

原爆の残留放射能と内部被曝

沢田昭二

1. 原爆被害

1-1. 初期放射線と火球

広島原爆の爆発

1945年8月6日、ウラン原爆が広島の上空約600mで、100万分の1秒間以下の瞬間に約800gのウラン235の原子核が核分裂の連鎖反応を起こし、高性能火薬TNT1万6000t分の爆発に相当するエネルギーを放出して「この世の地獄」をつくり出した。3日後の8月9日、長崎の上空約500メートルで100万分の1秒以内に約1kgのプルトニウム239の原子核が核分裂して、TNT火薬約2万2000tの爆発に相当するエネルギーを放出し、「この世の地獄」を長崎に再現した。図1に原爆の物理的影響をまとめた。

初期放射線と火球の生成

核分裂の連鎖反応でつくられた大量のガンマ線と中性子が、爆弾容器を貫いて大気中に放出された。放出されたガンマ線の大部分を吸収した周辺の大気は、数百万度・数十万気圧という超高温・超高压のプラズマ状態の火球をつくり出した。大気に吸収されなかったガンマ線と、大気中の原子核が中性子を吸収して放出したガンマ線も合わさって、図2のように地上に到達した。原爆が爆発して1分以内に放出されたガンマ線と中性子線を**初期放射線**という。初期放射線は最初に人びとの身体の外から身体の内部を貫いて急性**外部被曝**をもたらした。

熱線

生成直後の火球は超高温で、主にガンマ線、X線、紫外線を放出しながら膨張し、急速に温度を下げた。爆発約0.003秒後、火球の表面温度が太陽の表面温度と同じ数千度になると、火球の表面から可視光線を放出するようにな

る。このとき、人びとは初めてピカッと強烈な光を感じた。つづいて数秒後まで火球から熱線が放射され、この熱線によって人びとは生きたまま焼き殺された。熱線のエネルギーは原爆の全放出エネルギーの約3分の1に達した。

熱線から約3秒間に、爆心地では1平方m当たり120cal、爆心地から1kmの地点では27cal、4kmでは1.2calの熱エネルギーを受けた。太陽光線から3秒間に受ける熱エネルギーは1平方m当たり約0.01calであるから、4kmで太陽光線の100倍以上、爆心地では1万倍以上の原爆の熱線による影響を受けた。爆心地では熱線によって地表面は3000~4000°Cになり、爆心地から1km以内では、屋根瓦の表面がとけてぶつぶつの泡ができたので1800°C以上の温度になった。爆心地から広島で3.5km、長崎の爆心地から4kmで被爆した人は、露出した皮膚に熱傷を負った。人びとは熱線で焼けただれた皮膚をぼろ切れのようにぶら下げて逃げた。原爆による熱傷は、皮膚の深いところまで達したので、皮膚が身体からはがれたためである。

衝撃波と爆風

火球の表面の膨張で火球外周の大気圧が急激に大きくなり、この高压空気のショックフロントが火球から離れ、音速を超えるスピードで広がった。これが原爆の**衝撃波**である。地面から反射した衝撃波と火球から直接到達した衝撃波が合成されて地表付近の衝撃波はさらに高压となって広がった。衝撃波の高压とその前面の大気圧との圧力差によって空気の流れである**爆風**が発生した。

衝撃波は音波と同じ空気の圧力の強弱の伝搬で空気の移動を伴わない。衝撃波の伝搬

速度は遠方では音速に近づく。爆心地から 1 km 地点の 1 平方 m の面積が衝撃波から瞬間的に受ける圧力は 10 t 前後に及び、鉄筋コンクリート以外の建物は完全に破壊された。爆風は衝撃波の後を追うように最初は爆心地から外向きに吹き、衝撃波の圧力が大気圧より低い部分が通過した後は、爆心地の方向に揺り戻しの強風が発生した。爆風によって建物は倒壊し、人びとは倒壊した建物に閉じこめられ、さらに熱線で生じた火事によって焼き殺された。衝撃波と爆風のエネルギーは原爆の全エネルギーの約 2 分の 1 に相当した。

1-2. 原爆の残留放射能

放射能を帯びた「きのこ雲」

広島原爆の火球には、

- (1) 核分裂生成物の原子核 約 3.6×10^{24} 個
(3兆6千億個の1兆倍)、
- (2) 核分裂で生成された中性子を吸収して誘導放射化された原爆の装置と容器の原子核
(2~5) $\times 10^{24}$ 個 (2兆個~5兆個の1兆倍)、
- (3) 核分裂の連鎖反応をしなかったウラン
235 の原子核
約 1.5×10^{26} 個 (150兆個の1兆倍)

が含まれていたと計算される。長崎原爆の火球には、

- (1) 核分裂生成物の原子核 約 5×10^{24} 個
(5兆個の1兆倍)、
- (2) 核分裂で生成された中性子を吸収して誘導放射化された原爆の装置と容器の原子核
(2~5) $\times 10^{24}$ 個 (2兆個~5兆個の1兆倍)、
- (3) 核分裂の連鎖反応をしなかったプルトニウム
239 の原子核
約 4×10^{25} 個 (40兆個の1兆倍)

が含まれていたと計算される。

火球は膨張をつづけ、原爆の爆発から数秒後には火球の半径が 200 m~300 m に達した。火球は膨張とともに上昇を始め、温度が下がって光らなくなる。数千度以下に温度が下がると、火球に含まれていたさまざまな放射性の原子核は再び電子と結びついて放射性原子になり、原子どうしがくっついて分子がつく

られる。さらにいくつかの分子がくっついて放射性微粒子ができる。この微粒子に水蒸気が吸着して放射能を帯びた水滴ができ「きのこ雲」が生成された。「きのこ雲」が上昇して圏界面に達すると形が崩れ、大部分は四方に広がり、一部は成層圏まで上昇した。

図3は原爆投下約1時間後にエノラ・ゲイに随伴していた観測機が、広島市の南南東約70 kmの松山市付近の上空から撮影したもので、手前に爆心地から約30 km離れた倉橋島が見え、「きのこ雲」の雲頂は地上約14 km前後、「きのこ雲」の幅は約20 km程度に広がっていることがわかる。

広島と異なって山が接近している長崎市の北部上空で、気温が上昇した昼近くになって原爆が爆発したために、広島に比べて「きのこ雲」の雲柱がやや細く、粉塵の量もやや少なかった。図4に示した長崎の雲仙岳測候所からのスケッチによると、圏界面を突き破った「きのこ雲」の中央部分がさらに上空に達し、また圏界面で崩れた部分が横に広い範囲に広がった。「黒い雨」が強く降下した地域は爆心地から東方約3 kmの西山地域であるが、それは「きのこ雲」の中央部分に相当する。崩れた「きのこ雲」が広がった範囲は図4から推定すると爆心地から南方約22 kmの野母崎まで、北方も同程度まで広がっている。

放射性物質の降下

「きのこ雲」の周辺部では水分が蒸発し、水滴は乾いて放射性微粒子にもどり、微粒子が集合して「黒いすす」になった。他方、図5のように「きのこ雲」の中央部分と日陰の部分では水滴がさらに成長して「黒い雨」になった。「黒い雨」は降下する途中で放射性微粒子を取り込んでいっそう強い放射能を帯びた。爆心地に近い地域では「きのこ雲」に伴う上昇気流が支配的で、水滴はさらに成長して強い「黒い雨」を降らせた。爆心地付近の上昇していった大気を埋め合わせるように爆心地に向けて大気が吹き込んだ。そのため爆心地からやや離れた地域では図5に示すように下降気流が支配的になり、小さな水滴の水分が

蒸発し、「黒いすす」や放射性微粒子になって降下してきた。このような「黒い雨」、「黒いすす」、放射性微粒子を放射性降下物と呼ぶ。

広島では太陽光線が遮られた方向に「きのこ雲」の中心が移動したために、「黒い雨」と火災による煙のために「黒いすす」には気づいた被爆者は少なかった。太陽に照らされた南東方向では「黒い雨」が少なく、火災の煙に遮られなかった地域では「黒い煤」の降下が証言されている。ミクロン程度以下の大きさの放射能を帯びた放射性微粒子は目に見えないが、「黒いすす」とともに「きのこ雲」が覆った範囲よりもはるかに広い範囲に降下したと推定される。

長崎の爆心地から10 km以上離れた南東方向から北東方向にかけての地域では、「黒いすす」や放射性微粒子が太陽光線を遮って広がり、太陽が真っ赤な火の玉のように見えたという証言が多数寄せられている。この広範囲な地域には、僅かに「黒い雨」が降ったところもあるが、主として「黒いすす」と放射性微粒子が放射性降下物として降下した。そのため、主として「黒いすす」と放射性微粒子によって人々に外部被曝と内部被曝をもたらしたと考えられる。

放射性降下物による被曝

放射性降下物は大気中および地面に蓄積し、アルファ線、ベータ線およびガンマ線を放出して人びとに身体の外から外部被曝させた。

「黒い雨」のしぶき、「黒いすす」、放射性微粒子の中で、大きさが数ミクロン以下のものは、呼吸によって吸い込まれ肺胞にまで達したり、飲食によって摂取される。放射性物質は血管やリンパ管を通して体の中を移動し、組織や器官に沈着して、周辺の細胞に身体の中から内部被曝させる。

誘導放射能

爆心地付近では大量の中性子が建造物や土砂をつくっている原子核に吸収されて放射性原子核に変える誘導放射化が起こる。誘導放射化された原子核は主としてガンマ線とベータ線を放出しつづける。そのため、爆心地

周辺に滞在したり、直接被曝しなくても救援活動や肉親を探して爆心地近くをさまよった人は、誘導放射能によって外部被曝と同時に内部被曝もした。放射能は放射性原子核の種類ごとに定まっている半減期にしたがって次第に弱くなっていく。誘導放射化された原子核から放出された放射線による外部被曝線量は、被爆後から滞在した場所の爆心地からの距離と滞在時間がわかれば、物理学的な計算によって推測できる。

原爆の爆発から1分以後に放出されたものを**残留放射線**と呼ぶ。残留放射線には、誘導放射能と放射性降下物によるものがあり、アルファ線、ベータ線、ガンマ線が含まれる。アルファ線やベータ線は透過力が弱いので、身体の外からあびる外部被曝の場合、衣服や皮膚の表面で止まって、身体の中には入らない。しかし、呼吸や飲食を通じてアルファ線やベータ線を放出する放射性微粒子などをとりこんで起こる内部被曝では、放射線のエネルギーを集中して細胞などに与えるため、透過力の弱いほど逆に深刻な影響を及ぼす。

放射性降下物に加わった粉塵

爆心地付近では地上の建造物や土砂が誘導放射化されて放射能を帯びた。これら放射能を帯びた土煙などが粉塵となり、「きのこ雲」の上昇にともなって一旦吸い上げられ、やがて降下して放射性降下物に加わった。さらに、原爆の熱線によって発生した空前の大火災で、巨大な火事嵐や竜巻が生じ、誘導放射化された地上の土砂や物体が巻き上げられて、再び地上に降下してきたものも放射性降下物に含まれる。

1-3. 原爆の物理的影響のまとめ

図1に示したように原爆の物理的影響はきわめて多岐にわたる。しかし、これらの影響影響を、個々バラバラにとらえることはできない。怪我と火傷に放射線被曝が重なって、これらの障害の治癒機能を奪って障害の悪化を招いて死に至らせたり、治癒を遅らせたりした。また、医療施設の壊滅や、肉親を失い、

住居を奪われて生活基盤を喪失したことは、その後の原爆後障害による苦しみをいっそう深刻なものにした。

1-4. 原爆による死者数

広島と長崎の原爆によって死亡した人の数は、正確にわかっていないが、「核兵器禁止と核兵器使用禁止を国連に要請する国民代表团」による『広島・長崎の原爆災害とその後遺—国連事務総長への報告』と、1977年の「被爆の実相とその後遺・被爆者の実情に関する国際シンポジウム」において明らかにされた死者数が最も信頼されたものになっている。それによると、広島で直接被爆した一般人は31~32万人、軍人は約4万人であったとして、1945年12月末までに死亡した人数は約14万人±1万人と推定され、長崎では全体で27~28万人が直接被爆したとして、死亡した人数は約7万人±1万人と推定されている。

その他、原爆の爆発後1週間以内に広島市に入った人が、1950年の国勢調査で37,000人いたことがわかっており、こうした入市被爆者の中に残留放射能の影響で死亡した人がいたことも考慮しなければならない。さらに、中国、朝鮮から強制連行された人が、広島で数万人、長崎で約1万人が被爆しているが、その実態は今なお不明確なままである。

2. 放射線の人体影響

2-1. 放射線の電離作用と吸収線量

放射線が生物体を通過したり、生物体に吸収されたりしたとき、図6に示すように、生物体の細胞を構成するタンパク質や水などの分子中の電子にエネルギーを与え、エネルギーを得た電子が分子から飛び出す。これを電離作用という。放射線の生物体への影響はこの電離作用によって引き起こされる。

生体内における電離作用を引き起こすのに必要なエネルギーは10電子ボルト(eV)未満である(電子と同じ電荷をもつ粒子が1Vの電位差によって加速されて得たエネルギーを1eVとする)。放出された放射線のエネルギーはさまざまであるが、通例1個の放射線粒

子は1000eVから数百万eVにわたるエネルギーを持っている。1000eVから数百万eVのエネルギーを持つ1個の放射線が身体を貫き、電離作用によってエネルギーを放出し尽くすと、数百個から数十万個の電子を電離させていることになり、図6に示したようにタンパク質分子を破壊したり、水分子などを分解して活性酸素を発生させて細胞に悪影響を与える原因をつくる。図7にさまざまな染色体異常の例を示した。

放射線の影響は、電離作用によって生体に与えたエネルギーに比例するので、放射線の強さは、生体の単位の重さ当たり放射線から吸収するエネルギーによって表せる。そこで放射線の線量の単位として、物質が単位の重さ当たり放射線から吸収するエネルギーを吸収線量とし、1kg当たり1ジュールのエネルギーを与える放射線を1グレイ(Gray, Gy)として吸収線量の単位とする。旧単位として用いられたラド(rad)は $1\text{ rad} = 1/100\text{ Gy} = 1\text{ センチグレイ (cGy)}$ である。

DNAなどの生体分子は、切断されてもそれを修復する機能を持っていて、ほとんど元通りに修復される。しかし、数十万分のいくらの小さな確率で誤った修復が起こる。さらに、集中した場所に大量の切断が起こったり、切断の修復をする前に再び放射線をあびて近くで切断が起これば、修復できなくなって、細胞が死んでしまい、さまざまな急性症状を起こして死に至ることにもなる。また、DNAが誤って修復されて染色体異常が起こると、それが将来のがんや遺伝的障害につながる。

2-2. 高いLETと低いLETの放射線

同じ吸収線量でも、放射線の種類によって、生体の中で集中して電離作用を行うか、比較的まばらな電離作用を行うかによって生体の受ける損傷が異なる。集中して電離作用を行う放射線を高いLETの放射線、比較的まばらな電離作用を行う放射線を低いLETの放射線という。LETは線形エネルギー転移 Linear

Energy Transfer の略で、放射線が単位の距離 1 ミクロン (1 μm) 走ってどのくらいの密度で電離作用を行い、生体にエネルギーを移行させるかを表す。

一般に重い粒子ほど光に比べて速度が遅く、速度が遅いほど高い LET の放射線となり、また粒子が大きい電荷を持つほど高い LET の放射線となる。原子核や陽子 (水素原子の原子核) などは重い粒子で、高い LET の放射線になる。アルファ線はヘリウムの原子核 ${}^4_2\text{He}$ が高エネルギーで走るものであるが、電荷は 2 であり核子の数は 4 で重いので典型的な高い LET の放射線である。これに対し、電子は陽子の 1840 分の 1 とはるかに軽いので、低い LET の放射線である。ガンマ線は電荷を持たないが、図 8a に示したようにガンマ線を吸収した電子がエネルギーを得て電離し、さらにこの電子が次々と電離作用をするので低い LET の放射線といえる。

中性子は電荷を持っていないので直接電離作用を行わないが、図 8b のように高速で走ってきた中性子が陽子や原子核に衝突すると、衝突された陽子や原子核が走り出す。陽子や電荷を帯びた原子核は高い LET の放射線なので、中性子線も高い LET の放射線と見なされる。衝突を繰り返してエネルギーを失った中性子は、その速さに逆比例して衝突した原子核に吸収されやすくなる。エネルギーの低い中性子を吸収した原子核が走るとその原子核は高い LET の放射線となるが、その原子核は一般に低い LET の電子やガンマ線を放出する。そのため、中性子線はエネルギーが低いほど LET が小さくなる。

生物学的効果比と線量当量

放射線が細胞内のタンパク質分子や水分子などに電離作用を引き起こすとき、LET が大きい放射線ほど、生体に与える影響は大きい。そこでガンマ線の生物体への影響を基準にして、その何倍の損傷を与えるかを生物学的効果比 relative biological effectiveness (RBE) によって表す。RBE は、生体に引き起こされた損傷の度合いを医学的に調べて得られるが、

一般に LET が大きいほど RBE も大きくなる。例えば、アルファ線はガンマ線の 20~30 倍の生体影響を与えるので国際放射線防護委員会 (ICRP) は RBE 20 を勧告している。中性子線は低エネルギーと高エネルギーとで影響が異なり、ガンマ線の 5 倍ないし 30 倍の影響を与えるので、ICRP は RBE を 5~20 としている。

このような放射線の生物への影響を考慮した線量としては、吸収線量に RBE を乗じた線量当量が用いられる。RBE を乗じて 1Gy のガンマ線と同じ生物学的影響を与える線量当量の単位を 1 シーベルト (Sv) とする。旧単位はレム (rem) で 1 rem = 1/100 Sv である。そこで、ガンマ線の生物学的効果比は 1 であるから、吸収線量と線量当量の数値は同じで、吸収線量 1 Gy のガンマ線の線量当量は 1 Sv である。これに対し、生物学的効果比が 5 ないし 20 の中性子線の、吸収線量 1 グレイの中性子線の線量当量は 5 倍ないし 20 倍した 5~20 Sv になる。アルファ線の生物学的効果比を 20 とすると、吸収線量 1 Gy のアルファ線の線量当量は 20 Sv である。

2-3. 放射線障害

急性放射線症

即死を免れたものの、熱線と衝撃波や爆風で深刻な火傷や怪我をした人の多くが原爆投下から 1~2 週間の間に死亡した。火傷や怪我をしなかった人も、放射線被曝の影響によって被曝当日から悪心、嘔吐、下痢などの急性放射線症の症状が現れ、さらに 2~3 週間目に入ると、高熱、咽喉壊疽、皮下出血・紫斑、脱毛などの急性放射線症の症状を起こし、放射線を多くあびた人から次つぎと死亡していった。急性放射線症は、被曝した線量が多いほど重症になる。放射線をあびた人の 50% が 60 日以内に死亡する被曝線量を半致死線量と呼ぶ。半致死線量は約 4 Gy と考えられている。

被曝線量の少なかった人の急性症状は一定の時期を過ぎると回復した。原爆爆発後早い時期に入市した被爆者や遠距離被爆者の中に

も、少なくない人に急性放射線症が発症した。これら遠距離被爆者や入市被爆者の急性症状は、近距離被爆者とまったく同じ症状を遅れて発症し、重い症状を経て死亡する人もいた。

晩発性放射線症

急性症状から回復しても被爆者にはさまざまな放射線症が起こった。これらの症状を晩発性放射線症という。被爆するまでは健康でほとんど病気をしなかったのに、被爆後はさまざまな病気にかかり、満身に仕事ができなくなった被爆者も少なくない。被爆して数年後から白血病、さらに遅れてさまざまな種類のがんや白内障、甲状腺異常、肝臓機能低下などの症状が現れ、今日でも多くの被爆者が苦しんでいる。放射線による晩発性症状は、一般に被曝線量が多いほど高い確率で発症するが、一旦発症するとその程度は被曝線量にはよらない。さらに症状は、原爆放射線以外の原因で発症した場合と区別できない場合がほとんどである。また、診察を受けても異常が見つからないにもかかわらず、身体がだるく思うように動かない「原爆ぶらぶら病」と呼ばれる状態が多くの被爆者に現れた。特定の臓器のがんが発症し、転移ではなく次つぎと他の臓器のがんも発症する多臓器がんになる割合が多いのも被爆者のがんの特徴である。

2-4. 外部被曝と内部被曝

原爆の初期放射線による被曝はきわめて瞬間的に身体の外から被曝する外部被曝である。遠距離ではガンマ線の主なものは空気中の原子核が中性子を吸収して誘導放射化されたときに放出されたものの割合が多くなり、また中性子線は空気中の原子核によって散乱されるので、遠距離における初期放射線は爆心地の方向以外の方向からも被爆者に照射される。被曝線量は身体の表面から身体の内部にいたるほど弱くなるが、初期放射線のガンマ線も中性子線も透過力が強いので、吸収線量や線量当量によって被曝影響を表すことは、それほど問題はない。

しかし、残留放射能を持つ物質を体の中に

取り込んだ場合は、図9aと図9bの比較で示すように、放射性微粒子が身体の特定の場所に定着して継続して被曝させる内部被曝では、微粒子を取り巻く細胞に集中した電離作用を起こすので、身体全体や特定臓器などについて平均的な被曝影響を示す吸収線量や線量当量は、内部被曝の影響評価を行う適切な表現とは言えない。

水溶性と非水溶性放射性物質による内部被曝

放射性物質を体内に取り込んだとき、水溶性（あるいは油溶性）の場合は、微粒子の形で体内に取り込まれた場合でも、放射性物質が血液やリンパ液に溶けて、1個の原子または分子のレベルでばらばらに分散して体内全体に広がる。元素の種類によっては特定の器官に比較的集中して滞留することが起こる。例えば、放射性ヨウ素の分子が何万倍にも濃縮されて甲状腺に集まるとか、燐やコバルトが濃縮されて骨髄に集まるなどである。こうした場合でも、尿などの排泄物などには微量ながらも放射性の原子や分子が含まれて検出できるので、その測定から身体に取り込んだ放射性物質の量を推定できる。

ところが、水溶性や油溶性でない放射性微粒子が取り込まれ、微粒子がある程度の大きさを保ったまま固着すると、図9bに示したように、その周辺の細胞が集中して被曝する。具体例として核分裂で生じたストロンチウム95の微粒子が放射性降下物になった場合を考える。微粒子が地上に達した30分後には、ストロンチウム95はすでにベータ崩壊をくり返してイットリウム95を経てジルコニウム95の微粒子になっている。ジルコニウム95はベータ崩壊し、さらにニオブ95の微粒子になってベータ崩壊して安定なモリブデン95になる。ジルコニウム95とニオブ95が平均飛程2.5mmのベータ線を放出したとして、周辺細胞のあびる被曝線量を計算すると図10に示したようになる。微粒子の直径が1 μ mの場合は直近の細胞は2ヶ月間で数百Gyという、半致死量の100倍のベータ線による被曝をして死んでしまう。その周辺の0.3mmまでの数十

ないし数百の細胞は1 Gy 以上のさまざまな被曝線量をあび、どのような後障害につながってもおかしくない。このように放射性微粒子が沈着した場合には、沈着した部位から、かなり持続的に透過力の強い放射線を出し続けるような場合を除いて、放射性微粒子を特定することも困難であり、排泄物から推定することもできない。このような放射性微粒子による影響は、微粒子の大きさ、微粒子に含まれる放射性元素と放出される放射線の種類に大きく依存する。また、この影響を、RBE のように単純な因子で表現するのも困難である。

このように同じ内部被曝でも、水溶性や油溶性の放射性物質を摂取した場合と非水溶性や非油溶性の放射性微粒子を摂取した場合とはまったく異なった被曝影響を生ずるが、後者については、その放射線源になっている微粒子の検出はほとんど不可能であるため、これまでの内部被曝の研究は不十分ながらも前者のみで、後者に関する研究はほとんど進められていない。

入市被曝者が爆心地付近に入り、中性子線によって誘導放射化された残留放射能を帯びた微粒子を体内に取り込んだ場合には、入市の期日にもよるが、一般に半減期が数時間以上から数年間、あるいはそれ以上の放射性原子核から放射された放射線によって体内被曝する。とくに土埃に含まれる半減期 84 日のスカンジウム 46 や半減期 5.3 年のコバルト 60、セシウム 134 による被曝が問題になる。

3. 残留放射能による被曝影響の生物学的影響評価

3-1. 生物学的影響評価の重要性

風によって運び去られたり、台風に伴った大洪水が起こったために洗い流された放射性降下物について、かなり時間が経過した後におこなわれる物理学的測定によって推定することには困難が伴う。さらに、内部被曝については物理学的に可能性を指摘できても、具体的な影響を推測することは不可能である。こうした場合には被曝者に生じた急性放射線

症状の発症率、染色体異常の頻度、晩発性症状の発症率や死亡率の過剰相対リスクなどから逆算して残留放射線被曝の影響を推定する生物学的線量推定の方法が重要になる。

3-2. 急性症状の発症率による放射性降下物の被曝影響推定

被曝直後から多くの被曝者の急性症状発症を診断してきた肥田舜太郎医師の経験によると、入市被曝者の発症した急性症状は直爆被曝者とまったく同じような症状を示すが、一般に遅れて発症し、症状が継続するという特徴が見られたという。これは、内部被曝が継続した放射線放出によって何日も何ヶ月も被曝を続けた結果として説明できる。このことから、急性症状の発症率は、遠距離被曝者や爆心地近くに入った入市被曝者の内部被曝の影響を知る 1 つの重要な手がかりになる。

急性症状発症率調査

急性放射線症状の発症率が距離とともにどのように変化したかに関するすべての調査結果において、広島と長崎の直爆被曝者の両方で、発症率に多少の相違があるが、共通して、初期放射線がほとんど到達していない遠距離において急性放射線症状とみられる症状が現れている。また、3km 前後の遠距離においても脱毛や皮下出血などの発症率が、遮蔽物の有無によって異なっていることは、これらの症状が放射線に起因しているとしてしか説明できない。

図 11 は 1945 年の 9 月から約 1 年間、日米合同調査団による調査で得られた結果をオーターソン等の「日本における原爆の影響—日本における原爆影響調査合同委員会報告」（文献 1、以下日米合同調査）に記載した広島の直爆被曝者の爆心地からの距離別の急性症状の脱毛と紫斑のいずれか一方または両方を発症した発症率である。また、図 12 は広島の医師、於保源作が 1957 年『日本医事新報』に発表した論文「原爆残留放射能障碍の統計的観察」（文献 2、以下於保論文）に掲載された広島の被曝者の急性放射線症発症率調査結果で、

屋内被曝と屋外被曝、被曝後 3 ヶ月以内に広島
島の爆心地から 1km 以内に入入りしたかどう
かの区分ごとの爆心地からの距離別の急性症
状発症率である。この調査では、高熱、下痢、
脱毛、皮膚粘膜出血（紫斑）、咽喉痛のいづれ
かまたは合併して発症した場合を急性症状と
した。図 13 は於保論文の中心地出入りなしの
屋内被曝者の各種急性症状の距離別発症率で
ある。下痢、高熱の発症率が遠距離でも高い。
図 14 において、於保論文の屋内被曝で中心地
出入りなしの調査結果の中から、脱毛と皮膚
粘膜出血の急性症状発症率を日米合同調査の
急性症状（脱毛と紫斑）の発症率および東京
帝大の脱毛の発症率と比較した。日米合同調
査が紫斑を含めていることを考慮すると、こ
れらの調査の間に大きな差違はなく、初期放
射線がほとんど到達していない爆心地から 2
km を超える距離においても急性症状が発症し
ていることが示されている。

急性症状発症率と被曝線量の関係

これらの急性症状発症率調査から、被曝者の
受けた原爆放射線による被曝影響を知るため
には、急性症状の発症率と被曝線量の関係を
仮定しなければならない。動物実験では、被
曝線量と死亡率との関係が調べられ、死亡率
はほぼ被曝線量に対して正規分布することが
確かめられている。人間についても被曝線量
と死亡率との関係は正規分布によって与えら
れると考えられ、死亡率が 50%を超える被曝
線量約 4 Sv を半致死線量と呼んでいる。急性
症状の発症も急性症状の種類によって異なる
が、個体差による放射線感受性は、体重や身
長と同様に正規分布をしているとして、被曝
線量と急性症状の発症率との関係も正規分布
をしているとするのが自然である。発症率が
50%を超える半発症線量 $D(1/2)$ は、当然、
急性症状によって死亡する半致死線量より小
さく、急性症状の種類によって異なり、また、
どれだけの種類の急性症状を含めて調査した
かによっても異なる。『原爆放射線の人体影響
1992』の総論 2 に、脱毛、出血、咽頭部病変
の 3 種を含む急性症状について、初期放射線

による外部被曝線量 0.5 Gy で発症率 5%~
10%、3 Gy で発症率 50%~80%になると記
述している。この線量-発症率関係は、図 15
に示したように、 $D(1/2) = (2.4 \pm 0.6)$ Gy、
標準偏差 1.485 Gy の修正正規分布によって
表すことができる。被曝線量が 0 のとき発症
率が 0 になるように被曝線量が 0 に近い領域
において正規分布を修正してある。日米合同
調査では、脱毛と紫斑の 2 種類についての発
症率調査であるが、 $D(1/2) = (2.4 \pm 0.6)$ Gy
の修正正規分布を用いて解析した。於保論文
の急性症状には発熱、下痢、皮膚粘膜出血、
咽頭痛、脱毛の 5 種類の他に火傷も含まれて
いるので、火傷の割合が少ない屋内被曝の場
合について $D(1/2) = (1.8 \pm 0.6)$ Gy の修正正
規分布を用いて解析した。

放射性降下物による推定被曝線量

図 16 は、於保論文の屋内、中心地出入りな
しの急性症状発症率（図 12 の太い折れ線）に
図 15 の関係を用いてカイ二乗フィットさせた
結果（図 12 の細い曲線）である。日米合同調
査と於保論文の両方の急性症状発症率の解析
結果が重なり合った被曝影響の範囲が、図 16
の 2 つの太い破線の間で、上側の破線は日米
合同調査を $D(1/2) = 3.0$ Gy の修正正規分布
関数によって得たもの、下側の破線は於保論
文の屋内被曝者について $D(1/2) = 1.2$ Gy を
用いて得た結果である。これらの結果から、
遮蔽効果を考慮した広島原爆の初期放射線の
吸収線量（図 16 の細い曲線）を引き去ると、
太い山型の実線に挟まれた斜線をほどこした
領域が残る。この爆心地から 2 km から 4 km
にかけて山の頂から外側にかけての部分は、
放射性降下物による被曝影響である。

図 16 に示されているように、急性症状を引
き起こす放射性降下物による被曝影響は、爆
心地から 1.5 km 辺りの距離で初期放射線によ
る被曝影響とほぼ同じになり、それよりも遠
い距離では放射性降下物の影響が初期放射線
の影響を上回る。被曝影響の山のピークの位
置は、強い「黒い雨」が降下した広島己斐・
高須地域にほぼ一致している。DS86 報告書で

は己斐・高須地域で放射性降下物の外部被曝による累積被曝線量を 0.006 Gy~0.02 Gy としている。ピークの急性症状発症率を与える被曝影響は、ガンマ線の 0.6 Gy~0.8 Gy に相当する範囲で、己斐・高須地域の放射性降下物による累積外部被曝線量の約 30 倍から 130 倍の影響を与えている。この外部被曝の影響をはるかに上回る影響は、放射性降下物のほとんどが風によって運び去られたり、台風による雨で流されてしまったとしても、放射性降下物の影響の主要な部分が内部被曝によることを示している。

3-3. 誘導放射化物質による生物学的被曝影響評価

誘導放射能による外部被曝

地上の物質の原子核が、原爆から放出された中性子を吸収すると誘導放射化によって放射性の原子核になる。誘導放射化された物質から放出される放射線の強さは、中性子線が大量に到達した爆心地に近いほど強くなる。直爆被爆者が中心地付近をさまよって長時間とどまっていたり、原爆が爆発したときは遠距離にいたり、広島や長崎の市内にいなかった人でも、救援活動や肉親の安否を訪ねて後から爆心地に近いところに入ると、誘導放射化された物質からの残留放射線をあびる。この残留放射線による被曝は、身体の外から残留放射線をあびる外部被曝と、残留放射線を放出する物質を呼吸や飲食によって体内に取り込んで、体内で放出された放射線をあびる内部被曝とがある。放射性降下物の場合と同様に、放射化物質を毛髪や衣服に付着させた場合には、長時間にわたって外部被曝を受け続け、内部被曝に準じた影響を受け続ける

原爆が爆発した後どのような場所にどのくらいの時間滞在したかがわかれば、残留放射線による外部被曝線量をおおよそ計算できる(文献4)。

誘導放射能による内部被曝線量の推定

於保論文には、図 17 に示すように、非直爆入市被爆者の入市日時ごとの急性症状発症率

も与えられている。この発症率調査データにはかなりの上下のばらつきがある。本来ならばこのような調査を日本政府や ABC—放影研がおこなうべきであった。その意味で於保論文の調査結果は極めて貴重なものであり、この資料から少しでも情報を引き出す必要がある。カイ 2 乗フィットによる解析方法は、個々のデータに統計的な誤差によるばらつきが存在する調査結果であっても、その調査に系統的な規則性があれば、データを総合的に捉えることによってその規則性を見出すことが可能である。図 15 に示した被曝線量と急性症状発症率との関係に基づいてカイ 2 乗フィットを行うと、図 17 の急性症状発症率の調査結果から、図 18 に示す実効的被曝線量が推定される。原爆被爆当日(8月6日)入市者の実効的累積被曝線量は平均して 1.07 Gy から 1.82 Gy となり、実効的累積被曝線量が指数関数的に減少して半分になる日数は 6 日ないし 7 日となった。図 18 に、爆心地、爆心地から 500 m、爆心地から 1 km の地点において残留放射線を体外から被曝する累積外部被曝線量を示した。爆心地(0m)の場合でも、外部被曝による累積線量は 0.8 Gy、爆心地から 500 m では 0.09 Gy、1 km では 0.0017 Gy である。累積外部被曝線量と急性症状発症率から推定される実効的累積被曝線量の間大きな差違は、放射性物質を体内に取り込むことによる慢性的内部被曝の影響であり、内部被曝の影響が外部被曝に比して極めて大きいことを示唆している。

図 12 に示したように、於保論文の急性症状発症率調査は被爆後爆心地から 1 km 以内の中心地に原爆の爆発後 3 ヶ月以内に入入りしたか、しなかったかを区別して急性症状の発症率を与えている。破線で示した中心地への出入りした場合と、実線で示した中心地に入入りしなかった場合とを比較すると、急性症状の発症率の違いが中心地出入りの有無によって、とくに遠距離では歴然としている。この違いに基づいて中心地に入入りしたために中性子誘導放射化物質による被曝影響を求

めると、図 18 に示した水平方向の2つの破線の直線の間には挟まれた範囲が得られる。この3ヶ月以内に1 km 以内に入出入りして誘導放射物質によって受けた平均的影響は、爆心地から1.5km における初期放射線による外部被曝による影響に匹敵する0.8 Gy~0.9 Gy になる。

3-4. 染色体異常による放射性降下物の影響推定

放射線を浴びると細胞のなかの細胞核をつくっている染色体に異常が現れる。この染色体異常は吸収線量によって増加するので、血管やリンパ管の中を移動するリンパ球の染色体を調べると平均的な吸収線量を推定できる。

図 19 の誤差棒のついたマーカーは、佐々木と宮田が1960年代に広島の日赤中央病院に入出入りする被爆者と健康な非被爆者の流動性リンパ球の染色体異常を研究して、爆心地からの距離に対する被曝（吸収）線量を推定したものである。図 19 の吸収線量の目盛りは Gy の対数目盛りで、1目盛り上がると10倍になる。体内を移動するリンパ球の染色体異常には、全身の平均的な内部被曝の影響が現れるが、体内の1カ所にとどまっている放射性微粒子による局所的な内部被曝の影響は現れないと考えられる。佐々木・宮田のリンパ球の染色体異常の研究から、図 19 に実線 (DS86) と破線 (T65D) のほぼ直線で示された初期放射線があまり到達していない、2.5 km あたりの大きい●（不安定型染色体異常）や大きい○（安定型染色体異常）で示されているように平均0.07~0.3 Gy、3.5~4.0km でも0.03~0.15 Gy 前後の平均吸収線量が推定される。染色体異常から得られた被曝線量をカイ二乗フィットすると図 19 の実線曲線になり、これから初期放射線による吸収線量を差し引くと、図 19 の破線であらわされた山型の曲線が放射性降下物による内部被曝の吸収線量を与える。体内を移動するリンパ球の染色体異常には、全身の平均的な内部被曝の影響があらわれるが、体内の1カ所に留まっている放射性微粒

子による局所的な内部被曝の影響はあらわれないと考えられる。図 19 に示された染色体異常による0.3 Gy 前後と、図 16 に示された急性症状から推定した0.5~0.8 Gy との違いは放射性微粒子による局所的な内部被曝の影響を示しているとして説明できる。

3-5. 放影研のコントロールの晩発性障害標準相対リスク

ドイツブレーメン大学教授のシュミット-フオイエルハーケは、ABCC と放影研が「T65D」の初期放射線吸収線量で0.09 グレイ以下の遠距離被爆者「0.09 グレイ以下グループ」（広島爆心地から2.5 km 以遠の被爆に相当）55,000 人と原爆爆発後1950年までに入市した「入市者グループ」26,500 人を、比較対照の「非被曝集団」、すなわちコントロール・コホートとしていることに疑問を持った。彼女はこれらのコントロール・コホートの晩発性障害による死亡率と障害の発症率を、日本全国の死亡率あるいは発症率と比較した標準相対リスクを調べて1982年に発表した。その結果が図 20 である。相対リスクが1となれば日本全国の死亡率あるいは発症率と同じとなる。●は「0.09 グレイ以下グループ」、○は「入市者グループ」の相対リスクで、縦の破線で仕切った左側が死亡相対リスク、右側が発症相対リスクである。

コントロール・コホートの全死亡原因や全疾病による死亡相対リスクが1以下になっていることは、ABCC-放影研の調査対象となったコントロール・コホートが、日本全国平均以上の総合的な体力を持つ集団であることを示している。これは、ABCC が1950年以降を調査対象にしているため、被爆しても1950年まで生き残ることができた体力の人に限られ、それまでに死亡した人が含まれていないことを反映している。このことは、英国の疫学者で低線量被曝による白血病発症を最初に明らかにしたことで知られるアリス・スチュワートが問題として指摘していた。このような日本全国の平均以上の体力を持つ遠距離被

爆者の「0.09 Gy 以下グループ」でも、●で示されているように放射線の典型的な影響とされる白血病と肺がんによる死亡率が高く、乳がん、白血病、甲状腺がんの発症率が、「0.09 グレイ以下グループ」と「入市者グループ」のいずれもかなり高いことは、放射性降下物や残留放射線による影響が大きいことを示している。とくに甲状腺がんの発症率が高いのは放射性降下物に大量に含まれていたヨウ素 131 によると考えられ、遠距離被爆者への放射性降下物の影響を裏づけている。

また、「入市者グループ」の中から 30 日以内に市内に入った 4500 人の「早期入市者」について抜き出して調べると、○で示したように白血病は約 2 倍という高い死亡相対リスクで、これは早期入市被爆者の晩発性障害にたいする残留放射能の影響を示している。

4. 残留放射能と内部被曝の隠蔽政策

4-1. アメリカの原爆被害隠蔽政策 占領政策と原爆被害隠蔽

日本占領が始まった直後の 1945 年 9 月 6 日に、マンハッタン管区調査団の指揮官 T・ファーレル准将は東京で記者会見を行い「広島・長崎では、死ぬべき者は死んでしまい、9 月上旬現在において、原爆放射能で苦しんでいる者は皆無だ」という声明を発表した。さらに、ファーレル准将は「残留放射能の危険を取り除くために、相当の高度で爆発させたため、広島には原爆放射能は存在し得ず、もし、いま現に亡くなっている者があるとなれば、それは残留放射能によるものではなく、原爆投下時に受けた被害のため以外ありえない」と、救援活動に入った人びとに放射線障害が発症している事実を反した説明をした。

1945 年 9 月 19 日、連合国最高司令官総司令部 (GHQ) は、原爆に関する報道・文学を検閲によって厳しく規制し、被爆調査に関する発表も事前に許可をとることを要求し、事実上発表禁止のプレスコードを引いた。ファーレル准将の記者会見と GHQ のプレスコードは、放射線被害の隠ぺい、とくに残留放

射能による内部被曝の影響を覆い隠すアメリカの核被害隠ぺい政策の始まりであった。

アメリカの放射線防護委員会と国際放射線防護委員会

1942 年フェルミらによってシカゴ大学に初めての原子炉が運転されたとき、放射線防護のために保健物理学 (Health Physics) の研究グループが生まれ、1943 年にマンハッタン計画に基づいてウラン 235 の濃縮とプルトニウム製造の原子炉がオークリッジにつくられると同時に、オークリッジ国立研究所 (ORNL、当初の呼称はクリントン研究所) に保健物理学 (Health Physics) の研究部門がつくられカール・モーガン博士が着任した。しかし、戦時中は原爆製造を急いで、安全性は犠牲にされ、戦後は核兵器製造と原子力産業の利益を優先させるアメリカ原子力委員会 (AEC) の方針に従って、放射線防護は軽視された。アメリカ放射線防護委員会 (NCRP) と併行して国際放射線防護委員会 (ICRP) が設置されたが、内部被曝を検討した NCRP 第 2 委員会 (委員長カール・モーガン博士) の意見を無視し、外部被曝を検討した第 1 委員会の検討結果と「しきい値」論だけに基づいて、放射線防護の許容線量が決められた。その後も内部被曝も含め放射線防護に関する研究は軽視され、プルトニウム製造の中心になったハンフォードではプルトニウムによる汚染に注意を払わず、放射性廃棄物を直接河川や大気中に放出した。1970 年代における放射線防護の専門家の「放射線微粒子=ホット・パーティクル」の深刻な影響の告発は AEC によって弾圧された。こうして、今日に至るまで NCRP も ICRP も原子力産業界とアメリカエネルギー省 (DOE) の支配から自由ではない(文献 5)。

4-2. 原爆傷害調査委員会 (ABCC)

核兵器による世界支配政策を明確にしたアメリカは、核兵器使用による人体への影響、とくに初期放射線の即効的影響を研究する必要に迫られた。1946 年 11 月 26 日、トルーマン大統領は原子爆弾傷害に関する委員会

(CAC) の設置を指令し、CAC は原爆傷害調査委員会 (ABCC) の設置を決めた。ABCC は予備的な準備調査を経て、1950 年に広島と長崎に恒久的な施設を建設し、被爆者調査を開始した。被爆者調査では原爆被害全体を調査するのではなく、軍事的な関心から初期放射線による影響に研究の目標を置いた。そのため、被爆者の面接調査では、初期放射線の遮蔽効果を評価するために被爆したときにいた建造物やその瞬間の姿勢を詳細に調査した。その一方、残留放射線による被曝影響の評価に欠かせない被爆後の行動については一切調査項目に含めなかった。

ABCC の占領機関の閉鎖性、米側専門職員の頻繁な交替、徹底した検査をしても治療をしてくれない ABCC に対する広島・長崎市民の感情などによって、1955 年頃には ABCC の調査活動は全体として停滞気味になった。フランス委員会がつくられて ABCC を調査し、1955 年に勧告を行った。この勧告に沿って 1958 年 2 万人を対象とする成人健康調査、1959 年 10 万人を対象とする寿命調査 (LSS) が再発足した。しかし、初期放射線の影響だけを研究する基本方針は変わらなかった。1975 年になって、ようやく ABCC が廃止され、日米共同運営の放影研が創設された。しかし、放影研は職員、施設、事業と ABCC の内包する問題をそのまま引き継いだものになり、初期放射線にのみしぼった調査・研究計画もそのまま継続となった。その結果今日でも放影研の疫学調査や染色体異常の研究では残留放射線の影響が現れないように、コントロール・コホートとして、大きな放射線影響を受けている遠距離被爆者と入市被爆者の採用を継続している。その結果、膨大な経費と人力を投入したにもかかわらず、人類に対する責任を果たせなかったばかりか、誤った放射線影響評価を広げることになった。原爆症認定集団訴訟はこの問題を究明して、正しい放射線影響評価に立ち戻させる意味でも、科学者や医学者に大きな課題を与えている。

4-3. 「使いやすい核兵器」と地下貫通核兵器の危険性—核兵器使用政策を糾弾する科学者・医学者の責任—

最近米国政府は「使いやすい核兵器」と「地下貫通核兵器」の研究と開発決めた。この米国の好核政策には原爆被害の軽視ないし無視、とりわけ残留放射線の影響と内部被曝の深刻な影響の無視に大きく関係している。もし地下貫通核兵器が使われるならば、地上 600 m あるいは 500 m の高さで爆発して、放射能が弱くなって放射性降下物が降下し、誘導して残留放射能をつくる中性子が地上に達するまでに大幅に減少して到達した広島や長崎原爆のときには見られなかったような、ものすごい残留放射能の惨事が引き起こされるであろう。地下貫通核兵器の場合は、図 21 に示したように、地下 20 m も貫通しないで核爆発で生じた火球が、火球に含まれ、中性子に誘導されたさまざまな強い放射性物質を含んだ火砕流という熱せられた岩石や灰の流れを引き起こすだろう。これは「20 世紀のこの世の地獄」広島と長崎に代わるもう 1 つの「21 世紀のこの世の地獄」をつくりだすだろう。

参考文献

- 文献 1 オーターソン等『日本における原爆の影響—日本における原爆影響調査合同委員会報告』第 7 章 219 ページ図 7.2。AEC、1951 年、英文。
- 文献 2 於保源作；「原爆残留放射線障害の統計的観察」『日本医事新報』No.1476, 21—25、1957 年
- 文献 3 『原爆放射線の人体影響 1992』文光堂の総論 2、10 ページ。
- 文献 4 M. L. グリッツナーおよび W. A. ウールソン；DS86 報告書第 2 巻 葉佐井博巳および静岡清；「残留放射能」、『原爆放射線の人体影響 1992』20—3
- 文献 5 カール・モーガンら著、松井・片桐訳『原子力開発の光と影』昭和堂 2003 年。

図1 原爆の物理的影響のまとめ

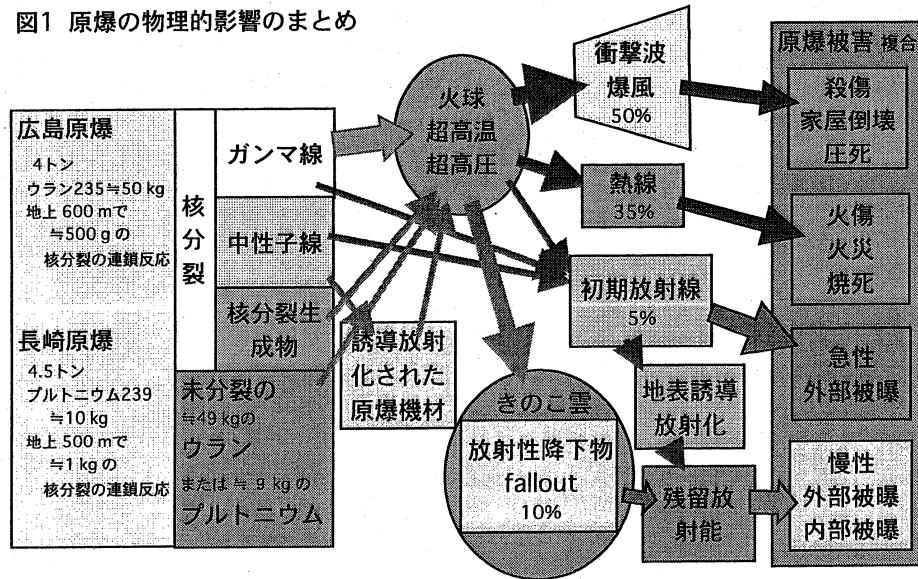


図2 原爆爆発後0.01秒後の火球と初期放射線

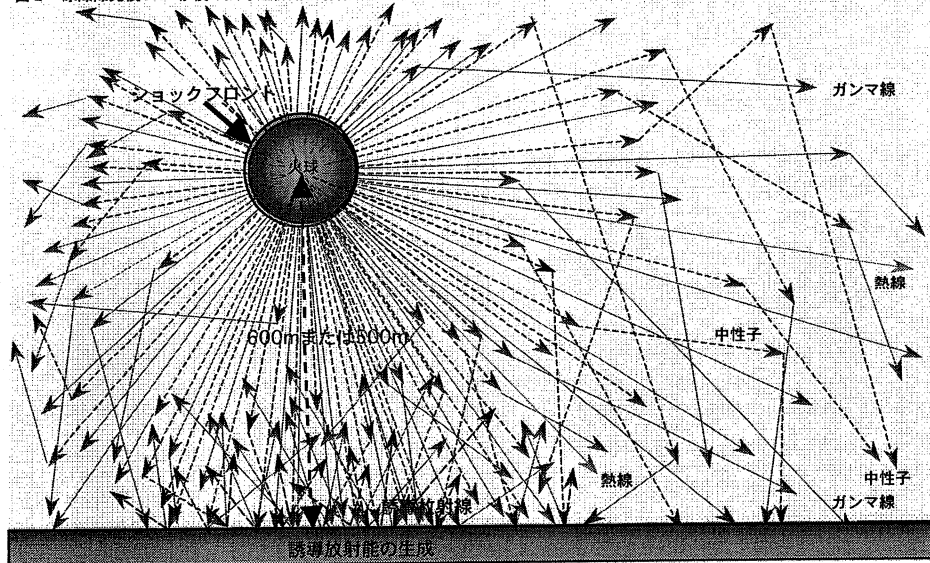


図3 広島原爆の「きのこ雲」
松山市上空1万mから
1時間後に米軍機撮影



図4 雲仙岳測候所からスケッチした長崎原爆「きのこ雲」約40分後。

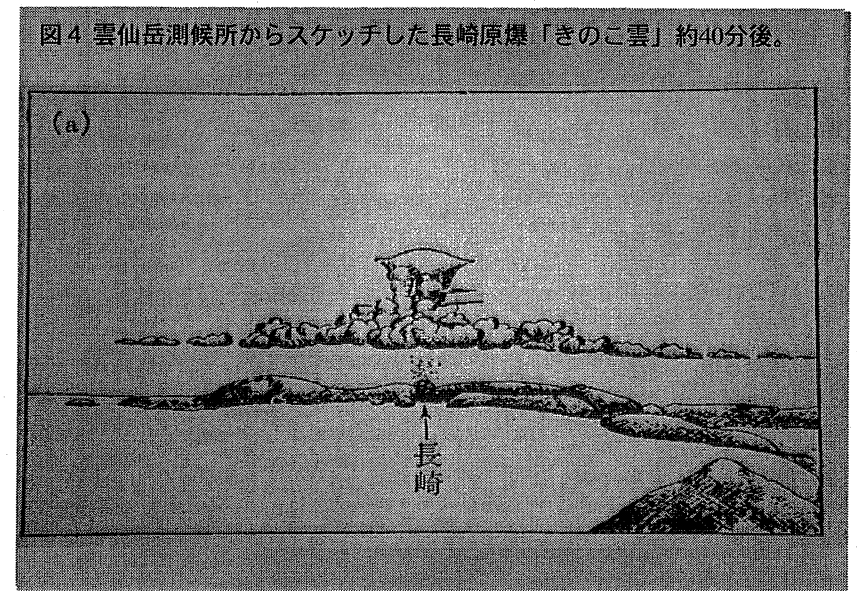


図5 原爆爆発後30分~1時間後。

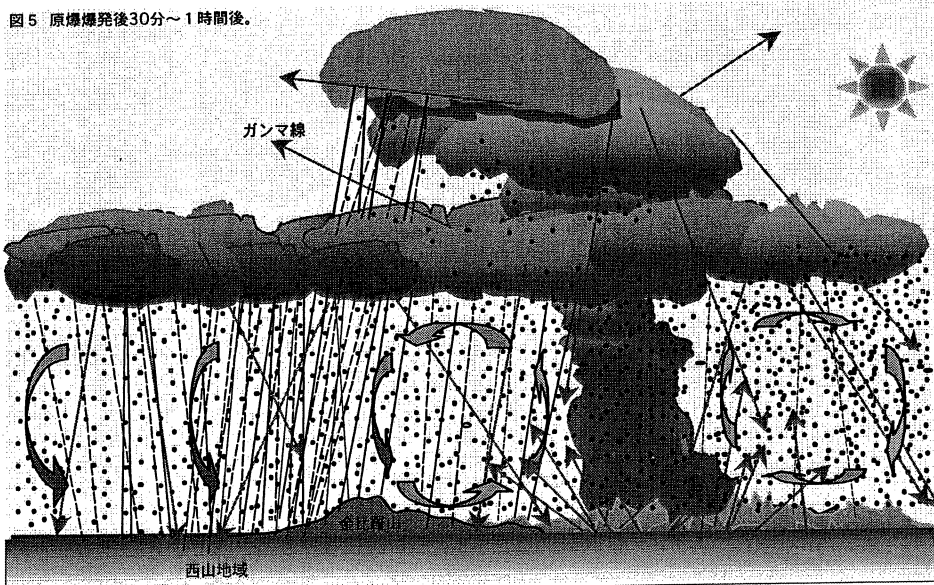


図6 ガンマ線によるDNA(デオキシリボ核酸)の2重螺旋の切断

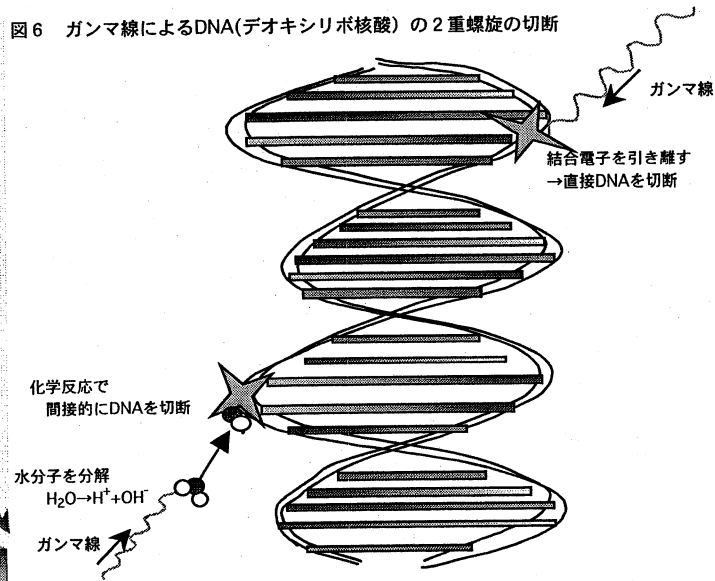


図7 放射線によるリンパ球のさまざまな染色体異常

細胞周期	染色体内交換			染色体間交換		
	正常	環染色体と断片 Cu(不安定型)	逆位 Cs(安定型)	正常	2動原体と断片 Cs(不安定型)	転座 Cu(安定型)
G ₀ 期 リンパ球染色体	修復	切	切	修復	切	切
S期	修復	修復	修復	修復	修復	修復
分裂中期	正常	異常	異常	正常	異常	異常
異常の種類 安定型/不安定型	正常	環染色体と断片 Cu(不安定型)	逆位 Cs(安定型)	正常	2動原体と断片 Cs(不安定型)	転座 Cu(安定型)

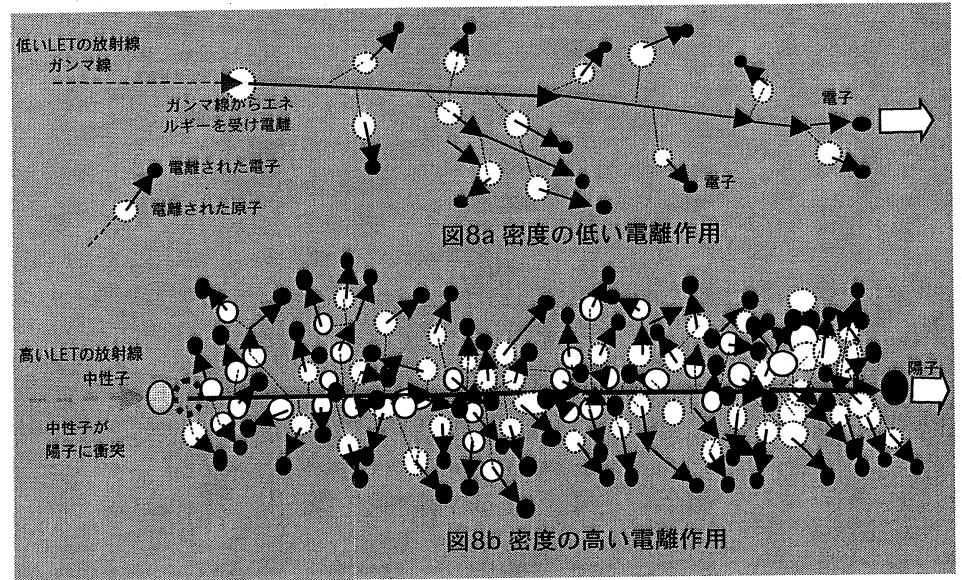


図9a 一樣な外部被曝

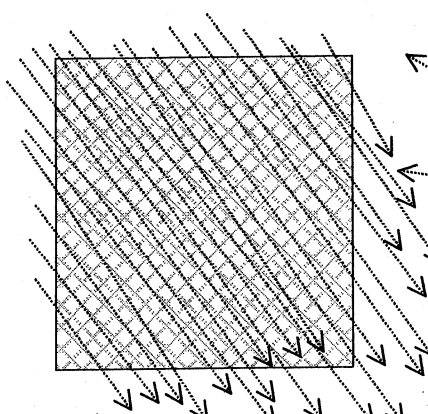


図9b 放射性微粒子による集中した内部被曝

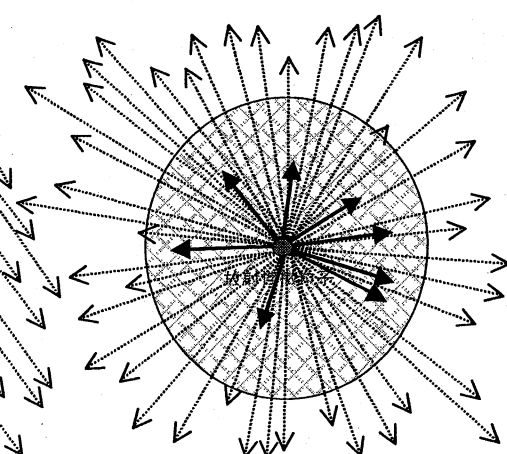


図10 Zr95→Nb95へのベータ崩壊する放射性微粒子による被曝線量

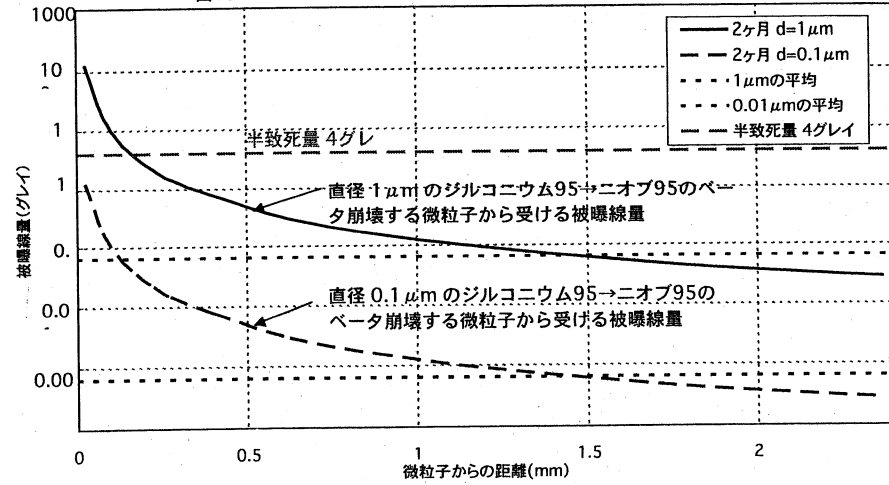


図11 急性症状発症率(脱毛+紫斑) 日米合同調査団

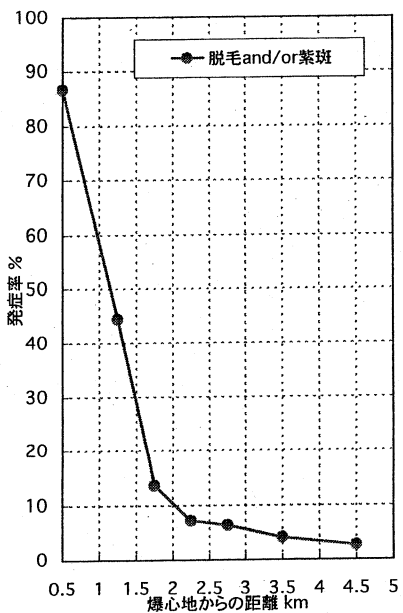


図12 於保論文の急性放射線症状発症率

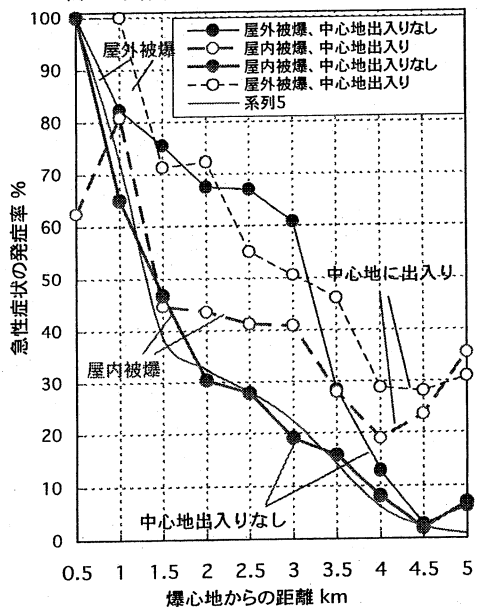


図13 屋内被曝、爆心地出入りなし(於保1957)

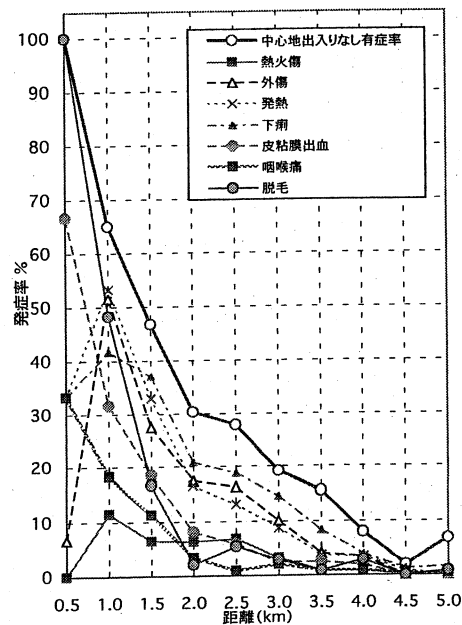


図14 急性症状有症率(日米合同、於保、東大)

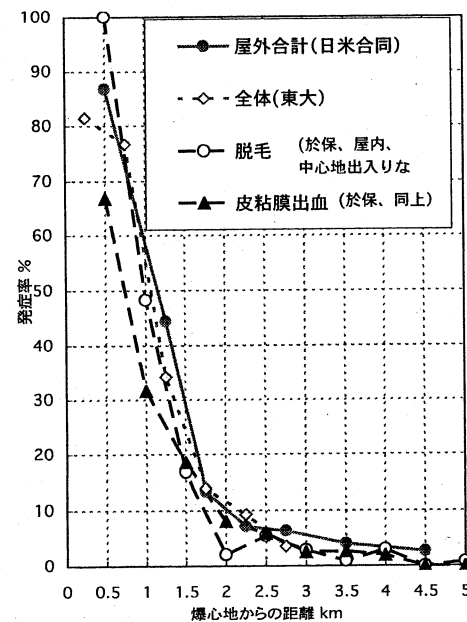


図15 発症率-被曝線量関係

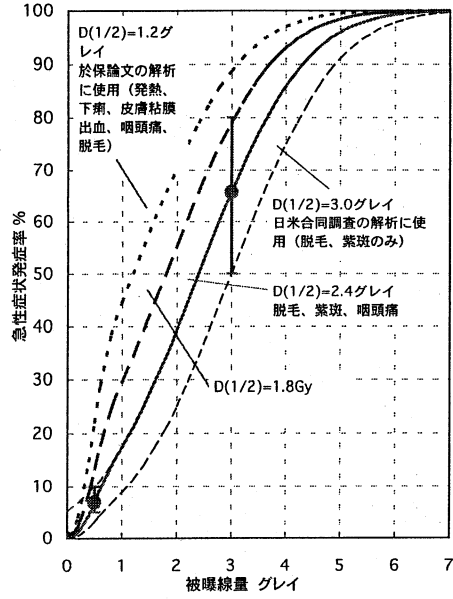


図16 急性症状による残留放射線の影響推定

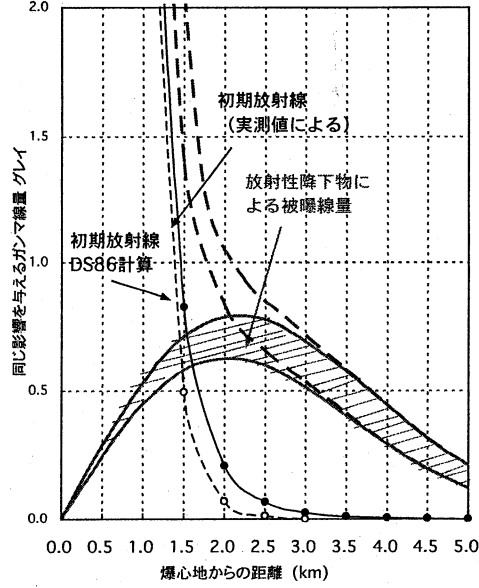


図17 入市被爆者の急性放射線症発症率の推移

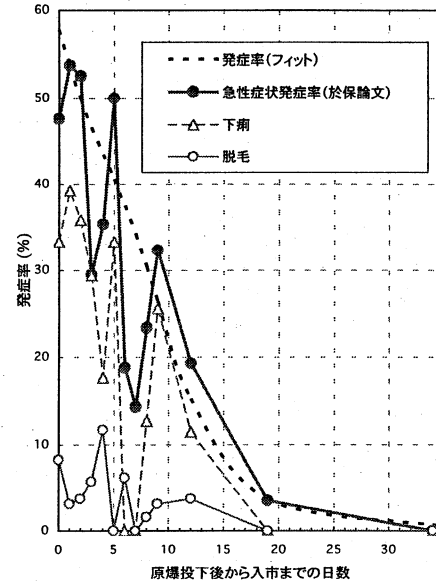


図18 入市被爆者の実効的累積被曝線量

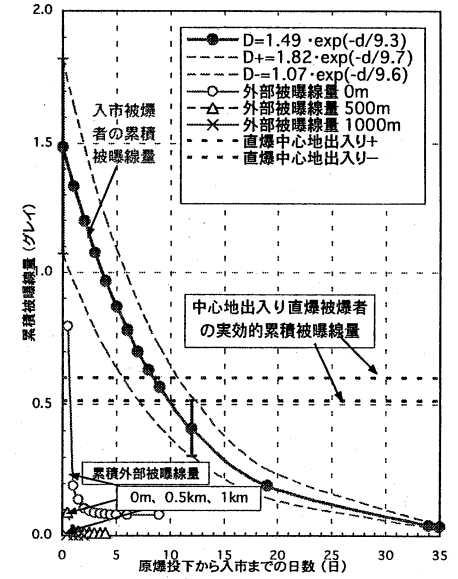


図19 染色体異常による被曝線量(佐々木、宮田)

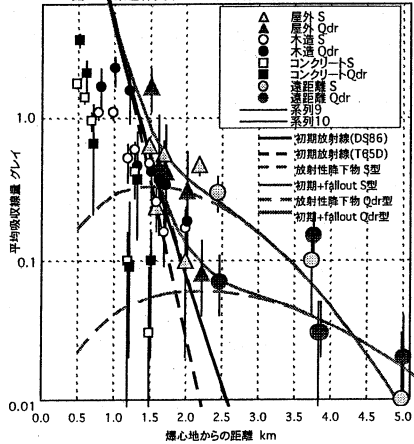


図20 放射影研の比較対照群の全国に対する相対リスク (Schmitz-Feuerhakeによる)

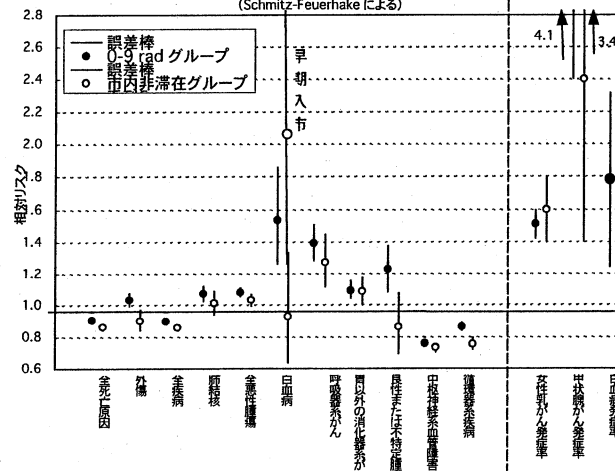


図21 地下貫通核兵器の爆発による強い放射能を持つ「火砕流」の発生

