

平成10年度  
厚生科学研究費補助金特別研究事業

# 日米共同による原子爆弾被曝線量再評価に関する研究

## 研究報告書

平成11年3月

日米共同による原子爆弾被曝線量再評価に関する研究

主任研究者 藤田正一郎

## 総括研究報告

# 日米共同による原子爆弾被曝線量再評価に関する研究

主任研究者 藤田正一郎 放射線影響研究所 副部長

### 研究要旨

原爆被爆者の個人被曝線量の推定には、1986年に導入されたDS86と呼ばれる線量体系が使用されている。このDS86は、現時点においても、放射線による被曝線量の決定とその健康後影響を検討する上で、世界的に評価され信頼に足るものとされている。しかしながら、DS86に関する報告書の内容が難解であること、中性子線量の評価に多少の誤差を含んでいることなどの理由から、この分野の専門家でない方々の間に、この評価体系全体が重大な誤りを持っているのではないかと疑念を抱かせることがあるようだ。そこで、本研究では、まずDS86線量体系についてあらためて概括を行い、併せてDS86線量体系に対する上記の疑念がどのようなものであるかを明らかにするために文献収集して要約し、次に、DS86の公表以来日米共同で行われてきたその再評価の状況について中間評価を行い、その評価を踏まえて、最終的にDS86線量変更の可能性とその程度およびそれに伴うリスクの変化の程度に関して考察を行った。その結果は、現時点ではDS86線量体系の大きな変更は考えられず、あるとしても線量は小幅な増加であろうと考えられる。またいくつかの線量変更モデルを仮定しても健康リスクへの影響は小幅である。現在進行中の線量再評価の結論が出ればそれに基づくDS86の修正は必要であるかもしれないが、現在のDS86を、放射線による被曝線量の決定とその健康後影響を検討することに用いることは妥当であると考えられる。

### 分担研究者

星 正治 (広島大学原爆放射能医学  
研究所 教授)  
Dale Preston (放射線影響研究所 部長)  
清水由紀子 (放射線影響研究所 副部  
長)  
早川 式彦 (広島大学原爆放射能医学  
研究所 教授)

### A. 研究目的

原爆被爆者の放射線被曝線量の評価には、1986年に日米合同の委員会によってまとめられたDS86 (1986年線量評価体系の略) が現時点における最良のものとされ、DS86に基づく健康後影響が国際放射線防護委員会 (ICRP) の基準の根拠として用いられるなど、世界の放射線防護の基本的資料となっている。

しかしながら、DS86に関する報告書の内容が難解であること、中性子線量の評価に多少の誤差を含んでいることなどの理由から、この分野の専門家でない人々の間に、この評価体系全体が重大な誤りを持っているのではないかと疑念を抱かせることがあるようだ。そこで本報告書は、まずDS86線量体系についてあらためて概括を行い、併せてDS86線量体系に対する上記の疑念がどのようなものであるかを明らかにするために文献収集して要約し考察することを目的とする。次に、DS86の公表以来日米共同で行われてきたその再評価の状況について中間評価を行い、その評価を踏まえて、最終的にDS86線量変更の可能性とその程度およびそれに伴うリスクの変化の程度に関して考察を行うことを目的とする。

## B. 研究方法

DS86が必ずしも被爆者等の信頼を得ていない理由の背景として次のようなものがあると考えられる。1) DS86の内容が余りにも難解であるため、この分野の専門でない方にはその内容の理解がしばしば困難であること、2) DS86は全体としては極めて信頼できる線量評価体系であると考えられているが、物理学的には中性子のデータの計算値と実測値との間の一部不一致、ガンマ線推定線量の計算値と実測値との若干の不一致があること、3) これらの物理学的な不一致をもって、ごく一部ではあるが、DS86の線量評価体系全体が根本から間違っているかのように説明をする者がいること、4) 従って、この評価体系を用いて原爆放射線健康後影響を評価することは誤っているかのように説明をする者がいること、5) 不一致問題については、その評価を含め線量評価体系全体への影響を検討するため、平成元年に日米双方で委員会を設けて研究を継続しているが、このことがDS86の線量評価体系全体が根本から大きく間違っているかのような印象を与えていること、などである。

る。

本研究班は、上記のような疑問に答えるために、次のような調査研究を行った。①被爆者の線量評価の方法をDS86を中心に、この分野の専門でない方にも理解しやすいように解説を加えること、②日米共同でこれまで行ってきたDS86及びその再評価の結果について、科学者による一定の中間評価を行うこと、③DS86線量変更の可能性について検討し、その程度とそれに伴うリスクの変化の程度に関して考察すること、④DS86線量体系の問題点に関する文献を収集し要約すること、などである。なお、これらの議論とは直接には関係ないが、今回併せて⑤被爆者二世について平成元年から平成10年の10年間の検診結果を集計した。

## C. 研究結果

研究方法の項で述べた5つの調査研究の各々について、以下に要約する。

(1) 1986年線量評価体系DS86：原爆被爆者の受けた放射線量の推定(藤田)：原爆被爆者の被曝線量を評価するシステムDS86は、日米原爆線量再評価検討委員会報告書として、本文460頁、付録650頁(すべて英文)から成り、1986年に数名の日米専門家により書かれたもので、その内容は高度に専門的であり全体を理解することは容易でない。そのために、本報告は被爆者の線量評価の方法をDS86を中心に一般向けに解説することを試み、その内容をいくらかでも理解が容易になるように記述したものである。

膨大な再評価活動の結果1986年にDS86が新たに導入されるまでに、約20年間にわたり使用されてきた線量評価方式T65Dは、長崎型爆弾によるネバダでの実験データに基づいて構成されており、被曝線量は比較的簡単な公式により計算できる。一方DS86は、現代核物理学の理論に基づいて超大型コンピュータにより計算された多数のデータベースとコンピ

ュータプログラムとから構成されており、これらに基づいて被曝線量を計算する。

被曝線量は爆弾からの距離と共に急速に減少するため、一人一人の被爆者に関する被曝時の位置の情報が大切である。この距離が同じでも、更に、被爆者の周囲にある建造物等遮蔽物の有無やその被爆者との位置関係により被曝線量に大きな差を生じ、遮蔽効果の計算は特に大切である。また、特定の臓器は人体表面からの深さにより差を生じ、被爆者の被曝時の姿勢や原子爆弾に対する向きも大切な情報である。

DS86は、被爆者の遮蔽データベースを含むこれらすべての情報を入力として、臓器線量などの被曝線量を計算する体系である。計算された個人被曝線量も同じくDS86と呼ばれている。

(2) 原爆線量再評価の過去10年と今後の問題(星)：原爆線量評価体系DS86は、日米の共同作業で作られ、主として日本側は中性子やガンマ線に関する被曝試料の測定を行い、アメリカ側はスーパーコンピュータを使った計算を行い、1986年に完成した。1989年に、広島において、被曝試料中に残っている中性子で誘導された放射能の測定値と、DS86に基づいて計算した対応する中性子の放射能の値とが一致しないことが日米線量会議ではじめて取り上げられ、本報告はそれ以降の日本側の活動を中心に記述している。

簡単に要約すると、中性子のうちでも熱中性子により生成されたユーロピウム152 (Eu-152)、コバルト60 (Co-60) が測定され、この測定値とDS86に基づく計算値との違いが遠距離になるほど測定値のほうが大きくなる。中性子は、その持っているエネルギーによって熱中性子と速中性子の2つに大別されるが、原爆被爆者への健康影響を考えた場合の被曝線量という点では、速中性子(1MeV前後のエネルギーの中性子)の寄与の方が大きい。従って、熱中性子における違いがその

まま被爆者の全ての中性子成分による被曝線量への違いを示すものではないし、直ちに健康影響評価の変更につながるものではない。しかし、この測定値と計算値との間に「ズレ」がある限り、純粹に物理学的にはDS86に問題がないとするわけにはいかず、その程度や原因を明らかにする試みが続けられている。問題解決のために本研究分担研究者星により理論的な説明の提案がなされているが、この提案も1km以内の測定値と計算値をすべて一致させることはできるが、1km以遠では一致しない。その理由の1つとして、被曝試料中の残留放射能(中性子成分)を測定しているといっても非常に微量の放射能であり、原爆と無関係に自然界に通常存在する放射能との兼ね合いもあり、測定値の側に問題がある可能性もある。

なお、中性子のうち健康への影響が大きい速中性子については、近年、銅試料中の残留放射能を測定することによりその推定が可能となり、数年のうちに測定結果が示されるものと思われる。また、たとえ計算値に多少の問題があったとしても遠距離における中性子線量の寄与は少ないため、熱中性子の測定値と計算値とのズレに基づいて全ての中性子線量を修正したとしても、被爆者の被曝総線量の変更は小幅であり、従って、健康リスクの再評価による変更も小幅なものであると考えられる。

(3) DS86線量推定値変更の可能性に関する考察(Preston)：この報告の重要な側面は、被爆者の推定被曝線量に変更があったとしても、被爆者の健康影響(観察可能な事象)に変更はなく、当然ながら爆心地からの距離と健康リスクとの関係に変更はないことである。一方で、放射線の健康影響は、特にがんのリスクに関しては、放射線影響研究所の研究を基礎としており、被爆者の個人被曝線量の増加は単位放射線量のがんリスクを減少させることとなり、放射線防護基準に対しては影響

を与えるかもしれない。

DS86の再評価に直接関わるいずれのグループもDS86にとって代わる線量体系を提案していない。このことがDS86線量や健康リスクの変更に関する誤解を招くような様々な主張がなされる状況に至ったことを述べ、本報告では、過去10年の線量再評価活動を要約し、特に、中性子に関する測定値とDS86計算値の関係を精査した上で、考えられ得る3つのDS86変更モデルを取り上げた。

3つのDS86変更モデルについて説明する。ガンマ線の空気中カーマは3つのモデルともに10%の増加を仮定し、中性子カーマの変更に関しては、(1)ストラウメ論文(Straumeら1992年)に引用されている熱中性子測定値と距離の関係による変更、(2)ストラウメ論文による変更を最高30倍までで押さえる、(3)速中性子の予備測定値を考慮してストラウメ論文の半分の変更を仮定しかつ変更を最高30倍までで押さえる、の3つのモデルである。

この3つの変更モデルに基づいて、放射線影響研究所の寿命調査対象者の個人修正線量を計算した。線量は距離と共に急速に減少するが、5ミリグレイから50ミリグレイ(1,900mから2,600m)の範囲の線量に対応する距離の変化は、1番目のモデルで80m増加し、他の2つのモデルでは30mの増加しかなく、がんのリスクと距離との関係から見て、この程度の距離の変動はがんのリスクの増減に殆ど関係しない。リスクと距離の関係は、2km以内では線量に依存して増加するが、遠距離では距離との相関は高くない。

(4)DS86線量の物理学的小および社会学的問題に関する文献収集およびその要約に関する研究(清水)：原爆放射線量の推定方式として、DS86線量評価体系が1986年に確立されたが、その時点においてDS86報告書でも指摘されていた中性子などのいわゆる「ズレ」の問題がその後の検討で再確認され、この問

題を含めて検討が続けられている。

そこで、DS86線量評価体系確立後に発表された物理的な問題点に関する文献、併せて、社会的な問題点に関する資料を収集し要約した。さらにDS86線量評価体系が修正された場合の健康影響評価に及ぼす影響についての文献も収集した。

(5)被爆者2世健康診断受診結果の集計(早川)：広島原爆障害対策協議会健康管理・増進センター(原対協と略す)では、広島の委託を受け、広島市に在住の被爆者二世に対する、いわゆる被爆者二世健康診断を行っている。原対協においては被爆者二世検診の受診記録を保存しており、本報告では平成元年から平成10年の10年間の検診結果の集計を報告している。集計方法は、被爆者二世検診が希望者のみであるため被爆者二世の全体を代表している資料でないことを考慮して分割表を用いた集計とした。毎年、2,000～2,500人の受診者があり、この10年間の実二世被爆者受診者は、9,315人(男3,398人、女5,917人)であった。10年間の平均年齢は、36.9歳(男36.3、女37.2歳)であった。各種の検診項目の中で、心電図検査・高血圧症・胸部X線検査の有所見率、要検診・要治療の頻度を対象項目とした。

#### D. 考察

原爆被爆者における原爆放射線の健康後影響を評価するには、調査対象集団を設定し、対象となる被爆者一人一人について「被曝線量」および「長期にわたる健康状態」を評価することが不可欠である。世界的な評価を得ている放影研で行われているの寿命調査について詳しく見てみる。まず、被曝線量を評価するために、1950年代後半から1960年代前半にかけて面接調査が行われ、対象被爆者一人一人について被曝位置、建造物などの周囲の状況、被爆者の姿勢や爆弾に対する向き、などの詳細な遮蔽状況が調べられた。面接調査

ほど詳しくはないが、質問票への回答による調査も行われた。一方で、爆弾の炸裂点からの距離に対応する線量（空气中カーマ）、空气中カーマが遮蔽物によって遮られる程度を考慮した線量（遮蔽カーマ）、更に、この遮蔽カーマが身体組織によって遮られる程度を考慮した各臓器が実際に受ける線量（臓器線量）、を推定する物理学的な方法がいくつか開発されてきた。その集大成としてDS86が開発され、上記被爆者の情報に基づき個人被曝線量が推定され、健康後影響の評価のために現在使用されている。一方、健康状態については、特に、死亡追跡調査が戸籍の活用により対象被爆者全員について行われてきた。死因については、死亡診断書の原死因が用いられている。被曝線量および死亡の有無とその死因の2つの情報を疫学手法を用いて分析することにより、放射線の健康後影響を評価している。本研究は、この被曝線量の推定のために用いられているDS86に焦点を当てたものである。

DS86線量評価体系は1986年に導入された。計算された線量を「推定線量」と呼ぶこともあるのは種々の誤差が見込まれていることを認識しているからである。推定線量に対する不確定性の推定は、DS86導入当時の予備的な値として空气中カーマに対して広島で16%、長崎で13%となっており、臓器線量に対しては25～35%となっている。後者には被爆者個人に関する情報の不確定性も含まれている。DS86はこのように世界的な評価を得て現在も使用されているが、国内的にはごく一部ではあるが誤解に基づく不信の声もある。

こうした問題を引き続き検討するために、DS86導入後第1回の日米線量会議が1989年に開催され、熱中性子による放射能の測定値と計算値の距離ごとの系統的なズレが取り上げられ、中性子問題として約10年間日米間で再評価がおこなわれてきた。まだ学問的には解決を見るに至っていないし、このことが、

DS86線量やそれに基づく健康リスクの変更に関する誤解を招くような様々な主張がなされる状況に至った。

まず、熱中性子のズレの問題であるが、前述の通り中性子は熱中性子と速中性子の2つに大別され、被曝線量、さらには健康影響への寄与は速中性子の方が大きい。ところで、熱中性子については、DS86公表後、測定方法の進歩および測定資料の収集とあいまって急速に測定がなされ、熱中性子による測定値と計算値のズレがはっきりしたものとなった。勿論、このズレを中性子による被曝線量の推定に平行して適用できるわけではないし、このズレがただちに健康リスクの増加やその変更を意味するわけではないが、このことがDS86体系に不都合があるのではないかとの疑念を生み、引き続き研究が行われてきた。

一方、速中性子の測定値としては、原爆当時電柱の碍子に使われていた硫黄中の燐32のデータがあり、この値はDS86計算値と合っている。燐32放射能の半減期は短くもう存在していない。その後測定可能な技術が開発されないまま、その代わりに熱中性子の測定のみが行われてきた。近年、測定技術の進歩により銅中のニッケル63の測定が可能となり、現在数個の被曝銅試料を測定中である。原爆後50年以上経った今現存する被曝銅試料は極めて少ないが、速中性子線量を確定する決め手となるとして期待されている。しかしながら技術の改善や試料の収集など解決すべき点は多く、ある程度成果が出るまでには、なお時間がかかりそうだ。

広島における熱中性子の測定値と計算値とのズレをそのまま空气中線量（遮蔽のない場合の被曝線量）の変更に適用することは必ずしも妥当でないが、1つの可能性として変化の程度を調べた。その結果、本研究の藤田による分担研究報告の中で熱中性子測定値と計算値の比較の図を示したが、この図から見て、中性子における測定値の計算値に対する倍率

が、最大に見積もって爆心から1,500mで20倍、2,000mで100倍と仮定し、中性子線量を同倍率で増加すると、総線量はそれぞれ32%および55%の増加となる（表参照）。

表 熱中性子測定値と計算値のズレに基づくDS86空气中総線量の変化の程度

被爆距離	DS86空气中線量 (mGy：ミリグレイ単位)			ズレの倍率	補正	補正	総線量の増加率
	総線量	ガンマ線量	中性子線量		中性子線量	総線量	
1,500m	498.4 mGy	490 mGy	8.4 mGy	20倍	168 mGy	658 mGy	32%
2,000m	71.4 mGy	71 mGy	0.4 mGy	100倍	40 mGy	111 mGy	55%

家屋等の遮蔽を加味するとこの増加率は更に小幅なものとなる。人体組織による遮蔽を考慮した場合、DS86小腸線量（固形がん全体を論ずる際に用いられる標準的な臓器線量）は広島における放影研の寿命調査対象被爆者の平均値で見ると、爆心から1,500mで中性子線量が約0.5ミリグレイ、ガンマ線量は約160ミリグレイであり、2,000mでは中性子線量が約0.03ミリグレイ、ガンマ線量は約22ミリグレイとなっており、上記倍率を適用すると総線量の増加率は、それぞれ、6%、14%と更に小幅となる。

ところで、これまで何度も述べたように熱中性子の測定値と計算値との系統的なズレについては、健康リスクには大きな影響を与えない。しかしながら、物理学的な差の原因については本研究分担研究者により理論的な検討がなされている。この提案に基づいて計

算すると、現在のところ、1km以内の測定値と計算値をすべて一致させることはできるが、なお、1km以遠では一致しない。そもそも測定しようとしているものが非常に微量の放射能であり、測定値の側に問題がある可能性も残されている。

#### E. まとめ

DS86は、原爆被爆者の個人被曝線量の推定のための最良の体系として用いられているDS86に関して、一部のものにはあるが、この評価体系全体が重大な誤りを持っているのではないかとの疑念があるようだ。その原因と考えられる種々の原因に関して検討を加えた結果、現在のDS86を、放射線による被曝線量の決定とその健康後影響を検討することに用いることは妥当であると考えられる。

## 分担研究報告

# 1986年線量評価体系DS86：原爆被爆者の受けた放射線量の推定

主任研究者 藤田正一郎 放射線影響研究所 副部長

### 研究要旨

原爆被爆者の被曝線量を評価するシステムDS86は、日米原爆線量再評価検討委員会報告書として、本文460頁、付録650頁（すべて英文）から成り、数名の日米専門家により書かれたもので、その内容は高度に専門的であり全体を理解することは容易でない。そのために、本報告は被爆者の線量評価の方法をDS86を中心に一般向けに解説することを試み、その内容をいくらかでも理解が容易になるように記述したものである。

被曝線量は爆弾からの距離と共に急速に減少するため、一人一人の被爆者の被曝時の位置の情報が大切である。この距離が同じでも、更に、被爆者の周囲の建造物等遮蔽物の有無やその被爆者との位置関係により被曝線量に大きな差を生じるため、遮蔽効果の計算は特に大切である。また、遮蔽効果を考慮した上で、さらに特定の臓器は人体表面からの深さにより差を生じる。従って、被爆者の被曝時の姿勢や原子爆弾に対する向きも大切な情報である。DS86は、個々の被爆者に対して、これらすべての情報を入力として、最終的には臓器線量などの被曝線量を計算する体系である。

### 1. はじめに

原爆放射線による健康影響と言うと、一般的には放射線特有の疾病や特有の病態があると考えられがちであるが、実際には放射線特有の健康影響というものが見られることは極めて稀で、従って、放射線による健康影響と放射線以外の要因による健康影響とを質的に区別することは通常できない。また、同じ放射線量を受けても個々の被爆者により健康影響の有無や程度が異なる。そこで、被曝した集団と被曝してない集団との間である特定の病気の頻度を比較したり、被曝線量が異なる集団の間で病

気の頻度を比較することにより原爆放射線の健康影響の有無やその程度を調べることが必要となる。

被爆者における原爆放射線の健康後影響を調査するためには、この調査の対象となる被爆者を選んで「調査集団を設定」すること、更に、この集団の対象者一人一人について「長期にわたる健康状態」を追跡調査すること、および原爆放射線による「被曝線量」を正確に推定することが不可欠である。

現在、放射線影響研究所（以下、放影研と略す）が行っている寿命調査は、放射線の健康後



影響の調査として世界的な評価を得ており、その結果は世界の放射線防護の基本的資料となっている。この寿命調査集団は、1950年の国勢調査で被爆したと答えた約28万人の中から選ばれた被爆者を含む約12万人から成る集団で、広島または長崎の近距離被爆者約5万人、遠距離被爆者約4万人、ならびに原爆時に両市にいなかった人（非被爆対照者）約3万人が含まれている。

健康状態に関しては、特に、死亡追跡調査が戸籍の活用により寿命調査対象者全員についてほぼ完全に行われてきた。死因については、死亡診断書に基づく人口統計死亡票から得ている。一方、被爆者との面接等により既に得た被爆位置、周囲の遮蔽状況、被爆時の姿勢や爆心に対する向きを考慮して、1986年線量評価体系（英語の「Dosimetry System 1986」を略して「DS86」と呼ばれることが多い）に基づく被曝線量が、寿命調査対象者のほとんどの人について計算されている。

このDS86は、1986年の日米線量再評価上級委員会により放影研において被曝線量の計算をするよう勧告された。このDS86の物理学的根拠については、本文460頁、付録650頁（すべて英文）から成る日米原爆線量再評価検討委員会報告書（以下DS86報告書と略す）として公表されているが、その内容は高度に専門的であり全体を理解することは容易でない。本稿は、被爆者の線量評価の方法をDS86を中心に一般向けに解説することを試み、その内容をいくらかでも理解が容易になるように記述したものである。

## 2. 放射線に関する基礎知識

1) 放射線と線量：放射線には、X線やガンマ線などの光と同じ性質を持つ電磁波と、アルファ線・ベータ線・中性子などの粒子線とがあり、いずれも物質を通過する能力があり、それらが通過する物質（人体細胞）にエネルギーを与えさまざまな傷を作る。原爆被爆者が受け

た放射線は、ガンマ線と中性子であり、ほとんどはガンマ線である。自然界にある放射線には、大地からの放射線、宇宙線、体内に取り込んだ放射性物質からの放射線がある。

放射線は、目にも見えず、耳にも聞こえず、味も臭いもない。そのために、放射線の検出には機械や装置が必要である。建物による遮蔽さらには人間の皮膚や筋肉による遮蔽を経て、最終的に人体臓器に吸収された放射線のエネルギーの量を吸収線量（臓器線量）という。単に線量ともいう。ここでは放射線量、被曝線量なども区別せずに使うことにする。なお、物質が放射線を放出する能力を放射能といい放射線と区別されており、この能力をもつ物質を放射性物質と呼ぶ。

2) 線量の単位：線量の単位は、現在、グレイ (Gy) が使われている。もう少し小さい単位としてはミリグレイ (mGy) が使われる。1 Gy = 1,000 mGy である。これまでラド (rad) が多く使われていたが、1 Gy = 100 rad である。シーベルト (Sv) は線量当量（放射線の種類の違いを加味した場合の線量で、ガンマ線量に換算した線量）の単位として使われる。レム (rem) も使われていたが、1 Sv = 100 rem の関係にある。ガンマ線の場合は1 Sv は1 Gy と同じである。1 Sv = 1,000 mSv である。

放射線量を感覚的に捉えてみる。人体に対する大量の放射線の瞬間全身照射の経験は広島・長崎が初めてであり、世界的にも余り知見がないが、1 Gy を越すと気分が悪くなったり吐き気がおき、4-6 Gy を受けると2ヶ月以内に半数が死亡し、8 Gy で90%が死亡、10 Gy で全員死亡するといわれている。私達の身のまわりでは、自然放射線として年間1から2 mSv（ミリシーベルト）、医療放射線は1から2 mSv（国民平均）、胃の集団検診1検査では4 mSv を受けており、仕事の上で放射線を扱う人に現在認められている年間の最高被ばく線量は20mSv、などとなっている。

### 3. 被爆者の受けた放射線と被曝線量

はじめに、「ひばく」という言葉に2種類の使い分けがされていることに注目しておく。

「被爆」は通常、原爆の被害を受けることの意味に用いられ、「被曝」または「被ばく」は放射線をあびること、と使い分けている。本稿でもできるだけこの使い分けをすることとする。原爆の影響と原爆放射線の影響とは区別されるべきものである。

原爆による放射線は、爆発後1分以内に放出されたものを初期放射線、その後に放出されたものを残留放射線と呼び2つに分類される。本稿では主として初期放射線について考える。被爆者が受けた初期放射線は「ガンマ線」と「中性子線」とに大別される。更に、それぞれは即発ガンマ線と遅発ガンマ線、および即発中性子と遅発中性子に分類される。詳しくは、後述の放射線の空中輸送を参照されたい。

爆心地近くで被爆した人の中には、建物により放射線から防護されていたために生き残った人がいる。放射線から人体を防護する建物やその他の付近の構造物は「遮蔽物」と呼ばれ、放射線を遮（さえぎ）る程度は通常「遮蔽」と呼ばれる。コンクリート建物は木造家屋よりも遮蔽効果が大きい。更に、特定の臓器が受けた線量を考える場合には、その臓器の周囲の人体組織も「遮蔽物」として考える必要がある。深部の臓器は体の表面に近い臓器よりも遮蔽が大きく、被爆時の姿勢や向きによって遮蔽効果が違ってくる。

被曝線量を考える場合に、「空気中カーマ」、「遮蔽カーマ」、「臓器線量」の3つを区別しておく。それぞれは、被爆者の周囲の遮蔽を考慮しない場合の被曝線量、被爆者の周囲の構造物による遮蔽を考慮した被曝線量、更に、人体組織による遮蔽も考慮した被曝線量、を意味する。被爆者の周囲に遮蔽物が無い場合の遮蔽カーマは空気中カーマと同じである。厳密には、カーマと線量（吸収線量）とは異なるが、本稿では区別をせず「空気中線量」、「遮蔽線量」、

「臓器線量」も同じに扱う。念のために、カーマ (Kinetic Energy Released in Material の略) とは、放射線により物質中に放出されたエネルギーのことを言い、空気中カーマおよび遮蔽カーマ（詳しくは共に空気中組織カーマ）は人体表面での被曝線量と考えられる。

### 4. 線量計算の歴史的概観

1945年8月6日広島に原爆が投下された後、日本人科学者による大小さまざまな調査が行われた。米国は、被爆者の長期追跡調査の重要性から、ABCC (Atomic Bomb Casualty Commission) を1947年広島に、1948年長崎に設立した。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)して協力体制をとった。1975年には放射線影響研究所(以下放影研と省略する)と改められ、日米両国政府の共同運営となった。

被爆者の被曝線量の評価はABCC-放影研の調査研究にとって必須であり、健康後影響の調査と共にその活動の中心をなした。被曝線量が推定されてなかったABCC-放影研での初期の調査研究では、相対的な被曝の程度を爆心地からの距離と急性放射線症状有無とを用いて表した。その後、被爆者の周囲の遮蔽に関する情報が得られるにしたがい、相対的な被曝線量群を決めるのに、爆心からの距離、大まかに分けた遮蔽の軽重、放射線症状の重篤度の組み合わせによる指標が用いられた。

1956年以来、米国オークリッジ国立研究所 (Oak Ridge National Laboratory, 以下ORNLと略す)保健物理部は個々の被爆者の被曝線量推定のための基礎研究を行ってきた。1963年以来、日本の放射線医学総合研究所もABCCの相談に応じると共に、この分野で独自の研究を行ってきた。被爆者一人一人について被爆時の位置や遮蔽状況の調査が行われ、線量評価のための物理学的な方法の開発が進められた。

1957年に、最初の個人被曝線量が推定された(T57D、暫定1957年線量と呼ばれる)が、実

際健康後影響の評価には使われなかった。しかしながら、爆心からの距離別の線量（空気中カーマ）曲線が作成され、不完全ながらも放射線の本造家屋による遮蔽効果の計算がガンマ線および中性子別できるようになった。その後、この方式が改善されて1965年にT65D（暫定1965年線量）と呼ばれる線量推定方式が開発され、この個人被曝線量がその後約20年間使われてきた。1967年にこのT65Dに疑問が投げかけられ、これをきっかけに日米共同で原爆被曝放射線量の再評価がなされた。1986年に新しい線量推定方式（DS86、1986年線量評価体系と呼ばれる）が開発され、現在この方式に基づく個人被曝線量が健康後影響の評価のために使用されている。

## 5. 調査対象集団の設定と被曝者の遮蔽情報

初期の調査は、特定の疑問に答えるかたちの調査であり、放射線量に関連する情報の収集も特定の被曝者に限られていた。放射線の健康後影響の調査には、固定集団の長期追跡の必要性が認識され、放影研の主要調査集団として、罹病調査のための成人健康調査、死亡調査のための寿命調査、胎内被曝児寿命調査、被曝二世の寿命調査、など調査対象固定集団が設定された。寿命調査集団は約12万人よりなる固定集団で、1950年国勢調査で確認された約28万人の被曝生存者に対照群としての非被曝者を加えた中から選ばれた。これらの集団の対象被曝者を中心に、個人被曝線量の推定作業が行われてきた。

1950年代を中心に、被曝者との面接調査により、原爆投下前後の航空写真を利用して被曝者が被曝時にいた正確な位置を地区図に示し、さらに、家屋の間取り図や断面図を作成して正確な遮蔽状況の把握に努め、被曝時の姿勢と爆央に対する方向、熱傷、外傷、火傷、各種急性放射線症状なども加え、被曝者一人一人の詳細な遮蔽情報を記録してきた（以後、遮蔽歴と呼ぶ）。爆心地から2km以内の全対象被曝者を目標としたが、広島は作業量の都合で途中から1.6

kmに縮小された。T57D開発時点で広島・長崎両市合わせて約1万件、現在までに約2万8千件（広島2万件、長崎8千件）の詳細な遮蔽歴が得られている。詳細な遮蔽歴が得られていない被曝者についても、単に「本造家屋内」といった簡単に分類された遮蔽状況が、調査対象被曝者全員について記録されている。

本造家屋内で被曝した場合、遮蔽状況は9つの数値に要約してコード化され、T65D線量の計算に用いられた。この数値は「9・パラメータ・データ」と呼ばれた。両市で約1万8千件ある。9つのパラメータとは、階層数、直接透過距離（家屋入射点より被曝者までの距離）、内部前壁数、内部側壁数、前方遮蔽建築物の有無、その大きさ、爆心方向の遮蔽されていない窓からの距離、床上の高さである。戸外にいて本造家屋により遮蔽されていた場合は、遮蔽された部分の割合を被曝者を中心とする球面上で詳述し、「グローブ・データ」としてコード化された。約4千件ある。その他の線量計算に必要な情報もすべて計算機で使用できるようにコード化され、T65D線量の計算に使われた。DS86線量評価体系の開発の際も、この被曝者に関する詳細な遮蔽データ・ベースに基づいて線量を推定することが大前提とされた。

## 6. 暫定1965年線量推定方式（T65D）と線量再評価

T65D線量推定方式は、長崎型原爆を用いて米国ネバダで行った実験データに基づいて構築された。空気中カーマを爆心からの距離別に計算する公式、および日本家屋などの遮蔽物の透過率（遮蔽カーマと空気中カーマの比に相当する）を計算する公式を作り、被曝者の遮蔽情報データベースに基づいて、広島と長崎別およびガンマ線と中性子別に被曝線量（遮蔽カーマ）を計算できるように設計されている。臓器線量は計算されなかったが、後に、各種臓器に対して自己の肉體組織の透過係数（臓器線量と遮蔽カーマの比に相当する）が全被曝者に共通の常

数として与えられたが、被曝時の姿勢や向きのような個人の差は考えていない。放射線の健康後影響の量的な評価は、実質的には T65D が導入されて初めて可能になり、その後 10 年以上に渡り使用され、数多くの研究成果が得られた。

1970 年代後半に T65D 線量推定方式に疑問が投げかけられ、線量の評価方法を再検討する必要が痛感された。アメリカでは 1981 年に線量再評価実務委員会が設置され、またその結果を評価するための上級委員会が米国学士院に設置された。この問題は日米の科学者の緊密な協力が不可欠で、日本側においても厚生省により線量実務委員会と上級委員会が組織され、アメリカと共同でこの問題に対処することになった。

4 回の日米合同のワークショップが開催され、日米の科学者による少人数の会合も数回開かれ、ありとあらゆる項目について検討がなされた。その結果、1986 年に日米合同の上級委員会において新しい線量評価体系 DS86 が承認され、放影研はこの体系を適用して被曝線量の計算をするよう勧告された。

爆弾の爆発と同時に生じた放射線は、火薬や爆弾の殻と相互作用を起こしながら空気中に放出される。放出された放射線は、大気中の空気分子と作用して二次ガンマ線を作りながら空气中を伝播して家屋などの遮蔽物に達する。ここでまた相互作用を起こしながら被曝者の身体表面に達し、身体の組織と再び相互作用を起こしながら臓器に達し、その臓器に線量を与えることになる。ここまでの放射線を即発放射線という。一方、核分裂片は、火球とともに上昇し、その過程でガンマ線を放出する。また遅発中性子も僅かながら放出される。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 線量推定方式は、上述の諸過程のすべてを最新の核物理学の理論に基づきプログラム化し、スーパーコンピュータの計算により、被曝者の遮蔽データを入力として、個々の被曝者の

被曝線量（空気中カーマ、遮蔽カーマ、臓器線量）を推定するものである。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計算プログラムの検証に用いられた。

## 7. DS86 線量評価体系：報告書（日米線量再評価）によるその物理学的根拠

日米線量再評価活動としては、日米両国に実務委員会が設置され、その作業班は次の主要 10 項目について検討を重ねた。すなわち、爆弾の出力、爆弾からの放射線の放出、放射線の空中輸送、ガンマ線の熱ルミネセンス測定、中性子の測定、残留放射能、家屋及び地形による遮蔽、臓器線量、線量評価体系の作成、および不確定性（誤差）解析である。最後の不確定性解析については、後日別に報告される予定であったが、検討課題も残っておりまだ出版されていない。以下に 9 項目の各々について報告書の順序に従って説明するが、第 8 項目までは、第 9 項目の DS86 線量評価体系の物理学的根拠となるものである。

### 1) 爆弾の出力

原子爆弾の爆発力は、爆弾から放出されたエネルギーの総量で表し、普通、高性能通常爆弾 TNT の火薬の量で示す。単位はキロトン (kt) を用いることが多く、1 kt=1,000 t である。広島原爆の出力は 15 kt、誤差は±3 kt、長崎爆弾は 21 kt、誤差は±2 kt と推定された。

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が、投下時のデータの大部分は失われており、直接の測定値からの出力は求められない。しかし、長崎爆弾と同一の原爆による 3 回の実験（1945 年の Trinity 実験、1946 年の Crossroads Able と Crossroads Baker 実験）が行われており、長崎爆弾の出力はかなり精度よく推定することができた。火球中にあった破裂片の放射化学分析、火球が時間と共に膨張していく速さの測定、爆弾の構造からの理論計算等に基づいて推定した。

表1. 長崎爆弾の出力の推定

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

表2. 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	

広島型の爆弾は、広島に投下されたものしかなく、出力の推定は長崎の場合より誤差が大きい。長崎で用いた方法の他に、衝撃波による圧力上昇と時間との関係、中国電力本社屋上にあった桧材の炭化の程度、電柱の碍子中の硫黄に速中性子で誘導された<sup>32</sup>Pの放射能の測定等に基づいて推定した(表2参照)。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。広島の出力に対する不確定性の最大値は20%すなわち3ktであり、長崎に対しては10%すなわち2ktである。

## 2) 線源

爆弾の出力が判明すると、次は爆弾の容器から放出される中性子(即発中性子)とガンマ線(即発ガンマ線)の粒子の「個数」を決定する必要がある。詳しくは、放出放射線の数を、エネルギー別および角度(方向)別の分布として求める必要があり、これらを称して放射線の「ソースターム」あるいは「漏洩スペクトル」という。放射線の粒子の数に関連する用語として、スペクトル(放射線粒子のエネルギー別分布、角度については考えない)、フルエンス(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)がある。

爆弾から中性子とガンマ線が放出される実際の状況は、爆発中の爆弾内部における輸送(放射線が伝播してゆくこと)と爆発に伴う流体力学運動の複雑な計算によってのみ決定することができる。「ソースターム」は爆弾の構造により変わってくる。放出された中性子のスペクトルは、広島の場合の方が長崎に較べて軟らかくなっている(エネルギーの高い方に分布している)。(図1)

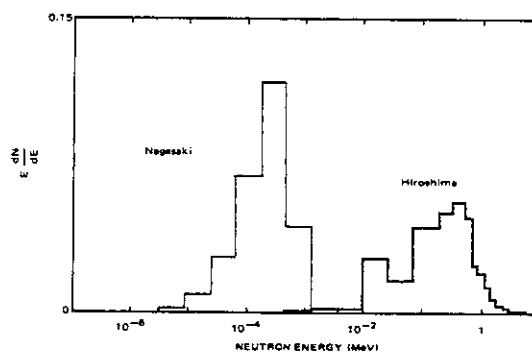


図1. 中性子のエネルギー分布：広島と長崎の比較

出力 kt 当たりの放出数を比較すると、ガンマ線は長崎の方が大きく（図2）、中性子は両市で大きな差はない（図1）。これらの計算の検証は、広島型爆弾のレプリカを用いた実験と比較して行ったが、計算値との一致は良好であった。長崎爆弾についてはほぼ球形であること、設計がより簡単であることから、計算については疑問の余地はほとんどないと考えられている。

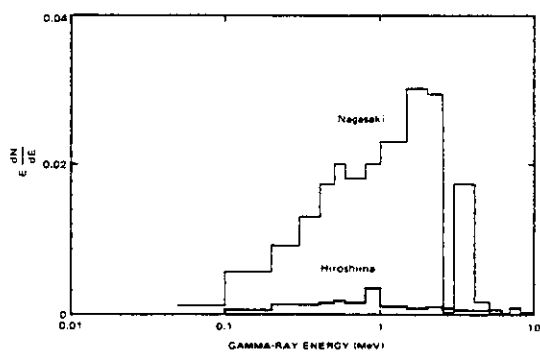


図2. ガンマ線のエネルギー分布：広島と長崎の比較

### 3) 放射線の空中輸送：空気中カーマの決定

原爆による放射線は、爆発後1分以内に放出されたものを初期放射線、その後に放出されたものを残留放射線と2つに分類する。ここでは初期放射線について考える。爆弾の線源から放射線は空気中を経て線量推定の対象となる地域に伝播していく。このことを放射線の輸送という。爆心地から2.5 kmまで（1986年に放影研に導入された際のDS86はこの距離までが計算の対象であった）の各距離における空中線量空気中カーマの決定は、広島・長崎の被爆者の被曝線量を決定する上で重要な手段である。

爆弾から放出される即発中性子と即発ガンマ線、および空気捕獲ガンマ線（空気中で中性子の捕獲によりつくられるガンマ線、この寄与も即発ガンマ線カーマに入れる）の空中輸送については、コンピューターによる大規模な計算がなされた。これら即放射線の輸送には、大

気は爆風によって攪乱されていない（すなわち輸送された中性子とガンマ線は爆風波より先に通過する）として計算している。即放射線のほか、上昇する火球の中の核分裂生成物（核分裂片）から出る遅発ガンマ線がガンマ線カーマに相当寄与している。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ガンマ線の取扱いは複雑で、モデルを一次元に単純化して計算を行った。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。火球は1分後に3000mの高度に達するので、地上での遅放射線による照射はほぼ終了する。この計算結果に基づき、自由空間データ・ベースが作成された。これは、DS86体系で被爆者の空気中カーマ（空中線量ともいわれる）の計算に用いられる。

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方法による結果と比較することによって検証された。被曝試料の残留放射能からの実測値と対応するDS86計算値との比較については、ガンマ線の熱ルミネッセンス測定、および中性子の測定の項で詳述する。

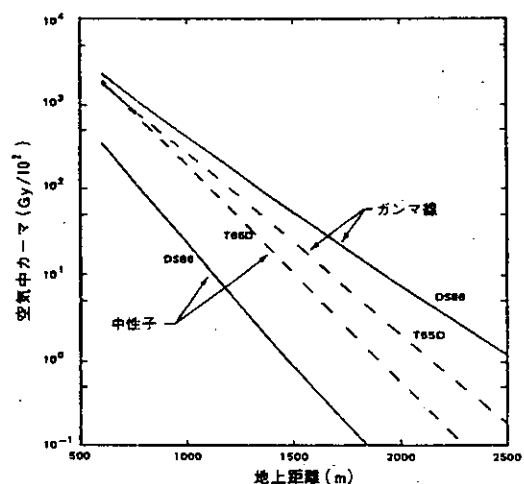


図3. 空気中カーマと爆心地からの距離との関係：広島

図3と図4に、それぞれ広島・長崎別に、空気中カーマと爆心地からの距離との関係を示

した。比較のため、T65D 空気中カーマも示した。両市とも、中性子線量はガンマ線量に較べて小さい。広島において、DS86 中性子線量が T65D に較べて約 10 分の 1 に減少しているが、ガンマ線量は増加している。長崎では再評価による変動が小さい。

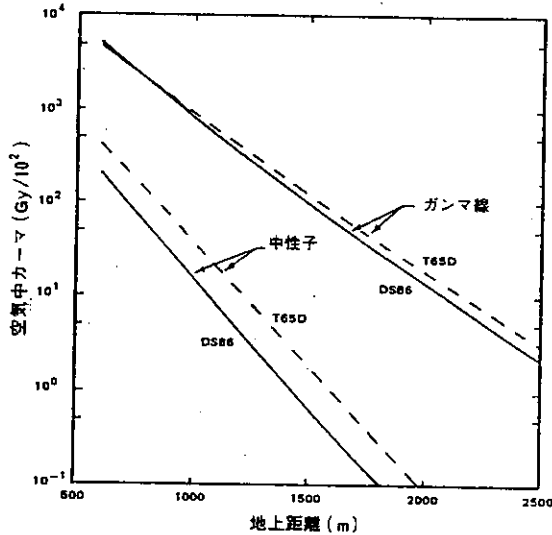


図4. 空気中カーマと爆心地からの距離との関係：長崎

図3、図4の縦軸の  $Gy/10^2$  は 100 rad に相当する。1 Gy=100rad である。参考のために、これらの図に対応する空気中カーマの数値をガンマ線カーマと中性子カーマのそれぞれについて、爆心地から 0.5 km 毎の概数として表3に示した

表3 初期放射線のDS86空気中カーマ (Gy単位)：広島・長崎別、被爆距離別

爆心地からの距離 (km)	広島		長崎	
	ガンマ線カーマ	中性子カーマ	ガンマ線カーマ	中性子カーマ
0.5	35.0	6.0	78.5	3.3
1.0	3.93	0.22	7.83	0.14
1.5	0.49	0.008	0.89	0.006
2.0	0.07	0.0004	0.13	0.0003
2.5	0.01	0.00002	0.02	0.00002

下の2つの図に、広島・長崎別にガンマ線カーマ (Total gamma rays で表示) と中性子線カーマ (Total neutrons) を実線で示し、それぞれに対する即発ガンマ線 (Prompt gamma rays)、遅発ガンマ線 (Delayed gamma rays) および即発中性子 (Prompt neutrons)、遅発中性子 (Delayed neutrons) の寄与を破線で示した。報告書における rad 単位をそのまま用いた。

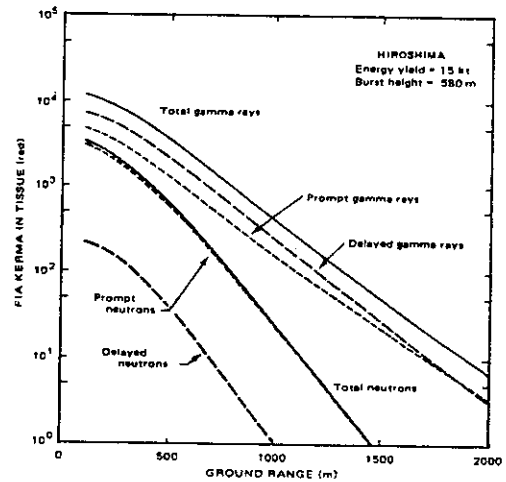


図5. 中性子カーマとガンマ線カーマについての即発および遅発放射線の寄与：広島

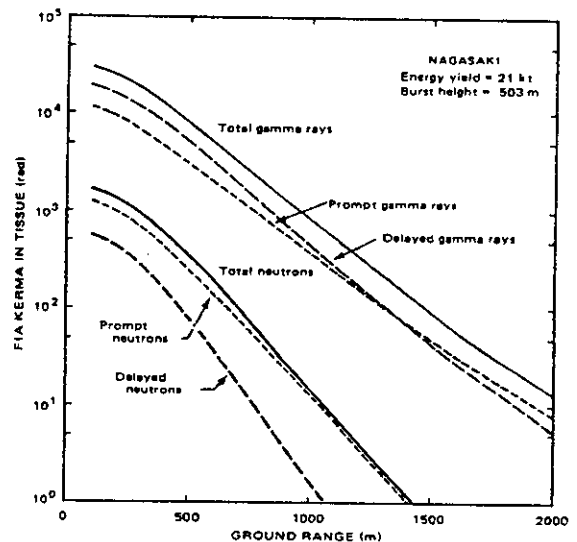


図6. 中性子カーマとガンマ線カーマについての即発および遅発放射線の寄与：長崎

#### 4) ガンマ線の熱ルミネッセンス測定

前節で計算された空气中カーマは、ガンマ線カーマと中性子線カーマ別に、広島・長崎の被曝試料に基づく実測値とそれに対応する DS86 に基づく計算値の比較により検証された。この節ではガンマ線カーマについて、次節では中性子線カーマの検証について述べる。

問題としている距離におけるガンマ線カーマを直接測定する方法として熱ルミネッセンス線量測定法 (TLD) が用いられた。自然放射線に被曝した陶器の年代を測定するために考古学の分野で用いられている方法である。被曝した瓦、レンガ、タイルなどを粉碎し、その中に含まれる石英の微粒子を取り出す。これを加熱すると光を発するが、これを熱ルミネッセンスといい、この光の量が被曝したガンマ線カーマに比例することを利用する方法である。このガンマ線カーマの実測は主として日本側で行われ、アメリカ側による計算を検証するという重要な意味があった。T65D の決定の際にもこの測定が行われていたが、測定値は 1 km 以内に限られており、その範囲での測定値は DS86 にも T65D にも比較的良く一致している。線量再評価に際して 1 km 以遠に重点を置いて測定が行われ、DS86 との一致が見られた。原爆投下から約 40 年を経過した当時、被曝したままの状態での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。特に、広島大理学部校舎、長崎市家野町民家の塀から被曝時の状態を保持している大量の試料が収集でき、日米英の 5 ヶ所の機関での熱ルミネッセンス測定の実施などにより、測定精度向上に役立った。

熱ルミネッセンス測定の結果と DS86 による計算結果とを図 7 と図 8 に示す。広島においては、1,000 m 以上の地点で測定値は計算値より大きくなっており、近い地点では逆に小さくなっている。長崎においてはこの関係は逆になっている。1,000 m 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、DS86 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 と比較すれば DS86 の方が遥かに良い一致を示している。

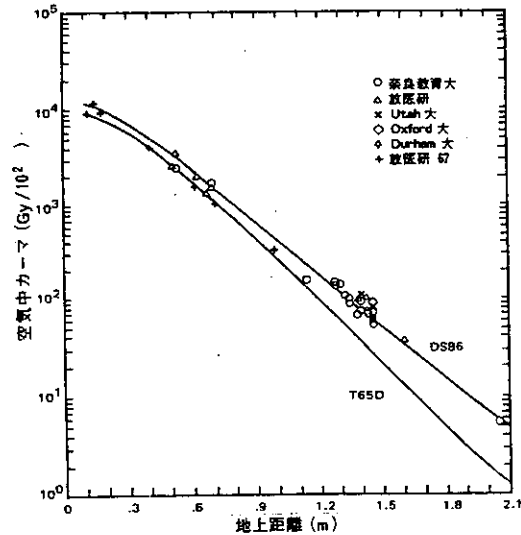


図 7. 熱ルミネッセンス測定の結果と DS86 による計算結果の比較：広島

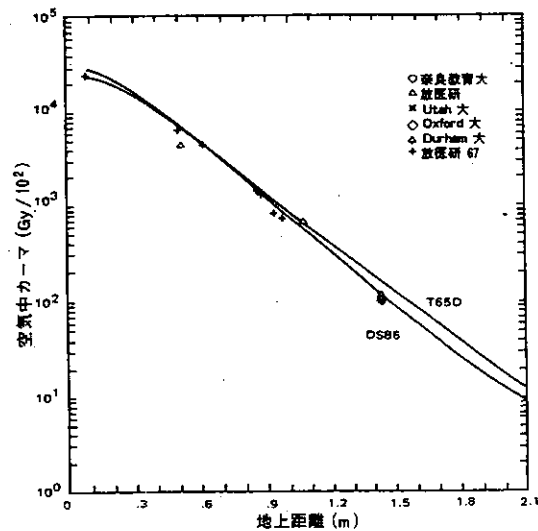


図 8. 熱ルミネッセンス測定の結果と DS86 による計算結果の比較：長崎

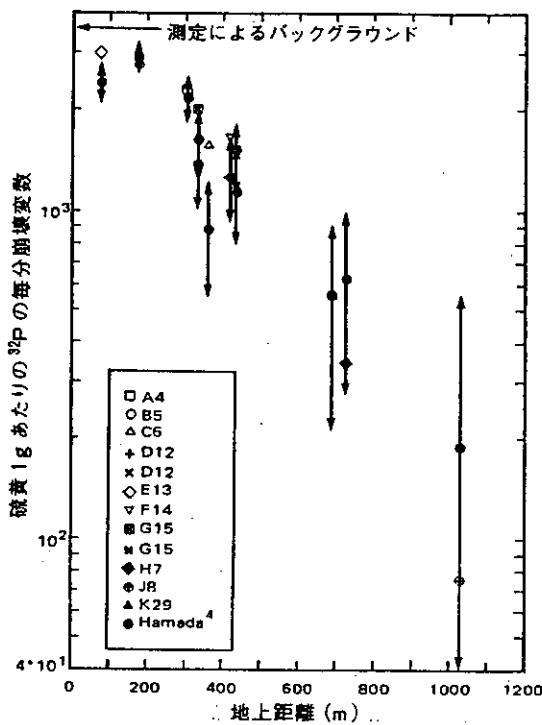
#### 5) 中性子の測定

中性子線量の検証には、線量を直接測定する方法はなく、中性子により特定の物質中に誘導された (生成された) 特定の放射性物質の放射



能を測定し（これを単に放射化の測定という）、この測定値に対応する DS86 に基づく計算値と比較するという方法を取った。誘導された放射性物質の中で半減期が短いものは現在測定できず、半減期が長くても残存する微量の誘導放射能を測定する技術が必要となる。

DS86 開発当時に得られていた放射能の測定値には、1) 速中性子により電柱の碍子の接着剤として使われていた硫黄に誘導された燐 32 ( $^{32}\text{P}$ )、2) 熱中性子によって鉄の中の不純物であるコバルト中に誘導されたコバルト 60 ( $^{60}\text{Co}$ )、3) 岩石の中のユーロピウムに誘導されたユーロピウム 152 ( $^{152}\text{Eu}$ ) があつた。放射能の半減期はそれぞれ、14.3 日、5.3 年、13 年である。燐 32 については、現在は測定できないが、爆弾投下の数日後に測定したデータに再検討が加えられた。DS86 との間に差は見られなかった (図 9)。



●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。

図 9. 硫黄の放射能の測定値と計算値の比較

コバルト 60 は、T65D の決定の際にもこの測定が行われていたが、新たな試料の測定も行われた。放射能の計算値は 290m において測定値の 1~1.5 倍、1,180m において測定値の 1/3 倍と系統的な差を示した (次頁図 10 参照)。

ユーロピウム 152 は当時新しい測定であったが、正確な評価を行うにはデータのばらつきが大きいとされた。

被爆者の被曝線量の推定に関しては、比較的高いエネルギー (0.5 MeV ぐらい以上) の中性子の影響が主となり、それ以下のエネルギーの影響はあまりない。その意味もあって、速中性子による燐 32 のデータを中心に検討が行われた。熱中性子の放射化データの理解には更に研究を行う必要があると考えられた。この点に関しては、後に改めて検討する。

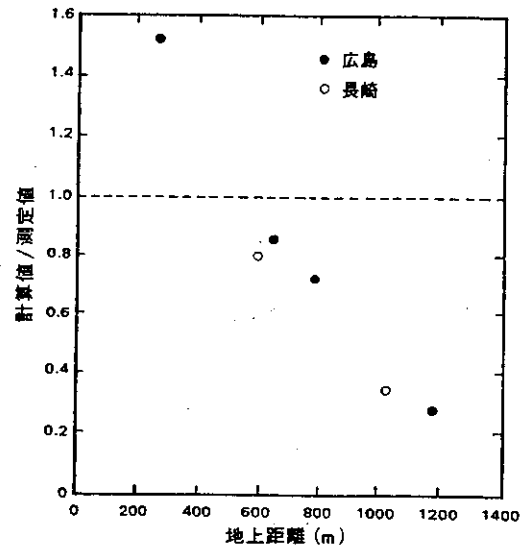


図 10. コバルト 60 の放射能の測定値と計算値の比較

## 6) 残留放射能の放射線量

広島・長崎の原爆に関わる放射線としては、これまでに見てきた原爆からの直接の放射線の他に、残留放射能からの放射線がある。残留放射能としては次の二種類が考えられる。一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（フォールアウトともいう）であり、地域としては、長崎では爆心地の東方約3kmの西山地区、広島では西方約3kmの己斐、高須地区が該当する。もう一つは、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。

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し、誘導放射能による放射能も時間と共に急速に減衰し、爆心地から離れても急速に減少（広島では爆心地から175m、長崎では350 m離れると半減）する。長崎の西山地区、広島の己斐、高須地区および広島、長崎の爆心地付近において、原爆後、数週間から数ヶ月の期間にわたって、それぞれ数回、線量率（単位時間当たりの線量）の測定が行われている。

これらの測定値から、地上1mの位置で、ガンマ線の爆発1時間後から無限時間までの積算線量は、長崎の西山地区の最も汚染の著しい数ヘクタールの地域で20～40レントゲン（以下Rを使う）、広島の己斐、高須地区では1～3Rと推定された。爆心地での地上1mにおける爆発直後から無限時間までのガンマ線の積算線量は広島で80R、長崎では30～40Rと推定された。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0.12～0.24 Gy、広島で0.006～0.02 Gyとなり、誘導放射能によるものは最大で広島で約0.5 Gy、長崎で0.18～0.24 Gyとなる。

誘導放射能による個人被曝線量については、DS86 報告書の付録に詳しい計算方法が示されており、被爆者や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すれば、必要に応じて計算することができる。

#### 7) 家屋および地形による遮蔽

DS86 体系においては、被爆者が被爆時に木造

の日本家屋の中にいた場合又は戸外にいて木造の日本家屋に遮蔽されていた場合が中心となっている。その遮蔽効果を計算するためのモデルについて説明する。新しい線量体系を開発する際に、T65D方式で用いられた二種類の遮蔽データベース（9-パラメータ・データベースとグローブ・データベース）が入力として利用できるようにモデルを組立てることが前提であった。数万人の被爆者一人一人の遮蔽記録から手がけると莫大な時間と経費が必要とされるからである。参考までに、詳細な遮蔽記録を持つ被爆者の遮蔽状況は、広島の約2万人については69%が木造の日本家屋の中、12%が戸外にいて木造の日本家屋に遮蔽、12%が戸外で無遮蔽となっている。一方、長崎の8千人では、それぞれ44%、13%、6%。となっており、他に工場内被爆や地形による遮蔽等がある。

日本家屋による遮蔽を計算するために、典型的な日本家屋の集まり（クラスターという）のコンピューターモデルを作った（図11）。使用したモデルは、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二種類である。その際、日本家屋の構造、材料及び厚さなどに関しては最良の情報を用いた。

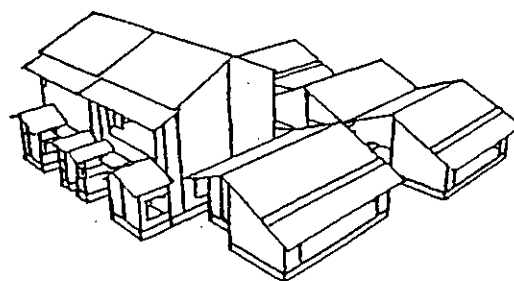


図11. 日本家屋のコンピューターモデル

6家屋クラスターの屋内に21個所及び長屋クラスターの屋内に40個所の点を選び、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、これらにのうちの1つの遮蔽状態に個々の被爆者の遮蔽状態（9-パラメー

タ・データ)を対応させた。

この976種類の各個所に対して、家屋の遮蔽効果の計算をするために、超大型コンピューターを用いモンテカルロ法による4万個の放射線粒子の追跡計算を行った。その結果が、家屋遮蔽データ・ベースとして保存されている。放影研の中型コンピューターで使用するために、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家屋遮蔽データ・ベースは、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家屋遮蔽データを平均して作った。

この家屋遮蔽データ・ベースと自由空間データ・ベース(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中性子及びガンマ線のエネルギーと角度別のフルエンス(これを遮蔽フルエンスと呼ぶ)が得られる。また、この時点でカーマを計算することができる(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、中性子とガンマ線別に見ればよい。ガンマ線の遮蔽カーマは、中性子によって家屋の材料中で生成されたガンマ線を含む。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、ガンマ線の透過率も距離の関数となる。ガンマ線の透過率は、放影研の寿命調査対象被爆者における平均値で見ると、T65Dで広島では0.90、長崎では0.81であったが、DS86では広島で0.46、長崎で0.48である。表にDS86の平均家屋透過係数を示す。

表4 平均家屋透過係数

	ガンマ線	中性子
広島	0.46	0.36
長崎	0.48	0.41

グローブ技法のデータをもつ被爆者(戸外にいて木造の日本家屋に遮蔽されていた場合)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個所と、丘によって遮蔽された10個所を選び、4つの距離と8つの方向と2つの都市に対して放射線粒子の追跡計算を行った。後に、特に長崎のために、工場内被爆や地形による遮蔽の効果も考慮できるようになった。

## 8) 臓器線量

臓器線量の計算には、放射線が被爆者の身体表面から特定臓器に達する間での身体自身の遮蔽効果を考慮する必要がある。そのために、1945年当時の典型的日本人のコンピューターモデル(人体模型、ファントム)を作成した。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(図12)。

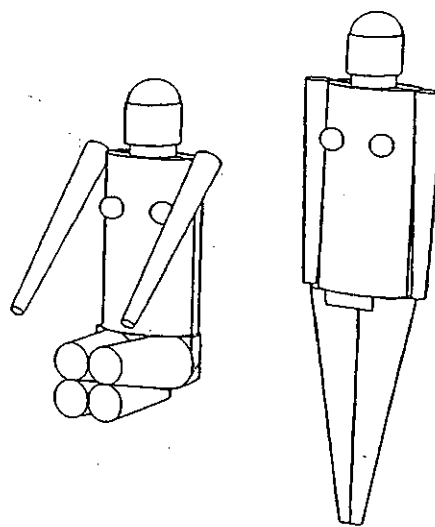


図12. ファントム(コンピューターモデル)

骨、軟組織の成分の違いを考慮し、頭、胴、手、足も模式化されている(図13)。

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した (図 14)。

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た。

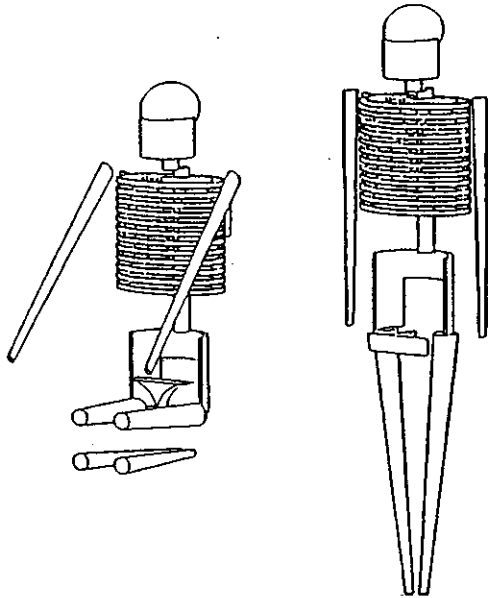


図 13. ファントムの骨格図

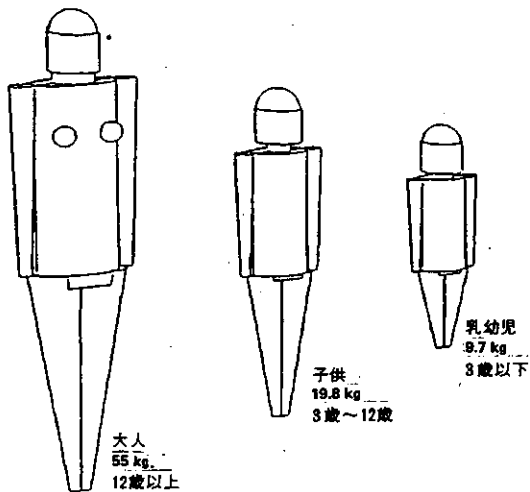


図 14. 年齢別のファントム

家屋遮蔽計算の場合と同様に、身体遮蔽を計算するために、超大型コンピューターを用いモンテカルロ法による 4 万個の放射線粒子の追

跡計算を行った。その結果が、身体遮蔽データ・ベースとして保存されている。前述の遮蔽フルエンスと身体遮蔽データ・ベースとを連結して、被爆者の特定の臓器に対する中性子及びガンマ線のエネルギー及び角度別のフルエンスが得られる。この時点で臓器線量を計算することができる。

この計算は、姿勢別 (直立、座位、臥位)、年齢群別 (乳幼児、小児、成人) に行われ、DS86 では次の 15 臓器を対象としている：赤色骨髄、膀胱、骨、脳、乳房、目、子宮 (胎児線量の代用にも使用)、大腸、肝、肺、卵巣、脾、胃、睾丸および甲状腺。

参考までに、表に、家屋遮蔽の場合と同様に、平均身体透過係数 (臓器線量と遮蔽カーマの比の平均) を、骨髄、大腸について示す。臓器の深さにより値が変動する。身体内で中性子の相互作用によって生ずるガンマ線もあるが、ガンマ線量への寄与が小さいので省略する。

表 5 平均身体透過係数

	ガンマ線	中性子
骨髄	0.81	0.37
大腸	0.74	0.19

#### 9) 1986 年線量推定体系 (DS86)

これまで、爆弾の出力、放出された放射線、最新の計算方法による空気中カーマ、遮蔽カーマ、臓器線量の計算モデルについて述べた。DS86 体系はこれらを統合し、被爆者の遮蔽データを入力として臓器線量および各種の線量 (カーマ) を計算するコンピューター・システムである。

被爆者の被爆時の遮蔽状況を大別すると、

- 1) 戸外で無遮蔽、2) 木造日本家屋内、3) 戸外で木造家屋により遮蔽、4) その他、の 4 つに分けられる。被爆者との面接により得られた遮蔽情報に基づく遮蔽関連データ・ベースが T65D の計算の際に構築され、2) は 9 - パラメータ・データ、3) はグローブ・データと呼ば