

自然放射線と原発事故によるセシウムの γ 線スペクトルの測定

1 はじめに

日本人は放射線に対して過敏に反応しすぎる結果、合理性を欠いた絶対安全である等の神話をつくり不安を回避してきたと思う。正しい知識を持てば、安全性向上に関する様々な技術を取り込み、深刻な事態は回避できたかもしれないと、今更ながら思っている。震災前になるが、我々が常に被爆している自然放射線の存在を知らせることがアレルギー解消には最も効果的な方法であると考え、放射線測定器の利用を試みたが、保有していた放射能測定器は壊れているのかと思うぐらい感度が悪く、自然放射線の存在を示すには、全く役に立たなかった。

皮肉な結果になったが、震災后感度の良い色々な放射線測定器が発売された。同時に自作の話題がネットで活発に行われるようになった。測定器を作るのに必要な特殊部品の入手も徐々に容易になり、自作に取り組む人たちも増えていった。このような背景から、自然放射線の存在を理解させられる感度を持つ装置を目指して自作に挑戦した。

当初の放射線測定器は満足できる性能ではなかったが、失敗を繰り返すうちに、目的とする性能の装置になっていった。完成した測定器は、 γ 線のスペクトルの測定が可能で、自然放射線の測定や、原発事故で環境に放出された放射性物質の現在の状況を測定することが可能になった。市販品の単なるカウンター方式の装置では理解できない、個々の放射性物質の変化を捉えることが可能になったからである。

2 放射線測定器の種類

放射線測定器には、GM管(ガイガーミュラー計数管)をつかったガイガーカウンターやシンチレーターをつかったシンチレーションカウンターなど放射線の個数を数える測定器と、放射線のエネルギー値を測定し放射性物質の種類が特定できるスペクトロメータがある。GM管は原理的にエネルギー値は測定できないため、スペクトロメータには利用されないが、シンチレーターを使った測定器はエネルギー値も測定できるのでスペクトロメータとして利用することもできる。

3 スペクトロメータ

スペクトロメータには、ゲルマニウム検出器を使った高精度に核種を特定できる検出器がある。勿論、そこまでの性能ではないが、シンチレーターを使った自作の装置で γ 線のスペクトルが測定できた事に驚きを感じた。スペクトロメータは、学生時代の感覚では、特殊なアナログデジタルコンバータやミニコン、ゲルマニウム検出器、またはシンチレーターに光電子増倍管を組み合わせた検出器が必要で、個人で所有できるような測定器ではないと思っていた。しかし、震災後、容易に入手可能になったシンチレーターは安値で、光電子増倍管の代わりにフォトダイオードも購入できるようになった。ノートパソコンは十分過ぎる性能があり、計測用のソフトもネットから無料で入手できるようになった。このような状況になったことで自作が容易になった。

放射線測定器は検出した放射線の1秒当たりの回数 cps や、人体への影響を考慮した値である μ Sv/h を表示するが、数だけの大小だけでは核種の同定はできない。原発事故の影響なのか自然放射線なのか判別するには、核種の同定が可能な測定器が必要になる。自作した測定器はパソコンにつなげばスペクトロメータになり、原発由来の放射性物質からの放射線であるかが特定ができる。

4 装置の校正に利用した放射性物質

放射性物質から放射される γ 線のエネルギーが測定できるため、放射性物質の特定が可能である。原発事故では放射性セシウムが大量に放出されたので、セシウムを測定できれば、汚染状況を確認できることになる。自作の装置なので、校正の問題から精度の高い測定は難しいが、バックグラウンドとの比較や時間経過とともに、どのように変化したのか等の相対的な比較は容易にできる。また自然放射線から分離して確認することが可能なので、このことから正しい自然放射線の理解にも役立つと思う。

まず、原発由来の放射線と装置の校正に利用した放射線源について説明する。

(1) 市販されている製品の中には、放射性物質が含まれているものがあり、それらの製品が装置の校正などに利用できる。利用した物は①キャンプで使うランタン用のマントルと②商品名「やさしお」で販売されている減塩塩である。どちらの物も特に注意を呼びかける表示もなく販売されている物で、言うまでもないが人体に影響を与える放射能はない。しかし、装置の感度が向上したことで、商品の放射能が確認でき、校正するための放射線源に利用が可能である。

①ランタン用のマントルとは、キャンプで利用するガスランタンの芯である。炎を安定させるために微量の放射性物質が混ぜられている。現在、販売されている製品は放射性物質の混入のないものになっている。ランタン用マントルにはトリウムが混入されており、スペクトロメータのエネルギー校正に利用した。

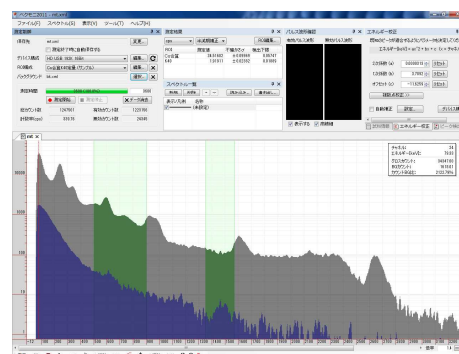
②「やさしお」はスーパーで販売されている減塩塩で、50%の塩化カリウムが塩化ナトリウムの代わりに混合されている。カリウムの大部分は安定な ^{39}K だが、放射性の ^{40}K も約0.0117%だけ含まれている。 ^{40}K は半減期 1.251×10^9 年(12.51億年)で壊変し、89.1%は1.311MeVの β 線、10.7%は1.461MeVの γ 線を放出する。やさしお1kgには276gのカリウムが含まれ、この0.0117%が ^{40}K となる。1kg中に0.032292gの ^{40}K が含まれ、半減期から計算すると毎秒約8500回の壊変が起こる。つまり約8500Bq/kgとなる。ただし自作した放射線測定器は γ 線のみに対応するので、850Bq/kgとなる。なお「やさしお」1袋180gでは、153Bqとなる。

(2) ^{137}Cs と ^{134}Cs は原発から放出された放射性物質である。 ^{137}Cs はウランの核分裂で生まれる。 ^{134}Cs はウランの核分裂生成物ではなく、ウランが核分裂で生まれた ^{133}Xe がベータ崩壊して安定な ^{133}Cs になり、この ^{133}Cs が原子炉のなかで中性子を捕獲して ^{134}Cs に変化したものである。 ^{134}Cs の量は、原子炉の運転期間などにより変化する。福島原発の事故で放出されたセシウムの場合の ^{134}Cs と ^{137}Cs の放射能強度比、 $r = (^{134}\text{Cs} \text{のベクレル量}) \div (^{137}\text{Cs} \text{のベクレル量})$ は、ほぼ1と言われている。 ^{134}Cs の半減期は2年であるのに対して、 ^{137}Cs は30年であるから、 r は時間の経過とともに変わり、 ^{134}Cs が先になくなることになる。2年後には、 r は約0.5に、4年後には0.25になる。この変化を自作の装置で確認することができた。また逆にこの変化を校正に利用した。

5 自作スペクトロメータの校正

放射線のエネルギーを測定するために、体積 5cm^3 のシンチレータにPINフォトダイオードを密着させてセンサーと、信号を積分するチャージアンプ+波形整形回路を自作した。シンチレータとPINフォトダイオードの特性を把握して、アンプのローノイズ化に時間がかかったが、市販品に負けない高性能な測定器が完成した。製作に関する内容はWebサイトで詳しく紹介した。

スペクトルの測定にはフリーソフトである「ベクモニ

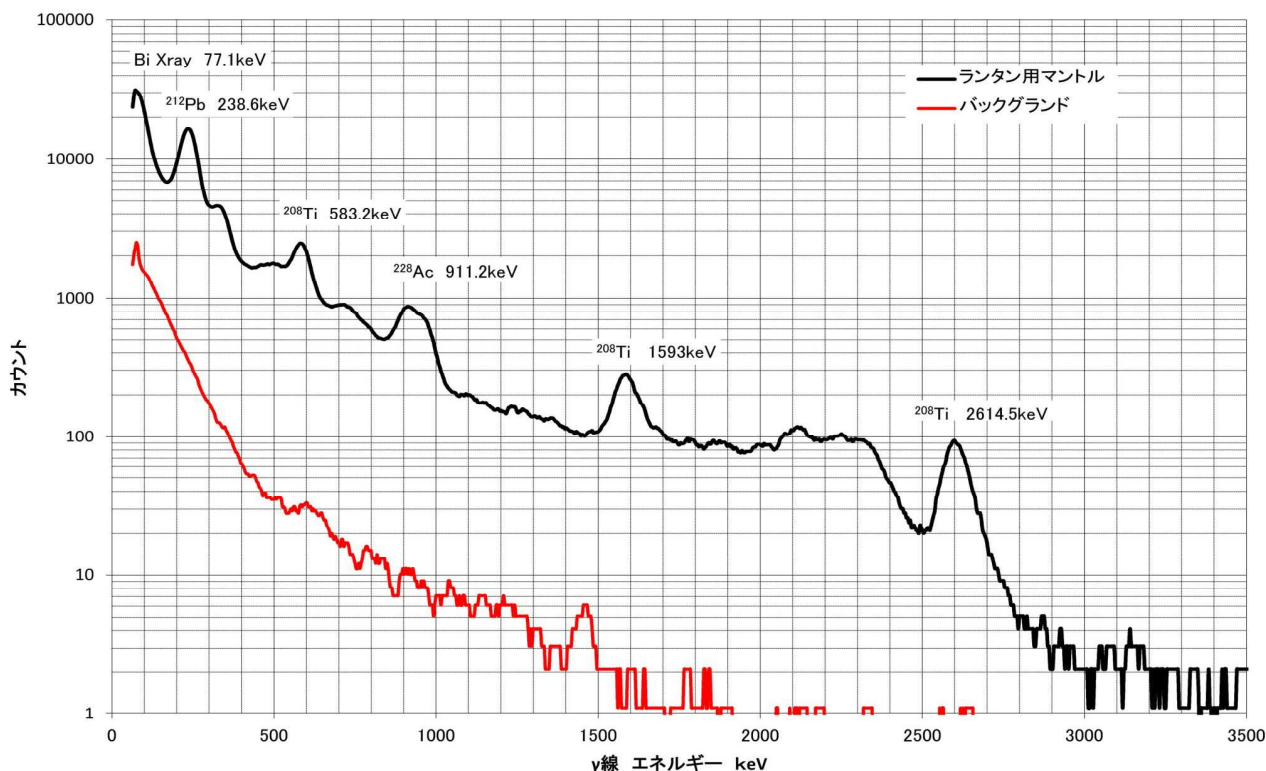


ベクモニ 2011 の画面

2011Ver1.0」を利用した。このソフトはパソコンの音声入力端子に入力された信号の波高を分析するソフトである。また信号のモニターに WaveSpectra を利用した。このソフトもフリーソフトで、増幅器の歪み率の測定などにも利用している便利なソフトである。これらのソフトは検索すれば容易にヒットする。また利用方法なども入手出来る。

(1) ランタン用マントルから出る γ 線を使つてのエネルギー校正

スペクトロメータのエネルギー校正のために、エネルギーがわかっている線源を測定して校正する。ランタン用マントルは色々な γ 線を放射するため校正に役立つ。分解能があまり良くないシンチレータ方式の装置でも判別できる γ 線のピークが複数存在する。その3点をベクモニでは利用している。装置のエネルギー分解能は温度によって大きく変化する。温度が高いとPINフォトダイオードのノイズが増加して分解能が悪化する。おおよそ気温が20℃以下にならないと、分解能が悪化してピークの形が鈍ってしまう。マントルの場合、77keVのX線のピークがノイズに埋もれて測定できなくなる。この様な理由で夏場の測定は分解能が悪く、セシウムの接近したピークを分離できなくなる。次の測定結果がマントルのスペクトルである。77keVのX線のピークが観測できている。気温は14℃であった。



(2) 「やさしお」からの ^{40}K の測定。

エネルギーの校正のほかに、何 Bq/kg であるか表示できるようにするためには、検出効率の校正を行うことが必要である。このために、放射線量のわかっている線源が必要になり、減塩塩「やさしお」を利用した。

γ 線がシンチレーターでエネルギーを失うことで発生した光をフォトダイオードで読み取る。 γ 線はシンチレータで、光電効果、コンプトン散乱、電子対生成の相互作用でエネルギーを電子に与え、この電子が束縛電子を励起させシンチレータは蛍光を発生する。

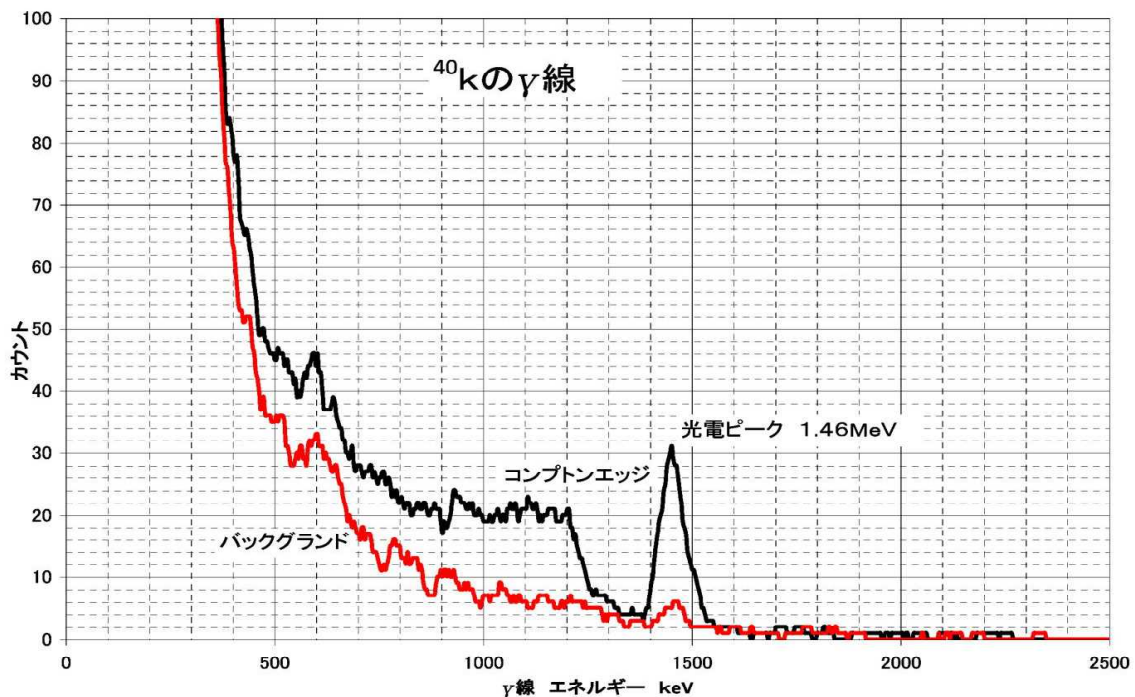
光電効果は全エネルギーを電子に与えるので、 γ 線が光電効果によりエネルギーを失った場合、

γ 線のエネルギーに対応したところにピークを示す事になる。光電効果は γ 線のエネルギーが低い場合の主な相互作用である。原発事故により環境に放出された0.66MeVの ^{137}Cs の γ 線に対しては、1.46MeVの ^{40}K より3倍ほど検出効率が向上する。この値は色々な資料を参考にして決定した。線量のわかっているCsがあれば校正は可能であるが、容易には入手出来ないため、理論値を基に大まかに見積もる方法をとった。従ってBq/kgの値は、誤差が含まれ、あくまでも参考値と考えている。

食品の放射線量を測定する場合、細かく砕いてマリネリ容器に入れて測定するが、百円ショップで購入した円筒形のプラスチック容器を流用した。測定ごとの検出器と試料の位置関係を同じにしないと誤差が入ることになる。従って専門機関のような正確な測定は難しいが、ある程度の目安は得られると考えている。



^{40}K の測定



室温18℃でやさしお180gを1時間測定した結果である。1.46MeVの山が光電ピークである。コンプトン散乱において γ 線が180°反射したときに電子に与えるエネルギーが最大になり、そのエネルギーが1.24MeVとなりコンプトンエッジが形成される。コンプトン散乱ではその値以下の連続的なエネルギーを電子に与えることになり、連続的なスペクトルが形成される。

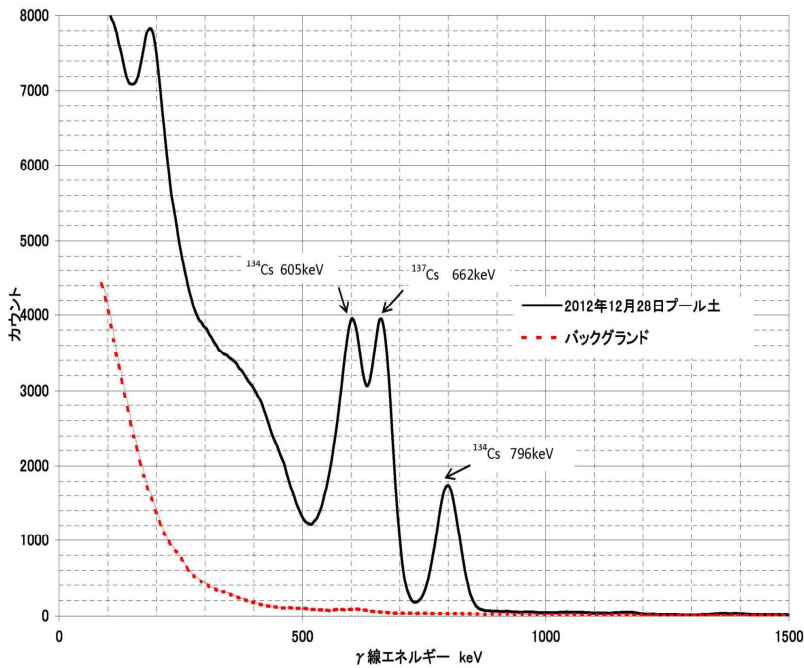
^{40}K の γ 線の放射線量をバックグラウンドと比較すると、カウンター方式の測定器では試料を近づけた事による計数値の増加は、それほど多くないことが読み取れる。

3600sの計測で、80keV以上のバックグラウンドの計数値は51730カウントで、14.4cpsにあたる。やさしおを測定すると56730カウントになり15.8cpsに変化する。1秒間に1.4回増加する。10%の変化である。放射線が入射したときの発信音の変化や、短時間の計数値の変化では、カリウムからの γ 線の存在を認識するのは難しい。その点スペクトルを見れば一目瞭然で、ピークが徐々に出現することで放射線の存在を把握できる。

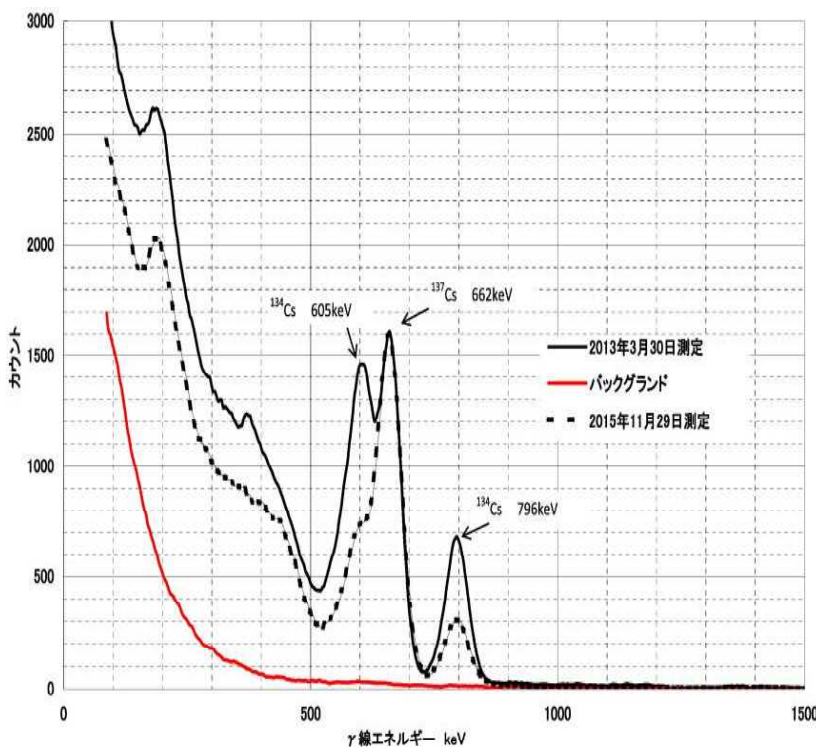
6 原発事故により生じた放射性セシウムについて

(1) プールサイドの排水口にたまった汚染土の測定

原発事故で拡散した放射性物質であるセシウムを測定した。該当する3つの領域のピークが観測できれば、原発由来の放射性物質であるセシウムであることが特定できる。そのエネルギーは605keV、796keV、662keVの3つで、セシウム三兄弟と言われている。プールサイドの側溝にたまった泥を震災1年後の2012年3月に採取して測定したスペクトルが次の図である。



2013年12月28日に測定したこのスペクトルにセシウム3兄弟がハッキリ見えている。下に描かれている線がバックグラウンドのスペクトルで、放射線源のない室内で測定している。通常これだけのγ線が室内を飛び交っている。私たちは常に被爆している事をあらためて認識した。このスペクトルは体積3 cm³のシンチレーターを使った測定器で測った。測定した資料は、プールの排水溝の排水口付近にたまっていた土で、放射性物質が濃縮されていたと考えられる。この汚染土は現在も密閉容器に収めて放射能の変化を測定するために保管している。



この汚染土を2013年3月30日と2015年11月29日に測定し、セシウムの放射能の変化を比較した。なお、測定条件を同じにすることが不可能であったので、¹³⁷Csのγ線によるピークが同じ高さになるように補正して、¹³⁴Csのγ線がどう変化したかを確認した。

福島第一原子力発電所から放出された¹³⁷Csと¹³⁴Csの比率は2011年3月の時点で1対1であったと言われている。この比率は¹³⁷Csの半減期30年、¹³⁴Csの半減期2年により変化するので、時とともに変化していくことになる。

密閉容器に保管している汚染土を定期的に測定してきた。そのスペクトル

から¹³⁴Cs と¹³⁷Cs のBq/kg をベクモニを使って読み取った。両者の比率は、2011年3月15日において1対1であるとされているので、測定した時点で理論的に計算することが可能である。この数値と実測したスペクトルを用い、ベクモニの設定が正しいことを確認した。(比率の変化を概ね正しく再現できるようにROI設定を調整した。)

測定日	時間年	セシウム137	セシウム134	理論比率	実測値	測定器
2011年 3月15日	0	1.00	1.00	1.00	1.00	
2012年10月10日	1.58	0.96	0.58	0.60	0.53	3cm ³ センサ
2012年12月28日	1.79	0.96	0.54	0.56	0.51	3cm ³ センサ
2013年 3月30日	2.04	0.95	0.49	0.52	0.50	5cm ³ センサ
2013年10月28日	2.62	0.94	0.40	0.43	0.44	5cm ³ センサ
2015年11月29日	4.71	0.90	0.20	0.22	0.30	5cm ³ センサ

なお、汚染土の重さは80gで、1kgに換算すると、2015年11月29日時点で

$$^{137}\text{Cs} = 46,866 \text{ Bq/kg} \quad ^{134}\text{Cs} = 14,435 \text{ Bq/kg} \quad \text{となる。}$$

(2) 市貝、原木栽培椎茸の測定

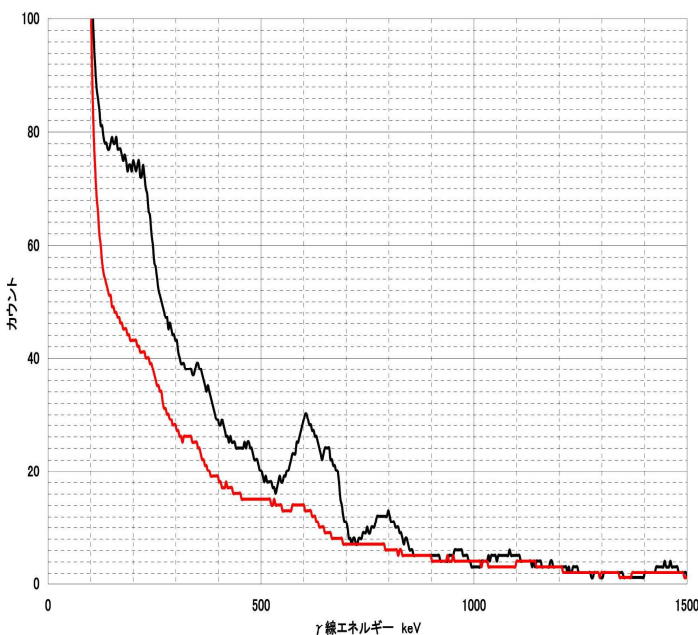
椎茸約10本、重さにして118gの原木栽培椎茸の放射線量(Bq/kg)を測定した。椎茸の出荷が規制されていた時の椎茸で、自家栽培の椎茸をいただいたとき、念のために椎茸の間に測定器を差し込んでスペクトルを測定したところ、セシウムのエネルギー領域にわずかにピークがあるのが認められた。そこで椎茸をフードプロセッサーで粉砕して容器に詰め込み、その中に測定器を差し込み密着させ測定した。

さらに鉛の板で試料を囲みバックグラウンドを減らし測定精度を向上させる工夫をした。2013年4月27日測定 ベクモニによる1時間の測定結果は



フードプロセッサーで粉砕した椎茸

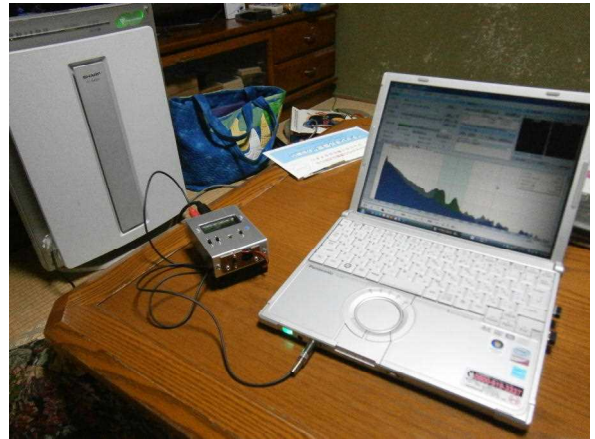
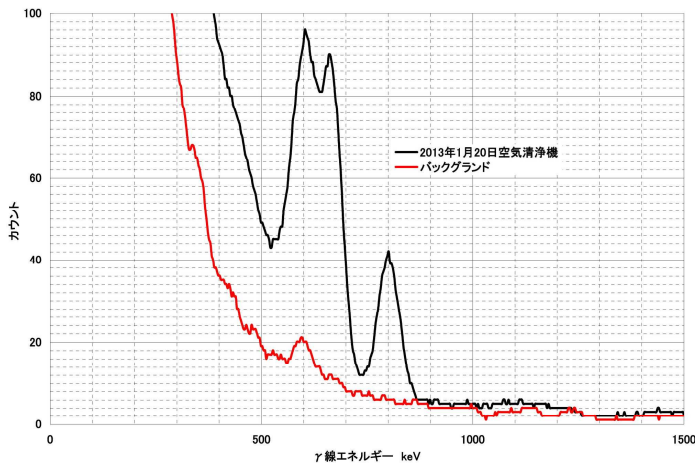
¹³⁷Cs = 354 ± 32 Bq/kg 検出下限 82 Bq/kg
¹³⁴Cs = 203 ± 37 Bq/kg 検出下限 52 Bq/kg
 と得られた。



放射性セシウムの基準値	
食品群	規制値 (Bq/kg)
一般食品	100
乳児用食品	50
牛乳	50
飲料水	10

放射性セシウムの基準値を超えていることが確認できた。

(3) 空気清浄機のフィルターの測定

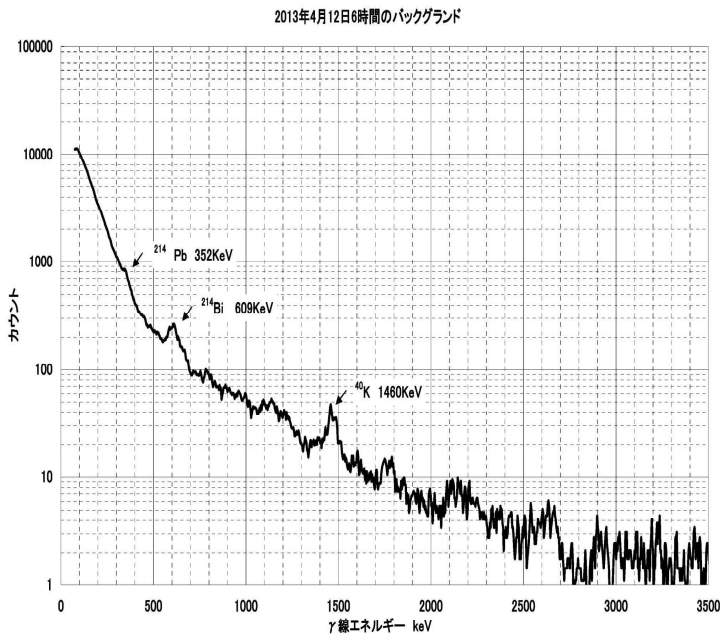


自宅居間の空気清浄機の測定

2011年3月以前から我が家の居間で使い続けてきた空気清浄機の汚染の状態を測定した。空気清浄機は大気中の塵を集積するので、放射線量が高くなっていることが知られていた。そこで写真のようにセンサー部を空気清浄機の隙間にさし込みフィルター表面から出ている放射線のスペクトルを測定した。測定日は2013年1月29日。

原発事故の時に窓を出来るだけ閉めきりにして、換気扇を回さず外の空気が室内に入らないように呼びかけがあったが、まさかこれほどセシウムで汚染されているとは思わなかった。真岡市でもこれだけの放射性物質が大気中に漂っていたことになる。椎茸、空気清浄機の測定はともに1時間の測定である。セシウムのカウント数の違いに注目してもらいたい。

(4) 室内の自然放射線の測定



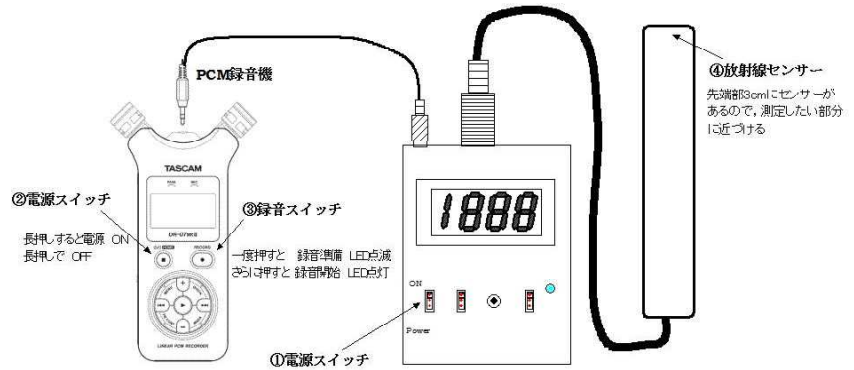
2013年4月12日、自宅の部屋で6時間にわたり自然放射線を測定した。セシウムのピークは見えないが、 ^{40}K の 1.46MeV、 ^{214}Bi の 0.609MeV、そして ^{214}Pb の 0.352MeV と 3つのピークが観測できる。

^{214}Pb と ^{214}Bi の γ 線は、大気中の ^{222}Rn (ラドン) が崩壊して生まれる短寿命放射性物質からの γ 線である。自然放射線による公衆被ばくにおいて、年間 1.15mSv のラドンの吸入があるとされ、吸入したラドンが体内で放出する α 線の被爆が問題視されている。特に欧米の建物は機密性が高い石造りの建物が多いため一般家庭でのラドン被爆の影響が議論されている。

自然放射線の存在を生徒に認識させるために、高感度の放射線測定器を自作した。自作した装置をシンチレーションカウンターとして利用すると、1秒間に15回の放射線をカウントする感度(15cps)がある。おおよそ、真岡では $0.05 \mu\text{Sv/h}$ の空間放射線率であるので、 $18,000\text{cpm}/\mu\text{Sv/h}$ の感度となる。しかし、放射線の数を数えるタイプであるガイガーカウンターやシンチレーションカウンターでは、ラドンの存在を認識できない。

7 シンチレーションカウンターとしての利用

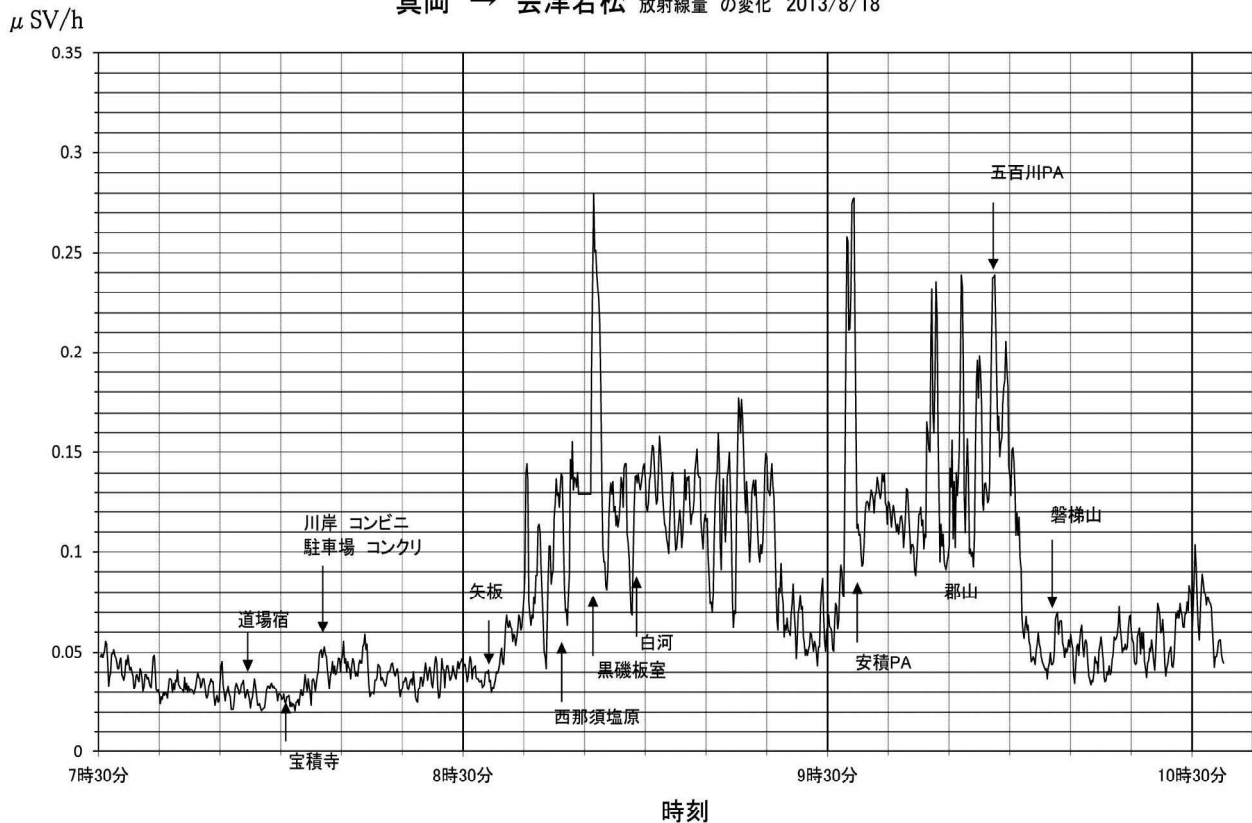
3cm³の大きさのシンチレーターを使った測定器は、スペクトロメータ用のエネルギーに比例したパルス信号を出力する端子と、一定以上の大きさのパルスを計数して表示するカウンターの機能を併せ持たせた。ホットスポットの測定などに利用した。



表示部には μ Sv/h の目盛りを振ったが、エネルギー補償機能などはないため、あくまで参考値を表示するだけである。

この装置の出力信号をリニア PCM レコーダーに記録してから、後日分析することも可能である。

真岡 → 会津若松 放射線量 の変化 2013/8/18



このやり方で、真岡から会津若松までの放射線量を測定した。「はかるくんを活用するために副読本・1」に示されている、「新幹線で測定した自然放射線量の変化」の測定のまねをした。

同じやり方で、宇都宮から仙台まで新幹線の中で測定した。電池切れで測定は中途半端なところで終わってしまった。測定できた範囲で「はかるくん」の新幹線の中の放射線量と比べたところ、トンネルの中で放射線量が減少する測定結果が得られた。理由は言うまでも無いと思う。

測定はレコーダーの出力を、シドニー大学の Marek Dolleiser 氏が公開している波形分析ソフト PRA.EXE を利用して測定した。このフリーソフトはベクモニのエンジン部分に使われているソフトである。

8 シンチレーションカウンター、スペクトロメータの自作

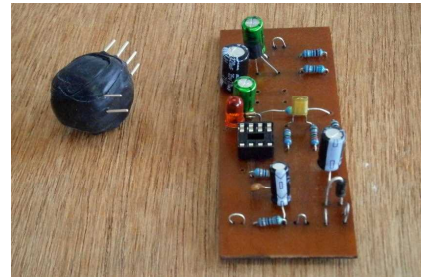
(1)原理

シンチレーション方式の測定器は、出力を波高分析すればスペクトロメータに、一定波高以上の信号をカウントすればシンチレーションカウンターになる。

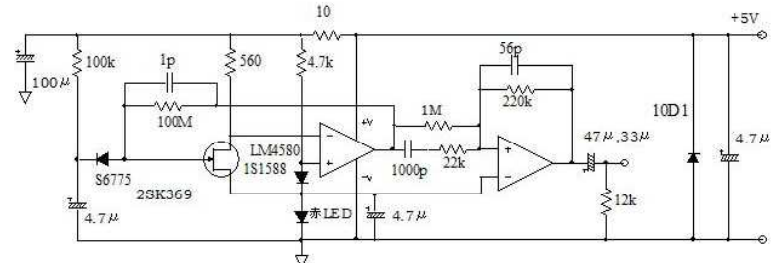
シンチレーション方式の測定器は、シンチレータに PIN フォトダイオードを密着させ、 γ 線と相互作用して蛍光した光を PIN フォトダイオードで検出し電荷に変換する。電気量は γ 線のエネルギーに比例するため、電荷を積分し電圧に変換して取り出す。電荷を電圧に変換する増幅器がチャージアンプで、回路的には積分器になっている。チャージアンプの入力回路に流れる電流は測定誤差になるため、高入力抵抗の低雑音増幅器が必要になる。具体的には FET + OP アンプ（演算増幅器）で構成することになる。積分器は反転入力端子と出力端子間に積分用のコンデンサーを接続するが、電荷が微弱なために数 pF の容量になる。また、電圧が飽和しないように放電用の抵抗を並列に接続する。この抵抗値は、コンデンサーが pF 程度なので 100M Ω 以上の高抵抗になる。

(2)製作

CsI(Tl) 固体シンチレータ、PIN フォトダイオードを使いセンサー部を組み立てる。シンチレータは若干潮解性があるため、直接手では触らず、必ずゴム手袋をして扱う。フォトダイオードに透明シリコングリスを塗って、シンチレータに貼り合わせる。次にシンチレータの光をフォトダイオードに導くために、水道工事で使うテフロンテープを巻き付ける。最後にフォトダイオードがはがれないように全体にブチレンテープを巻き付け固定する。

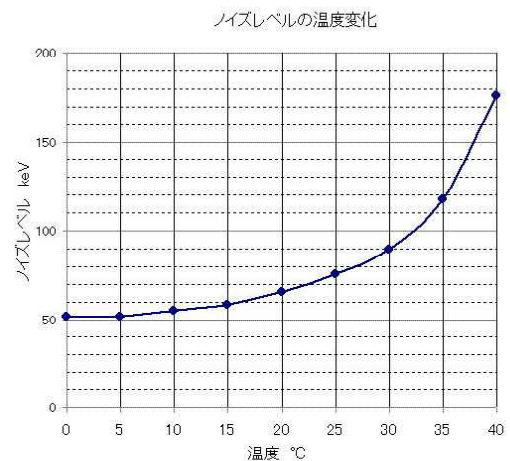


何種類かの電子回路を製作したが、比較的作りやすい回路を示した。この回路は生徒に製作させた回路で、十分な性能があった。安価（300 円）な PIN フォトダイオード S6775 を 3 個、ICC のシンチレータの 3 面に貼り付けセンサーとし、大型で高価（1 万円）な PIN フォトダイオード S3590-08 の代わりとした。



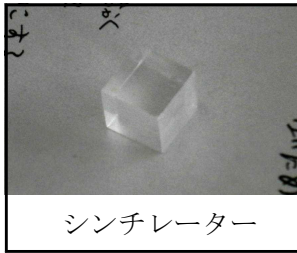
(3)ノイズの温度変化

シンチレータと PIN フォトダイオードのセンサーは、温度によりノイズレベルが変化するため、温度が高い場合分解能が低下して、セシウムの 605keV、662keV の分離ができなくなる。30 $^{\circ}\text{C}$ を超えると急激に分解能が悪化するので、夏場屋外でのスペクトルの測定は良い結果が得られなかった。そこでフォトダイオードをペルチェ素子で冷却するセンサーを作ったが、急激な温度変化を与えたことでシンチレータにひびを入れてしまう失敗をした。（グラフは S3590-08 の温度特性、ノイズレベルを放射線のエネルギー (keV) 換算で表し、温度によりどう変化するかを実際に測定したグラフである。夏場気温が 30 $^{\circ}\text{C}$ を超えると極端にノイズが増える。）



9 センサーの作り方 (参考)

(1) CsI(Tl) シンチレータに PIN フォトダイオードを取り付ける



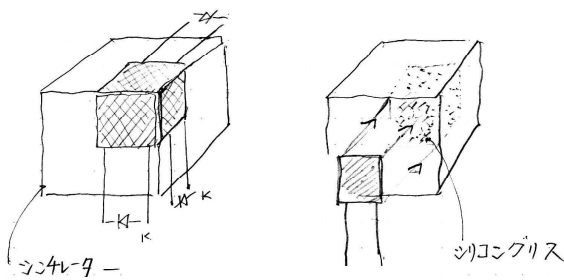
シンチレータ



PIN フォトダイオード



シンチレータは潮解性がある

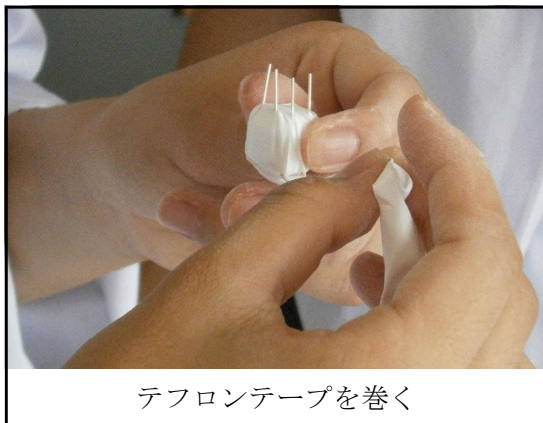


シンチレータ

シリコングリス

ゴム手袋をして行う。PIN フォトダイオードに光学用シリコングリスを塗り、図のようにシンチレータを鏡面仕上げされている面に貼り付ける。

(2) テフロンテープを巻く



テフロンテープを巻く

水道工事で利用するテフロンテープをシンチレータ、ダイオードの上から巻き付ける。白いテフロンが反射材となって光が外に漏れなくなる。試しにアルミ箔のような、より光を反射する素材に変えてみたが、結果はテフロンにかなわなかった。

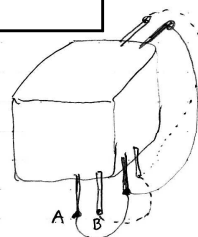
(3) ブチルテープで固定する



ブチルテープを巻く

最後に自己融着テープを巻き固定する。黒いテープで外部から光が侵入するのを防ぐ働きもある。最後に3つのダイオードを並列に接続する。

1CC 体積のシンチレータはマルツパーツで購入した。6面すべてが鏡面仕上げされている。



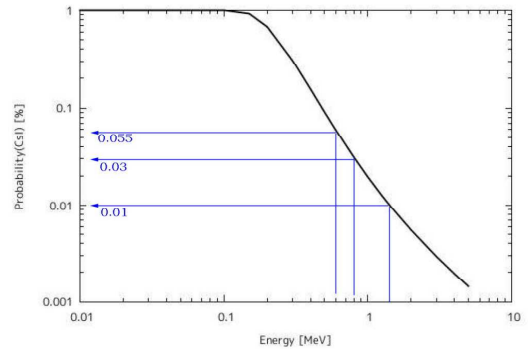
電極を並列に結線する

10 ベクモニの ROI 構成について

ROIとは Region Of Interest で、放射線量をカウントするエネルギー領域のことである。ベクモニの機能を生かすために ROI 等の設定が必要になる。Bq/kg で放射線量を表示するために、ROI 構成というタブで、ROI、計測したカウント値(cps)から Bq/kg に変換するための変換係数を設定する。

(1)最初に ^{40}K の1.46MeVのピーク面積から求まる cps から Bq/kg への変換係数を設定する。180gの「やさしお」で1350keV～1570keVのピーク領域の cps 値を測定し、850Bq/kgになるように換算係数を求めた。体積 5cm^3 のセンサーで1080であった。なお、未知の試料を測定する場合、試料を入れた容器とセンサーの位置関係を同じにする必要がある。

(2)720keV～862keVのROIは ^{134}Cs の796keVのピークがある領域である。 ^{40}K の γ 線があると、コンプトン散乱による計数値が重なる。そこで ^{40}K のピーク領域の cps 値に係数を乗じて差し引く。この係数は0.55とした。この領域の cps が ^{40}K のピークに対してどれだけの割合になるかを実測して求めた。また、720keV～862keVの感度は、 ^{40}K より γ 線のエネルギーが低いのでシンチレーターの感度は高くなる。その結果係数は小さくなる。CsI(Tl)の光電吸収確率を基に決定し感度は3倍と見積もり、換算係数は360と決定した。(文献1)



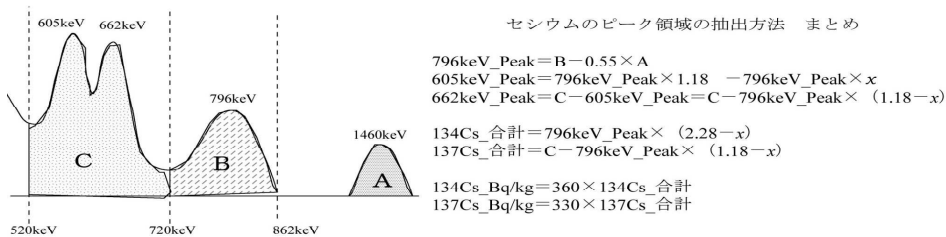
^{134}Cs の605keVの γ 線は ^{137}Cs の662keVと分離することができないので、 ^{134}Cs の798keVの γ 線を1.18倍(111.4÷94.2)し、その値から798keVの cps の x 倍を引き算した。

(3) ^{137}Cs のピークは、 ^{134}Cs のピークと完全に分離することができないため、520keV～720keVの領域の cps を求め、(2)で求めた605keVのピークを引き算して求めた。

^{134}Cs (半減期 2.0648 年) からの主な光子

エネルギー MeV	0.563	0.569	0.605	0.796	0.802	1.365
頻度	8.4%	5.4%	97.6%	85.5%	8.7%	3.0%
	111.4%			94.2%		

このようにして求めた cps に係数をかけて Bq/kg に変換する。この係数は330とした。最後に、 ^{134}Cs : ^{137}Cs の比が理論値に近づくように、 $x = 0.4$ と決定した。



購入先

- ・PIN フォトダイオード S3590-08 は直接浜松ホトニクスより購入できる。ただし個人では購入できないので学校をとおして購入する。(部品屋さんより購入すると約1万円もする。)
- ・シンチレータは (株)リーディングエッジアルゴリズムより、色々な大きさの物が購入できる。

文献

1. 中川崇之 「シンチレータと光半導体素子 MPPC を用いた携帯型放射線スペクトロメータの実用化」
広島大学大学院理学研究科 高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室