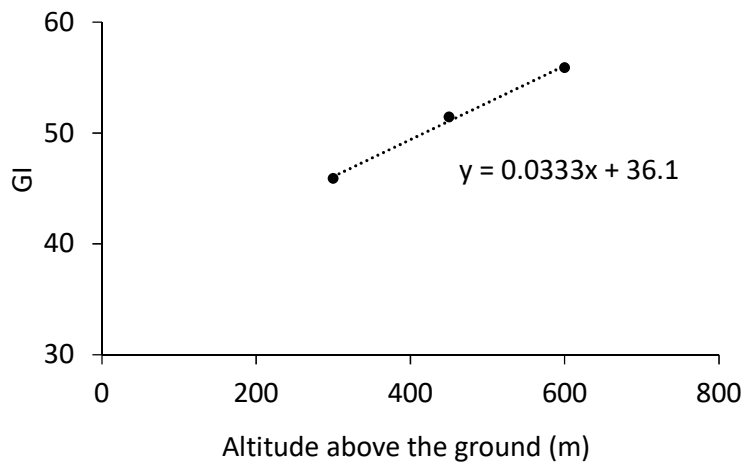


Fig. 3-22 シミュレーションによる測定高度と GI の関係

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. 3-23 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. 3-23 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. 3-7 (泊)、Fig. 3-8 (柏崎刈羽)、Fig. 3-9 (玄海) 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. 3-24 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。

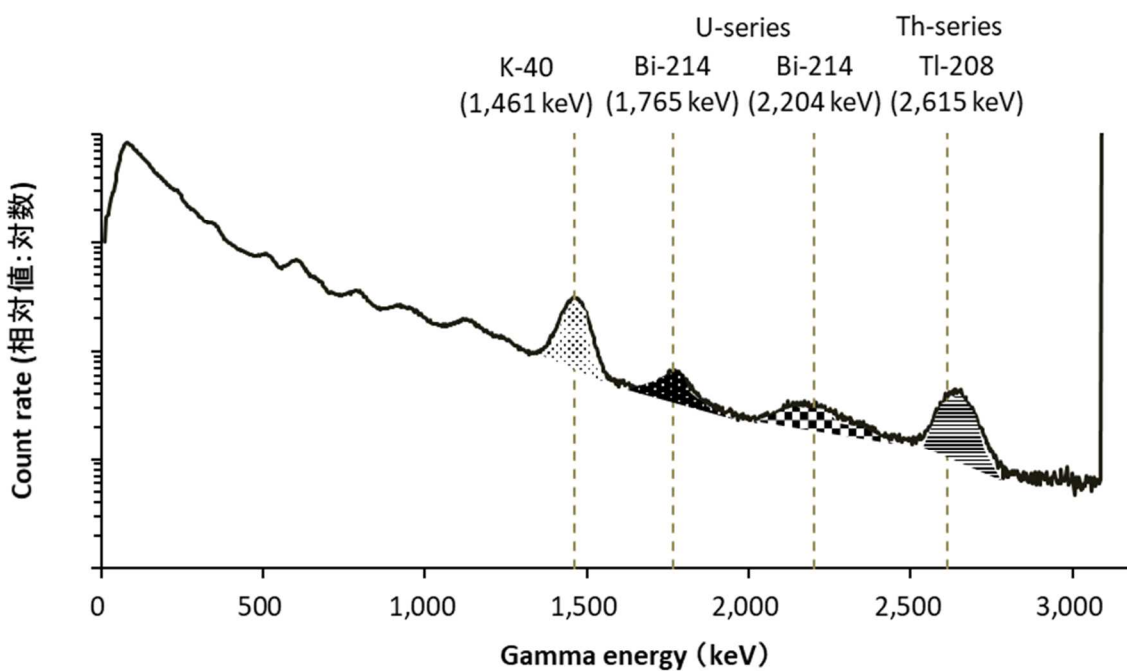


Fig. 3-23 天然の放射性核種によるピーク解析例

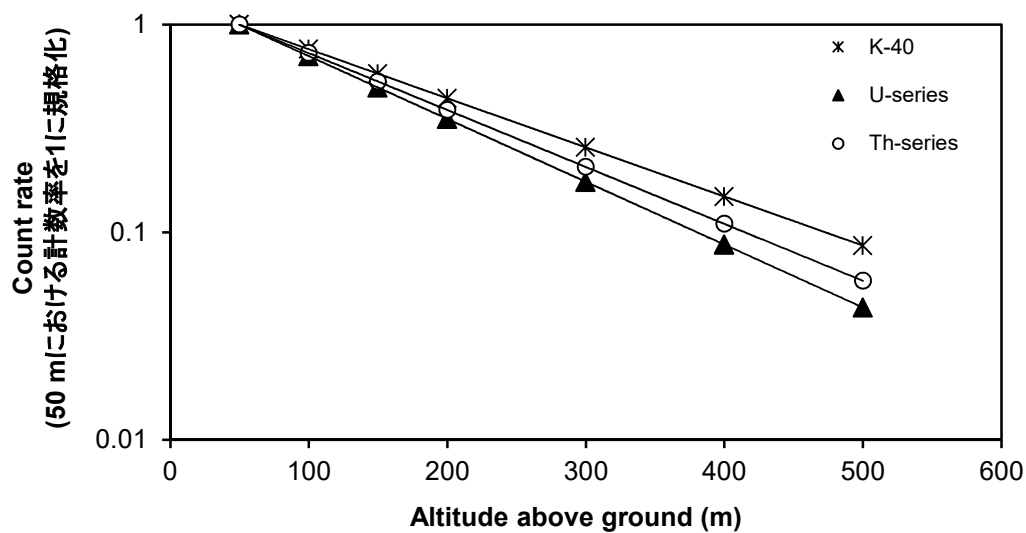


Fig. 3-24 天然の放射性核種別の高度と計数率の関係 (EGS5 によるシミュレーション)

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一覧

		K-40	U-series	Th-series
Tomari	CC (cps/Bq/kg)	0.052	0.32	0.18
	AF (m-1)*	-0.0054	-0.0070	-0.0063
Kashiwazakikariwa	CC (cps/Bq/kg)	0.034	0.35	0.18
	AF (m-1)*	-0.0054	-0.0070	-0.0063
Genkai	CC (cps/Bq/kg)	0.046	0.38	0.17
	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。

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、Fig 4-4 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。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。

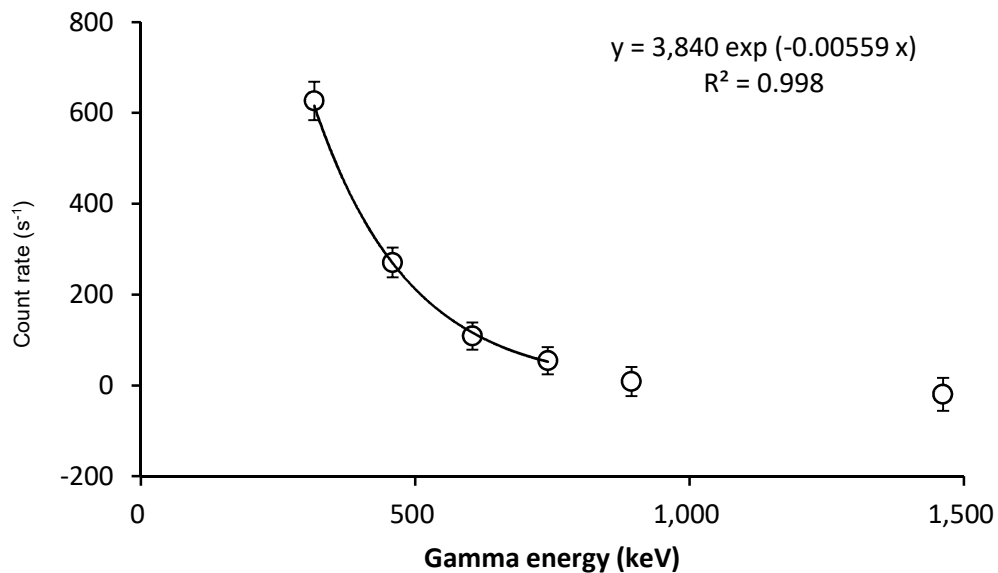


Fig. 4-1 対地高度と計数率の関係例
(誤差は 1 秒ごとのデータの標準偏差, Bell 412 JA6928, 2016/2/2 実施, Test line)

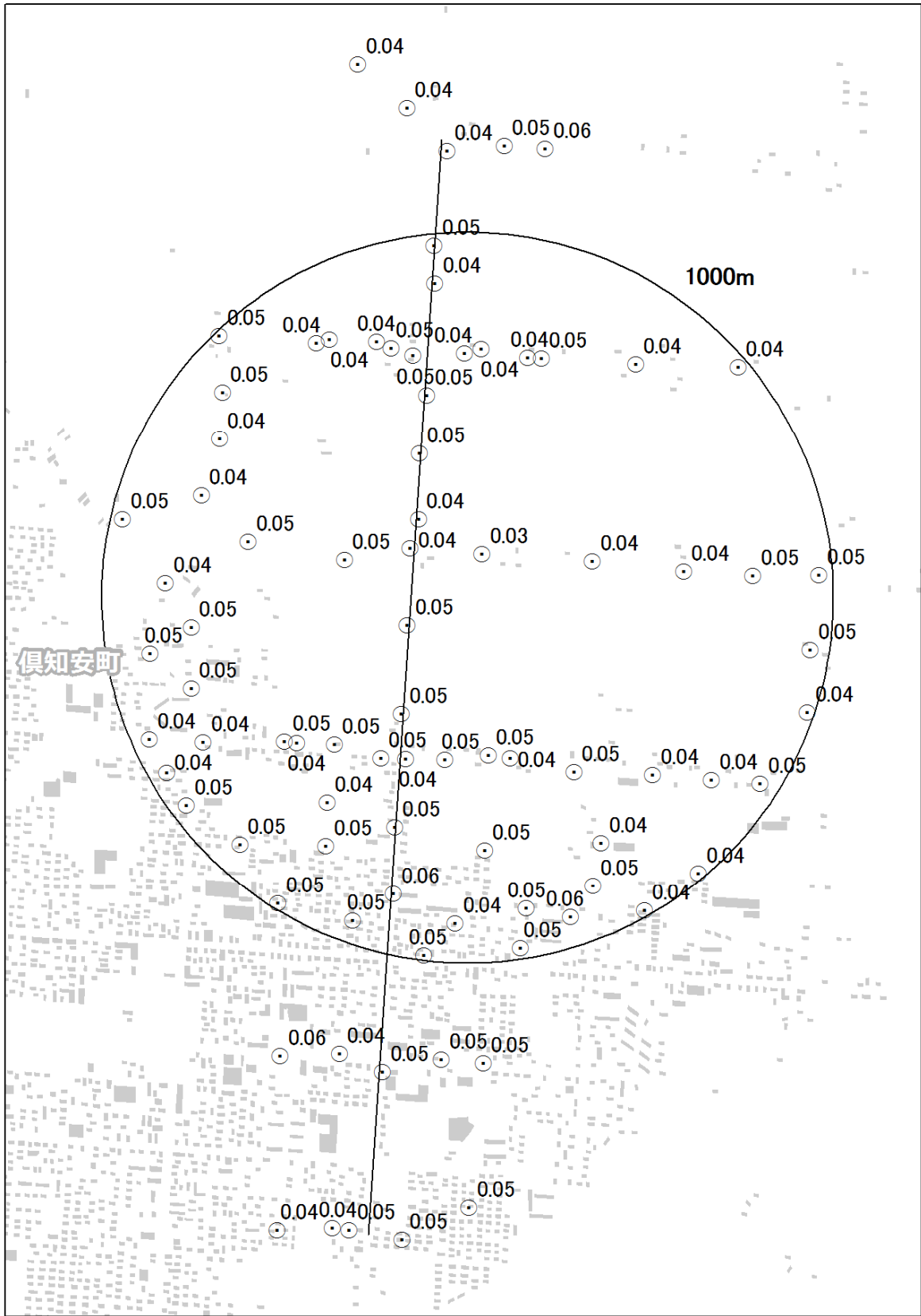


Fig. 4-2 地上測定データ(泊)

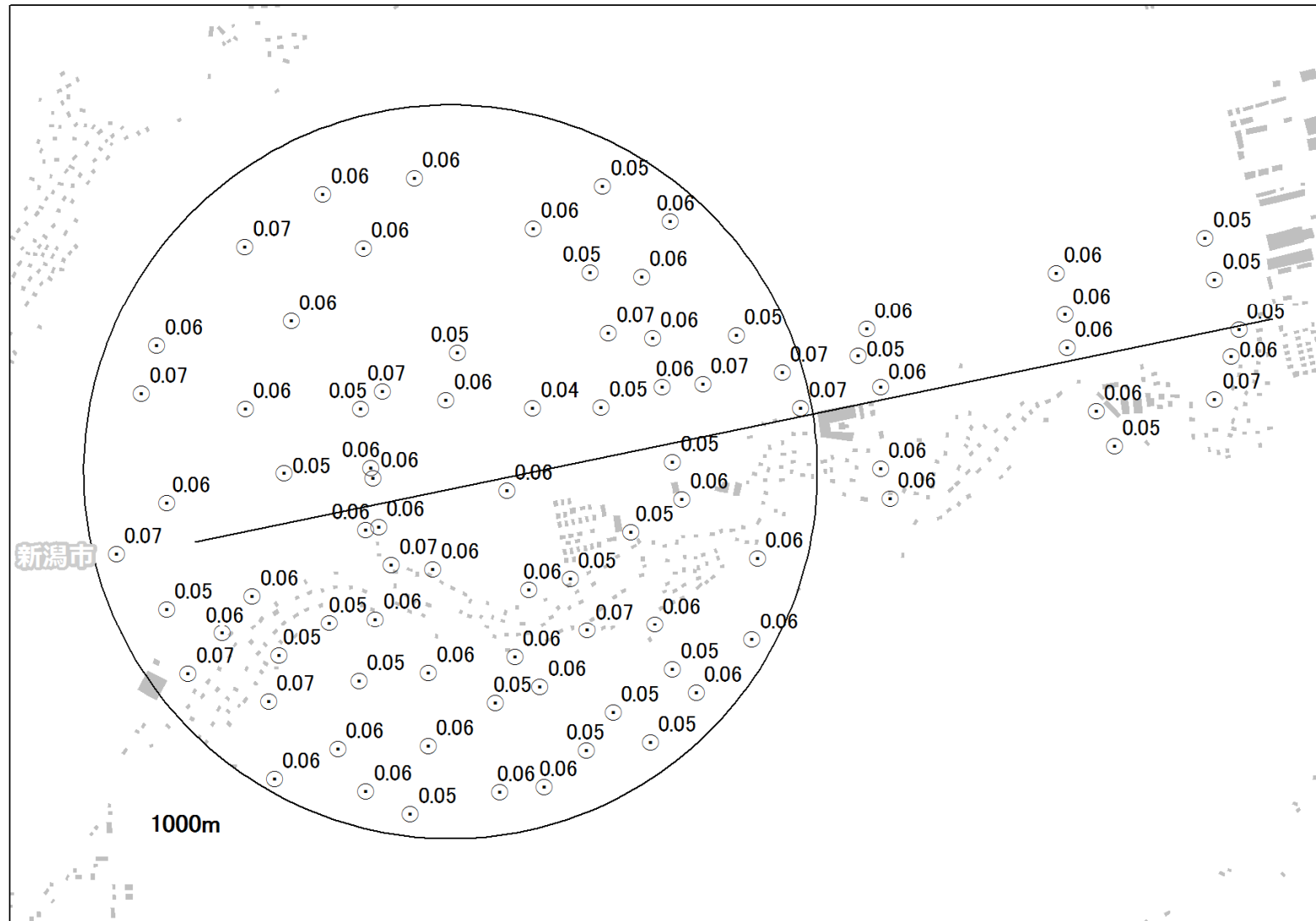


Fig. 4-3 地上測定データ(柏崎刈羽)

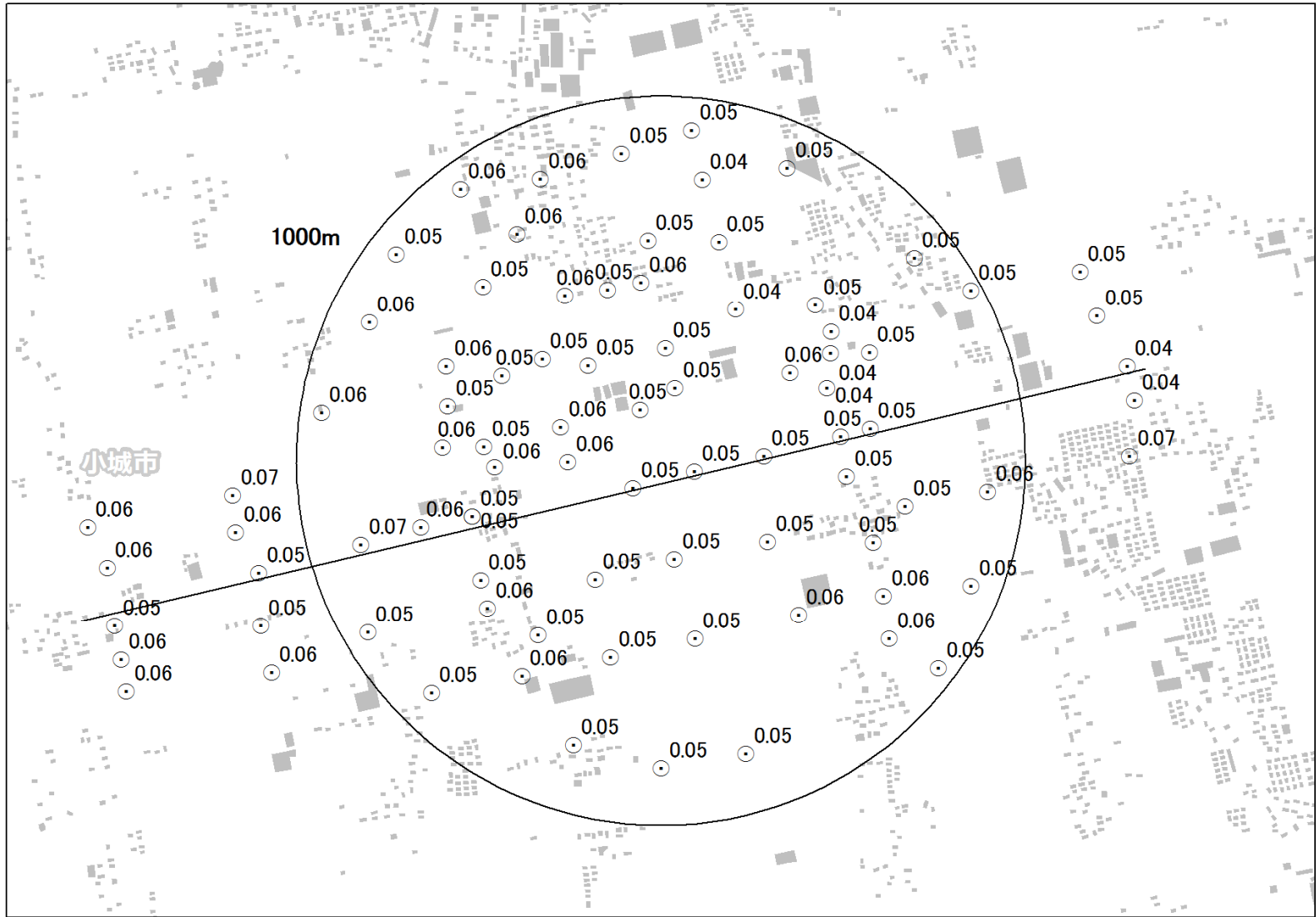


Fig. 4-4 地上測定データ(玄海)

Table 4-1 本事業で取得した AF データ一覧

Monitoring No	System (Device Serial)	Helicopter	Body No	Operarion campany	Location	Date	AF	
							$\mu(m^{-1})$	R ²
Tomari	5090	Bell412	JA6767	AAC	Kutchan_TestLine	2017/07/24	-0.00615	0.99818
Tomari	5090	Bell412	JA6767	AAC	Kutchan_TestLine	2017/07/29	-0.00902	0.99994
Average							-0.00759	
KashiwazakiKariwa	5089	Bell430	JA05TV	NNK	Niigata_TestLine	2017/07/26	-0.00902	0.96986
KashiwazakiKariwa	5089	Bell430	JA05TV	NNK	Niigata_TestLine	2017/08/05	-0.00338	0.99984
KashiwazakiKariwa	5089	Bell430	JA05TV	NNK	Niigata_TestLine	2017/10/01	-0.00743	0.99965
Average							-0.0066	
Genkai	5090	S76	JA6655	AAC	Ogi_TestLine	2017/11/28	-0.00625	0.99407
Genkai	5090	S76	JA6655	AAC	Ogi_TestLine	2017/12/04	-0.00558	0.99959
Average							-0.0059	

* R²: 近似した指数関数曲線の決定係数

Table 4-2 本事業で取得した CD データ一覧

Body No	Helicopter	Operarion campany	location	Date	Ground data (Nal survey)			AMS data			AGL (m)		CD (cps[μ Sv/h] ¹)	
					Survey (μ Sv/h)	Stdev (2 σ)	Stdev (%)	AMS data (cps)	Stdev (2 σ)	Stdev (%)	AGL (m)	Stdev (2 σ : %)		
JA6767	Bell412	NNK	Kutchan_TestPoint	2017/7/24	0.05	0.010	22	1109	88	8	312	12	4	9,100
JA6767	Bell412	NNK	Kutchan_TestPoint	2017/7/29	0.05	0.010	22	1058	122	11	370	53	14	11,200
Average													10,150	
JA05TV	Bell430	NNK	Niigata_TestPoint	2017/7/26	0.06	0.017	29	1257	100	8	303	13	4	8,900
JA05TV	Bell430	NNK	Niigata_TestPoint	2017/8/5	0.06	0.016	28	1776	181	10	277	25	9	16,500
JA05TV	Bell430	NNK	Niigata_TestPoint	2017/10/1	0.06	0.016	28	1701	172	10	279	26	9	13,800
Average													13,067	
JA6655	S76	AAC	Ogi_TestPoint	2017/11/28	0.05	0.008	16	1529	206	13	308	7	2	13,600
JA6655	S76	AAC	Ogi_TestPoint	2017/12/4	0.05	0.009	18	1514	97	6	298	12	4	10,700
Average													12,150	

* 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
Tomari	AF (m^{-1})	-0.0076	2				
	CD (cps/ μ Sv/h)	11200	2				
KashiwazakiKariwa	AF (m^{-1})			-0.0066	3		
	CD (cps/ μ Sv/h)			16500	3		
Genkai	AF (m^{-1})					-0.0059	2
	CD (cps/ μ Sv/h)					10700	2
Fukushima	AF (m^{-1})	-0.0072	\pm 0.00047	21	-0.0072	\pm 0.00040	35
	CD (cps/ μ Sv/h)	12600	\pm 5200	29	12800	\pm 2800	65

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. 4-5、Fig. 4-6、Fig. 4-7 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. 4-8、Fig. 4-9、Fig. 4-10、Fig. 4-11 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、昨年度までに実施している川内、大飯・高浜、伊方原子力発電所周辺で取得した地上値との比較を Fig. 4-12、Fig. 4-13、Fig. 4-14 に示す。地上値を基本とした相対偏差のヒストグラムは 0 をピークとしてガウス分布に近い形態を示していることから、航空機モニタリングの結果は地上値をよく再現していることが分かる。

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 周辺からの影響：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。

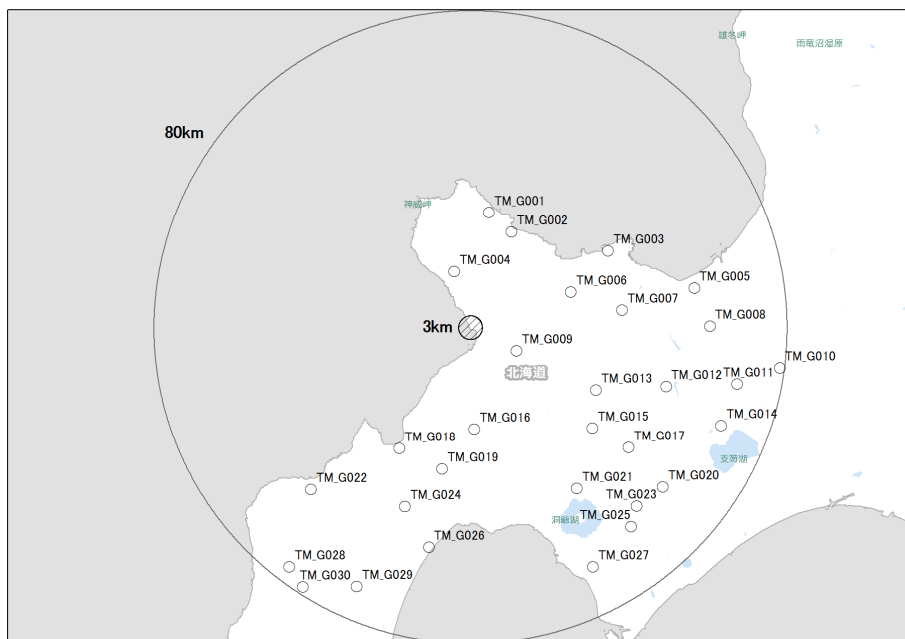


Fig. 4-5 地上における測定点(泊)

(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)

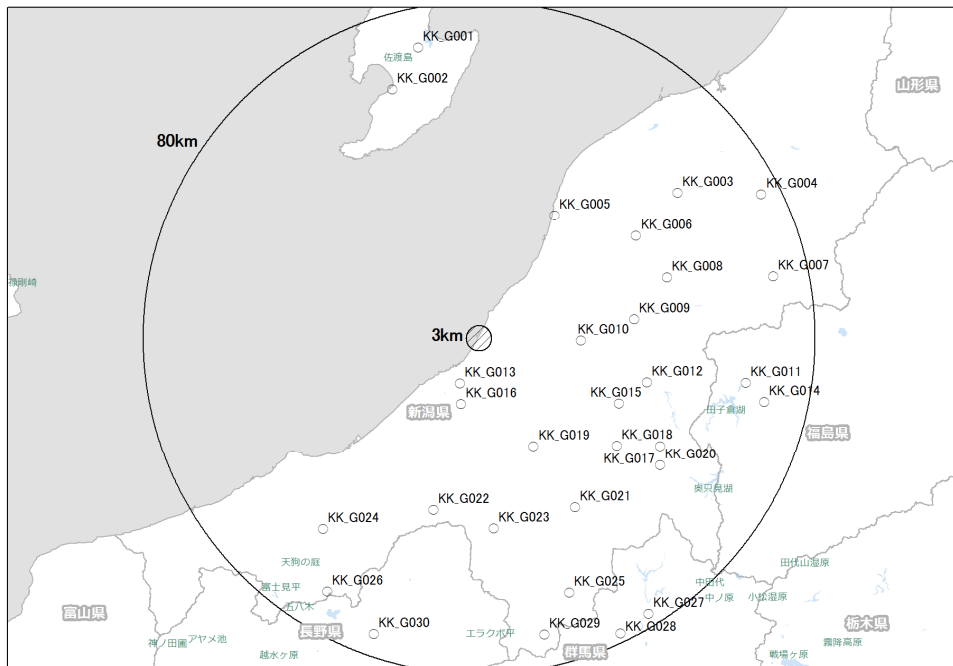


Fig. 4-6 地上における測定点(柏崎刈羽)

(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. 4-7 地上における測定点(玄海)

(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)

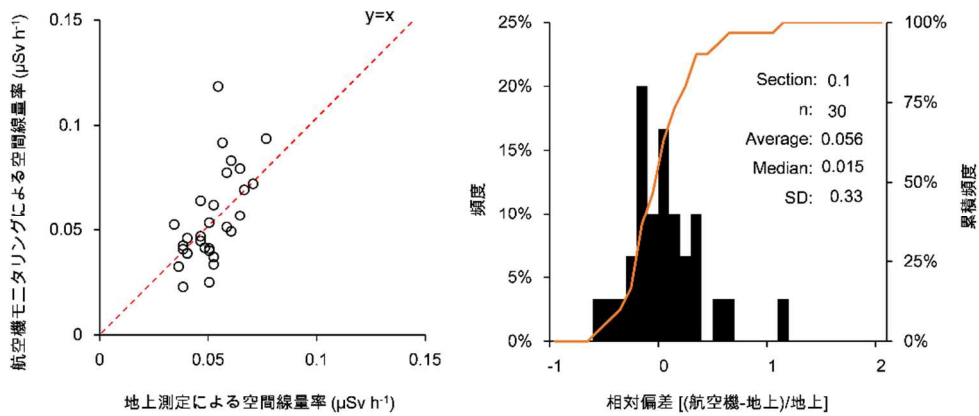


Fig. 4-8 地上における空間線量率測定結果との比較 (泊)
(左: 散布図; 右: 相対偏差頻度分布)

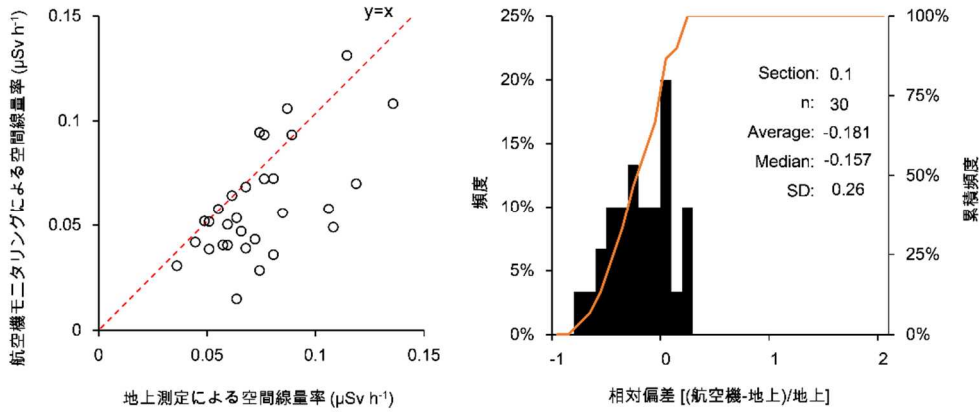


Fig. 4-9 地上における空間線量率測定結果との比較 (柏崎刈羽)
(左: 散布図; 右: 相対偏差頻度分布)

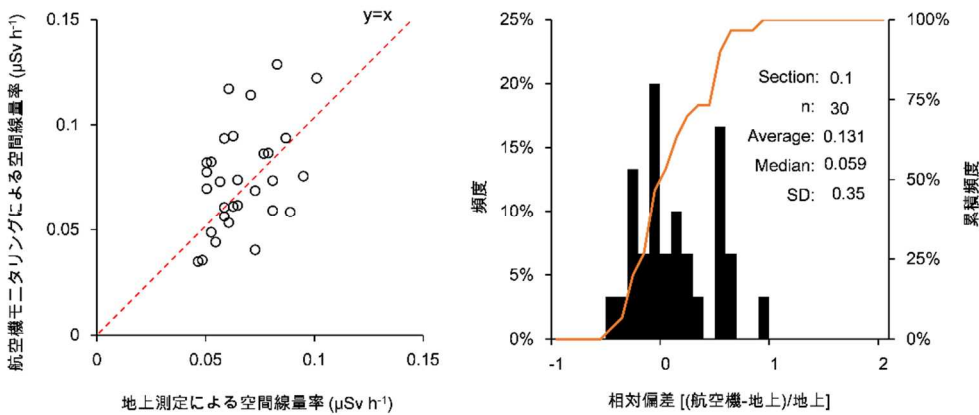


Fig. 4-10 地上における空間線量率測定結果との比較 (玄海)
(左: 散布図; 右: 相対偏差頻度分布)

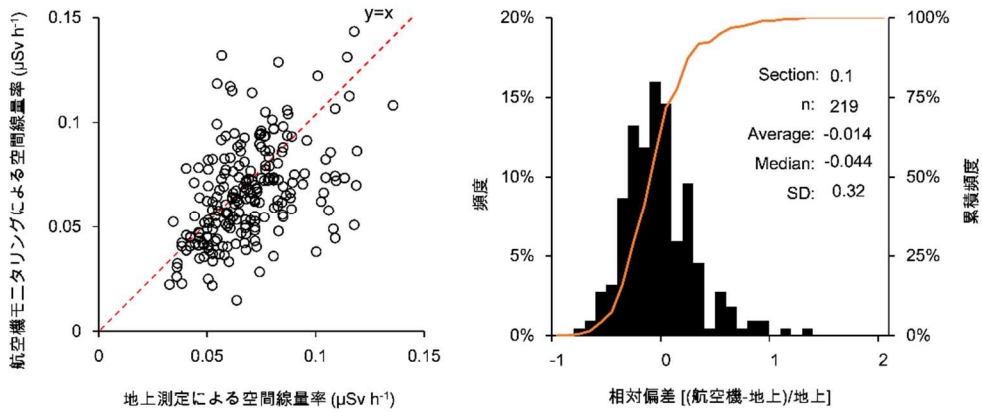


Fig. 4-11 地上における空間線量率測定結果との比較 (全データ)

(左: 散布図; 右: 相対偏差頻度分布)

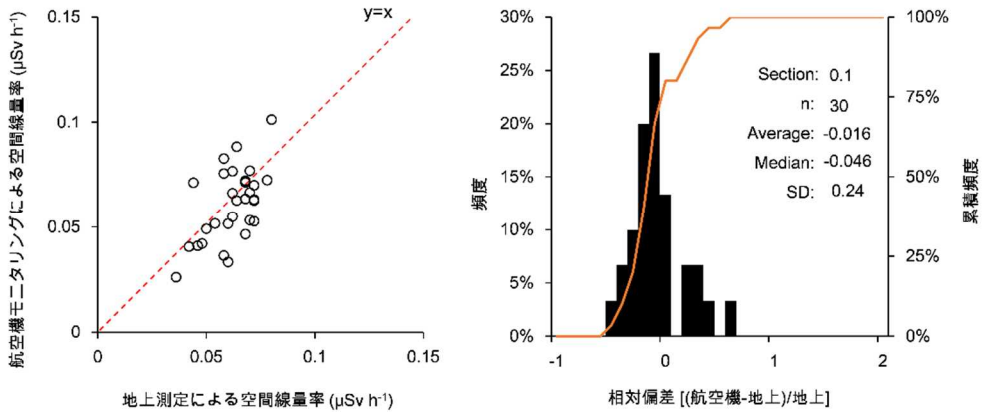


Fig. 4-12 地上における空間線量率測定結果との比較 (川内)

(左: 散布図; 右: 相対偏差頻度分布)

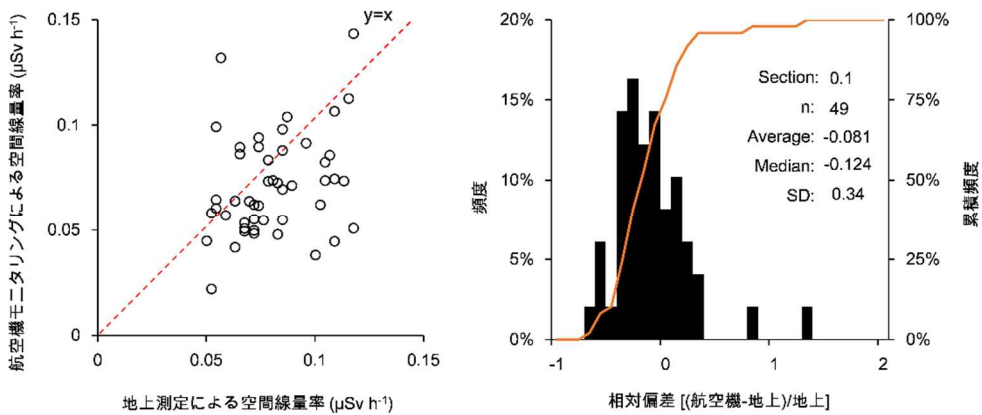


Fig. 4-13 地上における空間線量率測定結果との比較 (大飯高浜)

(左: 散布図; 右: 相対偏差頻度分布)

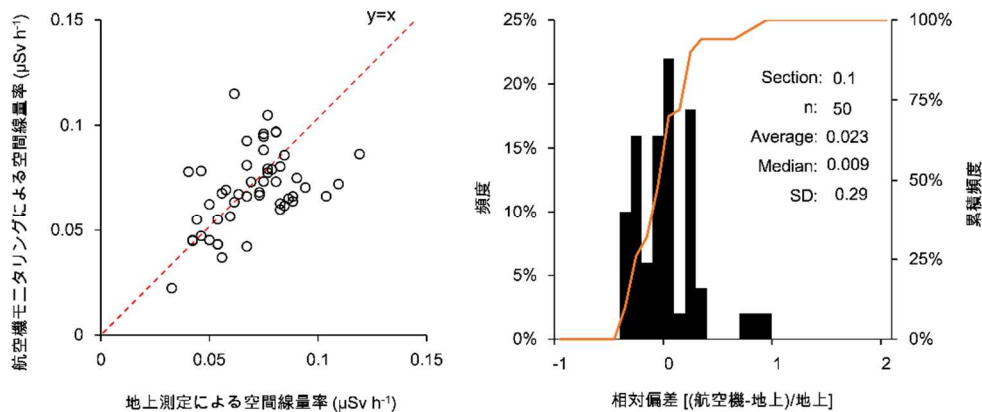


Fig. 4-14 地上における空間線量率測定結果との比較 (伊方)
(左: 散布図; 右: 相対偏差頻度分布)

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. 4-15、Fig. 4-16、Fig. 4-17 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、柏崎刈羽のバックグラウンドモニタリングで取得された最大 $0.40 \mu\text{Sv/h}$ 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¹⁰⁾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. 4-18 (泊)、Fig. 4-19 (柏崎刈羽)、Fig. 4-20 (玄海) に比較した。泊については、狩場山地周辺及び積丹半島で比較的線量率が高かった。狩場山は標高 1,520 m であり、比較的急峻な山地である¹⁹⁾。地質は主に花崗岩類となっており、その影響で比較的線量率が高くなっていると考えられる。一方、積丹半島では元素による空間線量率の推定結果では高い数値は見られず航空機による実測と異なった結果が得られた。周辺は活火山が多く、その影響と示唆されるが詳細は不明である。柏崎刈羽については、福島県境に比較的空間線量率の高い場所があった。ここは、帝釈山地という花崗岩地帯として知られた場所であり²⁰⁾、過去に日本全国の空間線量率を計測した結果と比較しても矛盾しない。玄海については、測定範囲の東方向に花崗岩地帯が広がっており²¹⁾、その影響が確認できる。

今回、航空機モニタリングで測定した結果は、Fig. 4-8、4-9、4-10 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。

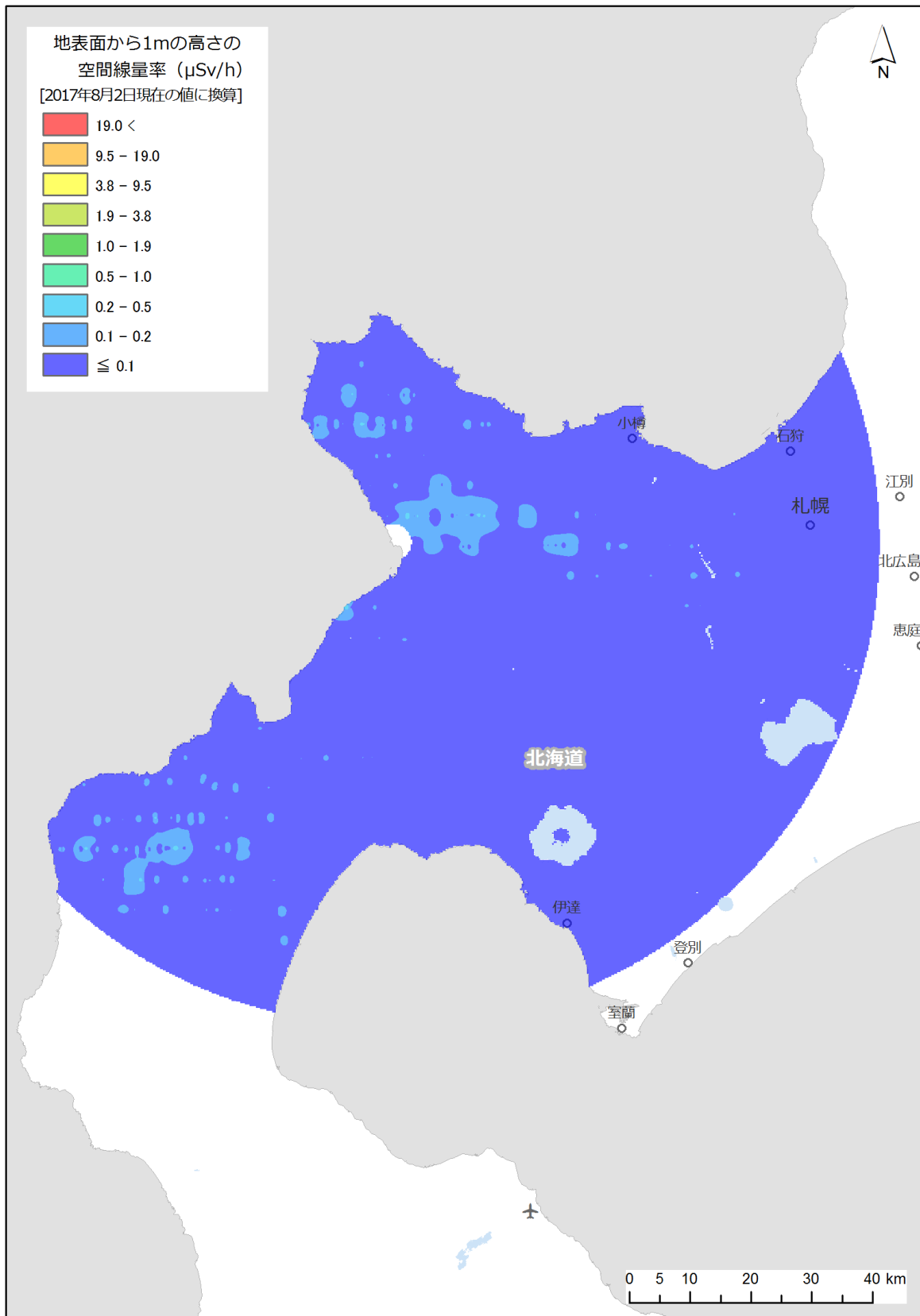


Fig. 4-15 泊発電所周辺の空間線量率マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

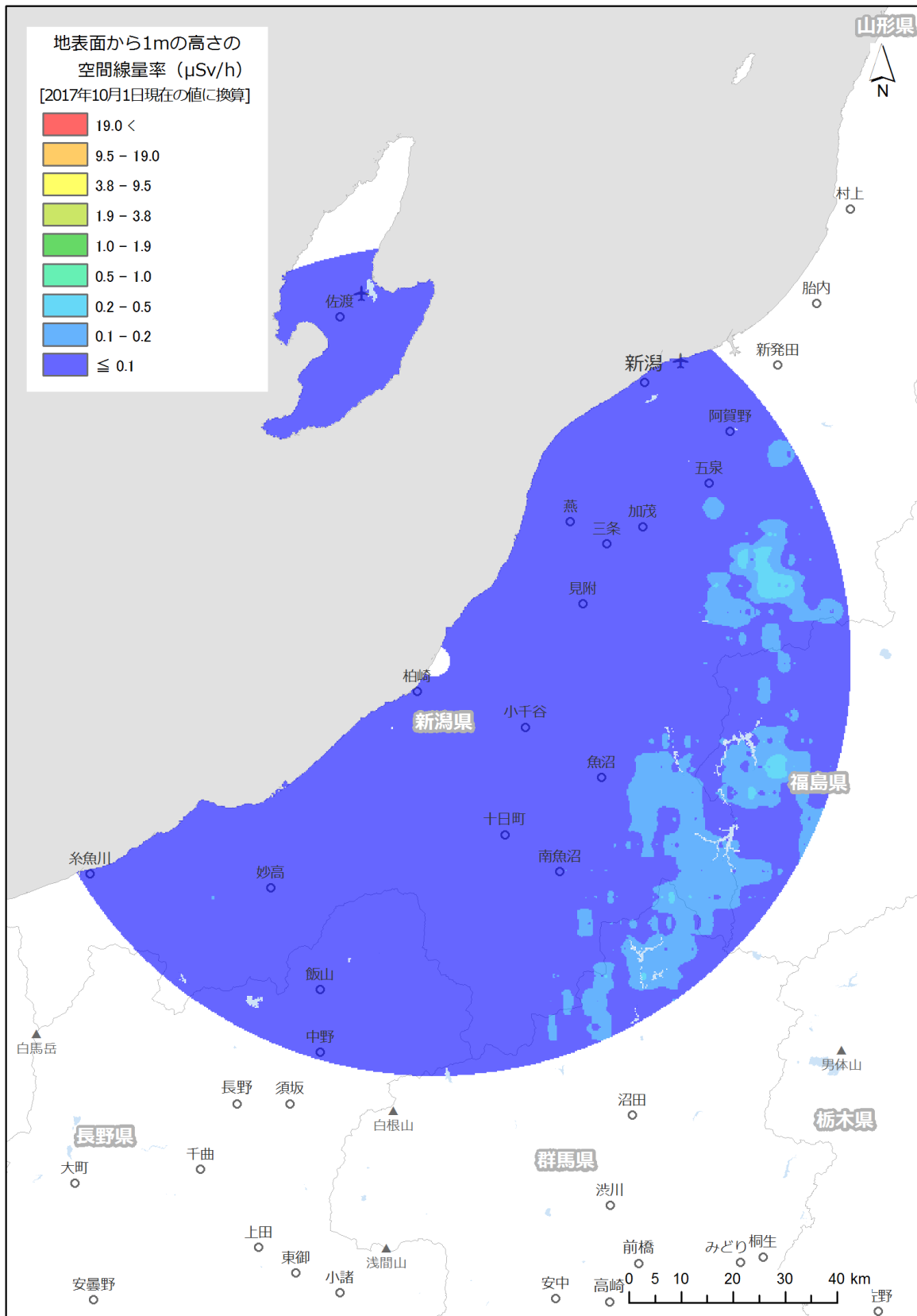


Fig. 4-16 柏崎刈羽原子力発電所周辺の空間線量率マップ
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

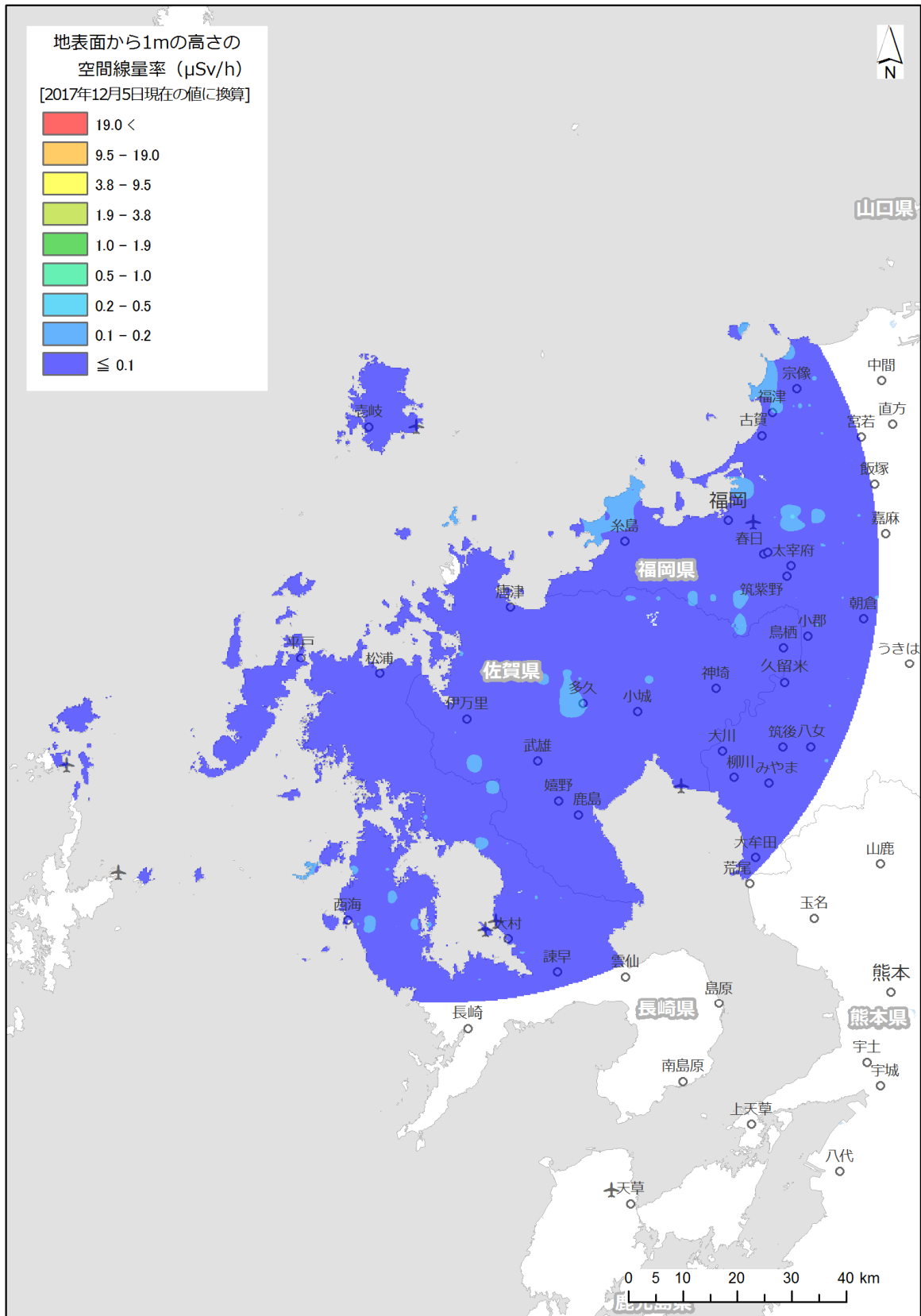


Fig. 4-17 玄海原子力発電所周辺の空間線量率マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

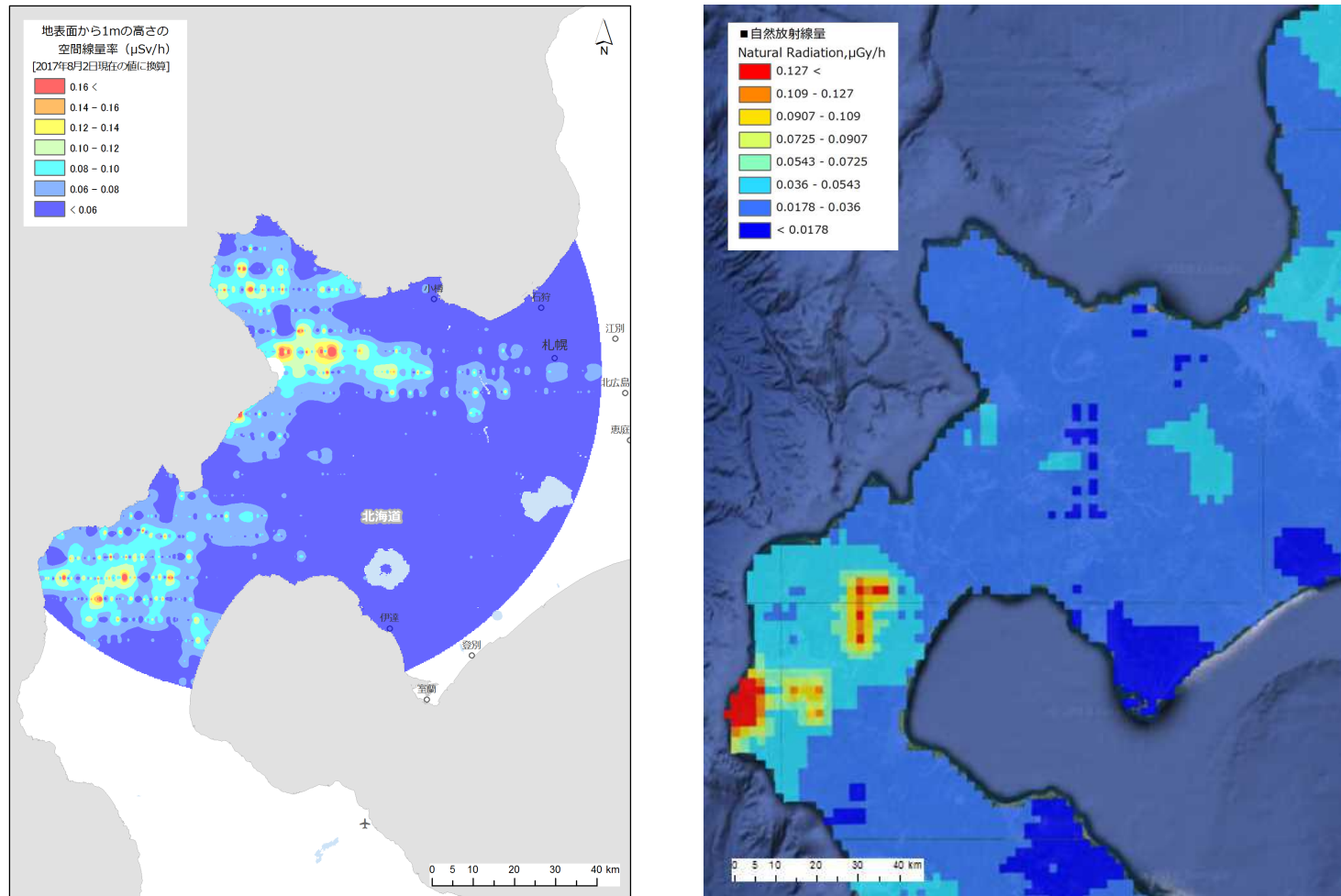


Fig. 4-18 泊発電所周辺の空間線量率マップの比較

(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)

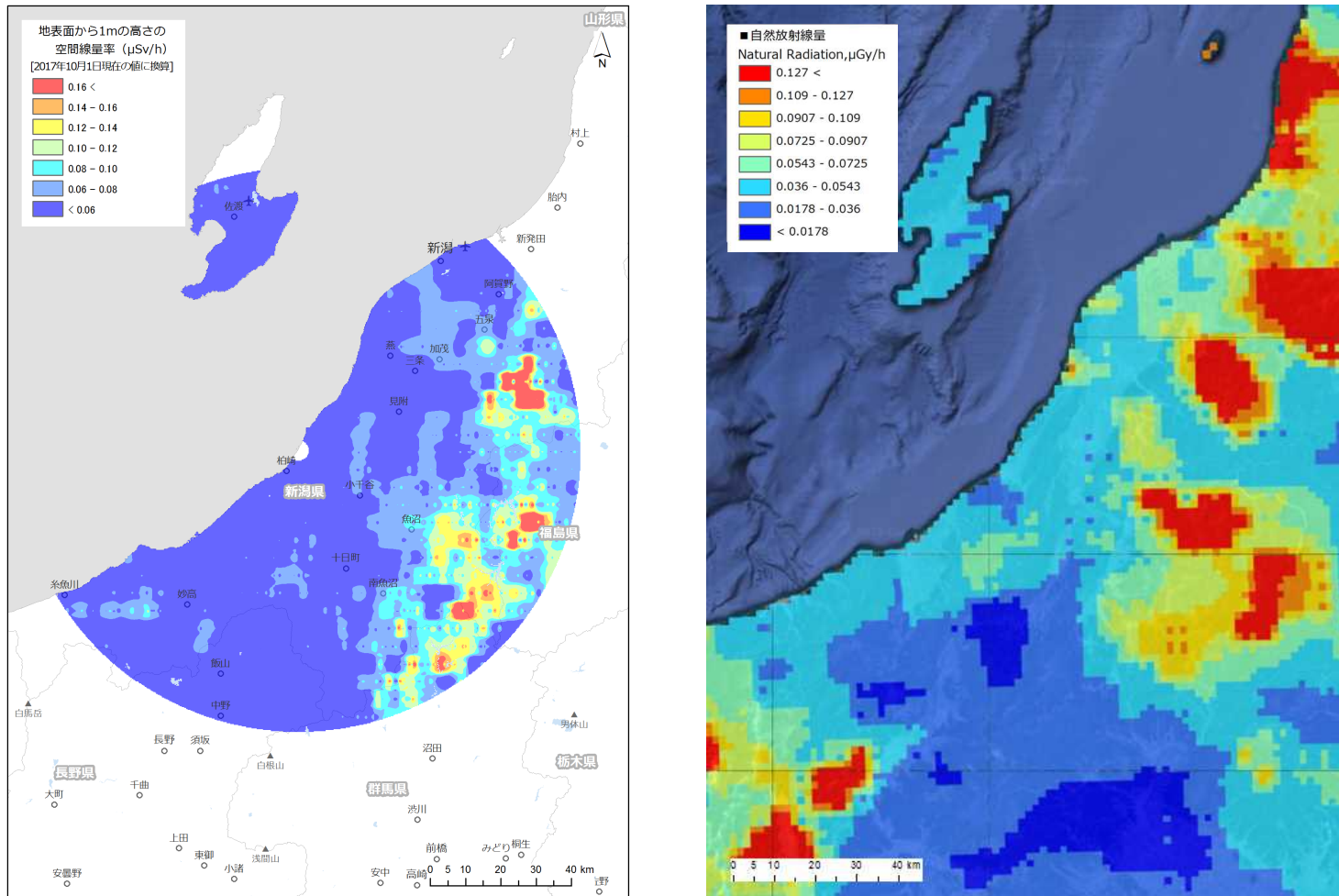


Fig. 4-19 柏崎刈羽原子力発電所周辺の空間線量率マップの比較

(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)

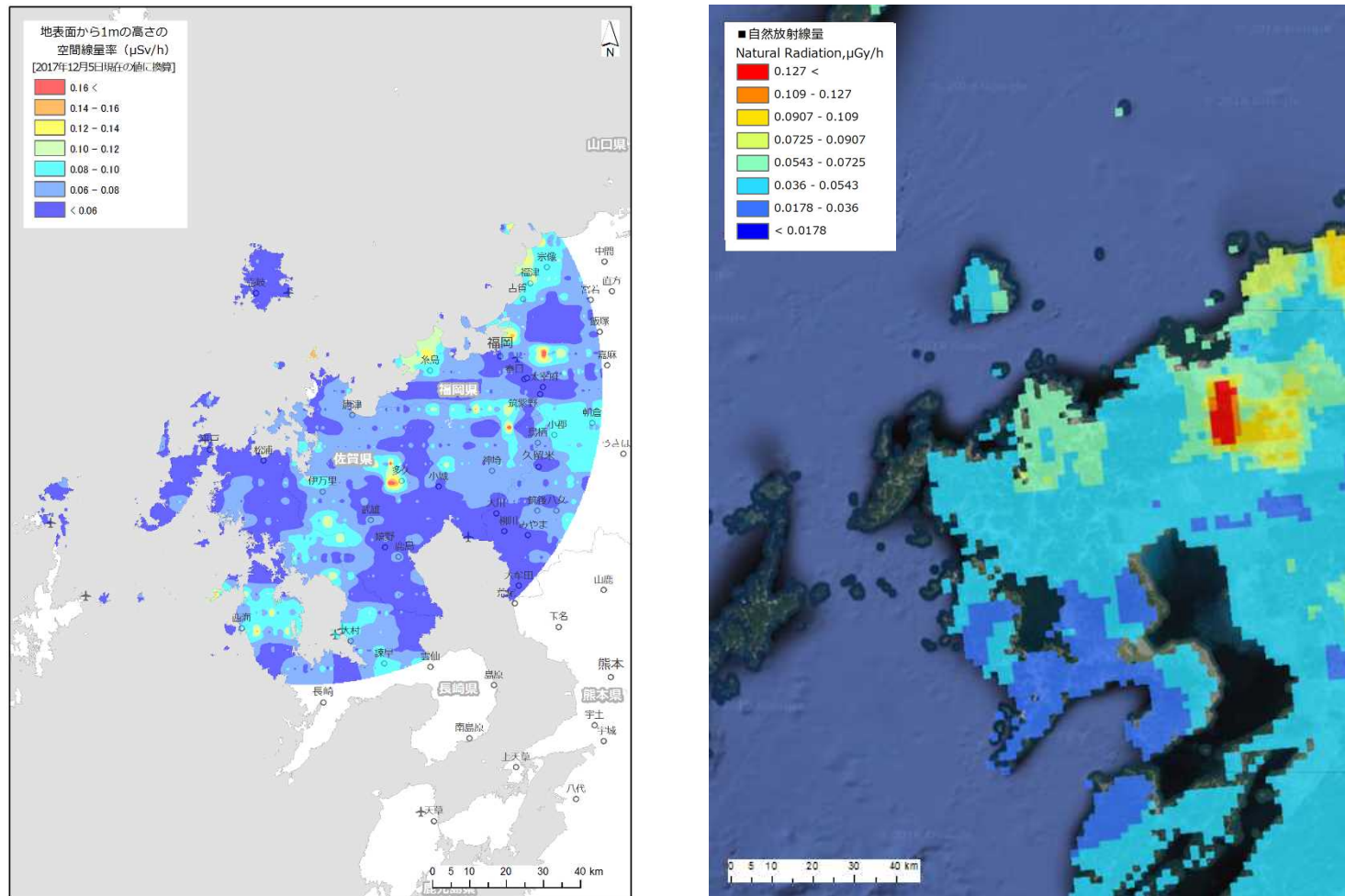


Fig. 4-20 玄海原子力発電所周辺の空間線量率マップの比較

(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. 4-21、4-22、4-23、4-24、4-25、4-26、4-27、4-28 および 4-29 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²²⁾を利用した。Fig. 4-30、Fig. 4-31、Fig 4-32 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、北海道の積丹半島における 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。

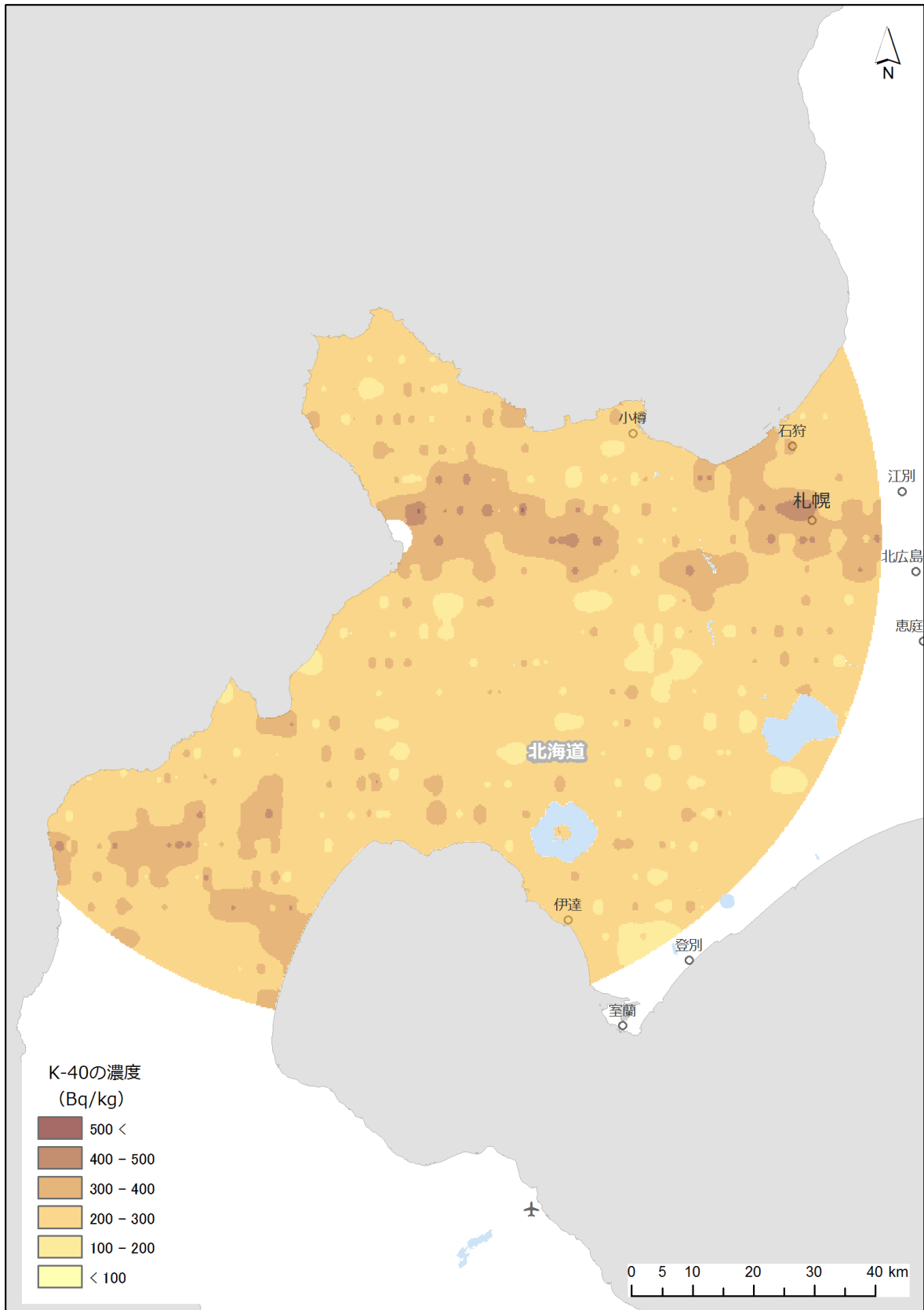


Fig. 4-21 泊発電所周辺の K-40 濃度マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

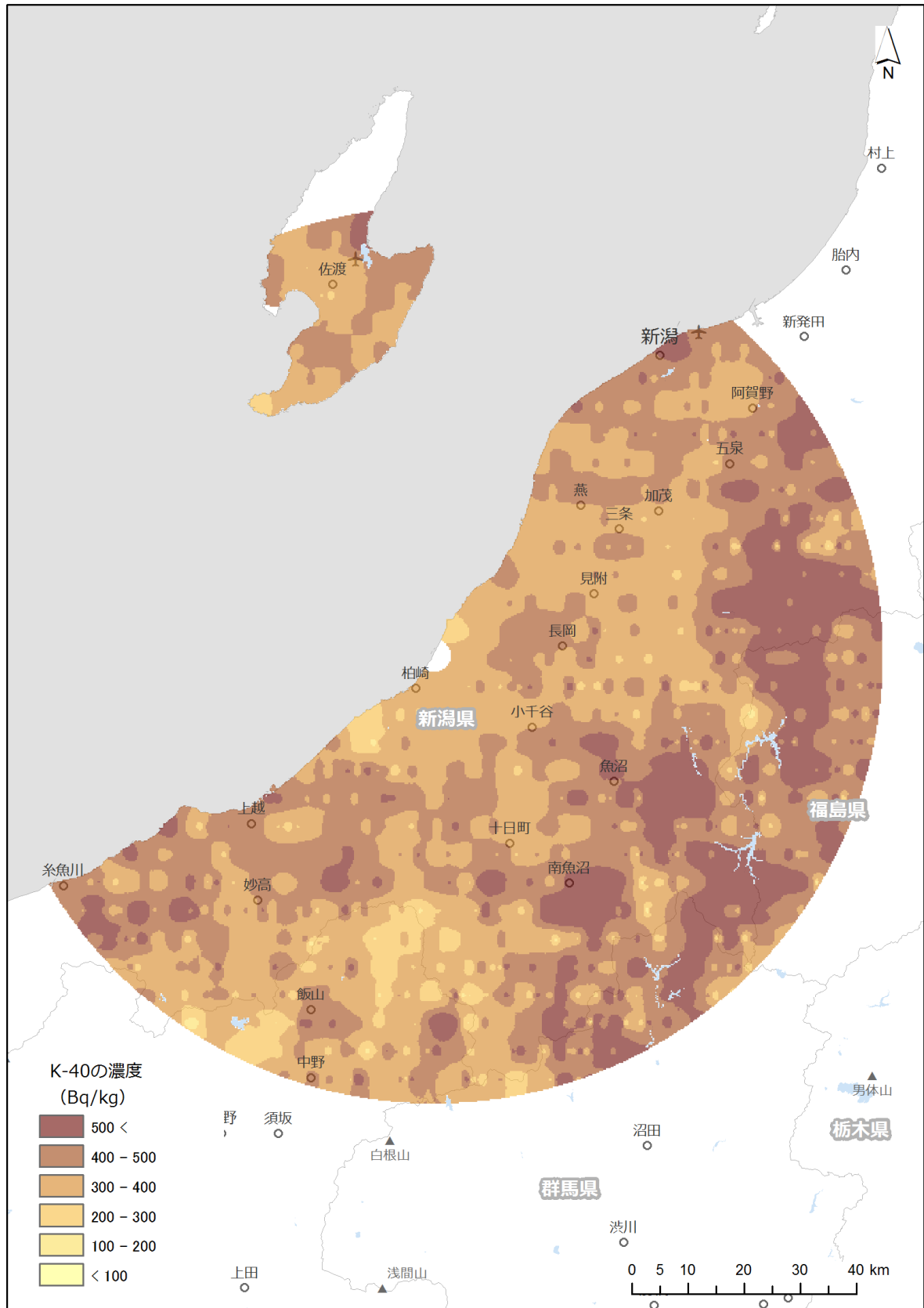


Fig. 4-22 柏崎刈羽原子力発電所周辺の K-40 濃度マップ
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

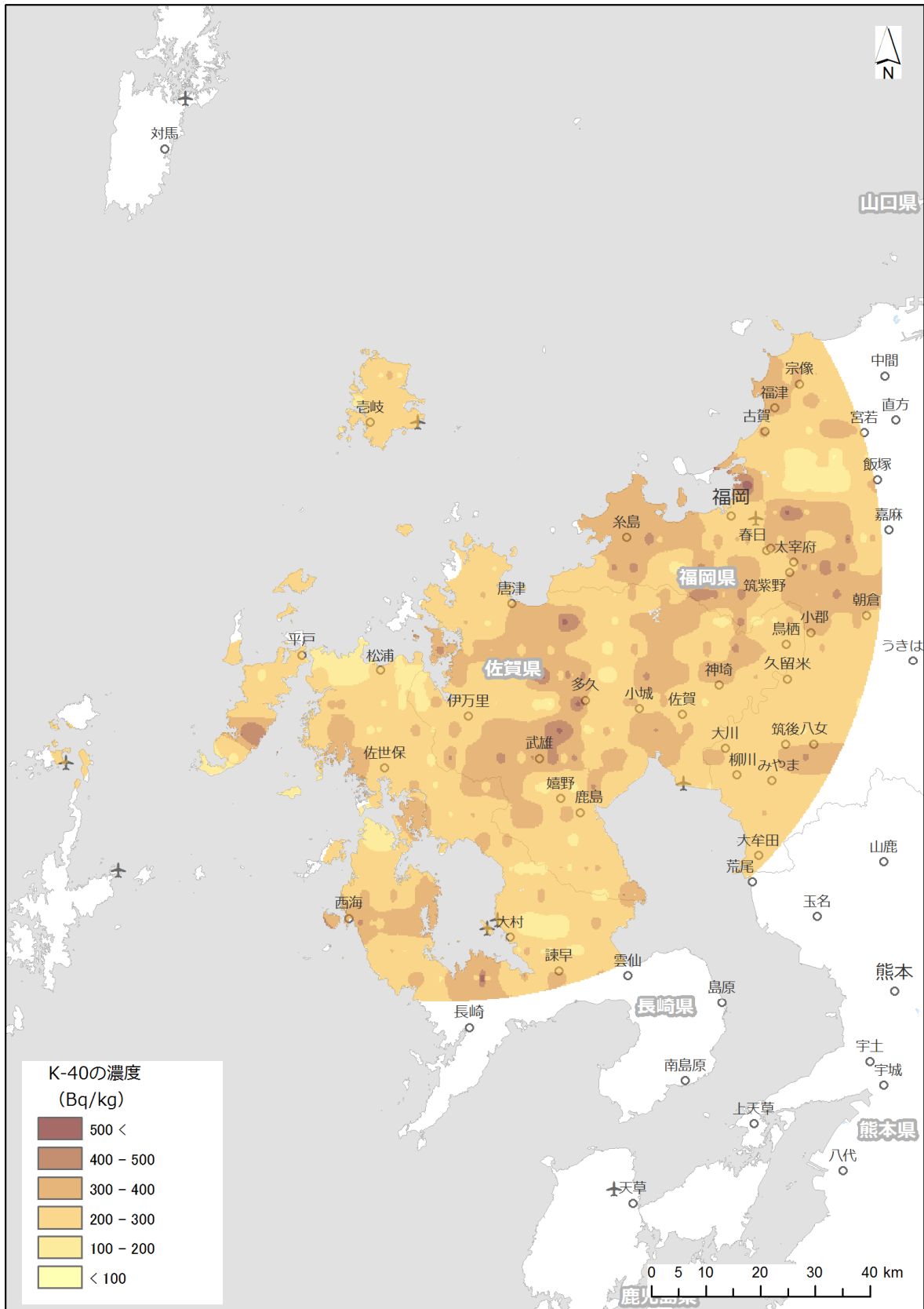


Fig. 4-23 玄海原子力発電所周辺の K-40 濃度マップ
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

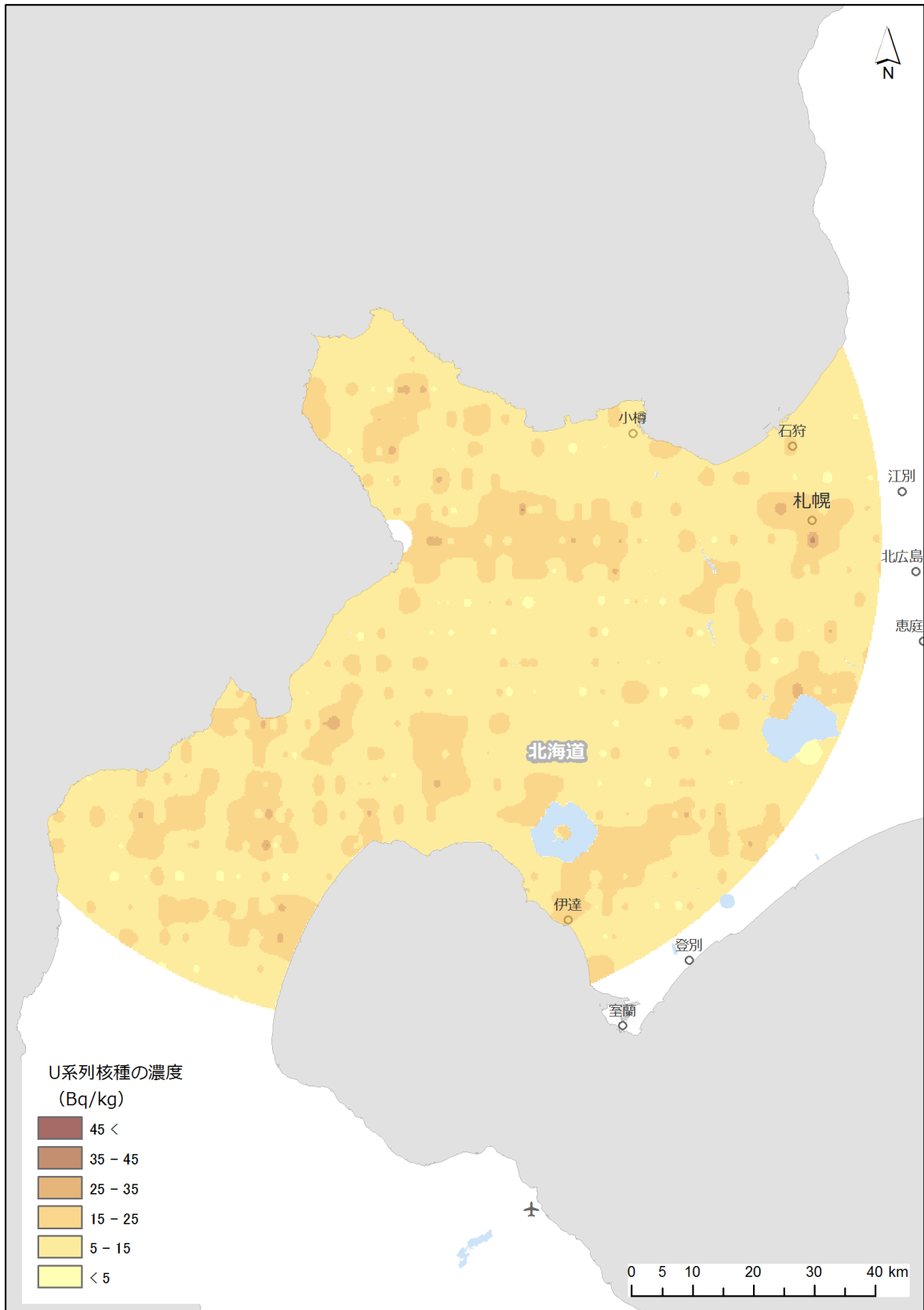


Fig. 4-24 泊発電所周辺の U 系列濃度マップ
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

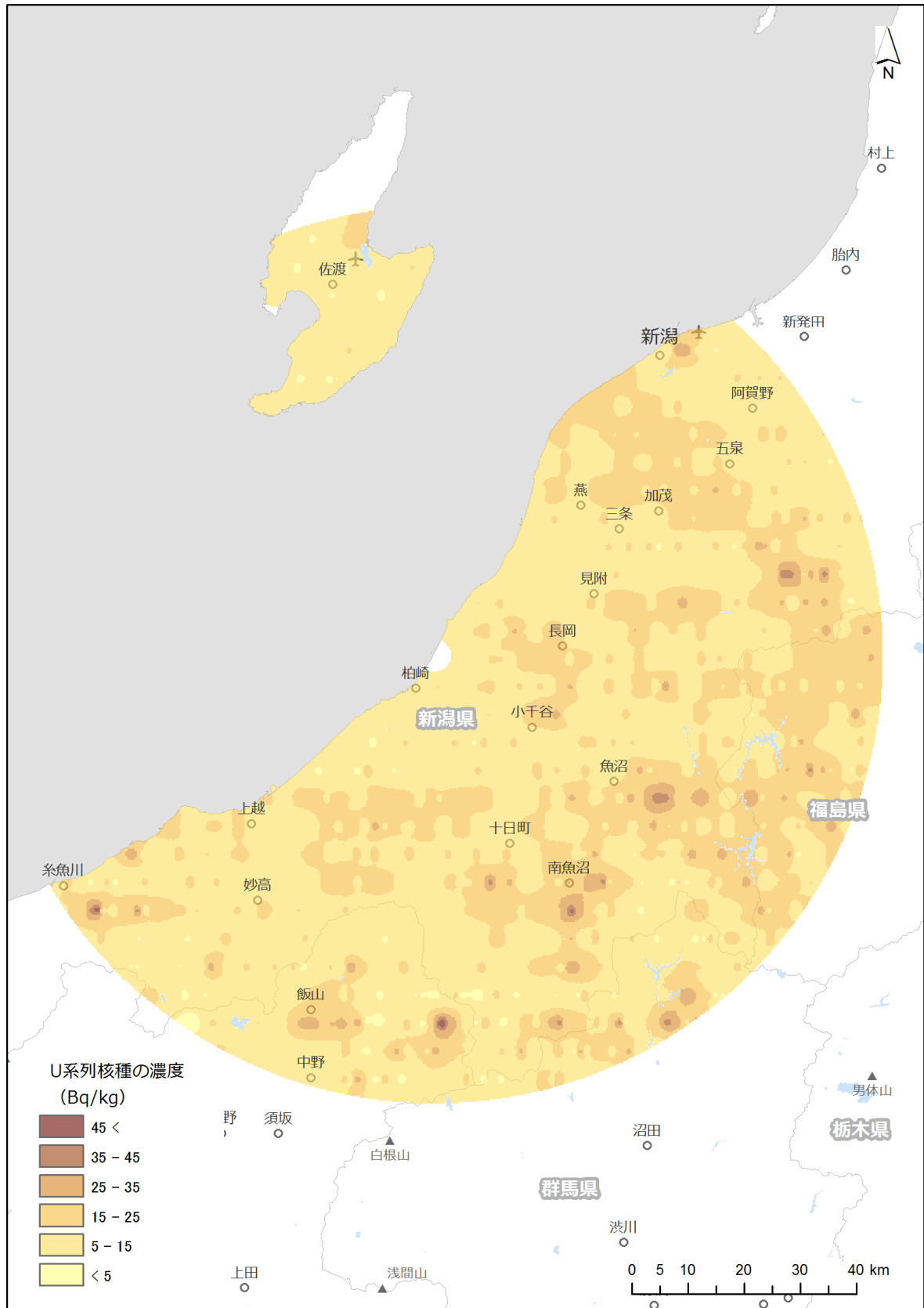


Fig. 4-25 柏崎刈羽原子力発電所周辺のU系列濃度マップ
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

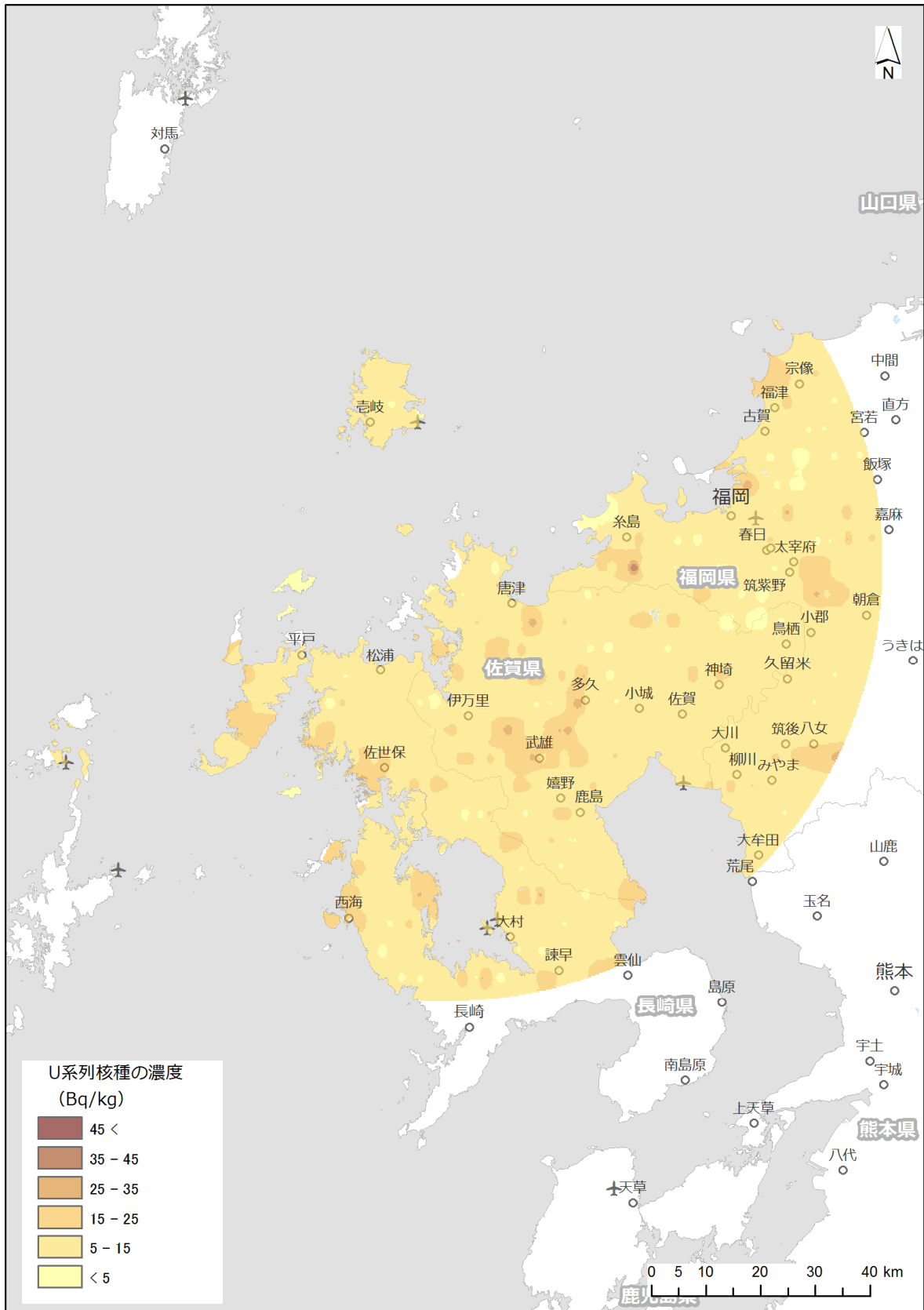


Fig. 4-26 玄海原子力発電所周辺の U 系列濃度マップ
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

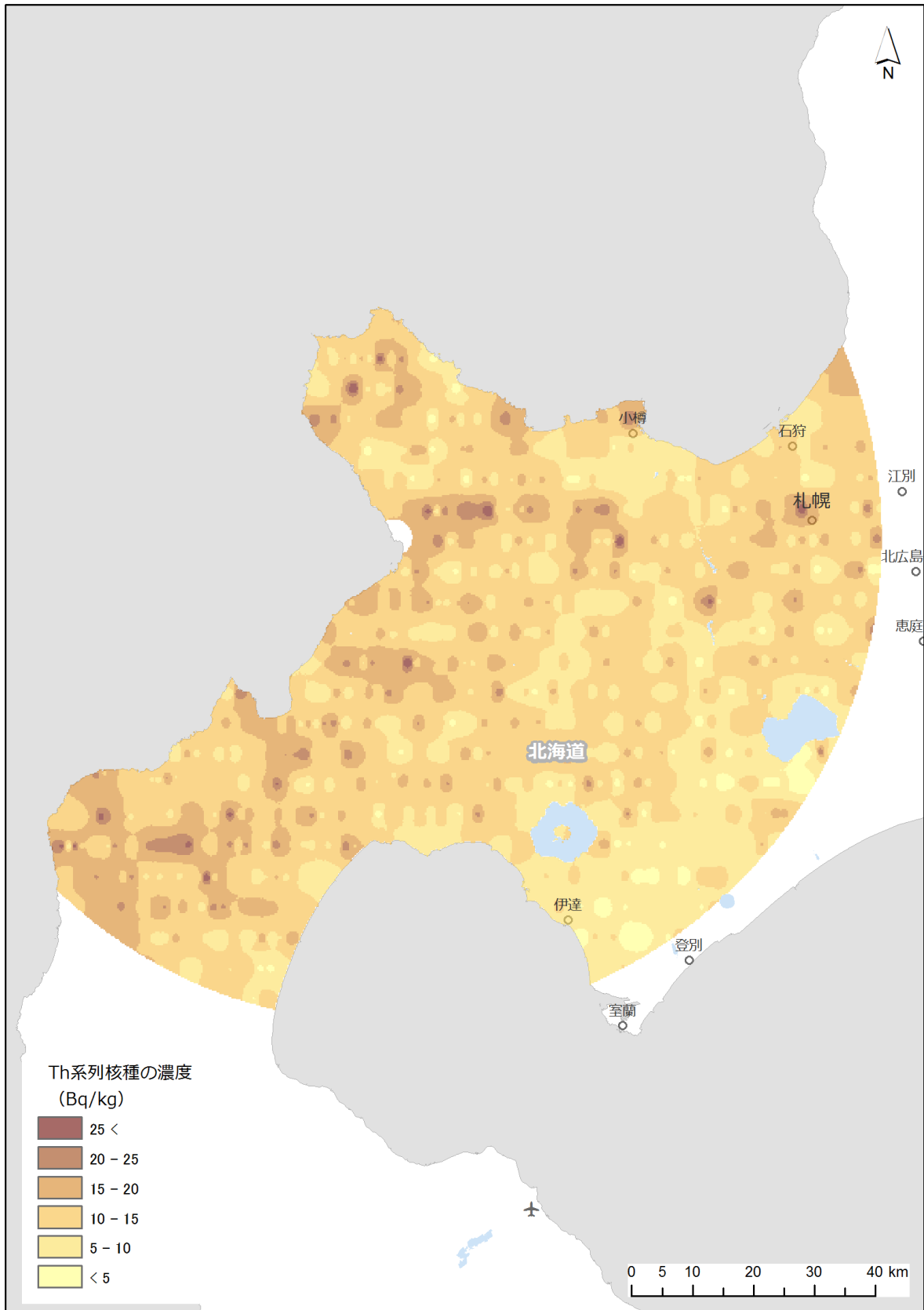


Fig. 4-27 泊発電所周辺の Th 系列濃度マップ
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

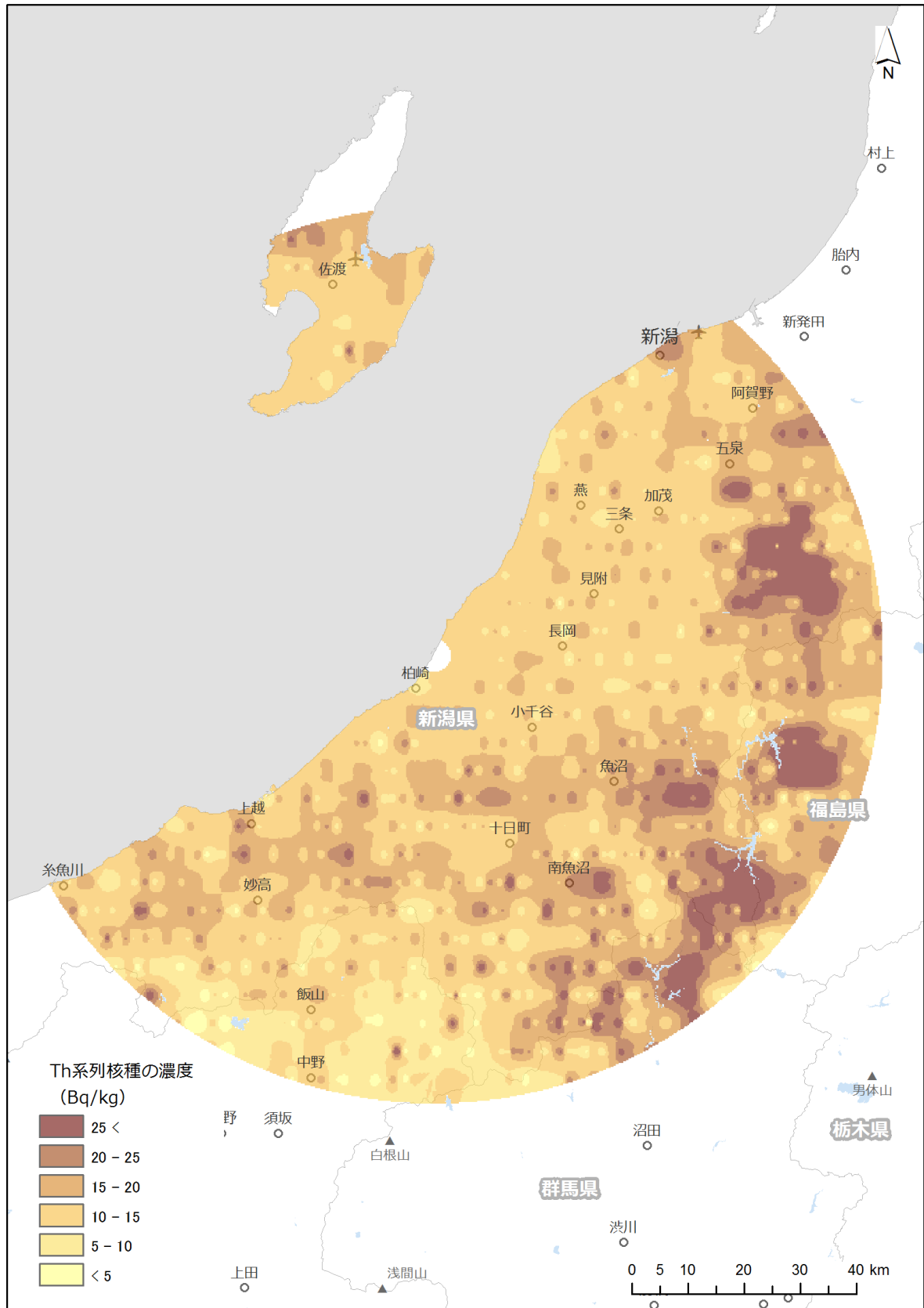


Fig. 4-28 柏崎刈羽原子力発電所周辺の Th 系列濃度マップ
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

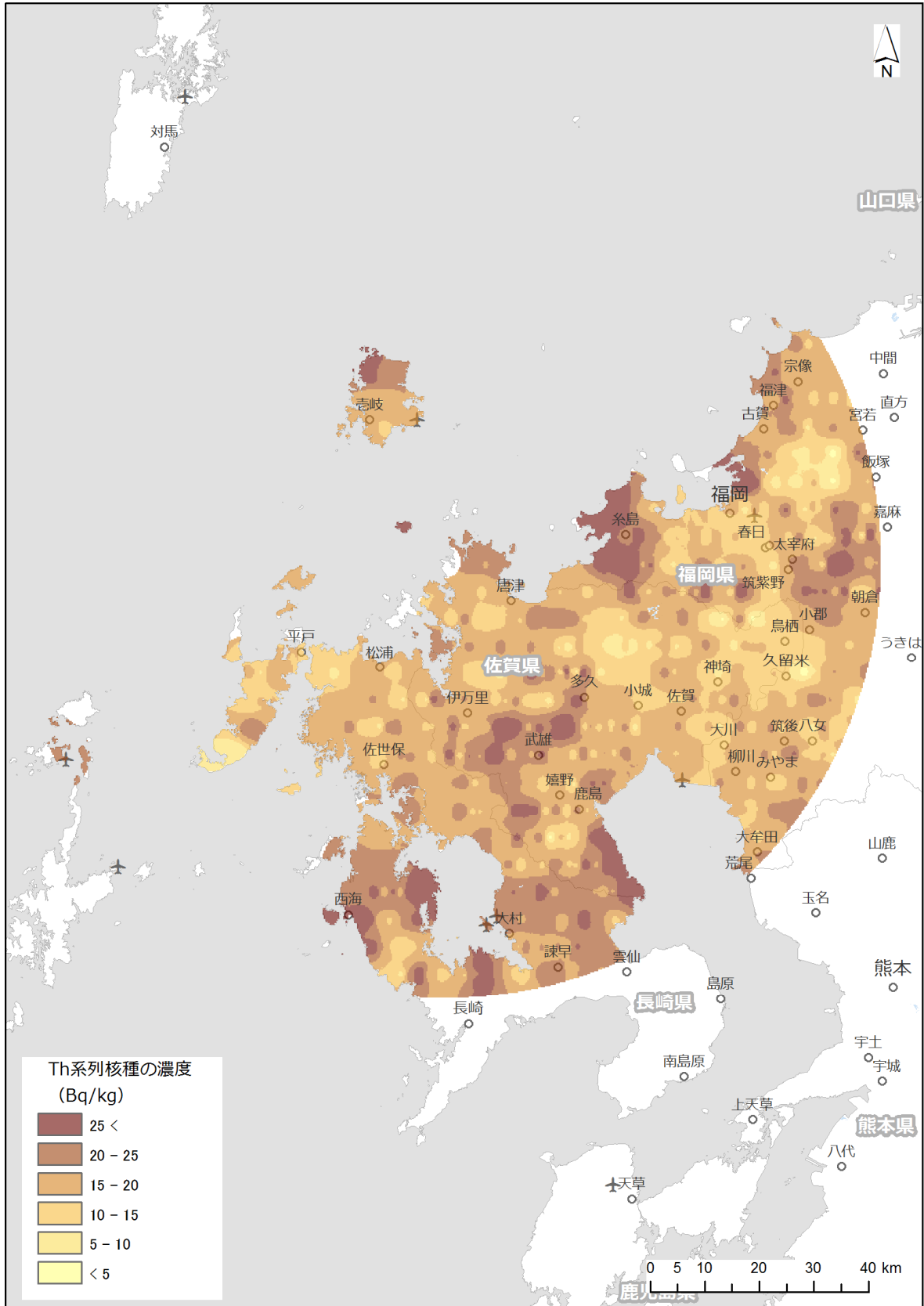


Fig. 4-29 玄海原子力発電所周辺の Th 系列濃度マップ
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

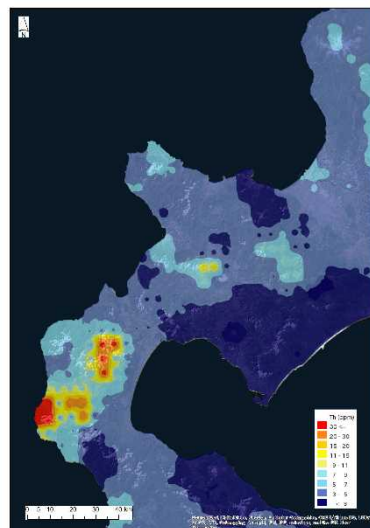
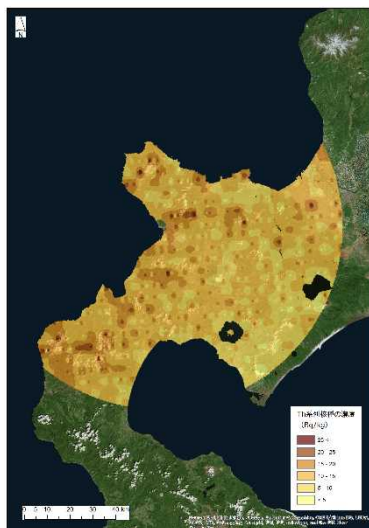
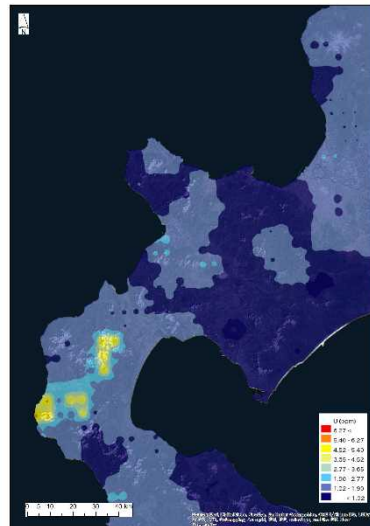
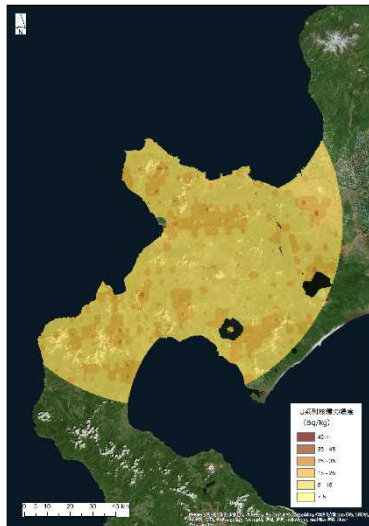
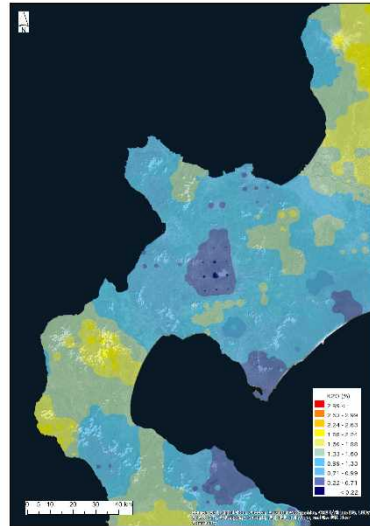
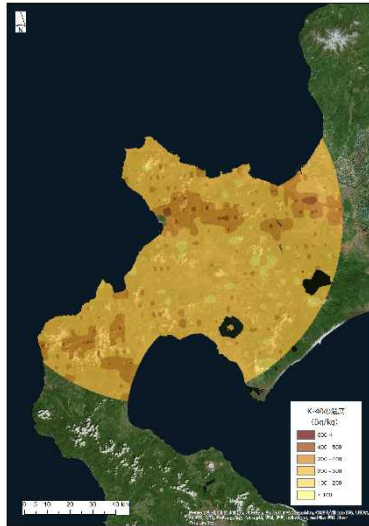


Fig. 4-30 泊発電所周辺の放射性核種濃度測定結果と地球化学図比較
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

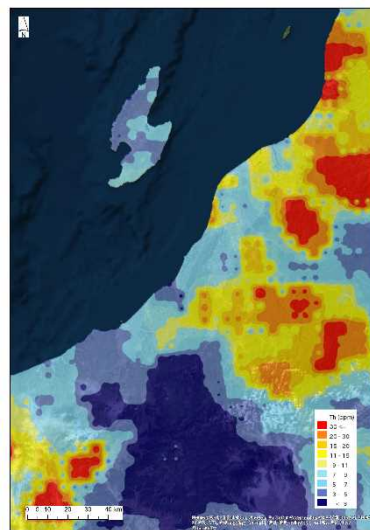
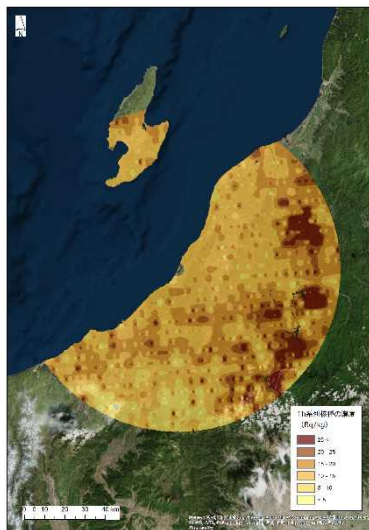
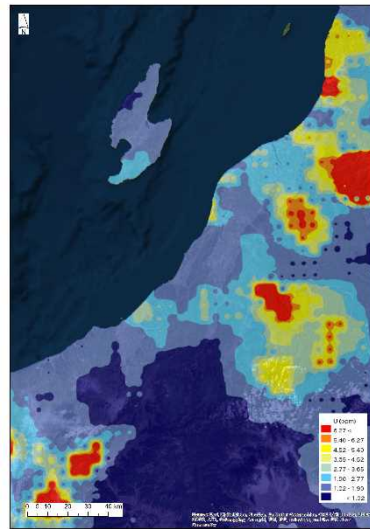
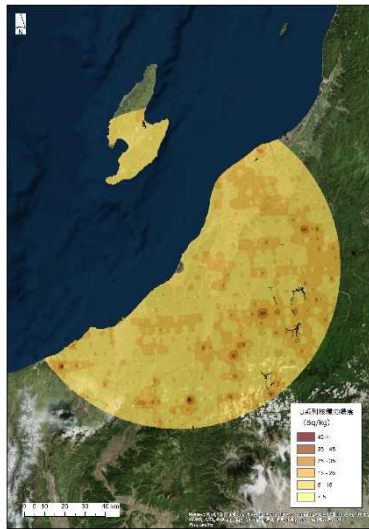
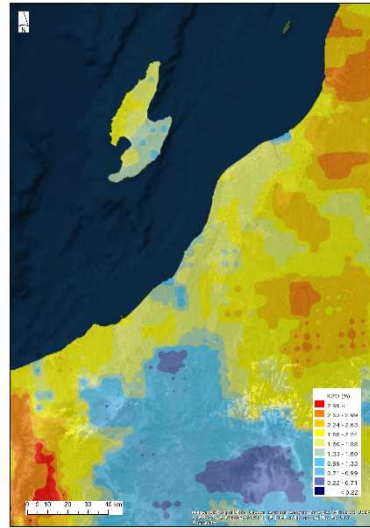
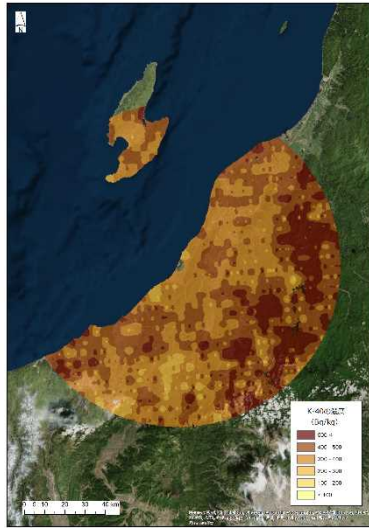


Fig. 4-31 柏崎刈羽原子力発電所周辺の放射性核種濃度測定結果と地球化学図比較
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

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。

泊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. 4-33(a) に示す。また、柏崎刈羽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. 4-33 (b) 、玄海原子力発電所で取得した結果を Fig 4-33 (c) に示す。なお、泊発電所では Bell 412 (JA6767)、柏崎刈羽原子力発電所では Bell 430 (JA05TV)、玄海原子力発電所では S76 (JA6655) 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。泊発電所、柏崎刈羽原子力発電所及び玄海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. 4-34 (d), (e) (F) に示す。本散布図の近似直線の傾きを RI と定義した。これらのパラメータ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	
泊BGモニタリング	2017/7/24	2017/8/2	23.7	30.7	Bell412	JA6767
柏崎刈羽BGモニタリング	2017/7/26	2017/10/1	23.5	28.5	Bell430	JA05TV
福島12次モニタリングA班	2017/9/9	2017/9/25	22.5	29.5	Bell430	JA05TV
福島12次モニタリングB班	2017/9/9	2017/9/25	22.6	32.6	Bell412	JA9616
東日本8次モニタリングA班	2017/9/29	2017/11/10	19.8	28.8	Bell430	JA05TV
東日本8次モニタリングB班*	2017/9/29	2017/10/26			Bell412	JA6767
	2017/10/26	2017/11/11	26.9	31.0	Bell412	JA9616
	2017/11/15	2017/11/16			Bell412	JA6928
玄海BGモニタリング	2017/11/28	2017/12/5	26.1	31.4	S76	JA6655

* 同機種であるため同じ数値を使用

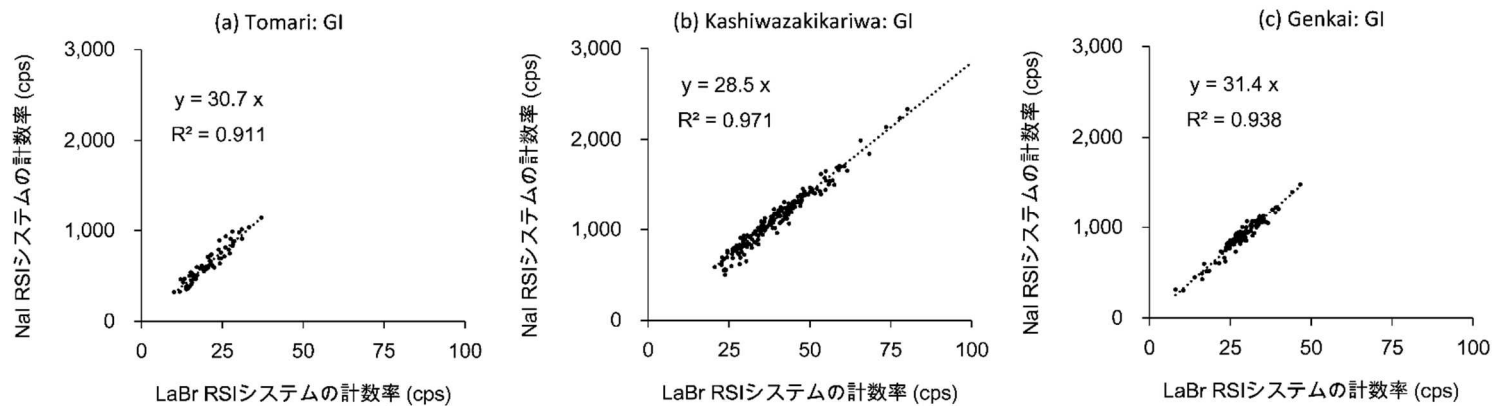


Fig. 4-33 陸上における NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係

(1 次近似曲線の傾きを GI と定義)

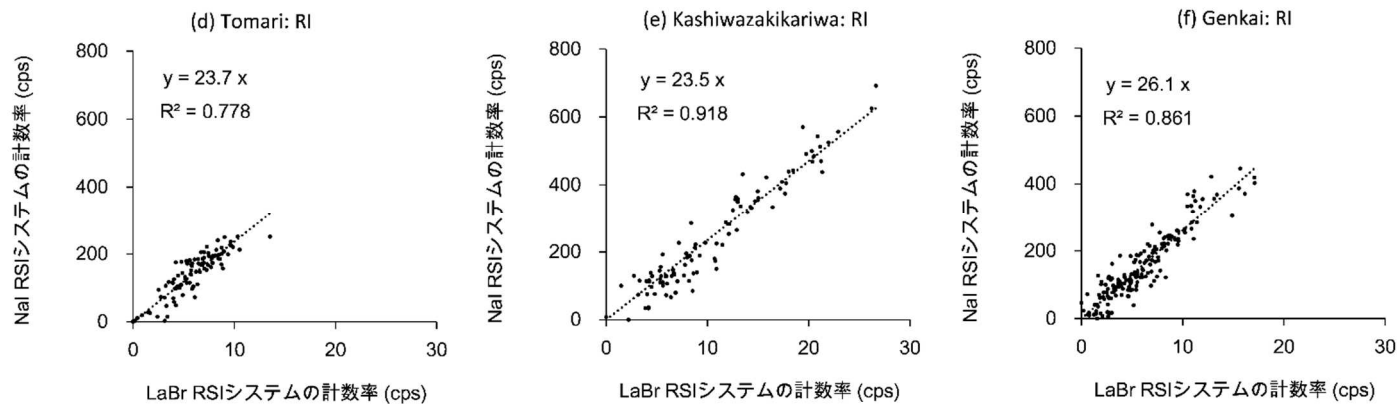


Fig. 4-34 陸上における NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係

(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. 4-35 に示す。図には比較のため、放射性セシウムが存在する H29 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 8 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 8 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 E8th_A および E8th_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。

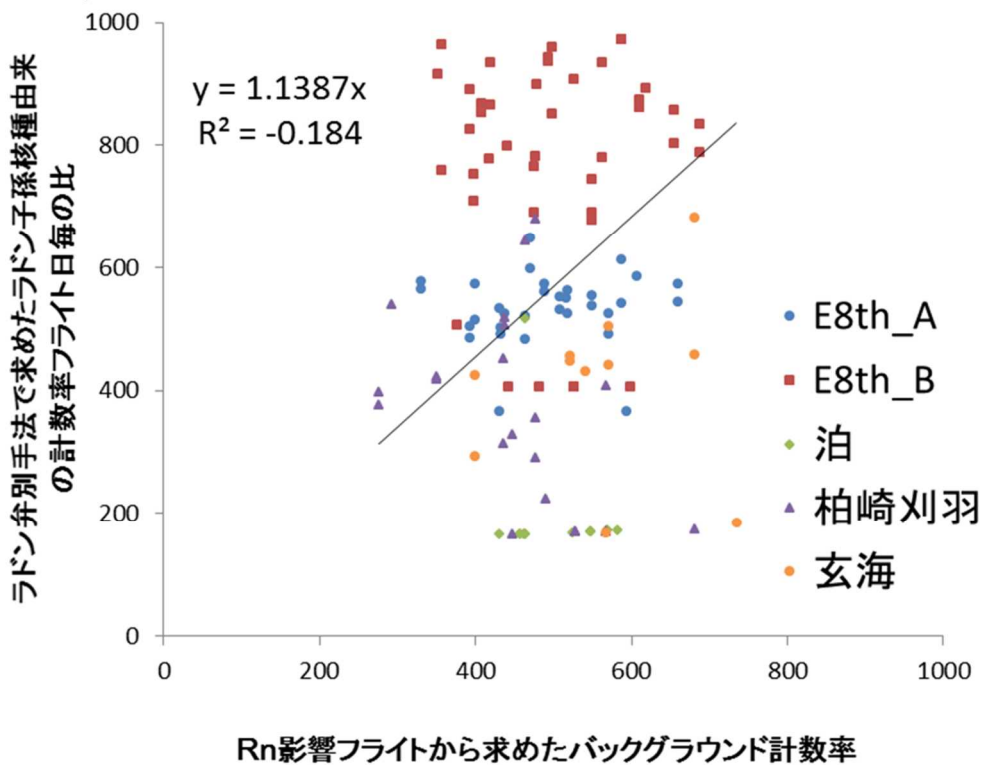


Fig. 4-35 ラドン影響フライトから求めた NaI RSI システムのバックグラウンド計数と同日にフライトしたデータにラドン弁別手法を適用し求めたラドン子孫核種の計数率の平均値の比較

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. 4-15、Fig. 4-16 及び Fig. 4-17 で示したマップとは異なる。

Fig. 4-36, Fig. 4-37, Fig. 4-38 に GI の数値が変化した場合の影響を調査するため各発電所の発電所の結果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、Fig. 4-39, Fig. 4-40, Fig. 4-41 にラドン弁別手法で減算した残渣の 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。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態でマップとして表現されている。Fig. 4-39 に泊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、ラドン子孫核種のはほとんど Rn 子孫核種が検出されていない。一方、Fig. 4-40 及び Fig. 4-41 に示した柏崎刈羽原子力発電所周辺及び玄海原子力発電所の結果に適用した例では、柏崎刈羽では福島県との県境に、玄海では全域に局所的に検出されている。これは、中国大陸起源と地表起源の違いに由来するものと推定されるが、証明にはさらなるデータの蓄積が必要だと考える。

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. 4-42 に示す。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. 4-43 (泊)、Fig. 4-44 (柏崎刈羽)、Fig. 4-45 (玄海) 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. 4-36 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。

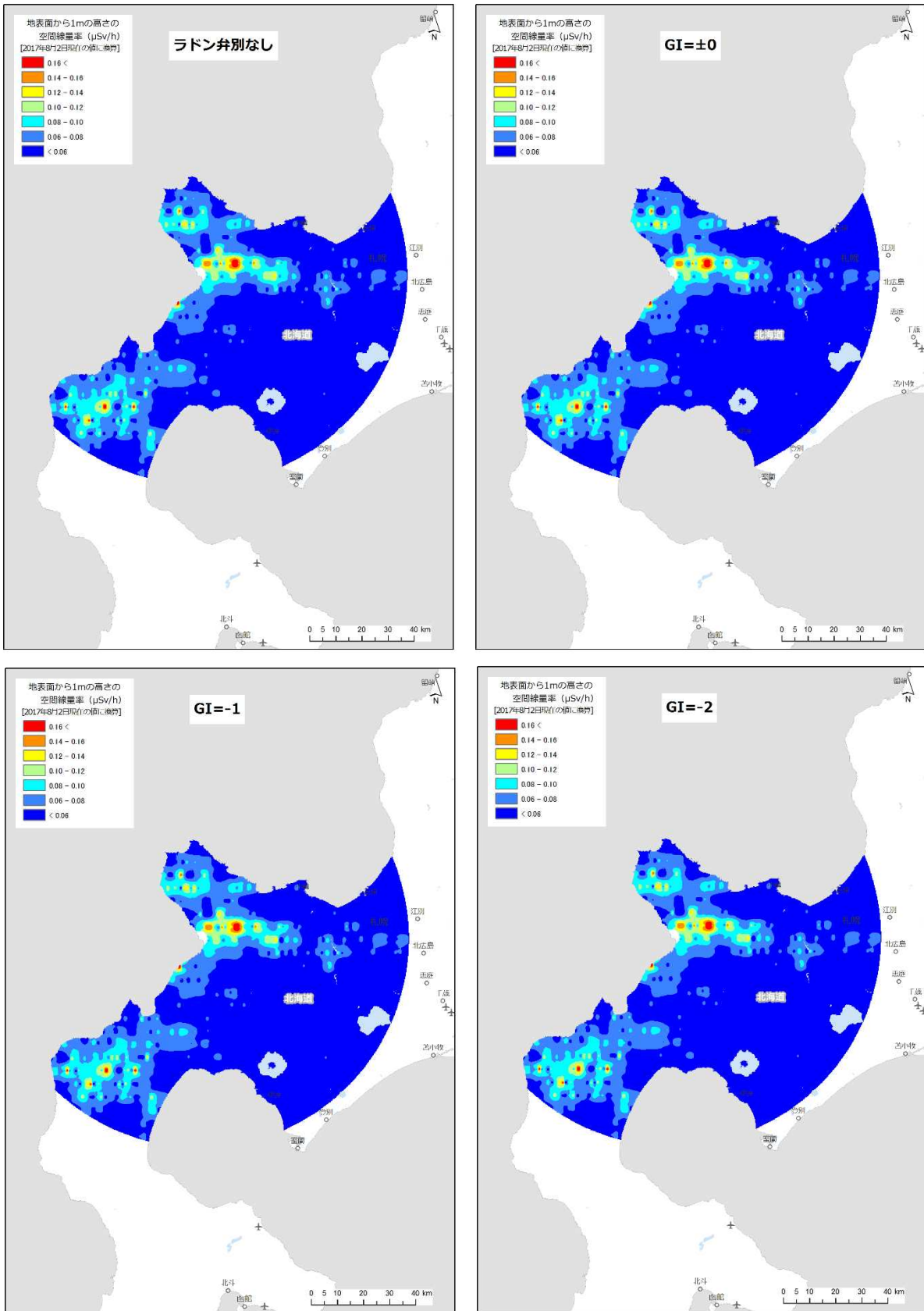


Fig. 4-36 ラドン影響弁別手法適用後の泊発電所周辺における空間線量率マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

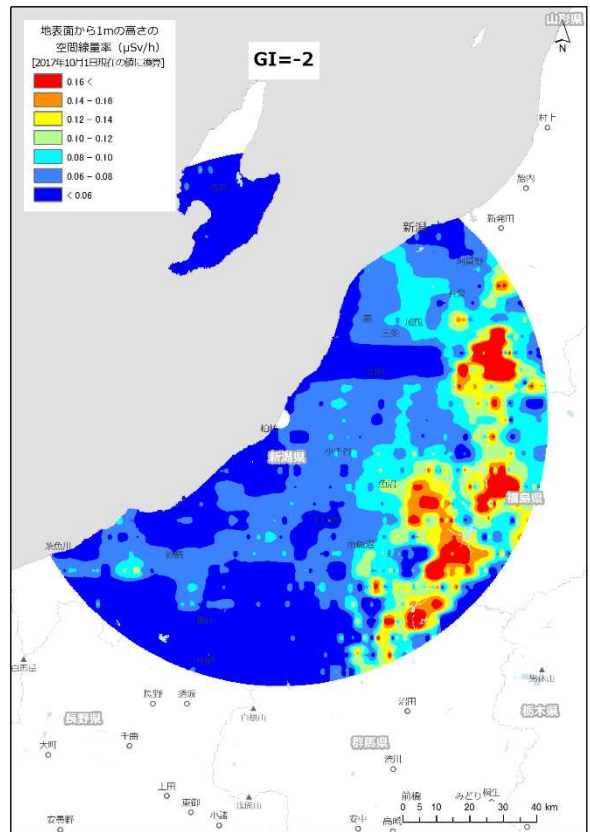
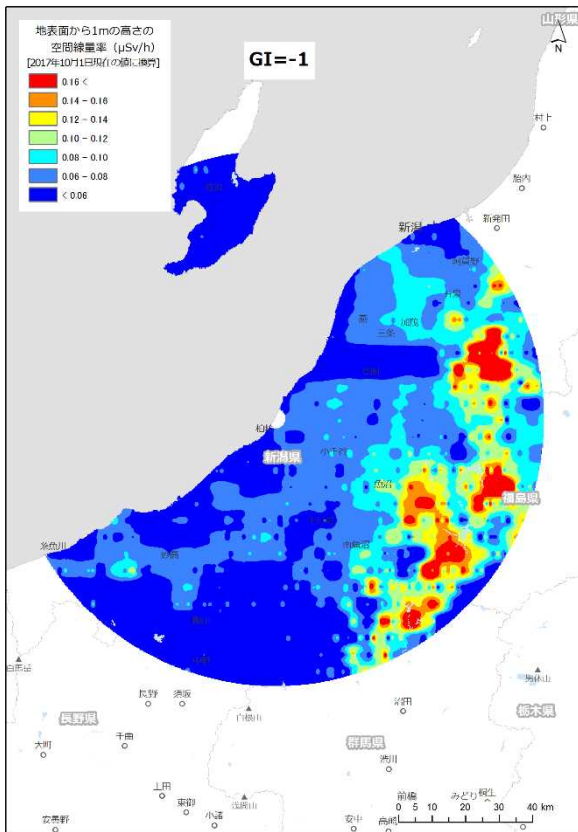
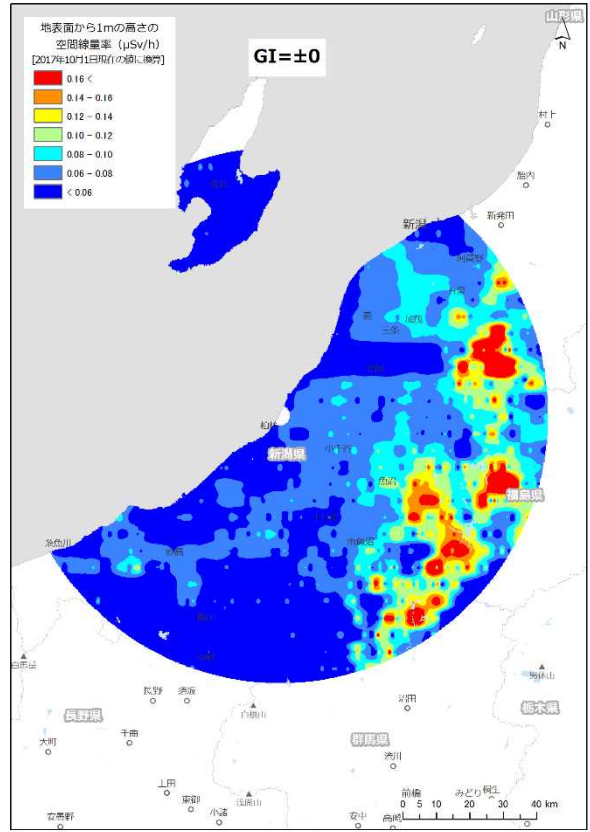
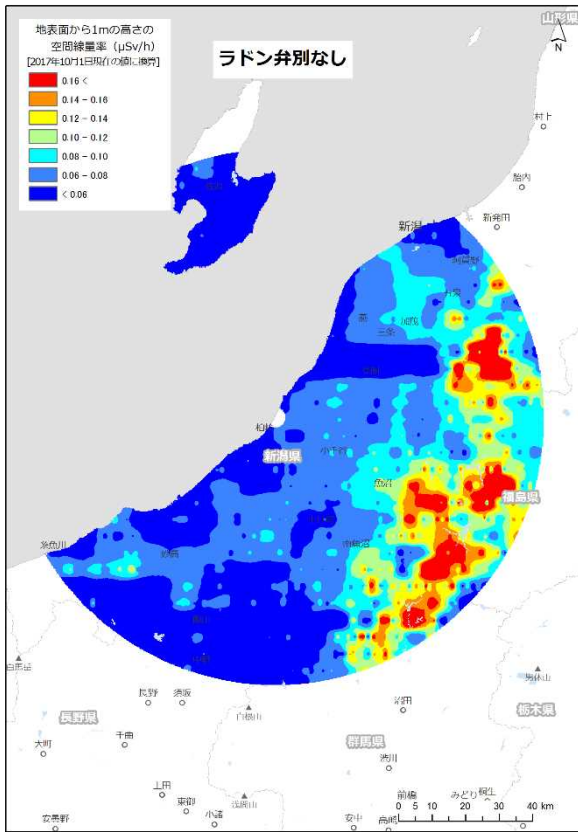


Fig. 4-37 ラドン影響弁別手法適用後の柏崎刈羽原子力発電所周辺における空間線量率マップ
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

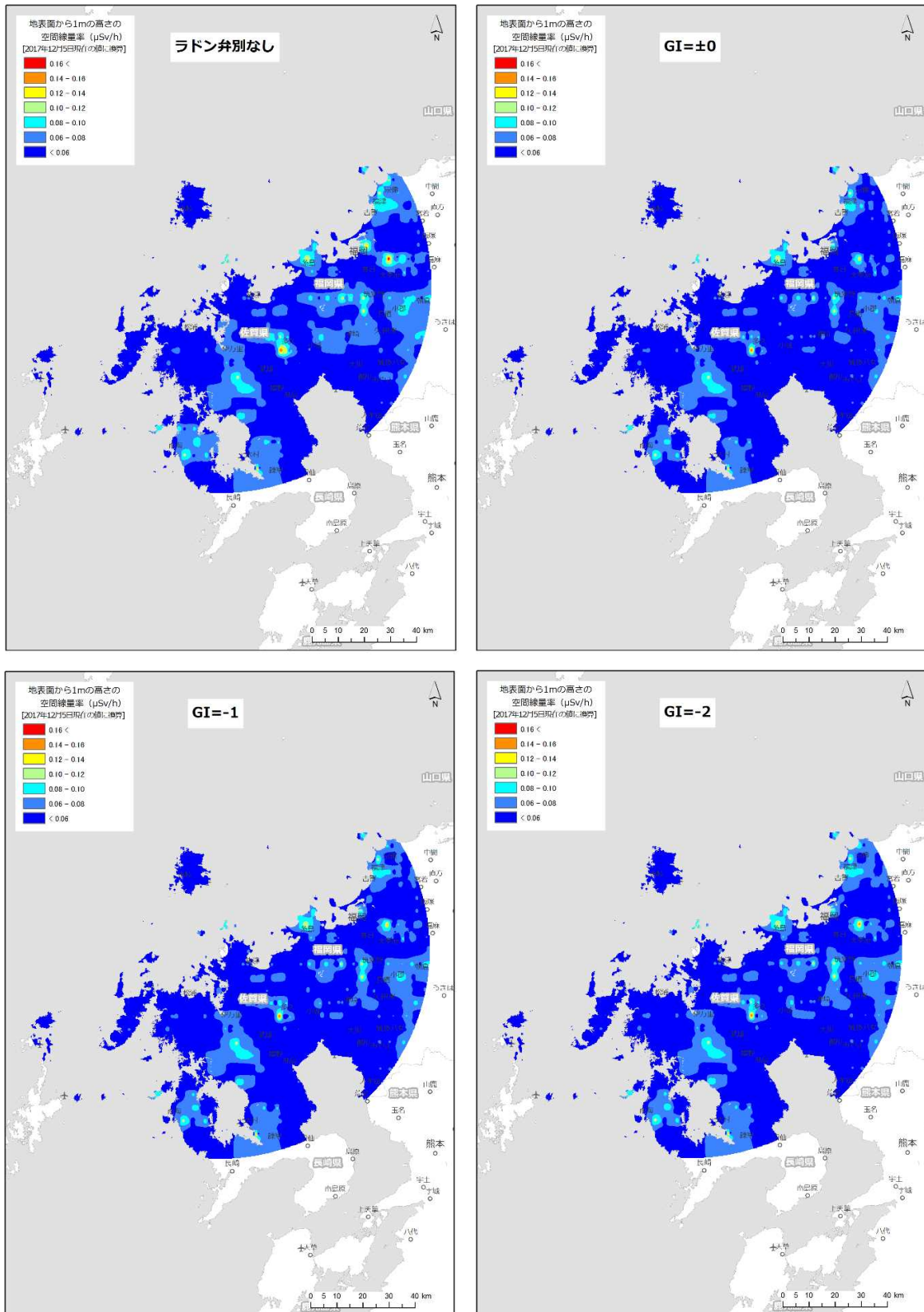


Fig. 4-38 ラドン影響弁別手法適用後の玄海原子力発電所周辺における空間線量率マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

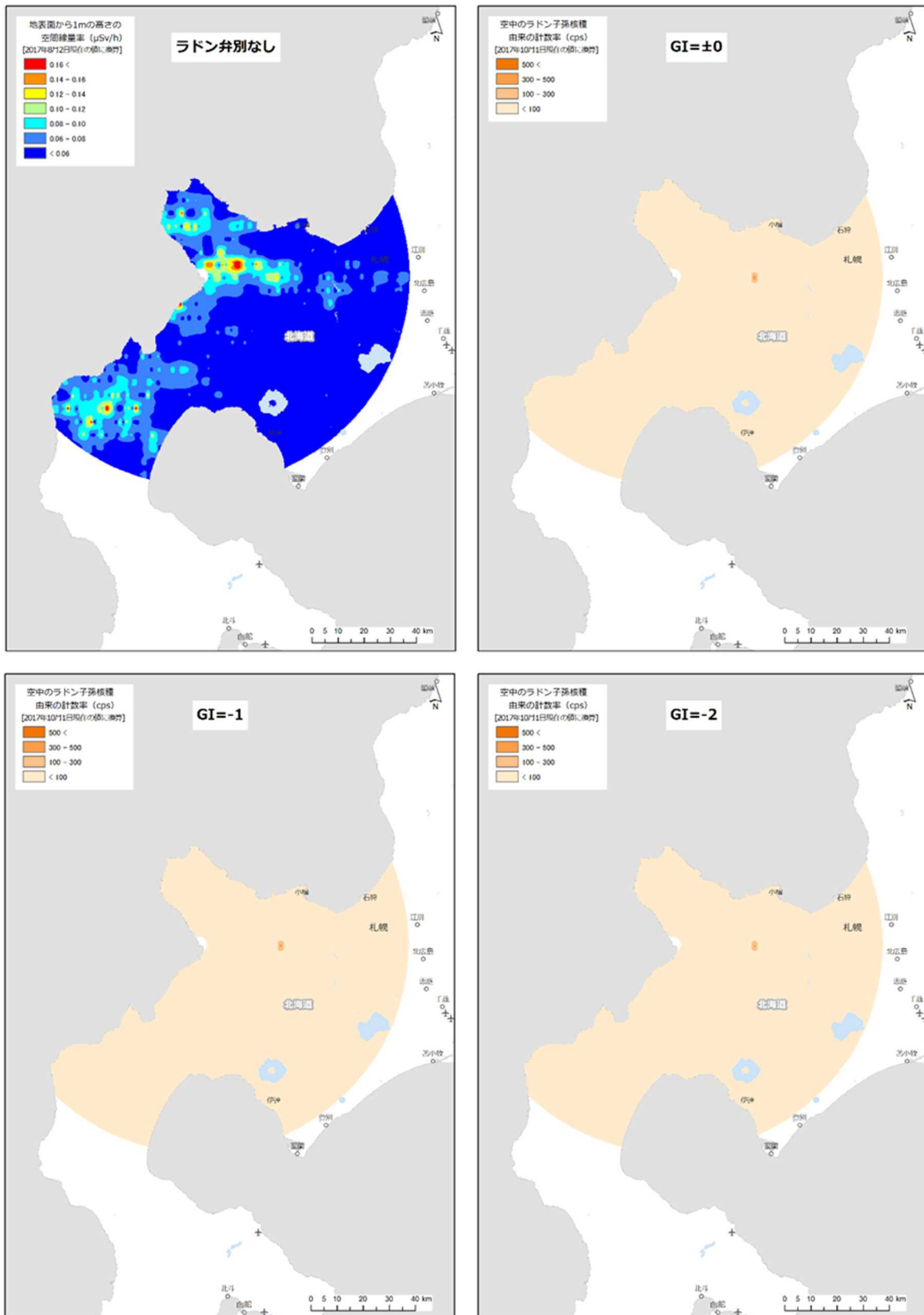


Fig. 4-39 ラドン影響弁別手法適用後の泊発電所周辺における空気中のラドン子孫核種起源の計数率マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

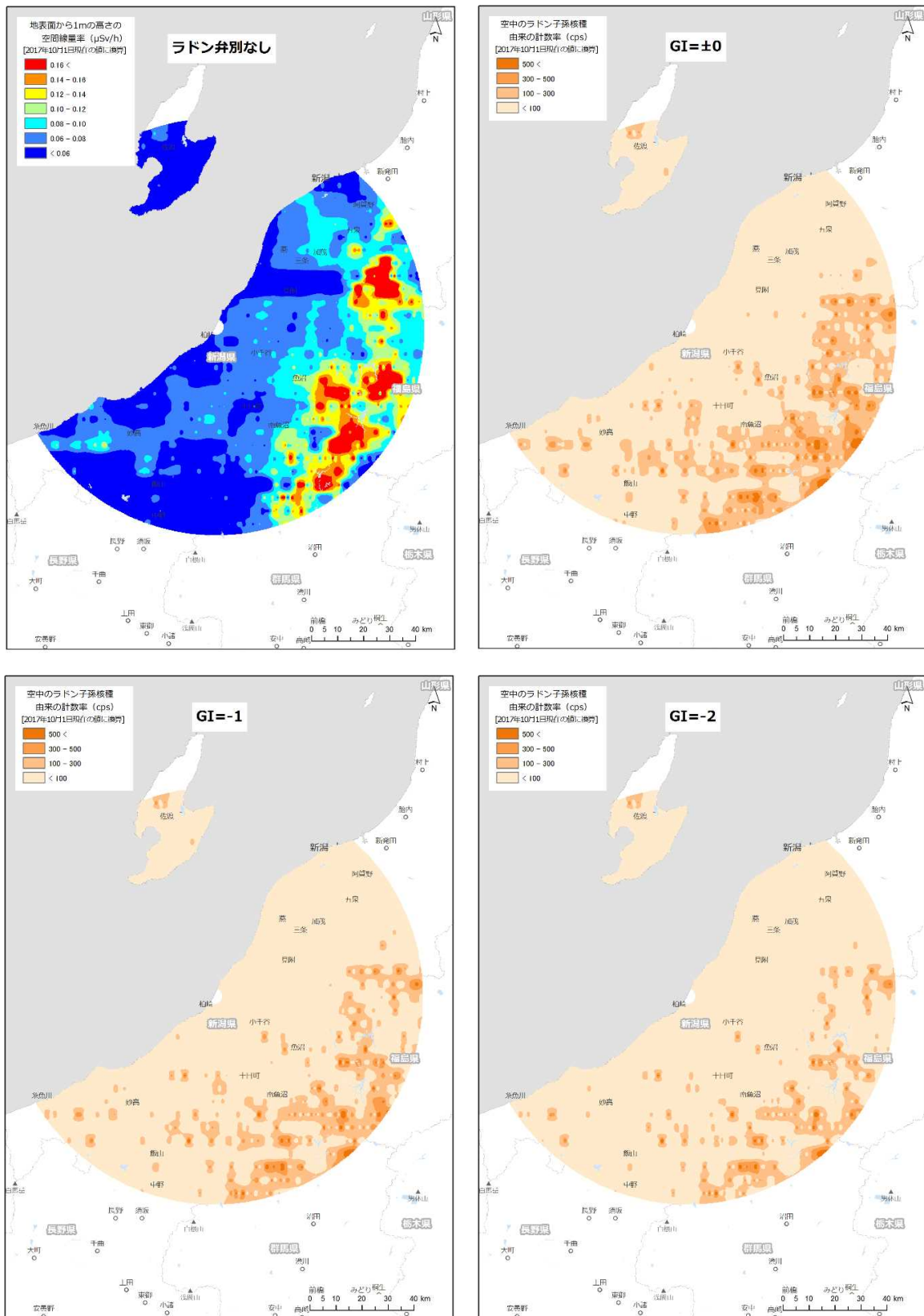


Fig. 4-40 ラドン影響弁別手法適用後の柏崎刈羽発電所周辺における空気中のラドン子孫核種起源の計
数率マップ

(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)

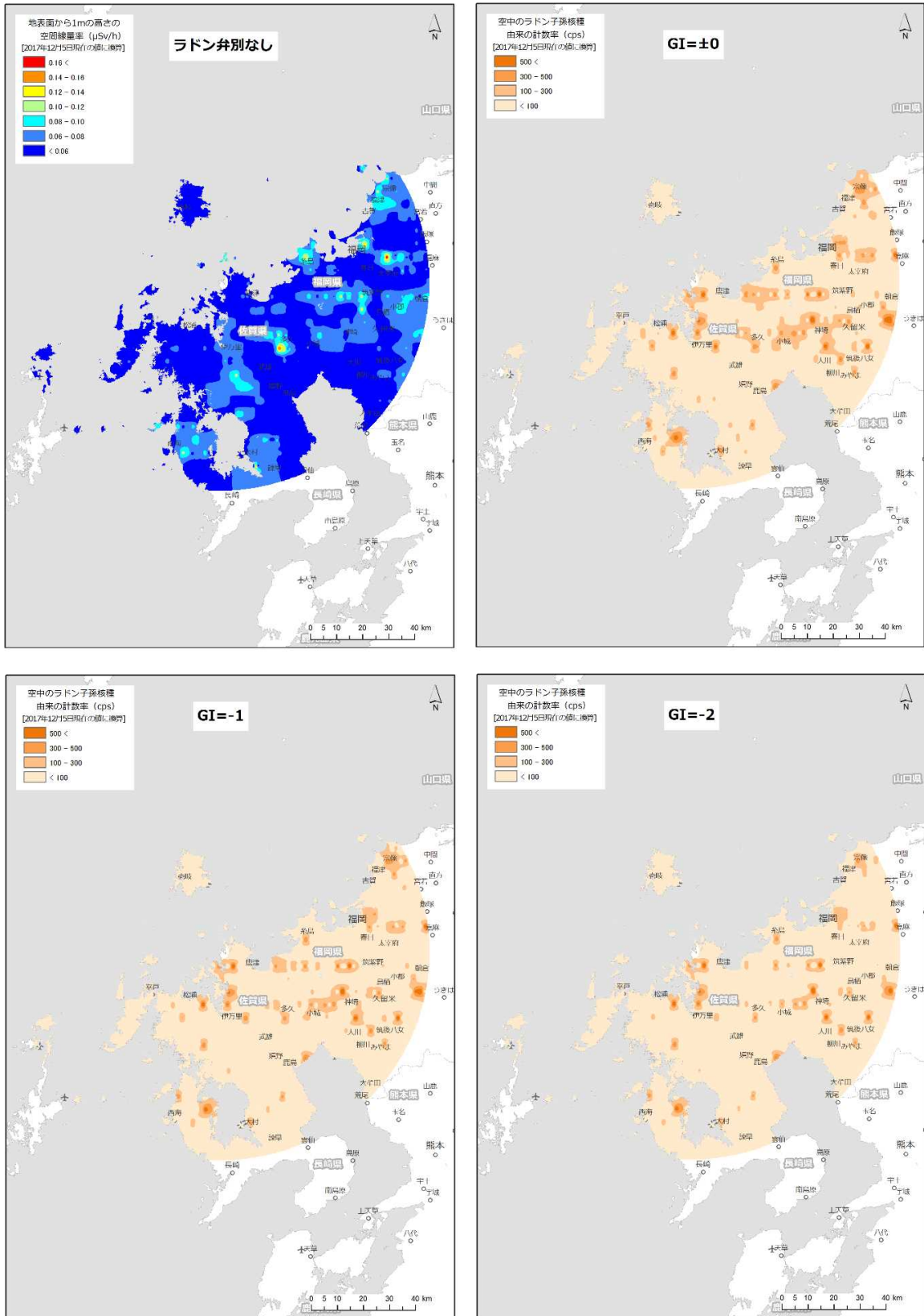


Fig. 4-41 ラドン影響弁別手法適用後の玄海原子力発電所周辺における空気中のラドン子孫核種起源の計数率マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

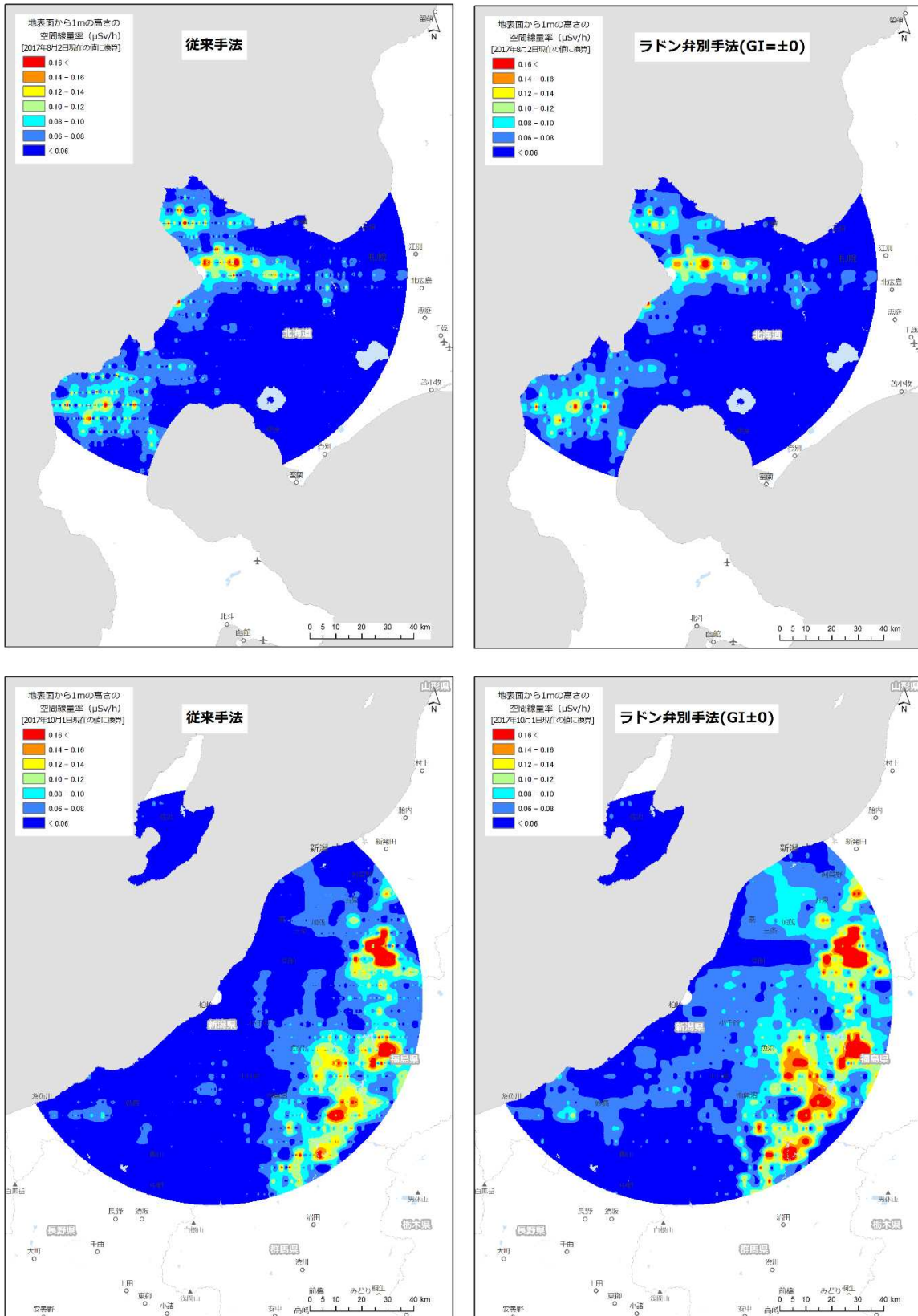


Fig. 4-42 ラドン影響弁別手法適用後の発電所周辺空間線量率マップ

(1/2)

(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)

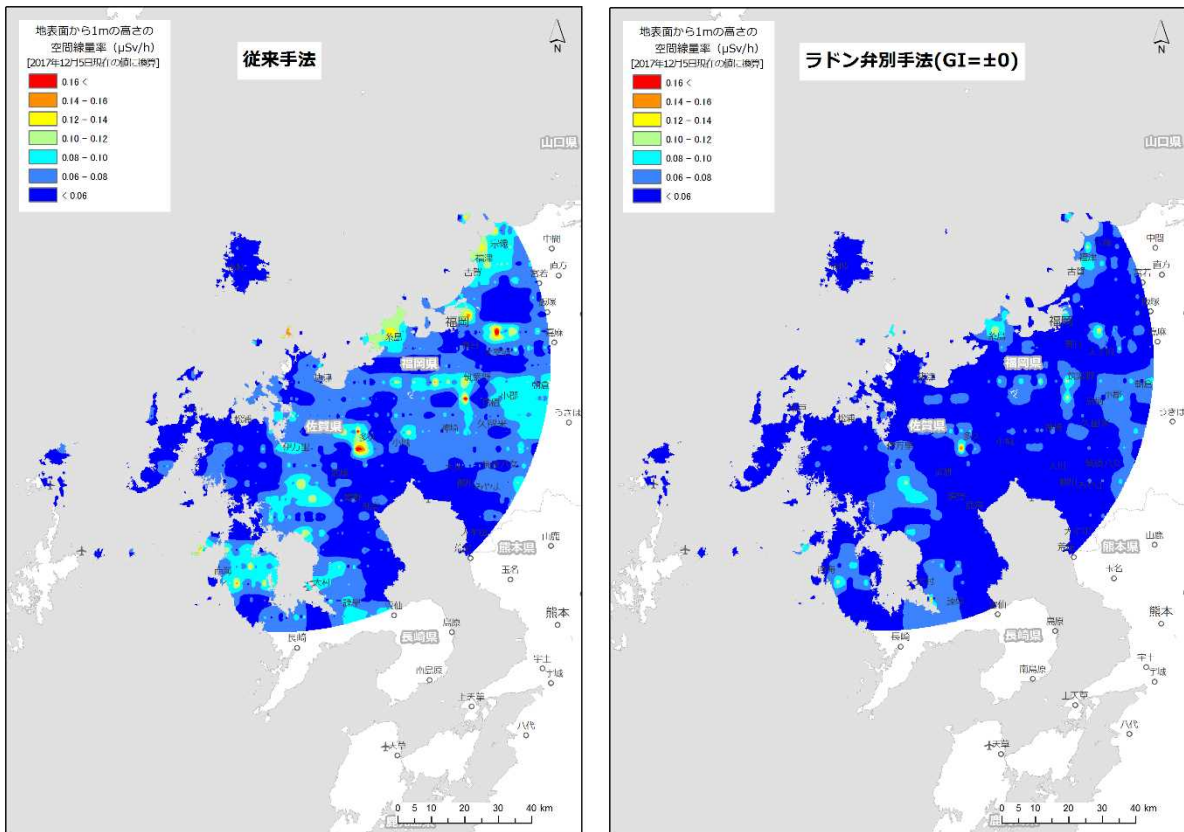


Fig. 4-42 ラドン影響弁別手法適用後の発電所周辺空間線量率マップ
(2/2)

(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)

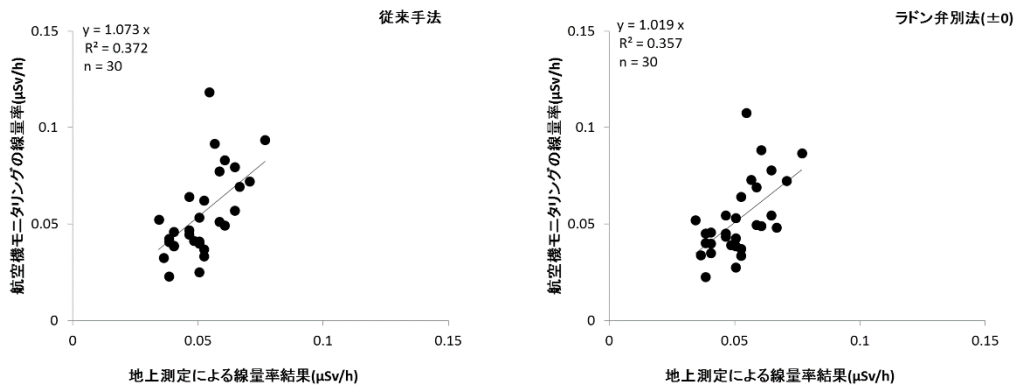


Fig. 4-43 泊発電所モニタリングにおける従来法とラドン弁別法を用いた空間線量率換算結果と地上測定値との比較

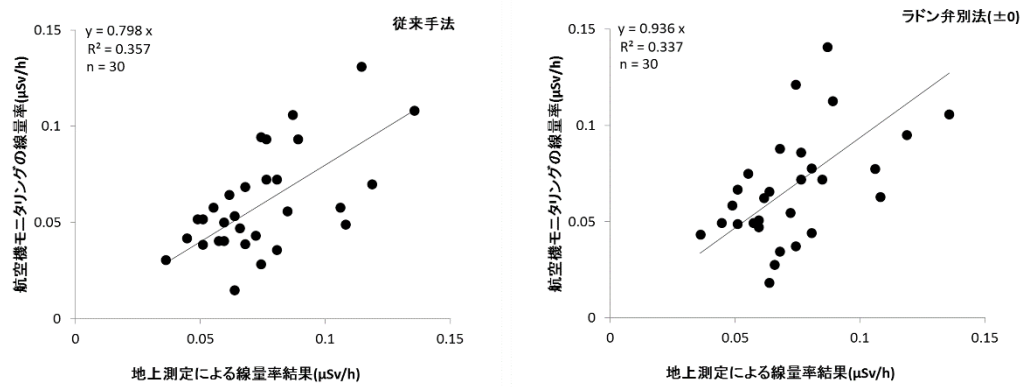


Fig. 4-44 柏崎刈羽原子力発電所モニタリングにおける従来法とラドン弁別法を用いた空間線量率換算結果と地上測定値との比較

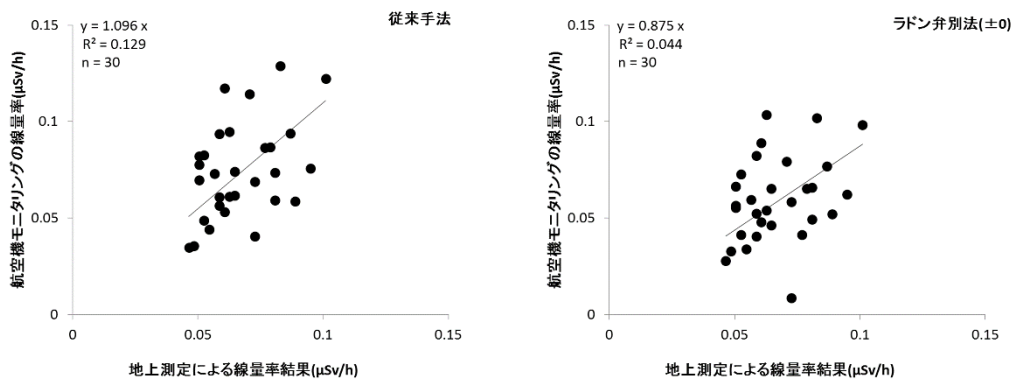


Fig. 4-45 玄海原子力発電所モニタリングにおける従来法とラドン弁別法を用いた空間線量率換算結果と地上測定値との比較

4.6. 放射性セシウム沈着量

泊発電所、柏崎刈羽原子力発電所および玄海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、放射性セシウム沈着量の算出を行った。放射性セシウム沈着量マップを Fig. 4-46 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。

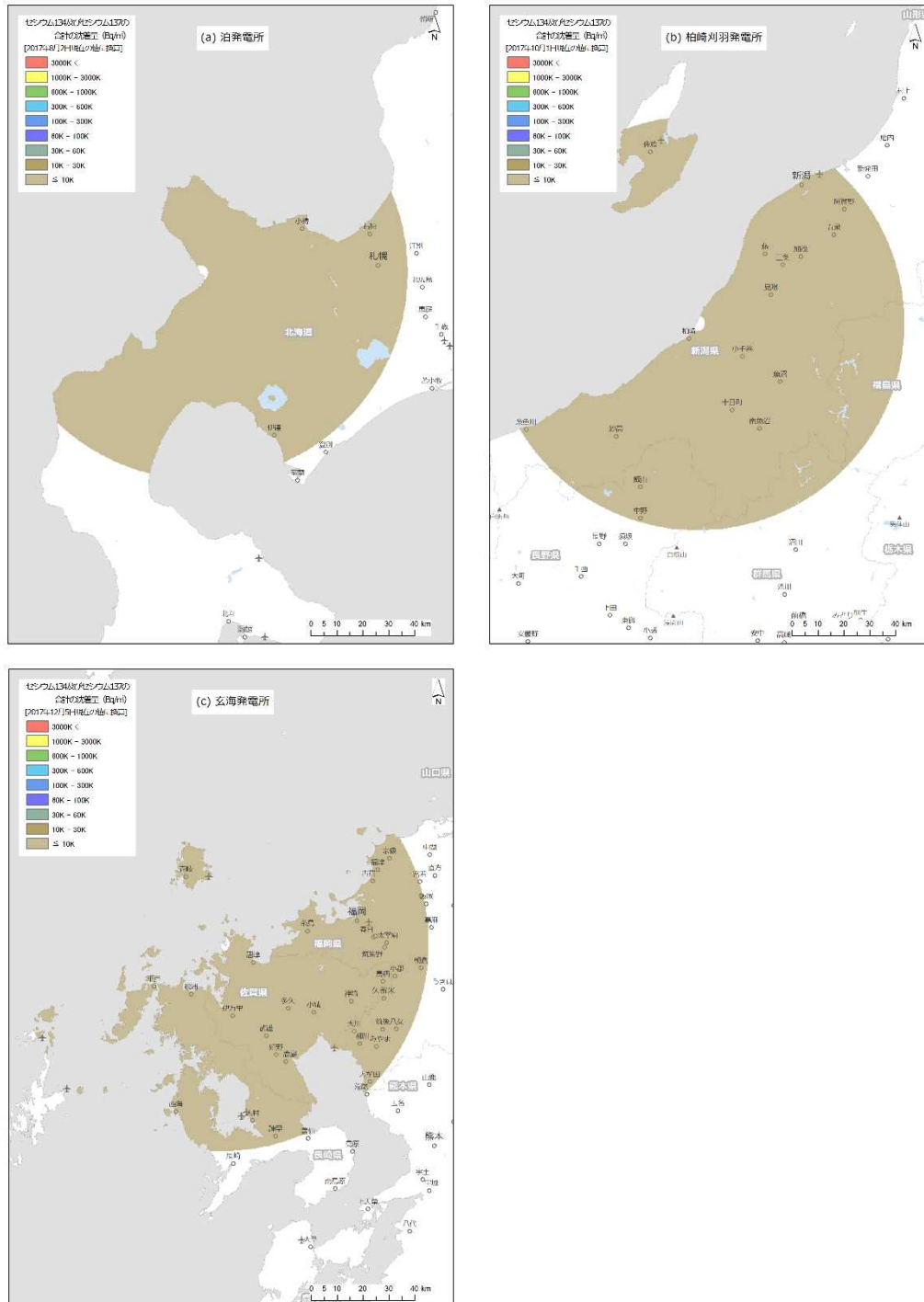


Fig. 4-46 発電所周辺の放射性セシウム沈着量マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

5. 緊急時モニタリング用ラックの製作

5.1. 目的

緊急時における航空機モニタリングの実施には、時間的及びマンパワー的な制約が予想されるため、機器の機体への積み込みは簡便である必要がある。現状の事業では、機体が特定できないため、機器を個々に固縛ロープで機体に固定して実施してきたが、搭載まで30分から1時間要していた。そこで、今年度様々な機体に対応でき機器をあらかじめ固定できるラックの製作を行った。本ラック自体を機体に固定することで簡便に搭載が可能になる。また、搭載後のラックの強度及び据付耐性について、計算で評価を行った。

5.2. ラックの外観

製作したラックの外観について Fig. 5-1 に示す。ラックは2つ分割できるように製作されており、1つのラックに機器を搭載した重量は約100 kg程度となり成人男性2名での運搬が可能である。各機器はラックにボルト (AN4 Bolt) で固定する。ラックは、機体取付金具 (JAW fitting) 及び固縛ベルトでの固定が可能とした。ラック取り付け後の重量について Table 5-1 に示す。



Fig. 5-1 製作したラックの写真

(左上) ラック, (左下) 機体取付金具, (右) 機器搭載後

Table 5-1 機器搭載後のラック重量

機器名	型式	重量 (kg)
ラック1	JM656-25-100-11	12.2
NaI 検出器	RSX-3+RS701	44.0
LaBr検出器	RSX-1	8.0
バッテリー	TI 1000GPU-24	26.0
	計	90.2
ラック2	JM656-25-100-21	14.8
NaI 検出器	RSX-3+RS701	44.0
データ収集装置	RS-501+PDC	20.0
高精度GPS	NK918BS	2.0
バッテリー	TI 1000GPU-24	26.0
	計	106.8

5.3. 強度計算

強度計算は、緊急時に使用するとされている UH-60J タイプのヘリコプターに搭載することを想定し、飛行時のラックの強度及び機体取付器具のせん断応力について評価を行った。評価方法は、耐空性審査要領²³⁾に従った。評価した慣性力について Table 5-2 に示す。なお、金具係数は 1.15 を採用した。評価項目について以下に示す。

- ① NaI 検出器の装備（ラックへの取付ボルトとラック下部パネルのせん断応力評価）
- ② バッテリーの装備（ラックへの取付アングルと固縛ベルトの評価）
- ③ データ収集装置用棚の強度計算（棚とラックの取付位置箇所のせん断応力評価）
- ④ ラックの機体への取り付け（ラックと機体の取付金具とラック下部パネルのせん断応力評価）
- ⑤ 固縛ベルトによるラックの機体への取付（ラック側の取付治具の強度）

それぞれの検討を行った結果すべての項目について、ラックの材料の強さと比較して計算結果が下回ったため、本ラックは飛行時の応力に対して安全であるといえる。

Table 5-2 各機器の慣性力

機器名	型式	重量 (kg)	最大終極慣性荷重 (kg)			
			上方	前方	側方	下方
NaI 検出器	RSX-3+RS701	44.0	66	176	88	231
LaBr検出器	RSX-1	8.0	12	32	16	42
バッテリー	TI 1000GPU-24	26.0	39	104	52	137
	ラック1合計	90.2	135	361	180	474
NaI 検出器	RSX-3+RS701	44.0	66	176	88	231
データ収集装置	RS-501+PDC	20.0	30	80	40	105
高精度GPS	NK918BS	2.0	3	8	4	11
バッテリー	TI 1000GPU-24	26.0	39	104	52	137
	ラック2合計	106.8	160	427	214	561
	慣性力係数		1.50	4.00	2.00	5.25

6. 衛星通信を利用したリアルタイムデータ通信システム的设计

6.1. 目的と背景

現在のRSIシステムは、データを取得した後、システムに内部保存されているデータについて解析を行っている。その結果、公開できるデータの完成までには、ヘリコプターが離陸してから着陸するまでの時間及び解析の時間が必要となる。実際の緊急時には、一刻も早くデータの提供・解析が求められるため、ヘリコプター内から何らかの通信で、放射線の測定データをダウンロードできるシステムを構築しておく必要がある。原子力規制庁では、平成28年度よりリアルタイムダウンロードのシステム検討を開始した。平成28年度は、ヘリコプター内で使用できる衛星通信の端末を購入し性能評価を行っている。購入した端末はナビコムアビエーション社製NCS-P01であり、外観についてFig. 6-1に示す。平成29年度は、端末からとRSIシステムの接続及び地上のシステムの検討及び設計を行った。



Fig. 6-1 規制庁所有衛星データ通信端末

6.2. 災害救援航空機情報共有ネットワーク (D-NET)

災害時には、数多くのヘリコプターが異なった目的で飛行を行うため、それらの管制を行うシステムを構築することは課題となっている。国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)は災害時に救援航空機と対策本部等の間で必要な情報を共有化し、最適な運航管理を行うことにより、救援ミッション遂行時の無駄時間や救援機同士の異常接近を減らすこと等によって、効率性と安全性を向上することを目的とした災害救援航空機情報共有ネットワーク(D-NET)の研究を行っている²⁴⁾。D-NETとは、通信フォーマットの統一化がその研究の優位点とであり、フォーマットを適用することにより、他機関にわたるヘリコプターの位置情報

等を共有することが可能である。また、システムは拡張性に優れローカルで使用する場合には位置情報以外にも様々な情報を追加可能である。すでに、総務省消防庁、自衛隊及び災害派遣医療チーム (DMAT) の使用するヘリコプターには実装されている²⁵⁾。ここでは、将来的に他機関との連携も可能な D-NET フォーマットに対応した航空機モニタリングのリアルタイム通信システムの設計を行った。

6.3. システム概要

システムは、衛星通信を使って日本のどの場所でも通信でき、かつ通信料の比較的安価な SBD (Short Burst Data) を採用する。SBD 方式は、双方向でのデータ通信が可能で、通信料はデータ量に応じた従量課金のサービスとなる。本データ通信はメールに添付する形で送られるため、1回につき送ることのできるデータ量が小さいものの (200~300 バイト程度)、遅延が比較的短いこと (1-3 分) が特徴である。それらのデータを送受信するシステムの全体イメージを Fig. 6-2 に示す。ヘリコプター内の RSI システムで取得した放射線の全計数率及び高精度 GPS で取得し位置情報は、イリジウム衛星を通して、地上のメールサーバに送られる。メールサーバで受信したデータは測定位置情報と計数率情報を一時的に動態管理システムと呼ばれるサーバでリアルタイムに機体の位置情報を表示するとともに計数率情報を放射線情報管理システムに転送する。転送された計数率情報は放射線情報管理システムで地図上に表示するためのデータ変換を行い、動態管理システムに再度送信され地図上に表示される。動態管理システムで表示される位置情報は、タブレット等の端末で確認可能となる。動態管理システムで表示される位置情報と放射線の計測情報のイメージと Fig. 6-3 に示す。

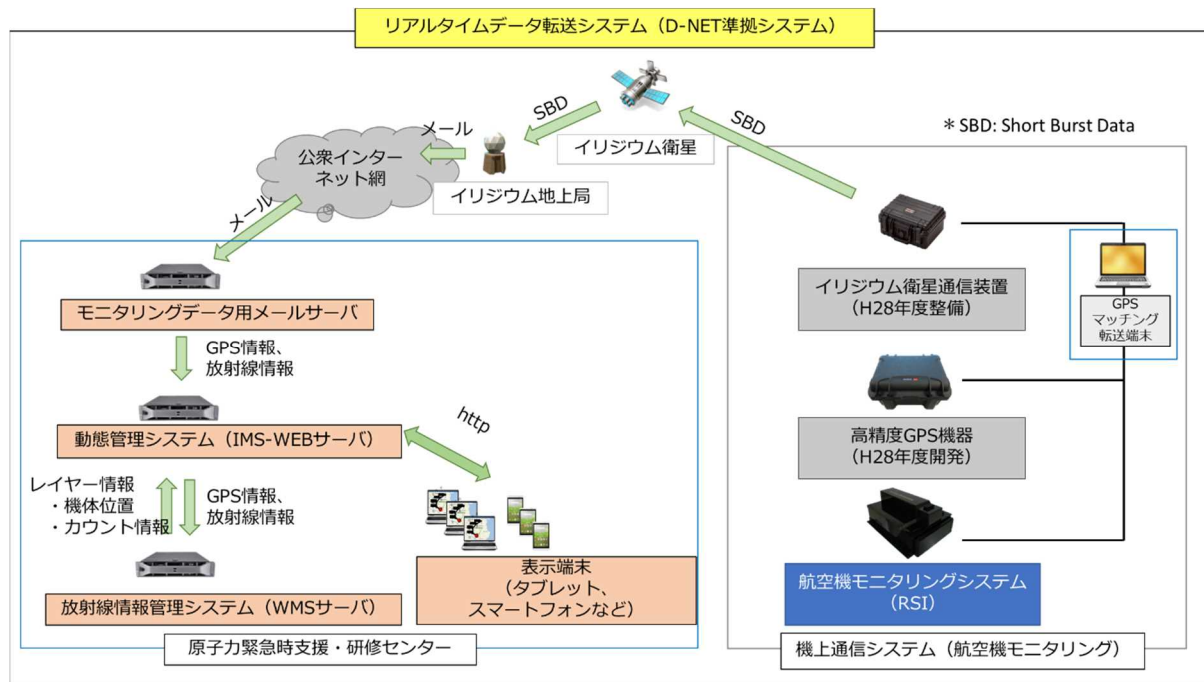


Fig. 6-2 リアルタイムデータ通信システムイメージ

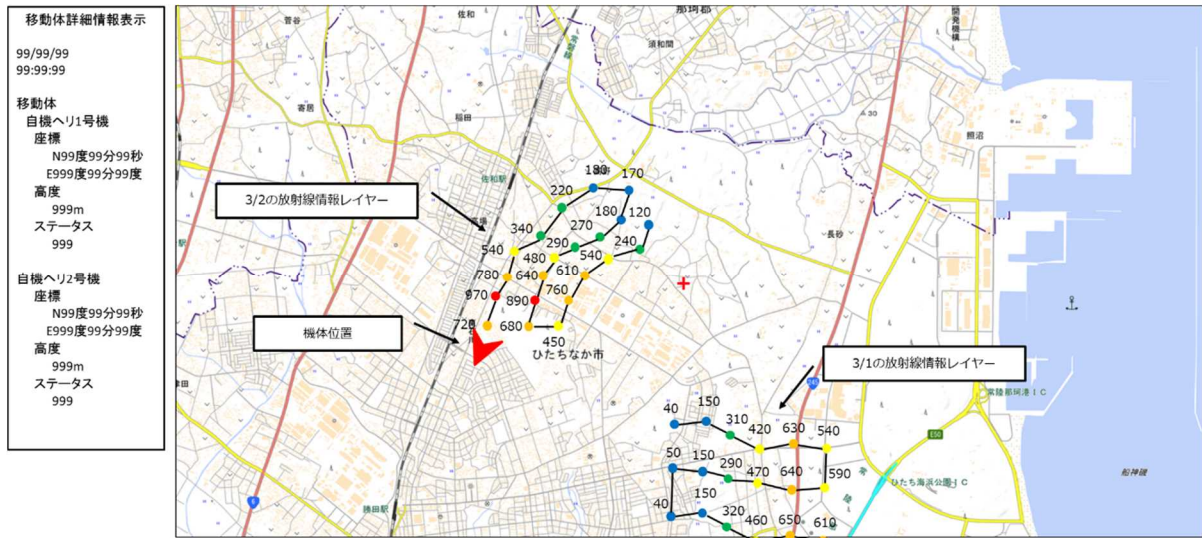


Fig. 6-3 動態管理システムに表示されるデータのイメージ

6.4. RSI システムとの接続の検討

上空で放射線測定を実施する RSI システムは海外製品であり、機器の信頼性を考えると大きな改造を行うことは望ましくない。そこで、現在の構成で測定情報を抽出するための検討を行った。調査の結果、RSI システムには外部出力用の com ポートが用意されており、GPS データ及び放射線測定データ (計数率) の出力が可能であることが分かった。実際に模擬的な測定データを取得しつつ、外部出力がされることを確認した結果、位置情報、検出器の全計数率及び特定の γ 線スペクトル (Region of Interest: ROI) の計数率が出力されることを確認した。

6.5. ハードウェアの設計

メールサーバ、動態管理システム及び放射線情報管理システムはメモリ及びデータの容量を考慮し、Table 6-1 に示すスペックとした。また、これらのサーバを組み込んだネットワークの構成図を Fig. 6-4 に示す。外部から本システムを閲覧する場合には、動態監視閲覧端末を使用し、VPN 接続を行うものとする。VPN により暗号化したデータ通信を行い、よりセキュアな環境で使用する。また、機上で測定したモニタリングデータは、衛星通信を使用し、リアルタイムで送信され、衛星局経由でインターネット網へ入り、メールサーバにメールデータとして送信される。なお、独自回線の外部との通信は最低限の通信に抑え、必要の無い通信はファイアウォールにてブロックする。

Table 6-1 サーバのスペック

項目	スペック	
メモリ装置	メモリ容量	16GB(8GB×2)
CPU	型式	Intel Xeon E3-1230 v6
	クロック数	3.5GHz
	キャッシュ	8M
HDD	データ容量	1.8TB
	回転速度	10000rpm
	インターフェース規格	SAS
	RAID構成	RAID6
	拡張スロット	指定なし
	標準インターフェース	指定なし
増設インターフェース	ネットワークカード: オンボード LOM 1GBE デュアルポート (BCM5720 GbE LOM)	
	寸法	42.8 x 434.2 x 482.4 mm
	質量(標準/最大)	13.8kg
	消費電力(100V最大構成時、高負荷時)	700.0W

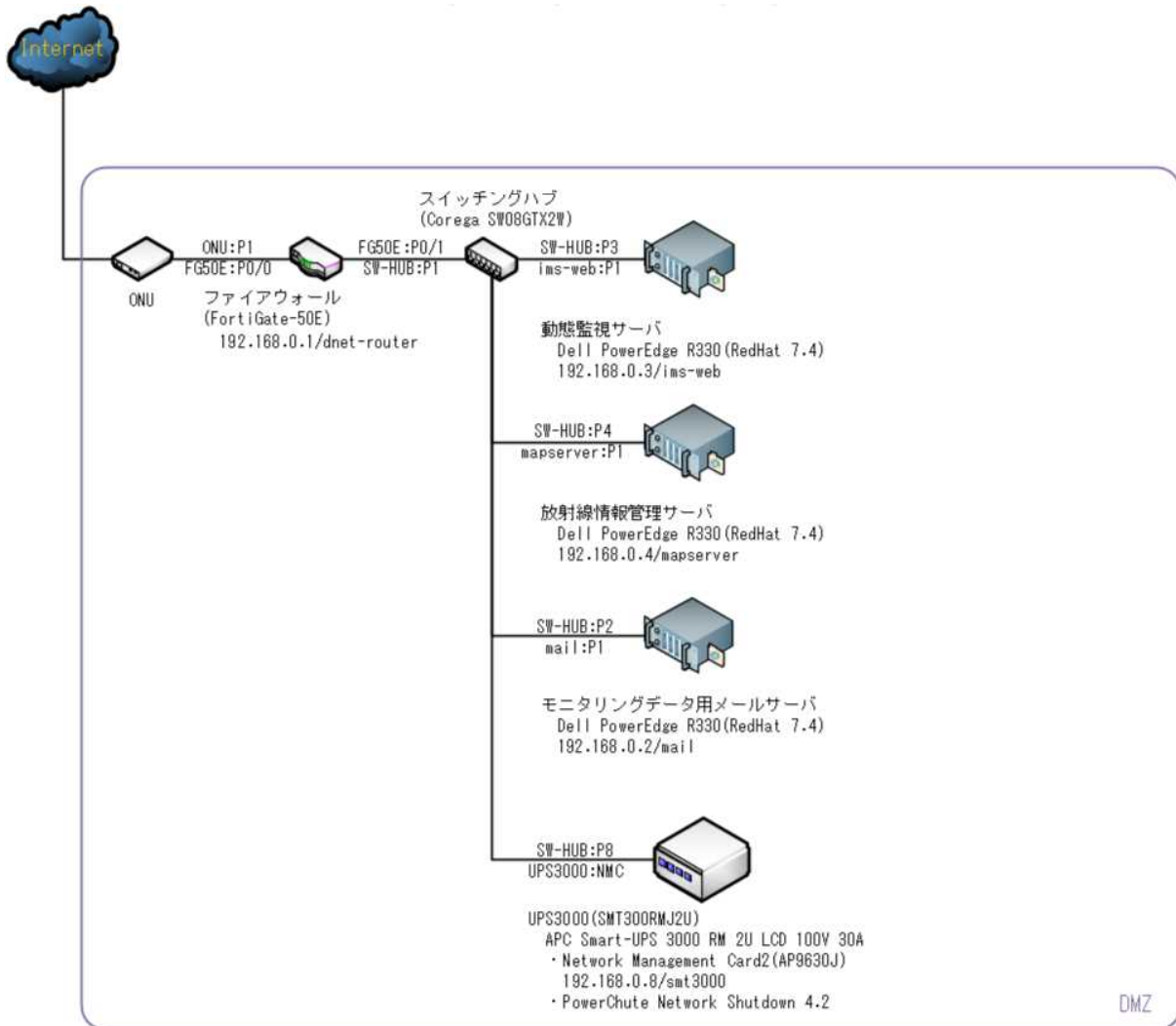


Fig. 6-4 ネットワーク接続図

6.6. ソフトウェアの設計

ヘリコプター内で RSI システムからの情報を変換し、衛星通信に送信するソフトウェアの設計を行った。Fig. 6-5 にソフトウェアの構成イメージを示す。主なソフトウェアの動作は以下のとおりである。

- A) RSI システムからデータを受信後、受信したデータから計数率を取得する。
- B) 計数率を GPS データと結合し、衛星通信でデータを送信する。
- C) この時、データの送信に成功したら、衛星通信状態の最終通信時刻を現在のシステム時刻に更新する。
- D) 通信状態を"OK"表示にする。
- E) 最終データ受信時刻を現在のシステム時刻に更新する。
- F) 一定期間、ラドアシストからデータが受信できない場合、接続状態を"NG"とする。
- G) なお、一定期間のしきい値は初期設定ファイルから取得する。
- H) ログ及び記録データを出力する。
- I) 衛星通信データを受信した場合、送信 ID をもとに正常に通信できたか確認する。
- J) 通信に成功した場合は、最終通信確認時刻を現在のシステム時刻に更新する。
- K) また、通信状態を"OK"にする。
- L) 一定時間内に衛星通信データを受信できない場合、エラーと判断し、通信状態を"NG"にする。
- M) ログを出力する。
- N) 一定間隔で電波強度確認コマンドを送信する。間隔は初期設定ファイルから取得するものとする。
- O) 取得した結果に応じて、電波強度アイコンを変更する。

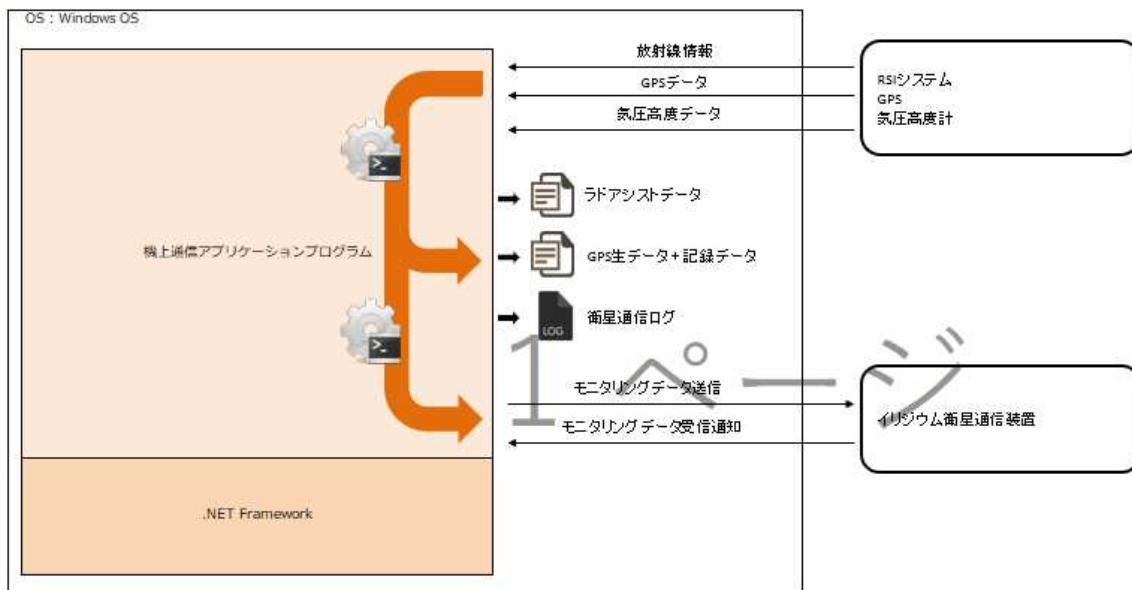


Fig. 6-5 ソフトウェアの構成イメージ

6.7. 今後の展望

今後、今回行った設計を基にシステムを構築することによって、航空機モニタリングデータがリアルタイムに地上にダウンリンクすることが可能となる。航空機モニタリングの情報は、事故状況を把握し政策決定の重要なデータとなりうるともに訓練時に活用することによってより現実に沿った対応状況を再現できると考えられる。

前述のように、本システムは D-NET に準拠しているため、JAXA 内に設置されているサーバと接続することにより、情報の共有が可能になる。一般的な D-NET の構成と設計するリアルタイムデータ通信システムとを接続イメージ図を Fig. 6-6 に示す。

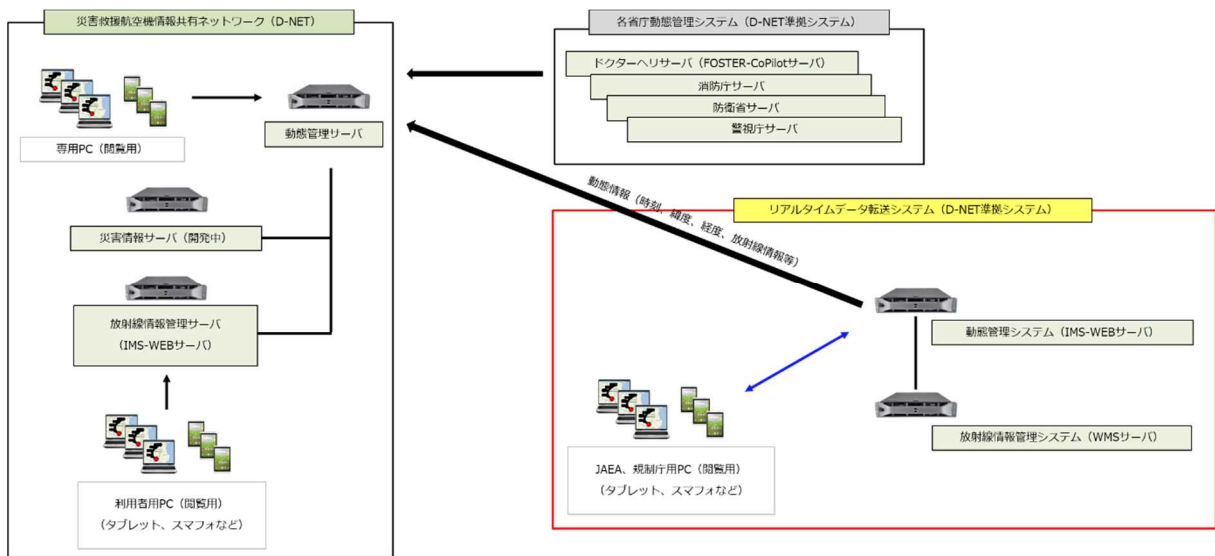


Fig. 6-6 リアルタイムデータ通信システムと D-NET との接続イメージ

7. 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

泊発電所、柏崎刈羽原子力発電所及び玄海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、泊発電所が平成29年7月24日～8月2日（のべ14フライト）の9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。柏崎刈羽原子力発電所では、平成29年7月26日～8月10日、平成29年9月30日～10月1日（のべ21フライト）の18日間を要した。7月後半から測定を開始したが、測定エリア南側の山岳部では日中雲がかかることが多く、測定の効率が著しく悪くなると判断し、8月10日で作業を中断した。その後、比較的山岳部の天候が安定すると予想された9月後半の30日から測定を再開した。期間中に天候不良で5日間フライトできない日があった。玄海原子力発電所では、平成29年11月28日～12月5日（のべ11フライト）の7日間を要した。期間中に天候不良で1日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

泊発電所：沿岸域では通年を通して海霧の発生頻度が高く、内陸深くまで入り込んでくる。海霧は地表付近を覆うため、ヘリコプターの運航に支障をきたすことが多い。

道内は本州に比較して天気の変化が大きく、局所的に状況が異なることもあるので注意が必要である。また、羊蹄山周辺は酪農が盛んな地域であり、家畜に対する騒音には十分な配慮をする必要がある。測定範囲東端には陸上自衛隊丘珠駐屯地との共用飛行場である札幌飛行場（通称：丘珠空港）の管制圏が含まれている。同飛行場は防災・消防・警察のヘリコプターの常駐する救難・防災の拠点基地となっており、かつ道内主要都市との間に定期航空路線が結ばれている。測定範囲西側は青森県三沢基地をベースとする米軍機及び千歳航空自衛隊機の訓練エリアとなっており、ほぼ毎日訓練が行なわれているが、訓練飛行は5,000ft以上が多いので調整は可能である。

柏崎刈羽原子力発電所：測定範囲南側には標高2,500mを超える越後山脈、筑摩山地があり、冬季の積雪が非常に多い地域である。そのため南側の山岳地帯は降雪が観測される11月下旬から、残雪のある5月頃までは測定には適さない。夏場においては日中の気温が上

昇するのに伴い山岳部に雲が付く事が多く、測定飛行の効率が著しく悪くなる傾向にある。天候が安定する期間、時間が少ないのが特徴である。新潟空港、佐渡空港の2空港が存在するが、過密空港ではなく測定範囲北縁のため測定飛行に支障はない。自衛隊の訓練エリアについては事前調整により飛行は可能であるが、前日まで使用状況が分からないため、当日の調整が必要である。民間の訓練エリアについては使用頻度が少ないので測定飛行に支障ない。

玄海原子力発電所：測定区域内は平野部が多く高い山もないため、地形的には測定飛行を実施する上で比較的容易な地域である。ただし、測定区域内には熱気球の練習エリアなど民間訓練区域が複数存在し、熱気球やパラグライダー飛行のための NOTAM（航空情報：Notice To Airmen）が出やすい地域であり注意が必要である。エリア東側には発着数の多い福岡空港があり、発着便の多い 11：00～13：00、16：00～18：00 はヘリコプターを含む小型機の飛行自粛依頼が出ているため、この時間帯での測定飛行は極力避けるべきである。測定エリア西側に自衛隊の訓練エリアがあり恒常的に 200ft～40,000ft での訓練が実施されているが、訓練エリアの殆どが海上であり、宇久島、小値賀島周辺の測定飛行のみ事前の調整が必要である。

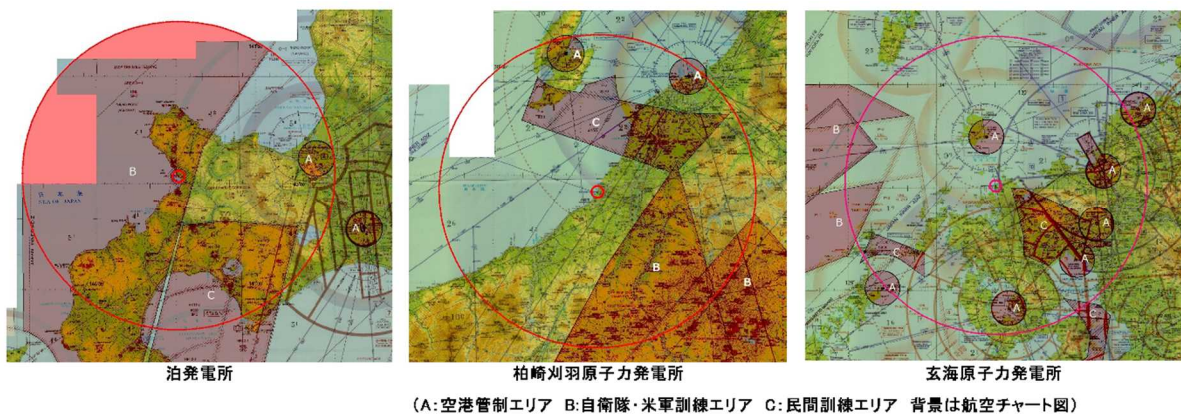


Fig. 7-1 各地区の空域

謝辞

本調査研究は、「原子力規制庁による平成 29 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, 飛田晋一朗, 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> (2018 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_(2018年3月1日閲覧).
- 19) 小疇尚, 野上道男, 小野侑五, 平川一臣, 日本の地形 2 北海道, 東京大学出版会, 2010
- 20) 町田洋, 松田時彦, 梅津正倫, 小泉武栄, 日本の地形 5 中部, 東京大学出版会, 2011
- 21) 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.
- 22) 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/> (2018年3月1日閲覧)
- 23) 国土交通省航空局, 耐空性審査要領, 鳳文書林出版販売, 2017.
- 24) 小林啓二, 防災・小型機運航技術～より多くの人を救うために～, 日本航空宇宙学会誌, 64, 305-308, 2016.
- 25) 宇宙航空研究開発機構ホームページ, 総務省消防庁による D-NET に対応した集中管理型消防防災ヘリコプター動態管理システムの運用開始について, http://www.jaxa.jp/press/2014/04/20140409_d_net_j.html(2018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 29 年 9 月 25 日

原子力規制庁及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。本訓練は、平成 29 年度「原子力総合防災訓練」の一環として実施された。

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及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及び測定上の課題を抽出する。

3. 訓練実施日時

平成 29 年 9 月 4 日 (月) 7:00～15:00

4. 訓練対応者

原子力規制庁：1 名

防衛省 (航空自衛隊)：3 名

防衛省 (統合幕僚監部)：1 名

JAEA: 現場: 3 名 (機器操作: 2 名; データ解析: 1 名)

○使用機体：UH-60 (図 1 機体写真)

6. 訓練実績

7:00 飛行決心連絡 (防衛省→規制庁・JAEA)

8:30 JAEA, 規制庁 芦屋基地到着

10:00-10:30 航空機モニタリング機器機体搭載(搭載写真: 図 2)

10:30-10:45 ブリーフィング

11:00-12:45 フライト (←記録シート確認、11:00-12:42)

12:45-13:00 機材撤収

12:50-13:50 解析

14:05 NEAT-ERC 報告

7. フライトプラン

- ・測定フライト：志岐島上空の 15 km 測線 3 本
- ・宇宙線フライト：芦屋基地志岐島間の海上 (300-1500 m)

- ・キャリブレーションフライト：芦屋基地敷地内上空 (300 m, 450 m, 600 m, 750 m)
- ・フライトの軌跡：図 3

8. 課題抽出

①輸送

- ・専用貨物による陸送 (JAEA NEAT (規制庁航空機モニタリング保管場所)～芦屋基地)：15 時間

②機材搭載

- ・ラックの整備により、機体への搭載委時間約 30 分

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 4
- ・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 5）
- ・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 6）
- ・線量率マップ：図 7（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）

④現地解析

- ・フライト後、解析結果報告まで時間：約 1 時間程度
- ・解析結果は、キャリブレーション個所の地上値の測定結果がなかったため、当初、昨年度に実施した木更津での解析パラメータを適用した。その結果、本来の線量率よりも 50% ほど高く解析された。そこまでの解析時間は約 40 分。その後、モニタリングポストのデータ等を参考に再解析し、おおむね妥当な結果を報告した（参考図）。
- ・現地解析手法については、より最適化が必要。

9. まとめ

- ・原子力規制庁及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。
- ・ラックの製作により、機材搭載時における簡便で時間のかからない搭載が可能。
- ・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（フライト場所及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 試験等の考慮が必要。
- ・現地での解析手法については、さらなる高精度化が必要。

以上



図 1 使用機体 (UH-60)



図 2 航空機モニタリング機材搭載状況



図3 フライト軌跡

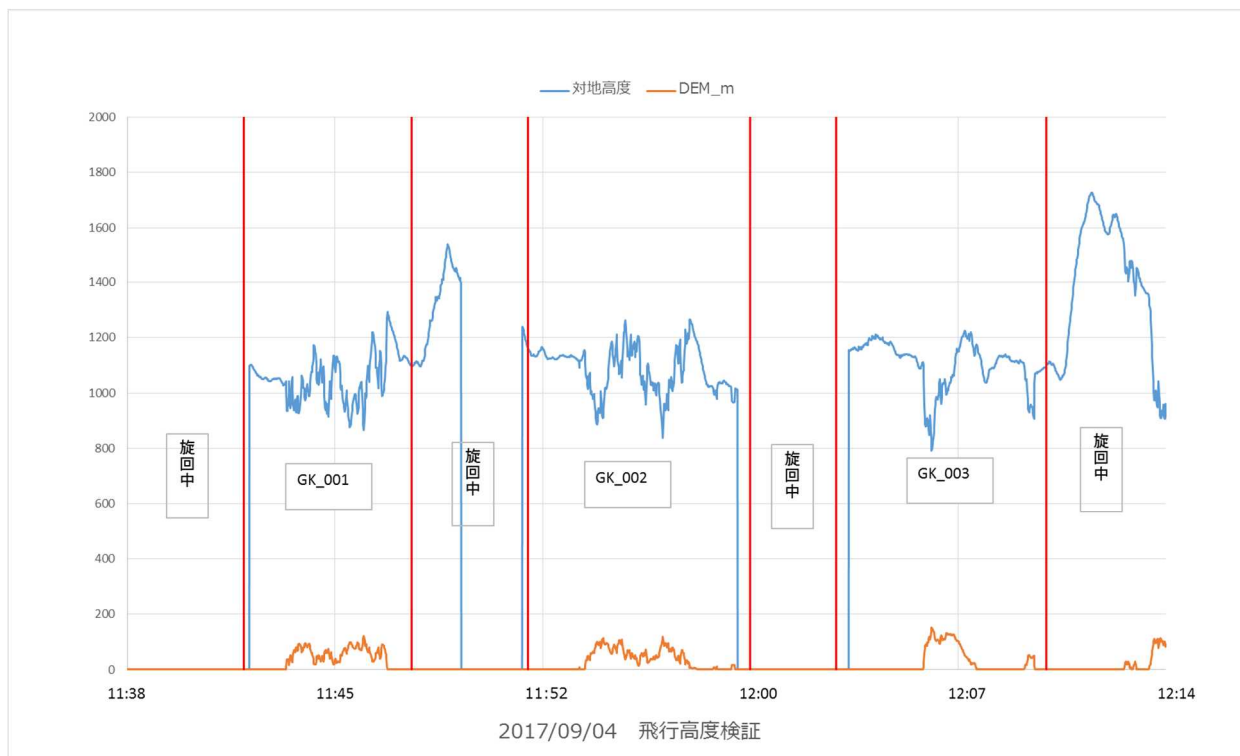


図4 対地高度の解析結果

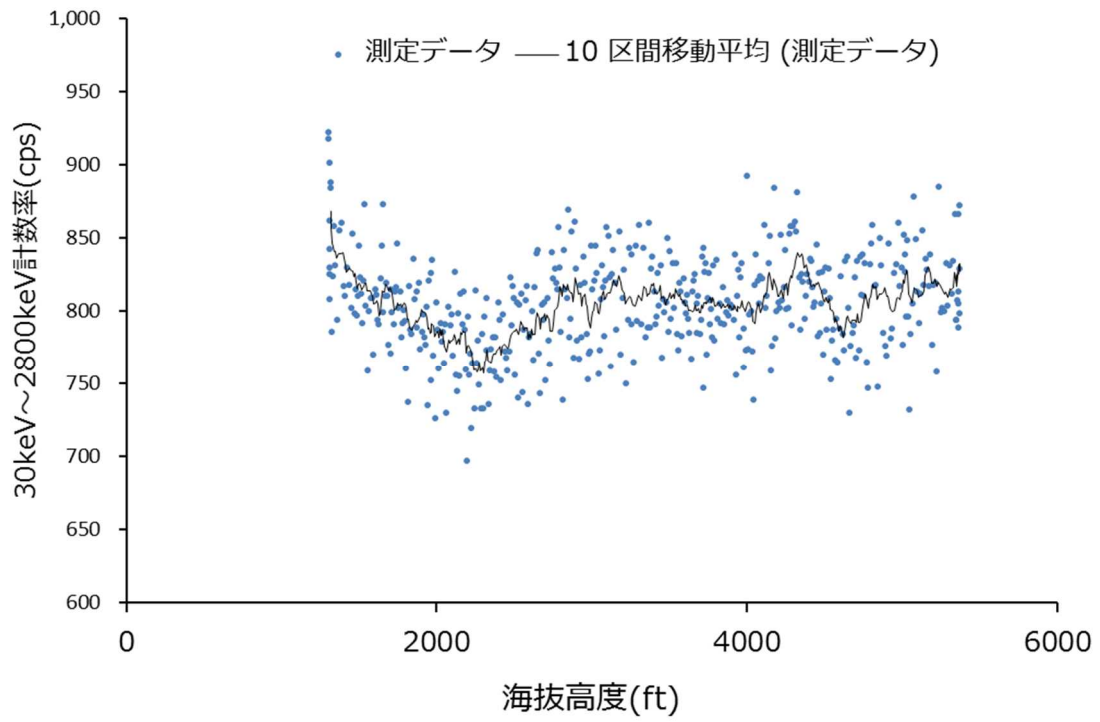


図5 宇宙線フライト解析結果

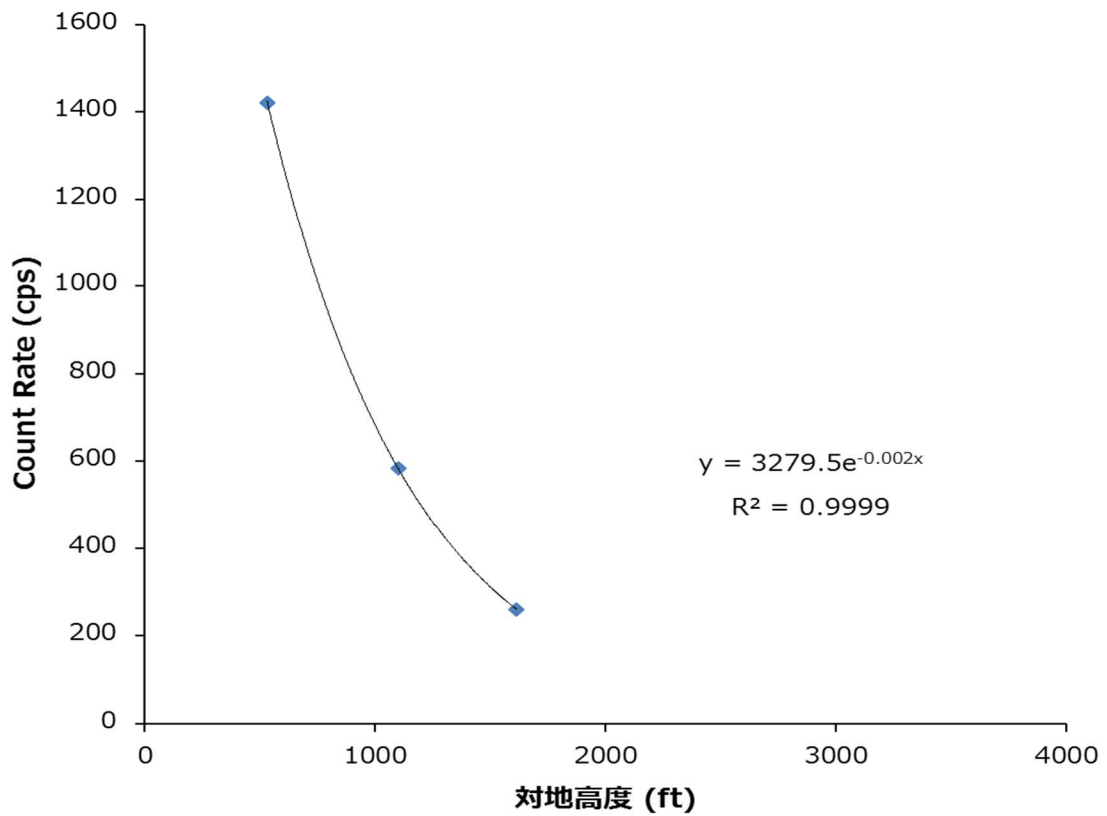


図6 キャリブレーションフライト解析結果

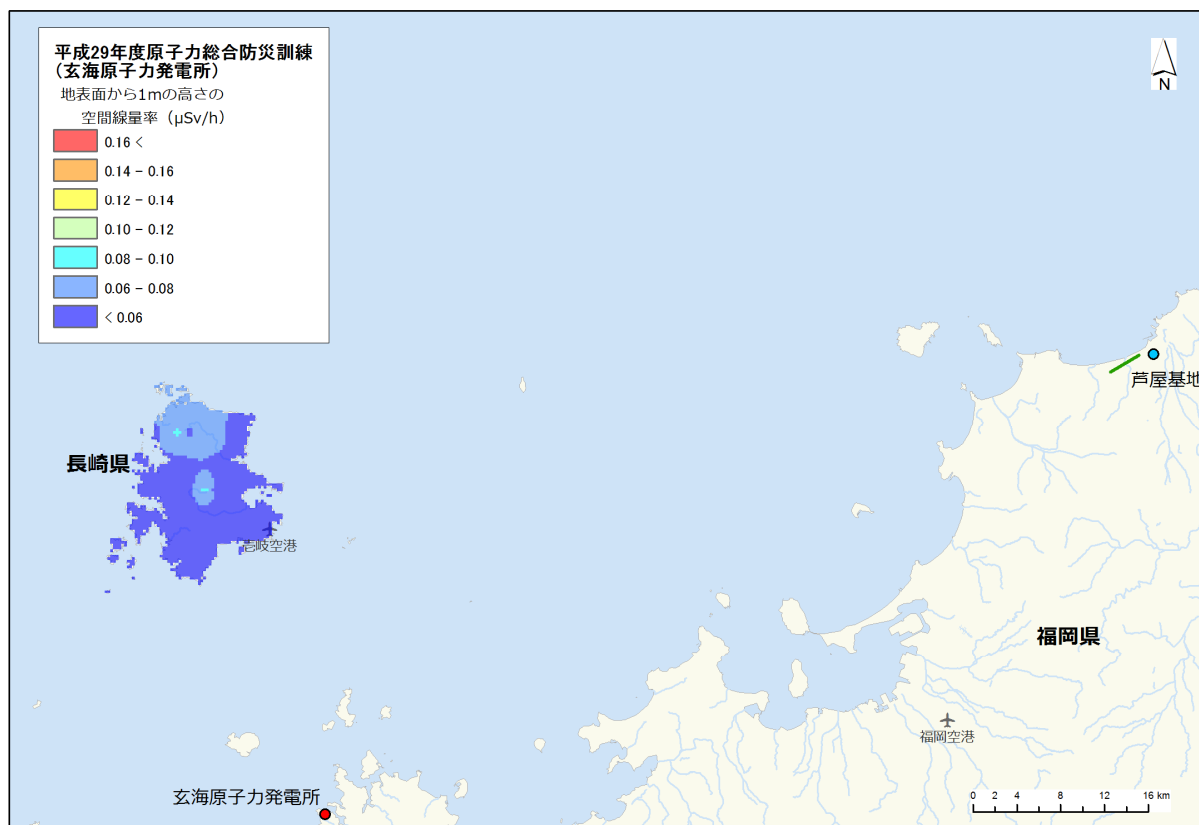


図7 線量率マップ

(地上測定は実施していないため、2012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)

参考図：プレ参考速報結果（未公表）

航空機モニタリング連絡フォーマット			
日時	2018/3/28 10:19 AM		訓練
タイトル	航空機モニタリングの結果について		
概要	平成29年度玄海原子力発電所総合防災訓練における航空機モニタリングデモの結果報告	確認	
フライト場所	壱岐		
フライト日時	2017/9/4 11:00	～	2017/9/4 12:42
キャリアレーション	テストライン		宇宙線・BG
地上測定	未実施	実施の場合：測定点数（ ）	
換算条件	過去のデータから換算		
備考			

