

(D) Ni-63 の測定

広島の中中性子の不一致問題が解決されないままに時間が過ぎてゆく過程で、新たに登場したのが速中性子誘導による銅試料中の Ni-63 の測定である。被曝線量は殆ど速中性子の寄与によるもので、空气中線量と距離との関係が直接測定できることになり期待された。問題は、測定のための被曝銅試料の入手であった。放影研など

の努力により最終的には広島で数カ所の地点から収集することが出来た。測定は AMS の技法により Ruehm らおよび Straume らにより行なわれた。測定および分析の途中で、敢えて計算値を示さない測定結果を図 15 に示した。遠距離のバックグラウンドの補正をしてないが、計算値を支持するものである。

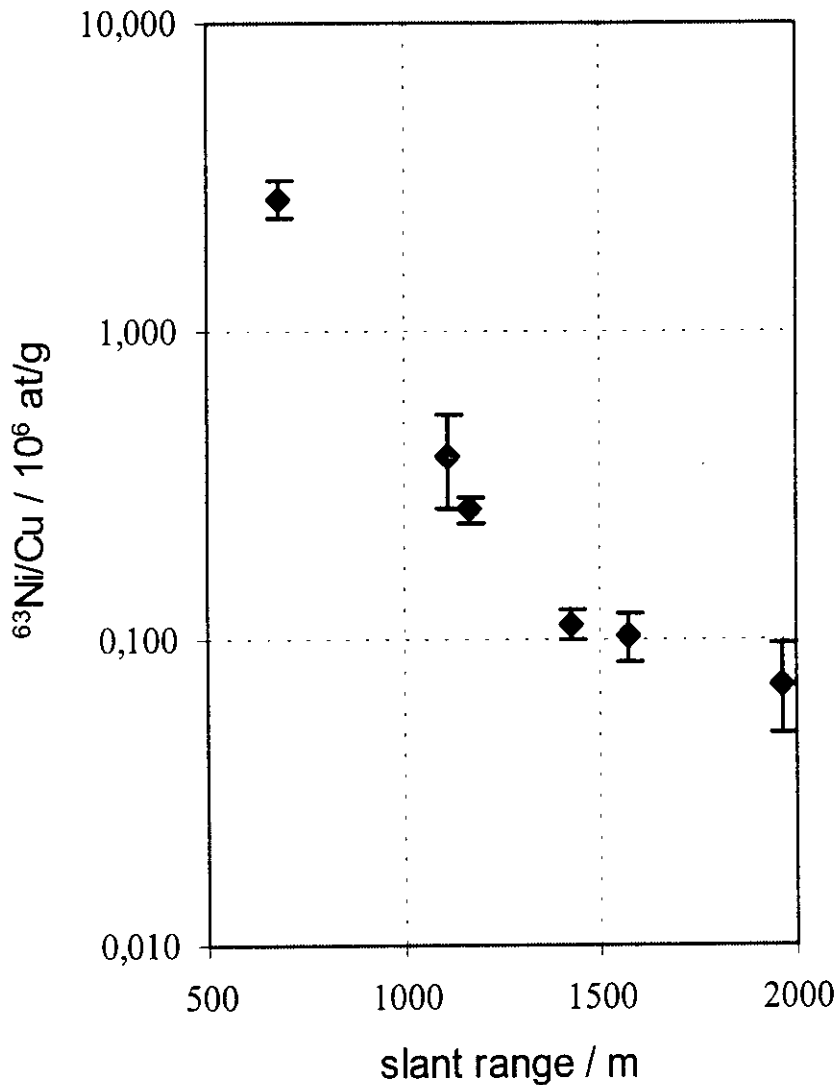


図 15. 銅試料中の Ni-63 の測定 (Ruehm 博士による)

3) 計算は線量評価体系 DS02 へ

中性子の不一致問題には大別して2つの問題点がある。1つは、爆心地の近辺での測定値が

種々の(核種の)測定において計算値のほうが高い値を示していることである。爆心地の近辺では放射線のシグナルが強く測定値へのバック

グラウンドなどの影響は極めて小さい、即ち、爆心地の近辺の測定値は信頼できるものである。一方で、新たに行なわれた計算も測定値から判断すれば爆心地の近辺で線量の過大評価となっていることから、実務班は爆弾に関するパラメータのうち相互関係のある爆弾の「出力」と「炸裂点の高度」について真剣に再考することを余儀なくされた。

この2つのパラメータの組み合わせに対応する計算値と測定値とを比較し、かつ、あらゆる既存の情報を総合的に判断して、最終的に広島において「出力を15 kt から16 kt へ、高度を580 m から600 m に変更」することに決定した。

これまでに測定値を説明できるモデルを考えることは難しいとされてきた。特に遠距離の測定データに苦慮したわけである。星は、ともかく1 km ぐらいまでは測定値を説明できるモデルを考案した。星のモデルは直接には取り上げられなかったが、最終結果の一面を予測するものであった。星のモデルは、近距離も遠距離も両方の測定値を正しいとして考えたものであったが、そんなモデルは考えられないとの米国側の反論に敢えて挑戦した意味では貴重なものであった。彼のモデルは炸裂点の高度を90 m 引き上げるものであったが、出力との兼ね合いとはいえ、最終的に20 m 引き上げられた。参考までに、参考資料1（星 正治、広島爆弾の被曝線量評価の問題点、放射線化学、第69号、2-9、2000.）を添付しておいた。DS86 評価の問題点とともに星のモデルが詳しく説明されている。

爆弾に関するこの2つのパラメータを変更し、他の改善も加えて新たに計算され線量を DS02 線量、この方式を DS02 線量評価体系と呼ぶこ

とにした。DS02 は、今年（2003 年）3 月に日本の厚労省と米国のエネルギー省合同の上級検討委員会により承認された。今後はこの方式に従って放影研で被爆者の被曝線量を計算し、放射線の健康後影響の再評価を行なうことになる。

広島の出力の15 kt から16 kt への増加は、爆心からの距離に関係無く空気中線量を6.7 % 増加させることになる。一方、炸裂点の高度を580 m から600 m に変更することは線量を減少さす方向であるが爆心地近くでないとその影響は小さく、被爆者の線量計算にはあまり影響しないと予測される。

4) DS02 と DS86 の比較

DS02 による空気中線量を DS86 と比較してみると、爆心地付近の生存者の殆どいない範囲を除けば、「5%から10%の増加」と要約できる。被曝線量はガンマ線量と中性子線量の総和として求められるが、放射線の大半がガンマ線であることから、上記の計算における変更を考慮すればこのような結果となり、再評価の際に考えられてきたように、新しい線量体系が出来たとしても、空気中線量は DS86 に比してあまり変わらない、との予測どりの結果となった。

空気中線量の広島・長崎別、ガンマ線量・中性子線量別、爆心地からの距離別に新しく出来た DS02 と DS86 を比較した結果を図16および図17に示す。

広島の空気中線量をみてみる。図16の上部の図は通常の片対数スケールで描いたものであるが、DS02 空気中線量と DS86 空気中線量はガンマ線量についても中性子線量についても殆ど違いが分からないほど変動がない。下方の図は、DS02 線量を DS86 線量で割った比を被

曝距離別にしめしたものである。これで見ると、ガンマ線量については、爆心地付近では DS02 線量と DS86 線量はあまり変わらないが、遠くなるに従って DS02 線量がだんだん DS86 よりも高くなり、約 10%以内で横ばいとなる。中性子線に関しては、爆心地付近では DS02 線量が DS86 線量よりも低いが、500m付近で逆転して

1000m付近で DS02 線量が DS86 線量より 10%程度高くなり、再びその比率が小さくなってゆき、2000m近くで同じ程度になり、それ以後では DS02 線量が DS86 線量よりも低くなってゆく。しかし、このあたりの中性子線量そのものは非常に小さくなる。

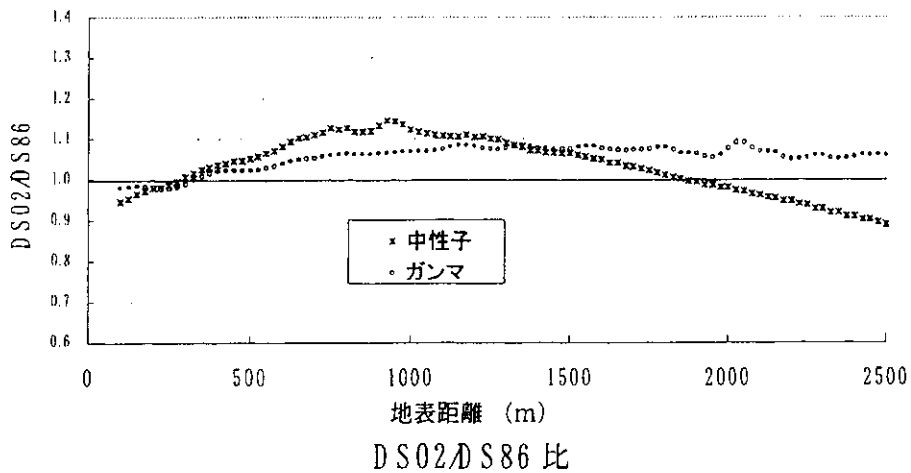
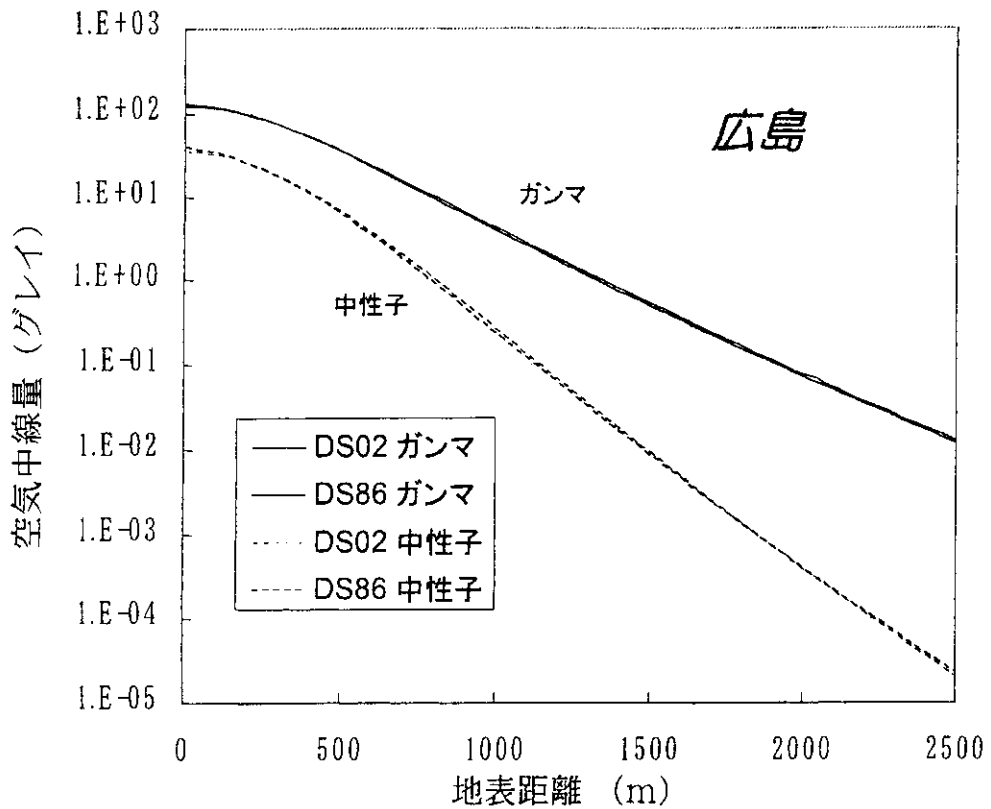


図16. DS02とDS86の比較、広島

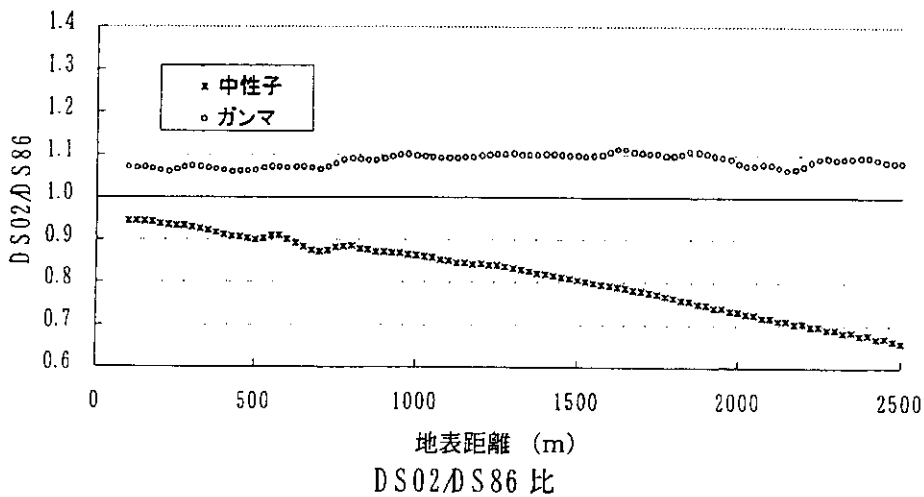
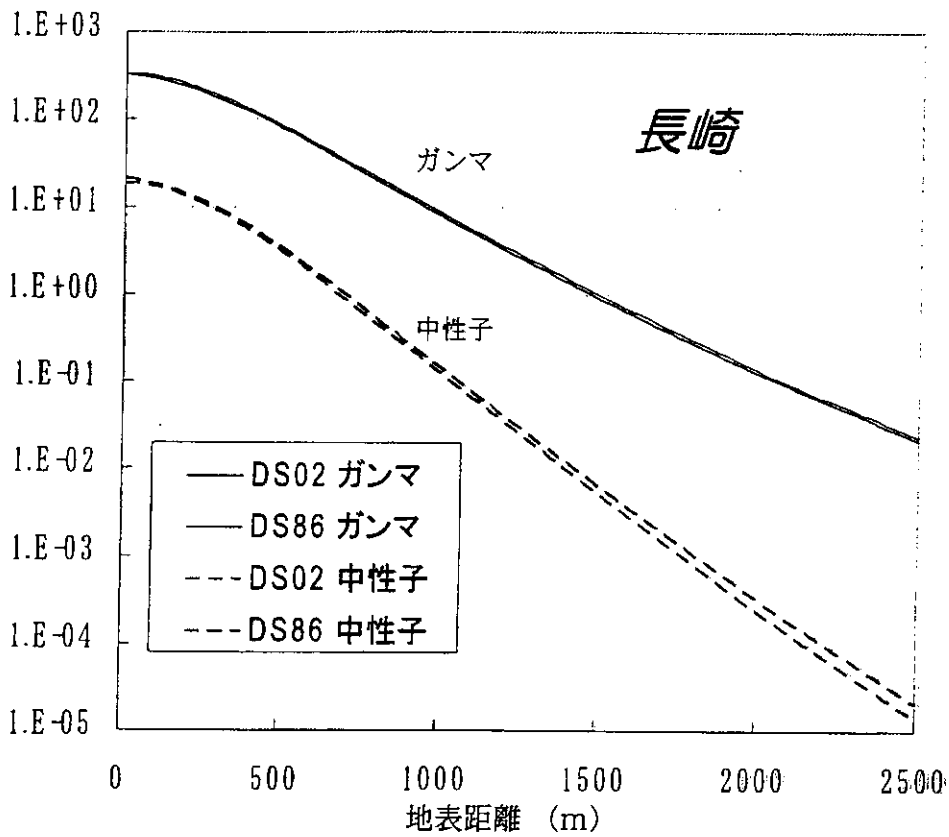


図17. DS02とDS86の比較、長崎

長崎に関してもDS02線量とDS86線量とであまり大きな変動はない。ガンマ線量は約10%の増加となっているが、DS02中性子線量はDS86線量よりも低く、その比率も増加し約30%くらいになる。勿論、中性子線量はガンマ線量に比べてはるかに小さく、かつ2000m以遠

では絶対値も非常に小さくなる。

中性子の不一致問題を解決するためには、空气中線量について、700mから1,500mの範囲で測定値が計算値を説明出来るか、計算モデルを変更して計算値と測定値との一致を主張するかであるが、長年にわたる検討によってもこれが

非常に困難なことであった。測定値は爆心地からある距離以遠になると測定可能な限界に達する。放射線のシグナルが極めて小さく、原爆由来のものとバックグラウンドやその他のノイズとの区別が困難となる。

このような状況を打開したのが、測定技術の向上である。通常の測定では用いない限界の状況での測定が実行可能なのであった。

5) 測定技術についての考察

通常の測定（放射線防護などのための）よりも低い水準の放射線を検出する特別の方法が要求される。更に、研究者は（測定者は）、計画的に用意された試料を使用して測定するのではなく、数十年前に被曝した自然のなかの試料を使用する必要がある。

ある種のガンマ線を放出する Eu-152 の測定において、岩石や建造物の材料の中に Eu-152 が放出するガンマ線と非常に良く似た放射線を放出する素材が含まれている。極端に低い水準の測定には、非常に高度な技術を要する化学処理と自然からの放射線を出来るだけ少なくする方法が不可欠となってくる。原爆放射線に関係しない放射線を注意深く区別することが要求される。実務班は、このような状況を克服するために、ワークショップを開いて解析方法について検討を重ねた。日米合同実務研究者会議（2002年9月1-12日、広島）は測定のみ話題を絞って開催した。参考資料2として日本側発表のスライド原稿を添付した。

Cl-36 の測定についても、種々の困難に直面した。測定結果の解析段階で、コンクリートと岩石で測定値に違いがあることが分かった。Cl-36 は半減期が長い（約30万年）ために、何百万年以上も地球上に存在してきた岩石中に自

然界の宇宙線などの放射線により生成される水準がある。一方、コンクリートは海水中で宇宙線を遮る機会が少ないが、ウラニウム等の影響は少ない。また、小石なども併用される。このような違いが、測定値に違いを生じ、解析を難しくしてきた。別の困難なこととして、コンクリート壁面の表面では塩素を含む雨水の影響が強く、深部と測定値に違いが生じることが分かった。

この測定作業の有効な努力として、種々の被爆距離に渡る9つの大きな試料の化学処理を組織的に行なったことがあげられる。即ち、化学処理のプロである日本分析センターに依頼して試料の化学処理を行なったことである。その後、Eu-152 の測定を、トンネルの奥深くに設置した特別な低バックグラウンド測定装置により測定した。同じ試料に対して、日・米・独の3つの異なる研究室により Cl-36 の測定を行なった。これは、異なる各種について、異なる研究室により、異なる方法で測定するという「測定の相互比較」として行なわれたものである。

新しい測定技術として、ニッケル63 (Ni-63) の測定方法が開発された。Ni-63 は速中性子と銅との相互作用により生成される核種で、1945年以降の速中性子によるすべての生成物の放射化を測定する。ニッケルと銅を分離する特別な化学処理を行なった後に、独逸・ムンヘンにある AMS (Accelerator Mass Spectrometry) 測定装置により放射化の測定を行なった。日本でも、別の方法で Ni-63 の測定を行なったが、試料が大量に必要なことと測定技術が確立していない段階で、要約結果が出始めたところである。速中性子の生成物 Ni-63 の測定値は中性子線量を直接測定できるものとして期待され、今回の中性子の不一致問題を解決する上で多大の貢献

を果たした。

日本で最初に測定された硫黄中の速中性子反応による P-32 測定データを含むすべての測定データを再解析した。試料の位置を地図上で再評価し正確な被爆距離を再評価した。爆心地からの距離の基礎となる爆心地の位置についても再評価した。近代的な地理情報システムを駆使し、戦時中の地図、最新の地図、戦前戦後の航空写真、その他あらゆる情報を用いて作業を行った。ガンマ線量の熱ルミネセンス法 (TLD) による測定値 (大半のデータは DS86 以前に測定されたものであるが、DS86 以降も若干の測定が行なわれた)、中性子放射化測定値 (こちらは、大半が DS86 以降に測定された) のすべてのデータについて再解析を行なった。その際、被曝試料の周囲の遮蔽や試料の水分含有量などについても考慮して細心の解析を総合的に行なった。その結果として、計算値の検証が行なわれ、DS02 線量体系が導入されるに至った。

6) 線量再評価活動における放影研の役割

最初にも述べたが、組織的な被爆者の線量推定は ABCC に始まったとあってよい。放影研 (前身は当時の ABCC) にとって、被爆者の健康後影響のためにも被爆者の正確な線量推定は欠かすことができない。米国側が線量推定を行なう目的は、その線量推定方法を ABCC-放影研の健康影響の調査のための被爆者の被曝線量を計算するためである。日本側の線量推定活動は、必ずしも ABCC-放影研のためとは限らずもっと学問的な要素が強かった。1970 年代後半に T65D に疑問が持たれこれが再評価されることになった際、放影研は日米合同の線量再評価の日本側の窓口として、米国側の窓口 NAS との

協力のもとに、その活動をバックアップした。

線量再評価の際に日本側の窓口としての役割のみでなく、中性子の不一致問題の解決に向けて米国側も実際の被曝試料の測定に着手し、その測定用被曝試料の収集も放影研が行なうこととなった。

最初にも述べたが、組織的な被爆者の線量推定は ABCC に始まったとあってよい。放影研 (前身は当時の ABCC) にとって、被爆者の健康後影響のためにも被爆者の正確な線量推定は欠かすことができない。当時の ABCC は、米国の ORNL とともに千葉の放医研・物理部にも、線量測定のために顧問をお願いしていた。米国側は、核実験などの実験に基づいて空中線量曲線 (空気中線量と被曝距離との関係) を開発 (T57D、特に T65D) した。放医研は実際の被曝試料の測定を行ない、独立して空気中曲線を作成した。両者は同じような結果を示し米国側の作成した線量体系が、日本側で検証されたとして健康影響の評価などに使われてきた。放影研は、この当時から放医研・物理部の先生方のための測定用被曝試料の収集に携わっていた。被曝試料である煉瓦・屋根瓦・タイルなどガンマ線量測定のために、中性子測定のためには鉄材を収集した。

T65D の作成については、まだこの線量そのものが疑問を持たれたわけではなく、また線量が確立していたわけでもないが、とにかく測定をすることが中心だったようで、被曝位地や周囲の遮蔽状況の正確さはさして要求されていなかった。T65D から DS86 への変更の際も、試料の収集にそれほどの要求がなかったのは、各試料に対して残されている記述からも窺い知れる。

DS86 な再評価のときは、DS86 に対する中性子の不一致問題の検討のための測定というは

っきりした目的があり、測定値そのものが出来るだけ正確なものであることが要求された。そのために、被爆試料の収集にあたっては、被曝位地や周囲の遮蔽状況がはっきりしているものに限定し、収集したすべての試料について、その詳細を記述した。

収集作業の中でも、長崎の銅試料の収集には莫大な費用と労力を要した。従来の熱中性子の測定に加えて、中性子線量をより直接評価できる銅中の速中性子由来の核種 Ni-63 を測定する技術が確立し、これが決めてとなるといわれた。早速、放影研は銅試料の収集に着手したが、現在までに残された銅試料は極めて少なかった。それでも広島では結果的には 10 地点ほどの試料を収集できたが、長崎は全然見当たらず、最終的には資料館の展示物を最新の技術で細心の注意を払って数点収集できた。残念なことに素

材に問題があり測定することが出来なかった。ともかく、放影研は単独であるいは広島の先生方との協力のもとに、要望のあった試料を最大の努力を払って収集し、被爆に関する情報の詳細を記述しデータベース化して便宜を図った。

7) 出力に関する考察

広島・長崎に投下された原爆の出力に関しては、T65D の再評価の際も検討された。長崎については、T65D の 22kt から DS86 では 21kt へと微調整された。一方、広島については、T65D の 12.5kt から DS86 では 15kt へと大幅に増加した。しかし、当時でさえまだ変更は不十分で 17kt という数値も議論となった。DS86 に使用された広島・長崎の出力は種々の推定値の平均として図 18 と図 19 に纏められている。

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	

図 18. DS86 における広島爆弾の出力推定

今回の再評価でも検討はしたものの、最後の最後まで変更の対象とはならなかった。しかし、広島の中性子の不一致問題解決のためにはどう

しても爆心地付近の測定値と計算値が一致することは不可欠と判断され、爆発高度と出力との組み合わせについて測定値と計算値一致度を睨

みながら、総合的に判断のもとに広島の実出力は 21kt と決定した。原爆の炸裂点の高度は 600m

を越す値についても検討されたが、総合判断として 600m に決定した。

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

図 19. DS86 における長崎爆弾の出力推定

7) 放影研での今後の作業

(1) 原爆被爆者における放射線の健康後影響調査

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、被爆した集団と被爆していない集団との間である特定の病気の頻度を比較する、あるいは、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が必要となる。

(2) 固定集団の設定と追跡調査

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、放影研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。

(3) 被爆者の個人被曝線量の計算

一方、被爆者との面接等により既に得た被曝位置、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DS86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。参考までに、

被爆者との面接により作成された遮蔽歴の例を図20に示す。この図は典型的な木造家屋ないの被曝例である。

今回の線量再評価により構築された体系DS02により、一人一人の被爆者の空気中線量を計算する。同時にDS86で考慮された木造家屋などの遮蔽による効果も含めた被曝線量も計算する。DS86では考慮してない地形（広島の比治山、長崎の金毘羅山、共に爆心地から約2-3kmの位置にある）の評価なども今回の作業に加える予定である。この点は、特に最近重要となってきた放射線の低線量影響の評価にとって重要である。

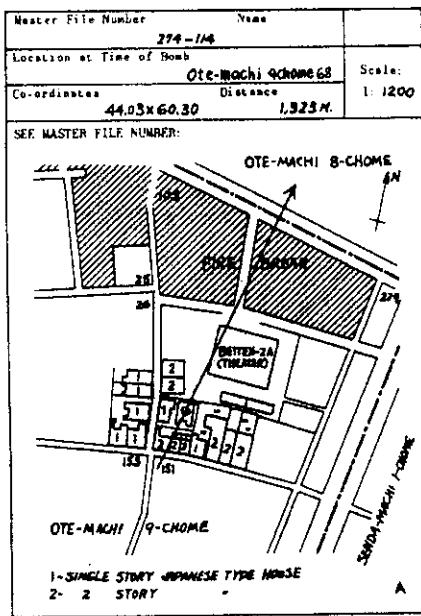


FIGURE 4 Shielding History
図4 遮蔽歴調査図面

- A. Site Plan 区画図
- B. Floor Plan 階取図
- C. Cross Section 断面図

図13 被爆者との面接により作成した遮蔽例

D. 結論

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ているが、広島の中性子に関する計算値と測定値の不一致を中心と

する不確実性が存在し、線量評価体系そのものの信頼性が疑われてきた。日米合同で長年に渡りこの線量体系全般について評価検討を続けてきた結果、日米合同原爆線量実務研究班により新しい線量体系DS02が構築され、本年3月に日本の厚労省と米国のエネルギー省合同の上級

検討委員会により承認されるに至った。今後は、被爆者の被曝線量の計算にはこの DS02 が使用されることとなる。

DS86 から DS02 への大きな変更は、広島における爆弾の出力を 15 kt から 16 kt に、爆発高度を 580 m から 600 m に修正したことである。DS02 は DS86 に比べると格段に精密な計算となっているものの、特に、空気中線量全般に関して大幅な変更はない。

日・米・独によるガンマ線（熱ルミネッセンス）および中性子（放射化による残留放射能）に関する測定値は、爆心地から少なくとも 1.2 km の地点までは、DS02 の計算値と全般的に極めて良く一致している。爆心地から 1.2–1.5 km 以遠での中性子の測定値と計算値の相違については、線量の絶対値が小さくバックグラウンドとの区別が困難なことなど測定値の不確実性によるものと判断されている。本研究でも扱った被曝試料測定相互比較は中性子の不一致問題の解決に大きく貢献するものであった。

参考までに、2000 年度以降の日米実務班研究者・研究協力者の名前と所属を列挙しておく。本文中に姓名のみを使用した名前についてはこれを参照されたい。

(A) 日本側実務班研究者・研究協力者

葉佐井 博巳（広島国際学院大学）班長

丸山 隆司（放射線医学総合研究所）

奥村 寛（長崎大学医学部原爆後障害医療研究施設）

柴田 徳思（高エネルギー加速器研究機構 放射線科学センター）

星 正治（広島大学原爆放射能医学研究所）

小佐古 敏荘（東京大学原子力総合研究センタ

一)

静間 清（広島大学大学院工学研究科）

中西 孝（金沢大学理学部化学科）

藤田 正一郎（放射線影響研究所統計部）

今中 哲二（京都大学原子炉実験所）

小村 和久（金沢大学理学部附属低レベル放射能実験施設）

長島 泰夫（筑波大学医療技術短期大学部）

柴田 誠一（京都大学原子炉実験所）

遠藤 暁（広島大学大学院工学研究科）

石川 正純（広島大学原爆放射能医学研究所）

岩谷 和夫（広島県立保健福祉大学放射線学科）

加藤 一生（広島県立保健福祉大学）

高田 純（広島大学原爆放射能医学研究所）

(B) 米国側実務班研究者・研究協力者

Robert W. Young (Defense Nuclear Agency (retired)) 班長

George D. Kerr (Oak Ridge National Laboratory (retired))

Robert F. Christy (California Institute of Technology)

Harry M. Cullings (Radiation Effects Research Foundation)

Stephen D. Egbert, (Science Applications International Corporation)

Alexandra R. Heath (Los Alamos National Laboratory)

Dean C. Kaul (Science Applications International Corporation)

Robert T. Santoro (Oak Ridge National Laboratory)

Tore Straume (University of Utah)

Paul P. Whalen (Los Alamos National Laboratory)

Stephen W. White (Los Alamos National

Laboratory)

Joe V. Pace (Oak Ridge National Laboratory)

Alfredo A. Marchetti (Lawrence Livermore
National Laboratory)

Jeffrey E. McAninch (Lawrence Livermore
National Laboratory)

James A. Roberts (Science Applications
International Corporation)

Werner Ruehm (Ludwig Maximilians
Universitaet, Munich)

Gunther Korschinek (Technical University of
Munich)

広島原爆の被曝線量評価の問題点

広島大学 原爆放射能医学研究所 星 正 治

Dosimetry study 1986 (DS86) was constructed by the effort of US and Japanese groups and used afterward at Radiation Effects Research Foundation. The DS86 has been used to estimate radiation risks for cancer induction of radiation based on the epidemiological study of atomic bomb survivors. However, discrepancy between neutron-induced data and calculation based on DS86 has been observed. The discrepancy was found in the evaluated neutron dose in Hiroshima. To find the reason of the discrepancy, experimental study were continued for more than 10 years among Japanese and US groups. However there was no answer. In this review, the activities of the Japanese groups are explained and a model to explain the discrepancy is shown. The new US and Japan joint study is beginning and effort to evaluate atomic bomb dose for survivors are still continuing.

Key words: Neutron, Hiroshima atomic bomb, dosimetry, DS86, neutron discrepancy

1. はじめに

広島・長崎の原爆の放射線量見直しが1986年に行われた。この線量のことを線量評価体系 (Dosimetry System 1986 (DS86)) と呼んでいる¹⁾。その線量再評価の作業は日米の共同研究で進められた。日本側は実験データを取り、アメリカ側の計算と比較することをおもな目的とした。まず花崗岩、コンクリートなどの原爆の被曝試料を収集し中性子で誘導され生成した放射能 (コ

バルト 60, ユーロピウム 152) を測定した²⁾⁻¹²⁾。これは中性子の線量評価に使うためである。またガンマ線に対しては屋根瓦やレンガ、タイルを収集し、熱蛍光法により線量を評価した。ここでの問題点は、ガンマ線は熱蛍光法での線量評価は直接ガンマ線の線量ができる。しかしながら、人体への被曝は数 100 keV 以上の中性子が中心であるのに、これらの放射化は熱中性子による。したがって、直接中性子の被曝線量を評価するデータとしない。したがって、被曝者の線量を決定する上ではこの熱中性子の量から速中性子の線量評価をしなければならぬことであった。

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

この DS86 が出来上がった後、私どもの広島グループや金沢、長崎のグループ、放射線影響研究所、などで引き続き被曝試料の測定を行ってきた。データがある程度集まってくると、図 1 にユーロピウムの測定と DS86 に基づいた計算との比較を示すが、系統的なずれが見いだされた⁶⁾。その後原因を解明するため MCNP による計算を行うことにした。原因解明の上で、問題となるのは爆発地点のガンマ線や中性子のスペクトルのチェックが基本的にできないことである。すなわち核爆弾の構造を調べたりすることは私どもの仕事ではない。したがって他の原因を一つ一つチェックし正しいかどうかつづいてゆく方法で進めることにした^{23), 25)-27)}。まず計算精度を確かめる作業を行った。1. ベンチマークテストを MCNP コード²⁴⁾ を使って行いその精度を確認した、その後原爆本体から出た中性子のスペクトルに問題がある

Problems in Dosimetry Study in the Hiroshima Atomic Bomb
Masaharu HOSHI (Research Institute for Radiation Biology and Medicine)
〒734-8553 広島市南区霞 1-2-3
TEL: 082-257-5872, FAX: 082-257-5873
E-mail: mhoshi@hiroshima-u.ac.jp

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ら良いかを検討した。これら1, 2について報告する。

この作業全体において使用したコードはMCNP3AとMCNP4Aである。主として使用した核データはENDF/B-IV, V, VIであり、その他のMCNPにつけてあるデータおよびJENDL3²⁸⁾も必要に応じて使った。

ところで、筆者はこのほか、チェルノブイリやセミパラチンスクにおける被曝者の被曝線量評価も進めている。最近では東海村でJCOの事故も起こった。チェルノブイリやセミパラチンスクでは、中性子の被曝はなくもっぱら核分裂に伴うフォールアウトからのガンマ線の被曝を受けた。それらのガンマ線による被曝は体の外から受けた場合と体の中にフォールアウトを取り込んで被曝した場合の2通りがある。JCOの事故の場合は主として中性子が問題であり、広島長崎の中性子の線量評価と共通する。前者のチェルノブイリとセミパラチンスクの場合は、外部被曝と内部被曝とを別々に、各種別に評価する必要がある。たとえば内部被曝を考えると、セシウムは全身に分布し、ベータ線とガンマ線の被曝を与える。生物学的な半減期が100日とされ食物による摂取がなくなれば減衰する。ヨードは甲状腺に集まり部分的な被曝となる。物理的半減期が8日である。プルトニウム、ストロンチウムは骨に沈着しほとんど生物学的に代謝して減衰しない、など線量評価は大変複雑である。これらについて現地の科学者と解決に努力している。

これらの目的は疫学的調査により発ガンなどの影響を調べ、ある線量でガンの発生がどのくらいであるかを求めることである。放射線の危険度(リスク)がわかるわけである。放射線の危険度を求めると、被曝者だけでなく我々一般人も医療被曝などのリスクがわかり安全性を確認することができる。線量を正確に求めることは、放射線の危険度を正確に求めることである。原爆とチェルノブイリやセミパラチンスクの被曝と比べると、その違いは、線量率、すなわち瞬時被曝と数週間から数カ月数年の長期低線量被曝である。低線量低線量率被曝のリスクは瞬時被曝の半分ぐらいという意見もあり、これらを確認することが最近重要になってきている。

このレビューでは広島・長崎の線量評価について問題点を説明するが、正確な線量評価を行い、正しく放射線の危険度を知る努力はこれからも引き続き進めていく。

2. ベンチマークテスト

原爆の放射線源からの地表そして放射化までの過程の

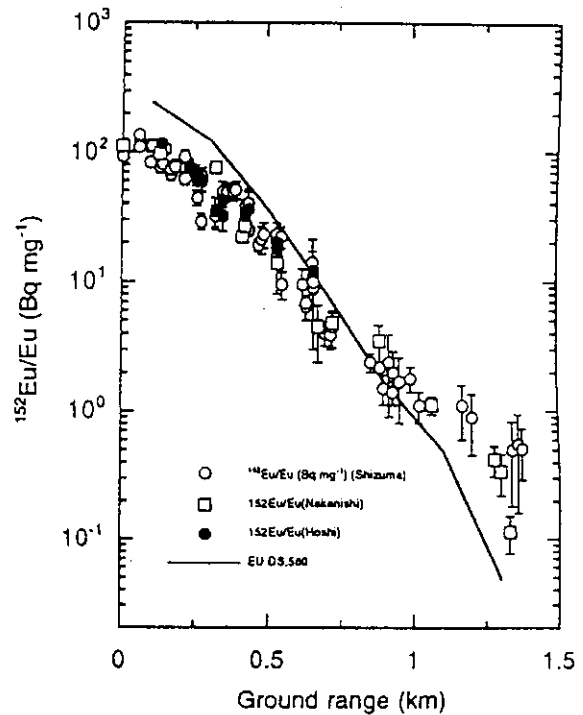


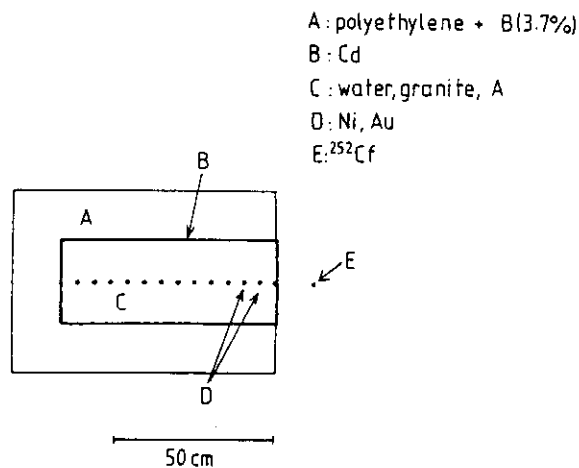
図1 広島のエーロビウム152の比放射能の測定結果と計算

実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の核分裂中性子と考えた場合のモデルによる計算。実線はDS86と一致している。球形のモデルでもDS86の計算として使えることを示している。細い点線(一番上)はDS86のフルエンスで裸の核分裂中性子と考えた場合²⁷⁾。

計算を行う上でMCNPがどこまでどれくらいの精度で計算できるのかチェックするため、ベンチマークテストを行った^{25), 26)}。計算で使った中性子の放出数は 10^5 から 5×10^6 個である。

広島大学原爆放射能医学研究所には²³⁵Uのカルフォルニウム252核分裂中性子線源がある。これはもともと原爆放射線と同様な線源での生物影響を調べる目的で導入された。この装置で核分裂中性子の物質中での透過、放射化の実験を行い、MCNPの計算と比較検討をした。図2がその実験系である。中心には5cmの厚さで25cm×25cmの広さをもつ板を65cmの厚さになるよう並べた。その周りには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以上になるように並べた。

中心の吸収体はいろいろな成分をもった材質を試した。ナイロン、アクリライト、水、塩化アンモニウムの粉末、



Cross sectional view of the bench mark test

図2 ベンチマークテストに使ったシステムの断面図

Aはカリフォルニウム252線源(^{252}Cf)、Bは中性子スペクトルを計算した場所を示す。Cは中性子の検出に使った金属箔の位置、Dはいろいろな材質を使った吸収体(モデレータ)、Eは0.5 mm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)。

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5 cm ごと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、65 cmの厚さは大体爆心から1,500 m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があることであった。この遮蔽のため15 cm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無くした。そうして入射の時と比べて100分の1から10,000分の1近くまでの減衰するところまで測定と計算とを比較した。これらの結果は星ら、岩谷らに示している^{25), 26)}。

次に大きな問題は金属箔の自己吸収の問題であった。これには最終的には実験で求めた。放射化の実験には

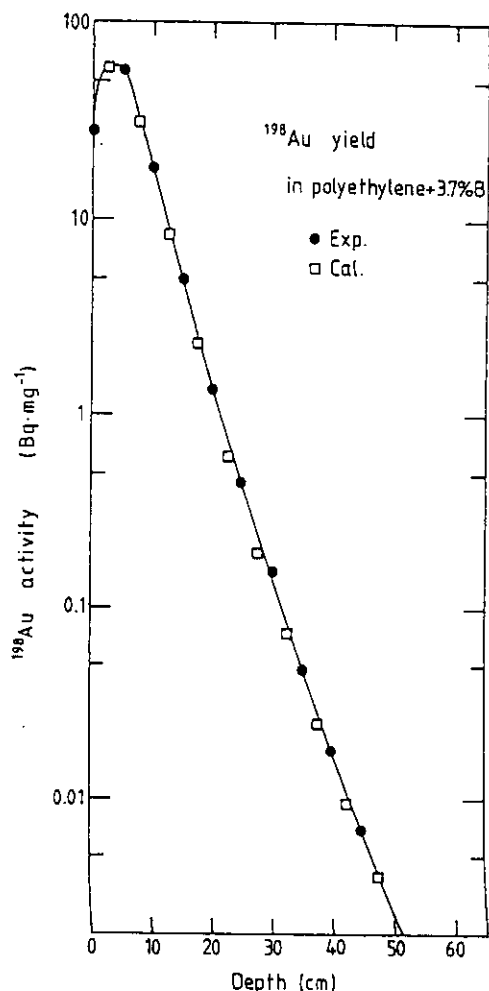


図3 ボロン入りのポリエチレン(ニューライト)を使った場合の計算と実験値の比較
 放射化箔は金で熱、熱外中性子を検出した。これ以外の水、岩石、塩化アンモニウムなど各種の材質においてもよい一致を示す²⁵⁾。

50ミクロン程度の厚さの金などを使った。自己吸収の見積もりには1ミクロンまでの各種の厚さの箔を放射化しゼロの厚さの場合を外挿して求めた。この自己吸収の解決は2~3倍の自己吸収があるので重要であった。詳しくは星ら²⁵⁾に示す。

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%以内ぐらいで合っていることがわかった。これは驚くほど合ったといった印象である。実験の方だけでもまずカリフォルニウム線源のフラックスの実験的な決定がある。これは電離箱の測定を基に決定した。次に減衰体のジオメトリの精度、放射化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

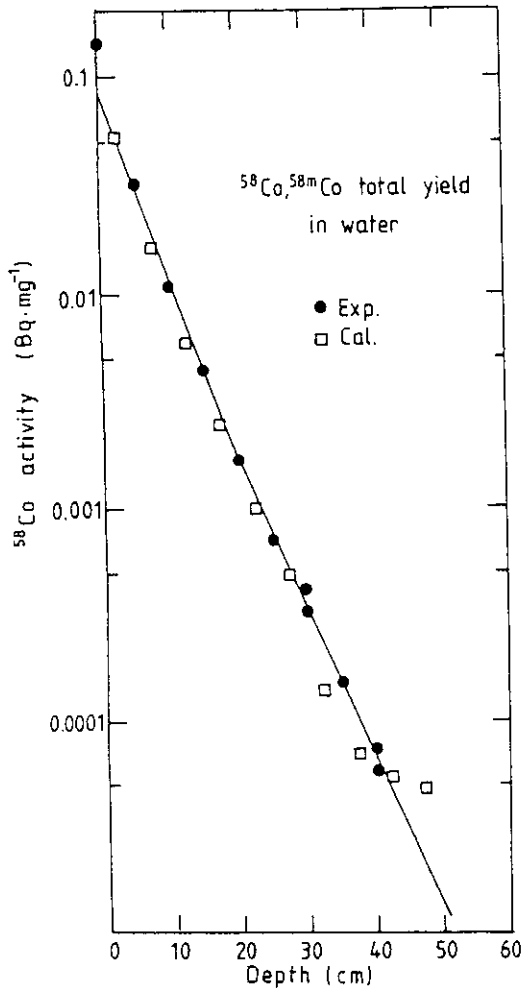


図4 図3と同様な比較
Ni(n, p)反応による速中性子を検出した。これは水の場合であるが、いろいろな材質においてもよい一致を示した²⁵⁾。

の統計精度の問題、等々がある。これらをすべて含めて大体30%以内で合った。

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

3. 広島原爆の中性子の輸送計算と中性子の吸収に伴うガンマ線の計算

中性子の輸送計算に使ったジオメトリーを図5に示す。空気や土壌の成分にはDS86 (RERF 1987) で使われた値を使用した。この空気の数値についてもチェックをした。原爆投下の気象状態に近いときを選んで上空まで実測した。この結果使用した空気の数値のデータは正しいことがわかった³⁰⁾。

原爆の中心には核分裂中性子をおき、その周りに5

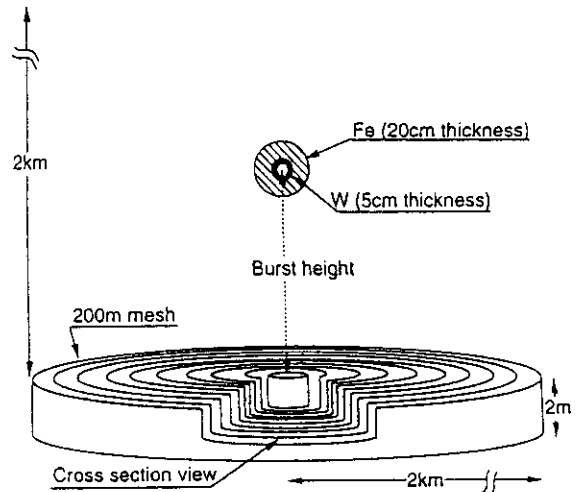


図5 広島原爆の輸送計算に使ったジオメトリー
ユーロピウム生成量計算に使う中性子のスペクトルは地表から地面の中に2 cm 入ったところまで、すなわち2 cmの厚さの部分の計算結果を使った。ガンマ線の場合は地表1 mの位置を使った。爆発点の高さはDS86では580 mである。90 m引き上げた場合の670 mの位置での計算も行った。

cm厚の球殻状のタングステン、その外側に20 cm厚の球殻状の鉄をおいた。これらはDS86のスペクトルを再現することを屋ら²⁷⁾が示している。全体は2 kmの高さで半径2 km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580 mで爆発の中心とした。仮説を考える場合は670 mの高さも試した。土壌は2 mの厚さとし200 mごとの半径の円筒を考えた。その中で中性子のエネルギースペクトルを計算した。(100 mメッシュの場合も試したが、200 mメッシュでも問題なかった。) 計算結果はそれぞれの同心円の間100 m, 300 m, 500 m, 700 m...を計算点としてプロットした。ガンマ線の場合は地表1 mの点でも計算を出した。

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

中性子の空気や、土壌による捕獲に伴って発生する2次ガンマ線の計算についても同様にDS86と比較した。ガンマ線の種類は4通りに分類されていて、それらは1. 即発ガンマ線、2. 即発2次ガンマ線、3. 遅発ガンマ線、4. 遅発2次ガンマ線である。しかしながらおも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

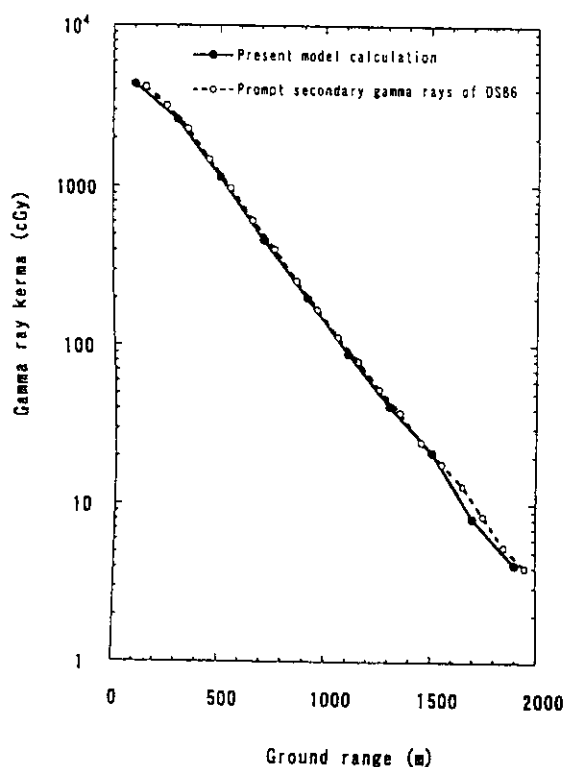


図6 即発中性子が空気や土と反応して発生した2次ガンマ線(即発2次ガンマ線)のDS86との比較。DS86と一致している。そのほかの成分についてもDS86の計算と矛盾はない。

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。これらも良い一致を示している。

4. 広島原爆の系統的なずれの問題

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

広島原爆の中性子により生成した放射能には当時電柱の碍子に使われていた硫黄との(n, p)反応で生成した、リン32もある。この反応は速中性子によって起こされるので今までの反応と違う。また被爆者への被曝線量はこの速中性子によって主として決まり熱中性子の影響は

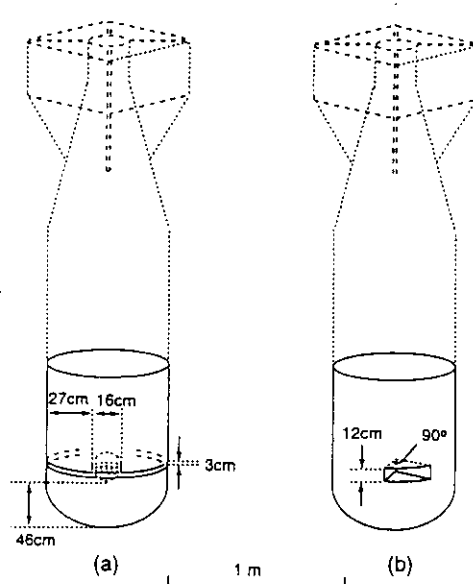


図7 より詳細な広島原爆の形を再現した場合の、クラックの仮定。左側はウランの位置を含む形で水平に割れた場合。割れ目の幅は3cmぐらいで計算とデータが合ってくる。右側は90度方向のみにクラックができた場合。文献30を参考に改変。

小さい。この放射能³²Pの半減期は短くもう存在していないが、当時のデータは残っていて、DS86の際には再評価された。そしてこのデータはDS86と合っていた。測定により求められた値と計算値との比を取ると、熱中性子の結果は一致して系統的なずれがあることがわかる。近距離でデータが計算より小さく遠距離で大きい。このことは図8の上に表示されている。もし実験値と計算値が一致していたらこの日は1になるはずである。

そこで問題を検討していたが、解決のための良い方法がなかなか見つからなかった。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わかっていなかった。問題点は何らかのパラメータを変更し、熱中性子のデータを合わせると、速中性子が合わなくなることである。両者を同時に合わせる事が困難であった。そうしているうちに球形のシンプルな原爆に底が割れたと考えがうかんだ。広島原爆はガンタイプといわれ、出口をふさいだ大砲の出口側と砲弾の入口側に二つのウラン235を配置し火薬で二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。そこで二つのウランの衝突の際、原爆の底が抜けたように割れたと仮定した。この隙間から連鎖反応の終わりの時期

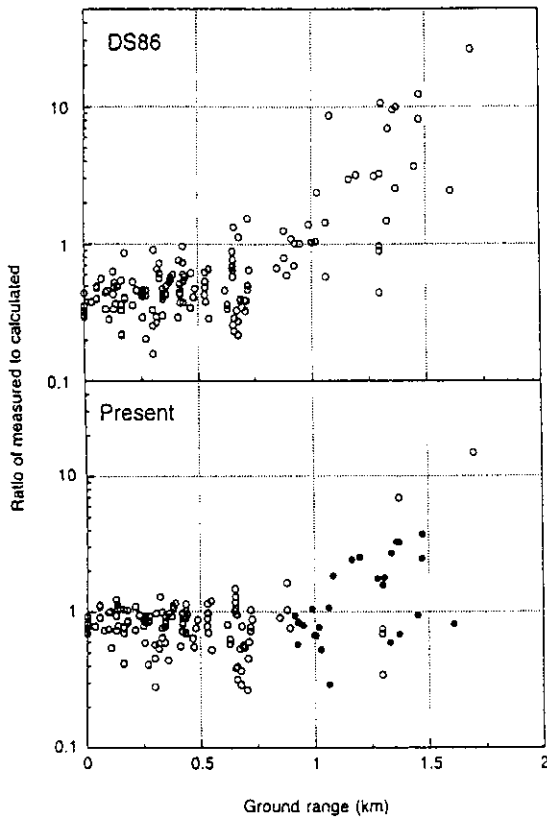


図8 実験値と計算値との比
 上の図はDS86との比較で、系統的なずれがあることがわかる。下の図は図7のようなクラックを仮定した場合、白丸が図7左の等方的な割れ方の場合、黒丸は非等方で、割れた中心を南東方向に向けた場合の計算。非等方の計算は遠距離をよく合わせるが、そのほかの方向で10倍前後高いデータも存在する。文献30より引用。

に裸の核分裂中性子が放出されたと考えた²⁷⁾。計算ではそれぞれDS86の中性子フルエンスを仮定して計算した。このときは割れた時間が最後の5%とした。こうしてさらに中性子が発生した高度を90m引き上げた。この仮定はリー32のデータがDS86と合っているので一つのパラメータを変えただけでは、ずれてしまうので必要である。もちろんこれらの仮定については承認されているわけではない。ここでの努力は可能性として示しアメリカ側に検討を迫るためのものである。

こうすると確かに1km以内ではすべてのデータが一致してくる²⁷⁾。しかしながら1kmより以遠ではまだ計算と一致させることができない。このモデルは単純なモデルであるが、最近より厳密に広島原爆の形を再現してみた。図7にその模式図を示す³¹⁾。こうして平行に割れたモデルを考え、その隙間を図7左のように3cmとす

ると、遠距離まで比較的再現できることがわかった。さらに図7右のように割れ方が等方的でなく4分の1だけ割れたとするとさらによく合うことが示せる³¹⁾。この場合について計算との比較を示すと、図9のようになる。これでだいたい合ってきたともいえる。

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

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

6. おわりに

原爆線量の問題について述べた。この問題は原因を考えるといった興味だけではなく、被爆者の線量評価が放射線影響研究所で進められてきた疫学調査と合わせた、放射線の人への危険度を求めることに直結しているため大切である²⁾。広島・長崎の被爆試料は建物などが急速に失われていて、ほとんどない状態である。すでに採取した試料から測定を行っている状態であり、今回を逃すと困難になってくる。問題点は現在も明確ではないが、広島グループとして引き続き解決への努力を進めていく。

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

<星 正治 略歴>

1. 最終学歴・学位等

昭和23年 1月 2日生

昭和45年 3月 25日 大阪大学理学部物理学科卒

昭和47年 3月 25日 同上 修士課程終了

昭和47年 4月 1日 広島大学理学部物理学科博士課程入学

昭和52年 3月 25日 博士課程単位修得

昭和52年 3月 31日 同上 退学

昭和52年 5月23日 理学博士

2. 職歴

昭和55年 4月 1日 広島大学原爆放射能医学研究所
助手

平成 4年 1月 1日 同上 助教授

平成 6年11月 1日 同上 教授

3. 現在従事している研究

広島長崎の被曝線量評価, 医学生物の研究のために使用する中性子とガンマ線の線量評価, チェルノブイリ, セミパラチンスクの被曝者の被曝線量評価とその人への影響

参考文献

- 1) Radiation Effects Research Foundation, "US-Japan joint reassessment of atomic bomb radiation dosimetry in Hiroshima and Nagasaki, final report," Vols. 1 and 2, ed. by W. C. Roesch, Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima (1987).
- 2) International Commission on Radiological Protection, "1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection," Pergamon Press, Oxford, ICRP Publication 60, Ann. ICRP, 21 (1-3) (1991).
- 3) H. Hasai, K. Iwatani, K. Shizuma, M. Hoshi, K. Yokoro, S. Sawada, T. Kosako, and H. Morishima, *Health Phys.*, 53, 227 (1987).
- 4) M. Hoshi and K. Kato, "US-Japan joint reassessment of atomic bomb radiation dosimetry in Hiroshima and Nagasaki, final report," Vol. 2, ed. by W. C. Roesch, Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima (1987), pp. 252-255.
- 5) M. Hoshi, H. Hasai, and K. Yokoro, *J. Radiat. Res. Suppl.*, 20 (1991).
- 6) M. Hoshi, K. Yokoro, S. Sawada, K. Shizuma, H. Hasai, T. Oka, H. Morishima, and D. J. Brenner, *Health Phys.*, 57, 831 (1989).
- 7) K. Shizuma, K. Iwatani, H. Hasai, T. Oka, H. Morishima, and M. Hoshi, *J. Radiat. Res.*, 33, 151 (1992).
- 8) K. Shizuma, K. Iwatani, H. Hasai, M. Hoshi, T. Oka, and H. Morishima, *Health Phys.*, 65, 272 (1993).
- 9) K. Shizuma, K. Iwatani, H. Hasai, T. Oka, M. Hoshi, S. Shibata, M. Imamura, and T. Shibata, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 384, 375 (1997).
- 10) K. Shizuma, K. Iwatani, H. Hasai, M. Hoshi, and T. Oka, *Health Phys.*, 72, 848 (1997).
- 11) T. Nakanishi, T. Morimoto, T. Komura, and M. Sakanoue, *Nature*, 302, 132 (1983).
- 12) T. Nakanishi, H. Ohtani, R. Mizuochi, K. Miyaji, T. Yamamoto, K. Kobayashi, and T. Imanaka, *J. Radiat. Res. Suppl.*, 32, 69 (1991).
- 13) T. Straume, R. C. Finkel, D. Eddy, P. W. Kubik, H. E. Gove, P. Sharma, S. Fujita, and M. Hoshi, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, 52, 552 (1990).
- 14) T. Straume, S. D. Egbert, W. A. Woolson, R. C. Finkel, P. W. Kubik, H. E. Gove, P. Sharma, and M. Hoshi, *Health Phys.*, 63, 421 (1992).
- 15) T. Straume, L. J. Harris, A. A. Marchetti, and S. D. Egbert, *Radiat. Res.*, 138, 193 (1994).
- 16) F. Arakatsu, K. Kimura, S. Shimizu, T. Hanatani, R. Ueda, R. Ishiwari, I. Takagi, S. Kondo, H. Takase, K. Aoki, K. Ishizaki, R. Ueda, E. Hondo, Y. Nishikawa, S. Takai, T. Horishige, and M. Murao, in "the Science Council of Japan, Collection of Investigation Reports on the Investigation of Atomic Bomb Casualties," ed. by Committee for Publication of Investigation Reports on the Atomic Bomb Disaster, Japan Science Promotion Society, Tokyo (1953), pp. 5-10.
- 17) F. Yamasaki and A. Sugimoto, in "the Science Council of Japan, 1953, Collection of Investigation Reports on the Investigation of Atomic Bomb Casualties," ed. by Committee for Publication of Investigation Reports on the Atomic Bomb Disaster, Japan Science Promotion Society, Tokyo (1953), pp. 16-18.
- 18) F. Yamasaki and A. Sugimoto, in "US-Japan joint reassessment of atomic bomb radiation dosimetry in Hiroshima and Nagasaki, final report," Vol. 2, ed. by W. C. Roesch, Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima (1987), pp. 246-247.
- 19) S. Shimizu and T. Saigusa, in "US-Japan joint reassessment of atomic bomb radiation dosimetry in Hiroshima and Nagasaki, final report," ed. by W. C. Roesch, Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima (1987), pp. 266-268.
- 20) T. Hamada, in "US Japan Joint reassessment of atomic bomb radiation dosimetry in Hiroshima and Nagasaki, final report," Vol. 2, ed. by W. C. Roesch, Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima (1987), pp. 272-279.
- 21) T. Hashizume, T. Maruyama, A. Shiragai, and S. Tanaka, *Health Phys.*, 13, 149 (1967).
- 22) G. D. Kerr, F. F. Dyer, J. F. Emery, J. V. Pace, III, R. L. Brodzinski, and J. Marcum, "Activation of cobalt by neutrons from the Hiroshima bomb," Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN (1990), Report No. ORNL-6590.

広島原爆の被曝線量評価の問題点

- 23) M. Hoshi, S. Sawada, T. Nagatomo, Y. Neyama, K. Marumoto, and T. Kanemaru, *Health Phys.*, 63, 656 (1992).
- 24) J. F. Briesmeister, "MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code," version 4A. LA-12625-M, Manual UC-705 and 700 (1993).
- 25) M. Hoshi, M. Hiraoka, N. Hayakawa, S. Sawada, M. Munaka, A. Kuramoto, T. Oka, K. Iwatani, K. Shizuma, H. Hasai, and T. Kobayashi, *Health Phys.*, 63, 532 (1992).
- 26) K. Iwatani, M. Hoshi, K. Shizuma, M. Hiraoka, N. Hayakawa, T. Oka, and H. Hasai, *Health Phys.*, 67, 354 (1994).
- 27) M. Hoshi, J. Takada, T. Oka, K. Iwatani, K. Shizuma, and H. Hasai, in "Nagasaki symposium radiation and human health," ed. by S. Nagataki, and S. Yamashita, Elsevier Science B. V. (1996), pp. 175-191.
- 28) K. Shibata, T. Nakagawa, T. Asami, T. Fukahori, T. Narita, S. Chiba, M. Mizumoto, A. Hasegawa, Y. Kikuchi, Y. Nakajima, and S. Igarashi, Japan Atomic Energy Research Institute, JAERI-13, 19 (1990).
- 29) M. L. Gritzner, and W. A. Woolson, in "US-Japan joint reassessment of atomic bomb radiation dosimetry in Hiroshima and Nagasaki, final report," Vol. 2, ed. by W. C. Roesch, Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima (1987), pp. 283-292.
- 30) M. Hoshi, S. Sawada, T. Nagatomo, Y. Neyama, K. Marumoto, and T. Kanemaru, *Health Phys.*, 63, 656 (1992).
- 31) M. Hoshi, S. Endo, J. Takada, Y. Nitta, M. Ishikawa, K. Iwatani, T. Oka, S. Fujita, K. Shizuma, and H. Hasai, *J. Radiat. Res.*, in press.

参考資料 2

日米合同実務研究者会議（2002年9月11-12日、広島）日本側スライド原稿抜粋

1. Results of Cl-36 measurements

Y. Nagashima

(資料-1) - (資料-14)

2. Eu-152 measurements in Hiroshima and Nagasaki

K. Komura

(資料-15) - (資料-23)

3. Measurements intercomparison in Hiroshima

M. Hoshi

(資料-24) - (資料-47)

4. Eu-152 measurements for intercomparison

K. Komura

(資料-48) - (資料-55)

5. Ni-63 measurements of Hiroshima copper samples

T. Shibata

(資料-56) - (資料-72)

6. Eu-152 depth distribution: Comparison between measurement and calculation

T. Imanaka

(資料-73) - (資料-77)

7. TL measurements of ceramic materials for the reexamination of the DS86

T. Maruyama

(資料-78) - (資料-81)