

4. DS86 の中性子不一致問題から DS02 へ

DS86 のガンマ線量については、被爆レンガやタイルの TL 測定データと比較され、広島 2km、長崎 1.5km の距離まで、計算と測定がまずまず一致する結果が得られていた。中性子については、速中性子データとして利用できるのは、原爆直後の  $^{32}\text{P}$  測定データだけであったが、距離 0.7km まで DS86 計算結果と矛盾していない。しかし、熱中性子については、橋詰らの  $^{60}\text{Co}$  測定値を DS86 計算値と比べると、近距離では計算値が大きく、距離とともに計算値が小さくなって一致せず、open question として残された。 $(^{152}\text{Eu}$  については、測定データが不十分で明確な判断はできなかった。)

DS86 後、日本側研究者による中性子放射化問題への積極的な取り組みがはじまり、静岡ら<sup>18)</sup>や中西ら<sup>19)</sup>が被爆花崗岩などの  $^{152}\text{Eu}$  や  $^{60}\text{Co}$  を測定したところ、近距離では計算値の方が大きく遠距離で次第に小さくなるという、橋詰らの  $^{60}\text{Co}$  データと類似した傾向が認められた。一方、米国の Straume らは 1992 年、加速器質量分析 (AMS) を用いて広島の被爆建物コンクリート中の  $^{36}\text{Cl}$  を測定し  $^{60}\text{Co}$  や  $^{152}\text{Eu}$  と同様の不一致傾向を報告した<sup>20)</sup>。

こうした熱中性子放射化データの不一致は当初、DS86 の計算プロセス、つまり、広島原爆の漏洩スペクトル計算か、大気・地面系での放射線輸送計算に問題があると考えられた。米国側でも DS86 の再検討がはじまり、1994 年頃から日米ワークショップを開いて中性子不一致問題が議論されるようになった。2000 年になり日本側・葉佐井、米国側・Young を座長とする日米合同 WG により問題解決に取り組むことになった。米国側では、LANL で Little Boy や Fatman 爆発プロセスのより詳細なシミュレーション計算が行われ、線源スペクトルが再計算された。そのスペクトルを基に ORNL や SAIC で放射線輸送計算が行われた(図 1)。また、広島花崗岩共通サンプルを用いて  $^{152}\text{Eu}$  と  $^{36}\text{Cl}$  測定に関する intercomparison が提案され、金沢大 ( $^{152}\text{Eu}$ )、筑波大 ( $^{36}\text{Cl}$ )、LLNL ( $^{36}\text{Cl}$ )、ミュンヘン工科大 ( $^{36}\text{Cl}$ ) が参加した<sup>21)</sup>。図 2 に、以前の主な測定と intercomparison の結果を示すが、 $^{152}\text{Eu}$  と  $^{36}\text{Cl}$  ともに、intercomparison は 1.2km 付近まで計算値とよい一致が得られた。以前の測定が遠距離で大きめになったのは、 $^{152}\text{Eu}$  についてはア

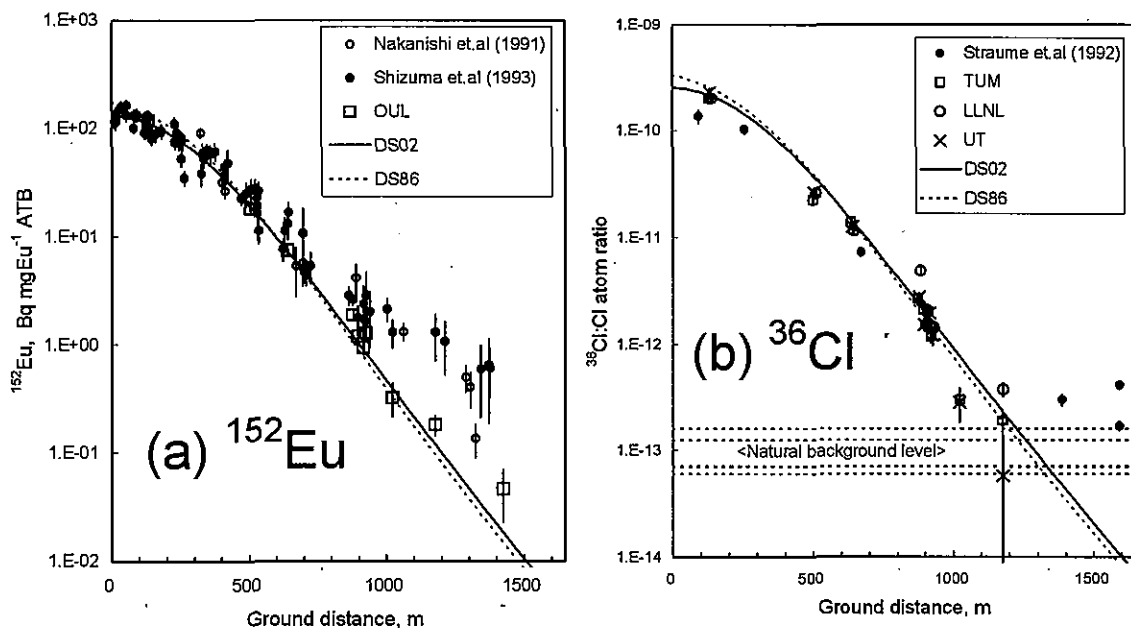


図 2. 広島原爆による  $^{152}\text{Eu}$  (a) と  $^{36}\text{Cl}$  (b) の測定値と計算値. OUL; 金沢大、TUM; ミュンヘン工科大、LLNL; ローレンスリバモア、UT; 筑波大.

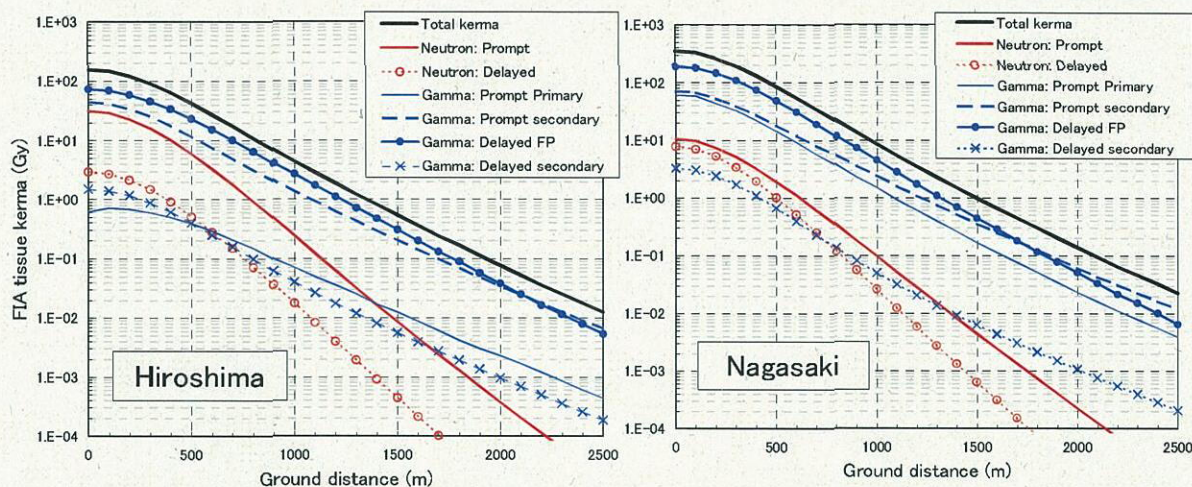


図3. DS02の初期放射線量：地上1mでの空気中組織カーマ (FIA tissue kerma)。中性子は即発と遅発の2成分。ガンマ線は、即発、遅発 (FP)、即発中性子2次、遅発中性子2次の4成分。

クチナイド系列  $^{227}\text{Th}$  と  $^{223}\text{Ra}$  の微小妨害ピークの影響、 $^{36}\text{Cl}$  についてはコンクリート中  $\text{Cl}$  が環境中  $\text{Cl}$  と化学的な置換作用をおこし、近距離で  $^{36}\text{Cl}$  濃度が低くなり遠距離で高くなったと推察されている。

日米合同 WG ではその他、銅試料中に速中性子(n,p)反応で生成した  $^{63}\text{Ni}$  について AMS や液体シンチレーションによる測定を行い 1.4km の距離まで計算値と一致する結果が得られた<sup>22,23)</sup>。さらに、従来からのデータをふくめ、放射線量評価に使えるすべての測定データをデータベース化して、爆発力、爆心地座標、爆発高さについての総合的な再検討を行い、新たな原爆放射線量評価システム DS02 を提案した<sup>24)</sup>。図3は、地上1mでの無遮蔽放射線量をガンマ線と中性子の成分別も含めてプロットしたものである。家屋遮蔽と人体遮蔽の計算モジュールは DS86 と基本的に同じである (図1)。2003年3月、日本側厚労省、米国側 DOE 推薦の8名の専門家によって構成された上級委員会により、DS02 は RERF の疫学調査で用いる被曝量推定方式として妥当なものであると承認された。表2には、DS86 と DS02 の主な違いをまとめた。DS02 は、DS86 以降の計算技術や測定技術の進歩、断面積ファイルの改良を反映したもので、いわば DS86 の version-up 版と言ってよいであろう。日本側 WG は、2004年7月に京大原子炉で専門研究会を開催して、DS02 に関するまとめと今後の課題について総合的な議論を行った<sup>25)</sup>。

表2. DS86 から DS02 への主な変更点。

	DS86	DS02
<広島>		
爆弾出力	15 キロトン	16 キロトン
爆発高さ	580m	600m
爆心位置		西へ 15m 移動
ガンマ線量		若干増加 (10%以内)
中性子線量		1-2km で増加 (最大 10%)
<長崎>		
爆弾出力	21 キロトン	変更なし
爆発高さ	503m	変更なし
爆心位置		西へ 3m 移動
ガンマ線量		若干増加 (約 10%)
中性子線量		1-2km で減少 (10-30%)

## 5. 残された問題

DS02 はどの程度確かか？ 無遮蔽空気中線量については、TL 測定データや放射化測定データとの比較から 2km までは±20%程度の不確定性を見込めばよいだろう。屋外遮蔽、人体遮蔽を含めた臓器線量では、問題はもっと複雑になる。DS02 報告書第 13 章で Kaul らは、22 人の被爆者について、染色体異常や歯エナメル ESR を用いた生物学的線量評価値と DS02 線量計算値を比較し、平均 30-40%の違いを認めている。しかし、Kaul らの解析では、outlier として 16 人が解析から除外されており、額面通りには受け取れない。生物学的線量評価の数を増やして LSS 集団全体に対する確かさを議論する必要がある。残留放射能による被曝量？ DS86 報告によると、LSS 集団の被曝に残留放射能が大きく寄与しているとは考えられないことから、DS02 では残留放射能の再評価は行っていない。一方、原爆直後に爆心近辺に出入りした早期入市者の中で脱毛や出血などの症状が報告されており<sup>5,26)</sup>、残留放射能による被曝影響の可能性が指摘されている<sup>27)</sup>。DS02 計算を基に誘導放射能にともなう外部被曝を計算してみると、爆心での無限時間積算として広島 1.2Gy、長崎 0.6Gy という値が得られたが、誘導放射能は時間および距離とともに急速に減衰するため、早期入市者の症状を大きな外部被曝があったとして説明することは困難である<sup>28)</sup>。放射性降下物（「黒い雨」放射能）については、最初に述べたように、広島では西方約 3km の己斐・高須地区、長崎では東方 3km の西山地区で放射線量増加が認められているが、その他では黒い雨による放射線量増加は記録されていない。これまで解明不十分だった広島山間部の黒い雨について、<sup>235</sup>U の速中性子(n,g)反応で生成した <sup>236</sup>U を測定して放射能降下量を評価する試みをはじめている。

## 文献

- 1) 放射線影響研究所要覧 (2008) 放射線影響研究所ホームページ: <http://www.rerf.or.jp>
- 2) 仁科記念財団 (編)「原子爆弾：広島・長崎の写真と記録」光風社(1973)
- 3) 日本学術会議 (編)「原子爆弾災害調査報告集」(第 1、2 分冊) 日本学術振興会 (1953)
- 4) N Pace and RE Smith, 「広島および長崎の原子爆弾被曝地域における残留放射能の強さの測定」 ABCC TR-26-59 (1959)
- 5) 広島市・長崎市原爆災害誌編集委員会 (編)「広島・長崎の原爆災害」岩波書店 (1979)
- 6) 日本学術会議 (編)「原子爆弾災害調査報告書 総括編」日本学術振興会 (1951)
- 7) GW Beebe 他「原子爆弾被爆生存者の寿命調査 (第 1 報)」 ABCC TR 05-61 (1961)
- 8) JA Auxier. "ICHIBAN" TID-27080 (1977)
- 9) RH Ritcher and GS Hurst: Health Physics Vol.1: 390-404 (1959)
- 10) JA Auxier et.al: Health Physics Vol.12: 425-429 (1966)
- 11) 斎藤信房「広島および長崎の原爆に伴う中性子束の推定」文部省研究報告集録 (放射線編)、p142 (1961)
- 12) T Higashimura et.al. Nature Vol.139: 1284-1285 29 March 1963
- 13) T Hashizume et.al. Health Physics Vol.13: 149-161 (1967)
- 14) RC Milton and T Shohoji 「原爆被爆生存者の 1965 年暫定線量(T65D)の推定」 ABCC TR 1-68 (1968)
- 15) E Marshall. Science Vol 212: 900-903. 22 May 1981
- 16) 今中哲二「広島・長崎原爆による中性子線量の推定」科学、Vol.53: 114-122 (1983)
- 17) WC Roesch (ed.) DS86 final report Vols. 1 and 2 RERF (1987). <http://www.rerf.or.jp>
- 18) K Shizuma et.al. Health Physics Vol.65: 272-282 (1993)
- 19) T Nakanishi et.al. J Radiation Research Vol.32: 69-82 (1991)
- 20) T Straume et.al. Health Physics Vol.63: 421-426 (1992).
- 21) M Hoshi et.al. Radiation and Environmental Biophysics Vol.47: 313-322 (2008)
- 22) T Straume et.al. Nature Vol.424: 539-542 31 July 2003
- 23) S Shibata et.al. J Radioanalytical Nuclear Chemistry Vol.273:517-520 (2007)
- 24) R Young and G Kerr G (ed.), DS02 report Vols 1&2. RERF (2005) <http://www.rerf.or.jp>
- 25) 薬佐井他 (編)、DS02 専研報告、KURRI-KR-114(2005)<http://hlweb.rri.kyoto-u.ac.jp/shibata-lab/DS02/KURRIKR114.html>
- 26) NHK 広島局・原爆プロジェクトチーム「ヒロシマ・残留放射能の 42 年」日本放送出版協会 (1988)
- 27) 沢田昭二「原爆症認定集団訴訟が問いかけるもの」、『いま問うヒバクシャと戦後補償』凱風社(2006)
- 28) T Imanaka et.al. Radiation and Environmental Biophysics Vol.47: 331-336 (2008)

Historical Review of Radiation Dosimetry for the Hiroshima-Nagasaki Atomic Bombs and Remaining Tasks  
Tetsuji IMANAKA