

放射線とは何か

正しい理解のために

青山 喬 滋賀医科大学 名誉教授



放射線とは何か

放射線というものは、われわれの五感に感じないため、理解することがなかなか難しいと思います。しかし、実際は非常に身近にある重要な存在です。と言う訳は、放射線は物質とともにわれわれが存在している宇宙の構成成分であるからです。つまり、宇宙は物質と放射線でできているのです。物質は原子や分子からできています。原子や分子は、さらに微細な粒子(電子や原子核を構成している陽子、中性子など)が互いに引力(核力やクーロン力)で結びついて集団を形成している状態です。

一方、微細な粒子が集団を作らずに、大きい運動エネルギーをもって、物質の中を走っている状態のものがあります。これが放射線と言われるものの中で、粒子線と言われるものです。また、微細粒子のうちで電荷をもっている粒子が運動状態を急に変化するときや、微細粒子の集団である原子核が崩壊するとき、励起状態になった原子核が安定しようとして、エネルギーを波状に変動する電場や磁場として放出します。これが放射線の中の電磁波と言われるものです。電磁波には、電波や可視光線、紫外線などが含まれますが、エネルギーが大きく、波長が短くなるほど、波の性質を失って、粒子の性質が強くなり、X線、 γ 線は光子と呼ばれることがあります。

放射線が物質中を単独で走るためには、それ相応のスピードが必要です。たとえば微細粒子として電子の場合を考えると、その電子がゆっくりしていれば、物質中の他の多くの電子や原子核の電気的な力で跳ね飛ばされます。しかし、スピードさえあれば、電子は多くの原子や分子と何も起こさず突き抜け、物体の内部まで侵入できます。その理由は、原子・分子内の原子核の部分は全体に対して相対的に小さく、また、電子はその周りを大体 10^8 cm/秒の速さで回っています(軌道電子)が、そこを 10^8 cm/秒以上のすごいスピードで放射線である電子が来ると、原子核の周りを回っている電子は止まっている状態と同じで、しかも、原子・分子の占める空間の大部分は何もない空っぽの空間のようなものなので、そこを放射線である電子が走り抜けるわけです(図1)。電磁波の場合も、周波数が非常に高い(10^{17} Hz以上)と、原子・分子内の電子と作用することなく通り抜けまします。これが放射線の持つ、重要な性質の1つである透過性です。

以上のことからおわかりのように、放射線は何か特別なものではなく、後で述べるように、もともと自然放射線として、光を含めて、大気、水、大地、温度などと同様、環境因子の1つとして存在しているのです。その中でヒトを含めて生物は進化して今日に至りました。しかし、1895年、レントゲン博士がX線を発見して以来、この自然放射線の上に人工放射線による被ばくの可能性

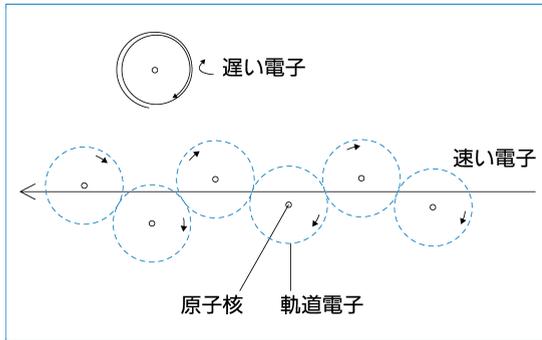


図1 放射線透過性の説明

微小な原子核の周囲を軌道電子が回っています。軌道電子の速度より遅い電子が原子に近づくと何回となく接触し跳ね返されます。ところが軌道電子の動きが止まって見えるほどの高速の電子にとっては、原子の中は空っぽで、何百個の原子でも突き抜けてしまいます。

文献2), p.68 ページより

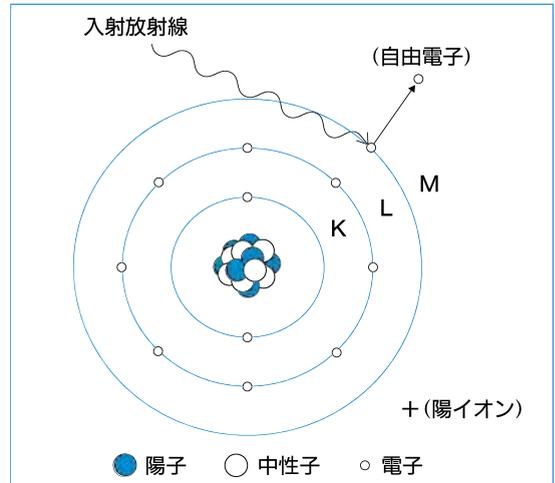


図2 放射線の電離作用

文献1)より

が加わったので、これらの放射線とどのようにつき合っていくかが重要なこととなりました。

放射線の種類と人体への影響の仕方

●放射線の電離作用

放射線の透過性のところで述べたように、原子というミクロの世界では、放射線曝露によって、電離*は容易に起こるものではありません。まったく確率的現象で、相当量の放射線の曝露を受けて初めて起こる出来事であることを理解していただきたいと思います。

しかし、放射線が身体を通過する過程で、われわれの身体を構成している原子の軌道電子に衝突して、電子がその軌道を飛び出すだけのエネルギーを与える、つまり、電離を起こすと、放射線影響を起こす最初のきっかけが生じます。残った原子は、電気的にマイナスの電子が飛び出したので、電気的には陽イオンとなり、その結果、電離によって自由電子と陽イオンが生じます(図2)。上述の粒子線と電磁波の中のX線、 γ 線は、このような電離作用を持っているので電離放射線と呼ばれ、これらの放射線の被ばくで人体影響が問題となるわけです。このようにして、放射線のエネルギーが人体に吸収されることを放射線被ばくと言います。

放射線の種類によって電離の様子が違います。

粒子線の実体は原子を構成している電子(β 線)や原子核(α 線:ヘリウムの原子核)そのものであったりするので、一般に電離の効率は高いですが、早くエネルギーを失うので透過力は弱いと言えます(加速器で高エネルギーを与えたものは別)。逆に電磁波(X線や γ 線)は電離の効率は低いですが、透過力は強くなります。したがって、粒子線を体外からあびる場合は、一般に影響は少なく、線源が体内にあって(たとえば、放射性同位元素が体内に取り込まれた場合)、体内からあびる場合は影響は大きいわけです。一方、電磁波は体外からあびる場合は影響が大きいですが、線源が体内にあって、体内からあびる場合、影響は小さくなります。中性子は名のごとく電荷が無いので、物質を通過するとき、原子との電気的な相互作用がないので、原子核と衝突した時にエネルギーを失います。しかし、原子核は原子に比べて非常に小さいので衝突の確率は低く、透過性が強いということになるのです。中性子が原子核とぶつかった時、相手が重いと、相手にあまりエネルギーを与えず、自分が飛ばされて方向を変えるだけになります。しかし、原子核が軽いと、衝突さ

*電離:放射線が原子または分子の軌道電子と衝突して、電子をはじきとばし、はじきとばされた電子は自由電子、電子を失った原子、分子は陽イオンとなる。この現象を電離という(図2参照)。

表1 放射線の種類と人体への影響の仕方

	記号	透過力 (空気中では)	同じ強さの放射線から受け るエネルギー密度と範囲	人体への影響(同じ強さ の放射線を受けた時)	
				体外から あびる場合	体内から あびる場合
アルファ線	α	数 cm	密度 大 範囲 局所	小	重要
ベータ線	β	数 10 cm~数 m	密度 小 範囲 中	小	やや重要
ガンマ線	γ	大きい	密度 極小 範囲 大	重要	小

れた原子核は飛ばされて周りの物質を強く電離し、エネルギーを失います。飛ばされた原子核を反跳核と言います。中性子の減速材として水素と酸素でできている水が用いられるのはこのためですし、人体も70%は水でできているので、中性子の影響を強く受けます。代表的な α 線、 β 線、 γ 線(X線)の人体への影響の仕方を表1にまとめました。

● DNA への影響

放射線がわれわれの身体を構成している原子にエネルギーを与え、電離を起こすことで初めて放射線影響を起こすきっかけを生じることは既に述べました。電離によって生じた自由電子と陽イオンは、細胞の最も重要な生体高分子DNAを直接的に攻撃するか(直接作用と言います)、われわれの身体の70%を占めるといわれる水分子と反応して分解し、反応性に富むイオン、ラジカル(遊離基)、過酸化物質などを作り、それによって間接的に攻撃します(間接作用と言います)(図3)。DNAがこのように攻撃されるといろいろな変化が起こりますが、人体影響に寄与が大きい変化は、今日ではDNAの2本鎖切断と考えられています。

DNAには細胞の生命体としての活動に必要な全情報が存在しているので、細胞にはDNAに起きた傷を修復する機構が備わっているのです。地球が誕生したのは46億年前、生物の元祖が誕生したのは30数億年前と言われています。生物の元祖となった細菌が原始の海に誕生した頃は、地

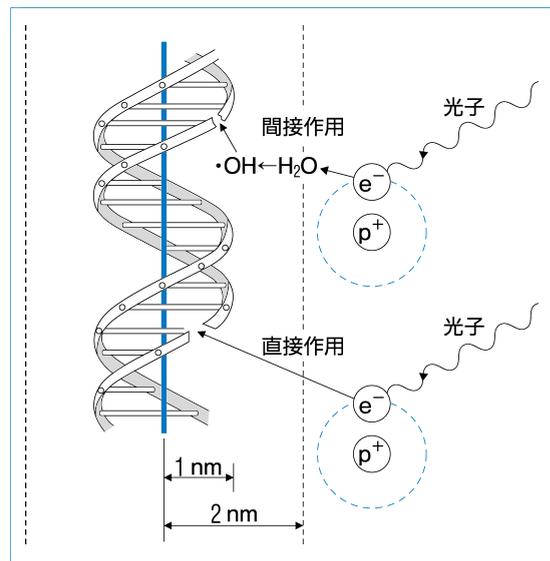


図3 DNAが受けるX線あるいは γ 線による直接作用と間接作用

直接作用では、光子の吸収によって飛び出した2次電子とDNA分子との直接的な相互作用によってDNAに損傷を生じる。間接作用では、飛び出した電子が水分子と反応し、ラジカル($\cdot\text{OH}$)を形成し、ラジカルがDNA分子を傷つける。半径2nm以内に生じたラジカルがDNAを攻撃できると推定される。文献1)より

球の表面は今より数千倍も強い太陽紫外線の嵐に覆われていたと想像されています。原始細菌はこの強烈な紫外線と10数億年という長期間、闘わねばならなかったわけです。当然、DNAの傷を修復する機構を備えるようになり、細菌から進化したわれわれ人間もその修復機構を持っています。紫外線の嵐は20億年前頃から酸素の出現によっておさまりはじめました。光合成細菌が誕生し、それから進化した生物がだんだん繁栄し、遊離酸素を放出、それが大気の上層で紫外線によ

てオゾンとなり、そのオゾン層が太陽紫外線を吸収してくれるようになったからです。ところが、その酸素も先に述べた反応性に富むラジカルの仲間なので猛毒でした。しかし、長い年月をかけて酸素に対する耐性を獲得し、逆に酸素を代謝活性の源に利用する能力を持つものが現われ、大進化をとげて、ヒトを含む現在の多細胞系生物が誕生します。この経過を見てもわかるように、われわれの細胞は多くの種類の傷害に対する修復機構を持っているのです。

したがって、DNA 鎖切断箇所が少なければ完全に修復されます。残念ながら、切断箇所が多ければ修復されても不完全な修復になり、非常に多ければいずれの形の修復も不可能で細胞は死ぬ(細胞死)こととなります。また、不完全な修復の場合、DNA が誤った情報を持った、正常の細胞とは違った細胞となります(突然変異細胞)。これらの細胞死、または、突然変異細胞の出現が基礎となって種々の人体影響が起こるのです。

放射線の人体影響を説明するとき用いる線量単位

放射線エネルギーの吸収によって、初めて放射線影響が出現する可能性が生まれることは前述の通りです。ですから、放射線の影響を知るためには、放射線エネルギーの吸収の程度を示す“ものさし”が必要になります。それが線量といわれるものですが、さらに、放射線防護という観点から放射線の人体影響の程度も取り込んだ線量単位がICRP(国際放射線防護委員会)から提案され、国際的に受け入れられています。つまり、線量がわかれば、ある程度、放射線の人体影響が予測できるということです。ここで線量について、簡単に説明しておきましょう。

1. 照射線量

放射線エネルギーは電離という形で物質に与えられます。したがって、この電離の程度を電離箱という装置を用いて測定する方法が生まれました。0°C、1気圧、1立方センチメートルの空気

表2 ICRP による Q の概略値

X線, γ 線および電子	1
熱中性子	2.3
エネルギー不明の中性子*, 陽子および静止質量が1原子質量単位より大きい電荷1の粒子	10
エネルギー不明の α 粒子と多重電荷の粒子	20

*1985年ICRPパリス声明で中性子は20と変更した。

に、1静電単位の電気量に相当する正または負のイオンを電離によって生じさせる放射線量を1レントゲン(R)としました。これは照射線量と呼ばれ、最近ではSI単位で 2.58×10^{-4} クーロン毎キログラム(C/Kg)と表示されます。ただし、この方法で測定できるのは、エネルギーが3MeV以下のX線、 γ 線に限られます。

2. 吸収線量

吸収されたエネルギーを示す最も基本的な線量単位で、SI単位ではジュール毎キログラム(J/kg)を用い、固有の名称としてグレイ(Gy:英国の放射線物理・生物学者、Grayにちなむ)が用いられます。しかし、実際には測定不可能なので、測定可能な照射線量から換算するか、化学線量計、熱ルミネッセンス線量計、写真乳剤(フィルム・バジジ)、半導体検出器などで測定し、いずれも換算によって、目的の物質に対する吸収線量を求めます。

3. 等価線量(ICRP 1977年勧告では線量当量と呼ばれています)

生体への影響は、生体を構成している細胞のDNAなどの生命維持に重要な分子レベルでの変化が重要であり、それはミクロの状態のエネルギー付与と密度(つまり電離密度)に依存します。これは前述のように放射線の種類(線質)の違いによるので、ICRPは1977年、線質の違いによるエネルギー付与の違いを補正するために線質係数Qを導入し、吸収線量にQを乗じた線量当量を提案しました。Qは物理学的に求められますが、実用的にはICRPが提案している概略値(表2)を用います。SI単位ではジュール毎キログラム(J/kg)を用い、固有の名称としてシーベルト(Sv:

表3 ICRP 1977年勧告における放射線影響リスク係数と荷重係数

組織・臓器	影響	リスク係数 (Sv ⁻¹)	荷重係数 ω_T
生殖腺	遺伝的影響	4×10^{-3}	0.25
乳房	乳癌による死	2.5×10^{-3}	0.15
赤色骨髄	白血病による死	2×10^{-3}	0.12
肺	肺癌による死	2×10^{-3}	0.12
甲状腺	甲状腺癌による死	5×10^{-4}	0.03
骨表面	骨癌による死	5×10^{-4}	0.03
残りの臓器	癌による死	5×10^{-3}	0.30
合計		1.64×10^{-2} (すべての障害) 1.25×10^{-2} (すべてのがん)	1.00

表4 ICRP 1990年勧告における組織・臓器別名目確率係数

組織・臓器	致死がんの確率 (10 ⁻² Sv ⁻¹)		総合損害 (10 ⁻² Sv ⁻¹)	
	全集団	作業者	全集団	作業者
膀胱	0.30	0.24	0.29	0.24
骨髄	0.50	0.40	1.04	0.83
骨表面	0.05	0.04	0.07	0.06
乳房	0.20	0.16	0.36	0.29
結腸	0.85	0.68	1.03	0.82
肝臓	0.15	0.12	0.16	0.13
肺	0.85	0.68	0.80	0.64
食道	0.30	0.24	0.24	0.19
卵巣	0.10	0.08	0.15	0.12
皮膚	0.02	0.02	0.04	0.03
胃	1.10	0.88	1.00	0.80
甲状腺	0.08	0.06	0.15	0.12
残りの組織・臓器	0.50	0.40	0.59	0.47
合計	5.00	4.00	5.92	4.74
重篤な遺伝性障害の確率				
生殖腺	1.00	0.60	1.33	0.80
総計(丸めてある)			7.30	5.60

表5 ICRP 1990年勧告における組織荷重係数

組織・臓器	組織荷重係数, ω_T
生殖腺	0.20
骨髄(赤色)	0.12
結腸	0.12
肺	0.12
胃	0.12
膀胱	0.05
乳房	0.05
肝臓	0.05
食道	0.05
甲状腺	0.05
皮膚	0.01
骨表面	0.01
残りの組織・臓器	0.05

スウェーデンの放射線防護の父、Sievert にちなむ)を用います。

4. 実効線量(ICRP 1977年勧告では実効線量当量と呼ばれています)

原爆被ばく者などについての研究で、被ばくを受けた臓器、組織の種類によって発がんや遺伝的影響の起こる確率が違うことがわかってきました。そこでICRPは1977年にそれらの単位線量当たりの発生確率(リスク係数とも言います)に応じた荷重係数(それぞれの臓器でのリスク係数の

全リスク係数に対する比)を決め(表3)、それぞれの臓器・組織の線量等量に乘じ、それを総和したものが、放射線リスク(リスクは放射線影響発現の集団としての頻度、個人のレベルでは確率と考えてください)まで取り込んだ、放射線防護に一番意味のある線量だとして実効線量を提案しています。

ICRPは1990年勧告で原爆被ばく者に対する線量の再評価の結果等を取り入れた新しい放射線リスクの値に基づいた致死がんの確率係数とさらに非致死がん罹患による影響の大きさを総合損害とし(表4)、総合損害を参考にして組織荷重係数(1977年勧告の荷重係数に相当)を決定しました(表5)。それぞれの臓器・組織の等価線量に乘じ、それを総和したものが実効線量です。線量等量と等価線量、実効線量等量と実効線量は基本的に同

じものですが、それらを求めるための係数の値が変わったため、混乱をさけるために名称も変更されました。SI単位ではジュール毎キログラム(J/kg)、固有の名称としてシーベルト(Sv)です。放射線防護では、この線量による線量評価が行なわれます。等価線量と同じシーベルトなので混乱することがあるので注意が必要です。

私たちのまわりの放射線

●自然放射線

自然放射線源の主要なものは、大地の放射性核種、宇宙線、宇宙線により生成される放射性核種です。大地の放射性核種は地球創生以来存在する核種で55種あるとされ、壊変系列であるウラン系列、トリウム系列、アクチニウム系列は α 、 β 、 γ 線を放出します。ウラン系列のラドン・トロンによる被ばくは自然放射線被ばくの50%以上を占めると考えられています。壊変しない長寿命核種もあり、その中の放射性カリウム40は化学的に正常のカリウム元素と変わらないので、正常のカリウムとまったく同様に人体に取り込まれます。

この放射性カリウム40を例にとり、自然にある放射性核種でどのくらい被ばくするかを見てみましょう。そのため体重を50kgと仮定すると、われわれの体内には、その約0.2%、すなわち、100gのカリウムが存在し、その1万分の1、0.01gが放射性カリウム40なのです。放射能の単位で言うと、3000Bqの放射性カリウム40が体内にあることとなります。3000Bqというと、毎秒3,000個の割合で、放射線粒子が発射されていることを意味します。この内、 β 線が大部分で、10発の内1発は γ 線です。 β 線が一発発射されると、細胞内で電離を起こしながら、平均250個の細胞を貫いて、エネルギーを使い果たして消滅するとされています。これを被ばく線量に直すと、年間の内部被ばくは0.4mSv(ミリシーベルト)(実効線量当量)とされています。このように、われわれは自然放射線と共存していることを理解してください。

次に、宇宙線ですが、これは幸い地磁気の影響で極方向以外の入射は少なく、高緯度でなければ線量は高くありません。また、宇宙線により生成される放射性核種は、大気中に存在する窒素、酸素、アルゴン等に2次宇宙線が衝突して生成されます。炭素14、ナトリウム22、トリチウム(水素3)などがありますが、自然放射線被ばくとしての寄与は少ないと考えられています。

●放射線の利用状況

自然放射線の存在はご理解いただけたと思いますが、日常生活の中で放射線が予想以上に利用されていることはご存知ないのではないのでしょうか。ある女性の会が女性1,000人について調査したところ、空港での荷物検査にX線を利用していることをご存知の方は6割だったそうですが、医療器具の殺菌や害虫駆除に用いられていることをご存知の方は1割だったそうです。半導体部品の製造に活躍していることをご存知の方はまずおられないと思います。

食品照射については、一時、マスコミで騒がれたので記憶されている方もおられるかも知れません。日本ではジャガイモの発芽を止めるためにコバルト60の γ 線、60~150Gyの照射が行なわれ、約8か月間、発芽を止めて、貯蔵されています。北海道のジャガイモの収穫期は9月、一方、本州の収穫期は6月ですから、その間、発芽を止めることができれば、年間通じてジャガイモを供給できるわけです。これが問題になったのは、照射食品と放射能汚染食品が混同されたためとされます。

放射線が殺菌目的に利用されているのは、医療の分野です。コバルト60の γ 線や加速器で発生させた電子線が用いられています。放射線の利点は熱を発生しない点にあるので、熱に弱いプラスチック製の医療機器の滅菌には不可欠のものとなっていることはご存知の通りです。

茨城県那珂郡大宮町に農水省の放射線種育場(ガンマーフィールド)があって、放射線照射により起こる有用突然変異を利用することも盛んに行なわれています。稲、大豆、梨などで、すでに活

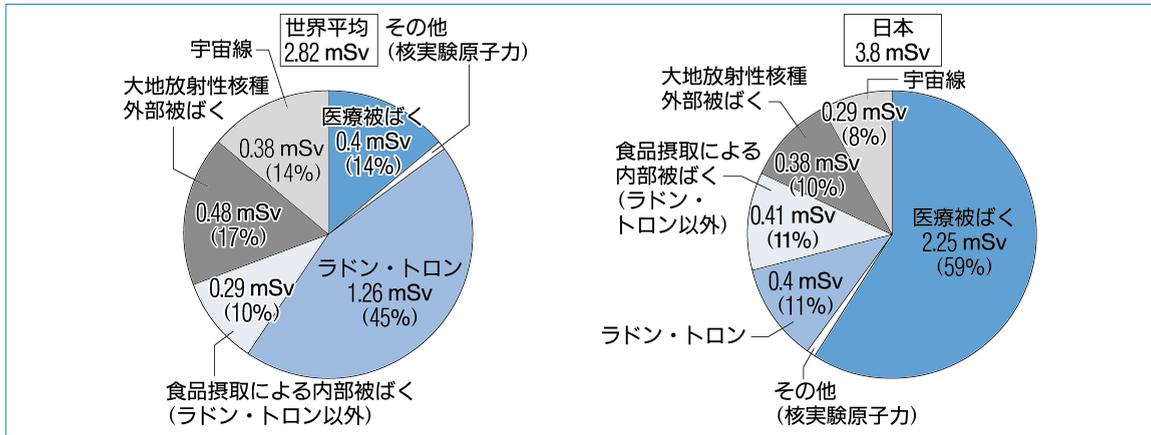


図 4-a 世界と日本の環境放射線の実態

世界平均は UNSCEAR 2000 年報告書にまとめられた集団実効線量から年間実効線量を算出した。日本については原子力安全研究協会編 “生活環境放射線” 1992 より転写。文献 1) より

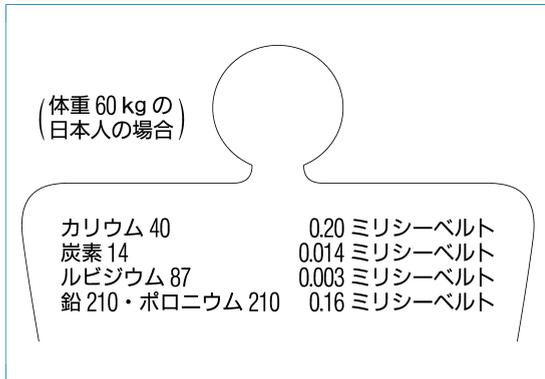


図 4-b 体内の自然放射性物質の量 文献 7) より

表 6 食物中のカリウム 40 の放射能量(日本)

食パン	30
米	30
ほうれん草	200
干ししいたけ	700
牛肉	100
魚	100
ポテトチップス	400
生わかめ	200
干しこんぶ	2,000
牛乳	50
ビール	10

(単位：ベクレル/kg)
文献 7) より

躍している優秀な品種があります。ことに、最近では、エネルギーの高い重粒子線の照射で、効率よく花の品種改良が行なわれ、今まで見たこともないような美しい花が街で溢れるようになったのは、この技術に負うところが多いのです。

しかし、放射線の利用を経済面から見ると、工業利用がかなりの割合を占め、しかも、半導体がその 4 分の 3、5 兆円の市場を有しているのです。半導体の基板の上に、複雑な、ミクロン・オーダーの IC 回路を作るには、放射線を利用した技術が必要というわけです。その他、鉄鉱石から鉄を作る過程でも放射性同位元素がいろいろな形で使われているとか、自動車のタイヤはゴムに電子線を照射し、弾力性のある強いタイヤに加工してあるなど、放射線は目に見えないところで働いていて、いまや、現代社会を支える、なくてはならな

いものになっています。

●医療面での利用

しかし、放射線の利用における本命は、何と言っても医学的利用だと思います。もちろん、診断領域では、放射線に代わるものとして超音波や MRI、内視鏡といった新しい方法も導入されましたが、放射線そのものはどうしても欠かすことのできないもので、診断の多くの過程で、まず X 線単純写真の撮影と考える医師が多いと思います。画像として、もう一步突っ込んだ情報を得たいとき、多くの医師は CT を撮るのではないのでしょうか？ ことに、改良された、3 次元の画像が撮れる “らせん走査 CT” の診断精度は抜群だと思います。また、どこの病院にもあるわけではありませんが、ポジトロン断層撮影法(PET)は、

組織の画像と同時に、代謝の状態や悪性腫瘍かどうかの判定もできると言われています。

がんの放射線治療も、近年、急速の進歩をとげてきました。装置面では、コバルト 60, リニアック, Ir-192 高線量率腔内照射装置の開発に加え、中性子線治療, 陽子線治療, 重粒子線治療の実現化が進展しました。さらに、コンピュータ支援による情報技術の発展により、病巣に局限して十分な線量が均等に照射できるようになりました。1つの典型的な例が、ガンマナイフと言われる照射装置で、半球状の本体底部に 201 個のコバルト線源を納め、線束が一点に集中するようにした装置です。コリメーターヘルメットを併用すると、線量分布を脳腫瘍の病巣の形や容積に合わせることができ、照射された組織は、壊死病巣と健全組織の境界がナイフで切除したように鋭利になります。放射線治療は、手術の場合に起こる機能欠損が少なく、患者の QOL を重視したもので、がんの集学的治療の一端を担っており、今後のがん治療の大きな柱になることは間違いありません。

このように放射線の利用は目を見張るものがありますが、一方では、日常生活の中での放射線被ばく、特に医療被ばくを忘れるわけにはいきません。もちろん、被ばくによるリスクより利益が大きいので放射線障害防止法の対象にはなっていま

せんが、診断においても 1 件当たりの被ばく量や施行件数の急増で問題になるものがでてきました。胸部 X 線撮影は 0.06 mSv, CT は 5~8 mSv といわれます。最後に、世界と日本の環境放射線の実態を図 4 a に、身体に取り込まれた自然放射性核種の量を図 4 b に、特に分布量が多いカリウム 40 について表 6 に示しておきます。

参考文献

「放射線とは何か」の項は文献 1, 2), 「放射線の種類と人体への影響の仕方」の項の「DNA への影響」は文献 3), 「私たちのまわりの放射線」の項の「放射線の利用状況」については文献 4), 「医療面での利用」では文献 5, 6), それ以外の部分及び全体にわたり文献 1) を参照してください。

- 1) 菅原努監修, 青山喬, 丹羽太貫, 他編著: 放射線基礎医学 10 版. 金芳堂, 2004
- 2) 大野新一: 放射線教育. 3(1): 67-74, 1999
- 3) 近藤宗平: 人は放射線になぜ弱いのか 3 版. ブルーバックス, 1998
- 4) 岩崎民子: 知っていますか? 放射線の利用. 丸善, 2003
- 5) 木村修治, 河野通雄: 放射線治療学 2 版. 金芳堂, 1996
- 6) 田中敬正, 平岡直寛, 赤木清, 笹井啓資 編著: 癌の放射線治療. 金芳堂, 1998
- 7) 放射線影響協会編; 放射線の影響がわかる本, 放射線影響協会, 2000

●青山 喬(あおやま・たかし)
〒520-0112 大津市日吉台 1 丁目 16-8