RADIATION EDUCATION

放射線教育

2009

VOL. 13 NO. 1

放射線教育フォーラム
Radiation Education Forum

放射線教育
Radiation Education
Vol. 13 No. 1

目　次

【巻頭言】　子どもの体力低下と理科離れ　渡利　一夫__ 1

【井口道生博士追悼記事】
放射線研究の魅力　井口　道生__ 3
惜別のことば―井口道生さんとの出会いと別れ　今村　昌__15
井口さんのこと　福田　昭__19
基本事項のまとめ：放射線と物質の相互作用　大野　新一__23

【原著論文】　大気塵埃付着のラドン子孫核種の α と β 線および β - α 相関事象の連続測定　橋本　哲夫__33

【研究報告】　全ての日本人が RI 取扱いの体験を持つには -- $^{68}Ge/^{68}Ga$ Generator の利用が有意義かつ現実的 --　野崎　正__43

【研究報告】　放射線教育に関する高校教員へのアンケート調査で表された意見の紹介と考察　田中　隆一__47

【実践報告】　青森支部 2009 年度の活動の記録　笹川　澄子__55

【実践報告】　知的好奇心の対象としての原子力・放射線への取り組み　大津　浩一__65

【ノート】　授業実践　見て・聞いて・数えて知る放射線　舩田　優__75

「放射線教育」投稿規定、原稿の書き方__77
編集後記__81

発行：2010 年 3 月 31 日，NPO 法人　放射線教育フォーラム
〒105-0003　東京都港区西新橋 3-23-6　白川ビル 5F
Tel: 03-3433-0308　FAX: 03-3433-4308
E-mail mt01-ref@kt.rim.or.jp,　*HP*：http://www.ref.or.jp

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 13, No. 1, p. 1 - 2 (2009)

【巻頭言】

子どもの体力低下と理科離れ

渡利　一夫
放射線医学総合研究所名誉研究員

文部科学省は 2008 年度、2009 年度に全国の 80%を超える小 5、中 2 の参加を得て全国体力調査、正確には「全国体力・運動能力、運動習慣等調査」を実施した。これとは別に 1964 年以降、全国から抽出した 6 歳～79 歳を対象に「体力・運動能力調査」を行っている。1985 年度の小 5 男子の“50 ﾒｰﾄﾙ走”、“ボール投げ”、“握力”の項目について 2009 年度の全国調査の結果と比較すると、それぞれ(9.05→9.37 秒)、(29.4→25.41 ﾒｰﾄﾙ), (18.5→16.96 ｷﾛ)でいずれも大幅に低下していることが明らかにされている。

一方、小 6、中 3 を対象に行われている全国学力調査で正答率が常に高い秋田県や福井県は 2009 年度の全国体力調査でも上位を占めていることは興味深い。

OECD による国際的な学習到達度調査（PISA）によれば日本は 2006 年度 15 歳の場合、読解力 15 位、数学的リテラシー（応用力）10 位、科学的リテラシー6 位で 2000 年度以降いずれも右肩下がりである。

また、国際教育到達度評価学会（IEA）による 4 年毎に行われる国際数学・理科教育動向調査（TIMSS）では 2003 年度の小 4 理科が前回比 10 点減、中 2 数学が 11 点減で、2007 年度もほぼ前回並みであった。以前は 1 位グループであったことを考えれば低落傾向の定着である。わが国で理科離れが叫ばれて久しいがこれらの結果はそれを裏付けているといえよう。

理科離れについてはさまざまな原因が指摘されている。以前は戸外で遊びながら動物、植物、自然現象などを学んでいたが自然は年々失われ、子どもたちは屋内で過ごすことが多くなった。学校での理科の実験の時間もすくなくなった。実験をすることにより科学的知識が培われていたが現状は十分とは言えない。加えて教師もなにかと忙しい。

このほか、学習意欲の低下、教育現場の荒廃、受験の影響も指摘されているが、基礎体力の低下と学力の低迷そして理科離れの相関関係は無視できない気がする。

このような事態を改善するために全国各地で関係者が努力を重ねている。2009 年 12 月、日本科学未来館で教育支援認証制度プレスタートシンポジウム（東京学芸大等主催）が開催された。その中のパネルディスカッション「市民の力をいかに教育に活かすのか……人材の側面から考える」では教育は学校の教員だけでは支えきれないさまざまな問題があり地域(市民)や行政との連携、そして人材の育成が急務であることが指摘されていた。

具体的な提案として、文部科学省が経費を保証する、大学の知的資源を活用する、自治体が場を提供する等を組み合わせる必要があるとの要望がだされていた。今後の検討すべき課題であろう。

理科教育の場合には人材、場所に加えて教材など難しい面もあるが最近さまざまな試みがなされている。理科実験の塾や教室も増えてきたし、各地で開かれている科学の祭典、科学技術カフェ、科学遊園地などのイベントも子どもたちに人気がある。大学や研究所の一線を退いた理系の研究者、技術者らも理科の楽しさ、自然の素晴らしさを伝えようと各地で活動をはじめている。私が関わっているニルス理科実験クラブは（独）放射線医学総合研究所のＯＢ有志が作った手作りの小さな実験クラブである。顕微鏡を使う、メダカの観察、昆虫の飼育、発芽と成長、酸とアルカリ、沈殿を作る、デンプン、ビタミンＣやタンパク質の検出、光を曲げるなどの実験を千葉市科学館や公民館などで親子が楽しく取り組んでいる。その姿はほほえましく家庭環境も大切なことを物語っている。

放射線教育の場合、一般の理科教育に比べてさらに難しい面がある。眼に見えない放射線・放射能を子供たちに理解させるのは難しいが、レントゲンやキュリー夫人の物語から始め、そして自然界での存在、病気の診断や治療、あるいは電力需要の現状なども教える必要がある。簡易放射線測定器（はかる君）でリン酸肥料、放射能温泉浴剤、キャンプ用ランタンのマントルなど身近なもので放射能の存在を知り、距離やしゃへい物で放射線の性質を学ぶ。ジェネレータや霧箱を用いるのも面白い。

放射線・放射能は宇宙創生以来の科学的現象であり、原子や元素は物質構成の基本であるが核兵器、原発、放射線障害、環境汚染などの視点から捉えられることが多い。その上これまでのわが国の放射線教育は先進諸国にくらべて十分とは言えなかった。急がば回れで時間はかかるかもしれないが中学高校の理科教育の一環として位置づけることが必要だと思う。

幸い平成 23 年度から中学校理科の学習指導要領が改訂され「放射線の性質と利用」が取り入れられることになった。しかし教える教師には不安もあると聞く。NPO 法人放射線教育フォーラムが正しい放射線教育について果たすべき役割はきわめて大きい。

そして、科学技術がこれからの地球環境、人類の未来にとって最も大切であるとの認識が理科離れを防ぐのに有効かもしれない。

（ニルス理科実験クラブ）

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 13, No. 1, p. 3 - 14 (2009)

【追悼記事】

放射線研究の魅力●

井口道生
アルゴン国立研究所
(2010年3月9日受理)

井口道生先生、2002年（脚注参照）

「要旨」　私の50年間にわたる仕事の大部分は放射線研究、すなわち物質に対する高エネルギー放射線の物理・化学・生物作用の研究である。（ここで高エネルギー放射線とはX線、ガンマ線、中性子線、それに物質中にイオン化を起こすほどに高いエネルギーをもつ荷電粒子のことである。可視光線、赤外線、マイクロ波、音波などは含まない。）放射線研究の魅力は、その研究が学問の諸分野にまたがっているところにある；私自身の専門は基礎物理であったが、興味の対象は次第に他の領域をも含むように広がり、そのことで非常

● U.S. Department of Energy, Office of Nuclear Physics からの研究費 Contract No. W-31-109-Eng-38 に基づく。

本論文は、第3回 放射線教育国際会議（ISRE04, Nagasaki Brick Hall, Nagasaki, Japan, August 23-26, 2004）における発表論文集から、その一部を英語から日本語に翻訳したものである： Mitio Inokuti, Charms of Radiation Research, JAERI-Conf 2005-001, p. 249-265（訳者：大野新一）

ここに掲載の写真は、2002年に井口氏から別件のため本誌編集委員会あてに送られてきたものである。

に満足している。高エネルギー放射線は宇宙、そしてわれわれを取り巻く環境を構成する重要な成分である。物質を特徴づけ、その挙動を理解するために有効な手段を提供してくれることもある。放射線は地球表面ではきわめてわずかしか存在しないが、にもかかわらずオーロラのような大気現象などで、また生命進化などで重要な働きをしている。最近の様々な高エネルギー放射線をつくり出す装置の開発は、医学や産業利用を含む放射線応用の可能性を拡大した。その利用に関連したことに私もたずさわってきた。一般人を対象とする講演ではいつも、基礎的科学の内容の話に加えて、知的な冗談をまじえるようにしてきた。放射線教育の目標の一つは、“放射線”という言葉を頻繁に使って“火”とか“電気”と同じようにありふれた一般的な言葉にすることであろうと。

１．プロローグ

日本の敗戦により第２次世界大戦が終結した1945年８月、私は東京の小学５年生であったが空爆をさけるための学童疎開により東京から北 120 km の日光山麓に平穏に生活していた。広島と長崎での原爆投下が行われた数日後に、理科教師が原子爆弾に関係した科学と技術の話を教室で生徒に話してくれた。1 時間足らずの授業ではあったが、私は強い興味を覚え、関心をもち続け、もっと学びたいと願った。今なおこの問題について学んでいると言ってもよい。

私が 1948 年に初めて英語で読んだ技術書は Smyth 報告書 [1] であった。これは原子爆弾についての最初の公式記録であり、多くの言語に訳され、確かに見事に書かれていた。この本のなかで Argonne Laboratory の名を私ははじめて目にし、後年、そこを引き継ぐ研究所で 40 年以上もの長い間、そして今なお、私が働くことになろうとは思いもしなかった。

放射線とその物質との相互作用に対する私の特別の思いは福竜丸（幸運な竜）事件から生じた。この事件は、1954 年のビキニ環礁における熱核融合装置（*Bravo* と名付けられた）の試験のあとで起こった。日本の漁船の乗組み員がかなりの放射線被ばくを受け、そのうちの一人が日本に帰還後ほどなく死亡した。同じ頃、私は医療診断あるいは治療で X 線が有用であることを学び始め、このことに好奇心さえも感じた。それ以来、私は放射線と物質の相互作用について学び、その知識を増すことに何がしかの貢献をしたいという欲望を抱き続けている。

放射線科学の魅力はそれが多岐にわたり、また多種多様なところにある。高エネルギーの放射線、そして物体に対するその作用は、加速器をはじめ他の放射線源、物理学に関わる関連装置などは言うに及ばず、素粒子、原子核、原子、分子、プラズマ、そして凝縮体などの研究に深く関わっている。高エネルギー放射線はいくつかの点で化学の諸部門にもまたがる：たとえば物理、無機、合成、および分析などの化学部門である。他の点では、生物、医学、環境科学、そして工学のある部門である。したがって放射線科学は、私のように興味の範囲が広い者にとっては好ましい研究部門であるといえる。放射線科学は異なる分野の寄せ集めでもあるが、百科全書的な知的集大成でもある。

ある種の科学の領域は物理から誕生したものの結局は工学の一分野として定着したものもあり、たとえば機械工学とか電気工学などがある。21 世紀には、同じように放射線工学

とよばれる部門も現れるかもしれない。

以下では、いくつか話題を選んで放射線科学の様々な面を説明することにする。

2．合成高分子に対する放射線効果

東京大学修士課程の学生としてこの標題の研究に従事した。この分野の重要性は、私の思うに、広く評価されているとは思えない。その重要さを示す例を挙げてみよう。

普通に入手できるポリエチレンは高分子（専門用語でポリマーと呼ばれる）から成り立っているが、それぞれは直線状のひもで化学構造 $-CH_2-$ のユニット(専門的にはモノマーと呼ばれる）が多数集ったものである。このポリエチレンをX線やガンマ線などの高エネルギー放射線で照射すると隣り合う分子の間で新しく化学結合ができる。この化学結合は専門的にはクロスリンクと呼ばれ、またこの結合の形成過程はクロスリンキング（＝橋かけ）と呼ばれている。放射線からの全エネルギー吸収のかなりの割合が橋かけのために消費され、この意味で橋かけは放射線作用の主要な結果の１つである。

照射をさらに続けて充分な数の橋かけが生じるとポリエチレン分子は三次元ネットワーク（専門用語ではゲル）を形成する。すると試料は機械的にも化学的にも著しく強く丈夫になる。この現象が多くの工業的な応用へとつながっている。一つの例は自動車エンジンの水冷却に関したものである。1960年代の終わりまで、冷却水の喪失、エンジンの過熱を経て車が動かなくなる事件によく遭遇した。これはゴム製チューブ・パイプの酸化劣化による破損から起こるもので、温度変化を繰り返し、しかも常時空気中の酸素と接触しているときに避けることの出来ないことであった。若い人はおそらくこの種の自動車事故について知らないかもしれないが、それは水冷却系に照射による橋かけポリエチレンを使用することですっかり事故がなくなったからである。

興味深いことに、この科学的な基礎が英国の Arthur Charlesby [2, 3] とアメリカの Malcolm Dole [4] によって互いに独立に発見されてから数年後のこと、この卓越した実用化が日本ではじまったことである。この事情は、トランジスターの発見とそれをラジオやその他の装置へ応用する場合と似ており、国が異なれば発揮する力も異なることを示している。

ポリマーに対する放射線効果は、一般的にいえばポリマーの分子種、配列、その他の特性によって異なり、いまなお豊かな研究分野の対象として調べられている [5, 6]。このことをもっと学びたいと願った私は、1962年に Northwestern University の Dole 研の助手になり、米国における私の生活がはじまった。私の科学への関心は少しずつ深くなるのである。

3．分子の電子励起とイオン化

空気のような気体、水やガソリンのような液体、合成ポリマーや生物細胞のような固体は分子から出来ており、専門用語としては分子状物質と呼ばれる。これらの物質の多くは絶縁性である。これらの物質に対する高エネルギー放射線の作用は、原子間の化学結合に関与し、そのため分子構造に決定的な役割を果たす電子の運動をかき乱すことからはじま

る。放射線エネルギーの大部分は電子の運動を変化させることに費やされるが、それは電子が物質の構成粒子のなかで最も軽く、実際に原子核よりもはるかに軽いからである。その結果、電子は高いエネルギーの軌道に引き上げられるがそれでもまだ原子なり分子なりに束縛されている；専門用語でこのことを電子励起と呼んでいる。でなければ電子は原子や分子から押し出され遠くへ引き離されてしまう；専門用語でこれはイオン化とよばれ、陽イオンがあとに残される。イオンというのは電荷をもつ原子や分子のことである。イオンをつくるような放射線を電離放射線（*Ionizing radiation*）と呼ぶ。

科学での新参者としての私は以上で述べた微視的なプロセスを完全に理解したいと願ったが、その分野の広さや深さについても何の認識を持っていなかった。それは原子、分子、それらが集合して液体や固体をつくるときの電子構造、そして衝突現象を包含するものであった。それから 50 年近く過ぎても、私は終わることのない研究を続けている。

4．Chicago で会った二人の先生

放射線に関連した物理と化学の二人の偉大な師 U. Fano と R. L. Platzman に遭遇した私は幸せであった。科学のどんな分野を学ぶときでも高い知的能力と愛着をもつ人物と知り合えることは幸運の一つである。

イタリア出身の Fano はローマで偉大な 20 世紀の物理学者である Enrico Fermi の指導を受けた。Fano は理論物理学の種々の分野で多くの貢献をした [7, 8]。私は、物質に対する放射線の相互作用の基礎について、まず東京での学生時代に彼の論文から、後には Chicago で彼との多くの会話を通して学んだ。彼は私に多くを教えた。しかしながら私がもっとも感銘を受けたのは彼のつぎの言葉である：“放射線科学のような応用分野で何かをしようというなら、基礎科学者からの尊敬が得られるだけの知的レベルの高さを保たなければならない。”この言葉が真理であることは、応用科学の分野での多くの凡庸な仕事を以後の私がみてくるにつれ、益々明瞭になってきたのである。

Platzman は米国人で、最初に Chicago で 20 世紀の偉大な化学者の一人 James Franck から、後に Copenhagen で Niels Bohr から指導を受け、理論放射線化学のパイオニアになった [9]。Platzman は後の発展につながる概念をいくつか考えだした。1963 年に彼は私を Argonne における研究協力者として雇ってくれた。沢山のことを私に教えてくれ、分子の電子励起を調べるいくつもの方法、いまでは世界中で多くの施設で実現されている放射光を使う方法、などを教えてくれた。

Platzman の業績としてもっとも有名なものは 1952 年の水和電子の予言である。照射中の液体の水のなかでは、イオン化が数多く起こっている；言い換えれば多くの電子が解放されて、陽イオンを後に残して水中を移動する。これらの電子がどうなるかを考えるには、まず水分子の性質を思い出さなければならない：分子の最外殻の電子は 2 個の水素原子よりも酸素原子のほうに近づく傾向がある。そこで離れたところから眺めると分子は双極子、すなわち一端が正に他端が負に帯電した 1 本の棒のようなものにみえる。棒の長さと両端の電荷の積（電気双極子モーメント）で双極子の強さがあらわされる。水分子は電気双極子モーメントを持つといい、水の多くの特性がこの電気双極子モーメントが大きいことで説明されるのである。室温の水中の分子は熱運動の結果として、動き回り、内部振動し、

もっと重要なことに回転しその双極子の向きを変化させている。もしも隣接した数個の双極子がある部分を向いているとき、近づく電子からみるとこの部分は陽電荷が存在するように見えるであろう。電子はそこに引き込まれ、余分の運動エネルギーを失えばこの部分に付着してしまう。暫くの間電子がこの部分に滞在すれば、すぐに分子配向、したがって双極子は電子を捕まえておくのにより適したようになる。Platzman はこの水中に捕捉された電子を水和電子（*hydrated electron*）と呼ぶことにし、これを分光学的に検出でき、また化学反応にあずかる化学種として容易に同定できる位に寿命が安定に違いないと推論した。

1962 年に、Hart と Boag [10, 11] は水和電子の吸収スペクトルを観測した。それから間もないころ、この大発見の喜びを共有している Platzman、Boag、Hart の会話を目撃した。事実、この発見はおそらく放射線化学が一般化学に貢献した最も重要なものであると思われる。アンモニアやアルコールなど、多くの誘電質の液体中で起こる類似の電子の状態は溶媒和電子とよばれる。

5．水に対する放射線効果

電離放射線によって開始される化学反応は 2 つの点で重要な研究テーマである。第一に、多くの原子炉で冷却材として水が使われている。第二に、水が生物体の主要な構成物質であることである。

Eugene Wigner のような原子炉工学のパイオニアたちは原子炉で使用されようとしていた材料の放射線効果を正しく承知していた。水はそのような材料の候補であり、安価に入手でき、また中性子の減速にもっとも効果的な水素原子が含まれているからである。水（H_2O）の照射によって水素分子（H_2）と酸素分子（O_2）ができて水素と酸素の気体が生成してくると単純に想像するかもしれない。そうならば運転中の原子炉の水冷却材から気泡が発生し、原子炉容器の気体圧力を高め、爆発の可能性ややっかいな工学的問題を起こすだろう。

当然のことながら、放射線によって水その他の材料が受ける化学変化についての研究はマンハッタン計画でも初期のうちにはじまった。こうした研究は*放射線化学*と呼ばれる研究分野として確立され、今日にも続いている。照射中の水からはごくわずかの量の気体しか発生しないことがすぐにわかった。さらに驚くことに、照射された水は短時間の後、といっても数多くの分子衝突が起こる時間の後に完全に元の水を復元する。この間、水和電子、水酸基（OH)、その他の中間化学種の間で様々な反応が起こる。これを全部述べること[12]は専門に過ぎるが、通常みられる分子状物質は照射後は通常元通りには戻らないことを述べておきたい。たとえば、油脂やガソリンなどは照射によりかなりの量の水素、メタン、その他の気体になってしまう。例外として気体あるいは液体の二酸化炭素は照射後も復元され、放射線抵抗性である。

生物細胞への放射線効果については、放射線からのエネルギー吸収には水がかなり関わることが重要である。さらに、細胞中のタンパク質その他の構成分子の元素組成(より正確には電子密度）は水の電子密度とほんの少ししか違わないので細胞の代わりに純水を考えることがそれほど悪い近似にならない。そこで細胞に対する放射線効果のある部分は水による放射線エネルギー吸収に起因する。言い換えれば、水酸基や他の化学種が水から生成

され生体分子と反応し、放射線効果をもたらす。これを*間接効果*と称する。でなければ、放射線効果の他の部分は細胞中のタンパク質、ヒストン、DNA、その他の分子によるエネルギー吸収に帰せられ、これらは*直接効果*と称される。専門家の多くは間接効果あるいは直接効果のどちらかにだけ基づく議論は完全ではないと考えている。言い換えるとこの 2 つの経路は重要さの点で相対的なのである。８章で再び放射線生物の問題を取り上げる。

６．金属に対する放射線効果

放射線研究の魅力の一つに放射線効果は物質が異なれば大きく異なるということがある。金属は、たとえば水、ポリマーなどの分子状物質とは根本的に異なる挙動をとり、以下にその理由を述べる。

金属片の中の電子の多くは原子核に強く縛り付けられている。これらの電子は原子核のすぐ近傍（専門用語で内殻と呼ばれるところ）を動き回り、原子構造や物体としての性質を決めるのにあまり役割を持っていない。ごくわずかの電子だけが原子核から遠くはなれたところを動き、原子構造や伝導度、磁性、光学などの物性に関係している。これらの電子は電気伝導をもたらすために導電性電子と呼ばれる。電離放射線は物質中のすべての電子にエネルギーを分け与え、大まかに言えばそれぞれ同じ程度である。電子に付与されたエネルギーは急速に膨大な数の原子振動の量子（専門用語でフォノン）に、それから熱エネルギーへと転換され、結晶構造に占める原子を正規の位置から不可逆的に変位させることはない；それで放射線は金属をある程度まで加熱することはあるが物性を変化させることはほとんどない。

金属に対する放射線効果を観測するには、特別の工夫が必要である。一つは、X 線やガンマ線を大量に吸収させる方法である。他の方法は、伝導電子と同じ程度もしくはより低速度の陽子線、アルファ線、重イオン線を用いる方法である；こうした低速の粒子線は電子を励起することはほとんどなく原子にエネルギーを与えて動かし、不可逆的な原子変位を起こして物性を変化させるのである。最後に中性子は直接に原子変位を起こすか、ないしは間接的にイオンを発生させる。したがって、原子炉材料に対する放射線効果を調べるときに、中性子、重イオン、その反跳として生じる粒子などを使うのである[13]。

第２章でのべたポリエチレンの橋かけの発見者の一人である Charlesby に、彼の晩年に近い頃、どのようにして発見したかと私的な会話のなかで私が訊ねたことがあった。彼の返事は次のようであった。1949 年、彼が Harwell の Atomic Energy Research Establishment に入所して間もないころ、彼の仕事は原子炉で使用される主たる材料、とくに構造上重要な金属の放射線効果を研究することであった。それ以前の研究によると金属は放射線にあまり反応しないことが分かっていたが、彼の仕事は効果が定量的に見えるところを決めることであった。何ヶ月もの間、彼は電気伝導、熱伝導、弾性率などの測定を続けたが無駄に終わった。Harwell 炉で通常の期間の照射から生じる変化はあまりにも小さくて、当時の汎用の測定装置では信頼できるほどの結果が出なかった；仕事は退屈で挫折感を与えるものであった。そのとき Harwell の近くの Oxford の街を歩いていたときに、ある考えが浮かんだ；ある店で安い腕時計のセールを目にし、それをたくさん買い求めた。当時の腕時計は、今日の電子式とは違い、鋼製バネの巻き戻りで動くものであった。彼はすべての時計

のバネをいっぱいに巻き、正確な時間に合わせ、それらを Harwell 炉内に置いた。一定時間後に次つぎと取り出しては時刻を読み取る；充分に精度よく、また照射時間に比例した時間の読みの変化を調べることが出来た。その測定結果を鋼の弾性率や他の機械的性質に転換することもできて、どうにか論文にまとめた。この逸話は腕時計の使用による測定精度を大幅に高めたという彼の実験物理への精通ぶりを物語っている。

このことの経験により Charlesby はもっと容易に放射線効果が見えてくる物質を探すようになった。手元の材料を次つぎと試みて当時の新材料ポリエチレンに辿りついたのは幸いであった。

7．放射線の測定

Charlesby の腕時計の照射の話（第 6 章）のなかで照射時間の長さに比例する効果（時間の読みとり）について述べた。もう少し詳しくこの点を説明したい。話を簡単にするために原子炉の強度はずっと一定であるとしよう。これは単位時間に生成するエネルギーが一定ということ、つまり単位の時間間隔のなかで核分裂する原子核の数も、そのなかで発生する二次荷電粒子の数も一定であることを意味する。炉内に置かれた腕時計が受ける“放射線の量”も単位時間当たり一定であると言ってもいい。ここで“放射線の量”とは何を意味するのか？原子炉のなかで腕時計は異なるエネルギーの異なる種類の粒子の衝撃を受ける。物質に対する放射線作用のメーターとして何らかの量を選ぶのがいいだろう。どんな量がもっとも適当か？100 年前の放射線科学の先駆者たちはこの問題に躓いた。

現在では物体の単位質量あたりに吸収されたエネルギーを指標として使い、これを線量 *absorbed dose* と呼んでいる。この量の単位はグレイ（gray）あるいはジュール/キログラム joule/kg である。省略記号で 1 Gy=1 J/kg とかく。この線量の概念は、いかなる放射線に対しても、またいかなる物質に対しても使われる。この表示法は経験的知識にもとづいているものである。経験によれば、ポリエチレンの橋かけ、金属中の原子変位、半導体中の電荷キャリアー、そして気体中のイオンなど、決められた条件下では、どの生成個数も線量にほぼ比例しているのである。その条件を完全に記述することは出来ないが、線量そして生成物の個数には上限値が存在する。典型的には、生成物個数は線量が高くなると比例関係から外れてくる。

線量に対する生成数の比例係数を理論的に導くことは可能であろうか？この問題を解決しようと私自身努力してきた。しかしながら私の答えはそれほど簡単でなく、ここで述べるには専門に過ぎる[14]。ここで述べることのできるのは、比例関係は近似的なもので、微視的な過程についてのいくつかの仮定に依存していることである。したがって、線量の使用は、科学による記述というよりも、その本質は便宜上採択された約束事なのである。

上記の制限付きとはいえ、物体への放射線エネルギー吸収に関する実験的・理論的研究は線量測定 *dosimetry* とよばれる放射線科学の一部門となって、医学、産業、法律など多くの実用上の文脈において重要であり、多くの人が関わっている。

線量測定に関する最近の研究は、利用できる放射線の種類がより多くなり、また吸収線量よりもさらに詳細な量を扱うようになっている[14]。

国際放射線単位測定委員会（ICRU＝International Commission on Radiation Units and

Measurements) の目標は、吸収線量をはじめ、放射線に関わる量の国際標準、その測定・計算のための技術、および結果の報告と医学、産業、他分野への応用のための作業に必要なデータを提供することである。ICRU は放射線医学者の要望にこたえて 1925 年に設立された。私は 1985 年以降そのメンバーである。ICRU の主な仕事は、放射線測定についての幅広い話題の中から時宜に適ったテーマを選び、知識の基準となるものと国際的な同意を考慮した意見を作成し、報告書を刊行してその基準を公にすることである。この目的のために、原稿執筆に最適任の科学者を指名して報告書委員会がつくられる。数年間の活動を経て、報告書委員会は本委員会に原稿を提出する。委員会の審議を経てほとんどの場合で原稿は書き直され、最終的に報告書として印刷される。これまでに 71 の報告書が出版され、公にされている。2001 年以来、私は科学編集者として仕事をし、報告書 No. 65－71 の最終段階の作業に関わった。ICRU 活動の全体像を知るには、web site: www.icru.org の参照をお推めする。そこでは電子ジャーナル *ICRU News* を読むこともできる。

８．放射線の生物効果

第 5 章を引き継いで、簡単に生物について論じたい。軟組織の細胞は多数の種類の分子から構成され、多層にわたる系統的構造をもっている。多くの専門家によれば、放射線効果は細胞核のなかの DNA(デオキシリボ核酸）の分子結合と構造の変化に起因し、正常の機能を壊すことである。生物効果の中には細胞死、突然変異または遺伝子変換、および器官の不具合あるいは病気などが含まれる。効果のなかでももっとも顕著なものであるがん化は、健全な細胞複製の失敗と細胞死(専門用語でアポトシス）に帰せられる。しかしながら細胞には DNA 以外にも、ヒストン、他のタンパク質、膜を形成する分子など多くの構成物が含まれている。放射線はこうした構成物にも大きな物理的そして化学的な変化を及ぼすに違いない；これらの変化がもたらす結果については、私の知る限り、まだあまり研究されていないのである。

これに対して、DNA における放射線誘起の変化は徹底的に研究されてきた。細胞の中で存在するときの DNA 分子はよく知られた二重らせん構造をとり、多くの合成ポリマーと異なる。そこで研究者たちは一重鎖切断と二重鎖切断を区別し、後者の切断が前者の切断よりも深刻な結果を導くと教えてくれている。そして DNA の切断ないしは損傷の大部分は酵素と免疫作用の働きで検知され修復されることもよく知られている；無生物界の物質でこんな仕組みは存在しない。

もう一つ際立った特徴は、生物効果の量は吸収線量が低い場合でも通常は線量に比例しないことである。よくみられることに、効果の量が２つの成分、1 は吸収線量に比例する、他は吸収線量の２乗に比例する部分からできていることである。これは何を意味するのか？第一に、何かの効果量が比例関係から外れる理由の一つは物理的なもので、ある範囲でエネルギー吸収が不均一なことに関係しているが、この範囲（マイクロメートルかそれ以下）はまた細胞構成物質のミクロ構造のスケールでもある。第二に、われわれが観測する生物効果は、一個の分子、いや一個の細胞の応答でもなく、近年の研究で次第に明らかにされている[15]ように、細胞集合系の組織だった応答ということである。

第一の理由（つまり物理的な）だけでもいくつか顕著な結果を示している。一つは、あ

る与えられた吸収線量における効果の量は放射線粒子の種類とエネルギーに依存する、というのも物質におけるエネルギー吸収の空間分布は異なる種類と異なるエネルギーの粒子によって異なることが物理から分かるからである。もう一つの結果は、吸収線量とその効果の間の関連は放射線の強度の時間変化に依存することである。

いま培養細胞系で半数の細胞を殺すために、X線を使うと吸収線量2.0 Gyが必要であり、中性子を使うと0.8 Gy が必要であったとしよう。X線を基準として、このことは中性子に対する生物学的効果比*relative biological effectiveness* は2.0/0.8＝2.5 であるということにしている。

医学および法的規制においては、線量等量 *dose equivalent* または等価線量 *equivalent dose* とよばれる実用線量が用いられるが、それは吸収線量に修正因子を乗じたものである。この無次元の修正因子は、生物学的効果比と考察中の放射線のなかに現れてくる全粒子の種類とエネルギーに関するデータを解析することから決められる。実用線量の単位はJ/kgでよいのであるが、グレイとの区別を強調するため特別の名前シーベルト（略してSv）の使用が勧告されている。一般人一人当たりの年間被ばく限度は1 mSv/y である。放射線従事者の被ばく限度は5ヵ年平均で 20 mSv/y である。

もっと大きい被ばく線量値の例を挙げてみよう。国際宇宙ステーション乗組員は太陽や宇宙線からの高エネルギーの陽子によっておよそ1 mSv/d を受ける。太陽フレアとよばれる太陽表面の爆発があると被ばくは10倍近く大きくなる。治療中のがん細胞を殺すための標準的な目標は60 Sv である。全身に100 Sv の被ばくは致命的である（人体に100 J/kg の熱エネルギーを与えても体温はわずかに0.024 ℃の上昇でしかないことに注意）。

人間と環境に対して被ばくの基準値を設けることは重要である。この目的のために必要な考察・検討などは、放射線防護 *radiation protection* と呼ばれ、自然科学を超えて経済、法律、そして政策決定の戦略などの要因をも含む。これに関連してよく議論される争点は、放射線による不利な効果が起こるリスクは、吸収線量が非常に小さいときも、線量に比例するのか、それとも吸収線量のある値（しきい値とよばれる）までは無視できるのかである。この種の問題に純科学的見地から答えるのは難しい；事実、争点が精密でなく明確な科学的な解答は出せない。この種の問題への解答は、現時点の限られた科学的知識に矛盾しないというだけでなく、大まかに言えば管理に関連したことでの決定あるいは政策を含むのが普通である。

国際放射線防護委員会（ICRP）には放射線防護に関する勧告書を刊行する責務がある。ICRPもICRUも協力関係を維持し、ICRPは検討問題を提起し、ICRUは問題解決に必要な検討のための科学的根拠を提供するのがしばしばである。

９．放射線研究および放射線利用における物理学の役割

放射線利用のなかでももっとも人類の福祉に貢献したのはX線による医療診断である。100年前にRöntgenによって開始されたX線医学画像はいまではコンピューター断層撮影（CT）に発展し、画像技術における偉業となっている。CT 装置は他のいかなる装置にもまして人命を救助したとよく言われる。電離放射線あるいは他の手段を使う画像技術（超音波や低周波の電磁波）は物質科学、機械・構造工学、地球科学、天文学、そして軍事技

術などで多くの応用がなされてきた。

診断技術のすばらしい進歩で私の知ることを紹介する。1960年代で公衆への被ばくでもっとも大きかったのは医療診断用のX線からであったが、現在もっとも大きなものは自然放射能からである。写真フィルムなどの装置や検出器の改良でかなりの被ばくが低減されるようになった。放射線画像技術の成功の理由は、この技術が広く確立した物理学の確固たる知識を基にしていることによる。前述の物理の役割をはっきりさせて示すために一般的な見解を挙げてみたい。放射線物理の問題は2種類に分類されるが、それでよいと私は考えている。第1種の問題は物質と相互作用したあとの放射線の行方に関するもの、第2種の問題は放射線と相互作用したあとの物質の行方に関するものである。第1種の典型的な問題は物質中を走る光子（すなわちX線またはγ線）の減弱の程度とそのときの物質による依存性である。光子エネルギーが極端に低いか高い場合でなく、また物質の原子番号が非常に大きい場合でなければ、この問題に対する信頼すべき解答は理論と実験の両面から得られており、それはイメージング技術の基礎として有用である。第1種の問題は実験的に研究しやすいが、それは物質を透過後の放射線を分析しさえすればいいからである。事実、第1種の問題の大部分は例外的な場合（1例は極めて正確な数値結果が要求されるとき、また物質が極度に不均一の場合など）を除いて原理的に解決されている。

第2種の問題はどれも研究することが難しい、というのは完全な解は原理的に照射下の物質中に存在する主な化学種のすべてを解析しなければならないからである。現在用いることのできる技術ではこの要求は満足されない。言い換えれば、どんな物質も照射により構成化学種のすべてが知られてないという意味で新物質になり、完全な解というにはこれら化学種のすべての特性を解明することを意味するからである。加えて照射下のどんな物質も熱平衡ではなく、そのためその性質は時間とともに変化するのである。第2種の問題の完全な解などは得られたことはないのである。

個人的に私は数年にわたって簡単そうに見える問題に取り組んできた：放射線エネルギーが純水素気体に吸収される際の主な経路を理論的に特定し、それぞれの経路の確率を評価すること。何人かの協力者の助けによって得た解は天文学者にとって有用であることが分かった。何故なら純粋な気体水素は星間雲のなかの冷たい領域や木星大気などを考察するときの基礎として役立つからである。

また別の古くからの第2種問題としてよく知られ、はるかに解決するのに困難なものがある。それはガイガー計数管のなかで実際に何が起こっているかという問いである。計数管は気体と1対の電極を含み、イオン化性の粒子が通過すると瞬時の放電が起こり、増幅されて電流となって外部で測定できる。経験的な試験によればアルゴンを主として微量のアルコール、エーテル、あるいはハロゲン含有分子を含む気体を使用するとよい。何故この組成がいいのか、どのようにして選ばれたのか、私は知らない。

最後に、放射線研究における物理の役割について一つの見方を付け加えておきたい。解析 [14] の結果によれば、広い意味の測定機器、たとえば放射線源、線量測定、特定の生成物を検出し解析するための方法、などの発展にとっての物理学の寄与したものは大きく、また決定的なものであった。しかしながら物質への放射線作用のメカニズムを解明することに対する物理学の寄与はまだ限定的で、また試験的なものである。この方向は続行するものと思われる。

10. エピローグ

前述の議論によって私がたずさわってきた研究の感じを伝えることができたと思う。私の能力の限界と許された紙面の範囲によってもっと広い話題を取り上げることはできなかった。それらのうちでも地球環境や宇宙のなかにあまねく存在する放射線と放射能については、Draganić, Draganić, Adloff [16] による優れた本がでている。他の話題としては原子力と核兵器がある。Garwin と Charpak [17] による最近の著書はこの分野の見事な紹介である。

謝辞

長年にわたって私に沢山のことを教えてくれた多くの友人たちに深く感謝の意を表したい。その間に本稿で記したような考えをまとめた。特に、最初書いた原稿に対して有益なコメントを下さった Paul A. Benioff, Ilya A. Shkrob そして André Wambersie にお礼を述べる。

引用文献

1. H. D. Smyth, Atomic Energy for Military Purposes. The Official Report on the Development of the Atomic Bomb under the Auspices of the United States Government, 1940-1945, Princeton University Press, 1945.

2. J. Kroh (ed.), Early Developments in Radiation Chemistry, Royal Society of Chemistry, Cambridge, U. K., 1989.

3. A. Charlesby, Chapter 4, p. 29 of Ref. 2.

4. M. Dole, Chapter 6, p. 81 of Ref. 2.

5. A. Mozumder and Y. Hatano (eds.), Charged Particle and Photon Interactions with Matter. Chemical, Physicochemical, and Biological Consequences with Applications, Marcel Dekker, Inc., New York, 2004.

6. S. Tagawa, S. Seki, and T. Kozawa, Chapter 19, p. 551 of Ref. 5.

7. M. Inokuti and A. R. P. Rau, Physica Scripta T68, C96 (2003).

8. M. Inokuti and A. R. P. Rau (eds.), Physics Essays 13, Nos. 2/3 (2000).

9. M. Inokuti, Radiatt. Phys/ Chem. 60, 283 (2001.

10. E. J. Hart and J. W. Boag, J. Am. Chem. Soc. 84, 4090 (1962).

11. J. W. Boag, in, Chapter 2, p. 7 of Ref. 2.

12. G. V. Buxton, Chapter 12, p. 331 of Ref. 5.

13. W. Schilling and H. Ullmaier, in Materials Science and Technology, A Comprehensive Treatment, edited by B. R. T. Frost, VCH Verlagsgesellschafst, Weinheim, Germany, 1994, p. 179.

14. M. Inokuti and S. M. Seltzer, Radiat. Res. 158, 3 (2002).

15. J. E. Trosko, J. Biochem. Mol. Biol. 36, 43 (2003).

16. I. G. Draganić, Z. D. Draganić, and J. -P. Adloff, Radiation and Radioactivity on Earth and Beyond, Second Edition, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1993.

17. R. L. Garwin and G. Charpak, Megawatts and Megatons. The Future of Nuclear Power and Nuclear Weapons, The University of Chicago Press, 2001.

注：本稿では専門的にしないという配慮により、引用文献としては一般的なものに限っている。歴史的に意義あるもの数点を除いて、標準的な科学上の文献を省略している。

「放射線教育」Radiation Education
Vol.13, No.1, p.15 - 18 (2009)

【追悼記事】

惜別のことば―井口道生さんとの出会いと別れ

今　村　　昌
放射線教育フォーラム顧問
(2010年2月10日受理)

昨年（2009）4月23日、久しぶりに、アメリカの井口道生さんからmailが届いた。井口さんとは、学問研究の話はあまりせず、もっぱら彼の多彩な知識に頼っていたので、また何かいい知恵を貸してくれるのかと思った。しかし今回のmailは、「放射線教育フォーラム」のニュースレター43号（2009年2月）に私が書いた「三つの"隠れ"トピックス」に対する感想であった。

井口さんからのmailには、「御説に全面的に賛成です」という書き出しに続いて、「私は過去数年、機会があるごとに二酸化炭素による大気の汚染という説が科学的には確立していないこと、そして政略的、および金儲けのために利用されていることを苦々しく思うと発言してきました。しかし微力なため、大して効果を挙げていません。」と書かれていた。わが国では、「温暖化」という言葉がマスコミの大々的な報道、識者のコメントなどによってすっかり定着し、その原因が人類の発生させるCO_2であるということになっている。確かに「温暖化」の原因の一つはCO_2であると思われるが、これに対する反論,異論などはすべて黙殺されているのがわが国の現状である。まさに戦時中の言論統制のようである。アメリカでは、これに対していろいろな反論,異論がかなり自由に議論されているようなので、機会があったら井口さんにアメリカをはじめとする諸外国の事情を率直に聞いてみたいと思っていたところであった。その矢先の悲報（2009年6月4日、没）であった。

筆者はまた、ニュースレター45号（2009年11月）に「CO_2 25% 削減・雑感」と題して、いま話題の中心になっていることの一つ、"eco"について雑文を書いた。ここで言いたかったこと、注意を喚起したかったことは、太陽エネルギーをはじめ、風力などによる発電や、いわゆる"ecoカー"と呼ばれる電気自動車、hybrid carなどのことである。これらは、運転中にはCO_2を排出,または殆ど排出しないから一見理想的な電源であり、自動車であるように受取られている。たしかに、屋根の上に置いた太陽電池から電流をとるとき、あるいは電気自動車を運転するときは"eco"である。しかし、太陽電池を半導体から作るとき、自動車を充電する電気を作るのにどれだけのエネルギー(おもに石油または原子力)を必要とするのかを考えると、必ずしもこれらは"eco"とは言えない。理科系出身の総理,副総理がとりしきる民主政権の政府がこれらの問題を考慮しているだろうか。井口さんと、これらの問題についても議論したかった。

井口さんが3年前頃からガンと闘っていたことは知っていたが、筆者より10歳も若い彼がこんなに早く世を去ることになろうとは夢にも思わなかった。わが国では、どんな考えや意見を発表してもレスポンスが返ってくることは極めて稀なので、井口さんのようにすぐ、率直な意見交換のできる友人を失ったことはかえすがえすも残念である。

井口さんのお仕事は、物質と放射線の相互作用を高エネルギー粒子と原子,分子との衝突過程

と捉え、R. L. Platzman、U. Fano 両博士の協力のもとで行われた物理的な研究が基本であるが、彼の該博な知識と好奇心は、放射線化学や放射線生物学にも大きな貢献をされた。その好例が「放射線化学」誌上に 20 回以上も連載された「放談」と彼が名づけた記事であろう。彼はその幅広い業績によって 1990 年、The University of Chicago Award for Distinguished Performance at Argonne National Laboratory を受けておられる。その他学会や國際機関における活動にもめざましいものがある。また、1985 年には ICRU のメンバーに選ばれ、2001 年には Scientific Editor に任命されている。

井口さんがガンと闘っている間も、筆者が受取った mail（4 月 23 日）によると、「まずまず普通の暮らしです。いろいろな仕事をしています。第一は、J. Appl. Phys.の編集です。仕事の大部分が web の上でできるので便利です。しかし、自宅で休みたいときでも、旅行に出ても、この仕事を怠る口実がありません。毎日、約 2 時間は働きます。アメリカ物理協会の職員として給与をもらっています。第二は、Principles of Radiation Physics と題する英文の本を一人で書いています。これまでに、double-spaced で印刷して 200 ページ以上書きました。予定の 1 / 3 に相当します。」そして、「あと 2 年ででき上がるでしょう。それまで生きたいものだ、と医者に言っています。医者は、その可能性は高い。但し、治療に関して協力すること、と言われます。」このように死を迎える直前まで、活発な研究活動を続けておられた姿を涙なしには想像することができない。

さて、私が井口さんに初めてお会いしたのは 1961 年秋に New Hampshire 州の小さいけれどもこじんまりしたきれいな学校で行われた放射線化学に関する Gordon Research Conference であった。このとき井口さんはアメリカへ来て間もない頃であったと思う。私もアメリカに来て間もない頃で、英語もまだろくすっぽしゃべれなかった。井口さんもアメリカに来られてそんなに日にちは経っていなかったと思われるが、堂々と英語を駆使して発表された。渡米前に会話の練習をしてこられたのであろうが、専門の研究者の前で示された自信のある態度に大いに畏敬の念をいだいたことを覚えている。このとき私は家族（妻と娘）を同伴していたが、休み時間に彼の若い奥さんがわたしの 10 歳の娘を相手に遊んでくださった。50 年も前のことであるが、忘れることのできない懐かしい最初の出会いであった。

研究のこと以外にも彼の関心、興味はいろいろなことに広がっていた。ポーランドの J. Kroh 教授から筆者に日本における放射線化学の歴史的なことを書くようにとの依頼を受けたとき、理研におけるサイクロトロンの歴史を紹介したいと思った。理研では、故仁科芳雄博士とそのグループの人たちがはじめて大型のサイクロトロンを建設したが、終戦後に占領軍によって破壊されたことは有名な事実である。筆者は勿論そのときはまだ学生であったから、ことの詳細は見聞していない。しかし執筆を依頼されたとき、破壊の後、再び建設されたサイクロトロンで仕事を始めていたので、是非この破壊と再建の事実を調べたいと思った。しかし日本には、破壊当時の記録などが纏まっていなかったので、アメリカでの当時の記録がないかどうか、もしあるとすれば入手したいものだと思って井口さんに相談した。井口さんは早速 Chicago 大学の図書館を探して、破壊に関する一連の New York Times をみつけ、大量の記事のコピーを送ってくださった。この大変なご援助のお陰で J. Kroh 教授が編纂された「Early Developments in Radiation Chemistry」(The Royal Society of Chemistry, 1989) の Chapter 15 に 「Cyclotrons at the Institute of Physical and Chemical Research: A Cyclotron Can be Destroyed, but Not Defeated」と題する一文を掲載することができた。この英文の内容はその後邦文にして「放射線教育」誌や「放

射線化学」誌に掲載していただいたので、お読み下さった方もあると思う。

井口さんはまた、日本人のために英文による論文の書き方についても適切な参考書を丸善から出版されている。亡くなられる直前にいただいた mail によると、新しい参考書を執筆中とのことであったが、とうとう手にとることはできなかった。井口さんはこのように日本人の英語の論文についても大きな関心をお持ちになっていた。筆者が厚かましくも「化学英語論文を書くための 11 章」（講談社サイエンティフィク、1987）を出版したとき、その初版を井口さんにお送りしてご意見を伺ったが、早速ていねいに目を通して下さり、適切なコメントを頂いた。訂正やコメントを書き加えてある第一刷は筆者の大切な記念である。この際に頂いたお手紙には「・・・全体の構成はまことによくできていて、大切なことはほとんどもれなく書いてあると思いました。また読んでいて楽しいように、いろいろなユーモアが入っているところも感心しました。・・・」という半分以上はお世辞めいたコメントもありがたく頂いた。

丸善に顔が利いた井口さんから「The Craft of Scientific Writing」（Michael Alley、Prentice-Hall, Inc. USA 1987）を翻訳するようにとの依頼を受け、だいぶ難儀の上「科学論文の書き方－説得力はこうして生まれる」（1989、丸善）を出版できたことを最後に記して懐かしい井口道生さんに捧げる感謝と追悼のことばといたします。

（理化学研究所　名誉研究員）

[編集委員会からの参考資料: 井口道生氏の略歴]

1958年 東京大学大学院数物系 (応用物理学専攻) 修士課程修了
1960年 東京大学大学院数物系 (応用物理学専攻) 博士課程中退
1962年 ノースウエスターン大学 博士研究員 (1962-1963)
工学博士 (東京大学)
1963 年 アルゴンヌ国立研究所 postdoctoral research associate.
1965年 アルゴンヌ国立研究所研究員 (full-time staff as a research physicist)
1973～95年 アルゴンヌ国立研究所主任研究員 (senior physicist and Manager of the Molecular Radiation Physics Program, Environmental Research Division.)
1995-2009 年 Post-retirement research participant, Argonne National Laboratory

(その他の兼職等):
1969-70 Visiting Fellow, Joint Institute for Laboratory Astrophysics, University of Colorado and National Bureau of Standards
1980 NORDITA Guest Professor, Odense University
1996-present Visiting Scientist, GSF National Research Center for Environment and Health, Munich
1999 Eminent Scientist, Institute for Physical and Chemical Research (RIKEN), Tokyo
Fellow, American Physical Society
Fellow, Institute of Physics (London)
Member, Physical Society of Japan
Member, Radiation Research Society
Member, International Radiation Physics Society
1985-present Member, International Commission on Radiation Units and Measurements
1988-present Member, Editorial Board for Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics
1996-present Associate Editor, Journal of Applied Physics
2000-present "Physics Essays" Editor
2009-passed away 4 June

日本語の主な著書:「英語で科学を語る」,「英語で科学を書こう」,「続 英語で科学を書こう」(以上, 丸善)

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 13, No. 1, p. 19 - 22 (2009)

【追悼記事】

井口さんのこと

福田　昭
理論放射線研究所
連絡先：〒300-0873 土浦市　荒川沖　110-43
E-mail: fukuda-chochi@mx6.ttcn.ne.jp
(2010年3月3日受理)

井口さんとわたしのお付き合いは1969年以来、というより1969年からわたしはご指導を戴き始めた。その年、京都で開催された質量分析国際会議にアメリカから出席された井口さんに初めてお会いした。誰だったか日本から参加された何人かの方々が井口さんに会うというときがあって、何も知らなかったわたしもご一緒させていただいた。そのとき初めてお会いした井口さんは放射線物理と原子衝突の研究者であるということを知った。当時の私は工業技術院電気試験所で放射線研究室に居て放射線計測関係の研究をしていたが、上司の紹介で当時の東京大学宇宙航空研究所にいらっしゃった高柳和夫先生にお会いしたときに、学生時代に原子衝突の物理学に興味を持ったことを思い出し、その関係の研究をしたいと考えていたときであった。国際会議の期間中、たまたまお一人での井口さんを見つけて、こういうところに居てこういう研究をしたいと思っているが・・・ということを相談させていただいた。井口さんは即座に、ご自身が同様な状態にあり、十分に両立することであるということをお話くださった。このときも、その後も、井口さんは私との会話のときに(挨拶程度のときは除いて)は、必ず席を見つけて時間を取ってゆっくりと話してくださった。わたしが先生とお呼びすることを嫌って、大学の教師ではないし福田さんとは同業者とでもいう関係ですから、わたしたちの間では「先生」はやめましょうということで、お年上の先輩に対して恐れ多いことながら、初めから「井口さん」で通させていただいた。

定期的にお会いするということはなく、国際的な会議(学会)に参加するときに、井口さんもわたしもいつも同じような会議に参加していたので、一年あるいは二年に一度というような間隔でお会いした程度であった。その間に井口さんは時々日本のいろいろな機関に招かれて来日されていたので、その機関が井口さんを交えた研究会などを開催したときには参加させていただき、お会いすることもあった。そんな程度で・・・と思われるかもしれないが、わたしは実験的研究をしているので、井口さんと話し合って大きくいえば研究の方向、小さくは研究テーマ内で、のさまざまな変更の必要があるとわたしが判断したときには、それを実行するには実験装置の変更・改良・付加を行わなくてはならず、予算措置から始めなくてはならないので、データを出して結果を持って井口さんと話し合うということのためには、その程度の期間が必要であり、国際会議がその程度の間隔で開催されるのは(参加旅費の都合からも)ちょうどよかった。井口さんが常におっしゃっていたのは、(井口さんの話は)コメント程度ととってほしい、こうしなさいと言っているのではない、

ということであった。ご自身の広く深いご経験からいろいろなお話を戴いたが、お話の口ぶりも決して強制的なことはおっしゃらず、こういうことを考えたらどうか、こういうことも考慮に入れてはどうか、というお話であった。ご自身は実験の経験はないからということで、そのようなコメントが実現可能かどうかということはわたしが自分で考えなさいということであったと思う。この実現可能かどうかということにはいろいろな意味があった。わたしが属していた電気試験所・名称が変更されて電子技術総合研究所(現在はさらには大きな組織改変された産業技術総合研究所となっている)は当時の通商産業省の研究所であったから何でも研究者の自由に研究できるという組織ではなかった。そこで行われる研究は当然ながら通商産業省の政策に沿うことであり、その政策に役立たねばならない。その研究所で放射線の研究が行われていたのは、通商産業省が放射線の計測に関する日本での標準の確立と供給を担当していたからである。当時の研究室では先輩研究者の多くは計測技術の高度化のための研究に携わっており、それにより、より正確・精密な放射線測定を行うことを目的としていた。そのような環境において原子衝突関連の研究を行うということは難しいかなと考えていたときに、幸いにも、これからの放射線の効果の研究には原子衝突関連の研究成果・知識が必要であるということを、直属の上司が言い出してくれて、高柳先生にお会いする機会があったりして、井口さんのアドバイスやコメントが生かされる雰囲気になってきた、つまりひとつのことは実現可能に近づいたのであった。万事このようであったから、わたしと井口さんとの交流が頻繁であったとは言えない。それでもわたしの研究に対して大きな影響を与えてくださったのである。

放射線関係の研究をされている方々はよくご存知のことと思うが、放射線の計測・標準に関して、国際的にはICRUという組織があり、大きな権威を持っている。その組織が不定期に発行するICRU REPORTはその時代における放射線計測の最先端を示し、携わる者に指標となっている。そのREPORTが取り扱うテーマには、この組織の設立初期には放射線計測技術の高度化を目指した技術的内容のものが多かった。時代が移ってICRUの構成メンバーに原子衝突物理学関係者が参加するようになり、井口さんも参加された。こういう時代になって、放射線効果の詳細な理解には電子・原子・分子・光の衝突関係の研究成果が必要であることが広く理解されるようになった。当然のことながらICRU REPORTの取り扱う内容にもそのような研究成果が大きく取り入れられるようになった。井口さんはそのICRUのメンバーとなってから積極的に発言されて、衝突物理学関係の論文を評価してデータ集として発行することに尽力された。わたしたちが放射線関連の研究室(所)で衝突物理学関係の(理論的・実験的)研究をしていて違和感がなくなってきたのは井口さんのおかげであるとさえ言える。こういう意味では、学生など若い方々で、現在衝突関係物理学の研究をされているなら、その経験を生かすなら、大学等でポストの空きを待つのでなく、放射線計測関係の研究所(室)を就職先として考えてみることもいいかも知れない。

わたしは井口さんが属しておられたアルゴンヌを訪問しようと思ったことはなかった。特に訪問しても、実験での研究者でない井口さんに(実験装置を見学するというようなことがないので)アルゴンヌでお会いしなくてはならないという理由もなかった。電子技術総合

研究所は 2001 年に産業技術総合研究所と改組されて組織内での広い交流ができるようになりわたしもほかのグループの研究にも関与するようになった。そのグループでの研究成果により Gordon Conference に参加できることになり 2001 年の夏にコネチカットでの会議のついでにアルゴンヌに立ち寄ることにした。噂には聞いていたが、わたしが研究室を訪問したいとお伝えしたときの井口さんの対応は大変に親切なものでした。ほかの日本からの研究者の方々にもしていることだからと、シカゴ空港へ出迎えのリムジンを手配してくださったことから始まって、訪問期間中の井口邸での宿泊滞在から帰りの空港までの送り届けまで、旅行会社でもここまで親切には・・・と思われたほどであったが、日本からの初対面の研究者にも同様にされていると聞いて大変に驚いた。昼食時には所内だけでなく、街の中のショッピングセンターのいくつかのレストランへも案内してくださった。三日間も滞在していれば、研究の話題だけでなく、いろいろなことを話し合うことが出来たが、思いがけず知ったのは、井口さんが放射線物理学の本を書くつもりであるということであった。ついては、わたしが定年退職したら引用文献の整理を手伝いにアルゴンヌに来ないか、というご提案があった。近い退職後の予定を特に決めてあることもなかったし、長らくご指導戴いたお礼のつもりで、そういうお手伝いなら喜んでさせていただくということにした。日本でどなたか、まとまった放射線物理学の教科書を書いていただけないかとかつて考えたときに、(故)小川岩雄先生にお願いしたことがあったが、もう歳だから・・・と断られてしまったので、井口さんのお話は大変うれしかった。ご多忙ながら少しずつ書いていくつもりであるということであったので、どのくらいかまとまった頃にご連絡を戴いてから来ますということにした。定年退職の知らせを送ったフランスとスイスの研究所からの、給料は支給しないが机と電話とコンピュータは用意するから来ないかという誘いを断って、井口さんからいつ呼ばれてもすぐに発てるように携行する多数の論文などを整理しつつ、またいつになるのだろうと思いつつ待っていた。でも、まさか井口さんに催促は出来ないのでこちらからは連絡はしなかった。それが、いきなりの訃報が届き、これほど驚いたことはなかった。その本に書くことの概要は聞いていたので、その本が出版されれば放射線物理学の研究を志す研究者にとっては座右の書ともなるべきはずのものであった。Mott & Massey の衝突論の教科書のような最新の研究論文まで引用文献して網羅した大部のものになるはずであった。そのような本が出版されることが不可能になったことでの、この分野での若い研究者を導くためのひとつのそして有力な手段が失われた損失は大きい、ということと同時に、わたしの個人的なことであるが、長年のご指導に対して唯一恩返しが出来るはずであった機会が失われてしまい、ついにわたしからは(当然でもあるが)何もして差し上げられなかったことが残念でならない。大野新一さんをはじめ何人かの日本の研究者は、井口さんのご病気についてご自身からの連絡ということでご存知だったとのことであったが、わたしには本の執筆以外で連絡をする必要もなかろうというご判断であられたか、お知らせはなかったので全くの突然のことであった。出版する予定であったご遺稿に誰かが手を加えることは、文章に細心の注意を払われていた井口さんにとって本望ではなかろうし、未完成のまま出版するわけにもいかないであろう。今後、いつ、井口さんのような原子衝突の研究にも放射線計測にも深い理解のある人が現れるであろうか、海外まで見渡しても、後継となれる人は見当たらない。若くしてアメリカの研究所に籍を置き、ご自身の研究を深められたことはもちろん、若い研究者の育成にまで配慮しつつこ

の分野で世界をまたに駆けてご活躍された井口さんのご冥福を祈る。

大野新一さんからのご連絡を受けて、井口さんに関して何か書くようにとのことでしたが、ちょうどわたしの属している原子衝突研究協会の会誌「しょうとつ」に寄稿したばかりでしたので、軽い気持ちでお引き受けはしましたが、いざ書いてみると、井口さんはわたしにとっては「先生」であって、日本の諸研究者の方々のように井口さんと対等に頻繁にお付き合いさせていただいていたわけではないので、細かな研究上の議論を除くと、話題が多くはなく、結局、「しょうとつ」に書いたことと同じような内容になってしまいました。大野さんから、書けないなら「しょうとつ」からの転載を依頼することを考えるとまで言われては、お世話になっている大野さんにご迷惑をかけてしまうので、書かせていただきました。

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 13, No. 1, p. 23 - 32 (2009)

【追悼記事】

基本事項のまとめ：放射線と物質の相互作用

大野新一
理論放射線研究所
〒227-0054 横浜市青葉区しらとり台 12-5
E-mail ohno-trl@1.246.ne.jp
(2010 年 3 月 19 日受理)

【要旨】 宇宙に存在するすべての物質は共通の数種類の微細粒子から構成されている。あるものは互いに結合して物質とよばれ、他のものはエネルギーを得て単独に走り放射線とよばれる。粒子は互いに衝突し、エネルギーの一部を交換する。光、電子、陽子の間の相互作用をまとめ、このことに生涯を通じて深い関心を持ち続けられた井口道生氏への追悼としたい。

1．はじめに

井口道生先生は、米国アルゴンヌ国立研究所で放射線と物質の相互作用についての研究を続けながら、基本的な事柄を徹底的に考えることの大切さと面白さを多くの人たち、とりわけ日本の放射線研究者に語ってこられた。そのことを思い出しながら、放射線教育に携わるさいに必要と思われる基本事項を整理してみたい。ここでは、目的はあくまでも放射線と物質の相互作用に関する科学、すなわち自然の仕組みを理解することを念頭におく。放射線の実用的な利用方法、放射線から身を守る技術、放射線の検出方法、放射線研究の歴史などは取り上げないことに留意されたい。

放射線としては電磁波（周波数 ν、あるいは光子）、荷電粒子（電荷 Ze、速度 *V*)を考える。物質としては電子、原子、分子の集団を考えればよいが、もっとも簡単な場合を考え、まずは 1 個の電子、つぎに水素原子を考える。

まず電磁波と 1 個の電子、つぎに陽子（速度 *V*) と 1 個の電子の相互作用、さらに電磁波と 1 個の水素原子の相互作用、陽子（速度 *V*) と 1 個の水素原子の相互作用をしらべ、最後にそれぞれの放射線を電子の集団、水素原子の集団に走らせたときに放射線がどのようにしてエネルギーを失って放射線でなくなるかをまとめる。

2．微細粒子に共通する性質

2.1 波動性と粒子性

放射線として本稿で対象とする電磁波(光子）や荷電粒子はすべて微細粒子であるが、最初に微細粒子の性質について触れておきたい。まず質量について、電磁波（光子）の質量は $m_\nu = 0$、電子の質量は $m_e = 3.1 \times 10^{-31}$ kg、陽子(中性子の質量もほぼ同じ）の質量は 1.67×10^{-27} kg である。電荷は、光子が 0、電子が $q_e = -1.6 \times 10^{-19}$ C、陽子は $q_p = +1.6 \times 10^{-19}$ C であり、原子核の電荷は含まれる陽子の電荷の和である。また Einstein の特殊相対性理論(1905)によれば、微細粒子のエネルギー E はその質量を m，運動量を $\boldsymbol{p}$ とするとき

$$E^2=(mc^2)^2+\boldsymbol{P}^2c^2 \qquad (1)$$

としてあらわされる。この式は、質量のないエネルギーEの光子(電磁波)の運動量が$p=E/c$であること、また静止している（運動量$p=0$) 質量m の物体のエネルギーがmc^2であることなどを示している。

ここで運動する微細粒子(実はこれが放射線と呼ばれているものの実体である)に共通する重要な性質について述べる。運動する微細粒子は、われわれが日常的に理解している“波”のように行動し、他の微細粒子と相互作用してエネルギーをやり取りするときにはわれわれが日常的に理解している“粒子”のように行動する(量子力学からの要請)。そこである時刻tにおいて、空間の座標の原点にそっと1個の電子をおいたとしよう。電子がじっと動かないでいることはない。波を座標の原点にとめておくことはできないのである。つぎに陽子を1個もってきて改めて陽子の位置を座標の原点としよう。陽子をある場所(原点）にじっと止めておくことは出来ないであろうが、電子はいつまでも陽子の周囲を行ったり来たりする。そこで電子は遠くへ行こうとしても直ぐに引き戻される。これが水素原子である。陽子の＋電荷に捉えられて遠くに離れることの出来ない電子は、陽子(原点）の近傍を動き回ることになるが、エネルギーのやり取りがない間は波動、しかもこの場合は時間的に形が変化しない定常波（定在波ともいう）として存在する。その定常波は電子の運動エネルギーの大きさによって球形（s波)、ダンベル型（p波)、d波、f波、・・などの形をとることが知られている。いずれも安定であり、このまま他の水素原子にぶつかり合ってもそれぞれの定常波の形は崩れない。

この水素原子のなかの電子の運動について少し考察を加える。最初に、古典力学的モデル、つぎに量子力学の波動モデルと本質的に同じものであるが不確定性原理とその応用として水素原子の大きさを考える。

2.2 古典力学的モデル

水素原子核（陽子）の周りを動き回る電子を陽子から眺めると、その電子が遠く(距離r)で静止の状態(運動エネルギー:$m_e V^2/2=0$) からスタートしても陽子からの引力により(クーロン力による位置のエネルギー：$-e^2/r=-q_e q_p/4\pi\varepsilon_0 r$) 次第に速度を増しながら近づいてくる。電子は陽子にぶつからないものとして通り過ぎて反対方向に飛び去り、速度がゼロになって再び落下する、その繰り返しである。

$$\text{電子の力学的エネルギー}：E=m_eV^2/2-e^2/r \qquad (2)$$

この式の値が負になる、すなわち電子の運動エネルギーが位置のエネルギーを超えることがなければ、電子は原子核に束縛されている。さらに運動エネルギーが特定の値であれば電子の波は定常波(定在波ともいう）を形成し、ここで原子の中の電子がなぜ外に出て行かないかを電子の運動エネルギーと波の屈折率の関係から説明できる[1)]。波がある媒質から屈折率の異なる他の媒質に入るとき、波面または進行方向が曲がる。屈折率が大きい媒質では波長(＝電子の運動量に逆比例する）が短いので、屈折率は速度に比例する。全エネルギーが (2) 式のように与えられている水素原子内の電子では、原子内の各点における速さは中心に近いほど大きい、したがって中心に向かって次第に屈折率が大きい。全エネルギーが適当な値であれば電子は屈折しながら陽子からはなれずに回ることが出来る。

2.3 不確定性原理

質量 m の微細粒子が一定の速度 V で x 軸方向を走るとき、波としての振幅(時刻 t、位置 x の関数としての波の振幅のこと；波の強さは振幅の 2 乗に比例する）は $A\sin(Vt-vx)$ とあらわされる。このときある時刻における微細粒子の位置については x 軸上のどこかにあることは分っていてもそれがどこにあるかの x の値は特定できない。ところが x 方向の運動量は $P_x = mV$ である。このことを x についての不確定さは $\Delta x=\infty$、運動量の不確定さは $\Delta P_x = 0$ と表現する。この場合、y 軸方向については、$\Delta y = \infty$、$\Delta P_y = 0$ であることもわかる。さらに水素原子中の電子については、Δx（Δy や Δz についても）はほぼ水素原子の大きさの程度であり、また ΔP_x は速度 0 から式 (2) で求められる速度に質量 m を乗じたもの(運動量の値の範囲としては正負の 2 つの方向があるのでその 2 倍をとる）としても大きな間違いはない。Heisenberg の量子論によれば、

$$\text{不確定性原理}\quad \Delta P_x \cdot \Delta x \sim \hbar \qquad (3)$$

が成立する。ただし $\hbar$ は $h/2\pi$、また h はプランク定数($=6.6\times10^{-34}$ J･s）である。

いま、水素原子内の電子が原子核からの距離 a の程度の広がりをもつとしよう。すると運動量の広がりは (3) 式からほぼ $\hbar/a$ であるといえる。したがって電子の運動エネルギー $(1/2)\cdot m_e V^2 = \hbar^2/2m_e a^2$ 。一方、位置のエネルギーは $-e^2/a$ (ただし e^2 は電子の電荷の 2 乗を $4\pi\varepsilon_0$ で割ったもの、ε_0 は真空の誘電率)。そこで電子の全エネルギーとして (2) 式を再現する式 $E = \hbar^2/2m_e a^2 - e^2/a$ が得られる。これが極小値をとる条件：$dE/da = 0$ から $a_0 = \hbar^2/m_e e^2 = 0.0528$ nm、$E_0 = -e^2/2a_0 = -m_e e^4/2a_0 = -m_e e^4/2\hbar^2 = -13.6$ eV が得られる。すなわち水素原子における電子の原子核からの距離は大略 0.0528 nm であり（0.528 オングストローム)、またこの電子を遠方にはじき飛ばすにはエネルギー13.6 eV が最低でも必要なことがわかる。

３．電磁波と物質との相互作用

3.1 電磁波と 1 個の電子 [2)]

座標上の点 P の位置に 1 個の電子(電荷 e）が存在し、遠くはなれた Q 点(P からの距離を r とする）に 1 個の荷電粒子(電荷 q；電子または陽子）が出現するとしよう。電荷 q から電子 e がうける影響はクーロン力として知られ、その大きさは $eq/4\pi\varepsilon_0 r^2$ に比例する遠隔力であると考えられていた。ところが Faraday や Maxwell 以降にはこの力は近接力として考えられるようになり、荷電粒子 q が現れてから r / c（c は光の速度）時間後から電子 e に作用するとされる。q から電場（と磁場）が波となって伝わり空間を伝わるが、時刻 t で点 P における電場を $\boldsymbol{E}(t)$とすると、電子に働く力は $e\boldsymbol{E}(t) = keq/4\pi\varepsilon_0 r^2$ である。ところで電子 e から見て荷電粒子 q が r は一定のまま横方向（上下方向でも左右方向でも）に振れる、あるいは振動（周波数を f とする）したりすると、その影響は r / c 時間後に点 P における電場の変化としてあらわれる。q の動き、すなわち電流がつくる磁場の時間変化に比例した強さの電場が発生することに注意して

$$\text{点 P における電場 } \boldsymbol{E}(t) = -\frac{q}{4\pi\varepsilon_0 rc^2} A_z\left(t-\frac{r}{c}\right) \qquad (4)$$

ここで $A_z(t-r/c)$ は時刻 t−r / c における電荷 q の加速度（点 P からみる q の垂直運動の方向を z 軸とする）である。位置 Q における横の動きは P からの視点で 1 / r だけ小さい。

またQの情報はPには時間 r / c だけ遅れて到達する。点Pにおかれた電子は $\boldsymbol{F}(t)=e\boldsymbol{E}(t)$ の力を受けて揺れ動かされる。その揺れの幅は $\boldsymbol{E}$ (t) に比例するが、最大の幅を振幅と呼ぶ。この振幅を2乗すると揺れ動かされる確率になるが、詳しくは6．に述べる。

またP点よりもさらにc Δtだけ遠いP' 点では Δt 時間後に (4) 式であらわされる電場が到達するので、電場は源から外側に波として動いている。これを電磁波と呼ぶ。r が大きいときには、クーロン力が $1/r^2$ で小さくなるのに対して (4) 式の $\boldsymbol{E}(t)$ が 1 / r で小さくなるので、電磁波の影響が遠くまで伝わることがわかる。また源が他にも存在するときはすべての源からのP点における電場が（波の位相をも含めて）加算される。位相によってP点における電場は強め合ったり弱め合ったりする（干渉)。このとき波源が1つであっても、近くに存在する物質中のすべての電子が波源からの電磁波の影響で動くので、それぞれが新たな波源となる。そこでP点における電場は、いつでも宇宙に存在するすべての電荷による電場の和としてあらわされる。波源の数が多いときには干渉効果に対して回折という言葉が使われる。

3.2　電磁波と1個の水素原子

水素原子の中では電子（質量 m_e）は原子核 (陽子）に束縛され、電子の運動のゼロ点を原子核の位置にとれば、2.2で述べたように電子の変位xに比例した復元力が働くとすることができる。この電子に電場 E_0、振動数 ω の光が作用する（$E_0 e^{i\omega t}$）とき、電子の運動方程式は $m_e\left(d^2x/dt^2+\omega_0{}^2x\right)=eE_0e^{i\omega t}$ であり[2)]、その解が

$$x=\frac{eE_0}{m_e(\omega_0{}^2-\omega^2)}e^{i\omega t} \tag{5}$$

であることは実際に(5)式を上の運動方程式に代入してみればわかる。ここで ω_0 は水素原子内の電子の固有(共鳴）振動数である。(5）式は電子が入射光と同じ振動数で振動することを示している。この電子の振動は永久に持続するものではない。このことを表現するために分母の $\omega_0{}^2-\omega^2$ を $\omega_0{}^2-\omega^2+i\gamma\omega$ に変える。γ は減衰係数とよばれる。また共鳴振動数もじつは電子が1個でも定常波が何種類も存在するので複数個になる。これらを考慮すると、光の作用を受けた電子の運動は、

$$x=\left(\frac{eE_0}{m_e}\right)\sum_k\frac{N_k}{\omega_k{}^2-\omega^2+i\gamma_k\omega} \tag{6}$$

であらわされる[2)]。ただし各電子の座標原点はそれぞれの原子核の位置とする。

透明な物体（図1を参照；水素原子の集団と考えてもよい）の背後に電場を知りたい点があるとき、物体の前にある光源からでた光（電磁波）の一部は物体から反射するが透過して背後に来る電磁波もある。また光源から直接来る電磁波もある。P 点における電場は両者の振幅の和であることを模式的に示した図である。物体中のすべての電子も光源の揺れに反応して(6)式のような揺れを起こし、それによって各電子があらためて電磁波の発生

源となって移送の遅れを含めてP点の電場に寄与する。また波は物体中を走る間に小さくなる。とくに光の振動数 ω が ω_0 に近くなると $\omega_k^2-\omega^2$ が小さくなり、物体による光の吸収が強くなる。

物体（板）に毎秒単位面積当たり入射する光のエネルギーを $\alpha <E_S^2>$ と書けば (図1)、板から出て行く電場のエネルギーは $\alpha <(E_S+E_a)^2> = \alpha <E_S^2+2E_sE_a+E_a^2>$ である。ここで $<E_S^2>$ は波の電場の2乗の時間平均であり、また α は比例定数である。物体中に毎秒なされる仕事（＝仕事率）は d/dt (力×距離) ＝ $eE_S(dx/dt)$ に原子数 $N\Delta z$ (N は電子密度、Δz は物体の厚さ）をかける。エネルギー保存則から

$$\alpha\left\langle E_S^{\,2}\right\rangle=\alpha\left\langle E_S^{\,2}\right\rangle+2\alpha\left\langle E_S E_a\right\rangle+N\Delta z.e\left\langle E_S v\right\rangle \qquad (7)$$

を得る [2]。ここでは E_a^2 を他の項に比して無視できるほどに小さいとして省略している。(11)式は、ガラスのように透明な物体を通過した光が物体中の電子の影響を受けことを意味している。

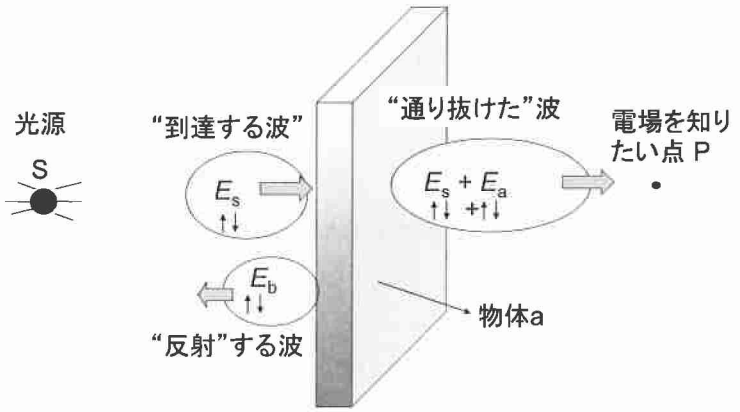


図1　透明な物体の層を通り抜けた電磁波(ファインマン物理学II;光、熱、波動(1967)岩波書店より)

3.3　加速度運動する電荷からの電磁波放射 [2]

加速度をもつ電子から空間に放射されるエネルギーをもとめる。電子の運動を $x_0e^{i\omega t}$ であらわすと速度は $i\omega x_0e^{i\omega t}$、加速度は $-\omega^2x_0e^{i\omega t}$、このときの振動の力学的エネルギーは

$$W=\frac{1}{2}m_e\omega^2x_0^{\,2} \qquad (8)$$

である。この電子から距離 r だけ離れた観測点における電場は (4) 式であらわされた。ここを単位時間に単位面積当たりに通過するエネルギーは ε_0cE^2 である。さらに全空間に向けて放射されるエネルギーは全空間に対して積分して

$$P = \int \left[\varepsilon_0 c E^2\right] 2\pi . r^2 \sin\theta d\theta$$

$$= \frac{{q_e}^2 \omega^4 {x_0}^2}{12\pi\varepsilon_0 c^3} \qquad (9)$$

ここで歴史的な理由により電荷の値は e と q_e の 2 通りの記述法があることに注意。

$e^2 = {q_e}^2 / 4\pi\varepsilon_0$ の関係があるが、q_e=1.6×10^{-19}C(クーロン) である。

4．荷電粒子と物質の相互作用 [6)]

4.1 荷電粒子（速度 V ）と 1 個の電子 [3)]

N. Bohr (1913) による衝突係数法とよばれる考え方である。静止している質量 m_e の電子 (電荷 e) に対して質量 M の粒子（電荷 Ze) が速度 V、衝突係数 p で衝突する。衝突時間 $2p/V$ の間だけクーロン力 Ze^2/p^2 が働くものとし、その結果、荷電粒子の運動エネルギーの一部が電子に移行するものとする（図 2 参照)。

移行エネルギーは

$$T = (\text{力} \times \text{衝突時間})^2 / 2\,\mathrm{M}$$

$$= \left(\frac{Ze^2}{p^2} \cdot \frac{2p}{V}\right)^2 \bullet \frac{1}{2m_e} \qquad (10)$$

よって、エネルギー T が移行する微分断面積 (移行エネルギーが T と $T+\mathrm{d}T$ の間にあ

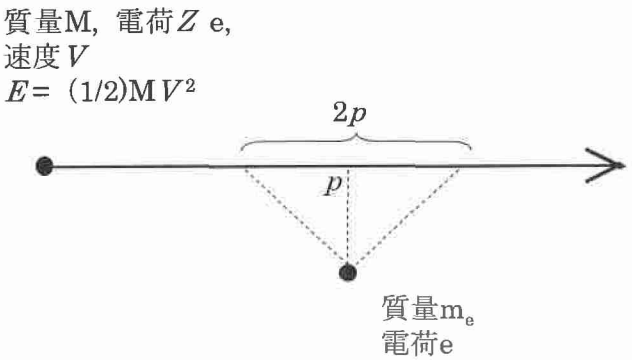


図 2 N.Bohr による荷電粒子間の衝突． 衝突時間を $2p/V$ とおく、この間は両粒子間にクーロン力 Ze^2/p^2 が働き、力積（＝運動量変化）を通して入射粒子から標的の電子へ運動エネルギーの移行が起こる。

る断面積）$\mathrm{d}\sigma(T)$ は次のようになる [3)]。式（10）の両辺を微分して

$$d\sigma(T) = 2\pi \cdot pdp = \frac{\pi \cdot Z^2 e^4}{(1/2) m_e V^2} \cdot \frac{dT}{T^2} \qquad (11)$$

つぎに図 2 で、荷電粒子が通過するときに電子の位置における電場 E の時間変化をしら

べる。電場は粒子の走る方向に対して平行な成分と垂直方向の成分に分け、また電子にもっとも近い点 O を通過するときを t = 0 とする。

$$\begin{cases} E_{\perp} = Ze\, p\,(V^2t^2 + p^2)^{-3/2} \\ E_{//} = Ze\, Vt\,(V^2t^2 + p^2)^{-3/2} \end{cases}$$

時刻 t = − t の地点 $-Vt$ から電子までの距離は $(-Vt)^2 + p^2$ の平方根、電場の成分を軌跡に平行なものと垂直なものを考えて上式がでる。 $E_{\perp}$ と $E_{//}$ を周波数 ω でフーリエ分解すると、各成分 $E\,\omega(t)$ は振動数 ν = ω / 2π の光が通過するときに電子がうける電場に相当することが分かる。

$$E_{\perp} = \int E_{\varpi}(p) e^{-i\varpi t} dt \qquad (12)$$

ここで

$$E_{\varpi\perp} = \frac{1}{2\pi}\int E_{\perp} e^{i\varpi t} d\varpi = \frac{Ze}{\pi \cdot pV}\left[\frac{\omega p}{V} K_1\left(\frac{\omega p}{V}\right)\right] \qquad (13)$$

ただし x→0 のとき $K_1(x) \to 1/x$ である。$\omega \leq V/p$ のとき $E_{\omega\perp} \approx Ze/\pi pV$ であり、これ以外の ω の範囲では 0 となる。すなわち電子に影響を及ぼす仮想上の光子群では、光エネルギーが ħω の光子数を N_ω = const. (1 / ħω) としてよい。

4.2　荷電粒子（速度 V ）と 1 個の水素原子

水素原子内の電子は静止してないで動き回っているが、平均値として約 10^3 km/s、エネルギーにして 13.6eV であることが知られている。これを考慮して(11) 式を改良したのが Thomas (1927) の式である：

$$d\sigma(T) = 2\pi \cdot pdp = \frac{\pi \cdot Z^2 e^4}{(1/2) m_e V^2}\left(\frac{1}{T^2} + \frac{4E}{3T^3}\right) \cdot dT \qquad (14)$$

E は水素原子内の電子の運動エネルギーである。

また 4.1 の最後に述べたように、高速荷電粒子が水素原子の近くを通過するときは N_ω = const. (1 / ħ ω) のスペクトルをもつ白色光の作用として近似できる（=光学近似)。各光子は水素原子を電子励起するが、その励起 n の起こる確率は光学的振動子強度 f_n に比例するので、荷電粒子によって生成される励起状態 n の個数は f_n / E に比例する。

5．放射線が物質中を透過する距離 [6)]

断面が 1 m^2 で長さ x m の箱の中に断面積 σ m^2 の多数の小さな球が浮かんでいる。球の密度を N 個/m^3 とする。この中を箱の断面から長さ方向に向けて点粒子を走らせ、球との衝突を考える。球の個数は N x、その断面積の合計は N x σ (m^2) なので、箱の長さが薄くて N x σ が小さいときは点粒子がどれかの球に衝突する確率は N x σ といえよう。そして衝突しない確率は (1 − N x σ)である。逆に、ともかく 1 回の衝突を受ける目安として x=1 / N σ だけ走ればよいといってもよい。このときの x、すなわち衝突しないで自由に空間を走る距離の平均値を平均自由行程（Mean free path)とよぶ。

x を大きくするとき、点粒子が x = 0 から x まで球と衝突しないで透過する確率を F(x) とする。走行をさらに微小距離 dx だけ延ばしても衝突が起こらない確率は F (x + dx)であるが、この確率は x まで衝突しない確率 F (x)と dx の微小距離を衝突しないで走る確率（1 $-N\sigma$ dx）との積に等しいと考えられる。

$$F(x+dx) = F(x)(1-N\sigma dx)$$

式を変形して、x=0 から x まで衝突しないで透過する確率 $F(x) = e^{-\sigma Nx}$ が得られ、

$$\text{衝突する確率} = 1 - e^{-\sigma Nx} \qquad (15)$$

が得られる。 もし σN x が 1 に比して小さく、例えば 0.01 のとき、衝突する確率 $\approx \sigma N$ x の近似を使うことができる。点粒子が x=0 から x に至るまでに 0.01 回の衝突をするということもできる。σN x が箱の断面積 1 m^2 に等しくなってもなお点粒子が透過する隙間が残ることに注意すること。

5.1 走る光子に抵抗を与える電子

光子は質量がゼロで電気的に中性の点粒子であるとみなされている。しかしながら(1)式であらわされるエネルギーと運動量をもつ微細粒子であり、何かにぶつかれば力を及ぼす。一方、電子は点粒子であるとされるが、かつては微小の負の電荷を無限のかなたから集めてきて半径 r_e の球の電子がつくられると考えられた。このために必要なエネルギーは e^2/r_e であるが、これが電子の質量 $m_e = 9.1 \times 10^{-30}$ kg に等しいとして電子半径 $r_e = 2.8 \times 10^{-15}$ m が提案され、電子の古典半径として今でも使用されることがある。それによれば電子の断面積は $\pi r_e^2 = 2.46 \times 10^{-29}$ m^2 となり、これに光子がぶつかれば抵抗をうける。電子からすれば光子に跳ね飛ばされてコンプトン散乱される。なお、液体の水であれば $N_e = 0.3 \times 10^{30}$ /m^3 なので x = 0.01 m で σN x = 0.07、すなわち厚さ 1 cm の水で光子は約 7% が散乱を受け、93%は透過することが予想される。

5.2 走る荷電粒子に抵抗を与える電子 [6)]

標的となる原子･分子内の電子は高速で動き回っているが、その速さよりもはるかに高速で入射してくる荷電粒子と電子との衝突を考える。このようなとき原子･分子内電子は静止しているとみなす近似が時に行われる。入射してくる点粒子の電荷を Ze、その速度 V とする。原子内の電子（質量 m_e、電荷 e）にとっては入射してくる粒子の質量は関係しない。荷電粒子同士の衝突は、働くクーロン力の大きさとその力が作用している時間の長さ(衝突時間)が重要である。働く力は Ze^2/p^2（あるいは $Zq_e^2/4\pi\varepsilon_0 p^2$）で、衝突時間は $2p/V$、力積（＝運動量変化）は $2Ze^2/pV$ である (図 2)。これが入射荷電粒子に対する電子の抵抗になる。これ以上の抵抗（運動量変化がこれ以上に大きい）を起こす確率（断面積）は、単位距離をすすむとき、衝突係数 p を半径として厚さ 1 m の円筒を考え、この円筒内に存在するすべての電子が力積 $2Ze^2/pV$ 以上で抵抗する。それによって入射粒子は運動エネルギーを失って物体がそのエネルギーを獲得する。単位距離を進むときに放射線から物体に移行するエネルギーを LET (Linear Energy Transfer) と称し、また物体からみるとこの値を放射線に対する阻止能であるという。阻止能は

$$S_e = N_e \int T d\sigma$$

$$= \frac{2\pi Z^2 e^4}{m_e V^2} N_e \left[\ln \cdot T\right]_{T_{\min}}^{T_{\max}} \qquad (16)$$

T_{min} は電子が受け取ることのできる最小のエネルギーで、原子内電子が量子化されていることから来る E_{ex} とする。T_{max} は電子のとり得る最大エネルギーで粒子が電子に正面衝突する場合で $T_{max} = (4\,m_e / M)$ (入射粒子のエネルギー) $= 2\,m_e V^2$ である。

$$S = \frac{2\pi \cdot Z^2 e^4}{m_e V^2} N_e \cdot \ln\left(\frac{2m_e V^2}{E_{ex}}\right) \qquad (17)$$

すなわち入射粒子の電荷と速度の比 Z / V の 2 乗に比例する。同じ速度であれば電子やプロトンよりもアルファ粒子や多価イオンがはるかに頻繁に抵抗をうける。また同じ荷電数であれば速度が遅くなるにつれて抵抗の受け方が頻繁になる。また入射粒子の質量とエネルギーの関係も知っておくと便利である。同じエネルギーであれば重い質量の粒子の速度は小さい。

また、入射粒子のエネルギーを E_0 とし、物体中でそのエネルギー E が減少して行き、最後に止まるまでの距離（＝飛程 $R(E_0)$）との関係を求める。

$$R(E_0) = \int_{E=0}^{E_0} dx = \int_0^{E_0} \frac{dE}{S(E)} \qquad (18)$$

$d/dE \langle R(E) \rangle = 1 / S(E)$ である。

6．場の量子論から考える [4,5)]

水素原子のなかで動き回っている電子（＝「大きさのない点状の粒子」）は、いつまでも同じ状態を維持する限り、1 つの定常的な状態にあるといえる。この状態を |H>という記号で表す。このとき電子が原子内の任意の場所（x とする）に存在する状態（<x|H> という記号で表す）が考えられる。x は様々に(無限に）異なる状態もあるが、それらの状態がすべて共存している。そのとき <x|H> の分布が波をつくり、その 2 乗 $\langle x|H\rangle^2$ が x の位置において電子が存在する確率をあらわす(波の振幅の 2 乗が波の強度に相当すること)。

では、光はどのように考えたらよいか。電磁波（電場と磁場）を量子論で考えるには、まず特定の波長（したがって特定の振動数、すなわちエネルギー ε ）をもつ波だけを考えて、その波が様々な振幅をもつ状態が共存する分布を考える。このとき波の振幅の 2 乗が波のエネルギーに相当するときは、波のエネルギーの値は等間隔に並ぶことに注意しよう。最も低いエネルギーを 0 とすれば、その上が ε、その上が 2ε、・・・となることが数学的に示される。そこで電磁波を特定のエネルギー ε をもつ粒子(＝光子）の集合と見ることができる。ここでは光子の集合が波を形成し、振幅の 2 乗に比例した分布を無数の光子が見出される確率をあらわす。

つぎに電子と陽子の系、すなわち水素原子を考える。電子も陽子も電荷をもつのでその周りに電場ができる。電子の周りにできる電場は電子から生まれる光子がつくる波である。光子のエネルギー ε は様々の値をとると考えられるが、いずれの光子も不確定性原理（$\Delta E \cdot \Delta t \sim h$ で許される時間の範囲内で発生し元にもどるものと考えられる。ε の大き

い光子は短時間だけ、ε. の大きくない光子はより長時間存在できる。また光子は元の電子に戻されるが、もし近くに光子を受け取ることのできる陽子が存在すれば陽子のところでも消失する。以上のことから、クーロン力は光子のやり取りによる近接作用であると考える根拠がえられる。

湯川秀樹 (1934) は中性子や陽子などの核子の間に働く核力も類似の機構によって起こると考えて近接作用にもとづいて説明した。核力の及ぶ範囲が短い (～10^{-15} m) ことから、10^{-15} m の距離を光速で走る時間 Δt から求められる ΔE に相当する質量の粒子（およそ電子の 200 倍の質量）をやり取りすることによって核力が生まれるとした。こうして予言されたのが π 中間子であった。

7．おわりに

光は直進する、光が鏡から反射するときは入射角と反射角は等しい、光が水中やガラス中を走るときの速さは空中を走るときの速さよりも遅い、などという表現はいずれもわれわれの身近な世界での現象を近似的に説明するためのものに過ぎない [4]。とりわけ「光がある点から離れた別の点まで走るとき、最小の時間で到達するような道筋を通る」（フェルマーの最小原理）などと呼ばれる原理もここで述べた電荷の揺れが電磁波を発生させ、またその電磁波はあらゆる方向に走り到達点まで達する。到達の確率は位相の遅れを考慮したすべての振幅の和の 2 乗に比例する。本稿では、紙数に制約があるために詳細は省略したが、光の反射、回折、屈折率、物体による吸収など興味ある現象が限りなく続く。

ところでガンマ線や X 線の物質に対する作用は、実質的には、物質からはじき飛ばされた電子（コンプトン電子など）による作用であると考えられている。そこで放射線作用は高速で走る電子や陽子などの電荷の作用であると考えてもよい。また高速電荷の作用は周波数が連続的に変わる（＝波長分布が広い白色光）光の作用に近似できる（4.1 および 4.2 で述べた）ことから物質に対する光と放射線の類似性が浮かび上がってくるのである。これについては別の機会に譲ることとしたい。

参考文献

1) 朝永振一郎： 物理学読本、みすず書房、1969
2) R. P. ファインマン：ファインマン物理学 II 光、熱、波動、岩波書店、1968
3) S. ワインバーグ：電子と原子核の発見、日経サイエンス、1986 の付録
4) R. P. ファインマン：光と物質の不思議な理論、岩波書店、1987
5) R. P. ファインマン：ファインマン物理学 V 量子力学、岩波書店、1979
6) 小田稔：物理学選書 5「宇宙線」(第 7 版)、裳華房、2002 の第 2 章

上記に掲げた参考文献以外に入門的な参考書をいくつか以下に挙げておく。

10) 中野董夫：物理入門コース「相対性理論」、岩波書店、1984. p131
11) 砂川重信：電磁気学の考え方、岩波書店、1993
12) 中島貞夫：物理入門コース「量子力学 I」、岩波書店、1993
13) 竹内薫：ブルーバックス「場とはなんだろう」講談社、2000
14) 砂川重信：力学の考え方、岩波書店、1993

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 13, No. 1, p. 33 - 42 (2009)

【原著論文】

大気塵埃付着のラドン子孫核種のαとβ線および β - α相関事象の連続測定

橋 本 哲 夫
新潟大学名誉教授、NRI研究所代表
〒950-2053 新潟市西区寺尾前通2-2-10

(2010年2月23日受理)

[要旨] 原子力・放射線教育やリテラシーの演示実験において、放射線源を手軽に準備することは意外に困難である。ここでは、大気中塵埃に付着しているラドン子孫核種を、黒板消しクリーナを改造し、金網上に置いたろ紙を吸引することにより集塵しつつオンラインで放射能測定する装置を開発した。放射能検出装置として、α - β弁別シンチレーションサーベイメータを使用し、塵埃捕集ろ紙より数ミリメートル離して対置させた。サーベイメータからのα・β (γ) 線由来のパルスを迅速パルスデータ解析システムに導入し、各々のパルス発生時間ファイルを作成しつつ液晶画面上にα・β壊変率の時系列変化を表示した。このことにより大気中塵埃にα・βを出して放射壊変する放射性核種が存在することが実感できる。更に、β壊変後マイクロ秒オーダでα壊変が連続壊変する現象であるβ - α相関現象（壊変曲線の半減期）からラドン子孫核種に由来する壊変であることを説明する。この実験から身近な大気中にも放射性物質が存在しており、放射能の数量的概念が重要なことを理解して貰う。

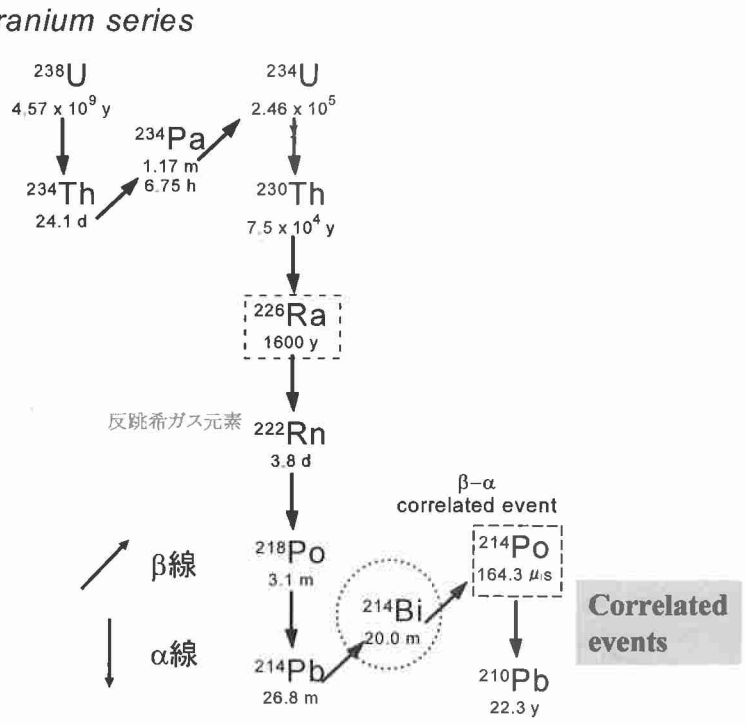


図1 ウラン系列核種と含まれるβ - α相関事象 (correlated events)

1、天然放射性核種は大気中にも存在する

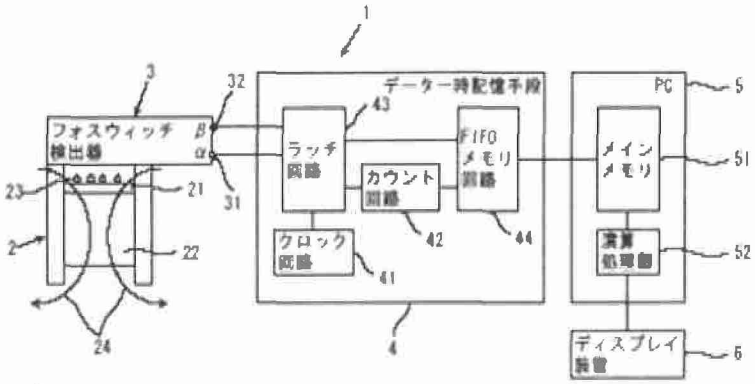
ベクレルがウラン鉱石から放射能を発見し、キュリー夫妻が放射性核種を化学分離して確認したのは、ピッチブレンド鉱物からであることは周知の事柄である。ピッチブレンド鉱物には連続して壊変する核種が存在しており、キュリー夫人が発見し命名したラジウム（Ra-226）やポロニウム(Po-210)およびラザフォードが見つけたラ

ドン(Rn-222)が属している。これらウラン(U-238)を一番長い寿命の親核種とし、それに続く不安定な子孫核種はα線・β線やγ線を放出して壊変を行い、最後には安定な鉛同位体(Pb-206)となる。この連続壊変列は親核種からウラン（壊変）系列（質量数を4で除すると余りが常に2となるので4n+2系列とも名づけられている）と呼ばれ、いずれの核種も生成以来保存されている閉鎖系では親のU-238と全ての子孫核種が放射平衡状態（系列内の全ての核種の壊変率が同じ）となる。長い半減期(寿命)を有する親核種を有し、より短い寿命の子孫核種へと連続壊変している放射性核種系列としてはウラン系列以外に自然界にはトリウム系列とアクチニウム系列が存在している。

親核種としてのウラン(U-238)・トリウム(Th-232)とともに、微量ながらU-235は地殻物質に必ず含まれているため、その子孫として3系列に属する放射性核種は必然的に自然界に存在している。これらは自然放射性核種や天然放射性核種とも呼ばれ、人類を含む生命体はその誕生以来これら天然放射性核種からの放射線ならびに地球外から飛来する宇宙線に曝され続けている。

図1のウラン系列に含まれるラドン(Rn-222)は希ガス元素であるため、ウランを含む地殻物質から離れて大気中に存在することができる。したがって、大気中に存在するRn-

(a)



(b)

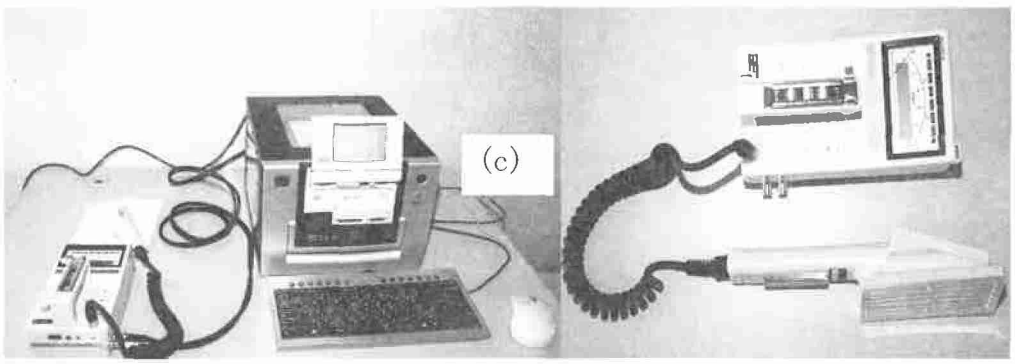


図2 大気塵埃捕集･測定と迅速パルスデータ解析システム概念図

222はウラン系列から独立した形で放射壊変を行いその子孫核種を連続して生成する。これらRn-子孫核種は壊変の際にプラス電荷を帯び大気中の塵埃に付着して存在する。その結果として大気塵埃にはRn-子孫核種を観測できる。ここでは、大気塵埃をろ紙上に捕集しつつ、放射性核種から放出されるα線とβ線を弁別できるシンチレーション検出器（α/β弁別シンチレーション測定器）を用いて測定し、α線とβ線強度の捕集時間依存性をリアルタイムで観察し、大気中に天然放射性核種の実在を確認する方法について解説する。次いで新たに開発した迅速パルスデータ解析システムを用い

て、β線パルスが検出された後に数百マイクロ秒以内でα線パルスを検出することに基づくパルス時間間隔法により、百マイクロ秒オーダで連続したβとα壊変を捉えることで、Rn-子孫核種の捕集されていることを確認する。これまでにない新たな放射線教育や放射線啓蒙活動での演示としての利用を目指している。

2. 大気塵埃に付着した天然放射性核種のオンライン検出と計測

図2に示すシステムを大気塵埃の捕集とオンライン放射性核種の測定に用いた。大気塵埃の簡便な捕集装置として黒板消しのクリーナを改造したもの(2)である。この捕集装置にガラスフィルター(23)を取り付けクリーナに内蔵のポンプで吸引(24)することにより大気塵埃を捕集した。フイルターの表面数ミリメートル直上にα/β弁別シンチレーション測定器(3)を固定して連続的に計測した。

検出器はα線とβ線の弁別できる2系統のホスフィッチ検出器を備えたサーベイ（可搬型）メータ（図2の(b)の左側に全容を(c)の下部に検出部分と上部にサーベイメータボックス、 アロカ社製 Model TCS-362）を使用した。このサーベイメータに特別にα線とβ線の出力を取り付け、迅速パルスデータ解析システム（図2の(a)(b)参照）のA(α線パルス)とB(β線パルス)の２チャンネルにそれぞれ入力した。この迅速パルスデータ解析システム（(a)の1）では入力パルス発生時間を1マイクロ秒の分解時間で記録すると共に内蔵ソフトで計算処理して、αとβパルスの計数率、相関事象の減衰曲線 およびβ-α・α-α・β-β相関計数率の何れかを液晶画面(b)にオンライン表示した。パルスの時間解析ソフトでは多重時間間隔(MTA : multiple time interval analysis)解析法を適用して時間間隔解析(time interval analysis: TIAと略記)を行っている。捕集大気塵埃の本測定にはβ-α相関事象を取り扱っているので、バックグラウンドは極端に少なくなる。いずれの相関事象をオンラインで取り扱うかは、最初の設定（時間スケールは途中変化可能）で決まり、オンライン表示できるがデータ取得後他の相関事象を調べたいときには、タイム(時間)データファイルを読み出し繰り返しオフラインで解析処理し画面表示できる(1-3)。従って、一つのデータファイルで幾つもの時間間隔分布スペクトルが作成可能となっている。

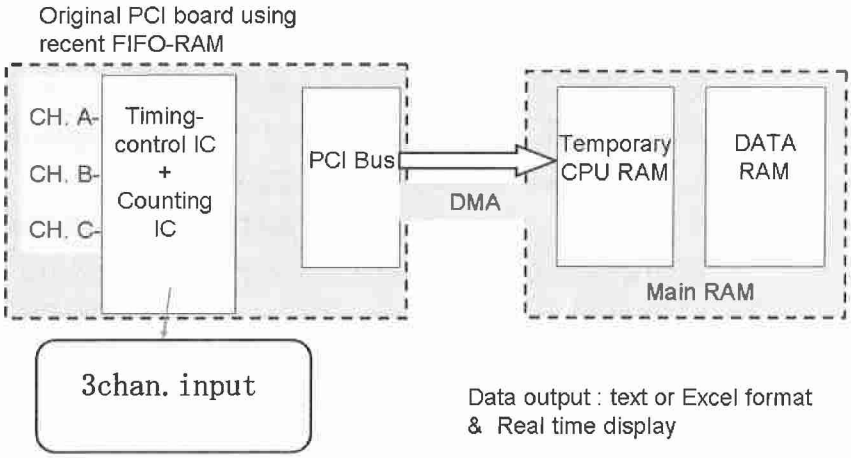


図3 迅速データ処理解析システム

図2(b)と(c)の放射線検出部位では、α線とβ線成分を分けるために、前方ではプラスチック板に表面塗布したZnSではα線を、その後方のプラスチックシンチレータではβ線を捉えて、光電子増倍管で電気パルスに換え、それぞれ回路を通して出来るだ

け純粋なα線、β線由来のパルス（今後はα、βパルスと略記）を出力する。混在するγ線の一部がラスチックシンチレータの発光に関与するので、βパルスはγ線由来の成分を分的に含んでいる。

図3の迅速データ記録･処理･表示システムは高速データプロセッサを搭載したTIA解析装置であり、Z-COSMOS社で開発された。

パルス入力端子としてのA・B・C (この内 Cチャンネルは予備用です)は並列に作動しておりTTLレベルのパルスの同時入力が可能となっている。3チャンネル同時に入力してもお互いに何らの支障もなく並行にデータを取得･記録･処理できる。それぞれのパルスの取得時間をPCI Busを通して、高速処理RAMを使いデータを一時保存し、逐次Busを通してパソコン側のメモリRAMに直接にDMAで記録される。このCPU-RAM側で、パルスの時間間隔（βパルスとαパルス間）についてMTA法で解析処理しながらリアルタイムで時間間隔分布曲線をαやβ計数率の啓治変化と共に液晶画面に表示する。パルサーを用いて分解能を測ったところ、1マイクロ秒の時間分解能をもつ非常に優れたシステムであることを確認できた(1-4)。

図1のウラン系列にはラジウム-226の娘核種のラドン-222が存在している。先述のようにこのラドン-222が希ガス元素であるため大気中に出てきて、大気中で放射壊変してRn-222の子孫核種を生成し塵埃に付着しているので、Rn-子孫核種由来のαとβ放射線の測定とともに、2～3百マイクロ秒の短時間に連続するβ-α壊変の検出に基づく、大気中Rnの同定が今回の目的である。

図1に示すように、Rn-222の子孫核種には3.1分の半減期のPo-218のα線を除くと、Pb-214やBi-214の2回のβ壊変とそれに続く短寿命の164マイクロ秒の半減期のPo-214のα壊変が存在する。原理的には、Rn-222に属する子孫核種はβ壊変数とα壊変数の割合が一定なので、β/α壊変数の割合から大気塵埃に付着したRn-子孫核種をある程度同定できそうに思われる。しかしながら、壊変で放出されるβ線は連続エネルギーを取る上に、α線は物質中の飛程が数ミクロメータと短いため吸着母体の塵埃の大きさや測定器表面をカバーする膜厚にα線の検出効率は左右される。その結果として、β線とα線由来のパルス数の割合を理論的に算出することは大変困難となり、更に大気の揺らぎによるα･β計数率も変化する場合が見られる。

ここでは、α線とβ線の計数率の時系列変化の結果から、一義的に大気中の放射性核種（物質）の存在を確認する。捕集した大気塵埃上にポリエステルフィルムとか紙を置くことにより、α線成分が極端に減少しβ線成分の減少は少ないことから、α線は通常の紙一枚で完全に吸収されることを観察する。さらに、大気塵埃と検出器表面との距離を変化させることにより、空気層が増加するにつれてα・β線ともに計数値が減衰し、数センチメートル離すとα線計数がなくなることが観測できる。

これらの結果から、α線を出す放射性核種は人体内部ではエネルギーが全て吸収されるため、呼吸や食餌で体内に摂取した時は内部被曝により人体の細胞を傷つけるが、人体の外部にあるときは普通紙1枚程度によりエネルギーが完全に吸収されるため、ゴム手袋や衣服でα線の照射(または被曝)の影響が容易に防げることを理解できる。β線はα線に比べて物質によるエネルギーの吸収は緩やかなため、局所的に放射線影響を受けることは緩慢であり、より重いアルミなど金属板や鉛ガラスのような

物質で遮蔽した場所で取り扱うことによりβ線からの影響を防ぐことができる。α・β線共に離れるほど計数値は減少しα線は空気層数センチメートル離れれば検知されなくなる。

発展的には、プラスチックスや木の板・布・Al箔など色んな物質を吸収剤として使うことでα線とβ線の性質を計数率の変化から知ることができる。

実際に大気塵埃に付着している放射性核種が天然放射性核種のRn子孫核種であることの確認については次章の"パルス時間間隔解析法"で述べる。

3. ラドン子孫核種確認のためのパルス時間間隔解析法の歴史

大気塵埃に付着している放射性核種が天然放射性核種のRn-222の子孫核種であることを、Bi-214(Ra-C)がβ線を放出してPo-214(Ra-C')となりこのPo-214は164マイクロ秒の半減期で数百マイクロ秒以内にα線を放出する連続したβ-α壊変現象を検知することで行う。この短時間に連続したβ-α壊変を相関事象と呼ぶ。先述の、大気塵埃からのα線β線由来のパルスの発生時間データを処理してパルス時間間隔解析(TIA)法によりこの相関事象をリアルタイム（オンライン）で観測できた。

先ず、TIA法の原理に付いて説明し、次に大気塵埃中のα線とβ線放射性核種とパルスTIA法を用いた相関事象のリアルタイム検出測定法を解説する。

1960年代から80年代にかけてルミネセンス年代測定の年間線量評価のために、ZnS（α線の検出用シンチレータ）で内面壁を塗布した検出箱を作成し、その中に考古遺物の細粉層を充填しそこから発生する気体を検出箱に導入した。この検出箱で気体中に含まれるラドン(Rn-222)とトロン(Rn-220、トリウム系列)に続く壊変の半減期の差異を用いてRn-220の壊変率を知り、ウラン系列とトリウム系列の識別を行った。測定器からのα放射線由来のパルスを取り出し、二つのカウンター(C1とC2)で計数した。カウンターC1は全体のパルスをカウントし、カウンターC2は1ないし2秒のデッドタイム（計測しない時間）を設定して計測した。測定終了後に、C1計数値からC2計数値の差を求めれば、その値はトロン(Rn-220)からPo-218への百ミリ秒単位で連続的に壊変する相関事象に相当しており、トリウム系列のRn-220の壊変率を見積もることができる。全体のカウント（C1の計数値でいずれも希ガス同位体のRn-222とRn-220とそれらの子孫核種のα壊変から成り立つ）からトリウム系列分を差し引けば、その残りの計数値からウラン系列の壊変率が見積もる方法である。この方法を基に、1980年代後半に放射線検出器由来のパルス時間間隔解析、TIA（time interval analysis）法を我々の研究室で案出し進展させてきた（5-9)。

1980年代前半からパソコンが非常に進歩し、パルスの発生時間の記録のためにタイマーカウンターを基板としたインターフェース(中間電子回路)が利用できるようになった。パソコンにこの基板を取り付け、α放射線由来のパルスの発生時間を記録した。測定後にパルス時間間隔を計算処理して、トリウム系列のα-α相関事象を抽出した。当初隣接時間間隔(STA)処理を行っていたが、後述のように多重時間解析（MTA）法の採用で著しい進展が得られた。このMTA解析に関しての理論式も大学院生が導入に成功した。当時の8ビット-パソコンではデータ取得の時間が遅く1mSが時間間隔の分解時間だったので、ミリ秒オーダのα-α相関事象を有するトリウム系

列の測定に限定されていた。

今日ではパソコンが進展して高速化と大容量化が進んだので、TIA法はマイクロ秒オーダ程度の迅速時間分解能が達成できる。その結果、図3に示す迅速パルスデータ解析システムの構築が可能となり高速にデータ取得や処理とともにオンライン画面表示が可能となった。その結果Rn-子孫核種のBi-214(β)→Po-214(α)→連続短時間壊変（α壊変の半減期が164マイクロ秒）由来の相関事象も選択的計測が可能になった。

4. パルス時間間隔解析法の原理

放射線と物質の相互作用に由来する発光現象などを電気信号であるパルスに変換して計測するのが一般的な放射線計測である。マイクロ秒から数百マイクロ秒オーダ半減期で子孫核種の壊変が親核種の壊変に連続して起きる時に、この連続壊変を相関事象(correlated event)と呼び、比較的高い放射線由来のバックグラウンドの存在の下でも、目的とする相関事象をTIA法適用により選択的に抽出測定できる(5-7)。

当初、検出器からの放射線由来のパルスの発生時間をパソコンに入力しタイム（時間）ファイルを作り、このファイルをデータ処理することで相関事象の選択的抽出を行い、時間間隔分布スペクトルを得ていた。手数は必要だったもののこのアイデアそのものが1980年代には画期的な方法であったと自負している。

隣り合ったパルスを解析するのが隣接時間間隔解析(STA: single time-interval analysis)法である。このSTA法は指数関数の加算した時間間隔スペクトルが得られるので、後の解析に含まれる誤差が大きいことが分かった。この欠点は多重時間間隔解析(MTA: multiple time-interval analysis)法で大きく改善できた。MTA法では、一つのパルスを元に一定時間内（δt）内の全ての時間間隔を求め、全てのパルスについて同様の処理をおこない最後に全時間間隔を積算する方法である[1]。この解析法で処理するとランダム事象（放射性核種からのα,β,γ－線や宇宙線並びに電子回路の雑音など）由来のバックグランド部分が水平線となり、解析結果の精度が大幅に向上した。目的のトリウム系列のα－α相関事象が簡単な化学分析と液体シンチレーション計測で選択検出できたので、玉川温泉（秋田県）の温泉沈殿物中のトリウム系列の識別定量行ったのが、1989年の最初のTIAの論文報告である(10)。理論的解説についてはここでは省略し参考論文のみ挙げておく(7,11)。

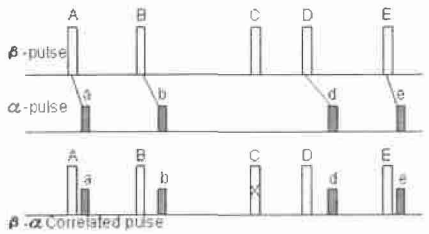


図4 β線とα線由来のパルス発生の時系列とβ－α相関事象計測の概念図

タイム(時間)ファイル（パルス発生時間リスト）がマイクロ秒で作成されていれば、そ

[1] MTA)法の解析の導入は大阪大学の先生（故福島先生と三藤先生）からの御教示によるところが大きかった。

のファイルをデータ処理して横軸のスケールをマイクロ秒に直すことにより、図１(a)のウラン系列のRn-222の娘核種由来の相関事象を抽出測定できる。タイムファイルさえあれば、相関事象が混入している場合でもファイル作成の分解時間以上であれば、時間スケールを変えることで目的とする複数個の相関事象を抽出計測でき、これが本TIA法の特徴である。大気塵埃に付着するのはRn-222子孫核種なので、マイクロ秒の分解時間で測定したデータファイルを基に、マイクロ秒単位で解析すれる必要がある。

従来の測定システムでは測定終了後にタイムファイルをデータ処理することを基本としていたが、測定に伴い時系列データがコンピュータに記録されるので、その記録ファイルに基づき測定しつつ計算処理して結果をオンライン表示することの方がより迅速で有用な情報を得られるのは言うまでもない(1-4)。

ここではα/β弁別検出器を使用して、α線とβ線パルスを別々に迅速パルスデータ解析システムに入力し、αとβパルスのタイムファイルを作成し、両ファイルを用いたβ‐α相関事象についてパルス時間間隔処理を説明する。図4にパルスの発生の様子を、時系列で描β－pulse、α－pulse 、β‐α相関事象(correlated pulse)の順に描いた。A, B, D, Eのβ線パルスを検出したとき、短時間後に連続したα線パルスa, b, d, eが検出できる。しかしながら、Dパルスのみはα線パルスが短時間で連続しないので相関事象とは見なせない。実際にはβパルスの方がαパルスよりも圧倒的に多いので非相関事象のほうが多いと言える。今、天然放射性壊変系列測定を考えた時、設定時間スケールを10マイクロ秒にすれば、ラドン子孫核種のβ-α相関事象である Bi-214(β)→Po-214(α)→で連続短時間β‐α壊変を捕らえることが出来る。β-α相関事象の時間間隔、すなわちA-a, B-b, D-d, E-eの間の時間をはかり(例えば１マイクロ秒の時間分解能)そのデータを集積すれば、短時間子孫核種の壊変曲線が得られ、半減期とともに相関事象の数が算出できる。

5. 大気塵埃に付着している放射性核種検出の実験

5.1 βとα線強度の捕集時間依存性

大気塵埃付着の放射性物質をα-β弁別測定し、オンラインでβ線とα線の計数率の捕集時間依存性を図5(b)に示す。両放射能強度ともにほぼ2時間で最高値を取り、その後緩やかな現象を示す。この減少の原因としては、吸引圧を一定に保持しているので捕集のためのろ紙の目詰まりが出てきており、捕集の塵埃量が僅かながら減少するためであろう。実際に黒板消しクリーナは一定圧以下に低下すると調整穴から空気が充填されて、内蔵吸入ポンプに無理させないように調整機構が働いていた。大気の吸収を止めて大気塵埃に付着した自然放射性核種の強度は(b)の捕集終了後に見られるようにα・β計数率共に減少する。この減衰傾向は図１のウラン系列の何れの放射性核種一種のみの半減期に相当しないことから、Pb-214とBi-214の混合核種の存在の壊変が過渡平衡状態を示している。

ここでの実験結果から、大気中塵埃には天然放射性核種が存在していることを確認できた。通常は単位立法メートル当たり数Bq（ベクレル、毎秒１壊変のことを言う)のRnとその子孫核種が大気中に存在することが知られている。

5.2 β - α相関事象の検出

実際の大気塵埃からのβ - α相関事象測定からの壊変曲線例を図5(a)に示す。横軸がマイクロ秒で描いてあるので、1000マイクロ秒以内で相関事象の壊変の終了が観察され、それ以降はほぼ水平な線となっている。この結果および理論的解析とともに相関事象を有しない測定の結果からもバックグランドはランダム事象率依存性を有することが確認できた(3)。このβ - α相関事象の壊変曲線はBi-214のβ線がトリガーパルスとなりPo-214のα壊変が100マイクロ秒オーダで連続して起こっているための相関事象なので、この壊変曲線についてカレイダグラフを使ってα壊変の曲線フィティング解析を行った。その結果164マイクロ秒という半減期値が評価でき、この結果は実際のPo-214の半減期によく一致していた。従って、図１のウラン系列のラドン子孫核種のBi-214(β)とPo-

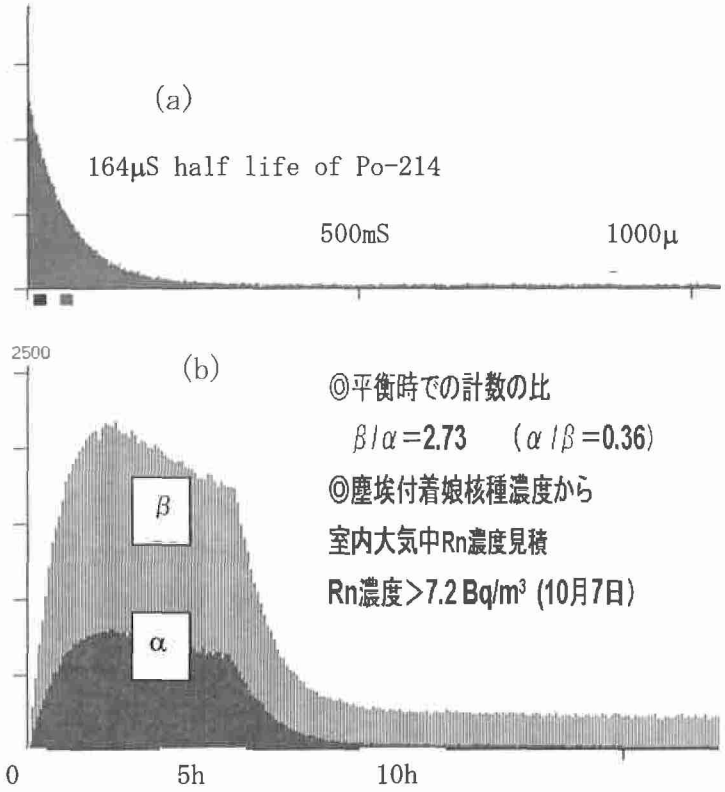


図5 大気塵埃付着放射性核種からのβ－α相関事象の時間間隔分布(a)とβとα計数率の捕集時間依存性(b)

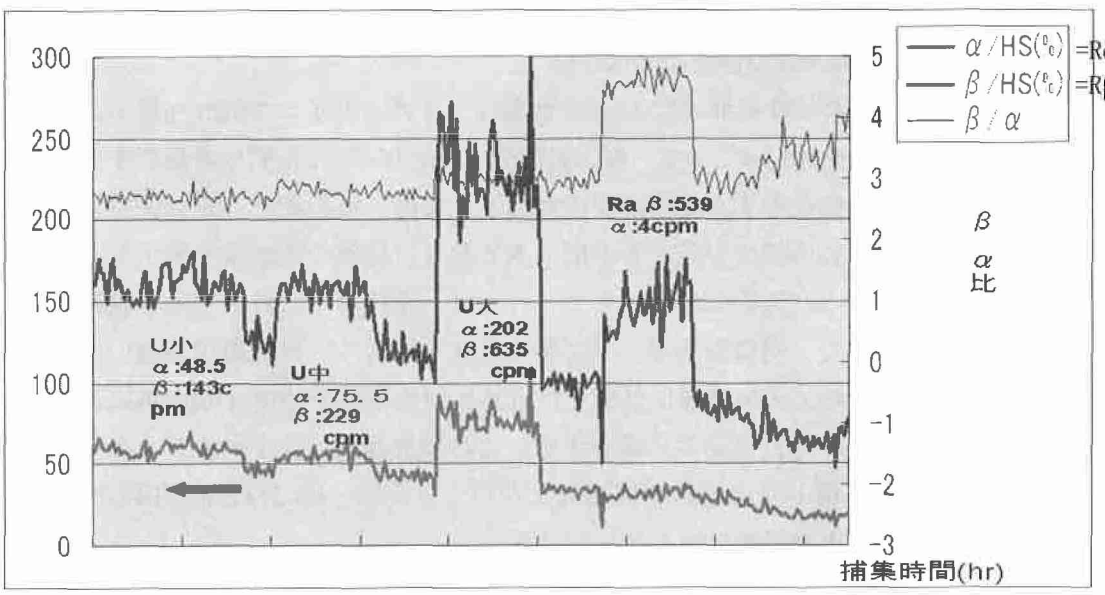


図6 U- とβ-線源挿入に伴うパラメータ変化

214(α)の連続壊変由来のβ－α相関事象を正確に捕らえていた事となり、大気中の塵埃にRn-子孫核種が付着していることを確認できたことになる。これらの結果は、このような簡単なシステムを使ってTIA法でRn-子孫核種を同定できた最初のケースであり、放射線教育に有効であろう。放射線教育以外に実際の放射線取り扱い施設や原子力エネルギー関連施設からの漏洩放射性物質のオンラインモニターリングを高感度で経済的に行えるのでこの迅速パルスデータ解析システムの開発は注目を浴びている。すなわち、この相関事象壊変曲線下の面積はβ-α相関事象の総数になるので、この総数を計測時間で除すことによって、相関事象率を求めることができこの結果もオンラインで表示とデータ取得が出来る。したがって、βとα計数率とこの相関事象率を使って、原子力施設からの超ウラン元素の大部分を占めるα放射性核種や核分裂生成物由来のβ放射性核種の高感度オンライン漏洩検知の方法を開発してきており、既に新潟県放射線監視センターでは本システムを使用したオンライン監視を2年間行っている実績を有している (2-4)。

ここでの放射性核種の漏洩を模擬した実測結果の一例を図6に示す。こまで記述してきたようにモニタリング用大気塵埃捕集ろ紙上にはRnおよびRn-子孫核種が捕集されるのでどこでモニタリングしても、バックグランドとしての天然放射性核種の捕集を避けることが出来ない。天然放射性核種であるRnおよびRn-子孫核種からの寄与分を正確に把握するためにここで述べたαとβ計数率とともにβ－α相関計数率を使用する方法を案出できた。その性能を試すために、捕集大気塵埃上にU電着版やRa線源を36マイクロメータ厚のポリエステルフイルムで覆ったβ線源（これらを外部からの漏洩あるいは汚染放射性物質と看做す）を置いた時の、β/α放射能比やβやα計数率を相関事象率で除したパラメータの変化を示す。これらのパラメータ（論文3でのに相当）は大気塵埃由来のRn-子孫核種のみからは大略一定値を示していた。したがってこれらのパラメータの変化の有無を基準にすることで、大気塵埃付着のRnやRn-子孫核種の妨害なく、放射性物質取り扱い施設において漏洩している人工放射性核種の高感度での検知の可能性を確認できた。

6. おわりに

α－β弁別サーベイメータと迅速パルスデータ解析システムを使った実験から、次のことが理解できる。

① 大気中塵埃に検出可能な天然放射性物質が付着している。
② 天然放射性物質からはβ線とα線が放出される。
③ α線は紙一枚や数センチメートルの空気層でも簡単に吸収される。一方β線はα線よりも強い透過の性質を有しており、木材や金属板で吸収される。
④ 大気塵埃に付着しているのはラドン－子孫核種である。
⑤ 天然放射性物質と人工放射性物質をオンラインで検知できるので、モニタリングへと利用可能である。
⑥ これらの実験結果から放射線の検出・遮蔽・吸収の基礎知識が得られる。

なお、本論文の一部は2009年7月26日新潟市の万代市民会館にて開催した“エネルギー・環境・放射線セミナー（北陸・新潟地区）”のテキストとして使用した。

謝　辞

本実験に際し、迅速パルスデータ解析システムやその解析ソフトを開発して下さったZ-コスモスの伊藤成樹社長並びにノナシステム社の川野名勇様に、また新潟県放射線監視センターの石山央存様には有益な助言を頂きました。この場を借りて感謝する。

参考論文

1)八幡 崇, 坂上央存, 伊藤成樹, 橋本哲夫, 複数入力に対応した高速パルス時間間隔データ処理およびリアルタイム表示システムの構築とその性能評価、*日本原子力学会和文論文誌*, **5**, 221-228(2006)

2)Sakaue, H., Fujimaki, H., Tonouchi, S., Itou, S., and Hashimoto, T., A new time interval analysis system for the on-line monitoring of artificial radionuclides in airborne dust using a phosfitch type alpha/beta detector, *J. Radioanal.Nucl. Chem.*, **271**, 449-445(2007)

3) 橋本哲夫, 石山央存, 伊藤成樹. β－α相関事象測定を用いた大気塵埃の自然放射性核種の連続観測－核燃料取り扱い施設などからの人工放射性核種のオンライン検知に向けて－, *RADIOISOTOPES*, 57, 679-694(2008)

4) 石山央存, 藤巻広司、丸田文之, 新ダスト・ヨウ素モニタの概要, *新潟県放射線監視センター年報*, **6**, 23-31(2008)

5) Hashimoto, T. and Sakai, Y., Selective determination of extremely low-levels of thorium series in environmental samples by a new delayed coincidence method, *J. Radioanal. Nucl. Chem. Articles*, **138**, 195-206(1990)

6) Hashimoto, T., Uezu, Y., Yamamoto, Y., Washio, H., and Noguchi, M., Principle of single and multiple time interval analysis applicable to radioactive nuclides with half-life of millsecond order, *J. Radioanal. Nucl. Chem. Articles*, **159**, 375-387 (1992)

7) Hashimoto, T., Ishizuka, F., Yoneyama, Y., Kubota, T., and Fukuyama, N., Determination of natural α-radionuclides related to millisecond order lives in environmentalsamples using time interval analysis (TIA) method, *J. Radioanal. Nucl. Chem. Art.*, **197**, 99-114(1995)

8) Hashimoto, T., Yoneyama, Y., Sato, K., and Komatsu, Y., Pulse time interval analysis (TIA) combined with liquid scintillation counting for the determination of environmental α-nuclides - Preparation and utilization of ^{225}Ra as a yield tracer, *J. Radioanal. Nucl. Chem. Art.*, **239**, 619-629 (1999)

9) Hashimoto, T., Sanada, Y., and Uezu, Y., Simultaneous determination of radio- nuclides belonging to three natural decay series using timeinterval analysis (TIA), *Anal. Bioanal. Chem.*, **379**, 227-233(2004)

10) 橋本哲夫・久保田知明, 時間間隔解析法を用いた玉川温泉水中のTh系列核種の絶対測定, *RADIOISOTOPES*, **38**, 415-420(1989)

11) 八幡 崇, 橋本哲夫, 多重パルス時間間隔解析(MTA)法の理論的なアプローチと壊変系列毎の微量放射性各種の弁別定量への適用, *RADIOISOTOPES*, **56**, 359-369(2007)

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 13, No. 1, p.43 - 46 (2009)

【研究報告】

全ての日本人がRI取扱いの体験を持つには
----- $^{68}Ge/^{68}Ga$ Generatorの利用が有意義かつ現実的 -----

野崎　正
元 理化学研究所、北里大学
259-1117 伊勢原市東成瀬 4-2-3-105（自宅）
E-mail: nozatadism@nifty.com
(2010年3月10日受理)

[要約]　RI (Radioisotope) の特性は種々の優れた教育実験のテーマとして活用できる。そして、特に若い時代の実験体験には大きなインパクトが期待される。$^{68}Ge/^{68}Ga$ Generatorは教育実験の理想的なRI源である。知恵を出しつつ努力を続ければ、全ての高校生や広い層の社会人がMilkingと半減期の測定など若干の実験を自らの手で体験するような世の中は、実現可能と考えられる。

1. はじめに

現在わが国では、特に教育機関において放射能・放射線関連分野のジリ貧状態が続き、教育実験の実働的指導者も消え失せつつある。また、放射線アレルギーなどのために国民的思考・討議において科学性が阻害されている場合も見受けられ、原子力や放射線の必要性・有用性を強調する種々のドキュメントが出回っても、この傾向は治まってこない。そこで筆者は、“急がば回れ”と考え、次の提案をし準備を進めている：“将来、殆ど全員の日本人が学校の実験でRIを用いる体験をする。”これは$^{68}Ge/^{68}Ga$ Generatorを用いれば可能で、また、RIの特性は種々の優れた教育実験テーマとして活用できる。だが、広くRI実験が採用されるには相当の努力と時間が必要であろう。すでに筆者は本稿と類似の表題の発表をしており、[1,2] ここでは、(a) 教育実験の有効性の再認識と資材・機器のレンタル制度の発想、(b) $^{68}Ge/^{68}Ga$ の有用性、(c) RI特性を活用した実験、とくに壊変の測定、の広い分野における大きな意義、を重点とする。

2. 科学教育は自然観察と実験から、関心→興味→情熱→愛着 へと

野外観察や実験を通して得た知見は一般に講義で習った知識より鮮やかに記憶に焼きつくもので、この傾向は若い時程強いようだ。実験に面白さを感じ自然現象に“関心”を持った青少年には、関心が“興味”へと発展し、その分野をLife Workに選んで“情熱”を注ぎこみ、さらに晩年でも“愛着”を持って後のために尽力する、といった一生を送ることも期待できよう。こんな生涯は、自らも満足で社会貢献も大きいと思われる。“関心”の段階で留まっても、メデイアから流れ込む関連情報の一部は気付かぬ間に知識となり、長い間には多く集積される。国家的意思決定も、多数の国民の“関心”から得た知識に基づかねばならない。放射線アレルギーの除去にも、結局、高校時代に全生徒がRIを用いる実験を体験するのが最善と考えられる。知識の詰め込み教育や現状讃美の強調には、かえって“関心”を阻害する恐れも感じられる。だが現制度下では、実習は教員の労力や費用が必要で、危険を伴うこともあるし、進学競争に役立たず、時間当たりの単位数も少ない。これでは、実験が疎んぜられ理科離れが進むのは当然と言えよう。

3. $^{68}Ge/^{68}Ga$ Generator の利用が最適

広い教育利用に最適な RI 源は、親娘両核種とも寿命が適切な Generator であるのは明白だが、なかでも $^{68}Ge/^{68}Ga$ Generator の下記の性質は、まさに天からの有難い贈り物とも言えよう。

核 種		半減期	壊変形式と β 線エネルギー	γ 線エネルギー
^{68}Ge	親核種	271 d	EC	no γ
^{68}Ga	娘核種	67.7 m	β^+, 89 % 1.9 MeV; EC 11 %	1.08 MeV 1.0 %, etc.

親核種は長期間利用でき、娘核種の半減期は特に壊変測定に適している。また普通の γ 線測定装置では、親核種には全く感じないような設定が可能で、娘核種も β^+ 消滅放射線以外の γ 線は強度が低い。今まで教育に用いられてきた $^{137}Cs/^{137m}Ba$ では娘核の半減期が 2.55 分と短過ぎるし、$^{140}Ba/^{140}La$ の親核種は 12.8 時間と短寿命に過ぎる。なお、単体ゲルマニウムは半導体で、γ 線スペクトルの測定にも用いられ、$Bi_2Ge_3O_9$ (BGO) も高効率の γ 線検出器となる。ガリウムは第 V 族の元素と GaN, GaAs 等の化合物半導体を作り、最近とくに発光ダイオードとして急速に実用化が進んでいる。両元素とも我々の今日の生活に深く関わっている。

$^{68}Ge/^{68}Ga$ Generator は ^{68}Ge の放射能が 100 kBq 未満ならば、RI 使用施設以外では障害防止法の対象とはならない。^{68}Ga が 50 kBq あれば、数組が同時に半減期測定などの実験を行うことができる。この Generator はまた、核医学における PET (Positron Emission Tomography, 陽電子断層撮像) 診断において、測定器の校正線源や ^{68}Ga 標識薬剤として用いられる。この事実は、放射線アレルギーの解消にも有効に活用できると思われる。

将来ほとんどの国民に RI 実験を体験させるために必要な $^{68}Ge/^{68}Ga$ Generator の個数を見積もろう。次の仮定に無理はないと考えられる：(1) 毎年 100 万人の新人が RI 実験に参加する（近年わが国の出生数は 100 万人/年より僅かに多い）；(2) 各 Generator は 50 日/年だけ新人教育に使われて 20 人/日が新たに RI 実験を体験する；(3) 各 Generator は作成時に 100 kBq の ^{68}Ge を含み、半年毎に減衰した分だけ補充する。そうすると、各 Generator は 1000 人/年の割合で新体験者を生み出すから、100 万人が体験するには、1000 個の Generator が必要となる。その作成には合計 $1x10^8$ Bq (2.7 mCi) の ^{68}Ge が必要で、半年毎の補充量は合計 $3.7x10^7$ Bq (1.0 mCi) となる。これ等の量には作成時や補充時のロスは含まれていないが、意外に少量で足りるのに気付く。

^{68}Ge は、ガリウムのアルミニウムまたはニッケルとの合金をサイクロトロンで 50 MeV 程度に加速した陽子で照射して、同時に起こる $^{69}Ga(p,2n)^{68}Ge$ と $^{71}Ga(p,4n)^{68}Ge$ 反応で製造し、塩酸溶液にしてから蒸留または溶媒抽出で分離する。これをカラムに詰めた酸化スズに吸着させて Generator とする方法が適切と思われ、Milking は 1 N 塩酸でよい。[3] 市販品は大型で放射能も強過ぎるので、100 kBq を超えない任意の量の ^{68}Ge を小さなカラムに吸着させ、さらに、減衰量だけを随時補充するための技術の確立が緊急課題となる。まさに着手するところである。

4. RI も自然の一員で、我々に語り掛けている

実験の前に、参加者に次の予備知識を与えておく。RI には “同じ元素だが互いに質量数が異なる放射性核種” と “放射性物質の総称” の二種の定義があるが、ここでは後者をさす。RI の起源には、(1) 地球のできた時から天然に存在してきた、(2) 宇宙線の作用により我々の周辺で絶えず生成している（^{14}C や ^{3}H）、(3) 放射線源等として用いるため人工的に生産され、また、原子力発電にともない大量に生成する、がある。RI は放射線を放出して他の元素へと壊変し減衰してい

く。これはRIの原子核が他の元素の原子核になる反応であるが、化学反応では原子には変化がない。人体中にも天然起源のRIが存在する（^{14}C と ^{40}K が主で平均して約 $1x10^2$ Bq /kg)。RIの特性を列挙し、その利用を [ ] 内に示す：(A) 壊変速度（＝単位時間当たりの減衰率）は化学状態や環境に依存せず各RIに固有な定数となる [年代測定]；(B) 同じ元素の他の核種（同位体）と同じく挙動する [トレーサー]; (C) 多くのRIは壊変に伴って放出する放射線の測定により高感度に検出され、また、3 次元分布およびその時間変化までも測定できる場合もある [放射化分析、画像診断医学、放射線源]。なお、放射線はRIが放出するほか、宇宙から飛来するもの、人工的に発生させるものがある。放射線源利用には、放射線利用計測、放射線化学反応の誘発、品種改良、滅菌、癌の照射治療、などがある。このようにRIは自然の一員として地球の現状形成にも関与してきた。また、宇宙の天体の中で化学反応が起こっているのはごく僅かで、大部分の天体では化合物は温度が高過ぎて存在できないか、低過ぎて反応が起こらない。

5. 実験メニューと習得目標の列挙・提案 ---- 多様性も望まれる

参加者を一応次の3種に分類する：(A類) 高校生を中心に、中学生、一般社会人；(B類) 経済・政治・法曹関連の社会人や一般大学生；(C類) 理科系の大学生・社会人。実験メニューを列挙し、[ ] 内に対象とする参加者と習得目標を示す：(a) ^{68}Ga の Milking と半減期の測定 [全類で必修; 指数関数変化の体験]；(b) Milking 後の放射平衡到達過程の観測と解析 [観測は全類、解析は理科系だけ; 理科系は微分方程式による自然現象の定量的解析]；(c) γ線（陽電子消滅放射線）の種々の物質による吸収 [全類; γ線の吸収曲線や、吸収係数と吸収体との関係]；(d) 同時計数による陽電子放出体の低バックグラウンド計数と PET の原理[1] [主に理科系]；(e) ^{68}Ga の濾紙への吸着 [理科系や特に興味を持つ高校生; 水溶液中における両性電解質イオンの挙動の pH 依存性]；(f) ^{68}Ga の分析化学利用、^{68}Ga 標識放射薬剤の合成と生体内挙動[4] [主に理科系の有志; RI実験の楽しさの実感]。放射能の測定は全ての実験で必ず行うが、複数の測定法を体験するのが好ましい。このうち、a と e は数組が同時に行ない、他は全員が1組または2, 3 組となる。 また、b, c, d では Milking せずに、Generator 中にあるままの ^{68}Ga を線源とする方がよい。

半減期測定は、RI のユニークな性質に基づいた、容易で全参加者にとって大変有意義な実験であり、先ず体験すべきである。とくに政治・経済関連者が指数関数（等比級数）変化の凄まじさを実感することの意義は重大と期待される。もちろん自然科学でも、指数関数は連鎖反応など種々の現象の理解に不可欠である。実験結果を片対数グラフに描き、^{68}Ga の半減期を求める。それから、指数関数の諸法則を復習し、また、RI は常に減衰し定率金利の借金は増加していくが、ともに指数関数であることをコメントする。そして、計算尺や麻雀に親しんだ時代と較べて現在は指数関数に接する機会が減少したことにも配慮しながら、次のような演習問題を活用して、指数関数則が経済成長や人口問題を考える上で不可欠なことを十分理解するように導く。

(i) ^{68}Ga の放射能が 1/10 と 1/1000 まで減衰するに要する時間はどれだけか？ 実験で求めた減衰曲線と 67.7 分の半減期の各々から求めよ。

(ii) 半減期の一割だけ経過すると放射能はどれだけ減衰するか？ 半減期の何倍が経過すると放射能は約千分の一に減衰するか？ （約 7 % と 10 倍；記憶せよ）

(iii) 鎌倉に幕府を開き日本に武家政治時代を到来させた 源 頼朝 は、1199 年に落馬がもとで死去した。1200 年に 北條政子 が香典を年利 7 % の複利で預金し、この条件が（税金も手数料も差し引かれることなく）継続していると仮定する。預金は 810 年後の現在何倍となっているか？ 先ず当てずっぽうに答え、次に計算せよ。ごく最近この値に追い越された自然科学の重要な常数

は何か。また、140億年前、ビッグバーンの頃に 年7 % の単利で預金し、利子を毎年タンス預金に移していた場合はどうなっている筈か？　　（答：$6.3x10^{23}$ 倍、Avogadro 数、約 $1x10^{9}$ 倍）

〖 記憶しておくべき数値： $1.07^{10} \fallingdotseq 2.0$,　$2^{10} \fallingdotseq 1000$ ；　$\therefore\ 1.07^{100} \fallingdotseq 1000$ ---- これから初めの問題は暗算で概算値が求められる。ついでに、1年 ≒ 1億/π 秒　も覚えておくと便利。〗

(iv) 世界の GDP が年率 3.5 %の成長を続けると、20, 40, 60 年後には何倍となるか？その場合、50 年後の地球や人類はどのようになっているであろうかを推測せよ。

(v)　生物にとって老化と死は避け得ないが、放射性核種には老化も前触れもなく突然死（壊変）のみがある。この違いの原因は何か？

RI の減衰測定は、また、一次反応速度が再現性良く迅速に容易に求められる典型例である。さらに、実験装置に僅かの工夫を施せば、“核反応速度は温度などの環境や化学形に依存しない”という事実を体験することもできる。

6.　実験資材や測定器のレンタル制度を立上げよう

各高校での実験を例にとろう。なるべく多種・多数の測定器があり、全生徒がそれらの操作を体験すべきである。だが一般の高校で RI 実験を行うのは毎年限られた日数だけで、若し Generator や十分な測定器等が支給されたとしても、その管理・保守はかえって大きな負担となる恐れが多い。特に RI Generator は、法律には抵触しない量であっても、その存在場所を信頼できる機関が掌握しているべきである。そこで、多数の Generator、測定器、その他の機器・資材を保守・管理している中心機関を設置し、前もって設定しておいたスケジュールに従って各高校に必要物件を順繰りに貸し出すレンタル制度が最適と考えられる。この中心機関は優れた人材を有し、保守・管理・貸出だけでなく、高校教員の相談にも応じ、協力して実験内容の改良にも務め、また、レンタルスケジュールの設定にも関与する必要がある。さらに、独自で講習会を開催したりして、この計画の普及にも努めねばならない。現在、日本アイソトープ協会と協力して準備を進めているが、この中心機関をどのような実態とするかは今後の課題である。一般の理科教育でも高価な機器が必要となるにつれ、レンタル制度の必要性も増すであろう。RI 実験がその先陣を満足に果たせたならば、それ自身で科学教育全般への大きな貢献となる。

現実では、特に高校教育では内容やスケジュールの大枠が決まっているのが普通で、新たな実験を割り込ませるのは容易でなく、普及には時間もかかるであろう。先ず、既に RI を扱っている大学や医療関連短大の職員や特に熱心な高校の先生方に Generator を配り、テストをお願いする計画である。いずれにせよ、皆で頭を絞ってなるべく多くのアイディアや計画を提出・論議・試行していくことこそ重要ではなかろうか。

引用文献

1) 野崎　正, ^{68}Ge-^{68}Ga Milking Generator の教育利用, Isotope News, **2009** 年 **6** 月号, 2－5.

2) Nozaki T., Proposal for active use of ^{68}Ge-^{68}Ga milking generator in education of various categories, ISRE08 NTHU—4th Int. Symp. Radiat. Educat., pp. 3-102－3-105 (2008)

3) Loc'h, C., Maziere, D., Comar, D. and Knipper, R., A new preparation of germanium 68, Int. J. appl. Radiat. Isot., **33**, 276－270 (1982)

4) Weiner, R.E. and Thukur, M.L., Chemistry of gallium and indium radiopharmaceuticals, in handbook of radiopharmaceuticals－Radiochemistry and application, Ed. Welch, M.J. and Redvanly, C.S., John Wiley, Sussex, pp. 363－400 (2003)

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 13, No.1, p. 47 - 54 (2009)

【研究報告】

放射線教育に関する高校教員へのアンケート調査で表された意見の紹介と考察

田中　隆一
NPO 法人放射線教育フォーラム
（2010 年 3 月 18 日受理）

【要旨】全国高校の理科教員を対象としたアンケート調査（2009 年 8 月実施、回答数 614、回答率 20%）においていくつかの設問への回答に表された様々な意見を、今後の放射線教育を考えていくうえで特に有益あるいは参考となると考えられるものを中心に紹介し、若干の考察を加えた。意見記述を求めた項目は物理や理科総合 A 以外の科目での放射線学習の必要性、外部からの協力・支援、試作版の指導資料、および原子力・放射線やリスクについての教育である。とくに、今後の放射線・原子力教育においてリスクの視点を取り入れようとするとき、教育現場には様々な問題があることが認識できた。

１．はじめに

放射線教育に関するアンケート調査については、2008 年に放射線教育フォーラムが全国の中学校の理科教員を対象として実施し、その結果は放射線教育フォーラムのホームページ(http://www.ref.or.jp)に紹介された。これに引き続いて全国の高校教員を対象とするアンケート調査を 2009 年 8 月に実施した。アンケートの回答数は 614（回答率 20%）であった。その調査結果も同ホームページで紹介される予定である。この調査では意見記述を求める 4 つの設問があり、これらについて多くの方々から貴重なご意見が寄せられた。ここでは、これらの意見のなかから、今後の放射線教育を考えていくうえで特に有益あるいは参考となると考えられるものを紹介させていただくとともに、若干の考察を加えた。

２．意見記述を求めたアンケートの設問

意見記述を求めた設問を以下に示す。

第４問　物理ご担当以外の先生にお尋ねします。物理及び理科総合 A 以外の科目の学習指導要領では放射線が扱われていません。ご担当科目での放射線に関わる学習の必要性についてあなたのご意見をお聞かせください。

第７問の１　外部からの協力･支援についてあなたのお考えをお聞かせください。

第１２問　放射線・原子力やリスクに関する教育についてあなたのご意見を以下にご自由にお書き下さい。また、このアンケートに関連して、なにかご質問、ご意見、ご要望があればお聞かせ下さい。

第１３問　ホームページで公開中の放射線に関する指導資料「放射線・放射能の基礎」

の改訂作業を現在行っております。この資料に関するご意見があればお聞かせ下さい。

3．　物理や理科総合A以外の科目での放射線学習の必要性について（第4問）

学習指導要領の改訂によって、現行の理科総合Aで扱われている放射線についての学習内容の多くが中学校理科に移行し、「物化生地」の各分野にそれぞれ2単位の基礎科目が新設され、「基礎物理」だけでなく、「化学基礎」でも放射線・放射能が扱われることになった(1)。このことによって、放射線の学習分野が物理に偏る傾向が見直される方向性が期待されるが、物理担当以外の先生方が放射線学習の必要性をどのように考えておられるかを尋ねてみた。

回答者のうち、化学、生物、地学を担当している先生の比率はそれぞれ、22%、21%、3%であったが、意見を記述した約半数のなかの大部分の方が放射線を扱う、あるいは、触れることの必要性を述べている。「特に必要ない」、「現行のままでよい」という回答は少数であった。ただし、「必要であるが時間が取れない」、「大学入試に出ない」などは隠れがちの意見として留意する必要があろう。

個々の科目に関しても多数の興味深い回答があったので、以下に紹介する。

化学担当の先生方からは、原子の構造の学習で放射性同位体を実際に扱っている、あるいは、扱いたいという意見が多かったが、今回の学習指導要領改訂で登場した「化学基礎」の学習内容として放射性同位体の扱いはすでに指導されている。放射線を扱っている教科書の実例（化学Ⅰ、東京書籍）もある。また、原子構造、原子核の理解だけでなく、科学史学習の必要性を強調する意見もあった。

生物担当の先生方からは、放射線の生物への影響及び放射線医療の重要性の指摘が目立った。ただし、人為的な突然変異などの悪影響が強調される傾向があり、自然に起きる変異などについての記述はほとんどなかった。

放射性同位体を標識トレーサーとして用いる生物実験はすでに「生物Ⅰ、Ⅱ」で扱われており、その扱いのなかで放射線・放射能について触れておく必要性の指摘もあった。医療分野を志望する生徒にとってとくに必要であるとの意見もあった。そのほか、品種改良や食品照射の扱いの必要性を述べる意見も少数ながらあった。

「生物」に関しては「化学」よりも多くの意見記述があった。高校における放射線学習を「物理」以外にも広げていくうえで「生物」をどのように位置づけるかが重要であると考える。

地学担当の先生方の回答比率は少なかったが、放射年代測定の学習ですでに扱っている、あるいは扱いが必要であるとの意見が多かった。放射年代測定については、化学や生物を担当する先生方からも必要性が述べられている。ただし、今度の学習指導要領改訂では、「化学基礎」の科目で扱うことが明記されている。

少数意見ながら、地球の歴史、地球の内部エネルギー（地殻熱流量の熱源）、宇宙線の学習の中で扱っているとの意見もあった。とくに、地殻熱流量に関する放射性同位体の自然崩壊の寄与があることは見逃されがちであるが、自然放射能の基礎的な理解にとって重要なポイントであろう。これに関連して、「地球に降り注ぐ電磁波、粒子線の項目で放射線を扱っている。原子力だけがすべてではない」という意見にも留意する必要があると考える。

個別科目以外の視点からの意見としては、「原子力・放射線に関わる社会常識として必要」という意見が多かった。「中学校で放射線を学習する以上は、それを深めるためにも関連付けて学習させる必要がある。」という中学校との連続性を重視する意見もいくつかあった。これは現行の科目編成による弊害に対する反省に立って、今回の学習指導要領改訂における物化生地の基礎科目の導入によって中学校との連続性を配慮するという文部科学省の指導内容とも合致している。放射線・放射能が「『物理Ⅱ』の選択分野なので、ほとんどの生徒が習わない」、「すべての高校生が履修する科目の中で必ず扱うのが望ましい」、「義務教育で扱うべき」などの意見も今回の学習指導要領改訂の意義を再確認するものと考える。

４．外部からの協力・支援に関する意見（第７問の１）

学習指導要領改訂によって、放射線学習が中学校理科に 30 年ぶりに「放射線の性質と利用」というキーワードで復活したことに伴って、同じキーワードが中学校から接続して高校も扱われるようになった。この学習指導の変更のもとで、高校理科の先生方が放射線の授業に関して外部からの協力・支援についてどのようなお考えをお持ちかを尋ねた。

全体的には肯定的な意見が多数を占めたが、条件付き肯定に意見や問題点を指摘する意見も多かった。ここでは、それぞれの意見例をまとめた結果を述べる。

４．１　外部からの協力・支援への肯定的意見

多数を代表する意見は、「高い専門知識・技術を持った方の協力・支援は非常に有効」、「専門知識がない教員にとってありがたい」、「生徒に多様な興味関心を育てるうえで必要」、「総合学習のなかで取り上げたい」などの目標を明確にした協力・支援への期待である。一方、回答者のうち放射線を教えた経験をもつと答えた先生が大部分であったにもかかわらず、「教師自身が学ぶことがまず必要」、「夏休みなどに学べる講座があるとよい」、「実験したことはないので助かる」など、教育現場のおかれた実情に合う支援を求める意見がかなり見受けられた。

これまで放射線を扱う実験・実習において協力・支援を得た経験もつ先生方からは、「無料での機器の貸し出しはありがたい」、「はかるくん、計測キットを借用したが、管理・整備がしっかりしてよかった」などの協力・支援を肯定的に評価する記述もかなりあった。また、当然のこととして、「放射線を扱う施設の見学をさせたい」という意見もあった。

一方、条件付きの肯定的な意見としては、「機会があれば実施したい」、「時間と予算があれば実施したい」、「生徒の能力・理解度を把握したうえで支援していただくのであれば有意義」、「難しい話でなく、社会と結び付けた話ならば生徒も身近で聞き易い」、「メリット・デメリットに中立的に考えることを守るならば積極的に受け入れたい」、「事前に十分な学習を積むことが前提であり、それなしでは外部講師のメリットはない」、「科目の指導内容、比重とのバランスで必要度が変わる。現状は器具借用だけ」、「実験の安全性など、細部にわたる打ち合わせが必要。自然放射線測定の演示なら容易」、「簡便に支援教育が実施できる仕組みが必要」など、時間や予算の制約、学習内容、学習の効果や評価、実験の安全性、協力・支援の仕組みなどの課題があることが

窺える。

４．２　協力・支援の問題点を指摘する意見

協力・支援の問題点を指摘する意見は比較的少数ではあるが、前述の肯定的な意見に付けられた条件の方に重みがかかるケースであると考えられる。

時間的、予算的な制約や学習効果に関しては、「校務多忙、現行内容で十分という意見が強く、外部支援を受けるに至らない」、「時間不足で基礎知識・理解があまりないなかで行うと学習効果が上がらない」、「実施までの手続き、時間の調整などの負担を考えると躊躇する」、「外部からの協力・支援は税金の無駄遣いという側面もある」、などの意見に連携・出前授業の問題点が典型的に表れていると考えられる。

学習内容に関しては、「科目内容の全体のバランスを考慮すると、そこまでの必要性を感じない」、「現行の『物理』では放射線は選択分野に含まれるので、授業もなく必要ではない」、「専門的内容を学習するために、外部から協力を得る必要性を感じない」、「理系クラスでも興味、関心には差があり、自分の興味以外のことは関心が低い」などの意見があった。

また、「外部支援では原子力・放射線のメリットに偏った話になることを危惧する」、「推進、賛成、反対など立場の異なる団体があるので、外部支援には慎重になる」、「原子力は政治的内容がからみ、どこから協力支援を受けるかの問題で躊躇する」、「この分野のみについては許可が取りにくい」、「原子力の学習について外部講師は不必要である」など、「原子力・放射線」の置かれた社会的な特殊性を示す否定的な意見もあった。

５．試作版の指導資料に対する意見（第１３問）

ホームページでも公開中の放射線に関する指導資料「放射線・放射能の基礎」試作版に関する意見は他の設問に比べて少なく、「特にありません」が最も多かった。多様であった意見のいくつかを紹介する。

「分かりやすくてよくまとまっている」、「是非利用させていただきたい」、「『自然放射線の測定』の実験試料はぜひ使ってみたい」というご賛同や積極的な活用の反応と並んで、授業実践を念頭に改善を要望する以下のような様々な意見があった。

「指導資料ならば、もっとくだけた感じであってもよい」、「身近に感じられるような図や写真、話題を盛り込まれるとよい」、「放射線の実体やその影響まで、詳しく図解してほしい」、「こういう易しい説明に置き換えるとよいとあれば、現場で使い易い」、「図をそのまま授業用として使えるようにしてもらえると助かる」、「わかりやすいがグラフや図が古そうなものが含まれる。新しくしてほしい」、「文章が長すぎる。情報量が多すぎる。実験例がもっとあってもよい」、「たいへん参考になるが、中学校での指導としては高度であると思う」、「もう少し踏み込んだ内容でもよい」などである。これらの要望は先生方の放射線に関する知識や授業実践の経験の程度にとって異なるのではないかと考える。また、要望の視点は実に多様であるので、全ての改善の要望に応じることは難しいが、完成版の作成に向けて貴重なご意見をいただいたと考える。

こうした改善の要望以外に、「安全性を強調し過ぎる書き方は不信感を抱かせる」、

「一部保護者からクレームがつくかもしれない。対処のアドバイスがほしい」、「世界的な非核の潮流につながる記述がほしい」、「LNTモデルが間違いであるかのように書かれている。原発のリスクが書かれていない。放射線の歴史や原爆の説明がほしい。」など、記述内容に対する批判的な意見も散見された。

６．原子力・放射線やリスクについての教育に関する意見（第１２問）

原子力や放射線については、その便益性だけでなく、危険の可能性（＝リスク）も認識することが科学技術と人間の関わりについての教育的な視点から大切である。原子力・放射線に関わる教育の在り方を考えるうえで、この設問が科学技術のリスクという視点からの議論のきっかけになることを期待した。その結果、後で述べるように、多くの貴重なご意見をいただいた。ただし、この設問では、リスクの意味を限定せずに自由に記述していただくことに重きをおいた。また、理科教員という職業的な使命感で回答する、あるいは、分からないことは調べてから回答するというのはなく、日常生活の感覚で自由にお答えいただくこととした。

その結果、リスクに関する学校教育を実施するべきであると回答した割合が６割以上であったが、教育の在り方よりも原子力それ自体に対する回答者の価値判断が直接に示された記述例が目立った。放射性廃棄物の処理が危険である、原子力推進側はリスクを隠している、あるいは放射線のリスクを正しく伝えていないという意見が多数あった。説明不足ながらリスクは「危険の可能性」を指すと一応ことわったが、「リスク＝危険」と受け取る人が多いことが示された。よく考えれば、「原子力・放射線」と「リスク」というキーワードを不用意に併記したため、両キーワードがもたらす相乗的な効果によって、教育論議よりもむしろ原子力の安全性が絡む価値判断の意見が誘発されたと考える。この意味では、第 12 問はアンケート調査の設問としては注意深さを欠いたと反省している。この設問の不用心さに気付いて、「リスクは“ひとり歩き”する」から注意するようにと親切に忠告してくれた回答もあった。リスクの意味付けを回答者の自由にまかせたことが回答者をかえって戸惑わせ、なにを答えてよいか迷うという意見やアンケート調査の意義に疑問をもつ意見も多かった。

以上のとおり、今回のアンケートにおける「リスク」への踏み込みは上のような反省を結果として生んだが、この試みが失敗に終わったわけでは決してない。われわれがリスクに関する教育を学校で扱う方向を目指すには、なにがポイントになるかを考えうえで参考となる多くの貴重な意見をいただけたと思う。

６．１　リスクを学校教育で扱うことに積極的な意見

リスクを学校教育で扱うことに積極的な意見のうち、いくつかを以下にピックアップする。

「放射線・原子力に限らず、リスクに関する教育は絶対に必要だと思います。現代社会においては、様々な化学物質や遺伝子組み換え作物に言及するまでもなく、自動車や携帯電話のように身近なものでさえ、リスク抜きでは語れません。リスクと利便性を秤にかけてリスクと共存することさえ必要となっています。この現実を知り、賢い選択をするための知識を身につけることは必須だと思います。」

「将来、社会の担い手となる子供たちが、社会の在り方や個人の生き方のなかで、

放射線・原子力について判断を迫られたとき、正しい知識をもち、リスクを承知のうえで方法や手段を選択できるような力を養うことが教育の役割であると思う。」

「リスクの概念が定着しつつあるが、この視点での教育が不足している、あるいは統一的な視点で取り扱う分野がない。学校教育のなかでは学習内容が分散し過ぎて、各教科の連携が取りにくい。横断的な視点が必要な内容である。」

「放射線だけ取り上げるのではなく、他のものも同じ尺度で並べる必要があります。ただし、尺度の取り方にコンセンサスがないので、複数の方法を示すべきです。」

「確かにリスクについての教育も必要だが、ベネフィットの側面についても触れるべきであり、情報をしっかり与えたうえで、各生徒に判断をさせることが必要。どちらを重く見るかは個人の判断の問題である。放射線だけでなく、社会生活で生じる様々なリスクを平等に評価する力が必要である。そのために、授業だけでなくいろいろな場で、必要性とリスクを取り上げて教えたい。」等々。

６．２　リスクを学校教育で扱うことの問題点の指摘例

上の述べた意見はリスクを身近な問題も含めて、広い見地からリスクを学校教育に取り入れる必要性を説いている例であるが、リスクを取り上げることに伴う問題点を指摘する次のような意見もあった。

「リスクかどうかは教員が判断して『リスクだよ』と教えるものではなく、生徒が学習を進めた結果、『これはリスクを伴うものだ』と判断できるようにすることが大切だと思います。原子力に関する正確でしっかりとした知識及び基礎的な技能を身につけるようにする。本来、一番重視されるべき内容がリスクというフィルターを通すことで、ゆがめられているのではないかと思います。」

「学校現場でのリスクには、保護者が敏感に反応し、場合によっては学校に対する圧力等があり、非常に回りを気にしなければならないという現実を見逃してはならない。社会全体で子供を育てるという意味でも雰囲気作りが重要であると考える。」

「そのリスクを受容するかしないかに、教える側の主観がかならず入る。これがよいか悪いか迷う。リスクに対する無知が一番危険だと思います。正しい知識を与えて選択させる教育が必要です。」

「放射線・原子力には政治が関係しているので、中立を守って教えるのが難しい。」

「放射線や原子力をイメージとしてすらもてない生徒が多いので、授業で扱うのは非常に難しく、毎回たいへんである。」

「原子力・放射線のリスクだけ独立して扱う時間はない。また、生徒にも響かないと思う。理科の関連分野として身近なこととつなげて伝えると、自分のものとして受け取ってくれるのではないかと思う。基礎知識理解の問題、視野・関心の狭さ、精神年齢の低さ･･･この前提で何ができ、なにが伝えられるか？」

「教科書の内容に準じて授業するわけであるから、教科書にきちんとした記述がなければ授業で触れるのは困難だと思う。つまり、リスクについて教科書に記述してほしい。」

「安全である、危険である、の判断は成人してから各自で行うべきであり、公の教育では判断材料を与える、正しい知識を伝えるなどに止めるべきである。」

「『放射線とは何か』『その役割は？』、さらに『生物への影響』と教えれば、便益性

やリスクという概念は不要。利用を推進しようとするあまり、便益性の強調につながる。それではバランスを欠くのでリスクを教えなければ、という発想になるのであって、科学的な知識を中立的に教えることができないのが問題だと思います。」

「リスクに関する教育は必要だと思うが、高校の物理で扱うには時間数が厳しく、教員側としては、目先の大学受験対策に力を注ぐ現状である。中学校での取扱いは比較的に時間数に余裕があるため、そこできちんと教育していくほうがよい。」

「放射線に対してだけリスクを強調するのは良くないと思います。化学物質と同様にくすりも毒になり得るので、放射線の性質から有用性まで広く教えるべきと思います。」等々。

6．3　マスメディアの影響についての意見

マスメディア報道に対する批判と絡めた意見が多数あったが、それらのうちから、代表的なものを以下にピックアップした。

「リスクに関する教育をしてもいま一つ反応は少なく感じます。テレビによるキャンペーンや口コミによる『うわさ』に強く反応する人が多いのではと感じています。高校生のような年代に対して安全性、利便性、危険性を天秤にかけて判断するような教材をもっと提供し、訓練しないと、感性だけで判断する人間をますます増やすことになります。」

「情報を自分なりに正しく理解できるように教育せねばと思います。マスメディアや本にも偏向的な内容があり、『何でも反対』ではなく、メディアリテラシーを常に考えるようにしています。」

「マスメディアの影響によって。良い面、悪い面が極端に表現されがちであるため、基本的な放射線の性質などが見失われている。近年起こった事件、事故を論理的に正しく解説し、理解させる教育を行うようにしたい。そのような討論や勉強会をやっていただきたい。」

「メディアで報道されているリスク、メリットだけでなく、異なる様々な立場からの意見を公開する機会を作っていただけたらと思う。先入観が先行する分野だと思うので、教師側も多くの意見を参考にし、教えていかなければならないと思います。」等々。

7. まとめ

選択肢から選ばせるアンケート回答の集計結果の全体を示さないまま、いくつかの設問で回答された意見記述を著者の私見も交えて紹介した。本来は集計結果の発表のなかで紹介するべきところであるが、それに先立って意見を中心に紹介させていただいた。結果として、放射線に関わるリスクの扱い、外部支援、学習内容などについての多様なご意見を全国の先生方から直接的にうかがうことができた。これによって、今後、新学習指導要領に基づく高等学校等における放射線教育をどのように支援していくかを考えるうえで貴重な判断材料が得られたと考える。とくに、今後の放射線・原子力教育においてリスクという視点を取り入れようとするとき、教育現場には様々な問題があることが認識できた。リスクに関する学校での教育については、この認識を踏まえた慎重な扱いが必要であると考える。

また、リスク教育に寄せられた多くの意見から、放射線に限らず広い科学技術や社

会に関わる客観的な正しい認識をベースに、リスク認知につながる思考力、判断力を育成することの必要性を多くの方々が感じておられる実態がつかめたと考える。それでは、リスクを扱うという教育の方向性のなかで放射線をどのように位置付けたらよいかということであるが、筆者は次のように考える。

「放射線」は、線量と人体への影響の関係をもとに、科学技術のリスクの包括的な理解のために最もふさわしい教材を提供できる。その理由は、第１に、「化学物質」と並ぶ科学技術におけるリスク認知の代表的な対象であること、第２に、安全（白）と危険（黒）の間の線量における灰色ゾーンの理解によってリスクの客観的な認識が容易であること、第３に、線量という共通尺度を通してリスクの評価、管理の正しい理解が可能であること、である。

終わりに、ご多忙にもかかわらず、貴重な時間を割いてアンケート調査に協力していただいた先生方にあらためて感謝する。

参考文献

(1) 文部科学省：高等学校学習指導要領(2009)
(2) 田中隆一：「リスクに関する学校教育を考える」、広領域教育、No.68、20-27

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 13, No. 1 , p.55 - 64 (2009)

【実践報告】

青森支部2009年度の活動の記録

笹川澄子
NPO法人放射線教育フォーラム青森支部
〒033-0023 三沢市下久保 1-3-6-C
（2010年3月17日受理）

［要約］青森支部は設立以来3年を経過した。支部活動の中心はセミナー開催である。今年度はセミナーを4回開催した。そのうち3回は地元の皆様とのコミュニケーションの方法としてサイエンスカフェを試みた。また，他団体主催のサイエンスカフェを，依頼を受けて共催した。人々の発意・発露を促し，円滑な双方向コミュニケーションを図ると共に，社会・生涯学習分野での活動が学校における放射線教育の側面支援につながることを願っている。

1. はじめに

NPO法人放射線教育フォーラム青森支部は，様々な分野で活躍する地元の方々や専門家など関係各位とともに，遍く住民の関心事を考え理解を深め，とりわけ原子力や放射線に関しては，住民の日常生活の中に安全安心が醸成されていくことを目指している。そのために，2007年度の設立以来3年間，セミナー開催を主な活動に掲げ，設立初年度（2007年度）は設立記念（第1回）および第2回セミナーを六ヶ所村で開催し[1)]，2008年度は予定の2回開催に加え，五所川原市住民の皆様の要望にお応えし，5回目となる「出前セミナー」を追加開催した[2)]。セミナーは第2回以降「あおもり県民カレッジ」認定講座に登録されている[1)]。

3年目に入った今年度は予定の2回に，同様に住民の皆様からの要請に基づく2回を加えた4回を開催した。特筆すべきことは，4回のうち後の3回を「サイエンスカフェ」(*)と銘打ったセミナーにしたことである。これらの概要を記述する。また，他団体主催の研修会を依頼に基づき共催したことも加筆したい。文末に，参加者にお願いしたアンケート回答のうち，自由記述欄に記述いただいた参加者の意見や要望を紹介する。個別設問に対する回答の詳細な解析は後日報告したい。セミナーの様子は折り折りに支部ホームページに資料（pdf）とともに公開しているので，閲覧されたい（http://www.jomon.ne.jp/~ssgw/）。なお，セミナー開催の案内方法はこれまでと殆ど変わらないため省略する。

*サイエンスカフェ Science café：1997～8年にイギリスとフランスで同時発生的に行われたのが起源とされる。カフェのような雰囲気の中で科学を語り合う場，またはその場を提供する団体の名前。特徴は，話題提供者と参加者，参加者同士の双方向コミュニケーションに重きを置き，また，お互いにファーストネームで呼び合うのをルールとしていることである。通常，最初にゲストスピーカーの話題提供，次いでドリンクタイム，参加者全員による質疑応答・意見交換・議論などが行われる。日本では2004年に京都で行われたものが最初とされている。（参照：フリー百科事典ウィキペディア）

2. 事業の概要

2-1 第6回セミナー[3)]

日　　時：2009年7月11日（土）10:00～12:00，13:30～15:30
場　　所：六ヶ所村文化交流プラザ「スワニー」小会議室
テ　ー　マ：医療における放射線の利用
参　加　者：約60名
プログラム：講演の部「放射線を用いたがん治療」（佐々木康人氏）
討 論 の 部：参加者全員

放射線はエネルギー，医療，農業，工業など様々な分野で利用されて久しく，産業界は勿論，我々の日常生活に深く必要なものになっている。にもかかわらず，そのことの認知度が低い。昨年度は，放射線がどこでどのように利用され役立っているかを経済効果も含めて六ヶ所村で学び，さらにその延長として，農業における放射線の利用を五所川原市で学んだ。そこで，今年度最初の第6回は，医療における放射線の利用をテーマにした。併せて，利用と裏腹にある廃棄物あるいは使用済み線源の処分に関連する問題も提起したいと考えた。講師には核医学を専門とされ，放射線医学総合研究所の前理事長で現在（社）日本アイソトープ協会常務理事の佐々木康人博士をお願いした。

講演は午前と午後の2回行った。その理由は，医療の問題，とりわけ高度医療や高度がん治療に対する希望は青森県では高いものがあり，そのため，できるだけ多くの地元の方々にご参加いただきお話しを聴く機会を設けたいと考えたからである。その分，佐々木博士にはご負担をお願いすることになったが，快諾いただいた。

講演内容は次のようであった；

1. がんの治療法
2. 放射線の医学利用
3. がんを切らずに治す放射線治療
4. 重粒子によるがんの治療

そもそも放射線がどのように発見されその利用がどのように展開されていったか，誰（歴史上の人物ということになる）がそこにいたか等，20世紀初頭の貴重な歴史を珍しい写真と共に示された。次に，放射線がなぜがん治療に有効なのかという細胞生物学を示され，そして放射線がん治療の技術，特長，治療例，最新の技術や施設整備の現状，この分野の人材育成や隠れている問題，緊急の解決を要する事など様々な問題の提起を丁寧にお話しになった。

村内だけでなく近隣市町村からも参加があり，質疑応答は終了予定時刻を超えて活発に行われた。医療における放射線の利用に関わる課題は，治療だけでなく治療施設の整備，人材育成にも及び，多くの人々が幅広くかかわるものであると思われた。この問題に係る参加者の感想や意見は後述の自由記述欄を参照されたい。

2-2 第7回セミナー「サイエンスカフェ六ヶ所」[4)]

日　　時：2009年11月8日（日）13:30～15:30

場　　所：六ヶ所村文化交流プラザ「スワニー」小会議室
テ　ー　マ：「霜月の昼下がりに科学と文学に親しむ」
参　加　者：約 50 名
プログラム：話題提供
　　科学の部「農漁業におけるイオンビームの利用」（小林泰彦氏）
　　文学の部「太宰治と真実の愛」（津島園子氏）
　　おしゃべりタイム

この回から「サイエンスカフェ」とした。青森支部にとっても初めての試みであった。どこかの先例に倣うのではなく，試行錯誤ではあっても独自色が打ち出せればとの思いをもって実施した。「サイエンスカフェ○○」とし，○○は開催市町村名を付け，サイエンスカフェのテーマはできるだけソフトな題にした。プログラムは話題提供と質疑応答・意見交換で構成し，後者は親しみが持てるように「おしゃべりタイム」と表記し，茶菓などを用意した。

話題提供の科学の部は，昨年度五所川原市で行った第 5 回の「農業における放射線の利用」[2] の六ヶ所村での再現である。但し，六ヶ所村の方から「本村では漁業も盛んで，漁業での利用の可能性を広げて欲しい」と要望されたことから今回のテーマへの変更となった。漁業分野では放射線の利用はほとんど無いということであるが，付加価値をより高めた水産物生産に向け将来の可能性を見据えて，敢えて「漁」を入れた。また，「放射線」は抽象的であるので，実際に使われているイオンビームと表記し，最終的に「農漁業におけるイオンビームの利用」とした。お話しは，まずは聞き慣れないイオンビームの解説から入った。そして実際に開発された花弁類で店頭にたくさん出回り，どのように開発されたか知らずに既におなじみになっているキク，カーネション，オステオスペルマム，さらには温室メロン等々が紹介された。質問もたくさんあって大変好評であった。

文学の部は，青森支部の津島園子支部長にお願いした。支部長は，本県津軽地方の生まれで昭和を代表する作家・太宰治の親族として著明であるが，太宰治生誕 100 年を迎えたこともあって快くお引き受けいただいた。お話しは外からは窺い知れないこと，新たに発見された資料などをまじえた新鮮なもので，参加者はその文学の世界に興味深く聴き入り，浸っておられるようであった。講演者が画家として発表した作品も何点か紹介され，文学だけでなく芸術にも親しむカフェとなった。プログラム終了後に出された参加者と講演者との懇談やサインの希望には，時間の許す限り応じていただいた。

今回のセミナーは，科学だけに終始するのではなく，文学や芸術（美術・音楽等々）をまじえると，科学は難しく特別の人々のものではなく人間の所作そのものであるという認識を参加者に喚起したようであり，科学に対する理解も格段に深まったのではないかという印象を持った。

2-3 第 8 回セミナー「サイエンスカフェ五所川原」[5]

日　　時：2009 年 11 月 29 日（日）10:00～12:30
場　　所：五所川原地域職業訓練センター2 階視聴覚室
テ　ー　マ：科学も文学も面白い

（五所川原はつらつ虹の会　女も学ぼうシリーズ 2）

参　加　者：約 40 名

プログラム：話題提供

科学の部「心身健やかに生きる秘訣」（筆者）

文学の部「科学する心　文学する心」（三村三千代氏）

おしゃべりタイム

科学の部は埋め草あるいは前座として筆者が話題提供した。オムニバス風に，温暖化ガス二酸化炭素，二酸化炭素と原子力，憲法第 25 条，について我々が知っているようで知らない，あるいは忘れていると思われる部分を紹介した。特に地球温暖化の原因と考えられている二酸化炭素の化学計算を試みたり，原子力発電と二酸化炭素との関わりについて新聞記事を基に示し，さらに，国民は健康で文化的な生活を享受するためには勉強しなければならないことが憲法にも謳われていることを提示した。

文学の部は三村三千代氏にお話しいただいた。タイトルはご自分でお考えになったものである。文学と科学（自然科学）とは相反するものか？そもそも言語（言葉）とは，文学と科学の融合，と古典文学者らしい内容も織り込まれた，興味をそそるお話しであった。三村氏は，昨年度の「活断層今昔話」と題した第 4 回[2]で，昔話の部をご講演いただいた。古典文学を専門（文学修士）とし，地元の八戸短期大学の客員教授である。結婚を機に青森県民になられた。以来，NHK 文化センター（青森市，八戸市，弘前市）やエルム文化センター（五所川原市）等で講師を務めてこられた。また，県内各市町村における市民大学等でも古典文学の講師を務められ，若々しく分かりやすく滑らかで興味をそそる語り口はつとに有名で，好評を博しておられる。今回のお話しも参加者の期待に十分応えるものであった。

2-4 第 9 回セミナー「サイエンスカフェ五所川原」[6]

日　　時：2010 年 2 月 21 日（日）13:00～15:00

場　　所：五所川原地域職業訓練センター2 階視聴覚室

テ　ー　マ：備えあれば憂いなし

（五所川原はつらつ虹の会　女も学ぼうシリーズ 3）

参　加　者：約 80 名

プログラム：話題提供

科学の部「活断層って何？どこにある？活断層を知って地震に備えよう」（島崎邦彦氏）

文学の部「太宰治と真実の愛」（津島園子氏）

おしゃべりタイム

科学の部は昨年度六ヶ所村での第 4 回「活断層今昔話」[2]の五所川原市での再現である。島崎邦彦博士は地震予知連絡会会長（第 5 代）になられたが，昨年度と同様に接して頂いた。お話しは，活断層とは何か，地形的にどのように現れているか，本県五所川原地域の活断層の分布，地震予測などを，現場写真や調査風景写真，地図，図解なども提示なさっ

て分かりやすくお話しになった。

文学の部は，第 7 回の五所川原市での再現である（お話しの概要は省略）。さらに，作家・太宰治の生誕の金木町が市町村合併によって五所川原市に組み込まれたために，ご当地での親族登場となった。「活断層」を知りたいことに加えてこのこともあって，会場の収容人員数 45 名をはるかに超える参加者となり，ぎゅうぎゅう詰めになってしまった。配付資料も品切れとなる盛況であった。

2-5 共催「サイエンスカフェ in 五所川原」[7)]

日　　時：2009 年 6 月 28 日（日）10:00～12:30
場　　所：五所川原地域職業訓練センター2 階視聴覚室
テ　ー　マ：環境問題を自分の視点で考えよう
　　（主催：あおもりアースレンジャー西北五連絡協議会）
参　加　者：約 10 名

「サイエンスカフェ in 五所川原」は主催者のあおもりアースレンジャー西北五連絡協議会からの依頼に基づき，青森支部が共催した。研修会の表現を「サイエンスカフェ in 五所川原」としようと提案したのは青森支部であり，テーマ「環境問題を自分の視点で考えよう」は主催者の指定であった。依頼に基づき，次の順番で話を進めた；

1. エコの定義・何が問題か
2. 環境問題フォトアルバム
3. 身近にある環境問題
4. これからどうする？

また，環境の擾乱の程度を直接反映するものの 1 つ，植物を取り上げ，実習・手作業として「植物標本作成」も行った。さく葉（押し葉）は筆者が作成したが，台紙への貼り付けやラベル記入を通して参加者には好評であった。

2-6 アンケート回答自由記述欄

各回でアンケートを実施した。アンケート回収率は事務局の動員可能な労力に依存しており，望ましいほどの高い回収率は得られなかった。本報告では，回答者の記述をほぼそのまま転載した自由記述欄を示したい（表 1～4）。これら自由記述欄も含め，回答の詳細な解析は後日報告したい。

3. まとめ

青森支部の活動の中心はセミナー形式の勉強会で，目指すところは話す側と聴く側の垣根を取り払った双方向コミュニケーションである。今年度は「サイエンスカフェ」形式を初めて試み，4 回のうち 3 回をサイエンスカフェとした。この試みは，事務局の不慣れや不手際等があったものの，全体としてはよかったのではないかと思っている。今後は，人々の発意・発露を促し芸術や文学などとも交流を図るサイエンスカフェ形式にし，自然な形で科学技術情報に親しめるようにしたいと考えている。そして，このような社会教育・生涯学習分野での活動が，本フォーラムの趣旨である，学校における放射線教育の推進への

側面支援につながるよう願っている。また，アンケートや直接面談でご指摘頂いた反省点も，支部幹事や関係者とともに改善していくように努めていきたい。

謝辞

ご講演あるいは話題提供いただいた（社）日本アイソトープ協会・佐々木康人先生，（独）日本原子力研究開発機構・小林泰彦先生，八戸短期大学客員教授・三村三千代先生，地震予知連絡会会長・島崎邦彦先生に深甚より謝意を表します。支部長の枠を超えて話題提供いただいた津島園子先生に心より感謝いたします。製品やパネルの展示・紹介，プレゼンテーション用機器の提供，講師派遣等，セミナー並びにサイエンスカフェの円滑な運営にご協力頂いた（独）日本原子力研究開発機構，（財）日本アイソトープ協会，（財）日本原子力文化振興財団，日本原燃株式会社，手薄な事務局を担うフォーラム会員や個人支部友並びに団体支部友各位に感謝いたします。

引用文献

1) 笹川澄子，新設なった青森支部2007年度の活動と反省の記録，放射線教育　11：41-52，2007
2) 笹川澄子，青森支部2008年度の活動の記録，放射線教育　12：75-84，2008
3) 青森支部第6回セミナー配付資料
4) 青森支部第7回セミナー配付資料
5) 青森支部第8回セミナー配付資料
6) 青森支部第9回セミナー配付資料
7) あおもりアースレンジャー西北五連絡協議会主催，NPO法人放射線教育フォーラム青森支部共催「サイエンスカフェin五所川原」配付資料（2009年6月28日，五所川原地域職業訓練センター）

アンケート自由記述欄の部（表 1〜4）

（回答者の記述をほぼそのまま転載。表中のカッコ内数字は記述数）

表 1　第 6 回セミナー

その他ご意見・ご感想などをご記入下さい
全体
質疑応答討論の時間が約30分とってあって良かった
次回がX線発見日に予定されていて面白いと思った
もう少し広い会場がよい
テーマの範囲を広げて欲しい
日時が7月21日でも良かった
講演
治療の症例が示されていて良かった。できれば症例数をもっと多く
放射線治療の順番待ちが多数いることを放医研で聞き、まだ安心出来ないと思った
わかりやすい講演でとても良かった
スライドと資料とで分かりやすく説明していただき参考・勉強になった
放医研を見学してきたことを思い出した
放医研で見学できなかった治療室内部を写真で見ることができ医学の進歩に驚かされた
身近な所に見学出来る施設（放射線治療）があると良い

今後どのような内容のサイエンスカフェ，セミナーあるいは講演をご希望ですか？
放射線をもちいたがん治療をテーマにしたサイエンスカフェ（2）

表 2　第 7 回セミナー「サイエンスカフェ六ヶ所」

その他ご意見・ご感想などをご記入下さい
全体
初めて参加した
サイエンスカフェではお茶お菓子はセルフサービス方式が良いと思う
席の配置はスクール方式よりも円卓あるいはコの字形の方がよいと思う
会場が狭苦しく感じられた
途中で出された飲み物とお菓子でホッとした気分になった
非常に参考になった
ありがとうございました
科学の部
「農漁業におけるイオンビームの利用」こういう講演は初めて聴いた
イオンビームの話しは面白かった

（続き）
文学の部
太宰治は本では理解できなかったことが分かり長女園子氏の話はとても参考になった
太宰治を深く理解できた
斜陽、ヴィヨンの妻、人間失格の内容が分かった
青森県の作家として誇りに思う
学生の頃「走れメロス」を読み感動していたことを思い出した
「太宰治の長女として父母のことを世に知らせるために自分がある」という言葉に感動した
以前は暗いイメージがあった太宰治に対するイメージが変わり作品を読んでみたくなった
始まる前は話題に違和感を覚えたが話の後は霧が晴れ、「科学する心文学する心」どこかで融合すると思った

今後どのような内容のサイエンスカフェ，セミナーあるいは講演をご希望ですか？
文学、政治、エネルギー
地方の歴史など
今後ともこのような勉強会を希望

表 3　第 8 回セミナー「サイエンスカフェ六ヶ所」

その他ご意見・ご感想などをご記入下さい
全体
今日のサイエンスカフェはチラシからは想像できなかった。大いに参考になりやってみたい
会場の広さもちょうど良かった
講師もユーモアがあって良かった
今日の（笹川・三村の）話は勉強になった、来てよかった（3）
このようなサイエンスカフェを続けて頂きたい（2）
もう少し聞き役（参加者）が欲しい、少なすぎる、もったいない
市民の方々がもっとたくさん来場して下さればよいのに
年を取っても修業と勉強は必要
こんな勉強の仕方があったのかと思った
講師席が特別にあるわけでなく参加者と同列にあって不思議に思ったが、むしろ良かった
こんな内容の勉強会が無料で良かった
自分たちが呼びたい講師を呼んでくれてよかった
地方自治体の研修会等では自分たちが希望する講師でない
サイエンスカフェは楽しく科学的な雰囲気・緊張感もあり自然に勉強するには良い場である
参加者がもっと積極的におしゃべりすると良い

（続き）

文学の部

大変聴きやすくわかりやすかった。また聴きたい
「因幡の白ウサギ」は結末をすっかり忘れていた。久しぶりに聴いて勉強になった
「博士の愛した数式」は昔の教科書を見てみたいと思った（若い頃は数学が好きだった）
スピード感があり興味深く、退屈無しの時間を忘れさせてくれる話であった

今後どのような内容のサイエンスカフェ，セミナーあるいは講演をご希望ですか？

文学、政治、エネルギー
地方の歴史など
今後ともこのような勉強会を希望

表 4　第 9 回セミナー「サイエンスカフェ五所川原」

その他ご意見・ご感想などをご記入下さい

全体

サイエンスカフェの手作り昼食は美味しくいただいき、暖かい気持ちになった（3）
手弁当での活動は手作り感が伝わり好印象
五所川原の皆様のおもてなしがうれしかった
サイエンスカフェのエプロン姿（進行役の幹事）と挨拶は衝撃的
サイエンスカフェについて、その存在すら知らなかった、今後関心を持ちたい
サイエンスカフェは参加者主催者の別無く全員野球、それを目指している様子が見て取れた
茶菓をセルフサービスでお願いするなど、会全体が柔らかい雰囲気で非常に参加しやすいと感じた
毎回同じ会場を使用している点も良いと思う
今後も様々なテーマで開催を定期的に続け、五所川原の皆さんのライフワークになって欲しい
気楽に参加できる雰囲気がよい
話題提供の時間が長くなって、おしゃべりタイムの時間が少なかったか
放射線教育フォーラムなので放射線の話題も少し入れるべき
おしゃべりタイムは意見を出やすくする工夫が必要か（3）
おしゃべりタイムは円卓を囲んだグループディスカッションを想像していた
質問などがもっと活発に出ると良い（2）
質問がでないのは挙手して聞きづらいからか、質問などを事前にとるのも一つの方法
せっかく第一線の先生をお迎えしているので質問しないのはもったいない（2）
「聞くは一時の恥、聞かぬは一生の恥」、多いに質問を出すべき
初めての話をただ一度聴いて全てを理解するのは無理、何回か聴くとよいと思う
とてもよい企画だと思った、びっくりした、全体としてよかった
家に閉じこもる年代であるがこの機会を与えていただき感謝、感謝（5）、また参加したい（4）
参加者が多くて会場が手狭になった（5）
会場が駅から近くでよかった（2）

（続き）

科学の部

もう少し詳しく聴きたかった（2）
地震について分かりやく、参考になった（3）
興味を持って聴いた、良かった、面白かった（2）
タイトルに大変興味を惹かれた
活断層と地形・地理との関係や地震との関係がわかってよかった
断層と活断層の違いがわかった
活断層は新しい学問であることがわかった
青森県津軽地方の活断層分布がわかってよかった
当地を例にしていたので興味が増した
内容が少し学問的で難しかった
質疑応答できるレベルになるともっと良いと思った
大学の講義のようなものでなく、もっと一般的なわかりやすい切り口がよいか
マイクの調子が良くなかったことが残念

文学の部

支部長（津島園子）さんの講演のスライドがよかった
全国的に知られている太宰治と真実の愛も女性的な様が素晴らしい人だと実感
興味を持って聴いた、良かった、面白かった（4）
どんなに苦しくても母の強さ、女の愛嬌の深さに感じ入った
昨年見た「ヴィヨンの妻」、昨日見た「人間失格」を思い出しながら興味深く聴いた
自分も太宰作品を読んでみようという気になって、よかった
娘だから言える真実、とても楽しく聴けた
太宰の生き方が「身内」の目で語られていて興味深かった
こういう時勢だから真実が必要と今日は本当に楽しい時間であった
時間が少し長かったが、親族のお話を直にうかがえる機会は貴重でよかった
太宰治・長女津島園子さんの講演はとても良かった、感激
津島園子さんのお話しは身近に感じられ、新しい見方で太宰を見ることができた
太宰治と家族の関係は面白かった
「津軽」の裏話が面白く、作品のもつ意味や深さがわかった

今後どのような内容のサイエンスカフェ，セミナーあるいは講演をご希望ですか？

これからの社会、家庭におけるエネルギーのあり方、温暖化防止、環境関連
青森県出身の作家、県内の歴史にまつわる話
食、食品照射、芽止めジャガイモを使ったサイエンスカフェ
放射線育種、遺伝子組み換え、農薬
科学も文学も感動できるセミナー、何らかの企画をぜひ

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 13, No. 1, p. 65 - 74 (2009)

【実践報告】

知的好奇心の対象としての原子力・放射線への取り組み

大津浩一
愛知県立熱田高等学校
〒456-0054　名古屋市熱田区千年 1-17-71
（2010 年 3 月 18 日受理）

[要旨]放射線に縁のなかった理科教員が、どうしてその重要性を認識したか、どうして可視光や赤外・紫外光と放射線教育を結びつける授業に至ったかとその内容、いかにして高校レベルの部活動で放射線分野を知的好奇心の対象にしたかを報告する。

1.はじめに

平成 17 年、大山南高校への転勤を機に、放射線のセミナーに参加することにした。以前は休日も部活動などで時間を割けないし、また、そこまでの気持ちも持っていなかった。チェレンコフ光が見たかったが、原子炉に忌避感があった。コバルト 60 でも見えるという案内で高崎量子応用研究所まで 2 泊 3 日で出かけた。

一度参加すると、とことん知りたくなり、多くのセミナーに参加した。原子炉のドップラー効果やボイド効果での自己制御性について驚き、放射線の特性、防御の方法を知り、工業分野，農業分野の多くの利用を知った。また、本物を見ることも楽しかった。エネルギー施設として原子力発電所はもちろん、六ヶ所の再処理工場、地熱発電所、太陽光などなど。放射線の医療関係の研究所や利用している工場も見学した。一方、社会的問題点も深く知ることになった。エネルギー安全保障、資源の枯渇、温暖化、反対派と呼ばれる人たちの考え方と活動。原子力を使ったとしても、あと 70 年でウランが枯渇すると知った時は驚いた。ひ孫の世代には、電気が無くなるのだろうかと。また、ホルミシスにも驚いた。

平成 18 年 9 月に勤務先へ文部科学省の高校生向け「原子力・エネルギー学習プログラム」への勧誘の電話がかかってきた。「結論が原子力反対でもいいですか？」との問いに「生徒さんが導いた結論で、もちろん結構です」との返事をいただき、参加を決め、有志 9 人と活動を始めた。

半年の間、私も生徒たちも吸収し続けた。見学はもちろん、講師をお招きしたり、新聞をチェックしたり、中学生から大人までの 200 名以上のアンケートを分析したり、いわゆる反対派の人々の主張を知るためにインターネットや出版物も読んだ。東京まで行って発表した結論は「原子力を進めるべきだが国民理解は不可欠である。先入観を持たない子供たちにアプローチするのは重要である。先入観を持っている大人たちにももちろんアプローチしなければいけない。」であり、その活動に対して日本原子力学会・社会環境部会賞・奨励賞をいただいた。名古屋までの新幹線で「自分たちのできることとして親子実験教室をやりたい」と一人の生徒が発案し、その場で全員が参加するとの意思表示をした。私から提案しようと思っていただけに、そこまでの思いに至っていることをうれしく思った。

平成19年の夏休みに犬山南高校で「測ってみよう！見てみよう！身のまわりの放射線」と題して親子実験教室を行なった（写真１）。近隣の小学校に案内を出したが、最終的に親子７組14人の参加者だった。「放射線」というタイトルで魅力を感じる人は少ない。「正しいことを伝えるだけではだめだ」と実感した。

写真１　犬山南高校での実験教室

しかしながら、実験教室にオブザーバーとして参加された小学校の校長先生から、小学校での開催をオファーされた。「好奇心をくすぐり、参加意欲を掻き立てよう。放射線と似た性質を持つ紫外線、赤外線との比較でいこう。」新メンバーを加え、平成20年３月に犬山西小学校で「見えないものを見よう！赤外線、紫外線、放射線」を行った。現在までに内容も自分の考え方も少しずつ変わってきてはいるが、熱田高校（現勤務校）での「物理」や「理科総合A」で行っている授業も、物理部の生徒が主体となって行った今年度の平成21年７月７日のPTA対象の実験教室、平成22年２月６日の名古屋市立白鳥小学校の実験教室もこのスタイルである。

2.授業の内容

2.1　狙い

- 放射線を特別扱いせず、可視・赤外・紫外と対比しつつ理解する
  - 児童，生徒がある程度知っている知識とのリンクをはかる
  - 正しい自然観を持つことが最終目的で、放射線もその一部として理解する
  - 光は児童，生徒にとって興味深いものなので、好奇心を喚起するのに活用する
- 自然放射線の存在を「目で見て実感」「数値で納得」する

2.2　組み立て

基本的に以下の表のように授業を行う。私の担当する高校での授業では演示実験が主となる。生徒とともに実験教室を行うときは、グループ分けして高校生が実験の指導をする。

表１　赤外線実験の組み立て

	実験のタイトル	実施方法	結果	学習効果・問題点	備考
1	光線の検出	生徒作成の光検出装置のセンサー（東芝TPS601Aを使用）部分に光を当てる	懐中電灯とLED（発光ダイオード）懐中電灯の光を感じると検出装置の赤色LEDが点灯（以下「検出装置」の点灯と呼ぶ）する	「光の存在」＝「検出装置の点灯」と認識させ、光の存在を「目で見る」以外に確かめる方法があることを知る	写真２
2	可視光線の視認	黒いガラス（赤外バンドパスフィルターであるが説明しない）を	光が目で見えないことを確認	生活に基づく素朴概念を確認する	目で見えないから「検出装置の点

		通して懐中電灯とLED懐中電灯を見る		フィルターは高価	灯」はないとの予想を確認
3	赤外線の検出	検出装置で調べる	懐中電灯では「検出装置の点灯」あり LED 懐中電灯では「検出装置の点灯」なし	懐中電灯から見えない光が出ている、素朴概念に反する現象が存在することを確認する	さらに太陽光を鏡で室内に導き、検出装置で確認する
4	赤外線の直進性の確認	おもちゃの車のリモコンに筒を装着して指向性を持たせ、直進性を確認する	筒が車に向いたときに車が動く	見えない光の直進性を感じる	まず、検出装置で見えない光の存在の確認を行う ゲーム性を作る リモコンカーは600円で購入 写真3
5	赤外線の反射の法則の確認	上記と同様にして、鏡を置いて実験する	反射の法則を満たす配置で車が動く	反射の法則を感じる 見えないけれども可視光線と同じく直進・反射をすることを理解する	
6	赤外線のCCD（電荷結合素子）カメラでの確認	5角形に配置した赤外線LEDのうち、星型の部分だけ点灯させ、目で見た場合とカメラ越しで見た場合の違いを観察する	CCD カメラで赤外線が見える	カメラにとって赤外線は可視光線と同じことを理解する	リモコンも同じように視認できることを確認する

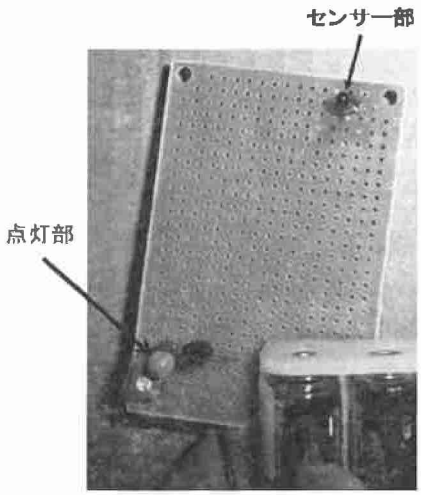


写真2　光検出装置

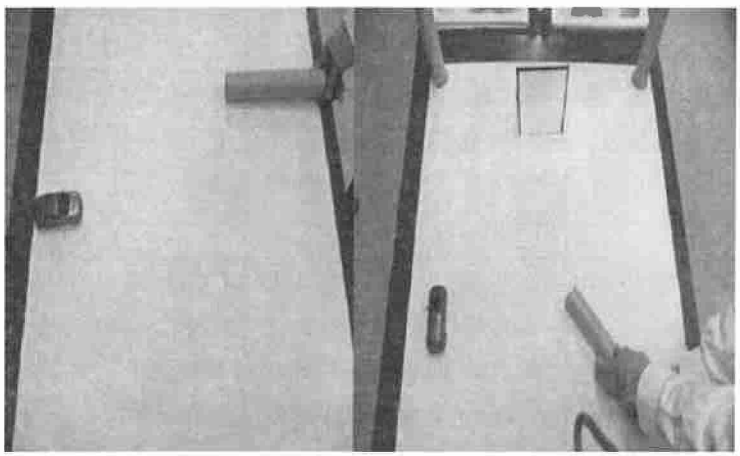


写真3　直進・反射の実験

リモコン前部に指向性を作るための紙筒を装着

まず、光を検知する適当な道具があることを示し、懐中電灯から目に見えない光が出ていることを示す。可視光線との比較からの理解、新たな予想をさせ、確認する。この流れは素朴理論を正しい自然観に置き換えるポズナーの説[1]の実践にあたる。実験の後に赤外線の説明をして、TV 付きインターホンの照明、暗視装置、保温利用、レーザーメス、その他の工業、農業、漁業、脳科学などの使用例など、赤外線の特徴と生活に大いに利用されていることを示す。重要なこととして、人は昔から浴びている（太陽光に含まれている）から、少量であれば危険は無視できることを示す。

表 2　紫外線実験の組み立て

	実験のタイトル	実施方法	結果	学習効果・問題点	備考
1	紫外線の可視化	郵便物に紫外線を当てて観察	バーコードが見える	紫外線が身近に利用されていることを知る	安全な紫外線光源を使用する（以下同様）写真 4
2	蛍光物質の存在の確認	黄色い蛍光マーカーで書いたドラえもんに青い蛍光マーカーで耳を書き加え、ブラックライトで観察	蛍光物質が含まれない青の蛍光マーカーの線で描いた耳は見えない	紫外線で光るものがあることを知る 真っ暗でないと耳が見える	青色も、メーカーにより蛍光物質が入っていることがある
3	蛍光の観察 1 医薬品は光る	栄養ドリンクやデカビタ C の蛍光を観察する	医薬品（ビタミン B2 を含む）は光るが、それ以外はいろいろ	蛍光がある自然由来の物質（ビタミン B2）の存在を知る	緑黄色野菜や鶏卵などにビタミン B2 が多い
4	蛍光の観察 2 どっちがダカラ	外見が同じである「ダカラ」と「洗剤液」を紫外線照明で観察	洗剤液は蛍光を発する	目で見た様子が、紫外線を光源にすると違うことを知る	洗剤は黄ばみの補色の青を出す蛍光剤を使用 写真 5
5	紫外線の検出	懐中電灯の光と LED 懐中電灯の光を蛍光ビーズに当てて観察する	懐中電灯の光でビーズが変色する	適当な方法で紫外線が検出できることを知る	太陽光，蛍光灯でも観察する
6	紫外線の CCD カメラでの確認	紫外線光源の CCD（電荷結合素子）カメラでの映像と目視での観察状態を比較する	CCD カメラ越しだと、より光って見える	赤外線と同様 CCD カメラで認識できて、可視光線と同じ性質を持つだろうことを感じる	目視で見えている光は安全のための可視光で、紫外線でないことを確認する

写真４　紫外線の利用

写真５　どっちがダカラ　犬山西小学校で

紫外線の説明をして、可視光線，赤外線との比較から理解させ、蛍光物質が紫外線を可視光線に変えることなど、紫外線の特徴と金属切断や殺菌灯などの利用も示す。鳥やチョウは紫外線を見ることができるから生き残ってきた（進化した）話もする。赤外線と同様、太陽光線に含まれていて、少量であれば危険は無視できることを示す。

表３　放射線実験の組み立て

	実験のタイトル	実施方法	結果	学習効果・問題点	備考
1	霧箱１	各自が直径 10cm ほどの霧箱を使って線源からの放射線を観察する	目では見えない放射線が、線源から放射状に出ているのが観察できる	見えない放射線も見る方法があることを知る 特別なものから出ると誤解する可能性がある	線源の線量が安全であることを宣言する
2	霧箱２	直径 20cm ほどの霧箱に線源を入れたものを観察する（全体でひとつ準備する）	良く見えるし、ときどき、放射状でない線も見える	大きな霧箱の準備は技術と経験が必要	過飽和層が厚いので鉛直方向も観察できる 霧箱３は、室温が低いほうが（冬期が）観察しやすい 写真７
3	霧箱３	直径 20cm ほどの霧箱に線源を入れないで観察をする（全体でひとつ，霧箱２と同時に準備して観察）	少量ながらランダムに飛ぶ放射線が観察できる	自然放射線の存在を目で見て実感できる	
4	GM 計数管(GM)でのアルファ線の遮蔽の観察	アメリシウムを線源として検知窓の前に置き、紙を挟む	紙１枚で遮蔽されるのが観察できる	可視光を例にとり、遮蔽は可能であることを示す	γ線などは遮蔽に必要な厚さが大きいことをつけ加える

5	「はかるくん」でのγ線の測定	花崗岩などとともに自分の体からの放射線を測定	自分の体からも放射線が出ていることを認識する	あらゆるものから放射線がでていることを認識する	自然放射線があることも確認

写真 7　直径 20cm の霧箱での観察

目で見えない放射線を霧箱という道具を使って可視化することで実感させる。「特別な物質から放射線が出る」と認識するのを避けるため、「放射線源なし」も観察することが大切だが、全員に同時に見せるのは難しいので、事前に写真かビデオを撮っておくのは重要である。直径 20cm の霧箱については市販もされているが、自作すると光源を除いて 1000 円程度でつくることができる。

安全管理上の問題の説明も含めて、最初に講義を行ってから霧箱の実験をする。その後に放射線一般の話をして、GM と「はかるくん」の実験に入る。

放射線の利用は、医療や発電はある程度知識を持っているため、特に工業的なものを詳しく伝える。

進化の中で生物は放射線、赤外線、紫外線に適応してきたことを説明し、大量では危険で、少量では危険が無視でき、人類は上手に利用していることを確認する。

2.3　授業以外の実験教室について

平成 21 年 7 月 7 日の PTA 対象の実験教室を行った。物理部の小学校での実験教室活動を知って、PTA を担当する教員から、PTA 対象にとのオファーを受けた。「(海外遠征など活発な活動を展開している) サッカー部の活動は PTA もよく知っているけれど、それ以外の生徒の活躍も見せたい」「教員と PTA が離れているのでやってほしい」「熱田高校の PTA は昨年度より環境をテーマに活動を行っているから、環境に関りのあることも入れてほしい」とのこと。物理部の生徒たちも放射線理解を進める重要性は認識していて、大人にアプローチするチャンスと考え、実施させていただいた。これにより、生徒自身の理解が深まり、実験能力、コミュニケーション能力が向上するなど、良いことずくめである。生徒たちは、対象が親ということで尻込みしたが、「実験教室を評価していただけたら、小学校での活動の予算援助をしてもらえるかも」と言ったら「それはやらないかん」との部長の一声が出た。平成 21 年 7 月 7 日に熱田高校物理室で、環境への応用の話を入れて、上に述べた内容の実験教室を開催した。予算は厳しく、実験教室を行うときは、科学技術振興財団、中部原子力懇談会、東濃地科学センター、PTA などの援助をいただいて行っている。

平成22年2月6日には名古屋市立白鳥小学校でも行った(写真8)。寒い日が続いたためドライアイスが数日間使え、私の担当する授業を受けている200名程度の生徒が、2〜3名に一つの割合で霧箱を体験できた。

写真8　大きなウラン鉱石を「はかるくん」で測定

2.4　実験授業のまとめ

放射線だけを対象にした実験教室の参加者は少なかったが、アンケートより、大いに理解して満足した様子がうかがえる。他の実験教室も同様である。よって、まず、参加しようという意欲を掻き立てることは最も重要である。また、光は児童・生徒にとって興味深いものでもあり、一般化にも繋がり、このスタイルの授業は効果が高いと考える。ドライアイス代を含む消耗品の費用の捻出は難しい。しかしながら、本物のウラン鉱石を見ることも含め、子供たちの好奇心が旺盛な早い時期からアプローチするのは有効と考える。

高校の授業では、放射線が明確にカリキュラムに入っているわけではないので、個人の裁量で行っている。生徒たちにはおおむね好評ではある。自然放射線の存在を初めて知り、驚く生徒は多い。行う価値の大きい授業だと考えている。やはり、費用の捻出が問題とはなる。

3. いかにして高校レベルの部活動で放射線分野を知的好奇心の対象にしたか

3.1「調査・研究支援」事業について

文部科学省の「調査活動支援」事業に熱田高校物理部として参加した。今年度の事業は、原子力・放射線関係について自由に研究して、その成果を壁新聞にまとめることが課題で、壁新聞の完成度と予備知識を持たない読者（高校生・一般）へのアピール度を競うものである。この事業についてと応募された壁新聞については(財)日本原子力文化振興財団が運営するホームページ「あとみん」で紹介されている。

3.2 いかにして放射線を知的好奇心の対象としたか

高校レベルでは、霧箱と「はかるくん」程度しか道具がなく、いかに好奇心を喚起するかが問題となる。また、物理部と聞いて、「研究心に燃えた生徒の集団」との誤解を想像するが、熱田高校は1年生全員が部活動に所属することになっているので、登録はするけれどおしゃべりをして帰るだけ、または登録のみで顔も出さない、というのが平成19年度（私の転入前）までの物理部の実態だった。生徒たちが、いかにして物理を楽しむか、如何にして研究能力を上げるか、もちろんその結果としていかにして理科系の大学で活躍するか、を物理部の課題と考えていて、その方策の一つ（実際には主）として、この事業に参加した。

壁新聞のタイトルは、『hot（放射線を追ってトラベル)』。生徒がつけたものだが、いろいろなところに行ったことを示している。

いくつかの記事を紹介して、どう科学的興味を持ったかを披露する。

『磁力線に乗る宇宙線』

宇宙線を測定するべく穂高岳へ出かけた。「太陽が放射線源だから、方向依存性があるはずだ」と仮説を立てた。簡易放射線測定器「はかるくん」のセンサー部のまわりに鉛を巻いてバックグランドを減らし、開口部への 10cm 厚の鉄（金床）の有無での放射線量の差をその方向からの線量とした(図 1)。測定結果(表 4)より、仮説に反して、いつも北側の放射線量が高いことがわかった。グラフを作った後に、一次宇宙線は地球の磁力線に巻きついて両極に誘導され、オーロラの原因にもなっていることを話したときには、生徒たちはリアルに感動していたようだ。中には、「磁力線が宇宙線を遮蔽しているはずだからおかしい」と言う生徒もいて、力強く感じた。

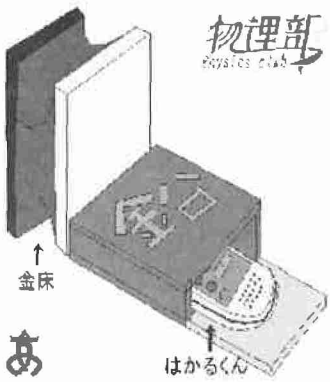


図 1　弱い信号をとる工夫

『測定器の違い』

穂高岳へ向かう車中での測定である。「はかるくん（半導体測定限界は 40keV)」と GM 計数管による測定で、トンネルに入ると「はかるくん」の値は上がり、「GM」の値は下がった（グラフ 1)。最初は「GM」の測定ミスかと思ったが、高エネルギーの宇宙線をさえぎる山体の下であり、かつ、低エネルギーの放射線源である地面に囲まれるのがトンネルの特徴だった。相対的に高エネルギーに感度が高いのが「GM」との結論になった。

表 4　宇宙線の方向依存性

太陽方向				太陽逆方向			
計測回	金床無	金床有	差	計測回	金床無	金床有	差
1	0.026	0.032		1	0.040	0.030	
2	0.027	0.033		2	0.018	0.020	
3	0.031	0.023		3	0.021	0.018	
4	0.025	0.024		4	0.041	0.031	
5	0.024	0.025		5	0.023	0.030	
平均	0.0266	0.0274	-0.0008	平均	0.0290	0.0260	0.0030
	差/金床有平均		-3%		差/金床有平均		12%

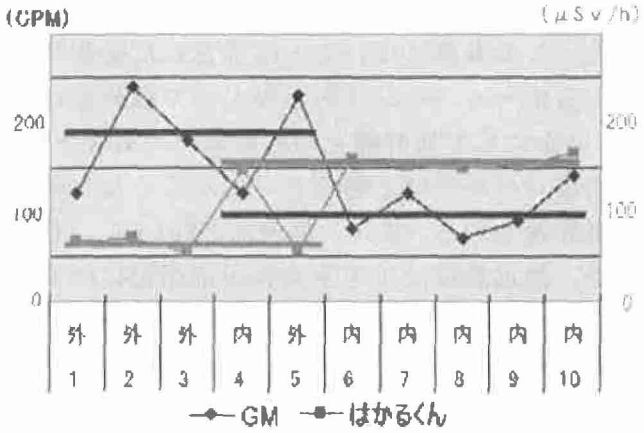


図 2　トンネル内外での放射線量比較

『宇宙線より雷降る』

霧箱で宇宙線を見ようと一式持って穂高岳に登ったが、あろうことか、雑イオンを除去する塩ビパイプを忘れた。ポテトチップのアルミ蒸着した袋を切って電極にして GM の電源をつないで雑イオンを落とそうとしたが、600V では足りなかったようだ。もちろん私の雷が降ったということだが、この表現に生徒たちの楽しみ方の一端が出ているかと思われる。

されている元原子力委員の竹内哲夫先生の鎌倉のお宅を訪問し、浴室のラドン濃度やガンマ線の強さを測定した話、また、浴室の空気を採取して霧箱で観察した話、日本原子力研究開発機構の瑞浪超深地層研究所の地下300mの研究坑道（当時）や高速増殖炉「もんじゅ」へ行き、ガンマ線の測定もさせていただいた話、放射線を含むサイエンスの面白さの普及と正しい自然観の涵養を目指して行っている、小学生やPTA対象の実験教室や学校祭での実験パフォーマンスについての話などを壁新聞の記事とした。

「調査・研究支援」事業に参加した25校のうちの上位8校に選ばれて、平成21年12月27日の東京でのプレゼンテーションに臨んだが、壁新聞の技術、サイエンスコミュニケーションの技術に大きく欠けていたようで残念な結果に終わった。しかし、充実した研究・観測ができ、また、論理的な結果を出すことができたことは、大きな収穫であり、生徒たちは大きな自信をつけた。今度は科学的な評価をいただくため「はかるくん大賞」などを目指し、データを再整理している。

4.おわりに

私は平成3年から2年間、パナマ共和国で過ごした。行ったばかりのころの話である。スコールのなか、3人の少年が傘もなしで歩いていた。真黒な雲の下の大雨で、私は寒さを感じていた。「彼らは寒くないのかなあ？」現地の人に聞くと「寒いだろうな」との答え。「風邪引かないのか？」「引くかもしれないね」ストリートチルドレンだった。何もできない無力感を感じた。別件。近年、中南米でトウモロコシからのバイオアルコールに反対するデモがたくさんあった。主食が高騰したからだ。

食糧やエネルギーでの行き詰まりは戦争に繋がる。今でも困窮している国がある。100年後の世界、1000年後の世界のエネルギーはどうなっているのか。化学工業の原材料としての石油はどうなっているのか。いろいろなエネルギーの開発が行われているが、量的に考えると、原子力、それも増殖炉を大きく使うこと、核融合を実用化することが、石油を残すことになり、また、エネルギーを確保することになり、将来世代の平和に貢献すると私は信じている。ただし、「原子力を平和利用にしか許さない」ことを制度的に担保するのはもちろんだが、世界の一人ひとりがそう思うような文化を持つことが不可欠だと信ずる。

人類はかつて「火」を手に入れた。私たちは、「火」が危険であり有用であることを子供の時から教える。「車」も手に入れた。物流量が飛躍的に増え、豊かな世界になった。しかし、「車」も危険であり、有用であることは同じ。「放射線」も然り。幸いにして、「放射線（原子力を含む）」は科学的にも面白いものである。可視・赤外・紫外の光と比較しながら好奇心をくすぐりつつ理解することから始めるのは正しい自然観を持たせるのに有効だと実験教室をやってきて感じた。

エネルギー環境教育の重要性が増している。放射線利用は地球環境全体の中で賛否を考えることが必要不可欠である。考える際に、水平の平等（南北問題）と垂直の平等（将来世代との平等）まで思いを馳せる大人が一人でも増えてほしいと思っている。

人に持ってほしい力が三つ。「情緒」：正しいか正しくないか、美しいか醜いか、そういう判断をする感覚の力。「論理力」：ああすればこうなるという論理を理解する思考力。「想像力」：ひとつひとつに論理を適用した結果の複合体として構成される未来の社会の全体を想像する力。これらの力で、ほとんどの問題が解決する。学校はもちろん、家庭、社会が

想像する力。これらの力で、ほとんどの問題が解決する。学校はもちろん、家庭、社会が連携してこれらの力を育てることが期待される。論理力に関して、その礎となる正しい自然観を持たせることが理科教師の重要な使命の一つと考えている。教育者として、生徒にいかに好奇心を持たせて楽しませながら教えていくかを腐心していくのは辛くもあり楽しくもある。

多くの学校が、被爆地への修学旅行で、広島・長崎の語り部さんに大変お世話になっている。語り継がれることで平和がより確かになっていると、生徒の反応を見ていて実感する。一方、語り部の方々は、放射線の専門家ではない。科学的に間違っていることをお話しされ、それを生徒たちが信じる姿を見ると、すべての日本人のサイエンスリテラシーの底上げの大切さを感じる。教育を通して香辛料の殺菌を始め、エネルギー以外のいろいろな対象にも、それぞれ是々非々で検討できる力をつけさせたいと思う。

参考文献

1) R.T.ホワイト「子ども達は理科をいかに学習し教師はいかに教えるか—認知論的アプローチによる授業論」(1990)

この原稿は、平成21年11月の放射線教育フォーラム第2回勉強会の発表内容を改編したものである。

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 13, No. 1, p. 75 - 76 (2009)

【ノート】

授業実践　見て・聞いて・数えて知る放射線

船田　優
千葉県立船橋法典高等学校
千葉県船橋市藤原４－１－１
（2010 年 3 月 18 日受理）

【要旨】高校の授業で放射線について扱った。「はかるくん」「霧箱」「放電箱」「ＧＭ管」等を用い、実際に見て・聞いて・数えることを念頭に実施した。放射線はどこにでも存在すること、放射線の防護について理解させることができた。

１．はじめに

身近な存在である自然放射線について学習することを目的とした。放射線の種類によって見るための装置、聞くための装置、カウントする装置というふうに観測する機器が異なることについて、測定器の原理も含めて学習した。最終的には定量的に扱うことを目指した。

２．授業内容

最初は教員の実践を紹介した。サイエンスキャンプで高エネルギー研究所へ行ったときの一コマである。ワイヤーチェンバーを作り、一緒に参加した高校生と組み合わせて自然放射線の飛んでくる方向をパソコン計測し、オシロスコープで表したものである。

「写真 1.工作したﾜｲﾔｰﾁｪﾝﾊﾞｰ」

「写真 2.ﾜｲﾔｰﾁｪﾝﾊﾞｰ測定中」

「写真 3.放電中の放電箱」

講義でいきなりスパークチェンバーを見せても何それ？となることは目に見えているので、各学年とも放射線の基礎から始めた。自然放射線にはα線、β線、γ線等があること、それぞれ観測する装置が異なることなどを教えた。生徒の放射線についての知識は「聞いたことがある。」「原子爆弾で広島、長崎に落ちた。」「原子力発電所」程度だった。

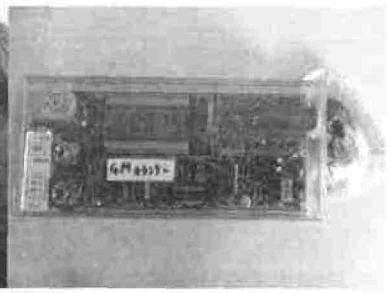
１年次、「はかるくん」を借りて自然放射線の測定をさせた。物理室を飛び出し、「校舎内で放射線が強そうなところ、逆に弱そうなところを探そう」と送り出した。他教科の研究室にお邪魔したが、どの研究室も快く測定に応じてくれた。研究室の他にはトイレ、事務室、図書室、進路資料室などにも行った。「放射線が無いところがあるか？」という疑問も提起し観測させた。

２年次にはポピュラーな「霧箱」をまず紹介した。教える我々にとってポピュラーではあるが、見たことがある生徒はいなかった。NPO 法人放射線教育フォーラム主催の「エネルギー・環境・放射線セミナー」に参加して作ってきた「霧箱」や霧箱で観測中の画像も見せた。次に「放電箱」の原理を講義し、実際に工作させて観測させた。

３年次には「霧箱」「空気ＧＭ管」「放電箱」の原理を講義し実物を紹介をした。ドライアイスも毎回購入すると費用も嵩むのでナリカから購入した「ペルチェ型霧箱」を見せた。写真４はペルチェ型霧箱で実際に観測しているところであり、写真５は生徒自ら放電箱でスパークさせているところである。ここで使った放電箱では自然放射線を捉えるのが困難なため、放射線源を準備した。写真５で手に持っているのが教育用放射線源（セシウム１３６）である。

「写真４.霧箱で観測中」

「写真５.放電箱放電中」



「写真６.ﾏﾝﾄﾙの放射線観測中」

数えている雰囲気を出すために「簡易型ＧＭカウンターキット」も準備した。マントルから出ている放射線を測定中の画像は写真６である。音がするのと回数が表示されるので放射線の強さがわかる。マントルからの放射線はバックグラウンドの数百倍に達した。

３．結果

今回の授業で得られたことは「放射線は身近にある」ことについて、生徒の認識を新たにさせることができたことである。「放射線がどこにでもあること」を知り、放射線障害について心配する生徒もいたが、定量化することによって年間放射線量が制限値内にあると学び、安心させることが出来た。また、今回理解させることが出来たことは放射線の防護の３原則（線源から遠ざかる、遮へいをする、扱うのは短時間にする）である。

４．考察

本校での放射線の授業の問題点は履修者が年度によって異なることである。今年度１年次は理科総合Ａで扱った。今年度は全員履修のため統一して行えたが、次年度も全員履修になるかは確定していない。２年次は理科基礎で扱ったが、今年度理科基礎を履修した生徒は３０名強、来年度履修希望生徒は５０名強である。３年次は物理で扱ったが、今年度の履修生徒は９名であり、来年度履修希望生徒は２２名である。２２名の中で今年度理科基礎を履修した生徒は２名とわずかである。年度によって異なる履修者になることへの改善案は教育課程が変更されることを考慮に入れて、現在の理科総合Ａ（全員履修）を物理基礎（２単位全員履修）にすることである。物理基礎のみを履修させることによる放射線を扱える時間が減少することについての改善案は工作の種類と数を厳選必要最小限にして、残りは過去に作った装置を活用することである。

「放射線教育」の投稿規定

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特定しない。「放射線教育」の内容及び体裁に合えば、誰でも投稿できるものとする。

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

そのまま印刷される図表つきの原稿本文を下記あて送付する。またフロッピーの同封、もしくは編集委員宛の E-mail による本文の送付を歓迎する。最終的な原稿はプリントアウトをして下記に送る。毎年 1 月 31 日をその年度の締切とする。

（送付先）〒105-0003　東京都港区西新橋 3-23-6　第一白川ビル５Ｆ
放射線教育フォーラム編集委員会
（封筒に「放射線教育投稿原稿」と朱書する）

論文の分類

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ー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ー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ー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

放射線教育フォーラム編集委員会
放射線教育フォーラム
〒105-0003　東京都港区西新橋 3-23-6　第一白川ビル５Ｆ

［要約］　「放射線教育」の投稿にあたって原稿の書き方を紹介する。

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 30mm，左右それぞれ 25mm 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 若しくは DOC
図	図 1，図 2……	図の下	JPEG 若しくは，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 →3.7×10^5 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 ^{60}Co、^{131}I 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 ^{137}Cs and ^{40}K 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】

本フォーラムの編集担当に携わさせていただいて数年が経過しますが、多々感じることがあります。その一つは本誌への中高校等の先生方による論文、実践報告の投稿、掲載が少ないことが気にかかります。本会員名簿を見ますとその先生方が少数であることも原因かもしれませんが。一般的に学術雑誌の投稿資格は会員又は会員との共同執筆者に限ると規定されている場合が多い。しかし、本誌への投稿資格は特定しないと投稿規程にありますように、本誌に内容及び体裁が合えば誰でも投稿できると規定されています。先生方の周囲に本誌に合う内容等を実践されている先生方がいらっしゃれば是非投稿をお勧めいただければと思います。また、書き方に不慣れの場合は、それを書いた成書が多く市販されていますので、それや本誌掲載報告等を参考にして執筆していただければと思います。中学校の学習指導要領が約30年ぶりに改訂され、放射線のことが取り扱われることになりました。生徒の理科離れが久しく言われています。興味を引く話題がマスコミで時々取り扱われています。例えば、ビートルズの音楽を吹き込んだアビィロードスタジオの売却問題を起こした英国の大手レコード会社ＥＭＩがＸ線とＩＴを融合したＣＴ（コンピュータトモグラフィ）を開発し、一時ＣＴをＥＭＩスキャンと呼んでいた事があります。

先生方による実践等が生徒の将来の方向に大きな影響を及ぼしていると思うからです。

中高校等の先生方による論文、実践報告の積極的な投稿を期待しています。　（細渕安弘）

放射線教育 Vol. 13, No. 1 (2009)

発行日：2010年3月

発行者：NPO法人放射線教育フォーラム(会長　有馬朗人)
URL ： http://www.ref.or.jp

編集者：放射線教育フォーラム編集委員会
細渕安弘(委員長)、大野新一(副委員長)、小高正敬(副委員長)、
今村　昌、岩崎民子、大橋國雄、菊池文誠、坂内忠明、堀内公子、村石幸正
(五十音順)

事務局：〒105-0003　東京都港区西新橋3−23−6　第一白川ビル5F
放射線教育フォーラム
Tel: 03-3433-0308　　FAX: 03-3433-4308,
E-mail ： mt01-ref@kt.rim.or.jp

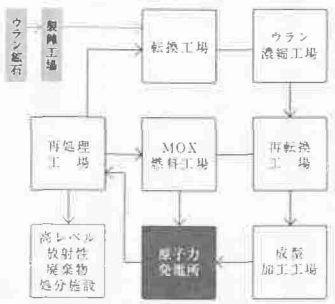
大豆5%、エネルギー4%。
なくてはならない、このふたつ。
自給率は、意外と低い。

日本には、ウラン資源を有効に活用できる「原子燃料サイクル」の確立が不可欠です。

豆腐や味噌などの原料として、暮らしにとても身近な大豆。同じように、暮らしに欠かせないエネルギー資源もそのほとんどを輸入に頼っています。そこで今、エネルギー資源を将来にわたって確保するため、使用済の原子燃料を再処理し、再び燃料として活用する「原子燃料サイクル」の確立がすすめられています。ウラン資源をリサイクルすることでエネルギー自給率は向上し、長期的かつ安定したエネルギー供給に貢献します。

※大豆5%…食料需給表（平成19年度版）活版本
エネルギー4%…エネルギー白書2008

［原子燃料サイクルの工程］



エネルギーの安定供給と地球環境保護のため、「原子燃料サイクル」を推進しています。

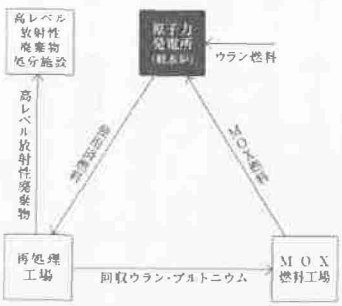
全国10の電力会社でつくる **電気事業連合会** http://www.fepc.or.jp

工夫して、有効活用。
それが、今の時代の考え方です。

ウラン資源も、リサイクルして有効活用。「プルサーマル」が可能にします。

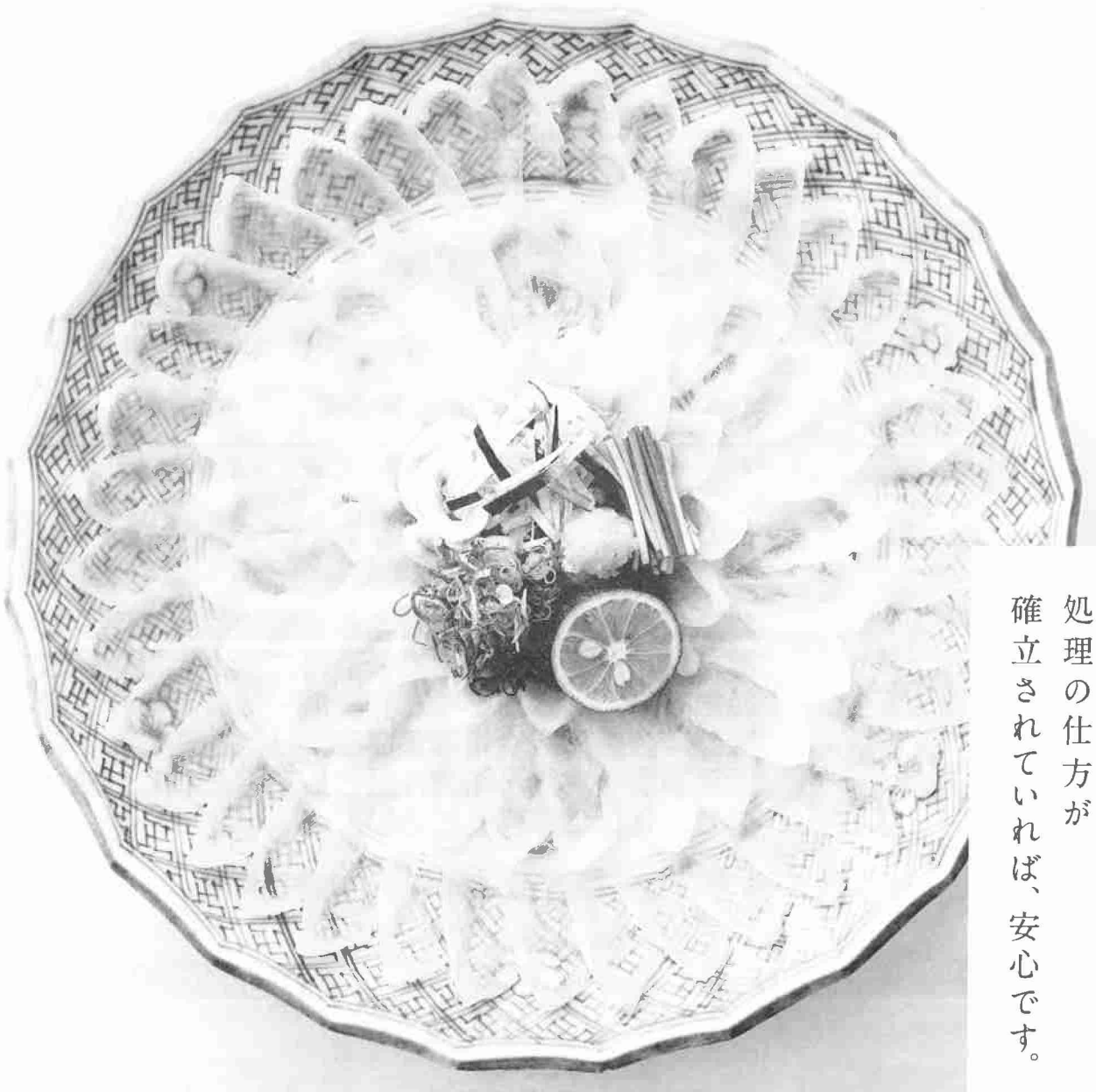
大根の葉は普段は捨ててしまいがちですが、炒めものや味噌汁などに利用できます。同じように、原子力発電の使用済燃料も、貴重な資源として再利用できるのです。使用済燃料に含まれる燃え残りのウランと生成されたプルトニウムを混ぜ合わせたMOX燃料を使うことを「プルサーマル」といいます。このようなウラン資源のリサイクルは、エネルギー自給率の向上という点でとても重要なことなのです。

［プルサーマルのしくみ］



エネルギーの安定供給と地球環境保護のため、「原子燃料サイクル」を推進しています。

全国10の電力会社でつくる **電気事業連合会** http://www.fepc.or.jp

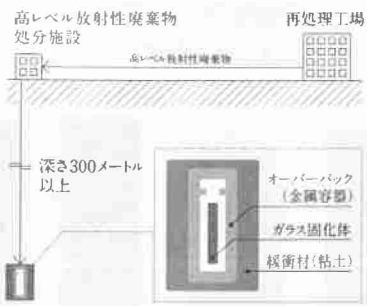


処理の仕方が
確立されていれば、安心です。

リサイクルしても
残ってしまう
高レベルの放射性廃棄物。
厳重な管理のもと、
適切に処分します。

安全にそして安心して食べられるように、ふぐの毒はしっかりとした技術で取り除かれます。原子力発電でも、使用済燃料の再処理過程で出る「高レベル放射性廃棄物」は、何重ものバリアで閉じ込められ、さらに、三百メートル以上の地下にしっかりと処分されます。この処分方法は地層処分と呼ばれ、「高レベル放射性廃棄物」を安全・確実に隔離し、生活環境から半永久的に遠ざけることを可能にするのです。

［高レベル放射性廃棄物の処分方法］



エネルギーの安定供給と地球環境保護のため、「原子燃料サイクル」を推進しています。

全国10の電力会社でつくる **電気事業連合会** http://www.fepc.or.jp

文部科学省委託事業

誰でも簡単に使える簡易放射線測定器

はかるくんで放射線を測ってみよう!

無料貸出中

わたしたちの身近に存在する自然放射線を測ってみませんか？グループで模造紙に測定結果をまとめたもの、「はかるくん」を使った実習の新しい展開、自由研究や指導案など、「はかるくん」の活用事例を実践・研究作品として募集していますので、ぜひご応募ください。

詳しくは‥ はかるくん 検索

夏休みの自由研究に!

電車の中は車体の金属によって放射線が弱められているよ!

自然界にも放射線があることを知ろう!

水の量が多いほど放射線はさえぎられるよ!

ラドン温泉では、放射線がたくさん出ているよ!

■□問い合わせ□■
財団法人 日本科学技術振興財団
情報システム開発部　「はかるくん」係
〒102-0091　東京都千代田区北の丸公園２－１
TEL：03-3212-8504　FAX：03-3212-8596
http://hakarukun.go.jp/

三菱重工は、ものづくり企業として
技術と情熱で、たしかな未来を提供していきます。

私たち三菱重工は、次の世代の暮らしと、そこにある幸福を想い、
人々に感動を与えるような技術と、ものづくりへの情熱によって、
たしかな未来を提供していくことを目指します。

そのために私たちは、これまで培ってきた技術を磨くとともに、
新たな発想で様々な技術を融合させるなど、
さらなる価値提供を追求し、
地球的な視野で人類の課題の解決と
夢の実現に取り組みます。

三菱重工
この星に、たしかな未来を

三菱重工業株式会社　原子力事業本部　〒108-8215　東京都港区港南2-16-5　TEL. 03-6716-3111　www.mhi.co.jp

■■ 原子力の今を学ぶために

原子力ポケットブック
本体価格6000円＋消費税300円
1964年に初版が刊行されて以来、その後のアイソトープ利用の拡大や原子力発電の導入などによって、年々その対象分野を広げ、「知りたい情報を簡便に」得られるデータ・バンクとして高い評価を受けております。
エネルギー・原子力行政に携わる人はもとより、原子力従事者、地方自治体やマスコミ関係者の座右の一冊です。

電力・エネルギー時事用語事典
本体価格2,667円＋消費税133円
「電気新聞」が日々新たな情報を提供する中で蓄積された情報を生かし、電力・エネルギーの世界で起こる事象を的確に理解いただくために必要な用語をわかりやすく解説したものです。その時々に時代を読み解くための情報として必要なキーワードを集め、理解に役立つ最新のニュース情報とともに解説しています。

電氣新聞
ENERGY & ELECTRICITY　The Denki Shimbun

■■ 原子力の今を知るために
電気新聞は電力，電機，情報通信分野における日刊専門紙です。原子力関係も最新のニュースを提供しています

購読のお申し込みは 新聞部 フリーダイヤル 0120－39－1551
またはウェブサイトから！

購読料
1ヶ月 3,990円
（本体価格3,800円＋消費税190円）

ほか多数の原子力関係書籍を販売しております！
詳しくは下記ウェブサイトをご覧ください

社団法人 日本電気協会
JAPAN ELECTRIC ASSOCIATION
www.shimbun.denki.or.jp