

平成11年度厚生科学研究費補助金
厚生科学特別研究事業報告書

**原子爆弾被曝線量評価方法の再評価及び
健康影響に関する研究**

平成12年3月31日

主任研究者 長 瀧 重 信

〈事務局連絡先〉

〒732-0815 広島県広島市南区比治山公園5番2号
財団法人 放射線影響研究所
TEL:082-261-3131 FAX:082-263-7279

研究班組織

主任研究者 長 瀧 重 信（財団法人放射線影響研究所理事長）

1. 原子爆弾被曝線量評価方法の再評価に関する研究

分担研究者 平 良 専 純（財団法人放射線影響研究所常務理事）
葉佐井 博 巳（広島国際学院大学工学部長）
星 正 治（広島大学原爆放射能医学研究所国際放射線情報センター教授）
研究協力者 丸 山 隆 司（財団法人放射線影響協会企画部長）
Dale L. Preston（財団法人放射線影響研究所統計部長）
藤 田 正一郎（財団法人放射線影響研究所統計部副部長）

2. 健康影響に関する研究

分担研究者 朝 長 万左男（長崎大学医学部附属原爆後障害医療研究施設教授）
伊 藤 千賀子（財団法人広島原爆障害対策協議会健康管理・増進センター所長）
柴 田 義 貞（長崎大学医学部附属原爆後障害医療研究施設教授）
土 肥 博 雄（広島赤十字・原爆病院副院長）
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 児 玉 和 紀（広島大学医学部保健学科教授）
中 村 典（財団法人放射線影響研究所遺伝学部長）
赤 星 正 純（財団法人放射線影響研究所長崎臨床研究部長）
陶 山 昭 彦（財団法人放射線影響研究所長崎疫学部長）
清 水 由紀子（財団法人放射線影響研究所疫学部副部長）
京 泉 誠 之（財団法人放射線影響研究所放射線生物学部室長）
山 田 美智子（財団法人放射線影響研究所臨床研究部主任研究員）
鎌 石 和 男（財団法人放射線影響研究所臨床研究部内科長）
児 玉 喜 明（財団法人放射線影響研究所遺伝学部室長）
楠 洋一郎（財団法人放射線影響研究所放射線生物学部副主任研究員）
小 平 美江子（財団法人放射線影響研究所遺伝学部副主任研究員）

目 次

I. 総括報告書	1
II. 分担報告書	
1: 原子爆弾被曝線量評価方法の再評価	
1- 1 原子爆弾被曝線量評価方法の再評価に関する研究	8
平良 専純 (財団法人放射線影響研究所常務理事)	
丸山 隆司 (財団法人放射線影響協会企画部長)	
Dale L. Preston (財団法人放射線影響研究所統計部長)	
藤田 正一郎 (財団法人放射線影響研究所統計部副部長)	
1- 2 原子爆弾被曝線量評価方法の再評価	24
葉佐井 博巳 (広島国際学院大学工学部長)	
1- 3 広島原爆の被曝線量評価の問題点	29
星 正治 (広島大学原爆放射能医学研究所国際放射線情報センター教授)	
2: 原子爆弾放射線被曝の健康影響に関する研究	
2- 1 原爆被爆者のがん死亡およびがん発生における放射線被曝の寄与リスクの推定	41
柴田 義貞 (長崎大学医学部附属原爆後障害医療研究施設教授)	
清水 由紀子 (財団法人放射線影響研究所疫学部副部長)	
陶山 昭彦 (財団法人放射線影響研究所長崎疫学部長)	
2- 2 良性腫瘍に関する研究	51
山田 美智子 (財団法人放射線影響研究所臨床研究部主任研究員)	
2- 3 原爆放射線被曝の甲状腺疾患に及ぼす影響に関する研究	57
赤星 正純 (財団法人放射線影響研究所長崎臨床研究部長)	
2- 4 糖尿病と呼吸器疾患	63
伊藤 千賀子 (財団法人広島原爆障害対策協議会健康管理・増進センター所長)	
2- 5 放射線誘発性血液疾患、とくに白血病に関する研究	67
朝長 万左男 (長崎大学医学部附属原爆後障害医療研究施設教授)	
2- 6 原爆被爆者における循環器疾患に関する研究	72
児玉 和紀 (広島大学医学部保健学科教授)	
2- 7 原爆被爆者における肝障害	78
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)	
2- 8 眼科疾患最近の知見	84
鎌石 和男 (財団法人放射線影響研究所臨床研究部内科長)	
2- 9 免疫能への影響に関する研究	91
楠 洋一郎 (財団法人放射線影響研究所放射線生物学部副主任研究員)	
京泉 誠之 (財団法人放射線影響研究所放射線生物学部室長)	
2-10 原爆被爆者の体細胞突然変異に関する研究	108
京泉 誠之 (財団法人放射線影響研究所放射線生物学部室長)	
楠 洋一郎 (財団法人放射線影響研究所放射線生物学部副主任研究員)	
2-11 生物学的線量評価	121
中村 典 (財団法人放射線影響研究所遺伝学部長)	
児玉 喜明 (財団法人放射線影響研究所遺伝学部室長)	
2-12 原子爆弾放射線の遺伝的影響：ミニサテライト遺伝子座における突然変異	131
小平 美江子 (財団法人放射線影響研究所遺伝学部副主任研究員)	
中村 典 (財団法人放射線影響研究所遺伝学部長)	
2-13 海外の被爆者の現状	140
土肥 博雄 (広島赤十字・原爆病院副院長)	

原子爆弾被曝線量評価方法の再評価及び健康影響に関する研究

主任研究者 長 瀧 重 信（放射線影響研究所理事長）

研究要旨

原子爆弾被曝線量評価方法（DS86）の再評価の進捗状況および今後の問題点の提起、原爆放射線被曝の1990年から現在までの健康後影響の知見を整理した。さらに、がん部位別リスクの推定および寄与リスクの推定、がん以外の疾患による死亡および慢性肝炎・肝硬変罹患の寄与リスクを求めた。

DS86（1986年線量評価体系の略）の再評価については、被曝試料の測定を中心に現時点における問題点の整理を行った。更に、線量再評価の促進を念頭に置き開催された日米合同の線量ワークショップにより、未解決の問題点やその解決策について広く討論した結果を要約した。

原爆放射線の健康後影響について、1990年からの新しい所見として放射線被曝と関係が認められた疾患は、胃、唾液腺、乳腺の良性腫瘍、子宮筋腫、自己抗体陽性の甲状腺機能低下症、がん以外の疾患の死亡率（心臓病死、脳卒中死亡）、心筋梗塞、慢性肝疾患である。結腸、直腸の良性腫瘍、糖尿病、肺がん以外の呼吸器疾患、C型肝炎ウイルス抗体陽性率は放射線被曝との関係は現時点では認められなかった。原爆被曝者の白血病に関する研究では、non-threshold model がほぼ追認されている。放射線白内障の閾値が再解析され、安全領域の閾値は1.75Svと推定された。免疫能に関してはTリンパ球（特にCD4 T細胞）が司る細胞性免疫の低下とBリンパ球が介在する体液性免疫の亢進が認められた。体細胞突然変異体頻度については、赤血球グリコフォリンA (GPA) 遺伝子突然変異体頻度のみが原爆被曝者において明確な線量効果関係を示した。生物学的線量評価として染色体異常と歯エナメル質を用いた電子スピン共鳴（ESR）信号が用いられいくつかの所見が得られた。ミニサテライト遺伝子座における突然変異の検索において、親の被曝の影響は見出されなかった。

海外の被曝者については、北米、南米、韓国、中華人民共和国、朝鮮民主主義人民共和国などに約5000人の被曝者が推定されている。

分担研究者

平 良 専 純（財団法人放射線影響研究所常務理事）

葉佐井 博 巳（広島国際学院大学工学部長）

星 正 治（広島大学原爆放射能医学研究所国際放射線情報センター教授）

朝 長 万左男 (長崎大学医学部附属原爆後障害医療研究施設分子医療部門教授)
伊 藤 千賀子 (財団法人広島原爆障害対策協議会健康管理・増進センター所長)
柴 田 義 貞 (長崎大学医学部附属原爆後障害医療研究施設放射線障害解析部門教授)
土 肥 博 雄 (広島赤十字・原爆病院副院長)
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

丸 山 隆 司 (財団法人放射線影響協会企画部長)
児 玉 和 紀 (広島大学医学部保健学科教授)
Dale L. Preston (財団法人放射線影響研究所統計部長)
中 村 典 (財団法人放射線影響研究所遺伝学部長)
赤 星 正 純 (財団法人放射線影響研究所長崎臨床研究部長)
陶 山 昭 彦 (財団法人放射線影響研究所長崎疫学部長)
藤 田 正一郎 (財団法人放射線影響研究所統計部副部長)
清 水 由紀子 (財団法人放射線影響研究所疫学部副部長)
鎌 石 和 男 (財団法人放射線影響研究所臨床研究部内科長)
山 田 美智子 (財団法人放射線影響研究所臨床研究部主任研究員)
京 泉 誠 之 (財団法人放射線影響研究所放射線生物学部室長)
児 玉 喜 明 (財団法人放射線影響研究所遺伝学部室長)
小 平 美江子 (財団法人放射線影響研究所遺伝学部副主任研究員)
楠 洋一郎 (財団法人放射線影響研究所放射線生物学部副主任研究員)

A. 研究目的

この研究事業は2つの目的を持っている。目的1) 原子爆弾被曝線量評価方法(DS86)の再評価の進捗状況のまとめと今後の問題点を洗い出すこと、2) 原爆放射線被曝の健康後影響の最近の知見を整理することである。

放射線影響研究所では、原爆放射線の健康に対する影響の検討において、被爆者個人個人の被曝線量を推定している。原爆被爆者の推定線量を求める方式として、1987年に日米の研究グループによってDS86(Dosimetry System 1986)が決められた。このDS86は、現時点において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。DS86を用いた放

射線と疾患リスクの関係についての結果は、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、中性子の評価に多少の誤差を含んでいる可能性が指摘され、DS86の公表以来、日米共同で再評価が行われてきた。この研究では、DS86の再評価の進捗状況およびこれから解決すべき問題点などについて検討を行った。

放射線影響研究所の寿命調査対象者におけるがん死亡(1950-1990)およびがん発生(1958-1987)のデータを基に、部位別リスクの推定および寄与リスクの推定を行った。寄与リスクについては、がん以外の疾患による死亡および慢性肝炎・肝硬変罹患についても

検討した。

原爆放射線被曝の影響について、過去 10 年間に発表された文献を検索し、被曝線量と疾病罹患に関する最新知見を整理することを目的とした。

B. 研究方法

1) 原子爆弾被曝線量評価方法 (DS86) の再評価

DS86 の再評価については、日米研究グループが検討を行っている。2000 年 3 月 13, 14 日には放射線影響研究所主催の日米線量ワークショップが広島で開催され、日米の研究者の活発な議論が行われ、これまでの成果および今後の問題点について意見交換が行われた。それらの議論にもとづき、DS86 の再評価の現状をまとめた。

2) 原爆放射線被曝の健康後影響

原爆被爆者のがん死亡およびがん発生における放射線被曝の寄与リスクの推定は、放射線影響研究所の寿命調査対象者におけるがん死亡 (1950-1990) およびがん発生 (1958-1987) のデータを基に推定を行った。寄与リスクについては、がん以外の疾患による死亡および慢性肝炎・肝硬変罹患についても検討した。

原爆放射線被曝線量と疾病罹患の関係について、1992 年 (平成 4 年) に「原爆放射線の人体影響 1992」(放射線被曝者医療国際協力推進協議会編) がまとめられた。それ以降の、がん、肝疾患、血液疾患、がん以外の疾患の死亡率などにおいていくつかの新しい知見が認められている。この研究では、過去 10 年間に発表された論文を検索し、それぞれの論文の評価を行った上で、整理しまとめた。

(倫理面への配慮)

この研究のうち、DS86 に関する研究は、物理的な側面からの研究が主であり倫理面では問題ない。また、放射線と疾病罹患の関係に関する研究は、既存の研究のレビューが中心となることから、倫理面では問題にならないと考えられた。

C. 研究結果および考察

1) 原子爆弾被曝線量評価方法 (DS86) の再評価 (担当: 平良専純、葉佐井博巳、星正治、丸山隆司、Dale Preston、藤田正一郎)

DS86 に関する問題点を、1) 測定、2) 家屋・地形による遮蔽、3) 臓器線量について問題点をまとめた。項目 1) については、空気中カーマ (無遮蔽状態での被曝線量に相当) の検証の意義があり、再評価の焦点でもある。項目の 2) および 3) は、主として費用と便益の兼ね合いの問題で、労力を払うことにより精度を上げることができる。

日米線量ワークショップの議論は、次のように要約された。

1. 広島・長崎に投下された原子爆弾により、当時 (1945 年) 両市にいた人々が被曝したと考えられる速中性子、熱中性子およびガンマ線について日本および米国 (ならびにドイツ) で実施中の測定の結果について検討が行なわれた。遮蔽および位置に関する問題についても討議が行なわれた。
2. 測定結果の一部は、地上で被曝した人に生じた事象について、現行の DS86 線量推定方式よりも、より正確な説明が可能であることを示唆している。
3. しかし、一部の測定結果は、現在予

備的段階にあり、より正確かつ完全な測定が必要である。

4. 日本、米国およびドイツの研究者は、測定準備ができており、既に入手している試料に関して可能な限り迅速に測定を進めている。
5. より完全な測定を実施するために、原爆投下時に、広島・長崎の特定箇所および爆心地から特定の距離に存在した銅その他のより多くの試料が早急に必要である。この種の試料入手のため、広島・長崎のすべての人々の協力が早急に必要である。
6. このような測定が十分な量の試料について実施され、短期—例えば来年中—に結論が得られれば、DS86よりも優れた線量推定方式が導入可能であろう。
7. 同時に、50年以上前に広島で生じた爆発に関して、より満足のいく説明を行なうため、広島型爆弾に関する理論的作業およびモデル作成が進行中である。
8. ワークショップは現在払われている最大限の努力を、「国際原爆線量推定年」(IABDY) [2000年3月～2001年3月]として、関係する研究者その他の人々に広く知らしめ、また、この1年間に課題を完遂することに我々の努力を注ぐことを提案する。
9. DS86策定以前のどの方式よりも真の線量推定方式に近いDS86は、被爆者の被曝線量を表す優れた線量推定方式である。約1年後に新方式が完成し日米の上級線量グループにより合同で承認されるまで、DS86の使用は続けられる。
10. ワークショップは、日米の研究者が

協力し積極的に作業を進めてこれらの目標を達成し、また、米国(エネルギー省)および日本(厚生省)の両政府が協力して資金ならびに援助を提供しこの科学的課題が遂行されることを保証することを確認する。

2) 原爆放射線被爆の健康後影響

1. 原爆被爆者のがん死亡および発生における放射線被曝の寄与リスクの推定(担当: 柴田義貞、清水由紀子、陶山昭彦)

放射線影響研究所の寿命調査対象者におけるがん死亡(1950-1990)およびがん発生(1958-1987)のデータを基に、部位別リスクの推定および寄与リスクの推定を行った。さらに、寄与リスクについては、がん以外の疾患による死亡および慢性肝炎・肝硬変罹患についても検討した。

2. 良性腫瘍(山田美智子)

放射線影響研究所の寿命調査対象集団において、広島・長崎の腫瘍登録の資料に基づき病理疫学的方法を使って、胃、結腸および直腸の良性腫瘍と唾液腺の良性腫瘍について検討した。さらに、寿命調査対象者の剖検試料を再度精査することにより、増殖性乳腺病変と放射線量の関係を検討した。寿命調査対象集団の亜集団である成人健康調査集団では、超音波検査により、子宮結節有病率と放射線量の関係が調べられた。調査された良性腫瘍の中で、放射線による誘発が認められた良性腫瘍は胃、唾液腺、乳腺と子宮筋腫であった。

3. 甲状腺疾患(赤星正純)

長崎成人健康調査対象者全員に甲状

腺超音波検査、さらに甲状腺に腫瘍を認めた全症例について細胞診を行なって甲状腺腫瘍の診断を確定した。甲状腺癌、甲状腺腫および組織型が判明していない甲状腺結節は線量と伴に増加した。また、自己抗体陽性の甲状腺機能低下症については、線量との間に上に凸の関係を示が示された。放射線内部被曝の影響については、放射性降下物の落下が確認された長崎西山地区の調査で、結節性甲状腺腫の増加が確認されている。

4. 糖尿病と呼吸器疾患（伊藤千賀子）

糖尿病に関しては原爆放射線との関連を報告した文献がなかったので、1990～1998年の検診受診者について糖尿病頻度と9年間の推移を詳細に検討したが、被曝の影響はみられなかった。肺癌以外の呼吸器疾患と原爆放射線被曝の関連についても数件の報告のみで、何れも被曝との関連は認めていない。一方、肺癌に関する報告は散見される。その中で被曝者肺癌の特徴として腺癌の増加がみられ、被曝線量と共に明らかに増加しているとの新しい知見が得られている。

5. 放射線誘発性血液疾患、とくに白血病に関する研究（朝長万左男）

原爆被曝者の白血病に関する放影研の公式レポートのデータベースに基づく追試を行った研究があり、non-threshold model がほぼ追認されている。白血病全体としては、線量反応は二次曲線を描く傾向があるが、これは最も症例数が多い急性骨髄性白血病（AML）の線量反応が反映されたものであり、被曝後早期にリスクが上昇し、比較的短期間で元に戻った急性リンパ性白血病（ALL）

と CML では、個別に解析すると linear model に最も fit することが認められる。

6. 循環器疾患（児玉和紀）

放影研寿命調査集団において、被曝者にがん以外の疾患死亡率の有意な増加が認められた。ただ、増加の程度は 1Sv 被曝につき 10%程度で、1Sv 被曝あたりの過剰相対危険度は、脳卒中死亡 0.09、心臓病死亡 0.14 であった。線量・効果曲線に閾値があるか否かについては確定できなかったが、0.5Sv 未満の被曝ではリスクの増加は全くみられなかった。成人健康調査においても被曝線量の増加に伴う心筋梗塞発生率の増加が認められている。ただし増加の程度は軽微で、1Gy 被曝の心筋梗塞発生相対危険度は 1.17 であった。またこの増加は、被曝時年齢 40 歳未満に特に有意であった。現時点では、放射線被曝と循環器疾患の関係については、疫学的に関連は認められるもの、放射線が動脈硬化を引き起こすメカニズムについては定かではなく、今後更なる研究が必要と考えられる。

7. 肝疾患（藤原佐枝子）

放影研寿命調査および成人健康調査から、原爆放射線被曝線量が高いほど、肝がん、肝硬変、慢性肝疾患の発生率が増加することが認められた。肝炎ウイルスの調査では、HBs 抗体陽性率と放射線被曝線量との関係は認められていないが、HBs 抗原陽性率は線量が高いほど高かった。また、C 型肝炎ウイルス（HCV）抗体陽性率は、放射線被曝との関係は認められなかった。しかし、HCV 抗体陽性者における慢性肝炎有病率は線量が高いほど高率で、陰性者における慢性肝炎有病率と線量との関係に比べて傾き

が急峻であった。この結果はHCV抗体陽性者において被曝によって慢性肝炎に進行しやすい可能性を示唆しているが、統計学的には有意な関係があるという証拠はなかった。

8. 眼科疾患（鎌石和男）

広島・長崎原爆被爆者の1978-80年の眼科検査について、DS86眼臓器線量に基づいて再解析され、若年齢者の水晶体が高齢者の水晶体よりも放射線感受性が高いことを示唆された。後囊下変化については、放射線誘発加齢効果の明確な証拠はなかった。1949年から1964年の間に認められた白内障（水晶体後囊下混濁）発現と電離放射線被曝の閾値が再検討され、推定閾値は、中性子線に対しては0.06Gy、ガンマ線に対しては1.08Gyであった。中性子RBEを18と仮定したDS86眼の臓器線量当量を用いた場合の放射線誘発白内障における安全領域の閾値は、1.75Sv（95%信頼区間1.31-2.21Sv）と推定された。

9. 免疫能への影響（楠洋一郎、京泉誠之）

被爆者においてTリンパ球（特にCD4 T細胞）が司る細胞性免疫の低下とBリンパ球が介在する体液性免疫の亢進が認められている。このような免疫系への長期的な放射線の影響は、被爆後のTリンパ球（特にCD4 T細胞）の回復が胸腺の加齢による退縮により不完全であったため、また放射線がCD4 T細胞の機能的分化に影響を与えて細胞性免疫が低下し体液性免疫が亢進するように免疫学的不均衡をもたらしたためであると考えられる。細胞性免疫の低下は、感染性微生物が原因の一つと考えられている

肝疾患や心臓血管疾患の発生に関係するかもしれない。原爆被爆者の免疫学的研究は、放射線の免疫系に対する影響の詳細を明らかにしつつあるとともに、種々の疾患の発生と免疫系の関わりについて新たな局面を迎えている。

10. 突然変異（京泉誠之、楠洋一郎）

ヒト血液細胞を用いた生体内体細胞突然変異体頻度の測定法の中で赤血球グリコフォリンA (GPA) 遺伝子突然変異体頻度のみが原爆被爆者において明確な線量効果関係を示した。これは、長寿命の血液幹細胞に放射線により誘導されたGPA突然変異が記録され、現在も突然変異赤血球が産生され続けていることを意味している。原爆被爆者GPA体細胞突然変異調査から、倍加線量は1.20Sv、最低検出線量は0.24Svであることが推定された。しかしながら、被爆者個人間のばらつきが大きく、個人の被曝線量推定への応用は難しいことがわかった。一方、GPA突然変異体頻度は癌リスクと挙動がよく似ていた。さらに、測定前後に悪性固型腫瘍と診断された被爆者のGPA突然変異体頻度の線量効果はそれ以外の被爆者よりも有意に大きいことがわかり、GPA突然変異の発癌リスクマーカーとしての意義が示唆された。

11. 生物学的線量評価（中村典、児玉喜明）

生物学的な被曝線量の評価には、末梢血中のリンパ球における染色体異常頻度と歯エナメル質における電子スピン共鳴（ESR）信号とが用いられている。染色体異常に関しては、長崎の工場内被爆者の調査結果の解析によりこれらの人はDS86線量が過大に与えられている

可能性が強く示唆された。また従来より知られていたクローン性異常は、骨髓幹細胞ばかりではなく末梢血中の成熟リンパ球にも由来する事が明らかになった。更には染色体異常の型を分類すると異なる種類の放射線被曝の証拠になる可能性が提唱され広島原爆の放射線にはもっと中性子線の寄与が大きかったのではないかと議論されたが、被爆者の調査結果を吟味したところそのような示唆は得られなかった。他方、歯エナメル質を用いた ESR 調査からは、染色体異常頻度との良い相関が認められたと同時に前歯には太陽紫外線の影響が大きく線量評価には用いるべきでない事が明らかとなった。

12. 遺伝的影響（小平美江子、中村典）

放影研で行ったミニサテライト遺伝子座における突然変異の検索において、単一遺伝子座検出用ミニサテライトプローブを用いて検索した結果、親の被曝の影響は見出されなかった。また、DNA フィンガープリントプローブ（多数のミニサテライト遺伝子座を同時に検査するもの）による検索の結果得られた突然変異率も放射線の影響は検出されなかった。

13. 海外の被爆者の現状（土肥博雄）

本邦には現在、原爆被爆者手帳を有する被爆者は約 31 万人存在するが、海外にも広島、長崎で被爆した被爆者が存在する。北米 1,076 名、南米 189 名、韓国 2,348 名、中華人民共和国 24 名、朝鮮民主主義人民共和国 1,301 名、その他（ブルネイ、マレーシア、インドネシア）5 名、台湾は不明である。

E. 結論

原子爆弾被曝線量評価方法（DS86）の再評価の進捗状況のまとめと今後の問題点の提起、原爆放射線被曝の 1990 年から現在までの健康後影響の知見を整理した。最近の知見では、原爆放射線被曝とがん以外の疾患との関係が認められているが、そのメカニズムは不明であり今後検討する必要があると思われる。

原子爆弾被曝線量評価方法の再評価に関する研究

分担研究者 平 良 専 純（放射線影響研究所 常務理事）
研究協力者 丸 山 隆 司（放射線影響協会企画部長）
Dale Preston（放射線影響研究所統計部長）
藤 田 正一郎（放射線影響研究所統計部副部長）

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、熱中性子による放射能の測定値と対応するDS86計算値が距離ごとに系統的なズレがあるとされ、約10年間日米共同による再評価がおこなわれてきた。学問的にはまだ解決を見るに至っていない。線量再評価を促進させ、未解決の問題点やその解決策について広く討論し整理するために、本年度3月に広島で日米合同の線量ワークショップを開催した。この1年間に課題の完遂に努力を傾注すると共に、新方式の完成および日米合同の承認まで、DS86の使用を続けることの妥当性を確認した。

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、熱中性子による放射能の測定値と対応するDS86計算値が距離ごとに系統的なズレがあるとされ、中性子問題として約10年間日米共同による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。そこで、本研究では、まず被曝試料の測定を中心に現時点における問題点の整理を行った。更に、

線量再評価の促進を念頭に置き開催された日米合同の線量ワークショップにより、未解決の問題点やその解決策について広く討論した結果を要約する。

B. 背景

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、被爆者一人一人について被爆位置、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（空気中カーマ）、遮蔽物が放射線を遮る程度を考慮した線量（遮蔽カーマ）、更に、身体

組織が放射線を遮る程度を考慮した各臓器が受ける線量（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。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（空気中カーマ、遮蔽カーマ、臓器線量）を推定することにあり、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。現在行われている再評価においても、日本側は被曝試料の測定、米国側は計算プログラムのチェックが中心的な役割である。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年間日米共同による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。現在では、放影研・広大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、米国およびドイツでも測定を行っている。

C. 研究の方法と結果

I. 問題点の整理

DS86に関する問題点を、1) 測定、2) 家屋・地形による遮蔽、3) 臓器線量の各項目についてまとめた。項目1) については、空気中カーマ（無遮蔽状態での被曝線量に相当）の検証の意義があり、再評価の焦点でもある。項目の2) およ

び3) は、問題点というよりも主として費用と便益の兼ね合いの問題で、労力を払うことにより精度を上げることができる。DS86の概要については添付の資料（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, 20. 被曝線量の推定, 1. DS86. 東京, 文光堂, pp. 332-342, 1992.）を参照されたい。

1) 測定について

被曝試料の測定データは、DS86以前の測定値も含めて、現在までに学術雑誌に公表されているものが全部で約600件（広島500件弱、長崎約100件）を越している。測定値の件数を爆心地からの距離別分布として表1に示した。そのうち、中性子（1件を除いて全て熱中性子）関連が約400件、ガンマ線関連が約200件である。これらの測定値と対応するDS86計算値との関係、および今後とも測定の必要性が有りや否かを線質別にまとめた。

1. 熱中性子（広島）： 熱中性子誘導放射能（Eu152, Co60, Cl36）の測定値と応ずる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、測定データは十分と考えられる。但し、遠距離（爆心地から1500m近辺）になっても測定値減少が緩く、バックグラウンドに関するデータが注目されている。

2. 熱中性子（長崎）： 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。岩石等の試料は収集されており、現在測定が行われており結果が注目される。

2. 速中性子： 速中性子誘導放射能である隣-32（P32）のデータは17件あるが、近距離の測定値に限られており、半減期

表1 被曝試料に基づく残留放射能測定値の件数：都市別、中性子（同位元素別）・ガンマ線別

爆心地からの距離(m)	中性子（同位元素）							ガンマ線	総計
	CI-36	Co-60	Eu-152	Eu-154	Ni-63	P-32	小計	TLD	
広島									
<800	6	74	212	3	1	13	309	26	335
800-1000	1	3	17			3	24	12	36
1000-1500	2	7	10			1	20	53	73
1500-1750	2	2					4	7	11
>1750		1					1	34	35
広島小計	11	87	239	3	1	17	358	132	490
長崎									
<800	7	7	25				39	17	56
800-1000	11	2	13				26	15	41
1000-1500								21	21
1500-1750								3	3
>1750			3				3	8	11
長崎小計	18	9	41				68	64	132
総計									
	29	96	280	3	1	17	426	196	622

が短く現在は測れない。近年、半減期が比較的長い銅試料中の速中性子誘導放射能ニッケル-63（Ni63）の測定が可能となり、数力所から被曝銅試料を収集し、現在測定中である。速中性子は中性子線量への寄与が大きく、中性子問題解決の決め手と期待されている。現存する銅試料が極めて少ないが、特に遠距離の銅試料（1500m位まで）の収集が求められている。

3. ガンマ線： ガンマ線量はTLDという方法により測定値が得られる。測定値はDS86計算値に較べ若干高い（約10%）ものの、非常に良く一致している。しかしながら、被曝線量の総合評価にはガンマ線量の再評価の方が中性子線量よりも寄与は大きいと考えられ、無視はできない。距離と共に若干倍率が増加するとのデータもある。測定値データは十分と考えられている。

2) 家屋・地形による遮蔽について

木造家屋内被曝については、個々の被爆者のファイルから前方遮蔽に関する未使用情報を活用することにより、より正確な被曝線量の評価ができる。コンピューター的能力が大幅に向上した現在、DS86で広島・長崎を2次元平面として扱ったものを3次元で計算することにより、特に、広島の比治山や長崎の金比羅山の裏側で被曝した被爆者の線量計算をより正確なものにできる。

3) 臓器線量について

DS86臓器線量の計算に用いたファントムについて、現在はもっと詳細なもの、例えば、ヌードファントムが使用できる。

II. 日米合同の線量ワークショップ

日米合同の線量ワークショップを、（財）放射線影響研究所の主催により、3月13日と14日の両日、広島全日空ホテル

ルにおいて開いた。参加者は日米独の専門家併せて約60名に及ぶものであった（日：40名、米：16名、独：2名、）。このたびのワークショップでは、原爆被爆者の個人被曝線量の推定に用いられているDS86の再評価に関して、日米欧の研究者による最新の調査研究結果を検討し、今後の研究体制、未解決の問題点とその解決策について広く討論し整理することを行った。以下の如く要約される。

1. 本ワークショップにおいては、広島・長崎に投下された原子爆弾により、当時（1945）両市にいた人々が被曝したと考えられる速中性子、熱中性子およびガンマ線について日本および米国（ならびにドイツ）で実施中の測定の結果について検討が行なわれた。遮蔽および位置に関する問題についても討議が行なわれた。

2. 測定結果は、地上で被爆した人に生じた被曝事象について、現行のDS86線量推定方式よりも、より正確な説明を示唆して可能性もある。

3. しかし、一部の測定結果は測定途中の予備的なものであり、より正確かつ完全な測定が必要である。

4. 日本、米国およびドイツの研究者は、測定準備ができており、既に入手している試料に関して可能な限り迅速に測定を進めている。

5. より完全な測定を実施するために、原爆投下時に、広島・長崎の特定箇所および爆心地から特定の距離に存在したより多くの銅（その他真鍮や青銅）の試料が早急に必要である。この種の試料入手のため、広島・長崎のすべての人々の協力が早急に（今すぐにも）必要である。

6. このような測定が十分な量の試

料について実施され、短期—例えば来年中—に結論が得られれば、DS86よりも優れた線量推定方式が導入可能であろう。

7. 同時に、50年以上前に広島で生じた爆発に関して、より満足のいく説明を行なうため、広島型爆弾に関する理論的作業およびモデル作成が進行中である。

8. ワークショップは現在払われている最大限の努力を、「国際原爆線量推定年」（IABDY）〔2000年3月～2001年3月〕として、関係する研究者その他の人々に広く知らせめ、また、この1年間に課題を完遂することに我々の努力を注ぐことを提案する。

9. DS86策定以前のどの方式よりも真の線量推定方式に近いDS86は、被爆者の被曝線量を表す優れた線量推定方式である。約1年後に新方式が完成し日米の上級線量グループにより合同で承認されるまで、DS86の使用は続けられる。

10. ワークショップは、日米の研究者が協力し積極的に作業を進めてこれらの目標を達成し、また、米国（エネルギー省）および日本（厚生省）の両政府が協力して資金ならびに援助を提供しこの科学的課題が遂行されることを保証することを確信する。

D. 考察

DS86線量評価体系は1986年に導入された。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DS86に対する不信の声もある。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ている。

熱中性子のズレの問題であるが、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試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。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なく、熱中性子の測定のみが行われてきた。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、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。まだ、技術の改善や試料の収集など時間がかかりそうだと考えられてきた。

熱中性子による放射能の測定値と対応するDS86計算値が距離ごとに系統的なズレがあるとされ、約10年間日米共同による再評価がおこなわれてきた。学問的にはまだ解決を見るに至っていない。線量再評価を促進させ、未解決の問題点やその解決策について広く討論し整理するために、本年度3月に広島で日米合同の線量ワークショップを開催した。こ

の1年間に、中性子問題のみならず、ガンマ線量も加えた被曝線量の総合評価など課題の完遂に努力を傾注することとなった。新方式が完成し、日米合同の上級線量委員会により新方式が承認されるまで、DS86の使用を続けることが確認された。

E. まとめ

原爆被爆者の個人被曝線量を推定するための最良の体系として用いられているDS86に関して、一部のものにではあるが、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。DS86は、それ以前のどの方式よりも真の線量推定方式に近く、被爆者の被曝線量を算定するための優れた線量推定方式である。再評価が行われている現在においても、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。

19990062

P.13-23 は雑誌/図書等に掲載された論文となりますので下記の「研究成果の刊行に関する一覧表」をご参照ください。

「研究成果の刊行に関する一覧表」

20. 被爆線量の推定 20-1DS86

原爆放射線の人体影響 1992 年 P.332-342

原子爆弾被爆線量評価方法の再評価

分担研究者 葉佐井 博 巳（広島国際学院大学工学部長）

研究要旨

広島長崎の原爆の放射線量見直しが行われ、線量評価体系（DS86）が日米の共同研究の結果発表された。その後、広島の被爆資料からの残留放射線を測定した結果、このDS86と比較すると、この間に違いがあることが判明した。そこであらためて長崎のデータを検討した結果測定値にばらつきが見られることが分かった。広島と同じ方法で長崎の線量測定を行い、この違いが同じ傾向にあるかを検討し、違いの解明に役立てることとした。資料収集から始め、中性子により誘導された岩石中のEu-152生成量を測定した。

A. 研究目的

DS86 はアメリカ側で当時のスーパーコンピュータを駆使して行った計算が主体になっている。この中では原爆の爆発点や、その地点での中性子スペクトルを入力し、その後の輸送計算（中性子が空気など物質を通過するときの散乱によりスペクトルも変化する）を行い到達点での線量とスペクトルを評価している。そのときのデータを基に熱中性子で誘導されたEu-152やCo-60が推定されるが、その推定値と我々の測定した値が一致して初めて線量評価は正しいと言える。我々の測定した広島データは十分に蓄積され、又、新しく加速器質量分析法（AMS）によりCl-36のデータも追加された。ところが、測定値と計算からの推定値の間に、近距離と遠距離でずれが見られる。

人体に及ぼす被爆は速中性子（100 keV以上）が問題になるが、Eu-152やCo-60、Cl-36は熱中性子で誘導されているため、計算と一致しない限り速中性子の推定値には疑問が残る。そこで

どうしても測定が間違っているか計算のどこかに問題があるかを解明しなければならない。そのため広島データに対してはバックグラウンドの問題や測定誤差の問題も含めて検討してきた。一方広島と長崎の爆弾はもともと異なったタイプである。そのため、長崎のデータが注目されてきた。長崎における残留放射能Eu-152の測定データはばらつきが大きく、違いの有無については明確ではなかったが、StraumeらによるAMSによるCl-36の測定からは、DS86に基づく計算値と一致しているとの報告がなされた。もしこのことが正しければ爆弾による影響が大であることになる。ところがCl-36の測定は3カ所のサンプルについて行われただけで、さらに多くの場所の測定が必要であるとともに、Co-60, Eu152などの他の核種についても確かめる必要が生じた。そこで広島・長崎放射線影響研究所の協力を得て、爆心から1 kmの範囲内で被爆資料の採取を行い、Eu-152の測定をするための試料処理を行い、現在測定中

である。これまでに得られた結果について報告する。なお、直接速中性子による反応を見れば健康影響に関するデータが得られるが、残念ながら今となつては有効な資料が得られない、最近Cu(n, p)Ni反応を測定できる可能性が見つかり、今資料の収集や測定技術の開発を考えている。

B. 研究方法

長崎のEu-152のデータを追加するために、平成10年度に10カ所から13個の資料を採取し11年度にかけて試料作成を行い測定をしてきた。この中の一つ

はコントロールで、爆心から2.8kmの地点から採取された。その他の資料は爆心から1kmの範囲内で、被爆当時の写真などを参考にして選んだ。Table 1に平成10年度の採取資料を示す。測定の結果、必ずしもすべての資料からEu-152は検出されなかった。このため計算値との違いの有無を確かめるにはさらに、爆心から1km付近での資料収集が必要であることが判明した。そこで、平成11年度にさらに、被爆建造物等の記録等1, 2)を参考にして岩石資料を選び、5個の資料採取を行った。Table 2に平成11年度の採取資料をしめ

Table 1. Nagasaki rock samples for Eu-152 measurement
(sampling August 1998)

No	Location	Ground range (m)	Slant range (m)	Sampling weight (g)	Enriched sample (g)
1	Matsuyama-1	164.6	529.2	240	5.34
2	Matsuyama-2	164.6	529.3	320	5.55
3	Yana Bridge	311.4	596.9	310	5.56
4	Hashiguchi-cho	391.0	631.0	190	5.52
5	Gokoku shrine- A	651.2	815.7	1450	3.50
6	Gokoku shrine- B	651.2	814.8	1510	4.27
7	Nanzan school- A	703.6	849.9	1240	5.44
8	Nanzan school- B	706.0	851.9	1200	5.90
9	San-ou Shrine	812.3	948.2	1040	12.80
10	Urakami station- A	870.5	1006.7	900	5.90
11	Sakamoto-cho	952.4	1068.4	1200	3.77
12	Urakami station- B	968.0	1092.1	700	2.26
13	Maruo-cho	2849.7	2889.5	1460	4.76

Table 2. Nagasaki rocke samples for Eu-152 measurement
(sampling: August 1999)

No	Location	Ground range (m)	Slant range (m)	Sampling weight (g)	Enriched sample (g)
1	Matsuyama-cho	155.4	526.5	240	-
2	Shimoda-house	781.9	926.5	320	7.00
3	Prefectrural gymnasium A	920.6	1046.3	310	5.43
4	Prefectrural gymnasium B	895.2	1024.0	190	6.51
5	St. Maria school	943.2	1061.2	1450	3.25

す。現在試料処理も終わり測定中である。測定に当たっては、先ず岩石を粉末にし化学処理を行い、岩石中のEuをの濃縮し、その中のEu-152の放射線量をGe検出器で測定する。濃縮されたEuの量は広島大学原爆放射能医学研究所のCf-252を使い放射能分析の手法を用いた。その結果Eu-152/Euの比を出し測定値とする。

C. 研究結果

現在測定中ですべてのデータが揃っているわけではないが、途中結果をTable 3に示す。また、Fig.1に爆央からの距離と比放射能Eu-152/Eu(Bq/mg)の関係を示す。この中で本研究の結果をDS86, 93Rev中性子による計算結果と比較するとともに、中西らの測定結果3, 4)と比較した。

Table 3. Preriminary results of Eu-152 measurement for Nagasaki samples

No	Location	Ground range (m)	Slant range (m)	Eu-152:Eu (Bq/mg)
1	Yan bridge	311	597	24.8 ± 2.9
2	Urakami churcha	465	677	6.5 ± 1.1
3	Nagasaki Univ.hospital	653	809	
4	Gokoku shrine A	651	816	2.73 ± 0.36
5	Gokoku shrine B	651	815	3.57 ± 0.63
6	Nanzan school	704	850	1.31 ± 0.29
7	Shimoda house	782	927	1.34 ± 0.40
8	Prefectural gymnasium A	921	1046	1.12 ± 0.41
9	St. Maria school	943	1061	1.05 ± 0.53
10	Sakamoto-cho graveyard	1039	1142	0.58 ± 0.31

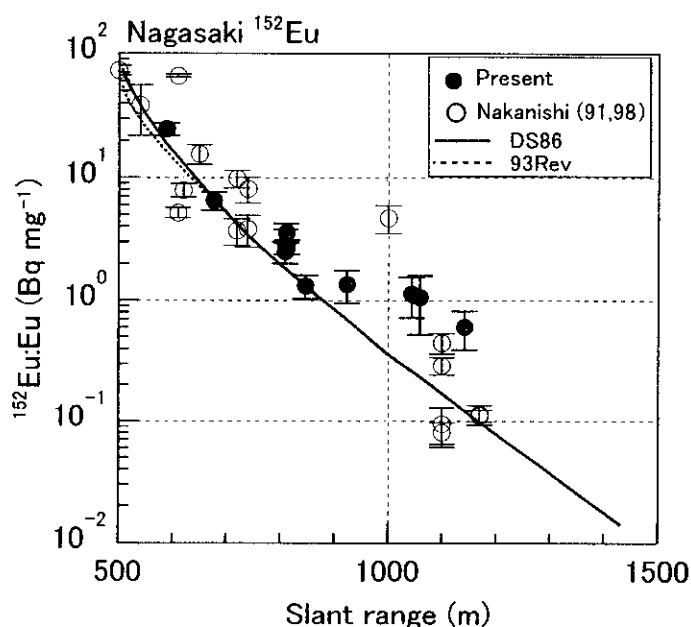


Fig.1 Specific activity $^{152}\text{Eu}:\text{Eu}$ for samples in Nagasaki

D. 考察

長崎の測定データと比較するために、広島Eu-152/Eu測定データをFig. 2に示す。実線はDS86を用いて推定した計算値で、明らかに測定値を説明することはできない。即ち測定値は計算値に比べ近距離で小さく遠距離では大きい値を示す。この事はCo-60やStraumeらのCl-36のデータでも同じ事が言える。Fig1に示す長崎のデータを見ると、今回の広島グループのデータはDS86とずれているようにも見える。この測定結果からは長崎においても約800m付近より遠方においては測定値の方がやや高い傾向にあることを示している。一方以前測定された中西のデータはDS86で説明できそうである。今後さらに測定を繰り返すことにより、正確なデータを得る予定である。

E. 結論

現在までに判明したことは広島においては明らかにDS86からの推定値と測定値の間に違いが存在している。長崎のデータについても同じ事が言えたら原因は輸送計算にある可能性が高まってくる。この事を決定するためにはさらにデータを蓄積し精度を上げ、さらに他の測定例えばCl-36, Ni-63等のデータが出そろるのが望ましい。

F. 参考文献

- 1) 長崎被爆50周年事業「被爆建造物等の記録」(長崎市、平成8年)
- 2) 長崎被爆50周年事業「被爆建造物等の記録」図面編(長崎市、平成8年)
- 3) T. Nakanishi, H. Ohtani, R. Mizuoch et al., J. Radiat. Res. 32, Suppl. 69-82(1991)

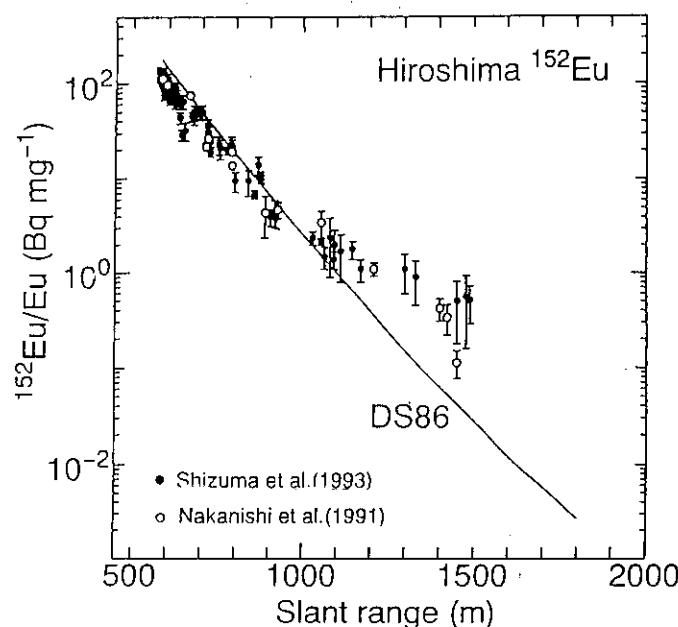


Fig. 2 Specific activity $^{152}\text{Eu}/\text{Eu}$ for samples in Hiroshima