放射線教育

付放射線教育フォーラム 2018 年度活動報告

2018

VOL. 22 NO. 1

放射線教育フォーラム
Radiation Education Forum

放射線教育

Radiation Education

Vol. 22 No. 1

	目	次
【巻頭言】 化学の目で見た物理と放射線	渡部 智博	1
【研究報告】 箔検電器による放射線の測定および他の理科実験	森千鶴夫	3
【資料】 電子線に着目したクルックス管観察の学習展開の考察	田中隆一	13
【資料】 放射線・その正体と働き	工藤 博司	21
【資料】 食品照射の現状と課題	古田 雅一	31
【資料】 福島県で放射線教育を続けて	磯部 久美	40
【資料】 放射線教育 巻頭言・編集後記執筆者		50
「放射線教育」投稿規定、原稿の書き方 編集後記	緒方 良至	

発行: 2019 年 3 月 31 日, NPO 法人放射線教育フォーラム 〒110-0015 東京都台東区東上野 6-7-2

萬栄ビル 202 号室

Tel: 03-3843-1070 FAX: 03-3843-1080

E-mail: forum@ref.or.jp, HP: http://www.ref.or.jp

【巻頭言】

化学の目で見た物理と放射線

渡部智博 立教新座中学校 · 高等学校



ある時、物理の教師と話していて気付いたことがあった。

単純な話である。それは、「½H」を見たときに、イメージしていることが違ったのである。中学や高校で化学を教えている私は、次のように説明する。元素記号の左下に書かれている数字は原子番号であり、原子番号は陽子数でもある。このため、中心の原子核には陽子が2個となる。また、左上の数字は陽子数と中性子数を合計した質量数である。質量数が4であるから中性子が2個ということになる。また、右上には何も記されていないので、電荷が相殺されていることを意味している。正電

荷の陽子が2個であるから、負電荷の電子は当然2個となる。また、右下にも何も記されていないので、ヘリウム原子1個で成り立っている分子、すなわちヘリウムが単原子分子であることがわかる。というような説明になる。

ところが、物理の教師がこの記号を見たときには、そうではないと言われた。この記号は原子核のみを表していると捉えるというのである。すなわち、陽子2個と中性子2個の原子核を表しており、電子については何も触れていないというのである。電子が0個ということでもない。触れていないというのである。このため、「 4_2 H」はヘリウムの原子核であり、 α 粒子であるとされるのである。

思い返してみると、私自身の高校時代、原子核の反応式を見たときに違和感を感じていたことがあったと記憶している。また、大学で放射化学を学んだ時、そう言えば、このような元素記号を見たときには原子核を表していると学んだことを思い出した。

化学系の書籍を調べてみると、「 ${}_{2}^{4}H^{2+}$ 」という記述を見つけることがある。化学を学ぶ者にとって、原子核のみを強調するためには、右上に正負の符号がないと不安なのである。物理の教師にしてみれば、この記号が α 粒子であると言われると、さらに違和感を感じるのではないだろうか。電子については、問題にする必要がないのだから。

もう一つ紹介すれば、「ニホニウム Nh」のことがある。理化学研究所のホームページを 見ると「113番元素はどのようにして発見されたのか」、「113番元素の合成」という ような文言が目に飛び込んでくる。化学の目で見ると、どうしても座りが悪い。「亜鉛の原 子核とビスマスの原子核を衝突させ、融合させれば113番元素が出来上がります。」とい う文章もあり、尚更頭が混乱してくる。お分かりだろうか。化学の目でみれば、原子番号 が113の原子核が合成されたのである。電子のことには一切触れていないのである。電 子についても触れているのであれば、原子番号が113番の原子が合成されたというはずである。研究者に聞いてみると、電子が113個であるものができたわけではないとのこと。正の電荷を帯びた陽イオンであるそうだが、何価であると明確に示しているわけではない。

このように、同じものを目にし、同じように表現したとしても、化学を学ぶとき、そして物理を学ぶときとで互いに異なるイメージを抱いていることがあるのである。簡単なことであるが、基本的なことであっても、互いに意思疎通に努めたいものである。そのような基盤があって初めて、教育が成り立つものであると思っているからである。

【研究報告】

箔検電器による放射線の測定および他の理科実験

森 千鶴夫 名古屋大学

464-8603 名古屋市千種区不老町 e-mail moric@wh.commufa.jp (2019 年 2 月23 受理)

[要約] 箱検電器による放射線の測定として、マントル線源からの α 線放出に関する実験、クルックス管からの X線の線量率の測定について述べ、箔検電器の他の理科実験への応用として、摩擦静電気の正負に関する実験、絶縁抵抗に近い高抵抗の測定、およびローソクの炎に関する実験について述べる。

1. はじめに

静電気に関するさまざまな現象が主に琥珀(ギリシャ語で Electron;電気の語源)の摩擦によって知られ、紙や糸が吸引されたり反発されたりすることを、より客観的に観測するために箔検電器が開発されてきた。

金属箔検電器は 1747 年にフランスのノールによって考案され、1786 年に英国のベネットが金箔検電器を考案した。1787 年にボルタはストロー検電器を発明し「電気の強さ」を定量的に測定することに利用した¹⁾。1896 年にベクレルが箔検電器でウラニウム塩の放射能を相対的に測る可能性について述べているが、金属箔検電器はそれよりも約 150 年も前に考案されていたのである。放射線に関連した事柄では、レントゲンが X 線照射によって箔が閉じることに触れている。ラザフォードも箔検電器を活用した。より感度の高いローリッツェン検電器が考案されて放射能の測定に活躍したが、その後は優れた種々の放射線検出器の開発によって、箔検電器はもはや放射線の測定に用いられることはなくなった。このような意味では、霧箱も同様である。

しかし、箔検電器も霧箱も教育の分野では今も活躍している。霧箱は放射線を実感する 実験器具として活用されているが、箔検電器は放射線とはほとんど無関係になり、初期に よく用いられたように摩擦静電気の実験に中学校や高等学校で今も多用されている。教育 実験研究者からは箔検電器の光電効果の実験や放射線実験への応用の研究も報告されてい る。X線が空気中にイオンを発生する検証としての箔検電器の利用に関する報告²⁾ やクル ックス管からの漏洩 X線の測定への箔検電器の利用に触れた報告³⁾ などがある。

筆者も箔検電器の特性、即ち手作りすることさえできる極めて簡単な構造であるにも関わらず、かなり高い感度を有することなどに魅力を感じて、いくつかの応用的理科実験を試みてきた。一つは放射線の測定で、いわゆるマントル線源からの放射線の測定およびクルックス管からの漏洩 X 線の線量率測定である。他の一つはいくつかの他の理科実験への応用である。放射線教育や、より一般的な理科教育に参考にして頂ければ幸いである。

2. 箔検電器とその特性

図1にいろいろな箔検電器を示す。左端は厚さ $1\sim2\,\mu\,\mathrm{m}$ の錫箔を用いたメーカー品で、学校において多用されている。より薄くできる金箔を用いた感度の高い箔検電器もあるが、中学校や高等学校には一般的には保有されていない。左から 2 番目は手作り品でクッキング用のアルミ箔(約 $12\,\mu\mathrm{m}$)を用いている 4)。3 番目、4 番目はティッシュペーパーを箔として用いた手作り品であるが、ティッシュペーパーは電気良導体ではないために電荷が行き渡るのに時間がかかるので箔の動きに 1 秒ほどの遅れがあり定量的な測定には向かないが、後述するようにデモンストレーション用には有用である。右端は本実験では使用しな

かったが、目盛り付きのメーカー品である。

図2に箔検電器の充電 特性、すなわち、電極に 印加した高電圧 V と箔の 開き角との関係を示す。 箔の静電容量 C は 1.5~ 2.5 p F であるが、箔の質 量なども影響して箔を同 じ角度に開かせるために 印加する電圧は異なる。



図1 左から標準的なタイプのメーカー品、アルミ箔の手作り品、ティッシュペーパーの手作り品(2種)、目盛り付きのメーカー品

しかし、いずれの場合においても開き角度が30度から60度の間はほぼ直線の関係がある。

図2では箔検電器への電荷量Q(=CV)を知るために高電圧を電極に印加したが、通常は摩

擦静電気で荷電する。箔検電器への荷電に際しては、あらかじめガラス瓶を手で覆い、かつ上部の電極に手を触れ、電荷を放電させて箔の位置がほぼゼロであることを確認する。正の電荷を荷電するには、塩化ビニールパイプとウールなどの布とを摩擦して、負に帯電した場でであるには、箔が十分に開いた状態でるを電極に近付け、箔が十分に開いた状態でる。次に手を触れて負の電荷を逃がすと箔は閉じると電極に残った正の電荷が箔に行き渡り箔は開発を電極に残った正の電荷を荷には、塩ビパイプに発生した負の電荷を箔検電器の電極に直接触れる

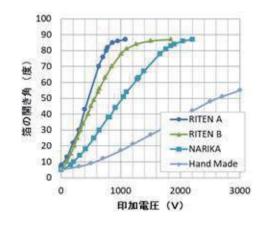


図2 箔検電器の充電特性

ことによって負の電荷が荷電され箔は開く。負の電荷の荷電は少し慣れる必要がある。

正電荷や負電荷を荷電した場合には、それらの電荷が確実に荷電されていることを確認する。すなわち正の荷電をした場合には、負の電荷が残る塩ビパイプを上部の電極に少し近づけると箔の開き角は小さくなる。逆に負の電荷を荷電した場合には、負の電荷が残る塩ビパイプを上部の電極に近付けると箔の開き角は大きくなる。後述するように、箔の開き角は 60 度から 30 度までの時間を測定するが、開き角が 60 度を大きく超えた場合には、60 度になるのを待つのには時間がかかる。そこで、普通のコピー用紙を折ったり切ったり

してやや小さくした紙の端を手にもって、他の端を軽く電極に触れることによって、電極 の電荷を逃がして箔の開き角を速く 60 度に近付けることができる。

3. 箔検電器による放射線の測定

3.1 マントル線源からの放射線の測定

図3のAにアルミ箔(厚さ $12 \mu m$)の手作り箔検電器のガラス瓶の中に石綿にトリウムを含浸させた所謂マントル線源を入れた状態を示す。Bには上部の電極の上に線源を置いた状態を示す。図4にマントル線源からの放射線による箔の開き角の減少の様子を示す。

マントル線源をガラス瓶の中に入れた場合と上部の電極の上に置いた場合とでは開き角の減少には大きな相違はない。角度が 60 度から 30 度に減少する時間を半減時間 Tとして、放射線量率測定の指標とする。線源がある場合には半減時間は約 18 分であった。線源に紙を被せて α 線をカットした場合には箔が閉じる時間は長くなり、半減時間は約 51 分であった。これは線源がない場合の自然放電の半減時間 78 分にかなり近い。自然放電の様子は測定の度にかなり変動する。従って α 線をカットした場合も変動が大きい。

手作り箔検電器の静電容量 C は、誤差は大きいが約 1.5pF であった。図 2 において、開き角が 60 度から 30

度まで減少するまでに約 500V の電圧が減少している。従って、この間に箔を含む電極が失う電荷 Q は Q=CV より 7.5×10^{-10} クーロン (1) である。箔の開き角を θ とすれば、微少時間 dt 内に箔が閉じる角度 $d\theta$ は次式で表される。

$$-\frac{d\theta}{dt} = k(q_{\alpha} + q_{\beta\gamma} + q_n) \quad (2) \quad \exists \exists k$$

は比例定数、 q_a および $q_{\beta\gamma}$ はそれぞれマントル線源からの α 線および β 線、 γ 線による 箔の単位時間における電荷損失 (coulomb/sec, C/s)、 q_n は自然放射線による電荷損失と箔検電器の絶縁抵抗を通じての電荷損失の和である。式(2)を積分して、 $\theta_0-\theta=k(q_\alpha+q_{\beta\gamma}+q_n)t$ (3) を得る。ここに θ_0 は経過時間 t=0 における箔の開き角、 θ は時間 t における開き角である。





図3 A:マントル線源をガラス瓶の中へ入れた状態、B:上部の電極の上に置いた状態

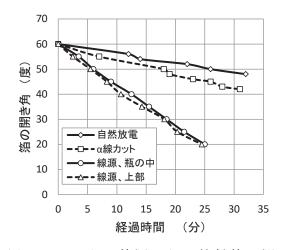


図 4 マントル線源からの放射線の測定;線源を上部の電極の上に置いた場合、線源をガラス瓶の中へ入れた場合、 $10 mg/cm^2$ のプラスチックフィルムで α 線をカットした場合、および自然放電の場合

線源がない場合の半減時間 78 分より、30°= kq_n ×78×60 (4) を得る。また、 α 線をカットした場合において、30°= $k(q_{\beta_{\gamma}}+q_n)$ 51×60 (5) を、同様に α 線を含む場合には、30°= $k(q_{\alpha}+q_{\beta_{\gamma}}+q_n)$ 18×60 (6) を得る。(1) と(4) より、k=4.0×10¹⁰degree/coulomb を得る。

3.2 クルックス管からの漏洩 X 線の線量率の測定

3.2.1 測定の意義

中学校や高等学校において理科の電子線の実験に使用されるクルックス管等から X線が発生していることが多い。すでに線量率測定 3)や教育現場における放射線管理 に関する報告もあるが、最近、放射線教育実験関係者の間で「教育現場などにおける 低エネルギーX線を対象とした安全管理体制の確立プロジェクト」が結成され、精力 的に活動している 5)。

筆者を含む関係者らもこのプロジェクトの主旨を踏まえてX線の測定方法を検討してきた。中学校や高等学校には一般的には放射線測定器はないので、X線の線量率を先生方が自身で確かめることはほとんどできない。そこで、どの学校にも概ね備えられている市販の箔検電器を使うことを検討した。箔検電器の箔がX線照射によって閉じるという報告³)はあるが定量的な検討はなされていない。今回提案する方法を使用すれば、学校の先生方はその使用状況における漏洩X線の線量率をその場でかなり定量的に測定できる。

3.2.2 実験装置とその特性

装置の配置を図5に示す。クルックス管の中心を通る軸から角度45度、陽極スリットの中心から60cmの位置で、箔検電器の上部の電極がスリットの中心の高さから3cm低い高さに箔検電器を置いて箔が閉じる半減時間Tを測定し、その位置に電離箱を置いて線量率Sを測定した。線量率は、誘導コイルの電流・電圧によって変化させた。誘導コイルはパルス



図5 実験装置の配置



図6 ガラスの外側に張られた目盛り紙と検電器の箔(角度65度)

状に高電圧を発生させ電流を流しているために電波が発生している。AMラジオを置けば、 ラジオがこの電波を受信してラジオからパルス的な音が聞こえる。誘導コイルを使用す る際にはこのことも生徒に知ってもらうとよいと思われる。

図 6 に箔検電器のガラスに貼られた目盛り紙と、約 65 度に開いた箔を示す。図 7 の A に箔の放電特性を示す。図中の「X線測定時」に示すように、角度が 60 度から 30 度に減少する時間を半減時間 T として X 線の線量率の指標とした。「自然放電」の半減時間は 30 分以上で長いが、このことを実験の開始にあたって確認しておく必要がある。

実験には主に UCHIDA-RITEN 製の箔検電器を用いたが、 $100\mu Sv/h$ の時の半減時間 T は約 85 秒であった。この間に電極の電圧は、図 2 のグラフから 260 V 低下することが分かる。箔検電器の静電容量約 1.5pF における電荷量(3.9×10^{-10} クーロン)の減少を、

 $100\mu Sv/h$ の X線によって作られた空気中のイオンで賄うには半径約 10cm の球(図 7 の B の実線の円)内の電荷が必要であることが計算で分かる。このことから、図 7 の B に示すように箔検電器の電荷収集の空間のイメージが得られる。

3.2.3 検量線の作成とその運用

図8に電離箱で測ったX線の線 量率Sと箔検電器の箔の開き角の半 減時間Tの関係を示す。データが錯 綜していて読み取りにくいが、この 関係は、箔検電器の電極に塩化ビニー ルのパイプによる摩擦静電気の電荷を 荷電した場合の電荷の正負(2.章参 照)によって、また、図1の誘導コイ ルからクルックス管への2本の導線の 配置によって大いに異なる。しかし、 正と負の荷電における半減時間Tの幾 何平均値をとれば、導線の配置におけ る相違は少ない。 従って、2本の導線 を並行にした場合の幾何平均値と負の 導線を机上に置いた場合の幾何平均値 の更にそれらの幾何平均値をとって検 量線とした。結局、導線のどのような 配置においても正と負の荷電のそれぞ れの半減時間を測定して、その幾何平 均値Tをとれば図中の式によって誤差 約±30%で線量率 S が得られる。図中 の理論値等については 3.2.6 において

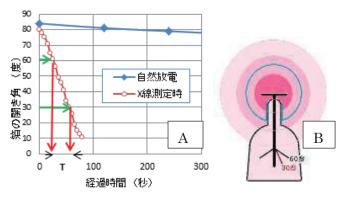


図 7 A: 箔の開き角と 閉じる時間

B: 箔検電器の電 荷収集のイメージ

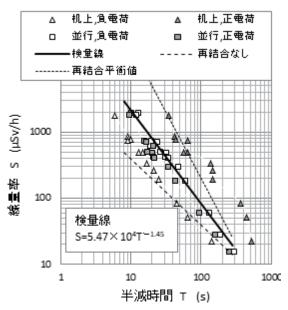


図8 電離箱で測った線量率 S と箔検電器の 半減時間 T の関係および検量線の作成

述べる。

図9にクルックス管(管の中心軸が 6-14 の軸上に置かれている)の陽極スリットの中心から $50 \, \mathrm{cm}$ における周辺の線量率分布を示す。図中の「電離箱」は入射窓を外した電離箱で測定した結果を、「箔検電器」は箔検電器で正負荷電の \mathbf{T} の幾何平均値 \mathbf{T} を求め図 $\mathbf{8}$ の検量線で求めた線量率を示す。両者は比較的よく一致しているが、例えば軸 $\mathbf{6}$ の方向は、陽極スリットの中心からみて直径約 $\mathbf{2} \, \mathrm{cm}$ 、厚さ約 $\mathbf{2} \, \mathrm{mm}$ のアルミニウムの陰極がある方向で、陽極からの \mathbf{X} 線は部分的に吸収されて線量率は小さい。このことは、電離箱(内径 $\mathbf{7.5} \, \mathrm{cm}$)ではかなりよく測定されているが、箔検電器は電離箱の $\mathbf{2} \, \mathrm{em}$ 倍以上の線量率になっている。これは、図 $\mathbf{7}$ の右に示すように、測定している空間が大きいためである。このような関係は他の方向でも見られる。

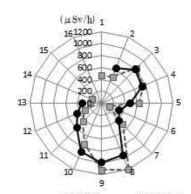
3.2.4 測定の要点と考察

箔検電器をX線の線量率測定に使用する場合には注意しなければならない点がある。① 箔検電器の電極の絶縁部分のホコリを拭って自然放電を少なくし、自然放電の半減時間が 30分以上であることを確認する。②窓を閉め、エアコンを止めて風の影響を少なくする。 ガスストーブ等は使用しない。③塩ビパイプでの摩擦静電気の正や負の荷電を荷電した場

合において、正や負の電荷が確実に荷電されていることを 2. 章において述べた方法で確認する。また使用後の塩ビパイプや布を箔検電器の傍に置かない。④箔検電器に正の電荷を荷電した場合の半減時間 T と負の電荷を荷電した場合の T の幾何平均値を求め、その値を図 8 の検量線に適用して線量率を求める。⑤作成した検量線は市販の通常の型のほとんどの箔検電器に適用できる。 X 線が電極などに当って発生する光電子などの影響は計算によれば 2%程度である。

3.2.5 この方法の活用

中学校や高等学校の先生方が手持ちの箔検電器で 箔の開き角の半減時間を測定し、筆者らが作成した検 量線を使うことによってクルックス管からの X 線の線 量率を先生方自身で測定することが可能である。そし て実験における線量率が前記の「プロジェクト」5) に



--**-**---電離箱 **--**----- 箔検電器

図9 クルックス管の周囲のX線の線量率を電離箱で測定した値と箔検電器で検量線を使って得た値との比較。箔検電器は半径約10cmの空間の平均値を示している。

沿っていることを確かめることができる。そのためには簡単なマニュアルが必要であると 思われる。

3.2.6 検量線の勾配に関する考察

放射線の線量率 $S(\mu \text{Sv/h})$ と半減時間 T(s)との関係を検討する。自然放射線と絶縁部分の電気抵抗体を通じての放電に伴う線量率相当分を S_n 、k を定数として、単位時間に開き角が減少する割合は単純には次式で表される。

$$-d\theta/_{dt} = k(S+S_n)$$
 、 従って、 $\theta_0 - \theta = k(S+S_n)t$ (6)

故に
$$S[\mu Sv/h] = \frac{(\theta_0 - \theta)\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_n}\right)}{k}$$
 (7)

 $\theta_0 - \theta$ は 30 度であり、X 線の線量率が $10\mu Sv/h$ の時に T=445s であった。自然放電の $T_s=78$ 分は大きいので無視すれば $k=6.7\times10^{-3}$ を得る。従って次式を得る。

$$S[\mu Sv/h] = 4.5 \times 10^3 \times T^{-1} \tag{8}$$

この式は図8において実験的に求めた検量線の式 $S[\mu Sv/h] = 5.47 \times 10^4 \times T^{-1.45}$ とは、対 数グラフ上における勾配がかなり異なる。式(8)を図8に粗い点線:再結合なしで示す。 直線の勾配は-1 である。式(6)の定数 k を実験値の線量率 10μSv/h の時の T=445s で求めて いるので、この点において実験式と理論式が合致するのは当然であるが、線量率が高くな ると理論式は実験式よりも小さくなり、より少ない線量率で半減時間を満たすようになる。 この相違はX線の照射中におけるイオンの再結合によるものと思われる。箔検電器の電極 の電圧があまり高くないために生成したイオンは再結合をすると考えられる。いま仮定と して、電界がない場合の再結合が生じている平衡電荷密度⁶⁾によって半減時間が決まると すれば、詳しい計算過程は省略するが、線量率と半減時間の勾配は-2となる。この直線を 図8に細かい点線;再結合平衡値で示す。但し、10μSv/hの時に445 sの実験値に合わ せている。実際は箔検電器の電圧によってイオンは集められているのであるから、-1の勾 配と-2 の勾配の中間に実験値が来るのは極めて妥当である。すなわち、箔検電器の本報告 のような利用は、電離箱を再結合域で動作させていることになり検量線が必要になる。

4. 箔検電器のいろいろな理科実験への応用

4.1 摩擦静電気の正負に関する実験

図1の最右のティッシュペーパーを用いた纏 い(まとい)式の手作り品は極めて簡単に作る ことができ、かつ見た目に分かりやすいのでこ れを利用する。

図 10 に化学反応性の強さを示す周期律表の 一部、および摩擦静電気を発生させるためのテ

第4族	第6族	第7族	第8族
			He
N	0	F	Ne
Р	S	CI	Ar
As	Se	Br	Kr
Sb	Te	I	Xe



図10 周期律表の一部、および摩擦静 電気の発生のためのテフロン板と塩化 ビニール棒(塩ビの棒が正に帯電する)













図 11 左から右へ順に、静電気を持たない纏い(まとい);塩化ビニール棒と普通の布を摩 擦した棒(負に帯電)を纏いにつながる針金に触れることによって負の静電気を荷電;そ の負に帯電した棒を近付けると同種の電荷のために纏いは逃げる;塩ビの棒とテフロンシ ートを摩擦した棒(正に帯電)を近付けると纏いは寄って来る;負に帯電したテフロンシ ートを近付けると纏いは逃げる。最右端は負に帯電した塩ビの棒をさらに近づけると纏い の数本(写真では1本)は却って近付いてくる。これは紙の中の分子が分極するために起 きる現象で、テフロンシートの場合にも起きる。

フロン板と塩化ビニールのパイプを示す。塩ビの棒と普通の布を摩擦すると強い電子親和力を持つ塩ビのパイプが負に帯電する。しかし、より強い電子親和力を持つテフロン板と塩ビのパイプを摩擦すると塩ビのパイプは正に帯電する。周期律表の第7族の特性を箔検電器で理解することができる。このように帯電した物体を図1のティッシュペーパーで作った纏い箔検電器に近付けた場合の纏いの動きを図11に示す。動きの詳細については図中の説明を参照されたい。纏い箔検電器はこのような実験のデモンストレーションに向いている。図11の右端の写真に示すように、ティッシュペーパーは良導体でないために起きる現象の理解にも役立つ。

4.2 高電圧、高抵抗の測定

箔検電器は入力インピーダンスが無限大に近い測定器である。従って、出力インピーダンスの大きい高電圧電源の電圧の測定や高抵抗の測定に向いている。図2に示すように他の高電圧電源で一度校正すれば箔の開き角から電圧が分かる。図12に、パソコンプリンタ用の通常のA4紙を幅2.5cm,長さ約10cmに切り、箔検電器の電極から垂らして下部のアルミ板に接地した。

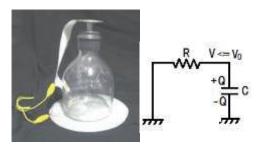


図 12 高抵抗の測定

この電気的等価回路を図12の右に示す。この等価回路から次の式が成り立つ。

 $\theta=\theta_0\times\exp(-t/(RC))$ θ_0 は今の場合には 60 度、t は経過時間、 θ は t における箔の開き角、R は紙の抵抗値、C は箔検電器 (NARIKA) の静電容量(約 2.5pF)である。従って次の式を得る。 $R=T/(C\times\ln 2)$ 、T は角度が 60 度から 30 度になるまでの時間(半減時間)である。実験では 7 秒であった。従って紙の抵抗値 R は約 $4\times10^{12}\Omega$ である。紙をドライヤーで熱すると箔の開き角はほとんど減少せず、紙の抵抗値は 2 桁程度大きくなったことが分かる。逆に、霧吹きで霧を軽く吹き付けると箔はほとんど瞬時に閉じる。紙の抵抗値に対する水分の影響が極めて大きいことが分かる。

4.3 ローソクの炎に関する実験

4.3.1 箔検電器のそばにローソクの炎を置いた場合

箱検電器の傍に炎があると箔は急速に閉じることはインターネットなどでも見ることができる。ローソクやライター、マッチなどの炎には正負のイオンが極めて多量に含まれ



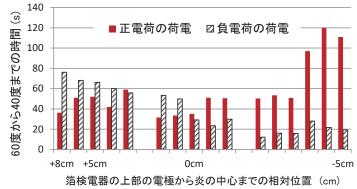


図 13 箔検電器のそばに置いたローソクの炎が開き角の減少時間に及ぼす影響 左の写真は箔検電器の上部の電極から炎の中心までの距離が 15cm の場合である。

ている。ここでは少し複雑な箔の動きについて報告する。

図 13 に示すように箔検電器の電極の中心から 15cm の位置にローソク (直径 1.65cm、や や太い)の炎を置いた場合の半減時間(図13の実験に関しては箔の開き角が60度から40 度になるまでの時間)は、箔を正に荷電した場合と負に荷電した場合とでは大いに異なる。 しかし、この相違は炎の高さと箔検電器の上部の円板の電極の高さとの相対位置によって も変化することが分かった。正に荷電した場合には、炎の中の負のイオン或いは電子によ って箔の電荷が中和されて箔が閉じ、負に荷電した場合には炎の中の正のイオンによって 中和されて箔が閉じる。ローソクの炎の場合には、光っている部分はほとんど正のイオン や正の電荷を持つ煤(すす)から成ること、最下部の少し青みを帯びた部分は負の電荷を 有することが炎に横方向の電界を印加することによって分る。このことから、炎の位置が 高い場合(図 13 では+8cm や+5cm の場合)には、箔に正電荷を荷電した場合に効率よく負 のイオンを引き寄せるので、時間は短い。負電荷を荷電した場合には、正のイオンは炎の より上部(より遠い位置)にあるために引き寄せ難く、箔の電荷が中和されるのに時間が かかると思われる。しかしこの関係は、炎の位置と電極の位置が 0cm (ほぼ左の写真の位 置)の辺りから逆転する。炎の位置が下になれば、炎の上部の正のイオンは箔の負電荷に よって効率よく集められ、短い時間で箔は閉じるが、炎の下部の負のイオンは遠いために、 箔の正電荷によって集められにくい。従って箔が閉じるのに時間がかかる。

ここに報告した例は、箔検電器の性質によるのではなく、ローソクの炎の性質によるのである。では都市ガスをブンゼンバーナーで燃焼させたら炎などはどうであろうか? 簡単に調べたところではローソクの炎のような相違はあまり見られなかったようであるが、より丁寧な実験が必要である。また、ローソクの炎の中の正負のイオンの分布や電子の挙動などもより詳細な検討が必要である。ともあれ、簡単そうに見えることでも、よく調べるとかなり検討すべきことがあり、高等学校などのクラブ活動で扱うのに適した現象かもしれない。

4.3.2 箔検電器とローソクの炎のそばに高電圧電源を置いた場合

ローソクの炎の中のイオンは 3.2.3 で述べたように周辺の電界の影響を強く受ける。図 14に示すように、ローソクの炎から 15cm の位置に高電圧電極 (6.5cm $\times 6.5$ cm) を置いて、



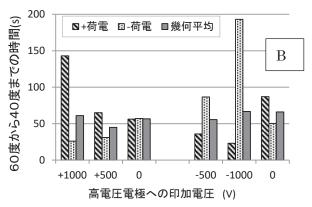


図 14 A のようにローソクの炎から左に 15cm 離れた位置に、正の高電圧あるいは負の高電圧を印加した場合の箔の開き角度が 60 度から 40 度になるまでの時間は、B に示すように、高電圧の値とその正負、および箔検電器の電荷の正負によって大いに異なる。

高電圧電極に正の電圧を印加した場合には炎の中の負イオンあるいは電子はこの電極に引き寄せられる。従って箔検電器に正の電荷が荷電されている時には中和されるべき負の電荷が極めて少ないために箔が閉じる時間は長い。逆に負の電圧が印加されている場合には、箔検電器に負の電荷が荷電されている場合にこの電荷が中和されるべき正の電荷が炎の中に少ないために箔が閉じる時間は長い。このようにして、炎の中のイオンが電界に敏感に動いているのが箔検電器によってよく分かる。しかし、幾何平均をとるとあまり大きな相違は無い(幾何平均の平均値は 59.13s)。この関係は実は 3.2.3 において述べた事柄、即ち、図1の誘導コイルからクルックス管への2本の導線の配置によって半減時間が大いに異なることの実験的検証でもある。高電圧電極が面状ではなく水平な線状であれば炎の縦方向の正負の電荷の分布の情報を得ることが可能かもしれない。

5. まとめ

本稿では放射線測定への応用として、いわゆるマントル線源からの α 線の放出に関する実験およびクルックス管からの漏洩X線の線量率の測定について述べた。特に後者は、放射線測定器を持たない学校の先生方が手持ちの箔検電器を使って自身でX線の線量率の測定が可能であることを示した。クルックス管は電波の発生に関する情報を得ることもできる。また、箔検電器はいろいろな理科実験に活用できる。正負の摩擦静電気の発生に関する実験はもちろんのこと、紙などの高抵抗値の測定、ローソクの炎に関係した実験など未知な物理現象の解明にも役立つのではないかと思えるほど応用測定への利用が可能である。放射線や他の理科の分野における教育実験に少しでも資することができれば幸いである。

謝辞

本稿中、3.2 項に関しては以下の方々(敬称略)の御協力を得た;緒方良至、中村嘉行、渡邊賢一、瓜谷 章(以上、名古屋大学)、秋吉優史(大阪府立大学)、臼井俊哉(愛知工業大学名電高等学校)、村上浩介(愛知県立名古屋南高等学校)、羽澄大介(名古屋市立山田東中学校)、神谷 均 (中部原子力懇談会)、宮川俊晴、田中隆一(以上、放射線教育フォーラム)、掛布智久(日本科学技術振興財団)。ここに深く謝意を表する。

文献

- 1) 木原壯林、電気化学者は見た! 測定法の歴史- (前篇)、Review of Polarography, **60**, No. 1, 59-71 (2014)
- 2) 林 裕晃、X線の電離作用、NLだより、N.465,p2(2016)
- 3) 宇藤茂憲、教育現場における冷陰極管の漏洩 X 線について、福岡教育大学紀要、第 66 号、第 3 分冊、1-11(2012)
- 4) 森 千鶴夫、手作り箔検電器と放射線の測定、Isotope News, No. 634、17-22(2007)
- 5) 秋吉優史、谷口良一、松浦寛人、宮丸広幸、神野郁夫、浜口 拓、野村貴美、山口一郎、谷口和史、小林育夫、川島紀子、佐藤 深、森山正樹、宮川俊晴、掛布智久、クルックス管からの低エネルギーX線評価手法の開発、放射線化学、第106号、31-38(2018)
- 6) W. J. プライス (関口 晃 訳)、「放射線計測」、80p、コロナ社 (1966)

電子線に着目した クルックス管観察の学習展開の考察

田中 隆一 放射線教育フォーラム 〒110-0015 東京都台東区東上野 6-7-2 萬栄ビル 202 号室 (2019 年 2 月 27 日受理)

[要約] 中学校理科の学習指導要領改訂によって、2学年の電流とその利用の学習に放射線が取り入れられることを受けて、クルックス管内の蛍光板上に筋状の発光として観察される電子線が放射線であることに着目し、真空放電と関連付けながら放射線の性質と利用の学習への展開について考察した。筋状発光の原因が電子線による電離作用であることは放射線学習への展開を容易にする。もう一つの性質である放射線の透過性については、極めて希薄な気体などクルックス管特有の複雑な物理的条件が絡むので、学習展開の工夫が今後の課題である。放射線利用学習への展開は、放射線の発見を導いたクルックス管が最初の人工放射線源であり、加速器の原点でもあることを踏まえて、放射線利用の最先端に相当するスマートフォンに至る科学技術発展の理解を可能にすることが期待される。

1. はじめに

中学校理科教科書における放射線に関する記述は、3学年後半の「エネルギー資源」学習で初めて登場するが、高校受験を目前の総復習とも時期が重なるので、生徒の十分な理解を意図する授業が難しい。その時期に重ならないとしても、「科学技術と人間」という社会科的な脈絡の単元で放射線にも触れることが指導されているので、実験や観察を伴わない講義だけになり易い。こうした事情を改善するため、3学年後半で初めて学ぶのでなく、3年間をとおして段階的に放射線を学ぶ授業を放射線教育フォーラムは提唱した10。

平成28年度の学習指導要領改訂によって、2学年の電流とその利用の単元のなかで放射線の性質や利用に触れる指導が新たに加わり、これによってわれわれの提案の一部がかなえられた。それだけでなく、放射線学習が上記のような社会科的な脈絡ではなく、「電流とその利用」という理科本来の脈絡で登場したことも重要な意味をもつ。クルックス管それ自体の知名度は高くないが、レントゲンによる世紀の大発見はクルックス管などを用いた真空放電の研究が進展していく只中であったので、19世紀末における現代科学のルーツを踏まえたうえで放射線学習が始まる意義も大きい。

クルックス管が、これまでのように、その観察を通して電子の存在を理解させ、電子の流れが電流であることを理解させる教材としてだけでなく、放射線学習教材としても脚光を浴びている主な理由は、クルックス管が霧箱や簡易測定器と並ぶ放射線実験の強力な教材として期待されるからである。クルックス管から放出されるX線を適切な安全管理のも

とで放射線授業に安心して活用できるようにするために、教育現場において放射線安全管理の指針をつくることが当面の大きな課題である $^{2,3)}$ 。

しかし、クルックス管によるX線実験を全ての理科教員が放射線の授業において実践するのは容易ではない。学校現場における様々な制約や事情によって、実践したくとも難しい場合も多いのではないかと推察する。ここでは、そのような学習環境においても、クルックス管実験をもとに放射線学習を導くことを可能にする一つの選択肢として、クルックス管内の蛍光板上に一筋の発光として観察される電子線が放射線であることに着目し、放射線の性質と利用の学習への展開について考察した。

この報告は霧箱及び簡易測定の実験から「放射線の性質」学習への展開を検討した結果 ⁴⁾ の続報でもあり、真空放電に関連付けながら展開が可能と考えられる放射線の学習内容 について考察したものである。

2. 電子線に着目した放射線学習 - 電離作用の活用によって電流の正体を確認

クルックス管を教材とする授業においてX線実験を実践できない場合でも、真空放電に 関連付けながら放射線の性質と利用にも触れる学習を可能にする必要がある。これについ ては次の2つの選択が考えられる。

- (1)放射線の発見に関わる科学史への興味・関心を惹きつけたうえで、放射線の性質と利用について学ぶ。
- (2)クルックス管内の蛍光板上に一筋の発光(図1参照)として観察される電子線が放射線の一種であることに着目して放射線の性質と利用について学ぶ。

このうち、(1) は実験や観察を通して放射線を身近に学ぶ選択ではないが、放射線発見に関わる興味・関心を出発点に放射線学習を始める選択である。一方、(2) はクルックス管内に存在する放射線を身近な対象としてガラス壁越しに観察することから放射線学習を始める選択である。

ここではクルックス管の観察から放射線学習を始める後者について考察する。



図1 クルックス管内の電子線が蛍光板面に当たり、電離作用によって板面の中心線に沿って生じた一筋の発光 (ワオ!科学実験ナビ http:://science.wao.ne.jp/から転用)

クルックス管内の陽極と陰極の間の電界分布に従って加速される電子線は蛍光板面上に筋状の発光として観察されるが、大半の電子は管の全長を通り抜け、陽電極の金属板やガラスの管壁に当たって止まる。電子線がそれらに当たった結果として二次的に発生するX線については、実験を安全に実施する可能なガイドライン策定に向けたプロジェクトが進行中である10。

クルックス管実験の展開として追加された放射線に関わる新学習指導では、電子線が電極板やガラス壁に当たることで二次的に発生する X線に関わる学習が指導されており、 X線の発生源である電子線については、放射線としての扱いでは言及されていない。ただし、新学習指導要領解説では、「X線と同じように透過性などをもつ放射線が存在し、医療や製造業などでも利用されていることに触れること」とある。 X線だけに触れているのは、クルックス管内の電子のエネルギーが低いので、物質の透過性が広く知られているベータ線よりもずっと弱く、 X線のように管外の空気中に取り出すこともできないので、中学性向きの放射線学習に活用するには不向きであるとみなしたからではないかと推察する。

しかし、クルックス管実験で生徒が観察する管内蛍光板上の筋状の発光は、誘導コイルなどの高圧電源を利用して加速された電子線による電離作用の結果としての蛍光現象である。霧箱実験のように放射線粒子の飛跡は観察できないが、加速された電子が管内の極めて希薄な気体中を通り抜けることが、蛍光板面の発光や管背面に投射された内蔵十字板の影(図2参照)によってその場で確認できる。十字板の影ができるのは、管背面内側に塗布された蛍光膜に電子線が当たると、電離作用に起因する蛍光を発するからである。

クルックス管内を通り抜ける電子のエネルギーは数 \sim 30 keV 程度であり、典型的な数百 keV 以上の放射線に比べれば桁違いに低いが、気体の分子(あるいは原子)1 個を電離するのに要する電子の平均エネルギー(<50 eV 5)に比べればはるかに高いので、クルックス管内の電子線を放射線として扱うことに問題はない。

3. 管内電子線の振舞について ― 放射線の透過性に関する考察

放射線のもう一つの性質である物質透過性は、電子線の場合、霧箱の場合とは異なって、 肉眼によるクルックス管の観察では確認が難しい。陰極付近で発生した電子は、両極間の 電位勾配よりもむしろ陰極近傍に偏在する正イオンによって形成される電界分布によって 加速される。クルックス管内の気体が極めて希薄であり、かつ、陰極近傍以外の両極間で

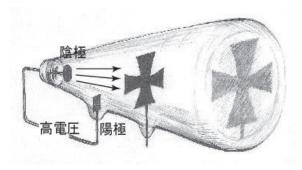


図2 十字板を内蔵するクルックス管の実験 (蛍光物質を塗布した管の背面が発光)

は電界強度がとても弱いために、大半の電子は気体の分子あるいは原子を電離するような 衝突をせずに直進的に通り抜ける⁶⁾。このことは、金属十字板を内蔵し、管背面内側に蛍 光膜を塗布したクルックス管の実験(図2参照)によって確認できる。

クルックス管も含めて陰極線菅内の希薄な気体中での高速電子の振舞から明らかなことは、気体中での放射線(電子)の通り抜けと電離作用は二つの別個の性質ではなく、物理的にはむしろ相補的な関係にあるということである。管内気体が濃密であり、電子の通路に沿う電離作用の密度が高いほど、電子は通り抜けにくい。逆に、クルックス管のように希薄で電子の通路に沿う電離作用の密度が低いほど通り抜けやすい。

十字板を内蔵するクルックス管の実験において、陽電極は電子線の直進方向ではなく管の下側にある(図2参照)のに、十字板の影が直進方向のガラス壁に投影されることがよく知られている。この現象については以下のような説明がなされている⁷⁾。

管内の気体分子あるいは原子の電離で生じるイオンは電子に比べて質量が大きいゆえに移動速度が小さいので、正イオン濃度の大きいエリアが陰極近傍に形成される。その結果、両極間の電位差は陰極近傍の狭いエリアに局在し、陰極近傍以外の電極間では電界強度がゼロに近くなる。こうして、電子が電界の作用をほとんど受けずに管の背面に向けて直進するので、陽極背後の管壁に映る十字板の影が形成されることになる。

この説明が有効であるのは、クルックス管内の気体物質が極めて希薄ゆえに、電子が通路沿いで気体の分子あるいは原子と衝突する頻度が極めて低くなり、大半の電子がほとんど偏向せずに管内を"素通り"し、管の背面に達するからである。

霧箱の場合は大気圧下での物質透過であるため、電子が物質を透過する過程をジグザグな飛跡として観察できるが、クルックス管内の気体は極めて希薄であるため、物質透過の観察までには至らず、"素通り"状態が際立つ結果となる。

放射線粒子は物質に作用(主に電離作用)しない限り、物質から反作用を受けないで、慣性の法則に従って直進する。つまり、物質を"素通り"する。この慣性の法則に従う"素通り"に透過の本質が現われる。一方、大気圧の空気のような密度の高い物質中では、電子線は衝突による電離作用を高密度に繰り返しながら物質を通過する。この通過は電離作用を連続的に繰り返した結果としての透過である、この現象は、地球に大量に降り注いでいるニュートリノに見られるように、密度の高い物質に対してもほとんど作用しない本質的な意味での透過とは区別する必要がある。透過に関してしばしば見かける誤解は、"透過作用"のような誤用例も含めて、透過の本質と現象の混同に起因する。

4. クルックス管観察が導く放射線の第3の性質 ― 電界と磁界の作用を受ける8)

中学校の理科教科書をはじめ、多くの放射線教材には、放射線の性質として通り抜ける 性質(透過性)と電離作用が扱われており、物質に対してどんな関わりをもつかという視 点で放射線が扱われている。

しかし、電界や磁界によって電子線が曲がるという、現行学習指導のもとでの実験結果は、電荷をもつ放射線は電界や磁界の作用を受けるという、第3の放射線の性質があることをはからずも気づかせてくれる。つまり、荷電放射線は、物質に対してだけではなく、電界や磁界に対してどんな関わりをもつかについても目を向けさせてくれる。

一般的な理解としては、電子線、ベータ線、アルファ線などの荷電粒子線は電界や磁界

の作用を受ける。ガンマ線、X線、中性子線のような電荷をもたない放射線は、当然ながら、電界や磁界の作用を受けない。

荷電放射線が電界や磁界の作用を受けるという性質は、電界及び磁界によって荷電放射線の加減速を可能にするだけでなく、偏向や集束などの制御も可能にする。この特性こそ、放射線の利用を今日のような著しい発展へと導いた最大の要因である。この重要性を正しく認識するならば、透過性や電離作用だけでなく、荷電放射線は電界や磁界の作用を受けることを放射線のもう一つの性質として学習することが望ましいと考える。

5. クルックス管の電子線観察が導く放射線利用の発展学習について

クルックス管学習においては、陰極線研究の歴史的成果としてのX線の発見直後から、 放射線診断をはじめとする医療への利用が瞬く間に世界中に広まり、1901年に第1回ノーベル賞授賞を促した成果に基づいて、放射線利用学習の展開へ導くのが放射線教育における効果的な進め方である。ここでは、X線の代わりに、クルックス管内で加速された電子の流れである電子線に着目して、放射線利用学習への展開について考察する。

クルックス管に代表される総称としての陰極線菅は、歴史的に最初の人工放射線源として位置づけられるが、陰極で発生した荷電粒子を陽極まで加速する装置であるということから、加速器の起源とみなすこともできる。加速器というと、一般的には、100万電子ボルト以上の高エネルギーの加速装置がよく知られているが、それ以下の比較的低いエネルギーの加速装置も開発され、医療、学術、及び産業の分野において、多様な放射線利用が当初から試みられてきた。20世紀の初めから開発が進んだX線発生装置、オシロスコープ、ブラウン管、電子顕微鏡だけでなく、20世紀の終わりに開発された電子線マスク描画装置(後述)も広義の意味では電子加速器であり、放射線の発見に触発されて開花した放射線利用技術の発展として捉えることができる。

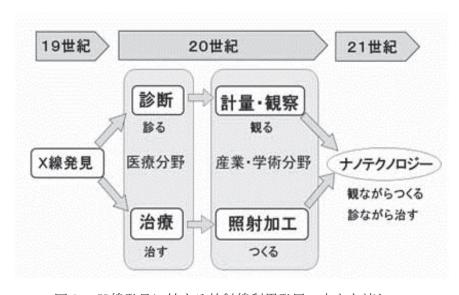


図3 X線発見に始まる放射線利用発展の大きな流れ

放射性同位体を含めて、20世紀初頭における放射線利用の主な目的は医療診断及び学術的な観察であったが、20世紀中頃になると、放射性同位体、加速器などの放射線源の製造

技術の進歩を背景に、放射線作用のより積極的な活用であるがん治療、工業、農業への利用へと発展した。この発展を包括的な視点から見ると、放射線を用いて"診る"あるいは"観る"利用から、"治す"あるいは"つくる"利用へと発展したことになる(図3)⁸⁾。放射線を利用した"つくる"技術の一つの頂点とも言える存在が20世紀の終わりに実現した半導体集積回路(LSI)製造の鍵とも言える電子線マスク描画技術である⁹⁾。

6. 真空放電に始まる科学技術の所産としてのスマートフォンについて9)

スマートフォンやタブレット PC など、高機能で小型・軽量の情報通信機器の普及によって、21世紀の生活環境は大きく変化しつつある。これを支えているのが、世紀の変わり目で高密度化、微細化が急速に進んだ集積回路(LSI)であり、その高集積性の鍵とも言えるものが LSI のネガフィルムに相当するフォトマスクである。フォトマスクに刻まれている超微細な回路パタンをシリコン基盤に焼き付けるため、基盤上を移動しながら回路パタンを投影レンズでさらに数分の1に縮小して露光・転写することによって LSI を製造している。

当初はフォトマスクの製造に光学レンズを利用していたので、解像度は光の波長で決まり、0.1マイクロメートルの限界があった。このため、回路パタンの線幅の最小寸法を下げて集積度をさらに高めることができなかった。その解決手段として登場したのが光よりも波長が何桁も短い、数万ボルトで加速された電子線である。電界及び磁界の作用を受ける荷電放射線の性質を最高度に発揮させることによって、0.1マイクロメートル以下の解像度をもつマスク描画技術が実現した。現状での回路の太さはすでにナノメートル(10億分の1メートル)の領域に入っている。電子線という波長の短い荷電放射線を利用することよって、一つのシリコンチップのLSI中に10億個以上のトランジスタを集積できるようになり、前世紀末から今世紀初頭にかけて、小型・軽量の情報通信機器の機能性が格段に高められた。そういうわけで、荷電放射線は電界及び磁界の作用を受けるという放射線の性質は、最新の医療や先端的な学術分野の放射線利用においては、放射線の性質の中で最も重要な役割を担っている。

内閣府が最近実施した放射線利用の実態調査¹⁰⁾ によれば、わが国における平成27年度の医療、工業、農業にわたる放射線利用の経済規模は4兆7千億円であり、電子線描画が鍵となる半導体加工がその4分の1以上を占めており、放射線の工業利用のなかでは最大の規模となっている。

7. 人工放射線から始まる放射線学習について ― スイッチオフできる放射線

上に述べたように、クルックス管を含めた真空放電管を最初の人工放射線源として捉えることができるが、現行の学習指導要領では、放射線は原子力エネルギーとの関わりで学ぶことが指導されているので、自然放射線の学習への展開が容易な α 、 β 、 γ 線などの放射性同位体のみが学習対象となる傾向がみられる。放射性同位体の利用もその特色を活かして発展しつつあるが、放射線利用全体としてみると、加速器などの人工放射線源が主流であり、放射性同位体が放射線利用全体に占める割合は長期にわたって漸減傾向にある。

放射線利用の学習は、利用事例を知ることを通して放射線のデメリットではなく、メリットを認識する機会とされているが、とかく利用事例を羅列するだけに終わりがちであり、

放射線利用の科学技術としての認識が見落とされがちである。多種多様な利用事例を知ることで放射線の便益性を認識しても、放射線それ自体は依然として摩訶不思議な"得体(正体)"が知れないままとなりがちである。科学技術として理解することによってこそ、放射線の"得体(正体)"を知ることになると考える。

近年における放射線利用では、加速器、X線発生装置など、放射線に関わる安全管理の比較的容易な人工放射線源の使用が広まっている。その最大の理由は、放射線利用への応用が難しい、極めて高い粒子エネルギーを除けば、X線、電子線、重粒子線などの人工放射線は、 α 、 β 、 γ 線などとは異なって、スイッチオフによって容易に放射線を止めることができるからである。

8. まとめ ― 電子線に着目する学習展開の実践に向けて

電子線に着目したクルックス管観察で始まる放射線の学習は、電流とその利用に関わる現行の学習に続く自然な流れのように見える。しかし、管内電子線の電子エネルギーは 10 ~30 keV 程度であり、原子力・放射線学習で従来から扱われている β 線、 γ 線などのエネルギー領域よりも低い。また、対象としての物質が電子線の透過をほとんど妨げないほど 希薄な気体であること、両電極間に電界分布が偏在することなど、真空放電特有の物理的条件が電子線の透過性の理解にも絡む。このため、放射線学習の導入部としては、内容が難しく受け取られるかもしれない。ただし、これまでの放射線学習では、 α 、 β 、 γ 線など、放射線の種類による透過性の違いを通して、透過性があたかも放射線の種類で決まる性質であるかのように説明されるだけでなく、もう一つの性質である電離作用との相補性が全く説明されてこなかった。クルックス管を活用した発展学習の工夫によって、透過性を物理的により正しく理解することにつなげていくことを期待している。

放射線の性質としての電離作用については、現行の理科教科書の放射線記述をもとにした学習では、実験や観察に基づかない暗記内容のように扱われている。しかし、「電流とその利用」の学習において電流が電子の流れであることを、電界と磁界による電子線の偏向によって確認できるのは、放射線の電離作用による蛍光現象を活用した結果である。つまり、現行のクルックス管の実験・観察学習は電子線に着目した「放射線の性質」学習への展開を、はからずも、すでに用意していることになる。

電子線に着目した放射線学習を展開するためには、クルックス管学習におけるこの意図 していない利点をうまく活用し、かつ、上記のクルックス管特有の避けがたい物理的条件 の複雑さに捕らわれることなく、放射線の透過性を正しく理解させるための工夫が今後の 課題であろう。

これまでの放射線利用の学習は、放射線がマイナスのイメージをもつ原子力エネルギーの学習を背景に始まるので、放射線がプラスのイメージをもつ個々の放射線利用事例を示す程度で済ますのが通例であり、放射線のどんな性質が個々の事例において活かされているかに触れる程度であった。放射線発生源の原点であるクルックス管の実験・観察から放射線学習が始まることによって、この事態が改善されることを期待している。このことは放射線利用学習への自然な展開が容易になるだけに止まらず、放射線利用を放射線の発見に触発されて開花した放射線発生源も含む科学技術の発展として捉えやすくなったことである。X線や電子線などの人工放射線から放射線学習がスタートすることによって、医療、

製造業、農業、学術への放射線利用を科学技術の発展として学ぶ方向づけが容易になると 考える。

2020年度の初めに新学習指導要領を踏まえた中学校理科教科書が公開される。今後 は新教科書の放射線記述調査を踏まえて、放射線学習の展開や授業実践の望ましい在り方 も含めて、さらなる考察を加えていく必要があろう。

参考文献等

- 1) 田中隆一,宮川俊晴,新教科書による中学校での放射線授業実践の支援 放射線教育フォーラムの最近の活動から一,エネルギー・環境教育研究 11, No.2, 77-82 (2017)
- 2) 秋吉優史, 宇藤茂憲他, 低エネルギーX線の評価と安全管理に関する問題点と現状, 日本放射線安全管理学会第17回学術大会予稿集 20p (2018)
- 3) 秋吉優史, 谷口良一他, クルックス管からの低エネルギーX 線評価手法の開発、放射線科学、106, 31-38 (2018)
- 4) 田中隆一, 実験・観察から「放射線の性質」学習への展開の試み, 放射線教育 **20,** 19-24 (2016)
- 5) 放射線の電離作用, -ATOMICA- <u>www.rist.or.jp</u> (08-01-02-02)
- 6) クルックス管,「ウィキペディア日本語版」(2018年8月16日(木))
- 7) クルックス管の電極の疑問, web.thn.jp/ninjinhouse/r-s-denki-crookes.html
- 8) 田中隆一, 放射線学習の骨組を構成するキーワードの要点解説、放射線教育 **16,** 57-66 (2012)
- 9) 田中隆一, 学習指導要領に基づいた放射線等の取扱いに関する考察, エネルギー・環境教育研究 **3**, No.2, 73-79 (2009)
- 10)超先端電子技術開発促進事業追跡評価報告,產業構造審議会產業技術分科会評価小委員会(2009)
- 1 1) 放射線利用の経済規模調査(平成 2 7 年度), 第 2 9 回原子力委員会資料第 1-1 号 (2017)

【資料(講演)】

放射線:その正体とはたらき

工藤博司

東北大学大学名誉教授 〒982-0026 仙台市太白区土手内 1-2-3 E-mail: kudo.hrs@nifty.com (2019年2月14日受理)

1. はじめに

10年以上にわたり、市民を対象に「放射線とは何か」について講演をしてきた。2011年3月の東京電力福島第一原子力発電所の事故の後には、東北各地の市民団体、教育団体、婦人団体、経営者団体、労働団体などに招かれ多い時には週に3回の講演をしたこともあった。主に「放射線:その正体とはたらき」と題して基礎的な話をしたが、放射線教育の資料として学校教育にも役立つのではないかと思いその概要をまとめてみた。本稿は事故から3年後の2014年3月に福島県葛尾村の臨時役場(三春町に設置)において村民を対象にした講演を柱にしている。

2. 講演の序

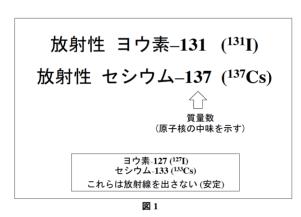
放射線は自然界に、そして私たちの身の周りにも常に存在しています。この部屋の中にも、皆さんの住いの中にもあります。宇宙からもやってきます。原子力発電所がなければ放射線はないと思う人もいるかも知れませんが、放射線は特別なものではなくどこにでもある自然現象の一つです。本日は、放射線とは何者なのか、またどのような"はたらき"をするのかについて分かりやすくお話したいと思います。高校の理科の授業のようになるかも知れませんが、生徒に戻ったつもりで聞いてください。

3. 元素・核種・同位体

図1に皆さんがよく耳にする「ヨウ素」、「セシウム」とあります。その単語の前に「放射性」とあり、後に131とか137という数字が付いています。ヨウ素やセシウムは元素名で、括弧内の「I」はヨウ素の、「Cs」はセシウムの元素記号です。元素記号の左肩に数字を付けることもあります。スポーツ選手のユニフォームに付いているチーム名と背番号の

ようなもので、同じ元素でもこの数字が異なると原子(正確には原子核)の性質が違ってきます。ヨウ素に付いている 131 という背番号は専門用語で質量数といい、原子核の中味を表します。I-131 は放射線を出すので放射性ヨウ素 131 と呼びます。Cs-137も放射線を出すので、放射性セシウム素-137と呼びます。

元素名に質量数を付けて I-131 (¹³¹I) や Cs-137 (¹³⁷Cs) のように表示するとき、その



1 H 水素	2					元	素	の	周	期	表	13	14	15	16	17	2 He ヘリウム
3 LI リチウム	4 Be ペリリ ウム											5 B ホウ素	6 C 炭素	7 N 金素	8 〇 酸素	9 F フッ寮	10 Ne ネオン
11 Na ナット』リ	12 Mg 艾多素	3	4	5	6	7	8	9	10	11 1:	2	13 AI 三分表	14 SI ケイ素	15 P リン	16 S 破黄	17 CI 塩素	18 Ar アルゴン
19 K カリウム	20 Ca カルシ ウム	21 SC スカン ジウム	22 TI チタン	23 V パナジ ウム	24 Cr ரமக்	25 Mn マンガン	26 Fe 鉄	27 Co コパルト	28 NI ニッケル	29 Cu 何	30 Zn 亜鉛	31 Ga ガリウム	32 Ge ゲルマム ニウム	33 AS 比集	34 Se セレン	35 Br 臭業	36 Kr クリブ
37 Rb ルビジ ウム	38 Sr ストロン チウム	39 Y 135	40 Zr ジルコム	41 Nb ニオブ	42 Mo デジ	43 TC 李多素	44 Ru ルデニ	45 Rh ロジウム	46 Pd パラジ ウム	47 Ag ∰	48 Cd かぶ	49 In ^소 주문	50 Sn スズ	51 Sb アンチ モン	52 Te テルル	53 ヨウ寮	54 Xe キセノン
55 Cs セシウム	56 Ba パリウム	57 La ランタン	72 Hf ^フニ ウム	73 Ta タンタル	74 W タチグ	75 Re レニウム	76 OS オスミ	77 Ir 14) <u>2</u>	78 Pt 自金	79 Au 金	80 Hg 水無	81 TI タリウム	82 Pb 船	83 Bi ピスマス	84 Po 考定	85 At 深汐	86 Rn ラドン
87 Fr フランシ ウム	88 Ra ラジウム	89 AC アクチ ニウム	104 Rf ラザホー ジウム	105 Db	106 Sg シーボー ギウム	107 Bh ボーリ ウム	108 Hs	109 Mt マイトネ リウム	110 DS ダームス タチウム	111 Rg レントグ ニウム	112 Cn コベルニ シウム	113 Nh ニホニウム	714 FI 7155 754	115 MC モスコ ビウム	116 Lv リパモ リウム	117 Ts テネ シン	118 Og オガネ ソン
			┌	·超重元	素 (SH	E)											
	ラン	タノイ	58 Ce セリウム	59 Pr プラセ オジム	60 Nd ネオジム	61 Pm 孝罗玄	62 Sm サマリ ウム	63 Eu ユーロ ピウム	64 Gd ガドリ ニウム	65 Tb テルビ ウム	66 Dy ジスプロ シウム	67 HO 水点	68 Er エルビ ウム	69 Tm ツリウム	70 Yb イッテル ピウム	71 Lu ルテチ クム	
	アクチ	ノイド	90 Th トリウム	91 Pa プロトアク チニウム	92 U ウラン	93 Np ネプツ ニウム	94 Pu ブルト ニウム	95 Am アメリ シウム	98 Cm キュリ ウム	97 Bk パーク リウム	98 Cf カリホル ニウム	99 ES アインス タイニウム	100 Fm フェル ミウム	101 Md メンデレ ビウム	102 NO ノーベ リウム	103 Lr ローレン シウム	
						Ц,	超ウラ	ン元素	(TRU)			(網掛)	ナの元	素の同]位体に	ま全てた	汝射性)

図 2

一つ一つを「核種」と言います。ヨウ素には質量数が 119 から 136 まで 20 種類以上の核種が知られていますが、自然界にある I-127 を除き全てのヨウ素は放射性核種です。セシウムにも 20 種類以上の核種があり、Cs-135 や Cs-137 は放射性ですが、Cs-133 は放射線を出しません。現在知られている元素の数は 118 種類ですが、核種の数は約 3000 種あり、そのほぼ 90%は放射性核種です。

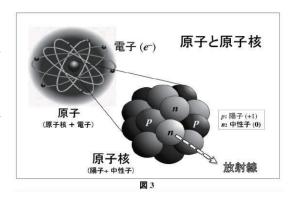
118 種類の元素をその性質に従って並べた表が**図 2** の「元素の周期表」です。左上に1 という数字と「H」いう記号をもつ水素があります。次いで 2、3、4・・・と続き、53 番目のところにヨウ素 (I) があります。セシウムは一番左の行にある 55 番元素です。このように、1番とか 55 番とか元素には番号が付いています。これを原子番号と言いますが、この数字はそれぞれの元素の原子核の中にある陽子の数に一致します。

図3に示すように原子は原子核と電子からできていて、原子核には陽子と中性子が存在します。元素は陽子の数で区別し、原子核に陽子を1個もつ元素が水素で、その原子番号は1です。原子番号53のヨウ素の原子核には53個の陽子があります。

質量数とは原子核中の陽子と中性子の数を足し合わせたものです。ヨウ素には 20 種類

以上の核種が知られていると言いましたが、同じョウ素でも核種によって原子核の中の中性子の数が異ります。ヨウ素の原子核には必ず53個の陽子がありますが、ヨウ素-131の中性子の数は131引く53で78個、ヨウ素-127の中性子数は127引く53の74です。原子核の陽子と中性子の比が異なると、原子核の性質も大きく違ってきます。

なお、I-131 と I-127 のように同じ元素に



属し質量数の異なる核種を同位体 (アイソトープ) といいます。放射線を出さないものを「安定同位体」、放射線を出すものを「放射性同位体 (ラジオアイソトープ)」と呼んで区別することもあります。

この周期表で網掛けした元素の同位体は全て放射性で、安定同位体はありません。43番のテクネチウム (Tc) と 61番のプロメチウム (Pm) も網掛けになっていますが、どちらも放射性同位体のみが知られている人工元素です。93番のネプツニウムから118番のオガネソンまでの26元素も人工元素です。白地の元素は全て自然界に存在し、放射線を出す同位体と出さない同位体が混在します。

4. 放射線の正体

放射線は 1895 年 11 月 8 日に突然発見 されました。ドイツの大学で物理学を教



図 4

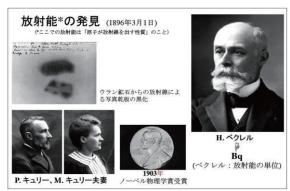
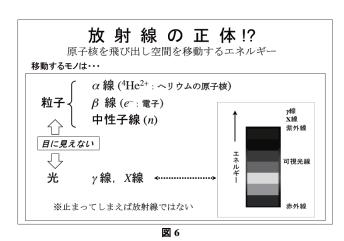


図 5

えていたレントゲン教授は、**図4**にあるような実験装置を使って毎晩ある実験を繰り返していたのですが、その日の実験で写真乾板に自分の手の透過写真が写り驚きました(図の写真は後日改めて撮った夫人の手)。彼は、実験装置から目に見えない光(?)が出ていると考えましたが、その正体をつかめなかったので「X線」と名付けました。X線は発見の翌年にはヨーロッパで広く医療に利用され、レントゲンは、X線の発見によって1901年にノーベル賞を受賞しました。ノーベル物理学賞の第1号です。

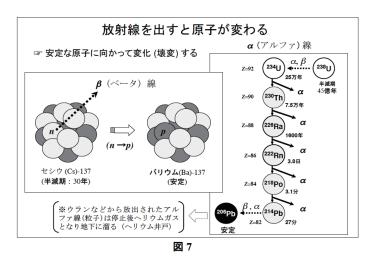
この発見に刺激を受けたのが、フランスのパリにある大学の物理学の教授だったベクレルです (図 5)。最近よく「ベクレル」という単位を耳にしますが、その呼称はこの科学者の名に由来します。ベクレルは、ウラン鉱石からX線のような目に見えない"何か"が常に出ていることを発見して"放射線"と名付けました。この"何か"は後にアルファ線



(α線) と呼ばれることになる放射線でした。図の左上の写真は、ウランから出たα線が写真乾板を黒化させたものです。同じパリで、その2年後にラジウムとポロニウムを発見したキュリー夫妻は、その原子核からも放射線が出ていること突き止め、原子が自然に放射線を出す性質あるいは現象を"放射能"と呼びました。そして、ベクレルとキュリー夫妻の3人は、放射能の発見で1903年にノ

ーベル物理学賞を受賞しました。

放射線が発見されて 120 年以上になりますが、その後の多くの研究の結果、今では放射線の正体はよく分かっています(図6)。高いエネルギー状態にある原子核が低いエネルギー状態に移るときに、その差に相当するエネルギーを粒子や目に見えない光として放出するのが放射線で、性質の違いによってα線、



 β 線、 γ 線、中性子線などと名付けられました。 γ 線とX線は両者とも目に見えない光ですが、原子核から放射されるものを γ 線、原子核の外側を周る電子がその軌道を変えるときに発生するものをX線と呼びます。

 α 線も目には見えませんが、実はヘリウムの原子核であり、 α 粒子と呼ぶことがあります。ヘリウムの原子核は陽子2個と中性子2個からできていて、+2の電荷をもちます。その原子核の外側に電子2個付くとヘリウム原子になります。お祭りなどで風船に詰めて売っているヘリウムガスです。ヘリウムガスは日本では採れませんが、アメリカ合衆国の南部にある井戸では天然ガスの副産物として大量に採取され、輸出されています。地中にあるウランやトリウムから出た α 線がヘリウムとなって地下に溜まっているのです。このように、 α 粒子が原子核を飛び出して動いているときは放射線ですが、止まってしまえばもう放射線ではありません。

ウラン-238 の半減期は 45 億年です。地球の年齢は 46 億歳ですから、地球が誕生したときに存在していたウラン-238 の半分がヘリウムに変わったことになります。 図 7(右)のようにウラン-238 は次々とα線を出し別の原子核に変化し、最後は安定な鉛-208 になります。その途中で現れるラジウム-226 はキュリー夫妻が発見したラジウムです。皆さんもラジウム温泉とかラドン温泉という名称を聞いたことがあると思います。秋田県の玉川温泉その一つで、そこでは放射性のラドンガスが空気中に漂っていて、身体に良いと評判です。

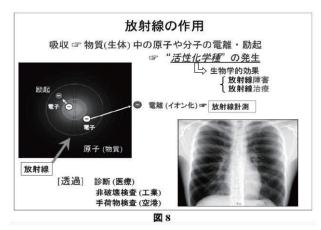
図6の β 線という用語の括弧内にeとあります。eとは電子のことです。つまり β 線の正体は電子です。ただし、この電子は原子核から出て、高いエネルギーで飛び回っている状態にあります。図7(左)はセシウム-137が β 線を出してバリウム-137に変化する様子を示します。セシウムの原子番号は55ですから、セシウム-137の原子核には137引く55で82個の中性子があります。その中性子の1個が β 線を出すと、陽子に変身します。それによって陽子が1個増えるので、原子番号は55から56に変わります。56番元素はバリウムですが、中性子は1個減るので、陽子数と中性子数を足し合わせた質量数は相変らず137です。したがって、新しく生まれた原子(核種)はバリウム-137となります。バリウム-137は放射線を出さない安定な核種です。

発見当初には正体不明だった X 線ですが、今では光の仲間であることが分かっています。光には目に見える可視光線と、目に見えない赤外線や紫外線があります。太陽から降り注ぐ紫外線はやや高いエネルギーをもっているので日焼けを起こす原因になります。紫

外線で透過写真を撮ることはできませんが、X線は紫外線の 1000 倍ものエネルギーをもっているのでレントゲン写真を撮ることができます。 γ 線は一般的に X線の 1000 倍ものエネルギーをもちます。

5. 放射線の作用

放射線のはたらき (作用) についてお話します。図 8 の左側にある絵は物質中にある原子を表し、原子核の周りを



電子が回っている様子を示しています。そこに放射線がやってくると、電子が軌道の外に 飛び出すことがあります。飛び出した電子はマイナスの電荷をもちますから、残された原 子はプラスのイオンになります。この現象を電離と言います。一方、電子は飛び出しませ んが外側の軌道に移ることがあり、これを励起と言います。

私たちの身体の約70%は水です。体内の水に放射線が吸収されると、電離や励起を経て身体の中にいろいろな活性化学種(ラジカルや活性酸素など)ができます。それによって、さまざまな生物学的効果が現れます。その一つが放射線障害ですが、うまく使えばがんの治療にも役立ちます。また、物質から飛び出した電子を捉えると、放射線を計測することができます。

作用ではありませんが、放射線はいろいろな物体を透過します。X線は医療で診断によく使われていますが、工業分野では分解せずに機器や物体の内部を調べる非破壊検査として広く利用されています。また、身近なところでは、空港での手荷物検査にも使われています。

6. 放射線の透過

放射線が物体を透過する度合いは放射線の種類や対象とする物質によって異なります。 **図9**のように、α線はコピー用紙1枚でも止まってしまいます。β線は紙を通過しますが、 アルミニウムのような軽い金属の薄い板で止まります。γ線は、軽い金属は通過しますが、 鉄や鉛のような重い金属があると止まります。会場の皆さんの何人かは歯科医院でレント

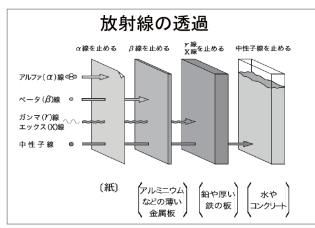


図 9

ゲン写真を撮った経験があると思います。歯の写真を撮るときに、ゴム製のエプロンを着けた記憶があるのではないでしょうか。その時、ゴムにしてはかなり重いと感じたはずです。エプロンに使われているゴムの中に鉛の粉をまぶしてあるからです。 X線が誤って別の部位に当たっても、鉛がX線を止めるので「安心してよい」ということです。

中性子線には面白い性質がありま

す。私たちの身体の中にも中性子は 存在します。私たちの身体はいろい ろな原子でできていて、中性子は水 素を除くすべての元素の原子核の中 にあるからです。しかし、その中性 子は原子核の中に閉じ込められてい て、外に出て自由に飛び回ることは ありません。それとは別に、自由に 動き回る中性子のことを中性子線と 呼びます。中性子線は原子炉の内部

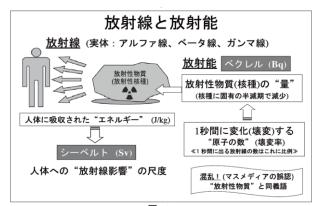


図 10

にありますが、宇宙からも飛んできます。中性子線は電気的に中性で電荷をもたないため物質との相互作用が小さく、どこまでも飛んでいきます。鉛のような重い金属でも平気で通過してしまいますが、水があると止まってしまいます。原子炉の中心部は冷却などのために水を張ったプールに浸けられていますが、水には中性子線を止めるという重要な役割も課せられています。

7. 放射線と放射能

福島第一原子力発電所の事故の後、放射線に関するさまざまな情報に触れる機会が増えましたが、皆さんは「シーベルト(Sv)」や「ベクレル(Bq)」という単位に戸惑を覚えるのではないでしょうか。それぞれ放射線と放射能の単位ですが、放射線と放射能の違いは何でしょうか。

図 10 に示すように、放射線は放射性物質から出てきます。目には見えませんが、粒子や光として実体があり、物質が放射線を吸収すると何らかの影響を受けます。放射線が人体に与える影響を計る尺度になる線量の単位が Sv です。この単位の呼び名はスウェーデンの科学者で、国際放射線防護委員会 (ICRP) の立ち上げに参画したシーベルトに由来します。

一方、「放射能」はベクレル(Bq) という単位で表されますが、これは「放射性物質 (核種) の量」のことです。先ほど、セシウム-137 が β 線を出すと、バリウム-137 という別の原子 (核種) に変化すると説明しました。この変化を"壊変"と言いますが、その 1 秒当たりの壊変率を Bq という単位で表し、放射性原子が 1 秒間に 1 個壊変するとき、これを 1 Bq と定義します。定義ですから、放射線と異なり"もの"としての実体はなく、「放射能が漏れる」とか「放射能の影響」という言い方は適切でありません。

「放射能は放射線を出す能力」との説明を耳にすることがありますが、これも適切でありません。放射能の「能」は能力の「能」ではなく壊変率のことであり、「放射性物質(核種)の"量"」であることを忘れないでください。なお、ベクレル (Bq) という単位の呼称は放射能の発見でノーベル物理学賞を受けたフランスの科学者ベクレルの名に因んでいますが、ベクレル自身は



図 11

「ウランなどの原子が放射線を出す性質」のことを放射能と呼びました。

放射能には多くの場合メガ (M, 100 万倍) やギガ (G, 10 億倍)、さらにはテラ (T, T)1兆倍)という大きな数量を意味する接頭語が付きます(図11)。なぜかというと、放射能 (Bq)を表す壊変率は原子1個1個を数えるからです。ちなみに、皆さんが料理などで「塩 ひとつまみ」というと、そこには1兆個の1億倍くらいの塩素原子が存在します。

他方、シーベルト (Sv)にはミリ (m、1000 分の 1) やマイクロ (μ、100 万分の 1) など小さ な数量を意味する接頭語が付きます。さらに小さい数量を意味する接頭語はナノです。ナ ノテクノロジーの「ナノ(n)」で、10億分の1のことです。

8. 放射能の半減期

放射能には半減期があります。半減期とは、放射能(放射性物質の量)が2分の1になる までの時間を指し、核種ごとに特定の値をとります(図12)。半減期が8日のヨウ素-131を 例に具体的に説明しましょう。ここに1万個のヨウ素-131原子があるとします。それが、 放射線を出して 5000 個に減少するまでに 8 日かかります。そして、そこからさらに 8 日 経つと、5000 個の半分の 2500 個になります。さらに 8 日経つとその半分の 1250 個と、8 日毎に半分になります。半減期が短い核種には、数時間というものもあれば、数分や数千 分の1秒のものもあります。セシウム-137の半減期は約30年ですが、セシウム-134は約 2年です。半減期は核種によって異なるので、半減期を測定すれば放射線を出している核 種を特定することができます。

図 13 は 2011 年 3 月 15 日以後の福島市の空間線量率の変化です。最も線量率が高かっ たのは 3 月 16 日で、その後はどんどん減ってきました。そして 4 月に入るとかなり減っ

てきて、5月にはその減り方が緩やかに なりました。ヨウ素-131の半減期は8日 ですから、1カ月で16分の1になりまし た。1年経つと54兆分の1になり、現在 ではヨウ-131からの放射線は検出されな くなりました。4月以降の緩やかな減少 は、半減期が約30年のセシウム-137と 半減期が約2年のセシウム-134に由来す る放射線です。この二つの核種はほぼ 1 対1の割合で飛散しました。この先、半 減期が約2年のセシウム-134は比較的速 く減りますから、空間線量率は事故か ら5年後には2分の1、30年後には4分 の1になります。

ところで、半減期が約30年のセシウ ム-137 によって汚染された食品を口に すると、体内に摂り込まれたセシウム-137 はいつまでも体内に留まるでしょう か。実はそうはなりません。ヒトの身 体に摂り込まれた物質は代謝により体

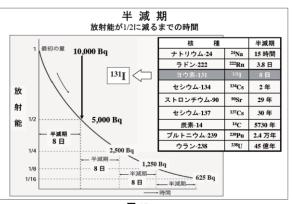


図 12

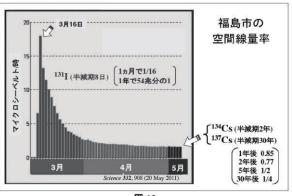


図 13

外に排出されます。ある物質の体内での存在 量が半分になるのに要する時間を"生物学的 半減期"と呼びます。これに対して、放射性 物質 (核種) の半減期を物理学的半減期と呼び 区別することがあります。ヨウ素とセシウム の生物学的半減期を図 14 に示します。どちら も若年層ほど小さな値になりますが、若い人 は新陳代謝が活発なためです。セシウムの生 物学的半減期は大人で約90日ですから、物理

生物学的半減期							
物理学的 体内の 生物学的半減期 半減期 実際の半減期							
ヨウ素-131	乳児	11日		4.6 日			
	5 歳児	23 日	8日	5.9 日			
(^{131}I)	成人	80 日		7.2 日			
				_			
	0~1歳	9日		9日			
セシウム-137	2~9歳	38日	20 F	38日			
(¹³⁷ Cs)	10~30歳	70日	30年	70日			
, ,	31~50歳	90日		89日			
食品と放射能Q&A, 消費者庁 (2011年8月25日)							

的半減期が約30年のセシウム-137を摂り込んでも実際には3ヶ月で半分になり、新たに 摂取しなければ、心配するほど長く体内に留まることはありません。

9. 身の周りの放射線

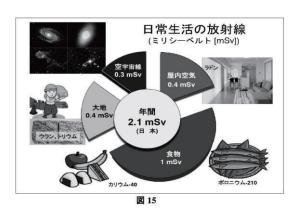
放射線は私たちの周りに常に存在します。図 15 に示すように、私たちは普段の生活で 1年間に約2 mSv の放射線を受けます (日本の平均)。その内訳は、空からくる宇宙線の線 量が約 0.3 mSv、大地から受ける線量が約 0.4 mSv です。大地には、花こう岩のようにウ ランやトリウムを含む岩石があり、そこから常に放射線が出ています。野菜や魚介類など の中にもごく微量のカリウム-40やポロニウム-210などが含まれていて、食品を通して体 内に摂り込まれる放射性物質から受ける線量は1年当たり約0.3 mSvになります。

鉄筋コンクリート造りの建物の中にいると、空気中のラドンという放射性物質から1年 間に約 0.4 mSv の放射線を受けます。ラドンとはコンクリートの骨材に含まれるごく微量 のウランやラジウムから発生する放射性の気体です(図7参照)。

10. 身体の中の放射性物質

原子力発電所の事故の有無にかかわらず、私たちの身体の中には微量の放射性物質が常 に存在します。前述のカリウム-40やポロニウム-210、それに炭素-14などです。カリウム は野菜や米をつくるときに欠かせない重要な肥料の一つですが、私たちにとっても筋肉を 動したり、神経細胞による情報伝達に欠かせない栄養素です。天然のカリウムの大部分は 放射線を出さないカリウムですが、1万個に1個の割合(0.01%)でカリウ-40が含まれま す。カリウム-40は13億年の半減期でβ線とγ線を出します。

体内のカリウムの量は体重に比例し (約 0.2%)、カリウム-40 はさらにその 0.01%ですか



身体の中のカリウム-40 (40K) 体重 60 kg のヒト: 4,000 ベクレル (Bq) **K (半減期13億年): 地球上のどこにでも存在 カリウム全体の 0.01% カリウムの全量: ヒトの体重の 0.2% (主に筋肉中) 他の放射性原子も合わせると<u>体重1 kg当たり約 100 Bq</u> 食物などに含まれる ⁴⁰K (ベクレル/kg) th 40~190 ほうれん草 70~370 こんぶ 40~370 塩化カリウム 9600

図 16

ら、体重が 60 kg の人は約 4000 Bq、体重 30 kg の子供なら約 2000 Bq のカリウム-40 をもっています。炭素-14 やポロニウム-210 など他の放射性物質と合わせると、体重 60 kg の人は総計で約6000 Bq の放射性物質を常にもっています。個人差はありますが、体重 1 kg 当たり約100 Bq です。私は違うという例外はなく、誰もがこれらの放射性物質を体内にもっています。しかし、これは大昔から続くごく自然な状態であり、病気の原因になると心配する必要はありまません。

11. 放射線の健康への影響

次に、皆さんも関心が高いと思われる放射線の健康への影響について述べます。報道等では、1 mSv という数値が頻繁に出てきて、1 mSv 以下なら大丈夫だが、1 mSv を超えたら危険だといいます。しかし、必ずしもそうではありません。

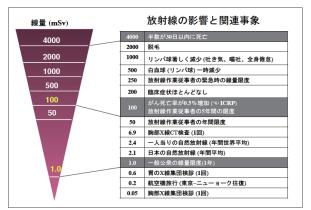


図 17



図 18

実は、200 mSv までは医学的影響をほとんど見い出せません。広島・長崎の原爆投下以来 70 年にわたり被ばく量と健康の相関について多くの研究がなされ結果が蓄積されていますが、これが科学的な事実です。ただし、500 mSv を超えると、白血球が減るなどの影響が見られます。そのため、放射線作業に従事する人(職業人)には、被ばく線量の常時測定と血液検査を含む定期健康診断が義務づけられています。

図 17 に、4000 という数字があります。全身で 4000 mSv の放射線を受けると、半数の人が 30 日以内に死亡することが分かっています。広島や長崎では、原爆により直接亡くなった人の被ばく線量は、瞬時に 4000 mSv を超えました。身近な放射線被ばくの例は胸の X 線検査です。この時の線量は 1 回当たり約 0.05 mSv です。飛行機っ乗してニューヨークを往復すると、宇宙線による被ばくが約 0.2 mSv になります。航空会社のパイロットや客室アテンダントは、週に何度も乗務しますが病気になることはありません。胃の X 線検査では 1 回当たり 0.6 mSv くらいになります。ICRP(国際放射線防護委員会)が一つの基準値として勧告しているのが 100 mSv で、この線量で公衆のがんの死亡率が 0.5%増えると見積もっています。

日常生活における被ばく量は、日本では年平均約 2 mSv ですが、ICRP は公衆の被ばく限度を年間 1 mSv としています (図 18)。この 1 mSv に法律の定めはありませんが、被ばくすることによって何ら利益を受けない人たちが不必要な被ばくを受けないための公衆の被ばく線量の限度と定め、"安心"の目安としています。この限度に医療被ばくを含めませんが、日本人の医療被ばくは平均で年に約 4 mSv です。

なお、医療や研究などで放射線を使う仕事に従事する人、つまり放射線作業従事者につ いては、良好な労働環境を守るという観点から許容される被ばく線量は年間 50 mSv 以内、 さらに5年間の合計で100 mSv 以内とすることが法律で定められています。

12. リスク (危険性) とベネフィット (便益)

図 19 に、被ばく線量と急性 放射線障害の関係を示しま す。同じ線量でも全身被ばく と局部被ばくとではその臨床 症状に大きな違いがありま す。全身に 4000 mSv の放射線 を受けると死に至りますが、 皮膚の一部の被ばくでは脱毛 (3000 mSv) や紅斑 (5000 mSv) のような症状が現れるも のの、死亡することはありま せん。このように線量が高く

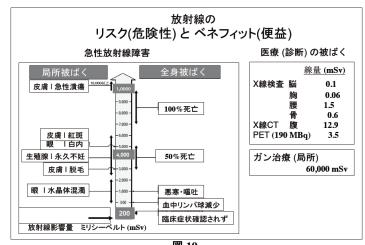


図 19

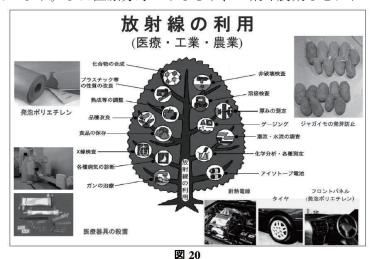
なればリスク(危険性)は増大しますが、リスクを知った上で放射線をうまく利用すれば、 大きなベネフィット(便益)が得られます。特に、医学利用の便益は大きく、最近では診 断や治療に広く用いられ、私たちの健康維持に欠かせないものになっています。

がんの放射線治療では、局所的ですが線量が 60000 mSv (60 Sv) に達することがあり ます。全身被ばくなら死に至る線量ですが、がん細胞に焦点を絞って放射線を照射してが ん細胞だけを死滅させ、通常の細胞への副作用を極力抑えるように工夫されています。と はいえ、医療被ばくのリスク低減に注意を払うことも大切で、その上で恩恵にあずかりた いものです。

13. 講演の結語

放射線と聞くと、皆さんは原子力発電所を連想するかも知れません。しかし放射線は自 然界のどこにでも常に存在しています。また医療分野のみならず、工業や農業などにおい

ても広く利用されています (図 20)。放射線が社会の幅 広い分野で役に立っている ことも忘れないでくださ い。本日は、放射線の正体 とその作用について基礎的 な話をしました。放射線の 正体を知って正しく怖が る。その判断力を身につけ ていただければ幸いです。



【資料】

食品照射の現状と課題

古田 雅一

大阪府立大学大学院工学研究科 量子放射線系専攻 放射線化学生物学研究室 〒599-8570 大阪府堺市中区学園町 1-2

[要約] 放射線照射による食品や農産物の保存技術は一般に「食品照射」と呼ばれ、照射量や照射条件を選ぶことにより、殺菌による腐敗防止のみならず、成熟、発芽、老化等、収穫後の損耗の原因となる様々な生理的変化が抑えられ、農作物や食品の保存期間延長が可能となる。2016年の報告においては60か国以上で食品照射が許可されており、年間50万トンが照射されている¹⁾。食品照射の用途の多くは殺菌が占め、果実の殺虫、芽止めなどの利用がそれに続く。その中で果実の殺虫への応用が顕著に伸びている。

1. はじめに

20世紀における急速な科学技術の発達は、人類の生活向上に多大に貢献した一方、地球温暖化やオゾン層の破壊による有害紫外線の増加など、顕著な地球環境の悪化をもたらした。地球環境の悪化は地球上の様々な地域において異常気象をもたらし、農業生産に悪影響を及ぼしている。その結果、急激な人口増加にあえぐ発展途上国を中心に慢性的な食料不足が懸念される事態となっている。これを解決するためには限られた農地を活用した農業生産の集約化、効率化に加え、収穫後の損耗を減らすための食糧保存技術の拡充の必要性が指摘されて久しい。一方で、コールドチェーンが発達し、十分な衛生状態にあるとされてきた先進諸国は、いまだに食中毒の発生に悩まされているのが現状である。これは加工食品の大量生産・流通及び外食産業・給食産業の急激な発達に伴い、製造過程における微生物汚染が工場内で拡大し、大規模な食中毒発生につながる危険性が指摘されている。同時により新鮮で風味豊かな食品への要望が高まり、加熱殺菌に代わる新たな殺菌技術が求められている。これらの要望にも食品への放射線照射、すなわち食品照射は有効に応えることができる。

本稿においては、放射線や放射線の持つ殺菌作用について解説するとともに、国内外における食品照射実用化の動向と課題についても触れたい。

2. 放射線とは? 食品照射とは?

空間に電場が生じると周りに磁場が生じ、これらが次々に波として伝わるのが電磁波であり、放送や通信に使われる電波をはじめ、日常生活や産業界において広く利用されている赤外線、可視光線、紫外線はすべて電磁波の一種である。電磁波は波長が短くなるほど高いエネルギーを持ち、上記の電磁波の中で最も波長が短い紫外線は分子を励起し、化学反応を生じさせることが可能となる。ガンマ線、エックス線などの放射線は紫外線より短波長の電磁波でより高いエネルギーを持つ。従って物質に対して高い透過性を持ち、原子や分子を励起または電離する能力を持つ。また電子やイオンも加速器を用いて加速することができ、物質に対して励起・電離作用を持つ高エネルギーの電子線やイオンビームとして利用することができる。このような特性を持つ電磁波と粒子線を併せて電離放射線と呼ぶ。電離放射線が物質に照射されるとエネルギーが物質に吸収され、その量はグレイ(Gray)という単位(Gy)で表され

る。これは一キログラムの物質に1ジュール (J) の放射線のエネルギーが吸収されたことを示す。10 kGy は水の温度を2.4℃上昇させるのに必要な熱量に匹敵し、電離放射線を用いることにより軽微な温度上昇で有効に殺菌可能であることがわかる。

電離放射線が生物に照射されると、放射線が直接 DNA、RNA などの核酸、タンパク質など生体物質と反応する「直接作用」と放射線が細胞内の水を分解して生成した OH ラジカル、水和電子などの'活性酸素'が二次的に生体物質と反応する「間接作用」によりゲノム DNA が切断されることがある。これが修復されないと細胞は死に至る。この細胞致死作用を農作物や食品に利用したのが「食品照射」である。例えばジャガイモ、タマネギ、ニンニクなどの根菜類に 30~150 Gy の放射線が照射されると放射線感受性の高い芽の細胞が不活化されるため、室温での長期間の保存が可能となる。また芽止めに要する線量よりも高い1 kGy までの線量域では果実類や穀類の殺虫が可能となる。さらに殺滅菌に関しては、一般的に食中毒や腐敗の原因になる大腸菌、緑膿菌 (Pseudomonas) などの栄養細胞型の細菌類は他の微生物種に比べ放射線感受性が高いため、生鮮食品や冷凍食品の食中毒菌の殺菌には低線量 (3 kGy程度) の照射で十分衛生化の目的が達成できる。一方、香辛料は Bacillus 属はじめ、土壌由来の細菌芽胞で汚染されている場合が多く、汚染菌数も場合によってはグラムあたり 10⁷ 個に達する場合もあり、10 kGy程度の高線量の照射が必要となる。表1に食品照射の各処理についてまとめて示す。

表 1. 食品照射の利用法

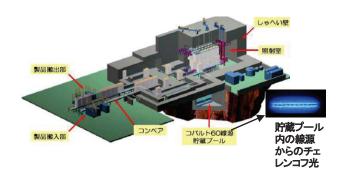
照射の目的	線量(kGy)	対象品目
発芽及び発根の抑制	0.03~0.15	馬鈴薯、タマネギ、ニンニク、甘藷、エ
		シャロット、ニンジン、栗
殺虫及び不妊化	0.1~1.0	穀類、豆類、果実、カカオ豆、ナツメヤシ、豚肉(寄生虫)、飼料原料
成熟遅延	0.5~1.0	バナナ、パパイア、マンゴー、アスパラガス、きの こ (開傘抑制)
品質改善	1.0~10.0	乾燥野菜(復元促進)、アルコール飲料(熟成促進)、コーヒー豆(抽出率向上)
殺菌(Radurization)	1.0~7.0	果実、水産加工品、畜肉加工品、魚
殺菌(Radicidation)	1.0~7.0	冷凍エビ、冷凍カエル脚、家禽肉、飼料原料
殺菌(Decontamination) または(Sanitization)	3.0~10.0	香辛料、乾燥野菜、乾燥血液、粉末卵、酵素製剤、 アラビアゴム、コルク
滅菌(Radappertization)	15~50	畜肉加工品、病人食、宇宙食、キャンプ食、実験動 物用飼料、包装容器、医療用具

放射線には多くの種類があるが、食品照射に利用できるのは、コバルト60 (60Co) およびセシウム137 (137Cs) のガンマ線、エネルギーが1000万電子ボルト(10 MeV)以下の電子線、エネルギーが500万電子ボルト(5MeV)以下のエックス線に限られている。これらのエネルギー範囲の放射線を使用するかぎり、照射した食品が放射能を帯びる心配はない。これらの中で現在、最も多く利用されているのは食品中での透過力が高い60Coガンマ線(1.13、1.31 MeV)であり、我が国で唯一実用化されているジャガイモの芽止めをはじめ、タマネギ、ニンニクなどの根菜類の芽止めには60Coガンマ線が利用されている。60Coは原子炉の中で天然に存在する金属コバルト

(5%Co) に中性子を照射して製造され、ペレットに成形してステンレス製のカプセルに封入して使用されるため、処理時に食品などが線源(放射性核種)に接触することはない。137Cs は商業用施設には利用されていない。電子線は電子加速装置により軌道電子を加速して得られる。電子線はガンマ線に比べて単位時間当りの線量、すなわち線量率が圧倒的に高いため、処理能力が優れているが、ガンマ線に比べて透過力が小さいため、厚さを自由に制御できる粉体、流体、液体状の食品に利用が限られる。現在では小麦の殺虫や冷凍肉類の殺菌に比較的エネルギーの高い電子線が利用されている。5 MeV エックス線は電子加速器装置により得られた加速電



図1 北海道士幌農協におけるジャガイモの芽止め照射



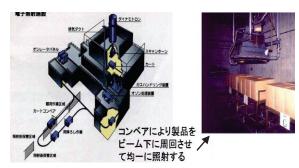


図 2 国内滅菌用ガンマ線照射施設(上)と電子線照射施設(下)

子をタングステンやタンタルなどの重金属のターゲットに衝突させて得られる。加速電子がエックス線に変換される際の変換効率は小さいが(約8%)、エックス線は加速電子線と異なり、物質中の透過力は大きいので根菜類、果実類など体積の大きい品物の処理には有利である。現在、ハワイにおいて果物の殺虫において利用されている。食品の放射線殺菌には、放射線滅菌用の照射施設がそのまま利用可能である。図2に国内の典型的な滅菌用照射施設の外観を示す。製品はコンベアで厚いコンクリート壁で遮蔽された照射室に運ばれ、60℃の線源の周りを移動しながら照射される。この過程においては製品が線源とは離れた位置に存在し、線源から放出された放射線のみが吸収されるため製品自体に線源の放射能が移ることはない。しかしながら、照射される製品が食品である場合、線量が医療用具よりは一般的に低いこと、香辛料など香味の強い食材を医療用具と同じ施設を用いて処理する場合には香味や臭気が他の製品に移らないように工夫することが必要となろう。

食品照射には、常温で殺菌でき、残留しない、従って食品の変質の心配が少ない、耐性菌が現れにく い、という利点がある。特に加熱により品質が劣化する香辛料・ハーブ類、生鮮野菜、冷凍食品の殺菌 には食品照射が向いている。実際に殺滅菌に使われる放射線は透過力が高く、容易に高強度の放射線が 得られるという実用的観点から放射性同位元素 ®Co から得られるガンマ線、加速器により得られる高エ ネルギー電子線が主に利用されている。放射線の強い透過力のため最終包装された製品の内部に対して も十分効果が発揮できることも食品照射の利点である。殺菌条件の決定後の工程管理については、加熱 の場合、温度分布、温度上昇に要する時間など複数のパラメータを管理する必要があるが、放射線殺菌 の場合は線量測定のみでよい(ドシメトリックリリース)という利点がある。従って今後、食品衛生を 保証するための HACCP 構築にも放射線殺菌は寄与するものと考えられる。放射線照射は臭化メチルな ど、オゾン層破壊の原因物質の一つとされている殺虫剤、発がん性が懸念されるポストハーベスト農薬 とは異なり、農産物や食品に残留しないため環境や人体への危害もない。また 6°Co ガンマ線、10 MeV 以内のエネルギーの電子線であれば製品が照射後に放射能を生じる心配はない。他方、欠点としては、 食品によっては味や匂いの変化を生じることがあり、食品ごとに品質に与える影響(材質劣化や成分分 解など)を調べ、放射線照射が適用可能かどうか判断する必要がある。またこれらの放射線を使用する ためには法律(放射線障害防止法)で定められた放射線漏洩の生じない堅牢な照射施設の建設が必要であ り、厳正な放射線管理が要求される。

2. 照射食品の健全性

レントゲン博士により放射線が発見された 1895 年の翌年にはエックス線照射により細胞が不活化することが知られていたが、実際に食品照射の研究が本格化したのは第二次世界大戦後である。米国におけるジャガイモの芽止めの研究を皮切りに、わが国も含め世界各国で研究がすすみ、1950 年代には殺菌、殺虫、熟度調整など、現在用いられている食品照射の技術が確立した。その後、60 年代から 70 年代にかけて FAO/IAEA/WHO などの国際機関や各国の研究機関において安全性の検討が行われるようになった。

これらの検討の中で、照射食品が人間の健康に及ぼす影響については、安全性よりも広い概念の健全性が検討されている。健全性とは、毒性学的安全性、微生物学的安全性、栄養学的適格性の3項目を総合した概念である。すなわち、食品照射による急性毒性、慢性毒性、発ガン性、遺伝毒性、細胞毒性、催奇形性、変異原性などの毒性の増加や、放射線照射による汚染微生物の突然変異や放射線抵抗性の高い汚染菌の異常増殖、栄養価の低下、アレルゲン生成などの総合的な安全性を指す。

照射食品の健全性は、長い年月をかけて得られた膨大な試験結果に基づいて判断されている。その中には食品照射の安全性に疑問を呈する研究結果もあり、例えば、1972年に発表された「芽止めジャガイモのアルコール抽出物の中にマウスの染色体異常や慢性致死を引き起こすラジオトキシンと称する毒素が存在する」という報告、1975年に発表された「0.75 kGy 照射した小麦を 4~6 週間摂取した栄養失調児の末梢血液細胞で倍数細胞(ポリプロイド、多倍体細胞)が増加した」という報告が代表的なものである。これらの報告は後の追試によりすべて否定された。すなわち、1970年に始まった国際食品照射プロジェクト(IFIP)及び各国独自の試験結果に基づいて、1980年にジュネーブで開催された FAO/IAEA/WHO 合同の照射食品の健全性に関する専門家委員会(JECFI)は、「平均線量が 10 kGy 以下の放射線を照射したいかなる食品も毒性を示すことはなく、したがって、10 kGy 以下照射した食品の毒性試験はこれ以上行う必要がない。さらに、10 kGy 以下の平均線量を照射した食品は、特別の栄養学的な問題や微生物学的な問題もない」という結論を出した。

この勧告を受けて、1983年にFAO/WHO国際食品規格委員会(Codex委員会)は、食品に平均10 kGy以下の線量の放射線を適切に照射して国際間で流通させるための基本的な規格として、「照射食品に関する国際一般規格」と「食品照射実施に関する国際規範」を作成した。

このような照射食品の健全性に対する評価にもかかわらず、各国に照射食品に対する不安や反対運動があるので、WHO は 1994 年に照射食品の健全性について再評価し、その結果、問題ないことを"Safety and Nutritional Adequacy of Irradiated Food"という本の形で公式の見解を表明した。わが国でも、翻訳本がコープ出版から出版されている。さらに、1997 年 9 月には WHO の専門家委員会が 10 kGy 以上照射した食品の健全性についても問題がないという見解を出しており、この結果に基づいて、2003 年に国際食品規格(Codex)の関連文書も改訂された。

一方、放射線照射により食品中の脂質から特異的に生成するとされ、照射検知法の指標として利用されている 2-アルキルシクロブタノン類 (2-ACBs) の毒性についての懸念が想起され、2-ACBs を対象とした照射食品の安全性試験が 1998 年から 2000 年代にかけて欧米を中心に実施された。その結果、変異原性は、いずれの試験においても認められなかったものの、 $in\ vitro$ の遺伝毒性試験における DNA 損傷性の発現や、ラットの 2 段階発がんモデル系において、大量の 2-ACBs を飲料水とともに投与すると、発がんプロモーション作用が認められたとの報告がなされた。しかし WHO などの国際機関は 2003 年、実際の照射食品中での生成量は極めて微量(パルミチン酸由来の 2-dDCB で、3 kGy 照射食鳥肉 100 g あたり 12.9μ g 程度)であり、過去に行われた 2-ACBs を含有する照射食鳥肉の長期動物投与試験結果などを根拠に、照射食品中の 2-ACBs を問題視する必要はないという見解を示している。これは後に述べる筆者らの検討においても確認されている20。

1998年~2001年にかけてアイルランドにおいて報告された照射滅菌飼料を摂取したネコに現れた leukocephalomyelpathy (LEM) (白質脳症)症は食品照射の安全性に対する新たな懸念材料となっているが、ヒトの発症例は報告されていないため、WHOやEUは、これらの報告だけで照射食品のヒトに対する 安全性に関する評価はできないとの立場を取っている³⁾。

一方、わが国においては、1967年から 1981年の期間、原子力委員会のもと食品照射特定総合研究が実施され、馬鈴薯(発芽抑制)、タマネギ(発芽抑制)、米(殺虫)、小麦(殺虫)、ウインナーソーセージ(殺菌)、水産練り製品(殺菌)、ミカン(表面殺菌)を対象とした試験研究が行われた。この試験研究において、これら 7 品目の照射食品の健全性には問題のないことが明らかにされている 4。この結果に基づいて、1972年に馬鈴薯のガンマ線照射が許可されて、1974年1月から北海道の士幌町農業協同組合で馬鈴薯の照射が実施されている。

さらに、国際的に疑問を投げかけられている安全性に係る問題について再検討するとともに新しい評価手法で照射食品の健全性を評価することが必要であるとの認識から、1986年から 1991年までの 6年間、日本アイソトープ協会は「食品照射研究委員会」を設けて、誘導放射能、食品成分の変化(香辛料の香味変化、照射ジャガイモのビタミン C 含量)、変異原性、微生物学的安全性(照射後の微生物のボツリヌス毒素やアフラトキシンの産生能の変化)について、最新の手法を用いて再試験を行った。その結果、すべての照射食品の健全性に問題のないことが確認された 50。 我が国では筆者らが照射食品中に含まれる 2-ACBs の遺伝毒性や発がんプロモーション活性の可能性について 欧米での報告よりもさらに厳しい条件で検討したが、2-dDCB および 2-tDCB の遺伝毒性は確認されず、また、ラットにおける 2-tDCB の大腸がんモデル実験系での発がんプロモーター活性も確認できなかった 20。

3. 食品照射についての国際規格

前述のCodex 照射食品の一般規格においては、照射施設における工程管理を適正に行うために、日付や食品の種類や線量などの条件の適切な記録と保存が求められている。また、照射食品の市場流通においては、消費者が照射食品と非照射食品を適切に選択できる権利を保証するために照射食品には照射されたことを示す表示を義務付けている。具体的には、「包装済み食品に関する国際一般規格(CODEX STAN 1-1985」12)で、容器包装に言葉による表示を行うこと、「照射食品の一般規格」で、ばら売りの食品に照射食品のシンボルマークとされているロゴ(Radura)を義務付けているの(図3)。

一方、WTO (世界貿易機関) 下の SPS 協定においては、植物防疫の分野では、IPPC (International Plant Protection Convention: 国際植物防疫条約) が定める「植物検疫に関する国際基準 (ISPM)」が唯一の国際規格となる。2003 年 4 月に

は、「放射線照射を植物検疫処理法として利用するための指針(ISPM#18)」10)が採択され、放射線照射処理は国際的に認知された植物検疫処理となった。さらに、オゾン層破壊の懸念のある臭化メチルの削減に向け、国際的にも放射線処理に代替技術としての大きな期待が寄せられており、「規制有害動植物に対する植物検疫処理(ISPM#28) Annex1~14」には、個別の検疫害虫の具体的な消毒処理基準としての最低吸収線量が設定されているで。



図 3. 食品が照射されたことを示すロゴマーク 左:我が国の芽止めジャガイモ。

右: Radura マーク

4. 食品照射の世界の実用化の現状

1970年代の健全性検討により80年代に照射食品の健全性が国際的に確立した結果、徐々に食品照射を許可する国が増加し、90年代に入ると、米国で家禽肉、赤身肉の照射が許可されるなど、米国内での利用機 運が高まったほか、欧州でもオランダ、ベルギー、フランスを中心に食品照射が進んだ。2000年代に入ると欧州では処理量は減少したが、逆にアジア地域では中国東南アジアを中心に順調似利用が拡大している。また最近では検疫の目的として従来用いられてきた臭化メチルがオゾン層破壊物質として国際的に禁止されるに従い、代わりに放射線による殺虫が急速に伸びており、熱帯果実の二国間貿易も活発化している」。

2005年のデータでは、処理量千トン以上の国は 16 カ国であり、世界における処理量の総量は 405,000 トンであった。地域別では、アジア・オセアニア地域が 183,000 トン(45%)、米国地域 116,000 トン(29%)、アフリカ・ウクライナその他の地域が 90,000 トン(22%)、欧州が 15,000 トン(4%) である。品目別では、香辛料類の殺菌 186,000 トン(46%)、穀物・果実の殺虫 82,000 トン(20%)、ニンニクなどの発芽防止 88,000 トン(22%)、肉・魚介類の殺菌 32,000 トン(8%)、その他 1.7 万トン(4%) である。香辛料の殺菌が半分近くを占めている 80。

2010年のデータでは、アジア 351,200トン、欧州 9,300トン、米国 103,000トンであった。2005年と比較して、アジアは 168,000トン増加、欧州は 6,000トン減少、米国は 11,000トン増加している。この 5年間での変化は、特にアジア地域での増加が顕著であるが、その大部分は中国の 120,000トンとベトナムの 50,000トン増である。その他のアジアの国では韓国の減少を除いて余り大きな変化は見られなかったが、2005年時点では照射実績のなかったパキスタン、バングラデシュなどで実用照射が開

始された。

一方、欧州では、ベルギー、オランダ、フランスで食品照射が活発に進められてきたが、1999年に表示違反が厳しく取り締まられるようになり、2005年には15,000トン、2010年には9,300トンと激減してきている。しかし、欧州全体の処理量が減少する一方で、スペイン、エストニア、ルーマニアなど新規の食品照射実施国も生まれている。

米国は、2005年は香辛料80,000トン、果実・野菜類4,000トン、牛挽肉および食鳥肉8,000トンの合計92,000トンの処理量であったが、2010年は103,000トンに増加した。5年間の増加分は、近年、アジアおよび中南米諸国で積極的に進められている植物検疫のための照射果実の輸入量であり、米国内での照射量は2005年とほぼ同じと考えられる。なお、メキシコは果実の照射が急増しており、2010年には10,318トンに達した。2013年11月中国、上海で開催された国際放射線プロセス会議(IMRP2013)での情報によると、中国の処理量は2011年に540,000トン、2012年に765,000トンと急激に伸びており、2012年の全世界における食品照射処理量は100万トンを超えたものと推定された。2016年11月にカナダ、バンクーバーで開催された放射線プロセス会議(IMRP2016)においても照射された食品量は50万トンでその40%は中国が占めていると報告されている。同会議においては中国から調味鶏足やベトナム国境におけるミカンの検疫用照射施設など多彩な報告が見られた。中国では自国で開発した加速器や照射施設により、自国内の市場を固めつつあるようである。また熱帯性果実の検疫照射に関してはラテンアメリカから米国への果物輸出が堅調であることが報告された。今後は熱帯果実の二国間貿易における検疫用の照射を中心に食品照射の需要はさらに伸びることが期待される%。

4. 我が国の現状と今後の展望

我が国においては1972年に世界に先駆けて許可されたジャガイモの芽止めが北海道の士幌農業協同組合において40年以上にわたり実用化されている。最近では年間約数千トン程度の芽止めジヤガイモが国内市場で流通しているといわれている⁹⁾。一方、21世紀に入ると海外における照射食品の流通拡大に伴い、輸入農産物や食品の中に放射線照射されたものが見つかる事例が多く見られるようになった。我が国においても2000年にはこのような状況を受け、2000年に全日本スパイス協会から放射線殺菌の利用の許可申請が厚生労働省に提出されたが、現在においても審議は進んでいない。一方で検疫処理として輸入農産物の放射線照射の有無を検知する必要性が高まり、すでにEUや国際機関で公定法として確立していた10種類の検知法について厚生労働省は独自に検証を行い、その成果に基づいて、2007年7月に香辛料や乾燥野菜に適用するTL法を通知した。その後も研究を続け、TL法での適用食品を拡大するとともに、2010年には、脂質を含む食品を対象とした2-アルキルシクロブタノン法を、さらに、2012年9月には、骨ラジカルと糖結晶ラジカルを測定対象としたESR法を通知した¹⁰⁾。

熱ルミネッセンス (TL) 法は照射食品に付着した鉱物物質 (ケイ酸塩) を分離し、放射線照射によってトラップされた不対電子を熱的に励起して放出される光を検出することで放射線照射の有無を判定する方法であり、香辛料・ハーブ類やエビや貝など土壌や砂に由来する鉱物質が含まれる可能性が高い食品に適用可能である。2-アルキルシクロブタノン法は肉類や卵、チーズなどの動物性食品や、脂質を多く含む植物種子などにおいて、脂肪 (トリグリセリド) の放射線分解によって生成する放射線特異的分解生成物である 2-アルキルシクロブタノン化合物を GC/MS などによって検出する。ESR 法は照射によって、肉類などの骨に生成するラジカル、乾燥果実などに含まれる結晶性の糖に由来するラジカル、植物組織中のセルロースに由来するラジカルなど比較的安定なラジカルを電子スピン共鳴装置により検出する方法である 6。

これらの方法はそれぞれ適用可能な農産物や食品が限られており、実際の運用にあたっては、状況に応じ、これらの方法を取捨選択、場合によっては組み合わせて利用することが必要となる。すべての食品を一律に分析できる方法の開発を目指し、筆者は大阪健康安全基盤研究所のメンバーと共同で食品に普遍的に含まれている DNA の放射線損傷生成物を指標とした新たな検知法を開発し、肉類、香辛料に対して有望な成果が得られつつある 110。

一方、1996年の大阪府堺市内で発生した大規模な病原性大腸菌による食中毒事件を始め、21世紀に入っても生肉汚染が原因の食中毒が頻発しており、2011年4月に発生した病原性大腸菌 0111株の汚染による生牛肉「ユッケ」の食中毒事件や牛生レバーの病原性大腸菌 0157株の汚染による食中毒事件を契機に生肉の衛生に関わる法的規制が強化され、特に生レバーについては"従来の衛生管理技術では完全な殺菌処理が不可能"という理由で流通が禁止された。これは胆管を通じて腸管に常在する病原性大腸菌 0157株がレバー内部に移行して存在する恐れがあり、生の状態を保ったまま内部まで殺菌する適当な方法が現状で見当たらないとされたためである。しかしながら生レバーを食したいという強い要望とともに透過力の高い放射線による殺菌への期待が消費者から提示され、現在、厚生労働科学研究により生レバーの放射線殺菌の有効性について検討が行われている10。

一方、食品の包装容器やキャップ類、焼き鳥の竹串、割り箸、トレイなど食品の包装材料の滅菌への放射線利用は近年着実に拡大している。さらに、1 MeV 未満の放射線は放射線障害防止法の適用外とされているため、放射線管理の必要がなく、低エネルギーの電子線照射装置がペットボトルの無菌充填包装機に組み入れられるなど食品工場における放射線利用の実用化も進みつつある ¹²⁾。これは従来用いられてきた過酸化水素、過酢酸などの洗浄除去や安全性の担保にかかるコストが大きく、残留性のない物理的殺菌法としての放射線の有効性が認められてきた証といえる。

一方、社会に対する知識普及の推進に関しては、食品照射に関するわが国唯一の学術団体である日本食品照射研究協議会が、研究発表会や学会誌[食品照射]を通じて研究発表や様々な情報提供を行ってきた(http://www.jrafi.jp/)。また関西地域では「放射線利用促進協議会(JAPI)」

(http://www.taishitsu.or.jp/JAPI/japi/japi_index.html) も同様の活動を行っている。さらに筆者らは消費者が実際の照射された製品に触れ、その有効性を実感することが食品照射の理解促進に重要であると考え、北海道士幌農協から取り寄



図4 「みんなのくらしと放射線展」における照 射香辛料の香り体験

せたガンマ線照射芽止めジャガイモやガンマ線殺菌を行った黒コショウ、バジル、ターメリックを放射線や放射線利用の知識普及を目的とした「みんなのくらしと放射線展」などの科学イベントにおいて展示してきた¹³⁾ (図 4)。その結果、ガンマ線殺菌された香辛料の色や香りの良さは一般消費者によっても十分体感され、放射線殺菌に対する理解促進の一助となっている。

一方、食品照射に対する反対運動も活発化しており、芽止めジャガイモを販売しているスーパーマーケットや芽止めジャガイモを展示した科学イベントの主催団体に抗議文書を送ったり、政治家による議会質問や要請文書などで新たな食品照射の許可を行わないように要望する活動を継続的に行っている。残念ながら反対派が芽止めジャガイモの危険性の科学的根拠としているのは誘導放射能や発がんプロモーション活性を有する 2-アルキルシクロブタノン類の生成である。しかし先に述べたように 60co ガン

マ線のエネルギーではジャガイモに含まれる元素に放射能を生じる核反応は実質上生じないことが理論 上明らかであり、自然放射線が十分遮蔽された鉄室内でのゲルマニウム半導体検出器による分析におい ても新たな放射能は検出されない。また 2-アルキルシクロブタノン類は食品の脂質成分の放射線分解 により生じるものであり、脂質含量の極めて低いジャガイモからガンマ線照射で生じる 2-アルキルシ クロブタノン類は極めて微量であると考えられる。

このような過去の誤った研究報告を根拠にした反対運動により誤った情報が消費者に伝わると食品照射に対する不安のみならず放射線に対する不安感を助長し、次世代を担う子供たちの科学リテラシーに対して悪影響を及ぼすおそれがある。これらに対処するために、学校における放射線教育を拡充するとともに専門的な食品照射の健全性研究の方法論や結果の解釈をわかりやすく一般消費者に伝える活動を継続することが重要であると考える。

参考文献

全般:

- ・第50回記念大会特集 食品照射研究の歴史と現状、食品照射、49、第50回記念大会特集号、47-122 (2014)。
- ・古田雅一、放射線照射による食品殺菌の現状と課題、食品と科学、3-2017、pp. 51-57(2017).
- 1) 古田雅一、1MRP2016 バンクーバー会議参加報告 (2) 食品照射分野、放射線と産業、No. 142 60-65 (2017) 古田雅一、照射食品の誘導放射能の評価. *食品照射*. **41**、p. 23-31 (2006).
- 2) 古田雅一、我が国で行われた 2-アルキルシクロブタノンの毒性試験 食品安全委員会 食品健康 影響評価技術研究(2009~2011 年度)の実施内容を中心に一、食品照射 **50**(1)、29-46(2015)
- 3) 古田雅一、最近の食品照射の国際動向 -欧州食品安全機関 (EFSA) の見解を中心に- 食品照射 **46** (1)、27-31 (2011)
- 4) 古田雅一、照射食品の健全性、FFI ジャーナル、209(12)、1069-1078 (2004)

Natural and induced radioactivity in food. IAEA-TECDOC-1287 IAEA April 2002.

- 5) 日本アイソトープ協会 食品照射研究委員会 研究成果最終報告書(1992年 12月)
- 6) 古田雅一、食品の放射線照射の現状と展望、生活衛生、55(1)、23-33(2011).
- 7) 等々力節子、https://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/files/52_p41.pdf
- 8) Kume T. Furuta M. Todoriki S. Uenoyama N. Kobayashi Y. Quantity and economic scale of food irradiation in the world. *RADIOISOTOPES* 2009; **58**, No. 1: 25-35.
- 9) Kume T., Todoriki S., Food Irradiation in Asia, the European Union, and the United States: A Status Update, *RADIOISOTOPES* 2013; **62**, No. 5 291-299
- 10) 食安発 0910 第2号、平成24年9月10日
- 11) 福井直樹、5,6-ジヒドロチミジンを検知指標とした LC-MS/MS による新規照射食品検知法の開発に関する研究、大阪府立大学博士論文 2018年2月
- 12) 古田雅一、福田直晃、食品容器殺菌への放射線利用の現状と展望、FFI JOURNAL Vol. 221、No. 4、297-300(2016)
- 13) 古田雅一、「みんなのくらしと放射線展」を通してみた照射食品に対する消費者意識. ESI-NEWS 2004; **22**、No. 7:320-324.

福島県で放射線教育を続けて

議部 久美 神戸学院大学研究支援グループ 〒651-2180 神戸市西区伊川谷町有瀬518番

放射線教育が行われていたら、このような大混乱は起こらなかっただろう。東日本大震 災に続き東京電力福島第一原子力発電所が起こした原子力災害による社会の混乱である。

福島第一原子力発電所の炉心冷温停止の失敗により水素爆発が起き、原子炉建屋から漏れ出た放射性物質が福島県を中心に拡散した。これにより各地で放射線量率が上昇し、双葉町上羽鳥では 1590 μ Gy/h (2011 年 3 月 12 日、モニタリングポスト)、福島市では 24 μ Sv/h (同日)を観測した ii 。放射線量率の高い地域の住民は強制避難を強いられた。警戒区域と呼ばれるこの区域は、外部被ばく線量が年間 20 mSv を超えると想定され、人は居住できないし、立入る際は、住民であっても許可が必要となる。後に警戒区域は、避難区域と名前を変え、放射線量率の軽減とともに避難区域は縮小しつつある。

事故対応への政府非難は承知しているが、早期の住民避難と屋内待機指示、早い時期に 農作物を出荷制限したことで、住民の外部被ばく量、内部被ばく量とも軽減できたことが 分かっている。後日、UNSCEAR (原子放射線の影響に関する国連科学委員会) は、福島の 原子力災害により急性影響、晩発影響とも健康被害を起こす被ばくはないだろうと結論づ けている¹⁾。しかしながら、得体の知れない放射線が及ぼす健康被害への不安、枝野元官 房長官の「直ちに健康被害は出ない」の発言、小佐古内閣官房の涙の辞任会見、錯綜する 情報、専門家達の意見の相違は、住民の不安と政府への不信感をますます深めるものとな った。

筆者は、福島県を中心に、放射線の正しい知識の普及のための支援活動を8年間続け、



図1 緊急被ばくスクリーニングの風景

福島訪問は100回を超え、放射線講習は70回を超えた。筆者のこれまでの活動を通して、福島の皆様の葛藤と復興への取り組みを紹介したい。

神戸学院大学は、被災地支援活動に力を入れている。文部科学省の要請による緊急被ばくスクリーニングのため、初めて福島に入ったのは事故から3ヶ月経過した頃だった。この時期、福島に行くことは、周囲からは決死の覚悟と捉えられていたようだ。家族は、危険な場所へ

i News Release 経済産業省 平成 23 年 10 月 20 日「放射性物質放出量データの一部誤りについて」

ii https://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16025d/jikogo-post.html

なぜ行くのかと涙を浮かべて訴えた。福島に行く際に、飛行場まで公用車で送迎するよう、 学長が指示を出した大学もあったらしい。

緊急被ばくスクリーニングとは、緊急避難した住民が、一時的に警戒区域内の自宅に帰宅することを許されて必要な家財を持ち帰ったり、留守の自宅の備えなどをした後に、警戒区域から出る際に行う汚染検査である(図 1)。一時帰宅はおよそ 2 時間程度だった。住民はマスクと防護服を着用し、個人被ばく線量計を装着する。住民が自宅から持ち出した物は、家族の着替えや日用品、位牌、おもちゃが多かった。スクリーニングレベルは、GMサーベイメーターで人は 13,000 cpm、物品は 100,000 cpm、消音して行った。福島第一原発を立地している大熊町、双葉町の住民の場合、2 時間の立入りで平均数十 μ Sv の外部被ばく線量になる。被ばくによる健康影響を説明する担当だった筆者は、この程度の被ばく量なら問題はないと説明したところ、「そんなの信じないわ」と言う女性がいた。ある中年男性から「家に戻れますか?」と尋ねられ言葉を失った。この線量だと 1 年間で 100 mSv を超える。「戻れるといいですね。」としか返すことができなかった。

原発事故のおよそ1年後、ようやく住宅の除染が始まった頃、福島市に環境省除染情報プラザ(現環境省環境再生プラザ)が開設され、放射線専門家講師として登録し現在に至っている。福島県で生活して受ける線量では健康被害は起こらないこと、放射線は身の周りにもあり、放射線が怖いのではなく放射線を受ける量が多くなると怖いことをできるだけ分かりやすく示しながら講演していくことになった。

2012 年 4 月、福島市内で最初の講師を務めた。この頃住民は、一日も早い自宅の除染を望んでいたが、除染は線量率の高い地域から順次行われるため、線量の軽減がまだまだ先になることへのもどかしさがあった。原発事故から 1 年が経過しても、放射線に関する情報が錯綜していたし、放射線の健康影響を過大に煽る情報も多かった。自主避難者(避難指示が出ていない地域であっても自身の判断で避難した人)が最も多かったのもこの頃ではないだろうか。当時の講演では、福島に留まって生活していても安全を確信できる内容を中心にした。原発事故による一般公衆の緊急時の追加年間線量が 1 mSv から 20 mSv に引き上げられたことについての「最適化」を一般の方が理解することは難しい。緊急時 20 mSv は国際的な合意を得ていること、健康影響を十分考慮した被ばく線量であること、避難して慣れない土地で生活するリスクと福島で暮らして被ばくするリスクでは、後者の方がはるかに低いことを話した。実際この頃、福島県の人が避難先で自殺したり、うつ病を発症したとの報告があった。

追加年間線量が 20 mSv に引き上げられたが、これで安全なら、除染はしなくていいのではないか、と質問があった。20 mSv に引き上げられたことの不安の現れと思われる。20 mSv が危険と安全の境界でないこと、事故後は被ばく量を低減する努力をすることの大切さを説明した。

講演終了後、一人の女性が近づいてきて言った。

「子供は付属中学校に通っている。生徒の 1/3 は避難しているが、避難した方がいいのだろうか。」

この頃は、被ばく線量の低減化や食品の安全対策などの対応が周知されていたのだが、まだ避難を考えている住民がいたのだ。健康被害が懸念された放射性ヨウ素は無くなっていて、今残っている放射性物質は、ほぼコントロール可能になっている。このような状況を踏まえて避難するかどうかご自身で判断してほしい。「お母さんが心配し過ぎると、お母

さんもお子様もストレスをかかえることになるので、心配し過ぎないように」と伝えた。

2012 年 7 月、西白河郡西郷村の独立行政法人家畜改良センターに派遣された。西郷村は放射能プルームが福島県と栃木県の県境にまたがる那須岳にぶつかり、多くの放射性物質が降り積もった場所である。職員は、放射線を心配する者と気にしない者に別れているようだった。敷地内を自主的に除染しており、密閉した除染物は敷地の一区画に集積しシートを被せてあった。表面線量は、2 μ Sv/h ほどだったそうだ。

ここでは警戒区域立入りの際の注意点についての講演希望があった。警戒区域では、住民が避難する際に放牧した牛や馬が野生化していた。職員は、これら家畜を屠殺するために立入るという。個人被ばく線量計は携帯するが、被ばくは大丈夫なのか。防護服の中の衣服はどうすればいいか。飲食はどうすればいいかなどの質問があった。

警戒区域は1日8時間の立入りでは年間20 mSv に達しないこと、衣服は普通の洗濯で十分であり、気になるなら他の洗濯物と分けて洗うこと、警戒区域内では飲食はできないが、熱中症対策のための水分補給は行った方がいいこと、休憩は車内で取れば車体が遮蔽体になって、放射線を遮ることができることなどを話した。

福島県産の農作物や水産物は、放射性物質の混入によりその多くが出荷制限を受けていた。食品中の放射性物質の基準値(図 2)を超える食品は市場に流通しない体制が取られていたが、住民の食品への不安は大きかった。基準値の米を一年間食べ続けてもわずかな内部被ばく量にしかならないことを説明した(図 3)。

食品中の放射性物質の基準値

放射性物質	食品	基準値 (Bq/kg)
	飲料水	10
	牛乳	50
放射性セシウム	乳児用食品	50
	一般食品	100

基準値の飲料水・食品を1年間食べ続けると1msvの被ばく。 放射性ストロンチウム、プルトニウム等も加味。 年齢区分別の食品摂取量と数け性物質の健康に与える影響を加味。

 基準値のお米を1年間食べ続けたとしたら

 米の基準値
 お米を毎日200g
 1年間食べる 1ベクレルあたりの摂取でうける内部被ばく量

 100 Bq/kg
 × 200g/日
 × 365日
 × 0.000013 mSv/Bq

0. 095mSv

人体に影響の現れるレベルではない

図3基準値の米を1年間食べた場合の内部被ばく量

図2食品中の放射性物質の基準値

講演の後、セシウムのベータ線による内部被ばくは心配ないのかと質問があった。彼は 科学の知識があり、センターの研究者かエンジニアと思われる。

放射線の強さ=放射性物質の量×定数/(距離)²

外部被ばく量を求める式だが、この式では、対象物と放射性物質の距離が短くなれば放射線の強さは強くなる。内部被ばくのような放射性物質が細胞の近傍にあるモデルでは、放射線は無限大の力を発揮し、細胞の遺伝子を延々に破壊し続けるというネット情報を信じていたという。しかもベータ線はガンマ線に比べ透過力が低く、体に留まり影響は強いと考えていたそうだ。

「今までの知識が間違っていることを知って自分自身を安心させたい。」と彼は言った。 公式は外部被ばく量を求めるもので、内部被ばくでは適用しないことなど説明した。

2012年12月、いわき市主催の「親子のための放射線・健康セミナー」では、いわき市放射線量軽減アドバイザーの強い希望があって、いわき市での甲状腺等価線量を大まかに

推定した。甲状腺被ばくについては、内閣府が 2011 年 3 月に行った最も被ばくしたと考えられる地域の子供 1080 人のデータがある。最大 35 mSv であり、この調査に依れば、放射線が起因する甲状腺がんの発症はないだろうとされた。そうであっても、いわき市の推定値を示すことで住民を落ち着かせたいとのことであった。この頃のいわき市と南相馬市は行政が出す情報に、不信感を持つ住民が最も多かった。

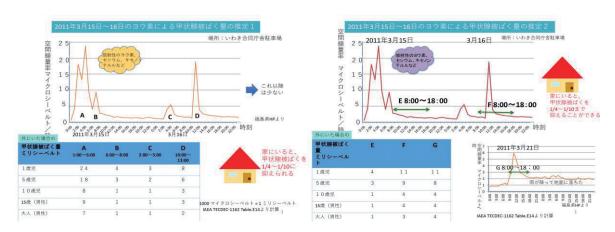


図 4 いわき市における甲状腺 等価線量推定値 1

図 5 いわき市における甲状腺 等価線量推定値 2

いわき市では、2011 年 3 月 15 日、16 日、21 日に大きな放射能プルームが到達している iii 。いわき市に到達した放射性物質の組成比率は、福島第一原発から南方向に流れた組成 比率と同じと仮定し $^{2)}$ 、IAEA TECDEC-1162 Table.E14 を基に計算したところ、15 日 0~6 時に 1 歳児が屋外に居た場合、甲状腺等価線量は 24 mSv であった(図 4、5)。プルームが 到達したのは夜間が多く、屋内待機指示のあったこの頃、屋外の長期滞在は無いであろう から、さらに被ばく量は少ないものと推定できる。

参加者の多くは母親と思われる。ホッとしたような安心感が見られた。中には、到達した放射性物質はヨウ素やセシウム以外(キセノン、テルル)もあったのかと落ち込む女性もいた。

筆者は、できるだけ地元のデータを示すよう心掛けている。いわき市のデータが多いことに、市民が納得していたと主催したいわき市の担当者に喜んでもらった。

岩手県平泉市の婦人会で講演したのは、2013 年 4 月であった。平泉は、放射能プルームが宮城県を飛び超えて到達したのだが、線量率はそれほど高くない。福島県内の講演より簡単だろうと決め込んでいたら、結果は非難の嵐であった。事前の調査では、被ばくにしろ食べ物にしろ特別な注意は必要ないと思われた。安心して生活してほしいとデータを示して話したところ、「食品の基準値 100 Bq/kg は放射性物質をゴミにする基準値と同じであり、ゴミと同じ基準値の食品を食べていいのか」と質問があった。「放射性物質をゴミにする基準はない」と答えたところ、「先生はそんなことも知らないのですか」の発言に会場が同調し、騒然となった。ゴミの基準値は、クリアランスレベルらしいことが後になって分かった。某参議院議員が SNS でこのように吹聴しているらしい。

最初に刷り込まれた情報は、その後修正することは難しい。人の脳細胞は正しく初期化

-

^{····} 福島 7 方部空間線量 0311-0331 (福島県)

しておかないと、正しく成長できないようだ。

平泉の講演は非難ばかりではなかった。岩手日日新聞社の記者は、自分なりに放射線の影響を調べていて、それほど心配はいらないと考えていたが、講演を聞いて自分の考えに確信を持った。記事にすると言った。

2014 年 11 月、郡山の専門学校に派遣された。学校では講話に加えて、放射線の強さと放射性物質の距離との関係を見る実験や掃除機で捕集した自然放射性物質の減衰を観察する実験を行った。余談だが、家庭用電気掃除機で空気を吸い込むと、空気中に浮遊する自然放射性物質が紙パックに捕集できる。放射線の影響を過度に煽る市民団体は、住民宅でこれを行い、家の中が原発事故の放射性物質で汚染されていると家人を脅す事例が、いわき市あたりで見受けられた。

実験中の学生を巡回していると、学生が唐突に私に言った。

「僕、飯舘村なんですけど、もう帰れないですよね」

「俺、甲状腺検査で嚢胞があることがわかって、半年毎に検査受けています」と別の学生。 そして次々と甲状腺被ばくへの不安の声があがった。

飯舘村の学生には除染が進めばきっと帰れると励ましたが、甲状腺検査の話題には、筆者は簡単に「大丈夫。心配することはない」と答えてしまった。大変後悔している。18歳以下の住民を対象にした甲状腺エコー検査では、甲状腺がんが多く見つかった。これについては、放射線の影響とは考えにくいと言われているiv。このことはかなり周知していたので、当たり前のように簡単に答えたのだ。福島県の人はあまり自身を主張しない。考えを持っていても押し黙る傾向がある。彼らが閉じ込めていた心の不安を、ようやく開いて見せた瞬間だったのではないか。もう少し丁寧に説明すべきだったと悔やまれる。

食品中の放射性物質を検査した結果、基準値を継続的に超えることがない農作物については出荷制限vが解除されていたが、福島県では、解除された農作物であっても県内産の農産物を食べることについてはまだまだ根強い抵抗があった。学校給食はすべて県外産の食

農林水産省 農作物に含まれる放射性セシウム濃度の検査結果 (随時更新) 平成26年度の農産物に含まれる放射性セシウム濃度の検査結果 (平成26年4月~) 検査法: Ge. Nai (単位: 点)

		放射性セシウム基準値(100Bq /kg) 以下		放射性セシ
*	検査点数	50 Bq/kg以下 (「検出せ ず」を含む)	50 Bq/kg超 100 Bq/kg以下	放射性セシ ウム基準値 (100 Bq/kg) 超
全袋検査分 (福島県)	766,333	766,333	0	0
抽出検査分 (福島県を除く16都県 ※1)	1,134	1,134	0	0

※1:青森県、秋田県、岩手県、山形県、宮城県、新潟県、茨城県、栃木県、群馬県、埼玉県、東京都、千葉県、神宗川県、埼玉県、長野県、静岡県

http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/s_chosa/index.html

図 6 平成 26 年度米に含まれる放射 性セシウム濃度の検査結果

	梨		桃		栗	7	イタ・	菌床シイ		柿	`	ブルー・	
4.3	南相馬市	3.7	本宮市	64	わき	14 L		相馬市	38	伊達市	36	郡山市	福島県
-	-	-	-	14	葉県	24 7	-	宮城県	7	栃木県	8.8	宮城県	他県
とう	ふきのと		くさそで (こごみ		うど		び	わらて		無花果	9	原木シイケ	
440	楢葉町	130	今津美里町	460	馬市	20 相	6	楢葉町	3.2	伊達市	72	西会津町	福島県
-	-	480	宮城県	17	形県	20 山	2	岩手県	-	-	140	茨城県	他県
ь	すもも	2	たけの		-3.8	芽	らの	たら	タケ	ネマガリ	1	ゼンマ	
42	伊達市	110	天栄村	140	天栄村	140	,町	猪苗代田	200	猪苗代町	700	広野町	福島県
-	-	210	宫城県	8.7	栃木県	500		宮城県	120	秋田県	110	栃木県 長野県	他県
75	コシアフ		梅		そは	7	91	チチ	めじ	さくらし	ζ.	カボ	
86	檜枝岐村	31	伊達市	6	湯川村	430	By	西会津町	180	三島町	18	南相馬市	福島県

平成26年度の農産物に含まれる放射性セシウム濃度の給査結果 (平成26年4月~)

http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/s_chosa/index.html

図 7 平成 26 年度農産物に含まれる放射 性セシウム濃度の検査結果

宮城県 320 長野県 150 宮城県 11 長野県 7.8 宮城県

iv 東京電力福島第一原子力発電所事故に伴う住民の健康管理のあり方に関する専門家会議 中間とりまとめ 平成 26 年 12 月 (環境省)

v 「検査計画、出荷制限等の品目・区画の設定・解除の考え方」(初版) 平成 23 年 4 月 4 日 原子力災害対策本部

材を使用していたが、宮城県との県境新地町は、新地町教育委員会の強い指導力のもと、 出荷制限が解除された地元産の食材を学校給食に使用することを検討していた。筆者は、 福島県産の農産物の安全性について、保護者を対象にした講演を 2014 年 11 月に行った

放射性物質の農作物への移行を押さえるために、福島県の農家は様々な対策を練った。これについては、環境再生ブラザの「なすびのギモン食品編」に分りやすく書かれている vi 。食品に含まれる放射性物質の量は、農家の努力のおかげで、福島県産の農作物と県外産の農作物とで違いはない(図 6、7)。

コープふくしまは、福島県の住民が食べる食事をもう一食分余分に作ってもらい(陰膳方式)、この食事に含まれる放射性物質を測定していた。検査には、県内産の農作物を食べる住民も含まれるが、放射性セシウムはほとんど検出されていない(図 8)。基準値以下の放射性セシウムを含む食品(柿)と、放射性セシウムをまったく含まない食品(ポテトチップス)を食べた場合、内部被ばく線量に違いはない(図 9)。最もインパクトを与えたのは、現状の放射線被ばくを心配するよりも、前向きな姿勢を持って、身体の免疫機能を高めることにより、健康的な生活を送ることができると話したことだった。



図8陰膳方式による食事に 含まれる放射性物質の測定

図9放射性セシウムを含む食品と含まない食品の内部被ばく量の違い

子供たちが福島県で生活していくには、放射線を正しく知る必要がある。県内の教育機関では放射線授業が義務化された。放射線授業のニーズの高まりを受けて、環境再生プラザ(当時、除染情報プラザ)は、教育チームを結成し県内各地で放射線出前講座(以下、出前講座)を開講することになった。教育機関は小学校から高校まで幅広いが、それぞれの学年に応じたメニューを用意した。環境再生プラザでは、子供にも分かりやすい教材を提供しているので紹介したいvii。

福島県の面積は全国の都道府県の中で3番目に広い。環境再生プラザのスタッフは、依頼のあった県内各地の学校に、打ち合わせのため何度も出向き、出前講座のための万全の準備をしてくれる。福島県から遠く離れた筆者が出前講座をスムーズに行えるのも、スタッフ一同のおかげである。この紙面を借りて感謝する。

原発事故の後、福島県は、学校給食の放射性物質の検査を実施し、現在も続いている。

.

vi http://josen.env.go.jp/nasubinogimon/

vii http://josen.env.go.jp/plaza/materials links/#Tab05



図10出前講座の様子(南相馬市)



田典・絵本「はしめましく ほうしゃせん」 原作:秋津 裕、制作:原子力安全システム研究所、2013年3月発行

図 11 デジタル紙芝居



図 12 霧箱の観察

水道水の検査も行われている。原発事故直後を除けば、放射性セシウムの検査はずっと ND が続いている。それでも心配する住民はまだまだ多い。親から水筒を持たされて通学する子供もいる。昨年、水道水の安全性について、南相馬市の小学校で出前講座を行ったところ、「検査で出ていなくても、怖いものは怖いよなー」と生徒に向かって話す先生がいたそうだ。

南相馬市は、原発事故により甚大な被害を受けた。市の一部が避難区域に指定され、これ以外の地域でも多くの住民が避難した。残った住民も専門家の異なる意見に右往左往した。怪しげな市民活動家が活発な活動を続けているのも南相馬市である。このような事情もあって放射線教育は特に熱心だった。2015年2月、南相馬市の小学校で実施した出前講座の様子は市のホームページに取り上げられ

た (図 10)。小学生に教えるのはこの時が初めてで、戸惑いがあったが、低学年にはデジタル紙芝居 (図 11)を行うなど、紙芝居おばさんになりきって、学年毎に分かりやすい内容の授業に努めた。

霧箱はエース級の教材である。放射線の飛跡が見えると歓声をあげている(図 12)。小学校中学年では、身の周りの放射線を測定する実験を行うことが多かった。教育用キットとして市販されている α 線を測るアルファちゃんと β 線を測るベータちゃんを使って、付属の湯の花、乾燥昆布、カリ肥料などを簡易的に測定する(図 13)。線源から遠ざけると放射線量は少なくなるので、仮置場(中間貯蔵施設に搬送する前に地域毎に除染物を集積している場所)は生活圏から離れているので被ばくは心配しなくてよいことを説明した。身の周りに放射線があることに驚きながらも生徒は楽しく放射線を測定している。出前講

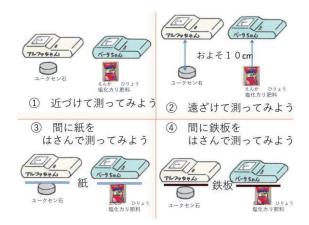


図 13 アルファちゃんベータちゃん



図14マッピング

図15 国道6号線通過時の外部被ばく線量

座を始めた頃は、測定したい物を持 参するように伝えると、親から持た されたのか多くの生徒が家庭菜園の 野菜を持って来た。食品の放射性物 質はこれでは測れないと伝えるとが っかりしていた。外で飼っているペットの犬の被ばくが心配で、犬の毛 を持って来た女の子がいた。「心配し なくても大丈夫だよ」と言うと喜ん でいた。

空間放射線測定器を使って、校内 の空間線量率を測定する出前講座 (マッピングと言う) は主に高学年 を対象とした(図14)。線量率を自ら 測ることで校内は安全なこと、測定 器の使い方、測定値の意味について 教えた。測定の高さを、大人は地面 から 1 m、子供は 50 cm の高さで行 うのは、最も放射線の影響を受けや すい体幹部の放射線量率を測定する からであり、市民活動家がやってい る地面直置き(放射性セシウムは土 と吸着しやすく、地面直置きが最も 線量率が高くなる) 測定は正しくな いことを教えた。そして、放射線を 浴びる量は、測定値にその場に滞在 する時間を乗じて得られることを説 明した。つまり線量率が高い場所で あっても滞在時間が短いと浴びる量 は少ないことを、国道 6 号線の避難 区域を通過する事例で 説明した (図 15)。いわき市から相馬市に転勤にな った教諭が、いわき市の実家へ戻る 際に、6 号線の避難区域を通過する 度に健康が損なわれているのではな

いか、との相談が何回かあった。東京とニューヨークを飛行機で往復するよりはるかに被 ばくは少ないことを説明して安心してもらった。

福島県から避難した子供が、避難先の学校で同級生からいじめられる事件があった。この頃から、風評被害についてどう対応するかをディスカッションするメニューが出前講座



図 16 ホールボディカウンターの結果

に加わった。福島県の農作物に不安を持つ他県 の住民を説得させる方法を、子供達が説明でき ることが目的である。ディスカッションでは、 家で作った安全を確認した米を他県の親戚に 久しぶりに送るという設定である。「食べてい る私が大丈夫なのだから大丈夫」という回答が 多かったが、放射線の影響は後から現れること もあると説明すると困っていた。ホールボディ カウンター検査の結果(図16)をディスカッシ ョン前の授業で説明しているが、それを親戚に 話すと答える生徒はほとんどいない。家で作っ

た農作物を食べる住民もホールボディカウンター検査を受けている。それでも放射性セシ ウムはほとんど検出されていないので、福島産の農作物は放射性セシウムがほとんど含ま れていないことが分かる。時々、回答のできない生徒を見かける。おそらく家庭菜園の農 作物を安心して食べることのできない家族なのかもしれない。

三春町立三春中学校には 2015 年から毎年訪問している。三春町の線量率はそれほど高 くはなく、放射線への生活の不安はほとんどない。しかしながら、福島県で起きた原子力 災害について正しく教えたいそうである。理科のS先生は大変熱心な方で、筆者の授業を すべて板書され、これを生徒に覚えるよう指導していた。三春町は葛尾村から避難した住 民を受け入れており、葛尾村立葛尾中学校の仮校舎がある。筆者の資料を使いながら、放 射線について葛尾中学校の生徒に教える合同授業を行った。合同授業で使われた資料がコ

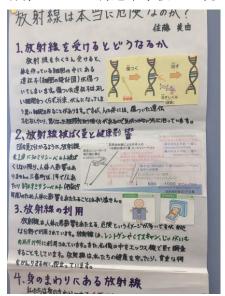


図 17 合同授業の資料

ミュタン福島福島県環境創造センターで紹介されている (図 17)。

伊達市立小国小学校は、原発事故で多くの児童が避難 した。筆者が訪問した 2015 年 12 月は、児童数は事故前 の 1/3 だった。付近の線量率はまだまだ高く、児童はバス で通学し、外遊びも自宅付近に限られていた。市内で採 れたりんごとじゃがいもを食品中の放射性物質を検査す る機械で検査したところ、ND だったので児童は大喜びし ていた。育てた野菜の放射性セシウム濃度が高くて売る ことができず、泣く泣く野菜を廃棄する祖父の姿を見て きた児童がいるという。

2018年9月、いわき市に仮設校舎がある双葉町立双葉 南北小学校を訪問した。福島第一原子力発電所は双葉町 と大熊町に立地している。線量率が高く全町避難してい

るが、比較的線量率の低い地域は、除染を進め数年後に避難解除 する計画が進んでいる。現在小学生の児童は、事故当時生まれていない子供もいるだろう し、双葉町での生活の記憶はないと思われる。それでも児童全員が強い帰還を望んでいる のは、おそらく親の影響に依るものと思われる。双葉町の話をする時の児童のキラキラし た目に双葉町の明るい未来を感じた。

出前講座の訪問先で様々なことを聞いた。2017年に、校区が避難区域に隣接しているこ

ともあって、生徒全員が避難した時期があった浜通りの中学校を訪問した。避難した当時は、明日の見えない状況で、親自身が不安な生活を送っていたので、子供の面倒をみる余裕がなかったそうだ。本来であれば親の愛情が注がれるべき時期に、それができなかったたこと。また、避難先でせっかく友人ができたのに戻って来たことへの不満から、突然に崩れる生徒が多いことなどだ。

福島県は原子力災害ばかりが注目されるが、浜通りは津波の被害も大きかった。警戒区域内の自宅に津波が到達したこと知った住民は、自宅に残された家族の安否が気がかりで自宅に戻りたいのだが、避難を強いられ戻ることができなかった。冷たくなった家族と再会できたのは、一時帰宅が許された数ヶ月後だった。もし、あの時、自宅に戻っていたなら家族を助け出せたのではないかと、強い後悔とともに自身を責めている住民の話も聞いた。



楽しそうに霧箱を観察している児童の中に、津 波で両親を失い、祖父と祖母に育てられている児 童がいると聞いた。屈託のない笑顔だったのだが。

これまで7年間放射線講習をやってきたが、正しい放射線の知識の普及は充分とはいえない。シーベルトの数値が同じであっても、内部被ばくの方が外部被ばくより人体影響は大きいと考える住民は多い。出前講座でも同じ答えが返えってくる。自然放射線は無害だが、人工放射線は体に悪いと考える人もまだまだ多い。原発事故から8年が経ち、福島県でも記憶が風化しつつある。8年前には

誰もが望んでいた除染でさえ、除染した実際の線量率と除染しなかった場合の線量率を推 定して比較することで、除染の効果を教えている(図 18)。

風評被害はまだまだ続いている。福島県の現状を正しく知ってもらうためには、環境再生プラザがしている放射線教育を、福島県外でもして欲しいという声に応えるためにも、正しい放射線の知識の普及に、努める必要がある。

参考文献

- 1) UNSCEAR2013 年報告書 第1巻国連総会報告書 科学的付属書 A:2011 年東日本 大震災後の原子力事故による放射線被ばくのレベルと影響
- 2) 福島第一原子力発電所事故に係る特別環境放射線モニタリング結果 JAEA-Review 2011-035

【資料】

「放射射線教育」巻頭言および編集後記執筆者

2019年3月31日現在

Vol.	No.	年度	発行年月	巻頭言執筆者	編集後記執筆者
1	1	1997		編集委員会	菊池文誠
2	1	1998		阪上正信	小高正敬
3	1	1999	2000 3	今村 昌	中村佳代子
5	1	2000	2001 3	後藤道夫	坂内忠明
5	1	2001	2002 3	井口道生	小高正敬
6	1	2002	2003 3	高島良正	小高正敬
7	1	2003	2004 3	渡邊正己	坂内忠明
8	1	2004	2005 3	山寺秀雄	小高正敬
9	1	2005	2006 3	砂屋敷 忠	坂内忠明
10	1	2006	2007 3	松浦辰男	村石幸正
11	1	2007	2008 3	河村正一	村主 進
12	1	2008	2009 3	長谷川圀彦	今村 昌
13	1	2009	2010 3	渡利一夫	細渕安弘
14	1	2010	2011 3	村主 進	堀内公子
15	1	2011	2012 3	中西友子	橋本哲夫
16	1	2012	2013 3	山寺秀雄	橋本哲夫
17	1	2013	2014 3	田中隆一	岩崎民子
18	1 (特集号)	2014	2015 3	長谷川圀彦	工藤博司
19	1	2015	2016 3	野崎 正	工藤博司
20	1	2016	2017 3	工藤博司	柴田誠一
21	1	2017	2018 3	森千鶴夫	柴田誠一
22	1	2018	2019 3	渡部智博	緒方良至

「放射線教育」の投稿規定

NPO 法人放射線教育フォーラム編集委員会

NPO 法人放射線教育フォーラム発行の論文集「放射線教育」では、広く放射線教育に有益と考えられる内容の原稿の投稿を募集している。

1. 投稿資格

本誌への投稿資格は原則として NPO 法人放射線教育フォーラム会員 (個人正会員、学生会員、団体正会員、賛助会員)とする。「放射線教育」の内容及び体裁に合えば、会員は誰でも投稿できるものとする。ただし、編集委員会が認めた場合にはその限りではない。

2. 掲載する論文について

内容としては、放射線教育、エネルギー・環境教育の進展に寄与すると思われるもので、長さ、新規性により研究報告、ノート、解説、資料、意見、諸報に分かれる。詳細については別紙に定める。原則として未発表のものとするが編集委員会の判断によっては転載を認める。原稿の書き方は別に定める。

3. 原稿の審査

編集委員会は、論文の審査を複数の専門家に依頼する。その結果、内容・体裁に問題があると判断した場合にはその旨を著者に伝え、修正を求める。受理できないと判断した場合は、理由を明記して、報文を著者に返送する。

4. 論文の版権

掲載された論文の版権は放射線教育フォーラムに属するが、論文内容についての責任 は著者にあるものとする

5. 原稿の送付

原稿は放射線教育フォーラム編集委員会に E-mail で、または CD あるいは DVD に記録し、下記に送付する。

(送付先) E-mail: forum@ref.or.jp

〒110-0015 東京都台東区東上野 6-7-2 萬栄ビル 202 号室 放射線教育フォーラム編集委員会

論文の分類

NPO 法人放射線教育フォーラム編集委員会

研究報告(10ページ以下)

結果と考察を含み、十分な意義があるもの

- a) 放射線教育、エネルギー・環境教育の進展に寄与すると思われる、独創性のある研究論文。実験、調査、比較研究なども含む、
- b) 放射線教育、エネルギー・環境教育の進展に寄与すると思われる教育実践の報告
- c) 新規に開発した教材・実験方法・器具の報告

ノート (1~2ページ)

- a) 放射線の理論や現象に関する新規の解釈
- b) 新規性の高い教材・実験方法・器具の報告
- c) 新規な実験データ及び考察
- d) 新規に考案した指導法、授業展開法、評価法など
- e) 放射線教育、エネルギー・環境教育に関する授業実践、イベント実践の報告

総説 (10ページ以下)

原則として編集委員会の依頼によるものとする。

各専門分野の研究について、その方面の進歩の状況、現状、将来への展望などを放射線教育若しくはエネルギー環境問題、放射線及び原子力問題に関連させてまとめたもの。

資料 (10ページ以下)

実験ならびに調査の結果または統計などをまとめたもので放射線教育、エネルギー・環境教育に利用できるもの(含む科学史研究)

意見 (1~2ページ)

放射線教育、エネルギー・環境教育、放射線に関する制度、教育制度などに関する種々の提案・意見など

諸報 (1~2 ページ)

- a) 会議報告 (放射線、エネルギー・環境教育に関連する会議に参加した報告で、教育 的価値が高いもの)
- b) 訪問記 (放射線、エネルギー・環境教育に関連する施設に訪問若しくはイベントに 参加した報告で、教育的価値が高いもの)
- c) ニュース (放射線、エネルギー・環境教育、理科教育に関連するニュースの紹介)
- d) 書評 (放射線教育、エネルギー・環境教育、理科教育に資する書籍の紹介)
- e) 製品紹介 (放射線教育、エネルギー・環境教育、理科教育に資する製品の紹介)
- f) サイト紹介 (放射線教育、エネルギー・環境教育に資するホームページの紹介)

「放射線教育」原稿の書き方

NPO 法人放射線教育フォーラム編集委員会

1. 使用言語

使用言語は日本語とする。

2. 使用ソフト及び保存ファイル

原稿はそのまま印刷できるように MS-Word (Microsoft) で作成する。他のソフトを利用した際は、doc ファイルで保存する。それができない場合は、文章を text ファイルで、図を JPEG 若しくは GIF で保存する。

3. 用紙

3.1 用紙の設定

用紙は A4 を用い, 1ページに 40 字 40 行, 上下それぞれ 30 mm, 左右それぞれ 25 mm 以上を空ける。意見, 諸報は二段組にし, 1 段に 17 字入れる。

3.2 枚数制限

研究報告,総説,資料は原則として 10 ページ以内にまとめる。ノート,意見,諸報は 2 ページ以内とする。別刷り作成に便利なように諸報以外は偶数ページの原稿となること が望ましい。

4. フォント

日本語のフォントは明朝体, 英語は Times を用い, 研究報告, 総説, 資料の場合, 大きさは表題のみ 16 ポイント太字, その他は 10.5 ポイントとし, 見出しは太字, 本文は標準とする。意見, 諸報は表題のみ 12 ポイント太字, その他は 10.5 ポイントとする。

5. 図表

図表のタイトルは太字とする。図は、図 1、図 2 と、表は表 1、表 2 と番号を振る。図表は上下左右のいずれかの欄に沿う状態で体裁を整える。図のタイトルは図の下に置き、表のタイトルは表の上に置く。表は縦線がない方が望ましい。

表1 図表の書き方

	番号の振り方	タイトルの位置	Word に入らない時の
			保存形式
表	表 1,表 2	表の上	表を送付し、TEXT あるいは
			DOC
図	図 1, 図 2	図の下	JPEG あるいは、GIF

6. 表題、要約及び見出し

研究報告,総説,資料の場合,1ページ目の第1行目に表題,2行目を空けて,3行目に氏名,4行目に所属,5行目に住所を書く。ここまでは各行の中央にそれぞれ記載する。6行目,7行目を空けて,8行目から[要約](50~200字程度)をつける。所属が複数になる場合,右肩にアルファベットを上付で付け,アルファベット毎に所属と住所をつける。本文の大見出し,中見出し,小見出しは point system とし,1.,1.1,1.1.1 等のように書く。意見,諸報の場合は,要約を書く必要がない。

7. 数値, 単位, 核種の表記

数値は、桁数が多くなる場合はなるべく10の乗数を用いる。

例: 370000 Bq →3.7×10⁵ Bq

単位は SI 単位を使用する。古い文献を引用するため、SI 単位以外の単位を用いなければならないときは、その単位を使用した後に、SI 単位に換算した値を示す。

例:検出された放射能は 1 nCi (=37 Bq) であった。

核種の質量数は 60Co, 131I のように元素記号左肩に上付きで表記する。

8. 引用文献

引用文献は番号に片かっこを付して本文の右肩につける。

引用文献は下の形式で原稿の最後に一括すること。ただし,文献のタイトル記載については,著者の判断に任せる。雑誌のタイトルは省略形を用いても構わない。

[雑誌] 著者名,タイトル,雑誌名,巻数,ページ(西暦発行年)

日本語の論文の場合、著者は全員の名前を書くようにする。英語の論文の場合、名前はファミリーネームとイニシャルを用いる。ページは最初のページと最後のページを ハイフンで結ぶ。

例) 坂内忠明,霧箱の歴史,放射線教育,4,4-17 (2000)

Ban-nai, T., Muramatsu, Y. and Yoshida, S. Concentration of ¹³⁷Cs and ⁴⁰K in edible mushroom collected in Japan and radiation dose due to their consumption. Health physics, **72**, 384-389 (1996)

[単行本] 著者名,タイトル,編者名,「書名」,ページ,発行所,発行地(西暦発行年)タイトルと編者名はある場合のみ。

例) 松浦辰男,「放射性元素物語」, 154p, 研成社, 東京 (1992) 渡利一夫, 放射性セシウム, 青木芳朗, 渡利一夫編, 「人体内放射能の除 去技術: 挙動と除染のメカニズム」, 7-10, 講談社, 東京 (1996)

9. その他の注意

- 1) 用語はなるべく各学会制定の用語を用い、翻訳不能の学術語、日本語化しない固有名詞に限り原語(活字体)のまま用いる。数字はアラビア数字を用いること。
- 2) 文献でない備考, 注などは, *, **を右肩につけ, 説明を脚注とし, その原稿用紙の下部に書くこと。

【編集後記】

今年のセンター試験の物理でも放射線に関する問題が出された。高校における授業での放射線の存在感が増すこととなる。中学校理科では、2年生の理科の学習指導要領解説で「電流とその利用」の単元で「高電圧発生装置の放電やクルックス管などの真空放電の観察から電子の存在を理解させる」、また、3年で「電流が電子の流れに関係していることを扱うこと。また、真空放電と関連付けながら放射線の性質と利用にも触れること」「その際、真空放電と関連させて X 線にも触れるとともに、X 線と同じように透過性をもつ放射線が存在し、医療や製造業などで利用されていることにも触れる」との記載がある。2年生の授業で扱うということは重要なファクターである。何故ならば3年生の最後の方で取り扱われる場合、入試に出題されることがなく、それ故、軽んじられるからである。

本巻では、クルックス管からの漏洩 X 線量を、どこの中学高・高校でも保有している「箔検電器」で測定できること、「箔検電器」は、それ以外にも様々な自然現象を観察することのできる優れものであることを名古屋大学名誉教授の森 千鶴夫先生に報告していただいた。また、放射線教育フォーラムの田中隆一先生に「電子線に着目したクルックス管観察の学習展開」という題で、クルックス管による実験学習の歴史的な意義、実践的な理解の増進について報告いただいた。

また、東北大学大学名誉教授の工藤博司先生には、東電福島の核災害以前から市民を対象に行ってきた講演を元に「放射線:その正体とはたらき」についてご報告いただいた。 市民のみならず、小中高校での放射線教育の資料として役立つものである。

一方、大阪府立大学の古田雅一先生には、「食品照射の現状と課題」という題で、歴史的事実から始まり、放射線の食品照射を取り巻く現状とその課題を分かりやすく解説していただいた。食品照射に対する我が国の問題は、放射線に対する知識の不足、放射線アレルギー、科学リテラシーの不足に起因するものの一つであろう。

神戸学院大学の磯部久美先生には「福島県で放射線教育を続けて」と題し、福島事故 以降、福島県を中心に放射線・放射能に関する知識の普及に関して活動した生々しい経験 を特別に寄稿していただいた。今年で震災後8年となるが、福島事故で未だに古里に帰還 できない方々は5万人を超える。その方達にとっては、震災後8年ではなく「震災8年」 であろう。事故を風化させることなく、かといって必要以上におそれることなく、着実に 古里を再建するために何が必要か、再考する必要がある。

本巻に載せた報告・資料が教育現場におられる先生方ばかりでなく、放射線教育に関心をお持ちの方々に少しでも資することができれば幸いです。

「放射線教育」、「ニュースレター」の充実には会員各位のご協力が不可欠です。会員各位の積極的な投稿を切にお願いいたします。 (緒方良至)

放射線教育 Vol. 22, No. 1 (2018)

発行日: 2019年3月31日

発行者: NPO 法人放射線教育フォーラム

URL: http://www.ref.or.jp

編集者: 緒方良至(委員長)、柴田誠一(副委員長)、岩崎民子、大野新一、

大森佐與子、工藤博司、小高正敬、畠山正恒、細渕安弘、

堀内公子

事務局: 〒110-0015 東京都台東区東上野 6-7-2 萬栄ビル 202 号室

NPO 法人放射線教育フォーラム

Tel: 03-3843-1070 FAX: 03-3843-1080

E-mail: forum@ref.or.jp

放射線教育フォーラム 2018 年度活動報告

		貝
1.	NPO 法人放射線教育フォーラムの活動概要	1
2.	NPO 法人放射線教育フォーラムの 2018·2019 年度役員名簿	2
3.	通常総会、理事会、勉強会等の開催記録	3
4.	放射線教育誌及びニュースレターの発行	5
5.	2018 年度教育課程検討委員会の活動報告	7
6	第 65 回全国中学校理科教育研究会兵庫大会の概要	9

1. NPO 法人放射線教育フォーラムの活動概要

NPO 法人放射線教育フォーラムは、放射線、原子力の専門家および学校教員の有志により構成されるボランタリー組織であり、1994年4月の設立から今年で25年目を迎えた。その間、2000年11月にNPO法人の認証を受けた。

2011年の3.11事故以前から多くの人々が放射線や放射能に対して過剰な不安感・嫌悪感を抱いており、そのことが原子力エネルギーに対するリスク認知を歪めている。さらには、世間一般の人々が科学・技術の進歩で恩恵を受けている一方で、生徒達に「理科離れ」、「理科嫌い」の傾向が見られる。当フォーラムはこの現状を憂慮している。

この現状を打開するために、当フォーラムは小・中・高等学校の教育において、放射線・放射能・原子力・エネルギー・環境問題に関する正しい理解が啓発・推進されるように、学習指導要領などの教育政策を改善し、意欲のある教員を育成することに重点を置いて、勉強会、パネル討論会及び国際シンポジウムを企画・開催している。また、いくつかの専門委員会を設けてそれぞれの諸課題を検討し、それらをもとに、文部科学省をはじめ、関係当局に政策提言を行なうなどの活動を行なっている。

当フォーラムの会員数は、2019年3月現在で個人正会員数117名、団体正会員数29団体である。3.11事故発生以後における原子力事業関係の団体会員の退会が急増している。この団体会員の減少が当フォーラムの財政に大きな影響を及ぼし、運営・活動にとって危機的状況をもたらしかねない状況にある。このような財政収支の改善を図るために、団体会員の勧誘に努力を重ねている。活気あるフォーラムを目指すためには、なにをおいても団体会員及び個人会員の増強が重要である。

今年度のフォーラムの定常的なイベント活動として、第1回勉強会を6月に、第2回勉強会を3月に、東京慈恵会医科大学において同大学アイソトープ実験研究施設との共催で開催した。どちらも参加者に好評であった。

専門委員会活動については、「教育課程検討委員会」を 3 回開催し、主に高等学校理科教科放射線記述について検討した。「DVD 教材委員会」は、昨年度企画した中学校生徒向け DVD 教材「R の正体一放射線の性質と利用一」の完成を受けて、DVD 教教材と付属説明資料を中学校教員および関係者に配布した。

フォーラム運営のための会合については、通常総会を東京慈恵会医科大学において開催するとともに、理事会を3回フォーラム事務所で開催した。円滑な運営を図るための事務連絡会をほぼ毎月1回のペースで実施した。

定期印刷物の刊行については、当フォーラムの機関紙である「放射線教育」Vol.22,No.1 を発行した。今年度活動報告や活動に関わる参考資料は経費節減のために後付けとした。広報誌としてのニュースレターは、71 号から 73 号まで 3 回(6 月、11 月、3 月)発行した。編集委員会は 2 回実施した。

以上の活動は、当フォーラムのホームページ(http//www.re.f.or.jp)に掲載されている。トップページには主な情報分類として、「放射線教育 先生の広場」、「放射線学習支援資料」、「活動報告」、「出版物」、「放射線教育フォーラムとは」、「GREETINGS IN ENGLISH」など 6 項目を編集し配置した。 -1-

2. NPO法人放射線教育フォーラムの 2018・2019 年度役員名簿

理事:(理事長)長谷川圀彦(静岡大学名誉教授)

(副理事長) 工藤博司 (東北大学名誉教授)

(副理事長兼事務局長) 田中隆一(元日本原子力研究所高崎研究所長)

(以下五十音順)

朝倉 正 (東京慈恵会医科大学教授)

大森佐與子 (元大妻女子大学教授)

緒方良至(名古屋大学アイソトープ総合センター)

小高正敬 (元東京工業大学助教授)

酒井一夫(東京医療保健大学教授)

柴田誠一(京都大学名誉教授)

畠山正恒(聖光学院中学·高等学校教諭)

細渕安弘 (元東京都立保健科学大学助教授)

堀内公子 (元大妻女子大学教授)

吉澤幸夫 (東京慈恵会医科大学)

渡部智博(立教新座中学·高等学校教諭)

監事:朝野武美(元大阪府立大学先端科学研究所助教授)

名誉会長:有馬朗人(根津育英会武蔵学園理事長、元文部大臣、元東京大学総長)

会 長:松浦辰男(立教大学名誉教授)

幹 事: 荒谷美智、大野和子、岸川俊明、菊池文誠、熊野善介、下道国、関根勉、

鶴田隆雄、坂内忠明、宮川俊晴、村石幸正

顧 問: 飯利雄一、岩崎民子、河村正一、工藤和彦、黄金旺、黒杭清治、村主進、

野崎正、森千鶴夫、山口彦之、山寺秀雄、渡利一夫

3. 通常総会、理事会、勉強会等の開催記録

2018年 4月16日(月)第1回事務連絡会 (フォーラム事務所、6名) 4月23日(月)第1回編集委員会 (フォーラム事務所、7名) 5月11日(金)第2回事務連絡会 (フォーラム事務所、5名) 5月26日(土)第1回理事会 (フォーラム事務所、7名) 5月27日(日)第1回教育課程検討委員会(フォーラム事務所、5名) 6月10日(日)通常総会 (東京慈恵会医科大学、委任状含む出席者82名) 6月10日(日)第1回勉強会 (東京慈恵会医科大学、60名) (勉強会プログラム) 放射線を通して現代科学に親しむ
〜教育内容の新提案〜 講演 大野 新一 理論放射線研究所 高校「物理基礎」教科書の放射線の扱いから 講演 ~放射線教育フォーラム 教育課程検討委員会の活動から~ 元筑波大学付属高等学校副校長 教員養成課程における放射線教育の実践 講演 鎌田 正裕 東京学芸大学教授 小学校での放射線学習の可能性を探る 講演 ~各教科等の学習内容と関連付ける教材化の工夫~ 平田 文夫 北海道大学エネルギー教育研究会 講演 中学校理科教科書の放射線に関わる記述の分析とアクション ~ 教育課程検討委員会の討議から~ 大津 浩一 名古屋経済大学市邨高等学校 6月19日(火)第3回事務連絡会 (フォーラム事務所、6名) 9月3日(月)第4回事務連絡会 (フォーラム事務所、5名) 10月23日(火)第5回事務連絡会 (フォーラム事務所、5名) 11月11日(日)第2回教育課程検討委員会 (フォーラム事務所、6名) 11月27日(火)第6回事務連絡会 (フォーラム事務所、6名) 12月9日(日)第2回理事会 (フォーラム事務所、10名) 12月10日(月)第2回編集委員会 (フォーラム事務所、7名) 1月11日(金)第7回事務連絡会 (フォーラム事務所、5名) 1月20日(日)第3回教育課程検討委員会 (フォーラム事務所、7名) 2月15日(金)第8回事務連絡会 (フォーラム事務所、6名) 3月3日(日)第2回勉強会 (東京慈恵会医科大学、49名) (勉強会プログラム)

講演 化学の目で見た物理と放射線

渡部 智博 立教新座中学校・高等学校

講演 看護職への放射線教育の現状

酒井 一夫 東京医療保健大学

講演 エネルギーリテラシー研究報告

一次世代のための効果的なエネルギー教育をめざして 一

秋津 裕 エネルギーリテラシー研究所代表

講演 クルックス管プロジェクトの現状と課題

秋吉 優史 大阪府立大学放射線研究センター

3月15日(金)第9回事務連絡会 (フォーラム事務所 6名)

4. 放射線教育誌及びニュースレターの発行

4. 1 放射線教育誌 2018 Vol.22, No.1

【巻頭言】 化学の目で見た物理と放射線

渡部 智博(立教新座中学校·高等学校)

【研究報告】

箔検電器による放射線の測定および他の理科実験

森 千鶴夫(名古屋大学名誉教

授)

【資料】 電子線に着目したクルックス管観察の学習展開

田中 隆一(放射線教育フォーラム)

【資料】 放射線・その正体と働き

工藤 博司(東北大学大学名誉教授)

【資料】食品照射の現状と課題

古田 雅一(大阪府立大学大学院)

【資料】福島県で放射線教育を続けて

磯部 久美(神戸学院大学)

「放射線教育」投稿規定、原稿の書き方

緒方 良至(名古屋大学)

編集後記

4.2 ニュースレター

ニュースレター No.71 2018.6

巻頭言 クルックス管による「電流」学習から放射線学習への新展開に向けて

田中 隆一(放射線教育フォーラム)

UNSCEAR2017年報告書の紹介-環境放射線からの被ばくとがんリスク

岩﨑民子(元放医研)

新学習指導要領に対応した放射線教育推進のための方策

高畠勇二(全国中学校理科教育研究会支援センター代表理事)

クルックス管などの放電管の概要と漏洩 X 線測定の試み 森 千鶴夫(名古屋大学名誉教授)

冷陰極管型クルックス管からの漏洩X線の軽減化

字藤 茂憲(福岡教育大学)

クルックス管の安全な取り扱いとその課題

秋吉 優史(大阪府立大学)

平成30年度放射線教育フォーラム通常総会及び第1回勉強会案内(開催案内)

2018・2019 年度役員(理事・監事)選挙結果報告

第6回放射線教育に関する国際シンポジウム(ISRE2020) 開催について

長谷川圀彦(放射線教育フォーラム)

会務報告

原稿募集案内(ニュースレター、放射線教育)

編集後記

緒方 良至(名古屋大学)

ニュースレター No.72 2018.11

巻頭言 放射線教育で「三方良し」 大津 浩一(名古屋経済大学市邨高等学校中学校)

放射線を通して現代科学に親しかための教育内容の提案 大野 新一(理論放射線研究所)

高校科目「物理基礎」放射線の一考察

広井 禎((元)筑波大学附属高校)

教員養成課程における放射線教育の実践

鎌田 正裕(東京学芸大学)

小学校での放射線学習の可能性を探る

平田 文夫(北海道大学エネルギー教育研究会)

主権者教育としての原子力の是非

大津 浩一(名古屋経済大学市邨高等学校中学校)

第65回全国中学校理科教育研究会兵庫大会出展報告 田中隆一(放射線教育フォーラム) 平成30年度通常総会資料(活動計画書、財産目録、賃貸対照表)

会務報告

原稿募集案内(ニュースレター、放射線教育)

編集後記

柴田誠一(放射線教育フォーラム)

ニュースレター No.73 2019.3

「放射線教育」もう8年目、まだ8年目 ~放射線リスク教育の一歩~

佐々木 清(前福島県郡山市立郡山第六中学校教諭)

「エネルギー教育フォーラム2018」を終えて

羽澄 大介(名古屋市立山田東中学校)

中学校理科における放射線教育の現状クルックス管による中学教育プロジェクトの最近の状況

森山 正樹(札幌市立白石中学校)

宮川 俊晴(放射線教育フォーラム)

平成30年度放射線教育フォーラム第2回勉強会案内(開催案内)

会務報告

原稿募集案内(ニュースレター、放射線教育)

編集後記

大森佐輿子(放射線教育フォーラム)

5. 2018 年度の教育課程検討委員会活動の記録

1. 設立趣旨(設立当時の趣旨)

放射線の内容は学校教育(初等中等教育)のいろいろな教科・科目で取り扱われ、一部では効果的な実験も発表されているが、大部分は取り扱いが断片的で、学習指導の時間は少ない。また、放射線の重要性や利便性に反して、一般には怖い、危ないなどの危険性の印象が定着している。

これらの現状を鑑み、誤った知識を是正し、市民としての素養に不可欠な放射線についての事項を、どのように学校教育の中に組み込むかを検討するため、1998年8月に本委員会が設立され現在に至っている。

2. 委員名簿(2018年度)

相談役 山寺 秀雄 名古屋大学名誉教授

委員長 黒杭 清治 元芝浦工業大学教授

委員 大津 浩一 名古屋経済大学市邨中・高校特任教諭

同 田中 隆一 元日本原子力研究所高崎研究所長

同 広井 禎 元筑波大学附属高等学校副校長

同 村石 幸正 中央大学理工学部 特任教授

同 渡部 智博 立教新座中 · 高等学校教諭

3. 活動経過と成果

(1) 2017 年度までの活動と成果

1998~2007 年度 資料収集・調査活動

教員、および小中高校生・大学生の放射線に関する知識・意識調査 (アンケート等)。

『児童・生徒の放射線リテラシー育成のための指導資料集』 4 章構成の制作

2008~2009 年度 中学校理科新学習指導要領の内容検討と放射線学習計画制作

「中学理科新学習指導要領に沿った放射線教育の先行的実践記録」

関東・信越地区(2)エネルギー・環境・放射線セミナーで発表

2010 年度以降 下記放射線教育 PPT 教材の制作、HP へ公開

授業ですぐに使えるパワーポイント

- 1. 原子構造と放射線の基礎 2. 自然界の放射線
- 3. 放射線の性質と利用 4. 放射線医療 5. ウリミバエの撲滅
- 6. 放射性炭素年代測定法の種明かし 7. ヨウ素 131 の半減期

福島原子力事故から何を学ぶか

第1部原発事故による健康への影響 第2部原発事故は防げるか

第3部未来のエネルギーを考える 第4部「住民が受けた原子力災害」

2015 年度以降 理科教科書の放射線に関わる記述の検討

2015 年度 中学校理科教科書の検討

2016 年度 同上の継続 及び 東京書籍・学校図書と中学校校理科放射線に関わる 記述についての意見交換を実施

2017 年度 高等学校新教科書「物理基礎の放射線に関わる記述の検討」

(2) 2018 年度の目標と活動

(2) -1 目標

- ①「物理基礎」の放射線に関わる記述検討の継続。②化学の目で見た物理
- ③PPT 教材の継続制作 ④教科書会社との意見交換会の実施
- (2)-2 2018 年度教育課程検討委員会の活動内容
- (2)-2-1 教育課程検討委員会を下記の日の13:00~16:00に事務所で3回開いた。

昨年度、高等学校新教科書「物理基礎の放射線に関わる記述の検討」を一通り終えたので、 当委員会の最終目標である「発達段階に応じた放射線リテラシー」作成を目指して、内容 が中学校での既習内容の繰り返しにならないように、何をどのように教えるかを決めるこ とに重点を置いて検討した。

(2)-2 活動

第1回 2018年5月27日(日)第1回勉強会(6月10日)で廣井委員が講演予定の『高校「物理基礎」教科書の放射線の扱いから』について廣井委員が用意した資料を検討した。

第2回 2018年11月11日(日)

1)「物理基礎」の検討(前回からの継続)

「物理基礎」の放射線に関わる記述の検討では、重要事項を表で済ませたり、総花的な記述があったりで、高校生にうまく伝わらないのではないかという意見が出た。

- 2) 文部科学省「中学生・高校生のための放射線副読本」改訂版(三訂版)の検討会員の工藤和彦氏及び神谷均氏の意見およびそれらに対する黒杭委員長、田中委員の意見・感想をもとに検討した。
- ▼工藤氏の初版 (平成 26 年度版) に記載されていた「国際原子力事象評価尺度表 (INES)」が三訂版では消えたので、「事故隠し」と思われる恐れがある』との見方に対しては、「福島第一原発事故から 8 年、事故には触れず、復興に話題を移したと見られる」との意見があった。
- ▼国立がん研究センター出典の「放射線の線量・生活習慣因子とがんの相対リスク」の表が記載され、100~200 ミリシーベルトの放射線を受けたときのがんのリスクは 1.08 倍であり、野菜を 1 日に 110g しか食べないリスク (1.06 倍) 同じ程度」との記述があり、これらと初版との違いから、文科省の編集方針の変化が見て取れた。
- ▼「学校の現状から見て、送られてきた 1 冊の副読本を授業に取り入れられることはほとんど考えられない(利用されない)」との意見があった。

第3回 2019年1月20日(日)

- 1)渡部委員が第2回勉強会で講演を予定している「化学の目で見た物理と放射線」について検討した。"物理"の記述を"化学の目"で見ると、意味の違いがあることを明確にする必要を感じるという本委員会での同委員の提案をもとに、物理教科書の記述を見直したものである。同じ高校生でも物理を学ぶときと化学を学ぶときとでは異なる内容を思い描いていることを、元素記号、電離などの用語例において明らかにした。
- 2) 制作中のPPT教材「放射線の単位」「低線量放射線の健康への影響」の検討は結論が 出せず、「宇宙線の観測と観測」「放射線の検出と測定」とともに次年度に延期。
- 3) 教科書会社との意見交換会 教育出版に教科書記述に関する要望書を提出し、それを 基に 2018 年 11 月 12 日 (月) に意見交換会を実施した。

出席者:教育出版側 後藤武司(中学校理科編集長)太田将登(編集局理科担当)

フォーラム側 黒杭委員 田中委員 廣井委員 宮川委員

教育出版編集者の意見はほとんどなかったが、提出した要望書、および当日フォーラム側から追加して述べた意見は改訂に向けた資料として役立てたいと好意的に受入れられた。

(3) 2020 年度の目標

- ①教科書会社との意見交換会:本年度までに実施できなかった啓林館に要望書を提出し開催する。
- ②『高等学校新教科書「物理基礎」の放射線に関わる記述の検討』は引き続き継続するが、本年度までに行ってきた教科書会社ごとの記述検討ではなく、高校生のための放射線リテラシー育成を目指すため、従来とは別の形で実施する。
- ③PPT 教材の制作:「放射線の単位」「低線量放射線の健康への影響」「霧箱」(担当 大津委員)「素粒子の探査で宇宙の謎に迫る」「見えない放射線を見える化する」を完成し、ホームページに掲載する。(文責 黒杭)

6. 第65回全国中学校理科教育研究会兵庫大会出展報告

NPO法人放射線教育フォーラム 田中 隆一

2018年8月9~10日に神戸市の神戸芸術センターで開催された第65回全国中学校理科教育研究会兵庫大会においてブース出展に参加した。当フォーラムとしては、3年前の富山大会以来4度目の参加である。

今回の出展は当フォーラムの企画をもとに最近制作された放射線 DVD 教材『R の正体』を展示し、関心を示した大会参加者の先生方に手渡すとともに、放射線授業への活用をお勧めした。それと同時に、大阪府立大学放射線研究センターが開発したペルチエ冷却式高性能霧箱による演示実験を行い、放射線授業への関心を惹き付けた。

大会の概要:

今回の主題は、自然と社会との主体的な関わりの中で、科学的な探求を通して、理科教育によって学びに向かう力を育むことであり、例年通り5つの分科会でそれぞれ各地域から選ばれた5件の研究報告と質疑、文部科学省主任視学官の講演などがあった。主催者の報告によると、参加者数は近年にないほどの多数の850名であり、特に地元兵庫県からの参加が多かった。

ブース出展の概要:

本大会の出展数は理科教材企業、教科書会社、公益法人など 24 件。放射線教育に関わる出展は、当フォーラム、日本原子力産業協会及び㈱サンルックスの 3 件。

放射線 DVD 教材の出展結果:

当フォーラムの企画で制作され、全国の中学校に一斉配布された放射線 DVD 教材が教育現場でどのように役立っているのか知りたいと考えていたが、この大会での出展は全国のから参加した多くの理科教員と直に会って話ができる絶好のチャンスとなった。

DVD 教材を一瞬目に止めて関心を示した参加者に「放射線授業に困っていませんか?」などと声をかけると、多くの参加者、特に若い先生方が快く応じていただき、学習指導要領に対応して制作したこの DVD 教材が授業に活用できそうであることを理解していただくことができた。

短い出展時間ではあったが、これまでになく多くの先生との接触によって、理科授業への有用をご理解の上で、持参した教材一式 150 部を余すことなく手渡した。所属校に 1 部すでに配布されていることを知っている参加者が多かったが、手元にも置いて、授業準備に使いたいということで、DVD 教材を受け取る先生方も多数おられた。演示実験の授業時間さえ確保できない先生方が実験映像集に関心を示す傾向も見られた。

ペルチエ冷却式高性能霧箱の出展結果:

放射線授業などの教育現場で手軽に活用できて、か細い電子線飛跡の観察も可能なペルチエ 冷却式高性能霧箱の演示実験では、飛跡観察がコンパクトな仕組みで可能であることに惹き付 けられた興味関心を、DVD 教材に振り向ける意図が成功したと考える。

出展参加者:

DVD 教材については、当フォーラムの田中隆一が担当。ペルチエ冷却式高性能霧箱実験については、大阪府立大学放射線研究センターの安藤太一さんに協力いただいた。

講演会及び分科会の概要:

文部科学省講演では、初等中等教育局主任視学官の清原洋一氏が、「これからの理科教育の展開」をテーマに、生産年齢人口の減少や AI の進展などがもたらす社会構造や雇用環境の急速変化に対応して、様々な情報を見極め、知識の概念理解からさらに情報を再構成する新たな価値に繋げることが求められており、そのために「社会に開かれた教育課程」を重視し、教科を超えて学校全体で議論することから始めることが強調された。当フォーラムが進めている授業支援の狙いともつながると思う。

分科会では、「主体的・対話的で深い学び」や「科学的な資質や能力の育成」などに向けた5つの分科会において、様々な授業改善の試みが報告された。エネルギー、原子力、放射線など、個々の教科授業に主眼を置く報告はなかった。

今後に向けて:

来年度の第66回大会は秋田市での開催が予定されている。この大会は中学校理科教員が一堂に会する最大の催しである。放射線教育フォーラムの存在を広く知っていただくとともに、関心をもつ理科教員、教科書会社や多くの教材関係者の方々と意見交換できる絶好のチャンスである。今後とも出展参加を継続していきたいと考える。

(放射線教育フォーラムニュースレターNO.72 に掲載)

放射線教育フォーラム 2018 年度活動に関わる参考資料

		頁
1.	中学校向け放射線教材DVDの制作(工藤博司)	1
	放射線教育フォーラムニュースレターNo.71 から転載	
2.	クルックス管による中学教育プロジェクトの最近の状況 (宮川俊晴)	2
	放射線教育フォーラムニュースレターNo.73 から転載	
3.	低エネルギーX線の評価と安全管理に関する問題点と現状(秋吉優史)	6
	日本放射線安全管理学会第 17 回学術大会講演要旨集(クルックス管プロジェクトシリース発表1)	
4.	中学校での放射線教育現状の報告(森山正樹)	7
	日本放射線安全管理学会第 17 回学術大会講演要旨集(クルックス管プロジェクトシリース発表2)	
5.	教育現場での実態測定結果報告(谷口和史)	8
	日本放射線安全管理学会第 17 回学術大会講演要旨集(クルックス管プロジェクトシリース発表3)	
6.	学習指導要領改訂による放射線教育の新展開(秋吉優史)	9
	第17回放射線プロセスシンポジウム講演要旨・ポスター発表要旨集から転載	

中学校向け放射線教材 DVD の制作

放射線教育フォーラム DVD 教材委員会委員長 工藤 博司

昨年 7 月、当フォーラムが株式会社放送映画製作所から標記 DVD の企画を依頼されたのを受けて理事長の諮問委員会として設置された当委員会は、アドバイザーとして DVD の制作に協力してきました。本年 5 月に、「R の正体 $^{\sim}$ 放射線の性質と利用 $^{\sim}$ 」と題する DVD と映像説明資料(冊子)が完成し、文部科学省 "選定"も得られ、国内の全中学校(約 2 万校)に贈与される運びとなりました。

この教材は、本編、実験編、福島編ならびに映像説明冊子(生徒用および教員用)で構成されており、本編(19分)には、「放射線の歴史と利用」、「放射線の性質と利用」、「放射線の人体への影響」が含まれています。実験編は実験映像集で「放電管を使って真空放電の実験」、「霧箱を使って放射線の秘跡を観察」および「身の周りの放射線を測定」の3巻に分かれています(計 10 分)。福島編(8 分)は、「福島の現状を知る」と題する映像で、中川啓一氏が昨年12月に飯館村を訪ねて被災地の近況を伝えています。

教師用手引の表紙(下図)には"新学習指導要領対応"とあり、裏表紙には企画: NPO 法人



放射線教育フォーラム、制作:放送映画製作所、監修・指導:東京大学医学部附属病院放射線科放射線治療部門長・中川恵一、理科教育支援センター・小森栄治と記されています。

なお、DVD 教材委員会は委員長と黒杭清治、酒井一夫、佐々木清、高畠勇二、畠山正恒、宮川俊晴および渡部智博各委員の計 8 名で構成し、制作過程の節目ごとに意見交換を重ね、助言をしてきました。生徒にはやや難解な点もありますが、教員にとっては放射線の理解を深めるための絶好の資料なったと思います。

この教材は、当フォーラム会員にも1セットずつ配布されますのでご活用下さい。 ご意見やお気付きの点はDVD教材委員会 委員長宛〈kudo. hrs@nifty. com〉にEメールでお寄せください。

クルックス管による中学教育プロジェクトの最近の状況

放射線教育フォーラム 宮川 俊晴

はじめに

現在中学校理科では 3 年生の科学技術と人間のエネルギーに関連して放射線授業が実施されているが、更に 2021 年度より 2 年生の電流でクルックス管に関連して放射線の授業が追加される予定となっている。クルックス管は元々真空放電から電子の特性を観察実験する教材として 2 年生で利用されている。しかし、一般的なタイプのクルックス菅や電源装置では、放射線が検知される状況が報告され(1、2)、教員の間に不安の声がある。このため、2017 年度より「教育現場などにおける低エネルギー X 線を対象とした放射線安全管理体制の確立」のプロジェクトが秋吉優史氏(大阪府大)の呼びかけの元、開始された。

去る 2018 年 12 月 5 日、名古屋大学で開催された日本放射線安全管理学会第 17 回学術大会の クルックス管のセッションでプロジェクトの最近の活動成果がシリーズ発表されたので、その概要を報告する。(3)

シリーズ発表は、以下の5名により実施された。

- 1) 秋吉優史氏(大阪府大)「低エネルギーX線の評価と安全管理に関する問題点と現状」
- 2) 森山正樹氏(札幌市立白石中学校)「中学校での放射線教育の現状」
- 3) 谷口和史氏(千代田テクノル)「教育現場での実態測定結果報告」
- 4) 藤淵俊王氏(九州大)「低エネルギーX線の放射線安全管理」
- 5) 山本堅士氏(大阪府大修士 2 年)「低エネルギーX 線評価に関する応用事例」

また、ポスターセッションに、緒方良至氏他(名古屋大)「箔検電器によるクルック管からの X 線の測定」が発表された。

以下に5氏の発表内容を記す。

1. 秋吉優史氏の発表

シリーズ発表の全体像を解説した。クルックス管は一部に強い X 線が検出されるが、高額な実験機材であり、学校で新品への買い替えが容易ではない。このため、放射線安全管理の視点から条件を設定して、安全を確保し安心して実験が出来るガイドラインを策定する必要性とその活動計画が報告された。クルックス管からの X 線は 20keV 程度とエネルギーが低いことから一般的に普及している放射線測定器ではエネルギー特性が適合せず正確な測定が出来ない。また電源装置の電圧がパルス状に発生する影響を受け、測定器の電子回路でパイルアップし、測定値が小さく評価されるケースもある。更に、電源装置の誘導コイルが機械的な動作をしており、その日の条件で発生電圧が変動することなどが明らかになっている。その上、装置は、昭和の時代のもの

から最近のものまで、その種類は千差万別であり、統一的な管理が困難である。一方で誘導コイルの放電板の距離を短くし発生電圧を低くすることで、X 線発生ので抑制、生徒や教師からクルックス管の距離を離すこと、ガラス板などの遮へい設置などにより被ばく量を低減可能であり、安全確保策が期待できる。これらを具体化するために、プロジェクトは 4 つのタスクチーム(I 線量評価。II 運用方法の検討。III 線量評価とガイドライン。IV 放射線教育プログラム普及)を構成し様々な方との議論を練り上げて進めることとしている。

2. 森山正樹氏の発表

中学校の授業現場での放射線の授業について演者の実践事例を引用しながら現状を紹介し、今後のクルックス管実験への放射線防護の専門家からのリスク評価と実験のガイドライン策定への貢献が要請された。

放射線授業は第三学年の科学技術と人間の単元で原子力発電の短所として扱われている現状に対して、第二学年のクルックス管に関連して今後実施されることが、より科学的な授業として扱える効果が大きく、更にクルックス管の実験はより深く放射線を理解する有用な授業法であることが発表された。また札幌市近郊の教員へのアンケート結果からクルックス管から出る X 線の認識があまり高くない教師が半数いるなど、X 線の実態を教師がよく理解することと教師が自信を持って授業をするために、時間、距離、電圧等の実験の設定条件を示すガイドラインの策定のため、専門家が参画することへの期待が述べられた。詳細は本ニューズレターの森山正樹氏の別稿を参照頂きたい。

3. 谷口和史氏の発表

札幌市から長崎市までの全国の中学校 19 校の協力を得て、クルックス管の放電実験時に出る X 線の線量を測定した結果が発表された。対象としたクルックス管は学校で利用されている十字 板入りのものと、電磁界によるビーム偏向を観察するスリット入りのものの 2 種類とした。 20keV 程度の低エネルギーX 線の測定であるため、中学校での測定前に秋吉氏(大阪府立大学)は、電離箱、蛍光ガラス線量計、GM管、NaI シンチレーター、プラスチックシンチレーター、Cs I シンチレーター、半導体検出器などで事前に比較測定を行い、結果として 10~80kv の低エネルギーX 線測定用で取扱いが容易な蛍光ガラス線量計(ガラスバッジ)を用いることとし、各学校にて測定が行われた。クルックス管の外表面から 15,30,50cm と距離を変えて空間線量を測定し、遠ざかることの線量低減効果を検証した。照射時間は中学の先生が1年間のクルックス管実験で実施している放電時間を考慮し、10 分間とした。

その結果、15cm の距離で、約半数は ND (0.1mSv 未満)であり、最大 32.6mSv とバラつきが見られた。測定値は、1/距離の二乗則にほぼ乗っており、生徒が接近する 1m の地点で評価すると最大のものでも 0.9mSv であった。

また、教師の腹部または胸部に装着したガラスバッチの測定値は、ND から 0.5 mSv であり、1 m の地点での評価値の $1/2 \sim 1/10$ と小さな値であった。これは教師が放電中は 1 m 以上の距離を取るなどの被ばく低減を図ったものと思われる。なお、クルックス管から放出される X 線のエネルギーは、 $16 \sim 25 \text{keV}$ の範囲であった。

今回の測定では、装置の違いで線量は大きくバラつくことが明らかになったが、距離の減衰効果が大きいことが確認された。このことから全身被ばくからの防護の必要性は少ないが、皮膚や水晶体の被ばくへの配慮が必要と思われるものがあり、放射線防護の専門家の貢献を期待したいと述べられた。注)ここに表記の数値は $70\,\mu\mathrm{m}$ 線量当量である。

4. 藤淵俊王氏の発表

クルックス管から発生する X 線による空間線量などを、モンテカルロコード PHITSv3. 05 により解析した結果が報告された。解析条件は、十字板入りクルックス管を半径 5cm、長さ 20cm、厚さ 1.5mm の円筒型ガラス管でモデル化し、20、30kV の 2 種類の印加電圧の条件で、夫々のエネルギースペクトルと空間線量分布 (1cm、70 μ m 線量当量、実効線量、空気カーマ)を解析した。また、クルックス管内部の十字板を厚さ 2mm のアルミニウム円板でモデル化し、十字板が立っている場合と倒れている場合の違いも解析された。その結果、印加電圧 20kV の場合の線量は 30kV の場合の 1/10 未満と小さくなり、印加電圧を低減する効果が示された。更に、低エネルギーX 線では、 70μ m 線量当量>1cm 線量当量>実効線量の順で 70μ m 線量当量と実効線量当量との間で 10 倍以上の差があり。線量指標の選定、および クルックス管の形状では方向依存性が大きいことから不均等被ばくに関する配慮とそれらへの理解を促す必要性が述べられた。

5. 山本堅士氏の発表

クルックス管を利用した放射線教育の教材開発の状況が発表された。教材として検討されたものは、①X線をチェキフィルムで感光して,X線の存在を確認するもの、②ペルチェ高性能霧箱で、飛跡の長さとエネルギーの関係を求めるもの、③箔検電器の箔の閉じ方の速さから線量率を評価するものが示された。

- ① チェキフィルムは 1894 年にレントゲン博士が X 線を発見した歴史的な方法であり、授業の中で科学史とともに扱える特徴がある。(既に長崎市や大阪で実践され、当フォーラムの公開パネル討論でも紹介された事例である。)
- ② ペルチェ式高性能霧箱は、霧箱の中で X 線がエタノール分子を電離した際に出来る飛跡の長さが X 線のエネルギーと対応していることを利用した。エネルギーの判明している特性 X 線 (Cu: 8.0keV。 Nb の 16.5keV) の飛跡を動画に撮り、その長さのヒストグラムを作成し、エネルギースペクトルとした。同時に CZT 検出器でもエネルギースペクトル測定 (15keV ピーク値) を実施した。エタノール蒸気で満たされた霧箱の中では、光電子は折曲がって飛ぶことから、観察されたピーク飛程距離は Cuでは 1~2cm、Nbでは 2~3cm となり、気温摂氏 0 度の空気条件での理論値より短く観測されたが、飛跡の長さとエネルギーとの対応が確認できたとした。

③ 箔検電器は、静電気で荷電して開いた箔にクルックス管からの X 線を当てると、逆極性のイオンを捕集し、徐々に電荷が失われて、開いた箔の角度が小さくなる現象を利用して、イオン電流を評価できるとした。

まとめとして、霧箱中の光電子の飛跡長さとエネルギーとの関係があることが示され、放射線と物質の相互作用とエネルギーを直感的に学習できるようになった。箔検電器を用いて、箔の閉じる速度からクルックス管の線量率について学習できると述べた。

会場からは、教師がクルックス管から離れて実験をする工夫と、線量影響について、全身被ば くのリスクは小さいと思われるが、水晶体の線量評価に配慮が必要とのコメントが出された。

以上

参考資料

- 1. クルックス管から漏洩する X 線の実態とその対策、大森儀郎、神奈川県立教育センター研究 集録、13 (1994) 21-24.
- 2. 教育現場における冷陰極管の漏洩 X 線について、宇藤茂憲、福岡教育大学紀要、66 (2017) 第 3 分冊、1-11.
- 3. 講演予稿集:日本放射線安全管理学会第17回学術大会(平成30年12月5日~7日、名古屋大学、野依記念学術交流館)

クルックス管プロジェクトシリーズ発表

- (1) 低エネルギーX 線の評価と安全管理に関する問題点と現状
- (1) The problem and the present status about evaluation and a safety control of low energy X-rays
- 〇秋吉 優史¹⁾、宇藤 茂憲²⁾、掛布 智久³⁾、神野 郁夫⁴⁾、小林 育夫⁵⁾、谷口 和史⁶⁾、野村 貴美⁷⁾、藤淵 俊王⁸⁾、宮川 俊晴⁹⁾、山口 一郎¹⁰⁾、横山 須美¹¹⁾
 - OMasafumi Akiyiohsi, Shigenori Utoh, Tomohisa Kakefu, Ikuo Kanno, Ikuo Kobayashi, Kazufumi Taniguchi, Kiyoshi Nomura, Toshioh Fujibuchi, Toshiharu Miyakawa, Ichiro Yamaguchi, Sumi Yokoyama
- ¹⁾大阪府大放センター、²⁾福岡教育大、³⁾日本科学技術振興財団、⁴⁾京大原子核、⁵⁾長瀬ランダウア、⁶⁾千代田テクノル、⁷⁾首都大東京、⁸⁾九大医、⁹⁾放射線教育 F、¹⁰⁾国立保健医療科学院、¹¹⁾藤田保健衛生大
 ¹⁾ Osaka Pref. Univ., ²⁾ Univ. Teach. Edu. Fukuoka, ³⁾ JSF, ⁴⁾ Kyoto Univ., ⁵⁾ Nagase Landauer, ⁶⁾ C-technol, ⁷⁾ Tokyo Metro. Univ., ⁸⁾ Kyushu Univ., ⁹⁾ Rad. Edu. Forum, ¹⁰⁾ National Inst. Public Health, ¹¹⁾ Fujita Health Univ.

中学校、高校の学習現場に於いて電子・電流に関する教育、また放射線教育の目的で従来からクルックス管が使われてきているが、古い製品の一部にはエネルギーは低いが近傍での H_p(0.07)が 100mSv/h を超える非常に高い強度の X 線を放出する製品が存在することがこれまでに報告されている[1-3]。20keV 程度の低エネルギーの X 線は、一般的なサーベイメーターではエネルギーが低すぎて線量測定が不可能である一方で、人体中1cm で半分程度にしか減衰せず、α線、β線の外部被ばくと異なり全身への被ばくによる実効線量は無視する事が出来ない量となる。実効線量の算出にはエネルギースペクトルと空間的な線量分布の評価が必要であるが、非定常的なパルス場であるため CZT 検出器などを用いてもパイルアップのためにスペクトル測定が困難である。加えて、誘導コイルの状態などによって X 線量が測定の度に数十%以上変動するため空間分布の評価も困難である。さらに経年変化により管内に封入したガス圧が減少すると放電に必要な印加電圧が上昇すると考えられるため、購入時期によっても大きく挙動が異なる。このため、実験室での詳細な測定に加えて実際の教育現場で用いられる製品を広く調査した上で(i)印加電圧のコントロール、(ii)距離と時間の制約、(iii)適切な遮蔽体の使用などによってクルックス管による実験を安全に実施可能なガイドラインを策定する必要がある。

クルックス管だけでなく、医療現場や廃炉作業現場での散乱線などにおいて、低エネルギー光子の正確な測定、評価手法が要求されている。特に、近年目の水晶体に対する被曝線量が問題となってきているが、低エネルギーX線は人体表面近傍での吸収が大きいため、検討を要する。また、生徒や教員は放射線作業従事者ではなく、放射線安全管理上これまであまり考慮の対象となっておらず慎重な検討が必要である。

このため、全国の放射線計測の専門家、線量評価の専門家、放射線教育関係者と実際の教育現場の先生方の協力を得て、「クルックス管プロジェクト」[4]を立ち上げ、遂行している。本セッションでは 1)低エネルギー X線測定の技術上の問題から本プロジェクトの意義を説明し、2)実際の教育現場の現状、3)全国の教育現場での横断的線量測定結果、4)計測器による測定結果からの実効線量評価上の問題点、5)低エネルギーX線評価に関する応用事例、の5件について発表を行う。

- [1] クルックス管から漏洩する X線の実態とその対策, 大森儀郎, 神奈川児立教育センター研究集録, 13(1994)21-24.
- [2] イメージングプレートを用いたクルックス管からの漏洩線量分布測定, 藤淵 俊王ら, 放射線安全管理学会誌, 10 (2011) 40-45.
- [3] 教育現場における冷陰極管の漏洩 X線について, 宇藤茂憲, 福岡教育大学紀要, 66 (2017) 第3分冊, 1-11.
- [4] http://bigbird.riast.osakafu-u.ac.jp/~akiyoshi/Works/index.htm

クルックス管プロジェクトシリーズ発表

(2) 中学校での放射線教育現状の報告

(2) The present situation of radiological education at Junior High School in Japan

森山 正樹 ¹⁾, 秋吉 優史 ²⁾, 掛布 智久 ³⁾, 川島 紀子 ⁴⁾, 佐藤 深 ⁵⁾, 宮川 俊晴 ⁶⁾
Masaki MORIYAMA ¹⁾, Masafumi AKIYOSHI ²⁾, Tomohisa KAKEFU ³⁾, Noriko KAWASHIMA ⁴⁾,
Shin SATO ⁵⁾, Toshiharu MIYAKAWA ⁶⁾

札幌市立白石中学校 ¹⁾, 大阪府大 ²⁾, 日本科学技術振興財団 ³⁾, 文京区立文林中学校 ⁴⁾, 札幌市立北栄中学校 ⁵⁾, 放射線教育 F⁶⁾

Shiroishi J. High School¹⁾, Osaka Pref. Univ. ²⁾, JSF³⁾, Bunrin J. High School⁴⁾, Hokuei J. High School⁵⁾, Radiation Edu. Forum⁶⁾

1. 中学校学習指導要領解説理科編の文言と現行の教科書におけるクルックス管を用いた実験の扱い

中学校理科第2学年では電流の正体が電子であることを理解するために、静電気の実験ならびにクルックス管による電子線(陰極線)の実験を扱っている。現行(平成20年告示)の中学校学習指導要領解説理科編[1]には、「高電圧発生装置(誘導コイルなど)の放電やクルックス管などの真空放電の観察から電子の存在を理解させる」とあり、現在用いている教科書では十字板や蛍光板入りのクルックス管による電子線を写真や図で説明している。平成29年告示の中学校学習指導要領解説理科編[2]では、第3学年で学習する放射線に関する内容の一部(は著者が記載)が第2学年に移行し、「電流が電子の流れに関係していることを扱うこと。また、真空放電と関連付けながら放射線の性質と利用にも触れること」と示している。そして、「その際、真空放電と関連させてX線にも触れるとともに、X線と同じように透過性などの性質をもつ放射線が存在し、医療や製造業などで利用されていることにも触れる」と記している。ある教科書会社では現行の内容でもレントゲンによるX線発見の歴史について発展的な読み物として扱っており、改訂中の教科書(平成33年度用)にはこのような内容が新しく入ってくると予想される。

2. 中学校の教育現場での実態と教師用指導書の記載内容の変化

中学校の教育現場では、クルックス管による漏洩X線の存在を知らなかったり、知っていても不安を感じながら演示実験をしたりしている理科教師が多い。また、歯科用のデンタルフィルムを用いてクルックス管から出る漏洩X線を用いた実験をしている教師もいる。ある教科書会社の 2012 年度版第 2 学年の教師用指導書では「放電管から 1 m も離れれば漏洩X線の影響はほとんどない」と記載していたが、2016 年度版においては「X線の影響に配慮し、演示は行わず、教科書の写真や図のみでの説明にとどめる」という表記に変わっていた。その背景として漏洩X線の話題が独り歩きし、十分な検証がされないまま安全側に配慮しての表記になったと考えられる。しかし、自然科学の教育において観察・実験を実

際に行う教育的効果は非常に大きく、クルックス管による演示実験が望ましいと考える現場の教師が相当数に上る。装置は高額かつ学校が統廃合しても引き継がれることもあり、昭和の時代に購入した誘導コイルや数種類のクルックス管を備品として理科室に保有している学校もあり、装置は多様である。授業では高電圧に対する安全性と生徒が目の前で観察する効果を鑑み、近い所にいる生徒と装置の距離を1m前後に保って数分間の演示実験を行う場合が多い(図



1)。 図1 演示実験の様子

[1] 文部科学省:中学校学習指導要領解説 理科編, pp. 33-36, 大日本図書株式会社(東京) 2008.

[2] 文部科学省: 中学校学習指導要領(平成 29 年告示)解説 理科編, pp. 40-43, 学校図書株式会社(東京) 2018.

クルックス管プロジェクトシリーズ発表

(3) 教育現場での実態測定結果報告

(3) Result of measurements in 16 junior high schools in Japan

谷口 和史¹⁾、青木 久美子²⁾、秋吉 優史³⁾、川島 紀子⁴⁾、小鍛治 優⁵⁾、 森山 正樹⁶⁾、宮川 俊晴⁷⁾、山口 一郎⁸⁾

Kazufumi Taniguchi¹⁾, Kumiko Aoki²⁾, Masafumi Akiyoshi³⁾, Noriko Kawashima⁴⁾, Yu Kokaji⁵⁾, Masaki Moriyama⁶⁾, Toshiharu Miyakawa⁷⁾, Ichiro Yamaguchi⁸⁾

千代田テクノル¹⁾、世田谷区立千歳中学校²⁾、大阪府大放センター³⁾、文京区立文林中学校⁴⁾、福井県永平寺町立志比北小学校⁵⁾、札幌市立白石中学校⁶⁾、放射線教育 F⁷⁾、国立保健医療科学院⁸⁾

C-technol¹⁾, Chitose junior high schl.²⁾, Osaka Pref. Univ.³⁾, Bunrin junior high schl.⁴⁾, Shihi-kita elementary schl.⁵⁾, Shiroishi junior high schl.⁶⁾, Radiation Edu. Forum⁷⁾, National Inst. Public Health⁸⁾

理科実験に使用するクルックス管から放出される低エネルギーX線の線量を確認するため、全国 16 の学校においてガラスバッジ(GB)を用いた線量測定を実施した。

X 線用ガラスバッジ(FX 型) サイズ:約 60x30x15mm エネルギー範囲:10keV~80keV 評価値:Hp(0.07),Hp(10)及び

図-1 FX 型ガラスバッジ

多種多様な放射線測定器が各学校で使用されているが、クルックス管から放出されるX線のエネルギーは最大で高々20keV 程度であり、放出方向・分布も極めて特異的である。このことから適切なエネルギー特性と測定器の大きさが重要である。また、最終的には授業でクルックス管を使う教師やそれを観察する生徒の被ばく線量が推定評価できる測定器である必要があると考えC社のGBを選定した。GBの特長を図-1に示す。

クルックス管からの低エネルギーX 線測定は、本プロジェクトに参加する学校の教師が実際に授業で使っている装置を用いて行った。測定実験における実施者の個人差を出来る限り排除するため、あらかじめ統一手順を

作成しこれに従い測定を実施した。図・2 に示すようなレイアウトで、クルックス管からの距離(15, 30, 50cm)による線量変化を測定するとともに、実効エネルギーの評価を行った。

測定の結果、クルックス管の種類、および高電圧を発生させる誘導コイルとその運用条件よって低エネルギー X線の線量はクルックス管近傍(at 15cm) 10 分間で検出限界値(0.05mSv)未満から 33mSv(70 μ m 線量当量)となり、図 3 に示すように 1m 距離での線量を外挿で求め 10 分間実験を行う実際の授業の条件を想定した場合、 $70\,\mu$ m 線量当量は $930\,\mu$ Sv に達することが明らかとなった。エネルギーも 17keV から 25keV の範囲で変化しており、これらの結果から人体への影響を確認するとともに、運用条件や装置の規制について検討を行う。



図-2 測定実験の様子

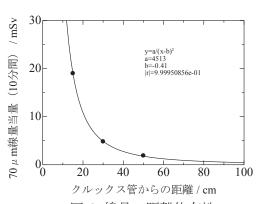


図-3 線量の距離依存性

学習指導要領改訂による放射線教育の新展開

大阪府立大学研究推進機構放射線研究センター 秋吉優史

1. はじめに

2008 年 3 月に行われた前回の中学校学習指導要領改訂で、3 年生のエネルギーと物質の単元で放射線について触れているが、一般的に 3 年生の 3 学期に取り扱う内容となっているため入試などにも余り出題されず、取り扱わない学校も多い。ところが、平成 29 年 3 月に公布された中学校の新学習指導要領では、2 年生で学習する「(3)電流とその利用」の単元に於いて「真空放電と関連付けながら放射線の性質と利用にも触れること」と言う内容が新しく追加されており、全ての学校が取り扱う 2 年生で学習する意義は極めて大きい。また、学習指導要領の解説に於いては、「クルックス管などの真空放電の観察から電子の存在を理解させ」と書かれており、クルックス管を用いた実験が求められている。

クルックス管は学習指導要領に記載された今回の改訂前から、中学校の学校教育現場で電流と電子の流れの教材として広く用いられており、現行の理科教科書 5 社全てでクルックス管について触れている。しかしながら古くはレントゲンが X 線を発見するきっかけとなったように、クルックス管からの放射線の漏洩が報告されており、製品によっては、また使用条件によっては、ガラス管表面から 5cm 位置で 1cm 線量当量が 100mSv/h を大きく超える、非常に高い強度の X 線が放出されている。

ところが、クルックス管から放出される X 線はエネルギーが低いため、ほとんどのサーベイメーターで正常に線量評価を行うことが出来ない。このため、実際の生徒への被ばく線量が評価されておらず、放射線安全管理上の問題が懸念される。特に近年眼の水晶体に対する被ばくが問題になっているが、エネルギーが低いため表面近傍での吸収が大きく、線源を見つめる必要があるクルックス管の特性上、詳細な検討が必要である。

とは言え実際の学校教育現場の教員は極めて多忙であり、また教員自身は放射線教育をほとんど受けていないため、教員自身が測定などを行って安全管理を行う事は極めて困難である。。このため、現在日本全国の放射線計測、線量評価、放射線安全管理、放射線教育の専門家と、現場の学校の先生方有志による、「教育現場などにおける低エネルギーX線を対象とした放射線安全管理体制の確立」プロジェクト、通称クルックス管プロジェクトを立ち上げ、教育現場におけるクルックス管運用上の放射線安全管理ガイドラインの作成と標準化を目指している。

2. クルックス管からの X 線の線量評価

誘導コイルからの出力電圧を制御するために、放電極間の距離を変えて、ギリギリ大気放電する放電出力として ガラスバッジにより線量の測定を行った結果を Fig.1 に示す。十字入りクルックス管の陽極側の正面ガラス端面か ら距離を変えてそれぞれ 10 分間測定を行った。クルックス管は点線源ではないが、点線源同様に概ね距離の逆二 乗で線量が下がっていくことが分かる。また放電出力を上げると、大幅に線量率が増加することが分かる。

次に、放電出力を変化させ、平均電流と距離 30cm での 70㎡ 線量当量率 (日立 ICS-1323 電離箱のフタ無しでの測定値を)を測定した (Fig. 2)。なお、放電極距離 20mm では放電出力 4 で大気放電が激しくなったためそれ以上上げていない。大気放電が起こらなければ放電極距離は電流や線量率に影響せず、放電出力と共に電流、線量率は上昇した。(放電極は電圧上昇のリミッターの役割を果たす)

3. クルックス管からの X 線のエネルギー評価

低エネルギーX線による全身へ実効線量を評価するためには、空間のある一点での線量だけでなく、エネルギースペクトルの情報が不可欠である。本研究ではCZT検出器を用いてスペクトル計測を行った。測定を行う上で、数十 cps 程度の低い計数率に於いてもパイルアップが起こってしまい、高エネルギー側に長く尾を引くスペクトルとなった。

これは、クルックス管からの X 線が間欠的にバースト状に放出されるパルス場であることに起因する。分圧器とオシロスコープを用いた印加電圧測定では、 $50\tilde{n}s$ 程度の幅のパルスが 1ms 程度の間隔で間欠的に印加され、平均では 10ms に 5 パルス程度であった (Fig. 3)。電圧が小さいうちはガラス管の外に X 線が放出されないことを考えると、概ね半値幅程度の $20\tilde{n}s$ が実際の X 線の放出時間となるため、計数率を 100 倍程度多く考えて測定を行う必要がある。 $\hat{u}0.5mm$ の穴開けをした 1mm 厚の鉛薄板を用いたコリメーターを用いて入射 X 線量を極端に減らし、10cps 以下での測定を行うことで、パイルアップの少ないスペクトルを CZT 検出器により取得した (Fig. 4)。ピーク位置は $14\sim18keV$ 程度の範囲で、印加電圧の上昇と共に僅かに高エネルギー側にシフトしていることが確認された。

4. 今後の展開

クルックス管から漏洩する X 線は、ただ厄介なだけではなく、様々な放射線教育に活用可能である。霧箱を用いることで X 線により叩き出された光電子による数 mm 程度の飛跡を観察可能である。放射線の本質は電子を弾き飛ばす電離作用であることを理解できるほか、距離や遮蔽によって飛跡の数が変化することを目で見て直感的に理解することが出来る。また、飛程を画像解析することでエネルギースペクトルを求めることが出来る可能性もある。特に、ペルチェ冷却式霧箱は過飽和層が薄く平面的に飛んだ飛跡のみを観察でき、熱電変換素子としてエネルギー教育にも役立てることが可能である。

また、電気と電流の単元で静電気の可視化によく使われる箔検電器は、一旦電荷をチャージした後に、周辺の空気中で放射線により生成した逆の電荷を吸い寄せて次第に箔が閉じていく。この閉じる 度は線量率に依存しており、一種の開放型の電離箱として機能することが明らかになってきている。

このように他の単元の内容とリンクすることで実験を一度に行い、授業時間を節約できることが可能である。今後様々な関係者により効果的な放射線教育コンテンツの発展に期待する。

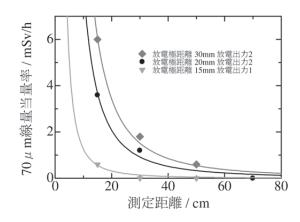


Fig.1 表面からの距離の逆二乗で線量率は低下し、 放電極距離の増加で大幅に線量率が上昇した。

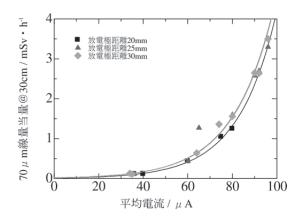


Fig.2 平均電流の増加と共に指数関数的に線量率が上昇する。

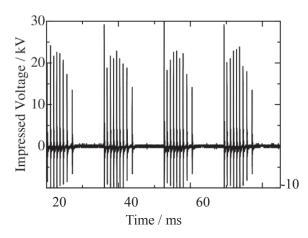


Fig.3 パルス状に印加される高電圧を分圧器とオシロスコープで測定した結果。放電極距離 $25 \,\mathrm{mm}$ 、放電出力 4 で平均電流は $80\,\mathrm{\~n}A$ であった。

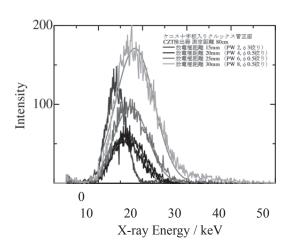


Fig.4 CZT 検出器で測定したクルックス管から のエネルギースペクトル

知りたい! エネルギーの? 電気の?

体験して学ぶ





科学技術館(東京・北の丸公園内)の「デンキファクトリー」、「アトミックステーション・ジオラボ」では、エネルギーや電気について、見て、触って体験できる展示を行っています。

科学技術館は日本科学技術振興財団 が運営しています

公益財団法人 日本科学技術振興財団・科学技術館 Japan Science Foundation / Science Museum

テータで学ぶ



電気事業連合会及び電力各社ホームページには、エネルギーや電気について、役立つ情報がいっぱいです。

まずは検索! 電事連 検索 (<u>http://www.fepc.or.jp</u>)

電気事業連合会





放射線は危険な性質を持っている反面、

有効に利用すれば人類に大きなメリットを与えてくれる無限の可能性をそなえています。

千代田テクノルは、医療・原子力・産業・放射線測定などの各分野において、

放射線を安全に有効利用するための機器やサービスをトータルに提供。

放射線の「利用」と「防護」の双方において、お客様のあらゆるニーズにきめ細かく対応しています。

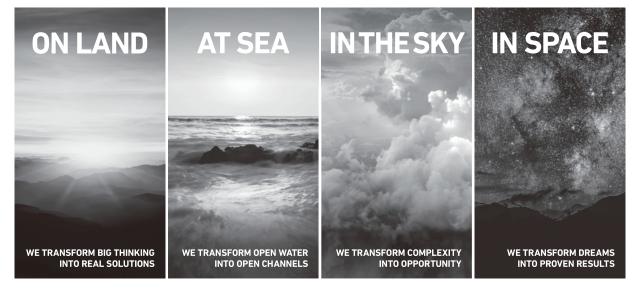
株式会社千代田テクノル

URL: http://www.c-technol.co.jp e-mail: ctc-master@c-technol.co.jp

千代田テクノル検索



MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES GROUP



たえまない変革を続け、この世界を一歩ずつ前に。陸、海、空、そして宇宙に、三菱重工グループ。

三菱重工業株式会社 パワードメイン 原子力事業部 〒100-8332 東京都千代田区丸の内 3-2-3 TEL 03-6275-6200 www.mhi.com/jp ★三菱重工

放射線教育用線源の無料貸出

小学校・中学校・高等学校における放射線教育への取り組みとして、放射線教育用線源(バリウム133、放射線障害防止法規制対象外)を作成し、無料貸出しております。

利用申込みの際は、当協会の放射線教育のサイトより**放射線教育用線源 利用申込書」**をダウンロードしていただき、ご記入の上、

Fax (03-5395-8053) 又は E-mail (gakujutsu@jrias.or.jp) にてお申込み下さい。

1) 学校名、2) 申込者氏名、3) 使用予定日、4) 使用目的、5) 線源希望個数、6) 送付先、7) 連絡先(電話番号、E-mail) 他

詳細はこちら:<u>http://www.jrias.or.jp/seminar/cat8/801.html</u>







