

福島県環境放射線研修のためのNaI検出器の性能評価

Performance study of NaI detector for the Environmental Radiation Training in Fukushima Prefecture

山下祐史¹, 住浜水季^{1,2}

Yamashita Yushi¹, Sumihama Mizuki^{1,2}

[キーワード Keyword]	放射線教育, NaI検出器, 性能評価
[所属 Institution]	¹ 〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1 岐阜大学教育学部理科教育講座物理科 ² 〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 10-1 大阪大学 核物理研究センター e-mail: sumihama@gifu-u.ac.jp

[要 旨 Abstract]

福島県飯舘村・大熊町にて環境放射線研修が毎年行われている。研修で採取された土壌と植物中の放射能を測定するために、NaI検出器が使われている。本研究では、このNaI検出器の性能評価を行った。測定する ^{137}Cs からの 662 keV のガンマ線のエネルギー分解能は約 6.7 % だった。周辺温度が変化すると、ゲイン変動が起こり、19.0 °C から 25.5 °C の温度変化で、約 2.5 % ゲインが落ちた。検出効率も、測定する試料の高さが 22.5 mm の時は約 3.9 % であり、試料の高が高いほど検出効率が低くなることが分かった。これらの性能評価を行ったことで、放射能を正確に算出することができるようになった。この研究を通して、放射線の生活への影響、福島県の復興を考えていきたい。

1. はじめに

2011年3月11日に起きた東日本大震災により、福島第一原子力発電所の原子炉が制御できなくなり水素爆発が起きた。水素爆発により原子炉の建屋が破壊され、大量の放射性物質が放出された。福島第一原子力発電所が所在する福島県双葉郡大熊町は、翌日に避難指示が発令され「全町避難」となった。事故後、除染作業が行われたこと、一部の放射性物質の放射能の減衰により、8年後の2019年4月に一部地区の避難指示が解除された。2020年3月には常磐線が全線再開されるなど復興が進んでいる。しかし、10年が経過した現在でも帰宅困難区域が大半を占めている[1]。今後も、除染作業が必要であり、放射能の測定を継続的に行うことが求められる。

著者は2022年8月21日から8月26日までの6日間、福島県飯舘村と大熊町で行われている大阪大学主催の環境放射線研修に参加した[2]。研修では、物理学、化学、医学、社会学、統計学、法学といった幅広い観点から放射線を学習した。現地では、東日本大震災・原子力災害伝承館の見学、復興に関連した討論、帰宅困難区域の視察及び、空間線量測定と土壌採取を行った。採取した土壌サンプルの放射能の測定を、ヨウ化ナトリウム (NaI) 検出器を用いて現地で行った。

2. 目的

本研究では、現地で用いたNaI検出器の性能評価を行った。正確に放射能を算出するために、エネルギー分解能、ゲイン変動、検出効率を求めた。

3. 測定で使用した放射性同位体

福島第一原子力発電所の事故で放出された放射性物質は雨や雪に交じって飛散し、土壌にしみ込んだ。その放射性物質にはガンマ線を放出する ^{131}I 、 ^{134}Cs や ^{137}Cs が含まれている。 ^{131}I の半減期は8日と短く、現在は検出されていない。 ^{134}Cs は半減期が2.07年で、11年後には約40分の1にまで減衰するため、現在ではほとんどの地域で検出されなくなっている。一方で、 ^{137}Cs は半減期が30.07年と長く、今後も人々の生活に影響を及ぼす可能性がある。 ^{134}Cs からは主に 605 keV のガンマ線が、 ^{137}Cs からは 662 keV のガンマ線が放出される。

本研究では、福島県で採取した ^{134}Cs や ^{137}Cs を含む土壌に加え、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co の校正用線源、自然放射線に含まれる ^{40}K を使用し、NaI検出器の性能評価を行った。 ^{60}Co からは 1173 keV と 1332 keV の2つのガンマ線が、 ^{40}K からは 1461 keV のガンマ線が放出される。

4. NaI 検出器を用いた放射能測定

一般に、ガンマ線の測定には検出効率の高いNaI検出器か、エネルギー分解能が優れているゲルマニウム半導体 (Ge) 検出器を用いることが多い。環境放射線研修で採取した土壌中の放射能測定には、この双方が用いられている。現地では、持ち運びが容易なNaI検出器を用い、その後、より正確な放射能測定を行うためにGe検出器を用いた。

図1は使用したNaI検出器と測定時のセットアップである。NaI検出器は ORTEC-51B51/2 で、結晶サイズは $\phi 53 \times 75$ [mm] である。検出器の上端に試料を充填したU-8 (径 56 mm, 高さ 68 mm) または、U-9 (径 56 mm, 高さ 39 mm) 容器をのせて測定する。NaI検出器は、NaI結晶と前置増幅器付き光電子増倍管からなる。ここからの電気信号は、マルチチャンネルアナライザー (MCA) で解析され、エネルギースペクトルとしてとり出される。エネルギースペクトルの解析には、CAEN MC² Analyzer を用いた。

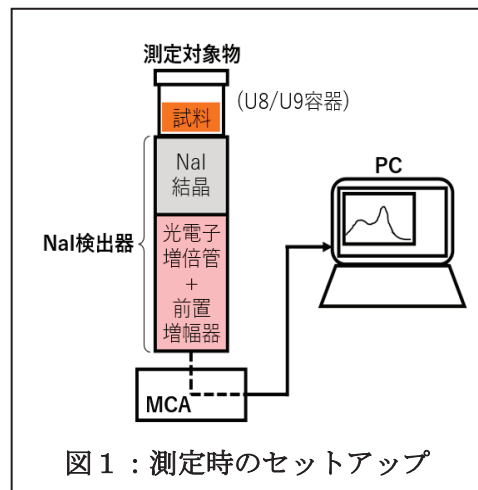


図1：測定時のセットアップ

5. NaI 検出器の性能評価

放射能測定に重要なエネルギー分解能、周辺温度によるゲイン変動、検出効率を調べた。

5-1 エネルギー分解能

^{137}Cs と ^{60}Co の校正用線源から放出されるガンマ線と、自然放射線に含まれる ^{40}K から放出されるガンマ線を使用し、エネルギー分解能のエネルギー依存性を調べた。図2は、NaI検出器で測定した ^{137}Cs の校正用線源から出るガンマ線のエネルギースペクトルである。縦軸がカウント数 [counts] で、横軸はガンマ線のエネルギー [keV] である。このスペクトルから、662 keV のガンマ線の全吸収ピークが観測され、低エネルギー側にはコンプトン端も観測されている。本研究では、ピーク半値幅を中心値で除したものをエネルギー分解能とした。測定した ^{137}Cs からの 662 keV のガンマ線に対するエネルギー分解能は約 6.7% だった。

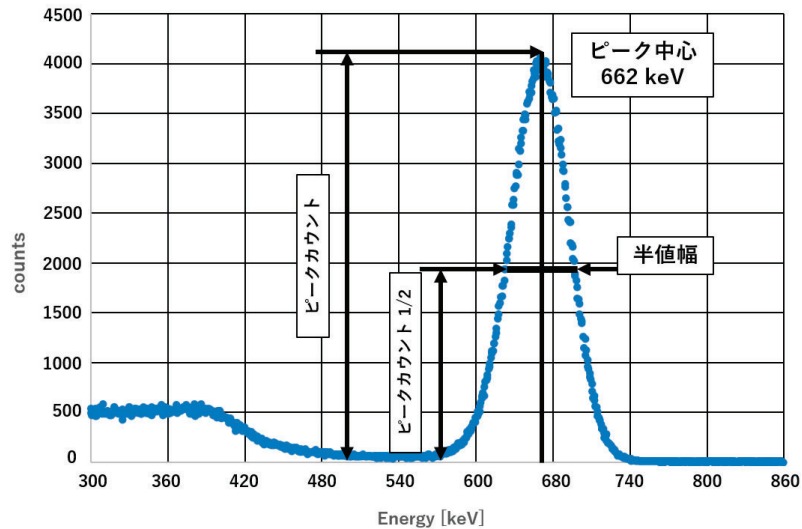


図 2 : ^{137}Cs の校正用線源のエネルギースペクトル

図 3 は、3つの放射性同位体からのガンマ線に対するエネルギー分解能の測定結果である。縦軸が分解能 [%] で、横軸がガンマ線のエネルギー E [keV] である。エネルギー分解能にはエネルギー依存性があり、エネルギーが大きいほど、エネルギー分解能が小さくなるのが分かる。これは、ガンマ線のエネルギーが高いほど、NaI結晶内の光子数が増加し、分解能が良くなったと理解できる。点線は、 $1/\sqrt{E}$ の関数でフィッティングした結果である。この点線におおむねのっていることから、上記のことが言える。

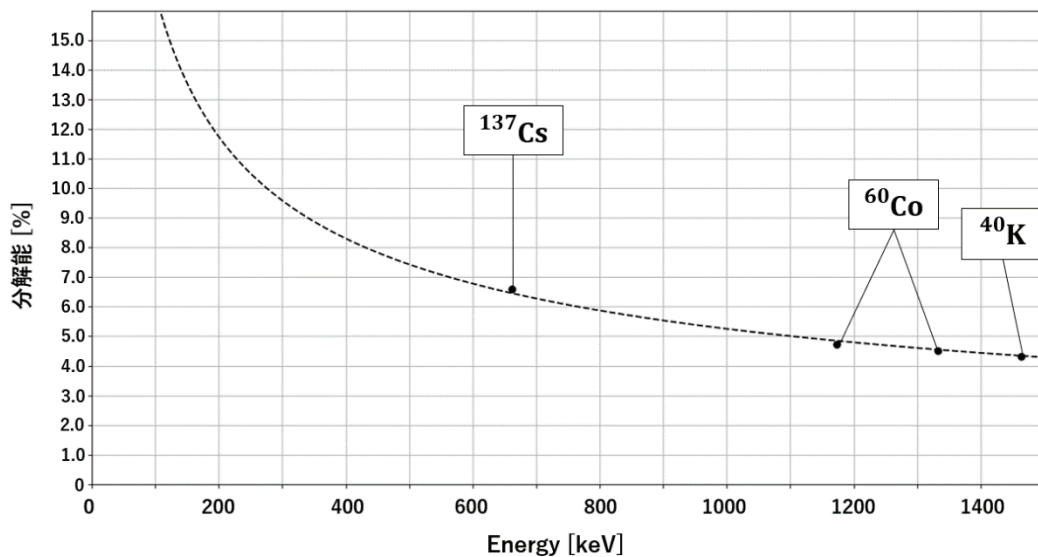


図 3 : 分解能のエネルギー依存性

5-2 周辺温度によるゲイン変動

検出器のNaI結晶と光電子増倍管は、温度の影響を受けやすい。本研究では、 ^{137}Cs 校正用線源から出るガンマ線を用いて、周辺温度によるゲイン変動を調べた。図 4 は、662 keV のピーク中心値の周辺温度依存性を示したものである。縦軸が初期ピーク中心値からのずれを百分率で示したもの [%] で、横軸が周辺温度 [°C] を示している。周辺温度が変化すると、ゲイン変動が起こる。19.0 °C から 25.5 °C の温度変化で、約 2.5 % ゲインが落ちた。 ^{137}Cs のエネルギー分解能 (6.7 %) と比較して、このゲイン変動は小さいが、周辺温度の変化が少ないほど高い精度が得られるので、温度管理を行うことが望ましい。

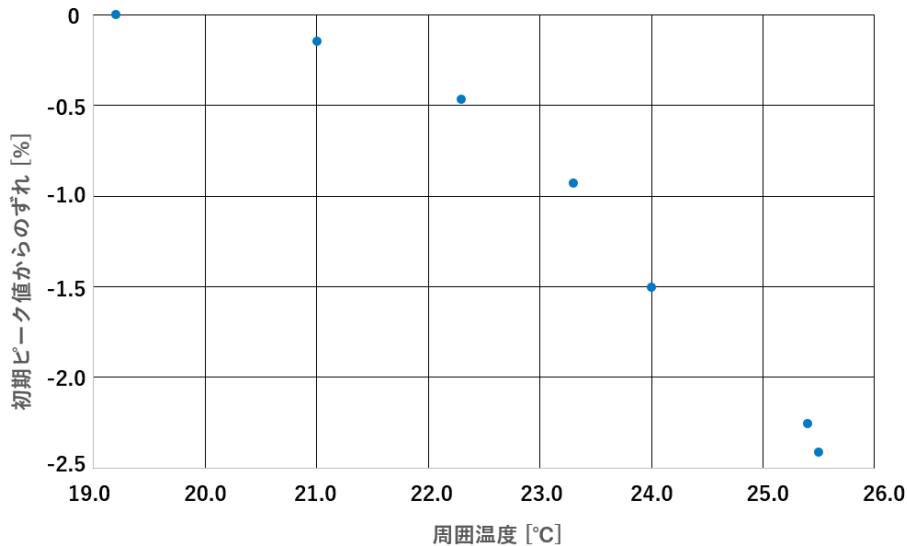


図4：周辺温度によるゲイン変動

5-3 検出効率

検出効率は、検出器自身の感度によるもの、試料中の自己吸収、検出器と試料の形状とこれらの配置の幾何学的な要因が含まれる。土壤サンプルの容器には同じ形状のものを用いたが、土壤の充填量によって高さが異なる。高さが変わると、NaI結晶と試料までの距離が変化して実効的な立体角や自己吸収が変化する。そこで、検出効率の高さ依存を評価した。測定には、環境放射線研修で採取した土壤試料中の 662 keV のガンマ線を使用した。

放射能濃度の算出は以下の計算式で行った。

$$S = \left(\frac{N_{s+b}}{T_{s+b}} - \frac{N_b}{T_b} \right) \cdot \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{1}{M} \cdot \frac{1}{B}$$

S : 放射能濃度 [Bq/kg],

N_{s+b} : 試料とバックグラウンドからの γ 線の計数値 [counts],

N_b : バックグラウンドからの γ 線の計数値 [counts],

T_{s+b} : 試料の測定時間 [s], T_b : バックグラウンドの測定時間 [s],

ε : 検出効率, M : サンプルの質量 [kg], B : ^{137}Cs の分岐比 ($0.9440 \cdot 0.851 = 0.803$)

NaI検出器の検出効率 ε は、Ge検出器で測定した同じ土壤試料の放射能濃度の算出結果と比較することで、以下の式から求めた。なお、このGe検出器の検出効率は既に分かっており、正しい値であるとした。Ge検出器の型番は GEM-20180-P で結晶サイズは $\varphi 53 \times 48$ [mm] である。

$$\varepsilon = \frac{S'}{S_{\text{Ge}}}$$

S' : NaI検出器の測定で得られた放射能濃度 [Bq/kg] $\times \varepsilon$

S_{Ge} : Ge検出器の測定で得られた放射能濃度 [Bq/kg]

図5は得られたNaI検出器の検出効率の高さ依存性を示したものである。図6はGe検出器の検出効率の高さ依存性を示したものである。縦軸が検出効率、横軸が試料の高さ [mm] であ

る。誤差は統計誤差のみを含む。測定する試料の高さが高いほど、検出効率が低くなること
 が分かる。また、NaI検出器の方がGe検出器よりも約2倍検出効率が良いことが分かる。

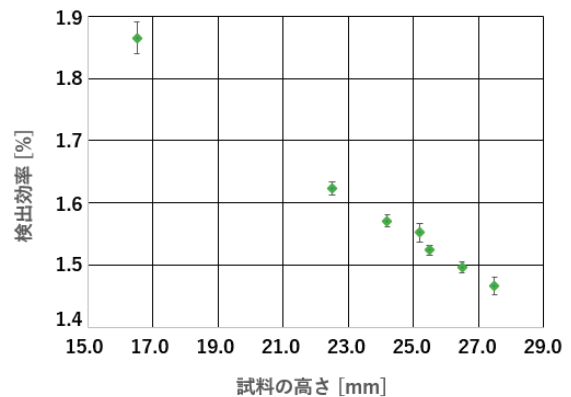
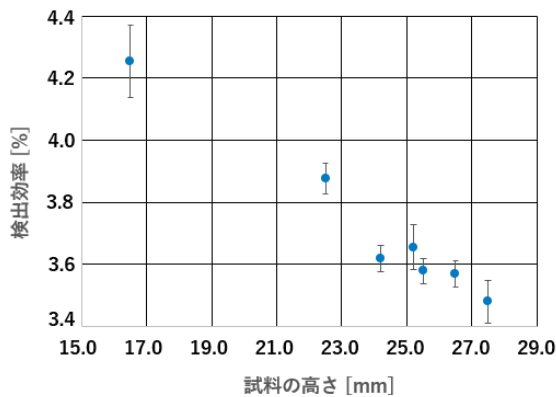


図5：NaI検出器の検出効率の高さ依存

図6：Ge検出器の検出効率の高さ依存

6. バックグラウンドの測定

NaI検出器でバックグラウンドの測定も行った。バックグラウンドには、宇宙線、周辺物質（コンクリートやガラスなど）に含まれる⁴⁰K、ラドン、ウラン系列、トリウム系列の壊変生成物等からのガンマ線がある。さらに、福島第一原子力発電所の事故によって放出された放射性セシウムも含む可能性もある。図7は、2地点のバックグラウンドでのエネルギースペクトルの比較である。縦軸がカウント数を測定時間で除したもの[s⁻¹]、横軸がガンマ線のエネルギー[keV]である。黒点が岐阜大学教育棟3階実験室で、白点が福島県富岡町にあるホテル内会議室での測定結果を示している。帰宅困難区域の指定を解除された富岡町のホテル内のバックグラウンドには、岐阜県のバックグラウンドに見られたピーク以外のピークは観測されなかった。横軸0点付近の2地点のずれは、ゲイン変動によるものである。

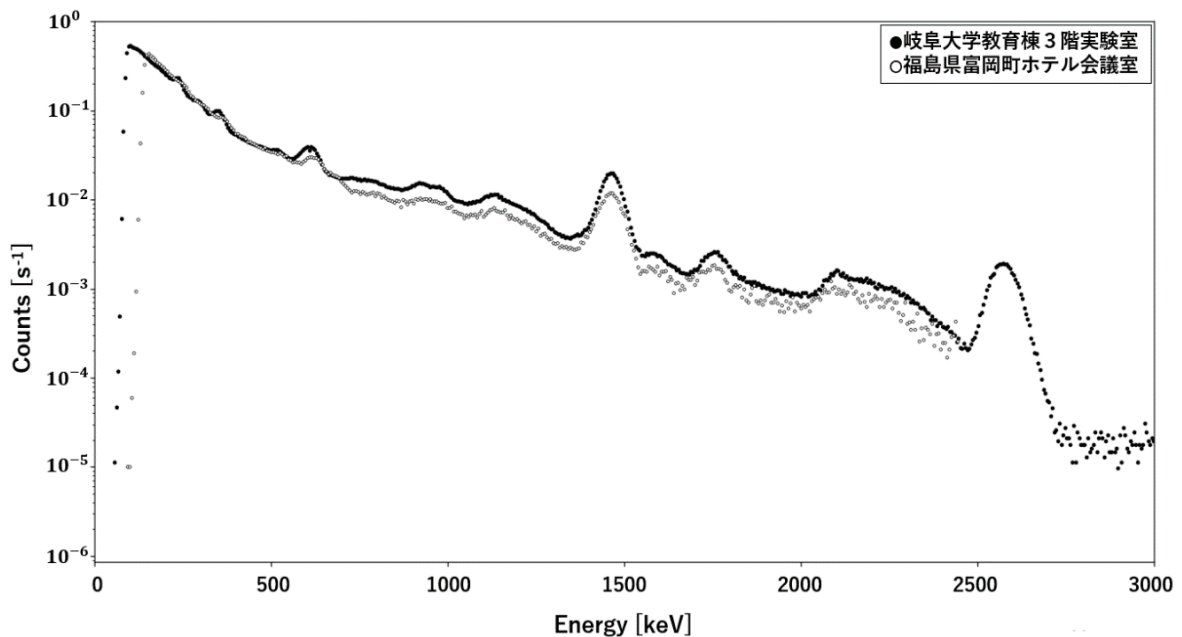


図7：2地点のバックグラウンドの比較

7. まとめ

2022年8月、福島県双葉郡大熊町にて行われた環境放射線研修では、土壌サンプルの採取と測定を行った。本研究では、この放射線研修で、現地の放射能測定に使用したNaI検出器の性能評価を行った。

エネルギー分解能は、ガンマ線のエネルギーに依存し、ガンマ線のエネルギーが大きいほど、エネルギー分解能が小さくなることが分かった。測定する ^{137}Cs からの662 keVのガンマ線に対するエネルギー分解能は約6.7%だった。周辺温度が変化すると、ゲイン変動が起こり、19.0℃から25.5℃の温度変化で、約2.5%ゲインが落ちた。検出効率は、測定する試料の高さが22.5 mmの時は約3.9%であり、試料の高さが高いほど検出効率が低くなることが分かった。また、本研究で使用したNaI検出器の検出効率は、本研究で使用したGe検出器の約2倍良いことが分かった。

8. 謝辞

本研究を進めるにあたり、環境放射線研修会に関わった方々皆様にお礼を申し上げます。この研究は、福島イノベーションコースト構想推進機構・大学等の「復興和」を活用した人材育成基盤構築事業「福島県浜通り地区環境放射線研修会」及び原子力規制人材育成事業「社会との共創による原子力規制人材育成プログラム」の一環として実施しました。

参考文献

[1]大熊町公式ホームページ

<https://www.town.okuma.fukushima.jp/>

[2]2022年度 環境放射線研修ホームページ

<https://rcnp.osaka-u.ac.jp/ja/ev/iitate-seminar/2022/index.html>