

第3章 放射線の人体への影響

放射線が人体に影響を及ぼすことが知られたのは、X線が発見された翌年1896年でした。やけどに似た皮膚障害を生ずることが認められたのです。また、X線やラジウムの医療利用が進む中で、医療従事者の中に多くの障害が出るようになり、生物への影響の研究は欠かせないものになりました。

現在では、過去の医療被ばく者、原爆被爆者、事故被ばく者などの調査から、大量の放射線被ばくの影響はかなり詳細に分かってきています。自然放射線が普通の地域より10倍ぐらい高い地域での調査が進んでいますが、放射線による影響は出ていません。広島・長崎の原爆被爆者の調査でも、低い線量（100ミリシーベルト以下）の場合には明らかな影響は出ていません。

一方、少ない放射線量が人体に及ぼす影響については、あまり分かっていません。がんや遺伝的障害についても、低線量の放射線が人に影響を及ぼしたという明確な証拠はありませんし、これだけの量を越えたら害になるという「しきい値」があるのかどうかという議論もまだ結論が出ていません。しかし、未知の部分がある以上、放射線を扱う場合は安全を大切に考えて、どんな低い線量でも低いなりの影響があるものとみなして、それを防ぐ対策を考える必要があります。

この章では、放射線の人体への影響について、詳しく見ていきましょう。

放射線影響の研究はX線の発見で始まった

19世紀の終わり、X線が発見された直後は、大量の放射線が人体に障害を及ぼすことは知られておらず、研究者たちは無防備な状態で実験をしていました。このためX線発見の翌年には早くも、X線管の製作に従事していた米国人技術者が皮膚炎にかかりました。また、治療の目的でX線を使っていた医師たちは、患者に皮膚炎が起き、潰瘍までできていることに気がつきました。

ウランの放射能を発見したベクレル博士は、微量のラジウムの入ったガラス管をポケットに入れて持ち歩いたため、腹部の皮膚に紅斑ができました。これを聞いたキュリー夫人が、確かめるために同じ試みをしたところ、腕に紅斑ができました。

夜光時計を作っていた米国の女子工員のラジウム中毒事件は有名です。彼女たちは第一次世界大戦から1924年ごろまで、時計の文字盤にラジウム入りの塗料を塗る仕事をしていました。ところが、筆の先を舐めながら塗っていたのでラジウムが大量に体内に入り、骨の周辺にできる悪性の腫瘍のほかいろいろな障害を起こし、死亡する人まで出てきたのです。このような事件が続いたことも

あって、放射線の生物への影響の研究が始まることになります。

人体に放射線があたると何が起こるか

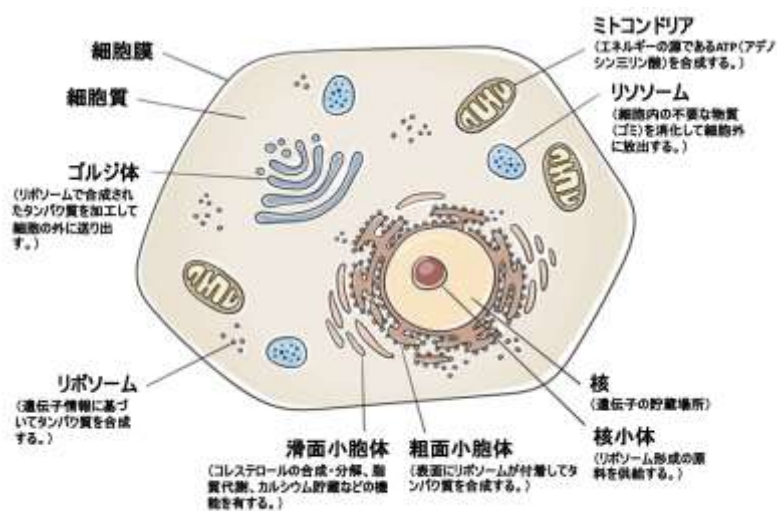
人体に放射線があたった場合の影響について、人体を構成する要素である細胞と、細胞が集まってできている組織・臓器とに分けて話を進めましょう。

人体への影響は放射線の種類や線量によって異なりますが、放射線が自然起源であるか、人工放射線であるかによる違いはありません。

◎細胞への影響

放射線の人体の影響を考えるときには、ヒトの細胞の中で何が起こるかを考える必要があります。私たちの体は小さな細胞の集まりでできている、様々な働きをもつ細胞が組み合わさって大きな塊となり、臓器を作ったり体の構造を作ったりしています。

細胞の大きさは、その直径が6～25μm（マイクロメートル：1メートルの100万分の1）で、これは6mm（ミリメートル）の1000分の1～25mmの1000分の1ほどの大きさで、生物の種類や臓器の種類によって大きさが異なっています。動物の細胞を例にとると、一番外側は細胞膜という膜で覆われています。細胞は細胞膜で覆われた水風船のような構造で、水風船の中は細胞質と呼ばれるゲル状の物質で満たされており、ミトコンドリアやリボソームなど様々な機能を持つ物質が浮かんでいます。さらにこの細胞質の中に、もう一つ、細胞核と呼ばれる小さな水風船が浮かんでいます。ヒトの細胞を絵で表したものが図3-1です。



出典:「Daniela Barreto/Shutterstock.com」から作成

図3-1. ヒトの細胞

細胞核は核膜で覆われており、その中心にあるのが、生物が生きて行くための働きや遺伝をつかさどっているデオキシリボ核酸、つまり DNA と呼ばれる遺伝物質です。細胞核の中はこの DNA の他に、DNA を設計図として合成された RNA 等で満たされています。

私たちの体はたった 1 つの細胞「受精卵」が分裂して増殖していくことで作られています。細胞が増殖のために分裂するときには DNA も複製されます。また、DNA に含まれている遺伝子をもとに、生きていくのに必要な働きをもつタンパク質が合成されます。細胞核の中の DNA は、生物の全ての活動の司令塔なのです。

第 1 章で説明したように、放射線には電離作用があります。放射線が人体にあたると、細胞の中にあるタンパク質や核酸といった物質に電離作用が働きますが、放射線の量が大きく電離作用も多いと、細胞にいろいろな影響が出てきます。次にそのいくつかを例示します。

DNA 損傷

放射線の電離作用は DNA を傷つけ、線量が多いと細胞の死を招きます。アメーバの実験では、150 万グレイの放射線で 5% 生存、250 万グレイで 100% 死亡しました。しかし核を除いた細胞に放射線をあてて、放射線を受けていない核をその細胞に戻してやると、250 万グレイの被ばくでも 100% 生存しました。核の中の DNA は細胞を支配しているため、核が損傷すると細胞は生存できなくなります。

細胞分裂の遅れ

大量の放射線を受けると、電離作用の影響によって細胞分裂は一時的に遅れますが、やがて回復します。ガラス皿で培養しているニワトリの細胞にガンマ線 10 グレイをかけた場合、細胞分裂の回数は低下し、2 時間後に分裂回数がゼロになりましたが、7 時間程度で回復しました。

酵素機能の低下

大量の放射線を受けると、細胞の働きを助けている酵素の機能は電離作用の影響によって低下します。その結果として細胞の機能も低下します。

以上、細胞レベルでみられる主な影響について説明しました。これらの影響により、細胞は生き続けていくのに重要な分裂機能を失って死んでしまうことがあります。また、外見上特別な異常がなくても、放射線によって DNA が傷つけられ、DNA 上の遺伝子に変化（変異）してしまった結果、将来のがんのもととなる場合があります。

とはいえ、生物は放射線と長い間共存していくなかで、がんを防ぐ仕組みも手に入れてきました。その働きのひとつが細胞の自殺「アポトーシス」です。ヒト

の体には DNA がおかしくなった細胞を殺す働きも備わっており、がんの発生を防いでいます。

細胞が放射線によって非常に大きなダメージを受け、そのダメージをがんばっても修復できない場合に、細胞突然変異を起こしてしまうことを避けるために、DNA の指示で細胞自身が分解してしまいます。あたかも細胞が自殺するように見えることから、この働きの発見当初は細胞自殺とも呼ばれました。しかし、細胞はこの働きのおかげで、外部から大きな刺激を受けたときにがんになることから逃れているのです。

次に線量別の細胞への影響を説明します。

①高い線量の放射線が細胞に与える影響

高い線量の放射線を受けると、細胞の中で DNA 構造の変化が起こり、それをきっかけとした DNA 鎖の切断とその修復、その修復から漏れた結果起きる染色体（DNA 鎖がぎっしりと絡み合った状態）の損傷やその回復など、様々なことが起こります。細胞の中で起きる DNA 損傷や染色体の損傷の大半は、細胞が本来持つ機能で元通りに回復します。修復や回復を逃れた DNA 鎖の変化が起こす影響の中で問題となるのは、細胞死と細胞の突然変異です。

高い線量の放射線を被ばくすると、その線量にもよりますが、主に細胞死が起こり、突然変異よりもこちらが大きな影響をもたらします。

細胞という小さな単位で発生するこれらの影響は、人の体の一部や全体へ及ぶと、機能や形態の異常を生じ、病的な症状や徴候を示します。

②低い線量の放射線が細胞に与える影響

低い線量の放射線でも DNA 構造の変化が起こります。ただし、高い線量を与える影響とは様子が変わってきます。低い線量の場合、細胞がもつ修復という回復機能が有効に働きます。修復は、DNA 鎖そのものに生じた損傷の DNA 修復や、DNA 鎖がぎっしりと詰まった、より太い染色体の切断の再結合といった染色体修復など、細胞の様々なレベルで機能します。これらの修復機能は、高線量の放射線に被ばくした場合にも機能しますが、低線量の放射線を浴びたときには、傷の量も多くないので修復する機能が有効かつ正確に働き、DNA や染色体に生じた損傷の殆どがきれいに回復します。そのため、高い線量に比べて低い線量を浴びた細胞は、細胞死に至ることなく生き続ける可能性が格段に高まります。

ちなみに DNA への損傷は放射線以外の様々な環境要因によっても起きることが知られています。紫外線や食品、そして普段われわれが普通に行っている呼吸によっても活性酸素が生み出され、DNA 損傷の原因となります。しか

しながら、これらは生物の細胞が持つ修復機能によって回復すると考えられます。

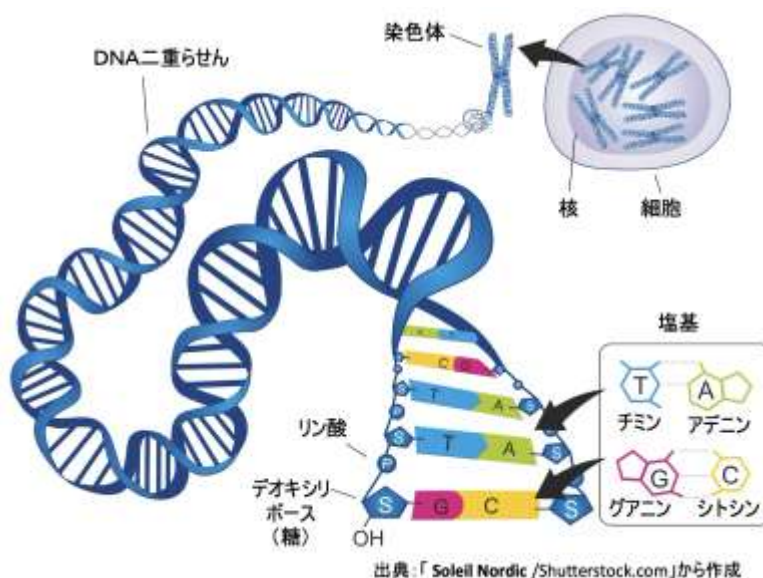
その一方で、修復機能がうまく働かない場合もあります。この場合、DNAの損傷が正しく修復されず、かといって細胞は死なないままです。不正確に修復された誤った配列をもつ遺伝子を持ったまま細胞が生き延びて分裂を続けていくことになります。このような細胞に生じた異常を「細胞の突然変異」と呼びます。この細胞の突然変異が、後のがんの原因となるのです。細胞が死ぬことは個々の細胞にとって大変なことです、突然変異を持ったまま分裂し続けることは、人間など生物にとって大きな問題となります。

細胞に突然変異が起きる場合、どの細胞に突然変異が起きるのかも重要な点です。これからどんどん細胞分裂し数を増やし、生物の持つ様々な臓器・組織に特有な細胞に変化していく元となる細胞（幹細胞と呼びます）に突然変異が起きると、将来、がんになりやすく、すでに分化を終えた細胞に突然変異が起きてもがんになる可能性は低いと考えられています。幹細胞は他の細胞と同様に複数の細胞集団として存在しており、そこで増殖し新陳代謝を行っていきます。そのような幹細胞に低い線量の放射線が当たった場合、放射線が当たった幹細胞と当たらなかった幹細胞が混じって存在することになり、放射線が当たった幹細胞も新陳代謝によって薄まっていくと考えられます。このことが低線量の放射線が高線量の放射線と比べて発がんのリスクが低い理由の1つと考えられています。

コラム⑦ DNAと遺伝子の関係

遺伝子を形成しているのが、デオキシリボ核酸という化学物質です。ふつうは英語のかしら文字をとって DNA と呼んでいます。

図に示すように DNA は2本の長い鎖(図では青いリボン)がはしご状にねじれあった二重鎖で、それぞれの鎖はデオキシリボース(5つの炭素からなる環状の糖)にリン酸(これが糖どうしを繋ぐ糊の役目をします)がついた基本単位が長く繋がった形をしています。そして、この2本の鎖の間を塩基という化学物質が向かい合って水素結合でつながることで二重鎖を形作っています。塩基にはアデニン(A)、チミン(T)、グアニン(G)、シトシン(C)の4種類があり、2本の鎖は A-T、あるいは G-C の水素結合で互いに結びついています。



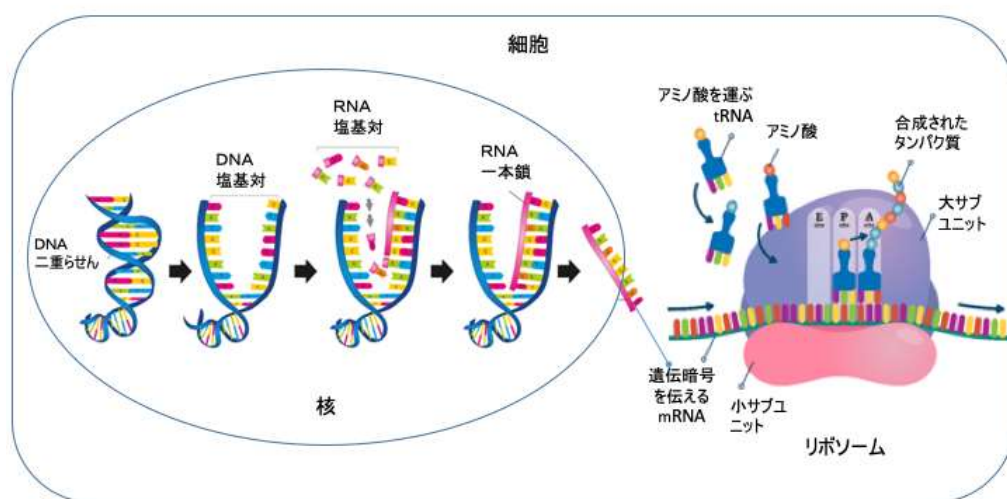
DNA の分子構造

DNA の中には「遺伝子」と呼ばれる短い配列が存在しています。遺伝というと親が子に似ることを一般的にはイメージしますが、DNA 上に存在している無数の遺伝子の1つ1つの役割は、タンパク質の設計図です。タンパク質は、生物のふだんの活動全てに関わっています。生体内の化学反応や、細胞の増殖、修復や免疫機能などの働きをもつ無数のタンパク質が無数の遺伝子によって生産され、それぞれが機能することで、私たちは生きることができます。

放射線によって DNA が傷つけられると、遺伝子も変異してしまい、正しいタンパク質が作られなくなり、それががん細胞を生み出したり、体の不調を起こしたりすることにつながる可能性が考えられるのです。

タンパク質は人間の体を形作っている重要な要素であるのはもちろんですが、体内で時々刻々進んでいる各種の反応や遺伝子の働きをコントロールする役割も果たしています。生体内の化学反応を促進する「酵素」もタンパク質をもとに構成されているものですし、いろいろなホルモンも大部分はタンパク質です。細胞の増殖の開始と停止、分化、老化、修復、発がん、その他すべての生物の働きが、タンパク質という道具の働きによって制御されています。

これが遺伝情報のことを生命の設計図という理由です。



出典:「Soleil Nordic / VectorMine / Shutterstock.com」から作成

タンパク質の合成

ノーベル賞を受賞した米国の分子生物学者ジェームズ・ワトソンと英国の科学者フランシス・クリックがDNAの構造を明らかにしたのは1953年のことですが、この重要な発見の後、ほぼ半世紀を経た1980年代以降になって、分子生物学という研究手法が飛躍的に発展し、様々なタンパク質の様々な働きが明らかにされていきました。

◎人体への影響

放射線を受けた場合の人体への影響は、大きく2つに分けられます。1つは放射線を受けた人の体に出る「身体的影響」であり、もう1つはその人の子孫にあらわれるかもしれない「遺伝的影響」です。後者は生殖細胞（精子と卵子）が被ばくした場合に起こります。身体的影響もまた、2つに分けられます。放射線を受けて数週間以内に症状が出る「急性障害」と、数カ月から数年後になって症状が出てくる「晩発障害」です。なお人が生まれる前の、つまり母親の胎内での被

ばくによる影響も身体的影響の1つであり、胎児の場合にも急性障害と晩発障害があります。

こうした影響は、受けた放射線の種類や量や、全身に受けたのか体のごく一部に受けたのかによって、異なります。急性障害の例では、全身に一度に1,000ミリグレイ程度の放射線を受けると、吐き気がしたり吐いたりします。また全身がだるい感じがします。一度に4,000ミリグレイ程度を全身に受けると、全く治療がなされない場合には受けた人の半数が死んでしまいます。晩発障害は、放射線を受けてからある程度時間が経過した後に症状が出るものですが、この症状が出るまでの期間を潜伏期といいます。広島・長崎の被爆者の調査結果でみると、例えば眼に5,000ミリグレイ程度受けると、数カ月から数年後に白内障になる人が出てきます。がんも晩発障害の1つで、潜伏期があります。

次に遺伝的影響ですが、精子や卵子の遺伝子が放射線によって変化してそれが子や孫に伝えられると、障害をもつ子ができる可能性があります。そのようなことが起きるのは、ショウジョウバエやマウスを使った動物実験では確かめられていますが、人間の場合、広島・長崎の原爆被爆者の調査をはじめ、そのほかの調査でも遺伝的影響は認められていません。がんや遺伝的影響、胎児への影響については、第7章でそれぞれ詳しく紹介します。

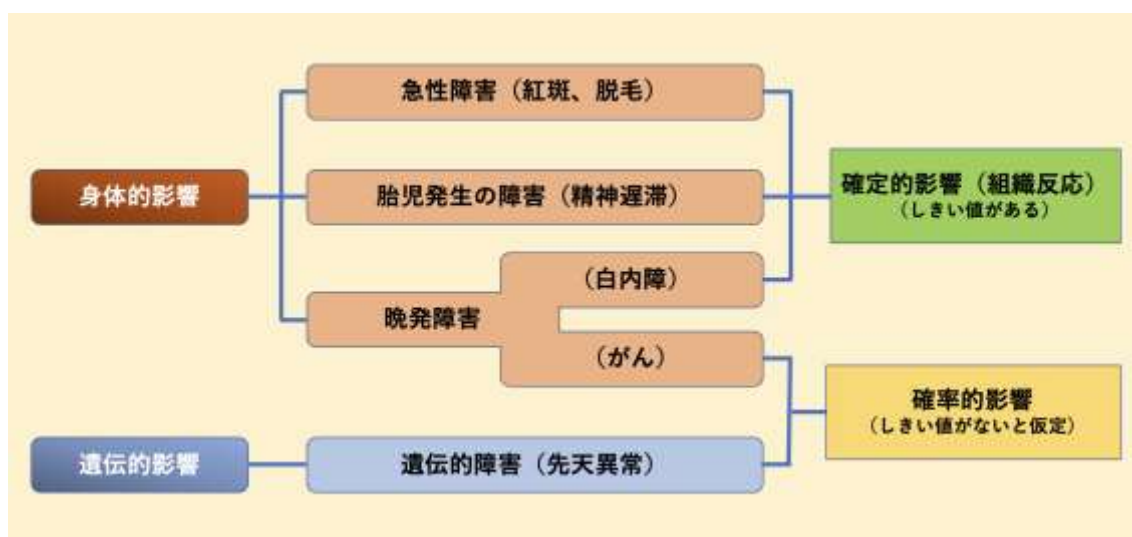


図3-2. 放射線の人体への影響

それでは線量別に人体への影響を見てみましょう。

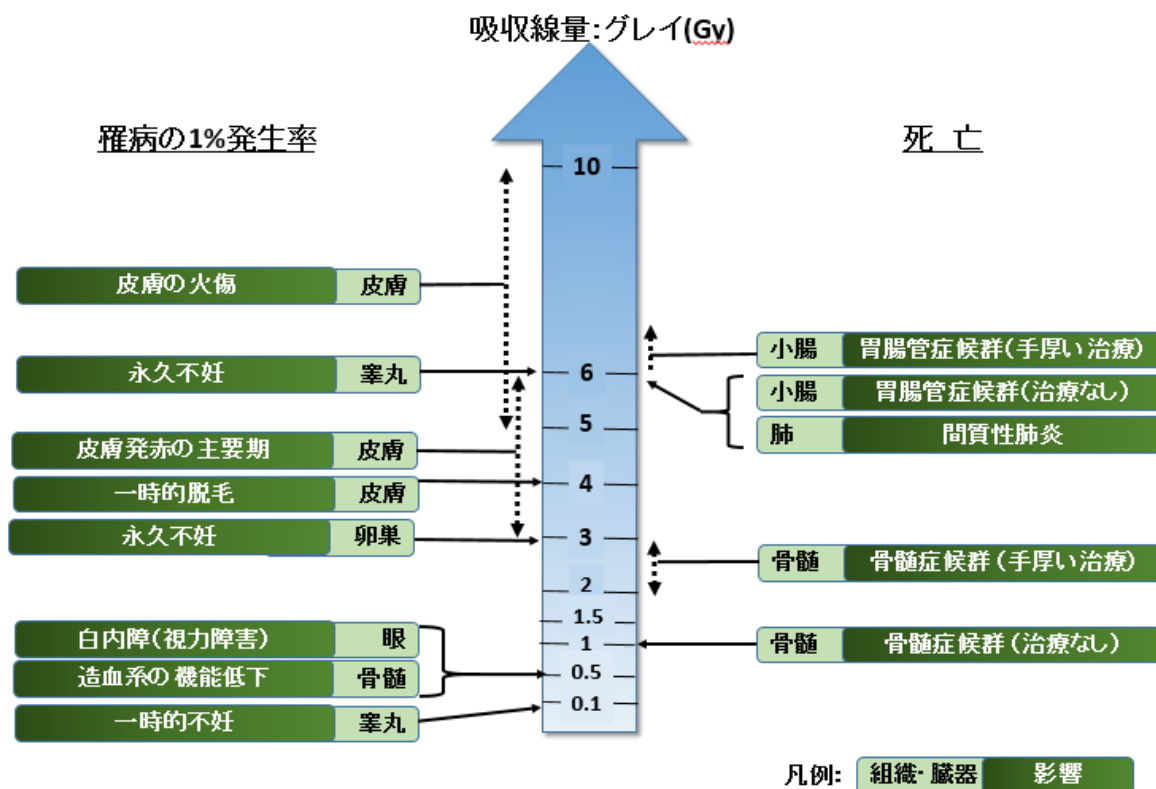
①高い線量の放射線が人体に与える影響

細胞死がある程度以上起ると、細胞の塊から出来ている臓器や組織は本来の機能を失います。例えば眼の水晶体を構成する細胞がその機能を失

うと水晶体の混濁や白内障となり、生殖に関わる精原細胞がその機能を失うと不妊が起こります。これ以外にも血液中のリンパ球の減少や脱毛、心筋梗塞などの循環器系の疾患など、本来の機能が損なわれるという影響が現れます。これらの影響は主に高い線量の放射線を浴びると現れます。

細胞の突然変異も起きますが、高い線量の放射線を浴びると、細胞死によって細胞自体がなくなってしまう。しかしながら、細胞死を逃れた細胞が突然変異の修復がなされないまま増殖すると、正常にコントロールされない臓器や生体組織が作られてしまいます。例えば、不完全な白血球が次々と生産される白血病や、本来あるべきでない所に大きな細胞の塊が出来るがん（癌）などがこれに相当します。

また、これらの目に見える影響の陰に隠れてしまいがちですが、将来的にがんが発生する可能性も生じてきます。



出典: ICRP 2007 年勧告 表 A.3.4 参考¹ 及び ICRP Publication 118 参考² から作成

図 3-3. 高い線量の放射線を一度に浴びた場合の影響

②低い線量の放射線が人体に与える影響

では低い線量の放射線が人体に当たるとどのような影響が生じるのでしょうか？ ここでいう人体に対する低い線量とは、100 ミリシーベルト以下の

線量を言います。高い線量を被ばくした時と違って、すぐさま目に見える症状が現れることはありません。さらに、低い線量の放射線を浴びた際に現れる症状は、高線量の放射線を浴びたときと異なり、被ばく直後に症状が現れず、何年、何十年も経ってから現れます。このため、低い線量を浴びた時に出る人体への影響を示すのはなかなか難しいとされます。最も知られている影響は発がんですが、発がんは加齢によっても現れる病気ですから、放射線の影響と区別することが困難です。このように、低線量の放射線を浴びた結果として生じる人体への影響は、被ばくに特有な特徴を持たないためやっかいです。

今のところ、低線量放射線によって人体に現れる影響としては発がんの他に血液のがんである白血病が知られています。国連科学委員会はその報告書で低線量でも高線量でも人での遺伝的影響の発生は明らかにされていないと報告しています^{参考3}。

確定的影響（組織反応）と確率的影響の違い

放射線の人体への影響については、「確定的影響」と「確率的影響」という2つの分け方もできます。

まず、「確定的影響」というのは、低線量の放射線では影響のないことがはっきりしているもので、ある線量以上になると影響が出る現象をいいます。これは、たくさんの細胞が放射線によって損傷を受けた場合に起き、毛が抜けたり、妊娠しにくくなったり、白内障になるといった障害や心筋梗塞などの循環器系の疾患があります。確定的影響では、受ける線量が多くなるにしたがって症状が重くなります。

確定的影響という呼び方は、最初に放射線が当たった時に生じた現象の程度で、最終的な結果が決定されるという意味でした。しかし、その後、身体の応答によって、また、外部からの投薬による治療等によって結果の現れ方が変わることがわかってきたため、適切な呼び方ではないと考えられるようになりました。現在では「組織反応」という呼び方に置き換えられつつあります。

一方、「確率的影響」というのは、必ず影響が出るわけではなく、受ける線量が多くなるほど影響の出る確率が高まる場合を指します。放射線影響のうち、がんや遺伝的障害がこれに該当するとされています。がんや遺伝的障害の発生メカニズムについては、様々な研究が進められていますが、いまだにはっきりとは分かっていません。しかしながら、放射線によって変化した1個の細胞でも一定の段階を経ればがんなどになる可能性があると考えられています。この考え方によれば、線量に応じてそれなりの影響があることになり、確率的影響として

分類されているわけです。

これらの影響は確定的影響とは異なり、線量が多いからといって症状が重くなるという性質のものではありません。ただ線量が増加するのに応じて影響の出る確率が高くなります。

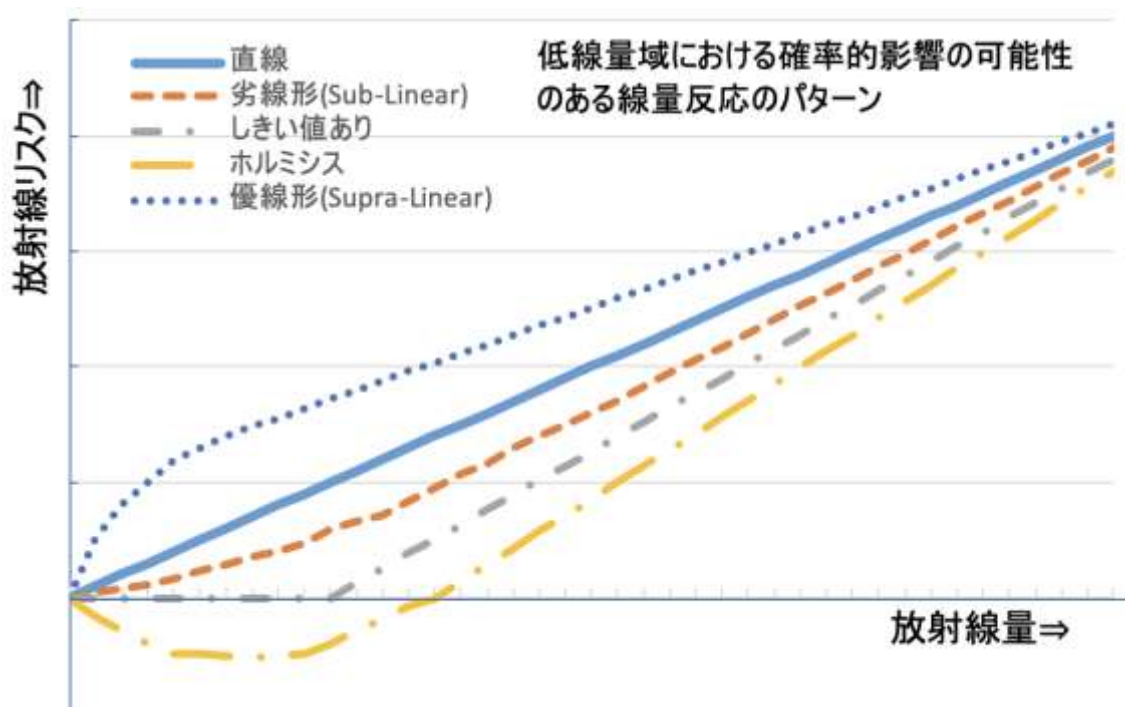
しきい値（しきい線量）はあるのか

まず、しきい値とはどういうものなのかを説明します。

しきい値とは、ある大きさの作用を与えた結果、反応を引き起こすか起こさないかの境の大きさ（値）のことをいいます。

確定的影響（組織反応）については前に述べたとおり、ある線量以上にならないと影響が出ないので、しきい値が存在することになります。

低線量領域での確率的影響の線量反応関係については諸説あって、今のところはっきりしていませんが（図 3-4）、放射線から人を守るための基準、つまり放射線防護の基準を検討している国際放射線防護委員会（ICRP）では、人が受ける放射線の線量はできるだけ少なくしておく方がより安全であるという立場から、現在のところはしきい値がないとして、つまりどんなに低い線量でもそれなりの影響があると仮定して、放射線防護の基準を決めています。なお、原爆を受けた人たちの調査などからも、人間では 100 ミリシーベルト以下のような低い線量では、がんによる死亡者がよけいに発生したという明確な結果は出ていません。



直線モデル

低線量放射線域においても高線量域と同様、被ばく線量に応じて直線的に比例して影響が生じると仮定したモデル

劣線形モデル

低線量域ではしきい値なし直線モデルよりも影響が小さいと仮定したモデル

しきい値あり直線モデル

被ばく線量に応じて直線的に比例して影響が生じるが、しきい値があると仮定したモデル

ホルミシスモデル

低線量域においてホルミシス効果が働き、健康に良い影響がでると仮定したモデル

優線形モデル

低線量域ではしきい値なし直線モデルよりも影響が大きいと仮定したモデル

出典：「放射線防護に用いられる直線しきい値なし(LNT)モデル
：NCRP 最新知見」参考4から作成

図3-4. 低線量放射線の確率的影響の可能性のある線量反応曲線

コラム⑧ 高い線量・低い線量

生物が放射線を受けたときの影響は、放射線の量によって違ってきます。

では、高い線量、低い線量の区別はどのように判断されるのでしょうか？

2016年に国際連合の下部機関である国連環境計画が、UNSCEAR(原子放射線の影響に関する国連科学委員会)の協力を得て放射線の線量と影響を分かりやすく解説して「放射線 影響と線源」として公表しました^{参考 5}。その中で、放射線の低線量から高線量までの線量の幅について、下表のように整理しています。

UNSCEAR で用いられる線量バンド		
高線量	約 1 グレイ以上 (約 1 シーベルト以上)	深刻な放射線事故(例えば、チェルノブイリ事故における消防士)
中線量	約 100 ミリグレイ～1 グレイ (約 100 ミリシーベルト～1 シーベルト)	チェルノブイリ事故後の 復旧作業
低線量	約 10～100 ミリグレイ (約 10～100 ミリシーベルト)	複数回にわたる コンピュータ断層撮影(CT)検査
非常に 低い線量	約 10 ミリグレイ未満 (約 10 ミリシーベルト未満)	単純 X 線検査(CT を伴わない)

(カッコ内は、本書のために X 線、ガンマ線被ばくを想定してグレイ単位をシーベルト単位に置き換えたものです)。

一方で、一般の人々が、事故でもなく、医学上の検査でもない、普段の生活や仕事上で受ける放射線の線量はこの表よりもさらに低い線量で、第 2 章で説明したように、年間数ミリシーベルトです。

放射線の作用や影響に関するさまざまな新しい発見

放射線が人体に影響をもたらす一番の原因は、先に説明したように DNA の損傷ですが、人体を構成している細胞は DNA だけで成り立っているわけではありません。遺伝子という設計図に基づいて合成されたタンパク質(その中でも、特別の働きをもつタンパク質は酵素と呼ばれます)は、放射線の影響に様々な形で関わっていることが分かっています。

昔は体に症状が現れるまで放射線の影響を知ることができませんでした。が、科学技術が発達した現在では、放射線の影響を遺伝子やタンパク質のレベルで調べることが出来るようになりました。

このように詳細に調べることができるようになったことで、死亡や発がんといった「人とその集団の病状」でしか把握できなかった放射線の影響だけでなく、その背景にある「メカニズム」についても新たな知見が増えつつあります。

コラム⑨ DNA レベルでわかってきた放射線の影響

従来、生体への影響は放射線が細胞の中の DNA を傷つけることで起こると考えられてきましたが、生命科学の研究が進み実験技法も開発されることで、新たにわかってきた影響の仕組みを以下に解説します。

○適応応答

適応応答は培養細胞や動物を用いた実験から明らかとなった現象です。予め放射線や化学物質などに少しだけばく露させておくと、その後に大量にばく露させた際の影響が弱くなる、という現象です。例えば、100 の影響を生じるはずが、事前の少量のばく露によって 90 や 80 になるという現象です。

○放射線ホルミシス

適応応答によく似た現象として放射線ホルミシスという現象があります。これは顕著な影響をもたらさない量の放射線を与えると、体のいくつかの働きが活性化され、より健康になったように映る現象です。これらの現象は、放射線は体に悪いという従来のイメージをくつがえすことから注目を浴びました。

○バイスタンダー効果

バイスタンダー効果は、周囲の細胞に放射線があたらないように工夫してその真ん中にある1つの細胞に放射線を照射すると、放射線があたっていない周囲の細胞にも放射線があたったのと同じような影響が現れてくる、という現象です。これは、放射線が細胞内の DNA を損傷することで影響が現れる、という古くからの考え方だけでは説明が出来ない現象でした。その後の様々な実験研究によって、放射線の影響は必ずしも DNA の傷だけがきっかけとなるのではないことが明らかにされています。

○ゲノム不安定性

DNA というのは物質名ですが、DNA にしまわれている情報のセットをゲノムといいます。ゲノム不安定性は、細胞に放射線を照射し、その細胞を長い期間培養した後に影響が出てくる現象で、放射線の晩発影響の仕組みと関連づけられて研究が進められています。

参考資料（第3章）

- 参考 1. 国際放射線防護委員会、「国際放射線防護委員会の 2007 年勧告」、ICRP Publication 103
- 参考 2. 国際放射線防護委員会、「組織反応に関する ICRP 声明 正常な組織・臓器における放射線の早期影響と晩発影響 –放射線防護の視点から見た組織反応のしきい線量–」、ICRP Publication 118
- 参考 3. 原子放射線の影響に関する国連科学委員会、「UNSCEAR2010 年 報告書」[日本語]
- 参考 4. ジョン・D・ボイス二世、他、「総説 放射線防護に用いられる直線しきい値なし（LNT）モデル：NCRP 最新知見」、Isotope News 2018 年 4 月号 No.756
- 参考 5. 国連環境計画、「放射線 影響と線源」、2017 年 11 月