

基礎研 レポート

放射線の画像検査への活用

放射線医療の現状（前編）

保険研究部 主席研究員 篠原 拓也
(03)3512-1823 tshino@nli-research.co.jp

0——はじめに

放射線は、現代の医療に欠かせない存在となっている。さまざまな検査法を通じて、身体の中の様子を撮影して、その画像をもとに正確な診断が行われている。また、悪性腫瘍などの病巣に、放射線を照射することにより、適切な治療が行われている。

しかし、放射線医療に対する一般の人の理解は、残念ながらあまり進んでいないものと思われる。2011年の東日本大震災での原子力発電所事故による放射能漏れや土壌汚染をはじめ、放射性物質が環境にもたらす悪影響、「グレイ」「シーベルト」等の聞きなれない放射線量の単位、被曝による発がんのリスクなど、マイナスのイメージばかりが先行してしまう。

このように、放射能は、怖いもの、近づかないほうがよいもの、という認識が広く浸透しており、このままでは、放射線医療の恩恵を受けることの妨げにもなりかねないと考えられる。現に、日本では、欧米よりも圧倒的に放射線医療の実施割合が低い。

そこで、一般の人が理解を高めることを目指して、本稿（前編）と次稿（後編）の2回に分けて、放射線医療の現状をみていきたい。ただし、筆者は、医師などの医療関係者ではない。医学書等をもとに、理解した内容をまとめていく。もし記載内容に誤り等があれば、ご指摘をいただければ幸いである。

ここで、簡単にテーマについて触れておく。まず、前編では、放射線とはどういうものか、放射線を用いた医療診断にはどのようなものがあるか、を中心にみていくこととしたい。

そして、後編では、放射線を用いた治療を概観することとしたい。そのうえで、最後に、放射線医療に関する私見を述べることとしたい。

本稿と次稿を通じて、読者の放射線医療への興味が高まれば幸いである。

[目次]

0—はじめに	1
1—放射線、放射能とは	3
1 一般の人が、放射線の医療への活用について学ぶ機会はほぼない	3
2 放射線は、目には見えないが、高いエネルギーを持つ	3
3 放射線は、自然環境のなかにも存在する	3
4 宇宙線や土壌からの自然放射線は場所によって異なる	4
5 一般の人が経験しやすい人工放射線として医療被曝がある	4
2—医療で活用される放射線	5
1 医療で用いられる放射線には、X線、 γ 線、陽子線などいくつかの種類がある	5
2 X線や電子線などは加速器で作られる	6
3 α 線や γ 線などは放射性同位元素から発生する	7
4 X線や γ 線の遮蔽には密度の高い鉛などが必要となる	8
(参考) エネルギーと被曝と放射線障害 — その関係は、単純ではない	8
3—放射線による検査と診断	8
1 放射線は発見当初から医療に活用されてきた	9
2 X線撮影は、撮影対象に応じて、異なるエネルギー水準を用いる	9
3 放射線量の単位は、ベクレル (Bq)、グレイ (Gy)、シーベルト (Sv) の3つ	10
4 放射線医療は、チーム医療として行われる	12
4—放射線検査の種類	12
1 一般撮影はさまざまな部位の検査に使われる	12
2 撮影室までの移動が困難な入院患者にはポータブル撮影が行われる	13
3 マンモグラフィ検査では、被曝量がある程度多くなる	13
4 X線透視検査では、体内を観察しながら撮影する	14
5 CT検査で胸部や腹部を撮影するときは、両腕を頭側に挙げる	14
6 血管連続撮影検査では、アームの位置や角度を自由に動かして撮影が行われる	14
7 核医学検査では、臓器や組織の機能が検査できる	15
8 PET検査では、陽電子による放射線が検出される	16
9 MRI検査では、水素の原子核の歳差運動の違いを画像化する	17
10 超音波検査は、主に軟部組織を対象に用いられる	17
11 日本は欧米よりも高度画像診断の設備が充実している	18
5—放射線防護と安全管理	18
1 放射線の防護には、3つの原則がある	18
2 放射線を取り扱う医療施設は、放射線障害予防規程を作成する必要がある	19
3 外部被曝と内部被曝を低減するための対策が必要	19
4 放射線を取り扱う医療施設は放射線管理区域を指定しなくてはならない	19
5 放射線発生装置や放射性物質を取り扱う人は放射線業務従事者となる	20
6—おわりに	21

1——放射線、放射能とは

放射線医療に入る前に、まず、放射線や放射能とはどういうものか、からみていくこととしたい。

1 | 一般の人が、放射線の医療への活用について学ぶ機会はほぼない

放射線について、学校ではどのように学習しているのだろうか。現在の学習指導要領によると、中学の理科では、電流とその利用に関する項目のなかで、放射線について学習することになっている。

そして、高校に進んで、物理の科目を選択すると、 α 線、 β 線、 γ 線、中性子線といった放射性物質に関する半減期などの基本的な性質や、放射線に関する単位について学ぶこととなる。そのうえで、医療、工業、農業等での利用状況など、放射線や原子力の利用と課題についても学習する。

その後、放射線の専門性を身に付けようと思えば、理工系や農学系もしくは医歯薬系の大学に進んで放射線物理や放射線医学を専攻する、もしくは医療系の専門学校に進んで放射線医療の実務を学ぶ、といった道が用意されている。

一方、放射線関係の仕事には就いていない一般の人が、放射線の医療への活用について、学ぶ機会はほぼない。ただし、健康診断や人間ドックなどで胸部X線検査等の放射線検査を受けたり、自分や家族ががんにかかって放射線治療を受けたりすることは、誰にでも普通に起こりうることだろう。

そこで、本稿では、そもそも放射線や放射能とはどういうものか、から概観していきたい。

2 | 放射線は、目には見えないが、高いエネルギーを持つ

まず、放射線についてみてみよう。いくつかの書籍をもとに、筆者がまとめてみたところ、放射線とは、「電磁波(電波、光など)や粒子などのうち、そのものが当たると、当たった相手の分子構造や原子・原子核などを破壊してしまうもの」といった説明が得られた。放射線は、目には見えないが、高いエネルギーを持っている。

そして、その放射線が、人間の身体に吸収されて、臓器、組織、細胞などに当たり、その構造を電離¹させて壊してしまうことは、「被曝(ひばく)」といわれる²。

放射性物質とは、原子が不安定で、自然に壊れて(「放射性崩壊」や「壊変」などといわれる)、放射線を出す物質をいう。放射性物質が、放射線を出して放射性崩壊を起こす能力を、放射能という。

3 | 放射線は、自然環境のなかにも存在する

放射線は、見えず、聞こえず、臭わないため、五感でとらえることは難しい。そのため、あまり身近に感じられないかもしれない。しかし、放射線は、自然環境のなかに、自然放射線として存在しており、誰もが日常生活の中で少量の被曝をしている。

自然放射線の例として、空気中の放射性物質からの被曝、宇宙線による被曝、土壌や建築物などから受ける被曝、食物に含まれている微量の放射性物質からの被曝などがあげられる。

一方、人工放射線もある。たとえば、放射線医療で診断や治療に使われるX線や γ 線などの放射線や、原子力発電所で核分裂のエネルギーを取り出す際に生まれる放射線などである。

¹ 電気解離の略で、中性の原子や分子が電気を帯びた原子や原子団(イオン)に分かれることをいう。(「広辞苑 第七版」(岩波書店)をもとに、筆者がまとめた。)

² 「曝」は、常用漢字ではない。そこで、「被ばく」と表記することも考えられるが、その場合、爆撃を受けることや原水爆の被害を受けることを意味する「被爆」と混同してしまう恐れがある。このため、本稿では、「被曝」という表現を用いていくこととする。

図表 1. 自然放射線と人工放射線の例（実効線量）

自然放射線		放射線量 (mSv)*	人工放射線	
ブラジル市街放射線(年間)	10	10	6.5	CT 検査(胸部)
1人あたりの自然放射線(年間, 世界平均)	2.4	1.0	1.0	一般公衆の医療被曝限度(年間)
うち、空気中のラドンからの被曝	1.2			
大地からの被曝	0.5			
宇宙からの被曝	0.4			
食物からの被曝	0.3	0.1	0.06	胸の集団検診(胸部単純X線撮影)(1回)
東京-ニューヨーク航空機旅行(往復)	0.18			

* 放射線量の単位 mSv は、「ミリシーベルト」。放射線が人体に当たったときに、どのような健康被害があるかを表す(詳細は第3章を参照)。
 ※「やさしくわかる放射線治療学」(公益社団法人日本放射線腫瘍学会, 学研メディカル秀潤社, 2018年)をもとに、筆者作成

4 | 宇宙線や土壌からの自然放射線は場所によって異なる

自然放射線は、どこにでも一様に存在するわけではない。場所によって、大きく分布が異なる。

(1) 宇宙線

宇宙線は、太陽や他の宇宙から飛来するX線や粒子などからなる。宇宙線の多くは、大気により防がれるため、地上では被曝が少ない。しかし、地磁気の影響により粒子が集まりやすい極地方や、大気の薄い山頂・高地では、被曝が多くなる。たとえば、北極などで見られるオーロラは、これらの粒子が作り出している。また、富士山頂では、平地の5倍程度被曝が多くなるという。さらに、宇宙線の影響で、飛行機に搭乗したときにも、被曝が多くなる。東京-ニューヨーク間を北極近くのルートで往復飛行すると、胸部単純X線撮影3回分程度の被曝があるとされる。

(2) 土壌からの自然被曝は場所によって異なる

土壌に含まれる放射性物質による被曝もある。被曝の程度は、場所によって大きく異なる。東京や神奈川は、関東ローム層があるために低い(1.0 mSv/年)。日本の平均は1.5 mSv/年、世界の平均は2.4 mSv/年程度とされる。

ブラジルの海岸沿いの観光地ガラパリでは10 mSv/年、インドのケララ州の高地では70 mSv/年にも達するという。いずれも、放射性トリウムを含むモナザイト鉱石があることが原因となっている。また、イランのラムサールの温泉地では、200 mSv/年に達する場所もある。こちらは、放射性ラジウムが、土壌に大量に含まれていることが影響している。³

5 | 一般の人が経験しやすい人工放射線として医療被曝がある

一方、人工放射線のうち一般の人が経験しやすいものとして、医療被曝がある。通常、放射線検査や放射線治療を受けると、ある程度の医療被曝は避けられない。医療被曝には、放射線防護の線量限度は適用されず、上限は設定されていない。受検者や患者に利益があり、被曝のリスクはその利益よりも十分に小さいことなどが、その理由とされている。計画的な医療被曝の最終責任は、医師にある。

放射線検査では、防護策として、なるべく被曝を抑えることとされている。放射線治療では、線量投与自体が治療の目的であるため、比較的に被曝線量は多くなる。その防護策として、腫瘍の周辺の正常組織の放射線有害作用を最小化することがあげられる。

³ 「知っていますか？ 放射線の特性と画像原理 ―すべての医療従事者(事務職員、看護師、技師、研修医、医師)のための放射線科ガイド―」今西好正編著(医療科学社, 2013年)より。

2—医療で活用される放射線

本章では、医療で放射線を活用する際の、メカニズムを概観していこう。

1 | 医療で用いられる放射線には、X線、γ線、陽子線などいくつかの種類がある

医療で用いられる放射線には、いくつかの種類がある。まず、放射線は、大きく光子線、電子線、重粒子線に分けられる。

(1) 光子線

光子線は、波長が、ごく短く、エネルギーが強い電磁波のことをいう。X線と、γ線がある⁴。

X線は、電子が厚い金属板に当たったときなどに発生する。主に、加速器で発生させる。γ線は、放射性同位元素の壊変の過程で発生する。X線とγ線は、電荷や質量を持たない。そのため、高い透過力を持つ。

(2) 電子線(広義)

狭義の電子線、β⁻線、β⁺線がある。電子線(狭義)は、X線と同じ加速器で、電子を加速させることで発生させる。β⁻線は、原子の原子核内で中性子が陽子に変わる変化に伴って、飛び出してくる電子でできている。β⁺線は原子の原子核内で陽子が中性子に変わる変化に伴って、飛び出してくる陽電子(プラスの電荷を持ち、「ポジトロン」とも呼ばれる)でできている。

電子線は、電荷を持っている。また、陽子線などに比べると極端に小さいが、質量も持っている。

(3) 重粒子線

重粒子線は、電子より重い粒子による放射線をいう。陽子線、α線、炭素イオン線、中性子線などがある⁵。陽子線と炭素イオン線は、大型の円形加速器によって作られる。α線は、原子核の崩壊によって発生するヘリウムの原子核からなる。中性子線は、核分裂や核融合の過程で作られる。陽子線、α線、炭素イオン線は電荷を持っているが、中性子線は、電荷を持っていない。

図表 2. 医療で用いられる放射線(主なもの)

	線の種類	電荷	質量 (10 ⁻²⁸ グラム)	説明	放射線医療での用途(例)
光子線	X線	0	0	原子核外より放出される電磁波	胸部単純X線撮影、外部照射全般
	γ線	0	0	原子核より放出される電磁波	ガンマナイフ、小線源治療法
電子線	電子線	-1	9.11	加速器より放出される電子	皮膚がんへの外部照射
	β ⁻ 線	-1	9.11	原子核より放出される電子	内用療法
	β ⁺ 線	+1	9.11	電子の反粒子である陽電子	PET 検査
重粒子線	陽子線	+1	16,730	水素の原子核	陽子線治療法
	α線	+2	66,640	ヘリウムの原子核	内用療法
	炭素イオン線	+4, +6	199,300	炭素の原子核	重粒子線治療法
	中性子線	0	16,750	核分裂や核融合の過程で作られる	ホウ素中性子捕捉療法

* 質量は、静止質量。炭素イオン線の質量には、炭素原子の質量を記載。

※ 「がん放射線療法ケアガイド 第3版」祖父江由紀子、久米恵江、土器屋卓志、濱口恵子編(中山書店、2019年)等を参考に、筆者作成

放射線医療の点からみると、X線、γ線、電子線、α線は、一般の医療施設で、さまざまな検査や治療に用いられている。一方、陽子線、炭素イオン線は、治療に用いる放射線を作るために、一定規模の円形加速器(サイクロトロンやシンクロトロン)が必要となる。このため、現状では、陽子線、炭

⁴ 主な電磁波を、波長が長いほうから並べると、MRI 検査の静電磁界からはじまって、地中探査の極超長波、海上無線の長波、AM ラジオ放送などのラジオ波、FM ラジオ放送などの超短波、地デジTV 放送や携帯電話などの極超短波、電子レンジや衛星TV 放送や電波望遠鏡などのマイクロ波、リモコンなどの赤外線、光学機器の可視光線、殺菌灯の紫外線、レントゲン撮影のX線、放射線治療のγ線という順番になる。

⁵ ネオン原子、シリコン原子、アルゴン原子が、医療に用いられることもある。

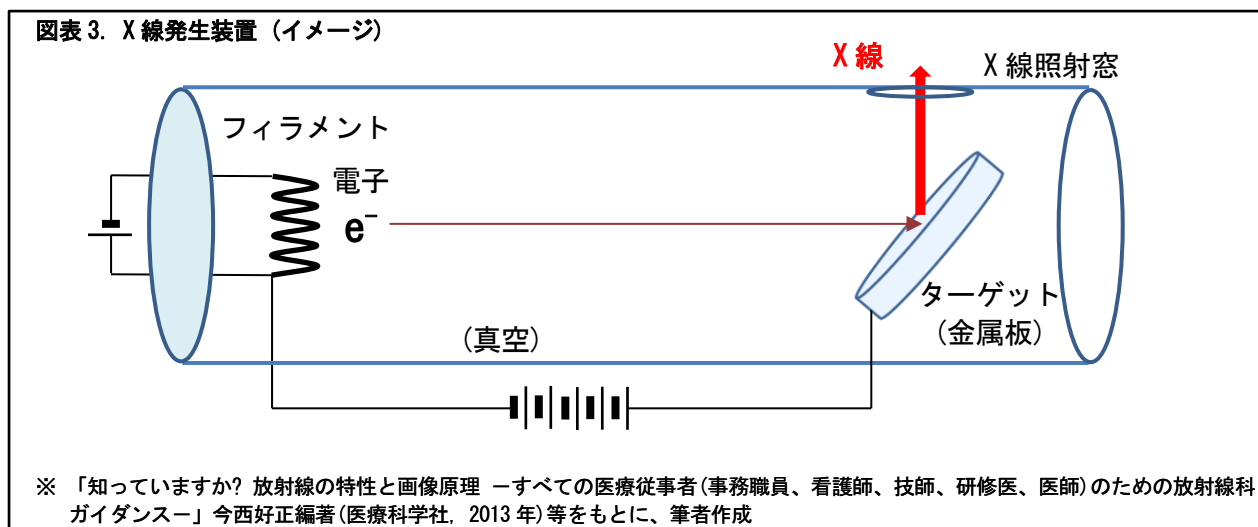
素イオン線を使用する施設は、限られている^{6 7}(施設名は後編参照)。

2 | X線や電子線などは加速器で作られる

放射線医療では、人工放射線が必要となる。X線や電子線などは、加速器を用いて作られる。その仕組みを簡単にみてみよう。

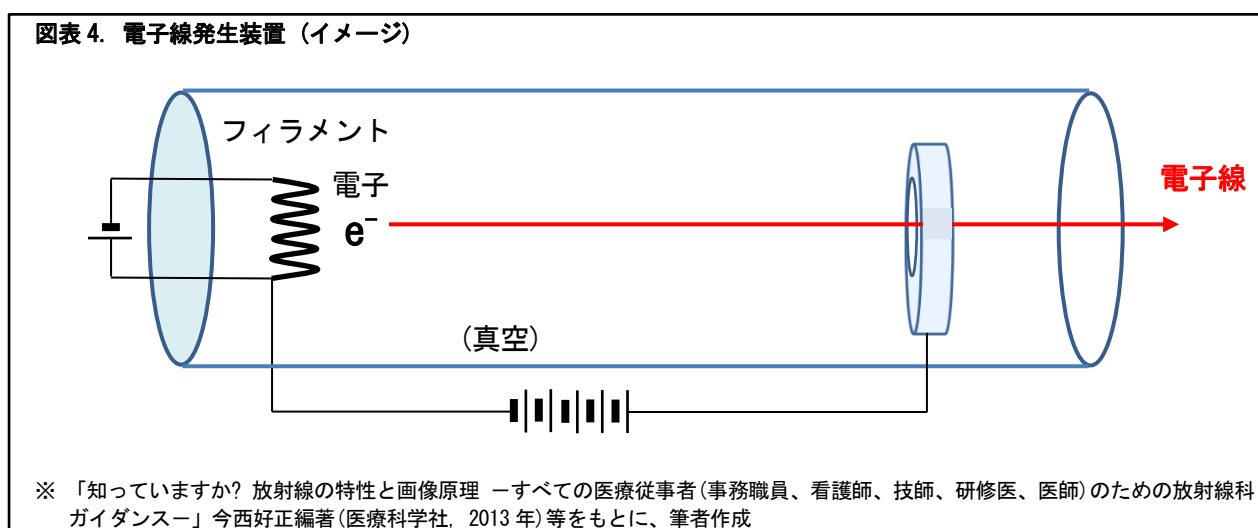
(1) X線発生装置

真空中で電子を加速して、銅、タングステン、モリブデン等できた金属板のターゲットに当たると、X線が発生する⁸。具体的には、フィラメントを陰極、ターゲットの金属板を陽極につないでおく。フィラメントを加熱すると、表面から電子が出て、ターゲットに向かって加速される。この加速された電子を、ターゲットに衝突させると、X線が出る。



(2) 電子線発生装置

X線発生装置で、ターゲットに穴をあけておくと、電子線となって電子が出る。



⁶ 医療施設内で陽子線をつくる「ベビーサイクロトロン」という小型のサイクロトロンもある。徐々に普及が進んでいる。

⁷ 中性子線については、従来、原子炉で作られたものを用いてきた。近年、直線加速器を用いた発生法の開発が期待されている。ただし、普及には、まだ時間がかかるとみられている。

⁸ ターゲットに衝突した電子の運動エネルギーは、大部分が熱エネルギーとして失われる。通常、ターゲットが加熱して溶けたり、変形したりするのを防ぐために、ターゲットは冷却水で強制的に冷却される構造となっている。また、タングステンやモリブデンといった融点の高い金属をターゲットに用いることで、加熱に耐える構造としている。

(3) 陽子線・炭素イオン線発生装置

陽子線は、サイクロトロンまたはシンクロトロンで発生させる。炭素イオン線は、シンクロトロンで発生させる。

サイクロトロンは、一様な磁場を発生させる電磁石と、その磁場の中に入れられた電極からなる。加速された荷電粒子の軌道は、螺旋(らせん)形となる。高エネルギーの重粒子線を得るには磁石を大きくする必要があるが、それには限界がある。

一方、シンクロトロンは、磁場をエネルギーの増加に合わせて時間とともに変化させていき、軌道半径を一定に保ちながら加速させる。荷電粒子の軌道は円形となる。一つのシンクロトロンでは、到達エネルギーに限界があるため、何段かの円形加速器で、次々とエネルギーを上げていくブースター方式がとられることもある。このため、通常、サイクロトロンよりも大きな規模の施設が必要となる。

3 | α線やγ線などは放射性同位元素から発生する

放射性同位元素から発生する放射線を、活用する方法もある。放射性同位元素とは、陽子や中性子の数の組み合わせが不安定な元素をいう。放射性同位元素は、放射線を放出して、安定な原子核になろうとする。天然に存在するものと、原子炉や加速器で作られるものがある。⁹

(1) α壊変

壊変により、陽子が2つ、中性子が2つ減った原子核に変化する。原子番号は2つ減る。ヘリウムの原子核がα粒子となって飛び出る。原子番号84以上の元素で起きるとされる。

(例) ラジウムの崩壊 (ラドンと、α粒子に分離)



(2) β⁻壊変

壊変により、陽子が1つ増え、中性子が1つ減った原子核に変化する。原子番号は1つ増える。電子がβ⁻粒子となって飛び出る。

(例) トリチウム(三重水素)の崩壊 (ヘリウムと、β⁻粒子に分離)



(3) β⁺壊変

壊変により、陽子が1つ減り、中性子が1つ増えた原子核に変化する。原子番号は1つ減る。陽電子がβ⁺粒子となって飛び出る。

(例) フッ素の崩壊 (酸素と、β⁺粒子に分離)



(4) γ線放出

α壊変、β⁻壊変、β⁺壊変後に、原子核が不安定な場合も多い。そのときはまだ余っているエネルギーが光子線(γ線)として放出される。γ線放出は、α壊変などに伴うもので、単独では起こらない。

(例) テクネチウムのγ線放出 (安定状態になるとともに、γ線を放出)



⁹ 元素記号の左肩の数字は、質量数(陽子数と中性子数の合計)を表す。また、(4) γ線放出の例で、質量数に続いて表記している「m」は、metastable(準安定状態)を表す。なお、本稿と次稿では、²²⁶Raを「ラジウム-226」などと文中で表記する。

4 | X線や γ 線の遮蔽には密度の高い鉛などが必要となる

放射線の透過性は、種類ごとに異なる。このことは、放射線被曝を防ぐための遮蔽(しゃへい)の方法にも関係してくる。

(1) α 線

紙1枚で、防護できる。ただし、その場合、 α 線のすべてのエネルギーがその紙に吸収される。その結果、紙はボロボロになる。

(2) β^- 線・電子線

厚めの服で防護できる。ただし、その場合、防護に使った服は、壊れる。

(3) β^+ 線

防護のためには、厚い鉛などが必要となる。

(4) X線・ γ 線

透過力の高い放射線であるため、防護には、密度の高い鉛などが使われる。

(5) 中性子線

陽子(水素の原子核)を高密度に含む液体水素、水、アクリル板などで防護できる。一般に、原子炉などの中性子が多く発生するところでは、防護のために水が大量に使われている。

(参考) エネルギーと被曝と放射線障害 — その関係は、単純ではない

「放射線は難解だ」と感じられる原因に、放射線のエネルギーの高低が、単純に放射線障害として身体に影響を及ぼすわけではない、ことがあげられる。次の例をみてみよう。¹⁰

— 「エネルギーが高いと、被曝量が大きくなる」とは限らない

γ 線¹¹は、エネルギーが高いと透過力が大きい。このため、身体に影響を残さずに通り抜けてしまう。逆に、エネルギーが低いと、身体で吸収されてしまう。つまり、エネルギーが低い場合に、被曝量が大きくなる。

— 「被曝量が大きいと、放射線障害も大きくなる」とは限らない

放射線障害には、皮膚の障害と内臓の障害がある。 γ 線で、140keV、80keV、30keV という、3つのエネルギーの放射線での障害を比較してみる¹²。

140keV では、皮膚も内臓も通り抜けるため、被曝量や障害は小さい。

30keV では、被曝量が多いが、主に皮膚の被曝にとどまる。内臓には放射線があまり到達せず、大きな障害には至らない。

80keV では、被曝して、皮膚にも内臓にも障害を引き起こす。その結果、大きな障害に至る。

3—放射線による検査と診断

本章では、放射線を用いた検査や診断について概観していく。

¹⁰ 「知っていますか? 放射線の特性と画像原理 —すべての医療従事者(事務職員、看護師、技師、研修医、医師)のための放射線科ガイドランス—」今西好正編著(医療科学社、2013年)を参考に、筆者がまとめた。

¹¹ γ 線放出時には、1つのエネルギー水準の γ 線だけが出る。ここでは設例の単純化のために、この性質を持つ γ 線を用いている。一方、X線発生時には、加速・衝突させる電子のエネルギー以下のすべてのエネルギー水準のX線が出るという。

¹² keVは、キロ電子ボルト。自由空間内で1つの電子が1ボルトの電圧で加速されるときに得るエネルギーが1eVで、1keVはその1000倍。1keV=1.602×10⁻¹⁶J(ジュール)という関係がある。

1 | 放射線は発見当初から医療に活用されてきた

放射線に関する歴史は、19世紀終わりからの約130年間に集約される。実は、その歴史は、放射線医療の歴史とほぼ重なっている。放射線は、発見当初から医療に活用されてきた。放射線医療は、放射線や放射性同位元素の発見、放射線発生装置や治療装置の開発、放射線治療法の導入などが、並行して発展してきたといえる。

海外と日本の歴史を比べると、海外の知見が、少し後れて日本国内に導入されてきた様子がわかる。

図表 5. 放射線医療の歴史（主な事項について海外と日本に分けて比較）

海外		日本	
1895 年	ヴィルヘルム・レントゲンがX線を発見		
1896	アンリ・ベクレルがα線を発見		
1898	キュリー夫妻がラジウムを発見		
1899	皮膚がんのX線治療成功		
1901	皮膚がんのラジウム治療(小線源療法)開始	1921 年	X線治療開始
1934	ジョリオ＝キュリー夫妻(キュリー夫人の長女夫妻)が人工放射性同位元素ポロニウム-30を発見	1935	ラジウム治療開始
1961	陽子線治療開始	1963	リニアック装置導入
1968	ガンマナイフ治療開始	1968	RALS(遠隔操作式治療装置)導入
1973	CT装置開発	1975	CT装置導入、普及
1994	IMRT(強度変調放射線治療)開発	1979	陽子線治療開始
1994	サイバーナイフ開発	1990	ガンマナイフ導入
2002	トモセラピー開発	1994	重粒子線治療開始
2005	VMAT(強度変調回転放射線治療)開発	1998	サイバーナイフ導入
		2000	高精度・高機能型リニアック(IMRT等)普及
		2005	トモセラピー導入
		2008	VMAT導入

※ 「がん放射線療法ケアガイド 第3版」祖父江由紀子、久米恵江、土器屋卓志、濱口恵子編(中山書店、2019年)、「キュリー夫人伝(新装版)」エーヴ・キュリー著、河野万里子訳(白水社、2014年)等を参考に、筆者作成

2 | X線撮影は、撮影対象に応じて、異なるエネルギー水準を用いる

放射線検査のなかで代表的な、X線撮影について、その原理を簡単にみてみよう。X線撮影では、X線が感光板を黒く変色させる。受検者をX線と感光板の間に置いて撮影すると、X線が身体を通過した部分は黒く、X線が身体に吸収された部分は白く写る。これを利用して画像検査が行われる。

一般に、X線などの電磁線には、光電効果とコンプトン散乱という物理的現象が影響する。また、X線などを吸収すれば被曝する。エネルギー水準の設定には、これらの要素を踏まえる必要がある。

(1) 光電効果

X線のエネルギーが、物質中の原子に当たる様子を考えてみよう。X線を当てると、最も原子核に近いところを回っている電子(「最内殻電子」という)が、そのエネルギーを吸収して、軌道から弾き飛ばされる。これを「光電効果」と呼ぶ。光電効果に伴って、X線は吸収される。

小さな原子では、低いX線エネルギーで光電効果が起こる。このため、X線の吸収は小さい。逆に、

大きな原子では、高い X 線エネルギーで光電効果が起こる。X 線の吸収は大きくなる。このため、同じ質量で比べたときに、原子番号が小さな原子ほど X 線吸収が小さいこととなる。

この現象を、体内の組織にあてはめてみよう。

脂肪組織は、主に水素、炭素、酸素(原子番号はそれぞれ 1、6、8)といった小さな原子からなるため、X 線吸収が小さい。筋肉は、細胞内液や組織液の形で、水素、酸素のほかに、ナトリウム、カリウム、塩素(同 11、19、17)などを含むため、中等度に X 線を吸収する。骨や石灰化した結石は、主にカルシウムとリン(同 20、15)からなり、X 線吸収が大きい¹³。このように、組織を構成する元素の種類によって、X 線の吸収に差が生じる。

(2) コンプトン散乱

一方、「コンプトン散乱」は、X 線のエネルギーが大きいと、軌道から弾き飛ばされる電子に、そのエネルギーの一部が吸収され、その分低いエネルギーとなった X 線が散乱することをいう。散乱した X 線は、「散乱線」と呼ばれる¹⁴。

コンプトン散乱は、原子の大きさに関係なく起こる。すなわち、脂肪、筋肉、骨といった組織に、同じように起こる。

(3) 被曝

低い X 線エネルギーは、身体に吸収されるため、被曝量が大きくなる。逆に、高い X 線エネルギーは、身体を通り抜けるため、被曝量は小さくなる(第 2 章(参考)を参照)。

光電効果、コンプトン散乱、被曝をあわせてみてみよう。X 線撮影では、撮影対象の組織ごとに、異なるエネルギー水準の X 線を用いることとなる。

【乳腺組織 (マンモグラフィ検査) : 25~35kV(キロボルト)】

乳腺組織等を鮮明に写すために、光電効果の強い低エネルギーの X 線を使用。被曝量は多くなる。¹⁵

【骨組織 (骨・関節撮影) : 40~60kV】

光電効果があり、透過性もあるエネルギー水準の X 線を使用する。

【腹部 (上部消化管造影検査(胃透視)) : 75~85kV】

脂肪組織とともに結石などをみるために、光電効果上限のエネルギー水準の X 線を使用する。

【胸部 (胸部単純 X 線撮影) : 100~120kV】

肋骨に隠れた肺病変をみるために、コンプトン散乱領域を含む高エネルギー水準の X 線を使用する。

3 | 放射線量の単位は、ベクレル (Bq)、グレイ (Gy)、シーベルト (Sv) の 3 つ

放射線の分野には、独特な計量単位がいくつかある。日本では、2011 年の東日本大震災で発生した原子力発電所事故の際に、放射能汚染の状況が、ベクレル、グレイ、シーベルトといった単位を用い

¹³ X 線撮影時に用いられるヨウ素(原子番号 53)やバリウム(同 56)などの造影剤は、X 線をよく吸収する。

¹⁴ 散乱線は、入射した X 線よりも、振動数が減り、波長が長くなる。散乱の角度は、入射した X 線に対して 0~180 度の範囲となる。

¹⁵ なお、軟部組織や腫瘍では、コンプトン散乱による散乱線がフィルムに当たってしまい、撮影にぼやけが生じる。このため、身体と感光板の間にグリッドを置いて、散乱線がフィルムに当たらないようにする(次章で詳述)。

て報じられた。これらの単位は、一般の人が日常的に見聞きするものではなく、放射線の難解さを印象付けるものとなっている可能性がある。ここでは、それぞれの単位の内容を簡単にみていこう。

ベクレル (Bq)

放射線を出す側に注目した単位。ベクレルは、放射性物質の放射能の強さを表す。食品中の放射線物質の安全基準などで、「食品 1 キログラムあたり〇ベクレル」といった表示をする¹⁶。1 秒間あたりに、放射性崩壊する原子核の個数で表す¹⁷。放射性物質が出す放射線に対して、使用される¹⁸。

グレイ (Gy)

放射線を受ける側に注目した単位。放射線がモノに当たったときに、物質 1 キログラムに付与されるエネルギーを「吸収線量」という。グレイは、この吸収線量の大きさを表す。物質 1 キログラムに、1 ジュールのエネルギーを与える放射線が、1 グレイとされている。グレイは、放射線の種類に関係なく使用される¹⁹。放射線治療で、投与する放射線の量を表すのに用いられる。

シーベルト (Sv)

放射線を受ける側に注目した単位。シーベルトは、放射線が人体に当たったときに、どのような健康被害があるかを表す。健康被害は、放射線の種類や、放射線が当たった部位などによって異なる。そこで、吸収線量を、修正係数で修正した線量を計算する。

まず、臓器・組織ごとに健康被害をもたらす線量をみる。ある臓器に、たとえば X 線、 α 線など、いくつかの種類の放射線が当たったときに、各放射線の吸収線量に、放射線の種類に応じた「生物学的効果比²⁰」を掛け算して、その合計をとる。これは「等価線量」と呼ばれる。

つぎに、各臓器・組織の等価線量に、組織の違いに応じた「組織荷重係数²¹」を掛け算して、その合計をとる。これは、「実効線量」と呼ばれ、人体全体での健康障害の程度を表す。

ただし、実効線量は、人体の臓器・組織の線量をもとに計算される量であり、一般に、測定器を使って直接測定することは難しいとされる。そこで、被曝管理には、実際に測定可能な実用量として、「周辺線量当量」や「個人線量当量」が用いられている。

周辺線量当量 : 人体の組織を模した、密度や元素組成が人体と等価の直径 30 センチメートルの球をつくり、その表面から 1 センチメートルの深さにおける線量が実用量とされる²²。
単位は、シーベルト。環境モニタリングなどで用いられる。

個人線量当量 : 人体のある特定した点の深さに応じた線量が実用量とされる。単位は、シーベルト。

¹⁶ 厚生労働省は、放射性セシウムの基準値(放射性ストロンチウム・プルトニウムなどの影響を計算に含む)として、飲料水は 10 Bq/kg、牛乳や乳児用食品は 50 Bq/kg、一般食品は 100 Bq/kg と示している。

¹⁷ 時間の逆数の次元を持つ SI 単位系の組立単位。ベクレル(Bq)は、周波数の単位であるヘルツ(Hz)などと同じ次元となるが、放射能の計量以外には使用できない。

¹⁸ 放射能の単位として、歴史的には、キュリー(Ci)が用いられてきた。1 キュリーは、1 グラムのラジウム-226 の放射能の強さを表す。キュリーとベクレルの間には、 $1\text{Ci}=3.7\times 10^{10}\text{Bq}$ という関係がある。

¹⁹ 1 ジュールは、標準重力加速度のもと、約 102 グラム(小さなリングくらいの重さ)の物体を 1 メートル持ち上げる仕事。

²⁰ 同じ吸収線量でも、放射線ごとに、障害をもたらす程度は異なる。生物学的効果比として、X 線・ γ 線・ β^- 線・ β^+ 線・電子線は 1、 α 線は 20、中性子線は 5~20、陽子線は 5 などと定められている。

²¹ 同じ等価線量でも、組織ごとに障害の程度は異なる。組織荷重係数として、肺・胃・乳房は 0.12、甲状腺・食道・肝臓は 0.04、皮膚・骨・脳は 0.01 などと定められている。

²² 深さ 3 ミリメートルの場合、目の水晶体の等価線量。70 マイクロメートルの場合、皮膚の等価線量に相当するとされる。

個人モニタリングなどで用いられる。

4 | 放射線医療は、チーム医療として行われる

一般に、放射線医療は、いくつかの職種が関わるチーム医療として行われる。

チーム医療において、検査・診断は放射線診断専門医(日本全体で5,802人)、治療は放射線治療専門医(1,283人)が中心となる。がん放射線療法看護認定看護師(323人)や、がん看護専門看護師(893人)は、患者のケアなどにあたる。検査や治療に用いる放射線装置のセットアップや品質管理は、診療放射線技師(54,213人)や医学物理士(1,252人)が行う。診療放射線技師は国家資格、医学物理士は認定資格である²³。このほかにも、「ヘルパー」、「クラーク」などと呼ばれる事務職員が、放射線治療の照射受付や、照射記録の管理を行っている。²⁴

4—放射線検査の種類

放射線を用いた検査には、いくつかの種類がある。一般には、人間ドックなどで肺や胃などの臓器を撮影する検査がなじみ深いところだろう。ほかにもケガで骨折の疑いがあるときの骨・関節撮影、歯科診療所での歯科撮影、乳がん検診で行われるマンモグラフィ検査など、よく知られた検査がある。これらの検査を受けると、少量ながら被曝する。被曝量についてまとめると、次表のとおりとなる。(なお本章では、放射線を用いないMRIや超音波検査も、比較の観点からみていくこととする。)

図表 6. 検査で受ける放射線量 (例)

検査の種類	診断参考レベル*1	実際の被曝線量*2	線量の種類
一般撮影 (胸部正面)	0.3 mGy	0.06 mSv	実効線量
マンモグラフィ検査	2.4 mGy	2 mGy 程度	等価線量*4
X線透視	透視線量率で 20 mGy/分	胃の透視 4.2-32 mSv 程度*3	実効線量
歯科撮影	下顎前歯部 1.1 mGy から 上顎大臼歯部 2.3 mGy まで	2-10 μ Sv 程度*5	実効線量
CT 検査	成人頭部単純ルーチン 85 mGy	5-30 mSv 程度	実効線量
	小児 (6~10 歳) 頭部 60 mGy		
核医学検査	放射線医薬品ごとの値	0.5-15 mSv 程度	実効線量
PET 検査	放射線医薬品ごとの値	2-20 mSv 程度	実効線量

*1 医療被ばく研究情報ネットワーク他「最新の国内実態調査結果に基づく診断参考レベル」平成 27 年 6 月 7 日 (平成 27 年 8 月 11 日一部修正)

*2 量子科学技術研究開発機構「CT 検査等医療被ばくの疑問に答える医療被ばくリスクとその防護についての考え方 Q&A」

*3 北里大学病院放射線部「医療の中の放射線基礎知識」における「健康診断の X 線検査」の「胃 (透視)」のデータより作成。術者や被検者により差がある。

*4 マンモグラフィ検査の等価線量は、平均乳腺線量

*5 μ Sv はマイクロシーベルトで、 10^{-6} シーベルトのこと。mSv はミリシーベルトで、 10^{-3} シーベルトを表す。

※ 「放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料 (平成 30 年度版)」(環境省)をもとに、筆者作成

1 | 一般撮影はさまざまな部位の検査に使われる

「X 線検査」や「レントゲン検査」として、一般の人になじみ深い検査は、「一般撮影」と呼ばれる。X 線で、胸部、腹部、骨・関節部などを撮影する。撮影では、X 線を当てる部分の体の後ろに、フィル

²³ 一般財団法人 医学物理士認定機構による認定。

²⁴ 人数は、診療放射線技師は 2017 年の常勤換算、医学物理士は 2020 年、それ以外は 2019 年。

ムや検出器²⁵を置いて、体内を透過したX線を検出する。検出した部分は、黒く写る。X線が吸収された白い部分と、透過した黒い部分の白黒の画像で、体内の様子を見ることができる。

鮮明な画像を得るために、グリッドが用いられることもある²⁶。グリッドは、コンプトン散乱により、X線が体内の病変等に当たって発生する散乱線がフィルムを感光して、画像がぼやけることを避ける。身体とフィルムの間に設置して、身体を直接透過したX線だけをフィルムに感光させる^{27,28}。

一般撮影は、さまざまな部位の検査に行われる。胸部を撮影する「胸部単純X線撮影」や、骨折の有無や変形などを撮影する「骨・関節撮影」が代表的な検査といえる。

2 | 撮影室までの移動が困難な入院患者にはポータブル撮影が行われる

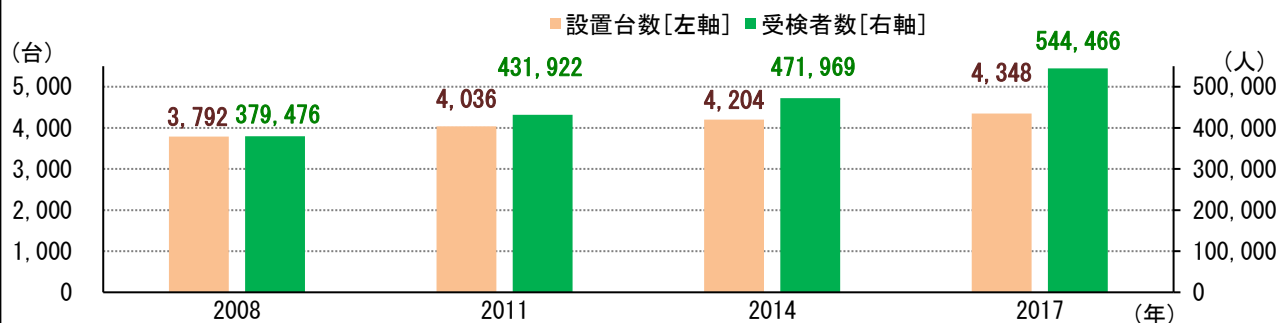
X線撮影室まで移動することが困難な入院患者に対して、病室に、移動型X線診断装置やポータブル撮影装置を持ち込んで撮影する。撮影時には、対象の入院患者から発生する散乱線により、撮影に従事した職員や周囲の患者が被曝してしまうリスクがある。また、グリッドが使用できないため、鮮明な画像が得られないことがある。

3 | マンモグラフィ検査では、被曝量がある程度多くなる

マンモグラフィ検査は、乳がんの検査法として浸透している。乳房専用のX線撮影装置により、片方ずつ乳房を撮影する。撮影には、光電効果の強い低エネルギー(25～35kV)のX線を使用するため、被曝量は多くなる。また、通常、アクリル板を用いて乳房を圧迫することで、乳腺組織の重なりを少なくして、鮮明に病変を撮影する²⁹。

マンモグラフィ検査は、装置の設置台数が増えており、それを上回る勢いで受検者数が伸びている。

図表7. マンモグラフィ検査装置の設置台数と受検者数の推移



* 病院と一般診療所の合計。各年9月中(1ヵ月間)の値。

※ 「医療施設調査」(厚生労働省)をもとに、筆者作成

²⁵ イメージングプレート(IP)や、フラットパネルディテクター(FPD)のこと。IPは、フィルムと異なり繰り返し使用可能。FPDはデジタル画像として撮影後すぐに見ることができる。FPDは感度がよく被曝量が低減できるため、導入が進んでいる。

²⁶ 従来より行われてきたフィルムを感光させる方式では、体内を透過したX線がフィルムをも透過してしまうことを避けるため、蛍光塗料を主成分としたプラスチックなどの増感紙をフィルムの後ろに密着して設置することが一般的。X線が増感紙に当たると、蛍光を発生し、フィルムを感光する。実際の撮影で、X線がフィルムを直接刊行するのは10%程度で、残り90%は増感紙の蛍光による感光とされている。〈p82〉

²⁷ なお、グリッド線自身がフィルムに写ることを避けるために、グリッドを高速で動かしながら撮影する「ブッキー撮影台」という装置もある。

²⁸ グリッドを使用した場合、グリッドによる吸収を考慮して、X線を多く出す必要があり、その分、被曝量が多くなる。一般に、手や足などあまり厚みのない部位の撮影では、被曝量を少なくとどめるために、グリッドは用いないことが多いとされる。

²⁹ アクリル板による圧迫は、X線の被曝量を少なくすることにもつながる。ただし、圧迫により、受検者が痛みを伴うことがある。痛みの緩和のために、撮影前に深呼吸をしてもらったり、肩の力を抜いてもらったりすることが行われる。

4 | X線透視検査では、体内を観察しながら撮影する

X線を用いて体内を透視し、リアルタイムに観察しながら撮影するものがX線透視検査である。受検者に、バリウムや発泡剤などの造影剤を服用してもらったうえで行う、上部消化管造影検査(胃透視)が代表的なものといえる。そのほかにも、大腸造影検査(注腸検査)、子宮卵管造影検査、関節造影検査、脊髄腔造影検査などが行われる。通常、検査で受検者が受ける実効線量は、一般撮影よりも多い。

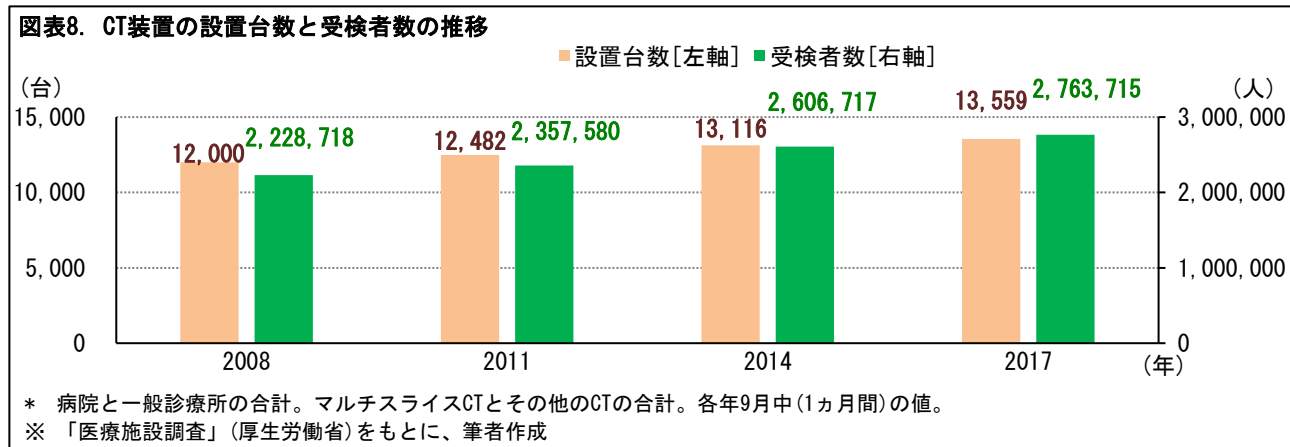
5 | CT検査で胸部や腹部を撮影するときは、両腕を頭側に挙げる

CT検査(コンピュータ断層撮影)³⁰は、X線を使って身体の断面像を撮影する。CT装置といわれる、X線発生装置(X線管球)とX線検出器を相向かいに設置したドーナツ状の装置の穴の部分に、受検者の身体を入れていく。撮影部位や検査室の関係などから、頭部から入れる場合と足部から入れる場合がある。X線管球とX線検出器の組が、ドーナツ内を1回転すると、1枚分の断面像が得られる。鮮明な画像を得るために、頭部や頸部の撮影の場合を除いて、受検者の両腕を頭側に挙げて撮影する。

CT装置の種類として、受検者が横たわる寝台を、1枚ごとに移動させて何回も撮影する「ノンヘリカルCT」と、寝台を一定速度で動かして複数枚の断面像を撮影する「ヘリカルCT」がある。ヘリカルCTのうち、検出器を1列に設置するものを「シングルスライスヘリカルCT」、複数の列に配置するものを「マルチスライスヘリカルCT」という。近年、マルチスライスヘリカルCTの導入が進んでいる。

撮影法の種類としては、造影剤を用いない「単純CT」のほかに、ヨウ素造影剤を静脈内に注射したうえで撮影する「造影CT」がある。単純CTは、肺や骨の形態、組織の浮腫などの撮影に用いられる。造影CTは、主に血管の撮影に用いられる。

CT検査は、設置台数、受検者数とも年々、増加している。



6 | 血管連続撮影検査では、アームの位置や角度を自由に動かして撮影が行われる

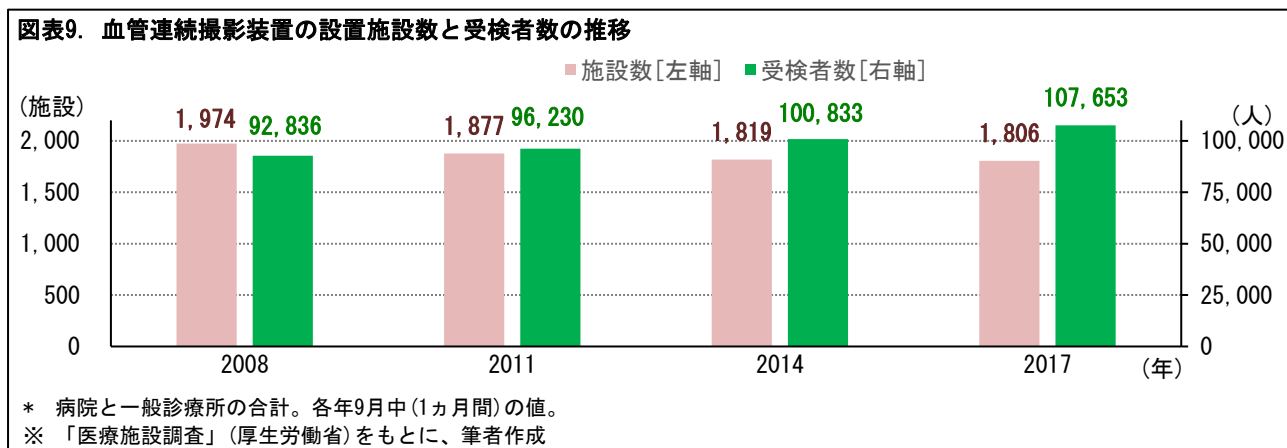
血管連続撮影検査では、受検者が横たわる寝台に対して、天井のレールから吊り下げられたアームの一端にX線発生装置、他端に大きな検出器が設置される。アームの位置や角度を自由に動かすことにより、さまざまな撮影が可能となる。

アームとX線発生装置と検出器が1セットの「シングルのプレーン撮影装置」や、2セットの「バイプレーン撮影装置」がある。バイプレーン撮影装置は、同時に2方向からの透視や撮影ができるため、

³⁰ CTは、Computed Tomography(コンピュータ断層診断)の略。

血管構造を立体的にとらえることができるという。

また、カテーテルと呼ばれる細い管を血管内に挿入して、造影剤を注入して撮影することもある³¹。
血管連続撮影装置の設置施設数は、近年、若干微減傾向にあるが、受検者数は徐々に増加している。



7 | 核医学検査では、臓器や組織の機能が検査できる

核医学検査(RI検査³²、アイソトープ検査)では、テクネチウム-99m³³などの放射性同位元素を含む薬剤を使って、受検者の特定の臓器・組織の機能の検査が行われる。受検者に薬剤を投与した後、しばらくすると、標的臓器にその薬剤が集まってくる。薬剤中の放射性同位元素が発する放射線(γ線)を、ガンマカメラでとらえて画像化する。このような放射性同位元素の分布状態を画像化する検査法は、「シンチグラフィ」と呼ばれる。シンチグラフィとして、代表的なものを2つみておこう。³⁴

(局所脳血流シンチグラフィ)

核医学検査により、頭部の断面像を撮影する。脳の血流機能の変化をとらえる検査であり、形態の変化をみるCT検査やMRI検査よりも、早期に脳梗塞などの異常を画像化できるというメリットがある。

(骨シンチグラフィ)

核医学検査により、骨の無機質の代謝を画像化する。代謝機能の変化をとらえる検査であり、カルシウムが増減した後の様子を写し出す一般撮影よりも、早期に病変が検出できる利点がある。

核医学検査の設置台数や受検者数は、近年、減少傾向にある。その背景として、核医学検査と同様、臓器や組織の機能をみるための検査である、PET検査装置が普及してきたことにより、一部の核医学検査がPET検査に置き換わっていることが考えられる。

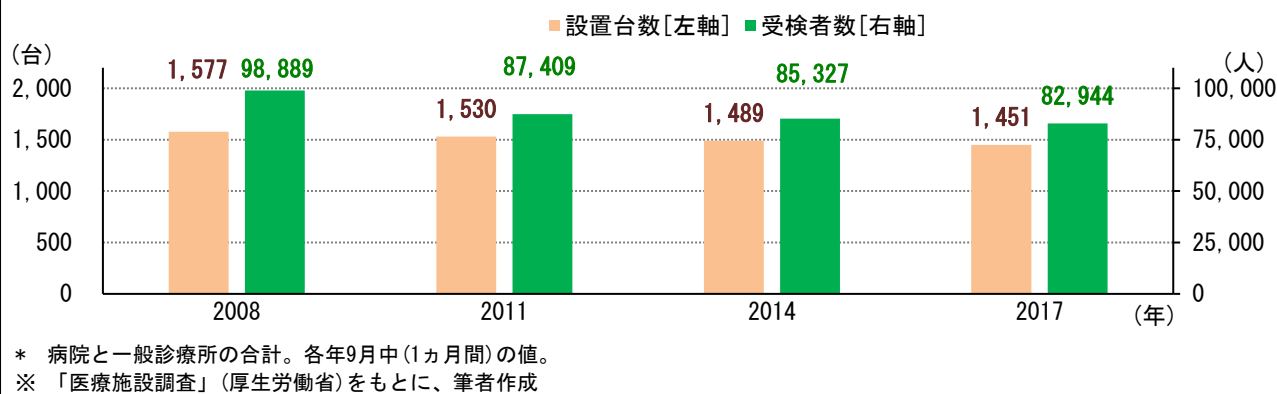
³¹ 血管連続撮影検査を行う血管撮影室では、血管撮影のほかに、心臓カテーテル検査などの検査や、ペースメーカー植え込み術、動脈内薬剤投与、血管塞栓術、ステント挿入・血管拡張術などの治療を行うこともある。

³² RIは、Radio Isotope(放射性同位元素)の略。

³³ テクネチウム-99mは、モリブデン-99という放射性同位元素がβ⁻壊変することで生じる。原料のモリブデン-99は、海外の原子炉で作られ、日本に輸入されている。

³⁴ なお、核医学検査は、妊婦や妊娠の可能性のある人には行えないことがある。また、授乳中の女性が検査を受ける場合は、一時的に授乳を中止することとされている。

図表10. 核医学検査装置の設置台数と受検者数の推移



8 | PET 検査では、陽電子による放射線が検出される

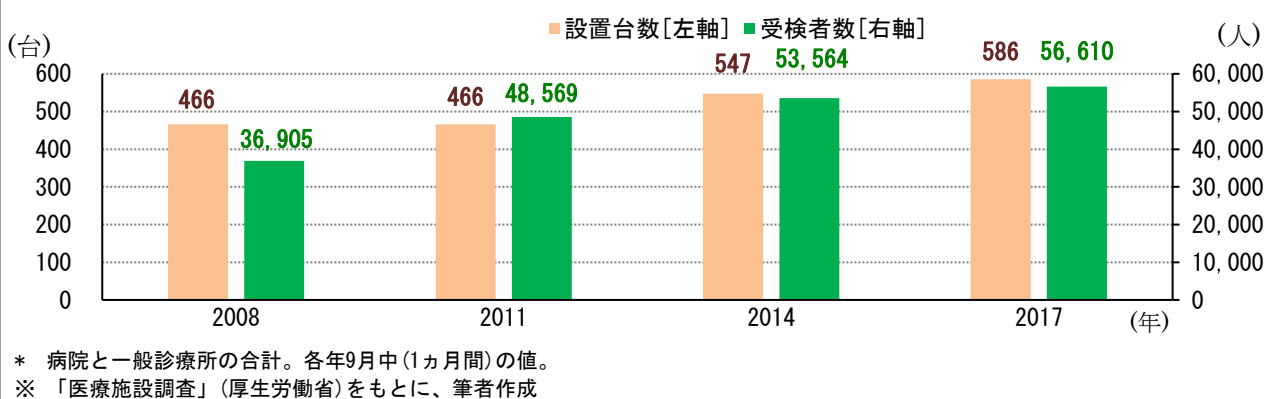
PET 検査³⁵は、がん細胞が正常細胞に比べて3~8倍多くブドウ糖を取り込む、という性質を利用する検査法である。ブドウ糖に近い化学構造を持つ、フルオロデオキシグルコース(FDG)³⁶を、体内に注射する。FDGに含まれる放射性同位元素フッ素-18は、 β^+ 壊変を起こして、陽電子(β^+ 粒子)を放出する。この陽電子による放射線を検出する³⁷ことで、全身でのFDGの分布状態がわかる。すなわち、FDGが多い部位にがん細胞がある、という形で、がんを発見する手がかりとなる。PET検査は、細胞の機能を利用して診断画像をつくることから、機能画像をみる検査といわれる。

PET検査を、形態画像をみるCT検査と同時にを行い、得られた画像を重ね合わせることで、異常部位を正確にとらえる検査法は、「PET-CT検査」と呼ばれる。

なお、放射性同位元素には、それぞれ固有の半減期がある。たとえば、核医学検査で用いられるテクネチウム-99mの半減期は約6時間、PET検査で用いられるフッ素-18の半減期は約110分となっている。放射性同位元素の半減期が短い場合には、作ってからすぐに検査に使用する必要がある。

近年、PET装置の設置台数は増加しており、受検者数も急速に伸びている。

図表11. PET検査装置(PET-CT検査装置を含む)の設置台数と受検者数の推移



³⁵ PETは、Positron Emission Tomography(陽電子放出断層撮影)の略。

³⁶ グルコースの一部の水酸基をフッ素-18で置換してつくる。フッ素-18は、陽子をサイクロトロン(もしくは小型のベビーサイクロトロン)で加速して、水の酸素原子に衝突させてつくる。

³⁷ 放出された陽電子が、水などの分子中の電子とぶつかり、消滅(「対消滅(ついしょうめつ)」という)すると、電子の静止質量に等しいエネルギー(511keV)の γ 線が2つ、反対方向に放出される。この2つの γ 線を検出器でとらえることで、放射線の飛来方向が把握できて、FDGの位置がつかめるといふ。

9 | MRI 検査では、水素の原子核の歳差運動の違いを画像化する

MRI 検査³⁸は、磁石と電磁波を使って、体内の様子を画像化する。その原理を簡単にみてみよう。

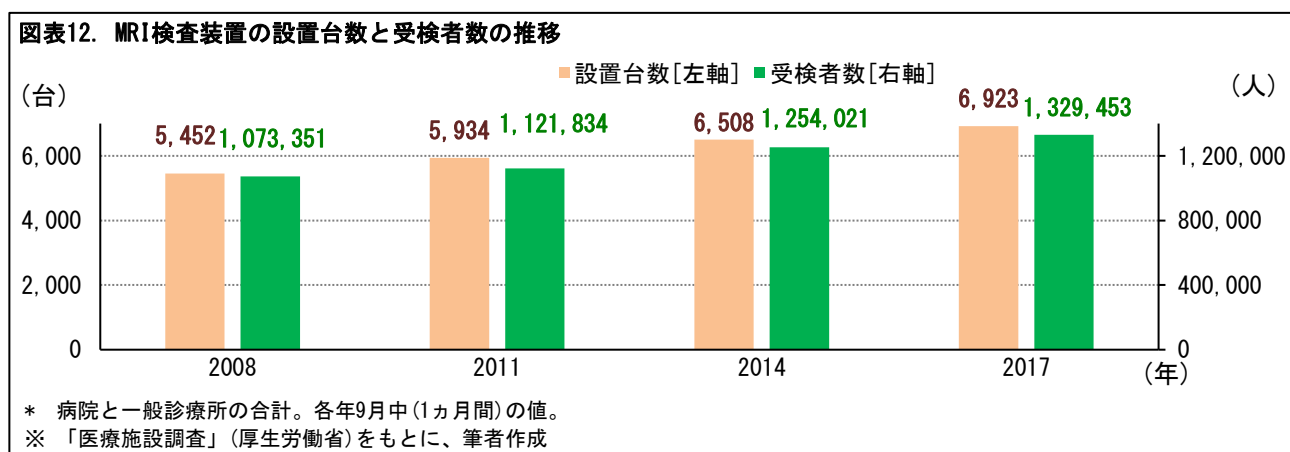
人体の組織や臓器には、多くの水や脂肪が含まれている。水や脂肪の分子中の水素の原子核は、コマのように自転しながら、首振り運動(「歳差運動」という)をしている。それぞれの原子核は自転により、微弱な磁石となっている。ただし、原子核ごとに周囲の磁場が異なるため、歳差運動の回転速度が速い原子核と、遅い原子核がある³⁹。すなわち、N 極の向きが原子核ごとに異なっている。

この状態に、原子核を揃える電磁波を当てると、原子核の N 極の向きが揃う。しかし、時間の経過とともに、その向きは、再びバラバラとなっていく。この状態で、原子核を反転させる電磁波を当てると、バラバラだった歳差運動がいずれ揃ってくる。N 極の向きが揃う様子を、位置ごとにとらえて、エコー信号として画像化する⁴⁰。

身体の中かに出血していたり、タンパク質が多く存在していたりする部分があると、鉄分やベンゼン環、二重結合を多く含む物質が水や脂肪に溶け出している。その付近の水素の原子核は、歳差運動の速度が変化するため、電磁波を当てても、他の原子核の N 極が揃う時期に揃わず、エコー信号が低下する。このエコー信号の低下する場所を解析することで、体内の様子を画像化することができる。

なお、MRI は磁石を用いる検査のため、MRI 検査室には金属類の持ち込みはできない。たとえば、原則として、義歯、歯科矯正機器、補聴器、ヘアピンなどをつけて、MRI 検査室に入ることはできない。

近年、MRI 検査は設置台数が増加しており、受検者数も、年々伸びている。



10 | 超音波検査は、主に軟部組織を対象に用いられる

超音波検査は、エコー検査とも呼ばれる。耳では聞くことのできない、周波数の高い音(超音波)を、身体に向けて出すと、臓器や血管などに超音波の一部が当たり、反射して戻ってくる。超音波を出してから戻ってくるまでの時間や、戻ってきた超音波の量や周波数を解析することで、身体の断面像をとることができる。

超音波検査装置で、超音波を出したり、戻ってきた超音波を受け取ったりする部分は「プローブ」

³⁸ MRI は、Magnetic Resonance Imaging(磁気共鳴画像診断)の略。

³⁹ 一般に、歳差運動の回転速度は、周囲の磁場が強いほど速くなる。

⁴⁰ 原子核を揃える電磁波は「90° パルス」、原子核を反転させる電磁波は「180° パルス」と呼ばれる。90° パルスを当てると、半分の原子核だけが影響を受けて、N 極が揃う。180° パルスを当てると、すべての原子核が影響を受けて、一番速く回転していた原子核が最後尾に、一番遅く回転していた原子核が先頭にくる。90° パルスを当ててから、180° パルスを当ててまでの時間と同じ時間が経つと、すべての原子核の N 極が揃う。

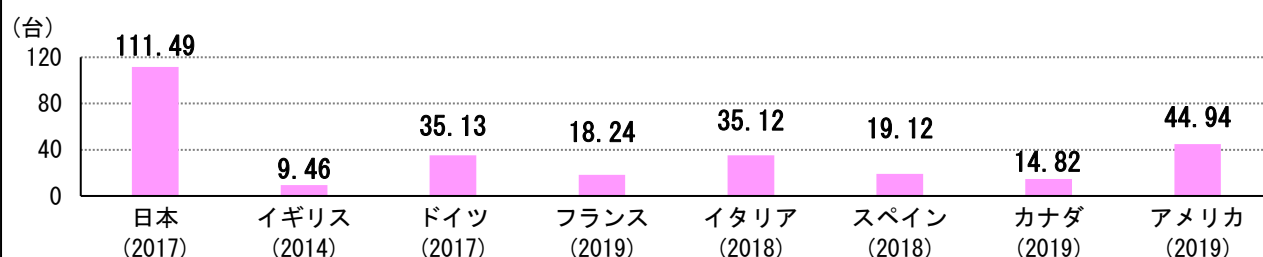
と呼ばれる。プローブと身体の上に空気があると、超音波は身体の中に入っていない。そこで、検査用クリームを塗ったうえで検査を行う。

超音波検査の対象は、主に、頸部、甲状腺、心臓、腹部、乳腺、末梢動静脈などの軟部組織となる。原則として、空気が多く含まれている肺や、骨に囲まれた脊髄や骨髄などは検査できない。実際の検査では、検査対象の部位の深さや広がりに応じて、周波数や超音波を出す範囲が異なるプローブを使い分けることもあるとされる。

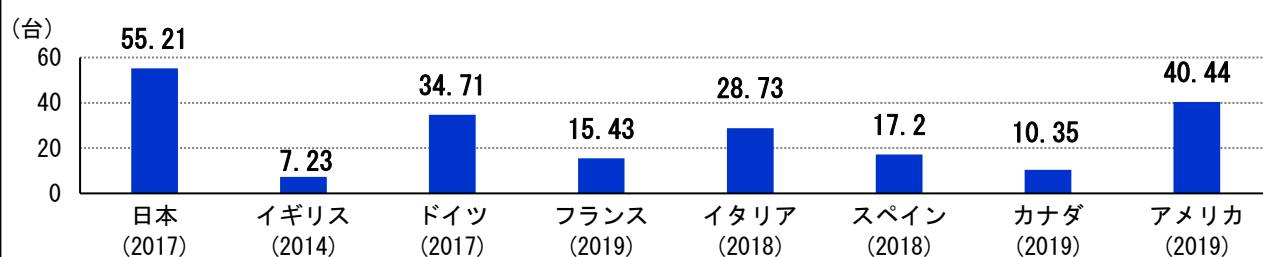
11 | 日本は欧米よりも高度画像診断の設備が充実している

以上、代表的な検査を簡単にみていった。これらのうち、日本は、CT と MRI といった高度画像診断装置の設置台数が多い。これらの装置に関して、欧米諸国よりも、検査設備が充実しているといえる。

図表13-1. CT装置設置台数（人口100万人あたり）



図表13-2. MRI装置設置台数（人口100万人あたり）



* イギリスは推定値。スペインとカナダは暫定値。（）内は、調査年。
 ※ “OECD Health Statistics 2020” (OECD) をもとに、筆者作成

5——放射線防護と安全管理

放射線医療においては、被曝による身体への有害事象は避ける必要がある。本章では、放射線の防護と安全管理について、概観していこう。

1 | 放射線の防護には、3つの原則がある

放射線は上手に用いれば、診断や治療に役立つ。放射線の有用性を不当に制限することなく、有害事象の確定的影響を防ぎ、確率的影響を減少させることを目指して⁴¹、国際放射線防護委員会(ICRP)は、放射線防護の3原則を定めている。それぞれの原則を要約すると、次表のとおりとなる。⁴²

⁴¹ 確定的影響とは、照射する線量がある閾値(しきいち)を超えると、有害事象が出る確率が急上昇すること。確率的影響とは、一般的には、線量が多いほど有害事象が出る確率が上昇するが、そこには確率的な要素が入り込み、「線量が少ないから絶対に出現しない」とか、「線量が多いから必ず出現する」などとは言い切れないことをいう。(詳細は、後編を参照。)

⁴² 3つの原則のうち、防護の最適化は、「合理的に達成できるかぎり低く保つべきである」(As Low As Reasonably Achievable)という部分を取り出して、「ALARA(アララ)の原則」とも呼ばれている。

図表 14. 放射線防護の3原則

行為の正当化	放射線被曝を伴うどんな行為も、それが引き起こす放射線損害を相殺するのに十分な便益を生むのでなければ、採用すべきでない。
防護の最適化	どんな線源に関しても、個人の被曝線量、被曝する人数、被曝する可能性を、経済・社会的要因を考慮して、合理的に達成できる限り低く保つべきである。
個人線量限度および個人リスク限度	個人の被曝は線量限度に従うべきであり、被曝のリスクは何らかの管理に従うべきである。

※ 「作業者の放射線防護に対する一般原則」(社団法人日本アイソトープ協会)をもとに、筆者がまとめた。

2 | 放射線を取り扱う医療施設は、放射線障害予防規程を作成する必要がある

放射線障害防止法(および同施行規則)により、医療施設は、施設の実態に即した放射線障害予防規程を作成して、放射線防護体制を確立することが求められている。

規程には、職務・組織、放射性同位元素等の使用・受入れ・払出し・保管・運搬・廃棄、危険時の措置などの事項を定めることとされている。

3 | 外部被曝と内部被曝を低減するための対策が必要

放射線被曝は、外部被曝と内部被曝に分けられる。

外部被曝は、放射線源が身体の外にあって、その線源から出た放射線を浴びることをいう。外部被曝を低減するためには、距離、遮蔽(しゃへい)、時間の3つに留意することが原則となる。

図表 15. 外部被曝低減の3つの留意点

(1) 距離	一般に、被曝量は距離の二乗に反比例して減少する。つまり、線源から離れることが重要となる。
(2) 遮蔽	鉛エプロンなどの防護衣の着用により、X線透視や血管造影の散乱線を遮蔽する。また、撮影室の壁に、鉛やコンクリートなどの遮蔽板を埋め込むことで、部屋の外での被曝を防ぐことも必要となる。
(3) 時間	一般に、被曝量は、時間に比例して増加する。放射線や原子力に関する事故や災害で被曝した人を診る緊急被曝医療では、医療関係者の作業時間を制限することで、被曝を管理している ⁴³

※ 「やさしくわかる放射線治療学」公益社団法人 日本放射線腫瘍学会監修(学研メディカル秀潤社, 2018年)をもとに、筆者作成

一方、内部被曝は、放射性物質が、経口摂取、吸入摂取、皮膚(創傷部)吸収などで、体内に取り込まれることをいう。放射性物質により、体内組織が被曝する。

内部被曝を低減するための原則としては、放射性物質を体内に取り込まないことや、取り込んでしまうリスクをできるだけ下げることがあげられる。

4 | 放射線を取り扱う医療施設は放射線管理区域を指定しなくてはならない

医療施設は、放射線を取り扱う場合、放射線管理区域を設けなくてはならない。X線診断装置や放射線治療装置が設置された部屋や、核医学診療室など放射性物質を使用する場所が、放射線管理区域に指定される。放射線障害防止法では、所定の基準に該当する場所⁴⁴を管理区域とすることが規定されている。管理区域には、そのことを示す標識や、立ち入り禁止の掲示が義務付けられる。

⁴³ 被曝量を計測する個人線量計として、医療者には、ガラスバッジ、電子ポケット線量計、リングバッジなどが装着される。

⁴⁴ ①外部放射線の実効線量が3か月あたり1.3mSv、②空気中の放射性物質濃度(3か月の平均)が空气中濃度限度の10分の1、③放射性物質による汚染が表面汚染密度限度の10分の1、を超えるおそれがある場所

図表 16. 放射線管理区域を示す標識の例



※ 諸資料をもとに、筆者作成

なお、医療施設が作成する放射線障害予防規程では、管理区域に立ち入る人に対して、遵守すべき事項が定められる。たとえば、定められた出入り口からの出入り、個人被曝線量計の着用、区域内での飲食・喫煙の禁止などが、遵守すべき事項としてあげられる。

管理区域では、区域の外側に漏れる放射線の管理、区域内への人の出入りの管理、区域内で働く人の被曝モニタ、放射性物質の出入りの管理、汚染拡大の防止などが行われる。

5 | 放射線発生装置や放射性物質を取り扱う人は放射線業務従事者となる

放射線業務従事者とは、放射線管理区域に立ち入って放射線発生装置や放射性物質などを取り扱ったり、管理したりする人という。

放射線業務従事者には、一般公衆の約 10 倍の高い線量限度が設定されている。個人線量計の装着により線量のモニタリングを行うとともに、健康診断や教育・訓練などを定期的に受けることなどが求められている。

図表 17. 線量限度

等価線量	対象部位	放射線業務従事者	一般公衆
	目の水晶体	1 年間に 150 mSv	1 年間に 15 mSv
	皮膚	1 年間に 500 mSv	1 年間に 50 mSv
	妊婦の腹部表面	妊娠中に 2 mSv	(なし)

実効線量	対象者	放射線業務従事者	一般公衆
	一般(下記を除く)	5 年間に 100 mSv かつ 1 年間に 50 mSv	1 年間に 1 mSv
	妊娠する可能性のある女性	3 か月間に 5 mSv	(なし)
	妊婦	妊娠中に 1 mSv [内部被曝]	(なし)

* 放射線障害の防止に関する法令による。

※ 「やさしくわかる放射線治療学」公益社団法人 日本放射線腫瘍学会監修(学研メディカル秀潤社, 2018 年)をもとに、筆者作成

(1) 個人線量計の装着

全身の被曝の程度をみる「均等被曝」について、基本部位(男性は胸部、女性は腹部⁴⁵)にガラスバッジなどの線量計を装着する。なお、胸・腹部よりも多く被曝する部位がある場合、「不均等被曝」として、最も多く被曝する場所にも線量計を装着する⁴⁶。

(2) 健康診断

労働安全衛生法(および電離放射線障害防止規則)により、初めて管理区域に立ち入る前、および立ち入り後6か月以内ごとに、健康診断を受けることが必要となる。

(3) 教育・訓練

放射線障害防止法(および同施行規則)により、初めて管理区域に立ち入る前、および立ち入り後1年以内ごとに、教育・訓練を受けることが必要となる⁴⁷。

6—おわりに

本稿では、放射線の仕組みや放射線を用いた検査・診断の概要をみていった。1つひとつの仕組みは、難解なものではない。むやみに放射線を怖がる必要はないことを感じ取っていただけたかと思う。

次稿では、放射線を用いた治療と、その有用性について概観していく。そして最後に、放射線医療についてのまとめと私見を述べることにしたい。

⁴⁵ 男女で付ける部位が違うのは、女性の場合、胎児に対する影響を考慮しているためとされる。すなわち、将来や現在の胎児のことを考えて、女性は腹部で測定して、個人線量を規制する。

⁴⁶ 鉛エプロンを着用する場合、防護衣の内側の基本部位に1つ装着し、防護衣から露出する頭頸部にもう1つ装着する。放射性物質を取り扱う場合は、基本部位に加えて、被曝が最大となる手指にリングバッジを着用する。

⁴⁷ 教育・訓練の内容には、放射線が人体に与える影響、放射性同位元素等又は放射線発生装置の安全な取り扱い、放射線障害の防止に関する法令、放射線障害予防規程が含まれる。

【参考文献・資料】

(下記 1～8 の文献・資料は、包括的に参考にした)

1. 「やさしくわかる放射線治療学」公益社団法人 日本放射線腫瘍学会監修(学研メディカル秀潤社, 2018 年)
2. 「がん放射線療法ケアガイド 第 3 版」祖父江由紀子、久米恵江、土器屋卓志、濱口恵子編(中山書店, 2019 年)
3. 「患者さんと家族のための放射線治療 Q&A 2015 年版」公益社団法人 日本放射線腫瘍学会編(金原出版, 2015 年)
4. 「知っていますか? 放射線の特性と画像原理 ―すべての医療従事者(事務職員、看護師、技師、研修医、医師)のための放射線科ガイダンス―」今西好正編著(医療科学社, 2013 年)
5. 「癌の画像診断、重要所見を見逃さない ―全身まるごと!各科でよく診る癌の鑑別とステージングがわかる」堀田昌利著(羊土社, 2018 年)
6. 「希望の最新医療 奇跡の放射線治療 ―脳腫瘍・頭頸部癌・肺癌・乳癌・食道癌・肝細胞癌・膵臓癌・前立腺癌・子宮頸癌・悪性リンパ腫 ほかに―」桜の花出版 取材班編(桜の花出版, 2016 年)
7. 「がん治療を支えるチーム医療 ―診療放射線技師―」熊谷孝三著(PILAR PRESS, 2009 年)
8. 「がんの時代」中川恵一著(海竜社, 2018 年)

(下記の文献・資料は、内容の一部を参考にした)

9. 「高等学校学習指導要領(平成 30 年告示)解説 理科編 理数編」(文部科学省, 平成 30 年 7 月)
10. 「広辞苑 第七版」(岩波書店)
11. 「キュリー夫人伝(新装版)」エーヴ・キュリー著, 河野万里子訳(白水社, 2014 年)
12. 「放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料(平成 30 年度版)」(環境省)
13. 「医療施設調査」(厚生労働省)
14. “OECD Health Statistics 2020” (OECD)
15. 「作業者の放射線防護に対する一般原則」(社団法人日本アイソトープ協会)