

- 4) T. Nakanishi, K. Miwa, R. Ohki,
J. Radiat. Res. 39, 243-
250 (1998)

G. 謝辞

原爆線量再評価の研究は広島グループである静間清、遠藤暁（広島大学工学部）星正治、高田純（広島大学原医研）藤田正一郎（放射線影響研究所）岡隆光（呉大学）を中心に行っている。資料収集に当たり長崎市役所、長崎放射線影響研究所の方に協力を頂きました。お礼申し上げます。

広島原爆の被曝線量評価の問題点

分担研究者 星 正治（広島大学原爆放射能医学研究所国際放射線情報センター教授）

1. はじめに

広島長崎の原爆の放射線量見直しが1986年に行われた。この線量のことを線量評価体系(Dosimetry System 1986(DS86))と呼んでいる。⁽¹⁾ その線量再評価の作業は日米の共同研究で進められた。日本側は実験データを取り、アメリカ側の計算と比較する事を主な目的とした。まず花崗岩、コンクリートなどの原爆の被爆試料を収集し中性子で誘導され生成した放射能(コバルト60、ユーロピウム152)を測定した。⁽³⁻¹²⁾ これは中性子の線量評価に使うためである。またガンマ線に対しては屋根瓦やレンガ、タイルを収集し、熱蛍光法により線量を評価した。ここでの問題点は、ガンマ線は熱蛍光法での線量評価は直接ガンマ線の線量ができる。しかしながら、人体への被曝は数100keV以上の中性子が中心であるのに、これらの放射化は熱中性子による。従って直接中性子の被曝線量を評価するデータとならない。従って被爆者の線量を決定する上ではこの熱中性子の量から速中性子の線量評価をしなければならないことであった。

またアメリカ側は当時のスーパーコンピュータを使った計算を行った。それらは、1. 原爆の爆発地点での中性子やガンマ線のスペクトルの計算(線源項)、2. 爆発地点から地表までの輸送計算、3. 地面、日本家屋での透過計算、4. 被爆者の計算モデルを使った各臓器の線量計算、である。これらには、過去のネバダでのデータなどが参考にされ、日本家屋も集合体としていろいろなタイプが試された、膨大な仕事であった。

このDS86が出来上がった後、私どもの広島グループや金沢、長崎のグループ、放射線影響研究所、などで引き続き被爆試料の測定を行ってきた。データがある程度集まってくると、図1にユーロピウムの測定とDS86に基づいた計算との比較を示すが、系統的なずれが見出された。

⁽⁶⁾ その後原因を解明するためMCNPによる計算を行うことにした。原因解明の上で、問題となるのは爆発地点のガンマ線や中性子のスペクトルのチェックが基本的にできないことである。すなわち核爆弾の構造を調べたりすることは私どもの仕事ではない。したがって他の原因を一つ一つチェックし正しいかどうかつぶしてゆく方法で進めることにした。^(23, 25, 26, 27) まず計算精度を確かめる作業を行った。1. ベンチマークテストをMCNPコード⁽²⁴⁾を使っておこないその精度を確認した、その後原爆本体から出た中性子のスペクトルに問題があるとの確信を得たので、2. いろいろなスペクトルや放射線の放出方法を考えて輸送計算を行いどうい

スペクトルでどういう放出方法を考えたら良いかを検討した。これら 1、2 について報告する。

この作業全体において使用したコードは MCNP3A と MCNP4A である。主として使用した核データは ENDF/B-IV、V、VI であり、その他の MCNP につけてあるデータ及び JENDL 3⁽²⁸⁾ も必要に応じて使った。

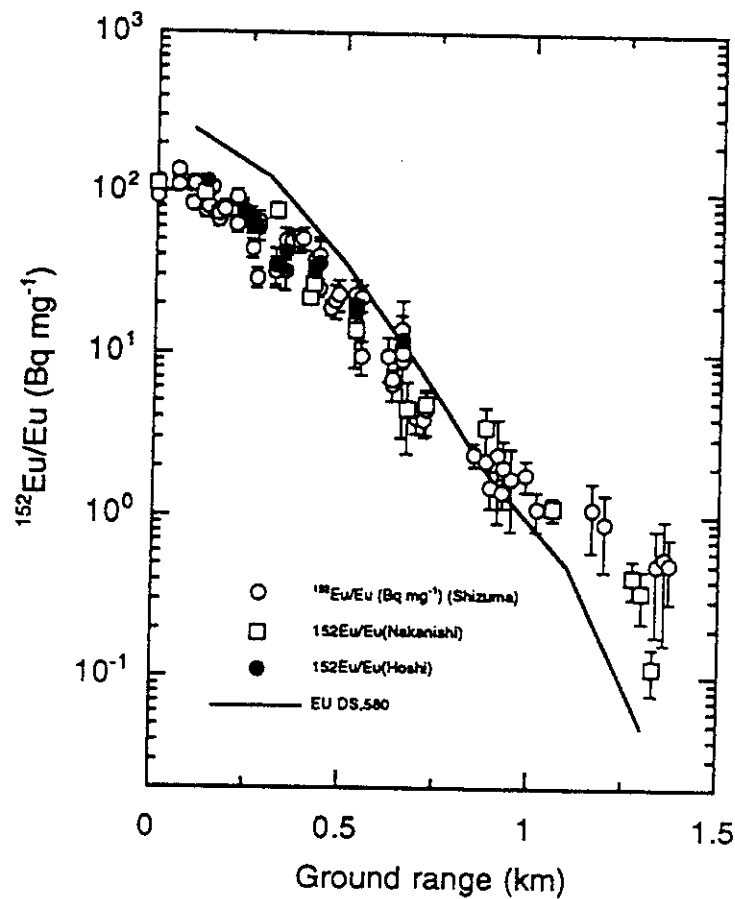


図 1. 広島のエーロピウム 152 の比放射能の測定結果と計算

太い点線は内側にタングステン 5cm 外側に鉄 20cm の球殻を考え、中心にウラン 235 の核分裂中性子を考えた場合のモデルによる計算。実線は DS86。太い実線と DS86 が一致している。球形のモデルでも DS86 の計算として使えることを示している。細い点線（一番上）は DS86 のフルエンスで裸の核分裂中性子を考えた場合。⁽²⁷⁾

2. ベンチマークテスト

原爆の放射線源からの地表そして放射化までの過程の計算を行う上で MCNP がどこまでどれくらいの精度で計算できるのかチェックするため、ベンチマークテストを行った。^(25, 26) 計算で使った中性子の放出数は 10^5 から 5×10^6 個である。

広島大学原爆放射能医学研究所には 2Ci のカリフォルニウム 252 核分裂中性子線源がある。これはもともと原爆放射線と同様な線源での生物影響を調べる目的で導入された。この装置で核分裂中性子の物質中での透過、放射化の実験を行い、MCNP の計算と比較検討をした。図 2 がその実験系である。中心には 5cm の厚さで 25cmx25cm の広さを持つ板を 65cm の厚さになるようならべた。その周りは 0.5mm のカドミウム板で覆った。中性子の入口以外はボロン 3.7% 入りの

ポリエチレン(商品名ニューライト)で実質の厚さが 15cm 以上になるようならべた。

中心の吸収体はいろいろな成分を持った材質を試した。ナイロン、アクリライト、水、塩化アンモニウムの粉末、花崗岩、ニューライトなどである。それぞれの板の中心に放射化のための金属箔などを貼り付け 5cm 毎の放射化量を測定した。これにより空気や材質中での輸送計算放射化の計算の精度の検討を行った。相対的な厚みとしては、空気中の透過としてみると、65cm の厚さは大体爆心から 1500m くらいに相当する。放射化箔には熱中性子や熱外中性子の検出を行うためのものと、速中性子を検出するためのものを用意した。前者には中性子を吸収する金、ユーロピウム、コバルトを使い、後者には (n, p) や (n, n') 反応をみる、ニッケルやインジウムを使った。照射し

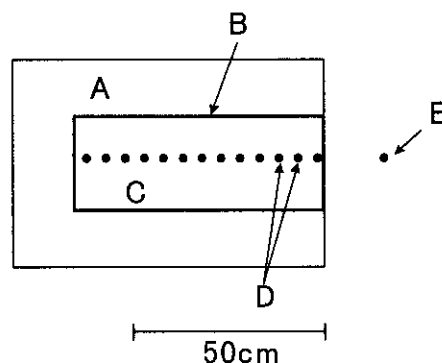
A : polyethylene+B(3.7%)

B : Cd

C : water, granite, A

D : Ni, Au

E : ^{252}Cf



Cross sectional view of the bench mark test

図 2. ベンチマークテストに使ったシステムの断面図

A はカリフォルニウム 252 線源 (2Ci)。B は中性子スペクトルを計算した場所を示す。C は中性子の検出に使った金属箔の位置。D はいろいろな材質を使った吸収体 (モデレータ)。E は 0.5mm の厚さのカドミウム板。F はボロン (3.7%) 入りのポリエチレン (商品名ニューライト)。

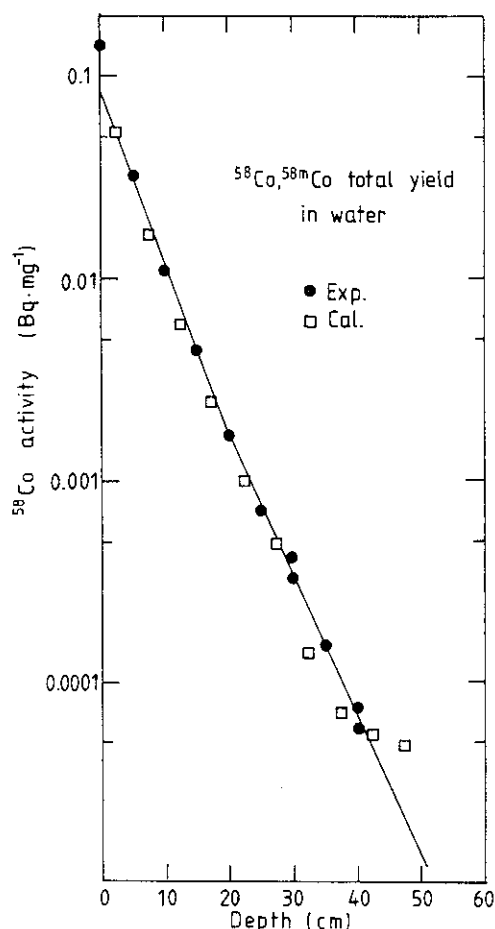
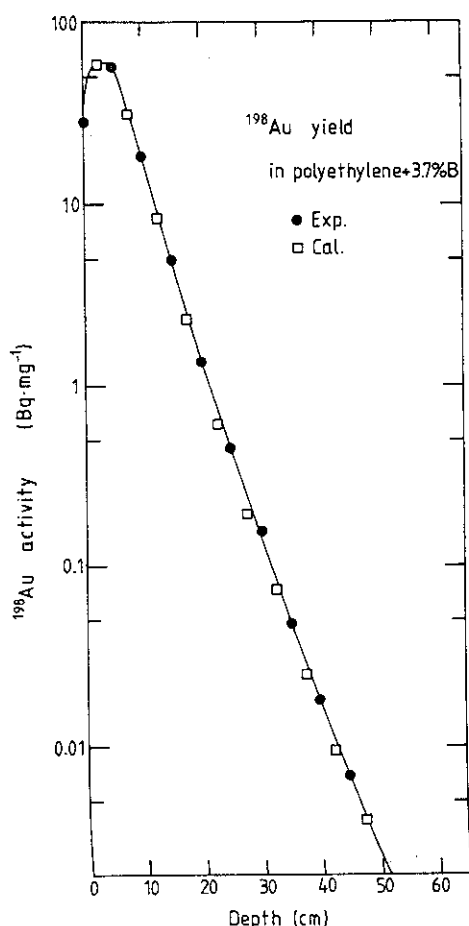
た金属箔はゲルマニウム検出器で測定し放射能の生成量を求めた。

この実験系の問題は散乱して横から入射する速中性子があることであった。この遮蔽のため 15cm 厚のニューライト中の、ポリエチレンの成分で速中性子を減速し同時にボロンで熱中性子を吸収した。速中性子がほぼなくなったところでカドミウムにより熱中性子を吸収する。これらにより横からの入射を徹底的になくした。そうして入射の時と比べて 100 分の 1 から 10000 分の 1 近くまでの減衰するところまで測定と計算とを比

較した。これらの結果は星ら、岩谷らに示している。^(25, 26)

次に大きな問題は金属箔の自己吸収の問題であった。これには最終的には実験で求めた。放射化の実験には 50 ミクロン程度の厚さの金などを使った。自己吸収の見積もりには 1 ミクロンまでの各種の厚さの箔を放射化しゼロの厚さの場合を外挿して求めた。この自己吸収の解決は 2-3 倍の自己吸収があるので重要であった。詳しくは星らに示す。⁽²⁵⁾

図 3、図 4 に一部の例を示す。結果として減衰しても全体として 30% ぐらい以



(左) 図 3. ボロン入りのポリエチレン (ニューライト) を使った場合の計算と実験値の比較

放射化箔は金で熱、熱外中性子を検出した。これ以外の水、岩石、塩化アンモニウムなど各種の材質においてもよい一致を示す。⁽²⁵⁾

(右) 図 4. 図 3 と同様な比較

Ni (n, p) 反応による速中性子を検出した。これは水の場合であるが、いろいろな材質においてもよい一致を示した。⁽²⁵⁾

内で合っていることがわかった。これは驚くほど合ったといった印象である。実験の方だけでもまずカリフォルニウム線源のフラックスの実験的な決定がある。これは電離箱の測定を基に決定した。次に減衰体のジオメトリの精度、放射化箱のゲルマニウムの測定による生成放射能の絶対値の決定、等々である。また MCNP 計算では何回も散乱する際使用される内部の核データの精度の問題、計算の精度の問題、結果の統計精度の問題、等々がある。これらをすべて含めて大体 30%以内で合った。

これらのベンチマークテストにより MCNP で輸送計算を行い放射化の計算をする上で十分な精度があると結論した。

3. 広島原爆の中性子の輸送計算と中性子の吸収に伴うガンマ線の計算

中性子の輸送計算に使ったジオメトリを図 5 に示す。空気や土壌の成分に

は DS86 (RERF 1987) で使われた値を使用した。この空気の密度についてもチェックをした。原爆投下の気象状態に近いときを選んで上空まで実測した。この結果使用した空気の密度のデータは正しいことが分かった。⁽³⁰⁾

原爆の中心には核分裂中性子を置き、その周りに 5cm 厚の球殻状のタングステン、その外側に 20cm 厚の球殻状の鉄をおいた。これらは DS86 のスペクトルを再現する事を星ら⁽²⁷⁾が示している。全体は 2km の高さで半径 2km の円筒形の空気を考える。原爆の高さは DS86 で使われているものが 580m で爆発の中心とした。仮説を考える場合は 670m の高さも試した。土壌は 2m の厚さとし 200m 毎の半径の円筒を考えその中での中性子のエネルギースペクトルを計算した。(100m メッシュの場合も試したが、200m メッシュでも問題無かった。) 計算結果はそれぞれの同心円の間 100m、300m、500m、700m...

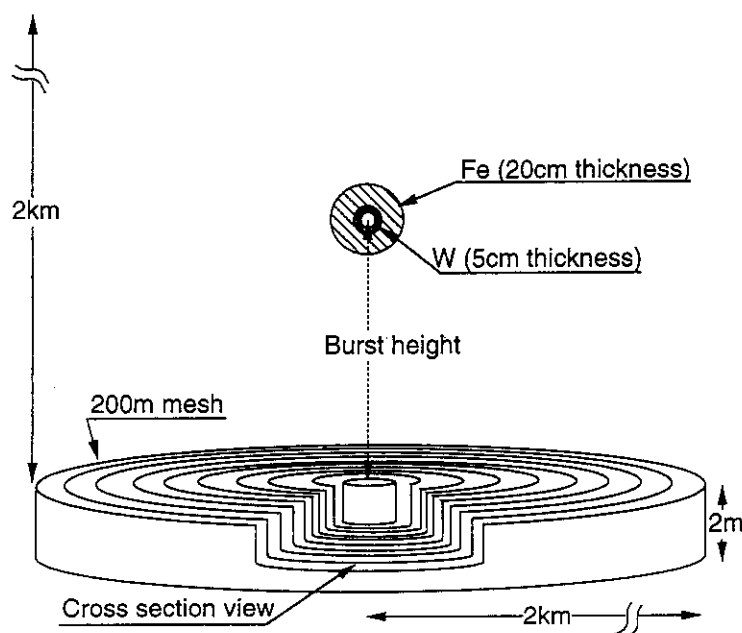


図 5. 広島原爆の輸送計算に使ったジオメトリ

ユーロピウムの生成量計算に使う中性子のスペクトルは地表から地面の中に 2cm 入ったところまで、すなわち 2cm の厚さの部分の計算結果を使った。ガンマ線の場合は地表 1m の位置を使った。爆発点の高さは DS86 では 580m である。90m 引き上げた場合の 670m の位置での計算も行った。

を計算点としてプロットした。ガンマ線の場合は地表 1m の点でも計算を出した。

図 1 にはこの球状の模式的原爆で計算したユーロピウムの生成量と、DS86 で計算したユーロピウムの生成量との計算の比較が示されている。図 1 のように模式的原爆で計算しても DS86 と良く一致する。⁽²⁷⁾

中性子の空気や、土壌による捕獲に伴って発生する 2 次ガンマ線の計算についても同様に DS86 と比較した。ガンマ線の種類は 4 通りに分類されていて、それらは 1. 即発ガンマ線、2. 即発 2 次ガンマ線、3. 遅発ガンマ線、4. 遅発 2 次ガンマ線である。しかしながら主な成分はそのうち遅発ガンマ線と、即発 2 次ガンマ線である。遅発ガンマ線は分裂後の核子から出るガンマ線が主でファイアボールやきのご雲から放出される。即発 2 次ガンマ線は核分裂の際発生する即

発中性子が空気や土壌の成分と作用して発生する 2 次ガンマ線である。他の 2 成分はこれらの 10 分の 1 以下である。ここでは即発 2 次ガンマ線について DS86 との比較を図 6 に示す。これらもよい一致を示している。

4. 広島原爆の系統的なずれの問題

図 1 に示すように、DS86 で計算した広島原爆の中性子はユーロピウムの生成量を説明できない。それだけでなくコバルト 60 の測定結果もうまく説明していない。以上は熱及び熱外中性子による反応である。その他のデータとして最近加測器マス (AMS) 方式で測定した塩素 36 もある。^(13, 14, 15) これも熱中性子で生成したもので同様な系統的ずれを示している。

広島原爆の中性子により生成した放射能には当時電柱の碍子に使われていた硫黄との (n, p) 反応で生成した、燐 32

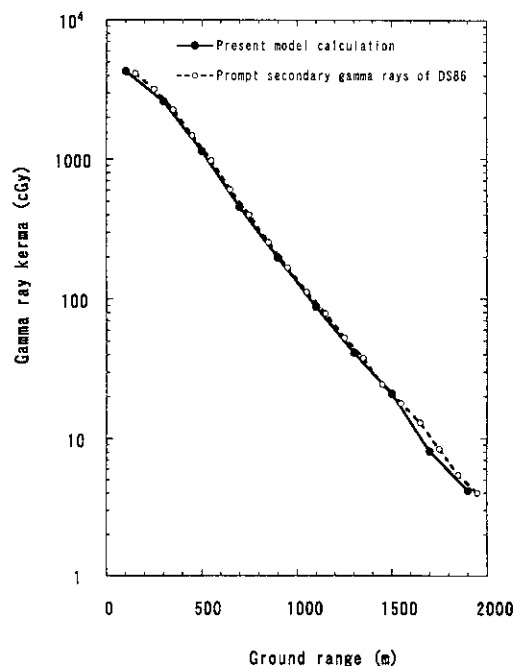


図 6. 即発中性子が空気や土と反応して発生した 2 次ガンマ線（即発 2 次ガンマ線）の DS86 との比較

DS86 と一致している。そのほかの成分についても DS86 の計算と矛盾はない。

もある。この反応は速中性子によっておこされるので今までの反応と違う。また被爆者への被曝線量はこの速中性子によって主として決まり熱中性子の影響は小さい。この放射能³²の半減期は短くもう存在していないが、当時のデータは残っていて、DS86の際には再評価された。そしてこのデータはDS86と合っていた。測定により求められた値と計算値との比を取ると、熱中性子の結果は一致して系統的なずれがある事が分かる。近距離でデータが計算より小さく遠距離で大きい。このことは図7の上に示されている。もし実験値と計算値が一致していたらこの比は1になるはずである。

そこで問題を検討していたが、解決のための良い方法がなかなか見付からな

かった。1996年および1997年に日米の再検討のための会議が開かれたがアメリカ側も原因は分かっていた。問題点は何らかのパラメータを変更し、熱中性子のデータを合わせると、速中性子が合わなくなることである。両者を同時に合わせる事が困難であった。そうしているうちに球形のシンプルな原爆にそこが割れたと考えがうかんだ。広島原爆はガンタイプといわれ、出口をふさいだ大砲の出口側と砲弾の入口側に2つのウラン235を配置し火薬で2つを出口側で合体させ臨界に達して爆発させたものである。そこでDS86では中性子の発生は厚い鉄がそのままの状態(壊れる前に)発生したとしている。中性子は鉄と(n, n')反応で非弾性散乱し、エネルギー

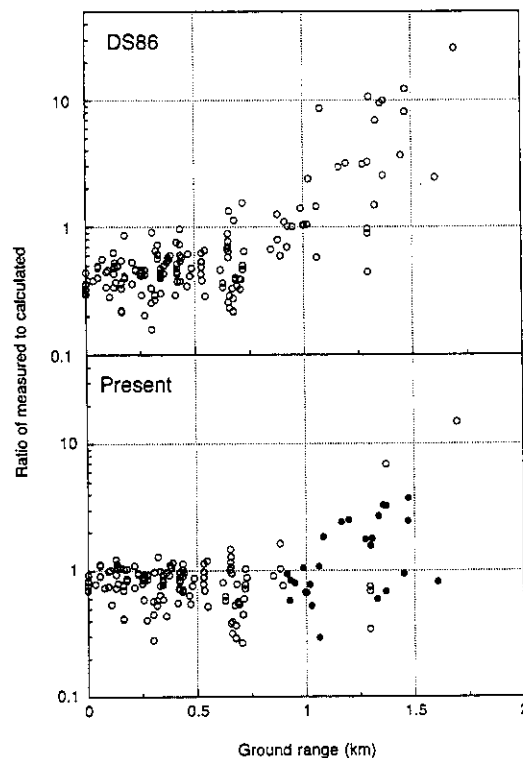


図7. 実験値と計算値との比

上の図はDS86との比較で、系統的なずれがある事が分かる。下の図は図8のようなクラックを仮定した場合。白丸が図8左の等方的な割れ方の場合。黒丸は非等方で、割れた中心を南東方向に向けた場合の計算。非等方の計算は遠距離をよく合わせるが、そのほかの方向で10倍前後高いデータも存在する。文献30より引用。

を失った。そこで2つのウランの衝突の際、原爆の底が抜けたように割れたと仮定した。この隙間から連鎖反応の終わりの時期に裸の核分裂中性子が放出されたと考えた。⁽²⁷⁾ 計算ではそれぞれDS86の中性子フルエンスを仮定して計算した。このときは割れた時間が最後の5%とした。こうしてさらに中性子が発生した高度を90m引き上げた。この仮定は隣32のデータがDS86と合っているので一つのパラメータを変えただけでは、ずれてしまうので必要である。もちろんこれらの仮定については承認されているわけではない。ここでの努力は可能性として示しアメリカ側に検討をせまるためのものである。

こうすると確かに1km以内では全てのデータが一致してくる。⁽²⁷⁾ しかしなが

ら1kmより以遠ではまだ計算と一致させることができない。このモデルは単純なモデルであるが、最近より厳密に広島原爆の形を再現してみた。図8にその模式図を示す。⁽³¹⁾ こうして平行に割れたモデルを考え、その隙間を図8左のように3cmとすると、遠距離まで比較的再現できることが分かった。さらに図8右のように割れ方が等方的でなく4分の1だけ割れたとするとさらによくあうことが示せる。⁽³¹⁾ この場合について計算との比較を示すと、図7下のようになる。これでだいたい合ってきたともいえる。

以上、こういったクラックモデルを仮定するとデータと計算とを合わせることが可能であることを示したといえる。ただこういったことが起こりうるのかアメリカ側が検討する必要がある。

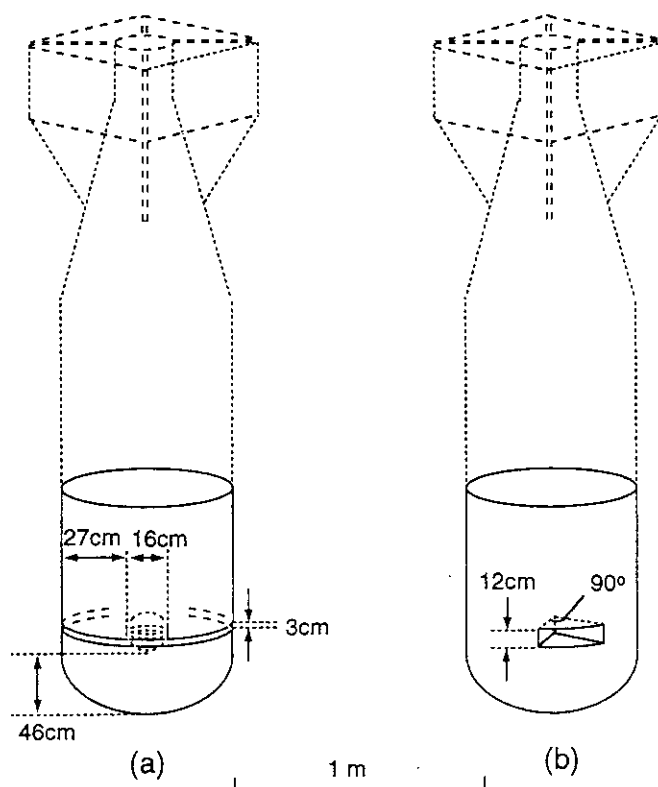


図8. より詳細な広島原爆の形を再現した場合の、クラックの仮定

左側はウランの位置を含む形で水平に割れた場合。割れ目の幅は3cmぐらいで計算とデータが合ってくる。右側は90度方向のみにクラックができた場合。文献30を参考に改変。

この計算モデル以外にも考えられることとして遠距離の測定値にはバックグラウンドの中性子が含まれている場合などの可能性も残されている。そのほかにも解答はあるかもしれない。まだ総合的に検討しなければならない。ただ現在のところ、広島原爆の中性子データの問題を説明できるのはこのモデルしかないのは確かである。

5. おわりに

原爆線量の問題について述べた。この問題は原因を考えるといった興味だけではなく、被爆者の線量評価が放射線影響研究所で進められてきた疫学調査と合わせた、放射線の人への危険度を求めることに直結しているため大切である。

(2) 広島長崎の被爆試料は建物などが急速に失われていて、ほとんどない状態である。すでに採取した試料から測定を行っている状態であり、今回を逃すと困難になってくる。問題点は現在も明確ではないが、広島グループとして引き続き解決への努力を進めていく。

謝辞

原爆線量再評価の研究は広島原爆線量評価グループである葉佐井博巳（広島国際学院大学）、岩谷和夫（広島県立医療保健福祉短期大学）岡隆光（呉大学）、静間清（広島大学工学部）遠藤暁（広島大学工学部）、高田純（広島大学原医研）藤田正一郎（放射線影響研究所）の方々との共同研究である。原医研国際放射線情報センターの平岡正行氏には MCNP の計算機へのインストールの際に援助していただいた。お礼申し上げます。

参考文献 REFERENCES

1. Radiation Effects Research Foundation. In, Roesch, W. C., ed. US-Japan joint reassessment of atomic bomb radiation dosimetry in Hiroshima and Nagasaki, final report. Hiroshima, Radiation Effects Research Foundation, Vol. 1 and 2. (1987).
2. International Commission on Radiological Protection. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford, Pergamon Press, ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21(1-3) (1991).
3. Hasai, H., Iwatani, K., Shizuma, K., Hoshi, M., Yokoro, K., Sawada, S., Kosako, T., Morishima H. Europium-152 depth profile of a stone bridge pillar exposed to the Hiroshima atomic bomb, ^{152}Eu activities for analysis of the neutron spectrum. Health Phys. 53, 227-239 (1987).
4. Hoshi, M., Kato, K. Data on neutrons in Hiroshima. In, Roesch, W. C., ed. US-Japan joint reassessment of atomic bomb radiation dosimetry in Hiroshima and Nagasaki, final report. Hiroshima, Radiation Effects Research Foundation, Vol. 2, 252-255 (1987).
5. Hoshi, M., Hasai, H. and Yokoro, K. Studies of radioactivity produced by the Hiroshima atomic bomb: 1. Neutron-induced radioactivity measurements for

- dose evaluation. J. Radiat. Res. Suppl., 20-31 (1991).
6. Hoshi, M., Yokoro, K. Sawada, S., Shizuma, K., Hasai, H., Oka, T., Morishima, H., Brenner, D. J. Europium-152 activity induced by Hiroshima atomic bomb neutrons, Comparison with the ^{32}P , ^{60}Co , and ^{152}Eu activities in dosimetry system 1986 (DS86). Health Phys. 57, 831-837 (1989).
 7. Shizuma, K., Iwatani, K., Hasai, H., Oka, T., Morishima, H. and Hoshi, M. Specific activities of ^{60}Co and ^{152}Eu in samples collected from the atomic-bomb dome in Hiroshima. J. Radiat. Res. 33, 151-162 (1992).
 8. Shizuma, K., Iwatani, K., Hasai, H., Hoshi, M., Oka, T. and Morishima, H. Residual ^{152}Eu and ^{60}Co activities induced by neutrons from the Hiroshima atomic bomb. Health Phys. 65, 272-282 (1993).
 9. Shizuma, K., Iwatani, K., Hasai, H., Oka, T., Hoshi, M., Shibata, S., Imamura, M. and Shibata, T. Identification of ^{63}Ni and ^{60}Co produced in a steel sample by thermal neutrons from the Hiroshima atomic bomb. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 384, 375-379 (1997).
 10. Shizuma, K., Iwatani, K., Hasai, H., Hoshi, M. and Oka, T. ^{152}Eu depth profiles in granite and concrete cores exposed to the Hiroshima atomic bomb. Health Phys. 72, 848-855 (1997).
 11. Nakanishi, T., Morimoto, T., Komura, T. and Sakanoue, M. Europium-152 in samples exposed to the nuclear explosions at Hiroshima and Nagasaki. Nature 302, 132-134 (1983).
 12. Nakanishi, T., Ohtani, H., Mizuochi, R., Miyaji, K., Yamamoto, T., Kobayashi, K., Imanaka, T. J. Residual neutron-induced radionuclei in samples exposed to the nuclear explosion over Hiroshima. Comparison of the measured values with the calculated values. J. Radiat. Res. Suppl. 32, 69-82, (1991).
 13. Straume, T., Finkel, R. C., Eddy, D., Kubik, P. W., Gove, H. E., Sharma, P., Fujita, S., Hoshi, M. Use of accelerator mass spectroscopy in the dosimetry of Hiroshima neutrons. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B52, 552-556, (1990).
 14. Straume, T., Egbert, S. D., Woolson, W. A., Finkel, R. C., Kubik, P. W., Gove, H. E., Sharma, P., Hoshi, M. Neutron discrepancies in the new (DS86) Hiroshima dosimetry. Health Phys. 63, 421-426, (1992).
 15. Straume, T., Harris, L. J., Marchetti, A. A., Egbert, S. D. Neutrons confirmed in Nagasaki and at the army pulsed radiation facility. Implications for Hiroshima. Radiat. Res. 138, 193-200, (1994).

16. Arakatsu. F., Kimura, K., Shimizu, S., Hanatani, T., Ueda, R., Ishiwari R., Takagi, I., Kondo, S., Takase, H., Aoki, K., Ishizaki. K., Ueda, R., Hondo, E., Nishikawa, Y. Takai. S., Horishige, T. Murao. M. Report on survey of radioactivity in Hiroshima several days after the atomic bomb explosion. In the Science Council of Japan, Collection of Investigation Reports on the Investigation of Atomic Bomb Casualties. ed. Committee for Publication of Investigation Reports on the Atomic Bomb Disaster. Japan Science Promotion Society. Tokyo. pp.5-10, (1953).
17. Yamasaki, F., Sugimoto, A. Radioactive ^{32}P produced in sulfur in Hiroshima. In the Science Council of Japan, 1953, Collection of Investigation Reports on the Investigation of Atomic Bomb Casualties. ed. Committee for Publication of Investigation Reports on the Atomic Bomb Disaster. Japan Science Promotion Society, Tokyo, pp. 16-18, (1953).
18. Yamasaki, F., Sugimoto, A. Radioactive ^{32}P produced in sulfur in Hiroshima. In, Roesch, W. C., ed. US-Japan joint reassessment of atomic bomb radiation dosimetry in Hiroshima and Nagasaki. final report. Hiroshima, Radiation Effects Research Foundation, Vol. 2, 246-247, (1987).
19. Shimizu. S., Saigusa. T. Estimation of ^{32}P induced in sulfur in utility-pole insulators at the time of the Hiroshima atomic bomb. In, Roesch, W. C., ed. US-Japan joint reassessment of atomic bomb radiation dosimetry in Hiroshima and Nagasaki, final report. Hiroshima, Radiation Effects Research Foundation, Vol. 2, 266-268, (1987).
20. Hamada, T. Measurements of ^{32}P in sulfur. In, Roesch, W. C., ed. US Japan Joint reassessment of atomic bomb radiation dosimetry in Hiroshima and Nagasaki, final report. Hiroshima, Radiation Effects Research Foundation, Vol. 2, 272-279, (1987).
21. Hashizume, T., Maruyama, T., Shiragai, A., Tanaka, S. Estimation of the air dose from the atomic bombs in Hiroshima and Nagasaki. Health Phys. 13, 149-169, (1967).
22. Kerr, G. D., Dyer, F. F., Emery, J. F., Pace III, J. V., Brodzinski, R. L., Marcum, J. Activation of cobalt by neutrons from the Hiroshima bomb. Oak Ridge, TN, Oak Ridge National Laboratory, Report No. ORNL-6590, (1990).
23. Hoshi, M., Sawada, S., Nagatomo, T., Neyama, Y., Marumoto, K., Kanemaru, T. Meteorological observations at Hiroshima on days with weather similar to that of

- the atomic bombing, Validity of the estimated atmospheric data in DS86 for neutron dose calculations. *Health Physics* 63, 656-664, (1992).
24. Briesmeister, J. F. MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, version 4A. LA-12625-M, Manual UC-705 and 700, (1993).
 25. Hoshi, M., Hiraoka, M., Hayakawa, N., Sawada, S., Munaka, M., Kuramoto, A., Oka, T., Iwatani, K., Shizuma, K., Hasai, H., Kobayashi, T. Benchmark test of transport calculations of gold and nickel activation with implications for neutron kerma at Hiroshima. *Health Physics* 63, 532-542, (1992).
 26. Iwatani, K., Hoshi, M., Shizuma, K., Hiraoka, M., Hayakawa, N., Oka, T., Hasai, H. Benchmark test of neutron transport calculations, II. Indium, nickel, gold, europium and cobalt activation with and without energy moderated fission neutrons by iron simulating the Hiroshima A-bomb casing. *Health Physics* 67, 354-362, (1994).
 27. Hoshi, M., Takada, J., Oka, T., Iwatani, K., Shizuma, K. and Hasai, H. A possible explanation for the DS86 discrepancy between the data and calculation in Hiroshima. In, Nagataki, S. and Yamashita, S. ed. Nagasaki symposium radiation and human health. Elsevier Science B. V. 175-191 (1996).
 28. Shibata, K., Nakagawa, T., Asami, T., Fukahori, T., Narita, T., Chiba, S., Mizumoto, M., Hasegawa, A., Kikuchi, Y., Nakajima, Y. and Igarashi, S. Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Version-3 -JENDL3-. Japan Atomic Energy Research Institute, JAERI-13 19, (1990).
 29. Gritzner, M. L., Woolson, W. A. Sulfur activation at Hiroshima. In, Roesch, W. C., ed. US-Japan joint reassessment of atomic bomb radiation dosimetry in Hiroshima and Nagasaki, final report. Hiroshima, Radiation Effects Research Foundation, Vol. 2, 283-292 (1987).
 30. M. Hoshi, S. Sawada, T. Nagatomo, Y. Neyama, K. Marumoto, and T. Kanemaru, *Health Phys.* 63, 656(1992).
 31. M. Hoshi, S. Endo, J. Takada, Y. Nitta, M. Ishikawa, K. Iwatani, T. Oka, S. Fujita, K. Shizuma, and H. Hasai, *J. Radiat. Res.* in press.

原爆被爆者のがん死亡およびがん発生における 放射線被曝の寄与リスクの推定

分担研究者 柴田 義貞（長崎大学医学部附属原爆後障害医療研究施設
放射線障害解析部門 教授）
研究協力者 清水 由紀子（放射線影響研究所広島研究所疫学部 副部長）
研究協力者 陶山 昭彦（放射線影響研究所長崎研究所疫学部 部長）

研究要旨

放射線影響研究所の寿命調査対象者におけるがん死亡（1950-1990）およびがん発生（1958-1987）のデータを基に、部位別リスクの推定および寄与リスクの推定を行った。さらに、寄与リスクについては、がん以外の疾患による死亡および慢性肝炎・肝硬変罹患についても検討した。

はじめに

放射線影響研究所では、ABCC時代に設定された固定人口集団である寿命調査集団について、死亡については1950年から、がん発生については1958年から追跡調査を行っており、その膨大な調査結果から、がんリスクの増加が認められている。¹⁻³

本研究では、まず寿命調査対象者における利用可能な最新のがん死亡（1950-1990）のデータを基に、固形癌の部位別死亡リスクを概観し、続いて固形癌による死亡および固形癌発生における原爆放射線被曝の寄与リスクを主要部位について性および被爆時年齢別に算出する。さらに、がん以外の疾患による死亡および慢性肝炎・肝硬変罹患についての寄与リスクも検討する。

研究方法

原爆被爆者の死亡率調査第12報第1部¹および原爆被爆者における癌発生率第2部²で使用され、現在放射線影響研究所

のホームページで公開されている、1950年から1990年までの寿命調査対象者の死亡率データおよび1958年から1987年までの癌発生率データを使用した。

性・被爆時年齢別寄与リスクの算出において、胃癌、肺癌等の致死的な癌については死亡率のデータを、非致死的な甲状腺癌および乳癌については、発生率のデータを使用した。

寄与リスク(ATR)は、がん死亡者（罹患者）のうち原爆放射線が原因と考えられるがん死亡者（罹患者）の割合で、過剰相対リスク(ERR)によって次のように表すことができる。

$$ATR = ERR / (1 + ERR) \quad (1)$$

固形癌のリスクを調査期間における平均過剰相対リスクによって表す場合、最近の死亡率調査報告では、次のようなモデルが用いられている。¹

$$ERR(d, s, e) = \beta_s \exp[\gamma(agex - 30)] \quad (2)$$

ここに、 d は推定被曝線量(DS86)、 $agex$ は被爆時年齢で、 β_s および γ が推定すべき未知母数である。 β は一般に男女で異

なるが、添字はそのことを表している。
このモデルでは、被爆時年齢を定めると、ERR は経時的に一定であることを示しており、 β_s は被爆時年齢 30 歳の人の 1 Sv あたりの ERR を表している。したがって、特定の被爆時年齢（たとえば、10 歳）の人の 1 Sv あたりの ERR とその信頼区間を求めるには、上記の ERR のモデルにある定数項の 30 を 10 で置き換えたモデルをあてはめればよいことが分かる。これらの未知母数の推定値およびその信頼区間の算出には AMFIT⁴ を用いた。ATR は ERR の単調増加関数であるから、AMFIT⁴ によって算出される尤度比検定に基づく ERR の信頼限界から尤度比検定に基づく ATR の信頼限界が簡単に計算できる。

結果

1. 固形癌死亡

表 1 は線量区分別の固形癌による死亡分布をまとめたものである。

表 1 の右端の数字は、追跡調査の最近の 5 年間、過剰リスクがかなり高かったことを示唆している。全過剰の約 25% が、全調査期間の 13% に過ぎないこの期間に起きていると推定される。

表 2 は、被爆時年齢および観察期間別の、観察された固形癌の過剰死亡数を示している。被爆時年齢が 30 歳以下である人の場合、40 年の追跡調査の全期間を通じた過剰死亡の半数近くが、最近の 5 年間に起きている。

表 1 固形癌の観察死亡数および期待死亡数（文献 1 より）

線量 (Sv)	対象者数	1950-1990			1986-1990		
		観察 死亡数	バックグラ ウンド期待 死亡数	過剰 死亡数	観察 死亡数	バックグラ ウンド期待 死亡数	過剰 死亡数
0 (<0.005)	36,459	3,013	3,055	-42	489	496	-7
0.005-0.1	32,849	2,795	2,710	85	443	428	15
0.1-0.2	5,467	504	486	18	90	74	16
0.2-0.5	6,308	632	555	77	106	85	21
0.5-1.0	3,202	336	263	73	48	42	6
1.0-2.0	1,608	215	131	84	40	22	18
>2.0	679	83	44	39	11	7	4
合 計	86,572	7,578	7,244	334	1,227	1,153	74

表2 被爆時年齢および観察期間別固形癌死亡（文献1より）

被爆時 年齢	1950-1975		1976-1985		1986-1990		1950-1990	
	観察	過剰	観察	過剰	観察	過剰	観察	過剰
0-9	35	4	89	10	103	10	227	24
10-19	139	15	282	28	241	22	662	66
20-29	247	20	310	23	259	19	816	62
30-39	674	33	653	29	361	16	1,688	78
40-49	1,400	44	720	22	250	7	2,370	72
50+	1,633	28	169	4	13	0	1,815	32
合 計	4,128	144	2,223	116	1,227	74	7,578	334

2. 部位別リスク推定値

図1は被爆時年齢30歳の女性における癌死亡の部位別過剰相対リスクおよび90%信頼区間を示したものである。¹ 実線は、モデル（2）に基く全固形癌の過剰相対リスクの推定値である。性特異の癌および肝臓癌を除き、男のリスクは女のリスクの0.49倍と推定されているので、男における過剰相対リスクの部位に

よる変動パターンは図1に類似するものと考えられる。肺および乳房以外の部位における他の被爆時年齢のリスクは、図1の値に $\exp[-0.038(\text{age}_x - 30)]$ を乗じれば求まる（-0.038は被爆時年齢係数、すなわち、モデル（1）にあるガンマの推定値）。肺癌および乳癌の被爆時年齢係数は、それぞれ+0.029、-0.079である。

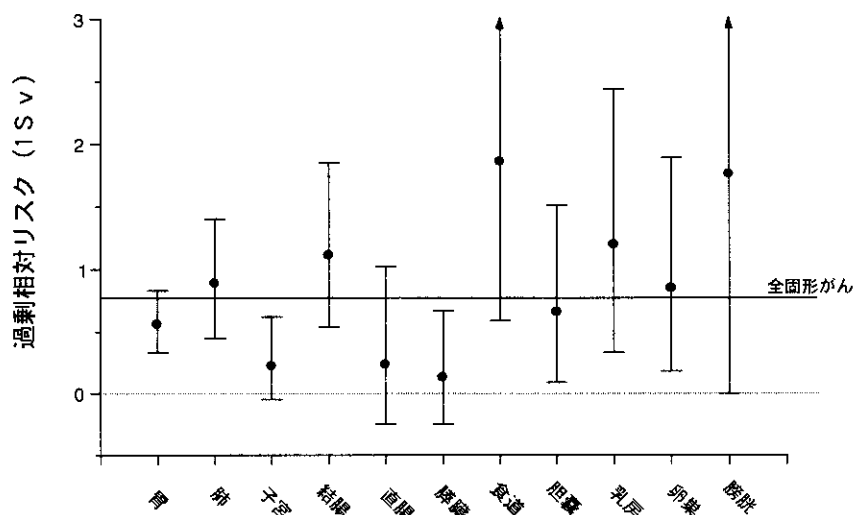


図1

被爆時年齢30歳の女性における部位別ERRの推定値と90%信頼区間（文献1より）

3. 寄与リスク

3.1 癌死・癌罹患

全固形癌、胃癌、肺癌、乳癌および結腸癌による死亡について、1 Sv の被曝における放射線被曝の寄与リスクを性および被爆時年齢別に計算した結果を表3－表7に示す。また、甲状腺癌と乳癌については癌罹患に関して同様の寄与リスクを求めた結果を表8、表9に示す。

所与の被曝線量における寄与リスクおよびその90%信頼区間は(1)式と(2)式を用いれば、表3－表9から簡単に求まる。

たとえば、被爆時年齢が10歳、被曝

線量が0.1 Sv の場合の男における全固形癌による死亡の寄与リスクの計算は次のようになる。(2)式と表3から、0.1 Sv における ERR は、 $0.82 \times 0.1 = 0.082$ である。したがって、(1)式より、寄与リスク ATR は、 $ATR = 0.082 / (1 + 0.082) = 0.076$ (=7.6%) と計算される。同様に、0.1 Sv における過剰相対リスクの90%信頼下限と信頼上限は、それぞれ $0.49 \times 0.1 = 0.049$ 、 $1.24 \times 0.1 = 0.124$ と計算されるから、寄与リスクの下限と上限として、それぞれ、 $0.049 / (1 + 0.049) = 0.0467$ (=4.67%)、 $0.124 / (1 + 0.124) = 0.110$ (=11.0%) が得られる。

表3 性・被爆時年齢別過剰相対リスクおよび寄与リスク 1950-1990
全固形癌*

性	被爆時年齢 (歳)	過剰相対リスク	寄与リスク (%)
男	0	1.21 (0.66, 2.02)	54.7 (39.7, 66.9)
	5	0.99 (0.57, 1.58)	49.8 (36.2, 61.2)
	10	0.82 (0.49, 1.24)	45.0 (32.7, 55.4)
	15	0.67 (0.41, 0.98)	40.2 (29.2, 49.6)
	20	0.55 (0.35, 0.79)	35.6 (25.7, 44.2)
	25	0.46 (0.29, 0.64)	31.3 (22.3, 39.2)
	30	0.38 (0.23, 0.53)	27.3 (19.0, 34.7)
女	0	2.49 (1.55, 3.87)	71.3 (60.8, 79.5)
	5	2.05 (1.36, 2.98)	67.2 (57.6, 74.9)
	10	1.68 (1.18, 2.31)	62.7 (54.2, 69.8)
	15	1.39 (1.02, 1.81)	58.1 (50.6, 64.5)
	20	1.14 (0.88, 1.44)	53.3 (46.7, 59.0)
	25	0.94 (0.73, 1.17)	48.4 (42.3, 53.8)
	30	0.77 (0.60, 0.96)	43.6 (37.4, 49.1)

*寿命調査対象者における1950年から1990年までの死亡観察データに基づく推定。
推定値に続く括弧内の数値は、90%信頼区間の下限と上限を示す。

表4 性・被爆時年齢別過剰相対リスクおよび寄与リスク 1950-1990
胃癌*

性	被爆時年齢（歳）	過剰相対リスク	寄与リスク（％）
男	0	0.17 (NA, 1.46)	14.2 (NA, 59.4)
	5	0.13 (NA, 1.06)	11.2 (NA, 51.4)
	10	0.10 (NA, 0.78)	8.8 (NA, 43.8)
	15	0.07 (NA, 0.58)	6.9 (NA, 36.9)
	20	0.06 (NA, 0.45)	5.4 (NA, 30.9)
	25	0.04 (NA, 0.35)	4.3 (NA, 25.9)
	30	0.03 (NA, 0.28)	3.3 (NA, 21.8)
女	0	3.10 (NA, 8.07)	75.6 (NA, 89.0)
	5	2.38 (NA, 5.22)	70.4 (NA, 83.9)
	10	1.83 (NA, 3.46)	64.7 (NA, 77.6)
	15	1.40 (NA, 2.37)	58.4 (NA, 70.4)
	20	1.08 (0.58, 1.70)	51.9 (36.8, 63.0)
	25	0.83 (0.45, 1.27)	45.3 (31.1, 56.0)
	30	0.64 (NA, 1.00)	38.8 (NA, 50.0)

*寿命調査対象者における 1950 年から 1990 年までの死亡観察データに基づく推定。
推定値に続く括弧内の数値は、90％信頼区間の下限と上限を示す。NA は計算不能であったことを示す。

表 5 性・被爆時年齢別過剰相対リスクおよび寄与リスク 1950-1990
肺癌*

性	被爆時年齢（歳）	過剰相対リスク	寄与リスク（％）
男	0	0.15 (0.02, 0.62)	13.1 (2.2, 38.4)
	5	0.17 (0.03, 0.62)	14.6 (2.9, 38.2)
	10	0.19 (0.04, 0.61)	16.2 (3.7, 38.1)
	15	0.22 (0.05, 0.62)	18.0 (4.8, 38.1)
	20	0.25 (0.06, 0.62)	20.0 (6.0, 38.3)
	25	0.28 (0.08, 0.64)	22.1 (7.4, 38.8)
	30	0.32 (0.10, 0.66)	24.4 (8.9, 39.8)
女	0	0.47 (NA, 1.64)	32.1 (NA, 62.1)
	5	0.54 (0.13, 1.61)	34.9 (11.2, 61.6)
	10	0.61 (0.17, 1.58)	37.8 (14.5, 61.3)
	15	0.69 (0.23, 1.57)	40.9 (18.6, 61.1)
	20	0.79 (0.30, 1.57)	44.0 (23.3, 61.1)
	25	0.89 (0.40, 1.59)	47.2 (28.7, 61.4)
	30	1.02 (0.52, 1.65)	50.4 (34.3, 62.3)

*寿命調査対象者における 1950 年から 1990 年までの死亡観察データに基づく推定。
推定値に続く括弧内の数値は、90％信頼区間の下限と上限を示す。NA は計算不能であったことを示す。

表6 性・被爆時年齢別過剰相対リスクおよび寄与リスク 1950-1990
乳癌*

性	被爆時年齢（歳）	過剰相対リスク	寄与リスク（％）
女	0	7.58 (NA, 25.72)	88.3 (NA, 96.3)
	5	5.48 (NA, 13.67)	84.6 (NA, 93.2)
	10	3.97 (NA, 7.72)	79.9 (NA, 88.5)
	15	2.88 (1.57, 4.81)	74.2 (61.1, 82.8)
	20	2.08 (1.11, NA)	67.5 (52.6, NA)
	25	1.51 (0.61, 2.56)	60.1 (37.9, 71.9)
	30	1.09 (0.32, 2.09)	52.2 (24.1, 67.7)

*寿命調査対象者における 1950 年から 1990 年までの死亡観察データに基づく推定。
推定値に続く括弧内の数値は、90%信頼区間の下限と上限を示し、NA は計算不能であったことを示す。

表7 性・被爆時年齢別過剰相対リスクおよび寄与リスク 1950-1990
結腸癌*

性	被爆時年齢（歳）	過剰相対リスク	寄与リスク（％）
男	0	3.96 (0.26, NA)	79.8 (20.7, NA)
	5	2.54 (0.19, 9.82)	71.7 (15.9, 90.8)
	10	1.63 (0.13, 4.93)	62.0 (11.8, 83.1)
	15	1.05 (0.09, 2.87)	51.1 (8.4, 74.2)
	20	0.67 (0.06, 1.88)	40.2 (5.7, 65.3)
	25	0.43 (NA, 1.34)	30.2 (NA, 57.2)
	30	0.28 (0.02, 1.00)	21.7 (1.6, 50.1)
女	0	10.61 (1.46, NA)	91.4 (59.3, NA)
	5	6.81 (1.24, NA)	87.2 (55.4, NA)
	10	4.38 (1.03, 15.70)	81.4 (50.7, 94.0)
	15	2.81 (0.79, 7.28)	73.7 (44.2, 87.9)
	20	1.81 (0.49, 3.99)	64.3 (33.0, 80.0)
	25	1.16 (0.24, 2.54)	53.7 (19.2, 71.7)
	30	0.74 (0.10, 1.79)	42.7 (9.1, 64.1)

*寿命調査対象者における 1950 年から 1990 年までの死亡観察データに基づく推定。
推定値に続く括弧内の数値は、90%信頼区間の下限と上限を示し、NA は計算不能であったことを示す。