



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2回 九州大学医学部2年次に実施していた放射線基礎医学教育 （講義と実習の一例）

大野みずき 續 輝久

1. はじめに

大阪大学の中島裕夫先生よりご依頼をいただき、過去に九州大学医学部2年次の必修科目「放射線基礎医学」にて実施していた座学の講義16コマ（表1）と全4回の学生実習の内容についてご紹介させていただきます。これから放射線教育や学生実習をお考えの皆様にとって少しでも参考になれば幸いです。（なお、本稿で紹介する講義・実習は、その後のカリキュラム改訂により、現在は実習は廃止され、講義についてもコマ数や内容が変更されています。）

2. 放射線基礎医学の学習目標と内容

放射線の利用は医療を含む様々な分野で社会に大きく貢献している。一方、原子力災害等を契機として、その安全性や健康影響にも高い関心が寄せられている。放射線の利用と安全性について科学的に理解した人材の育成は、医学教育・生命科学教育における重要な役割の1つである。放射線を「危険」あるいは「安全」という二元論的な見方で捉えるのではなく、物理学、生物学、医学を基盤とした科学的理解のもとで、その有用性とリスクを適切に考える力を養うことが重要である。本科目では、放射線・放射性物質の物理化学的基礎、生物影響、放射線防護、医療利用について体系的に学ぶと共に、医学・生命科学を学ぶ学生が放射線を科学的根拠に基づいて理解し、専門分野のみならず社会における放射線利用や健康影響について自ら考え判断できる素養を身につけることを目標とする。

2.1. 座学による講義内容

講義・実習を通して、放射線に関する基礎知識と生体への影響を理解し、放射性物質の取扱いや放射線被ばくからの防護について学ぶ。

一般学習目標：1) 放射線の物理化学的及び生物学的影響を理解し、放射線障害の防止に関する規則と

予防規程を踏まえた放射線の医学利用を目指す態度を身につける。2) 放射線及び放射性同位元素の安全取扱いを習得する。3) 放射線による診断と治療の基礎知識を理解する。4) 微量の環境放射線（自然、宇宙、医療被ばく等）を含む放射線の生体影響評価に基づく放射線障害防止の基本理念を理解する。

講義は全16コマ（1コマ90分）で構成し、1日に2コマずつ、各分野を専門とする教員によるオムニバス形式で実施していた。講義タイトルと概要を表1に示す。内容は、放射線・放射性物質の物理学・化学・生物学の基礎から、生体影響、医療への応用、放射線防護や関連法令、更に広島・長崎の原爆被爆者コホート研究から得られたヒトへの健康影響までを扱い、基礎科学から社会との関わりへと体系的に学べるような構成となっている。

本講義では、放射線・放射性物質を物理学、化学、生物学、医学、防護の各側面から体系的に学び、更に学生実習を通して理論と実践を結びつけることで、放射線を科学的に理解し、自ら考え判断する力を養うことを重視した。

表1 講義タイトルと概要

1) 放射線の物理学1	放射線の発生原理と特徴、物質との相互作用
2) 放射線の物理学2	生物作用の初期過程、放射線診断の物理的基礎
3) 放射化学1	原子・原子核の構造、核種の安定性と壊変様式
4) 放射化学2	放射線の種類と特徴、放射性物質の生体影響
5) 分子放射線生物学1	DNA損傷・突然変異の発生機構
6) 分子放射線生物学2	DNA修復機構
7) 放射線細胞生物学1	放射線照射後の細胞応答、チェックポイント
8) 放射線細胞生物学2	突然変異や発癌の機構、放射線治療
9) 放射線障害学1	急性・晩発放射線障害、発がんリスク
10) 放射線障害学2	遺伝性影響、個体レベルでの放射線影響
11) 放射線診断の進歩	各種画像診断法の特徴、放射線診断技術
12) 放射線治療	各種放射線治療法の特徴と適応、治療効果
13) 放射線防護1	放射線防護の基本概念、線量評価
14) 放射線防護2	関連法令や安全管理
15) 放射線発がん	被ばくによる発がん機構、発がんリスク
16) 胎内被ばく・遺伝影響	被ばくによる胎児影響・遺伝性影響

2.2. RI 実習

座学終了後に、「放射線物理学」「放射線生物学」

「放射線障害学」「放射線防護」の4つのトピックで実習を実施。実習は週1回（2コマ分）、4名の教員と補助スタッフが各実習を担当。医学科・生命科学科、合わせて約120～130名の学生をトピック別に4グループに分け、更に3人1組の班に編成した。学生はローテーション方式で全4回の実習を受講する。各実習終了後にはレポートの提出を課し、講義で学んだ知識を実験・実習を通して整理し、考察する機会となるように工夫した。

2.2.1. 放射線物理学

目的： β 線をGM計数管で測定するには、適切な使用電圧を設定する必要がある。本実習では、GM計数管の使用電圧を決定すると共に、その動作原理を理解する。また放射性同位元素の確率的壊変の現象を計数器による測定から体験する。

実験1) 計数管の電圧・計数率特性（プラトー曲線）

GM計数管は、細い陽極芯線と、それを囲む円筒状の陰極から構成されている。両電極間の電圧をある値以上にすると、入射した放射線によって生じた電子が管内のガスを次々に電離し、電子なだれを起こす。このため、最初に生じた電離の大きさにかかわらず、ほぼ一定の大きさの信号が得られる。このように、電圧を変えても計数率がほぼ一定となる領域をプラトーという。プラトーでは電圧を更に上げると多重計数が生じるため、計数率はわずかに増加する。この増加の程度をプラトーの傾斜（slope）といい、通常は100Vあたりの計数率の変化率（%）で表す。プラトーが広く、傾斜が小さいほど性能の良いGM計数管と評価される。

各班にGM計数装置と β 線源（ ^{90}Sr ）を配布する。 β 線源を測定棚にセットし、管電圧を徐々に上げて計数が始まる電圧（開始電圧 V_0 ）を求める。次に、管電圧を $V_0 + 100\text{V}$ に設定し、計数率が2000～3000 cpmとなるよう線源位置を調整する。以後は線源位置を固定し、 V_0 付近から50V間隔で各電圧における計数率を測定する。測定時間は統計的変動による相対誤差が1%以下となるよう設定し、計数率（cpm）に換算する。各電圧における測定時間、計数値、計数率、標準偏差及び相対誤差を表にまとめ、プラトー曲線を作成する。プラトー開始点から水平域の約4分の1付近の電圧をGM計数管の使用電圧とし、更に水平域中央付近における100Vあたりの

計数率変化率からプラトーの傾斜（slope）を求める（図1）。

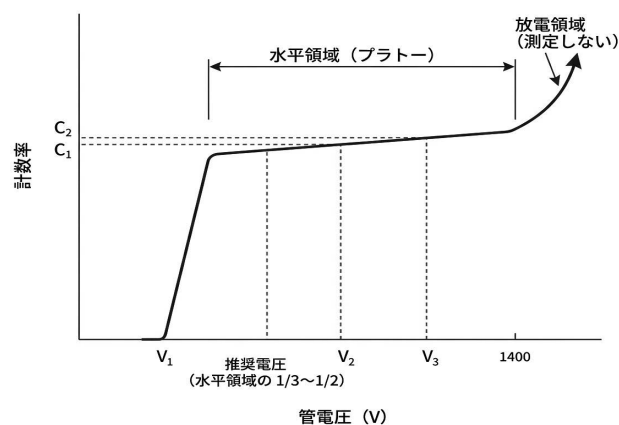


図1 管電圧と計数率のグラフ

実験2) 計数の統計的変動

放射性同位元素の壊変が確率的な現象であることを計数実験により理解すると共に、放射線計測における測定精度の評価方法を学ぶ。放射性同位元素を一定時間ごとに繰り返し測定すると、計数値は平均値の周りにばらつきを示す。これは、壊変が確率的に起こることに由来する統計的ゆらぎによるものである。自然計数（バックグラウンド（BG））を一定時間ずつ100回繰り返し測定し、頻度分布のグラフを作成、理論上のポアソン分布とどれくらい一致するか（適合度）を比較・検定する。微弱な放射能を持つ2つの試料（KCl、構内の土等）を、それぞれ50回程度測定し、BGを差し引き、試料正味の計数率と統計誤差をcpm単位で求める。

2.2.2. 放射線生物学

目的：放射線の細胞に対する最も顕著な効果である細胞死の誘導機構を理解すると共に、放射線により誘導されるアポトーシスの簡便な検出法を学ぶ。実験) X線照射後の細胞を用いたアポトーシスDNAラダーの検出

FM3A（マウス乳癌由来の浮遊細胞）にX線を7Gy照射し、3日間培養した後に細胞を回収、PBSで洗浄し、マイクロチューブに分注して遠沈し上清を捨てペレットを凍結保存しておく（ここまでは教員が行う）。実習当日に凍結細胞入りマイクロチューブを各班に配り氷上でゆっくり解凍させる。実習書記載の方法でゲノムDNAの抽出を行う。抽出したDNA

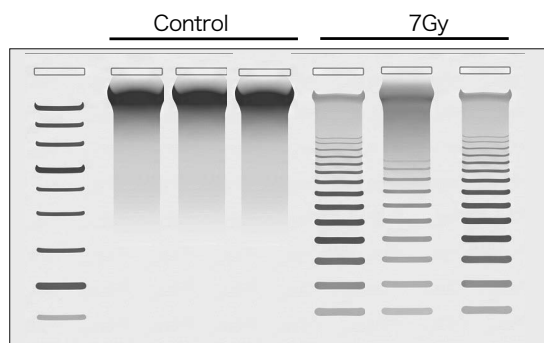


図2 ゲル電気泳動
アポトーシスによる DNA ラダーのイメージ

を用いてゲル電気泳動を行う。泳動結果の写真を撮影し（図2）、DNA ラダーの観察を行う。

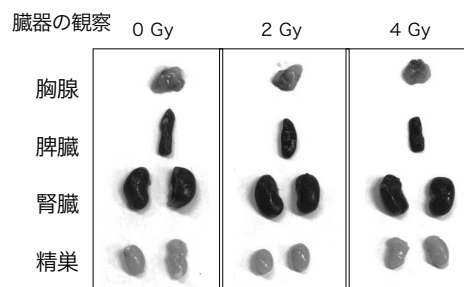
*アポトーシスを誘導して DNA ラダーを綺麗に出すためには事前の条件検討が必要。細胞は浮遊系かつ放射線感受性が高い細胞株が使いやすい（ヒトの血球系の細胞株 MOLT-4, HL-60 等）。X 線照射条件（1 Gy/min, 5-10 Gy）と照射後の培養時間（24～72 時間）を調整し適切な条件を決めておく必要がある。

2.2.3. 放射線障害学

目的：マウスに X 線を全身照射し、1 週間後に解剖して各臓器を観察することにより、急性放射線障害の特徴、臓器ごとの放射線感受性の違いや放射線障害の線量依存性について理解する。

実験）各班当たり 3 匹のマウス（X 線照射線量 0 Gy, 2 Gy, 4 Gy）を使用する。各グループの実習に合わせて全 10 班分のマウスを事前に業者から購入し、飼育及び X 線照射はスタッフが担当する。解剖は照射約 1 週間後に実施する。実習前半では、ベルゴニー・トリボンドーの法則をはじめとする放射線の臓器への影響に加え、動物実験の 3R（Replacement, Reduction, Refinement）、マウスの取扱いや過麻酔下での頸椎脱臼の方法、解剖手順について説明し、本実習の目的と内容を十分に理解したうえで実習を開始させる。

班ごとに必要な道具と手順の確認を行い、マウスを 1 匹ずつ受け取ってから解剖と臓器摘出を開始する。学生は最低 1 匹のマウスを自分で解剖する。過麻酔下での頸椎脱臼による安楽死を施した後に体重を測定し記録しておく。開腹後に、胸腺、脾臓、腎臓（左右）、精巣（左右）を摘出し、微量天秤で臓器重量を測定し記録する。摘出した臓器は照射線量ごとに厚紙に並べ、観察所見を記録する（図3）。すべての班の作業が終了したら、全 10 班の測定データを



臓器重量の測定結果

	0 Gy	2 Gy	4Gy
体重	21.22 g	21.60 g	20.75 g
胸腺	0.058	0.043	0.035
脾臓	0.047	0.045	0.029
腎臓(左右)	0.181 / 0.173	0.189 / 0.168	0.161 / 0.166
精巣(左右)	0.086 / 0.079	0.085 / 0.089	0.071 / 0.070

図3 照射線量による臓器変化の観察

実習書の結果欄に学生が記録した例

ホワイトボードに記載させる。レポートでは、各班の実測値をもとに考察を行うと共に、全班のデータを元に統計的処理と臓器ごと、線量ごとのグラフを作成させ、被ばく線量と臓器重量の関係、臓器による感受性の差について座学の知識と合わせて考察する。

* 胸腺と精巣では被ばく後の重量変化が異なるため、余裕があれば照射後日数を変えて臓器ごとの重量変化を観察させるのも面白い。

* C57BL/6J マウスでは、照射線量に応じた臓器重量の変化を再現性よく観察できる一方、129 系統マウスでは臓器重量の変化にばらつきが大きく、正確な臓器重量変化の解析には適さなかった。

* 本実習はマウスを扱う動物実験に該当するため、事前に各事業所で必要な申請を行い承認後に各種ガイドラインに従って適切に実施する。

2.2.4. 放射線防護実習（β線, γ線の遮蔽）

目的：放射線発生装置や放射性同位元素を取り扱う場合、放射線被ばくを受ける危険性が常にある。被ばくは人体に悪影響を及ぼすことから、適正な取扱を行い被ばくを最小限にとどめるように努力する必要がある。放射線被ばくには体外被ばくと体内被ばくがあり、この両者を理解の上防護を考える必要がある。

本実習では、体外被ばくの防護と体内被ばくにつながる「汚染」の防ぎ方や汚染チェックの方法を体

験するために、1) 非密封放射性物質の取り扱い、2) 密封 γ 線源を用いた放射線の強さと距離の関係、物質の素材と遮蔽効果についての実習を行う（図4）。

実験1) 密封線源を用いた γ 線の測定と距離や遮蔽材による影響の観察を行う。 γ 線密封線源、NaIシンチレーション式サーベイメータ、遮蔽板（縦10 cm × 横10 cm × 厚さ1 cmの鉛、鉄、アルミニウム、アクリル製板を各1枚、厚さ2 mmの鉛板6枚、アルミ板20枚）、メジャーを各班に配布する。線源のない場所でバックグラウンド（BG）値を測定。線源からの距離と線量率の関係を調べる実験を行うためメジャーを置き、サーベイメータのプロンプ位置に対して線源を水平に設置する。線源とプロンプの距離が10, 20, 30, 40, 50 cmの時の値を15秒ごと3回測定し記録する（使用する線源の放射能強度に応じて測定間隔や距離を調整する）。各測定地点での平均値からBGを差し引いた値を用いて通常のグラフと両対数グラフを作成し、距離の逆二乗則の推定値や関係を考察する。次に遮蔽材の種類による影響を観察する。すべて15秒ごと3回測定し平均値を使用する。まず線源から20 cm離れた位置での値を測定後、厚さ1 cmの素材の異なる遮蔽板を検出器の近くに設置し測定する。次に厚さ2 mmの鉛板を1枚ずつ、アルミ板は5枚ずつ増やしながら測定する。縦軸に線量率、横軸に鉛板の厚さをとりグラフを作成。放射線線量率が1/2になる厚さ（半価層）を求める。

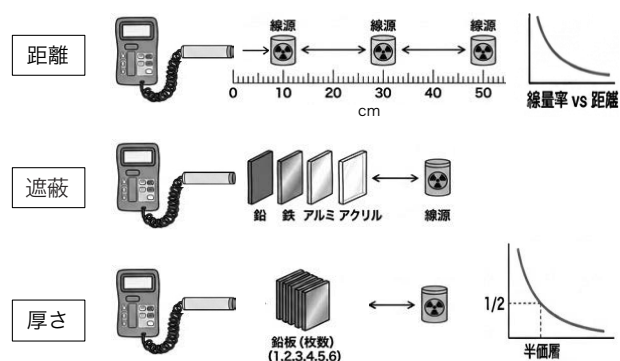


図4 密封線源を使用した実験の例

実験2) 非密封線源の安全取り扱い（図5）

非密封線源として $^{32}\text{P-H}_3\text{PO}_4$ 水溶液を用いて希釈操作と放射能測定を行う。スタッフは事前に適切な濃度に調整した $^{32}\text{P-H}_3\text{PO}_4$ 水溶液（これを原液とする）を各班分準備しておく。実習開始前に非密封RI

の取り扱い上の注意事項と実習手順を説明し、各班で必要な器具を準備した後、遮蔽容器に収納した $^{32}\text{P-H}_3\text{PO}_4$ 水溶液（原液）を配布する。1.5 mL マイクロチューブに希釈倍率を表記しておき、200 μL 用のマイクロピペットを用いて原液を蒸留水で3倍ずつ段階希釈して3, 9, 27, 81倍希釈液を調製する。各希釈液及びブランクを100 μL ずつバイアル瓶に分注し、液体シンチレーションカウンターを用いたチェレンコフ法により放射能を測定する。濃度と測定値の関係をグラフ化して考察する。廃液、汚染チューブ等の処理、GMサーベイメータによる汚染チェックを実施させる。

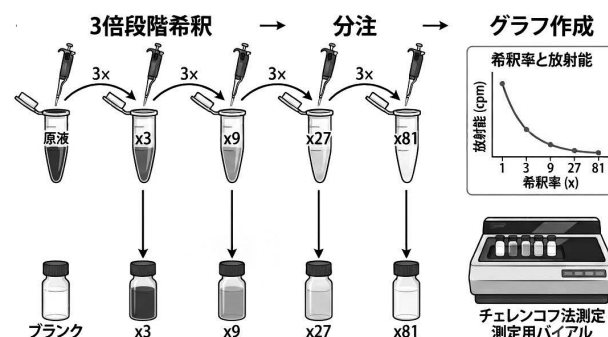


図5 非密封線源の希釈と測定の例

3. おわりに

近年、国内の医学部では放射線教育、とりわけ学生実習を実施する機会が減少しています。しかし、放射線医療の発展に加え、原子力災害や放射線事故への備え、更には核・放射線を巡る国際情勢を考えると、放射線に対する正しい知識と科学的な判断力を養う教育の重要性は、以前にも増して高まっていると考えています。学生が放射線やその生体影響を「見て」「測って」「考える」経験は、座学で学んだ知識をより深く理解し、科学的思考力を養う貴重な機会となります。本稿で紹介した実習内容や実施上の工夫が、今後の放射線教育や学生実習を検討される先生方の参考となれば幸いです。

追記

講義や実習内容についてのより詳細な情報をご希望の場合には九州大学の犬野までご連絡ください。

（九州大学大学院医学研究院 連携腫瘍学分野
（旧 基礎放射線医学分野））