

福島県浜通り地区環境放射線研修

放射線の生物影響とそのメカニズム

—放射線による健康影響はどのようなしくみで起こるのか—

大阪大学 核物理研究センター

放射線科学基盤機構・医学系研究科未来医療イメージングセンター

中島裕夫

はじめに

放射線は怖いもののベスト5にいつも挙げられます。しかし、一方で医療のみならず色々な分野で利用されており、私たちの生活には欠かせないものになっています。放射線はなぜ怖いのでしょうか。放射線にあたると人のからだの中ではどのような事が起こるのか。そしてどれくらいの放射線をあびるとそれは起こるのか。また、その後、からだはもとに戻れるのか。色々考えると怖さだけが増します。広島、長崎の原爆被爆そして第五福竜丸事件以来、一般大衆のみならず教育研究分野でも徐々にうすれかけていた放射線への関心と恐怖が福島第一原発事故以来再び強くなりました。

正しく怖がるとは？

物理学者である寺田寅彦は、随筆「小爆発二件」のなかで「ものをこわがらなさ過ぎたり、こわがり過ぎたりするのはやさしいが、正當にこわがることはなかなかむづかしいことだ」と書いています。正當に怖がるには、それなりの知識が必要で難しいことなのです。

この講義では、放射線の人体影響とはどのようなものか、体の中には放射線の影響から身を守る仕組みがあるのか、そして、法律で決められている、あびてもよい放射線量が人体影響を起こす線量とどのような関係なのか、このような基礎的なところを、正しく怖がるための一助になるように解り易く解説したいと思っています。

日本人の放射線に対する感情はどこから来たのか

日本は世界唯一の原爆被爆国です。さらに1954年の第五福竜丸事件が続き、多くの放射線被曝障害を目の当たりにしたために日本人は放射線に対

して強いアレルギーを持つことになりました。そして、放射線を世界一怖がる民族になったために、放射線被曝に関するニュースにはとても敏感で、過剰な恐怖心や嫌悪感をいだいたりしています。放射線は確かに危ないものです。しかし、少なくとも放射線の発見が医学に劇的な進歩をもたらせたことは言うまでもなく、今後も、放射線なしの医療は考えられないことも明らかです。だからこそ、放射線を扱う時に、まず、考慮しなければならないことは“放射線は、どこからが危なく、どこまではそれほど怖がる必要がないのか”ということを理解して正しく怖がらねばならないという事です。世界一放射線を怖がる日本人ですが、世界一医療被曝線量が多い国でもあるのです。そして世界一平均寿命が長いのも日本人なのです。

原爆とは何であったか

原爆の発したエネルギーは多大なものでしたが、ほとんどが爆風(50%)と熱線(35%)で、放射線は総エネルギーの15%ほどでした。原爆で亡くなった殆どの人々は爆風と熱線が原因でした。しかし、放射線の脅威が強調されているのは、生存した被爆者のいろいろな放射線障害を長年にわたって人々が見てきたこと、語り継がれたことが大きく影響しています。この不幸な広島・長崎の原爆被曝データが、現在の世界で放射線防護の法律を設定する時の最も重要な基礎データになっています。

微量の放射線影響についてなぜ研究するのか

さて、この原爆データを基にしますと、人では、全身に4000 mGy(ミリグレイ:医療で使うX、γ線、電子線では、mSv ミリシーベルトと同じと考えてよい)の放射線を被曝すると60日以内に半数の人

が死亡します。これを半致死線量 ($LD_{50/60}$) と言います。一方、人は、太古の昔から自然界の放射線に一年間で 2.1 mSv (これは現在の日本国内平均で、世界平均は 2.4mSv) 被曝しています。この自然界からの被曝線量は人にとって避けられないものなので、放射線被曝を考える時の許容の基準 (まあ、しょうがないね。ご先祖様から浴びていたので心配ない線量) となります。では、医療での被曝はどれくらいでしょうか。先進国の成人被曝平均ですと胸部直接撮影 (病院で撮る大判の X 線写真) で 0.06~0.15 mSv、胃透視 (胃がん検診でバリウムを飲むとき) で平均 3.6 mSv、CT で平均 8.8 mSv です。胸部撮影では、1 回 0.15mSv とすると一度に 27000 枚ほど撮影しないと半致死線量には達しません。しかし一生の内でもこれほど写真を撮る事はあり得ません。従って、通常の診断のための放射線被曝では、半致死量に達することはありません。

放射線影響には2つの異なったタイプがある

ではなぜ、医療従事者を含め、原発からのちょっとした放射能漏れなどでも放射線被曝が危惧されているのでしょうか。また、放射線従事者は年間被曝線量が 50 mSv を超えない、5年間の合計が 100 mSv 以下になる環境で仕事をさせなければならないという線量限度の法律が有るのでしょうか。ここに、放射線被曝の難しい問題があります。それは、「放射線の線量に比例して重傷度が増加する被曝障害 (確定的影響)」と、「障害の起こる可能性が確率的である」と考えられている癌や遺伝性影響 (確率的影響) という異なるタイプの被曝障害があるという点です。まさに、コーヒーなどの購入で集めた点数で景品をもらうこと (前者のタイプ) と、宝くじを買うこと (後者のタイプ) のちがいのようなものです。点数景品では収集点数が目的点数に達しなければ景品をもらうことができません。一方、宝くじでは、たくさん購入すればそれだけ当選する確率 (期待値) は上がるわけですが、1枚だけの購入でも当たる可能性があるということです。

1) 確定的影響

放射線被曝が少ないと発症しない確定的影響 (宿酔、皮膚紅斑・潰瘍、脱毛、不妊、白内障、線維症など) では、被曝線量を 1000mSv 以下に下げることによって障害が出ないようにすることができます。福島原発事故の報道時によく言われた、直ちに影

響が出ないとされる障害とはこのことです。

2) 確率的影響

しかし、少しでも被曝すれば発症する確率が増えるという確率的影響 (癌、遺伝性影響) では、いくら被曝線量を下げても発症の可能性が消えません。この確率的影響の問題が、放射線防護を複雑にしているのです。皮肉な事に微量線量であればあるほど、癌や子孫への遺伝的影響だけが放射線による影響の主体となっているのです。ですから、原発や医療従事者に対して被曝線量を制限する法律が制定されているのです。さらに最近では、国際線パイロットや CA、ますます増えると考えられる宇宙空間での作業員も新たな被曝線量を考えなければならない対象とされつつあるのです。ちなみに、成田とニューヨークの往復フライト 1 回で約 0.2mSv、国際宇宙ステーション (ISS) の 1 日で約 1mSv の宇宙からの放射線に被曝します。ですから、日本人初の船長である若田光一さんは、半年の ISS 滞在中に 180mSv 被曝したことになります。

放射線被曝から生命を守る能力 (修復能力)

ただ、人間の体には、放射線によって傷ついた遺伝子を修復する機能、死んだ細胞を補う細胞増殖、がん化した細胞を排除する機能、放射線の作用を減らすために備える機能など放射線による損傷に対する適応応答のための機構が生まれながらちゃんと備わっているのです。ですから、人体は、放射線に対して決して無防備ではないのです。

放射線被曝による人体影響とは?

1) 放射線の仕事

ヒトを半数死亡させる放射線量である 4000 mGy のエネルギーは、熱エネルギーに換算すると体重 70 kg 当たりに対してたったの 67 カロリーの付与なのです (ホットコーヒー 1 口分の熱エネルギーに相当)。このような小さなエネルギーでなぜヒトが死に至らしめられるのでしょうか。放射線の仕事は、主に光子 (X、 γ 線)、電子 (β 線)、水素原子核 (陽子線)、ヘリウム原子核 (α 線) などが、非常に速いスピードで細胞内を通り過ぎて、細胞内の水を電離 (イオン化) させるだけなのです。この水の電離作用がきっかけとなり、いろいろな化学反応が連鎖的に続くことで生成した活性酸素などによって遺伝情報がある DNA が切断されます。

2) 体内で増幅される影響

そして、このような分子レベルでの影響は、細胞レベルから臓器レベル、個体レベルへとドミノ倒しのように増幅されていきます（この時にはもう放射線は存在しません）。簡単にいうと、放射線によって活性酸素が作られ、DNAが切断されます。その切断が元通り修復されれば何も起こりません。しかし、線量が多くて修復できないくらいひどく、遺伝情報が壊れると、細胞死が起こり、その細胞数が多ければ、臓器死が起こります。その臓器が生きるために重要な臓器であれば、ヒトが死亡することになるのです。また、切断した遺伝子の修復を間違えると、遺伝子突然変異の原因となり、発がんや遺伝性影響の原因となります（但し、ヒトでは、これまでに原爆や小児がん治療での放射線被曝による次世代での遺伝性影響は確認されていません）。

3) 少ないエネルギーでヒトが死ぬわけ

ヒトを半数死亡させる放射線エネルギーは、熱エネルギーに換算すると非常に小さいですが、前述の一連の生物反応を起こすきっかけとなる物理、化学反応を引き起こすには充分な量なのです。

放射線被曝に安全なしき値はあるのか？

さて、放射線被曝による人体への影響については、どのくらいの線量以下が安全なのでしょう。それとも安全な線量は存在しないのでしょうか。また、被曝線量が同じでも放射線をドバツとあびるのと、ジワジワあびるのとではジワジワあびる方が障害は半分に減るとされていますが、正確にはどれくらいまで軽減されるかといった低線量・低線量率放射線被曝の人体への影響について現在も世界中で熱く論議されています。

身近な低線量被曝とは？

低線量被曝を最も身近に感じるのは放射線診断の時だと思しますので、医療被曝について例をあげてみます。図に示しますように、放射線技師や医師は放射線防護の最適化ということで ALARA (As Low As Reasonably Achievable) の原則に則り、診断に見合った画質の選択や被検者の体型などを考慮して、被曝線量をできる限り減らすために努力しなければなりません。しかし一方で、やや多く放射線を被曝してしまった被検者に対しては、心配ないということを説明しなくてはなりません。

放射線技師・医師のジレンマ

どれだけの線量から危険か？



ALARAの原則

As low as reasonably achievable

- 1 不必要な被曝は決して行わない
- 2 経済的に社会的に受け入れられる方法で、合理的に達成できる限り低く

これは放射線技師や医師のジレンマです。もし、放射線の生物影響にしきい値が存在するのでしたらこのよ

うなジレンマは生じないわけですが、残念な事に現在までの研究結果では低線量における無作用となるしきい値が本当に存在するのかわかっていません。

しきい値の存否が不明でも法律を作るのは

現在の科学では詳細な事はわかっていませんが、放射線の安全管理のためには、これ以上は危ないのでだめとする「リスクを許容できない」、「できる」を仕切る線量限度という法律が必要です。そこで、現在の法律では、持ちうる全ての知識を基に安全を見越し、わからないながらも考えられる条件の中でもっとも厳しい直線モデル（被曝放射線量が増えるにしたがって影響も比例して直線的に増えるだろうとする考え方）を採用して“線量限度”を決めています。ただ、Lモデルが法律の基本ということは、自然放射線や診療放射線などのような極微量の放射線でさえも被曝すれば将来に癌になるかもしれない可能性を否定できないことになり、皆さんにとっては心配の種になります。

放射線研究の難しさ

さらに厄介な事に、癌や遺伝的な疾患が放射線とは無関係に自然にも発生していることです。そのために発症原因を放射線だと特定する事はとても困難なのです。高線量被曝でしたら放射線誘発癌の発生頻度は明らかに自然発生率より多くなりますが、低線量になると、発生頻度が少なくなり、放射線誘発癌と自然発癌の2つの発生率を統計学的に区別することがとても難しくなるのです。

また、放射線障害には症状が出るまでの時間（潜伏期）のちがいによる分類もあります。それは、症

状が出るまでの期間が 3 カ月以内の急性障害（宿酔、皮膚紅斑・潰瘍、脱毛など）と、6 カ月から1 年以上経過しないと出ない晩発障害（白内障、線維症、癌、遺伝的影響など）です。そして、癌などは発症するまでに長い時間を要することから、それまでの間の他の影響（喫煙、生活習慣など）も考えなければなりません。従って、実際にこの研究をすることはとても大変なことなのです。

生涯累積線量 100mSv とは何なのか

現段階では、100 mSv 以下の被曝によって癌や遺伝的影響の発症率が自然発生率を上回るというリスクの科学的な証明ができていません。そこで、起こってしまった福島原発事故によって避けられない汚染環境の生活でも新たに上乗せ量としての生涯総被曝線量は 100 mSv を超えないようにしようと設定されました。しかし、これは、当面の目安となる許容値で汚染地の環境放射能が低くなれば、さらに許容値は下げられることでしょう。100mSv とは安全な線量という意味ではなく、現在の汚染状況や諸事情と合意されている科学的根拠を考慮した上で、現在においてでき得る限り低く設定した許容値で、これを超えないように食品や水などの流通管理をしましょうということなのです。幸いなことに現在流通している食品や水の汚染はほとんどありませんので国民の福島原発事故による生涯被曝線量の上乗せは 100 mSv よりはるかに低くなることが予想されます。

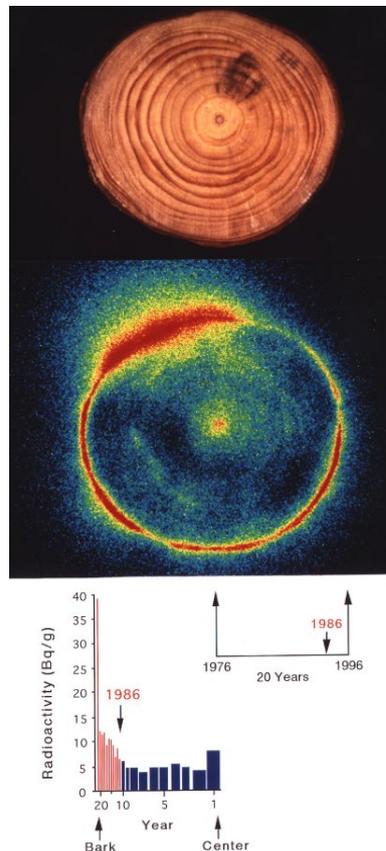
本講義では、このような話の他にチェルノブイリや福島県での調査の様子や得られた結果についても少し紹介いたします。また、堅い話だけではなく、原子力発電所を一つも持たない国であるにもかかわらず隣国（ウクライナ）の原発事故で国土の 3 分の 1 を汚染されたベラルーシでのことなども



少し紹介したいと考えています。

挿入図の解説

先頭頁左図：チェルノブイリ原発事故によって高濃度放射能汚染したベラルーシのマサニ村地に生育していたシラカバ類の葉（1997 年採取）（葉脈に最も強い放射能がみられる）



左図：1996 年のベラルーシ高濃度放射能汚染地域に生育していた松におけるセシウム 137 の分布。放射能は 1986 年の年輪上ではなく採集時に増殖していた樹皮（Bark）に多く存在していた（Nakajima, H. et al. Health Physics 74, 265-267, 1998 より）。福島県の汚染地で伐採された汚染建材でもこの松と同じと考えられ樹皮部

位を削るだけで除染できることが予想できる。

下図：チェルノブイリ原発事故 11 年後の高濃度放射能汚染地域に生育していた柏の葉と福島原発事故後 78 日のスイバ（福島市）、109 日の笹（飯館村）の放射能汚染状況の比較。ベラルーシの葉には葉脈内に吸収されたセシウム 137 のみ認められるが、福島原発事故後に採取した他の 2 つの葉には放射性降下物が付着した点状の汚染と葉脈中の汚染の両方が認められる（中島裕夫 他、現代科学 2012 年 1 月号 34-37 ページ）。

