

令和 4 年度  
原子力規制庁 放射性物質測定調査委託費

CsI 検出器及び LPWA を活用した  
環境放射線モニタリング機器の実現可能性調査

京都大学 谷垣 実

2023 年 3 月 14 日

## 1 概要

東京電力福島第一原子力発電所事故やその後発生した大規模な自然災害に伴い、原子力災害発生時の放射線や放射性物質のモニタリングに係る技術や体制についての様々な課題が明らかとなってきた。

原子力防災のために整備される放射線モニタリング機器では、これまでより災害時の運用も想定して堅牢性や信頼性を確保するべく入念に検討・用意されていた。電源や通信においても、自家発電機や大容量バッテリーによる電源の確保や、地上回線および衛星回線を用いた通信経路の多重化により、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、東京電力福島第一原子力発電所事故では電力、通信、交通をはじめとした社会インフラ自体の甚大な破壊が発生し、堅牢性や信頼性を担保する前提のネットワークや電源、移動手段などのインフラ群が深刻な機能不全に陥った。その結果、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。その後の北海道胆振東部地震においても全道のブラックアウトが発生し、固定モニタリングポストのうち 11 局が無停電電源の枯渇で 3～4 時間で測定を停止した。通信にも深刻な影響が発生しており、NTT の地上固定回線の交換局や各社携帯回線の基地局の非常用電源が枯渇し、道内の一部の地域では実際に地上の通信ネットワークを喪失した。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には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。

また、放射線モニタリング技術についてもさまざまな限界が見え始めている。例えば、モニタリングポストにおける高精度測定の主力である光電子増倍管を用いたシンチレーション検出器は、特性もよく研究されて検出器としての技術も確立しており長年の運用実績とノウハウの蓄積がある。しかしながら、検出器の光電子増倍管は真空管であり衝撃や温度変化に弱いこと、信号処理やバイアス回路など付随する計測用回路等が大型なこと、またこれらを屋外で安定して運用するために必要となる温度や湿度の管理機構、筐体や局舎にかかる設置や運用のコストの問題などがあり、稠密かつ機動的なモニタリング体制を構築することが困難になっている。

このように、原子力防災の一層の強化に当たる課題が明らかとなる一方、近年の通信や半導体技術の進歩はこれらの克服に有効と思われる技術をもたらしている。

例えば、近年の IoT 技術の進歩により、非常にシンプルな小型センサーを持つノードを大量に展開してネットワークで結び、大量のデータをリアルタイムで収集して解析するという手法が現実のものとなりつつある。その中で注目されているものの一つが LPWA (Low Power Wide Area) 通信で、小型低消費電力が求められる IoT 機器に適合した通信技術であり、伝送レートをセンサの読み取り値のやり取り程度に制限する代わりに数百 m～数 km 程度の通信距離と乾電池程度で年単位稼働可能な低消費電力を実現している。この特徴は電源喪失時でも安定したデータ収集を実現する上で極めて好ましい特性と言える。さらに IoT 技術においてはそれぞれのノードが一定のインテリジェンスを持つことが想定されており、それを実現するためのシングルボードコンピュータが誕生している。このシングルボードコンピュータは従来のコンピュータのようなグラフィックや通信機能を持たない代わり

に、低消費電力で各種センサからのデータ収集に必要なインターフェースや高度な電力制御機能を内蔵しており、従来のマイコンに比べても低消費電力と十分な信号処理・計算能力を保有している。

また、半導体技術と光計測市場の進展と拡大により、光電子増倍管のような増幅効果を持つ半導体受光素子である APD (Avalanche Photo Diode) や MPPC (Multi Pixel Photon Counter) が安価に広く普及しており、これを放射線計測に応用することで、小型軽量、振動や衝撃にも強く、高電圧のバイアス電圧や複雑な外部機構が不要で、消費電力も小さい使い勝手の良い検出器が実用化されている。このような運用環境を問わない検出器はやはり緊急時の機動的な運用に適していると言える。

このような近年の技術進展内容をフォローし、福島県及び周辺自治体における環境放射線モニタリングの実施体制や、国内での原子力防災体制に反映させることは有効かつ有用である。

そこで本事業では、MPPC を用いるシンチレーション検出器やシングルボードコンピュータ、低消費電力かつ長距離通信が可能となる無線通信技術を組み合わせた観測装置実現に向け、要素技術の検証や概念検討に必要な情報収集と検証を実施した。

## 2 研究目標

本研究においては、放射線計測技術や通信技術に関する最新の技術動向を踏まえ、MPPC を受光素子とするシンチレーション検出器及び低消費電力かつ長距離通信が可能となる無線通信技術 (LPWA, Low Power Wide Area) を組み合わせた観測装置実現を目指す観点から、以下のような内容についての調査研究を行う。放射線計測技術や通信技術に関する最新の技術動向を的確に反映して原子力防災におけるモニタリング能力の向上を測る。

1. 国内の無線データ通信技術の動向及び国内における主な LPWA 規格の動向についての調査
2. 環境放射線モニタリングに適した LPWA 規格についての検討と、環境放射線モニタリングに適した LPWA 規格の性能評価
3. 低消費電力の CPU と MPPC を受光素子とするシンチレーション検出器を用いた環境放射線モニタリング機器の試作

## 3 国内の無線データ通信技術の動向

### 3.1 無線データ通信全般の動向

#### 3.1.1 携帯回線の状況

国内における無線データ通信においては、携帯事業者が提供する携帯回線が主力である。国内の2020年の人口に対する携帯電話の契約数の割合154.5%と国民一人に1回線以上の普及を達成しており、国民の日常生活に深く浸透していることがわかる。

国内の携帯回線は、NTTドコモ、KDDI、ソフトバンク、楽天モバイルがMNO（移動体通信事業者）として自社が保有する設備で通信エリアを展開してサービスを提供しており、自社で展開したネットワークをMVNO（仮想移動体通信事業者）に貸し出す行うことで自社のネットワークの稼働率向上と利益の拡大を図っている。ネットワークとしては3G回線や周波数利用効率や通信速度の向上したLTE/4Gで、700/800 MHz帯のいわゆるプラチナバンドのほか、3GやLTE/4Gにおける世界共通の周波数帯である2.1GHz帯、2GからLTE/4Gへの転用である1.5 GHz帯、新規にLTE/4Gに割り当てられた1.7 GHz帯で展開されている。3G回線では概ね数Mbps程度、現在主力のLTE/4Gでは従来の3Gにくらべて広いチャンネルあたりの周波数帯域、64QAM（64値を表現可能な直交振幅変調方式）を含む多様な変調方式、複数のアンテナを使用するMIMO、複数のチャンネルを束ねるキャリアアグリゲーションなどの技術で周波数利用効率を高めて最大数百Mbps程度の通信速度と回線収容能力を向上させている。

さらに次世代の通信規格として高速、大容量、低遅延を特徴とする5G通信[1]の実用化が始まっている。この5G通信ではLTE/4Gに比べても広い周波数帯域が必要となるため、国内においては3.7 GHz帯や4.5 GHz帯といったいわゆるSub 6 GHzに各社100 MHz幅、ミリ波帯の28 GHz帯に400 MHz幅の割り当てが行われている。従来3G/LTE/4Gで使われていた周波数も5Gに転用されることになるが、その場合5GでもLTE/4Gと同等の通信に制限される。

これまでに携帯事業者が展開した通信エリアは国民の一般的な活動の範囲はほぼ完全にカバーしている。例えばNTTドコモの場合、2008年に3Gハイスピードエリアの人口カバー率100%を達成[2]しており、2016年度にはより高速で周波数利用効率の高いLTE/4Gによる99.8%を達成[3]している。各社とも現在の通信サービスはLTE/4Gが中心となっており、すべての事業者においてすでに3Gによるサービスの終了済みあるいは終了を予定している。3Gが利用可能な地域においても2.1 GHz帯の基地局の合理化が始まっており、700/800 MHz帯に対応していない端末は実質的なエリア減少となっている。例えばNTTドコモでは合理化に伴う通信エリアへの影響に関する情報公開を行なっている[4]。この公開された情報に基づけば、例えば北海道電力泊原子力発電所付近においても旧規格の端末で合理化による影響を受ける可能性があることがわかる。3Gのサービスが終了した後はLTE/4Gを利用することになるが、利用者が少ないと見込まれる人里離れた地域では3GとLTE/4Gではエリアが必ずしも一致しない。モニタリングポストは人里離れた場所に設置されていることも多いことから、通信サービス終了への対応や通信機器の更新は携帯事業者からの発表に基づき適切に行

う必要がある。

また次世代通信規格である 5G では、Sub 6 GHz やミリ波帯といった非常に高い周波数を使用しており、3G や LTE/4G に比べて電波の直進性が顕著となって不感地域が発生しやすくなる。従来の 3G や LTE では問題にならなかった地形や建物もエリア展開の支障となることから、従来の 3G や LTE/4G のような面的なエリア展開を行うにはよりきめ細やかな基地局の設置が必要となる。そこで一律に全国展開を行うのではなく、地域・産業のニーズに応じて地域の企業や自治体等が特定地域内のみでサービスに必要な自営網を展開する、いわゆるローカル 5G のような使い方も検討されている [5]。

このように主要なサービスエリアが構築されサービス向上のための技術更新が進む一方で、非居住地域を中心に不感地域が多数残されている。そのため、避難・救助をはじめ、物資供給等の応急活動のために緊急車両の通行を確保するための道路（緊急輸送道路）や、自然公園や登山道などの観光地等でのニーズに対応することが難しい状況が続いている。過疎地域におけるドローンによる物資輸送の試みにおいても、ドローンの飛行経路が圏外となってしまうことがしばしば課題になっている。また原子力防災においても、山間部などを中心に不感地域のために携帯回線によるデータ送信ができないモニタリングポストが少なくない。そのため総務省でも電波利用料を原資とした不感地域の解消に向けた事業を進める [6] ほか、緊急輸送道路や避難路沿いのエリア化に取り組む方針が示されているが、逆に言えばそれらの経路沿いから外れた場合のエリア化があまり望めない状況にあるともいえる。

### 3.1.2 衛星通信の状況

無線データ通信で主力となっているものの一つに通信衛星を活用したサービスがある。地表の衛星通信利用者と事業者の衛星通信用地球局の間を通信衛星を介して無線で結び、衛星通信用地球局で一般の通信網と接続している。通信衛星との間で無線接続が可能でさえあれば地上通信が困難な地域でも通信が可能となるため、山間部や離島のような地域、災害時の通信手段として認知されている。各通信事業者から通信衛星を利用した通信サービスが提供される [7][8][9][10] ほか、東日本大震災時の公的通信で活用された自治体衛星通信機構の地域衛星通信ネットワークのように、通信事業者の衛星や帯域を借り上げて独自に運営される通信サービスもある [11]。

衛星通信は上空に衛星が存在する場合のみ利用可能となるため、多くの場合 36000km 上空の静止衛星軌道に通信衛星を設置することで、常にサービスエリア地域の上空に衛星が滞在し、衛星の持つ指向性アンテナで地上の目的とする地域を常時カバーすることが可能となる。その一方、静止衛星が上空 36000km と遠い場所に存在するため、自由空間伝搬損失だけでも 200 dB と経路上での通信損失が大きく雲や降雨の影響を受けやすくなったり、地球局側の送信出力やアンテナが大型になってしまうことが課題である。また、静止衛星軌道の利用は ITU-R による国際的な調整が行われている [12] が、通信需要の増大とともに軌道の混雑がすすんでいること、また通信衛星の持つ通信容量（インマルサット社の high capacity 中継器で 6 Gbps）をエリア内のユーザで共有するため、ユーザあたりの速度が制限される（最大で数十 Mbps 程度）上、災害時のような通信需要の急激な増大時への対応が課題となっている。事業者側でも 1 Tbps に及ぶ大容量中継器の搭載や衛星側のアンテナのマルチビーム化によるエリアの細分化・フレキシブル化で通信の高速化や利用効率の向上をすすめている

が、特に東日本大震災以降、通常は訓練時程度しか稼働しない緊急時用通信としての衛星通信の導入が増えていると見られ、これまで以上に緊急時の輻輳リスクが高まっていると考えられる。

近年、低軌道（～2000 km）ないし中軌道（2000 km 以上静止軌道未満）で、小型軽量かつ単純化した衛星を多数同時に運用する、いわゆる衛星コンステレーションによるブロードバンドサービスが始まっている [13]。この考え方の通信サービスとしては 77 個の衛星を使用する構想であったイリジウムが古くから知られているが、近年のサービスではその衛星数の多さに特徴がある。その中でもサービス展開で先行しており、ロシア侵攻の際のウクライナにおけるインターネット環境提供でも話題となった Space X 社のスターリンク [14] の場合、3000 機以上（2022 年秋時点）の衛星を高度 340km、550km、1150km の軌道に展開している。このため、従来の静止衛星利用の場合に比べて通信経路上での伝搬損失と遅延が少なくなり、地球局および衛星両方のアンテナや出力を小さくしつつ、地上通信並みの数十 ms の低遅延遅延かつ数百 Mbps にも達する高速通信を実現している。なお、2023 年 2 月現在、スターリンクは日本国内では KDDI がサービスプロバイダとなっており [15]、災害時でも安定かつ高速な通信を必要とする行政や企業向けのサービスも開始している [16]。

衛星コンステレーションは衛星通信において大幅な能力向上をもたらしたものの、手法に伴う課題もある。まず、静止軌道のように常時衛星が上空にあるわけではなくなるため、常時通信できるようにするためには多数の衛星を同時に運用し、安定な通信確立に必要な数の衛星が上空に来るようにしつつ、地上のユーザの設置するアンテナも衛星を追尾するよう方向を制御しているため電力消費は大きくなる。また、これらの衛星は低高度を周回するため大気摩擦の影響が無視できないため、衛星の寿命が短くなる問題がある。大気摩擦の影響としては、すでに 2022 年 2 月に磁気嵐による大気密度の上昇によって 40 以上の衛星が大気圏に突入した事例が発生している [17]。そのため事業者が衛星数を維持し続ける必要がある。また、これらの衛星とインターネットとの接続点がボトルネックになる可能性がある。たとえば、スターリンクの場合はサービスエリアとなる国に数カ所の地球局を設置し、地上の設備を経由してインターネットに接続している。日本でも国内に数箇所の地球局を配備し、この地球局を経由した通信が東京と大阪で外部のネットワークに接続しているとされる。これらの設備が支障をきたした場合は、広範囲で大きな影響を受ける可能性がある。

このほか、楽天モバイルは米・AST SpaceMobile(AST) と連携し、低軌道人工衛星を使って地球上におけるモバイル通信サービスの提供エリアを拡大する「楽天モバイルスペース計画」に取り組んでいる [18]。これは低軌道衛星通信の低損失・低遅延である特徴を活かし、衛星を携帯電話の基地局化するという世界初のプロジェクトであり、携帯回線一般が持つ過疎地域でのエリア問題の新たな解決方法とも言える。なお、過疎地域のエリア問題については、KDDI がスターリンクを島嶼等地域での au 携帯電話用基地局のバックボーン回線として使用している [19]。

### 3.1.3 その他の通信規格

■**地域 BWA・自営 BWA** 地域 BWA[20][21] とはデジタルデバイド解消や地域の公共の福祉向上を目指した 2575 ～ 2595 MHz を使用した地域事業者向けの無線通信で、主に各地域のケーブルテレビ局の有線ブロードバンドサービスの延長として地域内での無線ブロードバンドサービスとして提供されていることが多い。通信方式は Wi-MAX R2.1 で、多くの市販される LTE スマートホンや無線

ルータが対応している [22]。

自営 BWA は、企業や自治体などが地域 BWA に割り当てられた同じ周波数と通信方式を使用して独自の通信網を構築するものである。自営網では通常の LTE と同じ数百 Mbps の通信が可能となるが、同じ周波数で行われる地域 BWA が一次業務、自営 BWA が二次業務と規定されており、許可される構築範囲も地域 BWA の通信に妨害を与えないよう自らの管理する建物内や敷地内に限定して免許が交付される。自営 BWA には、従来の PHS と同じ周波数と同じ出力で TD-LTE 方式を使用する免許不要の sXGP (Shared XGP) もある [23]。

■Wi-RAN これは内閣府革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) の中で開発された技術 [24] で、携帯電話に比較して低い周波数帯 (VHF 帯、UHF 帯) を用い、比較的大出力の数 W 程度で数十 Mbps 程度の通信速度と数十 km の範囲内の通信を行う地域無線ネットワーク (Regional Area Network) である。Wi-RAN は ARIB STD-T119 として標準化され [25]、200MHz 帯公共ブロードバンド移動通信システムとしても実用化されており、サービスの提供事例もある [26]。さらに地上テレビ放送のデジタル化によって発生した VHF 帯の空き周波数の有効利用に関する検討の中の一つの候補として検討が進められている [27]。



## 4 環境放射線モニタリングに適した LPWA 規格についての検討

### 4.1 無線通信の持つ特性

無線通信の規格の検討をする際、しばしばカタログスペック上の到達距離と通信速度だけで規格の是非が語られることがある。しかし、実際の通信においてはすべての要素でカタログスペック通りの性能が得られることはなく、使用する条件に応じた能力を示すことになる。そこで、最初に実際に使用するにあたって念頭におくべき無線通信の特性について考える。

一般に通信速度と到達距離はトレードオフの関係にある。ある通信経路で伝送可能な最大レートである通信路容量  $C$  は、シャノン・ハートレーの定理によって次のように与えられる。

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1)$$

ただし、 $B$  は通信で使用する帯域幅、 $S$  は信号の平均の強さ、 $N$  はノイズの強さである。この関係から、通信速度は経路の信号対雑音比 ( $S/N$ ) や通信に利用可能な帯域幅に左右されることがわかる。また通信経路のノイズがホワイトノイズの場合（多くの実用的な通信経路では良い近似となる）は周波数にかかわらず様にノイズ電力が分布するため、 $B$  に比例して  $N$  が大きくなる。このため、送信出力や空中線の形式や利得が同一であった場合、高速通信をしようとする  $S/N$  が悪化して通信路容量  $C$  が小さくなる。このためカタログ上の最大通信距離と最大通信速度を同時に達成することはできない。これを改善するには  $S/N$  を改善する必要があるが、一番簡単な方法は送信電力や空中線利得を増やして  $S$  を大きくすることである。しかし、空中線利得増大はアンテナの大型化、送信電力増大は機器の消費電力増大を伴うこととなるが、これらは法的な制約、あるいは電源容量や物理的・形状・大きさの制約などを受けることから、現実使用する際はなんらかのトレードオフは避けられないこととなる。携帯電話では通信速度は重要な要素であることから、比較的大きな送信出力を維持している。一方、LPWA は十分な電源容量を確保できない可能性のある IoT デバイスなどへの実装を念頭にしていることから、通信路容量や通信帯域幅を抑えて低出力・低消費電力でありながら長距離通信を実現している。

また、通信距離を安易に伸ばすと地域内で使用可能な通信容量を減少させることとなる。これは電波の届く範囲では同じ周波数を使うことができなくなるためと考えるとわかりやすい。これを回避するために拡散スペクトラム方式、狭帯域化による混信回避といった手法がとられるが、いずれの方法でも通信速度の低下をもたらすことになる。この場合、電波に指向性を持たせることができれば、指向性から外れた地域で同じ周波数が利用できて周波数資源の有効活用になるだけでなく、指向性のある方向では空中線利得の向上で実効的な送信出力増大や受信感度の向上で通信距離の伸びが期待できる。LTE/4G/5G においてもこのような考え方が取り入れられているが、LPWA の場合は指向性を持つアンテナの使用は法令上認められていない。

以上のように、到達距離を求めると通信容量や消費電力において不利な状況で運用することになり、消費電力を追求すると到達距離や通信容量において何らかの制約を受けることになるし、通信容量を

増やすためには到達距離や消費電力の妥協が必要である。そのため導入にあたっては利用実態を十分分析し、目的に合った適切な規格を選ぶ必要がある。

## 4.2 国内の主な LPWA 規格の動向

### 4.2.1 国内の主な規格

ここで、国内の LPWA に関する状況を検討する。現在国内で比較的普及していると思われる LPWA 規格についてまとめたものが表 1 である。

表 1 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
ELTRES		80 bps		
Wi-Fi HaLow		150 kbps ~		
Wi-SUN FAN		50 kbps ~ 600 kbps	メッシュ型	
ZETA		0.1 ~ 100 kbps		
UNISONet		370 bps ~ 12 kbps		
LTE Cat. M	携帯	0.3 ~ 1 Mbps	スター型	不可
NB-IoT		62/21 kbps (Up/Down)		

これらの規格の中で普及で先行しているのは Sigfox[28] と LoRaWAN[29] で、ZETA[30] および Wi-SUN FAN[31]、ELTRES[32]、UNISONet[33] は後発の規格であり、特に Wi-Fi HaLow[34] は 2022 年 9 月の総務省令改正 [35] により国内利用可能となった規格である。これらの規格はすべて免許不要の特定小電力無線局 [36] であり、総務省告示 [37] によってテレメーター用、テレコントロール用及びデータ伝送用に規定される 920 MHz 帯を使用している。そのため、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であり、設置や使用の制約が少ない。一方 LTE Cat. M[39] や NB-IoT[39] 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。

### 4.2.2 ネットワーク形態

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、ELTRES、Wi-Fi HaLow、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、UNISONet はメッシュ型

ネットワークが構築できる規格である。なお、Wi-Fi Halo はスター型ではあるものの中継機による到達距離延長は可能となっている。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1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、転送トラフィックの増大などの問題も発生する。UNISONet では、高精度の時刻同期を行なった各ノードが同一データを同一タイミングで一斉に送信すれば合成波が受信可能になるという同時送信フラッディング [40] という手法でメッシュ型ネットワークの欠点を克服したとしている。

#### 4.2.3 サービス提供方式

次にサービスの提供方式を比較する。通信事業者側がサービスエリアを展開しているのが Sigfox や ELTRES、一部の LoRaWAN 事業者である。LTE Cat. M や NB-IoT のような方式は携帯電話の通信規格として定められているため、携帯電話事業者が展開するエリアに準じた範囲で利用できる。この場合、ユーザはサービスエリア構築のための初期コストを負担することなく、通信端末を導入するだけで通信ができるのが利点である。その一方、エリア展開やエリア内の端末収容能力も通信事業者次第となる上、災害時などは通信事業者による復旧まで利用できない、あるいは経営破綻による事

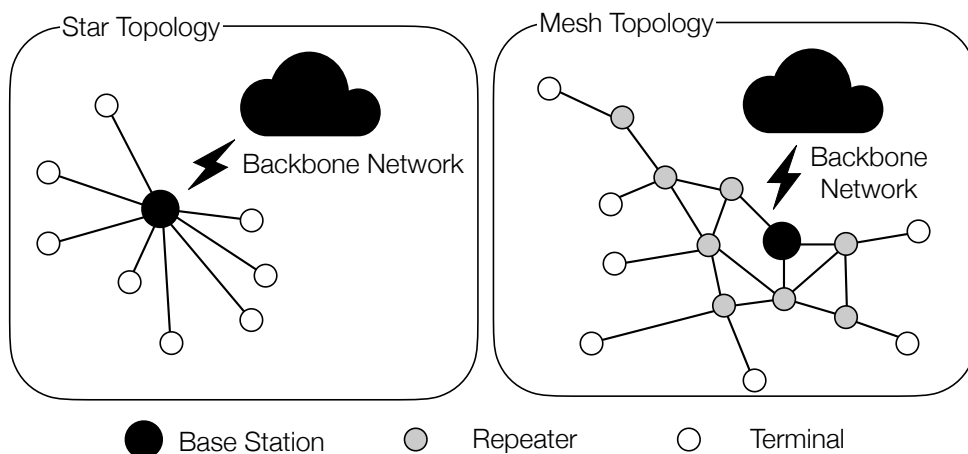


図1 スター型とメッシュ型のネットワーク形態のイメージ図。スター型では、既存回線との橋渡しとなる基地局が端末を直接収容し、メッシュ型では端末がメッシュ状のネットワークを構成する。

業停止といった通信事業者由来のサービス停止のリスクがある。実際 Sigfox の場合、運用に必要な基地局とクラウドサービスを提供するフランスの Sigfox 社が 2022 年に経営難に陥り [41]、サービス継続に不安が発生したことがある。一方自営網を構築する場合、自らの利用形態に応じたきめ細かい基地局や中継局設置で通信エリアや通信容量を確保しやすい。しかし、自ら基地局や中継局を設置してネットワークを構築したり、方式によっては自営網内の通信管理用サーバを維持管理するコストが発生する。例えば、ZETA ではネットワーク管理用のサーバ利用に年間数十万円程度の費用を負担するか構築時にオンプレミスサーバを購入する必要がある [30]。このため、端末自体の単価は安くても、自営網の構築や維持管理までのコストを含めると比較的高価になる場合が少なくない。

### 4.3 環境放射線モニタリングに適した LPWA 通信と規格選定

#### 4.3.1 求められる特徴

ここで、環境放射線モニタリングに適した LPWA 規格について検討する。

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、エリア拡大のたび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。

緊急時には災害の直接的・間接的影響で基地局が接続する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、生き残った基地局を起点としてネットワークを再構築する必要に迫られる可能性がある。直接基地局に接続する必要があるスター型では、使えなくなった基地局がカバーしていたエリアでは使用できなくなる。一方メッシュ型ネットワークの場合、利用可能な基地局を含むメッシュを拡張する形でネットワークを再構築できる可能性がある。一部のスター型ネットワークの規格では中継機による到達距離拡大ができる場合があるが、この場合スター型の各スポーク間を一次元的に伸ばしていくだけであり、限られた時間でできるだけ多くのモニタリングポストのデータ通信の確立を狙うには向いていないと思われる。

以上から、環境放射線モニタリングに適した LPWA の要件としては

- 自営網が構築できること
- メッシュ型ネットワークであること
- 通信可能距離がモニタリングポストの設置間隔程度であること
- スペクトルデータ転送に必要な通信容量であること

が考えられる。また、当然のことながら、

- 消費電力
- 市場流通や調達の容易さ
- 妥当な価格であること
- 通信規格の継続性や互換性（規格適合性の認証団体など）

といった面でも評価される必要がある。

#### 4.3.2 利用可能な規格での検討

前節の要件を踏まえ、国内利用可能な各規格の検討をおこなう。表 1 のうち自営網の構築できるメッシュ型 LPWA である ZETA、Wi-SUN FAN、UNISONet を比較する。

##### ■ZETA ZETA[30] は

- 超狭帯域（UNB: Ultra Narrow Band）による多チャンネルでの通信が可能
- 最大 4 段までのマルチホップ（中継）が可能
- Mesh ネットワークによる広域での分散アクセスが可能
- 双方向での低消費電力通信が可能

を特徴とするメッシュ型 LPWA ネットワークである。送信出力 20 mW ながら 0.6 ～ 2 kHz の狭帯域通信を行うことで、各ノードは見通しで 2～10 km という到達距離を実現するとともに混信にも強い。ZETA のモート（中継器）は自己組織的なメッシュネットワークを構成しており、そこに接続したセンサー（端末）と基地局（アクセスポイント）が最大 4 回のマルチホップで双方向通信を行うことができる（図 2）。ネットワーク運用にあたっては、端末登録や各種管理を行うための ZETA サーバをアクセスポイントと接続可能なインターネット側に設置する必要がある。

ZETA 規格をサポートする企業や団体によって ZETA Alliance が結成されており [38]、各社からさまざまな形で製品供給やサービスが提供されている。最近も国内で新しい通信モジュールが供給開始され、ネットワーク経由でのモジュールのファームウェア更新やセキュリティの強化、消費電力の低減が実現している [42]。国内での利用実績も多数あり、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 [43] をはじめ、全国各地での官民による利用事例が多数ある [44] ほか、過去の規制庁委託事業において、島根県松江市付近でモニタリングポストへの装着を想定した多彩なネットワーク構築を確認した実績もある [45]。しかしながら、到達距離や大規模な展開の代償として 1 回あたり 50 bytes、30 秒ごとの送信しかできない。そのため、モニタリングポストの線量率データ程度であれば問題なく利用可能であるものの、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。また、ZETA サーバは ZETA Alliance 加盟企業の提供するサーバサービスを利用するか自らが買い取ってサーバを保有する必要があるため、導入や運用に一定のコストが発生する。

■Wi-SUN FAN Wi-SUN FAN[31] は、Wi-SUN 規格の一つで、屋外などでの利用を想定したプロファイルである。見通しで 500 m の通信能力をもち、Leaf（端末）、Router（中継器）、Border

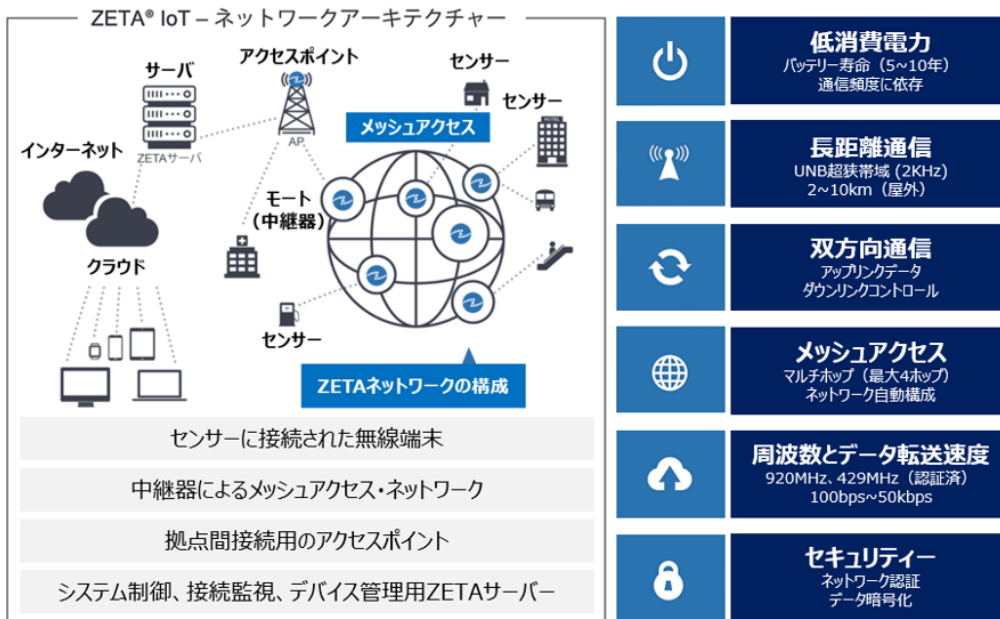


図2 ZETA の概要 [30]。メッシュ構造の中継機ネットワークに端末がアクセスし、混信に強く周波数資源が有効に利用できる狭帯域双方向通信を行うことが特徴である。最適な通信経路を動的に選択するため、通信環境の変化に対しても安定した通信を確立できる。

Router (基地局) によって動的に構成される IP v6 メッシュネットワークでは最大 300 kbps の双方向 TCP/UDP 通信をサポートしている。Leaf~Border Router 間は最大 20 段の中継が可能であり、Border Router には自分に接続する Router と Leaf を管理する機能が実装されているため、ZETA のようなネットワーク管理サーバは不要である。また、ZETA では中継器によるデータ収集はできなかったが、Wi-SUN FAN では Router は中継だけでなく Leaf と同じ機能を持つことができる。さらに、各 Border Router が管理するネットワークを 1 つの PAN(Personal Area Network) という単位として、複数の PAN を構成して WAN 経由での連携運用も可能である。この機能を使えば、スポット的に分散する多数の Wi-SUN FAN ネットワークを一つの大きなネットワークとして連携して運用することも可能となる (図3)。

この規格は京都大学が権利を保有する大学発の国産規格である。Wi-SUN 規格をサポートする企業や団体により Wi-SUN Alliance が結成されており [46]、Wi-SUN Alliance による認証を受けた機器同士であれば相互接続性が保証されている [47]。Wi-SUN FAN も認証を受けたチップの市販が開始されており [50]、チップを活用した機器の販売や活用事例も増えている [51]。また、Wi-SUN では Wi-SUN FAN の他に、スマートメータでの利用を想定した Wi-SUN ECHONET for B route、さらに家庭内各種機器間通信規格としての Wi-SUN HAN や Wi-SUN Enhanced HAN といったプロファイルが先行してリリースされているが、Wi-SUN FAN を含めこれらの PHY 層と MAC 層はそれぞれ IEEE802.15.4g、802.15.4e と共通である。これは無線通信部分のハードウェアは共通化が

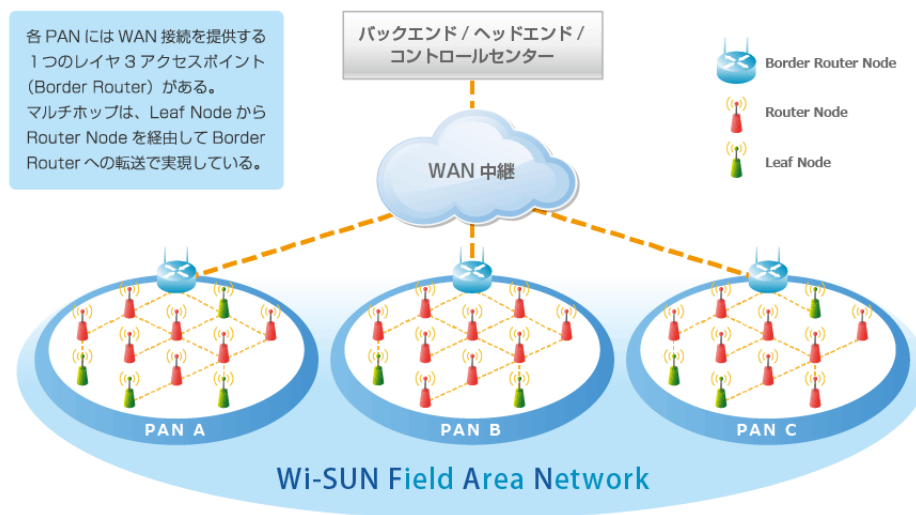


図3 Wi-SUN FANのネットワーク構成 [31]。多段接続可能なRouterとLeafがメッシュ上に接続してBorder Routerによって統括されるネットワーク（PAN）が構成され、PAN同士もBorder Routerの接続する外部ネットワークを通じて連携することが可能である。

しやすくチップの量産効果を期待できることを意味する。すでに経済産業省のエネルギー基本計画に基づき電力会社が急速に導入を進めている全世帯・全事業所へのスマートメーターではWi-SUN ECHONET for B routeが圧倒的シェアを誇っていることから、Wi-SUN FANにもその量産効果を期待することができる。

■UNISONet 従来のメッシュ型ネットワークではデータの転送が必須となるため、メッシュの構成を中継局が把握する必要がある。そのため、一定の頻度でノード間通信やブロードキャストが発生して通信容量や電力を消費してしまう問題が発生する。大規模なネットワークになればなるほどこのような制御のための通信の比率が高まることが容易に予想される。UNISONet[33]は、同時送信フラッドングという手法でこのような問題を解消したとしている。すなわち、複数の箇所から同時に届く同一の電波は重ね合わせが効くことを利用し、ネットワークに参加するすべてのノードについて高い精度で時刻同期をとった上で、前のノードが送信したデータを受信した複数のノードが受信しだい送信を行うと、次のノードにはほぼ同一のタイミングで複数のノードからの信号が届くこととなる。これを目的とするノードに届くまで繰り返す[33]。これに高精度の時分割スケジューリングを組み合わせることで、高いスループットや安定した動的ネットワークの構築を実現するだけでなく、省電力化と送信データのS/Nの改善も達成している。

UNISONetの規格としてはLPWA用の周波数で展開される高速通信タイプと長距離通信タイプの

二つの規格と、無線 LAN と同じ 2.4 GHz 帯の規格の 3 つがある。この規格は東大で開発された国産規格であり、供給も東大発のベンチャーであるソナス株式会社が行っている。しかし他の規格のように、規格をサポートする企業等が連携して普及のための活動や供給体制を構築してはいないようである。そのため、新しい方法による効率的なネットワーク運用が実現できる可能性があるものの、現時点では他の方式に比べて供給体制や規格の継続性について不安がある。

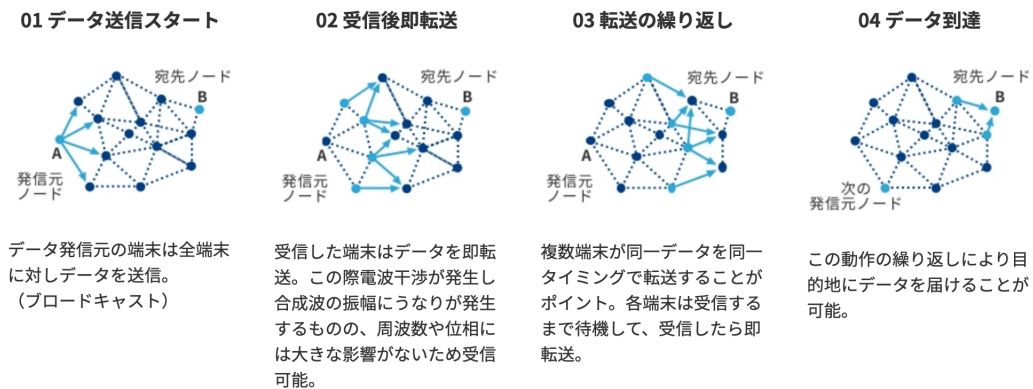


図 4 UNISONet で行っている同時フラッディングによるデータ送信の概念。図は [33] より引用。



## 5 環境放射線モニタリングに適した LPWA 規格の性能評価

### 5.1 実施内容

島根県原子力環境センターおよび京大情報学研究科原田研究室の協力のもと、Wi-SUN FAN の実環境における運用試験を行なった。試験では島根県原子力環境センターと深田北にあるモニタリングポストを結び、FTP による通信確立が可能かどうか評価することを目標とした。当初計画における機器構成を図 5 に示す。モニタリングポストを操作するための Wi-SUN FAN 回線はローム社製 BP35C5 チップ内蔵の Router で構成した。あらかじめ全ての計画地点に Router を配置するのではなく、原子力環境センターに近い地点から順に接続を確認して次の地点で中継局設置…という形で伝達経路を伸ばしていく方法を想定した。今回の FTP 通信試験のためには深田北局の LAN と Wi-SUN FAN の IP v6 ネットワーク用の機材では Border Router~Router 間の接続状況のモニタリングしかできないこと、また IP v6 回線、各地点で Border Router を稼働させて原子力環境センターとの接続を確認した後 Router を設置、そして次の地点に移動するという作業を繰り返した。このため、最終的には Border Router が原田研究室側で独自に伝搬状況を解析するためのデータ収集回線として IoT ゲートウェイ端末 [48] による Wi-SUN FAN 回線も構成している。

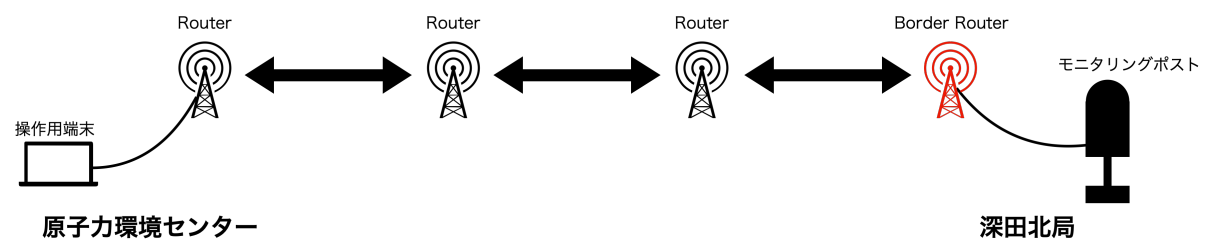


図 5 運用試験におけるネットワーク機器構成。基地局となる Border Router を深田北側に設置することになる。

### 5.2 ネットワーク設計

島根県原子力環境センター～深田北間は過去の規制庁委託事業において ZETA での通信試験を行なった経験のある地域であることから、当時の試験の際の伝搬状況を踏まえた計画を立てた。過去の規制庁委託事業の生馬公民館と島根県原子力環境センター間の通信試験の際、島根県原子力環境センターから 1.3 km 地点での中継点での受信電力が  $-111 \sim -117$  dBm であった。当時の ZETA の試験の際には保健環境研究所上に中継点を設けていないため、保健環境研究所による減衰が起きていると考えられる。ここで、保健環境研究所をモデル計算上取り扱いの単純なナイフエッジ状の障害物と看做したとき、ITU-R の勧告 [49] の与える減衰量は

$$L(\nu) = 6.9 + 20\log_{10}(\sqrt{(\nu - 0.1)^2 + 1}) + \nu - 0.1 \text{ (dB)} \quad (2)$$

ただし、 $\nu$ は無次元量であり、 $h$ を障害物の高さ、 $\lambda$ を波長、 $d_1$ 、 $d_2$ をそれぞれ送信アンテナと障害物、障害物と受信アンテナの距離とすると、

$$\nu = h\sqrt{\frac{2}{\lambda}\left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}\right)} \quad (3)$$

で与えられる。仮に保健環境研究所を高さ 20 m ナイフエッジとみなした場合、 $d_1$ を原子力環境センターと保健環境研究所の距離として 20 m、 $d_2$ を 1280 m とすると、 $L(\nu) = 21.1$  dB となる。つまり、保健環境研究所屋上にアンテナを設置した場合、以前 ZETA の試験で設置した島根県原子力環境センターから 1.3 km の中継点での受信電力は  $-90 \sim -96$  dBm 程度と見積もられる。ローム社 BP35C5 の公称受信感度は  $-98 \sim 105$  dBm であるため [50]、仮にノイズマージンとして 10 dB 程度を見た場合、ZETA における生馬公民館との接続のための中継点程度が通信の限界であるといえる。すなわち、試験を行う地域で見通しが良い条件であれば、概ね 1 km 程度まで Wi-SUN FAN での通信が確立できると考えられる。

このことを踏まえて計画したのが図 6 の中継局設置計画である。概ね 1 km の距離となるように、河川敷など中継局の設置に支障のない場所を選んで計画している。図 7 に示すとおり深田北手前一部を除きほぼ平坦な経路であるが、6 階建て（約 20 m）の島根県保健環境研究所があるため、原子力環境センターから深田北を直接目視することはできない。そこで、島根県保健環境研究所屋上に中継局を設置した。事実上この保健環境研究所の中継局が原子力環境センターとしての起点と考えることができる。

地理院地図  
Vector



図6 運用試験における中継局設置計画。島根県原子力環境センター

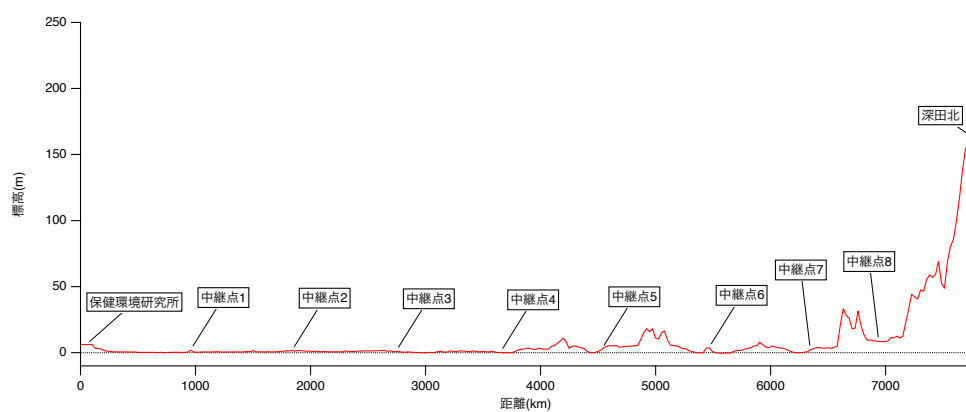


図7 経路の標高の様子

### 5.3 接続試験

以上のような検討を踏まえ、原子力環境センター～深田北の接続試験を行なった。Wi-SUN FAN は 4.3.2 で述べたように Leaf、Router、Border Router で構成されるネットワークを構成する。今回の試験では Leaf を使わず、複数の Router と Border Router として機能する IoT ゲートウェイを使用した。いずれにも技術基準適合証明取得時に認められている絶対利得 2.14 dBi のアンテナを使用している。Router および IoT ゲートウェイで使用している Wi-SUN FAN 無線チップである BP35C5 の主なスペックと IoT ゲートウェイのスペックをそれぞれ表 2 と表 3 に示す。これらを高さ約 2 m 程度の自立型のポールの頂点付近に機器を取り付ける形になっており、2.14 dBi の垂直アンテナを 1 本装備した Router と、2.14 dBi のアンテナを 2 本装備した IoT ゲートウェイを装備した (図 8)。また IoT ゲートウェイが利用する GPS を装備した。原子力環境センターに設置した通信端末および設置した中継局の様子をそれぞれ図 9、10 に示す。

表2 Wi-SUN FAN 通信モジュール BP35C5 のスペック [50]

項目	内容
無線規格	ARIB STD-T108, FCC Part 15C 準拠
無線周波数	920 MHz 帯
変調方式	2 値 GFSK
データレート	ARIB STD-T108:50 kbps, 100 kbps, 150 kbps,300 kbps FCC Part 15C:50 kbps, 150 kbps,300 kbps
伝送電力	20 mW, 10 mW, 1 mW
受信感度	-105 dBm (TYP.) (50 kbps, BER < 0.1 %) -98 dBm (TYP.) (150 kbps, BER < 0.1 %)
周波数偏差	± 20 ppm 以下
消費電流 (VDD=3.3 V, データレート 50 kbps)	40 mA (TYP.) [送信 20 mW 出力] 20 mA (TYP.) [受信]
HOST インターフェース	UART(115,200 bps), GPIO

表3 IoT ゲートウェイの主な仕様

処理	CPU Core	ARM Cortex-A7
	CPU Clock	MAX:900 MHz
	Cache	32 kB(命令) / 32 kB(Data) / 128 kB(L2)
メモリ	RAM	ARM Cortex-A7
	ROM	MAX:900 MHz
無線	Wi-Fi	Dual-Band 802.11 ac/a/b/g/n
	Bluetooth	Bluetooth 5
	Wi-SUN	Wi-SUN FAN (ROHM BP35C5)
インターフェース	USB	USB2.0 Type-A
		USBType-C(給電)
	SW	タクトスイッチ ×3
スライドスイッチ ×1		
LED	2色 LED(赤/緑) ×5	
OS	Linux 5.4	
入力電源	DC4.8 ~ 5.25 V (1.5A)	
保証環境	動作時	0 ~ +40°C, 25 ~ 85 % (結露なきこと)
	保管時	-10 ~ +50°C, 25 ~ 85 % (結露なきこと)
外形サイズ	69 × 115 mm (突起物を除く)	



図8 中継局の構成。2.14 dBiの垂直アンテナを1本装備したRouter（黒いケース）と、2.14dBiのアンテナ2本を装備したIoTゲートウェイ（白いケース）が頂点付近に取り付けられている。ポールにはIoTゲートウェイの使用するGPSが取り付けられている。



図9 原子力環境センター 2F ベランダに設置した局の様子。





図 10 保健環境研究所屋上に設置した中継局の様子。地上高約 20 m である。



図 11 中継点に設置した中継局の様子。高さ 2 ～ 2.5 m となるように設置された。

接続の確認は以下の通りで行なった。車内で Border Router を稼働させた状態で中継局設置予定箇所まで移動し、中継局を設置した後 Border Router で接続を確立した Router および Leaf との接続経路を確認する rplsr コマンドを実行して経路情報を取得する (図 12)。すべての Router は、その時に受信できた周辺の Router ないし Border Router の信号の状況を元に、Border Router に向かって直接ないし間接の接続確立を試みることになる。そのため、場合によっては前段の中継局が追加された中継局をバイパスして直接 Border Router に接続する可能性もある。この現象は、事実上保健環境研究所屋上しか通信できないと考えられる原子力環境センター側を Border Router とすることで発生は抑えられるはずである。しかし、深田北でのモニタリングポストとの FTP 接続を最終目標とする場合、Wi-SUN FAN の構成する IP v6 ネットワークのゲートウェイが深田北でモニタリングポストと接続する必要があり、今回使用した機材では Border Router のみがこのゲートウェイの役割を果たすことができるため、やむをえずこのような構成になっている。

今回の計画では、直線的に並んだ中継局が順に接続すると期待したが、現地で展開した場合にはそうならなかった。その一例を図 13 に示す。これは中継 2 の地点に中継局を設置した際、中継 2 すぐに置かれた Border Router に各所がどのように接続したかを示すものである。我々の計画は原子力環境センター→保健環境研究所→中継 1 →中継 2 →中継 2 すぐそばの Border Router という接続を想定しているが、実際には各点が十分な品質が確保できた経路で Border Router に到達しており、想定と異なる経路で接続を確立している。例えば、中継 1 からはわざわざ中継 2 を経由しなくても直接 Border Router と良好な通信ができたため、中継 1 が直接 Border Router に繋がっている。

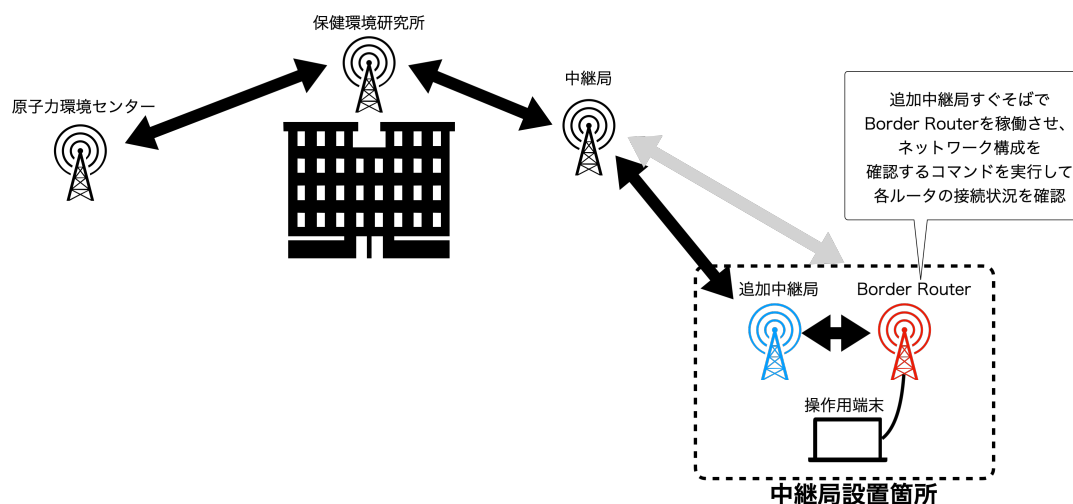


図 12 中継局設置と接続確認の方法。Border Router を追加中継局そばで稼働させ、Border Router で接続経路を確認する。すべての端末は Border Router へ到達するように通信確立を試みるので、状況によっては追加中継局がスキップされて直接 Border Router に到達する可能性もある (図中グレーの矢印)。

地理院地図  
Vector

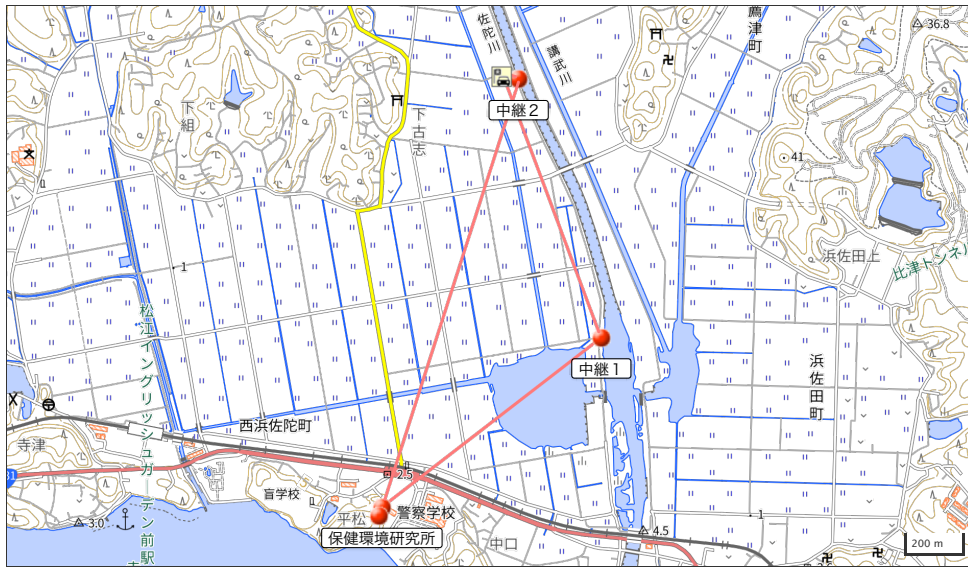


図 13 実際に発生した中継局の接続状況。中継 2 付近で Border Router で接続経路を確認すると、必ずしも期待した通りの経路で接続せず、品質の確保できた経路で繋がってしまっている。

この図 13 の接続の後、中継 3 の地点に中継局を設置して接続を確認したところ、中継 3 に設置した中継局以外接続が確立しなくなった (図 14)。

これは中継 1~2 間の距離 880 m に比べ中継 2~3 間の距離が 900 m と 20 m ほど遠くなっていること、また保健環境研究所からの直接経路も山裾に遮られる経路になっていることなど、通信確立が困難な状況になったためと考えられる。元々概ね 1 km 程度の到達距離を目安としていたが、これが現状の通信限界にかなり近い距離であり、少しの条件の変化で通信確立ができなくなる状況であったと思われる。実際、中継 3 を手前の中継 3-1 へ移動したことで接続が回復した (図 15)。

地理院地図  
Vector

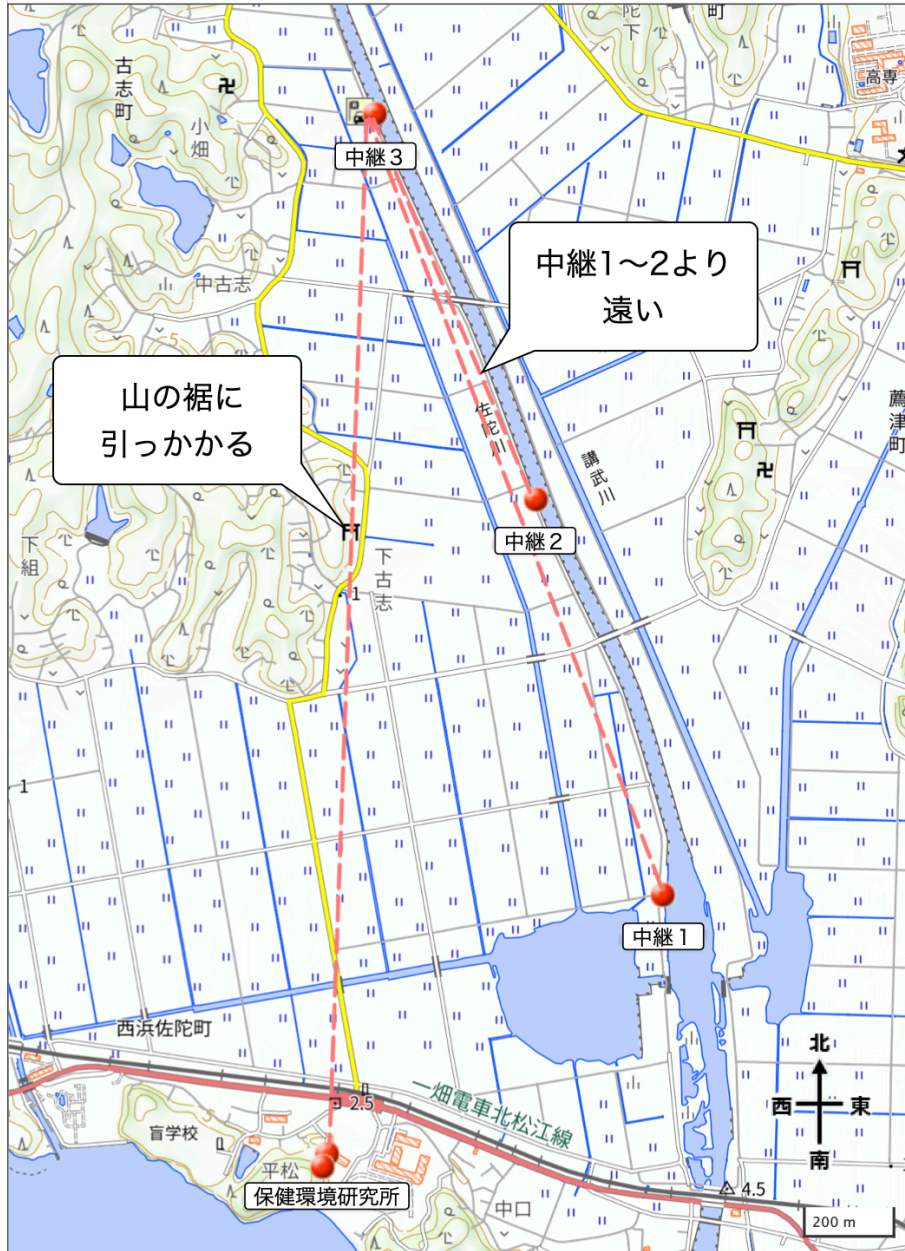


図 14 接続に失敗した時の状況。中継 2 → 3 への移動で通信が成立しづらくなっている様子がわかる。

地理院地図  
Vector

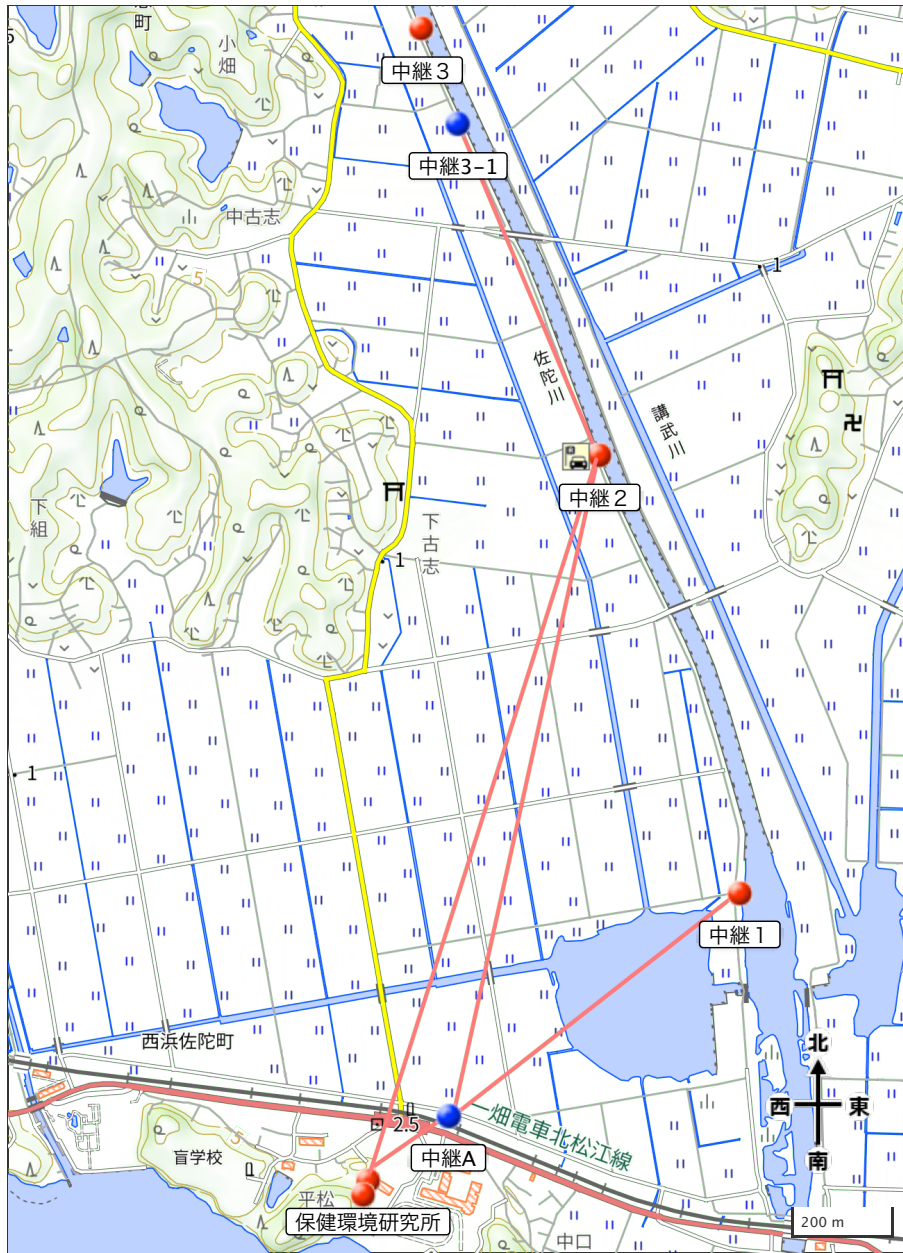


図 15 実際に発生した中継局の接続状況の別の事例。中継 2 付近に車載した Border Router で接続を確認している。中継 3 を中継 3-1 へ近づけたことで接続が回復している。中継 3-1 では依然として保健環境研究所との接続は回復しないため、中継 2 を経由することになる。中継 1 は中継 2 ではなく中継 A を経由した接続になっている。

## 5.4 考察とまとめ

今回の試験では、過去の委託事業時の ZETA の時には容易に実現できた深田北までの到達はできなかった。しかし、メッシュ型 LPWA の展開や運用における新たな知見が得られた。今回の試験での反省点としては、一本道の経路で規格の上限に近い距離で配置した中継点をバケツリレーさせる計画を立ててしまったことが挙げられる。このような計画により限られた機材で効率よく遠距離まで通信経路を確立できるように思われるが、中継点間距離を長く取ることは伝送経路の安定性に影響を与える。今回の試験の中継 3 で見られたように、机上計算では問題ないと考えられたのに現実の環境では予定通りの到達距離を得られない場合もあった。一方 ZETA は宍道湖一帯で多彩なネットワーク構築ができており、今回の Wi-SUN FAN との最大到達距離の差が効いていると見られる。そのため Wi-SUN FAN のような最大到達距離の短い方式ではより稠密な中継点の設置を行う必要があることが確認できた。また、机上では妥当と思われる経路であっても、実際にはその経路が選択されるとは限らないことも確認できた。元々 Wi-SUN FAN は機器自体がメッシュ型ネットワークを構成するシステムであることを考えても、あらかじめ計画した経路を取らせることを考えるより、多様な経路が可能となるよう系統全体で冗長性を持たせる方が有利であると思われる。

Wi-SUN FAN では現在実用化されている ver. 1.0 を拡張した ver. 1.1 の仕様策定が進められている [52]。このバージョンでは OFDM[53] に対応して 12.5 kbps～2400 kbps の範囲の通信をカバーすることで、距離重視のモードと近距離の速度重視のモードをサポートするようになる。このため、今回よりもより柔軟なネットワーク構成が可能になると期待される。ver. 1.1 は早ければ 2023 年中にも登場すると言われているため、利用可能になり次第、今回の結果を踏まえたより現実的なメッシュネットワークの構築試験を試みたいと考えている。

今回見られた Wi-SUN FAN の動的なネットワーク構成の特徴は、事象発生時に状況に応じて機動的に展開してモニタリングを実施するような使い方をする上で好ましい特徴といえる。例えば、超小型 KURAMA-II を平均で 2～300 m 程度間隔で配置するような使用方法であれば、今回見られたような接続を喪失するような事態を避けつつ超小型 KURAMA-II 自体で自律的なメッシュネットワークを構築できる可能性がある。このように Wi-SUN FAN 版の超小型 KURAMA-II の試作と試験的な展開も興味のある検討課題と言える。また、動的なネットワーク構成では、定期的な経路の見直して時間と共に当初とは異なる接続先を選択する中継点が発生しえる。そのため、系全体が最適な状態に落ち着くまでに一定時間を要することが想定されるが、今回の試験はそのような安定性を評価するには展開した機材の数やエリアの広さ、期間も不足している。今後ネットワーク構築後の長期的な安定性についての評価も必要と考えられる。

## 6 低消費電力の CPU と MPPC を受光素子とするシンチレーション検出器を用いた環境放射線モニタリング機器の試作

### 6.1 背景

近年の半導体技術と光計測市場の進展と拡大により、光電子増倍管のような増幅効果を持つ半導体受光素子である APD(Avalanche Photo Diode) や MPPC(Multi Pixel Photon Counter) が安価に広く普及しており、これを放射線計測に応用することで、複雑な外部機構を必要としない小型軽量、振動や衝撃にも強く使い勝手の良い検出器が実用化されている。これまでも走行サーベイシステムである KURAMA-II をはじめ、可搬型モニタリングポストや固定モニタリングポストに採用が進んでいる。この使い勝手の良い検出器をさらに普及させるためには、最新の IoT 技術を使った計測機器としてまとめ上げることができればより多彩な活用ができると期待される。

過去の規制庁事業では、CsI(Tl) シンチレータと MPPC を組み合わせた小型放射線検出器である浜松ホトニクス社 C12137[54] のアナログ系部分を取り出した検出モジュールを試作、これをソニーセミコンダクタソリューションズのシングルボードコンピュータである Spresense[55] と組み合わせることで、バッテリーおよび通信機能込みで手のひらサイズまで小型化した超小型 KURAMA-II を試作している。しかし、浜松ホトニクスからは様々なシンチレータのサイズや形状の C12137 が販売されており、このような市販検出器を目的に応じて選択して利用できる方が良い。

そこで、C12137 シリーズのような市販されている検出器を差し替えて利用可能な放射線計測システムを実現するための試みとして、環境放射線モニタリング機器の試作を行うこととした。

### 6.2 試作した機器のあらまし

MPPC ベースの検出器である浜松ホトニクス社 C12137 は、小型軽量で USB バスパワーで稼働する使い勝手の良い検出器である。この検出器を低消費電力かつ高性能なプロセッサを採用するソニーセミコンダクタソリューションズ社のシングルボードコンピュータである Spresense と組み合わせ、ガンマ線のエネルギースペクトルが計測できる機器を試作する。ガンマ線エネルギースペクトルが取得できれば、G(E) 関数法で直ちに線量率が得られたり核種同定などの様々な解析が可能になるため、モニタリング装置としての必要な能力を確保したと言える。

今回の試作計測システムで採用した Spresense の機能の概要を図 16 に、また今回の試作機器の構成概要を図 17 に示す。一般にシングルボードコンピュータ、特に省電力を特徴とするものについては USB ホスト機能を持たない場合が多く、Spresense も USB ホスト機能は持っていない。そこで、Spresense の add-on ボード用のスロットに USB ホスト機能を持った基板を追加して機能実現をすることとした。このボードは USB ホストコントローラ MAX3421E[56] を搭載している。この MAX3421E は広く普及している USB ホストコントローラの一つで、さまざまな機器に組み込まれており、別のシングルボードコンピュータである Arduino 用として各社から発売されている USB host



shield (USB ホスト機能付加のための拡張ボード) でも採用されている。

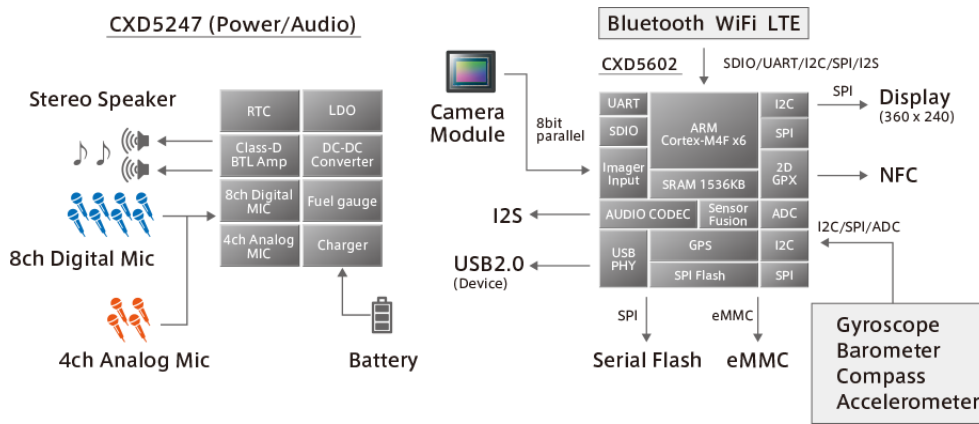


図 16 Spresense の搭載する LSI(CXD5602/CXD5247) のあらし。オーディオ信号処理とバッテリーマネジメントを受け持つ CXD5247 と ARM の 6 コアプロセッサを搭載し、一般的な演算処理や画像処理、GNSS 制御など各種インターフェースを受け持つ CXD5602 を搭載している。

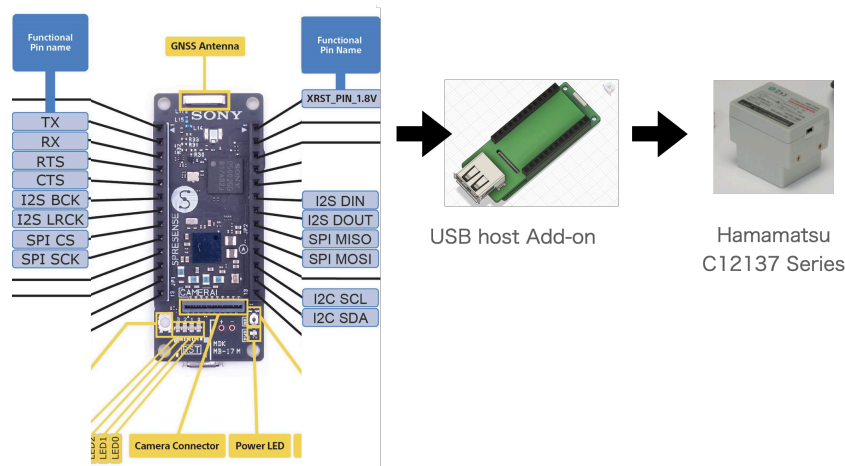


図 17 今回試作する浜松ホトニクス社 C12137 と Spresense を用いた放射線計測システムの構成。Spresense の add-on 用機能拡張ソケットに USB ホスト機能を持った add-on 基板を取り付け、USB タイプが一般的な C12137 シリーズが容易に使えるようにする。

実際に試作した環境放射線モニタリング機器の外観を図 18 に示す。LTE 通信機能拡張ボード上に Spresense が、さらにその上に USB ホスト機能を持つ拡張基板が搭載され、USB ポートには浜松ホトニクスの C12137 が接続されている。Spresense が GPS やみちびきなどに対応した測位機能を備えていることから、写真の構成で事実上基本型の KURAMA-II 相当の機能を保有することになる。

今回の製作において課題になったのは SubCore 1 の担当する C12137 とのデータ通信である。

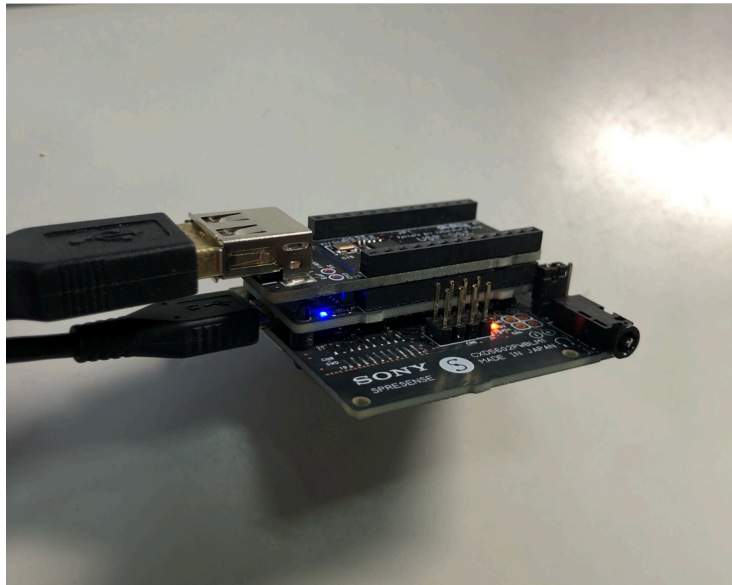


図 18 今回試作の環境放射線モニタリング機器の外観（上）。画像では LTE 拡張ボードの上に Spresense 本体が搭載され、Spresense の add-on 用機能拡張ソケットに USB ホスト機能を持った add-on 基板が取り付けられている（下）。LTE 拡張ボードが取り付けられているのは、将来的に従来の KURAMA-II と互換の LTE 回線によるデータ送信機能の実装も想定しているため、実際には機能しておらず消費電力や基板間の電力分配などの基礎的検討のみに使用している。

KURAMA-IIで採用されている高計数率型のC12137はUSB 2.0規格をサポートし、100 msごとに2112バイトのデータが更新されており、90 msの読み出し可能時間と10 msのデータ更新時間（データ更新中はアクセス不可）がある。USBホスト側がこのタイミングに正確に同期してデータ読み取りしなければデータの取りこぼしが発生する。そこで、Spresenseが6つのCPUコアによる並列処理が可能なことを利用し、SubCore 1をUSB通信専用としてMAX3421Eの制御とUSB通信のみ特化する一方、Main Coreを全体制御に割り振っている。このようにすることで、将来想定しているLTE通信やGPS測位機能の追加で発生する負荷増大があっても、USB通信を担当するSubCore 1によりC12137との通信の精密なタイミング制御を維持できるようになる。

試作においてはこのタイミング制御に困難が発生した。USB 2.0規格の通信速度を勘案し、SubCore 1とMAX3421Eの間のシリアル通信をMAX3421Eの定格内最大値である26 MHzに設定して通信を行うこととした。しかしながら数分～数十分程度の運用であれば計測はできるものの、その程度以上となるとC12137からの応答が得られなくなる現象が発生した。また、C12137とのUSB接続の確立中に接続がリセットされ再起動を繰り返す、電源安定化のためのチップが異常加熱するなどの問題が発生した。Spresense開発元であるソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社の協力を得てSpresenseや拡張基板の電源供給や通信に関する状態の解析、浜松ホトニクス株式会社の協力によるC12137の起動時～定常時までの消費電力解析などを行った結果、主にMAX3421EがSubCore 1側と定格内最大値である26 MHzで長時間通信できないことが原因と判明した。そこで、MAX3421EとSubCore 1の間の通信を1/2の13 MHzに落とし、かつSpresense側の一部ファイルの修正を行うことで長時間連続して測定ができるようになった。ソニーセミコンダクタソリューションズ側の試験では1ヶ月程度は安定して稼働していることが確認できている。チップの異常加熱についても原因が特定されており、C12137側で消費電力が瞬間的に増大するタイミングがあり、これに対する電源安定化チップの過渡応答が発生するためであった。瞬間的な電力増大をチップ側に伝えないように電源安定化チップまわりの部品の定数を見直すことで解消した。

### 6.3 試作した機器による測定例

安定して稼働するようになった環境放射線モニタリング機器にC12137を接続して、マントルからのガンマ線スペクトルを測定した結果を示す（図19）。この機器はユーザインタフェースを装備することを想定していないため、Spresenseのシリアルコンソールに選られたスペクトルデータを出力し、それをグラフソフトでグラフ化している。測定時間やC12137内のモデルごとの違い（結晶形状やエネルギー範囲など）による違いはあるものの、従来のKURAMA-IIによる測定と同様の結果が得られている。ピークの高さやエネルギー範囲などが若干異なるのは、C12137の結晶の形状の違いや測定可能なエネルギー範囲といったC12137の種類の違いに起因している。数え落としが発生しないことはC12137からの読み出しデータにシリアルナンバーを付与することでも確認している。

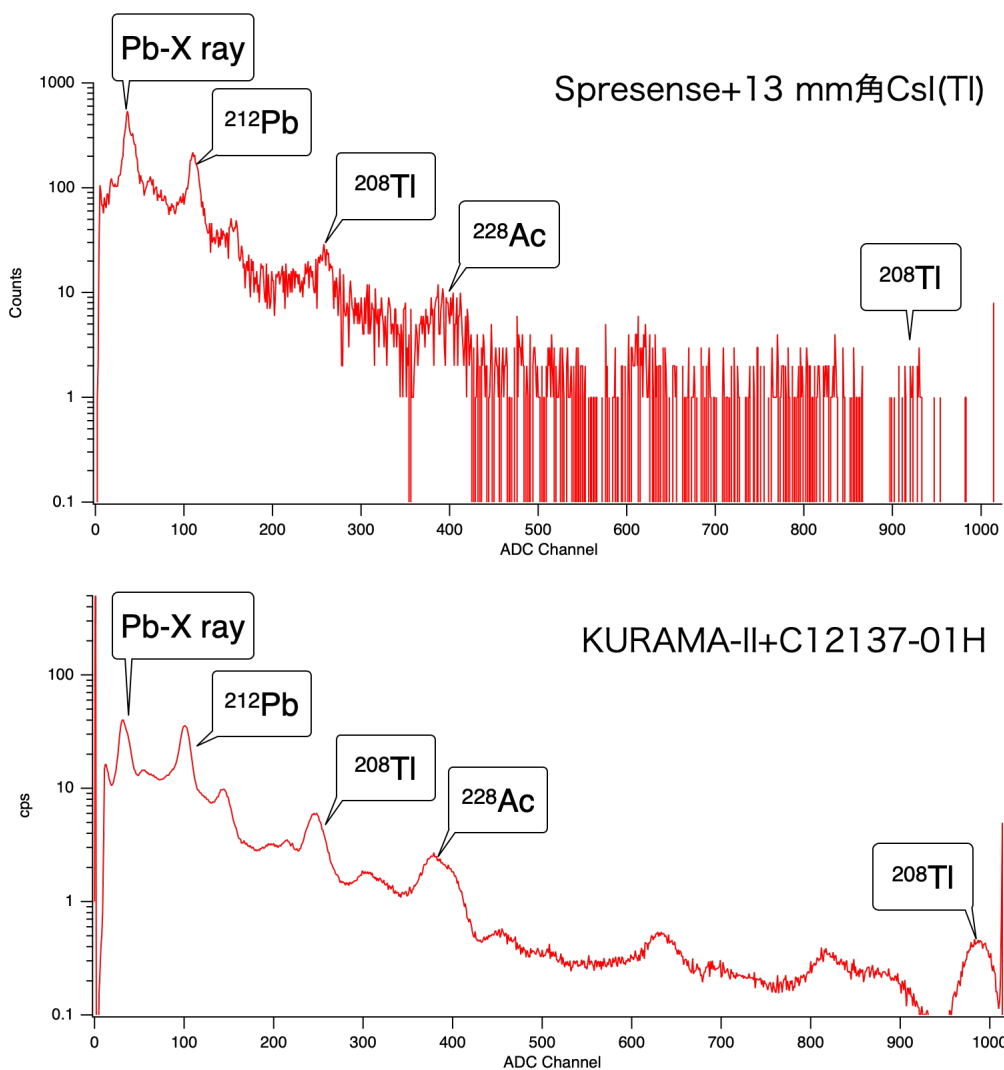


図 19 今回試作の環境放射線モニタリング機器で測定したマントルのスペクトル（上）と KURAMA-II で観測したスペクトル（下）。複数の核種のよく似たエネルギーのピークが分離できていない場合もあるので、主な核種のみ記載している。今回のモニタリング機器で使用した 13 mm 角 CsI(Tl) 搭載の C12137 シリーズのエネルギー範囲は 3 MeV までとなっており、従来の KURAMA-II で使用している C12137-01H の 2.8 MeV より広がっていることからピークの位置が若干ずれている。

#### 6.4 考察とまとめ

Spresense と C12137 を使用することで非常にコンパクトなモニタリング機器を試作することができた。発生した技術的課題についても製造メーカー等の協力により原因を特定し解消することができ

た。現時点では1ヶ月程度の安定稼働の実績が得られているが、事業期間後も引き続き試験や評価を継続するとともに、本体内蔵GNSSやメッシュ型LPWA、さらにはLTEへの対応を行い、より使い勝手の良い運用負荷の小さいマイクロサイズのKURAMA-IIとしての完成を目指したい。

## 7 まとめ

今回の研究では、最近のデータ通信の動向の調査、メッシュ型 LPWA に関する動向調査と有力規格である Wi-SUN FAN の実証試験、さらによりコンパクトで使い勝手の良い環境放射線モニタリング機器の試作を行なった。データ通信においては衛星通信分野での衛星コンステレーションによるブロードバンドサービスの隆盛、Wi-RAN という公的サービスをターゲットとした通信規格の開発の進展がみられ、今後の動向に注目が必要である。また LPWA についてはメッシュ型 LPWA で飛躍的な技術的進展は見られないものの着実な実用化が進んでいる。メッシュ型ネットワークの効率向上をめざした同時送信フラディング方式の実用性については今後検討するべきである。

Wi-SUN FAN による実証試験は計画通りの通信経路構築は達成できなかった。しかしメッシュネットワークの特性を考えると、今回の計画のように人が最適化された経路を検討して配置するより、ある程度冗長性を持たせた密度で端末を配置し、端末自身が自律的に経路を選択できるような尤度を持たせるべきと言える。実証試験の後半で確認された想定外の経路で中継局が接続していく状況はこの考え方を支持しているといえる。また、近々にリリース予定の Wi-SUN FAN 1.1 では、サポートする変調方式や通信速度の範囲の拡大で通信距離を稼ぐモードとより通信速度を上げるモードが実現するため、より柔軟なメッシュネットワークの構築が実現できると期待される。今後この新しい規格がリリースされた段階で再度実証試験を行うべく検討を進めている。

環境放射線モニタリング機器として、低消費電力の国産シングルボードコンピュータである Spresense と、KURAMA-II で実績のある CsI(Tl) 検出器 C12137 を組み合わせた試作品を製作し、安定して測定ができる状況を実現した。今後は測位機能と LPWA や LTE といった通信への対応を行なって柔軟に活用できる実用性の高い機器としてまとめていく計画である。

## 8 謝辞

この研究において実施した Wi-SUN FAN の実証試験の企画立案、現地試験においては、島根県原子力環境センターおよび同センター田中孝典氏、京都大学情報学研究科原田研究室 原田博司教授、同研究室 正木弘子氏のご協力をいただきました。また、環境放射線モニタリング機器の製作にあたっては、S2 ファクトリー株式会社、ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社および浜松ホトニクス株式会社の協力をいただきました。深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] NTT ドコモ, 5G, [https://www.docomo.ne.jp/area/5g/?utm\\_source=corp\\_other&utm\\_medium=owned&utm\\_campaign=corp\\_202003\\_from-crp-spe-5g-to-crp-are-5g](https://www.docomo.ne.jp/area/5g/?utm_source=corp_other&utm_medium=owned&utm_campaign=corp_202003_from-crp-spe-5g-to-crp-are-5g)
- [2] NTT ドコモ, 報道発表: FOMA ハイスピードエリアの人口カバー率 100% を達成, [https://www.docomo.ne.jp/info/news\\_release/page/090106\\_00.html](https://www.docomo.ne.jp/info/news_release/page/090106_00.html)
- [3] NTT ドコモ, NTT ドコモグループ サステナビリティレポート 2018, [https://www.docomo.ne.jp/binary/pdf/corporate/csr/report/csr2018w\\_all\\_print.pdf](https://www.docomo.ne.jp/binary/pdf/corporate/csr/report/csr2018w_all_print.pdf)
- [4] NTT ドコモ, FOMA プラスエリア非対応機種をご利用のお客さまへのお知らせ, <https://www.docomo.ne.jp/area/servicearea/foma.html>
- [5] 総務省, 「課題解決型ローカル 5G 等の実現に向けた開発実証」等に係る令和 4 年度事業の提案の公募の結果(開発実証事業), [https://www.soumu.go.jp/menu\\_news/s-news/01ryutsu06\\_02000325.html](https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01ryutsu06_02000325.html)
- [6] 総務省, 携帯電話等エリア整備事業, <https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/keitai/>
- [7] NTT ドコモ, ワイドスター II, <https://www.ntt.com/business/services/widestar.html>
- [8] KDDI, イリジウムサービス, <https://biz.kddi.com/service/iridium/>
- [9] KDDI, インマルサットサービス, <https://biz.kddi.com/service/inmarsat/>
- [10] スカパー JSAT, Exbird サービス, <https://www.skyperfectjsat.space/jsat/service/exbird/>
- [11] 自治体衛星通信機構, 地域衛星通信ネットワーク, <http://www.lascom.or.jp/network>
- [12] 総務省, 周波数の国際調整について, <https://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/process/freqint/>
- [13] 野村総合研究所, 衛星コンストレーションを用いた次世代インターネットの可能性と課題, [https://www.nri.com/-/media/Corporate/jp/Files/PDF/knowledge/publication/region/2019/02/2\\_vol187.pdf?la=ja-JP&hash=CAABB5E6D5B050275397F2F0E4A1C8ECDACD3EF8](https://www.nri.com/-/media/Corporate/jp/Files/PDF/knowledge/publication/region/2019/02/2_vol187.pdf?la=ja-JP&hash=CAABB5E6D5B050275397F2F0E4A1C8ECDACD3EF8)
- [14] Space X, STARLINK, <https://www.starlink.com>
- [15] KDDI, <https://biz.kddi.com/solution/starlink/>
- [16] KDDI, STARLINK business, <https://biz.kddi.com/service/starlink/>
- [17] Space X, Updates, <https://www.spacex.com/updates/>
- [18] 楽天モバイル, 2022 年 11 月 18 日プレスリリース, [https://corp.mobile.rakuten.co.jp/news/press/2022/1118\\_01/](https://corp.mobile.rakuten.co.jp/news/press/2022/1118_01/)
- [19] KDDI, 2022 年 12 月 1 日プレスリリース, <https://news.kddi.com/kddi/corporate/newsrelease/2022/12/01/6414.html>
- [20] 総務省, 地域 BWA 制度の概要, [https://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/system/ml/area\\_](https://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/system/ml/area_)



- bwa/
- [21] 地域 BWA 推進協会, 地域 BWA と Wi-MAX, <http://www.chiiki-wimax.jp/about/index.html>
  - [22] 地域 BWA 推進協会, 製品情報, <http://www.chiiki-wimax.jp/service/index.html>
  - [23] NEC, プライベート LTE (sXGP) とは, <https://jpn.nec.com/privatelte/index.html>
  - [24] 科学技術振興機構, 革新的研究開発プログラム ImPACT, <https://www.jst.go.jp/impact/program/16.html>
  - [25] 200 MHz 帯広帯域移動無線中継通信用無線設備(可搬用), [https://www.arib.or.jp/kikaku/kikaku\\_tushin/desc/std-t119.html](https://www.arib.or.jp/kikaku/kikaku_tushin/desc/std-t119.html)
  - [26] 日立国際電気, 公共ブロードバンドを用いた災害対策ソリューション, [https://www.hitachi-kokusai.co.jp/products/solutions/public/public\\_case7.html](https://www.hitachi-kokusai.co.jp/products/solutions/public/public_case7.html)
  - [27] 総務省, 報道資料: 周波数再編アクションプラン(令和4年度版)(案)に対する意見募集, [https://www.soumu.go.jp/menu\\_news/s-news/01kiban09\\_02000443.html](https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban09_02000443.html)
  - [28] 京セラコミュニケーションシステム, Sigfox とは, <https://www.kccs-iot.jp/service/>.
  - [29] LoRa Alliance, What is the LoRaWAN Specification?, <https://lora-alliance.org>.
  - [30] ZETA Alliance, 製品紹介, <https://zeta-alliance.org/zeta-lpwanetwork.php>.
  - [31] WI-SUN Alliance, Wi-SUN FAN, <https://www.wi-sun.org/fan/>
  - [32] SONY, ELTRES, <https://eltres-iot.jp>
  - [33] ソナス, UNISONet, <https://www.sonas.co.jp/technology/unisonet>
  - [34] Wi-Fi ALLIANCE, Wi-Fi Certified HaLow, <https://www.wi-fi.org/ja/discover-wi-fi/wi-fi-certified-halow>
  - [35] 総務省, 令和4年9月5日 総務省令第60号, [https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000833184.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000833184.pdf)
  - [36] 総務省, 特定小電力無線局, <https://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/system/ml/small/>
  - [37] 総務省, 平成元年1月27日 郵政省告示第42号, [https://www.tele.soumu.go.jp/horei/law\\_honbun/72008500.html](https://www.tele.soumu.go.jp/horei/law_honbun/72008500.html)
  - [38] ZETA Alliance, <https://japan.zeta-alliance.org>
  - [39] NTT docomo, 各通信方式の仕様, <https://www.nttdocomo.co.jp/biz/special/iot/lpwa/spec/>.
  - [40] 鈴木 誠他, 電子情報通信学会論文誌 B J100 – B (2017) 952-960.
  - [41] 日経 XTECH, 2022年1月27日付記事, <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/news/18/12121/>
  - [42] 凸版印刷, IoT 向け LPWA 無線通信規格 ZETA (ゼタ), <https://www.toppan.co.jp/electronics/solution/zeta/>
  - [43] 地方版 IoT 推進ラボ, 宮崎県内において IoT プロジェクト創出に向けた実証実験を始動!, <https://local-iot-lab.ipa.go.jp/article/miyazaki-pref-iot-3.html>.
  - [44] ZETA Alliance, 導入事例 <https://zeta-alliance.org/contents/case>

- [45] 谷垣 実, 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) 成果報告書, [https://www.nra.go.jp/activity/houshasenbougo/kenseika\\_houkokusyo.html](https://www.nra.go.jp/activity/houshasenbougo/kenseika_houkokusyo.html)
- [46] Wi-SUN Alliance, <https://wi-sun.org/ja/>
- [47] Wi-SUN Alliance, Wi-SUN 認証 <https://wi-sun.org/ja/certification/>
- [48] 京都大学原田研究室, 2021 年 4 月 27 日プレスリリース, [http://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/ja/PL/PL\\_2021\\_02.html](http://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/ja/PL/PL_2021_02.html)
- [49] ITU-R, Recommendation ITU.R P.526-15, Propagation by Diffraction, [https://www.itu.int/ams\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.526-15-201910-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/ams_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.526-15-201910-I!!PDF-E.pdf)
- [50] ローム, Wi-SUN モジュール, <https://www.rohm.co.jp/products/wireless-communication/specified-low-power-radio-modules>
- [51] 日新システムズ, IoT 向け LPWA 国際標準規格 Wi-SUN FAN ~ ちょうどいい IoT 無線センサーソリューション <https://www.co-nss.co.jp/iot/wisun/>
- [52] 電波 COE 研究開発プログラム, 共同型研究開発 技術課題 1 「Society 5.0 の実現に向けた大規模高密度マルチホップ国際標準無線通信システムの研究開発」, <https://w-coe.jp/project-01/>
- [53] Mathworks, OFDM とは, <https://jp.mathworks.com/discovery/ofdm.html>
- [54] 浜松ホトニクス, 放射線検出モジュール C12137, <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/radiation-sensor/radiation-detection-module/C12137.html>
- [55] SONY, Spresense - エッジコンピューティングを低消費電力で, <https://developer.sony.com/ja/develop/spresense/>
- [56] Analog Devices, MAX3421E, <https://www.analog.com/jp/products/max3421e.html>