

RADIATION EDUCATION

放射線教育

特集：現場からの報告

2 0 0 6

VOL. 10 NO. 1

放射線教育フォーラム
Radiation Education Forum

1_	【巻頭言】 「放射線教育」を国際的規模で発展させよう	松浦辰男
特集 現場からの報告		
3_	エネルギーと自然放射線についての環境教育の実践	岩倉三好
11_	ポリエチレン瓶を用いた水中のラドン (^{222}Rn) 濃度測定	堀内公子、飯島昭子
15_	霧箱による α 線飛跡観察からわかること	大野新一
23_	サイエンス・パートナーシップ・プロジェクト (SPP) における放射線教育とその成果	柳澤和章、笹川澄子、中野光士
	【実践報告】 49_小、中学生における放射線教育 ——ニルス理科実験クラブの試み——	渡利一夫
	【実践報告】 53_職場体験学習としての「ガラスの着色」	坂内忠明、阿部杏子、海老澤 悟
=====		
59_	21世紀、その真価が発揮される放射線利用 ——放射線はなぜ産業に役立つのか——	田中隆一
69_	地球の歴史と放射線	大野新一
77_	ポロニウム	坂内忠明
85_	メディア・リテラシーについて	村主 進
90_	「リスク」を考える	村主 進
93_	君子と虎子 —放射線を引き合いにリスク (危険かも知れないもの) との付き合い方を学ぶ—	加藤和明
103_	[書評] 放射線入門	小高正敬
105_	投稿規定	
108_	編集後記	

【巻頭言】

「放射線教育」を国際的規模で発展させよう

放射線教育フォーラム事務局長 松浦辰男



われわれは、「放射線教育」の社会的重要性・必要性を痛感するが故に、この組織を13年前に発足させた。

「放射線教育」において取り扱うべき内容・範囲は、狭義には、自然現象としての放射線・放射能の本質（原子核の現象としての α ・ β ・ γ 崩壊）、核分裂、素粒子、原子核の構造、同位体など、環境における放射線・放射能の存在とその由来、放射線や放射性同位体の諸分野における利用、放射線の生物影響の最近の研究結果に基づく正しい知識、放射線防護に関する考え方がまず挙げられる。次に、核エネルギー・臨界・核燃料・廃棄物処理など原子力発電に関する基礎的知識、更に広げてエネルギー問題、放射線・原子力の利用に伴う事故に関する正確な情報、核兵器に関する基礎的な知識など、という

ように、ほぼ純粋に自然科学的現象・事象が対象になるであろう。

一方、広義には、次のような、自然科学のほかに社会学・経済学、さらに心理学・倫理学までもが関連する問題が含まれる。それらは環境問題における原子力の役割、各種エネルギー資源の利害得失、放射線・原子力技術の利用に関する価値判断の問題、広くは科学技術の社会的受容、現代社会における種々のリスクのできるだけ正確なデータ、リスク・ベネフィット問題、（新聞報道などを批判的に見る目を養う）メディア・リテラシーの問題、原子力に関する歴史的・国際的諸問題などである。放射線教育の重要なポイントはこの広義のテーマである。

われわれは放射線教育で取り扱うこれらの情報の伝達をする際に、あくまでも正しい科学的情報を伝えることを主眼に活動を行っている。このようにして放射線教育がゆきわたれば、その結果として、原子力発電や医学をはじめとする放射線の利用などを促進させる社会的効果のあることは明白である。

教育とは、結局は個人と個人間のコミュニケーションであり、それが有効に行われるかどうかは、情報を発信する側と受ける側の信頼関係に大きく依存する。すなわち、講演の場合、情報の送り手である講演者が人間的に魅力があり、かつ信頼できそうなタイプの人であると、情報伝達はスムーズに行われる。これに反して、情報の受け手である聴衆の側に予めの主観的な思い込み、あるいは恐怖心のような感情的な偏りがある場合には、せっかく講演者が懸命に科学的に正しい意見を述べても反発される場合が少なくない。これは原子力に関する理解活動に携わっている人たちのよく経験するところである。われわれ放射線教育フォーラムの会員が講演会の講師として意見を発表するに当たって、自分の主張を有効に相手に伝えるには、講演の内容を練り、発表方法を工夫することのほかに、講演者の真摯さを始めとする人間としての全人格的な信頼の向上のための努力を常に心がけておくことが大切であろう。

さて、今後の日本の進むべき道は、国際社会において、何か手本になるような優れたものを広めることによって、外国の人々に尊敬され、感謝されるようなものであらねばならない。例えば日本の伝統的な文化、すなわち武士道精神や細かい情緒が表現された芸術、日々の積み上げによる職人芸的な技術力、discipline といわれるものなどは当然これに当てはまるとおもわれる。正しい「放射線教育」を広めることも、一つの方法ではないだろう

か。それは、放射線・放射能に関して、日本ばかりでなく国際的にも、あまりにも怖がられすぎているからである。核の洗礼を受けた日本人が、その禍を福として、核兵器廃絶の主張と共に、放射線教育とその実践で学んだ知識を、国際的規模において、今後粘り強く、かつ自信を持って広めてもらいたいと切に願うものである。

しかし、放射線教育、という、自然科学と社会学・経済学さらに心理学や倫理学を融合した総合的なものを外国に輸出するだけの実力を養うのは容易ではない。原爆を憎むからというので、原爆による効果、あるいは放射線による影響についても、科学的事実以上に過大に危険視し、また報道されていることがしばしばあるので注意しなければならない。

低レベルの放射線影響は放射線教育の基本になるものである。最近「適応応答」とかあるいは地球上の自然放射線レベルの高い地域の疫学的研究などで、低レベルの放射線の人体への影響についてはかなりの確からしさをもって「あまり心配しなくても良い」といえるようになっている。それにも関わらず、放射線に規制についてはいつまでも厳しい傾向が残っているのは、低線量でも有害であるという情報を研究者も、また報道する側も好んで発表する風潮があるためではないだろうか。

放射線教育は全世界のすべての人々に必要である。放射線に関する正しい知識が十分にゆきわたれば、世界中の人々が、自然放射線として常時浴びている程度の少量の放射線による障害の心配という無用の心配から開放されるであろう。その結果、原子力の受容が進み、エネルギー問題の解決も望みが見え、地球社会全体の経済的負担が少なくなり、国際的な緊張も緩み、多くの人々の幸せに貢献できるのではないだろうか。それにはまず自分の国の伝統を重んじ、社会のルールを守り、礼儀正しく、正しいと信じることを、外国の人にも共感され親しまれる方法で主張しなければならない。

(立教大学 名誉教授)

エネルギーと自然放射線についての環境教育の実践

岩倉三好

東京都立三田高等学校

東京都港区三田一丁目4番46号

(2007年3月18日 受理)

[要約]

エネルギーと自然放射線についての環境教育を実施した。一学期に、夏休み中、新聞に掲載されたエネルギーに関する記事をレポートまとめさせて、調べる課題をだした。二学期に、提出レポートの中で代表的なものを発表させた。次に、自然放射線の測定を行った。自然放射線についてアンケートを行った。これらを通して、エネルギーや自然放射線について考えさせた。また、考えられる今後の授業の展開について検討し、インターネットを利用した調査と学習を実施した。

1. はじめに

地球温暖化が、現在言われている。これは大気中の二酸化炭素の増加が要因と言われている。大気中の二酸化炭素の排出削減が必要である。新聞を利用したエネルギーに関する調べ学習と発表、自然放射線の測定とアンケートを行い、環境教育を実施した。これらを通して、エネルギーと自然放射線について考えさせた。さらに二酸化炭素の排出削減や環境保全の大切さについても、考えさせた。また、考えられる今後の授業の展開について検討し、実施した。

2. 指導の計画

(1) 実施対象の学年、期間、教科(科目)

全日制課程 普通科、1学年の3学級(生徒数119人)で実施した。

平成18年度(18年4月～19年3月)

教科(科目)、理科(生物I)(3単位)

この実践は1年で学習する遺伝、植物の反応と調節の章の内容に関連している。

(2) 指導の目標

新聞を利用した学習を通して、エネルギー(電気や発電など)について理解を深めさせる。また、自然放射線の測定を通して、自然放射線について理解を深めさせる。エネルギーと自然放射線について自分の考えをまとめさせる。インターネットを利用した調査と学習をさせる。

(3) 指導の方法

①新聞を利用し、エネルギーについて、夏休みの課題を与える。それをレポートにまとめさせる。学習の内容を発表させる。

②自然放射線とその測定方法について学習させる。実際に測定し、自然放射線について考えさせる。

③インターネットを利用したエネルギーについての調査と学習をさせ、考えをまとめさせる。

3. 新聞を利用した夏休みの課題

(1) 夏休みの課題の実施方法

3学級とも、7月の終わり頃の授業（30分程度）でプリントを用いて、課題の説明をした。

生物夏休みの課題 新聞「エネルギー」

エネルギー（発電、電気と生活、省エネルギーなど）について、新聞に掲載された記事を読んで、考えた事を配布したB5版の用紙にまとめて、提出して下さい。またその事について調べてみよう。新聞でなければ、本を読んだり、テレビを視聴したものでよい。

二酸化炭素の増加による温暖化や気温の上昇がわれている。

植物は光合成で炭素循環の役割をしている。

課題内容

①「エネルギー」について、例えば、火力、水力、原子力発電、電気と生活、新エネルギー（太陽光、風力、水素電池発電）、省エネなど

②提出日 2学期の最初の授業

③記入方法（新聞の切り抜きまたはコピーを添付） a. 新聞社名、月、日、朝刊・夕刊、頁 b. タイトル c. 内容（整理してまとめる。） d. 意見、感想（自分の意見をまとめる。） e. 関連した本を読んで調べた事や図表をつけると大変よいです。出来るだけ調べてみよう。後にとじてつけて下さい。

(2) 夏休みの課題の結果と内容の分析

①提出結果

提出数は119人中101人で約84.9%であった。出典別は101人中、新聞86人（85.1%）、新聞以外のその他15人（14.9%）であった。

新聞86の社別内訳は、朝日29（33.7%）、読売29（33.7%）、日経7（8.1%）、毎日5（5.8%）、東京4（4.7%）、産経4（4.7%）、その他9（10.5%）であった。

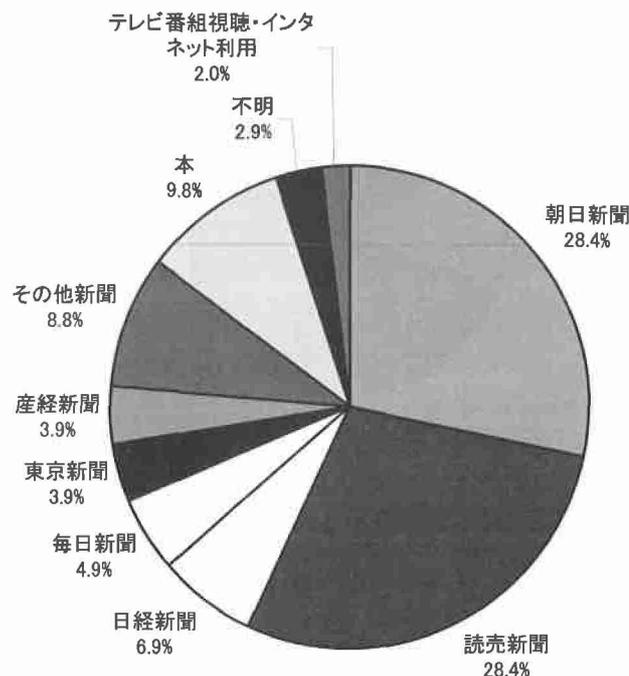
新聞以外のその他15の内訳は、本10、不明3、テレビ番組視聴1、インターネット1であった。図1に出典別内訳を示した。

新聞記事の内容についてさらに調べた人は86人中14人（16.3%）であった。そのうちインターネット利用10人（71.4%）、本4人（28.6%）であった。

インターネットの利用については調べるだけで終わるのではなく、整理し、まとめる作業が大切になってくる。

全体に良くまとめられていて、自分の意見・感想をしっかりと書いていた。その詳細な内容は省略する。

図1 出典別内訳



②内容分析

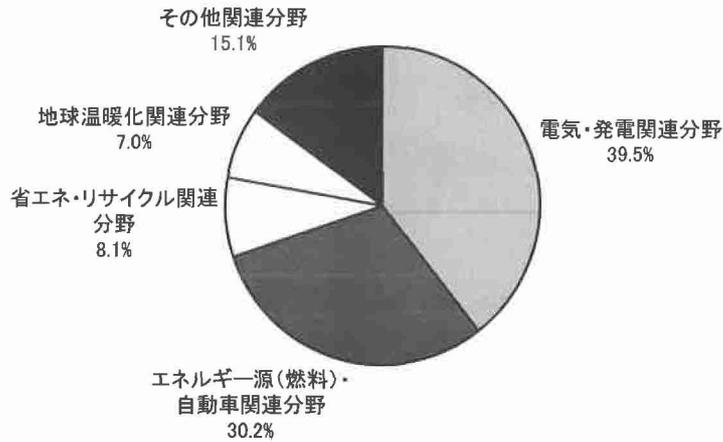
次に新聞86の内容別内訳(図2)を示す。

- a. 電気・発電関連分野34(39.5%、電気15、風力発電11、太陽光発電3、原子力発電3、燃料電池1、波力発電1)
- b. エネルギー源(燃料)・自動車関連分野26(30.2%、バイオエタノール15、石油6、電気自動車5)
- c. 省エネ・リサイクル関連分野7(8.1%、省エネ6、リサイクル1)
- d. 地球温暖化関連分野6(7.0%、地球温暖化3、二酸化炭素削減2、森林1)
- e. その他関連分野13(15.1%)

新聞以外のその他15の内容別内訳は次の通りである。

- a. 発電(原子力発電、太陽光発電、バイオマス、風力発電、廃棄物)7、
- b. エネルギー(新エネルギー、資源・石油、メタンハイドレート)4、
- c. その他、電気2、リサイクル1、地球温暖化1

図2 内容別内訳



③レポートの紹介

提出されたものの中で、エネルギーに関する主なものを取り上げて、朝日新聞と読売新聞の例を部分的に抜粋して紹介する。日付、朝刊・夕刊、タイトル、複数ある場合の数、内容分野を（ ）の中に記載した。

朝日新聞 26例 (平成18年)	読売新聞 22例 (平成18年)
7月15日朝刊、エリーカ、(電気自動車)	
7月24日、石油の値段が上がるとどうなるか? (石油)	7月24日朝刊、京都議定書公約どう実現、(二酸化炭素削減)
7月25日朝刊、ペットボトルで買い物券当たる、(リサイクル)	7月29日朝刊、プルサーマル中核施設 本州最北原発最前線、(原子力発電)
8月2日朝刊、油田開発に影響懸念も、(石油)	8月1日夕刊、バイオエタノール石油代替燃料として注目、(バイオエタノール)
8月8日、燃料電池、普及に全力、(燃料電池)	8月4日夕刊、風力発電の適地多い 国立公園でも推進、2、(風力発電)
8月12日朝刊、最大電力ってなあに?、2(電気)	8月11日朝刊、ドライアイスの代わりに保冷剤、(二酸化炭素削減)
8月14日朝刊、停電 首都圏140万、2	8月11日朝刊、水辺復活気温下がった!、(地球温暖化)
	8月14日夕刊、首都圏139万世帯停電、

<p>、 (電気)</p> <p>8月21日朝刊、風力発電に逆風、4、(風力発電)</p> <p>8月22日、石炭→ガソリン液化燃料技術、アジアで育成、(石油)</p> <p>8月22日夕刊、発明家ニコラ・テスラ生誕150年奇人は偉人に、(電気)</p> <p>8月23日夕刊、火力、水力、原子力など世界中で電気の素を支えるJ S W、(電気)・</p> <p>8月24日朝刊、環境ビジネス銀行注力、(新エネルギーと省エネルギー)</p> <p>8月25日朝刊、バイオエタノール混合燃料首都圏50ヶ所で販売、(バイオエタノール)</p> <p>8月26日朝刊、リチウムイオン電池、(電気)</p> <p>8月27日朝刊、地球温暖化防止に役立つ「植物油」、(バイオエタノール)</p> <p>8月29日朝刊、ウラン開発で協力、(原子力発電)</p> <p>8月、朝刊、中国へ走れ省エネ技術、(省エネ)</p> <p>8月、家庭の省エネ、(省エネ)</p> <p>9月3日朝刊、これが未来の鉄道、(燃料電池車他)</p> <p>9月3日夕刊、二酸化炭素減へ中国に広がれ蛍光灯、(省エネ)</p> <p>10月1日朝刊、利益を生むバイオ燃料、米 国にエタノールブームを見る、(バイオエタ</p>	<p>(電気)</p> <p>8月15日夕刊、トウモロコシ燃料に、(バイオエタノール)</p> <p>8月16日夕刊、到着前つり上げ以前から、(電気)</p> <p>8月22日朝刊、ガソリン高でも渋滞増、(石油)</p> <p>8月24日朝刊、電気自動車価格ガソリン車並みに、2、(電気自動車)</p> <p>8月25日朝刊、70年後40億人水不足に悩む、(気候変動)</p> <p>8月27日朝刊、地球温暖化に役立つ植物油、(バイオエタノール)</p> <p>8月27日、植物から作る燃料「バイオエタノール」、2、(バイオエタノール)</p> <p>8月31日夕刊、太陽光発電で住宅5万棟、2、(太陽光発電)</p> <p>8月31日、モンゴルに風力発電寄贈、(風力発電)</p> <p>9月5日夕刊、タクシー値上げの原油高、(石油)</p> <p>9月11日夕刊、雷！目が覚めた関東南部で停電、(電気)</p> <p>9月19日夕刊、マンション快適ライフ、(省エネ)</p> <p>10月16日朝刊、森再生、(森林)</p>
--	--

ノール)	
------	--

(3) 授業でのレポートの発表とその結果

① 11月中旬に3学級で各50分間実施した。前の時間にレポートを返却した。

その時、新聞を利用したものの中より、なるべく多くの分野に関連した代表的なものを各学級で15人程度選んで、次の時間に発表してほしい旨を伝えておいた。発表してくれるものから順番に教室の前に出て、新聞の日付、記事のタイトル、内容、意見・感想を一人5分程度発表した。

②発表の結果

大体各学級、7～10人位発表した。発表する事で、個々の生徒の学習の成果を互いに知る事ができる。他の人の考えの交流が図れる。自分の内容と比較できる。さらに学習の内容と理解を深めることができる。中には質問を受けて、答える生徒もでて、有意義な発表となった。

4. 自然放射線の測定

(1) 自然放射線の測定の実施方法

3学級とも、12月の中旬頃、生物実験室で授業(各50分間)を実施した。

学級を4人ずつの班に分けて、10班を作らせた。測定器「はかるくん」は各班に一つ、10個を使用した。

最初の10分間、参考文献(1)のビデオテープ「使ってみよう はかるくん 簡易放射線測定器」を視聴させた。

次に15分位、参考文献(2)と(3)の次の部分を抜粋したプリントを用いて自然放射線と測定方法について、説明した。参考文献(2)で「放射線とは」中の放射線の種類、日常生活と放射線について主に説明した。また参考文献(3)で簡易放射線測定器「はかるくん」の各部の名称と働き、「はかるくん」による放射線の測り方について主に説明した。次に実際の測定器を用いて、各自に3回ガンマー線を測定させ、放射線測定記録用紙に記録させた。最後に、自然放射線測定実践に関するアンケートを回答させた。

(2) 自然放射線の測定の実施の結果

3学級の生徒106人の測定値の平均は1時間あたり0.039マイクロシーベルトであった。この値は東京都平均(屋外)とほぼ同じ数値であった。

次にアンケートの質問についての回答を示す。数字(%)は106人中の回答数の内訳である。

1. 放射線や放射能に関して今までに学習したことがありますか。(回答を選択する。図3) ①ある 18.9%、ない ②80.2%。

2. 実験をする前から自然放射線の存在をしっていたか。(回答を選択する。図4) ①知っていた 44.3%、②知らなかった 54.7%。

3. 今回の実験から自然放射線の種類にどんなものがあるかわかりましたか。(回答を選択する。)

①わかった 42.5%、②わからなかった 52.8%。

4. 放射線に対する考え方が変わりましたか。(回答を選択する。)

①変わった 44.3%、②変わらない 49.1%。

①変わったと答えた人：どのようにかわりましたか。(回答を選択する。)

(多かったもの) 1) 放射線がすべて怖いものである。 0.9%

2) 安全に留意し、使用法に注意することが大切 20.1%

②変わらないと答えた人：どのように考えていますか、ご意見を記入してください。

(多かったもの) 放射線は怖い 5.7%

5. 今までに放射線や放射能の事故でどのようなことを知っていますか。知っているものがあれば記入してください。

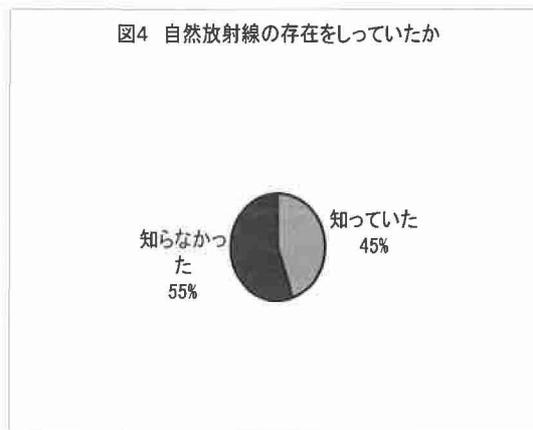
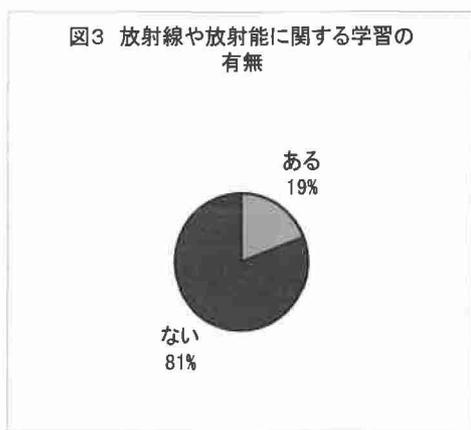
(多かったもの) チェルノブイリなどの原子力発電所の事故 27.4%

6. 放射線がどんなことに利用されているか知っていますか。(回答を選択する。複数回答でよい。)(多かったもの) ①医療健康 51.9%、③遺伝子工学 28.3%、②食品関係 9.4%、④農業の育種関係 6.6%

7. 今回の実験で印象に残ったことを記入してください。

(数例を記載する。) 場所と物によって測定値が変わる。意外と簡単に測れて驚いた。短時間で測定値が変わる。はかるくんがあるとは知らなくて、驚いた。放射線は意外に身近にある。見えなくてもでてるから、びっくりする。屋内でも屋外と同じぐらいの自然放射線があることに驚いた。

全体には身近な所に自然放射線があることを実感できて驚く生徒がいる。実際に測定して感じる事は大きく、今回の測定を行ったことは、良かった考える。



5. 今後の考えられる授業展開の検討(インターネットを利用した調査と学習を実施した。)

学校や自宅でのパソコンのインターネットを利用する方法を学習させる。さらには図書館の活用を取り入れた授業展開を考える。本などの書籍を利用して情報を入手する。読書を通じた情報入手能力、文章の読解力や自分で考え、問題を解決する力を育てる。多くの情報メディアを活用する力を育てる。

(1) インターネットを利用した調査と学習(50分間を2回実施する。)

①授業で学校のパソコン室を利用したインターネットでの調査を実施する。

最初にパソコンの操作方法とインターネットでの検索の仕方を学習させる。次に各自が決めたテーマを調べる。調べた内容をノートに記入したり、必要に応じて印刷する。できるものはさらに家庭でのインターネットでの調査を実施してもよい。

②調査結果をまとめさせる。授業で発表させる。

得られた資料を整理して、まとめる。発表できる形にする。

実際は三学期に、50分間で実施した。生徒は検索のしかたを学習し、積極的に取り組んだ。また、その内容をまとめさせた。一部の生徒に発表させた。

(2) 図書館を利用した学習の進め方(50分間を2回実施する。)

①自然科学分野の情報を図書館から入手する方法のオリエンテーションと指導
書籍の分類のしくみを学習する。書籍の所蔵場所を確認し、利用の仕方を学習する。

②本の紹介やブックトークなどを通して自然科学の読書への興味、関心を育てる。
関連する本を数冊紹介して、興味や関心を高める。読書量を増やす。

③学校図書館の書籍を利用して、エネルギーに関して調べる、考える。

(ア) 学級を4人位ずつの班に分ける。

(イ) 次に各自が興味、関心を持った内容が記載されている書籍を探し、読む。

(ウ) 各自が班で興味、関心を持ったことを互いに話し、意見交換する。

④班での討論などの過程を通して、各自が課題(テーマ)の決定をする。

⑤各自が決めたテーマについて調べて、まとめる。

学校図書館で不十分な時は、必要に応じて公共図書館などの利用、活用を考える。

6. おわりに

新聞を利用して、エネルギーについて最新の話題や情報の中から、興味や関心を持ったことを選択し、まとめ、調べる。自然放射線の学習と測定を通して、自然放射線の理解を深める。そして、エネルギーと自然放射線について考えをまとめる。さらに、他の情報メディアを利用した調べ学習を通して、情報選択やその活用能力を高める。さらに自分で問題を見だし、考える授業展開の進め方を検討する。このような実践がエネルギーと自然放射線、環境保全の大切さ、環境への理解を高め、学習を深めることにつながったらよいと考える。

参考文献

(1) ビデオテープ 使ってみよう はかるくん 簡易放射線測定器 2005版 文部科学省 財団法人 放射線計測協会

(2) 「はかるくん」を活用するために 副読本・1(放射線)、文部科学省、財団法人放射線計測協会、平成18年11月

(3) 取扱説明書 簡易放射線測定器「はかるくん」、財団法人 放射線計測協会 業務部

(4) 世界の情勢と原子力・エネルギー、発行 文部科学省、企画制作 財団法人 日本原子力文化振興財団、発行日 平成18年11月

ポリエチレン瓶を用いた水中のラドン (^{222}Rn) 濃度測定

堀内公子、飯島昭子
大妻女子大学社会情報学部
〒206-8540 多摩市唐木田 2-7-1
(2007年3月20日受理)

〔要約〕 水中のラドン濃度測定にポリエチレン瓶はよく使用される。しかし、ポリエチレンはラドンを吸着することが知られており、ポリエチレン容器を用いた場合には補正が必要になる。本稿は、ポリエチレン瓶を用いて水中のラドン濃度測定を行う際の補正式を求めた結果について報告する。

1. はじめに

中蓋付きポリエチレン瓶は、蓋をすると気密性が高く、軽くて割れない、抽出・分離操作が簡単、コストが安い、場合によっては使い捨ても可能である等の理由から水中のラドン濃度測定に多用されてきた。またフィールドワークで、試料を送付する際にも便利である。しかしラドンはポリエチレンに吸着され易いため^{1,2)}、試料水を長時間ポリエチレン瓶に保存する場合にはその補正が必要である。

そこで実際に野外の試料水を測定する手法に従って補正の検討を行なった³⁾。

2. 実験

抽出法⁴⁾を用いた野外における水中のラドン濃度測定の際、現地では試料水を採取し液体シンチレーター (LS) を添加・振盪後、実験室に送付し分離測定は実験室で行うことが多い。そのためポリエチレン瓶の中に試料水が保存される期間は少なくとも数時間から数日に及ぶことが考えられる。そこでラドンを多く含んでいる試料水を用いポリエチレン瓶内に保存する時間を変えることによって得られるラドンの回収量の変化率を求めた。

実験にはラドンを多く含んでいることが解っている増富温泉の飲泉水、および神戸薬科大学敷地内湧出の地下水を使用した。これらの試料水を 30L 入りの大型瓶に採取し実験室に送付し、測定試料採取用 1L ポリエチレン瓶による保存と抽出の実験は実験室内で行った。実験は一度に 20 本づつ 3 回試料調製を繰り返し、保存時間を 2.5 時間から 300 時間まで行なった。ラドンを逃がさないように手早く処理するため、計容器を用いる操作を除き、あらかじめ使用する器具、溶液の目方を量り容量を重量に置き換えて計算出来るよう操作手順を定めた。

実験室に送付されてきた大型瓶内の試料水のラドン濃度は均一とみなし、以下の手順で実験を行なった。

- ① 使用する 1L のポリエチレン瓶 20 本の容積と重量を計測する。
- ② 各瓶には予め 1L の位置に目盛り線を付けておく。
- ③ 試料水を大型ポリエチレン瓶からサイホン方式により各ポリエチレン瓶に目盛り線まで静かに注ぎ入れる。直ちに蓋をして計量した後、トルエンベースの LS40ml をホールピペットにより添加し再び蓋をして 1 分間激しく振盪する。LS を添加したときの時刻を記録する。
- ④ 上記操作を 20 回繰り返し、放置する。
- ⑤ ③の操作が終了した試料の内 1 本は振盪した後計量する。静置して、液層が二層に分離したら直ちに分取管 (テフロン栓にくの字型のガラス管をはめ、ガラス管の先端を細口にする: 形状・使用勝手共に洗瓶のイメージ) を取り付け、ポリエチレン瓶の胴を押しながら液面を上昇させ、

あらかじめ計量してある測定用バイアルに上層のLSを移送する。分離した時刻、水温、LSを採取したバイアルの計量を行なう。

- ⑥ LSを採取したバイアルは3.5時間以上静置し、LSにより抽出したラドンを放射平衡に達せしめ、液体シンチレーションカウンタ(LSC: Packard社製 Tri-Carb 2550)により測定する。

2本目以降は保存時間を色々に変えて分離し、計測を行なった。

3. 結果および考察

ポリエチレン瓶に試料水を入れた時間を開始時間0(t=0)とし、試料調製後直ちに分離測定した試料(A)のt=0におけるラドン濃度を100%回収とし、各保存時間(試料(A)を基準時間0とし、試料(A)から各試料の分離までの時間)における試料中ラドン濃度(t=0における)を求め、試料(A)の値と比較し回収率を求めた。その結果の一部を表1に示した。

全ての結果をプロットし、散布図を描くと100時間までに比べ100時間以降でラドン回収率の減少に違いが見られた。そこで、100時間までと100時間以降の二つに分けて、分離までの時間(X)と回収率(Y)の関係を示した散布図を描いて、各々に近似曲線を求めた(図1, 2)。

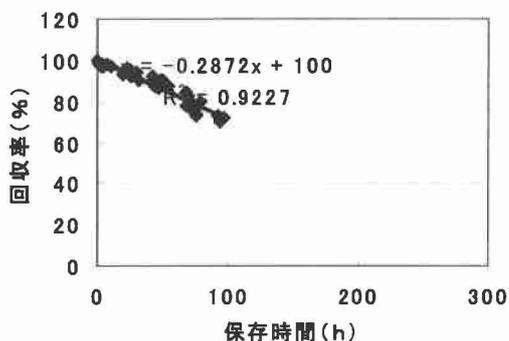


図1 分離までの時間と回収率(100hまで)

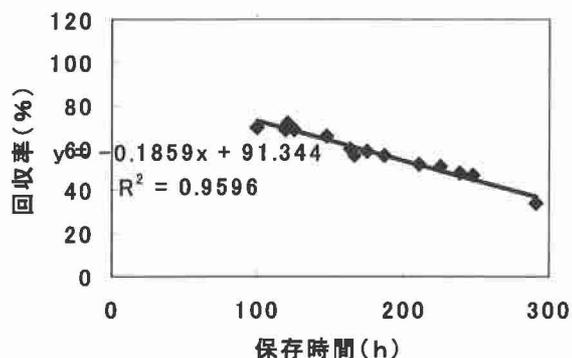


図2 分離までの時間と回収率[100h以降]

表1 ポリエチレン瓶の保存時間によるラドンの回収率

No	観測日時 (分離時刻)	分離までの時間 (保存時間:h)	水温(°C)	得られた ラドン量	
				(Bq/l)	(回収率:%)
1 試料(A)	2004/10/5 13:48	0.00	21.0	152.37	100.00
2	2004/10/5 16:06	2.30	22.3	147.66	96.91
3	2004/10/5 18:40	4.87	22.7	147.03	96.50
4	2004/10/6 9:56	20.13	23.1	142.38	93.44
5	2004/10/6 12:26	22.63	24.6	143.03	93.87
6	2004/10/6 15:00	25.20	25.8	144.18	94.62
7	2004/10/6 17:39	27.85	25.0	142.13	93.28
8	2004/10/7 9:29	43.68	24.5	133.68	87.73
9	2004/10/7 12:05	46.28	25.5	131.26	86.15
10	2004/10/7 14:55	49.12	26.0	136.77	89.76
11	2004/10/7 17:06	51.30	26.0	134.18	88.06
12	2004/10/8 10:08	68.33	24.0	119.00	78.10
13	2004/10/8 12:38	70.83	24.5	116.55	76.49
14	2004/10/8 15:15	73.45	24.5	115.55	75.84
15	2004/10/8 17:42	75.90	24.5	112.46	73.81
16	2004/10/9 9:40	91.87	22.5	111.33	73.06
17	2004/10/9 12:10	94.37	23.0	108.05	70.91
18	2004/10/9 14:42	96.90	23.5	110.20	72.33
19	2004/10/10 13:15	119.45	23.0	104.45	68.55
20	2004/10/10 15:15	121.45	23.0	107.43	70.51

各々の近似曲線は次のような近似式で示すことが出来た。保存時間 100 時間までの近似曲線は Y 軸の切片が 100 になるものを選んだ。

保存時間 100 時間まで

$$Y = -0.2872X + 100 \quad (R^2 = 0.9227) \dots\dots\dots (1)$$

保存時間 100 時間以降

$$Y = -0.1859X + 91.344 \quad (R^2 = 0.9598) \dots\dots\dots (2)$$

二つの式の相関係数 R はそれぞれ 0.9606、0.9797、寄与率 (相関の程度を表す数値) R^2 は 0.9227、0.9598 となり、かなりよい相関を示した。

本研究は実際に試料を扱う際の補正を検討したものである。よって用いるポリエチレン瓶の形状や種類が変わってくれば当然補正式も変わってくる。使用に則して検討する目安として利用出来るであろう。

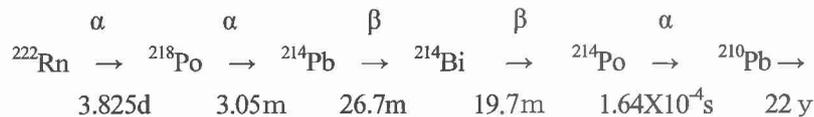
4. 参考文献

- 1) Saito M. : Correction for Loss of Radon-222 in Water Sample Caused by the Use of a Polyethylene Bottle, *BADIOISOTOPES*, 32, 109-112 (1983)
- 2) 斉藤正明 : 核種を吸収した高分子材料を液体シンチレータに溶解する新ラドン測定技術, *BADIOISOTOPES*, 48, 257-262 (1999)
- 3) 飯島昭子 : 大妻女子大学社会情報学部 社会環境情報学専攻 卒業論文 (2005)
- 4) 堀内公子 : 鉱泉中ラドンの抽出—液体シンチレーションカウンタによる新定量法について, 温泉工学会誌, 13, No.2, 95-103, (1978)

5. 付録

☆抽出法

抽出法はラドンが有機溶媒によく溶けることを利用している。トルエンベースの液体シンチレーター (LS) に抽出された半減期 3.825 日 (壊変定数: $\lambda=1.258 \times 10^{-4} \text{min}^{-1}$) のラドン (^{222}Rn) は、測定バイアルの中で下の崩壊図式に示すように崩壊する。ラドンから生成した娘核種ポロニウム-218 (^{218}Po) は半減期が短く、ラドン同様バイアルの中で崩壊し、以後順次崩壊が続いて行くが半減期 22 年の鉛-210 (^{210}Pb) に至って崩壊は一旦終了したと見なす事ができる。そしてラドンから鉛-210 までの 5 種の核種の間にはラドン抽出後 3.17 時間で放射平衡が成立する。測定は放射平衡成立以降の試料につき行う。



通常大型 LSC では積分計数法を用いて測定を行っているが、積分計数法による計測は 0 チャンネル付近に生じ易いノイズを除去するために独立 3 チャンネル方式で 0 チャンネル付近を除去した 25 チャンネル $\sim\infty$ 、50 チャンネル $\sim\infty$ 、75 チャンネル $\sim\infty$ の 3 つの領域のすべてのパルスを計数し、得られた 3 つの値から 0 チャンネルまでの値を外挿して求めている。LSC は α 線と β 線を同時に計数出来るため、ラドン測定においてはラドン (^{222}Rn)、ポロニウム-218 (^{218}Po)、ポロニウム-214 (^{214}Po) の 3 つの α 線, 鉛-214 (^{214}Pb)、ビスマス-214 (^{214}Bi) の 2 つの β 線を同時に計数していることになるが、積分計数法による $3\alpha + 2\beta$ の計数効率 は 100% である。外挿によって得られた 0 チャンネル $\sim\infty$ までの計数率は、ラドンから鉛-210 までの 5 核種 ($3\alpha + 2\beta$) のトータルの計数率を示しており、ラドンの計数率はその 1/5 である。

霧箱による α 線飛跡観察からわかること

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

(2007年2月6日 受理)

[要旨] 放射線セミナーで使われる霧箱内で観測される α 線の（真直な数センチの）飛跡から、われわれはどのようなことを理解したらよいかを原子・分子の構造・運動の観点からしらべた。 α 粒子は数万個の原子を突き抜け、飛跡周辺に十数万個のイオン化を形成し、飛跡が観測される。原子の中はほとんど真空であること、原子核の大きさは原子の大きさに対しておよそ1万分の1であること、 α 線は紙1枚の厚さで阻止されることなどが理解できる。

1. はじめに

放射線セミナーでは、いくつかの講義が一段落した後で、会場がひととき和やかな雰囲気包まれることがある。受講者全員が、指導員の指示に従いつつ、手作りキットを使って霧箱を作成し、それを使って暗がりの中で何とも心もとない放射線の飛跡を観察するひとときである。このための実験はおよそ一時間ほどであろうか、後片付けもあたふたとして、予定されたつぎのプログラムへと進んでいく。

観察されることは、アルファ線の真っすぐな数 cm ほどの飛跡の形成である。本稿は、このときの飛跡観察の余韻を楽しく思い出しながら、あれこれと原子や分子にまつわる話題を探るものである。

2. 霧箱の概要

多くの場合、受講者が作成する霧箱は高さ数 cm、直径 10 cm ほどのプラスチック製（底面だけは黒色の金属板）円筒容器である¹⁻³⁾（図は省略）。円筒内の上部はエタノールを浸み込ませたスポンジを張りめぐらし、そのため円筒内の上側領域は室温でエタノールが飽和されていると考えられる。容器の底部はドライアイス（マイナス 78°C）の板に密着して載せられているので、容器内の底側領域は低温（マイナス 30°C 程度）が維持される²⁾。容器は密閉され、静かに保たれ、また埃塵などを含まないものとする。すると容器内の空気は、上側領域はエタノール飽和の状態、エタノールは拡散によって下方に移行するがそこは低温のためにエタノール過飽和の状態、容器の底面に達してエタノールは凝結する。霧箱の原理は、エタノール過飽和の領域（高さにして数 mm から 1 cm 程度）に放射線が走り、空気をイオン化した場合の飛跡を観察する。イオンのまわりに極性分子（水、エタノールの分子などのように、分子に含まれる全電子の電荷の中心と陽電荷の中心がずれている分子をいう）が引きつけられ、つぎつぎと付加して大きく成長するが、逆に粒子表面から蒸発して消えてしまうこともある。適当な大きさの粒子が放射線の通過した飛跡に沿って多数できて、それが可視光線を散乱するのでその反射光が観察され、白く細い線が観察される。

表 1 霧箱内に存在する主な分子(原子)の存在量(%) (1 気圧、25℃)、分子量

分子	分子式	存在(%)	分子量
窒素	N ₂	73	28
酸素	O ₂	19	32
水	H ₂ O	0~2	18
二酸化炭素	CO ₂	0.03	44
アルゴン	Ar	0.9	40
エタノール	C ₂ H ₅ OH	~7	46

注) エタノールについては、25℃の値をのせた。

-30℃における値は 0.15%であり、過飽和となっている。水については、その日の気象条件によって異なるが、理科年表から推定した。

表 2 いくつかの温度におけるエタノールの飽和蒸気圧²⁾

温度 (°C)	飽和蒸気圧
78.3	1 (気圧)
20	0.058
0	0.017
-20	0.0036
-30	0.0015

3. 予め知られていること

考察に入る前に、後出の計算に必要な、予めよく知られていることをまとめておく。

(1) 霧箱内の主要な気体分子について

25℃、1 気圧の乾燥空気の密度は 0.001184 g/cm³ であることから、空気中の原子密度はおよそ $(0.001184/29) \times 2 \times \text{アボガドロ数} = 4.9 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ である。原子核の密度も同じ。原子の大きさは直径 1~2 Å (= $1 \sim 2 \times 10^{-8}$ cm) とする。またその原子 (実際は窒素分子も酸素分子も原子 2 個からできている) は 25℃ではおよそ 500 m/s の速さで動き回っている。マイナス 30℃の温度では、この速度は小さいがそれでも (分子運動のエネルギーが絶対温度に比例することから見積もると) 450 m/s 程度である。すこし重いエタノール分子でも 320 m/s 程度であろう。

(2) 各原子の内部構造について

中心に原子核とよばれ、大きさは小さいが原子の質量の大部分を担っている正電荷をもつ粒子が存在し、そのまわりを質量が極めて小さい負電荷をもつ電子が運動している。電子の個数はちょうど原子核の正電荷を打ち消すように、またその運動は定在波 (= 定常波) を形成し、時間的に変化しない一定の形 (= 軌道) を保っている。そのため原子核の周りを運動する電子は、一定以上の大きさのエネルギー (多くの原子の場合で 10~15 eV の値であり、イオン化エネルギーとよばれる) が与えられない限り、変化することなく、いつまでも定常的な運動状態を維持する。電子の質量は 9×10^{-31} kg、電荷は -1 単位 (-1.6×10^{-19} C) 原子核を構成する陽子と中性子のそれぞれの質量は 1.6×10^{-27} kg、陽子の電荷は +1 単位 ($+1.6 \times 10^{-19}$ C)、中性子の電荷は 0 である。

(3) 物体の運動について

すべて物体は力が作用しない限り一定の方向に一定の速度で運動を続ける (慣性の法則)。

(4) α 粒子の運動エネルギー

自然放射性元素から放出される α 粒子はじつはヘリウム原子核に他ならないことが

Rutherfordによって確かめられている(1906)。またそのエネルギーは5から8 MeVの範囲で知られているが、ここでは5 MeV ($=5 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19}$ J) とする。

以上に述べたことを表3にまとめておく。

表3 予め知られていること(計算に使用する数値)

- (1) 1気圧の気体中の原子密度(原子核密度)は $4.9 \times 10^{19}/\text{cm}^3$
- (2) 原子の半径は $0.5 \sim 1 \times 10^{-8}$ cm、室温で運動しているときの速度は ~ 500 m/s
- (3) 電子の質量は 9×10^{-31} kg、中性子および陽子の質量は 1.6×10^{-27} kg、陽子の電荷は+1単位($+1.6 \times 10^{-19}$ C)、中性子の電荷は0
- (4) 粒子(物体)の運動は慣性の法則に従う
- (5) 放射性原子の崩壊で放出される α 粒子のエネルギーは5 MeV ($=5 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19}$ J)

4. 考察

5 MeVの α 粒子の速度は $(1/2)MV^2 = 5 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19}$ Jの式のM(質量)に $4 \times 1.6 \times 10^{-27}$ kg = 6.4×10^{-27} kgを代入して速度 $V = 1.5 \times 10^7$ m/s、すなわち5 cmの距離をおよそ3 ns(10^{-9} 秒)で通過する。慣性の法則によれば α 粒子はいつまでも運動を続けるはずであるが、5 cmだけ進んだところで停止するのは α 粒子に力が働いて運動状態が変わってしまうためである。ではどのような力が働くのであろうか? 粒子は質量をもつが、その値が小さいので、重力は無視できる。強い力や弱い力は相手の粒子との距離が 10^{-14} mほどにまで接近したときに働く力なのでとりあえず考えないことにする。すると可能性があるのは電磁力である。

α 粒子は+2単位の電荷をもつので走行中に同じように電荷をもつ粒子(原子の中の電子や原子核)との間でクーロン相互作用を行う。まず-1単位の電荷をもつが質量は α 粒子のおよそ(1850 \times 4)分の1でしかない電子との相互作用から考える。 α 粒子が速度 1.5×10^7 m/sで走るのに対して原子内の電子もまた走ってはいるが、窒素原子や酸素原子のもっとも外側を走る電子の速度はおよそ 10^6 m/sであり、 α 粒子の速度からみたら無視できる。

(i) α 粒子と原子(空気分子)との衝突

5 MeVの α 粒子が1気圧の空気の中を5 cmの距離だけ進むときに要した時間は3 nsというほんの一瞬であるが、その間にいったいどれだけの個数の原子と衝突しているだろうか。それには半径 $(0.5 \sim 1) \times 10^{-8}$ cmの球が $4.9 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ の密度で存在している空間中で5 cmの長さの直線を引いたときに(平均して)ぶつかる球の個数を計算する。ある球が直線とぶつかる条件は球の中心点から直線までの最短距離(中心点から直線に下ろした垂線)の長

さが球の半径以下であることである。その個数は長さが 5 cm の直線を断面積 $\pi(0.5\sim 1\times 10^{-8}\text{ cm})^2\text{ cm}^2$ で長さ 5 cm の円筒で置き換え、その中に密度 $4.9\times 10^{19}/\text{cm}^3$ で存在する点の個数に等しい。それは $(2\sim 7.6)\times 10^4$ 個である。そこで α 線は3ナノ秒間で2~7万個の原子を通過したと考えざるを得ない。これらの原子は α 粒子の運動に対してほとんど抵抗を及ぼさない、 α 粒子の運動を大きく曲げることがない、極言すれば原子の中はほとんど真空であると結論できる。

(ii) α 粒子と原子核との衝突

α 粒子の大きさも原子核の大きさもまだわからないものとする。 α 粒子がヘリウム原子核であることから同じスケールの大きさ(じつは 10^{-12} cm)であろう。両者の衝突数を見積もるためには両者の半径の和を半径とする円を断面積とする長さ 5 cm の円筒を考え、その中に存在する原子核の個数を数える。いま原子核の半径を $r\text{ cm}$ とすれば、 $\pi(2r)^2 \times 5\text{ cm}^3 \times 4.9 \times 10^{19}/\text{cm}^3 = 3 \times 10^{21} r^2$ となる。いくつかの r の値に対して、得られる(期待される)衝突数を示すと、

原子核の半径 $r=10^{-10}\text{ cm}$ のとき、	5 cm の飛跡中の衝突数は 30
$r=10^{-11}\text{ cm}$ のとき、	0.3
$r=10^{-12}\text{ cm}$ のとき、	3×10^{-3}
$r=10^{-13}\text{ cm}$ のとき、	3×10^{-5}

である。これらの結果をどのように解釈するか、とりわけ Rutherford らの α 粒子散乱実験の結果⁴⁾と比較することは興味深い。(iv)を参照して欲しい。

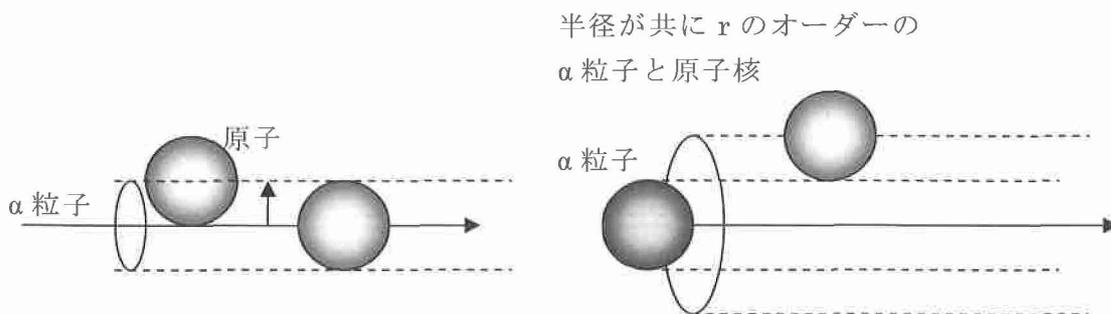


図 1. α 粒子と原子及び原子核の衝突数を計算する方法*)

(i) α 線飛跡から原子中心までの距離が原子半径よりも小さいときに衝突が起こる。(ii) α 線飛跡から原子核中心までの距離が(α 粒子の半径+標的原子核の半径)の和よりも小さいときに衝突が起こる。上の図では、左の原子の大きさは 10^{-8} cm 、右の原子核の大きさは 10^{-12} cm であることに注意

*) ある球が直線と交わる条件は球の中心点から直線までの最短距離(中心点から直線に降ろした垂線)の長さが球の半径よりも小さいことである。

Rutherford の 1911 年の論文には、 α 粒子が厚さ 4×10^{-5} cm の金はくを通過するさいに、20,000 個のうちの約 1 個が平均 90 度の角度で曲げられること、また厚い白金板に入射した α 粒子の約 1/8000 が後方に散乱(90 度以上の散乱)することが記載されている⁴⁾。さらに厚さ 4×10^{-5} cm の金はくは α 粒子の阻止能として 1.6 mm の空気層と同等であることも記載されている。5 cm の厚さの空気層はこの 30 倍であり、単純に計算すると 20,000 個のうち 30 個の散乱が期待される。それは $30/20,000 = 1.5 \times 10^{-3}$ となり、上の結果と比較すると原子核の半径として $r = 10^{-12}$ cm の値がもっとも近いことがわかる。付録で詳論する。

(iii) α 粒子はなぜ 5 cm だけ走って停止するのか (イオン化によるエネルギー損失)

α 粒子は +2 単位の電荷をもつので走行中に電荷をもつ粒子 (原子中の電子や原子核) との間でクーロン相互作用を行う。霧箱内の原子 (窒素や酸素) の大きさは $\sim 10^{-8}$ cm、原子核の大きさ $\sim 10^{-12}$ cm を思うと、 α 粒子の引き起こす現象は原子の(外側を回っている電子を跳ね飛ばすような)イオン化が大部分であることが想像できる。

電子の質量は α 粒子の質量に比べて著しく小さく、およそ(1850×4)分の 1 しかないので、 α 粒子が高速で電子の近傍を走るときに電子だけが跳ね飛ばされて、 α 粒子の進行方向は妨げられない。ただし電子が飛ばされるときに必要なエネルギーは α 粒子の運動エネルギーから受け取るほかない。そのエネルギーはイオン化エネルギー (およそ 15 eV) と飛ばされる電子の運動エネルギー (平均して 15~20 eV) である†)。つまり 1 回のイオン化についておよそ 30~35 eV 程度が消費される。5 MeV の α 粒子の 5 cm の走行中の全イオン化数が $5 \times 10^6 / 30 = (1.4 \sim 1.7) \times 10^5$ になると α 粒子は運動エネルギーがなくなるので走行が停まるのである。

(iv) α 粒子飛跡の構造

霧箱内で 1 本の α 粒子は 2~7 万個の分子を通過し、十数万個のイオン化を起こすこととなった。 α 粒子が 1 個の分子から電子を弾き飛ばすさいに、その弾き飛ばされた電子は元の α 粒子と同じ速度で走るものがかなり多いことが観測されている。この電子のエネルギーは $(1/2) m_e v^2 = (1/2) (9 \times 10^{-31} \text{ kg}) (1.5 \times 10^7 \text{ m/s})^2 = 1.0 \times 10^{-16} \text{ J} = 630 \text{ eV}$ である。この電子がまた別の分子をイオン化し、[†] さらに飛ばされた電子がまた別の分子をイオン化する、……。電子を放出した分子はすぐに隣の分子と結合する。また飛び出した電子は電子を受け入れやすい分子、たとえば二酸化炭素、酸素などに吸収されて負イオンを作る。生成した正負のイオンは近隣の分子、とくに極性分子(水やエタノール)を惹きつけ、凝縮性の分子を集め、光を反射させるほどの大きさにまで急速に (霧箱内の分子、とくにエタノール分子の速さから考えて、1 μm 範囲の周りから分子が集まって凝集されるまでの時間はおよそナノ秒(ns)でしかない) 成長するが、その一方で蒸発が起こりこのクラスターは消滅する。この凝集過程に関しては稿を改めて考えることにしたい。

†) 衝突係数 p は、飛跡から標的粒子までの実際の距離を表すのではなく、エネルギー E 以上の移行が起こるための断面積を πp^2 とあらわすときの p の値であると考えべきである。

(v) 放射線セミナーへの応用

20,000 個の α 粒子のうちの 1 (1.6 mm 空気層の場合) あるいは 30 (5 cm 空気層の場合) が 90 度以上の大きい散乱を受けることが予想される。放射線セミナー会場で霧箱が 50 個作られ、各霧箱で 20 個の α 線飛跡が観測され、このようなセミナーを 10 回開催したら全部で 10,000 本の飛跡が観測される。確率から考えて 1 本くらいは途中で大きく曲がる飛跡が観測されるかもしれない。このような実験を先人たちが繰り返し、それを見逃すことなく丹念に解析を進めて原子の構造が少しずつ明らかにされてきたのである。

通常の放射線セミナーでは「 α 線は紙 1 枚でとまる」と教えられることが多いが、同じセミナーで霧箱の実験が行われる。5 cm の空気層と 1 枚の紙の厚さの中の分子数が同じであれば (分子が違っていても含まれる電子が同じでいどの数であれば)、同じことをすでに霧箱によって観測していることになる。

5. 結論

5 cm の真っ直ぐな α 粒子の飛跡が観察されることを出発点として、考察をすすめてきたが、原子分子の構造について以下のことが結論できる。

(i) 原子の内部はほとんど何もない空間であり、 α 粒子はほとんど抵抗を受けることなく通過する (3 ナノ秒間で 5 cm)。それにもかかわらず α 粒子は膨大な数(十数万個)の電子を弾き飛ばしており、そのために最初に持っていたエネルギーを消費し尽してしまう。

(ii) 原子の大きさを 10^{-8} cm とすると原子核の大きさはその約 1 万分の 1 (面積では 10^8 分の 1、体積では 10^{12} 分の 1) のオーダーである。

6. 参考文献

- 1) 油井多丸: 簡易型霧箱キット[組み立て及び実験の手引き], 原子力体験セミナーテキスト (放射線利用振興協会)
- 2) 緒方良至, 加藤幸弘: 実験「放射線を見よう、測ろう」(原子力体験セミナー、愛知・岐阜・三重地区テキスト)
- 3) 坂内忠明: 霧箱の歴史、放射線教育, 4, [1], 4 (2000)
- 4) E. Rutherford: Phil. Mag. (Ser. 6), 21, 669 (1911) 日本語訳: 物理学古典論文叢書 9(東海大学出版会)

付 録

入射する荷電粒子については質量 M , 電荷 Ze , 速度 V とし、標的の荷電粒子については質量 m , 電荷 e であるとする(図 2 参照)。そして衝突係数 (標的の位置から入射粒子の飛跡に下ろした垂線の長さ) が p 、衝突前の標的が静止している座標系で考える。衝突時間は $2p/V$ 、このさいに両粒子間に Ze^2/p^2 (クーロン力の式には分母に $4\pi\epsilon_0$ が書き添えられる場合が多いが使用する単位系によるもので、ここでは簡便のためより簡単な表記法による) の力が働くので、 M から m へのエネルギー移行 E は

$$E = \frac{(\text{運動量変化})^2}{2m} = \frac{(\text{力} \times \text{衝突時間})^2}{2m}$$

$$= \frac{M}{m} \cdot \frac{Z^2 e^4}{T} \cdot \frac{1}{p^2} \quad (1)$$

またエネルギー移行量が E と $E + dE$ の間であるような断面積 $\sigma(E) dE$, すなわち衝突係数が p と $p + dp$ の間にあるような断面積は

$$2 \pi p dp = \sigma(E) dE = \frac{M}{m} \cdot \frac{\pi Z^2 e^4}{T} \cdot \frac{dE}{E^2} \quad (2)$$

ただし $T = (1/2) M V^2$ は運動エネルギーである。この 2 式からわかることを説明する：まず入射粒子 (5 MeV α 粒子) - 電子の衝突で $E = 15$ eV 移行の衝突が起こるためには、(1) 式に M/m に 4×1840 を、 Z^2 に 4 を、 T に 5×10^6 eV を代入して $p = 0.28 \text{ \AA}$ であることがわかる。(ここで $e^2 = 14.4 \text{ eV} \cdot \text{\AA}$ であることに注意)。すなわち断面積は $0.26 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ であり、 $\sigma(\text{電子密度})x = 1$ から $x = 1/(0.26 \times 10^{-16} \text{ cm}^2 (7 \times 4.9 \times 10^{19}/\text{cm}^3))$ 、すなわち平均して $1.1 \times 10^{-4} \text{ cm}$ を進むごとに $E = 15 \text{ eV}$ 以上のエネルギー移行が起こることがわかる。このまま続けば 5 cm の間に 45000 (4-5 万) 回のエネルギー移行 (イオン化) である。本文でも述べたように、ここで放出される二次電子の中には 630 eV という高エネルギー電子も存在しているので、さらに α 粒子飛跡のまわり (走行方向の横方向に) の空気分子をつぎつぎとイオン化をくりかえす。

電子-電子の衝突 ($T = 10^2 \text{ eV}$) で $E = 15 \text{ eV}$ 移行の衝突を起こすためには、 $p = 0.1 \text{ \AA}$ 以下であればよい。そして運動エネルギー = $10 - 100 \text{ eV}$ を得た標的電子が 10^{-4} cm ていどの距離を動くに要する時間 (応答時間) は $0.5 \times 10^{-12} \text{ s}$ でしかない。入射イオン (α 粒子) の衝突は、電子-電子の衝突に比して、粒子の質量 M 、電荷 Z の 2 乗に比例して衝突確率が大きくなり、またイオン化で飛び出した二次電子がさらに衝突を引き起こすとき、 T は小さいので確率は大きいことがわかる。

入射粒子 (α 粒子) - 原子核の衝突では、 $M = 4$ 、 $m = 14$ 、 $Z = 2$ であるが、原子核の電荷 ($Z' = 7$) にも考慮して $(Z')^2 = 7^2$ をも考慮する。そして今度は飛ばされるのは α 粒子のほうである。しかしそのためには α 粒子は原子核のごく近くにまで接近する必要があり、その断面積は非常に小さく、5 cm を走っても衝突の起こる回数は 10^{-3} のオーダーである。あるいは 1000 回実験を繰り返したら 1 回はこのような現象が観測されるだろうということである。

(エネルギー移行の局在化)

衝突係数 p が 0 から ∞ まで変化するときエネルギー移行 E は 0 からある値まで分布する。これは自由電子について言えることで、原子・分子中で束縛状態にある電子については、とり得る E の値について制約をとまなう。N₂ 分子の場合でいえば、外殻軌道の電子についてはイオン化エネルギーは 15.6 eV、また内殻軌道電子については 520 eV

であり、それは量子化されているためである。また E がある値以上であるためには p はある値以下でなければならない。すなわち物質中の多数のうちのごく限られた電子だけが衝突を受ける。これはエネルギー吸収の局在化にほかならない。そして放射線作用の特徴をもっとも的確にあらわすものである。

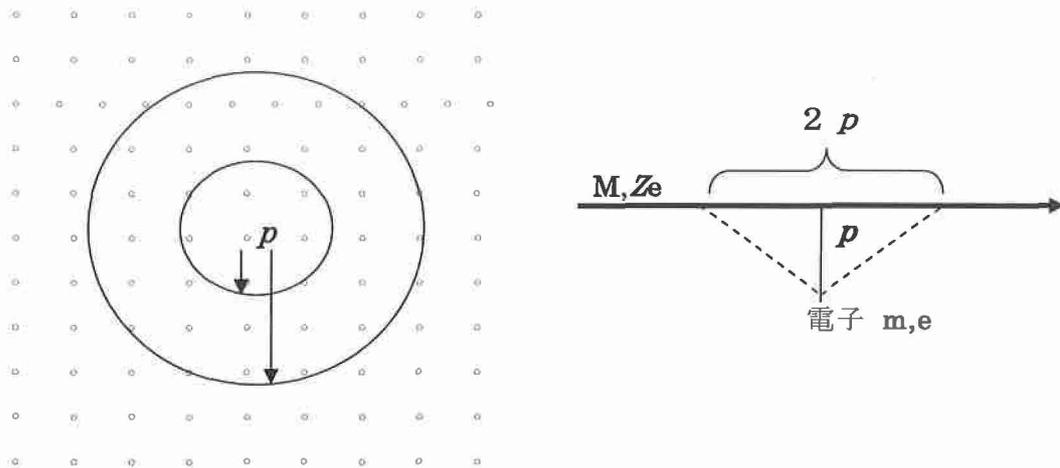


図 2. (左)紙面に垂直に同心円の中心に向かって入射粒子が通過するとき、その周りにほぼ均一に分布している電子(原子・分子)と衝突する。衝突係数 p の大きい衝突の頻度が高い(衝突の起こる回数が高い)ことを示す。(右)質量 M 、電荷 Ze 、速度 V の粒子が衝突係数 p で質量 m 、電荷 e の静止電子の近傍を横切る。 $2p$ の距離を入射粒子が速度 V で走る時間($=2p/V$)を衝突時間といい、この時間だけクーロン力($= Z^2 e^2/p^2$) が働くという近似を説明する。

サイエンス・パートナーシップ・プロジェクト (SPP) における放射線教育とその成果

柳澤和章^a, 笹川澄子^b, 中野光士^c

a 日本原子力研究開発機構 (〒370-1292 群馬県高崎市綿貫町 1233)

b (財) 環境科学技術研究所 (〒039-3212 青森県上北郡六ヶ所村大字尾駸字家ノ前 1-7)

c 群馬県立藤岡工業高等学校 (〒375-0012 群馬県藤岡市下戸塚 47-2)

(2007年3月7日 受理)

〔要約〕文科省および科学技術振興機構の平成18年度SPP事業で、群馬県立藤岡工業高等学校は旧原研（現：日本原子力研究開発機構）他と知的連携を組み、“地元工業高校生が学ぶ原子力技術とその未来”をテーマとする学習活動を実施した。放射線や原子力エネルギーに関する知識を基本事項を中心に授業を展開した結果、学習効果が3倍上昇した。近い将来、労働現場に立つであろう工高生に、教科書に書かれていないような基礎と応用を、SPPを活用して総合的に体系的に教えていくことは、自然で効果的な知識普及活動・理解活動のあり方の1つであり、結果として、放射線や原子力に対する理解者を増やすことにつながると期待されよう。

1. 序

放射線と教育の問題は、本誌「放射線教育」のメインテーマであり、1997年刊行の第1巻以降、常に話題性を持って様々な観点から論じられて来ている。この理由は比較的分かり易い。すなわち、学問・技術は常に進捗し、教育はそれを反映し、体系化を促す役割を持つ。つまり、教育は過去の事実を反映する静的な要素と現代事実を反映する動的な要素を内包しているために、その時代時代における多くの国民を代表する価値観を反映していかなければならないような要素を常に孕んでいる。このような状況下で、放射線教育フォーラムが学校における放射線教育という特集で「原子力体験セミナー文系コース」を総括した¹⁾。一方、原子力学会でも2007年問題に絡んでか、若い人材の確保の問題等が論じられ²⁾、内閣府からは高校教科書にみる原子力関連記述に関する報告書も発表された³⁾。これらは、どちらかという総論的な立場で、原子力および放射線教育と学校における教育との間のダイナミックスを論じている。

著者らは、これまでは各論的な立場、すなわち原子力と教育・PA (Public Acceptance, 社会的受容とも訳される)のあり方という観点から、健全な原子力時代を期待するならば、教育する側とされる側の両方の人間育成をも視野に入れた教育科学・学問が必要であると提言し^{4,5)}、それに関連して、新聞報道を基に原子力背景を分析してきた^{6,7)}。また、社会・経済的な立場から、放射線が本当に国民のために役立っているならば当然目に見える価値を持っている筈であるという仮定を立て、これまで明らかにされていなかった放射線の利用価値を貨幣で数える試みを実施した⁸⁾。波及効果として、放射線の恩恵が貨幣価値で表現でき、原子力分野で学ぶ多くの学生を勇気づけることが出来た。

著者らは、これまでの放射線教育に係わる活動の成果に基づき、様々な知識階層に位置する人々の、原子力利用（原子力エネルギー利用と放射線利用）に関する理解力の定量化をおこなう評価方法を模索してきた。幸いな事に最近それを試みる機会に恵まれた。すなわち、文部科学省が支援し独立行政法人科学技術振興機構（JST）が実施するサイエンス・パートナーシップ・プロジェクト（SPP）⁹⁾に、放射線利用のメッカと称されている日本原子力研究開発機構高崎（以下、原研高崎、旧原研高崎は2003年10月に独立行政法人化）の地元である群馬県立藤岡工業高等学校（以下、藤工）が応募・採択され、著者らがそれぞれの立場で、その活動を支援する事になった。この支援の段階で放射線教育に関する幾つかの新たな知見を得たので、第I部と第II部に分けて報告する。

第I部 原子力利用の理解力を定量化する評価に関する波及効果

I.1 目的

原子力利用に関して地元の工業高校生 14 人が、専門家による講義を受けた。その内容をどの程度理解できたかを定量化するための評価を実施する。

I.2 方法

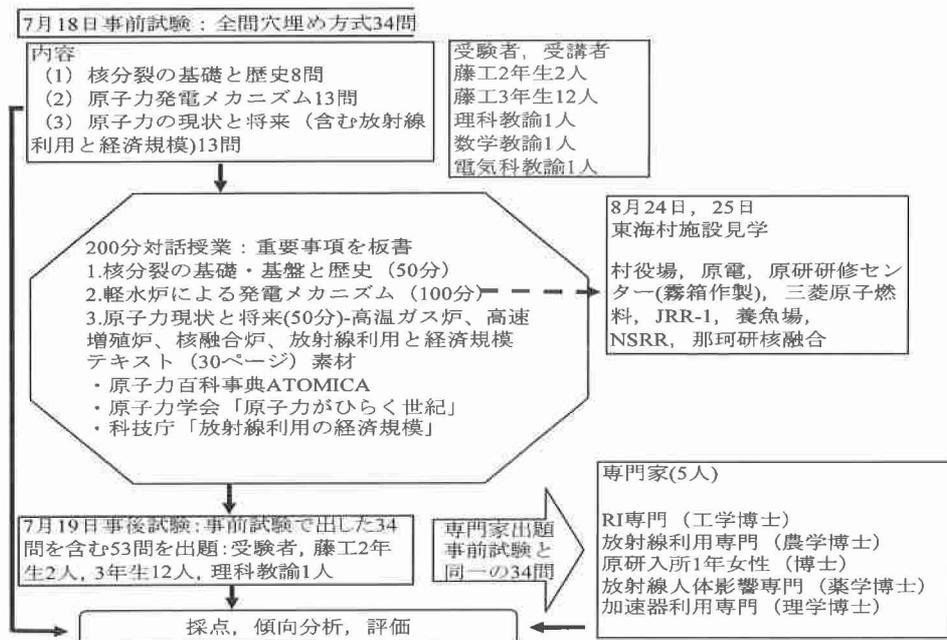


図1 評価試験の全体像（時間は上から下に流れる）

I.2.1 事前試験

図1に示すように、藤工におけるSPP関連の授業において、核分裂の基礎と歴史（高校物理で教える内容の含める）に関する設問8問、原子力発電メカニズムに関する設問13問、原子力の現状と将来（放射線利用や経済規模等）に関する設問13問、合計34問を、授業開始前20分で、いきなり試験した（以下、事前試験）。この事前試験の問題は、後綴

の資料の部の資料 1 にまとめて示した。受験者は生徒と同校教師（物理，数学，電気）3 人である。比較参考データとして，原子力に関する専門家 5 人もこの事前試験に参加した。当然のことであるが，生徒達（全て男子）には学習していない内容について設問しているので，理論的には生徒全員がゼロ点でよいはずである。山勘で答えを選択できないように，設問は全て穴埋め方式とした。答案用紙では個人名を伏せ全員が FUJI-XXXX というようなパスワード形式の名前を使用した。試験結果に関する分析は I.3 章に記述する。

I.2.2 講義

図 1 中「内容」として示されているように，核分裂に関する基礎と歴史，原子力発電のメカニズムおよび原子力の現状と将来（含む放射線利用と経済規模）という 3 テーマを中心にした講義を 50 分，100 分，50 分の合計 200 分実施した。テキストは原子力百科事典 ATOMICA¹⁰⁾等を参照にして筆者らが準備したが，素直に反省すれば，その内容は難しすぎた。授業では，生徒に本当に覚えてもらいたい事項を板書し，時間はかかるが生徒と対話する形式で理解を深めてもらった。なお，3 年生は，原子の構造，同位体，核分裂といった概念を，カリキュラムの都合上，学校の理科授業で殆ど勉強しておらず，2 年生は少々勉強している。生徒たちは，原研高崎の（南方 6km 離れた）地元の高校生といっても，原子力についてあまり予備知識を持っていなかったと言える。

I.2.3 事後試験

事後試験では 53 項目に亘って記入式問題を課した。勿論，事前設問で尋ねた 34 の質問項目も再度全く同じ形式で挿入した。この試験は講義翌日，20 分間で実施した。この試験問題は，後綴の資料の部の資料 2 にまとめて示した。

I.3. 試験結果の分析と評価

分析・評価では以下の点に着目した。

- ▶ 講義内容に対する生徒の理解度
- ▶ 生徒（素人）の理解力と原子力専門家の力量の違いを定量化するとどうなるか
- ▶ 核分裂基礎，原発メカニズム，原子力の経済規模という授業内容で，生徒が良く理解できた分野とよく理解できなかった分野の明確化

I.3.1 講義内容に対する生徒の理解度の評価

方法：事前試験の設問で，例えば，

設問 1-1

1898 年頃，アーネスト・ラザフォードはウラン (U) など天然の放射性物質から出ている放射線を発見し，①___ (ヘリウム原子核) 線，②___ (電子) 線，③___ 線と命名した。

というような形式で出題した。事後試験でもこれと全く同じ文章を出題している。回答にはそれぞれ①，②，③というように固有の番号を付帯してあるので，この番号を分類識別記号として使う。得られた回答については，正答の場合は得点 1 とし，誤答の場合は得点 0 とした。得点配分（問題に重みをつけるやり方）は採用していない。事前試験での設問は合計 34 項目あるので，全部正解すれば 34 点 (full score) となる。

結果：図2のとおりである。

分析1：事前問題に関する得点の分布を見ると14人の生徒全員が0点ではない。幅はあるが2～10点の範囲で原子力に関する予備知識を有していたことが推察される（平均値で表示すると 5 ± 3 点）。34問中、生徒の半数以上が正解をした設問は2つだけで、それらは以下である。

○ 群馬県には原子力発電所がないが、これはどういう物理的な障害が主な原因と考えられるか？ 回答：がないため。（正答率93%）

○ 放射線医学・医療利用

平成9年度の国民医療費29兆651億円のうち、放射線を使った医療費は全体の約4%（1兆2千億円）であった。内容は医科が91%、歯科が9%である。医科では（47%）、CT（37%）、核医学（12%）といった病気の診断に係わる放射線利用が主流である。経済規模は大きくないが、粒子線によるがん治療や中性子線による脳腫瘍の治療も実施されている。（正答率57%）

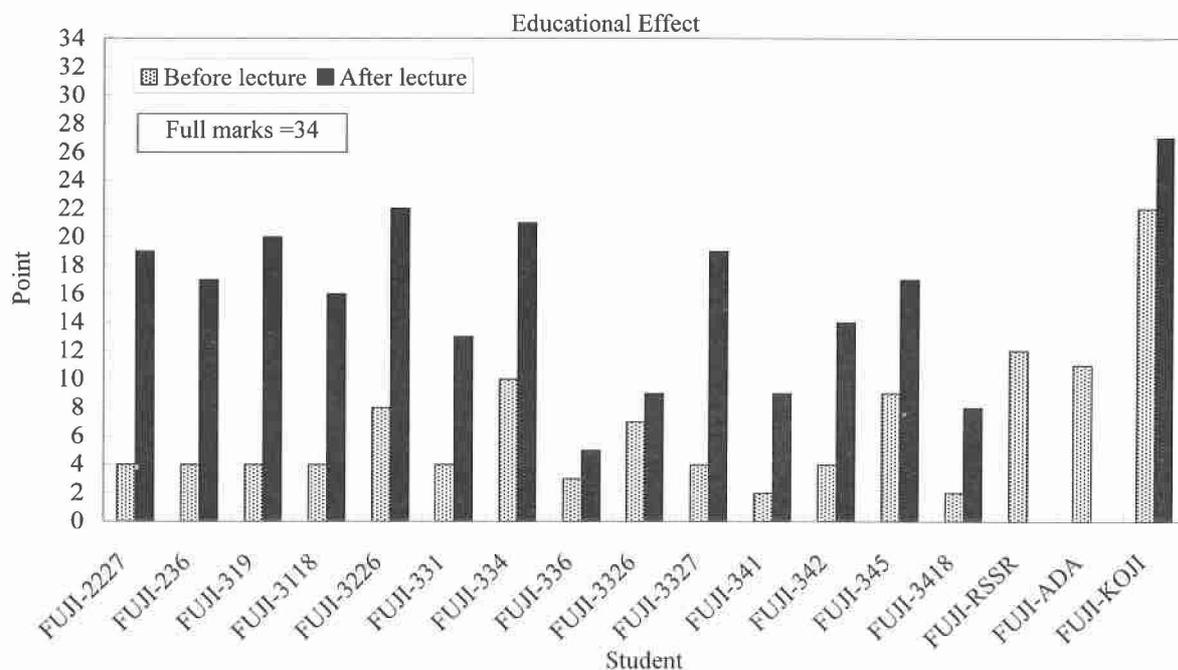


図2 講義前と講義後における、同一試験問題（34問）に対する生徒（教師）の総得点表 X軸において、FUJIの次に続く3～4桁の数字が生徒の識別番号である。FUJIの次に3～4桁の英文字が続くのが右のほうに3つほどあるが、これは数学、電気科、理科担当の教師のデータである。Y軸の数値は、34項目に対する生徒（と教師）の総得点数の事前データと事後データを同時にプロットしている。

分析2：事前試験の得点分布に比較して、事後試験の得点分布は明らかに全員が高得点側にシフトしている。つまり、5～22点の範囲で得点レベルが向上し、全体平均点で表示すると 15 ± 5 点であり、事前平均値の3倍になった。これは講義内容が一応成果を得ている事を示唆する。なお、生徒の原子力に対する理解が進んだ事は歴然であるが、そのことと原子力を好きになったかどうかは別の問題である。またそれを問うような質問は行わなかった。

分析3：3人の教師（図の右側3データ）は予備知識が生徒よりも高い。特に、理科教師は

事前試験の設問に対する得点が 22 点と高い。これは原子力（物理）に関する知識がかなり高い事を示唆するまた、事後試験でも 27 点と高得点であった。

I.3.2 生徒（素人）の理解力と原子力専門家の力量の違い

方法：原子力専門家の力量というのは定量化する機会が少ないので、この機会に、5 人の専門家（原子力工学，放射線教育，原子力・放射線 PA，あるいは放射線人体影響）を抽出し、生徒が行ったと同じ条件で筆記試験（20 分）を行った。

結果：図 3 のとおりである。

分析 1：素人である生徒と専門家 5 人の原子力予備知識レベルには明らかな差異がある。数量表示すると、生徒の平均得点は 5 ± 3 （母数 14）であるが、専門家の平均得点は 26 ± 6 （母数 5）であり、5 倍の開きがある。事前試験問題はほぼ原子力全般に亘る設問であるので、専門家に対しても総合力を問うている。専門家は満点～7 割程度の正答率で、この結果は当然といってよいであろう。それに対して特筆すべきは、学校側の理科担当である FUJI-KOJI 氏で、原子力分野の専門家に負けない位の力量が示された。

分析 2：生徒が原子力エネルギーの講義を受けた後のデータに注目したい。平均点 15 点はそれでもなお専門家（平均点 26 点）には及ばないが、講義を受けた事によって全体的に底上げ（平均的な得点で表示すると 3 倍上昇）が生じている。これは、原子力に関する講義によって生徒の知識が増加した事を示す一つの定量的な証左である。

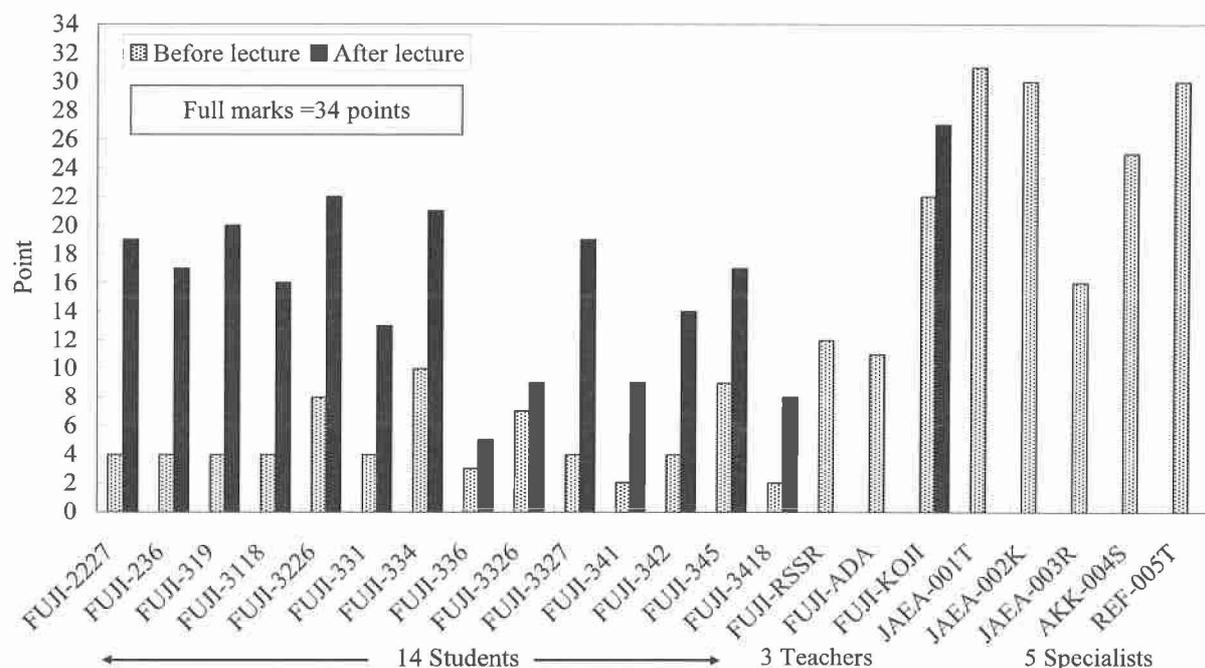


図 3 藤工生徒（14 人）と教師（3 人），および専門家（5 人）の事前試験成績

I.3.3 核分裂基礎，原発メカニズム，原子力の経済規模という授業内容で，生徒がよく理解できた事柄とよく理解できなかった事柄

方法：今回，生徒に原子力エネルギー概論と称して，核分裂の基礎，原発メカニズム，そして原子力（原子力エネルギーと放射線利用）の経済規模を講義した。その内容がどの程

度理解されたか重要な項目について設問した。生徒の正答率（生徒の総得点を生徒が全部正解した場合の得点 14 点で割ったものの百分率）が重要分野ごとにどの程度変動するものかを調べた。勿論、母集団は小さいので、この結果を引用して、例えば群馬県の工業高校生徒の原子力知識レベルを類推するのは間違いである。理解できた又はできなかったという判定基準として、ここでは正答率 50% で線を引いた。

結果：幾つかあるが、放射線利用に着目する（図 4 および 5）。

(1) 核分裂の基礎と原子力の歴史

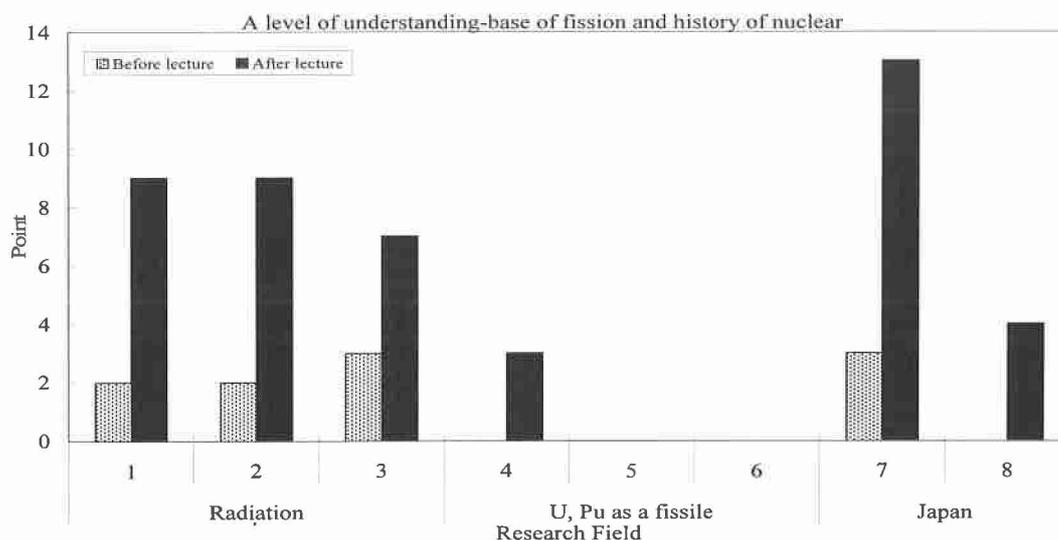


図 4 核分裂の基礎と歴史に係わる設問番号と正答率 (%)

分析 (図 4)：図中横軸の研究分野（例，Radiation）と設問番号（例，1）に従って逐一記述する。なお，設問番号は図中では 1, 2, 3 としているが本文では①，②，③と表記する。
Radiation（放射線）：放射線には①アルファ線，②ベータ線，③ガンマ線があることをよく理解できた（正答率 > 50%）。

U, Pu as a fissile（核分裂物質としてのウランとプルトニウム）：ウランとプルトニウムの同位体で核分裂する元素名を尋ねたところ，④U-235 は事後試験の設問で何とか正答したもの（正答率 20%），⑤Pu-239 と⑥Pu-241 は事前と事後試験を通して誰も正答しなかった（講座では自然に存在する U-235 と原子炉で中性子による核分裂で生成する Pu-239, Pu-241 を教えた）。

Japan（日本）：ここではわが国の原子力政策における原則事項である⑦非核三原則と⑧原子力基本法について質問した。⑦非核三原則はよく理解された（一部の生徒は核三原則と理解したが，このようなことがなければ正答率はさらに上がった）が，法律用語である⑧原子力基本法は馴染みがなかったようである。専門家でもこれは同様に難しく，5 人中 2 人しか正解がなかった。

(2) 原子力発電のメカニズム

放射線教育の観点からは少しずれるので，記述は全て省略する。

(3) 原子力の経済規模

分析 (図 5) :

Nuclear (原子力) (省略)

Radiation (放射線) : 放射線を利用した工業, 農業及び医学・医療分野の経済規模を問う問題である。原発の電気売上げである 7.3 兆円と工業利用の売上額が偶然同じだったので, この類推から工業利用の経済規模㉔ 7.3 兆円ができれば, 農業利用 1 千億円と医学・医療利用 1.2 兆円で合計㉕ 8.6 兆円がでる。これは皆全滅かと思っていたが予想外に良くできた (正答率約 40%)。

N vs R (原子力エネルギー対放射線利用) (省略)

Semi-con (半導体) : 放射線工業利用において, 最も大きな経済規模を誇る半導体産業では㉖ 5.4 兆円の売り上げがある。この数値は生徒達の実生活には結びついていないとみえ, 正解者は 1 人であった。これに関して講義では, 「実際の放射線利用では, 原研高崎が従来から実施しているように, 加速器やコバルト-60 を使ったベータ線およびガンマ線の利用, 半導体等では低エネルギーイオン注入装置が使われている」旨の事項を教えた。

Tire (タイヤ) : タイヤ全生産量の 90%以上がラジアルタイヤであり, その生産工程において加速器による照射が行われている。ラジアルタイヤの売り上げは㉗ 約 1 兆円である。これは覚えやすかったのか, 正答率が 43%まで上がった。しかし, 照射のメカニズムを講義では行わなかったため, 良く理解されたとはいえない。

Cables (電線・ケーブル) (省略)

Sterilization (滅菌) : 使い捨ての医療用器具の滅菌に γ 線と電子線が使われ, その割合は, ㉘ γ 線が 56%, ㉙ 電子線が 4%である。かなりの回答者がこの比率を逆に書いていた。

RI (放射性同位元素) : 私たちの身近でどのような RI が放射線応用計測機器として使われているか問うた。講義では, ㉚ 製紙工場の紙厚さ計, 鉄鋼業の厚み計, 高速道路の盛り土の締め固め度, 車のメタルハライドランプ, 火災報知器等を説明した。日常生活の利便性の向上のため至るところで使われているが, 私たちの目に直接触れないためか, 正答率は低かった。

NDE (非破壊検査) (省略)

Food (食品) : 食品照射については, わが国では 1 品種だけ照射が例外的に許されているがそれは何かを問うた。正答は㉛ 馬鈴薯である。事前試験では, タマネギ, 米, 野菜, きのこと, とり, 大豆などと回答が入り乱れ, 正答率は 43%であったが, 事後試験では教育効果があったと推察され 86%が正答した。教育効果があったと推察される。しかし, 梨と回答した者と無回答だった者がいて 100%にはならなかった。いずれにしても, 食品照射は他に比べ正答率が一番高かった。

Sterilization (害虫駆除) : 不妊虫放飼育法による害虫駆除で根絶された㉜ ミバエ (ウリミバエ) の名前を記憶できるかどうか質問した。4 人がミバエと正解 (正答率 29%) した。一方, ハエと回答したのが 3 人, ハチが 2 人, ハセミが 1 人いた。NHK テレビで放映されたこともあり, よく知れ渡っていると思っていたが, 実際はそうでもなかった。

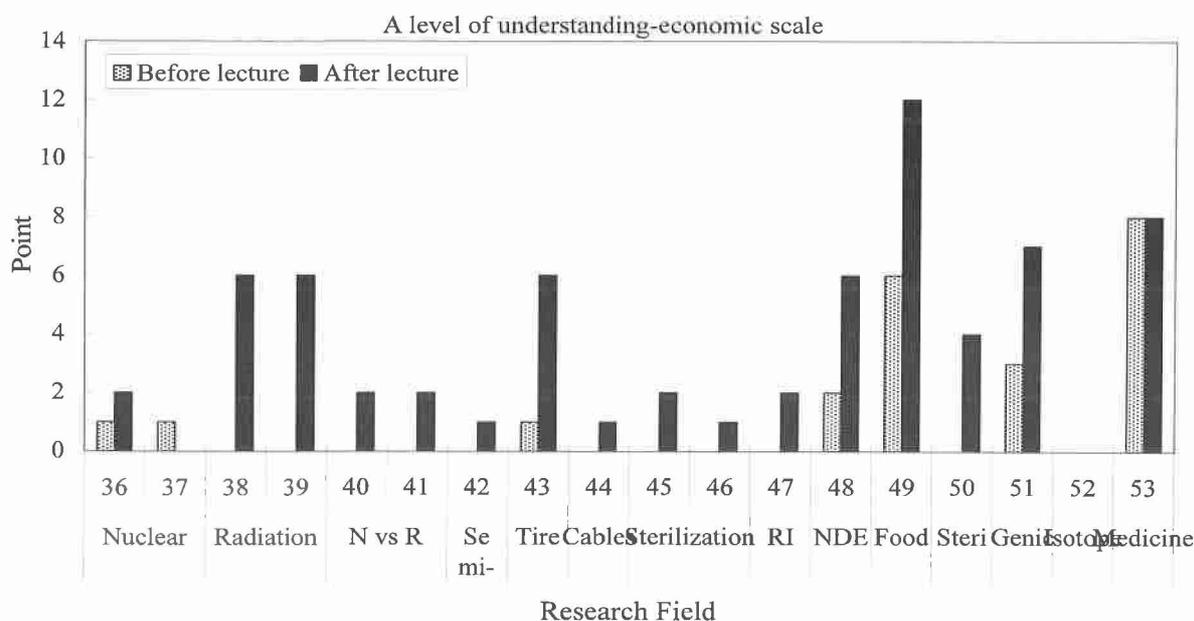


図5 原子力の経済規模に係わる設問番号と正答率 (%)

Gene (突然変異育種) : 放射線を利用した突然変異育種で市場化されたものを尋ねた。㊦イネ, ナシ, ダイズ, モモ, キク, コムギが記載していれば正解とした。正答率は 50%であり, よく理解されていた。食物に関しては, 生徒の興味もあり, 正しく教えれば正しく理解されることを確信した。

Isotope (ラジオアイソトープ) (省略)

Medicine (医学) : 最後に医学・医療に関連した問題を出した。医科で最も多く使われている放射線診断内容を問うた質問であり, ㊦X線撮影(レントゲン写真撮影)が正解である。正答率は 57%で, よく理解されていた。

I.4 原子力利用の理解力定量化のまとめ

講義の事前および事後において原子力に関する重要基本事項を, 全問穴埋め形式で受講生に出題し, 講義内容の理解度を正答率(判断基準 50%)で評価した。

- 1) 事前試験の得点分布では 34 点を満点として, 生徒の平均点は 5 点あった。これは, 原子力に関して地元工業高校生が何らかの予備知識を得ていた事を示唆する。事後試験の得点分布では 34 点を満点として, 生徒の平均点は 15 点であった。事後試験において, 生徒の知識は明らかに全員が高得点側にシフトした。正確な知識を与えれば, 誰でも正しく理解できることを示す証左である。
- 2) 専門家と素人(生徒)の原子力に関する力量を比較した(満点 34 点)。生徒平均点 5 点(母集団 14)に対して, 専門家平均点は 26 点(母集団 5)である。5 人中 3 人の専門家の得点は 30 点(2 人)と 31 点(1 人)であり満点(34 点)に近かった。藤工理科の教師は 22 点であり, 大学を出たばかりの原子力専門家(16 点)を凌いだものの, 他の 4 人の専門家には及ばなかった。ここで特筆すべきは, 事前試験では平均 5 点であ

った生徒の得点が、講義を受けた後の事後試験では、同じ問題に対して平均 15 点と高得点側にシフトした事実である。半日程度の講義でこれであるから、もっと長く根気良く講義すれば、知識レベルはさらに向上すると思われる。これは、藤工 SPP の実施が決して無意味でなく、理科（原子力）を理解するヒトの育成に有効であることを示唆する。

- 3) 生徒について得意・不得意な分野を分析してみた。核分裂の基礎では放射線の種類など比較的良く理解するが、プルトニウム同位体名や法律用語（原子力基本法）に関しては理解が不足する。原発メカニズムでは、常識的な事柄はよく理解している。例えば、再処理問題ではサイクルする日本やフランスと直接処分する米国の違い、総発電量に占める原発の割合（30%）、米国の原発数とわが国の原発数（わが国の約 2 倍）、燃料ペレットの発電価値（1つのペレットが 1 軒の年間消費電力の 7 ヶ月のエネルギーを出す事）、原発と群馬県の相関、チェルノブイリ事故等にも理解がある。一方、わが国にある 52 基程の原発の所在地、所在県、原発の基本構造等は、講義時間不足が主たる原因であるが、理解が進まなかった（平均 30～60%程度の正答率）。施設見学（今回の SPP では 8 月後半に茨城県東海村の原電施設、原研東海の研修所、JRR-1、NSRR 等の施設、三菱原子燃料製造工場、那珂の核融合施設等を見学）で実物を眺めつつ大いに見聞を広めることには意義がある。経済規模に関する出題は難問続出であった。それでも、食品照射や X 線検査に対してはかなりの生徒が良く理解する。エネルギー基盤としての原発の役割、国民生活の利便性向上における放射線利用の役割を、本 SPP 参加の生徒が、完全ではないが、正しく理解してくれたと考える。

第Ⅱ部 放射線と健康および放射線測定の話義における評価アンケート調査

Ⅱ.1 目的

ここでは、講義者に対する評価と受講者の理解度に対する評価をアンケート方式で調査した。その主要目的は、原子力・放射線の理解活動のあり方に関する人文社会科学的研究の一環として、自身の講義の仕方がどのように受け止められたか、また講義者に対する評価だけでなく、受講者の理解度はどうであったかのデータを得ることにある。そして、得られたデータを基に理解活動のあり方を考察し、人々の希望を的確に捉え的確に応えた理解活動の実施に役立てることにある。今回は受講者一人一人に目が行き届く比較的小グループであり、講義者の講義方法と受講者（生徒と教師）自身の理解度のデータを得る 1 つの好機と考えられた。

Ⅱ.2 結果と考察

講義は「放射線と健康」および「放射線を探そう」の 2 部構成とし、受講者は SPP に参加した生徒 12 名（3 年生）の他に、受講を申し出られた教師数名であった。各講義の後、評価アンケートを実施した。ここでは講義内容を議論することが目的ではないので、順を追ってその概略や印象を記述するにとどめ、評価アンケートの集計結果を、考察を交えながら記述する。

II.2.1 講義内容

「放射線と健康」の部

放射線の健康影響に言及するため、その基本として、人体をよりよく理解してもらうために、人体模型の分解と再構築を行ってもらった。どの生徒達も初めての経験らしく、興味を持って積極的に人体模型の分解と再構築を行った。この試みは、生徒にとどまらず、教師の方々にも好評であった。約30分を当てた「人体構造の理解」の後、この人体に対して放射線はどのように影響するのか、という切り口で、以下のような順で話を開始した。

- 1) 放射線の定義・種類・特徴：「工業高等学校ではX線やガンマ線は電磁波と教えている」という担当教諭からの事前情報を参考に、放射線を一言で説明するとどうなるかということと、そもそも水素から始まる一連の元素（含放射性核種）はどこでいつ頃作られたか、などという事を基に説明した。定義では、「高速で飛んでいる粒、波長の短い電磁波」、種類のところでは、定義に沿って、粒の放射線と電磁波の放射線に分けて列挙した。特徴のところでは、「なぜ危険なのか、しかし注意して使えば大変有益」がつながるように教示した。先行講義で習得していた知識と重複した部分があったようで、生徒達には効果的な復習になったように見受けられた。
- 2) 放射線はなぜ危険か：原爆ドームや投下された原爆の模型（広島型原爆リトルボーイ、長崎型原爆ファットマン）の写真を示した。また（財）放射線影響研究所（広島市および長崎市）で、日本の原爆被爆者のご協力をいただき調査研究がなされてきたこと、その結果、放射線の人体影響、つまり、すぐ現れる症状があること、潜伏期を経て後で現れる症状（主な症状、血液のがんと内臓のがん）があること、それらは被ばくした線量によって程度が違ふこと、が世界的に理解されるようになったという説明をした。生徒達は、原爆投下や終戦の日が講義日と前後していたため、原爆被ばく影響を絵空事ではなく受け取ったようであった。また、自作の「がんができるまで」というアニメーション様のイラストには、大変理解しやすかったという感想が寄せられた。
- 3) 注意して使うと大変有益：放射線はエネルギーをもっていること、そのため危険であること、しかし、エネルギーは有効活用すべきであること、併せて今日の日本の各産業分野における放射線利用の状況と経済効果を話した。例として、医療では毎年受ける健康診断での胸部X線撮影、空港での機内持ち込み荷物のX線による非開放検査、放射線を利用して開発されたものの例として、自動車のタイヤと消臭スプレー（市販品）を示した。上述の(1)放射線の定義・種類・特徴と同様に、先行講義で習得していた知識と重複した部分があり、生徒達には効果的な復習になったように見受けられた。そのため、講義者にとっても楽に説明できた。

最後に、次のように復習した：放射線にはいろんな種類がある、エネルギーをもつ、だから危険、だから有益、放射線は両刃の剣、注意して役立てよう。

この復習の後、後述の評価アンケートを実施し、午前の部を終えた。

- 4) 復習（記述省略）
- 5) 評価アンケート（後述）

「放射線を探そう」の部

身近にあるサンプルや珍しいサンプルの放射線量を測定した。放射線測定器「はかるくん」は放射線計測協会から借り出したもので、受講者 1 人に測定器 1 個を与えた。

- 1) 肥料から出ている放射線：市販の園芸用肥料（硫酸カリウム，硫酸，尿素）を机の上にならべ，ベータ線線量とガンマ線線量を測定してもらった。それぞれの肥料の化学式と測定値を比較した。測定データは後綴の資料の部の資料 3 に示した。
- 2) 塩から出ている放射線：岩塩（中国四川省産），イタリアの天日塩，浜御塩（対馬産），死海ミネラル塩（イスラエル産），食塩（（財）塩事業センター製造）の 5 種市販品を机の上にならべ，肥料の測定と同様に，ベータ線線量とガンマ線線量を測定してもらった。それぞれの塩の化学式と測定値を比較した。測定データは後綴の資料の部の資料 3 に示した。サンプルの説明に際して，それぞれの産地も世界地図で示したが，小型でしかも英語表記の地図しか持ち合わせず，日本語表記の大きな地図が用意できれば地理の学習にも発展させられたのに，と悔やまれた。
- 3) 植物から出ている放射線：次の 4 種植物の標本のイメージングプレート像を示した：カリウム含量が多いホウレンソウ，三大薬草の 1 つゲンノショウコ，美しい野草ツリガネニンジン，一般的な農作物ジャガイモ（地上部の花，葉，茎）。本項目はこのような探索方法や技術があることを教示する目的もあった。また，ゲンノショウコやツリガネニンジンが今日の高校生にはなじみが少ないのは理解できるが，畑作地が多い地域に生活している生徒のほとんどが，ジャガイモの花を見るのは初めて，というのは意外であった。このことが，II.2.2 の評価アンケートの結果に示すように，次回に期待する講義に，「植物の実験」と記述されていたことと関係しているのかも知れない。参考までに，ホウレンソウとジャガイモのイメージングプレート像を後綴の資料の部の資料 3 に示した。
- 4) 君から出ている放射線：測定観察の最後に，「ちょっとお遊び」を試みに加え，受講者自身の体の測定したい部分を測定してもらった。午前 10 時から途中昼休み 1 時間を挟んで午後 4 時頃までの強行軍で疲れ気味になっていた受講者達は，最後の「お遊び」にホッとしたようであった。また，ウランガラス製の小鉢とビー玉の測定も行った。このウランガラスには，こんなものがあるのかというような驚きを受講者に惹起したように見受けられた。
- 5) 復習（記述省略）
- 6) 評価アンケート（後述）

II.2.2 評価アンケート

1) 方法

調査票¹¹⁾：回答者数は午前の部は 18 名（生徒 12，教師 6），午後の部は 16 名（生徒 12，教師 4）であった。調査内容は，設問 1～5 が講演者に対する評価で，以下のような各講演に共通する「共通」設問である：①講演者の話は聞きやすかったか，②話の内容は分かったか，③図は分かったか，④図の量はどうかであったか，⑤資料は分かりやすかったか（表 1-1 あるいは表 2-1 参照）。設問⑥～⑩（あるいは⑪）はそれぞれの講義の内容に合わせた「個別」設問で，受講者の理解度を尋ねるものである（表 1-2 と 1-3，表 2-2 と 2-3 参照）。

最後に自由記述欄を設けた。調査票（評価アンケート）を後綴の資料の部の資料3に示した。

集計方法¹²⁾：評点は次の6段階とし、それぞれに点数を与えた：

「良い（分かった）」5点 「まあ良い（まあ分かった）」4点 「普通」3点
「やや悪い（やや聞きにくかった／やや分からなかった／やや多かった）」2点
「悪い（聞きにくかった／分からなかった）」1点 「無回答」0点

集計は、それぞれの段階に付いた○の数を単純に数え得点とした。次に、回答者数のバラツキを調整するために、以下のような計算式を考案し、それぞれの設問の評価得点をスコア化した（以下、共通設問1～5は共通スコア、個別設問⑥～⑩／⑪は個別スコアと呼ぶ）。

各設問のスコア = $(5 \times \text{「良い」の数} + 4 \times \text{「まあ良い」の数} + 3 \times \text{「普通」の数} + 2 \times \text{「まあ悪い」の数} + 1 \times \text{「悪い」の数} + 0 \times \text{「無回答」の数}) \div \text{回答者数}$

2) 結果

「放射線と健康」における評価（表1-1～1-3）

全体（生徒と教師）の評価：講義者に対する評価と受講者の理解度に対する評価は表1-1のようであった。両評価ともそれぞれ共通スコア（4.2～4.7）および個別スコア（4.7～4.9）に示されるように高得点となった。特に個別スコアは高く、受講者は学ぼうとする意欲が高いことがうかがわれる。

生徒の評価および教師の評価：上記のような全体（生徒と教師）評価が得られたので、次に生徒の評価と教師の評価に分け、同様に分析した（表1-2, 1-3）。その結果、共通設問も個別設問も高得点であった。これを反映して、共通スコアも個別スコアも極めて高い値となった。この理由として、受講者が勉強しようとする意欲的であったこと、そのため、講義内容が受講者によく理解されたこと、等が考えられた。

スコアについて多少言及したい。どの共通スコアも極めて高い値で、講義者がこれまで経験してきた中で最高であった⁹⁾。特に教師は講義者に対して満点の評価を下した。受講者による自身の理解度に対する評価である個別スコアは、生徒4.3～4.7、教師4.8～5.0の範囲にあった。共通スコアと同様に、受講者が勉強しようとする意欲的であったこと、また、講義内容が受講者によく理解されたことを反映するものであろう。生徒も教師も、人体模型の勉強には特に高得点を示した。やはり、医療情報は、自身や家族あるいは親族に病人が出て初めて関心事となることや、容易に得られそうで得にくいものであること等が背景に横たわっていると推察された。特に人体の構造はその典型例であることが強く示唆された。

共通スコアで最も低かったのは、④図等の量に対する教師の4.0であった。本設問に用意した回答欄は「良かった」、「まあ良かった」、「普通」、「やや多かった」、「多かった」であるが、「少なかった」と追加記述がなされていた。この回答は「悪い」に含めて集計した。講義者はこれまでの経験^{9,10)}から、「多すぎる」ことを心配していたが、杞憂であった。

「放射線を探そう」における評価（表2-1～2-3）

全体（生徒と教師）の評価：講義者に対する評価と受講者の理解度に対する評価は表2-1のようであった。先の「放射線と健康」と同様に、共通スコア（4.6～4.9）も個別スコア

(4.6~4.9)も高得点を示した。僅差ではあるが、共通スコアが前述の「放射線と健康」の場合よりも上昇したことは、講義方法が受講者に好意的に受け入れられたとも解釈され、安堵した。

生徒の評価と教師の評価：生徒と教師に分け、講義者に対する評価と受講者の理解度に対する評価を表 2-2 と 2-3 に示す。「放射線と健康」における評価と同様に、共通設問も個別設問も極めて高得点が示された。それを反映して、いずれのスコアも極めて高い値となった。講義者に対する評価である共通スコアは、生徒が 4.5~4.8 を示した。教師の場合、④ 図等の量に対して「普通」が 1 個あることが要因となった 4.5 が 1 つ、その他 4 項目は満点の 5.0 が示された。受講者による自身の理解度に対する評価である個別スコアは、生徒の場合、4.6~4.9、教師の場合、4.5 と 4.8 が 1 つずつで、その他の 3 項目は満点の 5.0 が示された。受講者は講義を実によく理解したと解釈できる高い評点であった。

3) 自由記述欄（意見・感想、次回に望む講義）

自由記述欄には「意見・感想」と「次回に望む講義」を記述してもらった。「意見・感想」は省略するが、「次回に望む講義」は、今回の講義を受講した結果どのようなことに興味が発展していったかを示すと考えられるため、そのまま下に列記する（カッコ内は複数記述件数）。生徒達はもちろん教師の方々にとっても、今回の講義は放射線・原子力に対する興味だけでなく、植物など他分野のことにも興味を惹起された様子が窺われた。また実験実習などを受講者にやってもらうことは、受講者自身にとっても好ましい経験になっていることが示されたのではないだろうか。専門知識を一方向的に押しつけるのではなく、自然の中に生きる生物にも目を向けること、ヒトもその生物の一種であるという見方を加味することも大切だと思われた^{4,5,13)}。また、科学技術はそれ単独にあるのではなく、歴史的要素を加えたり、今回は取り入れる余裕がなかったが、美術や音楽などの芸術分野とともに総合文化の両輪としてあること^{4,13)}を強調してもよいと思われた。

- 放射線の利用法についていろいろ知りたい
- 実験をたくさんしたい
- 植物の実験
- 空気中にどれ位放射線があるか
- 原発（2 件）
- いろいろなものの放射線を計測したい
- 今回のように自分から調べるのをまじえた方がいい
- 今回と同じ講演
- 六ヶ所村の現状・住民の声・研究者の声・将来の展望等々。

表 1-1 評価アンケート結果：放射線と健康（全体）

放射線と健康	全 体（生徒と教師）						スコア		
	良い	まあ良い	普通	やや悪い	悪い	無回答	N	共通	個別
共通設問	話し方	14	3	1	0	0	0	18	4.7
	内容の分かりやすさ	15	3	0	0	0	0	18	4.8
	図等の分かりやすさ	15	3	0	0	0	0	18	4.8
	図等の量	10	4	3	0	1	0	18	4.2
	資料	13	5	0	0	0	0	18	4.7
個別設問	放射線の定義	13	5	0	0	0	0	18	4.7
	50年間の研究結果	12	6	0	0	0	0	18	4.7
	放射線はなぜ危険	16	2	0	0	0	0	18	4.9
	放射線は両刃の剣	12	6	0	0	0	0	18	4.7
	復習効果	14	4	0	0	0	0	18	4.8
	人体模型	16	2	0	0	0	0	18	4.9

表 2-1 評価アンケート結果：放射線を探そう（全体）

放射線を探そう	全 体（生徒と教師）						スコア			
	良い	まあ良い	普通	やや悪い	悪い	無回答	N	共通	個別	
共通設問	話し方	14	2	0	0	0	0	16	4.9	
	内容の分かりやすさ	10	6	0	0	0	0	16	4.6	
	図等の分かりやすさ	12	4	0	0	0	0	16	4.8	
	図等の量	12	2	2	0	0	0	16	4.6	
	資料	13	2	1	0	0	0	16	4.8	
個別設問	肥料の放射線	14	1	1	0	0	0	16	4.8	4.8
	塩の放射線	12	3	1	0	0	0	16	4.7	4.7
	植物の放射線	11	5	0	0	0	0	16		4.7
	君の放射線	10	5	1	0	0	0	16		4.6
	復習効果	14	2	0	0	0	0	16		4.9

表 1-2 評価アンケート結果：放射線と健康（生徒）

放射線と健康	生 徒						スコア			
	良い	まあ良い	普通	やや悪い	悪い	無回答	N	共通	個別	
共通設問	話し方	9	2	1	0	0	0	12	4.7	
	内容の分かりやすさ	9	3	0	0	0	0	12	4.8	
	図等の分かりやすさ	9	3	0	0	0	0	12	4.8	
	図等の量	7	2	3	0	0	0	12	4.3	
	資料	7	5	0	0	0	0	12	4.6	
個別設問	放射線の定義	7	5	0	0	0	0	12		4.6
	50年間の研究結果	7	5	0	0	0	0	12		4.6
	放射線はなぜ危険	10	2	0	0	0	0	12		4.8
	放射線は両刃の剣	7	5	0	0	0	0	12		4.6
	復習効果	8	4	0	0	0	0	12		4.7
	人体模型	10	2	0	0	0	0	12		4.8

表 2-2 評価アンケート結果：放射線を探そう（生徒）

放射線を探そう	生 徒						スコア			
	良い	まあ良い	普通	やや悪い	悪い	無回答	N	共通	個別	
共通設問	話し方	10	2	0	0	0	0	12	4.8	
	内容の分かりやすさ	6	6	0	0	0	0	12	4.5	
	図等の分かりやすさ	8	4	0	0	0	0	12	4.7	
	図等の量	9	2	1	0	0	0	12	4.7	
	資料	9	2	1	0	0	0	12	4.7	
個別設問	肥料の放射線	10	1	1	0	0	0	12		4.8
	塩の放射線	8	3	1	0	0	0	12		4.6
	植物の放射線	9	3	0	0	0	0	12		4.8
	君の放射線	6	5	1	0	0	0	12		4.4
	復習効果	11	1	0	0	0	0	12		4.9

表 1-3 評価アンケート結果：放射線と健康（教師）

放射線と健康	教 師						スコア			
	良い	まあ良い	普通	やや悪い	悪い	無回答	N	共通	個別	
共通設問	話し方	5	1	0	0	0	0	6	4.8	
	内容の分かりやすさ	6	0	0	0	0	0	6	5.0	
	図等の分かりやすさ	6	0	0	0	0	0	6	5.0	
	図等の量	3	2	0	0	1	0	6	4.0	
	資料	6	0	0	0	0	0	6	5.0	
個別設問	放射線の定義	6	0	0	0	0	0	6		5.0
	50年間の研究結果	5	1	0	0	0	0	6		4.8
	放射線はなぜ危険	6	0	0	0	0	0	6		5.0
	放射線は両刃の剣	5	1	0	0	0	0	6		4.8
	復習効果	6	0	0	0	0	0	6		5.0
	人体模型	6	0	0	0	0	0	6		5.0

表 2-3 評価アンケート結果：放射線を探そう（教師）

放射線を探そう	教 師						スコア			
	良い	まあ良い	普通	やや悪い	悪い	無回答	N	共通	個別	
共通設問	話し方	4	0	0	0	0	0	4	5.0	
	内容の分かりやすさ	4	0	0	0	0	0	4	5.0	
	図等の分かりやすさ	4	0	0	0	0	0	4	5.0	
	図等の量	3	0	1	0	0	0	4	4.5	
	資料	4	0	0	0	0	0	4	5.0	
個別設問	肥料の放射線	4	0	0	0	0	0	4		5.0
	塩の放射線	4	0	0	0	0	0	4		5.0
	植物の放射線	2	2	0	0	0	0	4		4.5
	君の放射線	4	0	0	0	0	0	4		5.0
	復習効果	3	1	0	0	0	0	4		4.8

II.3. 放射線の健康影響および測定のとまとめ

- 1) 講義の仕方に対する評価は極めて好意的であった。講義者は、少なくとも、平易な言葉で話すこと、双方向的な会話をまじえること、を心掛けた。それが多少なりとも現れたと受け取られた。しかし、アンケートに現れてこない不具合や欠点などがあるとも考えられ、それらをどのように察していくかが、今後の課題である。
- 2) 受講者の理解度は極めて高かった。この理由として、前提要因として SPP に自ら参加を希望した生徒達と教師が対象であったことが考えられる。また今回の SPP は、複数の研究機関の関係者の連携プレーが功を奏し、体系的に総合的に原子力・放射線を学ぶ機会を提供することになった。このことも大きな要因としてあげられよう。この高い理解度が今後何らかの形で生かされれば幸いである。
- 3) 近い将来労働現場に立つであろう工業高等学校の生徒達に、教科書に書かれていないような放射線や原子力の基礎と応用を、SPP を活用して総合的に体系的に教えていくことは、自然で効果的な知識普及活動・理解活動のあり方の 1 つであると考えられる。その結果、放射線・原子力に対する理解者を増やすことにつながると期待されよう。
- 4) 教師の方々にも生徒と同列に立って体系的に放射線や原子力を学んでいただくことは、自然で効果的な知識普及活動・理解活動になると思われる。そのためには、適切な環境作りが必要で、そこに原子力推進政策の役割も専門家の役割も大いに期待される。
- 5) 今回のようなデータを蓄積し、例えば、受講者の社会経済学的な背景、時代的趨勢、心理等々、この種の調査研究に見落とされがちな人文社会科学的な視点も加味して調査分析することは、原子力・放射線に関する理解活動のより効果的な実施に対して重要な示唆を与えると期待される。

謝辞

本報告は、文部科学省および独立行政法人・科学技術振興機構の平成 18 年度サイエンス・パートナーシップ・プロジェクト (SPP) の支援によって実施した、講座型学習活動成果 (プラン A) から得られた放射線教育的効果を途上評価した結果である。ご支援いただいた文部科学省他の関係各位に謝して辞するものである。

参考文献

- 1) NPO 法人放射線教育フォーラム編、放射線教育フォーラム 2001 年度成果報告書「学校における放射線教育」(2002.3)
- 2) 斑目春樹、原子力における若い人材確保の問題について、日本原子力学会誌, 48, 11, 29-32 (2006)
- 3) 佐田務、チェルノブイリや臨界事故で言及される原子力：高校教科書にみる原子力関連記述、日本原子力学会誌, 48, 8, 27-34 (2006)
- 4) 笹川澄子、原子力時代に期待される教育・PA, 放射線教育, 3, 1, 43-50 (1999)
- 5) 笹川澄子、原子力の安全と安心を結ぶ理解活動を考える、放射線教育, 8, 1, 31-38 (2004)
- 6) 笹川澄子、新聞報道にみる原子力：2002 年 1～12 月予備調査、放射線教育, 6, 1, 15-20 (2002)
- 7) 笹川澄子、新聞報道にみる原子力：2001 年 4 月～2003 年 12 月、放射線教育, 7, 1, 59-68 (2003)

- 8) 田中隆一，柳澤和章，わが国における放射線利用の経済規模について，放射線教育，3，1，51-57（1999）
- 9) <http://rika.jst.go.jp/spp/18boshu1.htm>
- 10) <http://mext-atm.jst.go.jp/atomica/index2.html>
- 11) 笹川澄子，普及活動「住民・専門家対話集会（通称 出前講演会）」に対する評価・成績表，「日本保健物理学会第39回研究発表会」講演要旨集104頁，六ヶ所村，2005年6月30～7月1日
- 12) 笹川澄子，他，環境科学技術研究所の普及活動「住民・専門家対話集会（通称 出前講演会）」，「日本保健物理学会第39回研究発表会」講演要旨集163頁，六ヶ所村，2005年6月30～7月1日
- 13) 笹川澄子，放射線教育フォーラムは何処から来たのか 放射線教育フォーラムは何者なのか 放射線教育フォーラムは何処へ行くのか，放射線教育，4，1，26-31（2003）

サイエンス・パートナーシップ・プロジェクト (SPP) における放射線教育とその成果

資料の部

資料 1 第 I 部における事前試験問題 (34 問)

事前試験問題 34 問は事後試験問題 53 問から抜き出しているため、設問番号が連続ではない。

1. 核分裂の基礎及び原子力発電のメカニズムに関する設問

設問 1-1

1898 年頃、アーネスト・ラザフォードはウラン (U) など天然の放射性物質から出ている放射線を発見し、①_____ (ヘリウム原子核) 線、②_____ (電子) 線、③_____ 線と命名した。

設問 1-2

天然に存在するウラン-92 の同位体 (存在率 0.7%) で核分裂するのは④_____ であり、天然には存在しないが核分裂するプルトニウム-94 の同位体は⑤_____ 及び⑥_____ である。

設問 1-3

世界で唯一の被爆国であるわが国は「核兵器を持たず、作らず、持ち込まず」の⑦_____ を遵守し、⑧_____ に則り、原子力の利用は厳に平和目的に限っている。

設問 1-4

核燃料サイクル (nuclear fuel cycle) では、使用済み燃料を⑨_____ してプルトニウムを取り出し、再び原子炉に装荷して燃焼させることを計画する。核燃料サイクル路線を踏襲しているまたは踏襲しようとしているのは⑩_____ や日本であり、⑪_____ は使用済み燃料を直接処分する方式をとっている。

設問 1-5

冷却材と減速材に軽水 (H_2O) を使用したのが軽水型原子炉 (light water reactor) であり、大別すると沸騰水型原子炉 (BWR) と加圧水型原子炉 (PWR) に分かれる。わが国の商業用 BWR 発電炉の第 1 号機は敦賀発電所 1 号機で⑫_____ 県にある。一方、わが国の商業用 PWR 発電炉の第 1 号機は⑬_____ 原子力発電所 1 号機であり、大阪万博にも送電した。

設問 1-10

二酸化ウラン燃料ペレット⑭_____ 個であなただけの家 1 軒の 1 年分の電気が発電できる。

設問 1-12

核燃料サイクルでは、プルトニウム燃料を高速増殖炉 (FBR) で燃焼させるのが本筋であるが、その開発の遅れ等を考慮し、 UO_2 と PuO_2 との混合燃料 (MOX 燃料) を LWR で燃焼させるか計画がある。これを⑮_____ 計画という。

設問 1-13

群馬県には原子力発電所がないが、これはどういう物理的な障害が主な原因と考えられるか？ 回答：30がないため。

設問 1-14

原子炉の事故として、冷却材が喪失する事故（loss-of-coolant accident）及び核分裂に伴う反応度が異常に増加する事故（reactivity initiated accident）が代表格である。前者の場合、例えば地震等で配管が破断する事を想定するが、対応策として原子炉建屋に31が設置されている。地震が原因ではないが、冷却材が喪失して事故になった有名な例として1979年3月に発生した米国スリーマイルアイランドの32事故がある。また、反応度に関係した事故として1986年4月にソ連で発生した33事故がある。

設問 1-15

わが国は1973年（昭和48年）と1978年（昭和53年）の2度に亘って石油ショックに見舞われ、国民生活の基盤となるエネルギーをしっかりと確保する方策が模索された。この一つの対策として原子力エネルギーの重要性が認識され、原発の安定・定着化が国策として図られてきた。1970年頃は僅か数基だった原発も1997年（平成9年）頃になると52基まで増加した。その結果、全発電総量に占める原子力発電の割合は概略34%となった。一方、商用発電炉の本家本元である米国は、わが国の約35倍の数の原発が稼働中である（ヒント：人口比になっている）。

2. 原子力エネルギーと放射線利用の経済規模に関する設問

設問 2-1

平成9年度の総発電量に占める原発の売り上げシェアは36%であった。原発を有するわが国の電力会社の電気売り上げの総額はどのくらいであると考えるか？ 回答：約36兆円。原子炉周辺機器・核燃料サイクル関連費が1.6兆円あるとすれば、合計は37兆円となる。

設問 2-2

放射線利用の経済規模は、工業利用が約38兆円、農業利用が1千億円、医学・医療利用が1兆2千億円で、合計約39兆円となる。

設問 2-3

放射線利用の経済規模と原発関連のエネルギー利用経済規模の比率は全体を100%としたときに40%対41%となる。

設問 2-5

放射線工業利用：ラジアルタイヤ（放射線橋かけ）

わが国の1997年におけるタイヤの生産量は約1億7千万本で、そのうちの91.3%がラジアルタイヤである。ラジアルタイヤは、電子加速器（電子線）による前処理（ボデープライ等への放射線加硫30kGy）が行われており、その結果ボデープライ等の厚みを薄くでき品質の安定化に貢献できる。さらに天然ゴムの使用量を減らす事ができる。このように電子加速器を使ったラジアルタイヤの売り上げは年間約43兆円ある。

設問 2-8

ラジオアイソトープ (RI) 放射線応用計測機器の分野では、私たちの身近でどのようなものに放射線源が使われているか、知っているものがあつたら書きなさい。

47

設問 2-9

非破壊検査の部門でどのような放射線がどのような検査に役立っているでしょうか、知っていたら書きなさい。

48

設問 2-10

放射線農業利用：食品照射（19 億円の経済規模）

わが国で許されている食品照射は今のところ 1 品種だけですが、何に対する食品照射でしょうか。49

設問 2-11

放射線農業利用：害虫駆除（84 億円の経済規模）

沖縄、奄美群島、小笠原では放射線（ガンマ線）を使った害虫駆除が成功して、従来沖縄から出荷できなかった苦瓜（ゴーヤ）等が本州等に向かって出荷出来る様になりました。この駆除された害虫の名前はなんと申しますか。50

設問 2-12

放射線農業利用：突然変異

農業の分野では放射線を利用した突然変異育種により、病虫害に強い食物が生産されています。例えばどのようなものがあるか、書きなさい。

51

設問 2-14

放射線医学・医療利用

平成 9 年度の国民医療費は 29 兆 651 億円でしたが、放射線を使った医療費は全体の約 4%（1 兆 2 千億円）でした。内容は医科が 91%、歯科が 9%です。医科では 53（47%）、CT（37%）、核医学（12%）といった病気の診断に係わる放射線利用が主流です。経済規模は大きくありませんが、粒子線によるがん治療や中性子線による脳腫瘍の治療も実施されています。

資料 2 第 I 部における事後試験問題（53 問）と解答

1. 核分裂の基礎及び原子力発電のメカニズムに関する設問

設問 1-1

1898 年頃、アーネスト・ラザフォードはウラン (U) など天然の放射性物質から出ている放射線を発見し、① α （ヘリウム原子核）線、② β （電子）線、③ γ 線と命名した。

設問 1-2

天然に存在するウラン-92 の同位体（存在率 0.7%）で核分裂するのは④ ^{235}U であり、天然には存在しないが核分裂するプルトニウム-94 の同位体は⑤ ^{239}Pu 及び⑥ ^{241}Pu である。

設問 1-3

世界で唯一の被爆国であるわが国は「核兵器を持たず、作らず、持ち込まず」の⑦非核三原則を遵守し、⑧原子力基本法に則り、原子力の利用は厳に平和目的に限っている。

設問 1-4

核燃料サイクル (nuclear fuel cycle) では、使用済み燃料を⑨再処理 (reprocessing) してプルトニウムを取り出し、再び原子炉に装荷して燃焼させることを計画する。核燃料サイクル路線を踏襲しているまたは踏襲しようとしているのは⑩フランスや日本であり、⑪米国は使用済み燃料を直接処分する方式をとっている。

設問 1-5

冷却材と減速材に軽水 (H_2O) を使用したのが軽水型原子炉 (light water reactor) であり、大別すると沸騰水型原子炉 (BWR) と加圧水型原子炉 (PWR) に分かれる。わが国の商業用 BWR 発電炉の第 1 号機は敦賀発電所 1 号機で⑫福井県にある。一方、わが国の商業用 PWR 発電炉の第 1 号機は⑬美浜原子力発電所 1 号機であり、大阪万博にも送電した。

設問 1-6

BWR の炉心冷却材温度は約⑭ $300^{\circ}C$ 、圧力は約⑮ $60kg/cm^2$ であり、PWR の炉心冷却材温度は約⑯ $320^{\circ}C$ 、圧力は約⑰ $160kg/cm^2$ である。

設問 1-7

LWR に使われる二酸化ウラン (UO_2) 燃料ペレットの濃縮度は概略⑱3 w/o (重量パーセント) であり、濃縮の方法は六フッ化ガス (UF_6) による⑲ガス拡散法が最近では主流を占めている。 UO_2 燃料を収める燃料被覆管は⑳ジルコニウム (Zr) 金属名を主成分とする合金で、円筒状のさや形状をしており、その外径は約㉑1cm、長さは約㉒3.6mである。一本一本の燃料棒を束ねたのが燃料集合体であり、110 万 kW 級の BWR では㉓764 体の燃料集合体が装荷され、120 万 kW 級の PWR では㉔193 体の燃料集合体が装荷される。

設問 1-8

原子炉で使われる燃料棒は種々の原因で破損する事がある。1970 年代は UO_2 の製造後の乾燥が不十分で照射により発生した水素により、被覆管内面が水素脆化する事に起因した破損 (サンバースト破損) が多かった。1970 年代後半では、特に PWR において非加圧燃料棒が冷却材外圧でつぶれる破損が起こった (焼きしまり)。1970 年代後半から 80 年代に入ると、熱膨張した燃料の端面と被覆管が機械的に接触して、ヨウ素といった活性な核分裂生成物介在の下で応力腐食を起こして破損する現象が生じた。これを㉕PCI (ペレット-被覆管相互作用) 破損と称す。

設問 1-9

日本原子力研究所では、1967 年 (昭和 42 年) から国を代表して OECD/NEA が主催する㉖ハルデン (原子炉) 計画に参加し、燃料の健全性に関する炉内照射試験を実施してきた。

設問 1-10

二酸化ウラン燃料ペレット㉗1 個であなたの家 1 軒の 1 年分の電気が発電できる。

設問 1-11

原子炉の圧力障壁 (バウンダリー) を構成する圧力容器は、BWR では高さ約 22m、内径約 6m であるが、PWR では高さ約㉘13m、内径約 4m である。

設問 1-12

核燃料サイクルでは、プルトニウム燃料を高速増殖炉（FBR）で燃焼させるのが本筋であるが、その開発の遅れ等を考慮し、 UO_2 と PuO_2 との混合燃料（MOX 燃料）を LWR で燃焼させるか計画がある。これを **29 プルサーマル（Pu-thermal）計画** という。

設問 1-13

群馬県には原子力発電所がないが、これはどういう物理的な障害が主な原因と考えられるか？ 回答：**30 海（冷却材）**がないため。

設問 1-14

原子炉の事故として、冷却材が喪失する事故（loss-of-coolant accident）及び核分裂に伴う反応度が異常に増加する事故（reactivity initiated accident）が代表格である。前者の場合、例えば地震等で配管が破断する事を想定するが、対応策として原子炉建屋に **31 ECCS（緊急時炉心冷却系）** が設置されている。地震が原因ではないが、冷却材が喪失して事故になった有名な例として 1979 年 3 月に発生した米国スリーマイルアイランドの **32 TMI-2 事故** がある。また、反応度に関係した事故として 1986 年 4 月にソ連で発生した **33 チェルノブイリ（Chernobyl）事故** がある。

設問 1-15

わが国は 1973 年（昭和 48 年）と 1978 年（昭和 53 年）の 2 度に亘って石油ショックに見舞われ、国民生活の基盤となるエネルギーをしっかりと確保する方策が模索された。この一つの対策として原子力エネルギーの重要性が認識され、原発の安定・定着化が国策として図られてきた。1970 年頃は僅か数基だった原発も 1997 年（平成 9 年）頃になると 52 基まで増加した。その結果、全発電総量に占める原子力発電の割合は概略 **34 30%** となった。一方、商用発電炉の本家本元である米国は、わが国の約 **35 2 倍** の数の原発が稼働中である（ヒント：人口比になっている）。

2. 原子力エネルギーと放射線利用の経済規模に関する設問

注意：モノを作るという事は途中途中で幾つかの工程があり、それら工程を技術的にクリアして最終製品ができる。放射線を利用したモノづくりでも考え方は同じである。モノ作りのある一部分の工程で放射線が利用される事が多く、最初から最後の工程まで全部放射線を利用した製品は稀（まれ）である。私たちが勉強する原子力エネルギーと放射線利用の経済規模は、平成 9 年度（1997 年度）のデータを調査したものである。

設問 2-1

平成 9 年度の総発電量に占める原発の売り上げシェアは 36% であった。原発を有するわが国の電力会社の電気売り上げの総額はどのくらいであると考えるか？ 回答：約 **36 5.7 兆円**。原子炉周辺機器・核燃料サイクル関連費が 1.6 兆円あるとすれば、合計は **37 7.3 兆円** となる。

設問 2-2

放射線利用の経済規模は、工業利用が約 **38 7.3 兆円**、農業利用が 1 千億円、医学・医療利用が 1 兆 2 千億円で、合計約 **39 8.6 兆円** となる。

設問 2-3

放射線利用の経済規模と原発関連のエネルギー利用経済規模の比率は全体を 100% とした

ときに4054%対4046%となる。

設問 2-4

放射線工業利用：半導体

IT 革命での主役は半導体である。半導体の微細加工は、露光、エッチング、不純物添加（ドーピング）、成膜等の要素技術で構成されており、それぞれに数多くの電磁波や粒子ビームが利用され、それらのなかには電子線、エックス線、イオンビーム等の電離能力をもった電磁波や粒子が含まれている。この経済規模は原子力発電の売り上げとほぼ等しく約425.4兆円ある。

設問 2-5

放射線工業利用：ラジアルタイヤ（放射線橋かけ）

わが国の 1997 年におけるタイヤの生産量は約 1 億 7 千万本で、そのうちの 91.3%がラジアルタイヤである。ラジアルタイヤは、電子加速器（電子線）による前処理（ボデープライ等への放射線加硫 30kGy）が行われており、その結果ボデープライ等の厚みを薄くでき品質の安定化に貢献できる。さらに天然ゴムの使用量を減らす事ができる。このように電子加速器を使ったラジアルタイヤの売り上げは年間約431兆円ある。

設問 2-6

放射線工業利用：電線・ケーブルへの応用

電線は、導体の外側をポリエチレン（PE）や塩化ビニル（PVC）で被覆し絶縁したものであり、ケーブルは電線を金属で遮蔽したものである。それらの耐熱性、耐薬品性、対加熱変形性を向上させるため、低・中エネルギーを用いた電子加速器で放射線橋かけがなされている。特に電子機器配線用電線では売り上げ約 2,300 億円の 20%が放射線利用と推定され、44460 億円の経済規模となっている。

設問 2-7

放射線工業利用：使い捨て医療用具の滅菌

使い捨て医療用具（注射筒、ダイアライザ、メス等）の市場は 4,700 億円市場であるが、そのうちの 56%（2,647 億円）に45ガンマ線、4%（194 億円）に46電子線が使われている。

設問 2-8

ラジオアイソトープ（RI）放射線応用計測機器の分野では、私たちの身近でどのようなものに放射線源が使われているか、知っているものがあつたら書きなさい。

47パルプ・製紙工業の厚さ計（85Kr, 90Sr, 147Pm）、鉄鋼業の厚み計（ ^{137}Cs や ^{241}Am からのガンマ線）、煙感知器（ ^{214}Am の α 線）、高速道路盛り土の締め固め度（ ^{60}Co の γ 線 ^{252}Cf の中性子線）、メタルハライドランプ（ ^{147}Pm や ^{63}Ni の β 線）等何か書いてあれば正解

設問 2-9

非破壊検査の部門でどのような放射線がどのような検査に役立っているでしょうか、知っていたら書きなさい。

48溶接部の健全性（ガンマ線）、配管、圧力容器の溶接部の健全性（エックス線）空港の手荷物検査、半導体の不良品検査（エックス線検査装置）

設問 2-10

放射線農業利用：食品照射（19 億円の経済規模）

わが国で許されている食品照射は今のところ 1 品種だけですが、何に対する食品照射でし

ようか。49馬鈴薯（ジャガイモ，poteto）

設問 2-11

放射線農業利用：害虫駆除（84 億円の経済規模）

沖縄，奄美群島，小笠原では放射線（ガンマ線）を使った害虫駆除が成功して，従来沖縄から出荷できなかった苦瓜（ゴーヤ）等が本州等に向かって出荷出来る様になりました。この駆除された害虫の名前はなんと言いますか。50ミバエ（ウリミバエ）

設問 2-12

放射線農業利用：突然変異

農業の分野では放射線を利用した突然変異育種により，病虫害に強い食物が生産されています。例えばどのようなものがあるか，書きなさい。

51イネ，ナシ（ゴールド20世紀他），ダイズ，モモ，キク

設問 2-13

放射線農業利用：アイソトープ利用

地質分析，埋蔵文化財等年代測定では52¹⁴C（放射性同位体の名前）を使った年代測定が行われる。

設問 2-14

放射線医学・医療利用

平成9年度の国民医療費は29兆651億円でしたが，放射線を使った医療費は全体の約4%（1兆2千億円）でした。内容は医科が91%，歯科が9%です。医科では53エックス線撮影（47%），CT（37%），核医学（12%）といった病気の診断に係わる放射線利用が主流です。経済規模は大きくありませんが，粒子線によるがん治療や中性子線による脳腫瘍の治療も実施されています。

資料3 第II部における「放射線を探そう」での肥料および塩の測定結果

表 II-1 肥料の成分（製品記載データ）と肥料から出ている放射線

肥料の成分（製品に記載されているデータ）

硫酸カリウム K_2SO_4
 硫安 $(NH_4)_2SO_4$
 尿素 $CO(NH_2)_2$

No.	測定者	肥料(単位 ベータ線：cpm ガンマ線：マイクロSv/時)					
		硫酸カリウム		硫安		尿素	
		ベータ	ガンマ	ベータ	ガンマ	ベータ	ガンマ
1	TJMA	105	0.074	7	0.035	3	0.041
2	OT	108	0.065	5	0.044	10	0.042
3	KTOK	87	0.067	7	0.032	4	0.029
4	SMZ	87	0.073	7	0.073	5	0.044
5	AYKW	120	0.064	9	0.030	11	0.034
6	OS	105	0.085	8	0.038	10	0.040
7	NSD	105	0.066	7	0.037	9	0.045
8	NSMR	94	0.065	8	0.037	8	0.041
9	ARIKI	120	0.064	6	0.040	5	0.034
10	ARIKE	120	0.069	9	0.054	16	0.038
11	KGSM	102	0.082	6	0.035	4	0.081
12	TJMB	102	0.065	6	0.039	3	0.035
13	NKN	93	0.059	7	0.039	10	0.042
14	平均値	104	0.069	7	0.041	8	0.042

表 II-2 塩の成分（製品記載データ）と塩から出ている放射線

塩の成分（製品に記載されているデータ %あるいは100g当たりの重量）

塩A：岩塩（四川省） NaCl 87.6% Ca 1.2% K 0.14% Mg 0.38% Fe/H₂O 10.7%

塩B：イタリアの天日塩 記載無し

塩C：浜御塩 ナトリウム34.1g カルシウム953mg マグネシウム640mg カリウム223mg

塩D：死海ミネラル塩 MgCl₂ 33.3% KCl 24.3% NaCl 5.5% 結晶水 36.4%

塩E：食塩 NaCl 99.8%

No.	測定者	塩（単位 ベータ線：cpm ガンマ線：マイクロSv/時）									
		塩A		塩B		塩C		塩D		塩E	
		ベータ	ガンマ	ベータ	ガンマ	ベータ	ガンマ	ベータ	ガンマ	ベータ	ガンマ
1	TJMA	9	0.044	6	0.032	8	0.036	30	0.044	7	0.036
2	OT	9	0.039	4	0.040	8	0.044	27	0.037	7	0.050
3	KTOK	7	0.038	9	0.038	9	0.038	34	0.038	3	0.035
4	SMZ	6	0.032	6	0.041	11	0.039	30	0.037	8	0.050
5	AYKW	6	0.044	8	0.042	8	0.026	20	0.050	8	0.032
6	OS	4	0.036	8	0.028	9	0.032	29	0.039	5	0.034
7	NSD	9	0.040	8	0.042	7	0.04	34	0.043	7	0.038
8	NSMR	11	0.037	10	0.035	8	0.04	35	0.044	5	0.038
9	ARIKI	10	0.030	7	0.041	6	0.039	34	0.034	7	0.040
10	ARIKE	12	0.049	9	0.046	9	0.043	35	0.049	10	0.041
11	KGSM	4	0.039	7	0.041	8	0.049	37	0.034	34	0.073
12	TJMB	4	0.046	6	0.033	8	0.037	37	0.028	5	0.038
13	NKN	4	0.041	5	0.036	6	0.035	27	0.053	6	0.033
14	平均値	7	0.040	7	0.038	8	0.038	31	0.041	9	0.041

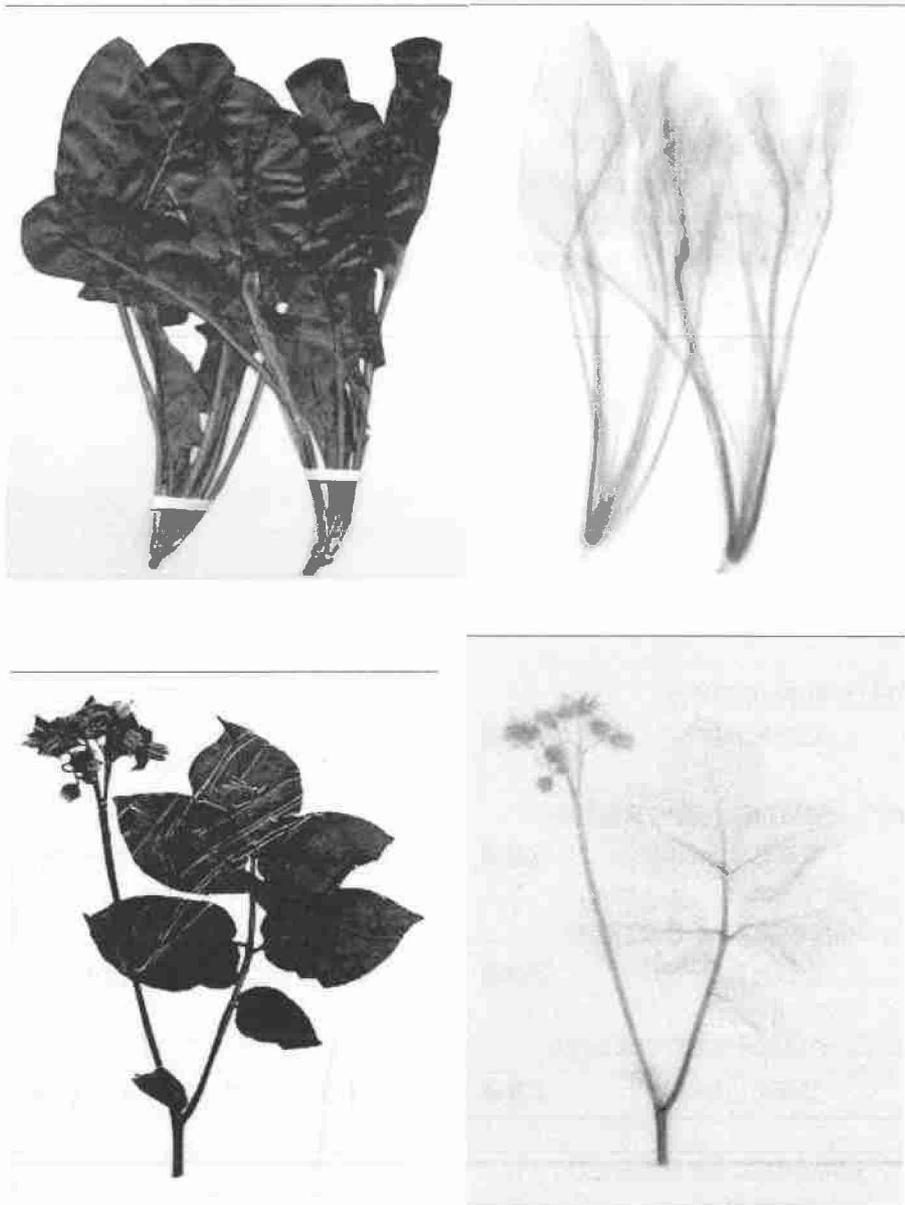


図 II-1 第Ⅱ部における「放射線を探そう」でのイメージングプレート像。
ホウレンソウ（左上：さく葉，右上）およびジャガイモ（左下：地上部さく葉，右下）

第Ⅱ部の調査票（例、「放射線を探そう」での評価アンケート）

今後の講演をより良いものにするために、君たちの意見をきかせてください。

本日の講演者 笹川澄子（財）環境科学技術研究所 調査役・主任研究員 2006年8月8日
テーマ 放射線って何？ 放射線を探そう（群馬県立藤岡工業高等学校S P P）

1. 講演者の話しは聞きやすかったですか

①聞きやすかった ②まあ聞きやすかった ③普通 ④やや聞きにくかった ⑤聞きにくかった

2. 話の内容は分かりましたか

①分かった ②まあ分かった ③普通 ④やや分からなかった ⑤分からなかった

3. 図は分かりましたか

①分かった ②まあ分かった ③普通 ④やや分からなかった ⑤分からなかった

4. 図などの量はどうでしたか

①良かった ②まあ良かった ③普通 ④やや多かった ⑤多かった

5. 資料は分かりやすかったですか

①分かった ②まあ分かった ③普通 ④やや分からなかった ⑤分からなかった

6. 肥料からでている放射線は分かりましたか

①分かった ②まあ分かった ③普通 ④やや分からなかった ⑤分からなかった

7. 塩からでている放射線は分かりましたか

①分かった ②まあ分かった ③普通 ④やや分からなかった ⑤分からなかった

8. 植物から出ている放射線は分かりましたか

①分かった ②まあ分かった ③普通 ④やや分からなかった ⑤分からなかった

9. 君からでている放射線は分かりましたか

①分かった ②まあ分かった ③普通 ④やや分からなかった ⑤分からなかった

10. 復習はやってよかったですか（しっかり理解するのに役立ちましたか）

①良かった ②まあ良かった ③普通 ④やや悪かった ⑤悪かった

その他、意見・感想などを記入してください

次回、あるとすればどのような内容の講演を希望しますか？

小、中学生における放射線教育

-----ニルス理科実験クラブの試み-----

渡利 一夫

放射線医学総合研究所 名誉研究員

(2007年3月2日 受理)

はじめに

現在、わが国では学校の荒廃、ゆとり教育の功罪、教育改革など学校教育をめぐるさまざまな問題が議論されている。なかでも学力の低下、とくに理数系教科において著しいことが指摘されている。分数計算の出来ない大学生も増えているという。

ここでは最近の子供たちの理科離れとその対策、とくに放射線・放射能の教育について考えてみたい。

1 学校における放射線教育

わが国は第二次大戦後、科学技術を国の柱として発展を続けてきた。1951年に産業教育基本法、1953年に理科教育振興法が制定されて理科教育の充実に力が注がれた。

1956年には科学技術庁が設立され研究体制も整備された。その成果は高度経済成長へとつながり、公害問題が生じるようになる。このような風潮は理科教育にも影響をあたえ、教育システムの変更とも相まって理科離れ、学力の低下をもたらした。しかし、基本的には教育方法が問題で実験の時間の減少が理科離れの原因の一つとなっていることは間違いない。高校での放射線教育も先進諸国に比し貧弱である。教師の関心も薄い。教科書でも記述は少なく、誤ったもの、不適切なもの、偏ったものもあることも指摘されている。

大学の入試でも難解な理系の科目は敬遠されるようになり、放射線・放射能についての出題はほとんどない。学校では社会科系の教科書の中で資源、エネルギー、環境汚染等の視点から記述されているが量も少なく、内容も乏しい。

アンケート調査によれば、放射線、放射能、原子力という言葉は初めて聞いたのは小学生、中学生時代で、これらの知識はマスコミを通じて得たものがほとんどで、そして、事故、死の灰、白血病、がん、遺伝的影響など怖いというマイナスイメージのものが多い。

このような現状を改善しようといくつかの実践がなされている。“みんなの暮らしと放射線”、“放射線でなんだろう・放射線を見つけよう”や“原子力オープンスクール”、“サイエンスキャンプ”、“女子高校生夏の学校—科学・技術者のたまごたち”等々。学会誌でも特集が組まれ、高校における放射線教育の試みについてもいくつか報告されている。また、初等中等教育や放射線教育の改善に関する要望書も関連学会から文部科学省に提出されるなど関係者の努力が重ねられている。

2 わが国における理科離れ

子供たちは本来、自然の中で遊ぶのが好きである。遊びながら動物、植物などを学んでいた。しかし、自然は年々失われ、子供たちは屋内で過ごすことが多くなった。

また、学校でも以前は理科の教科の中で多くの実験が行われていた。実験をすることにより物理的、化学的、生物学的な知識が培われていた。しかし、実験の時間は少なくなり、加えて、塾通いで子供たちに時間的余裕がないのが現状である。

IEAの国際数学・理科教育動向調査の2003年度調査(TIMSS2003)に参加した国立教育国策研究所(旧国立教育研究所)によれば世界各国の中学2年、3年生を対象に行った理科及び数学の学力調査でわが国は1970年にはそれぞれ1位、2位を占めていたが1995年ではともに3位で成績は下降傾向にある。その後の理科についての調査では中学2年生の平均得点は46ヶ国で6位、小学4年生の場合は25ヶ国で3位である。ちなみに、1位はいずれもシンガポールが占めている。理科の得点の変化を見ると中学2年生は1995年から2003年までほとんど変わらないが小学4年生の場合は10ポイント下回っている。内容領域別の正答率を見ると物理、生物、地学が前回より2ポイント減であるのに対し環境領域は4ポイント高い結果がえられている。これはわが国の現状を反映しているといえよう。

また、OECDの生徒学習到達度調査(PISA)における最近の調査では、わが国は数学的リテラシー及び科学的リテラシーで1位グループにあるが、理科離れが進んでいることを考えると今後が懸念される。(国際比較については国立教育国策研究所のホームページに詳しい。

しかし、最近、理科実験の塾や教室が子供たちに人気があり、また、“不思議、びっくり科学遊園地”、“未来の科学者サテライトスクール”、“サイエンスフェスティバル”、“面白サイエンス実験”のような催しが各地で開かれているのは心強い。

3 ニルス理科実験クラブの試み

子供たちに野外観察や理科実験の楽しさを伝えようと独立行政法人放射線医学総合研究所の出身者有志を中心に科学技術の研究や教育に関わってきた人たちが2006年10月に理科実験クラブ(江藤久美会長)を発足させた。2007年5月からは名称も「ニルス理科実験クラブ」とし、教室も佐倉市から千葉市都賀の瀧澤専門学校に移し、毎週土曜日(日曜日)に後述のようなテーマで子供たちと安全で楽しい理科実験を続けている。生徒の中には小学校1年生や2年生も在籍していることもあって保護者の同伴も歓迎することにした。親子で実験をしている姿は微笑ましく、時には親の方が熱心な場合も見受けられる。

入会は随時で当面は小学生と中学生が対象である。基本的なテーマは定めてあるが希望を出来るだけ受け入れる方式をとっている。実験室は約45m²あり、4箇所最大15人位の実験が可能である。指導員は現在約10人であるが協力者がさらに必要である。クラブの名前を「ニルス」としたのはノーベル賞作家ラーゲルレーブの「ニルスの不思議

な旅の物語の中で主人公の少年ニルス (Nils) が“がん”の背中に乗って国中を旅し、自分の国に対する理解を深めたが、この“がん”のように子供たちを科学の世界に連れていければと考えた。また、放射線医学総合研究所の英語の略称もニルス (NIRS) であることから、この実験クラブの名前を「ニルス」とした。放射線医学総合研究所も独立行政法人となり、地域への貢献という観点から支援が得られることになった。昨年4月の同研究所の所内一般公開の折には“子供実験室”を開設して「顕微鏡によるメダカの血流の観察」、「酸性とアルカリ性とはなにか」というテーマで協力した。

ただ、現状では実験室での火気の使用が出来ず、廃液処理の問題もあって実験の種類も限られる。これまでの1年間に行った実験の主なテーマを以下に列記する。

1) 顕微鏡を使う、2) 光を曲げる、3) 酸性とアルカリ性、4) 身近な昆虫、5) 磁石で遊ぶ、6) 電磁石を作る、7) 水中生物の飼育、8) 発芽と成長、9) 身近な放射線、10) デンプンはどこにある、11) 水とは何か、12) 空気とは何か、13) タマゴの浮き沈み、14) 万華鏡を作る、15) アルミ缶電池を作る、16) 植物のクローン、17) 一弦の楽器を作る、18) 魚の解剖をする、19) マウスの内臓を調べる、20) 食塩の性質を調べるなど。

この他に自然観察会、研究所などの見学会、ミニ講演会などを計画している。

4 ニルス理科実験クラブにおける放射線教育

わが国の一般市民の科学技術についての理解度は一般に低いことが明らかにされているが、とくに放射線・放射能や原子は科学の基本的な事象であるにもかかわらずその知識はきわめて低い。その上、世界で唯一の被ばく国であることや原子力発電所の安全性についての議論などから不安感を持っている人が多い。

しかし、放射線・放射能は医学分野における利用や原子エネルギーによる発電など現代の社会生活には欠かすことが出来ない。したがって、これらについての正しい知識を持つことは一般市民にとっても必要なのである。

子供の場合には、五感に感じない放射線・放射能について理解させることは難しい。私たちは先に示したさまざまな理科実験のうちの一つとして、放射線の実験を行っている。

実験を始める前にキュリー夫人の物語、宇宙線や地殻に含まれる放射線、病院での X 線検査、がんの診断と治療などの話をして、少しでも理解してもらうように努めている。

初めに身の回りにも放射線があることを実際に体験させることから始める。

たとえば、1) 室内外の自然放射線の測定、2) 塩化カリウムと塩化ナトリウムの比較、3) カリ肥料やリン酸肥料に含まれている放射能、4) 放射能温泉浴剤やキャンプ用ランタンのマンツルの放射能、5) 距離による放射線の減少、6) さまざまな物質による遮へい効果、7) 歯科用 X 線フィルムの利用 (オートラジオグラフィ)

このほか、霧箱、短寿命核種の減衰の現象などの実験も計画しているが、小学生と中学生とでは理解度に大きな差があるので、講義や実験の方法も考慮する必要がある。

放射線が私たちの生活の中で、すでにさまざまな分野で利用されていること、そして、

同時に、放射線による事故例や障害についても事実を正しく話をするべきだと思う。

おわりに

子供たちに科学技術の楽しさを是非知ってもらいたいと理科実験クラブを作ったが、放射線、放射能については理科実験の一環として教えることが有効だと考える。そして、同時に親の教育の必要性を痛感している。ミニ講演会の開催も具体化したい。

なお、千葉市教育振興財団が建設を予定している“子供科学館”での理科実験の担当も依頼されているので実験テーマの拡大についても考えたい。

本稿を記すにあたり、小学生、中学生の理科教育、放射線教育について役立つと思われる以下の総説、特集、報告書、提言を参考にした。

渡利一夫；放射線教育をめぐる最近の動き、放射線科学、41(1999)

渡利一夫、稲葉次郎編；放射能と人体、研成社（2000）

松浦辰男、飯利雄一；「放射線・原子力教育と教科書」、研成社(1998)

放射線教育フォーラム6年の歩み；「放射線教育」特集号(2000)

国民の常識としての放射線教育を；「放射線教育」別冊(2005)

座談会；放射線教育の現在とこれから、物理教育(1999)

坂本 浩；正当に怖がることは難しくなる?!、放射線教育フォーラムニュースレター、(2003)

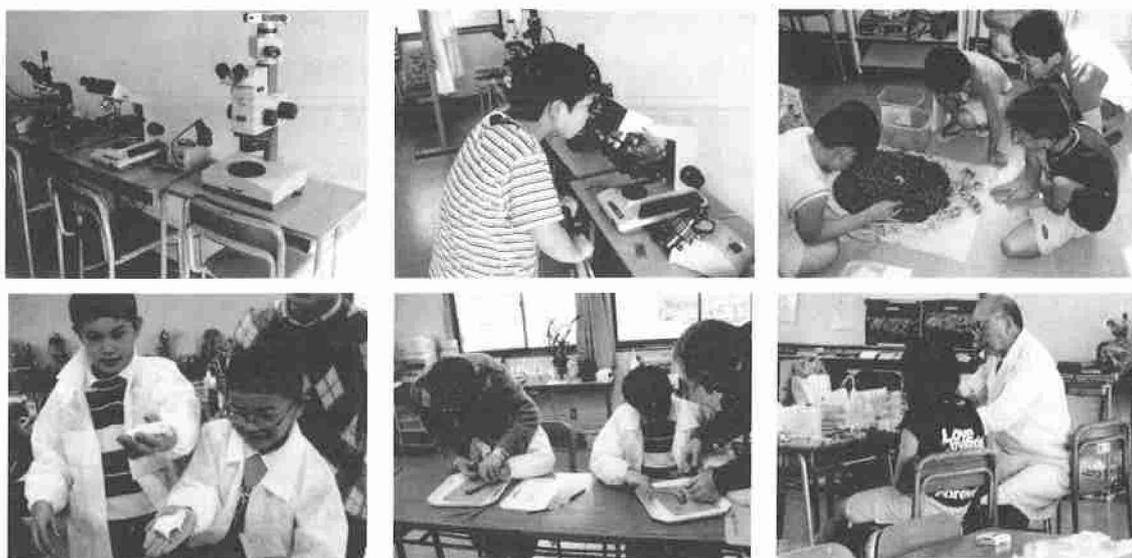
播磨良子他；小学校における放射線教育、放射線教育に関する国際シンポジウム（1998）

岡田往子；女子高校生夏の学校—科学・技術者のたまごたち、原子力誌、56(2007)

国立教育国策研究所編；「数学教育・理科教育の国際比較」、ぎょうせい(2001)

国立教育国策研究所監修；「小学校の算数教育・理科教育の国際比較」、東洋館出版社(1997)

国立教育国策研究所監修；「中学校の数学教育・理科教育の国際比較」東洋館出版社(1998)



実験室の光景(浅見行一、種田信司)

職場体験学習としての「ガラスの着色」

坂内 忠明^a、阿部 杏子^b、海老澤 悟^a

a 放射線医学総合研究所

〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川4-9-1

b 東邦大学 理学部 物理学科

〒274-8510 船橋市三山2-2-1

(2007年3月20日 受理)

[要約] 職場体験学習として、放射線の実習を行っている。その一例として放射線を用いたヨウ素でんぷん反応と、ガラスの着色の実験を中学生のグループを対象に行ったので、それについて紹介する。

1. はじめに

キャリア教育の普及に伴い、多くの中学校で職場体験を行うようになった。放射線医学総合研究所(以下「放医研」)でも年に数件であるが職場体験を受け入れている。職場体験を希望する生徒は、将来の職業として医療関係や科学者等を選ぼうとしている場合が多く、重粒子線治療装置の見学等を含めた体験が中心となるが、この他にも、この機会に放射線を理解する実験(体験)を行えるようにしている。

筆者らが、この体験学習の担当になった際、過去には、霧箱を作る実習や、放射線を測定する実習を行っていたが、放医研でなければできない体験をしてもらいたいと考え、普段実験で使用している高線量のガンマ線を利用してガラスを着色する実習を行ったので、それについて報告を行う。

2. 実習計画

2.1 実習の目的

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

2.2 対象とした生徒

2006年の場合、千葉県内の中学2年生の4人グループに2回行った。7月に来た生徒は理科の時間に元素や原子を教わっていない。9月に来た生徒は既に元素や原子は教わっているが、イオン等の知識はない。

2.3 使用した施設について

体験学習は、人材育成棟及び第一ガンマ線棟の二ヶ所で行った。

2.3.1 人材育成棟について

人材育成棟は、所外の人に研修を行う2階建て施設である。1階には教室、実験室等があり、2階にはセミナー室の他、管理区域の実験室があるが講義及び実習はセミナー室で行った。

2.3.2 第一ガンマ線棟について

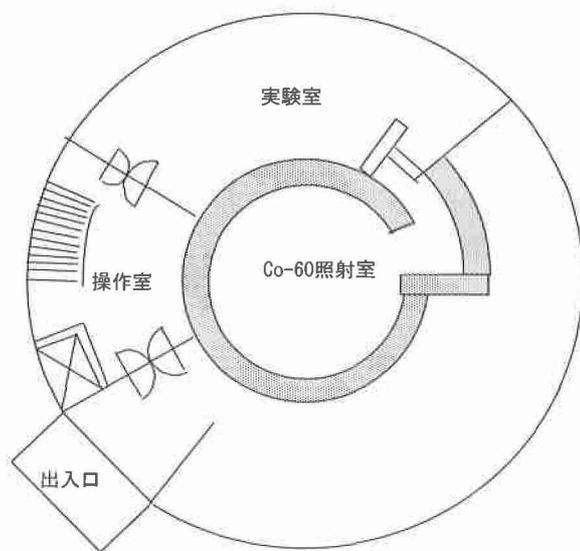


図1 第一γ線棟の平面図

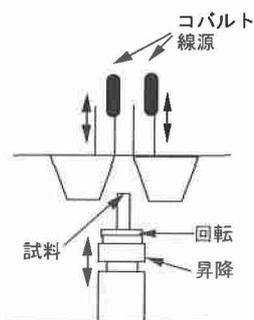


図2 照射装置の断面図

第一ガンマ線棟は、放医研ができた時に建てられた施設で、何度か改修が行われ、現在は1階にコバルトの線源と地下1階にセシウムの線源がある。

図1に1階の平面図を示す。1階の管理

区域用の扉を開けると、操作室があり、そこで線源の出し入れの操作を行う。ビーズの袋詰めなどの作業は実験室で行った。使用した線源は⁶⁰Co (111TBq 1997年3月13日納入)で、対象物を機械的に持ち上げ、空洞の中に入れ、線状の線源を筒状に配置したものを降ろすことにより、対象物を照射することができる(図2断面図参照)。照射域は直径約6cmの円柱状である。

実験の前に照射域のγ線計測を行った。計測は調整済みのC-110 (0.6) [電離箱サーベイメータ (応用技研)。電位計 AE-132S (応用技研) とデジタルマルチメータ 7561 (横河電機) を接続] によって行い、気温・気圧で補正した。6秒での測定、及び12秒の測定を10回ずつ行い、照射時間に含まれない線源の上げ下げにかかるときの線量(げた)と、1分間当りの線量を求めた。照射空間内の線量計測の結果を表1に示す。更に、この数値は半減期補正を行い、7月及び9月の実習日に合わせて計算した。

この結果より、基準の上2cm、下3cmまでの範囲を使用した。

2.4 実習時間

実習の時間は10時半または10時から12時までのおよそ1時間半から2時間程度を予定した。(注: 結果的には超過した)

表1 照射空間内の線量計測の結果

基準からの距離 (mm)	正味線量 (Gy/min)	げた (Gy)	10分間照射時の 線量 (Gy)
50	27.29 ± 0.13	6.89 ± 0.02	280
40	28.60 ± 0.08	6.46 ± 0.01	292
30	29.35 ± 0.08	6.13 ± 0.01	299
20	30.25 ± 2.29	5.84 ± 0.32	308
10	30.65 ± 1.68	5.48 ± 0.24	312
0	30.73 ± 1.51	5.14 ± 0.21	312
-10	30.62 ± 0.97	4.76 ± 0.14	311
-20	30.66 ± 0.13	4.46 ± 0.02	311
-30	30.59 ± 0.11	4.06 ± 0.02	310
-40	30.06 ± 0.14	3.71 ± 0.02	304
-50	29.27 ± 0.09	3.38 ± 0.01	296

2.5 予備実験 (ヨウ素デンプン反応)

ヨウ化カリウム溶液 0.73 g ml^{-1} を数滴、片栗粉を適量入れたミニシャーレ (直径 6cm) に落としたものを用意する。

線量を変え、色の変化を見た結果は表2の通りである。

ガラスビーズの着色については、色が変化するかどうかを確かめただけで細かくは確認していない。

表2 放射線によるヨウ素デンプン反応の着色

Gy	
0	無色
60	黄色
130	橙
190	赤紫
250	赤紫
310	赤紫

3. 実習の進行

実習の時間配分を表3に示す。

表3 実習の時間配分 (2時間の場合)

30分	講義 (原子の成り立ち、放射線の特徴)
10分	実演 (霧箱、クルックス管)
15分	GM サーベイメータの測定実習 (鉛板の遮蔽)
5分	移動
10分	見学 (第一γ線棟)
	実験
50分	1) ガラスビーズの1回目の照射 (10分)
	2) ヨウ化カリウムの照射 (8分)
	3) ガラスビーズの2回目の照射 (10分)
	4) ガラスビーズの3回目の照射 (10分)

3.1 講義

講義は、テキストとボードを用い、「物は元素に分けられ、原子でできていること」、「原子は原子核 (陽子と中性子) と電子に分かれること」、「陽子は正電荷を持ち、電子は負電荷を持つこと」、「陽子の数は元素によって変わること」、「放射線は電子

を弾き飛ばす力があること」等を中心に説明した。また、講義だけではイメージがつかめないので、市販されている霧箱、クルックス管を用いて見せた。使用した霧箱は島津理化の WH-20 (高温拡散霧箱) で、線源は Ra と Pm を用いて放射線の飛跡を見せ、偏向極板入りクルックス管 (島津理化 CG-DN) では、U字磁石によって電子線が曲がることをファラデーの法則を用いて説明した。(中学生はファラデーの法則をこの時期に習っている。)

3.3 身近な放射線

実際に、GM サーベイメータ (アロカ社 TGS-136) を用いて自由に測定してもらい、身近に放射線があることを理解してもらった。こちらで用意したものは、リン酸カリ肥料、ランプ (ランタン) のマントル、グロースターター、鉱物標本、玉川温泉の湯の花である。

また、マントルから出る放射線を鉛板で遮る実験を行い、放射線を止めることができることを示した。

3.4 第一ガンマ線棟の見学

ガンマ線棟の見学の際には下記の点 (特に安全性の確保について) に配慮して説明を行った。この時「身近な放射線」の測定で行った「距離を取る」と「遮蔽する」の知識を用いて説明する。

- ・ガンマ線棟に入る前に、建物の出入口及び管理区域の出入口に標識があること
- ・管理区域の出入口に常に鍵がかかっていること
- ・照射室のコンクリートの壁が厚いこと
- ・照射室の入口に迷路部分があること
- ・照射室の入口にオートロック、照射をしているかどうかを示す表示があり、厚い鉄の扉があること
- ・照射開始時にベルがなり、ブザーが鳴ること (警戒を示すランプが光ること)
- ・照射室を覗くことができる窓には鉛ガラスが入っていること

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

3.5 実習

3.5.1 用意した材料

(ヨウ素デンプン反応)

ヨウ化カリウムを0.5g入れた液シシバイアル1本を用意し、片栗粉を適量入れたミニシャーレを二枚、スポイトを1本用意した。

(ガラスビーズの着色)

市販されている直径1cm程度のガラスビーズを一人当たり8つ用いた。ガラスビーズを入れるビニール袋をひとりにつき4枚、及びビニール袋を詰めるシャーレを二人で一個ずつ用意した。

他に名前を記すためのサインペンを用意した。

3.5.2 ヨードデンプン反応

液シシバイアルに水を0.5ml入れ、ヨウ化カリウムの結晶を溶かす。できたヨウ化カリウム溶液をスポイトでとり、片栗粉にかける。一方はそのまま保管し、もう一つは、 γ 線照射を行う。

照射後、色を比較する。

放射線を当てることにより、下記の反応が促進され、照射した方は赤紫色に変化する。当てない方は、この程度の時間であれば無色のままである。



この反応は、「放射線は電子をはじき飛ばす力がある→原子核の周囲を回っている電子が無くなることで、不安定になる」ということを用いて説明した。(ラジカルという言葉は、生徒の興味を持たせるために「テレビで聞いたことがあるかどうか」を確認する程度で、詳細については説明しない)

3.5.3 ガラスの照射

ビーズを6個袋に入れ、2個は0Gy(対照)とする。6個入りの袋を0.3kGyになるように照射する。袋から2個取り出し、残りを照射して、照射の合計が、0.6kGyとなるように照射する。以後繰り返し、残りの2個は0.9kGyになるように照射する。それぞれの照射後、GMサーベイメータでビーズから放射線が出ていないことを確認させ、それぞれ色の変化を確認する。

線量が高くなるに従って茶色い色が濃くなるのがわかる。

着色したガラスビーズはお土産として持ち帰らせた。(時間が経つと退色するのが観察できる。)

3.6 第一ガンマ線棟での説明

第一ガンマ線棟で照射している際は、何も作業がない時間ができるので、その間に放射線の利用や放射線についての説明を行った。

ガラスの着色については、下記の話題を出した。

- 1) 放射線の着色を利用した装飾品（真珠やダイヤモンドなど）^{1) 2)}
 - 2) 産業総合研究所が 2001 年に特許を取った簡易型着色ガラス（ガラスの添加物で着色時の色が変わる [Mn→紫、Ag 超微粒子→黄]）^{3) 4)}
 - 3) ガラス線量計
 - 4) スモーキークォーツ（煙水晶）。イオンの置換で着色することもあるが、水晶が放射能を持つ岩石の近くにあると着色する。
- また、ヨウ素については下記の話を出した。
- 1) 原子力事故時のヨウ素剤
 - 2) 放射性ヨウ素を用いた核医学医療（甲状腺癌の治療や ¹²⁵I の密封線源を用いた前立腺癌の治療）
 - 3) ヨード含有水性造影剤

4. 生徒の反応・注意点・反省点

4.1 生徒の反応

- ・講義は、「放射線は、原子核の周囲を回っている電子を弾く」ということだけを理解してもらえると良いと思い、それだけを集中して説明したが、時間が足りず説明が速過ぎて理解できたとは言いきれない。
- ・GM サーベイメータで自由に測定させると、身の回りに普通に放射線があることに驚いていた。
- ・ガラスの色が変わる実験は、最初は驚くが、三回目の照射あたりになると実習に疲れてくることもあってか、あまり面白そうに感じていなかった。照射の実験は二回までで良いかもしれない。

4.2 注意点

- ・濃いヨウ化カリウム溶液を放置すると、自然にヨウ素ができてしまい、でんぷんが反応して着色するので、ヨウ化カリウム溶液は実験直前に作る必要がある。
- ・管理区域なので事前に放射線管理者に相談する必要がある。
- ・照射室への移動は事故がないように一人がついて行く必要がある。また操作盤に生徒が触れないようにさせるため、常に操作盤には一人を待機させなければならない。そのため、この実習には最低二人の指導者が必要である。
- ・実際にはなかったが、生徒がふざけた場合、危険を伴うので実習の中止も考えておく必要がある。照射室では、実際に起きた事故（中国で起きた、線源が出ている状態で照射室に入ってしまった事故⁵⁾等）の話をする、真剣に実験してもらえ、過剰な恐怖心を与えることになるかもしれない。

4.3 問題点

- ・管理区域なので、中学生は見学者扱いとなる。そのため、火を使う実験や危険な薬品を使う実験は一切できない（熱レミネッセンスの実験等も考えられるが、安全に行う方法が思いつかなかった。）
- ・時間が予定よりもかかってしまい、結局 20 分程度超過してしまった。

4.4 今後の課題

放射線による反応の原理を教える場合、原子の構造等の簡単な知識が必要となる。そのため、元素や原子の構造を教わっていない生徒に、それらを短時間で教える方法が必要となる。

また、この実験施設は2007年夏には、撤去され、代替施設としてこの10分の1程度の線量しか得られない施設ができる。その施設でも、このような実験ができるか検討している。

謝辞

研修課の設備の使用に際し企画室人材育成課の白川芳幸博士、東京ニュークリアサービス株式会社の光野冬樹様、第一γ線棟の使用に際し基盤技術センター研究基盤技術部放射線発生装置利用技術開発課の石川岡弘様、計測データの使用に際し基盤技術センター研究基盤技術部放射線発生装置利用技術開発課の濱野毅博士、放射線管理区域の使用許可に際し基盤技術センター安全・施設部放射線安全課の津浦伸次様、中学生の実習の全体のマネージメントに際し広報室の進士賀一様のお世話になりました。この場をお借りして御礼申し上げます。

参考文献

水溶液及びガラスの照射については下記の文献を参考にした。

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

引用文献

- 1) 梅田 巖、ジュエリーにおける放射線利用、原子力工業、**40**(7), 71-79(1994)
- 2) Nassau, K., The effect of gamma rays on tourmaline, greenish-yellow quartz, pearls, kunzite, and jade, *Lapidary Journal*, **28**(10), 1064-66, 68, 70, 72, 74, 84 (1974)
- 3) 角野 広平、赤井 智子、矢澤 哲夫、光(紫外線・X線)照射によるガラスの着色とその応用および課題、*マテリアルインテグレーション*、**16**(8), 11-15(2003)
- 4) 特許公開 2002-356349 リサイクルが可能な貴金属をドーブした着色ガラス、その製造方法およびリサイクル方法 (http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2001/pr20011206_4/pr20011206_4.html にもわかりやすい説明がある)
- 5) 原子力百科事典 ATOMICA の「中国上海市の殺菌装置で起きた放射線被ばく事故(09-03-02-13)」
http://mext-atm.jst.go.jp/atomica/09030213_1.html

21世紀、その真価が発揮される放射線利用

— 放射線はなぜ産業に役立つのか —

田中隆一

NPO法人放射線教育フォーラム
東京都港区西新橋 3-23-6 第一白川ビル
(2007年3月18日 受理)

【要旨】 放射線はX線などを用いた人体の透視、断層撮影、がん治療を通して今日における質の高い医療に貢献していることは広く知られている。しかし、クルマやテレビのような日常生活に密着した道具があたりまえに機能していることにも放射線が貢献している事実は多くの人々に知られていない。放射線の利用は、19世紀末にレントゲンがX線を発見した直後からその開発が始まり、特に第二次世界大戦後に研究開発が急速に進んだ結果、さまざまな用途に向けて実用化され、医療や産業の分野で広く普及し、現在では身近な生活のなかに深く浸透している。高度な科学技術が支える21世紀の社会において、放射線は欠かすことのできない重要な役割を果たしていると言ってよい。

1. 放射線は、ものを「見る」と「つくる」ための新しい手段

放射線が20世紀の人類史にどのようなインパクトを与えたのかについては、発見後100年余という短い歴史のあゆみのみから結論づけることはできないが、21世紀を見通した科学技術の展開という見地からは、次のことが言えるのではないであろうか。

放射線発見の後、ものを「見る（あるいは観る、診る、計る）」という科学的方法、及びものを「つくる（あるいは加工する、治療する、操作する）」という技術的方法の新しい手段として、人類は放射線を有効に役立てるまでに到った。「見る」ことにおいては、光を使うだけでは見えない微視的な物質像やその逆の巨視的な宇宙像を目の当たりにするのを可能にした。これによって、思考をめぐらし得る外的世界のイメージが日常世界を超えて飛躍的に広がり、その認識を深めることが可能になった。放射線を用いて「見る」ことのきっかけは、身体を傷つけることなく放射線によってその内部を透視したことであると考えられる。一方、「つくる」ことにおいては、人類が文明を形成して以来、「ものづくり」の手段としてきた人力、機械力、熱や光、バイオ等の手段による加工、さらに、近代科学の産物としての化学技術を用いる加工に加えて、20世紀は、放射線という新しい科学技術の手段によって、対象物の内部まで直接的に作用を及ぼすことをはじめて可能にした。放射線を用いて「つくる」ことのきっかけは、人体に放射線を照射し、その作用によって病気を治療したことであると考えられる。

放射線利用がこの100年間に普及が進んできた背景には、コバルト60のようなラジオアイソトープ（放射性同位元素）を用いる放射線源の果たした役割とともに、様々な放射線を人為的に発生させる道具として発展してきた加速器の役割がある。レントゲンによって発見されたX線を発生させた陰極線装置は電子加速器の原型と見ることができる。今日では、多種多様、かつ、大小さまざまな加速器が、素粒子・宇宙科学などの学術研究だけで

なく、産業及び医療分野における放射線発生手段の主役となっている。加速器が人類の新しい道具として定着しつつある姿をここに見ることができよう。

2. それでも「放射線」は、えたいの知れないものだろうか？

以上述べてきたことは、放射線が20世紀の人類史に与えたインパクトの明るい半面に過ぎないと言うべきかもしれない。原爆投下によって発生した放射線がもたらした惨禍を抜きにして放射線が人類史に与えたインパクトについて論じることはできない。

今日、大多数の日本人がもつ放射線に関わる不安感や恐怖感は、原爆の実体験を通して直接的に形成されたわけではないが、被災の事実や体験に関するコミュニケーションを通して長期にわたって社会的に形成され、とりわけ放射線に対する否定的な感情として広く共有されて今日に到っている。

今日では放射線が産業分野でも広く利用されているが、この事実は一般の消費者にあまり知られていない。その理由は、クルマやパソコンなどの出来上がった生活用品を支える技術として放射線が使われていても、消費者がそれを知るチャンスはほとんどないためであるというだけでなく、生産者が放射線を使っている事実を公表したがるからである。「放射線」という言葉が、商品やサービスを選択する立場の消費者にとって否定的なイメージをもつと考えるからである。しかし、医療分野では、医療行為に関わるインフォームド・コンセントなどにおけるコミュニケーションのように、人の生死にも関わるリスクレベルの高い選択が問題となるため、「放射線」という言葉の否定的イメージにこだわってられない事情がある。産業と医療の分野では人々の意識に微妙な差異が見られる。

原子力・放射線に関して広く流布している誤解、偏見、風説の背後には、放射線に対する恐怖感、嫌悪感、あるいは拒絶感などの否定的な感情がある。そこまでいかない場合でも、放射線が目に見えない「えたいの知れないもの」であるという不安な意識を依然として多くの人々が共有している。いずれにしても、こうした問題の解決には、単に放射線についての認知度を高めるだけではなく、放射線についての科学的な正しい理解が前提であることは言うまでもない。放射線利用については、「放射線がなぜ役に立つのか」という科学的、技術的な理解が大切であり、それを通して、放射線利用に限らず放射線そのものを正しく理解していくことになると考えられる。

3. 放射線利用は2つの方法で発展した

3.1 放射線利用の方法 — 診断が計量・観察に、治療が照射加工に発展した(図1参照)

放射線利用における当初の目的は医療であったが、その利用にはX線発見の直後から2つの異なる方法があった。

第1の方法は、X線による身体の内部透視によって身体を傷つけることなく病変を診断することに始まったが、この診断という利用形態はやがて普遍化されて、放射線作用の結果を計量あるいは観察し、それを情報として利用する方法へと発展した。冒頭で述べたように、これが、ものを「見る」ことで象徴される科学的方法である。

第2の方法は、X線を身体にあてることによって身体の内部まで直接的に作用を及ぼして病気の治療に役立てることに始まったが、この治療という利用形態もやがて普遍化され

て、放射線作用の効果そのものを加工に利用する方法へと発展した。これが「つくる」ことで象徴される技術的方法である。

こうして、医療で始まった放射線利用は、20世紀後半にはその利用範囲を産業や学術の



図1 放射線の発見から始まる放射線利用の発展

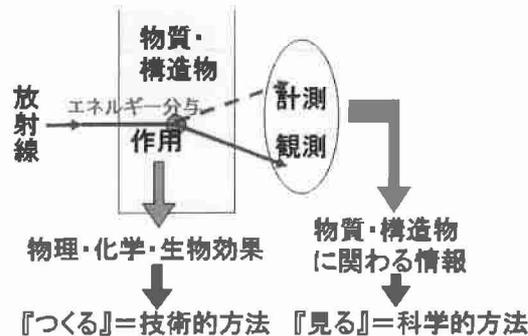


図2 放射線利用の2つの方法

分野へと広げた。医療における診断と治療という2つの利用方法は、それぞれ、放射線を利用する計量・観察と放射線を利用する照射加工というより普遍的な2つの利用方法へ引き継がれて今日に到っている（図1及び2参照）。

3.2 2つの利用方法は具体的にどう違う

第1の方法では物理効果を利用し、第2の方法では化学及び生物効果を利用している。第1の方法は物質や構造物に関する情報を得ることが目的なので、放射線は少量でよいのが普通であるが、第2の方法は放射線作用によって物質や生物の特質に変化を及ぼすことが目的なので、多量の放射線を必要とする。

第2の方法では利用する放射線の発生は人為的な手段に限られるが、第1の方法では自然放射線を利用することもある。宇宙放射線の作用によって大気中に生成する放射性同位元素である炭素14を利用する考古学試料や文化財の年代測定がこれにあたる。宇宙放射線の計測による太陽の内部診断も同様の事例である。第2の方法の場合はもちろん、第1の方法の多くの事例においても人為的な放射線発生法として普及している加速器が重要な役割を担っている。

3.3 放射線利用の将来 — ナノテクノロジーで2つの方法が融合する

人類の空間的な関心は、一方で LSI(大規模集積回路)、DNA 等で象徴される微視的な世界、他方で宇宙のような巨視的な世界へと拡張しているが、その両方向への科学技術の発展のために多種類の放射線が欠かせない手段としての重要な役割を担っている。LSI などの半導体の微細加工にも、光では見えない星の世界の計量や観察にも、放射線は欠かせない手段として利用されている。さらに、21世紀は、計量・観察と照射加工の2つの利用形態を機能的に融合した高度な放射線利用として、わが国が科学技術推進の重点戦略としているナノテクノロジーの発展が期待されている(図1参照)。

4. なぜ、放射線は役に立つのであろうか? — 明解な理由がある

4.1 計量・観察への利用 — 安全と品質を支える技術

放射線は厚い物体を通り抜けるという特徴を活かすと、物体を傷つけたりバラバラにしたりすることなく、物体内部の複雑な構造や状態を遠隔的に計量・観察できるという、他の手段には変えがたい利点がある。大型機器などの内部のキズを調べる非破壊検査や危険物の持ち込みを調べる空港手荷物検査などはその代表例である。放射線のもつ透過、散乱、吸収などの性質を利用して対象物の厚さ、密度、容器内の液体レベルをオンラインで計測する工程管理にも使われている。

物体に接触することなく計量できるという特長を活かすと、板あるいはフィルム状の製品の厚さを生産ライン上で自動的に制御できる利点がある。乗用車のボディ軽量化の主役となっている薄い鋼板の製造における品質管理では、非接触、連続的、かつ高温な状態で計測することが要求されるので、放射線以外に適切な手段がないのである。

このように、計量・観察への利用においても、産業・交通技術の安全や品質という生活基盤を支えるために、放射線が重要な役割を担っていることが分かる。

4.2 加工への利用 — 非接触で物体の深いところまで加工する20世紀の技術革新

次に、加工生産への利用について考えてみよう。自然物を加工する能力は人類が他の動物と一線を画している大きな要素であり、このことを強調して、人間はホモ・サピエンス(知性人)であるという見方に対してホモ・ファーベル(工作人)という見方もある。

人間社会の営みの歴史的変遷は加工技術の進歩に強く依存している。18世紀頃まで、人類は人力や熱、光など自然にあるものを利用する加工技術に基本的に頼ってきたが、19世紀になると、蒸気機関や電気の動力源を発明することによって動力機械による加工が導入

表1 加工技術として放射線利用の利点

- (1) 物体の深いところまで均等に加工(非接触的な遠隔作用)
- (2) 物体を加熱せずに加工(素材の形や性質を変えずに加工)
- (3) 高速加工(省エネルギー)
- (4) 有害物質の使用・排出を抑制(環境調和性)
- (5) 確実な品質保証、容易な品質制御(品質の高信頼性)
- (6) 計量・観察と一体化した高度な照射加工(ナノテクノロジー)

されるとともに、化学の進歩によって化学的な加工法が登場するようになった。これらは加工技術の飛躍的な発展をもたらしたが、機械加工、熱加工、化学処理の場合のように、加工される対象物と接触あるいは近接せずに、対象物の深いところまで遠隔的に作用する方法が、放射線の発見をきっかけとして20世紀に初めて登場した。これに類似した加工手段としては、放射線以外に、レーザー光、紫外光、赤外光、マイクロ波などの電磁波も利用されているが、こうした加工法の端緒となったのは放射線である。

機械的、熱的、化学的な加工法や放射線よりも波長の長い電磁波を用いる加工法に比べた場合、加工における放射線利用の共通的な利点をまとめると表1のようになる。

利点(1)については、医療用具の滅菌や食品の殺菌への放射線利用においてその利点の特徴的に表れている。医療用具の滅菌については、従来はガス状の薬品による滅菌作用を利用する方法が広く行われてきたが、対象物の深いところまで効果を及ぼしにくいだけでなく、有害な化学物質が内部に残留するリスクがある。一方、放射線法では深部まで均等に効果を及ぼすだけでなく、包装された製品あるいは輸送用の梱包のままコンベア上に載せた状態で連続的に加工できる。このことは理想的な衛生管理を可能にするだけでなく、製品を流通させるためにも好都合である。ガス滅菌のように時間をかけて滅菌作用の完了を待つこともなく連続的に加工できるので、高速加工(利点(3))を容易にするが、特に加速器を用いた電子線照射による加工法では、放射線のエネルギー出力が大きいため、短時間照射による高速加工が可能である。また、滅菌のために有害な化学物質を使わないので、環境調和性(利点(4))の立場からも有益である。

利点(2)については、電線や自動車タイヤに使われる高分子材料の電子線による照射加工においてもその利点の特徴的に発揮される。テレビや自動車などに使われる電線の高分子被覆材は、その電気絶縁に100℃以上の温度環境でも形が崩れない耐熱性が要求されるため、それを防ぐのに被覆材を構成する分子間の化学的な結合を強くする必要があるのである。しかし、通常使われている化学的な架橋(長い鎖状の高分子の間で橋を架けるように分子を結合する方法)の方法では高い反応温度が必要とするため、被覆材が軟化して形が崩れる。しかし、放射線による架橋では、温度はわずかしか上がらないため、素材の物性や形状を維持した状態で耐熱性にすることができる。

植物の品種改良への放射線利用においても、照射による植物の温度上昇は無視できるので、植物細胞の機能を正常に維持したまま、DNA分子内の一部の遺伝子を変異させて優良な品種を作り出すことができる。殺菌や殺虫を目的とした食品照射でもこれと同様の理由で品質の維持が容易である。

これから述べる、利点(3)、(4)及び(5)は、原理的な利点(1)及び(2)から誘導される応用的な利点と言える。

利点(3)(高速に加工できること)は医療用具等の滅菌で述べたように、物体に触れないで加工できるという利点(1)と加熱の必要がないという利点(2)から自動的に導かれる実用的な利点である。このことは省エネルギーという利点にもつながり、21世紀の工業生産に相応しい条件を満たしている。

利点(4)(有害物質の使用・排出を抑制できること)も近年ますます重要性を増している。有機物質の製造では、多くの場合、それに必要な化学処理を開始したり促進したりするた

めに化学物質を添加する必要があるが、添加物質は有害である場合が多く、それが製品内に残留したり、使用後の廃棄において環境負荷の原因ともなる。また、化学処理や必要とされる加熱によって排出される溶剤、添加物質等を含む排ガス、廃液、及び悪臭も環境負荷の原因となる。放射線照射という手段はそうした化学物質の添加を必要とせず、環境負荷を軽減する有効な手段となっている。前述の医療用具の滅菌や食品の殺菌や保存においても、有害な化学物質を使用するガス滅菌は国際的に使用制限が厳しくなっており、代わってクリーンな放射線照射利用が増えつつある。

利点(5) (品質の高信頼性) は、放射線加工が他のどの加工手段と比べても、その優位性をはっきりと強調できる特長である。加熱処理や化学処理の場合とは違って、放射線の効果は、たいていの場合、高い精度で計測された放射線量の数値だけをもとにして精密に制御できる。したがって、線量値に関する法的な規制や品質管理に関する国内及び国際的な規格がある医療用具、食品等の加工については、最終製品の品質を直接に計量管理しなくとも、線量の簡便な工程管理計測によってその場で適切に品質の高信頼性が保証されるとともに、短時間の照射工程のみで製品を工場から出荷することができる。

利点(6)は、以上のことから、放射線が 21 世紀型の新しい加工技術を支える柱になるという意味で、今後は最も重要視するべき利点である。特に、3. で述べたように、放射線は微細領域の物質を加工・操作する利用だけでなく、計量・観察のための利用にも最適である。照射加工と計量・観察という放射線の 2 つの利用法は、これまでは独立した利用法としてそれぞれ発展してきたが、両者を機能的に融合することによって高度な微細加工技術が遠くない将来に実現し、情報、素材、医療、加工などの諸分野で革新的な技術に発展することが期待されている。わが国が 21 世紀に優位性を発揮できると期待されるナノテクノロジーの戦略的な推進において、こうした高度な放射線利用がその重要な技術基盤となっている。

5. 日常生活に深く浸透しつつある放射線利用 — 工業分野

5.1 高分子材料 — 放射線が機能を高め、環境負荷を減らす

高分子に放射線を当てると不安定で反応性の高い原子や分子であるラジカルが生じ、その結果、架橋、グラフト重合、分解などが起きる。架橋は、このラジカルを起点に糸状の長い分子の間で結合が起こって網目状となり、熱に強く固い高分子材料にする。架橋に放射線を使うことは、加熱を必要としないため、素材の形や性質を変えないで熱に強く強靱な有機材料を作れるだけでなく、環境負荷の原因となる化学物質を使わない、という利点がある。現在では、自動車のタイヤ、テレビ、パソコン等の電気製品にも使われている耐熱性の電線、発泡プラスチックを用いた断熱材、内装材、クッション材料などの製造に放射線照射が使われている。ラジアルタイヤは、薄いゴム板を何層にも重ねた構造であるが、電子線照射によってゴムの強度や安定性が高まって品質が向上するとともに、軽量化によってコストが下がった。これらの製造には、放射線強度の高い工業用の電子加速器が用いられている。ラジアルタイヤの国内における年間売上高は 1 兆円に達している。

グラフト重合は、長い分子に機能性に優れた異分子を接ぎ木する方法である。放射線を照射したポリエチレンなどの高分子材料に、環境中の汚染物質あるいは有用物質を吸着する機能を持つ特殊の化合物をグラフト重合させた材料によって、有害物質を効率的に除去

する技術や水に溶けている有用な微量金属を捕集する技術が最近注目されている。放射線でグラフト重合させた繊維が従来の吸着材よりもはるかに高い吸着能力をもつためである。

5.2 医療用具の滅菌 — 放射線が理想的な衛生と安全を保証

放射線が生物に与える影響を逆手にとってうまく活用する利用方法が滅菌や殺菌である。注射器や手術用具にとって最も恐ろしいのが病原性の雑菌であるが、医療用具の製造、出荷から使用まで理想的な衛生状態を保つのに大きく役立っているのが放射線滅菌である。4. で述べたように、放射線ならば熱を加えて壊れる心配が要らないこと、ビニールで包装されたままでも医療用具が滅菌できること、化学物質による滅菌のように有害な残留物が用具に付着しないことなどの利点がある。こうした利点によって、現在では使い捨ての製品を始めとして、医療用具の60%は放射線で滅菌されている。照射工程で製品が受けた放射線量の実測値のみで滅菌が保証できるので、品質管理が簡単で迅速、かつ確実であることも、医療用具の滅菌に放射線利用が増えつつあるもう一つの理由である。

5.3 大気環境汚染の除去 — 中国での普及に期待

21世紀は環境問題の克服が大きな課題であるが、放射線利用は新しい環境保全の手段としても注目されている。生活や産業活動によって排出される石油や石炭の燃焼ガスに含まれる硫黄や窒素の酸化物が酸性雨などによる地球環境汚染の原因として問題となっているが、加速器を用いた電子線照射によって、それらの有害物を分解・除去する技術が実用化されつつある。化学処理による従来の方法と比べて、短時間で処理できるため設備を小型化できること、有害な廃液を出さないこと、処理の結果として硫酸や硝酸のような肥料を副産物として製造できることなどの優れた利点がある。この一石二鳥の技術は石炭等の火力源を多用する中国における環境汚染対策の一つとしても期待されている。

5.4 非破壊検査 — 安全・安心に貢献する放射線

照射加工に限らず計量・観察のための工業利用も広く普及している。代表例が非破壊検査であるが、この場合検査対象が人体ではなく構造物であるが、造船、航空機、橋梁、土木、各種プラントの製造業では、溶接加工、鋳込みなどに欠陥がなく健全であることを確認し、構造物がどの程度の使用に耐えるかの寿命診断に欠かせない手段として、X線装置や放射性同位元素を装備した検査機器が使われている。

身近な実例はハイジャック防止を目的とした空港での手荷物検査である。X線装置を用いて重い元素の物質で構成される金属製危険物をモニタに映し出すことが主目的であるが、最近では軽い元素の物質で構成される爆薬も検知できる新しい型の検査装置も登場し、テロ対策にも役立っている。高度に発達した文明社会における安全・安心を確保する技術手段として放射線が欠かすことのできない役割を担っている。

6. 食糧の安定供給に役立つ放射線利用 — 農業分野

6.1 食品照射 — わが国では普及が最も停滞している放射線加工

国連食糧農業機構(FAO)、世界保健機構(WHO)、及び国際原子力機関(IAEA)では食品の衛生と損耗防止の対策の一環として、放射線の利用を早くから着目し推進してきた。その

一つが食品照射である。放射線量に応じた殺菌や滅菌、検疫のための殺虫、発芽抑制による保存期間の延長など、食品照射には様々な目的がある。

食品照射の利点の第1は放射線の透過能力によって製品の深いところまで均等に殺菌できるので、搬送装置を使って包装した食品が放射線の間を通過するだけで簡単かつ確実に殺菌できることである。第2は照射による食品の加熱がほとんどないため、栄養成分だけでなく味や香りなどへの影響が少なく、生鮮食品や冷凍食品の処理にも利用できることである。しかし、食品照射はこれまで人類が経験しなかった新しい加工技術であるので、それが社会的に広く受容されるためには、有害物質の生成、栄養価への影響、放射能の誘導などの厳しい評価が必要である。こうした利点だけではなく、ある種の食品では食味の低下、特定栄養素の損失等の欠点も指摘されている。上記の国際機関は共同してそれらを繰り返し評価し、こうした照射食品の安全性の確認に努めている。

現在では、食品照射は世界の32カ国で多品目にわたり実施されており、わが国以外の東アジア諸国でも普及が進んでいる。最近では、サルモネラ、O-157などの病原性微生物による食中毒防止のため、米国では食肉の照射が実用化されている。わが国では約30年以上前にじゃがいもの食品照射が発芽抑制のために許可され、実用化されたが、その安全性について一部の消費者から疑問視され、それ以後は食品照射の許可について国は慎重な対応をとっている。

一方、国内で流通している香辛料はほとんど輸入品であるが、香辛料を用いた加工食品の製造・流通過程において有害な菌が増殖し腐敗の原因となる可能性がある。現在は主に高圧蒸気処理による殺菌が実施されているが、香味が失われるという品質上の問題があり、これを解決する方法として放射線照射による殺菌法がわが国を除く大部分の先進国においてすでに許可されている。また、輸入された生鮮果実等のくん蒸による害虫駆除に使用されている臭化メチルガスはオゾン層破壊物質であるため世界的に禁止の方向に進みつつあり、その代替法として米国では放射線照射が実施されている。

6.2 放射線による品種改良 — ライフサイエンスへの利用で最も期待される分野

農業分野で普及しているもう一つの重要な放射線利用は植物の放射線育種である。これは農産物を直接的に加工するのではなく、作物の放射線照射によって品種を改良するという間接的な加工法である。

植物育種はこれまで食糧の増産や安定な供給のために貢献してきた。育種の方法には交配と遺伝的変異があるが、交配は親品種の形質に制約されるため、新品种を生み出すには遺伝的変異を必要とする。放射線育種は作物に放射線を照射し、突然変異を誘発させて品種を改良する方法であるが、放射線作用の生物効果として生じるDNA分子の切断等を利用する。DNAの切断が一時的に起きても、大部分は修復機能が働いて元通りになるが、一部にDNA配列が変化した安定な変異体が生成する。このなかから農産物として有用なものを選別する。DNAとしての化学的性質には変わらないので、食物としての安全性が損なわれるわけではない。

すでに国内の成功例は200以上ある。付加価値の高い主な成功例としては、茎が短く風に強く倒れにくいイネの突然変異種「レイメイ」、黒斑病に弱い「二十世紀」ナシを改良した耐病性品種「ゴールド二十世紀」などが知られている。

放射線育種には従来ガンマ線やX線が利用されてきたが、近年、加速器からのイオンビーム（重粒子線）照射によって従来のガンマ線などでは得難い有用な突然変異が誘発されることがわが国で見出され、世界的に注目されている。γ線やX線の照射では生体内に比較的均一な電離が起きるが、炭素イオンなどの高エネルギーイオンでは、高密度の電離が局所的に起きるため、遺伝をつかさどるDNA分子に与える効果がγ線やX線の場合とは異なるためと考えられている。美しいカーネーションや菊の新品種がイオンビーム育種の成果としてすでに実用化されている。

7. 加速器が放射線利用の未来を担う

放射線利用に使われている放射線源は加速器とラジオアイソトープ(放射性同位元素)に大別される。歴史的な流れとしては、放射線源の主役はラジオアイソトープから加速器へと移り変わったが、レントゲン博士によるX線発見は、真空管内に形成した電界によって加速した電子を金属標的に衝突させたのがきっかけなので、放射線源の原形はむしろ加速器であると言ってよいかもしれない。

加速粒子そのものを利用する試みが始まったのは、高電圧や高周波の技術の発達を基盤に粒子加速器が発明された後の20世紀中頃である。それまで医療や学術研究に使われていたラジオアイソトープは、原子炉による製造が可能となるとともに、加速器の技術も向上し、両線源による放射線利用の研究開発は産業利用も含めて活発となった。50年代には加速器を用いた放射線治療や工業放射線利用の実用化が始まり、60年代以降はラジオアイソトープと加速器による放射線利用は医療、産業に限らず学術分野にも急速に普及した。

弱い放射能のラジオアイソトープでは放射線の遮へいや操作が簡単であり、計量・観察を目的とした学術分野への利用に適しますが、工業利用のように放射能が強い場合は、厚い遮へい体が必要であり、放射線防護のためにより厳しい安全管理が要求される。一方、加速器は電源、真空、制御装置等まで含めて、概して大型で運転に複雑な操作を必要とする。しかし、放射線の発生・停止を含めて放射線強度の制御が自在であり、特に比較的小型の工業用電子加速器では操作や安全管理が容易である。

8. 安全性こそ放射線利用事業の基本

放射線の利用は原子力エネルギーの場合と同様に、その利便性と引き換えに安全上のリスクを負うことは避けられない。もちろん、リスクという「危険に出会う可能性」に着目する限り、原子力・放射線の分野に限定された事柄ではない。放射線利用には2つの特徴的なリスクがあると考えられる。一つは放射線の利用の促進に伴う職業的な放射線業務従事者と住民の被ばくであり、もう一つは、放射線で処理された製品あるいは放射性物質が使用されている製品等に関わる安全性である。

前者については、自然放射線や医療被ばくを除く人工放射線による被ばく線量の上限値が職業人と一般の人々に分けて法令で定められている。医療被ばくを除く理由は医療行為を受けた個人はそれによって直接に便益を受けることになるので、その便益と被ばくのリスクはバランスし得ると判断されるからである。後者の例としては、食品照射及び夜光時計や煙感知器が挙げられる。食品照射においては、照射された食品の安全性を確保することが当然必要である。人為的に放射線を照射した食品を食べることは人類がこれまで経験

しなかったことなので、その安全性については、毒性、発ガン性、生殖器官への影響、遺伝的障害の危険性、栄養成分への影響などのたくさんの項目にわたる試験が主として動物を対象に行われ、これまで膨大なデータが国際機関等で繰り返し解析されてきた。その結果、悪影響を示唆する証拠はこれまで見出されていない。

9. まとめ — 放射線利用の未来に向かって

レントゲン博士は放射線を発見しただけでなく、陰極線を使って放射線利用への道を切り開いたと言える。西洋近代技術を導入し始めて間もなかったわが国でも、発見の翌年には幾人かの研究者、技術者によってX線実験の追試に早くも成功しており、翌々年には島津製作所が教育用X線装置を試作している。20世紀を迎える前にX線の医学利用が国内でも本格化し、日露戦争では陸軍野戦病院にX線装置が設置され、戦傷治療に使用されたという実績がある。百余年の昔ではあるが、こうして進取の気性とチャレンジ精神に富む先人達によってわが国における放射線の利用は始まったのである。

医療分野では患者に苦痛や副作用を与えない診断・治療法の開発が今日の大きな社会目標となっている。加速器を利用する放射線医療技術はまさにこの方向にぴったり合致しているが、技術のいっそうの高度化によってQOL(生活の質)の高い国民医療の実現に放射線が大きく貢献すると期待される。

放射線利用の現状を理解すれば、「放射線」はわれわれの健康を損なう存在ではなく、むしろ健康を守る存在であることに納得していただけたらと思う。

一方、産業分野でわが国が直面する課題は環境問題を克服しながら新しい産業を生み出す方向である。放射線を用いた加工技術は環境負荷が小さく、かつ、省エネルギーという優れた特長をもつだけでなく、高精度の計量を通して品質を確実に保証できる信頼性の高い技術である。しかし、現状では加速器が十分に使い易く、かつ、広い普及に相応しい市場競争力を実現したと言える段階に到っていない。今後は小型化、簡易化、安全性の向上による加速器の技術革新を一層進めるとともに、競合する放射線以外の技術との複合化も視野に入れて、幅広く産業・医療技術へ刺激を与えることを通して国民生活に貢献することが求められている。様々な可能性のなかで、放射線利用がその特色を最大に活かして、この21世紀に大きく発展する方向は、ライフサイエンスとナノテクノロジーであると考えられる。特に、21世紀型の新しい製造技術としてわが国が得意とするナノテクノロジーはいくつかの重要科学技術分野の基幹をなす存在であり、とりわけ、放射線技術は微細な物質構造や機能を制御する人工物の加工・組立及びそれに欠かせない観測・計測という基盤技術に多大な貢献をすることが期待されている。

放射線利用の普及におけるもう一つの問題は放射線に対する国民の不安である。放射線の利用に関しては、その必要性、安全性、及び利用普及の現状についての正しい情報が国民に広く知られることが必要である。消費者や患者が正確な情報を入手し理解できるように、生産者、医者及び国が努力する必要がある。それをベースに消費者や患者と情報を共有するとともに、相互に理解を深めていくことによって、放射線に対する国民の不安を解消していく必要がある。放射線利用が21世紀の産業・医療技術の重要な柱の一つとしてその真価を発揮し生活の質を高めるためには避けては通れない道である。

地球の歴史と放射線

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

(2007年2月10日 受理)

【要旨】 地球表面に生存する人類を含む地球上の生命は、はるか遠くの天体现象や地球内部の活動によって影響を受ける。その影響は物質とエネルギーの流れによるものであるが、ここではそのなかから放射線を通して受ける影響を整理し、宇宙の歴史・地球の歴史の中で人類を見つめるさいの参考に供したい。

1. はじめに

われわれの周囲をとりかこみわれわれに少なからぬ影響をおよぼすものが「環境」である。ここでは「放射線」を通しての影響を考える。「環境」は時間的に変化するが、その変化を駆動するもの、すなわちエネルギーと物質の流れに注目したい。それはまたわれわれ人類あるいは生命が生存する地球表層から遠く離れた場所で起こる天体现象や地球内部の活動によって影響を受けることを理解することでもある。

ここでの放射線 (=宇宙放射線) は、物質をつくる微細な荷電粒子 (電子、陽子など) が星の重力収縮にさいしてエネルギーを得て走りだし宇宙空間に存在する磁場によって加速されたもの、またこれらの荷電粒子の運動状態が電場や磁場の影響を受けて変化するときが発生する電磁波などである。磁場そのものも正負の荷電粒子の運動がそれぞれ異なることから形成されると考えられる。一般的には高速 (10^6 m/s 以上) の荷電粒子ならびに周波数の高い (10^{16} Hz 以上) 電磁波が放射線と呼ばれている。本稿における放射線は遠隔地に物質とエネルギーを運搬する主役としての意義を持つものである。

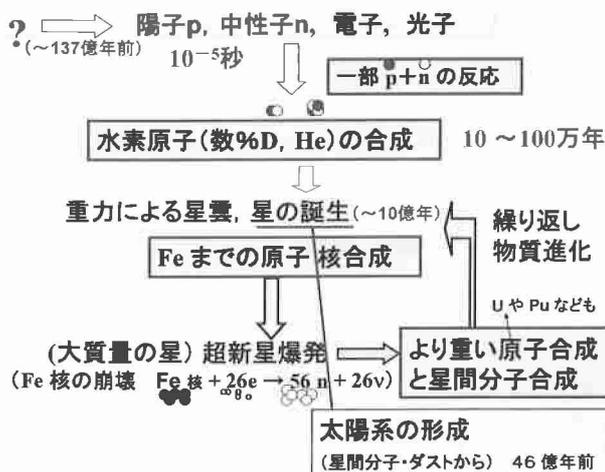


図1 宇宙における物質進化

137 億年前に誕生したときは何種類かの基本粒子だけであったが、10-100 万年後には水素原子が、さらに 10 億年後には星が誕生して、重力エネルギー解放により Fe までの元素合成が始まる。超新星爆発では Fe 核崩壊などが起こり大量の中性子発生による超重核種の合成と星間への元素の放出、星間における分子合成が起こる(図 3)。こうした過程の繰り返しによって物質が進化する。

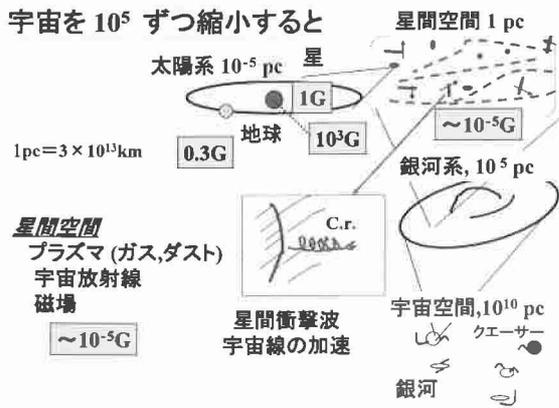


図2 宇宙の構造は、太陽系を 10^5 倍して星間空間があり、さらに 10^5 倍して銀河系の一部になり、さらに 10^5 倍して銀河が浮かぶ宇宙になる。それぞれの空間に磁場が存在し、プラズマが存在し、宇宙線が加速される。

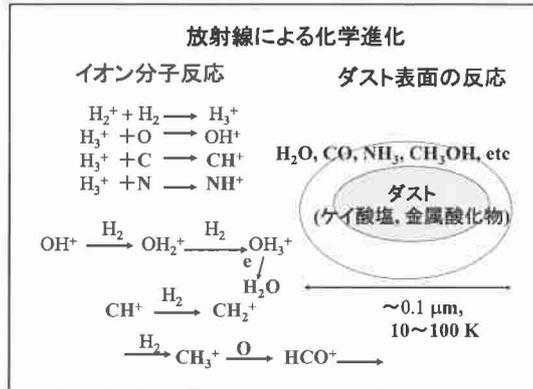


図3 宇宙空間に浮かぶ分子が放射線によってイオン化し、近隣の分子と反応して水、メタン、アンモニアなどの分子ができる。低温のダスト上に凝縮し、紫外線・宇宙線によって複雑な高分子が形成される。120種の分子が確認されている。

2. 太陽系の形成まで

宇宙は膨張しながら物質進化をすすめる(図1)。ビッグバンから数10万年後、H原子(密度: $10^{10}/\text{m}^3$)とその数%のHe原子、そして膨大な数の光子、ニュートリノ(もしくはダークマター)だけが存在した(このときの密度ゆらぎは10万分の1)。以後、重力収縮による星雲や星の形成、星の中の核融合反応(元素合成)および超新星爆発のさいの中性子捕獲による超重金属までの元素合成と合成された元素の宇宙空間への放出が繰り返され、物質進化が進む。

新しい星の誕生(たとえば46億年前の太陽系の形成)のプロセス:

原始太陽系星雲の回転 → ダストが沈殿する → 微惑星をつくる → 微惑星が衝突して惑星をつくる → 外惑星と内惑星ができる

できあがった太陽系の元素分布と構造(図4):

太陽(太陽系質量の99.8%を占める): H(93.7%), He(6.2%) 残り0.1%のうちの9割が(O, C, N, Ne)、さらに残りの割が(Mg, Si, Fe, S, Ar)、さらに1桁小さく(Al, K, Na)

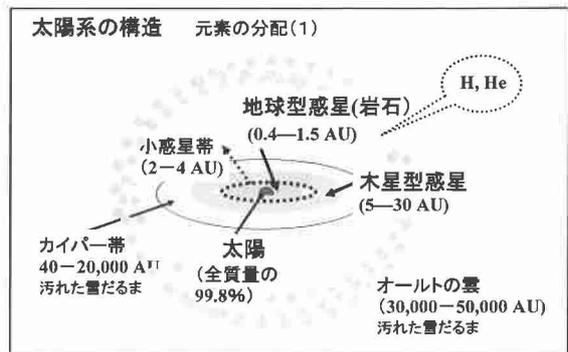
地球型惑星(主として金属鉄と岩石から成る): 水星、金星、地球、火星、小惑星

木星型惑星(太陽と同じ組成; 衛星は水、氷など): 木星、土星、天王星、海王星

カイパーベルト(数 ~ 10 km氷天体)短周期(<200年)型彗星

オールトの雲(数 ~ 10 km氷天体)長周期型彗星

図4 元は同じ分子とダスト(単一の相)から46億年前に生成した太陽系も、太陽、地球型惑星、木星型惑星、彗星のふるさとなどにグループ分けされた。カッコ内の単位AUは太陽-地球の距離



3. 地球の形成

微惑星の衝突と集積から原始地球が成長するとき、微惑星中の含水鉱物（粘土鉱物）や吸着水から水蒸気が放出され、原始地球は水蒸気によって厚く覆われ、微惑星の凝集によって発生する熱を宇宙に放出できなくなった。そのため原始地球の表層温度が高くなり、やがて表面から溶けだし、マグマオーシャンとなる。微惑星の集積時間を 5,000 万年として、水分含量 0.1 % の場合で、マグマオーシャンの深さは数十 km、微惑星中の水分含量 2 % の場合でマグマオーシャンの深さは 1,000 km、地表の水蒸気圧は 100 気圧と推定されている¹⁾。

- 地球の熱源^{1, 3)} :
- (1) 地球形成期に解放された重力エネルギー (2.8×10^{32} J)
 - (2) 放射性元素の崩壊のさいに発生する放射線エネルギー ($\sim 1 \times 10^{31}$ J)
 - (3) 重力的収縮に伴い発生するエネルギー ($\sim 1 \times 10^{31}$ J)
 - (4) コア物質の相変化・化学反応によるエネルギー放出 ($\sim 1 \times 10^{31}$ J)

発生したエネルギーは、内部に蓄積(10%程度)され、不連続的に地球表面から宇宙空間に放出される(現在の熱流出速度 ~ 0.1 W/m²、全地球では 4.4×10^{13} W)。太陽からの放射エネルギーは地球表面で 1.4 kW/m² (地球誕生直後では今よりも 30 ないし 40%ほど少ないとされる)であるが、岩石の熱伝導率が低いので同量がそのまま地球表面から熱放射される。しかし短期的には太陽からのエネルギーのごく一部は地球上に化学エネルギーの形で蓄積されることもある。

4. 地球の冷却と進化^{1, 5)}

エネルギー(熱)を獲得し終えてからの地球は冷却するのみである(図 5)。冷却過程の熱(エネルギー)の移動にともなって物質の移動も起こり、均質的な地球から不均質的な地球へと変化する。すなわちコア、マントル、地殻、海洋、大気、電離圏、磁気圏などへの分化(=進化)がすすむ。

マグマの海で鉄・ニッケル合金が沈殿して重力分離が進む一方、大気は下からマグマで加熱され、上層部分が湿気を運び、雨となる(上空 300–350 km)。微惑星の衝撃の頻度が減少するにつれて雨が地表に達する。すると短時間(1,000 年くらい)で水蒸気が地上に落下して海ができる。残された大気成分の一酸化炭素は、水蒸気の光分解生成物と反応して二酸化炭素になる。誕生した海は 3,000 m の厚さ、200°C の高温。ときどき(100 万年に 1 回程度の頻度で、数億年もの間)巨大な微惑星が衝突して地球は火の玉状態に戻る。これを繰り返した。

形成後 46 億年を経た現在の地球においても、大量の熱エネルギーが地球の内部に蓄積されたままである。内部のコア部分の外側(地球中心からの半径 3,000 km)で 4,000°C(コア中心部は 6,000°C)、その外側のマントル(岩石から構成される; すなわち熱絶縁体である)は突発的に起こる対流(数億年に 1 回の頻度で起こり、プルームと呼ばれる)によって熱が地球表面の方向に移動する。さらに地球表面は地殻(地球表面から陸地で平均 35 km の厚さ、海洋で平均 6 km の厚さ; マントルとは異なる岩石から成る)で覆われている。

海洋地殻(海洋の下にある地殻)は中央海嶺(海洋で地球内部からの高温マグマが噴出するところ)で生産され(玄武岩; SiO₂を 50w%ふくむ)、少しずつ押し出されて地球表面に沿って移動し、海溝と呼ばれるところで地球内部に再び沈み込む。沈み込んだところで水を

含む玄武岩の部分融解が起こり、ケイ酸成分にさらに富む大陸地殻（現在の陸地部分の地殻：SiO₂を75w%もふくむ花崗岩を主としているため比重が小さい）が生産される⁴⁾。

水蒸気が凝縮した後の大気は二酸化炭素と窒素を主としていたが、そのうち二酸化炭素は炭酸塩として海に沈殿（海水の組成が変化）するので大気中の二酸化炭素濃度は今日まで減少しつづけてきた。

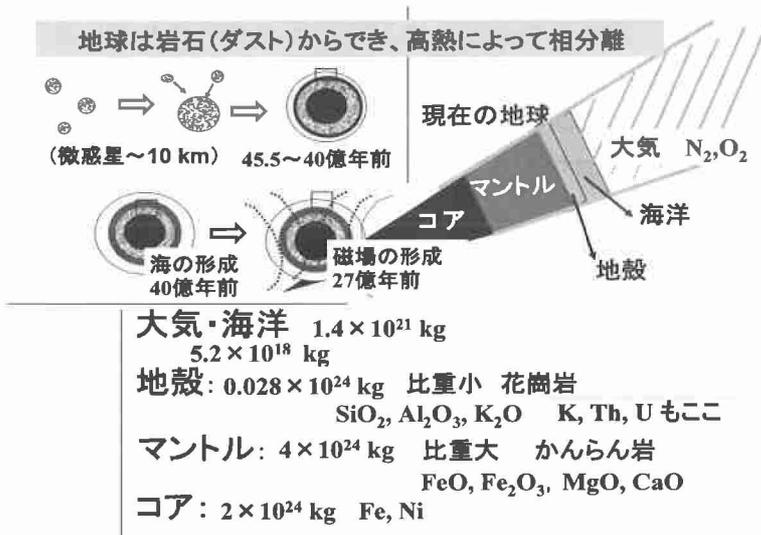


図4 地球の相分離
微惑星の衝突によって高温溶融状態になった地球では、重い金属鉄が沈み(コア)、ガスが溶け出し(大気と海)、さらに表面が冷えるにつれて地殻とマントルに分離した。その後、大気中の二酸化炭素は海へ、また植物の光合成が進んで大気中に酸素が出現した。また地球磁場の発生は地球の冷却の途中でコア(金属)が部分的に固体になったためと考えられている。

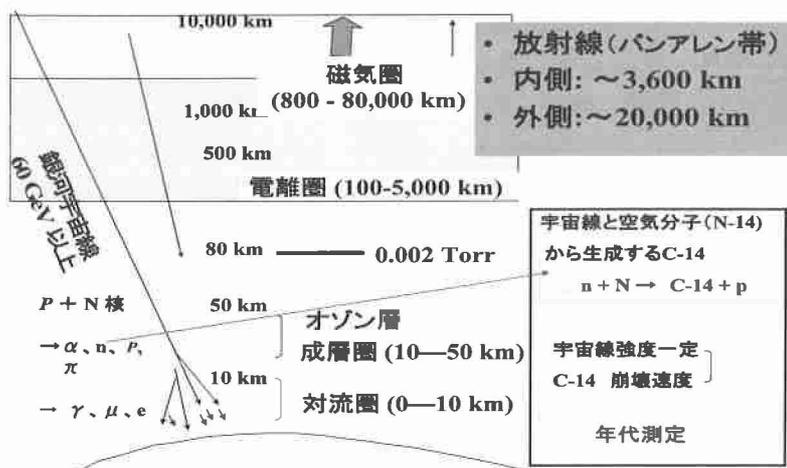


図5 太陽から来る太陽風ならびに太陽系外から来る低エネルギーの電子・陽子線などは地球磁場に捉えられてバンアレン帯をつくる。太陽系外の高エネルギー(60 GeV以上)粒子線は地球に侵入してくる。一部は空気分子と衝突して核反応を行い、中性子、陽子、α粒子、パイオン、ミュオンを発生させ、さらに多数の電子やガンマ線がつぎつぎと発生することが知られている。

5. 地球上における生命構成分子(有機化合物)の合成—提案されている説

①地球上の無機物質から光・放電・宇宙線によって合成された。その場所としては

- 1 CO₂·N₂·H₂O の酸化型大気のなか
- 2 CH₄·NH₃·H₂O の還元型大気のなか
- 3 CO を主体とする弱還元型大気のなか

4 種々の金属塩を含む海洋中

などが考えられている。

②天王星・海王星などの外惑星近辺、彗星上において光・宇宙放射線によって生成された有機物残さがその後に地球上に落下したと考えられる。

③深海底における高温マグマ噴出による熱化学反応によって、すなわちマグマからのエネルギーと物質、高温水と岩石との反応によると考えられる。

6. 生命の誕生とその進化^{1, 5)}

生命の誕生は、外界とは膜などで隔てられた空間を保ちながら、外界から独立して、自身と同じ分子をつくる(複製・増殖)という自己組織化(外界から物質やエネルギーを取込んで放出することにより活動する)がすすむことに起源があると考えられている。それは約40億年前、地球の形成5億年後のこととされている。

生命の歴史における7大革命

①原始生命の発生(40億年前) ②バクテリア(原核細胞)の出現(38~35億年前) ③光合成の開始(27億年前より) ④真核細胞の出現(21億年前) ⑤多細胞生物の出現(10億年前) ⑥硬骨格生物の出現(5.5億年前) ⑦人類の出現(700万年前)が地球生命の歴史における重大事件とされている。

最初の生命は深海底の熱噴出孔付近であろう：

その根拠：①化学化石(C12濃縮のみられる化石)が発見されるのは高温マグマが噴出したとみられる枕状熔岩(38億年前)の付近に限られている。

②細胞化石：35億年前、枕状熔岩の上の堆積岩チャート内で発見される。

③現存する生物のDNA解析(系統樹)から初期生命は高熱バクテリアであるとみられる。

現存する緑色および紅色硫黄細菌(光エネルギーによって硫化水素を酸化する細菌)は、(H₂S、S、Fe²⁺、H₂O)などと二酸化炭素から炭水化物(CH₂O)_nを合成することが知られている。1972年、イエローストーンの酸性75-85℃温泉水から硫黄細菌が、その後90-110℃の超高熱性細菌も発見されている。これらは古細菌として分類される。

原始生命につづく仮想的な生き物コモノートから、古細菌と真性細菌の2つが分岐した。コモノートに近いほど生存温度が高い。その後、さらに古細菌から真核細胞が分岐した。上記の緑色と紅色硫黄細菌の2種類が合体してできたのがシアノバクテリアであり、光合成反応により水と二酸化炭素から有機物質を合成する(現在の植物の先祖)。シアノバクテリアの出現は、海洋や大気中にそれまで存在しなかった酸素をもたらし、酸素呼吸によってエネルギーを獲得する生物を発生・進化させた。これが真核細胞や多細胞動物の誕生につながる。シアノバクテリアは約27億年前に繁栄、その物証は生物化石の炭素同位体比に異常があることである。シアノバクテリアがつくったコロニー状の構造物の化石はストロマトライトとよばれ、確かなものは27億年前のものである。原核細胞の中ではシアノバクテリアだけが酸素発生型光合成を行い、現在ではその種類は1500種以上が知られている。また鉄鉱物とシリカ(SiO₂)が交互に重なり合って縞状の層をなす「縞状鉄鉱層」(BIF: banded iron formation)は現在の人類の鉄鉱石資源となっているが、その生成ピークはいまから25~20

億年前であり、世界中の海底に大量の酸化鉄が堆積した時期と重なる。海水に溶けていた鉄イオン Fe^{2+} が当時出現した酸素によって酸化されて沈殿し、海洋プレートの動きにともなうてマントル内部へも沈み込んだが、一部は沈み込まないで取り残され、付加体となって陸地に隣り合った側に残されたものである。

真核細胞の出現：20 億年前、平たい菌と丸い菌が集合したときに、隙間にミトコンドリアや葉緑体が侵入して真核細胞が生まれた。これに伴い、DNA 情報量が 1000 倍に増えた。

多細胞動物の出現：6 億年ほど前、突然、多様な種類の多細胞動物がいっせいに出現した。海洋や大気が酸素で汚染されてから、酸素を使い二酸化炭素を廃棄するエネルギー利用を行なう大型生物が進化した。

7. 生命の進化と放射線 (図 6)

- ① 生命をつくる材料物質 (アミノ酸とその縮合物、糖、塩基、脂質等) は、放射線がかかわることによって太陽系が形成される以前につくられた可能性が高い。星間分子のイオン分子反応と低温ダスト表面における放射線有機合成反応などによると考えられる。ただし、深海熱噴出や隕石衝突のさいの放出エネルギーが生命材料物質をつくったと考える研究者も多い。
- ② 地球における生命の誕生 (40 億年前) は、宇宙線が到達できない深海底 (3,000–4,000m の海底にある熱水噴出孔の近く) であった可能性が高い。その理由は、熱噴出孔の近くでは熱と必要な物質が湧き出ることと、もろい DNA 分子などが放射線によって壊されることがないためであろう。(本節の末尾を参照のこと)。
- ③ 27 億年前に起きた地球の磁化にともない大部分の宇宙線 (荷電粒子線) が地球に入射できなくなり、生命は深海から浅海に移動して活動できるようになり、そこではやがて太陽エネルギーの利用が可能になった。シアノバクテリアによる光合成 (酸素の発生) が知られている。
- ④ 大気中の酸素蓄積から紫外線をカットするオゾン層の形成が起こり (4 億年前)、生命は初めて陸上に上陸できるようになった。
- ⑤ 人類と放射線の関係では、人類によって放射線がつくられ (加速器、原子炉、原子爆弾)、物質構造の研究、医学・工学などに利用されるようになった。放射線被ばくのないように管理されている。

地球の歴史と生命の進化には共通な節目が現れる (図 6)。物質に対する放射線作用を考えることによって、その因果関係が理解される。すなわち分子を形成する化学結合に関係する電子が放射線 (高速の荷電粒子) によって弾き飛ばされて化学結合が切断される。小さい分子よりも (多数の電子を含む) 大きい分子が放射線によって影響を受けやすい。したがって生命の活動をつかさどる分子の中でも DNA (遺伝情報をもつ巨大分子) がもっとも放射線の影響を受けやすいことから、上記の②③④が自然に理解できる。①は化学反応に関するものである。

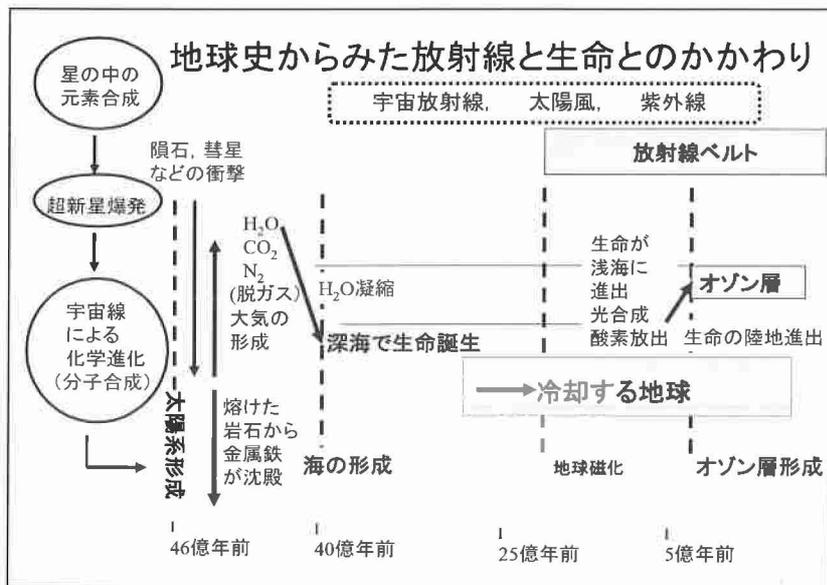


図6 星の中の元素合成、超新星爆発、宇宙線による化学進化を経て、46億年前に誕生した地球のその後の変化。岩石からしみ出した水で海ができ、深海で生命が誕生、地球磁化に伴い、生命は浅海に移動、光合成、酸素放出がはじまる。やがてオゾン層形成により生命の陸地上陸が実現した。

8. 環境からの放射線⁸⁾と環境への放射線

自然界（環境）から地球表面にいるわれわれに降り注ぐ放射線はつぎの3種に分類できる。

- ① 太陽系外からの高エネルギー放射線（図5）：超新星爆発と銀河系磁場によって加速された宇宙線：60 GeV以上のエネルギーの陽子が太陽系磁場と地球磁場を突き抜けて地球表面にまでやってくる。大気中で空気分子の原子核と反応して電子、ミュオン、中性子、ガンマ線など多数の粒子を発生させる。われわれに対する年間被ばく線量は0.4 mSv程度。
- ② 太陽から来る放射線：1 MeV程度の電子線や陽子線から成り、太陽風とよばれる。地球磁場にさえぎられて地上3,000—20,000 km上空で放射線帯(バンアレン帯)を形成する(図5)。スペースシャトルはこの下を飛ぶ。
- ③ 46億年前に地球が形成されたときに微惑星に含まれていたU-235、U-238、Th-232、K-40などの長寿命の放射性核種が酸化物など密度の比較的低い物質となったので地殻(3×10^{22} kg)に濃集されている。その放射性崩壊にさいしては、ガンマ線が地表にいるわれわれに0.6 mSv程度の被ばく線量を与える。アルファ線やベータ線も発生するが、地殻の中でとどまる。ただし崩壊の途中で希ガス(ラドン)になると容易に地殻から(岩石の表面、あるいはコンクリート建屋のなかで)大気中に抜け出して、われわれが呼吸するとき体内に吸収されてわれわれを被ばくする(0—14 mSv程度)。U-235、U-238、Th-232などの原子核は、いずれも232から238個の核子からなり、そのなかに90個程度の陽子が含まれ、互いに電気的な反発力を及ぼしながら運動している。一定の確率でアルファ粒子崩壊をつぎつぎと行い、そのつど陽子と中性子間の調整を行い(このときにベータ線放出が起こる)、多くの場合で電荷の運動状態が変化するのでガンマ線放出をとともなう。ラドンが崩壊した後はポロニウムや鉛になって空気中の微小固形物(エアロゾル)やちりに付着しているが、最後には安定な鉛の核種になる。

われわれが原子力発電(軽水炉)を運転すると放射性廃棄物ができる。U-235 を 1 個反応させるとき、U-238 も 1 個消失し、プルトニウム(半減期 2 万年)が 0.5 個生成、放射性元素(半減期: 数~200 万年)が 1.5 個生成される。世界中で 100 万キロワットの原発を 1000 基、1000 年間運転するときに、消失するウランは 8×10^8 kg、生成する放射性元素も 8×10^8 kg、地殻 (2×10^{22} kg) 中の放射性元素の存在量はあまり影響ないといえる⁹⁾。

8. おわりに

宇宙は、膨張を続けることによって、物質が熱平衡状態に陥ることなく、宇宙の平均温度は絶えず下がり続ける一方で局所的な高温状態を作り出し、また宇宙は絶えず空間を拡大することによってエントロピーを吸収する場を提供し続ける。典型的な例で言えば、天体の重力収縮のさいの重力エネルギーの解放によって天体内部の温度が上昇し、それによって重元素の合成が誘起される。さらに引き続く重力エネルギー解放によってついには超新星爆発が起こり、それに伴って宇宙線の発生が惹き起こされる。放出された重元素を含む星間空間においては、引き続いて発生する後続の超新星爆発がもたらす宇宙線(=放射線)によって化学反応が促進され、水、メタン、アンモニアをはじめとするさまざまな分子が合成され、結果として生命の誕生につながったのである。宇宙放射線が到達できなかった深海底で誕生し、そこで生存していた生命も、地球磁化に伴い放射線障害のおそれなくなると地球表面に進出し、太陽エネルギーの利用を可能とした。その結果、生命は(当時の汚染物質とでもいえる)酸素を利用して活動力を増す。また酸素の蓄積によって形成されたオゾン層(太陽紫外線から生命を保護することが知られている)によって、生命はようやく陸地の生活が可能になったのである。

地球も、誕生以来、内部に蓄積された熱エネルギーを断続的に宇宙空間に放出し、それによって均一化に陥ることなく、進化をもたらし続けてきた。およそ 1 万年前から始まった人類の文明はこうした宇宙の進化に影響を与え始めようとしている。人類は地球に蓄積されているエネルギー資源および必要物質を掘り出し、不要になった廃棄物質を地球の表面に戻している。自然界の物質とエネルギーの流れに対して人工的な影響を与えようとしている。急激な人口増加が他の生物の生存を脅かすことは、地球表層における生命をつくる有機物質の量が限られていることを思えば当然のことである。21 世紀に生きるわれわれは、考えなければならぬ大きな問題を抱えている。

参考資料

- 1) 松井孝典他:「地球惑星科学入門」岩波講座地球惑星科学 1。(岩波書店)、(全 14 巻)
- 2) 酒井 均:「地球と生命の起源」ブルーバックス、講談社 B1248
- 3) 松井孝典:「巨大隕石の衝突」PHP 新書、038
- 4) 高橋正樹「花崗岩が語る地球の進化」自然史の窓 7、(岩波書店)
- 5) 丸山茂徳・磯崎行雄:「生命と地球の歴史」岩波新書、543
- 6) 桜井邦朋:「天体物理学の基礎」(地人書館)
- 7) 池内 了:「宇宙はどこまでわかっているか」(NHK ライブラリー18)
- 8) 大野新一、八木国光、新井英彦:「自然放射線被ばくによる線量の理解」、放射線教育、5, [1] 41 (2001)
- 9) 大野新一、清水三郎:「エネルギー資源量ならびに人類のエネルギー消費量の予測」、放射線教育、7, [1] 21 (2003)

ポロニウム

坂内 忠明

放射線医学総合研究所

〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1

(2007年 3月 11日 受理)

(要旨) ポロニウムについて、基本的な性質、歴史的経緯、過去の事故、自然界での存在等について述べる。

0. 掲載の経緯

ポロニウムについては、昨年 11 月に英国に亡命中の元ロシア連邦保安庁情報部員が死亡し、尿の中から ^{210}Po が検出された事件以来、マスコミはもちろんのこと、様々な機関や団体がホームページ等で解説を行っている。しかし日本語の解説では重要な事柄（過去に起きた事件、対処に使われる薬品）や興味深い内容（分析方法、一日の摂取量、科学上の発見の役割等）が掲載されていない場合も多い。放射線教育フォーラムの会員でも、ポロニウムについて関心が深い方が多いのではないかと編集委員会で判断され、ニュースレターに書くことになったが、分量が多くなり過ぎたため、「放射線教育」に掲載することになった。

1. 基本的性質

ポロニウム (Po) は、原子番号 84 の酸素族 (第 16 族) に属する元素である。電子配置は $[\text{Xe}]4f^{14}5d^{10}6s^26p^4$ となっており、2 価、4 価、6 価、-2 価の化合物になることができる。-2 価は金属との間にできるポロニウム化物である。4 価は溶液中で最も安定な状態。塩化物の場合、二塩化ポロニウム及び四塩化ポロニウムと二種類できる。電気陰性度は 1.76 で、単体は半金属である。単体の融点は摂氏 254°C (255°C)、沸点は摂氏 962°C。昇華性がある。¹⁾

^{210}Po に限ると、1g の熱の発生は 1 秒につき 140 J。0.1mg で発光する。²⁾

2. 同位体及び壊変

質量数は 189 を除く 188 から 218 までの 29 種類 (核異性体を含めると 44 種類)。³⁾ 194 より重い人工の同位体はほとんどが Rn の壊変もしくは At の EC 壊変により初めて検出されている。Bi の β^- 壊変によりできるのは 210 より重い同位体だけである。(At の EC 壊変によりできるのは 211 より軽い同位体である。)⁴⁾

また、壊変が不明なものを除いて、ほとんどの同位体は α 壊変で鉛に変る。EC 壊変を起して Bi になるのは 192 と 195 から 209 まで、 β^- 壊変で At となるのは 215、217、218 だけである。

自然界に存在しうるポロニウムの同位体は、トリウム系列の 212、216、ウラン系列の 210、214、218、アクチニウム系列の 211 と 215 の 7 種類であるが、210 の半減期が 138 日、218 が 3.1 分、その他は半減期が 1 秒以下なので、実際に天然

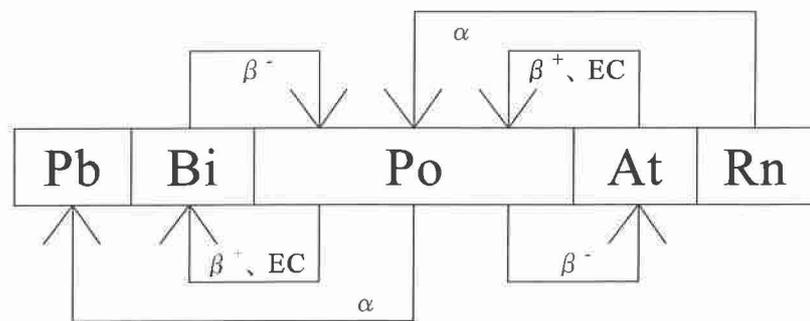


図 1: ポロニウムの壊変

表 1：ポロニウムの同位体

別名	質量数	半減期	比放射能 (Bq/g)	壊変の形
^{208}Po	207.98	2.8976年	2.19×10^{13}	α 、EC
^{209}Po	208.98	102 年	6.20×10^{11}	α 、EC
^{210}Po Radium-F	209.98	138.376 日	1.66×10^{14}	α ウラン系列
^{211}Po Actinium-C'	210.99	0.516 秒	3.83×10^{21}	α アクチニウム系列
^{212}Po Thorium-C'	211.99	0.299 μ 秒	6.58×10^{27}	α トリウム系列
^{213}Po	212.99	4.2 μ 秒	4.66×10^{26}	α ネプツニウム系列
^{214}Po Radium-C'	213.99	164 μ 秒	1.19×10^{25}	α ウラン系列
^{215}Po Actinium-A	215.00	1.781 m秒	1.09×10^{24}	α アクチニウム系列
^{216}Po Thorium-A	216.00	0.145 秒	1.33×10^{22}	α トリウム系列
^{217}Po	217.00	1.53 秒	1.26×10^{21}	α
^{218}Po Radium-A	218.00	3.1 分	1.03×10^{19}	α ウラン系列

に存在するポロニウムは 210 だけと言ってもよい。永続平衡が成立している時、親核種と娘核種の放射能は同じであるので、 ^{238}U が全て ^{210}Po になった場合、 ^{238}U と ^{210}Po の放射能は同じである（実際には、 ^{222}Rn の状態で大気へ逃げてしまうので同じにはならない）。

3. 発見の経緯^{5) 6)}

1891 年に、「前の場合（注：エカホウ素やエカケイ素のこと）ほどの確信はないが」と前置きをして、メンデレーエフは原子量約 212 の「ドヴィ・テルル (dvi tellurium)」を予言していた。1898 年、キュリー夫妻はピッチブレンドを分別処理している最中にビスマスと一緒に分離される分画に高い放射能があることを見つけた。更に分離を進め、高い放射能を持つ物質を発見した。この物質は新しい元素であると確信し、キュリー夫人の祖国ポーランドにちなんでポロニウムと名づけた。ポロニウムの略称 Po は 1898 年 7 月 13 日にピエール・キュリーによって書かれた研究所の日記に現れている。

とはいうものの、すんなりとポロニウムが認められたわけではない。

ポロニウムはビスマスの放射能をもった形として考えられ、Friedrich O. Giesel はポロニウムのことをラジオブスマス (Radiobismuth) と呼んだ。

1902 年、マックワルド (Willy Marckwald) はれき青ウラン鉱の残留物中にテルルに伴って存在する元素を放射性テルルと名づけていたが、これもポロニウムであった。

1905 年にはポロニウムはラザフォード (Ernest Rutherford) が自分が見つけたラジウム F と同一であることがわかった。⁷⁾

純粋な金属の結晶構造が報告されたのは 1946 年のことである。⁸⁾

4. 科学史上の特筆すべき点

ラザフォードが半減期に気づいたのは、ラドンがポロニウムに崩壊する過程である。当時、ラドンは放射源にちなんで「ラジウム・エマネーション」「トリウム・エマネーション」「アクチニウム・エマネーション」と呼ばれていた。ラザフォードはそのうちのひとつ「トリウム・エマネーション」が 54 秒間で放射能が半減し、その二倍の時間が経つと 4 分の 1 になることに気がついたのである。^{($^{220}\text{Rn} \rightarrow ^{216}\text{Po}$)⁹⁾}

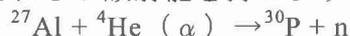
ハリエット・ブルックスが反跳に気がついたのもポロニウム (Ra-A) の崩壊現象による。彼女は銅板の上にポロニウムを付着させて試験容器内に入れると、試験容器の内側も放射

能を持つことがわかった。これはポロニウムが α 線を放出したときに、原子核が反対側に飛ばされて（反跳して）試験容器の壁面にくっついたことを示していた。¹⁰⁾

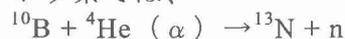
1919年にラザフォードが初めて人工的に核変換を行ったが、その時に用いた線源はポロニウムであった。本来は ^{210}Po の α 線が窒素ガスの中をどれくらい動くか調べていたのであるが、予想外の距離まで検出された。詳しく調べたところ、窒素が α 線とぶつかり酸素の原子核と陽子（水素原子）ができていたことがわかった。予想外の距離まで動いていたのは陽子であった。¹¹⁾

中性子の発見に用いられた α 線の線源もポロニウムである¹²⁾。1930年にはボーテ（Walther Bothe）とベッカーが、 ^{210}Po の α 線をBeに当てると透過力の高いベリリウム線（エネルギーの高い γ 線）が放出されることを報告した。1931年にはイレヌ・キュリー夫妻（Jean Frederic Joliot, Irene Curie Joliot）が同じ線源を用いて詳しく調べたが、エネルギーの高い γ 線であるという結論から離れることができなかった。1932年、チャドウィック（James Chadwick）は、 ^{210}Po の α 線がBeに当たることで放出されるベリリウム線は中性子線ではないかと考えた。ベリリウム線を窒素以下の軽い原子核に当てて、原子核をはじかせる。はじき出された原子核は電離箱や霧箱によりその運動エネルギーがわかった。チャドウィックは原子核をはじき出すに必要なエネルギーを調べ、物質を通り抜ける性質から、電氣的に中性である水素原子と同じ質量を持った粒子であると示した。

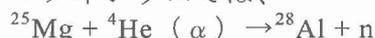
1934年にイレヌ・キュリー夫妻が人工放射能の発見に用いた線源もポロニウムであった。ポロニウムからのアルファ線でアルミニウム、ホウ素、マグネシウムを照射すると、それらが放射能を持つようになるのである。調べたところ、アルミニウムでは、



ホウ素では、



マグネシウムでは、



という反応が起きていた。¹¹⁾

5. 人工的な製造

人工的にできる核種で長寿命の核種としては208と209があり、209が102年と一番長い。とはいうものの、209は作りにくい。

^{210}Po は ^{209}Bi の(n, γ)反応で、 ^{210}Bi をつくり、 ^{210}Bi が5.013日の半減期で β -崩壊するのを待てば良い。この核反応は既に1935年の段階で報告されている¹³⁾。Biは自然界には209しかないので、実際にはビスマスを原子炉の中に放り込んで放射化したものから、単離すれば良いということになる。工業で利用されるポロニウムは ^{210}Po が多い。

^{208}Po はサイクロトロンにより α 粒子でBiを照射して作る。Bi自体を硝酸に溶かしたのち塩酸で調整しジブチルカルビノールで溶媒抽出を行う。²⁾

6. ^{210}Po の化学分析²⁾

ポロニウムを実験で使用する際には注意が必要である。量が多い場合は危険防止のためグローブボックス内で扱わなければならない。化学や物理的性質を調べる実験で ^{210}Po を使う場合、 ^{210}Po は1日0.5%の割合で鉛を生じるので使用直前に精製しなければならない。封管を用いるとヘリウムがたまって破裂することがある。結晶を調べる時には、 α 崩壊に伴い自己放射線損傷がおき、多量の格子欠陥が生成される、X線回折写真を撮る時フィルムが γ 線により黒化する等、の困難が生じる。¹⁴⁾

分析は、

- 1) 前処理：酸での溶解など。必要に応じてTBP（リン酸トリブチル）などで溶媒抽出
- 2) 金属への析出：金属板（通常は銀）を80℃以上の0.5M-HCl溶液中に吊るし、Poを析出させる

- 3) 測定：金属表面の α 線をそのまま測る
の工程で行う。(細かな操作は文献2を参照されたい。)

参考までにイギリスのHPA (Health Protection Agency、健康保護局) のホームページで紹介している「尿試料中の ^{210}Po の分析の概要」¹⁵⁾を記す。手順はほぼ下記の通りである。

1. 尿試料1リットルに収率を知るためのトレーサーとして量がわかっている ^{208}Po または ^{209}Po を添加する(通常は0.2Bq)
2. 濃硝酸を加えて加熱。さらに加熱を続けて蒸発乾固させる
3. 塩酸を加えて溶かし、乾燥させる。これを繰り返す
4. pH2の塩酸+塩化アンモニウム溶液を作り、加熱しながら銀の円盤を溶液の中に浸す
5. 銀の表面に析出したポロニウムを α 線スペクトロメーターで一晩測定する

^{210}Po は5.3MeVの α 線と803.1keVの γ 線を出す。 γ 線の放出割合は0.0012%であり、10万のポロニウムが崩壊して γ 線が1本出る程度なので余程大量に存在しないと(10kBq以上)測定は難しい。しかし、それとほぼ同じエネルギーを放出する核種は ^{206}Tl と ^{206}Bi の2つあるが、 ^{206}Tl は半減期が4.2分と短く、 ^{206}Bi は881keVのところにもピークを出すので、分解能が高いGe半導体検出器で検出できれば同定はかなり楽といえる。分析機器メーカーのホームページでポータブル γ 核種分析器がPoを分析したスペクトログラムを見ることができる。¹⁶⁾

α 線で測定する場合、放出割合はほぼ100%であり、 2π ガスフローカウンター、シリコン表面障壁型半導体検出器などが使える。

また、液体シンチレーション法でも測定できる²⁾。

7. 用途¹⁷⁾

用途としてはポロニウムは α 線を出すことから、ガス濃度計¹³⁾や、工業分野(繊維、写真など)における静電気除去に使われている。以前は、崩壊の時に発生する熱を利用したアイソトープ電池が1945年頃から研究され¹³⁾、人工衛星用のアイソトープ電池(宇宙衛星コスモスに搭載したオリオン-1、1965年等)にも使われていたが、現在はプルトニウム等の他の元素が主流である。また、ベリリウムと混ぜたものを中性子線の発生源として使用されており、核爆弾の起爆剤にも使われていた。(これに絡んでフレデリック・フォーサイスの小説「第四の核」の中にポロニウムが出てくる。)¹⁴⁾

日本アイソトープ協会の「アイソトープ等流通統計」の「放射線障害防止法定義量以下の密封アイソトープの供給量の推移」¹⁸⁾で2002年に20.1kBqが2個供給されている。「日本アイソトープ協会三十年史」には昭和25年から55年までのアイソトープの供給についての資料が掲載されている。精製アイソトープの ^{208}Po は昭和37年から51年までの間、輸入されていた。 ^{210}Po は昭和31年から断続的に輸入されている。 ^{214}Po は昭和39年のみの輸入であった。線源としては昭和36年からの記録となる(それ以前は他の核種と一緒にされているため)。¹⁹⁾いずれも輸入のため、日本では生産していなかった、もしくは生産したとしても研究室レベルと考えられる。

尚、測定器のチェックソースとしても普通に販売されている。²⁰⁾

8. 人への投与及び事故

マンハッタン計画の資料²¹⁾の中で、末期のがん患者へのポロニウムの投与について書かれている。その中で全身性リンパ肉腫を治療中の男性患者に $22.6\mu\text{Ci}$ (=836kBq)[体重1kg当り $0.3\mu\text{Ci}$ (=11.1kBq)]の塩化ポロニウムを静脈注射したケースがあるが、これが体重あたり一番多くポロニウムを投与したものである。亡くなったとは書いていないので、少なくとも43日以上は生存していたものと考えられる[$0.17\mu\text{Ci/kg}$ (=6.29kBq/kg)投与された患者は、6日後に亡くなっている]。

このような人為的な投与の他に、ポロニウムを吸入や摂取する事故が無かったわけではない。

例えば 1958 年に報告された論文²²⁾では二人の若い物理学者が実験で失敗し、ポロニウムを飛散させてしまい、被ばくしてしまったという事件がある。この事件により体内での半減期（実効半減期）が求められ、一人は 37 日、もう一人は 47 日であった。また、このとき EDTA を投与したが効果がないことがわかった。

1971 年にはノースカロライナ大学の印刷所で、静電気の排除装置に用いていた 57mCi (=2.1 GBq) の Po から従業員に汚染が起きた。²³⁾ 1975 年にはオークリッジで物理研究者が実験中に酸化ポロニウムを 0.015 μ Ci (=555 Bq) 被ばくする事故が発生している。²⁴⁾ 摂取したかどうかの判定には個人の尿や便を調査している。

日本では、理化学研究所サイクロトロン棟ホットラボで昭和 61 年 8 月 18 日、職員 2 名が ²¹⁰Po を含んだ放射性同位元素で内部被ばくを起こしている（合計しても 50mSv 以下であったので、当然影響は見られなかった。）²⁵⁾

イレヌ・キュリーは 1956 年に白血病で亡くなっているが、これは、10 数年前にポロニウムの密封カプセルが破裂して、被曝したからと書いてあるホームページがある²⁶⁾が、それを支持するための線量計算を行った論文はない。

事故時の対処の研究が行われていないわけではない。

1951 年に事故時の処方として Hursh により Dimercaprol（ジメルカプロール）投与が考案されている。ロシアでは動物実験でジメルカプロール誘導体の効果について、成功報告がある。²⁷⁾

Aposhian らのラットの実験では、²¹⁰Po (40 μ Ci kg⁻¹ = 1.5 MBq kg⁻¹) を腹腔投与したラットの生存期間（中央値）は 39 日であったにもかかわらず、DMPS、DMPA、DMSA を投与したラットの生存期間（中央値）は 106 日に増えたという結果を出している。²⁸⁾

Volf らは DMPS を投与し更に HOEtTTC (N,N'-di-(2-hydroxyethyl)ethylenediamine-N,N-biscarbodithioate) を投与したラットでは主に糞便を通して、²¹⁰Po の累積的な排出が、8 から 54%まで増加しているのが確認されている。²⁹⁾ 人体への報告がないので実際に事故時に使えるかどうかは不明である。

9. 毒性

ポロニウムの毒性は、マンハッタン計画の段階で調査されている³⁰⁾。

ラット（注射による投与）を用いた LD₅₀（20 日）では 50 μ Ci (=1.85MBq) kg⁻¹。

単体であれば体重 1kg あたりの致死量は 11.1ng となる。170 μ Ci (=6.29MBq) kg⁻¹ では 1 匹は 5 日で、もう 1 匹は 7 日で死んでいる。15 μ Ci (0.56MBq) kg⁻¹ では 4 匹のうち 3 匹は 300 日を越えても死ななかった。

ICRP³¹⁾ では、経口投与による吸収（塩化ポロニウム）は約 20%（ラットでは 3-6% という報告あり）で、肝臓、腎臓、脾臓に沈着。おそらく赤血球の表面に結合して血液中にも存在するとされている。その後の報告³²⁾では消化管からの取込みを 0.5 に設定している。

生物学半減期は 50 日としている。この数値は実際に事故で体内に取り込んでしまった人の調査から得られた値である。前述の事故²²⁾で、実効半減期が 37 日の場合生物学半減期は 50.5 日、47 日の場合は 71.2 日となる。

保健物理学会の情報シート¹⁷⁾では経口で摂取されたポロニウムの 50% から 90% は即座に消化器官に移行し、便として体外に出るとされている。

体重 60kg であれば致死量（20 日）は 667ng であるが、吸収率を 20% ととし、単体では水に溶けないので、二塩化物として計算すると、致死量は 4.46 μ g となる。

年間摂取限度は経口で 1×10^5 Bq、吸入で 2×10^4 Bq である³¹⁾。

10. 自然界での分布・日常生活での摂取

ポロニウムは地殻の最外層（1 マイル）にわずか 4000 トン含まれているにすぎない。¹³⁾ 土壌中の ²¹⁰Po は、8-220 Bq/kg とされている。³³⁾

土壌からの植物へ移行する割合（土を1とした時）は、小麦で 2.3×10^{-3} 、ジャガイモで 7.0×10^{-3} 、野菜で 1.2×10^{-3} 、牧草で 9.0×10^{-3} であった。³⁴⁾ 舞い上がりによる大気からの移行もありうるので、実際はもう少し低いはずである。

海水中の ^{210}Po は Cowen らの報告では 0.93 Bq m^{-3} である。³⁵⁾ Gasco らの報告では大西洋で 1.53 Bq m^{-3} 、地中海で 0.84 Bq m^{-3} であった。³⁶⁾

淡水では $0.25 - 2.6 \text{ Bq m}^{-3}$ である。³³⁾ Guogang らの報告³⁷⁾ では河川水の ^{210}Po は $0.28 - 0.97 \text{ mBq dm}^{-3}$ ($= 0.28 - 0.97 \text{ Bq m}^{-3}$)、海水では $1.72 - 5.12 \text{ mBq dm}^{-3}$ ($= 1.72 - 5.12 \text{ Bq m}^{-3}$) で、河川水より海水の方が高い傾向にあった。

大気中の ^{210}Po 濃度は、UNCEAR のデータ³⁸⁾ では米国で $10-40 \mu \text{ Bq m}^{-3}$ 、ドイツで $12-80 \mu \text{ Bq m}^{-3}$ であり、参考値としては $50 \mu \text{ Bq m}^{-3}$ が使われている。日本では 1968 年に黒田の報告³⁹⁾ があり、岡山では $0.0015 \text{ pCi m}^{-3}$ ($= 55.5 \mu \text{ Bq m}^{-3}$)、ウラン鉱山のウラン取扱い作業場では $0.0267 \text{ pCi m}^{-3}$ ($= 988 \mu \text{ Bq m}^{-3}$) であった。

ポロニウムはこのように天然にもあるので知らず知らずのうちに摂取している。

ポーランドの Pietrzak-Flis ら⁴⁰⁾ は食品中のポロニウムを詳しく調べている。数値が高い方から 10 個を選び、表 2 に示す。海産物、畜産物、穀類が多いが、UNSCEAR の参考値で

表 2：ポーランドの食品中の ^{210}Po の濃度⁴⁰⁾

	mBq kg ⁻¹	
ニシン	3805	± 304
タラ	3094	± 248
黒すぐり	213	± 14 .0
牛肉	102	± 9 .01
豚肉	99 .0	± 21
ライ麦粉	136	± 18 .7
小麦粉	92 .2	± 16 .4
カリフラワー	82 .1	± 8 .97
レタス	66 .9	± 4 .03
リーキ	75 .4	± 9 .28

表 4 ^{210}Po の年間摂取量³⁸⁾

	年間摂取量 (Bq/人)
日本	220
米国	22
アルゼンチン	18
中国	68-130
インド	20
イタリア	40
ポーランド	44
ルーマニア	51
ロシア	40-55
英国	28-44
参考値	58

表 3：食品中の ^{210}Po の濃度 (mBq kg⁻¹)³⁸⁾

	乳製品	肉製品	穀物製品	葉菜	根菜と 果実	魚製品 (Bq kg ⁻¹)	飲料水
米国						0.15-55	
中国	13	120	42	430	29	4.9	
インド	15	440	15-120	320	16-140		
フィンランド							0.2-7600
ドイツ	2-80	37-4000	37-1900	4-7400	22-5200	0.05-5.2	0.1-200
ポーランド	16	99-102	90-140	40-67	28-210	3.1-3.8	0.5
ポルトガル						0.08-120	
ルーマニア	13-140	38-110	20-360		12-140		7-44
英国	20-220	62-67000	27-260	37-3300		0.06-53	
参考値	15	60	60	100	40	2	5

は葉菜の方が高くなっている（表 3 参照）³⁸⁾。

UNSCEAR の報告では国別のポロニウムの摂取についての報告 (表 4) があるが、ポロニウムは海産物に含まれるため、日本は摂取量が比較的多い (220Bq 年^{-1})。海産物を缶詰、瓶詰にすると、長時間保存されることによりポロニウムが崩壊により自然と減少するため、摂取量が減る。³⁸⁾

タバコの葉もポロニウムを濃縮するので、喫煙によっても、Po を吸収する。日本のタバコの場合、Po の濃度は 0.42pCi ($=15.5\text{mBq}$) から 0.66pCi ($=24.4\text{mBq}$) で、平均が 0.51pCi ($=18.9\text{mBq}$) /kg である⁴¹⁾。吸収量の 38% が血液に移行する。発がんへの影響は、他の成分と比較すると低いとされている⁴¹⁾。

(引用文献)

- 1) フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』
<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9D%E3%83%AD%E3%83%8B%E3%82%A6%E3%83%A0>
- 2) 石森富太郎、吾勝永子、8.3 ポロニウム、日本化学会編「新実験化学講座 9 分析化学 I」p.230-234 丸善、東京
- 3) 核データの表 日本原子力研究開発機構 (JAEA)核データ評価研究グループ作成
http://www.ndc.tokai-sc.jaea.go.jp/NuC/index_J.html
- 4) Richard B. Firestone ; Virginia S. Shirley, editor ; assistant editors, Coral M. Baglin, S.Y. Frank Chu, and Jean Zipkin, "Table of isotopes 8th ed" New York : John Wiley, 1996
- 5) ウィークス、レスター著 大沼正則監訳「元素発見の歴史. 3」朝倉書店、東京、1990
- 6) <http://www.vanderkrogt.net/elements/elem/po.html>
- 7) エドワード・N.ダ・C.アンドレード著 ; 三輪光雄訳「ラザフォード : 20 世紀の錬金術師 4 版」、p.105-108 東京 : 河出書房新社, 1971
- 8) Beamer, W. H., and Maxwell, C. R., the crystal structure of polonium, J. Chem. Phys. 14,569,1946
- 9) エドワード・N.ダ・C.アンドレード著 ; 三輪光雄訳「ラザフォード : 20 世紀の錬金術師 4 版」、p.84-87 東京 : 河出書房新社, 1971
- 10) Marelene F.Rayner-Canham, Geoffrey W.Rayner-Canham 著 笹川澄子, 荒谷美智共訳 「ハリエット・ブルックスの生涯 : マタイ効果と女性科学者」p.45 丸善、東京 1998
- 11) http://sta-atm.jst.go.jp/atomica/16020105_1.html 人工放射能の発見 (16-02-01-05)
- 12) http://sta-atm.jst.go.jp/atomica/16030309_1.html チャドウィックによる中性子の発見 (16-03-03-09)
- 13) 品川睦明、根津弘幸、室松昭彦、ポロニウム-210、化学、1257-1262 (1964)
- 14) 小岩昌宏、元素発見秘話-ニッポニウムとポロニウム-、「金属学プロムナード-セレンディピティを追って-」p.28-39 アグネ技術センター、東京 (2004)
- 15) measurement of ^{210}Po in urine, http://www.hpa.org.uk/polonium/measurement_Po210_in_urine.pdf
- 16) <http://www.ortec-online.com/po210.htm>
- 17) Po-210 に関する米国保健物理学会ホームページの和訳
http://www.soc.nii.ac.jp/jhps/j/information/Po210_Information_Sheet_HPS_V3.pdf
- 18) 日本アイソトープ協会の「アイソトープ等流通統計 2006」
http://www.jrias.or.jp/index.cfm/6,1247,c,html/1247/ryutu_2006_200609.pdf
- 19) 日本アイソトープ協会、「日本アイソトープ協会三十年史」 p.110-115、日本アイソトープ協会 (東京) 1982
- 20) <http://www.canberra.com/products/819.asp>
- 21) Silberstein, H. E., Valentine, W. N, Minto, W. L., Lawrence, J. S., Frink, R. M. and Gorham, A. T. Studies of Polonium metabolism in human Subjects in "National nuclear energy series : Manhattan Project technical section ; division VI, vol. 3 Biological studies with polonium, radium, and plutonium" edited by Robert M.Fink, p.122-153 New York : McGraw-Hill, 1950
- 22) Foreman, H., Moss, W., Eustler, B. C. Clinical experiences with radioactive materials, Am. J. Roentg. Rad. Ther. nucl. Med. 79, 1071-1079, 1958
- 23) Caruthers, L. T. and Maxwell, R. B., Contamination of a university print shop resulting from the cleaning of a static eliminator device. Health Phys. 21(5):713-4,1971
- 24) Scott, L. M. and West, C. M. Excretion of ^{210}Po oxide following accidental inhalation. Health Phys. 1975 May;28(5):563-5.

- 25) 昭和 61 年度放射性同位元素等取扱施設における事故・故障
(12-06-01-07)http://sta-atm.jst.go.jp/atomica/12060107_1.html
- 26) The free encyclopedia "Polonium"
<http://en.wikipedia.org/wiki/Polonium>
- 27) NRC "Polonium Contamination"
http://www.ncrponline.org/Learn_More/Did_You_Know_65.html
- 28) PMID: 2827276
Aposhian, H. V., Dart, R. C., Aposhian, M. M., Dawson, B. V., Tissue decorporation of polonium-210 in rats by DMPA, Res. Commun. Chem. Pathol. Pharmacol. 58(2),157-71, 1987.
- 29) Volf, V., Rencova, J., Jones, M. M., Singh, P. K., Combined chelation treatment for polonium after simulated wound contamination in rat. Int J Radiat Biol. 68(4):395-404, 1995.
- 30) Boyd, G. A., silberstein, H. E., Fink, R. M., Frenkel, A., Minto, W. L., Metcalf, R. G., casarett, G. and Suter, G. M., Pilot studies on the Interavenous lethal dosage of polomnium, pltonium and radium in rats, "National nuclear energy series : Manhattan Project technical section ; division VI, vol. 3 Biological studies with polonium, radium, and plutonium" edited by Robert M.Fink, p.211-294 New York : McGraw-Hill, 1950
- 31) 日本アイソトープ協会,仁科記念財団〔訳編〕「ICRP publication 30, part 1 作業者による放射性核種の摂取の限度. part 1 」205,20p 日本アイソトープ協会 (東京) 1984
- 32) International Commission on Radiological Protection. Committee 2, "Ingestion dose coefficients (ICRP publication:67, 69. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides : a report of a Task Group of Committee 2 of the International Commission on Radiological Protection:pt. 2-3. Annals of the ICRP:v. 23, no.3/4, v. 25, no. 1)" p.81-84, Published for the International Commission on Radiological Protection by Pergamon Press, Oxford,1995
- 33) 広島大学地球資源論研究室 http://home.hiroshima-u.ac.jp/er/Rmin_GL_084.html
- 34) IAEA . Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environments, Technical Reports Series No. 364, pp. 12-31 IAEA,Vienna, 1994.
- 35) Cowen, J. P., Hodge, V. F. and Folsom, T. R., Coprecipitation and electrodeposition of polonium from sea water., Anal Chem. 49(3):494-6, 1977.
- 36) Gasco, C., Anton, M. P., Delfanti, R., Gonzalez, A. M., Meral, J., Papucci, C., Variation of the activity concentrations and fluxes of natural (^{210}Po , ^{210}Pb) and anthropogenic ($^{239,240}\text{Pu}$, ^{137}Cs) radionuclides in the Strait of Gibraltar (Spain). J. Environ. Radioact., 62, 241-62, 2002.
- 37) Guogang J., Belli, M., Blasi, M., Marchetti, A., Rosamilia, S., Sansone, U., Determination of ^{210}Pb and ^{210}Po in mineral and biological environmental samples, J. Radioanal.nucl.chem. 247,491-499, 2001
- 38) 原子放射線の影響に関する国連科学委員会〔編〕放射線医学総合研究所監訳「放射線の線源と影響 : 原子放射線の影響に関する国連科学委員会の,総会に対する 2000 年報告書. 上巻」 700p 実業公報社 (東京) 2002
- 39) 黒田健、ウラン系列天然放射性核種の分布 5 飲料水および空気中のポロニウム-210 ならびにラジウム-226 の濃度、医学と生物学、76、34-37,1968
- 40) Pietrzak-Flis, Z., Chrzanowski, E., Dembinska, S., Intake of ^{226}Ra , ^{210}Pb and ^{210}Po with food in Poland. Sci. Total. Environ. 203, 157-65, 1997
- 41) 村松 晋、煙草に含まれているポロニウム(^{210}Po)とそれによる肺がんのリスク、Radioisotopes、25(7)、418-425, 1976

メディア・リテラシーについて

村主 進

原子力システム研究懇話会

東京都港区虎ノ門 1-7-6 (升本ビル 4 階)

(2007 年 3 月 11 日 受理)

1. はしがき

民主主義の世の中では、国民の世論が政策を左右する。このため国民は物事を正しく判断する能力を持たなければならない。しかし大部分の国民にとって物事を判断する材料は一般にマスメディアの報道である。したがって国民はマスメディアの報道を間違っ受取らないようにすることが重要である。

一方マスメディアは新聞の読者、テレビの視聴者の関心を引くために、どのような切り口で報道するか工夫し、また事実にセンセーショナルな味をつけて報道するものである。このことが、事実が正確に把握されない原因になる。

このため読者・視聴者の側では、このような現実を認識して、メディア・リテラシーが必要となる。リテラシーとは「読み書きをする能力」のことであるが、メディア・リテラシーとは「読者・視聴者が、新聞記事やテレビ放送の内容をきちんと読み取り、自分で判断する力」である。

メディア・リテラシーは科学、政治、経済、文化などすべての分野で必要なもので、英国、カナダ、米国などでは高校程度からメディア・リテラシーの教育を始め、成人教育も盛んである。⁽¹⁾

著者は原子力発電の安全研究に長年携わり、またチェルノブイリ事故の健康影響に関しても調査してきた。チェルノブイリ事故の調査の結果、マスメディアの報道が、視聴者、読者に対し、実情とは異なった著しい誤解を与えていることを実感し、メディアリテラシーの重要性を痛感するものである。

10 年前の本誌 Vol.1, No.1 (1997) において「マスコミ報道について」の表題で、マスコミ報道のみでは正しい知識が得られないことを実例でもって示した。

しかし 10 年たった今でもこの事情は変わらず、メディア・リテラシーの重要性および必要性が認識されていないようなので再度この問題を提起したい。

このため、まず以下に新聞、テレビ報道の数例について報道内容と事実関係について述べる。

2. マスメディアの報道例

2.1. 1996 年 1 月 25 日の朝日新聞の報道

この報道ではベラルーシの水文気象委員会が纏めた報告書をもとに、「1995 年で事故前の平均放射能の約 20 倍に相当する、 1km^2 あたり 1Ci 以上の汚染地域が約 $45,500\text{km}^2$ 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、云々とあり、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。」と報道している。

この報道を読んだ読者は、おどろおどろしい思いを抱くであろう。しかし、記事にある広大な汚染区域は人の住まない、また人の行き来しない森林地帯のことである。実際は人の居住する区域の汚染は低くなっており、この当時には放射能による外部被ばくも内部被ばくも著しく低くな

っていることは明らかである⁽²⁾。この記事を書いた記者は現地で取材しているが、水文気象委員会の報告書を十分調査したり、現地の研究調査機関を訪問したり、現地の人の生活状況を見たり聞いたりしたのであろうか。

また「1 km²あたり 1Ci の放射能は事故前の平均放射能の 20 倍に相当する」とあるが、天然自然に ⁴⁰K の放射能があり、面積 1km²、深さ 10cm の土壌の中に ⁴⁰K が約 2 Ci ある事実には触れていない。

このことから「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」の「人をむしばみ続ける」は誇大報道である。

著者には、マスメディアはおどろおどろしいことのみ記事にして読者の関心をそそることを意図していると思えない。

2.2. 1995 年 11 月 24 日の読売新聞の報道

この記事も文献 (2) に詳細に述べているので、ここでは報道の要約と事実を簡潔に述べる。

この報道では、『チェルノブイリ及びその他の放射線事故の健康影響に関する国際会議』の WHO の報告で「旧ソ連 3 カ国ではチェルノブイリ事故が起きた 1986 年から 94 年までに計 565 人の子供が甲状腺ガンになった。その 95%以上は転移しやすい悪性のタイプで、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。」と報道している。

この報道を読んだ読者は、チェルノブイリ事故の影響の大きさに驚愕したものである。しかし WHO の報告書の中身を述べると、子供 (0 歳～14 歳) の甲状腺ガンの発生数が 1994 年までに合計 565 人に達するが、最も被害の大きい国であるベラルーシ国でも、その発生率は子供 100 万人あたり 145 人であると発表している。しかし報道では後者については何ら触れていない。

565 人の子供が甲状腺ガンになったと報道されれば、読者は驚愕するのは当然である。しかし、その発生率が子供 100 万人あたり 145 人ということは、子供 1 万にあたり 1.45 人となり、1 万人あたり 9,998 人は健康に生活していることになる。この事実を報道すればセンセーショナルな記事にならないから、報道されていないのであろう。

また甲状腺ガンの自然発生率はもともと非常に低く、100 万人あたり約 1 人であることもチェルノブイリ事故調査関係者にはよく知られているが、このことには触れず発病率が事故前の約百倍と読者を驚かす記事になっている。

さらに甲状腺ガンになった子供の死亡者が 7 人程度 (2006 年 4 月の発表では 15 名となった) であることには何も触れていない。

このことから見ても、この報道は誇大広告まがいの報道となるであろう。

2.3. 2006 年 4 月 16 日の NHK スペシャルの報道

この報道については、ここではこの報道の要約と事実について簡潔に述べる。

この放送の内容は、チェルノブイリ事故後 20 年経過した 2006 年において

- (1) チェルノブイリ事故による放射能が大地を汚染し続けている。
- (2) 被ばく者 500 万人が汚染地域に暮らす。
- (3) ガンが多発している。

という内容であるが、(1) については 2.1 節と同様な内容であり (2) については 2.2 節と同様な内容であるのでここでは省略する。

(3) のガンの多発に関しては、放送内容は主としてチェルノブイリ事故の汚染地域で作業し

たり、居住したりした人のうち、ガンになった4人を追跡するストーリーで、ガンになったのは事故による汚染のせいであるかのように報道している。

このように文字で書くとあまり実感はわからないが、映像は迫力せまるものがあり、チェルノブイリ事故によって多数の人がガンになっていると錯覚させられてしまうものである。

しかし放射線被ばくによってガンになる恐れはあるが、放射線に被ばくしないで生活をしている人々でも自然にガンに罹る割合は10万人あたり年間約300人である事実は報道していない。そして現在までのチェルノブイリ事故影響についての疫学的な調査では、甲状腺ガンを除いて、ガンの自然発生にマスクされて、放射線被ばくのせいでガンが増えたとは確認できないという事実を報道していない。

このことから、この報道は事故影響の一部のみを強調して徒に原子力発電所の恐怖を煽ることを意図していると思えない。

2.4. 2005年9月6日及び2006年4月15日の読売新聞の報道

少し日付が戻るが、IAEAとWHOが2005年9月に纏めたチェルノブイリ事故の環境影響及び健康影響に関する専門家グループ(チェルノブイリ・フォーラム)報告書についての新聞報道に触れる。

2005年9月6日に読売新聞が専門家グループの報告書について報道した。

内容は「①事故直後の被害拡大防止や除染など現場作業に従事した兵士や消防士など約20万人、②汚染地域から避難した住民約11.6万人、③汚染地域に住み続けた住民約27万人—の合計約60万人のうち、被ばくが原因のガンや白血病ですでに死亡したか、若しくは今後死亡する人が4,000人に上ると推計した。」とするものである。

この報道はこれでよい。しかし翌年2006年4月15日に読売新聞は「WHOはチェルノブイリ原発事故が原因で、ガンを発症して死亡する人の数が9,000人にのぼる可能性があるとする報告書を公表した」「チェルノブイリ原発事故を巡っては、昨年9月にWHOなどの国際機関と3か国政府が参加したチェルノブイリ・フォーラムが4,000人という死亡予測を発表したが、今回の9,000人という予測は、事実上、これを修正したものだ。」「4000人の死亡予測は事故復旧作業や強制移住者計60万人を対象に分析した結果で、今回はこの60万人の他に、放射能が比較的低い地域の居住者680万人も分析の対象に加えた。」(下線は筆者が加筆)と報道している。

実情はどうなのであろうか。表はCardis氏等の発表した文献⁽³⁾のもので、IAEAとWHOの報告書⁽⁴⁾に掲載されているものである。

表で分かるように05年9月の発表は、表の第1段～第3段を集計して、母集団605,000人、予想過剰ガン死3,960人を基にして、被ばくが原因のガンや白血病で、死亡したか今後死亡する人が約4,000人と発表したものである。一方、06年4月の発表は表の第4段も集計して、母集団7,405,000人、予想過剰ガン死8,930人を基にして、ガンを発症して死亡する人の数が9,000人にのぼると発表したものである。両者の発表の間に何らの齟齬もないものである。

この報道は一見何でもないのであるが、下線を施した「今回の9,000人という予測は、事実上、これ(05年9月の予想)を修正したものだ。」という記述は明らかに間違いである。この間違っただ記述が読者の頭に強烈な印象を与えたようである。

読者の多くはIAEA、WHO専門家グループは05年9月に間違っただ発表をしていると考えている。そして、IAEA及びWHOは信頼の置けない機関であると考えられるようになった。

事実、筆者は多くの人に人からこのように感じたと言っている。

表 各集団における自然ガン死亡および
チェルノブイリ事故の被ばくによる過剰ガン死亡(予想値)

集団	人口/ 平均線量	ガンの種類	期間	自然 ガン死	予想 過剰ガン死
汚染除去 従事者 1986-1987	200,000 人/ 100mSv	固形ガン 白血病 "	生涯(95 年)	41,500 人	2,000 人
			生涯(95 年)	800 人	200 人
			最初の 10 年	40 人	150 人
30km 圏より の退避者	135,000 人/ 10mSv	固形ガン 白血病 "	生涯(95 年)	21,500 人	150 人
			生涯(95 年)	500 人	10 人
			最初の 10 年	65 人	5 人
特別管理区域 の住民	270,000 人/ 50mSv	固形ガン 白血病 "	生涯(95 年)	43,500 人	1,500 人
			生涯(95 年)	1,000 人	100 人
			最初の 10 年	130 人	60 人
他の汚染区域 の住民	6,800,000 人/ 7mSv	固形ガン 白血病 "	生涯(95 年)	800,000 人	4,600 人
			生涯(95 年)	24,000 人	370 人
			最初の 10 年	3,300 人	190 人

下線部分がなければ正しい記事となる。この 2 つの報道を読者が注意深く読めば下線部分はおかしいと思うであろうが、メディア・リテラシーの力のない読者にこれを期待するのは無理であろう。

両者の間には何らの齟齬もないものを、マスメディアは人の関心を引くように報道しようと意図したことが報道の間違いになったものであろう。

このようなことでは、マスメディアの報道をそのまま信じることはできない。内容をよく熟読玩味して記事内容を正しく把握しなければならない。

3. 本論

世の中はマスメディア無しでは過ごされない。色々な情報はメディアより得られる。したがってマスメディアはなくてはならない存在であって、健全な発展を期待するものである。

一方マスメディアは色々な読者・視聴者に対して色々な切り口で報道するものであり、この意味では意図を持って編集されているものである。また、2 節の例に示すように、センセーショナルな記事にするために、事実のすべてを報道しない、あるいは記事に誤解するような記述を加えるのも実情である。

このような事情を勘案すると、報道されたものは真実ではなく構成されたものである。すなわち、報道は媒介された真実である。

それでは間違いのない真実とは何か。それは 1 次情報のみであるといっても多言ではないであろう。

我々はこのような現実にどのように対処すべきであろうか。

先ずメディア・リテラシー教育を学校教育で行うように取り組まなければならないと考える。また成人に対するメディア・リテラシー教育は直ちに実行する必要がある。これによってマスメデ

メディアの報道を正確に読み取るようにしなければならない。この道は容易ではないが、たゆまぬ努力を続ける必要がある。

次にマスメディアの情報を正確に読み取るためには、1次情報を豊富に流通させることも必要であろう。政治、経済、文化、理工学などあらゆる分野で豊富な1次情報を流通させて欲しいものである。専門的な内容は、専門分野以外の人にも分かりやすく解説することも必要である。

では1次情報を豊富に流通させる手段があるのだろうか。1次情報は広く流通させなければメディア・リテラシーに役立たない。

1次情報を広く流通させる一つの方法は、総合雑誌などに投稿することである。しかも専門分野以外の総合雑誌を選ぶことである。例えば原子力関係の場合は「エネルギー・レビュー」、「ジュリスト」（裁判官、弁護士向け総合雑誌）、「政界」など原子力関係以外の雑誌に積極的に投稿することである。分かりやすく書くことによって原子力専門家以外の知識層にも1次情報が伝達される。

別の方法はインターネットを利用することである。現在ではインターネットの発展は目覚ましい。ホームページによる発信は総合雑誌の読者以外の階層にも1次情報の正しい知識を浸透させることができる。またホームページによって、マスメディアの情報のみの受け手であったものが、ホームページの情報の受け手になり、情報の流れを変えることも可能であろう。

専門家は積極的に総合雑誌に投稿し、またインターネットを利用して、メディア・リテラシーに役立つ1次情報を積極的に流して欲しいものである。

原子力に関しては、色々の機関でPR活動を行っている。これは原子力の理解に大いに役立っている。しかし現在のPR活動が一般向けの言わばジュニアクラス版とすれば、ここに述べたことは一般向けのシニアクラス版と云えるであろう。そしてこの両者（ジュニアクラス版とシニアクラス版）が十分に機能することによって、原子力の理解が一層深まるものと考えている。

4. 終わりに

以上、筆者の専門のことでよく知悉している原子力関係についてメディアの報道の実例を述べた。原子力関係以外でも同様のことを見聞することもあるがこれについては他の専門家に述べてもらいたい。

原子力関係で、メディア・リテラシーに役立つ1次情報の解説の提供のために、筆者が主催している原子力・エネルギー勉強会 (<http://www.enup.jp>) を紹介する。この会は1次情報を分かりやすく説明して、国民の原子力への理解を深めようとするものである。分かりやすく説明することは難しいが色々努力している。

参考文献：

- (1) 菅谷明子；メディア・リテラシー—世界の現場から—、岩波新書 680 (2000. 8)
- (2) 村主進；メディア・リテラシーの勧め、原子力システムニュース、Vol. 8, No. 4 (1998)
- (3) E. Cardis et al. ; Estimated Long Term Health Effects of the Chernobyl Accident. in: One Decade After Chernobyl. Summing up the Consequences of the Accident. p.241-279 Proc. of an International Conference, Vienna, 1996. STI/PUB/1001. IAEA
- (4) IAEA ; Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Their Remediation : Twenty Years of Experience, August 2005

「リスク」を考える

村主 進

原子力システム研究懇話会

東京都港区虎ノ門 1-7-6 (升本ビル 4 階)

(2007 年 3 月 11 日 受理)

1. リスクとは

「リスク」とは分かりやすく説明すれば「危害または災害を受ける恐れ」である。すなわち、リスクとは過去の危害や災害ではなくて、将来受けるであろう危害や災害のことである。しかしながら将来の予測に過去の被害データを用いることが多い。このため一般にリスクを現実の被害と間違えて理解している人も多い。

さて人々は日常生活の中で常にリスクに曝されて生活しているものであるとの認識が薄い。そして、日常生活は安全であるとの考えは間違いである。我々は日常生活のリスクを現実的に定量的に把握し、リスクをできるだけ少なくし、それによって起こるベネフィットの低下をできるだけ少なくして、差し引き安全な生活を進めなければならない。ここに「ベネフィット」とは、利得とか利便といえれば理解できるであろう。

一方日常生活で「安全」とか「安心」という言葉がしばしば用いられているが、この安全とか安心は人々が情緒的に感情的に把握しているものである。ある人が安心と思っても他の人が安心と思わないことが多々ある。このように物事を情緒的に感情的にとらえていて、理性的に考えなければ、ディベートしても何ら結論が纏まらず平行線のまま推移するだけである。

このような問題を解決していくには国民は、定量的、理性的に取り扱うことのできる「リスク」で物事を考えなければならないと考える。

2. リスク評価について

一方国民の方もリスクに対する考え方に問題がないわけではない。

リスクの考え方は二つの過程を通して発展してきたと考えられる。一つは産業規模の大型化と共に進展してきた過程である。単位生産量あたりの労働災害は減少してきているにもかかわらず、産業規模の大型化と共に 1 事故あたりの被害が大きいため、被害の大きさを情緒的、感情的にとらえる嫌いがある。

他の一つは国民の健康意識の高揚と共に食品添加物、医薬品、化学物質のリスクが強調されるようになったことである。最近では環境リスク、廃棄物リスクの論議もされるようになった。しかしここでもリスクを情緒的、感情的にとらえて、安心のために、リスクを大きく考える嫌いがある。

しかしリスクを定量的に評価するようになれば、リスクは正しく受け入れられ、リスクを大きく捉える情緒的、感情的な傾向は低下するであろう。

さらに、世界人口の増大およびエネルギー需要の増加が地球規模のリスクの増大、すなわち地球温暖化による人類の存続を脅かすリスクの増大が予想されるようになったので、リスクはより定量的に正しく評価しなければならない時期にきているものと考えられる。

3. リスクとベネフィット

リスクで物事を考えれば、ベネフィットについても考えなければならない。一般にリスクを低減しようとする、これに伴いベネフィットが低下するものである。またベネフィットを得ようとするれば、必ずリスクは伴うものである。

そして一般にベネフィットの低下はリスクの減少を意味するものである。

したがって、どの程度リスクを下げようとするればどの程度のベネフィットの低下をもたらすのか、またどの程度のベネフィットを求めればどの程度のリスクが増大するのか、リスクとベネフィットをトレードオフしなければならない。しかもトレードオフの内容、すなわちリスクの低減化、最適化、正当化は透明であって、国民に理解されるものでなければならない。

例えば、自動車利用のリスクはかなり大きいものであるが、自動車事故のリスクを限りなく減らすには、交通規制強化では間に合わず自動車台数を限りなく減らさなくてはならない。これではリスクを減らしても、日常生活を不可能にする（ベネフィットが極端に低下する）ものであって、しかもこのことを国民がよく知っているので、自動車利用を現状でよしとしているものである。

このように、リスクおよびベネフィットの評価の内容が透明であれば、産業、衛生、健康などのリスクは国民の理解が十分得られるものと考えられる。

しかし、どのようなデータベースを使ってどのような手法でリスク、ベネフィットを求めたかを分かり易く説明できなければ、すなわち、その手法が国民にとって透明でなければ、リスクも「安心」と「安全」と同様に情緒的、感情的にしか把握されない。

4. バックグラウンドのリスク

また、我々は日常生活において常に多くのリスクに直面している事実も認識しなければならない。すなわち、あるリスクを問題にしようとするときに、当該リスク以外にバックグラウンドとしてのリスクが存在するものである。生命について言えば、病気になるリスクがある。ガンになるリスクもかなり大きい。家庭において転落事故、転倒事故のリスクがある。自動車事故のリスクも大きい。労働によって生計を維持するときに、労働災害や通勤途上に交通事故に遭うリスクもある。

したがって、問題にしようとしている当該リスク以外のバックグラウンドのリスクも斟酌して、リスク・ベネフィットをトレードオフする必要もある。

5. マスメディアの報道を正しく理解しよう(正しくリスクを評価するために)

さて、リスクを公衆に正当に認めてもらうために一つの障害が考えられる。それはマスメディアの報道姿勢である。マスメディアは読者・視聴者獲得競争のためにも、受け入れ側の興味を引くように編集するものである。すなわちニュース価値のあるものは報道するが、ニュース価値のないものは報道されない。

物事の本当の姿は全体を見て初めて正しく理解されるものであって、物事の一部だけでは間違った知識を生むものである。特に受け入れ側の興味を引くように編集すれば、さらに間違いの度合いは多くなる。

これが国民の誤解を生む基になる。このような報道姿勢であることを国民は十分知らなければならぬ。

リスクは事故、故障のデータを忠実に用いて求めるものである。事故、故障の正しい情報が流通しなければ、リスクは国民に正当に受け入れられない。

この障害を克服するには、メディアリテラシーを普及することである。リテラシーとは「読み書きができる」の意味である。メディアリテラシーとは、メディアの特性や社会的な意味をよく理解すると共に、メディアが送り出す情報を「構成されたもの」として建設的に批判することである。

メディアが送り出す情報は、現実そのものではなく、送り手の観点から捉えたものの見方のひとつに過ぎないものである。

メディアリテラシーはマスメディアの報道に対する国民の側からの対抗手段であって、かなり前よりメディア情報に対して、メディアリテラシーの重要性が主張されてきた。

メディアリテラシーを正しく推進するためには、安全および衛生に関する研究に携わる者は、研究によって得られた知見に基づき、安全および衛生関係者に正しい知識を普及しなければならない。また安全および衛生に携わる者は的確な知識を吸収して、これを国民に伝達しなければならない。

これによって、メディアリテラシーが普及し、国民が正しい安全知識を持つようになるであろう。そして正しいデータに基づく正しいリスク情報によって、国民にリスクの内容が正しく受け入れられるであろう。

「安心」および「安全」の理解のためにも、定量的に取り扱えるリスク分野の推進を望むものである。

君子と虎子

— 放射線を引き合いにリスク（危険かも知れないもの）との付き合い方を学ぶ —

加藤 和明

洗練課題研究所 (RISS)

茨城県立医療大学名誉教授

高エネルギー加速器研究機構名誉教授

300-4352 つくば市筑波 1318 (自宅)

((2007年3月20日 受理))

[まえがき] 2006年5月のある日、筑波山の中腹にある寓居でテレビの「モーツアルト特集」を聴き流しながら下界を眺め、「連休に入ったので東京のスモッグも今日はお休みだな」と呟いていたら、知人の息子である高校生がやってきた。リスクのことを知りたいというのだ。丁度、(NPO法人)放射線教育フォーラムから高校生向けに「リスクの解説書」を書いて欲しいと依頼を受けていたので、購入したまま“宝の持ち腐れ”状態にあったパソコン音声入力装置の使い方に慣れる良い機会とばかりに、そのときのヤリトリを文章化してみた。

TOT / T (Toad of Tsukuba) は「聞き役」、HOT / H (Hermit of Tsukuba) は「答え役」の、それぞれ紙上名である。

1. プロローグ

TOT: こんにちは!

色々教えて戴きたいことがあってお訪ねしました。

HOT: いらっしやい!

人生の先輩に教を乞うとは殊勝である。何なりと尋ねてご覧。但し、分らんことは正直に分らんと答えるからその積もりでな。

T: アリゴザです。

H: なんだ、そのアリゴザとは?

T: 知らないの? 「ありがとうございます」の省略形!

H: “若者語”は勉強していないので標準語で頼むよ。

T: これは意外。好奇心が抜群で、何か国語にも通じているといわれている“先生”のお言葉とは思えません。でも、教えて戴くことが大事なので、“大人語”で行きます。

H: 素直であることは美德の一つです。

T: では、先ず、格言というのがありますね。あれは一体どういうものですか?

H: 先人が苦勞して身に着けた“生活の知恵”を手短で覚えやすい形で表現したもの、とでも言えるのかな。辞書(岩波: 広辞苑)には「深い経験を踏まえ、簡潔に表現した戒めの言葉」と書いてあるよ。

T: 分かりました。でも、格言の中には全く反対のことを言っているのがあります。「君子危うきに近寄らず」といったかと思うと「虎穴に入らずんば虎子を得ず」ともいいます。

H: 「好きこそもの上手なれ」と「下手の横好き」というのもそうですね。ものごとというのは一般に多面的で、視点や視座が異なると違って見えることが多いのです。

T: 「君子危うきに近寄らず」というのは「リスクのあるものには身を遠ざけよ」ということですよ。

H: ご名答。リスクという言葉、よく知っていたね。

T: 正直に言うとナマカジリなのです。新聞や雑誌に良く出てくるのでこんな感じかなと思って使っているのですが、仲々すっきりしないので困っているのです。

H：「虎穴に入らずんば虎子を得ず」というのは、「虎の子」のような、その人にとって非常に大事なもの、価値のあるものは、それ相当の危険を覚悟しなければ手に入らないものだ」ということを教えています。

人生というのは可能性への挑戦でしょう。可能性に挑戦しない人生なんて、生きるに値しないと僕は思います。気に入った“虎の子”というのは、自分の人生にとって大きな価値を持つものです。それを最初から諦めるというのは、折角この世に生まれて来ることが出来たのに、なんとも残念なことである、と若しも君が考えるなら、リスクというものについて勉強しそれとの付き合い方を学ばなければならないのです。

T：そうですか。それでは、そのリスクとやらについて教えてください。

2. リスクとは

H：“分る”というのは“納得する”ということです。リスクという言葉は今日多くの分野で使われるようになり、新聞などにも登場しない日がないといってよいような感じですね。ただ、分野によって使い方が微妙に異なっていたり、大きく異なっていたりするので、君がまごついたというのはもっともなことだと思います。

T：先生はリスクをどう説明されますか？

H：う～ん。最も簡単に言うと「危険の可能性」かな。昔は「危険度」と訳していたりしました。

T：“可能性”ですか？ ということは「実際には危険でないこともある」ということですね！

H：未来に関することは一般に不確かさが付きまとい、何かを予想してもその予想が当たるか当たらないかはっきりしないことがままあります。危険なことが起きるかもしれないがなかったけれど、ある時間が経ってみると、それまでの間にその危険なことは起きなかった、ということはよくあることです。安全が売り物の新幹線だって絶対に事故を起こさないという保証があるわけではありません。1964年以來数え切れないほど新幹線のお世話になっていますが、事故が起きそれに自分が巻き込まれる可能性を何がしか持ちながら、利用を続けてきたのです。幸いにも今日まで、そのような可能性は実現しませんでした。つまり可能性というのは未来にかかることで、過ぎてしまった時間に対しては結果が確定してしまうわけです。新幹線を利用することに伴うリスク、危険の可能性、は、過ぎた時間に対してゼロ、つまり危険はなかった、ということになるのです。逆の話は宝くじです。当たるかもしれないと思って、つまり可能性が実現することを願って、宝くじを買うのですが、抽選の結果当たらなかった、というのはその時点で、当たるという幸運、つまり負のリスク、がゼロと確定するわけです。

関連はあるけれどもちょっと別のことをお話します。原因と結果が一对一に対応するのが日常の論理で、これを「必然性の論理」といいますが、物質や放射線の素材である素粒子のようなミクロの世界ではこうならなくて、原因と結果がある確率で結びついているのが普通です。因果律が成り立たなければ科学として取り扱うことが出来なくなりますが、確定した確率を介して因果律を作れるのでミクロの世界で起きることも科学の対象と為しえるのです。

本題に戻ります。リスクを「危険の可能性」と説明した背景には、「本当は危険でないかも知れないが今ははっきりしないので可能性があるとしておく」というのと「危険の度合いが何がしかある」という二つの意味が込められています。一般に、安全と危険の間には無数の段階があるのです。前の方の意味合いにおいても、曖昧さの度合いを「本当は危険である」という記述が正しいことの確率で表現することにすれば、両者ともに「危険が発現する確率」として統一的に規定・定義することが可能となります。

3. 生命を脅かすものを危険と考えるリスク

T：格言に「命あってのモノダネ」というのがあります。人に限らずこの世に生を営むものにとって“最も大事なものは”は“イノチ”ということですね。

H：私は必ずしも賛成しないけれど、言っていることはその通りです。「人の命は地球より重い」などと得意げに言う人がいますが私は気に入りません。脳死の状態で、いわゆる「植物人間」として、周りの人々や社会に迷惑を掛けるだけの存在として生き続けることが本当に善かといわれれば素直にイエスとは言えないからです。

それでも、危険の度合いを「命に障る度合い」として量化化することには賛同します。他により良い方法が見

当たらないからです。

T:すると先生はリスクを「生命の失われる確率」として考えるのですね。

H:基本的な考え方としてはイエスなのですが、注意が要ります。それは「人間というものは誰しも何時の日か必ず死ぬことが運命付けられている」からです。

T:といたしますと？

H:人に限らずあらゆる生物は何時の日か命を失います。そして、平均寿命が例えば80年であるといっても、80歳の誕生日の前後に一斉に死んでいく訳でもなければ、毎年1/80の割合で死んで行く訳でもありません。これらのことは、誰しも経験を通して、良く知っています。多くの人は、1年後の今日この日、自分がこの世から姿を消していることは、よもや、あるまいと思って生きています。結果として大概その予想は当たります。けれども、同じ年齢や性別を同じくする人が沢山集まると、1年のうちに、その中からある割合で決まって何人かが死を迎えていることが分ります。この割合のことをモータリティ (mortality:死亡率) といいます。

T:モータリティは若いうちは低くて歳をとるにつれて高くなっていくのですね。

H:頭の働きが良いね。大体正解で100点満点の80点くらいかな。生まれたばかりの赤ちゃんは弱い存在で、病気に罹って死んだりする確率が高いのです。それで0歳から20歳くらいまで急激に下がってきてあと年齢と共にゆっくり上がっていきます。非常に荒っぽく言って、20歳で1/1,000、30歳で1/500、40歳で1/300、50歳で1/200、60歳で1/100です。ある行為にリスクがあるというのは、このモータリティが何がしか増大することなのです。

T:人は皆「生命の失われる確率」を背負って生きている訳だ。だからリスクを「生命の失われる確率」と定義したのでは具合が悪いのですね。

H:その通り。だから「リスクとは“生命を維持する確率の損失”である」というのが正しい言い方になるのです。

T:「物事を易しく、しかし正確に、説明する」というのは難しいことなのです。

H:熱や光を一度に大量に浴びると目を潰したり火傷をします。放射線も同じで一度に大量に浴びると目を潰したり火傷をします。このような影響は「確定的影響」といって、放射線の量があるレベルを超えなければ絶対に起きないといわれています。一方、これらとは別に、それまでにカラダに受けた放射線の量に応じて発現の確率が増えるという影響があります。具体的には“がん”になったり、生まれる子孫に遺伝的障害が現れるというもので、「確率的影響」と呼ばれています。臓器の表面や内部にできる悪性の新生物(悪性腫瘍)を癌(ガン)といいますが、これは細胞分裂に制御が効かなくなって起きる病気です。白血球というのは身体の外からやってくる悪い細菌をやっつけてくれる大事なものですが、これにも分裂の制御が効かなくなる病気があり白血病と呼ばれています。医療界には、“癌”に、血液の癌ともいうべき“白血病”を加え、平仮名で“がん”と書く習慣があり、ここではこれを使いました。

さて、この「確率的影響」ですが、英語では stochastic effect といいます。

“確率的”という和普通 probabilistic の訳と思うのが普通なので、私は「確率論的影響」を使っているのですが、ここでは世間の習慣に合わせておきます。確率的影響は、一定の時間当たりに着目している事象、今の場合で言えば“がん”になるとか、奇形の子が生まれるといったこと、が起きる確率で表すことが多いのですが、厳密に言うと、このような影響は放射線に身を曝した時期(年齢)、発症の危険を考える時期(年齢と経過期間)により大きく影響を受けますので、過去の被曝に対する将来のリスクの予測には、“平均余命の短縮”についての期待値を使う方が良いのです。実際、世の中一般では、リスクを表現するのに「望ましくない影響が起きて齎(もたら)される損害の期待値」を使うのが普通です。放射線のリスクを問題にするときには「受けた確率的影響の大きさ」を表現するのに、割り切って、将来の「望ましくない事象が起きる1年当りの確率」の最大値を使うことが便利なこともあるので、ICRP(国際放射線防護委員会)ではリスクを“確率”で表現することが多いのです。一寸注意が要るのは、ICRPは、“がん”を致死性疾患と見立て、“がん”に冒されることは“命を失うこと”と同等に捉えているということです。後で触れることになると思うけど、実際には医療のお陰で命拾いをすることは多いのですし、医療の技術が進めば、どんな“がん”でも治癒される日が来るかも知れないのです。さて、放射線防護の体系では、確率的影響と呼ばれる“危険な影響”は、発現する確率が、線量ゼロから線量の

大きさに応じて一意に増加して行くと割り切って考えています (LNT モデル)。低線量のところでは対応は一次比例ではない、つまり単純な正比例になっていないという説や、この種の影響にも線量がある値以下なら影響が絶対現れないとする説もありますが、現在は、放射線被曝に伴って身体に受けるリスク、すなわち“がん”などという“危険な影響”が発現する可能性、は線量という変数に対する「単調増加関数」であるとしている訳です。ここで一つ大事なことを補足しておきます。前に「人は皆“生命の失われる確率”を背負って生きている」といいましたね。そういう枠組みの中で防護の仕組みが作られているので、確率的影響の発現に対しても、実際には線量に閾値があるように見えるということです。放射線によって引き起こされる“死”の小さな可能性は、あったとしても他の大きな可能性の蔭に埋もれてしまって見えなくなるということです。閾値は正しくは「いきち」と読みますが、専門家も含め「しきい値」と表現する人も少なくありません。英語では threshold といいます。

T : その“見かけの閾値”というのはどれくらいになるのですか？

H : 一人の日本人が 1 年間に身体に受ける自然放射線の量の 100 倍を、一人の日本人が、生涯のどこかの時点で一度に全身に受けたとしても、その人のその後の人生のどの時点に於いても、余命の期待値には目に見えるほどの変化が現れない、というのが、ICRP の出しているリスク係数 (放射線の単位量当たりのリスク) と我が国の人口動態調査結果を使って、私が自分で実際に (1996 年) 確かめてみた結果です。線量とその単位のこと、また防護の体系で取り入れている管理基準といったことをきちんと話してないので、説明も大変だし、聞く方も分りづらいと思うけど、一応いっておくと、実効線量という量で 100 ミリシーベルトという値です。

4. 経済的損失を危険と考えるリスク

H : ところで、今までのお話では“危険”を“命を失うこと”、すなわち“死”として捕らえています。命あつてのモノダネ、自分という存在にとって最も価値があるものが“命”という認識が、多くの人にとって最大公約数となっているだろうとの考えによるものです。原子力が怖いのは放射線に身を曝すのが怖いからであり、放射線が怖いのは命の営みに障る、最悪の場合命を失うことに繋がる可能性があるといわれるからです。だから、危険の実体に失命を取り上げたのです。しかし、私たちにとって嬉しくない出来事、苦痛をもたらす出来事は、他にもいろいろあります。勤務先の会社が破産して失業に追い込まれること、国が財政破綻し当てにしていた年金が貰えなくなること、高い利子に惹かれて投資した外国債券が思わぬ為替変動で大損すること、等々です。これらの不幸に会うことも“危険”に違いなく、このような危険に出くわす可能性も、広い意味での“リスク”です。

私たちがこの世で生の営みを続けて行く上で、(酸素を含む)空気と水が心配なく手に入ることが最も重要です。これらは普通に暮らしている限り、何の心配もなく手に入ります。砂漠を旅するときとか、洞窟に入るときなどの、特別な状況に置かれたときのみ、そのリスクが生じますが、少しばかり注意を払えばそのリスクは除去されます。空気と水の心配がないとなれば、生命の維持を脅かすものの代表としては、食料の調達、衣服や住居の手当て、病気になったときの医療、などに不都合が生じることです。

今日私たちが暮らしている社会の仕組みでは、オカネがあれば多くの場合これらの心配を払拭できます。その意味で、この世で生の営みを続けるのに、一番必要なものは“オカネ”であるといってもいいのです。このオカネが全く使えなくなるというのは“生命の維持”にとって危険以外の何物でもありません。

こうして、経済に関係する分野では、多くの場合、“リスク”を「経済的に損害をこうむることの可能性」を意味するものとして使用しています。

リスクの尺度として、可能性を、“事象が一定の時間当りに出現する確率”で表したものを使ったり、“損害の大きさに事象発生の確率を乗じて計算される (損害の) 期待値”を使用する、という習慣は、生命の損失を損害と考えるリスクにおいても、財的損失を損害と考えるリスクにおいても、今のところ、同じように行われています。

5. リスクとベネフィット

T : 人に限らず、生物はみな、本能的に危険を避けようとします。そのために先祖が苦勞して身に付けた知恵は遺

伝子に組み込まれ、無意識のうちに行動に反映されますよね。

H：人は、生の営みにおいて様々の行動を絶えず取り続けます。その際、意識していようがいまいが、ある種の判断を行っているのです。それは一口で言うと“便益の追求”ということです。「便益の追求と危険の回避」といってもいいのですが危険の回避は便益の一種といってもいいのでまとめてこういう言い方をしたのです。便益の追求と危険の回避は本能的欲求であり、近代の人間社会では基本的人権とされています。

T：行動の結果というのは未来のことですから、先ほどのお話から、予想がいつでも的中するとは限らないことになりますね。

H：そうです。よく思い出してくれました。そこが大事なところなのです。便益にしる危険にしる不確実性が伴っているものです。どんな行動であれ、便益の可能性と危険の可能性を併せ持っている、というのが真の姿です。危険の可能性をリスクとしましたので、便益の方についても可能性を表す言葉が欲しくなります。そこで本書では“ベネフィット”としてみました。

今のところこのような試みはここだけかも知れません。

T：クスリも度を越せば毒になると聞いたことがあります。

H：クスリを逆に読むとリスクです（笑）。これは偶然による冗句で、池田長生先生（筑波大学名誉教授）が良くお使いになっておられたものですが、非常に役立つ“格言”ですよ。砂糖や塩を取りすぎると身体に良くないことは今や誰でも知っています。空気や水も、それらがなくて生きていけません、酸素を取りすぎても身体に良くないことが知られていますし、水だって身体が欲する以上に無理やり飲み続けると苦いような味、要するにマズイ味となって身体が受け付けなくなります。水といえば、砂漠で水にありつけず死んだ人は数え切れなほほどいたはずですが。水の豊かな日本に住んでいても真夏日に油断すると熱中症に罹ります。熱中症とは脱水症のことです。そうかと思うと、夏に海水浴に行つて溺れ死ぬ人が毎年必ずといってよいほど出ます。家の中のお風呂で命を失う人もいます。バケツの水で幼児が溺れ死んだというニュースも覚えています。私たちが生きていくのに光や熱はなくてはならないものですが、一度に沢山カラダに浴びると目を潰したり火傷を負うといいました。このように、どんなものにもクスリとリスクの両面があり、どんな行為にも便益をもたらす可能性と同時に危険をもたらす可能性もあるのだということを知っておくことはとても大事なことです。

T：昨日（2006年5月3日）も富士山に登った69歳の男性が滑落して死亡しましたし、少し前（4月25日）には有名な登山家が奥多摩・本仁田山の尾根に登山中、落雷を受けて亡くなったばかりです。

6. リスクのトレードオフ

T：リスクの低減は一種の便益であり、便益が損なわれるのは一種のリスクであるという考え方は新鮮ですね。物理屋さんは概念を拡張し法則の適用限界を広げる仕事ではいつもパイオニアです。

H：褒めていただいて有難う。もう少し付け加えておきたいことがあります。

それは、ある種のリスクが低減化されたとしてもそれに伴って別のリスクが増大したり、別のベネフィットが減少したりすることがあるということです。ある種のリスクを仮にゼロまで持って行けたとしても、人は永遠の命を授けられる訳ではありません。他にある無数のリスク源の重要性の内容や順序が変わるだけなのです。皮肉なことですが、戦争が起きたり、大飢饉に見舞われたり、致死性の高い疫病が蔓延（はびこ）ったりすると放射線のリスクは相対的に低下することになります。

T：人が生物であって必ず死ぬ運命にあることと死ぬのは1回だけであるという制約があるので、無生物を対象とする物理の世界とはオモムキが違ってくるのですね。

H：くどいようだが、リスクというのは未来に係る予測です。予測は、過去及び現在の世の中の在りようを前提にしてなされるものです。従つて将来時が流れて行くに従い、この前提は成り立たなくなる可能性があります。医療の進歩により“がん”がかつての結核などのようにそんなに怖くない病気ということになれば、放射線の“がん”誘発に伴うリスクは低下します。

チェルノブイリの事故で放射線を浴びた人たちの現時点に於けるリスクを大きく左右しているのは、実は生活

の質なのです。そうならないことを願うけれども、仮に日本が将来今よりもうんと貧しくなったとするならば、日本人に対する放射線のリスクは大きくなるかも知れないし、平均寿命がうんと短くなって、放射線のリスクは相対的に小さくなるかも知れません。大事なことは、未来については不確実さが付きまとうものだというのと、生き延びてしまえばそれまでのリスクはゼロとして確定するということです。リスクは影響そのものではなく、従って、放射線を浴びたらある一定のリスクに影響として生涯負い続けると考えるのはおかしいことなのです。リスクをもたらすものの単位量が与えるリスクの大きさをリスク係数といいます。これは、他に大きなリスク要因が現れたり、科学技術が進歩したり国が経済的に豊かになった、というようなことによって影響を受けるものなので、時の流れや国の違いなどによって値が変わるものであることを知らねばなりません。

T：ということは、リスクの受容レベルも国によりまた時代により変わりうるということですか？

H：理屈の上ではそうなります。20年前チェルノブイリ原発が事故を起こしたとき、日本ではお母さんたちが、欧州からの放射能汚染が有意に認められた食品（チョコレートやスパゲッティなど）を一切受け入れず、送り返すか廃棄しました。しかし、近隣の国々では、放射能で多少汚れていても赤ん坊にミルクを飲ませ、トナカイの肉や野菜を食べて、飢え死や栄養失調を防いでいたのです。

T：日本人は白か黒か決着をつけるのが好き、というのか、安全か危険か、リスクがあるかないか、1か0か、という「二分法」で考えるのが好きなんですね。

H：そうなんだ！二分法は確かに思考を効率よく行うのに便利で重宝することも多いのですが、世の中にはスパッと割り切れないものも多いのです。

安全と危険の間には無数の段階があるということを知らねばなりません。

T：プレイボーイの友達に、好きな女の子を見つけると「君ボクのこと嫌い？」と聞きます。大概「いいえ」と答えるので、すかさず「じゃ好きなんだね！」と畳み掛けます。多くの場合好きでも嫌いでもない筈なんですが、そこを答えが2つしかないように思い込ませるといふ詭弁の術なんです。

H：その友達というのは君自身のことじゃないのかい？（笑）

もう一点、一般にあるリスク源のもたらすリスクを低減させるにはお金や人手がかかります。リスク低減の目標を下げれば下げるほど仕事は困難となりオカネや人手も沢山必要になってきます。さらに重要なことは、往々にして、一つのリスク要因についてだけリスク低減に努めても全体としてはバランスを欠くものとなるケースも多いということです。

7. 放射線のリスクとその管理基準

T：放射線は誰でも知っているリスク要因です。その放射線ですが、放射線に身を曝すと、放射線の量がどんなに微量であっても、それに対応して何がしかのリスクを受けることになるので、身に受ける放射線の量は少なければ少ないほど良いのだ、と聞いたことがあります。

H：確かにそのように受け取られても仕方がないようなことをICRPが言っています。でも、彼らの真意は、リスクの管理は、リスク低減に掛ける費用とそれによって見込まれるリスクの減少、他のリスク源に対するリスク管理策との整合性、等を考慮して最適に行われるべきだ、ということなのです。実際ここに挙げた事情は先進国と開発途上国で大きく異なっています。ICRPは防護の方策に最適化の原則を嵌（は）めた上で、父親（のような保護者）の視点で、どの国も従うべき、放射線被曝管理の上限値を勧告しているのです。

ICRPではこの「防護の最適化」を“合理的に達成できる限り低く”と表現し、英語の頭文字を集めてALARAの精神と呼びました。しかし、「出来る限り低くなるように努力せよ」といわれれば、究極の理想は「放射線の被曝量をゼロにすること」と考えたくなります。現実には、私たち誰しもが、自然界に存在する放射線を浴び続けていて、これをゼロにすることは実際上できないことすし、また意味のあることでもないのです。

T：病院では医療のために放射線を使っています。これによる被曝も無視できないのではないですか？

H：その通りです。今日本国民が全体として、例えば1年間という一定の期間に、身体に受けている放射線の量は、大雑把にあって約2/3が医療によるもの、自然放射線によるものが約1/3となっていて、大学や研究施設で使っている加速器や放射性物質に起因するものや原子力発電所などから出てくる放射線に起因するものは全

部足し合わせても1%に程遠く小さな値となっています。

わが国では、国民を放射線の害から守るため、特定の放射線源に対して保有や使用を制限するという方策をとっています。そして放射線管理の基準をICRPの勧告に準拠して定めているのですが、放射線が五感に訴えず検出や定量に専門的知識や技能を要するという事情があることから、他のリスク要因のリスク管理策と整合が取れないほど厳しいものとなっています。

わが国では、先の戦争で広島と長崎が原爆の被災を受けたことから国民の間に強烈な「放射線嫌悪の感情」が根付いていて、私など、合理性を欠くこと夥（おびただ）しいと思わざるを得ないような、このように厳しい方策に対してさえ批判的立場をとる人が少なくないのは残念なことです。

T：その放射線の管理基準というのはどのように定められているのでしょうか？

H：ICRPでは、放射線が人体に及ぼす、健康にとって望ましくない影響はすべて“蓄積性”であると安全側に割り切り、これを確定的影響と確率的影響の2種類に分類します。前者は、皮膚が火傷を起こしたようになったり目のレンズ（水晶体）が濁ってくる（白内障）といったような障害で、放射線の量がある値を超えない限り現れないとされているものです。もう一つは体内にある無数（約60兆個）の細胞の“生命再生産”に不都合が起こって引き起こされる障害で、これにはこれ以下の線量なら障害が発現しないというような線量の閾値は存在しないものと安全側に仮定されています。後の障害は具体的に言うと発ガンや遺伝障害ということになります。

ICRPはそれぞれの障害に対して、管理に使用する線量を定め、それぞれに管理基準の上限（線量限度と呼ぶ）を勧告しているのですが、前者については線量の閾値を十分に下回るところに、後者についてはそれに伴うリスクを、一般人に対する年間致死確率が生涯にわたって最大で1/10,000、職業人に対しては同じく1/1,000、に抑制することを目標としています。後者の基準が満足されれば前者の基準は結果として満足されることが多いので、放射線管理の目標は、實際上、確率的影響としてもたらされるリスクを上記の値に抑制することとなっているのです。

T：限度いっぱい被曝を受け続けたとき、先に教えていただいたモータリティの値が最悪これだけ上昇するのでしょうか？

H：その通りです。ただし、上記の方策や基準値算出には幾つもの安全側にたった仮定が織り込まれていますので、仮に限度いっぱいの線量で被曝を続けたとしても、実際に受けるリスクはもっと低くなるものと思われます。

T：微量の放射線は身体の生理作用を活性化させるのでリスクとしてはマイナス、つまり健康にとってプラスになるという話を聞いたこともあるのですが。

H：よく勉強していますね。そうです。放射線ホルミシスと呼ばれています。もっとも、低レベルの放射線による人体への影響というのは実験によって知見を得るのが難しく、学界では異論もあって未だ定説とまではいえない状況にあるようです。

発ガンや遺伝障害というのは、遺伝情報のメモリーであるDNA（と呼ばれ二重らせん状の高分子）に付けられた傷が出发点に成るというのは間違いないと思いますが、人間の身体には、ミクロなものからマクロなものまで、小さな傷は自分で治す力が備わっているので、ICRPが安全側に仮定しているLNTモデルは線量の低いところでは成り立っていない可能性があります。

放射線の生物に対する影響を調べている友人の話では、実際、線量に比例して染色体異常が起こる訳でもなく、染色体異常に比例して発ガンなどが起こる訳でもないことが、今では確かめられているのだそうです。

とはいえ、低線量の放射線影響については、実験データも得にくくこの仮説についての実験的な確証は得られていないのです。私は、全くの個人的見解ですが、チェルノブイリの事故から20年経過したことで、この仮説の成り立たないことは実証されたとみています。事態の推移を冷静に分析することにより、この仮説の成り立たないことを証明してくれる専門家が現れることを期待しているのです。

8. 放射線とどのように付き合うか

T：安全論やリスク管理論では、便益の享受を前提とするので、リスク源としてこれを追放するという方策は最初

から選択肢に含まれないとのことでした。放射線というのは私たちにどのような便益をもたらしてくれるのでしょうか？

H：科学のノーベル賞では、約 1/3 が何らかの形で放射線や放射能に関係しているといわれています。これは言葉を変えれば、私たちの文明を発展させるのに役立っているということです。このことはこれからも変わることがないでしょう。ミクロの世界を覗いてみたり、ミクロの世界で仕事をしようとすれば放射線の世話にならない訳に行かないからです。

また、既に言ったことですが、医療の世界は放射線の助けなしに成り立ちません。今日世界一の長寿命を誇っておられるのは、一口に言えば、生活の質が向上したからですが、高度の医療技術に負っているところも大なのです。さらに、個人が安心して命の営みを続けるには、良質の食料が安定的に供給されることが保証されなければなりません。同様に私たちが住む社会なり国家が、その生命を維持していくためには、良質のエネルギーが安定的に供給を保障されていることが必要です。個人の場合の食料に相当するのはエネルギー資源なのです。エネルギー資源に恵まれない日本にとって原子力は特別の意味を持っています。国民が良質で高度の生活を続けるためにも、外国から資源を買いこれを高度に加工して付加価値をつけ、外国の人達に買ってもらうしか日本民族は民族としての生命を維持できないのです。それには何としても良質のエネルギーを安定的に確保する必要があります。既に述べたように、原子力に付随して生成される放射線への被曝に伴うリスクというのはリスク管理の視点から見ると全く問題とならないほど小さなものです。

放射線は怖がらな過ぎても困りますが怖がり過ぎても困るのです。

9. 専門家は どうして放射線を一般人ほど怖がらないのか？

T：放射線安全を専門としている人達は どうして一般の人達のように放射線を怖がらないのでしょうか？

H：良い質問ですね。先ず私たちが何かを怖いと思うのは どういうときかを考えて見ましょう。怖いと思うものを 幾つか挙げてみて下さい。

T：え〜と、僕の場合は、先ず“死ぬこと”それから“自然災害”、“幽霊”も“放射線”、“原発事故”、“自動車事故”、“戦争”、“テロ”といったところかな。“火事”、“大地震”、“津波”、というのも出てきますがこれらは皆“自然災害”に入ります。

H：“幽霊”と“放射線”、“原発事故”以外はつまるところ“死への恐怖”ですね。

T：幽霊はどうして怖いとおもうのかなあ？

H：正体が分からないもの、少なからぬ数の他人が「怖い！」というもの、は先ず怖いと思うのではないのでしょうか。そしてその結果そんなものと出くわしたら殺されるかひどい怪我をするのではないかと思ったりするのです。それを避けようと思えば一目散に逃げ出すしかない。

T：逃げ出すこと以外に、怖さを冷静に制御するすべがないのですね。

H：正体を知ってしまえば怖さが消えるというものもあります。

T：「幽霊の 正体見たり 枯れ尾花」って奴ですね。

H：原発事故が怖いというのは、20年前のチェルノブイリ原発での事故のことを思い出したりするからでしょうが、結局のところ、放射線の被曝が怖いということでしょう。だとすると「放射線は何故怖い（と思う）のか」が共通する根本の問題ということになりますね。

T：放射線は五感に感じないこと。従って検出・定量は専門家以外無理であること。放射線の被曝量を表す量の名前に馴染みがなく、同じく馴染みのない名前の単位と一緒に数値を言われても、ピンと来ないこと。ピンと来ないもう一つの理由は、線量の量的判断に必要な基準量を体得していないこと。安全管理の基準設定の論理とデータの信憑性に納得できるレベルまでの理解がないこと、といったことがその理由だと思います。

H：えらい！全くその通りです。専門家といわれる人達は、挙げてくれたこれらすべてに納得できる答えを見出しているのです。発展した科学技術のお陰で、今や私たちは、私たちの五感に欠けている感覚をいとも容易に補うことが出来ます。そして放射線の正体や性質をよく知っています。どの様なときにもどの様にして私たちの身体に悪さをするかも充分にといっていらい既に分かっています。

私たちは、放射線との付き合いなしに生きていくことが出来ないのですから、放射線を必要以上に怖がらないで生きて行きたいとおもうならば、勉強してみる事です。今日は時間が無いのでこのテーマについて深入りすることが出来ないけれども、そして決して易しいこととはいえないけれども、その気になりさえすれば必ずや叶えられる願いです。

万一、何らかの理由で、そのような面倒なことはしたくない、したくても物理的に困難である、というのであれば、信用できる専門家を見つけ出し教を乞うことです。

T：良かった、僕には先生がついている（笑）。

H：コラッ！ 調子に乗って甘えるでない（笑）。

10. 自ら制御できるリスクの管理は自らの力量と意志で！

H：医療の世界では、EBM（Evidence-Based Medicine：治療行為は効果が実証されているものに限られるべきこと）とIC（Informed Consent：治療の方策決定には患者に必要な情報を提示し同意を取り付けるべきこと）が叫ばれ始めています。個人にしろ社会にしろ、自らの生命維持に係るリスクであって自らの力量で制御可能なものは、リスクの管理がその者の裁量にゆだねられる方向に、世の中が進んで行くものと思われまふ。そうであるべきなのです。それには、何がしかの知見と技能が必要です。知見と技能は日進月歩です。日頃、関心を持って世の中の出来事を見ているだけでも知見と技能は鍛えられるものです。

T：でも、現実には誰もが自分の裁量でリスク管理が出来るほど、知見と技能を身につけられないのではないのでしょうか？

H：そういう人たちは勿論沢山居るわけです。そういう人たちには、専門家との取次をする“仲介者”、英語で言えばmediatorですが、そういう人たちを社会が用意し、手助けすればいいのです。具体的には、定年を迎えた放射線の専門家、ボランティアとして余剰時間を提供できる現役の関連職業人や学生たちです。NPO法人の「放射線教育フォーラム」というのは、まさにこのようなことをも活動の目的に設立されたものです。

1999年に東海村のJCOという会社が臨界事故を起こしたとき（とその後）の一般住民やマスコミの応答をみると、啓蒙（という今では使ってはいけないとされている言葉の手法）により国民全体のレベルアップを図るというのは、掛ける経費や労力を考えると非常に効率が悪く、効果も得られないように思います。このような“仲介者”の育成・レベルアップに努めることの方が効果的だと思っています。

T：「リスク管理の達人」になるということは「人生の達人」になるということだということが良く分りました。視野がいつ頃に広がったような気ががします。

長い時間、ご指導有難うございました。

あとがき

私たちにとって便益をもたらしてくれる可能性を持つモノやコトには、全て危険の可能性、すなわち「リスク」が付きまとっている。飛行機というものをこの世から追放しない限り、飛行機が墜落するかも知れないという心配を絶対的になくすることはできない。安全論とかりリスク論が目指すのは、絶対的安全、すなわちモノゴトに付随するリスクをゼロにすること、ではない。モノゴトに付随リスクを、受容可能なレベル以下となるよう制御したり、以下であることの確認を行って、得られる便益をできるだけ享受しようとする事である。

文明が発達するにつれ、私たちは自分の命をヒトサマやカミサマに預けることが多くなって来た。飛行機に乗るとき、私たちの命運は、機体を操縦するパイロット、整備する整備士、空港の安全施設の保守や運用に当たる人たち、気象予報士、など多くの関係者に委ねられることになる。飛行機の安全性は、パイロットや整備士などの、腕前（技能）や健康状態や気分（精神状態）に依存することになるが、この世には人間の持てる英知だけではどうしても制御できないものもある。安心してこの世を生き抜いていくためには、このような、私たちの力だけではどうにも制御できないリスクについては「カミサマのなされたことだから」として受け入れるしかない。

このように墜落の可能性（というリスク）のある飛行機に「乗る・乗らない」、つまり「利用するかしないかの判断」は、その人にとって飛行機に乗ることのベネフィット（便益をもたらされる可能性）とリスク（墜落などという危険が実際に起こるかも知れない可能性）を比較して決められる。ベネフィットとリスクは、両者を共に貨幣価値に換算するなどの特別の場合を除いて、尺度を異にするので、多くの場合、比較は当人の価値観に基づいて主観的に行われることになる。

電車が衝突事故を起こしたとき、死者や負傷者が出るのは、先頭部が一番、後部がそれに次ぐ、というのは、経験的によく知られた事実である。従ってこの手のリスクを少しでも下げたいと思えば中央部の車両を選ぶことになる。しかし、（乗り換えの時間を短くするため特定のドア付近に席を取るといった例もあるが）このように考える人は多いので、中央部は得てして混み合っていることが多い。身体の調子が悪く、衝突時のリスクが多少高くなっても仕方がないと思うときには、それを承知で空いている先頭部に向かうこともある。このように、個人に係るリスクで、当人が制御可能なものは、自らの価値観に基づいた、自らの意思による、選択が可能であり、実行している人も少なくないであろう。勿論、自らの意思で、そのようなリスクの管理は行わないという人がいても良い。しかし、世の中には、個人に係るリスクでも、当人の裁量では制御が極めて難しかったり、為し得ないものも存在する。筆者が子供の頃は、醤油や味噌というのは、梅雨時になるとカビが生えると決まっていた。最近のものは、防腐技術のお陰でそんなものは存在しない。食中毒という危険の可能性が大きく低減したのである。しかし、防腐剤を入れるということに伴うリスクも当然存在する筈である。この種のリスクについての評価やメリットとの比較の上で下される安全管理基準の設定などは、社会の意思として決められる。この手の安全というのは「社会との契約」として決められるべきものだからである。

社会の構成員が、権利の上で平等で、それぞれの価値観を自由に持ち得る社会というのは、私たちが理想とするものであるが、一方で「社会としての意思」を統一することを困難にしている。また、契約というものは契約の当事者双方が、少なくとも知見（知識と見識；場合によっては経験と胆力まで含まれる）に関して“対等”でなければ、合理的なものにできない。これからは、この種の問題についての社会の意思決定に社会の構成員である個人もこれまで以上に寄与して行かねばならず、そのためには“社会という生き物”についてのリスクと管理法を学ぶ必要がある。

ストレスというのは全くないとなると健康を阻害するといわれているが、あり過ぎるといえるのはもっと悪い。大きな隕石が地球に落ちてきて、昔恐竜を滅ぼしたように今度は人類が減るのではないかと心配し、ノイローゼになったり（昔杞の国に空が落ちてくるのを心配して健康を損ねた人がいたという）胃や十二指腸などに穴を空けたりするのは、利口な生き方ではない。筆者は、人智の及ばぬ災害に自分が万一出くわしたときには運命（乱数を変数に持つ確率論方程式で、選ばれた乱数がたまたまジョーカーに相当するものだったということ）と諦めることにしている。私の人生方程式には、カミサマが振る賽子の目で決まる変数が組み込まれているので仕方がないことなのである。カミサマ（というものがあるとすればのハナシであるが）は、人の命を有限にし、未来が不確実なものであるようにこの世をつくっておられるが、そのお蔭で私たちは、現在という時の重要性を悟ることができるようになっているのである。

世間には残念なことにレイディオフォービア（radiophobia：放射線過敏症・放射線嫌悪症）に悩んでいる人も少なくないようである。実際問題として、私たちは放射線との付き合いを完全に絶って生きていくことは出来ないので、共存を図っていくしかない。放射線を全く怖がらないのも、逆に必要以上に怖がり過ぎるのも良くないことである。放射線がもたらすリスクについて学び、放射線を適切に怖がることによって放射線との共存を図り、それによって齎（もたら）されるベネフィットを、本書をお読み下さった皆さんが、出来るだけ多く享受されることになったとしたら、それも有難いことである。

（この文章は株式会社 千代田テクノルの「セイフティ・ダイジェスト」より許可を得て転載しました）

[書評]

放射線入門

鶴田隆雄著

通商産業研究社 2006年6月10日発行
ISBN4-86045-002-7 C3040 1680円

本書は放射線についての基本的な事項を知りたいと思っている一般の方々、学校で放射線を取り扱う学生諸君など幅広い読者向けに執筆されたものです。読んでみても感じたことは、文章がとても明解で平易なため、どんどん読めてしまう、どんどん勉強したくなる本だということです。

本書の構成は、序.放射線をひもとくにあたって、第1章.放射線と放射能、第2章.原子核の壊変と放射線の発生、第3章.放射能の減衰と半減期、第4章.壊変系列と放射平衡、第5章.放射線源、第6章.放射線と物質の相互作用、第7章.放射線の飛跡を見る、第8章.放射線の測定、第9章.放射線の量とその単位、第10章.放射線の人体への影響、第11章.放射線の被曝防止技術、第12章.放射線障害防止のための法規制、第13章.放射線の学習をする際に必要な数学、および付録からなっています。

第1章では、レントゲンのX線の発見とその性質に関する研究について、詳しくそして易しく誰にでも分かるように紹介されています。この章に限ったことではないのですが、章の終わりには参考文献も掲載されていて、さらに詳しく勉強したい読者にとってはありがたいことです。

第2章では、 α 壊変、 β 壊変、 β^+ 壊変、電子捕獲について易しくしかも詳しく説明されています。特に β 壊変では、原子核を構成している中性子の1個が、陽子1個と電子1個に変化し、同時に中性微子（ニュートリノ）1個を発生することを、トリチウムを例にして分かりやすく述べています。

またこの壊変で発生するエネルギーは、その都度 β 線と中性微子に適当に分配されるため、 β 線がさまざまな値をとることも分かりやすく説明しています。中性微子は非常に透過性の強い放射線で、地球をも貫いてしまう、物質中を通過してもほとんど物質と相互作用をしない、人体を透過しても放射線障害を与えることは無いなど、中性微子の特徴を詳しく紹介しています。これは今までの教科書ではほとんどみられなかったことです。小柴昌俊先生がニュートリノの研究で2002年ノーベル物理学賞を受賞したからでしょうか。また壊変図の説明に2ページ半使用しています。壊変すると、 α 線と γ 線を放出する ^{238}U 、 β 線のみを放出する ^3H 、 β 線と γ 線を放出する ^{60}Co および ^{24}Na 、 β^+ 線と γ 線を放出する ^{30}P 、それから分岐壊変（ β^+ 壊変と電子捕獲）をする ^{40}K 、それぞれの壊変図を例に取り上げて、壊変図から何が分かるか懇切丁寧に説明されています。ここを読めば、誰でも壊変図を理解出来るようになるでしょう。

第3章は、放射能という用語の説明から始まります。「放射能」という用語は3つの意味で使われますが、使用実例文を挙げて、その使い分けを示しています。とても明解な説明となっているので、ここを読めば誰でも使い分けできるようになるでしょう。この章では壊変の指数法則についても述べられています。途中の方程式も省略することなく、やさしく法則を導いています。

第6章では、中性子の性質について計算

問題を解くことも加えて説明しており、読者にとって興味深い内容となっています。

第7章では放射線の飛跡を見ることができる測定器が紹介されています。まず霧箱ですが、飛行機雲の話で霧箱の原理を分かりやすく述べています。そして簡単に誰でも作れる霧箱の作り方が要領よく書かれています。その他3種の測定器、泡箱、乳剤検出器、固体飛跡検出器についても紹介しています。著者は固体飛跡検出器に関連した研究も行なっていたこともあり、固体飛跡検出器については他の測定器より詳しく説明されています。またその参考文献も示されています。

第8章ではいろいろな放射線測定器が紹介されています。とくに電離箱については、基礎的な原理から始まり標準電離箱、空洞電離箱、組織等価電離箱やホウ素塗布電離箱まで詳しくかつ平易な説明があります。

第9章では中性子フルエンス、カーマ、吸収線量、臓器線量、等価線量、実効線量、預託等価線量、預託実効線量、1センチメートル線量当量、70マイクロメートル線量当量、年摂取限度、誘導空気中濃度などについて、易しく解説しています。

第11章では放射線の外部被曝および内部被曝の防止技術が具体的に紹介されています。また、外部被曝と内部被曝それぞれについて、その実効線量の算出方法を、例

題を解くことによって分かりやすく説明しています。

第13章では指数、対数、微分、不定積分といった、放射線を学ぶ上で必要な数学について解説していますが、読者にとっては大変便利だと思います。

本書は、難解なことを易しくしかも正確に読者に伝えようとすることに成功し、しかも初版のわりにはミスプリなども少ない完成度の高い教科書です。ただし本書に放射線の化学、および放射線の多方面にわたる応用についての記述が非常に少ないことは大変残念です。また付録の主要放射性同位元素の表に ^{238}U が掲載されていないのにはびっくりしました。 ^{238}U はウランの同位体のなかで最も多く天然に存在（存在比99.275%）する放射性同位体で、半減期 $4.468 \times 10^9\text{y}$ で α 壊変をして α 線と γ 線を放出します。また高速中性子が照射されれば核分裂も起こします。ぜひ忘れずに掲載してほしいものです。

本書の中には、「なるほどこのように説明すれば、専門外の一般の方々にも、学生諸君にも正確に理解してもらえらるだろうな」と思うところが多くありました。結論としては、多くの人々に読んで頂きたい、教科書として使って頂きたい良書だと思います。

（立教大学理学部化学科兼任講師

小高正敬）

「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. 論文の著作権

掲載された論文の著作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 日と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 5 F
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)

研究報告（10 ページ以下）

結果と考察を含み、十分な意義があるもの

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

ノート（1～2 ページ）

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

総説（10 ページ以下）

原則として編集委員会の依頼によるものとする。

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

資料（10 ページ以下）

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

意見（1～2 ページ）

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

諸報（1～2 ページ）

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

「放射線教育」原稿の書き方

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5 F

[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。別刷り作成に便利のように諸報以外は偶数ページの前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】

編集後記といっても、実際の編集にはずいぶん関わってはならず、他の編集委員の方々にずいぶんと迷惑をおかけしてしまっています。それは、教員が勤務時間に勤務場所を離れることが非常に難しくなってしまったからです。しかし、勤務時間に勤務場所を離れることが可能な場合もあるにはあります。それは、官製の研修です。本フォーラムでも地区ごとに文部科学省後援の放射線セミナーを開いていますので、関わっておられる会員の方々も多いのではないのでしょうか。

昨年夏、私はそのようなセミナーの一つに参加しました。そのセミナーに参加しておられた先生方は、放射線・放射能の違いをきちんと認識しておられる方から全く認識しておられない方までさまざまでした。ところで、このセミナーでお会いした小学校の先生方は、増殖炉とはどのようなもので、日本のエネルギー政策の中でどのような位置付けをされているのか（そのような政策そのものに対する意見には、賛否両論があるのでしょうか）ということをもっとよくとってよいほどご存じなく、ナトリウム漏れの事故の強い印象から、『怖いもの』という先入観だけを持っておられる方が多いように感じました。

翻って、放射線も同じような扱いを受けることが非常に多いと思います。自然放射線の存在をご存じない方は、放射線は核兵器や原子炉から出てくる怖いもの。自然放射線の存在をご存じの方の中にも、自然放射線は非常に微量なので人体に影響はないが、人工放射線は多量なので怖い、という認識の方もまだまだおられます。多量が怖いのなら、酸素も食塩も怖いものですし、人類はその叡智を持って、『電気』をコントロールし利用するようにもなっています。放射線も本来怖いものですが、コントロールしながら利用しているという事実をきちんと認識してもらおう努力がまだまだ必要なのだと改めて実感しました。

(村石 幸正)

放射線教育 Vol. 10, No. 1 (2006)

発行日： 2007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

堀内公子 (委員長)、坂内忠明 (副委員長)、今村 昌、岩崎民子、
大野新一、大橋國雄、菊池文誠、小高正敬、村主 進、細淵安弘、村石幸正

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

理科から科学へ 好奇心から探究心へ

日本理科教育振興協会は、子供たちの輝く瞳を応援しています。

理科好きの子供たちに、日頃経験できないような手作り実験や科学の原理を探究させるような観察・実験の機会を与え、「発見する喜び」や「つくる喜び」などを体験させることにより、子供たちに科学的なものの見方や考え方などの豊かな科学的素養を育成することを目的として実施しています。

▶ この事業は今年で10年目となり平成18年度は北海道の大自然の中、2泊3日のスケジュールで実施しました。

科学技術、理科・数学（算数）に対する興味・関心を育成することを目的に、小学校・中学校・高等学校等の児童・生徒を対象とする合宿（一泊二日）形式のキャンプです。

▶ 日本理科教育振興協会では平成18年度、岐阜・福井・愛知・沖縄・和歌山・鹿児島島の6会場で実施しました。

キッズワンダー
クラブ



サイエンス
キャンプ



教師のための
理科実験
セミナー



「その道の達人」
派遣事業



小学校の教師を対象に、児童・生徒が理科に関心・興味を持てるような授業の展開を図ることの啓発を目的とし毎年1回開催しています。

▶ 平成18年度は東京女学館中学校高等学校で100名近い参加がありました。

国内外の第一線で活躍する研究者、企業人等を希望する学校に派遣し、授業や講演会等を行うことにより、児童・生徒に学ぶことの楽しさを伝えるとともに、学習指導要領のねらいとする「確かな学力」の向上に向けた各学校の取り組みを支援しています。

▶ 平成17年度は306校の学校に達人を派遣し大きな反響を呼びました。現在達人の登録は57名に達しています。

<http://www.japse.or.jp/tatsujin/>

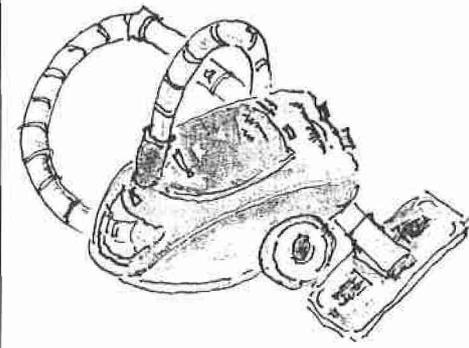
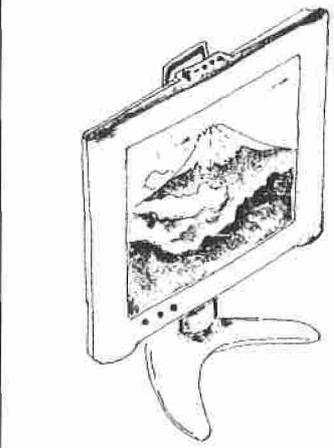
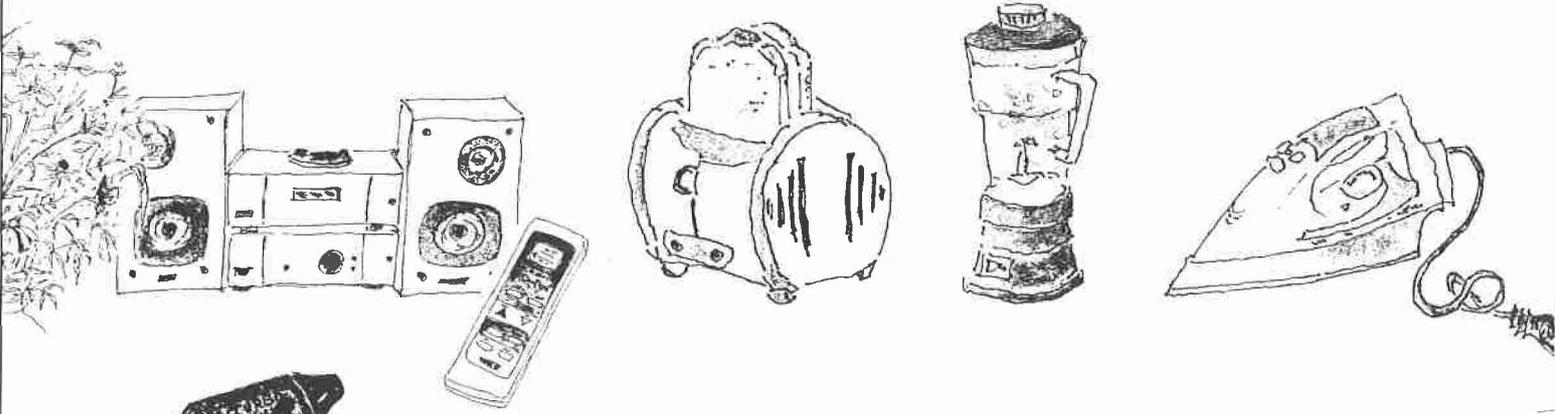
新たな「科学技術教育振興」へ向けて

科学創造立国の基盤強化



社団法人 日本理科教育振興協会

〒101-0052 東京都千代田区神田小川町3-28 TEL: 03-3294-0715 FAX: 03-3294-0716 URL: <http://www.japse.or.jp>



「再生電気」の活躍する日が訪れようとしています。

日本でも、プルサーマルによってつくられる

現在の発電所でふたたび発電に利用する…このリサイクル方法が「プルサーマル」です。

ウランと合わせた新しい燃料(MOX燃料)として、

その中から発電によって新たに生まれたプルトニウムをとり出し、

約95〜97%は、再利用することができます。

一度電気をつくり終わったウラン燃料(使用済燃料)の

水蒸気でタービンを回して電気をつくりますが

原子力発電は、「ウラン」が核分裂した時に出る熱からつくられる

電気のリサイクル「プルサーマル」計画はこのような発想から生まれました。

限りあるエネルギー資源をムダなく効果的に利用しよう…

しかし、そのウランには「再利用できる」という大きなメリットがあります。

その燃料である「ウラン」も約85年後には世界的に不足するといわれています。

日本の電気の約30%は原子力発電によってつくられていますが、



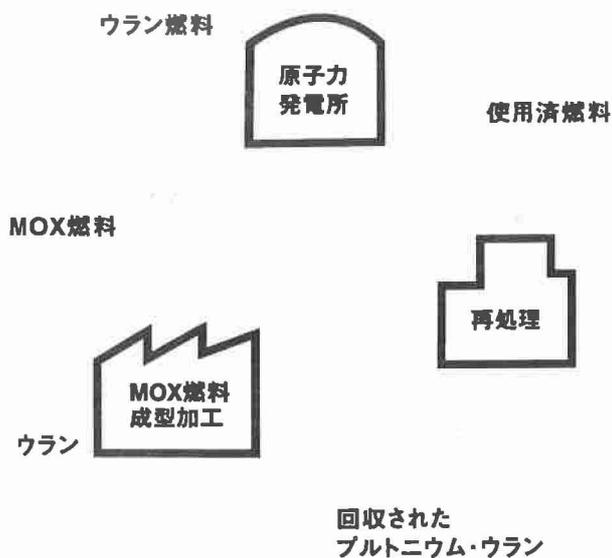
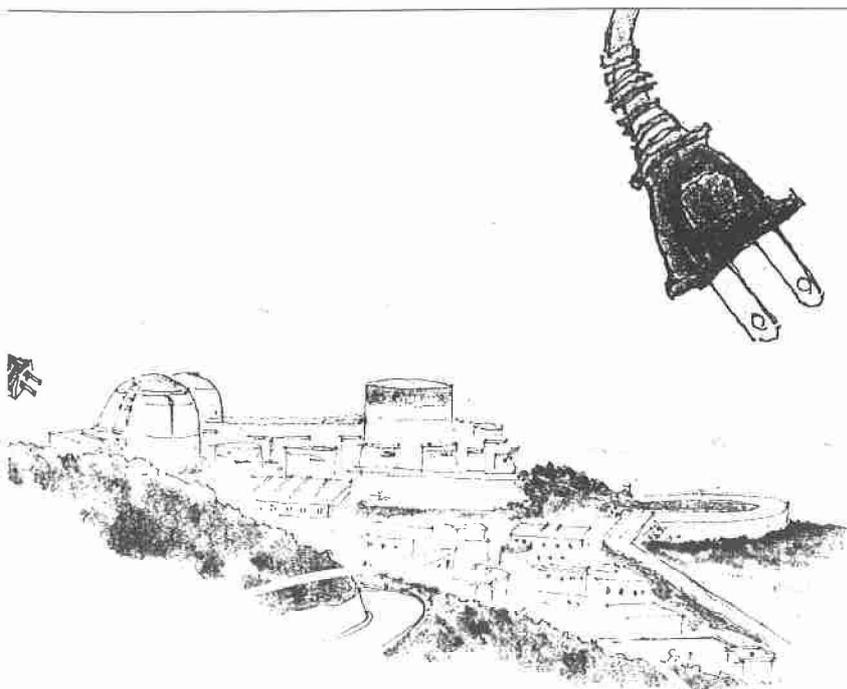
エネルギーから
あなたへ

全国10の電力会社でつくる
電気事業連合会

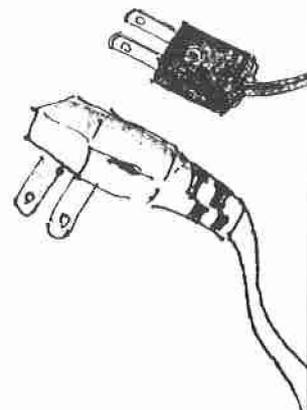
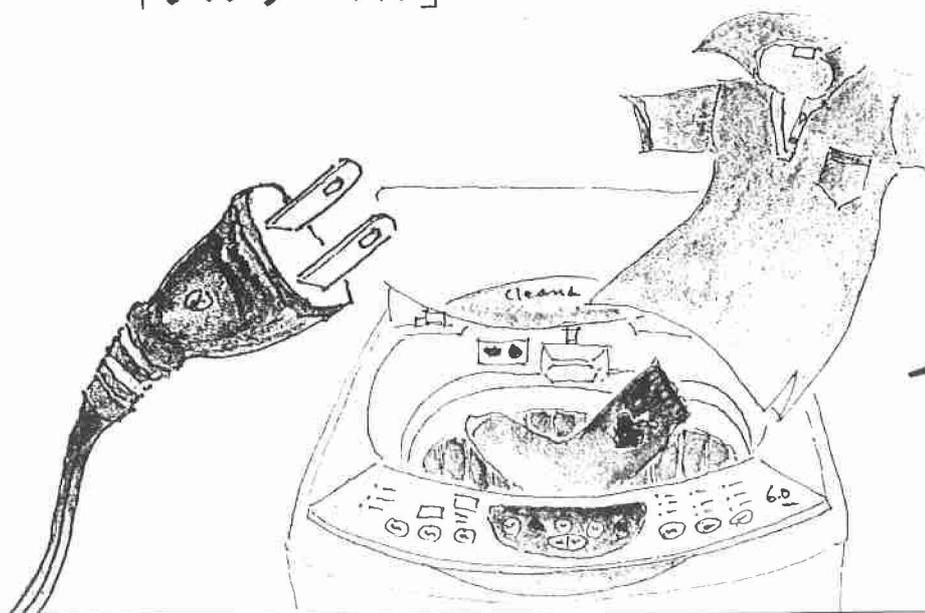
ホームページにもぜひアクセスを
<http://www.fepc.or.jp/>

「プルサーマル」は、いわば「再生電気をつくる」方法です。

限りある資源を有効に使うため、さまざまな分野でリサイクルが進められていますね。
たとえば、使用済みの古紙から新たに再生紙が生まれるように、「電気」の分野でも、燃料のリサイクルによる「再生電気」登場の時代を迎えています。



ウラン資源のリサイクル
「プルサーマル」



原子力・放射線をテーマに

資源・エネルギー教育、環境教育の題材を提供・・・

～見て、聞いて、触れて、考える、教員のための研修～

文部科学省委託事業 原子力体験セミナー

本セミナーは、文部科学省の委託事業として財団法人放射線利用振興協会が実施する、小学校、中学校、高等学校の教職員及びこれに準ずる教育関係者を対象とした研修です。

日本原子力研究開発機構の研究所等を主会場として全国の先生方を対象に開催するコースと、全国各地に出張して1～2日間で開催するコースがあります。

内容は、講義、実験・実習、施設見学、ワークショップなどで構成され、基礎的知識や科学的知識を習得するコース、資源・エネルギー・環境・防災教育といった「総合的な学習の時間」等へも役立てていただける内容のコースまで、担当教科や興味・関心に応じてご参加いただけます。また、学校で活用していただける教材も提供しています。

ここでの体験や専門家とのふれあいから、21世紀を担う児童・生徒達にとって魅力ある教育を探っていただければ幸いです。



- 参加資格：主として小学校・中学校・高等学校の教職員及びこれに準ずる教育関係者
- 参加費用：セミナーの参加に要する旅費、宿泊費等は主催者の規定により支給します。
- セミナーの予定やカリキュラムの詳細については下記にお問い合わせください。

RADA
RADIATION AND ATOMIC ENERGY ASSOCIATION

財団法人 放射線利用振興協会

国際原子力技術協力センター 国内研修部

〒319-1106 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

ホームページ：<http://www.rada.or.jp/taiken/>

E-mail:tokai-taiken@jaea.go.jp



インターネットで原子力のことを学ぼう!



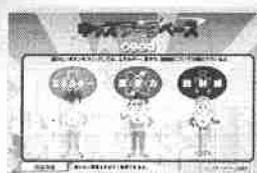
原子力 図書館 げんしろろ

原子力百科事典 ATOMICA



収録数2600件を超えるデータベース形式の百科事典です。世界の原子力や放射線など最新情報を豊富な図版とともに丁寧に解説します。

調べ学習にも最適! キッズデータベース



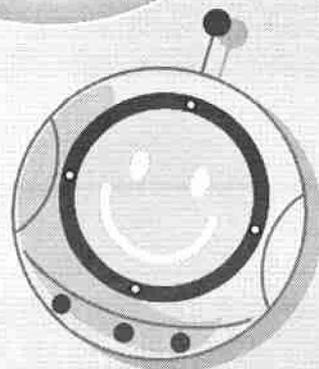
「ふりがな」がつく機能があるので読みやすいよ!!

エネルギー・原子力・放射線の3つのテーマに分かれ、イラスト入りでやさしく説明しているので、小学生にも読みやすいデータベースです。

もっと知りたい
もっと考えたい
原子力のこと



原子力に関連する最新情報、さまざまなデータ、解説、クイズなどをインターネットで提供しているバーチャル図書館です。



合格者リストに
アバターで
登録しよう!!

原子力・環境・放射線・エネルギーをテーマに小・中学生でも楽しめるクイズです。子供たちの学習にも活用できるコーナーです。



君は、どこからチャレンジする? げんしろろクイズ

原子力やエネルギーについて、遊びながら楽しく学べるキッズコーナーができました! ぜひご覧ください!



原子力のおもしろ広場 キッズコーナー

<http://mext-atm-jst.go.jp>

●「原子力図書館げんしろろ」は、文部科学省から委託され科学技術振興機構(JST)が行っている原子力情報普及業務です。



独立行政法人

科学技術振興機構

文献情報部 受託出版課

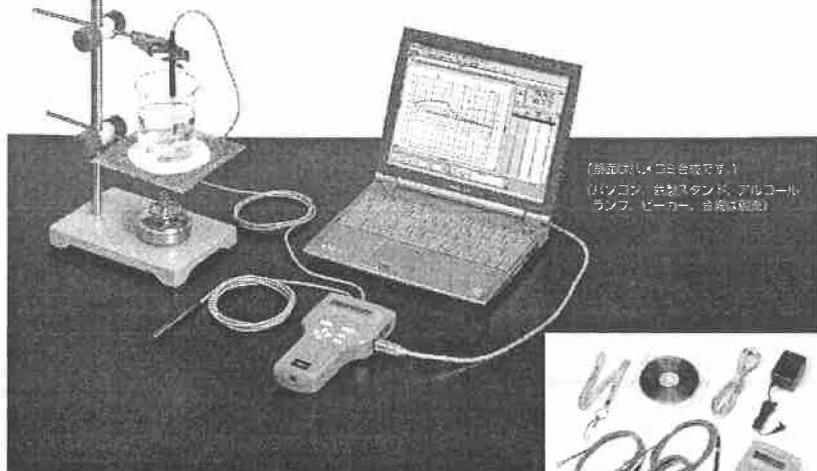
TEL:03-5210-4962 E-mail:helpdesk@mr.jst.go.jp

ウチタ パソコン計測システム

Science Mate® SL-4 (データロガー付き)

UCHIDA

- 「3つの使い方(単体計測・PC接続計測・データロガー解析)
- 「屋外での環境測定に最適(データロガー解析)
- 「グループ実験もできる、充実したアプリケーション!!



(別途購入のCD-ROMは含まれません)
パソコン、計測スタンド、アルコール
ランプ、ピーカー、温度計等



ラボセンサーセット

8-100-2001 SL-4 ラボセンサーセット
..... ¥48,000(税込 ¥50,400)

●セット内容: 本体(サイエンスキャプチャ)、ソフトウェアCD、USBケーブル、ACアダプター、ストラップ、気温センサー(1個)+液温センサー(1個)+光センサー(1個)

◆計測端末(サイエンスキャプチャ)と理科実験用センサーのセットです。

気温・液温・光のON/OFFが計測でき、温度変化や振り子の周期などが測定できます。

◆オプションセンサーを組合わせて、電流・電圧の計測や気象の計測もできます。

内田洋行 教育システム事業部

ウチタホームページアドレス
▶http://school.uchida.co.jp/



- 東京 〒135-8730 東京都江東区潮見2-9-15
東日本機器営業部 ☎ 03(5634)6280 ICT東日本第1営業部 ☎ 03(5634)6402
施設設備営業部 ☎ 03(5634)6318 ICT東日本第2営業部 ☎ 03(5634)6406
- 大阪 〒540-8520 大阪市中央区和泉町2-2-2
西日本機器営業部 ☎ 06(6320)2480 ICT西日本営業部 ☎ 06(6320)2641
施設設備営業部 ☎ 06(6320)2491
- 名古屋 〒460-0002 名古屋市中区丸の内1-17-19 キリックス丸の内ビル2階
中部営業部 ☎ 052(222)7255
- 北海道支社 〒060-0041 札幌市中央区大通り東3-1 ☎ 011(214)8611
- 九州支社 〒812-8692 福岡市博多区博多駅前1-14-14 ☎ 092(482)5950

社団法人 日本電気協会

JAPAN ELECTRIC ASSOCIATION

日本電気協会は大正10年に設立された、日本で唯一の電気関係総合団体です
電気の生産から消費に関わる幅広い会員を有し、電気関係事業の健全なる発展に寄与しております

■■■ 電気の今を学ぶために

あなたの知りたいこと

—電気事業について43の質問と答—
本体価格600円+消費税30円 送料450円 A5判・158頁
一般社会人、学生などを対象に、電気の生産、供給をになう電気事業者(電力会社等)の今日のありのままの姿や当面する諸問題について知っていただくために、Q&A方式で図表を多く取り入れ、2色刷りでわかりやすく説明しています

お問い合わせは 出版部 03-4283-2002
または下記ウェブサイトから!



東海林のり子の

電気事故リポート

—突然の災害から身を守るために—
本体価格28,572円+消費税1,428円 VHS・18分
災害が起こった時、あなたは冷静に対処できますか?このビデオは、災害で起こる電気事故から日常生活まで、家庭に必要な電気安全知識をわかりやすく紹介しています。テレビでおなじみの東海林のり子さんがリポートします!

お問い合わせは 広報部 03-4283-2006
または下記ウェブサイトから!

電気新聞

他にも多数の電気関係書籍・ビデオを発行しております

■■■ 電気の今を知るために

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
または下記ウェブサイトから!

購読料
1ヶ月 3,990円
(本体価格3,800円+消費税190円)

www.denki.or.jp

この星に、たしかな未来を。

Dramatic Technologies

三菱重工

**未来が未来で
なくなる前に、
私たちにできることを
考えたい。**



私たちの生活にとって
欠くことのできない電気。
今、その電気を生み出す
貴重なエネルギー資源が、
確実になくなりつつあります。
原子力発電所の使用済み燃料を
リサイクル利用するプルサーマル。
それは、豊かな未来をひらく
テクノロジーです。
未来を閉ざさないために――
三菱重工は、プルサーマルの実現を
サポートしています。

三菱PWR原子力発電プラント

豊かな未来をひらく、プルサーマル

三菱重工株式会社

本社 原子力事業本部 〒108-8215 東京都港区港南2-16-5 TEL.(03)6716-3111
支社 関西/中部/九州/北海道/中国/東北/北陸/四国

東京書籍

〒114-8524 東京都北区堀船2-17-1 TEL.03-5390-7331 FAX.03-5390-6014
東京書籍ホームページ…<http://www.tokyo-shoseki.co.jp> 東書Eネット…<http://ten.tokyo-shoseki.co.jp>

科学者になる方法 ～第一線の研究者が語る～

科学技術振興機構プレスルーム／編
A5判／208頁／定価1575円(本体1500円)

日本屈指の科学者35人が「理系に進んだきっかけ」や「研究者としての今」などを語る。話題の最先端研究や科学者の魅力・将来像などが具体的に見えてくる。

たのしくわかる物理実験事典

左巻健男、滝川洋二／編著
A5判／464頁／定価3990円(本体3800円)

小・中・高の授業で行いたい基礎的な実験でしかも「楽しくわかる」実験、新開発された実験をセレクトして、実験方法を丁寧に解説した物理実験書の決定版。

たのしくわかる化学実験事典

左巻健男／編著
A5判／480頁／定価3873円(本体3689円)

小・中・高の授業で行いたい基礎的でしかも「楽しくわかる」実験を丁寧に見やすく解説。生活や産業と化学の関わりを扱う実験も多数掲載。化学実験書の決定版。

新 観察・実験 大事典 全4編

「新 観察・実験大事典」編集委員会 編
定価：各編12,600円(税込) 各編 全3巻(分売不可)

物理編

生物編

化学編

地学編

日本原子力学会 シニアネットワーク (SNW) について

2007. 3. 20. SNW幹事 金氏 顕

シニアネットワーク連絡会は平成18年5月22日に設立された、原子力学会ではもっとも新しい連絡会である。現在会員は竹内哲夫会長（元原子力委員）以下140名、主に産業界、研究界、大学の原子力シニア達である。長年の知見と経験を活かして原子力に対する理解を社会に訴え、特に次代を担う若い世代にその想いを伝えたいと、次のような活動を積極的に展開している。

1. 生い立ち

母体は「エネルギー問題に発言する会」で、これは原子力の草創期を体験したOBが当初メディアの原子力に対する誤報道を正す目的で5年ほど前に作られた会である。ここに原子力学会の企画委員から「原子力を志す学生を支援する活動を一緒にしませんか」との話があり、学会の学生連絡会の委員との交流をきっかけに「学生とシニアの対話」の構想が生まれ、平成17年7月に武蔵工大で第1回が開催された。

2. SNW の設立とその後の活動

「学生とシニアの対話」は次々と回を重ね、この間活動の組織化が検討された結果、原子力学会にSNWを設立するに至り、第7回以降SNWが対話の主催を行っている。今年3月末までには北は北海道から南は九州まで都合11回、ほぼ全国の原子力系学科の17大学の学生との対話を一巡することになる。延べ参加学生数約370名、参加シニアは135名である。

対話の方法は、学生からの疑問、悩み、要望などについて、学生4～8名対シニア2～3名のグループに分れ、2時間程度討論した後各グループの学生代表が結果を発表する。この方式は対話の後により深く懇談するための懇親会ともども継承されている。

対話イン東北（昨年12月）



対話イン茨城（本年2月）



またSNWでは学生のみでなく広く世間一般にエネルギー・地球環境の問題を訴え、特に原子力について真の理解を求めため、シンポジウムも企画。討論では主に原子力OBシニアの果たす役割を議論、これまでに東京と北海道で3回実施し、参加者は延べ270名である。

3. 今後への期待

これまでの経験から、これらの問題を正しく理解し日々努力をされている教官方や学生の存在を知り心強く思う反面、その全体に対する比率から道遠しの感も否めない。

SNWではこれまでの活動のたゆまぬ継続と拡大発展により、我々の生涯をかけた原子力という貴重な財産を、信頼できる若い世代にしっかりバトンを引き継ぐことを念願している。

同じ想いのシニアの方がおられれば下記にSNWの入会手続きをお知らせします。

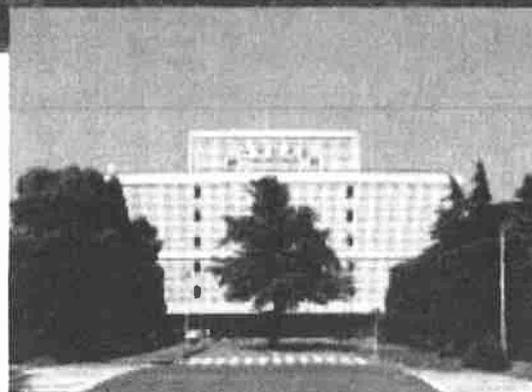
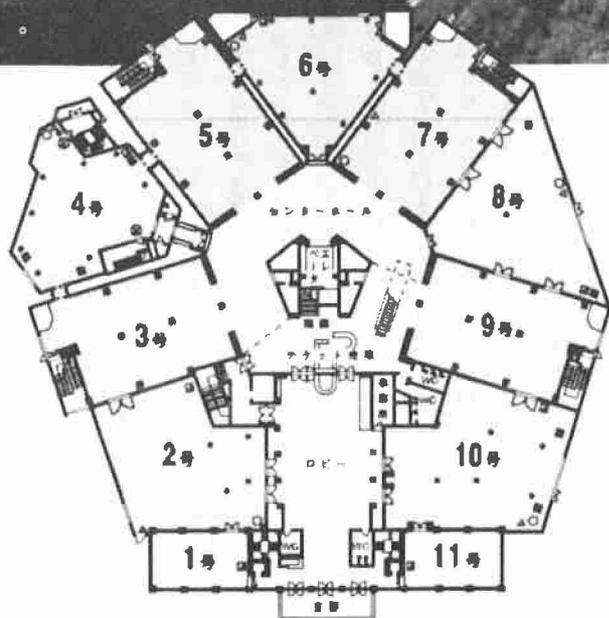
<http://wwwsoc.nii.ac.jp/aesj/snw/nyuukaiannai.html>

Better Transportation is The Best Formation.

青い空と深緑の森 都心にいることは しばらく忘れて…

The
Exhibition
Hall
in
Science
Museum

フレキシブルに展開する11のホールと 劇場型大ホール、気軽に使える中小会議室



ご案内図



ホール面積 (合計3,667m²)

1号	2号	3号	4号	5号	6号
109㎡	373㎡	330㎡	313㎡	330㎡	313㎡
7号	8号	9号	10号	11号	センターホール
330㎡	364㎡	330㎡	436㎡	109㎡	330㎡

～森の中の展示場～

科学技術館

(財)日本科学技術振興財団

〒102-0091 東京都千代田区北の丸公園2-1

TEL 03-3212-3939 (直) FAX 03-3212-8788

<http://www2.jsf.or.jp/>

アクセス

地下鉄東西線「竹橋」駅下車 1B出口より徒歩約7分
地下鉄東西線/半蔵門線/都営新宿線「九段下」駅下車 2出口より徒歩約7分
都心環状線外回り「代官町」/内回り「北の丸」出口より1分

※田安門、菊水門からのお車での進入はできません。

この夏、青木林は...

六ヶ所村

津軽海峡、日本海、太平洋に三方を囲まれ、

寒流と暖流がぶつかる青森の海は海産物の宝庫。

いまならば、イカ、ウニ、ホタテ、サザエ、シジミなどが旬の味でしょうか。

そして、北国の涼しい夏が、野菜や果物の美味をすくすくと育てています。

原生林から牛み出される豊かな清流が育てる、お米も自慢です。

人気の高い日本酒「田酒」の「田」も田んぼを意味してるのだとか。

青森の最新の注目スポットといえば、下北半島にある「六ヶ所村」です。

日本の電気の約30%は原子力発電でつくられています。

その燃料となるウランも、約85年後には世界的に不足すると予測されています。

そこで、「再利用できる」というウラン燃料のメリットをいかした

電気のリサイクル「フルサーマル」の実施を、日本でも進めています。

この六ヶ所村の再処理工場は、発電に使われた燃料から、

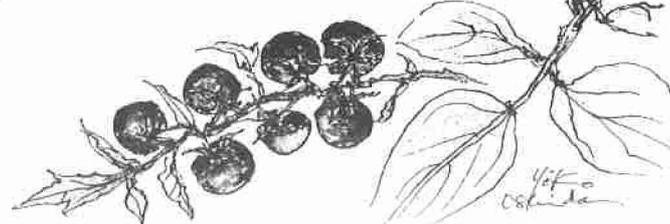
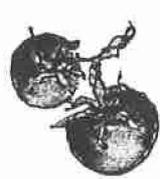
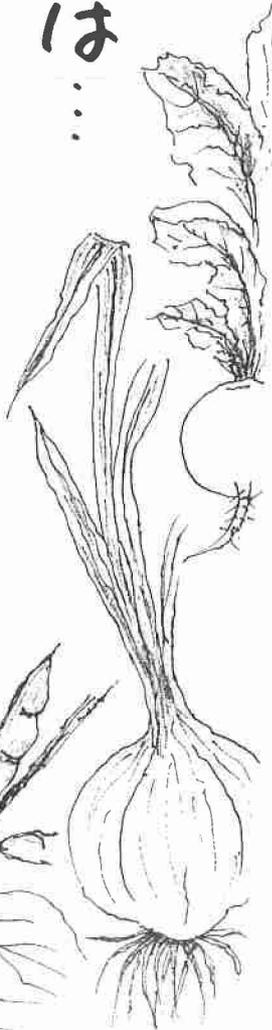
まだ使えるウランやプルトニウムをとり出し、新しい燃料(MOX燃料)として

使えるようにするための、日本で初めての商業用の工場なのです。

青森は、おいしい魚介類や肉、野菜や果物、日本酒などを全国に出荷していますが、

毎日の暮らしに欠かせない

「電気」というエネルギーも支えているのですね。



エネルギーから
あなたへ

全国10の電力会社でつくる
電気事業連合会

ホームページにもぜひアクセスを
<http://www.fepc.or.jp/>

