

DS02 原爆線量計算システムの概要とその検証計算

今中哲二*

京都大学原子炉実験所

1. はじめに

広島・長崎被爆生存者の放射線被曝量の推定に最初に用いられたのは、ネバダの核実験データを基に定式化された T57D (1957 年暫定線量) であった⁽¹⁾。しかし、ネバダの核実験データをそのまま広島・長崎に適用するのは不相当と考えられ、広島・長崎の放射線量評価のために ICHIBAN プロジェクトが実施された⁽²⁾。このプロジェクトでは、ネバダの砂漠に約 500m の鉄塔をたて、そこに裸の原子炉や ^{60}Co 線源を設置して、周辺への放射線伝播の測定が実施された。この ICHIBAN プロジェクトを基に T65D (1965 年暫定線量) が作られ、被爆生存者の個人線量が推定された。1980 年頃になって、T65D に疑問が投げかけられた。東西冷戦のさなか、中性子爆弾の開発が進められていた頃で、広島原爆の中性子スペクトルを計算してみたら、T65D とはかなり違った線量になりそうだ、というものであった。そこで、日米に原爆放射線量再評価検討委員会が設置され、1987 年に DS86 (Dose System 1986) が発表されるに至った⁽³⁾。DS86 は、原爆の爆発から人体臓器の被曝までの物理的プロセスを、各ステップに分けてシミュレーションしたもので、当時最先端の計算機技術を用いている。

1990 年代に入って ^{60}Co や ^{152}Eu の測定と計算が合わない中性子放射化不一致問題を契機に DS86 の見直しが始まり、一連の作業ののち新たな原爆放射線量評価システムとして DS02 がまとめられた^(4,5)。DS02 の計算システムとしての構造は基本的に DS86 と同じである。ひと言で言うなら、計算機技術の進歩と新たな断面積ライブラリーを反映した、DS86 のバージョンアップ版が DS02 である。ここでは、DS02 計算システムの概要と、今中らが行っているその検証計算について紹介する。

2. 原爆放射線の分類

原爆からの放射線は、その発生メカニズムと特性から、表 1 のように分類される。DS02 で扱っているのは初期放射線のみで、残留放射線は扱っていない。初期放射線は、即発放射線 (prompt radiation) と遅発放射線

表 1 原爆放射線の分類

(delayed radiation) に分けられる。即発放射線は原爆炸裂時の核分裂反応の際に放出される放射線で、遅発放射線は、上昇する火球の中の核分裂生成物から放出される放射線である。ガンマ線は、線源頂から直接放出される 1 次ガンマ線と、中性子の非弾性散乱や吸収にともなう 2 次ガンマ線とに分

放射線の種類	有効時間	被曝への寄与
< 初期放射線 initial radiation >		
- 即発放射線 prompt radiation -		
即発ガンマ線 prompt primary γ	< μ sec	中
即発中性子線 prompt neutron	< msec	小
即発 2 次ガンマ線 prompt 2ndary γ	< 0.1 sec	大
- 遅発放射線 delayed radiation -		
遅発ガンマ線 delayed γ	< 30sec	大
遅発中性子線 delayed neutron	< 10sec	微
遅発 2 次ガンマ線 delayed 2ndary γ	< 10sec	微
< 残留放射線 residual radiation >		
誘導放射能 induced radioactivity	< months	小
フォールアウト (黒い雨) fallout	< months	?

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

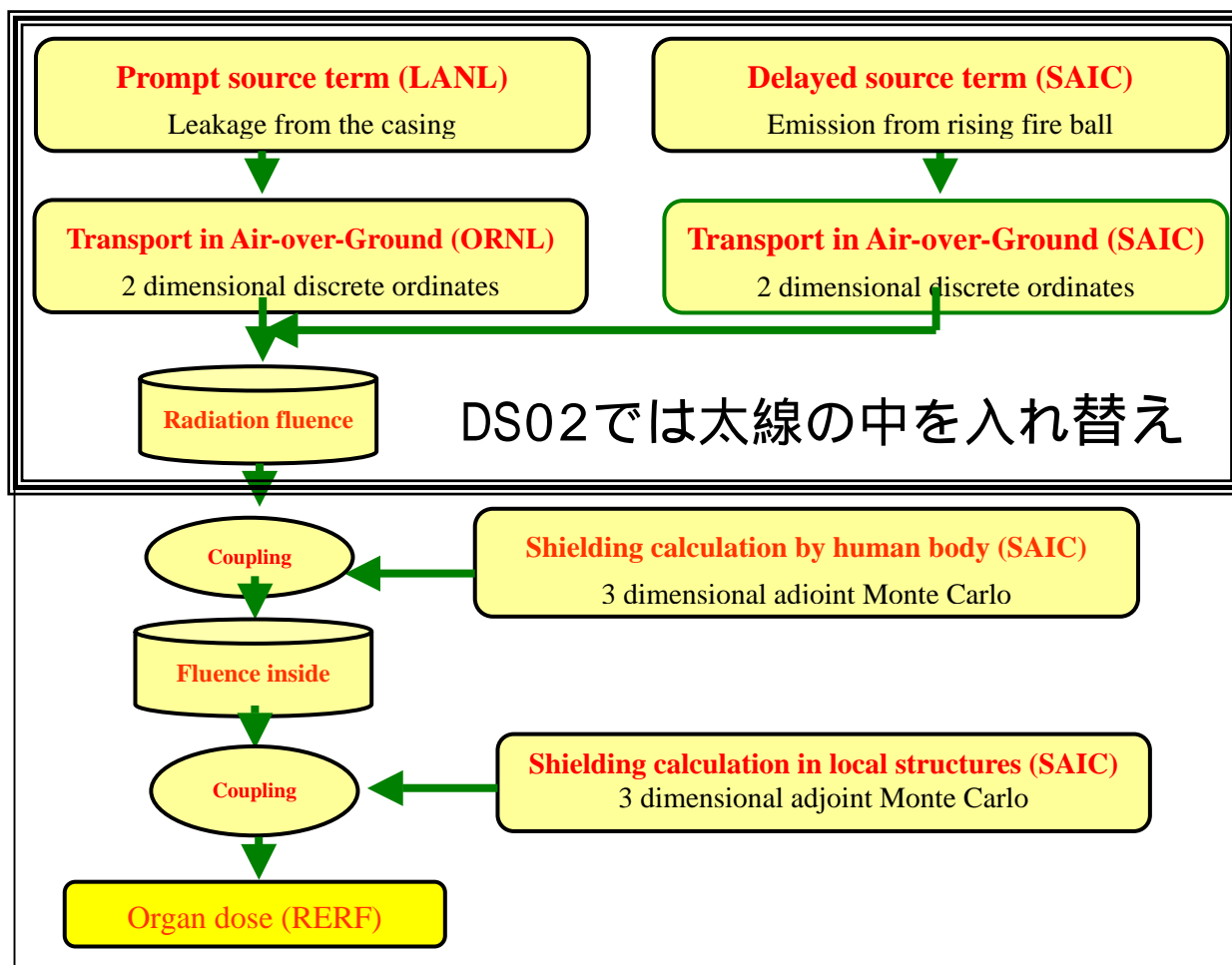


図1 . DS02 の計算モジュールと流れ

かれる。表1に示したように、被爆生存者の被曝に主に寄与しているのは、即発2次ガンマ線と遅発1次ガンマ線（FPガンマ線）である。

3 . DS02 計算システム

3-1 . 全体の流れ

DS 計算システムの特徴は、放射線の発生源から人体組織の被曝までの各計算プロセスがモジュール化され、必要に応じてモジュールの入れ替えが可能になっていることである。図1は、その計算の流れを示している。各ステップの計算結果は、別のモジュールの計算結果とカップリングさせられたりしながら、次のモジュールのインプットとして用いられる。計算プロセスは大きく分けると、次の4つである。

- a . 線源項の計算
- b . 大気・地上系での長距離輸送計算
- c . 地上構造物での遮蔽計算
- d . 人体の自己遮蔽と組織線量計算

DS02 では、上記4つのうち、aの線源項とbの長距離輸送計算が全面的に入れ替えられた。cの遮蔽計算では、広島のと比治山、長崎の金比羅山などによる地形の影響がモデル化され、長崎の工場や広島の学校校舎といった建物モデルが追加されている。

線源項パラメータについてDS02では、広島原爆の出力と爆発高さが16ktonと600m(DS86では15kton、580m)に変更された。長崎については21kton、503mでDS86のままである。

表 2 . 即発線源に関する計算結果の比較

	単位	DS02	DS86	DS02/DS86
< 広島 >				
放出中性子数	moles/kt	1.768E-01	1.773E-01	0.9972
平均中性子エネルギー	MeV	0.3106	0.3059	1.0153
放出ガンマ線数	moles/kt	6.665E-03	5.043E-03	1.3216
平均ガンマ線エネルギー	MeV	1.3979	1.4137	0.9888
< 長崎 >				
放出中性子数	moles/kt	2.640E-01	2.734E-01	0.9657
平均中性子エネルギー	MeV	0.0126	0.0201	0.6242
放出ガンマ線数	moles/kt	9.022E-02	6.296E-02	1.4330
平均ガンマ線エネルギー	MeV	1.2667	1.3495	0.9387

3-2 . 即発線源項の計算

ロスアラモス研究所 (LANL) の White らにより、広島 Little Boy と長崎 Fatman の爆発プロセスを模擬したモンテカルロ計算が行われ、中性子とガンマ線の放出スペクトルが再計算された⁽⁶⁾。計算には、Hydrodynamics を組み込んだ 3 次元モンテカルロコード MCNP と断面積ライブラリー ENDF/B6.2 が用いられた。DS86 では、計算機能力の都合上、爆弾の尻尾の構造は省略されたが、今回はフルモデルの計算になっている。計算結果は、中性子 199 群ガンマ線 42 群の爆弾放出エネルギースペクトルで与えられ、円筒形である Little Boy については、さらに鉛直方向角度に 40 分割されている。DS86 での線源計算に比べて約 60 倍の計算量であった。ちなみに DS86 では、計算結果は中性子 38 群ガンマ線 20 群、Little Boy の角度 20 分割であった。表 2 は、線源項に関する計算結果を DS02 と DS86 で比較したものである⁽⁶⁾。

中性子放射化データ不一致問題との関連で注目されていた、Little Boy の中性子スペクトル方向分布を図 2 に示す。DS02 では、計算精度がよくなった分、DS86 に比べなめらかな方向分布が得られている、基本的な形に大きな変化はない。方向を積分した中性子とガンマ線のエネルギースペクトルを、Fatman も加えて図 3 a~d に示す。Fatman は球対称で扱われており、方向分布はない。中性子スペクトルは、広島・長崎ともに、DS02 と DS86 でほぼ同じである。モンテカルロの追跡時間が長

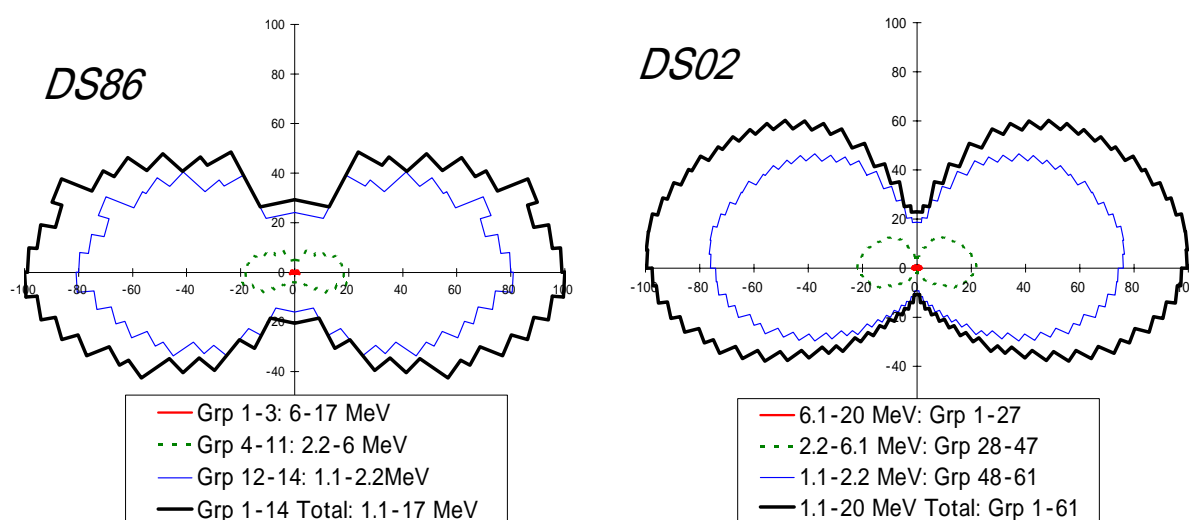


図 2 . Little Boy 中性子スペクトルの方向分布 .
1MeV 以上、最大値を 100 とした相対強度 . 下側が爆弾の頭方向 .

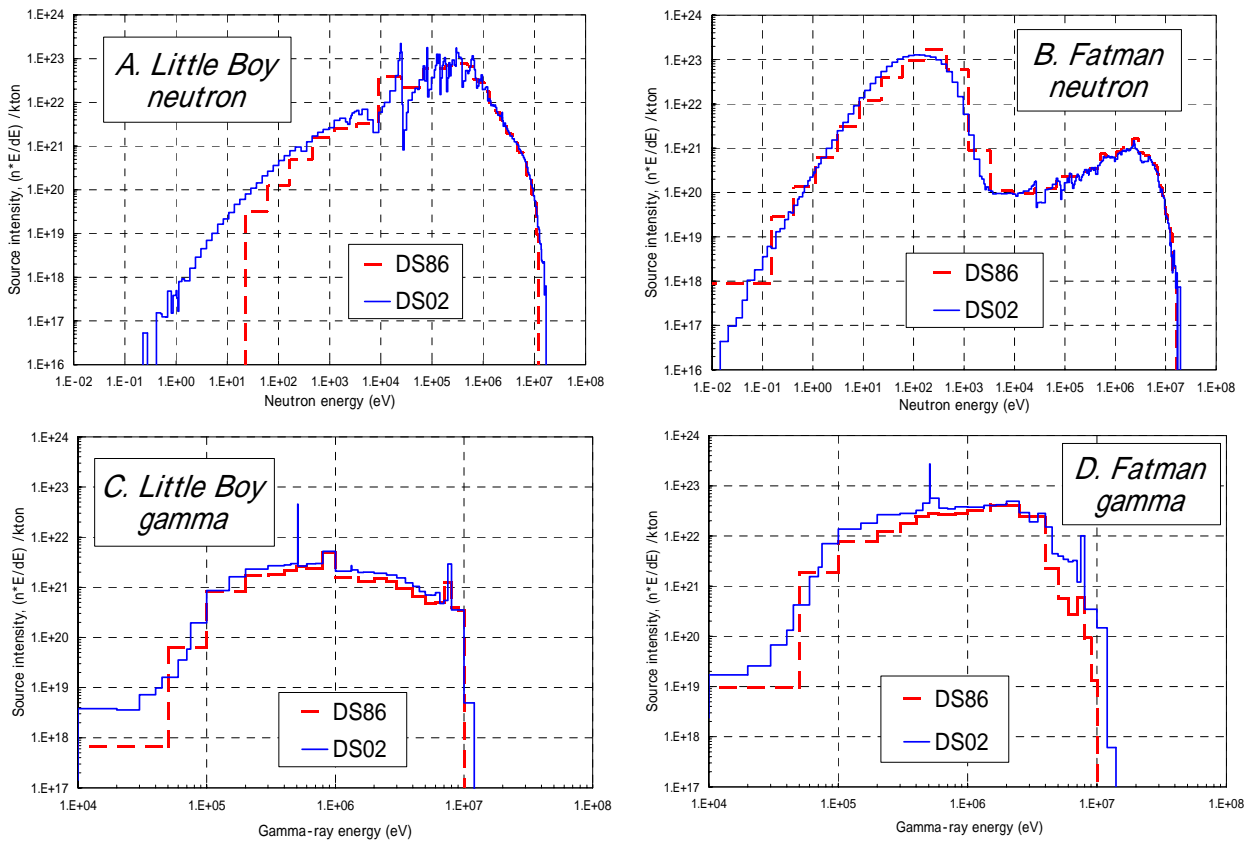


図3 . 広島・長崎原爆の中性子・ガンマ線放出スペクトル：DS86 と DS02 .

くなった分（DS02 は爆発 1 秒後まで） Little Boy のスペクトルが低エネルギー側に広がっている。ガンマ線では、Fatman の高エネルギー側が増えている。これは、断面積ライブラリーが ENDF/B5 から ENDF/B6 への変更にともなった変化である。

3-3 . 遅発線源項

遅発線源項は、爆発後の火球の中に存在する核分裂生成物からのガンマ線と遅発中性子である。爆発後の火球の成長や上昇の様子は、STLAMB hydrodynamics コードで計算されている。図4 は、DS86 の計算結果であるが、広島 2.028 秒後の大気密度の状態を表している⁽⁷⁾。STLAMB の計算結果によると、広島・長崎ともに、火球は爆発 1 秒後くらいから上昇をはじめ、8 秒後に約 900m、16 秒後に約 1300m の高さに達している。DS02 の遅発線源項は、爆発から 30 秒後までを、中性子については 12 区分、ガンマ線については 18 区分の時間区分に分け、それぞれの区間ごとに線源項を決めている。線源スペクトルの決定には ENDF/B6 を用いている。線源の形状は、4 秒後までは火球中心の点線源とし、そ

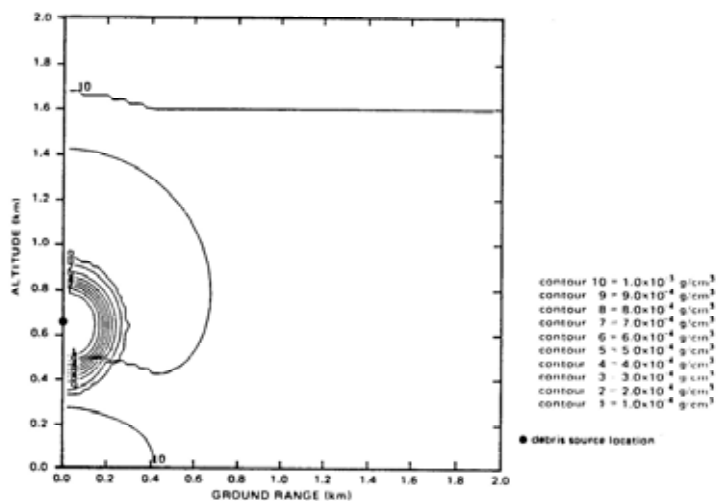


図4 . 広島原爆 2.028 秒後の大気密度 . STLAMB 計算結果による等密度線(DS86 報告書) .

れ以降はトーラス（円環）な分布を仮定している⁽⁸⁾。

3-4．大気・地上系長距離輸送計算

DS02 での線源項からの地表へ到達する放射線の計算は、2次元輸送計算コード DORT を用いて行われている⁽⁸⁾。図5に、DORT 計算の大気・地面 RZ 2次元系を示す。図の中の円柱は、ローカルな遮蔽計算を行うときの Forward-adjoint カップリング境界面を表しているが、DORT 計算では地上構造物は考慮せず無遮蔽モデルである。DORT の計算結果は、各メッシュ中点での（エネルギー別、方向別）放射線束として得られる。即発放射線の計算は、Z 軸上（広島 600m、長崎 503m）に点線源を置いて1回の run で計算結果が得られる。大気組成は、地上 2000mまでが7層の組に分けられ、最上層以外は DS86 と同じである。遅発放射線については、爆発後 30 秒までが時間区分に分けられ、それぞれの時間区分に対応する状況（線源、高さ、大気密度）での計算が行われている。表3に、DS86 での DOT4 計算と DS02 での DORT 計算の比較をまとめておく。

表3．DS02 と DS86 の大気・地面系輸送計算の比較

	DS86	DS02
< 即発放射線 >		
・ 計算コード	2次元 DOT4	2次元 DORT
・ 断面積	ENDF/B5 (中性子 46 群、ガンマ 22 群)	ENDF/B6 (中性子 199 群、ガンマ 42 群)
・ RZ 形状	R2800m × Z1500m R メッシュ巾：25m	R3000m × Z2000m R メッシュ巾：25m
< 遅発放射線 >		
・ 計算コード	1次元 ANISN	2次元 DORT
・ 断面積	EFDF/B4 (中性子 46 群、ガンマ 22 群)	EFDF/B6 (中性子 174 群、ガンマ 38 群)
・ タイムステップ	300 区間	中性子 12 区間、ガンマ 18 区間
・ 形状	STLAMB による line-of-sight 密度	STLAMB の 2次元計算結果

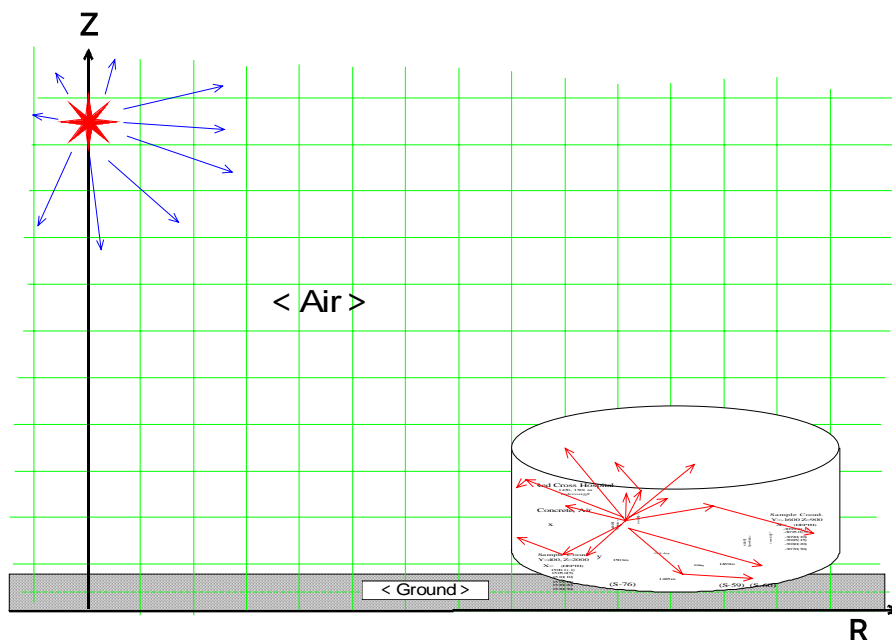


図5．大気・地面系長距離輸送計算に用いられる RZ 座標系

3-5 . 計算結果

表 1 に示した 6 種類の初期放射線の計算結果を図 6 に示す⁽⁹⁾。図の値は空气中組織カーマ(Gy)で、DORT 計算で得られた無遮蔽地上 1 m での放射線束値に、Kerr らによる換算係数⁽¹⁰⁾をかけて算出されたものである。図からわかるように、広島・長崎ともに、遅発ガンマ線と即発 2 次ガンマ線が主要な放射線成分である。長崎では、即発ガンマ (prompt primary) による線量が DS86 に比べ約 2 倍になり、全線量の 17% 程度になった。中性子線量の全線量に対する割合は、広島 1000m で 5.8%、1500m で 1.7%、2000m で 0.5% である。生存者の臓器吸収線量では、家屋透過係数と人体透過係数はともにガンマ線の方が大きいので、中性子の割合はさらに小さくなり、空气中組織カーマの割合の約 1/3 になる。長崎での中性子割合は、広島よりさらに少ない。

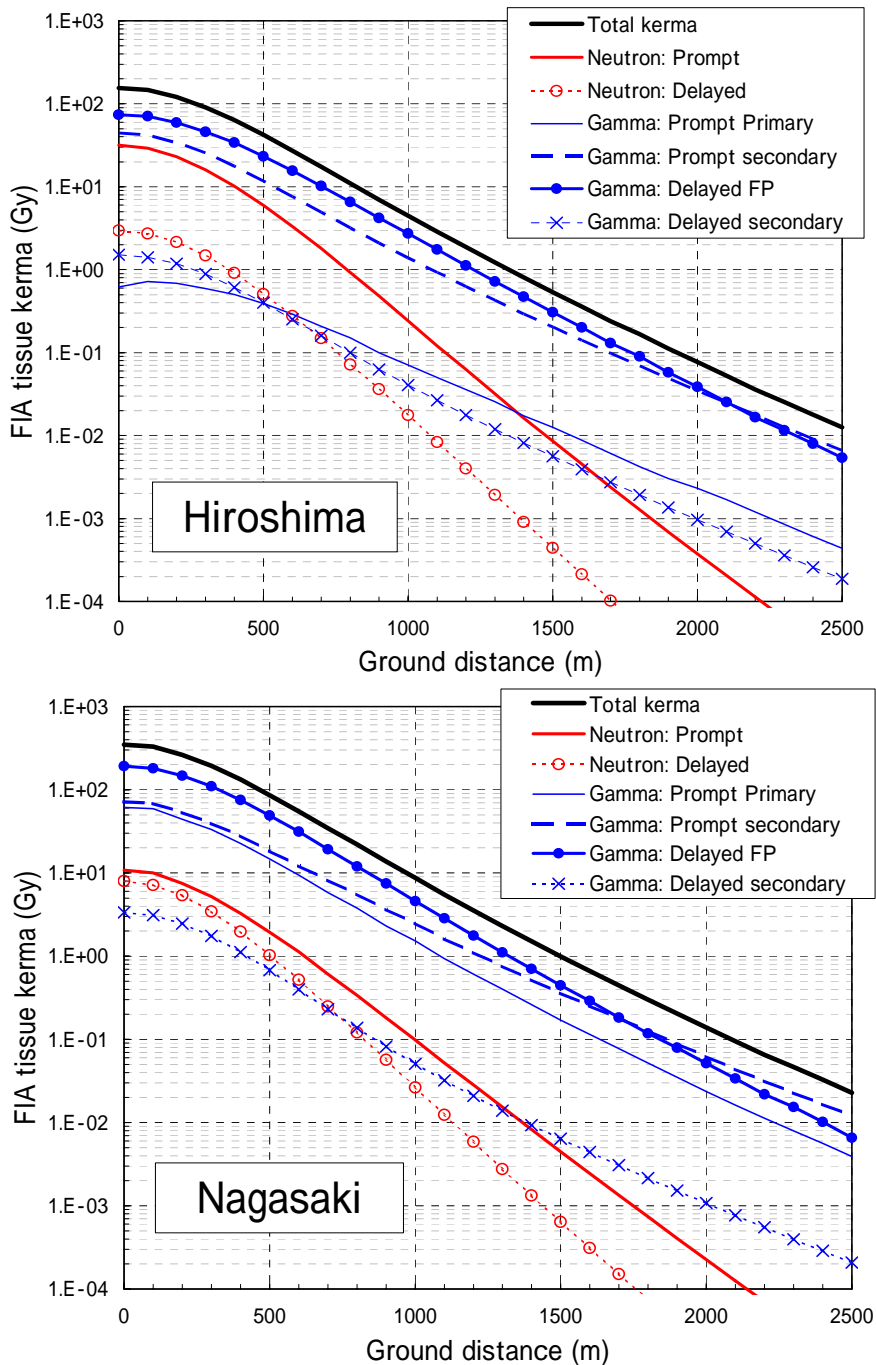


図 6 . 初期放射線の計算結果：地上 1 m での空气中組織カーマ (Gy) .

図7は、地上1m放射線量(空气中組織カーマ)をDS02とDS86で比較したものである。図7(上)のように、爆心距離と放射線量との関係を片対数でプロットすると、DS02とDS86はほとんど重なってしまう。図7(下)にはDS02/DS86比をプロットしてある(ラインが少々ガタついているのは、DORT計算法の弱点であるray effectのため)。一番大きく変わったのは長崎の中性子線量で、2000m以遠ではDS86の70%程度に減っている。この減少の主な理由は、ENDF/B6で窒素の断面積データが変わったためである。しかし、長崎の中性子線量はガンマ線に比べてもともと小さく、大勢には影響しない。広島はDS02/DS86比が爆心地近くで下がっているのは、爆発高さが580mから600mに変更されたことが反映している。総線量で言えば、DS02とDS86の違いはせいぜい10%と言ってよいであろう。

4. Forward-adjoint カップリングによる遮蔽計算

地上の建物などによる遮蔽効果の計算では、まずローカルな構造全体を図5に示したような円柱の中に3次元で設定し、構造物内の着目点と円柱界面から入射する放射線束との「関係性」をAdjointモードのモンテカルロによって計算する。次に、その「関係性」をDORT計算で得られた放射線束(Forward計算結果)とcouplingさせて、着目点での放射線束を求める。DS02では、 ^{152}Eu 、 ^{60}Co 、 ^{36}Cl 、 ^{63}Ni といった中性子放射化生成物サンプル、またタイルや瓦といったTL測定サンプルについても、サンプリング場所の遮蔽計算を実施し、遮蔽効果を考慮した計算値を基にして測定値と比較する議論が行われている。

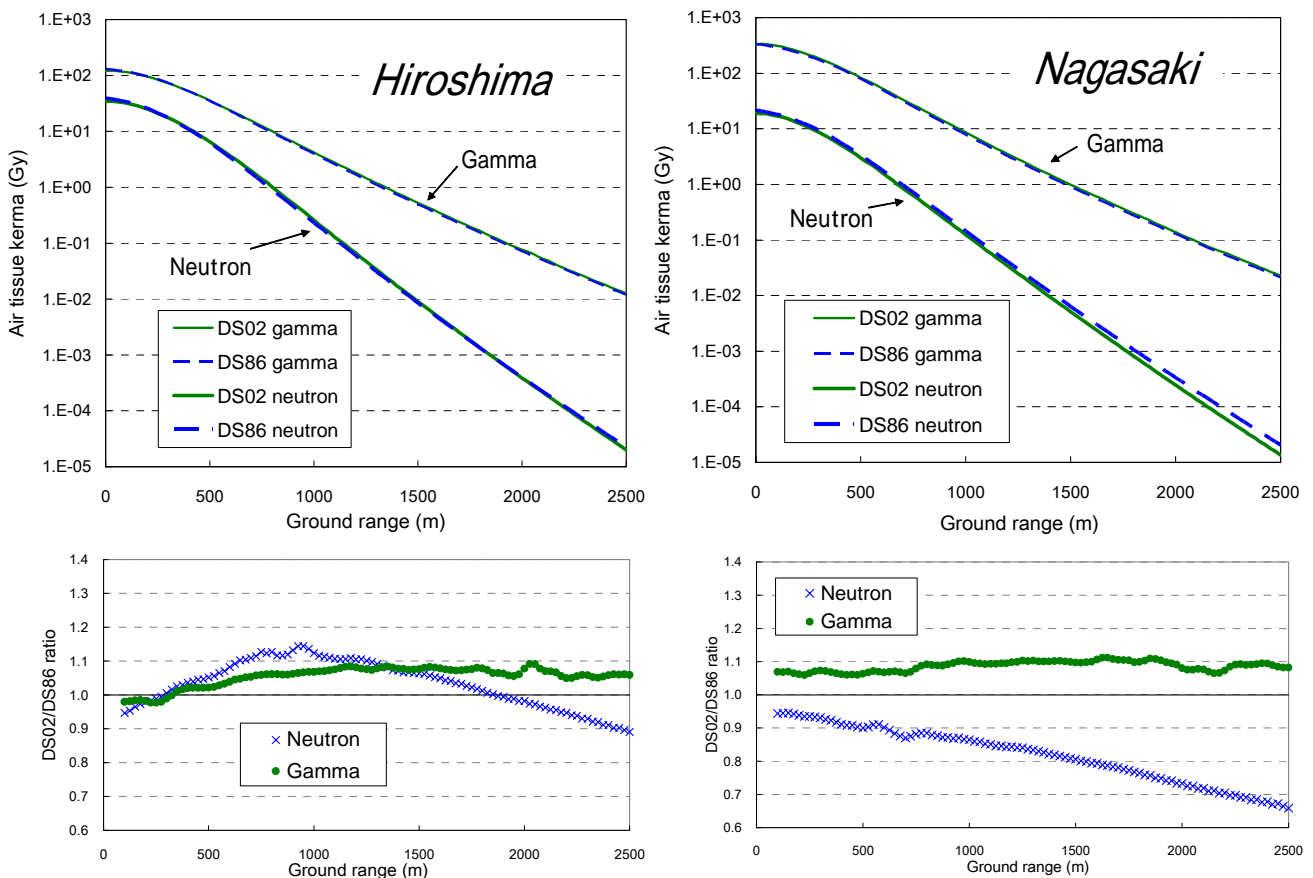


図7. DS02とDS86の無遮蔽地上1m放射線量の比較。
(上)空气中組織カーマ、(下)DS02/DS86比。

5 . DS02 の検証計算

日米原爆線量ワーキンググループの作業は、米国側 WG が DS02 による計算を行い、その結果を、日本側 WG を中心とする TL や中性子放射化の測定結果で検証する、という進め方で行われてきた。米国側 WG の計算能力は、LANL、ORNL、SAIC といった組織により長年の核開発の中で培われてきたものである。計算に関する彼我の力量差は明らかであるが、日本側でもできる範囲で DS02 の計算を確かめておくべきであろう、ということで検証計算に取り込んでみた。

これまでに今中らは、比較的計算の簡単な即発放射線 (prompt gamma、prompt neutron、prompt 2ndary gamma) について、DS02 と同じ線源項を用いて大気・地面系の輸送計算を行い、米国側の計算結果と比べてみた。計算コードには 3 次元モンテカルロ MCNP4C を用い、断面積ライブラリーには、米国側と同じ ENDF/B6 と日本の原研から出されている JENDL3.3 を用いた。以下に、これまでの結果をいくつか紹介しておく。

5-1 . 即発ガンマ線

即発ガンマ線に関する MCNP 計算結果と DS02 計算値の比較を図 8 に示す。地上 1 m での空気中組織カーマの比をプロットしたものである。DS02 は、先に述べた DORT コードによる計算である。MCNP のガンマ線断面積には、MCNP4C パッケージに入っている MCPLIB02 を用いた。ちなみに、JENDL には独自のガンマ線断面積ライブラリーはない。図からわかるように、MCNP (MCPLIB) の計算結果は、2000m まで DS02 とよく一致している。

5-2 . 即発中性子と即発 2 次ガンマ線

図 9 に即発中性子、図 10 に即発 2 次ガンマ線に関する計算結果の比較を示す。中性子線量では、MCNP (ENDFB6) は DS02 とまずまず一致しているが、MCNP(JENDL33)は、DS02 の値より距

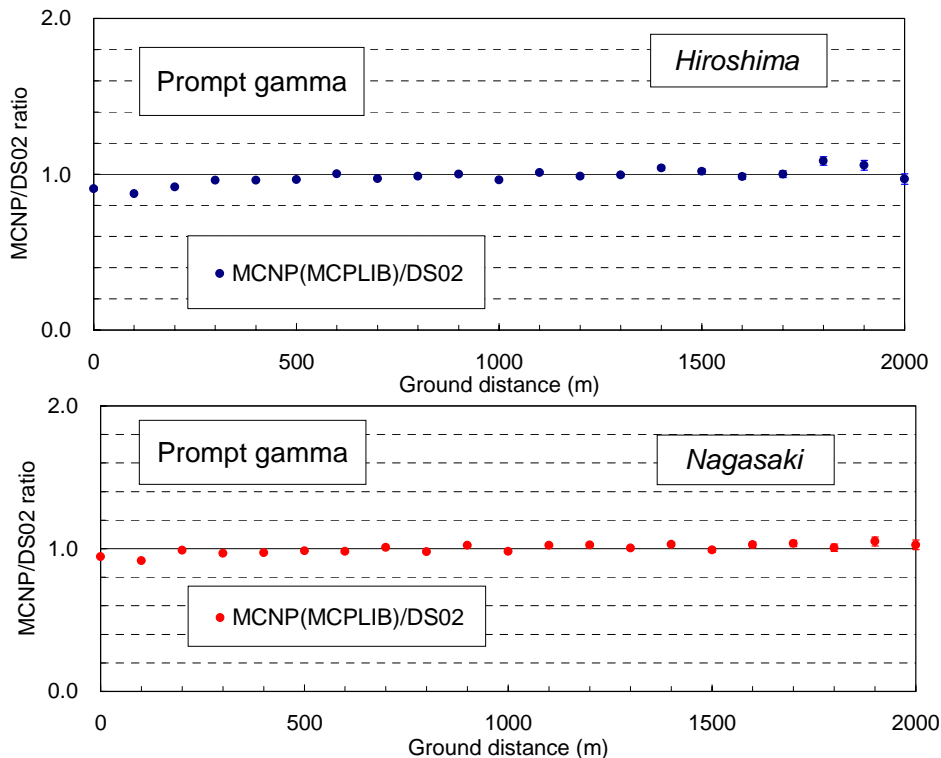


図 8 . MCNP による DS02 の検証計算：即発ガンマ (prompt primary gamma) .

離とともに大きくなる傾向が認められ、1500mでは4割程度大きくなっている。

この違いの理由を確認するため、JENDL 計算の空気中の窒素、酸素、水素をひとつずつ ENDF と置き換えてみたところ、酸素や水素の置き換えでは結果に変化はなかったが、窒素を置き換えた場合に DS02 とよく一致した。すなわち、JENDL3.3 と ENDF/B6 の窒素断面積の違いが中性子線量の差

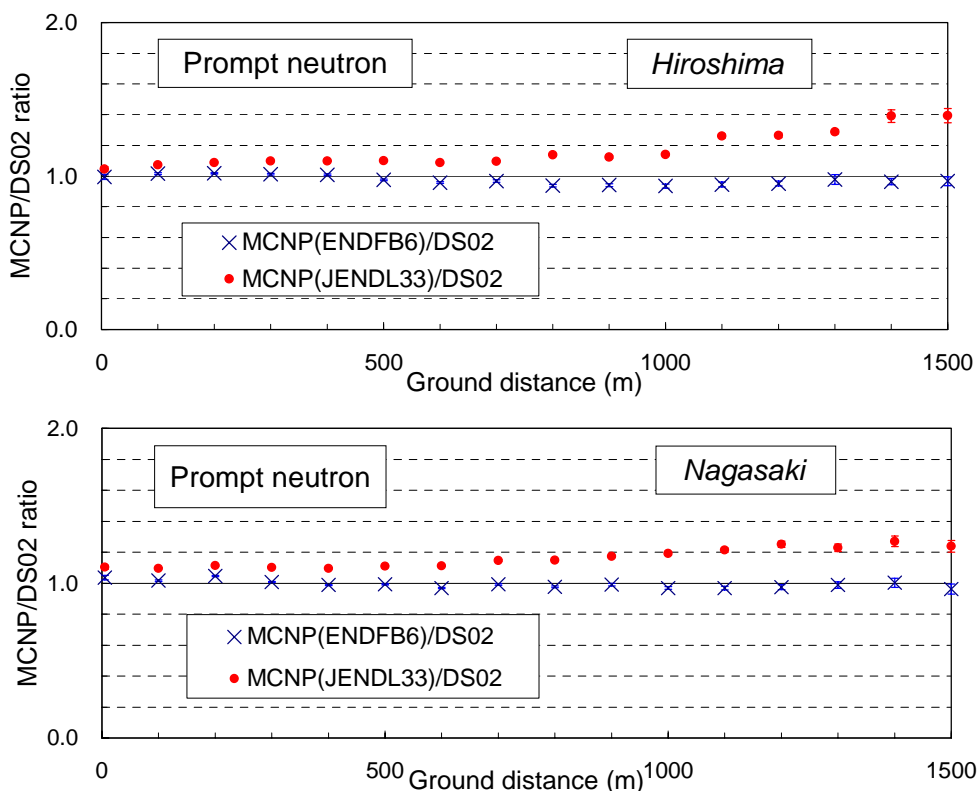


図9 . MCNP による DS02 の検証計算：即発中性子 .

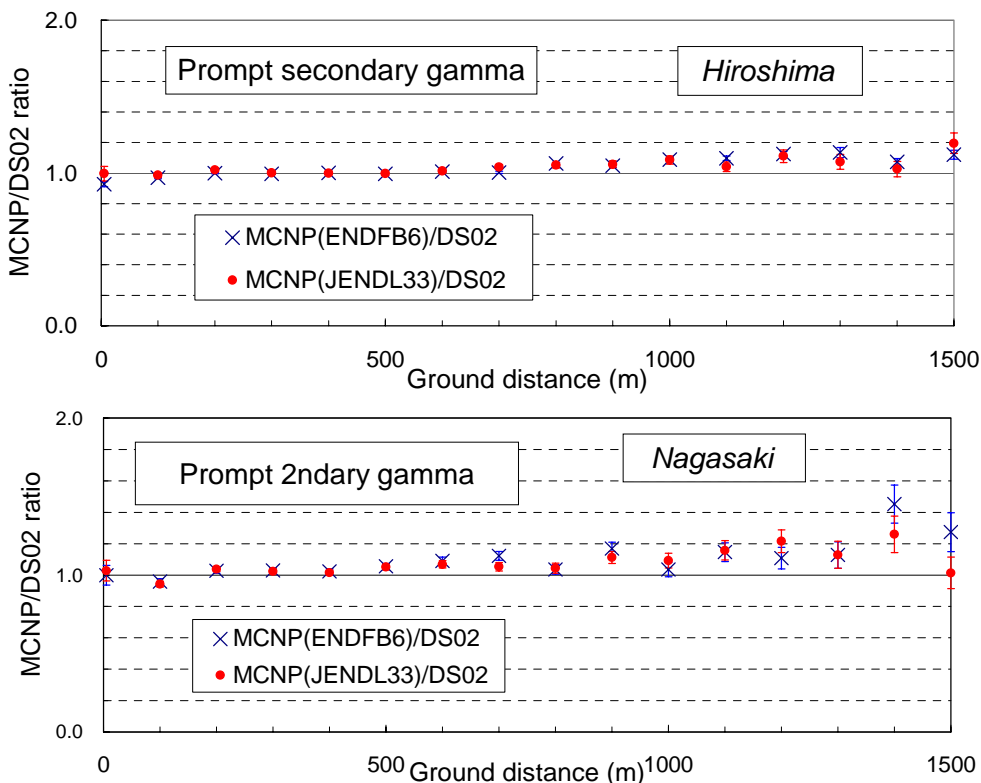


図10 . MCNP による DS02 の検証計算：即発2次ガンマ線 .

に反映しているものと考えられる。

図 10 の 2 次ガンマ計算では、MCNP の計算結果が遠距離で若干大きめになっている。ENDF と JENDL の両方ともその傾向があるが、その理由は今のところ不明である。

5-3 . 今後の検証計算

遅発放射線については、大気状態の Hydrodynamics な計算はできないが、Static な大気条件での近似計算なら可能であろう。また、中性子放射化データについても、3 次元-3 次元で Forward-adjoint カップリングコードを開発し、独自計算を行って DS02 との比較を試みる予定である。

参考文献

- 1 . R.H. Ritchie, G.S. Hurst ; 核兵器放射線の透過性 : 広島・長崎調査への応用、ABCC TR 26-59, 1959 .
- 2 . J.A. Auxier, “ICHIBAN: Radiation Dosimetry for the Survivors of the Bombings of Hiroshima and Nagasaki”, TID-27080, 1977.
- 3 . “US-Japan Joint Reassessment of Atomic Bomb Radiation Dosimetry in Hiroshima and Nagasaki”. (DS86 Final Report) Vols. 1&2. RERF, 1987.
- 4 . 原爆放射線量評価検討会、「DS02 に関する原爆放射線量評価検討会日米会議報告書」厚生労働省健康局総務課、2003 年 3 月 .
- 5 . US-Japan WG; “Reassessment of the A-bomb Radiation Dosimetry for Hiroshima and Nagasaki – Dosimetry System 2002” (DS02 Report), RERF (in preparation)
- 6 . S.W. White, P.P. Whalen, A.R. Heath; “Hiroshima and Nagasaki Bomb Output Calculation”, Chapter 2, DS02 Report (draft).
- 7 . D.C. Kaul et.al.; “Delayed Gamma Rays”, Chapter 3 Appendix 4, DS86 Final Report Vol.2, 1987.
- 8 . R.T. Santoro, S.E. Egbert et.al.; “Radiation Transport Calculations”, Chapter 3, DS02 Report (draft).
- 9 . Private communication with S.E. Egbert about the results of DS02 calculation in EXCEL sheets.
- 10 . G.D. Kerr; J.V. Pace III; “Fluence-to-Kerma Conversion Coefficients”, Chapter 12A, DS02 Report (draft).