

れているが、DS86 はこれらのデータ・ベースを入力として使用できるように作られている。

DS86 体系は、超大型コンピューターにより行われた膨大な放射線粒子の追跡計算の結果得られた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・ベースの3つのデータ・ベースを持っている。これらのデータ・ベースは、放影研の中型コンピューターでも線量計算を可能にするために、直接被爆者一人一人の臓器線量をシミュレーションにより計算する代わりに、超大型コンピューターによる結果に近い結果が得られるように工夫されている。以下の説明はそのための複雑さである。

自由空間データ・ベースには、爆心地よりの距離別 (100m から 2,500m まで 25m 毎の区間)、エネルギー別 (中性子 37 群、ガンマ線 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ガンマ線別のフルエンスが、広島と長崎別に保存されている。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气中カーマを必要に応じて計算することができる。

家屋遮蔽データ・ベースには、家屋内の 976 地点、戸外で家屋により遮蔽の 1920 地点、地形遮蔽の 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、その被爆者の遮蔽を考慮した場合のエネルギーと角度別の遮蔽フルエンスを得ることができる。これは、次の身体遮蔽計算に使用される。また、遮蔽カーマも必要に応じて計算することができる。

臓器データ・ベースには、15 の臓器に対して、年齢別 (3 群) 及び体位別に計算された粒子追

跡結果が保存されている。エネルギーと角度別の遮蔽フルエンスと連結して、被爆者の特定臓器のエネルギーと角度別のフルエンスを得ることができる。さらに、臓器線量も計算することができる。

DS86 による線量計算の方法を、図 15 で、木造家屋内での被爆者を例にとって見てみる。線源 (原爆) から数万個の放射線粒子を放出し、大気・家屋・人体組織を通過して特定の臓器に到達するまで一個一個の放射線粒子を追跡し、特定臓器の被曝線量を計算する。DS86 は、上述の説明にもあるが、一個一個の放射線粒子を線源から臓器まで追跡する代わりに、大気、家屋、人体組織のそれぞれについて放射線粒子の追跡計算を行い、後からそれらを結合できるように工夫されている。遮蔽カーマは、人体模型を取り除き、その地点の地上 1m の点まで到達した (大気・家屋を通過して) 放射線による線量 (カーマ) である。空气中カーマは、更に家屋も取り除いた状態で、同一点まで大気を通して到達した放射線による線量である。

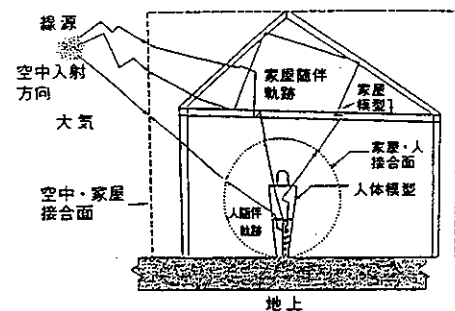


図 15. DS86 の計算過程

DS86 は特定の被爆者に関するデータを入力とし、これらのデータ・ベースを組み合わせることで各種の線量を出力することができるようになっている。すなわち、被爆者の被曝都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空气中カーマが得られる。次に 9 - パラメータ又はグローブ・データの入力により遮蔽

カーマを出力することができる。また、年齢、性、姿勢、原爆に対する向きを入力により特定臓器の吸収線量を出力することができるようになっている。

その後、長崎の工場内被爆に対する遮蔽データ・ベースが追加され、また、詳細な遮蔽状況がなくても、単に「木造式日本家屋内」、「戸外で木造家屋により遮蔽」のような遮蔽区分の情報に基づいて線量計算ができるように工夫がなされた。DS86はモジュール方式といわれ、新しいデータ・ベースとの取り替えおよび追加により容易に改訂できる。

推定線量に対する不確定性（誤差）の推定は、予備的な値としては、空气中カーマに対して広島で16%、長崎で13%となり、臓器線量に対しては25~35%となっている。不確定性（誤差）については別途出版の予定であったが、後述の中性子に関する測定値と計算値の不一致問題などの検討課題があるためまだ出版されていない。

## 8. DS86 設立後の日米線量再評価活動

前章5節において、DS86 中性子線量の検証のために誘導放射能の測定が行われ、速中性子により電柱の碍子の硫黄に誘導されたリン 32 ( $^{32}\text{P}$ ) の測定値は対応するDS86 計算値との一致が良かったが、熱中性子により鉄の中のコバルトに誘導されたコバルト 60 の測定値には系統的な不一致、即ち、爆心からの距離と共に測定値の計算値に対する倍率が増加することを見た。

熱中性子により岩石の中のユーロピウムに誘導されたユーロピウム 152 ( $^{152}\text{Eu}$ ) についても、その後数多くの測定値が得られ、同様の傾向が見られた。また、熱中性子によりコンクリート中に誘導されたクロライン 37 ( $^{37}\text{Cl}$ ) の測定技術も開発されることとなり、新たに多くの測定値が得られ同様の傾向を示した。これらの測定値とDS86 計算値との距離別の比較を、図16に示した。

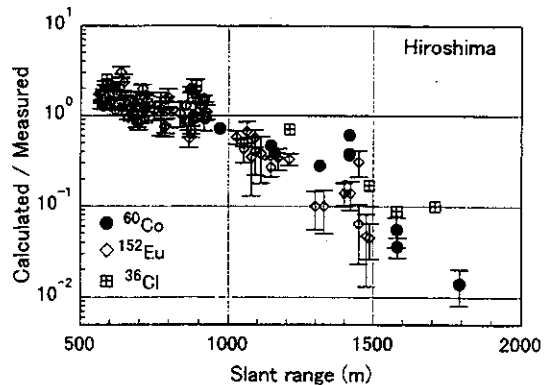


図16. 熱中性子により誘導された放射能の測定値と計算値の比較 (Shzuma 1988より)

この熱中性子の問題については、不一致の傾向ははっきりしたものの、その原因については未だに解決されていない。測定しているのは非常に微量の放射能であり、2kmを越すとあまりにも倍率が大きくなり、測定値に問題がある可能性も残されている。

速中性子により銅試料中に誘導されたニッケル 63 ( $^{63}\text{Ni}$ ) についても、最近測定が可能となった。まだ測定技術の確立のため、また測定のための銅試料の収集など、ある程度の測定データが得られるまでには時間がかかりそうだ。しかし、被爆者の被曝線量は主として速中性子により決まることから、中性子線量を確定する決め手となるとして期待されおり、数年の内の解決を目指している。

ガンマ線量についても、測定値は計算値よりも距離と共に倍率が増加しており、DS86に対して平均10%前後の増加が議論されている(参考文献)。熱中性子の測定値の計算値に対する倍率の方に多くの目が向けられているが、被曝線量のうちガンマ線量が殆どであることからすれば、線量推定の観点からすれば無視できない。

線量推定に変更があった場合、原爆被爆者のデータに基づいて推定されてきた放射線の健康後影響のリスク評価に影響する。約10年間にわたり日米で線量再評価活動が続けられているが、公には、変更の可能性についてまだ具体的な数値が示されたことはない。そのため、

測定値と計算値の関係から変更の具体的な数値を仮定して健康リスクに及ぼす影響も検討されているが、単位線量当たりのリスクが少し減少する程度である。

残された検討課題として、推定被曝線量の不確定性の項目がある。誤差には、統計的な確率変動をする誤差と、中性子問題のようにバイアスと考えられる誤差とがあるが、両者を含めた線量の不確定性の評価が最終的には報告されることになる。

## 9. 被曝者の被曝線量の具体例

被曝線量の計算の概要を把握するために、実際の計算よりもかなり簡素化した例を示す。架空の例として、「広島または長崎で、爆心地から1kmの地点（海拔ゼロと仮定）の木造家屋内で被曝」した被曝者の臓器線量（骨髄と大腸を例にとる）を計算する。この場合に、周囲を遮蔽を考えない場合（遮蔽がない場合）、家屋の遮蔽効果まで考慮した場合、特定の臓器に達するまでの人体そのものの遮蔽効果まで考慮した場合、の3つに分けて計算する。

### 1) 爆心地からの距離別被曝線量（空気中カーマ）

被曝者のまわりの遮蔽を考えない場合（被曝時に戸外にいて無遮蔽）には、被曝者の被曝線量は、爆心地からの距離の対数に逆比例して急速に減少する。爆心地から1kmでは、四捨五入して広島で4.2Gy（ガンマ線量：3.9Gy、中性子線量：0.2Gy）、長崎で8.0Gy（7.8Gy、0.1Gy）である。両市ともに半致死線量を越えている。参考までに、1.5kmでは、広島0.5Gy、長崎0.9Gy、2.0kmでは広島0.07Gy、長崎0.13Gy、3.0kmでは被曝線量はゼロ（0.005Gy以下）である。

### 2) 木造家屋内被曝線量（遮蔽カーマ）

木造家屋内被曝者について計算した遮蔽カーマと空気中カーマとの比を家屋透過係数と

いい、家屋が放射線を遮蔽する割合と逆に、放射線が家屋を通過する割合を示す。被曝者一人一人について、DS86体系により実際に計算した家屋透過係数の平均値（平均家屋透過係数）は、ガンマ線については広島で0.46、長崎で0.48であり、中性子については広島で0.36、長崎で0.41である。爆心地から1kmの木造家屋内で被曝した場合、遮蔽カーマは広島で1.8Gy（ $3.9 \times 0.46 + 0.2 \times 0.36$ ）、長崎で3.8Gy（ $7.8 \times 0.48 + 0.1 \times 0.41$ ）となり、両市とも空気中カーマの半分以下となる。

### 3) 臓器線量

DS86体系では、骨髄（白血病などのリスク評価に適用）、大腸（白血病以外の全がんなどのリスク評価に適用）、胃、肺、など15の身体各部位の臓器線量が計算できる。体の奥深い臓器ほど線量は少なくなる。身体組織による遮蔽（自己遮蔽）については、個々の被曝者の臓器線量と遮蔽カーマの比から計算した平均自己透過係数を見ると、例えば、骨髄についてはガンマ線が0.81、中性子が0.37であり、大腸についてはガンマ線が0.74、中性子が0.19である。両市での差はない。爆心地から1kmの家屋内被曝の場合の骨髄線量は、広島で1.5Gy：

$(3.9 \times 0.46 \times 0.81 + 0.2 \times 0.36 \times 0.37)$ 、  
長崎で3.1Gy：

$(7.8 \times 0.48 \times 0.81 + 0.1 \times 0.41 \times 0.37)$  となる。  
空気中カーマと比較すると広島でその36%、長崎で39%に減少している。

## 10. 結論

原爆被曝者の被曝線量を評価するシステムDS86は、その物理学的根拠に関する報告書が公表されているものの、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、本報告は被曝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。DS86は、一人一人の被爆者の被曝時の位置、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、被爆者の被曝時の姿勢や原子爆弾に対する向き、などの線量推定にとって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。

DS86は、1986年に導入されて以来、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。広島の中子による放射能の測定値とDS86による計算値の間に距離ごとの系統的なズレ等の不確定要素が存在するものの、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。

#### 参考文献

1. Roesch WC, US-Japan joint reassessment of atomic bomb radiation dosimeter in Hiroshima and Nagasaki, final report, Vol.1. Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima, 1987
2. Roesch WC, US-Japan joint reassessment of atomic bomb radiation dosimeter in Hiroshima and Nagasaki, final report, Vol.2.

Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima, 1987

3. 田島英三、重松逸造監修、DS86 翻訳事業会監訳、原爆線量再評価：広島および長崎における原子爆弾放射線の日米共同再評価。産興株式会社、1989

4. 星正治、被曝線量の推定 1. DS86. 放射線被曝者医療国際協力推進協議会 編、原爆放射線の人体影響 1992、pp.332-342, 1992

5. Shizuma K, Iwatani K, Hasai H, Oka T, Endo S, Takada J, Hoshi M, Fujita S, Watanabe T, Imanaka T. Residual  $^{60}\text{Co}$  activity in steel samples exposed to the Hiroshima atomic - bomb neutrons. Health Phys. 75(3):278-284; 1998

6. National Council on Radiation Protection and Measurements. Uncertainties in fatal cancer risk estimates used in radiation protection. NCRP Report No.126. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, Maryland, 1997

7. Preston DL, Pierce D, Vaeth M. Neutrons and radiation risk: a commentary. RERF Update 4 (3): 5, (1992-93) [Issues]

8. Rossi HH, Zaider M. Comment on the contribution of neutrons to the biological effect at Hiroshima. Radiat. Res. 146:590-591, 1996 [Letters to the editor]

9. Pierce DA, Shimizu Y, Preston DL, Vaeth M, Mabuchi K. Response to the letter of Drs. Rossi and Zaider. Radiat. Res. 146:591-593, 1996 [Letters to the editor]



## 原爆線量再評価の過去 10 年と今後の問題

分担研究者 星正治 広島大学原爆放射能医学研究 教授

### 研究要旨

広島長崎の原爆線量は過去何回か評価され、そして改定されてきた。今現在使われている原爆線量の評価システムは“原爆線量評価システム Dosimetry System 1986 (DS86)”と呼ばれていて、1986 年に完成した。この評価システムは日米の共同作業で作られた。主として日本側は被爆試料の測定を行い、アメリカ側はスーパーコンピュータを使って計算をした。この DS86 が出来てしばらくして、1989 年に特に広島において測定値と DS86 からの計算値とが一致しないことがはじめて発表された。測定値は中性子の内でも熱中性子で生成された Eu-152, Co-60 であるが、この違いは大きく、1.5km で 3-10 倍もデータのほうが大きい。原爆被爆者の被曝線量は 1MeV ぐらいのエネルギーの中性子（速中性子という）で影響が大きく、熱中性子では数 10 分の 1 以下で小さい。すなわちこの違いはたちまち原爆被爆者の被曝線量を変えるものではないが、その原因の追求がその時からはじまった。その原因を明らかにする試みがはじまっているところで、今後の展開が注目される。

### 1. はじめに

広島長崎の原爆の放射線量見直しは 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) その線量再評価は日米の共同研究で進められた。その時日本側は花崗岩、コンクリートなどの被爆試料を収集し中性子で誘導された放射能 (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を決定できたが、放射化で求めた放射能は熱中性子の量の評価にすぎず、被爆者の線量を決定する上では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。

またアメリカ側は主として当時のスーパーコンピュータを使った計算を行った。順番に説明すると、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、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。

その後、本研究の主体である広島グループ(特に静岡清広島大学教授)や金沢大学(特に中西孝金沢大学教授)、長崎大学のグループ、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。これは現在まで多大な労力を払って続いた研究であった。その結果が、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として示されている。この図を見れば分か

るとり系統的なずれが見られる。(6)

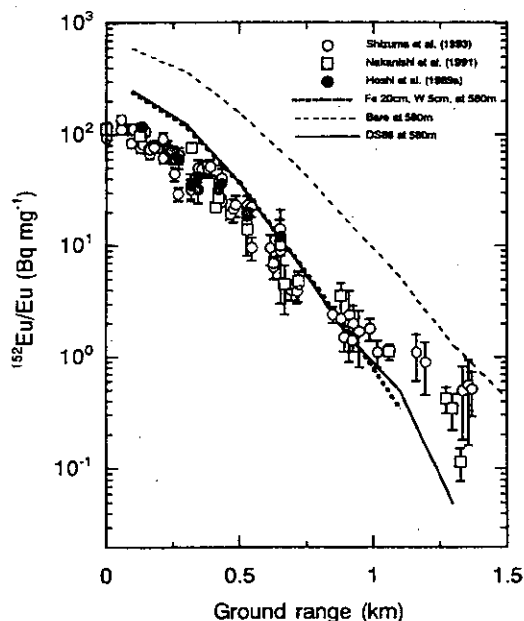


図1. 広島ユーロピウム152の比放射能の測定結果と計算。太い点線は内側にタングステン5cm外側に鉄20cmの球殻を考え、中心にウラン235の核分裂中性子を考えた場合のモデルによる計算。実線はDS86。太い実線とDS86が一致しているため、このモデルがDS86の計算として使えることを示している。細い点線(一番上)はDS86のフルエンスで裸の核分裂中性子を考えた場合。(27)

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。ここではこの問題点の検討についてやや重点をおく。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。したがって他の原因を一つ一つチェックすることからはじめることにした。(23,25,26,27)その過程で計算精度を確かめるために、1. ベンチマークテストをMCNPコード(24)を使って行った。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

輸送計算を行いどのようなスペクトルでどのような放出方法を考えた方が良いかを検討した。これら1、2について詳しく報告する。

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JENDL3(28)も必要に応じて使った。

## 2. 関連の国際ワークショップ

### 2-1. 日米の会議

(1) DS86の完成後はじめて開かれた日米の線量評価のためのワークショップは、平成元年(1989年)3月7日から3月12日まで米国ホノルル市で「DS86に関する日米合同ワークショップ」である。このワークショップにはuncertainty(誤差の問題)の章がまだ完成していなかったためそのことを議論することが第一の目的であった。DS86に参加した研究者はほぼ集まっていた。本研究の代表者はその時はじめてアメリカ側にDS86とデータとのずれがあることを示した。これによりアメリカ側にもはじめて問題の存在が確認できたと考える。

(2) 平成8年(1996年)5月22-23日米国カリフォルニア州アーバインで日米の会議が開催された。広島グループがハワイの会議に参加して長い時間が経過した。このとき広島大学の静間清氏と本研究代表者は今までの研究の集大成として問題点を報告した。これによりアメリカ側が問題が大きいことをはじめて認識し、日米の新たな再評価のための共同研究がはじまった。

(3) 平成11(1999年)年1月20-21日やはりカリフォルニア州アーバインで再び日米の会議があった。この会議は次の節に示す平成9年(1997年)の会議に引き続くと考えて良いと思う。すなわち事実上第3回目となる。ここでは、メンバーがしっかりしてきた。日本側として浜田達二氏、丸山隆司氏、藤田正一郎氏、静間清氏、中村典氏と本研究代表者が参加した。アメリカ側は、ワインバーグ氏、クリスティ氏らすべてのメンバーを網羅していた。ストローメ氏のグ

ループはドイツのリューム氏らのグループと共同研究を進めて $^{36}\text{Cl}$ の測定を報告していた。まだ少し問題があるようだ。静間清氏は $^{152}\text{Eu}$ の測定は広島だけでなく長崎も報告した。本研究代表者は新たなクラックモデルを紹介し、広島での遠距離の問題が説明できることを示した。これにより問題の焦点が明確になった。

## 2-2. 広島グループを中心とし放射線影響研究所で開催した国際ワークショップ

(1) 第1回目を平成6年(1994年)8月2-3日に、アメリカからトア・ストローメ氏を招き開催した。ここでは問題点を洗い出し、今後の方針を決定した。これが今回の再評価の出発点となった。そのアジェンダは1995年出版の広島大学原医研年報36号に掲載している。主たる点は①被爆した銅の試料を集め $^{63}\text{Cu}(n,p)^{60}\text{Ni}$ 反応でできた $^{60}\text{Ni}$ の測定を試みること、② $^{152}\text{Eu}$ 測定と $^{36}\text{Cl}$ 測定の相互比較を行うこと、③TLDの測定でまだもれているものがあるので測定を試みること、また出来ればストローメ氏により $^{36}\text{Cl}$ を測ることである。この会議は毎年開催することとした。

(2) 第2回目は平成7年(1995年)7月26-27日に開催した。このときは、本研究代表者が今までの経過を説明し、銅の測定のため東京大学の柴田徳思氏らが参加し、ユタ大学のストローメ氏が進行状況を説明し、広島大学の静間清氏が $^{60}\text{Co}$ と $^{60}\text{Ni}$ の測定を報告した。金沢大学の中西孝氏は $^{152}\text{Eu}$ の測定について化学分離を中心に話をした。他に今中哲二氏が計算の問題を、藤田正一郎氏が資料収集の問題点について説明した。

(3) 3回目は平成8年(1996年)7月26-27日に開催した。このときはその後の研究の進行情況が中心となった。アメリカ側からはストローメ氏に来てもらっている。このときは長崎から島崎氏を読んでデータの紹介をしてもらった。

(4) 第4回は平成9年(1997年)10月20-21日に開催した。このときはアメリカ側からも多

数参加した。アメリカの参加者は、エバンデュプル氏、ディーンカウル氏、ロバートヤング氏、ウェインラウダー氏などであった。

## 3. ベンチマークテスト

本研究代表者の進めてきた研究をここから紹介する。

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。<sup>(25,26)</sup>使用したコードはMCNP 3Aで核データはENDF/B-IVである。計算機は広島大学計算機センターのHITAC M-680及び広島大学原医研のACOS/20を使った。計算で使った中性子の放出数は $10^5$ から $5 \times 10^6$ 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 $^{252}\text{Cf}$ 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。

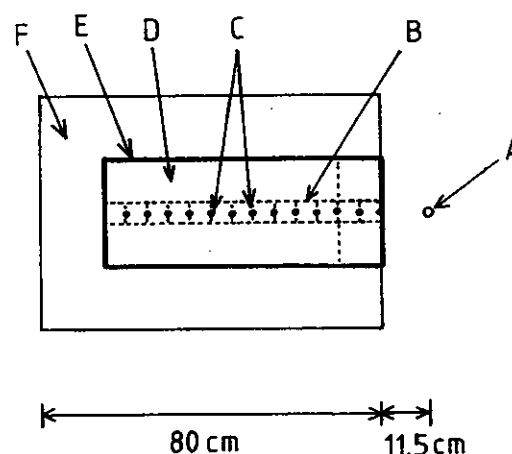


図2. ベンチマークテストの断面図。Aはカリフォルニウム252線源(2Ci)。Bは計算に使ったタリイの枠組みを示す。Cは中性子の検出に使った金属箔の位置。Dはいろいろな材質を使った吸収体(モデレータ)。Eは0.5mmの厚さのカドミウム板。Fはボロン(3.7%)入りのポリエチレン(商品名ニューライト)。



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 のカドミウムの板で覆った。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較して 100 分の 1 から 10000 分の 1 近くまでの減衰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 0 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)

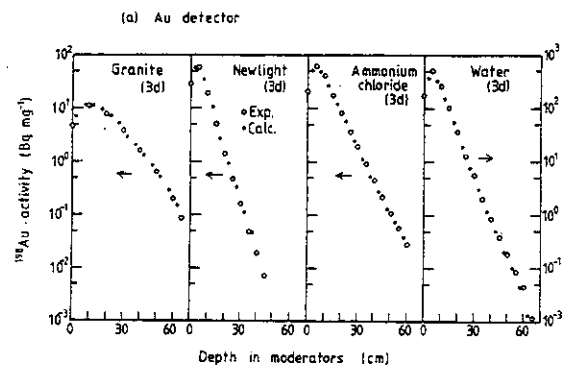


図 3. 各種の材質を使った場合の計算と実験値の比較。放射化箔は金で熱、熱外中性子を検出した。全ての材質においてよい一致を示す。星らより。(25)

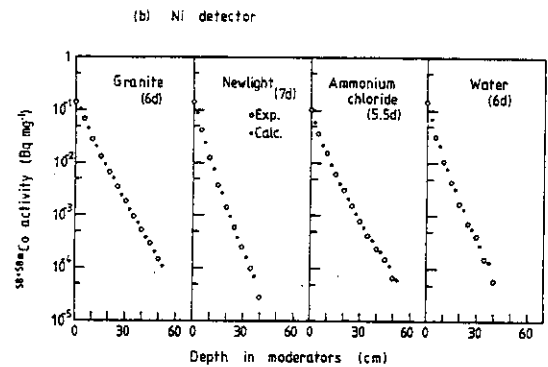


図 4. 図 3 と同様な比較。Ni(n,p)反応による速中性子を検出した。全ての材質においてよい一致を示した。星らより。(25)

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% ぐらい以内で合っていることがわかった。これは私にとっては驚くほど合ったといった印象である。実験サイド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、放射化箔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。これらをすべて合めて大体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。

#### 4. 広島原爆の中性子の輸送計算と中性子吸収ガンマ線の計算

中性子の輸送計算には MCNP 3A と ENDF/B-3A を主に使った。中性子の捕獲に伴って発生する2次ガンマ線の計算は MCNP 4A と ENDF/B-V と-VI に対応する核データを使った。中性子の計算では新しいバージョンを使っても計算に違いはなかった。しかし2次ガンマ線の計算の際に使った核データは ENDF/B-IV では計算には不十分であり、使えなかった。この2次ガンマ線の計算には ENDF/B-V と ENDF/B-VI を使わなければならなかった。

計算にはベンチマークテストと同様の計算機に加えて広島大学原医研のワークステーション NEC EWS4800/330 とノート型パーソナルコンピュータ IBM760EL を使用した。発生中性子数は最大  $10^7$  個の場合も行っている。これらの中ではノートパソコンが一番速くその次はワークステーションである。ノートパソコンの速さは大体ワークステーションに比べて2倍で、メインフレームの10倍である。

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。原爆の中心には核分裂中性子を置き、その周りに5cm厚のタンゲステン、20cm厚の鉄をおいた。これらは DS86 のスペクトルを再現する事を星ら<sup>(27)</sup>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。仮説を考えると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....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。

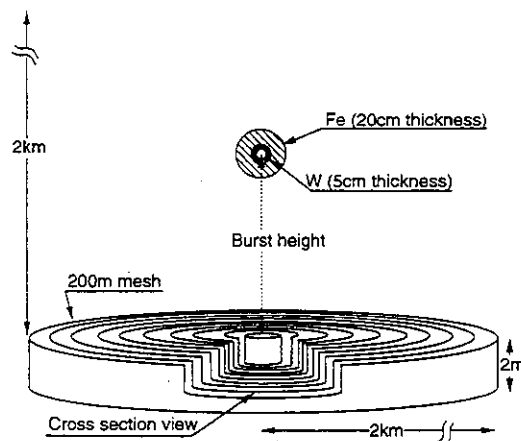


図5. 広島原爆の輸送計算に使ったジオメトリ。ユーロピウム生成量計算に使う中性子のスペクトルは地表から地面の中に2cm入ったところまで、すなわち2cmの厚さの部分の計算結果を使った。ガンマ線の場合は地表1mの位置を使った。爆発点の高さはDS86では580mである。90m引き上げた場合の670mの位置での計算も行った。

図1にはこ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。<sup>(27)</sup>

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。

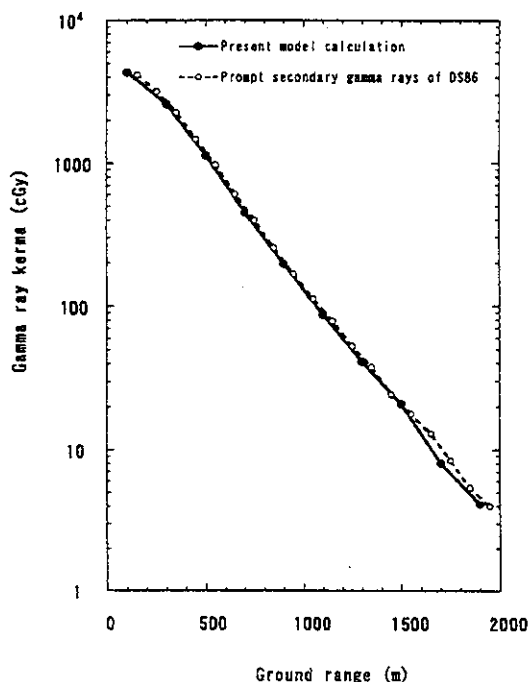


図6. 即発中性子が空気や土と反応して発生した2次ガンマ線(即発2次ガンマ線)のDS86との比較。DS86と一致しているので、今後計算を進める上で矛盾は生じない事が分かる。

### 5. 広島原爆の系統的なずれの問題点

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セパレータ(AMS)方式で測定した塩素36もある。<sup>(13,14,15)</sup>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もある。この反応は速中性子によっておこさえるので今まで

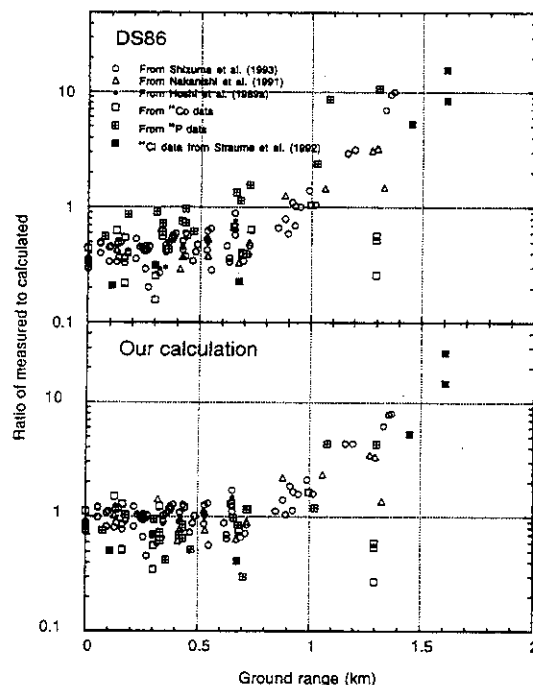


図7. 実験値と計算値との比。上の図はDS86との比較で、系統的なずれがある事が分かる。下の図は5%の核分裂中性子が横方向に出て、爆発地点を90m引き上げた仮定をした場合の比。1km以内は熱中性子の反応による生成量と、速中性子の反応による生成量それぞれが同時に合う。しかしながら1km以遠にはまだ問題が残っている。データは文献(3-22, 29)による。

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はほとんど関係ない。この放射能燐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ってみた図が図7である。もし計算値と合っていたらこの比は1になるはずである。図7の上半分はDS86との比較である。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。

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。

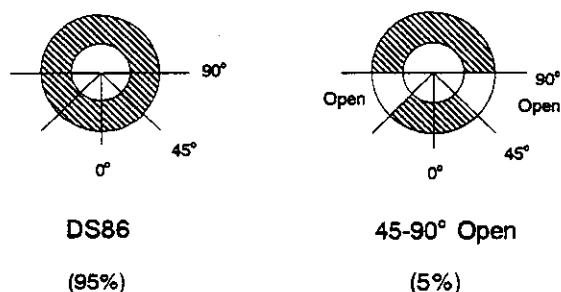


図8. 原爆の模式図. 左がDS86で内側に5cmのタングステン、外側に20cmの鉄の球殻を使った。中心にウラン235の核分裂中性子を発生させる。右の図は裂け目ができた場合の模式図である。図に示すように45-90°の範囲を真空にした。計算は左右独自に行い、ユーロピウム152などの放射化の計算まで行った後、中性子の総発生量を変えずに混合する。この場合は左の計算の95%と右の計算の5%をたしあわせた。

問題点は熱中性子のデータを合わせると、速中性子が合わないことである。両者を同時に合わすことが困難であった。そうしているうちに図8に示す模式図を考えた。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、エネルギーを失った。ここで図8の右側に示すように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。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、その結果を足しあわせた。

その結果左のDS86と等価な場合の95%と右の隙間から漏れた形の計算の5%を足しあわせた(全体で100%のフルエンスとする)。こうしてさらに爆発の高度を90m引き上げた。この仮定は隣32のデータがDS86と合っているのも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たわけではない。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。

こうすると図7の下の図のように、1km以内では全てのデータが一致してくる。<sup>(27)</sup>しかしながら1kmより以遠ではまだ計算と一致していない。この“遠距離の問題”は大きな問題である。すなわち中性子のエネルギーだけで合わせようとすると8MeV以上の中性子が主成分でなければならない。また中性子のエネルギーをそのままにすると空気による散乱がない状態すなわち真空のような状態を考えなければならない。

現状はここまでである。測定しているのは非常に微量の放射能である。測定に関わることもかもしれない。しかしながら調べれば調べるほど測定の問題の可能性は小さくなっている。こういった状態で広島原爆の中性子線量の解決にはまだまだ難問が残されている。

## 6. おわりに

原爆線量の問題についてMCNPによる計算との関わりで述べさせてもらった。この問題は原因を考えるという興味だけではなく、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て、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。<sup>(2)</sup>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。

## 7. 研究発表

### Neutron Dosimetry

- ① K. Shizuma, K. Iwatani, H. Hasai, T. Oka, S. Endo, J. Takada, M. Hoshi, S. Fujita, T., Watanabe and T. Imanaka: Residual  $^{60}\text{Co}$  Activity in Steel Samples Exposed to the Hiroshima Atomic-Bomb Neutrons; Health Phys. 75 (3) (1998) 278-284.
- ② K. Shizuma, K. Iwatani, H. Hasai, M. Hoshi and T. Oka:  $^{152}\text{Eu}$  Depth Profiles in Granite and Concrete Cores Exposed to the Hiroshima Atomic Bomb; Health Phys. 72 (6) (1997) 848-855.
- ③ K. Shizuma, K. Iwatani, H. Hasai, T. Oka, M. Hoshi, S. Shibata, M. Imamura, T. Shibata: Identification of  $^{63}\text{Ni}$  and  $^{60}\text{Co}$  produced in a steel sample by thermal neutrons from the Hiroshima atomic bomb; Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 384 (1997) 375-379.
- ④ M. Hoshi, J. Takada, T. Oka, K. Iwatani, K. Shizuma and H. Hasai: A possible explanation for the DS86 discrepancy between the data and calculation in Hiroshima; Nagasaki Symposium Radiation and Human Health: Proposal from Nagasaki, Proceedings of the Nagasaki Symposium '95, 50th Anniversary Meeting of the Atomic Bombing in Nagasaki, Nagasaki, Japan, 19 September 1995. Elsevier Science (1996) 175-191.
- ⑤ K. Shizuma, K. Iwatani, H. Hasai, M. Hoshi, T. Oka and H. Morishima: Residual  $^{152}\text{Eu}$  and  $^{60}\text{Co}$  Activities induced by Neutrons from the Hiroshima Atomic Bomb; Health Phys. 65 (3) (1993) 272-282.
- ⑥ K. Shizuma, K. Iwatani, H. Hasai, T. Oka, H. Morishima and M. Hoshi: Specific Activities of  $^{60}\text{Co}$  and  $^{152}\text{Eu}$  in Samples Collected from the Atomic-Bomb Dome in Hiroshima; Journal of Radiation Research 33 (2) (1992) 151-162.
- ⑦ M. Hoshi, H. Hasai and K. Yokoro: Studies of Radioactivity Produced by the Hiroshima Atomic Bomb: I. Neutron-Induced Radioactivity Measurements for Dose Evaluation; J. Radiat. Res., Supplement (1991) 20-31.
- ⑧ M. Hoshi, K. Yokoro, S. Sawada, K. Shizuma, K. Iwatani, H. Hasai, T. Oka, H. Morishima, D. J. Brenner: Europium-152 Activity induced by Hiroshima Atomic Bomb Neutrons: Comparison with the  $^{32}\text{P}$ ,  $^{60}\text{Co}$ , and  $^{152}\text{Eu}$  Activities in Dosimetry System 1986 (DS86); Health Physics 57 (5) (1989) 831-837.
- ⑨ H. Hasai, K. Iwatani, K. Shizuma, M. Hoshi, K. Yokoro, S. Sawada, T. Kosako, H. Morishima: Europium-152 Depth Profile of a Stone Bridge Pillar Exposed to the Hiroshima Atomic Bomb:  $^{152}\text{Eu}$  Activities for Analysis of the Neutron Spectrum; Health Physics 53 (3) (1987) 227-239.
- ⑩ K. Iwatani, M. Hoshi, K. Shizuma, M. Hiraoka, N. Hayakawa, T. Oka and H. Hasai: Benchmark Test of Neutron Transport Calculations: Indium, Nickel, Gold, Europium, and Cobalt Activation with and without Energy Moderated Fission Neutrons by Iron Simulating the Hiroshima Atomic Bomb casing; Health Phys. 67 (4) (1994)

354-362.

- ⑪ M. Hoshi, M. Hiraoka, N. Hayakawa, S. Sawada, M. Munaka, A. Kuramoto, T. Oka, K. Iwatani, K. Shizuma, H. Hasai and T. Kobayashi : Benchmark Test of Transport Calculations of Gold and Nickel Activation with Implications for Neutron Kerma at Hiroshima; Health Phys. 63 (5) (1992) 532-542.
- ⑫ M. Hoshi, S. Sawada, T. Nagatomo, Y. Neyama, K. Marumoto and T. Kanemaru: Meteorological Observations at Hiroshima on Days with Weather Similar to that of the Atomic Bombing; Health Phys. 63 (6) (1992) 656-664.

#### TLD

- ① M. Hoshi, J. Takada, S. Endo, K. Shizuma, K. Iwatani, T. Oka, S. Fujita and H. Hasai: Problems of Radiation Dose Evaluation in Hiroshima and Nagasaki and their Explanation; Radiation Protection Dosimetry 77 (1) (1998) 15-24.
- ② T. Nagatomo, M. Hoshi and Y. Ichikawa: Thermoluminescence Dosimetry of the Hiroshima Atomic-Bomb Gamma Rays between 1.59 km and 1.63 km from the Hypocenter; Health Phys. 69 (4) (1995) 556-559.
- ③ T. Nagatomo, M. Hoshi and Y. Ichikawa: Comparison of the Measured Gamma Ray Dose and the DS86 Estimate at 2.05 km Ground Distance in Hiroshima; J. Radiat. Res. 33 (1992) 211-217.
- ④ M. Hoshi, S. Sawada, Y. Ichikawa, T. Nagatomo, S. Uehara, S. Kondo: Thermoluminescence Dosimetry of  $\gamma$  - Rays from the Hiroshima Atomic Bomb at Distances 1.91-2.05 km from the Hypocenter; Health Physics 57 (6)

(1989) 1003-1008.

- ⑤ S. Uehara, M. Hoshi, S. Sawada, T. Nagatomo, Y. Ichikawa: Monte Carlo Calculations of Doses to Tiles Irradiated by  $^{60}\text{Co}$  and  $^{252}\text{Cf}$  Simulating Atomic Bomb  $\gamma$ -Ray Fluences; Health Physics 54 (3) (1988) 249-256.
- ⑥ Y. Ichikawa, T. Nagatomo, M. Hoshi, S. Kondo: Thermoluminescence Dosimetry of  $\gamma$  Rays from the Hiroshima Atomic Bomb at Distances of 1.27 to 1.46 Kilometers from the Hypocenter; Health Physics 52 (4) (1987) 443-451.

#### Fallout

- ① K. Shizuma, K. Iwatani, H. Hasai, M. Hoshi, T. Oka and M. Okano:  $^{137}\text{Cs}$  Concentration in Soil Samples from an Early Survey of Hiroshima Atomic bomb and Cumulative Dose Estimation from the Fallout; Health Phys. 71 (3) (1996) 340-346.
- ② H. Hasai, M. Hoshi and K. Yokoro: Studies of Radioactivity Produced by the Hiroshima Atomic Bomb: 2. Measurements of Fallout Radioactivity; J. Radiat. Res. Supplement (1991) 32-39.
- ③ K. Shizuma, K. Iwatani, H. Hasai, M. Hoshi: Fallout in the Hypocenter Area of the Hiroshima Atomic Bomb; Health Physics 57 (6) (1989) 1013-1016.
- ④ H. Kawamura, M. Hoshi, G. Tanaka, T. Onkita, K. Takeshita, S. Sawada, E. Nomura, S. Takeoka and T. Kumatori : Strontium-90 Activity in Bones of the A-bomb Exposed in Hiroshima and Exhumed on Ninoshima Island; Journal of Radiation Research 28 ( 1987) 109-116.
- ⑤ J. Takada, M. Hoshi, S. Sawada and M.

Sakanoue: Uranium Isotopes in Hiroshima "Black Rain" Soil; J. Radiat. Res. 24 (1983) 229-236.

#### ABS93D

- ① M. Matsuura, M. Hoshi, N. Hayakawa, H. Shimokata, M. Ohtaki, M. Ikeuchi and F. Kasagi: Analysis of cancer mortality among atomic bomb survivors registered at Hiroshima University; Int. J. Radiat. Biol. 71 (5) (1997) 603-611.
- ② M. Hoshi, M. Matsuura, N. Hayakawa, C. Ito and N. Kamada: Estimation of Radiation Doses for Atomic-Bomb Survivors in the Hiroshima University Registry; Health Phys. 70 (5) (1996) 735-740.

#### Others

- ① Meeting of the Japan and the U.S. Dosimetry Measurement Groups. (August 2&3, 1994, Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima, Japan )
- ② The Program of Second Workshop for the Evaluation of Atomic Bomb Radiation Doses in Hiroshima and Nagasaki. (July 26&27, 1995, Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima, Japan)
- ③ The Program of Third Workshop for the Evaluation of Atomic Bomb Radiation Doses in Hiroshima and Nagasaki. (July 26&27, 1996, Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima, Japan)
- ④ 4th Workshop for the Evaluation of Atomic Bomb Radiation Doses in Hiroshima and Nagasaki: Program. (October 20&21, 1997, Radiation Effects Research Foundation,

Hiroshima, Japan)

謝辞 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。

#### 8. 参考文献

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,  $^{152}\text{Eu}$  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  $^{32}\text{P}$ ,  $^{60}\text{Co}$ , and  $^{152}\text{Eu}$  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  $^{60}\text{Co}$  and  $^{152}\text{Eu}$  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  $^{152}\text{Eu}$  and  $^{60}\text{Co}$  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  $^{63}\text{Ni}$  and  $^{60}\text{Co}$  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.  $^{152}\text{Eu}$  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. B* 52, 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  $^{32}\text{P}$  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  $^{32}\text{P}$  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  $^{32}\text{P}$  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  $^{32}\text{P}$  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-1319, (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)

## DS86 線量推定値変更の可能性に関する考察

分担研究者 Dale Preston 放射線影響研究所 統計部 部長

### 1. 緒言

本報では線量推定方式 1986 (DS86) の変更が推定線量、放射線リスク推定値および広島の実原爆被爆者における実際のリスクに及ぼす影響に関する問題を考察する。本考察における重要な側面は、推定線量が変化すると放射線がリスクに及ぼす影響の推定値は変化するが、被爆者が受けた実際の線量に依存する実際の（観察可能な）事象は線量推定値の変更によって変化することはないという点である。リスクに関する考察では固形がん死亡率に焦点を当てるが、その見解を一般化して被爆者集団における全般的死亡率、がん罹患率、リスクのその他の側面に適用することができる。ここでは、放射線影響研究所（放影研）寿命調査（LSS）集団に含まれる広島の実原爆被爆者における線量推定値の変更の可能性と実際の固形がんリスクの性状に焦点を当てる。広島の中性子問題に関係する物理学的測定によってこれまで得られたデータも提示する。

将来実施されるかもしれない線量推定方式の変更の規模は不確実なため、現時点で新しいリスク推定値を算出することは適当でなく、本報ではそのような推定値算出は試みない。しかし、線量推定方式の変更によって個人線量推定値が増加するならば、放影研データに基づく特定線量に関するリスク推定値（即ち単位線量当たりのリスク）は減少することに留意すべきである。現在放影研データは放射線影響の定量的推定値の主要な基盤となっているので、線量推定値の変更はリスク推定値、ひいては放射線

防護基準へ影響を与えるであろう。DS86 推定値の問題を見極め、さらには修正するための公式検討の現状を述べた後、現在一般的に利用可能な情報を基に、DS86 推定値の変更の性質および規模について非公式の見解を示す。その後、爆心地からの距離の関数としての広島の実原爆被爆者における固形がんリスク（上記の通り線量推定方式が変更になっても変化しない）について簡単に述べる。

### 2. DS86 の経緯

1981-86年に日米の研究班が合同作業を実施し、DS86 が確立された。1986年3月に日米上級線量委員会が放影研におけるDS86使用を正式に承認した。基本的なDS86方式の詳細はRoeschの報告書（1987年）に述べられている。この方式の開発に関する問題は米国エネルギー省による一連の報告書、BondおよびThiessenの報告書（1981年）および放影研報告書（放射線影響研究所1983年；放射線影響研究所1984年；Roesch1987年）に示されている。

DS86は線量推定に関係するすべての主要問題を扱う理論的モデルおよびシミュレーションに基づいている。これらの主要問題には、爆弾の出力と放射線量；被爆者の位置までの放射線の空中輸送；建造物および地形による遮蔽の影響；体内遮蔽が特定組織被曝線量に及ぼす影響；被曝の線量推定値への変換などが含まれる。

DS86 推定値は以前の T65DR（暫定的改定1965線量推定方式）推定値とは幾つかの重要な側面において異なる。広島については、遮蔽の

影響は考慮せず、DS86 空气中 (FIA) カーマ推定値は幾分増加し、FIA 中性子カーマは以前の値の約 10% になった。長崎では、DS86 無遮蔽 FIA ガンマ線カーマは T65DR 値より少し低く、DS86 FIA 中性子カーマは T65DR 値の約 1/3 であった。典型的な家屋および長屋 (殆どの人はその中で被曝) による遮蔽の程度に関する推定値は T65D よりも DS86 の方がかなり高く、それにより広島での遮蔽ガンマ線カーマ推定値は殆ど変化しなかったが、長崎では少し減少した。

DS86 開発の重要な側面は、理論的計算値を物理的測定値と比較し、検証することであった。これらの測定値は、1950 年代および 1960 年代初めに米国が実施した様々な武器試験および実験からの測定値、および広島・長崎の採取場所が明確な試料の物理的測定値であった。DS86 最終報告には、この方式の開発段階で考慮された物理的測定値に関する詳細な考察が述べられている。

DS86 が確立された時点で、物理的測定値と DS86 推定値を比較するための追加作業の必要性は認識されていた。ガンマ線量に関しては、物理学的データの主要情報源は数多くのレンガおよび瓦試料の熱ルミネッセンス線量測定であった (丸山およびカワムラ 1987)。1987 年の丸山らの報告では、広島爆心地から 1000 m 以遠のガンマ推定値については「理論値が平均 (実測) 値と一致するには理論モデルにおいて 18% の増加」が必要であるとされた。また長崎では「1000 m 以遠では 10% 未満の減少」が必要であると述べられている。しかし、「理論値の修正には時期尚早である」と結論づけている。

中性子線量評価のための物理学的データは 1980 年代後半には極めて限られていた。主なものは、原爆後まもなく日本人科学者が広島で実施した少数の硫黄放射化測定値、橋詰ら (橋詰、丸山ら、1967 年) による熱中性子の  $^{60}\text{Co}$  測定値、新たに得られた限られた数の熱中性子によ

る  $^{152}\text{Eu}$  放射化測定値であった。Loewe、Mendelsohn らの報告書 (1987 年) では、DS86 最終報告の中性子測定データが検討されている。その報告では、硫黄データは DS86 計算値に良く一致しているが、 $^{60}\text{Co}$  データは「計算値と矛盾し、1000 m では 5 倍という違いで、この違いは増加し続ける」としている。またその当時利用可能であった  $^{152}\text{Eu}$  データは「計算結果と比較しても矛盾は示さないが、これらの値の不確実性により 1000 m での計算値の確認はできない」という見解を述べている。Loewe らは所見の要約で、「[広島] 中性子線量は更に調査を進めなければ判明しないというのが中性子測定に関する結論である」と記している。

### 3. DS86 後の測定と計算

広島における DS86 中性子線量推定値の問題に関する委員会の懸念に応じて、日米の様々な研究班が広島・長崎の中性子被曝に関係する追加測定のための広範な作業を開始した。これにより、数百の新しい熱中性子測定値が得られたが、その中には新たに得られた試料の多数の  $^{152}\text{Eu}$  測定値；限られた数の試料の新たな  $^{60}\text{Co}$  測定値；新しく開発された技法を用いた測定値 ( $^{36}\text{Cl}$ 、 $^{154}\text{Eu}$  など) が含まれている。1992 年に Straume ら (Straume、Egbert ら、1992 年) が DS86 後の所見を要約した。この報告書には、様々な種類の熱中性子測定値に関して距離に対する計算値と実測値の比を表したプロットが示されていた。この Straume のプロットは、測定値と DS86 推定値の食い違いが距離に依存するという明確な印象を与える。1990 年代初めに、Straume は  $^{63}\text{Cu}$ - $^{63}\text{Ni}$  反応に基づく速中性子線量推定を可能にする新しい質量スペクトロメトリー技法を提案した。この技法に基づく最初の測定は過去一年の間に実施された。試料数は極めて限られているが、これらの測定値はヒトの組織における線量の大半を説明できるエ

エネルギーの範囲の中性子に直接関係するので、極めて重要と思われる。

過去一年間に放影研では DS86 に関する物理的試料に関する情報およびそれらの試料を用いた測定結果のデータベースを開発した。殆どの試料に関しては、発表された論文から得られた DS86 推定値または Science Applications International Corporation (SAIC) (Egbert 1997 年、私信)に提供された情報もこのデータベースに入れられている。現在放影研の試料および測定データベースには 360 件の試料から得られた約 600 件の測定値が含まれている。以下の表に都市別の各種測定値の数を要約する。

同位元素		広島	長崎
Cl-36	熱中性子	11	18
Co-60	熱中性子	62	9
Eu-152	熱中性子	207	35
Eu-154	熱中性子	4	
Ni-63	速中性子	3	
	中性子測定値合計	287	62
TLD	ガンマ	160	64

殆どの TLD 測定は DS86 が最終的に確立される前に実施されたが、中性子に関する測定の大部分は DS86 確立後に行われた。

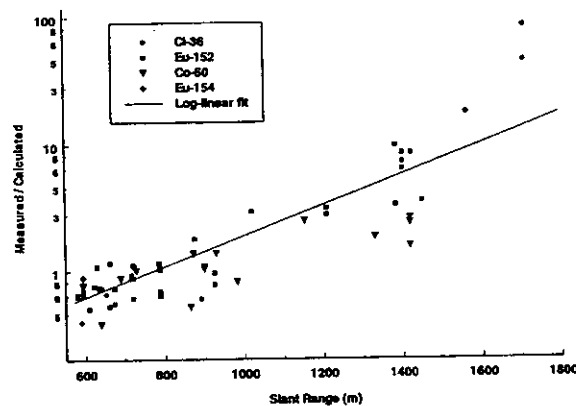


図 1. Straume ら (1992 年) が引用した参考文献に記載された広島の中熱中性子測定値に関する傾斜距離に対する実測値と DS86 計算値の比。DS86 値は当初の SAIC の論文から得たものである (S. Egbert、私信)。対数線形の当てはめ (実線) は、Straume の論文に示された直線と同じである。

### (1) 熱中性子測定データ

放影研試料・測定データベースを用いると、広島、そして限られた範囲ではあるが長崎の熱中性子放射化に関する情報収集の現状を見ることができる。我々はまずデータベースの情報を用いて、Straume、Egbert らの報告書 (1992 年) に引用された情報源 (橋詰、丸山ら、1967 年；橋詰、1983 年；中西、井村ら、1983 年；葉佐井、岩谷ら、1987 年；

中西、小林ら、1987 年；木村、高野ら、1990 年；Kerr、1990 年) から得たデータを使うことにより、距離に対する実測値と計算値の (対数) 比のプロットを描いた。78 個の測定値に関する情報を含むこのプロットを図 1 に示す。我々は同一試料の反復測定の平均は出しておらず少数の測定値については DS86 推定値がないので、この図と当初の論文中の図は少し異なる。このプロットに示し