

放射線の影響と飼育動物での対策

酪農学園大学 獣医学群

林 正 信

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災とそれに引き続いて発生した福島第一原子力発電所の事故によって放射性物質が環境へ放出され、その影響について大きな関心が持たれています。事故後約1年が経過しましたが、住民の方が元の生活へ復帰することは依然として難しい状況です。しかしながら、放射線に対する過度の対応は被災された方への理由の無い差別や風評被害によって更なる苦しみを与えることになり、また怪しげな健康食品の使用などにつながるようになります。このような二次的な被害を防ぐためにも放射線影響の正確な知識が必要です。また、今回の事故では飛散した放射性物質がどの地域に降下したかについての情報提供が遅れたため、住民が汚染された地域へ避難し、被ばく線量が高くなったり、牧草や稲わらの汚染対策が不十分になり、食肉中に基準値を超える放射性セシウムなどが検出される事態が起きました。これらのことからネガティブと思われる情報であっても、早く公開することが必要と考えられます。

2. 放射能と放射線

放射線は粒子放射線と電磁放射線に区分され、粒子放射線には荷電を持った α 線、 β 線と荷電を持たない中性子線などがあり、電磁放射線には γ 線とX線があります。X線以外は原子核から放出され、 α 線は中性子2個と陽子2個からなる大きな粒子で、中性子線は中性子1個、 β 線は電子または陽電子です。X線と γ 線は可視光や電波と同じ電磁波ですが、波長が 10^{-8}m 以下と非常に短いものです。また、放射線はその種類によって物を透過する能力が異なります。

放射性核種は放射線を出して別の元素に変わります。例えば、放射性核種のリン32は β 線を出してイオウ32（非放射性）に変わります。このように放射性核種は放射線を出して別の元素に変わり（この現象を壊変といいます）、放射線を出す性質（または能力）が放射能です。放射能は放射線を出す物質の量を表す際にも使用され、1秒間あたりに1壊変する放射性物質がある場合の放射能が1ベクレル（Bq）です。なお、1壊変当たり放出される放射線の種類や数は1つとは限りません。

放射性核種は放射線を出して別の元素に変わりますので、時間と共にその量は減少し、元あった量の半分になる時間が半減期です。半減期は核種毎に固有（ヨウ素131は8日間、セシウム137は30年間など）で、温度や湿度など外的条件によって変化しません。1半減期で半分に減り、次の半減期を経過するとその半分という減少の仕方、ヨウ素131では8日で $1/2$ 、16日で $1/4$ 、24日で $1/8$ に減少します。

放射線の作用はそのエネルギーが物質に吸収されることによって起こり、放射線のエネルギーが物質1kg当たり1ジュール吸収された時の吸収線量が1グレイ（Gy）です。1Gyの放射線は温度を $1/4,000^{\circ}\text{C}$ 上昇させるエネルギーに相当します。前記のように放射線には色々な性質のものが含まれるため、吸収線量が同じでも放射線の種類によって人体に生じる影響の程度が異なり、 α 線や中性子線はX線や γ 線、 β 線の5～20倍大きな影響を生じます。したがって、人体に生じる影響の程度を正確に評価するためには放射線の種類によって補正することが必要です。この補正係数が放射線加重係数です。体の特定の組織の吸収線量に放射線加重係数を乗じ

た線量が等価線量で、単位はシーベルト (Sv) です。実効線量は、主として人体における発癌のリスクを評価するために用いられます。発癌のリスクは組織で異なりますので、組織ごとの影響の起り易さ (組織加重係数) を等価線量に乗じて、全身の組織について加算した線量が実効線量で、単位はSvです。なお、動物への影響を評価する際にはSvは使用せず、Gyを用います。

3. 自然放射線と人工放射線

放射線は5感では感じられないため身の回りにあっても判りませんが、自然界には放射線が存在し、日本では平均して年間1.5ミリシーベルト (mSv) の自然放射線に被ばくしています。その内訳は宇宙線が0.29 mSv、大地から0.38 mSv、食物から0.41 mSv、ラドンガスの吸入で0.4 mSvなどです。世界平均では年間2.4 mSvで内訳は図1のようになっており、ラドンガスの影響が日本より0.8 mSv高くなっています。

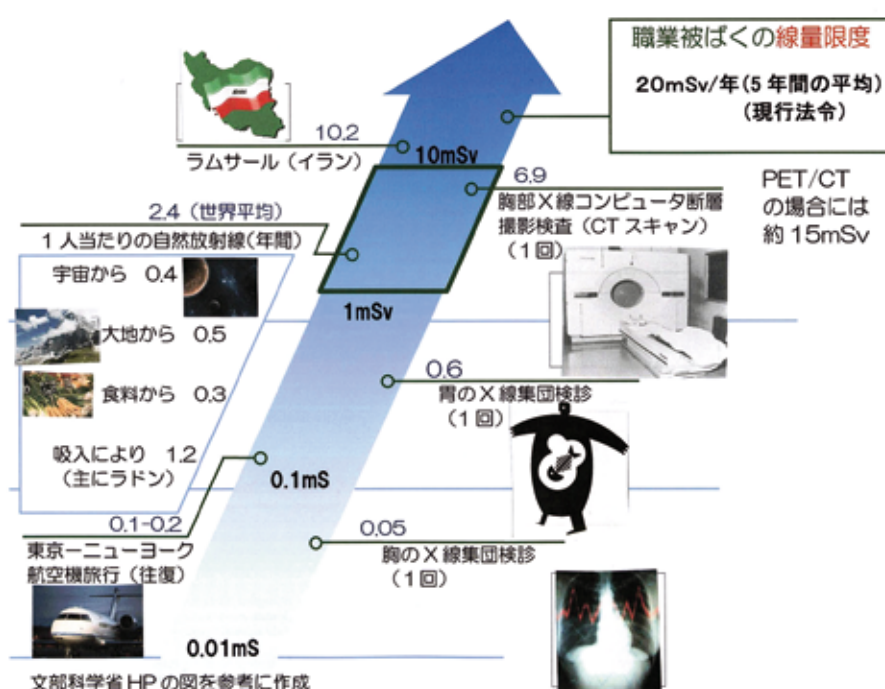


図1 自然放射線と人工放射線

宇宙線の影響は高度が高いほど大きく、成田-パリ間を航空機で往復すると約0.1 mSvの宇宙線に被ばくします。また、宇宙線に含まれる中性子は空気中の窒素と反応して放射性の炭素14を生成し、炭素14は炭酸ガスとなり、植物の光合成によって炭素14を含んだグルコースとなり、植物を介して動物体内に取り込まれます。植物は光合成によって常に一定の炭素14を取り込みますが、光合成を行わなくなると半減期が約5300年で減少し、このことは年代測定に利用されています。地球上には少量のウラン238やトリウム232等の元素が存在し、このような元素は最終的に安定な鉛となりますが、この過程でラドンガスを生成します。大地や食物の放射線の主な原因は放射性カリウム40です。日本では大地からの自然放射線量は年間平均0.38 mSvですが、地域によって0.026～0.13マイクロシーベルト (μ Sv) 毎時と差があります。また、世界的には大地からの放射線量が非常に高い地域があり、イランのラムサルで10.2 mSv、ブラジルのカラパリで5.5 mSv、インドのケララで3.8 mSv、中国の陽江で3.5 mSvと年間の被ばく線量が日本の10～30倍高い地域があります。カリウムの0.0118%が放射性のカリウム40で、人体には平均して0.35%のカリウムが含まれていますので、体重60kgの人には約4,000～6,400 Bqのカリウム40が存在し、人体からは毎秒数千本の放射線が出ていることになります。

日本では年間平均で2.3 mSvの人工放射線による被ばくを受けており、ほとんどはX線診断などの医療被ばくです。胸部のX線診断で1回当たり0.05 mSv、胃の集団検診で1回当たり0.6 mSv、X線CTで6.9 mSv、PET/CTで15 mSv程度の線量を被ばくします（図1）。

4. 放射線の人体や動物への影響

ヒトでも動物でも放射線の影響は同じです。放射線の被ばく様式は外部被ばく（体外被ばく）と内部被ばく（体内被ばく）に分けられます。また、体表面汚染からの被ばくも起こります。

外部被ばくでは主としてγ線が問題となり、今回の福島第一原子力発電所の事故では原子力発電所敷地内の作業者に外部被ばくが起っています。また、発電所から水素爆発等で空気中に放射性物質が放出され、これらは微粒子で空気中に浮遊し（放射性雲）、その後地上に落下します。落下する場所は風向きや地形、雨の降るタイミング等によって異なり、一般的に斑状になり、離れた地域でも放射性物質の濃度の高い場所が生じます。原子力発電所の敷地外での外部被ばくは空気中に浮遊している放射性雲や汚染された地表面の放射性物質からのγ線によって生じます。

内部被ばくは放射性雲中や汚染地表面から再浮遊した放射性物質を吸入したり、放射性物質で汚染された飲料水や食物を摂取することで体内に取り込まれた放射性物質によって起こり、α線やβ線での被ばくが主に問題となります。それぞれの放射性核種は特定の組織に蓄積しやすい傾向があり（例えば、放射性ヨウ素であれば甲状腺）、蓄積した組織が高い線量を被ばくします。体表面汚染では、放射性物質が体表面に付着してその部分、特に皮膚が高い線量を被ばくします。また、傷のある場合には傷口から体内に入り、内部被ばくの原因となります。なお、内部被ばくでも、人体に影響を与えるのは放射能ではなく放射線です。実効線量や等価線量で表示されている場合には放射線の種類などを補正した線量ですので、内部被ばくが外部被ばくと比較して人体への影響の程度が大きいことはありません。放射性物質によって汚染された食品を摂取することによって起こる放射線被ばく線量は以下の式で計算されます。実効線量係数は核種や摂取経路、年齢などで異なります。

$$\text{年間の預託実効線量 (mSv)} = \text{実効線量係数 (mSv/Bq)} \times \text{年間の核種摂取量 (Bq)} \times \text{市場希釈係数} \\ \times \text{調理などによる減少補正}$$

放射性ヨウ素は半減期が短いため、流通過程でかなりの割合で減少します。食品中の放射性セシウムの基準値は2012年4月1日から引き下げられますが、以前の暫定規制値の食品を摂取した場合でも年間の実効線量は5 mSvを超えることはありませんので、知らずに基準値程度の食品を摂取しても健康に影響はないと考えられますが、引き続き測定による食品汚染の確認が必要です。

放射線の人体影響は表1のように分類されますが、この分類で判りにくいのは確定的影響と確率的影響だと

表1 人体への放射線影響の分類

身体的影響 被ばくした本人に現れる影響 遺伝的影響 被ばくした子孫に現れる影響	急性影響 被ばく後比較的短期間、長くても数カ月以内に現れる影響	造血障害（血液中の血球数の減少）、 皮膚の紅斑、脱毛、 嘔吐、下痢など	確定的影響 影響が現れるためには一定以上の線量（しきい線量）がある
	晩発影響 数年～数十年の潜伏期を経て現れる影響	白内障、胎児影響、再生不良性貧血 発癌、白血病	確率的影響 しきい線量がないと考えられている影響
		遺伝子病	

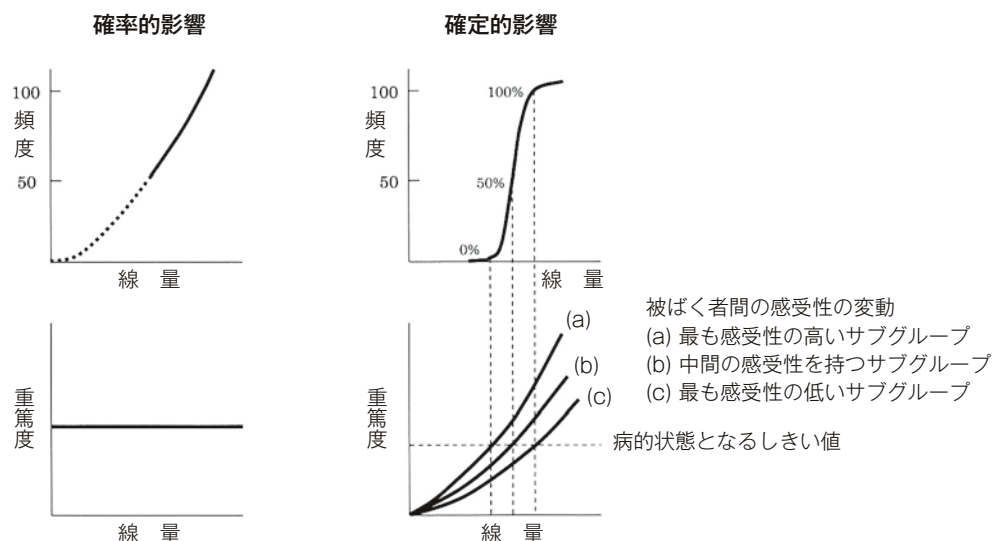


図2 確定的影響と確率的影響

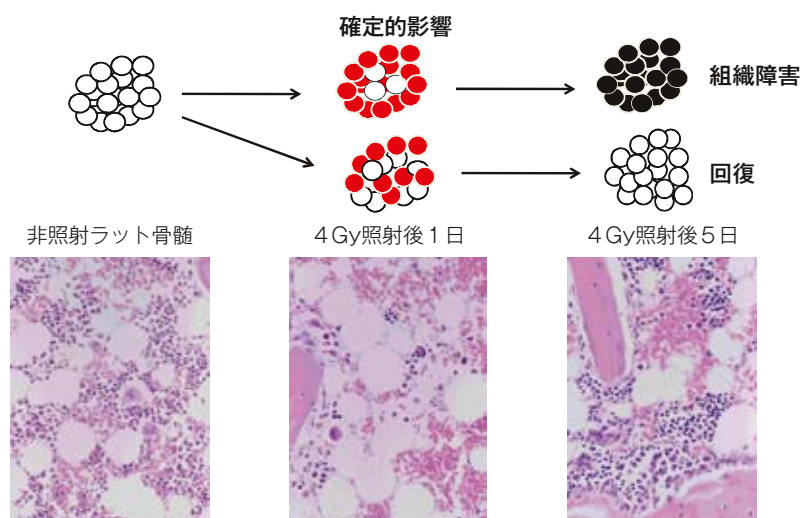


図3 骨髄障害と回復
4Gyを全身照射したラットの1日目と5日目の組織像

思います (図2)。確定的影響では一定の線量以上（しきい線量という）を被ばくした際に影響が生じます。例えば、全身が短時間で250 mSv以上の放射線に被ばくした場合に骨髄障害によって (図3) 血液中の白血球やリンパ球が減少します。この時、血液中の血球減少（一過性）のしきい線量は250 mSvとなります。違う言い方をしますと、しきい線量以下の被ばくでは影響は生じません。一方、確率的影響はしきい線量がないとして防護が考えられている影響で少ない線量でも発生率は増加すると仮定しており、発癌が主な対象となります。広島や長崎での原爆被ばく者の方についての調査から短期間に100 mSvの被ばくを受けた場合に白血病など発癌の生涯リスクは0.5%増加すると考えられています。しかし、これより低い線量での発癌への影響は明らかではありません。その理由は100 mSv以下の低線量では発癌頻度の増加が非常に小さく、他の要因（喫煙、食事、地域差、紫外線など）が大きく影響し、正確に評価することが不可能なためです。また、短時間で100 mSvを被ばくした場合と長期間にわたって被ばくした場合で、影響の程度は異なり、長期間に渡って低い線量率（単位時間当たりの線量）で被ばくした方が影響は1/2～1/5とずっと小さくなります。例えば、イランのラムサールでは年間10 mSvを超える自然放射線に被ばくしていて、10年間で100 mSvを超えますが、特に発がん率が高い証拠は示されていません。また、日本で平成18年の死亡原因の第1位は癌で、死亡原因の30.4%であり、死亡者

数は329,198人です。10万人が短期間で100 mSvを被ばくしたと仮定して生涯リスクが0.5%増加すると、最大で500人の癌死亡者数が増加（実際は長期に渡って発症するので、年間当たりに換算すると数十人程度の増加）することになりますが、33万人のうち数十人の増減が放射線の影響であることを証明することは困難です。また、今回の事故では作業員の方を別として100 mSvを超える線量を被ばくする事態は起こっていません。

放射線の生物影響は放射線のエネルギーが生体に吸収され、遺伝子DNAに損傷が生じることが主な原因です。DNAに生じた損傷のため、細胞の分裂が停止（増殖死）あるいは、細胞死（アポトーシス）が誘発されることで細胞が失われ、細胞機能の喪失が一定レベル以上になると組織の障害や個体死が起こります（図3）。また、未分化で細胞増殖が盛んな組織ほど影響を受けやすく、細胞分裂をしていない成人の脳や筋肉はほとんど影響を受けません。一方、胎児や乳幼児は体のほとんどの組織細胞が分裂をしているため成人よりも影響を受けやすいことになります。しかし、100mSv以下の線量であれば、胎児や乳幼児にも影響はほとんどないことが報告されています（国際放射線防護委員会報告2000）ので、あまり心配しすぎないことも大切です。

放射線による遺伝子DNAの損傷は放射線エネルギーが直接DNA分子に吸収され、損傷が生成する直接作用と細胞内に多量に存在する水分子にエネルギーが吸収されて生じる水ラジカルがDNAと反応して損傷が生成する間接作用によって起こり、放射線の種類で異なりますが、生体内では間接作用の寄与が大きいと考えられています。生成された水ラジカルは酸素と反応し、OHラジカル、 H_2O_2 、 O_2^- （スーパーオキシドラジカル）などの反応性の高い活性酸素（ROS）を生成します。活性酸素は細胞のミトコンドリアでのエネルギー産生の中間物質として日常的に多量に産生されており、その5～10%がミトコンドリアから漏出して細胞成分と反応し、放射線と関係なく種々のDNA損傷が、細胞当たり1日数万個生成していると推定されています（図4、表2）。

表2 DNA損傷の生成

損傷の種類	自然に生成される数 （／細胞／日）	放射線での生成量 （／細胞／100 mSv）
塩基損傷	20,000	30
1本鎖切断	50,000	100
2本鎖切断	10	3

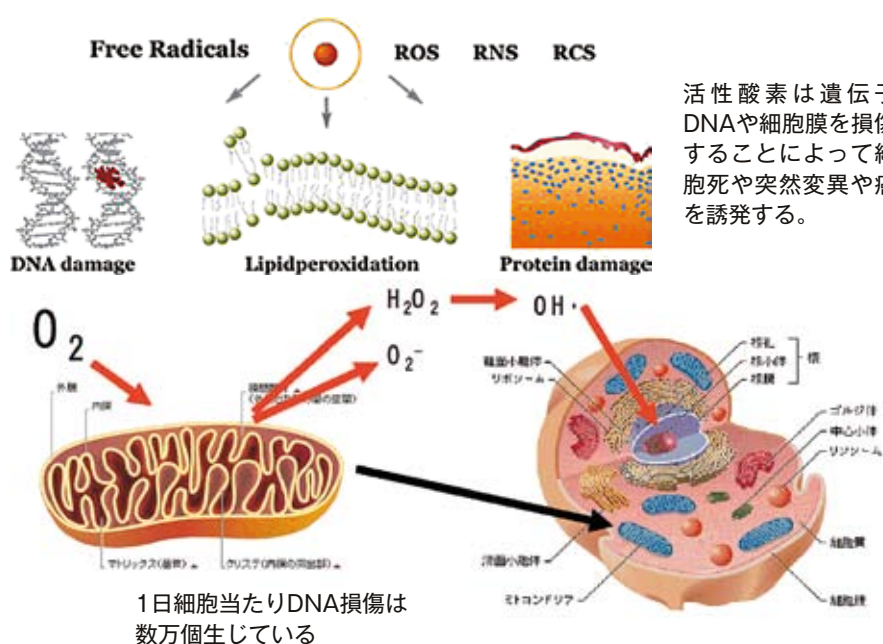


図4 細胞における活性酸素の産生

この様に放射線の生物作用を引き起こす機序は放射線に特異的なものではありません。細胞に致死的影响を与える損傷は主としてDNA 2本鎖切断ですが、DNA 2本鎖切断の生成率はX線100 mSv 当たり細胞当たり3.5個程度です。一方、正常時で細胞には1日当たり10個のDNA 2本鎖切断が生成されています。

生命はその誕生以来、DNA 損傷を生じる様々な要因に曝^{さら}されていますので、その影響を消去する機序が生体には備わっています。例えば、細胞にはグルタチオンのようにラジカルと反応して消去する物質やH₂O₂を分解するカタラーゼやO₂⁻を変換するスーパーオキシドジスムターゼなどの酵素が存在します。さらに、DNAに生じた損傷の修復系（治す機序）が存在すると共に、遺伝子に異常が生じた細胞の分裂を停止させる細胞老化や異常細胞を致死させる経路の誘導、生じた異常細胞の免疫機能での排除など、個体として遺伝子の健全さを維持する、すなわち、癌化を防ぐ何段階もの機序が備わっています。

5. 飼育動物での対策

イヌはヒトよりも放射線感受性が高いとされていますが、飼育動物が身体的影響を生じるような線量を被ばくする可能性は少ないと考えられます。発癌についても寿命を考えるとあまり心配する必要はないでしょう。むしろ放射性物質で汚染された動物からの飼育者への影響や産業動物では動物が汚染されることによる生産品への影響を考慮すべきだと思います。飼育動物については国や日本獣医師会からサーベイメータ（携帯式の放射線測定器）で1分間当たりの計数値が100,000カウントを超える場合には除染することが求められています（なお、この数値はヒトと同じです）。この数値は体表から10cm離れた場所で1 μ Sv 毎時の線量率に相当します。汚染された動物の体表から10cmのところを24時間365日作業したとしても年間の積算線量は8.76 mSv 程度ですので、人体に影響が出る線量ではありませんが、除染の作業時間を短くすると共に除染に当たっては内部被ばくを防止するために防護メガネや防護衣、マスク、手袋を着用すべきです。体内に取り込まれた放射性セシウムが排泄などの生物作用で半分に減少する時間（生物学的半減期）はウシで29日、羊で14日、ヤギで18日、ブタで19日、鶏で28日、マウスで13日と、人の100日と比較して短く、短期間で体外に排出されます。除染は水洗や水で濡らした布などで拭き取ることで行い、使用したものはビニール袋に入れて保管するなど乾燥して飛び散らない注意や糞尿などから吸入しないなどの注意が必要です。

おわりに

原子力発電所の事故だけでなく、東日本大震災で避難されている皆さんが一刻も早く、安心して元の生活に戻れるようになりますことを心から願っています。