

## DS02 計算と測定値の比較

遠藤 暁\*

広島大学原爆放射線医科学研究所・国際放射線情報センター

はじめに

1945年8月6日に広島に世界で初めての原子爆弾が投下され、その3日後である8月9日には2番目の原子爆弾が長崎に投下された。その後、広島の被爆者において、白内障と白血病が高頻度で発生するようになり、被爆者の被曝線量推定が必要となった。最初の線量評価体系は1957年に Tentative 1957 Dose (T57D)、1965年に Tentative 1965 Dose (T65D) としてまとめられた<sup>1)</sup>。これらの体系はその名の通り Tentative な体系で、将来的に修正が必要と考えられていた。1981年に実質的な原子爆弾線量再評価へ向け動き出し、1987年に再評価の結果が Dosimetry System 1986 (DS86)としてまとめられるに至った<sup>2)</sup>。この再評価において広島の中性子線量は、1/5 - 1/9に減少した。

DS86完成直後、葉佐井、星、静間を中心とした広島グループは、Eu-152の測定値とDS86計算の間の系統的なずれを見出した<sup>3-8)</sup>。特に遠距離で測定値が5 - 10倍も高い場合もあったため被曝線量への影響が心配された。その原因を明らかにするため、更なる測定を行いDS86の検討を開始した。その結果、DS86の計算値と被曝試料の測定値には、計算値が近距離で高く遠距離で低い系統的なずれが確認された。この問題を再検討することをアメリカ側に働きかけた結果、1996年には日米の研究者による合同研究会が開催され、共同研究が開始され、新しい線量評価体系に向けての検討が行われ始めた。

再評価作業においてアメリカ側は、10Tflopsの演算能力をもつ世界でも最高速クラスの計算機を用いて原爆ソースタームの再計算を行った。この計算では、より新しい断面積ライブラリーENDF B6を用いて、中性子エネルギービンが27ビンから200ビンへ、線エネルギービンを20から46ビンへ、中性子線放出角を20ビンから40ビンへとより細かい計算を行っている。また、アメリカの加速器質量分析法を用いたCl-36の新しいデータも報告された。これに対し、日本側では、それまで報告しているEu-152、Co-60のデータの見直し、環境中の中性子によるバックグラウンドの測定、更に日本、アメリカ、ドイツのそれぞれのデータを相互比較するプログラムを提案し、共同で実行した。

### 線源スペクトル

新しいソース計算の詳細は明らかにされていないが、Hydrodynamicsを用い、DS86の計算量の60倍に相当する計算を行った。使用した断面積は、ENDF B5からより新しい評価済みライブラリーENDF B6.2に換えている。新しいソースターム(LB2001)をDS86ソースタームと比較した図1を示す。図1(a)、(b)は広島原爆ソース、(c)、(d)は長崎原爆ソースを示す。また、(a)、(c)は中性子線、(b)、(d)は線である。表1にまとめるように、DS86とDS02ソース特に中性子には大きな違いは無いが、エネルギーごとに比較した場合、2-10倍の違いがある。更に、図2に、広島原爆の中性子・線の放出角分布を示す。中性子線に関しては、ほとんど一致しているが、線では30%程度の改定が認められる。これらの図から、新しいソースタームの再計算の計算精度はDS86に比較し格段に向上した

\* ENDO Satoru, Hiroshima University; [endos@hiroshima-u.ac.jp](mailto:endos@hiroshima-u.ac.jp)

ことがわかる。

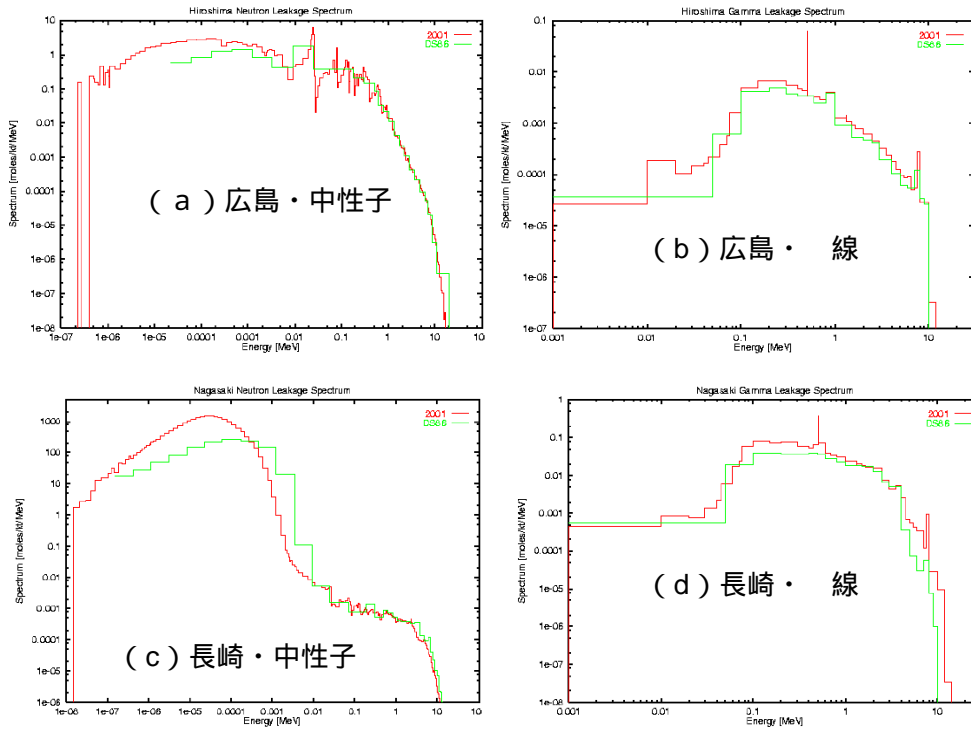


図1．広島・長崎原爆放出中性子・線のソースターム

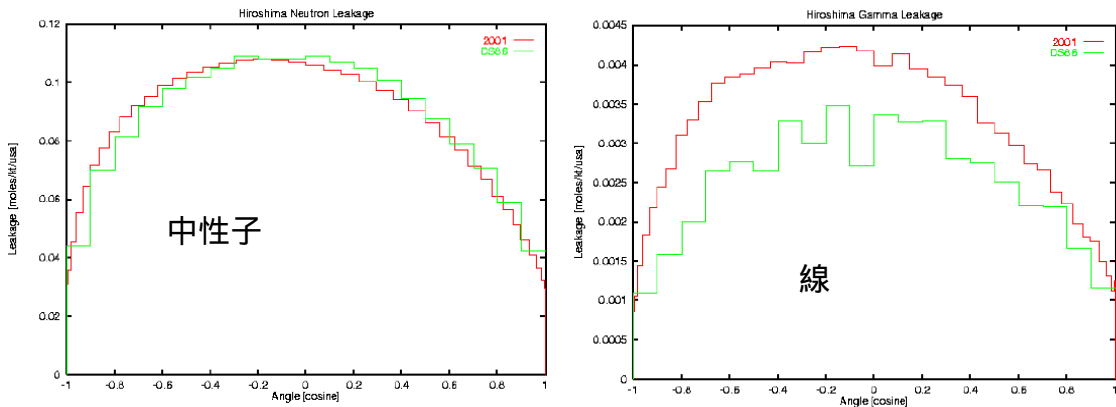


図2．広島原爆中性子・線の放出角分布：DS86 vs DS02 (US ワーキンググループによる)

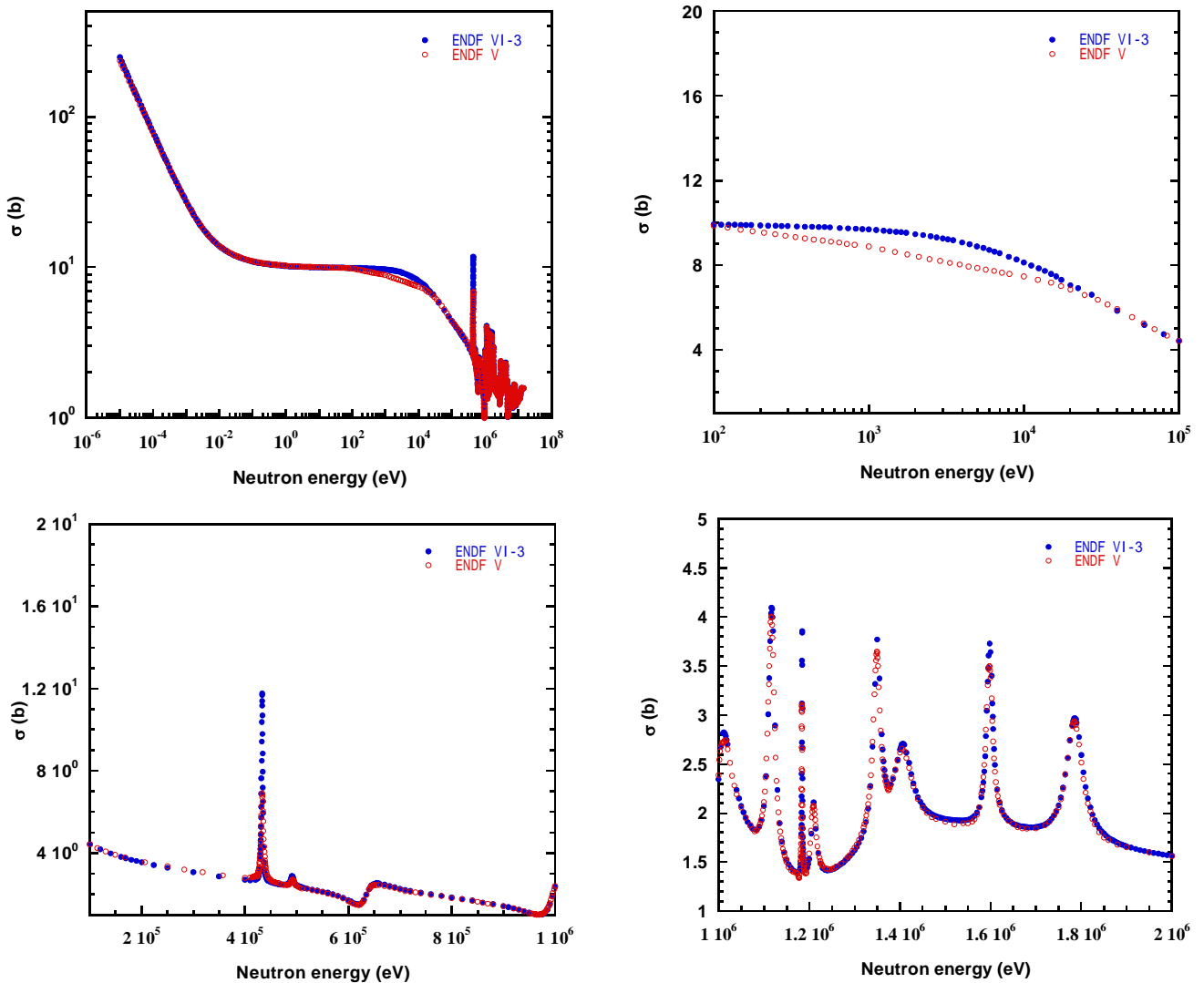
表1 線源項パラメータ (US ワーキンググループによる)

	Hiroshima			Nagasaki		
	DS02	DS86	DS02/DS86	DS02	DS86	DS02/DS86
Total Neutrons (Moles/kt)	1.768E-01	1.773E-01	0.9972	2.64E-01	2.73E-01	0.9660
Neutron energy (Average MeV)	0.3106	0.2976	1.0437	0.0126	0.0150	0.8401
Total $\gamma$ rays (Moles/kt)	6.665E-03	5.043E-03	1.3216	9.022E-02	6.296E-02	1.43
$\gamma$ ray energy (Average MeV)	1.3979	1.392	1.00	1.2667	1.335	0.949
Yield (kt)	16	15		21	21	

## 輸送計算

原爆から放出された中性子・線がどのように輸送され、被爆者や被爆試料まで到達するかを評価するためには輸送計算が必要である。この輸送計算においても、DS02では改良が加えられた。主たる改良点は、最新の断面積データ ENDF B6 を考慮していることである。地上 2000m、地表 50cm を半径 3000m、25m メッシュで DS86 と比べるとより細かいメッシュで計算を行っている。大地組成、空気組成などは DS86 と同様の値を用いている。

ENDF B6 と ENDF B5 の断面積の違いを窒素の断面積を例に図 3 に示す。窒素は、空気の主要成分であり、輸送計算においては最も計算結果に寄与すると考えられる。図 3 (a) は、 $10^{-6} - 2 \times 10^7 \text{eV}$  の領域を比較したものである。(b)、(c) 及び (d) は違いの大きなエネルギー領域を示している。 $10^2 - 10^4 \text{eV}$  の領域で 20% 程度、その他には共鳴ピーク上で数% - 40% 程度の違いが認められる。アメリカ側に LB2001 の線源項を提供してもらい広島グループにおいて中性子輸送計算を用いて確認したが、この断面積の違いが、輸送計算全体に及ぼす影響は数% 以下であった。



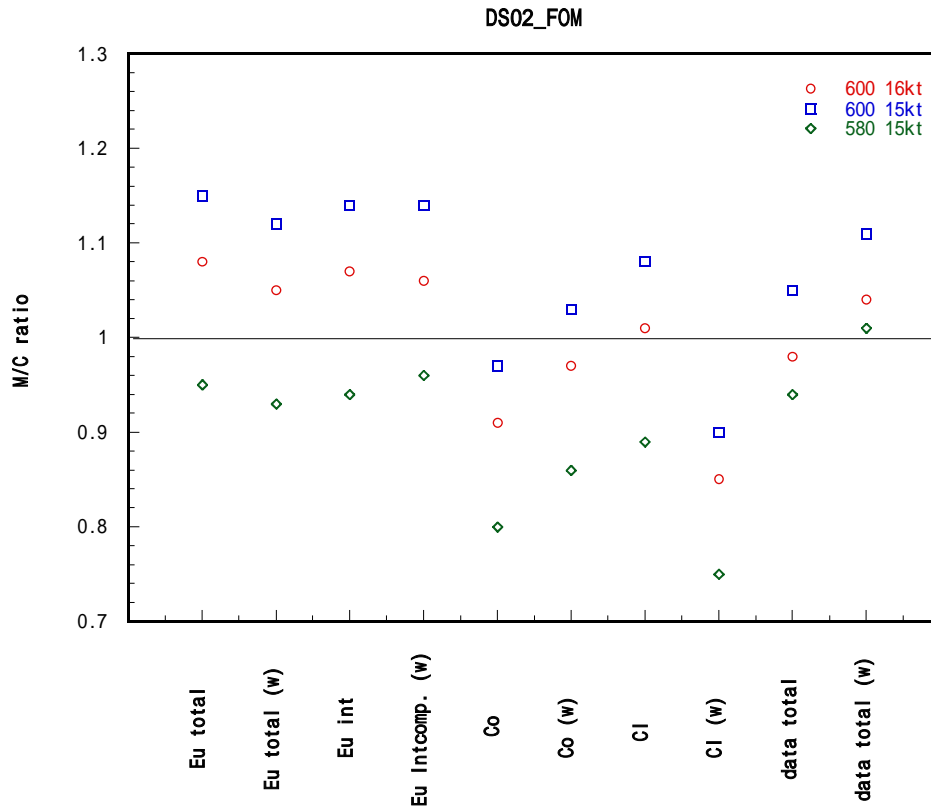


図3 爆発高度を変えたときの M/C 比の変化

### 爆発高度

爆発高度は熱線によりできた影を測定し評価されている。T57D の際の評価は 580m、T65D では 577m、DS86 では 580m の値が使われた。他にも数多くの測定があるが、その中でも荒川と長岡は 1169 の数多くの地点で測定し、606m の結果を得ている。Hubell ら<sup>10)</sup>はこれらの値を評価した結果 580±20m としている。DS02 では、爆発高度の再検討に DS86 以前の評価値、原爆出力計算の結果、誘導放射能の実測値などの結果をすべて考慮に入れ、高さ、出力を変化されて最良値を推定した。その際、輸送計算も爆発高度 580m、600m、610m に対して行った。各々の爆発高度ごとに計算した中性子スペクトルを基に Eu-152、Co-60、Cl-36、P-32、Ni-63 の誘導放射能を算出した。実測値と比較する際には、計算が空気中 1m での中性子の分布を与えることから、実測に用いた測定試料の遮蔽状況をできる限り考慮し、透過係数を別途見積り補正した値との比較を行っている。

図3に計算値を測定値で割った M/C 比を 1)580m、15kT、2)580m、16kT、3)600m、16kT の 3 種類について示す。図より 600m で 16kT とした場合最も M/C 比が全体として 1 に近いことがわかる。実際の作業ではその他の Ni-63、P-32 についても考慮しているが、P-32 の場合測定値の誤差が大きく、Ni-63 ではデータ点が少ないために大きく寄与しない。これらの結果より、爆発高度の評価値内でもっとも良く再現する高度として 600m を採用した。なお、爆発高度の評価は熱線で生じた陰影でも行われているが、その評価の範囲内である。また、爆発点の座標は、従来旧アメリカアーミーマップが使われてきたが、より正確な都市計画地図と比較解析し、広島で 15m 西に、長崎で 2m 西に移動することとした。DS86 と DS02 のソースタームの違いを表 2 にまとめておく。

表 2 . DS86 と DS02 の相違点

	広島		長崎	
	DS86	DS02	DS86	DS02
出力	15kT	16kT	21kT	変化無し
爆発点の高度	580m	600m	503m	変化無し
爆心の位置	-	15m 西へ移動	-	2m 西へ移動

放射化計算値と実測値の比較

広島原爆について新しいソースタームの条件での計算値と実測値の比較を図 4 に示す。左上から順番に、Eu-152, Co-60, Cl-36, Ni-63, TLD, P-32 を示す。実線は新しいシステム DS02 を示し破線は DS86 を示している。近距離で過大評価していた計算値が、よく合うようになっていることがわかる。

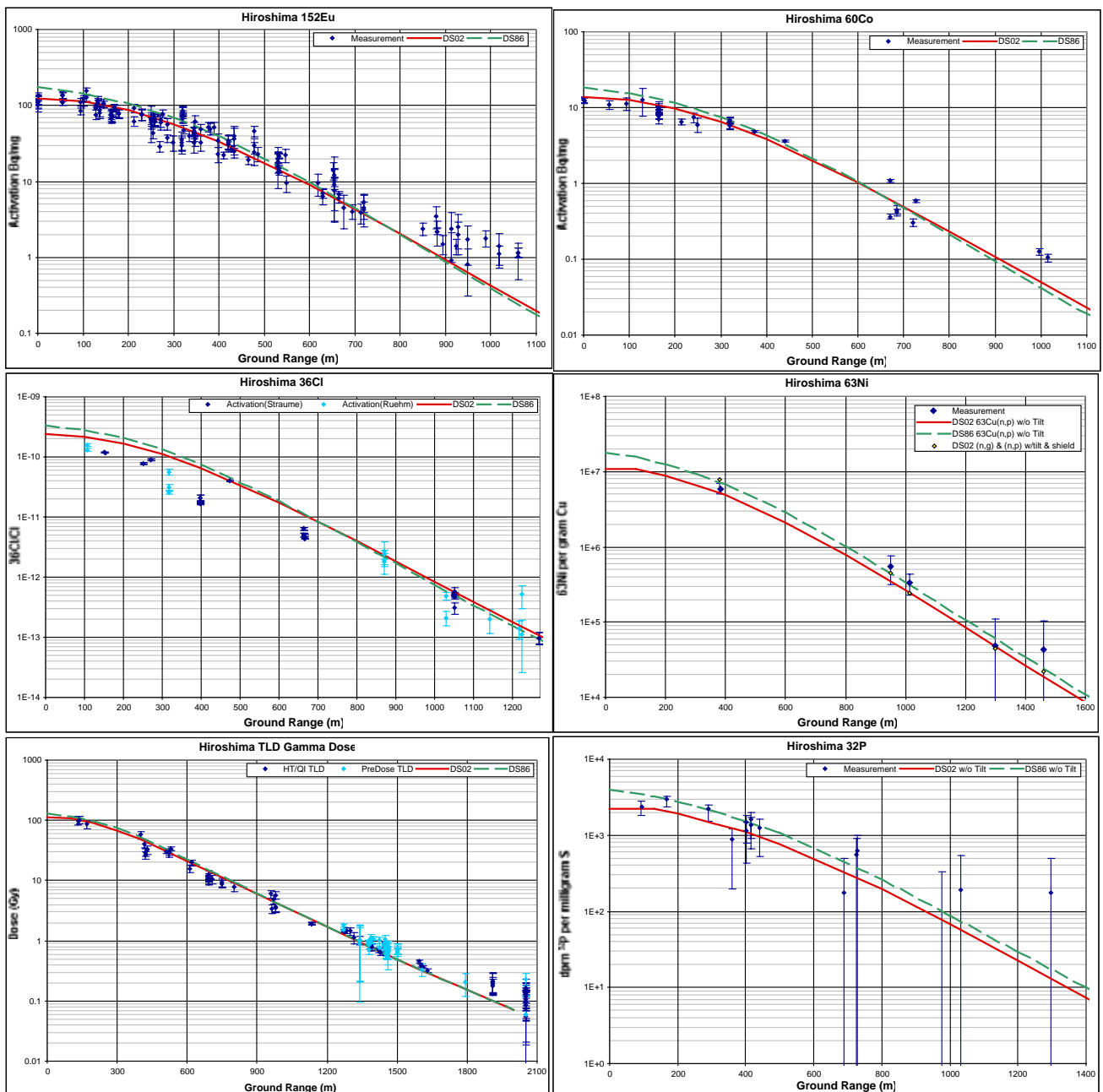


図 4 誘導放射能、TLD 測定値と DS02 及び DS86 計算値の比較 (USWG による)

遠距離の測定データについては、極々僅か改善したものの本質的に DS86 時と同じであった。これについては、当初 1200m 以遠のデータ誤差が大きいこと物理的な解釈が難しいことなどの理由で DS02 ではこれ以上の議論をしないという方向を選択することとなった。しかしながら、その後相互比較によって、この方向性は変わる事となる。

#### 相互比較

図 4 に示したように、計算と実測は改善されたが、遠距離の問題と Eu-152 と Cl-36 の間の因子としてのずれの傾向があることから、相互比較が広島大星より提案され行われることとなった。相互比較には、Cl-36 測定に、アメリカ（ストローメら）、ドイツ（リュームら）また筑波大学（長島ら）の 3 施設、Eu-152 測定には、金沢大学（小村ら）が参加した。

相互比較試料は、原爆被爆試料を近距離 140m から遠距離 1400m までのおよそ 17 試料を選択し、同一サンプルを 4 つの施設で測定する。更に、既知の 1000ppm の Eu 及び 10000ppm の標準塩化ナトリウム標準溶液を加えた標準溶液を Cf-252 の中性子場で照射した試料においても相互比較を行った。

これまでは Eu-152 の確認の測定は、岩石を溶解して抽出する作業が必要で、労力を要するため、測定試料の再測定が行われていなかった。今回は日本分析センターがその作業を行うことで了解が取れ、今までの 10 倍の 1kg の試料を溶解しユーロピウムを抽出してもらった。さらに金沢大学の小村が尾小屋実験室のトンネル内での、強力な遮蔽中での低バックグランド測定のシステムを使って Eu-152 の測定を行った。その結果、遠距離の Eu-152 の測定結果は DS02 に近いことが示された。また、それまで、Eu-152 の同定に使用していた 344keV 線の極近傍の 342.5keV の Ac-227 線があり、この線が混入していた可能性が小村によって指摘された。これらの結果は、尾小屋実験室という強力な遮蔽中での低バックグランド測定によって確認できたものである。

Cl-36 の測定においては、アメリカ、ドイツ、筑波大のデータは、アメリカの測定値が 2 点、他施設測定値の 2 倍を示した他は、ほぼ一致し、Cl-36 値は確認された。更に、Cl-36 と Eu-152 を比較すると 14%程度で一致した。

#### 元安橋深さ分布の計算値と測定値の比較

葉佐井らは、広島原爆中性子のエネルギースペクトル推定のため、1987 年元安橋の橋脚花崗岩から採取したコア中に精製された Eu-152 を深さの関数として測定した<sup>3)</sup>。その結果は、DS86 に基づいた計算では再現できず DS86 の見直しを迫る 1 つの材料であった。

この元安橋橋脚中 Eu-152 の深さ分布がどの程度改善したかを見るために、MCNP4C を用いて輸送計算を行った。計算では、DS02 の線源項を仮定し、600m 上空から原爆中性子を発生する。元安橋橋脚を囲むように 132m に半径 10m の仮想半球をもうけてこの半球上での中性子分布を計算した。次に仮想半球上より、中性子の輸送計算を開始し中止に定義した橋脚中の中性子分布を 4cm ごとに計算した。得られたスペクトルから Eu-151 の(n, )放射化断面積を用いて比放射能を計算した。葉佐井らによる測定値との比較するため結果を図 5 に共に示す。比較のため今中による計算結果を載せている。DS02 を仮定した計算では表面において 20%程度の違いがあるが、5cm より深部ではほぼ測定値を再現している。

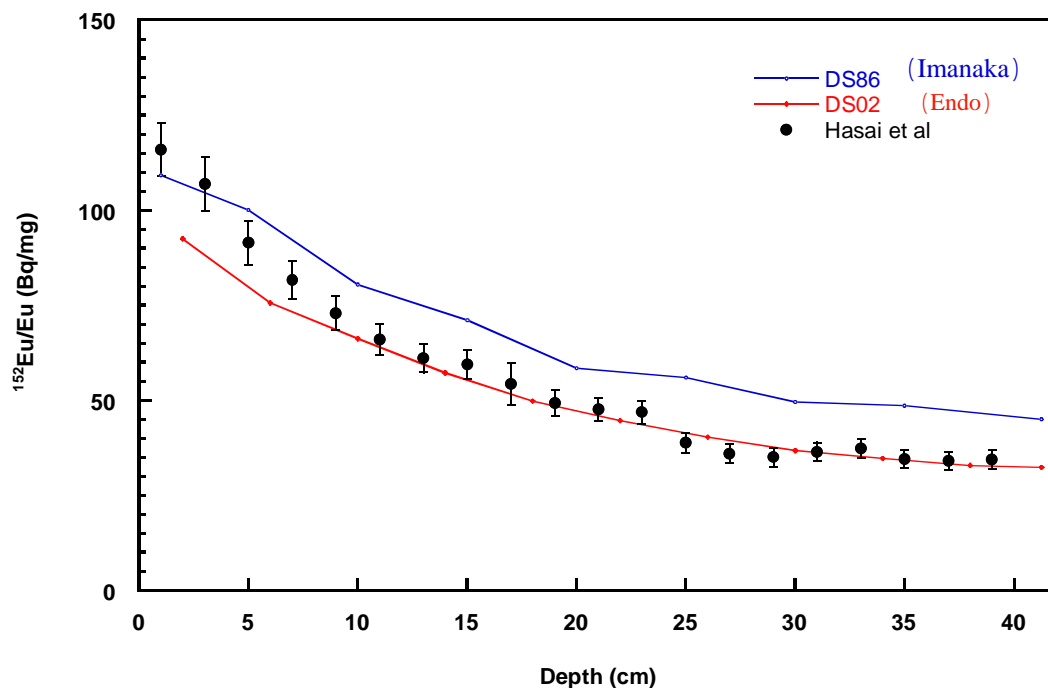


図 5：元安橋 Eu-152 比放射能の深さ依存性。プロットは葉佐井らによる測定値。DS86 は今中による計算、DS02 は本計算

#### まとめ

広島長崎原子爆弾の新しい線量評価体系 2002 (DS02) が構築された。その結果、DS86に見られた実測値と計算値の系統的なずれは、ほぼ理解できた。実測値は計算値によって 10~20%程度で見積もることができる。今後 DS02 は、放影研で行われている疫学調査へ取り込まれ、放射線のリスク評価へと利用されると考えられる。

#### 参考文献

1. Hashizume, T., Maruyama, T., Shiragai, A., Tanaka, S. Estimation of the air dose from the atomic bombs in Hiroshima and Nagasaki. Health Phys. 13, 149-169, (1967).
2. Radiation Effects Research Foundation. In, Roesch, W. C., ed. US-Japan joint reassessment of atomic bomb radiation dosimetry in Hiroshima and Nagasaki, final report. Hiroshima, Radiation Effects Research Foundation, Vol. 1 and 2. (1987).
3. Hasai, H., Iwatani, K., Shizuma, K., Hoshi, M., Yokoro, K., Sawada, S., Kosako, T., Morishima H. Europium-152 depth profile of a stone bridge pillar exposed to the Hiroshima atomic bomb,  $^{152}\text{Eu}$  activities for analysis of the neutron spectrum. Health Phys. 53, 227-239 (1987).
4. Hoshi, M., Hasai, H. and Yokoro, K. Studies of radioactivity produced by the Hiroshima atomic bomb: 1. Neutron-induced radioactivity measurements for dose evaluation. J. Radiat. Res. Suppl., 20-31 (1991).
5. Shizuma, K., Iwatani, K., Hasai, H., Oka, T., Morishima, H. and Hoshi, M. Specific activities of  $^{60}\text{Co}$  and  $^{152}\text{Eu}$  in samples collected from the atomic-bomb dome in Hiroshima. J. Radiat. Res. 33, 151-162 (1992).
6. Shizuma, K., Iwatani, K., Hasai, H., Hoshi, M., Oka, T. and Morishima, H. Residual  $^{152}\text{Eu}$  and  $^{60}\text{Co}$  activities induced by neutrons from the Hiroshima atomic bomb. Health Phys. 65, 272-282 (1993).

7. Shizuma, K., Iwatani, K., Hasai, H., Hoshi, M. and Oka, T.  $^{152}\text{Eu}$  depth profiles in granite and concrete cores exposed to the Hiroshima atomic bomb. *Health Phys.* 72, 848-855 (1997)
8. Nakanishi, T., Morimoto, T., Komura, T. and Sakanoue, M. Europium-152 in samples exposed to the nuclear explosions at Hiroshima and Nagasaki. *Nature* 302, 132-134 (1983).
9. Ichikawa, Y., Nagatomo, T., Hoshi, M. and Kondo, S. Thermoluminescence dosimetry of gamma rays from the Hiroshima atomic bomb at distances of 1.27 to 1.4 kilometers from the hypocenter. *Health Phys.* 52, 443-451(1987).
10. Hubbell, H. H., Jones, T. D. and Cheka, J. S. The epicenters of the atomic bombs: 2. Reevaluation of all available physical data with recommended values. ABCC-TR 3-69(1969).