

厚生労働科学研究研究費補助金
厚生労働科学特別研究事業

原子爆弾の放射線に関する研究

平成14年度 総括・分担研究報告書

主任研究者 平 良 専 純

平成15(2003)年3月

研究班組織

主任研究者 平 良 専 純 (財団法人放射線影響研究所副理事長)

1. 線量評価体系 DS86 から線量評価体系 DS02 へ

主任研究者 平 良 専 純 (財団法人放射線影響研究所副理事長)

分担研究者 藤 田 正一郎 (財団法人放射線影響研究所統計部副部長)

研究協力者 葉佐井 博 巳 (広島国際大学学長)

星 正 治 (広島大学原爆放射能医学研究所教授)

静 間 清 (広島大学大学院工学研究科教授)

今 中 哲 二 (京都大学原子炉実験所助手)

陶 山 昭 彦 (財団法人放射線影響研究所長崎疫学部部長)

2. 原爆放射線被曝とがん罹患ならびに死亡に関する文献的検討

分担研究者 児 玉 和 紀 (財団法人放射線影響研究所疫学部部長)

藤 原 佐枝子 (財団法人放射線影響研究所臨床研究部副部長)

研究協力者 笠 置 文 善 (財団法人放射線影響研究所疫学部副部長)

山 田 美智子 (財団法人放射線影響研究所臨床研究部放射線科科長)

小 山 幸次郎 (財団法人放射線影響研究所疫学部室長)

3. 米国における放射線被ばく訴訟の検討

分担研究者 鈴 木 元 (財団法人放射線影響研究所臨床研究部部長)

目 次

I. 総括報告書

原子爆弾の放射線に関する研究 -----	1
平良 専純 (財団法人放射線影響研究所副理事長)	

II. 分担報告書

1: 線量評価体系 DS86 から線量評価体系 DS02 へ -----	5
平良 専純 (財団法人放射線影響研究所副理事長)	
藤田 正一郎 (財団法人放射線影響研究所統計部副部長)	
2: 原爆放射線被曝とがん罹患ならびに死亡に関する文献的検討 -----	119
児玉 和紀 (財団法人放射線影響研究所疫学部部長)	
藤原 佐枝子 (財団法人放射線影響研究所臨床研究部副部長)	
3: 米国における放射線被ばく訴訟の検討 -----	139
鈴木 元 (財団法人放射線影響研究所臨床研究部部長)	

原子爆弾の放射線に関する研究

主任研究者 平良 専純 （財）放射線影響研究所副理事長

研究要旨

本研究は、1)2002年に新しく構築された原爆放射線線量の評価システム（Dosimetry System 2002,DS02）をまとめ、2)原爆放射線とがんの関連について最近の知見を整理するとともに、3)海外の放射線被ばく事故・災害における訴訟の文献調査を行った。

1) DS86が決定されて以来、懸案であった中性子線量に関する理論値と測定値の不一致に関して、日米独の研究者があらゆる方向で計算と測定の方法に改善を加えながら研究を続けてきた結果、線量の評価システム（DS02）が作成された。DS86からDS02への大きな変更は、広島における爆弾出力および爆発高度の修正であったが、その修正にもとづいて計算しても、空气中線量全般に関して大幅な変更はなかった。今後、今回得られた空气中線量を被爆者ひとりひとりに適用した臓器線量の計算を行なう予定である。

2)放射線影響研究所の寿命調査集団におけるがん罹患ならびに死亡に関する最新の報告をレビューした。胃がん、結腸がん、肺がん、乳がん、膀胱がん、白血病などは、発生率ならびに死亡率調査で放射線被ばくの影響が認められたが、発生率調査のみ、あるいは死亡調査のみで影響が認められたがんもあり、解釈には慎重を期す必要がある。今後、新しいDS02を使用して、更なる研究の進展が必要である。

3)米国の被ばく訴訟6件の裁判で使われた法令・規則、および参考文献を検討した。ALLEN訴訟の過程において、現在の米国の裁判所の判断基準が確立された。すなわち、①被ばく線量が防護基準を超していることが立証できること、②放射線被ばくにより誘発されやすい障害であること、③潜伏期間が妥当であること、④被ばく線量による発がん寄与リスク算定およびバックグラウンドにおける発がんリスクの算定、さらに他の発がん物質への暴露時による発がん寄与リスクを算定し、⑤被ばくの寄与リスクがすべてのリスクの総和の50%を超す場合に被ばくが原因らしいと判断される。

分担研究者

児玉和紀 放射線影響研究所 疫学部
部長

鈴木元 放射線影響研究所 臨床研究部
部長

藤田正一郎 放射線影響研究所 統計
部副部長

藤原佐枝子 放射線影響研究所 臨床
研究部副部長

研究協力者

葉佐井博巳 広島国際学院大学学長

星正治 広島大学原爆放射能医学研究
所教授

静間清 広島大学大学院工学研究科教
授

今中哲二 京都大学原子炉実験所助手

陶山昭彦 放射線影響研究所 長崎疫学
部部長

笠置文善 放射線影響研究所 疫学部副
部長

山田美智子 放射線影響研究所 臨床研
究部放射線科科长

小山幸次郎 放射線影響研究所 疫学部
室長

A. 研究目的

この調査の目的は、1) 2002年に新しく構築された原子爆弾による放射線被ばく線量の評価システム (DS02) をまとめること、2) 放影研から報告された論文をもとに原爆放射線とがんに関する最新の知見を検討すること、3) 米国における被ばく訴訟を検討し、被ばく健康障害の損害回復の基準を調べることである。

B. 研究方法

1) DS02 に関して

DS86が決定されて以来、懸案の広島における中性子不一致問題を解決するために、日本の厚労省と米国エネルギー省の実務研究班が取り組んできた測定および計算について、特に、日本側の役割分担である測定を中心に、その結果を計算値との比較をも含めてまとめた。

2) 放影研における約12万人からなる寿命調査集団におけるがんと原爆放射線被ばくとの関連性の有無についての文献レビューし、最新の調査結果のまとめを行った。

3) 米国の原爆開発に伴う健康被害訴訟記録を入手し、実際の訴訟において被ばく健康障害の認定基準あるいは損害回復の基準となった要点を抽出した。

(倫理面への配慮)

本研究は基本的には、被ばく試料の測定および計算からの線量評価と、文献および米国の公開されている訴訟記録の検討であり、倫理的問題はない。

C. 研究結果

1) DS02に関して：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580mから600m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、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。今後、空気中線量に関する結果を被ばく者各人に適用した臓器線量の計算が行なわれる予定である。

2) LSSにおける発生率調査ならびに死亡率調査で放射線被ばくの影響が認められたがん（悪性腫瘍）は、胃がん、結腸がん、肺がん、乳がん、膀胱がん、および白血病など、発生率調査で影響が認められたものには、肝臓がん、皮膚がん、甲状腺がん、卵巣がんなどがあげられた。病理学的検討では神経系腫瘍であるシュワン腫の発生に放射線被ばくとの関連が示された。食道がんと多発性骨髄腫は死亡率調査においてのみ、放射線被ばくとの関連が見られた。

3) 米国における放射線障害訴訟における原因決定の法的基準を確立したと称されているALLEN訴訟では、被ばくの認定に当たり、以下の要件が必要とされた。要件とは、①被ばく線量が防護基準を超して

いることが証明できること、②放射線被ばくに起因する障害の存在（障害の種類に関してはBEIR-III報告書に準拠）。もし、通常放射線により誘発されない障害であるなら損害回復はない。③障害の発生が通常認められている潜伏期間中に発生していること、④過剰リスクモデルあるいは相対リスクモデルに基づく当該被ばく線量における発がんリスクの程度とバックグラウンドの発がんリスクおよび他の発がん物質（タバコなど）への暴露時の発がんリスクを算定し、⑤次に、被ばくが原因らしいか否かを検定する。放射線以外の原因による発がん確率が、放射線が原因である発がん確率より高い場合は、損害回復はなされない。

D. 結論

原爆放射線の線量再評価の結果がDS02という形でまとめられた。DS86からDS02への大きな変更は、広島における爆弾出力および爆発高度の修正であったが、空気中線量全般に関して大幅な変更はなかった。ガンマ線および中性子に関する測定値は、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た。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は、測定値の不確実性によるものと判断された。

現在までに報告された放射線影響

研究所寿命調査集団を対象にした発生率調査と死亡率調査における結果をレビューした。発生率調査と死亡率調査における結果に不一致が見られるがんも多くあり、解釈には慎重を期す必要がある。今後、新しいDS02が使用して、更なる研究の進展が必要と考えられた。

米国における放射線障害訴訟の記録を入手し、損害回復を判断する際の米国の事例を検討しその要点を示した。

参考文献

1. Thompson D et al: Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part II: Solid tumors, 1958-1987. Radiat Res 137:S17-S67, 1994
2. Pierce DA et al: Studies of the mortality of atomic bomb survivors. Report 12, Part I. Cancer 1950-1990 Radiat Res 146:1-27, 1996
3. Cologne JB et al Effects of radiation on incidence of primary liver cancer among atomic bomb survivors. Radiat Res 152:364-373, 1999
4. Ron E et al: Skin Tumor Risk among Atomic-bomb Survivors in Japan. Cancer Causes and Control 9:393-401, 1998
5. Preston DL et al: Tumors of the Nervous System and Pituitary Gland Associated with Atomic Bomb Radiation Exposure. J Natl Cance Inst 94:1555-1563, 2002
6. Preston DL et al: Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part III: Leukemia, lymphoma and multiple myeloma, 1950-1987. Radiat Res 137:S68-S97, 1994
7. Case: *Prescott v. U.S.*, 858F.Supp. 1461 (D. Nevada 1994)
8. Case: *Cole v. U.S.*, 635 F. Supp. 1185 (N.D. Ala. 1986) - excerpt
9. Case: *Allen v. U.S.*, 588 F. Supp. 247 (D. Utah 1984)
10. Case: *Kuhne v. U.S.* 267 F. Supp. 649 (E.D. Tenn. 1967)
11. Case: *Dow Chemical Co. v. Gabel*, 746 P.2d 1357 (Colo. Ct. App. 1987)
12. Case: *Krumback v. Dow Chemical Co.*, 676 P.2d 1215 (Colo. St. App. 1983)
13. Am. Jur. 2d Workers' Compensation §Radiation.
14. Am. Jur. 2d Veterans and Veterans' Laws §60 Veterans Exposed to Toxic Substance, Radiation, or Environmental Hazard During Service
15. 14 Am. Jur. Proof of Facts 3d Radiation Injuries §14 (1991)

厚生労働科学研究研究費補助金（厚生労働科学特別研究事業）
分担研究報告書

線量評価体系 DS86 から線量評価体系 DS02 へ

主任研究者	平 良 専 純	(財) 放射線影響研究所副理事長
分担研究者	藤 田 正一郎	(財) 放射線影響研究所統計部副部長
研究協力者	葉佐井 博 巳	広島国際大学学長
	星 正 治	広島大学原爆放射能医学研究所教授
	静 間 清	広島大学大学院工学研究科教授
	今 中 哲 二	京都大学原子炉実験所助手
	陶 山 昭 彦	(財) 放射線影響研究所長崎疫学部部長

研究要旨

DS86 が決定されて以来これまでずっと、中性子線量に関する理論値と測定値が一致しないということが実際に測定を行なっている研究者の中から報告されており、それ以来、日米独の研究者があらゆる方向で計算と測定の方法に改善を加えながら研究を続けてきた結果、今回ようやくその一致を見て、新しく DS02 という形で出発することになる。現在、空気中線量については結果が出ており、それを被爆者ひとりひとりに適用した臓器線量の計算をこれから行なうところである。今回の研究は空気中線量に関する結果をまとめたものである。行政的にはこれまで裁判等で DS86 の不正確さが指摘されていたが、今回の研究結果を踏まえて構築された DS02 に基づいた線量計算を行えば、より正しい線量推定値がわかる。

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、健康後影響の評価の基礎情報として用いられている。

この DS86 は、広島の中性子に関する計算値と測定値の不一致問題があり、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。

本研究は、懸案の広島における中性子不一致問題を解決するために、日本の厚労省と米国エネルギー省の実務研究班が取り組んできた測定

および計算について、特に、日本側の役割分担である測定を中心に、その結果を計算値との比較をも含めて報告する。また、新しく構築された線量評価体系 DS02 とこれまで使用されてきた線量評価体系 DS86 との相違点についても報告する。

B. 背景

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。一方、厚生行政においても、広島・長崎における原子爆弾によ

る放射能や熱線等に起因する病気やけがについて、全額国庫負担での医療給付を受けるためには厚生労働大臣の認定を受ける必要があり、この認定の過程でも DS86 は個々の申請者の被曝線量評価に用いられている。

この DS86 に関しては、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定性が存在し、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。

DS86 が導入されて 20 年以上にわたりその再評価が続けられてきたが今回の DS02 は DS86 時のような問題点を持たずやっとな落ち着いた感がある。ここで、被爆者の線量測定の始まりから少し紐解いてみる。

1) 被爆者の被曝線量の推定

被爆者に対するの原爆放射線の被曝線量の推定については、現在の放射線影響研究所(以下、放影研と略す)の前身である ABCC (Atomic Bomb Casualty Commission) における組織的な線量測定の研究に始まるといえる。被爆者の原爆放射線による健康後影響を評価するためには、被爆者ひとりひとりが受けた放射線量をできるだけ正確に推定することが不可欠であり、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

量群を区分するために、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, ORNL) 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。被爆者ひとりひとり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。

2) T57D および T65D 線量評価体系

1957 年に、最初の個人被曝線量が推定された (T57D、暫定 1957 年線量と呼ばれている) が、実際の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木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ている) 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。

3) DS86 線量評価体系

現在使用されている原爆線量評価体系 DS86 は、核物理学の理論に基づく空気中カーマ、

遮蔽カーマ、臓器線量の計算モデルを統合した線量計算方法に、被爆者の遮蔽データを入力として被爆者の被曝線量を計算するコンピュータ・システムである。この計算値の妥当性は、実際に広島・長崎で被曝した物理学的な試料(瓦、タイル、岩石、鉄、コンクリート、硫黄、など)の中の残留放射能の測定値とそれに対応する計算値(DS86)との比較により検討された。

DS86の作成における日米の役割を大別すると、米国側は最新の核物理学の理論に基づく個々の被爆者の被曝線量(空气中カーマ、遮蔽カーマ、臓器線量)を推定することになり、日本側は広島・長崎で実際に被曝した試料を測定することであった。測定値は計算値(DS86線量推定値)の検証に用いられたのである。その後今日まで現在行われてきた線量再評価においても、日本側は被曝試料の測定、米国側は計算プログラムの作成とそのチェックが中心的な役割である。

4) ガンマ線の熱ルミネッセンス測定とDS86

原爆被爆者の受けた放射線にはガンマ線と中性子線がある。線量としては大半がガンマ線である。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。年代測定に使うこの技術を被曝した瓦やタイルを用いて適用して測定する。測定の結果とDS86による計算結果とを比較した結果を広島・長崎別に図1と図2に示す。

広島においては厳密には1,000 m以遠で測定値は計算値より大きく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でになっている。しかしこの程度の違いは良く一致していると考えられる。しかも、T65Dと比較すればDS86の方が遥かに良い一致を示している。

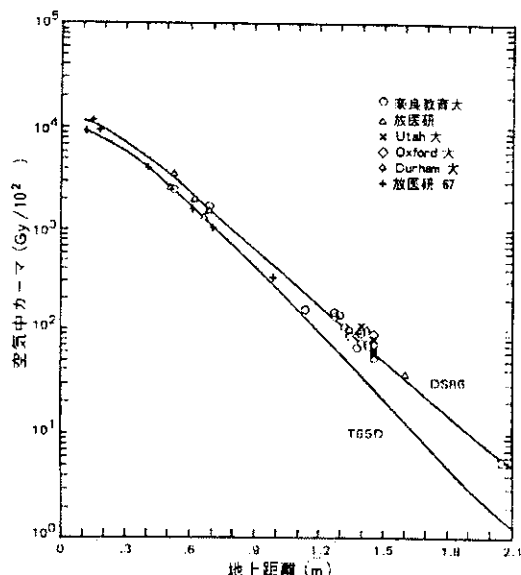


図1. 熱ルミネッセンス測定の結果とDS86による計算結果の比較：広島

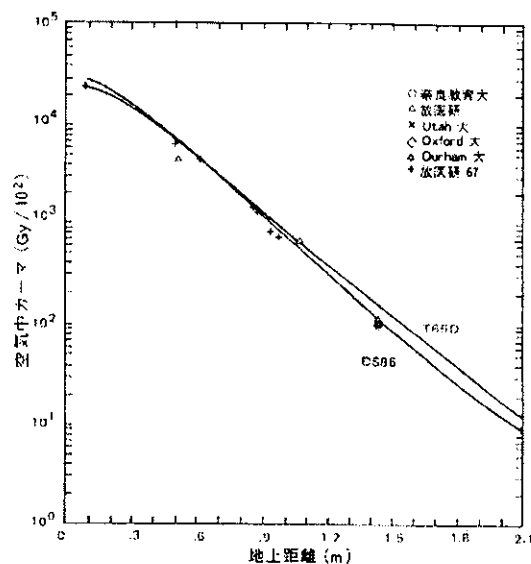


図2. 熱ルミネッセンス測定の結果とDS86による計算結果の比較：長崎

5) 中性子の測定とDS86

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。

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 (P-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3)。

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 (Co-60) については、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

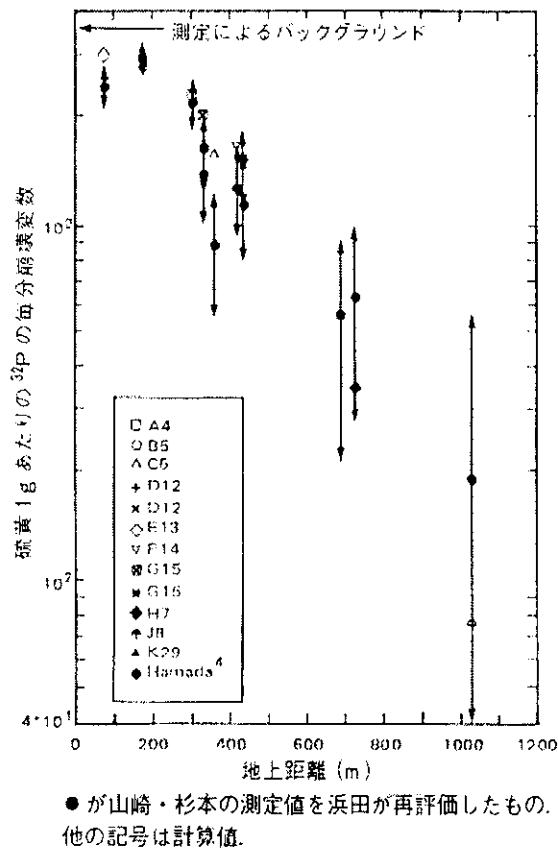


図3. 硫黄の放射能の測定値と計算値の比較

^{60}Co 放射能の測定値と計算値の比較

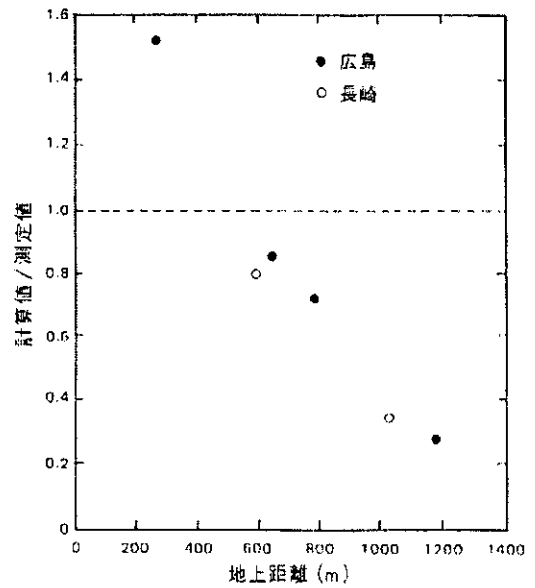


図4. コバルト 60 の放射能の測定値と計算値の比較

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 (図4参照)。

熱中性子によって岩石の中のユーロピウムに誘導されたユーロピウム 152 (Eu-152) については当時新しい測定であったが、測定値の数も少なく、正確な評価を行うにはデータのばらつき

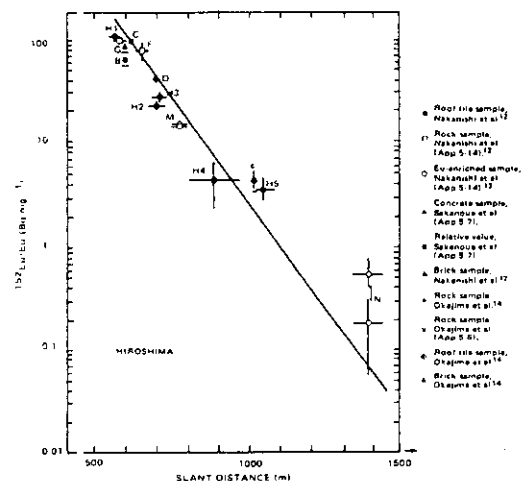


図5. Eu-152 測定値と計算値の比較
きが大きいとされた。参考までに図5に当時の

広島の結果を示しておく(図5)。

6) 中性子の不一致問題

熱中性子誘導放射能 (Eu152、Co60、Cl36) の測定値と応する DS86 計算値との間には系統的なズレが見られ、近距離では計算値が高く、遠距離では測定値が高くなっている。この傾向ははっきりしており、DS86 以降測定値の数が増加すると共に、広島においてはこのズレが顕著なものとなってきた。測定データは十分と考えられる。広島と異なり、系統的なズレを示さない測定データと広島と同様のズレを示すデータの両者がある。

熱中性子により岩石の中に誘導されたユーロピウム 152 (^{152}Eu) についても、その後数多くの測定値が得られ、広島では DS86 計算値

との間には系統的なズレが見られ、近距離では計算値が高く、遠距離では測定値が高くなっている。測定データは十分と考えられる。また、熱中性子によりコンクリート中に誘導された塩素 36 (^{36}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 計算値とを距離別に比較したものを図6に示した。この図は Eu152、Co60、Cl36 の測定値を同一の図にまとめてあり、測定値の計算値に対する比を距離別に示している。その値が1のと測定値と計算値は同じである。長崎に関しては、広島と異なり系統的なズレを示さない測定データと広島と同様のズレを示すデータの両者がある。

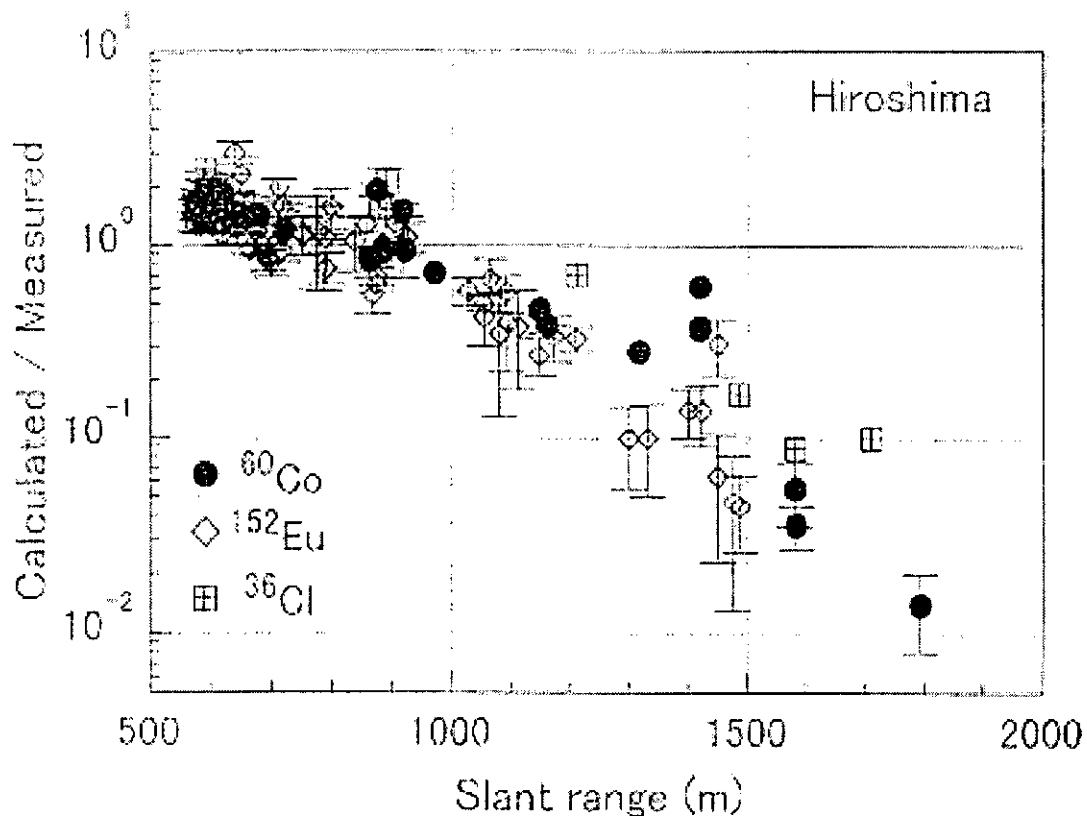


図6. 熱中性子により誘導された放射能の測定値と計算値の比較(Shzuma 1988 より)

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、2 km を越すとあまりにも倍率が大きくなり（10 倍、100 倍となつてゆく）、測定値に問題がある可能性も残されてい

るとされてきた。熱中性子の測定を行なっていた研究者たちが中性子の不一致問題を科学論文に公表し学問的に取り上げた論文の中の不一致の図を、図7と重複するが歴史的な図として図6に示す。

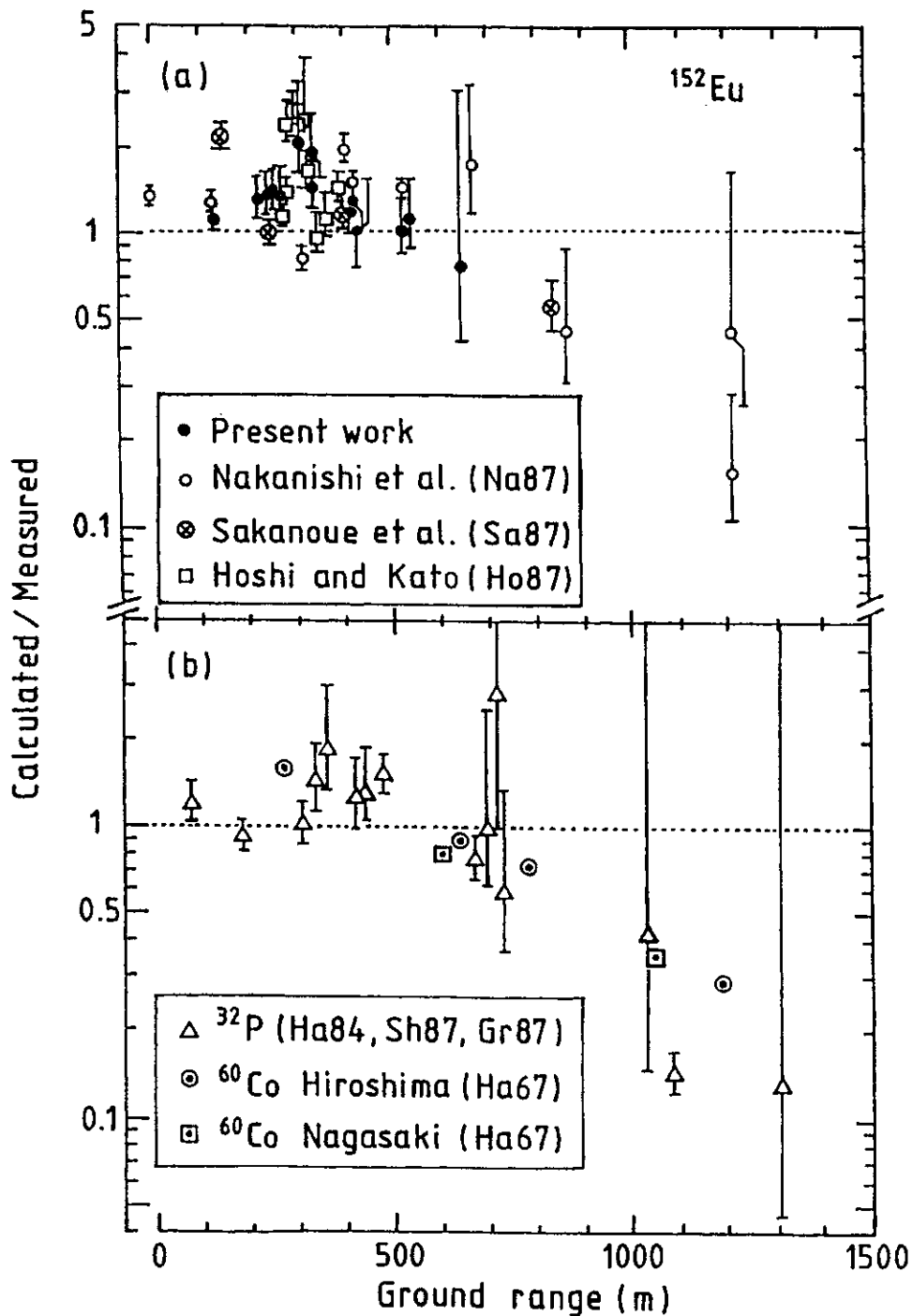


図7. 星らによるHealth Physics (1987)の論文中の不一致問題提起の図

C. 研究方法

1) 測定と計算

広島の中性子にかんする測定値と計算値との不一致問題を解決するために、技術の進歩に裏づけされた最先端の測定とコンピュータ技術の進歩により可能となった莫大な計算を再度行ない、測定・計算の両面からのすり合わせにより不一致の原因を究明する。このために、日米合同で定期的にワークショップを開催し、連携を密にする。

測定については、被曝位置や周囲の遮蔽状況がはっきりしている被曝試料（岩石、コンクリート、鉄、銅）に限定して収集する。特に、中性子線量を直接測定することになる銅の試料は、あらゆる手段を講じて収集し、測定も再優先で

行なう。

財政面について、米国はエネルギー省が多額の予算を工面し、期間を限定して労力を集中することとなった。これに呼応して、日本側でも厚労省が放影研を通じて予算面での援助を強化し、短期間での解決を切望した。

2) 測定の基礎と測定核種

広島および長崎において、原爆時に実際に存在した物質中に、中性子により生成された放射化生成物の中性子線量に関連する量を測定する。すなわち、現在の測定値から原爆当時の放射線量を逆算（類推）することになる。現在、計算の検証に使用できる測定技術を線量別に図7に示した。

放射線の種類	被曝試料の材質の種類	測定の技術
ガンマ線	煉瓦やタイル中の石英の結晶	熱蛍光法
速中性子	電柱碍子の中の硫黄	ベータ線の数を計測
速中性子	銅製金属	加速器質量分析法 (AMS)
遅中性子	鋼鉄、鉄	ベータ線とガンマ線の数を計測
遅中性子	岩石、タイル、コンクリート	ガンマ線の数を計測
遅中性子	岩石、コンクリート	加速器質量分析法 (AMS)

図8. 原爆被曝線量計算値の検証に使用されている測定技術

原爆から放出された中性子が、岩石や建造物中の物質との相互作用により生成した比較的半減期の長い放射性同位元素の放射能を測定する。

半減期は、ある程度長くて長期間を経た現在でも存在する必要がある、同時に、ある程度短くて単位時間に測定できる程度には放射線を放出

している必要がある。

このような条件を満たす核種は限られている。熱中性子に関しては、C0-60（橋詰ら、Kerrらのち静間らが測定）、Eu-152（星ら、中西らに続き静間ら）に加えて、AMS（Accelerator Mass Spectrometry）技法によるCl-36の測定（米国のStraumeら、独逸のRuehmら）が可能となった。

速中性子に関しては、日本人による碍子の硫黄中の³²P（P-32）の測定（半減期は14.3日、数ヶ月で消滅）の他に適当な放射性同位元素で対象となるものは見つからなかったが、近年、AMSの技法により銅試料中の⁶³Ni（Ni-63）の測定が可能となった（米国のStraumeら、独逸のRuehmら）。日本でもベータ線の測定が可能となってきた（柴田ら）。

3) 計算について

1993年遅発放射線の再計算を行なったが、中性子の不一致問題にはつながらなかった。新たに、コンピュータ技術の進歩を踏まえたうえで、最新の理論に基づく計算を再度「広島爆弾の線源」および「放射線の輸送」について行なう。爆弾全体をモデル化し、線減のエネルギーと角度分布を詳細に分割して用い、計算は爆発後十分な時間まで行なう、などの新しい工夫を導入することになる。輸送計算も、2つの異なる計算方法を採用して行なう。

モデルの提唱もあったが、熱中性子測定値と距離との関係を特定の核種について説明したものの、すべての核種を説明するものではなかった。この面の新たな展開にも期待する。

4) 測定の相互比較

これまで述べた近代測定技術を駆使した測定

結果を用いても、中性子の不一致問題を解決するには至らなかった。そこで前々から言われていた同一試料を複数核種（Eu-152とCl-36）について複数施設で測定するという相互比較を決行することにした。

時間的制約があり、使用する被曝試料は新たに採取せず、静間博士がユーロピウム測定に使用した残りの試料から広範囲の被曝距離に渡る数点を選び、コントロール（非被曝）試料のみ新たに採取した。測定のために必要な試料の基礎準備は、放影研の財政的援助により、日本分析センターに依頼した。これは研究者の時間的を助けるのみ出なく、測定試料への不純物の混入を最小限にし、濃縮を最大限にすることが重要であった。

試料は、日（静間：Eu-152）・米（Straume：Cl-36）・独（Ruehm：Cl-36）の3つの測定グループにより測定が開始され、日本国内でも関連核種の測定が可能となり、小村博士（金沢大：Eu-152）および長島（筑波大：Cl-36）が測定に参加した。小村（金沢大学）は低バックグラウンド施設における測定を行なった。使用した試料を以下に示す。

D. 結果と考察

1) 日米における研究班活動

1989年に、DS86導入後第1回の日米線量会議がハワイにおいて開催され。熱中性子の放射化測定値と対応する計算値との間に距離ごとの系統的なズレ（中性子の不一致問題）が明らかになり、日米共同で検討してゆくこととなった。測定のために放影研・広原医研を中心に収集された被曝試料は米国にも送付され、日本のみならず米国およびドイツでも測定を行ってきた。

1996年に、米国学術会議における放影研のための原爆線量測定委員会を強化し、日本側の参加のもとに体制を強化して、中性子不一致問題を中心に検討を行なった。指導力を発揮して、可能な作業を出来るだけ遂行し、あらゆる方向から検討を行ない、特に被曝試料の採取とその測定には力を入れた。問題の解決には至らなかったが、新たな計算、測定試料の分析等を中心に問題の整理を行ない、結果は2001年に1冊の本として出版した。

2000年に、新たに米国エネルギー省は新たに実務研究班を構成し、日本の厚労省に設置された実務研究班と合同で、なにがなんでも問題を解決する、即ち、新しい線量体系を構築し原爆線量への信頼を回復し、原爆放射線の健康影響

にたいする信頼のおけるリスク評価ができるようにするとの決意で臨んだ。日本側も裁判などにとって信頼のおける線量体系が構築されることは望ましいことであった。結果、2003年に新しい線量体系 DS02 (2002年に計算の本質的な部分が完了したので DS02 と呼ぶのであろう) が完成し、約15年に及ぶ中性子問題に決着をつけた。中性子の不一致問題解決の決め手となったのは、被曝試料測定の相互比較活動であった。

2) 中性子放射化の測定

DS86 線量評価体系の再評価の中心課題である広島における中性子の不一致問題に関する最近の測定は、熱中性子に関しては Eu152、Co-60、Cl-36 の核種についての測定があり、速

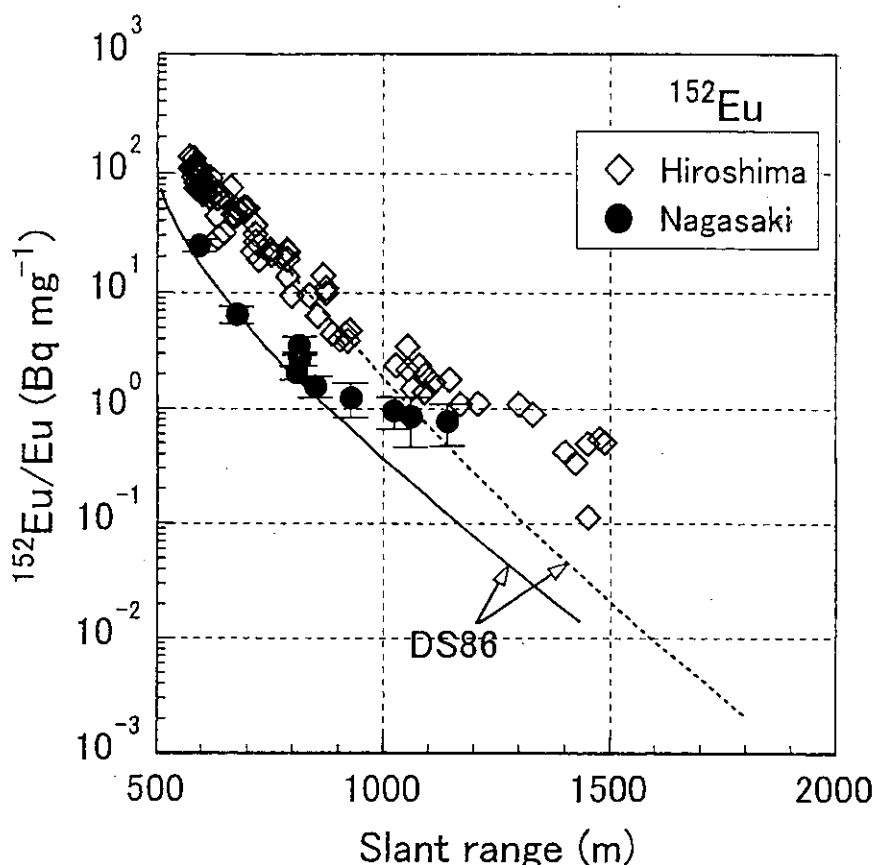


図9. 静間らによる Eu-152 測定値

中性子に関してはNi-63の測定がある。最初は日本人による測定が中心であったが、その後米国やドイツの研究者も参加し国際的な原爆線量再評価活動となった。以下に、日・米・独の研究者が取り組んできたそれらの測定結果を（測定者別および核種別に）報告する。

(A) 静岡からのEu-153およびCo-60の測定

静岡（広大・工学部）らのグループは中性子の不一致問題の初期から測定に携わっており、この領域の中心的な存在である。数多くの測定を爆心地付近から遠距離まで広範囲にわたって行なってきた。測定値と計算値との間には、図9に見るが如く、明らかに相違があり、爆心地付近では測定値が計算値よりも低く、距離と

共にこの関係が逆転して、鋭意距離では測定値のほうが計算値よりも高くなっている。計算における何らかの間違い、例えば広島爆弾の線原の間違いの可能性を示唆した。一方、計算側からのコメントとして、遠距離における測定値が距離と共にあまり減少しない傾向は理論的に見てありえないことで、測定もしくはその解釈に何らかの誤りがあるのではとの指摘もあった。静岡からは、Co-60の測定値にも同様の中性子の不一致問題が存在することを指摘し、問題がないとされてきた長崎についても同様の傾向の存在を指摘した。長崎に関しては、中西らの測定値については計算値と変わらないものであった（図10参照）。

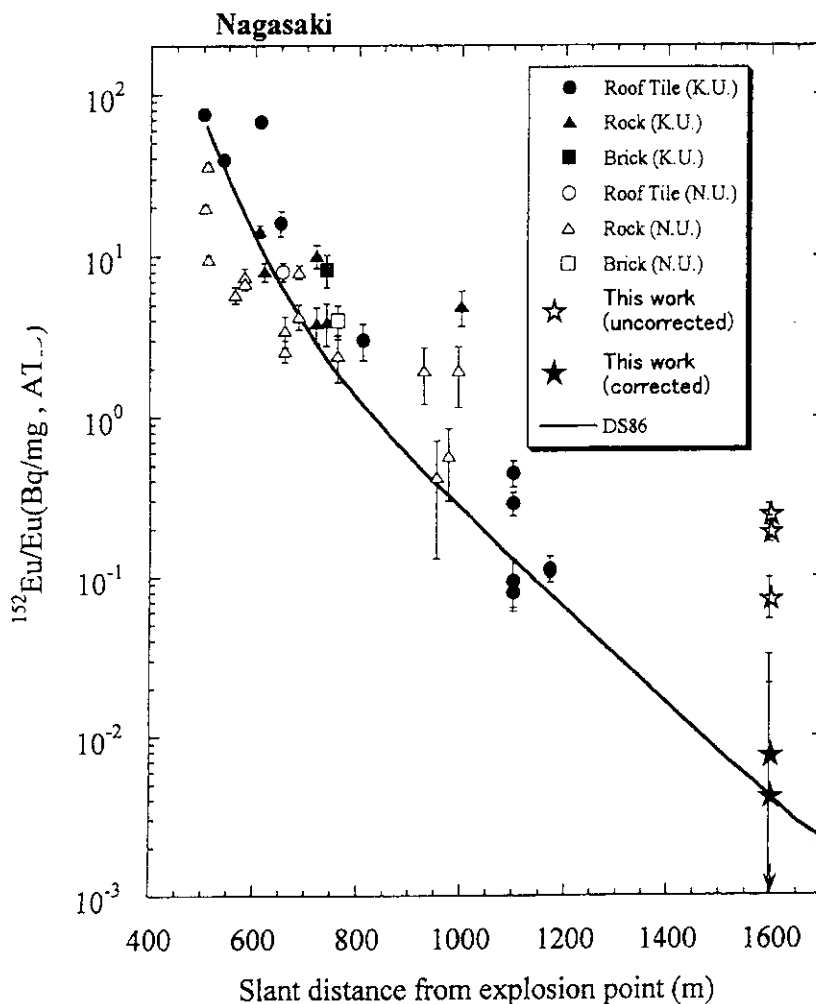


図10. 中西によるEu-152測定値と他の測定値尾の比較、長崎

(B) Straume と Ruehm による Cl-36 の測定 Eu-152 などの測定値と計算値の間の不一致が明らかになった段階で米国側も測定を開始した。Straume ら（ユタ大、当時ローレンスリバモア国立研究所）らが AMS による Cl-36 の測定である。被曝試料は、前方に遮蔽がなく被曝時の位地がはっきりしたものに限定した。藤田ら放影研が試料の収集には全面的に協力し、コンクリート建造物から直径 10cm のコンクリートコアを採取した。

その後、ドイツから Ruehm ら（ミュンヘン工科大）らも Cl-36 の測定に参加した。遠距離の試料は放射線のシグナルが低くローレンスリバモア国立研究所の測定には限界があったが、Ruehm 博士らはより遠距離の試料も測定可能であった。

Straume らと Ruehm らによる Cl-36 の測定値も計算値と距離との関係において、おおむね、静間博士らの測定値と同様の傾向を示した。静間博士らは測定値と計算値の不一致を信じて強調し一致しない原因の究明にはあまり労力を注がなかったし、実際にそのための手段も限られていた。

Ruehm らは墓石などの被曝岩石を使用して Cl-36 を測定したが、測定値には宇宙線などの自然環境のバックグラウンドが加わっていること、墓石によりバックグラウンドが異なることなどの細かな研究を続け、最終的には彼等の測定値はバックグラウンドの補正をすれば計算値と一致するとした。

Straume らの場合も、コンクリート試料の複雑さ（海水中の砂の自然界における被曝、建造物使用に小石を混入、コンクリート壁面と深部における塩分を含んだ雨水の浸透度の違い）を徹底的に調べ上げ、最終的には彼等の測定値も

これらのことを考慮してバックグラウンド補正をすれば計算値と一致するとした。少し歯切れは悪いがそれなりの中性子の不一致問題の解決であった。測定相互比較の貢献（計算値の妥当性を検証）が強く感じられる。

(C) 同一試料の測定による相互比較

ここでは、中性子の不一致問題の解決の決め手となった最終的な部分のみの結果を報告する。

9箇所の異なる被曝距離における被曝試料を、それぞれの4人の測定者用に分割して同一試料の測定をする環境を設定した。日本では小村らが Eu-152、長島らが Cl-36 を、米国の Straume らとドイツの Ruehm らは Cl-36 の測定を行なった。

以下に、相互比較に使用した試料名と被曝距離を示す。材質は花崗岩である。10番から16番はコントロールとして新たに採取した墓石の上部を使用した。

- | | |
|-----------------|-------|
| 1. 元安橋欄干上部 | 146m |
| 2. 白神社玉垣 | 496m |
| 3. 教伝寺 | 548m |
| 4. 妙頂寺 | 654m |
| 5. 旧県庁 | 881m |
| 6. 円隆時 | 912m |
| 7. 真行寺 | 927m |
| 8. 市役所敷石 | 1016m |
| 9. 興禅寺 | 1163m |
| 10. 千暁寺／元宇品／伊予石 | |
| 11. 観音寺／元宇品／倉橋石 | |
| 12. 専蔵坊／緑井／伊予石 | |
| 13. 専蔵坊／緑井／地石1 | |
| 14. 専蔵坊／緑井／地石2 | |
| 15. 明顕寺／海田／地石1 | |
| 16. 明顕寺／海田／地石2 | |

小村らによる Eu-152 の測定は、低バックグラウンド施設において行なわれた。それでもなお残っている原爆以外の放射線由来の Eu-152 をコンピューターによる解析によ除去する工夫がなされ、最終結果は、図1 1 の如く、計算値(DS8

もしくはDS02)と1kmを越す遠距離に至るまで非常に良く一致している。非常に感動的な図である。図1 2は、上記図 11 にそれまでに得られたすべての Eu-152 測定値を加えて比較のために示したものである。

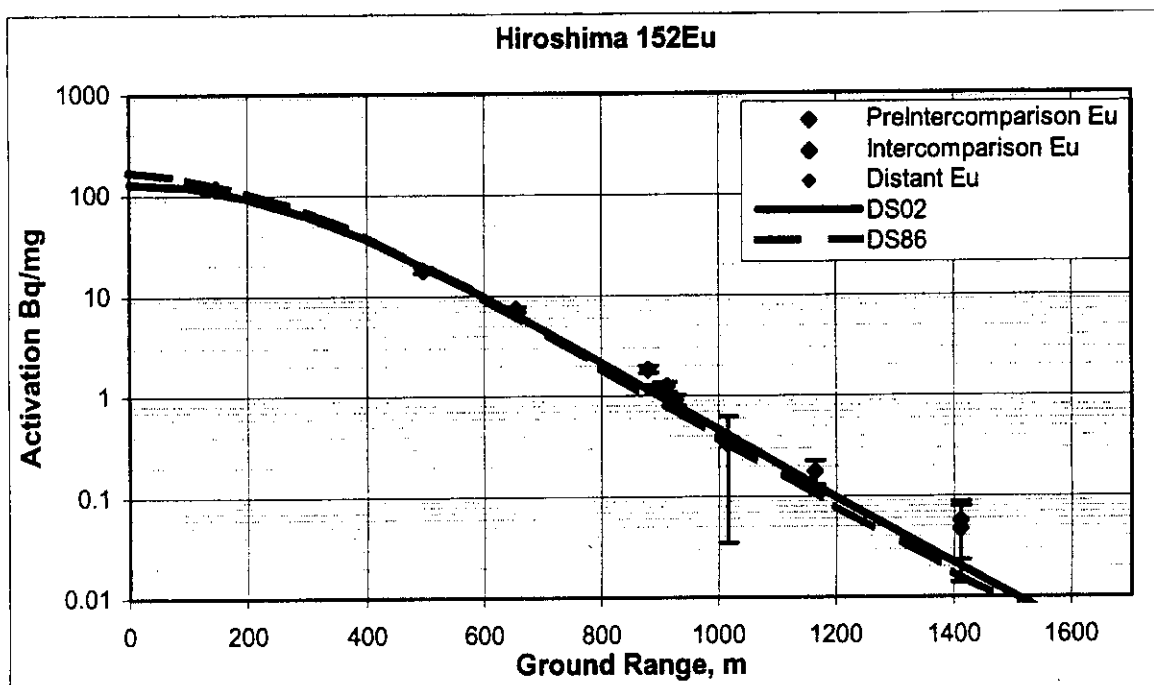


図1 1. 小村らによる相互比較のための Eu-152 測定値

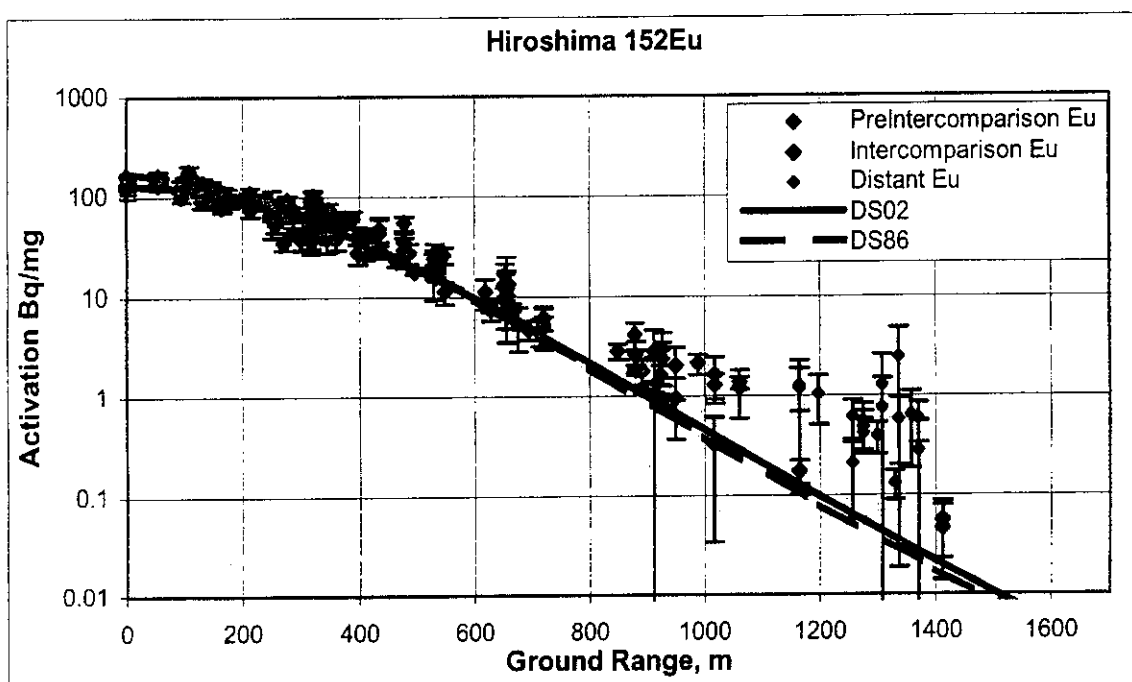


図1 2. 相互比較測定値を含むすべての Eu-152 測定値

Cl-36 については異なる日米独 3 箇所測定された。3 人の測定値は若干のばらつきが認められるものの、これまた Eu-152 と同様に計算値との一致がみられた (図 13 参照)。後に、

長島らは補正方法の改善により測定値の評価に改善を加え、全員の測定値がより一層一致度を増した。参考のために、これらの測定値にこれまでの測定値を加えたものを図 11 に示した。

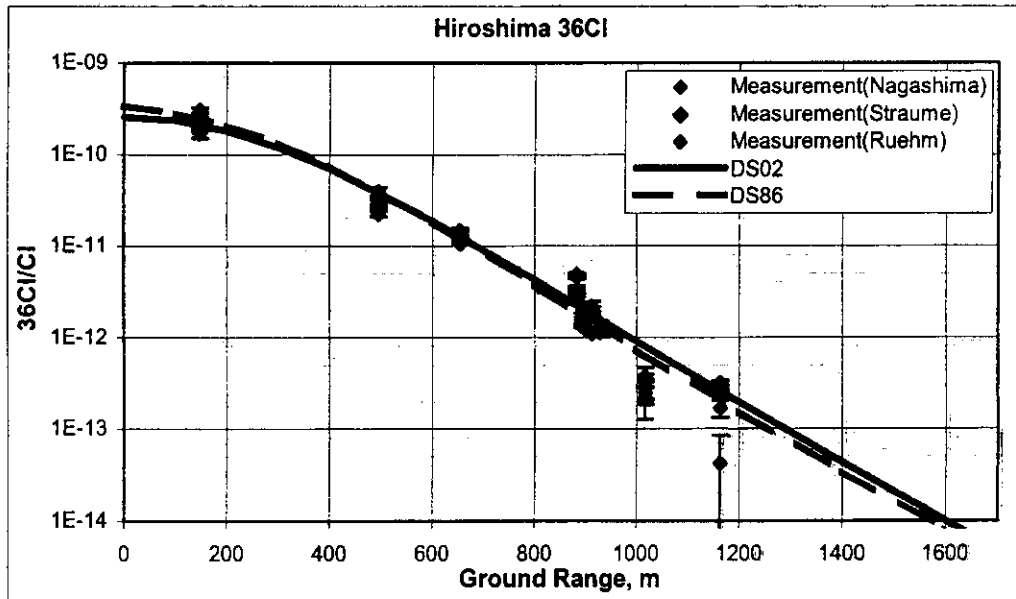


図 1 3. 3 人の測定者による相互比較のための Cl-36 測定値

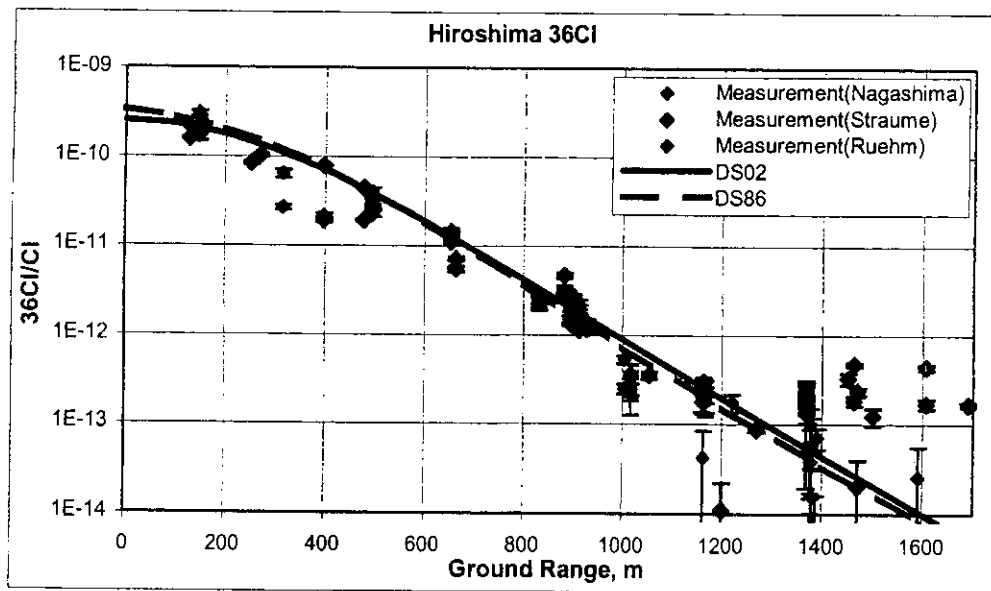


図 1 4. 相互比較測定値を含むすべての Cl-36 測定値

かくして、十余年にわたる広島の中性子の不一致問題は解消されることとなった。DS86 はやはり当時としては最良のものであったことが証明されたことになる。今回の再評価で新たに

計算された DS02 の方が、線量には本質的な変動がないものの、より良いものとして今後使用されることになる。