

放射線の基礎知識

高松赤十字病院 放射線科部 放射線防護チーム

安部 一成, 岡川 貢, 山花 大典, 岡島 舞子, 槇殿 元譽
藤原 直人, 坂本 吉伸, 高橋 徹

要 約

医療の分野において放射線を利用した画像診断や治療等の分野の発展は著しく、これら抜きでは医療が成り立たないと言っても言い過ぎではないほど重要な役割を担っている。しかし、一方では「医療被ばく大国」といったレッテルを貼られるほど¹⁾、医療被ばくに関しては世界でも突出しているのも事実である。そのような背景の中、原発事故などの様々な要因により国民の放射線への関心も高まりつつある²⁾。医療現場においても医療被ばくに関心を持つ国民は増加していると考えられ、臨床の現場で患者と接する医療従事者においては、それらの不安を患者から取り除くことも責務ではないかと考える。本稿では、医療被ばくに関して患者に説明する上で知っておくべき内容をまとめた。

キーワード

医療被ばく, DNA 損傷, 放射線障害, 回復効果

はじめに

日本は世界で唯一の被爆国であり、他国に比べて国民の放射線に対する意識は高くなければならないはずである。しかし、医療被ばくに関しては群を抜いており、残念ながら世界でもトップの位置を保持している^{3) 4)}。唯一の被爆国でありながら、医療被ばくに関してはもしかしたら無頓着で、更には放射線に関して無関心に見えてしまうような矛盾を感じてしまうことさえある。とはいえ、今の日本の医療においては放射線を利用した画像診断や治療は絶対的に欠かせないものであり、患者にとっても多くのベネフィットに寄与していることは間違いない。しかし近年、特に福島第一原発事故以来、一般国民の放射線に対する関心も高まっており²⁾、また、過剰な報道により必要以上に不安や恐怖心を抱かせているとの指摘も多々見受けられる。

そのような背景の中、放射線を利用した検査や治療に対しても、患者が放射線に対して不安な気持ちを抱くことはやむを得ないことであり、我々

医療に携わる者としては、その不安を拭い去ることも役割の一つであり、また放射線医療のベネフィットとリスクについて説明できることが必要であると考えられる。患者からの放射線に関する様々な質問に対して、的確に答えることが理想ではあるが、時間的な制約などの諸事情により、結局のところ、「大丈夫です。」の一言に集約せざるを得ない場合が殆どである。しかし、その言葉にはしっかりと裏付けがなくてはならない。今後、放射線を用いた検査や治療に対して不安を抱える患者さんに対して、少しでも自信を持って「大丈夫ですよ。」と言えるよう準備を整えることは、医療従事者の責務の一つである。

目 的

医用放射線に関する基礎的項目を抜粋・整理し、その内容を理解することで、放射線検査や医療被ばくについて不安や疑問を持つ患者に対して適切に対応し、放射線を利用した検査や治療への不安を患者から取り除くことを目的とする。

1. 放射線について

1-1. 放射線の種類

放射線は「電離放射線」と「非電離放射線」に分けられ、「電離放射線」は更にアルファ線（以下 α 線）やベータ線（以下 β 線）のような粒子線と、エックス線（以下X線）やガンマ線（以下 γ 線）のような電磁波に分けられる。「非電離放射線」には紫外線や赤外線、マイクロ波などが含まれ、通常、放射線と言うと「電離放射線」を指す（図1）。

1-2. 電磁波の種類

当院で治療や検査に利用される放射線はX線と γ 線がほぼ全てであり、これらは電磁波の一種である。電磁波の特徴として、波長の長さでその性質が変化し、我々が普段目にしている可視光も電磁波の一つである。可視光から波長が長くなれば、やがて電波として利用でき、逆に波長が短くなればやがてX線や γ 線となる（図2）。

放射線とは

- ◆電離放射線(電離・励起作用のあるもの)
 - 粒子線.....アルファ線、ベータ線、陽子線、中性子線、etc
 - 電磁波.....ガンマ線、エックス線
- ◆非電離放射線
 - 紫外線、赤外線、マイクロ波、etc
 - (主に励起のみだが、周波数の高い紫外線は電離作用がある)

一般的に「放射線」と言う場合、電離放射線を指し、法令上も非電離放射線は「放射線」として扱わない。

図1 主な放射線

電磁波の種類

出典：高校生のための放射線副読本 文部科学省

- ★可視光線も、ガンマ線も、電波も全て電磁波であり、従って進む速度は全て光の速度と同じ。
- ★粒子線の速度はいろいろ。

図2 電磁波の種類

1-3. 放射線の単位

放射線について理解を深める上で非常に重要な事柄の一つは、単位について理解することである。特に放射線に関する単位の中で必ず理解しておく必要があるものに以下の3つがある。

① ベクレル (Bq)

ベクレル（以下Bq）は放射能の量を表す単位であり、1Bqは1秒間に1個の原子核が崩壊することを意味する。例えば、1秒間に100個の原子核が崩壊して放射線を発生する放射線物質は、100Bqの放射能を有することになる。また、放射エネルギー（強度）まで知ることにはできない。

② グレイ (Gy)

グレイ（以下Gy）は吸収線量を表す単位であり、放射線のエネルギーが物質にどれだけ吸収されたかを表す単位でJ/Kgで表される。放射線治療で用いられる単位もこのグレイ(Gy)が用いられる。

③ シーベルト (Sv)

シーベルト（以下Sv）という単位が意味するもので重要なものは、等価線量と実効線量である。等価線量と実効線量は、人体が吸収した放射線によってどれだけ影響を受けるかを数値化した単位で、放射線防護の分野で使用される。

<等価線量>

吸収線量(Gy)に放射線の種類毎に定められた放射線荷重係数(図3)を乗じたもので、同じ吸収線量であっても、放射線の種類によって放射線障害の発生リスクが異なるた

等価線量

放射線の種類によるがん、遺伝性影響の発生に関する重み付け

等価線量(Sv) = $W_R \times$ 吸収線量(Gy)

放射線荷重係数 (ICRP2007年勧告)

放射線の種類	W_R
ガンマ線、エックス線、ベータ線	1
陽子線	2
アルファ線、重イオン	20
中性子線	2.5~20

図3 等価線量の定義

め、放射線の種類に応じて重みづけを行っている。

＜実効線量＞

等価線量に更に組織別に定められた組織荷重係数(図4)を乗じて合計したもので、言い換えれば全身被ばくに換算したものである。人体に放射線が照射された場合は、組織毎に放射線障害の発生リスクが異なるため、組織に応じて重みづけを行っている。特に部位などの指定がなく、被ばく線量がSvで表記されている場合は、主にこの実効線量を意味し、放射線防護の意味で用いられる。

1-4. 組織荷重係数

組織荷重係数は、前述したとおり組織別に定められた係数で、全ての係数の和が1になる値であるが、その数値は国際放射線防護委員会(以

下ICRP)の勧告に基づいている。我が国の放射線防護に関する様々な法令などは、基本的にはこのICRPの勧告に基づき制定されており、このICRPからの勧告は過去何度か改正されてきた。最新の組織荷重係数は2007年の勧告で修正されており、過去の数値も含めて表1に示す。

1-5. 実効線量の計算

実効線量は、全身被ばくであれ部分被ばくであれ、吸収した線量を全身被ばくに換算したものであり、以下のように求める。図5のように、例えば頭部を中心とした領域にX線が照射され、その時の吸収線量が1mGyであった場合、被ばくしたそれぞれの組織(甲状腺、脳、唾液腺)の等価線量はX線の放射線荷重係数が1であることからそれぞれ1mSvとなる。全身被ばくに換算するのであるから、定められた全ての組織の等価線量にそれぞれの組織荷重係数を乗じてそのの

被ばくした組織におけるがん、遺伝性影響の発生リスクに応じた重み付けとそのリスクの総和		
実効線量 (Sv)		
=すべての組織について総計 $\sum(W_T \times \text{等価線量})$		
組織荷重係数 (ICRP2007年勧告)		
組織	W_T	$\sum W_T$
骨髄(赤色)、結腸、肺、胃、乳房、 残りの組織	0.12	0.72
生殖腺	0.08	0.08
膀胱、食道、肝臓、甲状腺	0.04	0.16
骨表面、脳、唾液腺、皮膚	0.01	0.04
合計		1.00

図4 実行線量の定義
INNERVISION (25・26) 2010 : 45

表1 組織荷重係数
ICRP Publication 23, 60, 103

組織・臓器	組織荷重係数		
	ICRP103 (2007年)	ICRP60 (1990年)	ICRP23 (1977年)
生殖腺	0.08	0.20	0.25
赤色骨髄、肺	各0.12	各0.12	各0.12
結腸、胃	各0.12	各0.12	項目なし
乳房	0.12	0.05	0.15
甲状腺	0.04	0.05	0.03
肝臓、食道、膀胱	各0.04	各0.05	項目なし
骨表面	0.01	0.01	0.03
皮膚	0.01	0.01	項目なし
唾液腺、脳	各0.01	項目なし	項目なし
残りの組織・臓器	0.12	0.05	0.30

実効線量の計算 その②

頭部だけに均等にエックス線が1mGy当たった場合

平均 1 mGy

実効線量 =

- 0.04 × 1 (mSv) 甲状腺
- + 0.01 × 1 (mSv) 脳
- + 0.01 × 1 (mSv) 唾液腺
- + 0.12 × 0.1 (mSv) 骨髄 (10%)
- + 0.01 × 0.15 (mSv) 皮膚 (15%)
- + 0.12 × 0 (mSv) 結腸
- ⋮

= 0.07 mSv

図5 実効線量の計算(部分被ばく)
INNERVISION (25・26) 2010 : 45

実効線量の計算 その①

全身に均等にエックス線が1mGy当たった場合

平均 1 mGy

実効線量 =

- 0.12 × 1 (mSv) 骨髄
- + 0.12 × 1 (mSv) 結腸
- + 0.12 × 1 (mSv) 肺
- + 0.12 × 1 (mSv) 乳房
- ⋮
- + 0.04 × 1 (mSv) 皮膚
- = 1 mSv

図6 実効線量の計算(全身被ばく)
INNERVISION (25・26) 2010 : 45

和を求めた数値が実効線量となり、この場合は0.07mSvとなる。同様に、全身に被ばくしてそのときの吸収線量が1 mGyであった場合の実効線量は1 mSvとなる（図6）。

1-6. 線量限度

我が国ではICRPの勧告に基づき、確定的影響及び確率的影響について、その発生リスクが一般社会で容認できる範囲の線量を図7のように線量限度として定めている⁵⁾。基本原則としては、不必要な被ばくを避けるという考えが根底にあることから、一般公衆については1年間に最大で1 mSvとなっている。しかし、日常生活において我々は自然放射線を大気、宇宙線、食物、大地などから1年間に2.4mSv（世界平均）被ばくしており、それに加えて1 mSvまでということである。それに対し、放射線による被ばくを受ける可能性のある環境下で業務を行う場合は、5年間で100mSv（但し、1年間では50mSv以下）と定められている。ただ特記すべきは、医療被ばくに

は制限が定められていないことである。たとえ法令で定められた線量限度をいくら超えようとも、医療被ばくは制限を受けることはない。これは、医療被ばくに制限をかけることで、患者が受けるべきベネフィットにも制限がかかってしまい、結果、患者にとって損失が上回ってしまうことを防ぐためである（放射線防護の正当化）。しかし、我々医療従事者はこのことをしっかりと理解しておく必要がある。理想とするは、最小限度の被ばくで最大限のベネフィットを引き出すことであり（放射線防護の最適化）、被ばくによるリスクを全く考慮せずに放射線を利用することのないように十分注意を払うべきである。そして何よりも放射線防護体系の3原則が守られていることが重要である（図8）。

2. 放射線の影響について

2-1. 放射線影響の種類

放射線による身体への影響を図9に表す。放射線影響は、まず「身体的影響」と「遺伝的影響」

線量限度について	
◆一般公衆……	1mSv/年（自然放射線2.4mSv）
◆放射線診療（作業）従事者	
実効線量	100mSv/5年 （1年間につき50mSv）
水晶体（等価線量）	150mSv/年
皮膚（等価線量）	500mSv/年
妊娠可能な女子の腹部	5mSv/3ヶ月
妊娠中の女子の腹部表面	2mSv（内部被ばく1mSv）

※医療被曝は除く

図7 線量限度（抜粋）

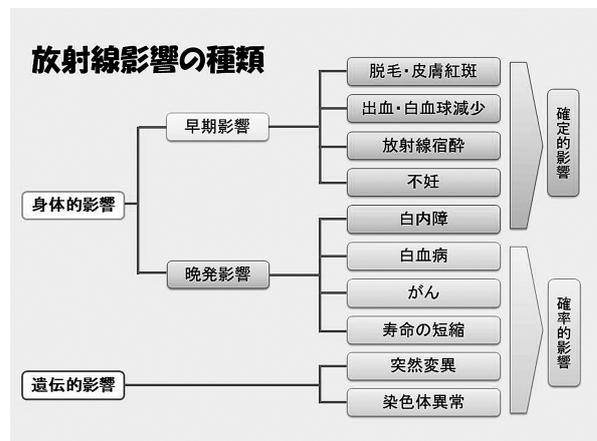


図9 放射線影響の分類

放射線防護体系の3原則	
正当化：	放射線に関する計画された活動の導入又は継続が、活動の結果生じる損害よりも大きな利益を個人と社会にもたらすべきである。
最適化：	被ばくする可能性、被ばくする人の数、及びその人たちへの個人線量の大きさは、すべて、経済的及び社会的な要因を考慮して、合理的に達成できる限り低く保たれるべきである。
線量限度：	規制された線源からのいかなる個人への総線量も、ICRPが勧告する適切な限度を超えるべきでない。

※上記のうち、「線量限度」は医療被ばくには適用されない

図8 放射線防護体系の3原則

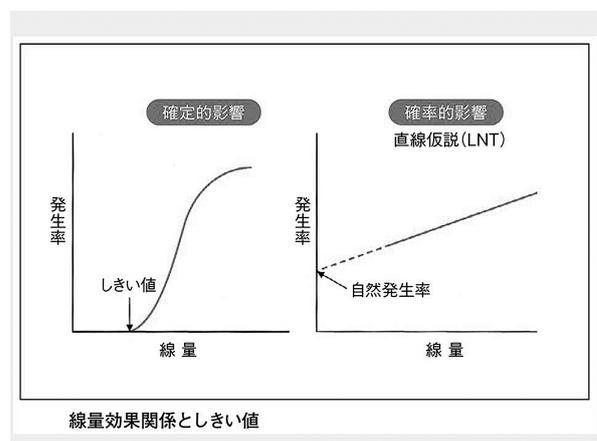


図10 確定的影響と確率的影響の違い

の大きく二つに分けられる。「身体的影響」は更に、比較的短期間で発生する「早期影響」と数カ月から数十年の潜伏期をおいて現れる「晩発影響」とに分けられる。更に、被ばく線量が一定量（しきい値）を超えた場合に発生する可能性が生じる「確定的影響」と被ばく線量に関わらず発生する可能性があるとして「確率的影響」に分けられる（図10）。

2-2. 確定的影響と確率的影響

<確定的影響>

被ばく線量がある一定量を越えないと発生しないものを言い、その線量をしきい値という。例として、図11に具体的な影響毎のしきい値を表示しているが、このしきい値を超えた場合に必ず影響が発生するというものではない。しきい値を超えた場合、数%の確率で影響が現れる可能性が生じるのであって、しきい値を超えなければ、確定的影響は発生しないとされている。また、しきい値を超えて被ばくした場合、その線量に応じて影響の発生率は上昇する。

<確率的影響>

確率的影響にはしきい値がなく、線量に関係なく被ばくした時から放射線影響のリスクが発生し、線量に比例して放射線影響の発生リスクが高まる。これに分類されるものに、がん、白血病、寿命の短縮、遺伝的影響がある。被ばく線量によってリスクは変化するが、発生する障害の重篤度には関係しない。確率的影響については、広島・長崎の原爆被爆者や原発事故などの放射線災害での被ばく者、また放射線作業従事者などを対象に疫学的調査が行われてきたが、50mSv～200mSv以下の低線量被ばくについては、放射線

による影響と自然発生する影響との明らかな有意差は認められておらず、放射線の各分野における専門家や研究者の間でも未だに統一見解は得られていない。しかし、ICRPにおいても直線仮説の採用は妥当とするも、100mSv以下の線量では発がんについて有意差は認められない⁶⁾としていることもあり、一般的には100mSvまでは影響はないという考え方が主流になっている。

また、遺伝的影響は次世代以降に現れる影響であるが、前述した疫学的調査においてそのような事例は今のところ確認されておらず、ICRP2007年勧告では生殖腺の組織荷重係数もかなり引き下げられている（表1）。

3. 医療被ばくについて

3-1. 我が国の現状

ある日の新聞（図12）に、日本における医療被ばくでの発がんリスクが3.2%と世界でも突出して高いと報じられている。これは、2004年に発表されたLANCETの論文⁷⁾を元に掲載されたものであるが、背景にはCTの普及が大きな要因であるともされている。しかし、この論文の内容については反論もあり、両方を簡単にまとめたものを図13および図14に表示した。

医療被ばくを増大させている要因としてはCTの普及であるとされているが、それは世界における日本でのCTの普及率を見ても一目瞭然である⁸⁾。図15は主に2008年のデータではあるが、日本のCT保有台数は世界でも2位を大きく引離しての1位である。また、患者の紹介元、紹介先で重複してCT検査を行う、あるいは「とりあえずCT」的な利用がなされていることもよく耳にする。しかし、これだけ普及しているが故

確定的影響

確定的影響には、しきい値（1～5%に影響が表れる線量）と呼ばれる影響の発生する最小の線量があり、このしきい値を超えて被ばくした場合でないと影響は発生しない。しきい値を超えた場合には、線量の増加とともに影響の発生する頻度および重篤度が增加する。

組織・臓器	影響	被ばく線量(mGy)
生殖腺(男)	永久不妊	3500～6000
生殖腺(女)	永久不妊	2500～6000
眼の水晶体	白内障	2000～10000
骨髓	造血機能低下	500
胎児	流産(受精～15日)	100
胎児	形態異常(受精後2～8週)	100
胎児	精神発達遅延(受精後8～15週)	120

図11 確定的影響のしきい値



図12 新聞記事より

LANCET論文の要旨

- 日本の原爆被爆者のがん発症のリスクに基づき評価
- 線量と発ガンの関係が直線になるというLNT仮説を使用
- 対象国は英国をはじめとするヘルスケア I の先進国15カ国
- 対象各国の放射線検査の頻度や被ばく線量を調査
- X線検査に伴う75歳までの発ガン患者を推定
- X線検査の頻度が最も多いのは日本で、発がん率は3.2%
- クロアチア1.8%、ドイツ1.5%、カナダ1.1%、アメリカ0.9%、イギリス0.6%

図 13

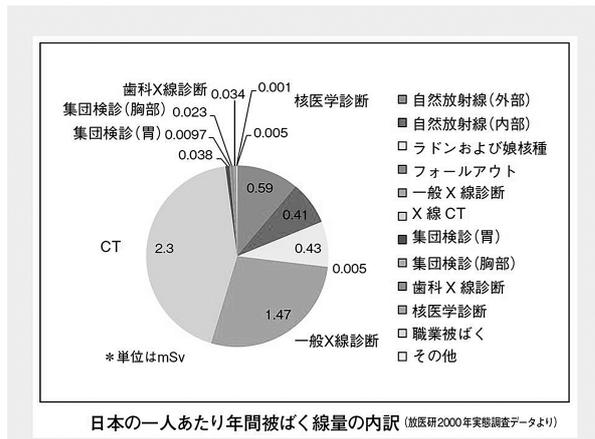


図 16 被ばく線量寄与率

LANCET論文への反論

LANCET論文に対しHerzog¹⁾らは、以下の点において、Berringtonらの論文²⁾には限界があると反論した。

- X線診断で用いられる程度の放射線でもがんが起きることを証明する信頼できるデータはない。
- 原爆被爆者のデータを用いている。
- X線検査による便益を評価していない。

1) P.Herzog, C.T.Rieger. Lancet 2004; 363: 340.
2) A.Berrington de Gonzalez, S.Darby. Lancet 2004; 363: 345-351.

図 14

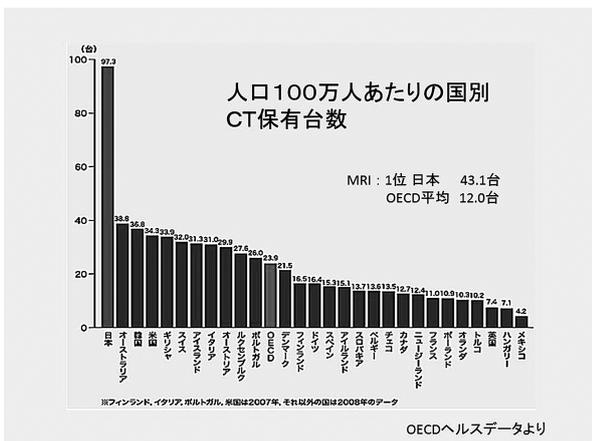


図 15 主要国のCT保有台数

に、早期発見・早期治療等に貢献され、多くのベネフィットが患者に供与されていることもまた事実であり、大切なことは、放射線を利用する検査や治療においては、全てにおいてベネフィットがリスクを上回っているかどうか、要するに正当化されたものであるかどうかを常に判断して行う事である。

そもそも、日常生活において一般の人が自然放射線以外で放射線被ばくをすることは、よほどの理由がない限りあり得ないことであり、被ばくするとすれば、それは医療の現場においてのみであると言っても過言ではない。それを裏付けるデータを図 16 に示した。これを見ると、いくら必要な検査であっても、医療被ばくを伴う場合は、その影響について十分に注意を払うべきであることがわかる。

一方、臨床医がいくらリスクについて注意を払っても、その装置を使う診療放射線技師が単純作業的に検査を行っていたのでは意味がない。日本診療放射線技師会の調査では、全国の施設でのX線診断装置（一般撮影装置、CT装置等）において、施設間での撮影条件のばらつきにより、被ばく線量の格差がかなり生じているとの報告もされている⁹⁾。必要最小限の線量で、最適な画像情報を臨床現場に提供するのには、我々診療放射線技師の最も重要な役割の一つであることを肝に銘じておく必要がある。

3-2. 当院の現状

ここまで、線量限度や放射線障害について基礎的な項目を述べてきたが、実際に当院で行っているX線検査ではどれくらい被ばくすることになるのかを当然知っておく必要がある。しかし、実際に被ばく線量を計測するとなると、計測する目的部位に線量計を埋め込まなければ正確な線量は測れない。そのようなことは現実には不可能であるから、専用のソフトを用いて、計算によって求めるのが通常である。表2、表3は当院における単純X線撮影時とCT検査時における主な検査項目の推定実効線量を計算により算出し、一部を

表2 単純X線撮影における推定実効線量

当院でのX線検査による被ばく線量

一般撮影での主な検査 (30歳大人)

撮影部位	撮影回数	実効線量 (mSv)
頭部2方向 (座位)	2	0.11
胸部2方向 (立位)	2	0.13
腹部立位+臥位	2	0.47
頸椎2方向	2	0.06
腰椎6方向	6	1.91
両股関節2方向	3	0.96

表3 CT検査における推定実効線量

当院でのX線検査による被ばく線量

CT検査 (64例) での主な検査 (30歳大人)

撮影部位	スキャン方式	実効線量 (mSv)
脳	ノンヘリカル	1.6~2.3
胸部	ヘリカル	9.1~13.0
上腹部	ヘリカル	9.8~14.0
上腹部~骨盤部	ヘリカル	18.9~27.0
胸部~骨盤部	ヘリカル	32.2~46.0
心臓3D	ヘリカル	70.0

表にしたものである。ただし、検査に必要な出力線量は患者の体型等によりバラツキがあるが、表の数値は平均的な成人男性の体型を前提に計算したもので、あくまで目安となるものである。これを見ると、単純X線撮影においては、どれも被ばく線量としては問題となるような数値には程遠く、あまり神経質になる必要はない。ただし、妊娠中の女性については、妊娠初期の胎児へのリスクが高いことと、妊娠期間中の線量限度が2mSv⁶⁾(図7)であることから、いくら医療被ばくとはいえ、腹部への検査は可能な限り避けた方が望ましいと言える。一方、CT検査においては単純X線撮影検査に比べはるかに被ばく線量が高いことがわかる。胸部の撮影を例にとると、単純X線撮影とCT検査では、被ばく線量に100倍以上の差がある。また、心臓CTやここでは表示していないが、ダイナミックCTなどの特殊な検査では、飛躍的に被ばく線量が増加する。これらの事実を、検査を依頼する側も機器を操作して検査を行う側も十分理解しておく必要がある。

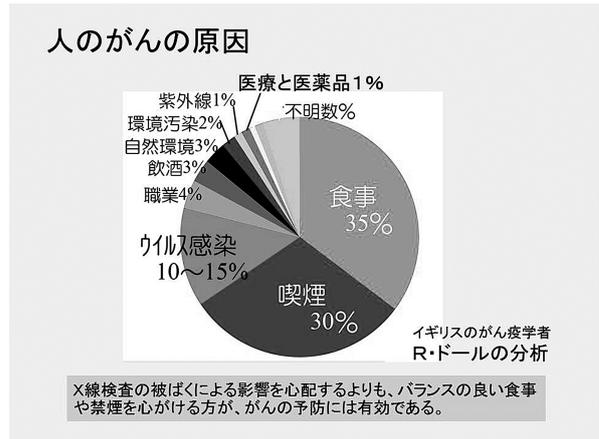


図 17

4. 放射線の生体への影響

4-1. 人のがんの原因

図17はイギリスのがん疫学者であるR・ドールが分析した有名な資料である。これによると、医療被ばくを含む医療や医薬品が発がんの原因となると考えられるのは僅か1%であるとされている。最も発がんの原因とされているのが生活習慣に関わる項目である。被ばくというと、特別に危険なもので、特別にがんなどの発生を増加させるのではないかといった過剰な不安を抱いている人も少なくない。しかし、がんの発生原因全体から見れば、低線量の医療被ばくを心配するよりも、生活習慣をしっかりと見直す方が、がんの発生リスクを減らすことができると言える。また、放射線による発がんと他の要因による発がんは同じであると考えてよく、それについては4-5に記す。

4-2. 電離と励起

がんは主に遺伝子の変異により発生するとされているが¹⁰⁾、その要因には、たばこ、活性酸素、ウイルス、飲酒、偏食、環境汚染、薬品、放射線など様々なものが挙げられている。その中で、放射線が生体に照射された場合に起こる現象過程を簡単な図式で示す(図18)。

放射線が生体内に入ると、細胞内の原子レベルで電離と励起といった現象が起こる。放射線が生体内の原子にぶつかり、電子を弾き飛ばし電荷を持つ状態を電離、電子が外側の軌道に飛び移り不安定な状態になることを励起と言ひ、はじき出された電子が更に別の原子の電子を弾き飛ばすなど連鎖的な現象が生じることもある(図19)。このような電離と励起が生体内に影響を及ぼすわけで

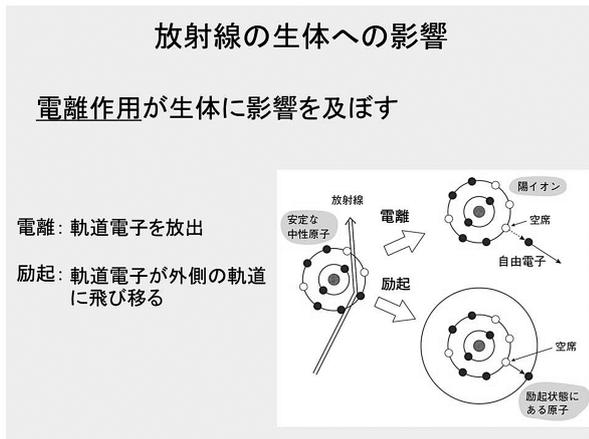


図 18
 出典：高エネルギー加速器研究機構放射線科学センター：暮らしの中の放射線

生物学的効果比(RBE)

放射線に被ばくした場合に、同じ吸収線量であっても、放射線の種類、エネルギーの違いにより生物に及ぼす効果に量的な差がある。その違いを比で表したものが生物学的効果比(RBE)である。

- ・ X、 γ 、 β 線 : 1
- ・ 陽子線(2MeV以上) : 5
- ・ α 線 : 20
- ・ 中性子線(エネルギーにより) : 5~20

図 21

これを線エネルギー付与 (LET)¹¹⁾ という (図 20)。当然 LET が異なれば同じ吸収線量であっても、放射線の種類によって生体に及ぼす効果には量的な差が生じる。これを比で表したものが生物学的効果比 (RBE) である (図 21)。

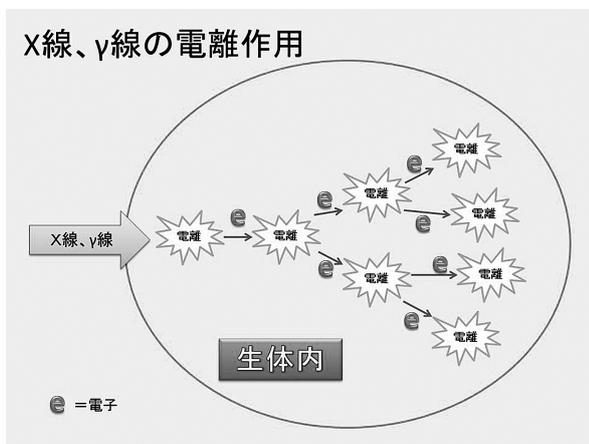


図 19

線エネルギー付与(LET)

放射線の生物学的効果に最も影響を及ぼす要因は、その飛跡に沿った電離および励起の分布状態である。しかし、同じ吸収線量を与える放射線であっても、放射線の種類とエネルギーの違いによって電離と励起の分布状態は異なる。

ガンマ線 (1MeV) 鉄イオン線 (1GeV)

イメージ図

図 20
 出典：放射線医学総合研究所，保田浩志氏

あるが、生体に与える影響の度合いで最も大きな要因は放射線の飛跡に沿った電離と励起の分布状態である。たとえ同じ吸収線量であっても、放射線の種類によってその分布は大きく異なる。こ

4-3. 放射線影響と活性酸素

生体内を放射線が通過すると、その電離作用で活性酸素の一種であるヒドロキシルラジカルを発生させ、生体に障害を与えることになる。ヒドロキシルラジカルは活性酸素の中でも最も反応性が高く¹²⁾、最も酸化力も強いと言われている。このヒドロキシルラジカルは放射線だけが発生させるのではなく、通常の活性酸素についても一部がヒドロキシルラジカルになる。活性酸素は、生体に対して細胞に損傷を与え、その有害性については広く知られている¹³⁾。われわれは呼吸によって酸素を体内に取り込まないと生きていけないが、一人が一日で消費する酸素量は約 500L と言われ、その内 2% が活性酸素になると言われている¹³⁾。しかし、人体にはそれを防ぐため抗酸化酵素と呼ばれる、活性酸素を消去・除去する酵素が存在する (図 22, 図 23)。

4-4. 直接作用と間接作用

放射線と発がんとの関係で最も重要なのは、放射線の影響による DNA の損傷である。同じ DNA の損傷でも、放射線の生体作用は直接作用と間接作用 (ヒドロキシルラジカルなどの活性酸素による作用) があるとされている (図 24)。しかし、それぞれの寄与の割合は放射線の種類によって大きく異なり、X 線・ γ 線のような低 LET 放射線は間接作用が大きな割合を占め、 α

活性酸素とフリーラジカル

一般に活性酸素とフリーラジカルは混同されることが多いが、活性酸素にはフリーラジカルとそうでないものがある。

狭義の活性酸素

- ヒドロキシルラジカル HO^\bullet
- スーパーオキシドアニオンラジカル $\text{O}_2^{\bullet-}$
- ヒドロペルオキシラジカル HO_2^\bullet
- 過酸化水素 HOOH
- 一重項酸素 $^1\text{O}_2$

下線がフリーラジカル

広義の活性酸素

- 一酸化窒素 NO
- 二酸化窒素 ONO
- オゾン O_3
- 過酸化脂質

図 22

DNA損傷

```

    graph LR
      A[放射線被曝] --> B[DNA損傷]
      B --> C[修復過程]
      C --> D[修復完了]
      C --> E[修復エラー]
      C --> F[細胞死]
      D --- G[ほとんどは修復]
      E --- H[がん、突然変異]
      F --- I[アポトーシス]
    
```

DNAの損傷は塩基損傷、塩基の遊離、鎖切断、架橋形成に分けられる。電離放射線の細胞への作用で最も大きく関与するのはDNA鎖の切断である。放射線照射により起こる二本鎖切断は一本鎖切断に比べ約1/40である。紫外線の生物作用はその大部分が塩基損傷である。DNA損傷による癌化を防ぐ癌抑制遺伝子p53、NBS1などが存在する。

図 25

活性酸素

活性酸素は様々な物質に対して非特異的な化学反応をもたらし、細胞に障害を与えるために、その有害性が指摘されています。

私たちは呼吸によって空気中から酸素を取り入れ、酸素を利用して体内のエネルギーを生成しています。この時に使用される酸素の一部が活性酸素に変化します。人の1日に酸素消費量は約500リットルで、その内の2%ほどが活性酸素になると言われています。

それを防ぐために私たちの体には抗酸化酵素と呼ばれる、活性酸素を消去あるいは除去する酵素が存在します。

- ・**抗酸化酵素** カタラーゼ、ペルオキシダーゼ、スーパーオキシドディスムターゼ など

(空気の組成 : 窒素78%、酸素21%、その他1%)

図 23

DNAの損傷の種類

鎖
塩基

放射線

DNA

鎖

塩基

一本鎖切断 (SSB)

二本鎖切断 (DSB)

塩基損傷

その他に塩基遊離、架橋形成など

最も重大なDNA損傷は二本鎖切断

ある研究報告では実効線量 80mSv で二本鎖切断が一か所

図 26

出典：放射線の飛跡構造シミュレーションと DNA 損傷研究。核データニュース No.79：2004。

作用、つまりヒドロキシルラジカルの作用が主であると言える。

4-5. DNA の損傷

DNA が損傷されると、元々の修復機構により修復が行われる¹⁴⁾。しかし、損傷の形式や程度によって、その結果は大きく三つに分かれる(図 25)。

まず、様々な修復機構により、ほとんどは修復される。次に、一部は修復ができず、がん化や突然変異を引き起こすとされている。そして更に、一部は自発死とも呼ばれるアポトーシスによって細胞死を迎える。

DNA の損傷にはいくつか形態があり、その中でも最も重大な損傷は二本鎖切断である(図 26)。細胞には元々修復機構が備わっており、DNA が損傷しても大半は修復されるとされる。しかし、二本鎖切断でも元々の修復機構は備

INDIRECT ACTION

PHOTON

DIRECT ACTION

PHOTON

2nm

4nm

図 24

出典：E. J. Hall (著)、浦野宗保 (訳)：放射線科医のための放射線生物学、第4版：11、篠原出版、1995。

線や中性子線のような高 LET 放射線は直接作用が主体となる。医療で用いる放射線はほとんどが X 線・γ 線であり、医療放射線の影響というのは、これら低 LET 放射線の影響と比べてよく、間接

わっているものの、正常な修復が困難とされている¹⁴⁾。しかし、放射線照射による鎖切断は、1 Gyの照射で一本鎖切断が約1,000個、二本鎖切断が20~50個とされており¹⁵⁾、100mSvの場合は単純に10分の1程度となり、二本鎖切断を生じる可能性は、低線量被ばくにおいては非常に低いと言える。また、二本鎖切断が生じて修復がなされなかったとしても、その殆どが免疫機能により排除されるか、アポトーシスにより死滅するとされている。

これらのDNAへの損傷や修復の過程は、放射線に限ったものではなく、日常生活における様々な要因（発がん原因）でも起こる過程と同じものである。

要するに、放射線被ばくによる発がん等の障害は、放射線に限っての特有なものではなく、他の発がん要因が及ぼす機序と同じであると考えてよい。

特に医療において主に利用されるX線、γ線、β線の生体への影響は、間接作用が主な要因であり、日常生活においてのがん予防の取り組みが、他の要因と同様に放射線の影響も軽減できると言える。

4-6. 放射線影響を軽減する食物成分

2011年、福岡大学の高田二郎教授と放射線医学総合研究所のグループが、ビタミンEの一種が放射線による被ばくの影響を軽減できることを動物実験で確認したとの報告がある¹⁶⁾。大豆やトウモロコシから抽出できるビタミンEの一種「γ-トコフェロール」は、投与すると体内でビタミンEに変る。実験では、マウスに7.5Svと高い線量のX線を照射し、この薬を与えた群と与えなかった群における1ヶ月後の生存率を比べた。

- ・照射後に約2.5mgを投与した42匹のマウスは98%が生きていた。
- ・投与しなかったマウスは約7%しか生き残らなかった。

という結果が得られたとのことであるが、ビタミンE以外の食物成分でも、ビタミンC、ビタミンA、β-カロチンが放射線の影響を軽減することが知られている。

これらは全て活性酸素を除去する成分と同じであり、バランスのよい食事を摂ることで放射線の影響を軽減させることが出来ると言える。

4-7. 放射線影響と個人差

放射線の被ばくによる影響は人それぞれであり、個人差がある。放射線が生体内を通過すると、主に間接作用により発生した活性酸素によってDNAが損傷される。しかし、本来の修復機構が働く時に、個々の抗酸化物質の量や、修復酵素、p53、免疫細胞の活性、あるいは生活習慣の違いなどによる栄養状態や体調などに個人差があり、その結果は必ずしも同じとは言えない(図27)。

放射線による害は、何か特殊な作用により特別な不利益をもたらすような感覚を持っている人もいるが、しかしそれは誤った認識であり、発がんのリスク、正確に言うと、生涯累積がん死亡リスクを高める他の因子と同じと考えてよい。発がん(生涯累積がん死亡リスク)のリスクを高める要因とされるものに、タバコ、ストレス、化学物質、不規則な生活、偏食、飲酒、ウイルス、環境汚染、薬品等々数多く挙げられるが、放射線も他の発がん要因が及ぼす機序と同じであると考えてよい。特に、医療において主に利用されるX線、γ線、β線の生体への影響は、間接作用が主な要因であり、日常生活においてのがん予防の取り組みが、他の要因と同様に放射線の影響も軽減できると言える。

4-8. 被ばくリスクの考え方

通常、放射線検査で用いられる程度の線量を対象に、患者さんなどに医療被ばくについてわかりやすく説明するためには、以下のような考え方を整理しておくとうい。

放射線によるリスクには個人差があり、まず平

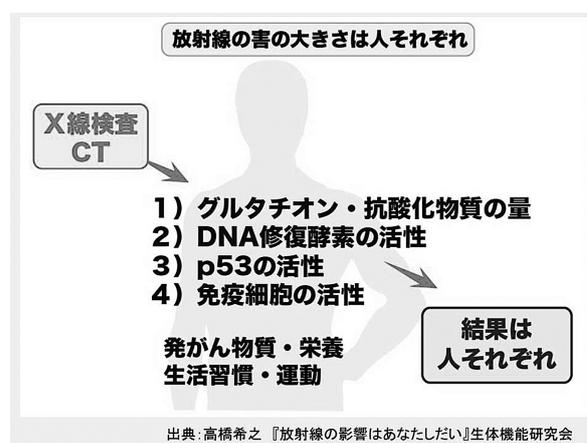


図 27

均的な成人の場合で考える。平均的な人の場合、被ばく線量が100mSv以下の線量ではリスクはないと考えてよい。しかし、ICRPでは直線仮説を採用しているため、直線仮説（リスクを過剰に見る）で仮定すると、100mSv被ばくした場合でも発がんのリスクは0.05%増加するのみで、他の発がん要因を含めて考えると、無視できる程度のリスクの増加と言える。

それでも心配で放射線による被ばくの影響について質問を受けた場合には、生活習慣を数か月だけでも改善するだけで帳消しにできるメカニズムを説明する。要するに、活性酸素を排除する方法をアドバイスする。

もし、100mSvを超える被ばくの場合は、放射線によるリスクと検査や治療をうけることによるベネフィットについて説明する。ただし、線量については積算線量であり、また確定的影響を及ぼすほどの被ばくについては別の対応が必要である。

また、長期間にわたり積算線量が100mSvを超えるような場合は、次項の回復効果も交えて説明する。

4-9. 放射線障害と回復効果

正常な細胞は、放射線等で損傷を受けても回復機構を有している。したがって、同じ線量でも1度に被ばくするのと、時間を空けて何度かに分けて被ばくするのでは影響が全く異なってくる。一方がん細胞は、1度に被ばくしても何回かに分けて被ばくしても、回復機構が極端に低下しているため、正常細胞のように短時間で回復しない。この特性を利用したのが放射線治療であり、分割照射を行うことで、正常細胞の回復を利用しながらがん細胞を死滅させていく。

この、細胞の回復効果については、ヒト細胞を用いた実験で、100~200mSv以下の放射線量であれば放射線で受けた傷の殆どは、わずか2時間程度で修復されてしまうことがすでに知られている¹⁷⁾。

仮に、特殊なCT検査で数10mSvの医療被ばくを受けたとしても、数日空ければ理論上は元の健康な細胞に戻っていると考えることができる。しかし、生体にそのまま応用できるかどうかの問題はあるにしても、100mSvの被ばくの場合、修復に必要な時間は1週間程度で、慎重に安全を見込んで、1か月程度で十分に細胞は被ばくによ

るダメージから回復しているとの文献もあり¹⁸⁾、医療被ばくの説明時には回復効果についても念頭に入れておく必要がある。

5. IVR時の被ばく

近年、インターベンショナル・ラジオロジー（Interventional Radiology：以下IVR）に関する技術や機器の発展に伴い、対象疾患の範囲も拡大している。中には、長時間に渡る透視と撮影を必要とする手技もあり、稀に確定的影響の線量限度を超えて皮膚障害を発症する事例も全国的には見受けられる。

皮膚障害が発生するとされるしきい値は3,000mSvであり、軽度の紅斑や脱毛が生じるとされている。12,000mSv~15,000mSvを超えると湿性皮膚炎や潰瘍を形成するようになるとされている。先に述べた細胞の回復は、あくまで低線量被ばくでのことであり、被ばく線量が多ければ回復機構も正常に機能しなくなる。図28に示す皮膚障害の例では、3,000mSvは間違いなく超えていると推察される。このように、放射線治療での1回分の線量を軽く超えてしまうようなケースもIVR施行時には起こり得るが、治療という視点から見れば、避けて通ることは非常に困難である。このように、時として多くの医療被ばくを伴うケースもあり得るIVRにおいては、術者と診療放射線技師を中心として、常に放射線影響の事を念頭に入れ、出来る限り被ばく線量の低減に努めなければならない。また、しきい値を超えた可能性がある場合は、放射線影響に関して術後のフォローも必要になってくる。



図 28

出典：日皮会誌 115(9)：1322, 2005.

6. 考 察

放射線被ばくに関して、特に 200mSv 以下の低線量被ばくでの影響や障害等については、今でも様々な論議が交わされ最終的な結論にまで至っていないのが現状である。福島原子力発電所の事故発生後の状況を見てもそれが顕著に伺える。本来、放射線作業従事者の線量限度は 5 年間で 100mSv（但し、1 年間で 50mSv 以内）であるはずだが、福島原発での作業員の線量限度は一時的に 250mSv に引き上げられた。また、様々な大学や研究機関、あるいは有識者からは、線量限度や放射線影響について様々な意見が様々な媒体を通じて激しい論議が交わされていた。マスメディアにおいては、放射線について視聴者が理解しているのがいまいが、過剰とも思える内容を相次いで報道し、いたずらに不安を増長するような状況もあったことは否定できない。しかし、そのような現象を招く原因は、低線量被ばくでの影響や障害について、明確なエビデンスが確立されていないことであるのは間違いない。しかし、過剰照射された放射線が悪影響を及ぼすことに気付いたときから今日まで、世界レベルで様々な研究者や専門機関が大規模な疫学調査を始めとして実験や研究を繰り返し、客観的な事実に基づき一定の結論や指針などを公開している。我が国の放射線障害防止法における線量限度なども ICRP の勧告に基づき制定され¹⁹⁾、ガイドラインなども我が国の法令に基づき策定されているはずである。我々現場で放射線を利用するものは、そうした法令やガイドラインなどを遵守することは基本であるが、何よりも医療被ばくにはそうした縛りが何もないことをしっかりと念頭に置いておかなければならない。放射線の影響に不安を抱える患者を前にしたとき、その不安を取り除き、患者本人が納得して検査や治療を受けられることができる一助となるよう、簡易的ではあるが必要と思われる項目について記載した。

7. おわりに

医療被ばく（放射線被ばく）に不安を抱える患者は少なくないと思われる。そのような患者から被ばくについての質問を受けた時に、冷静に的確に答えられる人が医療現場において診療放射線技師も含めて何名くらいいるだろうか。しかし、患者側は自分なりに納得できる答えを期待している

に違いない。期待に添えるだけの答えを導くには、事前にかかなりの準備が必要となる。福島原発事故発生により、医療従事者への放射線教育が見直されていることもあり^{20) 21)}、常に医療の現場で患者の疑問や不安と直接接する医療従事者の方々に本稿の内容が少しでも役立てば幸いである。

●文献

- 1) 日本放射線医学総合研究所, 医療被ばくリスクとその防護についての考え方 Q & A, <http://www.nirs.go.jp/rd/faq/medical.shtml> [accessed 2014 年 11 月 29 日]
- 2) 首相官邸公式サイト, 原子力災害専門家グループ, 国民の医療被曝への関心高まる, http://www.kantei.go.jp/saigai/senmonka_g65.html [accessed 2014 年 11 月 22 日]
- 3) INNERVISION (25・26) 2010, 電子版: 46-47.
- 4) 緊急被曝医療研修のホームページ, 医療関係者, 緊急被ばく医療ポケットブック, https://www.remnet.jp/lecture/b05_01/1_2.html [accessed 2014 年 11 月 22 日]
- 5) 環境防災 N ネット, 原子力防災基礎用語集, http://www.bousai.ne.jp/vis/bousai_kensyu/glossary/se21.html [accessed 2014 年 11 月 22 日]
- 6) ICRP Publication 103 (日本アイソトープ協会編集): 15-16.
- 7) Gonzalez AB, Darby S: Risk of cancer from diagnostic X-rays: estimates for the UK and 14 other countries. *Lancet* 363: 345-51, 2004.
- 8) INNERVISION (25・26) 2010, 電子版: 46-49.
- 9) 社団法人日本診療放射線技師会医療被ばくガイドライン委員会編: 患者さんのための医療被ばく低減目標値, 医療被ばくガイドライン: 17-18, 医療科学社, 2002.
- 10) Wikipedia, 悪性腫瘍, [accessed 2014 年 11 月 29 日]
- 11) 原子力防災用語集, 線エネルギー付与 (LET), http://www.bousai.ne.jp/vis/bousai_kensyu/glossary/se13.html [accessed 2014 年 11 月 22 日]
- 12) Wikipedia, ヒドロキシルラジカル, [accessed 2014 年 11 月 29 日]
- 13) Wikipedia, 活性酸素, [accessed 2014 年 11 月 29 日]
- 14) Wikipedia, DNA 修復,

[accessed 2014 年 11 月 29 日]

- 15) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes Volume II: Effects : 4.
- 16) 福岡大学研究推進部産学官連携センター, 福岡大学研究シーズクロズアップ, vol001, <http://www.adm.fukuoka-u.ac.jp/fu853/home1/closeup/vol.001/closeup001.html>
[accessed 2014 年 12 月 01 日]
- 17) 東京大学放射線治療チームホームページ, がんの放射線治療－その1 イントロダクション, <http://tnakagawa.eXblog.jp/15239706/>
[accessed 2014 年 11 月 29 日]
- 18) ウェード・アリソン (オックスフォード大学名誉教授), 峯村利哉訳: 放射線と理性～なぜ 100mSv なのか: 徳間書店, 2011.
- 19) 原子力百科事典 ATOMICA, 被ばく制限値の推移, http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No = 09-04-01-02
[accessed 2014 年 12 月 01 日]
- 20) 首相官邸公式サイト, 原子力災害専門家グループ, 放射線教育～反省を糧に, さらなる拡充へ～, http://www.kantei.go.jp/saigai/senmonka_g46.html
[accessed 2014 年 12 月 01 日]
- 21) 首相官邸公式サイト, 原子力災害専門家グループ, 放射線の健康リスクに関する科学教育の強化－日本学術会議提言－, http://www.kantei.go.jp/saigai/senmonka_g72.html
[accessed 2014 年 12 月 01 日]