わかりやすい放射線の基礎

〔第1回〕放射線の存在

東北大学名誉教授 工藤 博司

はじめに

2011年3月に重大な原子力事故が発生し、莫大な量の放射性物質が東京電力福島第一原子力発電所から放出されました。そのため、原子力発電所がなければ「世の中に放射線はなく、怖い思いをしなくて済む」と思った人は少なくありません。一方、その時「放射線は医療で広く使われている」ことを思い起こした人もいると思います。

放射性物質があれば、そこから放射線が出ます。私たちの身の周りには微量ですが放射性物質が存在しますから、日常生活ではわずかながら常に放射線を受けています。また、私たちの身体の中にも放射性物質が存在します。

放射性物質でないところから出てくる放射線もあります。その一つは、レントゲン撮影に使われるエックス線（X線）で、健康診断や空港の手荷物検査などに広く使われています。

この連載では、放射線の正体とそのはたらきについて勉強します。放射線とは何者かということを知れば、「大量の放射線を浴びると危険だが、私たちの体内にある放射性物質から出る放射線が健康に害を及ぼすことはない」ということが分かります。医療で使う放射線はどのようなはたらきをするのかも理解できます。他にもいろいろな使い方があることも紹介します。

放射線と放射能

次回以降に「放射線の正体」と「放射線のはたらき」について述べますが、用語の意味を知らないと混乱することがあります。先ず、放射線と放射能の区別をはっきりさせましょう。

放射線とは「空間を移動するごく微小の粒子か目に見えない光」です。少し難しい表現ですが、次回に詳しく説明しますから、今回は聞き流してください。放射線の量は“線量”と言い、色々な単位で表されますが、皆さんが一番気にする放射線の人体への影響はシーベルト（Sv）という単位で表されます。

放射線は放射性物質から出てきます。放射性物質とは放射線を出す原子（放射性原子）を含んでいる物質（気体、液体、固体）のことで、その“量”を放射能（単位はベクレル「Bq」）と言います。

身の周りの放射線

図に示すように、私たちは普段の生活で1年間に約2ミリシーベルト（mSv）の放射線を受けます（日本の平均）。その内訳は、上空からやってくる宇宙線が約0.3 mSv、大地から受ける線量が約0.4 mSvです。大地には、花こう岩のようにウランやトリウムなどの放射性原子を含む岩石があり、常に放射線が出ています。

野菜や魚介類などの中にもごく微量の放射性カリウム-40やポロニウム-210などが含まれていて、食品を通して体内に摂り込まれ、その線量は1年当たり約1 mSvになります。

鉄筋コンクリート造りの建物の中にいると、空気中のラドンという放射性物質から約0.4 mSvの放射線を受けます。ラドンとはコンクリートの骨材に含まれるごく微量のウランやラジウムから発生する放射性の気体です。

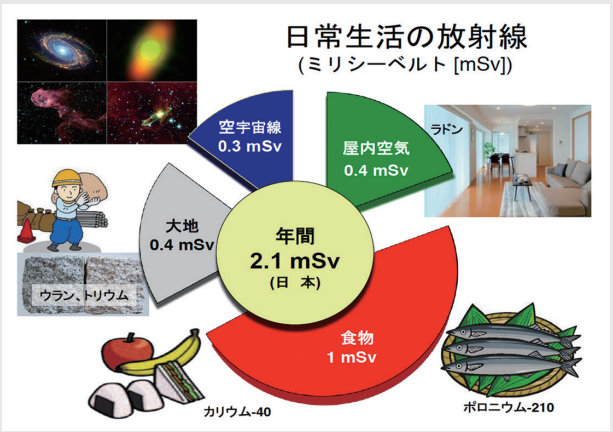

図 日本国内での生活で1年間に受ける平均的放射線量（mSv）

身体の中の放射性物質

私たちの身体の中には微量の放射性物質が常に存在します。前述のカリウム-40（^{40}K）とポロニウム-210（^{210}Po）の他に炭素-14（^{14}C）もあります。

カリウムは農業に欠かせない重要な肥料の一つですが、私たちにとっても筋肉を動かしたり、神経細胞による情報伝達に欠かせない栄養素です。天然のカリウムの大部分は放射線を出さないカリウムですが、1万個に1個の割合（0.01%）で放射性の^{40}K（13億年の半減期でβ線とγ線を放出）が含まれます。

体内のカリウムの量は体重に比例し（約0.2%）、^{40}Kはさらにその0.01%ですから、体重が60 kgの人は約4,000 Bq、体重30 kgの子供なら約2,000 Bqの^{40}Kをもっています。^{14}Cや^{210}Poなど他の放射性物質と合わせると、体重60 kgの人は総計で約6,000 Bqの放射性物質を常にもっています。個人差はありますが、体重1 kg当たり約100 Bqです。私はもっていないという例外はなく、誰もがこれらの放射性物質を体内にもっています。しかし、これは大昔から続くごく自然な状態であり、病気の原因になる心配は全くありません。

わかりやすい放射線の基礎

〔第2回〕放射線の正体

東北大学名誉教授 工藤 博司

放射線の発見

放射線は1895年11月8日に突然発見されました。ドイツの大学で物理学を教えていたレントゲン教授は、図1にあるような実験装置を使って毎晩ある実験をくり返していましたが、その日の実験で写真乾板に自分の手の骨が写り驚きました。彼は、装置から目に見えない光(?)が出ていると考えましたが、その時はまだ正体をつかめなかったため、“謎”の意を込めてエックス(X)線と名付けました。X線は発見の翌年にはヨーロッパで広く医療に利用され、彼はX線の発見によって1901年にノーベル物理学賞を受けました(ノーベル賞第1号)。

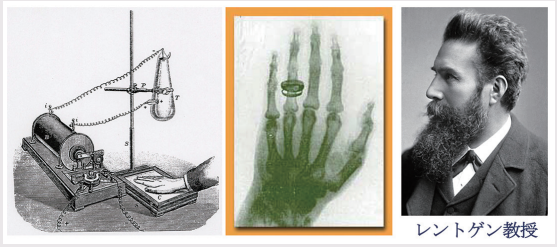

図1 レントゲン教授の実験装置とレントゲン夫人の手のX線写真

この発見に刺激を受けたのが、パリ理工科大学のベクレル教授でした。放射能(放射性物質の量を表す)の単位であるベクレル(Bq)は彼の名に由来します。彼は1896年にウラン鉱石からX線のような目に見えない“何か”が常に出ていることを発見し、“放射線”と名付けました。その“何か”は後にアルファ線と呼ばれるものでした。パリの別の大学で1898年にラジウムとポロニウムを発見したキュリー夫妻は、これらの原子からも放射線が出ていること突き止め、原子が放射線を出す性質あるいはその現象を“放射能”と呼びました。この3人は、放射能の発見で1903年にノーベル物理学賞を受賞しました。

放射線の正体

放射線の正体を図2に示します。高いエネルギー状態にある原子核がエネルギーの低い状態に移るとき、その差に相当するエネルギーを放射線として放出します。放射線は目に見えない粒子や光ですが、その違いによってアルファ(α)線、ベータ(β)線、ガンマ(γ)線、中性子線などに分類されます。

α線の正体はヘリウム(^{4}He)の原子核です(α粒子ともいいます)。ヘリウムの原子核は陽子(p)2個と中性子(n)2個からできていて、+2の電荷をもちます。その原子核の外側に電子が2個付くとヘリウム原子になります。お祭りなどで手にする風船に詰めるヘリウムガスです。このガスは米国のガス田などから採取されますが、実は、地中にあるウランやトリウムから出たα線がヘリウムガスとなって地下に溜まったものです。このように、α 粒子が原子核を飛び出して動いているときは放射線ですが、止まってしまえばもう放射線ではありません。

地球上のウランの大半を占めるウラン-238(^{238}U)の半減期は45億年で、地球の年齢は46億歳ですから、地球が誕生したときに存在したウランの量は今では半分に減り、その分ヘリウムガスが地下に溜りました。ウランはα線を出して次々と別の原子に変身します。キュリー夫妻が発見したラジウムもその途中で現れます。ラジウムはα線を出してラドンになり、そのラドンはまたα線を出してポロニウムにというように変身が続き、最後は放射線を出さない鉛になって一連の変化は終ります。

β線の正体は電子(e^-)です。ただ、この電子は原子核から飛び出して動いています。図2の左下に放射性のセシウムがβ線を出してバリウムに変化する様子を示します。中性子を出すと陽子になるので、原子番号(陽子の数)が1つ増えてバリウムになります。こうしてできたバリウムはもう放射線を出しません(安定元素)。

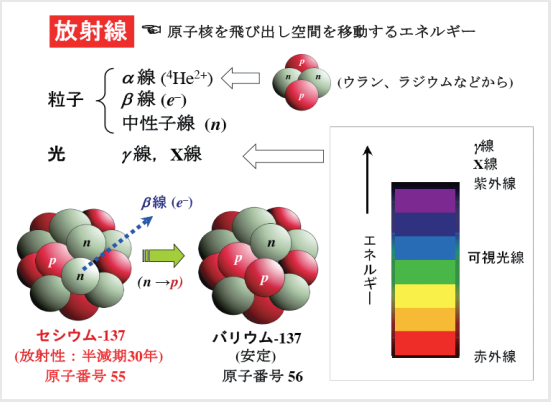

図2 放射線の正体(図中のnは中性子、pは陽子、e^-は電子)

正体不明のX線でしたが、実は光の仲間です。光には目に見える可視光と目に見えない赤外線や紫外線があります。紫外線はやや高いエネルギーをもっていて日焼けの原因になりますが、皮膚の下で止まってしまい透過写真を撮ることはできません。X線は原子の中にある電子がその軌道を変えるときに発生します。紫外線の1,000倍ほどのエネルギーをもち容易に人体や物質を通過しますから、レントゲン写真を撮ることができます。γ線も目に見えない光ですが、原子核から直接出るので、そのエネルギーがX線の1,000倍以上になることもあります。

わかりやすい放射線の基礎

〔第3回〕放射線のはたらき

東北大学名誉教授 工藤 博司

放射線のはたらき（作用）

放射線は物質に吸収されてはじめて“何か”を起こします。通過するだけでは何も起きません。その“何か”が作用です。図1の左側の絵は物質中の原子で、原子核の周りを電子が回っている様子を示します。そこに放射線がやってくると、電子が軌道の外に飛び出すことがあります。飛び出した電子はマイナスの電荷をもちますから、残された原子はプラスのイオンになります。この現象を電離と言います。他方、電子は飛び出さず外側の軌道に移ることがあります。これを励起と言います。

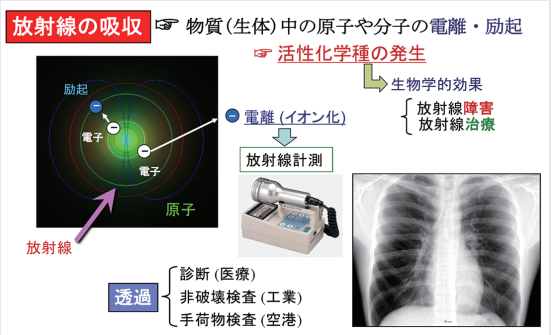

図1 放射線のはたらき（作用）
放射線が物質に吸収されると原子や分子の状態が変化する（電離と励起）

私たちの身体の約70%は水です。体内の水に放射線が吸収されると、電離や励起を経て反応性に富む分子（ラジカルや活性酸素などの“活性化学種”）が発生して、それがさまざまな生物学的効果を引き起こします。その一つが放射線障害ですが、うまく使えばがんの治療にも役立ちます。また、物質から飛び出した電子を捉えると、放射線を計測することができます。

放射線の透過と遮蔽

作用ではありませんが、放射線はいろいろな物体を透過します。X線は医療で診断によく使われますが、工業分野でも機器や製品を分解せずに内部の様子を調べる“非破壊検査”として広く利用されています。身近なところでは、空港の手荷物検査にも使われています。

放射線が物体を透過する度合いは放射線の種類や対象とする物質によって異なります。図2に示すように、α線はコピー用紙1枚でも止まってしまいます。β線は紙を通過しますが、アルミニウムのような軽い金属の薄膜でも止まります。γ線は、軽い金属を通過しますが、鉄や鉛のような重い金属ブロックで止めることができます。止まってしまえば放射線ではありません。放射線を止めることを“遮蔽”と言います。

歯科医院で歯のレントゲン写真を撮るときに、ゴム製のエプロンを着けた経験があると思います。その時、ゴムにしては重いと感じたはずです。エプロンに使われているゴムの中に鉛の粉をまぶしてあるからです。X線が誤って体の別の部位に当たっても、鉛がX線を止めるので「安心してください」ということです。

中性子線には面白い性質があります。電気的に中性で電荷をもたないため物質との相互作用の度合いが小さく、どこまでも飛んでいきます。鉛のような重い金属でも平気で通り抜けますが、水があると止まってしまいます。原子炉の中心部は冷却のために水に浸けておきますが、水には中性子線を止めるという重要な役割も課せられています。

中性子線は空からも降り注いでいます。太陽などからやってくる宇宙線（主に陽子）が大気中の酸素や窒素に衝突して発生し、ごく微量ですが地表にまで届きます。

中性子は水素を除くすべての元素の原子核にありますから、水素、酸素、炭素、窒素、カルシウム、リンなどを主成分とする私たちの身体の中にも存在します。しかし、その中性子は原子核の中に閉じ込められていて動き回ることはないので、中性子線（放射線）とは呼びません。

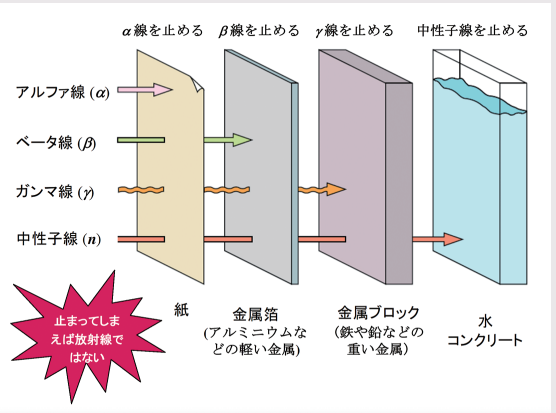

図2 放射線の透過と遮蔽（止める）

わかりやすい放射線の基礎
〔第4回〕放射線の健康への影響

東北大学名誉教授 工藤 博司

人体への影響

大量の放射線は確かに危険ですが、どのくらまで許容できるのでしょうか。「1ミリシーベルト（mSv）以下なら安心だが、それを超えたら危険だ」とよく言われますが、本当はどうなのかを考えてみることにします。

図1に人体が“全身”に放射線を受けた（被ばくした）ときの線量（mSv）と関連事象を示します。広島・長崎の原爆投下から75年以上にわたって蓄積された多くの科学的データの分析結果ですが、

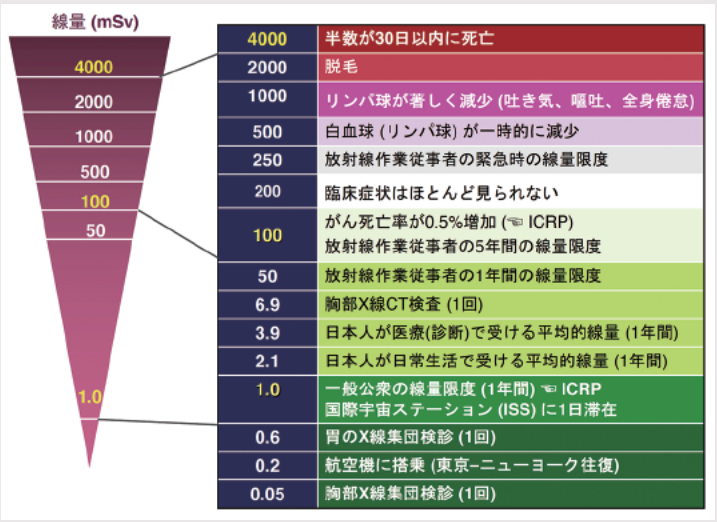

図1 被ばく線量（全身）と関連事象

200 mSvまでは影響の有無の明確な医学的知見は得られていません。しかし、500 mSvを超すと、白血球が減るなどの明らかな影響が現れます。4,000 mSvでは半数の人が30日以内に死亡します。被ばく線量が増えると間違いなく危険です。

放射線による健康被害を防ぐことを目的とする国際放射線防護委員会（ICRP）は、全身被ばくを100 mSv以下に抑えるよう勧告しています。これを受けて日本では、放射線を扱う職業人（放射線作業従事者）の被ばく限度を5年間で100 mSvと法律で定めています。公衆の許容線量として、ICRPは日常生活における被ばく（日本では年に約2 mSv）を除いて年間1 mSvという値を提示しています。これはあくまでも“安心”の目安であって、それを少しでも超えたら危険ということではありません。

同じ線量でも全身被ばくと局部被ばくとでは臨床症状に大きな違いがあります。全身に4,000 mSvの放射線を受けると死に至りますが、皮膚の一部や指先の被ばくでは脱毛（3,000 mSv）や紅斑（5,000 mSv）のような症状が現れるものの、死亡することはありません。

医療による被ばく

日本人の医療被ばく（治療は含めない）は一人当たり年に約4 mSvと世界で最も高いのですが、それが世界でトップクラスの長寿国であることにもつながっています。図2に示すように、X線断層診断（CT）では腹部で13 mSv、最近話題のPET（陽電子放出断層診断）では全身に3.5 mSvの放射線を受けます。PETでは、がん細胞に集まりやすい糖分子に放射性フッ素（^{18}F：半減期2時間弱）を付けた（標識した）放射性薬剤（FDG-^{18}F）を被験者に注射し、^{18}Fから出るガンマ線を測定してがんの位置を可視化します。その際、2億ベクレル（Bq）ほどの^{18}Fが全身を巡るので内部被ばくは3.5 mSvくらいになります。

がん治療での被ばくは60,000 mSv（60 Sv）とかなり高い線量に達します。全身被ばくなら死に至る線量ですが、何回かに分けて、がん細胞に焦点を絞って（数ミリメートル内に制御）放射線を当ててがん細胞だけを死滅させ、通常の細胞への影響（放射線障害）を極力抑えるように工夫されていますから過度の心配は要りません。とはいえ、医療被ばくのリスク低減に注意を払うことも大切で、その上で恩恵にあずかりたいものです。

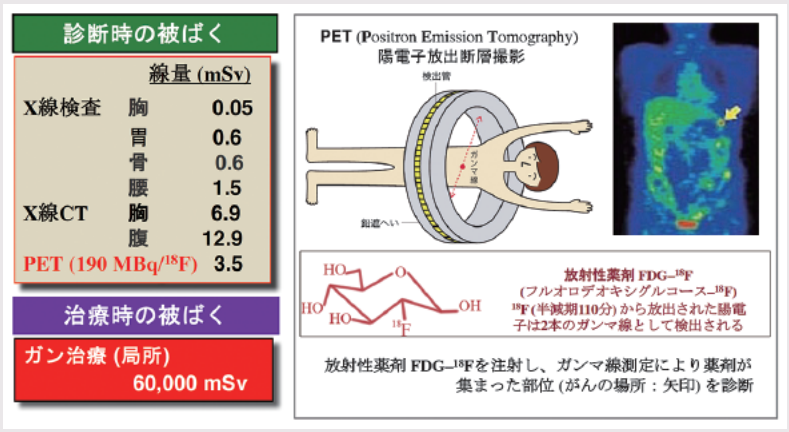

図2 医療による被ばくとPET診断の概要

わかりやすい放射線の基礎
〔第5回〕放射線の利用

東北大学名誉教授 工藤 博司

リスク（危険性）とベネフィット（便益）

放射線の量が増えればリスク（危険性）は増大しますが、リスクを知った上で放射線をうまく利用すれば大きなベネフィット（便益）が得られます。特に医学利用の便益は大きく、私たちの健康維持に欠かせないものになっていますが、放射線が他の分野でも広く利用されていて、私たちの生活に役立っていることはあまり知られていないようです。そこで今回は、農業、工業、研究開発の分野における放射線の利用例を紹介します（図）。

農業利用

農作物の品種や土壌の改良、動植物の代謝研究などに広く利用されています。常陸大宮市（茨城県）にはガンマフィールドと呼ばれる放射線育種場があります。直径100mの圃場の中心に設置された塔に納められている線源（コバルト-60[^{60}Co]）から出るガンマ線を作物に照射する施設で、大学、都道府県、企業などの研究に供されています。

放射線を照射すると加熱しなくても食品の殺菌ができます。香辛料や乾燥野菜の殺菌に最適で、海外では46ヵ国以上で使われていますが、わが国では未承認です。現在、わが国で唯一許可されている食品照射はジャガイモの発芽防止のためのガンマ線照射で、士幌農協（北海道）で実施され長期保存に役立っています。

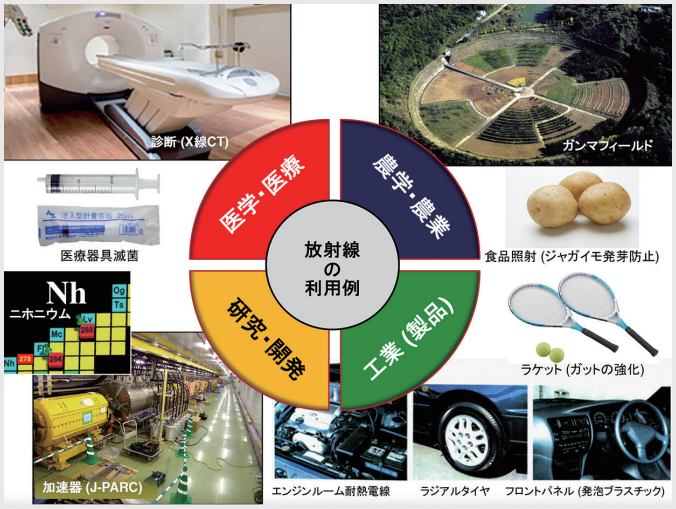

図 多様な放射線利用

工業利用

製鉄、製紙、製薬、プラスチック製造などで広く使われていて、製造工程での鋼板や紙の厚み測定、容器内容物の容量測定、製造装置や製品の欠陥の非破壊検査など多岐にわたります。身近なところでは、自動車のダッシュボード用発泡ポリエチレン、ラジアルタイヤ、エンジン周りの耐熱電線（被覆）の製造、テニスやバドミントンのガットや三味線の糸の強化などにも使われています。

医療機器の滅菌にも有効で、注射器の滅菌には欠かせません。注射器を1個ずつポリエチレン製の袋に封じ、数百本をまとめて段ボール箱に詰め、箱の外から丸ごとガンマ線を照射して滅菌します。袋を開封するまで滅菌状態が保たれるので、医療現場で安心して使用できます。

研究開発での利用

研究用原子炉の中性子、加速器で発生する高エネルギーの電子、陽子、重イオンなどは最先端の科学研究に不可欠な“放射線”です。また、原子炉や加速器を用いてつくられるラジオアイソトープ（放射性同位体）は環境や生体内での物質移動の研究などに使われます。前回述べたPET診断に使う放射性薬剤（FDG-^{18}F）の^{18}Fはサイクロトロン加速器を用いて製造します。2016年に日本発の新元素として世界に認められた113番元素ニホニウム（Nh）は理化学研究所（RIKEN）の直線加速器を利用して合成されました。最近話題の放射光施設では、微量物質の構造解析に欠かせない強力なX線が得られます。

おわりに

この連載では放射線の正体とその作用を中心に、「放射線とは何か」について学びました。放射線は“得体の知れない怖いもの”ではなく、地球が誕生した時からどこにでも存在し、私たちの身体の中にもあることを知りました。目に見えないから怖いのではなく、その量が問題になることもわかりました。日常生活では誰もが年に2 mSvほどの放射線を受けますが、それで健康を害することはありません。しかし、全身に500 mSvの放射線を受けると変調をきたし、4,000 mSv以上では死に至るので大変危険です。一方、放射線は医療をはじめ私たちの生活の質の向上に役立っています。

私たちの身の周りには、常に放射線が存在します。その放射線の量に危険はないか、便益を得るためにどこまで許せるかなどを、一人一人が適切に判断できるようになることを願ってやみません。