

☆ :: ☆



日米原爆線量再評価検討委員会報告書について

田島 英三*

(1987年 7月22日 受理)

*US-Japan Joint Reassessment of Atomic Bomb Radiation Dosimetry
in Hiroshima and Nagasaki (Final Report)*

By Eizo TAJIMA

☆ :: ☆

日米原爆線量再評価検討委員会報告書は、本文約460頁(英文)、付録約650頁(英文)から成り、本文は序文(Preface)、歴史的展望(Historical Review)、総括(Executive Summary)に続いて9章に分かれている。これらはそれぞれ日米両国から選ばれた数名の専門家によって書かれたもので、その内容は高度に専門的であって全体を理解することは容易でない。

本稿は、この『報告書』の全体像を把握するために、線量再評価が必要になった理由と、新しい評価システムDS 86によって得られた結果のうち特長的なものについて、従来の評価システムT65Dと比較しながら述べ、次いで各章の概要を述べる。

ただし、本稿では『報告書』の内容を必ずしも適切に反映しているとはいえないので、内容の正確な把握を望まれる方は『報告書』そのものを読んで頂きたい。

I. 原爆線量の再検討に至るまでの経緯

1945年8月6日広島に原爆が投下された直後から、日本の科学者は直ちに現地に入り、被害の状況を調査した。広島に最初に入った科学者は(財)理化学研究所の仁科芳雄博士(8月8日)と京都大学の荒勝文策教授(8月10日)であった。その後、小グループで理研および大学の調査班が派遣された。9月になって日本学術研究会議(現在の日本学術会議の前身)が大規模な調査班を組織して現地に派遣した。これらの調査結果は「原子爆弾災害調査報告書」(日本学術振興会1953年)に収録されているが、誠に貴重な資料である。アメリカのH. Truman大統領は、広島・長崎の被爆者を長期間追跡調査することの重要性に鑑み、National Academy of Sciences (NAS) に対してその方策を立案するよう命じた。NASの勧告に基づき設立されたのが Atomic

Bomb Casualty Commission (ABCC、広島は1947年、長崎は1948年設立)である。ABCCはアメリカ政府によって運営され、日本側も国立予防衛生研究所の支所を広島、長崎のABCC内に設置(1948年)してこれに協力した。1975年には組織が変更されて名称も「放射線影響研究所; Radiation Effects Research Foundation (RERF)」と改められ、日米両国政府の共同運営となっている。運営の主体は変わったが、研究調査の内容はABCC時代の事業をそのまま引き継ぎ、活発な活動を続けて今日に至っている。

RERFが実施する調査研究活動の目的にとって、被爆者が受けた放射線量を確度高く知ることは第一義的に重要なことである。これは当初から世界の科学者の関心事であったが、1965年にアメリカのOak Ridge National Laboratory (ORNL)の科学者によって初めて線量の評価システムが提案された。これをT65D (Tentative 1965 Doses) という。今日までRERFの研究調査で使用されている線量はこの評価システムによって計算されたものである。

ORNLの科学者がT65Dの根拠としたのは、「Ichiban Project」という大規模な実験プロジェクトの結果によるものである。このプロジェクトは、Nevada核実験場における長崎型原爆のテスト、高い塔に裸の小型原子炉あるいは強力な ^{60}Co 線源を設置した大がかりな実験、日本家屋を建てて行った遮蔽実験、等を含むものであった。このプロジェクトから得られた結果を広島と長崎の場合にあてはめて放射線量を推定したのがT65Dである。このプロジェクトのリーダーはJ.A. Auxierであった。

* 厚生省「原爆による線量の評価検討委員会」委員長

1970年代になると、この T65D に対していろいろな問題や矛盾が指摘されるようになった。1976年 H.H. Rossi は、T65D による中性子線量を基にしてリスク係数を計算し、これを用いて最大許容線量の中性子に対するリスクを計算すると、最大許容線量の γ 線の場合より 1 桁も大きくなるので、中性子に対する許容限度を 1 桁下げるべきであると主張した。また、J. Marcum は、T65D においては日本家屋の γ 線に対する透過率を距離に無関係に、広島では 0.9、長崎では 0.81 としているが、この値は約 $\frac{1}{2}$ にすべきであると主張した。W.C. Roesch は、1987年4月に開かれた National Council of Radiation Protection and Measurements (NCRP) の年次総会で、T65D の計算システムには大きな誤りがあることを次のように示した。すなわち、Nevada における 4 回の小型原爆実験(Hardtack)の空中線量測定値および広島・長崎の T65D 計算値の距離別分布は、単純に爆弾の出力を基準化しただけでは全く一致しないで、非常に異なった分布の仕方をしている。このことは、放出される放射線の空中伝播の仕方が爆弾によって大いに異なり、ある情況のもとで行われた原爆の実験結果を、出力だけを調節して他の場合にあてはめることは間違いであることを明瞭に示したものである。

こうしたことから、T65Dには非常に大きな誤差が含まれていることが指摘されていた頃、偶然に広島型原爆のレプリカが発見された。一方、W.E. Preeg が広島・長崎爆弾から放出された中性子のスペクトルを計算し、これを友人に宛てた手紙の形で発表した(1976年)。このスペクトルを基にして中性子線の空中の伝播をコード計算すると、T65D と大いに異なる結果となった。

このようにして線量の評価方法を再検討する必要があることが痛感され、アメリカでは1981年に F.Christy を座長とする線量再評価検討委員会(付録 a 参照)が設置され、またその結果を評価吟味するための上級委員会(Review Committee)(付録 b 参照)を NAS に設置し、その座長に F.Seitz が就いた。

これに対応して、日本側においても厚生省に検討委員会(付録 c 参照)と上級委員会(付録 d 参照)が組織され、アメリカと共同してこの問題に当たることになった。この問題は日米の科学者の緊密な協力がなければ解決しないからである。日本側の両委員会の委員長は田島英三が就任した。

日米の合同ワークショップはこれまで 4 回開かれた(1983年に 2 回、1984年と1986年に各 1 回)。これらの

全体会議のほか、日米の科学者による小人数の会合も何回か持たれた。そして、1986年の 3 月に開かれた日米合同の上級委員会において新しい線量評価システムを承認した。これを DS86(Dosimetry System 1986)と名付け、RERF はこの計算方式に基づいて直ちに被曝線量の計算を開始するよう要望するという内容の共同ステートメントを発表した。その声明の中で、「我々は現在の科学水準からみて、この計算方式が最良のものとして信じており、今後における研究の進展によって修正が必要となるかもしれないが、大きな変更はないものと考えている。」と述べている。

II. DS86 の主要な計算結果 と T65D との比較

爆弾の爆発と同時に生じた放射線は、起爆剤(火薬)や爆弾の殻と相互作用を起こしながら気中に放出される。放出された放射線は、大気中の空気分子と作用し、2次 γ 線をつくりながら伝播して家屋等の遮蔽物に達する。ここでまた相互作用を起こしながら被爆者の身体表面に到達し、身体の組織と再び相互作用を起こして臓器に達し、その臓器に線量を与えることになる。ここではこの放射線を即発放射線という。一方、核分裂片は火球と共に上昇し、その過程で γ 線を放出する。また遅発中性子も僅かではあるが放出される。これらの放射線を遅発放射線という。遅発放射線も即発放射線と同様の過程を経て、臓器に線量を与える。

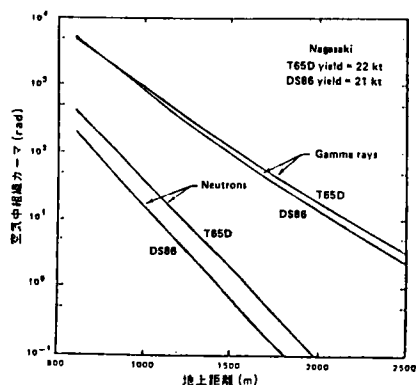
DS86 は、上の諸過程をすべて物理的素過程に基づいて計算コードに組み立てたものである。そして、種々の実験データや広島・長崎における測定データは、このコードの検証に用いられたものである。もし、計算と実験との一致が充分でない場合には、実験に誤りがないか、あるいは計算モデルに落度がないかを検討して改善を加えていく。このやり方は、長崎型の爆弾を用いて Nevada という特殊な情況のもとで行った実験データを、広島と長崎の場合に適用した T65D の計算の仕方と根本的に異なる点である。アメリカ側は、そのコードの組み立てに主要な役割を果たした。日本側の貢献の一つは、現地の情況の調査研究である。例えば、日本家屋の構造、当日の大気状態、当時の日本人の体格等に関する調査である。また、日本の科学者が投下直後から調査した資料は今回の再評価において重要な役割を果たした。例えば、中性子フルエンス*の決定や原爆の出力決定、西山地区、己斐・高須地区の放射

* フルエンスとは、単位大円断面積をもつ球に入射する放射線粒子の数をいう。

性降下物による線量決定等は、当時の調査資料に負うところが大きい。また、現在でも測定可能な熱ルミネセンス(TL)は γ 線の線量を定めるコードの検証の決め手となったものである。

DS86 では、任意の位置におけるエネルギー別、角度別のフルエンスを与えることができる。したがって、フルエンスから容易にカーマを計算することができるから、DS86 の特長を T65D との比較において示すために、空気中組織カーマ*(簡単に空気中カーマという)、遮蔽がある場合の空気中組織カーマ(簡単に遮蔽カーマという)および臓器線量について述べる。

第1図は、空気中カーマについて長崎の T65D と DS86 とを比較したものである。DS86 の γ 線カーマは T65D より幾分小さくなっているが、その差は誤差の範囲である。中性子は T65D の約 $\frac{1}{2}$ ～ $\frac{1}{3}$ である。 γ 線カーマが DS86 と T65D で余り変わらないのは、T65D が長崎型の爆弾を用いた Ichiban project による

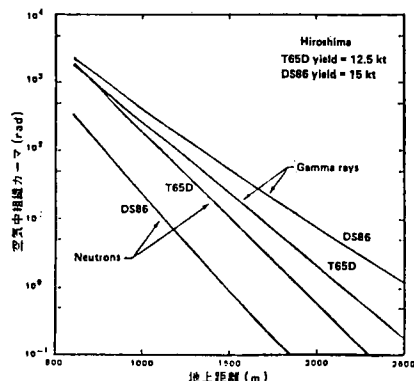


第1図 中性子および γ 線カーマの DS86 と T65D との比較 (長崎)

家屋内遮蔽カーマと空気中カーマとを比較することによって、家屋の透過率が計算できる。 γ 線の透過率には、中性子が家屋材料と相互作用することによって生ずる2次 γ 線の寄与分も含まれる。したがって、この透過率は当然のことながら、中性子フルエンスにより変化するから、距離によって変わるはずである。DS86 においては、爆心地から1,500 mの地点で即発 γ 線に対して0.53、遅発 γ 線に対して0.46になった。T65D では、距離に無関係に広島では0.9、長崎では0.81という値を与えていた。これは大きな違いである。Marcum は早い時期から T65D の値を問題としていて、即発 γ 線に対し0.55、遅発 γ 線に対し0.45の値を提唱していた。これらの値は今回の値に非常に近い。この例からわかるように、DS86 による家屋内遮蔽カ

ためであろう。また、中性子カーマが DS86 で大きく減少したのは、大気中の水蒸気成分による影響であると考えられる。

これに対し、第2図は広島の場合である。 γ 線カーマは地上距離によって異なるが、T65D の2～3.5倍に増大する。また、中性子カーマは T65D の約1/10と大幅に減少している。 γ 線カーマ増大の一因は、爆弾の出力が12 kt から15 kt に増大したためである。また、中性子カーマの減少は、長崎の場合と同じように、大気中水蒸気成分の影響のほか、広島の中性子スペクトルが長崎の中性子スペクトルより軟かいためである。これは、爆弾の起爆装置の相違と殻の厚さが異なることに起因する。すなわち、核分裂中性子は、広島では重金属の厚い層を通るのに対し、長崎では金属層は薄い起爆剤に含まれる水素原子との衝突によってエネルギーを多く失う。これらの事実は今回の線量評価によって明らかになったことの一つである。



第2図 中性子および γ 線カーマの DS86 と T65D との比較 (広島)

ーマは一般に T65D より小さくなる傾向がある。

臓器線量の計算に当たって考慮した主な事項は次のようなものである。

- (1) 1945年頃の日本人の体格
- (2) 被爆時における種々の遮蔽情況、被爆者の姿勢は、直立・座位・臥位の3つの場合を考慮に入

* カーマとは、電荷をもたない電離放射線によって単位質量の物質のなかで遊離されたすべての荷電粒子の初期運動エネルギーの和をいう。その物質の中で荷電粒子平衡が成立している場合にはカーマと吸収統量は一致する。したがって、混雑が生じない場合にはカーマの代わりに線量ということがある。

空気中組織カーマとは、大気中のある点における放射線フルエンスが組織に与えるカーマをいう。

れる。

- (3) 選ばれた臓器は15種類、T65D では臓器線量は計算されていないので、直接にDS86の結果と比較することはできない。RERFではG.D. Kerrの透過率を用いて臓器線量を計算しているが、この値はBEIR-80の報告*にある値と同じである。

そこで、BEIR-80報告に用いた透過率とDS86による透過率の計算結果の1例を第1表に示す。DS86計算結果の方がBEIR-80報告の値よりかなり大きくなっていることに注目する必要がある。T65Dで計算したリスク係数が、DS86においてはどうか変わるかということとは興味あることであるが、その際空気中カーマ、家屋透過率と共に、この臓器透過率を総合的に考慮しなければならない。

第1表 空気中カーマに対する赤色骨髓中
カーマのカーマ透過率

	BEIR-80	成人	小児	幼児
即発中性子	0.28	0.300	0.397	0.512
即発γ線	0.56	0.764	0.810	0.946
遅発γ線	0.56	0.721	0.791	0.927
遅発中性子	0.28	0.226	0.322	0.416
身体による 2次γ線	0.067	0.255	0.199	0.160

最後に、残留放射能について簡単に触れることとする。放射性降下物が特に多かったのは、広島では己斐・高須地区、長崎では西山地区であった。これらの地区で人々が実際に被曝した線量を推定するには、その人々の実際の行動を知らなければならないが、そのようなデータは現在残っていない。したがって、DS86にはその線量計算は含まれていない。原爆投下後1ヵ月以上経った時点で測定されたデータを基に非常に粗い近似を用いると、該当地区に居続けたと仮定した人の線量(最大値)は、長崎で12~24 rad、広島で0.6~2 rad程度と計算される。また、爆心地に投下直後入った人が誘導放射能から受けた被曝線量の最大値は広島で50 rad、長崎で18~24 radと計算される。

II. 報告書各章の概要

第1章 爆弾の出力

広島・長崎に投下された原爆の出力は、線量計算にとって最も基礎的なデータであるにもかかわらず、投下時のデータの大部分が失われたため、直接の測定値からの値は得られていない。しかし、長崎爆弾についてはTrinity実験および1946年のCrossroads Ableと

Crossroads Baker実験で使用された原爆がこの原爆と同一であったことから、長崎爆弾についてはかなり精度よく推定することができた。

第2表は、長崎爆弾の出力の推定方法とその値を示す。(1)放射化学分析は火球中にあった破裂片の放射化学分析を意味する。(2)は火球が時間と共に膨張していく速さを測定することによって出力を推定する。この(1)と(2)の方法が最も信頼のおける方法であるとされている。(3)の理論計算は爆弾の構造から出力を計算するものである。(4)は圧力波の被害から推定する方法である。(5)は熱ルミネセンスの測定値とDS86の計算とを合わせることににより出力を推定する。この表から最も推奨する値は21 ktとされた。

第2表 長崎爆弾の出力推定

方 法	出力(kt)
(1) 放射化学分析	
Trinity test	20.3
Crossroads Able test	20.4
Crossroads Baker test	21.7
(2) 火球	
Trinity test	20.8
Crossroads Able test	21.4
(3) 理論計算	22
(4) 爆風	22
(5) 熱ルミネセンス	22
推奨値	21

広島型の爆弾は、今までに広島に唯一発投下されただけであるので、出力の推定は長崎の場合より誤差が大きい。第3表はその出力を決めた方法と値である。(1)、(5)、(8)はそれぞれ長崎の(5)、(4)、(3)と同じである。(2)は衝撃波による圧力上昇と時間との関係から推定する方法、(3)は中国電力本社屋上にあった炭化した桧材と同じ厚さの炭化層を実験室の中で再現して決めた値である。(4)は罫子の絶縁材料として用いられている硫黄に速中性子で誘導される³²Pの放射能が測定されているので、この値とDS86の計算によって決めた値である。(6)は広島と長崎で同じ熱影響が現れた範囲の測定値を用い、長崎の爆弾の出力を21 ktとして相対的に決めた値である。(7)は爆風による被害の範囲から(6)と同じ手法により決めた値である。

* The Effect on Populations of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation (Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation, NAS, 1980)

第3表 広島爆弾の出力推定

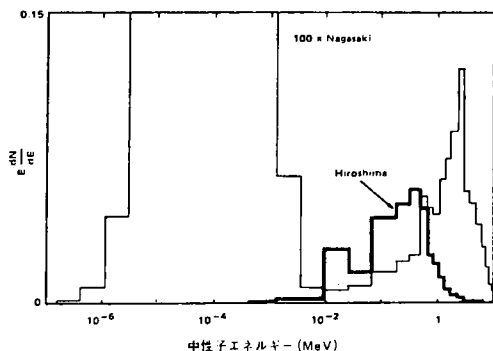
方 法	出力(kt)	荷 重
(1) 熱ルミネセンス	18	3
(2) 圧力対時間	16	3
(3) 桧材の炭化	15	2
(4) 硫黄の放射化	13	1
(5) 爆風	12	1
(6) 熱影響(相対的推定)	14	3
(7) 爆風(相対的推定)	15	1
(8) 理論計算	15	2
荷重平均	15	

この表に示された種々の推定値に、主観的ではあるが表の右端にある重みをかけて平均すると15ktとなる。しかし、単純平均でもこの値は変わらない。

結論として、広島爆弾の出力は15kt、誤差は ± 3 kt、長崎爆弾の出力は21kt、誤差は ± 2 ktの範囲にある。

第2章 ソースタームとその検証

原爆が爆発すると中性子(即発中性子)と γ 線(即発 γ 線)が放出されるが、その際、起爆剤の軽元素(特に水素原子を含む)およびケーシングの重元素と相互作用をする。したがって、放出放射線の角度分布とエネルギー分布は爆弾の構造によって変わる。広島爆弾はいわゆるガンタイプで、弾頭は厚い鋼鉄でできている。これに対し、長崎爆弾は核分裂性物質の周囲に火薬を配置してこれに点火し圧縮する方法、いわゆるインプロージョン型の爆弾で、弾頭は薄い鋼板でできている。このために、中性子は広島の場合は比較的薄い軽元素の層と厚い重元素の層を通り、長崎の場合はこれが反対になる。その結果、放出された中性子のスペクトルは広島の場合の方が軟くなる。第3図は、広島と長崎の中性子スペクトルを比較したものである。また、出力kt当りの放出数を比較すると、 γ 線は長崎



第3図 原子爆弾から放出された中性子スペクトル

の方が大きく、中性子は両市で大きな差はない。これらの計算の検証は、広島型原爆のレプリカを用いて組み立てた臨界実験装置(ただし、U量は少なくしてある)を用いた実験と比較して行った。弾頭方向を除いた他の方向で計算値との一致は良好であった。

放出された中性子の総量は、空気中チッ素による捕獲反応によって生ずる γ 線の強さと関係している。充分低いエネルギーまでの中性子測定結果があるが、その値は計算値とよい一致を示している。

第3章 放射線の空中輸送

即発中性子、即発 γ 線および空気捕獲 γ 線の空中輸送は、2次元コンピュータコードおよびMonte Carloコードを用いて大規模な計算がなされた。これらの“即発”輸送には、大気は爆風によって攪乱されていないとして計算している。

以上の3種の放射線に加えて重要な寄与をするのは、上昇する火球の中の核分裂片から出る遅発 γ 線である。火球は密度が極めて小さく、膨張し続ける。その中を運動している分裂片から出る γ 線の取扱いは複雑で、モデルを1次元に簡単化して計算を行った。

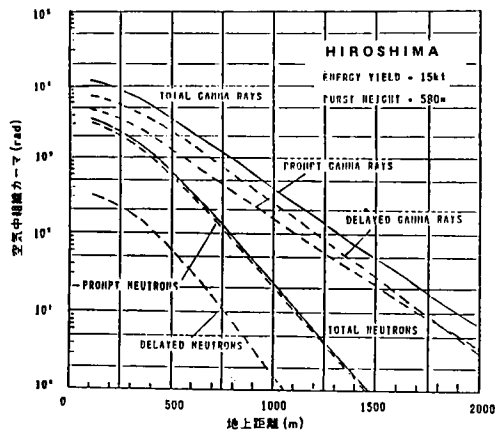
これらの計算は、実験データとの比較、あるいは異なった計算コードを用いた結果と比較することによって検証した。なお、遅発中性子の寄与も計算されているが、その寄与は小さい。

その計算の結果とT65Dとの比較を前出の第1, 2図に示す。前章で述べたように両市ともT65Dに比較して中性子成分が減少しているのは大気中の水蒸気成分の影響である。また、特に広島の減少が大きいのは、中性子スペクトルが軟いことが効いている。広島で γ 線成分が増大したのは、爆弾の出力が12.5ktから15ktに大きくなったためであろう。第4, 5図は各種放射線の寄与を示す。

第4章 γ 線の熱ルミネセンス測定

土壌を素材としたレンガやタイルに石英や長石が含まれている。石英などは放射線のエネルギーを吸収し、それによって電子や正孔(電子の抜けた跡)のエネルギー・レベルに変化が生ずる。それらの変化のある種のものは長期間にわたって保持される。そのような石英などがある加温率で加熱すると、それぞれの変化に対応する温度のところで、吸収した放射線のエネルギー量に比例した量のルミネセンス(光)が発生する。このような現象を熱ルミネセンス(TLと略す)といい、そのような現象を起こす物質をTL物質という。

土壌の中には、トリウムやウランあるいはそれらの崩壊生成物などの自然放射性物質が含まれている。石



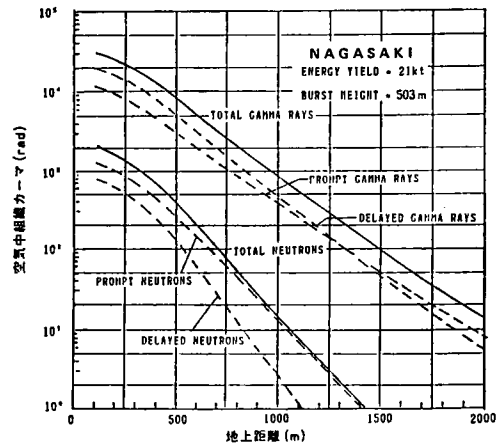
第4図 即発中性子とγ線および遅発中性子とγ線のDS86カーマに対する寄与(広島)

英などのTL物質は、これらの放射性物質からのα線、β線およびγ線に被曝するし、またこれに加えて宇宙線にも被曝する。したがって、広島と長崎のレンガやタイルは原爆からの放射線のほかに、自然放射線などの被曝(バックグラウンド)も受けている。

レンガやタイルは窯の中で高温に熱せられて造られるので、それまでのバックグラウンドによるTLは全部消滅する。したがって、バックグラウンドは製造の時点からの蓄積を考えればよい。TLの測定にはバックグラウンドの評価が難しいこと、TLに潜像退行(放射線によって生成された電子などのエネルギー・レベルが、長時間になんらかの影響で消滅してしまう現象)があることなどから、これらの影響を受けないで的確に線量評価を行うため、いろいろなTL測定法が実施されている。

原爆投下から約40年を経過して両市とも復興著しく、被爆したままの状態では火災にも遭っていないレンガやタイルなどの試料を収集することは困難であった。市民の協力を得て、爆心から1.5km近辺でいくつかの試料が収集できた。特に、広島大理学部校舎、長崎市家野町民家の塀から被爆時の状態を保持している大量の試料が採集でき、日米英の5箇所の機関でのTL測定の相互比較などに用いることができ、測定精度向上に役立った。

測定したTL量をγ線量に換算するため校正が必要である。原爆によるγ線が比較的高いエネルギーであるので、校正用の線源として ^{60}Co や ^{137}Cs γ線源が用いられた。校正のための標準照射は、電離箱線量計で測定したレントゲン(R)単位の照射線量で行われているので、計算との比較のために0.87(ラド/レントゲン)



第5図 即発中性子とγ線および遅発中性子とγ線のDS86カーマに対する寄与(長崎)

なる変換係数を用いて、すべての測定結果を石英の吸収線量で表している。

バックグラウンドを評価するには、レンガやタイルの製造年月日の情報が必要である。資料を採集した建物の建築年月日をはっきりわかっているため、それより1年前を製造年月日とした。

レンガやタイルのTLの中性子に対するレスポンスは無視し得るほど小さいので、原爆によるTLはγ線のみで生成されると考えてよく、TL測定によって建物表面が受けた原爆によるγ線量が測定できる。

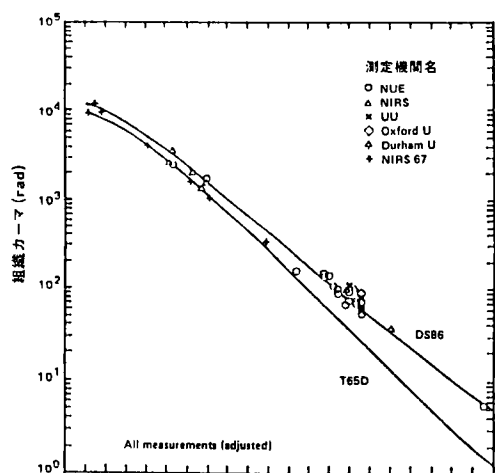
TL測定結果とDS86による計算結果とを第6.7図に示す。広島においては1,000m以上の地点で測定値は計算値より大きく、近い地点は逆に小さくなっている。長崎においてはこの関係は逆である。1,000m以上の地点で測定値の平均値と良い一致を得るためには、計算値は広島で約18%大きくなり、長崎で約10%小さくなる必要がある。しかし、T65Dとの比較ではDS86の方が遙かに良い一致を示している。

第5章 中性子の測定

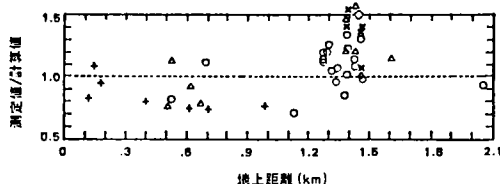
原爆投下後、今日までに次の中性子核反応による誘導放射能の測定が、広島と長崎の試料について行われている： $^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$ (しきいエネルギー約3 MeV)， $^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$ (熱中性子核反応)， $^{151}\text{Eu}(n,\gamma)^{152}\text{Eu}$ (熱中性子核反応)。また、米国においても原子爆弾や裸の原子炉を用いた実験が行われ、金箔の放射化その他の手法による測定がなされている。

これらの測定結果は、今回の線量再評価に際し、主として中性子に関する計算モデルおよび断面積等のパラメータの検証に用いられた。

高エネルギー中性子フルエンス 原爆投下直後の調

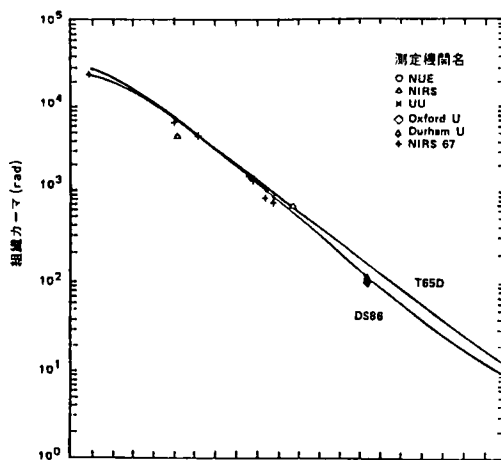


測定値とDS86の計算値の比

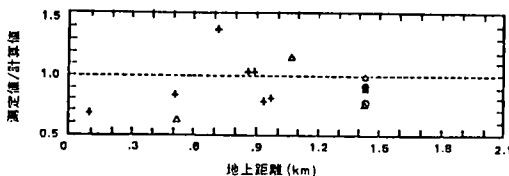


NUE: 奈良教育大, NIRS: 放医研,
UU: ユタ大学

第6図 TL法で求めた組織カーマと
地上距離の関係(広島)



測定値とDS86の計算値の比

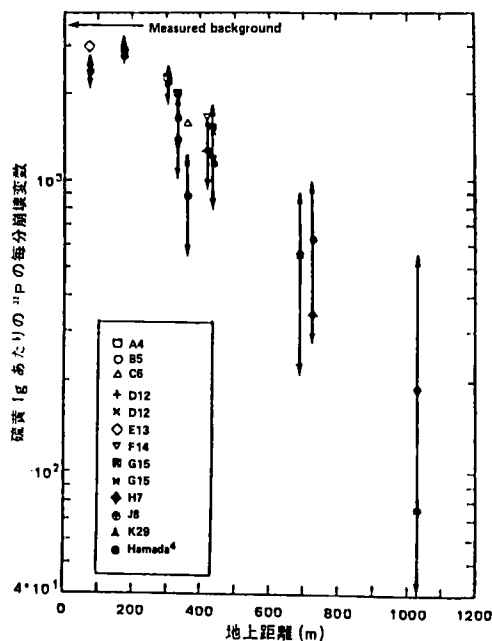


第7図 TL法で求めた組織カーマと
地上距離の関係(長崎)

査で広島において採取された絶縁膜子中の硫黄に含まれる ^{32}P の測定結果が、高エネルギー中性子フルエンス(約3 MeV以上)に関するほとんど唯一のデータである。このデータは、その後再吟味され、多少の修正が加えられた。一方、爆弾の出力を15 ktとした計算値と測定値との一致は、第8図に見るように近い地上距離においてはかなり良いが、400 m以遠では測定値の誤差が大きくなるため結論を下すことはできない。また、この計算において広島の爆弾は爆撃機の侵入方向に 15° 傾いて落下したことが推定された。

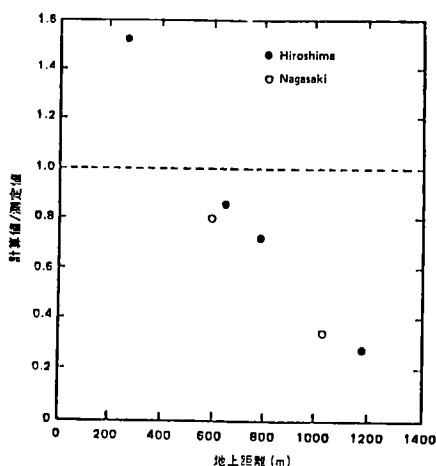
なお、3 MeV以上の中性子に関する同様の計算手法は、広島爆弾のレプリカを用いた実験および裸の原子炉を用いた実験にも適用され、いずれも約10%の精度を得ている。1 MeV以下の中性子は1.5 kmの距離を貫通しないので、1.5 km地点における中性子カーマの計算結果の誤差は20~30%以内であることが期待できる。

低エネルギー中性子フルエンス コンクリート建物の鉄筋その他の鉄材中に不純物として含まれるCoの放射化生成物である ^{60}Co を分析し、実験的に求めた換算係数を用いて組織カーマを計算した。しかし、この



●が山崎・杉本の測定値を浜田が再評価したもの、他の記号は計算値。
第8図 硫黄の放射能の測定値と計算値との比較
(広島原爆出力: 15 kt, 15° 傾斜)

カーマ値は換算係数の決定に用いた中性子源が適切でなかったため、恐らく正しくない。むしろ Co の放射化量を計算によって求めて比較の方が直接的である。計算の結果は第 9 図に示すように近距離では測定値より大きく、遠距離になるに従って測定値を下回り、1,180m 地点では 1/4 になるという系統的な食い違いを見出した。この不一致を解決するため、コンクリート中のホウ素および水分含有量の効果、爆風が中性子減衰に与える効果、地面の元素組成特に水分の効果などを調べたが、いずれも結果を大して変えるものではなかった。また、遅発中性子を考慮した計算を行ったが、これも上の食い違いを説明するに至らなかった。



第 9 図 ^{60}Co 放射能の測定値と計算値との比較

この測定結果は、反復分析結果の再現性も良好であり、 ^{60}Co に関する他のデータと比べて信頼性が高いと考えられる。鉄材中に ^{60}Co を生成する他の反応として $^{63}\text{Cu}(n, \alpha)^{60}\text{Co}$ および $^{60}\text{Ni}(n, p)^{60}\text{Co}$ が考察されたが、1,180m 地点における 4 倍の違いは解決しない。この問題は未解決のまま残されている。

最近、報告されている岩石中の ^{152}Eu の測定データは全体として計算結果と矛盾しないが、1 km の地上距離における計算結果の妥当性を確認するには不確かさが大きい。また、測定機関の間で差が見られる。

金の放射化によるサブカドミウム中性子の測定が Nevada の核爆発実験に際して行われ、その結果が計算方法の検証のために計算値と比較されたが、熱中性子フルエンスは最も遠い 1.6km 地点を除き、すべて計算値のほうが測定値を上回った。これは ^{60}Co の場合と逆である。したがって、熱中性子の問題は完全に解決したとはいえない。

第 6 章 残留放射能の放射線量

残留放射能としては次の 2 種類が考えられる。1 つは地上に落下した核分裂生成物、いわゆる放射性降下物(フォールアウト)であり、地域としては、長崎で爆心地の東方約 3 km の西山地区、広島では西方約 3 km の己斐、高須地区の限定された地域が該当する。もう 1 つは、爆心地付近の土壌、建造物等が中性子の照射を受けてできる誘導放射能である。

- (1) 放射性降下物による線量評価 放射性降下物の中には寿命を異にする多種類の放射性物質が含まれており、放射能は時間と共に急速に減衰する。爆発 1 時間後における γ 線の線量率 X_1 は、1 時間後の線量率を X_t とすれば、次のように表わされるとしている。

$$X_t = X_1 t^{-1.2}$$

長崎の西山地区、広島の己斐、高須地区では、爆発後、数週間から数ヶ月の期間にわたって、それぞれ数回の線量率 (X_t) の測定が行われている。それらの値から爆発 1 時間後の線量率 (X_1) を計算し、任意の時間内における線量を容易に求めることができる。ただし、この計算は Weathering 等の影響が無視されているので、その誤差はかなり大きいと思われる。

爆発 1 時間後から無限時間まで、地上 1 m の位置での γ 線の積算線量を上述の方法で計算した結果は、長崎の西山地区の最も汚染の著しい数 ha の地域で 20~40R、広島の己斐、高須地区では 1~3 R と推定された。広島に比べ長崎の方がかなり高い値である。長崎の場合、線量が最大値の 1/5 にまで減少する範囲は約 1,000 ha である。

西山地区住民は約 600 名で、爆発直後の行動の実態調査結果を基にして、汚染地区に居続けた人の最大照射線量は上記積算線量の約 3% と推定される。

西山住民の Wholebody counter による ^{137}Cs の体内量実測値から、1945~85 年の 40 年間の ^{137}Cs による被曝線量は男性で 10 mrem、女性で 8 mrem と推定された。

- (2) 誘導放射能による線量評価 中性子の照射によって爆心地付近の土壌その他の物質中に生じた誘導放射能のうち、早期入市者の被曝との関連で重要な核種は ^{56}Mn (2.6 h), ^{24}Na (15 h), ^{46}Sc (83.8 d), ^{134}Cs (2.1 a), ^{60}Co (5.3 a) である。

広島、長崎の爆心地付近において、爆発後数週間~数ヶ月の期間に、誘導放射能による地上での

7線の線量率の測定がそれぞれ数回行われている。また、中性子フルエンスと土壌分析結果から重要核種の誘導放射能による照射線量を計算することもできる。

爆発直後から無限時間までの爆心地での地上1mの積算線量は広島で80R、長崎では30~40Rと推定された。

地上での線量率は時間と共に急激に減少するし、爆心地から離れても急速に減少する。広島では爆心地から175m、長崎では350m離れると半減している。早期入市者の被曝線量は、その人の爆心地付近の行動の状況を正確に把握しなければ評価できない。

以上述べた線量は、地上1mでの空気中の照射線量(R)であって、組織の吸収線量に換算するには適切な換算係数を乗ずる必要がある。その結果、放射性降下物による人体組織の無限時間までの積算線量は、最大で長崎で12~24rad、広島で0.6~2radとなり、誘導放射能によるものは最大で広島で約50rad、長崎で18~24radとなる。

第7章 家屋および地形による遮蔽

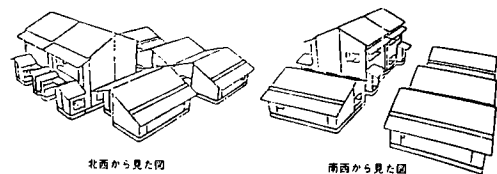
原爆被爆者で被爆時に日本家屋の中またはそばにいた場合、または戸外にいて日本家屋または地形により遮蔽されていた場合に、その遮蔽効果を計算するためのモデルについて説明している。

T65Dでは、遮蔽を計算するための技法として9-パラメータ法とグローブ技法とが用いられた。9-パラメータ法は、日本家屋の中またはそばで被爆した場合に、その状況を9つのパラメータ(FS: 前方遮蔽建築物の有無, FSS: その大きさ, FN: 階層数, SP: 直線透過距離, US: 爆心方向にある遮蔽されていない窓からの距離など)により記号化し、その関数として遮蔽効果を計算した。グローブ技法は、戸外にいて家屋または地形により遮蔽されていた被爆者に対し、その地点に入射する全球面を角度別に細分して各部の遮蔽割合を記号化し、中性子と7線の角度分布と組み合わせて遮蔽を計算した。DS86は、上記2種類の記号化された遮蔽データが利用できるようにモデルを組み立てなければならない。

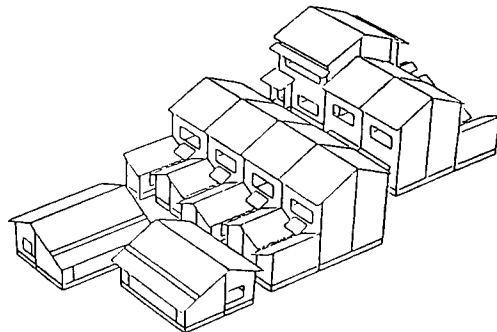
日本家屋による遮蔽を計算する手順は次の通りである：

- (1) 典型的な日本家屋の集まり(クラスターという)のコンピュータモデルを作る。その際、日本家屋の構造、材料および厚さなどに関しては最良の情報を用いる。モデルは、日本家屋の典型的な6家

屋のクラスターと長屋のクラスターの2種類とした(第10, 11図)。



第10図 6家屋クラスター・モデル



第11図 長屋クラスター・モデル

- (2) 連結(Ajoint)モンテカルロ法により、自由空間の放射線場と結合させることによって、被爆者が被爆時にいた位置における中性子および7線のエネルギーと角度別フルエンスを計算する。

6家屋クラスターの屋内の21箇所および長屋クラスターの屋内の40箇所の点を選び、爆心地に対する16方向について合計976種類の遮蔽状態を考え、これに対して9-パラメータを割り当てると、その集合は実際の被爆者約10,000人のデータの出現頻度とほぼ同じにすることができた。最終的には、4つのパラメータ(FNの3つの値, SPの5個の値, FSとUSの5つの組合せ)により75種類(実際に被爆者がいるのは57種類)の遮蔽状態に分類した。他のパラメータを加えても遮蔽効果の計算結果にあまり影響しないことが確認されている。

上記976種類の各箇所に対して、家屋遮蔽の計算をするためにモンテカルロ法による40,000個の粒子追跡計算を行った。その結果が、漏洩テープ(Leakage Tape)として保存されている。4つのパラメータにより分類された75種類の各遮蔽状態に対する漏洩テープは、9-パラメータにより分類された976種類のうちの対応するすべての遮蔽状態に対する漏洩テープを平均して作った。この漏洩テープと自由空間でのエネルギーと角度別フルエンスとを連結して、4-パラメータを持った被爆者の位置におけるエネルギーと角度別の遮

蔽フルエンスが得られる。

上記方法は、Nevada のBREN の実験で用いた家屋に適用してその有効性が検証された。また、 ^{60}Co の γ 線源を用いた実験ともよく一致している。裸の原子炉による中性子源に対しては、家の中の値はよい一致を示すが、家の外の点ではあまり一致は良くない。

日本家屋内で被爆した場合、その位置でのエネルギーと角度別フルエンスが上記に述べた手法により計算される。また、この時点でカーマが計算される(これを遮蔽カーマと呼ぶ)。

遮蔽現象を理解するには、その位置での空気中カーマに対する遮蔽カーマの比率(透過率と呼ぶ)を、中性子と γ 線別に見ればよい。 γ 線の遮蔽カーマは、中性子によって家屋の材料中で生成された γ 線を含む。今回の線量再評価により導かれた中性子スペクトルは距離により変化するので、 γ 線の透過率も距離の関数となる。T65D で γ 線の透過率は広島では0.9、長崎では0.81であったが、DS86 では1,500m の地点で即発 γ 線に対して0.53、遅発 γ 線に対して0.46となっている。

グローブ技法のデータをもつ被爆者に対する遮蔽計算は、上記方法を修正して用いた。家屋クラスターの戸外26箇所と、丘によって遮蔽された10箇所を選び、4つの距離と8つの方向と2つの都市に対して連結計算を行った。

第8章 臓器線量測定

被爆者の臓器線量を計算するために次のようなステップを踏んだ。

- (1) 1945年当時の典型的日本人に適合するファントムすなわち計算モデルの選択。
- (2) 被爆者の臓器位置に対応するファントム中の部位での中性子および γ 線のエネルギーおよび角度分布を計算する方法。
- (3) フルエンスからカーマの決定と臓器の詳細な構造に関する考え方。
- (4) 実験や他の計算結果との比較による照合および確認。

報告書はこのステップに従い、臓器線量計算の技法、関連する因子、不確かさについて述べている。

戦争中の日本人の体格は不明であるが、戦前、戦後の体格から内挿して、1945年頃の日本人成人の体重を55kgと推定した。この成人用ファントムとして、ORNL が15歳の欧米人用に作成した57kg ファントムを修正して、性別に関係なく使用した。臓器線量は、新生児～3歳までの乳幼児の被爆者に対して9.7kg フ

ァントム、3～12歳の小児に対して19.8kg ファントム、12歳以上については55kg ファントムを用いて計算される。被爆時の姿勢によって臓器の位置や身体の遮蔽などが異なることを考慮して、日本式正座位のファントムを開発し線量計算に用いている。計算に用いたファントムはミルド(MIRD)法で用いられている、いわゆる数学的ファントムとは多少形が異なる。しかし、概念的にはMIRD法を踏襲していると考えてよい。

計算方法は前章の遮蔽計算に用いられている方法と同じである。ファントムに入射して問題とする臓器に到達するまでの放射線の輸送に関する連結計算をする。すなわち、臓器の位置でのエネルギーと角度別のフルエンスが得られるように、被爆者の位置での遮蔽フルエンスに連結する。そのような計算はモンテカルロ法によって行われる。このとき、30,000個の入射粒子歴を追跡すれば、臓器カーマで約5%の精度が可能である。400,000個では1%の精度が可能となる。最終的なシステムでは、1つの臓器について線量を計算するのに6,000個、スペクトルを求めるのに約40,000個の粒子について追跡計算することが必要である。

荷電粒子平衡が成立しているときは、カーマは吸収線量に等しくなる。骨髄以外の臓器ではこの条件が成立しているが、骨髄ではこのような荷電粒子平衡が成り立たないので、特別の線量計算がなされた。

臓器線量評価システムをファントムに適用したところ、 γ 線の等方入射では実験と非常によく一致した。中性子と γ 線の混合場の被爆では、中性子の測定値は入射 γ 線に対する透過率と同様により一致を示している。しかし、人体中での中性子の相互作用によって生ずる γ 線については、計算値より実験値の方が大きいことを示している。この食い違いは、裸の原子炉による日本家屋の遮蔽実験の時にあった問題と同じ理由によるものと思われる。簡単なファントムと原子炉中性子を用いた実験では、一般に熱中性子およびエプサーマル中性子以外では実験データと約10%以内でよく一致している。このような計算による平均の臓器透過率はBEIR-80の値に比べるとかなり増加し、家屋の γ 線透過率が減少した分に匹敵する(第1表を参照)。

ファントムのパラメータや、姿勢を変えたとき臓器線量がどの程度変わるかを検討した。ファントムの不確かさは、線量の不確かさに10～20%の寄与をしており、不確かさはファントムの向きに依存し、また臓器の深さにも関係している。

この計算は、直立・座位・臥位について年齢群別の3

種類のファントムの中の各臓器に対して6,000個の粒子を追跡して行われる。要求があれば、システムはどの臓器の中でもエネルギーに依存するフルエンスを与えることができるし、臓器の中の小部分の吸収線量を計算することもできる。そのためには臓器あたり40,000個の粒子を追跡する必要がある、システム計算は8倍も遅くなる。DS86では次の15臓器を対象とした。

赤色骨髓、膀胱、骨、脳、乳房、目、胎児/子宮、大腸、肝、肺、卵巣、脾、胃、睾丸、甲状腺。

第9章 1986年線量推定方式 (DS86)

第1～8章では、爆弾の出力、ソース・ターム、最新の計算方法による空気中カーマ、遮蔽カーマ、臓器カーマの計算モデルについて述べた。DS86システムはこれらを統合し、被爆者の遮蔽データを入力として臓器の吸収線量など各種の線量(カーマ)を計算するシステムである。

原爆被爆者の被爆時の遮蔽状況を大別すると、次の4つに分けられる。

- (1) 戸外で無遮蔽
- (2) 日本家屋内
- (3) 戸外で家屋や地形により遮蔽
- (4) その他

被爆生存者との面接により得られた遮蔽情報は、T65Dの計算の際に、(2)は9-パラメータ・データ、(3)はグローブ・データとして記号化されていて、DS86はこのデータを入力として使用できるように作られている。

DS86のシステムは、超大型コンピュータにより行われた膨大な計算の結果得られた次の3つのデータ・ベースを持っている：

1. 自由空間データ・ベース
2. 家屋遮蔽データ・ベース
3. 臓器遮蔽データ・ベース

自由空間データ・ベース：爆心地よりの距離別(100～2,500mまで25m毎の区間)、エネルギー別(中性子37群、 γ 線21群)、角度別(240群)に、即発および遅発中性子と即発および遅発 γ 線別のフルエンスが、広島と長崎について保存されている。被爆者の爆心地からの距離に従って、2つの距離区間のデータを補間計算して、エネルギーと角度別の自由空間フルエンスを得ることができる。これは、次のステップの遮蔽計算に使用される。また、戸外無遮蔽被爆者に対する空気中カーマとフルエンス・スペクトルを必要に応じて計算することができる。

家屋遮蔽データ・ベース：家屋内976地点、戸外で家屋により遮蔽1,920地点、地形遮蔽640地点に対する粒子追跡結果およびそれを被爆者個人の遮蔽情報に対応するように平均したものが保存されている。特定の被爆者の対応する粒子追跡結果と、上記自由空間のエネルギーと角度別フルエンスとを連結して、その被爆者のエネルギーと角度別の遮蔽フルエンスを得る。これは、次の身体遮蔽計算に使用される。また、遮蔽フルエンスと遮蔽カーマも計算する。

臓器データ・ベース：15臓器に対して、年齢別(3群)、体位別に計算された粒子追跡結果が保存されている。

DS86は特定の被爆者の入力データに基づき、これらのデータ・ベースを組み合わせて所要の線量を出力として取り出すことができるようになっている。すなわち、被爆者の市および爆心地からの距離を入力して、被爆者の位置における自由空間の放射線場が得られる。次に、9-パラメータまたはグローブ・データの入力により遮蔽フルエンスを出力することができる。また、年齢・性・体位の入力により特定臓器の吸収線量等所要の情報を出力することができるようになっている。

DS86は、T65Dに完全に代わるものであるが、被爆者の遮蔽をより詳しく評価し、線量測定的面からより好ましい結果を与える。

T65Dでは、空気中カーマは中性子および γ 線別に爆弾からの距離の関数として与えられ、遮蔽カーマおよび臓器カーマは、それぞれ空気中カーマおよび遮蔽カーマに対する比率(透過率)で与えられている。これらは特定の実験に基づいたものである。DS86は計算に基づくもので、放射線の成分毎にカーマが直接得られ、結果として適当な比を取れば、透過率が計算できる。

DS86はモジュール方式になっていて、各種データ・ベースが組み込めるようになっている。1987年内には、工場内被爆に対する遮蔽データ・ベースが追加される予定である。再評価を行う場合でも、新しいデータ・ベースと取り替えることにより改訂できる。

推定線量に対する不確定性の推定は、予備的な値としては空気中カーマに対して広島で16%、長崎で13%となり、臓器カーマに対しては25～35%となっている。

DS86は、1986年3月16日～17日の第4回ワークショップで検討され、日米線量再評価上級委員会により放影研での適用を勧告された。

本稿を執筆するにあたり、有益な意見を寄せられた浜田達二(日本 RI 協会)、加藤寛夫、藤田正一郎(放射線影響研究所)の諸氏に厚く御礼を申し上げます。また、放射線影響研究所理事長重松逸造氏の貴重な御意見と校閲に対し深謝する。

各章の概要にはその章の執筆者の 1 人である小佐古敏荘(東京大学)、浜田達二(日本 RI 協会)、岡島俊三、藤田正一郎(放射線影響研究所)、丸山隆司(放射線医学総合研究所)の各氏に協力して頂いたので感謝の意を表したい。

(付録 a) 米国側線量再評価実務委員会

Dr. Robert F. Christy (Chairman), California Institute of Technology.
Mr. Gilbert C. Binniger, Science Applications International Corp.
Dr. Daniel G. Cacuci, Oak Ridge National Lab.
Dr. Stephen D. Egbert, Science Applications International Corp.
Mr. Michael L. Gritzner, *ibid.*
Dr. John H. Harley, former Director, Environmental Measurements Laboratory.
Dr. Edwin H. Haskell, DOE, Univ. of Utah.
Mr. Dean C. Kaul, Science Applications International Corp.
Dr. George D. Kerr, Oak Ridge National Lab.
Dr. William E. Loewe, Lawrence Livermore National Lab.
Dr. John Malik, Los Alamos National Lab.
Mr. Jess Marcum, R&D Associates.
Mr. Edgar Mendelsohn, Lawrence Livermore National Lab.
Mr. Joseph V. Pace, III, Oak Ridge National Lab.
Mr. William H. Scott, Jr., Science Applications International Corp.
Mr. Paul P. Whalen, Los Alamos National Lab.
Dr. William A. Woolson, Science Applications International Corp.
Mr. Wayne M. Lowder, DOE Liaison Officer.

(付録 b) 米国学士院線量再評価委員会 (米国側上級線量委員会)

Dr. Frederick Seitz (Chairman), National Academy of Sciences.
Dr. Michael A. Bender, Brookhaven National Lab.
Dr. Victor P. Bond, Brookhaven National Lab.

Dr. Merrill Eisenbud, New York Univ. Medical Center.
Mr. Charles M. Eisenhauer, National Bureau of Standards.

Dr. Mortimer L. Mendelsohn, Lawrence Livermore National Lab.

Dr. William C. Roesch, former Pacific Northwest Lab.
Dr. James H. Schulman, National Academy of Sciences.

Dr. Warren K. Sinclair, National Council on Radiation Protection and Measurements.

Dr. Lewis V. Spencer, former National Bureau of Standards.

Dr. Arthur C. Upton, New York Univ. Medical Center.

Dr. Harold O. Wyckoff, International Commission on Radiation Units and Measurements.

Dr. William H. Ellett, National Academy of Sciences.

(付録 c) 日本側線量実務委員会

田島 英三 (委員長)	立教大学名誉教授
橋詰 雅	麻布大学獣医学部
藤田正一郎	(財)放射線影響研究所
星 正治	広島大学原爆放射能医学研究所
市川 米太	奈良教育大学教育学部
神田 啓治	京都大学原子炉実験研究所
加藤 寛夫	(財)放射線影響研究所
小佐古敏荘	東京大学原子力研究総合センター
隈元 芳一	放射線医学総合研究所サイクロトロン 管理課
丸山 隆司	放射線医学総合研究所物理部第 3 研究室
長友 恒人	奈良教育大学教育学部
岡島 俊三	(財)放射線影響研究所

(付録 d) 原爆による線量の評価検討委員会 (日本側上級線量委員会)

田島 英三 (委員長)	立教大学名誉教授
道家 忠義	早稲田大学理工学研究所
浜田 達二	(社)日本アイソトープ協会
近藤 宗平	近畿大学原子力研究所
熊取 敏之	(財)放射線影響協会
織田 暢夫	東京理科大学理学部
阪上 正信	前・金沢大学理学部
重松 逸造	(財)放射線影響研究所