

放射線、その人体影響と防護

京都大学放射線生物研究センター 准教授 小林 純也

京都大学放射線生物研究センターの小林です。今日は東北大震災の福島原発事故について、放射線の人体影響と防護の観点でお話しさせていただきます。

今日お話しする内容は、放射線になじみのない一般の方が多いと思いますので、最初に放射線に関する簡単な用語・基礎知識を紹介し、2番目に本日のメインのお話しの、放射線の人体影響について、最後に福島原発の事故と関連した放射線の防護について5分程度お話しさせていただきます。

まず、福島原発事故から今日まで、連日「放射線」という言葉を頻繁に聞かれると思いますが、厳密に言いますと放射線ではなく、「電離放射線」という言い方が科学的に正しい用語になります。電離放射線とは、言葉通り、電離作用を持つ放射線という意味になります。原子は、原子核と軌道電子から出来ており、電子の近くを電離放射線が通りますと軌道電子をはじき飛ばします。そういう能力を持った粒子の流れが電離放射線と定義されています。本日は、一般的に使われる「放射線」を電離放射線と同義で使わせていただきます。また、「放射能」もよく聞く言葉で、様々な定義付けがあるのですが、一般的には原子の電離放射線を放出する能力のことをといます。

電離放射線には二種類、電磁波放射線と粒子放射線があります。電磁波放射線の実体は光子なのですが、波動をもった光子の流れ、高エネルギーをもった光子の流れで、これにはガンマ線とエックス線が含まれます。多くの場合、ヨウ素131、セシウム137等放射性同位元素から自然に出てくるのがガンマ線で、エックス線の方は人工的に装置で発生させることができます。エックス線は医療においてレントゲンやCT スキャンに使われていることで有名です。

一方の粒子放射線ですが、人工的に発生させる物を含めると数多いのですが、一般的な放射線物質（放射線同位元素）から自然に発せられる物では、 α 線、 β 線、中性子線があります。 α 線は陽子2個、中性子2個が組み合わさった粒子です。 β 線は、電子粒子の流れであり、中性子線というのは中性子そのものの流れで、ウラン235の核分裂で主に発せられることで知られています。

もう一枚、用語の定義について紹介しますが、放射線を出すもの（元素）は厳密には放射性同位体あるいは放射性同位元素といます。それぞれの元素にはいくつかの同位体があり、そのうち放射線を出すのが放射性同位体です。水素原子で説明しますと、陽子が1個の水素原子、陽子と中性子が1個の、2個の原子を持つ水素原子、トリチウムとよばれる陽子一個に対して中性子が2個持つものの、三種類の同位体があり、この中でトリチウム ^3H というものだけが、 β 線と

いう放射線を出しますので、放射性同位体と言います。通常は放射性同位体より放射性同位元素という言葉を使うことが一般的です。

放射性同位体は非常に不安定な性質を持っていますので、放射線を出しながらだんだん壊れていき、安定な原子状態に変化していきます。それを放射性崩壊と言います。どのように放射性崩壊していくか、崩壊に要する時間は元素ごとに決まっています。このように崩壊の時間が核種ごとに一定なので、それぞれの核種に対して物理的に半減する（放射線量が元の半分になる）時間が計算することができ、その時間を（物理）半減期と言います。物理半減期以外に、生体内に放射性物質が取り込まれたときの代謝時間を考慮した生物半減期という定義もありますが、これはあとでお話したいと思います。

これは α 線の放出を簡単に示したのですが、ウラン238はアルファ線粒子（陽子2個と中性子2個の塊）を放出して、タリウムという別の原子に変化します。これが放射性同位元素の放射線の放出ということになります。

放射線で使われる単位、ベクレル、グレイ、シーベルトも簡単に紹介します。先ほどのウラン235が1個の放射線を出すという現象を1秒間に1回（1回の崩壊現象）起こると、1ベクレルという数値で定義されます。

グレイは、物質が放射線のエネルギーをどれだけ受けたかを規定する単位で、1kgの物質が放射線により1ジュールのエネルギーを受けると1グレイと定義されます。グレイと類似した単位として、放射線防護で使われるシーベルトという単位があります。これはグレイと類似した定義の単位ですが、生体が1グレイのガンマ線をうけた場合と1グレイの中性子線をうけた場合とでは生物影響が異なるため、放射線の種類での影響の違いを考慮してシーベルトが定義されています。ただし、本日の話に登場するセシウム137、ヨウ素131がだすガンマ線は、グレイからシーベルトへの換算係数が1であり、グレイとシーベルトはイコールとなります。

次に今日の話の中心になる人体影響について話したいと思います。放射線は日常的に存在しており、日本で普通に生活しているだけで約1.4ミリシーベルトの放射線を浴びています。日常生活で一年に浴びる放射線の量は地域によって非常に幅があり、ブラジル、中国、インドなどの一部地域は10ミリグレイと高い量の放射線を一年間に浴びるというハイバックグラウンド地域として知られています。ただ、このような地域の調査でも発がん率が高いとは、今日まで報告されていません。一方、人工的に受ける放射線に対しては、年間1ミリシーベルトというのが、一般公衆、つまり皆さんが受ける限度として法律で定められています。しかし、医療ではこれより高い放射線を受ける可能性があります。一般的な胸部・胃のX線撮影は非常に放射線量が低いですが、CTスキャンは一度受けただけで1ミリシーベルトは大きく越えてしまいます。しかし、医療上で被ばくした放射線量は、この年間限度、1ミリシーベルトには含まないと、法律で定められております。

右側の円グラフは、一年間の通常生活から受ける放射線が何に由来するかを示しています。一

番多いのはコンクリートに含まれる放射性核種から生成するラドンガスの吸入で全体の3分の1、その次に多いのが、地殻に地球の形成時から含まれる放射性カリウム・炭素による外部被ばく、その経口を通しての内部被ばくです。日本では1年に平均1.4ミリシーベルトですが、世界平均では2.4ミリシーベルトが一般的に使われる年間被ばく量です。

このように低いレベルの放射線は自然界に存在し、日常的に我々は被ばくしてきていますが、次に、今回の福島原発事故ではどのような放射線が放出され、人体影響の可能性があるかについてお話ししたいと思います。

原子炉の中にはこのように燃料棒が入っており、燃料棒の中には核分裂するウラン235が約5%、ほぼ核分裂しないウラン238が95~97%あります。燃料棒中のウラン235に、別にある中性子源から発せられた中性子を衝突させると核分裂が起こります。核分裂にともない多数の中性子が出てきて、近接するウラン235と衝突し、さらに核分裂を起こします。この反応が連鎖的に起こるのが、東海村の事故時にも起こりました臨界反応です。この時に発生する膨大なエネルギーを原子力発電に利用しています。核分裂をもう少し説明すると、非常に質量数の大きいウラン235のような放射性核種が、放射性崩壊とは違う形式、ほぼ等分の形で二つの原子に分裂して、より安定な原子になろうとする反応が核分裂です。原子炉の中では中性子線を別の中性子源から供給して起こすので、誘導核分裂といいます。ウラン235は不安定な原子で一部は自発的に核分裂しますが、原子炉の中では誘導核分裂が主になります。

前述の放射性崩壊は、それぞれの元素ごとのパターンは一種類あるいは少数です。しかし核分裂の場合は多数のバリエーションがあり、ウラン235では40から80種類の元素が核分裂で生じます。主な生成元素が8種類あり、セシウム137、ヨウ素131が原子炉から自然界に放出され、人体影響を及ぼす可能性が高いと考えられます。ヨウ素は気体で存在し、吸入により内部被ばくが生じると考えられますが、セシウム137は漏洩時に高温で気化していた物が、放出後の常温で固体化し、飛散、降下して、広い地域での土壤汚染の原因になっていると考えられます。

このような事故では特定の放射性核種が放出され、それに由来する特定の放射線により人体影響を起こす可能性が考えられますが、最初に放射性核種、放射線の種類に問わず、共通した人体影響について説明します。放射線による人体影響を考える上で、重要な要素の一つは被ばくの形態です。それには放射線源が外にある外部被ばく、放射線源を体内に取り込んで特定の臓器に蓄積した内部被ばくの二種類があります。外部被ばくには、さらに全身にくまなく放射線が当たる全身被ばくと、放射線源を手で持って手のみが被ばくするような局所被ばくの二種類あり、3~10グレイの被ばくで造血系組織を構成する細胞死が起こり最終的に人体の死に至り、10グレイ以上では腸障害による死亡、100グレイ以上では脳神経系が急激に死ぬことにより急激な死亡へとつながります。これまでの研究からそれ以下だと放射線影響（症状）が現れない「しきい線量」が組織ごとで決められており、100ミリグレイ以下ではどの組織でも急性影響は起こらないと明らかになっています。

放射線は人体に前述以外にも様々な影響を起こしますが、それらは確定的影響と確率的影響の二種類に分類できます。前述したほぼ全ての急性障害と晩発障害の不妊が確定的影響に分類され、しきい線量が存在し、被ばく線量が大きくなればなるほど症状が重篤になります。確定的影響の要因は組織を構成する細胞の放射線障害による細胞死だと考えられます。

もう一つの分類は、福島原発事故後で特に問題になっている発がんを含む確率的影響です。確率的影響では、被ばく線量は障害が起こる確率（発生率）を上昇させ、現状ではしきい線量がないとされています。確率的影響として発がん以外にマウスでは遺伝的影響が報告されていますが、原爆被爆者の疫学調査では確認されていません。確率的影響は遺伝情報が記録されているゲノム DNA に放射線による傷が残ることが原因になると考えられます。放射線影響（障害）は、その発生時期により、放射線の照射直後におこる「急性障害」と数年、数十年を経て現れる「晩発障害」に分類できます。晩発障害の主なものは発がんですが、白内障、不妊という確定的影響も晩発障害に分類されます。

前述したしきい値（線量）は、確定的影響では定義され、それ以下では全く症状は発生しません。確率的影響である発がんは 0.1シーベルト以上では影響すると原爆被爆者の疫学研究などで報告されますが、0.1シーベルト以下の被ばくによる影響の有無は、今なお科学的には証明されていません。

このように放射線は人体にさまざまな影響を起こしますが、その放射線影響の最大要因は放射線による DNA 損傷の発生です。生体は主に DNA, RNA, タンパク質などの分子からできています。遺伝情報が記録される DNA は、細胞核中にありますが、その細胞核にだけ放射線をあてると細胞は死に、DNA の無い細胞質にあてても影響がでません。これ以外の様々な研究から、細胞核にある DNA が放射線により傷つく（切断される）ことにより様々な生体影響が起こると明らかになっています。このようにゲノム DNA が放射線で損傷すると、切断された DNA（染色体）がそのまま残ると次の細胞分裂時にはゲノム DNA（全遺伝情報）を均等に娘細胞に分配できないので、一度細胞増殖をとめて、切断された DNA を修復（再結合）し、それが完了すると増殖を再開します。DNA の切断は細胞レベルで可視化でき、1 グレイをあてて15分後は細胞核全体で多数の DNA 切断が見られますが、24時間後には修復されています。通常放射線で DNA 切断が起こると修復を試みますが、ある程度以上に DNA 切断が多くなると、一個一個の細胞で DNA 修復が追いつかず、結果として細胞死が起こります。しかし、この細胞死が少数であれば、生き残った細胞が再増殖して組織を回復し、組織全体として放射線影響は現れません。それゆえ、確定的影響にはしきい線量があると考えられます。しかし、放射線で生じた DNA 損傷（切断）が多くの細胞に多数起きると、組織を構成する大部分の細胞が死んでしまい、組織を回復できず、確定的影響として現れます。それに対して、確率的影響である発がんは、細胞に生じた DNA 損傷は大部分で修復されますが、一部の損傷が残存したままその細胞が再増殖・異常増殖した結果として起こると考えられます。

細胞はG 1, S, G 2, M 期で構成される細胞周期を回りながら増殖しており、その細胞周期ごとに放射線の影響の受けやすさが異なります。細胞は間期であるG 1 期からS 期に進むと全遺伝情報であるゲノムDNA を複製し、DNA 量を2 倍にします。それからG 2 期を通過してM 期で2 倍量になったゲノムDNA を2つの娘細胞に分配し、最終的に二個の娘細胞に分かれます。このような細胞周期の中では、M 期は放射線に感受性が高い、つまり放射線によって細胞が死にやすいことが知られています。また、S 期初期も放射線に対して感受性が高くなります。一方、S 期の前のG 1 期は放射線に抵抗性であることが知られていますが、我々の組織を構成している細胞の大部分はG 1 期で細胞周期を停止しているため、これら大部分の組織は放射線抵抗性となります。このように細胞周期により放射線影響の受けやすさが異なるため、生体組織ごとの放射線感受性は組織を構成する細胞の増殖度合いで決まります。ほとんどの生体組織はその構成細胞が増殖停止しているため、放射線抵抗性となります。つまり、造血系組織のように非常に分裂のさかんな細胞を多く含む組織では感受性が高く、ほとんど細胞増殖しない神経組織、筋肉組織では放射線抵抗性となります。

細胞増殖のさかんな生体組織として胎児も考えられますが、胎児組織も放射線感受性が非常に高いと考えられています。100 ミリグレイがしきい線量と考えられており、受精後早期の被ばくでは胎児死亡、そのあと妊娠時期が進むにつれて、奇形、脳障害による精神遅滞と放射線影響が異なっていきます。つまり、その妊娠時期に細胞増殖の激しい胎児組織が放射線影響を受けた結果だと考えられます。

次に確率的影響における組織ごとの影響の違いですが、それを示したものに原爆の被爆者の疫学研究があります。これは1シーベルト換算したときの組織ごとの発がんリスクですが、リスクが高いのは乳がん、甲状腺がん、白血病となります。また、前述したとおり、100 ミリシーベルト以下では発がんリスクの増加は報告されていません。発がんリスクの上昇でもう一つ注目して欲しいのが甲状腺がんです。原爆被爆者調査では外部被ばく線量しか評価しておりませんが、内部被ばくの結果と推測される甲状腺がんの上昇がこの通り、原爆被爆者でも起こっていました。

次に内部被ばくについて紹介します。外部被ばくは基本的に細胞増殖状態によって組織感受性が異なりますが、内部被ばくでは組織の増殖度以外に、放射性同位元素により蓄積されやすい臓器が異なること、つまり元素の種類、化学系による特定の臓器への蓄積が放射線影響を受けやすい組織の決定要因となります。よく知られているのがヨウ素の甲状腺蓄積、それ以外にプルトニウムの骨、セシウムの筋肉、ストロンチウムの骨への蓄積で、これらの結果による発がん影響が既に報告されています。このような内部被ばくの組織影響を考える上で、重要な数値があります。前述した生体内代謝を考慮した生物半減期です。これは物理半減期の数値とは大きく異なることが多く、例えば、セシウム137は物理半減期が30年ですが、生物半減期は約3ヶ月です。つまり、セシウム137を身体に取り込んでから3ヶ月たつと、身体の中での蓄積量が半分になることを意味しています。

最後に、福島原発事故における一般住民の放射線影響・防護についてお話ししたいと思います。福島原発事故では国の指針で約2.3ミリシーベルト／時が避難の目安ですが、これを越える4ミリシーベルト以上の地域も広範囲に広がっていることから、一般住民への放射線影響を注視していく必要があります。その一方で、多くの報道で知られますように、原発建屋内では200とか500ミリシーベルト／時という非常に高線量の環境にあり、このような原発事故復旧作業従事者と、周辺地域の一般住民では、2つの異なる被ばく環境にあり、それぞれの環境での放射線防護を考えていく必要があります。

最初に高線量被ばく環境にある復旧作業従事者が高線量の外部被ばくからどう防護するかについて話します。高線量の放射線を扱う場合の防護の世界共通の原則があります。①放射線源と作業者の身体の間に適当な遮断物を置く。②線源からできるだけ距離を離す。線源からの距離は倍になると、距離の2乗に反比例して被ばく線量は減少します。③作業時間を短くすることです。もちろん、放射性セシウムが事故原発建屋内にはホコリとともに多く舞っていますので、内部被ばくも気をつける必要があります。経口皮膚吸収も内部被ばくの主要経路ですので、このような事故原発屋内での作業では防護服、防護マスクによる内部被ばくの防止、高線量汚染エリアでは適切な遮蔽・作業時間の短縮による外部被ばくの管理が重要です。現在250ミリシーベルトが緊急時の被ばく限度になっていますが、これはできるだけ低減する必要があると考えます。

それに対して20ミリシーベルト（暫定）が限度とされる周辺住民の防護について次にお話ししたいと思います。確定的影響のしきい線量は100ミリシーベルト（グレイ）で、このような環境での考慮は小さいでしょう。しかし、しきい線量がないとされる確率的影響、発がんは20ミリシーベルトという線引きでも考える必要があります。国際放射線防護委員会（ICRP）では確率的影響・発がんにはしきい線量無く、被ばく線量は非常に低くても発がん発生頻度に寄与するとしております。ただし、ICRPは年間最大20ミリシーベルトを限度として居住可能であると、現在提言しています。国は、この20ミリシーベルトを参考線量とし、避難地域を設定し、汚染のある食物、飲料水の流通規制を行っています。

それでは、国の規制に加えて、住民自身は防護のために何を考える必要があるのか。教科書的になりますが、避難地域内に理由があって残っている人、規制線量より高い地域に住む人は屋外での作業では作業時間の短縮、マスクの着用が必要です。さらに自然の動物、植物、農作物の摂取はできるだけ避けるべきだと考えます。それに対して規制区域外では、やはりホットスポットを把握して、そのエリアに入るときは時間短縮、マスク、手袋の着用が重要ですし、周辺地域、つまり年間20ミリシーベルト以下の地域でも、自然からの産物の摂取は控えた方が良いと思います。また、原則的には土がついた場合は手洗い、シャワー等で取り除くのが肝要です。また、国による規制値年間20ミリシーベルトの子供への適用についてですが、チェルノブイリ事故や原爆から小児白血病の発症は報告されますが、これは高線量急性被ばくの影響だと言えます。チェルノブイリ事故で発生したヨウ素131の摂取による甲状腺がんですが、これは非常に高い放射

線を含んだ牛乳を摂取したためと言われており、今のところ科学的には20ミリシーベルトの小児への適用の是非について、結論は出ていません。ただ、小児への被ばくはできる限り低減するのは必要であると考えています。

今年はチェルノブイリ事故から25年になりますが、このチェルノブイリ事故からたくさんの学ぶべきことがあると我々は考えおり、これからも学ぶべきだと思っています。一番重要な知見は、チェルノブイリ事故前では小児での甲状腺がんの発生は注目されていませんでしたが、小児における注視すべき発がんが現在ではされています。チェルノブイリ原発周辺、日本の年間限度20ミリシーベルトより高いに地域でも多くの住民が住んでいます。その住民のための手引書がヨーロッパの研究グループにより10年前に作られました。その中には汚染食料品の流通規制、汚染地域の被ばく線量を測定すること、自生の物は食べないこと、さらに重要なこととして被ばく管理のための地域組織を住民によって整備することを提言しています。放射線生物研究センターの我々スタッフは福島県の住民、近隣地方自治体にこの本が役立つだろうと考えましたので、今回翻訳版を作成しました。150部ほど配布用に会場入り口に準備していますので、ご興味ある方はお持ち帰り下さい。

最後に、我々、京都大学放射線生物研究センターを少しだけ紹介して講演を終えたいと思います。我々のセンターは、放射線の生物影響を実験的手法で解明することを目的に、全国共同利用施設として約30年前に京都大学に開設された研究拠点です。松本智裕センター長のもとに4部門に、2客員部門という小さいセンターなのですが、放射線影響研究を長年行ってきました。福島原発事故では現地での貢献という機会は少ないのですが、我々は重点研究としては、低線量放射線の生物影響について全国の関連研究機関と共同で行っていますので、そのような研究成果をもって、皆さん、特に福島の周辺住民が、将来の生活のために適切な判断をくだすことができる情報、あるいは安心して暮らしていけるような情報を提供できるように、今後とも研究に力を入れていきたいと考えております。

