

Title	学生実験開発に向けた環境放射線のスペクトル測定について
Sub Title	On environmental gamma spectroscopy toward developing experiment for undergraduates
Author	松浦, 壮(Matsuura, So) 阪口, 真(Sakaguchi, Makoto)
Publisher	慶應義塾大学日吉紀要刊行委員会
Publication year	2012
Jtitle	慶應義塾大学日吉紀要. 自然科学 (The Hiyoshi review of the natural science). No.52 (2012. 9) ,p.59- 67
JaLC DOI	
Abstract	放射線は、一般的な感覚に反して、自然界のごくありふれた存在である。東日本大震災に伴う原子力発電所の事故によって原子力の危険性が再認識されると同時に、世界規模のエネルギー不足が問題となる現在、それらの問題の基本となる放射線の性質を誰でも正しく理解できるような学習環境を整えることは急務であると言える。そこで我々は、慶應大学医学部物理学教室で開発されたシンチレーション検出器を導入し、将来、文系学生向けの放射線測定実験を開発するための予備実験として、環境放射線のエネルギースペクトルを定量的に測定する実験を行った。そしてその応用として、天然放射性鉱物の一つであるユークセン石から発生するガンマ線のエネルギースペクトルを測定し、今回用いた測定方法が正しく機能していることを確かめた。
Notes	研究ノート
Genre	Departmental Bulletin Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN10079809-20120930-0059

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.

学生実験開発に向けた環境放射線のスペクトル測定について

松浦 壮・阪口 真*

On Environmental Gamma Spectroscopy toward Developing Experiment for
Undergraduates

So MATSUURA and Makoto SAKAGUCHI

要約

放射線は、一般的な感覚に反して、自然界のごくありふれた存在である。東日本大震災に伴う原子力発電所の事故によって原子力の危険性が再認識されると同時に、世界規模のエネルギー不足が問題となる現在、それらの問題の基本となる放射線の性質を誰でも正しく理解できるような学習環境を整えることは急務であると言える。そこで我々は、慶應大学医学部物理学教室で開発されたシンチレーション検出器を導入し、将来、文系学生向けの放射線測定実験を開発するための予備実験として、環境放射線のエネルギースペクトルを定量的に測定する実験を行った。そしてその応用として、天然放射性鉱物の一つであるユークセン石から発生するガンマ線のエネルギースペクトルを測定し、今回用いた測定方法が正しく機能していることを確かめた。

Keywords: radiation, education, experiment

1. 序論

2011年3月11日の東日本大震災に伴う原子力発電所の事故によって、放射線にまつわる様々

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) : Department of Physics, Keio University, 4-1-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8521, Japan. [Received Apr. 3, 2012]

*2012年4月から茨城大学理学部 (〒 310-8512 水戸市文京 2-1-1) : Department of Physics, Ibaraki University, Mito 310-8512, Japan

な事象はこれまで以上に世間の関心を集めるようになった。原子力を利用する危険性が改めて認識される一方で、地球規模でのエネルギー不足が懸念される現在¹，社会生活を行う上で原子力に関する議論を避けることは出来ない。そして、その際に最も基本になるのは、原子核反応やそれに伴う放射線に関する正しい理解であることは言うまでもないことである。従って、この分野の知識は、理系・文系という些末な分類には関係なく、現代社会を生きるすべての人々が学ぶべき基礎的な事項であると言える。

ところが、そのような高い関心にも関わらず、放射線に関する知識・情報が必ずしも正しい形で理解されているとは限らないようである。その最も大きな要因は、放射線が自然界のありふれた存在であるにも関わらず、その存在に触れる機会があまりに少ないためではないかと思われる。そこで我々は、放射線の存在を実感しつつ、必ずしも理系科目の専門知識が豊富でない学生であっても放射線に関する基本的な事柄を理解することができるような学習プログラムを開発する必要があると考えた。

実は、慶應義塾大学の医学部物理学教室において放射線観測の実験が既に導入されている。その実験装置を用いると、放射線の存在を確かめるだけでなく、ガンマ線のスペクトル測定すら可能である [1]。そこで今回我々は、医学部物理学教室で使われている実験装置を再構築し、将来的に文系学生向けの実習プログラムを開発するための予備的な実験として、ガンマ線のエネルギーを定量的に求める実験を行った。このノートは、その実験の記録をまとめたものである。

2. 実験の原理

今回の実験の目的は、環境放射線の中でも特にガンマ線に注目し、そのエネルギースペクトルから放射線の発生源を明らかにする方法を模索する事である。測定対象は環境放射線、もしくは、天然の放射性鉱石から放出される放射線であるため、特殊な放射線源は必要ない。この章では、測定装置の概要と、スペクトル測定の原理について説明した後で、シンチレータからの発光スペクトルについて簡単に説明する。

2-1. 実験装置の概要と測定の原理

実験装置の詳細については文献 [1] に詳しくまとめられているため、ここでは簡単な説明にとどめることにする。

今回導入した実験装置は、シンチレーション検出器、すなわち、シンチレータと光電子増倍管を直結したものである (図1)。一般に、放射線が物質に入射すると、その電離作用によってイオン対や分子の励起が発生し、放射線はエネルギーを失う。シンチレータとは、そのエネルギーが光の形で放出されるような物質で、放射線がシンチレータに飛び込むと、放射線がシ

¹ 一方、化石燃料の枯渇に関しては当面心配ないという指摘もなされている。

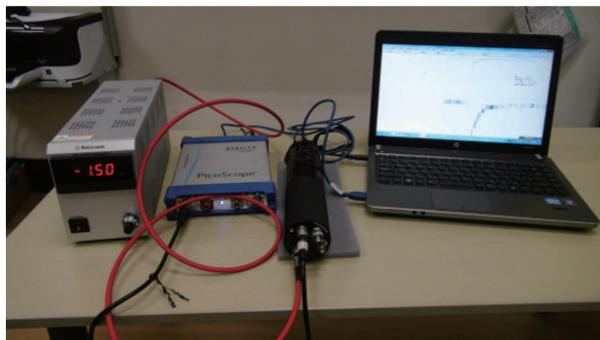


図1：実験装置の概観。左から高圧電源，デジタルオシロスコープ，シンチレータと光電子増倍管，計測用コンピュータ。

シンチレータ内で失ったエネルギーに相当する光子が発生する。従って，もし放射線が全てのエネルギーをシンチレータ内に落としたとすると，その時に発生する光子のエネルギーを測定することで入射した放射線のエネルギーを知る事ができる。今回の装置では，シンチレータをアルミ箔で覆っているため，シンチレータ内に飛び込む放射線はガンマ線のみと考えて良い。そこで，実験に使うシンチレータとして，ガンマ線の観測に適した NaI (Tl) シンチレータを選定した。

シンチレータからの発光量は微少であるため，その光量を直接観測することはせず，光電子増倍管を用いる。シンチレータ内で発生した光子が光電子増倍管の光電面に入射すると，光電効果によって電子が放出される。光電子増倍管内部では，この電子を高電圧（1 [kV]～2 [kV]）で加速して後段の電極にぶつけ，2次電子を発生させる。これを次々に起こす事で電子の数 10^6 ～ 10^7 倍に増幅させ，測定可能な電気パルスに変換する。光電効果では光子1個から1個の電子が発生するので，この機構によって，光電子増倍管に飛び込んだ光子の数にほぼ比例した電流が得られる。すなわち，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得られる事になる。光電子増倍管の増幅率は印可電圧の変動に強く影響されるため，今回の実験では，高電圧電源として電圧変動率の小さいものを選定した（松定プレジジョン株式会社・HJPM-2N1.5-SPLSh）。また，測定には一貫して1.5[kV]の電圧を用いた。

光電子増倍管から発生する電気信号は，デジタルオシロスコープ（Pico Technology 社・PicoScope6578）によってデジタル信号に変換される。オシロスコープはコンピュータに接続されており，得られた電圧値がリアルタイムでコンピュータの画面上に表示される。従って，シンチレーション光が光電子増倍管に飛び込む度にコンピュータ上にパルスが表示される²。上の説明から，このパルスの大きさが放射線のエネルギー（正確には今電子増倍管に飛び込んだ光子のエネルギー）に概ね比例する。そこで，あまりに小さいパルスを取り除くためにパル

² 実際にはオシロスコープの無応答時間があるため，全てのパルスを観測できる訳ではないが，実用上は問題ない [1]。

スの最大電圧に閾値を設け、その閾値を超えたパルスについて面積を計測し、パルスの面積に関する頻度分布を作成する。今回の測定では、医学部における実験に倣い、閾値として0.041 [V] を採用した。

このようにして得られた頻度分布はシンチレーション光のスペクトルに相当するが、このままでは横軸はパルスの面積である。面積とエネルギーの比例係数を知るためには、エネルギーの分かっているガンマ線のピークを測定して比較しなければならない。そこで今回は、放射線源として天然カリウムに0.0117%の割合で含まれる⁴⁰Kを用いる事にした。⁴⁰Kは、安定な³⁹Kの放射性同位体で、89%の確率で1.31[MeV]のベータ線を放出して⁴⁰Caになり、11%の確率で電子捕獲、または β^+ 崩壊によって⁴⁰Arになると同時に1.46[MeV]のガンマ線を放出する。今回の観測にかかるのはガンマ線なので、天然カリウムを測定器の近くに配置する事で1.46 [MeV]の位置にピークが得られることになる。天然カリウムを含む試料としては、プラスチック容器入りの塩化カリウム試薬(500g)を用いた。今、⁴⁰Kによって発生するピークの位置を A_K とすると、パルスの面積とエネルギー E の関係は、

$$E = \frac{A}{A_K} \times 1.46 [\text{MeV}], \quad (1)$$

のように評価できると期待される。これによって、同じ条件下で測定される他のガンマ線のエネルギーを測定し、その発生源を特定する事ができる。以上が、実験原理の概要である。

2-2. シンチレータによって得られるスペクトル

原子核から放出されるガンマ線は原子核の状態間の遷移によって生じるため、原子核のエネルギー固有値の差に相当する単一エネルギーを持つ。ところが、そのようなガンマ線がシンチレータに入射したとしても、シンチレータ内で起こる反応に複数の種類があるために、生じる蛍光のスペクトルは単純な線スペクトルにはならず、それぞれの反応によって生じるスペクトルの重ね合わせになる [2]。

光電ピーク

エネルギー E を持ったガンマ線が光電効果によって検出器の構成原子の電子をはじき出したとする。このとき、その電子の結合エネルギーを I ($\ll E$) とすると、光電子の持つ運動エネルギーは $E - I$ で与えられる。光電子はシンチレータ内で蛍光を発生させながらエネルギーを失い、シンチレータ内で止まったと仮定すれば、同じエネルギー量 ($E - I$) の蛍光を発する。一方、光電効果によって空席になった軌道には直ちに外殻から電子が遷移し、エネルギー I にほぼ等しい特性X線が発生する。この特性X線はエネルギーが低いために光電効果を起こしやすく、さらに光電子を発生させる。この光電子はシンチレータ内で再び吸収され、エネルギー I 程度の蛍光を発する。従って、この一連で発生するパルスはトータルで $(E - I) + I = E$ 程度のエネルギーを持つ事になり、エネルギーがほぼ E の位置にピークを発生させる。このピークは、入射したガンマ線のエネルギーが全て吸収されることによって生じるピークで、

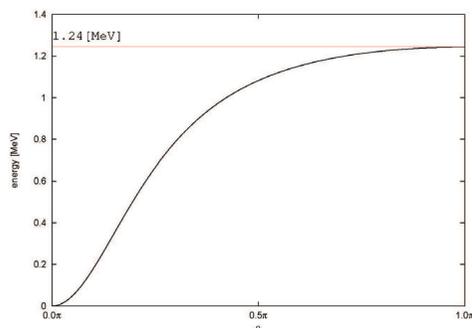


図2：エネルギー1.46[MeV] のガンマ線によってコンプトン散乱された電子のエネルギー

「光電ピーク」と呼ばれる。

コンプトンエッジ

入射したガンマ線の一部はシンチレータを構成する原子の軌道電子とコンプトン散乱を起こし、エネルギーの一部を電子に渡す。入射したガンマ線のエネルギーを E とすると、コンプトン散乱によって生じる反跳電子のエネルギー $E_r(\theta)$ は、

$$E_r(\theta) = E \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{E}{m_0 c^2} (1 - \cos\theta)} \right), \quad (2)$$

で与えられる。ただし、 m_0 は電子の質量、 c は光速、 θ は散乱角を表す。 $E = 1.46[\text{MeV}]$ とした時の E_r の振る舞いを図2に挙げる。ここから、反跳電子のエネルギーは $\theta = 180^\circ$ で最大値 $E_{r \max} = 2E^2 / (2E + 0.51) [\text{MeV}]$ をもち、 $E = 0 \sim E_{r \max}$ まで連続に分布する事がわかる。この効果によって、同じエネルギー領域に連続スペクトルが現れる事になる。特に、この連続スペクトルの最大値 ($E = E_{r \max}$) を「コンプトンエッジ」と呼ぶ。 $E = 1.46[\text{MeV}]$ の時には、 $E_{r \max} = 1.24[\text{MeV}]$ のところにコンプトンエッジが現れる。

電子対ピーク

ガンマ線のエネルギーが電子の質量の2倍 ($1.02[\text{MeV}]$) を超えると、電子と陽電子が対生成される。生成された電子・陽電子の合計の運動エネルギーは、ガンマ線のエネルギーから電子2個分の静止エネルギーを引いたものなので、 $E - 1.02[\text{MeV}]$ で与えられる。この運動エネルギーが両方とも光電吸収によってシンチレータ内で失われると、 $E - 1.02[\text{MeV}]$ のところにピークが現れる。

一方、発生した陽電子は、エネルギーが低下すると近くの電子と対消滅を起こし、エネルギー $0.51[\text{MeV}]$ のガンマ線を2本放出する。もし、このガンマ線が両方とも光電吸収されると、結果として全てのガンマ線のエネルギーが失われて、エネルギー E の位置にピークが生じる。(光電ピークと重なる。) また、片方のガンマ線のみが光電吸収され、もう1本のガンマ線がシンチレータ外に逃れたとすると、エネルギー $(E - 1.02) + 0.51 = E - 0.51[\text{MeV}]$ の位置に

ピークが現れる。そして、発生したガンマ線が2本とも外に逃れた場合には、 $E - 1.02[\text{MeV}]$ の位置にピークが現れることになる。

まとめると、 $E = 1.02[\text{MeV}]$ を超えるエネルギーのガンマ線が入射すると、電子・陽電子の対生成に伴って、 $E[\text{MeV}]$, $E - 0.51[\text{MeV}]$, $E - 1.02[\text{MeV}]$ の位置にピークが生じる。

その他のスペクトル

シンチレータに飛び込むガンマ線の中には、周囲の物質によって散乱されたものも含まれているおり、そのようなガンマ線は連続スペクトルを形成する³。また、シンチレータ内で生じた発光の一部しか光電子増倍管に入らなかった場合には、実際よりも小さい値のエネルギーが観測され、これも連続スペクトルを形成する。その他、放射性物質が近くにある場合には、ベータ線が静止するときに生じる制動X線も連続スペクトルの原因になり得る。また、入射する放射線に複数のエネルギーがある場合には、蛍光が同時に発生して、両方のエネルギーの和に相当する位置にピークが現れることがある。このピークは「サムピーク」と呼ばれ、ダミーピークの一つである。このように、スペクトルの低エネルギー側には様々な要因から生じるピークや連続スペクトルが現れる。

3. 環境ガンマ線のスペクトル

図3の左側は、シンチレータ単独で測定した場合（背景）と、KCl 試薬500g を近接させた場合のスペクトルを比較したものである。光電子増倍管の電圧は1.5[kV] を用いた。カウント数は、測定時間で割る事によって1秒間当たりの平均カウント数に規格化されている。背景の測定は1422秒、KCl 試薬を近接させた時の測定は1156秒で行われた。すぐに分かる通り、 $A = 86.2$ の位置にあるピークが大きく変化している。このことから、このピークが ^{40}K から放出されるガンマ線による光電ピークである事が推定される。従って、(1)において $A_K = 86.2$ となり、面積とエネルギーの対応は

$$E = \frac{A}{86.2} \times 1.46[\text{MeV}], \quad (3)$$

と見積もられる。またこの図には、 ^{40}K から生じるガンマ線の光電ピークの他に、コンプトンエッジが見られる他、他の放射性元素からのガンマ線と思われる小さなピークがいくつか観測される。低エネルギー側（面積<25）でエネルギーが急激に落ちているのはパルスの面積に閾値を設けているからであり、この地点に特別なピークが観測されているわけではない。

図3の右側は、(3)式に基づいて換算されたエネルギースペクトルである。代表的な環境放射線源である ^{40}K , ^{214}Bi , ^{208}Tl からの主なガンマ線スペクトルも同時に描いてある [3]。すぐに分かる通り、スペクトルに現れているピークが、代表的な環境放射線源のガンマ線スペ

³ 180度の後方散乱が多くあるような状況では、 $E - E_{r \max}$ の位置にピークが現れる。

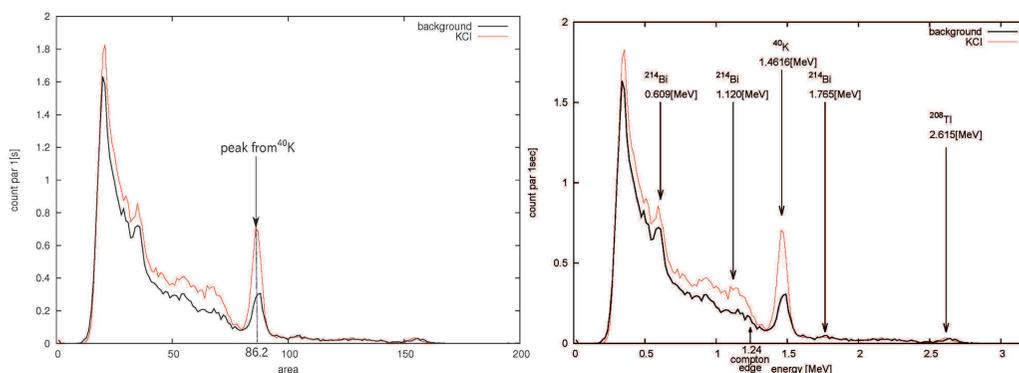


図 3：シンチレータ単独で測定した場合（背景）と、KCl 試薬500g を近接させた場合の比較。左は横軸がパルスの面積、右は横軸を（3）式に基づいてエネルギーに換算したもの。矢印で示されているのは、代表的な環境放射線源である ^{40}K 、 ^{214}Bi 、 ^{208}Tl からの主なガンマ線スペクトル [3]。

クトルと一致している。また、 ^{40}K から生じる1.46[MeV] のガンマ線に対応するコンプトンエッジ (1.24[MeV]) もほぼ正しい位置に現れている。このことから、換算式 (3) は、少なくともこのエネルギーレンジでは正しく機能していることが分かる。 ^{40}K からのガンマ線は1.02[MeV] を超えているので、光電ピークも同時に見られるはずだが、これらは連続スペクトルの中に埋もれてしまっている。

最後に一つ注意点を述べる。前章で注意したように、光電子増倍管の増幅率は印可する電圧に強く依存するため、(3) を用いる事ができるのは1.5[kV] の電圧を用いたときのみである。従って、2つ以上のスペクトルを比較する時には同じ電圧値使って測定を行わなければならない。そして、他の電圧値を用いる時には改めて比例係数を測定し直す必要がある。

4. 天然放射性鉱物から生じる放射線のスペクトル

環境放射線の測定の応用として、天然放射性鉱石から生じる放射線のスペクトルを測定したので、この章ではその結果について報告する。

今回測定用いた鉱石はユークセン石 (Euxenite) である (図 4)。ユークセン石の化学成分は $(\text{Y,Ca})(\text{Nb,Ti})_2\text{O}_6$ であるが、ウラン、及びトリウムを含み、天然鉱石としては比較的強い放射線を放出する。従って、ユークセン石を検出器に近接させてスペクトル測定を行うと、ウラン系列、トリウム系列の放射線元素から生じるガンマ線が観測されると期待される。ウラン系列とトリウム系列の中で、0.5[MeV] 以上の領域に比較的強いガンマ線を発するのは、それぞれ ^{214}Bi (0.609[MeV], 0.727[MeV], 1.120[MeV], 1.765[MeV])、及び、 ^{228}Ac (0.911[MeV])、 ^{208}Tl (2.615[MeV]) である。ただし、括弧の中はその原子核から生じるガンマ線の中で比

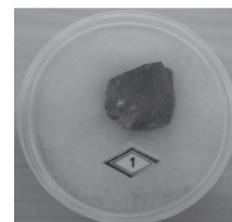


図 4：ユークセン石

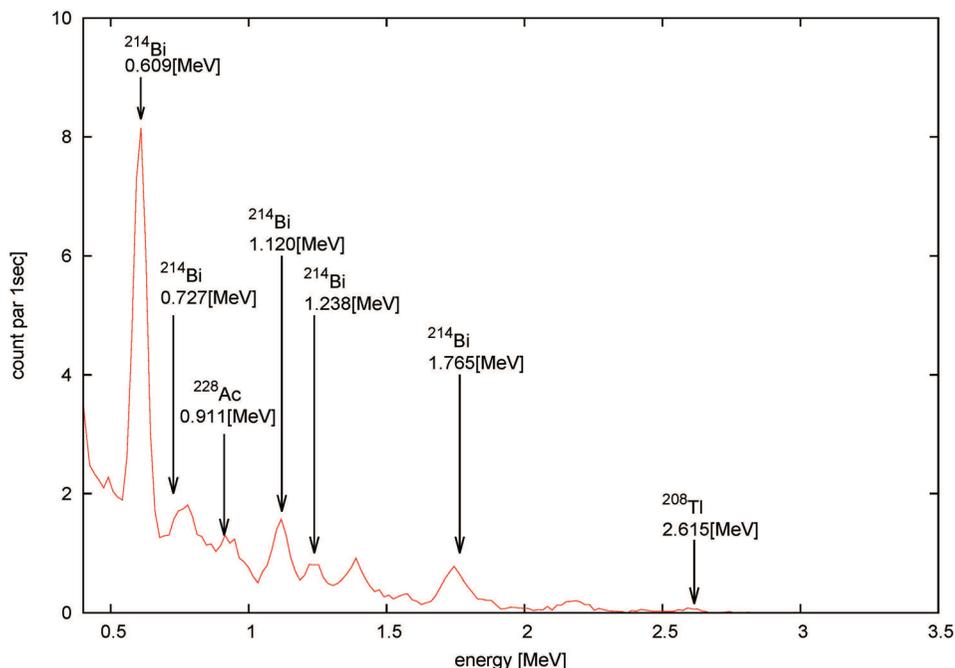


図5：ユークセン石から発生する放射線のスペクトルから背景のスペクトルを引いたもの。強度は1秒当たりの量に規格化されている。

較的強度の強いものを表している [3]⁴。

ユークセン石を検出器に近接させて得られたスペクトルと、これらのガンマ線のエネルギーを同時に描いたのが図5である。ただし、このスペクトルは背景のスペクトルを引いてあるため、ほぼユークセン石からのガンマ線スペクトルと考えて差し支えない。これを見ると、予想された位置にピークが現れていることが分かる。特に、背景に比べて ^{214}Bi のスペクトルが強く出ているのが特徴である。このことから、このエネルギースペクトルの評価方法が正しく機能していることが分かる。

その一方で、予想とは違う位置に現れているピークも存在する。これらの由来は现阶段では明らかではないが、別の放射性元素からのガンマ線の可能性の他に、ダミーピークの可能性もある。その見極めは将来の検討課題である。

5. 将来の課題

最初に述べたように、今回行った測定は、将来、文系学生向けの放射線測定実験を開発するための予備的な実験である。この実験によって、環境放射線のエネルギースペクトルが定量的

⁴ 地上に存在する環境放射線源は主にウラン系列とトリウム系列の元素なので、前章で挙げた元素と一致するのは当然である。

にも正しく求められることが確認出来たため、実験開発にとっては重要な一步と言える。しかし、未だに問題は多い。仮に今回の実験をそのまま行っただとすると、測定そのものはブラックボックスになってしまっているため、教育効果は心もとない。測定原理だけでなく、放射線の種類や半減期といった放射線に関する基本的な事項を理解したり、放射線が引き起こす反応をより直感的に理解できるような原始的な実験・実習を組み合わせる必要があると思われる。また、放射線の存在を自分の目で確かめるために、霧箱のような装置を取り入れる必要もあるだろう。どのような実験がより良い理解に繋がるのかを模索するのが将来的な課題である。

謝辞

数多くの有用な助言をしていただいた慶應義塾大学医学部の寺沢和洋氏、自作の測定用ソフトウェアを快く使わせていただいた同三井隆久氏、放射性鉱物を貸していただいた慶應義塾大学文学部の大場茂氏に感謝いたします。ここで報告した装置は、慶應義塾大学調整予算（平成23年度）からの助成金と文部科学省「大学教育・学生支援推進事業大学教育推進プログラム」からの支援を用いて開発・導入しました。

参考文献

- [1] “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，慶應義塾大学日吉紀要 自然科学 No.50。
- [2] “Q&A 放射線物理”，大塚徳勝・西谷源展，共立出版。
- [3] The Isotopes Project, Lawrence Berkeley National Laboratory, <http://ie.lbl.gov/>