

Ionising Radiation – a Double-Edged Sword

Christian Streffer, Professor for Medical Radiobiology and Emeritus Member of the Main Commission of ICRP, University Clinics Essen, Germany

Ionising radiation can be extremely useful and beneficial in wide fields of medical diagnostics and cancer therapy. However, the same radiation can also be very hazardous by causing cancer and other health damages. The kind and the extent of these damages is very much dependent on the radiation dose in the body and its organs. For radiation fields outside the body the so-called external dose can be measured directly and the dose within the organs can be calculated. However, the dose can only be calculated via biokinetic models for internal exposures after incorporation of radioactive material. For radiological protection in low dose ranges, the radiation dose is given in milliSievert (mSv) and the amount of radioactivity is given in Becquerel (Bq). Radiation arises from a so-called radioactive decay, where one radioactive decay per second equals one Bq. For dose estimation from internal exposures the incorporated radioactivity must be determined. This amount in Bq is then multiplied by a dose coefficient in order to obtain the radiation dose in mSv. The dose coefficient depends on the physical properties of the radiation which originates from the radioactive decay and on the biokinetic distribution as well as the retention of the radioactive material within the human body and organs. The distribution of radionuclides can be very different for individual radionuclides. Radioactive iodine is specifically taken up in the thyroid and the radiation dose in the thyroid is 1,000 times higher than in other organs, radioactive caesium is very evenly distributed in all living cells while radioactive strontium is especially accumulated in the bone. From our present knowledge we can state that the radiation effects are the same from external as well as from internal exposures at a certain radiation dose in the concerned organ. Many experimental data and clinical experiences show that the health effects at identical levels of radiation dose in mSv are the same in the concerned organs from external radiation sources or from uptake of radioactive material.

From experimental, clinical and epidemiological studies over more than 100 years a large amount of data and knowledge exists about the possible radiation effects and the corresponding dose ranges causing these effects. The experimental data come from studies with whole animals, with living cells and biological molecules including human material. The clinical experiences originate from the use of ionising radiation in medical diagnostics and therapy as well as from accidents which have occurred with technological nuclear installations as well as with technical devices in medicine including radioactive sources. From these experiences we have good evidence that the radiation effects increase with rising radiation doses. For some effects (stochastic effects) we assume that there exists no threshold dose (Figure). This is the case for the causation of genetic mutations as well as of cancer. For other radiation effects threshold doses have been observed (deterministic effects) and these effects can only be caused by radiation doses above the threshold dose (Figure) which are in all cases above 100 mSv but they differ up to several 1,000 mSv for the various radiation effects (ICRP 2007). The radiation effects after exposures during prenatal development deserve special attention which will be described in a further statement (ICRP 2003). As no threshold doses are assumed for genetic mutations and cancer these health effects are expected to occur also after small radiation doses below 100 mSv. However, the effects then will be small and they will further decrease with decreasing doses. For hereditary defects (genetic mutations) no significant increase has been observed in humans until now. This holds even for larger populations, e.g. the children of the survivors after the catastrophic atomic bombs in Hiroshima and Nagasaki (ICRP 2007). Therefore the risk of cancer causation is of strongest importance for the risk evaluation in the low dose range (<100mSv) of ionising radiation. However, it has to be kept in mind that in all studies (including the careful studies with the survivors in Hiroshima and Nagasaki) no measurable effect has been observed in the dose range below 100 mSv. A possible risk can only be obtained by extrapolation under the assumption of a linear dose response without a threshold (LNT model). The most important and most comprehensive data are

obtained from the survivors in Hiroshima and Nagasaki. From these data and further data from radiation exposed populations in Russia (Techa River) as well as data from patients who received radiation for medical treatment and diagnostics the risk evaluation results in an increase of cancer by 0.5 to 1 percent after a radiation dose of 100 mSv (ICRP 2007).

This evaluation is valid for a total population (both sexes and all ages). For radiological protection one certainly has to consider that children and the developing organism in utero is more radiosensitive by around a factor 3 than the average population. After the Chernobyl accident it has been found that the thyroid of children is highly radiosensitive with respect to causing thyroid cancer. This effect was mainly due to a strong uptake of iodine-131 into the thyroid. Therefore strict limits for iodine-131 are necessary in food especially milk after accidents of nuclear reactors. The uptake of 100 Bq iodine-131 with milk leads to a radiation dose of around 0.4 mSv in the thyroid of a one-year old child. Despite the high radiosensitivity of children this dose is still very much below a radiation dose above which a measurable increase of thyroid cancer will occur. In Japan the dose through iodine uptake is lower than in other countries as the food content of inactive iodine (high amount of fish and seafood) is higher than in other countries. This inactive iodine reduces the uptake of radioactive iodine into the thyroid. The uptake of 100 Bq Cs-137 with food leads to a radiation dose of around 0.0012 mSv in more or less all organs. Thus there is no specifically endangered organ in case of caesium. Radionuclides of iodine and caesium are the most frequent releases and therefore these are the releases for which most attention is necessary in case of nuclear accidents.

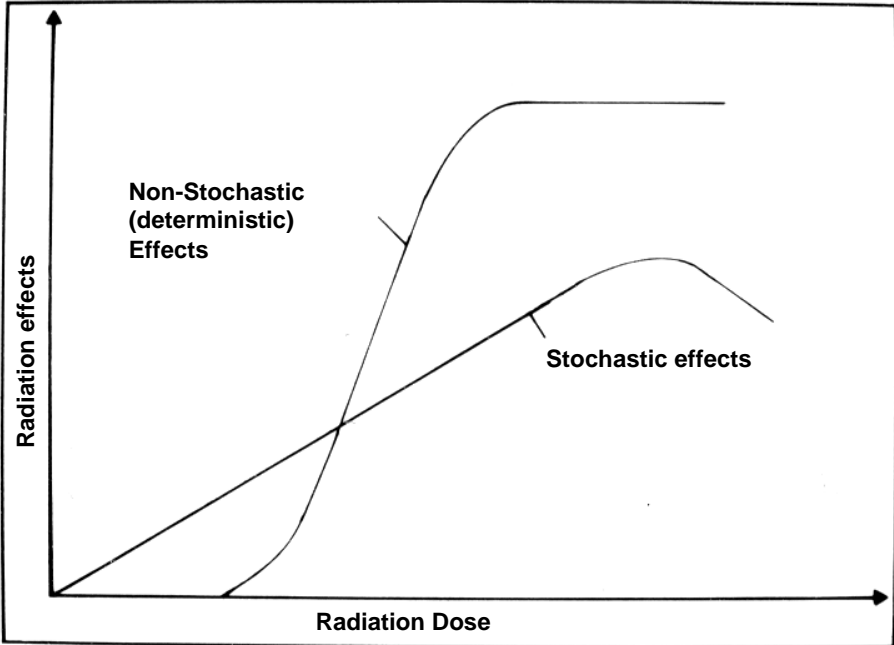
With respect to the toxicity of ionising radiation there exist very good comparative controls in the low dose range as life has been exposed to ionising radiation from natural sources since it exists on earth. Worldwide the population is annually exposed in average to external doses of about 0.87 mSv and to internal doses of about 0.29 mSv (UNSCEAR 2008). These exposures can strongly vary in different world regions. With studies in regions with high background radiation (up to 10- to 50-fold) no increase of cancer has been found until now. In this context it is interesting that an annual internal exposure of about 0.17 mSv is caused by the radioactive potassium-40. The biokinetic behaviour of potassium is very similar to that of caesium. Therefore a comparison of the two radioactive nuclides is possible. It should be noted that every human being carries with him/her around 9,000 Bq of natural radionuclides of which about 4,000 Bq are potassium-40. Additionally the respiratory tract is exposed to radioactive radon and its radioactive daughter products with comparatively high doses. Extensive studies resulted in an increase of lung cancer in geographic areas with high radon concentrations. These investigations in combination with the above described studies gives a further insight and information into the toxicity of ionising radiation.

Finally it should be pointed out that in industrialized countries everybody probably has been exposed to ionising radiation most likely including also to radioactive material in medical diagnostics. It should be noted that the radiation dose is in the range of 5 to 10 mSv for an examination with computed tomography (CT) or positron emission tomography (PET). These are two very useful medical technologies which are efficient for medical diagnostics and the frequency of these examinations is rising especially in the highly developed countries including Japan. Certainly these exposures should not be compared with the exposures which result from accidents of nuclear installations, as the medical exposures yield a direct benefit to the exposed patient while the reactor accident is an undesired, tragic catastrophe. Nevertheless with reactor accidents the possible health effects (estimated by extrapolation in this dose range) and the radiation doses are comparable however, the acceptability is certainly different.

In general it can be concluded that a rational analysis of unwanted, hazardous radiation effects allows scientific information about the radiation risk with respect to its extent and quality which has to be expected at a certain radiation dose. This knowledge should be used for the judgement of the governmental institutions and the administration in order to decide on the tolerable measures

and necessary regulations. For severe measures e.g. evacuation and relocation certainly economic and especially socio-psychological aspects have also to be taken into account.

Figure Typical dose-effect-relationships for health effects after exposure to ionising radiation



(仮訳)

放射線 — 両刃の剣

クリスチャン・ストレッフアー(医学放射線生物学教授、ICRP 主委員会名誉会員、ドイツエッセン大学病院)

放射線は、医療における診断やがん治療の広い分野において非常に有用で有益です。しかしながら、同じ放射線は、がんや他の健康被害を引き起こすことにより、非常に危険にもなりえます。その被害の種類や程度は、身体や臓器における放射線量に依存します。身体の外側の放射線場のいわゆる外部被ばく線量については、直接測定することができます。また、臓器内の線量は計算することができます。しかしながら、放射性物質の摂取後の内部被ばくは、(代謝を考慮した)生物動力学モデルによってのみ計算することができます。低線量領域の放射線防護の目的で、放射線量はミリシーベルト(mSv)で与えられます。また、放射能の量はベクレル(Bq)で与えられます。放射線は放射性崩壊により発生し、1秒当たり1つの放射性崩壊が1Bqに対応します。内部被ばくからの線量推定は、取り込まれた放射性物質により決定されます。ベクレルで示される量に線量係数をかけることにより、実効線量が得られます。線量係数は、放射性崩壊に起因する放射線の物理的性質に依存し、かつ、人体や臓器内における放射性物質の滞留と生物動力的な分布にも依存します。放射性核種の生体内分布は、個々の放射性核種で異なります。放射性ヨウ素は、甲状腺に選択的に取り込まれるため、甲状腺中の放射線量は、他の臓器と比べ1000倍も高くなります。放射性ストロンチウムは特に骨に蓄積され、放射性のセシウムは生細胞の中に均等に分布します。現在の知見から、ある臓器における内部被ばくからの放射線影響は、放射線量が同じであれば、外部被ばくからの放射線影響と同じであると言えます。多くの実験データや臨床経験が、ミリシーベルトで示される同じレベルの放射線量における健康影響は、特定の臓器において外部線源からの被ばくか放射性物質の取り込みからの被ばくかにかかわらず、同じであることを示しています。

100年以上にわたる実験、臨床および疫学研究から、起こり得る放射線影響とこれらの影響を引き起こす線量範囲に関する膨大なデータおよび知識が得られています。実験データは、細胞(ヒトの細胞を含む)、生物分子、実験動物を使った研究から得られています。臨床経験は、放射線を用いた放射線診断と治療から得られ、同様に、原子力施設や放射線源を含む医療装置利用技術における事故からも得られます。これらの経験から、私たちは、放射線量の増加とともに放射線健康影響が増加するという証拠を持っています。確率的影響(※1)と呼ぶある種の影響については、私たちは、しきい線量(閾)が存在しないと考えます。がんや遺伝的突然変異の発症がこれに当てはまります。他の放射線影響については、しきい線量が観測されています(確定的影響)。また、このしきい線量は、全体として100 mSv以上ですが、数千 mSv にいたるまで、様々な影響ごとに異なります。(ICRP 2007)。出生前の発育期における被ばく後の放射線影響(ICRP 2003)は、特別な関心事であるので別稿に述べるつもりです。

遺伝性突然変異やがんにしきい線量がないと仮定するので、100 mSv以下の小さな放射線量の被ばく後にも、確率的影響が生じると考えられます。しかしながら、その影響(確率)は小さくなります。また、線量が少なくなるとともに健康への影響は減少します。人における遺伝的欠損(遺伝性突然変異)については、その有意の増加はこれまで観察されていません。これは広島や長崎における破滅的な原子爆弾(による被ばく)の後、生存した人々の子ども達の調査のようなより大きな集団を対象とした調査においても示されています(ICRP 2007)。したがって、がん誘発のリスクが、低線量範囲(100mSv以下)の放射線におけるリスク評価に最も重要であると言えます。しかしながら、すべての研究(広島と長崎における生存者の注意深い研究を含む)において、100 mSv以下の線量範囲で測定可能な影響は観察されていないことを心に留めなければなりません。ありえるリスクは、しきい値のない線形の線量応答の仮定の下に外挿によってのみ得ることができます。最も重要で包括的なデータは、広島と長崎での生存者から得られます。これらのデータ、およびロシア(テチャ川)において被ばくした住民、また治療や診断において

被ばくした患者のさらなるデータから、100 mSv の放射線被ばく後に 0.5~1%がんの増加をもたらすというリスク評価に帰着します(ICRP 2007)。この評価は総人口(性別や年齢の区別なく)に有効です。放射線防護の観点からは、子どもと子宮内で発達中の胎児は、平均人口より 3 倍程度放射線感受性が高いことを考慮すべきことは確かです。チェルノブイリ事故の後、甲状腺がん誘発に関して、子どもの甲状腺の放射線感受性が高いことが判明しました。これは、甲状腺へのヨウ素 131 の取り込みが主な要因です。したがって、食物(特に原発事故後のミルク)に関して、ヨウ素 131 を厳しく制限することが必要です。100Bq のヨウ素 131 を含むミルクの摂取は、1 歳児の甲状腺において約 0.4 mSv の放射線量に相当します。子どもの放射線感受性が高いとはいえ、この線量は、甲状腺がんの計測可能な増加が観察できる放射線量に比べて十分に低い量です。日本では、安定ヨウ素(放射性物質ではないヨウ素)を含む食事(魚介類など)の摂取量が他の国々よりも高いため(一定量の安定ヨウ素が甲状腺に常に存在するため)、放射性ヨウ素摂取による被ばくは他の国々よりも低いと考えられます。この安定ヨウ素は、甲状腺への放射性ヨウ素の取り込みを減少させます。100Bq のセシウム-137 を含む食物の摂取は、多かれ少なかれすべての器官で約 0.0012 mSv の放射線量に相当します。したがって、セシウムの場合には(ヨウ素における甲状腺のように)特別に影響を受けそうな器官はありません。原子力事故において、放出される放射性核種のうち最も多いのはヨウ素とセシウムであり、従って、これらは最も注意が必要な核種といえます。

生命が地球に誕生して以来、自然界からの放射線にさらされていることから、放射線の毒性に関して、低線量領域の非常によい比較対象が存在します。人々は世界平均で、年間約 0.87 mSv の外部被ばく、約 0.29 mSv の内部被ばくをしています(UNSCEAR 2008)。これらの被ばく量は、地域が異なると大きくばらつきます。高バックグラウンド(平均の 10~50 倍までの線量)地域における疫学研究で、現在までにがんの増加は見つかっていません。このような背景がある中、毎年約 0.17 mSv の内部被ばくが放射性のカリウム-40 によって引き起こされていることは注目に値します。人体内でのカリウムの生物動力学的な振舞いは、セシウムのそれに非常に似ています。このため、2 つの放射性核種の比較が可能になります。すべての人々が、自身に 9,000 Bq もの自然放射性核種を(常に)持ち運んでいることは注目されるべきです。このうち約 4,000 Bq はカリウム-40 によるものです。さらに、呼吸器官は、放射性ラドン、また比較的高線量のラドンの娘核種(※2)にさらされています。広範囲な研究により、高ラドン濃度の地域で肺がんの増加が見出されました。上述の研究とこれらの調査から、放射線の毒性に関するさらなる実態や情報が得られます。

最後に、先進国では、おそらく誰もが、疾病診断における放射性物質も含む放射線にもさらされていることが指摘されるべきです。CT検査やPET検査では、放射線量は 5~10 mSv の範囲にあります。これら 2 つの検査は、効率的な疾病診断に非常に有用な医療技術です。また、特に日本のような高度に発展した国々では、これらの検査の頻度が高くなっています。確かに、医療による被ばくは、患者への直接の利益があり、原発事故が望まれない悲劇の大災害であることを考えると、これらの被ばくは原子力施設の事故に起因する被ばくと比較されるべきではありません。しかしながら、原発事故で(この線量範囲の外挿法によって評価された)想定される健康影響および放射線量は、受容性は確かに異なるものの医療被ばくによる放射線量と比較可能です。一般に、ある放射線量において考慮されるべき放射線リスクの範囲と質に関する科学情報は、望まれず危険な放射線影響の合理的分析により得られるということが結論できます。得られた知識は、政府機関と政府が許容できる対策や必要な規則(規制)を決めるために使用されるべきです。例えば、避難や移住などの重大な対策にあたっては、経済や特に社会心理学的な側面も考慮に入れる必要が確かにあります。

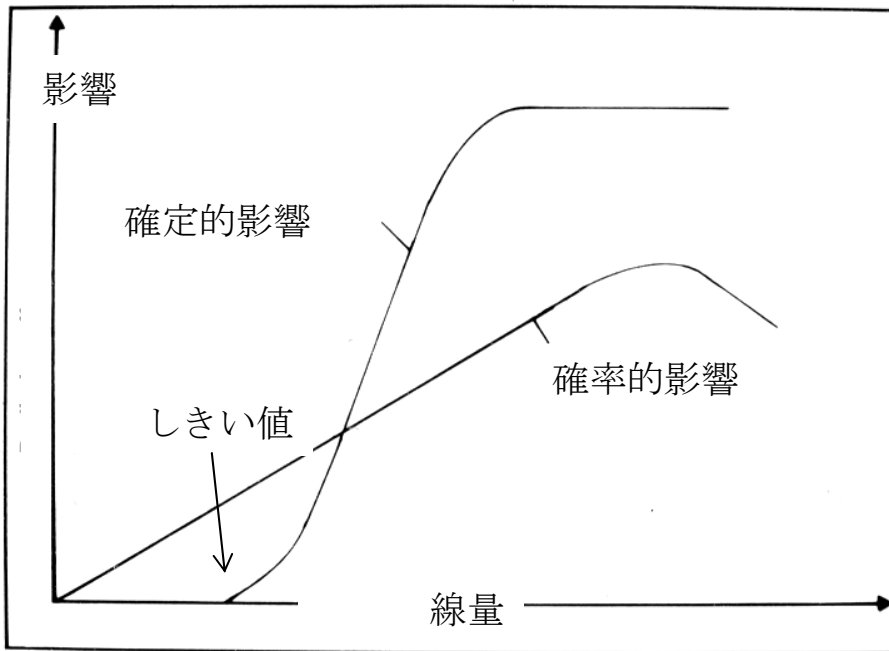


図 放射線被ばく後の健康影響の線量-影響関係。

(参考: 訳者による注)

※1 確率的影響と確定的影響

被ばくにより必ずがんになるというわけではありませんが、被ばくしなかった場合に比べ、発病の確率が高くなります。これを、確率的影響といいます。例えば、白血病や固形がんなどの症状は、被ばく線量が増加するほど発生確率も高くなり、発病した場合の重篤度は被ばく線量の大小には関係しないという特徴があります。

一方、被ばくの量があるしきい値(境となる値:この値の上下で条件や判定などが異なる)を越えると発生する症状があり、これを確定的影響といいます。例えば、白内障などがその例で、しきい線量を超える被ばくすると、被ばく線量が大きくなるにつれて症状は重くなり、発病の確率も高くなっていきます。

※2 娘核種

放射性核種が放射性崩壊することによって新しく生成された核種のこと。放射性核種Aが崩壊して核種Bに変換するときに放射線を放出します。このとき、Bを娘核種といい、またAを親核種といいます。