

DS02 に基づく誘導放射線量の評価

今中哲二*

京都大学原子炉実験所

1. はじめに

広島・長崎原爆による残留放射線被曝は、土壌や建物が原爆中性子により放射化したことによる誘導放射能からの被曝と、核分裂生成物やウラン・プルトニウムといった原爆材料の fallout、いわゆる「黒い雨」ともなう被曝とに分類される。残留放射線による被曝は、被曝当時の位置や行動に大きく依存し、初期放射線による被曝に比べ、個人被曝量の正確な評価は困難である。DS86 では、Okajima らが残留放射線被曝に関するそれまでの仕事のレビューを行っている⁽¹⁾。その結果によると、誘導放射能については爆心地での最大外部被曝量として、広島で 80R、長崎で 30~40R という値になり、黒い雨ともなう外部被曝量としては、長崎・西山地区で 20~40R、広島の己斐・高須地区で 1~3 R という値を示している。一方、Gritzner らは、輸送計算を用いて土壌中に生成する放射エネルギーを求め、爆心地での無限積算外部被曝量として、広島で 140cGy、長崎で 70cGy という値を報告している⁽²⁾。

DS02 では、初期放射線に関してのみ見直しが行われ、残留放射能については検討されていない。残留放射線による被曝は、初期放射線による被曝に比べ、一般的にはかなり小さいものと考えられているが、特殊な例では無視できない被曝があったと思われる。本報告では、DS86 報告書にある Gritzner らの計算結果を DS02 に応用することにより、距離と時間の関数として誘導放射能による地上 1 m での外部被曝（空気中組織カーマ）を求めた。また、放射化された粉塵の吸入ともなう被曝量についても簡単に見積もってみた。

2. 評価方法

2-1. DS86 での誘導放射能被曝計算

DS86 では、2次元輸送コード DOT4 などを用いて、原爆炸裂点で発生する即発中性子や上昇する火球からの遅発中性子の地上への伝播計算が行われている⁽³⁾。DOT4 の計算体系は R-Z 円筒 2次元で、R 方向 120 メッシュ(0~2800m)、Z 方向 99 メッシュ(-0.5~1500m) に分割され、そのうち 50cm の地面層は Z 方向に 21 メッシュに刻まれている。DOT4 計算では、各メッシュ中点での中性子エネルギー束が得られる。Gritzner らは、その中性子束と土壌組成から、土壌各メッシュでの中性子放射化生成量を計算し、各核種からのガンマ線による地上 1 m での被曝量を計算した。表 1 に、Gritzner らが誘導放射能計算の対象とした核種とその土壌中組成を示す⁽²⁾。

Gritzner の計算によると、誘導放射線に寄与する主な核種

表 1 誘導放射能計算の対象元素

元素	原子密度 (× 10 ⁻²⁴ atom cm ⁻³)	
	広島	長崎
Na	5.451E-4	2.556E-4
Al	2.061E-3	2.816E-3
Si	9.315E-3	6.806E-3
P	4.247E-6	2.424E-5
K	7.191E-4	1.150E-4
Ca	1.583E-4	2.267E-4
Sc	8.708E-8	3.483E-7
Ti	2.567E-5	1.034E-4
Cr	3.087E-6	2.289E-6
Mn	6.659E-6	1.796E-5
Fe	2.482E-4	8.247E-4
Co	4.916E-8	2.950E-7
Ni	6.668E-8	7.201E-7
Cu	4.436E-7	6.284E-7
Mg	8.180E-5	2.367E-4
V	3.428E-7	2.628E-6

* IMANAKA Tetsuji, Kyoto University; imanaka@rri.kyoto-u.ac.jp

は、 ^{27}Al (半減期 2.24m)、 ^{56}Mn (2.58h)、 ^{24}Na (15.0h)、 ^{46}Sc (83.8d) で、時間とともに主役が交代する。Gritzner らの計算結果は、DS86 報告書 Vol. 2 I に図表で示されている。

2-2 . DS86 と DS02 の放射化量比

DS02 では土壤中放射化量の計算は行われていないが、無遮蔽地上 1 m での放射化量を Santro らが計算している⁽⁴⁾。ここでは、DS86 と DS02 の地上 1 m での ^{60}Co 放射化量の比をそのまま誘導放射線量の比として採用する。誘導放射線に寄与する核種はいずれも主に熱中性子反応によって生成するものであり、第 1 近似としてはこの方法で十分であろう。図 1 は、DS86 と DS02 での ^{60}Co 生成量の比である。広島市の爆心近辺で比が 1 より小さいのは、爆発点高さが 580m から 600m に変わったため、遠距離で 1 より大きい理由のひとつは、15kt が 16kt に変わったためである。長崎の比が 0.8 ~ 0.9 になっている理由のひとつは、断面積ライブラリーが ENDF/B5 から ENDF/B6 になったためと思われる。図 1 の DS02/DS86 比を、Gritzner らによる DS86 報告書の値に掛けることにより、DS02 に基づく誘導放射線量を求めた。

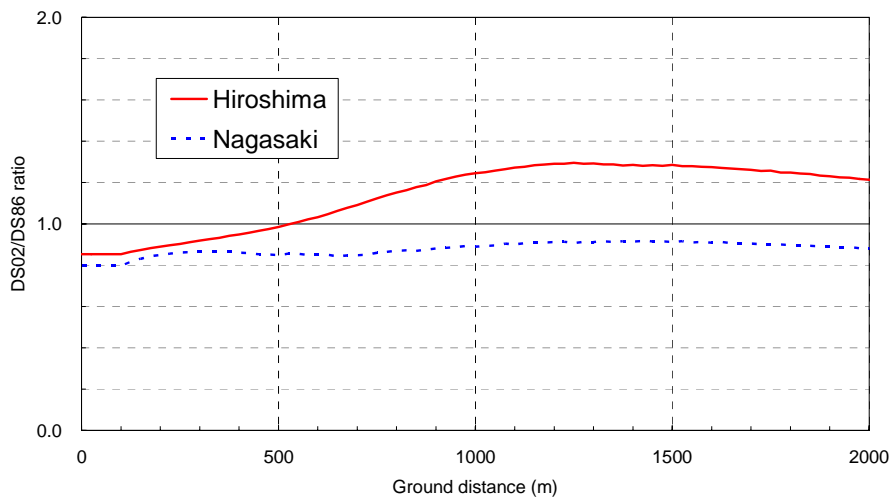


図 1 地表 1 m での ^{60}Co 放射化量比 : DS02/DS86

3 . 計算結果

3-1 . 誘導放射線量率

誘導放射能による地上 1 m での放射線量率が変化する様子を、図 2 と図 3 に広島と長崎について示した。図からわかるように、放射線量率は時間とともに急速に減衰する。爆発 1 分後の爆心地での放射線量率は、広島で約 600 cGy/h、長崎で約 400 cGy/h となっているが、広島・長崎ともに、1 日後にはその 1000 分の 1 に、1 週間後には 100 万分の 1 にまで減少している。それでも、自然放射線レベルを 1×10^{-5} cGy/h 程度とすると、爆心近辺では約 1 年近く自然レベル以上の放射線量率が続いていたことになる。図には、爆心近辺での測定値をいくつか示した。Pace & Smith は米軍調査団の GM 管による測定値である⁽⁵⁾。米軍調査団は、長崎と広島での爆心近辺と黒い雨地帯で広範なサーベイをおこなっている。広島の宮崎と増田⁽⁶⁾、長崎の増田ら⁽⁷⁾の測定はネイヤ型宇宙線計、篠原ら⁽⁸⁾はローリツェン検電器による測定である。これらの測定値と計算値を比較すると、広島はまずまずであるが、長崎では篠原らや増田らの測定値に比べ計算値はその 6 ~ 8 倍である。違いの理由は定かではないが、一応、計算の方が大きめの方向である可能性を示唆している。

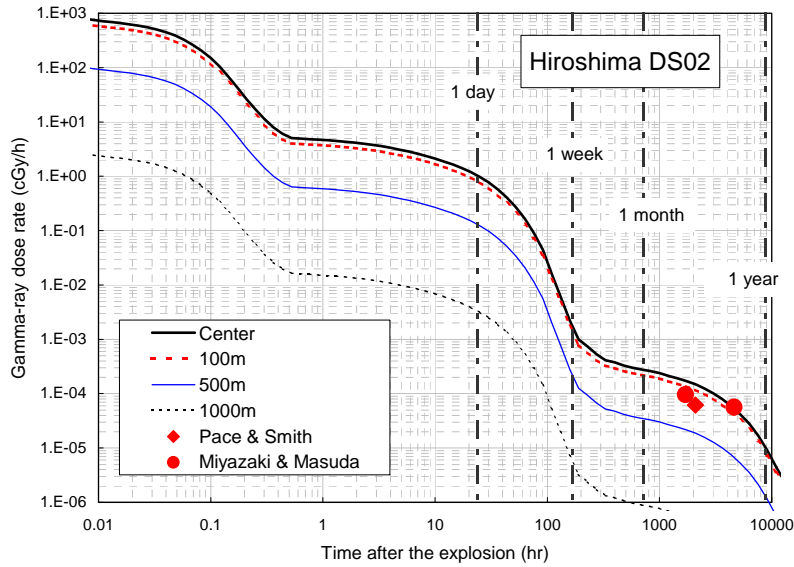


図2 誘導放射能による放射線量率の時間変化：広島
 曲線は、爆心地からの距離別．Pace & Smith、Miyazaki & Masuda は測定値．

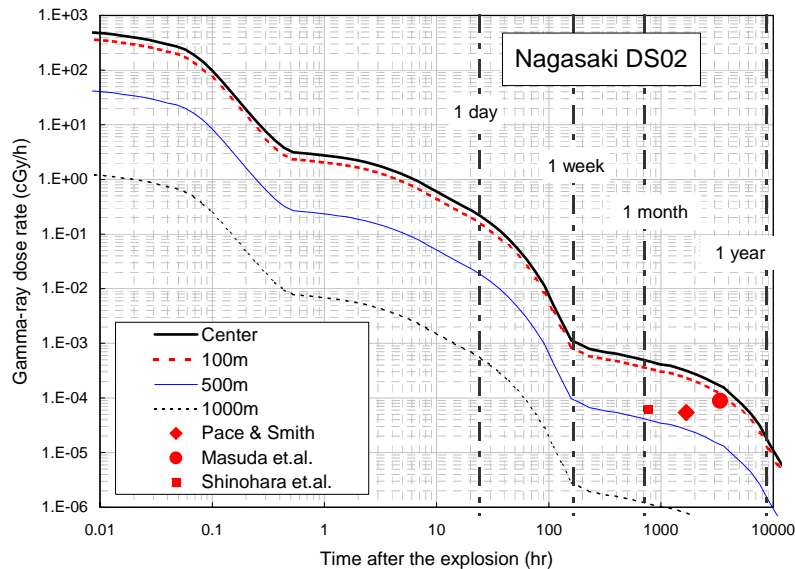


図3 誘導放射能による放射線量率の時間変化：長崎
 曲線は、爆心地からの距離別．Pace & Smith、Masuda et.al.、Shinohara et.al.は測定値．

3-2．積算放射線量

図2と図3に示した放射線量率を、各爆心距離について、無限時間まで積分した値を図4に示す。無限時間積分とは、爆発直後からずっと同じところに居続けたときの放射線量である。積算線量値は、爆心からの距離とともに速やかに減少する。爆心地での積算線量は、広島 120cGy、長崎 57cGy であるが、爆心から 1000m では広島 0.39cGy 長崎 0.14cGy となり、爆心地のそれぞれ 1/300 と 1/400 である。1500m では広島 0.01cGy、長崎 0.005cGy となり、これ以上の距離での誘導放射線被曝は無視して構わないだろう。

図5は、「ある時刻以降の積算線量」の「時刻ゼロからの積算線量」に対する比である。たとえば、図5の 1 day 値は広島 0.16、長崎 0.097 である。したがって、広島爆心地に1日後に入って、それからずっと滞在した場合の線量は $120 \times 0.16 = 19$ cGy となり、長崎の場合は、 $57 \times 0.097 = 5.5$ cGy

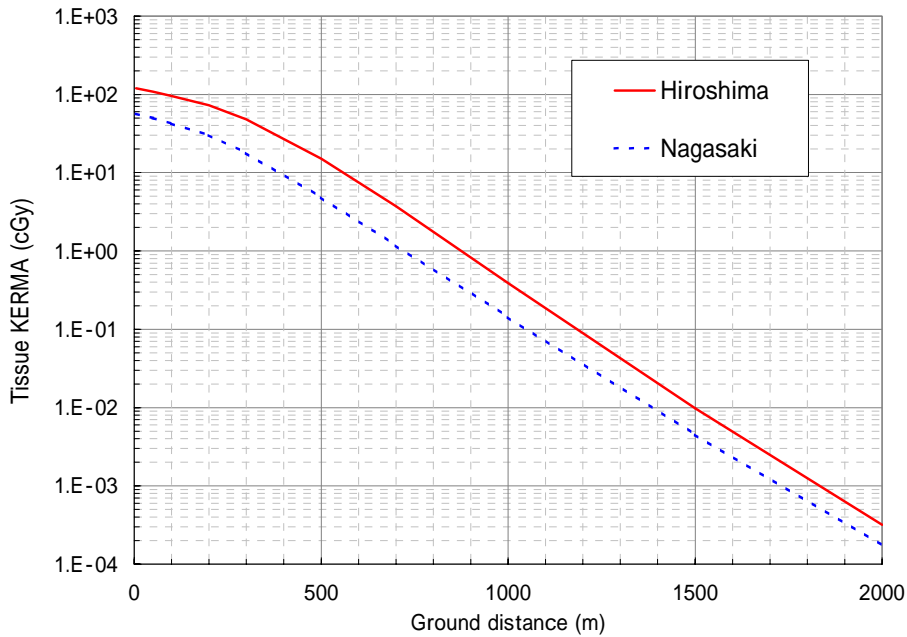


図4 爆発直後から無限時間までの積算放射線量

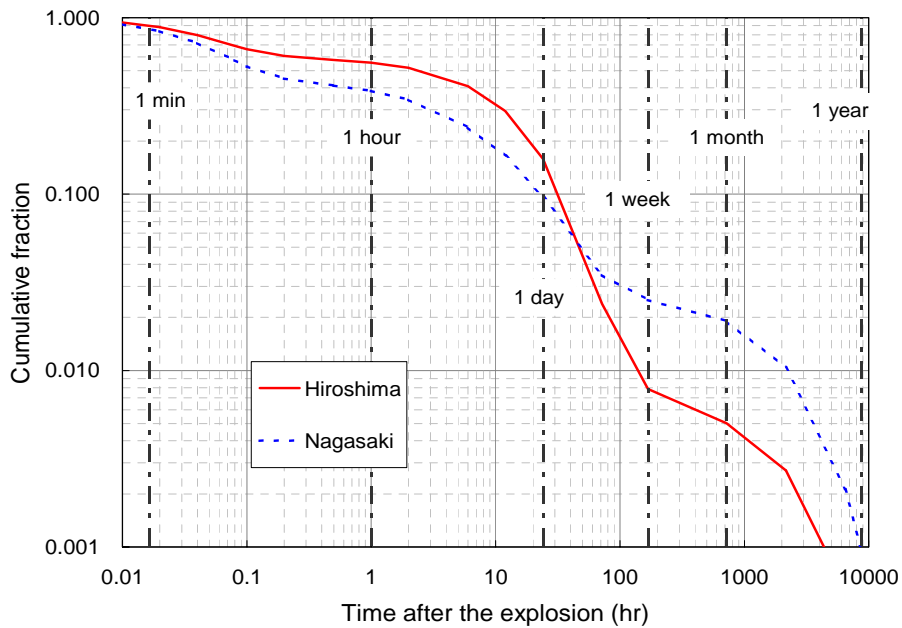


図5 「ある時間以降の積算線量」の「時間ゼロからの積算線量」に対する比となる。1 week 値は広島 0.0078 長崎 0.025 なので、1 週間後に爆心地に入らずと滞在した場合は、それぞれ 0.94cGy と 1.4cGy となる。図5の途中から長崎の値の方が大きくなっているのは、表1に示されているように、Scの土壌中密度が広島に比べ約4倍もあるためである。

3-3. 放射化された塵埃の吸入による被曝

誘導放射能の体内取り込みにともなう内部被曝の正確な評価は、外部被曝以上に困難である。それでも、おおざっぱな仮定を基にどの程度の被曝になりそうか見積もってみるにはそれなりの意味があろう。ここでは、焼け跡の片づけに従事した人々の塵埃吸入を想定して、内部被曝評価を試みた。吸入の対象とした放射能は土壌中の ^{24}Na と ^{46}Sc である。放射化生成量は、DS02 検証計算で得られた MCNP による地上 1 m 中性子束を用いて、1km 以内の平均値を計算した。塵埃吸入量は、NHK

テレビ特別番組⁽⁹⁾での後かたづけ模擬作業を参考に、塵埃濃度を 2 mg/m³ と想定した。表 2 に計算パラメータと計算結果をまとめた。この計算は、原爆当日に広島で 8 時間の片づけ作業に従事したとして、内部被曝を評価してみたものである。その結果 0.06 μSv という値になった。この値は、考えられる外部被曝に比べ無視できるレベルである。

表 2 後片づけ作業にともなう吸入被曝計算

計算項目	²⁴ Na	⁴⁶ Sc	備考
A = 生成比放射能量 (Bq/g 元素)	5.0 × 10 ⁶	9.6 × 10 ⁵	1 km 以内平均値 (爆弾直後)
B = 土壌中濃度 (重量%)	1.22	0.0005	DS86 報告書より
C = 空气中塵埃濃度 (g/m ³)	0.002		NHK 模擬作業より
D = 呼吸率 (m ³ /min)	0.04		重労働相当 (ICRP30)
E = 作業時間 (min)	480		8 時間作業
F = C × D × E : 塵埃吸入量 (g)	0.0384		
G = A × B × F : 吸入放射能量 (Bq)	230	0.018	
H = 実効線量換算係数 (μSv/Bq)	2.6 × 10 ⁻⁴	5.5 × 10 ⁻³	ICRP30
I = G × H : 実効線量 (μSv)	0.06	0.0001	

4. まとめ

DS86 での誘導放射能の計算結果を基に、DS02 での外部被曝を評価してみた。その結果、個人線量の正確な評価は困難であるものの、誘導放射能による被曝が問題となるのは、爆心地から 1 km 以内に 1 週間以内に入った人々である、と言ってよいであろう。また、焼け跡の片づけ作業に従事した人々の塵埃吸入にともなう内部被曝を見積もってみたが、外部被曝に比べ無視できるレベルであった。

文献

1. S. Okajima, S. Fujita, H. Harley; Radiation doses from residual radioactivity, Chapter 6, DS86 final report, Vol 1 (1987).
2. M. I. Gritzner, W. A. Woolson; Calculation of doses due to atomic bomb induced soil activation. DS86 final report Vol. 2 (1987).
3. G. D. Kerr et.al.; Transport of initial radiations in air over ground. Chapter 3, DS86 final report Vol. 1 (1987).
4. R. T. Santoro et.al.; Radiation transport calculations for Hiroshima and Nagasaki. Chapter 3 (Draft), DS02 report (in preparation).
5. N. Pace, R. E. Smith; 広島および長崎の原子爆弾被爆地域における残留放射能の強さの測定、ABCC TR 26-59(1959) .
6. 宮崎友喜雄、増田時男; 原子爆弾により惹起された広島市内およびその附近の放射能について (その 2) . 原子爆弾災害調査報告集、第 1 分冊、pp35-38 . 日本学術振興会、1953 .
7. 増田時男、坂田民雄、中根良平; 長崎およびその隣接地区における原子爆弾による放射能 . 原子爆弾災害調査報告集、第 1 分冊、pp38-40 . 日本学術振興会、1953 .
8. 篠原健一ほか; 長崎市およびその近傍における土地の放射能 第 1 部 爆心地附近の放射能 . 原子爆弾災害調査報告集、第 1 分冊、pp41-44 . 日本学術振興会、1953 .
9. 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 年 .