

放射線による内部被曝——福島原発事故に関連して——

沢田昭二

はじめに

3月11日の巨大地震と大津波によって東京電力福島第一原発はスリーマイル島原発事故を上回る大事故を引き起こした。いまなお安定的な冷却が実現できないばかりか、燃料棒の露出による水素爆発の危険は継続している。放射能が強いためその放出箇所の特定制もできず、電源確保による安定的冷却が鍵であるが、そのための作業は難航し、作業員の累積被曝はかなりの線量に達している。大気と海に放出された放射性物質がひろがり、原発から20 km圏内の住民は見通しもない長期的な避難を余儀なくされ、福島県と北関東の農作物や魚の汚染によって出荷禁止や摂取禁止措置なども深刻な影響をもたらしている。

今回の放射線被曝は、広島・長崎原爆の原子雲から降下した放射性降下物による被曝と共通性がある。日本政府は放射性降下物による被曝を無視できるとしてきた。これに対し、原爆被曝者は2003年から、国に対して全国的な集団訴訟に取り組み、放射性降下物の影響を不当に無視した岡山地裁判決を唯一の例外として、現在までに地裁と高裁で27連勝している。

この集団訴訟では、被曝者の間に起こった事実に基づいて、放射性降下物による被曝影響無視の非科学的被曝者行政の批判が行われ、その結果、今回の事故による被曝について、政府も内部被曝に触れるようになったものの、放射線影響の研究者を含めて、内部被曝に関する理解は不十分なままである。本稿では、こうした広島・長崎原爆の被曝実態に基づいて、内部被曝に重点を置いて福島原発事故による放射線被曝について考察する。

放射線被曝

放射線にはアルファ線、ベータ線、ガンマ線、X線、中性子線など様々なものがある。ベータ線は電子、アルファ線はヘリウムの原子核で、放射性原子核から数千電子ボルトないし数百万電子ボルトのエネルギーを持って放出された量子（量子化された波の塊）である。ここで電子ボルトはミクロの世界のエネルギーの単位で、eVと記し、電子と同じ電荷を持つ粒子が1ボルトの電位差の電極間で加速されて得るエネルギーが1eVである。X線やガンマ線は電磁波で、光子と呼ばれる量子として放射性原子核から放出される。X線やガンマ線の光子は、通常の可視光線や電波の光子よりもはるかに波長が短く振動数が大きい。光子の持つエネルギーは振動数に比例するのでX線の光子はおおよそ1000 eV以上、

ガンマ線の光子はおよそ10万 eV以上のエネルギーを持って原子核から放出される。

ヘリウム原子核あるいは電子は電荷を持っているので、体内を通過する時、電磁相互作用によって光子を放出し、この光子が、水、タンパク質、DNAなど、生体分子内で原子を結合する役割を担っている電子に吸収されたり、散乱されたりして、電子にエネルギーを渡す。エネルギーを受取った電子は分子から離脱し、その結果、水や生体分子が壊される。これが放射線による電離作用で、すべての放射線影響の始まりである。電離作用に必要なエネルギーはせいぜい10eVであるのに対し、放射線を構成する量子は数千eVないし数百万eVのエネルギーを持つので、一個の放射線の量子は、生体組織内で数百ないし数十万カ所の電離作用を引き起こす。可視光線や電波はX線やガンマ線と同じ電磁波であるが、その光子は1 eVに満たないエネルギーしか持たないので電離作用をせず、非電離性放射線と呼ばれる。

放射線は電離作用によって人体に障害を引き起こすので、物理学的には放射線が人体にどれくらいエネルギーを与えたかで被曝線量を表し、人体組織1 kg当たり1ジュールのエネルギーを放射線から吸収したとき1グレイ (Gy, Gray) の吸収線量という。しかし、放射線の種類によって人体への障害の程度が異なるので、X線に比べて何倍の影響を与えるかを考慮した生物学的効果比 (RBE)

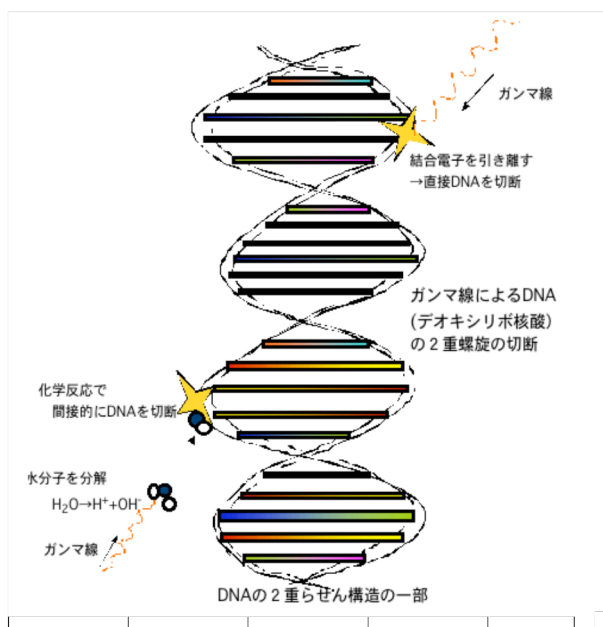


図1 放射線の電離作用。ガンマ線が電離作用によって染色体DNAの2重らせんを直接切断する場合と、細胞内の水分子 H_2O を電離して水素イオンと水酸化物イオンをつくり、水酸化物イオンがDNAと化学反応して、間接的に切断する場合を示した。

をグレイに乗じた線量当量としてシーベルト (Sv, Sievert) が用いられる。国際放射線防護委員会 (ICRP) はガンマ線とベータ線は外部被曝ではX線と同程度の影響であるとして、RBEを1とし、アルファ線のRBEを20としている。今回の福島原発事故による被曝は、1シーベルトの100分の1以下の被曝が問題になっているので1シーベルトの1000分の1のミリシーベルト (mSv)、あるいは100万分の1のマイクロシーベルト(μ Sv)の単位が用いられている。

1シーベルトのガンマ線を体重 50 kgの人が全身被曝すると、50 ジュール= 3.12×10^{20} eVのエネルギーを受けたことになり、これは全身の約60兆個の細胞1個当たり平均して52万カ所以上の電離作用、1ミリシーベルトでは細胞1個当たり平均520カ所の電離作用を受けることになる。電離作用を受けても、ほとんどの生体分子は、再びもとの状態に修復される。ところが、きわめて小さい確率で誤った修復が行われる。とくに電離作用がDNA分子の2重らせんの接近した箇所で行われると、切断箇所が誤って接合される確率が大きくなり、もとのDNA分子とは違うDNAになって染色体異常をつくり出し、次の細胞分裂を不可能にして急性放射線症を引き起こしたり、細胞分裂をしても、染色体異常を持つ細胞を再生して癌細胞につながる。

放射線被曝による障害は、発症時期によって急性放射線症と晩発性障害とに大別される。体外から放射線をあびる外部被曝による急性放射線症は一般には1週間から2週間後に発症し、内部被曝の場合には、取込んだ放射性物質が放出する放射線を浴び続けるので一般的にはさらに遅れて発症する。また、癌などの晩発性障害は被曝後数年から10年以上を経て発症する。このように放射線影響は一般に被曝からかなり遅れて発症する。このことを利用して「直ちに」健康に影響が出るレベルではない」と影響がないかのように報道するのはごまかしである。

放射線被曝による急性症状の発症も晩発性障害の発症も個人差が大きい。これを調べるために、典型的な急性放射線症である脱毛の発症率を検討する。原爆傷害調査委員会 (ABCC) が1950年代に寿命調査 (Life-Span-Study; LSS) 集団について重度脱毛発症率調査 (67%以上、60日以内発症) を行った中で広島被曝者の発症率を図2の■印で示す。図3に○印を付した曲線で表された被曝線量と脱毛発症率の関係を用いて、図2の■印の振舞全体を再現するように初期放射線と呼ばれる原爆爆発1分以内に放出されたガンマ線と中性子線による被曝線量と、放射性降下物による被曝線量を求めた。その結果が図4の被曝線量で、図2の■印を貫く太い曲線のようにきわめて良い精度で脱毛発症率を再

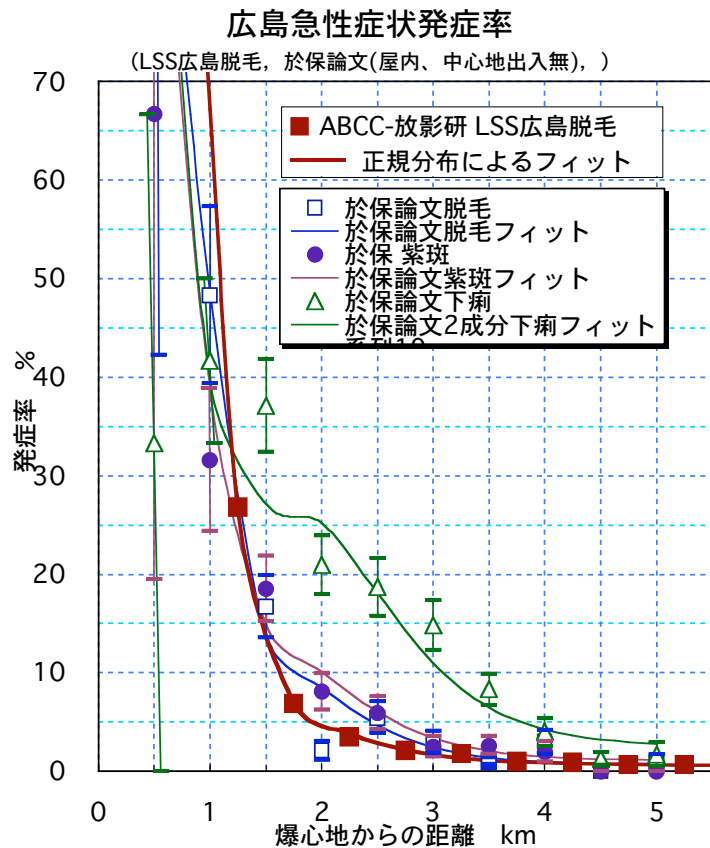


図2 広島原爆による脱毛，紫斑および下痢の爆心地からの距離による発症率。
爆心地から 0.75 kmにおける脱毛と紫斑の発症率は100%である。

現している。

図3のように，1シーベルトの被曝で5%の人が脱毛を発症するのに対し，60日以内に50%の人が死亡する半致死線量4シーベルトの被曝でも，5%以上の人は脱毛を発症しない。一般に，急性放射線症は，個人差はあるものの，その個人に特有の線量の被曝をすれば必ず発症するので「確定的」影響と呼ばれる。

外部被曝と内部被曝

放射線が生体組織を通過する時，X線とガンマ線はまばらに電離作用を引き起こすのでエネルギーを減少するまでに相当の距離を走り抜けるため透過力が強い。これに対し，アルファ線はきわめて密度の高い電離作用をして，数百万eVのエネルギーを数十 μm 走るうちに全部放出して止まるので，透過力はきわめて弱い。ベータ線はこの中間で，生体内では通常数cm走ってエネルギーを失って止まる。電離作用を行う密度が大きいと，それだけ分子の接近した箇所を切断する可能性が大きくなるので，電離作用による障害が大きくなる。こうしたことを考慮すると，国際放射線防護委員会が，内部被曝に対してベータ

線のRBEを1とすることには疑問がある。

この問題を、具体的に於保源作医師が調査した広島市の被爆者の爆心地からの距離による急性症状の脱毛、皮下出血による紫斑、下痢の発症率について見よう。図2に示したように脱毛の□印と紫斑の○印は爆心地からの距離とともにほぼ同じような変化をしている。しかし、△印の下痢の発症率は近距離では脱毛や紫斑に比べて小さく、遠距離では数倍大きい。近距離では初期放射線のガンマ線や中性子線による瞬間的な外部被曝が主要な被曝影響を与える。外部被曝では透過力の強いガンマ線が腸壁まで到達し、腸壁の細胞に障害を与えて下痢を発症させる。ところで到達したガンマ線はまばらな電離作用を行って薄い腸壁を通り抜けてしまうので、脱毛や紫斑を発症させるよりもさらに高線量のガンマ線でなければ下痢を起こさない。一方、遠距離では放射性降下物の放射性微粒子を体内に摂取したことによる内部被曝が主要になる。呼吸や飲食で取込んだベータ線を放出する放射性微粒子が腸壁に到達すると、ベータ線は密度の高い電離作用を行うので腸壁に損傷を与えて下痢を発症させる。このことを考慮して、図3に示したように、被曝線量と下痢の発症率の関係を、初期放射

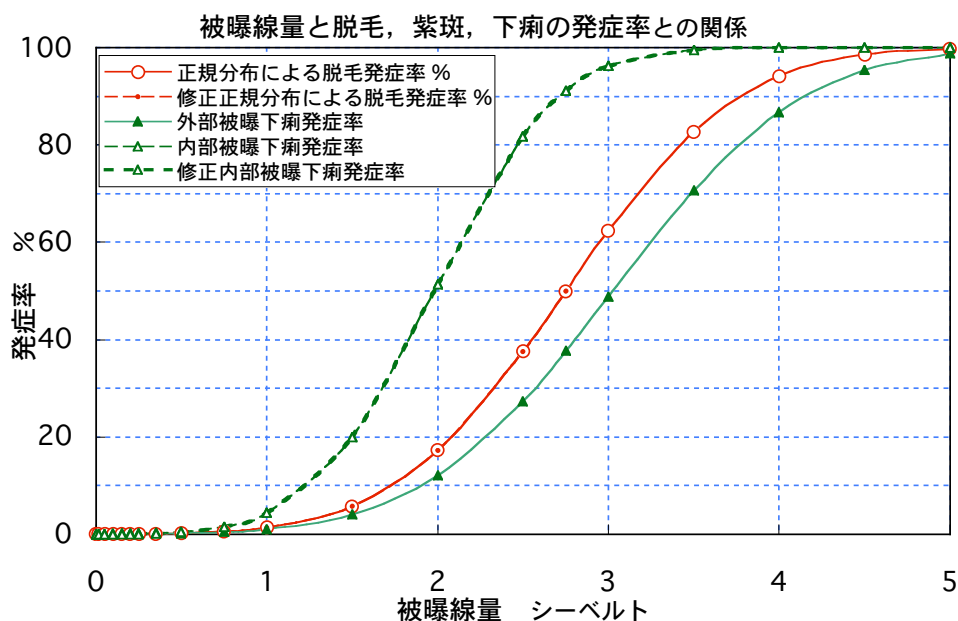


図3 被曝線量と脱毛、紫斑、下痢の発症率の関係。脱毛と紫斑については、50%の人が発症する半発症線量（感受性の平均値）を2.75シーベルト、感受性のばらつきの度合いを表す標準偏差が0.75シーベルトの正規分布 $N(2.75 \text{ Sv}, 0.79 \text{ Sv})$ 、下痢については初期放射線の外部被曝に対して正規分布 $N(3.03 \text{ Sv}, 0.87 \text{ Sv})$ 、放射性降下物の内部被曝に対して正規分布 $N(1.98 \text{ Sv}, 0.57 \text{ Sv})$ を用いた。

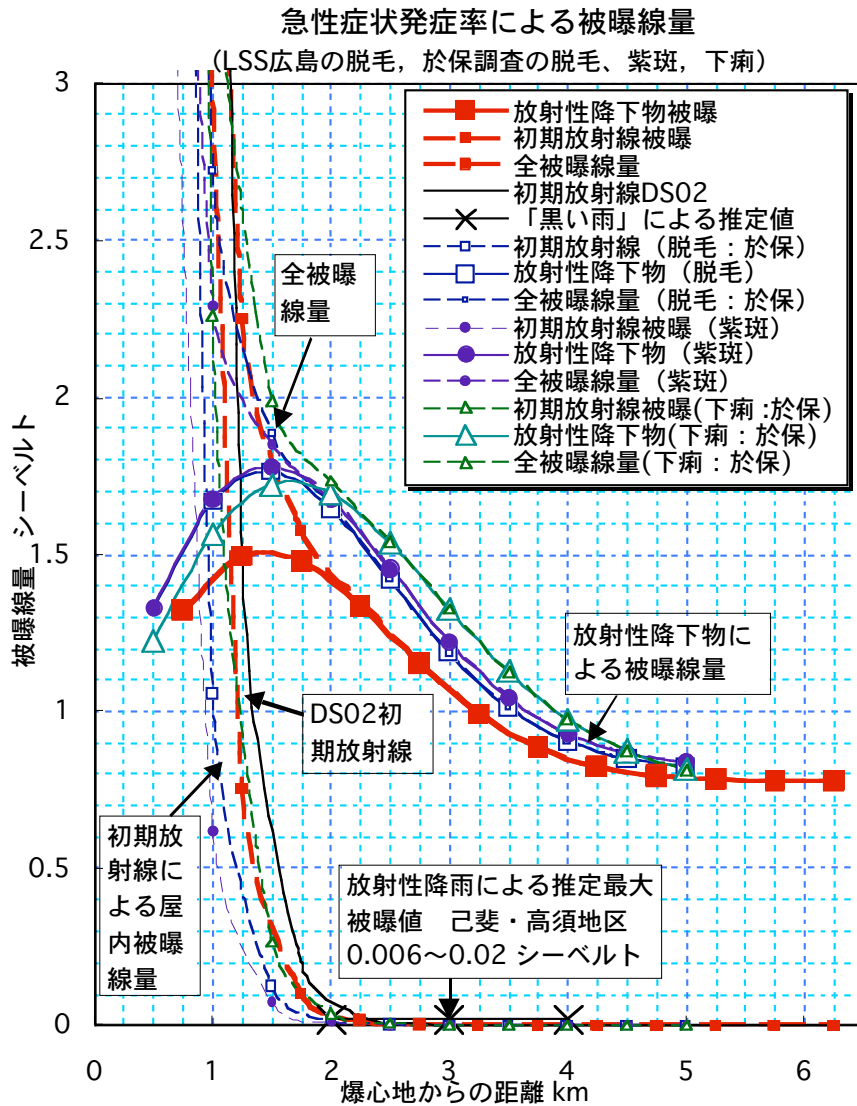


図4 急性放射線症発症率による広島原爆の推定被曝線量

線のガンマ線による外部被曝の場合には脱毛と紫斑の場合より高い被曝線量方向にずれた曲線によって与え、放射性降下物による内部被曝の場合には脱毛と紫斑の場合より低い被曝線量方向にずれた曲線を用いると、図4に示したようにほとんど同じ被曝線量によって、脱毛、紫斑、および下痢の3種の急性症状の発症率を図2の細い曲線で示したように同時に再現することができる。

このように内部被曝の障害のしくみが外部被曝と異なるのでX線やCTスキャンによる被曝と安易に比較することは適当でない。さらに、X線やCTスキャンは病気の危険を減ずることの兼ね合いで被曝を覚悟であびるもので、こうしたことを無視した比較は二重に不適當である。

今回の原発事故による拡散した放射性物質は酸化物などの微粒子として飛散

していると考えられるが、 $1\ \mu\text{m}$ 以下の大きさであれば、呼吸で鼻毛などに遮られないで肺胞を経て血液に達して全身を廻る。その際、放射性微粒子が水溶性あるいは油溶性であれば原子あるいは分子レベルに分解し、元素の種類によって特定臓器に蓄積し、集中した被曝を与える。水溶性でない場合には微粒子のまま、あるいはいくつかの微粒子に分解して循環し、体内の特定箇所に着する。 $1\ \mu\text{m}$ の微粒子でも、原理的には数百億個の放射性原子を含むこともありうるので、微粒子が沈着した周辺の細胞は大量の被曝を継続して死滅する。とくに微粒子が多数のウランやプルトニウム原子核を含む場合にはきわめて高密度の電離作用をするアルファ線を放出するので被曝影響が大きくなる。こうしたことも外部被曝にない内部被曝の特質である。

図3に示されたように放射線の影響は個人差が大きく、標準的な人が発症しなくても、放射線感受性の高い人には影響が現れることを無視してはならない。また、図4に示されたように爆心地から1.2 kmまでは初期放射線による外部被曝が主要な影響を与えているが、1.2 kmより遠距離では放射性降下物による内部被曝が主要な影響を与えたことがわかる。これまで、放射性降下物による被曝線量は、「黒い雨」と呼ばれる放射性降雨に含まれて地中に浸透し、その後の火災雨や台風による洪水で流されなかった放射性物質から放出された放射線を測定した結果で、図4に×印で示した広島爆心地から西方約2 kmから4 kmの己斐・高須地域における積算被曝線量の0.006シーベルト～0.02シーベルトである。その他の地域においては放射性降下物による被曝は無視できるとされてきた。図4に示されるように、被曝者の間に生じた急性症状から推定した値は0.85シーベルトないし1.7シーベルトで、2桁の過小評価である。この過小評価が、国際放射線防護委員会の内部被曝の軽視と、今回の福島原発事故における内部被曝影響の軽視につながっている。

ここで、被曝線量の単位のシーベルトを用いているが、急性症状の発症から求めたことからわかるように、外部被曝と同等な急性症状の発症率を与える内部被曝の影響を表しているもので、被曝当時放射性降下物による外部被曝線量が測定されておれば、これにRBEを乗じたものに相当する。

低線量被曝影響の推定

広島原爆の被曝者の間に発症した脱毛、紫斑および内部被曝による下痢について、図3に示したような被曝線量と発症率の関係が求めたので、今回の福島原発事故によって放出された放射線や、野菜や魚を経由して摂取した放射性物質による被曝影響の推定を試みる。「確定的」影響である急性症状発症には、

かつては、これ以下の被曝線量では症状は起こらないという「しきい値線量」が考えられていた。しかし、今日では図3のように分布していることがわかり、従来の「しきい値線量」に近い、発症率が5%ないし10%になる線量を「しきい値線量」と呼ぶ場合もある。ところが、古い「しきい値線量」の考え方に立って、「100 ミシーベルト以下の被曝では全く問題はありません」と言い切り、放射線感受性のきわめて高い人が発症する可能性を否定している。

被曝線量と急性症状の発症率の関係を、発症率が0.1%以下になるところまで実験によって求めることは動物実験でも困難である。また、高線量被曝から低線量被曝に引き下ろして推定する場合にも曖昧さが伴う。図3の被曝線量と発症率の曲線を低線量被曝のところを拡大してみると、被曝線量が0でも発症率は0にならない。そこで分布の修正が必要になり、その修正の方法によって被曝線量と急性症状の発症率の関係に曖昧さが生ずる。このように、低線量被曝の影響には未解明な状況が残されているが、被曝影響がないと断定することは出来ない。そこで、分布にもっともらしい修正を行ってみると、0.3 シーベルト、すなわち、300 ミシーベルトの被曝では、脱毛と紫斑の発症率は0.05%、すなわち1万人が被曝して5人、内部被曝による下痢の発症率は0.08%、すなわち1万人が被曝して8人が発症することになる。多数の細胞死によって発症する急性放射線症状は、被曝線量によって重篤度が異なり、低線量被曝では限定的・部分的発症となって臨床的には検出されない可能性があり、まれな発症の発見も難しいと考えられるので、福島原発事故による被曝影響の検出は、白血球減少症のように発症を検出しやすいものに頼らざるを得ない。

低線量被曝と晩発性障害

癌あるいは悪性新生物などの晩発性障害の大部分は、放射線に被曝しても必ずしも発症するとは限らない。しかし、被曝線量が増えれば一般的に発症率が大きくなる。このような障害を確率的影響という。一般に晩発性障害の原因には、放射線被曝以外にも様々な原因があり、障害の起因性を急性症状のように放射線被曝であると特定することは困難である。そのため、全く放射線被曝をしていない人々の集団の発症率と比較して被曝影響を求めることになる。特定個人の晩発性障害が放射線被曝によるかどうかの判定には、その個人の被曝前後の健康状態の変化を含め、過去からのさまざまな健康状態や他の疾病の経緯を総合して判断することになる。被曝線量と晩発性障害の発症との関係は、例外もあるが、中程度の被曝の場合には、晩発性障害発症率の増加が被曝線量に

比例すると考えられている。この関係がそのまま、低線量領域においても成り立つかどうかについては、様々なモデルが提唱されて、明確な結論はいまだに得られていない。最近になって、マイクロビームの放射線を特定細胞に照射し、その細胞に生じた障害が、照射を受けなかった隣接細胞にも生ずるバイスタンダー効果が確認されており、低線量被曝の方が深刻な傷害を引き起こす可能性も示唆されている。

こうした問題があるが、具体的に低線量被曝影響を推定するために、広島大学原爆放射線医科学研究所（原医研）が広島県居住の被曝者の悪性新生物による死亡率を広島県民と比較した研究「昭和 43～47 年における広島県内居住被曝者の死因別死亡統計」にもとづいて、被曝による悪性新生物年間死亡率の増加を求める。この論文は、爆心地から 1 km 以内、1 km～1.5 km、1.5 km～2 km、2 km～6 km の各区分の直爆被曝者と非被曝の広島県民の悪性新生物による 1 年間の死亡率に対し、それぞれ 0.504 %、0.454 %、0.347 %、0.374 %、0.186 % を得た。これらの死亡率を、図 4 に■印で示した ABCC の脱毛発症率から求めた合計被曝線量に対して図 5 に示す。爆心地から 1 km 未満の直爆被曝者の大半は、半致死線量の 4 シーベルト以上を被曝し、1968 年までに死亡していることを考慮してこれを除き、悪性新生物の増加が被曝線量に比例するとして回帰直線を求めると、年間死亡率 = 0.138% × 被曝線量 + 0.186% となる。すな

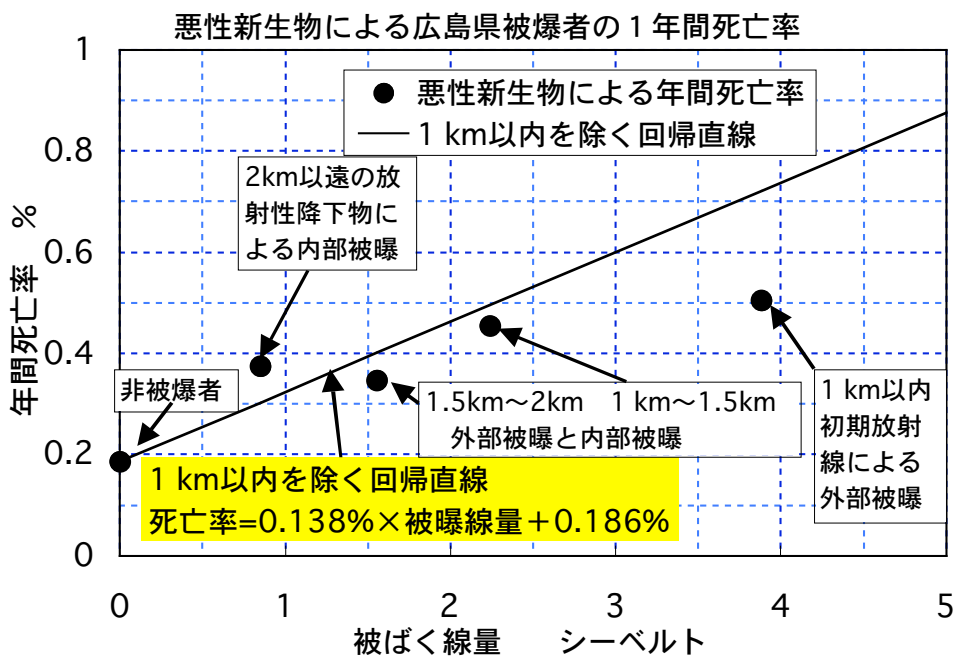


図 5 広島県居住被曝者の悪性新生物による 1 年間死亡率と被曝線量の関係

わち、悪性新生物による年間死亡率は1シーベルトの被曝により0.138%増加する。低線量被曝まで被曝線量に比例するとして、100万人が10³シーベルトの被曝をすると10年間で悪性新生物によって死亡する人が138人増えることになる。晩発性障害に対しても個人差や年齢差が大きく分布しており、抵抗力が弱いとされている人の場合には100³シーベルトの被曝は要注意である。ところが専門家の意見を聞いて白血球減少症状が起こらないから作業員の作業被曝線量を250³シーベルトに引き上げた。しかし、しきい値論に立っての判断は危険で、作業員に被曝影響が出て、しきい値以下だから放射線影響ではないと切り捨てる可能性がある。

おわりに

原発は未完成な技術である上に、地震と人口密集の日本ではいっそう危険性が高いので、エネルギー政策を原発から転換すべきだと考えてきた。安全性の問題に加えて、①放射性廃棄物の処理に見通しがいいこと、②米国核兵器産業維持のための日米原子力協定でスタートしたこと、③原子力平和利用の自主・民主・公開の3原則のすべてに反する原子力政策の実態、④国民の安全に責任を持つ独立した原子力安全委員会ないし規制委員会がないことなどの問題があり、一刻も早く原発を終息させ、エネルギー政策を太陽光発電などに変換すべきである。中部電力浜岡原発は、東海地震の震源域の真上にあり、福島原発以上に深刻な事態を招く可能性がもっとも高い危険な原発である。そこで、3月15日に原発問題愛知県連絡センターと日本共産党愛知県委員会が共同で中電に原発の即時停止を申し入れた。

図5に示したように被曝者の悪性新生物による死亡率は非被曝者よりも高いにもかかわらず、全死因による死亡率は男女とも非被曝者より9%低率である。このことは、許容限度の被曝であるとして放置するのではなく、原発周辺の作業員など、今回の放射線によって被曝した人々に対する健康管理を、国の責任で行う体制づくりの重要性を示している。