

Demonstration of principle of low natural environment radiation background counting detector by new method

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2023-03-31 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 高久, 圭二, TAKAHISA, Keiji メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.20608/00001202

原著

新方式による低自然環境放射線バックグラウンド計数 検出器の原理の実証

高久 圭二¹⁾

Demonstration of principle of low natural environment radiation background counting detector by new method

Keiji TAKAHISA¹⁾

要旨

食品に含まれる自然放射線量を定量化することは、放射線に対する偏見をなくすためにも教育的に有効な方法である。しかしながら、その放射線量は微量なため、測定するには液体窒素で冷却するエネルギー分解能の優れた高価なゲルマニウム半導体検出器が必要であり、さらに鉛などを使用した大掛かりな自然環境放射線シールドが必要である。低価格なシンチレーション検出器で、微量な放射線量を定量化する方法を検討した結果、放射線源の方向を特定できるチェレンコフ光を利用することにより、放射線検出器の測定物以外からの自然環境放射線バックグラウンドの測定値を6分の1にできる原理を小型のシンチレーション結晶で実証した。今後は、測定物以外からの自然環境放射線バックグラウンドを防ぐ大掛かりなシールドを用いず、大型のシンチレーション検出器で、どの程度まで食品に含まれる自然放射線を定量化できるかを明らかにしていく。

キーワード：シンチレーション検出器、チェレンコフ光、自然環境放射線

Abstract

By investigating a method of quantifying a very small amount of radiation with a low-cost scintillation detector, we found that the conventional natural environmental radiation counting background of the radiation detector can be reduced using Cherenkov light, which can identify the direction of the radiation source. A small scintillation crystal was used to demonstrate the principle of 1/6 reduction.

Key words: Scintillation detector, Cherenkov light, Natural environmental radiation

1) 保健科学部診療放射線学科

はじめに

本研究では、放射線源の方向を特定できるチェレンコフ光を利用することにより、測定物以外からの放射線検出器への自然環境放射線バックグラウンドの測定値を6分の1にすることが可能である原理を実証した。

この原理を応用すれば、容易に測定物以外からの放射線検出器への自然環境放射線バックグラウンドの測定値を減らすことが出来る。したがって、測定物以外からの放射線検出器への自然環境放射線バックグラウンドを減らすための大掛かりなシールドの必要が無くなる画期的手法を実現することが可能となる。

食品に含まれる自然放射線量を定量化することは、放射線に対する偏見をなくすためにも教育的に有効な方法である。しかしながら、食品に含まれている自然放射線量は微量なため、測定したい γ 線のエネルギースペクトルのSN比（Noiseに対するSignalの比）を高くしなければならない。SN比を上げるためには γ 線のエネルギースペクトルのエネルギー分解能を上げることと、測定物以外の放射線バックグラウンドをできるだけ少なくする必要がある。エネルギー分解能を上げる方法としては、一般的には液体窒素で冷却する一台が500万円ほどのエネルギー分解能の優れたゲルマニウム半導体検出器を使用する。また、測定物以外の自然環境放射線バックグラウンドをできるだけ少なくするために、10cm厚程度の鉛や5cm厚程度の無酸素銅などを使用した大掛かりな放射線シールドが必要である。したがって全体的に高価な装置となり、液体窒素の補給などインフラや維持費も必要となる¹⁻³⁾。

神戸常盤大学で微量な放射線量の測定を行う場合、液体窒素のリザーバー等のインフラがないため、ゲルマニウム半導体検出器の使用が適さない。他の方法としては、エネルギー分解能がゲルマニウム半導体検出器よりも低い、シンチレーション検

出器で、微量放射線量を定量化する方法がある。測定物以外の自然環境放射線バックグラウンドの測定値をできるだけ少なくする検討を行い、放射線源の方向を特定できるチェレンコフ光を利用することにより、測定物以外の自然環境放射線バックグラウンドの測定値を6分の1にできる方法を考案した。

一般的によく使用されている直径3インチのNaI(Tl)シンチレーターと光電子増倍管を組み合わせたシンチレーション検出器で自然環境放射線バックグラウンドを測定し、マルチチャンネルアナライザーでエネルギースペクトル測定した場合、⁴⁰Kのガンマ線は2.4Bq、⁴⁰Kのガンマ線のエネルギー領域でのバックグラウンドは1.3Bq程度であった。したがって食品中の⁴⁰Kの濃度を測るには、測定物以外からの⁴⁰Kの測定値との差を測定するしか方法はない。また¹³⁷Csのガンマ線のエネルギー領域では5Bqの自然環境放射線バックグラウンドが存在する。原発事故により汚染された土壤による福島県産の食品は¹³⁷Csに関しては、100Bq/kgが国の基準値となっている。この基準値以上かどうかを判断するためには、立体角や検出効率を考慮すると、測定時間をかけて、測定物以外の自然環境放射線バックグラウンドとの差を見ることになる。したがって、効率良く短時間で測定するためには、測定物以外の自然環境放射線バックグラウンドの測定値をできるだけ少なくする必要がある。そのため本研究では、測定物以外の自然環境放射線バックグラウンドの測定値を減らすことが可能な方法として、測定物以外の自然環境放射線バックグラウンドの測定値を1/6にすることが可能である原理を実証した。

原理

入射光子は図1のように、シンチレーター内で電子とのコンプトン散乱を起こし、コンプトン電子は90°よりも前方にはじかれ、シンチレーター中

方法

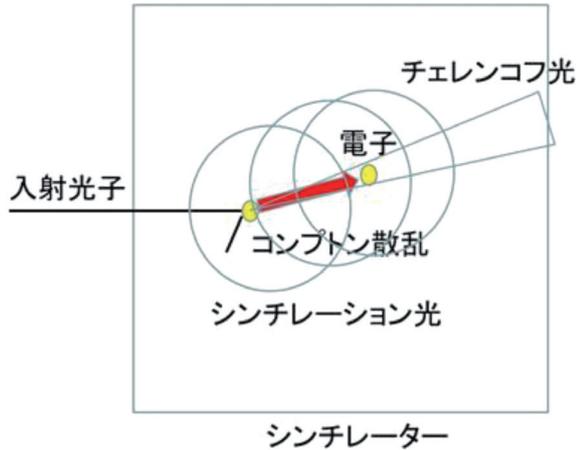


図1 シンチレーター内での入射光子とコンプトン散乱電子、チェレンコフ光の関係

での光の速度よりも、コンプトン電子の速度が速い場合は、電子の進む方向にコーン状にチェレンコフ光を発する。チェレンコフ光は電子が移動する瞬間に発するのに対して、シンチレーション光は電子がシンチレーターの原子を励起させ、基底状態に遷移する時に等方的に発するので、時間の遅れが生じる。

コンプトン電子は90°よりも前方にはじかれるので、入射光子の入射面ではチェレンコフ光は観測できない。対面の光検出器で測定したチェレンコフ光より遅れて入射光子の入射面ではシンチレーション光が観測されるので、信号に時間差が生じた場合は、遅れて出た信号側から入射したことになる。

したがって、例えば立方体の各面に光検出器を設置すれば、6面のどの面から入射したのかが明らかになるので、様々な方向から来る自然環境放射線バックグラウンドを測定物からの方向に定めることが可能になることから、自然環境放射線バックグラウンドの測定値を6分の1にすることが可能となる。また、入射面で光検出を行えば、チェレンコフ光が重ならない信号となるので、光電ピークの生成する検出効率やエネルギー分解能が、今までより良くなる可能性が高い。

光電子増倍管は光電面に使用されている物質からの⁴⁰Kの自然放射線が多いので、最近光電子増倍管に替わって使われ始めているMPPC (Multi-Pixel Photon Counter) を光検出器として採用した。MPPCは、SiPM (Silicon Photomultiplier) と呼ばれるデバイスの1種で、ガイガーモードAPD (Avalanche Photodiode) をマルチピクセル化した新しいタイプのフォトンカウンティング (光子計測) デバイスである。放射線によるシンチレーション結晶からのシンチレーション光の光量を光検出器で受光する数を増やすことによって、フォトン数が増加し、エネルギー分解能を高くすることが可能なので、LYSO (Ce) シンチレータ 10mm×10mm×10mmの多面にMPPCを設置した⁴⁾。LYSO(Ce) ([Cerium doped] Lutetium Yttrium Orthosilicate) シンチレータの密度は7.4g/cm³、屈折率は1.82である。チェレンコフ光の発生条件は屈折率をnとすると $n\beta \geq 1$ となるので、 $\beta \geq 0.55$ となる。ここで β は粒子の速度を光速で除したものである。この関係からチェレンコフ光の発するコンプトン電子の最低エネルギーは

$$511\text{keV}(\text{電子の質量}) \times \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1\right) = 101\text{keV}$$

となる。

従来使用されていた光電子増倍管では、シンチレーション検出器に対する放射線の入射方向に設

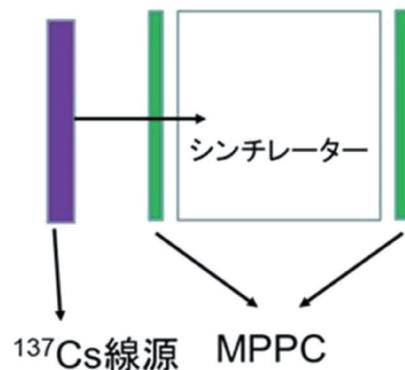


図2 ¹³⁷Cs線源とシンチレーター、MPPCの関係

置するのは、光電面からの光電子を増幅させる構造上の問題から、少なくとも 10cm 程度の金属等が必要であるので不可能であった。MPPC では、光検出器の厚さが 1mm ほどなので、光検出器における光子の減衰が小さいため、初めてシンチレーション検出器に対する放射線の入射方向に設置する研究が可能になった。

図 2 のように 10mm×10mm×10mm の立方体の LYSO(Ce)シンチレーターの両側に光検出用の MPPC を設置した。¹³⁷Cs 線源からの γ 線(662keV)を、図のシンチレーション結晶の側面、左側と右側から照射し、各 MPPC からの信号をオシロスコープで観測した。

コンプトン電子の最大エネルギーは $2\alpha h\nu / (1+2\alpha)$ の式で与えられる。ここで $\alpha = h\nu / 511\text{keV}$ (電子の質量)、 h はプランク定数 ($6.6 \times 10^{-34}\text{Js}$)、 ν は入射光子の振動数である。¹³⁷Cs 線源からの γ 線(662keV)

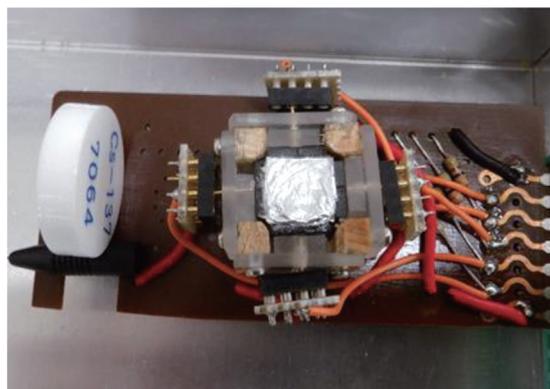


図 3 実際の装置

左側の白い円盤状の物が ¹³⁷Cs γ 線源。真ん中の銀色の部分が LYSO 結晶をライトシールドしたアルミナイズドマイラー。その両側が MPPC である。

は、コンプトン電子の最大エネルギーは 478keV となり、チェレンコフ光の発生条件である 101keV 以上を満たしている。また、コンプトン電子の最大エネルギー 478keV の時はチェレンコフ光のコーン角の最大角は $\cos\theta = 1/(n\beta)$ より 50° となる。

結果

図 3 のように ¹³⁷Cs 線源をシンチレーターの左側に設置した場合、オシロスコープで、それぞれの MPPC からの信号を観測すると、右側の MPPC からの信号が最初の信号となり、左側の MPPC からの信号は 20nsec ほど遅れて異なる波形となった。右側の信号は左側の信号よりも波高が大きくなっていた。¹³⁷Cs 線源をシンチレーターの右側に設置すると、逆の時間差と波形の信号となった。また、側面から照射すると同じタイミングで、同じ波形の信号が観測された。

考察

入射面とその対面の時間差が生じるのはガンマ線によって発生するコンプトン電子の方向に生じるチェレンコフ光の後にシンチレーション光が発生するためである。チェレンコフ光は電子が移動する瞬間に移動する方向にコーン状に発するのに対して、シンチレーション光はシンチレーターの原子を励起させ、基底状態に遷移する時に等方的に発するので、時間差が生じる。側面からの入射では、

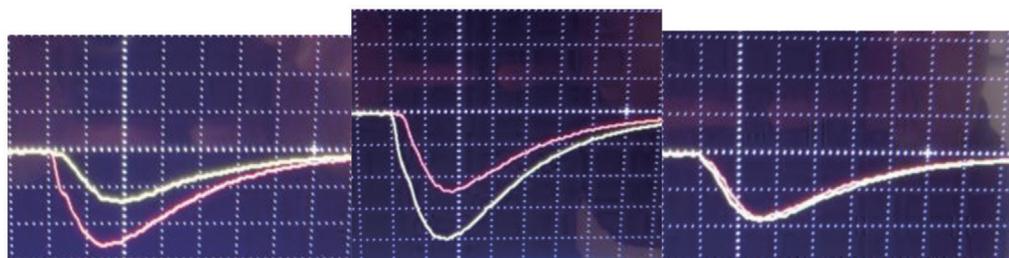


図 4 左側から、線源を左側、右側、側面にした状態の信号

黄色い信号は左側、赤い信号は右側の MPPC の信号である。明らかに時間情報とパルス形状が異なる信号が観測された。図中の横軸の 1 メモリは 50nsec なので、20nsec ほどの遅れが観測された。

チェレンコフ光が観測されないことから、側面の光検出器にはシンチレーション光の等しい波形が測定され、入射面に対面していないことがわかる。したがって放射線の入射面がわかるので、立方体の検出器の六面あるうちの一面であることがわかり、入射光子の方向を限定することが可能となる。立方体の検出器であれば、四方八方から来る自然環境放射線バックグラウンドの測定値を1/6に減らすことが出来ることが実証された。

また、光検出器として光電子増倍管を使用した従来の測定では入射面と対面の光検出器では、シンチレーション光にチェレンコフ光が重なっていた可能性がある。チェレンコフ光はコーン状に広がり、円状に広がったすべての光を受光できない可能性があることから、部分的に光検出器に検出されていたとすれば光電ピークのエネルギー分解能及び検出効率を悪くしていた可能性がある。時間差を利用すればチェレンコフ光とシンチレーション光を分けることができ、入射面側のみの読み出しにすれば、光電ピークのエネルギー分解能及び検出効率も上げることが可能となる。

ただしLYSO (Ce) シンチレーターの場合、チェレンコフ光はコンプトン電子が101keV以上でないと発しないので、101keV以上のコンプトン電子を生じない181keV以下の光子の測定には適さないが、食品に含まれると想定している¹³⁷Csや⁴⁰K (1.47MeV)の放射線量の測定には適している。

今後の課題

- (i) シンチレーターにおけるチェレンコフ光とシンチレーション光の時間の遅れの情報はデータがないので、シンチレーターごとに明らかにする必要がある。その中で一番適したシンチレーターはどれかを研究する必要がある。
- (ii) ⁴⁰K (1.46MeV) の測定も行いたいため、シンチレーターの結晶を大型化した場合、MPPCの幾何学的な配置を検討する必要がある。つま

り、チェレンコフ光はコーン状に広がり、円状に広がったすべての光を受光できない可能性があることから、光検出効率の問題が生じる可能性がある。問題点はないかを研究する必要がある。

- (iii) 光検出器として光電子増倍管を使用した従来の測定ではシンチレーション光にチェレンコフ光が重なっていた可能性があり、チェレンコフ光はコーン状に広がり、円状に広がったすべての光を受光できない可能性があることから、光電ピークのエネルギー分解能及び検出効率を悪くしていた可能性がある。チェレンコフ光とシンチレーション光を時間情報か波形の情報で分けることにより、エネルギー分解能及び検出効率も上げることが可能かどうかを明らかにする必要がある。

今後の研究は神戸常盤大学のテーマ別研究「新方式による低放射線バックグラウンド検出器の開発」が採択されたので、その予算で進めていく予定である。

食品の低放射線量の測定が可能な低価格で構成される検出器の開発なので、開発が成功すれば福島産の食品や一般に販売されている食品中に含まれる放射線のレベルを明らかにし、学生への教育効果を高めることが可能となる。また一般市民に対する放射線教育を進めていくことが可能となる。更には低価格で測定が可能になることが見込まれるため食品の低放射線量の測定を全世界に広めることが可能になり、放射線教育を広げることが可能になると思われる。

この結果は特許申請中である(特願 2023-024289)。

謝辞

この研究は日本学術振興会 科学研究費助成事業 基盤研究(C)「大強度連続ミューオンビームによる三核子系の三体力の解明」で購入した装置を用い

て行えたものである。

また、この研究は神戸常盤大学のテーマ別研究「新方式による低放射線バックグラウンド検出器の開発」で採択されたので、今後研究を進めることが可能になり、感謝いたします。

文献

- 1) 高久圭二. 大塔コスモ観測所におけるニュートリノ物理.
The Conference on Neutrino Physics at Hachimantai. 1998, p.11-29.
- 2) 高久圭二. OTO Cosmo Observatory and measurement of Double beta decay.
Conference on Physics by means of electron beam on MeV to GeV energy region, LNS, Tohoku-u, Sendai, Japan.
Proceedings : LNS Report1999. p.110-116.
- 3) K.Takahisa; Y.Tujimoto; E.Choi; K.Hayashi; N.Kudomi; K.Kume; K.Matsuoka; Y.Nagai and S.Yoshida. Background contamination of ELEGANT VII. RCNP (Osaka), Ann.Rept., 1999, p.103.
- 4) Nguyen V. H. Viet; M. Nomachi; K. Takahisa; T. Shima; B. T. Kha; R. Takaish; K. Miyamoto.
Pulse Shape Discrimination of CsI(Tl) With a Photomultiplier Tube and Multipixel Photon Counters.
IEEE Transactions on Nuclear Science., 2021, 68, 2, 203-210.