JAEA-Technology 2023-026 DOI:10.11484/jaea-technology-2023-026



令和4年度緊急時対応技術適用のための バックグラウンド航空機モニタリング及び 無人航空機による放射線モニタリングに係る技術開発 (受託研究)

Background Radiation Monitoring via Manned Helicopter and Development of Technology for Radiation Monitoring via Unmanned Airplane for Application of Nuclear Emergency Response Technique in the Fiscal Year 2022 (Contract Research)

普天間 章	眞田 幸尚	佐々木 美雪	川﨑 義晴
岩井 毅行	平賀 祥吾	萩野谷 仁	松永 祐樹
圷 雄一郎	新井 仁規	外間 智規	平岡 大和
ト部 嘉 コ	□藤 保		

Akira FUTEMMA, Yukihisa SANADA, Miyuki SASAKI, Yoshiharu KAWASAKI Takeyuki IWAI, Shogo HIRAGA, Masashi HAGINOYA, Yuki MATSUNAGA Yuichiro AKUTSU, Yoshinori ARAI, Tomonori HOKAMA, Hirokazu HIRAOKA Yoshimi URABE and Tamotsu KUDO

> 安全研究・防災支援部門 原子力緊急時支援・研修センター

Nuclear Emergency Assistance and Training Center Sector of Nuclear Safety Research and Emergency Preparedness

March 2024

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。 本レポートの成果(データを含む)に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の 条件で利用してください。(<u>https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja</u>) なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト(<u>https://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課 〒 319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地 49 E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan

E-mail: ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2024

令和4年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング及び 無人航空機による放射線モニタリングに係る技術開発

(受託研究)

日本原子力研究開発機構 安全研究・防災支援部門

原子力緊急時支援・研修センター

普天間 章、眞田 幸尚、佐々木 美雪⁺¹、川崎 義晴^{*1}、岩井 毅行^{*1}、平賀 祥吾^{*1}、 萩野谷 仁^{*2}、松永 祐樹^{*2}、圷 雄一郎^{*3}、新井 仁規^{*3}、外間 智規、平岡 大和、 卜部 嘉^{*1}、工藤 保

(2023年12月1日受理)

2011年(平成23年)3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による津波に起因した東京電力福 島第一原子力発電所事故によって、大量の放射性物質が周辺環境に飛散した。事故直後より、放 射線の分布を迅速かつ広範囲に測定する手法として、有人へリコプター等を用いた航空機モニタ リングが活用されている。本モニタリング技術を原子力施設等の事故時における緊急時モニタリ ングに活用し、モニタリング結果を迅速に提供するために、全国の発電所周辺におけるバックグ ラウンド放射線量や地形的特徴、管制空域等の情報を事前に整備している。令和4年度は関西電力 (株) 美浜発電所並びに日本原子力発電(株) 敦賀発電所及び四国電力(株)伊方発電所の周辺につい て航空機モニタリングを実施し、バックグランド放射線量及び管制区域等の情報を整備した。さ らに、有人へリコプター等を用いた航空機モニタリングの代替技術として期待されている無人航 空機によるモニタリングの技術開発を進めた。本報告書は、それらの結果及び抽出された技術的 課題についてまとめたものである。

本調査研究は、日本原子力研究開発機構が原子力規制庁との委託契約により実施した「令和4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。

- 原子力緊急時支援・研修センター:〒311-1206 茨城県ひたちなか市西十三奉行 11601-13
- +1福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉環境国際共同研究センター

*1 株式会社 NESI

*2 検査開発株式会社

*3原子力エンジニアリング株式会社

JAEA-Technology 2023-026

Background Radiation Monitoring via Manned Helicopter and Development of Technology for Radiation Monitoring via Unmanned Airplane for Application of Nuclear Emergency Response Technique in the Fiscal Year 2022 (Contract Research)

Akira FUTEMMA, Yukihisa SANADA, Miyuki SASAKI⁺¹, Yoshiharu KAWASAKI^{*1}, Takeyuki IWAI^{*1}, Shogo HIRAGA^{*1}, Masashi HAGINOYA^{*2}, Yuki MATSUNAGA^{*2}, Yuichiro AKUTSU^{*3}, Yoshinori ARAI^{*3}, Tomonori HOKAMA, Hirokazu HIRAOKA, Yoshimi URABE^{*1} and Tamotsu KUDO

> Nuclear Emergency Assistance and Training Center Sector of Nuclear Safety Research and Emergency Preparedness Japan Atomic Energy Agency Hitachinaka-shi, Ibaraki-ken

> > (Received December 1, 2023)

By the accident at Tokyo Electric Power Company's (TEPCO's) Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (FDNPS), caused by tsunami triggered by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, a large amount of radioactive material was released into the surrounding environment. After the accident, Airborne Radiation Monitoring (ARM) via manned helicopter has been utilized as a method to quickly and extensively measure radiation distribution surrounding FDNPS. In order to utilize ARM and to promptly provide the results during a nuclear emergency, information on background radiation levels, topographical features, and controlled airspace surrounding nationwide nuclear facilities have been prepared in advance. In the fiscal year 2022, we conducted ARM around the Mihama Nuclear Power Station of Kansai Electric Power Company (KEPCO), the Tsuruga Power Station of Japan Atomic Power Company (JAPC), and the Ikata Power Station of Shikoku Electric Power Company (YONDEN), and prepared information on background radiation doses and controlled airspace. In addition, we have developed an aerial radiation detection system via unmanned airplane, which is expected to be an alternative to ARM, during a nuclear emergency. This report summarizes the results and technical issues identified.

Keywords: Aerial Radiation Monitoring, Nuclear Emergency Preparedness, Unmanned Airplane

This report summarizes results that Japan Atomic Energy Agency carried out as commissioned business by "the projects of the radiation monitoring using manned helicopter around Nuclear Power Stations" of the Nuclear Regulation Authority in the fiscal year 2022.

+ 1 Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science, Fukushima Research Institute, Sector of Fukushima Research and Development

*1 NESI Inc.

- *2 Inspection Development Company Ltd.
- *3 Nuclear Engineering Co., Ltd.

目次

1.	はじ	めに	1
2.	モニ	タリングシステムとヘリコプター	7
	2.1.	航空機モニタリングシステム	7
	2.2.	ヘリコプターの選定	9
	2.3.	RSI システムの保守	11
3.	デー	タ取得及び解析方法	14
	3.1.	航空機モニタリングの方法	14
	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	
	3.4.	空間線量率への換算方法	
		3.4.1. 空気中核種及び宇宙線由来のγ線計数率	
		3.4.2. 対地高度補正係数 HF の算出方法	
		3.4.3. 空間線量率への換算係数 CD の算出方法	
		3.4.4. 空間線量率への換算方法	
	3.5.	検出限界值	27
	3.6.	不確かさ	27
	3.7.	補間方法	27
	3.8.	空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	
		3.8.2. ラドン弁別手法の理論	
		3.8.3. GIの高度補正方法	
	3.9.	天然放射性核種の濃度換算手法	
4.	モニ	タリング結果と考察	37
	4.1.	ヘリコプターによるフライト実績	
	4.2.	換算パラメータ	
	4.3.	地上測定値との比較	
	4.4.	空間線量率	
		4.4.1. 美浜・敦賀	
		4.4.2. 伊方	
	4.5.	天然放射性核種の濃度	60
		4.5.1. 美浜・敦賀	60
		4.5.2. 伊方	61
	4.6.	ラドン弁別手法の適用	75
		4.6.1. パラメータ (<i>RI</i> 及び <i>GI</i>) の決定	75
		4.6.2. ラドン弁別手法の適用結果及び標準的解析手法との比較	
	4.7.	放射性セシウムの沈着量	

5.	原子ス	力防災訓	練における緊急時航空機モニタリング	94
	5.1.	原子力	総合防災訓練等に係る航空機モニタリングの経緯	94
	5.2.	令和4	年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングの全体概要	95
	5.3.	訓練か	ら得られた緊急時航空機モニタリングの課題	104
6.	無人舟	航空機に	よる放射線モニタリングを想定した要素技術試験	106
	6.1.	原子力	災害時における無人航空機運用の課題	106
	6.2.	無人航	空機の開発状況	108
	6.3.	Penguir	c のカタログ性能	110
	6.4.	フライ	ト試験及び地上における通信試験の概要及び結果	114
		6.4.1.	機体の基本性能及び信頼性の確認及び評価	118
		6.4.2.	夜間フライトに必要となる機能及び運用体制の確認評価	124
		6.4.3.	無線通信試験	127
	6.5.	原子力	災害時に想定される無人航空機放射線モニタリングへの適用性について	129
	6.6.	無人飛	行機搭載用放射線測定システムの設計製作及び動作試験	138
		6.6.1.	無人飛行機搭載用放射線測定システム及びその改良	138
		6.6.2.	改良試作機による地上試験の結果	141
		6.6.3.	改良試作機によるフライト試験の結果	142
		6.6.4.	無人飛行機搭載用放射線測定システムの必要性能及び課題について	145
		6.6.5.	無人飛行機搭載用放射線測定システム案	147
7.	まとる	めと緊急	時モニタリングに資する知見の整理	152
謝辞	斧			157
参考	兮文献.			158

Contents

1.	Introd	ntroduction		
2.	Measurement system and helicopters			
	2.1.	Measu	rement system of ARM	7
	2.2.	Helico	pters	9
	2.3.	Mainte	nance of RSI system	11
3.	Data a	acquisiti	on and analysis	14
	3.1.	Metho	d of ARM	14
	3.2.	Calibra	ation flight	17
	3.3.	Outline	e of analysis method	
	3.4.	Conver	rsion procedure to dose rate at 1 m above the ground	
		3.4.1.	Count rates from airborne nuclides and cosmic rays	
		3.4.2.	Height correction	
		3.4.3.	Conversion factor from counting rates to dose rate	
		3.4.4.	Conversion flow to dose rate	
	3.5.	Detecti	ion limit	
	3.6.	Uncert	ainty	
	3.7.	. Interpolation		
	3.8.	Discrin	nination technique of Rn progenies	29
		3.8.1.	Rn progenies	
		3.8.2.	Theory of discrimination technique of Rn progenies	
		3.8.3.	Height correction of GI	33
	3.9.	Conver	rsion to the concentration of natural radionuclides	
4.	Resul	ts and di	scussion	37
	4.1.	Operat	ional results of the helicopters	
	4.2.	Parame	eters	
	4.3.	Compa	rison with ground measurement data	
	4.4.	Dose ra	ate at 1 m above the ground	
		4.4.1.	Mihama Nuclear Power Station and Tsuruga Power Station	
		4.4.2.	Ikata Power Station	52
	4.5.	Concer	ntration of natural nuclides	60
		4.5.1.	Mihama Nuclear Power Station and Tsuruga Power Station	60
		4.5.2.	Ikata Power Station	61
	4.6.	Applic	ation result of discrimination technique of Rn progenies	75
		4.6.1.	Parameters (GI and RI)	75
		4.6.2.	Application result and comparison with the conventional technique	
	4.7.	Radioc	esium deposition	

5.	Integr	Integrated nuclear emergency response drill				
	5.1.	Genera	l outline			
	5.2.	Outline	of ARM in the drill			
	5.3.	Summa	ries and challenges	104		
6.	Techn	ological	tests for aerial radiation detection system via unmanned airplane	106		
	6.1.	Challer	nges for the operation during a radiological disaster	106		
	6.2.	Develo	pmental status of unmanned airplanes	108		
	6.3.	Perform	nance of Penguin C	110		
	6.4.	Operati	onal results			
		6.4.1.	Confirmation of basic performance and reliability	118		
		6.4.2.	Confirmation of functions and operational systems required for night flights	124		
		6.4.3.	Evaluation of wireless communication distance	127		
	6.5.	Assume	ed response for radiation monitoring during a nuclear emergency	129		
	6.6.	Build a	nd operational test results of a radiation measurement system	138		
		6.6.1.	Outline of the system	138		
		6.6.2.	Results of ground tests	141		
		6.6.3.	Results of flight tests	142		
		6.6.4.	Performance requirements and challenges of the system	145		
		6.6.5.	Proposed improvements to the system	147		
7.	Summ	naries		152		
Ack	Acknowledgments					
Refe	erences			158		

Table list

Table 1-1 原子力災害対策指針における OIL	
Table 3-1 キャリブレーションフライトの一覧	
Table 3-2 RSI システムと機体組み合わせと空気中核種由来の計数率平	均値及び CR-Index 24
Table 3-3 ラドン子孫核種の放出する γ線	
Table 3-4 天然放射性核種濃度への換算パラメーター覧	
Table 4-1 ヘリコプターのフライト距離及び速度とフライト回数	
Table 4-2 2022 年度取得した AF データー覧	
Table 4-3 2022 年度取得した CD データー覧	
Table 4-4 解析に用いた換算パラメータのまとめ	
Table 4-5 解析に用いた RI 及び GI の一覧	
Table 5-1 原子力総合防災訓練等における航空機モニタリング実施状況	Z95
Table 5-2 地上測定地点の位置情報及び空間線量率の値	
Table 5-3 令和 4 年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタ	リングに係るタイムテーブ
ル (2022 年 11 月 6 日)	
Table 5-4 UH-60 に対する換算パラメータの一覧	
Table 5-5 緊急時航空機モニタリングによる空間線量率分布マップと地	也上測定による空間線量率の
比較	
Table 6-1 代表的な無人航空機の概観とスペック	
Table 6-2 Penguin C 機体のカタログスペック	
Table 6-3 UAV Factory における平均故障間隔 (MTBF) 計算時の事故分	類113
Table 6-4 試験日及び試験内容一覧	
Table 6-5 各フライト試験の詳細情報	
Table 6-6 10 回のフライト試験において修理交換した部品一覧	
Table 6-7 アンテナ高が 2.9 m の通信試験結果	
Table 6-8 アンテナ高が 9.2 m の通信試験結果	
Table 6-9 UAV IP Data Link 仕様	
Table 6-10 ドローン等での使用が想定される主な無線通信システム	
Table 6-11 各モデルのSC1とSC2の算出結果	

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	5
Fig. 1-2 2015 年度から 2020 年度までのバックグラウンド航空機モニタリング結果	6
Fig. 2-1 RSI システムのブロック図	8
Fig. 2-2 RSI システムの外観	8
Fig. 2-3 ヘリコプター機底に燃料タンクのない機体一覧	9
Fig. 2-4 美浜・敦賀周辺の航空機モニタリングに使用した機体 (Bell430 (JA02AX))	10
Fig. 2-5 伊方周辺の航空機モニタリングに使用した機体 (Bell412 (JA9616))	10
Fig. 2-6 システムのエネルギー分解能及び Gain の推移 (美浜・敦賀)	12
Fig. 2-7 システムのエネルギー分解能及び Gain の推移 (伊方)	13
Fig. 3-1 予定したフライトの測線 (美浜・敦賀)	15
Fig. 3-2 予定したフライトの測線 (伊方)	16
Fig. 3-3 航空機モニタリングデータ取得のイメージ	17
Fig. 3-4 航空機モニタリングにおける測定範囲のイメージ	17
Fig. 3-5 テストラインフライトのイメージ	19
Fig. 3-6 美浜・敦賀におけるテストライン及びテストポイントの場所(岐阜県安八郡輪之内町)	20
Fig. 3-7 伊方におけるテストライン及びテストポイントの場所 (愛媛県東温市)	20
Fig. 3-8 テストポイントフライトのイメージ	21
Fig. 3-9 宇宙線フライトのイメージ	21
Fig. 3-10 空気中核種フライトのイメージ	21
Fig. 3-11 解析のフロー	22
Fig. 3-12 空気中核種フライトで取得した陸上と海上でのγ線スペクトル例	24
Fig. 3-13 海抜高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例	24
Fig. 3-14 IDW に入力するパラメータとマップの関係	29
Fig. 3-15 ウラン系列及びトリウム系列	30
Fig. 3-16 空気中ラドン子孫核種測定用の検出器とヘリコプターへの搭載状況	32
Fig. 3-17 空気中のラドン子孫核種と地表面からの放射線のイメージ	33
Fig. 3-18 天然放射性核種によるピークの解析例	35
Fig. 3-19 天然放射性核種ごとの対地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	38
Fig. 4-2 美浜・敦賀のテストポイントにおける地上測定値 (μSv/h)	39
Fig. 4-3 伊方のテストポイントにおける地上測定値 (μSv/h)	40
Fig. 4-4 美浜・敦賀の測線近傍における地上測定値 (μSv/h)	46
Fig. 4-5 伊方の測線近傍における地上測定値 (μSv/h)	47
Fig. 4-6 美浜・敦賀における航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値の比較	48
Fig. 4-7 伊方における航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値の比較	49
Fig. 4-8 航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値の比較 (2015 年度から 2020 年度ま)	での

全データ)	50
Fig. 4-9 美浜・敦賀における空間線量率マップ	56
Fig. 4-10 美浜・敦賀における空間線量率マップの比較	57
Fig. 4-11 伊方における空間線量率マップ	58
Fig. 4-12 伊方における空間線量率マップの比較	59
Fig. 4-13 K-40 濃度マップ (美浜・敦賀)	63
Fig. 4-14 U 系列濃度マップ (美浜・敦賀)	64
Fig. 4-15 Th 系列濃度マップ (美浜・敦賀)	65
Fig. 4-16 美浜・敦賀の放射性核種濃度測定結果 (左)と地球化学図 (右)の比較 (K-40)	66
Fig. 4-17 美浜・敦賀の放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右)の比較 (U 系列)	67
Fig. 4-18 美浜・敦賀の放射性核種濃度測定結果 (左)と地球化学図 (右)の比較 (Th 系列)	68
Fig. 4-19 K-40 濃度マップ (伊方)	69
Fig. 4-20 U 系列濃度マップ (伊方)	70
Fig. 4-21 Th 系列濃度マップ (伊方)	71
Fig. 4-22 伊方の放射性核種濃度測定結果 (左)と地球化学図 (右)の比較 (K-40)	72
Fig. 4-23 伊方の放射性核種濃度測定結果 (左)と地球化学図 (右)の比較 (U 系列)	73
Fig. 4-24 伊方の放射性核種濃度測定結果 (左)と地球化学図 (右)の比較 (Th 系列)	74
Fig. 4-25 海上及び陸上における NaI(Tl)検出器の計数率と LaBr3 検出器の計数率の関係	76
Fig. 4-26 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ (美浜・敦賀)	82
Fig. 4-27 空気中のラドン子孫核種起源の計数率マップ (美浜・敦賀)	83
Fig. 4-28 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ (伊方)	84
Fig. 4-29 空気中のラドン子孫核種起源の計数率マップ (伊方)	85
Fig. 4-30標準的解析手法及びラドン弁別手法による空間線量率の計算結果と地上測定値との比較	ž
(美浜・敦賀)	86
Fig. 4-31 標準的解析手法及びラドン弁別手法による空間線量率の計算結果と地上測定値との比較	ζ
(伊方)	88
Fig. 4-32 空気中核種フライトで取得した計数率とラドン弁別手法で求めた空気中ラドン子孫核種	Ē
由来の計数率の比較	90
Fig. 4-33 放射性セシウム沈着量マップ (美浜・敦賀)	92
Fig. 4-34 放射性セシウム沈着量マップ (伊方)	93
Fig. 5-1 令和4年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングのフライトプラン	99
Fig. 5-2 令和4年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングに使用したヘリコプ	タ
	00
Fig. 5-3 航空機モニタリングシステムの搭載状況1	00
Fig. 5-4 令和4年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングのヘリコプター内での	の
測定状況 (訓練)1	01
Fig. 5-5 令和4年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングによる空間線量率分差	布
マップ1	102

Fig. 5-6 緊急時航空機モニタリング中の対地高度の推移	103
Fig. 6-1 既存の無人機によるシステムと原子力災害時に備えるべき無人航空機システムのイメ	ージ
	107
Fig. 6-2 原子力発電所事故を例にした対応シミュレーション	107
Fig. 6-3 Penguin C の概観	111
Fig. 6-4 フライト試験の工程	117
Fig. 6-5 Penguin C のフライト軌跡 (2022 年 7 月 19 日)	119
Fig. 6-6 Penguin C のフライト試験時の飛行ログ(2022 年 7 月 19 日)	120
Fig. 6-7 LED ライトを装着した状態で行ったフライト時の様子	126
Fig. 6-8 日中に撮影したフライト時の IR カメラ画像	126
Fig. 6-9 通信試験アンテナ設置場所	128
Fig. 6-10 通信試験アンテナ設置状況	128
Fig. 6-11 カタパルトに対する打ち上げ時の風向	136
Fig. 6-12 直線通信距離とフレネルゾーンについて	136
Fig. 6-13 フレネルゾーンを 100 %確保するための高さ相関	137
Fig. 6-14 フレネルゾーンを 80%確保するための高さ相関図	137
Fig. 6-15 放射線測定システム試作機 (改良試作機)の概要	139
Fig. 6-16 ホスウィッチ型検出器の外観図面	140
Fig. 6-17 放射線測定システム機体搭載図面	140
Fig. 6-18 エンジン回転数 3,000 rpm 付近で見られるノイズ現象 (地上試験)	141
Fig. 6-19 フライト試験時のγ線計数率及び地表面から1mの高さの空間線量率	143
Fig. 6-20 フライト試験時のエンジン回転数とβ線及びγ線計数率	144
Fig. 6-21 無人飛行機 Penguin C 搭載用放射線測定システム設計案	150
Fig. 6-22 マルチ検出システムのシミュレーションモデル 1	150
Fig. 6-23 マルチ検出システムのシミュレーションモデル 2	151
Fig. 6-24 各モデルの周辺からの影響に応じたAgの検出限界	151
Fig. 7-1 伊方周辺における管制空域に係る情報	156

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(平成23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(以下、福島原子力発 電所)事故後から、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。事故から約12年にわたり、継 続的に航空機モニタリングを実施しながら、手法の改善及び体制の整備を行ってきた¹⁾⁻¹⁹⁾。 原子力防災のツールとして航空機モニタリングを活かすためには、事故時の航空機モニタリ ングの具体的な活用方法、機器の恒久的な管理体制の維持及び技術の継承等の課題があるこ とが分かった。事故後整備された原子力災害対策マニュアルには、このような課題及び福島 原子力発電所事故における教訓を踏まえ、航空機モニタリングに関し下記のように定められ ており²⁰⁾、原子力防災のツールとして有効活用できるよう基盤整備が進められている。

原子力災害対策マニュアル 第2 関係省庁における対応要領 第1編 事態ごとの組織・応急対策業務等 第4章 全面緊急事態 第2節 応急対策業務 13 緊急時モニタリング結果等の情報の収集及び共有 <放射線班>(規制庁等) (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、フライトのタイミングや体制等を事故前に決定 しておく必要がある。特にフライトのタイミングについては、原子力災害対策指針²¹)に定 められている防護措置の実施の判断基準 (Operational Intervention Level: OIL) を踏まえて位 置づけられることが望ましい。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、機能的かつ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及び事故発生からフライト開 始までの最短時間評価並びに地形等フライト時の懸念事項)を把握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、福島原子力発電所の周辺で行っている航空機モニタリングは、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、天然放射性核種の影響 は無視できるが、福島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。福島原子力発電所事故以前に実施された測定に より推定された天然の放射性核種由来の空間線量率分布は西日本で高い傾向にあり、最大 0.13 µGy/h程度の場所もあるとされている²²⁾。また、河川堆積物試料中に含まれる天然放射 性核種濃度を基に空間線量率を評価した例²³⁾を Fig. 1-1 に示す。この例でも空間線量率は西 日本で高い傾向にあり、約0.13 µGy/hを上回る地域が一部に見られる。このような天然放射 性核種由来の空間線量率 (以下、バックグラウンド) は、Table 1-1 に示した飲食物に係るス クリーニングを実施するための基準となる 0.5 μSv/h を評価する場合には、無視できない大 きさである。バックグラウンドの影響を除いた空間線量率を算出するには、γ線エネルギー スペクトルからバックグウランド計数率を減算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。原子力災害時等の緊急時に モニタリング対象となることが想定される地域のバックグラウンドを事前に調査しておくと、 緊急時に迅速かつ正確にバックグラウンドを減算したうえで空間線量率の評価が可能となる。 また、事故が発生する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、測定拠 点として用いることのできる空港等の特徴や利用方法及び山間部等のフライト上の危険個所 の抽出等、緊急時における迅速かつ確実な航空機モニタリングの実施に資する情報を予め整 備できる。原子力災害時における緊急時モニタリングにおいて航空機モニタリングを適切に 活用するためには、平常時から航空機モニタリングを実施することによってデータ解析の経 験や知見を蓄積し、技術維持及び品質向上に努めることが肝要である。このため、原子力規 制庁からの受託事業として平成27年度(2015年度)から国内の原子力発電所周辺において航 空機によりバックグラウンドの測定を目的としたモニタリングを実施してきた 7),9),11),13), 15),17),19)。この内、平成 27 年度 (2015 年度) から令和 2 年度 (2020 年度) までの受託事業で実 施した原子力施設周辺における航空機モニタリングにより作成したバックグラウンド空間線 量率マップを Fig. 1-2 に示す。バックグラウンドは近畿地方及び中国地方を含む西日本側で 比較的高い傾向にあり、Fig. 1-1 で示した河川堆積物中の天然放射性核種濃度の測定データ を基に作成された空間線量率マップと分布傾向は同様である。

近年、ドローン等の無人飛翔体 (UAV)の開発は著しく、福島原子力発電所事故後、放射 線検出器と組み合わせたシステムが開発されている。原子力機構では、福島原子力発電所周 辺のモニタリングや河川敷のモニタリングにヤマハ発動機社製の自律型無人へリコプターを 活用している²⁴⁾⁻²⁶⁾。また、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (以下、JAXA)と共同 で燃費が良い飛行機型 UAV に放射線検出システムを搭載したモニタリングシステム (Unmanned Airplane Radiation Monitoring System : UARMS)を開発してきている²⁷⁾⁻²⁹⁾。 UARMS はすでに試作機まで開発されており、実用化のための基礎データを福島原子力発電 所周辺で取得することにより実用機開発が進められている²⁷⁾。無人飛行機の特徴は、長距 離通信での無人飛行が可能及び航続時間が長いことが挙げられ、有人へリコプターを用いた 航空機モニタリングの代替技術として期待されているほか、将来的には原子力防災への適用 が可能と考えられている。UAV を用いると放射線計測を遠隔地から実施できるため、本技術を原子力防災のツールとして適用することで、測定関係者の被ばく線量を低減することが可能となる。以上のことから、我が国の原子力防災に UARMS を適用することを念頭に、原子力規制庁からの受託事業として令和元年度 (2019 年度)から UARMS の開発及び運用試験を開始し、無人飛行機 Penguin C について性能評価を行うとともに、国内での運用に当たっての課題を抽出しその解決を図ってきた^{15),17),19)}。

これまでの原子力発電所周辺における航空機モニタリング及び無人航空機の国内における 運用技術開発に関する受託事業で得られた成果は以下の通りである。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 km~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、天然放射性核種の放射能濃度マップの作成手法を整備した⁷⁾。

平成28年度(2016年度)には、福井県にある関西電力大飯発電所並びに高浜発電所(以下、 大飯・高浜)及び愛媛県にある四国電力伊方発電所(以下、伊方)周辺3km~80km 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⁹。

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 (以下、泊)、新潟県に ある東京電力柏崎刈羽原子力発電所及び佐賀県にある九州電力玄海原子力発電所 (以下、玄 海) 周辺 3 km~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¹¹⁾。

平成 30 年度 (2018 年度) には、島根県にある中国電力島根原子力発電所 (以下、島根) 及 び静岡県にある中部電力浜岡原子力発電所周辺 3 km~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¹³)。

令和元年度(2019年度)には、青森県にある東北電力東通原子力発電所並びに日本原燃六 ケ所再処理工場及び石川県にある北陸電力志賀原子力発電所周辺3km~80km 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。また、当年度より、無人飛行機を用いた原子力 防災への運用技術開発に着手し、機器の選定及び仕様の確認のためのフライト試験を実施し た¹⁵⁾。

令和2年度(2020年度)には、福井県にある関西電力美浜発電所並びに日本原子力発電敦 賀発電所(以下、美浜・敦賀)及び大阪府にある近畿大学原子力研究所並びに京都大学複合 原子力科学研究所における研究用原子炉(以下、近大炉・京大炉)周辺3km~80km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。ただし、美浜・敦賀及び近大炉・京大炉 の測定範囲は平成28年度(2016年度)の大飯・高浜の測定範囲と重複する領域を除いた。ま た、無人飛行機PenguinCの原子力防災への運用技術開発の一環として、機体の運用を慣熟 することを目的としたフライト試験を実施するとともに機体に搭載する放射線検出器や通信 システム等を試作し、本試作機を搭載したフライトを実施して得られたデータ及び原子力防 災への運用に際しての今後の技術開発課題等を取りまとめた¹⁷⁾。

令和3年度 (2021年度) には、平成28年度 (2016年度) 以来、2回目となる大飯・高浜周 辺3 km~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。また、Penguin C の運用技術開発を進め、フライト試験を引き続き実施するとともに、機体に搭載する放射線 検出器や通信システム等の基本設計及び製作を行った。本システムを搭載してフライトを実 施することで得られたデータ及び緊急時モニタリングへの運用に際しての更なる課題等についてとりまとめた¹⁹⁾。

令和4年度(2022年度)には、美浜・敦賀及び伊方の周辺3 km~80 km 圏内においてバッ クグラウンドを実施した。なお、美浜・敦賀及び伊方での測定はそれぞれ令和2年度(2020 年度)及び平成28年度(2016年度)以来2回目となる。また、原子力災害時の緊急時モニタ リングにおける無人飛行機 Penguin C の運用技術開発の一環として、令和3年度(2021年度) に引き続き、フライト試験による慣熟訓練を実施するとともに、原子力災害時における緊急 時モニタリングのツールとして運用する際に必要となる機能等について検討した。

本報告書では、令和4年度(2022年度)に実施した、美浜・敦賀及び伊方の周辺3km~80 km 圏内におけるバックグラウンドモニタリングにより得られた測定結果を報告する。また、 原子力災害時の緊急時モニタリングに備えた無人飛行機 Penguin C のフライト試験の結果及 び緊急時モニタリングへの適用に際しての課題等について報告する。

	基準の種類	基準の概要		初期設定値	
		住民等を数時間以内に避難	難		
	OIL1	や屋内退避させるための基	空間線量率 500 μSv/h (地表面から1 mの高さ)		.mの高さ)
緊急防護措置		準			
		除沈た謙ドスための甘淮	β線: 40,000 cpm	皮膚から数 cm, 入	、射窓面積 20 cm ²
	UIL4	陈木を蒔しるための奉卒	β線: 13,000 cpm	1ヵ月後の値	
		地域生産物の摂取を制限す			
早期防護世署	OIL2	るとともに、住民等を1週間	灾問約景玄 20S	か問約号索 20…2…(h) (##ま売か):1 …の方さ)	
十期防破阻固		以内程度内に一時移転させ	至间漆重率 20μ3ν/Π (地衣回から1 Ⅲの向さ)		
		るための基準			
		飲食物中の放射性核種濃度	空間線量率 0.5 μSv/h (地表面から1 mの高さ)		
		測定を実施すべき地域を特			
	> / 基中	定する際の基準			
			核種	飲料水等	食物等
飲食物摂取制限			1久1里	(Bq/kg)	(Bq/kg)
		飲食物の摂取を制限する際	放射性ヨウ素	300	2,000
	UIL6	の基準	放射性セシウム	200	500
			ウラン	20	100
			プルトニウム	1	10

Table 1-1 原子力災害対策指針における OIL



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 (日本地質学会ホームページ²³⁾より)



Fig. 1-2 2015 年度から 2020 年度までのバックグラウンド航空機モニタリング結果 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

2. モニタリングシステムとヘリコプター

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(Tl)シンチレーション式検出器(以下、NaI(Tl)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 Radiation Solutions Inc. (RSI, Canada) 製のシステム (以下、 RSI システム) は、機内に装着するタイプである。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。検出部には、2"×4"×16"の NaI(Tl)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)。なお、NaI(Tl)検出器の上部に設置してある LaBr₃(Ce)シンチレーション式検出器 (3"×3"、以下、LaBr₃検出器) は空気中ラドンの子孫核種 に起因する γ線計数率の弁別 (3.8 節に詳述する) に使用する。検出器で計測した 1,024 ch (0 ch ~1,023 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、RS-701 と呼ばれる NaI(Tl)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 RS-501 という装置で統合される。RS-501 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できる。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、航空機モニタリングで用いられている機器は複数あり、福島原子力発電所周辺にお ける航空機モニタリングで主に使われている2システム (RSI1及びRSI2) と区別するため、 本報告書ではRSI3と表記する。

また、RSIシステムのGPS受信機とは独立して高精度GPSシステムも機内に搭載している。 後者には高精度GPS受信機(CORE 社製 QZNEO)が用いられており、RSIシステムのGPS受信 機と比較して利用可能なGPS信号が多い。具体的には、準天頂衛星システム(通称:みちびき) からの情報を利用できるほか、L1-SAIFと呼ばれる補強信号を受信することにより、精度の高 い位置情報の測定を行うことができる。測定されたγ線計数率とその位置情報との紐付けは基 本的にRSIシステムのGPSで取得された緯度及び経度を基に行うが、RSIシステムのGPSが 異常値を示す例が確認されている¹⁰⁾。そのような事象が起きた際には、位置情報を高精度 GPSで取得された緯度及び経度に置換する。



Fig. 2-1 RSI システムのブロック図



Fig. 2-2 RSI システムの外観

2.2. ヘリコプターの選定

RSI システムはヘリコプター機内に搭載するタイプであるため、ヘリコプターの機底に燃料 タンクがある場合、燃料タンクの材料及び燃料によるγ線の遮蔽効果を考慮する必要がある。 そこで、γ線測定値の誤差を低減するため、ヘリコプター機体は機底に燃料タンクのないもの に限定した。使用できる機種の例を Fig. 2-3 に示す。令和4年度(2022年度)に使用したヘリコ プター機種(機体番号)を Fig. 2-4、Fig. 2-5 に示す。機体繰りの都合から、美浜・敦賀では Bell430 (JA02AX)、伊方では Bell412 (JA9616)を使用した。



Bell430 ベル・ヘリコプター・テキストロン社製



Bell412 ベル・ヘリコプター・テキストロン社製



AS332 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 美浜・敦賀周辺の航空機モニタリングに使用した機体 (Bell430 (JA02AX))



Fig. 2-5 伊方周辺の航空機モニタリングに使用した機体 (Bell412 (JA9616))

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 (RS-701 及び RS-501) 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 TI-208 の 2,614 keV のピークに対するエネルギー分解能 (Energy Resolution) 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)

2,614 keV のピークに対するエネルギー分解能については、メーカーから 6 %以下という保 守の推奨値が示されている。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する。また、アンプのゲインについても同様にメー カーから示されている推奨値である 0.8 を下回る場合に再調整を行うこととしている。美浜・ 敦賀及び伊方の測定期間におけるエネルギー分解能とアンプのゲインの推移について Fig. 2-6 及び Fig. 2-7 に示す。図中の RSI 3 以降の枝番は配置してある検出器の番号である。美浜・敦 賀及び伊方のモニタリング期間を通じて、エネルギー分解能は安定しており、ゲインの再調整 を行う必要性は生じなかった。今までの経験から、気温が低下した場合にゲインが若干上昇す る傾向にあることが分かっている。これは周囲の気温が低下するにつれて RSI システム自体の 温度上昇も鈍くなることで、光電子増倍管に使用される電子素子のインピーダンスが減少しゲ インが上昇するという、温度特性が反映されていると考えられる。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。RSI システムには一定期間ごとに自動でゲインを補正 する機能があり、この温度特性はある程度までは自動で補正可能である。



Fig. 2-6 システムのエネルギー分解能及び Gain の推移 (美浜・敦賀)



Fig. 2-7 システムのエネルギー分解能及び Gain の推移 (伊方)

3. データ取得及び解析方法

3.1. 航空機モニタリングの方法

航空機モニタリングでは、測定対象となるエリアにおいて予め設定した飛行経路(以下、測線)の上空をフライトし、γ線計数率と位置情報のデータを取得する。以下に、航空機モニタリングによるデータ取得方法の詳細を記述する。

航空機モニタリングによる測定データは下記のようなフライト条件で取得した。なお、こ れらの条件は気象状況や地形の高度勾配によって若干変化する。

[フライト条件]

- 速度:160 km/hを基準とし、130 km/h~180 km/hの範囲
- 基準対地高度: 300 m (=1,000 ft)
- 対地高度の許容範囲:0m~約 500m (= 1,750 ft)
- 測線間隔:5 km または10 km

測定データは1秒ごとに GPS による位置情報と検出器のγ線の計数率を記録し、対地高度の 許容範囲から逸脱した測定データは不確かさが比較的大きく含まれるため、空間線量率等の算 出には用いないこととした。Fig. 3-1 及び Fig. 3-2 に美浜・敦賀及び伊方における予定測線を 東西方向の実線で示す。本測線は令和2年度 (2020年度)及び平成28年度 (2016年度) に実施 した美浜・敦賀及び伊方におけるバックグラウンドモニタリングから一部間引いたもので、測 線間隔は基本的に5 km であるが、一部で10 km とした。航空機モニタリングの拠点として、 美浜・敦賀では県営名古屋空港、伊方では広島ヘリポートを使用した。必要に応じてヘリコプ ターへの燃料給油地点として、美浜・敦賀では福井空港、伊方では大分空港を利用した。なお、 航空機モニタリングによる測定は以下のような仮定に基づいている。

- 航空機モニタリングで計測される計数率は、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表面範囲における平均値とする。
- 測定対象となる地表面は、平坦かつ放射線の分布は一様とする。

Fig. 3-3 に航空機モニタリングデータ取得のイメージを示し、Fig. 3-4 に航空機モニタリング における測定範囲のイメージについて示す。また、航空機モニタリングにより評価する空間線 量率の妥当性を検証するため、Fig. 3-1 及び Fig. 3-2 に示した測線の近傍 (黄色丸点)の 20 地点 において、NaI(TI)検出器 (日立製作所製 TCS-172B)を用いて、地表面から1mの高さの空間線 量率の測定 (以下、地上測定)を行った。地上測定地点には周囲に建物等の遮蔽物がなく地形 的に平坦な場所を選定し、NaI(TI)検出器の時定数を 10 秒とし、各測定地点にて地面に対して 水平方向にプローブを 30 秒間保持してから開始した。およそ 5 秒間隔でサーベイメータに表 示されるデジタル値を 5 回記録し、その平均値に校正乗数を乗じた値を小数点第 3 桁で四捨五 入して小数点第 2 桁とし、その地点における地上測定値として取り扱った。



Fig. 3-1 予定したフライトの測線 (美浜・敦賀) (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)



Fig. 3-2 予定したフライトの測線 (伊方) (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)



Fig. 3-3 航空機モニタリングデータ取得のイメージ



Fig. 3-4 航空機モニタリングにおける測定範囲のイメージ

3.2. キャリブレーションフライト方法

航空機モニタリングにより上空で取得したγ線計数率を地表面から1mの高さの空間線量率 や地表面の放射性セシウムの沈着量に換算するためのパラメータを求めるため、各種キャリブ レーションフライトを実施する。キャリブレーションフライトの種類と目的について以下に示 す。また、Table 3-1 に各キャリブレーションフライトの概略をまとめた。

・テストラインフライト

実際のフライト対地高度と基準対地高度とのずれによって生じる γ 線計数率の多寡を補正するための実効的な空気減弱係数 (Attenuation Factor: *AF* (m⁻¹))を求めるフライトである。本フライトは、線量や地形の変化が少ない地点において距離が約 3 km のラインを設定し、その上空において対地高度を変化 (300 m、450 m、600 m、750 m、900 m 及び 1,500 m) させてフライトを実施する。上記の各対地高度でフライトした際の対地高度の平均値と γ 線計数率の平均値をプロットし、それらプロットに対する指数近似曲線の傾きを *AF* とする。テストラインフラ

イトのイメージを Fig. 3-5 に示す。本報告において、テストラインフライトの実施場所は美 浜・敦賀では岐阜県安八郡輪之内町、伊方では愛媛県東温市の周辺とした。また、美浜・敦賀 及び伊方においてテストラインとして選定した具体的な場所について Fig. 3-6 及び Fig. 3-7 に 直線で示す。

・テストポイントフライト

空間線量率の勾配が小さく、かつ地形の平坦な地点 (テストポイント)を選定し、テストポ イントの中心点から半径 500 m の範囲内において、対地高度 300 m を維持して 3 分間ホバリン グして γ線計数率を取得するものである。また、テストポイントの中心点から半径 500 m の範 囲内で 30 地点を目安に NaI(Tl)検出器を用いて地上測定を行う。本フライトとテストポイント における地上測定値を相互比較することにより、基準対地高度 (300 m) における γ線計数率を 地表面から 1 m の高さの空間線量率に換算するための係数 (Conversion factor of Dose-rate: CD ([s⁻¹]/[µSv/h]))が求まる。本報告において、テストポイントフライトの実施場所はテストライ ンフライトと同様とした。美浜・敦賀及び伊方においてテストポイントとして選定した具体的 な場所を Fig. 3-6 及び Fig. 3-7 に半径 500 m の円で示す。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、地上からのγ線の影響が極めて少ないと考えられる海上を約 300m~2,400mまで上昇し、宇宙線に起因するγ線計数率データを取得するものである。宇宙 線フライトにより取得されるγ線計数率は海抜高度の上昇に伴って増加し、その上昇の度合い は測定エリアにはほとんど依存せず、概ね一定であることが見出されている⁴⁾。一方で、測定 時期や使用するヘリコプター機種の違いが宇宙線フライトにおけるγ線計数率の上昇の度合い に及ぼす影響に関する知見はやや不十分である。そこで、本知見を拡充するため、各測定エリ アで航空機モニタリングを実施する度に宇宙線フライトを実施することとしている。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。なお、本報告において、宇 宙線フライトは美浜・敦賀では若狭湾、伊方では伊予灘の周辺で実施した。

・空気中核種フライト

地上からの放射線の影響が極めて少ないと考えられる地上における対地高度(または海上に おける海抜高度)約900mに保ち、約3分間のフライトを継続し、ヘリコプター機体及びその 周辺の空気中に存在する放射性核種由来のγ線計数率を取得する。空気中核種フライトのイメ ージを Fig. 3-10に示す。本報告において、空気中核種フライトは美浜・敦賀では琵琶湖上ま たは若狭湾上、伊方では安芸灘周辺の海上で実施した。

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	テストライン上で対地 高度を変化 (300 m、450 m、600 m、750 m、900 m、及び 1,500 m)させて フライト	測定期間中に少な くとも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	テストポイント範囲内で、対地高度 300 m で 3分間ホバリング	測定期間中に少な くとも2回
宇宙線 フライト	宇宙線の影響を調査	海上を海抜高度 300 m~ 2,400 m まで上昇	測定期間中に少な くとも2回
空気中核種 フライト	ヘリコプター機体及 びその周辺の空気中 に存在する放射性核 種の影響を調査	対地高度 (または海抜高 度) 900 m を 3 分間フラ イト	毎日

Table 3-1 キャリブレーションフライトの一覧



Test line:線量率、地形の変化が少ない場所

Fig. 3-5 テストラインフライトのイメージ



Fig. 3-6 美浜・敦賀におけるテストライン及びテストポイントの場所 (岐阜県安八郡輪之内町) (背景地図は、ESRI, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community を使用。)



Fig. 3-7 伊方におけるテストライン及びテストポイントの場所 (愛媛県東温市) (背景地図は、ESRI, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community を使用。)



陸上または海上

Fig. 3-10 空気中核種フライトのイメージ

3.3. 解析のフロー

航空機モニタリングによって上空で計数されるγ線は、主に以下の4種類に分けられる。

- 天然放射性核種からのγ線
- ② 空気中核種からのγ線
- ③ 宇宙線
- ④ 放射性セシウムのγ線

本報告で測定した美浜・敦賀及び伊方においては④の影響は非常に小さく無視できるため、 ①を評価するためには、②及び③起源の計数率を全計数率から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。本報告では、当該フロー図に則った標準的な解析 方法を「標準的解析手法」と呼称する。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

3.4.1. 空気中核種及び宇宙線由来のγ線計数率

航空機モニタリングにおいて、空気中核種及び宇宙線由来の計数率は全計数率から減算す る必要がある。本項では、これらの減算方法について示す。

空気中核種由来のγ線計数率については、空気中核種フライト(地上からの放射線がほとん ど届かないと考えられる対地高度(または海抜高度)900 m以上)で取得したデータを用いる。 空気中核種フライトによって陸上及び海上で取得したスペクトルの例を Fig. 3-12 に示す。こ のように、空気中核種フライトで得られるスペクトルには陸地と海上とで顕著な差異はなく、 対地高度を十分に取れば陸地で得られたデータでも空気中核種からのγ線計数率の減算に用い ることが可能である。本報告においては、美浜・敦賀では琵琶湖上、伊方では安芸灘周辺の海 上で空気中核種フライトのデータを取得した。空気中核種フライトで取得した計数率の算術平 均値を Table 3-2 に示す。なお、空気中核種フライトのデータを用いることなく、空気中ラド ン子孫核種による計数率を減算する手法(ラドン弁別手法)については 3.8 節に詳述する。

これまでの経験 ⁵⁾⁻¹⁹⁾から海抜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 γ 線は RSI システムが測定している全エネルギー範囲 (30 keV~3,000 keV) で計数されており、TI-208 が放出する 2,614 keV の γ 線及びその散乱線の影響により、 2,614 keV 以下の計数から宇宙線による計数を弁別することは難しい。そこで、宇宙線だけを 計数していると考えられる 2,800 keV 以上の計数に着目した。Fig. 3-13 に海抜高度と宇宙線の 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、海抜高度 50 m~2,000 m で取得したデータのうち、2,800 keV 以上の γ 線の計数率をプロットしたものである。なお、 RSI システムにおいて、3,000 keV 以上の γ 線の計数率をプロットしたものである。この ように、海抜高度と 2,800 keV 以上の γ 線の計数率は正の相関にあり、計測する場所に影響さ れない。また、2,800 keV 以上の γ 線の計数率と 2,800 keV 以下の γ 線の計数率の比 (*CR-Index*) は、高度に依存せず一定の数値を示す。*CR-Index* は機体と検出器の組み合わせごとに設 定し、測定データにおける 2,800 keV 以上の γ 線計数率に *CR-Index* を乗じることで全エネルギ ーにおける宇宙線起因の計数率を推定し、全計数率から差し引く。実測したデータを基に算出 した *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、空気中 核種及び宇宙線由来の計数率の減算を行った。具体的な減算方法は 3.4.4 項に示す。



Fig. 3-12 空気中核種フライトで取得した陸上と海上でのγ線スペクトル例



Fig. 3-13 海抜高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例 4)

(a: 沖縄海域, b: 北海道海域)

(図中の曲線は、測定データの指数関数による近似曲線である。)

Table 3-2 RSI システムと機体組み合わせと空気中核種由来の計数率平均値及び CR-Index

測定エリア	RSIシステム	ヘリコプター 機種 (機体番号)	運航会社	空気中核種由来の 計数率平均値(s ⁻¹)	CR-Index
美浜·敦賀	RSI 3	Bell430 (JA02AX)	朝日航洋 株式会社	280	3.51
伊方	RSI 3	Bell412 (JA9616)	朝日航洋 株式会社	503	3.86
3.4.2. 対地高度補正係数 HF の算出方法

各測定点における対地高度と基準対地高度とのずれによって生じるγ線計数率の多寡を補正 するために、テストラインで取得したデータを基に、実効的な空気減弱係数 *AF* を求め、計算 式 [1] から対地高度補正係数 *HF* を算出した。ここで、令和4年度 (2022年度) より航空機モニ タリング解析システムを Python3 で動作するよう更新したのに伴い、*AF* は非線形最小二乗法 により求めることとした。

$$HF = \exp[AF (H_{std} - H_m)]$$
^[1]

ここで、

HF: 対地高度補正係数(Height correction Factor (m⁻¹))

AF:空気減弱係数 (Attenuation Factor (m⁻¹))

H_{std}: 基準対地高度(300 m)

- H_m:対地高度(楕円対地高度-DEM-ジオイド高)
- である。

対地高度の算出には、GPS で記録した楕円対地高度から、10 m メッシュの数値標高モデル (Digital Elevation Model: DEM)³⁰⁾及びジオイド高³⁰⁾を差し引いて求めた*¹。テストラインフラ イト中の対地高度及び計数率の平均値をプロットし、非線形最小二乗法によって指数関数回帰 を Python3 で実施し、最適化された曲線の傾きを *AF* とした。指数関数回帰のあてはまりの良 さは残差分散 (本報告では、実測値と回帰による推定値との差の平方和を、データ数-説明変 数の個数 (2 個) で除算することで算出した。以下、RV) で評価した。RV は非負であり、小さ いほど実測値と回帰による推定値がよく一致していることを意味する。実際に使用した換算パ ラメータについては、4.2 節に詳述する。

3.4.3. 空間線量率への換算係数 CD の算出方法

航空機モニタリングによるγ線計数率を地表面から1mの高さの空間線量率に換算するための換算係数 CD ([s⁻¹]/[μSv/h]) は、テストポイントにおける地上測定値の平均値とテストポイントの対地高度 300 m を 3 分間ホバリングして得られた計数率の平均値との比から求めた。地上 測定値として、3 分間のホバリング中の緯度及び経度の平均値を求め、その地点から半径 500 m 円内における平均値を用いた。テストポイントにおける地上測定値及び算出した CD については 4.2 節に詳述する。

^{*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 m~40 m である。

3.4.4. 空間線量率への換算方法

上記し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] 及び式 [3] に示す。

① 測定で得られた y 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 を超えるエネルギーの計数率 (C>2,800 keV)
- ② 式 [2] で用いられる、C_{net}を算出するために、C_{>2,800 keV}に CR-Index を乗じて全エネルギー領域に対する宇宙線起源の計数率 (C_{cos})を推定する。
- ③ 空気中核種フライトで取得したデータを空気中核種起源の計数率 (Cair) とする。
- ④ *C*_{all}から*C*_{cos}と*C*_{air}を差し引いた計数率を正味の計数率*C*_{net}とし、*CD*及び*HF*を用いて地 表面から1mの高さの空間線量率*D*を算出する。

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

ここで、

D: 地表面から1mの高さの空間線量率 (µSv/h)

 C_{net} :正味の計数率(s⁻¹) (= $C_{\text{all}} - C_{\cos} - C_{\text{air}}$ (ただし、 $C_{\cos} = C_{>2,800 \text{ keV}}$ CR-Index))

HF: 対地高度補正係数 (m⁻¹)

CD:空間線量率換算係数 ([s⁻¹]/[µSv/h])

である。式 [1] を式 [2] に代入すると、測定で得られたγ線スペクトルから地表面 1 m の高さの空間線量率 D に換算する式 [3] が得られる。

$$D = \frac{C_{\text{net}} \exp[AF (H_{\text{std}} - H_{\text{m}})]}{CD}$$
[3]

定義した各記号の凡例を改めて以下に示す。

D: 地表面から1mの高さの空間線量率(µSv/h)

AF: 空気減弱係数 (m⁻¹)

H_{std}: 基準対地高度 (300 m)

H_m: 測定対地高度 (m)

CD:空間線量率換算係数 (s⁻¹/[µSv/h])

以下では、*CR-Index、AF や CD* といった、全計数率から空間線量率に換算するための換算 係数等を総称し「換算パラメータ」と呼ぶ。 3.5. 検出限界值

検出限界 (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、検出限界値を計算する。式 [3] に示したように、航空機モニタリングにより算出される空間線量率の検出限界値は C_{air} と C_{cos} の影響を受ける。 C_{cos} はこれまでの測定結果 ⁵⁾⁻¹⁹⁾を見ると 200 s⁻¹~500 s⁻¹の範囲となり、 C_{air} は約 400 s⁻¹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、 C_{air} + C_{cos} = 900 s⁻¹として評価を行った。

一般的に、検出限界値を求める際には、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³¹)に当てはめ、検出限界値 (N_D)を算出する。

$$N_{\rm D} = 4.653\sigma_{N_{\rm B}} + 2.706$$
 [4]

ここで、N_Bを 900 s⁻¹とすると、N_Dは 142 s⁻¹となる。これに、RSI システムの標準的な CD (13,000 [s⁻¹]/[µSv/h]) から RSI システムによる空間線量率の検出下限値を計算すると、0.011 µSv/h となった。

3.6. 不確かさ

航空機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。
- 高度情報に係る誤差:航空機モニタリングにおいて海抜高度は GPS で測位しているが、 衛星の位置等の測位状況によっては、海抜高度に最大 30 m 程度の誤差が生じる。本誤差 の低減については今後の課題である。

3.7. 補間方法

空間線量率や放射性物質沈着量のマッピングについては、国際原子力機関 (IAEA) から標準 的な方法が示されている³²⁾。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 島原子力発電所周辺の航空機モニタリングでは、平成 23 年 (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米国エネルギー省が用いた IDW を踏襲している。IDW と はある補間地点の近傍にある複数のサンプル点の測定値を補間地点からサンプル点までの水平 距離の逆数のべき乗関数により重み付け平均することで、ある補間地点における値を推定する 方法である。IDWによる補間点における推定値は以下の式 [5] で表される³³⁾。

$$\widehat{z_{0}} = \frac{\sum_{i=1}^{s} d_{\mathrm{NT}}(p_{0}, p_{i})^{-\lambda} z_{i}}{\sum_{i=1}^{s} d_{\mathrm{NT}}(p_{0}, p_{i})^{-\lambda}}$$
[5]

ここで、

2₀:補間地点における空間線量率の推定値

 $d_{NT}(p_0, p_i)$ (i = 1, 2, ..., s):補間地点 p_0 からサンプル点 p_i までの水平距離

zi: 各サンプル点が持つ実測値

s:補間地点から近傍のサンプル点

である。

IDW による補間の条件として「補間地点とサンプル点間の距離が大きくなるにつれて、その補間地点においてサンプル点が推定値に与える影響が減衰していく」ことが前提になる。そのため、推定する (重み付け平均)値は補間地点から近傍 s 点の最高値より大きくならず、最低値より小さくなることはない。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、補間地点とサンプル点間の距離に応じて影響度を制御するべき乗数 λ と内挿処理の対象となるサンプル点数 s の 2 つである。IDW では λ と s の設定によって結果が異なってくるが、最良の値を決定するための基準が存在していない。λ が大きいほど補間地点近傍データの影響力が相対的に大きくなる。λ として一般的に 2 がよく用いられるが、必ずしも 2 が最良であるとは限らない。本報告では、今まで積み上げてきた経験から、λ として 2.3、s として 400 を採用した。Fig. 3-14 にパラメータ設定の異なる 2 パターンの空間線量率マップを示す。λ を 2.3、s を 180 とした Fig. 3-14 a) と λ を 2.0、s を 12 とした Fig. 3-14 b) を比べると、両者の分 布傾向は概ね一致しているが、a) の方が線量のレンジの境界がなめらかになっていることが分かる。

航空機モニタリングにおいては、前述した通り 300 m 上空からの測定を実施するため、測定 される範囲は、ヘリコプター直下の地上半径 300 m 円内における放射線量の平均値となる。空 間線量率等のマッピングにおいては、基準地域メッシュ (1 km) をベースとしつつ、上記の測 定範囲を考慮して 250 m にメッシュサイズを決定した。





3.8. 空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壊変系列には、気体であるラドンが存在し、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壊変系列であるウラン系列とトリウ ム系列について示す。Table 3-3 にラドン子孫核種が放出するγ線エネルギーについて示す。地 設中から大気中に散逸したラドン (Rn-222: ラドン、Rn-220: トロン)は、Po、Pb 及び Bi など の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 グにおける基準測定高度である対地高度約 300 m 付近におけるラドン子孫核種濃度の測定例は ほとんど無いものの、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6Bq/m³程度となっている³⁴⁾。このラドンの濃度レベルは比較的低いものの、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ような場合、測定される計数率に一 定の影響があると考えられる。また、日単位や季節単位で空気中におけるラドン子孫核種濃度 が変動することが知られており、航空機モニタリングの測定データに及ぼす影響も常に一定と は限らないと推察される 35)。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によるγ線計数率を地表面から1mの高さの空間線量 率に換算した際に過大評価となる例が報告されている 5)-7)。そのため、航空機モニタリングに よる空間線量率を適切に算出する観点から、ラドン子孫核種由来のγ線計数率を除去すること が望ましい。

これまでの航空機モニタリングにおいては、ラドン子孫核種の影響を除去するため、平成

27年度(2015年度)に空間線量率の計算高度化のための検討を実施し⁷⁾、平成28年度(2016年 度)には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開発した 手法を組み込んだ⁸⁾。また、組み込んだ解析プログラムを使用して平成28年度(2016年度)か ら令和3年度(2021年度)に実施した原子力施設周辺におけるモニタリングデータを解析し、 大気中のラドン子孫核種の影響について考察した^{9),11),13),15),17),19)。令和4年度(2022年度)も引 き続き美浜・敦賀及び伊方各原子力施設周辺の測定データに本手法を適用した。以下、大気中 のラドン子孫核種の影響の除去手法を「ラドン弁別手法」と呼称する。}



Fig. 3-15 ウラン系列及びトリウム系列 (核種名の下の数値は半減期を表す。)

Nuclide	Series	Gamma energy (keV)	Blanching ratio (%)	Note
Pb-212	Th	239	43.3	
Pb-214	U	352	37.6	
TI-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	
TI-208	Th	2,615	99.2	

Table 3-3 ラドン子孫核種の放出する γ線

3.8.2. ラドン弁別手法の理論

前述したように、ラドン子孫核種は大気中だけでなく地表面及び地殻にも存在し、そのγ線 エネルギー領域は広範である。よって、航空機モニタリングで取得される全計数率から、ラド ン子孫核種に起因するγ線計数率のみをスペクトル分析によって弁別することは一般に難しい。 航空機モニタリングにおいて空気中ラドン子孫核種に起因するγ線計数率を推定する方法とし て、全計数率を取得する検出器に加え、空気中のラドン子孫核種から放出されるγ線を測定す るための検出器を使用し、両者の計数率とそれらを基にして算出される換算パラメータを用い る方法が示されている³²⁾。原子力機構では当該手法を参考にして、空気中のラドン子孫核種 に起因するγ線を測定する検出器に LaBr₃検出器を採用してラドン弁別手法を実施するための 測定体系の構築を行い、NaI(TI)検出器と LaBr₃検出器のγ線計数率を基にした換算パラメータ の設定方法について検討と改良を重ねてきた⁷⁾⁻¹⁹⁾。本項では、これまでの研究から得られたラ ドン弁別手法の概略を示す。

LaBr₃検出器をヘリコプター内に搭載した状況を Fig. 3-16 に示す。地表面の放射性核種から 放出される γ線をなるべく遮蔽し、空気中ラドン子孫核種の γ線のみを測定できるようにする ために、LaBr₃検出器は NaI(Tl)検出器の上方に配置した。Fig. 3-17 にヘリコプター機内の検出 器と γ線放出核種の位置関係のイメージを示す。NaI(Tl)検出器と LaBr₃検出器の位置関係から 地表面の放射性核種が存在する場合及び存在しない場合の LaBr₃検出器の計数率に対する NaI(Tl)検出器の計数率の比をそれぞれ「グラウンドインデックス」及び「ラドンインデック ス」とし、その差からラドン子孫核種由来の γ線計数率を弁別するものである。

・ラドンインデックス (以下、*RI*):地表面の放射性核種から放出される γ 線による影響がな いと考えられる海上で取得したデータにおける LaBr₃ 検出器の計数率 ($C_{LaBr,a}$) に対する NaI(Tl)検出器の計数率 ($C_{Nal,a}$) の比 ($C_{Nal,a} / C_{LaBr,a}$)。ラドン子孫核種由来の γ 線は等方的 に飛来することから、NaI(Tl)検出器による遮蔽の影響を受けにくく、LaBr₃ 検出器の計数 率にさほど影響を及ぼさないと考えられる。 ・グラウンドインデックス (以下、*GI*):地表面の放射性核種から放出される γ 線による影響 が支配的な陸地で取得したデータにおける LaBr₃検出器の計数率 ($C_{\text{LaBr,g}}$)に対する NaI(Tl) 検出器の計数率 ($C_{\text{NaI,g}}$)の比 ($C_{\text{NaI,g}} / C_{\text{LaBr,g}}$)。ラドン子孫核種由来の γ 線はヘリコプター 下方から飛来することから、NaI(Tl)検出器に遮蔽されて LaBr₃検出器では比較的計数され にくい。*GI*は、*RI*よりも大きくなると推察される。

これら2つのパラメータを利用して式[6]よりC_{Nal,g}を求め、これを空間線量率に換算してマッピングする。

$$C_{\text{NaI,g}} = \frac{GI(C_{\text{NaI,all}} - RI C_{\text{LaBr,all}})}{GI - RI}$$
[6]

ここで、

C_{NaLall}: NaI(Tl)検出器における全計数率 (30 keV~2800 keV) (s⁻¹)

 $C_{\text{LaBr,all}}$: LaBr₃検出器における全計数率 (50 keV~700 keV) (s⁻¹) である。

ヘリコプターの機種または機体によって γ線の遮蔽効果が異なるのに付随して、RI 及び GI もヘリコプターの機種または機体に依存すると考えられることから、使用するヘリコプターご とに海上及び陸地で実際に取得したデータを基に RI 及び GI を設定することとしている。RI 及 び GI を決定するために取得したデータと両パラメータの算出結果については 4.6.1 項に詳述す る。



Fig. 3-16 空気中ラドン子孫核種測定用の検出器とヘリコプターへの搭載状況



Fig. 3-17 空気中のラドン子孫核種と地表面からの放射線のイメージ

3.8.3. GIの高度補正方法

グラウンドインデックス GI については、平成 27 年度 (2015 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、実環境中で 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。そこで、平成 29 年度 (2017 年度) に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⁸⁾。その結果、式 [7] に示す関係にあることが見出された。本報告において、式 [7] に基づいて、GI の高度補正を行った。

$$GI_{\rm corr} = 0.0333 \times (H_{\rm m} - H_{\rm std}) + GI$$
^[7]

ここで、

GI_{corr}:高度補正後の GI H_m:測定時における対地高度 (m) H_{std}:基準対地高度 (300 m) GI:高度補正前の GI である。

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特定し、その放射能を定量化する手法が 用いられている。航空機モニタリングにおいても、γ線スペクトルが取得できることから、天 然放射性核種ごとに放射能の定量化が可能である。Fig. 3-18 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、散乱線の影響の比較的少ない高エネルギー領域 において自然放射性核種である K-40 (1,461 keV)、U 系列 (Bi-214:1,765 keV、2,204 keV) 及び Th 系列 (TI-208:2,614 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では、空間線量率の算出にスペクトルの全エネルギーの計数率 を利用するため、1 秒ごと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、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。

航空機モニタリングの取得データから地上における天然放射性核種濃度を求めるためには、 それぞれの核種に対する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 [(s⁻¹)/(Bq/kg)]) を求めるためには、テストポイント内における地上測定値と上空での計数率との比較が必要で ある。ここでは、Fig. 3-6 (美浜・敦賀) 及び Fig. 3-7 (伊方) で示した、測定対象エリアごとに 設定したテストポイント内の 5 地点において可搬型ゲルマニウム半導体検出器 (以下、可搬型 Ge検出器)により、地表面から1mの高さにおいて120分間の測定を行い、K-40、U系列及び Th系列の濃度を測定し、その平均値を核種濃度 (Bq/kg) として取り扱った。テストポイント上 における計数率については、基準対地高度である 300 m でホバリングして計数率データ (s⁻¹)を 取得し、可搬型 Ge 検出器による核種濃度との比を取って CC [(s⁻¹)/(Bq/kg)]を求めた。また、 式[1]に示したように対地高度補正係数の評価に必要な空気減弱係数 (AF) については、EGS5 (Electron Gamma Shower Version 5)³⁶によるシミュレーションの結果⁷⁾を利用した。当該計算に は、無限平板を模擬した半径 2,000 mの線源が仮定され、その上空 50 m、100 m、150 m、200 m、300m、400m及び500mの計数率が計算された。計算した対地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に規格化したものを Fig. 3-19 に示す。このように対地高度 と計数率は指数関数の関係となり、Microsoft Excel®の指数近似機能によって得られた傾きを それぞれの天然放射性核種に対する AF とした。よって、天然放射性核種濃度マップの作成に 用いる AF は非線形回帰でなく指数関数の両辺を対数変換して線形回帰して得られたものであ ることに留意する必要がある。以上により求めた CC と AF の数値について Table 3-4 に示す。



Fig. 3-18 天然放射性核種によるピークの解析例



Fig. 3-19 天然放射性核種ごとの対地高度と計数率の関係 (EGS5 によるシミュレーション⁷⁾)

Measurement area	Parameters	K-40	U-series	Th-series
羊行, 动智	$CC ~(s^{-1}/[Bq/kg])$	0.030	0.230	0.140
天供"我員	$AF (m^{-1})^*$	-0.0054	-0.0070	-0.0063
	$\mathcal{CC}~(s^{-1}/[Bq/kg])$	0.030	0.190	0.120
ነታ ጋ	$AF (m^{-1})^*$	-0.0054	-0.0070	-0.0063

Table 3-4 天然放射性核種濃度への換算パラメータ一覧

*EGS5によるシミュレーション結果より⁷⁾

4.1. ヘリコプターによるフライト実績

2.2 節に記述した通り、美浜・敦賀及び伊方の航空機モニタリングでは Bell430 (JA02AX)及 び Bell412 (JA9616)を使用した。フライトに要した期間は以下の通りである。また、ヘリコ プターごとにフライトした距離や平均フライト速度、回数等をまとめた表を Table 4-1 に示す。 測線上をフライトしたときに取得した GPS データを基に、ヘリコプターの飛行平均速度を算 出したところ、前項で示した速度の範囲内であった。また、地上測定に要した期間について も以下に示した通り、航空機モニタリングと同時期であった。

- [フライト及び地上測定に要した期間]
- 美浜・敦賀
 - ・航空機モニタリング:令和4年(2022年)7月26日~7月31日(延べ9フライト)
 - ・地上測定
 :同年7月26日~7月30日
- 伊方
 - ・航空機モニタリング:令和4年(2022年)11月11日~11月21日(延べ16フライト) ・地上測定 :同年11月11日~11月18日

モニタリングエリア ヘリコプター機種 (機体番号)	測線フライト距離 (km)	総飛行距離 [※] (km)	平均速度(km/h)	測定開始日	測定終了日	延べフライト回数
美浜・敦賀 Bell430 (JA02AX)	836	3,167	143	2022年7月26日	2022年7月31日	9
伊方 Bell412 (JA9616)	1,906	6,575	135	2022年11月11日	2022年11月21日	16

Table 4-1 ヘリコプターのフライト距離及び速度とフライト回数

※測線フライト以外の、空輸やキャリブレーションフライト等による飛行距離も含む。

4.2. 換算パラメータ

3.4.2 項で示した方法により対地高度補正係数 HF を求めた。Fig. 4-1 に対地高度と計数率の 関係を例示する。HF を求めるために必要な実効的な空気減弱係数 AF は、テストラインフラ イトで取得したデータを基に、非線形最小二乗法による指数関数回帰で求めた (Table 4-2)。ま た、テストポイントフライトで取得したデータを基に、3.4.3 項で示した方法によりγ線計数率 を地表面から1mの高さの空間線量率に換算するための換算係数 CD を求めた (Table 4-3)。CD を算出するために用いたテストポイントにおける地上測定値を Fig. 4-2 (美浜・敦賀) 及び Fig. 4-3 (伊方) に示す。なお、本図に示した空間線量率 (μSv/h) は NaI(TI)検出器の指示値である。

以上で求めた *AF* 及び *CD* の内、テストラインフライトデータ及びテストポイントフライト 中のγ線計数率及び対地高度等の一定性を評価し、最も信頼できるパラメータを1組選定した。 選定したパラメータを Table 4-4 に示す。*AF* については RV が最も小さいデータとして美浜・ 軟賀では7月31日、伊方では11月11日に取得した数値を採用した。*CD*についてはγ線計数 率及び対地高度が最も安定して取得できていたデータとして、美浜・敦賀では7月26日、伊 方では11月17日に取得した数値を採用した。また本表には参考として、福島原子力発電所周 辺における航空機モニタリングで使用している換算パラメータを併記した。この換算パラメー タは平成24年(2012年)から平成26年(2014年)に取得したデータの算術平均値であり、Cs-137の地表面沈着量が比較的大きな地域で取得したものが多く含まれる。このように、同様の ヘリコプター機種を用いたとしても、本報告における*AF*及び*CD*の値は福島原子力発電所周 辺の航空機モニタリングで用いている数値とやや差異が見られた。測定対象となるγ線の平均 エネルギーについて、前者ではK-40(1,461 keV)が主体と思われるが、後者ではCs-137(662 keV)の割合が比較的大きいため前者よりも空気減弱されやすく、これが両者の差異に表れて いると推察される。





(Bell412 JA9616、2022 年 11 月 11 日、TestLine (愛媛県東温市) にて実施。本図中の RV は指数回帰における残差分散を表す。)



Fig. 4-2 美浜・敦賀のテストポイントにおける地上測定値 (µSv/h)



Fig. 4-3 伊方のテストポイントにおける地上測定値 (µSv/h)

Table 4-2 2022 年度取得した AF データー覧

モニタリングエリア		ヘリコプター機種(機体番号)	RSIシステム	実施年日	テストライン名	非線形最小二乗法により 指数関数回帰の結果		
		(連机会社)				<i>AF</i> (m⁻¹)	RV	
	羊汇,动智	Bell430 (JA02AX)	RSI 3	2022/07/26	龄 之内	-0.00545	2,24	
	天供・我員	(AAC)		2022/07/31	*冊 ~ 173	-0.00551	82	
	毎七	Bell412 (JA9616)		2022/11/11	古旧	-0.00581	1	
	1,7 Л	(AAC)	K91 3	2022/11/17	上	-0.00552	1;	

Average(美浜・敦賀) -0.00548

Average(伊方) -0.00567

※AAC:朝日航洋株式会社 ※RV:指数関数回帰における残差分散

Table 4-3 2022 年度取得した CD データー覧

	ヘリコプター機種(機体釆号)					地上測定値			テストポイント	・フライトデータ		CD
モニタリングエリア	(運航会社)	RSIシステム	実施年日	テストポイント名	空間線量率	標本標準偏差	相対標準偏差	計数率	標本標準偏差	対地高度	標本標準偏差	(s ⁻¹ /[uSv/h])
					(µSv/h)	(2 σ)	(%)	(s ⁻¹)	(2 σ)	(ft)	(2 σ)	
羊近,	Bell430 (JA02AX)		2022/07/26	於今市	0.07	0.01	16	2,124	256	1,025	18	20,600
天洪・	(AAC)	R31 3	2022/07/31	判える	0.07	0.01	17	1,823	313	1,072	53	19,700
伊士	Bell412 (JA9616)		2022/11/11 東泪	0.09	0.03	29	2,561	221	900	21	18,600	
1升力	(AAC)	R91 3	2022/11/17		0.09	0.02	26	1,958	138	1,165	36	15,900
										A	verage(美浜・敦賀)	20,200
											Average(伊方)	17,300
											※AAC:朝	日航洋株式会社



エータリングエリフ	ヘリコプター機種	換算パラメータ			
	(機体番号)	$AF(m^{-1})$	<i>CD</i> (s ⁻¹ /[µSv/h])		
美浜·敦賀	Bell430 (JA02AX)	-0.00551	20,600		
福島原子力発電所	Bell430 (JA05TV)	-0.00720	13,000		
伊方	Bell412 (JA9616)	-0.00581	15,900		
福島原子力発電所	Bell412 (JA9616、JA6928及びJA412N)	-0.00720	11,000		

Table 4-4 解析に用いた換算パラメータのまとめ

4.3. 地上測定値との比較

航空機モニタリングによる空間線量率の妥当性を検証するため、Fig. 3-1 (美浜・敦賀) 及 び Fig. 3-2 (伊方) に示した 20 地点において NaI(Tl)検出器により空間線量率の地上測定を実 施した。地上測定による空間線量率測定結果 (以下、地上測定値) を Fig. 4-4 及び Fig. 4-5 に 示す。

航空機モニタリングによる空間線量率(以下、航空機モニタリング値)と地上測定値との 比較を Fig. 4-6 (美浜・敦賀) 及び Fig. 4-7 (伊方) に示す。これらの図には参考として、令和 2年度 (2020年度)の美浜・敦賀及び平成 28年度 (2016年度)の伊方の比較結果も掲載した。 それぞれ散布図及び相対誤差のヒストグラムで比較した。なお、相対誤差は(航空機モニタ リング値 – 地上測定値) / (地上測定値) により算出した。散布図を見ると、航空機モニタリ ング値が地上測定値のファクター2 に収まっていた割合については、美浜・敦賀の場合、令 和4年度(2022年度)では85%(全20点中17点)、令和2年度(2020年度)では93%(全30 点中 28 点) であった。伊方の場合、令和4年度 (2022年度) では75% (全20点中15点)、平 成28年度(2016年度)では100%(全50点中50点)であった。次に、相対誤差のヒストグ ラムを見ると、0以下(航空機モニタリング値の方が地上測定値よりも小さい)に分布がやや 偏る傾向が見られた。平均値及び中央値については、美浜・敦賀の場合、令和4年度 (2022 年度)では-0.25及び-0.30、令和2年度(2020年度)では0.09及び0.07であり、伊方の場合、 令和4年度(2022年度)では-0.23及び-0.19、平成28年度(2016年度)では0.02及び0.01で あった。令和4年度 (2022年度)の美浜・敦賀及び伊方では、航空機モニタリング値は地上 測定値よりも概ね 20%~30%程度、過小評価したことが窺える。令和2年度 (2020年度)の 美浜・敦賀及び平成28年度(2016年度)の伊方については平均値と中央値ともに0に近かっ たことから、令和4年度(2022年度)の美浜・敦賀及び伊方の航空機モニタリングと地上測 定との整合性について、過去の結果と比べるとやや妥当性に劣るように思われる。

さらに、航空機モニタリング値が地上測定値に対して、絶対値としてどの程度乖離しているのかを知るために、地上測定値に対する航空機モニタリング値の平方根平均二乗誤差 (Root Mean Squared Error: RMSE)を以下の式 [8] に従って算出した。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (D_{a,i} - D_{g,i})^{2}}$$
[8]

ここで、

RMSE:平方根平均二乗誤差 (µSv/h)

n:データ数

*D*_{a,i}: i番目の航空機モニタリングによる空間線量率 (μSv/h)

D_{g,i}:i番目の地上測定値 (µSv/h)

である。

RMSE は非負であり、0 に近いほど航空機モニタリング値が地上測定値とよく合致するこ とを意味する。原子力施設等周辺におけるバックグラウンド航空機モニタリングが一巡した 平成 27 年度 (2015 年度) から令和 2 年度(2020 年度)までのデータについて航空機モニタリン グ値と地上測定値を比較した結果を Fig. 4-8 に示す。散布図を見ると、93%(全 429 点中 399 点)がファクター2 に収まり、相対誤差は 0 付近をピークとした正規分布に近い形をしてお り、その平均値及び中央値は0に近く、RMSEは0.025 µSv/h であった。これらのことから、 今までに評価してきた原子力施設等周辺のバックグラウンド空間線量率は一定の水準で正確 性を有するものの、地上測定値に対して 0.03 µSv/h 程度の誤差が生じると見込まれる。よっ て、令和4年度 (2022 年度)の測定データから評価した RMSE がこれを下回るか否かが航空 機モニタリングによる空間線量率の換算結果の妥当性を判断する指標の一つとなろう。

RMSE を過去の測定と比較すると、美浜・敦賀の場合、令和 4 年度 (2022 年度) では約 0.027 µSv/h、令和 2 年度 (2020 年度) では約 0.024 µSv/h であり、伊方の場合、令和 4 年度 (2022 年度) では約 0.032 µSv/h、平成 28 年度 (2016 年度) では約 0.019 µSv/h であった。異 なるデータセット間で一概に比較できるものではないが、 令和 4 年度 (2022 年度) の航空機 モニタリングによる空間線量率の測定結果は過去の測定結果に比べて RMSE が大きく、妥当 性にやや劣るように思われる。しかしながら、平成 27 年度 (2015 年度) から令和 2 年度 (2020 年度) までのデータから求めた上記指標 0.03 µSv/h に照らし合わせると、両モニタリ ングにおける空間線量率の計算結果は概ね誤差範囲に収まっており妥当なものであると考え られる。

また、地上測定値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:対地高度 300 m 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(半径約300m)に該当する地上の放射線量の平均値となる。一方、地表 面から1mの高さにおける測定範囲は半径30m程度の円の放射線量の平均値となる。よ って、地上の放射線分布が一様の場所では地上測定値と航空機モニタリング測定値は整合 しやすいが、地上の空間線量率の分布が均一でない場所では、測定結果が整合しにくいと 考えられる。

②周辺からの影響:地上の測定場所の近傍に大きな建物や森林等がある場合には、建物や樹木に沈着している放射性核種が地上測定値に影響する可能性がある。また、上空で測定す

る場合においては、建物や森林等が地表面からの放射線を遮蔽するため、単純に比較でき ない場所がある。本報告において、比較用に取得した地上測定値は比較的地形が平坦な場 所が多く、条件がよい場所を選定しているが、上記した影響を免れない場所が一部含まれ ている。











Fig. 4-6 美浜・敦賀における航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値の比較 (上:2022 年度、下:2020 年度¹⁷⁾) (左:散布図、右:相対誤差の頻度分布)



Fig. 4-7 伊方における航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値の比較 (上:2022 年度、下:2016 年度⁹⁾) (左:散布図、右:相対誤差の頻度分布)



Fig. 4-8 航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値の比較 (2015 年度から 2020 年度までの全データ^{7),9),11),13),15),17)}) (左:散布図、右:相対誤差の頻度分布)

4.4. 空間線量率

本節では、航空機モニタリングの測定結果を基に、地表面から1mの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」を示す。空間線量率マップの色合いについては、福 島原子力発電所周辺において行っている航空機モニタリングの設定¹⁸⁾に準じた。次に、今 年度及び過去の航空機モニタリングによる空間線量率マップとFig.1-1に示した日本地質学 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²³⁾を比較した。このとき、空間線量率の分布傾向を分かりやすく視覚化し、 かつ日本地質学会による自然放射線量マップとの比較をある程度容易にするために、本比較 における航空機モニタリングによる空間線量率マップの色合いは、コンターインターバルを 0.02 µSv/h とし、0.06 µSv/h 未満~0.16 µSv/h を超える範囲までの7 段階に設定した。

なお、日本地質学会のホームページに掲載されている自然放射線量マップは日本各地で採 取された河川堆積物試料中のU、Th及びKの濃度をもとに計算によって求める方法⁴⁵⁾で作 成されている。この計算手法では、「ベータ線とガンマ線の場合には全身に均等に吸収され たとき1Gy = 1Svと換算できる」²³⁾という仮定を採用し、空気吸収線量率 (µGy/h)から実 効線量(µSv/h)に単位変換を行っていることから、当該マップは実効線量として意味づけが なされていると考えられる。3.3節に記述した通り、航空機モニタリングにおける空間線量 率は周辺線量当量率 (1 cm線量当量率)であり、日本地質学会の自然放射線量マップとは必 ずしも1対1で比較できるものではないことに注意を要する。また、日本地質学会の自然放 射線量マップ作成に際して計算に使用された試料の採取密度が概ね10 km×10 kmに1試料 であり、それらの試料の各元素濃度の測定結果には0.5~2.0倍程度の誤差が伴っていること、 核種濃度の測定結果が得られなかった地点については内挿補間で色付けされていることから、 自然放射線量の計算値にはある程度の不確かさがあり、その分解能は10 km 程度であると思 われる。結果の比較には以上の点を念頭に置く必要がある。

4.4.1. 美浜·敦賀

美浜・敦賀における空間線量率マップを Fig. 4-9 に示す。なお、空間線量率の最大値は岐 阜県関市板取の竜波山周辺で約 0.22 µSv/h であった。次に、Fig. 4-10 に示した美浜・敦賀に おける航空機モニタリングによる空間線量率マップについて、測定エリアの中央部で空間線 量率が比較的高くなる傾向は令和 2 年度 (2020 年度) と令和 4 年度(2022 年度)の両者で同様 であったが、主に北部と南部で相違が見られ、令和 4 年度 (2022 年度)の方が空間線量率は 全体的に低く算出される傾向にあった。令和 4 年度 (2022 年度)において令和 2 年度 (2020 年度)よりもコンターレベルが 2 段階 (0.04 µSv/h)以上変化する程に空間線量率が低く算出 された主な地域は、北部については①福井県大野市の北西部の市街地部、②福井県坂井市と あわら市の境界付近の市街地部、③福井県大野市の北東部打波川流域の山間部、④石川県加 賀市の動橋川流域の山間部、南部については⑤岐阜県本巣市の魚金山周囲の山岳地帯、⑥岐 阜県養老郡養老町と安八郡輪之内町の境界付近にある市街地部、⑦岐阜県関市の板取川流域 から山県市にかかる山岳地帯、⑧三重県いなべ市と東近江市の境界付近にある竜ヶ岳周辺で あった。日本シームレス地質図³⁷⁾及び各エリアにおける既往の詳細な地質調査レポート等 を基に、航空機モニタリングによる空間線量率が比較的高く算出された要因について令和 2 年度 (2020 年度)に考察を行った¹⁷⁾。これに上記の①、②及び⑥について日本シームレス地 質図を基に情報を補完して、令和 4 年度 (2022 年度)の航空機モニタリングによる空間線量 率と既往の地質情報との対比について簡潔に示す。

①は扇状堆積物等の堆積物と船津花崗岩類(トーナル岩、花崗閃緑岩及び閃緑岩から成る)、 ②は玄武岩質安山岩や段丘堆積物、⑥は海岸平野堆積物等がそれぞれ主な堆積物として分布 している。②~⑥については花崗岩類の存在が確認できず、地質学的な情報と空間線量率が 比較的高く算出されることの関連付けが難しい地域である。逆に、①、⑦及び⑧については 花崗岩類の存在が認められ、空間線量率が比較的高く算出されることが妥当と思われる地域 である。①は令和4年度 (2022年度) では大部分で空間線量率が 0.06 μSv/h 未満であり、理 由は判然としないが、船津花崗岩類に起因する γ線を捉えられなかったことが推察される。 ⑦は空間線量率の比較的高いエリアが令和2年度(2020年度)では花崗岩類の分布範囲をは み出して過剰に広がったのに対し、令和4年度(2022年度)では花崗岩体の分布範囲内に丁 度よく収まった。⑧は令和2年度(2020年度)当時から測線を間引いた影響により、令和4 年度 (2022 年度) 年度には花崗岩類の分布地帯を測定できておらず、従って空間線量率が低 く算出されたと推察される。次に、日本地質学会の自然放射線量マップでは、測定エリアの 中央部から南部にかけて比較的高線量率であり、令和4年度(2022年度)の航空機モニタリ ングによる空間線量率の分布傾向は、南部域を除いて概ね同様であるように思われる。以上 のことから、①及び⑧を除いた地域では、航空機モニタリングによる空間線量率マップと地 質分布及び自然放射線量マップとの対比が比較的良好であると思われる。

4.4.2. 伊方

伊方における空間線量率マップを Fig. 4-11 に示す。伊方から半径 3 km 圏内は航空機モニ タリングの対象範囲外であるためマッピングを行っていない。また、平成 28 年度 (2016 年 度) 当時から測線を間引いたことに伴い、測定データが取得できなかった一部の諸島や半島 部はマッピングの対象外とした。なお、空間線量率の最大値は愛媛県西条市丹原町の中山川 渓谷周辺で約 0.40 μSv/h であった。次に、Fig. 4-12 に示した伊方における航空機モニタリン グによる空間線量率マップについて、測定エリアの北部及び南東部で空間線量率が比較的高 くなる傾向は、平成 28 年度 (2016 年度) と令和 4 年度(2022 年度)の両者で同様であった。一 方、東部において 2016 年度では 0.16 μSv/h 以上の領域が広がっているのに対し、令和 4 年 度 (2022 年度) ではその大部分で 0.06 μSv/h 未満であったという点で相違が見られた。日本 地質学会の空間線量率マップ (Fig. 4-12 (右)) では、北部で特に高線量率であり、中央部と 南部にも比較的高線量率なエリアが広がっている点で、航空機モニタリング値の分布傾向と 概ね同様である。当該マップでは、東部については概ね 0.05 μGy/h 前後であり、令和 4 年度 (2022 年度) の航空機モニタリングによる空間線量率マップのコンター色と同レベルの線量 率であった。本報告では、令和4年度(2022年度)の空間線量率マップにおいて 0.16 µSv/h を超えたエリアと平成28年度(2016年度)と相違が見られたエリアを主に対象として、日本 シームレス地質図及び各エリアにおける既往の詳細な地質調査レポート等を基に、空間線量 率の多寡に影響を与えた要因について考察を行った。なお、中国地方と四国地方の地質調査 レポートは現時点で非公開のものが多数あり考察に十分な情報量がないのが現状である。 0.16 µSv/h を超えたのは測定範囲の北側から、広島県については、①江田島市の南部及び呉 市の倉橋島一帯であった。山口県については、①岩国市の一帯であった。愛媛県については、 ①松山市米野町の南部から今治市玉川町龍岡上の中央部、②西条市丹原町の中山川渓谷付近、 ③伊予郡砥部町の中央東部の山間部、④上浮穴郡久万高原町若山の山間部、⑤北宇和郡松野 町豊岡の中央部、⑥宇和郡鬼北町の東部の山間部及び⑦南宇和郡愛南町の北部に位置する篠 山周辺の山岳部であった。高知県については、①四万十市勝間の周辺、四万十川流域の山間 部であった。

・広島県について

① 江田島市の南部及び呉市の倉橋島一帯について³⁸⁾

本地域の大部分を呉花崗岩が占めており、一部に音戸花崗閃緑岩が分布している。呉 花崗岩は中-粗粒黒雲母花崗岩、細粒黒雲母花崗岩及び細-中粒単斜輝石含有黒雲母角 閃石閃緑岩及び角閃石黒雲母トーナル岩の大きく3つに分類される。空間線量率が0.16 µSv/hを超えたのは中-粗粒黒雲母花崗岩の分布地帯の内、倉橋島の中央部及び南東部で あるが、両地域でとりわけ空間線量率が大きく算出された理由は不明確である。いずれ にせよ、本地域に広く分布する花崗岩類に起因するγ線を捉えたため、航空機モニタリン グによる空間線量率が本地域一帯で比較的高く算出されたと推察される。

- ・山口県について
- 岩国市の一帯について³⁹⁾

本地域は花崗岩質な地域であり、広島花崗岩類、領家新規花崗岩類及び領家古期花崗 岩類が広く分布している。これら岩石類に起因するγ線を捉えたため、航空機モニタリン グによる空間線量率が比較的高く算出されたと推察される。特に、空間線量率が 0.16 μSv/hを超えたのは領家新規花崗岩類に属する木部花崗岩の分布地帯である。本岩の主岩 相は粗粒黒雲母花崗岩であり、珪長質鉱物のモード組成によると純粋な花崗岩に分類さ れ、特にγ線強度が高いことが推察される。

・愛媛県について

① 松山市米野町の南部から今治市玉川町龍岡上の中央部について⁴⁰

本地域一帯には領家花崗岩類に属する弱片状斑状粗粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩が主に 分布している中に、黒雲母花崗岩もある程度広く分布している。航空機モニタリングに よる空間線量率が 0.16 µSv/h 前後と特に高く算出されたのは黒雲母花崗岩の分布範囲と 概ね重なっている。

ここで、上記の通り松山市一帯は花崗岩類によって占められているが、松山市中央部 でのみ航空機モニタリングによる空間線量率が 0.06 µSv/h 前後であった。本地域におけ る地質情報は現時点で非公開であり、花崗岩に関する詳細な情報は不明確であるが、空 間線量率の上昇には寄与しない何らかの要因が存在する可能性がある。

② 西条市丹原町の中山川渓谷付近について

日本シームレス地質図によると、本地域は砂岩泥岩互層や海岸平野堆積物が主体であ り、空間線量率の上昇に寄与すると思われる岩石類の存在は認められない。地形的にや や複雑ではあるが、航空機モニタリングによる空間線量率が 0.16 µSv/h 以上になる程に 影響を与える要因であるとは考え難い。地質的及び地形的要因から空間線量率の多寡を 説明するには困難な点があり、これら以外の要因が潜在している可能性がある。

③ 伊予郡砥部町の中央東部の山間部について

日本シームレス地質図によると、本地域は苦鉄質片岩や安山岩が主体であり、空間線 量率の上昇に寄与すると思われる岩石類の存在は認められない。②と同様に地形的に複 雑ではあるが、航空機モニタリングによる空間線量率が 0.16 µSv/h 以上になる程に影響 を与える要因であるとは考え難い。地質的及び地形的要因から空間線量率の多寡を説明 するには困難な点があり、これら以外の要因が潜在している可能性がある。

④ 上浮穴郡久万高原町若山の山間部について 41)

本地域一帯には火山性陥没構造(通称:石鎚コールドロン)が形成されており、その大部分は火砕流堆積物で占められているが、一部に花崗岩体の存在が認められる。航空機 モニタリングによる空間線量率が 0.16 μSv/h を上回ったのは、石鎚コールドロン北側外縁の花崗閃緑岩体、南西部の斑状花崗閃緑岩や花崗斑岩岩体(通称:坂瀬川岩体)及び黒 雲母アダメロ岩体(通称:鉄砲石川岩体)の3箇所である。いずれの場所においても花崗 岩体から放出されたγ線を捉えたため、空間線量率が上昇したと推察される。

⑤ 北宇和郡松野町豊岡の中央部について 42)

本地域には頁岩や砂岩から成る地層が主に分布しており、空間線量率の上昇に寄与す る岩石類の存在は一見して確認できない。一方、本地域から南西方向に約5km離れた場 所に大きな花崗閃緑岩体 (通称:高月山岩体) が認められ、その周囲にはホルンフェルス (花崗岩類等の深成岩の接触変成作用により形成される変成岩) が広がっていることが見 出されている。このことから、高月山岩体を含む岩石類が本地域に存在する可能性があ るものの、航空機モニタリングによる空間線量率が 0.16 µSv/h を超える程に影響を与え る要因であるとは考え難く、地質的な要因のみでは説明が困難である。

⑥ 宇和郡鬼北町の東部の山間部

日本シームレス地質図によると、本地域では泥岩、砂岩及び泥岩砂岩互層が主に分布 しており、空間線量率の上昇に寄与する岩石類の存在は確認できない。父野川中の地蔵 山近辺で航空機モニタリングによる空間線量率が 0.16 µSv/h を上回ったが、地形の起伏 がこれほどまでに空間線量率の多寡に寄与するとは考え難い。また、本地域にはかつて 水銀鉱山が存在していたようだが、航空機モニタリングによる空間線量率の上昇との相 関は不明である。

⑦ 南宇和郡愛南町の北部に位置する篠山周辺の山岳部について

日本シームレス地質図によると、本地域には砂岩泥岩互層が主に分布しており、空間線量率の上昇に寄与する岩石類の存在は確認できない。篠川流域の地形の起伏が激しい

地域において航空機モニタリングによる空間線量率が 0.16 µSv/h を上回ったが、地形の 起伏がこれほどまでに空間線量率の多寡に寄与するとは考え難い。地質的及び地形的要 因から空間線量率の多寡を説明するには困難な点があり、これら以外の要因が潜在して いる可能性がある。

・高知県について

① 四万十市勝間の周辺、四万十川流域の山間部について

日本シームレス地質図によると、本地域は砂岩及び頁岩が主に分布しており、空間線 量率の上昇に寄与すると思われる岩石類の存在は認められない。本地域は複雑な地形で あることが窺われるものの、地形の起伏がこれほどまでに空間線量率の多寡に寄与する とは考え難い。地質的及び地形的要因から空間線量率の多寡を説明するには困難な点が あり、これら以外の要因が潜在している可能性がある。

また、伊方エリア東部において平成28年度(2016年度)で空間線量率が0.16µSv/h以上で あったのに対し、令和4年度(2022年度)で0.06µSv/h未満であったのは、吾川郡仁淀川町、 高岡郡越知町、高岡郡津野町に跨る山間部域であった。日本シームレス地質図によると、本 地域は様々な岩石類が複雑に入り組んで分布しており、空間線量率の上昇に寄与すると思わ れる岩石類は、吾川郡仁淀川町近辺のごく狭小な範囲に花崗岩類が認められるに留まる。平 成28年度(2016年度)当時に伊方エリア東部に空間線量率の比較的高いエリアが広がった理 由は判然としない。

以上のように、一部で既往の地質調査レポート等との関連付けが難しい場所はあったもの の、空間線量率が比較的高く算出された場所のほとんどで花崗岩類 (を含む岩石体)の存在 が関連していることが推察された。



Fig. 4-9 美浜・敦賀における空間線量率マップ (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)







Fig. 4-11 伊方における空間線量率マップ (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)





- 59 -

4.5. 天然放射性核種の濃度

本節では、Table 3-4 に示したパラメータを利用し、天然放射性核種濃度をマップ化した結 果を示す。なお、日本における K-40、U系列及び Th 系列の核種濃度は、それぞれ 100 Bq/kg ~700 Bq/kg、10 Bq/kg~50 Bq/kg 及び 7 Bq/kg~50 Bq/kg とされている⁴³⁾。次に、天然放射性 核種濃度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⁴⁴⁾との比較結果を示す。この海と陸の地 球化学図の元素濃度マップは日本各地における河川堆積物試料の元素濃度測定結果に対して Beck et al.⁴⁵⁾の換算係数を適用して作成されており、その中でも K-40、U系列及び Th 系列の濃 度測定結果は 4.4 節で示したように、日本地質学会の空間線量率マップに使用されている。し かしながら、山間部等のデータは少ないため、比較にあたっては注意が必要である。また、海 と陸の地球化学図では河川堆積物試料中の元素濃度(%または ppm)を示しており、航空機モニ タリングによる計算結果 (Bq/kg) との単純な比較は難しいことも念頭に置く必要がある。

4.5.1. 美浜·敦賀

K-40、U系列及びTh系列の濃度マップをFig. 4-13~Fig. 4-15 に示す。K-40、U系列及びTh 系列の各最大濃度については、約 1,600 Bq/kg(岐阜県本巣市根尾越波の中水谷の近辺)、約 100 Bq/kg(石川県小松市の中央部の山岳地帯、五百峠の周辺)及び約 130 Bq/kg(岐阜県本巣市根尾 上大須の上大須ダムの近辺)であった。また、測定エリア全体における K-40、U 系列及びTh 系列の各平均濃度については、約 560 Bq/kg、約 36 Bq/kg及び約 33 Bq/kg であり、上記した各 元素の平均濃度レベルと概ね整合した。

航空機モニタリングによる天然放射性核種濃度マップと海と陸の地球化学図による元素濃 度マップの比較を K-40、U 系列、Th 系列の順に Fig. 4-16~Fig. 4-18 に示す。測定エリアの中 央部と南部で各元素ともに比較的高濃度であるという点で大まかな分布傾向は一致していた。 また、Fig. 4-9 に示した空間線量率マップにおいて空間線量率が比較的高く算出された箇所と の対比も良好に思われる。K-40 の濃度マップ (Fig. 4-16) について、航空機モニタリングによ るマップと海と陸の地球化学図によるマップとで、測定エリアの中央部から南部にかけて比較 的高濃度であり、概ね同様な分布傾向であった。U系列濃度マップ (Fig. 4-17) については、測 定エリアの中央部と南部に比較的高濃度な領域が広がっている点で、航空機モニタリングによ るマップと海と陸の地球化学図によるマップとで同様な分布傾向であった。他方で、測定エリ アの北端において、航空機モニタリングによるマップでは比較的高濃度な領域が見られたのに 対し、海と陸の地球化学図によるマップでは低濃度であるという点で相違が見られた。本地域 は 4.4.1 項に記した「②福井県坂井市とあわら市の境界付近の市街地部」を含み、玄武岩質安 山岩や段丘堆積物が主体であるが、日本シームレス地質図によると、その東方にデイサイトや 流紋岩類が主体の岩体が広く分布している。航空機モニタリングによる U 系列濃度マップで 比較的高濃度であったのは、このデイサイトや流紋岩体の分布エリアであり、本岩体によるU 系列核種に起因する γ線強度は比較的強かったことが推察される。一方、海と陸の地球化学図

マップの基となった河川堆積物試料の U 系列濃度は、本地域ではいずれも 2 ppm 以下である が、そのほとんどが段丘堆積物の分布領域のものであることから、デイサイトや流紋岩体に起 因する U 系列濃度が当該マップに反映されていない可能性が高い。Th 系列濃度マップ (Fig. 4-18) についても、U 系列濃度マップの場合と同様に、測定エリアの中央部と南部に比較的高 濃度な領域が見られる点で、航空機モニタリングによるマップと海と陸の地球化学図によるマ ップとで同様な分布傾向であるが、測定エリアの北端においては分布傾向に相違が見られた。 この相違が生じた理由は上記と同様であると思われる。

4.5.2. 伊方

K-40、U系列及びTh系列の濃度マップをFig.4-19~Fig.4-21に示す。K-40、U系列及びTh 系列の各最大濃度については、約 1,700 Bq/kg (愛媛県宇和島市津島町山財の山財ダム北方)、 約 185 Bq/kg (愛媛県西条市丹原町の中山川渓谷付近)及び約 120 Bq/kg (南宇和郡愛南町の北部 に位置する篠山周辺の山岳部)であった。また、測定エリア全体におけるK-40、U系列及びTh 系列の各平均濃度については、約 500 Bq/kg、約 36 Bq/kg及び約 28 Bq/kg であり、本節冒頭に 記載した各元素の平均濃度レベルと概ね整合した。

次に、航空機モニタリングによるマップと海と陸の地球化学図によるマップの比較結果を Fig. 4-22~Fig. 4-24 に示す。測定エリア北方で各元素とも特に高濃度であったという点で大ま かな分布傾向は一致しており、また、Fig. 4-11 に示した空間線量率マップにおいて空間線量率 が比較的高く算出された箇所との対比も良好に思われる。K-40の濃度マップ (Fig. 4-22) につ いて、航空機モニタリングによるマップと海と陸の地球化学図によるマップとで全体的に高濃 度である一方で、測定エリアの中央西部 (大分県国東市の周辺) から中央部 (愛媛県八幡浜市及 び西宇和郡伊方町の周辺) にかけて比較的低濃度な領域が見られる点で、概ね同様な分布傾向 であった。U系列濃度マップ (Fig. 4-23) については、海と陸の地球化学図マップでは測定エリ ア北部以外のほとんどの領域で 2 ppm 以下と低濃度である。一方で、航空機モニタリングによ るマップでは、測定エリア北部以外にも愛媛県中央部とその以南及び大分県東部の大部分にお いて 30 Bq/kg 以上の比較的高濃度な領域が広がっており、海と陸の地球化学図によるマップ と分布傾向がやや異なる。愛媛県中央部は四国山地或いはその辺縁、その以南は山岳地帯であ り、海と陸の地球化学図の基となった河川堆積物試料の採取地点が限定的であるため、濃度の 変化を細かに表現できていないものと思われる。対して、航空機モニタリングではこれら山岳 地帯を飛行して取得した γ線計数率データを基に濃度マップを作成したため、U系列核種に起 因する計数率の多寡に応じた濃度変化が表現できているものと思われる。ただし、日本シーム レス地質図で確認できる範囲でも、本エリアには様々な地質体が複雑に入り組んだ形で分布し ており、実環境に沿った濃度分布を再現できているかは不確実である。大分県東部に関しては、 航空機モニタリングによる U 系列濃度が 60 Bq/kg 以上の高濃度になったのは、例えば、津久 見湾周囲、豊後大熨から臼杵市にわたる山岳部、佐伯市の番匠川の流域と米水津湾の周囲であ るが、いずれも近辺にデイサイトまたは花崗閃緑岩が存在しており、これらの岩体が U 系列 濃度の上昇に寄与したものと思われる。海と陸の地球化学図の基となった河川堆積物試料の採
取地点に、このデイサイトの分布領域に位置するものが幾つか含まれるものの、いずれの試料 についても U 濃度は 2 ppm 以下であり、航空機モニタリングによる U 系列濃度マップとは齟 齬が生じる。Th 系列濃度マップ (Fig. 4-24) の分布傾向は U 系列濃度と概ね同様であるが、航 空機モニタリングによる U 系列能濃度マップにおいて、四国山地或いはその辺縁で見られた 高濃度な領域は Th 系列濃度マップにはない。

以上のことから、地上の河川堆積物試料中の元素濃度測定結果に基づく元素濃度マップを 再現するのが難しい箇所があるものの、航空機モニタリングにより、一定の信頼性をもつ天然 放射性核種濃度マップの作成が可能であると考えられる。しかしながら、航空機モニタリング によるマップでは U 系列濃度の方が高いのに対し、海と陸の地球化学図によるマップでは Th 系列濃度の方が高い。海と陸の地球化学図による元素濃度マップが完成したのが平成 22 年 (2010 年)であり、その当時から各種元素の分布状況が変化している可能性がある。信頼性の より高い現存の自然放射性核種の分布マップを構築するために、3.9 節に示した航空機モニタ リングによる一連の解析手法の更なるブラッシュアップを目指したい。



Fig. 4-13 K-40 濃度マップ (美浜・敦賀) (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)



Fig. 4-14 U 系列濃度マップ (美浜・敦賀) (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)



Fig. 4-15 Th 系列濃度マップ (美浜・敦賀) (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)



、H 水 地 d l av 、 L av を使用。)



を使用。





を使用。



Fig. 4-19 K-40 濃度マップ (伊方) (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)



Fig. 4-20 U 系列濃度マップ (伊方) (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)



Fig. 4-21 Th 系列濃度マップ (伊方) (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)







を使用。



4.6. ラドン弁別手法の適用

4.6.1. パラメータ (RI 及び GI) の決定

式 [6] を用いたラドン弁別法の信頼性はグラウンドインデックス GI とラドンインデック ス RI の設定精度に依存する。ヘリコプターの遮蔽による γ 線計数率の変化に付随して、こ れらのパラメータも変化すると考えられるため、使用したヘリコプター機種ごとに実測デー タから数値を決定した。

計数率の変動による影響をなるべく低減するために、美浜・敦賀及び伊方における航空機 モニタリングにおいて取得した計数率データ及び GPS データ (緯度、経度及び飛行高度)を 40 秒平均し、全計数率から宇宙線及びヘリコプター機体に起因するγ線計数率の寄与をバッ クグラウンドとして減算したうえで RI及び GIの算出に用いた。このとき、RIについては海 上でフライトしたデータの内、海抜高度が 300 m ± 150 m (実際のフライト海抜高度が 150 m ~450 m) で取得したデータを抽出対象とし、GI については陸上で取得したデータの内、対 地高度が 300 m 前後 (実際のフライト対地高度が 290 m~320 m) のデータのみを抽出対象と した。RI及びGIの算出に係るNaI(TI)検出器の計数率とLaBr3検出器の計数率の関係をFig. 4-25 に示す。本図において線形回帰 (ただし、切片が 0 であることを前提とする) を実施し て得られた傾き(回帰係数)を RI 及び GI とする。データ数が少ない或いはばらつきが比較的 大きく外れ値が含まれるデータに対して最小二乗法による線形回帰を実施した場合、回帰係 数に悪影響を及ぼすケースが過去に見られた¹⁷⁾。最小二乗法では実測値と予測値との二乗 誤差を最小にする回帰係数を決定するため、外れ値が生じた場合の影響が大きく、回帰係数 が外れ値側に偏った値に近似されてしまうためである。そこで、外れ値を含むデータに対し ても適切な回帰係数を得ることを目的として、ロバスト回帰を試行的に導入することを検討 した。本報告では、ロバスト回帰の中でも比較的単純で導入が容易な最小絶対値法を用いる こととした。最小絶対値法では実測値と予測値との絶対値誤差を最小にする回帰係数を決定 するため外れ値の影響を比較的受けにくいことが知られている。一方で、データに外れ値が 含まれない (実測値と予測値の誤差が正規分布に従う) 場合には、最小二乗法の方が最小絶 対値法よりも信頼度の高い回帰係数を与える⁴⁶⁾。以上のことを勘案すると、RI及びGIの算 出に際しては、最小二乗法及び最小絶対値法による回帰係数を取得し、それぞれの数値がほ とんど同一である場合には最小二乗法による回帰係数を用い、明らかに異なる場合には最小 絶対値法による回帰係数を用いるのがより適切と思われる。

*RI*及び*GI*の算出に係る NaI(TI)検出器の計数率と LaBr₃検出器の計数率の関係を Fig. 4-25 に示す。本図には最小二乗法及び最小絶対値法による線形回帰で得られた近似直線と回帰式 を併記した。本図の上段に示した、*RI*の算出に用いたデータは海上で取得したものである ことから、ラドン子孫核種に起因する計数率のみが反映されていると考えられるが、ややば らつきが大きい。これは大気中ラドン子孫核種の分布の不均一さや抽出対象とするデータの 海抜高度範囲が広いことに起因すると思われる。また、Fig. 4-25 の下段に示した *GI*の算出 に用いたデータについては、上記したように陸上で取得したものであり、実環境中において ラドン子孫核種による影響が含まれないデータを取得することは困難であることから、GI にはラドン子孫核種の影響がある程度含まれていることに留意する必要がある。

本報告においては、美浜・敦賀及び伊方の RI、GI ともに外れ値が生じず、最小二乗法と 最小絶対値法とで回帰係数はほとんど同一であった。よって、解析に使用する RI 及び GI は 最小二乗法により得られたものに統一した。実際に解析に用いた RI 及び GI を Table 4-5 に 示す。本表には参考情報として、令和4年度 (2023年度) に行った福島原子力発電所から 80 km 圏外における航空機モニタリング (東日本第 13 次モニタリング) で使用した各へリコプ ター機体に設定した RI 及び GI も併記した。GI は概ね同様な値であるのに対し、同様のへ リコプター機種を用いたとしても、RI はやや異なる傾向にあった。



Fig. 4-25 海上及び陸上における NaI(TI)検出器の計数率と LaBr3 検出器の計数率の関係

	GI	29.3	29.9	28.0	30.1	
	RI	18.3	21.2	19.1	15.6	
	ヘリコプター機種(機体番号)	Bell430 (JA02AX)	Bell412 (JA9616)	Bell430 (JA05TV)	Bell412 (JA6928)	Bell412 (JA412N)
	終了日	2022/07/31	2022/11/21	2022/10/21	2022/10/03	2022/10/19
	開始日	2022/07/26	2022/11/11	2022/09/30	2022/09/13	2022/10/03
	モニタリング名	美浜 敦賀	伊方		東日本13次モニタリング	

Table 4-5 解析に用いた RI 及び GI の一覧

4.6.2. ラドン弁別手法の適用結果及び標準的解析手法との比較

(1) ラドン弁別手法による空間線量率マップ

3.8.2 項に示したラドン弁別手法を美浜・敦賀及び伊方における航空機モニタリングデー タに適用し、空間線量率マップ及び空気中ラドン子孫核種の計数率マップを作成した。

美浜・敦賀について Fig. 4-26 及び Fig. 4-27 にそれぞれのマップを示す。空間線量率マッ プについては比較のため、Fig. 4-9 に示した標準的解析手法によるマップも掲載した。ラド ン弁別手法を適用すると、標準的解析手法の場合よりも空間線量率が比較的高い領域の面積 が明らかに減少した。また、ラドン弁別手法において、空間線量率は GI を基準値から減じ るほど大きくなる傾向にあった。これは式 [6] において、GIを1及び2減じる程度の範囲に おいては、C_{Nal,g}が大きくなる傾向にあるためである。空気中ラドン子孫核種の計数率マッ プはラドン弁別手法の過程で計算した、NaI(Tl)検出器における空気中ラドン子孫核種由来 の計数率をマッピングしたものである。この計数率は NaI(TI)検出器における全計数率から、 式[6]により算出したCNalgを減算し、求めたものである。測定日時が場所により異なるた め、空気中ラドン子孫核種由来の計数率は離散的である。また、空気ラドン子孫核種の起源 としては中国大陸からの大気輸送と測定地近傍における地殻からの放出が考えられ、前者の 影響は特に日本海側の冬季に大きくなる傾向にある 47)-49)。本手法で検出されたラドン子孫 核種がどちら由来なのか弁別することは困難であり、本結果はその地域におけるラドン子孫 核種の分布傾向を決定付けるものではないことに留意する必要がある。Fig. 4-27 について、 美浜・敦賀エリアの大部分で空気中ラドン子孫核種由来の計数率は 100 s⁻¹を下回る程に小 さかったが、中央部から北東部にかけて 100 s⁻¹ 以上の領域が広がり、この領域と空間線量 率が比較的大きく算出された領域とが概ね一致した。このことから、美浜・敦賀の航空機モ ニタリングにおいて空間線量率が比較的高く算出された領域においては、全計数率の内、空 気中ラドン子孫核種由来のγ線計数率が占める割合が比較的大きく、従ってラドン弁別手法 を適用すると、標準的解析手法の場合よりも空間線量率の比較的高い領域の面積が減少した と推察される。

伊方について、空間線量率マップ及び空気中ラドン子孫核種の計数率マップを Fig. 4-28 及び Fig. 4-29 に示す。空間線量率マップについては、標準的解析手法とラドン弁別手法の 両者で空間線量率の分布傾向は概ね同様であり、伊方エリアの北東部及び南東部おいて 0.16 μSv/h を上回る領域が一部消失した。空気中ラドン子孫核種の計数率マップについては、伊 方エリアの西部及び東部で 300 s⁻¹~500 s⁻¹の計数率が比較的高い領域が広がった。この領域 と空間線量率が比較的高く算出された領域はほとんど重ならず、むしろ空間線量率が 0.06 μSv/h 未満の領域と重なった。このことから、伊方の航空機モニタリングにおいて空間線量 率が比較的高く算出された領域においては、全計数率の内、地表面の放射性核種から放出さ れる γ線計数率が占める割合が支配的であり、空気中ラドン子孫核種の影響は比較的小さか ったため、標準的解析手法とラドン弁別手法とで空間線量率マップにさほど差異が生じなか ったと思われる。 (2) GIの設定値及びラドン弁別手法による空間線量率の妥当性の検証

今までの経験から GI を実測データに基づく数値よりもある程度小さく設定した方が、航空機モニタリングによる空間線量率の換算値が地上測定値とよく整合するという知見が得られている。これに再現性があるかを検証するために、前節で示した GI を基準値とし、基準値から 1 及び 2 を減じた場合についても解析を実施した。すなわち、美浜・敦賀の場合は 29.3、伊方の場合は 29.9 をそれぞれ GI の基準値とし、GI を 28.3 及び 27.3、28.9 及び 27.9 とした場合についても解析し、それぞれの場合で空間線量率マップ及び空気中ラドン子孫核種の計数率マップを作成した。また、ラドン弁別手法を適用して作成した空間線量率マップと地上測定値 20 点とを比較し、ラドン弁別手法による空間線量率の妥当性について検証した。この時、Fig. 4-6 (美浜・敦賀) 及び Fig. 4-7 (伊方) に示した標準的解析手法 (ラドン弁別手法を適用しない場合の航空機モニタリングによる空間線量率解析手法) による比較結果も併記し、ラドン弁別手法が空間線量率の計算結果の妥当性向上をもたらすかを検証した。

標準的解析手法と上記した各 GI の数値を用いてラドン弁別手法を適用した場合の間線量 率の計算値と地上測定値との比較結果を Fig. 4-30 (美浜・敦賀) 及び Fig. 4-31 (伊方) に示す。 美浜・敦賀については、Fig. 4-26 の空間線量率マップでも見られた通り、ラドン弁別手法を 適用したとき、標準的解析手法よりも空間線量率が低く算出された。散布図において、ファ クター2の範囲に収まっているプロットの数に着目すると、標準的解析手法で85%(全20点 中 17 点) であったのに対し、ラドン弁別手法では GI = 29.3 及び GI = 28.3 で 60 % (全 20 点 中 12 点)、GI = 27.3 で 65 % (全 20 点中 13 点) であり、ラドン弁別手法では収まりが悪化し た。また、ラドン弁別手法を適用した結果同士で比較すると、今までの知見通り、GI を基 準値よりも小さく設定した方が、地上測定値との整合が僅かではあるものの良くなる傾向に あった。相対誤差については、標準的解析手法では平均値が-0.25、中央値が-0.30、1標本 標準偏差が 0.27 であったのに対し、ラドン弁別手法では GI をいずれの値に設定しても、平 均値、中央値ともに-0.4以下、1標本標準偏差は0.15程度であった。ラドン弁別手法では相 対誤差のばらつきを小さく抑えることができてはいるものの、標準的解析手法の場合よりも さらに空間線量率を過小に評価したことが示された。また、式 [8] に基づいて RMSE を計算 したところ、標準的解析手法で 0.027 μSv/h であったのに対し、ラドン弁別手法では GI= 29.3 のとき 0.035 μ Sv/h、GI = 28.3 のとき 0.034 μ Sv/h、GI = 27.3 のとき 0.033 μ Sv/h であ り、地上測定値との乖離がやや大きくなった。伊方についても同様に比較すると、散布図に おいて、ファクター2の範囲に収まっているプロットの数は、標準的解析手法で 75% (全20 点中15点)であったのに対し、ラドン弁別手法ではGI=29.9のとき75%(全20点中15点)、 GI = 28.9 及び GI = 27.9 で 80 % (全 20 点中 16 点) であり、互いにほとんど同等であった。 相対誤差については、標準的解析手法では平均値は-0.23、中央値は-0.19、1標本標準偏差 は 0.37 であったのに対し、ラドン弁別手法では平均値は-0.3~-0.2 程度、中央値は-0.2~-0.1 程度、1 標本標準偏差は 0.3 前後であり、両者は概ね同等であった。RMSE については、 標準的解析手法で 0.032 μSv/h であったのに対し、ラドン弁別手法では GI = 29.9 のとき 0.030 µSv/h、GI = 28.9 のとき 0.029 µSv/h、GI = 27.9 のとき 0.028 µSv/h であり、標準的解 析手法と比べて地上測定値との整合が僅かながら改善される傾向にあったものの、有意な差

とは言い難い。

(3) y線計数率の除去効果の有効性

空間線量率マップを作成するにあたって評価対象外となるγ線計数率の除去効果の有効性 を検証するため、標準的解析手法において空気中核種フライトで求めた計数率と、GI に基 準値を設定しラドン弁別手法を適用して求めたラドン子孫核種由来の計数率を比較した (Fig. 4-32)。3.2 節「空気中核種フライト」の項目に記載した通り、空気中核種フライトは美浜・ 敦賀については琵琶湖上または若狭湾上、伊方については安芸灘周辺の海上で実施した。ま た、本図には比較のため、2022年(令和4年)9月13日~10月21日にかけて実施した、福 島原子力発電所から半径 80 km 圏外における航空機モニタリング (以下、東日本第13次モニ タリング) のデータについて同様に比較した結果も示した。東日本第 13 次モニタリングで は、空気中核種フライトは海域だけでなく、陸域で行っている場合もあり、Bell412 (JA6928) については鹿島灘、群馬県伊勢崎市の周辺、Bell412 (JA412N) については福島県 須賀川市の周辺、栃木県芳賀郡芳賀町、Bell430 (JA05TV) については福島県須賀川市の周 辺、宮城県登米市の周辺、栃木県さくら市の周辺、栃木県芳賀郡益子町の周辺において実施 された。Fig. 4-32 を見ると、美浜・敦賀及び伊方について、空気中核種フライトで取得した 計数率よりもラドン弁別手法で求めた計数率の方が 1.7 倍及び 1.3 倍程度高くなった。この ことから、ラドン弁別手法では全計数率から除去した計数率がやや過剰であり、従って標準 的解析手法よりも空間線量率が低く算出されたことが解される。一方、東日本第 13 次モニ タリングにおいては、いずれのヘリコプター機体についても、標準的解析手法で用いた空気 中核種由来の計数率よりもラドン弁別手法で求めた計数率の方が低くなる傾向にあった。例 えば、Bell412 (JA6928 及び JA412N) では約 0.7 倍、Bell430 (JA02AX) では約 0.9 倍程度で あった。このように、美浜・敦賀及び伊方と東日本第 13 次モニタリングとで、ラドン弁別 手法で求めた空気中ラドン子孫核種由来のγ線計数率と標準的解析手法で用いた計数率にお ける多寡の関係はほとんど真逆であった。今までの経験から、ラドン弁別手法では、RI及 び GI の算出に用いるデータに外れ値が含まれる等によりこれら数値パラメータに悪影響が 及ばない限り、標準的解析手法と同等以上に妥当性のよい空間線量率マップが作成可能であ ることが分かっている。本報告において、RI及び GIを最小二乗法と最小絶対値法により算 出したところ、両者でほとんど差異は生じず、外れ値による悪影響はないものと思われた。 しかしながら、美浜・敦賀のケースではラドン弁別手法が従来通りに機能せず、その理由は 判然としない点があり、本原因を検証する必要がある。

標準的解析手法では、地表面に分布する放射性核種由来のγ線計数率を算出するために、 測定日ごとに空気中核種フライトを実施し取得した計数率を、その日の測定エリア全体にお ける全計数率から減算する。空気中核種フライトで取得される計数率には空気中ラドン子孫 核種由来の計数率も含まれており、ある程度正確に空気中ラドン子孫核種の影響を差し引く ことが可能であると思われる。しかしながら、空気中核種フライトを実施する場所と測線フ ライトを実施する場所が離れてしまった場合、測定エリア近傍における地殻から放出される 空気中ラドン子孫核種由来の計数率を適切に除去できない可能性が高い。一方、ラドン弁別 手法では、各測定点における全計数率から、空気中ラドン子孫核種(遠方からの輸送及び近 傍の地殻から放出されたものを含む)に起因する計数率を切り出して除去できる点に強みが ある。ラドン弁別手法の信頼性を向上させることができれば、空気中核種フライトが不要と なり、航空機モニタリングの測定期間やデータの解析に掛かる時間の短縮等の効率化に寄与 することとなる。よって、ラドン弁別手法の更なる改良と信頼性の向上に係る検討を重ねる ことは意義深いことであり、RI 及び GI の算出方法について、今後も知見を蓄積し更なる改 良に向けた検討を行っていく必要があると考えられる。例えば、最小絶対値法や最小二乗法 では縦軸データまたは横軸データ (本報告ではそれぞれ、NaI(TI)検出器の計数率または LaBr3 検出器の計数率)のどちらか一方にのみ誤差が含まれるという仮定の下に回帰係数を 求めるため、RI 及び GI を求めるには適切な回帰アルゴリズムであるとは言い難い。そこで、 縦軸データ及び横軸データの両方に誤差が含まれることを考慮した回帰アルゴリズムである 最小距離二乗法を取り入れ、これとロバスト回帰とを組み合わせることで、外れ値が生じた 場合においても適切に RI 及び GI を安定的に算出できる方法の導入を検討したい。



Fig. 4-26 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ (美浜・敦賀) (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)



 Fig. 4-27 空気中のラドン子孫核種起源の計数率マップ (美浜・敦賀)

 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)



Fig. 4-28 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ (伊方) (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)



Fig. 4-29 空気中のラドン子孫核種起源の計数率マップ (伊方) (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)



Fig. 4-30 標準的解析手法及びラドン弁別手法による空間線量率の計算結果と地上測定値との比較 (美浜・敦賀)

(1/2)



Fig. 4-30 標準的解析手法及びラドン弁別手法による空間線量率の計算結果と地上測定値との比較 (美浜・敦賀)

(2/2)



Fig. 4-31 標準的解析手法及びラドン弁別手法による空間線量率の計算結果と地上測定値との比較 (伊方)

(1/2)



Fig. 4-31 標準的解析手法及びラドン弁別手法による空間線量率の計算結果と地上測定値との比較 (伊方)

(2/2)



Fig. 4-32 空気中核種フライトで取得した計数率とラドン弁別手法で求めた空気中ラドン子 孫核種由来の計数率の比較

4.7. 放射性セシウムの沈着量

令和4年度(2022年度)の美浜・敦賀及び伊方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を評価した。放射性セシウムの沈着量マップをFig. 4-33 及びFig. 4-34に示す。このように、全範囲において検出限界値未満となり、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及びマップの 色合いの設定については、福島原子力発電所周辺における航空機モニタリング¹⁸⁾と同様とした。



Fig. 4-33 放射性セシウム沈着量マップ (美浜・敦賀) (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)



Fig. 4-34 放射性セシウム沈着量マップ (伊方) (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

5. 原子力防災訓練における緊急時航空機モニタリング

5.1. 原子力総合防災訓練等に係る航空機モニタリングの経緯

原子力機構は原子力災害時等の緊急時に人的及び技術的支援を行うことが要求されている。 第1章で触れた通り、緊急時モニタリングの一環として、航空機モニタリングを実施するこ とが原子力災害対策マニュアルに定められている。緊急時における航空機モニタリングの実 効性向上に資するため、内閣府が主体となって実施する原子力総合防災訓練等において原子 力規制庁及び防衛省(自衛隊)と連携して航空機モニタリングに協力してきた (Table 5-1)。 なお、令和3年度(2021年度)の北海道原子力防災訓練については防衛省(陸上自衛隊)から 航空機モニタリングシステムの使用許可が得られなかったため、モニタリングは実施せず、 事前に策定したフライトプランに沿ってフライトするのみに留まった。

本章では、令和4年度(2022年度)の原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリ ングの概要及び本訓練で得られた実働上の課題について述べる。本訓練の対象サイトは美浜 発電所であり、航空自衛隊小牧基地を離発着点として、岐阜県の揖斐郡揖斐川町、滋賀県の 米原市、長浜市及び高島市の周辺において緊急時航空機モニタリングを実施した。 Table 5-1 原子力総合防災訓練等における航空機モニタリング実施状況

訓練名 (実施年日)	対象サイト (モニタリング地域)	使用機体 (所有部隊)	機体の 離発着地点
航空機モニタリング訓練 (2016年11月7日)	なし (千葉県富津市)	CH−47 (陸上自衛隊木更津駐屯地)	千葉県 木更津駐屯地
平成29年度 原子力総合防災訓練 (2017年9月4日)	玄海 (長崎県壱岐市)	UH−60 (航空自衛隊芦屋基地)	福岡県 芦屋基地
平成30年度 原子力総合防災訓練 (2018年8月26日)	大飯·高浜 (滋賀県高島市)	UH−60 (航空自衛隊小松基地)	石川県 小松基地
平成30年度 北海道原子力防災訓練 (2018年10月22日)	泊 (北海道小樽市から余市郡 赤井川村)	UH−1J (陸上自衛隊丘珠駐屯地)	北海道 丘珠駐屯地
令和元年度 原子力総合防災訓練 (2019年11月8日~10日)	島根 (鳥取県米子市、西伯郡南 部町、島根県安来市)	UH−60 (航空自衛隊芦屋基地)	島根県 美保基地
令和2年度 原子力総合防災訓練 (2021年2月7日)	女川 (宮城県登米市から宮城郡 松島町)	新型コロナウイルス感染症に関する緊急事態宣言の発令 に伴い、中止となった。	
令和3年度 北海道原子力防災訓練 (2021年10月27日~28日)	泊 (北海道小樽市から余市郡 赤井川村) ※フライトのみ実施	UH−1J (陸上自衛隊丘珠駐屯地)	北海道 丘珠駐屯地
令和3年度 原子力総合防災訓練 (2022年2月11日~12日)	女川 (宮城県登米市から宮城郡 松島町)	訓練対応者に新型コロナウイルス感染症の罹患者が認め られたため、中止となった。	
令和4年度 原子力総合防災訓練 (2022年11月4日~6日)	美浜 (岐阜県揖斐郡揖斐川町、滋 賀県米原市、長浜市、高島 市)	UH−60 (航空自衛隊小牧基地)	愛知県 小牧基地
令和5年度 原子力総合防災訓練 (2023年10月27日~29日)	柏崎刈羽 (新潟県柏崎市、上越市、十 日町市)	UH−60 (航空自衛隊新潟分屯基地)	新潟県 新潟分屯基地

5.2. 令和4年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングの全体概要

令和4年度原子力総合防災訓練における原子力発電所事故の想定⁵⁰⁾を以下に示す。

『福井県嶺南を震源とした地震が発生する。これにより、運転中の美浜発電所3号機は緊 急停止する。さらには、原子炉冷却材の漏えいが発生するとともに、設備の故障が重なり、 蒸気発生器冷却機能、原子炉注水機能を喪失する事象が発生し、施設敷地緊急事態、全面緊 急事態に至る。』

このように事故が進展していく中で周辺環境中に放射性核種が放出されたと想定し、原子

カ規制庁緊急時対応センター (以下、ERC) 放射線班から原子力緊急時支援・研修センター (以下、NEAT) に航空機モニタリング出動要請が発出された。放射性核種は発電所から南東 方向に拡散したと想定し、航空自衛隊小牧基地を離発着点として、琵琶湖上を通過して測線 ①の東端から進入し、以降は測線②から測線⑦まで順番に飛行するプランとした (Fig. 5-1)。 この時、基準対地高度は 300 m (≒1,000 ft)、上限対地高度は 530 m (≒1,750 ft)、下限対地 高度は 0 m と設定した。

航空機モニタリングシステムは緊急時モニタリング用ラック¹¹)に取付け、令和4年11月 2日にNEATから小牧基地へ輸送した。11月4日に小牧基地で航空機モニタリングシステム を積み下ろし、本訓練における使用ヘリコプターであるUH-60 (Fig. 5-2) に搭載し、ケーブ ル接続等を行った。搭載完了後の航空機モニタリングシステムの外観をFig. 5-3 に示す。ま た同日、航空機モニタリングシステムから発せられる電磁ノイズがUH-60 に備えられてい る計器類に悪影響を及ぼすか否かを確認するため、簡易的な電磁干渉試験を2機のUH-60 に 対して実施し、いずれに対しても問題がないことを確認した。

緊急時航空機モニタリングによって取得したデータを基に作成する空間線量率マップの妥 当性の確認に資するため、Fig. 5-1 に黄色丸点で示した 4 地点 (G1~G4) において、3.2 節に 記した方法に則り、11 月 5 日に地上測定を実施した。ただし、NaI(T1)検出器には旧日立ア ロカメディカル製 TCS-171B を用いた。本地上測定を実施した具体的な位置情報及び空間線 量率を Table 5-2 に示す。これらの空間線量率と本訓練で作成する緊急時航空機モニタリン グによる空間線量率分布マップとを比較することとした。

上記フライトプランに基づき、11月6日に緊急時航空機モニタリングを実施した。Table 5-3 に当日のタイムテーブルを示す。航空機モニタリング要員として NEAT から参加した 3 名が現地対応し、内2名が機体に搭乗して 2.5 時間程度モニタリングを行った (Fig. 5-4)。小牧基地のパイロットと NEAT 航空機モニタリング要員とで密にコミュニケーションを取り、 RSI システム及び高精度 GPS システムに備えられているナビゲーション機能も適宜利用して、パイロットへのフライト指示を確実に行った。残りの1名は地上に待機し、緊急時航空機モニタリングデータ専用の解析ソフトウェア「AMS Total System」を用いた。UH-60に対する換算パラメータは過去に取得したものの内、最も信頼性が高いと思われるパラメータセットを選定し適用した。具体的には、*CR-Index*及び *AF* については平成 30 年度原子力総合防災訓練で取得した数値を用いた (Table 5-4)。解析結果を基に作成した空間線量率分布マップをFig. 5-5 に示す。住民等に対する防護措置の実施判断に活用しやすくするため、本マップの色分けは以下の基準に沿って設定した。

- ・赤色:500 µSv/h 超過 (緊急防護措置としての OIL1 を超過)
- 黄色: 20 µSv/h~500 µSv/h (早期防護措置としての OIL2 を超過)
- 緑色: 0.5 µSv/h~20 µSv/h (飲食物に係るスクリーニング基準を超過)
- ・ 青色: 0.5 µSv/h 未満 (防護措置を実施する判断基準未満)

データ解析を開始してから空間線量率分布マップを完成させNEAT本部に報告を完了するま

で、15分程度であった。その後、本マップを NEAT 本部から ERC 放射線班へメールで送付 し、緊急時航空機モニタリングの結果を報告した。空間線量率分布マップと Table 5-2 に示 した地上測定値との比較結果については次節に記す。

緊急時航空機モニタリング中に取得した GPS 測位データに基づいた対地高度の推移を Fig. 5-6 に示す。測線上では基準対地高度である 1,000 ft 付近を概ね維持しながらフライトでき たが、測線②の東端付近で 1,750 ft を超えた状態で 1 km 以上フライトする場面も見られる。 当該箇所は山岳地帯 (伊吹山) であり、地形の起伏の変化が激しい場所であったため、対地 高度を一定に保持することが困難であったことが窺われる。なお、測定中に高精度 GPS シ ステムにより対地高度基準超過状態を検知した NEAT 航空機モニタリング要員からパイロッ トに当該箇所を再測定するよう指示した。
Table 5-2 地上測定地点の位置情報及び空間線量率の値

測定地点	緯度	経度	住所	備考	空間線量率 (µSv/h)
G1	35.512521	136.214867	滋賀県長浜市木之本町黒田	空地	0.05
G2	35.471356	136.290773	滋賀県長浜市谷口町921	公園	0.09
G3	35.427991	135.996800	滋賀県高島市今津町日置前4201	ゴンドラ山麓駅空地	0.06
G4	35.423400	136.266630	滋賀県長浜市宮部町	虎姫運動広場横の空地	0.07

Table 5-3 令和 4 年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングに係るタイム

テーブル (2022年11月6日)

時刻	実施内容
6:50	小牧基地に入域
7:00	飛行決心
7:10	防衛省及び原子力機構:RSIシステムチェック等の航空機モニタリング準備
8:00	小牧基地を離陸
8:23~10:10	測線①~測線⑦をフライト
10:30	小牧基地に着陸、航空機モニタリングシステムの取り外し
10:45~11:00	航空機モニタリングデータの解析、空間線量率分布マップの作成及び結果報告
11:30	小牧基地から航空機モニタリング機材の搬出作業
11:45	小牧基地から退域

Table 5-4 UH-60 に対する換算パラメータの一覧

CR-Index	AF	CD
(-)	(m^{-1})	(s ⁻¹ /[µSv/h])
2.45	-0.00394	10,300

※CR-Index及びAFについては、平成30年度原子力総合防災訓練で取得したものである。

※CDについては、平成23年(2011年)に福島原子力発電所周辺における航空機モニタリングで取得した数値である。





Fig. 5-2 令和4年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングに使用したヘリ コプター (UH-60)



Fig. 5-3 航空機モニタリングシステムの搭載状況



Fig. 5-4 令和4年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングのヘリコプター 内での測定状況 (訓練)







5.3. 訓練から得られた緊急時航空機モニタリングの課題

令和4年度原子力総合防災訓練で実施した緊急時航空機モニタリングの各作業において抽出 した課題を以下にまとめる。

航空機モニタリングシステムの輸送について

本訓練では民間の輸送業者に委託して航空機モニタリングシステム等測定機材をヘリコプ ターの離発着地点まで輸送した。しかしながら、原子力災害時等においては、民間の輸送業者 や自衛隊等の他機関から輸送に係る協力を得られない可能性もあるため、原子力機構が当該輸 送を担う方法についても検討する必要がある。

・航空機モニタリングシステムの UH-60 への搭載について

航空機モニタリングシステムのヘリコプターへの搭載作業にあたっては、小牧基地の隊員 からの協力を得て、概ね 30 分程度で設置及び動作確認を完了した。より迅速に本作業を完了 するために、以下の点について検討を加える必要がある。

UH-60機内床にスタッドボルトを設置できるポイントが多数あるため、ラックにフィットするスタッドボルトの位置が一見で確定できず、ラックの設置作業がやや難航した。また、UH-60 機内の限られたスペースで、工具を用いてスタッドボルト締めを迅速に行うのにやや難があった。よって、UH-60 にラックを取り付ける際のスタッドボルトの設置場所を予め特定しておき、ラックの設置手順書として取りまとめておくことで、現地で試行錯誤することなく、設置作業を完了できるよう備えておく必要があるという知見が得られた。また、ボルト締め作業を非常に狭いスペースで行うことを想定した事前練習を積み重ねることが重要と考える。また、航空機モニタリング要員はインチ工具の取り扱いの習熟に努めることが必要である。さらに、リアルタイムデータ通信システム¹³を搭載及び使用する場合、作業時間が増加する可能性が高いため、適宜、各種機材の設置要領を再確認すべきと考える。

• 電磁干渉試験について

本訓練では航空機モニタリングシステムの内、RSIシステム及び高精度 GPS システムのみを 使用することとしため、簡易的な電磁干渉試験のみを実施した。一方、リアルタイムデータ通 信システムを使用する場合には、より精密な電磁干渉試験が必須であり、具体的にどのような 試験を、どれくらいの時間をかけて行うのかについての情報を収集しておく必要がある。 ・データ解析、空間線量率マッピング及び地上測定値との比較について

AMS Total System により、測定データの解析に着手してから空間線量率分布マップの作成及 び NEAT 本部への報告完了まで概ね 15 分程度で完了した。しかしながら、UH-60 に適用すべ き換算パラメータの選択を誤ってしまい、本来算出されるべき空間線量率よりも2.5 倍~3.0 倍 程度過大に評価された空間線量率分布マップを作成し、報告してしまう事象が起きた。本事象 の再発を防ぐために、空間線量率分布マップを作成する前に、適用される換算パラメータを視 認できるような機構を AMS Total System に設ける等の改善が必要である。

次に、本訓練で作成した空間線量率分布マップと Table 5-2 に示した地上測定による空間線 量率とを比較した結果を Table 5-5 に示す。4.3 節に述べた通り、空間線量率がバックグランド レベルの地域においては、航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定による空間線量率 とは概ね 0.03 µSv/h 前後の差が生じるが、本訓練においては、緊急時航空機モニタリングによ る空間線量率の方が 0.02 µSv/h~0.06 µSv/h 小さく算出された。前述した通り、UH-60 に適用 した数値パラメータは平成 30 年度原子力総合防災訓練及び 2011 年に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で取得したものであり、限られたパラメータセットの中から選 定せざるを得ないのが現状である。UH-60 による緊急時航空機モニタリングによって、より正 確な空間線量率分布マップを作成するためには、換算パラメータを改めて取得し、その設定に ついて再検討する必要があると考える。

Table 5-5 緊急時航空機モニタリングによる空間線量率分布マップと地上測定による空間線量 率の比較

測定地点	緊急時航空機モニタリングによる 空間線量率分布マップ (μSv/h)	地上測定による 空間線量率(µSv/h)	空間線量率比 (航空機モニタリング/地上測定)	空間線量率の差分 (航空機モニタリング-地上測定)
G1	0.03	0.05	0.60	-0.02
G2	0.03	0.09	0.33	-0.06
G3	0.04	0.06	0.67	-0.02
G4	0.03	0.07	0.43	-0.04

6. 無人航空機による放射線モニタリングを想定した要素技術試験

6.1. 原子力災害時における無人航空機運用の課題

福島原子力発電所事故後、「原子力災害対策マニュアル²⁰」が改定され、原子力災害時に おける事故後の対応について大幅な改定が行われた。事故後初期段階における緊急時モニタリ ングは、オフサイトセンター内に設置される緊急時モニタリングセンターが実施することとな っており、対応のための資材準備等が行われている。OILの区域設定やスクリーニングの重要 性分類のための放射線モニタリング(緊急時モニタリング)は、迅速かつタイムリーに行われ る必要がある。福島原子力発電所事故後の対応において、発電所周辺の放射線分布測定のため 無人へリコプター等の無人航空機が活用されている^{24),25)}。また、無人航空機を用いた放射性 プルームの計測技術について要素技術開発が行われてきた⁵²⁾⁻⁵⁴⁾。無人航空機によるモニタリ ングは車両や人手によるモニタリングと比較して、モニタリング要員の被ばく低減が可能なほ か、陸路を用いないため住民の避難との干渉を防ぐことができ、モニタリングポストのような 点での測定と比較して面的な放射線分布の評価が可能である等の特長がある。しかしながら、 現状として、無人航空機によるモニタリング技術は原子力災害時における緊急時モニタリング にすぐ運用できる状況にはなく、上記の「原子力災害対策マニュアル」の枠組みを考慮し、活 用シーンに合わせた要素技術開発が必要である。

原子力施設敷地外に放射性物質が放出された場合、数時間以内に UPZ (Urgent Protective action planning Zone, 原子力施設から概ね 5 km~30 km 圏内)の OIL1 区域の住民は避難もしく は屋内退避が必要になる。OIL1 区域の特定のためモニタリング要員が安全に無人機を運用す るためには、少なくとも UPZ 外からの遠隔操縦が必要になる (Fig. 6-1)。また、Fig. 6-2 に原子 力発電所事故の例と福島原子力発電所周辺で運用されている無人航空機システム (ヤマハ発動 機製の無人へリコプター)による運用想定及び理想的な無人航空機システムによる運用想定を 示す。このように、既存の無人航空機システムは、現状データをリアルタイムに地上にリンク するシステムが現状としてないこと、上空からの測定では地上における空間線量率への換算に 距離補正の処理が必要であることから、測定結果の共有まで時間がかかることが課題として挙 げられる。また、フライトの時間が短いこと、長距離通信による運用が難しいことも課題とな る。

令和元年度 (2019 年度) には、原子力災害時における緊急時モニタリングでの運用を想定し、 商用化された飛行機型の無人航空機の中で最も稼働時間の長い UAV-Factory (ラトビア) 製の Penguin C について、フライト試験を通した基礎性能試験を実施した。令和 2~3 年度は、福島 ロボットテストフィールドでのフライト試験を通して、Penguin C の運用のための手順確認や 放射線検出器の搭載方法を検討した。令和 4 年度 (2022 年度) は、引き続き、福島ロボットテ ストフィールドでのフライト試験を通して Penguin C の運用のための慣熟訓練を実施するとと もに、原子力災害時における緊急時モニタリングに運用する際に必要となる機能等について検 討した。



Fig. 6-1 既存の無人機によるシステムと原子力災害時に備えるべき無人航空機システムのイメ ージ

	1日目		2 E	目			3 E	目		
H41 H1	12-18	18-24	0-6	6-12	12-18	18-24	0-6	6-12	12-18	18-24
原子力施設事故 対応例	▽14:00 地震 ▽ 16:00 旅 PAZ避	発生 診敷地緊急 難準備・実	事態施		★敷地夕 ▽16: U	▶への放射性 00 全面緊急 PZ屋内退選	物質放出の 事態 準備・実施	確認		
既存の無人航空 機システムによ る運用想定	→ 移動 → →	か・飛行準備 敷地境界の ━━> データ ≪リアルタイ	1h (雨 フライト 1h 解析 2h ムのデータ:	夜間飛行不 天時飛行不 解析不可能	可能 ※	·屋内からの (目視内 (UPZ外から (操縦範囲2	操縦不可能 飛行) の操縦不可 km~ 3 km)	ite		
理想的な無人航 空機システムに よる運用想定	→ 81	動・飛行準備 敷地境界の	1h フライト 20	h		rOIL1, 2区均	^{成の特定} UPZ内のフ	ライト 20 h		
	I			リアルタ	イムのデー	タ解析+共有	Ī			

※PAZ (Precautionary Action Zone, 原子力施設から概ね5km圏内)

※UPZ (Urgent Protective action planning Zone, 原子力施設から概ね5km~30 km圏内)

Fig. 6-2 原子力発電所事故を例にした対応シミュレーション

6.2. 無人航空機の開発状況

近年、無人航空機の技術革新は目覚ましく、国内外で様々な製品が開発されている。無人 航空機の種類は、固定翼機 (飛行機タイプ) と回転翼機 (ヘリコプタータイプ) に分けられる。 両タイプの一般的な利点・欠点は以下の通りである。

・固定翼機

(利点) 燃費が良く航続時間が長い。

(欠点)離着陸のための滑走路が必要 (カタパルト方式で離陸できる機体もある)。日本に は滑走路に適した道路等が少なく、また滑走路を使用した着陸には機体操縦者の高度な 技術が必要となる。

·回転翼機

(利点)ホバリングできるため、固定点での長時間測定等が可能。

(欠点)固定翼機に比べると燃費が悪い。

原子力災害時の緊急時モニタリングに使用する無人航空機に求められる性能として以下の 項目が挙げられる。

- (1) 長時間 (20時間以上) のフライトが可能であること。
- (2) 放射線検出器を搭載するため5kg程度のペイロードが確保されること。
- (3) 離陸のための滑走路を要しないこと。
- (4) あらかじめ設定したプログラムにより自律飛行が可能であること。
- (5) 同無人航空機によるフライトの実績が 100 時間を超え、墜落事故に対する平均故障間 隔 (MTBF) が評価されていること。
- (6) 風速 10 m/s 以下でのフライトが可能であること。
- (7) 雨天時のフライトが可能であること。

これらの性能に近い国内外の代表的な無人航空機の例を Table 6-1 に示す。固定翼機として は国内で原子力機構と JAXA が共同開発している UARMS があり、航続時間 6 時間で中継器を 用いた 20 km 以遠からのオートパイロットの操縦実績があり、原子力防災への適用機種として 有力候補である。本機体は実用機の試験段階で製品化はされていないが、日本のメーカーが開 発初期から携わっていることから細かい部分のカスタマイズが可能なところに強みがある。回 転翼機ではヤマハ発動機社の Fazer R G2 が挙げられる。航続距離は、固定翼機に及ばないもの の、1時間 30 分のフライトが可能であり、既存のバッテリー駆動のドローンと比べると様々な ミッションに適用可能である。また、全国の農薬散布業務に国内で 1,000 台以上が運用されて いること、操縦免許の取得しやすさやメンテナンスのための工場が全国に配備されていること など、実運用面で優位な点が多い。本機はヤマハ発動機社が独自に 10 年以上前から開発を重 ねてきたものであり、製品としての完成度が高く福島原子力発電所事故後の環境放射線モニタ リングの運用において 100 時間以上のフライトを行っているが、人的ミス以外の事故がなく信 頼性が高いことも魅力である。

原子力防災時における緊急時モニタリングに求められる性能を最も満たす機種は、UAV Factoryの Penguin C である。Penguin C は、20時間にわたり航続可能でありオプションとして

衛星通信を使えることや固定翼機でありながらカタパルト方式の離陸が可能である。また、中 東を中心とした国外への納入実績が数多くある。

令和4年度 (2022年度) は、国内外の無人航空機で最も原子力災害時における緊急時モニタ リングに適用可能な性能を有すると考えられる Penguin C について、実際に飛行試験などを通 じて性能評価を試みるとともに、国内での運用に当たっての課題を抽出した。

Table 6-1 代表的な無人航空機の概観とスペック

名	名称	Pen guin C	UARMS	Fazer R G2
開発 <i>></i> (< ーカー 国)	UAV Factory Ltd. (ラトビア)	JAEA-JAXA開発中 (日本)	ヤマハ発動機社 (日本)
大	きさ	3.3 m (翼長)	4m(翼長)	4m(ローター長)
离推 陸 (陸重量 kg)	22.5	50	81
烧	太料	ガソリン	混合油	ガソリン
航線 (r	売時間 nin)	<u>1,320</u>	360	100
巡舟 (r	亢速度 n/s)	22	25	20(最大速度)
离隹陸	睦方法	カタパルト+ パラシュート	滑走のみ	_
最大离 (k	推隔距離 sm)	∞ (衛星通信対応)	5 km (中継器を用いると20 km)	∞ (衛星通信対応)
最大 ^注 (ペイロ	積載量 Iード:kg)	5	10	<u>35</u>

6.3. Penguin C のカタログ性能

選定した Penguin C の概観及びカタログ性能について、それぞれ Fig. 6-3 及び Table 6-2 に示 す。翼長は 3.3 m、機長は 2.3 m の大きさで、専用ケースに収納可能である。燃料として、ガ ソリンとオイル (UAV Factory 製 2-STROOKE ENGINE OIL) の混合燃料が用いられる。カタロ グスペックから、原子力災害時における緊急時モニタリングに適用するにあたって必要となる 以下の性能があることを確認した。

- (1) 長時間 (20時間以上)のフライトが可能であること。 Penguin C は特製の燃料噴射式エンジンを備えており、20時間以上の連続フライトが可能とされている。UAV Factory によると、同モデルのこれまでの最長飛行時間は 21時間である。ただし同実績は、ペイロード等のバッテリーを余分に消費する機器を搭載 せず燃料を満杯にし、最適な気象条件の下で得られたものである。
- (2) 放射線検出器を搭載するため5kg程度のペイロードが確保されること。 Penguin C本体には最大5kgまでのペイロードを搭載できる。なお、離陸条件及び気象 条件(離陸高度、風速、機体重量等)によってカタパルトによる発射圧力及び離陸重量 が変わるため、5kgまでペイロードを搭載できない場合がある。
- (3) 離陸のための滑走路を要しないこと。 Penguin C は滑走路を必要とせず、持ち運び可能な空気式カタパルトから発射及び離陸 する。着陸にはパラシュートを利用する。
- (4) あらかじめ設定したプログラムにより飛行可能であること。
 フライトコントロールシステム (Cloud Cap Technology 製オートパイロット Piccolo Command Center (PCC))で事前に作成したフライトプランにより飛行可能である。離発着を含めて手動による操縦は必要ない。
- (5) 同機種によるフライトの実績が 100 時間を超え、墜落事故に対する平均故障間隔 (MTBF)が評価されていること。 Penguin C の通常のフライト及びテストフライト実績はどちらも 1,000 時間を超え、 UAV Factory 内で MTBF が評価されている。実際の数値については社外秘となってい るが、評価の方法として事故の分類を Table 6-3 のようにし、運用の結果をデータベー ス化することで評価を行っている。
- (6) 風速 10 m/s 以下でのフライトが可能であること。 本機体がフライト可能な条件として、最大風速は 20 m/s、カタパルト発射時の向かい 風は最大 10 m/s、パラシュート展開時の地表の突風は最大 8 m/s が限界値とされてい る。
- (7) 雨天時のフライトが可能であること。
 5 mm/h 程度までならば雨天時でもオペレーションは可能とされている。

JAEA-Technology 2023-026





Fig. 6-3 Penguin C の概観 ⁵⁵⁾

機体の仕様				
翼幅	3.3 m			
最大離陸重量 (MTOW)	23 kg			
飛行時間	20 時間以上			
飛行距離	最大 100 km ※トラッキングアンテナを使用した場合			
巡航速度	19 m/s~22 m/s			
限界高度	4,500 m (≒15,000 ft) ※平均海面			
離陸方式	可搬型空気圧式カタパルト			
最大離陸高度	3,000 m (≒10,000 ft) ※海抜高度			
着陸方式	パラシュート及びエアバッグ			
動作温度	$-25^{\circ}C^{\sim}+40^{\circ}C$			
凍結防止機能	加熱式ピトー管 (+10℃以下の場合に使用)			
環境対応	雨天時オペレーション可 (降水量 5 mm/h まで)			
	 エンジン仕様			
タイプ	燃料噴射式、28 cc エンジン			
温度制御システム	フラップによる自動制御			
燃料タイプ	オクタン価 98 ガソリンとオイル混合燃料			
オイルタイプ	EDGE AUTONOMY 製 2 ストロークエンジンオイル			
燃料重量	5.0 kg			
発電システム	100 W、オンボード発電システム			
データリンク仕様				
周波数	2.4 GHz 帯または 5.7 GHz 帯			
リンクレート	最大 12 Mbps			
フライトコントロールシステム				
オートパイロット	Cloud Cap Technology 製 Piccolo Command Center			
・タイプ	及び EDGE AUTONOMY 製 CoPilot			
地上局				
タイプ	可搬型地上局、タッチスクリーン、2 画面タイプ			
	アンテナ			
タイプ	指向性・無指向性自動切換式トラッキングアンテナ			
	カタパルト			
タイプ	可搬型空気圧式			
最大発射圧力	11.5 Bar (1.15 MPa)			

Table 6-2 Penguin C 機体のカタログスペック ⁵⁵⁾

アクシデント (偶然の事故)	インシデント (人為的な事故)
機体の重大なダメージ、墜落または緊急着	MTBF の計算対象として分類されないもの
陸を引き起こす欠陥であり、MTBF の計算対	
象として分類されるもの	
・人的要因	・.パラシュートリリースの欠陥
・通信障害	・離陸後のカタパルトの損傷 (離陸に影響を
・エンジンの故障	与える可能性のない損傷や摩耗の増加な
・パラシュートシステムの故障	ど)
・フライト中のパーツの分離	• エアバッグの欠陥
・GPS 障害	・ ソフトウェアのクラッシュ
・ソフトウェアの故障	- ソフトウェアの再起動で解決する場合
・アビオニクス (通信機器、航法システム、	- 墜落の原因とならないもの
自動操縦装置の類の電子機器)の故障	・ 制御不能な要因による損傷:戦争、ストラ
・離陸に影響を及ぼすカタパルトの欠陥	イキ、暴動、犯罪、落雷、他の航空機との
・着陸エリア外での着陸	衝突など、当事者が制御できない異常な出
	来事または状況が発生した場合に両当事者
	の責任または義務を根本的に免除するも
	\mathcal{O}_{\circ}

Table 6-3 UAV Factory における平均故障間隔 (MTBF) 計算時の事故分類 ⁵⁶⁾

6.4. フライト試験及び地上における通信試験の概要及び結果

Penguin C を用いて各種フライト試験及び地上における通信試験を実施した。Penguin C は日本での運用実績が少ない。よって日本の法律及び気象環境下における試験を実施することで、 緊急時モニタリングの運用等に適用することができるかの検討を行うため、以下の項目を重点的に試験し、評価した。

- (1) 機体基本性能及び信頼性の確認及び評価
- (2) 夜間フライトに必要となる機能及び運用体制の確認評価
- (3) 無線通信試験

令和4年度(2022年度)に実施した試験の実施日及び内容をTable 6-4に、各フライトの詳細 情報をTable 6-5に示す。1時間のフライト試験を6回、1時間の夜間想定フライト試験を3回、 6時間のフライト試験を1回、合計10回実施した。なお本試験は、UAV Factory が発行する Penguin C フライトのための免許を有する、株式会社 JDRONE に試験実施を委託した。

フライト試験の工程をFig. 6-4に示す。フライト前の機体の健全性確認はPenguin C用の「機 体健全性確認の点検手順書」に従って実施した。この点検手順書はメーカーのマニュアルを基 に本事業で作成されたものであり、機材の更新履歴やフライト試験で得られた知見を反映し、 常に最新版となるようアップデートしている。健全性確認では点検手順書に従い、カタパルト、 トラッキングアンテナ、地上局及び機体の組み立てとエンジン動作確認までを行い、部品の脱 落や摩耗がないか、各機器との通信に異常は見られないかどうかを確認する。点検はフライト 実施予定の前週などフライトまでに余裕をもって行った。点検の結果、必要があれば部品の交 換を実施し、該当箇所に係る点検工程を再度実施して問題なく作動することを確認したうえで フライト試験を実施した。なお、フライト直前にもプリフライトチェックにて機体の状態確認 は実施するが、プリフライトチェックは機体の詳細な点検等を事前に完了していることを前提 とした飛行前の最終確認という位置付けである。

フライト前の事前確認の他に、機体の定期保守点検も実施した。定期保守点検については、 Penguin Cのメーカーである EDGE AUTONOMY 社が作成している各機器専用マニュアルに点 検頻度や内容が記されており、本マニュアルを基にして「定期保守点検手順書」を作成し、保 守点検を実施した。定期保守点検手順書の内容は、メーカーのマニュアル更新や、試験経験を 踏まえて追加が必要な部分があれば、随時更新を行っている。定期保守点検頻度は、メーカー 指定の通り、5回のフライト毎に1回、または対象機体を用いてフライトを行っていない場合 には月に1回とした。

Table 6-4 試験日及び試験内容一覧

試験日 (2022年)		実施場所	試験内容	フライト No.
7月19日	(火)		フライト試験1時間1回	2022-1
7月21日	(木)		フライト試験6時間1回	2022-2
7月25日	(月)		夜間想定フライト1時間1回	2022-3
8月22日	(月)		夜間想定フライト試験1時間1回 無線通信試験	2022-4
8月23日	(火)	協島ロホットアス トフィールド (福島県南相馬市)	夜間想定フライト試験1時間1回 無線通信試験	2022-5
8月24日	(水)		フライト試験1時間1回	2022-6
10月11日	(火)		フライト試験1時間1回 アンテナデータ取得試験	2022-7
12月12日	(月)		フライト試験1時間2回	2022-8 2022-9
12月13日	(火)		フライト試験1時間1回	2022-10

項目					観測	則値				
目付	2022/07/19	2022/07/21	2022/07/25	2022/08/22	2022/08/23	2022/08/24	2022/10/11	2022/12/12	2022/12/12	2022/12/13
フライト No.	2022-1	2022-2	2022-3	2022-4	2022-5	2022-6	2022-7	2022-8	2022-9	2022-10
試験場所	RTF*1	RTF	RTF	RTF	RTF	RTF	RTF	RTF	RTF	RTF
天候		晴れ	晴れ	曇り	唯和	曇り	晴れ	唯制	唯和	曇り
外気温 (度)	24	26	26	25	28	25	22	11	6	6
風速/離陸時 (m/s)	1	2.5	1.7	2.2	1.1	3.8	2.5	4	3	1
風速/着陸時 (m/s)	1	2.9	2	2	3	2.9	3	3	2.5	3
風向/離陸時 (°)*2	06	100	60	50	130	43	300	10	0	210
風向/着陸時 (°)*2	100	175	105	50	125	30	250	0	0	220
気圧 (hPa)	1,003	1,007	1,012	1,010	1,006	1,008	1,012	1,024	1,022	1,012
閳辀鞇黬	11:45	10:27	10:41	12:55	10:34	10:50	11:13	11:14	13:55	11:11
着陸時間	12:55	16:28	11:49	14:00	11:41	11:56	12:18	12:39	15:21	12:17
飛行時間	1時間10分	6時間01分	1時間 08 分	1時間 05 分	1 時間 07 分	1 時間 06 分	1 時間 05 分	1 時間 25 分	1 時間 26 分	1時間06分
機体番号	PNC0056	PNC0094	PNC0094	PNC0094	PNC0094	PNC0094	PNC0056	PNC0056	PNC0094	PNC0056
エンジン番号	EFI-1	1044	1044	1044	1044	1044	EFI-1	EFI-1	1044	EFI-1
یر ۱ ۲	放射線	11 7 F	الا م ج	パ マ チ	الا ب ل	パ イ チ	放射線	放射線	الا ح ج	放射線
1	検出器	\ \ \ \	\ \ \ \	ヽ ヽ ヽ ヽ ヽ		~ ~ ~	検出器	検出器		検出器
離陸時重量 (kg)	20.08	20.78	19.78	19.6	19.62	19.62	19.84	19.89	19.59	19.89
搭載燃料 (kg)	2.04	3.04	2.04	2.00	2.02	2.02	2.04	2.00	2.00	2.00
消費燃料 (kg)	0.46	1.68	0.38	0.42	0.4	0.36	0.36	0.56	0.5	0.46
								र 1 	بال 1 1	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

Table 6-5 各フライト試験の詳細情報

JAEA-Technology 2023-026

*2 北を 0°、東を 90°とする。

*' KTF:福島ロボットテストフィールド(福島県南相馬市)



Fig. 6-4 フライト試験の工程

6.4.1. 機体の基本性能及び信頼性の確認及び評価

Penguin C 機体の基本性能及び信頼性の確認を行うため、計10回のフライト試験を行い、フ ライト中の飛行位置、機体姿勢、エンジン、機体システム等の情報を記録した。フライトデー タの記録情報の一例 (令和4年 (2022年)7月19日の試験結果) について、飛行軌跡を Fig. 6-5 に、フライト中に取得した一連のデータログを Fig. 6-6 に示す。

フライト試験の結果、どの試験においてもフライト中の機体の動作異常やシステム異常等 は見られなかった。ただし、機体の離陸に使用するカタパルトの部品交換や機体の部品交換及 び修理を途中、何度か行った。Table 6-6 に今年度に交換及び修理した部品一覧を示す。 Penguin C の部品はラトビアからの輸入となるため、部品の調達には数ヵ月を要する場合もあ った。Penguin C を運用する際には、各予備パーツをあらかじめ保持しておくことで、スムー ズな運用が可能となる。

対応日	対応	部品名前
2022/06/16	交換	PNC0056 パラシュートサーボ 1式
2022/07/05	交換	PNC0056 アビオニクス 1式
2022/07/12	交換	PNC0094 プロペラ 1枚
2022/07/19	交換	ピトー管 1本
2022/07/20	修理	パイロットシュート
2022/07/22	交換	センターウィング ワッシャー 2枚
2022/07/25	六協	カタパルト A1 ジョイント部 O リング 1 個
2022/07/23	父换	カタパルト 連結部ネジ 1本
2022/09/16	交換	カタパルトダンパー 2個
2022/11/01	交換	カタパルト キャリッジ用パーツ 1 式
2022/11/01	修理	センターウィング 1式
		センターウィング 1式
2022/12/13	交換	左テールウィング 1式
		テールブーム 1式
	修理	エアバッグ
2022/12/14	修理	PNC0056 ダクトテープ
2022/12/14	修理	PNC0094 ダクトテープ

Table 6-6 10 回のフライト試験において修理交換した部品一覧



Fig. 6-5 Penguin C のフライト軌跡 (2022 年 7 月 19 日) (赤線で示した枠内は立入制限監視区域である。)

(背景地図は、国土地理院撮影の空中写真 (2018 年撮影)⁵¹⁾に Penguin C のフライト軌跡及び立 入制限監視区域を追記して掲載)



Fig. 6-6 Penguin C のフライト試験時の飛行ログ(2022 年 7 月 19 日) (1/4)



Fig. 6-6 Penguin C のフライト試験時の飛行ログ (2022 年 7 月 19 日)

(2/4)



Fig. 6-6 Penguin C のフライト試験時の飛行ログ (2022 年 7 月 19 日) (3/4)



Fig. 6-6 Penguin C のフライト試験時の飛行ログ (2022 年 7 月 19 日)

(4/4)

6.4.2. 夜間フライトに必要となる機能及び運用体制の確認評価

無人航空機で夜間フライトを実施するにあたっては、まず関連法規に準じて事前に関係各 所への申請を行い、飛行許可を得る必要がある。以下に、該当する航空法の条文を示す。

航空法 第九章 無人航空機 (飛行の方法) 第百三十二条の八十六 無人航空機を飛行させる者は、次に掲げる方法によりこれ を飛行させなければならない。 (略) 2 無人航空機を飛行させる者は、技能証明を受けた者が機体認証を受けた無人航 空機を飛行させる場合(立入管理措置を講ずることなく無人航空機を飛行させると きは、一等無人航空機操縦士の技能証明を受けた者が第一種機体認証を受けた無人 航空機を飛行させる場合に限る。)を除き、次に掲げる方法により、これを飛行さ せなければならない。 一 日出から日没までの間において飛行させること。 (略) 5 前三項の規定は、次の各号のいずれかに該当する場合には、適用しない。 (略) 二 前号に掲げるもののほか、国土交通省令で定めるところにより、あらかじめ、 第二項各号に掲げる方法のいずれかによらずに無人航空機を飛行させることが航空 機の航行の安全並びに地上及び水上の人及び物件の安全を損なうおそれがないこと について国土交通大臣の承認を受けて、その承認を受けたところに従い、これを飛 行させる場合

(以下、略)

上記に示した通り、夜間(日出から日没以外の時間を指す)に飛行する場合には国土交通大臣の承認を得る必要がある。承認を得るため、同省が運営するオンラインサービス『DIPS』を通して夜間フライトの申請を行う。飛行許可(国土交通大臣の承認)を得るためには、同省が作成している「航空局標準マニュアル」に則った機体性能を保持していること及びマニュアルに則った運用体制が必要となる。同マニュアルが示す夜間飛行実施にあたり必要となる体制は以下の通りである。

無人航空機飛行マニュアル

- (空港等周辺・150m以上・DID・夜間・目視外・30m・催し・危険物・物件投下) 場所を特定した申請について適用 国土交通省航空局標準マニュアル① 令和4年12月5日版
- 3-7夜間飛行を行う際の体制
- (1) 夜間飛行においては、目視外飛行は実施せず、機体の向きを視認できる灯火が 装備された機体を使用し、機体の灯火が容易に認識できる範囲内での飛行に限 定する。
- (2) 飛行高度と同じ距離の半径の範囲内に第三者が存在しない状況でのみ飛行を実施する。
- (3) 操縦者は、夜間飛行の訓練を修了した者に限る。
- (4) 補助者についても、飛行させている無人航空機の特性を十分理解させておくこと。3-1(5)に示す第三者の立入管理措置を行う場合には、補助者の配置に代えることができる。
- (5) 夜間の離発着場所において車のヘッドライトや撮影用照明機材等で機体離発着 場所に十分な照明を確保する。

以上の内容より、夜間飛行時は「機体の向きを視認できる灯火」装備が必要である。

夜間フライト想定試験では、灯火機能として LED ライトを機体の両翼裏面に装着させ、フ ライト時における地上からのライト視認性確認を行った。LED ライトは航空機と同様に、左 翼に赤いライト、右翼に緑のライトとした。Fig. 6-7 に試験時の機体の様子を示す。試験を行 った結果、日中の明るい中、対地高度 300 m で飛行している最中でも LED の発光及び機体の 向きを視認できた。よって LED ライトを両翼裏面に装着させることで、夜間飛行時に必要と なる視認性は確保できると考えられる。

無人航空機飛行マニュアルには記載されていないが、夜間においてフライトを行う場合、 暗視カメラを搭載することで、フライトの安全性をさらに向上させることができると考えられ る。そこで周囲の状況を確認できる暗視カメラ (Epsilon140: UAV Factory Ltd. Europe)を機体 に搭載し、フライト試験を実施した。Fig. 6-8 は暗視カメラで日中に撮影した赤外線 (IR) 画像 である。試験で使用した暗視カメラの画像では高解像度ではないものの、おおよその建物や車 等の物体を認識することが可能であった。夜間フライト時の暗視カメラの使用は、フライトの 安全性の向上させるとともに、緊急時モニタリング時に現場状況を確認等にも使用することが でき、有用なツールであることが分かった。

運用体制については、操縦者の夜間飛行に対する技能向上、また夜間における周囲監視の 方法や、機体特性の再確認が必要である。2023年2月の現時点において、日本での Penguin C による夜間フライトの実績はなく、「航空局標準マニュアル」に則った夜間フライトの運用体 制は整えられていない。今後、海外や国内のテストフィールド等において、夜間フライトの経 験を積むことで、運用体制を整えられることができると考えられる。 JAEA-Technology 2023-026



Fig. 6-7 LED ライトを装着した状態で行ったフライト時の様子



Fig. 6-8 日中に撮影したフライト時の IR カメラ画像

6.4.3. 無線通信試験

現在の Penguin C の無線通信システムの最大通信距離は 1 km 程度であるが、通信距離はア ンテナ周辺の地形や設置状況により変化する。アンテナの設置状況で通信電波強度がどのよう に変化するのかを確認するために、福島ロボットテストフィールド (RTF) においてアンテナ設 置高さを変えてフライト試験を行った。地上局において、機体と通信するアンテナを地面に設 置した場合と、RTF 内にある建物の 2 階に設置した場合の 2 つの高さで飛行試験を行った。地 上からアンテナの先端までの高さはそれぞれ、2.9 m、9.2 m である。機体の飛行エリアは RTF 内とし、半径 250 m 円を反時計回りに、対地高度 150 m、200 m、250 m の 3 パターンで各 5 分 間、通信電波強度のデータを取得した。飛行場所、アンテナ設置場所を Fig. 6-9 に示す。また アンテナの設置状況を Fig. 6-10 に示す。

Table 6-7 と Table 6-8 にそれぞれの通信試験の結果得られた、地上局と機体間の無線通信の 電波強度の値を示す。地上から機体への通信電波強度を意味する Ground Link (地上→機体) は 両者ともに差は見られなかったが、機体から地上への通信電波強度を意味する Air Link (機体 →地上) は、アンテナを 9.2 m に設置した場合の方が、通信電波強度が大きくなった。Ground Link (地上→機体) の通信電波強度が変化しなかった理由としては、アンテナを地面に設置し た時の地面からの高さと、施設 2 階に設置した時の床面からの高さが同じであることが原因で あると考えられる。高所作業車等でアンテナを地面から離すことで、Ground Link (地上→機 体) の通信電波強度を増強できる可能性がある。

高度 [m]	平均電波切	Gro	und Link	Rssi [dBm]	Air Link Rssi [dBm]		
	断秒数 [sec]	最大	最小	平均	最大	最小	平均
150	1.8	-71	-95	-77	-72	-88	-80
200	3	-70	-93	-77	-72	-85	-78
250	4.4	-70	-95	-76	-71	-84	-78
300	4.75	-71	-93	-77	-72	-86	-78

Table 6-7 アンテナ高が 2.9 m の通信試験結果

Table 6-8 アンテナ高が 9.2 m の通信試験結果

高度 [m]	平均電波切	C	bround Li	nk [dBm]	Air Link Rssi [dBm]		
	断秒数 [sec]	最大	最小	平均	最大	最小	平均
150	2.75	-71	-92	-78	-69	-86	-76
200	2.25	-71	-92	-78	-68	-86	-76
250	1.75	-71	-93	-77	-69	-88	-75



Fig. 6-9 通信試験アンテナ設置場所

(背景地図は、国土地理院撮影の空中写真 (2018 年撮影)⁵¹⁾に Penguin C の飛行ルート及びアン テナの設置場所を追記して掲載)



Fig. 6-10 通信試験アンテナ設置状況

6.5. 原子力災害時に想定される無人航空機放射線モニタリングへの適用性について

各種試験の結果と Penguin C の性能を踏まえ、原子力災害時における緊急時モニタリングを 実施するために必要となる下記の項目について、同機が適応可能であるか評価した結果を以下 に示す。(1)~(7) については 6.3 節に示した項目と同一で、Penguin C 機体が有する性能につい て評価したものであり、(8)~(13) については Penguin C を原子力災害時における緊急時モニタ リングのツールとして運用するにあたり具備すべき条件を独自に追加し、評価したものである。

(1) 長時間 (20 時間以上) のフライトが可能であること。

搭載機器を軽量化することで、連続 20 時間以上フライトは可能である。実際に EDGE AUTONOMY 社のテストにおいて、連続 20 時間以上フライトを実施した実績 がある。Penguin Cはメーカーオリジナルの EFI エンジン(Electronic Fuel injection: 電 子制御燃料噴射)を搭載しており、同エンジンは氷点下から高温まで対応する冷却装 置を備え、高いエンジン効率を実現する性能を持つ。

今年度のフライト試験 No.2022-02 において、6 時間フライトを実施した際の燃料消 費率は 0.28 kg/h であった。5.6 kg の燃料を搭載した場合、約 20 時間の連続フライト が可能である。

(2) 放射線検出器を搭載するため5kg程度のペイロードが確保されること。

Penguin C の最大離陸重量は 23 kg であり、機体自体の重さは 15.64 kg である。よって搭載可能な重量は、燃料と搭載機器合わせて、7.64 kg である。燃料搭載量を2 kg とした場合に 5 kg 程度のペイロード搭載が可能である。

(3) 離陸のための滑走路を要しないこと。

Penguin C の離陸には可搬型空気圧式カタパルトを使用するため、滑走路は必要としない。ただし、アンカーペグによりカタパルトを地面に固定できる場所が必要となる。また、カタパルトからの離陸方向に障害物がないこと、Fig. 6-11 に示した緑の方向からの風向きである必要がある。なお風速 0 m/s の場合は、離陸方向にある障害物との距離を 200 m 以上確保することができれば、方向に制限はない。

(4) あらかじめ設定したプログラムにより飛行可能であること。

Penguin C を制御する地上管制ソフトウェア PCC を使用し、フライトプランを作成 することで、あらかじめ設定したフライトルートのプログラム飛行が可能である。

ただし飛行高度に対して対地高度が最低高度を下回らないことと、最高高度を超え ないことを事前に確認する必要がある。本事業のフライト試験結果より、機体は飛行 中に目標高度から最大 10 m 程度上下することが分かった。よって、最低及び最高高 度から 10 m 以上余裕を持たせて飛行経路や高度を設定する必要がある。なお、100 m 以下の高度になると、機体のパラシュートが開く設定となっているため、高度 100 m 以下での運用はできない。

(5) 同機種によるフライトの実績が100時間以上を超え、墜落事故に対する平均故障間隔 (MTBF)が評価されていること。

メーカー公表値で Penguin C のテストフライト実績は 9,000 時間を超え、様々な環

境下におけるフライト試験を通じて、機体の耐久性及び堅牢性が実証されている。実際に、本事業において無人飛行機の運用技術開発に着手してから今年度に至るまでの3年間で、延べ約60時間のフライト試験を行ったが墜落事故及び墜落事故に至るような機器異常は見られていない。また、MTBFについては、メーカー内にて一定の基準を設け、各事象に対する評価が行われている。実際の数値については公表されていないが、事故分類基準についてはTable 6-3に示した。

(6) 風速 10 m/s 以下でのフライトが可能であること。

フライト中、風速 10 m/s 以下であれば、フライトが可能である。Penguin C オペレ ーションに係る風速制限は下記の通り設定されている。

- ・フライト中-最大 20 m/s
- ・カタパルト発射時の向かい風-最大10m/s
- ・パラシュートリリース時の地上突風-最大8m/s
- (7) 雨天時のフライトが可能であること。

Penguin C のカタログスペック上、5 mm/h 程度の雨量までフライト可能である。雨 や霧等湿度の高い環境における機体の耐久性を高めるため、機体には静圧ポートを覆 うプロテクターが導入されている。今年度の No.2022-01 のフライト試験が雨天 (約 1 mm/h) であったが、問題なくフライトを行っている。

(8) 事故発生から1時間以内に離陸が可能であること。

Penguin C は地上局及びトラッキングアンテナを含め機器一式の組立から離陸まで 短時間で完了できるよう設計されている。大型の機器であるトラッキングアンテナ及 びカタパルトがあらかじめ組立済みであれば、準備開始から概ね1時間程度で離陸準 備が可能である。

(9) リアルタイムに画像や機体の位置やステータス情報を地上に送信可能であること。

フライト中、機体と地上局は常時相互通信可能な状態にある。地上局では、PCCを 通して機体位置情報を、CoPilot を通してエンジン等のステータス情報をリアルタイ ムに確認することができる。また、ペイロードとしてカメラを搭載した場合には、上 空でカメラが撮影している映像も同時に地上局にて受信及び確認が可能である。

(10) 原子力災害対策指針の OIL に則り避難等の防護措置が実施された後において、UPZ の外側から、データ通信が可能であること。

Penguin C の無線通信システムの最大通信距離は約 1 km であり、UPZ の外側 (30 km 以遠) からのデータ通信は難しい。

長距離通信を行う場合、電波出力だけでなく、地球の丸みを考慮する必要があり、 電波の直線通信距離とフレネルゾーン*2を満たすために、機体の高度とアンテナの高 さを上げる必要がある (Fig. 6-12~Fig. 6-14)。Fig. 6-13 及び Fig. 6-14 はフレネルゾー ンを考慮し、通信距離に伴い必要となる機体高度補正値を算出した結果である。現在

^{*2}フレネルゾーンとは、無線通信などで電力損失をすることなく電波が到達するために必要となる領域のことである。この領域内に障害物があると電波強度が確保できなくなる。

使用しているアンテナを地上3 m 地点に設置した場合、30 km 先を飛行させるために は、機体の高度を約 300 m~400 m にする必要がある。

Penguin Cのアンテナにはオムニダイレクショナルアンテナ (無指向性アンテナ) と ダイレクショナルアンテナ (指向性高利得アンテナ)が取り付けられており、地上局 側のアンテナと Penguin C 側のアンテナの距離に応じて自動的に切り替わる仕組みに なっている。現在オムニアンテナとダイレクショナルアンテナの出力は 0.56 W であ り、近距離で使用する場合はオムニアンテナ、長距離で使用する場合はダイレクショ ナルアンテナが対応する。オムニアンテナの最大通信距離は約 1 km であるが、ダイ レクショナルアンテナを使用することで、さらに通信距離を延ばすことができる。た だし、ダイレクショナルアンテナの使用は、電波法に基づいた総務省の使用許可を得 ることができていないため、現状では使用することができない。オムニアンテナを用 いて長距離通信を行おうとする場合、Penguin C 機体側及び地上局側のアンテナにア ンプを搭載し、電波の出力を上げて通信距離を延ばすことが一案として挙げられる。 そのためには電波の高出力使用許可を総務省から得ることが必要となり、現在使用し ている無線通信帯域 (2.4 GHz 帯)の電波出力を上げると一般で使用されている Wi-Fi などの通信に悪影響を及ぼす可能性があるため、許可を得ることは困難であると思わ れる。

その他の通信方法として、衛星通信があるが、UAV で使用されている衛星通信機 材は小型のもの (例えば、株式会社日本デジコム製 AVIATOR UAV200)でも重量が約 1.5 kg あり、サイズは 24 cm×16 cm×6 cm 程度である。よって Penguin C への搭載は難 しく、通信機を搭載できたとしても、放射線モニタリングに必要な機材等を搭載する スペースが非常に小さくなるという課題がある。またその他の無線通信機として、近 年、ドローン用の SIM を用いることで、上空での LTE 利用が可能となっている。し かし LTE 通信は山間部等の電波がないところでは運用ができないという課題があり、 また高高度 (80 m~100 m 以上) では LET の電波を受信できないという事例も報告さ れている。合わせて衛星通信や LTE による通信システムは、Penguin C で対応してい ないため、適用する場合はメーカーに改造発注をしなければならない。

現状、原子力災害時における無人機運用の課題として、長距離無線技術が最も大き な課題と考えられる。今後、現無線システムだけではなく、衛星通信や LTE 通信等 の様々な無線通信を用いた試験を通して、日本での運用における最適な通信システム を構築する必要があると考えられる。

(11) 夜間にフライトするための機能(暗視カメラ、航空灯など)を有すること。

Penguin C に航空灯及び暗視カメラを機体に搭載することで、夜間にフライトする ための機能を保持させることができる。

夜間フライト想定試験においては、UAV 用 LED ライトを両翼の裏面に取り付けて フライトを実施し、機体に強い物理的衝撃が加わる離着陸時においても機材が落下し ないこと、また機体が対地高度 300 m を飛行している際にもライトの点滅を目視でき ることを確認している。また、エルロンのサーボを利用した LED ライトの取り付け 方法についてもメーカーが情報提供をしており、使用目的に応じていずれかの方法を 選択することが可能である。

機体前方のペイロードベイにはユーザーの用途に応じたペイロードを搭載すること ができ、本試験ではメーカー推奨の Octopus ISR Systems 製 UAV 用カメラ Epsilon を 搭載したフライトを行っている。同機はカラーカメラと赤外線カメラを備えており、 夜間のフライトにおいても赤外線カメラを利用した対象物の確認等が可能である。た だし、同機材を機体に搭載すると、放射線モニタリングに必要となる機器が搭載でき なくなる課題がある。放射線モニタリングに必要となる機材と暗視カメラを併用する 場合、両者を一体化させる必要がある。

(12) 国内での規定基準類に準拠していること。

Penguin C 運用に際して依拠すべき日本国内規定基準類は、電波法及び高圧ガス保 安法である。電波法は地上局と機体間の電波通信について適用され、高圧ガス保安法 についてはカタパルトが同法適用対象であるか照合が必要となる。順に詳細を以下に 述べる。

1) 電波法

国内で電波を利用するためには、使用する無線設備が技術基準適合証明を受けていること、且つ、原則として無線局を開設することが必要となる。無線局申請にあたり、技術基準適合証明を受けている無線設備のみを使用する場合には、申請の一部が簡素化される特例措置が適用される。

Penguin C については、地上局と機体の通信に UAV IP Data link を使用している。同機器は Microhard Systems Inc.製 pMDDL2450 無線モデムを利用しており、同モデムが技術基準適合証明を受けている。また、無線局について、同モデムの仕様 (Table 6-9) は Table 6-10 の通り携帯局に該当する。地上局及び機体各々に無線局免許状を申請し、免許を付与されている。

周波数オプション	送信出力	チャンネル帯域幅
2.405 - 2.470 GHz	20 dB - 30 dB (100mW - 1.0W)	4/8 MHz

Table 6-9 UAV IP Data Link 仕様

分類	無線局 免許	周波数带	送信 出力	利用形態	備考	無線従事 者資格	
免許及び 登録を要 しない無 線局	不要	73 MHz 带 等	×1	操縦用	ラジコン 用微弱無 線局	不要	
	不要※2	920 MHz 帯	20mW	操縦用	920MHz 帯テレメ ータ用、 テレコール トロ特定小 電力無線 局		
		2.4 GHz 帯	10mW /MHz ※3	操縦用 画像伝送用 データ伝送用	 2.4GHz帯 小電力デ 一タ通信 システム 		
携帯局	要 ※4	169 MHz 帯	10mW ※5	操縦用 画像伝送用 データ伝送用	無人殺動	第三級陸 上特殊無 線技士以 上の資格	
		2.4 GHz 帯	1 W	操縦用 画像伝送用 データ伝送用	ボハ 伊朝 体画像伝 送システ		
		5.7 GHz 帯	1 W	操縦用 画像伝送用 データ伝送用			

Table 6-10 ドローン等での使用が想定される主な無線通信システム

*太文字: Penguin C 該当箇所

※1:500 mの距離において、電界強度が 200 µV/m 以下のもの。

※2:技術基準適合証明等(技術基準適合証明及び工事設計認証)を受けた適合表示無線設備で あることが必要。

※3:変調方式や占有周波数帯幅によって出力の上限は異なる。

※4:運用に際しては、運用調整を行うこと。

※5:地上から電波発射を行う無線局の場合は最大1W。

引用元:総務省電波利用ホームページ https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/others/drone/
② 高圧ガス保安法

機体離陸の際に使用する可搬型空気圧式カタパルトはエアーコンプレッサーを 備えており、最大発射圧力が1.15 MPaに達する。これは高圧ガス保安法第二条第 一項に規定される「高圧ガス」に該当しているが、後述する同法及び関連法規に 規定される適用除外項目に該当するため、カタパルト使用にあたり同法に則る許 可取得等は現時点では不要である。

高圧ガス保安法

第三条 (適用除外)

九 その他災害の発生のおそれがない高圧ガスであつて、政令で定めるもの

上記の高圧ガス保安法に関しては、本機器のカタパルトは標準大気 (災害の発生のおそれがない高圧ガス)を使用するため、本項に該当する。

高圧ガス保安法施行令 (適用除外) 第二条 3 法第三条第一項第九号の政令で定める高圧ガスは、次のとおりとする。 一 圧縮装置(空気分離装置に用いられているものを除く。次号において同 じ。)内における圧縮空気であって、温度三十五度において圧力(ゲージ圧 力をいう。以下同じ。)五メガパスカル以下のもの

上記の通り、高圧ガス保安法施工例を参照すると、本機器のカタパルトで使用 されるのはエアーコンプレッサーで生成された圧縮空気であり、最大発射圧力は 1.15 MPa であるため、本項に該当する。



本機器のカタパルトはエアータンク、コンプレッサー、バルブが一体として管 理されている装置である。また、エアータンクから放出された圧縮空気は大気中 に放たれて消費される。以上のことから、高圧ガス保安法及び関係政省令等の運 用及び解釈について (内規) からも法の適用を受けない場合に該当する。 (13) 少人数 (2~3 名) での運用が可能であること

Penguin C は離陸地点までの機器一式(機体、アンテナ、地上局及びカタパルトを指 す)の運搬、機器組立、離陸、ミッションフライト並びに着陸までの一連の作業を最 小人数2名で遂行することが可能である。しかしながら、災害時の迅速な対応を最優 先事項とすると、運搬から離陸までの過程は人手を増やすことで時間短縮が可能とな ることから、3名以上の作業員を配置することが望ましい。また、少人数での運用を する場合、使用している機材は重量物も多く、安全性と効率を考慮して、機材積み降 ろし用のリフターを備えた運搬車を準備しておくことが望ましい。



Fig. 6-11 カタパルトに対する打ち上げ時の風向



Fig. 6-12 直線通信距離とフレネルゾーンについて



Fig. 6-13 フレネルゾーンを 100 %確保するための高さ相関



Fig. 6-14 フレネルゾーンを 80 %確保するための高さ相関図

6.6. 無人飛行機搭載用放射線測定システムの設計製作及び動作試験

本節では、これまでの本事業におけるフライト試験等の結果を踏まえ、無人飛行機搭載用 放射線測定システム¹⁹⁾に対して改良を施した試作機(以下、改良試作機)を用いて試験評価を 行った結果を述べる。またその試験結果を踏まえ、Penguin C を用いた緊急時放射線モニタリ ングを行う上で無人飛行機搭載用放射線測定システムに必要とされる性能及び今後の課題を述 べる。

6.6.1. 無人飛行機搭載用放射線測定システム及びその改良

原子力災害時の放射線モニタリングを想定し、無人飛行機 (Penguin C) に搭載する改良試作 機の設計製作及び改良試作機による測定試験を実施した。Fig. 6-15 に本試験で設計及び製作し た改良試作機の概要を示す。当試作機には放射線検出器モジュール (日本放射線エンジニアリ ング株式会社製)、カメラ (Panasonic 製 WV-S3130)、GNSS センサー (u-blox 製 GlobalSat® BU-353W10: M8M) が搭載されており、それらのデータはデータロガーPC (エスティーラボ製 Raspberry Pi 3B) によって USB メモリに保存されると同時に、機体の通信機能を用いて地上局 にデータが送信される (コントレイルズ製のシステムソフトウェア)。データは全て、GNSS か ら得られた時刻情報で関連付けされており、1 秒ごとに緯度、経度、高度、気圧、温湿度、β 線及び γ 線計数率、γ 線スペクトルの情報が得られる。放射線検出器にはゲルマニウム酸ビス マス (BGO) とプラスチックシンチレータを用いたホスウィッチ型検出器を採用した。ホスウ ィッチ型検出器とは、複数の異なるシンチレータを用いることで、放射線の種別 (改良試作機 では γ 線と β 線)に得られるパルス形状に変化を与えることで、β 線と γ 線を弁別して計測可能 な検出器である。ホスウィッチ型検出器は二つの検出器を搭載することなく二種類の放射線を 計測でき、小型軽量であるため、搭載スペース及び重量に制限のある今回のような測定状況に おいて最適であると考え、本試験で採用した。

Fig. 6-16 に本試験で使用したホスウィッチ型検出器の外観図面を示す。検出器は、表面から 順に遮光用のアルミ蒸着マイラ膜、プラスチックシンチレータ (25 mm φ × 1 mm H)、そして BGO (25 mm φ × 25 mm H) といった積層構造になっている。β線はプラスチックシンチレータ で、γ線は BGO で検出するシステムとなっている。原子力災害時における緊急時モニタリン グにおいて、放射線測定時の機体の汚染 (自己汚染) をどのようにして把握するのかが課題の 一つである。本システムでは、ホスウィッチ型検出器を用いることで機体表面の汚染状況を β 線のカウントで把握できるようにした。

令和3年度の試験では、機体のエンジン回転による振動の影響により、ホスウィッチ型検出 器のβ線計数率が不自然な変動を示す現象(以下、ノイズ現象)が見られ、本現象の解決が課 題として挙げられた¹⁹⁾。今年度は、ノイズ現象を抑制するために次の改良を施した。放射線 検出器に対するインシュレーター(防振ゴム)の取付け、電磁波シールドメッシュによる被覆、 システム全体をシンプルな形状に一体化、専用架台を作成した。機体への放射線検出器システ ム搭載図面を Fig. 6-17 に示す。



Fig. 6-15 放射線測定システム試作機 (改良試作機)の概要 (赤い点線で囲んだものは令和4年度に改良した部分である。)







Fig. 6-17 放射線測定システム機体搭載図面 (赤字で示した部品は令和4年度に改良した部分である。)

改良試作機を Penguin C に搭載し、地上において動作試験を行った。地上で機体のエンジン を動かし、放射線検出器の測定結果にどのような影響があるのか確認した。試験結果を Fig. 6-18 に示す。ノイズ現象への対策を施した結果、 γ 線計数率については、従来通りノイズ現象 は見られなかった。一方、 β 線計数率については、エンジン回転数が 3,500 rpm 以上の領域で ノイズ現象は見られなかったものの、機体のペイロード用カバー無しの状態のとき、3,000 rpm 付近で β 線計数率が不自然に上昇するノイズ現象が見られた。しかしながら、地上試験に おいては、ノイズ現象はカバーを装着することで解消できたため、フライト試験時には必ずカ バーを装着することとした。



Fig. 6-18 エンジン回転数 3,000 rpm 付近で見られるノイズ現象 (地上試験) (本図中のエラーバーは標本標準偏差を表している。)

6.6.3. 改良試作機によるフライト試験の結果

改良試作機をPenguin Cに搭載し、フライト試験を行った。Fig. 6-19に改良試作機をPenguin Cに搭載し、フライト試験を行った結果の一例を示す。Fig. 6-19 (a) は対地高度約 200 m にお ける γ線計数率、Fig. 6-19 (b) はフライトと同時期に歩行式サーベイメータ (日本遮蔽技研製ホ ットスポットファインダー) で地表面から 1 m の高さの空間線量率を測定した結果である。フ ライト試験による分布は、内挿法 (クリギング法) を用いて内挿補間した結果である。フライ ト試験時の γ線測定結果と地表面から 1 m の高さの空間線量率の測定結果は、同様の分布傾向 を示した。

Fig. 6-20 は Fig. 6-19 に示したフライト試験時の β 線及び γ 線計数率とエンジン回転数を時系 列で示したものである。離陸直後に途中検出器が動作停止しているが、これはカタパルト発射 時の衝撃により電源系統にエラーが発生したためである。 γ 線については離陸以降、計数率は 概ね一定レベルで安定しており、ノイズ現象は見られなかった。一方、 β 線については離陸以 降、計数率が不安定であり、特に、12:00~12:15 の領域で計数率が不自然に大きく変動するノ イズ現象が見られた。前項に示した地上試験は台座に機体を固定して試験を行うため、フライ ト試験に比べて、機器への振動影響が少なかったが、フライト試験時は地上試験のシチュエー ションと異なり、機器への振動の影響が大きくなり、 β 線計数率にノイズが混入したと考えら れる。

令和4年度の改良では、電磁波シールドメッシュによる被覆、グランドの設置、インシュレ ーターの設置、専用架台の作成等、様々なノイズ対策をホスウィッチ型検出器に対して適用し たが、ホスウィッチ型検出器のβ線計数率に見られるノイズ現象を完全に解消することはでき なかった。



Fig. 6-19 フライト試験時のγ線計数率及び地表面から1mの高さの空間線量率 (背景地図は、国土地理院撮影の空中写真 (2018 年撮影)⁵¹⁾に以下のデータを追記して掲載)

- (a) ホスウィッチ型検出器で得られた対地高度 200 m における γ 線計数率 (2022 年 12 月 12 日、 図中に黒線で示した円周上をフライトして測定した)
- (b) 歩行式サーベイメータで得られた地表面から1mの高さの空間線量率 (2022 年 12 月 14 日 測定)





6.6.4. 無人飛行機搭載用放射線測定システムの必要性能及び課題について

6.5 節では原子力災害時における緊急時モニタリングを実施するために必要となる性能項目 について、Penguin C が適応可能であるか評価した。本項では Penguin C を用いた緊急時放射 線モニタリングを行う上で、必要となる無人飛行機搭載用放射線測定システム (以下、単にシ ステムという)の性能条件を以下にまとめる。

無人飛行機を用いた緊急時放射線モニタリングを行う上で必要となる性能条件

- ・機体への搭載物は防塵、防滴仕様であり、目安として-10℃~50℃において動作すること。
- 機体への搭載物は20時間以上、安定的に動作すること。
- 搭載システムは突然の電源消失時においても機器が破損しないように、機器設計を行うこと。機体からの供給電圧を安定的にするため、可能であればバッテリー等により電源を放射線検出器等に供給することが望ましい。
- 搭載システムによる取得データはTCP/IP通信等を用いて、リアルタイムで地上局において状況確認やデータ受信が可能であること。機体搭載システムは、離着陸時の衝撃により機能が停止する可能性があるため、遠隔でシステムの電源 ON/OFF や再起動操作が可能であることが望ましい。
- 搭載システムは各機器が故障しても直ぐに交換できるように、シンプルな構造にすること。フライト時の振動や離着陸の衝撃によりコネクタ接続部等が故障しやすいため、ねじ止め等が可能なコネクタ形状であることが望ましい。併せて、緊急時放射線モニタリングでは搭載システム自体が汚染する可能性もあるため、システムを構成する各機器のストックが常にある状態が望ましい。
- 搭載システムによる取得データは、システム内及び地上局の両方に保存可能であること。
 これは途中で機体又は搭載システムをロストした場合、測定データが取得できなくなる
 ことを防ぐためである。
- 搭載システムは、GNSS 受信機を保持する、又は機体からの GNSS 情報を受信し、取得 データの全てを GNSS 時刻で関連付けできること。
- 機体へ搭載する放射線検出器は地上からの放射線影響と、機体周辺汚染による放射線影響を区別できるシステムであること。
- 機体への搭載物が取得する数値情報は1秒ごとにデータを連続して保存が可能であること。
- 機体への搭載システムはカタパルト発射時等の離着陸時の衝撃に備え、架台等にしっかりと固定されていること。
- 搭載システムには機体からの電磁パルス (EMP) ノイズを防止する処理 (電磁波シールド メッシュによる被覆等)を施すこと。
- 搭載システムには機体への影響 (GNSS 電波への干渉等) を防止する処理を施すこと。
- 搭載システムには振動ノイズの影響を防止する処理 (専用架台の作成、インシュレータ

ーの設置等)を施すこと。

 搭載システムの稼働状況を確認できる LED ランプ等が搭載されていること。これは無人 航空機の運用時に、迅速な機器確認を行うためのものである。

Penguin C を用いた緊急時放射線モニタリングを行う上で必要となる性能条件

- 機体に搭載するシステムの総重量は 2 kg 未満、大きさはおおよそ 220 mm × 200 mm × 100 mm 以下であること。システムの総重量が 2 kg 以上の場合、6 時間以上の連続運用が 難しくなる。
- 機体への搭載物の電源は機体からの供給電源 (12 V × 2 個、24 V × 1 個) を用いたもので あること。

無人飛行機搭載用放射線測定システム構築にあたって一番の課題は、放射線検出器のβ線計 数率データに見られるノイズ現象の防止である。令和4年度の改良試作機には可能な限り様々 なノイズ現象の防止策を施したが、ノイズ現象を解消することができなかった。ノイズ現象が 誘起される原因として、①振動によりβ線で得られるパルス形状に近い電磁パルスが発生して いる、②機体や放射線検出器が振動により静電気を保持し、β線を誤検出していることが挙げ られる。本検出器はPenguin C へ搭載するために軽量化されているため、振動の影響を受けや すい可能性がある。

本試験では、軽量化及び機体汚染の計数率を分離するために軽量化したホスウィッチ型検 出器を採用したが、試験結果を踏まえると、本試験で使用したような小型軽量化したホスウィ ッチ型検出器の Penguin C を用いた測定システムへの適用は難しいと思われる。なお、無人へ リコプター (ヤマハ発動機製 FAZER R G2) に対しても同ホスウィッチ型検出器を搭載し測定試 験を実施してみたところ、β 線計数率にノイズ現象が同様に見られた。このことからも、軽量 化したホスウィッチ型検出器はフライト中に一定レベル以上の振動を生ずる無人航空機に対し て不向きであることが示唆される。

Penguin C に搭載する放射線検出器を開発する際は、振動の影響を受けにくい単体結晶のシ ンチレータ放射線検出器や複数の結晶を用いた放射線検出器を採用する方が望ましいと考えら れる。その場合においても、アルミ蒸着マイラ膜で検出器表面を覆った単体結晶のシンチレー ション式検出器を用いて、本報告で実施したような地上試験及びフライト試験を行い、ノイズ 現象が見られる否かを確かめる必要がある。単体結晶の検出器においてもノイズ現象が見られ る場合、Penguin C に搭載する放射線検出器に軽量化したホスウィッチ型検出器は採用すべき でないといえる。

「平成 28 年度~平成 30 年度 無人飛行機を用いた放射性プルーム測定技術の確立」⁵²⁾⁻⁵⁴⁾に おいても、無人航空機に搭載する放射線検出器の開発を行っている。このシステムでは、ホス ウィッチ型検出器の他に、3 つのシンチレータを用いることで、プルームからの放射線、機体 に付着した放射性核種からの放射線及び地上からの放射線の三つの影響の弁別を可能としてい る。その放射線検出器は約 10 kg と、改良試作機の検出器に比べて約 5 倍であった。このシス テムの無人へリコプターへの搭載測定試験の結果にはβ線のノイズに関しての報告はない。10 kg 程度の重量があったために検出器本体が安定し振動の影響が少なく、ノイズが見られなかったのではないかと推察される。

以上の検討結果を踏まえ、ホスウィッチ型検出器を使用せず、機体周辺と地表面からの放 射線影響を弁別可能であり、Penguin C へ搭載可能な小型の測定システム案を 6.6.5 項に示す。 当該項に示す案は、2 つのシンチレータを用いた放射線測定システムである。

なお、本報告書に詳細は記載していないが、機体に搭載するデータログ用の小型パソコン や、各種機器が電波ノイズを発し、機体側が受信する GNSS 電波へ影響を及ぼす事象が発生し ている。機体に搭載する機器に関してはあらかじめ、スペクトラムアナライザ等で各種機器が 電波を発していないか、確認する必要があることをここで述べておく。

6.6.5. 無人飛行機搭載用放射線測定システム案

前節までの検討結果を踏まえ作成した、Penguin C に搭載する放射線測定システムの全体像 をFig. 6-21に示し、放射線検出器の詳細な構成案をFig. 6-22及びFig. 6-23の2パターン示す。 本報告書ではこれらのシステムを「マルチ検出システム」と呼称する。

マルチ検出システムは、二つの検出部 (A、Bとする)を用いることで、機体の周辺汚染状況 と地面からの放射線寄与を弁別するシステムである。個々の結晶からγ線計数率を取得し、遮 蔽率の違いから、各放射線寄与による計数率を推定する。

Fig. 6-22 の環境において、地表面及び機体周辺の放射性物質からの放射線の計数率には以下のような関係が成り立つと仮定する。

$$\mathbf{y}_{\mathbf{A}} = \mathbf{A}_{\mathbf{c}} + \mathbf{A}_{\mathbf{g}} \tag{9}$$

$$y_{\rm B} = B_{\rm c} + B_{\rm g} \tag{10}$$

ここで、y_Aは検出部 A の全計数率、y_Bは検出部 B の全計数率、A_c, B_cは各検出部で機体周辺の 放射性物質に起因する計数率、A_g, B_gは地表面に存在する放射性核種に起因する計数率である。 機体周辺に汚染がなく、全計数率が地表面に存在する放射性核種に起因する計数率のみと

展体局近に汚染がなく、主計数単が地衣面に存在する放射性核種に起因する計数単のみと見なせる場合、AgとBgの比は一定であると仮定すると、以下の式[11]が成り立つ。

$$\boldsymbol{B}_{g} = \boldsymbol{S}\boldsymbol{C}_{1} \times \boldsymbol{A}_{g}$$
 [11]

ここで、SC1は遮蔽係数であり、遮蔽体や各検出部の配置によって変化する。

次に、地表面に存在する放射性核種に起因する計数率の影響がほとんどなく、全計数率が 機体周辺の放射性物質に起因する計数率のみであると見なせる場合、*A*_cと*B*_cの比は一定である と仮定すると以下の式[12]が成り立つ。

$$\boldsymbol{B}_{c} = \boldsymbol{S}\boldsymbol{C}_{2} \times \boldsymbol{A}_{c}$$
^[12]

ここで、 SC_2 は遮蔽係数であり、遮蔽体や各検出部の配置によって変化する。 $SC_1 \neq SC_2$ のとき、以下の連立方程式[13]から A_c, A_g を推定することが可能となる。

$$\begin{cases} y_{\rm A} = A_{\rm c} + A_{\rm g} \\ y_{\rm B} = SC_2 A_{\rm c} + SC_1 A_{\rm g} \end{cases}$$
[13]

$$A_{g} = \frac{SC_{2} y_{A} - y_{B}}{SC_{2} - SC_{1}}, \sigma_{g} = \sqrt{\left(\frac{SC_{2}}{SC_{2} - SC_{1}}\right)^{2} y_{A} + \left(\frac{1}{SC_{2} - SC_{1}}\right)^{2} y_{B}}$$
[14]

$$A_{c} = \frac{SC_{1} y_{A} - y_{B}}{SC_{1} - SC_{2}}, \sigma_{c} = \sqrt{\left(\frac{SC_{1}}{SC_{1} - SC_{2}}\right)^{2} y_{A} + \left(\frac{1}{SC_{1} - SC_{2}}\right)^{2} y_{B}}$$
[15]

ここで、 $\sigma_g \ge \sigma_c \operatorname{il} A_g \ge A_c$ の標準偏差である。 $SC_1 \ge SC_2$ の差が大きいほど、推定精度は向上する。 $A_c \ge A_g$ のバックグラウンドと考えると、 A_g の検出限界値 N_g は式[16]により算出される。

$$N_{\rm g} = A_{\rm c} + 3\sigma_{\rm c} \tag{16}$$

マルチ検出システムの計数率の推定精度を評価するために、モンテカルロ計算コードPHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System: Ver. 3.290)⁵⁷⁾を用いて放射線検出のシミュレーションを行った。遮蔽体や各検出部の配置によって、 A_g の推定精度がどのように変化するのか評価するために、Fig. 6-22 のモデル 1 と、Fig. 6-23 のモデル 2 の 2 パターンのモデルを用いて、シミュレーションを行った。各モデルとも、遮蔽体を 1 mm と 3 mm の厚さに設定し、 γ 線源 (Cs-137: Cs-134: I-131 = 1:1:1)を球表面全体に分布させ、 A_c 及び B_c を取得した。また球の中央から 5 m 離れた箇所に 10 m × 10 m の平面 γ 線源 (Cs-137: Cs-134: I-131 = 1:1:1) を設置し、これを地表面からの γ 線の影響と仮定し、 A_g 及び B_g を取得した。

Table 6-11 は PHITS によるシミュレーションにより、各モデルの SC_1 と SC_2 を算出した結果で ある。これらの値を用いて、各モデルの周辺汚染による検出部 B のカウントが上昇したとき ($y_B = SC_2 A_c$ のとき)の、 A_g の検出限界値 N_g を算出した結果が Fig. 6-24 である。

本結果より、遮蔽体の厚さを変化させることで、周辺汚染による検出部Bのカウントの上昇 に伴うAgの検出限界値の上昇が抑えられていることが確認できる。また、モデル1とモデル2 を比較すると、モデル2の方が検出限界値の上昇が小さい。これは、SC₁とSC₂の差がモデル2 の方が大きいためと考えられる。

これらの結果から、遮蔽体及び検出部の配置、各結晶サイズ等の最適化を行うことにより、 マルチ検出システムにおけるAgの推定精度を向上させることができることが分かった。ただ しマルチ検出システムは、地表面の放射性核種からの寄与と機体周辺の放射性核種からの寄与 を大まかに弁別することは可能だが、機体周辺の放射性核種からの寄与について、さらに機体 周辺に存在する放射性プルーム等からの寄与と機体自体に付着している放射性核種からの寄与 を詳細に弁別することは難しいという課題がある。マルチ検出システムの検出部 Bをホスウィ ッチ型検出器に変更する、又はもう一つβ線測定用の放射線検出器を追加することで、放射性 プルームからの寄与と機体に付着した放射性核種からの寄与を弁別することは可能となるが、 β線計数率におけるノイズ現象が未解決であり、今後、β線計測の評価研究を行う必要がある。 また、マルチ検出システムでは、放射線スペクトルを活用して放射性核種の弁別を行うことは 可能だが、それぞれの放射性核種濃度を算出することは難しい。

上記で示したマルチ検出システムの他に、二つの検出器の同時計数率を取得する方法(複数の入力端子に、ある一定時間内に到達したパルスだけを計数する方法)で地表面の放射性核種による影響を評価する手法も考えられるが、無人航空機で放射線モニタリングを行うというシチュエーションでは、γ線を二つの検出器で同時計数する確率は非常に低く、Agの検出限界が大きくなることが予想される。なお、「平成28年度~平成30年度無人飛行機を用いた放射性プルーム測定技術の確立」⁵²⁾⁻⁵⁴⁾においては1"×1"のシンチレータを3つ用いて、同時計数率を取得していたが、その比率は最大 0.5%程度であった。

なお本章で示したマルチ検出システムは、簡易的なシミュレーションの結果のみを示して おり、実際の機体へ搭載した際は、結果が異なってくると考えられる。機体への搭載には、検 出器配置等に様々な制限があるため、マルチ検出システムの詳細な性能評価には、実機による 検出器及び遮蔽体の配置の最適化や、フィールド測定による性能試験評価が必要となる。

モデル	遮蔽体厚さ	SC_1	SC_2
1	1 mm	0.869	1.112
	3 mm	0.916	1.267
2	1 mm	0.726	1.361
	3 mm	0.717	1.444

Table 6-11 各モデルのSC₁とSC₂の算出結果



Fig. 6-21 無人飛行機 Penguin C 搭載用放射線測定システム設計案



Fig. 6-22 マルチ検出システムのシミュレーションモデル1

実際の計算モデルは、左図のピンク色の半球が球状 (半径 10 cm) である。遮蔽体は鉛 (50 mm × 50 mm × 厚さ 1~3 mm)、検出部は CdZnTe (25 mm × 25 mm × 13 mm)、検出モジュールは Al (25 mm × 25 mm × 58 mm) を用いた。



Fig. 6-23 マルチ検出システムのシミュレーションモデル 2



Fig. 6-24 各モデルの周辺からの影響に応じたAgの検出限界

7. まとめと緊急時モニタリングに資する知見の整理

本報告で得られた成果を以下にまとめる。

・航空機モニタリング結果について

美浜・敦賀及び伊方について、3 km~80 km 圏における天然放射性核種由来の空間線量率の 分布マップ及び天然放射性核種 (K-40、U系列及び Th系列) について濃度マップを作成した。 作成したマップの妥当性については、地上測定値や他機関から公開されている地質調査レポー ト等と比較することで検証した。空間線量率マップについては、標準的解析手法によるものと、 ラドン弁別手法によるものの二種類を作成した。両解析手法ともに、空間線量率の計算値と地 上測定値との RMSE は 0.03 µSv/h 程度であり、概ね妥当な誤差範囲に収まった。また、空間線 量率マップは、一部で既往の地質調査レポート等との関連付けが難しい場所はあったものの、 空間線量率が比較的高く算出された場所のほとんどで花崗岩類の存在が関連していることが推 察され、地質の分布との対比は概ね良好に思われた。これらのことから、標準的解析手法に基 づく γ線計数率から空間線量率への換算方法を今後も運用するにあたって、特段の問題はない と思われる。ラドン弁別手法については、標準的解析手法と遜色のない解析結果を得られる点 で一定の有効性が示されているものの、本手法を用いても明らかなメリットが得られていない のが現状である。ラドン弁別手法の信頼性を向上させることができれば、標準的解析手法で行 っている空気中核種フライトが不要となり、航空機モニタリングの測定期間やデータの解析に 掛かる時間の短縮等の効率化に寄与することとなる。本手法の信頼性向上に資するため、換算 パラメータ RI 及び GI の算出方法を改良し、更なる高度化に努める必要がある。天然放射性核 種の濃度マップについては、他機関から公開されている元素濃度マップの分布傾向を概ね再現 できていた。このことから、航空機モニタリングデータに対してコベル法が有効に機能してお り、一定の信頼性を持った自然放射性核種別濃度マップが作成可能であると思われる。

・航空機モニタリングの期間と出来事について

測線は5kmまたは10kmで東西方向に設定した。美浜・敦賀については、航空機による測定期間は令和4年(2022年)7月26日~7月31日(延べ9フライト)の6日間、地上測定の測定 期間は令和4年(2022年)7月26日~7月30日の5日間であった。伊方については航空機によ る測定期間は令和4年(2022年)11月11日~11月21日(延べ16フライト)の11日間、地上測 定の測定期間は令和4年(2022年)11月11日~11月18日の8日間であった。美浜・敦賀、伊 方ともに航空機モニタリングシステムにトラブルが生じることなくスムーズに測定が進んだ。 しかしながら、伊方の測定期間中、11月11日に愛媛県東温市周辺でテストポイントフライト を実施した際、住民の方から愛媛県庁に対してヘリコプターの騒音苦情に係る連絡が寄せられ た。テストポイントフライトは対地高度300mを保った状態で3分間ホバリングを行うという 性質上、騒音の発生は不可避である。航空機モニタリングを実施する地域の住民の方々と地方 自治体の職員にご迷惑を掛けることのないよう、テストポイントの場所の選定に当たっては、 住宅密集地を避ける等の配慮を行う必要がある。

・RSI システムの保守点検方法について

RSI システムについて、月例保守点検の方法を定型化し、確実に実施した。結果として、特

にシステムの異常等は見られなかった。

・原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングについて

対象サイトを美浜発電所とした令和4年度原子力総合防災訓練において、緊急時航空機モニ タリングを実施した。本訓練では、美浜発電所から南東方向に放射性核種が拡散したと想定し、 航空自衛隊小牧基地を離発着点として岐阜県の北西部及び滋賀県北部域をモニタリングした。 取得データをオンサイトで解析し、空間線量率分布マップを作成した。航空機モニタリングシ ステムを一まとまりにする緊急時モニタリング用ラックが有効に機能し、UH-60にシステムを 搭載完了するまで 30 分程度であった。本ラックを UH-60 の機体床に固定するためのポイント を確定させるまでに時間を要したため、固定ポイントをすぐに確定し搭載完了までの時間をよ り短縮できるよう、ラック搭載マニュアルを視覚的に分かりやすい形で整備する必要がある。 モニタリングについては、事前にヘリコプターパイロットと入念に打ち合わせを行うとともに、 フライト中にも密にコミュニケーションを取ることで、良質なモニタリングデータの取得に努 めた。データ解析については、航空機モニタリング専用の解析システムである AMS Total System が有効に機能し、データ解析に着手してから結果の共有まで、約15分程度であった。 しかしながら、UH-60に適用すべき解析パラメータとは異なる数値を適用した解析結果を報告 してしまう事象が発生した。本事象の再発を防止するため、適用する解析パラメータを視認で きるような機構を本システムに設ける必要がある。作成した空間線量率マップと本訓練の期間 中に取得した地上測定値を比較したところ、やや大きな乖離が見られる場合があった。現状で は UH-60 に適用できる数値パラメータが限られており、より正確な空間線量率マップを作成 できるよう、今後、本機体を用いて改めて一連の換算パラメータを取得し、その妥当性の検証 に取り組む必要がある。

・測定エリアの管制空域、空港等の特徴及び気候、地形等に関する特徴について

美浜・敦賀については、令和2年度 (2020年度) に航空機モニタリングを実施した際に本項 目についてまとめた¹⁷⁾。当該内容から特段の変更点はないため、本報告では割愛する。

Fig. 7-1 に伊方 (P1)から半径 80 km 圏内 (以下、伊方測定エリア)における管制空域に係る情報を円及び多角形の枠で示す。本報告では、資機材等の搬出入等の手続きに煩雑さが少なく、現地測定作業員の待機場所が使用できること等、利便性が高いことから、伊方測定エリアの拠点として広島へリポートを使用した。広島へリポートは伊方測定エリア外ではあるが、そのすぐ北方に位置しており、離陸してから測線に到達するまで多少のロスは生じるものの、測定の進捗に顕著な影響が出る程ではない。この他、伊方測定エリアの拠点候補として広島空港(A1)、松山空港(A2)及び大分空港(A3)があるが、いずれも資機材の搬出入に係る手続き等が煩雑であり、現地測定作業員の待機場所が確保できない等、利便性が比較的低いため、測定エリアの西部または東部をモニタリングする際の燃料給油地点として利用するのがよい。伊方測定エリア北部域にある米海兵隊岩国航空基地(A4)には軍民共用の岩国錦帯橋空港が併設されていることもあり、航空管制が特に厳格に行われている。当該航空基地の管制圏内を飛行する許可が下りるまでに比較的時間が掛かるため、事前調整には十分な時間的余裕をもって臨む必要がある。また、伊方測定エリア外ではあるが、北西部の測線の延長線上に位置する航空自衛隊防府北基地(A5)では定期的に飛行訓練が行われており、近辺を飛行する際には航空管制を

受ける可能性があることに留意する必要がある。伊方測定エリア中央部及び南部には民間訓練 /試験空域 (B1 及び B2) が広い範囲で設定されており、不定期で飛行訓練が実施されることが あるため、事前に当該空域の使用状況を確認するとともに、通過時には管制機関等とのコンタ クトを確実に実施する必要がある。

伊方測定エリアにおける気象の特徴について、気象庁のホームページ ⁵⁸⁾を参考に以下に記述する。伊方測定エリアの大部分は瀬戸内海式気候に区分され、梅雨時期を除いて年間の降水量は比較的少なく、晴天の日が多い傾向にあるが、春から梅雨時期にかけては瀬戸内海を中心に濃霧の(移流霧)発生が見られ、秋から初冬にかけては内陸部や盆地で濃霧(放射霧)の発生が見られる。瀬戸内海側と宇和海側とで気候は異なり、例えば、冬期には一般に北西の季節風が卓越するが、瀬戸内海側では中国山地が障壁となり季節風の影響を受けにくいのに対し、宇和海側では季節風が海門海峡を吹き抜けてくるため強風が吹くことがある。伊方測定エリアにおける通年の気象情報を総合すると、梅雨の明けた頃(平年では7月中旬以降)から、冬期に入る前までの12月の間が航空機モニタリングに適していると思われる。

伊方測定エリアにおける地形的な特徴として、愛媛県と高知県の県境付近には西日本で最 高峰の標高(1,982 m)を誇る石鎚山を筆頭に、標高1,500 m級の山々が東西50 kmに渡って連 峰を成す急峻な山岳地帯が広がっている。測線を東西方向に設定した場合、このような地形の 変化が激しいエリアにおいて対地高度を約300 m付近に維持して飛行するには、熟練したヘリ コプターパイロットを手配するとともに、本報告で用いた Bell 412 のようなパワーがあり上昇 力に余裕のある機種を航空機モニタリングに用いることが望ましい。

・原子力災害時における無人飛行機の運用技術開発について

原子力災害時等の緊急時モニタリングにおける、有人ヘリコプターを用いた航空機モニタ リングの代替技術として期待されている無人飛行機について運用技術開発を行った。2019 年 度に選定した無人飛行機 (Penguin C) について福島ロボットテストフィールドにて、計10回の フライト試験(総フライト時間約 930 分)を実施した。本試験には6時間に渡る長時間のフライ ト試験及び夜間想定フライトを含めた。全試験を予定通り完遂でき、システムの異常などは確 認されなかった。以上のことより、Penguin C のフライト性能に対する信頼性は高いものと考 えられる。次年度以降も引き続き、機体の運用を慣熟する試験を継続していく必要がある。ま た、放射線測定システムを搭載してフライト試験を実施した。当該システムの放射線検出器は、 放射性プルームによる機体の汚染とそれ以外の線源による計数率を弁別するのに資するため、 プラスチックシンチレータによりβ線、BGOによりγ線をそれぞれ測定できるよう、ホスウィ ッチ型検出器とした。フライト試験中、β線の計数率が不自然な変動を示すノイズ現象が見ら れたが、本現象は機体のエンジンを駆動させたときに生じる電磁ノイズや振動が原因と思われ る。本事象を防止するため、シールドメッシュによる被覆、グランド線の設置、インシュレー ターの設置等により可能な限りのノイズ対策を施したところ、ノイズ現象がある程度緩和され たが、完全に解消することはできなかった。本現象の根本的な原因は未だ解明できておらず、 解消に至らない場合、本検出器を無人航空機用の放射線測定システムに用いるべきでない。そ こで、ノイズ現象が解消されない場合に備えた代替案として、二つの異なる検出部を用いたマ ルチ検出システムを考案した。モンテカルロ計算コード PHITS により、本システムの放射性

プルームによる機体の汚染とそれ以外の線源による計数率を弁別する能力について評価した。 結果として、地表面の放射性核種からの計数率と、機体周辺の放射性核種からの計数率とに大 まかな弁別は可能であることが示唆された。しかしながら、機体周辺の放射性核種からの寄与 について、機体周辺に存在する放射性プルーム等からの寄与と、機体自体に付着している放射 性核種からの寄与とに詳細に弁別することは困難であるという課題が残された。本課題を解決 するために、マルチ検出システムの構成を再検討する必要がある。



Fig. 7-1 伊方周辺における管制空域に係る情報 A:空港及び航空基地、B:民間訓練/試験空域、P:原子力関連施設 (背景地図は、区分航空図 中国・四国((公社)日本航空機操縦士協会)を使用。)

謝辞

本調査研究は、原子力規制庁からの受託事業「令和 4 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、 株式会社静環検査センターの 20 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。ヘリコプターの運航は、朝日航洋株式会社が 行った。また、令和4年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングの実施にあ たり、航空自衛隊小牧基地救難教育隊の皆様にご協力を頂いた。無人航空機の運用技術開発に 係る試験の実施にあたり、株式会社 JDRONE から多大な協力を頂いた。ここに本事業に関与 された皆様に謹んで謝意を表します。

参考文献

- 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(ATOMOΣ),54(3),2012, pp.160-165.
- 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),2012, pp.137-140.
- 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), 2012, pp.7-11.
- 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, 髙村善英, 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 2014-012, 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, 石﨑梓, 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, 131p.
- 8) 眞田幸尚,森愛理,岩井毅行,瀬口栄作,松永祐樹,河端智樹,豊田政幸,飛田晋一朗,平賀祥 吾,佐藤義治,卜部嘉,石崎梓,嶋田和真,廣内淳,工藤保,平成28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-Technology 2017-034, 2017, 117p.
- 9) 眞田幸尚, 森愛理, 岩井毅行, 瀬口栄作, 松永祐樹, 河端智樹, 豊田政幸, 飛田晋一朗, 平賀祥 吾, 佐藤義治, 卜部嘉, 石崎梓, 嶋田和真, 廣内淳, 工藤保, 平成 28 年度緊急時対応技術適用の ためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2017-035, 2018, 69p.
- 10) 普天間章, 眞田幸尚, 石﨑梓, 岩井毅行, 瀬口栄作, 松永祐樹, 河端智樹, 豊田政幸, 飛田晋一 朗, 平賀 祥吾, 佐藤一彦, 佐藤義治, 卜部嘉, 嶋田和真, 森愛理, 廣内淳, 工藤保, 平成 29 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-Technology 2018-015, 2019, 120p.
- 11) 普天間章, 眞田幸尚, 岩井毅行, 瀬口栄作, 松永祐樹, 河端智樹, 豊田政幸, 飛田晋一朗, 平賀 祥吾, 佐藤一彦, 佐藤義治, 卜部嘉, 石崎梓, 嶋田和真, 森愛理, 廣内淳, 工藤保, 平成 29 年度 緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2018-016, 2019, 98p.
- 12) 普天間章, 眞田幸尚, 石﨑梓, 古宮友和, 岩井毅行, 瀬口栄作, 松永祐樹, 河端智樹, 萩野谷仁, 平賀 祥吾, 佐藤一彦, 佐藤義治, 卜部嘉, 嶋田和真, 森愛理, 廣内淳, 平岡大和, 工藤保, 平成 30

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-Technology 2019-016, 2019, 116p.

- 13) 普天間章, 眞田幸尚, 古宮友和, 岩井毅行, 瀬口栄作, 松永祐樹, 河端智樹, 萩野谷仁, 平賀祥 吾, 佐藤一彦, 佐藤義治, 卜部嘉, 石崎梓, 嶋田和真, 森愛理, 廣内淳, 平岡大和, 工藤保, 平成 30 年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2019-017, 2019, 95p.
- 14) 普天間章, 眞田幸尚, 石崎梓, 川崎義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 佐藤一彦, 萩野谷仁, 松永祐樹, 菊池陽, 廣内淳, 平岡大和, 卜部嘉, 工藤保, 令和元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-Technology 2020-018, 2021, 121p.
- 15) 普天間章, 眞田幸尚, 川崎義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 佐藤一彦, 萩野谷仁, 松永祐樹, 菊池陽, 石崎梓, 廣内淳, 平岡大和, 卜部嘉, 工藤保, 令和元年度緊急時対応技術適用のためのバック グラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2020-019, 2021, 128p.
- 16) 普天間章, 眞田幸尚, 石崎梓, 川崎義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 佐藤一彦, 萩野谷仁, 松永祐樹, 菊池陽, 嶋田和真, 外間智規, 平岡大和, 卜部嘉, 外川織彦, 安藤真樹, 工藤保, 令和2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-Technology 2021-029, 2022, 132p.
- 17) 普天間章, 眞田幸尚, 佐々木美雪, 川﨑義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 佐藤一彦, 萩野谷仁, 松永 祐樹, 菊池陽, 卜部嘉, 工藤保, 令和2年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航 空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2021-020, 2021, 138p.
- 18) 普天間章, 眞田幸尚, 長久保梓, 川崎義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 萩野谷仁, 松永祐樹, 圷雄一郎, 卜部嘉, 工藤保, 令和3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-Technology 2022-027, 2023, 148p.
- 19) 普天間章, 眞田幸尚, 佐々木美雪, 川崎義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 萩野谷仁, 松永祐樹, 圷雄 一郎, 外間智規, 平岡大和, 卜部嘉, 工藤保, 令和3年度緊急時対応技術適用のためのバック グラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2022-028, 2023, 127p.
- 20) 原子力防災会議幹事会,原子力災害対策マニュアル,平成24年10月19日制定(令和4年9月2日一部改訂).
- 21) 原子力規制委員会, 原子力災害対策指針, 平成 24 年 10 月 31 日制定 (令和 4 年 7 月 6 日一部 改正).
- 22) 湊進,日本における地表 γ線の空間線量率分布,地学雑誌,115,2006, pp.87-95.
- 23) 日本地質学会,日本の自然放射線量,
 http://www.geosociety.jp/uploads/fckeditor/hazard/2011/daishinsai/20110412imai/Radiation m2.gif (2023 年 3 月 1 日閲覧).
- 24) 眞田幸尚, 西澤幸康, 山田勉, 池田和隆, 松井雅士, 土田清文, 佐藤義治, 平山弘克, 高村善英, 西原克哉, 伊村光生, 石田睦司, 卜部嘉, 志風義明, 杉田武志, 近藤敦哉, 鳥居建男, 原子力発 電所事故後の無人ヘリコプターを用いた放射線測定, JAEA-Research 2013-049, 2014, 129p.
- 25) Sanada, Y., and Torii, T., Aerial radiation monitoring around the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant using an unmanned helicopter, J. Environ. Radioact., 139, 2015, pp.294-299.

- 26) Sanada, Y., Kondo, A., Sugita, T., Nishizawa, Y., Yuki, Y., Ikeda, K., Shoji, Y., Torii, T., Radiation monitoring using an unmanned helicopter in the evacuation zone around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Expl. Geophys., 45(1), 2014, pp.3-7.
- 27) 佐藤昌之,村岡浩治,穂積弘毅,眞田幸尚,山田勉,鳥居建男, Multiple Model Approach によ る構造化ロバスト制御器設計法を適用した放射線モニタリング無人固定翼機の飛行制御則 設計-福島県浪江町における放射線モニタリング飛行-,計測自動制御学会論文集,51(4), 2015, pp.215-225.
- UARMS 開発チーム, 無人飛行機による放射線モニタリングシステムの開発, Isotope News, (727), 2014, pp.30-34.
- 29) 眞田幸尚,鳥居建男,村岡浩次,福島原子力発電所事故後における無人機を用いた放射線モニタリング-UARMSの開発状況-,第53回飛行機シンポジウム講演論文集,2015,2A05.
- 30) 国土地理院,基盤地図情報ダウンロードサービス, https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php (2023 年 3 月 1 日閲覧).
- 31) Currie, L. A., Limits for qualitative detection and quantitative determination. Application to radiochemistry., Anal. Chem, 40(3), 1968, pp.586-593.
- 32) IAEA, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA-TECDOC-1363, 2003, pp.81-101.
- 33) 塩出志乃, 逆距離加重法によるネットワーク空間上での点補間に関する研究, Theory and Applications of GIS, 13(1), 2004, pp.33-41.
- 34) 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(2),
 2003, pp.203-213.
- 35) 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, 1998, pp.83-94.
- 36) Hirayama, H., Namito, Y., Bielajew, A. F., Wilderman, S. J., Nelson, W. R., The EGS5 Code System, SLAC-R-730 and KEK Report 2005-8, 2005, pp.20-132.
- 37) 産業技術総合研究所地質調査総合センター,20万分の1日本シームレス地質図2015年5月
 29日版, https://gbank.gsj.jp/seamless/(2023年3月1日閲覧).
- 38) 松浦浩久, 倉橋島及び柱島地域の地質, 地質調査所, 地域地質研究報告 5 万分の1 地質図幅 高知(13)第 25,26 号, 1997, 53p.
- 39) 東元定雄, 濡木輝一, 原郁夫, 佃栄吉, 中島隆, 岩国地域の地質, 地質調査所, 地域地質研究報告5万分の1地質図幅高知(13)第24号, 1983, 79p.
- 40) 八島隆一,浜口浩一,古火山の復元 松山市西部の第三紀火山岩類-,福島大学理科報告 37 号, 1986, pp.29-43.
- 41) 吉田武義,村田守,山路敦,石鎚コールドロンの形成と中新世テクトニクス, Mem. Geol. Soc.
 Japan, No.42, 1993, pp.297-349.
- 42) 寺岡易司,池田幸雄,鹿島愛彦,宇和島地域の地質,地質調査所,地域地質研究報告5万分の

1 地質図幅 高知(13) 第 77 号, 1986, 91p.

- 43) 原子力百科事典 ATOMICA, 天然の放射性核種, https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat detail 09-01-01-02.html (2023 年 3 月 1 日閲覧).
- 44) 産業技術総合研究所地質調査総合センター,海と陸の地球化学図, https://gbank.gsj.jp/geochemmap/ (2023 年 3 月 1 日閲覧).
- 45) Beck, H. L., DeCampo, J. and Gogolak, C., In situ Ge(Li) and NaI(T1) gamma-ray spectrometry, USAEC Report HASL-258, 1972.
- 46) 末吉俊幸, 最小絶対値法による回帰分析, 日本オペレーションズ・リサーチ学会論文, 40(2), 1997, pp.261-275.
- 47) 吉岡勝廣, 飯田孝夫, 大気中ラドン濃度の周期性変動の主要な影響因子 -海洋と陸地の違い -, 保健物理, 42(1), 2007, pp.53-62.
- 48) 藤波直人, 渡辺哲也, 前田高志, 荒木智徳, 山川和彦, 日本の気候区別空間線量率の年間最大 値の月別出現頻度, RADIOISOTOPES, 54, 2005, pp.569-573.
- 49) 永井英志,山澤弘実,森泉純,平尾茂一,冬季日本海側における高空間線量率事象の解析,保
 健物理,53(4),2018, pp.219-229.
- 50) 内閣府, 令和4年度原子力総合防災訓練 訓練実施要領, https://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/kunren/pdf/07_r4jissi.pdf (2023 年 3 月 1 日閲覧).
- 51) 国土地理院,地理院タイル一覧, https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html (2023 年 3 月 1 日閲覧).
- 52) 石崎梓, 眞田幸尚, 西澤幸康, 普天間章, 宗像 雅広, 平成 28 年度無人飛行機を用いた放射性 プルーム測定技術の確立, JAEA-Research 2017-012, 2018, 58p.
- 53) 眞田幸尚, 西澤幸康, 越智康太郎, 結城洋一, 石崎梓, 長田直之, 平成 29 年度無人飛行機を用いた放射性プルーム測定技術の確立, JAEA-Research 2018-009, 2019, 48p.
- 54) 眞田幸尚, 越智康太郎, 石﨑梓, 平成 30 年度無人飛行機を用いた放射性プルーム測定技術の 確立, JAEA-Research 2020-006, 2020, 60p.
- 55) UAV Factory Ltd., Penguin C Operator's Handbook V1.13, 2020.
- 56) UAV Factory Ltd., MEAN TIME BETWEEN FAILURES DATA COLLECTION, 2020.
- 57) Tatsuhiko Sato, Yosuke Iwamoto, Shintaro Hashimoto, Tatsuhiko Ogawa, Takuya Furuta, Shinichiro Abe, Takeshi Kai, Pi-En Tsai, Norihiro Matsuda, Hiroshi Iwase, Nobuhiro Shigyo, Lembit Sihver and Koji Niita, Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02, J. Nucl. Sci. Technol., 55(5-6), 2018, pp.684-690.
- 58) 気象庁ホームページ,愛媛県の気象特性, https://www.jma-net.go.jp/matsuyama/tokusei/kishou_tokusei.html (2023年3月1日閲覧).

This is a blank page.