

Title	パソコン制御デジタルオシロスコープ信号取得によるガンマ線スペクトロメーターの開発と実習への応用
Sub Title	Development of a gamma-ray energy spectrometer by acquisition of signals with a computerized digital oscilloscope and application to laboratory teaching
Author	三井, 隆久(Mitsui, Takahisa) 寺沢, 和洋(Terasawa, Kazuhiro)
Publisher	慶應義塾大学日吉紀要刊行委員会
Publication year	2011
Jtitle	慶應義塾大学日吉紀要. 自然科学 (The Hiyoshi review of the natural science). No.50 (2011. 9) ,p.31- 42
JaLC DOI	
Abstract	放射線計測における電子機器は高速パルス回路が主体であり, 多くの場合NIMビンやCAMACクレートなど専用に設計・製作された機器を用いる。しかしながら, 価格, 配線の複雑さ, 大学初年度の文化系もしくは医学系学生に対する教育的意義の点で専用機器の使用は不適切であり, 実習で放射線計測を行う上での大きな障害となっていた。我々は汎用計測器として市販されているデジタルオシロスコープでパルス信号の取得を行い, パソコンで統計処理を行うことで安価で操作法が簡単なガンマ線スペクトロメーターの開発を行い, 放射線計測実習を行った。本論文では, 放射線計測の原理, 我々の開発した装置と計測例, 実習の結果について述べる。
Notes	50号記念号 原著論文
Genre	Departmental Bulletin Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN10079809-20110930-0031

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

パソコン制御デジタルオシロスコープ信号取得による ガンマ線スペクトロメーターの開発と実習への応用

三井隆久*・寺沢和洋*

Development of a Gamma-ray Energy Spectrometer by Acquisition of Signals
with a Computerized Digital Oscilloscope and Application to Laboratory Teaching

Takahisa MITSUI, Kazuhiro TERASAWA

要旨

放射線計測における電子機器は高速パルス回路が主体であり、多くの場合 NIM ビンや CAMAC クレートなど専用に設計・製作された機器を用いる。しかしながら、価格、配線の複雑さ、大学初年度の文化系もしくは医学系学生に対する教育的意義の点で専用機器の使用は不適切であり、実習で放射線計測を行う上での大きな障害となっていた。我々は汎用計測器として市販されているデジタルオシロスコープでパルス信号の取得を行い、パソコンで統計処理を行うことで安価で操作法が簡単なガンマ線スペクトロメーターの開発を行い、放射線計測実習を行った。本論文では、放射線計測の原理、我々の開発した装置と計測例、実習の結果について述べる。

1. はじめに

放射線や原子核は日本人が最も嫌うことの1つであるが、CO₂を出さない発電としての原子力、レントゲン撮影や放射線治療、ポジトロン断層法、そして事故による被曝など、21世紀に入り重要性はますます高まっている。これからの文明社会では、放射線や原子核を避けて通ることはできない。このような中で、日本の大学を卒業した学士が放射線に対する正確な知識をほとんど持っていないという現実、物理教育を担当する者にとって極めて遺憾である。この

* 慶應義塾大学日吉物理学教室 (〒 223-8521 横浜市港北区日吉 4-1-1) : Dep. of Physics, Keio University, 4-1-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, 223-8521, Japan. [Received Apr. 2, 2011]

ような状況を改善すべく、現実的な放射線計測実習法について長年検討してきたが、多くの問題点があり実現しなかった。問題点は1) 放射線源を使用する場合の管理, 2) 市販の装置を用いる場合、著しく高価なうえに複雑な配線を必要とする、などである。

放射線については、厳重な管理を義務付けられている放射線源を用いなくても、自然環境中に存在する放射線（環境放射線）を用いることができる。これは、宇宙線や ^{40}K [1], Rnなどが環境に存在するからである。環境放射線を用いれば、管理の心配をする必要がなくなる。これにより問題点1) は解決することができた。問題点2) は最も苦勞した点であり、解決により実習課題として導入することが可能になった。放射線計測に必要な電子機器は主としてパルス計測器であり、従来は高価な電子機器と複雑な配線によりこれを行っていたが、複雑な配線の教育的必要性、実習時間、実習スペース、予算などの点で不必要・不可能である。本装置では、電気信号の取得と統計処理をコンピュータ制御デジタルオシロスコープを用いて行うことでこれらの問題点を解決した。

以下では、放射線計測装置の基本構造と、我々の開発した装置、実習における教育効果について述べる。

2. 放射線計測装置の基本構成

放射線は五感で感じられないので検出が難しいように思われがちであるが、X線撮影に代表されるように検出は容易である。しかし、頻度、方角、エネルギー、種類などの精密な計測を行うことはそれほど容易ではない。本実験ではシンチレータと光電子増倍管を用いてガンマ線のエネルギーを測定する。

シンチレータは、放射線が入射しエネルギーを落とした時に発光する物質である。発光量が落としたエネルギーに従って増加する。本実験では代表的なシンチレータであるNaI (Tl) とプラスチック・シンチレータを使用する。シンチレータの発光量は微弱であり、定量的な計測には光子1個から検出できる光電子増倍管を用いる。

光電子増倍管に入射した光子は光電面で電子を出す。この電子を高電圧で加速し、後段の電極（ダイノード電極）にぶつけると、複数個の二次電子が発生し、この電子を高電圧で加速し、さらに別な電極にぶつけ更に多くの電子を出す。光電子増倍管内には約10段のダイノード電極があり、ねずみ算式に2次電子が増幅され、 $10^6 \sim 10^7$ の増倍率を得ることができる。動作させるため、本実験では1.5kVの高電圧を用いた。

放射線がシンチレータに入射すると、シンチレータ内で失ったエネルギーに比例した大きさの電気パルスが1個光電子増倍管から出力される。後段の電子機器によりこのパルスの面積や頻度などの信号処理を行い、入射した放射線のエネルギー、時間に関する情報を得ることができる。それらの情報を元に目には見えない放射線にまつわる様々な物理現象を扱うことができる。

放射線計測には長い歴史があり、電子機器はNIMビン (nuclear instrumentation module

standard) および CAMAC クレート (computer automated measurement and control standard) を用いて動くように作られている (図 1) [2]。これらの規格に合った電子機器を用いると様々な信号処理が複雑ではあるがパネル前面の配線のみで行うことができる。本実験も、最初はこの方法で信号処理を行い、放射線計測に必要なパルス計測のスペックを求めた。

光電子増倍管から送られてくる信号：

- 1) パルス幅は10ns から 1 μ s 程度。
- 2) パルスの振幅は 1 mV から 1 V 程度。
- 3) パルスの発生頻度は平均で毎秒100個程度。
- 4) PM 1 と PM 2 の同時発生を弁別。この頻度は毎秒10程度。20cm \times 20cm のプラスチック・シンテレーターで使用した場合。(PM は Photomultiplier, 光電子増倍管の略)

これらの信号をもとに行うデータ処理は、光電子増倍管が 1 つの場合：

- 1) PM 1 にトリガレベルを設定しパルスの弁別を行う。
- 2) レベルを超えたパルスを時間の関数として表示する。
- 3) パルスの数を求める。
- 4) パルスの面積を求め、面積に対する出現頻度を集計し、グラフにする。

光電子増倍管が 2 個の場合：

- 1) PM 1, PM 2 に対して個別にトリガレベルを設定しパルスの弁別を行う。
- 2) レベルを超えたパルスを時間の関数として表示する。
- 3) パルスの数を PM 1, PM 2 に対して個別に求める。
- 4) パルスの面積を求め、面積に対する出現頻度を集計し、グラフにする。
- 5) PM 1 と PM 2 からの同時パルス発生の判定を行う。
- 6) 同時パルスの数を求める。
- 7) 同時パルス発生時 PM 1, PM 2 のパルス面積を個別に求め、面積に対する出現頻度を個別に集計し、グラフにする。

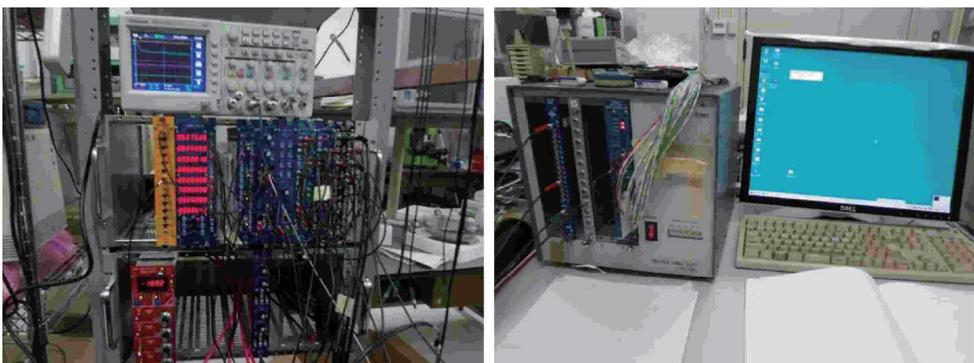


図 1. 従来の放射線計測用電子機器。左：NIM ビン，右：CAMAC クレーとパソコン画面。

以下で、デジタルオシロスコープを用いたこのスペックを満たす装置について述べる。

3. デジタルオシロスコープを用いた信号取得・処理

3-1. 基本構成

信号取得・処理装置として最も使われている機器は、オシロスコープである。実際、どのような放射線計測においても調整や動作の確認にオシロスコープを用いている。オシロスコープには、放射線計測に必要な基本性能の大半が含まれている。オシロスコープは近年デジタル化し、ad (analog-to-digital) 変換器を用いたデジタルオシロスコープが主流となった。これにより、取得したデータをコンピュータへ転送することが可能になり、統計処理もコンピュータで行うことができる。

デジタルオシロスコープは、パルス弁別を行ってパルスが来たときのみデータをコンピュータに転送する機能が備わっている。図2はデジタルオシロスコープの内部構造を示す。デジタルオシロスコープのトリガ機能をパルス弁別に流用できる。また、光電子増倍管から得られる信号の大きさは、光電子増倍管に加える電圧やシンチレータから得られる光量で大きく変わり、パルス信号を ad 変換する前に適切な大きさに増幅する必要がある。このために必要な増幅器もしくは信号減衰器は、デジタルオシロスコープに標準で備わっており、入力電圧レンジを変えることで、様々な大きさの入力電圧レンジに容易に対応できる。このため、デジタルオシロスコープと光電子増倍管との間に増幅器を入れる必要が無い。デジタルオシロスコープが比較的安価であることを考慮すると、今回の用途には最適であるといえる。

しかしながら、デジタルオシロスコープは放射線計測用に作られていないため、大きな欠点がある。USB 接続により、コンピュータにデータを転送することは、取り扱いが容易ですばらしいことであるが、ほとんどの安価な製品はデータ転送速度が遅く、5 パルス /s 程度までしか放射線信号を取得できない。

デジタルオシロスコープからディスプレイや操作ボタンを取り去り、USB 接続でコンピュータと併用して使用することが前提で作られたオシロスコープ (USB オシロスコープ) が近年、各社から商品化されるようになった。このような省略化をすると、コンピュータが不可欠になるという欠点が生じるが、本体そのものは小型で安価になり、コンピュータの普及した現

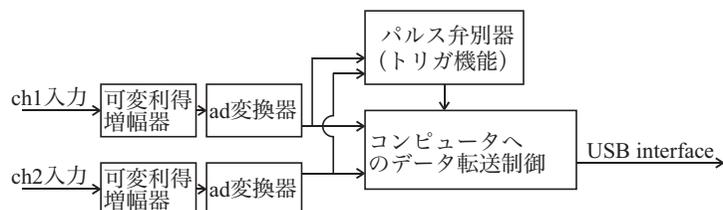


図2. デジタルオシロスコープの内部構造。オシロスコープに不可欠のトリガ機能がそのままパルス弁別につかえる。(表示部は省略。)

在ではかなり使われている。USB オシロスコープは USB 経由でデータ転送することが前提であり、デジタルオシロスコープより転送速度が速いことが期待される。したがって、今回の用途には最適であると期待して幾つかの商品を探した。メーカーから試供品を貸していただき使用した結果、安価に入手できる商品は ad 変換速度が200Ms/s 程度であり、この点を妥協するとしても、データ転送速度が遅く、取得可能な放射線信号は、10パルス /s 程度であった。

このような中で、様々な機種を検討した結果、英国のピコスコープ社の ps5203 が適当であることが判った。この機種は、1 ch 使用の場合には1 Gs/s の変換速度があり、2 ch 使用の場合には500Ms/s の変換速度がある。特徴として、オシロスコープとして使うための優れたソフトウェアも付いているが、使用者が自分でプログラムを書いて制御することにも重点が置かれ、ソフトウェア開発を比較的容易に行うことができる。また、この点が最も重要であるが、USB 経由のデータ転送速度が速く、ブロック転送モードでは1000パルス /s、通常の転送モードでも500パルス /s まで、放射線信号をコンピュータへ送ることができる。ブロック転送モードでは、指定した回数トリガレベルを超えるパルスが来るまでデータを本体にため込み、その後で複数のデータを一度に送るモードである。これにより、USB 接続の転送準備に費やす時間を節約できるため、転送速度が上がる。当初、ブロック転送モードでソフトウェア開発を行ったが、このモードは指定した回数パルスが来るまで応答しないため、パルス頻度が低い場合、ps5203 が長時間応答せず、少し不便であることから、通常の転送モード、すなわち、トリガがかかるたびにデータを転送するモードで使用した。2 インチの NaI (Tl) シンチレータと光電子増倍管から得られる信号は、日吉の環境放射線に対して50パルス /s 程度であり、パルスの発生頻度がポアソン分布であることを考慮すると装置の無応答時間は20ms よりも十分に短い必要がある。ps5203 のパルス取得速度が500パルス /s であることから、2 ms の無応答時間が生じることになり、時折パルスを見落とすことになるが、この程度であれば、実用上問題ない。

3-2. 信号処理装置のハードウェア構成

ハードウェアとして必要なほとんどの機能は USB オシロスコープが行うので、信号処理装置のハードウェア構成は図3に示すように、極めて単純である。このため、4セットそろえることも容易であり、故障など予期せぬ場合の対応も迅速に行うことができる。

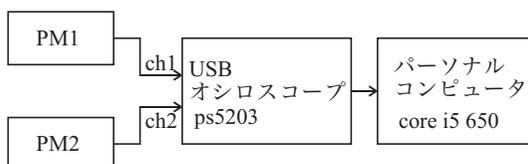


図3. 光電子増倍管を2個 (PM1, PM2) 用いた場合のUSBオシロスコープを用いた放射線信号処理装置のハードウェア構成。USBオシロスコープを使用することで、装置の大幅な簡略化ができる。

3-3. デジタルデータ処理について

USB オシロスコープを使うことで、信号処理系を全てパソコンによるデジタル処理にすることができる。特に、パルスの面積計測をデジタル処理することで、従来から行われているコンデンサを用いた電荷の積分回路が不要になり、装置が簡略化できる。ps5203は8 bit の ad コンバータを使用しているので、ゼロを中心に正方向にも負方向にも128の分解能がある。すなわち、パルス振幅に対して7 bit の分解能がある。一方で、1 bit 程度の電氣的雑音と1 bit の量子化雑音を含むので、振幅計測器としての測定精度はあまり高くない。しかしながら、時間方向には1 ns の分解能があるので、たとえば幅が256ns のパルスに対しては256回 ad 変換を行い、この数だけ足し算を行う。雑音は足し合わせた数の平方根だけ減少し、256回の足し算の場合、雑音は1/16に減少する。したがって、面積に対しては10bit 以上の分解能が期待できる。コンデンサで電荷を蓄え、1回の ad 変換でパルス面積を取得する場合には、積算窓を設定するためのアナログスイッチのスパイク雑音など余計な回路にともなう雑音があり、実際に得られる精度が ad 変換器の精度より低いことを考慮すると、デジタル信号処理はそれほど悪くないといえる。

USB オシロスコープの入力を AC 結合にするか、DC 結合にするかは、重要な問題であり、最後まで迷ったが、従来の装置が AC 結合であることから、AC 結合とした。理想的には DC 結合にすべきであり、AC 結合で面積測定をすれば、パルス面積は常にゼロになる。これは、AC 結合をするためのカップリングコンデンサが直流を流せないことによる。しかし、AC 通過帯域の下限を決めている時定数よりも十分に短いゲート時間（積算窓を開けている時間）で面積測定すれば、パルス面積を正確に計測できる。USB オシロスコープの場合、AC 結合の時定数は0.1s 程度であり、一方でゲート時間は1 μ s 程度なので、この条件を満たしている。このようなことから、最終的には AC 結合で面積測定を行うこととした。

3-4. 光電子増倍管が1つの場合の信号処理系

光電子増倍管 (PM1) が1つの場合の信号処理系を図4に示す。パルス弁別器は USB オシロスコープのトリガ設定で行い、パルス面積計測と、パルスカウンタはコンピュータ内のソフトウェアで行った。ただし、パルス入力が無い場合コンピュータが無応にならないよう、0.5秒パルス入力が無い場合、USB オシロスコープから処理が戻るようになっている。

コンピュータのオペレーティングシステムは windows7 (64bit) であり、当初は Visual C++ 6.0 sp6で開発を行ったが、途中で最新の開発環境である Visual C++ 2008に変更した。

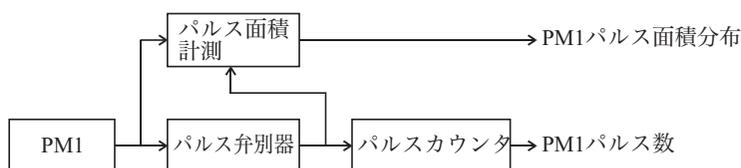


図4. 光電子増倍管が1つの場合の信号処理系

どちらにも問題は無かった。コンピュータのCPUはcore i5 650であり、内部に処理装置を2台集積しているが、ハイパースレディングモードを用い見かけ上4個のCPUに仕事を分散させている。物理的に4個のCPUを搭載している方が良いが、パソコン本体の大きさなどを考慮してこの機種になった。ps5203とのデータやりとりは負荷が重いので、この作業を専門に1つのCPUが行っている。また、パソコン画面の描画とメニューボタンの処理用に他の1つのCPUが割り当てられ、もう1つのCPUで面積を求める作業と、パルス数のカウントを行っている。このため、3CPU以上ないと、放射線信号の抜け落ち頻度が増大する。平均50パルス/sでパルスが来るとき、最大で1CPUの稼働率が70%程度であり、余裕はないがオーバースペックでもないといえる。このように複数のCPUに仕事を割り当てると、処理速度が上がるという利点の他に、データ保存時のファイル名を入力している間など、人間が操作する間に画面表示用のCPUが止まっても、信号処理系のCPUは無関係に動いているので、その間のデータ抜け落ちがないという利点がある。

パソコンの画面(図5)には、USBオシロスコープのダイナミックレンジいっぱいに表示したパルスの波形とトリガレベル、トリガレベル近辺のみを拡大したパルスの波形とトリガレベル、面積計測時間範囲、パルス面積分布グラフなどが表示される。

データの保存は、現在の状態をすみやかに保存するモードと、指定回数だけパルスが来たら自動的に保存し、この作業を指定回数繰り返すモードがある。これらの機能により、自動計測が容易になる。図6、7に測定結果の一例を示す。

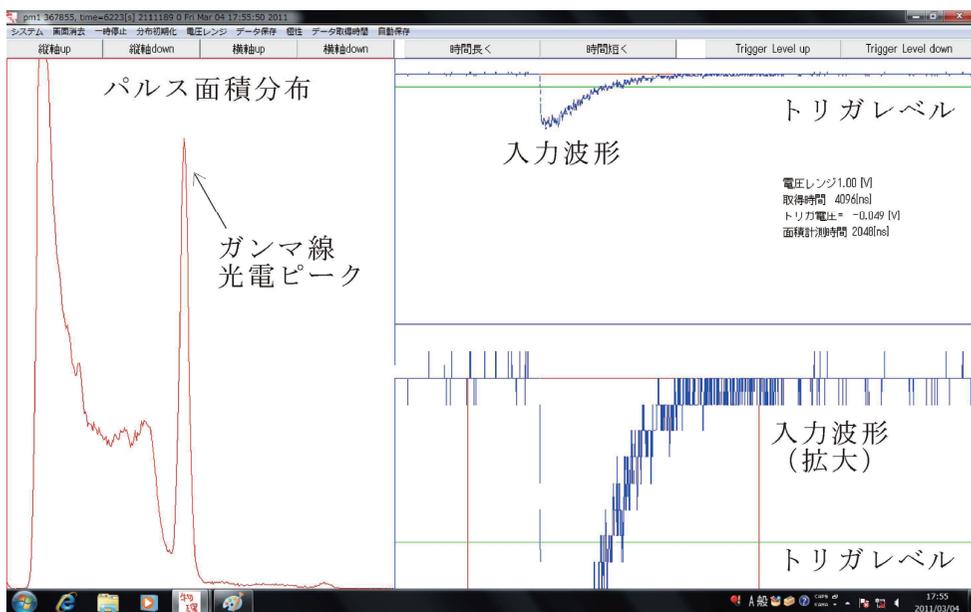


図5. 測定画面の一例。放射線源は環境と500gのKCl試薬3瓶。計測時間は6223秒、パルス数は367855である。カリウムからのガンマ線に由来した光電ピーク、コンプトン端などが観測できる。そのほかに高エネルギー側に小さなピークがある。

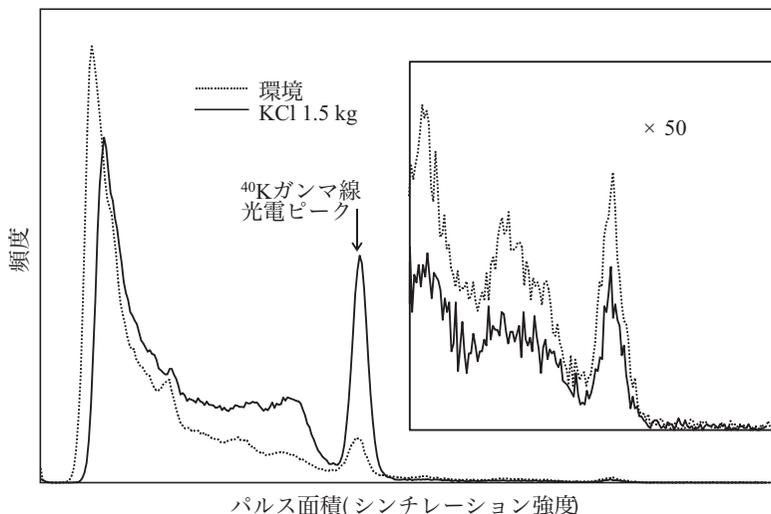


図6. 測定結果の一例。シンチレータ単独で環境放射線を測定した場合と、KCl試薬500gで3瓶をシンチレータに近接させた場合。KClからのガンマ線に由来した光電ピーク、コンプトン端などが観測できる。両者で計測日時が異なるため、シンチレータの発光効率が多少異なる。右半分(高エネルギー側)の頻度が小さいので、50倍に拡大した図を追加した。左端(低エネルギー側)で頻度が少なくなっているのは、パルス検出に閾値を設けているため、検出されないことによる。

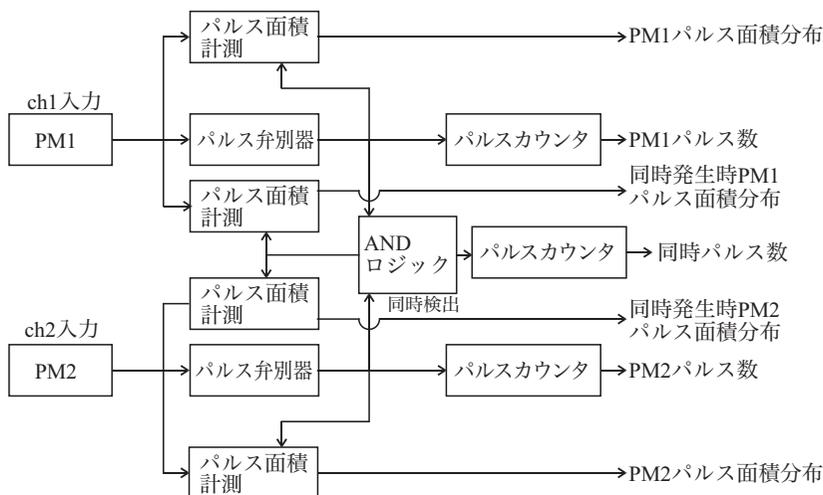


図7. ANDロジックを用いた光電子増倍管が2つの場合の信号処理系

3-5. 光電子増倍管が2つの場合の信号処理系

光電子増倍管を2つ (PM 1, PM 2) 備えることで、2個の光電子増倍管から同時に信号が出力された場合のみを選択的に検出することができ、これにより光電子増倍管の暗電流の影響を除去できる。USB オシロスコープには標準で2ch 入力があり、このような複雑な信号処理も図3に示した単純なハードウェア構成でできる。ハードウェア構成は単純であるが、ソフ



図8. 測定装置。左からディスプレイ、パソコン本体とps5203、高圧電源2台、シンチレータ2個。

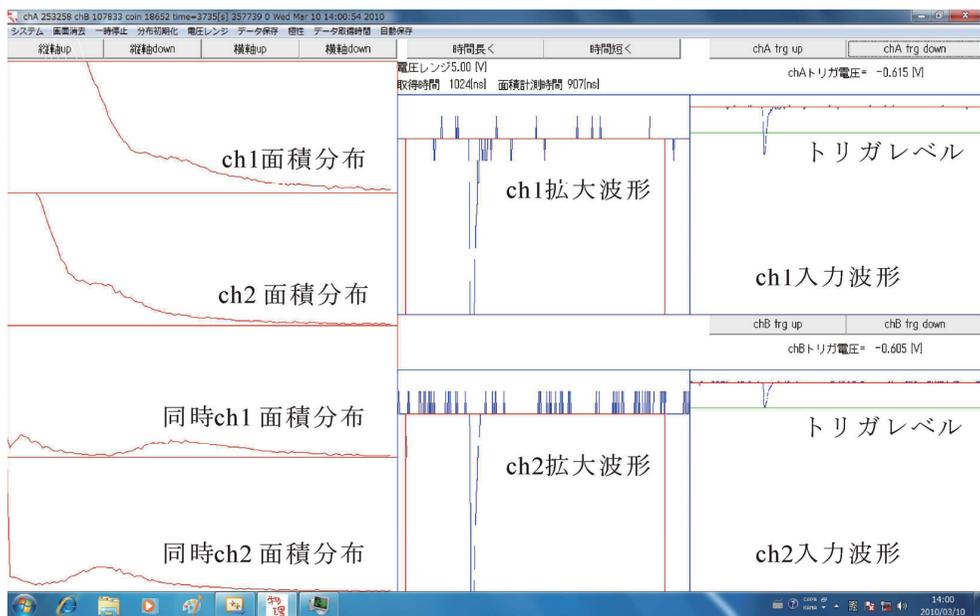


図9. ANDロジックを用いた同時判定をソフトウェアで行う計測時のパソコン画面の一例

トウエアには多少の工夫が必要である。図7はこの方法のブロック、図8に測定画面の一例を示す。使用したUSBオシロスコープのトリガモードを活用することで、通常の放射線計測で行われる全ての情報を取得する装置をパソコンとUSBオシロスコープのみで構築できた。

2個の光電子増倍管から同時にパルスが出力された場合に、2個のシンチレータに放射線がエネルギーを落としたとみなせる。信号を取得するためには、ch1およびch2に対して独立

にトリガレベルを設定した個別のパルス弁別器により波形を常に観測し、両者に同時にトリガレベル以上の信号が来た場合のパルス頻度や面積分布などの統計処理を行う。USB オシロスコープ ps5203には、ch 1, 2 に対して個別にトリガレベルを設定し、どちらか1つでもトリガレベルを超えたらパソコンにデータを転送する機能がある。この機能を用い、転送されたデータをソフトウェア的に調べて、同時条件をはずした場合と課した場合それぞれについて、ch 1 および ch 2 単独のパルス数とパルス面積分布を計測している。

この方法の欠点は、USB 経由で転送されるデータ量が多く、ps5203と使用したパソコンの両者に対して過負荷となる場合があることである。別な方法、例えば、ps5203ではch 1 のみにトリガをかけて、データ転送を行い、ch 2 に対してはパソコン内でトリガ判定をする方法であれば、データ量は約半分になる。このトリガ方法の欠点は、同時ではないch 2 の面積分布が得られないことである。

4. 実習への導入と教育効果

導入1年目は、課題を最小限に限定した方がトラブルに対処しやすいということで、1chでの計測を行い、2ch同時計測は行わなかった。放射線計測と聞くとほとんどの人は放射性物質の管理と被曝を思い浮かべるが、本実習では宇宙線などの環境放射線と ^{40}K を用いるので、このような心配は必要ない。 ^{40}K は天然のカリウム中に0.0117%含まれており、本実習では塩化カリウム500g(市販の試薬)を用いた。市販の試薬を購入し、開封することなく用いている。塩化カリウムはプラスチックの容器に入れられているが、 ^{40}K からのガンマ線はあまり減衰することなく容器から放射される。これにより、学生は特殊な物質ではなく、普通の身近な物質から放射線が放射されていることを実感できる。

光電子増倍管には1.5kVの高電圧を印加する。学生はゼロボルトから数十秒かけてゆっくりとこの電圧まであげる。感電すれば生命の危険を伴う電圧なので、コネクタは接続したままで、さらにテフロン粘着テープを巻いて不注意の事故ではずすことがないようにした。この箇所は本実習で唯一危険な箇所である。ただし、故意にコネクタをはずし、電極にふれない限り危険ではない。高圧のかかる電極部分は針金等を突っ込まない限り直接触れられないような仕組みになっており、危険性は全くない。本実験で学生が行う配線は光電子増倍管からps5203への同軸ケーブルの接続のみである。

パソコンを立ち上げ、我々の開発した計測プログラムを実行すると画面上にパルスが観測される。学生はテキストに従って、適切なトリガレベルに設定する。これにより、雑音の影響を避け、パルス取得が可能になる。

図10は学生が実習を行う際の計測条件を示す。(a)は計測器単体であり、この場合には室内の環境放射線を測定することができる。この計測により、環境に放射線が存在することを実感できる。また、KCl試薬を近接させた場合との対比としての役割もある。(b)はKClからの放射線を測定する配置である。これにより、放射性物質として扱われていない、また人間の

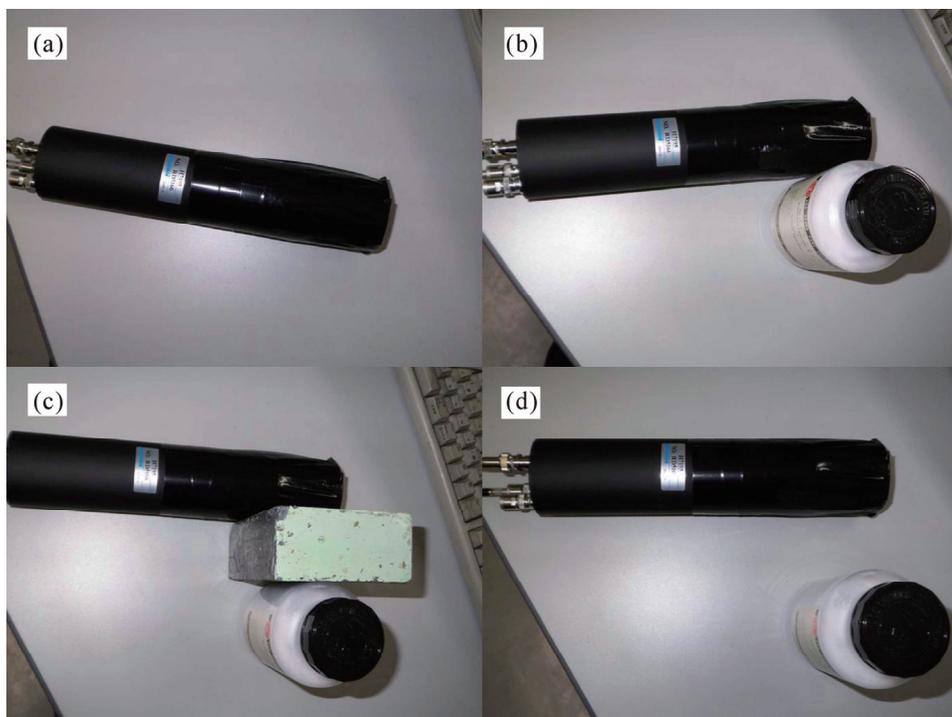


図10. 実習における計測条件。(a) 光電子増倍管単体, (b) KCl試薬単体を近接させたとき, (c) 5 cm厚みの鉛を挟んだとき, (d) 鉛をはずしたとき。



図11. 実習の様子。放射線計測実習としては比較的高度な測定を行っているが、従来の放射線計測（図1）と異なり安全で配線も測定も容易である。PicoScope ps5203の下にあるのは発振器で、同軸ケーブル中を伝搬する電気パルスの伝搬速度を測定する際に用いる。

生存に必要なカリウムから放射線が出ていることがわかる。(c) は鉛を挟んだ場合である。鉛により放射線が減衰することがわかる。(d) は (c) の対比を行うために必要である。

この測定では毎秒50パルス程度得られ、50000カウントになるのを待つて一回の計測を行う。一回の計測時間は1000sであり、4通りの場合を計測すると、1時間以上かかる。その間、計測はパソコンにより自動的に行われ、学生はほとんど何もすることがない。教育的見地から見て、この時間を有効に活用する配慮が必要であり、検討中である。ただし、計測器が順調に動作していることを見守る必要はある。

5. おわりに

本装置は、放射線計測装置としては安価であり、性能は十分である。しかしながら、実際に作成し動作している状態を他の教員に評価していただいたところ、教育効果に対する疑問が挙げられた。ほとんどの操作は、コンピュータの前に座り、マウスを動かすことで行われる。そして、一度適切な計測状況が見つかると、その後は1時間程度放置しておくだけで全ての計測が自動的に行われる。使用している学生には、内部で行われている高度な信号処理はブラックボックスであり、教育上の効果が不完全な可能性がある。一方で、計測系はブラックボックスでもかまわず、放射線・宇宙線の性質や特徴を理解できれば良いという考え方もある。テープレコーダの内部構造を知らなくても、テープレコーダを用いた語学練習が効果的なものと似ている。先に述べたように、このような装置で、 ^{40}K の放射線や宇宙線、鉛による減衰、ポアソン分布などを理解することができる。

教育効果を高めるためには、放射線の理解に直結した優れた課題を考案することが最も重要であり、今後の課題である。安価で操作性が良く被曝や放射線管理の心配を必要のない本実験装置は、実際に実習を行う上で極めて有用であり、多くの可能性を秘めている確信している。

謝辞

有用な助言をして頂いた古野泰二教授、神戸大学で行われている放射線計測実習についての資料を提供して頂いた絹川亨先生、カリウムを含む塩からの放射線計測に対するデータを提供して頂いた青木健一郎教授、山本裕樹先生に感謝いたします。ここで報告した装置の開発は、慶應義塾大学調整予算（平成20、21年度）からの助成金を用いて行われました。

参考文献

- [1] 青木健一郎、山本裕樹著「放射能の測定」（平成19年度慶應義塾大学日吉特色 GP 活動報告書一文系学生への実験を重視した自然科学教育―）pp. 214-218.
- [2] G.F.Knoll, 木村逸郎, 阪井英次・訳「放射線計測ハンドブック」pp. 889-894 (2001).