

放射線の影響を調べる科学研究

独立行政法人 放射線医学総合研究所 放射線安全研究センター
内山 禮子・王 冰・山内 正剛

はじめに

妊娠中や妊娠している可能性があるときには、放射線による医療診断は控えたほうがよい、というのはよく聞く話である。たとえば、妊娠中に放射線を受けると、胎児にはどのような影響が出るのであろうか。世間一般に、放射線は人体に悪影響をおよぼす危険なものという悪いイメージがあるが、きちんと理解したうえで怖がっている人は意外に少ない。放射線の影響を考えると、もっとも大切なのは被ばく量である。それが自然放射線レベルなのか、職業人(医療従事者、原子炉運転にかかわる技術者、放射線の研究者など)レベルなのか、事故被ばくレベルなのかをきちんと知る必要がある。それぞれの利便性と危険性を科学的に理解したうえで、放射線影響の有無を予測し、必要に応じて適切な対処をしなくてはならない。

放射線の人間に対する影響を研究する手法は、人体実験が一番手っ取り早く確実なのであるが、言うまでもなく、現代社会では非人道的な人体実験は許されない。したがって、われわれ人間に対する放射線の影響を調べる研究には間接的な手法を用いる。間接的な手法にはいろいろな種類のものがあるが、それぞれ長所と短所があり、完璧な方法というものは存在しない。代表的なものとして、広島や長崎で原子爆弾に被ばくした人々の協

力を得て行なう疫学研究、ヒトやマウスなどの細胞を使う研究、実験動物を使う研究などがあるが、いずれも直接的なものではない。本稿では放射線の人体影響に関して得られている主な知見と、その根拠となっている研究の内容について解説し、読者の方々が放射線の影響を正しく理解するための一助としたい。

人体の被ばく影響に関する疫学調査研究

疫学調査は、原因と結果との因果関係が必ずしも明らかでない場合に用いられる研究手法である。放射線により突然変異が発生し、がんの発生率が高まるのは、まるで常識であるかのようにいわれているが、実際にどのようなメカニズムでこれらの現象が発生するのかよくわかっていない。

たとえば、がんができたとき、それが放射線により発生したものか、または別の原因によるものであるのかどうかを区別できないのだ。放射線は遺伝子に異常を引き起こし、がんの原因になるが、ウイルスや紫外線、化学物質なども遺伝子を傷つけ、がんを起こす原因になる。細胞や遺伝子が傷ついてから、がんが発生するまでには年単位の長い期間がかかることも、因果関係の解明を困難にする理由の1つである。

因果関係が明らかでなくとも、経験的に相関関係が疑われる場合は、統計学的手法を使って解

析することができる。たとえば、喫煙がどのようなメカニズムで肺がんを引き起こすかは不明であるが、喫煙と肺がんとの相関関係は統計学的手法を用いた疫学研究によって示されている。広島や長崎で原爆の放射線に被ばくした人たちやその子孫に関しても、同様の疫学的手法を用いた調査研究が進められている。また、炉心溶融事故を起こした旧ソ連のチェルノブイリ原子力発電所の周辺住民や清掃作業員においても、放射線の健康影響を調べる疫学調査が実施されている。

これまでにいろいろな疫学調査が実施された結果、以下のようなことがわかってきた。

放射線の発がん影響

1. 白血病への影響

白血病は、毎年10万人に4~5人程度の自然発生率であるが、放射線被ばくによって発生率が高まるがんとして知られている。原爆被ばく者の疫学調査¹⁾によれば、推定被ばく線量が200 mSv (ミリシーベルト)以上の人々の間では、白血病の発生率は有意に増加している。具体的には、推定全身被ばく線量が200 mSv以下の8,500人では発症予測値の1.1倍、200~800 mSvを被ばくした13,000人では発症数は予測値の2倍、810~3,200 mSvを被ばくした8,600人では発症数は予測値の12倍に増加していた¹⁾。

放射線被ばくによる白血病の誘発では、造血組織である赤色骨髄に吸収される線量が問題となるが、通常の放射線診断で赤色骨髄に200 mSvもの被ばくを受けることはないので、白血病が誘発される可能性はほとんどないといえる。通常の検診における胸部X線撮影での被ばく線量は約0.05 mSv、腹部(胃)のX線撮影での被ばく量は約0.6 mSv程度である。ただし、比較的被ばく量が多いCTスキャンニングについては、わが国における過度の使用が発がん率を押し上げている可能性が指摘されている²⁾ので、注意を要するかもしれない。

2. 胎児への影響

胎児被ばくの発がん影響については、広島や長崎で胎児期に原子爆弾による被ばくを受けた人たちの調査が、現在も続けられている³⁾。14歳までの調査(1950~59年)では小児がんは増えていなかったが、39歳までの調査(1950~84年)では成人型のがんが増えていた。1,000 mSvの被ばくを受けた場合には自然発生の約2.8倍の率でがんが増えていた。40~44歳(1985~89年)の期間では、がんの増加は認められなかった³⁾。同じように被ばくしても、がんになる人とがんにならない人がいる理由についてはよくわかっていない。

3. 自然放射線からの影響

われわれは一般に環境放射線や自然放射線と呼ばれる自然界の放射線に被ばくしながら毎日を暮らしている。自然放射線の詳細については青山先生の稿をご参照いただきたい。

われわれ人類に限らず、この地球上に暮らすすべての生物は、自然放射線に絶えず被ばくする環境下で進化してきたので、自然放射線に対する抵抗性は十分に獲得されているにちがいないと考えられてきた。自然放射線として最も割合が多いのはラドンと呼ばれる希ガス元素である。1991年に環境中のラドンが肺がん罹患リスクを有意に引き上げる可能性⁴⁾が示唆されて以来、さまざまな研究が行なわれてきている。

いまだにラドンの生物影響については未知の部分が多く、よくわかっていない。とくに日本人は温泉をさまざまな形で療養に利用してきているが、温泉場におけるラドン濃度は通常の居住地と比較するとはるかに高いことが多い。しかし、温泉療養の回数に応じて肺がんが増加するわけではない。われわれが研究活動に従事している放射線医学総合研究所では、ラドン濃度をコントロールできる生物実験施設を完成させ、ラドンが細胞や動物個体にどのような影響をおよぼすのかについて研究を開始している。近い将来、ラドンの生物影響を分子レベルで理解し、科学的に評価できるようになると期待されている。

放射線の遺伝的影響

遺伝的影響とは、生殖細胞が外的な要因によって突然変異を起こし、生まれてくる子どもにその影響がおよぶことをいう。遺伝的影響の本質はゲノム DNA 上に生じた突然変異であると考えられている。突然変異は放射線に被ばくしなくても低い割合で自然に発生するが、放射線の遺伝的影響に関する主な知見をまとめると以下ようになる。

1. 広島・長崎での調査

1945年に広島・長崎に投下された原子爆弾で大量の放射線を浴びた人々の子どもでは、被ばくによる突然変異の誘発は検出されなかった。この調査では、原爆被ばく者の50家族(子ども64人)⁵⁾、ならびに100家族(子ども124人)⁶⁾について、反復配列を指標とした新規な突然変異の検出を試みたが、有意な差(=突然変異の誘発)は検出されなかった。同様の遺伝的背景をもつ日本人を対照集団として用いているため、統計解析結果の信頼性は高い。

2. チェルノブイリ原発周辺での調査

1986年に事故を起こした旧ソ連チェルノブイリ原発の周辺住民では突然変異の発生率が上昇していたと報告⁷⁾され、センセーショナルを巻き起こした。本解析では、1の広島・長崎での調査と同様に反復配列を指標とした突然変異の検出が行なわれたが、チェルノブイリ原発近傍のベラルーシ地域で被ばくした79家族に対する対照集団として、英国中部地方に居住する集団を用いたため、その有効性を疑問視する向きもある。また、被ばくしたとされるベラルーシ地域住民の被ばく線量の評価も不正確ではないかといわれている。同じ研究グループから、チェルノブイリ原発周辺住民で突然変異が誘発されていることを示す報告が、その後も出されている^{8,9)}。

3. チェルノブイリ原発事故後の追跡調査

事故後の旧ソ連チェルノブイリ原発を清掃した作業者の家族に生まれた子どもでは突然変異の発生率は有意に上昇していなかったとする研究報告が、複数の研究グループから出されている。

ウクライナの国立科学アカデミーの研究者らは、チェルノブイリ原発の清掃作業者の子どもたち183人と非汚染地域で暮らす対照群の子どもたち163人との間で比較解析を行ない、有意差は検出されなかったと報告した。ただし、父親の被ばく後4か月以降に受精した子どもたちと、被ばく2か月以内に受精した子どもたちとを区別してデータを見直したところ、被ばく2か月以内受精群では1.44倍の変異頻度の上昇がみられた¹⁰⁾。この知見は、男性生殖細胞は精子細胞期において放射線感受性が一番高くなるという従来からの知見と一致する。

また、フィンランドの研究グループは、エストニア人のチェルノブイリ清掃作業者の子ども155人について解析し、全体的には有意差は検出されなかったが、200 mSv以上の被ばくを受けた父親の子どもを区別したうえで比較解析を行なうと、200 mSv以上被ばく群では突然変異の発生率はわずかに上昇していたと報告した¹¹⁾。

これらの疫学研究に参加した清掃作業者の被ばく線量評価の精度は高い。また、同じ地域に居住する人々を対照集団として設定しているため、統計学的な解析精度も高いとされる。

4. マウスによる実験

実験用マウスを使った実験では、放射線の被ばく線量の上昇に伴って、次世代での突然変異の発生率が上昇する¹²⁾。本実験は、数万匹単位の実験用マウスを用いて、さまざまな線量で放射線を照射し、遺伝的影響を解析した精度の高い実験である。

数百 R(レントゲン)を超える線量の放射線を照射した場合には、照射線量と子どもでの突然変異の発生頻度との間に直線的な比例関係が認められた。ただし、最終的な照射線量の合計が同じであっても、毎分0.8 R(ほぼ8 mSvに相当)または

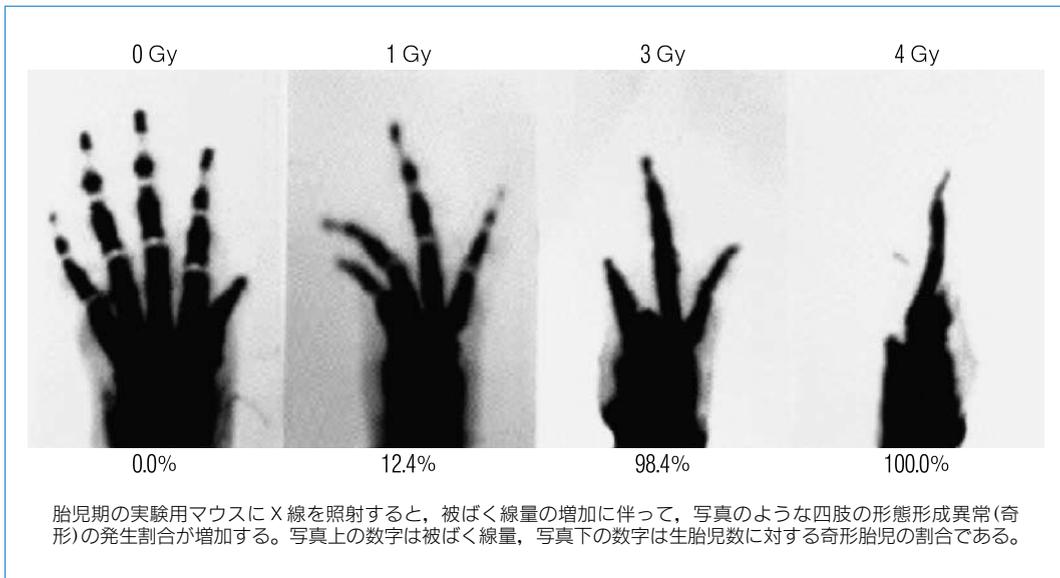


図1 胎児期のX線照射により誘発される四肢の異常

それ以下の緩性照射の場合には、出現する突然変異の数が半減した。すなわち、少量の放射線を長時間受けた場合と、強い放射線を一度に浴びた場合とでは、線量の合計が同じでも、影響の程度が異なることを示している。

これら原爆や原子炉事故などのように、被ばく線量が高い人類集団の疫学データは存在するので、100 mSvを超えるような放射線被ばくを受けた場合の健康影響については、かなり正確に科学的な評価をすることが可能である。

しかし、100 mSvよりも低い線量を被ばくした場合の健康影響については、これを科学的に説明するのに必要なデータが存在しない。このことは、1999年に臨界事故を起こしたJCOウラン加工工場の周辺住民の健康影響を評価しようとする際に一番大きな問題となり、住民の健康不安は解消されないまま今日に至っている。医療放射線による被ばくもこの線量域に入るものであるため、被験者や医療従事者の不安を解消するという意味でも、低線量放射線による被ばく影響の研究は重要性が高い。

もちろん、日本政府としてもJCO周辺住民の健康不安に対して手をこまねいていたわけではない。2000年に独立行政法人へと機構改革した放

射線医学総合研究所では、JCO周辺住民の健康影響を評価する際にもっとも問題となった低線量の放射線被ばくによる生物影響を解析するための5か年プロジェクトを立ち上げ、研究に取り組んでいる。また、自然レベルの低い線量率での放射線の影響は、青森の六ヶ所村にある環境科学技術研究所で研究されている。

放射線の胎児影響

原爆被ばく者のうち、妊娠4か月の間に胎児(母親ではない)が100 mGy以上の被ばくを受けた場合には、流産、死産、奇形などのいろいろな影響が観察されている。被ばく胎児影響に関する詳細は草間先生の稿をご参照いただきたい。ここで忘れてならないのは、人間の場合、過度の放射線に被ばくしなくても、1,000人に7人程度の割合で奇形が発生することである。新生児の5~10%くらいには何らかの先天異常が発見されることも広く知られた事実である。胎児の異常はいろいろな要因(薬剤、タバコ、アルコール、ウイルス感染、遺伝子異常など)で起こるため、明らかに放射線による異常であると判断できるのは、かなりの線量の被ばくを受けたときだけである。

実験用マウスを用いた被ばく実験では、図1に

示すような四肢の形態形成異常を伴う奇形の発生が検出されている。過度の放射線被ばくを受けない場合には、このような奇形が観察されることはないが、胎児が被ばくする放射線量が増加するに伴い、形態形成異常の程度と発生頻度のいずれも増加する。ただし、これらの被ばく放射線量は、致死線量に近いレベルであり、通常の医療被ばくの線量をはるかに超えるものである。

胎児の被ばくの影響を調べた 人体実験

人体実験は許されないと先に述べたが、1940年代から1970年代にかけて、米国では政府の研究資金を使って、放射線の影響を調べる人体実験が数多く試みられた^{13,14}。多くの実験は核戦争の勃発を想定して秘密裏に行なわれた軍事的なものであったため、スキャンダルとして発覚するまで世間にはほとんど知られていなかった。当然のことながら、実験結果が公表されているものはごく一部に過ぎない。

このような人体実験の中には、1945年から1949年に、テネシー州のバンダービルト大学病院において、貧しくて医療費が払えない820人の妊娠中の白人女性に対して放射性標識した鉄剤を投与し、その胎児への移行を観察した人体実験のように、今では到底信じられないような類のものもあった^{15,16}。この実験のあと生まれた子どもたちのうち、3人は5歳から11歳までの間にがんや白血病で死亡している。当時のテネシー州での平均的ながん死亡率は同じくらいの年齢層や人数で0.65であったので、3という数字は明らかに高かったといえる。

これらのような非人道的な人体実験は1993年以降、次々と明るみに出されて糾弾され^{13,14}、多くは損害賠償訴訟へと発展している。

自然放射線レベルが高い地域で 暮らす人々の健康状態

中国・広東省の一部は自然放射線が高い地域と

して知られており、住民の健康調査の一環として、染色体異常の発生に関する調査が行なわれた。その結果、細胞が分裂できなくなる不安定型の染色体異常は被ばくして蓄積した放射線の量に比例して増加していたが、細胞分裂を妨害しない安定型の染色体異常は増えていないという非常に興味深い調査結果が得られた^{17~19}。

発がんに関係するのは、細胞分裂を妨害しない安定型の染色体異常である。つまり、自然放射線レベルが高い地域に住んでいても、発がんに関係する安定型の染色体異常は増加していないのである。この結果は、地域住民の健康に特段の問題が生じていないこととも一致する。放射線被ばくが増える不安定型の染色体異常は、細胞分裂に伴って失われていくので、発がんにはほとんど影響しないと考えられている。事実、がん死亡率は対照地区の住民と同じであった。

疫学研究の限界

疫学研究の手法を用いることにより、因果関係のメカニズムがよくわからない場合でも、原因と結果の相関を推定することができることは先に述べた。疫学は人類集団で起こっているさまざまなことを、統計学的手法を駆使することによって、人体実験を行なうことなしに解析できるので、非常に有効な科学的研究手法であるということが出来る。しかしながら、疫学研究では、集団における傾向は把握できるものの、ある特定個人の将来を予測することはできない。

たとえば、ある集団が放射線被ばくを受けたことにより、白血病の発生率が10倍になったという疫学調査があったとしよう。通常は白血病の発症頻度は10万人に4~5人であり、それがたとえば50人に増えたとする、それは大変なことであるにちがいはないのだが、白血病にならなかった99,950人にとっては0%の発生事象であり、白血病になった50人にとっては100%の発生事象である。個人の体質に合わせたオーダーメイド医療の重要性が強調される今日には、特定個人における発症の可能性を推測できるようになるため

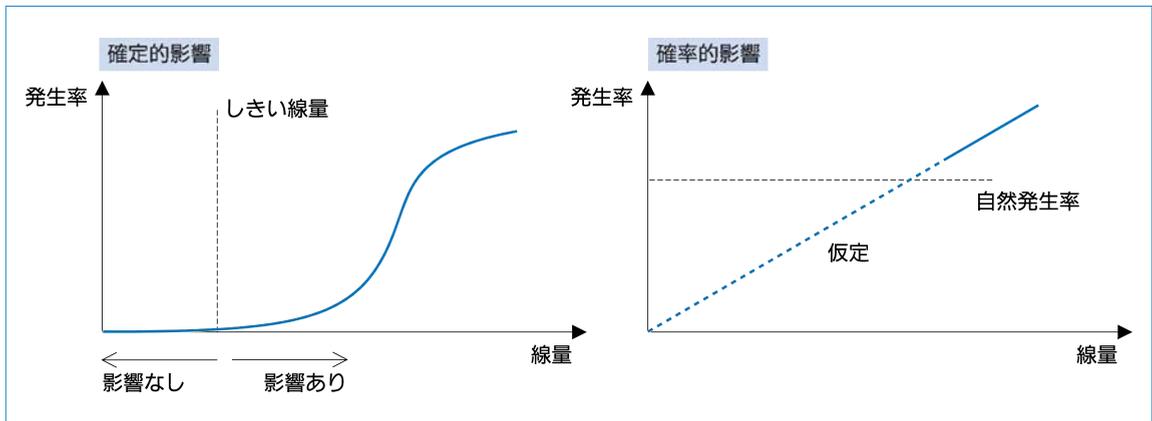


図2 確定的影響と確率的影響

確定的影響は「しきい線量」を超えないと影響が表れないが、確率的影響は被ばく線量に応じて直線的に比例して影響が表れる。

の研究が、これからますます促進されていかなく
てはならない。

放射線被ばくの確定的影響と 確率的影響 (図2)

疫学研究と関連して、放射線被ばくによる人体
影響を確定的影響と確率的影響に分けて考えるこ
とが提唱されている。放射線の生体影響は、生物
現象として未解明の部分が多いが、数学モデルを
用いて説明しようとするとき、それぞれ別のモデル
を当てはめて考えるほうが都合がよいとされる。

確定的影響とは、しきい線量を超える放射線の
被ばくを受けた場合に症状が現れるタイプの生体
影響で、脱毛、不妊、白内障などがある。「しき
い線量」とは、その被ばく量を超えたらんらか
の影響が発生する可能性が出てくる最小の値のこ
とである。しきい線量を超えて被ばくした場合
は、線量が大きくなるにつれて影響の程度が重く
なる。しきい線量以下の放射線被ばくで影響が出
ることはない。その理由は、しきい線量以下で
は、障害の原因となる細胞や遺伝子の損傷が、修
復機能によって回復し、影響が現れないためであ
ると考えられている。

これに対して、確率的影響では、被ばく線量が
大きくなるにつれて障害が発生する確率が高くな
る。発がんや遺伝的影響がこれに含まれるが、確

定的影響と異なる点は、確率的という言葉で表さ
れるように、同じ量の放射線に被ばくしても、影
響が出る人と出ない人がいる点である。確率的影
響では、どんなに少量の放射線でも、発がんや遺
伝におよぼす影響がゼロになることはなく、しき
い線量は存在しないと仮定している。この考え方は
予防原則に立ったきわめて安全なものである。
しかし、とくに 100 mSv 以下の被ばく量では、
自然に起こるがんや突然変異と発生率が変わらな
くなるので、本当に放射線の影響があるのかどう
か、どのがんが放射線に誘発されたものであるの
か、実際にはよくわからなくなってしまうという
問題がある。

おわりに

われわれが日常的に関係する放射線被ばくには、
医療機関では医師・放射線技師・看護師などが受
ける職業被ばくや、被験者が放射線を用いた検
査や治療で受ける医療被ばくがある。また、す
べての生物が自然界から受けている自然放射線か
らの被ばくがある。職業被ばくには、原子炉運
転の技術者やその周辺で働く人々、工業用・農業
用に放射線を利用する人々、放射線を研究してい
る人々の被ばくも含まれる。

医療被ばくが他の被ばくと異なる点は、被ばく
によるリスクよりも、被験者が検査や治療により
受ける利益のほうが高いことであるとされてい

る。しかし、放射線による検査を受けて、その影響を心配する人も少なくない。不安を感じる人からの問い合わせには、本人に必要な検査であったこと、放射線の影響は限りなくゼロに近いことなどを説明する必要がある。このような説明を求められたとき、その根拠となる科学的な知見を示せるか否かで説得性に大きなちがいが出てくる。

妊婦に限らず、検査を受ける人の被ばく線量をできるだけ少なくするよう、日本放射線技師会が独自のガイドラインを設定して被ばくの低減方法を検討している。もちろん、検査や治療においては、目的の場所以外に不要な放射線の被ばくがないように、細心の注意が払われなくてはならない。とくに、被ばく線量が大きいCT検査については、複数回の連続使用により200 mSvを超える被ばくが起り得るので、被験者にその必要性とリスクを十分に納得してもらったうえで実施することが望ましいであろう。

• 謝辞

本稿を執筆するにあたりご協力いただいた当センターの島田義也先生にこの場をお借りして御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 原子力百科事典 ATOMICA <http://sta-atm.jst.go.jp/atomica/index2.html>
- 2) de Gonzalez AB and Darby S: Risk of cancer from diagnostic X-rays: estimates for the UK and 14 other countries. *Lancet*, **363**: 345-351, 2004
- 3) 放射線の影響がわかる本(増補改訂). 財団法人放射線影響協会, 2000
- 4) Bridges BA, et al: Possible association between mutant frequency in peripheral lymphocytes and domestic radon concentrations. *Lancet*, **337**: 1187-89, 1991
- 5) Kodaira M, Satoh C, Hiyama K, Toyama K: Lack of effects of atomic bomb radiation on genetic instability of tandem-repetitive elements in human germ cells. *Am J Hum Genet*, **57**(6): 1275-1283, 1995
- 6) Satoh C, Takahashi N, Asakawa J, Kodaira M, Kuick R, Hanash SM, Neel JV: Genetic analysis of children of atomic bomb survivors. *Environ. Health Perspect*, **104** Suppl 3: 511-519, 1996
- 7) Dubrova YE, Nesterov VN, Krouchinsky NG, Ostapenko VA, Neumann R, Neil DL, Jeffreys AJ: Human minisatellite mutation rate after the Chernobyl accident. *Nature*, **380**(6576): 683-686, 1996
- 8) Dubrova YE, Nesterov VN, Krouchinsky NG, Ostapenko VA, Vergnaud G, Giraudeau F, Buard J, Jeffreys AJ: Further evidence for elevated human minisatellite mutation rate in Belarus eight years after the Chernobyl accident. *Mutat Res*, **381**(2): 267-278, 1997
- 9) Dubrova YE, Grant G, Chumak AA, Stezhka VA, Karakasian AN: Elevated minisatellite mutation rate in the post-Chernobyl families from Ukraine. *Am J Hum Genet*, **71**(4): 801-809, 2002
- 10) Livshits LA, Malyarchuk SG, Kravchenko SA, Matsuka GH, Lukyanova EM, Antipkin YG, Arabskaya LP, Petit E, Giraudeau F, Gourmelon P, Vergnaud G, Le Guen B: Children of Chernobyl cleanup workers do not show elevated rates of mutations in minisatellite alleles. *Radiat. Res*, **155**(1): 74-80, 2001
- 11) Kiuru A, Auvinen A, Luukkamaki M, Makkonen K, Veidebaum T, Tekkel M, Rahu M, Hakulinen T, Servomaa K, Rytomaa T, Mustonen R: Hereditary minisatellite mutations among the offspring of Estonian Chernobyl cleanup workers. *Radiat. Res*, **159**(5): 651-655, 2003
- 12) Russell WL, Kelly EM: Mutation frequencies in male mice and the estimation of genetic hazards of radiation in men. *Proc Natl Acad Sci USA*, **79**: 542-544, 1982
- 13) Resources on the Atomic Energy Commission and the Department of Defense Experiments. http://members.aol.com/_ht_a/lillithsrealm/myhomepage/Humanity/RadiationExposure/DOEResources.htm
- 14) Advisory Committee on Human Radiation Experiments. <http://www.gwu.edu/~nsarchiv/radiation/>
- 15) Hahn P, et al: Iron Metabolism in Human Pregnancy as Studied with the Radioactive Isotope. Fe-59. *Am J Obstet Gynecol*, **61**: 477-486, 1951
- 16) Hagstrom RM, et al: Long Term Effects of Radioactive Iron Administered During Human Pregnancy. *Am J Epidemiol*, **90**: 1-8, 1969
- 17) Jiang T, Hayata I, Wang C, Nakai S, Yao S, Yuan Y, Dai L, Liu Q, Chen D, Wei L, Sugahara T: Dose-effect relationship of dicentric and ring chromosomes in lymphocytes of individuals living in the high background radiation areas in China. *J Radiat Res (Tokyo)*, **41** Suppl: 63-68, 2000

- 18) Hayata I, Wang C, Zhang W, Chen D, Minamihisamatsu M, Morishima H, Yuan Y, Wei L, Sugahara T: Chromosome translocation in residents of the high background radiation areas in southern China. *J Radiat Res (Tokyo)*, **41** Suppl: 69-74, 2000
- 19) Zhang W, Wang C, Chen D, Minamihisamatsu M, Morishima H, Yuan Y, Wei L, Sugahara T, Hayata I: Imperceptible effect of radiation based on stable type chromosome aberrations accumulated in the

lymphocytes of residents in the high background radiation area in China. *J Radiat Res (Tokyo)*, **44** (1) : 69-74, 2003

●内山禮子(うちやま・れいこ)
王冰(わん・びん)
山内正剛(やまうち・まさたけ)
放射線医学総合研究所
〒263-8555 千葉県稲毛区穴川4-9-1