

広島・長崎原爆放射線量評価体系の変遷と未解決問題

(京大原子炉) 今中哲二

第2回「原爆体験者等健康意識調査報告書」等に関する検討会	参考資料2
平成23年2月24日(木)	

(今中参考人提出資料)

広島・長崎の被爆生存者を対象に放射線影響研究所 (Radiation Effects Research Foundation: RERF) で実施されている疫学的追跡調査は、放射線被曝にともなう長期的な人体影響に関して多くの貴重なデータを提供している<sup>1)</sup>。疫学データに基づいて被曝リスクを求めるためには被曝量の値が必要となるが、被爆者の個人被曝量を評価する方法としては現在、DS02 (Dose System 2002) と呼ばれる放射線量評価システムが採用されている。報告者はDS02策定のWGメンバーとして原爆放射線量評価の問題に関わった。広島・長崎の原爆からすでに63年を経過し、その放射線量評価作業はなかば“考古学”の感もあるが、原爆直後の調査活動を含め、原爆放射線量評価の変遷を振り返ってみるとともに、残されている課題についてまとめてみる。まずは、原爆放射線の分類を表1に示しておく。

1. 原爆直後の放射能調査活動

「新型爆弾」の調査のため理化学研究所の仁科芳雄らが広島に到着したのは原爆2日後の1945年8月8日だった<sup>2)</sup>。その2日後の8月10日には、京都帝大の荒勝文策らのグループと大阪帝大の浅田常三郎らのグループが広島入りしている<sup>3)</sup>。いずれのグループも爆心近辺の土壌や銅などのサンプルから通常以上の放射能を検出し、新型爆弾が原爆であることを確認した。用いられた放射線検出器はLauritzen検電計とGM管だった。長崎では九州帝大の篠原健一らが8月13日に採取した土壌から放射能の増加を確認している<sup>2)</sup>。9月14日には文部省学術研究会議が、被災状況を解明するため「原子爆弾災害調査研究特別委員会」を発足させるなど、当初の調査活動は活発だった。(なお、京大第3次調査団は広島滞在中の9月17日夜に枕崎台風にとともなう山津波により11名の殉職者を出した<sup>2)</sup>。)

原爆を落とした米国側にとっても、原爆の威力を調査することは最優先の課題であった。9月2日に降伏文書が調印され連合軍占領統治がはじまると、米軍最初の放射線サーベイチームが9月8日に広島入りし、13日には長崎に入っている。米国海軍医学研究所のPaceらは、ラジウム校正線源付ポータブルGM管により1945年の10~11月に長崎(約900カ所)と広島(約100カ所)の残留放射能を測定している<sup>4)</sup>。彼らの報告によると、爆心地での放射線量は、長崎で72 $\mu$ r/h(10月18日)広島で81 $\mu$ r/h(11月1日)であった。黒い雨地域については長崎西山地区で1080 $\mu$ r/h、広島高須地域で42 $\mu$ r/hであった。米国側調査団は日本側研究者に協力を求めたが、その一方で連合軍総司令部は9月19日にプレスコードは設け、原爆災害の報道や発表を禁止した<sup>5)</sup>。

学術研究会議調査委員会報告の総括編<sup>6)</sup>が出版されたのは1951年のことで、1953年には本編2分冊<sup>3)</sup>が出版された。本編には、広島電柱碍子中硫

表1 原爆放射線の分類

放射線の種類	有効時間	被曝量への寄与
<初期放射線>		
-即発放射線-		
即発ガンマ線	< $\mu$ sec	中
即発中性子線	< msec	中
即発2次ガンマ線	< 0.1 sec	大
-遅発放射線-		
遅発ガンマ線	< 30sec	大
遅発中性子線	< 10sec	小
遅発2次ガンマ線	< 10sec	小
<残留放射線>		
誘導放射能	< weeks	小?
フォールアウト(黒い雨)	< months	?

黄に(n,p)反応で生じた  $^{32}\text{P}$  を測定した山崎文男らの報告、熱線による陰影から爆央点を推定した田島英三らの報告など、原爆直後の調査活動について約 200 編の報告が含まれている。1946 年はじめに書かれた原稿の中で中泉正徳は、広島原爆による放射線量として爆心からの距離 1000、1500、2000m でそれぞれ 325、82、26 r (レントゲン) という推定値を示している<sup>6)</sup>。

## 2. ABCC (現 RERF) の設置と T65D の策定

米国トルーマン大統領は 1946 年 11 月、米国学士院 (NAS) に対し、広島・長崎での原爆被爆影響を継続的に調査するため原爆傷害調査委員会 (Atomic Bomb Casualty Commission: ABCC) の設置を命じた。1947 年に広島と長崎に ABCC の研究所が設置され、日本側からは厚生省予防衛生研が協力することになった。ABCC の初期の活動で確認された放射線被曝影響は、胎内被爆者小頭症・精神遅滞、白内障、白血病であった。1955 年に ABCC の研究計画の見直しが行われ、大規模な固定集団を設定して長期の疫学調査を実施することになった<sup>1)</sup>。

1950 年の国勢調査で日本政府は原爆被災に関する付帯調査を行っていた。その調査によると被爆者の数は 28.4 万人で、この中から、広島・長崎に本籍があり、爆心から 2.5km 以内いた全員 4.5 万人と 2.5 ~ 10km にいた 2.8 万人の合計 7.3 万人が調査対象として抽出された。さらに、原爆時に市内にいなかった 2.6 万人を加えて、約 10 万人を対象とする寿命調査 (Life Span Study: LSS) がはじまった<sup>7)</sup> (その後、本籍が広島・長崎でない被爆者などが追加され、現在の LSS 集団の人数は 12 万人)。追跡開始時点は国勢調査が行われた 1950 年 10 月 1 日で、それ以降の生死が定期的に戸籍で照合され、死亡の場合は死亡診断書により死因確認が行われている (LSS 第 13 報終了時点 (~1997.12.31) での生存率は約 48%)。

LSS の立ち上げと平行して、被爆者ひとりひとりの個人被曝量を推定しようという ICHIBAN 計画がはじまった<sup>8)</sup>。ICHIBAN には 2 つの大きな課題があった。そのひとつは、原爆による地上の放射線場を爆心からの距離の関数として定式化し、さらに家屋などによる遮蔽効果を見積もって個人被曝量を推定する手法を開発することであった。もうひとつの課題は、出来上がった線量評価システムを適用すべき LSS 集団各被爆者が、原爆時にいた場所と周囲の遮蔽状況に関する情報を収集することであった。

野外放射線場として当初、米空軍の York による計算式 (T57D)<sup>9)</sup> が提唱されたが、不確実性が大きいということにより詳細な評価に取り組むことになった。長崎原爆 (Fatman) については同型原爆を用いた核実験データが野外放射線場の定式化に用いられた。一方、広島原爆 (Little Boy) については同型の核実験がなく、さまざまな模擬実験が試みられた。ネバダ砂漠に 500m のタワーを建設し、その上に Little Boy を模擬した裸の原子炉 (HPRR) や  $^{60}\text{Co}$  線源を設置し大気中での放射線伝播の実験が行われた。また、Little Boy レプリカに  $^{252}\text{Cf}$  線源を入れて放射線漏洩が測定された。さらにネバダの砂漠の中に日本家屋が建設され、遮蔽効果を測定する実験が行われた。こうして出来上がった被曝量評価システムが T65D (Tentative 1965 Dose) であった<sup>10)</sup>。

T65D より以前に、東京大学の斉藤信房は、広島原爆ドームや長崎医大の鉄材中に(n, $\gamma$ )反応で生成した  $^{60}\text{Co}$  を測定し熱中性子束を推定し<sup>11)</sup>、また、京都大学の東村武信らは、広島・長崎で被爆した屋根瓦の熱蛍光 (TL) を用いてガンマ線量が推定できることを報告していた<sup>12)</sup>。放医研の橋詰雅らは、ICHIBAN 計画の一環として、広島・長崎に残存していた建造物の煉瓦・タイルを採取し TL を測定するとともに、熱中性子によって鉄筋中に生成した  $^{60}\text{Co}$  を測定し、T65D に基づくガンマ線量や中性子線量と比較したところよい一致が得られたと報告している<sup>13)</sup>。

ICHIBAN ネバダ実験と平行して ABCC では、2km 以内にいた LSS 集団を対象に被爆時状況の聞き取

り調査が進められた。被爆者の多くは日本家屋内にいたが、その家の構造、隣家・長屋の配置などが図面として作成された。1962年までに近距離被爆者を中心に2.8万人の詳細な遮蔽歴が収集された。詳細な遮蔽歴が入手できなかった場合には平均透過係数が適用され、T65Dが完成した1966年時点で、広島・長崎2.5km以内のLSS対象者8.4万人の個人線量が計算された<sup>14)</sup>。

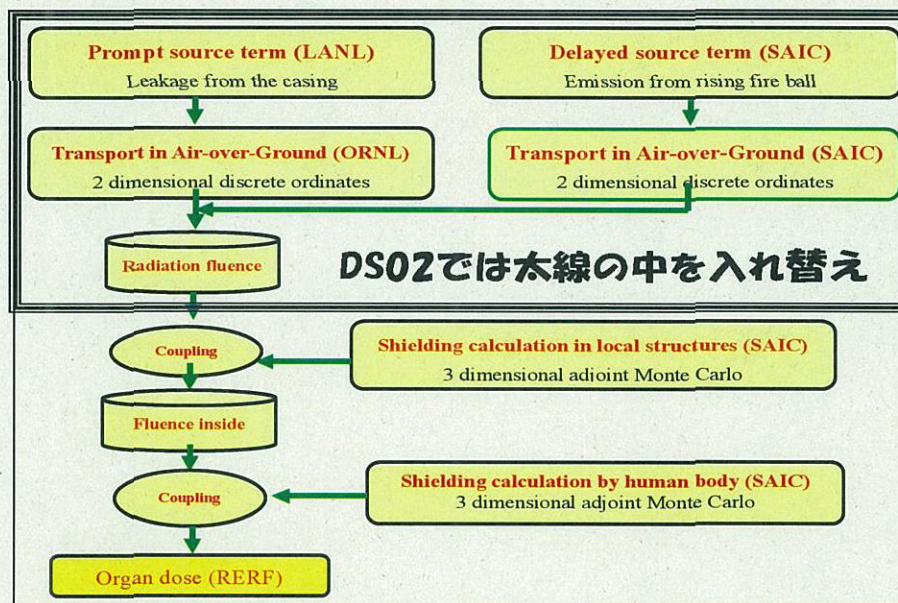
### 3. T65Dの見直しからDS86へ

「T65Dは間違ってるぞ」という記事が1981年5月のScienceに掲載された<sup>15)</sup>。米国核開発の中心であるLANLの研究者が、広島原爆のシミュレーション計算をしてみたらT65Dとは異なる放射線場になるという内容だった。当時、米ソの間では中性子爆弾の開発が行われており、その関連で広島・長崎放射線スペクトルの模擬計算が行われたものと推察された。T65Dは、ネバダ砂漠で行われた核実験やタワー実験に依存していたが、ネバダ砂漠と広島・長崎では気象条件が大きく違って、とくに湿度の大きい日本の夏では、大気に含まれる水分中の水素によって中性子線の伝播が妨げられる。また、広島原爆を模擬した裸の原子炉からの中性子スペクトルは、Little Boyに比べエネルギーが大きかった<sup>16)</sup>。

広島・長崎の放射線量を再検討するため、日米合同の線量再評価委員会が設置され、日本側は原子力安全委員会の田島英三、米国側はマンハッタン計画のメンバーでもあったCaltechのChristyが座長を勤めた。1983年から1986年にかけて、最新コンピューター技術を用いた計算や新たなTL測定などが行われ、1986年に新原爆線量評価システムDS86が策定された<sup>17)</sup>。

DS86は、爆発過程で放出される線源スペクトル計算からはじまり、大気・地面系での放射線伝播計算、日本家屋といった構造物での遮蔽計算をへて、人体内臓器の被曝量を求める大規模な計算システムである。図1に示すように、各プロセスはモジュール化され、入替え可能になっている。各被爆者の放射線遮蔽については、日本家屋や長屋をモデル化した3次元モンテカルロ計算により、T65Dの際に用いられた“9パラメータ”や“球面グローブ”データから透過係数を計算する手法が開発された。

T65DからDS86への変更にとまらぬ無遮蔽地表1mでの放射線量を比較してみると、広島では、中性子線量が約10分の1に減少し、ガンマ線量は2~3.5倍増加した。一方、長崎では、中性子線量が1/2から1/3となり、ガンマ線量は10~30%減少した。



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

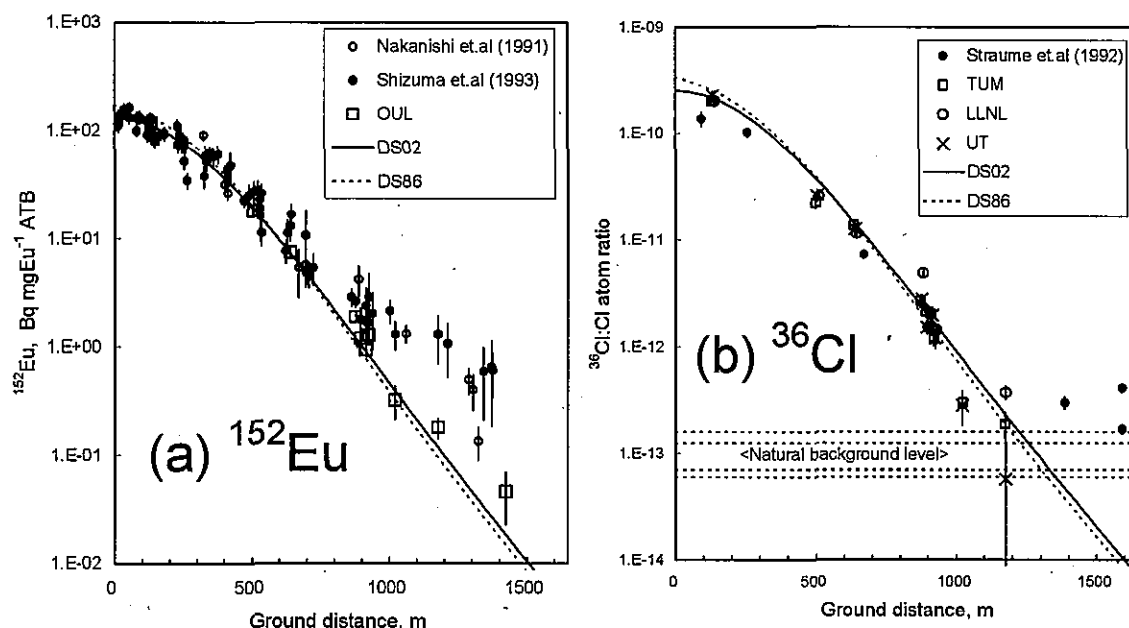


図 2. 広島原爆による  $^{152}\text{Eu}$  (a) と  $^{36}\text{Cl}$  (b) の測定値と計算値. OUL; 金沢大、TUM; ミュンヘン工科大、LLNL; ローレンスリバモア、UT; 筑波大.

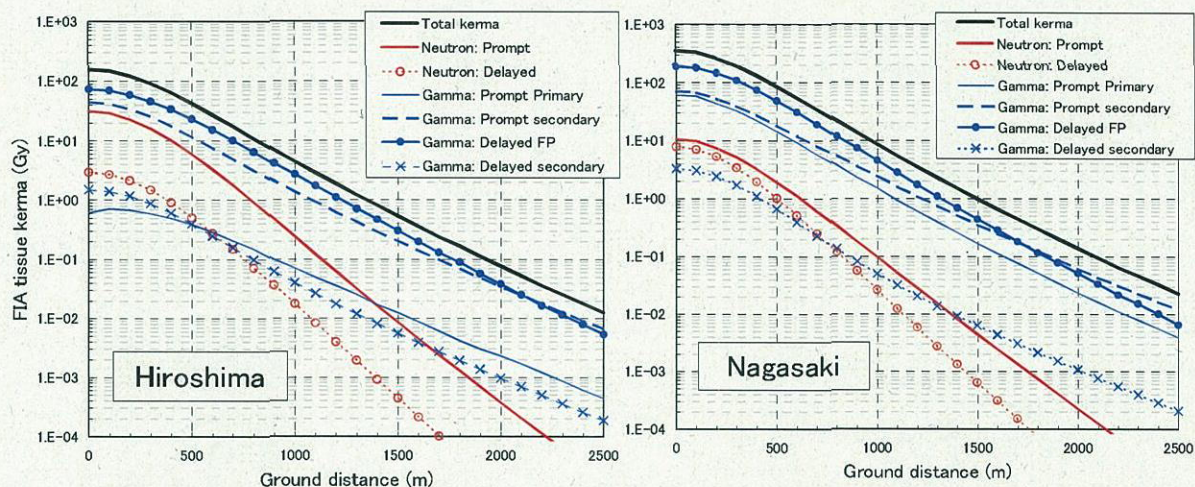


図3. DS02の初期放射線量：地上1mでの空气中組織カーマ（FIA tissue kerma）。中性子は即発と遅発の2成分。ガンマ線は、即発、遅発（FP）、即発中性子2次、遅発中性子2次の4成分。

タチナイド系列  $^{227}\text{Th}$  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 ほどの程度確かか？ 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間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.ref.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.ref.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.ref.or.jp>
- 25) 葉佐井他 (編)、DS02 専研報告、KURRI-KR-114(2005)<http://hlweb.rii.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』光風社(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