

広島・長崎原爆線量再評価問題とその意味について

° 今中哲二・海老沢徹・川野真治・小出裕章・小林圭二・瀬尾健(京大・炉)

桜井醇児(広大・理) 高木仁三郎(プルトニウム研)

京都大学原子炉実験所

第17回学術講演会

講演要旨集 別刷

1983年3月18日

(12) 広島・長崎原爆線量再評価問題とその意味について

○ 今中哲二・海老沢徹・川野真治・小出裕章・小林圭二・瀬尾健（京大・炉）

桜井醇児（広島大・理）・高木仁三郎（プルトニウム研究会）

I. 被曝データの意義と線量再評価の経緯

広島、長崎の被爆生存者におけるガン等の発生率と被曝線量との相関データは、放射線による人体への確率的影響を評価する上で、最も基礎的なデータであり、これを RERF（放射線影響研究所、旧 ABCC）は、1950 年以来約 10 万人の固定集団を対象に被爆者の追跡調査を行い、死亡統計調査（LSS）として報告を続けている⁽¹⁾。LSS データは、ICRP や国連科学委員会等において尊重され、放射線の「許容量」を決定する上で大きな役割を果たしてきた⁽²⁾⁽³⁾。

原爆データに基づき放射線のリスクを検討するためには、原爆による被曝線量を推定する必要がある。1956 年、原爆線量推定のための大規模なプロジェクト⁽⁴⁾が ORNL を中心に作られ、1965 年 T65D と呼ばれる線量推定値⁽⁵⁾が発表された。T65D は、被曝線量データや原子炉実験等に基づいており、その算出過程の詳細が明らかでないという点も知られており、原爆線量推定の確度として長年用いられてきた。LSS では、この T65D を用いて被曝者個人ごとの線量を割り出している⁽⁶⁾。LSS 報告によると、広島と長崎では放射線の線量効果の違いが認められている。例えば、図 1 は、LSS 第 9 報⁽¹⁾に基づく白血病死亡についての線量と発生率の関係であり、広島の方が下りの線量効果を示している。T65D によると、長崎ではガンマ線が圧倒的に中性子に無視できるが、広島では中性子の寄与が大きく、上記の広島と長崎の差は中性子の効果と考えられてきた。そして、ガンマ線などの低 LET 線のリスク評価においては、長崎データが重視されてきたのである。

表 1 は、幾つかのリスク評価から、白血病と全ガンについてのリスク係数をまとめた。

表 1 白血病及び全ガンのリスク係数値

($\times 10^{-6} \text{ rem}^{-1}$)

	白血病	全ガン	備考
ICRP	20	100	
国連科学委員会	15~25	75~175	主として、 原爆に被ばく データによる
BEIR III LQ-L モデル	44	77~226	
L-L モデル	54	170~501	
RERF	48	130	
Manouso et al	~1000	~5000	Hanford 被ばく データによる

(注) 評価者によりリスクの表示方法が異っているが、ICRP の表示に換算した値である。LQ-L モデルとは、線量効果関係において低 LET 線には 2 次、中性子には 1 次の関係を適合させる。L-L モデルでは、どちらも 1 次とする。

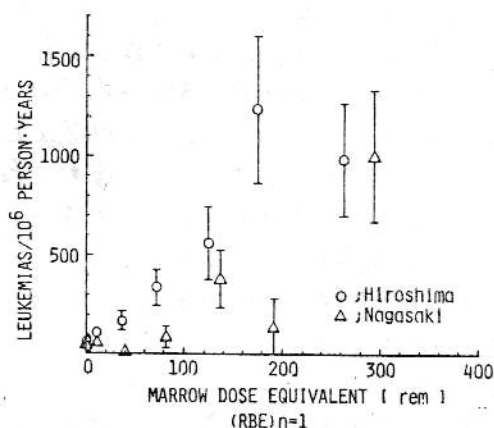


図 1. LSS に基づく骨髄線量と白血病発生率
(骨髄線量換算係数は BEIR III の値を用いる。)

のである。米国科学アカデミーのBEIR委員会報告(BEIR III)では、LSS報告と
 含め様々なデータを検討しているが、線量-効果モデルについての論争があり、統一的な
 見解は出していない⁽⁷⁾。Mancuso等は、Hanford原子力施設の作業従事者の被曝記録と死
 亡調査を基に、従来の評価より大巾にリスクを見直すという⁽⁸⁾。Mancuso等の統計的
 手法の妥当性については議論があるが、高線量域データの低線量域への外挿が問題となる
 原爆データに対し、Hanfordデータは低線量域での被曝データであるだけに意味が大きい。
 また、Stewartは、被曝生存者は生来抵抗力の高い集団と考えられることから、原爆デ
 ータに基づくリスク評価は過小になると指摘している⁽⁹⁾。

こうした放射線のリスクをめぐる議論の高まりの中で、従来のT65Dに基づく評価に根本
 的な疑問を投げかけているのが、最近行われた原爆線量の見直しである。LLNLの
 Loewe等⁽¹⁰⁾やORNLのKerr⁽¹¹⁾は、LANLのPreegが発表した広島・長崎原爆の放射
 線放出スペクトル推定値⁽¹²⁾を基に線量計算を行い、T65Dとは大巾に違ふ線量推定値を
 報告している。新しい線量推定値の特徴は、広島において中性子線量が大きく減少し、送
 りガンマ線量が増加していることである。その結果、図1で認められるような広島と長崎
 での線量効果の顕著な違いは縮小し、従来の中性子が効果の中心とされてきた広島データの
 意味が変わってくることになる。^{(13), (14)}

ここでは、まず、中性子線量について我々が行った計算を中心に、再評価線量とT65
 Dについて述べ、次に線量の見直しによるリスク評価に及ぼす影響について、白血病データと
 取り上げて議論する。

II. T65Dと再評価線量

II-1 中性子線量

LANLのPreegが発表した原爆放出中性子のエネルギースペクトルを基に、大気中
 の中性子組織線量(free-in-air tissue Kerma)の計算を行った。⁽¹⁵⁾

【ソーススペクトル】：計算に用いた広島原爆(Little Boy)と長崎原爆(Fat Man)
 の中性子スペクトルを図2に示す。このスペクトルは、爆発過程を組込んだ次元モンテ
 カルロ計算によるが、Preegは計算結果を発表しているのみで、計算の詳細については明
 らかにされていない。放出中性子の平均エネル
 ギーはLittle Boyで ~ 300 keV, Fat Manで
 ~ 10 keVである。ところが、1 MeV以上の領域
 ではスペクトルを比べると、むしろFat Man
 の方が小さく、1 MeV以上での中性子エネル
 ギーの平均はFat Manの方が大きくなる、とい
 う。中性子の透過距離への依存は、透過力の大きい高
 エネルギー(> 1 MeV)中性子によって決まる。
 図3は、単一エネルギーご同一個数の中性子を
 ソースとするときの大気中での線量の依存を、
 一次元輸送計算コードANISNにより計算し

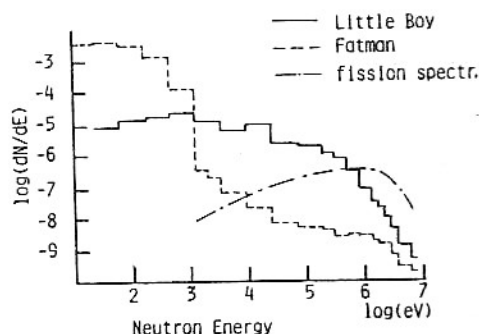


図2. 計算に用いた原爆放出中性子
 エネルギースペクトル

にものである。1 km 以上の距離で線量の初値は 1 MeV 以上のソース中性子であり、1 MeV 以上ではエネルギーが大きい程線量が減衰していくことを示している。T65D では、中性子線量の空気中での減衰の仕方は、Little Boy と Fat Man では同一と示しているが、図2と図3を合わせて考えると、線量の減衰はソーススペクトルに依存し、T65D の前提は成立しない。

【計算結果とT65Dの比較】：線量計算には二次元輸送計算コードDOTを用いた。核断面積ライブラリーにはENDF/B-Vを用い、中性子束から線量への換算係数算出にはR122等の値を用いた。大気組成については、原爆投下時の地上気象データと低高度での湿度観測データから求めた。地面組成については、筆者等が以前広島で土壌サンプリングを行ったときの密度、水分量と、岩石の組成データとを組合せて算出した。

図4、5に地表距離と中性子線量の関係と、広島・長崎について示す。比較のためLoewe, Kerr 及びT65Dの値も加えてある。筆者らの計算結果は、LoeweやKerrとはほぼ一致している。しかし、T65Dと比べると、広島では地表距離1 km ほど $\sim 1/5$, 2 km ほど $\sim 1/9$ となり、長崎ではいずれの距離でも $\sim 1/3$ である。

【 ^{32}P 測定値と計算値の比較】：原爆中性子による誘導放射能の測定としては、 ^{32}P , ^{60}Co 等についての報告がある。^{(16),(17),(18)} 山崎等は、広島の実験場を用いて、硫酸を原爆直後に採取し、(n, p) 反応で生成した ^{32}P を測定している。⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾ ^{60}Co の生成が主として熱中性子によるの比べ、 ^{32}S (n, p) ^{32}P 反応は2 MeV 以上の中性子による閾値反応であり、中性子線量との関係が直接的であるという意味で貴重である。

図6は、DOT計算により求めた ^{32}P 放射線量と山崎等の測定値の比較である。図中の点線

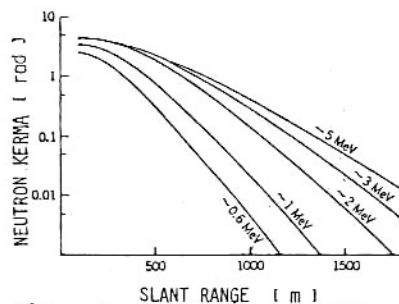


図3. 単一エネルギーのソース中性子による線量 (ソース中性子はいずれも 10^{20} である。)

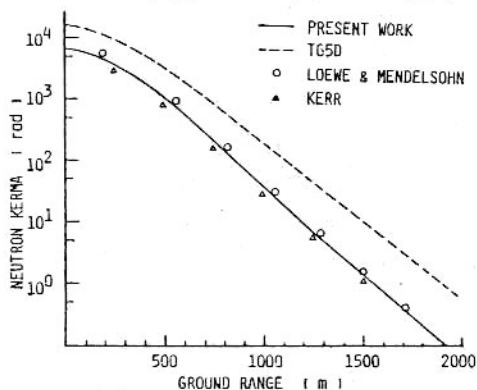


図4. 広島原爆による中性子線量の推定値 (爆発規模は本計算、Loewe 及び Kerr の 15 km, T65D, Kerr の 12.5 km)

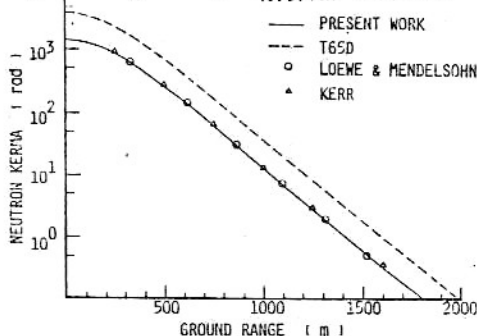


図5. 長崎原爆による中性子線量の推定値 (爆発規模はいずれも 22 km)

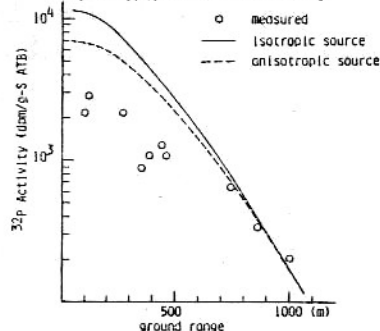


図6. ^{32}P 測定値と計算値の比較

は、Little Boyモックアップ実験⁽¹⁹⁾に基づき、
原爆中性子の放出方向に相対的な重みを付け、
非等オソースを入力して計算した値である。

700 ~ 1000 m の点については、計算値と測定値は良く一致しているが、500 m 以内では計算値の方がかなり大きい。この傾向は非等オソースでは若干改善されるものの、いぜんとして近距離では計算値が3 ~ 4倍大きい。この非等オソースは、方向により相対的な強さは違うものの、スペクトルの形は同一である。Little Boy頭部方向へ放出されるスペクトルは、構造が厚いため、本計算に用いたスペクトルより「軟い」はずである。今後、放出方向を考慮したスペクトルを推定すれば、近距離での測定値との差はさらに改善されると思われる。

II-2 ガンマ線量

原爆によるガンマ線は、即発ガンマ線、大気等による中性子捕獲ガンマ線及び上昇する火球中からの下Pガンマ線から構成される。原爆ガンマ線量の直接的な測定としては、1 km 以内において市川等⁽²⁰⁾や楡訪等⁽²¹⁾による熱ルミネッセンス測定が報告されている。LoeweとKerrは、即発ガンマ線と捕獲ガンマ線については輸送計算を行い、下Pガンマ線については、それぞれ別個のデータから算出して総ガンマ線量を推定している。図7、8は、広島・長崎についてのLoewe及びKerrによるガンマ線量とT65Dの比較であり、熱ルミネッセンスデータも加えてある。1 km 以内ではいずれの推定にも大きな差はないが、1 km 以上では違ってくる。LoeweとKerrの間では、中性子線量の場合ほど一致は良くない。T65Dと比べると、広島では1 km 以上ではLoeweとKerrが大きくなり、2 km では各々4倍、2.5倍となる。長崎では、LoeweとKerrはT65Dより2 ~ 3割程度低めである。今後1 km 以上における熱ルミネッセンス測定が行われると重要なデータになると言える。

図9は、地表距離1500 m でのガンマ線量について即発・捕獲及び下Pガンマ線の割合を示している。即発ガンマ線の割合は1割以下であり、残りは捕獲と下Pが半々程度である。LoeweとKerrの違いは主として下Pガンマ線の見積りの違いに由来している。

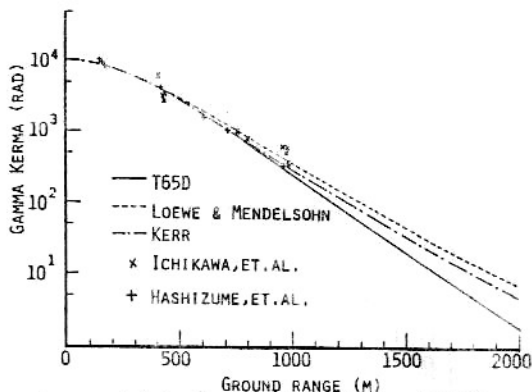


図7 広島原爆によるガンマ線量の推定値

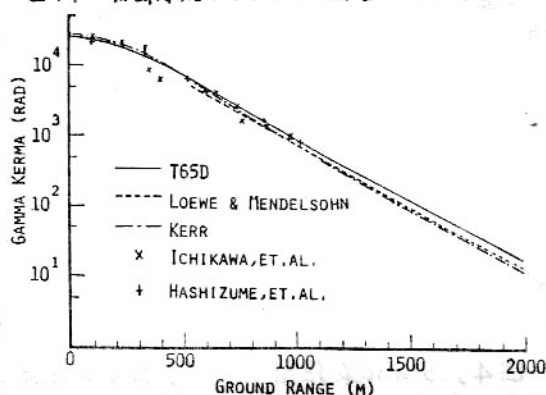


図8 長崎原爆によるガンマ線量の推定値

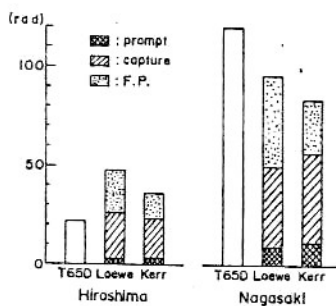
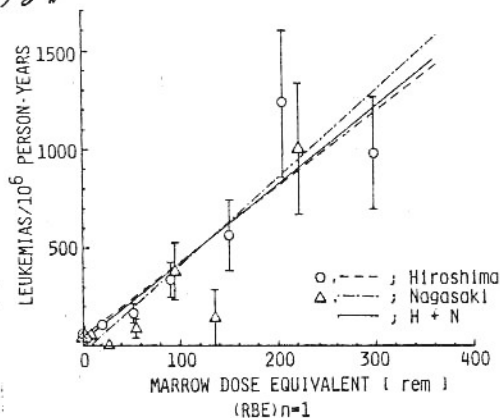


図9
地表距離
1500 m での
ガンマ線量
の成分比較

これより推定された線量は、地表付近の free-in-air dose であり、被爆者にそのまゝ用いられる線量ではない。被爆当時屋内にいた人々についてこの建物等の遮蔽効果を見直さなければならぬし、人体中での減衰も考慮する必要がある。

Ⅲ. 再評価線量に基づくリスク評価の試み

原爆線量の再評価は現在進行中であり、線量が確定したと云える段階ではないが、ここからは、これまでに明らかになった事実に知見を基に、LSS データにおいて、再評価線量を放射線のリスク評価にどのように反映するかの検討を試みる。着目する疾患は、放射線に対する感受性が高いことと知られており白血球減少である。最初の図1を用いたのと同じ LSS データに、再評価線量を適用して、線量と白血球減少率の関係を示したのが図10である。T65D に基いて各線量区間の平均線量値を、図10. 再評価線量に基づく白血球減少率とそれに対応する再評価線量値と置き換えにものだが、建屋等の遮蔽係数は同じとして、中性子線量については我々の計算値を採用し、ガンマ線量については Kerr の値に若干の修正 (Little Boy については爆発規模を 15 ktom に調整) を加えて用いた。図1では、広島と長崎の線量効果に顕著な差が認められるのに対して、図10では両者の差は明らかとは言えなくなっている。



リスク係数は、係数値算出に用いる線量効果モデルに依存する。従来、中性子については直線モデルが妥当とされてきたが、ガンマ線等の低 LET 線の線量効果モデルについては直線モデル説と二次曲線モデル説との間に論争があり、二次モデル説の主な根拠は、図1に示されたような広島と長崎の差を示す原爆データであった。再評価線量に基づく図10は、両者を統一して扱う可能性を示しており、ここからは直線モデルに従って議論する。図10の点線及び一点鎖線は、各々広島・長崎についての回帰直線、実線は両市を合わせた直線である。両市の直線はほぼ一致し、両市を合わせた直線の傾きは、 $4.0/10^6 \text{ 人} \cdot \text{rem} \cdot \text{Year}$ である。図10では中性子の RBE は 1 としているが、RBE を増加させると両市の一致は悪くなる。仮りに、相関性は悪くなるものの RBE を 10 とし回帰直線を求めると、その傾きは $3.2/10^6 \text{ 人} \cdot \text{rem} \cdot \text{Year}$ であり、RBE = 1 の場合と比べてあまり変化はない。つまり、線量再評価により中性子線量が減った結果、原爆被爆者の白血球減少については、ガンマ線の寄与が中心であるとすると、中性子の RBE についての知見を引き出すのは困難になると言える。以上より、 $10^6 \text{ 人} \cdot \text{rem} \cdot \text{Year}$ 当たり 3~4 の白血球減少率が 33 年間 (LSS 調査 28 年とその前の空白期 5 年を加える) 続いたとすると単位線量当りの発生率、つまり白血球減少のリスク係数は $100 \sim 130 \times 10^{-6} \text{ rem}^{-1}$ となる。この値は ICRP の勧告値 20×10^{-6} の 5~6 倍に相当するのである。今回の議論は予備的なものであるが、放射線のリスク評価は、放射線に関連する労働者と公衆の安全に係る問題である。今後、原爆線量再評価とともに、リスクについても見直しが行われるべきである。

(参考文献)

- (1) H.Kato & W. Schull; Life Span Study Report 9, RERF TR 12-80 (1932)
- (2) ICRP Publication 26 (1977)
- (3) 国連科学委員会; 放射線の線源と影響, 放射線監視 (1977)
- (4) J.A.Auxier; TID-27080 (1977)
- (5) J.A.Auxier et.al.; Health Physics 12, 425 (1966)
- (6) R.C.Milton & T.Shohoji; ABCC TR 1-68 (1968)
- (7) BEIR Committee; The Effects on the Populations of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation, NAS (1980)
- (8) G.W.Kneale et.al.; IAEA-SM-224/510 (1978)
- (9) A.M.Stewart; 低レベル放射線による発癌のリスク, 原子力工業 28 4月号 (1982)
- (10) W.E.Loewe & E.Mendelsohn; Nucl. Sci. Eng. 81, 325 (1982)
- (11) G.D.Kerr; ORNL/TM-8078 (1981)
- (12) W.E.Preeg to C.P.Knowles; letter dated April 5 (1976)
- (13) W.E.Loewe & E.Mendelsohn; Health Physics 41, 663 (1981)
- (14) 高木仁三郎; 原爆線量再評価の意味するもの, 科学 53 No.2 (1983)
- (15) 今中哲二; 広島・長崎原爆による中性子線量の推定, 科学 53 No.2 (1983)
- (16) 日本学術会議編; 原子爆弾被害調査報告集 (1953)
- (17) N.Pace & R.E.Smith; ABCC TR 26-59 (1959)
- (18) T.Hashizume et.al.; Health Physics 13, 149 (1967)
- (19) ORNL Health Physics Div. Ann. Prog. Rep., ORNL-4446 (1969)
- (20) Y.Ichikawa et.al.; Health Physics 12, 395 (1966)

DOSE REESTIMATION OF ATOMIC BOMBS IN HIROSHIMA AND NAGASAKI

Tetsuji Imanaka, Tohru Ebisawa, Hiroaki Koide, Keiji Kobayashi.

Shinji Kawano and Takeshi Seo

(Research Reactor Institute, Kyoto University, Osaka 590-04)

Junji Sakurai

(Department of Physics, Hiroshima University, Hiroshima 730)

Jinzaburo Takagi

(Forum for Plutonium Studies, Tokyo 105)

Transport calculations of neutron doses have been carried out on the basis of the neutron spectra emerging from the atomic bombs in Hiroshima and Nagasaki given by the Los Alamos National Laboratory. From obtained results it is concluded that the neutron doses at the distance of 1-2 kilometers from the hypocenter in Hiroshima is 1/5-1/9 and in Nagasaki 1/3 as large as those estimated with T65D (tentative 1965 dose estimates). This discrepancy indicates that dose estimates which have been in use since 1965 should be revised. The effect of this revision on the risk assessment of human exposure to radiation is discussed and a preliminary risk assessment of leukemia mortality in Hiroshima and Nagasaki is presented.