

学校での放射線リスク教育

ガイドブック

ー第二版ー

Guidebook for radiation risk education at school

編集

千葉大学 教育学部基礎医科学

杉田 克生

はじめに

千葉大学教育学部基礎医科学 杉田 克生

東日本大震災にともなう福島原子力発電所事故後、科学技術としての放射線への不信感が日本全土に蔓延している。有害事象とは本来因果関係は問わず結果的に生体に好ましくないできごとの総称であるが、これがすべて因果を有する副作用と認識される。戦後世界に類のない平和と安全な国家が日本で形成されたためか、日常生活上不可避な不確実性やリスクを正しく認識できないことが一要因と思われる。医療技術も含め科学技術を推進するには、リスクを正しく認識する必要性を国民が共通に認識すべきである。放射線教育を通して日本でのリスク認知やリスク教育を充実させる重要性がここにある。

日本の学校教育では、「安全教育」は指導要領にも組み込まれている。例えば文部科学省のホームページ (http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chukyo/chukyo3/022/siryo/07091003/003.htm) では、「現行の学習指導要領における食育、安全教育、性に関する指導に関する主な内容」と題されたページで、「食育」、「安全教育」、「性に関する指導」がそれぞれどの教科で指導されるか示されている。「安全教育」は体育・保健体育、社会科、理科、生活科、特別活動、道徳など各教科にわたって災害、事故、応急手当、生命尊重などが指導されることになっている。「教科横断的な内容で取り組むべき内容」とされているが、要は主体な教科ひいては教師がいないのが現状である。一方リスク教育については、中学校技術・家庭科学習指導要領解説の総説に「安全・リスクの問題も含めた技術と社会・環境との関係の理解」に関する記述がある。ただし学校での現状は前記した「安全教育」にとどまっており、リスクに関する知識や概念は指導されていない。

一方、放射線教育を実施するにあたり、放射線に関する用語にも注意を向けるべきである。原子力発電所は“nuclear power station”、核崩壊は“radioactive decay”、核分解は“nuclear fission”、核燃料や核廃棄物は“nuclear fuel and waste”である。放射性物質による被曝に関して日本では外部被曝と内部被曝に分けているが、このテキストでは“irradiation”と“contamination”に2分類して説明がある。前者は、体外での放射線源への暴露であり、後者は放射線源が体内に入った(enter)場合あるいは皮膚や衣服に付着

(get on) した際の用語と説明されている。

リスク教育に関しては、英語では“risk”の類語として“danger”がある。2つの用語がある以上、日本語で両者とも「危険」と訳しても本来のニュアンスは異なる。小学館オックスフォード英語類語辞典では、“risk”は「(悪いことが起こる) 危険(性)、リスク」とあり、“danger”は「傷害・危害・殺害・損害・破壊が伴う危険、危機」とある。“danger”とは“something like a clear possibility of harm if we are not careful”とし、“risk”とは“something like an uncertain possibility of harm”が英国人の通念である。従来安全と言われていた福島原子力発電所は、地震の際には“risky”ととらえていたが、現在でも大量の放射線を出している同発電所は“dangerous”と表現すべきである。

上記の現状を鑑み、現場の理科教員、養護教員向けに作成したのが「学校での放射線リスク教育ガイドブック」である。放射線リスク教育の日本ならびに欧州の現状、リスク教育に必要な生物統計学、子どもの放射線被曝影響、放射線リスク実験教育教材開発、レギュラトリーサイエンスを導入した放射線リスク教育などを解説した。さらに第二版を発刊するにあたり、チェルノブイリ原発事故における小児甲状腺がん、長崎での原爆被爆者健康調査を加えた。また、実験教材作製や放射線染色体傷害実験に加え科学的観点からレントゲンによるX線発見再現実験を加筆した。なお放射線の基礎的理解を深めるため、資料として放射性元素の語源や参考文献を付記した。今回改訂した本ガイドブックが多数の教員に活用され、学校での放射線教育の育充実につながることを期待したい。

[謝辞] 本ガイドブック作製にあたり千葉大学教育学部養護教育講座 野村純教授、理科教育講座 加藤徹也教授、技術科教育講座 飯塚正明教授の御指導があったことを記し、深甚の謝意を表する。

本研究には、基盤研究(B) 平成25年-28年「放射線教育を軸としたESD推進のための学習プログラム開発と理科教員養成」課題番号25582033ならびに基盤研究(B) 平成28年度-30年度「レギュラトリーサイエンスを導入した放射線教育プログラム開発ならびに教員養成」課題番号16H03053の助成を得た。

目次

はじめに

学校で行う放射線リスク教育の目的と実践

量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 神田 玲子 4

放射線生体リスクを評価するための生物統計学

千葉大学大学院医学研究院臨床試験学 佐藤 泰憲 7

レギュラトリーサイエンスを導入した放射線リスク教育

千葉大学大学院教育学研究科 前田 彩香 11

欧州での放射線リスク教育

千葉大学教育学部基礎医科学 杉田 克生 14

中学校理科における放射線教育の変遷

千葉大学教育学部養護教諭養成課程 菅波 詩織 16

子どもの放射線被曝影響

量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 柿沼 志津子 20

チェルノブイリ原発事故と小児の甲状腺がん

東京通信病院病理診断科 田村 浩一 24

原爆被爆者健康調査（長崎）

長崎大学 原爆後障害医療研究所 三根真理子 28

大学生の放射線に対する知識の現状

千葉大学教育学部養護教諭養成課程 山中 有美・・・・・・・・・・・・・・32

大学生の放射線リスク認知の現状

千葉大学教育学部養護教諭養成課程 岩本 里美・・・・・・・・・・・・・・36

放射線教育実験教材提供の試み

千葉大学大学院医学研究院分子腫瘍学 喜多和子・・・・・・・・・・・・・・41

放射線 DNA 傷害・修復実験法

千葉大学教育学部養護教諭養成課程 土岐 香苗 飯田 祥子・・・・・・・・・・・・44

放射線染色体傷害を学ぶ実験講座

千葉大学教育学部養護教諭養成課程 土岐 香苗・・・・・・・・・・・・・・48

レントゲンによる X 線発見を再現させた実験教材開発

千葉大学教育学部養護教諭養成課程 吉田 千明・・・・・・・・・・・・・・55

X 線ならびに放射線研究の歴史

千葉大学教育学部基礎医科学 杉田 克生・・・・・・・・・・・・・・58

資料

放射線元素の語源

千葉大学教育学部基礎医科学 杉田 克生・・・・・・・・・・・・・・61

参考文献一覧

学校で行う放射線リスク教育の目的と実践

量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 神田 玲子

1. 放射線教育とリスク教育の接点

現在、教育現場が抱える放射線教育への問題意識は、指導要領の改正や東京電力福島第一原子力発電所事故（以下、福島原発事故と呼ぶ）以降、放射線の問題に学校が深く関わるようになったことに端を発している。他方、福島原発事故対応として行われたリスクコミュニケーションでは、一般公衆の科学リテラシーやリスクリテラシーの不足が露見し、教育現場への期待を高めている。

またこれからの科学技術社会を担う子どもたちには、放射線に限らず、安全とは何か、科学技術のリスクとどのように折り合うのかといった教育もまた必要である。そこで本稿では、放射線を例題としたリスク教育の目的や具体的な方法について解説する。なお本稿は、以前発表した論文[1]を現在の状況に合わせて加筆修正したものである。

2. 放射線リスク教育の目的

安全とは「許容できないリスクがないこと」（ISO/IEC Guide 51）という定義があるように、リスクの大小だけで決められるものではない。特にリスクがさほど大きくない場合は、受け入れられるかどうかは個人差が生じる。こうした判断は「個人の自由」なのだが、生活が不便になる場合もある。よってリスクベースの合理的な判断ができ、今後、新規のリスクの問題に直面した時も、適切な対応が可能な人間を育てることが、放射線リスク教育の目的である。

福島原発事故対応として行われているリスクコミュニケーションも、単に正しい知識を得て、リスクを理解して安心することが目的ではない。放射線のリスクや便益あるいは線量低減に係るコストのバランスを考慮して、自らが合理的な判断ができるようになる点にある。この合理的な判断は、日常生活においても無意識に行われていることが多い。例えば無農薬野菜を買う／買わないといった判断は、農薬のリスク、価格、購入の頻度など、様々な要素を天秤にかけて行われている。しかしリスクが未知と判断された場合、秤にかけるべきリスクの推定が定量的でなく「危ない」か「危なくない」かの二択となることが多い。

そこで学校での放射線教育は、リスクの定量的理解のために学年のレベルに合わせた知識の習得を第1段階として行う

べきである。第2段階は、リスク、便益、コストを天秤にかけた合理的判断プロセスを身につけるための総合教育となるが、この第2段階は学校教育に限るものではない。そこで本稿は第1段階の教育のポイントを中心にまとめる。

3. リスクの定量的理解のための知識①：単位と実測

リスクリテラシーの基本は、量が多ければリスクは大きい、量が少なければリスクは小さい、という点にある。そこで単位を正しく理解することが重要である。福島原発事故以降、初めて見聞きする放射線の単位（Sv や Bq）に、多くの人が戸惑った。学校で Sv や Bq を教えるべきかどうかについては意見の分かれるところであるが、基本的な単位概念を応用可能なレベルまで理解させるべきである。

放射線は目に見えない、匂いもしないと言われるが、人工的に匂いを付けている都市ガスのように五感で検知できる毒物の方がまれである。むしろ放射線ほど計測しやすいものではなく、空間線量率や被曝の累積線量などを個人が購入可能な機器で調べることができる。線量計を持って学校内を調べ、校内であっても測定場所によって値が変わること、同じ地点でも測定日時や機器によって値にばらつきがあるなどを生徒自らが発見することで、線量を定量的に考えるベースができる。

4. リスクの定量的理解のための知識②：半減期、遮蔽、自然放射線

定量的概念の習得に加え、放射線特有の性質については知識として知っておくべきことがある。表1は平成14年に日本原子力産業会議（当時）が高校生対象に行った調査であるが[2]、中学卒業までに、この6問を正答できること、つまりは半減期、遮蔽、自然放射線に関する知識を習得させることを学習の到達目標とすべきである。特に放射線の量を説明する際には、日常生活で受ける放射線（自然放射線、航空機被曝、医療被曝など）に関する知識が、線量や影響の理解のベースとなるだろう。

そこで、自然放射線と人工放射線については、線量が同じであれば影響には差がないことを、誤解を解く形で教える必要がある。概して、「自然のものは体にいい、人工は悪い」というイメージがあるが、自然界にも有毒物質は多くあること、害

を及ぼすかどうかは、自然由来か人工由来かが問題なのではなく、量の問題であることを総括的に伝えることが望ましい。

5. リスクの定量的理解のための知識③：イメージ

先に紹介した高校生対象の調査 [2] はアジア各国の高校生に対して行われているが、日本の高校生の知識レベルが特段低いというわけではない。しかし同時に行われた放射線に関するイメージに関するアンケート調査で、放射線は「管理できる」「身近である」と答えた高校生の割合が、日本のみ極めて低かったことは特記に値する。例えば「放射線は管理できる」という問いに、「そう思う」「ややそう思う」と答えた高校生の割合が最も高かったのはベトナム (75.0%)、日本に次いで低かったのはインドネシア (51.8%) であったが、日本の割合は 21.7% であった。

社会心理学研究からは、リスクの感じ方は「自分で制御管理できるか」「よく知っているリスクか」等の要因で左右されることが明らかになっている (表 2) [2]。つまり、放射線の量と影響に関する知識があっても、放射線は管理できない、未知のリスクであるというイメージがあれば、リスクを定量的に考える際にバイアスがかかることを意味している。

生徒たちの放射線に対するイメージは、福島原発事故の影響もあり、かなり画一的なものになっている。より放射線を身近なものと感じさせるためには、自然放射線が存在や放射線利用の例 (放射線検査、ビート版の加工、グレープフルーツの品種改良)、放射線の発見や利用の歴史、考古学や美術分野の利用例などを教えることも適当と思われる。

6. リスクの定量的理解のための知識④：生物影響

放射線の場合は、量に応じて誘発される影響の種類も変わる。このメカニズムについては、生物の細胞のしくみや遺伝を教える単元と結びつけて教えることが望ましい。細胞に放射線が当たると、DNA が損傷することがある。DNA 損傷の大部分は酵素により短時間に修復されるが、中には細胞死や遺伝子の変化を起こすものもある。放射線の量が多くなれば、細胞死の量が増え、障害の発生頻度と重篤度が増す。一方非致死性の変化は、遺伝性影響やがんの原因となり、線量が増えると疾患発生の頻度が増す。

また放射線以外にも発がん性や催奇性のある物質が身の回りにはあり、放射線を受けた、受けないにかかわらず、ある一定の割合でそうした疾患が見られることも、知識として得ることが望ましい。リスクのイメージを修飾する要素に「子どもへの影響」があることから、特に女子には、放射線の次世代影響については、正確な情報を伝える必要がある (表 3) が、理科教育というより、保健教育の範疇でと思われる。

7. 合理的判断プロセスを身につけるための学習：リスクの比較と制御

合理的判断プロセスを身に付けるには、家庭も含めた社会との相互作用によるリスクに関するセンスを養う必要があり、学校教育だけで完結するものではない。そこで、学校で行うべきことは、身の回りのリスクを意識させ、安全とは何かということを考えるきっかけを与えること、そして、リスク、便益、コストの面から、自分たちが今後の科学技術を取捨選択する立場にあることを自覚させることにある。

放射線の量やリスクの定量的な理解には、自然放射線あるいは自然発生による疾患率との比較が重要であることは既に述べた。さらに深くリスクを理解する上でよく行われるのは、異なるリスク同士の比較である。特に身近と感じられているリスクと比較することにより、未知のリスクも判断できるセンスは現代人にとって必要である。例えば死亡リスクが 10^{-6} (100 万人のうち 1 人死亡する) と言われても実感がわかないのは当然であるが、飛行機 1 回乗った時の死亡リスクと同程度という情報を得た時に、このリスクを自分が受け入れられるかどうか判断できるようにするためには、日頃から身の回りのリスクを意識している必要がある。

学校教育では、交通安全教育や防災教育 (避難訓練)、実験での諸注意などの折に触れ、リスクの頻度や重篤度などを伝え、「危ない・危なくない」ではなく「どれほど危険か」というとらえ方をするように指導し、さらに「どうしたらリスクを下げられるか」という思考パターンを形成することが望ましい。

参考文献

- [1] 神田玲子「放射線リスクコミュニケーションの基盤となる学校教育」『エネルギー環境教育研究』2013; 8: 78-81.
- [2] 日本原子力産業会議「FNCA 各国高校生の放射線についての知識 関心等に関する合同アンケート調査報告書」2003
- [3] Fischhoff, B. et al Acceptable Risk. New York Cambridge University Press, 1981.
- [4] ICRP Pregnancy and Medical Radiation. Ann. ICRP 30 (1), 2000.

表 1. 高校生の知識調査（平成 14 年実施）[2]

問い	正解	正答率
放射線の強さは時間がたっても変わらない	×	64.2%
放射線を出す物質は地球ができた時から自然界に存在する	○	62.7%
放射線の進む方向は強い風によって変わる	×	50.3%
放射線は微量だが普通の食物の中からも出ている	○	49.0%
放射線は微量だが常に身体からも出ている	○	41.9%
自然放射線と人工放射線は性質が異なる	×	19.3%

表 2. リスクのイメージを修飾する要素[3]

容認しにくいリスク	受けいれやすいリスク
押しつけられたもの	自発的なもの
他人が制御管理	自分で制御管理可能
利益がない	利益がある
人為的・人工的	自然由来
不公平に及ぶ	公平に及ぶ
破滅的	統計に基づいている
リスク源が信用できない	リスク源が信用できる
経験がない、外来	熟知している
子どもへの影響	大人への影響

表 3. 放射線による疾患率とベースラインの比較[4]

胚・胎児の吸収線量 *	小児がんにならない確率	子どもが奇形を持たない確率
0 mGy	99.7%	97%
1	99.7	97
5	99.7	97
10	99.6	97
50	99.4	97
100	99.1	97
>100	より低くなる	97 に近い

* 吸収線量：単位は Gy(グレイ)。1Gy は物質 1kg 当たり 1 ジュール (J) のエネルギーが吸収されることを意味する。 γ 線、 β 線の場合、1Gy は 1Sv(シーベルト)に相当する。

放射線生体リスクを評価するための生物統計学

千葉大学大学院医学研究院グローバル臨床試験学 佐藤 泰憲

1. はじめに

日常生活のなかには、災害、病気、事件等の様々なリスクがあり、生命・健康を脅かすものは数多くある。そのため、リスクという危険というイメージが強いのではないだろうか。我々は、風邪等の病気になると薬を服薬するひが多いと思われる。「くすり」を逆から読むと「リスク」である。昔から、「毒と薬は紙一重」と言われ、薬はもともと毒であるが、これに注意して上手に利用すれば、病気を治すことができる[1]。まさに、「くすり」と「リスク」は表裏一体の関係を意味している。そのため、リスクは危険のみを考えるのではなく、「ベネフィットを得るためにリスクを負う」という考えも必要であろう。また、リスクを科学的に評価するためには、何らかの合理的な定義が必要であるが、様々な分野においてそれぞれ関心のある事象や指標が異なっており、統一的な定義をすることは困難であろう。

放射線生体リスク評価では、「リスク」は放射線被曝によって生ずる有害な健康影響の大きさを表現するための定量的概念として用いられており、様々な指標が利用されている。これらのリスクはデータに基づいて評価するため、データの取得・提示・活用の各側面で、データの取り扱いが重要である。本稿では、データの提供と利用の注意点・留意点について、統計学的視点から概説する。

2. 母集団と標本

もともと統計というものは、本当に存在している人の集団について、人数や所有物の量等を調べ、数量的にその集団を把握するものであった。やがて集団全体を調べなくても、集団の一部を調べれば全体がかなりよく把握できることがわかり、一部のみを調べることが行われるようになった(図1)。このときの集団の中で調べられる一部分を集団からの「標本(sample)」と呼び、元の集団を「母集団(population)」という[2]。

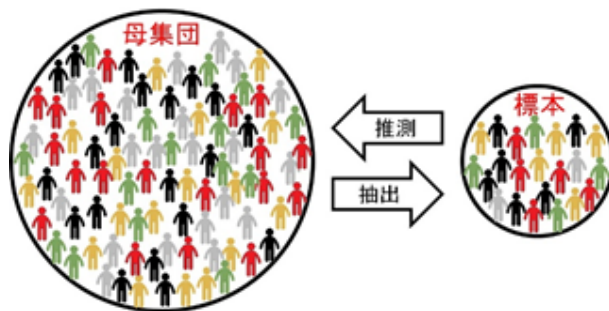


図 1. 母集団と標本

我々が扱うデータの多くは母集団から抽出された標本である。データを評価する際に、① 母集団の規定、② 標本の抽出方法が重要なポイントである。母集団の規定においては、標本が母集団の主な特徴を反映するように取得されていなければならない。たとえば、定点観測地点の放射線量測定データは、測定機器の設置場所周辺の測定時点での大気を母集団とすることが正しいが、測定地点から離れた住民の生活圏の大気を母集団とすることは正しくない。

次に、標本の抽出方法は、理想的には、母集団からランダムに選ばれることが望ましい。この場合のランダムとは、母集団のどの部分も標本に選ばれる可能性が同じであることを意味する。放射線生体リスクを評価するために、収集されたデータの母集団がどのような集団であるか定義(場所や時期等)を明確にし、どのようにデータが収集されたかを確認することが重要であろう。

3. 系統誤差と偶然誤差

データのとり方やまとめ方によって結論が大きく異なることがある。そのようなことが起こる本質的な原因のひとつは、データがばらつきを伴っていることである。ばらつきとは、同じようなものの測定値の集まりが、同じ値にならず、色々違った値になることである。ばらつきが生じる原因は、測定環境、測定方法、測定誤差、はっきりしない様々な要因の影響として生じているのであろう。これらの誤差は偶然誤差と系統誤差に大きく分けられる[2]。

前者は、原因が特定されることなく偶発的に発生する誤差である。たとえば、ガイガーカウンターで同じ場所・同じ時刻に空間線量を複数回測定した場合に、線量は一定にならず、わずかに測定値がばらつくことがあり、これが偶然誤差である(図2)。

一方、系統誤差は、ある特定の原因によって系統的に発生する誤差である。たとえば、常に高く測定してしまう壊れたガイガーカウンターで先ほどと同じ条件で複数回測定した場合、正常なガイガーカウンターで測定した値よりも常に高くなる。このようにある原因により一定方向に偏ることを系統誤差という(図2)。疫学分野では、系統誤差を偶然誤差と明確に区別して「バイアス」と呼ぶことが一般的である[3]。

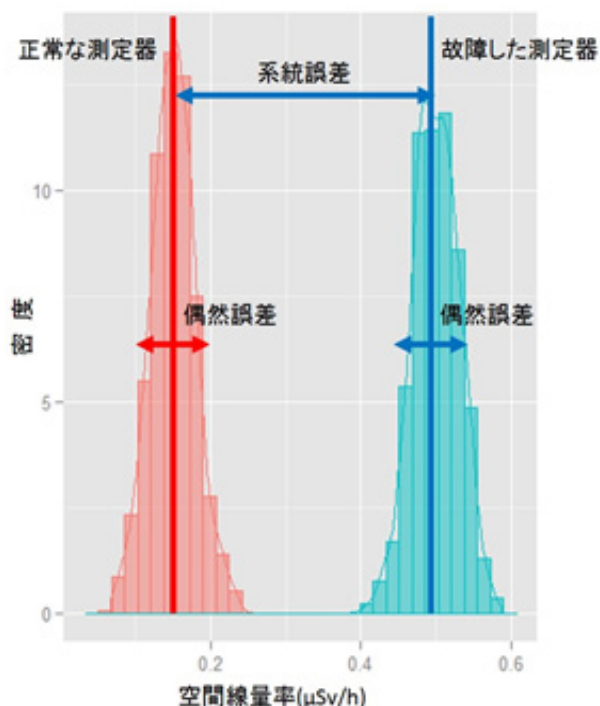


図 2. 偶然誤差と系統誤差

同じ誤差であっても、両者はまったく意味や取り扱いが異なり、偶然誤差は測定者がいくら努力しても偶発的に生じるため取り除くことはできないが、測定を複数回繰り返すことにより小さくすることはできる。一方、系統誤差は原因が必ず存在するため、その原因を見つけ、取り除く必要がある。

我々が利用するデータには、ばらつきが存在するため、ばらつきを小さくするような工夫や効率的にデータを集める方法を研究計画段階から吟味する必要がある。

4. 交絡

仮想的な事例として、低自然放射線地域(地域A)の住民と高自然放射線地域(地域B)の住民を20年間調査し、死亡割合を比較した。その結果、表1のような結果が得られた。

表 1. 二つの地域の死亡割合

地域	死亡	生存	合計
地域 A	3,250 (65%)	1,750 (35%)	5,000
地域 B	1,900 (38%)	3,100 (72%)	5,000
合計	5,150 (52%)	4,850 (48%)	10,000

地域Aの死亡割合は65%、地域Bの死亡割合は38%であり、低自然放射線地域の方が、約30%死亡割合が高い。

死亡と高齢は相関することから年齢(65歳未満、65歳以上)でサブグループ解析すると表2のようになった。

表 2. 年齢で層別した結果

地域	年齢	死亡	生存	合計
地域 A	65 歳以上	3,150 (80%)	1,350 (20%)	4,500
	65 歳未満	100 (20%)	400 (80%)	500
地域 B	65 歳以上	1,200 (80%)	300 (20%)	1,500
	65 歳未満	700 (20%)	2800 (80%)	3,500

65歳以上のグループでは、どちらの群も死亡割合は80%であり高い。一方、65歳未満のグループでは、どちらの群も死亡割合は20%であり低い。また、この結果から地域Aと地域Bとの死亡割合は同じである。

このように結果のまとめ方によって、なぜ結論が変わってしまうのだろうか。表1及び表2の結果を図示すると図3のようになる。

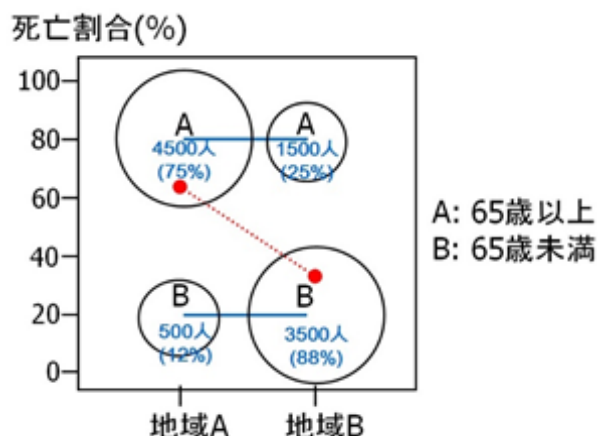


図 3. 交絡の仕組み

図3の結果をよくみると、地域Aでは、全体の被験者数に対して65歳以上の割合が、地域Bよりも高く、地域Bでは地域Aよりも65歳未満の占める割合が高いことがわかる。つまり、65歳以上の高齢者は、20年も追跡調査をすれば寿命等で亡くなるリスクが高いことから、高齢者が多い地域ほど死亡割合が高くなる。

このように、「興味ある要因」が「結果」に与える効果を正しく評価できない現象を交絡といい、そのような影響する要因を交絡因子という[3]。この事例では、年齢が交絡因子である。

研究から得られた結果を評価する際に、交絡の存在を見落としてしまうと、誤った結論が導きだされる可能性がある。そのため、交絡因子の存在と交絡の可能性を常に意識して統計解析することが重要である。また、研究開始前に交絡因子の存在がわかっている場合は、交絡を除去するような研究計画を立てることが重要である。

5. 欠測値・外れ値の取り扱い

医学・生物実験において、欠測値や外れ値が必ず存在する。これらは、統計解析のなかで最も取り扱いに困るものである。欠測値は、本来の計画では得られるはずだったにもかかわらず、何らかの理由でデータが得られないことである。例えば、実験途中で動物が死亡したり、臨床試験では転院等で被験者が脱落して測定値が得られないことがある。また、単純なミスによる測り忘れ、検体の取り違い、操作ミスによる試料の破壊等もある。このような欠測が偶然かつランダムに発生するのであれば、解析結果に影響を与えることはない。

しかし、欠測値が厄介なのは、欠測の存在自体が処理の影響である可能性を秘めていることである。例えば、放射線量と発がんの影響を評価するために、低線量、中線量、高線量をマウスに照射したとする。線量が強すぎたため、高線量群で死亡が増え、データが欠測になってしまった。このような状況では、欠測値を無視して解析すると放射線量の影響を過小評価することになり、正しい結果が得られない。

欠測値の取り扱いの留意点は、1) データの持つ情報を過不足なく取り入れる、2) 欠測のメカニズムを十分反映させて解析を行う、3) 欠測に伴う結論の偏りを無くす、4) 欠測による情報の損失を適切に評価することである[4]。欠測値に関する対処法としては、1) ひとつでも欠測値がある被験者は取り除き、完全データとして解析、2) 被験者のどこかの変数に欠測があっても得られた測定値を利用して解析、3) 欠測に何らかの値を補完して解析、4) 欠測はそのままモデル化して解析することである[4]。どの手法を用いればよいかは、欠測のメカニズムに依存しているため、欠測メカニズムを考慮して、適切な統計手法を選択することが重要である。

外れ値に関しては、欠測値よりも取り扱いが難しい。その理由のひとつとして、外れ値の定義が明確でないことである。直観的には、ひとかたまりのデータにおいて、1～2個飛び離れた値があるときにこれを外れ値という。外れ値が存在すると、「外れ値＝異常値」と認識し、統計解析の際に、異常だから除外してよい判断する者も多いが、それは間違いである。

外れ値の対処法として、1) ノンパラメトリック法、あるいは頑健な統計手法を用いて解析する 2) 外れ値を除いた場合と除かない場合の両方の解析結果を比較し（感度分析）、結果を併記し結論を利用するときに考慮する 3) 外れ値が多いときは、実験の結果も信頼できないため、研究をもう一度やりなおす[5]。このような原則的視点のもとで、状況に応じて対処すべきである。

6. 統計モデルを利用した解析

我々の生活において、「モデル」という言葉をよく見聞きする。モデルという術語は、分野によって異なる意味を持っているが、その異なる中にもある種の共通性がある。それはある形質に注目しているときには代用品として使えるものという性質である[2]。統計学で用いるモデルは、確率変数という概念を導入して、測定値の構造を数式で表現したものであり、数学モデル、確率モデルと同様である[6]。

放射線リスク評価の重要な課題のひとつは、がんの発症に関して、放射線量や性別、年齢、喫煙、家族歴、被曝歴等の要因を考慮してリスクを数量的に推定することである。そのための方法のひとつが、統計モデルを利用したものである。例えば、我が国の原爆被曝者の疫学調査データに基づき、がんによる死亡年齢、被曝時年齢、放射線被曝線量、性別をパラメータとして、がんの発症リスクを推定するモデルが提案されている[7]。その結果、被曝線量によって増加する年齢別のがん死亡確率や1Svあたりのがん誘発の確率を臓器ごとに算出することができる[8,9]。

このように統計モデルを利用すると、要因ごとに定量的にリスクを推定することができるため、非常に有益である。しかし、統計モデルを利用する際に注意すべきことは、モデルは現実と完全に同じではないことである。例えば、上記のがんの発症リスクモデルでは、過剰相対リスク（「被曝で増加したがん死亡率」の「自然がん死亡率」に対する比）が、時間によらず一定であると仮定している。現実的には、リスクの時間的な変化が一定とは限らないため、このような仮定が妥当なのか吟味したうえで統計モデルを利用する必要がある。

医学・疫学研究から得られたデータは、メカニズムや因果関係が不明であることが多い。このような場合に、データの特徴をモデル化して有用な情報を集約することが重要である。また、データの図示を通じて、変数間の関連を見つけ出し、

因果関係の有無やデータが特殊な構造になっていないかを確認し、データの発生過程を考慮してモデル化することも重要であろう。

著名な統計学者 George Box は「すべての統計モデルには間違いがあるが、役に立つモデルも存在する[10]」と述べているように、統計モデルが現実完璧に当てはまることはなく、誤った結論を導かないように検証を行ない、十分に吟味し統計モデルに基づいた解析結果を受け入れるというのが現実的態度であろう。そのため、統計家・疫学者のみで統計モデル作成やその結果の解釈を行うのではなく、分子生物や放射線等の専門家とコミュニケーションを図りながら、生物医学的側面と統計学的側面からの議論することが重要である。

参考文献

- [1] 佐久間昭「薬の効果・逆効果—臨床薬理学入門」
講談社 1981
- [2] 吉村功「医学・薬学・健康の統計学—理論の実用に向けて」サイエンティスト社 2009
- [3] 矢野栄二（翻訳）「ロスマンの疫学—科学的思考への誘い」篠原出版新社 2013
- [4] 岩崎学「不完全データの統計解析」
エコノミスト社 2002
- [5] 吉村功「毒性・薬効データの統計解析」
サイエンティスト社 1987
- [6] 丹後俊郎「統計モデル入門（医学統計学シリーズ）」
朝倉書店 2000
- [7] 柴田義貞「放射線リスク 行動計量学」
2016 ; 43 : 35-43.
- [8] International Commission on Radiological Protection (ICRP). Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Ann ICRP. 1991 ; 21 : 1-3.
- [9] ICRP. The 2007 Recommendations of the international commission on radiological protection(ICRP Publication 103). Ann ICRP. 2007 ; 37(2-4) : 1-332.
- [10] Box GEP. Science and Statistics. J Am Stat Assoc. 1976 ; 71 : 791-799.

レギュラトリーサイエンスを導入した放射線リスク教育

千葉大学大学院教育学研究科 前田 彩香

1. レギュラトリーサイエンスとは何か

平成 23 年 8 月に閣議決定された科学技術基本計画では「科学技術の成果を人と社会に役立てることを目的に、根拠に基づき確かな予測、評価、判断を行い、科学技術の成果を人と社会とも調査の上で最も望ましい姿に調整するための科学」と定義されている。本来の科学（ここではアカデミックな科学）とはまた異なったもう一つの科学としてレギュラトリーサイエンスが提示されている（図 1）。

アカデミックな科学において不明や未知なことは「わからない」と言うことができ、なおかつ時間的な制約はなく無制限に探求していくことが可能である。その反面、レギュラトリーサイエンスは規制のための科学であり、未知や不明な場合においても、基準値の設定や規制を設けなければいけないという違いがある。またアカデミックな科学と規制との間にある大きなギャップを埋めると同時に橋渡しする役割を担っている。

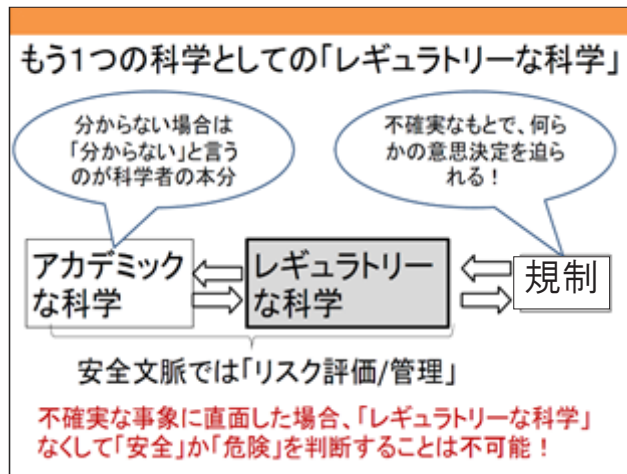


図 1. 岸本充生, 安全な作法としての「レギュラトリーな科学」より

放射線においても様々な規制が存在する。具体的には、放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律、原子力基本法、食品衛生法、放射性同位元素等車両運搬規則などがあげられ、放射線一つをとってみてもこれだけ多くの法律によって具体的な数字で基準値を設けて規制がされている。実際、私たちの生活の中には膨大な数の規制が張られてるが、一方で提示された基準値をそのまま受け入れて生活していることがほとんどであり、どこに根拠があるのか、どのよ

うに設定されたのかまで考えて生活している人は少ないと思われる。

様々な価値観を持った人々からなる社会において、「受け入れられるリスク」になる基準値設定が求められていると同時に、どのように「受け入れられるリスク」を算出したのか、それらの根拠などを理解した上で生活することが重要と考える。

2. 基準値による混乱

福島第一原子力発電所の事故以前は、放射線に不安を抱きながら生活していた人は少なかったと思われる。しかし発電所の事故以降、病院での X 線撮影を拒否したり、年間被曝線量へ対する不安から海外に移住する人などが現れた。学校現場においては、給食における牛乳の停止、弁当の持ち込みなどが相次ぎ対応に追われていた。対応している教員側も基準値以内であるにも関わらず、拒否申請を受け付けてしまうなど基準値が役割を果たせずにいた。多くの人が基準値を超える、超えないということに対して敏感になっていた時期である。

さらに深刻であったのは、基準値という数値だけの判断も不安になる人が続出したということだ。基準値の根拠を知っていればモノサシとして利用できるが、その数値の持つ意味が分からなかったため、基準値があるのに人々はその基準値を信頼することができず個人個人の信念で行動していたのである。

私たちは基準値を目の前にしたとき、その一線を超える超えないで一喜一憂してしまう。健康診断などの時に検査値で一喜一憂している経験がある人も多いのではないだろうか。しかし実際は基準値以下なら安全、それを超えたとなんに危険というようないわゆる、安全 / 危険の二分化ということは起こらない。なぜならゼロリスクは常にありえないからである。ほとんどの場合、ある程度の大きさのリスクを受け入れていることが多い。では基準値はどのようにして決められるのか考えてみる。

3. 放射線の基準値、根拠はどこにあるのか

避難の基準値「20mSv/年」はどのようにして決められたのか。ピンとくる人もいるかもしれないが、職業被曝の線量限度と一致する。

適用	線量限度 ¹⁾	
	職業被曝 ²⁾	公衆被曝 ³⁾
実効線量	決められた5年間の平均が1年あたり20mSv ²⁾	1年に1mSv ³⁾
年等価線量		
眼の水晶体	150mSv	15mSv
皮膚 ⁴⁾	500mSv	50mSv
手先および足先	500mSv	-

- 1) この限度は特定の期間の外部被曝からの該当する線量と、同一期間内の摂取による50年予測線量(子孫に対しては70歳まで)との合計に適用される。
- 2) 実効線量は任意の1年に50mSvを超えるべきではないという付加条件つき。妊娠している女性の職業被曝については、妊娠が告知された後の残りの期間の腹部の表面について2mSvという補助的な等価線量限度を適用する。
- 3) 特殊な状況では、5年間にわたる平均が年あたり1mSvを超えなければ、単一年にこれよりも高い実効線量が許されることがありうる。
- 4) 実効線量をこの値に制限することにより、確率的影響に対し皮膚は十分に防護される。局所被曝については、確定的影響を防止するための追加の限度が必要である。

まず受け入れられるリスクとしては「年間死亡リスクを1000人当たり1人」と設定した。この考えをもとに死亡リスクを計算したのが下記の表である。年間死亡リスクが65歳まで「1000人当たり1人」を超えない線量を見ていくと、20mSv/年以下となったことから、職業被曝線量限度は20mSv/年へと決定された。これが日本においては避難の基準値の根拠となっている。

表 1. 線量による年間死亡リスク表

線量 (mSv/年)	年齢 30	40	50	60	65	70	75
10	0.008	0.037	0.114	0.295	0.445	0.65	0.93
15	0.013	0.055	0.117	0.44	0.65	1	1.4
20	0.017	0.075	0.23	0.59	0.89	1.3	1.9
30	0.025	0.11	0.34	0.88	1.3	2	2.8
50	0.042	0.19	0.57	1.5	2.2	0.32	4.7

では私たちにより関係のある公衆被曝の線量限度についてである。現在の線量限度は1mSv/年(バリ声明)である。ICRPの1990年勧告において5mSv/年(1977年勧告)から見直しがされた。その際に妥当な数値なのか2つアプローチで検証された。

- ①「受け入れられるリスクのレベル」と比較するという方法
- ②自然放射線の線量レベルの変動をもとに判断するという方法

①は職業被曝線量限度と似ている。公衆被曝線量限度は年間5mSv/年を連続に被曝した場合のリスクを検討し、死亡リスクが、それぞれの年齢の平均的死亡リスクと比較しても増加は非常に小さい。②は、まず受け入れられないリスクを「地域間における線量」とした。例えば、引っ越しなどの時に自然放射線が以前より高い土地であった仮定すると、その影響はゼロとは言えないかもしれないが、通常の場合は受け入れることができるリスクであると考えられた。

放射線には様々な種類があるが、ラドンは地域によってばらつきが大きい。1990年勧告では、自然放射線量の変動量算定の上で、ばらつきの大きいラドンは含まないとされた。そこで自然放射線源からラドンを除いた場合の実効線量は1mSv/年であり、放射線が平均よりも高い地域の実効線量は、少なくともその2倍になると説明された。つまり少なくとも1mSv/年は地域によって変動があるため、これは受け入れることができるだろうと考えられた。以上2つの検証アプローチのうちより厳しい②を採択することになり、年間限度被曝線量は1mSv/年に決まったのである。どんな数値も科学的根拠があると考えてしまう傾向があり、その数値は絶対的と思ってしまうのが基準値の怖いところである。

4. 教育現場におけるレギュラトリーサイエンスの導入状況

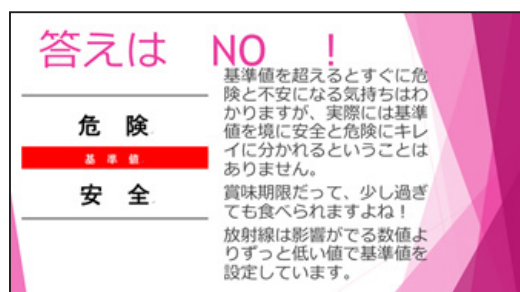
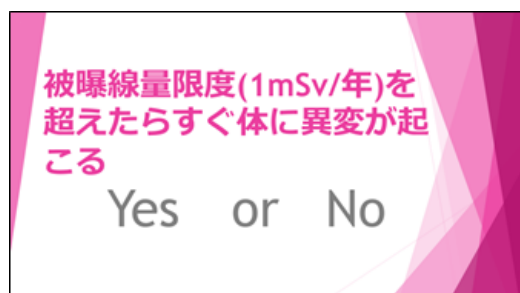
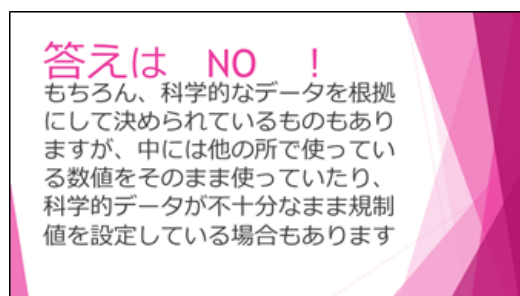
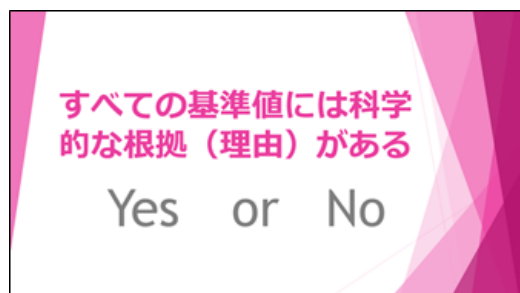
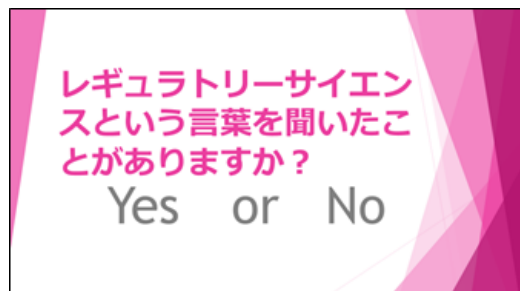
義務教育と高等学校までの教育ではレギュラトリーサイエンスが登場する機会はほとんどない。概念自体も新しいものであり、まだまだ世間に浸透していないことも理由の一つであろう。「現在我が国では、東京大学、名古屋市立大学、慶應義塾大学、武蔵野大学をはじめとする幾つかの薬学系大学においてレギュラトリーサイエンス関連の教育と研究が進められつつあるが、東京大学を除いて大半は2010年以降に設立されたものである。」とのことで、やっと大学レベルで教育が始まっている段階である。また理系における普及であり、ごく限られた人が学んでいる状況であるといえる。

5. 放射線リスク教育におけるレギュラトリーサイエンスの在り方

中学校3年生の使用する教科書の中には、年間の被曝線量や、医療被曝による線量など、線量について記載されている。しかしどのようにして決められたのか、その基準値がどんな意味を持つのかを記載している教科書は存在しない。年間被曝線量や医療被曝について説明をする際に、関連してレギュラトリーサイエンスについて学ぶことができる。

6. 授業ですぐに使えるパワーポイント資料

限られた時間の中で学習できるように発問はすくなく、関心が高まるようにクイズ形式のものを作成した。



参考文献

- [1] 北海道大学レギュラトリーサイエンス部門 HP
<http://rs-medhu.umin.jp/regulatoryscience/>
- [2] 村上道夫、永井孝志、小野恭子、岸本光生
「基準値のからくり」 講談社 2014
- [3] 岸本充生「安全な作法としての レギュラトリーな科学」
http://www.scicomsociety.jp/wp-content/uploads/2012/08/sc_20120801_kishimoto.pdf
- [4] 塚本桂「アメリカにおけるレギュラトリーサイエンスの教育と研究の現状報告」2015
- [5] 松田尚樹「健康と医療の安全・安心 - 放射線と健康 Radioisotopes 」2014

欧州での放射線リスク教育

千葉大学教育学部基礎医科学 杉田 克生

英国での放射線教育の取り組みを初めに紹介する。英国は原子の中の荷電粒子（電子）を発見したトムソン、 α 線をヘリウムイオンと結論付けたラザフォードなど放射線研究では錚々たる研究者を輩出している。教科書検定制度がない英国では、一般に認められた参考書として、14歳から16歳向けに General Certificate of Secondary Education (GCSE) がイングランド、ウェールズ、北アイルランド共通に学術書として出版されている。各教科のテキストがあるが、放射線関連を例にすると Science のテキストでは、物理領域 (Physics の P) として P2 (Radiation and life), P3 (sustainable energy), P6 (Radioactive materials) に解説されている。

内容を一部紹介すると、P2 の章では、X 線や γ 線の医療での有効利用を取り上げながらも、Dr. S Stewart & Dr. G Kneale による“妊婦の X 線照射と生れ出た子どもの発がんの関連報告”を記述してある。この結果から、「医師は X 線使用により注意を払うようになった」とし、細胞分裂が更新している胎児や乳幼児への危険性を解説し、“So the risk associated with X-rays for small children and pregnant woman usually outweigh any benefit.”と明確に記述している。電離放射線の X 線フォトンが生体分子をイオン化し、DNA 分子に作用した場合は“particularly risky”だとし、発がんの機序を簡単ではあるが化学的に記述してある。その後では、“Reducing the risk”の項目で放射線障害軽減の方策を示しているが、随所に“risk”対策が記述され、少なくとも科学や物理を学ぶ中高生はリスク観念が植えつけられる[1][2]。

P6 の章では、何故放射性物質を学ぶかが解説されている。医学的に興味のあるのは、がん治療への応用の箇所とリスク軽減方法の項目である。“Living with radon”の箇所では、炭鉱夫のラドンガスによる肺癌について記述されている。2008 年のデータとして引用されているが、「ラドンのリスクとして毎年 1100 名が癌で亡くなる一方、喫煙では 35000 人、紫外線による皮膚がんは 1400 人アスベストによる癌は 4000 人」と表に示してある。

甲状腺がんの放射線治療 (radioiodine treatment) についても概説されている。“Radioiodine naturally collects in your thyroid, because this gland uses iodine to make its hormone.”と記され、「 β 線によりがん細胞を殺す」と明記し

ている。

放射線実験に関しては、放射線リスク教育を中高校生向けに実践しているオランダのウトレヒト大学講座内容を紹介する[1]。同大学内科学・数学教育研究所が運営する The Ionising Radiation Laboratory (以下オランダ語略 ISP) である。ここでは、放射性物質ならびに X 線源を用いた実験を実施している。当然ながら、放射線管理区域での実験となる。

ISP が中高生向けに実験ラボを開講しているのには、2つの理由がある。第1に、通常の中学、高校では比較的高価な放射性物質、X線源や計測装置を購入する財源や放射線実験に必要な許可証や注意文書を準備することが難しいため、それらを統括する意味がある。第2に、実験施設がなければ理論だけの授業となるが、実際に手をくだす実験 (hands-on experiments) により、中高生の主体的動機づけが可能となり、さらに放射線という社会的重要事項に関しての概念形成を育むことを理由にあげている。低地が広がるオランダでは、地球温暖化対策としてのエネルギー問題は国家的重要案件であることの反映でもあると思われる。

主な内容としては、電離放射線の特性、放射能、半減期、吸収、半値層、飛程などを学習するプログラムである (<http://www.fi.uu.nl/isp/english/index.php>)。学習プログラムのテキストには、23 項目の実験解説ならびに参考情報 5 項目が掲載されている (表 1)。実際に見聞して印象深かったのは、“Radioactive Decay of Radiation-220”である。トリウム 232 崩壊により産生されるラドン 220 からの α 線による電離作用を電流量に換算して提示する実験である。さらに X 線 CT の実験コーナーでは、検査対象を回転させながら X 線照射により断層画像が得られる仕組みが理解できる装置が置かれていた (図 1)。また検査対象を交換することで X 線吸収度の違いを可視化させ、人体での異なった組織や器官が描出される原理を学ぶことがこの装置を通じて理解できる。ちなみにこれら実験装置は通常の学校実験室にも配送設置可能であり、いわば「出前授業」も依頼があれば実施している。

一方表 1 中の“Information”の一つに、“radiation risk”の項目がある。「通常オランダでは 1 年間で自然放射線 1.8 mSv の暴露があるが、それに加えて 0.6 mSv の医療放射線の暴露がある」と説明されている。10 mSv の暴露量での 20

年あるいは40年での各種癌による死亡数が表示されているが、「実際の癌死亡数に比して医療放射線による癌死亡数は極小である」と明示している。さらに「1mSvによる遺伝影響について、100万人に2人の遺伝子異常児が出生」と記載されており、「他の要因によって同じく100万人あたり6万から9万の遺伝子異常児が生まれている」と説明している。大量放射線被曝については、「10 Svでの消化管障害、50 Sv以上での中枢神経障害により、数時間あるいは数日で死亡」と記載されている。ただし「これら大量被曝は原子爆弾によるとされ、被爆者の死因は熱波に起因する」との説明があり、日本人が犠牲になった原爆被害の実態は日本の学校現場で児童生徒に正しく伝えるべきと思われる。原爆被爆者から得られた放射線の生体影響の知見が統計疫学的見地から教科書に掲載され、放射線教育を通じてバランスのとれたリスク認知能力を児童生徒に育むことが重要である。

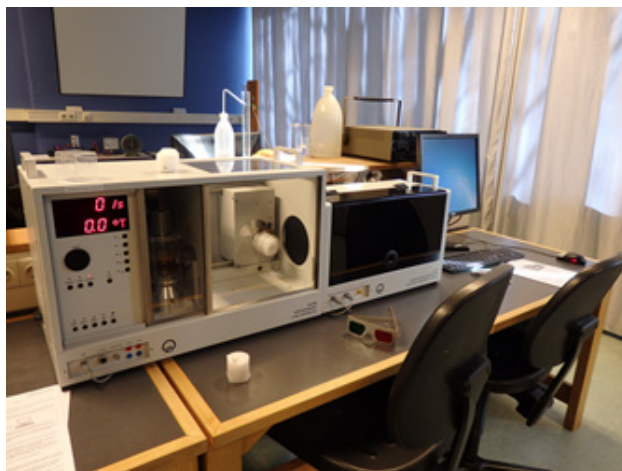


図 1. X-ray CT 実験 中央の円柱のボックスに検査対象を入れ、回転させながらX線照射し、断層像を算出してパソコンディスプレイ上に提示

参考文献

- [1] 杉田克生 「日欧での放射線教育の現状」『放射線生物研究』 2015 ; 50 : 281-290.
- [2] 杉田克生 「英国での放射線リスク教育」『日本醫事新報』 2015 ; 4735 : 70-72.
- [3] www.fisme.science.uu.nl/isp

表 1.Experiments with Radioactive sources and X-Ray Devices [3]

Experiments(1-23)

1. Range of Alpha Particle in Air
2. Radioactive Decay of Radon-220
3. Statistical Variation
4. Back Scattering of Beta Particles
5. Absorption of Beta Particles in Aluminum and Perspex
6. Geiger-Müller Tube
7. Energy of Beta Particles
8. Radiation Intensity and Distance
9. Wilson Chamber
10. Mini Generator: The Barium Cow
11. Detection of Lead
12. Absorption of Gamma Radiation by Lead
13. Qualitative Identification of Radioactive Sources
14. X-Ray Device
15. Ionisation of Air by X Rays
16. Bragg Reflection
17. Gamma Spectrometry
18. Elastic Modulus of Rubber
19. Range of Alpha Particles and Air Pressure
20. Radioactive Decay of Protactinium-234
21. Age of Radioactive Sources
22. Coefficient of Absorption of Aluminium for Gamma Radiation
23. X-Ray Computed Tomography

Information(1-5)

1. Table of Isotope
2. Single Logarithmic Graph Paper
3. List of Concepts
4. Radiation Risk
5. Radiation Exposure

中学校理科における放射線教育の変遷

千葉大学教育学部養護教諭養成課程 菅波 詩織

1. はじめに

現在の教育課程において、放射線に関する教育は主に中学校 3 年の理科と高等学校の物理科において行われている。その際指導の基盤となる教材が「教科書」である。日本で使用されている教科書は 4 年ごとに文部科学省の検定を受け、その都度改定されている。特に現在の中学校の教科書は平成 27 年に検定を受け、平成 28 年度から使用が開始された。つまり福島第一原子力発電所事故以来初めて改定された教科書が、本年度から使用されていることになる。

本項では、放射線に関する分野の記述量と内容において、改定前後で教科書がどのように変化したかについて紹介する。

2. 対象教科書

中学 3 年の理科の教科書のうち、文部科学省の教科書検定を平成 27 年に通過した教科書 [「新編新しい科学 3 [1]」(東京書籍)、「中学校科学 3 [2]」(学校図書)、「自然の探求 中学校理科 3 [3]」(教育出版)、「未来へひろがるサイエンス 3[4]」(啓林館)、「新版理科の世界 [5]」(大日本図書)]と、平成 23 年に通過した教科書 [「新しい科学 3 [6]」(東京書籍)、「中学校科学 3 [7]」(学校図書)、「自然の探求 中学校理科 3 [8]」(教育出版)、「未来へひろがるサイエンス 3 [9]」(啓林館)、「理科の世界 [10]」(大日本書籍)]を対象とする。

3. 調査結果

1) 学習指導要領と中学校理科の教科書

日本で使用されている教科書は、文部科学省が発行する学習指導要領 [11] をもとに作成されている。学習指導要領は各学校で教育課程を作成する際の基準を定めたものであり、法的な拘束力を有する。なお、文部科学省は学習指導要領のより詳細な事項を記載した学習指導要領解説 [12] も発行している。この学習指導要領解説に法的な拘束力はないが、教科書は事実上この学習指導要領解説に準じて作られている。学習指導要領は基本的に 10 年に 1 度改定されており、現行の学習指導要領は平成 20 年に作成されたものである。これまでの学習指導要領における放射線に関する記述は、表 1 のように推移している。

表 1. 中学校学習指導要領（理科）における放射線関連項目の推移

年	内容
S.26	科学技術の発展としての放射線利用 (X 線の性質と利用)
S.33	原子力平和利用の学習 (放射性同位体、放射線の種類)
S.52	-
H.20	エネルギー教育 (放射性の性質と利用)

(「第 12 回原子力委員会資料第 1-2-2 号 学校における放射線教育 [13]」より改変)

昭和 52 年以降、学習指導要領から放射線に関する記述は削除されていたが平成 20 年から約 30 年ぶりに復活した。平成 20 年の中学校学習指導要領、学習指導要領解説における放射線に関する記述は表 2,3 の通りである。

表 2. 中学校学習指導要領

中学校学習指導要領（第 2 章 -4 節 理科）

第 2 各分野の目標及び内容

2 内容

(7) 科学技術と人間 - ア. エネルギー

(イ) エネルギー資源

人間は、水力、火力、原子力などからエネルギーを得ていることを知るとともに、エネルギーの有効な利用が大切であることを認識すること。

3 内容の取扱い

(8) - イアの (イ) については、放射線の性質と利用にも触れること。

表 3. 解説における放射線に関する記述

中学校理科学習指導要領解説
第2章 理科の目標及び内容
第2節 各分野の目標及び内容
2 第1分野の内容
(7) 科学技術と人間
(イ) エネルギー資源について
原子力発電ではウランなどの核燃料からエネルギーを取り出していること、核燃料は放射線を出していることや放射線は自然界にも存在すること、放射線は透過性などをもち、医療や製造業などで利用されていることなどにも触れる。

2) 中学校理科の教科書における放射線に関する記述の量

旧版と新版の教科書を比較して、放射線に関する記載があるページの数はいずれの平均でもおよそ2倍に増加している。特にその増加の幅が大きかったのは東京書籍である。旧版では『原子力発電では、ウランなどの核燃料から放射線が発生する。放射線には、物質を透過しやすいという性質があり、人体や作物の内部に入ると悪影響をあたえる場合がある。しかし、実は、放射線には宇宙空間から降り注ぐものや、自然界に存在する放射性物質から出るものなどもあり、わたしたちは日常的にある程度の放射線をあびている。

放射線は、その透過性を利用して、医療に利用されたり、物体内部の検査に利用されたりしている。』(「新しい科学3年」H23 東京書籍)と学習指導要領解説に記されている最低限の内容を記すにとどまっていた。対して新版の教科書では5ページにわたって記載があり、教科書全体を占める量としては、およそ8倍に増加している。このように教科書全体を占める割合は増加しているが、各出版社によって取扱いの量には差がある。特に学校図書と教育出版の間には、新版においてもその記載の量が2倍異なっている。以下表4に各社の記述量の比較を示す。

表 4. 放射線・原発に関する記載の量

放射線・原発に関するページ数 / 教科書全体		
	H23 年	H27 年
東書	0.5/272 (0.2%)	5/317 (1.6%)
学図	3/291 (1%)	6/319 (1.9%)
教出	1.5/237 (0.6%)	3/317 (0.9%)
啓林	2.5/249 (1%)	3.5/297 (1.2%)
大日	4/313 (1.3%)	5.5/333 (1.7%)
5社平均	2.3/272 (0.8%)	4.6/317 (1.5%)

3) 中学校理科の教科書における放射線に関する記述の内容

原子力発電所の仕組みや長短については旧版、新版ともに全社が示している。原子力発電所の長所としては、少量の燃料で一定で大量のエネルギーを生み出すことができること、発電の過程で二酸化炭素や有害なガスが出ないこと、短所としては、発電の過程で発生する放射線や放射性物質について管理や廃棄が難しいことなどを記載している。特に「未来へひろがるサイエンス3」(H27年 啓林館)では『ウランなどの放射性物質が出す放射線は、生物や環境に影響をおよぼすおそれがある。事故などで原子力発電所から外部に放射性物質が放出されると、広範囲に長期間にわたって強い放射線が発生し、生物や環境に大きな影響を与える。』といった、事故を想定した記載もみられる。

この原子力発電所の事故については、旧版では1/5社、新版では全社が取り扱っていた。旧版で扱われているのはチェルノブイリの原子力発電所事故であったが、新版では全社が福島第一原子力発電所での事故について記載している(図1)。



図 1. 爆発した福島第一原子力発電所

(「未来へひろがるサイエンス3」H27年 啓林館より)

「中学校科学3」(H27年 学校図書)では『放出された放射性物質が大量に降った地域では、放射線の影響を避けるため、多くの住民が自宅をはなれて避難し、現在も多くの人が避難生活を送っています。被害を受けた地域では、放射線の影響を減らすため、放射性物質が付着した土や草木を取り除く除染作業など、復興・再生に向けての取り組みが進められています。私たちは放射線についての基礎知識をもち、科学的な根拠のないうわさに惑わされないよう、科学的な見方や考え方を身につけなければなりません。』と記し、除染作業の様子やモニタリングポストの写真も掲載している(図2)。



図 2. 除染作業の様子
(「中学校科学 3」H27 年 学校図書より)

次に放射線に関する記載について、学習指導要領解説に示されている記載事項は放射線の性質、利用、自然界での存在の 3 点である。旧版、新版ともに全社がこれを満たしているが、その取扱いの内容については出版社や旧版、新版の間で差がある。

まず放射線の性質について、旧版では透過力について記述があるのみで、放射線の電離作用や放射線が目に見えないことについては取扱っていない出版社が見られる。対して新版では放射線の性質として透過力があることや電離作用があることについて全社で述べているほか、放射線には電離作用によって物質を変質する作用があることや放射線が放出されるしくみについても触れている。

放射線の利用については、旧版、新版ともに写真を用いて掲載している出版社が多くみられる。放射線は医療、工業、農業などのさまざまな分野に利用されているとして、各社が CT 検査やがん治療、品質改良を取り上げている。

放射線の自然界での存在については、新版の啓林館と東京書籍が自然放射線が宇宙などのほかに、食物や温泉、人間自身といった身近な物からも放出されていることを記している。他(図 3)のようなグラフも掲載している。また旧版では 1/5 社、新版では 3/5 社が、自然放射線に関連して人工放射線についても触れている。

一方、学習指導要領解説を越えた内容についても記載がある。特に放射線の単位や放射線に関する言葉の定義、半減期、放射線発見の歴史については旧版と新版の間で取り扱っている出版社の数に差がある。

放射線の単位について取り扱っているのは旧版では 2/5 社であるのに対し、新版では全社で記載がある。また、旧版で取り扱われている単位はシーベルトのみであるが、新版ではシーベルトについては全社で記載され、グレイ(3/5 社)、ベクレル(4/5 社)についても記載がある。加えて図 4 のようにイラストでの記載も見られる。また、新版の教科書のうち 4/5 社が、ミリシーベルトやマイクロシーベルトについても触れている。しかし、シーベルトについて、臓器ごとに影響の大きさが異なることについて記述があるのは、新版においても 1/5



図 3. 自然放射線
(「中学校科学 3」H27 年 学校図書より)

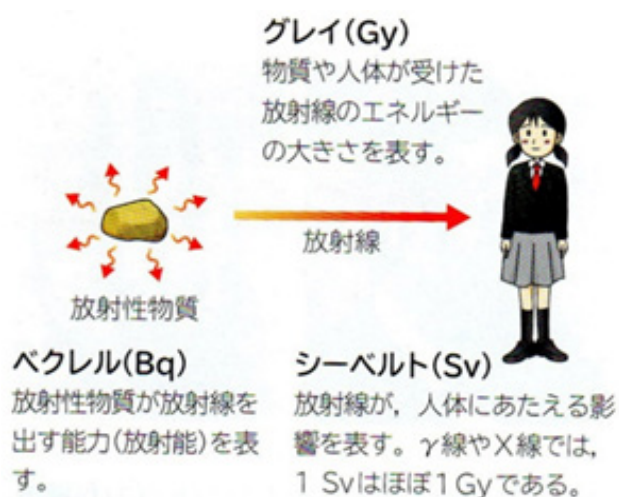


図 4. 放射線の単位
(「新版理科の世界」H27 年 大日本図書より)

社にとどまった。

次に言葉の定義について、新版では被曝や汚染など専門的な言葉の意味についても取り扱う出版社が増加している。特に注目したいのは放射線、放射能、放射性物質の定義の違いについて全社が述べていたことである。これらの言葉については、政府の公式会見においても「放射能漏れ」という言葉が使われるなど、混同して使用されている現状がある。この 3 つの言葉の違いについて、旧版では言及されていたのが 1/5 社であったのに対し、新版ではこれも全社が記載している。「未来へひろがるサイエンス」(H27 年 啓林館)では「なお、『放射能がもれた』という表現が用いられることもあるが正しく

放射能
(放射線を出す能力)

放射線

放射性物質

光

懐中電灯

光を出す能力

また半減期については、旧版で 1/5 社、新版では 4/5 社
 が取り扱っている。放射線発見の歴史についても、旧版で
 1/5 社、新版では 4/5 社が取り扱っている。

放射線を受けることを被ばくという。

放射線の量 (ミリシーベルト)

10,000

7,000~10,000
全身被ばく(1回)
死亡

1,000
全身被ばく(1回)
はき気、おう吐

500
全身被ばく(1回)
血液中のリンパ球の減少

6.9
胸部CTスキャン(1回)

1.0
法律が定めている
いっばんの人の
被ばくの限度(年間)
(自然放射線、医療をのぞく)

0.6
胃のX線集団検診(1回)

0.05
胸のX線集団検診(1回)

10
ブラジル
ガラバリでの自然放射線(年間)

2.4
(世界平均)
1人当たりの自然放射線(年間)

2.1
(日本平均)
1人当たりの自然放射線(年間)

0.2
東京~ニューヨーク
航空機旅行(往復)
(高度による放射線の増加)

参考文献

- 19

子どもの放射線被曝影響

量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 柿沼 志津子

はじめに

福島原発事故後、放射線被曝後の健康影響について多くの方が心配されている。子どもは、大人に比べてその影響が大きいと考えられているため、子どもの放射線被曝による健康影響は特に心配されている。放射線の健康影響を理解するためには、放射線について正しく理解することが大切である。ここでは、はじめに放射線の基礎知識について、続いて子どもの放射線被曝による影響について、ヒトの疫学データと動物の研究データを紹介する。

1. 放射線の基礎知識

1) 放射線は、私たちの回りにいつもある

放射線（放射性物質）は、今からおよそ 137 億年前に宇宙がビッグバンによって生まれた時に生成した。そのため、今でも常に宇宙からの放射線（宇宙線）が地球に降り注いでいる。また、地球は 46 億年ほど前に宇宙の塵が集まって誕生したため、大地には放射性物質（放射線を出す物質）が多く含まれている。人を含む全ての生物が放射性物質を含み、放射線が存在する中で生まれ進化してきた。したがって、私たちは、日常生活のなかで見たり感じたりできないが常に自然からの放射線を浴びている。

空気には、主にラドン（岩石から微量に放出される希ガス）という放射性物質が含まれている。また、大地で作られる食べ物には主にカリウム 40 という放射性物質が含まれている。カリウムは、植物の三大栄養素だが、人間の健康にも欠かせない栄養素で、体重の約 0.2% 含まれている。したがって、私たち日本人は、自然からの放射線（空気、大地、食べ物など）として年間約 2.1 ミリシーベルト（世界平均は 2.4 ミリシーベルト）を浴びている [1]。

2) 放射線の存在は 100 余年前に分かった

放射線ができたのは宇宙ができたときだが、私たち人類がそれに気がついてからまだ 100 余年しかたっていない。レントゲンやベクレルそしてキュリー夫妻らの研究の結果である。放射線の物を通り抜ける性質が、体の中を検査するために大切な技術になった。私たちは、レントゲン検査で体の中の骨の形が見えることを知っている。放射線が周りの組織に比べて骨は通りにくいのである。

＊	137 億年前
	ビッグバン 宇宙誕生
	放射性物質（放射線）生成
＊	46 億年前 星、地球の生成
＊	2 億 3000 万年～ 6500 万年前 恐竜誕生
＊	200 万年前 人間の先祖誕生
＊	1895 年 レントゲン X 線 放射線の発見
＊	1896 年 ベクレル キュリー夫妻 放射能
現在	自然の放射線が存在

図1. 放射線の生成と発見

2. 放射線の被曝影響

私たちの生活で心配される放射線被曝は、医療における放射線を使った検査や治療が主なものになる。その他には、福島原発事故後の環境中に残っている放射性物質からの被曝も心配されている。その被曝量は、低線量・低線量率の被曝が中心で、このようなレベルの放射線影響は被曝後長時間立ってから発生するがんである。

1) 人の疫学研究からわかったこと

人への放射線被曝影響については、広島・長崎の原爆被爆生存者についての長期のフォローアップによる疫学研究がある。被曝した線量とがん死亡のリスクの関係について図2に示した。（小笹ら [2]）。被曝線量が 100 mGy 以上で発がんリスクが有意に増加し、線量の増加に伴って発がんリスクが増加することがわかる。一方、100mGy 以下ではリスクの増減は見えなくなることでもわかった。

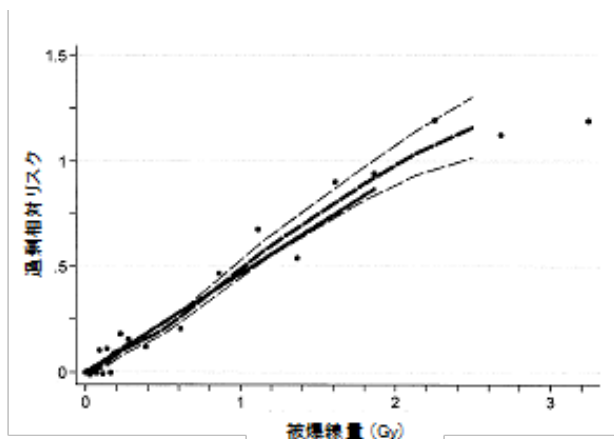


図2. 原爆被爆後のがんの発症リスク ([2] より改定)

被曝年齢と発がんリスクの関係は、被曝時年齢が若いほど同じ年齢に到達した時の発がんリスクが大きいことが示された。また、高い線量（1～4Gy）を被曝した集団では、被曝時年齢が若い方ほどリスクの値は大きく、子どもは大人より2～3倍大きいこと、また、女性は男性よりリスクが大きいことが分かった（Prestonら[3]）。しかし同じ解析の中で、低い線量（0.005～0.5Gy）を被曝した集団では、被曝時の年齢にかかわらずリスクの値は小さく、発がんリスクの有意な増加は認められなかった。これらの結果から、子どもの被曝影響は、高い線量の時のみ大人に比べて大きいことがわかる。

表1. 被曝時年齢、被曝線量、性別による発がんリスクの相対リスク^a

被曝時年齢 (歳)	男性		女性	
	0.005-0.5 ^b	1 - 4	0.005-0.5 ^b	1 - 4
0-9	0.96	3.8	1.12	4.46
10-19	1.14	2.07	1.01	2.91
20-29	0.91	1.37	1.15	2.30
30-39	1.00	1.31	1.14	1.84
40-49	0.99	1.20	1.05	1.56
50+	1.08	1.33	1.18	2.03

a, 0.005Gy以下のグループに対する相対リスク（1に近いと差が小さいことを意味する。）

b, 大腸の線量（Gy）

さらに、胎児期と子ども期の被曝影響を比較すると、子ども期の被曝による発がん過剰相対リスクは、大きく、過剰相対リスクは1.7、胎児期被曝は子ども期被曝に比べてリスクが小さく過剰相対リスクは0.42であることが示された。（過剰相対リスク：被曝しない場合のリスク1とした場合のリスクの増加分を示す）[3]

現在、日本人の死因の1位はがんで、がん死亡率は約25%である。その発がんの原因は、タバコや食事、ウイルス感染であることが報告されている。また、原爆被曝者の疫学調査の解析から、放射線以外の生活環境要因が発がんリスクに影響することが報告されている。例えば、タバコは放射線被曝による発がんリスクを増加させる。タバコの本数が増えるほどリスクが増加するが、タバコを1日1箱以上吸う人は、タバコによる発がんリスクが大きいため、放射線被曝によるリスクは逆に小さくなることも明らかになった[4]。また、緑黄色野菜や果物の摂取は、これらをあまり摂取しない人に比べて発がんリスクを低減させることがわかった[5,6]。このように、人の疫学データは、生活環境要因が影響しているため、放射線被曝だけの影響を見ることは難しいことがわかる。

2) 動物を用いた影響研究

人のデータは、上述のように複数の生活環境に影響を受けるのに対して、実験動物を用いた実験は、飼育環境、被曝線量、被曝時年齢、性別をコントロールできるため、放射線の影響を観察することができる。

私たちのグループでは、胎児期、子ども期の放射線被曝リスクを明らかにし、そのメカニズムを解明する必要があると考え、研究を行ってきた。ガンマ線被曝の研究からは、1) 寿命短縮に対する被曝時年齢の影響、2) 臓器により放射線発がん感受性時期のウィンドウが異なること、3) 子どもの細胞の放射線応答は大人とは異なることが分かってきたので紹介する。

寿命短縮に対する被曝時年齢依存性

B6C3F1 マウスの雄雌両方を用いて被曝時期年齢依存性を解析した。被曝時年齢は、胎児期、子ども期、成体期から7ポイントについて解析した。照射後、マウスを生後飼育して寿命を解析し、照射しない場合に比した寿命短縮率や生存率に基づくリスクのハザード比を算出した。この研究から分かってきたことは、以下の3点である。

- ①成体期被曝では、雌は雄に比べてリスクが高い。
- ②子ども期（1週齢）被曝は、他の週齢の被曝に比べて最もリスクが高く、雌雄差は認められない。
- ③胎児期後期の被曝は、子ども期の被曝に比べてリスクが小さい。

得られた結果は、上述の人の疫学データとおおよそ一致する結果となっている。特に、出生前後で放射線感受性が大きく変動することが明らかとなった。

臓器によって放射線発がん感受性時期のウインドウは異なる

上記の B6C3F1 雌雄のマウスを用いた寿命試験や、いくつかの発がんモデル動物を用いた研究から、発生するがんの種類によって、発がんしやすくなる被曝時年齢のウインドウがあることが明らかになってきた。その結果を図 3 にまとめた。

胎児期後期から新生児期に被曝すると脳腫瘍や腎がんが、新生児期の被曝では、T 細胞白血病や肝がん、ヒト家族性大腸腺腫症の発生率が高くなった。これに対して、急性骨髄性白血病は成体期の被曝で発がんしやすく、小児期の被曝では発がんしにくいことが分かった。このような発がん感受性時期のウインドウが狭いタイプのがんに対して、乳がんは、胎児期被曝でリスクは低く、幼若期（1 週齢）から成体期（7 週齢）の間の被曝でリスクの高いことが分かった [7]。肺がんは、明らかな被曝時年齢依存性は認められなかった [8]。興味深いことに、ラットの乳がんも肺がんも化学発がん物質は子ども期（2 ～ 3 週齢）の投与が最も発がんしやすく [7,8]、放射線被曝による発がん感受性のウインドウと発がん化学物質によるウインドウが異なることも分かった。

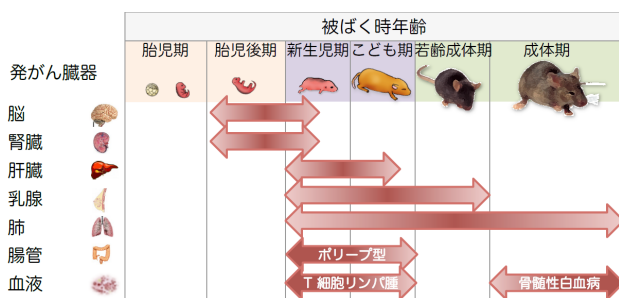


図 3. 発がん感受性時期のウインドウ

矢印の時期に被曝すると、それぞれの臓器の将来のがん発生リスクが高くなる。必ずしも子ども被曝でリスクが高くない。

子どもの細胞の放射線応答は大人とは異なる

子どもの放射線感受性が高い理由としては、細胞分裂が盛んなことがあげられるが、それ以外にも被曝時年齢依存性をもたらすメカニズムがあることが分かってきた。

小脳のがん（髄芽腫）を発症する特殊なマウス（Ptch1+/-マウス）で調べた。このマウスは、出生前後に放射線を被曝すると、がんの発生率が被曝しない場合より高くなるが、生後 10 日以降に被曝してもがんは増えなかった。この理由を調べてみると、Ptch1 遺伝子が出生前後の脳の発生段階で重要な役割があるため、この時期に Ptch1 遺伝子に異常があると髄芽腫が発生することがわかった。原因遺伝子が発生段階の特定時期に重要な場合には、発がん感受性の時期が限定される例である。

発達期と成体期における被曝後の放射線応答の違いを、生

体組織の中でも特に放射線感受性の高い腸管のアポトーシスを指標に比較した。その結果、成体期では、これまでに報告されているように傷ついた細胞を排除するシステムであるアポトーシスが高頻度にかかるが、発達期では、細胞増殖停止が起り、アポトーシスは起こらなかった。傷ついた細胞が除去されないことが発がんのリスクを高めている原因のひとつかもしれない。

子ども期の放射線発がん感受性について研究を進めることで、子ども期と成体期の放射線影響の違いが少しずつ明らかになってきた。今後は、そのメカニズムを明らかにすることで、放射線防護や被曝後の発がんリスクを低減できる方策を提示できるように研究を進めていきたいと思う。

最後に

私たちの生活空間において、空気や光は直接見ることでないが、その存在を意識することができる。放射線も同じように生活空間に存在するが、見ることも感じることもできない。放射線が私たちの周りに常にある、少ないながら被曝をしていることや、発がんの原因は生活習慣が大きく影響していることを、理解することが大切である。

参考文献

- [1] 原子力安全研究協会「生活環境放射線」
- [2] K. Ozasa, Y. Shimizu, A. Suyama, F. Kasagi, M. Soda, E.J. Grant, R. Sakata, H. Sugiyama, K. Kodama, Studies of the mortality of atomic bomb survivors, Report 14, 1950–2003: an overview of cancer and noncancer diseases, Radiat Res, 2012 ; 177 : 229–243.
- [3] D.L. Preston, H. Cullings, A. Suyama, S. Funamoto, N. Nishi, M. Soda, K. Mabuchi, K. Kodama, F. Kasagi, R.E. Shore, Solid cancer incidence in atomic bomb survivors exposed in utero or as young children, J Natl Cancer Inst, 2008 ; 100 : 428–436.
- [4] K. Furukawa, D.L. Preston, S. Lonn, S. Funamoto, S. Yonehara, T. Matsuo, H. Egawa, S. Tokuoka, K. Ozasa, F. Kasagi, K. Kodama, K. Mabuchi, Radiation and smoking effects on lung cancer incidence among atomic bomb survivors, Radiat Res, 2010 ; 174 : 72–82.
- [5] J. Nagano, S. Kono, D.L. Preston, H. Moriwaki, G.B. Sharp, K. Koyama, K. Mabuchi, Bladder-cancer incidence in relation to vegetable and fruit consumption: a prospective study of atomic-bomb survivors, Int J Cancer, 2000 ; 86 : 132–138.
- [6] C. Sauvaget, J. Nagano, M. Hayashi, E. Spencer, Y. Shimizu, N. Allen, Vegetables and fruit intake and cancer

mortality in the Hiroshima/Nagasaki Life Span Study, *Br J Cancer*, 2003 ; 88 : 689–694.

[7] T. Imaoka, M. Nishimura, K. Daino, T. Kokubo, K. Doi, D. Iizuka, Y. Nishimura, T. Okutani, M. Takabatake, S. Kakinuma, Y. Shimada, Influence of Age on the Relative Biological Effectiveness of Carbon Ion Radiation for Induction of Rat Mammary Carcinoma, *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2013 ; 85 : 1134–40.

[8] Y. Yamada, K.I. Iwata, B.J. Blyth, K. Doi, T. Morioka, K. Daino, M. Nishimura, S. Kakinuma, Y. Shimada, Effect of Age at Exposure on the Incidence of Lung and Mammary Cancer after Thoracic X-Ray Irradiation in Wistar Rats, *Radiat Res*, 2017 ; 187 : 210–220.

[9] K. Iwata, Y. Yamada, A. Nakata, Y. Oghiso, S. Tani, K. Doi, T. Morioka, B.J. Blyth, M. Nishimura, S. Kakinuma, Y. Shimada, Co-operative effects of thoracic X-ray irradiation and N-nitrosobis(2-hydroxypropyl) amine administration on lung tumorigenesis in neonatal, juvenile and adult Wistar rats, *Toxicol Appl Pharmacol*, 2013 ; 267 : 266–275.

チェルノブイリ原発事故と小児の甲状腺がん

東京逓信病院病理診断科 田村 浩一

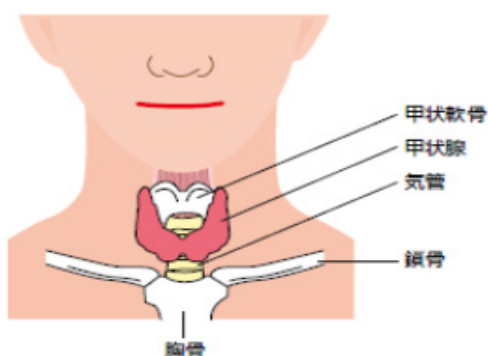
1986年4月26日、旧ソ連邦（現ウクライナ）のチェルノブイリ原子力発電所4号炉が炉心融解（メルトダウン）のちに爆発炎上し、多量の放射性化合物が周辺地域に飛び散った。4～5年後よりウクライナのほか、風下であったベラルーシなどの汚染地域で小児の甲状腺がんが報告されるようになり、その後も増加し続けることになった。この地域の甲状腺検診や治療のために、日本からも長期にわたり救援の手が差し伸べられている〔1〕。また、このようなチェルノブイリの経験に基づいて、福島原発事故の後、福島県は事故当時おおむね18歳以下だった住人全員を対象に、甲状腺の超音波検診を続けているのである。

ここではまず、なぜ「小児」が対象になっているのか、なぜ他の臓器ではなく「甲状腺」が問題なのかを中心に、20年以上かけてチェルノブイリの原発事故で明らかにされた放射線と甲状腺がんの発生の関係、日本からの援助の様子を含めた甲状腺の検診および甲状腺がんの診断などについて解説する。

1. 小児と甲状腺

1. 甲状腺の働き

甲状腺は頸部にある蝶のような形の臓器で、甲状腺ホルモンを分泌している。甲状腺ホルモンの主な働きは、新陳代謝の促進である。糖、蛋白、脂質を代謝して組織をつくり、エネルギーを生み、交感神経の活動を活発にする。小児では、中枢神経系の組織の形成にも重要な役割を果たすとともに、身体の成長や発達を促進させる働きをする。したがって小児では成長のために甲状腺ホルモンは欠かせず、特に成長が著しい乳幼児期には多くの甲状腺ホルモンを必要とする。



2. 甲状腺ホルモンはヨウ素（ヨード）を材料としてつくられる

甲状腺ホルモンの主な原料はヨウ素である。ヨウ素は身体の中で作ることのできないので、ヨウ素を含む飲食物から吸収しなければならない。ヨウ素イオンは胃と腸で完全に吸収され、その他の形態のヨウ素は消化管で還元されて吸収される。吸収されたヨウ素のほとんどが甲状腺に取り込まれ、甲状腺ホルモンの構成要素として使用されるのである。成長のために毎日たくさんのホルモンを作りつづける小児では、当然のことながら、材料のヨウ素を多く摂取して、甲状腺内に取り込む必要がある。

ヨウ素は海水に多く存在するため、海藻類や魚貝類に多く含まれている。従って日本などの海産物を摂取することが多い地域では、ヨウ素が不足する状況は起こりにくい。山岳地帯などで海産物の摂取が少ない地域では、子供を含めて人々の身体にはヨウ素が不足している状態と考えられる。なお、摂取して余ったヨウ素の大部分は尿中へ、一部は糞便中に排泄される。

3. 原発事故で発生するI-131というヨウ素が問題

原発事故では原子炉からI-131という放射性ヨウ素が大量に放出される。残念ながら人の身体は放射性ヨウ素を普通のヨウ素と区別することはできない。したがって、この放射性ヨウ素もヨウ素として身体に取り込まれ、甲状腺ホルモンをつくる材料として、甲状腺に集められることになる。

すなわち原発事故によりまき散らされる放射性物質から直接被曝する「外部被曝」ではなく、身体に取り込まれたI-131が甲状腺に集積し、そこで放射線をだして甲状腺組織に障害を与えるという「内部被曝」が起こることが発がんにつながるのである。

4. I-131による内部被曝

内部被曝による放射線障害と聞くと、取り込まれた放射性物質がずっと放射線を出し続け、これによってがんが発生してくると思うかも知れない。しかしI-131の半減期はたった8日であり、体内に取り込まれたI-131が体外に排出されて半分になるまでの生物学的半減期でも約10日～80日と言われている。つまり身体に取り込まれたI-131が放射線障害を起

こしている時間は極めて短いと言ってもよい。これは逆に、事故後の時間が経過すると、内部被爆を受けた人を調べても I-131 はほとんど検出されなくなることも意味している。

ちなみに I-131 というヨウ素は、甲状腺機能亢進症（バセドウ病）や甲状腺がんに対する治療にも用いられている。使われるのは事故による内部被曝よりもはるかに高線量であり、細胞の遺伝子が傷つくのではなく細胞自身が死んでしまう。そのような治療でも、ガイドラインに記載されているのは 1 週間程度周囲の人との距離をあける（小児や妊婦との密接な接触は 3 週間程度さける）という程度であり、いかに I-131 の影響が短時間であるかがわかる。

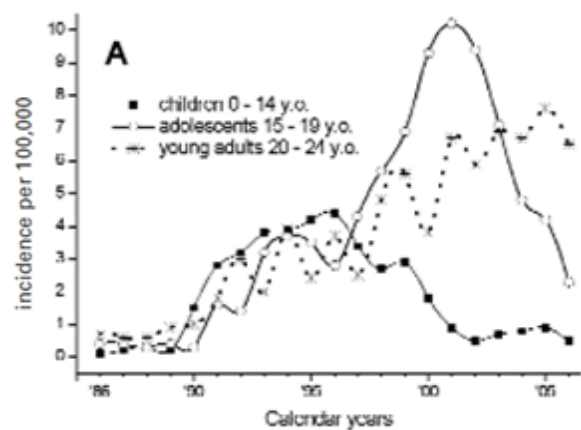
5. 発がんと身体の防御機構

人の身体では遺伝子の突然変異により、正常でも毎日多くのがん細胞が誕生している。しかし身体には発生した異常を修復するしくみや、生まれたがん細胞をやっつける機序があって、がんは成長しない。放射線障害により、DNA が損傷されても、ほとんどは修復機構が働いて修復される。まれに修復できずにがん細胞が生まれても、自爆スイッチを入れてアポトーシスに陥らせ、排除するしくみが働く。結局、きわめてわずかながん細胞が生き残り、細胞分裂を繰り返してがんとなるのである〔2〕。

発がんのしくみを考えると、半減期が短い I-131 によって本当にがんが発生するのかと疑いたくなる。実際にチェルノブイリ原発事故後も、1991 年に国際原子力機関（IAEA）は国際チェルノブイリプロジェクトの報告会〔3〕で「汚染地域住民の間にチェルノブイリ事故による放射線影響は認められない。汚染対策はもっと甘くてもよいが、社会状況を考えると現状でやむをえないであろう」という、振り返ってみればとんでもない結論を公表しているのである。ちなみに、最も問題なのは放射線被曝による障害ではなく、「放射線恐怖症」による精神的ストレスであるとしている。

II. チェルノブイリの経験

次のグラフはベラルーシにおける甲状腺がんの患者数である〔4〕。年齢別のグラフになっているが、この年齢は甲状腺がんを発症した時の年齢である。この図を見れば一目瞭然といえるのだが、チェルノブイリ原発事故が甲状腺がんを増加させるというコンセンサスが得られるまでには、実に 20 年もの時間がかかっている。



1. 甲状腺がん増加の報告と、それに対する反論

1992 年に、ベラルーシでの小児甲状腺がんの急増を報告する論文が、科学雑誌ネイチャーに発表された〔5〕。これに対して、先の報告をした IAEA のメンバーからはさまざまな疑問が投げかけられた。主な項目は以下のとおりである。

- ①甲状腺がんの診断は確かなのか
- ②それまで行われていなかった小児の甲状腺検診を行ったことにより、今まで見つかっていなかった甲状腺がんがみついているだけではないのか（放射線の影響ではなく、もともと存在した無症状の甲状腺がんが、非常に多くの人々に対する検診の実施と診断技術の向上によってみついているだけではないか）
- ③ベラルーシには多くて、他の被爆地域のウクライナ、ロシアでは増加の報告がないのはなぜか（甲状腺の被爆量とがん発生率の相関が示されていない）
- ④発生数だけでは議論できない、母集団が固定された疫学的研究が必要である
- ⑤被爆の影響と考えるには潜伏期が短すぎるのではないかと（通常、がん発生までには 10 年程度かかるとされていた）
- ⑥短寿命な I-131 が原因の甲状腺がんが、なぜ 5 年も経ってから増加し始めるのか

この内、①の甲状腺がんの診断については次項で述べる。

②で指摘された「検診実施によるみかけ上の増加」ではなかったことは、先のグラフからも明らかである。0～14 歳の甲状腺がん発生が事故の約 10 年後にピークを迎え、その後減少しているのは、被爆時に 0～14 歳であった者が 15 年後には皆 15 歳以上となり、それ以降にがんを発症した場合には 15 歳以上の群に入っているからである。したがって 15～19 歳での発がんは事故後 16 年くらいでピークを迎え、20 歳以上の成人での発症はそれ以降も増え続けている。放射線障害に関係なくたまたま検診で見つかることが増えた甲状腺がんであれば、このようなカーブを描くはずがない。しかしもとも甲状腺がんは症状がほとんどないこともあり、小児の甲状腺がんの増加がみられ始めた当初は、②は当然考えなければならぬ問題点だったのである。

2. ヨウ素不足を背景に、汚染されたミルクから放射性ヨウ素が摂取された

ベラルーシでは、 $I-131$ で汚染された牧草を食べた乳牛から採れるミルクを乳幼児が摂取することで、内部被爆を起こしたことが明らかになった〔6,7〕。牧草の中の $I-131$ が乳牛の身体でミルクの中に濃縮され、それを摂取した乳幼児の身体の中でさらに甲状腺へと集積したのである。半減期が短いとは言え、ミルクに含まれる $I-131$ を毎日継続的に摂取していたことも、遺伝子障害が繰り返されて発がんに関与した可能性があろう。同じ放射線の汚染地域でも、汚染されていない牛乳を供給した地域では小児の甲状腺がんの増加は見られなかった。これが被爆地域によって甲状腺がん発症率に差を生じた理由の1つと考えられている。なお事故の20年後にようやく、被爆量と過剰発症率の間の比例関係（線量応答）を明確に示す論文が公表されるに至っている〔8〕。

また先に述べたように、ベラルーシは山岳地帯で海産物などからのヨウ素摂取量が少なく、住民はもともとヨウ素不足にあつたことも $I-131$ の取り込みが増えた要因の一つとして挙げられている。これは後に、原発事故の際に安定ヨウ素剤の服用によって放射性ヨウ素による被爆を予防するという対策に、役立てられることになった。

3. 小児甲状腺がんに見られた遺伝子異常

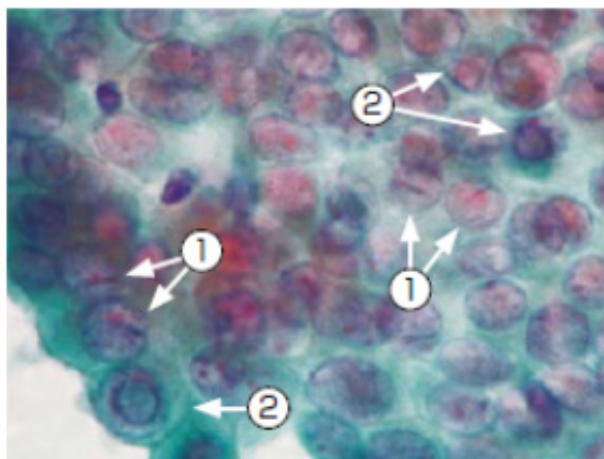
⑤の小児甲状腺がんがなぜ予想よりも短期間の間に発症したのか、⑥の半減期の短い $I-131$ がどのようにして甲状腺がんの発症に関与したのか、については、まだ不明な点が多い。しかしチェルノブイリの小児甲状腺がんの初期の症例では、乳頭癌でみられるとされている RET 遺伝子の異常の中で、通常とは異なった RET/PTC3 再配列という異常が高頻度に見つかり、放射線による発がんの機序が明らかにされつつある〔9〕。

III. 検診と診断

1. 甲状腺がんの種類と病理学的な特徴

甲状腺がんには、乳頭癌、濾胞癌、髄様癌、未分化癌という種類があるが、その約9割を乳頭癌が占めている。次に多いのが濾胞癌で、他のものは稀である。チェルノブイリの原発事故後に見られた甲状腺がんもその大部分が乳頭癌であった。

乳頭癌は、細胞の核がスリガラスのように明るく見え、核にコーヒー豆のような溝が見えることが多く、核の中に細胞質と同色に見える封入体が見られるものがあるという特徴をもつ。したがって顕微鏡で細胞をみただけで癌と診断できるのである〔10〕。



A. 甲状腺乳頭癌の穿刺吸引細胞診

核のクロマチンが淡くてスリガラス状であり、核溝(①)や、核内細胞質封入体(②)が認められる。このような特徴から細胞診所見のみで乳頭癌と診断できる。(Papanicolaou染色)

これに対して濾胞癌は、もともとの甲状腺の構造として濾胞という袋をつくる性格をもち、細胞を見ただけでは診断できない。手術で摘出した後に組織を詳しく調べ、被膜(カプセル)を破って増殖していたり、血管やリンパ管を食い破っていたりする所見がみつければ癌、見つからなければ良性の腺腫と診断する。

2. 行われた甲状腺がんの検診



(日本の援助と指導で行われた超音波検診)

人間ドックなどの検診ではまず甲状腺の触診から行うが、原発事故後の検診ではその次のステップである超音波検査が行われた。これで甲状腺内にできた数mm程度の微小な結節もみつけることができる。結節が見つかったら、そこに針を刺して細胞を吸い出し、顕微鏡で観察して診断する。これが穿刺吸引細胞診である。先に述べたように甲状腺乳頭癌は細胞診で癌と確定診断できる。



(現地で穿刺吸引細胞診を指導する日本医科大学内分泌外科の清水一雄教授)

細胞診の判定には知識と熟練が必要であり、ベラルーシには細胞検査士の資格をもつ技師も毎年同行して指導を行ってきた。



(検診の最後に現地の医師と細胞所見を確認する日本医科大学付属病院病理部の渡曾泰彦技師長)

3. 予後

甲状腺乳頭がんは比較的予後のよいがんの一つである。周囲のリンパ節に転移があっても、手術で一緒に取ってしまえば完治する。事故から20年後の報告では、発見された4000名の甲状腺がん患者のうち、死亡したのは15名だった。これには初期の頃の、肺に転移がみつかった小児例が含まれ、放射線障害による特殊性も示唆されている。

以上、原発事故と甲状腺がんについて簡単に解説した。発がんまでの長期の潜伏期を考えると原発事故の影響が終焉したわけではなく、今後も調査と研究が必要である。

参考文献

[1] チェルノブイリ医療支援ネットワーク

<http://www.cher9.org/>

【渡曾泰彦 ベラルーシ共和国における甲状腺がん検診のあゆみ 10年を振り返る 2016.11.16. 講演資料】

[2] 田村浩一 「よくわかる病理学の基本としくみ」

秀和システム 2011

[3] IAEA 国際チェルノブイリ計画・国際諮問委員会報告 1991

[4] Demidchik YE, et al. Childhood thyroid cancer in Belarus, Russia, and Ukraine after Chernobyl and at present. *Arch Bras Endocrinol Metab* 2007 ; 51 : 748-762.

[5] Kazakov VS, et al. Thyroid cancer after Chernobyl. *Nature* 1992 ; 359 : 21.

[6] 大津留晶 「甲状腺がんと放射線障害」『日内会誌』 2015 ; 104 : 593-599.

[7] 児玉龍彦 「チェルノブイリ原発事故から甲状腺癌の発症を学ぶーエビデンス探索 20年の歴史を辿る」『医学のあゆみ』 2009 ; 231 : 306-310.

[8] Cardis E, et al. Risk of thyroid cancer after exposure to ¹³¹I in childhood *JNCI* 2005 ; 97 : 724-732.

[9] 濱谷清裕 「甲状腺がん：放射線関連甲状腺乳頭がん、特に原爆放射線被曝に関連した分子的特徴」 *J Thyroid disorders & Therapy* 2015 ; 4 : 1-7.

[10] 田村浩一 「よくわかる病理診断学の基本としくみ」 秀和システム 2016

原爆被爆者健康調査（長崎）

長崎大学 原爆後障害医療研究所 三根真理子

被爆者とは

ここでいう原爆被爆者とは被爆者健康手帳を所持している人である。表1に被爆者の分類を示す。

表1. 被爆者の分類

直接被爆	長崎市・指定周辺地域（北東西約6km以内）で被爆した者
入市	8月9日～23日の間に指定区域（約2km以内）に立ち入った者
救護	死体処理および救護に当たった者
胎児	上記3区分の被爆者の胎児

また、被爆者健康調査は長崎市に限定して紹介する。

本格的調査まで

被爆者への援護開始はかなり遅く、健康管理のための被爆者健康手帳の交付開始は原爆の後、12年が経過した1957年であった。被爆者の相談事業は1967年から開始された。1972年からは長崎市原爆被爆対策課に相談室が開設された。主な事業は保健指導、一人暮らし被爆者の家庭訪問、健康教育であった。原爆により一瞬に「からだ・こころ・くらし」に被害を受けた被爆者は、さらに高齢化・独居化という厳しい状況に置かれた。このような被爆者を支えるために保健相談事業が推進された。この間、テレフォンサービス、健康教室、生きがい健康教室、料理教室などを展開してきた。

原子爆弾被爆者健康調査（1997年）

長崎市は1997年に実情に即した総合的、継続的な相談事業を行い、被爆者の健康維持、増進、生きがいづくりに役立てていくための基礎データを得ることを目的とした調査を実施した。被爆者の健康状態、日常生活の自立度、経済・住居などの生活状態、保健・福祉サービスに対するニーズ等被爆者の実態を把握するためのものである。

長崎市内の全被爆者56,969人を対象に郵送自記式の健康調査を行い、92.7%という高い回収率であった。さらに、そのうちの5,000人を無作為抽出して訪問面接調査を行い、3,831人の協力が得られた。GHQ30項目版（General

Health Questionnaire30、注1を参照）を用いて心の健康調査を実施した。また、被爆体験の聞き取りを行った。この聞き取りのうち、同意が得られた1,200人の被爆体験を録音した。印刷したものは2003年から国立長崎原爆死没者追悼平和祈念館で公開している。

回答者の年齢分布を図1に示す。65～69歳が最も多く、65歳以上の高齢者は57.7%となっていた。

被爆距離別では2キロメートル未満が10.2%、2キロメートル以上が70.4%、入市などが19.4%となっており、2キロメートル以上の被爆者が圧倒的多数であった。

＜注1＞ GHQ-30とは、軽度の精神的問題の有無をスクリーニングする手段として世界的に使用されている精神的健康調査票である。日本においては精神的問題を有する可能性が高いと判別されるのは、30点満点中、8点以上の高得点であることが確認されている。

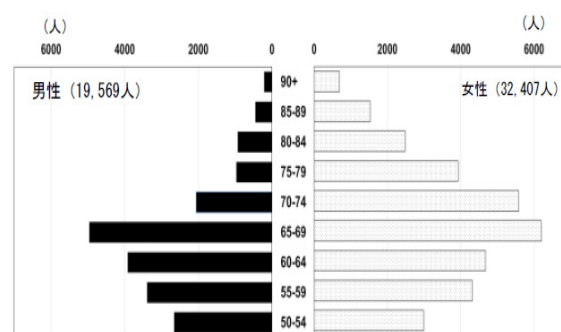


図1. 性・年齢別構成（1997年調査）

被爆者の平均家族数は2.75人で、二人暮らしが38%と最も多かった。一人暮らしは14.3%で75歳以上では21.9%と5人に1人が一人暮らしだった。

健康状態が良くないのは、48.7%と半数で男女差はないが高齢になるほど多くなっていた。被爆者は一人平均2.7個の病気を抱えており、多いのは「関節痛・腰痛」「高血圧」「目の病気」の順であった。

訪問面接調査、被爆体験の聞き取り

調査時、被爆後53年（1998年）経過していたにもかかわらず、被爆が健康状態に影響を及ぼしているとの思いから、

発病の不安や恐怖感を抱えながら生活しており、被爆体験の精神的・身体的影響が大きいことが伺えた。

被爆体験を客観的に示した項目は次の4項目である。

1. 悲惨な光景・今でも思い出す
あっちもこっちも燃えて、人間でも何でもゴロゴロして…
死人を見て頭から消えなかった。そのシーンは今でもリアルに思い出す。
2. 家族に話したことは無い
今まで言うたことはなかったとよ。
誰にも話すごとなかと…うちの子供は知らんですたい。
3. 自責の念
妹は修道院にいたけど、同僚が次々に死亡して、
妹がその人たち全員を看取って、…何で自分は
亡くならなかったのか、一緒に死にたかった…
4. 体調が悪い時、原爆との関係を考える
そうですね、やっぱり、ずっと貧血がありますから、
それかな、と考えたりしますけども。

被爆の心への影響に関する調査は初期のころ行われたのみで数も少ない。被爆 50 周年（1995 年）を機に被爆者のこころの調査が開始された。被爆者証言をもとに要素（単語）の出現頻度と性、年齢、被爆距離との関連の有無を検討した。被爆時年齢別の出現頻度を表 2 に示す。

表 2. 要素の被爆時年齢別出現頻度

要素	被爆時年齢（歳）			
	6-9 (108)	10-19 (482)	20-29 (255)	30- (83)
母親	81.5	70.6	60.7	45.2
光	41.7	34.6	24.5	20.2
風	39.8	43.5	40.9	23.8
怖い	33.3	20.3	17.5	15.5
三菱	19.4	32.5	30.7	28.6
兵器	11.1	26.3	17.5	10.7
骨	9.3	20.3	23.7	16.7
焼けて	6.5	14.7	19.1	11.9
大橋	3.7	20.5	12.8	7.1

「母親」の出現頻度は 9 歳未満の者で 81.5%、10 代で 70.6%、20 代で 60.7%、30 代で 45.2%と、被爆時年齢が若いほど高い傾向であった。「光」、「怖い」も同様の傾向であった。「三菱」、「兵器」、「大橋」は当時 10 代、20 代であった被爆者の証言に多く出現した。表 3 に被爆距離別出現頻度を示す。近距離被爆者（爆心から 2km 未満で被爆）は 142 人、遠距離被爆者（爆心から 2km 以上で被爆）は 786 人であった。「風」は近距離被爆者の証言の

51.4%に、遠距離被爆者の証言の 71.6%に出現しており、遠距離被爆者に多い傾向であった。「ガラス」も同様の傾向であった。一方、「母親」は近距離被爆者の証言の 83.8%に、遠距離被爆者の証言の 63.8%に出現しており、近距離被爆者に多い傾向であった。

表 3. 要素の被爆距離別出現頻度

要素	近距離 (142)	遠距離 (786)
風	51.4	71.6
ガラス	28.9	40.5
母親	83.8	63.8
傷	67.6	39.0
火傷	53.5	26.7
水	48.6	40.3
死んだ	45.8	28.1
血	43.0	29.5
三菱	43.0	27.8
兵器	42.3	16.8
燃えて	30.3	23.2
骨	28.2	18.1
焼けて	27.5	12.4

証言に現れる要素を KJ 法によりカテゴリー分類した結果を図 2 に示す。＜カテゴリー：原爆＞は、「新型爆弾」、「ピカドン」、「B29」、「落下傘」を含むもの、＜カテゴリー：家屋の被害＞は「火事」、「ガラス」、「落ちた」、「燃えて」を含むもの、＜カテゴリー：精神的なもの＞は「怖い」、「地獄」、「ショック」、「悲惨」を含むものとした。このようにして 13 のカテゴリーに分類できた。

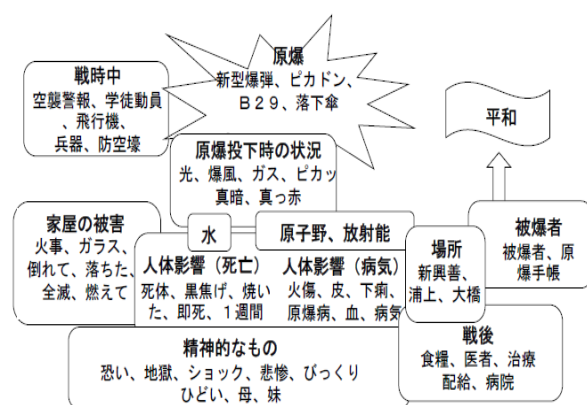


図 2. 証言要素のカテゴリー分類

被爆者の証言をもとに、被爆者のこころの傷について、その全体像の把握の可能性について検討した。予備的分析から要素の出現頻度は性、被爆時年齢、被爆距離により異なることがわかった。女性では「怖い」、「母親」といった精神

的なものを現す要素が証言の中に多く出現していた。近距離被爆者では「火傷」、「死んだ」など身体的影響を現す要素が多く出現していた。小児期に被爆した者では「怖い」、「母親」といった精神的なものを現す要素が多く出現し、女性と似た特徴を示した。このことは要素を分類し、証言の類型化が行える可能性を示唆している。さらに証言の類型化により、こころの全体像がみえてくることが期待できる。

原子爆弾被爆者健康調査（2003 年）

長崎市は 2003 年 1 月末現在で長崎市に在住していた被爆者 49,867 人（平均年齢 71.2 歳）を対象に郵送調査を実施した。

調査内容は一般健康調査と生活実態調査（身体的健康、生活状況、居住環境、将来の生活設計、必要な公的支援）、精神的健康調査などで 35,035 人（回収率 72.2%）から回答を得た。回答者の性・年齢分布を図3に示す。70～74 歳が最も多く、65 歳以上の高齢者は 75.3%となっていた。

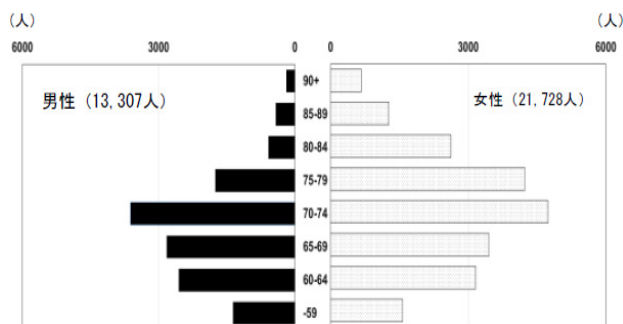


図3. 性・年齢別構成（2003 年調査）

被爆者は高齢化し、一人暮らしが増えている中、自宅で生活している人も多い（90%）。約半数の被爆者は「健康状態が良くない」と感じており、高齢になるほど増えている。現在かかっている病気は、「関節痛・腰痛」「高血圧」「目の病気」が多かった。また、一人が抱えている病気は一人平均 3.8 個と 1997 年に比べて増えていた。4人に1人の被爆者が介助を受けており、介助内容は家事援助（買い物、掃除）が多い。健康診断を受けている人は 84.4%と高率で、自分の健康に関心があり、健康管理のために受診している人が多い。被爆者の半数以上の人々がストレスを感じていた。約8割の被爆者が、家庭での役割・趣味や楽しみを持ち、困ったときに相談できる相手がある。「健康状態が悪い」「ストレスがある」人は、「人と会ったり、話したくない」と思っている反面「被爆者同士の集まりには参加したい」と希望している。一人暮らしは増加していた（1997 年 14.3% → 2003 年 16.6%）。

精神的健康に関する尺度は、原爆被爆に関連した PTSD 症状を評価する Impact of Event Scale-Revised (IES-R) (注

2参照) と調査時点の精神的健康度を評価する General Health Questionnaire-12 項目版 (GHQ-12) (注3参照) を使用した。

＜注2＞ ト라우マの「心的衝撃度」を測定する評価尺度。トラウマとなる出来事がもたらす「心的衝撃度」を客観的に測定する国際水準の評価尺度。この尺度を用いれば、調査時点に直面したトラウマだけではなく、過去に遭遇したトラウマの心的衝撃度も測定できる。

＜注3＞ GHQ の 12 項目版では、軽度の精神的問題を有する可能性が高いと判別されるのは 12 点満点中の4点以上であることが確認されている。

被爆から約 60 年が経過した 2003 年においても図4に示すように爆心地に近い場所で被爆した被爆者ほどトラウマ的な「心的衝撃度」のレベルは強度のまま残っていた。つまり、原爆被爆（トラウマ）への曝露度が強いほど心的衝撃度も強くなるという「量 - 反応関係」が他のトラウマに関する研究・調査と同様に確認された。爆心地からの距離区分は、2km 以内で被爆、2～3km で被爆、3km 以遠で被爆とした。図5に長崎市の被爆地域を示す。

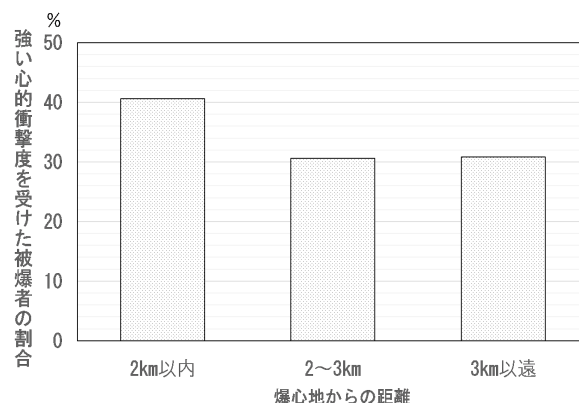


図4. 爆心地からの距離別にみた「心的衝撃度」が強い群の割合

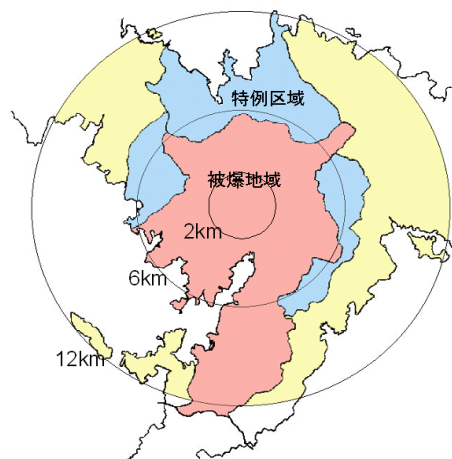


図5. 長崎市の被爆地域

まとめ

長崎市において 1997 年と 2003 年に被爆者の健康調査が実施された。被爆者の生活実態および精神的健康度が把握された。

これまで身体的影響に関する調査研究が多かったが、被爆 50 周年を機にこころの問題に焦点をあてた。1997 年の被爆体験聞き取り調査や 2003 年のトラウマ調査の結果、被爆距離とこころの健康度との関連があり、被爆体験は性、被爆時年齢、被爆距離により異なることがわかった。また、トラウマ(心的衝撃度)も被爆距離と強く関連していた。今後、被爆者の健康管理はもとより、こころの健康に関するケアが重要であると考えられる。

大学生の放射線に対する知識の現状

千葉大学教育学部養護教諭養成課程 山中 有美

学校現場では放射線教育が求められているが、未だいじめ問題などが生じていることから、放射線教育が十分でないことが伺える。その原因の一つに、教員の放射線知識が不十分であることが考えられる。学校現場で子どもたちに放射線について正しく理解させるにあたり、教員らの放射線についての理解が求められている。そこで学校現場において、放射線の生体影響を指導する任にある養護教諭と、科学的視点から放射線について指導する任のある理科教諭を目指す大学生に知識調査を実施した。また、医学的な側面から放射線や放射線について学ぶ機会のある医学部の学生や、健康スポーツ学科の学生の知識情報を紹介する。

1. 対象

- ・千葉大学教育学部養護教諭養成課程学生（以下、養学と表記）70名
（一年生36名、三年生34名）
- ・千葉大学教育学部 理科専修学生（以下、理学と表記）38名
- ・医学部学生（以下、医学と表記）175名
- ・健康スポーツ学科学生（以下、健学と表記）94名

2. 方法・および内容

調査紙による回答（正誤問題）。質問内容は長崎大学の松田尚樹の論文[1]から抜粋している（表1）。

3. 調査期間

2015年7月～12月

4. 放射線知識状況

設問ごとの正答率は以下の表の通りである（表2）。なお養学に関しては、学年別と全体平均とで分けている。養学1年と3年の結果に大差がないことから、高校以前の放射線教育における知識で回答していることがうかがえる。

表1. 放射線に対する正誤問題20問の内容

	質問	正解
1	単純撮影や頭部CTなどの放射線診断にはγ線が用いられる	×
2	マンモグラフィではエネルギーの低いX線が使用されている	○
3	X線とγ線の本体はいずれも電磁波である	○
4	β線の本体は電子である	○
5	X線照射室では、照射後短時間の間放射線が残存している	×
6	¹²⁵ Iによる密封小線源（シード）治療を受けた前立腺がん患者の病室では、室内中の放射線濃度が高まる可能性がある	×
7	核医学検査を受けた直後の患者からは、主としてγ線が放出されている	○
8	ポジトロンとは陽子のことである	×
9	放射線の生物影響は主としてDNA損傷に起因する	○
10	放射線によるDNA変異が体細胞に生じた場合が癌、生殖細胞に生じた場合が遺伝的影響となる	○
11	放射線の確率的影響とは、放射線による発癌と遺伝的影響のことである	○
12	放射線により固形癌の発生が増加することは、疫学的研究では証明されていない	×
13	放射線の遺伝的影響は、疫学的研究では証明されていない	○
14	放射線の健康被害の大きさはX線、γ線、中性子線などの放射線の種類によらず一定である	×
15	白内障は放射線の急性影響の一つである	×
16	全身CT程度の線量ではDNA損傷は生じない	×
17	腹部CT程度の線量では胎児の奇形発現の「しきい値」を超える	×
18	骨髄は皮膚よりも放射線感受性が強い	○
19	病棟撮影の際には、放射線防護上、医師及び看護師は可能な限り病室から退室することが好ましい	×
20	実効線量20mSv程度では、不妊あるいは胎児への影響が生じる恐れはない	○

表 2. 各設問の正答率（％）

問	養学 1	養学 3	養学	理学	医学	健学	平均
1	72.2	55.9	64.1	29.0	50.1	55.0	49.5
2	86.1	82.4	84.2	60.6	68.8	58.2	67.9
3	47.2	47.1	47.1	73.3	57.5	51.7	57.5
4	69.4	58.8	64.1	63.2	73.4	52.8	63.4
5	22.2	17.6	19.9	26.3	30.3	25.3	25.5
6	55.6	41.2	48.4	29.0	39.3	42.9	39.9
7	47.2	35.3	41.3	47.4	53.0	45.1	46.7
8	61.1	41.2	51.1	50.0	28.7	40.7	42.6
9	97.2	94.1	95.7	84.2	89.6	73.6	85.8
10	77.8	88.2	83.0	84.2	76.7	69.2	78.3
11	66.7	73.5	70.1	60.5	61.4	58.2	62.6
12	52.8	61.8	57.3	60.5	60.8	59.3	59.5
13	36.1	20.6	28.3	47.4	37.7	45.1	39.6
14	88.9	100.0	94.4	94.7	81.3	68.1	84.6
15	41.7	35.3	38.5	44.7	38.0	44.0	41.3
16	44.4	26.5	35.5	21.1	39.4	31.9	31.9
17	36.1	67.6	51.9	36.1	46.0	44.0	51.2
18	66.7	61.8	64.2	76.3	76.9	59.3	69.2
19	13.9	14.7	14.3	21.1	16.1	20.1	18.1
20	38.9	32.4	35.6	39.5	42.1	30.1	37.0
平均	56.1	52.8	54.5	48.8	53.3	48.8	51.3

マンモグラフィの設問（問 2）の養学の正答率は先行研究の正答率（7 割程度）を上回り 84.2%である（図 1）。調査対象の性別正答率を以下の表 3～6 に示す。養学の正答率の高さに性別は関与しないことがわかる。放射線の健康被害の設問（問 14）に関しては、メディアで多く取り上げられていた内容のため正答率が全体的に高い（図 2）。放射線に関する知識量は個人の興味関心や、メディアの影響が大きいことが明らかと思われる。

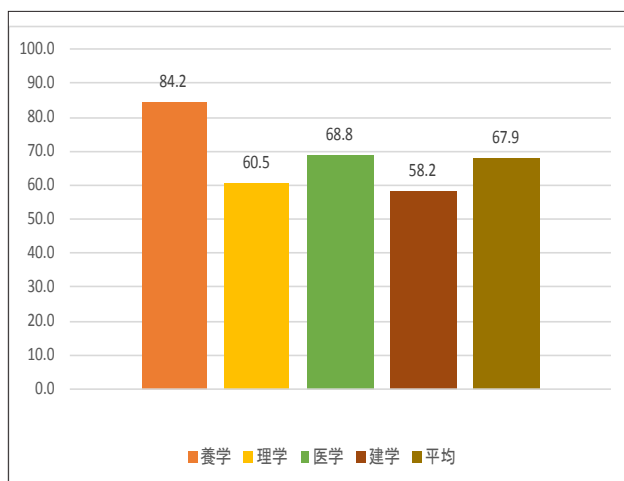


図 1. マンモグラフィに関する設問（問 2）の解答率

表 3. 養護教諭養成課程学生マンモグラフィの知識性別正答率

養学	女性	男性
人数	70	0
正答率 (%)	84.2	—

表 4. 理科専修学生マンモグラフィの知識性別正答率

理学	女性	男性
人数	12	26
正答率 (%)	36.4	70.4

表 5. 医学部学生マンモグラフィの知識性別正答率

医学	女性	男性
人数	56	112
正答率	64.11	72.09

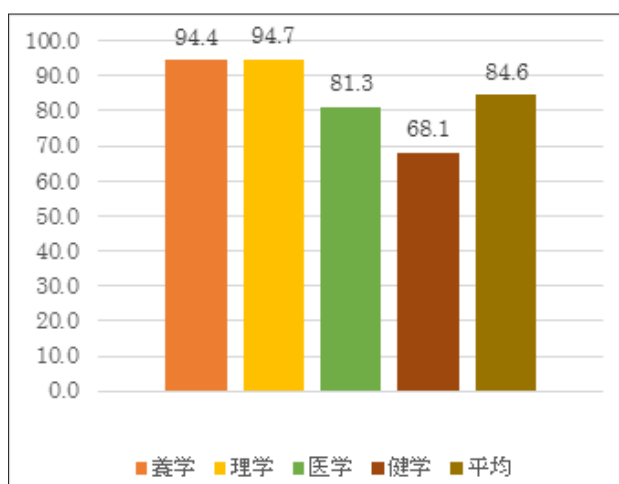


図 2. 放射線の健康被害に関する設問（問 14）の解答率

放射線の生物影響の設問の結果（図 3）からは、「放射線が DNA に影響を及ぼして生体影響を引き起こしている」ことの理解がされていることがわかった。

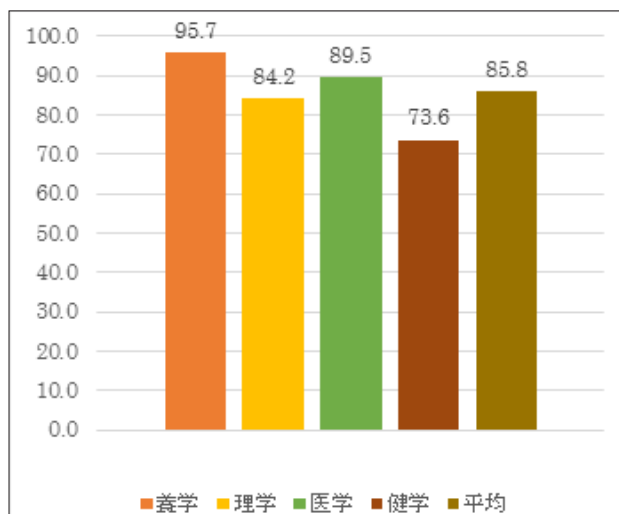


図 3. 放射線の生物影響に関する設問（問 9）の解答率

しかし放射線の確率的影響の設問の結果（図 4）をみると、完全に理解されているとは言えない。まだ放射線のについての学習が不十分であることがうかがえる。

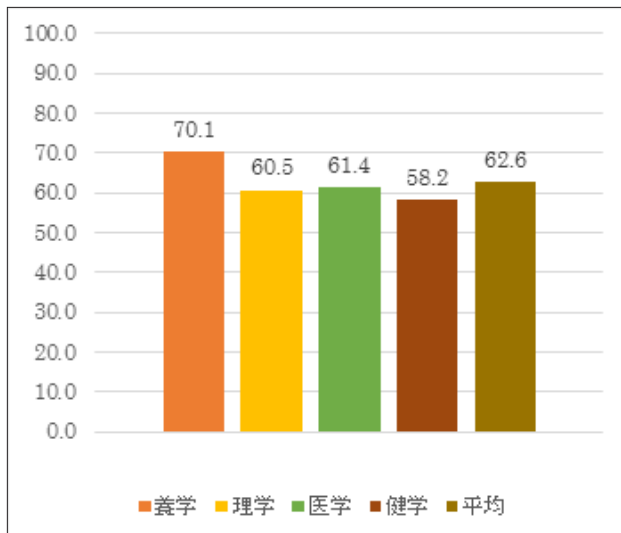


図 4. 放射線の確率的影響に関する設問（問 11）の解答率

放射線治療の設問の正答率は、全体として高くはなかった（図 5）。「放射線は人に伝染する」などの放射線への間違ったイメージがあることがわかる。X 線照射の設問の正答率は低かった（図 6）。「放射線は残る」というイメージが強いことがわかる。また、放射線防護の設問の結果（図 7）からも放射線への不安感、恐怖感を多くの人が持っていることが伺えた。

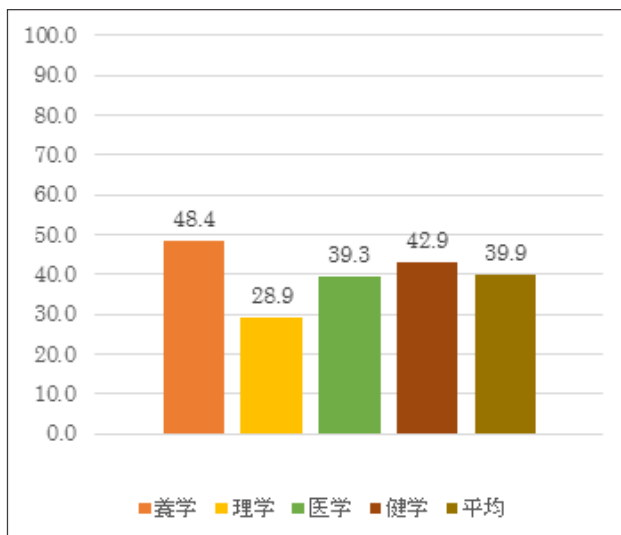


図 5. 放射線治療に関する設問（問 6）の解答率

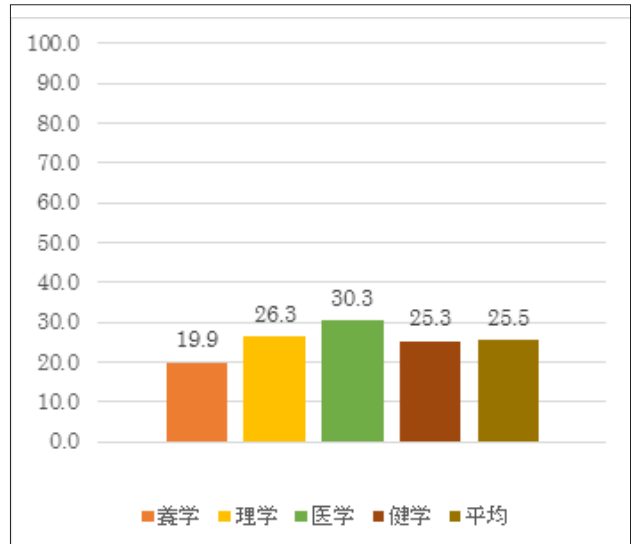


図 6. X 線照射に関する設問（問 5）の解答率

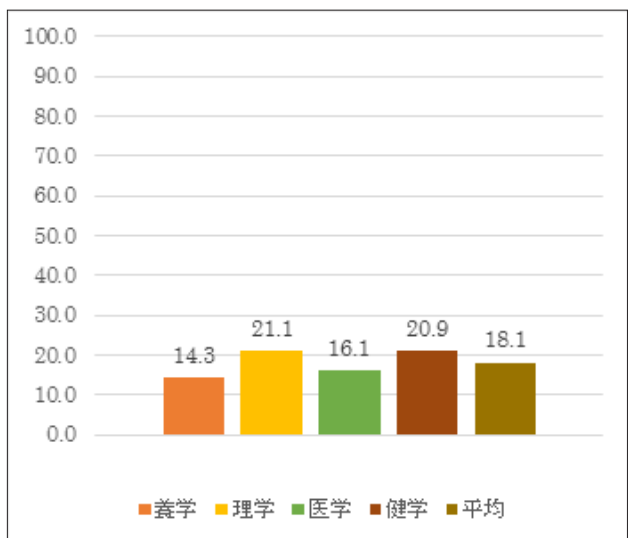


図 7. 放射線防護に関する設問（問 19）の解答率

一方で、CT 検査の設問の結果（図 8）からは放射線への過剰な恐怖感は見られなかった。医療現場で取り扱う放射線など、放射線の活用についての理解がされていないことが推察される。またリスク教育が求められる結果となった。

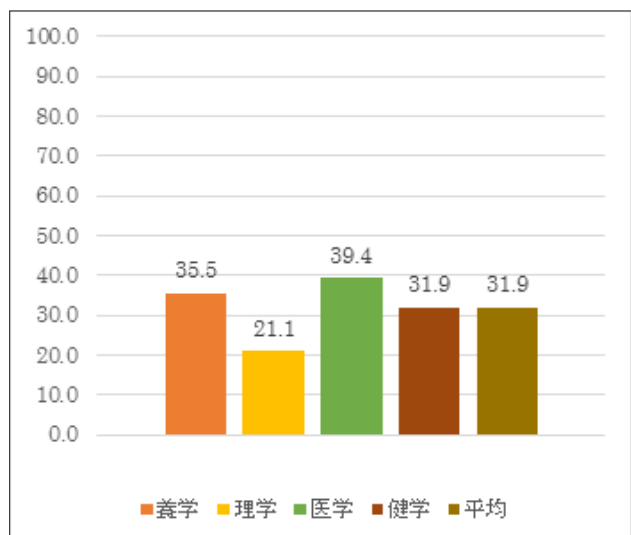


図 8. CT 検査に関する設問（問 16）の解答率

5. 放射線教育の課題

放射線教育には学校教育が大きく関連している。教科書の改訂前後で知識量に差が生じるかどうかを見ていく。養学の三年生は教科書改訂前、一年生は教科書改訂後の教育を受けている。結果をグラフで示す（図9）。設問によって、多少差はあるもののどちらかの正答率が高い、低いという結果は得られなかった。しかし、教科書改定後の初年度の学生に調査をしたため、教科書改訂の効果が明確に示された結果とは言い難い。今後の放射線教育に期待したい。

学校教育で放射線教育を行う場合、副読本[2]や教科書などの充実だけに頼らずに現場の教員らの指導方法の工夫も必要である。しかし、将来教育する側になる理学、養学の放射線知識量が不足していることが明らかである。指導する側・教員らの放射線学習が必要であると同時に、放射線生体リスク学習プログラムの開発も重要である[3]。

参考文献

- [1] 松田尚樹、三浦美和、山内基弘、奥野浩二「臨床研修医への放射線教育から見てきたもの—放射線の理解とリスク認知度の解析—」『RADIOISOTOPES』2014；63：435-442.
- [2] 放射線等に関する副読本掲載データ（文部科学省ホームページより）http://www.mext.go.jp/b_menu/shuppan/sonota/attach/1313004.htm
- [3] 川崎靖奈、前田彩香、杉田克生、野村純、加藤徹也、高橋博代「放射線知識調査を基にした放射線生体リスク学習プログラムの開発」『千葉大学教育学部研究紀要』2017；65：375-382.

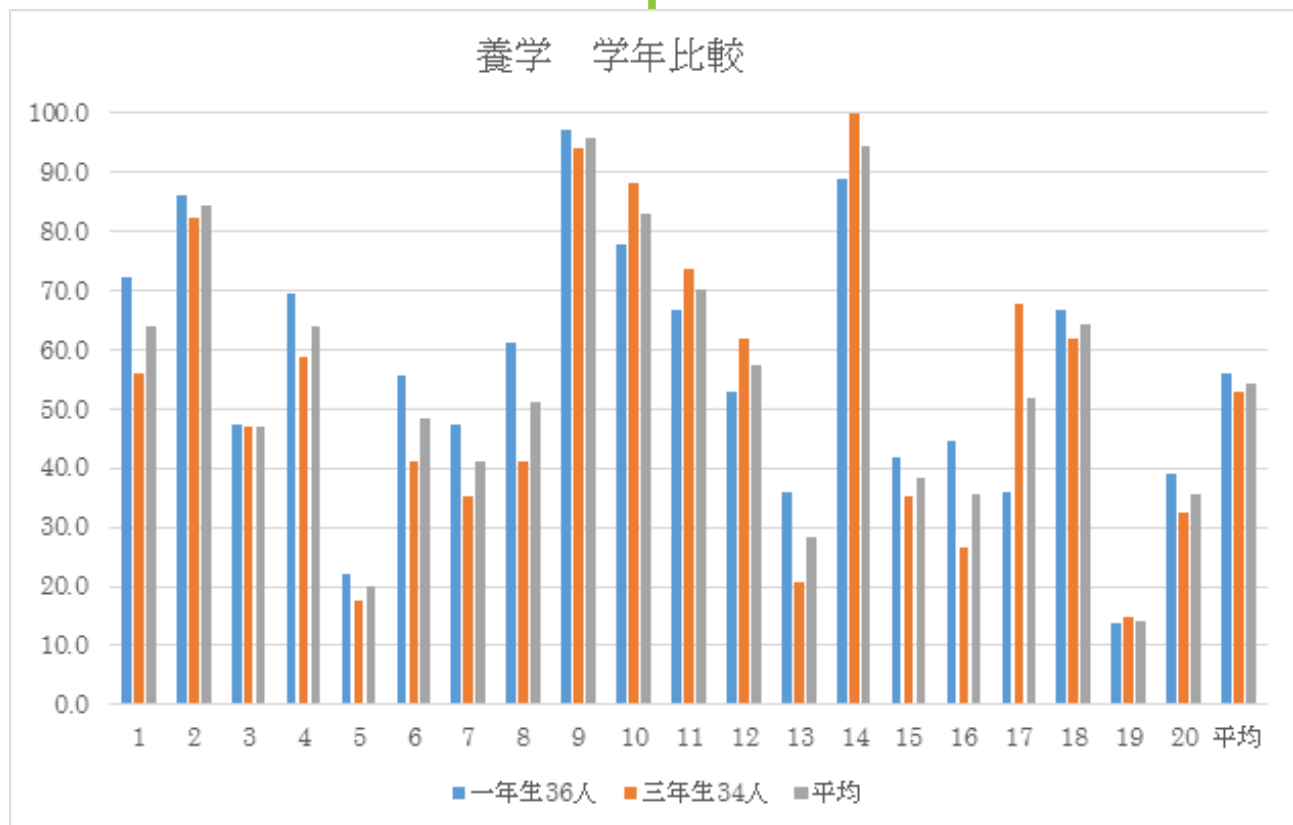


図9. 養学学年比較

大学生の放射線リスク認知の現状

千葉大学教育学部養護教諭養成課程 岩本 里美

1. はじめに

東日本大震災による福島第一原子力発電所事故以来、放射線に関する正しい理解が広く一般に求められるようになった。そこで学校教育における放射線教育についても関心が高まっている。このような動向から、今後さらに、日本の将来を担っていく子どもたちが放射線のリスクについて正しく理解し、自ら判断、行動選択できるような教育を行っていくことが期待される。そこで、放射線リスク教育の課題を明らかにするため、現在の大学生を対象に放射線リスクについての認知度調査を行った。

本項では、大学教育で放射線に関する知識に触れる機会がそれぞれ異なると考えられる多種の学部生の放射線リスク認知の現状について紹介する。

2. 対象

- ・千葉大学医学部
2年生 94名（男：65名 女：29名）
- ・千葉大学教育学部理科教員養成課程
2年生 19名（男：11名 女：8名）
- ・千葉大学教育学部養護教諭養成課程
1～3年生 108名（女：108名）
- ・東洋大学ライフデザイン学部
2年生 117名（男：68名 女：49名）

3. 方法・および内容

調査紙による回答（5択選択式）。質問内容は長崎大学の三浦美和の論文[1]より、一部改変している（表1）。

各項目について、「1. どの程度恐ろしいと思うか」「2. どの程度未知なものか」という2つの観点より判断基準例に沿って（表2）、そのリスクを「－2：全くそう思わない」「－1：あまりそう思わない」「0：どちらともいえない」「1：そう思う」「2：強くそう思う」の5段階の得点で評価させた。以下、この5段階評価については、質問項目を引用した長崎大学の研究と比較しやすいように、実際にアンケートで使用した－2～2の選択肢をそれぞれ1～5の数値に対応させた。

表 1. アンケート項目

	質問
1	病院で頭部 CT 検査を受ける
2	酸性雨
3	HIV ウイルス感染
4	受動喫煙
5	放射線を用いた研究を行う
6	原子力で発電する
7	新型インフルエンザ感染地域から戻ってきた知人と会う
8	紫外線ケアをせずに真夏に屋外で運動する
9	飛行機に搭乗する
10	原子発電所の近くで生活する
11	地球温暖化
12	アメリカ産牛肉を食べる
13	感染症流行地域に行く
14	病院でX線検査を受ける
15	北朝鮮情勢
16	屋内ファンによる被ばく
17	中国産食品を食べる
18	HPV ワクチン（子宮頸がんワクチン）接種
19	遺伝子組み換え食品を食べる
20	インターネットで風邪薬を買う

表 2. リスク評価基準例

1. 恐ろしい

そのリスクによる障害の発生を自分で制御できるか
そのリスクによる障害が発生した場合のひどさを制御できるか
そのリスクによる障害が死を招くか
そのリスクは世界的大惨事を招き一度に多くの人命が失われるか
そのリスクとそれによるベネフィットは人々に公平に分配されるか
そのリスクは将来の世代の脅威となるか
そのリスクは削減できるか
そのリスクは増大しつつあるか
そのリスクは自発的に関わるものか
そのリスクに個人として接するか

2. 未知である

そのリスクによる障害が発生するプロセスは観察可能か
リスクにさらされている人がそのリスクを正確に知っているか
死のリスクは即座にやってくるか
そのリスクは新奇なものか
そのリスクは科学的にわかっているか

4. 調査期間

2017年6月～10月

5. 放射線リスク認知調査

全リスク項目における全回答者の平均得点は「1. 恐ろしい」が3.48（図1－A）、「2. 未知である」が3.22（図1－B）となった。範囲としては、「1. 恐ろしい」が「HIVウイルス感染」の4.70から「アメリカ産牛肉を食べる」の2.18（図1－A）、「2. 未知である」が「屋内ラドンによる被ばく」の4.14から「飛行機に搭乗する」の2.29までであった（図1－B）。

放射線関連事項について注してみると、「恐ろしい」という観点において原子力関連のリスクは比較的高い得点を示したが、医療放射線のリスクは全項目中でも低い得点を示した（図1）。

これは、東日本大震災による福島第一原発の事故による影響が大きいと考えられる。先行研究においても同様の報告がされている[1]。

一方、放射線関連事項の「未知である」という観点に関しては、原子力関連のリスクと医療放射線のリスクという分類で見られる特徴はなかった（図1－B）。これは、「病院で頭部CT検査を受ける」の項目において、「恐ろしい」でのリスク評価に対し、「未知である」のリスク評価が相対的に高くなっていることが影響している。この結果の原因として、頭部CT検査が大学生にとって身近でないということが考えられる。

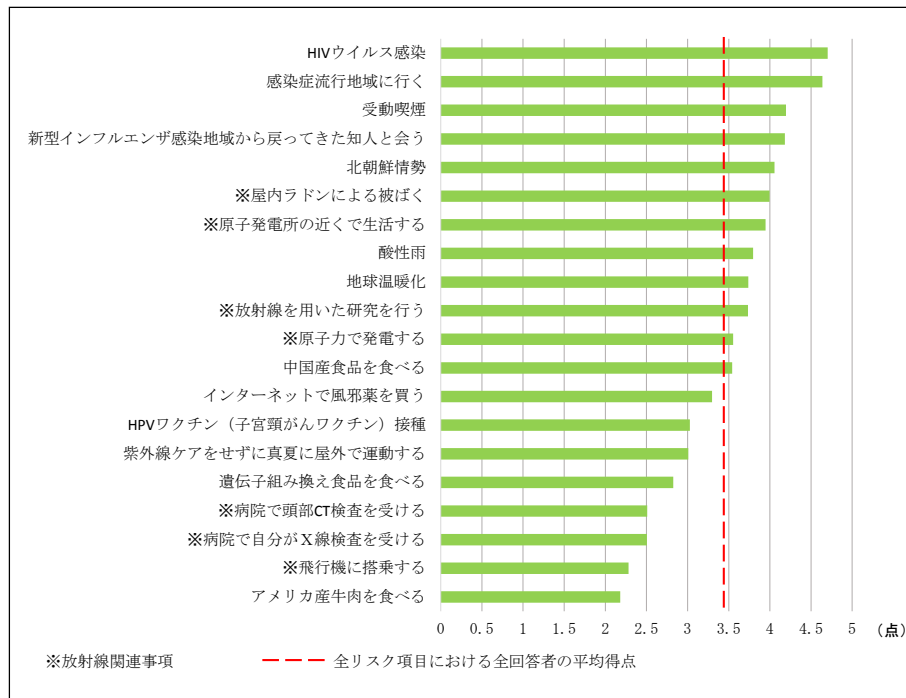


図1－A. 「1. 恐ろしい」の観点での全回答者の平均得点

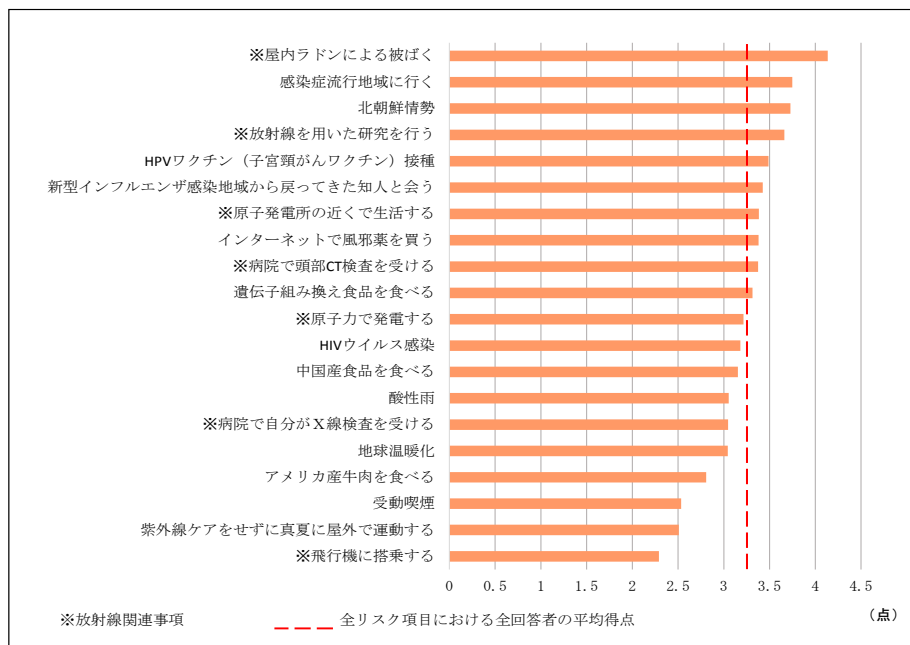


図1－B. 「2. 未知である」の観点での全回答者の平均得点

また、「1. 恐ろしい」と「2. 未知である」の2観点間の比較では、放射線関連事項において、「1. 恐ろしい」で高得点を示しているものは、比較的「2. 未知である」でも高得点を示しており、正の相関関係が見られる（図2）。しかし、全リスク項目で見ると「恐ろしい」で非常に高いリスクと評価されていた「HIVウイルス感染」や「受動喫煙」については、「未知である」の観点ではそれぞれ平均以下の得点を示しており、リスク評価において2観点は必ずしも正の相関があるとは限らなかった（図3）。

これは、放射線についての知識がなく、身近でないために恐ろしく感じるということを示唆している。特に、自然放射線の一種であり人間が日常的に浴びている「屋内ラドンによる被ばく」が、「恐ろしい」と「未知である」の観点の双方において、放射線関連事項の中で最も得点が高くなっているのは、他のリスク項目と比較しても特異である。つまり、「屋内ラドン」についての知識がないために、そのリスクを過大評価した可能性が疑われる。

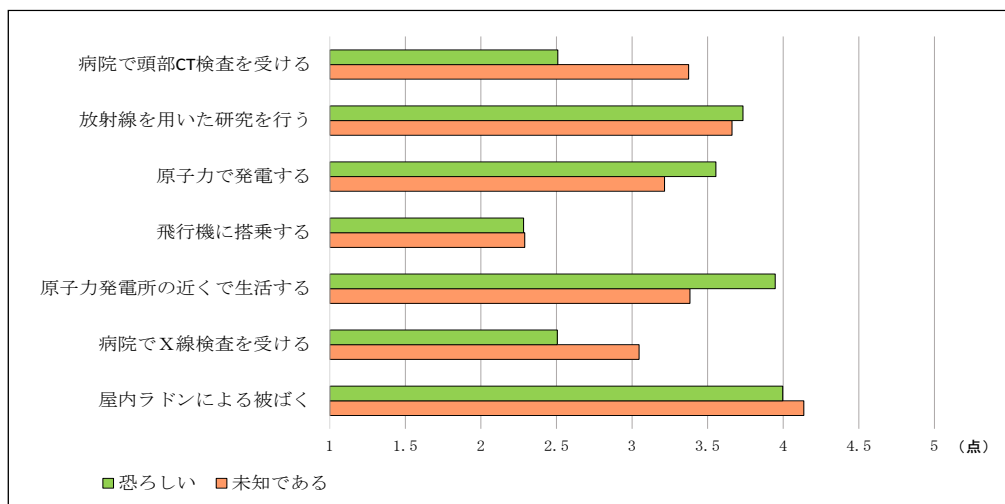


図2. 放射線関連事項での全回答者の平均得点

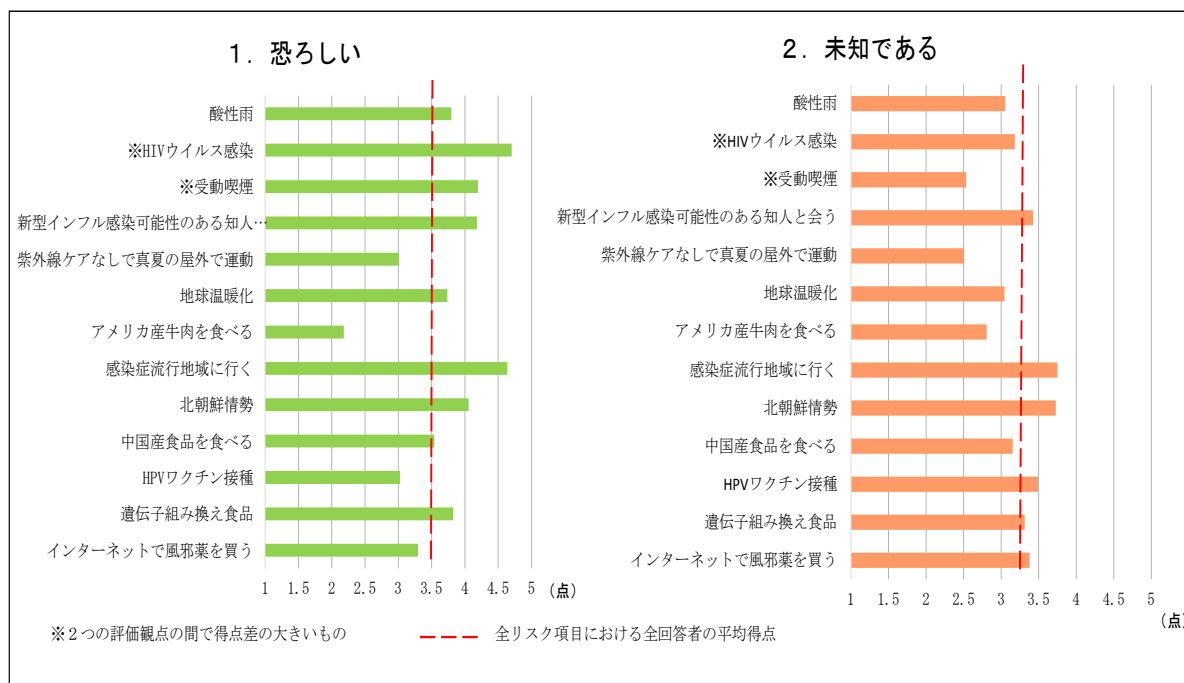


図3. その他の事項での全回答者の平均得点

専攻間で比較すると全リスク項目の平均得点は「恐ろしい」と「未知である」でそれぞれ、医学部が3.30と2.94、理科教員養成課程が3.58と3.39、養護教諭養成課程（2年生）が3.45と3.36、ライフデザイン学部が3.54と3.25であった。各リスク項目については、専攻ごとによる差異はほとんど認められず、全体の傾向とほぼ一致していた（図4－A、B）。養護教諭養成課程の学生の学年間での比較では、専門分野と少し異なることもあり、学年による特徴は特にみられなかった。

性別間での比較では、「1. 恐ろしい」の観点において、全リスク項目でどの選択肢を選んだかで若干の男女差がみられた（図5）。男性では各項目において、選択肢の「4: 思う」「5: 強く思う」を選んだ人の平均割合が52.1%であるのに対し、女性では58.7%と男性より高い数値が観察された。「2. 未知である」においては、ほぼ差異が認められず、また、各項目におけるリスク評価の男女差についても顕著な違いはみられなかった。

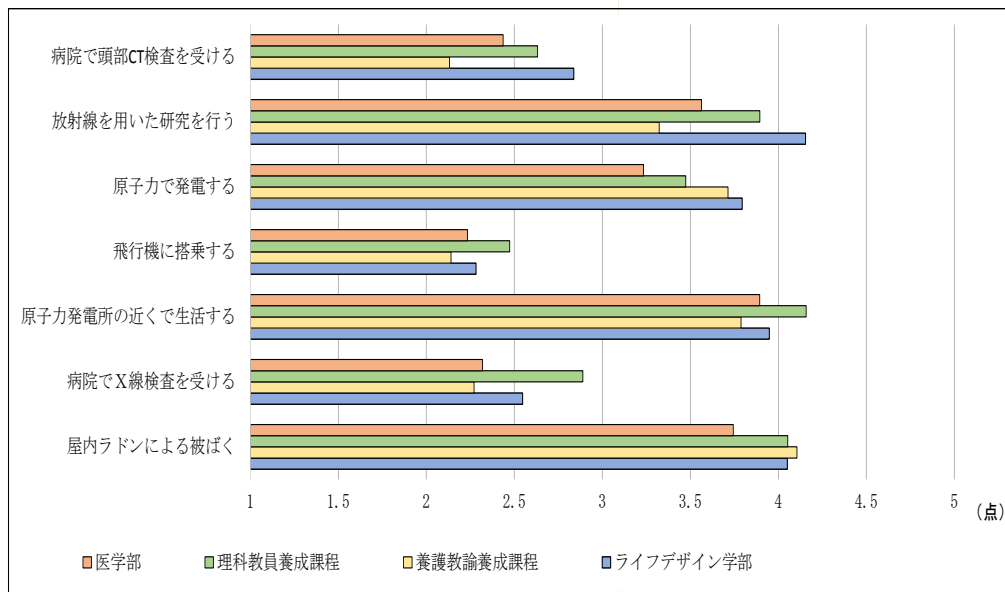


図4－A. 放射線関連事項での学部ごとの平均得点の比較「1. 恐ろしい」について

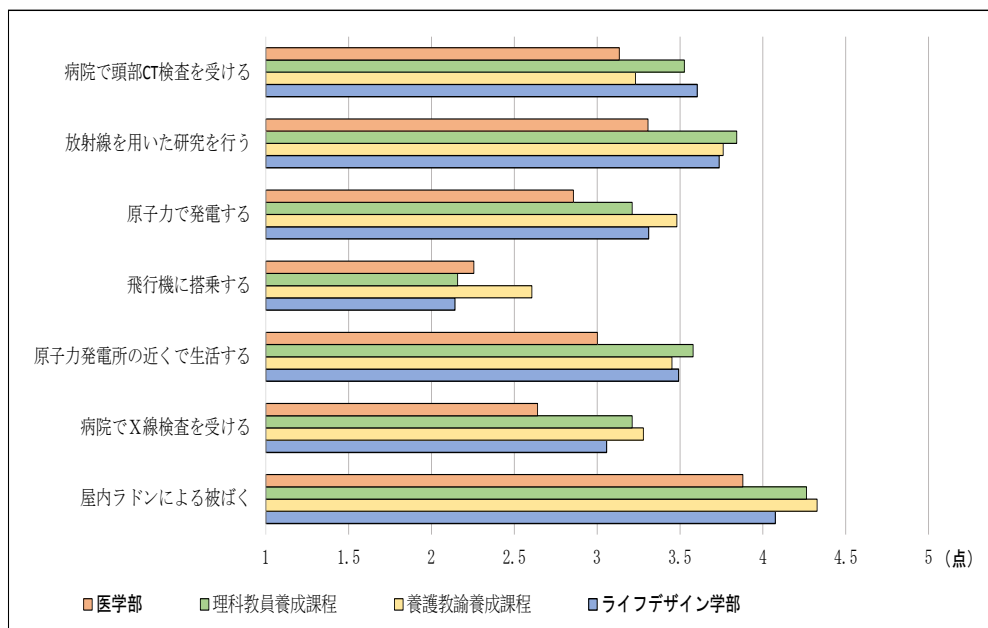


図4－B. 放射線関連事項での学部ごとの平均得点の比較「2. 未知である」について

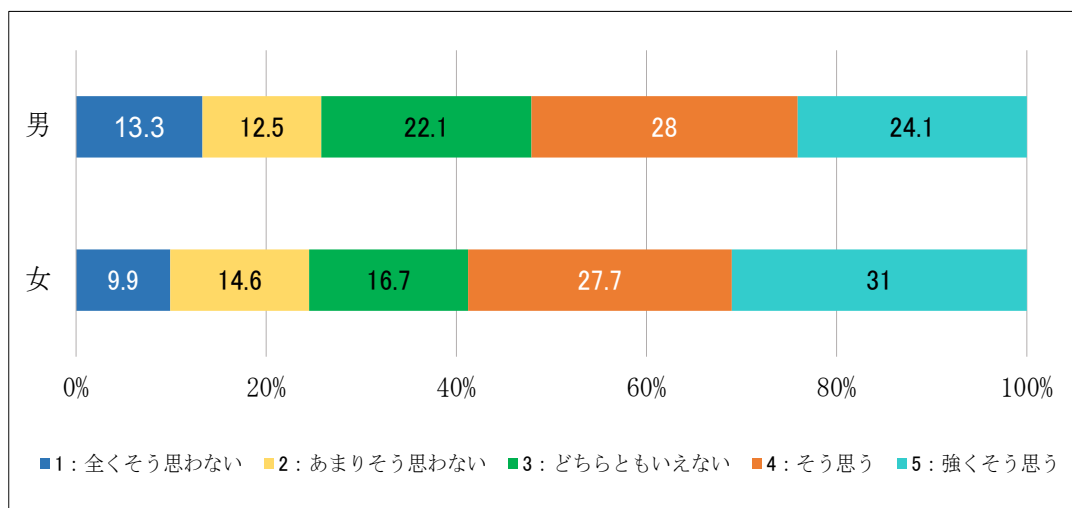


図 5. 「1. 怖い」での各選択肢の平均割合

6. 中学・高校の放射線教育における課題

調査結果の考察より、今後の中学・高校の放射線教育における課題は、①放射線について科学的に正しく理解させること ②放射線を身近なものとする ③リスク教育の充実の3点である。

本調査結果からも、今までの放射線教育では、放射線についての科学的な理解には不十分であるということがいえる。また、放射線は目に見えないということもあり、知識がないことに加え、未知なものとして恐怖に結び付きやすい。もっと放射線を身近なものとして捉えることができるようになれば、根拠のない恐怖感もなくなる。

さらに、放射線教育の中でもリスクに関する教育が不足しているということが考えられる。日本の教育において、規制科学（レギュラトリーサイエンス）に基づくリスク教育は実施されてきていないが、人間がより良い行動選択をして生きていくためには、必要不可欠な教育内容である。医療放射線の利用や、今後の原発問題について、個人が正しい理解のもとリスク評価できるようになるためにも、規制科学の観点から放射線教育を今後さらに充実させていく必要がある。

参考文献

[1] Miura Miwa, Masahiro Yoshida, Hideaki Takao, and Naoki Matsuda “Perception of Risk from Radiation by Faculty and Students of Nagasaki University” Radiation Safety Management, 2008 ; 7 : 1-5.

放射線教育実験教材提供の試み

千葉大学大学院医学研究院分子腫瘍学 喜多和子

放射線教育では、人体にどのような影響があるのかを理解させることが重要であり、そのためにどのような教材を提供できるかが課題となる。そこで、ここでは培養ヒト細胞を用いた実験系を複数紹介し、さらに、その中から教材として提供可能な実験系について考察する。

細胞は、放射線や紫外線あるいは抗がん剤をはじめとする化学物質などのストレスにさらされると、細胞増殖停止・細胞死・遺伝子 DNA 損傷・遺伝子変異などが誘導される。あるいは、それらを乗り越えて正常に活動し増殖する場合もある[1]。その違いは、ストレスの強さや細胞の種類などに起因する。これらの細胞の生物学的性質に関する実験レベルでの解析法を簡略的に表1に表した。

表 1. 細胞の生物学的性質の解析法

生物学的性質	解析法
1 増殖能	細胞数の計測、細胞内酵素活性測定
2 細胞死	DNA断片化の検出など
3 DNA損傷	コメットアッセイなどによる損傷DNAの検出
4 染色体異常	ギムザ染色による染色体形態異常の検出
5 遺伝子発現変動	RNAレベル変動の解析など
6 タンパク質レベル変動	ウェスタンブロット法などによるタンパク質レベル変動の解析

以下にこれらの解析法に関して、簡単に説明する。

1. 細胞増殖能力解析

細胞増殖能力のシンプルな解析法は、時間経過を追って細胞数を計測することである。図1はチャイニーズハムスターの肺（CHL）細胞にX線照射した後の細胞数の変化を計測した結果である。照射量が4 Gy以上になると細胞数が増加しにくくなり、10 Gy照射でほとんど増加せず、増殖能力が低下していることがわかる。細胞増殖能力の解析では、細胞数の計測のほかに生細胞を発色反応で測定する方法があり、キット（Cell Counting Kit-8, 同仁化学研究所など）が市販されている。このキットは、人工基質を細胞シャーレに加えると、脱水素酵素の作用により基質が橙色に発色することを利用し、生細胞数を推定するもので[2]、近年研究室でよく使用されている。図2はヒト子宮頸がん由来 HeLa 細胞にX線照射した後の増殖能をキットを用いて解析した結果で

あるが、やはり、4 Gy 以上になると増殖能が低下することがわかる。

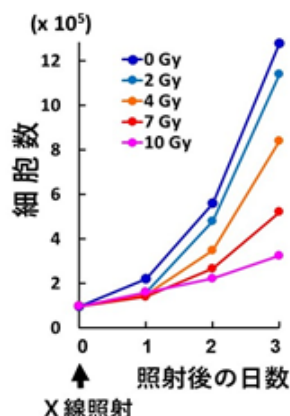


図 1. X 線照射後の細胞数変化

CHL 細胞をシャーレに 1×10^5 個撒き、翌日（0 日）に X 線各線量照射し、1 日後から 3 日後までの細胞数をセルカウンターで計測した。

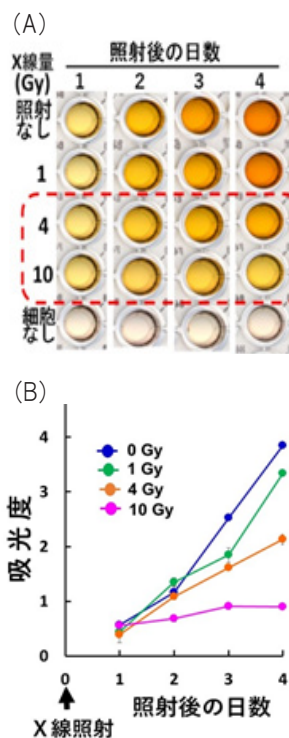


図 2. 細胞内脱水素酵素活性アッセイキットを用いた X 線照射後の細胞増殖能の解析

2. 細胞死解析

高線量の放射線などの強いストレスを受けた細胞はアポトーシスと呼ばれるプログラム細胞死に至る。アポトーシスは、遺伝子変異や染色体異常が起こった細胞を除去する生体

御機構のひとつであると考えられている。アポトーシスが起ると、細胞膜の組成変化や損傷、アポトーシス誘導タンパク質の活性化、核内の DNA の断片化などが認められることから、これらの変化を指標にアポトーシスを検出する。その解析法の1例として、断片化した DNA の末端を蛍光色素でラベルする TUNEL (TdT-mediated dUTP nick end labeling) 染色法 [3] を紹介する。図 3 は、短波長紫外線 UVC 照射した HeLa 細胞における DNA 断片化を TUNEL 染色法で観察したものである。

この実験では、紫外線や放射線に高い感受性を有するコケイン患者由来細胞を用い、紫外線防護タンパク質の添加有り無しで紫外線照射した後のアポトーシス誘導細胞を検出した [4]。添加無しでは蛍光標識された DNA 断片を有する細胞（アポトーシス細胞）が多いが、添加有りでは少ない。

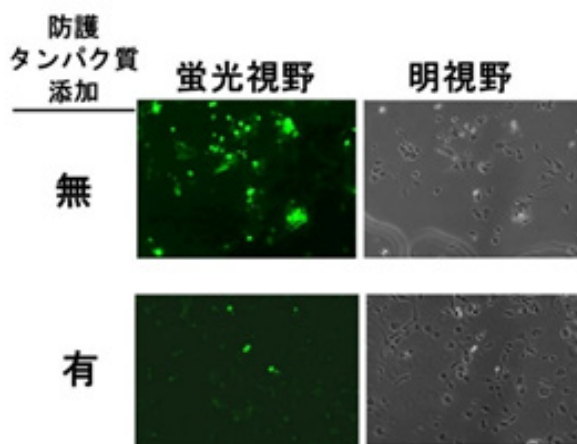


図 3. 紫外線照射後の DNA 断片化

コケイン患者由来培養細胞に UVC (6 J/m^2) 照射 24 時間後、細胞の DNA を TUNEL 染色し蛍光顕微鏡下で観察した。

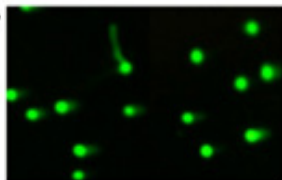
他の例として細胞周期解析がある。細胞周期とは、1 つの細胞が 2 つの娘細胞に分裂するまでの過程で、便宜上 4 つの期間 (DNA 合成準備期: G_1 、DNA 合成期: S、分裂準備期: G_2 、分裂期: M) にわけられている。このほかに分裂を停止している静止状態 (G_0 期) もある。DNA 量は、 G_2 /M 期に G_0 / G_1 期の 2 倍に、S 期には 1 倍から 2 倍の間の量になる。この DNA 量の違いを利用し、細胞の DNA を蛍光色素で染めてフローサイトメーターという装置で DNA 相対量を見積もることで、細胞周期を解析する方法がある。増殖能が高い細胞は DNA 合成が盛んに行われることから S 期の細胞が多くなり、静止状態の細胞は G_0 / G_1 期の細胞が多くなる。また、アポトーシスを起こした細胞では、断片化された DNA を小胞に取り込んだアポトーシス小体が、非常に DNA 量の少ない画分に検出される。従って、この解析では 1 の増殖能と 2 の細胞死の両方を調べることができる。

3. DNA 損傷解析

DNA 損傷の解析法には、蛍光標識抗体を使って損傷に集まる修復タンパク質を検出する方法や、損傷 DNA を蛍光色素で染める方法など複数ある。コメットアッセイは後者であり、損傷 DNA を蛍光色素で染色し電気泳動すると DNA が彗星のように見えることから、この名前が付けられた。図 4 では、X 線照射した HeLa 細胞の DNA をコメットアッセイで調べた結果で、DNA 損傷が生じていることがわかる。

X線照射

無



有

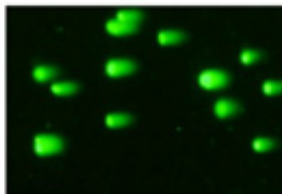


図 4. X 線照射後の DNA 損傷

HeLa 細胞に X 線 (10 Gy) 照射した直後にコメットアッセイで DNA 損傷を検出した。照射無しの細胞の DNA は密な高次構造をとっているため電気泳動後丸い形をしている。X 線照射した細胞では、損傷を受けた DNA の構造が緩むため電気泳動で非損傷部分より早く移動し、彗星のような形になる。

4. 染色体異常検査

細胞分裂期に観察される染色体の形態をギムザ染色することで形態異常を検出する解析である。図 5 は X 線照射した CHL 細胞の染色体をギムザ染色した結果である。照射により、動原体を複数有する二動原体染色体や動原体のない無動原体断片などの染色体異常が誘導された。これらの染色体異常は放射線による DNA の 2 本鎖切断に起因するとされている。

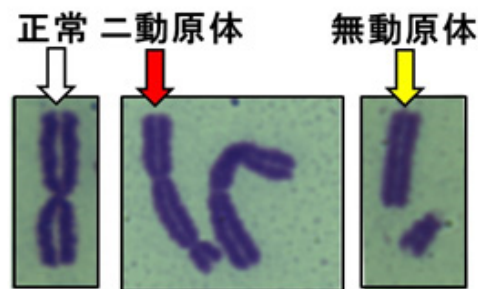


図 5. X 線照射後の染色体異常

CHL 細胞に X 線 (7 Gy) 照射し 24 時間後に染色体をギムザ染色し、顕微鏡下で観察した。

左（白矢印）：正常染色体
中央（赤矢印）：動原体が二つある二動原体染色体
右（黄色矢印）：動原体のない無動原体断片

5. 遺伝子発現解析

6. タンパク質レベル変動解析

その他に5の遺伝子発現変動の解析や6のタンパク質の解析などがある。遺伝子発現とは、遺伝子DNAからRNAへと転写され、さらにタンパク質へと情報が発現されることである。細胞にストレスが負荷され活動状態が変動する際、たとえば増殖が停止したりアポトーシスが誘導される際には、遺伝子発現やタンパク質のレベルや性質（修飾など）が変動する。近年、遺伝子発現のうちRNAへの転写活性を調べる技術が画期的に進歩してきている。たとえば、細胞からRNAを抽出し相補的なDNAを合成した後、特定の相補DNAだけを遺伝子増幅装置を使って定量的に増やして調べる方法（Reverse Transcription Polymerase Chain Reaction, RT-PCR）がある。また、さらに進んだ解析法として、抽出したRNAに対する相補的DNA（約2万のすべて）の塩基配列を一挙に次世代シーケンサー（高速に読み出せる装置）で読み取り、読み取り回数の頻度によって元のRNAの量を測るという方法もある。

タンパク質のレベルや質の変動を調べる方法としては、抗体を用いたウエスタンブロット法という解析などがある。例えば、アポトーシスが起る際には、カスパーゼというタンパク質が活性化されるので、活性化カスパーゼに対する抗体を用いてその量を調べることができる。

7. 教材として提供可能な実験系

以上に紹介した解析法を実施するには、細胞培養技術と培養に適した環境、吸光度計、光学顕微鏡、蛍光顕微鏡、電気泳動装置、遺伝子増幅装置などが必要であり、中学校や高校での実施が難しいものもある。3のコメットアッセイによるDNA損傷検出と4の染色体異常検査は、平成25年以降千葉大学教育学部杉田克生教授との連携で、高校の理科教員や中高生を対象に“ひらめきときめきサイエンス実験講座”や“スーパーサイエンスハイスクール連携講座”を開催し、実際に実験に参加してもらい実験教材提示を試みている。コメットアッセイでは蛍光顕微鏡が必要であるが、染色体異常検査は光学顕微鏡で観察でき、細胞から抽出したDNAは固定すれば安定であることから、教材としては比較的提供しやすいと考えられる。なお、この2法の実施に関する詳細は、2017年 学校での放射線リスク教育ガイドブック24-27頁、2018年千葉大学教育学部研究紀要 第66巻 No.2,323-327頁に記載されている。

参考文献

- [1] 菅原努、青山喬「放射線基礎医学 第9版」金芳堂 2000
- [2] Ishiyama M, Miyazono Y, Sasamoto K, Ohkura Y, Ueno K. Highly water-soluble disulfonated tetrazolium salt as a chromogenic indicator for NADH as well as cell viability. *Talanta* 1997 ; 44 : 1299-305.
- [3] Gold R, Schmied M, Giegerich G, Breitschopf H, Hartung HP, Toyka KV, Lassmann H. Differentiation between cellular apoptosis and necrosis by the combined use of in situ tailing and nick translation techniques. *Lab Invest* 1994 ; 71 : 219-25.
- [4] Kita K, Sugita K, Chen SP, Suzuki T, Sugaya S, Tanaka T, Jin YH, Satoh T, Tong XB, Suzuki N. Extracellular recombinant annexin II confers UVC-radiation resistance and increases the Bcl-xL to Bax protein ratios in human UVC-radiation-sensitive cells. *Radiat Res* 2011 ; 176 : 732-42.

放射線 DNA 傷害・修復実験法

千葉大学教育学部養護教諭養成課程 土岐 香苗 飯田 祥子

1. 放射線の生体影響に関する教育の現状

平成 28 年度の中学校教科書改訂に伴い、各社において放射線に関する内容の充実化が図られた。その結果、放射線の生体影響に関しても触れることとなり、『放射線により DNA が傷害されるという』記述が追加された教科書もあった。しかしながら、放射線による DNA 傷害とはどのような物なのか、また、傷害の結果人体にどのような影響があるのか、については具体的に説明されているものは少なく、放射線の生体影響を理解するためには不十分であると考えられる。そこで今回、放射線による DNA の傷害・修復の機序を説明するとともに、視覚的に実感することのできる「コメットアッセイ」実験ならびに染色体異常を教材として扱う。

2. DNA 傷害

放射線や紫外線を受けると、DNA 中の塩基同士が結合したり、鎖構造の骨格がある頻度で傷を受ける。また、DNA に損傷を与えるのは放射線に限らない。身の周りの化学物質（天然のもの、人工のものも含め）が DNA の塩基に結合したり、塩基同士を結合させたり、鎖を切断することもあり、DNA は周囲の環境や化学物質から損傷を受けやすい分子であるといえる。上にあげたように、

- ①塩基の損傷・消失
- ② 2 本鎖 DNA の片側の鎖のみ切断
- ③ 2 本鎖 DNA の両鎖切断

などのパターンが存在する。しかし、放射線により DNA はどのように傷害されるのか、また、傷害された DNA は、損傷前と比較してどのような違いがあるのかを、体感的に確認することができる教材は少ない。そこで、視覚的に確認できる教材の一つとして、コメットアッセイ実験を紹介する〔1〕。

3. コメットアッセイ実験

1) 意義

目に見えない放射線による生体影響を、ヒト培養細胞に X 線を照射し、DNA 損傷・回復の様子を視覚化することで理解させる。

2) 原理

損傷の入った DNA を電気泳動によりアガロースゲル内で移動させ、蛍光染色することで、顕微鏡下では DNA が彗星（コメット）のように見える。これは、損傷が入った DNA は鎖がほどけた構造になり、より早く陽極側に移動することで、尾（テール）部分となり、一方、損傷のない DNA は核領域に残り頭部を形成するためである（図 1）。

コメットアッセイによる DNA 損傷の検出

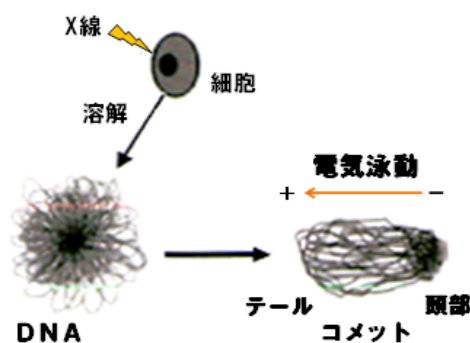


図 1. コメットアッセイの原理

3) 準備

〔試薬〕

細胞溶解液、リン酸緩衝液 (PBS)、LMP (低融点アガロース)、電気泳動用緩衝液 (中性条件)、DNA pre-cipitation 溶液、70%エタノール溶液、DNA 染色蛍光試薬 (サイバークリーン溶液)

〔器具〕

ピペット、チップ、チップ捨て、セルスクレーパー、1.5mL チューブ、ウォーターバス、ヒーター、冷蔵庫、アルミホイル、恒温槽、(37℃、42℃)、ビニール手袋、アスピレーター、遠心分離機、鉛筆、スライドガラス、ピンセット、バット、竹串、電気泳動装置、ビニール袋、蛍光顕微鏡

4) 実験手順

①培養ヒト細胞の X 線照射

- ・培養ヒト細胞として HeLa (図 2) を用いる。
 - ・X 線照射装置を使用し、10Gy の X 線を照射する。
- ※X 線照射と非照射での DNA 像の違いを比較するため、X 線照射しない細胞 (0Gy) も以下の手順で蛍光観察する。

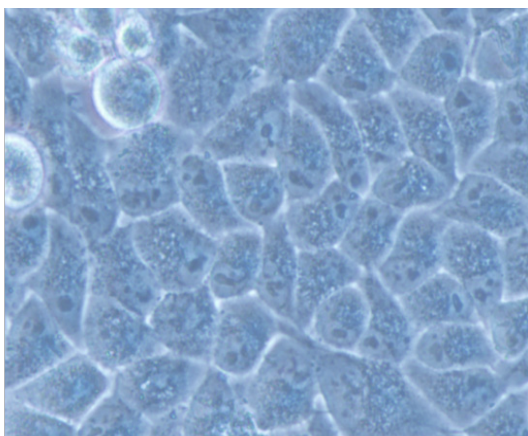


図 2.HeLa 細胞

なお学校での実験する場合には DNA 傷害として放射線照射に代え、過酸化水素により同様の実験が実施可能である。その場合、アルカリ条件下で実験を進める。その場合の手順も以下に記載する。

- ・培養液を取り除き、過酸化水素水を含む培養液で 30 分おく。
- ・比較として片方の細胞に過酸化水素水のかわりに培養液を入れる。

②細胞回収

- ・ほぼ一面に細胞が接着している直径 3.5cm のシャーレに PBS0.8mL を加え、細胞をかきとった後、細胞浮遊液を 1.5mL チューブに回収する。
- ・細胞溶液を遠心し、細胞の沈殿をさわらないように上澄みを取り除く。
- ・細胞を均一にするためチューブをピペティングし、細胞浮遊液を作成する。

③低融点アガロースゲル内への細胞固定

- ・1.5mL チューブに LMP(低融点)アガロース 250 μ L と細胞浮遊液 25 μ L を入れよく混合する。
- ・混合液 50 μ L をスライドガラスのサークル上に乗せ均一に広げる。
- ・周辺にゲルをはがれなくするためのリングが現れるまで、冷暗所にて 30 分間放置する。

④細胞溶解

- ・細胞を固定したスライドガラスを冷細胞溶液に浸し、冷暗所にて 1 時間放置する。
- ・スライドガラスの余分な細胞溶液をアスピレーターで取り除き、中性電気泳動緩衝液に浸し、冷暗所にて 30 分間放置する。

⑤電気泳動

- ・中性を保つため、泳動装置に泳動緩衝液を入れておく。
- ・泳動すると熱が発生するので、泳動装置をアイスボックスにセットする。
- ・スライドガラスを泳動装置に設置し、21V、4℃の環境で 1

時間電気を流す。

⑥ DNA 固定・細胞乾燥

- ・スライドガラス上の余分な泳動緩衝液を取り除く。
- ・スライドガラスを DNA precipitation 溶液に浸し、暗室にて 30 分間放置する。
- ・スライドガラスを 70%エタノール溶液に浸し、暗室にて 30 分放置する。
- ・全ての細胞を同一平面上に並べるため、スライドガラスを 42℃恒温槽にて 10 分間放置し、アガロースを乾燥させる。

⑦蛍光染色による DNA 染色

- ・スライドガラス上の各細胞リングにサイバーグリーン溶液を 100 μ L 加え、冷暗所にて 5 分間放置する。
- ・スライドガラス上の余分な染色液をアスピレーターで取り除き、42℃以下で完全に乾燥させる。

⑧蛍光顕微鏡下での観察

励起波長 494nm, 放出波長 521nm で観察する。

5) 結果

結果の写真を比較すると、X 線照射なし細胞の DNA は丸くテールがほとんど観察されない(図 3)が、10 Gy の X 線を照射した細胞の DNA が横に伸びていることがわかる(図 4)。これは、電気泳動させることで、損傷の入った DNA の鎖がほどけた構造になり、より早く陽極側に移動し、テール部分となり、核領域に残った DNA は頭部を形成するためである。時間がたつと、DNA の修復が行われるため、X 線照射線量 0Gy の細胞と 10Gy の細胞の DNA の形状差は小さくなることも考察させる。

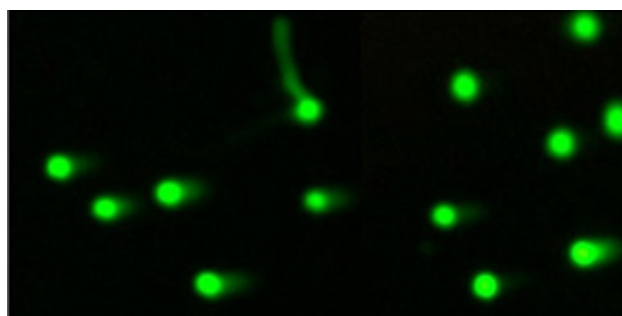


図 3. 放射線照射なしの HeLa 細胞の観察

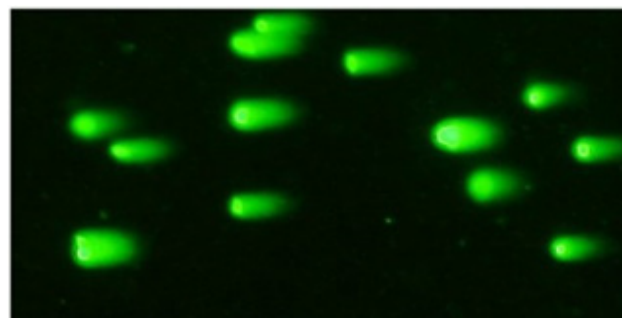


図 4. 放射線照射後の HeLa 細胞の観察結果

4. コメットアッセイ実験の解説

コメットアッセイ実験は、放射線を照射した細胞の細胞膜を融解し、電気泳動を行うことにより、DNA が傷害された様子を観察することができる。実験には、ヒトのがん細胞である HeLa 細胞を用いる。放射線の照射により、DNA 傷害されていることを証明する。細胞を培養したシャーレを二つ用意し、放射線照射と対照として非照射を比較する。

細胞を放射線傷害した後、細胞をゲル内に固定し、スライドを作成する。また、細胞膜などの細胞構造を溶解することで、傷害された DNA が、電気泳動によって流されている様子を観察しやすくする。DNA は、マイナスの電気を帯びていることから、傷害されて、細かく切断された DNA 断片は、バラバラになって、陽極側へと流れ、一方、放射線を照射していないコントロールの細胞の DNA には、ほとんど変化は見られない (図 5)。



図 5. 電気泳動

これを観察するため、乾燥させ、染色を行う。サイバーグリーン溶液で染色し、蛍光顕微鏡で観察すると、放射線照射なしの細胞は、円い緑の光が観察されるが、放射線を照射した細胞の DNA は、彗星の形になる (図 6)。これは、切断されほどけた DNA はより早く陽極側に流れ、それが尾の部分形成するためである。

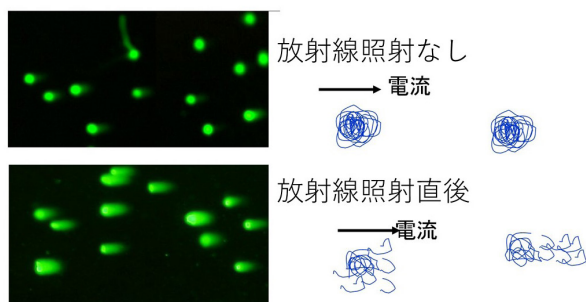


図 6. コメットアッセイ観察結果

また、放射線を照射し傷害された DNA も、時間が経つと修復されることがわかっている。これは、生体にはリペア (修復) 機能というものが備わっているためである。DNA の修復についての詳細は、次のトピックで扱う。

5. DNA の修復

DNA の傷害について教育で扱う際は、必ず細胞の修復機構についても扱う必要がある。傷害される過程だけのみを取り扱うと、DNA が一度傷害されると、その細胞がすべてがん化するというような、誤った認識を与えてしまうためである。

DNA が損傷を受けると、遺伝子として機能できなくなり、その細胞は分裂して娘細胞を生み出すことができなくなる。その結果、その細胞は死に向かう。あるいは遺伝子の情報が変化する遺伝子変異や染色体異常 (図 7,8) が誘導される。そのため、細胞が存続するためには、DNA 損傷を正しく修復し、遺伝子を正常な構造で持ち続ける必要がある。

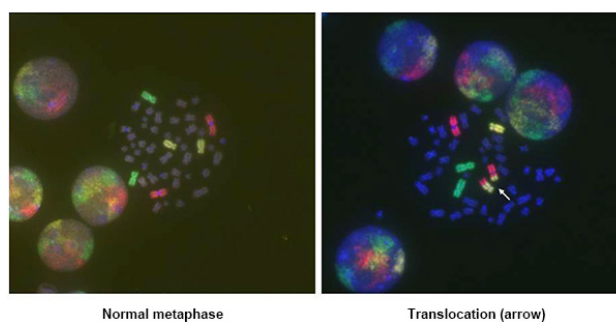


図 7. 3-color FISH 法により検出された染色体転位 (#1, red; #2, green; #4, yellow) ([2] より引用)

Radiation-induced chromosome aberrations

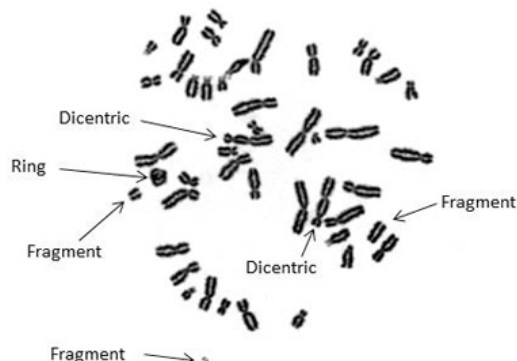


図 8. ヒトの中期細胞。末梢血中のリンパ球を ^{60}Co -ガンマ線 (5 Gy) で照射した。二動原体染色体 (dicentric chromosomes) と環状染色体 (ring chromosome) と断片 (fragment) が観測された ([2] より引用)

細胞は、自らを存続させるために、多様な修復機構を持っている。修復とは、DNA が受けた損傷を、傷を受ける前の構造に戻す機能である。損傷の程度が、①塩基の損傷・消失 ②2本鎖 DNA の片側の鎖のみ切断の場合、DNA の構造が2本鎖であることを利用し、傷害されていない相手の鎖を鋳型とし、元と同じ完全な2本鎖 DNA を再生することができる。また、③2本鎖 DNA の両鎖が切断の場合も、DNA が複製される同じ遺伝情報を持つ姉妹染色体がある場合、その中の

DNA 情報をバックアップとして、再生することができる。

DNA 損傷があると、DNA 修復が終わるまで細胞分裂の進行を抑えるチェックポイント調節機構なども働く。このような仕組みを幾重にも持つことにより、日々発生する DNA 損傷を持つがん候補となる細胞が生き残ることのないようにしている。

しかし、受けた放射線量などが非常に大きくなると、姉妹染色体が両方とも切断を受けたり、傷を受けてしまうこともある。その結果、修復ができなかった細胞は、自死（アポトーシス）を迎えることとなる。

DNA の修復、チェックポイント・アポトーシスにより、普段の生活の中で多くの DNA 損傷を受けながら、最終的にがん化する細胞を非常に少なく抑える仕組みが、人体には備わっている。コメットアッセイ実験等を通し、放射線による生体影響を教育で扱う際は、これらの人体の機能を説明し、いたずらに放射線に対する恐怖心や、破壊的なイメージのみを必要以上に植え付けることのないよう、留意して行う必要がある。

参考文献

[1] 山本菜月、杉田克生、加藤徹也「リスク教育導入のための放射線実験プログラム作製」『千葉大学教育学部研究紀要』2015；63：381-391.

[2] <http://www.nirs.qst.go.jp/ENG/core/rmd/05.html>

千葉大学教育学部養護教諭養成課程 土岐 香苗



図 2. CHL 細胞の X 線照射

②細胞の回収

細胞は、密集した状態 (confluent) に近づくと分裂を休止する。分裂が止まった細胞では染色体を観察することができないため、confluent になる前の状態で回収する (表 1)。

表 1. ②細胞の回収実験手順

	実験内容
1	コルセミド溶液 (10 $\mu\text{g}/\text{ml}$) を終濃度 0.1 $\mu\text{g}/\text{L}$ になるように各シャーレに加えて、静かに攪拌する。
2	培養細胞シャーレを、CO ₂ インキュベーターに 2 時間入れる。
3	培養細胞シャーレの培養液を 15 mL チューブに回収し、生理食塩水 1 mL を加えて洗い、同様にチューブに加える。

4 シャーレに残った細胞にトリプシン処理を行い、ピペッティングで細胞をシャーレからはがして、15mL チューブに加えて、細胞をすべて回収する。(図 3)

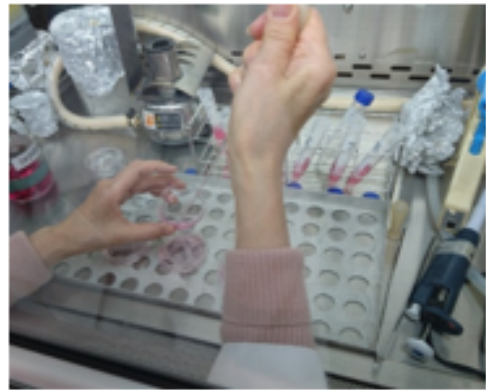


図 3. 培養 CHL 細胞の X 線照射

5 細胞浮遊液を遠心し、細胞の沈殿のみを残して上澄みを取り除く。

③細胞溶解・固定

37℃に温めた 0.075 M 塩化カリウム溶液 5ml を少しずつ加えピペッティングで攪拌し、37℃のウォーターバスに 15 分おく。新鮮な冷固定液を加えて、半固定する。細胞核浮遊液を遠心し、細胞核の沈殿を残して上澄みを取り除き、冷固定液を 5 mL 加えて、再度遠心分離する。この作業を 3 度繰り返す。3 度目は遠心せずに -20℃に保存する。

④プレパラートの作成 [教材として活用する工程] (表 2)

表 2. ④プレパラートの作成の実験手順

	実験内容
1	-20℃に保存してあった細胞浮遊液を遠心分離する。

- 2 核の沈殿(図 4)を残して上澄みを完全に
に取り除く。

このとき、一度ひっくり返して固定液
の大半を取り除き、残りの固定液をピ
ペットマンで少量ずつ取り除くこと
で、沈殿を舞い上げる、吸い取って
しまうなどのミスを防ぐ。



図 4. 沈殿した核

- 3 沈渣の量により、固定液を 100～500
μL 加えて若干の濁りが見える程度に
薄め、ピペッティングをして均一な核
浮遊液を調整する。(図 5)

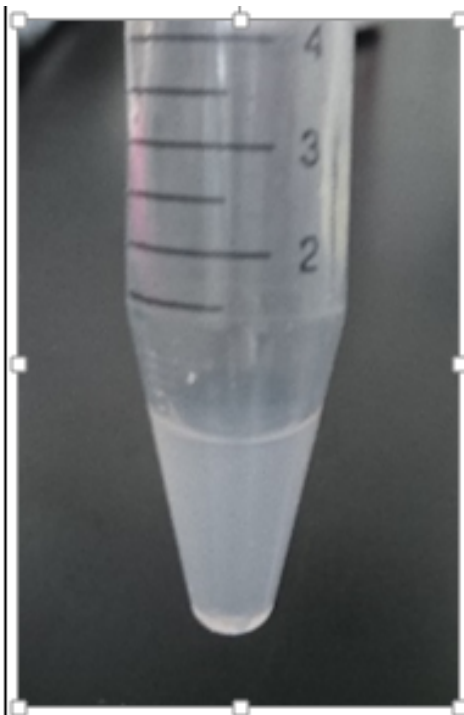


図 5. 調整した均一な核浮遊液

- 4 脱脂したスライドガラスに、核浮遊
液 20μL を、20 cm以上上から落とす
ようにしてのせる。(図 6)

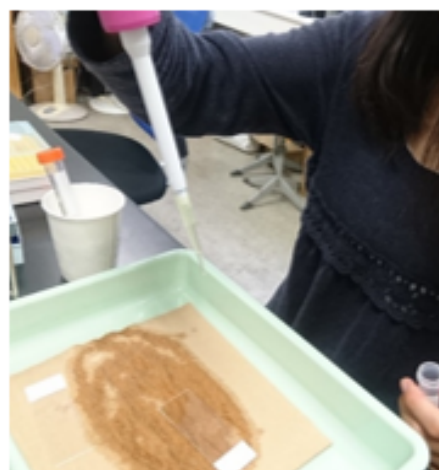


図 6.核浮遊液の滴下

- 5 自然乾燥させ、ギムザ染色を行うギムザ染色液と pH6.4 リン酸緩衝液を



1:20 の割合で含む染色液に 15 分浸ける。(図 7)

図 7. 浸漬法によるギムザ染色

- 6 水道水で洗い流し、標本用封入剤を 1 滴かけて(図 8)カバーガラスで覆う。このとき、カバーガラスからはみ出た封入剤をふき取らずにおく。



図 8. 封入剤滴下

- 7 ドライヤーの冷風で封入剤を乾かす
- 8 顕微鏡観察をする

5) 結果

X 線を照射していない細胞は、X 字状に対合し、中心に動原体を有する正常な染色体が観察される(図 9)。細胞分裂が止まってしまった細胞では、染色体が凝集していないため観察することができず核が丸く染まる(図 10)。

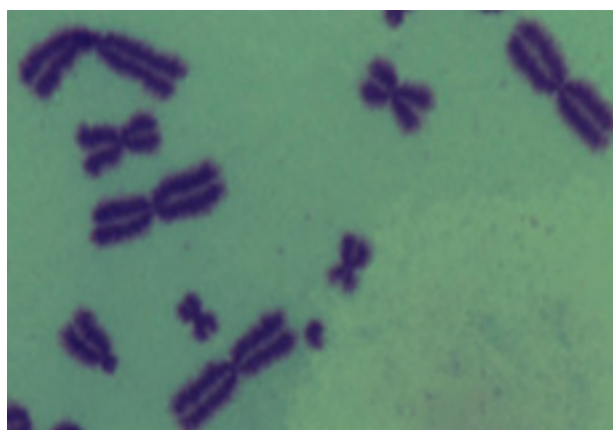


図 9. CHL 細胞の正常な染色体 (0Gy)

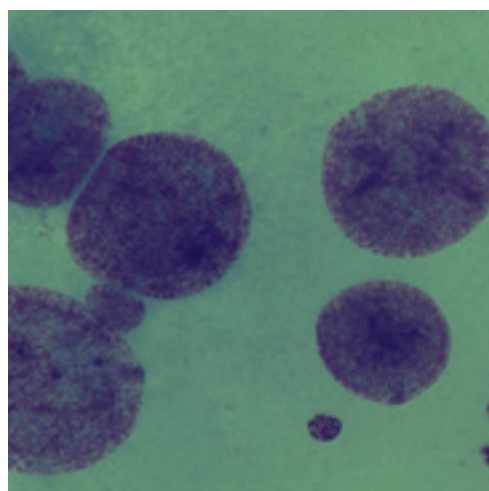


図 10. 間期の CHL 細胞 (0Gy)

X 線照射された細胞では、動原体が二つある二動原体染色体や染色体の断片などの染色体の異常が生ずる。本実験でも X 線 (4Gy) を照射した細胞では、正常な染色体に加え二動原体染色体(図 11 黒丸)や染色体の断片(図 11 赤丸)が観察された。

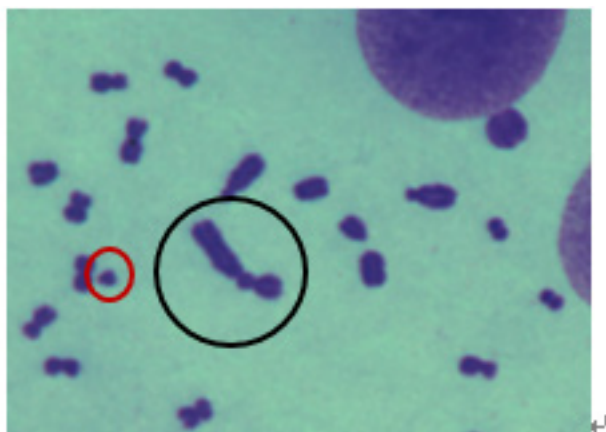


図 11. CHL 細胞の異常染色体

3. 染色体異常試験の解説

染色体異常試験は、X線を照射した細胞の細胞膜を低張処理により破裂させて核の沈渣を回収し、ギムザ染色を行うことで、異常染色体を観察することができる。実験には、CHL細胞を用いる(図 12)。染色体が比較的大きな CHL 細胞を使用することで、学校に備品として準備されていることの多い×100の顕微鏡で染色体の構造異常を観察することが可能となり、放射線の生体影響を可視化して理解しやすくする。細胞を培養したシャーレを二つ用意し、X線照射と非照射を対照比較する。

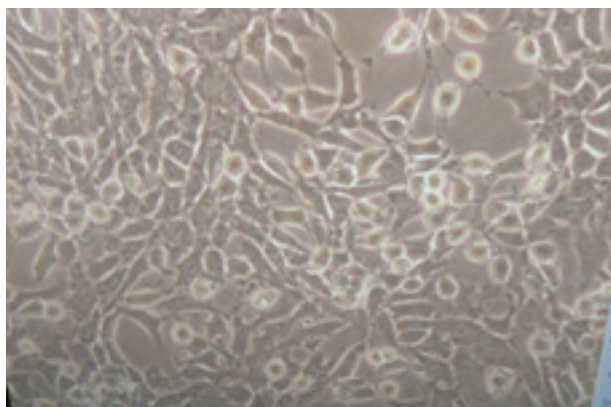
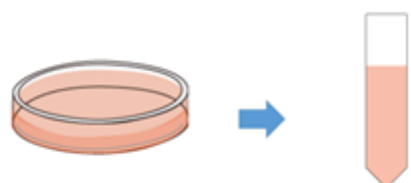


図 12. CHL 細胞

1. エックス線での傷害



2. 細胞回収 トリプシン処理



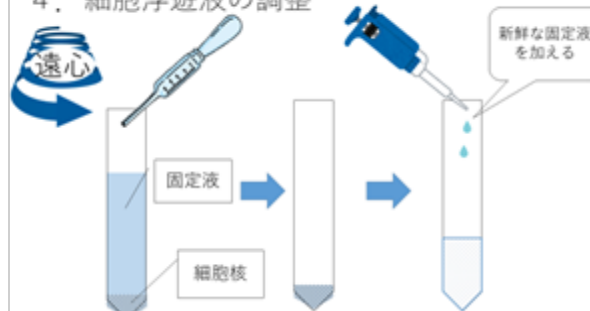
1. トリプシン処理を行い、シャーレの底から細胞をはがす。
2. 15mlチューブに細胞をすべて回収する

3. 細胞膜の除去

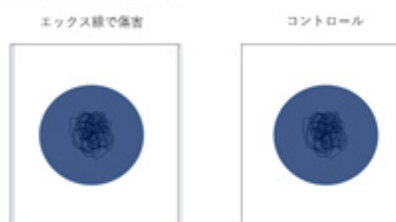


0.075 M塩化カリウム溶液により低張処理を行い細胞膜を破裂させる。

4. 細胞浮遊液の調整



5. 染色(ギムザ染色液)



ギムザ染色液とpH6.4リン酸緩衝液の混合液にスライドガラスごと浸けて染色

今回開発した染色体異常を検出する実験は、全工程を行うためには長時間を要し、専門的な器材を使用する。しかし、③細胞の固定まで実験を進めた細胞核を -20°C におくことで、長期の保存や、運搬が可能となる。このため、細胞核を提供することで、学校にある機材や試薬のみで実施可能な実験とした(図13)。冷凍保存をする前の実験の工程については、実験全体の流れをイメージすることができるように動画教材を作成した。



図13. 実験工程

また、参考とした祖父尼の方法[3]では、今回行った最終工程のみについても、長時間かかること、実験の手技が中学生や高校生には難しいことなどの課題がある。封入剤を乾燥させる工程を短縮させる方法を考案した。カバーガラスから微量にはみ出た封入剤をあえて拭かず、そこにドライヤーの冷風を当て、カバーガラスの周りの封入剤のみ乾かすことで、15分程度で顕微鏡観察が可能な程度までカバーガラスの固定が可能である(図14)。また、封入剤については、使用しなくても観察は可能であることを確認した。

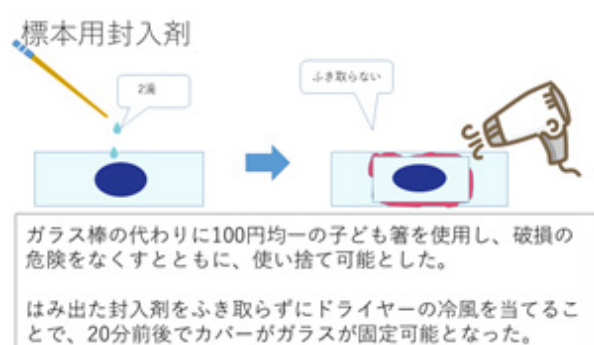


図14. 封入剤の乾燥法

一方、実験の手技の困難さについては、形式にこだわらず、より簡易で正確性のある方法に改変した。実験の手順の中で特に難易度の高い「核を残して上澄みを取り除く作業」では、スポイトで核を吸い込んだり、上澄みの中でスポイトを押してしまい、空気の泡が核の沈殿を舞い上げてしまう等の失敗が起こりやすい。そこで、スポイトを使用せず、そのまま試験管を

傾けて上澄みを捨てることで上記のような失敗を少なくすることが可能である(図15)。その際微量の核は流れてしまうが、回収する細胞の数を増やすことで対応が可能であると考えられる。祖父尼の6cmシャーレで行うCHL細胞培養方法3)を改変し、10cmシャーレで培養をすることで、回収できる細胞数を増加させることが可能である。また、ギムザ染色液を直接滴下するのではなく、浸漬法を用いることで、中学生にも実施可能な手技とした。

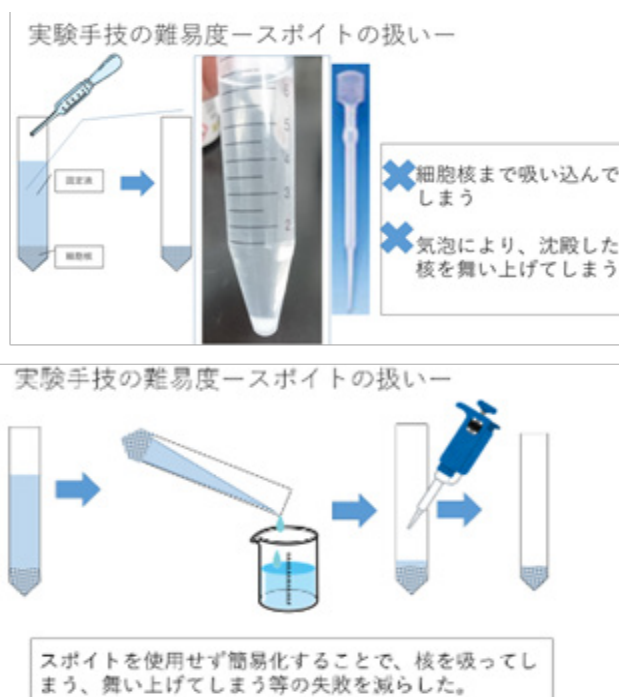


図15. 細胞核の回収法

また、今回の講座全体の中で最もつまづきが多かったのは、実験手技ではなく、顕微鏡観察であった。染色体の顕微鏡観察は難易度が高く、ピントを合わせる対象物がわからない、倍率が上がると、ピントを合わせることができないなどの問題があった。事前に顕微鏡の扱いについて学ぶ機会を設け、一斉指導の際には、各倍率での染色体の見え方や、視界の中央に持ってくるべき対象物をスクリーンに写真で提示することで、子ども自身が染色体を顕微鏡観察できる能力身に着け、より主体的な学びにつなげることができると考える(図16)。

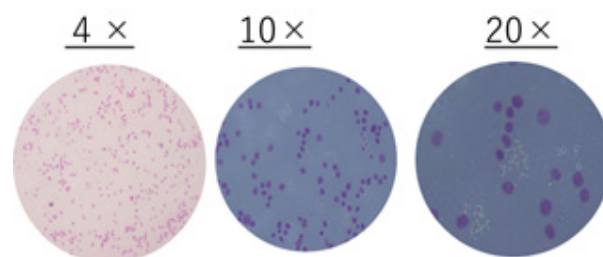


図16. 各倍率での染色体の見え方

4. 本教材の課題と展望

現在、放射線教育は理科教育に一任されている現状がある。しかし、学習指導要領に位置づけられた放射線項の中だけでは、生体影響を理解させる教育を行うことは困難であると考えられる。そのため、「生命の連続性」の中の細胞分裂と生物の成長の項で、細胞の構造や染色体について学んだ際にこの実験を取り入れることで、放射線の生体影響と細胞分裂の双方についての知識をより深める教育をすることができると推測される。

加えて、実際に自身で染色体を観察することや、間期の細胞では染色体が観察できない事を実感することで、細胞分裂の流れや、細胞分裂の周期、染色体についての理解が深まるとともに、放射線によりDNA が傷害されて染色体の構造に異常を生じることや、それらによる人体への影響についても、よりイメージしやすい教育につながると考える。

しかし、今回開発した実験教材は、放射線によるDNA 損傷を可視化し、実感することを可能にしているが、本教材のみで生体影響を具体的に理解することは困難だという課題がある。今後、染色体異常試験と関連させて、細胞分裂やたんぱく質合成における染色体やDNA の役割等の補助教材を作成することで、より学校現場で導入しやすい教材開発を期待する。

参考文献

- [1] 菅波詩織 「中学校理科における放射線教育の変遷」
『学校での放射線リスク教育ガイドブック』2019；16-19
- [2] 田中隆一 「学校における放射線教育」
NPO 法人放射線教育フォーラム 2010
第 12 回原子力委員会資料第 1-2-2 号
- [3] 祖父尼俊雄 「染色体異常試験－メカニズムから試験法、
国際的標準化法まで」 サイエントリスト社 2005

レントゲンによる X 線発見を再現させた実験教材開発

千葉大学教育学部養護教諭養成課程 吉田 千明

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災による福島第一原子力発電所の事故をきっかけに、メディアから放射線に関する様々な情報が氾濫し、人々の放射線の生体影響への関心が高まった。学校現場でも、放射線に関する本質的な理解ができていないために、「放射能がうつる」といった放射線に関するいじめの問題が起きている。こうした状況の中で、子どもたちに放射線に関する本質的な理解を促す放射線教育の実施が急を要するものになっている。

学校での放射線教育の観点では、平成 29 年告示の新中学校学習指導要領 第 4 節 理科 第 2 各分野の目標及び内容〔第 1 分野〕1 目標 に、「物質やエネルギーに関する事物・現象を科学的に探究するために必要な資質・能力を次のとおり育成することを目指す。」と示しており、続けて「科学技術の発展と人間生活の関わりについて認識を深めるようにする。」「物質やエネルギーに関する事物・現象に関わり、それらの中に問題を見いだし見通しをもって観察、実験などを行い、その結果を分析して解釈し表現するなど、科学的に探究する活動を通して、規則性を見いだしたり課題を解決したりする力を養う。」といった記述がある。また、3 内容の取扱い (5) エでは、静電気と電流の単元で「真空放電と関連付けながら放射線の性質と利用にも触れること。」との記述がある。平成 30 年告示の新高等学校学習指導要領 第 5 節 理科 では、より発展的に「自然の事物・現象を科学的に探究するために必要な資質・能力の育成を目指す。」との目標を掲げている。

これらを踏まえ、新学習指導要領に沿った今後の放射線教育は、科学的に探究する活動を重視し、そのために必要な資質・能力の育成を目指すという方向性になっていくことが予想される。そこで、新学習指導要領に沿った今後の放射線教育で活用できる教材が必要であると考え、生徒が実験を通して放射線について体験的に学び、科学的な思考力を高めることを目的として、レントゲンの X 線発見を再現させた実験を取り入れた教材を開発した。

2. X 線発見までの流れ

レントゲンが研究に勤しんだ 19 世紀後半は真空放電現象が注目され、当時の物理学者がガイスラー、ヒットルフ、ゴール

ドシュタイン、クルックスなどが色々な形の陰極管（放電管）を作製した。1888 年に電磁波を発見したハインリッヒ・ルドルフ・ヘルツは、弟子のレナルトに命じて陰極線があたるガラス管壁に 0.005mm のアルミ箔の窓をつけたレナルト管（図 1）を作製し、わずか 2cm ではあるがその窓を通して陰極線を取り出すことに成功した。

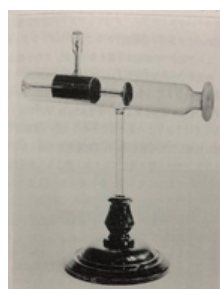


図 1. アルミニウム箔窓付レナルト管

レントゲンはこの陰極線を外に取り出す実験に興味を持った。陰極線が薄い金属板を透過することは当時すでに証明されていたので、薄いガラス管壁も透過しうのではと考え、クルックス管の真空度や電圧を上げて透過性を高めて実験を実施した。陰極線の検出のため白金シアン化バリウムを塗った蛍光板を用い、ヒットルフ・

クルックス管を黒いボール紙で覆って管外に光が漏れないようにし、さらに部屋を暗くして陰極線がガラス管壁や紙を通過するか観察した。管から一条の光も出ないことを確認し、電流を遮断しようとした時、1m 近く離れた所に置いてあった白金シアン化バリウムを塗った蛍光板が発光したことに気付いた。1895 年 11 月 8 日のことである。それまでの知識では、陰極線は空気中で数 cm 以上は通過しないと言われていた。この性質とは明らかに異なる陰極線ではない何か別の線が、ヒットルフ・クルックス管から出ていることを発見し、それを正体不明の線「X 線」として命名した。

その後、レントゲンは X 線の性質の研究として、管と蛍光板の間に紙や本、種々の金属板を用いて遮蔽実験を行い、その線の透過性を調べた。その中でも鉛の線を遮断する特異な力に興味をもち、小さな鉛の円板を拇指と人差し指との間に



図 2. ベルタ・レントゲンの手の X 線写真

挟み、陰極管と蛍光板の間に位置付けた。その結果、鉛の円板の明瞭な輪郭のみならず、拇指と人差し指の輪郭、さらには彼自身の手の骨の明瞭な輪郭が認められた。これらの実験結果を証拠に残すために写真乾板を用いて X 線写真を撮影した（図 2）。

レントゲンは写真技術にも優れており、その後の X 線撮影に役立った。X 線発見後、ウィーンの新聞 Die Press には、1 月 5 日「センセーショナルな発見」という記事で紹介され、同年 1 月 6 日ベルリン内科学会で神経科医のジャストロビッツが「不透明体を通過する新光線の発見」として X 線発見に言及した。その後瞬く間に世界中に X 線の発見が伝えられ、数日後には人体をはじめ種々の分野で利用された。レントゲンはこの X 線発見によって、1901 年に第 1 回ノーベル物理学賞を受賞している。

3. レントゲンによる X 線発見の再現実験

【使用器材】

○器材 1

真空管の一種であり、陰極線を出すための装置、クルックス管（図 3）。管の中に種々の気体を満たして高圧放電を通すと、陰極端から陰極線が流出する。

○器材 2

高い電圧をかけることのできる機器、誘導コイル（図 4）。最大で $100V \times 1,000$ 倍ほどの出力が可能。極性切替ができ、写真では赤が+になっている。



図 3. クルックス管



図 4. 誘導コイル

○器材 3

GM 計数管に電流を流し、管に入射した放射線の量を数値として表示する放射線計数装置（図 5）。

○器材 4

管内の気体が入射した放射線によって電離され、その際に放出された電子が一時に陽極に流れ込むことによって生じる強いパルス電圧を電子回路によって計測する装置、GM 計数管（図 6）。この電圧の計測によって、入射した放射線の量を数えることができる。



図 5. 放射線計数装置



図 6. GM 計数管

○器材 5

レントゲンによる X 線発見の実験では使用されていなかったが、再現実験では上記の蛍光板を光らせるために紫外線照射装置（図 7）を使用する。紫外線照射時に照射部を直視

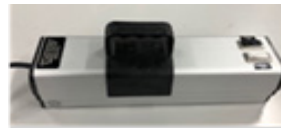


図 7. 紫外線照射装置

したり、不用意に手を差し出したりしないように注意する。

○器材 6

レントゲンが用いた蛍光物質は、図 8 に示すシアン化白金バリウムである。これを濡れたろ紙に塗り付けて乾燥させ、蛍光物質が取れないようにシャーレの蓋をかぶせ蛍光板を作製した（図 9）。この蛍光板を用いレントゲンの実験を再現したが、蛍光板が光ることは確認できなかった。当時レントゲンは真っ暗な部屋で蛍光板が微かに光るのを見たとのことで鋭い観察眼があったこと、非常に高い線量の放射線で実験を行っていたこと、加えて作成した蛍光板のシアン化白金バリウムに不純物が混入していたこと等が原因として推測される。今回の再現実験では安全性を考慮する点からも、紫外線照射装置を用いて蛍光板が光る様子を再現する。



図 8. シアン化白金バリウム



図 9. 作製した蛍光板

【実験手順】

- 1 誘導コイルをクルックス管の電極につなぐ。写真は赤が+極、黒が一極である（図 10）。
- 2 GM 計数管を放射線計数装置につなぐ。計数管は1つあれば実験は成立するが、複数あると場所による放射線量の違いを数値として同時に見るができるため、写真では3つ使用している。安全を考慮し、これらの作業は機器のコンセントを抜いた状態で行う（図 11）。



図 10. 手順 1 の様子



図 11. 手順 2 の様子

- 3 放射線計数装置の電源を入れ、カウントを開始する。
- 4 クルックス管を写真の向きにセットし、誘導コイルの電源を入れてクルックス管に電圧をかける。放射線計数装置のカウント数の変化を見ることで、クルックス管から放射線が出ていることを視覚的にとらえることができる（図 12）。

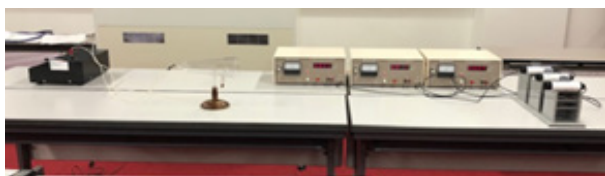


図 12. 手順 4 の様子

追加実験①として、GM 計数管をクルックス管周囲の様々な位置に配置し、放射線源からの距離で放射線量にどのような違いがあるかを調べる。

追加実験②として、図 13 のように金属板等、生徒の興味に合わせたものをクルックス管と GM 計数管の間に置く。放射線量の違いによって、その物質の X 線遮蔽効果を調べることができる（遮蔽実験）。



図 13. 追加実験②、アルミニウム板を用いている。

5 クルックス管から約 1m の位置に蛍光板を置く（図 14）。

6 部屋を暗くし（なるべく真っ暗に）、紫外線照射装置の電源を入れ、蛍光板を光らせる（図 15）。この際被曝を防ぐため、誘導コイルの電源はいれていない。また、写真では見えやすいように蛍光板を強く光らせているが、レントゲンが行った実験では微かに光ったとのことなので、もう少し紫外線照射装置を蛍光板から離すことで、より再現性の高めることができる。



図 14. 手順 5 の様子



図 15. 手順 6 の様子

4. おわりに

今回は、レントゲンによる X 線発見の歴史的な背景を学ぶ新しい形の放射線教育教材を作製した。新学習指導要領に示された“科学的に探究する活動を重視する”今後の放射線教育において、放射線についての基礎知識や社会的側面を学習するだけでなく、X 線が発見された経緯を学び、それを再現させた実験を通して体験的に学習を進められる本教材は科学的な思考力を高められる有効なものである。

しかし、学校教育の中で放射線教育に充てられる時間は多

くはなく、X 線発見の歴史を学び、さらに X 線発見を再現させた実験を行うことは難しいことが予想できる。そこで、本教材は写真を多く取り入れた冊子という形にすることで、必要な部分を選択して授業における資料として扱ったり、X 線発見を再現させた実験の手順書として使用したり、教科書や副読本と一緒に活用し放射線に関する学びを深めるためのツールの 1 つとして利用したりと、様々な用途で使えるようにした。

一方、X 線発見を再現させた実験も学校で実施できる形にするため、使用器材や実験の安全性について検討を重ねた。学校で放射線を扱う実験を行う際には保護者の同意が必要な場合が多いため、レントゲンが行った実験で使用された器材を使いつつ、クルックス管から放出される放射線は数値として可視化し、蛍光板を光らせる工程は紫外線を用いて前工程とは分けて行うことで、クルックス管から放出される放射線による被曝の危険性を減らした。紫外線を用いる工程は多少再現性に欠ける部分ともなってしまったが、中学生及び高校生が参加する放射線に関する実験講座でこの実験のデモンストレーションを行った際には、クルックス管から出ている放射線の数値や、追加実験として扱っている遮蔽実験で金属板の種類や厚さ、クルックス管からの距離でその数値が変化の様子、蛍光板が光る様子を熱心に見ている生徒の姿が見られた。

学校で行う放射線教育は、時間や設備が限られることが多い。しかし、生徒が体験的に学び科学的な思考力を高めることが期待できる実験を扱った教材には大きな価値があり、今後も学校で行うことのできる実験を取り入れた学習プログラムを検討・開発していく必要があることは明確である。私は、教材開発には専門的な知識を基に十分な検討を重ねていける環境が必要であることから、こうした科学的に探究する活動を学校教育に取り入れる際にも専門機関等との連携が欠かせないと考える。子どもたちへの放射線教育を学校の理科の授業に一任するのではなく、物理学、化学、生物学、医学など様々な分野の専門家、専門機関が協力することで、放射線を多面的に捉え深く学べるような教材や学習プログラムを開発し、学校における放射線教育の充実を図ることを今後の課題としたい。

参考文献

- [1] 青柳泰司「近代科学の扉を開いた人 レントゲンと X 線の発見」恒星社厚生閣 2000
- [2] 山崎岐男「X 線の発見者 レントゲンの生涯」考古堂書店 1989
- [3] 山崎岐男「レントゲンの生涯 X 線発見の栄光と影」富士書院 1986
- [4] 文部科学省 中学校学習指導要領比較対照表【理科】2017
- [5] 文部科学省 高等学校学習指導要領比較対照表【理科】2018

X線発見ならびに放射線研究の歴史

千葉大学教育学部基礎医科学 杉田 克生

ドイツ・ヴュルツブルグ大学の Friedrich Conrad Röntgen（レントゲン）は、陰極線がガラス管の壁に当たるとガラスが緑色の蛍光を発し、別のある種の化合物に対しても蛍光を出す冷光現象に注目していた。1895年11月この冷光現象をより鮮明に見ようと、外からの光を遮るため紙に包んだ陰極線管を動作させた際に、1mほど離れた所に置いてあったシアン化白金バリウムを塗った紙が蛍光を発するのを観察した。通常陰極線は大気圧で数 cm しか通過しないため、陰極線以外の放射線が生じていると理解した。彼はとりあえず“X線”と名付けた。レントゲンがX線を発見した研究室は現在レントゲン記念館となっている（図1,2）。



図1. レントゲン環状通り8番地のヴュルツブルグ大学旧物理学研究所（現在レントゲン記念館）



図2. 1905年から1937年まで、レントゲン記念館外壁に掲げられていた記念銘板（左）、1905年のX線発見10周年とレントゲン60歳の誕生日にドイツの有数な物理学者らにより贈られた

1900年にはバイエルン政府の要請でミュンヘン大学物理学主任教授となり、1920年まで務めた。1901年のノーベル賞受賞後、バイエルン国王から“von”の称号を呈示されたが受諾を辞退した。この清貧の科学者は、第1次世界大戦後のインフレ経済に追い詰められ、1923年大腸がんで死去した（図3）。



図3. レントゲンの終焉の家、ミュンヘンのマリア・テレジア通り11番地

このレントゲンの研究に興味をそそられたのがフランスの Antoine Henri Becquerel（ベクレル）である。蛍光を発するウラン化合物が、写真乾板を感光することを見つけ、当初はベクレル線と呼ばれた。ウラン化合物と写真乾板の間に骨を入れると、骨の写真が写ったが、X線ほど鮮明でなかったため注目はされなかった。ただしベクレルの発見は、キュリー夫妻（Marie Skłodowska Curie と Pierre Curie）に受け継がれた。夫妻はウラン鉱物であるピッチブレンドを化学処理し、1898年ポロニウム元素を発見している。同年末には、ウラン化合物の250万倍強い放射線を出す元素ラジウムを発見している。ちなみに放射線を出しているのはウランなどの元素であることを実験で示し、その能力を「放射能」と名付けたのはキュリー夫妻である。1903年キュリー夫妻とベクレルはノーベル物理学賞を分かち合った。

なおX線が身体に有害であることは、初期の段階で認識されていた。レントゲン自身も長い露光の後、皮膚に腫瘍ができ、髪の毛が抜けることに気づいていた。X線装置を扱う人々

に放射線皮膚障害が広く見られていた。一方シカゴの医学生、エミール・グルツベはX線が治療能力を持つことを認識し、1896年に乳がんの女性に用いた。フランスでの胃癌治療、ウィーンでの皮膚癌治療、スウェーデンでの頭部および頸部の癌治療が実施され、放射線による癌治療が期待された。

一方、ベクレルは何時間か胸ポケットにラジウムを入れたままにし、そのため数週間皮膚に潰瘍ができた。放射性元素はX線と似た生理学的影響をもつことがわかり、放射性物質に直接触れるがん治療である小線源治療が開発された。現在の放射線治療は、電子線、陽子線、中性子線などの粒子線とX線やγ線などの電磁放射線を用いて、悪性腫瘍の治療が行われている。例えばラジウムやコバルト60などの密封線源を利用した癌治療などである。

なお、X線発見に関しては園部利彦「命と医学を考えると知っておきたい科学者と科学史」（近代文芸社）の一読を薦める。

資料

放射性元素の語源

千葉大学教育学部基礎医科学 杉田 克生

ウラン（元素記号：U）は、英語は uranium、ドイツ語 Uran である。1789 年、Martin Heinrich Klaproth がピッチブレンドの中から発見した。同時期に天文学者の Herschel が Uranus（天王星）を発見・命名にちなんで uranium と名付けられた。Uranus の語源はギリシャ神話における天空の神 Ouranos（ウラノス）である。ウラノスは一時全世界の支配権を手に入れるが、その王座を自らの子のクロノスによって暴力的に奪われてしまう。また、クロノスもその子ゼウスによって統治権を奪われる。本来「天、天空」を意味するギリシャ語 uranos の派生語には、天文の分野だけでも uranography（天文学）、uranolith（隕石）、uranoscopy（天体観測）などがある。

なお Klaproth は uranium との類推により、元素チタン（titanium：Ti）も1795年に命名している。鉱物の分析から新しい金属酸化物が見出されるようになった時代、この元素チタンは鉱物中から発見され、神話のティターン（Titan）にちなんで命名された。チタンは天の神ウラヌスと地の神ガイアの子である。他に Titan に由来する用語には次のものがある。土星の衛星 Titan（タイタン）、豪華客船 RMS(Royal Mail Steamer) Titanic（タイタニック号）、恐竜の Titanosaurus（ティタノサウルス）などがある。手元の辞書では、「Titanic」とは、「絶対安全と考えられていたものが災禍に遭遇する場合に使われることがある」と補足説明がある。福島第一原子力発電所事故に使用できるかどうかは疑問である。

次にポロニウム（Polonium:Po）であるが、ラテン語のポーランド（Polonia）が由来である。この元素の発見者キュリー夫人の祖国がポーランドであったため、国名に因んで名付けられた。英語 Poland は地元では Polska とよばれ、「野原、平地」を意味するロシア語 *п о л е* との関連が言われている。またラジウム（Radium：Ra）はラテン語 radius（放射）が語源である。ラジウムによる放射線が細胞に影響を与えることは発見の初期から分かっていた。また放射性物質ラドン（Radon：Rn）は、ラジウムの崩壊によって生まれることから、RADium emanatiON の略で Radon と名付けられた。

語源としての radio-（母音の前で radi-）は、「放射の、電波、無線」の連結形である。派生語として、radioactive（放射能の、放射性的）、radioactive isotope（放射性同位元素）、radio astronomy（電波天文学）、radio carbon dating（放

射性炭素年代測定法）、radio frequency（無線周波数）、radio frequency heating（高周波加熱）、radiogram（無線電報、X線写真）、radiology（放射線医学）、radioscopy（X線透視）、radio source（宇宙の電波源）、radio telegraph（無線電信）、radius（半径、車輪の輻、放射）などがある。ただし radio- には橈骨の意味での radius も派生語である。車輪の軸と輪とを放射状につなぐ棒である「輻」のことも radius と言い、解剖学上橈骨が車輪の輻に似ているところから名づけられたと言われている。

放射線治療に用いられるコバルト（Cobalt：Co）はギリシャ語 kobold（地中の妖精、中世の妖精）が由来である。コバルト（Kobold, Kobolt）はドイツの民間伝承として語られてきた醜い妖精、精霊である。英語ではゴブリンと訳されることもある。青の顔料として古くはエジプトの陶器やイランのガラス球の着色に用いられていた。この元素を含む鉱物は冶金が難しく、16世紀のドイツの鉱山労働者たちはドイツ民話の醜い山の精コバルト（Kobold, Kobolt）が鉱石に魔法をかけているのであろうと考えた。その後、この元素は18世紀にスウェーデンの化学者イエオリ・ブラント（1694-1768）によって初めて分離された。ベルグマンによって新元素であると確認され、コバルトに因んだ名前が付けられた。語源は同じだが説明が若干異なる他の説によると、妖精が山野に出現し中世すでに有用であった鉄を盗んだという。その廃鉱石が Kobalt と名付けられ、その石から発見された元素にコバルトという名前が付けられたという話である。

コバルトはドイツ民話の山の精が由来であるが、トリウムは北欧神話の雷神（Thor）に由来するなど、元素名の由来を辿ると各地の神話に行きつく。27核種の同位体すべてが放射能をもつトリウムは、スウェーデンの化学者ベルセーリウス（1779-1848）がトール石（ノルウェーの鉱物）の中から発見した。雷神であり農耕神でもあるトールの使命は霧の国の巨人と闘って神々の世界を守ることであった。トールはどのような敵でも一撃で倒すミヨルニーというハンマーを持っているが、ある時巨人トリムによってそのハンマーが盗まれてしまった。トールはハンマーを取り返すために美しい女神の格好をしてトリムの元へ行ったが、なぜそのような格好をしたのか不明である。ちなみに、木曜日 Thursday はトールの日である。

元素名の由来に神話に関わっている例は多くある。日本人はギリシャ語、ラテン語の素養がなく、ましてやギリシャ神話やローマ神話など少なくとも学校教育では正式には習わない。科学立国を目指す日本の生徒にも、科学用語の語源になっているギリシャ語やラテン語を学ぶ機会が望ましい。また放射線元素語源をより知りたい方には、池田黎太郎監修、市毛みゆき、杉田克生著「元素名語源集」千葉大学教育学部養護教諭養成課程（平成26年3月31日発行 ISBN978-4-903328-16-4）の一読を薦める。また、1. 竹村文祥「神話、伝説、医学用語」東明社、2. 竹本喜一、金岡喜久子「化学語源ものがたり」化学同人、杉田克生「放射性元素の発見と命名由来」STETHOSCOPE 2014；215：12-14.なども参考となる。

参考文献一覧

『千葉大学教育学部研究紀要』

- [1] 石田菜摘、杉田克生、高橋博代「学習指導要領改訂に伴う中学校での放射線教育の実態調査」
2014；62：361-366.
- [2] 山本菜月、杉田克生「リスク教育導入のための放射線実験プログラム作製」2015；63：381-391.
- [3] 前田彩香、高橋あかり、杉田克生「放射線生体リスクにおける学習プログラム開発」2016；64：365-373.
- [4] 川崎靖奈、前田彩香、杉田克生「放射線知識調査を基にした放射線生体リスク学習プログラムの開発」
2017；65：375-382.
- [5] 飯田祥子、前田彩香、土岐香苗、杉田克生「放射線リスク教育のための学習プログラム開発」
2018；66-1：363-367.
- [6] 土岐香苗、杉田克生「放射線リスク教育のための学習プログラム開発」2019；66-2：323-327.

『放射線のリスクを学ぶー保健師のためのテキスト』

日本アイソトープ協会 2018
<https://www.jrias.or.jp/seminar/101.html>

『放射線学入門』

産業医科大学産業生態科学研究所放射線健康医学研究室
岡崎龍史

[1] 「一般向け緊急被曝ガイド（放射線学入門）」

<https://www.uoeh-u.ac.jp/var/rev0/0015/5811/118814131515.pdf>

[2] 「放射線教育講習プログラム（youtube）」

放射線の人体影響

1) <https://www.youtube.com/watch?v=dnSoJW9ISJo>

2) <https://www.youtube.com/watch?v=Z8rmlHVlyNc&t=226s>

3) <https://www.youtube.com/watch?v=94Qtm94EUK8>

4) <https://www.youtube.com/watch?v=YwXpgYg4xk8>

5) <https://www.youtube.com/watch?v=wMYuLdKUfOI>



CHIBA UNIVERSITY

学校での放射線リスク教育ガイドブック ー第二版ー

Guidebook for radiation risk education at school

発行 平成 31 年 3 月 1 日

編集 千葉大学教育学部基礎医科学

杉田 克生

出版元 千葉大学教育学部養護教諭教育講座

〒 263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1 - 33

TEL 043-290-2584

<https://doi.org/10.20776/105879>

表紙デザイン 飯田 祥子