

RADIATION EDUCATION

放射線教育

1 9 9 7

VOL. 1 NO. 1

放射線教育フォーラム

Radiation Education Forum

目次

「放射線教育」の創刊にあたって・・・・・・・・・・編集委員会	1
【シンポジウム報告】	
これからの放射線教育（高校）についての一考察・・・・・・・・佐伯邦子	2
放射線の授業、はじめの一時間・・・・・・・・大野新一、後藤千春	5
中等教育における放射線教育・・・・・・・・・・村石幸正	8
放射線の規制とは・・・・・・・・・・近藤民夫	15
入試問題と放射線教育・・・・・・・・・・長谷川閑彦	18
放射線と放射能を認識してもらうためのヒント・・・・・・・・更田豊治郎	21
マスコミ報道についての考察・・・・・・・・・・村主 進	24
【投稿】	
溶媒抽出法によるラドン水よりの ^{214}Pb の分離と ^{214}Pb の半減期測定・・・・・・・・谷本清四郎	27
【資料紹介】	
物理学者列伝 ロルフ・シーベルト・・・・・・・・・・竹沢攻一	37
放射線の一世紀と史跡・・・・・・・・・・菊池文誠	55
原稿募集・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	64
編集後記・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	65

「放射線教育」の創刊にあたって

「放射線教育フォーラム」が1994年の春に設立されてからもう4年近くの歳月が経過した。その間に会員数は116名に達し、「ニュースレター」に記録されているように、シンポジウムや研究会を開催するなどの活動を行ってきた。

「放射線教育フォーラム」の第一の目標は、日本の学校における放射線や放射能に関する教育の改善である。これは、多くの高校の教科書の中の放射線や放射能についての記述が、間違っていたり、正確でないことが余りにも多いことがわかったからである。これについては、すでに文部省と科学技術庁に改善を強く要望した。「放射線教育フォーラム」は、さらにその活動をより効果的に、学校教育だけではなく、一般の人達にも広げることを念頭において、ここに「放射線教育」誌を刊行することにした。

放射線、放射能は、宇宙創生以来の自然現象であり、人類はこのなかで進化してきた。今世紀になると、放射線、放射能は人工的にもつくられるようになり、われわれはこれらを利用して高度の文化的生活を享受している。この過程で発見された原子力エネルギーは、現在重要なエネルギー源になっている。しかし、不幸なことに原子力は最初に戦争の具として使われたため、放射線、放射能は危険なものであるという第一印象を与えることになったのは、極めて残念なことであった。

放射線、放射能が時と場合によっては危険なものであることは事実である。すべてのものに善と悪の両面があるように、放射線、放射能にもメリットとデメリットがある。このことをよく理解することが、放射線教育の第一歩である。「放射線教育」誌は、学術的な専門誌ではない。放射線、放射能を、単に理科の観点だけでなく、広く社会科学的な立場から考える論理的な解説、教育の方法論なども掲載する。

これらの記事から、放射線や放射能についての広い知識、新しい事実などを学び、放射線や放射能に対して、これからどのように対応するかのヒントを得ることができれば幸いである。

これから定期的に刊行を予定している「放射線教育」誌に対する、読者諸氏のご協力をお願いする次第である。

1997年11月

編集委員会

〔発表要旨〕 これからの放射線教育（高校）についての一考察

—キュリー研究所（フランス）を訪ねて—

秋田経済法科大学付属高校教諭 佐伯 邦子

1996年11月、私は念願のキュリー研究所（フランス）への訪問を実現することができた。これは、当フォーラムの松浦先生始め諸先生、日本原子力文化振興財団の山本理事並びに関係諸先生のご尽力で、やっと、実現することができたものである。この研究所は非公開で、フランス政府の許可がないと個人では訪問できない。4月に山本理事が手続きをしてくださって、許可をいただいたのが9月の下旬だったから、半ば諦めていたところ、訪問可能となり、大変嬉しかった。ここに、まずもって、諸先生に厚く御礼申し上げます。

さて、この訪問で得た最大の収穫は、私自身、キュリー夫妻の科学の研究にむかう姿勢（名誉によって損われなかったただ一人の科学者、アインシュタインの言葉から）が現在もなおこの研究所のすみずみまで、しっかりと受け継がれていることに感激したことである。また、ポロニウム、ラジウムという二つの元素の発見が、人類の発展に大きく役立ち、特に、生化学、分子生物学、物理学、医学への貢献はすばらしいものであることを、この目で確かめ、信ずる事が出来るようになった。

いままでは、原子力発電所の事故のようなものがあるたびに、何か後ろめたい気持ちというか、学校内においても、この放射能をもつ物質を肩身の狭い思いで教えているところがあって、何かしっくりいかなかった部分があった。放射線についてもその使用方法さえ正しければ、有効なものであることさえ高校という立場上、遠慮がちにしか言えなかったのであるが、今、はっきりとふっ切れたように思う。これから、この教材を取り扱う若い先生達は、是非このキュリー研究所に行く機会を何らかの方法で作し、自信をもって、高校生にそれらの元素の有効性を教えていければ、最高であろう。

さて、私は、フランスでもう一つ大きなものに出あう事ができた。それは、リセと言われている普通高校で使用している高校の理科の教科書との出会いであった。フランスはエネルギー資源が不足している点では、我が国と同じで、全般的に科学立国フランスを強調して教えている事を知り興味を持った。以下①～⑦に日本の教科書との根本的な相違で気のついた点をまとめたので文部省などで是非検討いただきたいものである。日本の教科書には、以下

①日本人の科学者や、技術者の功績が書かれているかどうか。科学の進歩に寄与した日本人の日本や世界における功績をとりあげているか。科学立国日本の姿を描いているか。（フランスの教科書では、フランスの科学者や、技術者の功績が実に丁寧に書かれている。）

②1950年代以降現在までの科学や技術の進歩、内容が取上げられているか。その進歩によって、私たちの日常生活がどのように変わったか、書かれているか。古典的な内容が重視されていないか。

（フランスの教科書では1950年代以降現在までの科学や技術の進歩、内容多くが取上げられていて、その進歩によって、私たちの日常生活がどのように変わったか、どのような恩恵を受けているか良く書かれている。）

③写真やドキュメントを用いて生徒の関心を引くような魅力的な工夫がなされているか。（フランスの教科書は、フランス語を理解出来ない私が見ても、ページを捲っているだけで、大変楽しくできている。）

④地球や人類にとって最も大切な事柄についての記述が少なくないか。データが古かったり、データに基づいた説明がなされていなかったり、あるいは、著者の主観的な記述で偏った印象を与えたものになっていないか。

（フランスの教科書では、最近のデータが実に沢山載っているのです、なかなか面白い。）

⑤興味が深く探求できるような階層的構造になっているか。

（フランスの教科書では、もっと深く勉強したい生徒用の何種類もの教科書が準備されている。）

⑥大学入試問題がむやみに難しくなる要因を作っていないか。高校教諭を問題作成に加えたらどうか。（フランスでは、すでに、沢山の高校教諭が問題作成に参加しているとのことである。）

⑦教科書検定を行っている文部省が、正しい記述を促す立場に立っているかどうか。通商産業省や科学技術庁の原子力についての方針が文部省に理解されているだろうか。

（フランスの教科書作成にあたっては、まず政府の方針が最重要視されている。）

次に、私が実際の高校の教育現場でこのキュリー夫妻の研究についてどのように授業の中で展開しているか、簡単に紹介したい。

①第1章 物質の構造

これは、現在日本の高校化学I Bの教科書で最初に勉強する物質の構造についての記述である。（資料省略）原子、分子、イオンのところからすぐに原子の構

造になっていて、ベクレルもキュリー夫妻の業績も出でこない。生徒は、何でドルトンの原子説で原子は『それ以上分割できない物質の最小単位である。』と言っているのに、原子の構造では、陽子や中性子、電子などいろいろな粒子が出てくるのか理解に苦しむ。私は、ここで必ず、この間約100年の時間が流れていて、科学史上どんなことがあったかを話し、生徒の理解を高めている。一例をあげると、ベクレルがウラン原子そのものに放射能があることを示した翌1897年、学位論文のテーマを探していたマリー・キュリーは、放射能を定量的に取り扱おうと研究を始めた。この時マリーは、圧電効果の研究などで知られたピエールと結婚したばかりだった。マリーは放射能を測る装置を工夫して、ピッチブレンドなどの鉱石の放射能を測ってみると、それは、ウランより強い放射能を持っている事が解った。はじめは、ウラン特有の性質と思われた放射能は、より一般的なものと想定でき、やがて、ピエールもマリーの実験に加わって、二人で放射能を持つ物質を探すことになって、そして、翌1998年7月にポロニウム、12月にラジウムを発見した。このラジウムの放射能は、ウランよりも百万倍も強く、減衰もしなかったの、これほど大きなエネルギーの放射能が自然に発生するということから、原子に関する新しい問題が提起されるようになった。マリーは彼女の著書の中で『放射能を持つ物質は普通の安定した状態にないと認めざるを得ない。化学的には、これ以上分けられないはずの原子はさらに内部構造を持っており、しかも、永遠に不変のものでないらしい。』と発表し、これがドルトン以来の原子説にたいして、自然観の決定的変更につながった。

そして、私たちが、ふだんなにげなくつかう放射線という言葉が1898年マリーが自発的に未知の性質の光を放射する新化学体を予想した時に名づけたこと、レントゲンによって発見されたX線、ベクレルによって発見された、ベクレル線とも区別されることにもふれている。(添付資料省略)

②第4章 無機物質 金属元素の単体と化合物

この章では、最後に金属イオンの定性分析が取り扱われている。これは、生徒たちが最も喜んで、授業や実験に参加する教材である。私は、ここでラジウムの発見に至る化学的操作の一つとして、マリー・キュリーがピッチブレンド鉱から未知の元素を分離した方法を授業の中で解説している。(添付資料省略)

1995年の東大前期の入学試験問題には、この内容が出ているので、是非見ていただきたい。(添付資料省略)そして、大学試験問題に、この放射性元素についてどんどん出題すれば、高校の先生達も、予備校の先生達も必ず教材の中で、取り扱うこと間違いないと思う。発表の最後にキュリー研究所のコゼット教授が撮ってくださったスライド写真を紹介したい。また、休憩時間に1996年に作製された同研究所のビデオをいただいていたので上映させていただきたい。(略)時間が足りず不十分な発表になってしまったが、ご静聴ありがとうございました。

放射線の授業、はじめの一時間

(東海大学¹・原研²) 大野新一¹、後藤千春²

1. はじめに

放射線の種類、エネルギー、検出方法、線量などについてある程度の知識をもつ人にとっても、放射線は得体の知れないものである。われわれは放射線を感じできない。また間接的に推定する以外には測定できない微量の放射線エネルギーをうけて生物は死に至る。放射線はどこにでも存在する、少量であれば心配はない、を繰り返しても正しい理解は望むべくもない。放射線についての説明の仕方を3つ(A,B,C)に分け、その長短を考察する。

2. 放射線の説明——3つの立場

放射線についての伝統的な授業では、レントゲンのX線の発見、ベクレルの自然放射能の発見から始まり、つづいて宇宙線の発見、そして加速器による人工的な放射線発生という歴史的な経過を説明する。この時の放射線発生の場所を特定すれば、放電管、特殊な原子、宇宙(超新星など)、加速器である。この伝統的な授業は、生徒がそれまでに耳にした(多少とも親しみのある)言葉のリストアップからなり、授業が終わった後でも相変わらず、放射線とは何なのか、得体の知れない感じのまま過ぎる場合が多い。この立場の授業を(A)としよう。

第2の立場の授業では、放射線として共通に持つ性質、しかも放射線そのものの特質を説明する。すなわち物体の姿・形を全く崩すことなく、放射線が物体を透過すること、これを換言すれば、物質を構成する原子のなかを素通りすることである。極微の原子核の周りを数個の電子が $10^6 \sim 10^7 \text{m/s}$ で動き回る(回転することであらわすと $10^{16} \sim 10^{17} \text{回/s}$ の周波数)という原子の構造は既知であるとする。この原子のなかを素通りできるものは、① $10^{16} \sim 10^{17} \text{Hz}$ を超える周波数の電磁波、② $10^6 \sim 10^7 \text{m/s}$ の速度よりも速いスピードの荷電粒子(電子、プロトン、原子核など)、③中性子の3つである。原子を素通りするからくりが納得できれば、放射線の具体像ははっきりする。この立場の授業を(B)としよう。

第3の立場(C)の授業は物質に対する放射線作用を説明するものである。放

射線の電離作用、写真作用、化学作用、生物作用というように言葉を羅列して覚えさせようとする人がある。これらの作用はすべて物質中の電子が放射線によって弾き飛ばされることから起こるのであるから、放射線とは電子を弾き飛ばすもの、しかしその確率がどの程度に小さいかを説明するのが自然である。あまりにも周波数の高い電磁波は電子にとっては運動量をもつ中性の点粒子である（コンプトン散乱）。電子の周期運動に合致するような周波数の電磁波は光電効果として電子を飛ばす。 $10^6 \sim 10^7 \text{ m/s}$ 以上のスピードの荷電粒子からみると、原子のなかは空っぽの空間であるがたまたま原子内電子のごく近くに接近して衝突することもある。中性子は原子核に衝突してあらたに荷電粒子を発生させる。

3. アンケート結果

上述のような考えにもとづいた講義の後、聴講生にアンケートを依頼した。「放射線とはどのようなものかを初めての人（たとえば高校生）に説明するとき、あなたは (A)、(B)、(C) の3つの立場のうちどれがもっとも受け入れられやすいと考えますか？」

聴講生の別（解答者数）	A(%)	B(%)	C(%)
一般学生（48）	44	46	10
専門学生（23）	17	57	26
高校理科教師（25）	52	48	0
企業研究者（13）	50	42	8

すなわち (B) が特に難点があるということではない。

また主なコメントを紹介すると、

(A) なじみのある言葉が多い、しかし放射線のイメージがつかめない。

(B) 新鮮な感じ、具体像が明確、しかし原子構造の知識が必要。

(C) 身近な日常生活と関連付けて考えやすい。

4. 提案

放射線に対する「得体の知れなさ」感をなくすためには、まず原子の構造を説明し、理解してもらう。つぎに (B)、(C) で放射線の具体的な像、すなわち原子のなかを素通りできるような周波数の高い電磁波、高速の荷電粒子、それに中性の

粒子の存在と物質内電子をはじき飛ばす小さい確率のあることを説明する。そして（A）で放射線の発生機構について発見された順序にそった話をすすめる方法を提案したい。

（付記）

1997年3月16日、放射線教育フォーラム発表会で上記の報告をした際、伏見康治先生から「大正時代の旧制高校物理の教科書に、物質不可貫入説（=2つの物体は同時に空間の同じ場所を占めることはできない）というのがあった。」とのコメントをいただいた。原子のなかを突き抜けるという考えはこの説に背く。図書館の本を探してみると、寺田寅彦「物理学序説」に近い表現のものが見つかった。「昔から物質の第一性質と考えられる不可入性と称せられるものも、根元は物体が吾人に与える抵抗の感覚から起こったものである。しかし物の混合や浸透の現象はすぐに物体の可分性を思わせる。そして無限の可分性という事は却って不可入性と矛盾するから有限可分性即ち分子の如き物を考えさせる。そして不可入性の神殿を物体から分子に移すのである。現今でこれが分子から原子に、原子から電子に移されてしまったのである。云々」

もちろん現在の知識からすれば物質をつくるフェルミ粒子や力に関係するボース粒子を持ち出して物質不可貫入性を論じることでもできよう。この程度の話をもじえたゆとりのある授業でありたいものである。そして伏見先生に感謝の意を表したい。

中等教育における放射線教育

—理科教育専攻の大学生へのアンケート調査から—

東京大学教育学部附属中・高等学校 村石幸正

概 要

理科教育を専攻している大学生へのアンケート調査を行った結果、①将来理科の教員になろうとしている学生の半数以上が放射線の影響についての学習経験がないこと、②放射線の性質や影響についての学習経験とそれらに対する知識量との関係を見ると、学校外での学習経験は成果があがっているとはいえず、中等教育の理科での学習が成果をあげていることがわかった。

1 はじめに

筆者が「放射線の学習」の実践¹⁾を始めたのは、ある時に、筆者自身が放射線やその影響についてあまりにも無知であることに気がついたからであった。おくればせながらも少しずつ勉強し始め、改めて自分のまわりの人達に注意を向けてみると、「歯医者で絶対にレントゲン写真をとらせない」同僚、「相手が長崎出身だからと結婚を反対された」妻の友人、「原子炉は原爆と原理が同じだから、いつ爆発するかわからない恐ろしいものだ」と思っていた知り合いの化学の先生、などがいた。これには少しびっくりし、このままでよいのかという疑問を感じ、特別単元として授業実践を始めたのである。しかし、(エネルギー問題に絡む) 原子力発電に付随する放射線・放射性物質に関して、あるいは、必要性・重要性が増すであろう医療放射線に関して、考え・判断することが求められていくであろうこれからの社会の中では、一教師の実践ということではなく、一般的な知識・教養として、中等教育としての組織化された放射線教育が重要となっていくと思われる。この時重要になるのは、カリキュラムの内容だけでなく、理科教師が放射線についての知識と興味関心を持ってくれていることである。はたして中等教育の理科教師は放射線教育に関心を持っているのであろうか。そしてまた、これから理科教師になろうとしている人達は、どのような放射線教育を受け、そして、どの程度の知識を持っているのであろうか。このような疑問を抱くようになってきたおり、東京学芸大学の理科専攻の学生にアンケート調査をさせていただける機会を得た。そこで、理科教師になろうとしている人達の放射線に関しての学習の経験を調査してみることにした。

2 アンケート調査の概要

2.1 目的

中学高校での放射線の種類性質について、あるいは、放射線の影響についての学習経験を調べる。また、放射線の種類性質や放射線の影響についての学習経験とその知識量との関係を調べる。

2.2 方法

被調査者 : 東京学芸大学生 理科専攻あるいは理科教育専攻の学部 1～3 年生 143 名

研究法 : 質問紙調査法

配布および回収方法 : 授業中、その場で回答、回収した。回収率 100%。

調査項目の構成 : I. フェース部分 (2 項目) 専攻専門、卒業年 … 多枝選択法
II. 放射線の学習経験について (6 項目) …… 多枝選択法
III. 放射線の知識について (種類性質について (6 項目), 影響について (6 項目), 計 12 項目) …… 「しらなかった」、「聞いたことはある」、「よく知っている」の 3 枝から選ぶ多枝選択法。
なお、放射線の種類知識についての項目と放射線の影響についての項目は、筆者が行った「放射線の学習」の授業で学習している事項の中から選んだ。

3 結果と考察

3.1 学習経験について

中学校での学習経験についての質問回答結果を集計したのが表 1 である。

いずれも、「ない」が非常に多かった。しかし、筆者が想像していたよりも多くの学習経験者がいたのが印象的である。

高校での学習経験についての質問回答結果を集計したのが表 2 である。

項目	ない	社会科で	理科で	その他
種類や性質について	110 (76.9%)	14 (9.8%)	17 (11.9%)	2 (1.4%)
影響について	97 (67.8%)	28 (19.6%)	14 (9.8%)	4 (2.8%)

表 1: 中学校での学習経験

項目	ない	社会科 (の科目) で	理科 I で	物理で	その他
種類や性質について	52 (36.4%)	3 (2.1%)	14 (9.8%)	63 (44.1%)	11 (7.7%)
影響について	79 (55.2%)	7 (4.9%)	6 (4.2%)	42 (29.4%)	9 (6.3%)

表 2: 高校での学習経験

高校でも、やはり「ない」と回答した人が非常に多い。学習経験者の中では、理科（それも物理）での学習経験者が多い。とはいえ、放射線の性質等を物理で学習した人は44.1%、放射線による影響について物理で学習した人は29.4%しかいないのである。

学校外での学習経験についての質問解答結果を集計したのが表 3 である。

学校外においてもやはり、「ない」と解答した人が非常に多い。ここで特徴的だったのは、放射線の性質よりも影響を学習した経験があると答えた人のほうが多かったということである。これはとりもなおさず、学校外では放射線の性質などを取り上げることなく、いきなり影響のことを取り上げている場合が以外とあるということの意味する。

このようにみていくと、やはり、放射線に関する学習はあまり行われていないのが現実であることがわかる。以上の結果から指摘しておきたいことは、このアンケート調査の回答者、すなわち将来理科の教員になろうとしている学生が放射線に

項目	ない	ある
種類や性質について	124 (86.7%)	19 (3.3%)
影響について	115 (80.4%)	19 (19.6%)

表 3: 学校以外での学習経験

関しての教育を中等教育ではあまり受けていないという事である。特に、放射線の影響に関して半数以上の学生は学習経験がない。この事は、放射線教育がなされないということの再生産が行われていく可能性が高いことを意味するのである。

3.2 知識と学習経験の関係

では、この中等教育における学習経験は知識量に影響を及ぼしているのだろうか。知識に関する項目は、性質に関するもの6問(①～⑥)、影響に関するもの6問(⑦～⑫)から成る。そこで、性質、影響それぞれについて「よく知っている」と回答した項目数の平均を集計し、学習経験との関係を調べた。

3.2.1 放射線の種類・性質に関して

高校の理科Ⅰあるいは物理で学習経験がある人となない人との間で、平均項目数の差を検討したところ、有意差がみられ、学習経験のある人のほうが高かった(知っていた)(表4)。

同様に、高校の物理で学習経験がある人となない人とは、学習経験のある人のほうが高かった(知っていた)(表5)。

中学と高校の両方で、理科(高校では理科Ⅰあるいは物理)で学習経験がある人とそうではない人とは、学習経験のある人のほうが高かった(知っていた)(表6)。

学校以外の場所で放射線の種類性質に関して学習したことがある人となない人との間で平均項目数の差を検討したところ、有意差があるとはいえなかった(表7)。

放射線の種類性質に関しては、ごく常識的な結果が得られた。すなわち、学校で学習した人がよく知っており、学校以外の場所で放射線の種類性質に関して学習した経験があっても、知識として定着しているとはいえない。つまり、中等教育の理科の成果がはっきりと表れている。

群	N	$\bar{x}(SD)$	t	
学習経験あり	77	2.62(1.72)	5000000	$p < .01$
なし	66	1.38(1.99)		

表 4: 高校の理科Ⅰあるいは物理での学習経験

群	N	$\bar{x}(SD)$	t	
学習経験あり	63	2.70(1.86)	4.99	$p < .01$
なし	80	1.54(1.92)		

表 5: 高校の物理での学習経験

群	N	$\bar{x}(SD)$	t	
学習経験あり	15	3.07(1.66)	2.85	$p < .01$
なし	128	1.93(2.16)		

表 6: 中学と高校の両方で、理科 (高校では理科 I あるいは物理) での学習経験

3.2.2 放射線の影響に関して

放射線の影響に関する知識と放射線の影響に関する学習経験との関係では、有意差がみられる項目はなかった

4 考察と提言

第一に、放射線に関する知識の獲得には中等教育こそが大きな成果をあげることがわかった。これは、学校の授業での学習は後でテストに出る可能性があるので、テスト前に生徒がもう一度勉強する可能性が高いことが大きく影響していることが考えられる。また、いわゆる科学の広場のようなところでの体験はいわゆるショーとしてとらえられてしまい、学習という意味合いが薄く、よほど印象に残った物でも漠然とした知識としてでしか残らないということもあるのではないだろうか。しかしこの結果は、最近よく行われている科学の広場などの催し物の意義を否定するものではない。科学の広場などの催し物での内容は学校の授業では到底できそうにないようなものが多く、また、そのレベルも高い。そしてそこには、一介の教師など到底およばない豊富な知識と経験を持たれた専門家がいることが多い。このよう

群	N	$\bar{x}(SD)$	t	
学習経験あり	19	2.74(1.46)	2.18	$p > .01$
なし	124	1.94(2.26)		

表 7: 学校以外の場所で放射線の種類性質に関しての学習経験

なことから、「学校の授業」と「催し物」とは、互いに補完的に機能することこそが理想なのではないだろうか。このような観点に立ったときに、一教師として一言注文がある。それは、「学校の授業」でも簡単にできるようなことまで「催し物」の方で行ってしまう物があることである。これではパイの奪い合いである。やっていない学校が悪いのではあるが、簡単にできて生徒が大喜びするような実験観察は、学校のほうに少しは残しておいていただきたいものである。第二に、中等教育ではあまり放射線に関する学習が行われていないという実態が確かめられた。それとともに、12項目の質問に対し、中等教育の理科の教員を目指している学生が「よく知っている」と回答した平均項目数は3.8項目にすぎなかった。これは、放射線教育に関しては中等教育での学習が効果があるとはいえ、まだ、学習が不十分であるという事が言える。それと共に、設問の内容が筆者が行っている「放射線の学習」という授業の中から選んだ項目なので、一般的でないものが含まれているせいもあるかもしれない。だとするならば、中等教育で行われる放射線教育に望まれる内容とはどのようなものなのであろうか。さらに、一般的な知識教養のとして中等教育で放射線教育が行われるのがよいと思うのだが、放射線の事を学習した経験のある教師はほとんどが物理の教師であろう事が放射線教育を広く行いうえでのネックの1つになっていると思われる。それゆえ、中等教育の中での放射線教育の位置付けをはっきりとさせ、専門分野にとらわれずにすべての教師が取り組めるように精選された内容の単元の設定が望まれる。それだけではなく、中等教育での放射線教育が重要であるということは、理科教師となる学生に対して(一般教養としてではない)放射線教育がもっと行われるべきであろう。放射線教育の必要性を要望すると共に、このようなところにまで踏み込んだ実際的な提案が望まれるところである。

5 おわりに

最後に、今回のアンケート調査に際して快く協力してくださった、東京学芸大学の下条 隆嗣先生、佐藤 文男先生、里 嘉千茂先生、そしてなによりも、右も左もわからない筆者に丁寧な、アンケートの作成から検定までご指導をしてくださいました東京学芸大学の岸 学先生に感謝いたします。

参考文献

- 1) 村石幸正：「放射線の学習」の実践報告、『物理教育』VOL.43,NO.2(1995)154-159
- 2) 村石幸正：放射線に対する認識の調査から、『東大附属論集』第37号(1994)77-80

＜アンケート＞

I. ここでは、回答者ご自身のことについてうかがいます。

- Q1. () 類 () 専攻
専門 (物理・化学・生物・地学・理科教育・その他・決まっていない)
- Q2. 高校の卒業年は 平成 () 年

II. ここでは、放射線に関する学習の経験などについてうかがいます。

- Q3. 中学校時代、学校で放射線 (の種類や性質あるいは利用のされかたなど) について学習したことがありますか。(複数回答可)
① ない ② 社会科で学習した ③ 理科で学習した ④ その他 ()
- Q4. 中学校時代、学校で放射線による影響 (あるいはリスク) について学習したことがありますか。(複数回答可)
① ない ② 社会科で学習した ③ 理科で学習した ④ その他 ()
- Q5. 高校時代、学校で放射線 (の種類や性質あるいは利用のされかたなど) について学習したことがありますか。(複数回答可)
① ない ② 社会科 (の科目) で学習した ③ 理科 I で学習した
④ 物理で学習した ⑤ その他 ()
- Q6. 高校時代、学校で放射線による影響 (あるいはリスク) について学習したことがありますか。(複数回答可)
① ない ② 社会科 (の科目) で学習した ③ 理科 I で学習した
④ 物理で学習した ⑤ その他 ()
- Q7. 現在まで、学校以外の場所 (例: 青少年科学センター, 博物館, △△科学の広場 など) で放射線 (の種類や性質あるいは利用のされかたなど) について学習したことがありますか。
① ない ② ある (具体的な場所名:)
- Q8. 現在まで、学校以外の場所 (例: 青少年科学センター, 博物館, ○○科学の広場 など) で放射線による影響 (あるいはリスク) について学習したことがありますか。
① ない ② ある (具体的な場所名:)

III. ここでは、放射線に関する知識についてうかがいます。

Q9. 次の①～⑫の質問について、1(知らなかった),2(聞いたことはある),3(よく知っている)のうち、該当するものに1つだけ○印をつけてください。

- | | | | |
|--|---|---|---|
| ① 放射線には α 線, β 線, γ 線の3種類ある。 | 1 | 2 | 3 |
| ② 放射線量は、海の上では少なく、トンネルの中では多い。 | 1 | 2 | 3 |
| ③ 「放射能」と言うことばは、「放射線を出す性質」、「放射性物質」の両方の意味で使われている。 | 1 | 2 | 3 |
| ④ 放射能の強さ(放射線を出す性質の強さ)の単位は、Bq(ベクレル)である。 | 1 | 2 | 3 |
| ⑤ 放射能の強さが元の半分になるまでの時間を半減期という。 | 1 | 2 | 3 |
| ⑥ 放射線による生物学的な影響(効果)を示すための単位は、Sv(シーベルト)である。 | 1 | 2 | 3 |
| ⑦ 私たちは、日常生活の中で、天然の放射性物質からの放射線や宇宙線を絶えず受けている。 | 1 | 2 | 3 |
| ⑧ 放射線による影響には、ガンの発生率の増加・やけどに似た皮膚障害・不妊化などがある。 | 1 | 2 | 3 |
| ⑨ 放射線に対する感受性は個人によりかなり違い、敏感な人と鈍感な人では、障害が現れる被ばく放射線量は2倍くらい違う。 | 1 | 2 | 3 |
| ⑩ 胸のx線写真を一枚撮影したことによる肺ガン発生率の増加はおよそ0.00015%程度である。 | 1 | 2 | 3 |
| ⑪ 一般に、胎児が被ばくすると奇形児として生まれてくる確率が高くなる。 | 1 | 2 | 3 |
| ⑫ 動植物による実験では、放射線によって遺伝的影響が出る可能性があることが確かめられている。 | 1 | 2 | 3 |

放射線の規制とは

日本メジフィジックス株式会社

東京本部 近藤民夫

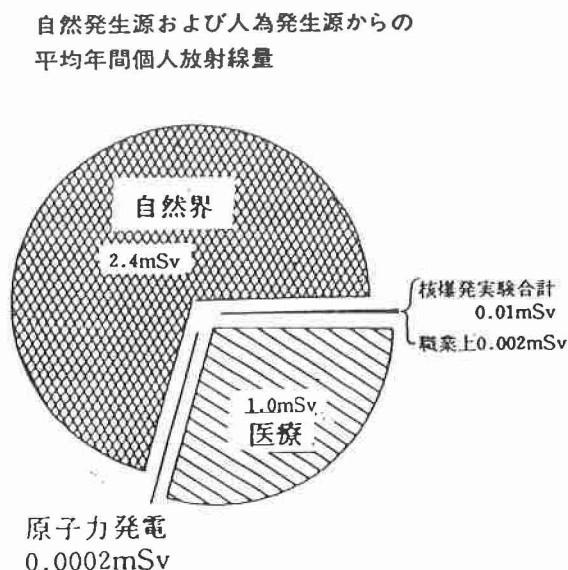
原子力基本法では、ウラン、プルトニウム及びトリウムを「原子炉等規制法」これら以外の放射性同位元素及び放射線発生装置を「放射線障害防止法」と略称する法令で規制するよう定めている。

放射線障害防止法は、放射性同位元素等の取り扱いを規制することによりこれらによる放射線障害を防止し、公共の安全を確保することを目的としている。この法律を基本として労働者と国家公務員の安全確保の為に電離放射線障害防止法規則と人事院規則が、また医療放射線の防護のために、医療法施行規則等がそれぞれ制定されている。放射線障害防止法は、国際放射線防護委員会（ICRP）の勧告を尊重し、線量限度、放射性同位元素等の定義、18才未満の者に対する取り扱いの禁止等の条項を定めている。現行法令は、1977年勧告に拠っているが現在、1990年勧告の取り入れを科学技術庁は検討している。

ICRP勧告の新、旧の線量限度を下表にまとめた。

項 目	1977年勧告	1990年勧告
①職業被曝 ・実効線量	<u>5.0 mSv/年</u>	<u>5年平均で2.0 mSv/年</u> ただし、5.0 mSv/年を超えてはならない
・組織線量	水晶体 1.50 mSv/年 その他の組織・器官 5.00 mSv/年	水晶体 1.50 mSv/年 皮膚 5.00 mSv/年 手足 5.00 mSv/年
・女性（妊娠中）	<u>職業被曝の線量限度値の$\frac{3}{10}$</u>	妊娠期間中の腹部表面 2 mSv
②公衆被曝 ・実効線量	1 mSv/年（生涯にわたる実効線量の年平均が1 mSvを超えることがない限り、5 mSv/年という補助的限度を数年にわたって用いてもよい）	1 mSv/年（特別な状況ではこれを超えることが許されるが5年間の平均が1 mSv/年を超えないようにしなければならない）
・組織線量	水晶体 <u>5.0 mSv/年</u> 皮膚 5.0 mSv/年	水晶体 <u>1.5 mSv/年</u> 皮膚 5.0 mSv/年
③緊急被曝	_____	実効線量 5.00 mSv 皮膚 5.000 mSv

このような線量限度が適用されないのは、自然放射線による被ばく及び診療のために患者が受ける被ばくである。下の円グラフを参照されたい。



法令で規制する放射性同位元素は、表1の数量と濃度との両方の値を超えるものである。したがって密封された完成品または部品の集まりは、3.7メガベクレル以下なら規制の対象とはならない。また、非密封の放射性同位元素については、その種類ごとに3.7キロベクレルから3.7メガベクレルまで4区分して規制の対象にしない数量を定めている。一方、濃度については、すべて74ベクレル毎グラム以下であれば表2の温泉のように大量に存在しても数量は規制されない。

表1 放射性同位元素の定義量

区 分		濃 度	数 量
密封されていない放射性同位元素	1 種類	74Bq／g を超えるもの 〔自然物で固体状のものは370Bq／g を超えるもの〕	告, 第 1 条の表の値を超えるもの
	2 種類以上		それぞれの群別区分ごとの割合の和が 1 を超えるもの
密封された放射性同位元素		〔自然物で固体状のものは370Bq／g を超えるもの〕	1 個あたり 3.7 MB q を超えるもの
集合状態の密封された放射性同位元素			集合したものごとに 3.7 MB q を超えるもの

表2 食品等に含まれる放射性物質の濃度

品 目	1 グラム中の含有量(Bq/g)	
玄米	0.07	
牛肉	0.06	
ほうれん草	0.09~0.022	
サラダオイル	0.18	
ビール	0.005	
山梨増富温泉	11.1	ラジウム・ラドン泉
岐阜高山温泉	3.8	
鳥取三朝温泉	1.9	
兵庫有馬温泉	0.4	
リン酸肥料	0.4 ~ 3.1	リン鉱石精製
石こうボード	9.1 ~ 1.5	リン酸石こう

温泉には喜んで入っても、放射線は、微量でも危険であると信じる人は多い。ある小説では、原子力発電所の燃料棒貯蔵プールに落ち込んだ犯人がプールの水を飲み込んだため「放射線病」で即死するという話もある。しかし、燃料棒は使用済みであっても密封線源である。それで被ばくすることはあっても、それを冷却する水を飲んでたちまち死ぬことは絶対でない。放射線を恐れさせるよりも注意深く判断させることこそが大切である。

「入試問題と放射線教育」 —— 今年の入試問題から
静岡大学理学部 長谷川 圀彦

8 回目を迎える平成 9 年度の大学入試センター試験が、1 月 18 日と 19 日の 2 日間にわたって全国一斉に実施された。この大学入試センター試験は、大学入試志願者の高等学校段階における基礎的な学習の達成の程度を判定するものである。この入試センター試験の理科①試験問題の中で、放射線に関連する問題として出題された 1A として出題された物理 1A【選択問題】を中心に、平成 7 年度および平成 8 年度の問題について紹介する。

平成 7 年度の問題について：

問題 A： 簡単な知識で答えられるもの（放射線 α β γ ）。

問題 B： どの教科書にもある基本的な原理・現象を示す図について問う新しい形式の問題（光電効果、コンプトン効果、ブラック反射、 α 線の散乱）。

平成 8 年度の問題について：

α 崩壊における原子核の原子番号と質量数の変化を問う問題（ α 崩壊）。

平成 9 年度の問題について：

物理学者ベクレルの放射能発見とキュリー夫妻のラジウムとポロニウムの発見に関するものと、ピエール・キュリーがノーベル物理学賞を受賞した際の講演についての問題。

物理 A の選択問題

第3問 物理学の影響に関する次の問 A（問 1・問 2）に答えよ、

A 1896 年、フランスの物理学者ベクレルは、ウラン鉱物中のウラン原子が、物質をよく透過し写真乾板を感光させる（1）を出すことを発見した。このように、原子自身が自然に（1）を出す性質を（2）という。1898 年、キュリー夫妻は、さらに高い（2）を持つ（3）とポロニウムを発見した。彼ら 3 人はその業績によりノーベル物理学賞を受賞した。

受賞のときにピエール・キュリーが行った講演の最後の部分を以下に示す。

「犯罪人の手にかかれば、（3）は、きわめて危険な物ともなりかねません。そのことに関連して、われわれは、いったい人間が自然の秘密を知ることによって利益があるのであるうか、いったい人間は自然の秘密を知って善用することができるほど成熟しているのであらうか、あるいはまた、このようなことを知るとは人間に有害なのではあるまいか、いちおう疑ってみることができます。ノーベルの諸発見こそは、この問題にとってもってこいの例であります。すなわち強力な爆薬は人間に感嘆すべき大事業を可能にしたのでありました。一方これらの爆薬は、諸国民を戦争に引きずりこむような犯罪人の手にかかれば、恐ろしい破壊の手段ともなるのであります。わたしより多くの善を引きだすであらうと信じ

る者の一人であります。」

これは 20 世紀初頭の講演であるあるが、私たちにとって、20 世紀末の今日に見られる科学技術のもとたらず二つの側面を予見しているかのように読みとれる。

問1 上の文章の(1)～(3)に入れるのに最も適当なものを、次の放射線、赤外線、紫外線、核融合、放射能、ウラン、ラジウム、カドミウム、ヘリウムのうちから一つずつ選べ。

問2 上の文章の下線部をよく表している例として最も適当なもの三つを、次の①～⑦のうちから選べ。ただし、解答の順序は問わない。

- ① 蒸気機関の発明により、多くの労働者が肉体的苦痛から解放される。一方で、いくつかの都市がばい煙（スモッグ）に悩まされるようになった。
- ② 発電機の発明により、どの家庭でも電灯が利用できるようになる一方で、鉄道が電化されて沿線の住民はばい煙から解放された。
- ③ さまざまな化学物質の合成により、人々の生活が豊かになる一方で、強力な毒物による大量殺人の恐怖が発生した。
- ④ 天体運動の解明により、大洋を航行する指針が与えられる一方で、正確な暦法が発達した。
- ⑤ 原子核反応にともなう巨大なエネルギーを利用して、原子力発電が可能になる一方で、核兵器が開発されて人類に脅威を与えるようになった。
- ⑥ トランジスタや集積回路を用いたコンピューターの出現により、大量の情報処理や遠距離の通信が可能になる一方で、個人のプライバシーの侵害や大規模な金融犯罪の危険性も高くなった。
- ⑦ 電波を利用した大陸間無線通信に発明により、外国の出来事が新聞で速報される一方で、外交交渉における大使館と本国政府との連絡が緊密になった。

この第3問のうちの問1の問題に関しては、ごく普通の放射線および放射能に関する物理の基本的な出題と見てよかろう。他方、問2の問題に関しては、科学の極限や経済性を追求するということのほか、人間性の尊重や自然と地球との共生に配慮した科学技術のパラダイムという、極めて深遠な根本的な問題で大きな社会的意味を含んでいると考える。たとえば、⑤の文章に見られるような原子核反応、すなわち原子力さらには核兵器（原子爆弾）ということのみが強調されることにならぬよう注意が必要であると考え。

平成7年度、平成8年度および平成9年度の大学入試センター試験の問題の出題範囲を、物理の四つの分野、力と運動、波動、電気と磁気および原子に分類す

ると、放射能と放射線は原子の分類に入る。放射能及び放射線に関する問題で全体の出題に対する配点の割合は、平成7年度は15%、平成8年度は6%、平成9年度の配点の割合が明確でないが約10%前後と考えられる。

平成8年度大学入試センター試験における物理の問題に関するアンケート結果（日本物理教育学会入試検討委員会）について、つぎのような紹介をした。

回答者の年齢

	1	2	3	4	5	
年 齢	22～34	35～44	45～54	55～64	65～	合 計
回答数	12	30	42	31	8	123

回答者の勤務先

勤務先	国公立大学	私立大学	短期大学	高専	高校	教育センター	小・中学校	企業等	合計
回答者数	19	6	1	0	89	1	1	6	123

出題分野について、の結果は「大変適切である」と答えた人が17%で「特に問題ない」の72%と合わせると約90%を占めている。「偏りが大きい」と答えた11%の減らすべき分野と増やすべき分野で最も多いのは電磁気であり、増やすべき分野で最も多いのは熱である。原子の分野は増やすべき分野に入っている。以上は物理に於いてのアンケート結果であるが、化学についてのそれは公表されていない。

また、平成年8年度の化学で原子核の中性数に関する問題、平成9年度の化学の問題で、原子核の質量数と原子番号に関するものが出題された。

なお、静岡大学の平成9年度後期日程における物理の試験問題で、 α 線、 β 線および半減期について適当な物理用語を用いて物理的内容を表す文章を作成する問題についても紹介した。

他大学の放射線関連の大学入学試験問題について、さらに調査検討をほどこす必要があると考える。

放射線と放射能を認識してもらうためのヒント

(財)高度情報科学技術研究機構 更田 豊治郎

科学技術が進歩すればするほど社会問題についての判断に、とりわけ理科学的な素養が必要になってきている。今日、放射線・放射能は医療、工業、農業、多くの分野の基礎研究など幅広い分野で多様に利用されているが、世間一般に「放射線恐怖症」とも言うべき感覚を持っている人々が少なくないように思われる。

私は昭和32年に日本原子力研究所(原研)に入所するまでの約5年間、大学で加速器関係の実験に従事し、原研では原子炉と加速器を使って実験を行ってきた実験物理屋です。当時の大学では未だ放射線管理が今日ほどには行き届いてなくて、かなりの被曝も経験しているが、自分自身の率直な実感として、法令で定められている基準値あるいは限度値以下の少量の放射線被曝に神経質になる事は全く無用だと思っている。無用の恐怖心を持つことは、その人にとって不幸であるばかりでなく、社会的偏見のもとともなる可能性がある意味で危険である。しかし、公衆に対して放射線・放射能について過度の危険性宣伝が行き渡っているので、心配しすぎるのは無用ということを受容してもらうのは容易なことではなく、高校の理科教育で放射線・放射能についての基礎を習得してもらうことが益々必要だと痛感している。

表題で「認識」という語を使ったのは、例えば入試の答案が書けるという意味での理解というよりも、少しでも自然現象の素過程の主要な例について実感に近い認識を持って納得することに近づけるような教育を願望するからである。そうは言っても、特に事新しいことを述べる事が出来るわけではない。例えばガイガーカウンターをありふれた素材を使って目の前で作って見せる素晴らしい教室実験に感服したことがある。高校の先生方が生徒たちに理解させるために苦勞しておられることに、些かでもヒントになるところがあればとの願望が表題で先走ってしまったというところである。実は、このシンポジウムに発表の申し込みをした後で、松浦辰男先生はじめこのフォーラムの皆様が作成された要望書を読み直してみると、放射線・放射能に関する基本的なことがよく書かれていて、これを玩味すれば、ここでさらに述べる事が殆ど無くなってしまうような気持ちにもなった次第である。しかし、要望書の内容の部分と同様のことでも、私が強調したい点を率直かつ簡単に述べたいと思う。

先ず、宇宙の初期には放射線・放射能が満ち満ちており、それが宇宙規模の長年月を経て現在の地球が存在することである。現在の地球の自然放射線・放射能は言わば名残であるが、自然放射線・放射能のレベルがずっと高かった頃から放射線を浴び続けた生物の進化で人間が存在するのである。詰まりは、放射線・放射能が全く自然そのものの基本的存在であるということである。

次に、人工放射線・人工放射能は自然のものと異質さ(物理的異質さと言って

もよいが、狭い意味に誤解されるのを避けた) が全く無いことである。それは人工放射線・人工放射能を作る反応の組み合わせが比較的単純であることから理解できる。この事は、特殊な合成化合物が自然界に無い特異な性質を持っていたり、バイオ技術で自然界に無い細菌を造りだしたり、クローンを造ることが倫理上の問題になったりするのとは異質のように思われる。もっとも、人造生物なども神の手の内、釈迦の手の内という考え方もあるが、倫理は人間社会が確立すべきものである。

放射線はエネルギーを伝送あるいは伝播する基本的な手段でもある。(手段という語が適当かどうかは等閑にしておく。) ミクロの世界では、原子・分子での eV~keV オーダーのエネルギーの遣り取りがあり、原子核での keV~MeV 以上のエネルギーの遣り取りがあるが、その場に放射線を欠くことはできない。マクロの世界の代表的なものが太陽からの放射線である。放射線が無ければ太陽の恩恵も無いわけである。放射線に色々な種類があり、同じ種類の放射線でもそのエネルギーによって物質との反応の仕方などが異なるから、そういったことの解説も必要であるが、ここではその様な系統的な話をしている訳ではない。

低線量の放射線被曝が人体あるいは生物に及ぼす影響が未だ充分には解明されていないのは、放射線が得体の知れないものだからではなく、人体あるいは生物がえも言われぬ複雑・巧妙精緻なものだからである。別の面から言えば、疫学的に明確な結論を出すことが極めて困難なほど弱い影響なのである。未だ充分には解明されていないことから、低線量の放射線被曝を心配する向きもあるが、現代自然科学の特徴として「まだ判っていない場合に、どの様にどの程度判っていないかを合理的に絞り定めること」を挙げたい。すなわち、低線量の放射線被曝を心配するのは無用と言える程度には充分解明されていると思っている。この問題の解明を一層深めるために、DNAが放射線で損傷を受けた場合の自己修復のしくみの研究が期待されている。

放射線・放射能の認識には、ミクロの世界とマクロの世界の様相の違いを、大づかみにでも数量的に把握することが大切と思われる。特にアボガドロ数の大きさを認識することはミクロの世界とマクロの世界のつながりを理解するうえで極めて重要である。或る放射性元素の半減期を知れば、同元素の原子量とアボガドロ数を使って同元素の一定量の放射能の強さが計算できる。参考書の典型的な演習問題だから計算は省略するが、半減期 1600 年のラジウム226 1グラムの放射能の強さは 3.66×10^{10} dps (dps = 毎秒の崩壊数) である。このことから 1 キュリー (Ci) = 3.7×10^{10} dps と定義された。Ci という単位は馴染み深いものだが、近年になって 1 dps = 1 Bq なる Bq (ベクレル) という単位が国際単位系に定められた。ベクレルは定義の明解な単位ではあるが、小さ過ぎて、注意をすれば簡単な遮蔽の後ろでピンセットで扱える程度の 1 ミリキュリーの放射線源を 37 メガベクレルの線源と言うと、単位をよく知らない人には、何かずっと

強い線源のように誤解させかねない実用上の欠点がある。

実は、シンポジウムで上述の計算例を示したのであるが、会場におられた伏見康治先生が後で私に「あの話をするのかと思ったが——」という意味のことを言われた。「あの話」とは、昭和27年頃大阪大学理学部物理学科で先生が量子統計力学の講義の中でされた挿話である。この挿話が私に強い印象を残していて、40年以上経った最近になって、そのことを先生に申し上げたことがあったのである。さて、約45年前に先生がされた様なエレガントな表現は私には出来ないが、「あの話」の内容は次のようなものである。「ナポレオンの時代から現在まで地球の大気の大分子に大気以外との間に何らの出入りも無いと仮定し、ナポレオン一世の臨終の吐息(200ccとする)の分子に印が付けられるものとし、それが大気と充分よく混合したと仮定する。今、君が深く息を吸い込んだら(Y=1ℓとする)、その中に印の付いた分子が1つでも入っていると思うか。」という問題である。

普通、素直に直観的には入っているとは思えないだろうが、そういう質問をするのだから入っているとするのが正解なのだろうと勘を働かせる人もいるだろう。実際に計算してみよう。地球の大気量は $5.3 \times 10^{21} \text{ g}$ と国立天文台編の理科年表1993年版p.173 に載っている。この値がどの様にして求められたかは知らないが、地球の表面積 $= 5.1 \times 10^8 \text{ km}^2 = 5.1 \times 10^{18} \text{ cm}^2$ に $1 \text{ atm} = 1.033 \text{ kgf/cm}^2$ を乗じた値と一致する。大気の組成を窒素78%, 酸素21%, アルゴン0.9%として、平均の分子量を求めると 28.95 である。大気のアボガドロ数でのモル数は $5.3 \times 10^{21} \div 28.95 = 1.83 \times 10^{20} \text{ mol}$ となり、これに 22.4 ℓ を乗じて、大気の標準状態(0℃, 1気圧)としての体積は $4.1 \times 10^{21} \text{ ℓ}$ となる。 200 cc (0℃, 1気圧)中の分子の数 = (アボガドロ数 $= 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$) $\times 0.2 \div 22.4 = 5.4 \times 10^{21}$ 。君の吸気Yの中に入っているナポレオンの印の付いた分子の数は $(5.4 \times 10^{21}) \div (4.1 \times 10^{21}) = 1.3$ 。すなわち、1コは入っていることになる。

これはアボガドロ数が如何に大きな数であることを認識するのに良い寓話であると思われる。勿論、ナポレオンでなくても、例えばイニシャルをNの一つ前のMにしてマリリン・モンローでも誰でもよいのだが、その辺は趣味の問題である。

チェルノブイリ原発事故は多量の放射能が大気に放出され広い範囲に被害が及んだ二度と起こしてはならない史上最悪の原発事故である。この様な異常事態については、特に事実についての客観的な分析評価が肝要で、許すべからざる悪事でも、その影響を過大に宣伝することは他の健全な事業の発展を不当に抑圧し、結果として社会の損失をまねきかねない。チェルノブイリ原発事故で放出された放射能が日本でも検出されたことが大きく報道されたが、大量の空気をフィルターに通して異物を捕収して高感度の検出器で測定した結果、微量の放射能が検出されたことだけでは驚くには当たらないことが、上の寓話から類推されよう。

マスコミ報道についての考察

原子力システム研究懇話会

村主 進 (すぐり すすむ)

ここでは、「マスコミで得た知識は正しいか」という観点で話をしたい。まず、マスコミ報道は事実に基づいて行われていると思われる。しかし、視聴者、読者の興味をそそるように、事実関係にセンセーショナルな味をつけて報道している。これによって、視聴者、読者の数は増えるであろうが、報道の内容が正確に把握されないきらいがある。またマスコミはニュース価値のあるものしか報道しない。ニュース価値のないものは全く報道しない。

さて、正しい知識はある一面からのみでは得られない。全ての事実関係を把握してはじめて正しい知識は得られるものである。まして事実関係にセンセーショナルな味をつけて報道したもののみを読んで得た知識は正しくないことが多いものである。

ここではその例として2つを取り上げる。

第1の例として、1996年1月25日の朝日新聞の記事を取り上げたい。記事には「チェルノブイリ周辺放射能汚染、事故30年後も、域内に125 万人居住、ベラルーシ」の見出しがある。記事の要点は、「1995年では $1\text{ Ci}/\text{km}^2$ 以上の汚染区域が約 $45,500\text{ km}^2$ に及び、全国土の約22%を占める。この地域に現在、人口の約2割に当たる約 200万人が暮らしている。……（事故30年後の）2016年を予測すると $15\text{ Ci}/\text{km}^2$ 以上の地域がなお残る。…… $40\text{ Ci}/\text{km}^2$ 以上の地域もある。 $1\text{ Ci}/\text{km}^2$ 以上の汚染区域は、全国土の約14% に当たる $28,300\text{ km}^2$ 。その時点で、なお125 万人程度が住んでいると推測している。」であって、また「地表付近から採った土壌試料で、 $1\text{ Ci}/\text{km}^2$ の汚染は事故前の平均放射能の約20倍に相当する」としている。そして、記事のレジメに「世代を超えて人と大地をむしばみ続ける原発事故の恐ろしさを物語る未来像だ。」と書いてある。

この記事はチェルノブイリ事故を調査している人にとっては正しく理解されるであろうが、一般の人には間違って理解されかねない。

先ず第1に指摘したいことは、土壌の自然放射能は天然に存在するカリ40だけでも地表より10cmの深さの土壌で約 $2\text{ Ci}/\text{km}^2$ の放射能である。（但し、カリ40の γ 放射能は、 β 放射能の約1/10であるので、約 $0.2\text{ Ci}/\text{km}^2$ となる。）「 $1\text{ Ci}/\text{km}^2$ の汚染は事故前の平均放射能の約20倍に相当する」のは、地表より 2.5mmの深さの土壌中の放射能（即ち $0.05\text{ Ci}/\text{km}^2$ ）の20倍である。このことを明らかにしないと読者に間違った印象を与える。

第2に指摘したいことは、事故による健康被害は放射能汚染によるのではなくて、放射線被ばくによるものであることである。土壌の放射能汚染の大部分は半減期30年のセシウム137 によるものであるから、事故30年後の2016年になっても地表付近の放射能は半分には減衰しないので、新聞に書いてあるとおりであろう。しかし地表のセシウム137 は年々雨などにより地表より地中にしみ込み、土壌の放射線遮蔽効果により地上に居る人間の放射線被ばくは年々非常な速さで減少している。農産物中の放射能も年々減少しており、食品の摂取による内部被ば

くも非常に速さで減衰している。このことについては何ら報道されていない。第1表にロシア連邦のブリャンスク州でセシウム137 によって $15\text{Ci}/\text{cm}^2 \sim 40\text{Ci}/\text{cm}^2$ ($1\text{Ci}/\text{cm}^2$ の15倍以上の汚染)の汚染区域に住む村民の平均被ばく線量を示す。この表が示すとおり、事故の起こった1986年以降被ばく線量は指数関数的に非常に速さで減少している。 $15\text{Ci}/\text{cm}^2 \sim 40\text{Ci}/\text{cm}^2$ の汚染区域に住む旧ソ連の住民は27万人程度であるが、事故の汚染によるこの人達の生涯にわたる被ばく線量は、生涯にわたる自然放射線の被ばく線量とほぼ等しいと予測されている。このようなことも報道されていれば、正しい知識を得ることになり、一般の人も間違った理解をしないであろう。そして「世代を超えて人と大地をむしばみ続ける原発事故の恐ろしさを物語る未来像だ。」との表現があっても、その恐ろしさはどの程度のものか正しく理解されるであろう。

第2の例は1995年11月24日の読売新聞の記事である。見出しは「チェルノブイリ周辺の子供、ガン急増、原因は原発事故、WHO 会議が結論」とある。その内容は「WHO によると(旧ソ連)3か国では事故が起きた1986年から94年まで(9年間)に計565 人の子供が甲状腺ガンになった。……ベラルーシの汚染地域では発病率が事故前の約百倍に達している。」という記事である。この記事は正しい。14歳以下の子供の甲状腺ガンの発症者の WHOの発表(第2表)に基づくものであろう。しかし、甲状腺ガンは治癒率が高く、10人のガン患者のうち、死亡する人は1人と少ないことが予想されることには触れていない。また日常生活でガンによる死者がかなり多いにもかかわらず、これにも触れていない。

WHOのデータのチェルノブイリ事故による14歳以下の子供の甲状腺ガンの発生に対して、その0.1の割合の子供が発症後何年か後に死亡すると考えて纏めたものを第3表の第1欄に記載した。これに対して日本における毎年の全ガン死及び白血病死の人数を第2欄および第3欄に示す。事故による子供の甲状腺ガンの急増は紛れもない事実であるので、これをニュースにするのは当然であろうが、第3表のような事実は解説記事にも取り上げられていない。表によれば、14歳以下の子供は全ガンの死亡者が子供 100万人当たり毎年約20人、白血病による死亡者でも毎年約10人であるのに、チェルノブイリ事故による甲状腺ガン患者の発生は1995年においても子供 100万当たり40人であって、その40人が将来死亡すると予想される人数は約4人である。第3表のようなことを知らされなければ、一般の人が原子力発電の安全性に不安を持つのは当然であろう。

また、新聞記事のみより知識を得ている人は、チェルノブイリ事故による甲状腺ガンの被害者は子供のみである、若しくは子供に多いと思っているようであるが、これも間違っている。1996年の WHOの報告を図にして示すと第1図のようになり、成人の甲状腺ガンの発生数は子供より多い。マスコミが成人の甲状腺ガンについて報道しないのは、成人の甲状腺ガンの自然発生数は 100万人当たり年間16人程度と多いので、事故による成人の甲状腺ガンの発症の報道はセンセーショナルな記事にならないとマスコミが考えたからであろう。

以上、2つの事例を報告する。この事例のように、マスコミの報道のみでは正しい知識が得られないことが皆さんに理解されたと思う。原子力関係の事故では権威ある関係機関や国際機関または国際会議などで正確な報告が出されるので、筆者としては皆さんがこれらに基づいて

正しい知識を得てほしいと考える。放射線教育フォーラムもこれらの正確な報告を人々に提供するように努力したい。

第1表 ^{137}Cs によって 15 Ci/km^2 以上に汚染されたブリャンスク州の村民の
平均実効線量 (International Workshop at Chiba Jan. 1994)
(40 Ci/km^2 以上に汚染された地域は居住禁止である)

年	外部被曝線量	内部被曝線量	合計
1986	17.0 mSv	6.2 mSv	23.2
1987	6.7	2.4	9.1
1988	4.6	1.5	6.1
1989	3.4	1.1	4.5
1990	2.2	0.99	3.1
1991	1.9	0.65	2.5
1992	1.5	0.45	2.0
1986~1992合計	37 mSv	13 mSv	50 mSv

第2表 子供(0歳~14歳)の甲状腺ガン発生数および百万人当たりの発生数
(WHO Report Nov. 1995)

	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	合計
ベラルーシ	2 (0.9)	4 (1.7)	5 (2.2)	7 (3.0)	29 (13)	59 (26)	66 (28)	79 (34)	82 (36)	333 [145]
ロシア連邦 **	0 (0.0)	1 (2.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	2 (4.0)	0 (0.0)	4 (8.0)	6 (12)	11 (22)	24 [48]
ウクライナ	8 (0.7)	7 (0.6)	8 (0.7)	11 (0.9)	26 (2.2)	22 (1.8)	47 (3.9)	42 (3.5)	37* (3.1*)	208* [17*]

下段()内の値は、子供100万人当たりの甲状腺ガンの発生数を示す。

下段[]内の値は、1986年から1994年までの子供100万人当たりの甲状腺ガンの発生数の合計を示す。

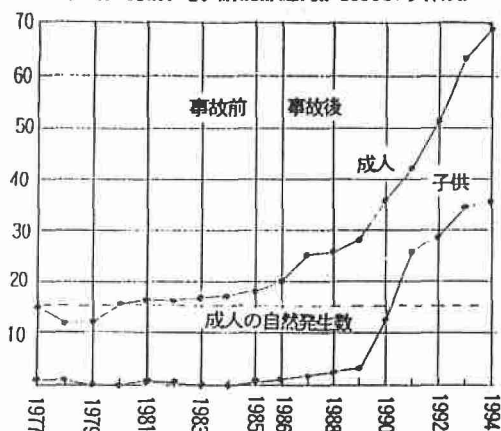
子供の人口: ベラルーシ230万人、ロシア連邦(下記**2州)50万人、ウクライナ1200万人

(*) 不完全な値

(**) ブリャンスク、カルガの2州

第1図

ベラルーシの100万人当たりの甲状腺ガン発生数
(人) (Int. Conf. at Minsk, March 1996より作成)



第3表 子供(0~14歳)の百万人当たりの各種ガン死の比較
(WHO Report Nov. 1995 および厚生省人口動態統計 1997より作成)

チェルノブイリ事故による ベラルーシの甲状腺ガン 死の想定人数	発症年 (人)	90	91	92	93	94	95
		1.3	2.6	2.8	3.4	3.6	4.0
日本に於ける全ガン死	毎年約 20 人						
日本における白血病死	毎年約 10 人						

溶媒抽出法によるラドン水よりの ^{214}Pb の分離と ^{214}Pb の半減期の測定

1. はじめに

谷本清四郎

放射性同位体の半減期をもとめることわ核種決定の上で重要な条件である。しかし短時間の実験で、半減期を求めこれを理解するための適当な教材は容易に得られない。

^{32}P (T=14. 2d)、 ^{90}Y (T=64h) などもあるが入手困難と半減期測定に数日ないし十数日かかるので適当であるとわいえない。

ラドン水より抽出した ^{214}Pb は半減期が26. 8分でおよそ1時間の測定で結果が得られることとミルキング法により何回でも抽出できることは極めて有利である。本実験ではGM計数装置・レートメーターの使用により大体よい値が得られた。

(この実験の意義は次の通りである。)

- ・放射化学的分離法の一つとして溶媒抽出法の基本的操作を習得する。
- ・半減期測定により放射性核種の同定。
- ・ラドン水より ^{214}Pb を何回でも抽出することによりミルキングの意味の理解。
- ・壊変現象が指数関数的であることの理解。

2. 実 験

(1) 概要 ウランーラジウム系列の放射性鉱物を水に浸して密栓し、2、3日放置しておくときそれより放出されるラドンが水に溶解する結果ラドンおよびその壊変生成物を含む水溶液が得られる。この水溶液はふつうラドン水とよばれる。ラドン水には主として次の放射性核種が含まれている。

核 種	半減期	放射線
^{222}Rn	3. 823 d	α
^{218}Po	3. 05 ■	α
^{214}Pb	26. 8 ■	β^-
^{214}Bi	19. 7 ■	β^-
^{214}Po	$1. 64 \times 10^{-4}$ s	α

これらのうち ^{218}Po 、 ^{214}Bi はpH3の硝酸酸性溶液よりジチソンの四塩化炭素溶液で抽出され、 ^{214}Pb は抽出されずに溶液にとどまるから、この性質のちがいを利用してあらかじめpH3で ^{218}Po 、 ^{214}Bi を抽出、除去しておき、つぎに溶液のpHを8～9にして ^{214}Pb をジチソン溶液で抽出する。この抽出した部分の半減期を調べて ^{214}Pb であることを確かめる。

(2) 試料および試薬

- ・ラドン水：ピッチブレンドを250ml の共せん試薬びんに入れ、水をみたして密せんして2、3日放置した後、上ずみ液を使用する。(使用後水をみたしておけばふたたびラドン水が得られる)
- ・硝酸鉛溶液 (100 $\mu\text{g Pb}^{2+}/\text{ml}$) 加水分解を防ぐために弱硝酸酸性にしておく。
- ・硝酸ビスマス溶液 (100 $\mu\text{g Bi}^{3+}/\text{ml}$) 加水分解を防ぐために弱硝酸酸性にしておく。
- ・希硝酸 (1 : 100)
- ・ジチソンー四塩化炭素溶液 (0. 02% 重量/容量)

・希アンモニア水（1：100）

・B P B試験紙 T B試験紙

（3）操 作

a. ラドン水100 mlを 200mlの分液漏斗にとる。

b. 担体として0.5 mlずつのPb²⁺およびBi³⁺に相当する硝酸鉛溶液、硝酸ビスマス溶液を加える。

c. 希硝酸（1：100）を加え、B P B試験紙を指示薬として溶液のpHを3に調節する。

d. ジチソンの四塩化炭素溶液（0.02%）2 mlを加えて1.5～2分間はげしくふりまぜる。この操作により ²¹⁸Po, ²¹⁴Biは四塩化炭素層に抽出され²¹⁴Pbは水層に残る。

e. 四塩化炭素層を廃液だめにする。

f. 水層にさらに1 mlのジチゾン溶液を加えて抽出操作をくりかえし、四塩化炭素層を捨てる。

g. 上記のようにして ²¹⁸Po, ²¹⁴Biを除去した水層に希アンモニア水（1：100）を添加し、T B試験紙を指示薬としてpHを8.0～8.5に調節する。

h. ジチソンの四塩化炭素溶液2 mlを加えて1.5～2分間はげしくふりまぜる。この操作により²¹⁴Pbは四塩化炭素層に抽出される。

i. 四塩化炭素層を注意して測定皿に移す。

j. さらに1 mlのジチゾン溶液を加えて抽出操作をくりかえし四塩化炭素層を前記の測定皿に移す。

k. 測定皿中の四塩化炭素溶液を赤外線ランプの下で注意して蒸発乾固する。

l. 蒸発乾固後軽く焼いて有機物を燃焼除去する。

m. このようにして得られた測定皿中の残留物の放射能をGM計数装置を用いて測定する。

（4）結果の整理

片対数方眼紙の横軸に時間、縦軸に放射能をとって半減期を求める。また普通の方眼紙に横軸に時間、縦軸に放射能をとると壊変現象が指数関数的であることがよくわかる。

<参考文献>

・日本化学会編 実験化学講座 13. トレーサー技術

・日本アイソトープ協会編改訂3版 ラジオアイソトープ講義と実習

3. 測定値

^{214}Pb (第1表)

(1) レートメーターによる測定

B. G (36)

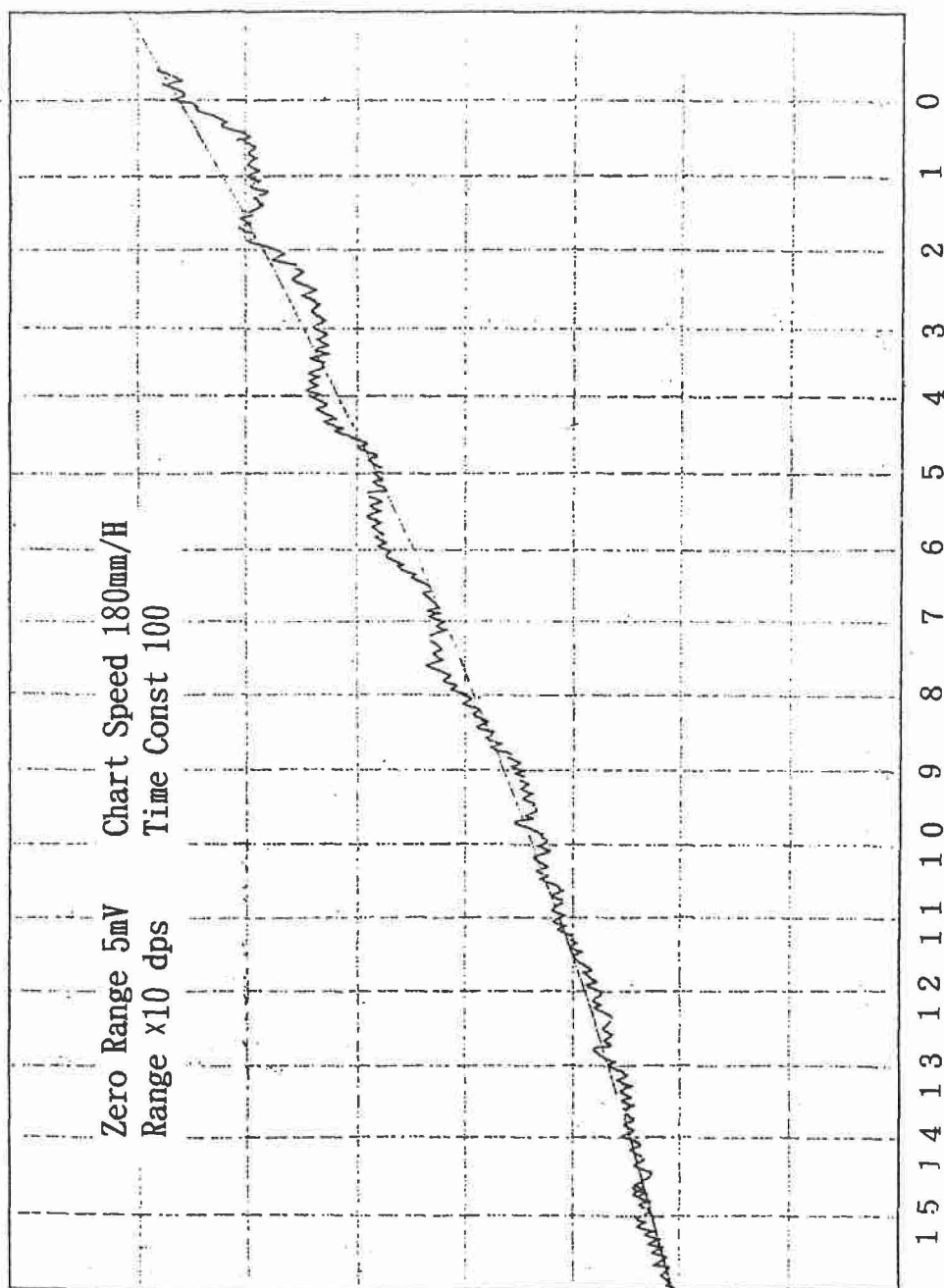
記録用紙 の番号	経過時間 (分)	記録紙の 読みcps	c p m	CPm-B. G (24時間後)
0	0	76	456	420
1	3.3	72	432	396
2	6.7	69	414	378
3	10.0	65	390	354
4	13.3	62	372	336
5	16.7	59	354	318
6	20.0	56	336	300
7	23.3	53	318	282
8	26.7	50	300	264
9	30.0	47	282	246
10	33.3	44	264	228
11	36.7	41	246	210
12	40.0	39	234	198
13	43.3	37	222	186
14	46.7	35	210	174
15	50.0	32	192	156
16	53.3	30	180	144
17	56.7	28	168	132
18	60.0	27	162	126
19	63.3	25	150	114
20	66.7	24	144	108
21	70.0	23	138	102
22	73.3	21	126	90
23	76.7	20	120	84
24	80.0	19	114	78
25	83.3	18	108	72
26	86.7	17	102	66
27	90.0	16	96	60

(第2表)

(2) GM計数装置による測定 ^{214}Pb B. G 147

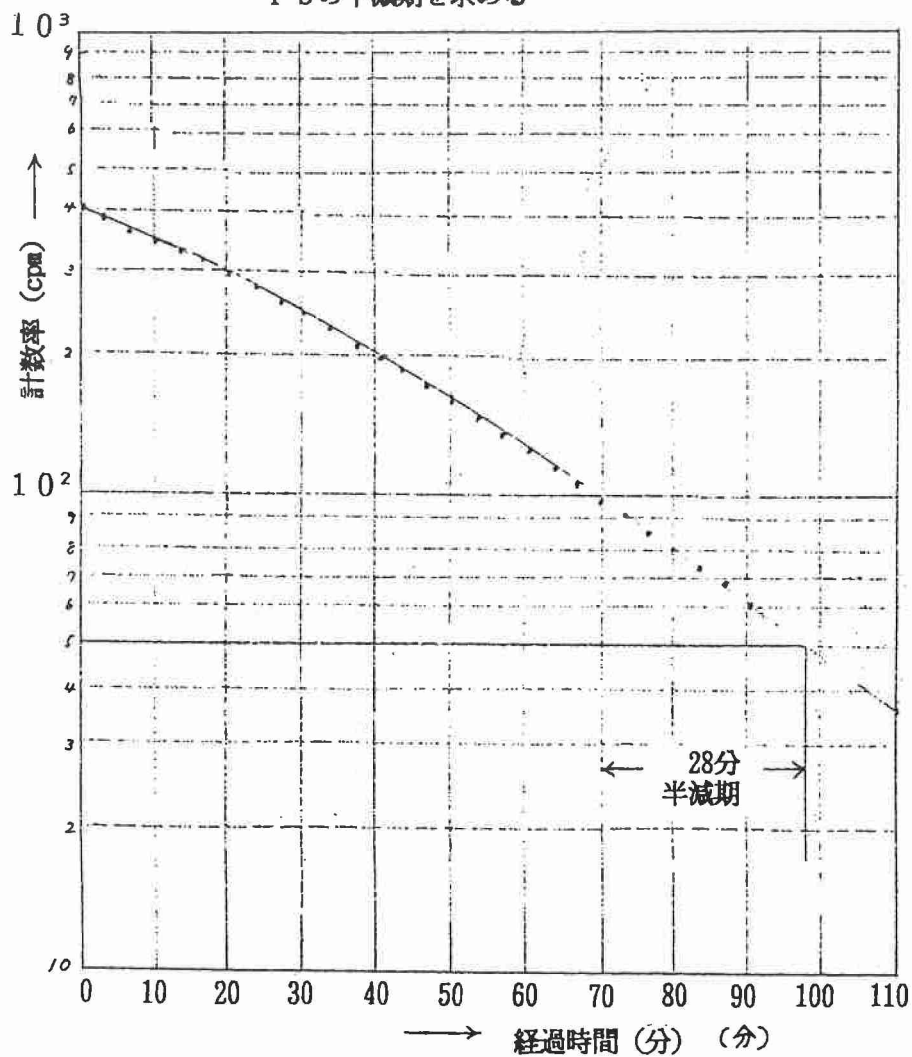
経過時間 (分)	測定時間 (分)	全計数	計数率 (cpm)	計数率-B. G
0	2	4583	2492	2345
5	2	4071	2036	1889
10	2	3553	1777	1630
15	2	3314	1657	1510
20	2	2850	1425	1278
25	2	2610	1305	1158
30	2	2528	1264	1117
35	2	2139	1070	923
40	2	1892	946	799
45	2	1777	889	742
50	2	1607	804	657
55	2	1520	760	613
60	2	1313	657	510
65	2	1190	595	448
70	2	1098	549	402
75	2	962	481	334
80	2	927	464	317
85	2	768	384	237
90	2	764	382	235
95	2	672	336	189
100	2	627	314	167

(第1図) ^{214}Pb の減衰曲線 レートメーターによる記録



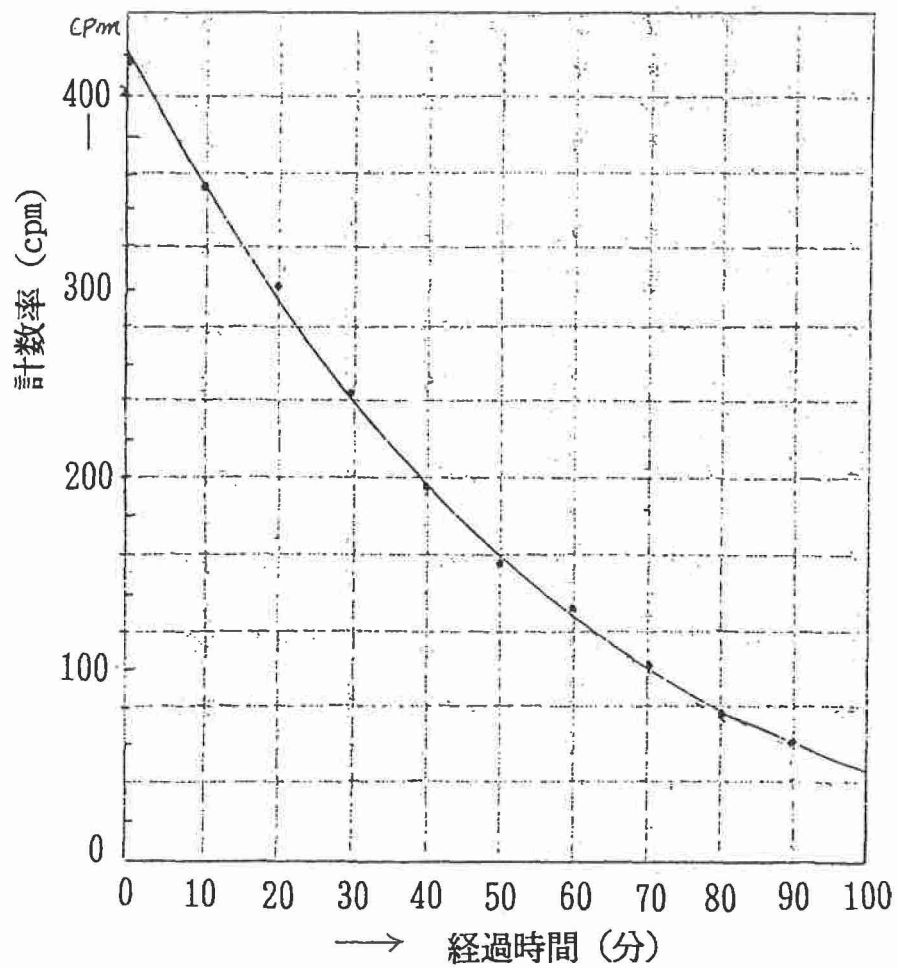
(第2図) レートメーターによる測定値 (第1表の値)

ラドン水より抽出した ^{214}Pb の減衰曲線より
 ^{214}Pb の半減期を求める



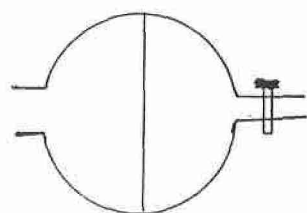
(第3図)

^{214}Pb の減衰曲線
(第1表の値による)



溶媒抽出法によるラドン水よりの

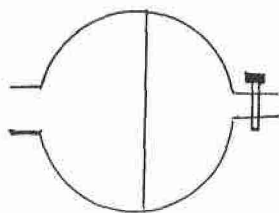
^{214}Pb の分離と ^{214}Pb の半減期の測定



a

100 ml ラドン水

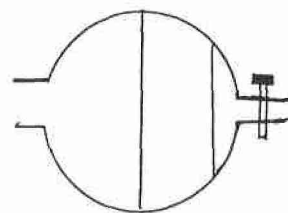
担体 Pb^{2+} 、 Bi^{3+} 0.5 ml
ずっ加える



b

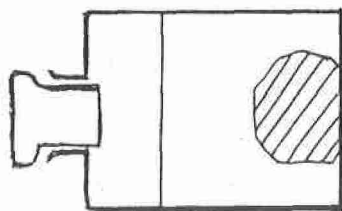
希硝酸 (1 : 100) を加える

BPB 試験紙 または pHメーター
pH 3 に調節



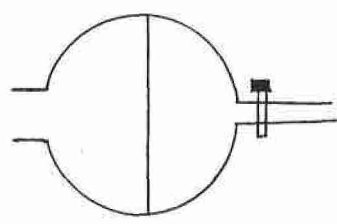
d

ジチゾン四塩化炭素 (0.02%) 2 ml 加えて
2分間 激しくふる



ウラン鉱石 ラドン水
2～3日 放置

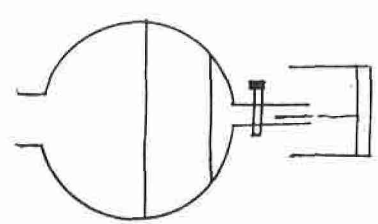
アンモニア水 (1 : 100) を加えて
 PB または pHメーター
 pH 8. 0 ~ 8. 5 にする



g

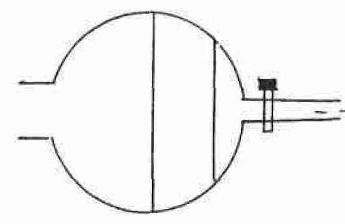
四塩化炭素層を捨てる

^{218}Po , ^{214}Bi を除去



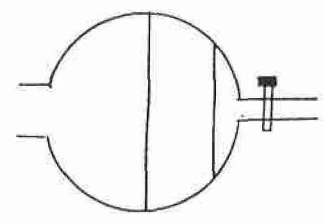
e

ジチゾン四塩化炭素 (0. 02%) 2 ml
 2 分間 激しくふる
 ^{214}Pb は四塩化炭素層に入る



h
i
j

1 ml ジチゾン液を加える
 抽出操作をくりけす
 四塩化炭素層を捨てる



f

四塩化炭素層を測定皿に移す
 四塩化炭素 1 ml を加え
 くりかえす 測定皿にとる

赤外線ランプで蒸発乾固

軽く焼く G-M で測定

物理学者列伝(1) ロルフ・シーベルト

新潟南高等学校 竹沢攻一

物理学者の名前が付けられた法則やその事績は、教科書に載っていて駆け出しの学徒にもよく知られている。しかし、その生涯についてはかなり熟練した物理学者でも知らないことが多い。それゆえ浅学非才を顧みず、自らの勉学のために書き留めたり、恣意的に読み漁ったりしたことをまとめ、同好の士のいささかの参考に供するとともに、さらなる情報の提供を乞わんとするものである。なにとぞよろしく御教示のほどをお願いしたい。そのため、本稿を知られざる物理学者から始めるのが目的になっているかと考える。

まず、放射線の実効線量の国際単位系の名称になっている、ロルフ・シーベルト (Rolf Sievert) からはじめることにする。放射線の単位にはいろいろなものがあって、物理を専攻している人にとっても、何となく煩わしいとか苦手だなという意識が植えつけられる基になっていると思われる。1979年の国際度量衡総会によって線量当量の単位として定められた Sv ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$) という組立単位は、ようやく定着してきたが、その名称の主シーベルトについては未だにあまり知られていない。人名辞典にもなく『岩波 理化学辞典 第4版』(1987)には、「電磁放射線の線量当量のS I単位」とあるだけで、まったくそつけない。シーベルトとは何者かさえ判然としない。そこで、単位を含めてシーベルトについて、もっぱらHans Weinberger 著、山崎岐男訳、『放射線防護の父 シーベルトの生涯』(考古堂、1994年)¹⁾によって紹介する。編年体風になってしまったが、このような紹介文ではやむを得ないことと御了解いただくこととし、詳しくは上掲書をお読みいただきたい。

1 出生

ロルフの先祖は統一前の東ドイツのザクセン地方出身で、祖父は菓子屋を開業して財をなし、町の有力者となって町議会議長まで務めた。ロルフの父マックスは、機械専門の代理店業務に携わっているうちに、スウェーデンでの機械卸商人としての事業の可能性に気づき、1881年ストックホルムに移住しマックス・シーベルト機械商会を開設した。事業は当たり、工具や機械を輸入するだけでなく、1888年にはストックホルムで馬蹄鉄用の釘を製造したうえ、ソルナ(ストックホルム市郊外)に電話ケーブルを製造する会社まで興した。マックスはスウェーデンの市民権を取得し、その9年後の1894年にHärnösand出身のソフィア(Sofia Calorina Panchéén)と結婚した。翌年に娘リサが、その翌年(1896年5月6日)にロルフが生まれた。姉弟は仲がよく、なに不自由のない生活をしていた。父は年中旅行中で仕事に厳しかったから、ロルフと父は特に親しみを感じていたわけではなかった。父は自分の跡をロルフが継ぐものと決めてかかり、ロルフに自分の工場の実習をさせたが、ロルフの頭に鉄製のものが飛んできて危うく一命を落とすという事件が起こった。それ以後、その実習は中止された。母親は子どもの世話は家政婦にまかせっきりであったが、教育面では関心が高く、教育ママであったと伝えられる。

1913年、ロルフが17歳になったばかりで父マックスは他界してしまった。莫大な財産の相続人となったロルフは3つの学校で勉強して模索してみた後、1915年にウプサラ大学に入学し理学を専攻し、オセーンに師事して1年間、力学を学んだ。

1918年、ロルフはイングリッド・サンドバーグと結婚した。時に22歳、翌年ボー Bo

が生まれた。一家はストックホルムの Riddar 通りに住んだ。その翌年次男 Max が、1922 年 Bengt が、1926年には Kerstin が生まれた。

2 放射線物理学との遭遇

1919年に学士試験にパスした後、ストックホルムに戻り、科学アカデミー・ノーベル研究所でX線吸収に関する研究に従事していたチコ・アウレンの助手に採用された。1920年に、彼はアメリカの放射線物理学の最近の趨勢を探るため、自費でアメリカに留学した。ニューヨークのスクネクタディにある放射線研究センターで彼は偶然に、スウェーデン放射線医学の創始者とみなされているエスタ・フォセルに出会った。

フォセルは、1902年にウプサラ大学医学部を卒業し、同大学病院の外科X線実験室の非常勤助手になり、1895年に発見されたばかりのX線の研究に従事した。放射線医学界はすでに広い国際的なネットワークが形成されており、彼はかなりの時間を割いて外国の研究室を訪問した。彼はベルクとともに1910年に民間資金を集めてストックホルムに癌治療クリニック・ラジウムヘムメットを開院した。1913年には医学博士号を授与され、クリニックも市や国の特別資金等を補助され発展していった。フォセルはアメリカに行く前に、配下のルングレン博士をノーベル研究所のロルフ・シーベルト（以下ではシーベルトと称することにする）の所に派遣して、シーベルトに放射線線量計算の仕事をする気がないか打診させていたのだった。なお、放射線とは広い意味で原子核または原子から放射される粒子あるいは電磁波のことで、 α 線、 β 線（電子線）、陽電子線、 γ 線、X線、中性子線などを指す。

ロルフはフォセルと意気投合して一緒にアメリカ各地を視察して回り、帰国後ラジウムヘムメット（ストックホルム市北部）に身を寄せたのだった。彼はこのころ発表した点状でないラジウム線源周囲の γ 線強度分布に関する研究で、分布を数学的に表現する際に、今日シーベルト積分として知られている積分を使用した。彼は、自家の地下室に専用の私的実験室を作って勉強したともいわれるが何をしたかについては明らかではない。1次線が2次線の基になっていることで関心をもたれていたことから1923年に、放射線治療の2次線について研究論文を発表したが、これは職業人の防護壁の後方での被曝を調べるために大いに役立った。翌年、彼はストックホルム理科大学の理学修士号を取得した。学業の傍ら、シーベルト・ケーブル製作所の経営にも参加したが、経営意識が薄いうえ損失を出したりしたので、1928年には株券を売却してしまった。しかし他の大きな会社の株券は手放さず備蓄予算とした。

3 放射線物理研究所の誕生

1921年にフォセルの発案で放射線学者の雑誌として Acta Radiologica が創刊され、次第に重視されるようになり、シーベルトは査読委員として重要な役割を演ずることとなった。彼は興味深い他の文献、特にすべての雑誌を入手するために非常な努力と多額の金をつぎ込んだ。彼には放射線量を精密に決定する測定技術の開発が求められていたのである。

1924年にシーベルトは、ラジウムヘムメットの新築の放射線物理実験室の室長に任命された。（彼は自らの実験室に匿名で30,000クローネを寄付して、癌協会に更に45,000クローネを支出し、少なくとも向こう5年間は支援と維持を保証することを条件とした。）このころにはすでに彼の優れた組織力と強い集権力が際だっていたようである。彼は、微量

放射線測定のため検電器やX線強度の自動記録装置、防護壁を透過する放射線の測定装置の開発をしたり、線量の標準化とそれを実現するための移動測定部門を軌道に乗せ可搬式X線強度測定器を製作してそれを強化したり、1926年に蓄電式電離箱（シーベルト箱）法を考案し、それをいろいろに改良したりして、1932年に博士号を授与された。彼は小型の蓄電式電離箱（最も小さな物は直径が14mmで郵送できた）を作製して職業人の線量管理を行ったり、子宮内ラジウム挿入器で一連の線量率の測定も行ったりするなど、次々と新しい測定器具を開発していった。

1926年になって彼は、国内の病院等の線量計算を標準レントゲン(R)単位(Intensity Roentgen: 1 kg の空気に照射して正負それぞれ $2.58 \times 10^{-4} \text{C}$ のイオンをつくる放射線量 $\approx 0^\circ\text{C}$, 1気圧の乾燥空気 1cm^3 内に1CGSesuのイオンをつくる放射線量)で規定し、物理学的な皮膚紅斑量として表すことにし、移動測定部門が定期的に訪問して電圧、管電流、線量率を測定したり、校正したりすることによって放射線の管理を行っていくことにした。

1929年の終わり頃国際X線・ラジウム防護委員会の勧告に基づいて、シーベルトは職業人がラジウムを操作している際の被曝時間を短縮するための労働時間の第1回の改定を行った。医学放射線のラジウム製剤の検定では彼の実験室はトップレベルの施設であった。作業場は鉛の壁で囲われ、安全にX線を調べることができた。

1928年に国王グスタフ五世の70歳の誕生記念日に国民から贈られた寄付金により、グスタフ五世記念財団が設立され、カロリンスカ病院に放射線治療外来を作ることになった。しかし、シーベルトが放射線物理部門と放射線病理部門を切り離すことを主張し、加えて放射線病理部門をラジウムヘムメットかカロリンスカ研究所のどちらに帰属させるかが定まらなかったため建築工事が先延ばしになっていた。1937年になってようやく、ラジウムヘムメットがソルナのノルバックに移転して工事が完成し、グスタフ五世記念クリニックという名前のカロリンスカ病院分院となり、発展期に入った。時を同じくして物理実験室は病院の他の主要建造物から100メートル離れた新しい専用の建物に移り、カロリンスカ病院付属放射線物理研究所として、シーベルトの強い影響下に入るようになった。念願の新しい場所に4階建て総面積850m²の専用の放射線物理実験室を新築することができたので、彼はその4階の5つの部屋と台所を官舎として定年退職(1965年)まで専有し、病院物理の全責任を引き受けたのであった。1941年になって放射線防護法が制定されると、業務の性格上、放射線物理研究所は国立に移管され、まったく独立の研究所に昇格して、シーベルトは同研究所の教授に任命された。

4 放射線防護思想の進歩

X線やラジウムが発見された当初、その検定の方法は、皮膚を一定時間照射して、1時間後に紅斑ができるかどうかを調べるというものだった。(皮膚紅斑は、1889年にビドマークが紫外線によって生じることを発見していた。)石英水銀ランプで発生させた人工紫外線がクロマイヤーによって皮膚疾患の治療に応用されたのは、それから17年後の1906年であった。皮膚紅斑(HED)は、皮膚の色素沈着と放射線の線質に依存し、それによって治療線量が決められていた。皮膚癌はX線治療によって成功裡に治癒するようになった。

放射線障害はすでに1500年ころからドイツ南部やチェコスロバキアの鉱山特有の奇病として、シュネーベルク(鉱山の名前)病として知られていた。ウランは古くからヨーロッパで陶磁器のうわ薬の着色料の原料として使用されていたのである。これらは呼吸器疾患

の一種と考えられていたが、最近の疫学調査から肺癌であったことが判明している。キュリー夫人がラジウムを抽出したピッチブレンドの産地、ヨアヒムスタール鉱山でも鉱山病が発生していて、これは坑道内のラドンガスによるものであった。1890年代になって新型のクルックス管球を製造していた職人は、放射線による皮膚障害に悩まされるようになった²⁾。

X線が発見されるとすぐ、エックス線眼鏡やエックス線オペラグラスなどが想像され、エックス線透視を防ぐ鉛入り下着を売りつけようとする者さえ現れたという。1900年～1940年ころは、世界中でX線透視の見せ物が行われており、1902年には、毎日自分の手を透視して見せていた浅草の興業師の放射線障害に関する症例が報告されているという。1913年に管内の陰極にフィラメントをつけて熱電子を放出する強力なクーリッジ管が発明されると、今度は身体の表面だけでなく内部の組織に癌や白血病、その他の遺伝的影響が現れはじめたのであった。

また、1890年代にすでに造影剤が考案されていたし、1930年になるとドイツのハイデン社は、血管内に注入しても急性の副作用を生じない、コロイド状の2酸化トリウムを15%含有する造影剤（商品名トロトラスト）を発売した。トロトラストの主成分トリウムは、放射性の ^{232}Th と ^{228}Th であったので、これを投与された人々は、トリウムの連続する壊変によって終生、体内で放射線を被曝し続けた。当時アメリカでは、夜光時計の針や文字盤にラジウムペイントを塗装していた婦人労働者に、ラジウムの体内被曝が原因と考えられる骨肉腫が発生することが社会問題になっていた。そのため、アメリカ医師会は、1932年と1937年にトロトラストの使用について警告した（さらに1947年の調査でこれが肝血管内皮腫などの発生原因となることが報告され、1950年ころには製造されなくなった）。

5 国際X線・ラジウム防護委員会（ICXRP）

このような経験が積み重ねられていった結果、1913年にドイツレントゲン協会が、次いで1915年イギリスレントゲン協会が、放射線治療に従事する者の放射線防護の基準を定めるに至った。イギリスレントゲン協会は1898年以来、放射線障害のデータを収集していたが、人体が古い放射線を覚えていられるらしいことが次第に認識されるようになり、イギリスで9人目の放射線障害による死者が出た1921年になって、英国エックス線・ラジウム防護委員会（英国国教会は、このとき王立医学院のもとにこの委員会を設けたのである）と米国レントゲン線協会は、人体が耐えうる放射線の量を生物学的基準によって定め、物理学的な単位によって定義することが必要であるという声明を出した。

患者とか個人の放射線の防護の法律を最初に制定した国はイタリアで、1925年のことであった。それは放射線治療施設で働く職業人の防護から第三者の防護に至るまで規定する画期的なものであった。同年、ソ連邦の人民委員会は、防護対策、労働時間、衛生管理を規定した通告を公布した。

北欧諸国ではデンマークが1930年にX線などの利用に関する法律を制定し、健康管理局が監督官庁になった。それは1938年に改正された。同じ年に、ノルウェーでも制定され、それはデンマークの法律と類似していて、監督業務で手数料が取れるようになっていた。

1925年に初めてロンドンで開催された国際放射線医学会議で、物理的に放射線の線量を定める必要性について徹底的な討論がなされ、単位の問題を研究する非公式なグループが結成され、次の会議で報告するよう委嘱された。さまざまな条件の中で仕事をしてきたグループの放射線学者たちは、共通の防護規程を作るという難しい作業に直面したが、シ

ーベルトはそこで牽引車的な役割を果たしたといわれる。

彼は1928年のストックホルムでの第2回国際放射線医学会議で多くの研究者と知己になったが、中でもイギリスの物理学者フレデリック・スパイアーズと病院物理学者をしていたルイス・ハロルド・グレイと親しくなった。会議の会長にフォセルが就任し、準備の段階で組織づくりに多大の尽力をした。第2回の会議はストックホルムの国会議事堂で開催され（7月23日～27日）、40か国964人の代表が参集した。勧告案は採択され、国際X線・ラジウム防護委員会（ICXRP）が発足し、シーベルトが委員長に選出された。同会議の単位委員会は、新しく統一された線量単位レントゲンRの採用と放射線作業従事者の作業環境の改善とを勧告したのである。委員会に所属していたシーベルトは、新しい単位をまずスウェーデンで早急に導入しようと動いていたが、スウェーデン医学放射線学会はようやく1936年1月1日から線量計算はすべて国際的なr単位（R単位とは少し違って定義されていた。後のremに相当する）にすることを決議した。

第2時世界大戦前にICXRPで牽引的な力を発揮したのは、同委員会の幹事に選ばれたイギリス人ケイン（G. W. C. Kaye）であった。委員会は、1931年にパリで、1934年にチューリッヒで、1937年にシカゴで、国際放射線医学会議と一緒に開催された。チューリッヒでの会議で、シーベルトは「自然界のγ線について」と題する概説的な講演を行い、その中で室内での放射線の基準値が高いという調査結果を報告し、動物の成長に及ぼす放射線の生物学的作用の問題とか突然変異に関する矛盾だらけの議論についても総括した。この会合で、人為的な要因に基づく放射線障害を回避する目的から、初めて線量限度を規定した。こうしてシーベルトの尽力によるスウェーデンでの定量的な物理測定の経験とノウハウが、次第に国際的な場に広がっていった。

スウェーデンでは、シーベルトが第2回国際放射線医学会議に間に合わせようと計画して挫折した放射線防護法の作成にかなりの時間を割いていた。1932年に医務衛生庁が提出していた法案に対しては、6年後に厚生大臣による否定的な見解が示された。しかし、大臣より医務衛生庁に放射線防護の説明書を準備するようにという指示を受け、翌年末に放射線防護法案が政府に提出された。シーベルトは、厚生大臣により拒否された法律を、控訴院判事と官房秘書官とともに16条に分割して起草したり、研究所のトレウスとベンナーの助けを借りて新しい機関の構想を盛り込んだりしたのである。それは、医務衛生庁が監督官庁になり許可権も所有し、デンマーク方式で監督業務の料金が取れるように改正されていた。しかし、実際の管理や測定、具体的な出願手続きと採決などは放射線物理研究所が行うようになっていた。それは移動測定部門の経験からほぼ一定の間隔で査察を行ったり、現場責任者の資格の経歴を提出させたり、運搬の計画変更が生じた場合その届を求めたり、放射線従事者の障害や法定健康診断の結果を報告させたりするという、徹底したものであった。また、それらの費用は国の予算でまかなわれることになった。

その法律の施行に当たっては、同研究所は指導業務に当たるだけでなく、科学的な研究も遂行することが義務づけられており、1941年6月6日に採択された。シーベルト自身は指導のための講義は好まず、他の所員に任せていたといわれる。なお、同年、フランスとドイツもX線業務とそれに伴う防護対策に関する法律を制定した。

6 軍事物理研究所（MFI）

第2次世界大戦が勃発して数日後の1939年9月1日、シーベルトはノーベル研究所（科学

アカデミー物理学研究所)にシーグバーン教授(真空分光器を考案し(1921年),特性X線スペクトルの精密測定を行うなどのX線分光学発展への寄与により,1924年ノーベル物理学賞を授賞)を訪ね,軍事技術問題を取り扱う際の専門科学を開発するために,物理学者が組織されるべきだと提案した。9月6日の会合には,シーグバーンを委員長として国立の物理研究所長等が参集した。秋には物理学者からなる準備委員会が結成され,2カ月後には,スウェーデン物理国家委員会という組織が提案され,そのメンバーは科学アカデミーから承認された。

スウェーデンでは1800年代の終わり頃から,軍と産業界との結びつきがあり,第一次世界大戦で毒ガスが使用されてから,両者の共同研究が行われてきた経緯がある。そして1928年には技術者科学アカデミーの技術準備委員会ができ,政府と議会の承認を得て軍事研究を行ってきていた。また,スウェーデンでは戦前から科学者間には公的サービスの精神が普及し,公的動員の思想が存在していたという。このような背景から戦争が間近かに迫ってきたとき,国防財政予算を審議する国家委員会は,シーベルトを介して科学アカデミーに「できるだけ早急に物理及び化学の実験施設を目途とした国の資金による建設計画書を作成すべきである」と進言したのである。

ヨーロッパ全域に戦争が拡大すると,スウェーデンも参戦したが,軍事予算はすぐ底をついてしまったので,各界が協力しあい一丸となって技術的な発展を保持する必要性が痛感された。そのため軍を助けるための科学者の軍事研究の成果は進展し,1940年の11月には暫定的な軍事物理研究所(MF I)が設置されるまでになった。翌年4月,スバンテ・アレニウス(1903年電解質溶液の電離説でノーベル化学賞を授賞した)の息子オロフ(理学博士)が,ストックホルムの南にある Grindjön の土地130ヘクタールを研究施設の建設用に寄贈したので,同年秋にはMF Iが完成した。物理国家委員会はシーベルトが実行委員に選ばれたとき,軍事物理的な業務の管理を委嘱したので,軍事技術の業務の多くのものが放射線物理研究所に移されることになった。

しかし,学問の自由を保持し自らのアイデアで研究をしようとする科学者たちと軍と産業界のネットワークとはやがて衝突し,防衛委員会が1943年12月に防衛研究所(FOA)設立のための組織プランを政府に提出するに至った。シーベルトたちの反対にもかかわらず,1945年4月1日にFOAは開設され,MF Iはそれに合併して2つの部門になった。シーベルトがMF Iに肩入れした理由の1つは,新しい放射線保護法の監督ならびに管理の必要があったためである。しかし,1944年以降に彼の軍事物理学への関与が急速に弱まっていったのは,FOAでの秘密裏の原子爆弾に関する研究が微妙にかかわり合っていたからではないかという憶測がある。

7 高圧ホール

1945年に広島に原爆が投下されて,突然,一時的な大線量放射線の物理研究の必要性が浮かび上がってきた。同時にエネルギー問題の解決のため,原子力の平和利用が現実味を帯びてきて,放射線防護の問題がよりいっそう重要視されるようになってきた。シーベルトは,1945年の晩秋に発足した原子力委員会から,一時的に強い線量を発生させるためのコッククロフト・ウォルトン高圧発生器の建設費として215,000クローナを獲得した。1946年から工事が着工され,高圧ホールを下賜した皇太子グスタフ・アドルフを迎えて1950年5月8日に華々しい開所式が行われた。

しかし、多大な放射線量を発生させるべく予定していた放電電圧ではX線管は機能しなかったので、1952年のうちにこのX線管を単に生物学研究用に改造してしまい、放射線治療を行うという考えは放棄してしまった。この失敗は彼の古い低電圧の電気技術の知識を高電圧にまで当てはめようとしたことによるものであり、電気分野の技術的進歩を知らなかったことによるのだという。

一方、シーベルトはエグマルクと共同してラドン実験室を建設し、ラドンガスを毛细管に封入した。また、輪状に配列された10本の細長い高圧イオンチェンバーの中央円筒状の空間に人を寝かせて人体からの放射線の全身測定も行った。それによって彼は人体の主な放射線源はラジウムではなく、 ^{40}K であることを証明した。さらに地理的要因や生物学的因子との関係を調べるため、いろいろな住民グループの体内放射線を測定したが、特にソルナの学校医の計らいでいくつかの学級のボランティアで調査した。その結果、我々すべてが多量の放射性元素を保有していることを明らかにした。

宇宙線を遮断して測定できるような岩室を物色し、彼は1952年に Henriksdal 清掃工場の地下にかなり大きな測定実験室を完成させた。各地の飲料水の中のラジウム、トリウムの含有量を測定したり、測定室全体を囲んでいるタンクを非放射性の水（テムズ川の水）で満たし、環境放射能の約1%に減弱させたりすることに成功した。部屋の放射線が家屋の建築材料によることも若い物理学者 B. Hultqvist と技師エクルンド (G. Eklund) と共同して明らかにした (1956年)。ラドンガスはラジウムの崩壊で発生する希ガスで、大部分は物質を通過して拡散される。ラドンは一連の崩壊過程でラドン娘群といわれる18の同位元素を生み出すので、ラドンガスを吸った人は生涯肺の中で α 粒子に照射されるという有害な物質である。Hultqvist は換気の悪い部屋は換気の良い部屋よりラドンガスが13倍も多く充満していることを見いだした。

1950年代の初めにシーベルトは、Waltersam と共同して測定値を自動的に読みとることのできる二重電離箱を製作した。蓄電器式電離箱より感度が上昇し、大量に製作することによって放射線防護の総括的な監視ができるようになった。

8 キルナ地球物理観測所

北スウェーデンでフェーン風やオーロラ、雪崩等、地球物理学的な観測を行うため、1912年にラップランドのアビスコに観測所が建設された。科学アカデミーと国立気象水文学研究所 (SMHI) は、休止状態の観測所を組織化するため、科学アカデミー、SMHI、海図作成局からなる管理委員会を設けたが、1945年8月になってシーベルトに委員長のお鉢が回ってきた。彼はアルフェン (Hannes Alfvén) 教授と知り合いその感化を受けたからか、オーロラの研究にも非常に興味をもち、活発な活動を行った。この委員会はアビスコ委員会と呼ばれ、定期的にシーベルトの官舎で開かれた。委員会は、キルナ近郊に地球物理観測所を設置することとアビスコ自然科学観測所を存続させるべきこと、Hambergska 観測小屋で気象観測を続けることを提案した。この勧告を受けて、これらは北極圏自然科学研究所と命名され、機能の集中化が図られた。観測所の設立は1947年に国会の承認を得ていたにもかかわらず、1957-1958年の国際地球物理年 (IGY) 前年まで引き延ばされた。シーベルトは建築特別委員会の委員長として活躍し、1957年7月2日の開所式でリンネ金賞が授与された。時にシーベルト生誕60周年のことであった。彼は死ぬまで北極圏の研究施設の委員長の職に留まった。



9 原子力と放射線防護

1946年にスウェーデン物理委員会は、原子力の研究とともに科学的な諸問題进行处理するために会議を開いた。それに関して1950年には放射線物理研究所内で原子力エネルギー研究の放射線防護協議会という非公式な組織が結成された。しかしシーベルトがスウェーデンの核兵器の研究に関与していたという証拠はどこにもないといわれる。

放射線物理研究所の部門長ヘルデは、1週間につき0.5レントゲン以下の放射線負荷でも血液像に変化が生ずることを明らかにしていた。そのためシーベルトは、1947年のロンドンでの講演の中で、放射線作業従事者の最高週線量は0.1レントゲンであるべきだとしたが、これは1934年チューリッヒでの第3回国際放射線医学会議で採択した週線量の1/10に相当するものであった。

第2次世界大戦によって国際的な共同作業は中断し、各国間がお互いに交流をもつようになるのに10年を要した。1950年ロンドンでの第6回国際放射線医学会議に関連して、ICXRP（国際X線・ラジウム防護委員会）の名称が国際放射線防護委員会ICRP（International Commission on Radiological Protection）に変更され、週0.3レントゲン以下に線量限度が下げられた。このとき姉妹委員会としてICRU（国際放射線単位測定委員会）と放射線の教育に関する委員会も発足した。またICRPは、耐容線量を許容線量

と呼び変え、レントゲンの単位記号Rを小文字のr（後の rem）に書き換えて、空気のエネ
ルギーに対してだけでなく人体の影響度についても使用することにした。

ICRUは1953年に、物質1kgにつき0.01J (1gにつき100erg) の放射線エネルギーが吸収
されるときに吸収線量としてrad (radiation の頭文字) という単位を提案した。人体とい
う特定の複合物質 1g が、1 レントゲンの放射線を照射されたときに吸収されるエネルギ
ーは、93erg (0.93rad) となるので、人体に対し0.93radとなる放射線量に1Rep (物理的
レントゲン等価線量 Roentgen equivalent Physical の略) という単位を定めた。

ところで、同じ照射線量であっても組織が 1 g 当たりに吸収するエネルギーの量は、組
織の組成ごとに異なる。また、X線や γ 線など線種が異なると、1 レントゲンの照射当
たり組織が受けとるエネルギーの量は異なる。例えば、X線や ^{60}Co からの γ 線のような低
LET (線エネルギー付与=1cm当たりに生じるイオンの数=Linear Energy Transfer の略)
の放射線の場合、空気中の照射線量を表すRや生物に及ぼす影響を表すrもそれほど違い
はない。しかし、中性子や α 線のような高LETでは大きな違いが生じる。例えば、中性子線
は骨は透過しやすいが、筋肉などの水分の多い器官や組織にはほとんど吸収されてしま
うのに対し、電子線や β 線あるいは α 線などは、10万電子ボルト程度の低いエネルギーにな
ると、ほとんど全部皮膚などの人体表面の組織に吸収されてしまい、骨はもちろん筋肉な
ども透過できない。

このようなことを考慮して、ICRPは1954年に、組織や線種に関わりのない吸収線量
として rem (roentgen equivalent man の略) という単位を提唱し、線量当量 (dose equi
-valent) DE と表現することにした。rem は rad にRBE (人体各部の組織や器官ごとに異
なるリスク係数で、生物学的効果比 relative biological effectiveness の略) をかけて
重みづけしたもので、物理学上の単位ではない。1962年、ICRUはこれを修正し、DE =
DQN と表現することを提唱した。ここで、D は吸収線量、Q = LET の関数である。また、
当面 N = 1 とされた。後述するように、1990年に、線量当量 DE の定義は少し修正され、
実効線量と呼ばれるようになる。

放射線の生物学的効果を論ずるためにシーベルトが音頭をとり、1952年ストックホルム
で開催されたICRPとICRU、UNESCOの放射線生物関係機関との連合会議にマ
ラー (H. Muller; X線で突然変異が生ずることを実証し (1927年)、1947年にノーベル医
学生理学賞を授与された) を招聘した。他にも大勢の有名な生物学者も招かれたが、放射
線による遺伝的障害を防ぐ適切な勧告を出すには至らなかった。とはいえ、遺伝的影響を
考慮せねばならぬことは確認された。シーベルトは国際放射線医学会議 (ICR) から分
離した国際放射線防護機関を作ろうとして議論を重ねたが、結局は分離しないことになっ
た。彼はさらに国際放射線防護協会を設立すべきだという覚え書きも提出したが、徹底的
な議論の末、ICRPはICRと結びついたままであるべきだという点で意見が一致した。
いったんは取り下げたものの、シーベルトはICRの会期中または直前だけの活動ではな
く、放射線防護の常置組織をつくることを夢見て寄付金を募ったが、至るところで拒否に
あった。

シーベルトの指導でスウェーデンでは長い間ずっと低い線量限度を採用していたが、I
CRPもこれにならって1956年に週0.1レントゲンの線量限度に引き下げた。

Henriksdal 実験室が機能してきたので、シーベルトは1950年に自然 γ 線の連続測定装置
を製作し、逐次測定器の台数を増やしていった。また1957年には20気圧をかけることによ

って4Lの容積に減らした圧力電離箱を作ることにも成功した。同じ年予算を獲得し、バスでスウェーデン全土のバックグラウンド（自然放射線量）を測定するネットワークをつくって苔の放射能を調べ、地理的な分布を定量的に図示することができた。また、冬期に雪で覆われることによって γ 線が吸収されることや自然放射線は地方ではなく都会で目立って増加していることも明らかになった。折しも1950年代および1960年代にアメリカとソ連が大気圏で行った核爆発実験により生じた地球規模のフォールアウト（放射性降下物）が国際問題となり、彼の知識がそれを処理する際に役だった。1953年8月中旬のソ連最初の水爆実験によるバックグラウンドの増加を最初に記録したのは放射線物理研究所であった。シーベルトは1952年からいろいろな食料品を集めて貯蔵しており、1956年には「すべての食料品で核爆発実験によるフォールアウトが原因と思われる放射線量の顕著な増加が観察される」と報告している。しかし、この線量の増加がCsおよび他の放射性元素によるものであることは、1956年シカゴの科学者ミラーとマリネリによって同定されたのであった。以後、スウェーデンの比較的大きな研究所すべてにシンチレーションスペクトロメーターが設備されるようになったという。1945年から1955年の間の大気中の核爆発実験は57回であったが、1955年-1956年には44回、1956-1957年には実に128回も実施された。

ミラーとマリネリはすでにスチラの核兵器実験による放射能が地球の反対側の人体内で見いだされたことを発表しており、牛乳などの基本食品における放射性元素の濃縮の不安が広がった。それが基で1955年、国連事務総長直轄の専門委員会として、国連放射線影響科学委員会 (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR) が設立された。これは、一般大衆の強い不安を解消する方策を講じ、冷戦下での秘密交渉や会議の舞台の設営を目的とするものであった。シーベルトはジュネーブ会議場に、大災害時でも人体や食料品の線量を測定することができる（検査能力は1時間に100人）測定用バスを運んでいき、ハマーショルド国連総長にその装備を説明した。

軍事的な発展と平行して各国では原子力の平和利用が計画されていた。スウェーデンでも1954年にストックホルムの王立工科大学地区に第1号の原子炉が設置された。その開発に当たったエクルンド (S. Eklund) に、ヴァン・デ・グラーフ（核分裂に必要な中性子を作るための装置）の権威者マイネオードと 그레이を紹介したり、放射線医学の分野で必要な外国との交流の手引きをしたりしたのはシーベルトであった。原子炉は首都の一角に建設されたので、原子炉が稼働する前と稼働中との地域の放射線の測定はシーベルトの共同研究者ベナー (S. Benner) との緊密な協力の下で実施された。ベナーは1940年代後半以降に原子力に従事している職員とりわけ放射性元素と接触のある人の血液像検査を定期的に実施し、大線量の放射線を受け放射線休暇をとったとしても血液像には変化が生じないことを明らかにしていた。シーベルトとともに彼は、万一、原子炉から放射能が洩れても処理し制御できるという見解をもっていた。

こうして放射線物理研究所はルーチン化した監督業務が増大し、研究業務が圧迫されるようになってきた。そこで1951年、スウェーデンの内務大臣は、5人のメンバーからなる放射線防護委員会を発足させた。自身も委員の1人であったシーベルトは、自分自身の仕事の負担とか定期的な監視業務の負担を軽減しようとした反面、研究所のあらゆる研究部門の管理を保持しようとする矛盾した期待を委員会に寄せたのだった。研究所の長所は、管理、医療物理、研究との間の緊密な共同作業にあるといって譲らなかつた。この伝統の故にイギリスを除いてスウェーデンほど放射線物理の強い国はどこにもなかったのである。

彼は国際的な経験から、研究を伴わず単に機能的なだけでは放射線の防護はうまく行かないことを知っていた。それでも1958年、委員会は管理業務と分離された国立放射線防護研究所（SSI）の設立を提言し、国会はこれを承認した。そして研究所にたくさんの職員が供給された結果、地方の需要に応ずることができるようになった。

これらの委員会と相まって、人工放射線源の急速な増加に伴う放射線防護の法律を作り直す必要から、1956年に原子力法が、1963年に原子力船の事故災害時の補償を盛り込んだ特別立法が制定された。

10 ICRP委員長時代

シーベルトは1956年のICRPの委員長に就任し（～1962年）、2年後にはUNSCEARの委員長にもなった（1958～1960年）。彼は従来の4つの委員会を廃止し、4つの特別委員会「放射線の生物学的作用に関するもの」「内部被曝に関するもの」「体外被曝に関するもの」「委員会勧告の適用に関するもの」を発足させた。彼は財政的に独立した組織を作ろうと努力して実らなかったが、現存する機関の財政的基盤を強固にすることには成功した。またICRPへの出資金を増やして独立させることで、その存続を可能にした。ICRPは、大胆にも全公衆の限界値を提案したが、批判的な人々は、それでも長期間にわたる放射線の影響の見積りが低いと考えたので、論争が長く尾を引くこととなった。

1958年から1965年まで、ICRPは、許容線量として放射線作業に従事する職業人に対して毎年5rem（約50mSv）、一般公衆に対してその1/10を勧告した。

1959年4月UNSCEARは新たにICRPとICRUに対して、電離放射線の医学的利用に由来する放射線量について詳細な調査をするよう要請した。スウェーデン代表としてシーベルトやリンデル、ラーソンが17名のメンバーの中に加わっていた。ラーソンは研究メンバーの秘書官として活躍した。1960年末にグループは「医療行為で生ずる電離放射線による人間の被曝特に放射線発癌について」の報告をUNSCEARに提出した。これは放射線物理研究所の研究成果によるところが大きかったという。

1957年、リンデルがICRPの秘書官に選ばれ、以後1962年まで秘書官は放射線物理研究所から選出された。同研究所放射線物理部長トレウスはICRUの仕事に参画し、パリの度量衡国際課での電離放射線の標準測量諮問委員会への研究所代表でもあった。核物理学部長ヘドグランはヨーロッパ原子力機関でのいろいろな放射線防護問題を扱う会議に参加したし、トレウスはウィーンの国際原子力機関でγ線の標準化に関する会議を開催した。これらはいうまでもなくシーベルトの推挽によるものである。1962年にシーベルトとリンデルがその地位を退いたが、2人ともICRPの親委員会のメンバーとして留まった。

1958年にシーベルトは、かつて運動してうまくいかなかった国際的防護機関の設立を再び実現させるべく懸命に努力したが、資金の援助が得られず否定的な結果に終わってしまった。シーベルトの国際舞台での活躍は、スウェーデンでの仕事をほったらかして関わっていたという、内部批判を招くことにもなった。

11 原子炉事故対策委員会

1957年、イギリスのウインドスケール（Windscale）の原子炉で事故が発生し、放射能の雨は風向きにより全ヨーロッパに広がり、向きを変えてスカンジナビアにもやってきた。このためシーベルトは、内務大臣からの要請でスウェーデンでの原子炉事故時の助言をす

る専門委員会（K R A）の発足を促され、1960年代に入って業務を開始した。彼は、もし原子炉事故が起こり、万一破滅的な事態が起きても、完全無欠の知識を提供できるように、いろいろな研究所や大学の研究者からなるグループをつくろうとした。

シーベルトはソ連のノバヤゼムリア島での核爆発実験の失敗に備えて、北欧各国での放射線監視の協力態勢づくりに奔走した。1961年春にはスウェーデンに降りかかるフォールアウトの処理対策を盛り込んだ独自の準備計画を用意した。それには地震研究所からの連絡による警報伝達網、気象学者による降灰の予想と中央司令部や県知事、地方ラジオ局との連絡方法、一般住民に対するオリエンテーションの方法、航空機等による継続測定、強化人員の派遣等が盛り込まれていた。

1958年にデンマークの放射線保護局は、Salttholm での飲料水の放射能値が I C R P が作成した種々の核分裂生成物の基準値を越えていることから、この地域の水の使用を禁止したことがあった。北欧の専門家たちがストックホルムやコペンハーゲンに集まって発生状況を討論した。結果的には I C R P 勧告の基準値を越えていないことが確認されたが、1960年代には北欧専門家会議が10回にもわたり開催された。その牽引力となったのは、いうまでもなくシーベルトであった。

彼は、1956年に提唱されていた専用の行政機関である国立放射線防護研究所（S S I）を、自分の定年前に再組織化することにした。その結果、放射線物理研究所は普通の大学の研究所に戻り、新たに独立した放射線生物研究所が設立されることになった。

1962年の春には、シーベルトの発案で科学アカデミーに放射線防護基金を設置する決定がなされ、基金から国際的な放射線防護の仕事で価値ある業績をあげた人に金メダルが贈られたのだった。

彼は1963年に67歳となったが、例外が認められて、1965年の夏に年金生活に入るまでの2年間自分の定年を延期することができた。定年後も官職を持っていたし、一家はソルナにある研究所近くの新築した家に移り、秘書もそのまま留まったのである。1966年12月1日、シーベルトはカロリンスカ病院で胃の手術を受けたが、2時間後に血栓症を併発して、予想もしなかったほど突如として鬼籍に入ってしまった。

12 人となり

シーベルトは背丈が高く、満20歳を過ぎてから体重が100kgを下がることなく、堂々とした体躯をしていた。当然声は力強く、それだけで特別な権威を与えた。鋭い眼差しは太い眉毛と広い額の下にあって、相談に来る人に尊敬の念を抱かせるに十分であった。彼が映っている写真はどれも、口をぎゅっと食いしばり、真剣な眼差しをしていた。本人は写真に撮られるのが嫌で、神経質になり緊張したためだと説明していたという。

彼は最初の夫人と13年間結婚生活を営んだ後、自らの家を財産分与として与え、翌年アストリド・エステルグレンと再婚した。翌年の1933年にロルフ（Ⅱ世）が、1935年にジョアンが、1938年にクリスチナが授かった。ラジウムヘムメットの近く、市の南にあるクリップ通りに居を移し、1938年に放射線物理研究所がソルナに建てられるとその4階に引っ越し、定年の1965年まで家族と家政婦とともに住んだ。彼の最初の夫人が癌で亡くなると、その子どもたちも官舎に引っ越ししてきた。アストリド夫人との間の子どもたちは高等専門学校で学び、休暇になるとオステルイェートランド県のトゥバルトープの別荘で過ごした。彼女は子どもたちや屋敷、1,000haの土地の面倒を見るために、トゥバルトープに住み、ス

トックホルムとの間を足繁く往復した。

シーベルトは評判の子ども好きで、できるだけ子どもと過ごそうとしたので、家庭での招待パーティは稀であった。趣味は音楽でパイプオルガンを演奏したが、コンサートにはほとんど出かけなかった。幼児期から蝶の蒐集が好きで、アルフェンとキルナ地球物理観測所で働いたとき、捕虫網を持って高原を駆け回ったという。彼は色弱であったといわれるが、後半生は花特にサボテンに凝って温室を作ったほどだという。別荘には200Vの自家発電施設を設置し、製材所と工場とを所有していた。

シーベルトは創造力と独創性に充ち溢れていた。いろいろなことに関心を抱き、触れ合うものすべてを自分の力の及ぶ限りいい方向に変えようとした。彼は、高圧的なボスとか、信頼のおける頼もしい友とか、組織づくりのうまい人、意志の強い人等々とさまざまな感想をもたれたようである。彼自身は、彼の見解をすべて無批判に受け入れる人を喜ばなかった。また気前がよくいつでも支援の手を差し伸べたし、合同金曜会では彼はコーヒーとビスケットで所員をもてなし、各部門の融和を図ることに心を砕いた。彼は所員の些細なことまで詮索し、思わぬ経済的な困窮などを聞きつけ、救済の手を差し伸べたという。生涯の後半になるにつれてますます人の話をよく聞くようになったため、国際的な舞台で他の人々の協力を得ることができたのだった。

彼はどんな忙しいときでも、アイディアが湧いてくると書き留め、設計図を書いた。器具とか装置をつくり出したり、考案したりすることは子どものころからの楽しみであったようである。

いずれにしても、史上最悪のチェルノブイリ原発事故を世界で最初にキャッチし、ソ連の隠ぺい作戦を不能にしたのがスウェーデン全土の放射線観測網であり、それを作ったのがシーベルトその人だった¹⁾ということ覚えておくことは大切であると考える。

1.3 国際単位“シーベルト”

ICRPは、1977年の勧告で、radはGyに、remはSvに改められ、RepもRも廃止された。もちろんGyはR、H.グレイに因み、Svはシーベルトに因んでいる。1Sv = 1Gy × Qである。人名に由来する単位を制定する場合、故人に限るということで、時あたかも放射線防護に粉骨砕身努力したシーベルトが急逝したと相まって彼は単位系にその名前を残す荣誉に輝くことになった。

またこの勧告で、実効線量当量という新しい概念が導入されて、年間5mSvという一般公衆のための線量限度が発表されたが、その背景に、線量とは時間的に積算した量であり、どんなに被曝線量が低くても何らかの障害が起こり得るという仮定があった。

1977年の勧告後、広島・長崎で被曝した線量推定値の大規模な見直しがなされ、1990年の勧告では実効線量当量が単に実効線量と呼ばれ、それは

$$\text{実効線量 (Sv)} = \text{等価線量 (Sv)} \times \text{組織荷重係数} \quad (1)$$

$$\text{ただし、等価線量 (Sv)} = \text{組織の放射線吸収線量 (Gy)} \times \text{放射線荷重係数} \quad (2)$$

で定義される。(2)式の放射線荷重係数は表1のように²⁾、X線の1からα線の20までの9種類が、また(1)式の組織荷重係数は表2のように²⁾、ヒトの皮膚や骨の表面についての0.01から生殖腺についての0.20まで、および残りの組織などについて13種類が定められた。

組織荷重係数は表2のように、男女同数幅広い年齢層で構成された集団について一率に定めた係数で、1シーベルト当たりのリスクの推定割合では、長期間の被曝による障害の

表 1 1990 年勧告の放射線荷重係数

放射線の種類とエネルギー	放射線荷重係数
すべてのエネルギーの엑스・ガンマ線	1
すべてのエネルギーの電子・ベータ線	1
5 区分したエネルギー範囲の中性子線	
10 keV 未満	5
10 keV から 100 keV	10
100 keV を超え, 2 MeV 未満	20
2 MeV を超え, 20 MeV 未満	10
20 MeV 超	5
2 MeV を超えるエネルギーの陽子線	5
アルファ線やその他の重粒子線	20

注: 吸収線量 (グレイ) × 放射線荷重係数 = 等価線量
 等価線量 × 組織荷重係数 = 実効線量

表 2 1990 年勧告の組織荷重係数

組織・器官	組織荷重係数
甲状腺	0.05
食道	0.05
胃	0.12
結腸	0.12
肺	0.12
乳房	0.05
肝	0.05
ぼうこう	0.05
生殖腺	0.20
骨の表面	0.01
赤色骨髓	0.12
皮膚	0.01
その他	0.05

注 (1) 表の値は性と年齢についての平均である。

(2) 「その他」は残りの組織・器官で、脳、胸腺、脾(すい)、脾(ひ)、腎、副腎、小腸、子宮および筋肉を含む。

これらのどれかが選択的に拡大する場合、は特別な係数を用いることを勧告している。

発生率は短時間の被曝による発生率の半分になるという大胆な仮定が入っている。さらに決定論的な影響を及ぼすしきい線量は、一般に数グレイの吸収線量、あるいは1年間に1グレイ程度の吸収線量率(数百 mSv 相当)となるだろうと予想されている。

また、組織ごとに一般公衆の被曝限度を年間 1 mSv とし、放射線施設では、実効線量を 20 mSv 以下とし、職業上の線量限度を5年間に 100 mSv と厳しくした²⁾。実効線量も吸収線量もともに J/kg という同じ次元の量であるが、実効線量は放射線防護関係にのみ使用される量で、吸収線量との混同を避けるためにシーベルトという特別な組立単位を設けたのである。シーベルトを用いれば、放射線の種類やエネルギーのことをいちいち考えなくても、人間が放射線をどれくらい受けても安全かどうかを比較することができるのである。

1 mSv の被曝は約7,000億個の放射線粒子を浴びることに相当するが、粒子の種類や人の体重により健康リスクが異なることを考慮している。例えば、大きな成人と小さな子どもがある放射線場に並んで立つと、成人の方がより大きな放射線を浴びるが、これによる2人のガンリスクはほぼ同じであるから、mSvで表せば同量の放射線を浴びるということになる。放射線を0.01 mSv 浴びるごとにガンで死ぬリスクが400万分の1増大する。これはわれわれの余命を2分間短縮することに対応し、タバコを2,3服(2,3口)吸う(1本吸うと余命は10分間短縮する)とか道路を5回横断する(道路横断時に死ぬ平均確率(アメリカでの値)に基づく)、体重過剰の人が20カロリー分(1/4枚のパンとバター)余計に食べる、自動車で8 km 走るとかいった行為によるリスクと同じである³⁾。ある調査では、アルコールを1/5合飲むと、遺伝的影響の観点からは1.4 mSv の放射線被曝に等しく、1杯のコーヒーは0.024 mSv に等しいという³⁾。

グレイとベクレルは1975年の国際度量衡総会で、シーベルトは1979年の国際度量衡総会でそれぞれS I単位となった。

ここで、錯綜している単位についてまとめておきたい。

<照射線量と空気中のイオン量>

1レントゲン=1 R = 空気1キログラム当たり、100万分の258 C の電気をもつイオンを発生させる照射量(当分の間使用される予定)

<放射線を出す能力（放射能）の単位>

1ベクレル=1 Bq = 毎秒の崩壊数が1個であるときの放射能

1キュリー=1 Ci = 3.7×10^{10} Bq $\approx$ 1 g のラジウムの放射能

<吸収線量>

1グレイ=1 Gy = ある物質がある点において、その物質 1 kg 当たり 1 J のエネルギーが吸収されるとき放射線量

$= 1 \text{ (J/kg)} \approx$ 数万年分の自然放射線量に相当する吸収線量 $= 100 \text{ rad}$

<放射線防護上の線量単位>

1シーベルト=1 Sv = 100 rem $\approx$ 自然放射線の500年分の身体内での線量

1.4 身の回りの放射線とその量の比較²⁾

身の回りにはさまざまなところで放射線が利用されている。折角シーベルトについて紹介したのだから、本節ではついでに気になる放射線についてまとめておくので参考にしてください。よく利用されている放射性物質の核種とその半減期を表3に、その応用分野や代表的線源を表4に示す²⁾。

半減期とは安定状態にない粒子の寿命の一種で、その状態の粒子数が $\frac{1}{2}$ に減少するまでの時間をいう。ただし、個々の原子はバラバラと不規則に壊変するので、半減期は粒子の平均的な減り方を表しているわけである。10半減期も経過すると、生き残る確率は $1/1024$ となって、放射能の影響は減ってくる。半減期が特に短い核種は、診断に使用しても患者の被曝線量はほとんど無視できる (^{207}mPb , $^{81\text{m}}\text{Kr}$, $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{67}Ga , ^{123}I)。質量数の脇につけられている記号 m は、metastable (準安定) の頭文字である。原子炉内では200種類以上の放射性の元素が生成する。使用済みの燃料棒の処理から発生する高レベル放射性廃棄物は少なく、1トンの燃料から発生する量は約100リットルといわれる。原子力発電所では、この高レベル放射性物質をガラス固化し、地中深く貯蔵管理している。放射能が約1万分の1に減るまでには1千年もかかるので、半減期を短縮する研究が行われているという。

表3 主な核種とその半減期

原子番号	核種名	記号	半減期
1	トリチウム	^3H	12.3年
6	炭素14	^{14}C	5730年
8	酸素15	^{15}O	2.037分
15	リン32	^{32}P	14.26日
27	コバルト60	^{60}Co	5.27年
28	ニッケル63	^{63}Ni	100年
31	ガリウム67	^{67}Ga	3日
36	クリプトン81m	$^{81\text{m}}\text{Kr}$	13秒
38	ストロンチウム90	^{90}Sr	28.8年
43	テクネチウム99m	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6時間
53	ヨウ素123	^{123}I	13.2時間
53	ヨウ素131	^{131}I	8.04日
55	セシウム137	^{137}Cs	30年
77	イリジウム192	^{192}Ir	74日
82	鉛207m	$^{207\text{m}}\text{Pb}$	0.81秒
86	ラドン222	^{222}Rn	4日
88	ラジウム226	^{226}Ra	1622年
90	トリウム232	^{232}Th	141億年
92	ウラン235	^{235}U	7億年
94	プルトニウム239	^{239}Pu	25000年

表4 放射線と放射性物質の医学、産業、研究への応用

応用分野	分野別代表技術	代表的線源
放射線撮影技術	産業用放射線撮影 (非破壊検査)	0.5TBq, ^{192}Ir
	医学診断用放射線撮影	70 kVp X線
放射線分析技術	蛍光エックス線分析	X線, ^{109}Cd 等
	電子捕獲法による分析 中性子捕獲および放射化分析	400MBq, ^{63}Ni $^{241}\text{Am}-\text{Be}$, ^{252}Cf
放射線計測技術	透過型厚み計	^{137}Pm , ^{137}Cs
	散乱型厚み計	4GBq, ^{241}Am
	蛍光エックス線厚み計	500MBq, ^{55}Fe
	透過・散乱レベル計	^{241}Am , ^{60}Co
	熱中性子水分計 選択吸収分析計	$^{241}\text{Am}-\text{Be}$, ^{252}Cf ^{241}Am , ^{55}Fe
放射線照射技術	遠隔放射線治療	500TBq ^{60}Co
	近接放射線治療	^{137}Cs , ^{60}Co , ^{226}Ra
放射性物質利用技術	放射線滅菌、架橋、硬化、重合反応、食品保存	数100PBqの ^{60}Co , ^{137}Cs または X、電子線
	アイソトープ・トレーサ技術	$^3\text{H} \sim ^{203}\text{Hg}$ まで多数
	放射性医薬品による診療	$^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{123}I
	自発光性の燃料 放電制御、トリウムの利用等	^3H , ^{147}Pm ^{147}Pm , Th
その他の放射線技術	静電気除去	^{210}Po
	煙検知器等	^{241}Am

事故を起こさない限り、原子力発電所からの放射線の安全管理は、化石燃料を燃やしている火力発電所から放出される二酸化炭素や放射性物質などの有害物質の管理よりも容易である。現在、環境に放出されているかなりの量の自然放射線は、大部分が火力発電所や地熱発電所からのものである。

毒性の強いポロニウムのような α 線源やトリチウムのような β 線源は放射性医薬品としては使えない。脳や骨などの診断には透過力の強い γ 線を出す ^{99m}Tc が、甲状腺にはそこによく集まる ^{123}I が、吸い込ませて肺機能を調べるのに便利なガス状の ^{81m}Kr や ^{133}Xe が、ガンにはそこによく集まる ^{67}Ga が用いられている。 ^{123}I は ^{131}I （半減期8日）より高価であるが、半減期が13時間と短く、患者の被曝時間を減らせるので使用量が急増しているという。

地球上の人々が1年間に平均して浴びている約3.4 mSvの被曝のうち、約70%は自然放射線で、人工放射線による被曝のほとんどは病気の診断のための被曝で、約29%を占める。約0.3%は核実験の名残で、残りは推定誤差と家庭用品によるものだという。

日本では過去20年間でX線検査件数は約3倍になったが、被曝線量は半に減少したという。それは、不必要なX線を幅広く放射しない高性能X線発生装置、X線に対して高感度をもつ増感紙とX線フィルム、蛍光板の代わりにX線によって発生する微弱な光を増幅してモニターテレビに写し出す、X線テレビカメラやコンピュータ撮影法の開発などによって可能になった。1992年報告の推定では、先進国で診断用X線によって年間被曝する1人当たりの実効線量は1 mSv、歯科では0.01 mSv、核医学では0.05 mSvである。しかし、医療被曝線量は漸増して、日本では1.6 mSvに達しているともいわれる。

透過性により、産業用非破壊検査技術として溶接の良否の判定や、透過型厚み計、容積計、水準計などに使われている。例えば、チューインガムや粘着テープ、絆創膏、鋼板、生乾きの紙の厚さ、あるいは葉タバコの詰め具合やガソリンや軽油などのイオウ含有量は放射線厚み計によってきわめて正確にコントロールできるようになった（表4参照）。放射線の感度は高く、ごく微量しか使われないので、厚み計の放射線による被曝は無視できる程度だという。 ^{241}Am はイオウという元素だけに特に敏感に反応する特定のエネルギーのX線を放出する放射性核種であるため、石油中のイオウの量の測定や煙感知器に有効なのである。

天然ゴムの放射線加硫では、 ^{60}Co からの γ 線を40～50グレイ照射して行われている。イオウを使用しないので、焼却などの廃棄物処理時にも有害な SO_x を放出せず、この方法で製造したゴム製品は、柔らかな上、透明性にも優れており、医療用のゾンデやカテーテル、人工臓器部品などに用いられている。ある高分子化合物に発泡剤を混ぜてシート状にしてから電子線を照射すると、発泡ポリオレフィンができる。スリッパや自動車の内装クッション材、風呂用マット、冷蔵庫等の各種断熱材、救命用ライフジャケット、包装材料と応用範囲が実に広い。電子線硬化塗装や電子線排煙処理は環境保全の促進に大いに威力を発揮しているが、ここではこれ以上触れない。

ジャガイモやタマネギの発芽防止などに ^{60}Co や数百万ボルト級のエネルギーのX線が利用されていることはよく知られている。どのような食品も全体的な平均線量が10 kGyまでなら、いかなる毒物的危険もないといわれる（国連食料農業機構、国際原子力機関および世界保健機構の食品照射合同専門医委員会の見解）。ジャガイモの発芽防止の場合、100 Gy程度の放射線を照射しているという。

また蛍光灯のグロー点灯管は内部電極の一部に ^{63}Ni やプロメチウム147(プロメチウムPmの安定核種は存在しない)という β 線を出す放射線同位体をメッキしてあるが、 ^{147}Pm などのメッキ量は37 kBq 内外で夜光時計の文字盤や指針に塗る量よりはるかに少なくてすむ。そして β 線は点灯管のガラスの壁で遮られる。その放射能は、数千本のグロー点灯管を壊して、電極の放射性物質を削り取り1週間露光させたとしても、写真フィルムにやっと感光する程度のものである。

テレビの高周波部分の要所とか無線通信機のアンテナ端子や電話ケーブルの途中にある分配器の中に取りつけられているアレスターという放電管は、異常高電圧の放電を開始させる引き金として、微量の ^{147}Pm やトリチウムが封入されている。

ガラスをつくる原料にウランの炭酸塩を入れると、透明度が増すことは古くから知られていた。また、酸化ウラン塩を混ぜると、その量によって黒、ブラウン、緑、黄色から赤色までの透明な着色ガラスができるという。花瓶や飾りガラス、人工宝石にはウランガラスが多く、光学ガラスの原料にはウランやトリウムが含まれている。陶磁器に輝くように美しいオレンジ系の色をつけるうわ薬として、ウランが利用され続けてきたし、七宝焼のうわ薬にもウランやトリウムが使われてきた。うわ薬を使った食器に酢の物やドレッシングサラダなどを盛りつけると、ウランが酸に溶け出すこともあるという。

害虫の雄のさなぎに適当な量の放射線を照射しておくと、その成虫は雌と交尾はするが授精させることはできなくなる。不妊虫放飼というこの方法で、米国では、家畜の体内に産卵するラセンウジバエをフロリダ州で絶滅させた。キュウリやメロン、スイカなどに産卵するウリミバエの根絶作戦は、世界最大規模で沖縄諸島と八重山群島で行われ18年ほどで達成された。

放射線医療が有効な病気はガンであることが分かってきて、よりいっそう患部へ集中的に放射線を照射する方法が開発されていった。ラジウムを密封した針状の線源を舌ガンなどの患部に直接刺入するラジウム近接照射法やコバルト60、セシウム137、イリジウム192などを封入した針を差し込む方法、固定したチューブを通してこれらの放射線源をリモコンで送り込む方法などがそれである。さらに身体内部のガン病巣に深く入射させるために、コバルト60遠隔治療装置(1993年現在日本国内で約350台)、医療用ベータトロン、電子を加速するリニアック(同じく1993年現在で約550台)、中性子線治療を行うための大型サイクロトロンや原子炉等が利用されてきている。

このように近年、核医学が発達し、ガンマカメラやポジトロンCTまで使用されるようになっていく。患者に γ 線源を直接投与してそのエミッションをCT画像にするのがガンマカメラであり、X線CTより被曝量ははるかに少なく高感度、高分解能であるため局部脳血流の断面像など生理的、生化学的な脳の病変を検出することができるという(インビボ(「生体内で」の意)診断と呼ぶ)。

また、ポジトロンは ^{11}C (半減期約20分)、 ^{13}N (約10分)、 ^{15}O (2.037分)のような核種から放出される。ポジトロンを投与された身体内の臓器やガンなどからは、ポジトロンが電子と衝突して消滅すると正反対の方向に2本の γ 線が出る。このときの γ 線のエネルギーは511 keV という一定のエネルギーで、反対方向にある検出器でそれぞれの到着時間を測定して、ポジトロンが消滅した時間を測定することができる。コンピュータを使ってこれらの位置をすべて計算することによって、ポジトロンが集まった臓器やガンなどの形状を消滅放射線が発生した無数の点の集合として立体的に描き出すことができるのであ

る。しかし、このような単寿命の核種は製造すると同時に使用しなければならないため、サイクロトロンが附属している必要があり、日本では1993年現在で20カ所の病院で設置されている。ポジトロンCTはガンマカメラと比べても患者の被曝量は著しく小さいが、患者を被曝させないで診断するのが理想である。

それがMRI (magnetic resonance imaging) と略称される核磁気共鳴を利用した診断装置が普及しはじめた所以である。また、患者の血液や尿などの資料中の微量成分が放出する放射線を目印にして微量な成分の変化量を定量する方法が実用化されている。このように試験管などのガラス器具に患者の体内から採取した試料を入れ、これに放射性試薬を混ぜ合わせて検査するという意味で、この方法をインビトロ核医学診断と呼ぶ(ビトロは「ガラスの」を意味するラテン語で、長崎のガラス玉、ビードロにも使われている)。

以下に、実効線量の大きさの例をメモ風に列挙しておく：

- ・関東ローム層地帯の年間放射線量＝ 0.2～0.4 mSv
- ・関西の花崗岩地帯の年間放射線量＝ 0.8～1.2 mSv
- ・自然放射線源からの年間被曝線量当量≒2.4 mSv
- ・胸部間接撮影 皮膚～1 mSv, 肺～0.7 mSv
- ・胸部直接撮影 間接撮影の～1/7, 腹部～2 mSv
- ・胃腸など腹部の透視～44 mSv/min
- ・バリウム注腸透視～49 mSv
- ・高度1万メートルでの被曝～5 μ Sv/h (日本-欧米間を1往復したとき：30～100 μ Sv)
- ・グロー点灯管からの放射線<0.1 μ Sv
- ・ペンダント (毎週10時間つける場合)：40 mSv/年
- ・差し義歯 (陶磁器製)：10 mSv/本・年 というデータあり
- ・眼鏡のレンズとコーティング (アメリカのレンズメーカーの自主規制) からの放射線 <5 mSv/年

シーベルトが心を砕いた放射線防護の思想は、近年洗練され、安全性が重視されるようになってきたと思われる。彼は、今日のような放射能が現在のような普及を見ることを予想して厳しい放射線管理を心がけたのではなかろうか。本稿で、国際単位系になぜ Sv が用いられるようになったかを、ある程度理解していただければ幸である。

参考文献

- 1) Hans Weinberger著, 山崎岐男訳, 『放射線防護の父 シーベルトの生涯』, 考古堂, 1994.
- 2) 近藤民夫著, 『わかる放射線』, 共立出版, 1992.
- 3) バーナード・L・コーエン著, 近藤駿介監訳, 『私はなぜ原子力を選択するか』, E R C出版, 1994.

物理教育 第42巻 第2号 (1994)

連載 科学史

放射線の一世紀と史跡

菊池 文 誠 東海大学理学部, 259-12 平塚市北金目 1117

放射線が発見されて以来 100 年になる。この放射線を研究することにより現代科学が形成され、人類は多くのことを知り、その知識を良くも悪くも利用してきた。本稿ではそれらの歴史的流れと関連の史跡や実験装置のある施設を紹介するとともに現代社会との関わりについても考える。特に日本に関することについて多く触れる。これらのことが教育から欠落している現実こそ重大な問題である。

1. はじめに

現在の宇宙論によれば 150 億年ほど前のビッグバンが宇宙の始まりとされている。それ以来宇宙空間にはさまざまな種類の放射線が存在し、46 億年前に生まれた地球を構成している物質にも多くの放射性元素が含まれている。地球上の生物は原始生物の時代からこれらの放射線にさらされながら進化を遂げてきた。しかし、人類が放射線の存在を知ったのは 19 世紀の末、今からわずか 100 年ほど前のことである。1901 年に制定されたノーベル賞の最初の物理学賞を受けたのは X 線の発見者のレントゲンである。それ以来放射線およびその関連の研究が進み、電子や原子、そして原子核の構造と性質が解明されてきた。このことはその後のノーベル賞の歴史を見れば明らかであり、放射線関係の研究に対して多数の物理学賞、化学賞が与えられている。医学・生理学の分野でも X 線による突然変異の研究、X 線回折による DNA の構造の解明、X 線とコンピューターによる断層写真撮影などが授賞の対象となった。つまり放射線の研究によって現代科学が形成されたといっても過言ではない。

このような放射線や原子核の研究の歴史の流れから、人類は原子核の中から莫大なエネルギーを取り出すことができた。不幸にも核兵器が生まれ、一方、エネルギー危機が叫ばれる中で、世界中で 400 基を超える電力発電所が稼働し、その安全性をめぐる議論も活発である。また、我々の周辺で放射線は、医療面における X 線やラジオアイソトープの利用を始め、産業の各分野や基礎科学の研究にも重要な役割を果たしている。日常生活でも多くの放射線関連商品を使用している。空には原子炉を積んだ人工衛星が飛び、海中では原子力潜水艦が活動し、沈んだままのも何隻かある。このような状況のなか

で我々は生活しているので、放射線との共存と安全の確保は不可欠であり、正しい知識を多くの人に教育することは極めて大切である。ここに放射線研究の歴史を振り返りながら各地にある関係の史跡を紹介するとともに現代における意義を考える。

2. X 線の発見と放射能の発見

ドイツのほぼ中央部、フランクフルトから鉄道で約 1 時間半ほどのところにヴュルツブルグという落ち着いた美しい小都市がある。交通の要衝でドイツ有数の観光ルートであるロマンチック街道の起点でもある。中世にはカソリックの大司教の支配する都市として栄えた。また、幕末の長崎に住み、科学の面で日本の近代化に大きな影響を与えたオランダ人の医師、フォン・シーボルトはここで生まれ、ヴュルツブルグ大学で医学を学んでいる。

この駅前、バスターミナルの少し先にヴュルツブルグ大学の物理学教室の淡いグリーン色の 3 階建ての校舎がある。1895 年 11 月、この建物の 2 階左端の部屋で



写真 1 レントゲンが X 線を発見したヴュルツブルグ大学物理学教室、2 階の左端にそれを示す記念の文字がある



写真2 レントゲンの研究室、当時のまま保存されている

レントゲンによって気体放電と陰極線の研究中に偶然X線が発見された^{1,2)}。内部は事前に依頼すれば見学することができる。彼の実験室が当時のままの姿で保存されている。まさに現代物理学誕生の場所である。

同じ頃、独立にX線や陰極線の研究をしていた人にはドイツのレナート、イギリスのクルックス、ブラッグ父子などがいる。

レントゲンはあとで述べるようにライン河下流のレムシャイト・レンネップという町に生まれ、3歳のときにオランダのユトレヒトに移住し、その地の工業学校を経てチューリッヒ大学を出てすぐに有名なクント教授の助手としてこのヴュルツブルグ大学に勤務している。その後各地の大学を転々として20年後にコールラウシュ教授の後任の物理学教授として再びこの大学に戻っている。

彼の生まれ故郷のレムシャイト・レンネップはルール炭坑地帯の中央部でケルンからローカル鉄道で1時間ほどのところにある。刃物で有名なゾーリンゲンの隣町である。中世の城壁の跡が外周道路となり、駅から半径数百メートルの市街地を横断して徒歩15分ほどのところにレントゲン博物館がある。

博物館の内部は三つの建物からなり、X線についてのすべてにわたって、基礎から応用までのそれも初期のものから最近のものまで見事に整理されて展示されている。教育的配慮もいき届いていておよそX線についてはすべて知ることができる。レントゲンがヴュルツブルク大学で最初にX線を発見した装置もここにある。付近には彼の生家も残っている。

彼の墓地はフランクフルト北方のギーセンというところにあり、そこには化学の教育の近代化で画期的な成果を挙げ、多くの弟子を育てた化学者・リービッヒの実験室を保存したリービッヒ博物館がある。

このX線の発見をきっかけとして研究は、ラウエ、

ジグバーン、モーズレーらに引き継がれ、X線分光学や結晶解析などを通じて原子の世界の扉が開かれた。

イギリスのオックスフォード大学に科学史博物館があり、古い天文関係や光学機器の多くのコレクションがある。ここにモーズレーが使用したX線分光器がある³⁾。特性X線のスペクトルと原子番号の間の簡単な関係はモーズレーの法則として知られ、元素の周期律表の完成に大きく貢献した。惜しいことに彼は若くして第1次世界大戦で戦死したためノーベル賞は受賞できなかった。

X線の発見された翌年、バリの工芸学校教授アンリ・ベクレルはウラニル塩の蛍光作用の研究中に偶然のことからウランがX線によく似た強力な放射線を出すことを発見した。

その後、ピエール、マリー・キュリー夫妻は苦心の末、ウラン鉱石のピッチブレンドの中からウランよりもはるかに強力な放射性物質のラジウムを抽出するのに成功した。そのような放射線を出す性質の物質は「放射能」と呼ばれるようになった。この放射線のことは早くイギリスのラザフォードらによって研究され、アルファ、ベータ、ガンマの3種類あることや崩壊の法則やなどが解明された。ピエールは事故で早く亡くなったがマリーはその後も研究を続けた。

バリのソルボンヌ大学（現在のパリ大学）ではキュリー夫妻の業績を評価し、ラジウム研究所を設立した。これは現在はキュリー研究所と名称が変わっているが大学の一角に残っている。ラジウムを発見した歴史的な建物はよく知られているように当時でもバラックだったので今はなく、跡地は駐車場になっていて、それを示す小さな記念碑が残っている。研究所の中庭にはキュリー夫妻の胸像があり、建物の中には初代の所長だったマリー・キュリーの部屋が当時のままの姿で保存されている。ノーベル賞の証書も家具の上に無造作に置かれている。隣の部屋には数々の実験装置が保存されている。母



写真3 キュリー研究所、キュリー夫人の部屋、当時のまま保存されている

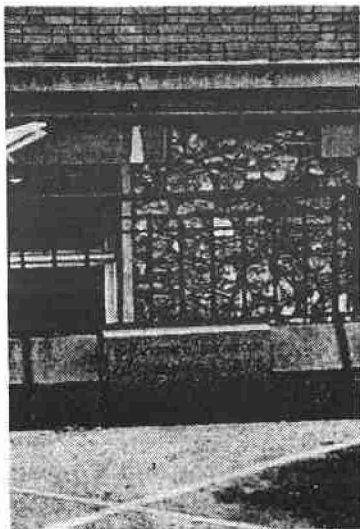


写真4 キュリー夫妻がラジウムを抽出した場所、現在は駐車場になっていてそれを示すレリーフがある

親の後を継いで所長になったイレヌ・キュリーとジョリオ夫妻のものが多い。数々の論文も展示されている。この夫妻は事実上中性子を発見していながら気がつかなかった。もし、母親のマリー・キュリーが生存していたやどうであっただろうか。後に述べるように若き発見者チャドウィックにはラザフォードという偉大な師がいたのである。

しかし、二人にはその後人工放射能の発見という輝かしい業績があり、これがキュリー家に三つ目のノーベル賞をもたらした。このようなフランスの放射能研究の伝統が今日の原子力発電大国へとつながったのである。

3. 栄光のキャベンディッシュ研究所

19世紀後半のケンブリッジ大学では過去にニュートンがいたにもかかわらず、科学研究が低迷していた。そこで実験物理学の研究所を設立することになり、名譽総長のデボンシャー公爵・ウィリアム・キャベンディッシュ（万有引力定数を測定したヘンリー・キャベンディッシュの傍系の子孫）が基金を提供し1874年に研究所が創立された。初代の教授（所長）には当時最高の科学者で熱力学の大家ウィリアム・トムソン（後のケルビン卿）が予定されたが遠方に居住していることを理由に辞退したため、マクスウェルが就任した。この研究所こそ20数名のノーベル賞受賞者を輩出し、現代物理学の扉を大きく開いたのである。



写真5 旧キャベンディッシュ研究所（ケンブリッジ大学）

2代目の所長がアルゴンの発見者レイリー卿である。そして3代目が J. J. トムソンで、彼によって1897年電子が発見された。わずか2年程の間にドイツ、フランス、イギリスでそれぞれX線、放射能、電子が続いて発見されたのである。まさに19世紀末の三大発見である。

J. J. トムソンは電子が電場で曲がるのを利用して電子の電荷と質量の比、 e/m を測定している。これは後にアメリカのミリカンによって測定された電子の素電荷と組み合わせて電子という微小粒子の質量が決定された。また、彼はぶどうパンモデルと呼ばれる原子モデルを考えている。これは長岡半太郎の土星モデルと並んで原子モデルの草分けとなった。しかし、いずれも想像の域を出なかった。同じ頃、ウイelsonの霧箱、アストンの質量分析装置などが相次いで生まれた。

次の所長に就任したのがラザフォードである。この時にキャベンディッシュ研究所の活動はピークに達した。今でも古い研究所の建物の外壁に彼のニックネームにちなんだクロコダイルの大きな彫刻が残っている。

ニュージーランド出身のラザフォードはケンブリッジに戻る前にカナダやマンチェスターで研究活動を行い、前に述べたようにいち早く放射線のいろいろな性質を解明している。アルファ線の正体はヘリウムであることも放電のスペクトルから突き止められた。この精力的な指導者ラザフォードのもとに各地から優秀な若手研究者が集まり、次々に大きな業績が生まれた。それらの人々の中にはガイガー、ミュラー、マースデン、コッククロフト、ウォルトン、チャドウィック、G. P. トムソンなどがいた。彼らによってGM計数管の製作、アルファ線の原子核による散乱実験（原子核の存在）、最初の粒子加速器の開発、原子核の破壊、中性子の発見、電子の波動性の発見など驚くべきことがわずかの間に達成された。

電子の性質については父親の J.J. トムソンによって粒子性が、息子の G.P. トムソンによって波動性が明らかにされたのである。原子と原子核の構造や性質、そして放射線の諸性質はラザフォードとそのグループによってほとんど解明されたと言ってもよい。

特に 1932 年のチャドウィックによる中性子の発見はその存在をラザフォードが前から予言していたからこそ実現したとも言える。ドイツのボーテとベッカー、およびフランスのジョリオ、イレヌ・キュリー夫妻が事実上少し早く発見するチャンスにありながら気がつかなかったことも好運であった。

日本からこの研究所に留学した人も何人かいるが清水武雄は霧箱の改良で知られている。彼は長岡半太郎の後任の東大教授に就任するため途中で帰国し、研究が中断したことは惜しまれる。歴史に「もし」は禁句だが、もし、仕事が継続されていればあるいは日本人最初のノーベル賞を受けたかも知れない。また、彼は後に日本物理学会の初代会長に就任している。

現在のキャベンディッシュ研究所は 1974 年に同ケンブリッジ市内で数 km 離れたところに移転している。その展示室に当時の実験装置の数々が展示されている。しかし、ここは公開されていないので見学するにはケンブリッジ大学関係者の紹介が必要である。また、ロンドンのサウスケンジントンにある科学博物館にも多数の関連装置が展示されていて見ることができる。その原子物理コーナーはイギリス以外のその他の業績の紹介も併わせてレントゲンの X 線から最近の巨大加速器まで見事な展示である。

4. デンマークとドイツそして日本

当時の原子物理の実験の中心がイギリスなら理論面で大きな業績を挙げたのは主としてドイツの学者であった。1900 年の暮れ、20 世紀を目前にしてマックス・プランクによって量子論が発表されたのである。これを用いて 1913 年デンマークのボーアが原子の構造を説明した。彼は当時ラザフォードがアルファ線の散乱実験から導いた原子構造モデルの矛盾を解決するためにこのプランクの量子論と、それ以前にスイスのバルマーの発見した水素スペクトルの二つを用いて原子核の回りに電子は跳びとびの軌道を回るという考えを示した。この考えは翌年ドイツのゲッティンゲン大学のプランクとヘルツが電離電流の測定によって実験的に立証した。

コペンハーゲンのボーアのもとには世界中から若い研究者が集まり、活発な討論がなされた。日本の仁科芳雄もその一人であった。ちょうど量子力学の建設期であり、

その生々しい現場のヨーロッパで学んだ彼は帰国後、日本における原子核・放射線研究の草分けとなった。

理化学研究所に開設された仁科研究室は西川正治博士の率いる西川研と並んで日本の原子物理学の源流となった。そこに集まった人達によって、量子力学、宇宙線、加速器、放射線、核物理学などの研究が進められた。その雰囲気は仁科博士がボーアのもとから持ち帰った自由なものであった。後にノーベル賞を受けた朝永振一郎博士も若い頃ここで過ごしている。また、ここで研究した人達は戦後全国各地の大学に散り、それぞれの場所で研究と教育に当たった。このように多くの人材を育てたのが当時の理研の最大の成果であろう。日本最初のサイクロトロンが作られたのも仁科研であった。この装置は残念ながら、第 2 次世界大戦後アメリカの占領軍によって東京湾に破棄された。核兵器生産の道具と誤解されたためである。これにより戦後の日本の実験核物理学の研究は大幅に遅れ、理論物理が先行した。加速器のない実験研究は気球や高山を頼りに大自然の加速器（宇宙線）へと向かった。

ドイツではゲッティンゲンと並んで主に理論物理学の分野で中心になったのはミュンヘンであった。マックス・プランクを筆頭に、ゾンマーフェルト、パウリ、ハイゼンベルクなどがここの大学を舞台に活躍した。彼らによって量子力学は生まれ、育てられたのである。そしてこの新しい理論によって原子や原子核の姿が解明されていくのである。

このミュンヘンに科学技術に関して世界でも最大規模のドイツ博物館がある。いろいろな歴史に残る展示に混じってオットー・ハーンによる核分裂の発見に用いられた装置がある。また、ミュンヘンの西方にウルムという美しい町があり、アインシュタインの生誕地である。しかし、現在ここには彼の生家は残っておらず、記念となるようなものは 2・3 のモニュメントがある程度である。

5. 新天地アメリカ^{4,5)}

この分野におけるアメリカでの先駆的な仕事はミリカンによる電荷の測定である。この実験装置はシカゴの科学産業博物館にある。これと比電荷 e/m とを組み合わせる前に述べたように電子の質量が決定された。また、コンプトンによりコンプトン効果が発見され、光電効果とともに光の粒子性が証明されたのである。

しかし、アメリカがヨーロッパ諸国に代わって世界の中心となったのは豊かな経済力を背景にビックサイエンス化の方向へ進んだからである。その第一歩は加速器であった。1930 年頃からボストンのマサチューセッツ工

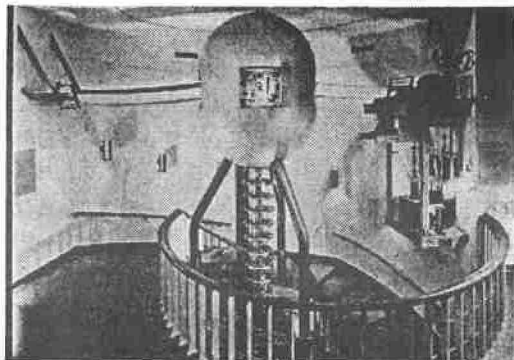


写真6 バンデグラーフ1号機 (スミソニアン博物館)

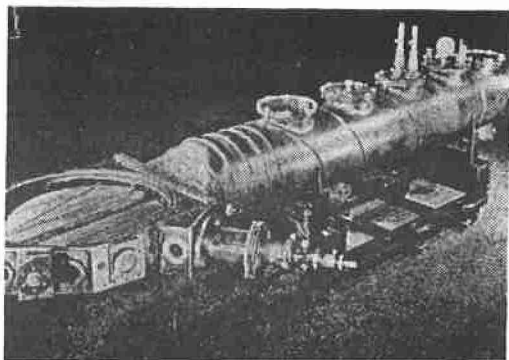


写真8 初期のサイクロトロン (スミソニアン博物館)

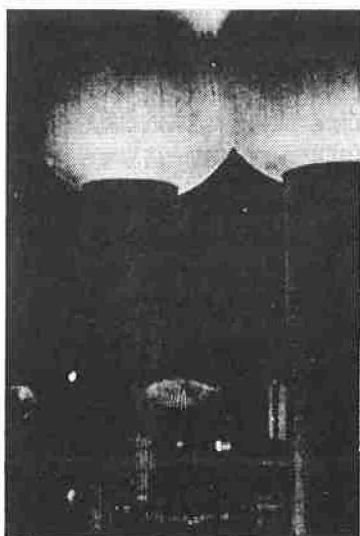


写真7 ポストン科学博物館におけるバンデグラーフを用いた放電実験, ファラデーケージが見える

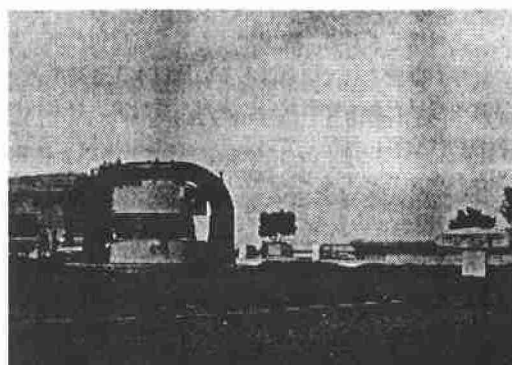


写真9 ローレンスホールにあるサイクロトロンのマグネット (カリフォルニア大学)

科大学でバンデグラーフによって静電型加速器が建設され、同じ頃バークレーのカリフォルニア大学でローレンスらによってサイクロトロンが作られた。キャベンディッシュ研究所でコッククロフト・ウォルトンの整流型加速器が作られたのもこの時期であった。

ワシントンにはスミソニアン協会所属の多くの博物館がある。その一つにアメリカ歴史博物館という大きな施設があり、その名のとおりアメリカ建国以来の歴史および科学技術に関した貴重な品が保存されている。ここの物理コーナーに原子物理学の初期に活躍したいろいろな実験装置が展示されている。バンデグラーフの1号機もここにある。また、ボストンの科学博物館にはマサ

チューセッツ工科大学から移した大型バンデグラーフを使用して大がかりな放電実験を公開している。60年も前の装置が現在でも科学教育のために活動しているのである。

一方西海岸サンフランシスコ郊外のバークレーのカリフォルニア大学にはキャンパスの裏手の小高い丘の上にローレンスホールと呼ばれる科学館がある。ここはローレンスとサイクロトロンに関する記念館でもある。最初の装置 (なんと手のひらに乗る大きさ) から次々に開発されたサイクロトロンの数々を見ることができる。そして近くのローレンス研究所では戦後、大型機で次々に超ウラン元素が作られたのである。戦争遂行上不可欠のレーダーの開発のためのマイクロ波発振技術がそのまま加速器に転用された。それはアイデアだけで実現が遅れていたライナック (線形加速器) の建設にも役立った。サンフランシスコの南、バロアルトのスタンフォード大学に世界最大の長さ2マイル (3.2 km) のライナックがある。

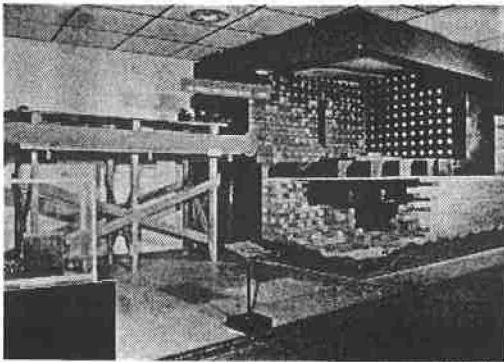


写真 10 フェルミが建設したシカゴパイルの実物大模型（スミソニアン博物館）



写真 12 初めて連鎖反応の制御の成功を示す記念レリーフ（シカゴ大学）

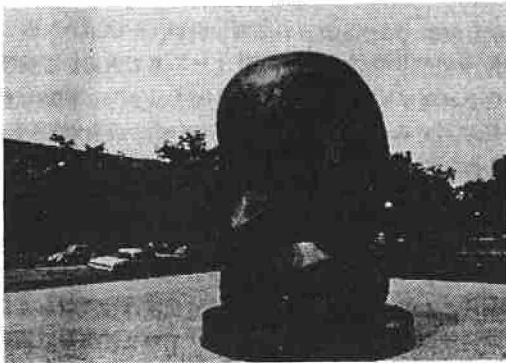


写真 11 原子炉跡地にあるエネルギーを象徴するモニュメント（シカゴ大学）

人類の生んだ最も巨大な実験装置が加速器である。これを用いてミクロの世界が解明された。そしてその背後には当時のあらゆる最新の技術、特に真空とエレクトロニクス技術や、最近ではコンピューターの進歩が支えとなっている。そしてそこに経済大国アメリカの威信もあった。

現在では加速器は国力のバロメーターでもある。経済力・技術力の総合である。ヨーロッパでは一国が単独で巨大加速器を建設できないのでセルンが組織され、スイス・フランス国境で周囲が 27 km という電子・陽電子衝突実験用大型加速器その他を運用している。アメリカではダラスに周囲 87 km、エネルギー 40 TeV（テラ・エレクトロンボルト）の陽子同士を衝突させる超伝導マグネット使用の超大型加速器計画があったが、（一時は日本も巻き込まれた）あまりにも膨大な費用がかかるという理由で 1993 年 10 月建設計画が中止された。

加速器と並んでアメリカの夢の対象となったもう一つ

は原子力である。ドイツのハーンとシュトラスマンによって発見されたウランの核分裂は原子核の結合エネルギーの解放の可能性を秘めていたが、1942 年 12 月 2 日シカゴ大学の球技場に作られた黒鉛と天然ウランのブロックの中で核分裂の連鎖反応の制御が実現した。指導者はベータ崩壊の理論でノーベル賞を受けたイタリアから来たフェルミである。彼はノーベル賞受賞を理由にイタリアをでてファシズムによる弾圧を避けてアメリカに移住したのである。この世界最初の原子炉（当時はパイルと呼ばれた）はその後解体され、現存していないが先に述べたワシントンの歴史博物館に実物大の模型がある。また、シカゴ大学の現地には記念碑と彫刻家ヘンリー・ムーアの手になるモニュメントがある。

折から第 2 次世界大戦は激しさを増し、戦局を有利に導くためドイツでは原子爆弾の開発が秘かに進められた。自らもナチスのユダヤ人迫害から逃れるためにアメリカに来ていたアインシュタインはナチスが原爆を持つことに危険を感じたので当時のルーズベルト大統領に手紙を送り、アメリカも核兵器の開発を急ぐよう進言した。この手紙はニューヨークの郊外、ハドソン河上流のウェスト・ポイントにある陸軍士官学校の軍事博物館に保存されている。そこには最初の原爆の模型もある。その手紙の取果、マンハッタン計画と呼ばれる原爆開発計画が進められ、核物理や宇宙線関係の学者が多数動員された。それはまさにアメリカ的という物量作戦であった。特に農産ウランを作るために行われた気体拡散法は大きな装置で強引に力づくでわずかの質量差を利用して分離したものである。

このようにして完成した原爆は、ニューメキシコの砂漠で一度だけテストされた後、直ちに広島に投下された。また、数日後に長崎に投下されたものはプルトニウムを

使用したものでこれは濃縮の必要がなく、作るのはウランを使用したものよりはるかに簡単であったと思われる。しかし、プルトニウム取扱技術が全く未熟な当時としてはアメリカにとっては、たとえ意識しなかったにせよ、極めて危険なことであったと推測できる。

いや、そればかりではない。一部の科学者の間では、原爆が引金となって大気中の窒素や海水中の重水素が反応して核融合が起こり、地球全体が火の玉となることさえ懸念されていたほどだった。いずれにせよ核の時代は悲劇的な幕開けとなったのである。

6. 核実験の急増と原子力平和利用の動き

戦争は終わったもののアメリカ・ソ連を軸とする東西の対立という冷戦時代を迎え、両陣営とも軍備拡張競争が始まった。その中心は核兵器とその運搬手段の各種ミサイルである。また、原子炉で動く空母や潜水艦も建造された。そしてこの二国だけでなく、イギリス、フランス、中国なども加わって昭和 20 年代から 30 年代にかけて地球上の各地で核実験が行われた。その回数は現在まで 2000 回以上とも言われている。

先頭を切ったアメリカは戦後すぐ中部太平洋マーシャル諸島のビキニ環礁で機動艦隊に対する原爆の効果を見るため、不用になった古い戦艦や空母、それに日本やドイツの軍艦（かつての連合艦隊の旗艦であった戦艦長門を含む）など約 80 隻の仮想の機動艦隊を配置して実験動物を乗せ、空中および水中で爆発させている。そして琵琶湖ほどの大きさのこの環礁だけでも中止するまでの 12 年間に前後 23 回もの核実験が行われた^{6),7)}。

特筆すべきことは、1954 年 3 月 1 日に行われた最初の水爆実験である。これは爆発の規模が当初の予想をはるかに上回り付近を航海していた日本のマグロ漁船の第五福龍丸が爆発で生じた放射性降下物を浴び、広島、長

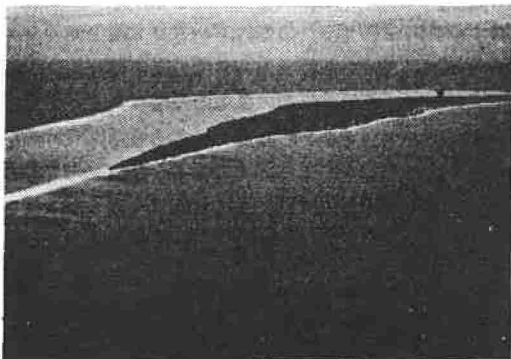


写真 13 ビキニ島、このサンゴ礁の海域で 23 回の核実験が行われた



写真 14 核実験終了後にアメリカの援助で建てられた原住民の住宅、その後残留放射能が見つかり、住民は他の島に移住したため現在は廃墟になっている（ビキニ島）

崎について 3 度目の被害を受けたことである。この事件をきっかけに原水爆禁止運動が盛り上がり、同時に放射能に対する日本人の国民感情の形成の大きな要因となった。東京江東区の夢の島公園の一角にこの第五福龍丸の船体およびいろいろな関係資料、それに当時の新聞記事などを保存した記念館がある。

一方、事件直後に現地に派遣された水産庁の調査船には海洋、水産、気象、生物、医学、化学、物理などさまざまな学問分野の研究者が参加し、これまでにない画期的な共同作業が行われた。この学際的な活動が日本放射線影響学会の誕生のきっかけとなった。当時の若手研究者たちは、その後それぞれの分野で指導的な役割を勤められ、現在はほとんどの方が第一線を退かれている。結果としては日本における放射線計測学、放射化学、放射線医学、放射線防護学などの放射線関連の学問が世界のトップレベルとなったことは事実である。また、その後放射線障害と防護およびその関連分野だけを対象とした日本保健物理学会も設立されている。これはその他の有害物質や危険物には見られないことである。

同じ頃世界的に原子力平和利用の機運が高まり、各国で研究用原子炉が作られた。加速器や原子炉で生産されたラジオアイソトープも基礎的な学術研究だけでなく、医学、工業、農業などの分野で利用が実用化された。

日本でもその普及のために日本アイソトープ協会が設立され、仁科芳雄博士のご尽力により、協会を通じてアメリカからアイソトープが輸入された。さらに昭和 30 年代に入ると、原子力研究所や放射線医学総合研究所などの専門研究機関が設立され、いくつかの大学でも人材養成のため原子力のコースが開設された。民間会社も

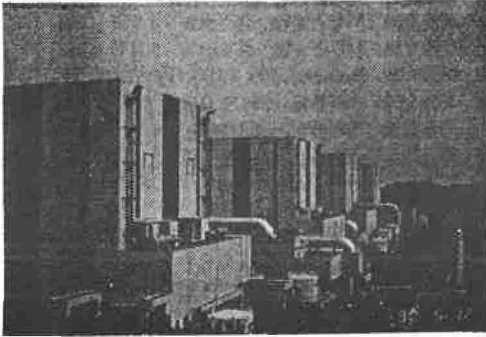


写真 15 東京電力福島第2原子力発電所、4基の原子炉建屋がある

競って新しいビジネスに進出した。

このように原子力時代の幕開けとなったが、本命は原子力発電の実現にあった。その最重要問題の核燃料精錬、加工、などを目的とした国策機関として原子燃料公社（現在の動力炉・核燃料開発事業団）が設立され、着々と準備が進められた。ところがスタートでは日本独自の技術開発の体制を取りながらも当時の政府や産業界は早期実現の方向へ走り、アメリカからの技術導入に踏み切った。これが後に大きな問題を残すことになる。

最初に導入されたのは原子力潜水艦用の沸騰水型と呼ばれる原子炉で、アメリカの技術指導のもとで発電が開始された。これがトラブル続きで運転しているより停止していることの方が多いという状態であった。日本の技術が定着してようやく原子力発電は安定した運転状態になり、現在では国内の電力の約30パーセントを供給している。一方、加速器やラジオアイソトープを使用している事業所も全国で5000箇所近くになっている。

7. 放射線と現代

放射線の発見から100年近くの流れの中で原子核・放射線に関することは大部分解明された。物理学では核を構成しているものよりもっと極微の素粒子の世界および高エネルギー現象へと舞台は広がっている。また、X線望遠鏡やガンマ線望遠鏡によって得られた情報は宇宙物理学を大きく前進させた。

残されたものは数少ないがいずれも難問ばかりである。放射線を検出することについては、低エネルギーベータ線（例えばトリチウム）の測定や核分裂の際放出されるエネルギーが数10 MeVの中性子が熱中性子（室温と平衡状態という意味、約0.025 eV）となって再び核分裂するまでのおよそ10桁に及ぶ範囲のエネルギー測定

が残されているので、この両方が関係する数年前の常温核融合騒ぎも今のところ結論が出ていない。

微量放射線の生体に及ぼす影響についても、最近ホルミシス作用というプラスの効果が報告され、各地でそれを裏付けるデータが集められている。これまでの「たとえ少量であっても放射線は人体に有害である。」という客観的データに基づかず、いわば既知のことから外挿された通説に対して大きな疑問が提出されたわけで今後の動向が注目される。

スリーマイル島およびチェルノブイリの事故もあり、原発の安全性に大きな不安を抱く人も多い。一方エネルギー需要の伸びや石炭・石油資源の枯渇、それに地球の温暖化問題を考えるとエネルギー資源の確保は当面は原子力に頼らざるを得ないともいえる。プルトニウムを用いる高速増殖炉を実用化すれば資源面では解決するとはいうもののプルトニウムの危険性や冷却にこれまた危険な液体ナトリウムを使うとなると解決すべき問題が数多くあるし、はたして解決可能かが問われることになる。さしあたり地球規模の環境問題を巡って原子力発電をどうするかが大きな論点となっている今日、市民レベルで単なるイデオロギー論や感情論でなく、正しく判断することが不可欠である。そのための基礎知識を教えることが高校や大学の教育から欠落していることこそ早急に改めるべきことである⁹⁾。

8. おわりに

かつての力学の発展が産業革命を起こして機械文明をもたらし、電磁気学の発展が次の時代の電気文明を開いた。とすれば21世紀には近代物理学の成果が文明の母体となるであろう⁹⁾。もうそれは電子現象、核現象の利用として現在すでに定着している。

ここに述べたように放射線の研究こそ近代物理学を築いたのであり、その過程は実にドラマチックであった。また、それらは我々の日常生活とも大きく関わっている。一般市民がそれらの知識を得るのが、学校教育でなく、主として新聞、テレビなどによる断片的なものであり、中には正確さを欠いたものも多く見られる。それが社会的混乱を広げていることは事実である。身近な存在にあるだけに学校教育、社会教育の両面から積極的なアプローチが必要である。

科学史シリーズの企画の一環として執筆をお勧め下さり、有益な助言をいただいた本学会副会長の広井慎先生に謝意を表します。

追記

本稿脱稿直後の1994年3月、ワシントンを訪れる機会があり、スミソニアン協会のいくつかの博物館にも立ち寄った。ところが歴史博物館では物理学の展示コーナーが最近閉鎖されたとのことで、新素材および物質科学に関する内容のものに代わっていた。したがってここに紹介したフェルミがシカゴ大学に建設した最初の原子炉の実物大模型、バングラーフの第1号機、その他の初期の核物理関係の貴重な実験装置などは一切見ることができなかった。博物館の展示物の更新はよくあることだが、ただ残念であるといわざるを得ない。近い将来の再開を期待したい。ここに掲載した写真は1980年に訪れたときに撮影したものである。

参 考 文 献

1) 菊池文誠: 物理教育 40 (1992) 106.

2) 菊池文誠: Isotope News 1月号 (1992) 22.

3) 橋本静代: 物理教育通信 54号 (1988) 163.

4) 菊池文誠: 科学と実験 共立出版 8月号 (1981) 73.

5) 菊池文誠: 科学と実験 共立出版 9月号 (1981) 79.

6) 菊池文誠: Isotope News 3月号 (1996) 12.

7) 菊池文誠: 理科教室, 29-11 (1986) 60.

8) 菊池文誠: 物理教育, 36 (1988) 126.

9) 森永晴彦: 放射能を考える 講談社 (1984).

その他本稿に関連した全般的な参考書も多数ある。主なものを挙げると

ワインバーグ (著): 中間三郎 (訳): 電子と原子核の発見 日経サイエンス社 (1986).

セグレ (著): 久保亮五, 矢崎裕二 (訳): X線からクォークまで みすず書房 (1982).

クライン (著): 芝垣・杉元・新聞 (訳): 現代物理学をつくった人びと 東京図書 (1977). などがある。

(1994年2月28日受理)

皆様の投稿原稿募集

編集委員会では皆様からの投稿原稿を募集しています。巻頭言にもある通り、本誌は学術研究発表の場ではなく、放射能・放射線およびその関連分野について正しい知識の普及を目的としています。教育現場からの実践報告、専門家による解説記事、放射線教育についての論説やご意見などを歓迎致します。また、他誌に発表されたものでも、より多くの読者に読んで頂きたいものを積極的に「資料紹介」として転載して放射線教育に役立てたいと考えています。これについても自薦・他薦をお願いいたします。

《「放射線教育」投稿規定》

1997年3月16日制定

1. 原稿は依頼原稿および会員の投稿原稿とする。
2. 原稿はそのまま印刷出来る形としてワープロ印刷で出して頂く。用紙はB5判とし写真・図・表も文中に挿入する。この場合、1ページ36文字×36行程度が読み易い。ページ番号は打たずに鉛筆で薄く書く。
3. 最初のページの1行目に題目、2行目に所属および氏名を入れる。
4. 査読・審査は行わない。原則としてそのまま掲載する。内容についてはすべて執筆者の責任とする。ただし、内容に明らかに重大な誤りのあるもの、他人を中傷するもの、フォーラムの活動に関係のないもの、国際問題を引き起こすおそれのあるものについては編集委員会の判断で掲載を断ることがある。
5. 文章が著しく読みづらい場合、紙面の都合で長すぎる場合は修正を求めることがある。
6. 原稿に対して投稿料は頂かない。また、謝金は差し上げない。

(以上)

原稿送り先

〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1

東京工業大学原子炉工学研究所 小高研究室気付

放射線教育編集委員会

【編集後記】

フォーラムの機関紙としてニューズレターに続く本誌発刊の構想が生まれて8ヶ月以上経過してようやく創刊号をお届けすることが出来ました。これまでに本誌の性格やスタイルについて総務幹事会や編集委員会で多くの議論がありました。発行予定が大幅に遅れましたことをお詫び申し上げます。最初はいろいろ不備な点もあるかと思いますが、ニューズレターとの記事の分離など順次進めなければならない問題です。当面は年2回の刊行（本年度は1回）予定で取り組みます。将来は会員の増加や活動の拡大状況によって発行回数が増えることを念願しています。本誌が混迷を続ける放射線教育の推進に大きな力として育つよう皆様のご協力、ご支援をお願いいたします。また、本誌に対するご意見やご要望もお寄せください。

（担当編集委員：菊池文誠）

放射線教育フォーラム編集委員会（五十音順）

今村 昌（顧問）	菊池文誠	小高正敬	中村佳代子
村主 進	村石幸正	渡利一夫（委員長）	

放射線教育 Vol. 1, No. 1. 1997

発行所：放射線教育フォーラム

事務局：〒105 東京都港区西新橋 1-17-2 三和第一ビル5F

Tel./Fax 03-3591-5366

発行人：有馬朗人

編集人：渡利一夫

