

RI・放射線 一般向け教育実験ノート

社団法人 日本アイソトープ協会 理工学部会
「RI・放射線 一般向け教育実験ノート」ワーキンググループ

「RI・放射線 一般向け教育実験ノート」の合本に当たって

日本アイソトープ協会理工学部会では、「RI・放射線 一般向け教育実験ノート」を企画し、“Isotope News”に23回(2006年4月～2008年12月)にわたって連載した。今回、これを合本して利用しやすくすることになった。

この連載の趣旨は、「連載開始に当たって」で述べたように、ラジオアイソトープ(RI)・放射線に関する事柄を、小・中・高校生や大学生、あるいは一般の方に理解して頂くため、比較的容易にできる実験的手法を示すことである。実験そのものは、指導者のもとで生徒等が直接行うものでも、また指導者がデモンストレーションで行う実験ないしシミュレーションであってもよい。この連載の読者は生徒や一般の方ではなく、実験の指導者を想定している。

RIや放射線は、産業や医療等を通じ、我々の生活に直接関連して大いに利用されているが、一般の方の認知度は低い。出張講義等を通じて、多くの方が、このような状況の改善に取り組み、講義や実験に工夫・改善がなされている。それらの情報を開示して頂いて、より多くの方に活用して頂くことが本連載のねらいである。

多くの執筆者の方に、目的に沿った内容の手法をご開示頂いた。そのまま利用するにはやや困難なテーマもあるが、指導者の方によって工夫が加えられ、少しでも活用して頂くことになれば幸いである。また、これを機に、新しいテーマを提示して頂ければ、再びご開示をお願いすることになるかもしれない。

小・中学校の学習指導要領において、中学理科では1977年から「放射線」が扱われなくなっていたが、2008年7月の改訂では、約30年ぶりに「放射線の性質と利用についても触れる」ことになった。本連載はこの改訂よりも2年以上前から始めたことではあるが、今回の合本がこうした状況に対してもいくらかでもお役に立てれば幸いである。

連載と合本に際して、執筆者と日本アイソトープ協会理工学部会およびIsotope News編集委員会の方々のご協力に深く感謝申し上げます。

2009年2月

(社)日本アイソトープ協会理工学部会[†]
RI・放射線 一般向け教育実験ノート
ワーキンググループ代表 森 千鶴夫

[†] Physical Science and Industry Committee,
Japan Radioisotope Association

目 次

- 序文 「R I・放射線 一般向け教育実験ノート」の連載開始に当たって
..... (No.624, 30, Apr. 2006)
森 千鶴夫、白川芳幸、藤浪真紀
(社) 日本アイソトープ協会 理工学部会
「R I・放射線 一般向け教育実験ノート」ワーキンググループ
- 1 手作り霧箱で α 線の飛跡を観察しよう! (No.624, 31-34, Apr. 2006)
油井多丸 国際医療福祉大学
- 2 ガラス容器で霧箱を作ろう (No.625, 23-27, May 2006)
戸田一郎 北陸電力エネルギー科学館
- 3 演示実験用卓上型霧箱 (No.626, 25-28, Jun. 2006)
戸田一郎 北陸電力エネルギー科学館
- 4 拡散型霧箱における霧滴の成長について (No.627, 25-29, Jul. 2006)
森 千鶴夫、白川芳幸、藤浪真紀
(社) 日本アイソトープ協会 理工学部会
「R I・放射線 一般向け教育実験ノート」ワーキンググループ
- 5 紙筒で高感度ガイガー計数管を作ろう! (No.628, 15-18, Aug. 2006)
三門正吾 千葉県立柏高等学校
- 6 紙筒ガイガー計数管を用いた放射線の測定 (No.629, 31-34, Sep. 2006)
三門正吾 千葉県立柏高等学校
- 7 宇宙線を目で見る装置「スパークチェンバー」
..... (No.630, 21-26, Oct. 2006)
柴田徳思 (独) 日本原子力研究開発機構
- 8 簡易放射線測定器「はかるくん」とその活用
..... (No.631, 29-32, Nov. 2006)
石沢昌登 (財) 放射線計測協会
- 9 高校生のための放射線実習セミナー (No.632, 27-30, Dec. 2006)
岡元博志 (財) 日本原子力文化振興財団
- 10 セミナー「放射線ウォッチング」—GM カウンターキットの組立てと実験—
..... (No.633, 33-36, Jan. 2007)
渡邊 鏝 名古屋大学名誉教授
- 11 手作り箔検電器と放射線の測定 (No.634, 17-22, Feb. 2007)
森 千鶴夫 愛知工業大学

- 12 サーバイメータの適切な使用のための応答実験
 (No.635, 19-24, Mar. 2007)
 白川芳幸 (独) 放射線医学総合研究所
- 13 紙筒ガイガー管の性能の検討 (No.636, 25-28, Apr. 2007)
 三門正吾 千葉県立柏高等学校
- 14 イメージングプレートを用いた実習実験 (No.637, 25-30, May 2007)
 小林勝利 元 (独) 日本原子力研究開発機構
- 15 高線量の照射装置を用いたガラスの着色 (No.647, 31-34, Mar. 2008)
 坂内忠明 (独) 放射線医学総合研究所
- 16 放射線が固体中に作る飛跡の観察 (No.648, 33-38, Apr. 2008)
 鶴田隆雄 近畿大学原子力研究所
- 17 ガイスター管放電によるオーロラの模擬 (No.649, 29-34, May 2008)
 森 千鶴夫 愛知工業大学、緒方良至 名古屋大学医学部、佐久間 洋一 核融合科学研究所
- 18 ガイスター管とイメージングプレートを利用した簡易X線透過像撮影
 (No.651, 25-30, Jul. 2008)
 森 千鶴夫 愛知工業大学、緒方良至 名古屋大学医学部、佐久間 洋一 核融合科学研究所
- 19 放射線教育導入のためのデモンストレーション実験(1) —放射線防護の三原則—
 (No.652, 39-42, Aug. 2008)
 白川芳幸 (独) 放射線医学総合研究所
- 20 EGS コードと飛跡表示プログラムを用いた放射線教育教材(1) —高校生向け教材—
 (No.653, 31-35, Sep. 2008)
 波戸芳仁、萩原雅之、平山英夫 高エネルギー加速器研究機構
- 21 EGS コードと飛跡表示プログラムを用いた放射線教育教材(2) —大学生向け教材—
 (No.654, 31-37, Oct. 2008)
 波戸芳仁、萩原雅之、平山英夫 高エネルギー加速器研究機構
- 22 水分の動きを中性子で可視化 —DVD 動画集—
 (No.655, 31-36, Nov. 2008)
 持木幸一 武蔵工業大学
- 23 放射線教育導入のためのデモンストレーション実験(2)
 —汚染サーベイに関するシミュレーションプログラムによる検討—
 (No.656, 33-39, Dec. 2008)
 白川芳幸 (独) 放射線医学総合研究所

注：() 内は、Isotope News 掲載号等を示す。

「RI・放射線 一般向け 教育実験ノート」 の連載開始に当たって

生徒・学生や専門外の方たちを対象とした、RI・放射線等に関する教育的実験についての情報を集め、本誌に毎月2~6ページ程度の記事を掲載することを、当協会の理工学部会で計画した。誰でも比較的容易にできる実験手法を示すことによって、様々な理科教育の現場で、あるいはデモンストレーションの場で、このような実験を多く取り入れていただくことを期待し、結果として、RI・放射線関係者以外の方たちにRI・放射線に対する理解、ひいては自然現象に対する理解を深めていただくことに寄与できるものと考えている。

我が国は原子力・放射線に関する学校教育があまり十分でないこともあり、外部からの講演やデモンストレーション実験などによって補う努力がなされている。その甲斐もあって、RI・放射線関係の教育的実験の手法は随分と工夫され、その努力や成果には敬服するところが多い。しかし、そのような新しい工夫やその成果が必ずしも広く理解され、活用されているとは限らない。したがって標記のような記事を紹介することで、実験者側の相互の理解や活用に役立つのみならず、新しい実験者の出現が期待できる、記事内容に関する意見交換が実験内容をより深め、さらに新しい実験を生み出す、などの効果が考えられる。また、場合によっては日本における事柄にとどまらず、諸外国との情報のやりとりにも広がることになればより一層の効果が期待できる。

記事内容としては、前述したように、誰にでも比較的容易にできる内容で、やや大人数の前でデモンストレーション的に行う実験、あるいは1人1人が、または数人で行う実験であってもよい。

内容の分類としては次のように考えている。

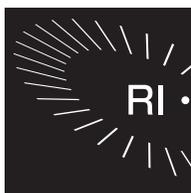
①RI・放射線を用いた手軽な教育的実験。この中

には、拡散霧箱、GM管などがあるが、特に霧箱は様々なバージョンがある。また、研修生のための導入実験、研修実験などの中にも適当な実験がある。パソコンなどの活用も魅力がある。

- ②教育的実験に役立つ放射線源。ここでは特に自然放射線源を考えている。
- ③大学・研究所が保有するやや大型の放射線関連機器を使った教育的実験。例えばスパークチェンバ、レーザー、加速器、大型放射線測定器、イメージングプレート読取機、などである。
- ④RI・放射線の教育的実験の内容をより明確に理解することに役立つ周辺の物理・化学・生物学的な教育的実験。
- ⑤放射線による自然現象に関連した事柄。例えば、オーロラ、岩石の自然着色・蛍光、飛跡、など。

基本的には、本シリーズは担当のワーキンググループから、適切な方々に執筆依頼をした記事を主とする。記事内容はワーキンググループで検討させていただくが、確認実験は行わない。したがって、内容は原則として執筆者の責任とする。また、本ノートは頁数の関係から、完全な実験マニュアルとはいえない。しかし、読者からの記事に関するいろいろな問合せやご意見や、関連したアイデア、あるいは他の実験の提案、などが寄せられることを大いに期待しており、これらはワーキンググループで、誠意前向きに検討させていただく予定である。必要であれば、読者と執筆者との交流の場を設けることも考えている。本欄を含めて意見交換の場になれば幸いである。

(本連載担当ワーキンググループ：
森千鶴夫，白川芳幸，藤浪真紀)



手作り霧箱で α 線の飛跡を観察しよう！

油井多丸

1. はじめに

本稿では、キット化された手作り霧箱の組み立てと、それをを用いた実験について説明する。

最初にこの霧箱の由来について簡単に述べる。日本原子力研究所*のラジオアイソトープスクール (RIS) において故山崎文男先生が、当時の所員に「研修生に簡単な霧箱で放射線を見せたらいかかが」と提案されたのが始まりである。「アマチュア科学者」¹⁾ (白揚社) と、浜田達二先生などのご意見をもとに、手作りの拡散型霧箱を作製し、RIS の所内公開日に展示していた。一方、同・原子炉研修部門では(株)鳥津製作所製のエチレングリコール式霧箱を多数揃え、いくつかのコースの研修課目に用いている。担当講師は、最初は末武雅晴氏で現在は霧箱メールで著名な武田常夫氏である。

チェルノブイリ事故以降、一般の方々に放射線を理解していただくため、RIS でも北海道から沖縄に至る高校、教育センターなどで手作り霧箱を紹介していたが、研修参加者の人数分の素材を毎回集めて加工することが次第に困難になった。そこで元教官の鳥敬二郎氏、故杉暉夫氏のご尽力によりキット化がなされた。

キット化の要点は次の3点であった。

①雑イオン除去用の電源を不要とする、②自然の放射線源を用いる、③授業で使えるよう60分で終わる、などである。①に関しては、霧箱用の容器に塩ビなどのように帯電列からみて容器表面がマイナス側になりやすい材質を用いた場合には雑イオン除去用の電源が欠かせないよう、ポリプロピレン樹脂などプラス側に寄る材質を用いることでほぼ解決した。②の線源としては、当初は²¹⁰Poを用いていたが、試行錯誤の末に、ザイール産の閃ウラン鉱石を適当に崩し、針金の先端にほんの少し接着剤(アラルダイト)を付け、崩した鉱石を、団子に黒胡麻をまぶすようにして付けた。マントルヒータ用の芯を線源にする考えは、この業務がRISから離れた頃である。③はキット化により必然的に満たされた。

現在、このキットは「簡易霧箱キット」**として放射線に関する講習会などで多く用いられている。キットを使用しなくても、同様の材料を百元ショップやホームセンターなどで揃えて自作することはもちろん可能である。

2. 霧箱キットの組立て

2.1 作り始める前に

部品はキットとして袋詰めになっているが、各部品を確認してから組立てをする。マーカーペン、ハサミ、手袋、懐中電灯と油注し(トロンガス線源用)は貸出方式での利用とする。講

* 現、独立行政法人日本原子力研究開発機構

** キットの入手先:(株)原子力エンジニアリング
(☎029 287 3636)

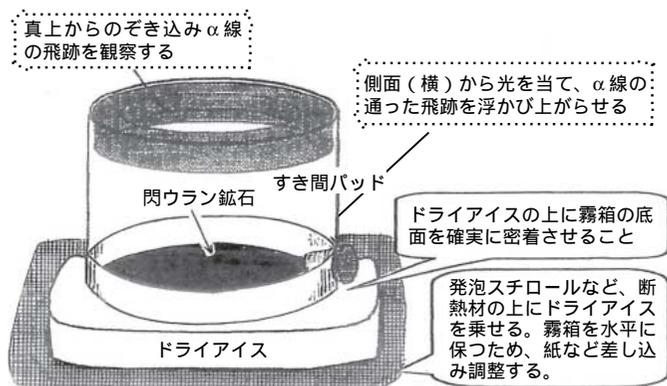


図1 簡易霧箱キットを組み立ててドライアイスの上に置いた状態



図2 簡易霧箱キットを組み立てた写真
((財)放射線利用振興協会:千田充久氏提供)

習会などでは最初に完成した霧箱を紹介する(図1及び図2参照)。

2.2 組み立て手順

図3にキットの組み立ての手順を示す。

a アルミ板を容器の開口部に当て、マーカーペンで容器にそって円を描く。描かれた円の内側を鋏で切り抜き、円板を作る。

b 容器の開口部を上にして、容器の底近くの側面にスポンジテープ(すき間パッド)を取り付ける。テープの薄紙をはがして粘着部を接着してもよいが、薄紙を付けたままでもよい。スポンジテープのほぼ真ん中にピアノ線をつけ、ピアノ線のスプリング効果で、スポンジテープを容器の側面に押し付け、テープが動かないようにする。

c 容器の開口部に、アルミ円板の黒い面を内側にしてふたをする。

d 容器とアルミ円板をアルミ粘着テープで密封するために、まず、アルミ粘着テープの薄紙をはがしながら、テープの幅の半分を容器の周囲にぐるりと接着する。

e 次に、テープ幅の残りの半分にはさみで、1 cm 間隔程度に切り込みを入れる。

f 切り込んだ1枚1枚をていねいにアルミ円板側に折り曲げて、容器とアルミ円板を完全に密着(密封)する。

g エチルアルコールを入れたポリエチレン容器の先端をはさみで切断し、容器の側面の穴からスポンジにアルコールを浸ませる。次に、容器側面の穴からシリコンゴム栓に付けている線源棒を挿入し、シリコンゴム栓でしっかりと穴をふさぐ。この際、線源棒の先端がアルミ円板から5 mm~1 cm 程度になるようにする。

2.3 作動とその原理

次に図1のように、発泡スチロールか新聞紙などの上にドライアイス置き、その上に霧箱を置く。ドライアイスは粒状でも、1~2 cmの厚さの板状でもよい。板状の場合、ドライアイスの上面が水平でなければ、発泡スチロールの下に紙などを挿入して、霧箱が水平になるようにする。部屋を暗くして、容器の横から懐中電灯で照らし、容器の上面から線源の周辺を見つめる。会場に暗幕などの設備がない場合には、小舟で海底のサザエなどを捕る時にガラス板を付けた木箱から覗き込むように、段ボール箱の中に霧箱を入れるような工夫もある。側面から照らす光源は通常の豆ランプでよいが、高輝度LEDランプがあればなおよい。周囲が暗いほど、きれいに飛跡が浮かびあがり、か細く曲がりくねった β 線の飛跡も見える場合がある。

動作原理は次のようである。容器の上面近くの常温のスポンジからアルコールが蒸発してい

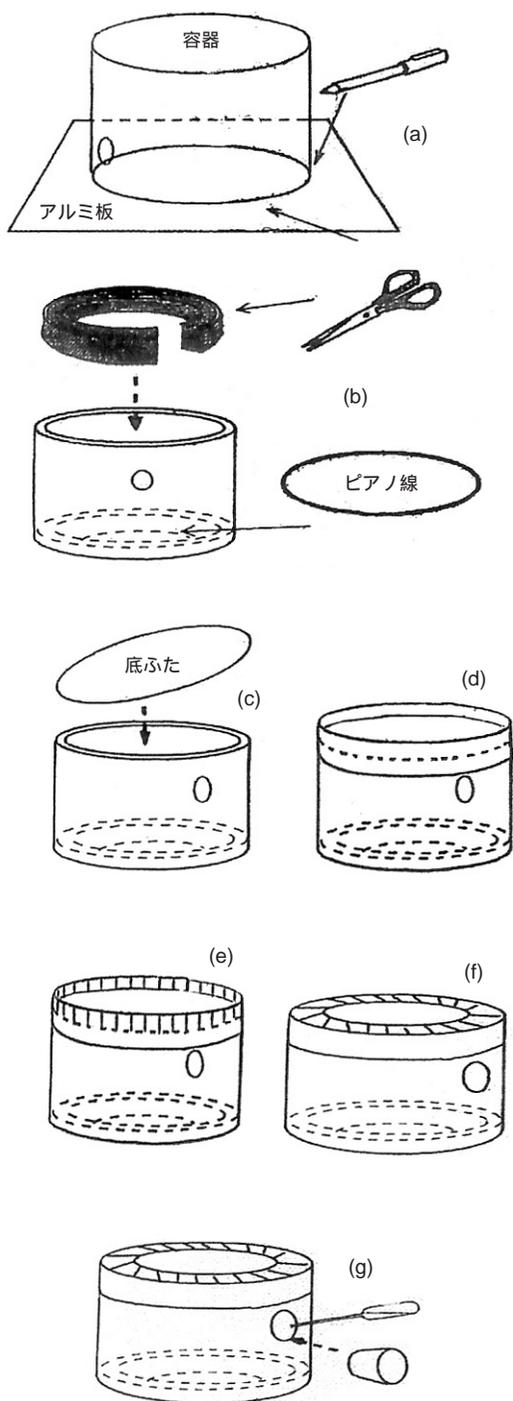


図3 簡易霧箱キットの組立て手順
手順の詳細は本文参照

る。ほぼ飽和蒸気圧になっているアルコール蒸気は、 -70 近くまで冷却された底面に移動(拡散)する。結果として、ドライアイスの上に乗せて数分後に、底面の近くの数 mm 程度の厚さに過飽和領域が生じる。 α 線が気体中にイオン対を作り、これらがアルコール分子を引きつけて、過飽和領域では小さな液体の粒々に成長する。この粒々が光を反射して α 線の飛跡が見えるようになる。シリコンゴム栓を動かして、線源の位置を変えれば、飛跡の出来具合から過飽和領域の厚さなどが分かる。線源を後述のダスト線源やトロンガス線源に変えてみると面白い。

2.4 飛跡が見えない場合の措置

底面とドライアイスの接触がよいか、アルコールを入れ忘れていないか、線源の先端がアルコールで濡れていないか、アルミ粘着テープによる密封性が悪く底面付近で空気が通っていないか、などに注意する。予備の線源があれば交換してみるとか、プラスチック製の物指しなどを布でこすり容器の外側につけて静電場で雑イオンの除去を試みるとかするのもよい。

3. ダスト線源, トロンガス線源の作り方

3.1 ダスト線源

スタップレックス製ダストサンプラーという集塵機で室内の空気中の微細な塵を直径 11 cm のろ紙 (HE 40 T) に集める。集塵は 20 分~1 時間程度でよい。電気掃除機のホースの開口部、黒板消し用電気クリーナーなどに網を張り、コーヒー用ろ紙などをかぶせて集塵するのも一案である。ろ紙の両面を受講者に見せて集塵側の汚れ具合を納得してもらおう。GM カウンターがある場合には音や数値で示す。自然放射線強度の 2 倍程度なら上出来である。ろ紙を幅 1 cm 弱の短冊に切る。当初、短冊は竹串で挟んだが、竹を串割りにするのに手間がかかるので、富山の戸田一郎先生がクリップを提言され、以後この方法を踏襲している(図 4 参照)。

短冊の面を垂直になるように装着する。この

ダスト線源は、ラドン²²²Rnの娘核種の²¹⁸Po（半減期約3分）から放出される α 線、及び孫核種の²¹⁴Pb（半減期約27分）、²¹⁴Biを経て²¹⁴Poから放出される α 線であるため、実質的な半減期は²¹⁴Pbの半減期で決まる。

3.2 トロンガス線源

小さな油差しの中に、アウトドアー用マントルヒータの芯を入れておく。ただし、最近トリウムを含まないマントルヒータがあるが、これは使えない。短冊紙付きのクリップをシリコン栓から外し、シリコン栓で霧箱の線源挿入穴をしっかりと閉める。次に、その栓を手早くそっと開き、そこに芯を入れた小さな油差しのキャップを取り外し、先端を少し差し込み、軽く油差し内の空気を霧箱に送り込み、すぐに栓で穴を閉じる。霧箱内は1~2分の間、白い霧の状態になるが、やがて霧が消え過飽和領域が回復して、 α 線の飛跡があちらこちらに見られる。数分間、 α 線の飛跡を注意深く観察してもらう。この線源はトロン²²⁰Rn（半減期約1分）からの α 線である。1か所から2本の飛跡が松葉状に観測できる場合もある（図5参照）。これは²²⁰Rnからの α 線の放出に続いて、娘核種²¹⁶Po（半減期約0.1秒）がすぐに α 線を出すためである。しかし、過飽和領域が狭いため、観測されるのはごく一部分である。

4. この霧箱で得られる情報

α 線の飛跡は、閃ウラン鉱石は鉱石部分から、ダスト線源はダストの付いている面から、トロン線源はいろいろな場所から発生していること、 α 線はまっすぐに進むことなどが分かり、飛跡の長さから α 線のエネルギーが分かる。飛跡の現われ方は時間的にアトランダムであることが分かる。また、鉱石や空気中に放射

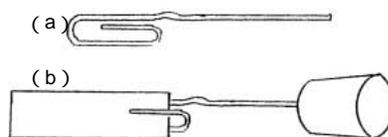


図4 ダスト線源の作製
詳細は本文参照



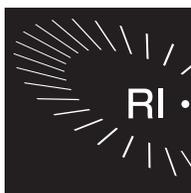
図5 松葉状に観測された α 線
((財)放射線利用振興協会: 千田充久氏提供)

性物質があることが分かる。蒸気圧、飽和蒸気圧、過飽和蒸気圧の理解にも有用である。

参考文献

- 1) G.L. ストング編, 村山信彦訳: アマチュア科学者, 白揚社 (1963)
- 2) 三浦功, 他著: 放射線計測学, 裳華房 (1960)
- 3) A. Langsdorf: *Rev. Sci. Instrum.*, **10**, 91 (1939)
- 4) 武田常夫: 手作り簡易型霧箱キット 組み立てマニュアル兼指導者マニュアル (1997)
- 5) 後藤道夫: ドライアイス使用の拡散型霧箱, *Isotope News*, No.287, 17 (1978)
- 6) YAHOO: 「拡散型霧箱」で検索
www.jsf.or.jp/sln/fog/31.html
www.3.tokai.jaeri.go.jp/nutec/CTZBK/CCKA.htm
- 7) Google: 「Cloud Chamber」で検索

(国際医療福祉大学 E-mail aburai@tc.at.ne.jp)



ガラス容器で霧箱を作ろう

戸田 一郎

Imagination is more important than knowledge .
—A. Einstein

1. はじめに

かつて私が高校の物理教師をしていたとき、多くの生徒は「放射線とは原子爆弾や原子力発電所から出るもの」「放射線はすべて危険なもの」、言いかえれば「放射線とはすべて人工的に作り出される危険な現象」と考える傾向があった。このことから私は「最も身近な“自然放射線”の存在を教えずして放射線教育はあり得ないのではないか」と考えるようになった。

「自然放射線とはどのようなものか？」をまず自分で調べてみようと考え、昭和60年3月、富山から九州までの修学旅行にGMサーベイメータを持参し、その全行程の自然放射線量を測定した。

出発の日の朝、勤務校（富山第一高校）の物理室内での測定から始まり、北陸自動車道を通って原子力発電所の多い敦賀を抜け、大阪南港から瀬戸内海をフェリーに乗って広島沖を通過し、九州に渡って別府（噴出泉）、八丁原（地熱発電所）、阿蘇山（火山）、有明海（海上）、長崎（被爆地）、佐世保（当時、原子力空母エンタープライズの入港で紛糾していた）の各地点や、長崎～大阪間の飛行機内では離陸から着陸まで連続して測定した。

この修学旅行の自然放射線測定地は科学的に見ても変化に富み、また一般に「放射線量が多い」と誤解されやすい場所を多く含んでいる。

生徒124名に対する帰校後のアンケートで「修学旅行コースの中で自然放射線量に変化があるとすれば、多いと思う場所はどこか？」の質問に対し、第1位から3位は「長崎 敦賀 佐世保」、放射線量の少ないと思う場所」の第1位から3位は「富山 飛行機内 船内」であった。

生徒が「多いと思う場所」の測定値は決して多いわけではなかった。しかし生徒たちの考え方には、風評などによる誤解がいかに大きいかをあらためて考えさせられた。一方、「少ない場所」は「空気がきれいな場所」であると考えており、富山は特に「田舎だから…」という理由であることに驚いた¹⁾。

しかし、このような考え方は広く一般にも共通して見られるものであることをその後、多くの機会 で知った。

私は、放射線を正しく理解させるためには測定器の数値だけではなく放射線の飛跡を実際に見て考えさせる教育が重要であり、特に自然放射線の存在を教えることは放射線に対する誤解や拒否反応を取り除く上で大きな効果があり、またエネルギーや環境教育の上で大事なことであると思うようになった。

2. 断熱膨張型霧箱を使って

当時、学校には観察槽の直径が12 cm、深さが2 cmほどの断熱膨張型の霧箱があった。観察槽底部のフェルトをアルコールで湿らせ、待ち針の頭に接着してある放射線源を観察槽の側面から内部に差し込み、側面のグリップを回して装置の下方にあるカムを回転させ、カムに連動したピストンの上下動で観察槽内部の空気を圧縮・膨張させる仕組みである(図1)。

授業のときは生徒を2人ずつ教卓に呼ぶ。2人はお互いの顔が触れるくらいに近寄り、息を殺して小さな霧箱を覗き込む。私は「イチッ、ニッ、サン!」の合図とともにカムを回してピストンをガタッと下げて断熱膨張を起す。その一瞬、2~3本の α 線の飛跡が待ち針の頭付近からかすかに見える。

見分け難いこれらの飛跡を見逃す生徒も多く「先生、もう1回!」「お願い、もう1回だけ見せて!」と見えるまで何度も霧箱を操作して欲しいと真剣に頼んでくる。授業中、すべての生徒が見えるまで操作を繰り返す時間はなく、「もう、おしまい! 座席に戻りなさい。次の2人、前に来て...」と言わなければならない。

残念そうに席に戻る生徒の後姿を見て、教師でありながら生徒の学ぶ意欲を満足させることのできない自分が責められてならなかった。



図1

「もっと授業に使いやすい霧箱はないものか」と痛切に思った。

当時、工学院大学高校の物理教師で日本物理教育学会の副会長であった後藤道夫先生がドライアイス冷却による拡散型霧箱を開発され、授業やクラブ活動で使用しておられることを知り、八王子市に先生をお訪ねして教えを請うた。このことがきっかけとなり私はその後、拡散型霧箱の開発に取り組んだ。

あれから20年、出来上がった3タイプは「科学館常設展示用霧箱」、本誌次号で記す予定の「演示実験用霧箱」と本稿で述べる「生徒実験用霧箱」である。

3. 生徒実験用拡散型霧箱を作る

3.1 装置の作り方*と観察方法

1 内径18 cm、深さ6 cmのパイレックスガラス容器の内側の、開口部から1 cmほど下に、ぐるりと一周してスポンジテープをしっかりと貼り付ける(図2)。

2 約1 kgのドライアイスの木ハンマーで細かくパウダー状に砕き、発泡スチロールで作った受け皿に少し中央部を盛り上げるように入れる(図3)。(ガラス容器の裏底が凹形であるため)

3 ガラス容器を両手で持ち、ドライアイス粉末の上に2~3回強く叩きつけるように置き、容器の裏底全体が均一にドライアイスに密着していることを確かめる(図4)。

4 スポンジテープにはたつぷりと、容器の底には少し濡れる程度にエチルアルコールをかける。アルコールが多すぎて容器の底に溜まる

* ガラス霧箱は本稿のタイトルの通り自作できるものである。しかし「ガラス容器(スポンジテープ貼付)、発泡スチロールトレイ、黒い紙(ミューズコットン)、3 mmのガラス板(^{220}Rn 注入用の小穴あり)、塩ビパイプ、 α 線源(ユークセナイト)、 ^{220}Rn 線源(注射器入り)」の一式からなるキットとしても入手でき、有限会社ラド(<http://www.kiribako-rado.co.jp>)、もしくは一般の理科教材販売会社で取り扱っている。

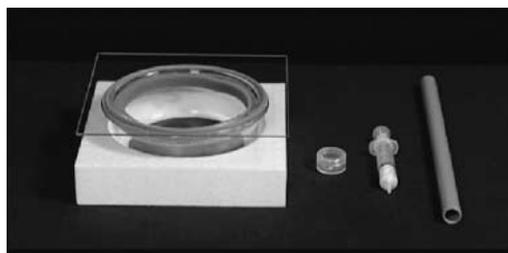


図 2



図 5

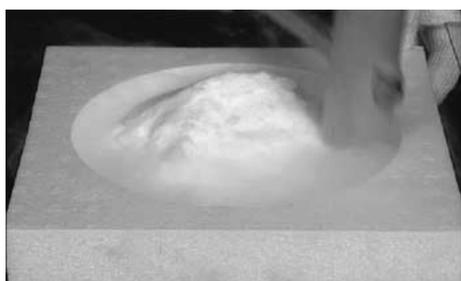


図 3

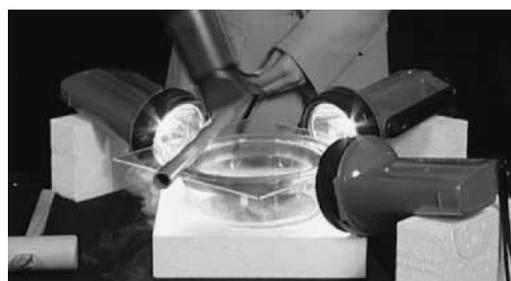


図 6



図 4



図 7

と冷却効果が落ちるので注意 (図 5)。

5 直径 15 cm の円形に切った黒い紙 (画材: ミューズコットン) をガラス容器の底に, 空気溜まりができないようにぴったりと張り付くように敷く。

6 容器の開口部を厚さ 3 mm のガラス板で蓋をするか, または料理用ラップで覆う。

7 容器の側面から懐中電灯 (4~5 個) で容器の内部を斜め下に向けて照らす。

白色 LED を 12 個使用した市販の小型ライトを数本使うと非常に明るく, 飛跡がすばらしく鮮明で, しかも電池が長持ちする。

8 直径 2 cm, 長さ 40 cm ほどの塩化ビニルパイプをティッシュペーパーでこすって静電気を起こし, ガラス板から 1 cm ほど上を水平に何度も動かして容器内部のイオンを取り除く。

観察中もこの作業を頻繁に繰り返す (図 6)。部屋を暗くし, 8 の作業を開始してから 2~3 分すると, 容器の底近くに長さ数 cm の白い飛行機雲のような α 線の飛跡が見え始める。

目が慣れてくると細い縮れ毛のような β 線の飛跡や, 容器の端から端を一直線に横切るミューオンと思われる力強い飛跡が観察できる (図 7)。

3.2 その他の観察方法

④ 「空気中の放射性物質」を捕集し、その飛跡を観察する

「捕集」にはダストサンプラーがあればよいが、ない場合は掃除機とペットボトルを組み合わせてダストサンプラーを作る。

ペットボトルを輪切りにし、飲み口側の切断面に（台所で使う）水切りネットをかぶせ、その上にサンプリングフィルターまたは濾紙を当て、飲み口部分を掃除機のホースに差し込む。



図 8

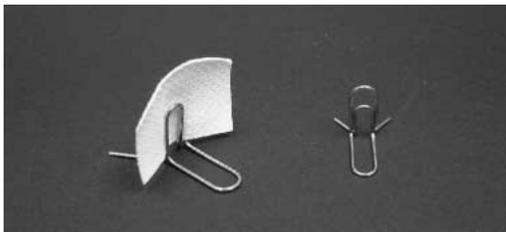


図 9



図 10

捕集中、掃除機のモーターに負担をかけないため、ペットボトルの側面に直径 5 mm 程度の穴を何個か空けるか、ボトルの断面より幾分小さい濾紙を使い、空気の取り入れ口を作る（図 8）。

換気せずに 1 日以上閉めきってあった、壁紙や塗装が施されていないむき出しのコンクリートやコンクリートブロック壁の室内（倉庫、配電室、地下駐車場など）で 1 時間ほど掃除機を運転した後、得られたフィルターを適度な大きさに切り、ゼムクリップで作ったスタンドに立てて霧箱に入れる（図 9）。

塩化ビニル（塩ビ）パイプを使って霧箱内のイオン除去を行うとフィルターから出る α 線の飛跡が観察できる。「こんなに出てもいいの？」と驚くほど多くの飛跡が見えることがある（図 10）。

④ 高い山に登って宇宙線の飛跡を観察する

去年の 8 月、ある出版社の依頼で富士山の 8 合目（3,250 m）までこの霧箱を運び、実験した。たしかに高い山ではミュオンと思われる太く、長い飛跡が平地よりも多く観察できる²⁾。

4. 生徒実験用霧箱の素材別特徴

4.1 小型プラスチック容器を使った霧箱

小型のプラスチック容器をドライアイスで冷却する霧箱はいろいろなタイプが考案されている。手軽である反面、いくつかの難点がある。

1) 霧箱容器が小さいため、自然放射線のダイナミックな飛跡を観察するのが比較的難しく、むしろ放射線源を入れて飛跡を 1 人で観察するのに適している。

2) 硬いドライアイスブロックの上に軽い霧箱容器を置くため、霧箱容器の裏底全体とドライアイスが完全に密着せず、時間が経つと霧箱容器の裏底に霜や氷が付着し、霧箱底部が 0 以下に下がりにくくなる。

3) 霧箱が小さいため、複数人間が同時に飛跡を観察できない。

4.2 ガラス容器霧箱

1) 容器が大きいと自然放射線が飛び込む確率が高く、頻りに飛跡を観察できるので教育効果が大きい。

2) 冷却効果が長時間にわたって持続・安定するため、細い β 線の飛跡もはっきり観察できる。

3) 各種の線源を出し入れすることが容易であり、応用実験の範囲が広い。

4) 1個の霧箱で数人が十分に観察できるため、多人数の実験などには最適である。

*

1kgのドライアイスを砕くことによって固形の場合よりも冷却面積を広げ、より大きな霧箱に使用できる。

パウダー状に砕いたドライアイスの上にガラス容器をしっかり叩きつけて置くことによって容器裏底とドライアイスが密着し、空気中の水分が入り込む隙間を作らないために霜や氷が付着せず、望ましい冷却温度が持続し、容器内部のアルコール気体の過飽和層が深く、安定した霧箱ができる。

しかもパイレックスガラス容器は、叩きつけても十分な丈夫さと、適度な重さも持っている。

5. 飛跡がよく見えないとき

ガラス容器霧箱で、以下の点を確認する。

☞容器内のアルコール蒸気が不足？

スポンジテープにアルコールをたっぷりかける。

容器全体が冷えすぎてアルコールが充分蒸発しないか、容器内で温度勾配ができていない場合は、容器を一度ドライアイスから離し、ヘアドライヤーなどで暖めてから再試行する。

☞容器底面の冷却不足？

底にアルコールが溜まり過ぎている場合は

容器を傾けてスポンジテープに戻す。

ドライアイスが粗い塊であるために容器の裏底に部分的にしか密着していない場合は、もう一度細かく砕き、密着をよくする。底に敷いた黒い紙の裏に空気溜りがある場合は、紙を押さえて空気を追い出す。

☞その他

容器が水平に保たれていないと飛跡が一方に流れ、安定して見えない。トレイと机の間に物を挟み、容器を水平に保つ。ライトが暗いと見えない。電池を取り替えるか、ライトの数を増やす。

光の当て方が悪いと見えない。容器の側面から斜めに底面に向けて光を当てる。容器内のイオン除去が完全でないと見えない。静電気を起した塩ビパイプを使い、頻りにイオンを取り除く。

ガラス板が曇ってきたらヘアドライヤーか、または手を置いて暖めて曇りを取る。

6. 結び

私たちは放射線のシャワーの中で生活し、放射性物質が浮遊する空気を呼吸している。この事実を理解させることから放射線教育は始まる。

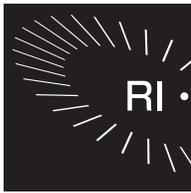
「自然放射線の飛跡が見える霧箱」を作るきっかけとなったかつての教え子たちに「これが飛跡だ。気が済むまでゆっくり見ていていいよ！」と感謝を込めて言ってやりたい思いでいっぱいである。

参考文献

- 1) 日本科学教育学会・第9回年会 1985 発表
- 2) 学研「大人の科学マガジン」Vol.09, 2005年11月, p.73

(北陸電力エネルギー科学館

E mail ▶ i toda@kiribako rado.co.jp)



演示実験用卓上型霧箱

戸田 一郎

1. 自然放射線の飛跡が乱舞する霧箱

1988年、ロンドンのサイエンスミュージアムでドイツ・フィーベ社製の大型拡散型霧箱を偶然に見る機会があった。80 cm 四方の冷却板の上で乱舞する自然放射線の飛跡に私は圧倒された。「身の回りをこんなに多くの放射線が飛び交っていることを教えずして放射線教育はあり得ない。自然放射線の存在を最も効果的に教える装置は霧箱であり、その飛跡を見せることが教育用霧箱の重要な役割である」と考えるようになった。

それ以前からプラスチックケースや名刺入れを利用したものなど、ドライアイス冷却を中心にいろいろな霧箱を作っていたが、今から思うと“自然放射線の飛跡を観察する”ためには次のような点が不十分であった。

1) 霧箱が小さい

霧箱が小さいと自然放射線の飛び込む確率が小さく、飛跡が見えない。

2) 飛跡の照明が不十分

何本もの懐中電灯を使って照明する方が、細い飛跡も鮮明に観察できる。

3) 電圧が低すぎる

霧箱内の残留イオンを除去するために掛ける電圧は、容器の上下で約 10^5 V/m が目安である。

4) 冷却温度の不安定

ドライアイスは扱いが簡単であるが、霧箱を持続的に冷却するには工夫が必要である。これらの欠点を改善したものが、今回紹介する演示実験用霧箱である。

2. 演示実験用卓上型霧箱

教師の演示実験用としてある程度の放射線実験が可能な霧箱*を作った(図1)。

観察槽の大きさは30 cm 四方、ドライアイス(25 cm×25 cm×4 cm) 1個でおおよそ数時間の冷却が可能である。蓋はヒーターガラス(導電性透明フィルムを貼った2重の板ガラス)を使用し、霧箱内の温度差を作るヒーターとして、アルコールの液滴による曇り止め、また残留イオンを除去する電極の役目も果たしている。観



図1 演示実験用卓上型霧箱

* 文中の霧箱については、有限会社ラドまたは理科教材販売会社で取り扱っている。

察槽底部のアルミ板の裏側にはおよそ 400 本のステンレスピンが打ってある。ピンがドライアイスに食い込み、アルミ板の冷却を完璧なものにしている。

2.1 観察例

この霧箱を使い、前号（本誌 5 月号）で述べた「空気中の放射性物質の捕集による飛跡観察」の他、以下の実験を行うことができる。

☞自然放射線の飛跡の観察

飛跡が鮮明であり、 β 線の細い飛跡もはっきり観察できる（図 2）。

☞線源による飛跡の特徴の観察

①プロメシウムからの β 線の飛跡（図 3）

②ラジウム線源による飛跡

α 線や β 線、あるいは γ 線によるコンプトン散乱電子と思われる飛跡が観察できる（図 4）。

☞半減期を視覚的に理解

モナザイトを少し入れたチューブを注射器の先に取り付け（あるいはキャンプ用のランタンに使うマントルを注射器のシリンダーの中に入れ）、ピストンを引いて 5ml ほどの空気を霧箱内に注入すると、 ^{220}Rn からの α 線とすぐにそれに続く ^{216}Po からの α 線による V 字形の飛跡が霧箱中に広がる。ただし、マントルによっては ThO_2 が塗布されていないものがあり、これは ^{220}Rn のガス発生には使用できない。

授業では「 ^{220}Rn から ^{216}Po へ崩壊する半減期は 55.6 秒、 ^{216}Po から ^{212}Pb へ崩壊する半減期は 0.145 秒なので飛跡が V 字形に見え、その V 字形の数はおおよそ 1 分ごとに半減していくこと」を説明する。デジタルカメラで 1 分ごとに撮影し、画像をスクリーンに投影して飛跡の数を比較することも容易である（図 5）。

☞磁場による β 線の飛跡の偏向

ネオジム磁石[†]（直径 20 mm 程度の円盤状の磁石）を霧箱に入れる。 β 線を磁石の上を通過させない場合、飛跡が真っ直ぐに飛ぶ。しか

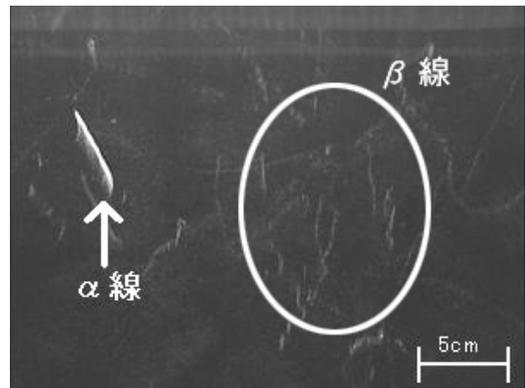


図 2 自然放射線の飛跡

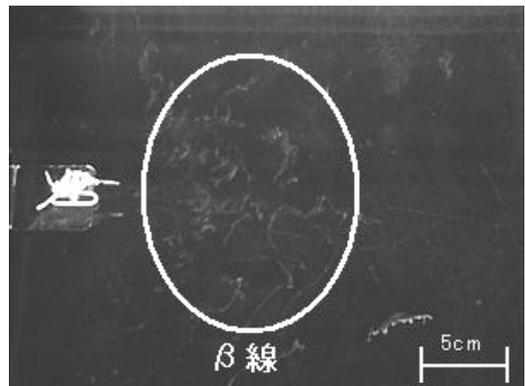


図 3 プロメシウムからの β 線

し β 線源を磁石の一端に置き、 β 線を磁場の真上を通過させると、飛跡が磁場によって偏るのが分かる。

☞光電効果、コンプトン散乱の理解

①霧箱の上に X 線管球を置き、スイッチを入れると、霧箱内が瞬時に光電子やコンプトン散乱電子などの飛跡で真っ白になる。ちなみに X 線管球の電極の正負を逆にすると、飛跡の様子から X 線の発生が極端に少ないことが分かる（図 6(a), (b)）。

②霧箱の蓋の上に燐灰ウラン鉱を置くと、そこから出る γ 線によって 2 次の散乱電子が発生し、霧箱内は多くの細かい飛跡で雪が降るように見える（図 7）。

[†] ネオジム磁石については、理科教材販売会社で入手することができる。

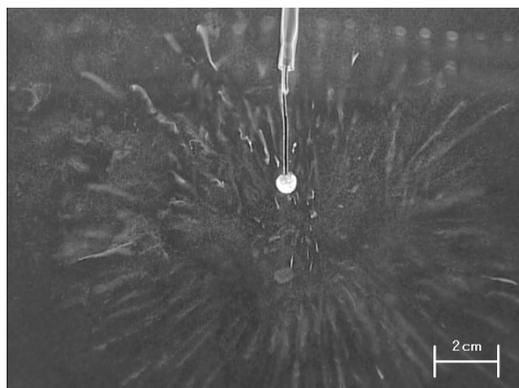


図4 ラジウムからの飛跡



図6 (a) X線発生前

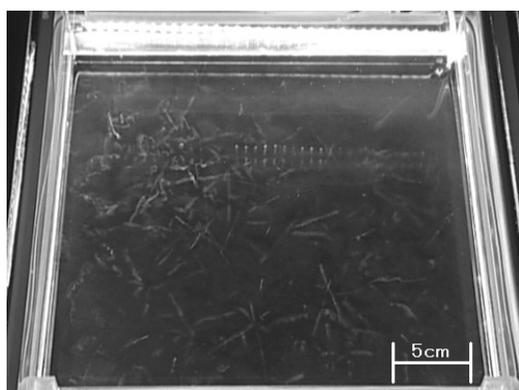


図5 $^{220}\text{Rn} \rightarrow ^{216}\text{Po} \rightarrow ^{212}\text{Pb}$ の α 線の飛跡



図6 (b) X線発生中

運動エネルギーの大きさを飛跡で理解

Rn や Po が崩壊する際は α 線の飛跡しか見えず、反対側に動くはずの Po や Pb の飛跡は見えない。この事実の理解のために「エネルギー保存則」と「運動量保存則」を使って、質量数の大きく異なる2つの粒子の運動エネルギーを計算してみるのもよい。それによると、 α 粒子の運動エネルギーの方が Po や Pb に比べておよそ50倍大きくなる。

3. 冷却方法の違いによる霧箱の特徴

本稿で紹介した他にもいろいろな冷却タイプの霧箱を作った。以下はその利点と考慮すべき点である。

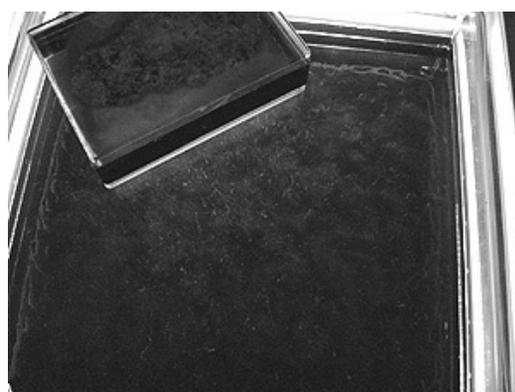


図7 燐灰ウラン鉱から出る γ 線によるコンプトン散乱電子の飛跡
飛び交う散乱電子は、粉雪が舞い落ちる様子を見ているようにきれいである

1) ドライアイス冷却

ドライアイスは入手しやすく、取り扱いも簡単である。しかし、時間とともにドライアイスと霧箱容器の平らな接触面に霜や氷が付き始め、冷却効果が落ちるので注意が必要である。

2) ドライアイスとアルコールの混合液冷却

ドライアイスを入れたアルコールに霧箱の底面を浸漬する方法である。冷却効果はたいへん良いが、冷却に使うアルコールが気化して室内に充満する危険が高いので注意が必要である。

3) 液体窒素冷却

-200℃ 近い温度なので霧箱の底を直接液体窒素で冷やすことは避け、液体窒素で冷却したアルミ型材の上に霧箱を載せるなど、少し高い温度で利用する工夫が必要である。

4) 冷却機を使った冷却

電源さえあれば飛跡が観察できるが、高価であり、技術的にも簡単ではない。しかし工夫の余地はあると考えている。

アルコールや液体窒素を使う以上、室内の換気には十分な注意が必要である。「慣れ」は特に怖い。冬の真夜中、理科準備室でストーブを焚いて1人で実験中、霧箱用のアルコールが気化して室内に充満したことに気付かず急性アルコール中毒になり、あわやということも経験した。液体窒素の場合は窒息死の危険がある。

4. 霧箱実験の課題

学校教育で霧箱を使って実験する際、一番苦勞するのは放射線源の入手である。

1) 自然放射線

①霧箱にランダムに飛び込む自然放射線

②本誌5月号で述べた方法で捕集した、空気中のRnなどからの放射線

2) 放射性鉱物

①ユークセナイトなどが鉱物取扱店でたまに入手できることはあるが、一般に放射性鉱物は入手が困難

②花崗岩の多い川で「椀かけ法」(お椀で川底の砂を掬い、水流で比重の重い鉱物を選別する方法)でジルコン(UやThを含む鉱物)など

を採集(「楽しい実験室」代表執筆者・後藤道夫, p.113, 日本教育新聞社)

3) α , β , γ 線源

① α 線源: キャンプ用ランタンに使用するマントルを登山用品店で購入(p.26参照)

② β 線源: 数年前までは蛍光灯のグローランプを壊して中のパイメタルを取り出し、塗布してあるプロメシウムからの β 線を利用していたが、最近ではプロメシウムが使われていなく飛跡が観察できない。

③ $\alpha \cdot \beta \cdot \gamma$ の密封線源: 日本アイソトープ協会で購入。ただし、学校教育用にはかなり高価である。

以上のように、放射線源入手はなかなか困難である。放射線教育を進める上で、安全と価格を考慮した「教育用放射線源の供給体制」を関係機関でぜひ作っていただきたいものである。

5. 「放射線」を冷静に語るために…

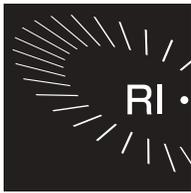
およそ10年前、新潟県巻町で東北電力(株)の原子力発電所建設計画について通商産業省と地元住民による公開討論会が行われた。放射線教育に資したいと考えて巻町に行った私はそこでの議論の多くを聞いて、「国が『環境の一部としての自然放射線』を学校教育でしっかり教えないツケ」が今ここに露呈しているように感じた。

言葉や文字だけで放射線についての理解は得られない。ならば自分にできることは何か? 「優れた霧箱」を作り、自然放射線の飛跡を多くの人に見てもらい、放射線について冷静に考えるきっかけにでももらえたら…。そんな思いが嵩じて博物館展示用霧箱まで作るに至った(本年6月上旬より日本科学未来館5Fにて公開展示)。

自然放射線の飛跡を見て「心が癒される!」という人は多い。「霧箱」が家庭のインテリアとなると、人々の放射線に対する考えは大きく変わるにちがいない。いつの日かそんな霧箱を作りたいと、私は今も夢見ている。

(北陸電力エネルギー科学館

E-mail ▶ i-toda@kiribako-rado.co.jp)



拡散型霧箱における霧滴の成長について

森 千鶴夫, 白川 芳幸, 藤浪 真紀

1. はじめに

本シリーズの最初に、教育的な実験によく使用されている拡散型霧箱について3回連載したが、霧の発生原理について少し理論的な説明を行う必要があるのではないかとのご意見があった。ワーキンググループでも同様に感じていたので、今回は特別に、それらのご意見に応えるつもりで、文献1)を頼りに若干の解説を試みることにした。読者の方々が内容をそのままトレースできるようにやや詳しくしたため、かえって読みづらくなっているところがあるかと思われるが、ご容赦いただければと思っている。

拡散型霧箱では、温度の高い部分で蒸発し、飽和蒸気圧に近い状態になっている気体が、温度の低い部分へ拡散してくると過飽和状態になる。このような気体では、小さな塵などを核として、あるいは大きな擾乱が原因で小さな霧滴ができる。しかし、過飽和の程度が相当大きくなければ、霧滴は成長を続けることができない。

一方、荷電粒子放射線が気体中を走行すると、気体を電離しイオンを生成する。このイオンが核となり水やアルコールの有極性分子の小さな霧滴が発生する。こうしてできた電荷を持った霧滴は電荷を持たない霧滴に比べて、過飽和の程度がそれほど大きくななくても成長を続けることができる。すなわち、荷電粒子放射線が

通過したときにのみ、霧滴が成長し、目で見えるようになるということになる。これらの様子をやや理論的に解説するのが今回の目的である。

霧の発生の説明には霧箱内の温度分布に関する情報が欠かせない。文献1)では温度分布を理論的に求めているが、ここでは実験的に測定した値を使用した。また、文献1)はCGS単位系で水に対する計算を行っているが、ここではMKS単位系によりエチルアルコールに対して、また連載の第1回に述べたキット化されている霧箱*に対して測定及び計算した結果を示す。

2. 霧箱内の温度の測定

図1に完成したキットの霧箱をドライアイス上に置いた時からの温度の低下の様子を示す。

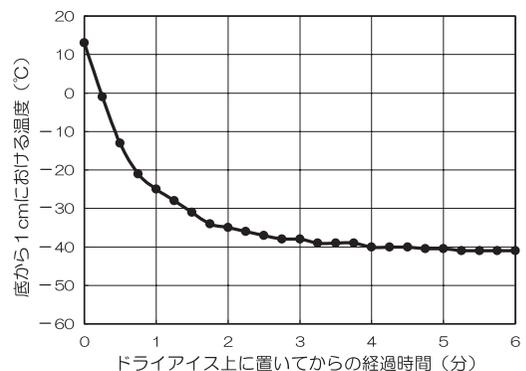


図1 霧箱をドライアイス上に置いてからの霧箱内(底から1cmの高さ)の温度の時間変化

*キットの入手先:(株)原子力エンジニアリング

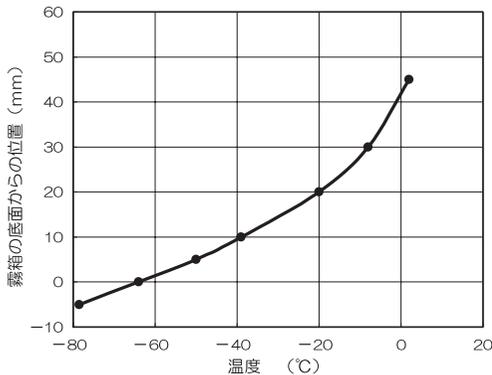


図2 円筒霧箱内の中心軸上の温度分布

測定は直径 0.1 mm の W Re 熱電対の先端を霧箱円筒 (直径 11 cm, 高さ 6 cm) の中心軸上で底面 (厚さ 0.3 mm のアルミニウム板) から 10 mm の位置にセットした。4 分でほとんど一定値である -40 に達するが、実質的には 1 分 ~ 2 分で温度は十分に低下している。このことは、このキットの霧箱をドライアイス上に置いてからほとんど 1 分程度で飛跡が見え始めることに対応している。

図 2 に、霧箱の中心軸上における底面からの高さ方向の温度分布を示す。熱電対の先端の位置を動かすにつれて、ほとんど瞬間的に起電圧変化が得られ、すぐに安定するので、熱電対の熱容量及び外部からの熱伝導の影響は無視できることが分かる。

3. 霧滴の成長における表面張力及び静電気反発力の影響

半径 r の液滴の表面エネルギー W_s は、 σ を表面張力 (N/m) とすれば次式で表される。

$$W_s = 4\pi r^2 \sigma \quad (1)$$

表面張力は、表面に仮想的に考えた単位長さ当たりの線に垂直に、表面を引きつけるように働く力 (ファンデルワールス力) であるから、常に表面積を最小に保つように作用している。いま、この球の半径を Δr だけ増加したときに、表面積が増加することによる表面エネルギーの

変化 ΔW_s は次式で得られる。

$$\begin{aligned} \Delta W_s &= \frac{d}{dr} (4\pi r^2 \sigma) \Delta r \\ &= 4\pi \left(2r\sigma + r^2 \frac{d\sigma}{dr} \right) \Delta r \approx 8\pi r \sigma \Delta r \quad (2) \end{aligned}$$

ただし、上式の右辺 2 行目で $d\sigma/dr \approx 0$ としたが、実際 $d\sigma/dr$ は負の極めて小さな値である。結局、液滴には常に半径を小さくしようとする力が働いており、半径を大きくしようとするれば、外部からエネルギーを供給しなければならぬ。

一般に、液面が平面で気中が飽和蒸気圧になっている場合には、気中から液面に衝突してトラップされる分子の数と液面から出ていく分子の数は等しく、液面の位置は変化しない。もしほんのわずかでも過飽和蒸気圧になっていれば液面は上昇する。しかし液滴の場合には、球が大きくなるには表面エネルギーが増加しなければならないので、飽和蒸気圧よりもかなり高い過飽和蒸気圧がなす仕事が必要なければ液滴は大きくなれない。式(2)で示すエネルギーが供給されてはじめて球は大きくなる。

一般に、圧力 p 、体積 V 、絶対温度 T の理想気体の状態方程式は $pV = nRT$ で表される。ここで、 n はモル数、 R は気体定数で 8.31451 (J/mol·K) である。

いま、液滴の周辺の体積 V に含まれる蒸気を、過飽和になっている圧力 p から飽和圧力 p_0 まで低下 (膨張) することによって、液滴の半径が大きくなる場合を考えよう。

この場合に、蒸気がする仕事 W_j は

$$W_j = - \int_p^{p_0} V dp = - \int_p^{p_0} \frac{nRT}{p} dp = nRT \ln \frac{p}{p_0} \quad (3)$$

いま、半径 r の液滴が半径 Δr だけ大きくなる場合には、この増加に必要な分子のモル数は、 ρ を液滴の密度、 M を分子数とすれば次式で表される。

$$n = \frac{4\pi r^2 \rho \Delta r}{M}$$

したがって、このときに過飽和蒸気が外部にする仕事は

$$\Delta W_j = \frac{4\pi r^2 \rho \Delta r}{M} RT \ln \frac{p}{p_0} \quad (4)$$

$\Delta W_j = \Delta W_s$ を満たす式は、平衡に達する半径 r と過飽和に達した気体の割合（過飽和度 S ） p/p_0 の関係を示す。この平衡を与える割合を $(p/p_0)_B$ とすれば

$$\frac{4\pi r^2 \rho \Delta r}{M} RT \ln \left(\frac{p}{p_0} \right)_B = 8\pi r \sigma \Delta r \quad (5)$$

したがって、以下の式を得る。

$$\left(\frac{p}{p_0} \right)_B = \exp \left(\frac{2M\sigma}{RT\rho r} \right) \quad (6)$$

エタノールに対して、 $M=46$ 、 $\sigma=26.8 \times 10^{-3}$ (N/m, at -40), $R=8.31451$ (J/mol·K), $T=233$ (K), $\rho=0.789 \times 10^6$ (g/m³) を代入して、 p/p_0 と r の関係を求めたのが、図3の曲線(a)である。電荷を持たない液滴がこの線上にある場合には平衡を保って、その大きさは変化しない。この線よりも下側に液滴Aがある場合には、過飽和度 S が足りないため、液滴は成長せず消えてゆく(←---A)。一方、線の上側にあるBの場合には、十分な過飽和度があるために液滴は成長する(----→B)。図では矢印は水平に描かれているが、より厳密には、左上がりまたは右下がりの若干の傾きを持つ。

次に、半径 r の球表面に電荷 e を持つ球体の場合を考えよう。この球の静電エネルギー W_e は

$$W_e = - \int_0^e \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} dq = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r} \quad (7)$$

いま、この球の半径を Δr だけ大きくしたときの静電エネルギーの変化 ΔW_e は

$$\Delta W_e = \frac{d}{dr} \left(\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r} \right) \Delta r = - \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r^2} \Delta r \quad (8)$$

すなわち、液滴の半径を大きくしようとすれば、球から外部へエネルギーが放出される。球表面の静電気は相互の反撥のために球をできるだけ大きくしようとしているのである。したが

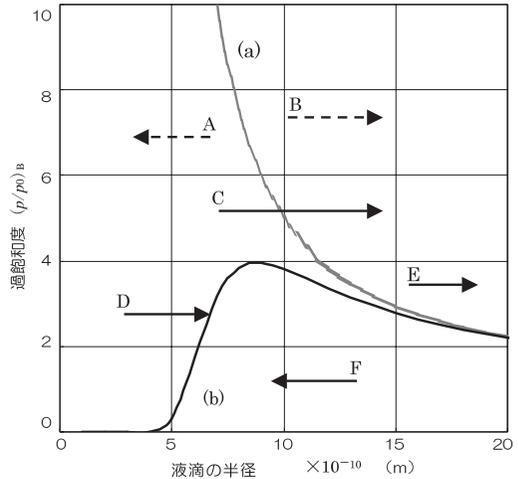


図3 霧箱内のエチルアルコール液滴の半径とその半径が変化しないで平衡状態を保つための蒸気の過飽和度を示す曲線

(a) 電荷を持たない液滴に対する曲線
(b) 素電荷 e を持つ液滴に対する曲線

って、静電荷を有する球は、上述の過飽和蒸気圧の低下に伴うエネルギーの供給は少なくてもよいことになる。ここで、素電荷 e が球表面上に一樣に分布する考え方に疑問を持たれる方が多いかもしれないが、この問題は電子の存在確率の一樣性などを含めてかなり複雑なので、ここでは立ち入らないことにする。

次に、液滴が電荷 e を持っている場合における平衡条件 $\Delta W_j = \Delta W_s + \Delta W_e$ を満たす関係を求める。

$$\begin{aligned} \frac{4\pi r^2 \rho \Delta r}{M} RT \ln \left(\frac{p}{p_0} \right)_B \\ = 8\pi r \sigma \Delta r - \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r^2} \Delta r \end{aligned} \quad (9)$$

ゆえに

$$\left(\frac{p}{p_0} \right)_B = \exp \left\{ \frac{M}{RT\rho} \left(\frac{2\sigma}{r} - \frac{e^2}{32\pi^2\epsilon_0 r^4} \right) \right\} \quad (10)$$

式(10)に、 $e=1.6022 \times 10^{-19}$ (C), $\epsilon_0=8.8542 \times 10^{-12}$ (C²/N·m²) を代入して得た結果を図3の(b)に示す。

実線(b)は、平衡を保って、液滴のサイズが変化しない条件を示す線である。この線よりも

上の状態にある電荷を持つ液滴 C は成長する。しかし、点 D の状態にある液滴は成長していくにつれて、実線 (b) に突き当たる。したがって平衡状態になり、それ以上に半径が大きくなることはない。電荷を持つ液滴が点 C や E の状態にある場合には成長を続ける。F の状態にある液滴は曲線 (b) に突き当たり、平衡状態になる。

実線 (b) のピーク時の液滴の半径は、式 (10) を微分して得られる。

$$r = \left(\frac{e^2}{16 \pi^2 \epsilon_0 \sigma} \right) = 8.81 \times 10^{-10} \text{ (m)} \quad (11)$$

この時の p/p_0 は、式 (10) に式 (11) の値を代入することによって得られ、「イオンリミット」と呼ばれる。これは電荷を持つ霧滴が大きくなっていくのに必要な最低の過飽和度で、ここでは (p/p_0) と記述することにする。エチルアルコールの場合には -40 において 3.951 であるが、この値以上の過飽和度がなければ、式 (11) で示される半径以下の電荷を持つ小さな液滴が成長することはできない。

4. 実際の霧箱内での霧滴の成長の条件

図 4 に霧箱内における霧滴の成長の条件を示す。縦軸は霧箱の底面からの高さである。下の横軸は、その高さにおける霧箱の中心軸上の温度の実測値であり太い実線で示す。上の横軸は、式 (10) にその高さにおける温度を代入して、イオンリミット (p/p_0) を計算した結果を示す。上の横軸にはまた、過飽和度 $S (= p/p_0)$ を同時に示す。

この過飽和度は、文献 1) では非常に複雑な式を用いて計算しているが、計算に用いた多くの定数が分からないので、ここでは第 1 近似として、霧箱内の上部の温度 -10 における飽和蒸気圧を、それぞれの高さにおける温度に対応した飽和蒸気圧²⁾ で除した値を用いた。したがって、 S の値は厳密とは言えないが、ここでは半定量的な理解には役立つと思われる。すなわち、その場所の過飽和度 S の値がイオンリ

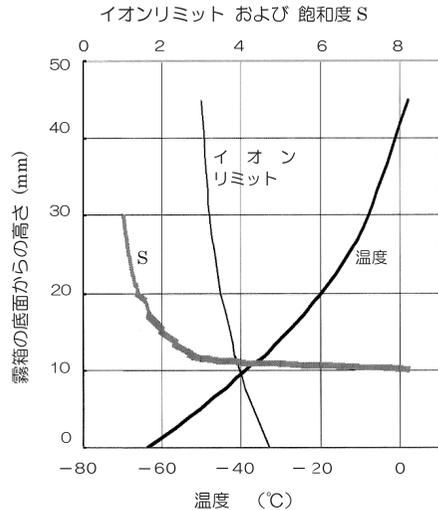


図 4 素電荷を持つ液滴が成長することができる領域 (S とイオンリミットの交点よりも低い領域) を説明する図

ミットよりも大きくなければ、小さな霧滴はイオンリミットのピークを越えることができずに、成長が止まることになる。S とイオンリミットの交点は底面から約 11 mm の位置にあるので、この高さから下の領域で飛跡が観察できることになる。

5. 霧滴の成長の比喩的な説明

ここでは霧滴の成長をゴム風船を膨らませることと対比して考えてみよう。

図 5(a) は、ある大きさのゴム風船の中の気体の圧力 P_{s1} が、ゴムの張力 (霧滴の表面張力に対応する) による体積を縮める力と外気の圧力の和の力につりあっている。このゴム風船の半径を大きくする目的で、高圧力 P_1 、体積 V_1 のガスを有するピストンをつなぐ。すると隔壁は点線の矢印の方向に移動し、隔壁の左側にあった気体を風船に押し込み、風船は膨張する。この時に高圧の気体がする仕事が式 (3) で表され、式 (6) の (p/p_0) の値が大きくなる必要がある。すなわち、大きな過飽和蒸気圧 p 、すなわち大きな過飽和度が必要である。

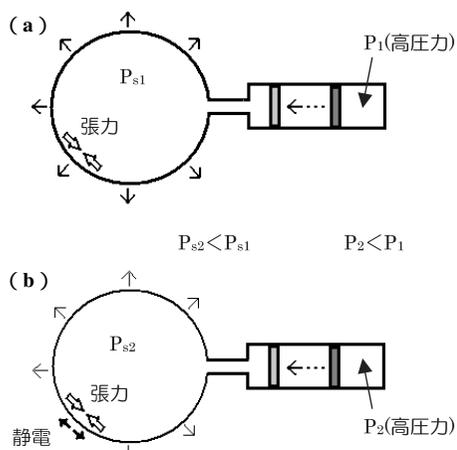


図5 液滴の成長に及ぼす電荷や過飽和蒸気圧の影響を比喩的に説明する図

もし風船の表面に一樣に同種の符号の静電気が存在する場合にはどうであろうか。図5(b)に示すように、静電気はお互いに反撥し合う。すなわち、ゴム風船の張力の方向とは反対の方向であるために、張力を弱めることになる。この場合に、(a)の場合と同じだけ風船を膨らませようとするれば、ピストンの高圧力の部分 P_2 (高圧力)は、(a)の P_1 (高圧力)よりも低い圧力でよいことになる。つまり霧滴に電荷がある場合には、式(10)の表現では $(p/p_0)_B$ 、すなわち過飽和度はあまり大きくなくてもよい。結果として、電荷を持たない霧滴の場合には成長できない程度の小さな p/p_0 の場合でも、電荷があれば成長できることになり、飛跡に沿って連続した霧滴が生成する。

ゴム風船の張力は液滴の表面張力よりも3桁以上も大きいので、実際にゴム風船の表面の静電荷はよほど多量でない限りゴム風船のふくらみに影響を及ぼすことはない。

6. まとめ

電荷を持たない液滴が、表面積を小さくするように働く表面張力に抗して大きくなっていくには、大きなエネルギーが必要で、このエネルギーは極めて高い過飽和蒸気圧から圧力が低下することによってまかなわれる。したがって、電荷を持たない液滴が成長するには極めて大きな過飽和度が必要である。通常の簡単な拡散型霧箱ではこのような大きな過飽和度を持つ領域はほとんど実現しない。

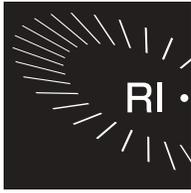
しかし、電荷を持つ液滴はイオンリミット以上の過飽和度があれば成長できる。この過飽和度は、電荷を持たない霧滴の成長に必要な過飽和度よりもかなり小さい。このような過飽和度は拡散型霧箱の低温度領域で実現している。すなわち、 α 線などの通過に伴って電荷を与えられた液滴は、その電荷が液滴の表面積を大きくするような力を与えるため表面張力の影響を少なくする方向に作用し、液滴の成長のために外部から与えなければならないエネルギーはかなり少なくてすむ。すなわち、小さな過飽和度でよい。

これが拡散型霧箱の底部において、 α 線の飛跡に沿って多くの霧滴が成長する理由である。したがって、電荷は正であっても負であってもよい。

参考文献

- 1) 三浦功, 菅浩一, 俣野恒夫著: 放射線計測学, 裳華房, p.141 (1962)
- 2) 理科年表机上版, 丸善 p.415 (2002). 他に, www.uprise-system.co.jp/VaporPressureQ1.html を参照。

(理工学部教育実験ノートワーキンググループ
E-mail ▶ cmori@sc.starcat.ne.jp)



紙筒で高感度ガイガー計数管を作ろう！

三 門 正 吾

1. はじめに

空気清浄用の小型高圧電源*と紙筒を利用することによって、高感度で、しかも簡便なガイガー型の放射線検出器を作ることができる。身の回りの放射線の検出や、半減期の測定などに使って、放射線に対する認識を体験的に深めることができる。

ガイガー計数管（以下、ガイガー管）は容易に手作りでき、しかも動作させることも簡単である。かつての物理IB「放射線」の分野で、私は毎年授業で自作のガイガー管を用いた生徒実験を行ってきた。2004年度は、スーパーサイエンスハイスクールの研究開発校に指定されたのを機に、理数科の1年生に2人1組で20台製作させ、放射線計測実験を行った。紙筒ガイガー管は、原理そのままの構造で中がよく見え、教材として適している。かなり口径の大きい紙筒が使えるので、このガイガー管は非常に高感度である。したがって、身の回りの微弱な自然放射線を検出するのに適している。ここでは、小型高圧電源を用いる装置と、静電気を利用する装置の製作を紹介する。

2. ガイガー管の構造と特徴

矢野・米村式ガイガー管^{1,2)}の基本構造を図1に示す。陽極は直径0.15mmの銅線を2つ折

りにしたもの、窓はポリエチレンフィルムを用いる。芯線を2つ折りにするのは米村傅治郎先生のアイデアである。外部消滅型に分類されるこの計数管は、先端放電方式で陰極に高抵抗の紙を用いる。紙を用いるのは、連続放電にならないための矢野淳滋先生のアイデアである。ここでは、紙筒本体が陰極になっている。この計数管は、現在のガイガー・ミュラー計数管（以下、GM管）タイプではなく、むしろガイガーによる初期のタイプのものである。普通のGM管は管内を1/10気圧程度に減圧してあるが、ガイガー管では減圧はしない。

測定の前に、ガイガー管の中にブタンガスを注入する。ブタンガスを注入しないと、ガイガー管が正常に動作しない。さらにガイガー管を正常に動作させるためには、適正な電圧を加えること、及び陽極をいつもクリーンにしておく

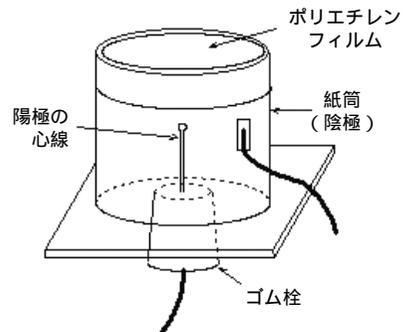


図1 ガイガー計数管の構造

*（財）放射線利用振興協会に問い合わせのこと。

ことである。陽極に高電圧をかけているので、空気中の塵などが付きやすい。そうすると連続的な放電が起こって、測定ができなくなる。そういうときは充分アルコールを浸した紙で拭いて陽極をきれいにする必要がある。

測定するときには、選局を外した（特定の局を受信しない）AM ラジオをガイガー管のそばに置く。放射線が入射すると、陽極の芯線の先端と紙筒の間にパルス放電が起こる。放電は小さな雷と同じなので、ノイズ電波を放射する。これをラジオが受けて、ガリッという音を発するので、放射線が入ったことが分かる。

このガイガー管の特徴は以下の通りである。

原理がそのまま見てわかる構造である。

動作電圧は 4,000 V ~ 5,000 V 程度の高電圧が必要である。

分解能が悪い（分解時間が長い）ので、強い線源の測定には不向きである。

ポリエチレンフィルムの窓の面積を大きくすれば、感度が高くなる。

上記のとに関連して、環境にある低線量の線源の測定に向いている。

安価にしかも容易に製作できる。

3. ガイガー管の製作

3.1 陽極の作り方

最もデリケートな部分なので、慎重に作業したい（図 2 ~ , それぞれ 1~6 に対応）。

- 1 リード線（普通のもの）を約 8 cm むく。
- 2 金属線を 1 本残して、残りの 6 本は折り曲げる。
- 3 金属線の輪をつくる。
- 4 セロハンテープからはみ出た 6 本の金属線をニッパで切り落とす。
- 5 穴を開けたゴム栓にリード線を入れる。
- 6 指の腹で金属線の輪を 2 つ折りにする。

3.2 紙筒ガイガー管本体の製作

- 1 正方形の板（プラスチックや木の板）の中央に、ゴム栓が収まる穴を開ける。

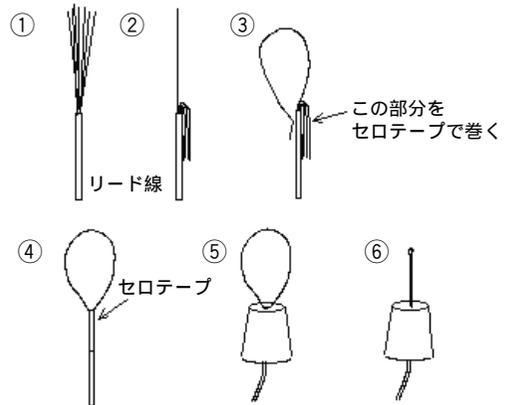


図 2 陽極の作り方

- 2 輪切りにした紙筒を板に接着する。

3 筒の先端に両面テープを貼り、ポリエチレンフィルム（スーパーなどの薄いポリエチレン袋などを切り取って使っても良い）を窓として、貼る。ポリエチレンフィルムを密着させた上からビニールテープを巻く。ガイガー管は紫外線に反応する。室内で使用するときにはフィルムが透明な場合でもほとんど問題ないが、光が心配なところでは黒の油性マーカー等を塗って光が入らないようにした方がよい。

4 紙筒の側面に、陰極用リード線をセロハンテープで貼り付ける。

5 ゴム栓に収めた陽極を、板に開けた穴に入れ、紙筒に収める（図 1 参照）。

4. 高圧電源を用いた紙筒ガイガー管の製作

図 3 に、電源部を含めた全体写真を示す。

12 V の AC アダプタを付けると、電源の出力はおよそ 10,000 V になる。+ 極の線に直に触れるとかなりの電気ショックを受けるので、発泡スチロールで覆って感電するのを防止する。

ガイガー管の動作電圧は 5,000 V 程度で、電流はほとんど必要としないため、厚紙で電圧を分割してガイガー管に加える。

抵抗 R_1 と R_2 を直列につなぎ、 R_2 の両端から取り出された電圧は、

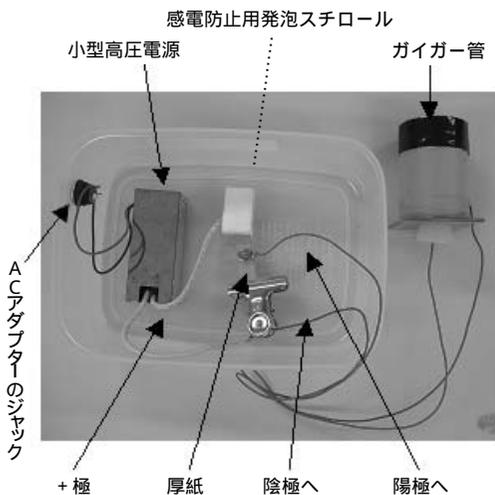


図3 全体写真

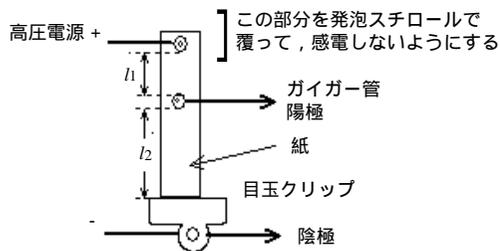


図4 電圧調整器

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V \quad V: \text{電源電圧}$$

となる。抵抗体の抵抗は長さに比例するから、 R_1 と R_2 に相当する紙の長さをそれぞれ l_1 、 l_2 とすると、ガイガー管に加えられる電圧は、

$$\frac{l_2}{l_1 + l_2} \cdot V$$

となる。クリップで l_2 の長さを長くすれば大きな電圧、 l_2 を短くすれば小さな電圧となる(図4)。クリップを動かして、電圧を最適な状態に調整する具体的な方法は後述する。

5. 静電気ガイガー管の製作

紙筒の側面に、電気容量 $0.0047 \mu\text{F}$ 、耐電圧 $2,500 \text{ V}$ のフィルムコンデンサの片足を付けて固定する。このコンデンサが電源である。感電



図5 コンデンサの取り付け

防止のため、むき出しの部分には絶縁用のチューブを付ける。また、図5のように筒の側面に陰極用の導線をセロハンテープで固定する。紙筒の側面を発泡ポリエチレンで巻いて陰極を絶縁する。

6. ガイガー管の使い方

1 ゴム栓をはずし、紙筒の中にガスライターからブタンガスをつぶり入れる。ブタンガスは空気より重いので、下向きにして入れる。

2 AMラジオをガイガー管のそばに置き、スイッチを入れ、選局を外しておく。

3 12 V のACアダプタをつなぎ、適当な放射線源をガイガー管の窓に近づける。放射線がガイガー管に入ると放電が起こる。そこからノイズ電波が放射され、ラジオがガリッという。

4 適正な電圧にするための電圧調整は以下のようにする。電圧が低すぎると動作せず、高すぎると連続放電になる。その中間の電圧にクリップを動かして調整する。音が小さいときは電圧が低いので、クリップを動かして l_2 を少し長くする。大きな音でシャツという感じの音がするときは電圧が高すぎるので、 l_2 を少し短くする。何度も実験していると経験的に適正な音が分かるようになる。 l_2 を調整するときには、ACアダプタを外して行うこと。また、電源の+の線の金属部分には手を触れないこと(発泡スチロールで覆ってあるが、念のため)。

5 適正な電圧でも陽極に塵が付着していたり、汚れていると連続放電を起こしてしまう。そのようなときは、ACアダプタを外したの



図6 カリ肥料からの放射線の検出
(静電気ガイガー管)

ち、ティッシュペーパーにアルコールを充分しみこませて陽極を拭く。陽極がきれいになれば連続放電は収まる。

6 紙筒に入れたガスは1~2時間は保つと思われるが、紙筒のボタンガスが抜けてしまうと正常に動作しなくなるから、その場合はACアダプタを外したのち、ガスを補充する。

7 静電気ガイガー管の使い方は、高压電源によるものと同様であるが、以下の部分だけ異なる。棒起電器³⁾の+極を陽極の線に、-極を紙筒の側面に固定した導線に接続する。棒起電器を70~80回往復させるとだいたいコンデンサが充電される(図6)。充電されたかどうかは、ガイガー管のそばに置いたラジオの反応で判断する。カウントできるようになったら、棒起電器を外す。1回の充電で10分くらいは持続するはずであるが、電圧が下がって測定できなくなったら、再び棒起電器で充電する。一度充電した後は、10回程度の往復でガイガー管が動作する電圧まで上がる。棒起電器の代わりに、小型高压電源に高抵抗を接続してコンデンサを充電してもよい。

7. 万歩計で定量測定

放射線が入射するたびにガイガー管内に放電が起こり、そこから発生するノイズ電波をラジオで聴く、というのがこの観察の方法である。そこで、ラジオのスピーカーにトランジスタによるスイッチング回路をつけ万歩計につないで

トランジスタ 2SC 3113



図7 改造万歩計

数を数えることができる⁴⁾。こうすることで、放射線の入射に伴ってガリッというノイズ音とともに、万歩計の値が1つ増加する。ただし、万歩計は分解能が悪く、強い線源からの放射線は数え落としが多くなる。しかし、身近な微弱放射線源の場合には十分である。図7に改造した万歩計の例を示す。

トランジスタは、2SC 3113が今のところ一番性能がよい。また、万歩計は100円ショップで手に入れたものでもよい。いくつか取り寄せて、調べてみるとよいだろう。

8. おわりに

私がガイガー管の研究に取り組んだのは、今から10年以上前である。初期のものに比べると、現在のものはずっとシンプルになっている。今まで様々なところで製作研修会を行ったが、100%動作するようになった。陽極をていねいに作ることに、適正電圧を与えるという2点がポイントである。

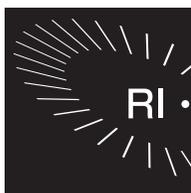
今回は、この紙筒ガイガー管を用いて身のまわりの放射線を測定した結果について述べる。

参考文献

- 1) 矢野淳滋：物理教育，38，312（1990）
- 2) 米村傳治郎：物理教育，41，192（1993）
- 3) 物理I 新訂版（実教出版）p.193
- 4) 三門正吾：物理教育，50，23（2002）

（千葉県立柏高等学校

E-mail ▶ s.mkd@khe.biglobe.ne.jp）



紙筒ガイガー計数管を用いた放射線の測定

三 門 正 吾

1. はじめに

前回、紙筒ガイガー計数管(以下、ガイガー管)の製作を紹介したが、今回はそれを利用した放射線実験を紹介する。かつて高等学校の物理IB「放射線」の分野、及びスーパーサイエンスハイスクール(SSH)の学校設定科目等で、「身のまわりの微弱な放射線の測定」及び「トロン(ラドン220)の半減期の測定」を生徒自らが行う実験として実践してきた。

新指導要領になってからは、物理の分野で実践するのは難しい状況になっている。「身のまわりの微弱な放射線の測定」については、理科総合Aで実践することが可能であるが、本校での実践はまだない。したがって、ここで紹介するのは、物理IBで実践した内容である。生徒用ワークシート、感想も含めて紹介する。

2. 身のまわりの微弱な放射線の測定

以下、生徒用ワークシートに添って実験手順と生徒の測定データを示す(ワークシートの見本は図1参照)。

2.1 身のまわりの放射線

📎 目的

放射線は身近に存在していることを実験で確かめよう。

📎 準備

ガイガー管、改造万歩計付きラジオ(教育実験ノート・5参照)、ガスライター、ストップウォッチ、

硫酸カリウム(カリ肥料)、過リン酸石灰(リン酸肥料)、空気中の塵。

📎 実験方法

1 ガイガー管の中にガスライターからブタンガスを入れる。ガイガー管にACアダプターを接続する。

2 何も近づけないときの放射線の数をカウントする。宇宙線や大地などからの放射線を数えていることになる。これを自然放射線という。3分間にガイガー管に入ってきた放射線の数を測定し、1分あたりの数を求める(表1)。(計数率:単位cpm)

3 ポリエチレンの袋に入っている硫酸カリウム、過リン酸石灰にガイガー管を接触させて、1分間の放射線の数をカウントする。

4 空気中の塵に含まれる放射線を測定する。まず、風船をウールで摩擦して帯電させ、実験室の空気中の塵を静電気で集める。測定するときは風船をしぼませ、ガイガー管を密着させて、1分間の放射線の数をカウントする。湿気が多く、静電気で塵を集めるのが困難な場合は、掃除機のホースの先にキッチンペーパーをつけ、輪ゴムでとめて、約5分間空気中の塵を吸引する。それをガイガー管に密着させて放射線の数をカウントする。

5 その他、時間があったら放射線を出していそうなものを測定してみる。

実験 身近な放射線

1 目的

放射線は身近に存在していることを実験で確かめよう。また、遮へい効果を確かめよう。

2 準備

ガイガー管、改造万歩計付きラジオ、ガスライター、ストップウォッチ、硫酸カリウム（カリ肥料）、食塩、過リン酸石灰（リン酸肥料）、空気中の塵、グロー管の電極、マントル、紙、厚紙、下敷き

3 実験方法

- ガイガー管の中にガスライターからブタンガスを入れる。ガイガー管の電源をONにする。3分の間にガイガー管に入ってきた放射線を数え、1分あたりの数を求める。
- 何も近づけないときの放射線の数をカウントする。宇宙線や大地などからの放射線を数えていることになる。これを自然放射線という。
- 硫酸カリウム、食塩、過リン酸石灰からの放射線測定
ポリエチレンの袋に入っている硫酸カリウム、食塩、過リン酸石灰にガイガー管を接触させて、放射線の数をカウントする。
- 空気中の塵に含まれる放射線の測定
風船をウールで摩擦して帯電させ、空気中の塵を静電気で集める。湿気が多く、静電気で塵を集めるのが困難な場合は、掃除機のホースの先にキッチンペーパーをつけ、輪ゴムでとめて、約5分空気中の塵を吸引する。それをガイガー管に密着させて放射線の数をカウントする。
- グロー管の電極（プロメチウム、 β 線源）を用いた遮へい実験
グロー管の電極をガイガー管から適当な距離離して、間に何も無いとき、遮へい物として薄い紙、厚紙、下敷きを用いたときの放射線の数をカウントする。
- マントルを用いた遮へい実験
(5)と同様な実験をする。

4 実験結果

バックグラウンド（自然放射線）

3分間の測定	1分あたりの数
	cpm

硫酸カリウム、食塩、過リン酸石灰、空気中の塵

	1回目	2回目	平均の数
硫酸カリウム			cpm
食塩			cpm
過リン酸石灰			cpm
空気中の塵			cpm
			cpm

プロメチウムとマントルの遮へい実験

	遮へい物	1分あたりの数		遮へい物	1分あたりの数
プロメチウム	なし(空気)	cpm	マントル	なし(空気)	cpm
	薄い紙	cpm		薄い紙	cpm
	厚紙	cpm		厚紙	cpm
	下敷き	cpm		下敷き	cpm
		cpm			cpm

5 考察

図1 ワークシートの例「実験 身近な放射線」

実験結果

以下に生徒の測定データを示す。

表1 バックグラウンド計数值（自然放射線）

3分間の計数值	1分あたりの計数值(cpm)
60	20

表2 身近な微弱放射線源の計数值

	1回目	2回目	平均の計数值
硫酸カリウム 100g	140	133	137 cpm
過リン酸石灰 100g	73	65	69 cpm
空気中の塵	252	238	245 cpm
レンガ	72	75	74 cpm
(食塩) 100g	23	21	22 cpm

考察

食塩は肥料等との違いを実感してもらうために入れた。自然放射線と変わらないことが分かる。また、この時期は乾燥していた時期でもあり、静電捕集法による浮遊塵からのカウント数が非常に大きかった。公立高校はエアコンがな

いということも関係していると思われる。

2.2 放射線の遮へい

目的

放射線源の種類と遮へい物の違いでカウント数にどのような違いがあらわれるか実験してみよう。

準備

ガイガー管、改造万歩計付きラジオ、ガスライター、ストップウォッチ、グロー管の電極、マントル、紙、厚紙、下敷き。

実験方法

1 グロー管の電極（プロメチウム、 β 線源）をガイガー管から約3cm離して、間に何も無いとき、遮へい物として薄い紙、厚紙、下敷きを用いたときの放射線の数をカウントする。また、そのカウント数から自然放射線のカウント数を引いた補正值を計算する。

2 マントルを用いて1と同様な遮へい実験をする。

📄 実験結果

以下に生徒の測定データを示す。

表3 遮へい実験の結果

	遮へい物	測定値	補正值
グロー管	なし(空気)	268 cpm	248 cpm
	薄紙	208 cpm	188 cpm
	厚紙	30 cpm	10 cpm
	下敷き	30 cpm	10 cpm
マントル	なし(空気)	216 cpm	196 cpm
	薄紙	216 cpm	196 cpm
	厚紙	196 cpm	176 cpm
	下敷き	156 cpm	136 cpm

📄 考察

グロー管の電極に塗ってあるプロメチウムからの β 線はエネルギーが低いので、厚紙やプラスチック板で容易に遮へいされる。他方、マントルから出る放射線(主に γ 線)は厚紙程度ではあまり遮へいされないことが分かる(表3)。

ここでの実験は、放射線の種類や性質について学習していなくても、目に見えない放射線に透過力の違いがあること、また、分厚い物で遮へいされるということが分かればよいと考える。

2.3 生徒の感想

2002年の夏休みに学校説明会で体験授業を行った。そのときに参加した中学3年生の実験の感想を以下に記す。高校生の感想も、基本的には中学生と共通しているが、中学生の方がより新鮮に受け止めているように思われる。一部を紹介する。

❖私は自分の生活に放射線など関係ないと思っていましたが、今日の実験で空気中の塵や肥料など、身近なところからでているのが分かりました。多く浴びなければ体に害はないと聞いたので安心しました。

❖今まで、放射線とは原子爆弾の中に含まれている有害なもので、普段の私たちの生活とは関係ないと思っていたので、こんな身近にあることを知りびっくりしました。実験も楽しかったし、知らなかったことが知れてよかったと思いました。

❖普通の状態でも、放射線は出ていることを初めて知りました。ものすごく身近にあるんだあって思ってとてもびっくりしました。普段から人は被ばくしているということにもものすごく違和感を感じました。普段、TVとかで事故などのニュースを見てうわーとか思っていたので、この実験はいい体験だったなあと思います。たった50分だったけどものすごくおもしろかったです。

❖普通に生活している中でも、放射線が出ていることが分かった。放射線はしゃだんすることができるのが分かった。爆弾の放射線は、もっと勢いがあるから、人に害があるんだと思う。放射線の数を数えられることに驚いた。

❖身近なものにも放射線は含まれていて、とくに空気中の塵から多くの放射線が出ていることにおどろいた。

3. トロンの半減期の測定

📄 目的

トリウム系列の娘核種にラドン220(通称トリオンと呼ばれる気体の放射性同位体)があり、 α 崩壊をする。気体なのでガイガー管の中に封入することによって、 α 崩壊を検出することができる。この半減期を測定する。

📄 準備

ガイガー管、改造万歩計付ラジオ、ガスライター、ストップウォッチ、マントル入りの注射器(この注射器の中に気体のトリオンが充満している)。

📄 実験方法

1 ガイガー管の中にガスライターからボタンガスを入れる。電源を入れ、自然放射線を測定する。3分間測定し、10秒あたりの平均値を小数点以下第1位まで求める(表4)。

2 線源のマントルを入れた注射器の空気(トリオンを含む)を約10mlほど、すばやくガイガー管に注入する。

3 カウントが始まるが、ラジオからの音と万歩計の計数のタイミングがほぼ合っているのを確認したら、万歩計のリセットボタンを押し、同時にストップウォッチをスタートさせる。

4 10秒ごとに崩壊した原子数の累計(万歩計

表5 トロンの半減期の測定データの一部

時間 t (秒)	0	10	20	30	40			310	320	330	340	350	360
計数の累計	0	60	127	180	242			843	859	867	878	881	890
自然放射線の累計	0	7	14	20	27			211	218	224	231	238	245
崩壊原子	0	53	113	160	215			632	641	643	647	643	645
残存原子 N	645	592	532	485	430			13	4	2	0	2	0

の読み)を読み取って記録する。6分間続ける。

5 計数の累計値から、自然放射線の累計値

$$n_B \times (\text{測定時間(秒)}) / (10 \text{秒})$$

を引いたものを崩壊原子数とする。

6 6分経過したときの崩壊原子数をトロンの最初の原子数 N_0 とする。 N_0 から崩壊原子数を引き、各時間 t における残存原子数 N を計算する。

実験結果

表4と表5に、生徒の測定データを示す。

表4 自然放射線の計数値

3分間の計数値	122
10秒あたりの値 n_B	6.8

データ処理

1 横軸に時間 t 、縦軸に残存原子数 N をとってデータをプロットし、なめらかにグラフをつなぐ。

2 残存原子数が半分になる時間を、グラフ上で3箇所求める。それらは同じ値になることが期待されるがどうだろうか。

3 片対数グラフで表現したらどうなるか。

図2にデータ処理で得られた結果を示す。

考察

実験の結果、トロンの半減期は約60秒となった。文献値では56秒なので、誤差を考えると信頼できる値だということが分かった。

4. おわりに

これらの実験は、かつて高校の物理IBで実践したが、新指導要領のもとで教育課程が変わってからは、物理で実践することはほとんど不

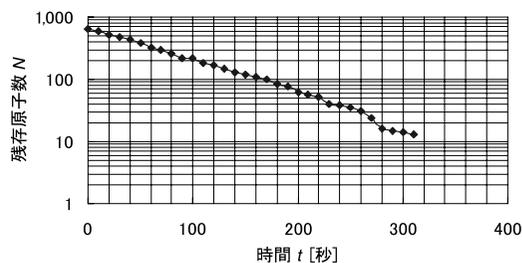
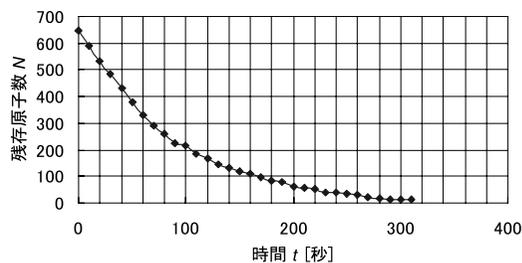
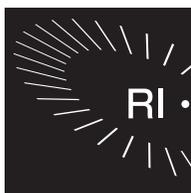


図2 紙筒ガイガー管で測定した経過時間 t とトロンの残存原子数 N
下のグラフは縦軸を対数目盛にしたもの

可能になった。物理Iには放射線を扱うところがないし、物理IIでは、3年の後期になり、実験はほとんど不可能であろう。現教育課程で扱えるのは、「理科総合A」という科目である。教科書によっては、半減期まで扱っているものもある。もっとも、この科目を履修するのは1年生であろうから、トロンの半減期を生徒実験で扱うのは少々難しい。しかし、特別授業や一般の方々を対象にした公開講座などでは、前回報告したガイガー管の自作や今回のような実験は効果的に扱うことができる。

(千葉県立柏高等学校)

E-mail ▶ s.mkd@khe.biglobe.ne.jp)



宇宙線を目で見る装置「スパークチェンバー」

柴田 徳 思

スパークチェンバーは、1960年からおよそ10年間にわたり宇宙線の研究や加速器を用いた原子核実験のための装置として用いられた。この装置は、大阪大学に在籍されていた福井崇時氏と宮本重徳氏により発明された装置である。現在では、宇宙線を目で見るための装置として、科学博物館などで見ることができる。この発明に至る経緯については福井氏が「研究への発想・発見・発明 意図した成果・意図せぬ発見 早過ぎる独創は権威ある大家も否定する」と題した文の中で述べられている¹⁾。この文の中ではスパークチェンバーの発明に至る経緯の外に、多くの興味ある事例が紹介されていて、実験研究者にとって大変に示唆に富む内容である。

なお、福井氏らが発明した時点では“Discharge Chamber”(放電箱)と呼んでいて、Cranshawら²⁾が作ったものを“Spark Counter”と呼んでいた。その後、福井氏らの発明品が「スパークチェンバー」と呼ばれている。

1. 開発の経緯

スパークチェンバーの発明に至る背景には、日本における第2次世界大戦後の原子核研究の進展に大いに関係がある。福井氏によると開発に至る経緯が以下のように述べられている¹⁾。

敗戦後GHQは原子核の実験研究を全面禁止した。1951年に来日したローレンス博士

の尽力もあり、GHQはこの年に原子核研究を許可した。1952年に理化学研究所、大阪大学、京都大学でサイクロトロン建設が始まり、1955年には東京大学附置の全国共同利用の原子核研究所が田無市(現西東京市)に建設されることになった。宇宙線研究の進め方については、多くの議論の後、巨大空気シャワー現象を種々の装置を使って徹底的に調べること及び高空での写真乾板による素粒子反応を詳細に調べることとなった。巨大空気シャワーの測定装置の1つとして、ホドスコープチェンバーを大阪大学で福井氏と宮本氏で製作することになった。この製作の過程で、ホドスコープチェンバーの動作を詳しく調べる中で、より位置情報を精度良く測定できるスパークチェンバーのアイデアに辿り着き、発明につながった。

2. ホドスコープチェンバー

ホドスコープの発明はConversiらによりなされたが³⁾、文献1によれば、以下のような経緯から発明されたと記されている。

マグネトロンが電波を発信するかどうかを調べているときに、アンテナの近くにあった小さなネオン球が電波の出ているときに光ることに気づいた。ネオン球は電気回路のオンオフを示す指示球である。部屋の電気を消して暗くすると電波が出ていてもネオン球は光らず、明るくすると光ることから放電の原因を考えた。

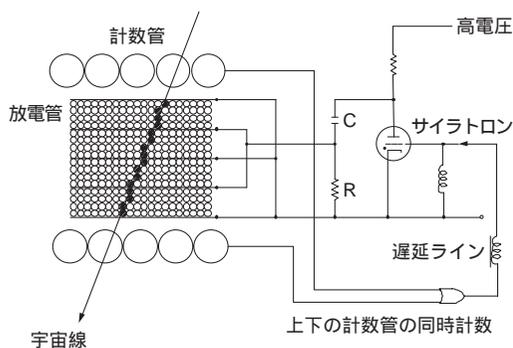


図1 ホドスコープの概略図
回路図は文献4による

そして電波が出ていても暗いため光らないネオン球の近くにラジオアイソトープを置くとネオン球が光ることを発見した。これよりネオン原子の電離が元になり、放電が成長すると結論し、ネオン球が宇宙線などで電離した直後に高電圧をかけることにより放電を引き起こすことができると考えて、ホドスコープを発明した(ここに述べられているネオン球は、指示用に用いられるもので、豆球のような小さいものと考えられる)。

ホドスコープとは次のような装置である。図1に示すように金属の電極板の間に放電管を多数配置し、放電管からの光が他の放電管に入らないように放電管の側面を黒紙で光の遮へいをしておく。発生する荷電粒子が通過したことを外側の上下の検出器で検出して、同時計測によりトリガーをかけて、 $2\mu\text{s}$ 程度の幅の高電圧を電極に印加する。すると荷電粒子の通過した放電管が光り、通過した飛跡を見ることができる^{3,4)}。写真(図2)に示すように宇宙線の飛跡が良く見える。このように、ホドスコープチェンバーは安価で安定な大容積の検出器を作ることができる利点がある。

なお、このホドスコープに用いられた放電管は35 cmHgのネオンガスを細いガラス管に封じたもので、外径0.7 cm、内径0.65 cm、長さ22 cmの大きさであり、通常の放電管と異なり管の内部に電極はない。

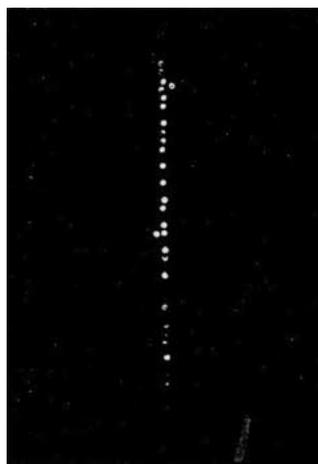


図2 ホドスコープによる宇宙線の飛跡の写真³⁾

3. スパークチェンバー

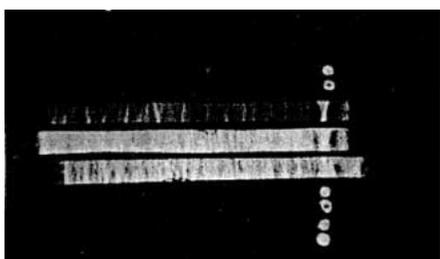
福井氏らは、ホドスコープチェンバーの特性、すなわち、検出効率、高電圧印加の際の遅延時間依存性、ガス圧力依存性、ガスの純度依存性などの基本的な性能を調べた⁴⁾。

この実験の装置は次のような構成であった。ホドスコープチェンバーを上下2組用意して、上下のホドスコープチェンバーの間に、ガス圧の異なる3本の放電管をホドスコープの放電管と直角に配置した。この配置は、宇宙線により放電が起こったときの放電管内部の様子が分かるようにという狙いによる。ホドスコープでは隣接する放電管の光を遮へいするために黒い紙で側面を覆ってあるが、この3本は内部を観察するため光の遮へいはされていない。3本の放電管のガス(Ne + 0.2% Ar)圧は、上から50 cmHg, 35 cmHg, 10 cmHgである。宇宙線により3本の放電管が放電した様子を図3に示す。

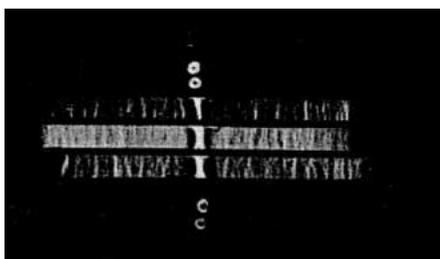
図3(a)を見てみよう。白く見えるのは、放電が生じている箇所である。帯状に見えるのは放電管で、ガス圧の違う3本のうち、一番下の放電管である。内部のあちこちで放電が生じているため、帯状に光って見える。この帯の上に縦に2本、幅の狭い白線が見える。これを放電柱という。どちらも放電管の一部が光ってい



(a) 電圧 5 kV/2 cm, 遅延時間 1 μs



(b) 電圧 8 kV/2 cm, 遅延時間 1 μs



(c) 電圧 10 kV/2 cm, 遅延時間 1 μs

図3 ホドスコープの放電状態を放電管の横から見た写真⁴⁾

るのだが、中段の放電管では少し太い線が見え、上段の放電管では細い線が1本だけ見える(矢印)。この細い線が、宇宙線の飛跡に沿った放電である。これ以外の白い箇所は、放電により発生した紫外線による電離で放電が成長したものであると考えられる。

(なお、写真の白く丸い点は、観測用の放電管をはさんで上下に直角にセットされたホドスコープの放電管の断面である。ホドスコープでも宇宙線により放電が生じているため、白く見える)。

どのような放電が生じるかは、印加電圧だけ

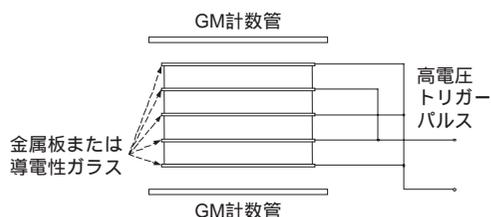


図4 福井氏らによって作られたスパークチェンバー



図5 宇宙線をスパークチェンバーで捉えた最初の写真⁵⁾

でなく、宇宙線が通過してから高電圧パルスを加えるまでの遅延時間によっても変わってくる。電圧 8 kV/2 cm でガス圧が 50 cmHg の場合、遅延時間が 1 μs では図3(b)の上段のように明るい放電は宇宙線の飛跡に沿って1本であるが、遅延時間が 10.5 μs では、明るい放電が飛跡の近くに数本見られるようになる⁴⁾。これは宇宙線により電離された電子が拡散するためであると考えられる。

検出器の理想は、求める現象だけを精度良く観測できることであるが、図3(a)の電圧 5 kV/2 cm でガス圧が 50 cmHg の放電管では、宇宙線の飛跡に沿った1本の放電のみが見られる。これは、宇宙線の飛跡を良い精度で測定できることを意味している。ホドスコープチェンバーの欠点は、飛跡の精度が放電管のサイズで決まってしまうことであるが、図3(a)はこの欠点を大幅に改善できることを示している。

このような実験結果から、粒子の通過した跡にのみ放電を成長させる新しい試みのために次の知見を得た。

- 1) 導電性ガラスは電極として用いることが可能。
- 2) 放電は同一空間内で何本も起こりうる。
- 3) 粒子の飛跡以外に放電を起こさせないためには、できるだけ時間幅の狭い電圧パルスを加える(例えばRC時定数は 10^{-7} s)。
- 4) 高電圧パルスの時間幅が狭いので電圧値は高くなる(例えばピークで12 kV/2 cm)。

これらの結果を元に、スパークチェンバーが製作された⁵⁾。テスト用に作られたチェンバーを図4に示す。チェンバーの上下にGM計数管を配置し、金属板あるいは導電性のガラス板を電極とし、0.5 mmまたは2 mmの厚さのガラスで内寸8.5 cm×13 cm×2 cmまたは8.5 cm×13 cm×1 cmの箱を重ねたものである。内部は1気圧のネオンとアルゴンの混合ガスを用いている。上下のGM計数管の信号の同時計数で宇宙線の通過した事象を捉え、これで高圧電源をトリガーし、高電圧パルスを加える。高電圧パルスを与える回路は図1と同様の回路を用いている。図5は、スパークチェンバーで宇宙線を捉えた最初の写真である⁵⁾。

宇宙線の飛跡に沿って電離が起こり、その後高電圧を印加すると、電離で自由になった電子が加速され、放電に成長する。宇宙線により電離された電子は気体中を拡散するので、遅延時間が長いと放電の起こる箇所は複数になる。また、高電圧のかかっている時間が長いと、放電により生じる光で気体が励起され、高電圧で電子が生じるので、箱全体の放電に広がる。このために、遅延時間と高電圧パルスの時間幅は重要なパラメータである。

RC時定数は 10^{-7} sとし、印加する電圧は2 cmの箱で12.5 kV/2 cmから15 kV/2 cm、1 cmの箱で8 kV/1 cmから12 kV/1 cmを用いている。同時計数信号と高電圧パルスの遅延時間は 2μ sより短ければ検出効率は100%である。また、検出器の回復時間は実験によりおよそ0.1 sと求められた。図5から飛跡の位置分解能は2 mm程度である。これにより、空間分解

能が良く、同時に複数の宇宙線がチェンバーを通ってもそれぞれの飛跡を検出できる検出器が完成したのである。

4. デモンストレーション用スパークチェンバー
 スパークチェンバーは宇宙線を目で見えるように示すことができるので、各地の科学館などで用いられている。応用光研工業(株)では、宇宙線観察装置として取り扱いやすいスパークチ

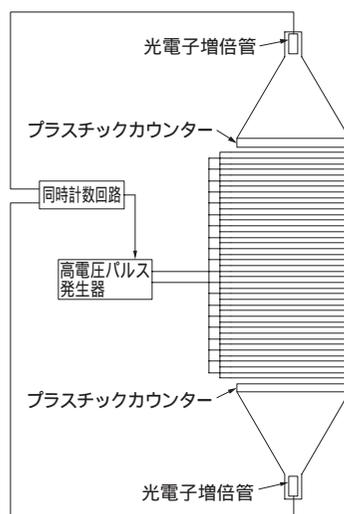


図6 宇宙線観察装置の概略



図7 宇宙線観察装置

表示部に穴をあけて、宇宙線の飛跡だけではなく、手や物を宇宙線が通りぬける様子が見られるようにしてある。穴の部分に鉄板を差し入れている様子。(写真提供：応用光研工業(株))

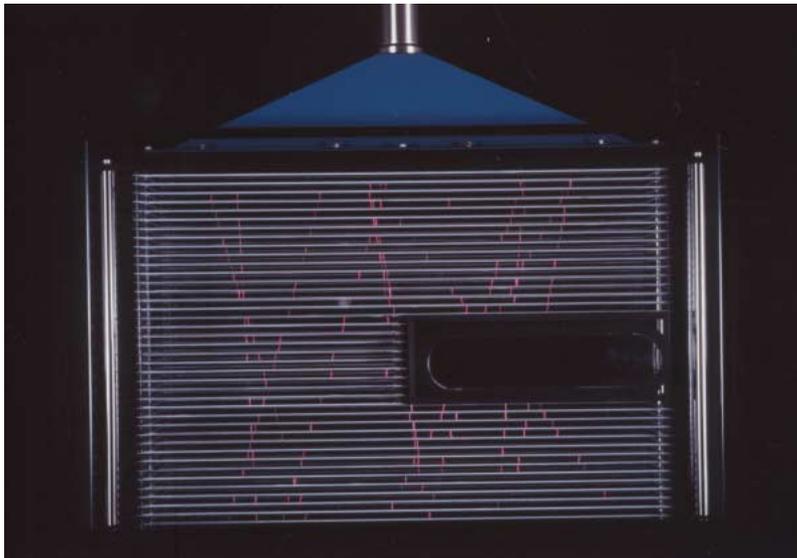


図 8 宇宙線による放電の様子
宇宙線がシャワーのように降り注ぐ様子を示した写真で、宇宙線の通った跡が赤く光って見えている。写真は 10 分間の露光撮影によるものである。(写真提供：応用光研工業(株))

エンバーを製造している。この原理図を図 6 に示す。上下の電極とするアルミニウム板とアクリル樹脂の角棒を側面とする薄平たい箱を 30 ~ 40 層重ねた構造で、各箱にはヘリウムガスが詰められている。

宇宙線の通過は上下のプラスチックシンチレータの同時計数信号で検知し、高電圧パルスを発生している。内部に空間を作り、手を入れることができ、宇宙線が手を通過することを確認できるタイプのもも製造されている(図 7)。実際の観察装置を見ると、宇宙線の飛跡がきれいに見られる(図 8)。光っている時間は $1\mu\text{s}$ 程度であるが、もっと長いように見える。また、光る箇所が上から下へ進むように見えるが、実際には全ての箇所は同時に光っている。観察装置は、観察しやすいように通過する宇宙線の数が毎秒 1~5 個程度になるように設計されている。このチェンバーを囲むようにして磁場をかけることができると、荷電粒子が磁場により曲げられる様子が分かり、この曲げ半径から運動量を求めることができる。

5. 手作りのスパークチェンバー

スパークチェンバーを製作する試みに関する報告はいくつか見られる^{6,8)}。ここでは、京都大学物理教室で行われた学生実験プログラムの中で、延與秀人助教授(当時)の指導で 1997 年から 2000 年に行われたスパークチェンバーの製作プログラムの内容を紹介する^{7),8)}。

実験装置の概要

検出器：プラスチックシンチレーションカウンタを使用。

スパークチェンバー：30 cm × 15 cm のアルミニウム板と、その 1 cm 程度内側に入るように 10 mm 厚のアクリル板で井桁を組んでエポキシで接着した箱を 3 段重ねにした構造。

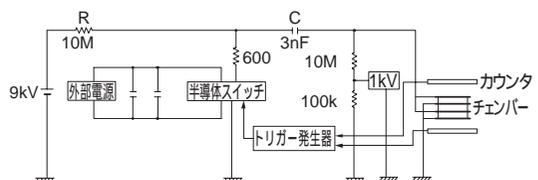


図 9 手作りスパークチェンバーの回路図⁷⁾

回路：回路図は図9参照。放電管の実験と異なり，チェンバーの放電電流でコンデンサーを放電するので時定数は短い。当初は高電圧パルスを発生させるためにサイラトロンを用いていたが，不調に終わり，高価な高電圧半導体スイッチに変更。半導体スイッチはパルス電子技術(株)製のHVS 12k20(立上り時間~100 ns)を使用。

放電用ガス：ヘリウムガスとネオンガスを2:1から3:1に混合したガスを使用。

この装置を用いて，福井氏らの放電管による実験で明らかにされた，宇宙線の通過を効果的に捉える3つの条件の達成を旨とした。

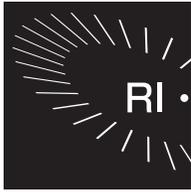
- 1) 宇宙線の通過と高電圧パルスとの時間差は $2\mu\text{s}$ より短くする。
- 2) 高電圧のパルス幅を短くする(RC時定数 $\sim 10^{-7}\text{s}$ 程度)。
- 3) 高電圧パルスの立上り時間を短くする。

手作りのスパークチェンバーで宇宙線が見えたときには感激であったと記されている。ガス漏れを注意深く探して補修した結果，性能が上がり，粒子の飛跡が良く見えるようになったということである。

なお，実際に手作りするときには，高電圧を用いるので十分注意する必要がある。

参考文献

- 1) 京都コンピュータ学院卒業生編集誌アキュム，15号(1993)
(<http://www.kcg.ac.jp/acm/a5042.html>)
- 2) T.E. Cranshaw, *et al.*: *Nuovo Cimento*, **5**, 1107 (1957)
- 3) M. Conversi, *et al.*: *Nuovo Cimento*, **2**, 189(1955)
- 4) S. Fukui, *et al.*: INS-TCA 10(1957), INS-TCA 11(1958)
- 5) S. Fukui, *et al.*: *Nuovo Cimento*, **11**, 113 (1959)
- 6) 岡山県教育センターによる高等学校理科研修講座(物理・平成17年度):ここで製作されたのは放射線の通過で放電を起こさせる装置で，飛跡を見ることはできない。
(<http://www.edu.c.pref.okayama.jp/sien/kyouka/rika/buturi/4/index.htm>)
- 7) 京都大学物理教室による学生実験プログラムの一部:1997年から2000年まで行われた。内容は以下のURLで見ることができる。
(<http://www2.scphys.kyoto-u.ac.jp/BIRDnet/Edu/SS97/spark.html.bak>)
(<http://www2.scphys.kyoto-u.ac.jp/BIRDnet/Edu/SS00/sparkchamber.pdf>)
pdfファイルの記述は実験を行った詳細が示されていて，大変興味ある記述である。
- 8) 私信・延與秀人氏(2006)
(日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門
E-mail ▶ tokushi.shibata@kek.jp)



簡易放射線測定器「はかるくん」とその活用

石 沢 昌 登

1. はじめに

1986年4月、旧ソビエト連邦のチェルノブイリ原子力発電所で原子炉事故が発生し、大量の放射性物質が大気中に放出されました。ヨーロッパをはじめ、偏西風に乗った放射性物質が日本でも検出され、多くの人々を不安にさせました。世界で唯一原子爆弾による被ばくを経験した私たち日本国民は、日頃から放射線(能)について神経質であり、「放射線(能)」=「悪いもの」という一義的なイメージを持っています。また、そのような強いイメージにさいなまれ、放射線(能)についての正しい理解をする努力を怠ってきたように思われます。今日においても、まだ多くの方が、このイメージに縛られているようです。このような先入観を解くために「はかるくん」は誕生しました。

2. 「はかるくん」の誕生

「はかるくん」が製作される以前の放射線測定器は、専門家が使う高価な測定器がほとんどであり、一般の人が日常的に気軽に使える物を探すことは大変でした。ないのであれば作るしかありません。国民の間違った認識を解くために、文部科学省(当時の科学技術庁)の委託を受けプロジェクトはスタートしました。

測定器の専門家、原子力機関の広報担当者、原子力モニタの方々の協力を得ながら、測定器に関する次のコンセプトを決めました。

- ・デジタル線量当量率表示 ($\mu\text{Sv/h}$)
- ・ヨウ化セシウム検出器
- ・ γ 線専用(エネルギー範囲 150 keV ~ 3 MeV)
- ・電源、計数音の2ボタン
- ・充電電池式 24時間測定可能

平成元年、放射線計測協会を中心として委員会やメーカーの協力の下、1号機(DX 100)が完成しました。女性や子どもの手にはちょっと大きな重量 500 g の無骨なデザインでしたが、無料貸出し制度は歓迎され、無事スタートしました。平成3年、電磁波シールドの強化、小型軽量化を図った2号機(DX 200)を製作し、一般の方を対象にした貸出しは着実に伸びて行きました。その一方、中高生と教師を対象に、より高度な放射線教育を展開する目的で β 線検出器、記憶機能、通信機能を搭載したIIタイプの製作、 β 線検出器を省いたメモリータイプの製作を行い、広範囲な利用の要望に応えられるよう、3機種約5,000台を保有し貸出しに供しています(図1)。



図1 はかるくん3種

表1 はかるくんの仕様

機種	DX 200	メモリー II	II β 機能
測定放射線	γ 線	γ 線	β 線
検出器種類	CsK(Tl)	CsK(Tl)	Si 半導体
感度, 効率	0.01 μSv/h において 10 cpm	0.01 μSv/h において 10 cpm	U ₃ O ₈ のβ 線 に対して 10%
指示誤差	± 10%	± 10%	
エネルギー	150 keV ~ 3 MeV	150 keV ~ 3 MeV	
測定範囲	0.001 ~ 9.999 (μSv/h)	0.001 ~ 9.999 (μSv/h)	0 ~ 9999 (cpm)
表示間隔	60 秒間の計 数値(移動 平均値)を 10 秒ごとに 表示	60 秒間の計 数値(移動 平均値)を 10 秒ごとに 表示	60 秒間の計 数値(移動 平均値)を 10 秒ごとに 表示
電池	Ni Cd 充電電池	Li イオン電池	Li イオン電池
使用時間	約 10 時間	約 100 時間	約 100 時間
記憶機能	なし	600 データ記憶	600 データ記憶
寸法(H×W×D) (mm)	151×63×26	150×55×26	150×55×26
重量(g)	約 260	約 175	約 215

3. 「はかるくん」の種類と特徴

不特定多数の方に安心して使っていただくために、堅牢で安定した性能が求められます。利用者の手元に届いた測定器の動作が不安定で、指し示す値に信頼が置けないとしたなら、放射線(能)に対する不安を払拭するどころか、信頼を失うことになりかねません。測定器の製作には、測定値の信頼性に細心の注意を払っています。なお、測定値の信頼性を確保するために、貸出し前には健全性を確認する点検校正作業を行い、品質の維持管理に努めています。

現在無料貸出しを行っている「はかるくん」の性能・特徴は、表1の通りです。

4. 貸出し事業

「はかるくん」の貸出しは平成元年から今日まで18年間行われており、平成17年度の利用・貸出し実績は18,001台、貸出し開始当初から延べ183,687台の貸出しを行ってきました(図2)。

当初は原子力モトナなど極く一部の利用に限

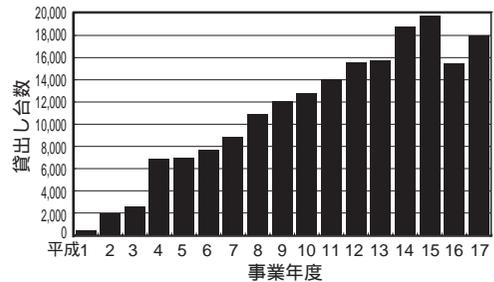


図2 はかるくん貸出し台数の推移

られていましたが、年を重ねるごとに個人のほか原子力関連団体、自治体などの利用も増え、特に近年目立った傾向としては、次世代層を中心とした学校での利用がその中心を占めています。エネルギー問題、環境問題を考えるための材料として、原子力に関連した項目として教育現場での放射線教育が活発になってきているものと考えられます。

チェルノブイリ原発事故から約20年、JCO臨界事故(1999年9月30日)から約7年。人々の放射線に対する意識も少しずつ変化を見せ始めていますが、残念ながら未だに放射線(能)という言葉に嫌悪感を抱く方々も存在しています。まだまだこの「はかるくん」貸出しPA事業が担うべき仕事は続くものと思います。

5. 活用コンクール

「はかるくん」を夏休みの自由研究の題材に活用するという使われ方は、貸出し当初からありました。小学生が「研究作品を学校に提出し、賞を貰った」、また「資料をまとめたので送ります」など、個人利用の中で発展的に、熱心に利用される方が多いことが報告されていました。これらの利用成果に対し、何か感謝の意を表現する方法がないものだろうかとの考えから始まったのが、活用コンクールです。

平成14年度から文部科学大臣賞を受けるコンクールとして実施し、初回は204件の作品が集まりました。受賞した作品の内容は予想を遥かに超えた大作で、回を重ねるごとにレベルアップしてきました。

充実した作品が届き、内容がレベルアップして行くことは十分に意義のある成果であると思います。しかしその一方で問題もありました。作品の内容が高度になるのに反比例し、作品の応募件数が伸び悩んでいるという状況でした。この事業について検証を行う委員の中からも、「小学生が作る作品にしては高度過ぎる。夏休みを健全に過ごしている子どもたちが気軽に参加できる内容に修正するべきである」との助言をいただきました。

このような反省を踏まえ、今年度の活用コンクールでは、小学生以下は壁新聞形式で模造紙1枚以内、中学生以上はレポート形式でA4レポート用紙10枚以内とする制約を設けました。これにより、より多くの方がチャレンジしやすい内容へと軌道修正をしました。また、全国の小学校や図書館などに資料を配布し、コンクールへの参加を呼びかけました。今年度はどのような作品が選ばれ、どんなユニークな利用法や結論が導き出されているのかとても楽しみです。

6. 実習用キット

「はかるくん」を有効活用していただくためのツールとして「実習用キット」を準備しています。 ^{137}Cs 線源からの γ 線を用いて、距離による減衰、遮へい材質の違いによる遮へい効果、遮へい材厚みによる遮へい効果の違いの3種の実験を効率的に行えるよう工夫されたキットです。図3に示す通り、4方向について同時に測定を行うことで、効率的に実験を行うことが可能です。

このキットも「はかるくん」と同様に無料貸出しを学校向けに行っています。貸出しには、実験を進めるための教師用解説テキストと生徒用テキスト、解説のビデオを付けています。年間約1,000組が貸出されています。

7. 面白い使い方

「はかるくんII」は β 線も測定できることが最大の特徴です。破損しやすいため一般向けに



図3 実習用キット

は貸出していませんが、専用の実験テキストも用意し、高校、大学等の理科系の実験に利用していただくことを想定しています。

この実験テキストに記載されている「空気中に存在する放射性物質の観察」と「集められた塵に含まれる放射性物質の壊変(放射能の減衰)の確認」の実験例を以下に紹介します。

7.1 実験の準備(準備するもの)

「はかるくんII」、家庭用電気掃除機、網(水切りネット)、ティッシュペーパー(集塵用フィルタとして使用)、粘着テープ

1 網を、電気掃除機のホース先端に被せ、粘着テープで固定する。

2 1の網の上にティッシュペーパーを集塵用フィルタとして被せ、粘着テープで固定する。

3 電気掃除機のホース先端部を床又は地上50cm位の高さに固定する(図4)。

(注)この実験の集塵場所は、空気移動が無い密閉されたコンクリートの小部屋が適している。



図4 電気掃除機とティッシュペーパー

7.2 実験の手順

☞実験 A 空気中に存在する放射性物質の観察

- 1 「はかるくんⅡ」の電源スイッチを入れ、 β 線測定モードに切り替える。
- 2 バックグラウンド値として、集塵前のティッシュ表面を測定する(10回測定の平均を用いる)。
- 3 ティッシュをセットした電気掃除機を15分稼働させ集塵する(電気掃除機の発熱に注意)。
- 4 「はかるくんⅡ」でティッシュの表面を測定し、その値を記録する(測定開始1分後の値)。
- 5 さらに電気掃除機を15分稼働させ、「集塵」「測定」を繰り返す。

以上の要領で、45分程度集塵し、集塵時間と測定値を比較する。空気中に存在する放射性塵埃がティッシュ表面に捕集されることが分かり、空気中に放射性物質が存在することが理解できる。

☞実験 B 集められた塵埃に含まれる放射性物質の壊変(放射能の減衰)の確認実験

- 1 バックグラウンド値として、集塵前のティッシュ表面を測定する(10回測定の平均を用いる)。
 - 2 実験 A と同様に電気掃除機で45分程度集塵する(実験 A の連続実験として行うと効率的行える)。
 - 3 ホースからティッシュを取り外し、「はかるくんⅡ」の β 線測定窓を捕集面に密着させて測定を行う。
 - 4 測定開始後1分の指示値を読み取り、記録する。その後5分ごとに指示値を読み取り、記録する。
- *メモリー機能を利用すると、1分ごとの測定値を自動記録できるので便利。測定終了後、各測定値を読み出し記録する。
- 5 4で読み取った計数値から1のバックグラウンド値を差し引き、正味計数値を求める。
 - 6 正味計数値と時間の関係をグラフにし、放射能の減衰曲線を作成する(図5)。

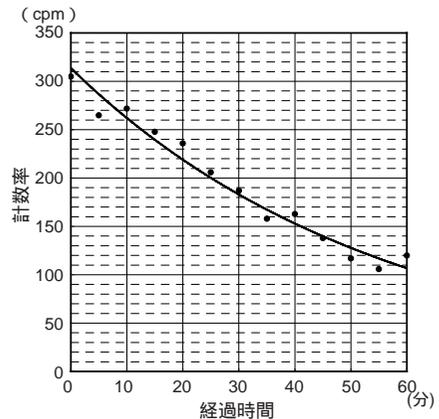


図5 集めた塵中の放射性物質の減衰

7.3 電気掃除機とティッシュペーパーを使用する意義

空気中塵埃の集塵には、専用のダストサンブラと集塵ろ紙が最適であるが、価格が高く、一般的に使用することが困難であると共に特殊な装置のイメージが強い。これに対して電気掃除機とティッシュペーパーは日常見慣れたものであり、準備も容易である。特殊な仕掛けなしで「空気中の放射性物質を集められる」ことを実感することは、常時空気中に放射性物質が存在していることを強くイメージできる効果がある。

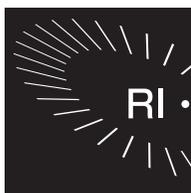
8. まとめ

五感に感じない放射線は、直感的に捉えにくいからか、取組み難い学問の1つとして敬遠されているように思われます。それゆえ敷居も高く、多くの方に正しく理解されない要因なのかもしれません。

難解な理論や公式はさておき、まずは感じることから始めれば、自ずと「何で?」、「どうして?」との疑問が湧き、自ら探求する気持ちへと発展するのではないかと考えます。

「はかるくん」を、人体には備わっていない新たなセンサーとして利用し、人体が感じない放射線を感じられる道具として、ぜひ活用してみてください。ご利用お待ちしております。

(放射線計測協会 E-mail▶m.ishizawa@irm.or.jp)



高校生のための放射線実習セミナー

岡元博志

日本原子力文化振興財団（以下、当財団）では、全国の高等学校を対象とした“高校生のための放射線実習セミナー”を開催している。開催校は毎年約40校を数え、現在延べ3万6,623人（平成18年8月11日現在）の生徒が本セミナーを受講している。本セミナーは、1978（昭和53）年より実施され、放射線とは何かを正しく理解してもらうため、当財団が継続的にを行っている事業である。

原子力と聞くと、まず、一般の人は放射線・放射能による人体への影響という心配をしまい、高校生を含めて、恐ろしさが先に立つのが大半で、世界で唯一原子爆弾を受けた国民としては無理からぬことだ。

これまでに当財団が行ったアンケート調査結果においても、放射線・放射能の区別がついていない人も多く、医療の分野での放射線利用は認識しているものの、その他の放射線利用や自然放射線などについての正しい知識・理解については低い（あるいは乏しい）という結果が窺える。

学校教育の現場でも原子力の基礎が取り上げられる機会は少なく、高等教育の物理Ⅱにおいて学期末の最後で触れられる程度である。そして、大学入試でも、原子や放射線に関する問題はあまり出題されないため、大きな関心を得ることはない。また、大学においても限られた専門分野に進んだ学生以外は放射線について勉強する機会は少なく、実習を受ける機会は皆無

といえる。

放射線は医療・産業など様々な分野で利用されており、現代社会で欠くことのできないものとなっている。しかしながら、たくさんの恩恵を受けている現実があるにもかかわらず、原子力の平和利用の分野は認知されていない。放射線に対する正しい理解がまだまだ得られておらず、短絡的に原子力・放射線は怖いということになってしまっているのが現状である。

以上のような背景から、原子力の正しい理解を得るためには、まず、放射線について理解してもらう活動が必要と考え、「高校生のための放射線実習セミナー」を約30年にわたり実施している。

1. いくつかのテーマを組み合わせる実習

本セミナーは、1日程度の標準コース（約4時間）と短期コース（約2時間）の2つのコースを設けており、当該高校の教室などで実習機器を持ち込んで行う出前授業である。

まず最初に、「放射線のはなし」と題して1時間程度の講義を行った後、実習を行う。実習は4人1グループに分かれ、放射性物質を用いてGM（ガイガー・ミュラー）計数管による測定をしたり（図1）、簡易放射線測定器「はかるくん」（放射線計測協会の協力）を使い、学校内を探索して身のまわりの放射線（自然放射線）を測定する実習などを行っている。

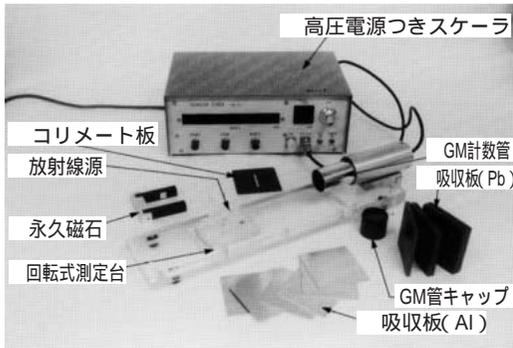


図1 GM計数管を使った実験装置

用意されている実習は全部で7種類あり、学校側にてテーマを選択し実習を行っている。

実習テーマ

- ・ GM計数管の特性
- ・ β 線の磁石による偏向
- ・ β 線の物質による吸収
- ・ γ 線の物質による吸収
- ・ 距離の逆2乗則
- ・ 霧箱による放射線の飛跡の観測
- ・ 自然放射線の測定

使用する放射線源

- ・ ^{90}Sr (β 線), ^{137}Cs (γ 線)

2. 歴史から最新の話題を織り交ぜての講義

まず最初に専門の講師による放射線についての講義を行う。放射線研究の歴史から種類・性質などについて説明し、自然放射線の話、医療・工業などでの放射線利用、そしてニュートリノの研究までと、最新の話題を取り混ぜ内容は多岐にわたる。

放射線については、これまでは漠然と怖いと思っていた生徒が大半で、講義・実習を経ていくにつれて、その意識は大きく変わっていくようである。

実習開始直後は、放射線源を目の前に置くと怖がって触れることすらしない生徒たちも、放射線の性質や今回使用している放射線源の量などを理解していくにつれて、生徒自身で筆箱や下敷きなどいろいろな物を置いて、放射線がど

の程度遮へいされるのかを試すなど、積極的に実習に参加しているようである。

実習後のアンケート調査などでも、「放射線についてイメージしていたほど怖いものではないことがわかった」、「身のまわりに放射線があることを知った」、「放射能と放射線の違いがわかった」、「マスコミの情報と大分違う」といった声が寄せられている。

「放射線は、私たちの身のまわりでは大きく役立っている。放射線を少しでも理解してから、正しく怖がるのが大切である」と述べる講師もいる。

では、その実習のいくつかを簡単に紹介する。

3. 楽しそうに、白い線を

真っ暗で、シーンと静まりかえった教室で、突然生徒から、「あっ見えた。白い線が見えた」と興奮した声が高々と教室内に響く。すると他のグループもさらに真剣になって小さなプラスチック容器に、懐中電灯を当て生徒同士頭をくっつけながら、白い線を懸命に捜している(写真1)。

時間が経過すると「こっちも見えた」と興奮した声で、初めて目にする放射線の飛跡に生徒たちが皆、釘付けになっている。なぜ見えるのかを考えながら、放射線の飛跡が見えては消え、そしてまた見える摩訶不思議な白い線の現象に興味深く覗いている。

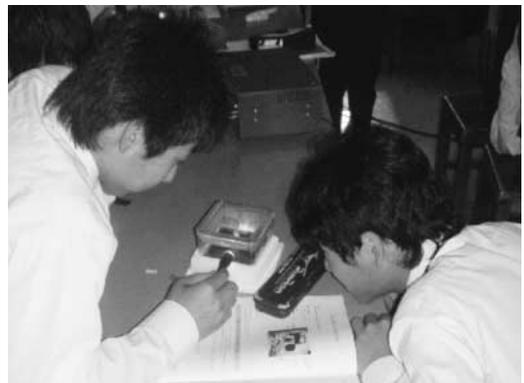


写真1 飛跡を一生懸命捜して

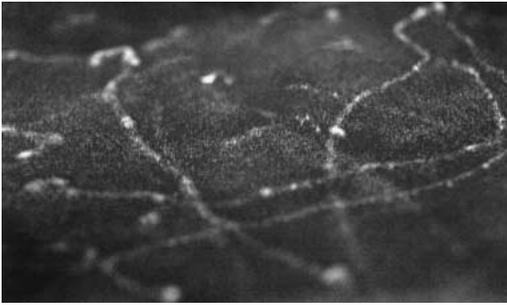


写真2 霧箱の中 β 線の飛跡

そこで講師が「このプラスチック容器の中では、空中で飛行機雲ができるのと同じ状態をつくっているんだよ」と言うと、また小さなプラスチック容器の中をまじまじと白い飛跡を追うように見入っている（写真2）。

これは、本セミナーの中でも特に人気の高い実習で、約100年前にイギリスの気象学者ウィルソンによって発見され、後にノーベル物理学賞を受賞した「ウィルソンの霧箱」であると説明すると、生徒たちは100年の時を経て、ノーベル賞級の実験をしていることを実感している様子が窺える。

この実験は、機材はすべて市販されているものを使ってできる実験ということもあり、放射線というものが少しでも身近に存在するを感じられる実習の1つといえる。

4. 中学で教わったフレミングの左手の法則

「中学で教わったフレミングの左手の法則を思い出して下さい」と言うと、みな左手の親指・人差し指・中指を見つめ「FBI」または「でん・



図2
フレミング左手の法則

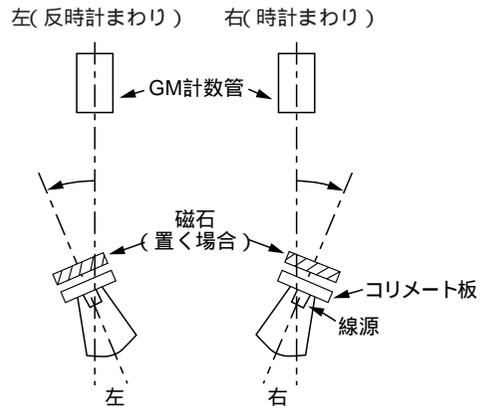


図3 回転台の目盛の左右

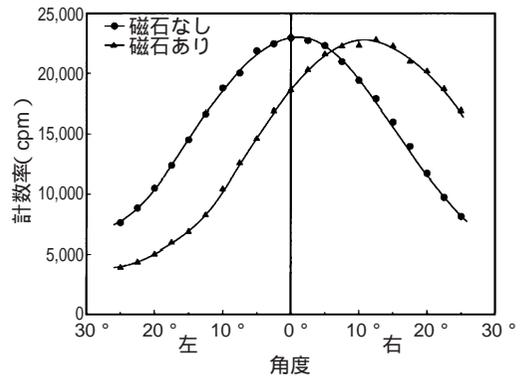


図4 磁石による β 線の偏向

じりよく」と中学でそれぞれの教わった覚え方を思い出して、「親指が力だっけ」など思い出している（図2）。

この実験は、磁石を利用して放射線（ β 線）が曲がる（偏向）という現象を、フレミングの左手の法則から導き、電荷を持った粒子の流れを確認する実験である。

放射線の放出方向をコリメート板で限定し、その放出方向を左右に振り分けて放射線の量を測定する（図3）。磁石を利用しない時と、磁石を置いて磁界の間に放射線を通過させることによって、どのように変化するのか、測定した放射線の量をグラフにプロットしていく。結果は図4の通りになり、磁石を置くことにより曲がる

無回答 だった 難しい 実験 他	少し 難しか った	少し やさし かった	やさしい 実験 だった	579 人を対象に行ったアンケート 2006 年 5 月 30 日～8 月 10 日 (単位%)	非常 に面 白 かった	面白 かつ た	あま り面 白 なかつ た	面白 くな か 他	無回 答 他
6.9	24.3	39.9	24.9	GM 計数管の特性	19.1	54.9	17.3	6.9	
4.1	22.8	40.1	32.2	β 線の磁石による偏向	34.5	53.5	10.5	4.3	
6.3	20.8	35.7	29.5	β 線の物質による吸収	22.7	57.0	14.5	4.3	
3.2	16.5	37.6	37.9	γ 線の物質による吸収	34.1	47.5	13.1	2.4	
0.0	29.6	29.6	32.4	距離の逆 2 乗則	33.0	48.1	14.2	4.7	
1.5	9.6	28.5	56.6	霧箱による放射線の観察	64.9	30.6	0.7	1.9	
1.4	27.1	21.7	65.8	自然放射線の測定	43.6	42.7	10.6	0.5	

図 5 セミナー終了後に寄せられた感想等

方向(力の向き)が理解できる。そこからフレミングの左手の法則を用いて、 β 線がマイナスの電荷を持ったものだということを確かめる。

5. 実習機器を利用して水位計

最後にデモンストレーションで、紙で覆い隠したペットボトルの水位を β 線の線源と GM 計数管で探し当てる、という実験を行っている。

生徒を教壇の前に集め、水で遮へいされる β 線の性質を利用して、見えない水面の高さを測るといった、いわゆる「レベル計、非破壊検査」を目の前で見せる実験である。

用意する物は、ペットボトルと黒い紙だけで、ペットボトルの中身が見えないよう紙で覆うだけで出来上がりである。ペットボトルの中には適当な量の水を入れ、生徒たちには、どの程度水が入っているか分からないようにしてある。そこで、生徒には計数値の表示画面を注視するよう指示し、GM 計数管と β 線源をペットボトルをはさむように平行に、上からゆっくりと下になぞっていく。すると「あっ、計数値が遅くなった！」と水の遮へい効果により計数値の増加が遅くなった位置にペンで印を付けて、覆っていた紙を取り、ペットボトルと並べる。紙に付けた印と水面の高さが一致すると、生徒たちから「おっー！」と歓声が上がった。

6. まとめ

本セミナーでは、定められた放射線の基礎的な実習に加えて、こうした身近で利用されている放射線利用も加えながら、放射線について少しでも理解してもらうことも心掛けている。

セミナー終了後、感想などを聞いたところ、「放射線についてよくわかり、充実した 1 日だった」、「放射線について偏見を持ちすぎていた」、「放射線 = 危険というイメージが薄らいだ」などの感想が数多く寄せられている(図 5)。

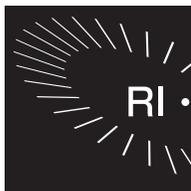
これらの反響は、私たちにとってこれほどうれしいことはなく、改めて次世代層を対象とした草の根的な知識啓発活動と体験学習の重要性を認識した次第である。

このような実習キットを、学校独自で所有することは難しく、また現行のカリキュラムにおいて、実験・実習を行う時間を取ることが難しいのが現状である。そのようなことから、本セミナーを授業の一環として取り入れ、年間行事予定に組み込んでいる学校も多くあり、好評を得ている。

今後も、より身近に感じられる実習テーマを加えながらセミナーを通して、放射線教育の一助となればと思っている。

(日本原子力文化振興財団

E-mail ▶ okamoto@jaero.or.jp)



セミナー“放射線ウォッチング” GM カウンターキットの組立てと実験

渡 邊 鑑

1. はじめに

1993年より、中学・高校生(教員も含む)を主な対象としたセミナー“放射線ウォッチング”を中部原子力懇談会及び放射線測定 of 専門家とともに開設し、累計31回(2006年夏まで)、受講生は557名(延人数)を数えた。セミナーでは小型GM計数管を用いた簡単な放射線測定器の組立てと、組み上がった測定器を使用して、放射線の基礎的な測定を行ってきた。

はんだごてを握って部品を1個1個誤りなく組み込んでいき、動作を確認するまでには、相当の注意深さと緊張、忍耐の持続が必要である。近年このような教育実験はほとんど行われなくなった。このセミナーは受講人数は多くはないが、そのような基礎教育実験を望む受講生を対象としており、指導者1人が3~4名の受講生を担当する。言わばマンツーマン方式で、キットの組立てそのものに相当のウエイトを置いている。中学生にも組立て可能にするために、キットは電子基板などを含めて独自に改良を加えたもので、市販で入手することはできない。キットの入手はセミナーの受講者に限られるため、セミナーへの応募に関しては下記*に問い合わせられたい。

本稿は主として中・高校生を対象とした教育

実験として紹介するものである。セミナーの概要はすでに報告した¹⁾ので、ここではキットの動作内容、組立てなどについて、すなわち、前記の注意深さと忍耐を要する部分の実験内容を中心にして述べる。

2. GM カウンターキットの内容

キットは当初、市販品を使用していたが、1996年より独自に作ったキットを使用した。その後、度々改良を加えてきたが、今回紹介するのは最新のモデルで、部品数も少なく、安定に動作し、電池の寿命も長い設計となっている。

2.1 GM 計数管

GM 計数管は当初、浜松ホトニクス社製のD3372型のGM計数管を使用していた。陰極直径5mm、長さ16mmの小型計数管で、ハロゲン消滅型である。プラトー領域は500~700Vである。浜松ホトニクス社がこの計数管の製造をやめたので、現在はNational Electronics社製のZP1310型の計数管を使用している。前記以外のメーカー、例えばLND, INC(USA)でもGM計数管が販売されているが、高価でもあり個人で入手することは困難である。

2.2 高圧電源部

図1にキットの全回路図²⁾を示す。キットはS-006Pの積層乾電池(9V)によって動作する。高圧電源部はGM計数管に印加する約600V

*中部原子力懇談会(☎052 223 6614, ホームページ <http://www.chugenkou.org/>)

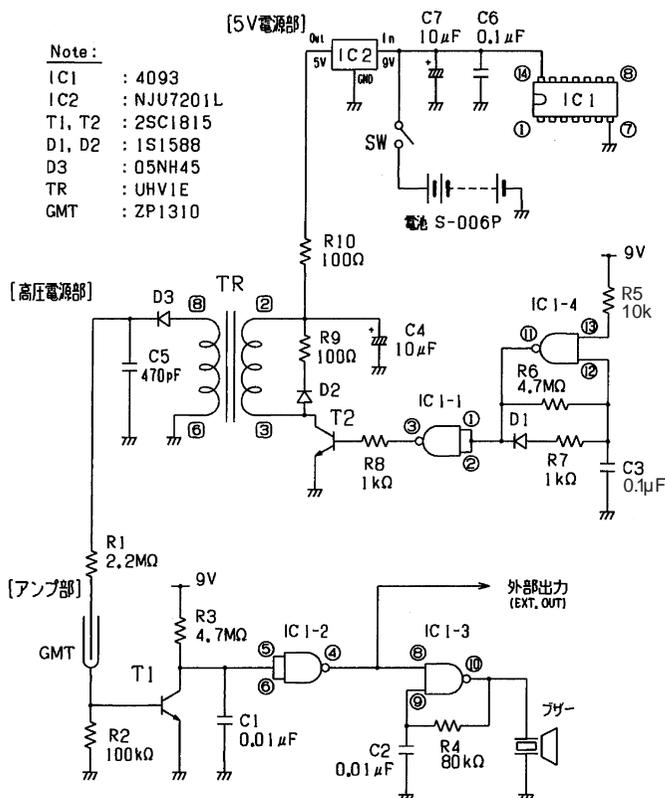


図1 GMカウンターキットの全体回路図

の電圧を作るためのDC-DCコンバータである。

IC1は4個のNAND型IC(MOS型)から構成されるが、このうちのIC1-4とIC1-1の2個によって、高さ8V、幅 $20\mu\text{s}$ 、周期77msの正のパルスを作り、トランジスタT2を制御する。T2がONになるとコンデンサC4の電荷は変圧器TRの1次側を通して放電される。1次側の電圧は1:120の巻数比をもつTRにより昇圧され、耐高電圧ダイオードD3と耐高電圧コンデンサC5により再び直流に変換される。電池の寿命を長くするためにこの高圧電源は電圧安定化回路を設けていない。電池電圧の低下によるGM計数管の印加電圧の低下を防止するために、TRの1次側に加える電圧を3端子レギュレータIC2により5Vに安定化した。IC2には内部消費電流の少ないものを選んだ。

T2がOFFになる瞬間にT2のコレクタに高電圧が印加されT2が破壊されるのを防止するために、ダイオードD2と抵抗R9よりなるダンパー回路をTRの1次側に並列に挿入した。この回路の挿入により、T2がOFFになった後も短時間TRの1次側に電流を流すことができるので、DC-DCコンバータの変換効率がよくなるという利点がある。C4にはT2がOFFの間に抵抗R10を通してIC2より充電される。

2.3 アンプ部³⁾

GM計数管の陰極から信号(幅約 $70\mu\text{s}$)を取り出し、トランジスタT1のベースに印加する。T1とIC1-2のインバータにより幅40ms、高さ8.5V(電池電圧9V)のパルスに変換される。この幅の広いパルスはIC1-3により、4kHzの交流電圧に変換され、ブザーによりピーブ音としてGM計数管の放電を知らせる。このGMカウンターキットは、電池電圧が約5Vに低下するまで動作する。消費電流は約0.5mAであった。組立てたキットを図2(写真)に示す。

3. GMカウンターキットの組立て

3.1 はんだ付けの練習

キットを組立てた後、電子回路が正しく動作するかどうかは、はんだ付けの良否によって決まると言っても過言ではない。そこで部品の組立て・取り付けに先立って、練習用基板を使用して、はんだ付けが正しくできるように指導している。

3.2 部品点検

組立ての前にキットの部品が過不足なく用意されているか点検を行う。この点検作業はまた、部品とその名称を対照することにより、組立てに際して部品を取り違えて組込むことを防止するのに有効である。

3.3 組立て

組立マニュアルに書いてある工程順序に従って、基板の部品配置図(図3⁵⁾：工程番号(2)~(11)の図を例として示す)を参照しながら作業を進めれば40工程で組立ては完了する。工程順序としては、ジャンパー線などのように後で取り付けが難しい作業をまず行う。次いで、最も部品数の多い高压電源部の部品の取り付けを行い、そしてアンプ部、5V電源部へと進んでいく。

3.4 動作テスト

一部分の部品の取り付けを残した状態で、動作テストを行う。このキットは部品数33個、はんだ付けはおよそ90か所になるので、回路要素を分割して次のテストを行う。

1□絶縁テスト

電池の+側のラインが接地していると電池を破壊する危険があるので、他のテストに先立って、電池をつけないで電源の+ラインと接地間の絶縁テストを行う。

2□5V電源部テスト

電源スイッチをONにして、3端子レギュレータIC2の出力側に+5Vが出ていればこの回路の組立てはOKである。

3□アンプ部テスト

1MΩの抵抗を通して電源の+9VをGM計数管の陰極に加えることによって、トランジスタTIをONにすればブザーが鳴る。もしも鳴らなければ、この回路のどこかに不良箇所が存在する。

4□全回路テスト

電源スイッチをONにし、γ線源をGM計数管に近づけるとブザーが“ピー、ピー”と鳴れば、キットは完成である。GM計数管の良否はあらかじめテストしてある

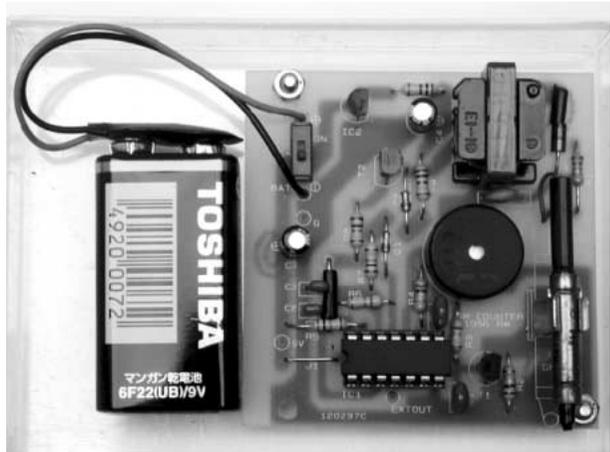


図2 キットの組立完成写真

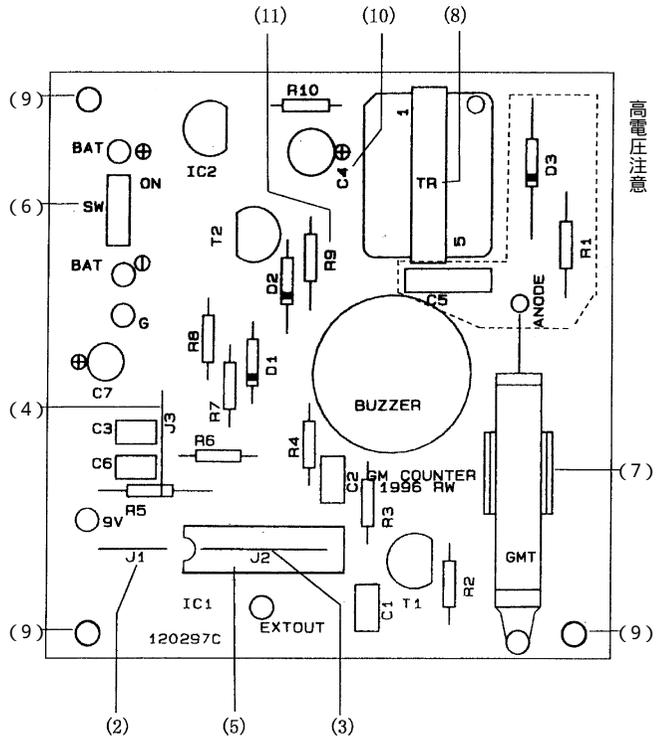


図3 基板の部品配置図(工程番号を含む)の例
(工程に応じて4枚の図を用意している)

ので、ブザーが鳴らない場合は高電圧回路のどこかに不良がある。

3.5 トラブル修理

トラブルの中では、はんだ付けの不良、特にテンブラ(部品脚と基板の銅箔の間の導通不良)に基づくものが最も多かった。しかし、この不良箇所の発見は困難であった。このトラブルは、当初の銅箔が錫めっきされた基板を使用していた場合に多かった。この基板では、はんだが基板に付きやすく、一見はんだ付けできたように見えるのであるが、逆に、部品の脚とののはんだ付けが不十分である場合が発生した。したがって、その後のキットでは銅箔の錫めっき基板の使用は取り止めた。

次に多いトラブルの原因は、銅箔間のはんだによる短絡であった。また、部品の取り違い、及びトランジスタ、ダイオード、ICなどの取り付け方の間違いが目立った。

4. 放射線実験

☞実験 1 放射線強度のゆらぎの実験

サーベイメータのチェック線源 (^{226}Ra) を使う。線源と GM 計数管の距離を調節して 30 秒間で最大で 15 計数程度になるようにする。30 秒間の計数を 100 回繰り返して測定する。計数値の度数分布をグラフ用紙に描く。平均値や分散を計算して、放射線強度のゆらぎについて理解する。

☞実験 2 放射線の鉛板による吸収実験

まず、自然計数率を測定し、周囲に自然の放射線があることを理解する。線源と GM 計数管の間に 1 枚の厚さが 5 mm の鉛板を入れ、その枚数と計数率(自然計数率を差引く)の関係

を片対数目盛用紙に描き、放射線の吸収について理解する。

☞実験 3 屋外の放射線強度測定

公園などの屋外において、1 か所で 10 分の測定を数か所で行い、場所による自然放射線強度の相違、屋内との相違について理解する。

5. おわりに

キットが改良されるにつれてトラブルが少なくなり、また、組立に要する時間も短くなった。しかし、前述したように、組立てには注意深さと忍耐が必要で、それだけに本セミナーの終了後のアンケートによれば、ほとんどの受講生が GM カウンターキットの組立てに成功した喜びを述べていた。電子回路の動作原理について詳しく説明を求める受講生もいる。

キットを組立てたあとの実験は、自身で組立てた測定器なので、大切に取扱って実験している姿を見るのは嬉しいことである。

なお、テキストはお申し出があればコピーをお送りできる(本稿 1 頁目脚注参照)。

参考文献

- 1) 渡辺 鏝:セミナー“放射線ウオッチング”十年, *Isotope News*, **590**, 15 (2003)
- 2) 放射線ウオッチングテキスト(第5版): 中部原子力懇談会, p.13 (2006)
- 3) ポケットガイガーカウンタキット製作・技術マニュアル: 秋月電子, p.3 (1989)
- 4) 放射線ウオッチングテキスト(第5版): 中部原子力懇談会, p.14 (2006)
- 5) 放射線ウオッチングテキスト(第5版): 中部原子力懇談会, p.5 (2006)

(名古屋大学名誉教授)



手作り箔検電器と放射線の測定

森 千鶴夫

1. はじめに

箔検電器は放射能発見の当初から、放射能・放射線の測定に使われ、また、V.F. Hessによる気球を使った宇宙線の測定にも使われた。その後、同じ原理に基づくローリッツェン検電器やポケット線量計が比較的最近まで放射線の測定に使われていた。一方、箔検電器は静電気の実験のために中学校や高校に常備されている。

ここでは、箔検電器を手作りして放射線測定を体験できること、および、学校に常備されている箔検電器でも放射線測定を体験できることについて述べる。

2. 箔検電器のしくみ

箔検電器の写真を図1に示すが、容器の中に箔があり、上部に荷電するための電極がある。箔に荷電するには、よく知られていることでは

あるが次のようにする。例えば、塩化ビニールのパイプを毛の布などで摩擦するとパイプが負に帯電するが、その先端部を図1(a)の上部の円形の電極の一端に近づけると上部電極に正の電荷が静電誘導され、箔の近辺には負の電荷が現れて、相互の反発力により箔が開く。この状態で、手をパイプを近づけた反対側の円板に軽く触れると、負の電荷が逃げて箔が閉じる。手を離れた後に、パイプを遠ざけると正の電荷が箔の部分にも広がり、箔は再び開く。また、塩化ビニールのパイプの先端を上部の電極に直接こすりつけるようにしてもよい。この場合には負の電荷が荷電され箔が開く。ガラス管を木綿などで摩擦すると正に帯電するので、塩化ビニールなどと同様に荷電に用いることができる。

3. 市販の箔検電器と手作りの箔検電器

市販の箔検電器：中学校、高校に常備されている市販の箔検電器の1つを図1(a)に示す。上部に円形のしっかりした電極を有し、長さ約2cm、幅約3mmの2枚の箔（多分厚さ2μm程度のアルミニウムかあるいは錫箔、写真の検電器は左側の箔が破損してなくなっている）は中央の垂直な電極に導電的に接着されている。非常に薄く柔らかで感度が高く、静電気を近づけると接着部の近くがたわんで箔の開き角度が大きくなる。

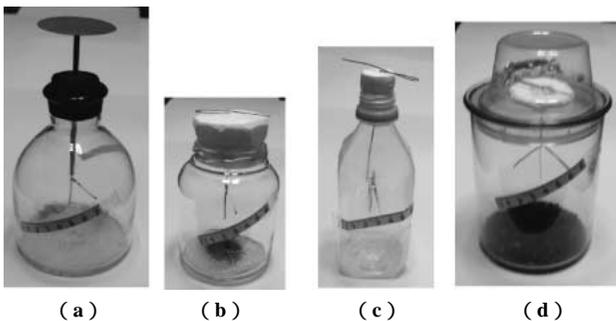


図1 市販品と手作りの箔検電器

手作りの箔検電器：手作りの箔検電器を図1(b)~(d)に示す。(b)はAGFのインスタントコーヒーMAXIMのガラスの空き瓶とクッキングホイル(厚さ約11 μm , 3 mg/cm²)を使った検電器で、ふたは容易に開けることができ、瓶の中にカンテラの芯(後述)を放射線源として入れてある。(c)はペットボトルとクッキングホイルを使った検電器である。(d)は著者の手作りの検電器としては最高のもので、100円ショップでアクリルの広口容器を求め、箔として、(株)箔一*で通信販売されている錫箔(127 mm \times 127 mm, 10枚入り1,890円(含送料))を使用した。これは厚さ1.3 μm (1.0 mg/cm²)で、市販の箔検電器のように柔らかくてたわむので、単に電極に接着するだけでよい。箔の扱いに少々注意を要するがピンセットで、なんとか取扱いが可能である。

箔の作製：(株)箔一から、アルミニウム箔(厚さ0.45 μm , 0.143 mg/cm²)が販売されているが、この箔は素人には取扱いが困難である。2 μm 程度のアルミニウム箔が入手できればよいように思う。クッキングホイルよりも薄くて入手が容易なアルミニウム箔として、Kiosk(キヨスク)やコンビニエンスストアなどで売られている、MORINAGA Hi-SOFTというキャラメルのお包み紙をしばらく温度の高い水に浸しておいてから、紙の部分を指先の腹でこすると、紙の部分が剥がれて、アルミニウム箔のみになる。この箔(約7 μm , 2 mg/cm²)は、クッキングホイルよりも薄く感度がよい。しかし、この箔やクッキングホイルは錫箔に比べて剛性が強く、単に電極に接着すると、接着部のそばでたわまないのので、箔が開かない。したがって、針金に引っ掛けるようにしなければならない。これらのアルミニウム箔は感度はよくないが、後述するように、こちらの方がかえって作りやすく、動作もまずまずである。

容器の作製：前述のコーヒーやジャムの空き

瓶などを使う場合、中に放射線源を入れるので、口が直径5 cm程度以上開いているのがよい。最良の絶縁体であり加工の容易なスチロールフォームでふたを作る。ポリエチレンまたはアクリル樹脂(絶縁性は十分でない)製のふた付きの広口容器を100円ショップで求めることができる(ガラス製があればなおよい)が、この場合には、一般に口が10 cm程度あるので、容器のふた(ポリエチレンやアクリル樹脂製が多く、十分な絶縁性が得られない)の中心に直径1 cm以上の穴をドリルで開ける。小さな穴をやすりで広げてよい。この直径よりも大きな直径で長さ2 cm程度にカットしたスチロールフォームの円柱を作り穴にねじ込む。開口部の直径が大きくても、2~3 cm程度以上の厚さのスチロールフォームがあれば、それ自身を削ってふたおよび絶縁体としてそのまま開口部に図1(b)のように押し込むとよい。容器の側面には目盛を付けた紙(定規の目盛をコピーすればよい)を斜めに貼る。市販の箔検電器のガラス容器に比べて、ポリエチレン、ことにアクリル樹脂は電気絶縁性が比較的高いため内面や表面に付着した電荷が逃げにくく、箔の動きに影響を与えるので、静電スプレーを両面にさっとかけるとよい。容器がガラスの場合にはこの必要はない。容器の中に乾燥剤のシリカゲルを入れ、上部の電極のそばにもシリカゲルを入れてカバーすると、箔が自然に閉じる時間が極めて長くなり数日かかる。しかし、通常は乾燥剤を入れなくてもよい。

電極の作製：直径0.8 mm~1 mmの針金(鉄線)を、図2に示すようにラジオペンチを使って折り曲げる。クッキングホイルやキャラメルホイルを使う場合には(a)の形にする。錫箔を使う場合には(b)の形にする。Aの先端を容器のふたのスチロールフォームに突き刺し、上に通す。その後、点線のように折り曲げる。アルミニウム箔を使う場合には、幅約2 mm、長さ約30 mm程度に切り、先端をCのように曲げる。それを、Bの部分に引っ掛ける。

* インターネット、美HAKU倶楽部、または、(株)箔一

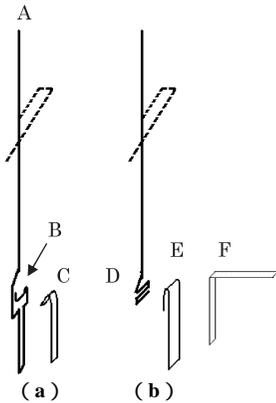


図2 電極の作り方

この際、Cの部分の幅は、Bの幅よりも小さくなければならない。また、Bの部分は直線になっている必要がある。箔が自由に回転できるようになっていなければならない。錫箔Fを使う場合には、厚さ0.2mm程度のアルミニウム板をEのように缺で切り、先を曲げてDの部分にラジオペンチなどで圧着する。次に、錫箔を幅約3mm、長さ約50mmに切り、机の端に箔の一端をやや垂らすように置き、ピンセットで中央の部分を、あらかじめ糊（ふえき糊でもよいが、導電性の接着剤ならばなおよい）を極めて薄く付けたEの部分に垂らしこむように置く。接着部分をピンセットで若干調節して箔が垂直に垂れるようにする。長さ30mm程度の1枚の箔を電極の一方の面に付けるほうが容易かもしれない。

極めて薄い箔を扱うので、箔の取り付けの作業が最も重要であり、少々大変でもある。電極の付いたふたを容器に付ける。図1(d)に示すように、クッキングホイルで作った小さな舟形の容器にシリカゲルを入れて、ふたの上ののせ、プリンのカップなどを乗せるのもよい。

電極への荷電は、カップをとり、塩化ビニールパイプを毛の布などで摩擦して、図2の点線の電極の一方の端に斜め上から近付け、他端に指先を触れたあと、塩化ビニールパイプを遠ざけると箔が開く。箔が垂直線から60度以上に

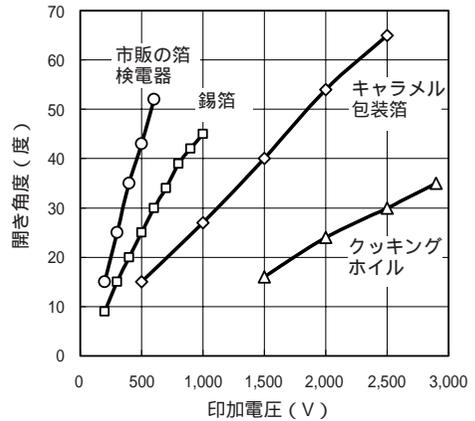


図3 印加電圧と開き角度

しないことが大切である。角度があまり大きいと、箔を損傷してしまうことがあり、また、最初の箔の放電（角度の減少）に時間がかかる。

4. 箔検電器の性能

箔と開き角：図3に高圧電源を使って電極に印加した電圧と箔の開き角の関係を示す。分度器を当てて目盛を読んだもので、読取り精度はよくない。市販の検電器は低い電圧でも箔が大きく開く。錫箔がそれに続き、キャラメルの包装箔はその次で、クッキングホイルの感度はよくない。概略の計算によれば静電容量は図1(d)の場合に6pF程度であるから、開き角45°程度の場合に1,000V印加しているので、全電荷は6nC程度である。

上部の電極の大きさ：図1(b)の容器にキャラメルの包装箔を引っ掛けた検電器で、中にカンテラの芯を入れた状態で、図2の点線のように折り曲げた上部電極の上に何も乗せない場合（針金電極のみ）、クッキングホイルで作った面積約8cm²の電極を乗せた場合、約20cm²の電極を乗せた場合のそれぞれにおいて、荷電したあとの放電の速さ、すなわち、箔と針金電極の先端の距離と経過時間の関係を図4に示す。

なお、カンテラの芯にはトリウム（²³²Th）が塗布されている芯と塗布されていない芯（最近

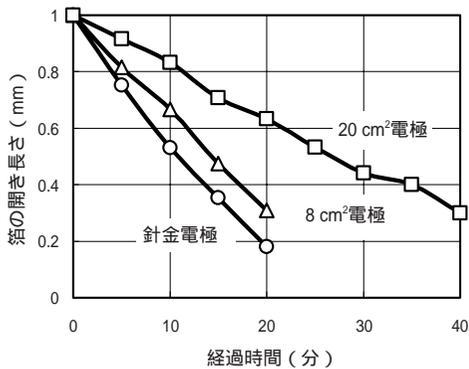


図4 電極の大きさと箔が閉じる速さ

は後者が多いが、これは本実験では役に立たない)がある。前者はカンテラの輝度を上げるために塗布されているが、放射能強度が数百 Bq がある。この芯の取扱いそのものは実験指導者が行うのがよい。この芯からは α 線、 β 線、および γ 線が放出されているが、箔が閉じるのに寄与するのは主として α 線である。 α 線は空気中で多くのイオン対を作り、箔の電荷を中和(放電)するので箔が閉じる。この芯をビニールの袋に入れて、 α 線が出ないようにしても β 線や γ 線の寄与によって、ゆっくりではあるが箔が閉じる。カンテラの芯以外の他の自然放射線源(例えば湯の花など)は箔検電器の実験にはあまり効果はない。

箔と針金電極の先端の距離の読取りは、容器の側面に貼った目盛紙を使うが、眼と容器の距離をほぼ一定にすることや、箔や針金の位置と目盛との合わせ方など、読取り方法に注意し、工夫する必要がある。注意深く読取れば、 ± 0.2 mm 程度の精度で読取れる。図4から、上部電極の大きさに関しては、小さい方が総電荷量が少なく放電が速くてよいが、摩擦した塩化ビニールパイプで荷電する際のしやすさを考慮すれば、図2の点線のようにある程度の長さが必要である。

乾燥剤と上部のふたの必要性: 図1(d)の容器にキャラメル包装箔を使った検電器で内部に線源を入れずに実験した。この日は小雨が降り

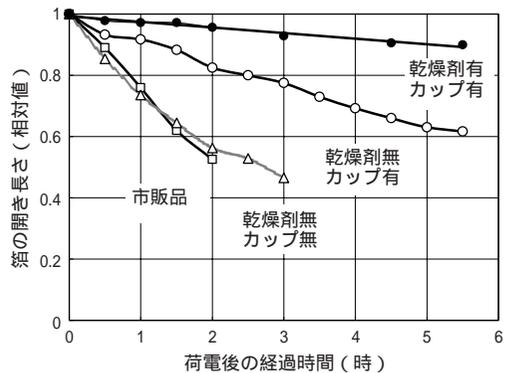


図5 乾燥剤の有無による自然減衰の速さ

湿度はやや高かった(50%)が、底とふたの上部に乾燥剤であるシリカゲルが有る場合と無い場合の影響や、上部の電極を覆うためのカップの有無の影響を、市販品との比較を含めて図5に示す。乾燥剤を入れ、上部電極を覆うカップがある場合には箔が閉じる速度が極めて遅い。カップが無い場合に減衰が速いのは、上部の電極の電荷が、開いた空間からの電荷によって中和されやすいためであろう。カップが無くて、室内での人の動きが激しいと減衰が速いようである。しかし、あまり室内の湿度が高くない限り乾燥剤はなくてもよく、カンテラの芯の線源がある場合に箔が閉じる速度が速いということを理解する実験は十分可能である。

5. 放射線の測定

すでに、図4にカンテラの芯から放出された放射線による容器内の空気の電離に伴って箔が閉じることを示した。市販の箔検電器は中に線源を入れることはできないが、上部の電極のそばにカンテラの芯をおいて実験できる。

図6に、いくつかの異なった条件における手作りの箔検電器による放射線測定の例を示す。図6(a)は、図1(d)のアクリル樹脂の容器と錫箔の検電器の内部にカンテラの芯を入れて測定したものである。(d)はカンテラの芯を薄いビニールの袋(カンテラの芯を購入した時の袋)に入れた状態で同じ検電器の中に入れた

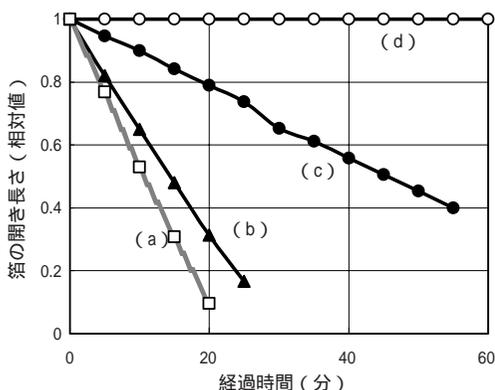


図6 各種検電器及び異なる測定条件における放射線測定 (詳細は本文参照)

(a): 錫箔, 線源内部, (b): アルミ箔, 線源内部, (c): アルミ箔, 線源外部, (d): 錫箔, ビニール袋線源

場合である。薄いビニール1枚 (α 線がカットできる程度の厚さ)があるだけで放電の速さがかなり遅くなることから、箔の電荷の放電には α 線による空気の電離が大きな影響を及ぼしていることが分かる。試みに湯の花などの試料をビニール袋に入れて容器の中に置いてみたが、ほとんど放電しなかった。図6の(b)は、図1のコーヒー瓶の容器とキッチンホイル箔の検電器の中にカンテラ芯を入れた場合で、意外に早い速度で箔が閉じている。(c)はこの検出器の上部の電極のそばにカンテラの芯を置いた場合で、 α 線による空気の電離の効果が上部の電極に十分に捕らえられていないことを示している。

市販の検電器の上部の電極のそばにカンテラの芯を置くと図6の(c)とほぼ同様の結果が得られるので、中学校、高校で市販の検電器を使った実験ができる。

きわめて概略の計算ではあるが、前述のように、電極の電荷が例えば6nCとし、この電荷が約25分で放電するので、6MeVの α 線がその半分のエネルギーを空気中で失うとして、1秒間に約250個の α 線が放出されていること

になる。 $\left(\frac{6 \times 10^{-19}}{1.6 \times 10^{-19}} \times \frac{1}{25 \times 60} / (3 \times 10^6 / 35) \right) 250$

カンテラの芯のほんの一部を切り出して霧箱で観察すると、1秒間に数本の飛跡が観察されるので前記の α 線の数は妥当であると思われる。

6. 箔検電器の教育的実験

箔検電器に関する事柄をインターネットで調べてみると、実にいろんな教育的実験が理科の先生方によって工夫されている。ここではそのいくつかを项目的に紹介する。

数10kBqの α 線源やX線源を使った箔検電器のデモンストレーション実験ビデオを見ることができる**。放射線に関係しない使い方として、摩擦電気の実験に使用されていることは当然であるが、紫外線電灯を用いた光電効果(亜鉛電極がよい)の実験、炎を近づけることによってあつという間に箔が閉じることから炎がイオン化していることを示す実験、電極の上でゴムを伸張させると箔が開くことからゴムが伸張によって帯電することを示す実験、出力インピーダンスの極めて高い高電圧の測定(校正が必要)や同じことであるが屋外の空間電位の測定実験、霧吹きからの霧の帯電の実験、2つの箔検電器を使った電荷の移動の実験、など面白い実験があり、放射線の実験と組み合わせれば、より興味をそそるかと思われる。

7. まとめ

いくつかの手作りの箔検電器とこれらを使った実験について述べてきたが、やはり簡単なのは、コーヒー瓶などとクッキングホイルの組み合わせの検電器である。箔の先端の幅を狭くして細長い3角形のようにすれば感度もそれほど悪くなく、カンテラの芯を使った実験は十分できる。梅雨時の湿度があまり高い時には乾燥剤があればよい。リング状の針金に、箔を何枚も吊り下げた検電器を作り、花が開いたようになるのを楽しむのも面白い。検電器をもっと工夫することは可能であると思う。

** <http://rikanet2.jst.go.jp/koukou/koukou.php>

【参考】箔に働く力と電荷量の推定

きわめて単純な仮定のもとではあるが，箔に働く力と箔上の電荷の関係について検討してみた。十分にたわむことができる市販の検電器や，錫箔の検電器においても箔が開いたときに直線状になっていることから，図7において，箔の支点 O からの距離 x における微小部分 dx (図ではスペースの関係から記入していない) に働く重力の箔面への垂直成分 f_g と，静電反発力の箔面への垂直成分 f_e が等しいと考えてよい。ただし，錫箔の検電器や市販の箔検電器を傾けると箔は重力の方向に垂れるので，箔の付け根のたわみの応力は無視する。

箔の単位長さ当たりの質量を M (kg/m)，重力加速度を g とすれば， $f_g = Mdxg \sin\theta$ である。錫箔の質量厚さは 1 mg/cm^2 ，幅 3 mm なので， $f_g = 2.94 \times 10^{-4} dx \sin\theta$ (N)となる。

支点 O から距離 x における単位長さ当りの電荷を $Q(x)$ ，距離 y における電荷を $Q(y)$ とすれば， y 上の微小長さ dy の電荷によって x 上の微小長さ dx の電荷に働く静電反発力 F_e は次式で表される。

$$F_e = \frac{Q(x)dxQ(y)dy}{4\pi\epsilon_0 z^2}$$

この力の箔に対する垂直成分は $f_e = F_e \sin\phi$ であり， y 上の全電荷による垂直成分は

$$f_e = \int_0^L f_e dy \text{ で表される。}$$

z や ϕ は x, y ，及び θ の関数であるから，結局，次の式が得られる。

$$f_e = \int_0^L \frac{Q(x)dxQ(y)ysin\theta}{4\pi\epsilon_0(x^2 + y^2 - 2xy\cos\theta)^{3/2}} dy \quad (1)$$

この力 f_e が前述の重力の垂直成分 f_g に等しくなっていると考える。

箔上の電荷分布 $Q(x)$ 及び垂直な電極上の電荷分布 $Q(y)$ は，箔や電極の厚さは異なるが形状がほぼ等しいことから， $Q(x) = Q(y)$ とする。

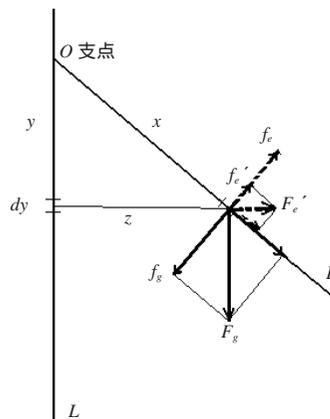


図7 箔に働く力の説明図

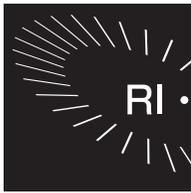
f_g は箔上のすべての位置において一定であるから， f_e も一定でなければならない。この条件と箔の表面の電位が等しい条件を満たす電荷分布は，ある程度の考察と試行錯誤により，

$$Q(x) = Q(y) = k \left\{ 0.15 + \left(\frac{x \text{ (or } y)}{L} \right)^{2.5} \right\} \quad (2)$$

が妥当である。これを式(1)に代入する。式(1)を解析的に積分することは困難なので数値積分をする。式(1)において， $k^2 Q(x)dx / 4\pi\epsilon_0$ を除いた部分の積分値(ただし積分の下限値を $y = 0.05L$ にした)は， $\theta = 45^\circ$ ， $x/L = 0.5$ において 0.52 である(この値は x/L の大きさによってあまり変わらない)。

これらの値を式(1)に代入し $f_e = f_g$ とおいて， k の値を得る ($k = 3.11 \times 10^{-7} \text{ (C/m)}$)。式(2)を積分して ($0.436 kL$) 箔上の電荷を求めると 2.7 nC になる。垂直板状電極，および上部の電極などにもほぼ同量の電荷があると考えれば約 $3 \sim 4$ 倍しなければならない。すると，約 $8 \sim 10 \text{ nC}$ になって，4章において計算した 6 nC に近い値になり，このような力学的，電磁気学的考え方がおおむね妥当であることが分かる。

(愛知工業大学 E-mail cmori@sc.starcat.ne.jp)



サーベイメータの適切な使用のための応答実験

白川 芳幸

1. はじめに

本シリーズでは、拡散型霧箱やガイガー計数管について、その製作過程や実験の様子を紹介してきた。前者の原理は電離箱サーベイメータとして、後者の原理はGMサーベイメータとして実用化、商品化されている。そして放射線を扱う現場においては不可欠な管理用測定機器となっている。まだ紹介していないが、放射線と物質の相互作用が光として現れるシンチレーション現象はシンチレーションサーベイメータに利用されている。

これらのサーベイメータは放射線管理担当者以外にも多種多様な方々（RI取扱事業所を管轄する消防署の消防士、放射性医薬品を扱う薬剤師、看護師、医師、日常的に放射線と関わる診療放射線技師など）の身近に存在する。

今回はサーベイメータの性質を実験的に確かめて、使用上の留意点を導くことを意図している。そして「表面汚染検査をする時には、①サーベイメータの時定数を3秒にして、測定面から10mmほど離して、毎秒50mmほどのゆっくりとした速さで動かす。②指針が通常より振れたと感じた場合には、その場所で時定数を10秒に変えて、サーベイメータを静止させ、20秒から30秒待って指示値を読む。」という指導内容が本ノートによって定量的に納得いただければ幸いである。

2. 応答実験装置

筆者の属する放射線医学総合研究所は人材育成部門を有し、様々な職種の方々を対象に様々な放射線研修を実施している。放射線測定に関連する実習、あるいは原子力防災に関連する実習ではサーベイメータを使用することが多い。これらの経験から放射線管理の担当者でも必ずしもサーベイメータを十分に使いこなしていないと感ずることがある。一見、簡単な装置に思えるが、その性質を熟知していないと測定は容易ではないことを実感する。その理由の1つは、定量的な理解が不足していることである。

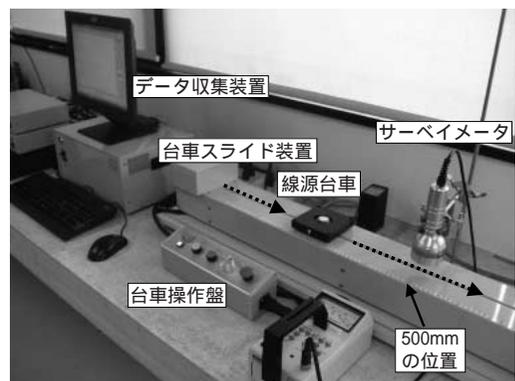


図1 サーベイメータ応答実験装置の外観
(汚染検査などを考えると、通常はサーベイメータを動かしながら汚染箇所を探るのであるが、本装置ではサーベイメータを固定して、汚染部位のほうを動かすことにした)

サーベイメータの性質を定性的に教えられても、実際の現場では数値を判断する必要があり、数値に対する定量的な知識がないと使いきれない。そこで研修生のためにサーベイメータの性質を定量的に調べる“サーベイメータ応答実験装置”を製作した。その全体を図1に示す。主たる仕様を以下にまとめる。

サーベイメータ応答実験装置

装置構成：台車スライド装置，台車（線源用），
操作盤，サーベイメータ固定治具，
データ収集装置

移動距離：0～1,500 mm

移動速度：毎秒 50 mm，100 mm，微速

入力：サーベイメータからの
アナログ出力 0～10 mV

データ：計数率（cpm）

静止測定：300点のデータ収集（例：0.2秒ごと）

移動測定：300点のデータ収集（5 mm ごと）

この装置の動作について説明する。まず、移動測定について例示する。この装置では、台車に線源を固定し、毎秒 50 mm，100 mm，微速で移動させることができる。サーベイメータをスライド装置に付属する 0～1,500 mm の定規の任意の位置に固定治具を用いて固定する。例えばサーベイメータ受感面の中心を 500 mm，線源との距離を 10 mm とする。サーベイメータのアナログ出力（0～10 mV）端子に専用のケーブルを差し込み、データ収集装置と接続する。その時のサーベイメータのレンジ及び時定数*をデータ収集装置の PC 画面に入力する。操作盤のボタンを押すと、台車が動き、5 mm ごとにアナログ出力がサンプリングされ、計数率（cpm）に変換され 300 点記録される。静止測定では上記と同様な設定で、台車を寸動で移動させ、サーベイメータの中心位置に静止させ

* 注意：時定数とは測定装置の応答の速さを表す指標で、最終応答の 63% に達するまでに必要な時間と定義される。

る。サンプリング周期例えば 0.2 秒を入力し、PC 画面のスタートをクリックする。するとデータ収集が開始され、300 点、60 秒間のデータが記録される。

3. 実験の準備

3.1 線源の準備

β 線と γ 線では透過力が違い、そのためサーベイメータでの検出効率も異なる。両者が混在する場合は結果の解釈の説明が複雑になるので、本ノートでは β 線のみを放出する核種を使用した実験結果に基づいて話を進める。 γ 線のみを放出する核種を用いた事前の実験でも基本的には同様の結果を確認したからである。線源の外観を図2に、また主たる線源仕様を以下に示す。

β 線源（本ノートで使用した β 線源）

核種： $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$

壊変： β -壊変

放射能：3.3 kBq（使用時）

最大エネルギー：546 keV（100%）2,280 keV（100%）

形状：直径 25 mm，厚さ 6 mm の円盤状，
上面中心に薄いアルミ膜を介して直径約 5 mm の線源

備考： γ 線を放出しない

γ 線源（事前の実験で使用した γ 線源）

核種： ^{133}Ba

壊変：軌道電子捕獲

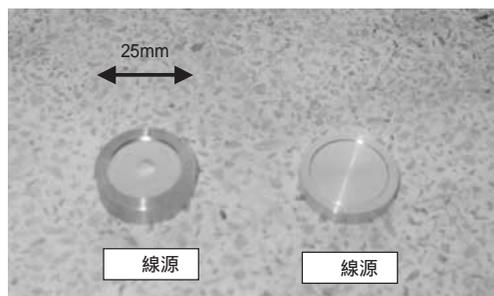


図2 線源の外観（日本アイソトープ協会から購入）

放射能：29.4 kBq（使用時）

最大エネルギー：356 keV（62%）81 keV（34%）他

形状：直径 25 mm，厚さ 4 mm の円盤状，
上面中心に薄いジュラルミン窓を介して直径約 10 mm の線源

備考：β線を放出しない

3.2 サーベイメータの準備

表面汚染検査には、従来は圧倒的に GM サーベイメータが使われてきたが、β線のみならずγ線にも検出効率が良いことからプラスチックシンチレータを装備したサーベイメータも普及してきた。このことを考慮し、後者を実験に使用した。外観を図3に示す。また一般的な仕様を以下に示す。

汚染検査用サーベイメータ

測定対象：主としてβ線（γ線も可）

測定範囲：計数率 0～100,000 cpm

（1分間あたりに換算した計数値）

測定方式：GM管式，シンチレーション式

受感面：直径 50 mm 程度

時定数：3，10，30 秒

4. 静止応答の実験と結果

本章では「サーベイメータの指示値は 20 秒から 30 秒待ってから読む。」という指導の意味について実験を通して考察する。



図3 サーベイメータの外観

4.1 静止応答の速さ

プラスチックシンチレーションサーベイメータを応答実験装置の 500 mm の位置にセットし、その位置にβ線源（⁹⁰Sr/⁹⁰Y）の中心がくるように台車を操作した。線源上面とサーベイメータの受感面の距離を 10 mm とした。この状態でサーベイメータのリセットボタンにより針がゼロを指すようにする。リセットボタンを離すと同時にデータ収集装置のスタートをかける。出力のサンプリングは、60 秒のデータを記録するために 0.2 秒で行った。その結果のグラフを図4(a)に示す。

定性的に見ると、サーベイメータの時定数を 3 秒にセットした場合、時定数 10 秒の場合と比較して応答が速いことが分かる。これを調べるために応答の立上りの部分を拡大してみた。この様子を図4(b)に示す。

まず時定数 3 秒の場合を考えると、3 秒経過時の計数率は 27,930 cpm であった。1 分以上経過した後の計数率は 42,100 cpm であった。両者の比率は 66% である。一方、時定数 10 秒の場合、10 秒経過時の計数率は 27,075 cpm であった。同様に 1 分以上経過した後の計数率 42,100 cpm と比較すると比率は 64% となる。

次に時定数 3 秒の場合、6 秒（時定数の 2 倍）経過時の比率は 88% となった。一方、時定数 10 秒の場合、20 秒（時定数の 2 倍）経過時の比率は 88% であった。

そして時定数 3 秒の場合、9 秒（時定数の 3 倍）経過時の比率は 99% となった。一方、時定数 10 秒の場合、30 秒（時定数の 3 倍）経過時の比率は 96% であった。これらの結果を表 1 にまとめた。

測定誤差を考えなければ数学的に、時定数経過後は最終応答値（cpm）の 63%，時定数の 2 倍の時間経過後は 86%，同様に 3 倍では 95% となる。数式

(専門的には1次遅れ系という)では,

$$N(t) = N_0 [1 - \exp(-t/T)]$$

と表される。ここで $N(t)$ は t 秒経過時の計数率 (cpm), N_0 は最終応答値 (最終応答時の計数率, cpm), t は経過時間 (秒), そして T が時定数 (秒) である。したがって,

$$N(T) = N_0 \times 0.63$$

$$N(2T) = N_0 \times 0.86$$

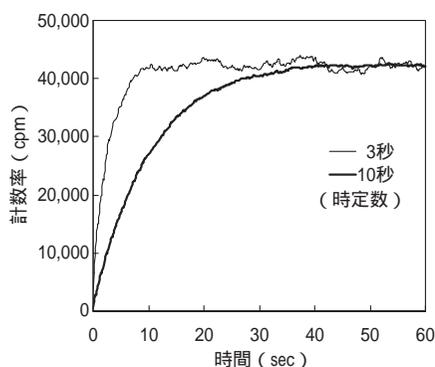
$$N(3T) = N_0 \times 0.95$$

となる。

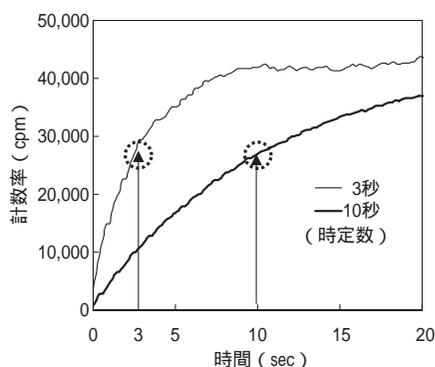
実験結果はほぼ理論どおりであった。サーベイメータについて, 時定数の2倍から3倍の時間が経過してから指示値 (cpm) を読むように指導するのは最終応答の86%から95%程度でほぼ応答したと考えても良いということである。実際には時定数3秒の場合は6から9秒, 時定数10秒の場合は20から30秒の間で指示値 (cpm) を読む。時定数3秒の場合は時定数10秒の場合より3倍強, 応答が速いことも分かる。

表1 時定数と応答値の関係 (最大の最終応答値 42,100 cpm に対する比率)

経過時間 (秒)	時定数 3 秒	時定数 10 秒
時定数の 1 倍	66%	64%
時定数の 2 倍	88%	88%
時定数の 3 倍	99%	96%



(a) 応答全体の様子



(b) 応答の立ち上がりの様子

図4 静止応答の様子

4.2 指示値の変動

以上の考察では, サーベイメータを使用する場合には応答の速い時定数3秒が適していると思える。しかしながら, この推察は, 原子核の壊変, それに伴う放射線の放出現象に統計変動があるので一概に正しいと言えない。図4(a)の30秒から60秒の最終応答に近い部分の応答値の変動を見てみよう。

30秒から60秒までを0.2秒でサンプリングして得られた151個の応答値の標準偏差 σ (cpm) を求めた。時定数10秒の場合は $\sigma_{10} = 515$ cpm, 時定数3秒の場合は $\sigma_3 = 805$ cpm であった。時定数3秒の場合, 時定数10秒の場合と比べると感覚的に針の振れが1.6倍 ($= \sigma_3 / \sigma_{10}$) となり, かなり読み難いことが分かる。この場合, 最終応答値が42,100 cpm であるので相対変動率は時定数10秒の場合, 1.2%, 時定数3秒の場合, 1.9% と小さいので助かるが, 最終応答値が小さくなるに従い相対変動率は大きくなり, ますま読み難くなる。この針の変動にはサーベイメータの使用経験が少ないと戸惑うことがある。まとめると, 時定数が小さいと早く応答するが指示値 (cpm) の変動が大きくなる。一方, 時定数が大きいと応答は遅いが指示値 (cpm) は安定している。

4.3 まとめ

以上から「サーベイメータの指示値は時定数の2倍から3倍の時間の経過後に読みなさい。」という結論が誘導される。さらに「指示値を示す針は静止することなく振れ続けるので振れの中心あたりの指示値を読むように。」という補足注意も導き出せる。

5. 移動応答の実験と結果

本章では「サーベイメータを早く動かすと汚染を見落とす。毎秒50mm程度で動かすように。」という指導の内容について実験を通して考察する。

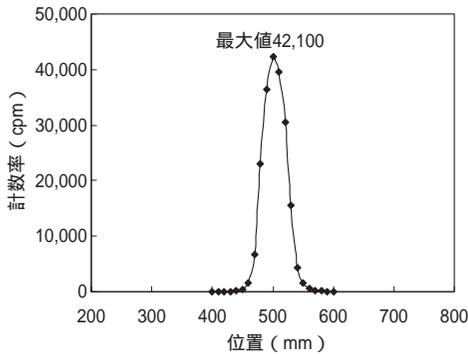


図5 サーベイメータの静止応答の最終値(線源は500 mmの位置)

実験に先立ち、線源と検出器が静止した状態での最終応答値(cpm)(1分当たりの計数値を代用した)を各位置で求めた。各位置での最終応答値を図5に示す。図5から線源位置500 mmに対して400 mmより手前、600 mmより向こうではバックグラウンドになることが判明した。

5.1 時定数と応答

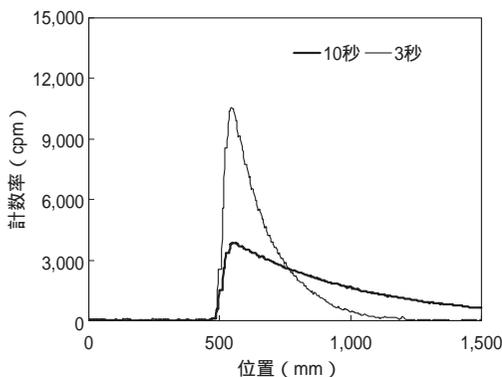
移動速度を一定にして、時定数を10秒、3秒にすると応答がどのように変わるかを図6にグラフ化した。

移動速度毎秒50 mmで時定数10秒の場合、最大応答値は560 mmの位置で3,828 cpmであった。時定数3秒の場合は545 mmの位置で10,540 cpmであった。最終応答値42,100 cpmに対してそれぞれ9%、25%まで応答したことが確認できた。

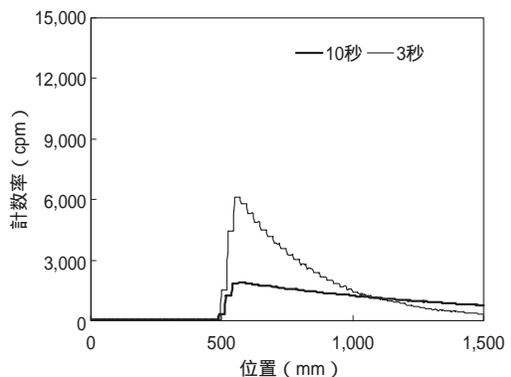
移動速度毎秒100 mmで時定数10秒の場合、最大応答値は585 mmの位置で1,876 cpmであった。時定数3秒の場合は565 mmの位置で6,116 cpmであった。最終応答値42,100 cpmに対してそれぞれ4%、15%まで応答したことが確認できた。

5.2 移動速度と応答

時定数を一定にして、移動速度を毎秒50 mm、100 mmと変えると応答がどのようにな

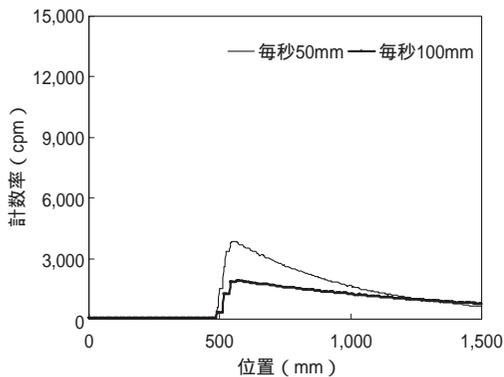


(a) 移動速度毎秒50 mm

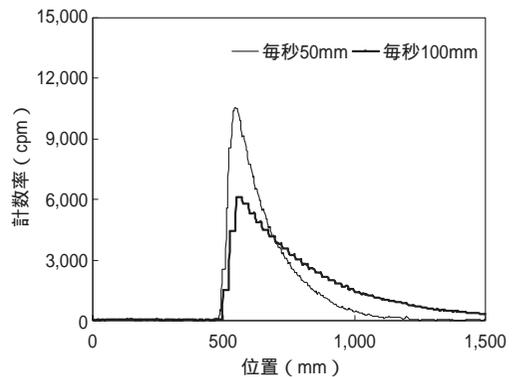


(b) 移動速度毎秒100 mm

図6 サーベイメータ移動応答(β 線源、時定数10秒と3秒の比較)



(a) 時定数 10 秒



(b) 時定数 3 秒

図7 サーベイメータ移動応答 (β 線源, 移動速度毎秒 50 mm と 100 mm の比較)

表2 移動速度と時定数の関係 (最大の最終応答値 42,100 cpm に対する比率)

	時定数 10 秒	時定数 3 秒
移動速度毎秒 50 mm	9%	25%
移動速度毎秒 100 mm	4%	15%

るかを図7にグラフ化した。

時定数 10 秒の場合, 移動速度毎秒 50 mm で最大応答値は 560 mm の位置で 3,828 cpm であった。また, 移動速度毎秒 100 mm で最大応答値は 585 mm の位置で 1,876 cpm であった。最終応答値 42,100 cpm に対してそれぞれ 9%, 4% まで応答したことが確認できた。時定数 3 秒の場合, 移動速度毎秒 50 mm で最大応答値は 545 mm の位置で 10,540 cpm であった。移動速度毎秒 100 mm の場合, 最大応答値は 565 mm の位置で 6,116 cpm であった。最終応答値 42,100 cpm に対してそれぞれ 25%, 15% まで応答したことが確認できた。

以上を表2に整理した。「時定数 10 秒で移動速度毎秒 50 mm の場合, 静止させて得た最終応答に対しておよそ 1/10 しか応答しない。時定数 3 秒にするとおよそ 1/4 まで応答する。」ということが分かる。また, 最大値は線源直上ではなく線源を通過後の位置で現れることも知

っておいてほしい。この傾向は時定数が大きいほど顕著になる。移動速度毎秒 100 mm の時, 応答が小さすぎて熟練者以外では線源の存在を確認することは難しい。実際の汚染は実験に使用した線源より放射能強度 (Bq, あるいは Bq/cm²) が低く, 発見は一層難しいので, この速さを推奨していない。

5.3 まとめ

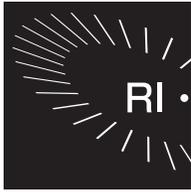
以上の考察により「サーベイメータを動かしながら使用する時, 時定数 3 秒, 毎秒 50 mm の速さで動かすのが合理的である。」ということが確認された。

6. まとめ

研修生には「サーベイメータはすぐに応答しない。」「サーベイメータを移動させながら指示値を読むと小さい値を示す。」という事実から1章で述べたような指導を行っている。指導内容はいたって簡単であるが, 実験によって定量的に考察することでサーベイメータの使い方に関する理解は深まっていく。今後ともこのような教育実験を通して放射線教育の質的向上を図っていきたい。

(放射線医学総合研究所)

E-mail ▶ sirakawa@nirs.go.jp)



紙筒ガイガー計数管の性能の検討

三 門 正 吾

1. はじめに

教育実験ノート・5で、「紙筒で高感度ガイガー計数管を作ろう!」を、実験ノート・6で「紙筒計数管を用いた放射線の測定」を紹介した。今回は、生徒がスーパーサイエンスハイスクール (SSH) の課題研究で行った「紙筒ガイガー計数管の性能」についての研究結果を中心に紹介する。

生徒が1年生のときに、紙筒ガイガー計数管 (以下、紙筒ガイガー管) の製作と身の周りの放射線測定をサイエンスラボ I という授業で行った。彼らが2年生になり、本格的な課題研究に取り組むことになったとき、3人の生徒が、この紙筒ガイガー管の性能について深く研究したいと申し出た。週2時間の授業の中で、試行錯誤しながら、1年以上にわたっていろいろな測定を行った。この紙筒ガイガー管の性能研究自体が一般向けの実験でもあると考えられるので、以下にその結果を一部変更して紹介する。

2. 動作電圧の範囲 (プラトー領域)

実験ノート・5で紹介した小型高圧電源を直流可変電圧電源に接続して、高電圧にする。高電圧の測定は、1 GΩ と 1 MΩ の抵抗を直列に接続し、1 MΩ の抵抗の両端の電圧を高入力抵抗電圧計で測定する。測定値の1,000倍が推定される電圧である。電圧を上げていき、初めてカウントする電圧から連続放電になる電圧まで

測定する。線源は硫酸カリウムを用いた。その結果を図1に示す。

結果より、紙筒ガイガー管の動作電圧は約4,900~5,800 V とかなり広い範囲にわたっているのが分かる。このために、実験ノート・5で紹介した静電気ガイガー管という使い方ができるのである。なお、5,800 V 以降カウント数が下がっているが、これは計数のために使用した改造万歩計の分解能が悪い (分解時間が長い) ためである。ラジオから聞こえるノイズ音の数は増加しているにもかかわらず、計数値は増加せず、むしろ減少した。最後の0というのは、実際は連続放電になって万歩計が機能しなくなったことを示している。この結果より、実験を行うときは中間の5,300~5,400 V あたりの電圧に設定する。プラトー領域は、筒の大きさ

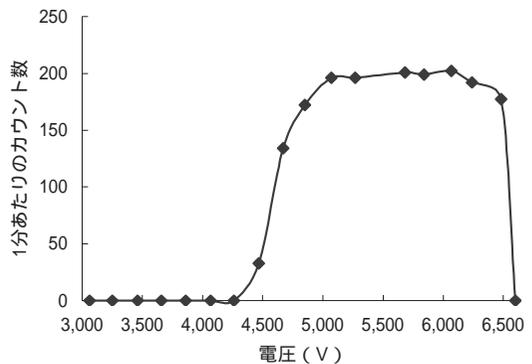


図1 紙筒ガイガー管の動作電圧

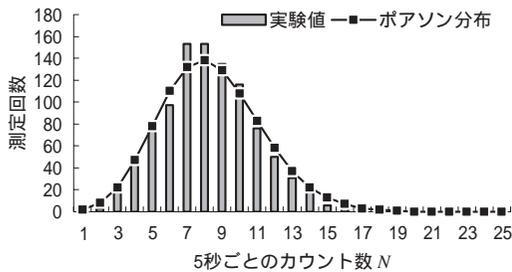


図2 測定値の統計分布(実験値と理論値の比較)

と陽極の芯線の折り曲げ方によって微妙に変化する。

3. 測定値の統計分布

放射性壊変は確率的な事象なので、壊変で放出される放射線の計測には常にばらつきが生じる。このばらつきはポアソン分布に従うことが知られている。硫酸カリウムを放射線源として測定条件を変えないで5秒ごとのカウント数を1,000回測定し、カウント数と測定回数との関係を調べた。図2がその結果である。ポアソン分布は次式で表される。

$P(N)$: 5秒ごとのカウント数が N である確率

λ : カウント数 N の平均値

$$P(N) = \frac{\lambda^N e^{-\lambda}}{N!}$$

平均値は $\lambda = 8.40$ であり、縦軸は $1,000 \times P(N)$ である。

実際の放射線測定の統計分布はポアソン分布に近いことが分かる。このことから、紙筒ガイガー管は装置として信頼できることが分かった。1,000回の測定を人海戦術で行ったが、測定が終了するのに2時間以上を要した。

4. 紙筒ガイガー管と市販 GM 管の性能比較

紙筒ガイガー管とアロカ(株)製のサーベイメータ TGS-146 との性能比較を行った。この市販の GM 管の直径は 5 cm なので、紙筒ガイガー管も直径 5 cm で実験した。

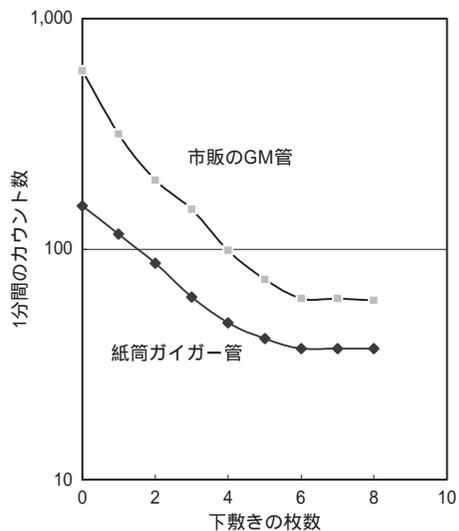


図3 ^{90}Sr - ^{90}Y を用いた β 線の吸収曲線

4.1 β 線の遮へい実験

β 線がどれくらい厚さでどの程度遮へいされるのかを確かめる。 β 線源は ^{90}Sr - ^{90}Y を用いる。遮へいするのに用いるのは厚さ 0.75 mm の下敷きで、下敷きを 0 枚、1 枚、2 枚...8 枚と重ねていき、それぞれにおける 1 分間のカウント数を測定する。

図3が紙筒ガイガー管と市販 GM 管による β 線の遮へいのようなすである。ただし、 β 線源と紙筒ガイガー管の距離と β 線源と市販 GM 管の距離は同一ではない。それぞれ測定しやすい距離で実験を行った。グラフから、紙筒ガイガー管も市販 GM 管と同じような曲線を描いている。いずれも下敷きが 6 枚以上で遮へいされ、自然放射線のレベルになっている。

4.2 身のまわりの低線量放射線源の測定

紙筒ガイガー管と市販 GM 管を用い、自然放射線とランタン用マントル、玉川温泉の華、硫酸カリウム、昆布、過リン酸石灰、パーミキュライトの放射線源から出る放射線を 6 分間測定する。また、線源と紙筒ガイガー管、市販 GM 管の配置は同一条件とする。用いた紙筒ガイガー管の直径は 5 cm、市販 GM 管の直径も

表1 低線量放射線源での比較

	紙筒ガイガー管	市販 GM 管	感度比
	(cpm)	(cpm)	
自然放射線	31	57	1.8
パーミキュライト	85	125	1.5
玉川温泉の華	74	102	1.4
硫酸カリウム	173	261	1.5
昆布	66	101	1.5
過リン酸石灰	130	194	1.5
マントル	242	735	3.0

5 cm である。

表1に示す結果より、市販 GM 管は紙筒ガイガー管よりも約 1.5 倍の感度がある。紙筒ガイガー管と市販 GM 管の窓の厚さが異なるのかもしれない。また、 γ 線の影響も考えられる。我々の作った紙筒ガイガー管は側面が紙なので、 γ 線を測定しにくいと考えられる。マントルに関しては、今のところ原因が推測できない。

5. γ 線の感度を向上させる実験

紙筒ガイガー管は γ 線の測定感度が市販の GM 管に比べて悪いと考えられるので、紙筒外側の側面に厚さ 1 mm の鉛を巻き、測定感度を向上させることを試みた。鉛は原子番号 82 番の安定した元素で、鉛の原子核の周りには数多くの電子が存在する。その電子に γ 線が当たり、コンプトン効果や光電効果によって弾き出された電子がガイガー管で検出されるためである。 γ 線源は ^{60}Co を用いる。使用する紙筒ガイガー管の直径は市販 GM 管と同じ 5 cm である。測定時間は 10 分間として、1 分あたりに換算する(表2)。

自然放射線に関しては紙筒ガイガー管と市販 GM 管の感度はほぼ同じになった。 γ 線源を用いた実験でも、自然放射線とまではいかなかったが感度比の向上が見られた。 γ 線源の場合は、自然放射線と異なり、方向に指向性がある。鉛は側面のみを覆ったので、その影響が出

表2 紙筒ガイガー管の側面に鉛を巻いた実験

	紙筒ガイガー管(cpm)		市販の GM 管(cpm)
	鉛なし	鉛あり	
自然放射線	42	72	72
^{60}Co	100	134	149
$^{60}\text{Co}^*$	58	62	77

$^{60}\text{Co}^*$ は自然放射線値を差し引いた値である。

たものではないかと思われる。いずれにしても、ガイガー管に鉛を巻くことによって、 γ 線に対する測定感度は向上したと言える。

6. 紙筒ガイガー管の大小と計数率の関係

紙筒ガイガー管の大小(図4)と自然放射線に対する感度はどのような関係があるのかを調べる。 γ 線がカウントされるためには、 γ 線が筒を貫かなければならない。 γ 線に垂直な面で筒を切ったときの断面積は γ 線の方向によって異なるが、平均化すれば、有効な断面積は

$$(\text{筒の直径}) \times (\text{筒の長さ})$$

に比例すると考えられる。そこで、私たちは $(\text{筒の直径}) \times (\text{筒の長さ})$ を有効断面積と定義

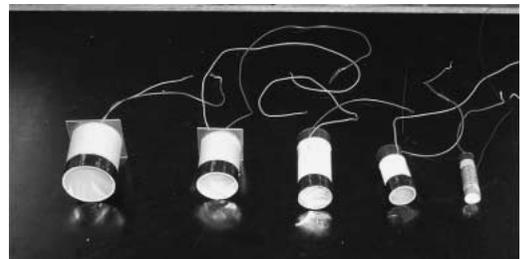


図4 大きさの異なる紙筒ガイガー管

表3 使用した紙筒ガイガー管の動作電圧

管の直径 (cm)	動作電圧 (V)
1.3	4,400
2.5	4,600
3.3	4,800
4.0	5,200
5.0	5,000

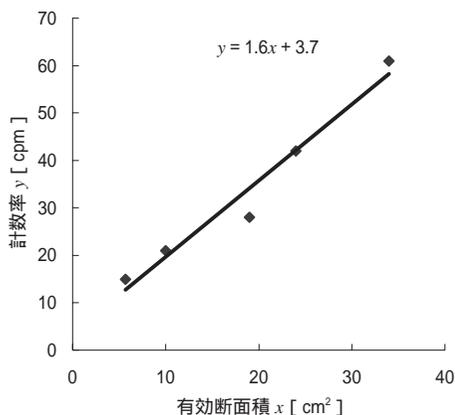


図5 有効断面積と自然放射線のカウント数

して、有効断面積と1分あたりのカウント数(計数率)の関係を調べてみた。なお、動作電圧(プラトー領域の中央値)は、筒の大きさと陽極の芯線の折り曲げ方によって変化するのであらかじめ測定しておく(表3)。線源は硫酸カリウムとする。

有効断面積の大きさと自然放射線の計数率の間にはほぼ比例の関係がある(図5)。しかし、有効断面積が0のときに放射線計数率0から3.7だけのずれがある。このずれが、何らかの意味を持つのか、または、データ不足のためなのかは現段階では説明ができていない。

7. おわりに

紙筒ガイガー管は、低計数率の測定ならば、市販のGM管と遜色ない性能を示すことが今回の実験で明らかになった。

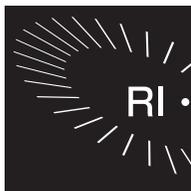
生徒が表題のテーマで課題研究を進めるときに障害となったものは、手作り装置ゆえの動作の不安定さである。性能の測定なので、ただ動作することを確認するのは違う苦労があった。陽極の芯線の汚れにより、計数率が異常に大きくなり、あわててエタノールで洗浄するというこもしばしばあった。特に最後の管の大きさと測定感度の関係を調べる実験では、複数の手作り管の動作を調べるので、どの程度条件をそろえられているか、若干疑問がある。機会を設け、さらに精密に測定する必要があると感じている。ただし、大まかな傾向は今回の実験でつかめたのではないかと考えている。

参考文献

- 1) 三門正吾: *Isotope News*, No.628, 15-18 (2006)
- 2) 三門正吾: *Isotope News*, No.629, 31-33 (2006)

(千葉県立柏高等学校)

E-mail ▶ s.mkd@khe.biglobe.ne.jp)



イメージングプレートを用いた実習実験

小林 勝利

1. はじめに

X線や γ 線などの放射線によって画像を得る方法は、ラジオグラフィー (Radiography ; RG) と呼ばれ、ハロゲン化銀結晶を写真感光物質として塗布したX線フィルムが長い間使用されてきた。解像力に優れている反面、応答特性のダイナミックレンジが狭い上、黒化濃度と放射線量の比例範囲も限られ、現像・定着処理などの操作を必要とする¹⁾。

富士フィルム(株)が開発したイメージングプレート (Imaging Plate ; IP) は、支持体の上に輝尽性蛍光体が塗布されたもので積分型2次元放射線検出として機能する。ここで輝尽性蛍光体とは、X線、電子線、紫外線などの放射線で蛍光体を励起した後、発光波長よりも長波長の光を照射すると再発光する (輝尽発光) 特殊な蛍光体である²⁾。

IPは、X線フィルムに比べ検出感度が3桁ほど高く、広い測定範囲で定量性があり、現像・定着処理も不要で、かつ繰り返し使用できることから短時間の実習研修にも適している。

日本原子力研究開発機構・原子力研修センターの前身であるラジオアイソトープ研修所 (Radioisotope School ; RIS) では、生物・医学領域を対象とする専門コースや基礎課程において初期の頃から放射性試料自体からの放射線をIPに密着露出して検出する、オートラジオグラフィー (Autoradiography ; ARG) 実習を行っ

てきた¹⁾。4年ほど前に東海研究所への施設移転に伴い、研修コースが中止され長年使用した画像解析機器である、バイオ・アナライザー・システム (BAS 5000²⁾)ほか：富士フィルム(株)製の利用頻度が減少した。

そこで筆者らは、放射線や原子力分野の初心者を対象とするIPを用いたARG及びRG実習を開講したので紹介する。この実習は一般の方々を対象とした講習にも適用できると考えている。

2. 実習

2.1 講義

講義では最初に、レントゲンのX線写真 (RG)、ベクレルのウラン化合物からの写真黒化現象 (ARG)、キュリー夫妻が他のウラン化合物から初めて放射性物質を分離し放射能の存在を明らかにしたことなど、初期の放射線の歴史と関連して本実習との類似性を述べる。次いで、IPの原理やBASシステムの概要、ARG及びRG実習スケジュールなどを説明する。

IPを用い、露光 (露出) 読み取り 画像解析 IP消去 (画像消去) までの一連の流れを図1に示す²⁾。

実験は1グループ3~4人の3グループとし、2時間以内の実習では2.2項のARG実験を省き、2.3項のARG画像の観察及び2.4項のRG実験のみ行う。

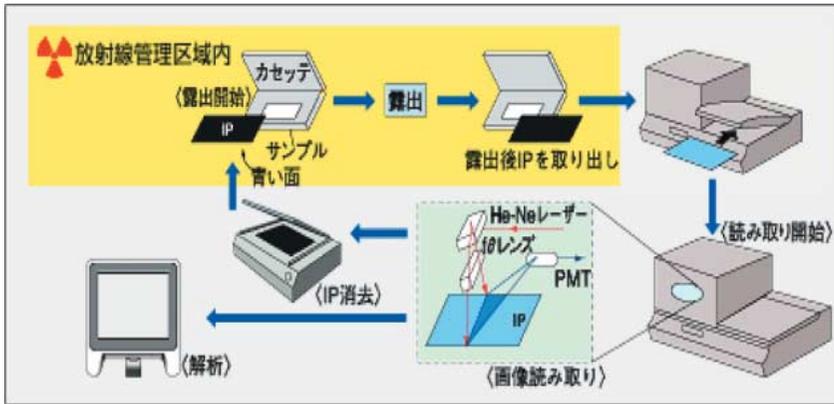


図1 露光(露出)から画像解析及びIP消去までの流れ(一部改変)



写真1 IP(右)とカセット(左)

2.2 ARG 実験

サンプルは、 ^{14}C 標識・炭酸ガス雰囲気中で生長したインゲン豆の調製済み試料を用いる。カセット内に収まるように薄いラップ(0.40 mg/cm²)で包装し、汚染防止のためビニール(4.5 mg/cm²)で二重に密封してある。使用するIP(商品名: BAS SR2025, 20 cm×25 cm)とカセット(商品名: BAS2025)を写真1に示す。

カセット内に感光層(青白色面)を上にしてIPを置き、IPの上にサンプルを密着して載せる。カセットを閉めて10~20分間露光した後、部屋の照明を新聞が読める程度に暗くしてサンプルのみを取り出す。露光時間と露光終了時刻をグループごとに記録し、IPをカセットに入れたまま非管理区域にあるBAS 5000の設置場

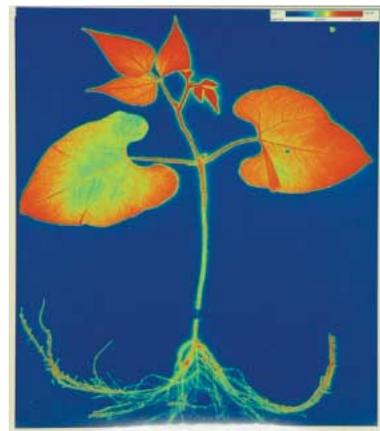


写真2 ^{14}C で標識・炭酸ガスを吸収したインゲン豆のオートラジオグラフィ

所まで運ぶ。

カセットからIPを取り出す際、IPへの感光防止のため部屋を暗くする。BAS 5000の蓋を開けIPを挿入し(図1)、蓋を閉めて画像の読取りを開始したら部屋を明るくする。露光終了から読取り開始までの時間は、約15分である。

BASの操作や画像調整は研修生が交代で行い、読取り時間の制限から読取り画素サイズを50 μm、階調数を256ビットにした。ARG画像を写真2に示す。最小画素サイズを25 μmとし、解析機能(解析桁数、階調数など)を高めれば写真2よりも鮮明な撮像が得ら

れる。

アンケートでは、「思ったよりも鮮明な画像で驚いた」「光合成の高い若葉に ^{14}C が多く存在しているのが判別できる」など、初めてのARG体験を率直に喜んでくるとの印象を受けた。

2.3 ARG 画像の観察実習

①研修所(RIS)時代のARG画像¹⁾、その他²⁾、②筆者らが開発した手法で撮像したARG画像^{3,4)}、ほか③引用文献⁵⁾を題材とした。

①の例では、ラットに ^{14}C グルコースを投与し、その凍結切片を乾燥したサンプルのRI分布を調べると、時間とともに ^{14}C が体内全域に及んでいる。すなわち、ブドウ糖(グルコース： $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$)は、米やパンなどのでんぷん質が消化管系の酵素により分解されたものであり、小腸に吸収されて血液により各組織に運ばれエネルギーとして使われている。 ^3H 、 ^{14}C 、 ^{32}P などを動物に投与し、ARG画像によりRI分布を測定する手法は「全身オートラジオグラフィー」と呼ばれる。

RIを指標とするトレーサ法に対し、②は「アクチバブル・トレーサ」法を用いて、磁気共鳴断層撮影(MRI)用ガドリニウム造影剤(^{152}Gd DTPA)注射による体内のガドリニウム(Gd)の残留分布を求める方法³⁾である。

図2に示すように、非放射性的濃縮安定同位体 ^{152}Gd を含む造影剤をラットに投与後、一定時間飼育して処理したラット切片や尿などのサンプルを原子炉で照射する。放射化したサンプル中の誘導放射性核種(^{24}Na 、 ^{32}P 、 ^{45}Ca ほか)が減衰後、生成した ^{153}Gd (半減期：242日)に着目しARG法及びゲルマニウム検出器で定量する。写真3に示すように、時間とともに大部分が腎臓から尿として排出し、一部は肝臓に残留することが分かる。一方、尿などの排泄物とラット切片を臓器ごとに切り取り、 γ 線測定からも ^{153}Gd を定量しARG法の有効性を確認している。

②のもう1つの手法は、原子炉施設廃止に伴う一次冷却系重水配管(Al)に浸透する ^3H をIPによるARG法と液体シンチレーション計数法(Liquid Scintillation Counting; LSC)を併用して求める方法⁴⁾である。配管を広げ矩形にしたサンプル周囲の非汚染面を不溶性の塗料で塗布し、汚染面のみを少しずつフッ化水素酸(1.5%)で侵食しながら、その都度深さ方向における ^3H をARG法で定量する。この結果、 ^3H の浸透深さは最大 $25\ \mu\text{m}$ 、約90%は $7\ \mu\text{m}$ 内に存在していた。

当センターにある、防災用研修機材について筆者らが撮像したARG画像を観察する。写真

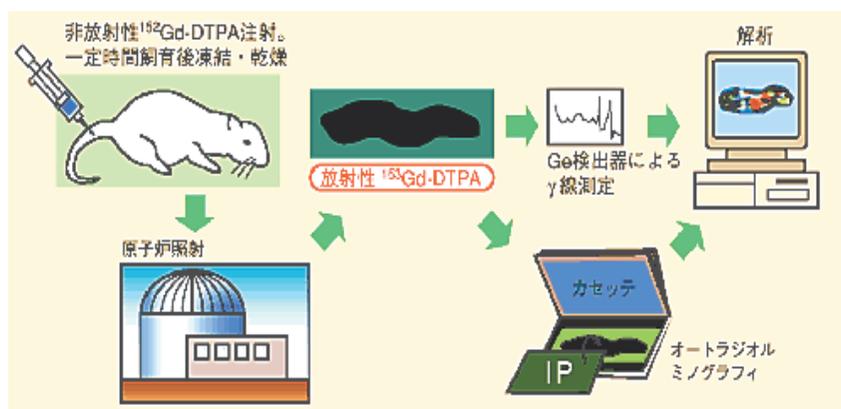


図2 濃縮安定同位体を含む造影剤による体内残留分布測定法

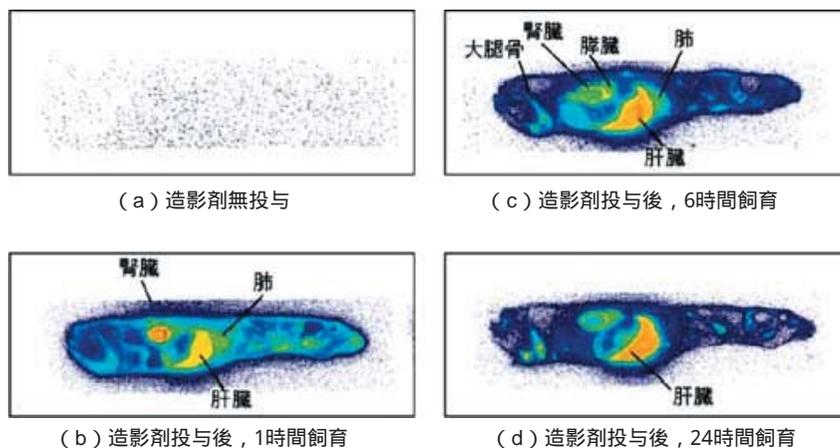


写真3 ^{153}Gd 造影剤 (DTPA) の体内残留分布のオートラジオグラフィ



写真4 RIが含まれている研修機材
左上から下に向かい右方向へ、塩化カリウム試薬、
塩化加里肥料、グローランプ、磷酸加里肥料、夜光
時計及び御影石

4の試料に含まれるRIをGM計数管で計数してARG画像のRI分布と比較する。

GM計数管では検出できない植物、食料、装飾品、眼鏡などに含まれている微量のRIは、長期間の露光を要する。このため文献5)にあるARG画像を紹介し、自然にも人工物にも ^{40}K などのRIが含まれていることを知る。余裕がある場合、ヒトの身体(60kg)や塩化カリウム(KCl: 10g)試薬に含まれる ^{40}K (Bq)の量を求める。さらに、検出効率20%と仮定したGM計数管で試薬10gを測定した場合の



写真5 40種類の被検体(サンプル)

計数率(cpm)を求め、実際に測定して検出効率の妥当性を検討する。

2.4 RG実習

1 被検体の選定

写真5の被検体の中からグループごとに好きなサンプルを選択する。携帯電話機、電卓、金属製テストピース、シークレットボックス(中身のサンプルが見えない箱)、ポケット線量計、GM計数管、フィルムバッジ、放射線機器など、40数種類がある。内部構造が分かる試料は不人気であるが、シークレットボックスや放射線機器がよく選択される。受講生の手持試料(文房具など)を試した例もあった。

IP をカセット内にセットし、カセットの外側（IP の感光層面）にサンプルをテープで密着・固定する。

2 照射場での露光

放射線源は、手持ちの ^{241}Am Be 密封中性子線源（37 GBq）を活用した。

照射場は、写真 6 に示すように 3 グループで同時に 3 方向に露光するための開口部を 3 か所設け、露光面積がカセットの広さに相当する距離に設置するようにした。開口部以外は、パラフィン・ブロックを用いて中性子を遮へいし、 γ 線を遮へいするため鉛ブロックで組み立てた。

照射場の線源からの距離と放射線線量率を表 1 に示す。

線量率は γ 線よりも中性子の方が高いが、中性子線による潜像化は起こらない。中性子画像を得るには、例えば中性子捕獲断面積の大き

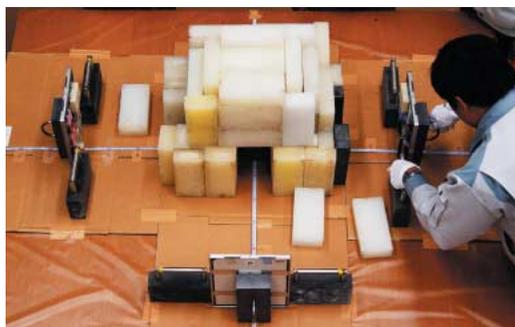


写真 6 照射場でサンプル付き IP を設置

表 1 ^{241}Am Be 線源（37 GBq）の露光条件

項目	距離		
	40 cm	50 cm	60 cm
露光位置	A	B	C
γ 線 ($\mu\text{Sv/h}$)	80	60	50
中性子線 ($\mu\text{Sv/h}$)	150	110	80
グループ	1 班	2 班	3 班
露光時間	20 分	30 分	35 分

な Gd 酸化物粉末を混合した中性子用 IP (BAS ND2025) を用いる。しかし、Gd の放射化で IP に有感な転換電子を潜像化するには、中性子フルエンスが格段に大きい ^{252}Cf 中性子源または原子炉中性子源を必要とする。

サンプル付きカセットを露光位置に設置し、講師が線源を貯蔵容器から取り出して照射場の中心に置いた時刻を露光開始とする。露光中は立ち入り禁止の標識を掛け、部屋を施錠する。露光後、カセットを外して BAS 5000 が設置してある実習室に運ぶ。露光終了後から読取り開始まで約 5 分であり、ARG 実習と同じ設定で画像解析を行う。露光条件やサンプルの位置などは、写真の横に記入する。最後に IP 消去器で IP 画像を消去する。

職業人を対象とする実習では、照射場の中性子線や γ 線の線量率を測定する。水、パラフィン・ブロック、鉛に対する遮へいや散乱の様子を計測する。

3. 実験結果

3.1 RG 画像

研修生が撮像した一例を写真 7 に示す。

低エネルギー γ 線は薄い金属やプラスチックなどの透過減弱に敏感であり、鮮明な画像が得られている。通常見ることのできない内部の構造をデジタル画像として可視化したことによ

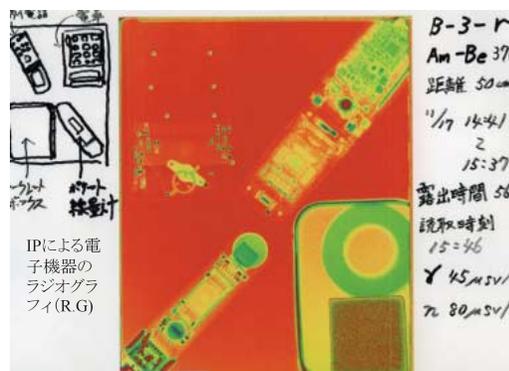


写真 7 RG 画像

り、研修生は材質の異なるサンプルに対しても強い関心を示した。アンケートでは「思ったよりも鮮明な画像であり、IPの優れた性質を理解した」「実験により γ 線の物質に対する透過率の差などを実感できた」などの感想が多かった。研修生には実習報告書の添付資料としてRG及びARG画像を持ち帰りできるようにした。

その画像例として、本誌 No.621 p.12 の新春特別企画に掲載された「100円玉はどこ？」がある（資料請求が可能）。

4. まとめ

職業人を対象とする実習では、「中性子測定は今後おそらく経験できないであろう、貴重な体験となった」「構造不明の部品の中身を初めて観察できて感動した」などの感想があった。

最近、放射線計測協会主催の体験セミナーが開講され、高校の理系の先生方・教育関係者を対象とするRG実習が初めて行われた。限られた2時間のRG実習であったが、教育現場に活用するための積極的な提言などもあり、アンケート結果は全体に好評であった。

照射場の立ち入りを制限すれば、中・高生や

一般を対象にしたRG実習も可能であり、ARG実習と併せ興味や関心は高いと考えている。密封線源、研修機材、BASなど、実験設備を有する施設でしか体験できないARG及びRG実験は、いずれも視覚的に訴求効果が高い実習であり、原子力・放射線教育を深める上にも意義あるものと結論できる。

参考文献

- 1) 宮原諄二：オートラジオグラフィ，日本原子力研究所 国際原子力総合技術センター（現原子力研修センター），オートラジオグラフィ 専門課程テキスト RIS 6001（2002）
- 2) BAS 5000とIPの主な仕様，<http://www.fujifilm.co.jp/>
- 3) 小林勝利，羽鳥晶子：ガドリニウム造影剤の体内残留を高感度で検出，*Isotope News*, No.525, 12-14（1998）
- 4) 本石章司，小林勝利，佐伯秀也：イメージングプレートによるJRR 2一次冷却系重水用アルミニウム配管中のトリチウム量の測定，*JAERI Tech* 2000-070（2000）
- 5) 森千鶴夫：イメージングプレートによる極微量放射能分布の測定，*RADIOISOTOPES*, 48, No.9, 589-599（1999），*Isotope News*, No.621, 15-16（2006）

（元 日本原子力研究所

E-mail▶koxiaolin@yahoo.co.jp）



高線量の照射装置を用いたガラスの着色

坂内 忠明

Ban-nai Tadaaki

1. はじめに

放射線医学総合研究所（以下“放医研”）では年に2件程度であるが、中学生の職場体験を受け入れている。職場体験を希望する生徒は多くの場合、将来の職業として医療関係や科学者等を選ぼうとしているので、重粒子線治療装置の見学等を含めた体験が中心となるが、このほかにも、この機会に放射線を理解する実験（体験）を行えるようにしている。

筆者が、この体験学習（数日あるうちの2～3時間程度）を担当することになった際、過去には、霧箱を作る実習や、身近な物質を用いて放射線を測定する実習を行っていた。しかし、これらの実験は最近様々な場所で行われており、中学生が既に体験している可能性がある。また、職業体験として来ているのであるから、できれば、実際に行われている実験に近い作業をさせたい。

そこで、全国の幾つかの研究機関にある装置で、かつ放医研では普段の実験に使用している装置として、高線量率のガンマ線照射装置を使うことを考えた。そして、その線量率で比較的短時間で変化が見られるものとして、ガラスの着色を実習に選んだ。放医研以外でも照射装置を持っているところではその実験ができると思われ、何らかの参考になればと思い、ここに報告する。

2. 実習計画

対象とした生徒は通常中学2年生なので元素や原子、イオン等を教わっていない場合がある。元素の話から始めると、着色の理由の複雑な部分は教えても忘れてしまう可能性が高いと考え、建物や装置を見るだけで分かるような部分の説明に重点を置くことにした。

よって、実験の目的としては、次の2点に絞った。

- 1) ガラスの着色を通して、放射線の作用や利用について学習する。
- 2) 使用施設の見学を通じて、放射線を安全に使うことを実習する。

体験学習は、非管理区域で講義を行い、管理区域で実習を行った。

使用した管理区域（第一ガンマ線棟）は、操作室（線源の出し入れの操作を行う）、実験室（ビーズの袋詰めなどの作業を行う）、照射室（放射線で照射する）に分かれている。

照射室への移動は事故がないように指導者が1人つき添って行く必要がある。また操作盤に生徒が触れないようにさせるため、常に1人を操作盤付近に待機させなければならない。この実習には最低2人の指導者が必要となる。

使用した装置であるが、線源は ^{60}Co （111TBq 1997年3月13日納入時）である。実習は25～28 Gy/分の線量率の場所で行った。

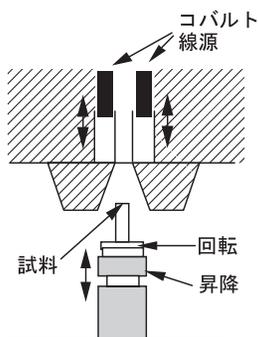


図1 照射装置の断面図

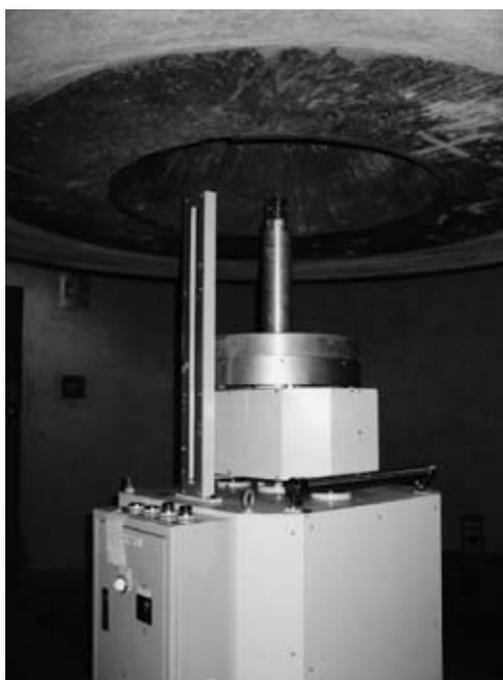


写真1 照射装置の外観

中央の丸い台全体が上がり、上部のコンクリートに囲まれた部分の中にある円筒状に配された線源の中央に棒状の台の上に置いたサンプルが入る。棒状の台の上には、数枚重ねたシャーレが見える

図1に装置の構造、写真1にその外観を示す。対象物を機械的に持ち上げ、空洞の中に入れ、線状の線源を筒状に配置したものを降ろすことにより、対象物を照射することができる。照射域は直径約6cmの円柱状で、その高さはミニシャーレ3枚分程度である。そのため、3グルー

プ以下になるように生徒を分け、1グループは1～2人となった。実習時間の長さは線量にもよるが、あまり長いと暇な時間ができてしまい、短いと慌ただしくなるので線源からの距離を工夫して、線量を適切にする必要がある。

また、当実験においては管理区域内への立ち入りもあることから事前に放射線安全管理者と内容について十分な打合せをしておく必要がある。

3. 実習の進行

実習時間3時間で実習を行った際の時間配分を表1に示す。実習ではGMサーベイメータを用いるがその使用についての実習は既に別の日に行っているので表には書かれていない。事前の講義では原子の成り立ち、放射線の特徴について30分程度で説明した。時間に余裕があったときは3回目の照射の時間を2倍にして、ビーズに1,200 Gyを照射した。そのときは、ヨウ化カリウムの照射を最後にし、準備で待ち時間を費やした。

3.1 第一ガンマ線棟の見学

管理区域に入る前に事業所の放射線障害予防規程等に従い、注意を説明するとともに、違反

表1 実際の実習部分の時間配分

40分	講義（原子の成り立ち、放射線の特徴）
10分	（休憩）
5分	移動
10分	見学（第一ガンマ線棟）
	実験
	1) ガラスビーズの1回目の照射（300 Gy, 10分）
	※この間に、ガラスビーズの袋の準備
90分*	2) ガラスビーズの2回目の照射（計600 Gy, 10分）
	※この間に、休憩を挟む
	3) ガラスビーズの3回目の照射（計1,200 Gy, 20分**）
	※この間に、ヨウ化カリウムの照射の準備
	4) ヨウ化カリウムの照射（10分）
5分	まとめ、片付け
(20分)	予備

*：サンプル交換の時にそれぞれ10分程度必要。

**：合計が900 Gyにするときは20分。

をした場合、実験の中止もあり得ることを話ししておく。

ガンマ線棟の見学の際には安全性の確保に配慮して下記の点を説明をした。特に放射線防護の“距離を取る”と“遮蔽する”の知識を用いて説明することに留意した。

- ・ガンマ線棟に入る前に、建物の出入口及び管理区域の出入口に注意をうながす標識があること。
- ・管理区域の出入口に常に鍵がかかっており、限られた人しか出入りできないこと。
- ・照射室のコンクリートの壁が厚く、外部と遮蔽されていること。
- ・照射室の入口に迷路部分があること（間違えて扉を開けても直接放射線が当たらない）。
- ・照射室の入口にオートロック、照射をしているかどうかを示す表示があり、厚い鉄の扉があること。
- ・照射開始時にベルが鳴り、照射中はブザーが鳴ること（警戒を示すランプが光ること）。
- ・照射室を覗くことができる窓には鉛ガラス（黄色いガラス）が入っていること。

照射室に入る時には各自 GM サーベイメータを持ち、照射室に入る前に線量が自然状態と同じことを確認した。

3.2 実習（ヨウ化カリウムの照射）

この実験はヨウ化カリウム溶液をデンブんに加え、放射線を当てることで生成する I_2 をヨードデンブン反応で検出する実験である。

☞準備

1 グループにつき、ヨウ化カリウムを 0.5 g 入れた 20 ml 容の液シンバイアル 1 本、片栗粉（じゃがいもデンブン）を適量入れたミニシャーレを 2 枚、スポイト 1 本を用意した。共通のものとして、純水を入れた容器とピペット、名前を記入するためのサインペンを用意した。

☞実験

1) 液シンバイアルに水を 0.5 ml 入れ、ヨウ化カリウムの結晶を溶かす。このときに振って

溶かすだけであるが、多少乱暴に振っても液がこぼれないようにあらかじめ液シンバイアルの蓋がちゃんと締まっているかどうかを指導者が確認すること。

2) できたヨウ化カリウム溶液をスポイトで取り、両方のシャーレのデンブンにかける。シャーレには区別がつくように名前を記入する。

3) 一方はそのまま保管し、もう 1 つは、200 ~ 300 Gy 程度（約 10 分）、 γ 線照射を行う。

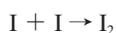
4) 照射後、GM サーベイメータで放射化していないことを確認する。

5) 放射線を当てた物と当てない物の色を比較する。

照射した方は赤紫色に変化する。当てない方は、この程度の時間であれば無色のままである。

☞解説

放射線を当てることにより、下記のような反応が起きていると考えられる。



この反応は、“放射線は電子をはじき飛ばす力がある → 原子を結び付けて分子にしている原子核の外の電子の数が少なくなることで、分子が不安定になる”ということを用いて説明した。

☞注意点

この時、濃いヨウ化カリウム溶液を放置すると、自然にヨウ素が生成してしまい、デンブンが反応して着色するので、ヨウ化カリウム溶液は実験直前に作る必要がある。

3.3 実習（ガラスの照射）

☞準備

市販されている直径 1 cm 程度のガラスビーズを 1 人当たり 8 つ用いた。ガラスビーズは手芸店などで入手できる。色付きのガラスビーズを用いても色がくすんだ感じになるだけなので、無色のビーズを用いた。

ガラスビーズを入れるビニール袋（ユニパツ

ク A-4) を 1 人につき 4 枚, 及びビニール袋を詰めるシャーレを 2 人で 1 個ずつ用意した。他に名前を記すためのサインペンを用意した。

実験

- 1) 実験開始前に、ビーズの色が同じであることを確認する。
 - 2) 自分の名前を書いた袋にビーズを 6 個入れ、残りの 2 個は 0 Gy (対照) として扱う。
 - 3) 6 個入りの袋を 300 Gy 照射する。その間に、袋に 0 Gy, 300 Gy, 600 Gy, 900 Gy (または 1,200 Gy) と記入し、手許にあるビーズ 2 個を 0 Gy の袋に入れる。
 - 4) 照射後、GM サーベイメータで放射化されていないことを確認する。
 - 5) 袋から 2 個取り出し、300 Gy と書いた袋に入れる。
 - 6) 以下繰り返し、2 個ずつ 600 Gy, 900 Gy (または 1,200 Gy) になるように照射する。それぞれの照射後、GM サーベイメータでビーズから放射線が出ていないことを確認する。
 - 7) 照射したビーズのそれぞれ色の変化を確認する。
- 線量が高くなるに従って茶色い色が濃くなるのが分かる (写真 2)。着色したガラスビー



写真 2 ガラスビーズを照射したもの
左から 0 Gy, 300 Gy, 600 Gy, 900 Gy。最初は黄色く変化し、だんだん黒っぽくなっていくのが分かる

ズはお土産として持ち帰らせた。なお、この際、数週間経つと退色が見られることを話しておく。

解説

ガラス中の不純物に放射線があたることにより、カラーセンターと呼ばれる光を吸収する部分ができる。そのため、透明に見えるための条件である“すべての波長の可視光線が透過すること”ができず、ガラスは色がついて見える。なお、カラーセンターの量は当たった放射線の量に応じて増加する。

3.4 照射時間中の説明

照射のための待機時間中に、ガラスの着色について、放射線による着色を利用した装飾品、簡易型着色ガラス (2001 年に産業技術総合研究所が特許を取っている、マンガンを添加し放射線を当てて紫色、銀を添加し放射線を当てて黄色に着色させる)、ガラス線量計、スモーキーコート (煙水晶) 等の話題を出した。

スモーキーコートはイオンの置換で着色することもあるが、水晶が放射能を持つ岩石の近くにあると着色する (スモーキーコートは天然石のアクセサリーの販売店等で容易に入手できるので実物を見せた)。

補足：この照射施設は 2007 年 9 月末に解体撤去されているので、現在の放医研ではこの実験に対応できない。

参考文献

水溶液及びガラスの照射については下記の文献を参考にした。

J. H. オドンネル, D. F. サングスタ, 近藤正春
ほか訳, 「放射線化学の基礎」, 197p, 三共出版, 東京 (1972)

また、下記も参考にされたい。

坂内忠明他, 放射線教育, 10, 53-58, (2007)

(放射線医学総合研究所)

E-mail ▶ t_bannai@nirs.go.jp)



放射線が固体中に作る飛跡の観察

鶴田 隆雄

Tsuruta Takao

1. はじめに

α 線に代表されるような重荷電粒子線が固体中を走るとその経路に沿って飛跡を残す。飛跡は非常に細く、電子顕微鏡でようやく確認できる程度のものであるが、飛跡のある固体をアルカリ溶液等に浸しておく、固体表面付近の飛跡は溶液により蝕刻（エッチング）、拡大され、光学顕微鏡で容易に観察できる大きさになる。この種の放射線検出器を固体飛跡検出器という。固体飛跡検出器は、霧箱、泡箱、乳剤に次ぐ第4番目の飛跡検出器といえることができる¹⁾。

目に見えない放射線であるが、その飛跡は、放射線というものがあるという存在しているということを我々に実感させてくれる。エッチングによって拡大された飛跡をエッチピットというが、エッチピットを観察しながら放射線に対する豊かなイメージを形成することができる。放射線についての基礎教育の段階で、ここに述べられるような固体飛跡検出器の実験を導入すれば、より高い教育的効果が得られるものと期待される。

2. ランタン用マントルからの α 線の検出

2.1 実験の目的

α 線の照射に始まり、エッチング、エッチピットの観察という実験の過程を通じて放射線の基本的な性質を学ぶ。

2.2 実験に必要な材料及び装置

(イ) ランタン用マントル、(ロ) ラップフィルム、(ハ) CR-39 プラスチック（樹脂）板、(ニ) プラスチックカッター、(ホ) オイルバスとシリコンオイル、(ヘ) エッチング槽、(ト) 温度計、(チ) 水酸化カリウム（KOH）、(リ) 光学顕微鏡。

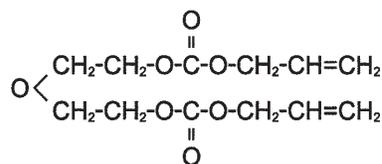
図1にランタン用マントルの写真を示す。ランタンは、キャンプなどで使用するランプである。マントルは、そのランタンの火口にかぶせて白熱させる網目状の袋で、アウトドア用品店等で購入することができる。ただし、市販のマントルには α 線を放出しないものがあるので注意を要する。



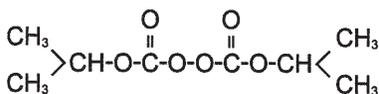
図1 ランタン用マントル



図2 実験材料及び装置



CR-39 Allyl diglycol carbonate (C₁₂H₁₈O₇)



IPP Diisopropyl peroxy dicarbonate (C₈H₁₄O₈)

図3 CR-39とIPP

図2にその他の実験材料及び装置を示す。

ラップフィルムは、食品の包装用に利用されるものでポリ塩化ビニリデン製、密度は1.6 g/cm³、厚さは11 μmである。

CR-39樹脂板は、図3に示されるようなCR-39単量体を少量の重合開始剤：IPPを使って熱硬化させたもので無色透明、厚さは約1.6 mmである。

図2に示す試料固定具及び“すのこ”は、必ずしも必要とするものではない。少数の試料を簡便にエッチングしようとする際は、CR-39樹脂板をクリップで挟み針金でエッチング溶液内に吊り下げればよい。オイルバスはマグネチックスターラー付きで、回転子で溶液を攪拌できるとよいが、これも必須ではない。

2.3 実験の方法

☞ α線照射

まず、ランタン用マンツルの繊維をほぐし、繊維の何本かを縫い合わせて太目の糸状にしておく。次に、プラスチックカッターでCR-39樹脂板を適当な大きさに切断する。CR-39樹脂板の一部はそのまま、一部をラップフィルム1枚で、別の一部をラップフィルム2枚でラップ、別の一部は紙で覆う。最後に、こうした

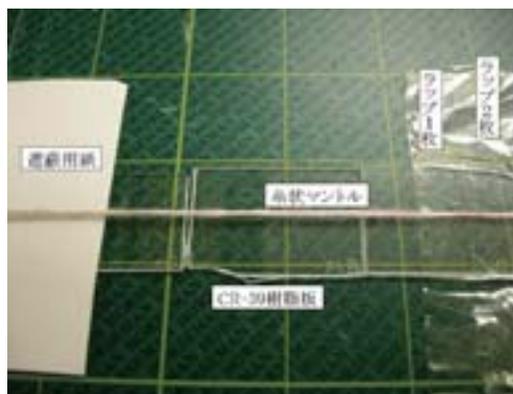


図4 CR-39樹脂板上に置かれた糸状マンツル

CR-39樹脂板の表面に、図4に示すように糸状マンツルを密着させて約1週間放置する。糸状マンツルから放出されるα線がCR-39樹脂板に入射し、約1週間の間に樹脂板上に数多くの飛跡を生成させる。

☞ エッチング

まず、30% KOH水溶液を調製し、エッチング槽に入れる。KOHを水に溶解させる際に溶液が一時的に白濁し、発熱する、また、溶液に直接触れない、などの注意を与えておく必要がある。次に、オイルバスにシリコンオイルを入



図5 エッチング後のCR-39樹脂板
エッチング条件：30% KOH, 90℃
エッチング時間：30 min

れ、オイルの中に上記エッチング槽を入れて昇温、KOH水溶液が90℃の一定温度を保持するようにする。KOH水溶液の中に照射済みのCR-39樹脂板を浸し8～30分間エッチングする。エッチング終了後、CR-39樹脂板を水洗し、自然乾燥させる。よく水切りをしてから自然乾燥させれば、乾燥に要する時間は15分程度である。

④エッチピットの観察

乾燥させたCR-39樹脂板を手にとって見ると、図5に示すように、糸状マントルを密着させた部分に白い筋ができていたのが観察できる。白い筋は、そこにエッチピットが集中して存在していることを示している。さらに詳しく観察すると、白い筋は、ラップしなかった所が1番濃く、1枚、2枚とラップフィルムの枚数が増えるに従って薄くなっているのが分かる。白い筋のある部分を中心に光学顕微鏡を使ってエッチピットの観察を始める。

2.4 実験結果

ラップフィルムなしで、糸状マントルを密着させてα線照射したのち、30% KOH, 90℃のエッチング条件で8, 15, 30分エッチングしたとき、CR-39樹脂板表面に現れるエッチピットを図6 a, b, cに示す。a, b, c 3枚の写真は同一の場所の各々のエッチング時間における

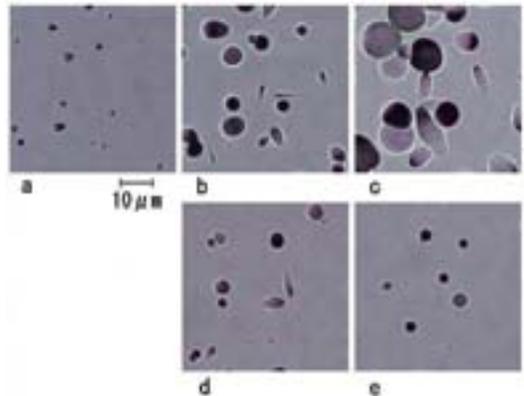


図6 CR-39樹脂板上のα線飛跡から成長したエッチピット
a, b, cはラップなしで照射した部分
dはラップフィルムを1枚隔てて照射した部分
eはラップフィルムを2枚隔てて照射した部分
エッチング条件：30% KOH, 90℃ エッチング時間：a-8 min, b, d, e-15 min, c-30 min

写真で、個々のエッチピットがどのように拡大してゆくか、その成長の過程を確認することができる。

エッチングの初期にはα線の入射方向が読み取れるような細長く、小さなエッチピットが多いが、エッチング時間が経過するにつれて、個々のエッチピットは開口部の形状を円に近づけながら拡大してゆく。この実験のように重荷電粒子を外部から飛跡検出固体に入射させた場合は、エッチングが進行しても飛跡の密度は変わらない。

図6 d及びeには、糸状マントルからラップフィルムをそれぞれ1枚及び2枚隔ててα線照射し、15分間エッチングしたCR-39樹脂板上のエッチピットを示す。図6でbとd, eを比較すると分かるように、ラップフィルムが1枚、2枚と増えるにつれて、エッチピットの密度が小さくなり、また、細長いものより円形のもの割合が増える。紙で覆ったCR-39樹脂板上にはエッチピットが存在しない。

エッチング溶液の温度は必ずしも、90℃でなければならないということはない。オイルの使

用が難しい場合などは、ウォータバスとして30% KOH 水溶液を60～70℃の温度に保ってエッチングすればよい。ただし、時間はかかり、90℃、15分で得られるようなエッチピット像を得るのに60℃の場合は約2時間を要する。

2.5 考察

ランタン用マントル中の何が α 線を放出させているのであろうか。ランタン用マントルから放出される γ 線のエネルギーを、ゲルマニウム半導体検出器を使って測定すると、トリウム系列核種が放出する γ 線のエネルギーピークが検出される。したがって、 α 線を放出しているのはトリウム系列の核種で、それらの核種から放出されている α 線のエネルギーは数 MeV と考えられる。

α 線は固体中にどのような飛跡を生成しているのであろうか。固体中に入射して、エッチングした場合に拡大するような飛跡を作る放射線は、核分裂片、 α 線等の重荷電粒子線に限られる。中性子線に代表されるような中性の粒子線、 β 線、電子線等の軽荷電粒子線及びX線、 γ 線等の電磁波は、固体中に直接飛跡を作ることを行ない。また、飛跡ができるのは絶縁性の物質中に限られる。

雲母のような結晶性の物質中を重荷電粒子が通過すると、電離により粒子の経路に沿って密に生じた正イオンが互いに反発、飛び散り、周囲の結晶中に格子間原子となって入り込み、経路に沿って空孔が高密度に残されることになる、これが飛跡形成モデルの1つである。金属中に飛跡が生成しないのは、正イオンが反発、飛び散る前に自由電子と再結合してしまうためであると説明されている。

CR-39樹脂のような非晶質の高分子化合物の場合は、電離により高分子鎖の切断が高密度に起こる、これが別の飛跡形成モデルである。

すなわち、飛跡の本質は、結晶構造の乱れまたは高分子鎖の切断という放射線損傷の連続した領域であると考えられている。そのような領域は、一般に化学的活性が高く、溶液に溶け出

しやすい。

エッチピットが様々な形状をしているのはなぜであろうか。ある核種から放出される α 線は特定のエネルギーを持っている。しかしながら、糸状マントルの各部で発生した α 線は、糸状マントル自身やラップフィルム内部を通過するうちに減速され、様々なエネルギーを持った粒子となり、CR-39樹脂板に入射する。ラップフィルムのない状態で α 線照射された樹脂表面のエッチピットがいろいろな大きさ、形をしているのは、様々なエネルギーの α 線が様々な角度から樹脂表面に入射したためである。

ラップフィルムが1枚、2枚と増えるに従って、エッチピットの密度が小さくなり、また、円形のもの割合が増えている。その理由は、ラップフィルムの表面に平行に近い角度で入射した α 線は、垂直に入射した α 線と比較してフィルム内での飛程が長くなるために吸収される割合が増えるからである。結果的に、樹脂板に入射する α 線の数減少、特に樹脂板に浅い角度で入射する α 線の数減少する。

紙で覆った部分にエッチピットが存在しないのは、 α 線が紙1枚で完全に遮蔽されるからである。

α 線を測定対象とする固体飛跡検出器は、空気中のラドン濃度の測定、摂取された α 線放出核種の体内挙動を調べる研究において動物に投与された核種の体内分布の測定等に应用されている。

3. 熱中性子の検出

前述のように熱中性子が絶縁性物質に入射しても直接飛跡を作ることはしない。しかしながら、もし、熱中性子を吸収して α 線を発生させるような物質、もしくは、熱中性子を吸収して核分裂片を発生させるような物質を絶縁性物質に密着させ、または、絶縁性物質中に溶解させることができれば、それは熱中性子の検出器となる可能性がある。

オルトカルボランというホウ素化合物を溶解させたCR-39樹脂板がある。このホウ素溶解CR-39樹脂板を熱中性子で照射したとき、樹脂の中では ^{10}B (n, α) ^7Li 反応が起こり、発生した α 線と ^7Li 原子核が樹脂内を進行し、飛跡を生成させる。

この樹脂板を、近畿大学原子炉の炉心内で熱中性子照射し、前述のエッチング条件(30% KOH, 90°C)で8, 15, 30分エッチングしたとき、樹脂板上に現れるエッチピットの成長過程を図7 a, b, cに示す。エッチングが進行するにつれて、樹脂表面が削り取られ、樹脂内部に潜在していた飛跡が次々にエッチピットとして出現してくる様子が観察される。初期に出現したエッチピットがコントラストを失って計数できなくなるまでの間、エッチピットの表面密度はエッチングの進行とともに増加する。

あるホウ素濃度のCR-39樹脂板を熱中性子フルエンス Φ [cm^{-2}]で照射し、一定のエッチング条件・時間でエッチングするとき、樹脂板上に出現するエッチピットの表面密度 P [cm^{-2}]は Φ に比例する。

$$P = K \Phi \quad (1)$$

ここで、比例定数 K は無次元量で、熱中性子感度と呼ばれる。CR-39樹脂板中のオルトカルボランの濃度はほぼ0.5%が適切で、この濃度のCR-39樹脂板の熱中性子感度は、最適なエッチング条件・時間を選択した場合、ほぼ

1×10^{-3} であることが確認されている²⁾。熱中性子で照射されたその濃度の樹脂板を、最適なエッチング条件・時間でエッチングして 1×10^3 [cm^{-2}]のエッチピットが検出されたとき、照射された熱中性子フルエンスは 1×10^6 [cm^{-2}]だったことになる。これは実効線量に換算すると7.6 μSv に相当する。

この熱中性子検出実験と同じ原理であるが、窒化ホウ素(BN)とCR-39樹脂板を密着させた検出器が、現在、放射線業務従事者の熱中性子用検出器として利用されている。

4. 高速中性子の検出

CR-39樹脂は、図3から分かるように、水素、炭素、酸素の3種類の元素からなる。高速中性子がCR-39樹脂板に入射すると、その一部が水素、炭素、酸素原子の原子核に衝突、それらの原子核を跳ね飛ばす反応(反跳反応)を起こす。跳ね飛ばされた原子核は正のイオン、すなわち、重荷電粒子となって樹脂内を進行し、飛跡を生成させる。

ラジウム-ベリリウム(Ra-Be)、プルトニウム-ベリリウム(Pu-Be)、アメリカウム-ベリリウム(Am-Be)といった中性子源がある。 ^{226}Ra , ^{239}Pu , ^{241}Am といった核種が α 線を放出、 ^9Be (α, n) ^{12}C 反応により中性子が発生する。この反応によって生成する中性子は、平均エネルギーが数MeVの高速中性子である。

この高速中性子でCR-39樹脂板を照射し、

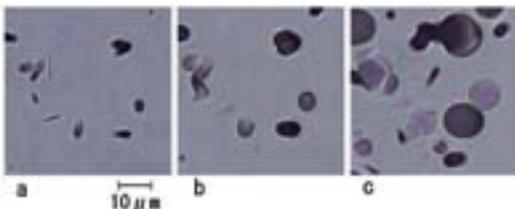


図7 熱中性子で照射したホウ素溶解CR-39樹脂板上のエッチピットの成長
エッチング条件: 30% KOH, 90°C エッチング時間: a-8 min, b-15 min, c-30 min

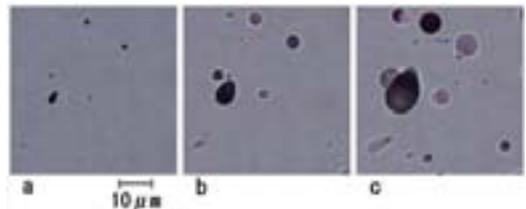


図8 高速中性子で照射したCR-39樹脂板上のエッチピットの成長
エッチング条件: 30% KOH, 90°C エッチング時間: a-8 min, b-15 min, c-30 min

前述のエッチング条件 (30% KOH, 90°C) で 8, 15, 30 分エッチングしたとき出現するエッチピットの成長過程を図 8 a, b, c に示す。この高速中性子検出実験の場合も、熱中性子検出実験の場合と同様、エッチングが進行するにつれて、樹脂表面が削り取られ、樹脂内部に潜在していた飛跡がエッチピットとして出現してくるので、エッチング初期にはエッチングの進行とともにエッチピットの表面密度が増加する。

高速中性子の検出の場合、一定のエッチング条件・時間で CR-39 樹脂板をエッチングするとき、樹脂板上に出現するエッチピットの表面密度 P [cm^{-2}] と照射高速中性子フルエンス Φ (E) [cm^{-2}] の間には次式が成立する。

$$P = \int_0^E K(E) \Phi(E) dE \quad (2)$$

CR-39 樹脂板の高速中性子に対する感度 K (E) は、入射中性子エネルギー E の関数である。最適なエッチング条件・時間でエッチングした場合、数 MeV のエネルギーの中性子に対する感度 K (E) は、ほぼ 5×10^{-4} であることが確認されている³⁾。数 MeV のエネルギーの中性子で照射し、最適な条件・時間でエッチングした樹脂板に 1×10^3 [cm^{-2}] のエッチピットが検出されたとき、照射した中性子フルエンスは 2×10^6 [cm^{-2}] だったことになる。これは実効線量に換算すると 0.95 mSv に相当する。

CR-39 樹脂板をポリエチレン等の樹脂と密着させると、ポリエチレンが重荷電粒子の発生源、すなわち、ジェネレータの役割を果たし感度が上昇する。このようにした CR-39 樹脂検出器が、現在、放射線業務従事者の高速中性子用検出器として利用されている。

最近 DAP (Diallyl phthalate) と CR-39 の共重合樹脂が開発され、宇宙線中の重荷電粒子測定への応用が期待されている⁴⁾。

5. まとめ

2. に詳述した基礎的な実験は、特別な放射線源を用いる必要がないので、小中高等学校の教室で容易に行うことができる。実験の過程で生徒諸君からは様々な質問が出されるであろうが、予測される代表的な質問に対する答えの一例を考察の部分に記述した。3. と 4. に概説したやや発展的内容のある 2 つの実験は中性子源を必要とするので、学校でそれを取り上げる場合は、中性子源を保有する研究機関等の協力を得ることが必要となるであろう。また、ここに紹介した実験の幾つかは、大学や研究機関で行われる放射線についての一般向けの研修会のプログラムの 1 つとして採用していただけるのではないかと考える。

【謝 辞】

本稿を纏めるにあたり、マンツルの γ 線スペクトル測定でお世話になった近畿大学原子力研究所の芳原新也氏及び写真撮影等でご助力いただいた近畿大学大学院総合理工学研究科院生中西良樹氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 鶴田隆雄：放射線入門 (第 2 版), 通商産業研究社, pp.71-79 (2008)
- 2) T. Tsuruta and N. Juto : Neutron dosimetry with boron-doped CR-39 plastic, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **21**, 871-876 (1984)
- 3) T. Tsuruta, T. Niwa and Y. Fukumoto : Experimental study of CR-39 etched track detector for fast neutron dosimetry, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **29**, 1108-1115 (1992)
- 4) 鶴田隆雄：新しい飛跡検出固体：DAP 樹脂について, *Isotope News*, No.645, 11-17 (2008)

(近畿大学原子力研究所

E-mail ▶ tsuruta@msa.kindai.ac.jp)



ガイスラー管放電によるオーロラの模擬

森 千鶴夫*, 緒方 良至**, 佐久間 洋一***

Mori Chizuo Ogata Yoshiyuki Sakuma Youichi

1. はじめに

最近の真空実験ではガイスラー管はあまり使われなくなっている。しかし、ガイスラー管内の放電色は、高速の電子線による気体の電離や励起に伴うもので、特に、ガイスラー管の中に磁石を入れた場合の発光は、磁界を持っている地球の高空の希薄な空気を宇宙線が電離・励起することによって現れるオーロラのミニアチュア版とも言える。その意味でガイスラー管内の放電は、宇宙線、放射線の理解の一助になり得る。加えて、中学校や高校で習う電流と磁界の相互作用など理科の基本的な事柄の理解にも役立つと思われる。

本稿はオーロラの模擬としてのガイスラー管放電実験について述べるが、このような実験には、通常の実験室にある真空装置を使うことができる。この程度の実験装置は、新しく購入しても真空ポンプを含めて、一式10万円程度なので、真空実験装置を持っていない者にとっても手の届く範囲である。各個人でできる実験ではないが、グループを対象とした放射線の教育、理科の教育のためのデモンストレーション実験としては有用であると思われる。

しかし、この実験に関しては、注意事項として次のことを強調しておきたい。放電のために1～3kVの高電圧電源を使用するので、感電の危険がないようにアクリル樹脂などの遮蔽板を使用して高電圧部分に触れる恐れがないよう

にすること、及び実験は限られた指導者のみが行うことなどである。

2. 実験装置

図1に実験装置を示す。手持ちの部品を集めた最少限の装置であるため、リーク弁や真空度の調節弁がない。したがって、真空度の調節はできないが、ロータリーポンプを止めた後、時間の経過とともに徐々に真空度が低下し適当な放電色が現れるのを待って実験を行う。また、実験が終了した後に、ロータリーポンプのオイルが逆流して来ないようにガイスラー管とゴムホースを外して置く必要がある。

図2はガイスラー管の写真である。ガイスラー管は、真空装置に連結され、両端の電極（通常はアルミニウムの円板電極）に数kVないし数十kVの交流または直流電圧が印加される。その放電発光の状態から真空度の目安を、発光

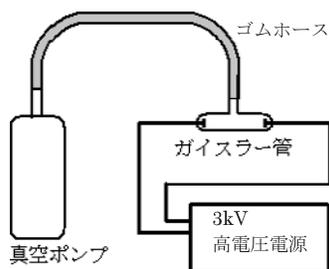


図1 実験装置

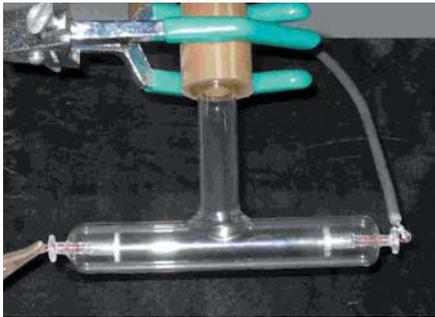


図2 ガイスラー管

色から残留気体の成分の目安を得ることができる。したがって、真空装置には古くから使われ普及している。

3. ガイスラー管の放電

ガイスラー管内の放電発光の様子は真空度によって著しく異なるが、一般的には、管の両電極に印加された電圧と管内のイオンによって作られる電界によって加速された電子が管内のガスを電離し、プラズマ状態になったイオンの再結合や、正負の電荷が管内を移動するときのガスの励起などによる発光であって、かなり複雑な現象である¹⁾。図3にガイスラー管の一般的な放電の写真を示す。以後の実験において、印加電圧は直流3kVとした。

図3(a)は真空度が10パスカル(Pa)程度の圧力の場合である。この放電の様子を簡単に説明する。陰極の傍には大量の陽イオンが存在し、このイオンが陰極に衝突して大量の電子を放出する。しかし、電子のエネルギーが低くガス分子を電離できないため、陰極表面には厚さが極めて薄いアストン暗部と呼ばれる部分ができる(図3(a)では、はっきりとは見えていない)。これらの電子は陰極表面と近傍の大量の陽イオンが作る強い電界で加速され、ガスを電離するため、陰極グローが発生する(図では陰極表面が光って見える部分)。この電離によって大量のイオンと電子が生じる。しかし、電子のエネルギーが高くなっていくと、ガスとの衝

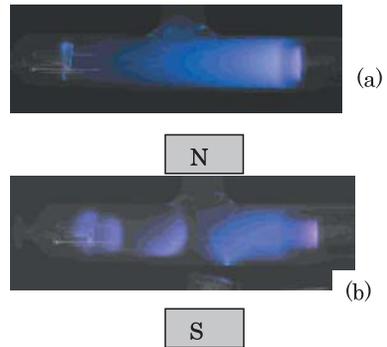


図3 (a)：ガイスラー管に3kVの直流電圧を印加した場合、左側が陽極、(b)：管の中央の外側に馬蹄形磁石を置いた場合、(c)：管の中のプラス電極の上に針金状の電極(下側が陽極)を置いた場合

突の確率(ガス圧力にはほぼ比例する)が減少し、暗い部分が発生する。この領域はダークスペース(クルックス暗黒部)と呼ばれ、その長さは真空度の目安とされる(図には約5mmの長さのダークスペースがある)。やがて、電子はガスに衝突し、負グローと呼ばれる光る部分が長く続いている。そして、電界の強さや圧力の関数として、ドリフトや電離を行い、ファラデー暗黒部、陽光柱、陽極暗部、陽極グローなどが続く(図では陽光柱、陽極グローが一体化して見える)。(b)は管の中央の外側に馬蹄形磁石を置いた場合で磁界によって電子が曲げられ、ガスとの衝突・電離の確率が増え、負グローが短くなり、明るい部分と暗い部分の繰り返しが生じている。(c)はガイスラー管を縦にして、管の中の陽極電極(下側)の上に針状の電極を置いた場合で、電界が強くなるために電子が加速され激しく電離しながら陽極グローが発生し、この電極に集中している様子が分かる。

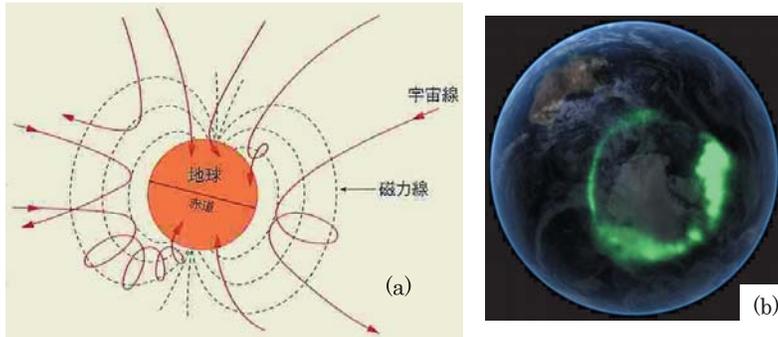


図4 (a) 地磁気の磁力線が宇宙線に及ぼす影響²⁾ (b) 南極上空から観測したオーロラオーバル (オーロラの環状発生, NASAの人工衛星写真より)⁷⁾

4. 宇宙線と地磁気とオーロラ

図4(a)に模式的に示すように、地球は弱い磁石である²⁾。磁極は地理上の南極からは緯度で約20度、北極からは約10度ずれてはいるが³⁾、地理上の極に近い位置にある。宇宙線中の高速の荷電粒子（主として陽子や電子）、あるいは荷電粒子によって上空の大気中で作られた二次的な陽子や電子は、地球の磁界によって、フレミングの左手の法則に従う力を受けて反射されたり、磁力線に沿う螺旋運動をするため、地球の大気圏に近づく割合は極めて小さい。しかし、南極や北極の磁極付近では、磁力線が地球表面にほぼ垂直に入射しているため、磁力線とほぼ同じ方向に入射した荷電粒子は磁力線による力をほとんど受けず、磁力線に沿って地球表面へやってくる。このときに、荷電粒子は地球上空100～300 kmにおいて、大気分子を励起し光を発生する。大量の荷電粒子がやって来た時には、オーロラとして観測される⁴⁻⁶⁾。

しかし、図4(a)は通常の場合のやや模式的な磁力線分布で、オーロラが現れるような場合、すなわち太陽風が強い場合には、地球の磁力線は、後述の〔参考〕⁴⁾の中の図8に示すように、太陽風に押されるため、磁力線が磁界の弱い上空から地球表面へほぼ垂直に入射しているところは、磁極ではなくて、磁極を取り巻く

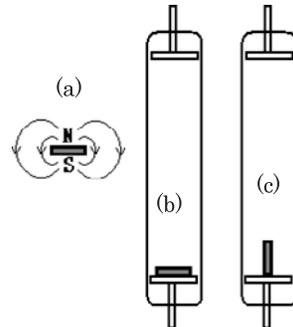


図5 (a)：ネオジウム磁石と磁力線、(b)：ガイスラ管の一方の電極に磁石を横にして置いた場合、(c)：磁石を縦にして置いた場合

楕円形の環状の部分になる（詳細は後述の〔参考〕を参照されたい）。この部分では宇宙線は、磁力線に沿って、あるいは磁力線に巻きついた形で大気圏に入射してくるので、オーロラも磁極を取り巻く環状（オーロラオーバルと呼ばれる）になる。図4(b)は、NASA（アメリカ航空宇宙局）が公開している南極大陸上空の人工衛星から撮影したオーロラオーバル⁷⁾である。

5. 磁界中のガイスラー放電によるオーロラの模擬

図5(a)にネオジウム磁石（直径14 mm、厚さ5 mm）の磁力線の様子を模式的に示す。この磁石を(b)のように、垂直に立てたガイスラ

一管の中の下部のアルミニウムの電極面の上に水平においた場合、及び(c)のように垂直に置いた場合において、下部の電極に正の電圧 (+3 kV) を印加して放電させた。(c)のように縦に置くためには、いわゆるダブルクリップ (背が平らで、スプリングの役割を果たしている) で磁石を挟んだ後、クリップの針金ハンドルを

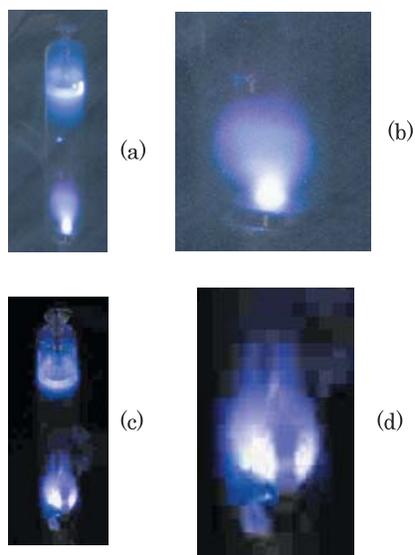


図6 印加電圧は下部の電極に+3 kV: 磁石の配置は(a): 図5の(b)の場合、(b): 拡大図、(c): 図5の(c)の場合、(d): 拡大図

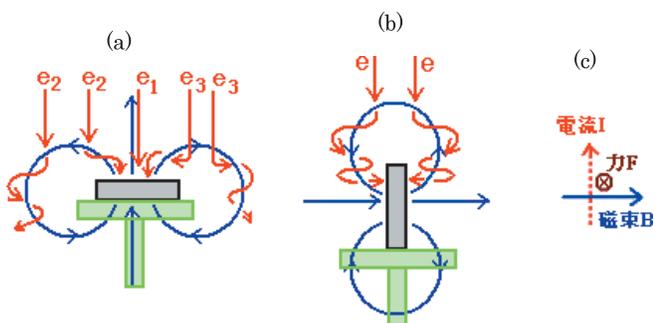


図7 (a): 図6の(b)の説明図, (b): 図6の(d)の説明図, 赤は入射電子, 青は磁力線, 黒は磁石, 緑はアルミニウム電極 (+3 kV), (c): フレミングの左手の法則。図中には電界は記入されていない

取り外し、ガイスラーの中へ入れた。磁石が転倒したり、位置がずれたりした場合には、管の外から他の磁石を用いて修正した。

図6に放電の様子を示す。図6(a)は図5(b)の場合で、横に置かれた磁石の上平面の中央に電子の流れが集中し、ガス(空気)を励起し、光っている。図6(b)は下部の磁石の部分拡大したものである。このように、磁石の中央に電子が集まるのは、図7の(a)に示すように、磁力線(青)に沿って平行に入射した電子 e_1 (赤)や、磁力線に巻きついて移動する電子 e_2 , e_3 のみが磁石の中央に到達できることによる。電子は磁力線による力とともに電極近くの電界による加速を受け、ガス分子を電離して光っている。

図6の(c)は図5の(c)の場合で、縦に置かれた磁石の平面の中央の両側に電子が集中している。これは、図7の(b)に示すように、上方からの電子は、磁力線にほぼ垂直に入射するため、フレミングの左手の法則(c)に従う強いローレンツ力を受け、磁石に近づけない。しかし、磁力線に巻きついた形で移動し、磁石の両側から磁石の平面の両側中央に入射してくる。この時、電子は磁石に印加されている正の電圧のために電界からエネルギーを得ながら、ガスを電離・励起して光が発生する。

図6の(b)や(d)の様子は、宇宙線あるいはそれによって作られた荷電粒子(主として陽子と電子)が、地球の南極や北極近くの地球表面にほぼ垂直になっている磁力線に沿って、地球表面の大気圏へ侵入してくることによって発生するオーロラを模擬していると言することができる(図4の(a)参照)。宇宙線はエネルギーが高いため、電界によるエネルギーの補給がなくても、空気中でエネルギー損失を続け、光を発生しながら長い距離を飛行することができる。

6. まとめ

自然放射線の一種である宇宙線によってオーロラが発生する。オーロラの発生のメカニズムや、光の不思議な色や動きなどは今も研究対象ではあるが、かなり解明されつつある。本稿では、真空実験に用いられるありふれたガイスター管の中に、ネオジウム磁石を入れてオーロラの発生を模擬した。荷電粒子線に働く力、気体の電離や励起による光の発生などを実験的に知ることによって、放射線や地球の極地方に輝くオーロラの発生の理解にも役立つものと思われる。

ただし、オーロラに関しては、後述の〔参考〕に示すように、現象そのものが極めて複雑であり、原理的な模擬は可能であっても、十分な模擬はかなり難しいと言わざるを得ない。それほど自然は複雑で神秘的である。

参考文献

- 1) 石井博, 中山勝矢: 真空度測定 (真空技術講座 3), 日刊工業新聞社, p.89 (1968)
- 2) 図で見る環境放射線: 中部原子力懇談会編パンフレット, p.5 (1997)
- 3) 文部科学省国立天文台編: 理科年表 (机上版), p.796, 797 (2002)
- 4) 赤祖父俊一: オーロラ 地球をとりまく放電現象, 中央公論社 (1975)
- 5) 小口高: 神秘の光オーロラ, NHK ブックス (1978)
- 6) 上出洋介: オーロラと磁気嵐, 東京大学出版会 (1982)
- 7) NASA 人工衛星写真 (NASA copyright policy page or JPL Image Use Policy). http://earthobservatory.nasa.gov/Newsroom/NewImages/images.php3?img_id=17165



〔参考〕

1) オーロラオーバル (環) について

図5の(a), あるいは, 図7の(a)及び(b)においては, 地球磁界を単純な双極子磁界で示している。実験で使用した磁石の磁界を記述する場合にはこれでよいが, 地球の周りの磁界は, かなり複雑である。それは, 次の図8 (文献4) p.87の図24) に示すように, 点線の双極子磁界が太陽風に押されて, 実線のように, 上手では圧縮され, 下手では引き延ばされた形になる。Bとbの辺りの磁力線は図の右方向の外 (スペースの関係で描かれていないが, 図9 (文献4) p.179の図85) ではこの様子が分かる)

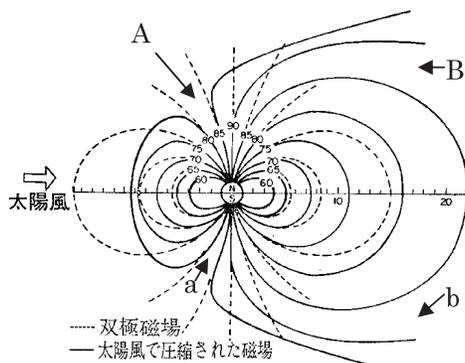
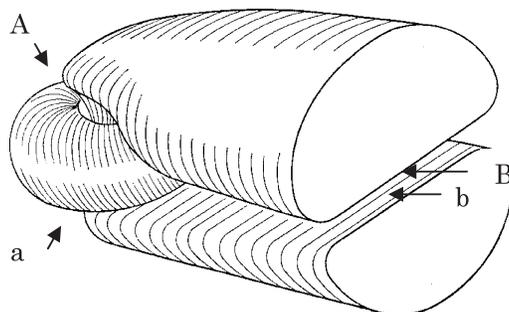


図24 太陽から流れ出るプラズマ流によって三次元的に変形した地球磁場 [G. D. Mead & D. B. Beard による]。

図8 文献4) 87 頁より転載・改変



第85図 地球に近いところでは磁力線はたまねぎ状に南北でつながり, 極冠域から出た磁力線は後にのびている。したがってその二つの領域の間には漏斗状の境界がある。

図9 文献4) 179 頁より転載・改変

では近接し、磁力線の方向は互いに逆なので、この領域の磁界はほとんどゼロである。図9はこのような様子を3次元的に描いたもので、かなり複雑な形になっている。磁界がほとんどゼロの領域から地球表面に入り込んでいる場所は、地球表面では円環状（あるいは楕円環状）になる。この円環状の箇所は磁力線が外に向かって開いた形になっているので、A, a, B, bの矢印（記号及び矢印は筆者が記入）のように荷電宇宙線粒子が入り込みやすい。このように円環状に入射してくる宇宙線によって、オーロラ環（オーロラオーバル）ができる（図4の(b)）。

“太陽風に押される”という表現は、次のように考えてよい。大気中のいわゆる“風”は空気の分子の流れである。太陽からは、陽子や電子が宇宙空間に放出され、これらの流れがあたかも風のように地球の方にも押し寄せてくる。陽子や電子は荷電粒子であるから、その流れは磁界を伴い、空間に磁気エネルギー（ $HB/2$ (J/m^3)) の流れをもたらす。地球の磁界も磁気

エネルギーを持っている。エネルギーは高い密度から低い密度へ移動するので、地球の磁界は“太陽風に押される”ことになる。

2) ネオジウム磁石

使用した磁石は2個 1,500円で購入できる（中村理科工業(株)）。

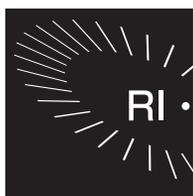
3) 市販の放電実験セット

水素、酸素、アルゴン、などの種々のガスを封入したガイスラー管が1本 8,000円程度で、また、十字架や回転車入りのクルックス管（3～4万円）などが市販されている（中村理科工業(株)）。

4) 放電実験の紹介

3)の市販の放電管を使った実験や手作りの放電管実験が、“天神の研究室” <http://www2.hamajima.co.jp/~tenjin/labo.htm> に紹介されている。

(*愛知工業大学,
**名古屋大学医学部,
***核融合科学研究所
E-mail ▶ cmori@sc.starcat.ne.jp)



ガイスラー管とイメージングプレートを利用した簡易 X 線透過像撮影

森 千鶴夫*，緒方 良至**，佐久間 洋一***

Mori Chizuo

Ogata Yoshiyuki

Sakuma Youichi

1. はじめに

ロータリーポンプを使うやや古い真空装置には、真空度を簡単に推定するガイスラー管装置がついている。ガイスラー管¹⁾は両端に電極を有し、高電圧を印加して放電させる単純な放電管で、真空度に応じて放電の様相が異なるため、真空度の目安を知るのに用いられる。放電電圧を印加するためには、通常、インダクションコイルやネオントランスが用いられ、真空度が1パスカル程度以下になると X 線が発生することが知られている¹⁾。イメージングプレート²⁾ (IP) は、X 線フィルムの 10 ~ 100 倍程度の高い感度を有する放射線検出フィルムで、厚さ約 500 ミクロン、20 cm × 25 cm などのサイズがある。

本稿ではガイスラー管からの X 線と IP を使えば、身の回りの小物の X 線写真を簡単に撮るデモンストレーション実験ができるということについて述べる。この実験は、放射線の医療や産業への利用について、また、放射線の性質について、比較的容易に実験的に理解してもらうのに役立つと思われる。

しかし、後述するように、IP の読取装置を含めた一式は高価で、購入することは困難であるが、理科系の学部を有する大抵の大学にはあるので、このような大学と連携するか、むしろ大学側が積極的にこのデモンストレーション実

験を行うのが望まれる。また、大学側の学生実験としても活用できると思われる。

2. 実験装置、X 線線量と安全の確保

2.1 実験装置

ガイスラー管に印加する高電圧は、インダクションコイルが多いが、ネオントランスの場合もある。10 ~ 20 kV 程度の電圧が発生し、真空度が1パスカル程度以下になると X 線が発生する。新しくガイスラー管、ロータリーポンプ、インダクションコイル、ゴムホースなどの一式を購入しても、10 ~ 15 万円程度なので、理科実験費などで購入できる範囲であると思われる。ただし、IP 装置に関しては、IP そのものは 3 ~ 4 万円であるが、IP の読取装置は高価なので、この装置を所持していなければ、前述したように所持している研究室と連携する必要がある。

図 1 に実験装置の概略を示す。ただし IP の読取装置は示していない。当実験で使用したガイスラー管は、ガラス管の両端に直径 18 mm、厚さ 1.3 mm の円形のアルミニウム電極が 9 cm 離れて対向している。高電圧の発生にはインダクションコイルを用いた。インダクションコイルでは、2 本の針状のスパーク放電電極の距離を調節することによって、発生する高電圧を変えることができる。実験では針状電極間隔を約

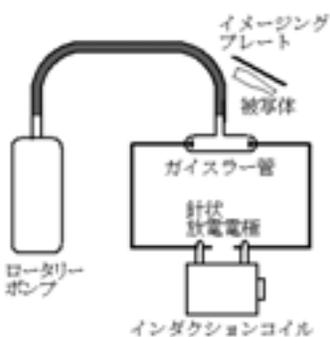


図1 実験装置

3 cm にした。発生するパルス高電圧は、高抵抗で分圧し、シンクロスコープで波高を観測して求めた。針状電極のスパーク放電による電磁波ノイズによって、正確に観測することは困難であったが、最高約 20 kV の電圧が推定された。

X 線の強度が弱いので、X 線フィルムの代わりにイメージングプレート (IP) を使った。IP は ST-VN 型で、読取装置は FCR AC-3 型であったが、どの型の読取装置でも、それに合った IP を使用すれば利用できる。IP を専用のカセットに入れて X 線を照射し、直ちに読取装置で画像を得た。

被写体試料は、X 線のエネルギーや線量率があまり高くないので、花や葉、文房具などの X 線を透過しやすい試料を並べた。

2.2 X 線線量と安全の確保

発生 X 線線量率は、ガイスラー管から 1 m の距離において電離箱式サーベイメータで測定した。最大 5 マイクロシーベルト毎時 ($\mu\text{Sv/h}$) であったので、今回の場合のように、1 回の X 線露出時間が 3、4 分程度の実験を異なる試料に対して 4、5 回行う場合に、2 m 離れた位置では、積算で 0.5 μSv 程度になり、自然放射線の 10 日分程度の被ばくとなる。

ロータリーポンプや拡散ポンプなどの真空系は、一般的には金属板の囲いの中にあるため、X 線はほとんど囲いの外へ出ない。したがって、通常はガイスラー管から X 線が発生することにほとんど気を遣うことなく、ガイスラー

管を放電させている。

しかし、X 線写真を撮る目的でガイスラー管を放電させる実験は、安全上、特別に注意を払う必要がある。前述したようにガイスラー管から 2 m 離れた位置での X 線の被ばく線量は、自然放射線の 10 日分程度であるので問題ないと考えてよいが、遮蔽板を置けば X 線の線量を低減でき、かつ距離を確保することにもなる。1 cm の厚さの亚克力樹脂板を遮蔽板として置けば、線量はほぼ 1/3 に減少する。1 mm 程度の厚さのガラスでも同様の効果がある。したがって、X 線像の実際の撮影では、ロープを張るなどして距離を 2 m 程度にとり、ガイスラー管や高電圧電源に近づけないようにする。また前記のような遮蔽板を置いて行うようにする。撮影の様子は透明な遮蔽板を通して観察できる。X 線作業主任者の指導の下で行えばなお安心である。

3. 線源の工夫

図 2 に、ガイスラー管の直下 15 cm の位置に IP を置き、試料がない状態で 1 分間の露出を行った場合の X 線像を示す。このような像が現れる理由を図 3 に示す。ガイスラー管の両端のアルミニウム電極の表面で発生した X 線が電極の影を直線上に示す形で写せる。図 2 の像

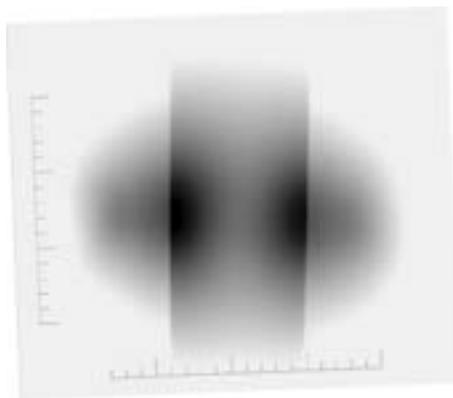


図2 ガイスラー管の下 15 cm において、試料なしの場合の X 線像 (図中の尺度の 1 目盛は 1 cm である)

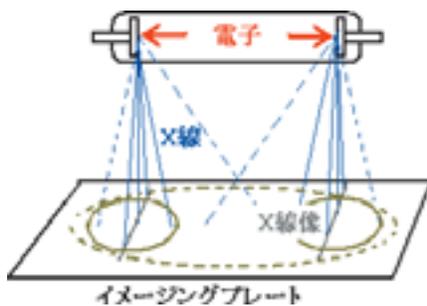


図3 図2のX線像ができる理由の説明図

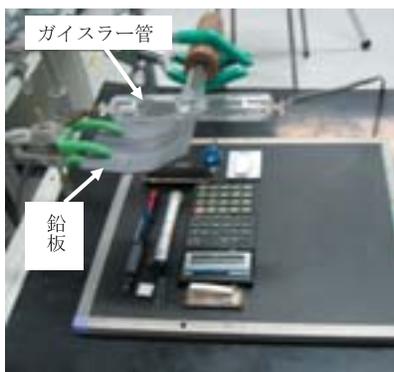


図4 ガイスター管の左側の電極の下に厚さ1mmの鉛板をつけて、この電極からのX線が試料に当たらないようにしている

を見ると、両電極の直下に円形の濃いX線像があることから、ややエネルギーの高いX線の一部は厚さ1.3mmのアルミニウム電極を透過していることが分かる。すなわち、電極の裏側には、その電極を透過してきたX線と対向する電極の表面からのX線の両方が存在することになる。両電極間は当然のことながら、2つの電極面からのX線が存在する。

このままでは、X線源が2か所にあるために、試料のX線像は2重写しになる。それを避けるために、図4に示すように、一方のアルミニウム電極の直下に、厚さ1mmの鉛板をつけて、この電極で発生したX線が試料に当たらないようにした。図5(a)は、鉛板がない場合で、2か所のX線源のために、小さなセラミックコンデンサの2本のリード線や懐中時計の竜頭の保護環、マイクロディスクの中央の小さな穴などが二重写しになっている。図5(b)は鉛板によって一方の電極からのX線を遮蔽した場合で、二重写しはなくなり、より鮮明な像が得られている。ガイスター管のアルミニウム電極の上に、より原子番号の大きな突起状の電極をつければ、点線源で、かつ、より大きなX線線量率が得られると思われる。

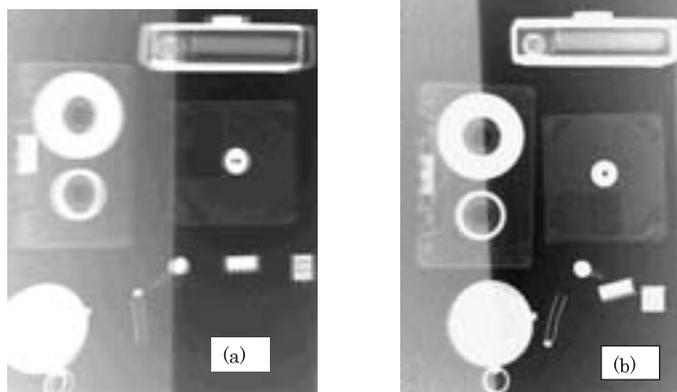


図5 (a) ガイスター管の2つの電極面から放射されるX線で撮った写真。X線の発生点が2か所あるために、像が2重写しになっている。(b) 図4に示すように一方の電極を1mmの厚さの鉛板で覆って撮った写真

試料に対する X 線の照射は、ガイスラー管から最短距離で約 25 cm の位置において、3～4 分間行った。この位置における X 線の線量率は、約 80 $\mu\text{Sv/h}$ である。3～4 分間の照射における線量は約 5 μSv で、この値は X 線フィルムによる胸部の撮影（約 50 μSv ）の約 1/10 である。このように少ない線量で撮影できるのは、IP を使用したことによると思われる。

4. 試料と X 線像

図 6 に試料となる花の写真とその X 線像を示す。ゴールドスティックやユリなどの像はかなり良いが、他はコントラストがあまり良くない。インダクションコイルのスパーク電極の距離を狭めれば、よりエネルギーの低い X 線が得られ、より良いコントラストの画像が得られ

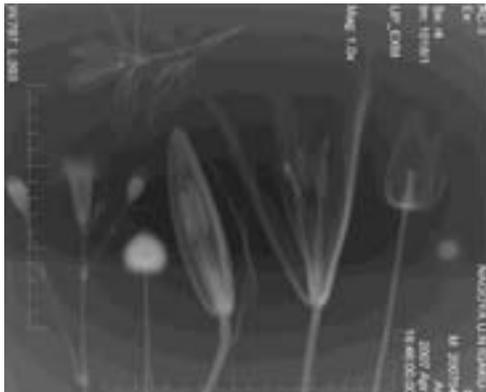


図 6 上：実物写真、下：X 線写真
カーネーション、つつじ、ゴールドスティック、ゆり、チューリップ、タンポポ、など

ると思われる。

図 7 において、比較的密度が高く、厚い試料のソテツの実や球根などは X 線がほとんど透過していないことが分かる。

図 8 は、野菜や魚であるが、小アジの体内の浮き袋（少し黒い部分）が写っている。眼球の後ろに小さな円形の白い部分があるが、解剖してみると、頭骨と背骨が重なった部分のようである。インターネットを見ると、小学生や中学生がアジの解剖実習を行った報告が多くあるが、もしこのような X 線写真を撮りながら実習すれば大きな教育効果が得られると思う。

図 9 は文房具類であるが、フィルムバッジの各種フィルタ、卓上計算機の半田付けの部分、ポケット線量計の電極部分（右上に拡大図を示す）、ボールペンの金属部分などが明瞭に出て

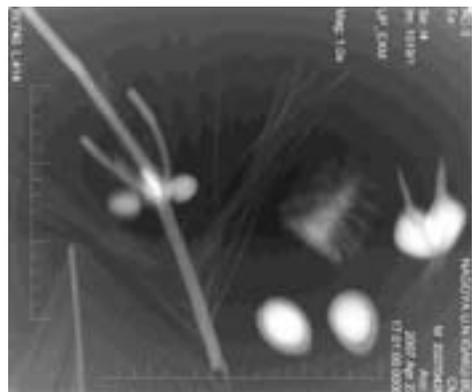


図 7 ソテツの葉、松の枝、ソテツの実、松かさ、球根



図8 さやえんどう、えんどう、ピーマン、小あじ、小いか、など

いる。半田の部分は極めて薄いですが、鉛や錫を含むため原子番号が大きく、その効果が歴然である。

5. まとめ

放射線の透過写真は、放射線の医学利用や産業利用の典型的な一例である。その意味で、手近にある簡単な装置を利用することにより、X線写真の撮影を小・中学生や一般の方々にデモンストレーション的に見せることは、放射線の有用性を容易に理解してもらうことに役立つと思われる。

本稿では、手近にあるロータリーポンプとガイスラー管装置によって、X線を発生させ、IPを検出器として、様々な試料の透過写真を比較的容易に撮れることを示した。子供たちに好きな試料を持参してもらい、これらを並べて撮影すれば、より興味を持ってもらえると思う。ま

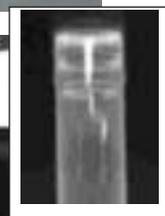


図9 上から右へ：フロッピーディスク、フィルムリング、フィルムバッジ大、フィルムバッジ小、蛍光ペン、小型ラジオ、卓上計算機、ポケット線量計、印鑑入れ、ボールペン、コンデンサ、IC、フォトダイオード。ポケット線量計の頭部を拡大して右上に示す

た、試料の解剖、解体などの他の手法と併用すれば、より大きな教育効果が期待できる。ただし、間違ってもX線源や高電圧電源に近づけないような措置を講ずる必要がある。

このデモンストレーション実験は、ガイスラー管と高電圧発生装置及びIP装置（IPとIPの読取装置から成り、後者は極めて高価である）を使う必要があるが、このような条件を既に満たしているところでは容易に行い得る。またIP装置がなくても、所有している研究室などの協力が得られれば行い得る。もちろん、市販の軟X線装置などもあるが、本稿の方法は、部品が丸見えであるから、X線発生が容易に理解できる。前回（本誌2008年5月号）

に述べたガイスラー管の放電実験と合わせて行えば、より効果的であると思われる。

参考文献

- 1) 真空技術講座 3 真空度測定 (日刊工業新聞社) p.93, (1968)
- 2) 宮原諄二: 固体物理, **21** (3), 172 (1986)
- 3) アイソトープ手帳 10 版 (日本アイソトープ協会編) p.129 (1999)

〔参考〕 X 線のエネルギーの検討

本実験で使用したガイスラー管の電極で発生する X 線はアルミニウムの特性 X 線と制動 X 線であるが、特性 X 線はエネルギーが 1.5 keV で低いので、ガイスラー管を透過しない。したがって、制動 X 線のみとなり連続エネルギー分

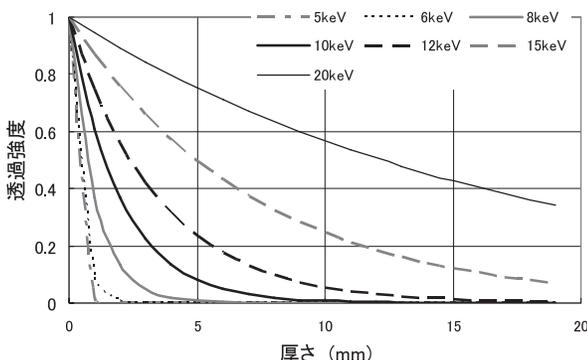
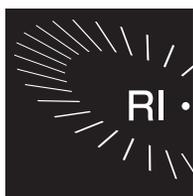


図 A 単色エネルギーの X 線の ICRU-44 の軟組織に対する透過強度

布をしているが、得られた像のコントラストから、X 線の実効的なエネルギーを推定してみる。

図 A は、本実験で使用した被写体とほぼ同等と考えて良い ICRU-44 の軟組織等価物質の X 線吸収係数³⁾をもとにして、この物質の厚さと、いろいろな単色エネルギーの X 線の透過割合を計算した結果を示す。同じ厚さでもエネルギーの高い X 線は透過割合が大きい。本文の図 7 において、試料のソテツの実や球根などの最大厚さは約 10 mm であり、この部分の X 線の透過割合は 1/10 以下である。図 A において、厚さ 10 mm 程度で透過割合がほぼ 1/10 になる X 線のエネルギーは 10 ~ 12 keV である。したがって、今回のガイスラー管からの X 線の実効エネルギーはほぼこの程度であることが分かり、適当な被写体の選定の日安となる。また、密度が 1 程度で、厚さが 10 mm 以上の厚さの物質には、よりエネルギーの高い X 線を必要とすることが分かる。実効エネルギーの推定は、アルミニウムや鉄板を階段状に重ねたステップウエッジで吸収特性を測定すれば、より正確に行い得る。実効エネルギーは実質的には試料の厚さの関数で、試料の厚さとともに実効エネルギーは高くなる。

(*愛知工業大学,
**名古屋大学医学部,
***核融合科学研究所
E-mail ▶ cmori@sc.starcat.ne.jp)



放射線教育導入のためのデモンストレーション実験 (1) —放射線防護の三原則—

白川 芳幸

Shirakawa Yoshiyuki

1. はじめに

筆者が勤務する(独)放射線医学総合研究所(放医研)は、スーパーサイエンスハイスクール(SSH)やサイエンスパートナープログラム(SPP)における高校生の課外活動に積極的に協力している。高校生に放射線医学の最新の成果を見せると同時に、放射線自体に興味を持ってもらうための実験も行っている。また、放射線の取り扱いを主業務としていない医師、看護師、技師、消防士などの多様な方々に放射線の基礎知識を教授するために同様な実験を実施している。しかしながら、実験に用いる装置、実験の安全性、実験に要する時間などの制約によって各個人が実際の実験を体験することが難しい場合もある。そこでデモンストレーション実験を事前に実施し、映像化し、さらにアニメーションを加えた教材によって前記の課題を解決し、受講生に疑似体験をしてもらうも行っている。本稿では幾つかのデモンストレーションの中で最も基礎的な“放射線防護の三原則”についての実験を紹介したい。

2. 距離の効果

外部被ばくの低減には、1) 距離をとる、2) 遮へいをする、3) 時間を短くする、いわゆる“放射線防護の三原則”がよく知られている。当研究所でのデモンストレーション実験は定性的に知られている事実を定量的に理解して

もらうために実施している。図1に実験スタンド(放医研設計, (株)千代田テクノ制作)、線源(日本アイソトープ協会製)、吸収板(放医研設計, (株)千代田テクノ制作)を示す。実験スタンドはアクリルを材料としたスタンドで検出器表面から一定の距離に溝を切り、ここに線源や吸収板をセットする。スタンド頂上に

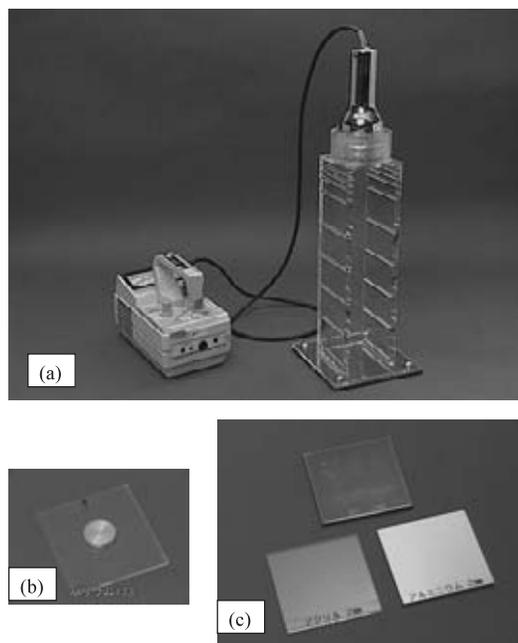


図1 (a) GM サーベイメータと実験用スタンド
(b) ^{133}Ba - γ 線源
(c) 吸収板(アクリル樹脂, アルミニウム, 鉛)

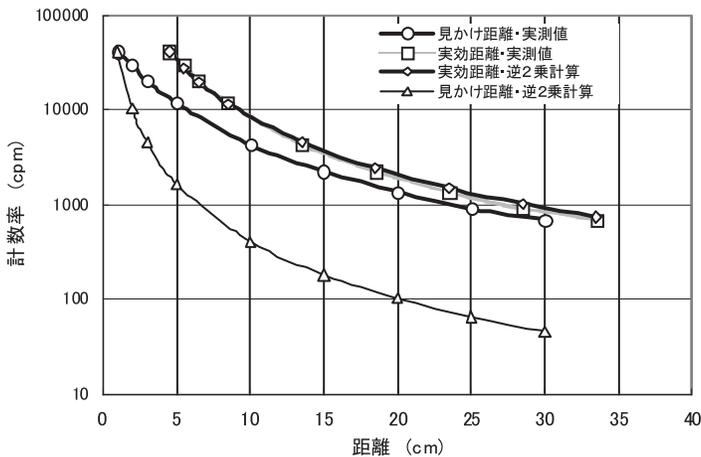


図2a 計数率の減弱と距離の関係

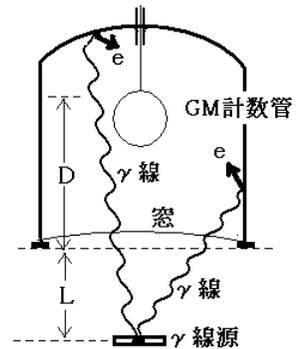


図2b γ線源とGM計数管の配置

GMサーベイメータ（アロカ(株)製TGS136、デジタル表示、スケーラモード付）の検出部を取めるようにしている。実験に用いる線源は密封された¹³³Baのγ線源（356 keV, 62.1%, 81 keV, 34.1%, 303 keV, 18.3%, 他）で、放射能は43.9 kBqである。規制値は1 MBqであるから約1/20の微弱な線源であり、管理区域外の普通の室内で利用可能である。まずGMサーベイメータをスケーラモードにし、計数時間を1分に設定した。次に距離（1～30 cm）を変えながら計数率（cpm）を求めた。その結果を図2a（○印）に示す。グラフ値はバックグラウンド計数率の63を差し引いた正味計数率（cpm）である。さらにGM管の数え落とし補正（不感時間200 μ秒）を施した値である。図2a（○印）のグラフより、研修生は距離が近い時は少し離れることによって被ばくが急減することを知り、ある程度の距離になると減り具合が少なくなることを知る。被ばくは距離の逆2乗則によって低減すると教えるのだが、実際の実験系では図2a（○印、△印）に見るようにそうはならない。すなわち逆2乗則ほどは減弱していない。この理由を検討する。どうしても実験装置からの散乱γ線に起因した誤差が生じるが評価し難く、一般的に影響度は小さいのでここでは考慮しない。逆2乗則による計算値

と実測値が一致しない大きな要因としてGM管の大きさに起因する誤差がある。図2bに示すGM管は、放射線が入射する窓（薄いマイカ膜2.5 mg/cm²）の直径が5 cm、奥行きがおよそ5 cmという形状をしたケーシングの中にQガス（ヘリウム98%、イソブタン2%）を充填したものである。線源と検出器の距離（見かけ距離L）は検出器の先端から測っているが、実際は検出器の内部の電極（50 μmの細い金属線を図2bのように円状にしたもの）近傍の実効的な中心から測らなければいけない。しかしながら、¹³³Baのγ線に対する実効的な中心の位置がどこか分からないので、距離減衰計算の起点を内部Dの奥行き位置として実測値と逆2乗則を用いた計算値の差が小さくなるように試行錯誤で繰返して計算してみた。今回はDを3.5 cmとした場合、図2b（□印、◇印）のように誤差が少なくなることが分かった。すなわち実効距離（D+L）でプロットし直した実測値（□印）と逆2乗則を用いた計算値（◇印）はよく一致した。以上の理由で、GM管の大きさが問題となるような線源から近い距離では実効距離で補正することにより逆2乗則が成り立つ。GM管の大きさが問題とならないような遠くでは見かけ距離で逆2乗則が成り立つことが推論される。このようなことを理解させた

上で研修生には線源からの距離が n 倍になると計数率は $1/n^2$ 倍になると教えている。

3. 遮へいの効果

遮へいの効果は距離のように直感的に理解するのは難しい。したがって、理解を促進するデモンストレーション実験は有用である。実験の材料として3種類の吸収板を考えた。ここでは軽い物の例として密度 1.01 g/cm^3 のアクリル樹脂の板、中くらいの物として密度 2.70 g/cm^3 のアルミニウム板、重い物の代表として密度 11.35 g/cm^3 の鉛板を用意した。線源を 5 cm の場所に、吸収板を 3 cm の位置に固定し、吸収板の厚さ ($2, 4, 8, 15 \text{ mm}$) を変えながら1分間の計数率 (cpm) を求めた。この結果を図3にまとめた。前述と同様にグラフ値はバックグラウンドを差し引き、数え落としを補正している。研修生がすぐに気づく点は、重い材料の方が、遮へい効果が高いということである。例えば同じ遮へい効果を生むには図3から鉛 2 mm に対してアルミニウムはおよそ 15 mm が必要であることが分かる。もう少し定量的に扱うために線減弱係数 (cm^{-1}) について考えてみる。放射線が単一エネルギーの γ 線で、平行線束となっている場合、

$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu t) \quad (1)$$

が成り立つ。ここでは I_0 は入射する γ 線数、 I

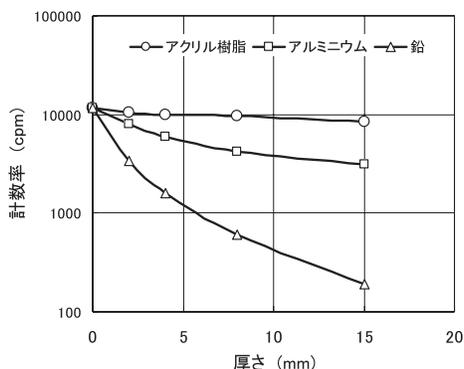


図3 種々の材料による遮へい効果の相違

は透過した γ 線数、 t は吸収材の厚さ (cm)、 μ は線減弱係数 (cm^{-1}) である。今回の実験の線源は 81 keV から 356 keV の複数のエネルギーの γ 線を放出していること、線源から検出器の距離が短いため平行線束の条件を満足しないことから (1) 式の適用は厳密性を欠くが、実効的な線減弱係数の議論には使えると考えた。(1) 式を μ について解くと、

$$\mu = -1/t \cdot \ln(I/I_0) \quad (2)$$

が得られる。(2) 式に図3の厚さ t 、それに対応する透過した γ 線数 I の数値を代入して得られた実効的な線減弱係数を図4に示す。研修生は、この図3、4から密度が大きな物質は遮へい効果が高く、その理由は減衰挙動を支配する線源弱係数が大きいためであると理解する。

さらに図4の様子を検討してみる。コンプトン散乱が優勢になるエネルギー領域でビルドアップ効果を加味しないで (1) 式を解くと一般的に必ず緩やかな右下がりのカーブが得られる。アクリル樹脂、アルミニウムはこの傾向を示すが、吸収材の厚さが最大 15 mm 程度とまだ薄いのであまり大きく線減弱係数の値は変化しない。それに対して鉛は原子番号が大きく光電効果の影響を強く受けること、かつ線源から放出される γ 線には光電効果の影響が大きい 81 keV の低エネルギー γ 線が含まれていることから線減弱係数は、吸収材の厚さが増すに従い急

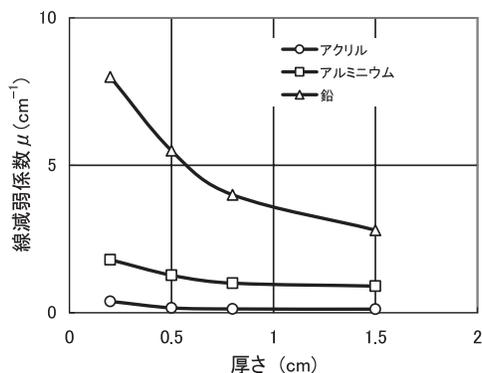


図4 線減弱係数 μ の厚さによる変化

激に小さくなる。すなわち、低エネルギー γ 線は厚さが増すにつれてすぐに吸収され、相対的にエネルギーの高い γ 線の減衰挙動が、厚さが

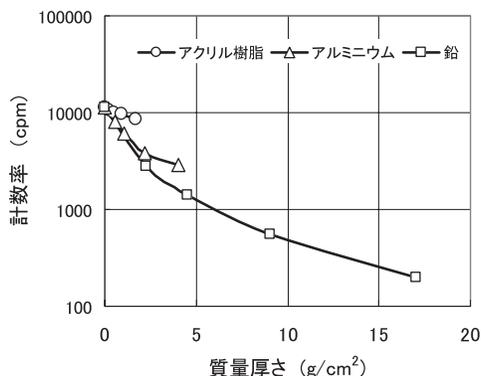


図5 質量厚さで表した減弱曲線

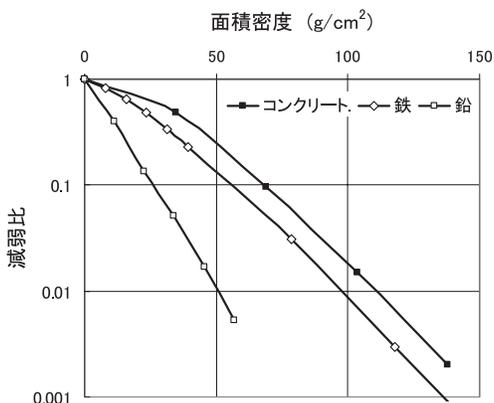


図6 ¹³⁷Cs- γ 線の減弱曲線

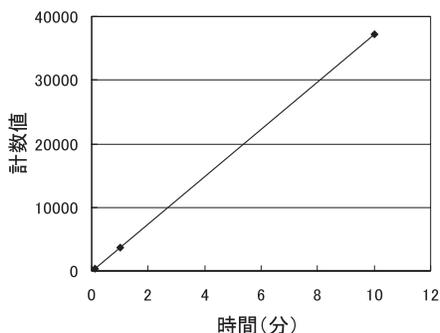


図7 時間と計数値の変化

増した場合は主流となる。このため、カーブは急激な減少から緩やかな減少に変化していく。

ここで図3を作り直し、同じ遮へい効果を得るための各材料の厚さの比較を再度試みる。図5は図3の横軸の厚さ (cm) に密度 (g/cm³) をかけて面積密度 (g/cm²) に変換したものである。厚さで考察した鉛 2 mm とアルミニウム 15 mm を質量厚さで比較するとそれぞれ 2.3 g/cm² と 4.1 g/cm² となる。すなわち、同じ遮へい能力に設計する場合は鉛の方が軽くなるということを表している。本実験だけではデータが少ないので、アイソトープ手帳(10版, p. 148)を参考に ¹³⁷Cs (662 keV) についてのグラフを作ると図6のようになった。コンクリート、鉄、鉛を比較すると、やはり鉛の質量厚さ当たりの遮へい能力が大きいことが確認できる。

4. 時間の効果

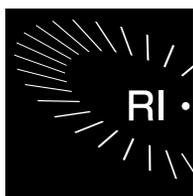
GM サーベイメータのスケアラモードにおいて設定できる 0.1 分, 1 分, 10 分を計数時間として、線源を 10 cm の位置にセットし測定した。測定結果を図7に示す。前述と同様にグラフ値はバックグラウンドを差し引き、数え落としを補正している。図7から明らかに計数値と時間は正比例の関係にあり、被ばく時間が 10 倍になれば被ばく線量 (計数値と比例関係にある) は 10 倍になることが容易に理解できる。一般化して時間が n 倍になれば被ばく線量は n 倍になると教えている。

5. おわりに

各人が自ら実験できない場合を考えて、デモンストレーション実験を事前に行い、それを実写とアニメーションで加工した教材を作り、その一部をここで紹介した。この教材で“放射線防護の三原則”が研修生により理解してもらえれば幸いである。今後、シミュレーション教材についても紹介していきたい。

(放射線医学総合研究所)

E-mail ▶ sirakawa@nirs.go.jp)

EGS コードと飛跡表示プログラムを用いた
放射線教育教材 (1) —高校生向け教材—

波戸 芳仁, 萩原 雅之, 平山 英夫

Namito Yoshihito Hagiwara Masayuki Hirayama Hideo

放射線は、その動きを見たり感じたりすることができず、このことが放射線に対する理解を妨げる要因の1つになっている。これまでの“一般向け教育実験ノート”の記事を拝見すると、霧箱が繰り返し取り上げられている。霧箱は放射線の動きを視覚的に分かりやすく表示するものであり、放射線を理解する際の“見えない”という難点を克服するのに適した教材である。本稿で紹介する飛跡表示プログラムも、シミュレーション結果を視覚的に理解しやすい形式に表示することで放射線に関する事柄の理解をはかるものである。ただし、本プログラムの使用に先立って、放射線と物質との相互作用に関して簡単な説明をあらかじめ受けるものとする。

物質内での放射線の動きをモンテカルロ法で計算する場合には、反応の位置、散乱や吸収といった反応の種類、反応後の粒子のエネルギーや方向などを、乱数を用いて次々にサンプリングする。この過程で計算される粒子の反応位置を線で結んで表示すると、粒子の動きを見ているかのような表示を得ることができる。また、粒子の生成・消滅の様子を画面上で観察することでサンプリングされた反応の種類を知ることができる。このように、モンテカルロ計算と飛跡表示は親和性が高い。

EGS (Electron Gamma Shower) は KEK (高エネルギー物理学研究所) が開発拠点の1つとして研究を続けている電磁カスケードモンテカ

ルロコードである¹⁾。EGS では、光電効果、コンプトン散乱、電子対生成、レイリー散乱、メラー散乱、制動放射、連続減速、パーバー散乱及び消滅などの現象を取り扱っている。また、我々は EGS で計算した光子、電子及び陽電子の飛跡を Windows PC の画面に表示するシステムを開発してきた²⁻⁴⁾。本稿では、EGS の対話型実行可能ファイル (shield.exe) と飛跡表示システム (egs4win32.exe) による放射線教育教材について述べる。

shield.exe は飛跡表示のための EGS4 の実行可能プログラムである。50 本の放射線を平板体系に垂直入射させてモンテカルロ法により放射線輸送計算を行い、放射線の飛跡ファイルを作成する。平板の材質と厚さ、放射線の種類とエネルギーは対話型で指定する。shield.exe を用いて γ 線の遮蔽計算や β 線の飛程のシミュレーションを行うことができる。egs4win32.exe は飛跡ファイルを表示するプログラムである。飛跡の拡大、回転、粒子の種類ごとの表示、非表示の切り替えなどの機能を持つ。

1. 高校生向け教材について

KEK がサイエンスキャンプ (高校生のための2泊3日の先進的科学技術体験合宿プログラム。科学技術振興機構主催) の受け入れ機関となったときに使用した教材のうち、本稿に関係する部分を紹介する。なお、サイエンスキャン

ここでは本稿で紹介するシミュレーションと平行して、線源を利用した実験も行っている。例えば次節の“ β 線の飛程”の教材では、まず、 ^{90}Sr - ^{90}Y から発生する β 線のアルミニウム (Al) 中での減衰を受講者に実測させる。参加者は実験を通して、 β 線に興味を持つ。一方、参加者は ^{90}Sr - ^{90}Y から発生する β 線のAl中での減衰をshield.exeを用いてシミュレーションする。参加者は計算結果を観察、分析することで電子の飛程や電子と物質の相互作用など、 β 線の物質内での挙動に関する事柄を学ぶ。実験とシミュレーションを平行して行い、受講者が実験と計算を比較して考えるようにしていただくと、より効果的かと思う。

2. β 線の飛程

egs4win32.exe を起動すると図1のような飛跡表示ウィンドウが表示される。図1のCALC欄を選択すると、図2のようなコマンドプロンプトが現れる。

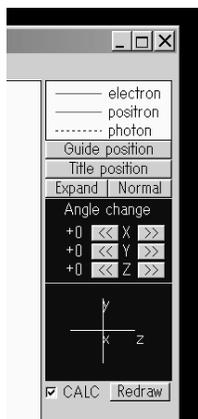


図1 飛跡表示ウィンドウ (画面の一部分を示す)

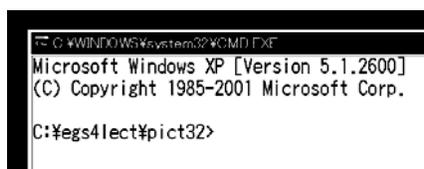


図2 コマンドプロンプト (画面の一部分を示す)

ここでは例として、厚さ 0.3 cm のアルミニウムに ^{90}Sr - ^{90}Y の最大エネルギーの β 線 (electron, 2.28 MeV) を入射する場合の入力の仕方について説明する。コマンドプロンプトで、shield.exe を実行する。問いに対してパラメータを入力する。

1. Key in Material number (1:Al, 2:Fe, 3:Pb, 4:Air, 5:PMMA, 0:end)
物質番号を入力する。アルミニウムの場合には (1) を入力する。
2. Key in particle type
(-1:electron, 0:photon, 1:positron, 9:new material)
線源の放射線の種類を入力する。(-1)
3. Key in particle kinetic energy in MeV (0 means new particle)
粒子の運動エネルギーを入力する。(2.28)*¹
4. Key in slab thickness in cm
遮蔽体の厚さを入力する。(0.3) 0 を入力すると 1 つ前のエネルギーの入力に戻る。
5. 自動的に 50 個の入射粒子 (この場合には β 線) についての計算が行われ、すべての計算が終了すると、再び Key in slab thickness in cm が表示される。飛跡表示ウィンドウで File をクリックし、Data file open を選択し、表示データの書かれたファイル (mortjob.pic) を選択し、OK をクリックする。
6. Redraw をクリックすると、図3に示すような、粒子の飛跡が表示される。

計算結果を次の点について調べる。

- ・ β 線がアルミニウム中何 cm で止まるか。
- ・どういう挙動をしているか。透過した粒子の数は画面を見て数える。

*¹shield.exe では入射粒子のエネルギー分布を扱っていない。この分布を扱うには、後で述べるように、ソースコードを変更する。

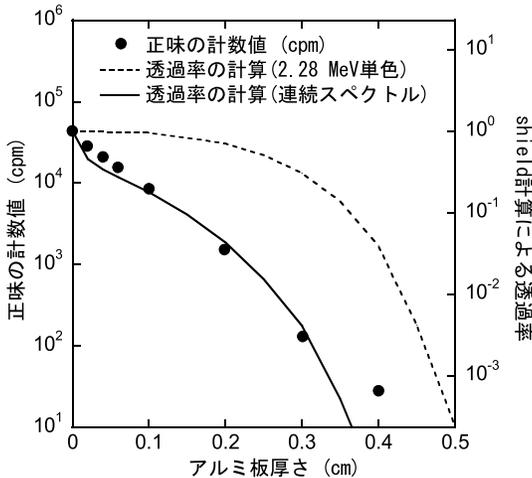


図4 β 線源を置き、アルミ板厚さを変化させたときの正味の計数值（測定時間：1分間）shieldによる2種類の計算結果を比較のため示す（破線：2.28 MeV単色線源、実線： ^{90}Sr - ^{90}Y の連続エネルギースペクトル線源）

以下の厚さの場合の減衰を計算は再現できていない。そこで、ソースコードを変更し、 ^{90}Sr - ^{90}Y からの β 線のエネルギー分布⁵⁾を考慮して計算を行うと、実験と計算がよく一致した。なお、これらの計算では、制動放射光子を数せずアルミ板を通り抜けた電子の数のみを数数している^{*2}。また、プログラムを変更し、入射電子数を50000としている。

3. γ 線の測定（遮蔽体の種類）

^{60}Co からの γ 線が遮蔽体で吸収される様子をシミュレーションと実測で学ぶ。 γ 線の平均自由行程や γ 線と物質の相互作用など、 γ 線の物質内での挙動についての初歩的な事柄を学ぶ。コマンドプロンプトで、shield.exeを実行する。問いに対してパラメータを入力する。

^{*2}0.4 cmの所で計算が実測を下回るこの原因として、制動放射の一部が実験で数数されているためではないかと推測している。計算の試みとして制動放射も含めて数数すると、0.4 cmの所で実測を約10倍過大評価する。GM管の電子、光子に対する効率を計算で考慮すれば、計算と実験はさらに広い範囲で一致する可能性がある。

1. Key in Material number (1:Al, 2:Fe, 3:Pb, 4:Air, 5:PMMA, 0:end)
物質番号を入力する。(2)
2. Do you want to produce K X-ray of Lead ?
(0:no, 1:yes)
0を入力する。(この問いは鉛を選択した場合にのみ表示される。)
3. Key in particle type
- 1:electron, 0:photon, 1:positron, 9:new material
線源の放射線の種類を入力する。(0)
4. Key in particle kinetic energy in MeV (0 means new particle)
粒子の運動エネルギーを入力する。(1,25)^{*3}
5. Key in slab thickness in cm
遮蔽体の厚さを入力する。(3)
6. 50個の線源についての計算が終了後、 β 線の場合と同様の操作を行い、図5に示すような、粒子の飛跡を得る。

計算結果を次の点について調べる。

- ・ γ 線(50本)が遮蔽体を通過後何本になっているか
 - ・遮蔽体中でどのような挙動をしているか
- 参加者は、EGSシミュレーションと平行して、チェックソースとNaIシンチレーションサーベイメータを用いて、遮蔽体透過後の線量率を測定し、表2に示すように、測定結果とEGSの計算結果を記入して比較する。

【プログラムの入手方法】

本稿で紹介したプログラムはダウンロード可能である。使用方法などについてご連絡をいただければ相談に応じます。(URL：<http://rcw.ww.kek.jp/research/shield/education.html>)

参考文献

- 1) W. R. Nelson, H. Hirayama, D. W. O. Rogers,

^{*3}1.17 MeV と 1.33 MeV の平均値

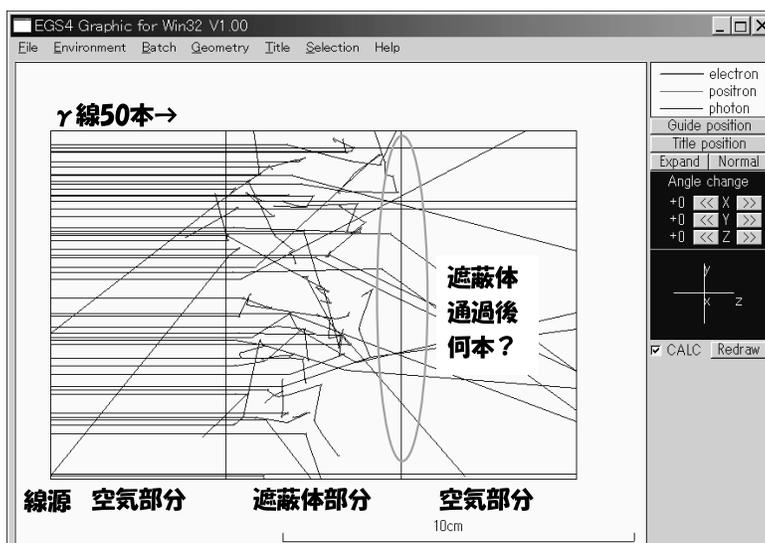


図5 γ 線の表示 計算体系は左から順に空気 (5 cm厚さ)+鉄遮蔽体 (5 cm)+空気 (5 cm)。斜めに走っている γ 線はすべて遮蔽体からの散乱線である

表2 γ 線の測定 (遮蔽体の種類, 数値等は一例である)

- 使用した測定器: NaI シンチレーションサーベイメータ (Aloka TCS-161)
- 使用した線源 (名称, 強度): ^{60}Co
- 線源が無いときの計数 (バックグラウンド): 0.1 ($\mu\text{Sv/h}$)

遮蔽体の種類	遮蔽体の厚さ (g/cm ³)	測定値 ($\mu\text{Sv/h}$)	正味の測定値 ($\mu\text{Sv/h}$)	遮蔽体無しとの比	EGSの結果 (? / 50)
遮蔽体無し	0.0	3.1	3.0	1	1
アクリル板 (1cm)	1.2	2.9	2.8	0.93	0.94
アルミ板 (1cm)	2.7	2.9	2.8	0.93	0.94
鉄板 (1cm)	7.86	2.5	2.4	0.80	0.70
鉛板 (1cm)	11.35	1.9	1.8	0.60	0.52

- 測定結果を考察してみよう
 - どうして物質間で差がでるのか?
 - 物質の何と相互作用しているのか?

“EGS4 Code System”, SLAC-265 (1985)

2) H. Hirayama, Y. Namito, S. Ban, R. Ikeda and Y. Tokuda, “EGS4 Shower Display System EGS4PICT(2), Windows Version”, KEK Internal 94-10 (1994)

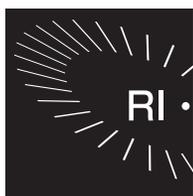
3) H. Hirayama, Y. Namito, S. Ban, R. Ikeda and Y. Tokuda, “EGS4 Shower Display System (EGS4PICT), Windows Version 2.0”, KEK Internal 96-9 (1996)

4) H. Hirayama, Y. Namito, S. Ban, N. Numajiri and

R. Ikeda, (EGS4 Shower Display System (EGS4PICT), Windows 32 bit Version”, KEK Internal 2001-4 (2001)

5) “Dosimetry of External Beta Rays for Radiation Protection”, ICRU Report 56, ICRU (1997)

(高エネルギー加速器研究機構
共通基盤研究施設 (KEK)
E-mail ▶ yoshihito.namito@kek.jp)



EGS コードと飛跡表示プログラムを用いた放射線教育教材 (2) —大学生向け教材—

波戸 芳仁, 萩原 雅之, 平山 英夫
Namito Yoshihito Hagiwara Masayuki Hirayama Hideo

前回の9月号では、EGS コードと飛跡表示プログラムを用いた高校生向けの放射線教育教材について述べた。今回は、医学物理・放射線技術分野の学部学生の実習で用いられている教材を2例紹介する。ここでは、 γ 線と物質との相互作用に関する基礎知識は既に有しているか、あるいは簡単な講義をあらかじめ受けるものとする。基礎となる技術は前回と同様、EGS コードと飛跡表示プログラムである。最初の例は γ 線のしゃへいを模擬した計算である。 γ 線のエネルギーと物質の両方を順に変えて、相互作用や透過する γ 線の本数を繰り返し観察する。そして、平均自由行程や主に起こる相互作用が γ 線のエネルギーと物質の種類に依存してどのように変わるかを学ぶ。もう1つの例は放射線検出器を模擬した計算である。 γ 線を検出器に1個ずつ入射させて、検出器内部での放射線の飛跡をスケッチし、吸収エネルギーも記録する。そして、検出器のエネルギー応答関数の各部分がどのような相互作用と関連しているかを理解する。

1. γ 線のしゃへい

光電効果、コンプトン散乱、レイリー散乱、電子対生成などの相互作用が、それぞれどういったエネルギーと物質の組み合わせにおいて顕著に現れるか、そういった相互作用で放出され

る粒子は何かなど、 γ 線と物質の相互作用の基本的な事柄を学ぶ。モンテカルロ計算と飛跡表示にそれぞれ、shield.exe と egs4win32.exe を使用する。

A: システムの操作方法の説明

egs4win32.exe を起動し、その中の CALC 欄を選択すると、コマンドプロンプトが現れる。ここでは、厚さ 1 cm のアルミニウム板に 0.1 MeV の γ 線 (photon) を入射する場合の入力について説明する。コマンドプロンプトで shield.exe を実行し、問いに対してパラメータを入力する。

1. Key in Material number (1:Al, 2:Fe, 3:Pb, 4:Air, 5:PMMA, 0:end)
物質番号を入力する。(1)
2. Do you want to produce K X-ray of Lead ? (0:no, 1:yes)
特性 X 線の発生の有無を入力する。(0) (この問いは鉛を選択した場合にのみ表示される。)*1
3. Key in Particle type
(-1:electron, 0:photon, 1:positron, 9:new material)
線源の放射線の種類を入力する。(0)
4. Key in Particle Kinetic Energy in MeV (0 means new particle)

粒子の運動エネルギーを入力する。(0.1)

5. Key in slab thickness in cm

遮蔽体の厚さを入力する。(1.0)

6. 50 個の線源についての計算が終了すると、再び Key in slab thickness in cm が表示される。飛跡表示ウィンドウで File をクリックし、Data file open を選択し、表示データの書かれたファイル (mortjob.pic) を選択し、OK をクリックする。

7. Redraw をクリックすると、粒子の飛跡が表示される。

計算結果を次の点について調べ、繰り返し計算を行う。

- ・非散乱線と散乱線を数える。
- ・厚さが 1 cm の場合には、1 番目と 2 番目に多い反応の種類を調べる。反応の種類の見定は、図 1 を参照する。

B: 受講者への課題

1. 平板に光子が入射した場合に、相互作用をせずに透過する光子の割合 (P) 及び相互作用をした後で透過する光子の割合 (S) を求めよ。平板の材質は、Al, Fe, Pb, 光子エネルギーは 0.1, 1.0, 10.0 MeV とする。平板の厚さは、1, 2, 5, 10 cm とする。入射粒子数は 50 である。

*1 光電効果で X 線を発生する場合とコンプトン散乱は、飛跡で区別がつかない。これは、飛跡による反応識別の弱い点であり、以下のいずれかの方法で問題を回避している。

- ・飛跡計算時に、“特性 X 線を発生させない” を選択する。
- ・Environment において、光子のカットオフエネルギーを、K X 線の最も高いエネルギーより、少し高い値に設定する。鉛の場合は 0.088 MeV, NaI の場合は、0.035 MeV にする。Redraw を行った際に、書かれない光子は、光電吸収後に発生した X 線であり、消えない場合にはコンプトン散乱と判定する。この方法はより詳しい取り扱いであり、検出器の応答関数を計算する場合には、K X 線エスケープピークも再現できる。しかし、光電効果とコンプトン散乱の判別が煩雑となる。

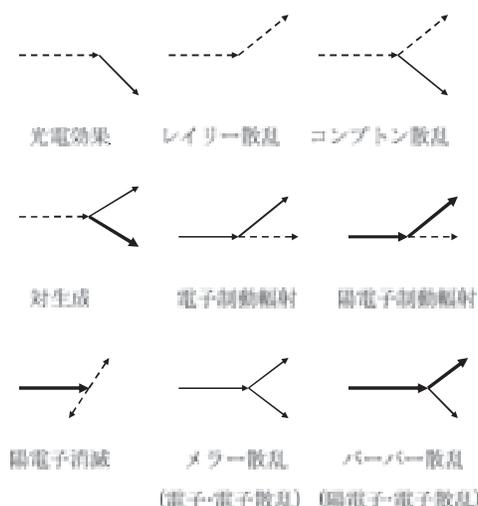


図 1 各反応の模式図 光子：黒破線，電子：実線，陽電子：太実線（ディスプレイ上では赤，黄，青などのカラーで表示する）

1 cm の場合にのみ、1 番多く起こる反応と 2 番目に多く起こる反応は何かを数えて記録せよ。

2. 厚さの関数として、 P を片対数グラフ用紙にプロットし、指数関数で回帰計算を行え。この回帰曲線の傾きから平板に光子が入射した場合に、 P が最初の $1/e$ になる厚さを求めよ。この厚さを“光子の平均自由行程”と呼ぶ。平均自由行程の物質及びエネルギー依存について考察せよ。また、平均自由行程は何を表す量か？
3. 物質を Pb, エネルギーを 60, 80, 100, 120 keV として平均自由行程を求め、そのエネルギー依存を考察せよ。
4. $(P + S)/P$ は光子数の“再生係数”と呼ばれる量である。再生係数の厚さ、エネルギー、物質依存について考察せよ。
5. エネルギーと物質によって光子と物質の主な相互作用がどのように変化するか考察せよ。また、放射線診断、治療で各相互作用がどのように利用されたり、雑音になったりしているか述べよ。

表 1 平均自由行程と反応割合の回答例

アルミニウム, $\rho = 2.699 \text{ g/cm}^3$					
Energy	μ/ρ	$\lambda = 1/\mu$	Photo/Total	Compt/Total	Rayl./Total
0.1 MeV	0.170	2.18 cm	0.11	0.81	0.08
1.0 MeV	0.0615	6.02 cm		1.00	
10.0 MeV	0.0232	16.0 cm		0.64	
鉄, $\rho = 7.874 \text{ g/cm}^3$					
Energy	μ/ρ	$\lambda = 1/\mu$	Photo/Total	Compt/Total	Rayl./Total
0.1 MeV	0.372	0.342 cm	0.55	0.35	0.10
1.0 MeV	0.0599	2.12 cm	0.006	0.99	0.007
10.0 MeV	0.0299	4.25 cm	0.0004	0.48	
鉛, $\rho = 11.35 \text{ g/cm}^3$					
Energy	μ/ρ	$\lambda = 1/\mu$	Photo/Total	Compt/Total	Rayl./Total
0.1 MeV	5.55	0.0159 cm	0.94	0.02	0.04
1.0 MeV	0.0710	1.24 cm	0.25	0.70	0.04
10.0 MeV	0.0497	1.77 cm	0.01	0.25	0.0006

6. 今回求めた Al, Fe, Pb の 1 MeV 光子に対する平均自由行程の値と, Al, Fe, Pb の平均自由行程の理論値との比較を行え。また, ^{60}Co の γ 線による平均自由行程の実測値と比較せよ。

C: 回答例及び考察

1. 課題 1 の回答例を表 1 に示す。1 番目と 2 番目に多く起こる反応は, 光電効果, コンプトン散乱, レイリー散乱の割合から答えることができる。
2. 遮蔽体の材質をアルミニウムとした場合の課題 2 の回答例を図 2 に示す。誤差は, P 相互作用を起こさずに遮蔽体を透過した光子数) から, $\sqrt{P(1-P/50)}$ によって求めた。 P は厚さの指数関数として変化するため, 指数関数を用いて重み付き最小二乗計算を行い, 得られた全減弱係数を図中に示した。ここで誤差の逆数の二乗を重みとして用いた。また, 全減弱係数と平均自由行程及び反応の割合を XCOM¹⁾ から読み取り, 表 1 に示した。
3. 課題 3 は, 鉛の K 吸収エネルギー (88

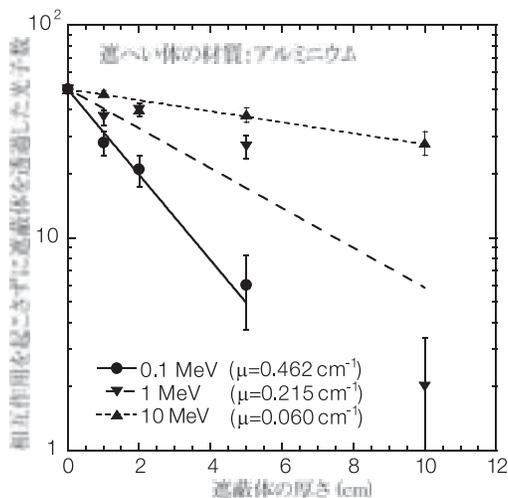


図 2 減衰曲線のプロット例 凡例の後の μ の値は, 重み付き最小二乗フィットの結果得られた全減弱係数

keV) 近傍での, 平均自由行程のエネルギーによる変化を観察し, 光電断面積のエネルギー依存を学ぶためのものである。

4. 課題 5 について想定している解答は次の通りである。低エネルギーで光電効果やレイリー散乱が多く, 中間エネルギーで

はコンプトン散乱が主であり、高エネルギーでは電子対生成が多い。低Z物質ではコンプトン散乱が主であるエネルギー領域が広い。これらの光子と物質の相互作用のうち、診断に関連する物は主に光电効果とコンプトン散乱である。コンプトン散乱は散乱線が発生するため雑音の元にもなる。治療に関連するものは主にコンプトン散乱と電子対生成である。

2. 放射線検出器のエネルギー応答関数

放射線検出器のエネルギー応答関数と、その原因となる光子と物質の相互作用の関連を理解することを目的として、ヨウ化ナトリウム検出器（以下、「NaI 検出器」と呼ぶ。NaI シンチレータにはタリウムが微量含まれているが、これを無視する）に 1 MeV の γ 線が入射した場合のエネルギー応答関数^{*2}の計算を行う。モンテカルロ計算と飛跡表示にそれぞれ、`detecc.exe`^{*3}と`egs4win32.exe`を使用する。

A：システムの操作方法の説明

`egs4win32.exe`を起動し、その中のCALC欄を選択すると、コマンドプロンプトが現れる。コマンドプロンプトで`detecc.exe`を実行し、問いに対してパラメータを入力する。

1. Key in absorbed energy spectrum format

0:Point, 1:Histogram

吸収エネルギースペクトルの書式を選択する。(1)^{*4}

2. Key in Material number (1:Ge, 2:NaI, 3:BGO, 0:End of run)

検出器の物質を入力する。(2)

3. Do you want to produce fluorescent X ray of detector? (0:no, 1:yes)

特性X線の発生の有無を入力する。(0)^{*1}

4. Key in Particle type (-1:electron, 0:photon, 1:positron)

線源の放射線の種類を入力する。(0)

5. Key in slab thickness in cm

検出器の厚さを入力する。(7.62)

6. Key in particle kinetic energy in MeV (≤ 10.0)

粒子の運動エネルギーを入力する。(1)

7. Key in number of cases

入射粒子数を入力する。(1)

8. 計算が終了後、再びKey in number of casesが現れるので、飛跡表示システムに戻りData file openを選択し、表示データのかかれたファイル(mortjob.pic)を選択し、OKをクリックする。

9. Redrawをクリックすると、粒子の飛跡が表示される。

計算結果を次の点に調べ、繰り返し計算を行う。

- ・飛跡をスケッチし、反応の種類、検出器内ですべての粒子が吸収されたかどうかと吸収エネルギーを記録する。反応の種類は、画面上の飛跡と図1を比較して決定せよ。
- ・記録が終了すれば、CALCをクリックして、コマンドプロンプトに戻り、操作7以降を繰り返す(2回目以降は、操作8は不要)。
- ・20回行ったら、操作7の問いに対して、50000を入力し、吸収エネルギー分布を調べる(吸収エネルギー分布は、mortjob.170

^{*2}単一エネルギーの放射線が入射したときの吸収エネルギーの分布。この例題のように、NaI 検出器に γ 線が入射する場合にはエネルギー応答関数を構成する主な要素は、全エネルギー吸収ピークとコンプトン連続部分である。

^{*3}`detecc.exe`は放射線検出器のエネルギー応答関数計算用に作成した、EGS4の実行可能プログラムである。直径3 in (7.62 cm)の円柱体系に放射線を垂直に入射させる。飛跡に加えて、円柱体系での吸収エネルギーとそのヒストグラムを出力する。

^{*4}0の場合はエネルギービンの中心のエネルギーとレスポンスの値が、1の場合はエネルギー下限とエネルギー上限のついて同じレスポンスの値が出力される。どちらを選ぶかは、使用するグラフソフトに依存する。

というファイルに出力されている。また、この場合は飛跡をファイルに出力しないようプログラムしてある)。

- ・終了したら、操作7の問いに対して、0を入力し、操作6以降を繰り返す。

B：受講者への課題

1. detecc.exe を使用して NaI 平板に 1 MeV の光子を 1 個ずつ入射させ、飛跡をスケッチし、反応の種類、検出器内ですべての粒子が吸収されたかどうかと吸収エネルギーを記録せよ。これを 20 回行え (粒子が側面から逃げたかどうかは、Y 軸周りに 90° 回転させて調べる)。20 回の記録の後、次の点を考察せよ。

- (a) 検出器内で粒子がすべて吸収される場合の吸収エネルギーはいくらか？
- (b) 検出器で粒子の一部が吸収される場合の吸収エネルギーはいくらか？
- (c) 粒子が検出器を素通りする場合の吸収エネルギーはいくらか？

2. 上記条件で、粒子数を 50,000 個に増やして吸収エネルギー分布を計算せよ。また全効率とピーク効率を記録せよ。ピーク効率は、入射エネルギーの全部が吸収される確率である。全効率は、吸収エネルギー分布の合計である。

- (a) 全エネルギー吸収ピークは、飛跡観察におけるどのような反応に対応しているか。
- (b) 他のピークがある場合、どのような反応に対応するか (ヒント：消滅 γ 線 (0.511 MeV) が逃げる場合にピークとなる)。
- (c) 連続部分は、飛跡観察でのどのような反応に対応しているか。また、この部分はなぜピークとならず連続的な分布となるか？

3. 光子エネルギーを 0.3 MeV 及び 3.0 MeV に変更して 1 MeV と同じように飛跡スケ

ッチと吸収エネルギーの計算を行え。

4. 連続エネルギー部分の右端のエネルギーとピークエネルギーの差 (ΔE) は何に起因するか？ ΔE を入射エネルギーの関数としてプロットし、理論式と比較せよ。

【ヒント】コンプトン散乱光子エネルギー k_c (MeV) は入射光子エネルギー k_0 (MeV) と散乱角 θ から次の式で計算できる。 $k_c = k_0 / \{1 + k_0(1 - \cos\theta)/0.511\}$ ここで $\theta = 180^\circ$ の時、 k_c は最小になる。この k_c の最小値が上記理論式である。

5. 全効率及びピーク効率が入射エネルギーによってどのように変わるか考察せよ。
6. NaI 検出器の応答関数やその基礎である相互作用について問題を設定し、それについて考察せよ。

C：回答例及び考察

1. 飛跡及び吸収エネルギーの記録例を図 3 に示す。図 3 の最上段左側の図では、コンプトン散乱が 1 回起こり、吸収エネルギーは 0.416 MeV である。このエネルギーは、図 4 でのコンプトン連続部分に対応する。したがって、コンプトン散乱が起こると、コンプトン連続部分に 1 カウントされることが分かる。図 3 の最上段中央の図では、入射粒子は相互作用を起こさずに通り抜けており、吸収エネルギーは 0 MeV である (この図を見て、光子が通り抜ける場合があるということをすぐに納得せず、若干の驚きとともに納得する受講者は比較的多い)。このような場合、当然のことながら図 4 の吸収エネルギーの分布図にカウントは追加されない。図 3 の 3 段目の 1 番右側の図では、光電効果が起こっており、吸収エネルギーは 1 MeV である。この場合、図 4 の吸収エネルギーの分布図では、入射エネルギーに等しいところに 1 カウント加算され、これは全エネルギー吸収ピークであるこ

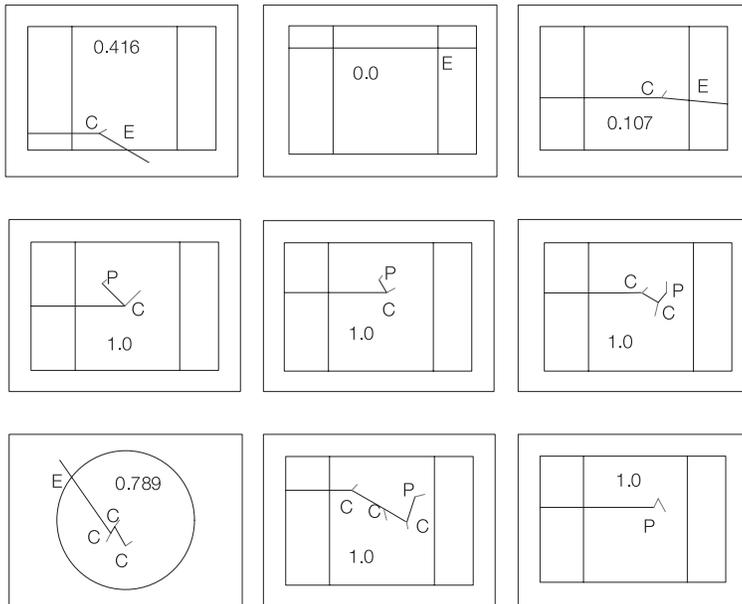


図3 飛跡の記録例 入射粒子は1 MeVの光子。電子の飛跡は、一般的に短くて見えにくいので、灰色の線で実際よりも長く書いている。図中のC, P, Eは、それぞれコンプトン散乱、光電効果、検出器外への逃げを示す。また、コマンドプロンプトに吸収エネルギーも表示し、それをMeV単位で図中に記録している。(0.789 MeVの図では、逃げを明示的に記録するために、底面から見た図を記録している)

とが分かる。このように、吸収エネルギーの値を仲立ちとして、サンプリングした反応と、エネルギー応答関数のある部分へのカウントとの関連を学ぶことができる。

2. 図4に実験との比較が可能な¹³⁷Cs γ 線(0.662 MeV)について、実験結果²⁾と計算結果^{*5}の比較を示す。ただしこの場合には、NaI検出器のエネルギー分解能を考慮に入れている^{*6}。0.2 MeV付近における実験と計算との相違は、検出器の後方の物体からの γ 線の後方散乱が、計算では考慮されていないことによる。“面平

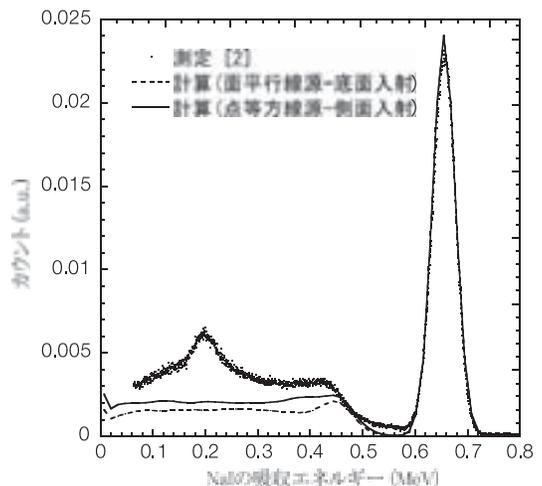


図4 ¹³⁷Csからの662 keV単色 γ 線に対する直径3 in × 厚さ3 in NaI検出器のエネルギー応答 測定は、参考文献2)に示されている値。“面平行線源-底面入射”はdetecc.exeの通常の状態での計算。“点等方線源-側面入射”は線源条件を測定に合わせて変更した計算

*5 detecc.exeを用い、入射光子数は50,000個とした。

*6 計算結果は実験値の全エネルギー吸収ピークの幅と合うように $\sigma = 6.7\%$ でガウススミアしてある。

行線源-底面入射”は `detecc.exe` の設定を全く変えない場合の計算結果であり、この場合はコンプトン連続部分を過小評価した。そこで、測定条件を参考にして、線源位置を“NaI の側面から 3 cm の所、軸方向には中心の所”，線源を“点等方線源”と変更して再度計算したところ、コンプトン連続部分の計算値が測定に近づいた。これを“点等方線源-側面入射”として示してある。なお、2 種類の計算と実験値は、全エネルギー吸収ピークの高さで規格化してある。計算では NaI を空气中に置いている。実験架台や検出器ケースなどを計算で考慮すれば、0.2 MeV 付近の後方散乱ピークなどについても、実験と計算がより一致すると期待できる。

3. 0.3 MeV 入射の場合には、全エネルギー吸収ピークが最も大きい。また、特性 X 線エスケープピークが現れる。3 MeV 入射の場合には、コンプトン連続部分が主要な部分である。また、3 MeV 入射の場合には、2.5 MeV 付近と 2 MeV 付近にそれぞれシングルエスケープピークとダブル

ルエスケープピークが現れている。これらは、1 本ないし 2 本の消滅 γ 線が NaI 結晶外に逃げたことに対応している。

【プログラムの入手方法】

本稿で紹介したプログラムはダウンロード可能である。使用方法などについてご連絡をいただければ相談に応じます。

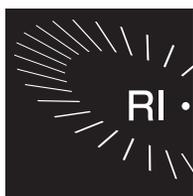
(URL : <http://rcwww.kek.jp/research/shield/education.html>)

参考文献

- 1) M.J. Berger, *et al*, XCOM : Photon Cross Sections Database, NIST, <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html>
- 2) H. Tawara, S. Sasaki, K. Saito, and E. Shibamura, “A Monte-Carlo Method for Determining Absolute Scintillation-Photon Yields and Energy Resolution of Scintillators for Gamma Rays”, *KEK Proc. 2000-20*, 152-160 (2000)

(高エネルギー加速器研究機構
共通基盤研究施設 (KEK))

E-mail ▶ yoshihito.namito@kek.jp)



水分の動きを中性子で可視化 — DVD 動画集 —

持木 幸一

Mochiki Koichi

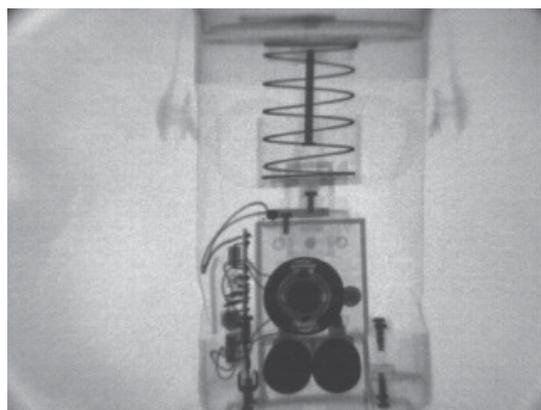
1. はじめに

放射線の透過像を利用する非破壊検査や可視化技術をラジオグラフィという。放射線としては、X線が広く使用されているが、中性子線の透過像もX線にはないユニークな特徴を有しており、研究に利用されている。最近では、中性子線を使用して動態の透過像を取得するための特殊な撮像装置である中性子イメージンテンシファイアが改良され、極めて明るい動画像が出力されるようになってきた。その実験システムや撮像方法、及び取得画像について解説し、最後にDVD動画集の入手法について述べる。このDVD動画集は、放射線にはあまりなじみ

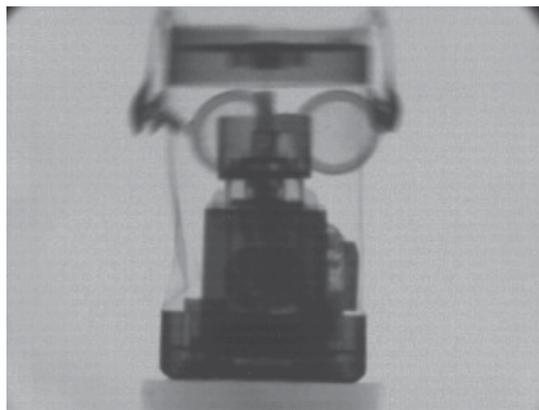
のない生徒、学生及び一般の方々に対して、放射線、ことに中性子とその応用への理解を深めていただくのに有用な教材と考えられるのでここに紹介する次第である。

2. 中性子ラジオグラフィの原理

中性子ラジオグラフィとは中性子線を用いた透過像を得る技術である。図1の(A)と(B)に、音がすると踊りだすおもちゃを同じ方向からX線と中性子で撮影した透過像を示す。図から分かるように、X線は金属などの電子密度の高い材料の可視化に適している。一方、中性子は水素などの軽元素で構成される材料があると、散



(A) X線



(B) 中性子

図1 X線ラジオグラフィと中性子ラジオグラフィの違い

乱されて飛行経路からそれるため、結果としてこれらの材料を含む部品は影となって識別できる。ボロンやカドミウムなどの特別な元素は吸収効果が高いので同様に可視化できる。このように、X線ラジオグラフィと中性子ラジオグラフィはそれぞれの特徴があり、非破壊検査や不可視情報の可視化分野において、相補的な役割を担っている。

3. 撮像システム

図2に、日本原子力研究開発機構の研究用原子炉 JRR-3M (Japan Research Reactor No.3 Modified) に設置されている中性子ラジオグラフィ用設備の断面を示す。第2照射室の照射野はA4判用紙程度と広く、熱中性子束は $1.5 \times 10^8 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ と高く、以下に示す動画はここで取得されている。

図3に撮像体系を示す。図3(A)は中性子用蛍光板 ${}^6\text{LiF} + \text{ZnS}:\text{Ag}$ に現れる暗い透過像を、高感度カメラで撮像するシステムである。カメラを中性子ビームにさらすことは避けたいので、反射ミラーを用いている。したがって、蛍

光板からの光を十分に集めることができず、個々の中性子反応を十分に信号に変換できていない。いわゆる、中性子の実効的な検出効率が低い。この撮像系では、動画用の高感度カメラとして、以前は放射線が照射されても輝点状のノイズが発生しにくい SIT (Silicon Intensifier Target) 管カメラが使用されていたが、画像処理が多用される現在では、デジタルカメラに使用されている安定性に優れた CCD (電荷結合素子) などの固体撮像素子が用いられるようになってきている。しかし、その場合には、CCDが放射線に照射されることによる輝点状のノイズが発生しやすく、その除去が問題となる。

図3(B)は中性子イメージンテンシファイア¹⁾を用いた撮像系である。入射面に塗布された $\text{Gd}_2\text{O}_3:\text{Tb}$ で熱中性子が吸収されて発光し、蛍光がマルチアルカリの光電面に達して光電子が放出される。光電子は静電界で加速・集束されて出力の蛍光面に衝突し、ここに明るい画像が出力されることになる。出力画像が明るいために、可視化の目的に応じて、高速度、高感

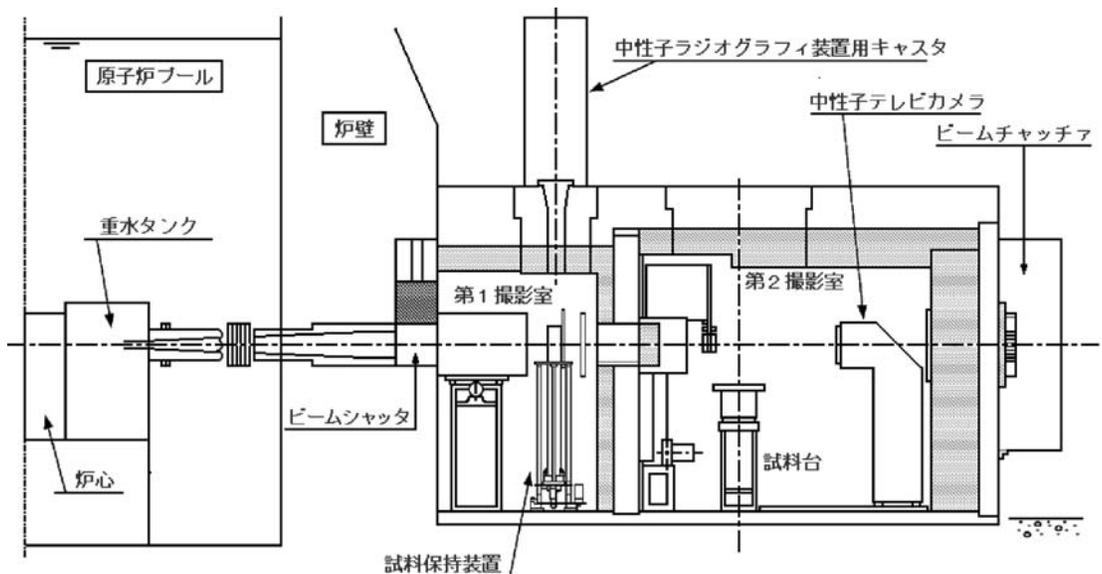
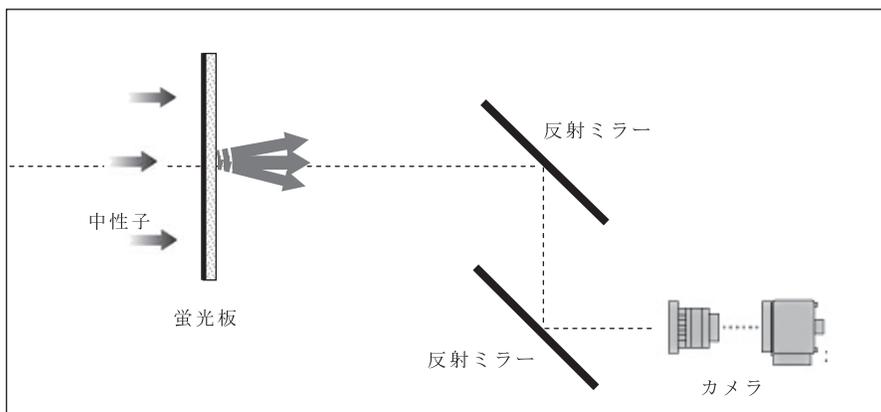
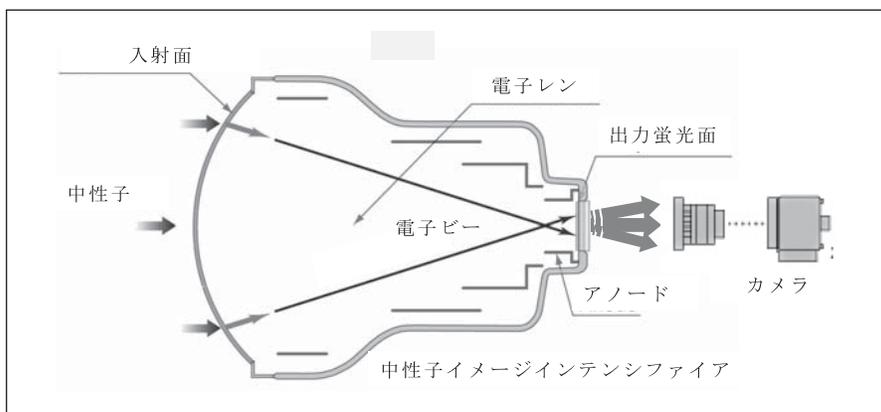


図2 中性子ラジオグラフィ照射装置 (JRR-3M)



(A) 中性子蛍光板を使用する方法



(B) 中性子イメージンシファイアを使用する方法

図3 撮像系の概要

度、高分解能、カラーなど、選択できるカメラの種類も多くなり、データの質の向上がなされている。また、この撮像系では、入射面での吸収反応の確率が高く、また、1つの反応による出力面で放出される蛍光光子の数が極めて大きいため、レンズを介して撮像素子に集光しても、確実に中性子個々の反応は信号に寄与することになる。いわゆる、実効的な検出効率が高いシステムと言え、入射してくる中性子を最大限有効に使用できる撮像系であり、この特長を生かした実験として、短時間で画像を取得しなければならない高速現象の撮像や、高速CT撮像に威力を発揮している。

図4は、実験現場で必要な情報を可視化して観察するための実時間信号処理システムのブロック図である。ビデオ信号は8～12ビット程度でAD（アナログ-デジタル）変換され、補正部で撮像素子の光信号がない状態でのオフセット成分（通称暗電流成分）の減算による補正処理や、照射野内での中性子ビーム強度やカメラ感度の空間的な不均一性の除算による補正処理が行われる。被検体に中性子が入射し、距離1cmの間で反応し、進路からはずれてしまう確率を Σ [1/cm] で表し、巨視的断面積と呼んでいる。いま、被検体の厚さを T [cm] とすると、透過率は $\exp(-\Sigma T)$ で表され、厚さ

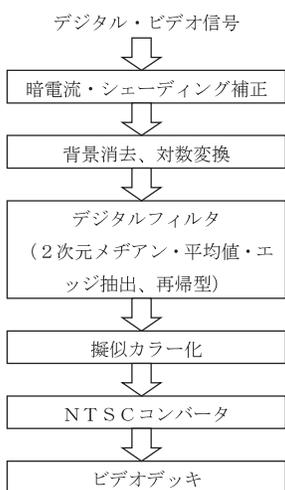


図4 画像信号処理システムの概要

T の情報を得たい場合には、対数 \ln で変換する必要がある。また、変化前の厚さ T_0 から、変化分 $T_0 - T = \Delta T$ のみを抽出するには、画素ごとに、変化前の初期画像で現在の動画を除算し、対数変換して求めることができる。

$$\frac{\text{現在の画像}}{\text{初期画像}} = \frac{e^{-\Sigma(T_0 - \Delta T)}}{e^{-\Sigma T_0}} = \frac{e^{-\Sigma T_0} \cdot e^{\Sigma \Delta T}}{e^{-\Sigma T_0}} = e^{\Sigma \Delta T}$$

これらの演算処理部が用途に応じて挿入される。デジタルフィルタは、放射線の量子的な性質が原因で発生するざらつきを軽減させるためのメザン処理や平均値処理、輪郭を表示するためのエッジ抽出処理、及び動画の複数のフレームにわたって移動平均化をする再帰型処理などがある。その後、画像での階調差（濃淡）を認識しやすくするために、決められたコードでカラー化するための擬似カラー変換部がある。そして、TV モニター用の NTSC 信号に変換し、ビデオデッキに録画している。

4. 動画例

これまで述べたシステムで取得された動画を紹介する。限られた誌上で動画を紹介することは困難であるが、動画の内容の一端を理解し

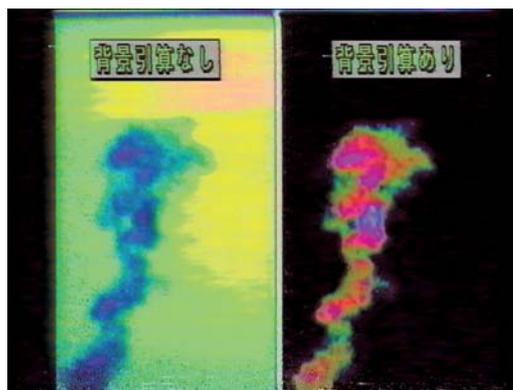


図5 砂にしみ込む水(A)

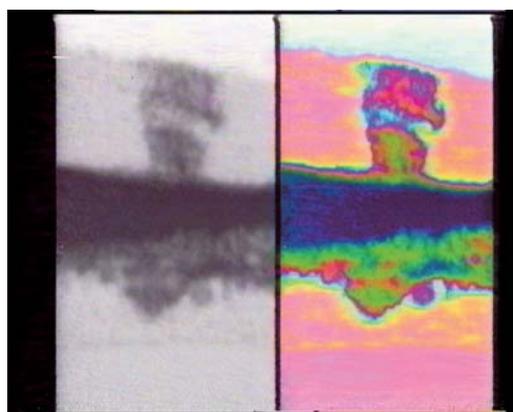


図6 砂にしみ込む水(B)

ていただくことはできるかと思う。(1)から(6)までは、図3(A)の撮像系、(7)から(11)までは図3(B)の撮像系で取得されたものである。

(1) 砂にしみ込む水 (A) (図5)

川砂の上から水を滴下し、しみ込む様子を可視化している。右半面の画像は、水の滴下前の初期画像データを入力画像から差し引く処理（背景引算）がなされており、変化分である水だけが可視化されている。赤い部分は水の量が多く、青い部分は水の量が少ない。DVD では水のしみ込みの時間的な変化が明瞭に分かる。

(2) 砂にしみ込む水 (B) (図6)

川砂と砂時計に使用されるような細かい砂の2種類を3層にし、上から水滴をたらして水の

挙動を可視化している。左側はモノクロ画像、右側は擬似カラー画像である。カラーにすると水の量の多少に基づく微妙な階調の違いも分かるようになる。

(3) 流動層

循環式流動層ボイラ熱交換器内の固気二相流の挙動の可視化である。川砂の上から石炭が落下しており、下からは窒素ガスを吹き上げて粒子層を流動化させている。

(4) 冷凍機

冷凍機内の冷媒挙動の可視化である。簡単な冷凍サイクルからなる市販の除湿機を使用しており、蒸発部の可視化を行っている。

(5) うず

中央の円筒部の下部から窒素と水の気液二相流が入り、うずが発生している。対数変換により気体層の厚さを求め、その後フレームの積算により平均的なボイド率を可視化している。

(6) ゆらぎ

気液二相流の平均ボイド率を表示している。対数変換処理と再帰型デジタルフィルタ（重み付き積算処理）でボイド率の平均化をおこなっている。再帰型デジタルフィルタは、処理回路に入力した現在のビデオ画像に、重み（ r ）付けした時間的に過去の画像を加算して出力する

もので、重み係数 r が0.75の場合は、直前に出力された過去の重み付加算画像が75%、現在の画像が25%の割合で加算されるものである。また、動画像に現れる重み係数0.9375と0.96875も同様であり、係数が大きくなるほど時間的な平均化の度合いが大きくなっているのが容易に理解できる。

(7) 音に反応し踊りだすおもちゃ（図1(A), (B)）

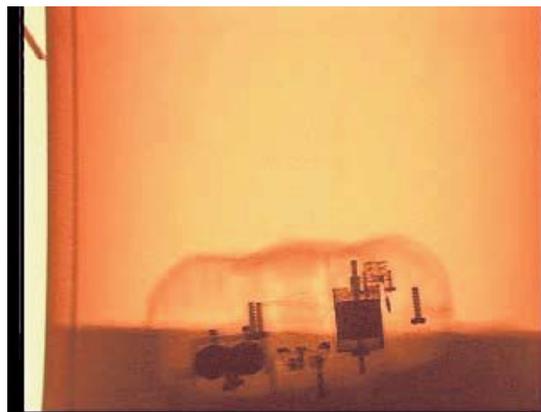
これ以降は、中性子イメージンテンシファイアを用いて撮像されている。このおもちゃは基本構成要素がプラスチックであり、内部の金属製スプリングにより、くねりながら踊る動作が作られているのが分かる。X線と中性子での透過像の違いを明瞭に理解できる。カメラはモノクロの130万画素の高解像度CMOSイメージセンサを用いている。

(8) キャラクターのおもちゃ

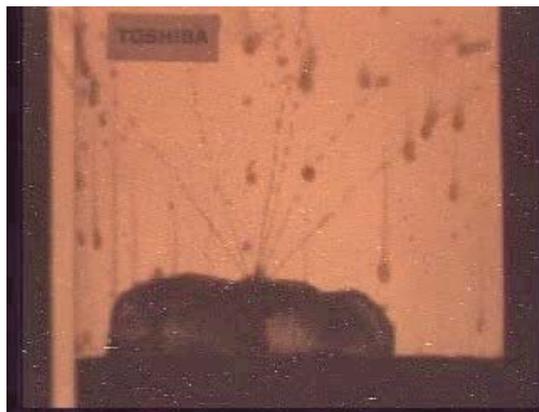
外形はプラスチックであるが、内部に金属材料を含むボタン電池やねじがあるのが明瞭に分かる。

(9) お風呂のおもちゃ（図7）

浴槽にいれて、お湯を吹き上げながら回転するおもちゃである。ブリキ缶の中に水をはり、回転させながら撮像した。X線では、水の挙動



(A) X線



(B) 中性子

図7 お風呂のおもちゃ

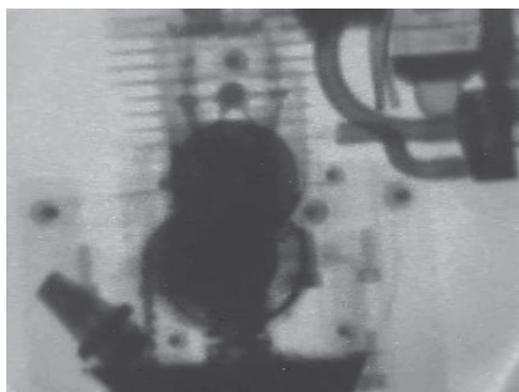


図8 25 ml エンジン

を視認できないが、中性子では、極めて明瞭に動きを把握できる。カラー CCD カメラで撮像しており、出力蛍光面がオレンジ色に発光しているのが分かる。電子シャッターを狭くして撮像できるので、水のしずくがぼけることなく撮像できている。

(10)ハードディスク

3.5 インチのハードディスクをカラー CCD カメラで撮像している。Si の CCD イメージセンサは赤色に感度が高く、イメージインテンシファイアの発光ピークである赤色波長域との相性が良い。

(11)25 ml エンジン (図 8)

ガソリンではなく、電気モータで回転させて撮像した生画像である。1 枚の画像では分らないが、オイルの挙動や、弁やピストンの動きが明瞭に可視化されている。

5. まとめ

中性子イメージングに関しては、*RADIO-ISOTOPES* の 56 巻 4 号から 57 巻 5 号まで連載

されており²⁾、充実した内容であるので、参照していただきたい。ここでは、イメージング中性子ラジオグラフィで得られる動画像をできるだけ理解しやすいように解説したつもりであるが、やはり、動画像は実際に見るのが 1 番である³⁾。そこで、アイソトープ協会と筆者の URL で、動画像を閲覧できるように準備する予定である。ご利用いただければ幸いです。

●動画像掲載 URL：

日本アイソトープ協会

<http://www.jrias.or.jp/>

武蔵工業大学工学部原子力安全工学科
放射線診断分析研究室

<http://www.nim.nuc.musashi-tech.ac.jp>

●問合せ先：

社団法人日本アイソトープ協会

学部学術課

E-mail gakujutsu@jrias.or.jp

☎ 03-5395-8081 FAX 03-5395-8053

参考文献

- 1) 持木幸一, 日塔光一, 中性子カラーイメージインテンシファイア, 応用物理, Vol.75, No.11, 1349-1353 (2006)
- 2) 連載講座“中性子イメージング技術の基礎と応用”, *RADIOISOTOPES*, 56, No.4 (2007) - 57, No.5 (2008)
- 3) 非破壊検査の最前線 (CD-ROM), 非破壊検査工学叢書, 日本非破壊検査協会 4 巻 1-64-71, 動画像 No-1-9 (2002)

(武蔵工業大学工学部原子力安全工学科

E-mail ▶ kmochiki@sc.musashi-tech.ac.jp)



放射線教育導入のためのデモンストレーション実験 (2) —汚染サーベイに関するシミュレーション プログラムによる検討—

白川 芳幸

Shirakawa Yoshiyuki

1. はじめに

本シリーズの12回 (*Isotope News*, No.635, 19-24, (2007)) ではサーベイメータの性質を実験的に確かめて、使用上の留意点を導くことを意図した。そして“表面汚染検査をする時には、サーベイメータの時定数を3秒にして、測定面から1 cmほど離して、毎秒5 cmほどのゆっくりした速さで動かす。”という結論を導き出した。今回は同様な知見をより自由度の高いシミュレーションで導き出すための考え方と実際に作成したプログラムを紹介する。

2. シミュレーションの準備

シミュレーションのプログラムを開発する時のデータを得るために“サーベイメータ応答実験装置”を活用した。12回でも紹介したこの装置の全体を図1に示す。また、装置の仕様と動作についても再度、以下に説明する。

サーベイメータ応答実験装置

装置構成：台車スライド装置、線源台車、操作盤、サーベイメータ固定用具、データ収集装置、サーベイメータ

移動距離：0～150 cm

移動速度：毎秒5 cm, 10 cm

停止操作：任意の位置に手動操作で停止

データ：計数率 (cpm)

静止測定：300点のデータ収集 (例：0.2秒ごと)

移動測定：300点のデータ収集 (0.5 cm ごと)

この装置の動作について説明する。まず移動測定について例示する。この装置では、台車に線源を固定し、毎秒5 cm, 10 cm, 寸動 (1 mm 位の低速移動) で移動させることができる。サーベイメータをスライド装置に付属する0～150 cmの定規の任意の位置に固定用具を用いて固定する。例えばサーベイメータ検出部の窓の中心を、台車スライド装置の左端の原点から50 cm、線源との距離を1 cmとする。サーベイメータのアナログ出力 (0～10 mV) 端子に専用のケーブルを差し込み、データ収集装置と接続する。その時のサーベイメータのレンジ及び

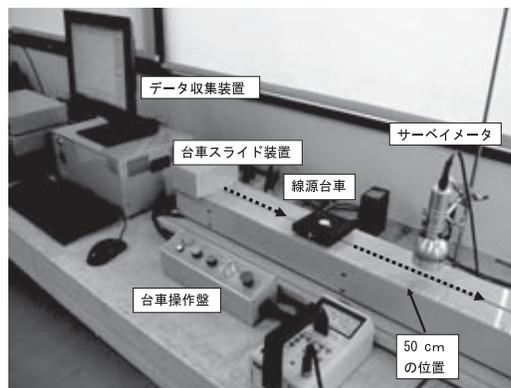


図1 実験装置の構成

時定数をデータ収集装置のPC画面に入力する。操作盤のボタンを押すと、線源台車が動き、0.5 cm ごとにアナログ出力がサンプリングされ、計数率 (cpm) に変換され 300 点記録される。静止測定では前記と同様の設定で、線源台車を寸動で移動させ、サーベイメータの中心位置に静止させる。サンプリング周期を例えば 0.2 秒を入力し、PC 画面のスタートをクリックする。するとデータ収集が開始され、300 点、60 秒分のデータが記録される。また、任意の位置に手動操作で停止させることができる。ここで静止測定を行えば、後述する実験データを採取することが容易である。

次に使用する 2 種類の線源とサーベイメータの仕様を以下に示す。

使用する線源

【β線源】

核種： $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$

壊変： β^- 壊変

放射能：3.7 kBq (2006 年 10 月 31 日)

エネルギー：546 keV (100%), 2,280 keV (100%)

形状：直径 25 mm × 厚さ 6 mm の円盤状、
上面中心に薄いアルミ膜を介して直径約 5 mm の線源

備考： γ 線を放出しない

【γ線源】

核種： ^{133}Ba

壊変：軌道電子捕獲

放射能：37.9 kBq (2006 年 10 月 31 日)

エネルギー：356 keV (62%), 81 keV (34%), 他

形状：直径 25 mm × 厚さ 4 mm の円盤状、
上面中心に薄いジュラルミン窓を介して直径約 10 mm の線源

備考： β 線を放出しない

汚染検査用サーベイメータ

測定対象：主として β線 (γ線も可)

測定範囲：計数率 0 ~ 100,000 cpm

(1 分間当たり に換算した計数值)

測定方式：シンチレーション式

受感面：直径 5 cm 程度

時定数：3, 10, 30 秒

(注意：時定数とは測定装置の応答の速さを表す指標で、最終応答の 63% に達するまでに必要な時間と定義される。)

3. シミュレーションデータ

図 1 の線源台車の中央部に β線源を固定する。次にサーベイメータ検出部の中央を 50 cm の位置でかつ β線源から 1 cm 上方にセットする。手動操作で線源台車を移動させ 40 cm の位置に線源がくるように停止させる。この状態で 1 分間測定し計数率 (cpm) を求める。次に 41 cm とし、以降 1 cm ずつ位置を変え 60 cm までの計数率を求める。この操作によりサーベイメータ検出部の前後 10 cm の計数率が分かる。この計数率からバックグラウンド計数率を引いた正味計数率を実験データとする。図 2 の例では線源が 47 cm に置かれている場合に検出部が出力

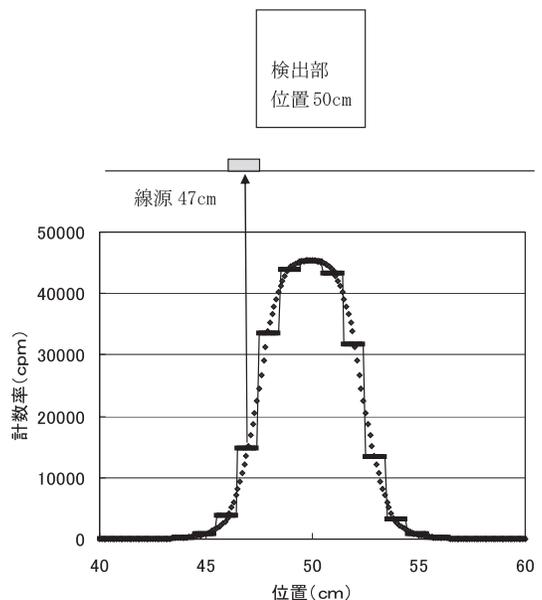


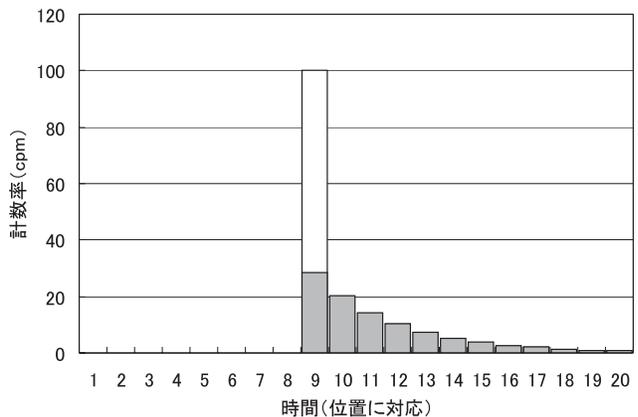
図 2 実験データ (矩形) と近似曲線 (点線)
(実験データは 1 cm おきに測定。近似曲線は 0.1 cm おきに計算)

する cpm を示している。47 cm の位置の出力は 46.5 ~ 47.4 cm の矩形で表現される。このような階段状の矩形が 1 cm ずつできている。この実験データを 0.1 cm 刻みで近似したものをシミュレーションデータとした。

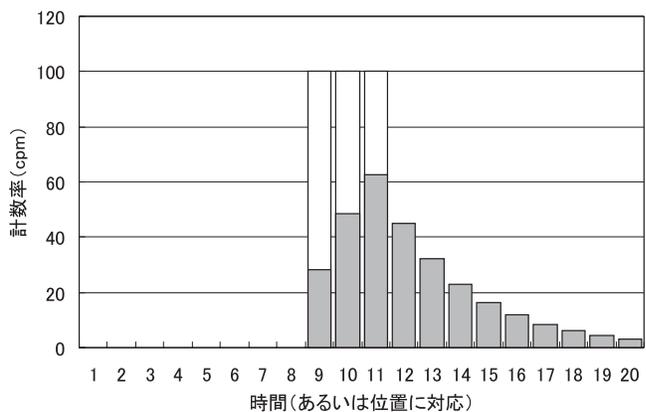
4. シミュレーションアルゴリズム

シミュレーションデータは線源と検出部の隙間を 1 cm とし 3.7 kBq の β 線源, 37.9 kBq の γ 線源を用いて得られたものである。それを用いて近似曲線を作成した。ここで単位放射能 kBq で規格化する。これは単純に近似曲線の cpm を kBq で割るだけでよい。これで kBq 単位の任意の入力に対応する近似曲線が得られる。

次に任意の近似曲線をパルスの集合と解釈し、このパルスに対する応答を数学的に求める。線源と検出部の関係は線源を止めて検出部を動かした場合（実際の汚染検査の場合）、検出部を固定して線源を動かした場合（この実験装置を用いた場合）とも座標（位置を表す）の向きを逆にすれば同一の出力が得られる。ここでは後者で考える。線源が x cm の位置にあるときに検出部に入る放射線数を $N(x)$ とする。また線源の移動する速さを v cm/秒とすると $x = v \times t$ で表わされる。ここで t は基準点 0 cm からの経過時間である。アルゴリズムを説明するため v を一定として t のみの関数 $n(t)$ を考える。図 3 で説明すると横軸は経過時間 t で秒 ($x = v \times t$ の関係で線源の位置に対応)、縦軸は計数率 (cpm) で $n(t)$ に対応する。 $n(t)$ はその状態が 1 分間続けば、検出部に n 個の放射線が入ることを示している。今後、これを入力と呼ぶ。図 3 (a) の例では $8.5 < t \leq 9.5$ の 1 秒間、100 cpm の入



(a) 単一パルス入力に対する検出器応答例 (白：入力, 灰色：応答)



(b) 3 連パルス入力に対する検出器応答例 (白：入力, 灰色：応答)

図 3 パルス入力に対する応答 (パルス入力 1 秒持続, 検出部時定数 3 秒)

力があることを白抜き棒グラフが表している。次に応答 $r(t)$ を考えると、 $r(t)$ は、

$$r(t) = n(t) \times (1 - \exp(-(t-8.5)/T)) \quad (1)$$

となり t と共に増加する。ここで $n(8.5) = 100$, 検出部の時定数 $T = 3$ である。入力がゼロになる 9.5 秒以降は、

$$r(t) = r(9.5) \times \exp(-(t-9.5)/T) \quad (2)$$

となり単調減少してゼロに向かう。これが単一パルス応答である。図中では灰色で示している。

この単一パルスを重ねて任意の応答を作る例を示す。図3 (b) は単一パルスを3連にした3秒続くパルスである。応答も (1), (2) 式の値を入力の時刻に対応する時間ずらして単純に重ねて得ることができる。 r (11.5) は100の入力開始後3秒の値で63である。検出部の応答の時定数が3秒であるから理論どおりである。複雑な入力もこのように単純なパルスの重ね合わせで作成し、応答も重ね合わせで計算する。

以上のように棒状のパルスとその応答の重ね合わせで説明した事象は、パルスの時間幅をゼロに近づけると数学的には畳み込み積分という手法に一致し、より厳密に記述できる。専門的になりすぎるので詳細はここでは割愛させていただく。

アルゴリズムの実際を説明する。ここでは、時間による考え方を位置に対応した考え方に変えていく。図4の線源設定画面(入力画面)で以下3項目を指定する。

【核種選択】

β 線源 ($^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$), γ 線源 (^{133}Ba) を選択する。

【放射線分布入力】

kBq 単位で線量を入力する。

【検出器高さ選択】

線源とサーベイメータ検出部底面との距離



図4 シミュレーション入力画面の例

1, 5, 10 cm を選択する。

次に図5, 図6の出力画面の右上の入力に關する2項目を指定する。

【移動速度入力】

線源を動かす速度 (実際はサーベイメータを移動する速さ) を cm/秒を入力する。

【時定数選択】

時定数を 3, 10, 30 秒から選択する。

【計算開始】

クリックで計算がスタート, グラフ表示が開始される。

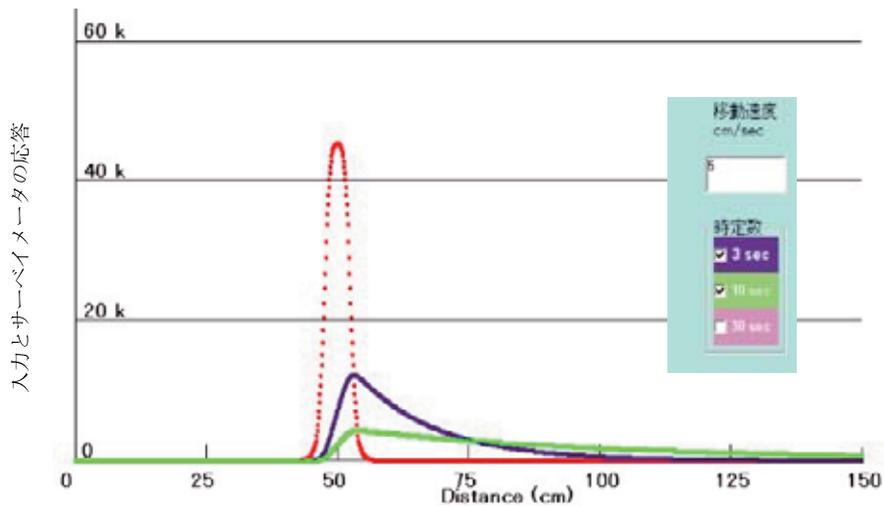
これの入力条件が決定され, 計算が開始されると以下の動作がプログラム上で開始される。

【シミュレーションデータ呼び出し】

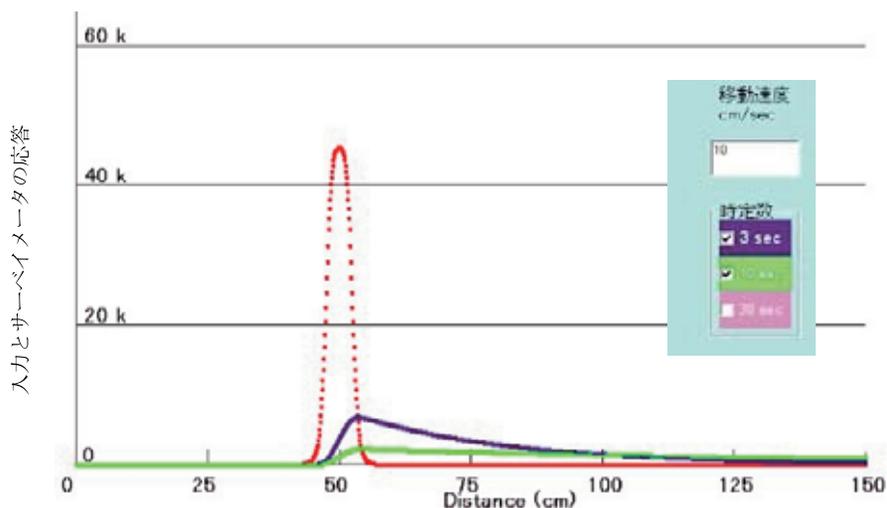
線源ごと, 検出器高さごとに 1 kBq の条件でメモリされている 50 cm を中心に 0.1 cm 刻みの近似データが呼び出される。

5. シミュレーション結果

図5には β 線源 ($^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$, 3.7 kBq) の例を示している。図5 (a) は移動速度 5 cm/秒で時定数は 3 秒, 10 秒の応答曲線が表示されている。応答の様子を実験値と比較する。括弧内に実験値を示す。時定数 3 秒の場合の最大応答は線源が 53.0 cm (54.5 cm) を通過した時で静止応答の 26.9% (25.0%) となる。時定数 10 秒の場合の最大応答は線源が 53.8 cm (56.0 cm) を通過した時で静止応答の 9.5% (9.0%) となる。図5 (b) は移動速度 10 cm/秒で時定数は 3 秒, 10 秒の応答曲線が表示されている。時定数 3 秒の場合の最大応答は線源が 53.5 cm (56.5 cm) を



(a) 移動速度 5 cm/秒

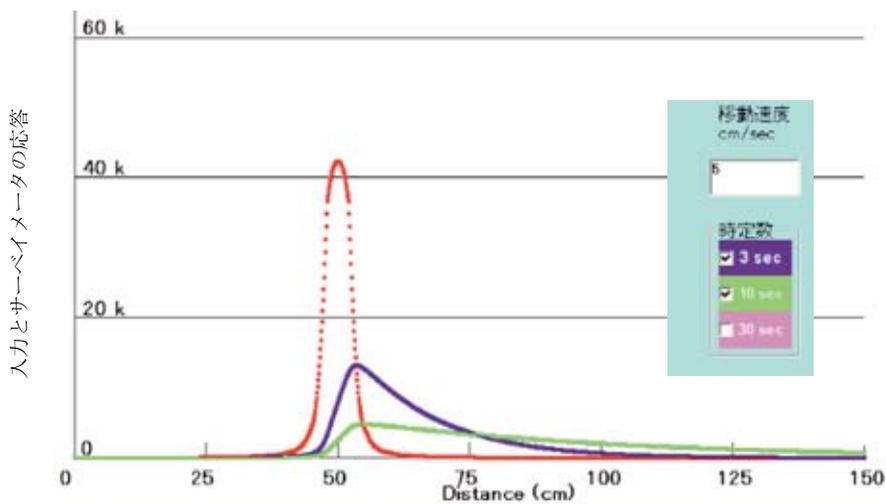


(b) 移動速度 10 cm/秒

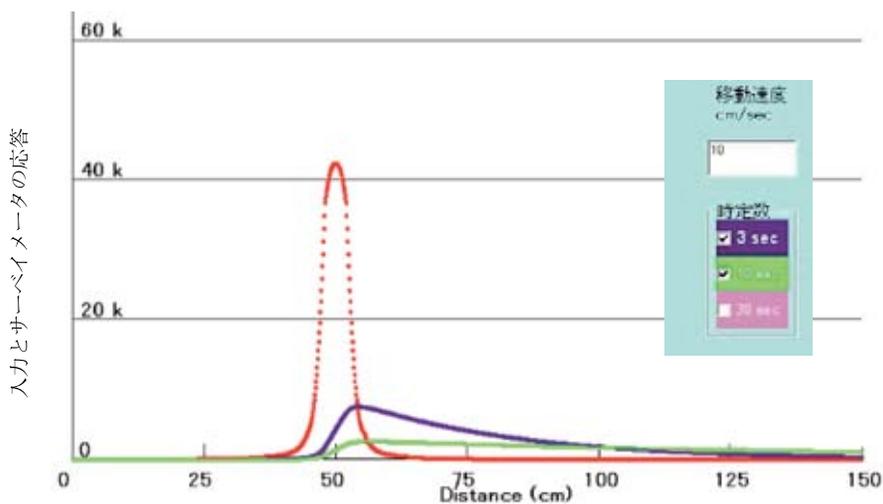
図 5 シミュレーション結果の画面 (^{90}Sr - ^{90}Y の場合)

通過した時で静止応答の 15.0% (15.0%) となる。時定数 10 秒の場合の最大応答は線源が 54.2 cm (58.5 cm) を通過した時で静止応答の 4.9% (4.0%) となる。図 5 (b) の移動速度 10 cm/秒の場合には最大応答値は図 5 (a) の移動速度 5 cm/秒の場合の値の半分程度に低下し、サーベイメータの使用法としては実用的ではない。

ここで括弧内の実験値とシミュレーション値について考える。サーベイメータの時定数の設計値は 3 秒、10 秒であるが、実験的に確認した時定数は、それぞれ 2.8 秒、9.5 秒であった。また、高計数率の実験のため数え落としも生じている。すなわち実験値はこのような要因、及びその他の要因によって生じる誤差を含む。一方、シミュレーション値は計算誤差や統計変動



(a) 移動速度 5 cm/秒



(b) 移動速度 10 cm/秒

図 6 シミュレーション結果の画面 (^{133}Ba の場合)

を想定しない。したがって比較検討は厳密には難しいが、前述の両者のデータはおおむね一致しているので、シミュレーションアルゴリズムもプログラムも妥当であると結論した。

さらに実例を紹介する。図 6 には γ 線源 (^{133}Ba , 37.9 kBq) のシミュレーション結果を示している。 γ 線であるから静止応答のすそ野は β 線源の場合より広がっていることが分

かる。図 6 (a) は移動速度 5 cm/秒で時定数は 3 秒、10 秒の応答曲線が表示されている。時定数 3 秒の場合の最大応答は線源が 53.4 cm を通過した時で静止応答の 31.4% となる。時定数 10 秒の場合の最大応答は線源が 54.7 cm を通過した時で静止応答の 11.4% となる。図 6 (b) については前述のとおり実用的ではない。

以上から時定数 3 秒の最大応答が 10 秒の場

合の2～3倍の大きさを示すことから汚染検査には時定数3秒を用いることが推奨される。また移動速度5 cm/秒が実用的である。

6. まとめ

今回はサーベイメータ応答実験装置という専用の装置を用いて線源とサーベイメータの静止応答を求めたが、サーベイメータをスタンドに固定し、定規の上に線源を置いてデータを取ることができる。このデータがあれば4章に示した方法でExcel (Microsoft)のマクロなどを使用してシミュレーションプログラムを作ることができる。線源の強さを変えたり、移動速度を変えたりして、実験に比べて一層自由に知見を求めることができる。放射線教育に十分に有用と考えている。

*

本プログラムの作成方法については以下を参照のこと。

【シミュレーションデータ加工】

シミュレーションデータ×入力kBqで図2の近似曲線の計数率が決定される。

【移動速度と時間の変換】

加工データは0.1 cm幅の矩形で規定されている。すなわち図2の1 cm幅のヒストグラムが0.1 cm幅の近似ヒストグラム(近似曲線) $nm(x)$ となっている。移動速度が v cm/秒の場合、0.1 cmの幅を線源が横切る時間 Δt は、 $\Delta t = 0.1/v$ となる。また、基準点からの位置と経過時間の関係は $x = v \times t$ あるいは $t = x/v$ で表わされる。

【応答の重ね合わせ】

図2の灰色ヒストグラムに対応する計算を行う。ここで x は0 cmの基準点から0.1 cm単位で150 cmまでの範囲である。

$$rr(x+0.1) = nm(x) \times (1 - \exp(-\Delta t/T)) \quad (3)$$

$$rr(xx) = rr(x+0.1) \times \exp(-(xx - (x+0.1))/v/T)$$

ただし、 $xx > x + 0.1$ (4)

ここで $(xx - (x + 0.1))/v$ は入力終了後の経過時間である。以上の位置(時間を陽に含んでいない)を含んだ(3)、(4)式をすべての0.1 cm刻みの位置で計算し、すべて重ね合わせる。例えば100 cmの位置の値は0.1, 0.2, ..., 99.8, 99.9, 100.0の位置で計算された(3)、(4)式の重ね合わせで計算される。

【表示】

50 cmの位置を中心に1分間、その場所で静止して得られると曲線(静止応答)が示される。これは【シミュレーションデータ加工】で示されたデータである。次に選択された時定数における応答曲線が示される。

以上のアルゴリズムはVisual Basic (Microsoft)でプログラム化され、データはExcel (Microsoft)で保存される。

(放射線医学総合研究所)

E-mail ▶ sirakawa@nirs.go.jp)

— 休載のお知らせ —

本教育実験ノートは、読者アンケートで好評との結果をいただいておりますが、第23回にて一旦、連載を休止させていただきます。

次の企画に向けて情報を収集し、再び読者の皆様と再会できることを楽しみにしております。また、読者からの情報提供も歓迎いたします。

— 理工学部会「RI・放射線 一般向け
教育実験ノート」ワーキンググループ