

令和2年度
原子力規制庁 放射線対策委託費
(放射線安全規制研究戦略的推進事業費)

発災直後の面的な放射線モニタリング体制のための技術的研究

研究代表者：京都大学 谷垣 実

2021年3月19日

目次

1	概要	1
2	背景	2
3	研究目標	5
3.1	研究の内容	5
3.2	想定される活用・従来のモニタリング機器との関係	5
4	研究体制と遂行状況	8
4.1	実施体制	8
4.2	研究の年次計画	9
4.3	研究実施状況	9
4.4	研究成果の公表	10
5	可搬型モニタリングポスト	12
5.1	可搬型モニタリングポストのあらまし	12
5.1.1	全体の構成	12
5.1.2	放射線検出器	14
5.2	可搬型モニタリングポストの特性試験	15
5.2.1	線量率直線性試験	15
5.2.2	方向特性試験	15
5.2.3	エネルギー特性試験	16
5.3	可搬型モニタリングポストの実証試験	22
5.4	可搬型モニタリングポストに関するまとめ	24
6	自律型データネットワークの構築技術	25
6.1	ネットワーク技術の動向	25
6.2	主な LPWA 規格	26
6.3	ZETA 規格のあらまし	29
6.4	ZETA による実証試験	29
6.4.1	長期的な通信試験	31
6.4.2	実践的な面的展開の提案とそれに基づく通信試験	34
6.5	自律型ネットワークのまとめ	38
7	超小型 KURAMA-II	42
7.1	超小型 KURAMA-II のあらましと	42
7.2	超小型 KURAMA-II に実装する検出器の製作	43
7.3	超小型 KURAMA-II 試作機の製作	44
7.4	Spresense のソフトウェア改修	47

7.5	超小型 KURAMA-II の実証試験	50
7.6	超小型 KURAMA-II のまとめ	50
8	発災直後の面的な放射線モニタリングの一提案	53
9	謝辞	54

1 概要

大規模原子力災害時においては、 ^{131}I のような短寿命核種を含む放射性物質による広域汚染と多数の汚染・傷病者が発生する。そのため、発災直後から迅速かつ面的なモニタリングにより汚染等の分布状況を的確に把握することで、優先度の高い集団や地域から防護措置や被曝医療のリソースを投入する必要がある。しかしながら、従来のモニタリング資機材では、たとえば重すぎて人による携行ができず特殊な電源規格により事実上商用電源なしには継続稼働が困難な可搬型モニタリングポストや、線量率の計測のみで短寿命核種の情報を取得できないサーベイメータなどの課題があり、その実現は困難である。

そこで、東電福島第一原子力発電所事故で実績ある KURAMA-II の技術を活用し、発災直後から迅速かつ面的なモニタリングにより汚染等の分布状況を的確に把握する手段を提供することを目指す。

具体的には、小型軽量で人が携行でき連続稼働時間が長くスペクトルデータの取得可能な可搬モニタリングポスト、シングルボードコンピュータベースのモバイルバッテリーで動作する超小型 KURAMA-II を開発する。また、同時に IoT 分野の活用と相まって技術進展の著しい LPWA (Low Power Wide Area network) による自律的に構成されるメッシュネットワークを活用したデータ通信方法を確立し、大規模災害時の面的なモニタリング展開の困難の一つである通信手段の確保の問題の解決を図る。この研究で開発したモニタリングポストや超小型 KURAMA-II、LPWA によるデータ通信方法を組み合わせ、これまで整備されてきたモニタリング体制との連携により、発災直後から迅速かつ面的なモニタリングにより汚染等の分布状況を的確に把握することができるようになる。さらに、実環境や校正施設を活用してこれらの技術要素の特性を評価し、それらを踏まえて災害時の面的なモニタリングのあり方に関する検討を行う。また、超小型 KURAMA-II については、その製作方法や回路図、アルゴリズムの可能な限りの開示をおこない、国民の原子力防災への関心や理解を深めることを目指す。

本研究の成果を活用することで、発災直後から迅速かつ容易に面的なモニタリングを展開することが可能となり、防護措置や被曝医療のリソース投入が最適化されるようになり、国民の安全と安心に大きく貢献することができる。

2 背景

東電福島第一原子力発電所事故のような大規模災害では放射性物質による広域の汚染と大量の汚染・傷病者が発生し、過酷な環境下で限られた人や資機材により状況を把握し必要な防護措置や被ばく医療処置をとる困難な状況となる [1]。特に ^{131}I 等の短寿命核種を考えれば、発災後 10 日間程度の間には優先度を判断しながら迅速かつ適切な防護措置や被ばく医療処置が必要で、その判断基準として面的な汚染状況等の分布把握は必須である。

これまでもその重要性は十分認識されており、緊急時環境線量情報予測システム (SPEEDI)[2] で、放射性物質の環境中への放出量及び事故の起きた施設周辺の気象観測データから大気中での放射性物質の拡散挙動を計算し、放射性物質の空気中濃度及び人の被曝線量が予測されることとなっていた。また、予め最適化された定点観測のための固定式モニタリングポスト、機動的な展開を目的とした可搬型モニタリングポストやモニタリングカー、サーベイメータ等の整備が進められ、SPEEDI の予測の確認や実際の状況とのズレがあった場合の把握や必要な修正を行うことで、的確かつ信頼性の高い放射性物質の空気中濃度及び人の被曝線量の分布状況が提供されることとなっていた。この時の各種測定器は堅牢性や信頼性を確保するべく入念に検討・用意され、電源の多重化や地上回線および衛星回線で多重化されたネットワークで測定やデータ収集の継続性を確保することとなっていた。

しかしながら、このような万全の体制が裏目に出たことは否めない。東電福島第一原子力発電所事故では、東日本大震災により電力や通信、交通のインフラに甚大な被害が発生した。測定やデータ収集の継続性の前提となるネットワークや電源、移手段などのインフラ群が深刻な機能不全に陥り、事故前に想定していたような放出源情報の収集や分布状況確認のためのモニタリング活動が展開できなかった。たとえば、事故直後における ^{131}I 他の短寿命核種等の分布については、事故直後からのデータを基に放出方向や量の評価が報告されている [3] が、住民の被曝量推定などに必要となる地域における詳細な分布については 2011 年 6 月の文科省が実施した調査まで待つこととなり [4]、この測定機会の損失で住民の甲状腺被曝量の推定などに大きな禍根を残すこととなった。

この東電福島第一原子力発電所事故での反省を踏まえ、2014 年には緊急時においても積極的なモニタリング活動を展開して実測データを収集して対応を進める方針が示された [5]。緊急時には可搬型モニタリングポスト、モニタリングカー、サーベイメータなどが機動的に展開されることとなっており (図 1)、これらのモニタリング機器やその運用の方法が重要な課題となっている。

この体制が実際に試されることとなったのが、2019 年の北海道胆振東部地震において発生した北海道全域の停電 [6] である。この時、固定モニタリングポスト 11 局が停電後無停電電源により測定を継続したものの 3 ~ 4 時間で測定を停止した [7]。またこの地震による停電は単なる電力喪失だけでなく、地上固定回線の交換局や携帯回線の基地局の非常用電源の枯渇も発生させており、道内の一部の地域ではネットワークの喪失が実際に発生した。幸いにもモニタリングポストのデータ収集への影響はなかったものの、復電に時間を要した場合モニタリングの継続に重大な支障をきたしかねない状況であった。

このような問題がある背景には、従来の可搬型モニタリングポストは高価であり重量が大きく運搬が困難であること、また特殊なバッテリーを装備して事実上商用電源前提の運用となってしまうと迅速で機動的な運用ができないこと、モニタリングポストに装備される通信回線は通常固定回線か携帯回線単独で多重化が進んでいないこと、また多重化されている場合でもバックアップ回線は衛星回線であり、通信確立のための設置条件がシビアなことに加えて衛星の回線容量による他の緊急通信との輻輳という問題がある。さらに規制



図1 既存のモニタリング機器の位置付け。発災時には可搬型モニタリングポスト、モニタリングカー、サーベイメータが機動的に展開されることになっている。

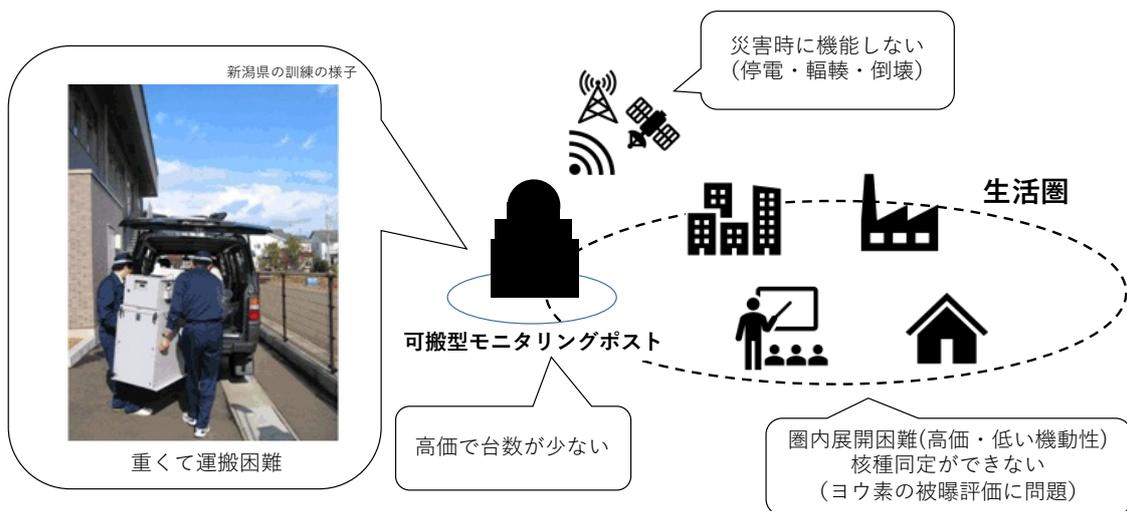


図2 既存のモニタリング体制の問題点

事務所のサーベイメータ等の資機材は空間線量率測定に最適化されており、 ^{131}I のような短寿命核種情報をリアルタイムに収集することができないことが挙げられる(図2)。

京都大学複合原子力科学研究所では、東電福島第一原子力発電所事故以降 GPS 連動型放射線自動計測システム KURAMA[8] とその発展系である KURAMA-II[9] を開発している。この KURAMA/KURAMA-II は操作のほとんど不要な端末を自動車等に搭載して対象地域に大規模に展開し、これらからのデータをクラウド経由でリアルタイムに収集するシステムで、東電福島第一原子力発電所の事故における機動的かつ柔軟な面的モニタリングの実現を目指したものである。特に KURAMA-II は、完全自動測定や CsI(Tl) 検出器によるスペクトルデータの取得も実現し、2011年6月以降現在まで福島県を中心とする東日本一帯における大規模な走行サーベイ調査や福島県内の路線バスによる連続的な生活圏モニタリングなどで多数の調査活動での実績を通じ、その能力と信頼性が高く評価されているシステムである。

この KURAMA-II の能力は現在の発災直後のモニタリングの枠組みの欠点を補うものであり、KURAMA-II の様々な成果や知見を元に発災直後のモニタリング機器や手法を開発することで、緊急時のモニタリング活動の質を向上し防護措置や被曝医療のリソースの的確な投入が実現できると考えられる。

3 研究目標

3.1 研究の内容

東電福島第一原子力発電所事故のような大規模原子力災害時における防護措置や被曝医療のリソースの投入と対応には、詳細かつ面的な放射線モニタリングの結果に基づく確かな判断が必要となる。そこで、想定外事象下でも迅速かつ面的に展開でき、線量率やヨウ素 131 のような短寿命核種に関する詳細なモニタリングが可能な体制を実現するべく、以下のようなモニタリング技術開発に取り組む（図 3）。

人が携行可能な可搬モニタリングポストの開発

東電福島第一原子力発電所の事故後のモニタリング活動で高い信頼性と実績を誇る KURAMA-II をベースに、人が携行可能な小型軽量で 10 日間程度稼働でき、線量率だけでなくスペクトルデータの取得も可能な可搬モニタリングポストを開発し、その性能評価を行うとともに運用方法についての検討を行う。

自律型データネットワークの構築技術の開発

近年技術革新の著しい LPWA(Low Power Wide Area Network) 技術の動向について調査し、緊急時のモニタリングポスト等を結ぶために利用可能な LPWA 規格の有力候補を選定し、実証試験を行って運用方法について検討するとともに、可搬型モニタリングポストや超小型 KURAMA への実装を行う。

超小型 KURAMA-II の開発

緊急時の機動性や面密度の確保を極限まで追求した、低消費電力・手のひらサイズかつ線量率およびスペクトルデータの取得も可能で、従来のサーベイメータ等に比べて十分安価な超小型 KURAMA-II を開発する。近年の IoT 技術の進展により低価格で高性能なシングルボードコンピュータが数多く登場していることから、既存の KURAMA-II の成果をこのようなシングルボードコンピュータに移植する。同時に従来の KURAMA-II で採用する CsI 検出器と同等の放射線計測特性を持ちつつもシングルボードに最適化することでコストを抑えた CsI 検出器を開発して実装し、上の自律型ネットワーク等と組み合わせる。超小型 KURAMA-II については、ソフトウェアのオープンソース化、回路図の公開も検討するなど、製作に関する情報を可能な範囲で広く公開して国民に活用してもらうことを目指す。

3.2 想定される活用・従来のモニタリング機器との関係

従来整備されてきたモニタリング機器は、機動性や電源や通信が喪失した際のデータ収集の継続性等について問題があるものの、機器自体の堅牢性や信頼性は高い。今回の研究で開発される各技術により従来のモニタリング機器を完全に置き換えるのではなく、従来の可搬型モニタリングポスト等と協調しながら機動性や測定地点数などを補い、活動に大きな制約が発生する緊急時においても迅速かつ面的にきめ細かな線量率やスペクトルデータの収集を実現する。このようにして測定機会の損失を最小限に食い止めつつ、この後に計画される本格的なモニタリング活動までのリードタイムを確保することができる（図 4）。

原子力災害で特に重要な発災直後における放射線モニタリングについて、従来のモニタリングの枠組みを補完する技術や手法が提供され、特に短寿命核種等の測定機会の損失を最小限に食い止めることができる。例えば周辺住民のヨウ素被曝量については、発災直後の迅速かつ面的なモニタリングが必須であり、東電事故でも禍根の残るところとなっている。今回整備する可搬型モニタリングポスト型と超小型の KURAMA-II のスペ

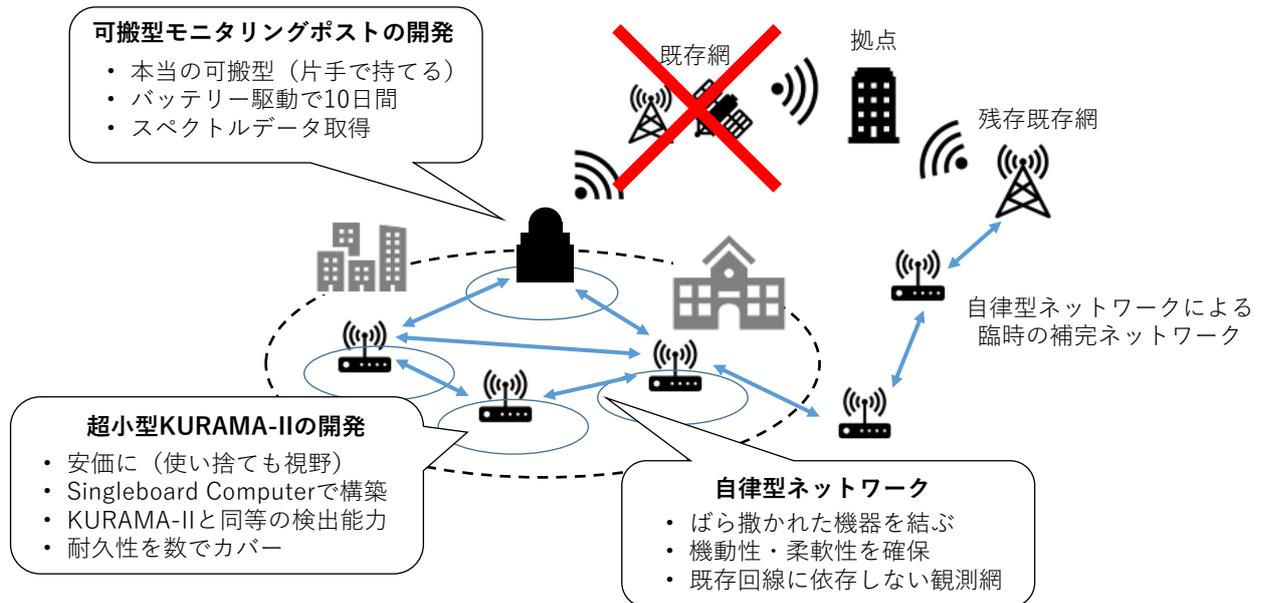


図3 今回の研究目標。KURAMA-IIの開発成果をもとに、緊急時にも容易に展開できる高い機動性を持ったモニタリング機器とそれらを結ぶ高い柔軟性を持った自律型ネットワークを開発する。

クトルデータの収集機能は、従来の可搬型モニタリングポストやサーベイメータでは得られなかった放出各種に関する情報を与えるものであり、信頼性は高いものの面的な展開の困難な試料サンプリングによる精密測定を補完し、対象地域内の事故由来放射性核種の分布状況や住民の被曝状況の把握の上で有効なツールとなるものである。

低廉な超小型 KURAMA-II は放射線教育の教材としても有効と考えられる。そこで、アルゴリズムや回路図、製作方法などを公開し、放射線教育の教材や教育方法の研究など国民の放射線やモニタリング活動への関

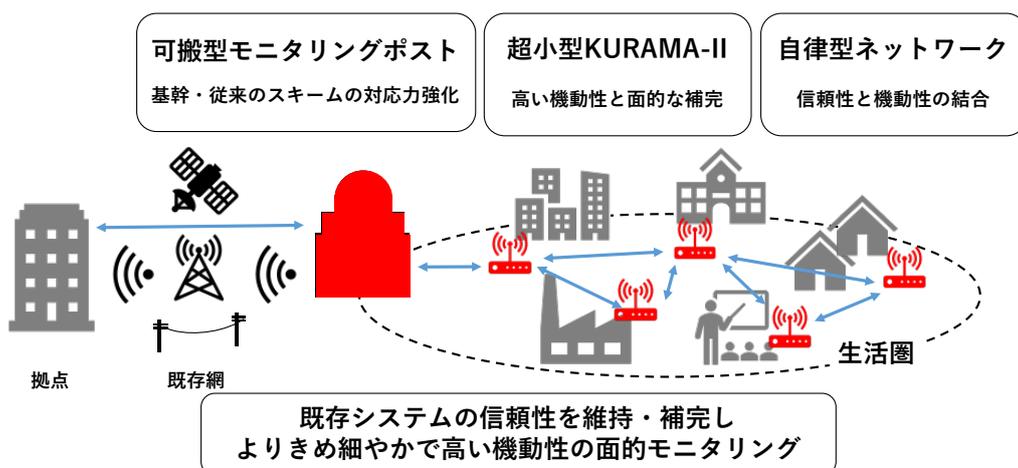


図4 今回の研究成果と従来のモニタリングの関係。既存のモニタリング体制の持つ問題点や弱点を補完するとともに、緊急時におけるモニタリングの選択肢を広げるものである。

心や理解を深め、公的機関の実施するモニタリング活動の妥当性や合理性への理解や信頼の醸成に役立つ。

4 研究体制と遂行状況

4.1 実施体制

令和元年度の研究実施体制は谷垣実（京都大学・助教）のもと、以下の研究協力者と研究参加者によって実施された（表 1, 2, 図 5）。研究協力者と研究参加者はこれまで KURAMA-II 関連の研究開発に従事してきた実績のある者から構成されている。令和 2 年度には、製作した可搬型モニタリングポストの性能評価と LPWA ネットワークの実証試験のための新たな研究協力者が参加している。

表 1 研究協力者

氏名	参加内容	所属機関	所属機関での職名
花井浩之	ワンボードコンピュータプログラミング ネットワークやクラウド構築・維持管理 コンピュータプログラミング	株式会社 S2 ファクトリー	代表取締役
松浦隆弘	可搬型モニタリングポスト他の 試作機的设计・製作	株式会社松浦電弘社	代表取締役社長
吉田忠義	可搬型モニタリングポストの 照射試験	日本原子力研究開発機構	マネージャー
星勝也	可搬型モニタリングポストの 照射試験	日本原子力研究開発機構	技術員
田中孝典	LPWA ネットワークの実証試験	島根県原子力環境センター	職員

表 2 研究参加者

氏名	参加内容	所属機関	所属機関での職名
奥村良	各種試作機の開発・調整および現地試験補助	京都大学 複合原子力科学研究所	技術職員
吉永尚生	各種試作機の開発・調整および現地試験補助	京都大学 複合原子力科学研究所	技術職員
吉野泰史	各種試作機の開発・調整および現地試験補助	京都大学 複合原子力科学研究所	技術職員

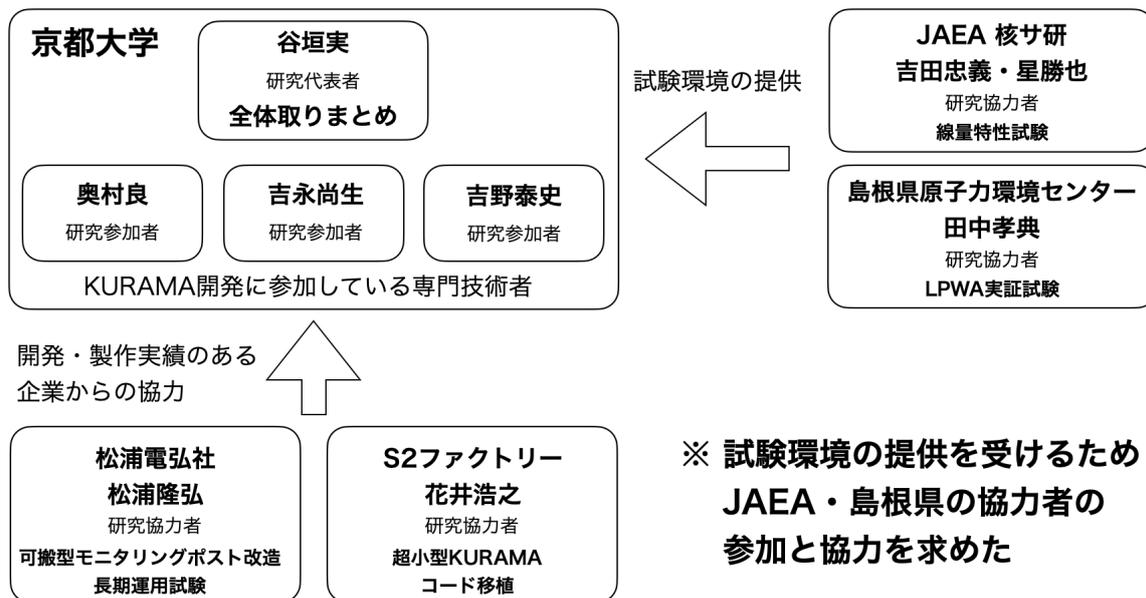


図5 研究体制図

4.2 研究の年次計画

本研究は2ヵ年計画で取り組む研究である。初年度の実績である開発済みの可搬型モニタリングポスト、本年度は可搬型モニタリングポストの開発、自律型ネットワークの検証、超小型 KURAMA-II の開発の完了が目標となる。しかし新型コロナ流行とそれに伴う緊急事態宣言とそれに伴う各種自粛要請が支障となり、試作や動作試験、現地試験などが当初計画通り進められず、内容を精査して実質的な目標達成を目指さざるを得なくなった。そこで、可搬型モニタリングポストは JAEA 校正施設の照射試験による性能評価の実施と、石川県内に試験場所を確保して屋外における長期連用試験を行い実用的な完成度を確保することとした。自律型 LPWA ネットワークでは、島根県原子力環境センターの支援を受け、島根原発周辺での短期及び長期の試験用通信網を構築、既設固定モニタリングポスト程度の密度での安定かつ機動的な通信網の運用を確認することとした。超小型 KURAMA-II は検出器の試作検証及び改良、シングルボードコンピュータのファームウェア改良などを進め、本事業で完成させた実証試験機数台を島根県に構築した試験用通信網に接続して実証試験を行うこととした。

4.3 研究実施状況

今年度は新型コロナ感染拡大に伴う緊急事態宣言や各種移動規制により、概ね第一四半期～第二四半期は実証試験等を中心に事業進捗が見込めない状況であったが、随時可能な範囲での作業や試験準備を進めておくことで、影響を最小限に食い止めた。

実施状況については、原子力規制庁のプログラムオフィサー (PO) およびプログラムオフィサー補佐 (PO 補佐) へ適時メールでの報告を行って指導と助言を受けた。また、2020年9月に PO 補佐による石川県での実証試験の状況視察を受け、事業や経費執行状況の確認および事業遂行の助言を受けた。

研究代表者の所属する京都大学複合原子力科学研究所でも、12月に所長による研究進捗状況の確認が行わ

れた。また研究所の財務掛および契約管理掛とも緊密に連絡を取り、経費の執行状況の確認と執行方法や調達した物品等の管理、事務手続きに関する確認や指導を受けた。研究代表者の所属する研究室においても、所属研究室の教授による研究進捗状況や研究費の執行状況の掌握と必要な指導や助言を受けた。

実施項目	担当者* (所属機関)	令和元年度				令和2年度			
		第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期
目標：KURAMA-II をベースにした小型軽量なモニタリング機器の開発と災害時の運用方法の確立									
自律型可搬モニタリングポストの開発	谷垣実(京都大学) 松浦隆弘(松浦電弘社)	基本設計		製作		現地試験(季節ごとに2週間程度)および各種特性試験			
						現地試験・特性試験に基づく不具合修正・最適化作業			
自律型ネットワークの構築技術の研究	谷垣実(京都大学) 奥村良(京都大学)	実施体制構築		各種通信規格の調査		試験用端末試作		ネットワーク単独試験	
						ネットワーク試験等のための環境整備・試験内容検討		モニタリングポスト等との組み合わせ試験	
超小型 KURAMA-II の開発	谷垣実(京都大学) 花井浩之(S2ファクトリー) 奥村良(京都大学)	実施体制構築		KURAMA-II ソフトウェア移植作業		KURAMA-II ソフトウェア最適化作業・シングルボードコンピュータ改善作業		超小型 KURAMA-II 単体/組合せ試験	
						簡素で廉価な CsI 検出器の試作及び改良作業			
上記開発研究に使用する関連計測技術の調査、研究開発における成果発表および取りまとめ	谷垣実(京都大学)	ICALEPCS2019 に参加し、計測制御技術の調査及び進捗状況発表				IRPA 15 で計測制御技術の調査及び進捗状況発表			
						超小型 KURAMA-II の製作方法の公開方法について検討			
						結果取りまとめ論文執筆			

図6 研究の年次計画。新型コロナウイルス感染拡大に伴う緊急事態宣言や各種移動規制により、概ね第一四半期～第二四半期は実証試験等を中心に事業進捗が見込めない状況であった。

4.4 研究成果の公表

本年度の研究成果については、随時国内外の学会等での発表を行なった。国際会議が1件、国内学会・研究会が3件である。

国際会議での発表

M. Tanigaki, "CURRENT STATUS OF KURAMA-II", 15th International Congress of the International Radiation Protection Association (IRPA 15), Seoul, Korea (オンライン開催), 18-19 Jan.

2021.

学会発表

谷垣 実, “KURAMA-II の開発の現状”, 日本保健物理学会 53 回研究発表会, オンライン開催, 2019 年 6 月 29 日-7 月 31 日

学会発表

谷垣 実, “福島における放射性物質分布調査 (2) KURAMA-II の開発の現状”, 日本原子力学会 2020 年秋の大会, オンライン開催, 2020 年 9 月 16-18 日

研究会講演

谷垣 実, “KURAMA の現状”, 第 8 回「原発事故被災地域における放射線量マッピングシステムの技術開発・運用とデータ解析に関する研究会」および第 440 回生存圏研究所シンポジウム「第 10 回東日本大震災以降の福島県の現状及び支援の取り組みについて」(合同開催), ザ・セレクトン福島, ホテルグランヴィア京都およびオンライン開催, 2020 年 11 月 30 日-12 月 1 日

5 可搬型モニタリングポスト

5.1 可搬型モニタリングポストのあらまし

5.1.1 全体の構成

今回の可搬型モニタリングポストの機器構成図を図7に示す。測定部分については車載型 KURAMA-II[9]の構成を踏襲していて、コントローラとなる組み込みコンピュータに検出器、GPS、通信モジュールが接続された形となっている。コントローラとしては、National Instruments 社の組み込みコントローラ CompactRIO シリーズ [10] の cRIO-9064 を採用した。CompactRIO は高性能な CPU と FPGA と拡張スロットが小型で堅牢な筐体を実装されたコントローラである。OS として NI Linux Realtime を搭載しており、グラフィカルなプログラミング言語である LabVIEW で簡単に高度な機器制御のソフトウェアを開発することができる。CompactRIO は機器組み込みや劣悪な環境を想定して高い耐環境性や堅牢性を備えていることが特徴で、屋外の厳しい環境での使用が想定される可搬型モニタリングポストでの使用に適している。

この CompactRIO には GPS 受信機と放射線検出器が USB バスで接続されている。C12137 からは 100 ms ごとに波高データが送られ、これを線量率に換算したり、受信機からの時刻及び測位情報でタグづけし、線量率データおよびスペクトルデータとして LTE モジュールからサーバに送信するとともに、データを内部の不揮発メモリで保持する。

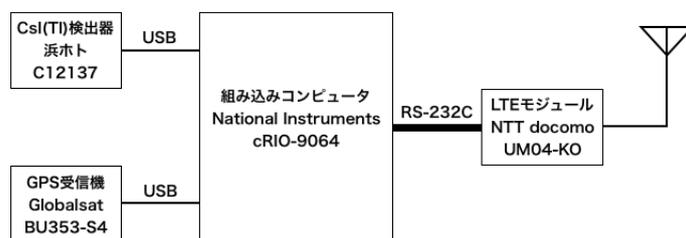


図7 可搬型モニタリングポストのブロックダイアグラム

取得したデータの送信のための通信には従来の KURAMA-II は SEA 社の 3G/GPS モジュールを使用していたが、可搬型モニタリングポストでは長期間の稼働が必要なことから、より消費電力の少ない組み込み機器用 LTE モジュールを採用した。この組み込み機器用 LTE モジュールは RS-232C 接続で AT コマンド制御で

表3 主な仕様

電源	12 V DC
重量	約 4 kg
寸法	280 mm × 150 mm × 300 mm (足および取手を含まず)
検出器	C12137 (浜松ホトニクス)
データ通信	TCP/IP over LTE

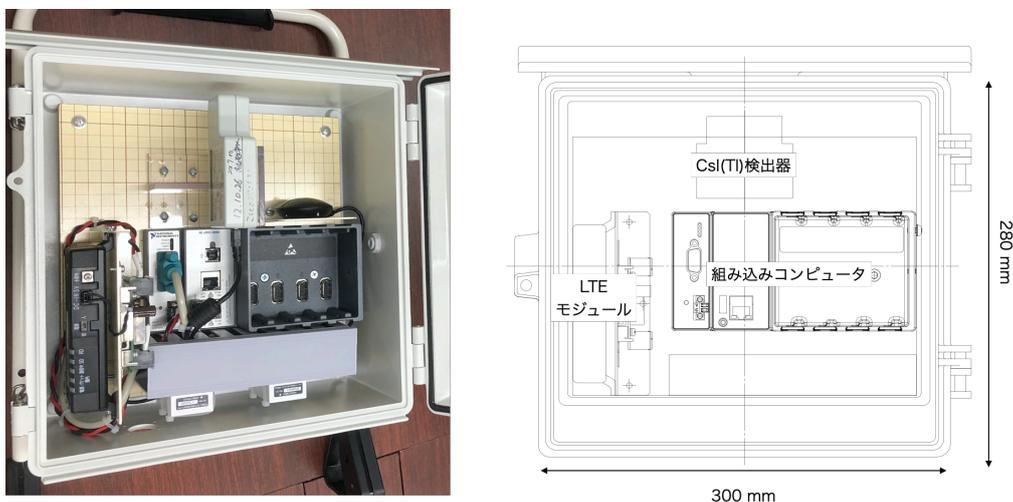


図8 今回開発した可搬型モニタリングポストの内部の様子。

使用するが、自律型ネットワークのモジュールでは一般的にシリアル接続で AT コマンド制御による通信が行われるため、これらのネットワークを使用する際の対応が容易になるという利点もある。

前年度の研究では、従来の KURAMA-II が 550 Wh の蓄電池で 20 時間程度の稼働時間だったところを、通信モジュールの低消費電力化により同容量の蓄電池で 55 時間まで伸ばすことに成功した。今年度はソフトウェアの最適化による消費電力の低減を図った。そして屋外設置のままでバッテリーによる連続稼働試験も行い、1000 Wh 程度の携帯型リチウムイオンバッテリーで約 1 週間の稼働を実現した。なお、ここまで LTE 通信は連続でおこなっている。そのため通信を一定時間間隔で行うことにより、さらなる消費電力低減が見込める。

可搬型モニタリングポストでは耐環境性も問題とされ、屋外での風雨に耐えられる必要がある。そこで筐体には屋外設置の分電盤収納に使われる防水の樹脂ボックスを採用しているが、令和元年度の試験結果を踏まえ、より防水性の高い筐体を採用した。また、内部の機器配置では検出器の方向依存性を最小限に抑えるため検出器の下側に機材を配置することとした (図 8)。KURAMA-II を持ち運びや設置しやすさを考慮してスタンドを装着しており、従来のモニタリングポストに比べて著しい小型軽量化を達成している。

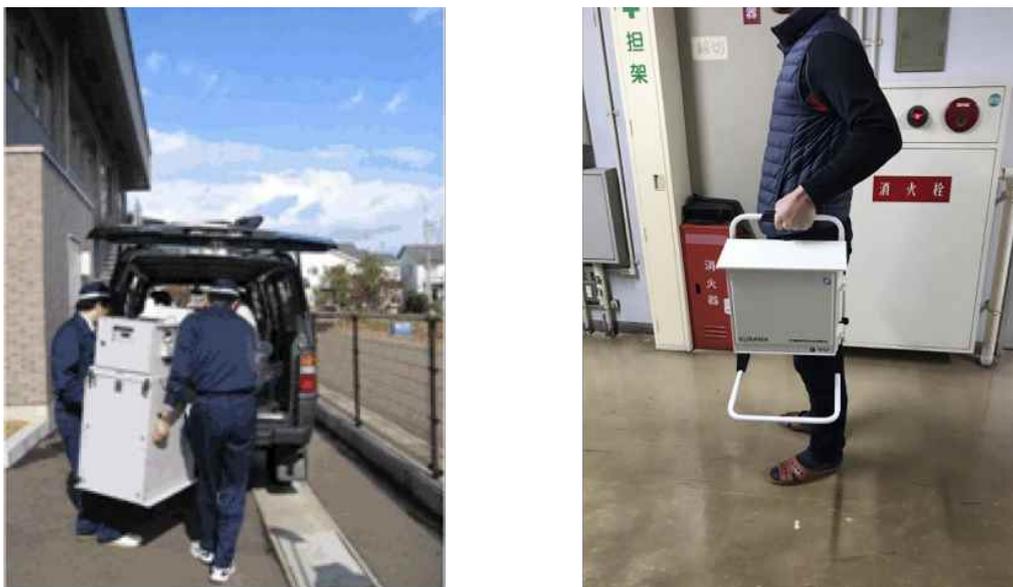


図9 (左) 従来の可搬型モニタリングポストの運搬の様子(新潟県 原子力防災訓練 Web ページより [13])
 (右) 今回開発した可搬型モニタリングポスト試作機。片手で容易に運べる小型軽量化を実現している。

5.1.2 放射線検出器

放射線検出器に CsI(Tl) 検出器である浜松ホトニクス C12137 シリーズ [11] を採用した。この検出器は CsI(Tl) シンチレータと MPPC (multi-pixel photon counter) を内蔵した γ 線検出器である。MPPC は電子雪崩による信号増倍効果を持つ APD(Avalanche Photo Diode) を面的に配列した受光素子で、高い光検出効率と信号対ノイズ比を実現した素子である。シンチレーション光の検出に MPPC を採用したことで、大型で機械的強度の低い光電子増倍管が不要となり、また MPPC のバイアス電圧も数十 V で良いことから大幅な小型軽量化と耐久性の向上に成功し、信号処理回路や AD 変換回路までがコンパクトな筐体に収められている。ADC で変換された波高データは内蔵マイコンにより USB で 100 ms ごとに出力され、電源供給も USB バスパワーで行われる。C12137 シリーズの内部構成図を図 10 に示す。

C12137 シリーズは目的に応じて $3.3 \text{ cm}^3 \sim 240 \text{ cm}^3$ の結晶サイズのものが用意されているが、結晶サイズにかかわらず電気的には完全互換であり、同一ソフトウェアで検出器からの波高データを処理することができる。KURAMA-II では周辺線量当量率等を G(E) 関数法で算出している [12] が、この C12137 シリーズの互換性により、結晶に応じた G(E) 関数に入れ替えるだけで同一のソフトウェアのまま様々な目的に応じた測定が可能になる。

さらに KURAMA-II では、使用する C12137 の内蔵マイコンのアルゴリズムに京都大学と浜松ホトニクスで共同開発したアルゴリズムを実装した、いわゆる高計数率対応タイプのもを採用し、一般に市販されている C12137 シリーズで発生する内部マイコンの処理の遅延に伴う数え落としを防いでいる。この数え落としは、実環境中での線量率測定に影響を与える。もともと無機シンチレータは原子番号の大きな元素で構成されているが、実環境では散乱などで発生する低エネルギー成分の寄与も大きい。その結果シンチレータのカウント数あたりの線量率への寄与の小さい低エネルギー成分の計数が高くなり、従来の C12137 では線量率が低いのに数え落としが発生することがあった。このため、浜ホトからも一般向け製品において「低エネルギー放射

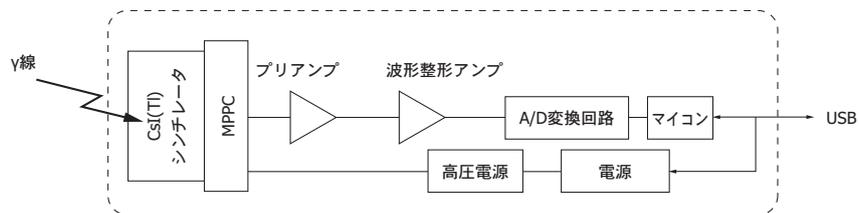


図 10 C12137 の内部構成図 [11]。MPPC からの出力信号をプリアンプと波形整形アンプで整形した後 AD 変換し、得られた波高データをマイコンが USB Raw 通信で外部に出力する。内部の回路は MPPC 用高圧電源も含めすべて USB バスパワーで賄われる。

線が支配的な環境放射線を検出する場合、最大測定値が $1/3 \sim 1/2$ 程度になります」との注意喚起が行われている [11]。京大と浜ホトが開発したアルゴリズムを採用した高計数率対応タイプではこの欠点が克服されている。この結果、一般向け C12137 でみられた実環境での数え落としがなくなっただけでなく、ダイナミックレンジの大幅な拡大を実現している (図 11)。今回の可搬型モニタリングポストでもこのアルゴリズムを採用した C12137 を使用する。

5.2 可搬型モニタリングポストの特性試験

製作したモニタリングポストの性能評価のため、JAEA 核燃料サイクル工学研究所計量機器校正施設を利用して直線性試験、方向性試験、エネルギー特性試験を行ない、環境 γ 線モニタ JIS Z4325 との比較を行った。

5.2.1 線量率直線性試験

計量機器校正施設 照射室 A のコリメート型 ^{137}Cs 線源 (555 MBq, 11.1GBq) を用い、 $2 \mu\text{Sv/h}$ 10 mSv/h 程度の範囲で照射を行い、その時の可搬型モニタリングポストの指示値を取得し相関を調べた。測定時間は各点 40 50 秒である。可搬型モニタリングポストは 1 秒間隔で測定を行うため、この測定時間中の測定値の平均を指示値、測定値の分散の平方根を誤差とした。またバックグラウンドについては線量率の分布を少数統計の連続値の分布であるガンマ分布でフィットして期待値と分散を求めた。可搬型モニタリングポスト位置における周辺線量線量率 $H^*(10)$ と指示値の関係を図 12 に示す。

概ね 2 mSv/h 程度までは JIS Z4325 の定める環境 γ 線モニタの指示値の許容値内に収まっていることが確認された。これは従来の高計数率化 C12137 に期待される能力通りの結果である。

5.2.2 方向特性試験

直線性試験と同じく計量機器校正施設 照射室 A において、コリメート型 ^{137}Cs 線源 (11.1GBq) 線源から 4 m の距離に可搬型モニタリングポストを置き、 15 度ずつ回転させながら水平方向および垂直方向の方向特性を測定した。設置状況を図 13, 14 に示す。この試験において可搬型モニタリングポスト位置の周辺線量当量率 $H^*(10)$ は約 $60 \mu\text{Sv/h}$ であった。

なお、垂直面内の照射にあたっては、可搬型モニタリングポストの金属部品や機材の内部構造から考えて異方向性が最も大きくなる扉面の法線が鉛直になる置き方とした。方向依存性の測定結果を図 15 に示す。一点あたりの測定時間および指示値、誤差、バックグラウンドの評価については直線性試験の時と同じである。JIS Z4325 では垂直面内での方向依存性として ± 120 度の範囲で $\pm 20\%$ (^{137}Cs 照射時) と規定されているが、

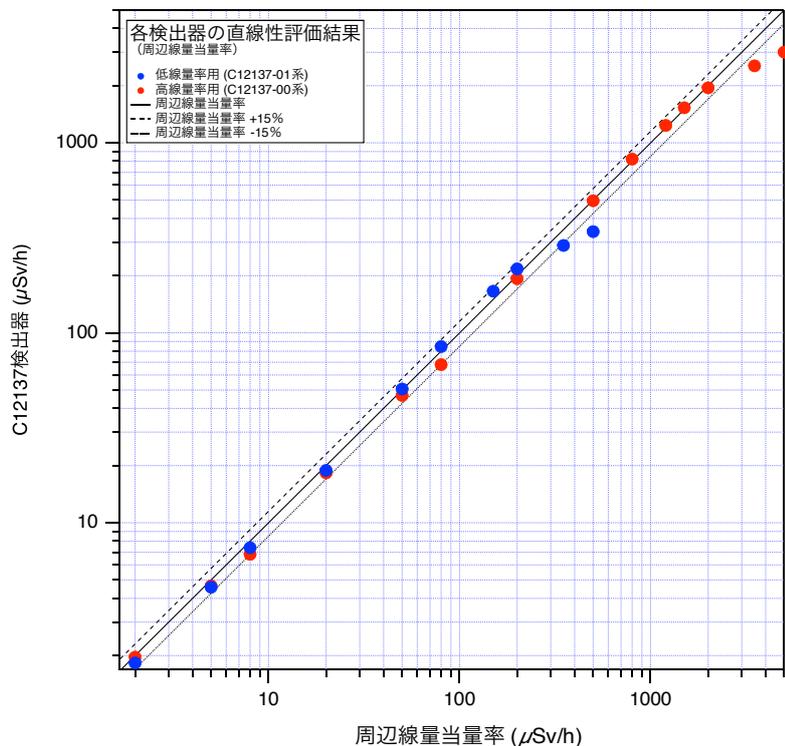


図 11 改良型 C12137 シリーズのダイナミックレンジ。JAEA 核燃料サイクル工学研究所の所有する ^{137}Cs 線源による校正場で照射した。市販される C12137-00 は公称 $100 \mu\text{Sv/h}$ まで、C12137-01 は公称 $10 \mu\text{Sv/h}$ まで計測可能となっているが、アルゴリズム改良で大幅に測定可能範囲が広がっており、C12137-00 タイプでは 2 mSv/h まで到達する。

今回の結果はそれを満たすものとなっている。

5.2.3 エネルギー特性試験

可搬型モニタリングポストについて ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{60}Co の各線源をつかってエネルギー特性試験を行った。計量機器校正施設 照射室 B において、可搬型モニタリングポストの結晶中心から前方 30 cm の位置に線源 (1 m 距離で $0.02 \sim 1 \mu\text{Sv/h}$ 程度) を置き、概ね数分間の線量率の指示値をヒストグラム化して、その分布の中心値と幅を誤差とした。このときの線源と可搬型モニタリングポストの配置を図 16 に、典型的な波高スペクトルを図 17 に示す。

可搬型モニタリングポストの線源なしの場合の指示値は $0.07 \pm 0.04 \mu\text{Sv/h}$ であり、これをバックグラウンドとして指示値から差し引いた上で照射線量率との比較を行った (図 18)。誤差は線源とバックグラウンドの相対的な比率に由来している。この結果、JIS Z4325 に規定される $80 \text{ keV} \sim 1.5 \text{ MeV}$ で $\pm 30\%$ に収まる条件はクリアしていることがわかる。バックグラウンド差し引き前においても全般に低エネルギー側が高めの指示値を出しており、これは他機関での同型の検出器 (C12137-00H) も見られた傾向であることから、偶然の一致か機器あるいは $G(E)$ 関数などの線量率算出状の問題であるかについては、今後より詳細にエネルギー依存

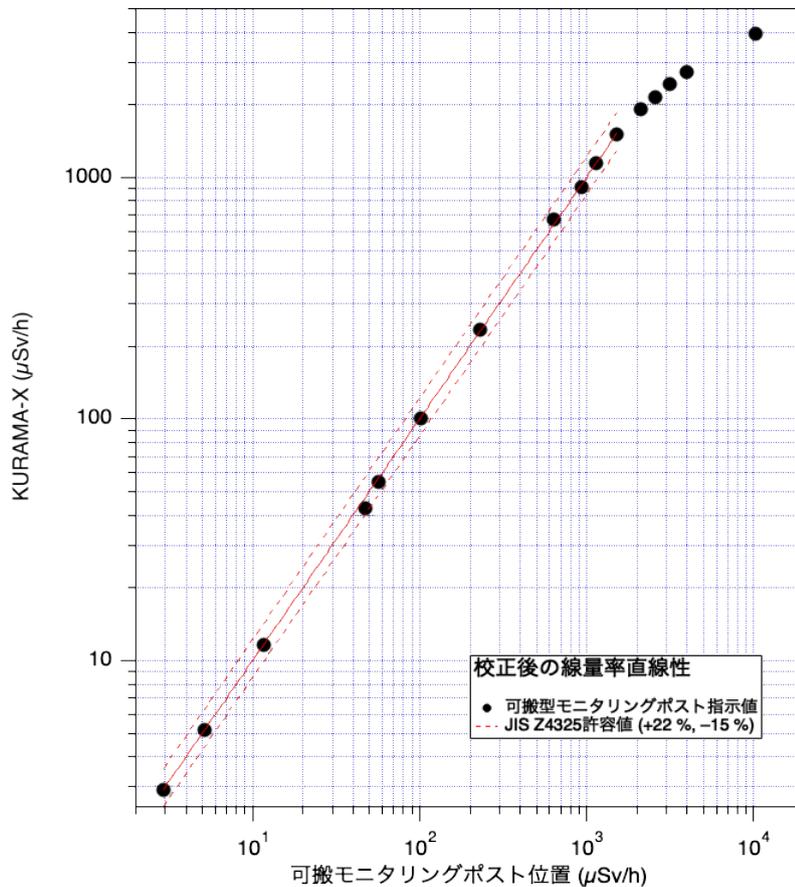


図 12 可搬型モニタリングポストの線量率直線性。グラフ内の実線は $2 \mu\text{Sv/h} \sim 1 \text{ mSv/h}$ 程度の範囲で定めた校正直線で、そこからの JIS Z4325 許容値 (+25%, -15%) が点線で示されている。

性の評価を行うべきと考えられる。一つの可能性として考えられるのは検出器のパイルアップの効果である。特に ^{241}Am で顕著に見られる本来の γ 線の最大エネルギー以上のカウントは ^{241}Am の γ 線が検出器の時間分解能より短い間隔で入射した、あるいはバックグラウンドの γ 線と偶然重なった場合と考えられる。これにより、本来計数されるはずのないエネルギーのパルスが検出されたこととなり、それが線量率が加算される結果指示値が増えることになる。 $G(E)$ 関数は低エネルギー側で変化が顕著であることから、この仮説が正しければ低エネルギー照射ほど線量率が高めに出ることとなる。

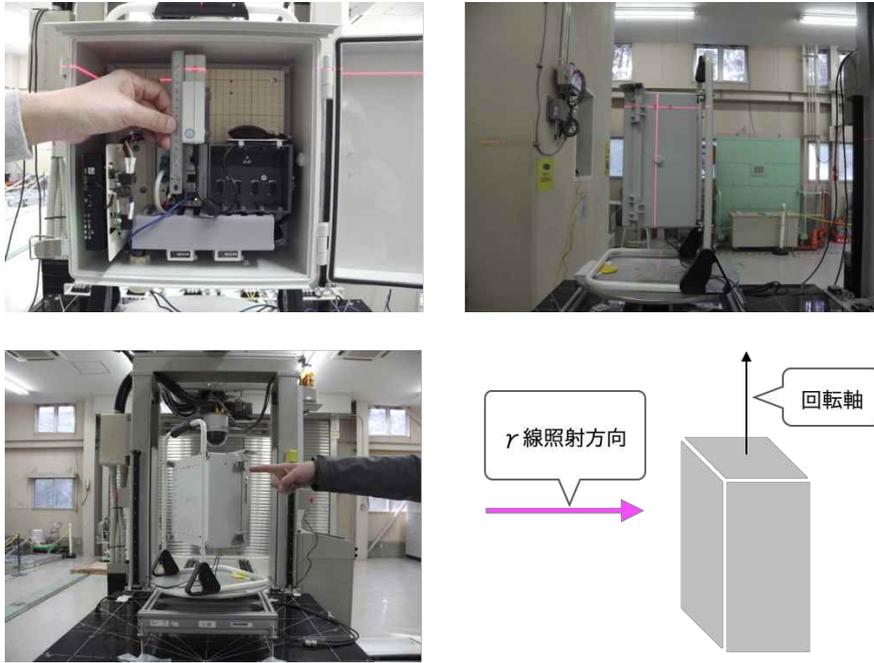


図 13 水平面内回転時の前面からの様子（左上）側面（右上）および回転中の様子（左下）と γ 線照射方向と回転軸の関係（右下）

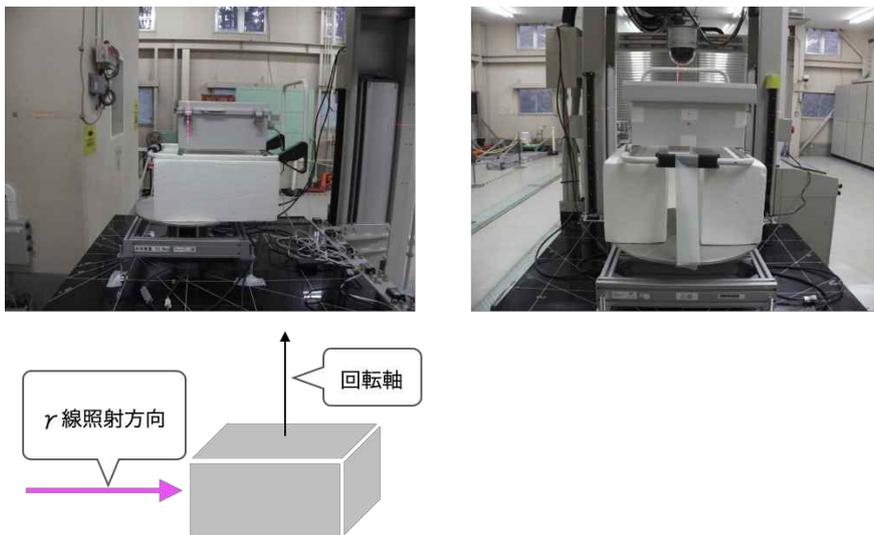


図 14 垂直面内回転時の側面からの様子（左上）側面（右上）および γ 線照射方向と回転軸の関係（左下）。回転中心は検出器の結晶中心を通っている。

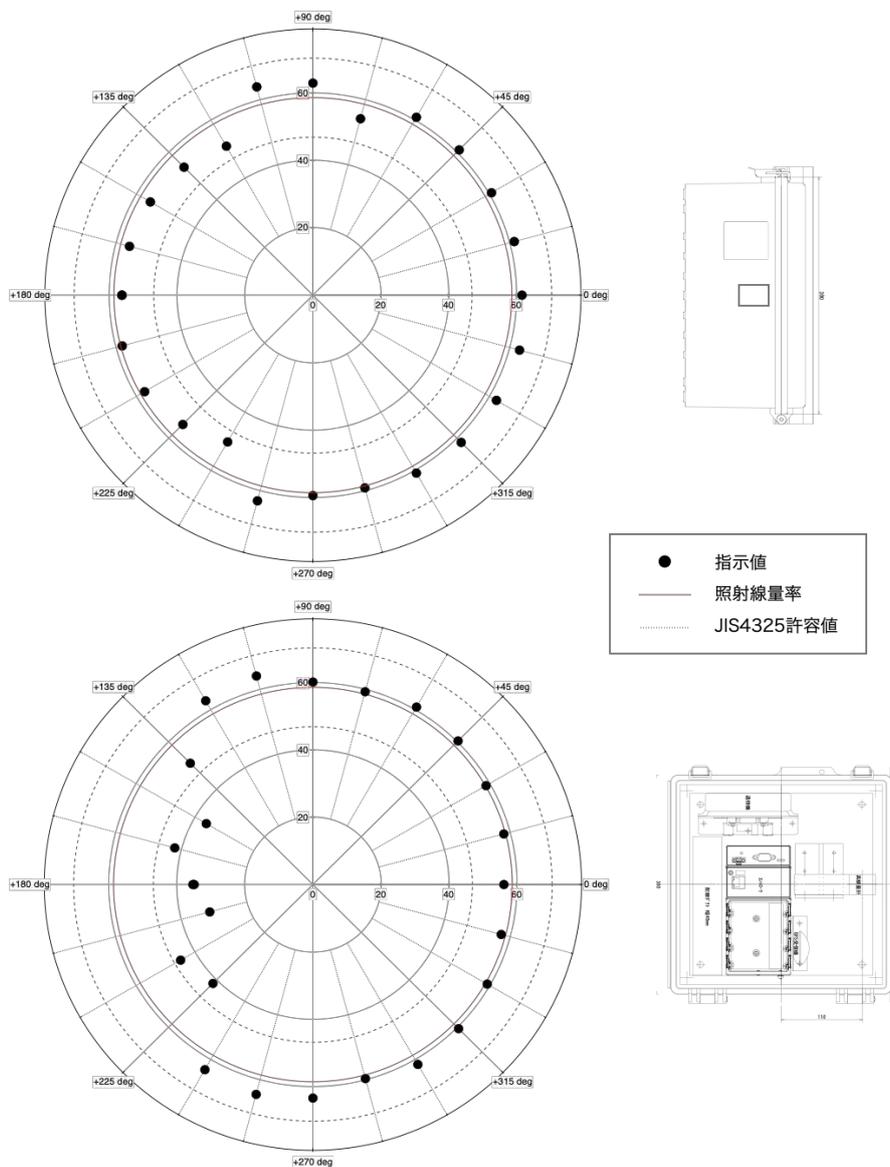


図 15 水平方向の方向依存性（上）と垂直方向の方向依存性（下）。それぞれ紙面右側（0度）より照射。その時のモニタリングポストの配置が右側に書かれている。JIS Z4325 の AI 型の許容値（垂直方向について ±120 度の範囲で ±20% 以内（¹³⁷Cs 基準））をクリアしている。



図 16 エネルギー特性試験の配置の様子。

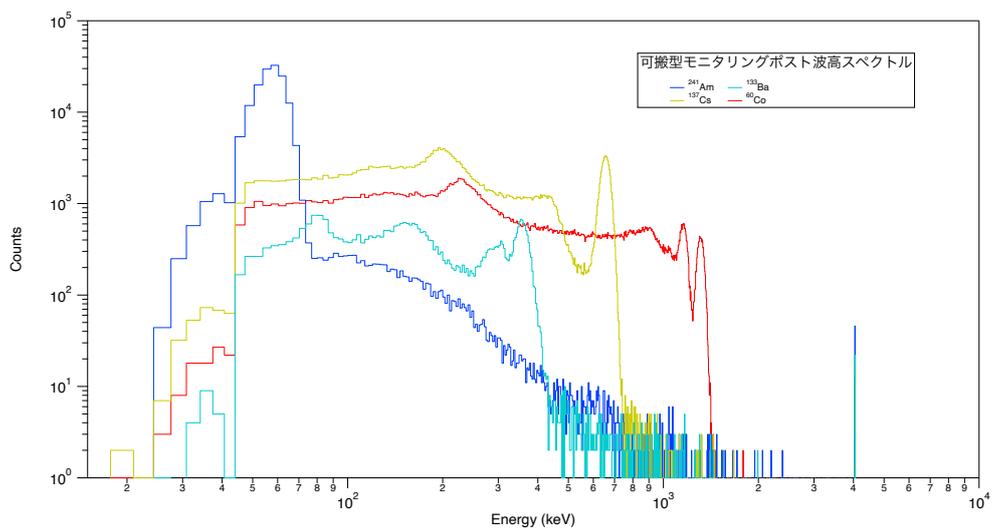


図 17 各線源における波高スペクトル。

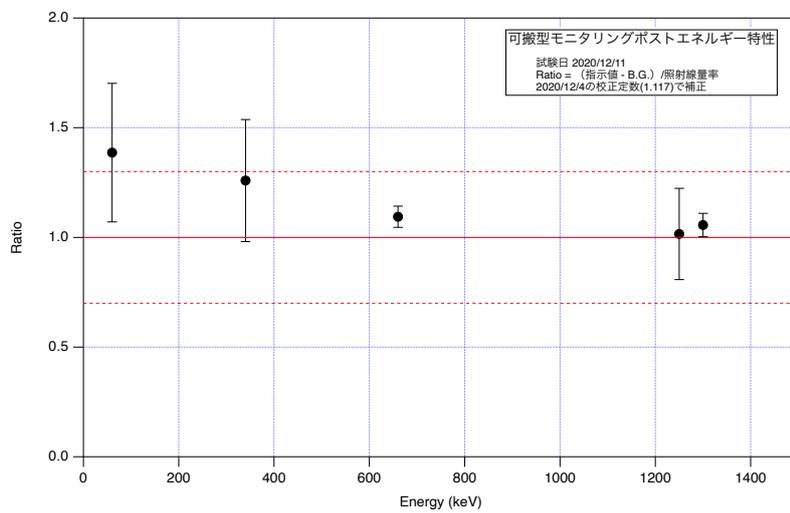


図 18 エネルギー特性試験の結果。一番右の 2 つの点は ^{60}Co について 2 つの線源で行ったそれぞれの結果である。

5.3 可搬型モニタリングポストの実証試験

今回の可搬型モニタリングポストについて、2020年9月より石川県野々市市内にある松浦電弘社敷地内において屋外での総合的な実証試験を行い、耐候性や測定の安定性などの評価を続けている（図19）。可搬型モニタリングポストはコンクリート基礎の樹脂製支柱に検出器の結晶中心で高さ1.8 m程度に設置されている。高さを1.8 mとしたのは石川県所有のモニタリングポストに合わせたこと、また設置場所における冬季の積雪の影響を考慮したためである。現時点までのところ安定して動作しており、電気的・機械的な故障は発生していない。



図19 屋外での総合試験用に設置された可搬型モニタリングポスト。

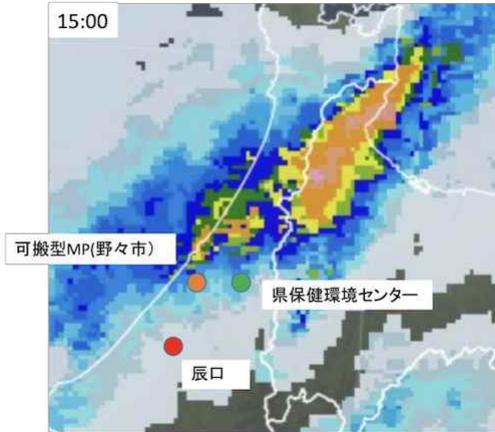
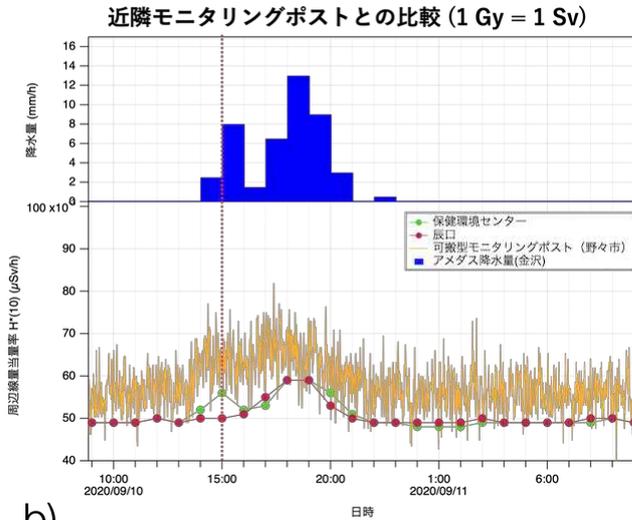
放射線計測機器の能力自体は JAEA 核燃料サイクル研究所の計量機器校正施設で評価済みであるが、実際の環境放射線の測定状況を把握するため、連続測定の中から特徴的な条件として、夕方から夜半にかけて強い雨の降った2020年9月10日の午前9時前より翌日11日の午前10時過ぎまで1分毎の測定を行った時の結果を図20に示す。比較のため規制庁からデータが公開されている近隣の固定モニタリングポストである石川県保健環境センターと辰口の1時間ごとの周辺線量当量率、また当日の降雨の状況としてアメダスの金沢の降雨量を合わせて示している。

それぞれの絶対値は異なるものの経時変化はほぼ同一である。絶対値のズレは既設モニタリングポストは $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Sv}$ の緊急時モニタリングの換算値に基づくのに対し、可搬型モニタリングポストは $H^*(10)$ の値 (662 keV では $1 \text{ Gy} = 1.3 \text{ Sv}$) であることが主たる要因である。

辰口のモニタリングポストでは15時ごろの線量率の変化がない。これは15時ごろに辰口のモニタリングポスト付近では降雨がなかったためと考えられる。辰口のモニタリングポストには降雨計が併設されており、規制庁から記録データが公開されているが、そこには15時台の降雨が記録されていなかった。

また、保健環境センターと可搬型モニタリングポストの間でも線量率上昇に時間差があるように見えるが、

a)



b)

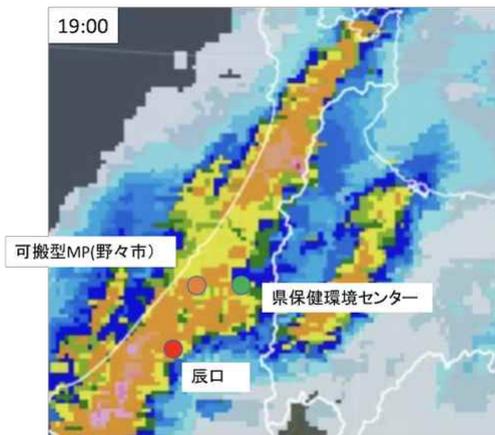
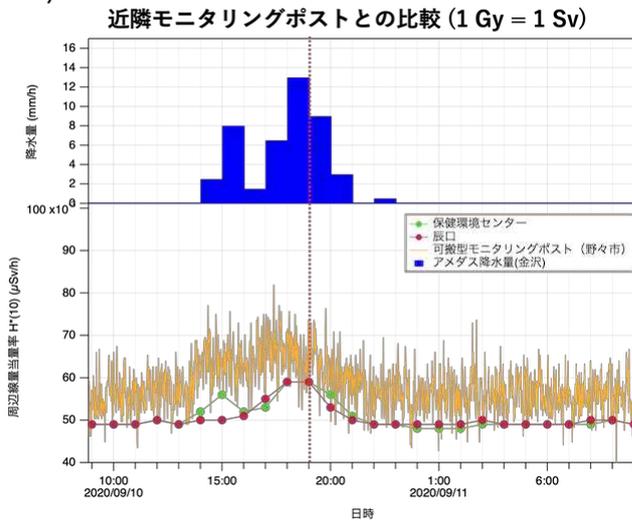


図 20 a) 2020 年 9 月 10 日 15 時のアメダスで観測した金沢市の雨量（上）と可搬型モニタリングポストと既設モニタリングポスト（辰口および石川県保健環境センター）の線量率データ（下）およびその時の気象レーダ（右）。b) 2020 年 9 月 10 日 19 時のアメダスで観測した金沢市の雨量（上）と可搬型モニタリングポストと既設モニタリングポスト（辰口および石川県保健環境センター）の線量率データ（下）およびその時の気象レーダ（右）。

図 20 を見ると、雲が南西から北東に向かって動いており、降雨タイミングがずれているためであると考えられると理解できる。

今回の降雨による線量率上昇について、可搬型モニタリングポストで取得したスペクトルデータで原因を確認することとした。降雨のあった 16 時～20 時と降雨の終わった 20 時～24 時までの間のスペクトルデータを比較したものが図 21 である。降雨による線量率上昇要因として知られる ^{238}U 系列核の天然核種である ^{214}Pb 、 ^{214}Bi のピーク上昇が顕著であり、これらの降雨による地表への降下が原因であることがわかる。

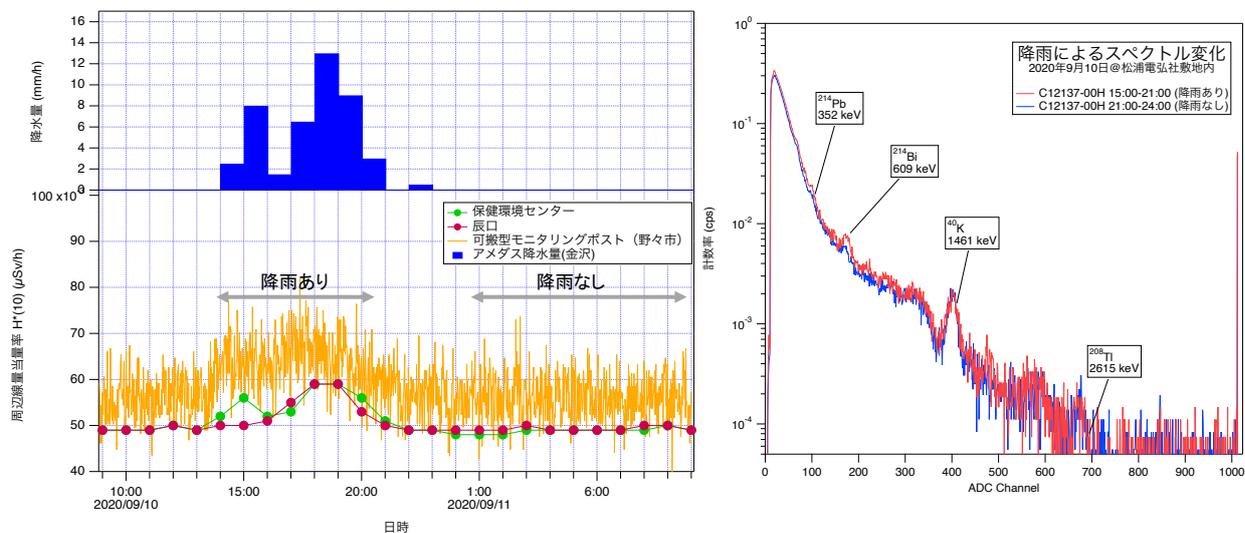


図 21 降雨によるスペクトル形状の変化。降雨のあった時間帯と降雨のなかった時間帯の波高スペクトルの積算値を比較したところ、降雨ありの場合に典型的な ^{214}Pb や ^{214}Bi のピークが見られることがわかる。

5.4 可搬型モニタリングポストに関するまとめ

前年度の事業で製作した可搬型モニタリングポストについてさらなる改良と試験を実施した。小型軽量はそのままより防水性能の高い樹脂筐体に変更して耐環境性能を向上した。特性試験の結果、2 mSv/h までの測定範囲と JIS Z4325 への適合を確認した。実環境における測定試験として、2020 年夏より石川県野々市市で屋外設置の試験を継続しており、気象変化におけるバックグラウンドレベルの変動が捉えられ、近隣のモニタリングポストと矛盾しない測定値が得られることを確認した。また、市販の 1000 Wh 程度の Li-ion ポータブル電源で約 1 週間稼働できることを確認した。このように環境 γ 線モニタリング活動に十分使用可能な能力を備えた可搬型モニタリングポストの開発に成功した。今後は委託研究費および大学における知財の扱いルールに基づき実用化や商品化を進めていく計画である。

6 自律型データネットワークの構築技術

6.1 ネットワーク技術の動向

近年注目を集める IoT (Internet of Things) は、世の中のあらゆるものをネットワークで結び、相互の情報のやり取りや制御、連携により、より高度な機能やサービスを実現するという考え方である。最近の半導体技術やネットワーク技術の進展によりセンサーやデバイスといった機器、通信インフラ、クラウドサービスの高性能化、低価格化が進んだことで、幅広い分野で導入が進んでいる。

ネットワーク技術は IoT の中で重要な要素であり、コンピュータや携帯電話などの従来のネットワーク対応機器を超えてあらゆるものに実装する場合、電力や通信可能な範囲、また伝送可能なデータ量が問題になる。例えば、遠隔手術のような用途ではリアルタイム性や高精細な映像を送るための通信速度や容量が求められる。一方、水道メータの監視のような用途になると、データの伝送量は小さくて良いものの、良好な通信環境も期待できず電池交換もメータ交換の数年～10年に1回程度になるような端末を広域に展開することになる。

このような様々な特性を持つ利用目的や利用環境に応じ、様々な通信規格が開発提唱されている。LPWA(Low Power Wide Area network) は、低速・低消費電力&広域・遠距離通信を担う通信技術である(図 22)。その特徴として

- 比較的高い周波数(概ね GHz 帯)を使ってアンテナも含めた小型化を実現
- 比較的遅い通信速度(数十 bps～数百 kbs)ながらも km オーダーの到達距離を実現
- 送受信や通信モジュール内のきめ細かい電力管理による低消費電力を実現

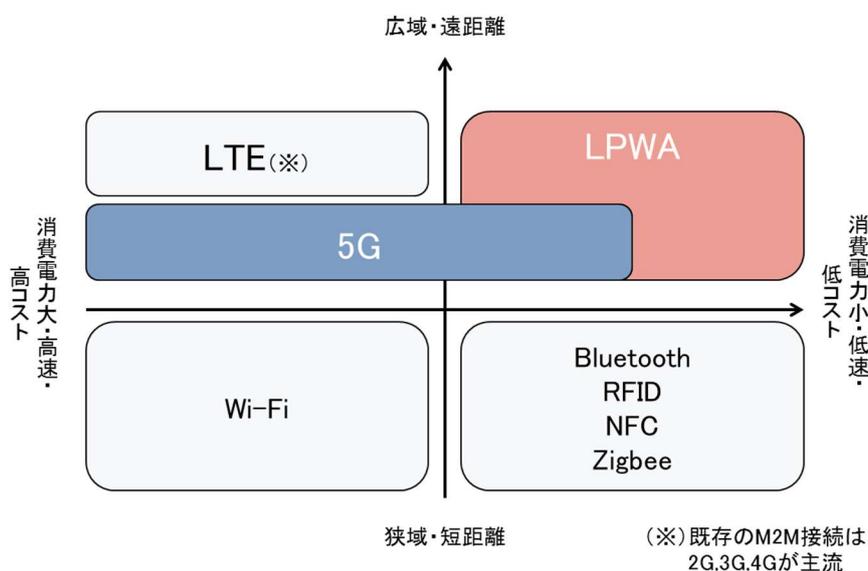


図 22 様々な通信規格の中における LPWA の位置づけ。比較的数据量が少ないセンサ等を大量・広域に展開し、継続的にデータ収集するような用途に適している。図は総務省「第4次産業革命における産業構造分析とIoT・AI等の進展に係る現状及び課題に関する調査研究」報告書（三菱総研作成）より引用。

が挙げられる。

これらの特徴を持つ LPWA は、既存の電力・通信インフラが必ずしも機能するとは限らない緊急時において、迅速かつ広範囲に計測データ収集ネットワークを構築する必要のある放射線モニタリングのためのネットワークとしても望ましいものである。そこで、緊急時の放射線モニタリングのためのネットワークとしての観点から LPWA の主な規格やその特徴について調査を行なった。

6.2 主な LPWA 規格

緊急時における放射線モニタリング活動では、既存インフラが部分的あるいは広範囲にわたって被害を受けてしまうことを想定しなくてはならない。そのため、災害時に事業者によるネットワーク構築を待つことなく展開できることが望ましい。また、残存する既存ネットワークへの結節点となる基地局の設置が思うようにいかない場合を想定しなくてはならない。基地局に直接接続するスター型のネットワークでは、エリア拡大のために既存ネットワークの復旧も必要となってしまう。そのため、機器間でのデータの転送や中継局による拡大が可能なメッシュ型のネットワークが構築できる規格が望ましい。また、福島におけるモニタリングポスト等の設置状況を参考にする場合、数百 m 程度の間隔で設置される可能性があり、その距離においても今回の研究開発でベースとなる KURAMA-II 程度のデータ転送量（数百 bps 程度）を確保できることが望ましい。以上の観点から、現在国内で比較的普及していると思われる規格について特徴をまとめたものが図 23 である。また、特に国内で普及している、あるいは国内外で大規模な採用実績があるとみられる規格についてまとめたものが表 4 である。

これらの規格の中で普及で先行しているのは Sigfox[14] と LoRaWAN[15] で、ZETA[16] および Wi-SUN FAN[17] は後発の規格である。この 4 つの規格はすべて免許不要であり、同じ免許不要の周波数帯である 2.4GHz に比べて電波伝搬的にも通信の混雑の面でも有利な 920 MHz 帯を使用しているため、設置や使用の

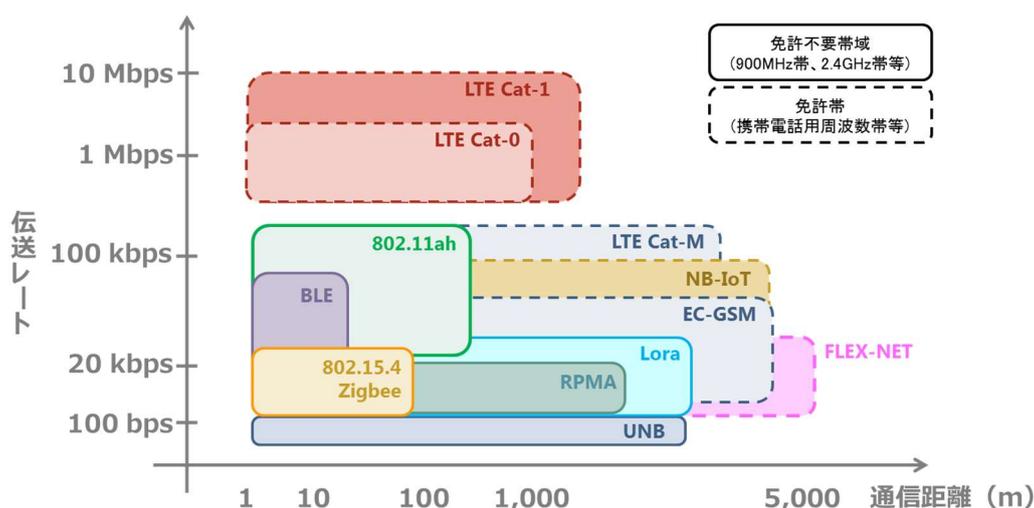


図 23 LPWA の主な規格の位置づけを速度と到達距離から整理したもの。図は総務省「第 4 次産業革命における産業構造分析と IoT・AI 等の進展に係る現状及び課題に関する調査研究」報告書（三菱総研作成）より引用。

表 4 主な LPWA の仕様。Up、Down はそれぞれ基地局向きの上り通信、基地局から端末への下り通信を指す。

規格名	使用周波数（日本）	通信速度	ネットワーク形態	自営網構築
Sigfox	920 MHz	100/600 bps (Up/Down)	スター型	不可
LoRaWAN		250 bps ~ 50 kbps		可能
Wi-Fi HaLow		150 kbps ~		
Wi-SUN FAN		50 kbps ~ 600 kbps	メッシュ型	
ZETA		0.1 ~ 100 kbps		
LTE Cat. M	携帯	0.3 ~ 1 Mbps	スター型	不可
NB-IoT		62/21 kbps (Up/Down)		

制約が少ない。一方 LTE Cat. M[18] や NB-IoT[18] は従来の携帯回線規格である LTE の中に規定されるもので、インフラとしてすでに津々浦々に普及している携帯事業者の基地局を利用できる反面、免許が必要となり設置や使用に制約がある。なお Sigfox は各国ごとに 1 事業者が独占的に基地局網を提供し、ユーザはその事業者と契約することで世界中の基地局にアクセスすることができる。日本の場合、Sigfox は京セラ系の会社が事業者として基地局ネットワークを展開している。

ここでネットワーク形態について比較する。主な LPWA 規格ではスター型ないしメッシュ型の形態を取っており、Sigfox や LoRaWAN、LTE Cat. M や NB-IoT がスター型ネットワークを構築するのに対し、ZETA および Wi-SUN FAN はメッシュ型ネットワークが構築できる規格である。このスター型とメッシュ型のネットワークがどのようなものであるかを示したのが図 24 である。スター型では、既存回線やデータセンターとの橋渡しとなる基地局が端末を直接収容するため、中継による遅延等が発生しない反面、既存回線と接続できる場所にしか基地局を設置できない。メッシュ型では端末がメッシュ状のネットワークを構成しており、条件の良い経路を選択しながら中継されて基地局に到達する。そのため、既存回線へのアクセスが難しくスター型のネットワークでは展開が困難な場所でもエリア展開が容易になる反面、多段中継による遅延などの問題も発生する。

緊急時には災害の直接的・間接的影響で既存回線へのアクセスが困難な状況が多発すると考えられることか

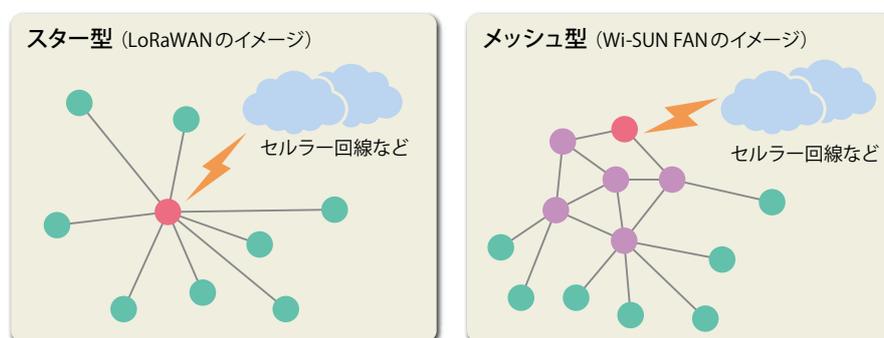


図 24 スター型とメッシュ型のネットワーク形態のイメージ図 [19]。スター型では、既存回線との橋渡しとなる基地局が端末を直接収容し、メッシュ型では端末がメッシュ状のネットワークを構成する。

ら、スター型よりメッシュ型のネットワークが構成できる方が望ましいと考えられる。これらを踏まえ、今回の研究では通信規格として ZETA および Wi-SUN FAN を有力候補として選定した。

ZETA は到達距離も見通して 2~10 km であり、4 段までの中継や端末や中継器が動的に最適な通信経路を選択するなど、柔軟なネットワーク構築が可能な規格である。すでに一般利用のための製品が流通しており、例えば携帯電話の圏外である山奥の養殖施設の監視業務 [20] や、上海で数万局を展開しての市内の公共インフラの IoT 化の実績もある。しかしながら都市部で十分な通信距離を確保する場合、低速通信をせざるを得ず、1 回あたり 49 bytes、30 秒ごとの送信しかできない。このため、線量率データ程度であれば送信可能だが、KURAMA-II のようにスペクトルデータを含む数百 bytes/sec のデータをそのまま送信するのは困難という欠点がある。

一方 Wi-SUN FAN は見通して 500 m、20 段までの中継や動的に最適な通信経路選択機能を持ち、加えて最大 300 kbps の TCP/UDP 通信をサポートしていることから、従来の KURAMA-II の通信方式をそのまま使用できる可能性がある。また、京都大学が権利を保有する大学発の規格でもある。一方、実用化という面では、Wi-SUN 規格の中の Wi-SUN HAN(Home Area Network) は国内のスマート電力計に採用され圧倒的なシェアをもつものの、Wi-SUN FAN については評価用の端末が限定的に提供されている程度で、一般利用のための評価機器は 2020 年度末に流通を始めた状態であり、直ちに試験や採用を計画することは難しい。

以上を踏まえ、本年度も引き続き ZETA を採用規格とし、具体的なネットワーク構築と実証試験を行うこととした。

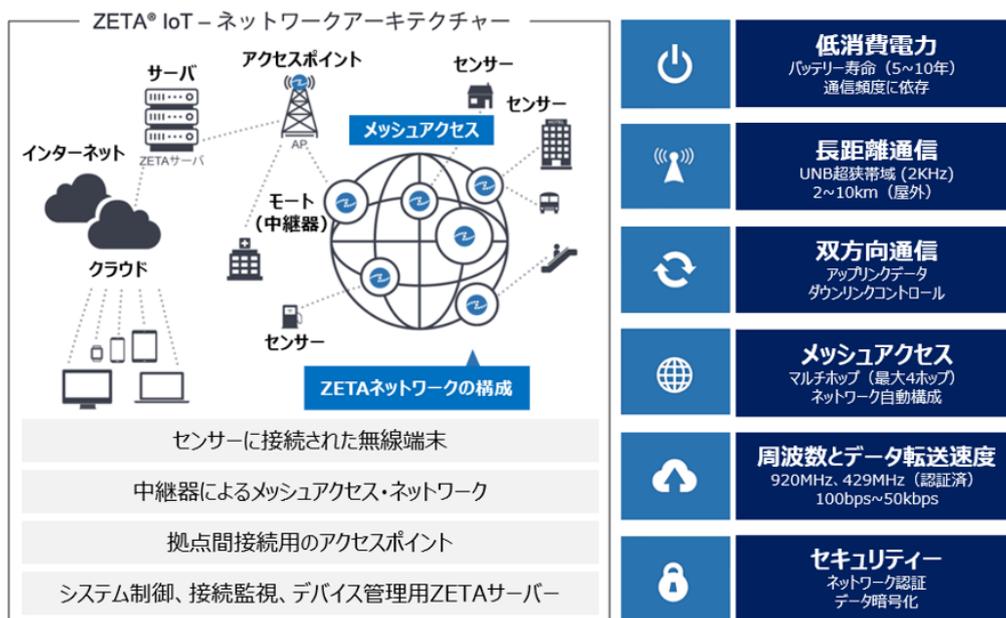


図 25 ZETA の概要 [21]。メッシュ構造の中継機ネットワークに端末がアクセスし、混信に強く周波数資源が有効に利用できる狭帯域双方向通信を行うことが特徴である。最適な通信経路を動的に選択するため、通信環境の変化に対しても安定した通信を確立できる。

6.3 ZETA 規格のあらまし

ZETA とは、ZiFiSense 社が開発した免許の不要な LPWA 規格である (図 25)。ZETA の大きな特徴は約 0.6 ~ 2 kHz という超狭帯域通信を行うことで、周波数帯域を有効に利用する多チャンネルでの通信が可能である。これにより混雑した周波数帯域でも通信の確立がしやすくなる利点がある。また、基地局と端末の間に 4 段までの中継器の設置が可能で、中継器による同士がメッシュネットワークを構成することが可能であり、通信距離は最大 10~20 km (見通し距離) とすることができる。加えて、各端末や中継器が通信環境の変化に応じて動的に最適な通信経路を選択することが可能であり、端末と基地局の間で安定な通信が可能となる。また消費電力が非常に小さいことが特徴であり、中継機や端末自体は乾電池で数年間稼働が可能である。ZETA の電力消費の低さを生かし、30 分に 1 回のデータ送信であれば単三電池 4 本で連続 1 年間稼働可能な ZETA 搭載 AI カメラが開発されている。

6.4 ZETA による実証試験

緊急時の放射線モニタリング活動は、オフィス街、住宅地、農地、山間部など様々な状況での展開が想定される。自律型ネットワークにはそれぞれの環境で相応のネットワークが構築できることが求められる。また、昨年度の成果を踏まえると既設の固定・可搬モニタリングポストのデータ送信用バックアップ回線としての適用可能性もあることから、昨年度に引き続き ZETA によるネットワーク構築の実証試験を行うこととした。

昨年度の試験では基本的な特性を評価することが中心であったが、今回は既設の固定・可搬モニタリングポスト間のバックアップ回線としての利用可能性と、面的なモニタリング装置を展開した際のネットワーク接続の機動的な確立の実現性を評価するため、定常的なネットワークの設置を想定した長期試験と基地局及び中継局の機動的な設置によるエリア改善の効果の検証を行った。

島根県地域防災計画 (原子力災害対策編) [22] で定められている平常時ないし緊急時のモニタリング地点は図 26 のようになっており、概ね数百 m から数 km ごとにモニタリング地点が置かれていることがわかる。これらを定常的あるいは機動的に設置したネットワークで安定して結ぶことができれば、原子力防災において有効な自律型ネットワークとして活用できると考えられる。

基地局は島根県原子力環境センター (2 階建) の北側に隣接する島根県保健環境センター (6 階建) 屋上に設置した (図 27)。アンテナは電波法により免許を要しない特定省電力無線で認められている上限である空中線利得 +2.14dBi の無指向性アンテナを使用した。各モニタリング地点に設置される端末は空中線利得 0 dBi の無指向性アンテナを装備しており、送信出力は 20 mW である。中継機は図 28 に示したものと同じで、アンテナは基地局と同じ空中線利得 +2.14dBi の無指向性アンテナである。また ZETA の受信感度は -130 dBm である。



図 26 島根県地域防災計画に定められた平常時および監視強化段階におけるモニタリング地点マップ [22]。人口集積地を中心に概ね数百 m ~ 数 km 程度に設置されている。



図 27 今回使用した基地局と同型のもの。ポール先端にアンテナがついている。



図 28 県水産技術センターに設置された端末（左）とサンレイク及び宍道湖ふれあいパークに設置されている中継局と同型のもの（右）。

6.4.1 長期的な通信試験

既設モニタリングポストの補完を想定した場合、あるいは緊急事態時の機動的な展開後本格的なモニタリング体制確立までの時間を想定した場合、天候や周辺の状況の変化に対する通信状態の安定性を評価する必要がある。そこで、宍道湖周辺の地点間を結んで長期間通信状態を維持し、その安定性を評価することとした。

今回長期試験用に設置した通信経路を図 29 に示す。基地局と島根県水産技術センターに設置された試験用端末（ZETA モジュール搭載の温度センサ）を宍道湖畔の 2 箇所に設置する中継局で結ぶ経路である。宍道湖横断をする経路を選んだのは、電界強度の下がる長距離通信において霧や降雨、降雪による減衰、湖面の波高の変化による反射波と直接波の干渉など長期の安定通信に大きな影響を与える要素が想定されるためである。

この経路において 1 時間ごとに試験用端末が取得する温度センサーデータを送信する状態を維持しているが、これまで中継機設置箇所での工事に伴う撤去のほかは回線が切断されたことはない。各区間におけるアップリンク（端末側 → 基地局向きのデータの流れ）とダウンリンク（基地局側 → 端末向きのデータの流れ）の典型的な受信電力は表 5 の通りとなっており、ZETA の受信限界である -130 dBm を十分余裕を持って上回っていることがわかる。

表 5 長期接続試験時の典型的な受信電力。アップリンクは端末→基地局向きの通信、ダウンリンクは基地局→端末向きの通信。

地点名	機器間距離 (km)	アップリンク (dBm)	ダウンリンク (dBm)
水産技術センター - サンレイク	2.2	-116	-115
サンレイク - ふれあいパーク	10	-96	-99
ふれあいパーク - 基地局	5.5	-109	-108

今回の試験における電波の伝搬においては、湖面を完全導体とみなし直接波と湖面での反射波の 2 成分によ



図 29 長期通信安定試験用に設置した通信経路。图中 AP は基地局、Mote は中継機、センサは端末となる。基地局から 2 段中継した後水産技術センターに設置された端末に接続する形である。

る合成波の受信であると近似することができる (図 30)。この時の波長 λ の電波の受信機の位置での電界強度 $G_E(\text{V/m})$ は

$$G_E = \frac{\lambda}{2\pi d} E_{free} \left| \sin \frac{\lambda \Delta l}{4\pi} \right| \quad (1)$$

ただし経路差 Δl は

$$\Delta l = \sqrt{d^2 + (h_1 + h_2)^2} - \sqrt{d^2 + (h_1 - h_2)^2} \quad (2)$$

であり、自由空間における電界強度 E は

$$E_{free} = \frac{\sqrt{30PG_1}}{d} \quad (3)$$

で与えられる。これを一番長距離であるサンレイク - ふれあいパーク間に適用した場合は図 31 となる。両者の 10 km でも ZETA の受信限界である -130 dB_i を十分上回っており、今回の実験のような長距離伝搬も安定して行えることが予想され、実際の結果と一致している。また計算結果より実際の受信電力が大きくなっている理由は、設置場所の状況により結果としてアンテナが双方の方向に指向性を持っている可能性のほか、湖面上の空気の湿度変化や温度変化により屈折率が変わって導波管様の状態が出来上がるラジオダクト現象が発生している可能性も考えられる。

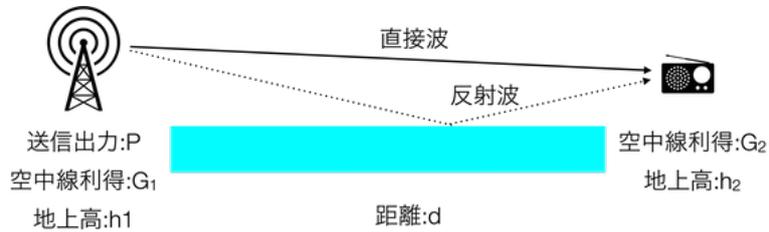


図 30 受信機の位置における電界強度。地上および海上のような地面や水面の無視できない環境では、直接到達する直接波と地面や水面で反射する反射波の干渉によって決まる。多くの場合地面や水面は完全導体に良く近似できる。

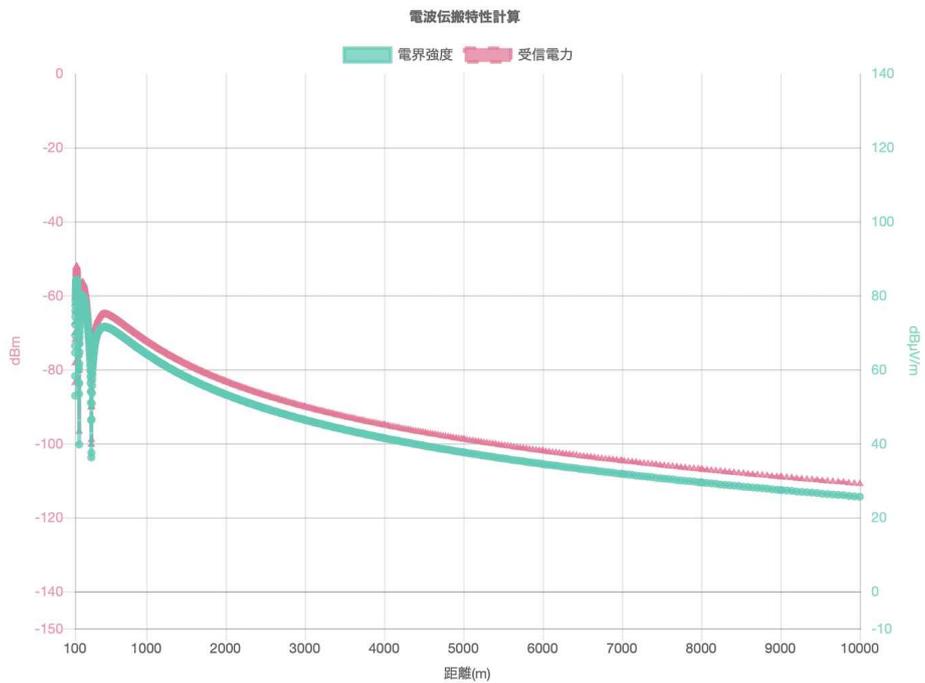


図 31 ふれあいパーク - サンレイク間の電界強度の計算例 [23]。ふれあいパークのアンテナの利得を 2.14 dBi、アンテナ高さを湖面から 10 m、サンレイクのアンテナの利得を 0 dBi、高さを湖面から 5 m と仮定した。

6.4.2 実践的な面的展開の提案とそれに基づく通信試験

前年度の研究成果により、鳥根県原子力環境センターとその周辺の既設モニタリングポスト間であれば ZETA の持つ通信経路の自動選択機能により通信が確立できることが確認されている。また長距離通信も安定して行えることがわかっている。

これらの結果と 4 段階までの中継が可能な ZETA の仕様を踏まえ、より実践的なネットワークとして次の様な構成を想定した (図 32)。すなわち地域ごとに山頂や高層ビル屋上という見通しが効きやすく長距離通信が安定して確立できる場所に基幹となる中継局 (ただしハードウェアは通常の中継局と同じもの) を設置し、この基幹となる中継局に対して接続することを想定してその地域の端末や中継局を展開する。中継局同士は動的にメッシュを構成するので、基幹中継局は地域内に展開された中継局および他の基幹中継局同士でもメッシュを構成する。一方展開される中継局や端末は基幹となる中継局に対して接続すればよくなるので、より設置の自由度が上がり機動性が確保できる。

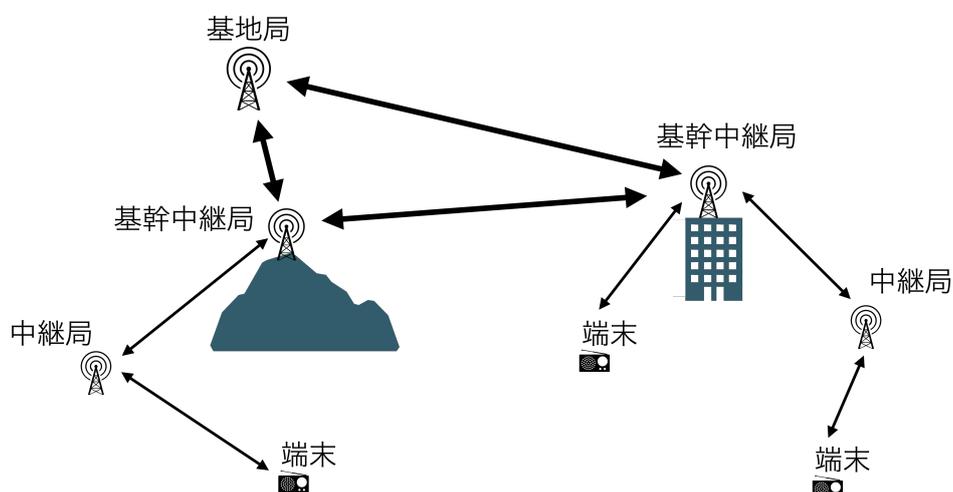


図 32 ZETA の特性を考慮した実践的なネットワーク構成の概念図。見通しの良い場所に設置することで ZETA の仕様により基幹中継局同士でもメッシュが自動構成されるため、より安定に広域での通信が確保できる様になる。

この構成を実現するには、

- 山頂やビル屋上等に設置する基幹となる中継局との安定な通信の確立
- 基幹となる中継局と地域内に展開した中継局や端末との通信の確立

が問題となる。また緊急時の機動的な運用を想定した場合

- 代替基地局の設置をした際の運用の連続性やネットワークの機動的な切り替え

も課題となる。そこで、これらの検証のための試験を行った。

6.4.2.1 基幹となる中継局の展開

基幹となる中継局は、基地局との通信が確立できることやその地域に対して十分な見通し範囲を確保できることが望ましい。そこで、新たに図 33 に示す様に深田北と忌部の 2 箇所に中継局を設置することとした（図 34）。深田北は島根原発に隣接した標高 163 m にあるモニタリングポスト設置箇所であり、南方向にある保健環境科学研究所に見通しが効く場所にあるとともに、島根原発周辺のモニタリングポストとも良好な通信が期待できる場所である。また忌部は標高 463 m の位置にある無線中継所付近であり、保健環境科学研究所と県庁側に開けた場所にあるとともに、山間に散在する集落等に対する通信が期待できる場所である。これらの通信結果を表 6 にまとめる。



図 33 中継局の設置箇所。深田北は島根原発近くのモニタリングポスト向けを想定し、忌部は山間部にある集落への通信を想定している。



図 34 中継局を設置した場所の状況。深田北は南方向に保健環境科学研究所が見える（左）。忌部は保健環境科学研究所と島根県庁方向に開けている（右）。

今回の結果は概ね予想通りであり、基地局との通信は良好であったが、忌部で想定された県庁との通信が確

表 6 各中継局の受信電力。アップリンクは中継局→基地局向き、ダウンリンクは基地局→中継局向きの通信。

地点名	機器間距離 (km)	アップリンク (dBm)	ダウンリンク (dBm)
深田北	6.5	-108	-110
忌部	10.5	-117	-121

立できなかった。県庁側はちょうど中間位置に西忌部町にある標高 209 m の山があり、この山の 200 m 程度の高さの山の峰が連続してちょうど県庁側を遮る配置となっていた。この山に遮られて通信できなかったためと考えられる。この問題は基幹となる中継局がさらに増えて経路が複数確保できる様になれば解決できると考えられる。

6.4.2.2 機動的な中継局・端末の展開

1) 深田北を起点とする展開

地域に置く基幹的な中継局の確立で一定の成果を確認したので、引き続きその基幹的な中継局による地域内での機動的な中継局・端末の展開の試験を行った。

まず、島根県が管理する場所にある深田北の中継局をそのままにした状態で、周辺のモニタリングポストからの直接ないし中継局を介して深田北の中継局に接続し、そこから基地局へ接続する試験を行った。深田北の中継局およびその周辺のモニタリングポストの位置関係および通信試験の結果を図 35 に、また各地点での受信電力等を表 7 に示す。概ね深田北地点からの見通しが確保できるモニタリングポスト地点との間で良好な通信が確保できている。魚瀬は直線距離にもかかわらず良好な通信を確立できているのは深田北から古浦方面の海に向かって平地で障害物がないためと考えられる。



図 35 島根原発周辺のモニタリングポスト配置 [24] と通信試験を行なった箇所のうち通信が成立した場所 (赤丸) とその経路 (黄線)、および通信確立ができなかった場所 (青丸)。

この試験で特筆すべきは手結南の通信確立である。これは直接の通信が不可だったことから魚瀬に中継局を設置したところ手結南との通信が確立された。適切な箇所を追加の中継局を機動的に置くことで通信不可の地域を解消することができることが示された。深田北より東側の地域では中継局を設置しての試験は行なってい

表7 接続試験時の典型的な受信電力。アップリンクは端末→基地局向きの通信、ダウンリンクは基地局→端末向きの通信。

地点名	可否	直接中継	アップリンク (dBm)	ダウンリンク (dBm)
片句	×	-	-	-
手結	×	-	-	-
手結南	○	中継	-118	-122
魚瀬	○	直接	-97	-102
古浦	○	直接	-85	-88
池平	○	直接	-92	-98
佐陀本郷	○	直接	-115	-107
名分	○	直接	-113	-112
上講武	×	-	-	-
大芦別所	×	-	-	-
大芦	×	-	-	-
加賀	×	-	-	-

ないが、深田北を見通せる山頂ないし海側、あるいは谷合を経由していく経路での中継局の設置で改善ができる可能性がある。例えば今回の試験では通信確立ができなかった加賀局についても、人員や機器手配の都合上中継局設置まではできなかったものの、同局近くの海岸から深田北との接続が確認されている。

2) 市内中心街における展開

市街地では郊外とは違って建物の影響を大きく受けて複雑な伝搬の様相を呈すると予想される。そこで市街地における検証もおこなった。保健環境科学センターの基地局と島根県庁および県立美術館の中継局を使い、市内中心部各地にあるモニタリングポスト設置箇所との通信を試みた。さらに、緊急時のネットワーク展開の自由度を確認するため、テクノアークしまねに臨時の基地局を、風土記の丘に臨時の中継局をそれぞれ追加で設置しての通信も試みた。各地点の位置関係を図36に示す。また、各地点での通信試験の結果は表8の通りである。松江市内中心部のモニタリングポストについては、大半のモニタリングポストは保健環境科学センターに設置の基地局へ直接接続する、あるいは県庁→県立美術館の中継局を経由して接続することができた。一部のモニタリングポストはテクノアークしまねに設置した基地局への直接ないし風土記の丘に臨時設置した中継局経由での接続が確認された(図37、38)。通信状態も概ね良好である。風土記の丘は松江市中心街の南端部に広がる丘陵地帯であり南側から市内を一望できる場所であり市街地の通信状態改善に大きく寄与していると考えられることから、基幹となる基地局の設置に良い場所とも言える。

唯一通信できなかった松江市南消防署はすり鉢状の地形の底にあり、県庁や美術館、風土記の丘の各中継局方向には高い建物ないし坂がある状態であった(図39)。機動的な展開を考慮した場合、事前に計画を立てての中継局や基地局の設置ができない場合があるため、先に述べた基幹となる基地局を多方面に展開しておくことでより多方向からの接続を確保する必要性を示していると言える。

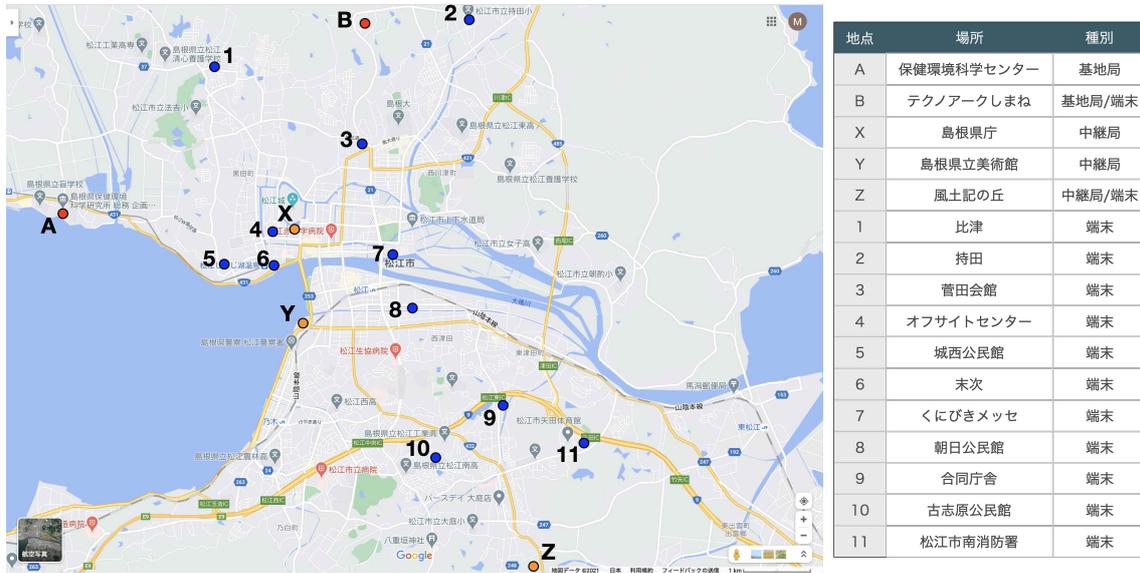


図 36 松江市内中心部の通信試験を行なった地点。テクノアークしまねには臨時的基地局を、風土記の丘には臨時の中継局を追加設置した。

6.5 自律型ネットワークのまとめ

前年度に引き続き ZETA を利用した実践的な自律的ネットワーク構築の試験を行なった。ZETA の実現する無線通信は極めて安定しており使いやすいものであった。圏内にさえ入れれば自動で最適な通信経路を決定して通信できるようになるため、設置にあたって専門の知識や特段の技術を要求せず、今回の宍道湖周辺での長期試験で得られた安定した通信、島根原発周辺および松江市内で展開した機動的な面的ネットワークの展開のような運用が誰でも可能である。実用的な水準の安定した通信網を機動的に構築する能力が十分示されたと考える。ZETA の規格上の通信容量 (49 bytes/30 sec) の制約はあるものの、その制約を踏まえた運用であれば緊急時の即応性と平常時の安定した運用を両立できるものである。また、ZETA は規格に暗号化プロトコルや指定グループの通信機器のみとの接続を行うホワイトリスト機能を持っており、これを活用することでデータのセキュリティも確保できる。

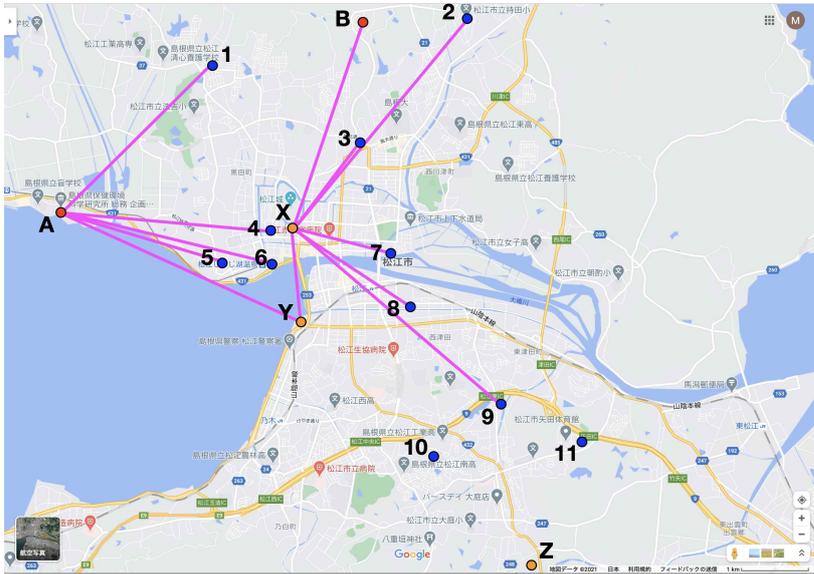
今回の結果は ZETA のものであるが、ZETA と同じくメッシュネットワークと最適通信経路の自動選択を実装する Wi-SUN FAN のような他の LPWA 通信規格でも期待できる効果であると考えられる。また LPWA 自体が IoT への適用を想定して開発されていることから、通信モジュールも極めて安価かつ潤沢に供給されている。例えば ZETA の端末用通信モジュールの実勢価格は 2000 円を下回っている。このように調達も容易であることから、今後様々なモニタリングネットワークにおけるバックアップ回線としての LPWA 通信の各規格の研究を継続すべきであり、その適用可能性を積極的に検討する価値はある。

例えば、国土強靱化の施策の一環としてモニタリングポスト等の通信の多重化による信頼性向上も検討されているが、従来の多重化における選択肢である地上固定回線、携帯回線、衛星回線、無線テレメトリーのいずれも機材や設置の導入費用、運用の費用、免許等の問題があり、導入する自治体の大きな負担となっている。このような多重化の検討の際に LPWA を選択肢に加えることは自治体の抱える課題を解決すると考えら

表8 接続試験時の典型的な受信電力。接続基地局で「保」は保健環境科学研究所、「テ」はテクノアークしまね。アップリンク/ダウンリンクの受信電力は端末と最初の中継局間のもので単位は dBm。また、アップリンクが端末→基地局向きの通信、ダウンリンクは基地局→端末向きの通信。

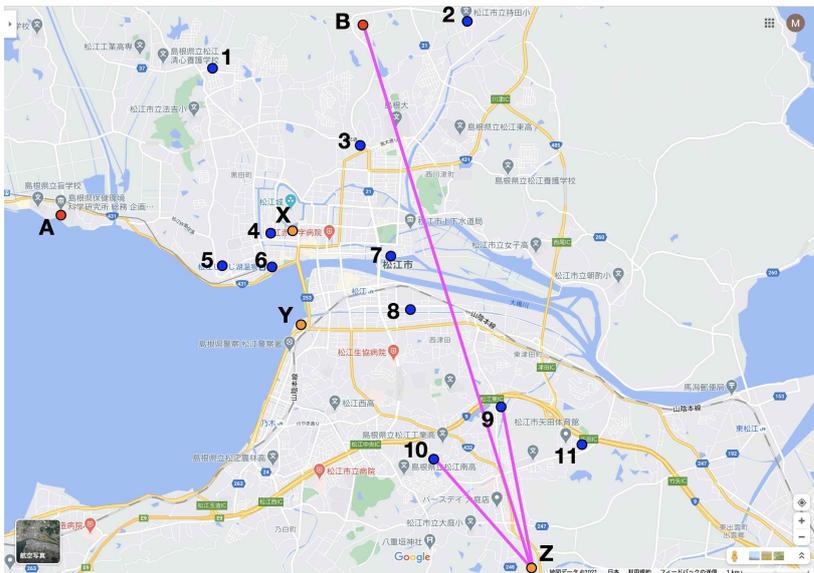
地点名	可否	接続基地局	直接中継	経路	アップリンク	ダウンリンク
テクノアークしまね	○	保	中継	県庁-美術館	-110	-104
風土記の丘	○	テ	直接	-	-113	-126
比津	○	保	直接	-	-121	-120
持田	○	保	中継	県庁-美術館	-94	-93
菅田会館	○	保	中継	県庁-美術館	-85	-88
オフサイトセンター	○	保	直接	-	-92	-98
城西公民館	○	保	直接	-	-115	-107
末次	○	保	直接	-	-113	-112
くにびきメッセ	○	保	中継	県庁-美術館	-109	-105
朝日公民館	○	保	中継	県庁-美術館	-120	-120
合同庁舎	○	保/テ	中継	県庁-美術館/風土記	-111/-102	-109/-112
古志原公民館	○	テ	中継	風土記	-120	-116
松江市南消防署	×	-	-	-	-	-

れる。



地点	場所	種別
A	保健環境科学センター	基地局
B	テクノアークしまね	基地局/端末
X	島根県庁	中継局
Y	島根県立美術館	中継局
Z	風土記の丘	中継局/端末
1	比津	端末
2	持田	端末
3	菅田会館	端末
4	オフサイトセンター	端末
5	城西公民館	端末
6	末次	端末
7	くにびきメッセ	端末
8	朝日公民館	端末
9	合同庁舎	端末
10	古志原公民館	端末
11	松江市南消防署	端末

図 37 松江市内中心部で保健環境科学センターの基地局に接続した地点とその経路。県庁の中継局が各地に対してよい中継局として機能している。



地点	場所	種別
A	保健環境科学センター	基地局
B	テクノアークしまね	基地局/端末
X	島根県庁	中継局
Y	島根県立美術館	中継局
Z	風土記の丘	中継局/端末
1	比津	端末
2	持田	端末
3	菅田会館	端末
4	オフサイトセンター	端末
5	城西公民館	端末
6	末次	端末
7	くにびきメッセ	端末
8	朝日公民館	端末
9	合同庁舎	端末
10	古志原公民館	端末
11	松江市南消防署	端末

図 38 松江市内中心部でテクノアークしまねの基地局に接続した地点とその経路。風土記の丘経由による市内南側の通信改善が実現している。

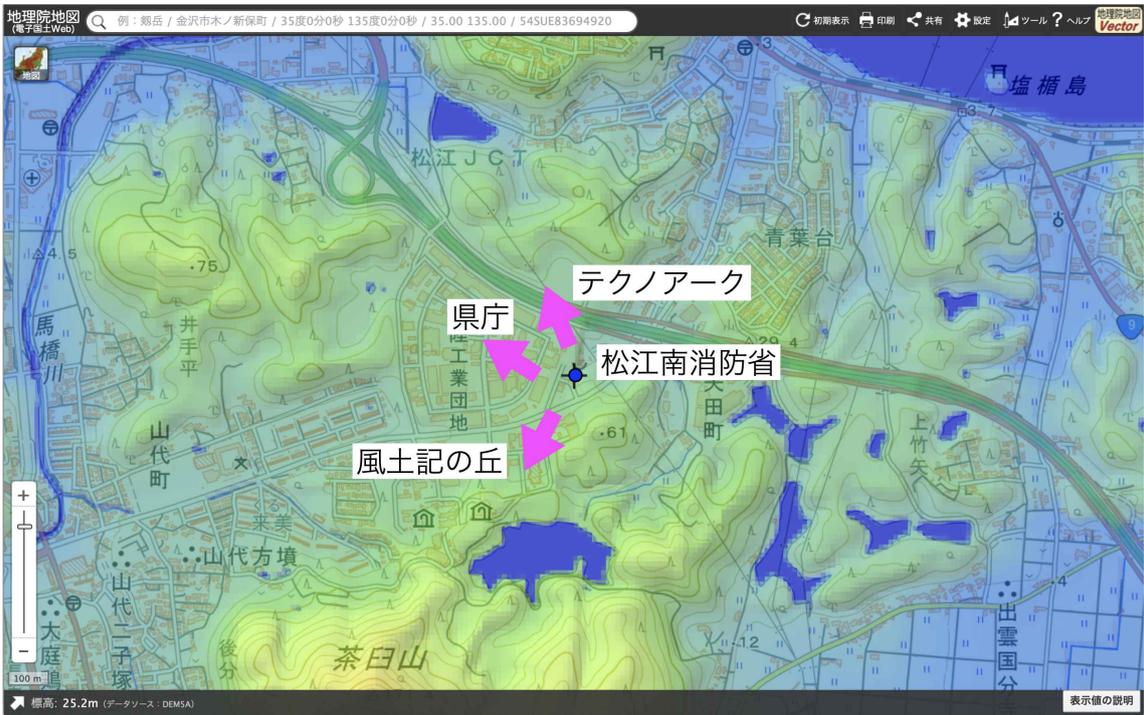


図 39 通信のできなかつた松江南消防署の立地条件 [25]。すり鉢状の地形の底にあり、今回使用した中継局および基地局の方向に障害物となる山が存在している。