

「放射線外部被ばく防護三原則の実験指導」に  
関する教材開発と評価：

中学校理科教員を対象に

佐藤 公法・竹内 達哉・安見 周平

東京学芸大学紀要 自然科学系 第68集

平成28年9月

# 「放射線外部被ばく防護三原則の実験指導」に関する教材開発と評価：

中学校理科教員を対象に

佐藤 公法\*<sup>1</sup>・竹内 達哉\*<sup>2</sup>・安見 周平\*<sup>2</sup>

環境科学分野

(2016年5月25日受理)

SATO, K., TAKEUCHI, T. and YASUMI, S.: Development and evaluation of teaching materials for the experimental instruction of three principles protecting materials from external exposure. Bull. Tokyo Gakugei Univ. Div. Nat. Sci., 68: 83-90. (2016)

ISSN 1880-4330

## Abstract

We developed teaching exercises about protecting materials from external exposure suitable for the classroom. In the teaching materials, both the lecture and experiment are given on the three principles of protection from external exposure: 1. protection by distance, 2. protection by time, and 3. protection by shielding, in addition to the fundamentals of radiation and radiation measurements. Bachelor students, master students, and in-service teachers were trained with this teaching material, where most of them obtained the knowledge and technique required for teaching the three principles of protection from external exposure.

Keywords: external exposure protection, three principles, radiation measurements

*Department of Environmental Sciences, Tokyo Gakugei University, 4-1-1 Nukuikita-machi, Koganei-shi, Tokyo 184-8501, Japan*

要旨：放射線外部被ばく防護に関する実習を講義室レベルで実践する中学校理科教員を対象とする研修用教材を開発した。開発した教材では、放射線や放射線計測の基礎事項の概説に加えて、放射線外部被ばく防護三原則である(1)距離による防護、(2)時間による防護、(3)遮へいによる防護について講義と実習を行う。この教材を用いて学部生、大学院修士課程学生、現職教員に対して研修を行った結果、ほとんどの研修参加者が放射線外部被ばく防護三原則の実験指導を行うための知識や技術を習得できたという結果を得た。

\*1 東京学芸大学 広域自然科学講座 環境科学分野 (184-8501 小金井市貫井北町4-1-1)

\*2 東京学芸大学教育学部 初等教育教員養成課程 理科選修 物理教室



## 1. はじめに

2008年度の学習指導要領改訂に伴い、小・中・高等学校の教育において原子力や放射線の平和利用に関する事項が増加した<sup>1)</sup>。さらに、2011年3月には東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所事故が発生し、我々がかつて経験したことのない環境放射能汚染が身近なものになった。未曾有の事故の教訓を踏まえ、放射線に対する安全性への国民の関心がこれまで以上に高まっている反面、放射線計測や防護に関する理解は必ずしも深まっているとは言い難い。そのため、小・中・高等学校のとりわけ理科の教員には、放射線に関して正確で高度な知識と理解がこれまで以上に求められている。

放射線とは高い運動エネルギーをもって流れる物質粒子と高エネルギーの電磁波、すなわち極めて波長の短い電磁波の総称である<sup>2)</sup>。高い運動エネルギーをもって流れる物質粒子とはイオン、電子、中性子、陽子などのことである。一方、高エネルギーの電磁波とはガンマ線とエックス線を指し、通常は紫外線を含めない。不安定な原子核が壊変し、それに伴う放射線を放出する性質あるいは能力のことを放射能という。我々の身の回りには、自然放射線と人工放射線が存在している。自然放射線は宇宙線や大気中のラドンなど自然界からの放射線で、世界的な平均年実効線量は2.4ミリシーベルトとされている。人工放射線は医療診断に使われるレントゲン撮影やCTスキャンのエックス線など、人工的な装置から発生する放射線、原子力発電などによって人工的に作られた放射性物質から放出する放射線のことである。人工放射線の種類や物理的性質は自然放射線と同様で、人体への影響も自然放射線と変わらない。

人体が放射線にさらされると、放射線に被ばくしたと表現する。放射線被ばくは、人体と放射線源の位置関係の観点から、外部被ばくと内部被ばくに分類される。外部被ばくは、体外に存在する放射性物質や放射線発生装置から放出する放射線による被ばくで、体外被ばくとも言われる。広島、長崎の原子爆弾による被爆、チェルノブイリ原子力発電所事故による被ばくは、外部被ばくが主な被害とされている。内部被ばくは、吸入、経口、皮膚侵入によって体内に取り込んだ放射性物質によって引き起こされる被ばくで、体内被ばくとも言われる。外部被ばく、内部被ばくともに、放射線被ばくはガンや白血病などの放射線障害に結びつく恐れがあるため、被ばく線量は防護によって低減する必要がある。放射線外部被ばくの理解には、防護三原則を知る必要がある。そこで、本論文では、放射線外部被ばく防護に関する実習を講義室レベルで実践する教員研修用の教材を開発した。そして、開発した教材を用いて学部生、大学院修士課程学生、現職教員に対して研修を実施し、教材を評価した。

## 2. 放射線外部被ばく防護の三原則

放射線防護の基本原則は国際放射線防護委員会 (ICRP) に基づき、放射線作業や施設内及びその周辺に居住する一般公衆の放射線被ばくをできる限り低いレベルに保つことにある<sup>3)</sup>。例えば診療現場では、X線発生装置からの放射線防護を行うことにより、放射線外部被ばくをできる限り低減することが試みられる。放射線による外部被ばくの防護は、遮へい (shield)、時間 (time)、距離 (distance) に着目した3つの原則に基づく。これを放射線外部被ばく防護の三原則という。まず、適切に遮へいすることが重要である。

(1) 遮へいの原則は、放射線源との間に適切な遮へい物を設置することにより被ばく線量を低減することである。外部放射線被ばく防護の主な対象は、エックス線、ガンマ線、ベータ線、及び中性子線である。アルファ線は皮膚を透過できないため、通常は考える必要はない。ベータ線の遮へいには、厚さ1から1.5cmの透明なアクリル板が用いられる。ベータ線のエネルギーが高くなると、制動放射線が発生することがあるので注意が必要である。ガンマ線やエックス線の遮へいには密度が高く、原子番号の大きな物質である鉛や鉄が有効である。中性子線の遮へいには水やパラフィンなど、原子番号の小さい物質が有効である。

(2) 時間の原則は、放射線に曝されている時間を短縮することにより被ばく線量を低減することである。時間による被ばく低減は、時間の短縮に比例している。時間を短縮するために、作業量や手順を合理的に計画することや、コールドラン実験などにより作業者の熟練度を向上させるなどの工夫ができる。

(3) 距離の原則は、放射線源との距離を離すことにより、空間線量率を低減することである。距離による減衰効果は、点線源からの放射線の線束が距離の二乗に反比例 (逆二乗の法則) することからも示されるように、放射線の線量率も同様に逆二乗の法則が適用できる。ピンセットやトンクなどの器具を使用することにより、距離を効果



的にとることが可能となる。外部被ばくの防護は、三原則を適切に組み合わせることにより効率よく行う。

### 3. 実験指導の方法

放射線外部被ばく防護に関する実習を講義室レベルで実践するためには、実習をするスペースに加えて、放射線放出源である放射性同位元素を準備する必要がある。さらに、放射線を計測するための放射線検出器を準備する必要もある。これらについて、以下で説明する。

#### 3. 1 放射性同位元素

外部被ばく防護に関する実習を実践するためには、ガンマ線放出線源が適している。「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（放射線障害防止法）」で定める下限数量（規制対象下限値）以下の密封された放射性同位元素で、規制の対象にならないものを、法規制対象外の線源という。法規制対象外であるため、許可・届出の必要がない。法規制対象外の線源は、放射線測定器及び応用計測器の点検、医療診断用ガンマカメラの測定分解能及び感度分布試験、放射線管理用サーベイメータの測定効率校正、ゲルマニウム半導体検出器における測定効率校正など、校正用線源として使用されている。また、教室や講義室レベルでの放射線教育にも利用することができる。法規制対象外の線源は、公益社団法人（公社）日本アイソトープ協会を通して購入することが可能である<sup>4)</sup>。同協会では、小学校・中学校・高等学校を対象にして（大学は対象外）、放射線教育用線源（<sup>133</sup>Ba 370kBq）を無料貸出ししている<sup>4)</sup>。

放射線障害防止のための機能に係る設計、設計に合致することの確認の方法、使用・保管・運搬条件について認証を受けることを設計認証という<sup>5)</sup>。設計認証を受けた表示付認証機器は法規制対象ではあるが、放射線障害防止法の規制をあまり受けずに使用することができる。そのため、放射線取扱主任者の選出を必要とせず、書類の届け出だけで誰もが使用できる。表示付認証機器は、使用の目的が定められており、目的以外の使用はできない。公社日本アイソトープ協会は、設計認証を受けた表示付認証機器として、放射能標準ガンマ線源、照射線量率標準ガンマ線源、ガンマ線源を取り扱っており、これらを放射線教育に利用することができる。ただし、放射線障害防止法の取り扱いの制限により、18歳未満の者は表示付認証機器を取り扱うことができないため、小学校・中学校・高等学校では法規制対象外の線源を用いることになる。法規制対象外の線源、表示付認証機器を使用する際には、放射線が不必要に人体にあたるのは避けるべきである。

#### 3. 2 放射線検出器

放射線検出器とは、放射線と物質との相互作用（電離作用や発光作用など）を利用して放射線を検出する装置である。検出器は安価なものでは数万円程度から1000万円以上するものまで多岐にわたる。放射線外部被ばく防護に関する実習には、ガイガー・ミュラー（GM）計数管、シンチレーションカウンタ、半導体検出器などを使用することができる<sup>2)</sup>。以下に、各放射線検出器の原理を説明する。

GM計数管による放射線検出の原理は、電離現象に基づいている。放射線が入射すると充填ガスの電離が起こり、陽イオンと電子が生じる。発生した電子は陽極に向かって増加しながら移動する。一方、陽イオンは陰極に移動するため、瞬間的にパルス電流が発生する。発生するパルス数を計測することにより、放射線計測を行う。シグナルを電氣的に増幅するため誤差が大きい。

シンチレーションカウンタによる放射線検出の原理は、発光現象に基づいている。シンチレータに放射線が入射するとそれを構成する原子が励起され、短い時間にもとの状態に戻る。この際に、励起エネルギーに相当する発光が生じる。シンチレーションカウンタでは、シンチレータに入射する放射線によるエネルギーに比例した強度の光を、電気信号として検出する。

半導体検出器による放射線検出の原理は、シリコンやゲルマニウムなどの固体の電離現象に基づいている。整流作用を持つ半導体接合に電気が流れない方向に電圧をかけると、伝導帯にほとんどキャリアが存在しない空乏層が形成される。空乏層に放射線が入射する際に生じる電子・正孔対からなるキャリアを信号として検出する。半導体検出器は、放射線のエネルギー分解能が非常に良いため放射性核種の分析に用いられる。

放射線外部被ばく防護に関する実習を精度良く行うためには、放射線のエネルギースペクトルを解析する方法



(スペクトロスコーピー) が望ましい。放射線のエネルギースペクトルは、放射線検出器からの出力信号を増幅器で増幅させた後、マルチチャンネルパルス波高分析器で表示する<sup>6)</sup>。最近では、5万円ほどの簡易型システムも販売されている。

#### 4. 中学校、高校の理科教員研修用教材の開発

以下のテーマで構成される教員研修用教材を開発した。(1) から (5) の構成からなる。

(1) 放射線概論, (2) 放射線安全取扱い, (3) 放射線計測, (4) 食品の安全, (5) 外部被ばく防護三原則

(1) から (4) については、講義を行った。放射線と放射能, エックス線, ガンマ線, ベータ線, 中性子線などの放射線の種類, 原子・原子核の構造, 放射性同位元素 (Radioisotope: RI), 放射性壊変, 放射能の単位, 等価線量や実効線量の考え方, 放射線の遮へい, 外部被ばくと内部被ばく, 外部被ばく防護, ガンマ線スペクトロメトリー, 食品の安全について概説した。特に食品の安全については、震災後の2012年4月1日から施行された放射性セシウムの新基準値にも言及した<sup>7)</sup>。(5) では、放射線外部被ばく防護三原則である“距離による防護”, “時間による防護”, “遮へいによる防護”について講義と実習を行った。尚, 教員研修で使用したワークシートを図1に示した。ワークシートには実験操作を記載するとともに、測定したデータをすぐ記入できるようにした。最終的には、この実験データに基づいて方眼用紙にグラフを作成するようになっている。これは研修を受けた教員が、データを記入してからグラフ化することで理解度を上げるためである。

放射性同位元素として、表示付認証機器である放射能標準ガンマ線源401CE (核種: セシウム137, 公称放射能: 1メガベクレル, 放射能規格: 公称放射能 $\pm$ 20%) を用いた。この線源は公社日本アイソトープ協会が設計認証を受けた放射能標準ガンマ線源であり、使用の目的は放射能及び放射能測定器の校正, 動作確認及び学生実験等の教材に限られている。本研修で用いた放射能標準ガンマ線源401CEは、使用の開始の日から30日以内に原子力規制委員会に届出を行った。

放射線検出器には、イギリス kromek 社製 (日本代理店は仁木工芸株式会社) の CdTeZn 半導体検出器 RadAngel を採用した。RadAngel は、5 × 5 × 5mm の CdTeZn 半導体を搭載している。安価で手のひらサイズであり、世界初の個人向け放射線検出器である。iPhone や iPad などに接続してデータを取ることも可能であり、簡便に使用することができる。本研修では、RadAngel を USB ケーブルを用いて Windows タブレットに接続し、無償制御用プログラム KSpec を用いてガンマ線スペクトロメトリーを行った。セシウム137 から放出される 662keV のガンマ線による全吸収ピークに着目し、Region of Interest (ROI) を指定してカウント数を計測した。

時間による防護の実習では、5, 10, 30, 60, 120, 180, 360秒間測定したカウント数を表に書き取り、これをもとに方眼用紙にグラフ化した。遮へいによる防護の実習では、遮へい材としてアルミニウム (Al), ステンレス鋼 (SUS), 銅 (Cu), 鉛 (Pb) の 1mm 厚の平板を用意し、線源と検出器の間に挟んだ状態で6分間のカウント数を測定した。遮へいの効果が物質の密度に依存することを理解するために、ワークシートには密度の値も追記した。距離による防護の実習では、線源と検出器の距離を 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11cm にした状態で3分間のカウント数を表に書き取り、これをもとに方眼用紙にグラフ化した。

#### 5. 結果と評価

開発した教員研修用教材を用いて、2015年12月27日に実施された平成27年度理科教員高度支援センター主催の現職教員用長期研修 (専門研修) 「放射線の科学」で実践した<sup>8)</sup>。研修時間は3時間で、参加した現職教員の人数は8名であった。また、将来教員を希望する理科専攻学部生用に開設されている授業科目の「物性物理学」、大学院修士課程理科教育専攻用に開設されている「環境自然科学教育研究法」の授業で、学部2, 3, 4年生と大学院修士課程1, 2年生に対して、1コマ (90分) 実践した。参加した人数は、学部生が13名、大学院生が7名であった。学部学生は2年生から4年生まで混在しており、ほぼ全てが物理系の分野に所属する学生であった。大学院生は1年生と2年生が混在しており、物理系、化学系、地学系の教室に所属する学生であった。研修前に、参加した現職教員に対して、“食品の放射性物質の基準値について知っていましたか”というアンケートを実施した。その結果、研修参加者8名中3名が“知っている”と答えていた。一方、同様のアンケートを学部学生と大学院生に実

「放射線外部被ばく防護三原則」ワークシート

実習 1 : 放射線強度と時間の関係

時間[秒]	カウント数
5	
•	
•	
•	
180	
360	

線源を1番近づけた状態で放射線強度を調べ, 時間との関係を方眼用紙に作図する。

実習 2 : 放射線強度と遮へいの関係

遮へい材	密度[kgm <sup>-3</sup> ]	カウント数
Al	2700	
•		
•		
•		
Pb	11340	

線源を下から, 3番目の位置にして, 6分間の放射線強度を調べる。

実習 3 : 放射線強度と距離の関係

距離[cm]	カウント数
1	
2	
•	
•	
•	
10	
11	

3分間の放射線強度を調べ, 距離との関係を方眼用紙に作図する。

図1 本研修で用いたワークシート

施したが, “知っている” と回答した学生は一人もいなかった。現職教員の食に対する安全性への関心が高いことが示された。

放射線外部被ばく防護三原則である (1) 距離による防護, (2) 時間による防護, (3) 遮へいによる防護についての実習では, ワークシートに記載した実験操作に従い, 2名のティーチングアシスタントとともに研修参加者が自ら実験を行った。全ての研修参加者が, 放射線強度の時間依存性のグラフを作成することができた。特に, 研修参加者の一人が作成したグラフを図2に示した。明瞭な一次関数がフリーハンドで描けている。放射線強度の距離依存性についても全ての研修参加者が, 逆二乗則を示すグラフを作成することができた。遮へいによる防護の実習では, 密度が一番高い鉛でカウント数が減少することは確認できたが, その他の物質では有意にカウント数の差を



見出すことはできなかった。このことは、662keVのガンマ線全吸収ピークにROIを指定するだけでは、遮へいによる防護の実習を定量的に行うことが困難であることを示唆している。全吸収ピークに対してバックグラウンドの差し引きを行うなど、さらなる工夫が必要であろう。“距離による防護”，“時間による防護”，“遮へいによる防護”について、上で述べた傾向は学部生，大学院生についても同様であった。

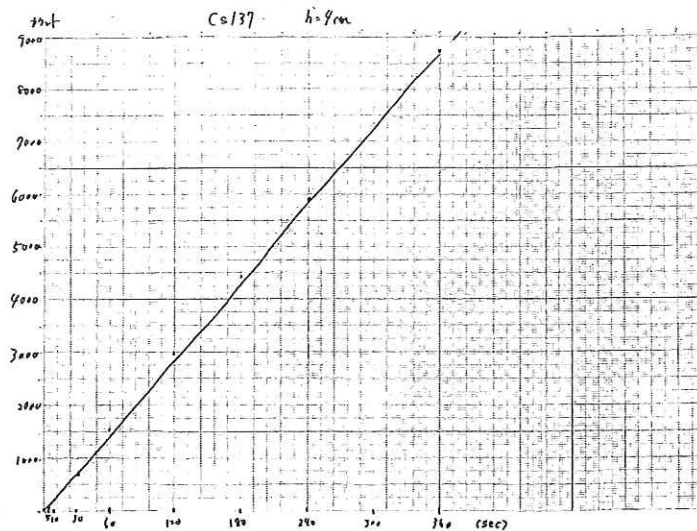


図2 本研修参加者の一人が作成した放射線強度時間依存性のグラフ。グラフでは縦軸は放射線強度，横軸は時間 [秒] を示す。

研修を受講した現職教員の理解度を把握するため，本研修終了後に「放射線の科学」について理解度診断を実施した（表1）。（1）“放射線強度と被ばく時間にはどのような関係があるか”という問いに対して，全ての研修参加者が“放射線強度が時間に比例して増加する”と答えた。時間による防護について，全ての研修受講者が理解できているものと判定される。（2）“放射線強度と遮へい材にはどのような関係があるか”という問いに対して，8名中7名の研修参加者が“遮へい材の密度が高くなると，放射線強度が減少する”と答えた。遮へい材の密度に言及していたのは，ワークシートに密度の値を追記していたためと推測される。遮へいによる防護についても，概ね研修参加者が理解できていると思われる。（3）“放射線強度と線源からの距離にはどのような関係があるか”という問いに対して，8名中2名の研修参加者が“放射線強度が距離の二乗に反比例して減少する”と答えた。それ以外の6名は，“減少する”，“反比例する”，“小さくなる”など，漠然とした回答であった。全ての研修参加者が距離の二乗に反比例するグラフを描けていることを鑑みると，グラフに対する数学的な読み取りに問題があるように思われる。“一般食品の放射性セシウムの基準値はいくらか”という問いに対しては，参加者全員が100 Bq/kgと答えることができおり，本研修を受けることにより理解が進んだという結果を示した。

表1 研修終了後に現職教員に対して実施した理解度診断の結果

(1) “放射線強度が時間に比例して増加する”と答えた人	8名中8名
(2) “放射線強度が遮へい材の密度が高くなると減少する”と答えた人	8名中7名
(3) “放射線強度が距離の二乗に反比例して減少する”と答えた人	8名中2名

学部学生と大学院生に対して実施した理解度診断（表2）では，（1）“放射線強度と被ばく時間にはどのような関係があるか”との問いに対して，学部学生，大学院生ともに全ての学生が“放射線強度が時間に比例して増加する”と答えた。時間による防護について理解できたと判定できる。（2）“放射線強度と遮へい材にはどのような関係があるか”との問いに対しては，学部学生の全員が“遮へい材の密度とともに放射線強度が減少する”と答えた。しかし，大学院生は7名中4名しか密度との関係に言及できなかった。（3）放射線強度と距離の関係については，逆二乗の法則に触れていたのは，学部学生が13名中9名，大学院生が7名中わずか3名であった。“遮へいによる防護”と“距離による防護”に関する実習では，物理的要素が高いため，化学系や地学系の大学院生の理



解が不十分であったと推測される。“一般食品の放射性セシウムの基準値はいくらか”という問いに対しては、参加者全員が100Bq/kgと答えることができおり、現職教員と同様に本研修を受けることにより理解が進んだという結果を示した。

表2 研修終了後に学部学生、大学院生に対して実施した理解度診断の結果

学部学生	
(1) “放射線強度が時間に比例して増加する”と答えた人	13名中13名
(2) “放射線強度が遮へい材の密度が高くなると減少する”と答えた人	13名中13名
(3) “放射線強度が距離の二乗に反比例して減少する”と答えた人	13名中7名
大学院生	
(1) “放射線強度が時間に比例して増加する”と答えた人	7名中7名
(2) “放射線強度が遮へい材の密度が高くなると減少する”と答えた人	7名中4名
(3) “放射線強度が距離の二乗に反比例して減少する”と答えた人	7名中3名

本教員研修の終了後に実施した「放射線の科学」の指導に関するアンケート調査の結果について以下で議論する。アンケートは、研修参加者の大学時の専門分野、教職経験年数、本研修の有効性に関する問いから構成されている。大学での専門分野に対する調査では、研修参加者8名全員が“理系”と答えた。その内2名が、大学で放射線に関する実験を行った経験を持っていた。“「放射線」に関する授業は必要だと思いますか”という問いに対して、研修参加者全員が“必要”と答えた。2011年の東日本大震災以降、教育の現場で、放射線への関心がこれまで以上に高まっていることを示している。“「放射線」は学習内容を理解させるのが難しい単元だと思いますか”という問いに対して、6名の研修参加者が“難しい”と答えた。その理由は、“放射線は目に見えないため、生徒には実感してもらいにくい”というものである。さらに、“教える側がきちんと学習していないため、うまく説明できない”という教員側の能力不足を示唆する回答も見られた。“今回の「放射線の科学」に関する研修を今後の実践に役立てようと思いますか”という問いに対して、研修参加者全員が“役立てようと思う”と答えた。このことは、本研修の内容が実際の教育現場で活用できる内容であったことを示しており、教材として有効性が示された。改善として、「放射線強度が距離の二乗に反比例する」ことをグラフに描けているにもかかわらず、文章や語句で表現できない人があるので、そのギャップを埋めることが挙げられる。

## 6. 結論

本論文では、放射線外部被ばく防護に関する実習を講義室レベルで実践する研修用教材の開発を行った。開発した教材は主に、(1)放射線概論、(2)放射線安全取扱い、(3)放射線計測、(4)食品の安全、(5)外部被ばく防護三原則から構成される。(1)から(4)については、放射線、放射線計測に関する基礎事項で、講義が中心である。(5)については、放射線外部被ばく防護三原則である“距離による防護”、“時間による防護”、“遮へいによる防護”について講義と実習を行う。この教材を用いて実際に教員研修を行った結果、ほとんどの教員が教員研修を通じ、放射線外部被ばく防護三原則の実験指導を行うための知識や技術を習得できたという結果が得られた。このことにより、本教材を活用して教員研修を教員が受講することは意義があることが示された。

## 謝辞

本研究は、平成27年度文部科学省「国際原子力人材育成イニシアティブ事業（原子力人材育成等推進事業費補助金）」の助成を受けて実施されました。また、本論文を執筆するにあたり、東京学芸大学環境科学分野の松川正樹教授には、論文の企画、構成、内容について、教育に関する専門的視点より多くのご指導ご指摘をして頂きました。ここに多大なる感謝の意を表します。



引用文献

- 1) 文部科学省ホームページ, <http://www.mext.go.jp/>
- 2) 放射線計測ハンドブック (第4版), Glenn F. Knoll 著, 神野郁夫, 木村逸郎, 阪井英次共訳, オーム社 (2013).
- 3) 国際放射線防護委員会勧告, <http://www.icrp.org/index.asp>
- 4) 公益社団法人日本アイソトープ協会ホームページ, <http://www.jrias.or.jp/>
- 5) 2014年版アイソトープ法令集I, 丸善株式会社 (2014).
- 6) 放射線計測概論, 関口晃著, 東京大学出版会 (1979).
- 7) 厚生労働省ホームページ, <http://www.mhlw.go.jp/>
- 8) 東京学芸大学理科教員高度支援センターホームページ, <http://www.u-gakugei.ac.jp/~ascest/>

