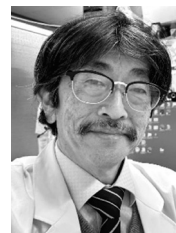




シリーズ：放射線教育のリ・アウェイクニング（再覚醒）
—次世代医療人を育てる放射線実習の羅針盤—

第1回 大阪大学医学部3年生における放射線基礎医学教育
（講義と実習の一例）



中島 裕夫

現代の医療教育において、放射線に関する基礎知識の習得は不可欠です。しかし、大学における専門講座の減少や、指導経験を持つ教員の不足等により、効果的な講義やRI実習の実施に苦慮している大学が少なくないのが現状であり、今後の医療教育に望ましい環境を維持するためにも早急な対応が求められています。こうした教育現場に向き合うべく、今号より新シリーズを始動いたします。

各大学の先生方に、講義カリキュラムの工夫、実習の具体的な取組み、若手教員へのノウハウの継承等、現場での実践例をリレー形式でご紹介いただきます。医療系教育に携わる皆様にとりまして、日々の教育に活かせる実践的なガイドとなり、これからの放射線教育の在り方を共に考える一助となれば幸いです。

（放射線安全取扱部会 広報専門委員会）

1. はじめに

本誌2025年10月号の自由空間欄（No.801, p.44-45）に書いた「医学部における放射線基礎医学教育の重要性」で紹介したように、医学部での放射線基礎医学の座学やRI実習は、医師を目指す学生にとってとても重要な経験となっている。

原爆からの怖いイメージがある放射線ではあるが、放射線なしでは劇的な医学の進歩はなかったことは明らかである。医療に従事する者として、放射線についての良い面と悪い面の両方の知識を広く持てるようにと、大阪大学医学部では放射線基礎医学講座開講以来改良を重ね、座学として2.1に挙げる趣旨に基づき、表1に示す1~18の項目についてできるだけ平易な言葉で、15コマの講義枠での解説を行っている。また、放射性物質を扱う実体験をするために、10時間の非密封の放射性同位元素を扱う実習も行っている。以下に講義と実習の内容を紹介する。

2. 放射線基礎医学の学習目標と内容

2.1. 座学による講義内容（シラバス抜粋）

原爆被爆国であるがゆえに放射線アレルギーを持つ日本人だが、年間国民医療被ばく線量は世界一である。このように、恐れられたり、多くの利用がなされたりしている放射線は、医学の劇的な進歩のた

表1 放射線基礎医学の講義内容

1. 放射線の歴史と功罪（自然・産業・医療被曝の歴史）
2. 放射線はなぜ怖いのか
3. 放射線作用の分類（物理学、化学、生物学）
4. 放射線生物学で用いる単位と用語
5. 放射線生物学の基礎（放射線生物作用の原理と発現過程）
6. 放射線による細胞死と生存率曲線
7. 分子レベルでの放射線影響と修復
8. 細胞レベルでの放射線影響と修復
9. 組織レベルでの放射線影響と修復
10. 個体レベルでの放射線影響（確率的影響、確定的影響）
11. 次世代への影響（生殖細胞・胎児）
12. 放射線による発がんや遺伝的影響（genetic effects）・遺伝性影響（heritable effects）、そして、実験動物で認められてヒトでは認められていない影響
13. 腫瘍の放射線生物学（放射線治療の原理、効果、障害、機器）
14. 臨床での放射線治療
15. 法律と生物影響と医療被曝の関係
16. リスクコミュニケーション、クライシスコミュニケーション
17. 放射線障害の防護（産業、医療、放射線災害の被曝から身を守る術）
18. チェルノブイリ、福島で起こったこととは

めには不可欠なものであるが、生物に対してどのような影響を与えるのだろうか。特に、医療の現場において、これから諸君が照射することになるヒトを中心に、放射線の物理的作用、生化学的作用、生物学的作用のメカニズムを理解し、放射線の自然被ばく、医療被ばく、大量被ばくでのそれぞれの線量における人体影響を学び、放射線健康リスクについて多角的に説明できるようにする。

更に、治療や検査ではどのくらいの放射線量を被ばくするのか、放射線治療の患者にはどのような症状が出るのか、その患者への照射において何に気を付けるべきかを理解するために、分子レベル、細胞

レベル、臓器レベル、個体レベルの影響と症状の関係を理解すると共に、十分な理解のないまま、ただ怖いと思われる放射線に対する適切な怖さを認識することを目指す（どれくらいの放射線線量までが怖くてどれくらいの線量なら恐れなくてもよいか）。

また同時に、臨床における放射線利用の実際と基礎の講義を臨床系教員により行い、医学部4年生で履修する放射線科講義への予備知識習得も目指して科目間の垂直的統合を行う。

終講試験では、ラジオアイソトープ実習で管理区域内に入るための基礎編としてA問（約100問）を、そして、放射線基礎医学の必要最小限の内容と臨床において受けるであろう質問に対応するための基礎知識として必要なB問（約100問）の記述試験を行う。いずれも60点以上で合格として、A問合格でRI実習受講資格が決まり、B問並びにRI実習のレポートをもって放射線基礎医学の単位が認定される。なお、医学部では、この放射線基礎医学の単位を修得したことで、卒業後の学位取得等の研究で本学においてRI従事者となるのに必要なRI取扱い実習が免除される。

2.2. RI実習の内容：放射性物質の取扱い方・汚染検査法、生物影響

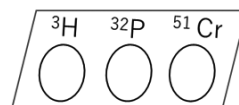
2.2.1. 使用核種と実験準備

放射線の物理学的性質を知ることが目的として、放射線測定や核種同定の方法や原理等の実験を行うために、非密封の ^3H （弱い β 線核種）、 ^{32}P （強い β 線核種）、 ^{51}Cr （ γ 線核種）をそれぞれ $2 \times 10^5 \text{ dpm}/0.1 \text{ mL}$ 、 $10^5 \text{ cpm}/0.1 \text{ mL}$ （計数効率2.4%）、 $2 \times 10^5 \text{ dpm}/\text{mL}$ の濃度の水溶液を実習に使用する。ここで ^{32}P のみ、あえてcpmで調製して渡し、dpm, cpm, 計数効率の関係を理解する。また、線種によって測定できる装置が異なることも学習する。

物理的性質を知る実習を行う手始めに、学生自身で ^{32}P （ $10^5 \text{ cpm}/0.1 \text{ mL}$ ）水溶液を10倍、10倍の希釈シリーズにより $10^4 \text{ cpm}/0.1 \text{ mL}$ 、 $10^3 \text{ cpm}/0.1 \text{ mL}$ 、 $10^2 \text{ cpm}/0.1 \text{ mL}$ の溶液に調製を行う。そして、各水溶液をアルミ製のプランシェットに0.1 mLずつ分注して乾燥させ、各プランシェットの線量を測定し、ピペット操作が正確であったかを確認する。その後2.2.2.の1), 2), 3)の実験を行う。

また、同時にステンレス板（ $300 \times 150 \text{ mm}$ ）（図1）にマジックで3つの円を描き、 ^3H 、 ^{32}P 、 ^{51}Cr を明記し、円内にそれぞれの水溶液を

図1 ステンレス板



0.1 mLずつ滴下し、乾燥させて模擬的な汚染状況を設定した汚染検査実習を行う。

2.2.2. 物理学実験（RIの基本的性質）

1) ^{32}P の最大エネルギー測定により β 核種同定の原理を学ぶ。

計数効率2.4%で 10^4 cpm になるように調製した ^{32}P のプランシェットにアルミ吸収板をかぶせて、0～900 mg/cm^2 まで間で100 mg/cm^2 毎の厚さにおける計数を1分間測定（cpm）する（図2左）。この計数値を、片対数グラフにプロットし（縦軸対数目盛を計数率：cpm，横軸普通目盛をアルミ吸収板の厚さ： mg/cm^2 ），グラフの直線部分の延長線がbackground計数率を横切る時のアルミ板の厚さを飛程R値（最大飛程）として求める（図2右）。R値を①式に代入して最大エネルギー E_{max} （MeV）を求める。

$$R = 0.542 E_{\text{max}} - 0.133 \dots \dots \dots \textcircled{1}$$

$$(0.8 \text{ MeV} < E_{\text{max}} < 3.0 \text{ MeV})$$

また、同時に、直線部分の傾きから③式を使い質量吸収係数 μ/ρ （ cm^2/g ）を求め、④式に代入して最大エネルギー E_{max} を求める。

$$N = N_0 \cdot e^{-(\mu/\rho)X} \dots \dots \dots \textcircled{2}$$

（Xは実験値の mg/cm^2 ではなく g/cm^2 であることに気を付ける）

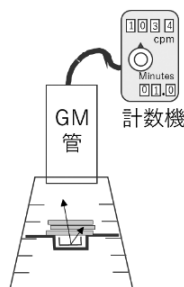
$$\log N = \log N_0 - \{(\mu/\rho)/2.303\}X \dots \dots \dots \textcircled{3}$$

$$(\mu/\rho) = 22 / E_{\text{max}}^{4/3} \dots \dots \dots \textcircled{4}$$

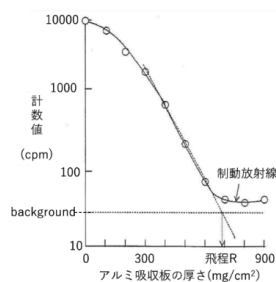
$$(0.1 \text{ MeV} < E_{\text{max}} < 3.0 \text{ MeV})$$

^{32}P から放出される β 線の最大エネルギーは1.71 MeVであるので、実験によって求められた最大エネルギーと比較する。

図2 GM管測定装置



^{32}P のベータ線吸収曲線



2) 放射線源からの距離と線量の関係

GM計数管は、線源から全方向球体状に放出され

る β 線のうち、線源を頂点とした GM 計数管までの距離を高さとし、GM 計数管の有効窓部を底面とする円錐形に当たる部分だけを計測している(図 3)。測定範囲は次式で与えられる。

$$N = N_0 (1 - h/\sqrt{r^2 + h^2}) / 2$$

N : 距離 h (mm) を変えたときの計数率 (cpm),

r : GM 管の有効窓部分の半径 (mm),

h : GM 管窓から線源までの距離 (mm),

N_0 : 線源から放出される全 β 線数 (dpm)

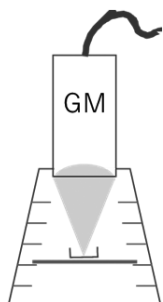


図 3 GM 管測定装置

プランチェットをセットする段をずらして h が大きくなると計数値 N が小さくなることを確かめると共に、それぞれの距離での N_0 を求めて一定であるかどうかを検討する。計数値は距離の 2 乗に反比例しているか、また、 N_0 が一定にならない場合にはなぜそうなったかを

考察する。(実際の実習では、距離が離れるにしたがって N_0 が大きくなる。これは、線源を金属チャンバー内にセットして測定を行っているために、距離が離れるに従って壁による反射が多くなることが原因で、このことに気が付くかが 1 つの考察対象となっている)

3) 崩壊のバラツキ

放射能測定で最も重要な崩壊のバラツキを知るための実験。放射線はいつも同じ間隔で放出されているのではなく核種がポアソン分布に従って崩壊することによって放出されていることを知り、放射能測定に必要な基礎を理解する。

実験方法は、計数効率 2.4% で 10^2 cpm に調整されたプランチェットを用いて、1 分間の測定を 50 回行う。得られた各計数値からバックグラウンドを差し引き、10 cpm 間隔の階級に分けた度数分布表を基にヒストグラムを作成する。プランチェットからの β 線放出率が一定のばらつきを持っていることを理解し、50 回の計数値を基に、理論的ポアソン分布のグラフを作成して実験結果と比較する統計解析を行う。

4) 実習の息抜きのクイズ形式の問題を解く。

問題は A, B, C と表記とした容器にそれぞれ ^{32}P (β 線源), ^{51}Cr (γ 線源), ^{137}Cs (β と γ 線源) の水溶液を入れて渡し、GM サーベイメータと NaI γ サー

ベイメータを用いてどの容器がどの核種であるかを当てる (図 4)。

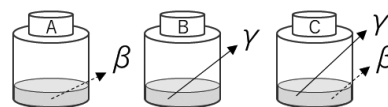


図 4 A, B, C 容器内の放射性核種を同定する

2.2.3. 汚染検査法の実習

2.2.1. で用意した 3 つの放射性核種を塗布したステンレス板を用いて汚染検査の実習を行う。

4 枚のスミアろ紙に水を 0.1 mL 滴下して、1 つは background とし、残りのスミアろ紙で乾燥したステンレス板上 (図 1) の 3 核種をそれぞれ拭き取る。次にステンレス板に滴下した 3 つの核種の水溶液をそれぞれ 0.1 mL ずつ直接スミアろ紙に滴下し、原液スミアろ紙とする。これらの原液スミアろ紙の計数率と、拭き取りをしたろ紙の計数率を測定して拭き取り効率を求める。また、スミアろ紙に 0.1 mL の水を滴下して、身近なところの任意の場所を拭き取り、実際の汚染検査サンプルとする。

それぞれのスミアろ紙を、GM サーベイメータ、 γ シンチレーションカウンター、液体シンチレーションカウンターにて測定し、核種によって測定できる機器が異なること、なぜ、異なるかを学ぶ。

これらの汚染検査実験を通して、以下の①～⑤についても学ぶ。

- ① β 線では 1 cm のアクリル板で遮蔽できるが、 γ 線はできないことを観察して線質によって遮蔽物が異なること。
- ② ^{32}P と同じ β 線を出す ^3H が、なぜ ^{32}P と同様に GM 管測定器で測定できないのか。
- ③ β 線しか出していない ^{32}P がなぜ γ 線測定器でも測定ができるのか。
- ④ 放射性物質を含む水が付着したとき、表面の滑らかなステンレス板でさえも乾いてしまうと除染が難しくなることを拭き取り効率を計算することで学ぶ。
- ⑤ GM サーベイメータの測定限界 (精度) を理解する。

2.3. 放射線の生物影響に関する実習

生物影響実験 (1 日で放射線による生物個体影響を観察する実験)

リンパ球は、放射線感受性が非常に高い細胞で、

放射線被ばく後数時間で apoptosis による細胞死を起こして消滅する。マウス末梢血においては 24 時間でリンパ球が激減する様子を容易に観察できる。

実習前日(24 時間前)に 0, 1, 2, 4, 8 Gy 相当の γ 線(もしくは 180 keV の X 線)をマウスに照射する。実習当日に、マウスの半致死線量(6 Gy)以上を被ばくしたマウスの行動が非被ばくマウスと差がないことを観察し、安楽死させた後に解剖を行い、リンパ球を多く含む胸腺と脾臓を剔出する。剔出した臓器の大きさを目視で比較し、被ばく後 24 時間で既に線量依存的に臓器が縮小していることを観察する。その後、それぞれの臓器内細胞の定量的比較を行うために、10 mL の生理食塩水中に細胞を取り出して細胞浮遊液をつくり、チュルク液にて白血球を染め、顕微鏡下でビルケルチュルク血球計算盤にてリンパ球数をカウントする。

このようにして得られたリンパ球数の線量依存的変化をグラフにプロットして、被ばく後の自発行動には影響が認められなくとも、細胞レベルで始まっている被ばく初期の放射線影響を観察し、座学で習った被ばくによる個体レベルの初期影響を理解する。

3. おわりに

一般公衆が原爆平和教育により、長年にわたってインプリントされてきた危ない放射線のイメージは間違いではない。しかし、その中で量に関する情報が抜け落ちていたことは否めない。放射線は危ないものではあるが、一方で自然放射線のように容認できる線量があり、線量や利用法を誤らなければ生物影響を憂慮しなくてもよい領域があることを周知することが大切である。

医療においてリスクより利益が勝ると考えられるときには、法律に規制されることなく放射線をヒトに照射をすることのできる医師は、放射線の危険性・意義・照射の正当性、そして、被ばくによる線量と影響の関係を十分理解している必要がある。更に、患者のみならず一般市民に対しても、最も信頼を持ってもらいながら説明ができるのも医師なのではないかと思われる。

非日常的な放射線の取扱いを通して、学生からは多くの気づきや成長が毎年報告されている。放射線に関する講義と実習の組み合わせは、学生に座学だ

けでは得られない貴重な経験をもたらし、深い学びを提供している。最後に学生からの主な感想を表 2 で紹介する。

表 2 講義・実習を終えた学生の主な感想

- ビビッと線量計が鳴っても恐怖ですぐに逃げなくて良くなりました。(A.H)
- 放射線について机で勉強しても実際どういうものなのか実感が湧かなかったが、実習を通して放射線の性質をより深く学べた。また、強い放射線の影響を細胞レベルで観察して数値化したことで、放射線の恐ろしさをあらためて感じた。(F.N)
- 広島出身で原子爆弾の放射線による影響を昔から学んでいたのも、興味があり、座学から多くのことを学べたが、実際に放射性物質を扱うことができ、よりリアルに感じることで良かった。新型コロナウイルスと同様に見えないものである放射線は、正しい知識をもとに正しく怖がらなければいけないという共通点があると思った。(M.H)
- 机上での理論的な放射線の動態や作用を、実際に実験結果やマウス生体影響として観察されたときには、純粋に面白かった。一方で放射性物質を取り扱う施設の厳重さから、取り扱いには繊細な心掛けをして実験、保管、廃棄をする必要があることを身を持って体験した。正しく、注意して取り扱うことが大事だと再認識した。(H.M)
- 今まで放射線は、テレビや講義で知り、頭の中で理解した存在でした。今回実際に測定器を用いてさまざまな実験を行うことで音や数値として捉えることができ、より、放射線に対するイメージが明確なものとなりました。(Y.K)
- 普段の生活では絶対に身近にない放射性物質を使うことで、その特徴、危険性を身にしみて理解することができた。これから臨床などで放射線を扱う上で大事な緊張感をこの実習で体得することができたと思います。(H.K)
- 放射線を当てて1日後では、マウスの外見上の変化は見られなかったにもかかわらず、こんなに内面での変化は大きいのかと驚きました。(K.Y)
- 私は、講義や実習を受ける前は、放射線は何となく少しでも体に浴びると大きな影響が生じると感じていました。ですが、放射線基礎医学の講義とこの実習を通じて、微量では、生命や、身体に対しての影響は限りなく無いに等しいということを学びました。また、逆に多量の放射線を浴びるとわずか1日でも身体、特に臓器に対して重大な影響を与えることを直接見て知りました。今後は、放射線を正しく怖がり、正確な判断ができるように努めます。(T.M)
- 放射線を用いた実験もマウスの解剖も初めての経験だったので多くの事を学んだ実習でした。特に、実験室の放射線に対する徹底した管理が大変印象深かったです。(K.T)
- 放射性物質を扱った実習は初めてだったので、GM管がピーツとなって少し緊張したが、ポケット線量計の値が0のままで、無事実験を終了することができて良かったと思う。(U.T)
- 今後、医師として働いていく上で放射線を扱うことは、避けられませんが、それに対する理解を深められることができて良かったです。これからも放射線を恐れ過ぎず、かつ、軽視し過ぎないようにうまく扱っていければと思います。(T.H)
- 知識のない人がGM管だけを渡されたら、あの強い音で、人体に影響があるほど被ばくしていると勘違いしても不思議ではなく、放射線に関する正しい知識を広めることが重要だと思った。また、スミア濾紙でのふき取り実験の際に、かなり強くふき取ったつもりだったが、半分しか拭き取れておらず、除染は難しいのだなと思った。(M.Y)
- はじめてRIを扱ったが、放射線の人体影響などを勉強したにもかかわらず、昔から放射線に対する何となくのイメージですごく危険なことをしているような気分だった。管理区域に入るのに線量計が必要であったり、部屋ごとにスリッパが分けてあったりと、放射線を扱うことが、被ばくする危険と隣り合わせであることを実感し、医療に貢献する放射線研究の貴重さを感じた。(H.M)

追記

大学等において RI を使った実習を行ううえで、本稿で紹介した実習のテキストに興味を持たれ、参考にしたい方は以下にご相談ください。

ishikawa@radbio.med.osaka-u.ac.jp 藤原智子

nakajima@radbio.med.osaka-u.ac.jp 中島裕夫

(大阪大学核物理研究センター、放射線科学基盤機構、医学系研究科未来医療イメージングセンター)