

大規模イベント等のための核セキュリティ技術開発 (共同研究)

Development of Nuclear Security Technologies for a Large Public Event
(Collaboration Research)

高橋 時音 持丸 貴則 小泉 光生 吉見 優希
山西 弘城 若林 源一郎 伊藤 史哲

Tohn TAKAHASHI, Takanori MOCHIMARU, Mitsuo KOIZUMI, Yuki YOSHIMI
Hirokuni YAMANISHI, Genichiro WAKABAYASHI and Fumiaki ITO

原子力人材育成・核不拡散・核セキュリティ総合支援センター

Integrated Support Center for Nuclear Nonproliferation, Security and Human Resource Development

November 2025

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。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
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（<https://www.jaea.go.jp>）
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 研究開発推進部 科学技術情報課
〒 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 Library, Institutional Repository and INIS Section,
Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.

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

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

大規模イベント等のための核セキュリティ技術開発 (共同研究)

日本原子力研究開発機構 原子力人材育成・核不拡散・核セキュリティ総合支援センター

高橋 時音, 持丸 貴則^{*1}, 小泉 光生, 吉見 優希^{*2}, 山西 弘城^{*3}, 若林 源一郎^{*3},
伊藤 史哲^{*4}

(2025 年 7 月 16 日受理)

大規模イベント等において、核・放射性物質を用いたテロ行為を未然に防ぐために、それらの物質を持ち込ませない、あるいは、持ち込まれたとしても迅速に検知し対応するための監視技術の強化が求められている。従来は、イベント会場及びその周辺の要所にゲートモニターを設置し、通過する人や車両等を監視して、不審な物品の持ち込みがないことを確認する手法がとられてきたが、監視をすり抜ける場合を考慮すると、ゲート内のエリアを継続的にサーベイする補完的な技術が必要である。サーベイする領域が広い場合には、移動しながら放射線を測定し、各測定点の放射線量を地図上に記録していく放射線マッピングが有効である。複数の検出器を用いて並行して測定を進め、結果を集約することで、より効率的にサーベイを行うことができる。そこで本技術開発では、屋外で位置情報と放射線を同時に計測できる可搬型検出器を開発し、測定結果をネットワークで集約し、即時にマップ上で確認できる技術の開発を進めた。屋内においては、通過した場所の周辺環境地図を作成する SLAM に放射線測定結果を統合し、3 次元地図を作成する技術を開発した。また、核物質を含む中性子源の迅速な検知のために、高速中性子検出器を用いた線源探索技術開発を進めた。

本稿では、広域サーベイシステムのコンセプトについて述べるとともに、これまでの技術開発で得られた成果等について報告する。

本報告書は、文部科学省の核セキュリティ強化等推進事業費補助金の下で進められた研究成果に関するものである。本報告書は、近畿大学及び高エネルギー加速器研究機構との共同研究の成果に関するものである。

原子力科学研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4

*1 NAIS

*2 BREXA Technology

*3 近畿大学

*4 高エネルギー加速器研究機構

Development of Nuclear Security Technologies for a Large Public Event (Collaboration Research)

Tohn TAKAHASHI, Takanori MOCHIMARU^{*1}, Mitsuo KOIZUMI, Yuki YOSHIMI^{*2},
Hirokuni YAMANISHI^{*3}, Genichiro WAKABAYASHI^{*3} and Fumiaki ITO^{*4}

Integrated Support Center for Nuclear Nonproliferation, Security and Human Resource Development
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 16, 2025)

To prevent acts of terrorism involving nuclear or radioactive materials at major public events, it is required to have surveillance technologies that either prevent these materials from being brought in or detect quickly if somebody brings them in secretly. Setting radiation gate monitors to survey pedestrians and vehicles is one of the effective methods. However, considering the possibility of individuals bypassing these monitors, complementary technologies are needed to continuously survey areas inside the gates. To survey extensive areas, radiation mapping is effective. By using multiple detectors and aggregating the data, the survey becomes much more efficient.

We have developed mobile detectors capable of simultaneously measuring location data and radiation levels outdoors, with the ability to aggregate measurement results via a network and immediately visualize them on a map. For indoor environments, we have developed a technology that integrates radiation measurement results with environmental mapping created using SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) to produce 3D maps of the surveyed areas. Additionally, we have been working on the development of a source search technology using a fast neutron detector to quickly detect neutron sources, including nuclear materials.

In this report, we describe a concept of the wide area survey system and report technology development results so far.

Keywords: Wide Area Monitoring, Nuclear Security, Gamma Detector, Fast Neutron Detection, Unmanned Vehicle, Low Power Wide Area, Radiation Mapping, Mobile Devices

This development was implemented under the subsidiary for nuclear security promotion of MEXT. This work has been performed in Japan Atomic Energy Agency as collaboration research with Kindai University and KEK.

*1 NAIS Co. Inc.,

*2 BREXA Technology

*3 Kindai University

*4 High Energy Accelerator Research Organization

目 次

1. 序論-----	1
2. 広域サーベイシステムの開発-----	3
2.1 屋外のサーベイに対応するための GPS を組み込んだ放射線検出器の開発 -----	3
2.2 ネットワーク機器の性能試験 -----	5
2.3 屋外サーベイ結果リアルタイム表示ソフトの開発 -----	6
2.4 屋内のサーベイに対応するための SLAM を組み込んだ放射線検出器の開発-----	8
2.5 可搬型ガンマ線スペクトロメーターの高度化 -----	12
2.5.1 可搬型 LaBr ₃ (Ce)検出器の性能試験 -----	12
2.5.2 光電子増倍管を使用した性能試験-----	13
2.6 広域サーベイシステムの開発のまとめ -----	17
3. 中性子源検出システムの開発-----	19
3.1 高速中性子検出器の開発 -----	19
3.2 PSD プラスチックシンチレーターの基礎試験 -----	20
3.2.1 長尺型検出器の角度依存性の評価-----	21
3.2.2 長尺型検出器と減速体を組み合わせた線源探知用検出器-----	22
3.2.3 長尺型検出器を用いた移動しながらの測定による中性子源探知 -----	24
3.2.4 平板型検出器の角度依存性の評価-----	26
3.2.5 平板型検出器を用いた移動しながらの測定による中性子源探知 -----	28
3.3 中性子源検出システムの開発のまとめ -----	30
4. 結論-----	31
謝辞-----	33
参考文献-----	34

Contents

1. Introduction	1
2. Development of Wide Area Survey System	3
2.1 Development of GPS Installed Radiation Detector for Outdoor Survey	3
2.2 Performance Test of Network Devices	5
2.3 Development of Online Mapping Software	6
2.4 Development of Radiation Mapping System using SLAM for Indoor Survey	8
2.5 Improvement of Mobile Gamma-ray Spectrometer	12
2.5.1 Performance Test of a Mobile LaBr ₃ (Ce) detector	12
2.5.2 Performance Test Using Photo Multiplier Tube	13
2.6 Summary of the Development of Wide Area Survey System	17
3. Development of Neutron Source Detection System	19
3.1 Development of Fast Neutron Detector	19
3.2 Basic Test of PSD Plastic Scintillator	20
3.2.1 Evaluation of Angle Dependency of Detection Efficiency of a Long Detector	21
3.2.2 Detector constructed with Long Plastic Scintillators and a Moderator	22
3.2.3 Neutron Source Detection by Moving Measurement Using Long Detectors	24
3.2.4 Evaluation of Angle Dependency of Detection Efficiency of a Plate Detector	26
3.2.5 Neutron Source Detection by Moving Measurement Using Plate Detectors	28
3.3 Summary of the Development of Neutron Source Detection System	30
4. Conclusion	31
Acknowledgements	33
References	34

表リスト

表 2.1 LPWA デバイスの仕様例-----	5
表 2.2 Ge 半導体、CZT 半導体、LaBr ₃ (Ce)シンチレーター、CsI(Tl)シンチレーターの比較 --	12
表 2.3 試験に用いた SiPM の仕様 -----	14
表 2.4 試験に用いた光電子増倍管 (PMT) の仕様 -----	14

図リスト

図 1.1 広域サーベイのイメージ-----	2
図 2.1 GPS 付 CsI(Tl)検出器の写真 (左) と構成 (右) -----	3
図 2.2 GPS 付 CsI(Tl)検出器で測定した各種放射線源のガンマ線スペクトル -----	4
図 2.3 屋外環境放射能マッピング試験-----	4
図 2.4 Wi-SUN FAN デバイス -----	5
図 2.5 Wi-SUN FAN を用いた 1 対 1 の通信試験 -----	6
図 2.6 サーベイ結果表示ソフトの概念図-----	7
図 2.7 室内サーベイ実験 -----	8
図 2.8 KEK 加速器施設でのサーベイ実験 -----	9
図 2.9 1 インチ CsI(Tl)シンチレーション検出器の計数率の時間変化 -----	9
図 2.10 A 地点を通過する 130 秒間に CsI(Tl)検出器で取得したスペクトルの積算-----	10
図 2.11 A 地点において CZT 検出器を用いて 30 分間測定したガンマ線スペクトル -----	11
図 2.12 SiPM を用いた測定体系及び写真-----	13
図 2.13 PMT を使った測定の概略図及び写真-----	15
図 2.14 CsI(Tl)と SiPM を用いた検出器 (青線) と LaBr ₃ (Ce)と PMT を用いた検出器 (赤線) のエネルギースペクトルの比較-----	16
図 3.1 中性子・ガンマ線のプラスチックシンチレーターによるパルス形状の違い (概念図) ---	20
図 3.2 長尺型検出器の外観 -----	20
図 3.3 長尺型検出器の PSD カラーマップ -----	21
図 3.4 長尺型検出器の中性子計数の角度依存性評価実験 -----	21
図 3.5 長尺型検出器を用いた線源方向探索法 -----	22
図 3.6 ポリエチレンと長尺型検出器を組み合わせた試験-----	22
図 3.7 ポリエチレンと長尺型検出器を組み合わせて測定した中性子計数の角度依存性 -----	23
図 3.8 PHITS を用いたシミュレーション計算結果 -----	24
図 3.9 長尺型検出器を用いた平行移動実験-----	24
図 3.10 長軸型検出器を移動させた測定の中性子計数率の変化 -----	25
図 3.11 平板型検出器の外観 -----	26
図 3.12 平板型検出器を用いた高速中性子線源の測定の様子 -----	27
図 3.13 平板型検出器の PSD カラーマップ-----	27
図 3.14 平板型検出器で得られた中性子計数の角度依存性 -----	27

図 3.15 平板型検出器移動実験体系 -----	29
図 3.16 平板型検出器を移動させた時の中性子計率の変化（線源位置 A：同じ高さ） -----	29
図 3.17 平板型検出器を移動させた時の中性子計率の変化（線源位置 B：70 cm 上） -----	29
図 4.1 広域モニタリングシステム-----	32

1. 序論

原子力や放射線利用が広まる中、核物質や放射性物質が不法に持ち出され、それを利用したテロリズムをいかに防ぐかが問われている^[1]。大規模イベント等においてのテロは、そのインパクトの高さから、核セキュリティ対策の導入が試みられている^[2]。放射線検出器を組み込んだゲートモニターを設置することにより、核・放射性物質の持ち込みを防ぐことはできるが、あらかじめ持ち込まれたものや、巧妙に持ち込まれたものが置かれている可能性は残ったままである。そのため、そうしたものがイベント会場内に置かれていないことを可搬型放射線検出器によるエリアサーベイで確認する必要がある。図 1.1 は広域サーベイのイメージを示したものである。広い会場内のエリアサーベイを行うためには、可搬型検出器を複数用い、システムティックで効率的に進める必要がある。

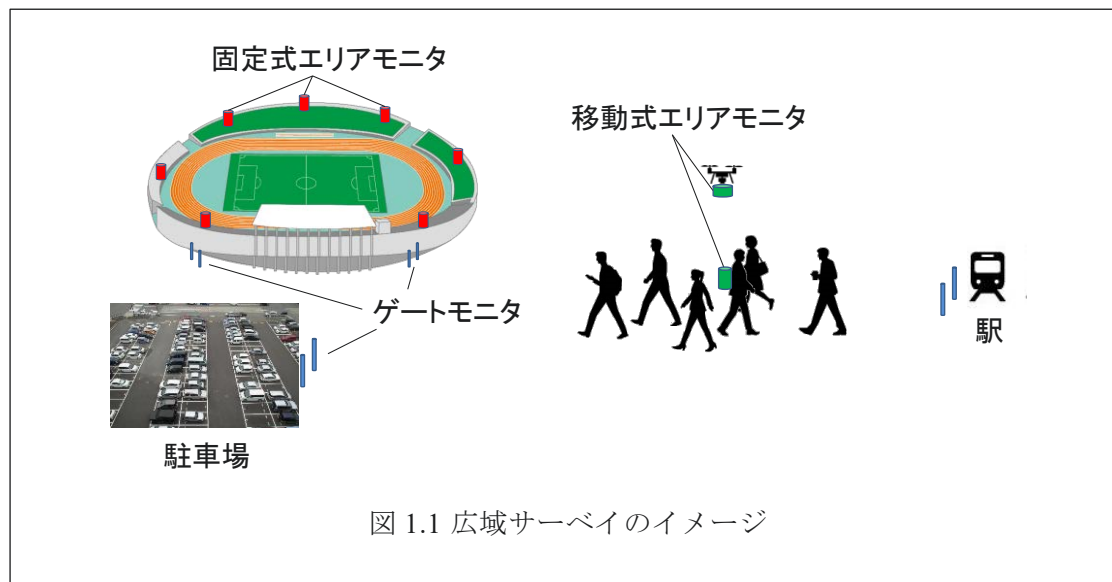
本報告書は、核セキュリティ強化等推進事業費補助金の下で 2020 年度（令和 2 年度）から実施してきたプロジェクト「広域かつ迅速な核・放射性物質検知技術開発」の成果概要を報告するものである^[3,4]。

広域サーベイを行うためには、可搬型放射線検出器に様々な技術を融合させる必要がある。放射線検出器は、可搬にするため軽く、感度の高いものが望ましい。また、もし何か見つかったときに二次的な測定を行わず、対象物がどのようなものか迅速に分析し、即座に対応できるように核種同定ができる方が望ましい。そこで、本技術開発では、まず CsI(Tl)シンチレータを用いた可搬型のガンマ線スペクトロメーターを開発した。本装置は、広い領域を効率よくカバーし、対象物の位置を素早く見出すために、スペクトルと同時に GPS（Global Positioning System）からの位置情報も取得できるようにした。装置の位置と放射線量（スペクトル）をマップ化できるようにした（2.1 節）。広域をサーベイするには、複数台で連携し、かつ、サーベイの状況の確認ができ、測定の重複や見逃しを避ける必要がある。また、即時に対応できるようにするため、ネットワークによる情報の集約が求められる。ネットワークデバイスとしては、携帯電話を使った通信機器が利用可能であるが、セキュリティ上の理由からローカルなネットワークが望ましいケースも生じる。本技術開発では、IoT（Internet of Things）向け LPWA（Low Power Wide Area network）である Wi-SUN FAN^[5]と呼ばれるデバイスの導入試験を進めた（2.2 節）。また、並行して、集約した情報をオンラインで確認するためのマッピングツールの開発を進めた（2.3 節）。

屋内においては、GPS の電波の受信ができなくなることから、SLAM（Simultaneous Localization And Mapping）技術の導入を進めた。SLAM とは、周囲の環境をリアルタイムでスキャンし、移動しながらスキャン情報を重ね合わせて地図を作成する技術である。我々は LiDAR（Light Detection And Ranging）と呼ばれるレーザースキャンをセンサーとして採用し、開発した装置の試験を進めた（2.4 節）。さらに、ガンマ線分析による核種同定能力を向上させるために、近年利用が広がりつつある LaBr₃(Ce)といった高エネルギー分解能シンチレータを利用したガンマ線検出器の開発を進めた（2.5 節）。

核テロで想定される対象物には、工業用中性子源や核物質等も含まれる、中性子検出器の導入の開発も並行して進めてきた。一般的な中性子検出器は、熱化した中性子を測定するが、

中性子を減速させると、飛来方向の情報が失われてしまうため、中性子線源の探索に向いていない。そこで、携帯が容易で効率よく中性子源を探索することができる、高速中性子検出器システムの開発を進めた（3章）。



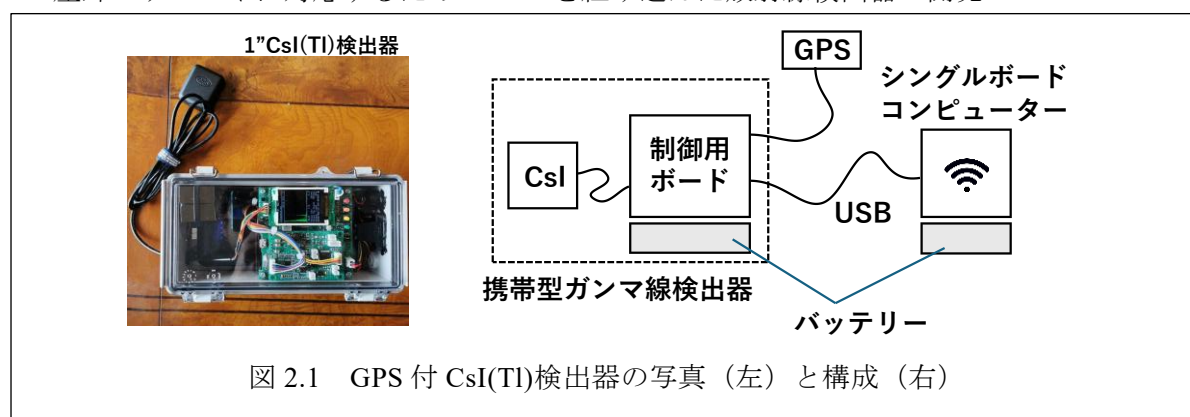
2. 広域サーベイシステムの開発

広い領域を効率よくサーベイするためには、可搬型放射線検出器に測位センサーを取り付け、放射線量と位置を紐づけて記録する方法が効果的である。測定結果を地図に重ねて表示すると、不審な放射線源の位置判定が容易になる。ネットワークデバイスを通じて状況が報告できるようになれば、複数台で連携したときに、指揮所でサーベイの状況の確認ができるようになり、測定の重複や見逃しを避けられるようになる。また、不審な放射線源の検知に対し、迅速な判断・対処が可能となる。ガンマ線検出器については、スペクトルも取得できる検出器を導入すれば、検知した放射性物質を同定することができ、その後の対応の判断材料を迅速に取得することが可能となる。

これらの機能を備えた広域サーベイシステム開発を目指して、(1) 屋外のサーベイに対応するための GPS を組み込んだ放射線検出器の開発、(2) ネットワーク機器の性能試験、(3) 屋外サーベイ結果を確認するためのリアルタイム表示ソフトの開発、(4) 屋内のサーベイに対応するための SLAM を組み込んだ放射線検出器の開発、さらに (5) 放射性核種の同定能力向上を目指した可搬型ガンマ線スペクトロメーターの高度化を行った。

本章では、それぞれの開発について報告する。

2.1 屋外のサーベイに対応するための GPS を組み込んだ放射線検出器の開発



屋外のサーベイに対応するため、GPS を組み込んだ放射線検出器の開発を進めた。ガンマ線スペクトルを取得できる検出器として、比較的安価な CsI(Tl)シンチレーション検出器を導入することとした。GPS は、2018 年にサービスを開始した「みちびき」^[6]の誤差 1 m 以下の測位が可能となるサブメーター級測位補強サービスを利用できる受信機を導入した。

図 2.1 の左に開発した検出器の写真を示す。装置全体の大きさは 13×22×8 cm で、重量が 1 kg である。1 インチ角の CsI(Tl)結晶のシンチレーション光を SiPM で読出し、1024 チャンネルのスペクトルを取得する。取得したスペクトルは、任意に設定した時間間隔（1 秒以上）で定期的に保存することができる。保存する際には、取り付けられている GPS で得られる位置情報と併せて保存される。また、図 2.1 の右図のように、シングルボードコンピューター（SBC）から USB 端子を通じてこの装置を制御し、定期的にスペクトルを読み出すことができる。この SBC にネットワークデバイスを取り付けると、外部との通信が可能となる。

開発した装置について、ガンマ線のエネルギー分解能を評価するため、Ba-133、Co-60、Cs-137 線源を用いてスペクトルの測定を行った。図 2.2 に示すスペクトルにあるように、662 keV、1332 keV におけるエネルギー分解能は、それぞれ 7.8 %、5.5 %であった。

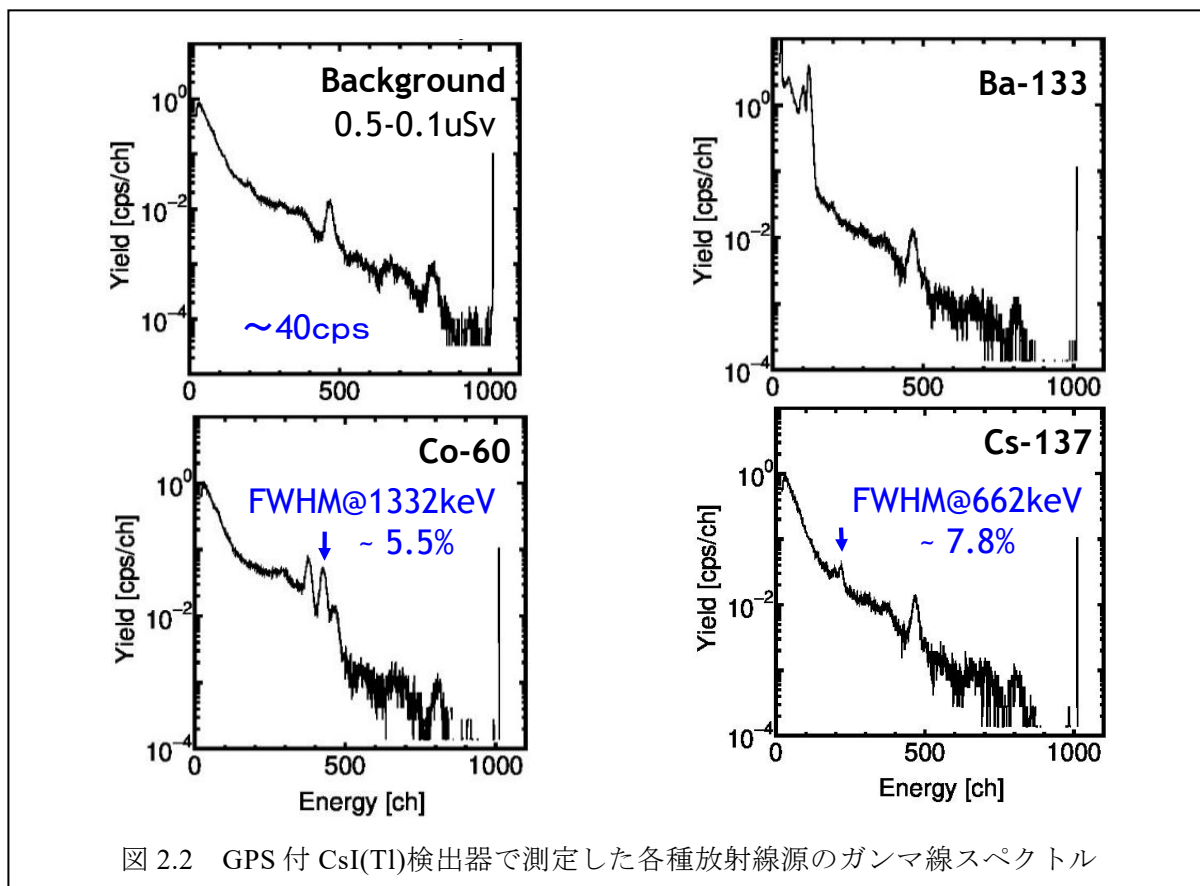
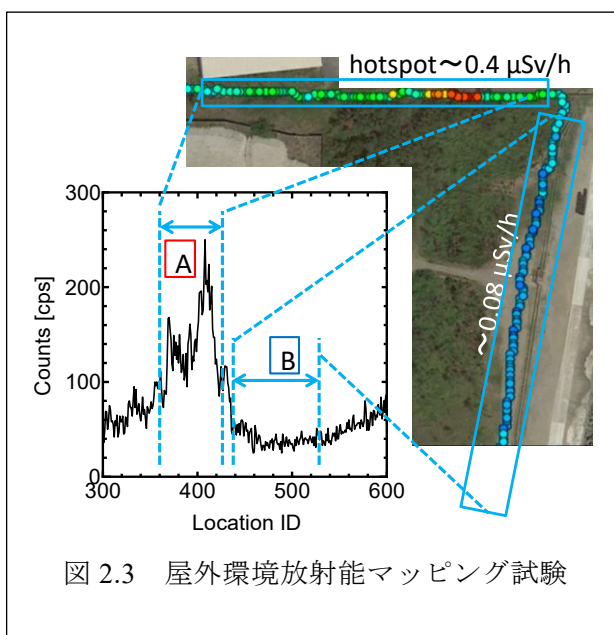


図 2.3 は、開発した装置で測定した屋外の環境放射能をマッピングツール^[7]を用いて衛星写真（Google Earth）と重ねてプロットしたものである。GPS の精度は、歩行したコース（歩道など）からのずれがほとんどなかったことから、ほぼ 1 m 程度の精度で測定できていることが確認できた。プロットは、計数の増加に従い、色を青-緑-黄-赤と段階的に分けている。図の上側に計数の上昇がみられる箇所がある。この部分の 70 秒間のスペクトルを足し合わせたところ、Cs-137 由来のピークが見られたことから、福島第一原子力発電所由来のホットスポットによる計数の上昇であったことがわ

かった。右縦の部分は、計数が森の中と比べ低い、ここは整地されており、放射性物質が除かれているためと考えられる。



現在、SBC を利用してデータ収集を行うことを前提に、機能を限定し、小型化した装置の開発を進めているところである。

2.2 ネットワーク機器の性能試験

2.1 で開発した様々な可搬型放射線検出器のデータを、モニターや指揮所に送信するため、ネットワークの検討を進めた。携帯電話回線は高速で簡単に利用できるが、より高いセキュリティを求めるためには、ローカルで閉じたネットワークの方が望ましい。近年、ユビキタス機器用の 900 MHz 帯域を使う低消費電力デバイス LPWA が注目されている。表 2.1 は、LPWA で入手可能な規格を示したものである。我々は、その中で、比較的高速である、通信費不要なデバイスである Wi-SUN FAN^[5]の導入試験を開始した。このデバイスは 1 対 1 の通信距離が 1 km で、マルチホップを使うと最大 24 ホップ、25 km までの通信が可能である。また、メッシュ通信が可能なので、堅牢なネットワークの構築が期待できる。

図 2.4 は、Wi-SUN FAN 試験デバイスである。Wi-SUN FAN デバイスは緑のボードでアルミニウム製の箱の中に収められている。箱には、通信用アンテナと USB 端子が取り付けられている。USB で電源供給と SBC からの通信制御を受ける。

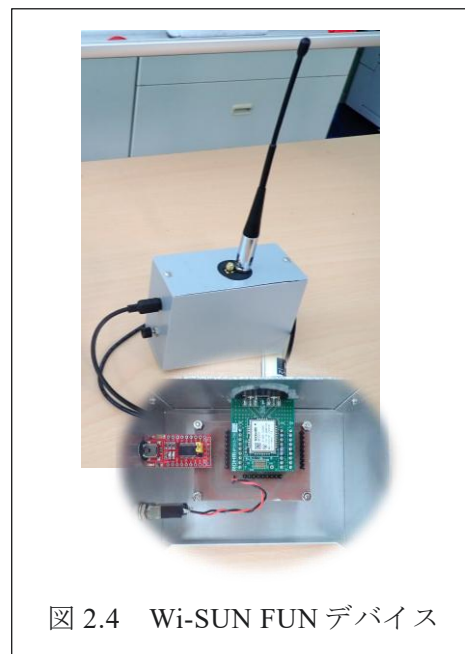


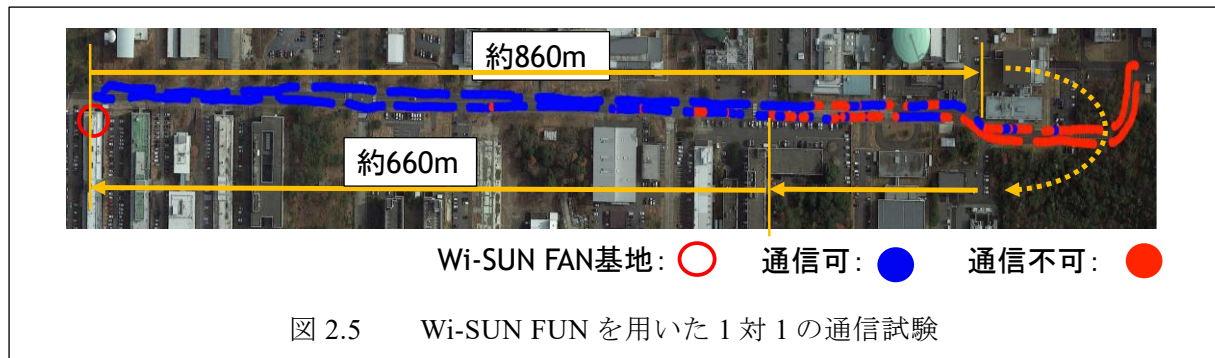
図 2.4 Wi-SUN FAN デバイス

表 2.1 LPWA デバイスの仕様例^[5]

	Wi-SUN FAN	Sigfox	LoRaWAN	ZETA
network	local	public	both	local
speed	300 kbps max (to be 2.4 Mbps soon)	up 10 bps down 600 bps	37.5 kbps max	100 bps – 50 kbps
data size	no limit	limited	limited in public network	no limit
distance	1 km each, 25 km using multi hop	50 km	10-20 km	2-10 km
multi hop	Yes (24)	no	no	Yes (4)

図 2.5 は、Wi-SUN FAN を用いた 1 対 1 の通信試験の結果を示したものである。本試験では、1 台を基地局として固定して、直線道路を往復し、通信距離がどこまで到達するかを調べた。この試験では、デバイス間の距離が 650 m より遠くなると通信が不安定になった。別の試験で

は、3 階建ての建物の屋上に基地局を置き、その建物周囲を周回した。基地局を中心として半径 160 m 程度まで通信できることを確認した。今後は、障害物等があるときに中継器を設置し、マルチホップを用いた通信で、より広い領域での通信をカバーできることを確認していく予定である。



2.3 屋外サーベイ結果リアルタイム表示ソフトの開発

広い領域にわたる屋外サーベイを効率的に進めるには、複数の検出器で並行してサーベイを行う必要がある。検出器で測定したデータは、ネットワーク経由で指揮所に送信され、指揮所では、各検出器から送られる GPS 座標と放射線量をモニターし、測定位置の重複や抜け落ちを防ぐとともに、放射線量の情報をいち早く察知し、対応を決定する必要がある。そのためには、リアルタイムに線量マッピングを表示できるソフトウェアが必要となる。

2.1 及び 2.2 で使用した線量マッピングツール^[7]は、測定された緯度・経度・放射線量を Google Earth 上に表示する形式へ変換するものであるが、これは測定後のデータを一括変換する用途に適しており、リアルタイムで逐次処理しながら地図上に表示する用途には不向きである。さらに、Google Earth の地図はインターネット上のサーバーから衛星写真をダウンロードして描画されるため、インターネットの接続が必要である。

実際の広域サーベイにおいては、リアルタイムでの描画をネットワーク接続に制限がかけられた条件で行う場合も想定されるが、そうした状況で利用できるソフトウェアは開発されていない。そこで、我々は、線量マッピングソフトウェアを独自に開発することにした。

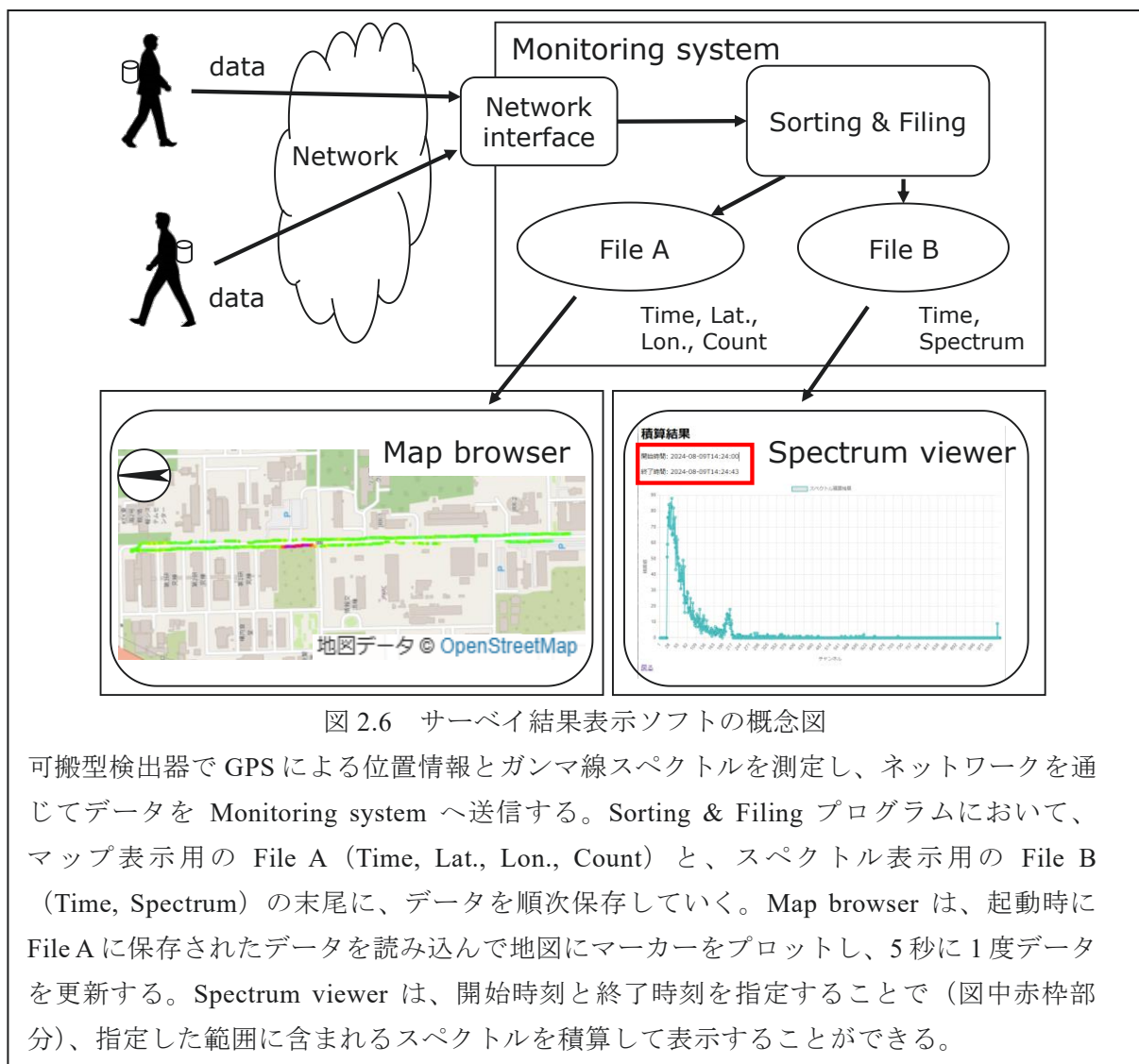
図 2.6 は、今回開発した線量マッピングソフトウェアの構成を示したものである。測定された各検出器からの GPS 座標と線量データはネットワークを通じて Monitoring system に送られる。検出器からのデータは、ネットワークインターフェースを介して取り込まれ、Sorting & Filing プログラムにより、データは地図表示用の File A と、スペクトル表示用の File B として逐次記録される。

図 2.6 下の Map browser と Spectrum viewer は、保存されたファイルを監視するための外部ソフトウェアである。Map browser は File A を読み込み、地図上に線量マップを作成するソフトウェアで、定期的に（例えば 5 秒ごとに）ソフトウェア表示を更新し、リアルタイム性を実現している。地図画像データを事前に保存することで、インターネット接続なしでの描画を実現している。Spectrum viewer は、指定した時間帯で File B のスペクトルデータを積算して表示することができる。放射線量の上昇した領域で積分して得られたスペクトルを解析することによ

って、原因となる放射性物質を特定することができる。

図 2.6 下に測定例を示している。Map browser で示された線量マップの赤いドットは、緑のドットよりも線量が高い。Spectrum viewer には、その領域を積算したスペクトルが示されている。スペクトルには 662 keV のピークが現れている。この線量の上昇は、福島第一原子力発電所事故に由来する Cs-137 のホットスポットが原因である。

以上のように、今回開発したソフトウェアはインターネットのない状況で、GPS 座標とガンマ線スペクトルをリアルタイムで確認することができ、線量が上昇した場所の特定や原因核種の同定に有用である。今後は、ソフトウェアの使いやすさを向上するためのインターフェース機能を追加する予定である。



2.4 屋内のサーベイに対応するための SLAM を組み込んだ放射線検出器の開発

2.1 では、GPS による測位を利用したサーベイ試験について紹介した。大規模イベント等では、屋外に限らず、スタジアムやコンサート会場など屋内サーベイが必要となる場面が想定されるが、GPS では衛星電波が届かず位置情報取得ができないことが想定される。そこで、屋内外に対応可能な SLAM 技術を用いた装置の開発を進めた。SLAM とは、周囲の環境をリアルタイムでスキャンし、移動しながらスキャン情報を重ね合わせて地図を作成する技術である。我々は、LiDAR と呼ばれるレーザースキャナをセンサーとして採用した。LiDAR は、一定の間隔でレーザー光を発射し、その反射を検出するまでの時間を計測することで周囲の形状を捉えることができる。これにより、屋内の詳細なマッピングが可能となる。

図 2.7 (左) の写真は、開発した装置である。無人走行車両 (Clearpath Robotics 製 JACKAL) の上に LiDAR と CsI(Tl)シンチレーション検出器を搭載している。検出器から定期的にスペクトル・計数データを取得しながら、LiDAR SLAM で位置情報を算出し、放射能マッピングを行うことができる。図 2.7 (右) に、1 秒間隔で測定しながら室内を走行させて得られたマッピングの結果を示す。黄緑色の部分が SLAM で得られた地図であり、室内の壁や障害物がわかる。車両の軌跡上には、計数に応じて青→緑→黄→赤のグラデーションで色が変化するプロットが配置されている。この実験では、地図上部の赤丸の位置に線源を配置した。車両が線源に近づくと、プロットの色が青から赤に変化し、計数画像化していることが確認できた。CsI(Tl)シンチレーション検出器の計数とプロットの色が同期しており、システムが正常に動作していることが確認された。

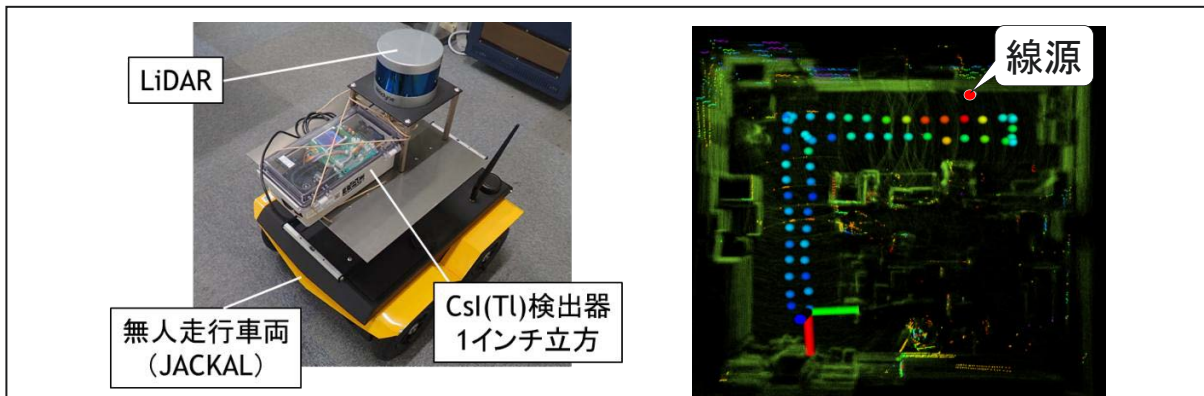


図 2.7 室内サーベイ実験

左の写真は、屋内サーベイを行うために開発した装置、右のマップは開発した装置による測定結果である。無人走行車両にガンマ線検出器と LiDAR を搭載している。試験は実験室内で行った。右の図の黄緑色は LiDAR で検出された障害物を示している。車両の軌跡上に検出器の計数に応じたプロットを表示している。実験室内に置いた線源の近くで、計数の上昇 (赤系統色への変化) が見られ、SLAM と検出器が同期して測定できることが確認できた。

次に、開発した装置の長距離でのマッピング能力を検証するため、SuperKEKB (高エネルギー加速器研究機構) の加速器施設で試験を行った。この施設では、電子や陽子などの粒子を

加速・衝突させ、素粒子の反応を観察する実験が行われている。その過程で、一部の粒子がビームラインの軌道から外れ、装置と衝突し放射化するため、線量が高い装置がある。本実験ではビームラインの四分の一を使って、長距離を移動しながらガンマ線計測を行い、放射化した箇所を特定できることを検証した。

図 2.8（左）に、KEK でのマッピング試験に使用した装置の写真を示す。屋内サーベイに使用した CsI(Tl)シンチレーション検出器（1 インチ結晶）に加え、少し大きめの CsI(Tl)シンチレーション検出器（φ110×25 mm）を搭載した。ビームラインを走行しながら SLAM で作成した地図を図 2.8(右)に示す。青線はビームラインの CAD データを示しており、SLAM で得られたモノクロの地図に重ねて表示している。地図と CAD データが一致していることが確認でき、700 m での測定でおよそ 1 m 程度の誤差しか生じていないことがわかった。A 地点と B 地点では計数が高く、通過した経路が赤で色分けされている。図 2.9 は、1 インチの CsI(Tl)シンチレーション検出器の計数率の時間変化を示したものであり、A 地点及び B 地点における計数率の上昇が明確に確認できる。この場所については、施設側で行った線量サーベイにおいても線量率が高いことがわかっており、試験結果と一致することを確認した。なお、試験中に線量計で測定した A 地点での空間線量率は 2 $\mu\text{Sv/h}$ であった。

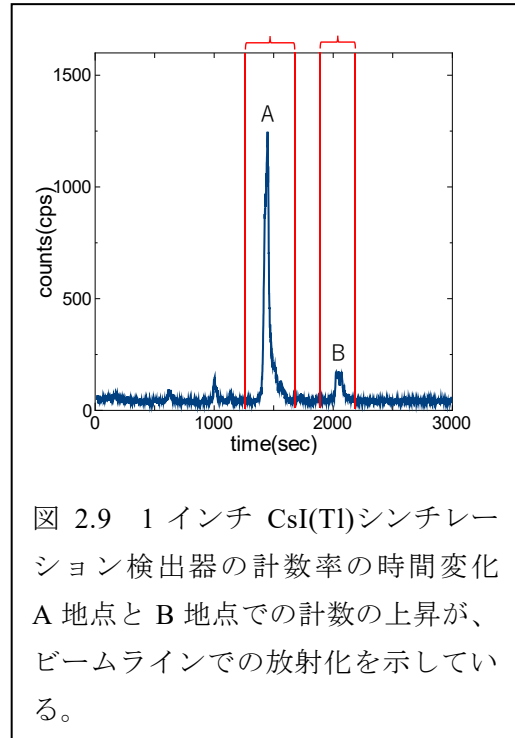


図 2.9 1 インチ CsI(Tl)シンチレーション検出器の計数率の時間変化 A 地点と B 地点での計数の上昇が、ビームラインでの放射化を示している。

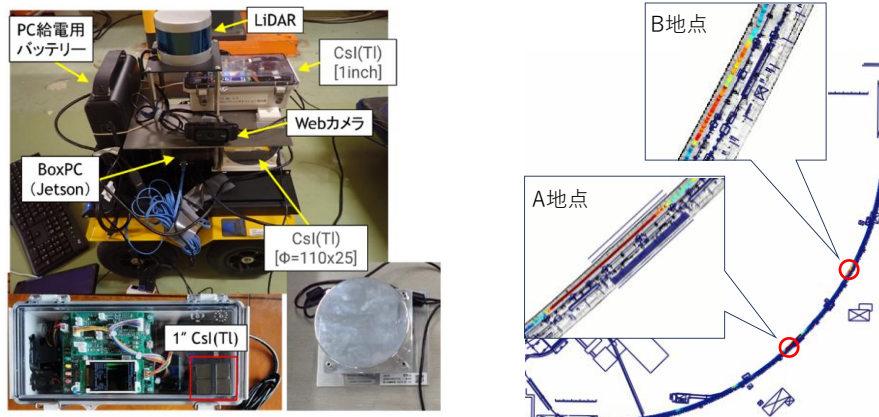


図 2.8 KEK 加速器施設でのサーベイ実験

左の写真は、KEK の実験で実際に使用した装置、右のマップはビームラインでの測定結果である。右図の青線描画は CAD データを使っている。マップの左下から右上に向かって走行し、全走行距離は約 700 m である。無人走行車両の軌跡に沿って得られた障害物はモノクロの描画で、放射線検出器の計数率はカラーでプロットした。スペクトルの取得間隔は 1 秒である。

大規模イベント等の現場において、放射性物質が検知された場合には、ガンマ線スペクトルの分析等から核種を判定し、その後の対応を速やかに決定する必要がある。本実験においても、測定した結果から核種同定が可能かを確かめた。図 2.10 は、A 地点を通過する前後 130 秒間、CsI(Tl)シンチレーション検出器で取得したスペクトルデータを積算したものである。青線は 1 インチ結晶のスペクトルを示し、赤線は $\phi 110 \times 25$ mm 結晶のスペクトルを示している。結晶サイズの大きい検出器の方（赤のプロット）で計数が多く、ガンマ線ピークがより明確に見える。KEK の文献など^[8,9,10]を参考にして、ビームラインの構成装置やその場にあった物質を考慮した結果、図 2.10 のスペクトルのピークが放射化による Co-57、Mn-54、Na-22 であると同定した。

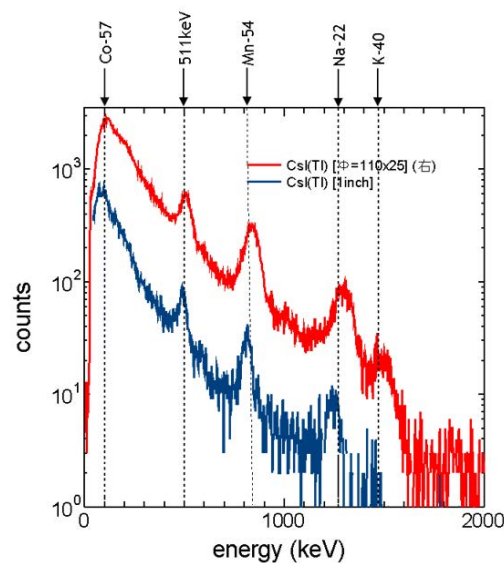


図 2.10 A 地点を通過する 130 秒間に CsI(Tl)検出器で取得したスペクトルの積算
赤と青のプロットの差は検出器の大きさによる。放射化による Co-57、Mn-54、Na-22 のピークが確認できた。K-40 は、ビームラインで常に観測されるバックグラウンドである。

移動中に測定したガンマ線スペクトルに基づく核種同定の妥当性を確認するため、A 地点において、30 分間ガンマ線スペクトルの定点測定を実施した。検出器はエネルギー分解能の高い CZT 半導体検出器を三脚の上に固定して、ビームラインと同じ高さで測定した。測定結果を図 2.11 に示す。移動中の測定から得られたスペクトル（図 2.10）と比較すると、主要なガンマ線は共通して確認できていることがわかる。CZT の測定では、新たに Co-60 及び Y-88 由来の小さいピークが確認できた。Y-88 は、ビームラインの銀めっきから生成される放射化物として報告されている^[9]。Co-60 については、Na-22 の 1275 keV のピークの左右に位置しており、1275 keV のピーク強度が相対的に大きいことが原因で、CsI(Tl)の測定で確認することができなかった。

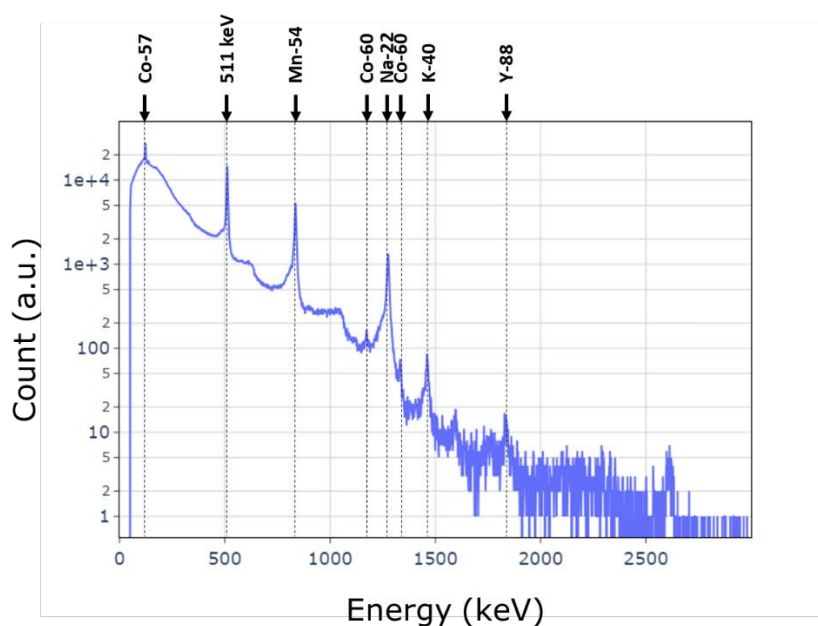


図 2.11 A 地点において CZT 検出器を用いて 30 分間測定したガンマ線スペクトル

以上の結果から、開発した SLAM 搭載放射線検出器で、屋内外での放射線マッピングをしながら、移動中の測定で放射線の検出・同定ができることが確認された。CsI(Tl)と CZT との比較では、今回のように複数の放射性同位体が混在している場合での核種同定において、エネルギー分解能の高い検出器を用いる有効性が確認された。

2.5 可搬型ガンマ線スペクトロメーターの高度化

広域サーベイシステム開発で試作した可搬型ガンマ線スペクトロメーターは、安価な CsI(Tl)シンチレーターと、低電圧で動作する SiPM (Silicon Photomultiplier) 光検出器を組み合わせたものである。CsI(Tl)シンチレーターのエネルギー分解能は、662 keV のガンマ線について 7% ～ 8%である。数百 keV 以上のガンマ線を放出する核種が単独で存在する場合に核種を同定するには、この分解能は十分である。しかし、低エネルギーのガンマ線では、ピークが広がり、環境ガンマ線に由来する連続スペクトルに埋もれやすくなる。高エネルギーガンマ線を放出する核種が同時に存在する場合には、そのガンマ線のコンプトン散乱や後方散乱のスペクトルが重なるため、ピークを確認することがさらに難しくなる。このような場合には、CsI(Tl)のエネルギー分解能が不十分なため、検知すべき核種を見落としてしまう可能性がある。

低エネルギーガンマ線を放出する核種の検知能力を向上するためには、ガンマ線スペクトロメーターのエネルギー分解能向上が必要である。エネルギー分解能の高い検出器には、例えば、分解能の高い順に、Ge 半導体検出器、CZT 半導体検出器、LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器があげられる。表 2.2 は、3 つの検出器と、CsI(Tl)シンチレーション検出器の特徴を比較したものである。最も優れたエネルギー分解能を持つ Ge 検出器は、液体窒素温度まで冷却が必要である。液体窒素を必要としない電気冷却式のものもあるが、バッテリーから電力を供給する必要がある。そのため、長時間継続して測定を行うには不向きである。CZT 検出器は、常温で使用できるが、製造可能な結晶サイズが小さいため、検出効率が低い。そのため、放射線源を離れた位置から検知する応用に適していない。LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器は、これら 2 つと比べてエネルギー分解能は劣るが、冷却が不要で、サイズが大きい結晶が入手可能であるため、高い検出効率を得ることができる。そこで、LaBr₃(Ce)シンチレーターを導入し、可搬型ガンマ線スペクトロメーターのエネルギー分解能を向上する開発を開始した。

表 2.2 Ge 半導体、CZT 半導体、LaBr₃(Ce)シンチレーター、CsI(Tl)シンチレーターの比較

	Ge	CZT	LaBr ₃ (Ce)	CsI(Tl)
エネルギー分解能 (FWHM@662 keV)	0.3%	< 3%	3%	7-8%
最大結晶サイズ	4 inches	数 mm 厚	3 inches	4 inches
密度 (g/cm ³)	5.33	5.8	5.29	4.51
発光量 (photon/MeV)	-	-	63,000	56,000
発光中心波長 (nm)	-	-	380	540
発光減衰時間 (ns)	-	-	26	680(64%) 3,340(36%)
潮解性	無	無	有	僅かに
自己放射能	無	無	有	無

2.5.1 可搬型 LaBr₃(Ce)検出器の性能試験

可搬型検出器に LaBr₃(Ce)を導入するにあたり、CsI(Tl)を用いた検出器に倣い、SiPM と組み

合わせた可搬型検出器を試作した。図 2.12 は、試作した検出器の構成を示したものである。直径2インチ、高さ2インチの $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレータにCAEN社のi-Spector^[11]を取り付け、バッテリーから直流12Vを給電して動作させた。直流5Vで動作するSBCをLANケーブルで接続して、データの読出しを行った。

シンチレータに取り付けた i-Spector は、SiPM (S14160-60520HS、受光面積：30 mm×30 mm)、SiPM 用電圧供給ボード及び信号処理の機能が一体となった機器である。放射線によるシンチレーション光を SiPM で電気信号にし、それを 12 bit、80 MS/s のアナログデジタル変換器でデジタル化、時間積分して、4096 チャンネルのスペクトルとする。測定用パラメータの設定、SiPM への電圧の ON/OFF、測定の start/stop 及びスペクトルデータの読出しは、Ethernet 経由で行った。起動、測定開始・終了、スペクトル保存の一連のコマンドを自動で送信するプログラムを作成し、SBC で実行してデータを取り込んだ。

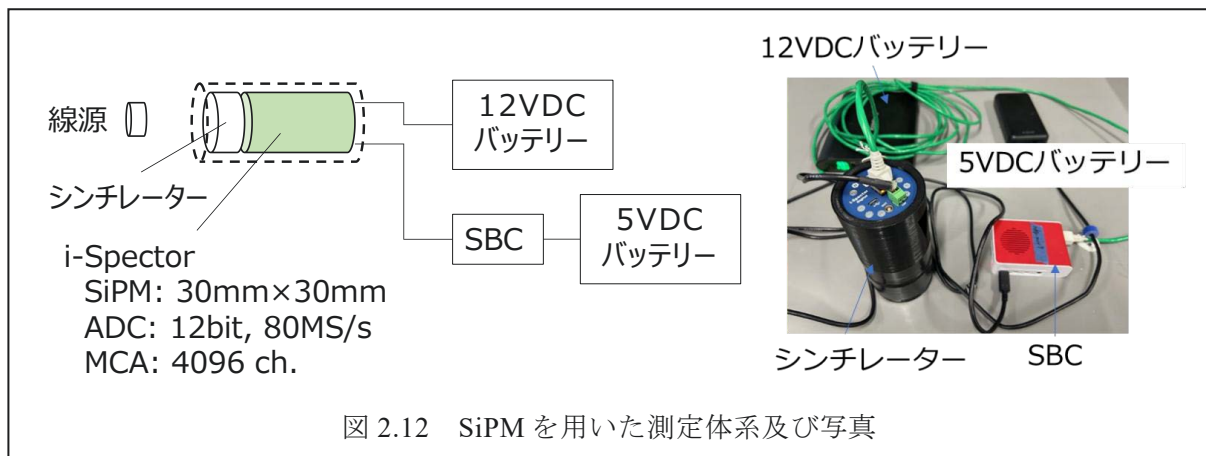


図 2.12 SiPM を用いた測定体系及び写真

試作した可搬型検出器を用いて、Cs-137 線源が放出する 662 keV のガンマ線のエネルギー分解能を評価する測定を行った。検出器正面に Cs-137 線源を設置し、10 分間測定を行い、取得したスペクトルを分析した。ピークの分析によって得られた半値全幅は、4.4%となった。

Cs(Tl)シンチレータを用いた検出器のエネルギー分解能 7.8%と比べて、エネルギー分解能を向上することができた。本試験で用いた機器は、バッテリー駆動であり、制御に SBC を用いているため、GPS や LiDAR といったセンサーを容易に付加することが可能である。今後、測定データを周期的に記録するプログラムを作成して、マッピングの試験を行う予定である。

2.5.2 光電子増倍管を使用した性能試験

2.5.1 では、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ と SiPM を組み合わせて開発した可搬型検出器を紹介した。この検出器は、CsI(Tl)を使用した検出器より分解能が向上しているが、表 2.2 に示すエネルギー分解能は達成できていない。これは、表 2.3 に示すように、SiPM の感度波長がやや長波長側が高く、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション光の波長とずれがあるため、シンチレーション光を電気信号に変換する効率が十分に得られなかったためと考えられる。また、発光減衰時間が短いため、波形

処理に使用した i-Spector の処理速度が十分ではなかった可能性も考えられる。

表 2.3 試験に用いた SiPM の仕様

	Silicon Photomultiplier (SiPM)
型番	S14160-6050HS
感度波長	400~1000+ nm
動作電圧	45 V
受光面	30 mm×30 mm

LaBr₃(Ce)シンチレーターについて、より高いエネルギー分解能を得るためには、通常組み合わせられて使われる光電子増倍管（PMT：Photomultiplier Tube）を用いることが有効であると考えられる。そこで、LaBr₃(Ce)と PMT を組み合わせた場合のエネルギー分解能を測定した。図 2.13 は、測定に用いた機器の構成を示している。この測定では、汎用的に用いられる高電圧源の Canberra 3002D 及び波高分析器 CAEN DT5730SB（ADC：14 bit, 500 MS/s）を用いた。PMT は、表 2.4 に示すものを選定した。光電面にスーパーバイアルカリを使用しており、従来の PMT と比べて量子効率が高いことが特徴である。検出器の正面に Cs-137 線源を設置し、10 分間測定した。Cs-137 が放出する 662 keV のガンマ線ピークのエネルギー分解能は、3.1%となった。SiPM と組み合わせた場合と比較してさらに高いエネルギー分解能を達成した。光検出器の感度波長が、表 2.2 で示した LaBr₃(Ce)の発光波長に適したものになったことに加えて、受光面積の拡大や、信号処理の高速化により向上できたと考えられる。

表 2.4 試験に用いた光電子増倍管（PMT）の仕様

	光電子増倍管(PMT)
型番	H15266-100-07
感度波長	300~800 nm
光電面種類	スーパーバイアルカリ ^[12]
最大定格電圧	-1200 V
受光面	直径 70 mm

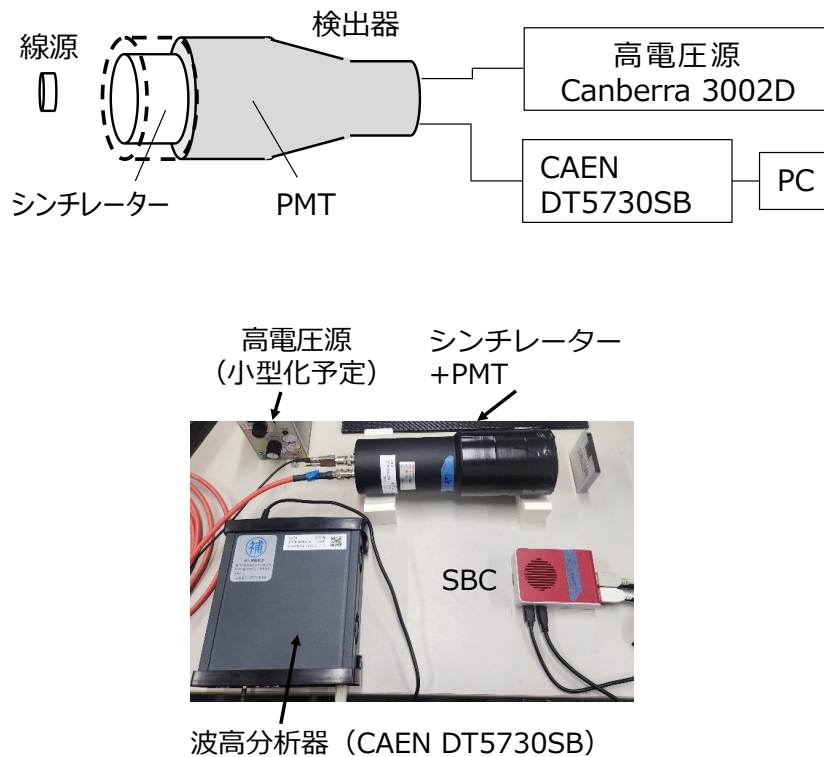


図 2.13 PMT を使った測定の概略図及び写真

LaBr₃(Ce)と PMT を組み合わせた検出器と CsI(Tl)検出器のガンマ線ピークを分離する能力を比較するため、低エネルギーガンマ線を測定した。図 2.14 は、Ba-133 線源及び Eu-152 線源を同時に測定したスペクトルである。青線は CsI(Tl)と SiPM の検出器で得られたスペクトルで、赤線は LaBr₃(Ce)と PMT の検出器で得られたスペクトルである。図の上部には、Ba-133 線源のガンマ線エネルギーを緑で、Eu-152 線源のガンマ線エネルギーを水色で示している。2つのスペクトルを比較すると、放出率の低い 4 本のガンマ線 (Ba-133 線源の 276、384 keV、Eu-152 線源の 411、444 keV) 及び特性 X 線は、赤で示した LaBr₃(Ce)検出器のスペクトルでのみ観測できている。LaBr₃(Ce)と PMT を組み合わせた検出器を用いることにより、低エネルギーガンマ線を放出する核種が混在する場合にも、核種同定が容易になることが期待できる。

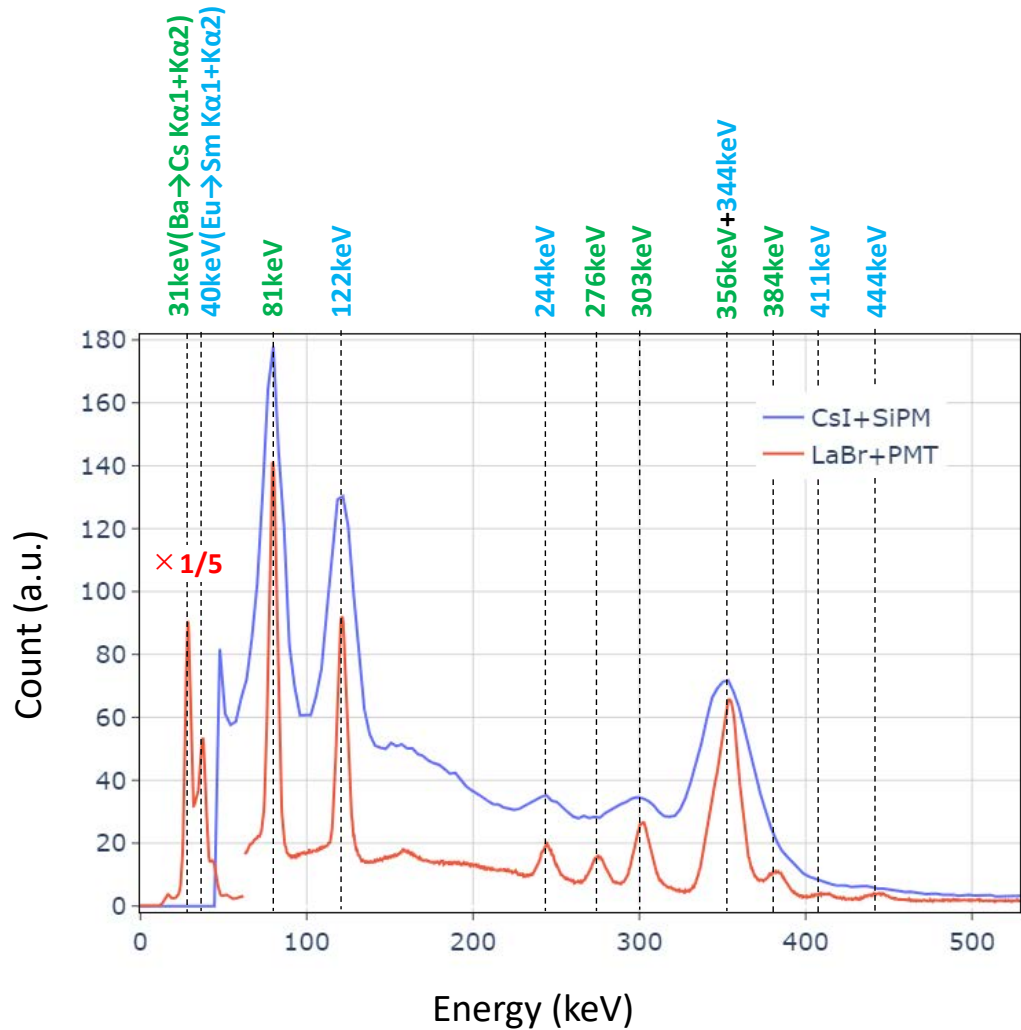


図 2.14 CsI(Tl)と SiPM を用いた検出器（青線）と LaBr₃(Ce)と PMT を用いた検出器（赤線）のエネルギースペクトルの比較

図の上部に記載したガンマ線のエネルギーは、緑が Ba-133 線源のもの、水色が Eu-152 線源のものである。LaBr₃(Ce)検出器のエネルギー分解能がより高いため、250～450 keV の領域でより多くのピークを観測することができた。

LaBr₃(Ce)と PMT を組み合わせた検出器を可搬型装置へ導入し、マッピングを行うためには、今回の試験で用いた高電圧源及び波高分析器は適していない。高電圧源（Canberra 3002D）は、サイズが大きく、重量も重い。波高分析器（CAEN DT5730SB）は、消費電力が大きく、長時間持ち運んで測定に用いるには、容量の大きい大型のバッテリーに接続して使用しなければならない。

今後、USB バスパワーで動作し、約 1000 V の電圧を印加できる小型高電圧源の開発を進める。波高分析器は、SBC から給電可能で、測定開始・終了、データの保存等を USB シリアル

通信で行えるものの導入を進めている。マッピング測定のために、周期的にガンマ線スペクトルを保存するプログラムを作成する。これらを実装した可搬型検出器を用いてマッピング試験を行い、線源検知性能及び核種同定能力の評価を進める予定である。

2.6 広域サーベイシステムの開発のまとめ

本章では、広い領域の放射線をサーベイするための要素技術開発について報告した。

屋外放射線マッピング技術開発では、GPSによる位置情報とガンマ線スペクトルを同時に測定する可搬型検出器の開発を進めた。CsI(Tl)を用いたバッテリー動作のスペクトロメーターにGPSアンテナを取り付け、測定結果を一定の間隔で保存する検出器を試作した。屋外における線源探知を想定した性能評価試験を実施し、約1 mの誤差で通過した経路の計数を地図上に表示した。その結果、マッピング範囲のうち、放射線量が高いエリアを特定できることを確認した。そのエリアで測定したガンマ線スペクトルを積算し、原因となる核種を特定することができた。現在、SBCを組み込み、小型かつ拡張性の高い装置の開発を進めている。

ネットワーク技術開発では、可搬型検出器で測定したデータを遠隔の指揮所へ送信し、並行して測定している検出器のデータを一箇所に集約するため、秘匿性の高いローカルネットワークを構築できるWi-SUN FANを導入し、試験を行った。その結果、見通しの良い環境において、約650 mの範囲で通信可能であることを確認した。現在、複数の通信試験デバイスの中継して宛先までデータを送るマルチホップ通信の試験を進めている。今後、複数台の可搬型検出器を使用して、測定データを並行して送信する実証実験を行う予定である。

リアルタイムマッピングソフト開発では、ローカルネットワークで収集した複数の放射線検出器の測定データをリアルタイムに確認するため、可搬型検出器から逐次送られてくるデータを処理して、地図上にヒートマップを作成するソフトウェアの開発を行った。今後、ソフトウェアの利便性の向上、保存するデータの圧縮等を進め、より実用的なソフトウェアを目指していく予定である。

屋内に対応可能な放射線マッピング技術の開発では、屋内で移動しながら周辺の環境地図を作成し、その地図上の通過した経路を算出できるLiDAR SLAMを用いたマッピングシステムの開発を進めた。LiDAR SLAMで得られた通過経路を放射線の計数で色分けして、ヒートマップを表示できる技術を開発した。SuperKEKB加速器施設にて、リング加速器トンネル内の約700 mの範囲の放射線量を測定する試験を行った。測定場所の地図を取得し、放射線量のヒートマップを重ねて線量が高いエリアを特定できることを確認した。本技術を用いることにより、大規模イベント会場として想定されるスタジアムやショッピングモール等の屋内においても、放射線量をマッピングしてサーベイに活用することができる。今後、無人走行車両の自動、自律走行等の実装を進めて、マッピングの効率化等を進める予定である。

高分解能可搬型検出器開発では、サーベイ中に検出された核種を同定する能力を向上するため、可搬型LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器の開発を行った。はじめに、LaBr₃(Ce)シンチレーターとSiPMを組み合わせた可搬型検出器を試作した結果、CsI(Tl)シンチレーターを用いた場合と比べて、エネルギー分解能を向上することができた。周期的な測定を行うデータ収集プログラムを実装することで、マッピング測定に使用する検出器の核種同定能力を向上できる

見込みを得た。さらに、シンチレーターの性能を引き出すために、PMT と組み合わせた場合についても試験を実施した結果、SiPM より分解能を向上できることを確認した。今後、PMT 用高電圧源、波高分析器の小型化を進め、可搬化した検出器を用いた試験を行う予定である。

今後、上記の開発した要素技術を組み合わせ、統合化した広域サーベイシステムの開発を進める。ネットワークで連携した複数台の可搬型装置を用いて、異なる箇所の測定を並行して進め、大規模イベント会場の広い範囲のモニタリングを効率的に行うための技術の開発を目指す。

3. 中性子源検知システムの開発

U、Pu などの核物質や Cf-252、AmBe(α, n)などの工業用中性子源を検知する場合、ガンマ線よりも透過力が高く、鉛などでの遮蔽が難しい中性子を検出することが有効な場面が想定される。

特に核物質は IAEA の評価する放射線源の潜在的危険性の評価値である D 値^[13]において、特に警戒すべきものであるとされている。

3.1 高速中性子検出器の開発

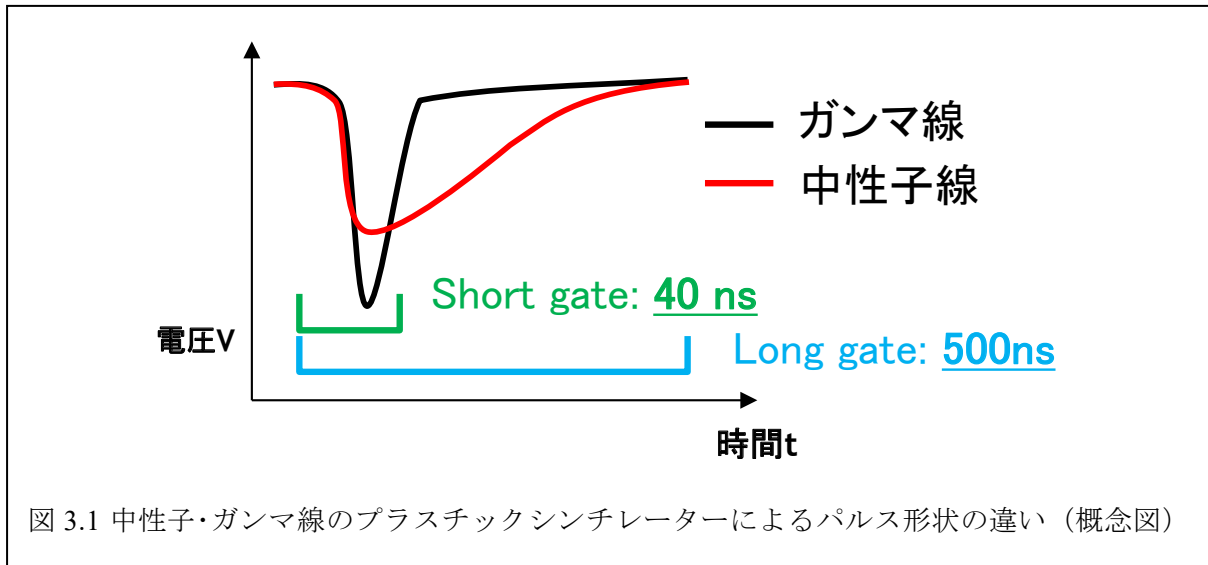
一般的に中性子の検出には、ポリエチレンや軽水などの水素を含む物質を用いて中性子を減速させ、エネルギーの低い熱中性子とし、反応断面積の大きい、He-3(n, p)H-3 や Li-6(n, α)H-3 などの反応を用いる。しかし、中性子を減速させると、その過程で中性子の飛来方向、エネルギーの情報は失われてしまう。そのため、熱中性子検出器は、測定地点における中性子の空間線量を測定することには適しているが、中性子の飛来方向を推定できない。また、減速体を用いるため、検出システム全体の体系が大きくなってしまう。このため、ロボットへの搭載や可搬化には不向きである。そこで我々は、中性子を減速させず、中性子源から発生した高速中性子を直接検出することで、検出システム全体の体積・質量の削減と中性子飛来方向の推定を目指し、高速中性子検出器開発を実施した。

高速中性子検出器として、我々はプラスチックシンチレーターに着目した。プラスチックシンチレーターは、水素と炭素で構成される有機シンチレーター的一种である。中性子によって散乱された水素は蛍光分子を励起し、その後の脱励起により蛍光が発生する。安価・大型化しやすく、加工・添加 (Li-6、B-10 等)・運搬といった取り扱いが容易な特徴を有すが、ガンマ線により散乱された電子によっても蛍光を発するため、ガンマ線バックグラウンドの抑制が課題となる。

近年、米国にて開発された PSD (Pulse Shape Discrimination) プラスチックシンチレーター (型番:EJ-276、EJ-299-33) ^[14]は、中性子とガンマ線の出力波形が異なることを用いて、中性子とガンマ線イベントを弁別できる。そこで我々は、PSD プラスチックシンチレーターを用いた中性子検出システムを開発することとした。

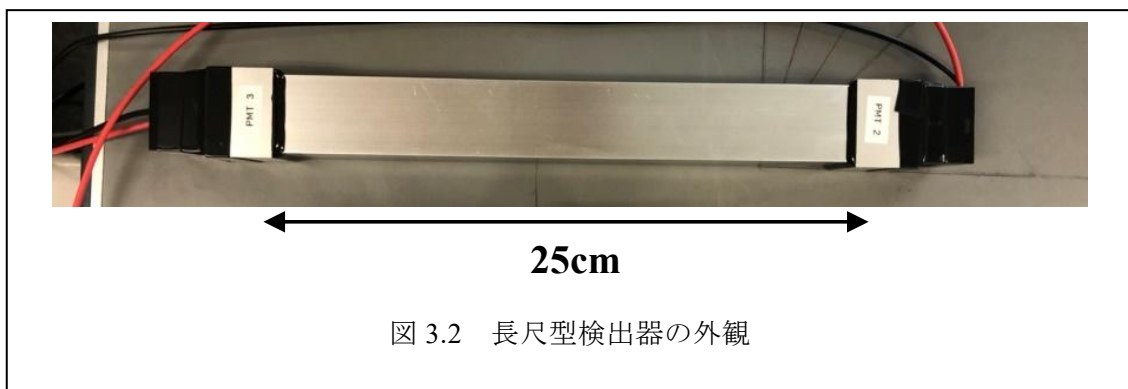
図 3.1 は PSD プラスチックシンチレーターの出力波形を概念的に示したものである。横軸が時間、縦軸が電圧である。ガンマ線と中性子では励起準位に違いが生じるため、脱励起の時間特性も異なる。図 3.1 のように、中性子由来のパルスの方が、ガンマ線由来のパルスよりも減衰時間が長くなる。その差異は式(1)を用いると、評価することができる。ここで、 Q_L 、 Q_S は図 3.1 に示す時間幅で電圧を積分した値である。

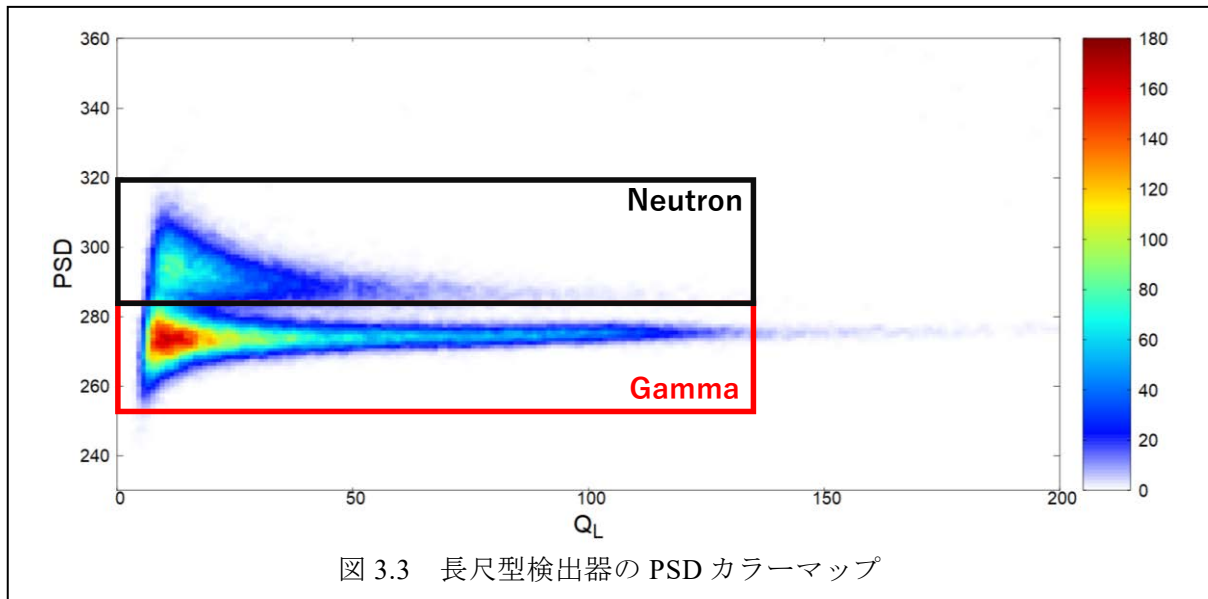
$$PSD = \frac{(Q_L - Q_S)}{Q_L} \quad \cdots(1)$$



3.2 PSD プラスチックシンチレーターの基礎試験

2.5×2.5×25 cm のジオメトリのプラスチックシンチレーター（ELJEN:EJ-299-33）を用いた高速中性子検出器を開発した。この長尺型プラスチックシンチレーターは両端に光電子増倍管（Hamamatsu:H11934-100-010）を設置し、両端から出力を取り出せるようになっている。外観を図 3.2 に示す。実験に際し、事前に所有のガンマ線源を用いて、両端の光電子増倍管の出力が同程度となるような電圧を求めた。近畿大学原子力研究所の所有する高速中性子線源を用いて中性子とガンマ線のイベントの弁別を実施した。結果の PSD カラーマップを図 3.3 に示す。横軸がパルスの積分値、縦軸が(1)式で評価された弁別指標 PSD である。イベントは両端の光電子増倍管の同時計数イベントのみを使用し、(1)式中の Q_L 、 Q_S 共に二つの光電子増倍管の出力の和を用いた。図 3.3 より、中性子とガンマ線のイベントが明確に弁別できていることが確認できる。





3.2.1 長尺型検出器の角度依存性の評価

長尺プラスチックシンチレーターは、その形状から中性子感度に方向依存性を有するため、近畿大学原子力研究所において中性子の入射角による計数の変化を実際に測定した。検出器は線源との角度がわかるように図 3.4(a)のように角度を記した板の上に置いた。線源は検出器の中心から 1 m の位置に置き、プラスチックシンチレーター長辺と線源が一直線に並ぶ状態を角度 0°として設置し、各角度で 10 分間測定を行った。

検出器の検出効率（計数を入射中性子数で割ったもの）は、線源が 0°方向にある場合で約 4%、90°で 1.5%であった。この差は、中性子から見たプラスチックシンチレーターの厚さが検出器の角度により変わることによる。1 m 位置にある線源からプラスチックシンチレーターの検出効率は、線源が 0°方向にある場合で約 0.0035%、90°にある場合で 0.0085%であった。この差は主に線源から見た検出器の立体角による。

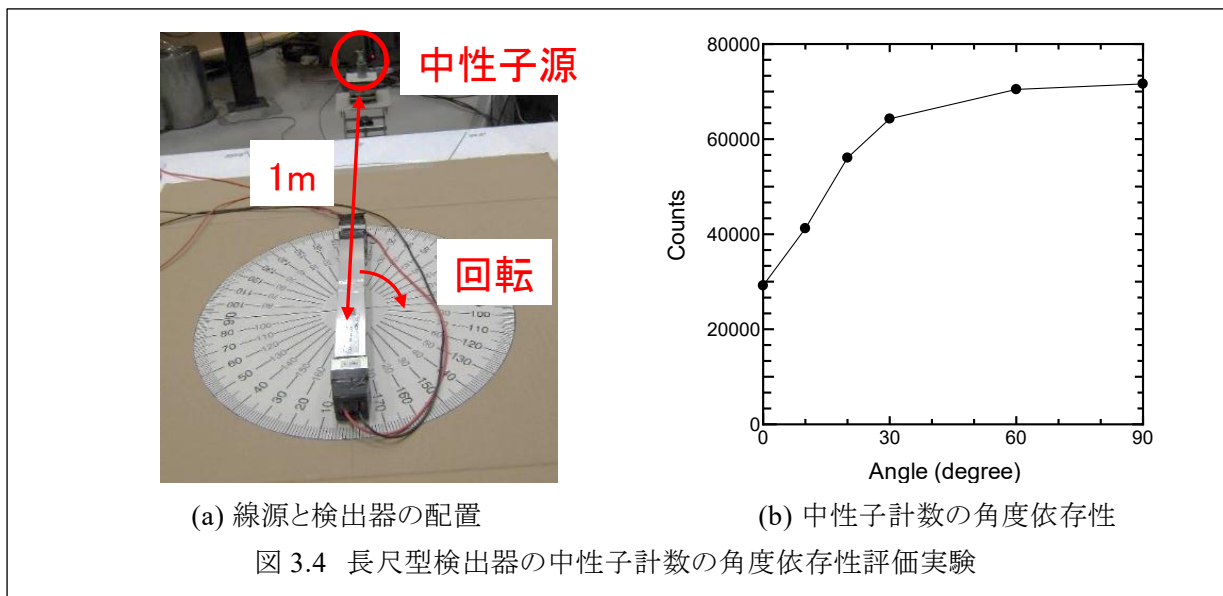


図 3.4(b)に中性子計数（10 分間測定）の角度依存性を示す。回転角度が大きくなるにつれ、線源から検出器への立体角は大きくなるが、中性子から見た実効シンチレーター厚さは薄くなる。これらの複合効果が表れている。0°から 30°の範囲では角度が変わるにつれ計数が鋭く変化している。しかし、30°以上の角度では、ほぼ同じような計数となった。検出器の向きが線源方向と一致する（0°）と鋭く計数が下がることから、中性子線源探索に有用となる可能性がある。

3.2.2 長尺型検出器と減速体を組み合わせた線源探知用検出器

線源方向を特定する手法として、Yamanishi は、He-3 や Li-6 ガラスといった熱中性子検出器とポリエチレンを組み合わせ、回転角による計数の変化で、中性子の線源方向を特定する手法を提案した^[15,16]。概念図を図 3.5 に示す。He-3 などの検出器は熱中性子に感度があるため、線源から発生した中性子は、ポリエチレンによって減速された後に、検出器に到達したものが計数される。実験結果から、線源に正対している検出器ほど計数は多く、ポリエチレンで影になると計数は減少し変化がほとんど見られなくなった。

高速中性子の検出においても同様な線源探知ができるか確認するため、EJ-299-33 プラスチックシンチレーション検出器を、ポリエチレンと組み合わせて、同様の試験を行った。図 3.6 は、実験における装置の配置を示したものである。ポリエチレンブロックは 100×100×250 mm を用い、長尺プラスチックシンチレーション検出器をポリエチレンの前面と背面に取り付けた。

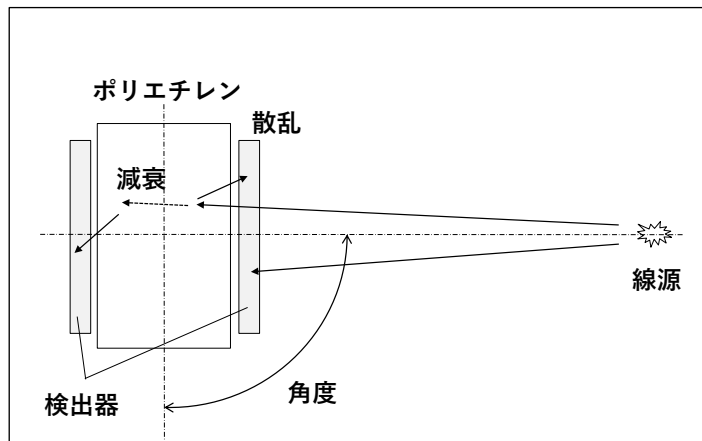


図 3.5 長尺型検出器を用いた線源方向探索法

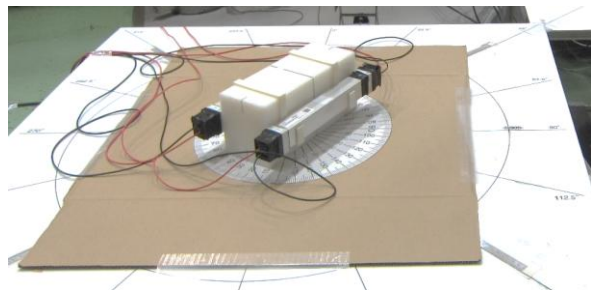
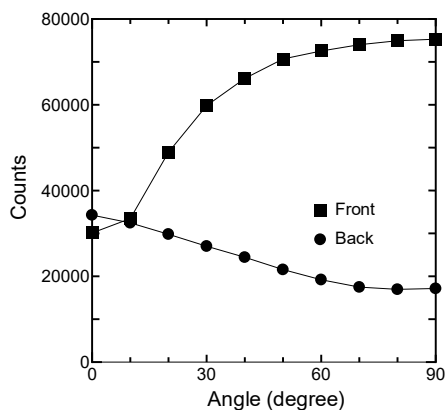
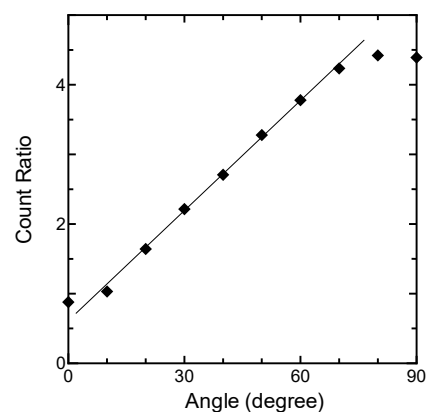


図 3.6 ポリエチレンと長尺型検出器を組み合わせた試験

図 3.7(a)に得られた中性子計数（10 分間測定）の角度依存性を示す。プラスチックシンチレータは高速中性子に感度を持つが、熱中性子に対しては感度を持たない。線源の反対側に設置した検出器においては、高速中性子がポリエチレンで減速され検出効率が下がる。実験では、角度が大きくなるにつれ、計数率が下がっていくことがわかった。一方、線源に面している検出器は、高速中性子を直接検出するので、単体で角度依存性を試験したときと同じような角度分布となった。0°付近で、若干ゆるやかになっているのは、単体の検出器の中心軸は、装置の中心軸と 5 cm 離れているためと考えられる。図 3.7(b)は、表側と裏側の検出器の計数比の角度依存性を示したものである。図 3.7(b)から 10°~70°の範囲で、直線に乗ることがわかった。高速中性子のエネルギー分布、ポリエチレンの大きさ、シンチレータの検出効率など、偶然、条件が整ったためと考えられる。しかし、原理的に、計数比は角度依存性を有することは明らかで、線源位置の探索に有効な技術となる可能性がある。実験結果をシミュレーションで再現可能か否かをモンテカルロシミュレーションコード PHITS（Particle and Heavy Ion Transport code System）^[17]を用いて計算を行った。中性子スペクトルには Cf-252、AmBe、PuBe の 3 種を用いて計算を実施した。計算の結果を図 3.8 に示す。中性子のエネルギー閾値を 1MeV とすると、実験の結果を良く再現した。また、異なる 3 種の高速中性子スペクトル全てに対して、線形性を示すことが示された^[18]。

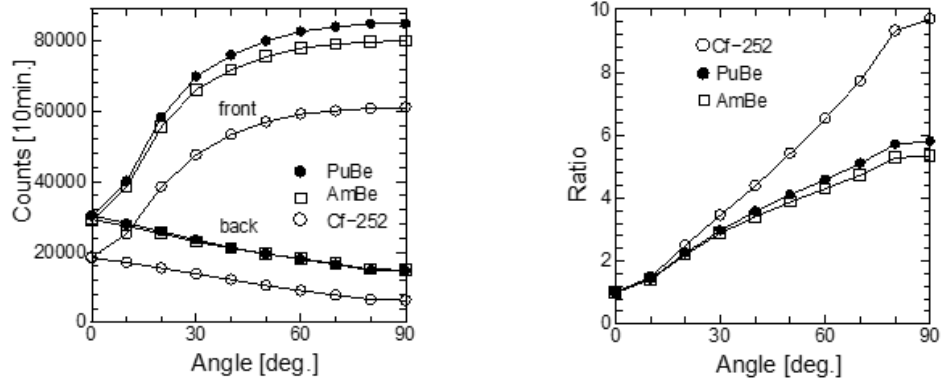


(a) 中性子計数の角度依存性



(b) 前後の検出器の計数比の角度依存性

図 3.7 ポリエチレンと長尺型検出器を組み合わせ測定した中性子計数の角度依存性



(a) 中性子計数の角度依存性

(b) 前後の検出器の計数比の角度依存性

図 3.8 PHITS を用いたシミュレーション計算結果

3.2.3 長尺型検出器を用いた移動しながらの測定による中性子源探知

広域モニタリングではロボットへの搭載を視野に入れている。そのため、より簡素で軽量でありながら線源方向を推定可能な測定システムとして、長尺検出器 2 本を十字に組み合わせた体系を考案し、その試験を行った。図 3.9 は、試験における線源と検出器の配置を示したものである。測定は線源位置を A（検出器と同じ高さ）と B（A から 70 cm 上方）に置いて行った。

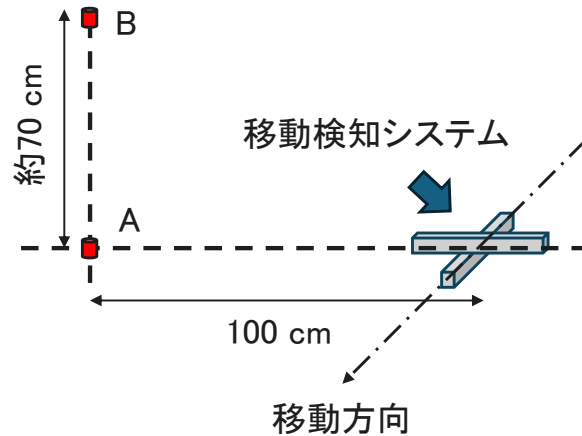


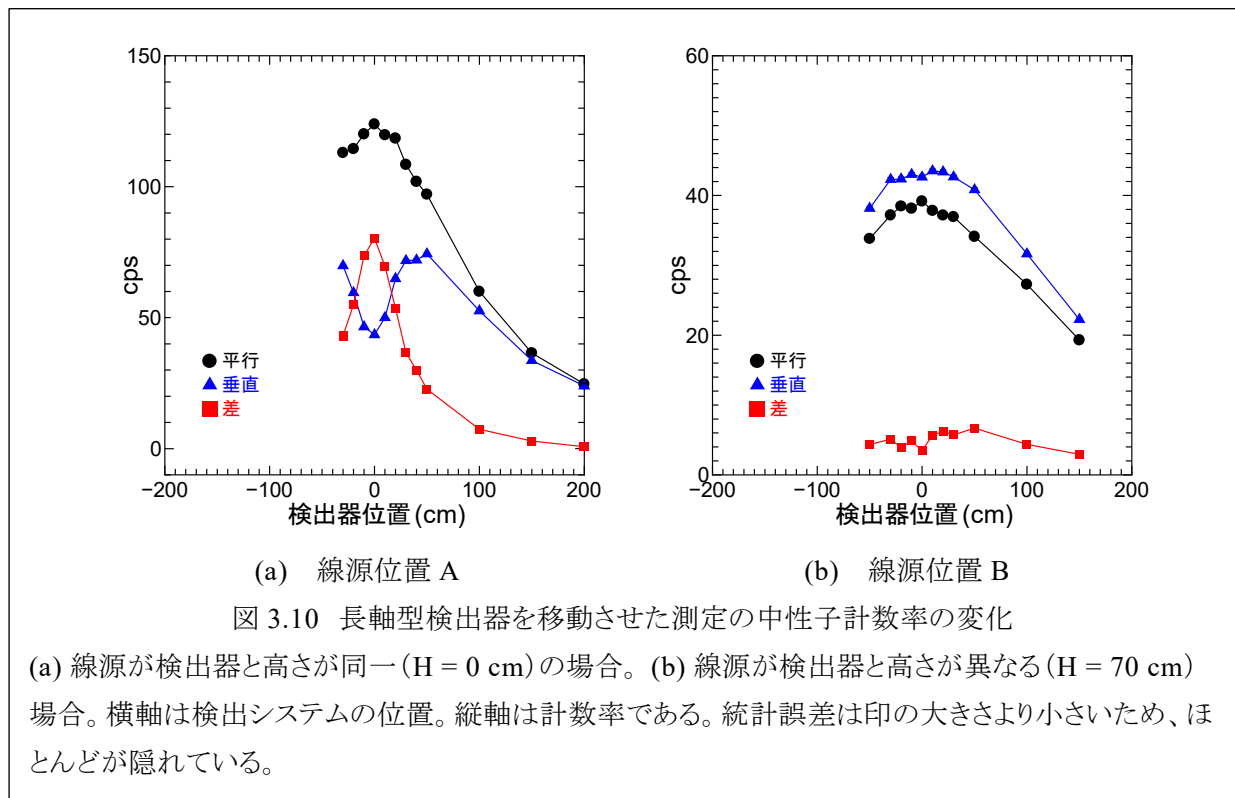
図 3.9 長尺型検出器を用いた平行移動実験

長尺型検出器 2 本を十字に組み合わせ、片方の検出器の長軸方向に向かってまっすぐに移動しながら測定を行った。移動する直線上から 1m 離れた位置に線源を設置し、高さを A ($H = 0$ cm) と B ($H = 70$ cm) に変化させて測定を行った。

測定結果を図 3.10(a)及び(b)に示す。図 3.10(a)、(b)の横軸は検出システムの位置、縦軸は計数率である。検出器システムは、検出器位置 0 cm で線源に最も近づく。図 3.10(a)の線源位置

A ($H = 0$ cm)において、平行な検出器の計数率は、位置が 0 cm から離れるに従い徐々に減っていく様子が見られる。これは、検出器と線源との距離が離れ角度がついていくことによる。一方、垂直に置いた検出器は、0 cm から離れるに従い徐々に計数率が増え、50 cm を超えたあたりから徐々に減少していくことがわかる。線源に近い 0 cm 付近の位置では、線源から見た検出器の立体角が小さく、検出効率が著しく減少するためである。2 つの検出器の計数率の差を取ると、図中の赤線で示したような位置依存性が得られ、単独の計数より精度良く、線源方向を示すことができる（ただし、線源の位置が移動方向の左右のどちらにあるかは、このプロットから見出すことはできない）。

図 3.10(b)は、線源位置 B ($H = 70$ cm)での測定結果で、垂直の検出器の軸と線源がずれるため、図 3.10(a)に見られた位置 0 cm におけるような計数率の減少は起きない。なお、水平方向の検出器の計数率が垂直方向の検出器よりも低い、これは下に置いた検出器が、上の検出器の陰になり、検出器に入射する中性子の数が減少したためと考えられる。



3.2.4 平板型検出器の角度依存性の評価

長尺検出器は、前項で示したように線源が軸上にある場合に計数が減り、線源方向検知に有用であるが、線源が軸から外れるとその感度は減る。そこで、高さ方向に関する検出器感度を無くすため、平板型検出器を導入した。検出器の外観を図 3.11 に示す。25×25×2.5 cm の立方体の四隅を切り落とし、シンチレーター表面にテフロンテープを反射材として巻き、アルミニウムケースに収納し、光電子増倍管（Hamamatsu: H6410）を四隅に取り付けた。各光電子増倍管からの出力をデジタイザーCAEN-DT5730（14 bit、500 MS/s）で処理して波形情報（PSD、 Q_L 、 Q_S 、Event Time）を取得した。

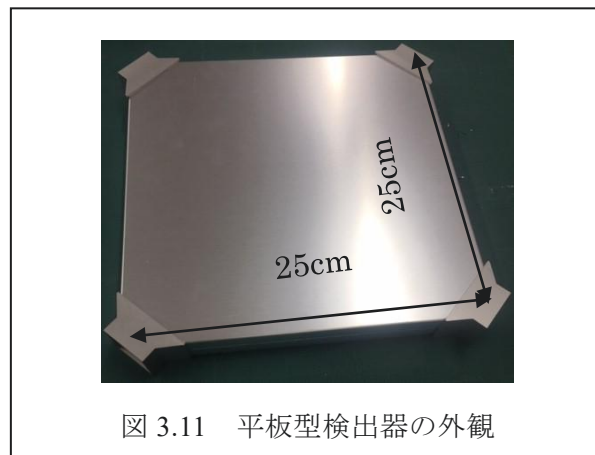


図 3.11 平板型検出器の外観

作成した検出器の試験を近畿大学原子力研究所の中性子源を用いて実施した。検出器は線源から 1 m 距離を取り、 $0^\circ \sim 90^\circ$ まで 10° ごと回転させ、角度ごとに 10 分間測定した。実験体系を図 3.12 に示す。角度は図 3.12 の写真のようにプラスチックシンチレーター面が線源に向いている角度を 0° とした。また、角度 0° の時の式(1)で弁別した PSD のカラーマップを図 3.13 に示す。横軸はエネルギー、縦軸は式(1)で評価した PSD である。この時、検出器についている光電子増倍管の出力で同時計数を取り、4 つの PMT からの Q_L 、 Q_S の合計から PSD を算出した。図 3.14 の上側（PSD の大きい側）のイベントが中性子、下側（PSD の小さい側）のイベントがガンマ線である。中性子、ガンマ線それぞれ良く弁別できていることがわかる。式(1)の $PSD = 0.19$ を境として、弁別したイベントの計数をそれぞれ図 3.15 に示す。中性子とガンマ線を比較すると、大きな回転角度における減少率は中性子のほうが大きい。これは、線源から見た立体角だけで検出効率が決まるわけではなく、中性子とガンマ線のエネルギーやシンチレーターの厚さにより検出効率が変わるためである。本試験の結果、予想通り棒状検出器と同様な角度依存性を持つことがわかった。

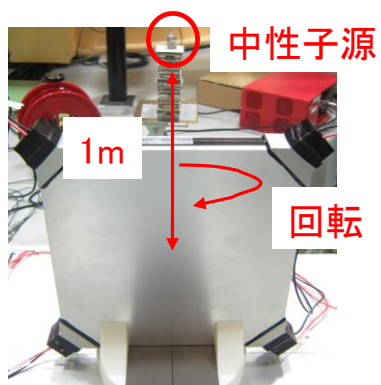


図 3.12 平板型検出器を用いた高速中性子源の測定の様子

写真の向きを 0° 方向として、鉛直方向を軸に右回りに 90° まで回転させ、それぞれの角度での計数を測定した。

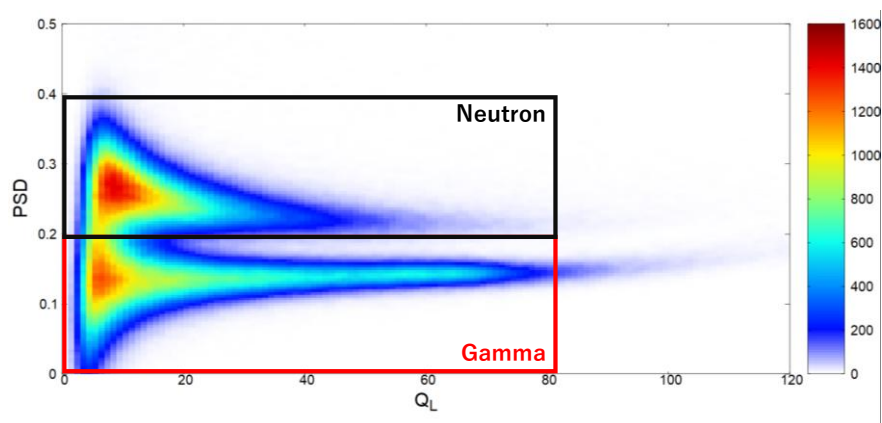


図 3.13 平板型検出器の PSD カラーマップ

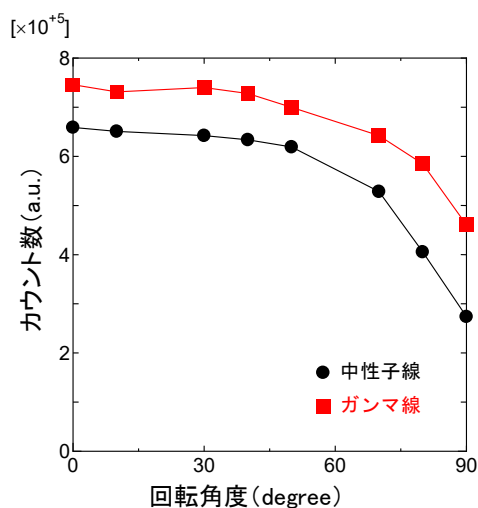


図 3.14 平板型検出器で得られた中性子計数の角度依存性

3.2.5 平板型検出器を用いた移動しながらの測定による中性子源探知

広い領域における核検知においては、検知の効率化が求められる。また、検出した際は速やかに線源位置を特定する必要がある。核検知に角度依存性のある検出器を回転させ、線源方向を見出すことはできるが、この方法は時間を要するため、広い領域をカバーするには向いていない。そこで、これらの中性子検出器を自律走行ロボットのような UMV に搭載することを見据え、平行移動しながら線源方向を特定する試験を実施した。実験は検出器を 1 枚ずつ、線源に対して平行、垂直として平行移動しながら測定を行った。線源高さが検出器と同じ場合（A 点）、70 cm 高い場所にある場合を（B 点）とし、それぞれ PSD を用いて弁別した中性子計数とその差を求めた。実験体系を図 3.15 に示す。線源高さが検出器と同じ高さにある場合の結果を図 3.16 に示す。検出器を進行方向に平行で移動しながら測定した場合の中性子計数が黒線のグラフで半値幅は約 ± 100 cm であった。再度、検出器を平行から垂直に変更し、移動しながら測定した結果が青線のグラフである。線源と検出器が一直線に並ぶ時、明確に線源方向を示している。それらの差が赤線のグラフであり、半値幅は約 ± 20 cm であった。黒線と比べ、約 5 倍、線源方向の推定精度が向上した。

線源高さを検出器と異なる高さ +70 cm（B 点）に置いた場合の結果を図 3.17 に示す。図 3.16 と同様の傾向が得られ、半値幅はそれぞれ約 ± 150 cm、 ± 30 cm と大幅な推定精度向上が得られた。A 地点より幅が広がったのは、主に距離が離れたことによるものである。検出器と線源の高さが同一平面状に存在しない場合でも、線源方向の推定が可能であることを示している。

コンサートホールや野球場の観客席などはすり鉢状に近い形状をしており、座席の配置により、検出器の水平面に線源が存在しないことが想定される場合でも適用可能である。このことにより、移動しながらの線源の検知の効率化を図ることができる。

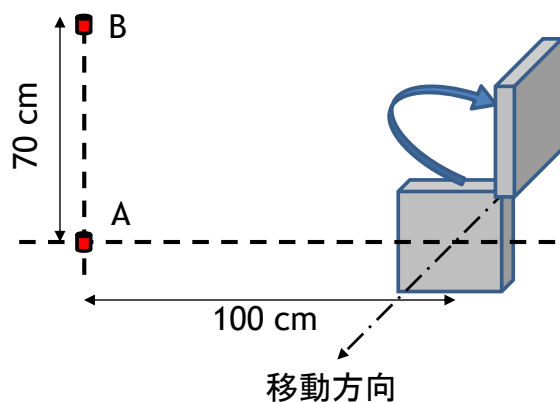


図 3.15 平板型検出器移動実験体系

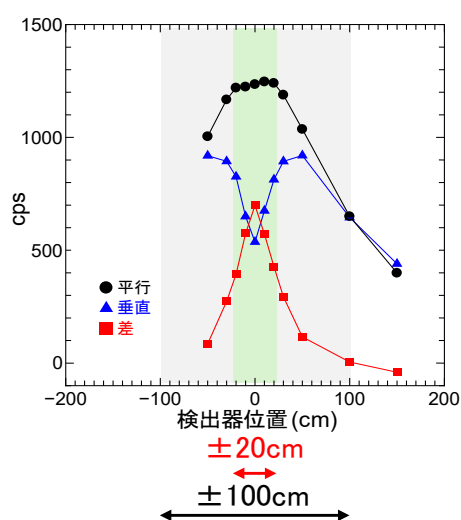


図 3.16 平板型検出器を移動させた時の中性子計数率の変化（線源位置 A：同じ高さ）

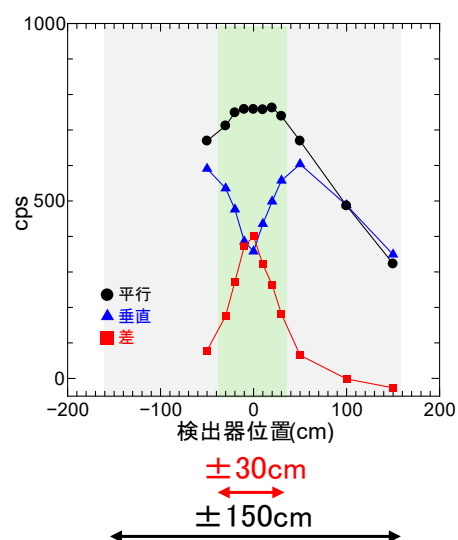


図 3.17 平板型検出器を移動させた時の中性子計数率の変化（線源位置 B：70 cm 上）

3.3 中性子源検出システムの開発のまとめ

核セキュリティにおいて、危険性が高いと評価されている核物質や工業用中性子線源の迅速かつ効率的な検知能力の向上を目指し、高速中性子検出器開発を実施した。PSDプラスチックシンチレーターを用いて、長尺、平板の2種の形状の中性子・ガンマ線イベントの弁別能と線源方向推定能を確認した。ロボットへの搭載を見据え、移動しながらの測定を実施し、長尺検出器の場合は、同一平面に線源が存在する場合は線源方向推定が可能であること、平板型検出器の場合は、線源が検出器の斜め上方向に存在する場合でも方向推定が可能であることを確認した。また、当初の目論見通り、高速中性子のみを検出していることをシミュレーション及び実験から確認した。中性子のエネルギー閾値は 1 MeV であった。これにより、線源から周辺の物質によって散乱された中性子を測定せず、直接入射する中性子のみを検知することで、周辺環境に依存せず、線源方向推定が可能であることを確認できた。また、中性子だけでなく、ガンマ線の計数も取得できるため、ガンマ線源の方向推定も同時に行うことができる。将来的には屋外での取り扱い向上のため、低消費電力の ARM 系 CPU を搭載するシングルボードコンピューター、ボックスコンピューターでのデータの取得を行えるように開発を進めている。

4. 結論

大規模イベント等における核物質や放射性物質を利用したテロ行為を未然に防ぐため、広い領域の放射線の状況をサーベイし、エリア内での異常を速やかに検知するための技術開発を進めた。広域のサーベイを効率良く行うための技術として、放射線マッピングに着目し、効率的なマッピングを行うために必要な様々な技術を可搬型放射線検出器に導入し、試験を実施した。

GPS座標を取得できるようにしたガンマ線スペクトロメーターの開発では、準天頂衛星測位システム「みちびき」のサブメーター級測位サービスを利用できる可搬型検出器を開発し、屋外でマッピング試験を行った。約1 mの誤差で測定結果を表示し、放射線量が高いエリアを可視化できることを確認した。同時に、そのエリアのガンマ線スペクトルを積算して、原因となる核種が何であるかが特定できることを確認した。SBC に接続して制御を行うことを前提とした、小型化、モジュール化を進めている。

測定した結果を遠隔で即時に確認し、複数の場所で並行して進めている測定の結果を集約できるようにするための通信技術の導入では、インターネットへの接続をせずに、広い範囲でガンマ線スペクトルを含むデータを送受信するため、LPWA の一つである Wi-SUN FAN の試験を進めた。Wi-SUN FAN モジュールを用いた1対1の通信で、通信可能距離を評価するための基礎試験を実施した。中継局を繋いで通信距離を伸ばすマルチホップ通信の試験や、可搬型検出器で測定したスペクトルデータを送信する試験を進める予定である。

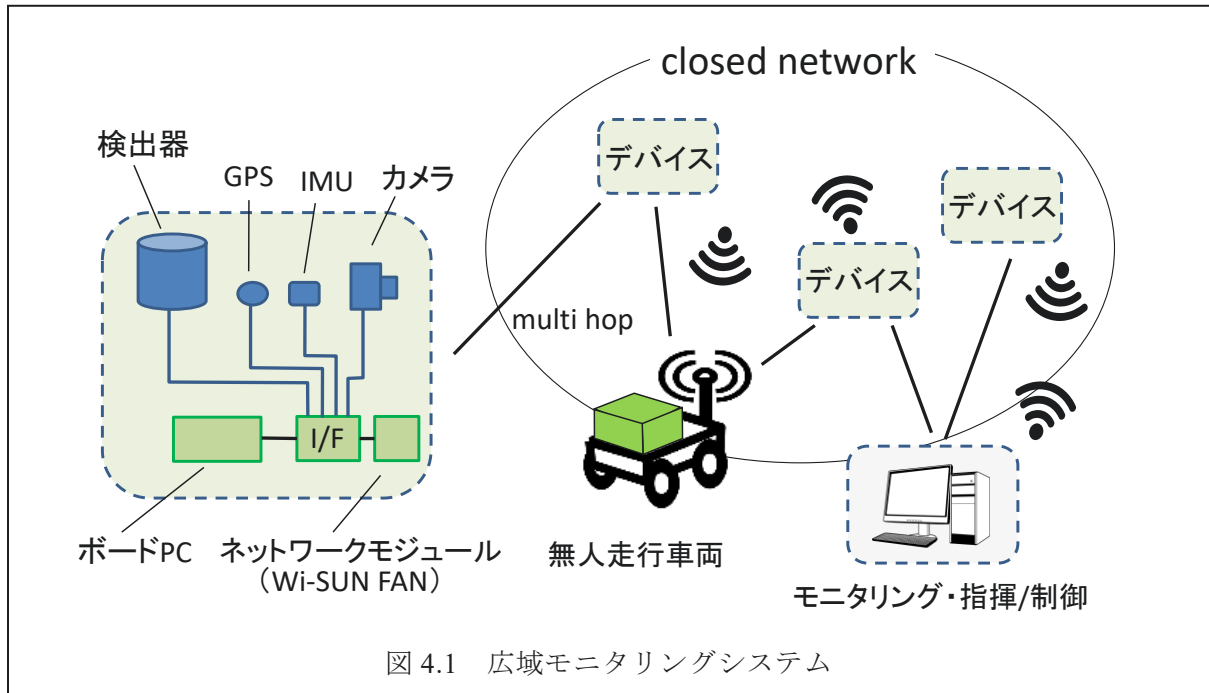
集約した全ての結果を1つのマップ上に表示するためのソフトウェア開発では、送られてくる測定データをリアルタイムで地図上に表示できる機能及び線源が高いエリアのスペクトルを選択して表示できる機能を実装した。これらの技術により、複数の可搬型検出器で並行して行う測定の指揮・統制ができるようになる。また、専用の回線でデータの通信を行うことにより、秘匿性を担保することができる。表示するデータの選択機能の実装や、インターフェースの改良を行い、利便性を向上させる開発を進める。

GPSの電波を受信できない屋内において、放射線マッピングを行うための技術開発では、自身の位置座標を得る手法として、LiDAR等のセンサーの情報から自己位置を推定しつつ、周囲の環境地図を作成するSLAM技術を導入した。SLAMで取得した位置情報と放射線検出器の測定結果を統合し、屋内においても地図上に測定した放射線量を表示できる装置の試験を行った。加速器施設において放射線量分布をマッピングする試験を実施し、700 mにわたるマッピングで約1 mの誤差で地図を作成でき、移動中に測定したガンマ線スペクトルから、放射化によって生じた核種を同定できることを確認した。また、ガンマ線核種の同定能力向上を目指して、LaBr₃(Ce)シンチレーターを導入した可搬型検出器の試験を実施し、エネルギー分解能の向上を達成した。

核物質を含む中性子源を高感度に検知し、迅速に位置を特定するための技術として、高速中性子検出器を用いた中性子線源探索技術の開発を進めた。長尺型や平板型に加工したプラスチックシンチレーション検出器を用いて中性子の測定試験を行い、計数の方向依存性を利用して中性子が飛来した方向から線源方向を特定する技術の開発を進めた。

今後、将来的な実用化を目指して、システムとしての統合を進めていく予定である。図 4.1

は、各要素技術を統合した広域モニタリングシステムのイメージを示したものである。シングルボードコンピュータを基礎として、放射線検出器、測位センサー、カメラ等を搭載した可搬型装置を用いて、データを定期的に取り得する。デバイス同士をメッシュ型ネットワークで接続し、得られたデータを送受信して、モニタリングの指揮/制御を行うセンターで情報を集約する。センターでは、全体の測定データを確認し、有機的に指揮し、何か異常があった場合には分析し、その対応を決定する。無人走行車両等を有効に導入することで、省力化、効率化できるので、ロボット技術の導入を並行して進める。



謝 辞

本技術開発は、文部科学省の核セキュリティ強化等推進事業費補助金の下で進められた。
また、本技術開発は、日本原子力研究開発機構と国際原子力機関（IAEA）との共同研究
（Coordinated Research Program (CRP), J02015 (Facilitation of Safe and Secure Trade Using Nuclear
Detection Technology - Detection of RN and Other Contraband)) に対しても寄与するものである。

参考文献

- [1] International Atomic Energy Agency, Combatting illicit trafficking in nuclear and other radioactive material, IAEA Nucl.Secur.Ser. (6) (2007).
- [2] International Atomic Energy Agency, Nuclear Security Systems and Measures for Major Public Events, IAEA Nucl.Secur.Ser.(18)(2012).
- [3] 高橋時音ほか、「大規模公共イベント等における核・放射性物質モニタリング技術開発」日本核物質管理学会第44回年次大会予稿集(2023)東海.
- [4] M.Koizumi et al., Current status of a JAEA development program on nuclear and radioactive materials detection techniques in major public events, Proc. of the INMM and ESARDA joint Annual Meeting (2023), Viena, Austria.
- [5] 日新システムズ, IOT 向け LPWA 国際標準規格 Wi-SUN FAN, <https://www.connss.co.jp/iot/wisun/> (accessed 2025/10/01).
- [6] 内閣府 宇宙開発戦略推進事務局, みちびき (準天頂衛星システム: QZSS) , <https://qzss.go.jp/> (accessed 2025/10/01).
- [7] 日本原子力研究開発機構, マッピングツール| 放射性物質モニタリングデータの情報公開サイト, https://emdb.jaea.go.jp/emdb_old/mappingtool.html (accessed 2025/10/01).
- [8] 柴田徳思, 使用を廃止した加速器の放射化の問題, RADIOISOTOPES, 48, pp. 208-215 (1999).
- [9] 松村宏, 放射性核種の生成と放射線防護, 高エネルギー加速器セミナーOHO (2016).
- [10] 石橋拓弥ほか, SuperKEKB 陽電子リング用コリメータの設計, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan(2013) pp. 1191-1195.
- [11] i-Spector Digital, <https://www.caen.it/products/i-spector-digital/> (accessed 2025/10/01).
- [12] K. Nakamura et al., Latest bialkali photocathode with ultra high sensitivity, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 623 (2010) pp. 276-278.
- [13] IAEA, Dangerous quantities of radioactive material(D-values), (2006).
- [14] Eljen Technology, PSD PLASTIC SCINTILATOR EJ-276D&EJ-276G, https://eljentechnology.com/images/products/data_sheets/EJ-276D.pdf (accessed 2025/10/01).
- [15] H.Yamanishi, Proposal for a Portable Directional Neutron Source Finder, Jpn. J. Health Phys., 38(3) (2003) pp. 267-269.
- [16] H.Yamanishi, Design of a portable directional neutron source finder, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 544 (2005) pp. 643-648.
- [17] T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T. Kai, Y. Matsuya, N. Matsuda, Y. Hirata, T. Sekikawa, L. Yao, P.E. Tsai, H.N. Ratliff, H. Iwase, Y. Sakaki, K. Sugihara, N. Shigyo, L. Sihver and K. Niita, Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code System - PHITS version 3.33, J. Nucl. Sci. Technol. 61, pp. 127-135 (2024).
- [18] M.Koizumi et al., Rod-shepd pulse shape discrimination plastic scintillation detectors applied for neutron source direction survey, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 1042 (2022).

