

つのウラン 235 を配置し火薬で2つを出口側で合体させ臨界に達して爆発させたものである。そこでDS86では中性子の発生は厚い鉄がそのままの状態(壊れる前に)発生したとしている。中性子は鉄と(n,n')反応で非弾性散乱し、エネルギーを失った。そこで2つのウランの塊が衝突する際、原爆の底が抜けたように割れたと仮定した。この隙間から連鎖反応の終わりの時期に裸の核分裂中性子が放出されたと考えた。<sup>(27)</sup> 計算ではそれぞれDS86の中性子フルエンスを仮定して計算した。このときは割れた時間が最後の5%とした。こうしてさらに中性子が発生した高度を90m引き上げた。この仮定は燐32のデータがDS86と合っているので一つのパラメータを変えただけでは、ずれてしまうので必要である。もちろんこれらの仮定については承認されているわけではない。ここでの努力は可能性として示しアメリカ側に検討をせまるためのものである。

こうすると確かに1km以内では全てのデータが一致してくる。<sup>(28)</sup> しかしながら1kmより遠くではまだ計算と一致させることができない。このモデルは単純なモデルであるが、最近より厳密に広島原爆の形を再現してみた。図7にその模式図を示す。<sup>(30)</sup> こうして平行に割れたモデルを考え、その隙間を図7左のように3cmとすると、遠距離まで比較的再現できることが分かった。さらに図7右のように割れ方が等方的でなく4分の1だけ割れたとするとさらによくあうことが示せる。<sup>(31)</sup> この場合について計算との比較を示すと、図9のようになる。これでだいたい合ってきたともいえる。

以上、こういったクラックモデルを仮定するとデータと計算とを合わせることが可能であることを示したといえる。ただこういったことが起こりうるのかアメリカ側が検討する必要がある。

この計算モデル以外にも考えられることとして遠距離の測定値にはバックグラウンドの中性子が含まれている場合などの可能性も残

されている。そのほかにも解答はあるかもしれない。まだ総合的に検討しなければならない。ただ現在のところ、広島原爆の中性子データの問題を説明できるのはこのモデルしかないのは確かである。

## 5. ワークショップ

1) 平成12年3月と12月に放射線影響研究所で開催された日米のワークショップ

昨年(平成12年)3月に放射線影響研究所で日米のほとんどの研究者が参加してワークショップが開催された。この時のアジェンダを付録に示す。アメリカ側はDOEが予算を認め新しい線量を1年以内に発表する必要があるとの事でかなり急いでいる様子であった。しかしそんなに早く解決するとも思えなかった。発表の主な内容は以下の通りである。

- ① 銅のサンプルに生じたニッケル63の測定。これは測中性子の測定結果が半減期の短い燐32の過去のデータしかなかったが、加速器マスとよばれる新たな測定技術の進歩で測定ができるようになった。この途中経過であるが測定結果が発表された。アメリカのストローメのグループを中心として、ドイツのリュームさんのグループが発表した。日本の柴田徳思、柴田誠一さんのグループはニッケル63のβ船側邸の方法による実験の途中経過の発表があった。これは日米ともその結果がどのようなものになるか大変期待している。
- ② 実験データと計算の矛盾に関する発表。このことでは筆者はクラックモデルを発表してきている。1. クラックが横方向に生じ速中性子はその方向に放出された。2. 中性子の発生地点の高さを90m引き上げその90m落下しファイアボールとなった。3. 原爆の出力を20%増やす。この3点が仮説であるが、これ以外に実験データと計算とを説明するモデルはなかったのも事実である。筆者は4. で説明し

たモデルを発表した。アメリカ側は出力を20%増加させること以外は認めてこなかったが、今回DS86を計算したカウルがそうする以外に説明はできないことを認める発表を行った。ただ1と2の仮説を認めたわけではない。

- ③ 平成11年の年末に東海村のJCOで臨界事故があった。そのときの熱中性子の放射化データや、モニタリングポストの測定結果が発表された。これらは原爆線量で問題にしている2kmの遠距離までの結果が出ていて、計算と結果と矛盾は存在していなかった。すなわち計算は非常に正確で2kmの距離まで結果を説明していた。このことは今までトランスポート計算か広島原爆の線源としての原爆の中性子スペクトルかの問題に対し、『計算は正しいこと』を証明した。そうすると後者の、広島原爆の中性子スペクトルの問題となる。この結果は金沢大学の小村和久や京都大学の今中哲二および筆者が発表した。
- ④ バックグラウンドとしての宇宙線由来の中性子による放射化。ユーロピウムなどの測定結果が遠距離で高いのはなぜなのかという問題に対し、バックグラウンド中性子の放射化はどのくらいあるのかは常に問題となってきた。今回はヘリウム3カウンターによる熱中性子の実測の結果を広島大学原医研の石川正純が発表し、金による放射化のデータを金沢大学の小村和久が発表した。いずれもその値は小さく問題にならないというものであった。このことも今までの疑問に対して結論を出すものとなった。
- ⑤ その他。ストローメのグループによる塩素36の測定などその他の発表もあったが、これらには新しい展開となる内容はこれらの中には含まれていなかった。

以上の様にこのワークショップは日米の関係者がほとんど集まっただけでなく、今までの

疑問に対して回答を出す結果がいくつか含まれていた。重要な会議となった。この際年内にもう一度関係者だけで集まってワークショップを開催することになった。

## 2) 平成12年12月開催のワークショップ

関係者だけが集まってこれまでの結果を出して発表した。アメリカ側はロバートヤングが代表者となってまとめることが決まった。日本側は葉佐井博巳が代表となる。筆者は全ての会議に出席できなかったので一部は後で報告を聞いたことも含まれる。アメリカ側は特に新しい結果を持ってきていなかった。代表者のヤングが、アメリカ側は本年(平成13年)中に線量を何らかの形で計算すると明言した。その際、日本側に筆者(星正治)をメンバーとして入れたいと申し入れてきた。そして日本側の納得が得られることを条件として線量を出すと約束した。このことは我々の10年以上にわたる努力をアメリカ側が正式に認めた結果と考える。

筆者は、ユーロピウムのデータとDS86とを比較するグラフを示して、1. まず近距離のデータは確実であり、データが計算値より小さいことを説明する必要がある。2. 遠距離でデータが計算値より大きいことは従来より問題でこのことを説明する必要がある。これらを指摘した。またクラックから即発ガンマが漏れたとするとガンマ線のデータで1.5km以遠が計算より高いことを説明する可能性があることを示した。ジョージカーは中性子のバックグラウンドが高いとき熱中性子の遠距離問題が解決することを示した。

本年(平成13年)3月に再度日米の会議を開催する。アメリカ側は計算結果を持ち寄ると約束しているのでどんな結果を持ってくるのか期待している。

## 6. おわりに

原爆線量の問題について述べた。この問題は原因を考えるといった興味だけではなく、被爆者の線量評価が放射線影響研究所で進められ

てきた疫学調査と合わせた、放射線の人への危険度を求めることに直結しているため大切である。<sup>②</sup> 広島長崎の被爆試料は建物などが急速に失われていて、ほとんどない状態である。すでに採取した試料から測定を行っている状態であり、今回を逃すと困難になってくる。問題点は現在も明確ではないが、広島グループとして引き続き解決への努力を進めていく。

**謝辞** 原爆線量再評価の研究は広島原爆線量評価グループである葉佐井博巳（広島国際学院大学）、岩谷和夫（広島県立医療保健福祉短期大学）岡隆光（呉大学）、静岡清（広島大学工学部）遠藤暁（広島大学工学部）、高田純（広島大学原医研）藤田正一郎（放射線影響研究所）の方々との共同研究である。原医研国際放射線情報センターの平岡正行氏には MCNP の計算機へのインストールの際に援助していただいた。お礼申し上げます。

## 参考文献

1. Radiation Effects Research Foundation. In, Roesch, W. C., ed. US-Japan joint reassessment of atomic bomb radiation dosimetry in Hiroshima and Nagasaki, reassessment of atomic bomb radiation dosimetry in Hiroshima and Nagasaki, final report. Hiroshima, Radiation Effects Research Foundation, Vol. 1 and 2. (1987).
2. International Commission on Radiological Protection. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford, Pergamon Press, ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21(1-3) (1991).
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., Kato, K. Data on neutrons in Hiroshima. 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. 2, 252-255 (1987).
5. 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).
6. Hoshi, M., Yokoro, K. Sawada, S., Shizuma, K., Hasai, H., Oka, T., Morishima, H., Brenner, D. J. Europium-152 activity induced by Hiroshima atomic bomb neutrons, Comparison with the  $^{32}\text{P}$ ,  $^{60}\text{Co}$ , and  $^{152}\text{Eu}$  activities in dosimetry system 1986(DS86). Health Phys. 57, 831- 837 (1989).
7. 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).
8. 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).

9. Shizuma, K., Iwatani, K., Hasai, H., Oka, T., Hoshi, M., Shibata, S., Imamura, M. and Shibata, T. Identification of  $^{63}\text{Ni}$  and  $^{60}\text{Co}$  produced in a steel sample by thermal neutrons from the Hiroshima atomic bomb. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 384, 375-379 (1997).
10. 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)
11. 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).
12. Nakanishi, T., Ohtani, H., Mizuochi, R., Miyaji, K., Yamamoto, T., Kobayashi, K., Imanaka, T. J. Residual neutron-induced radionuclei in samples exposed to the nuclear explosion over Hiroshima, Comparison of the measured values with the calculated values. *J. Radiat. Res. Suppl.* 32, 69-82, (1991).
13. Straume, T., Finkel, R. C., Eddy, D., Kubik, P. W., Gove, H. E., Sharma, P., Fujita, S., Hoshi, M. Use of accelerator mass spectroscopy in the dosimetry of Hiroshima neutrons. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* 52, 552-556, (1990).
14. Straume, T., Egbert, S. D., Woolson, W. A., Finkel, R. C., Kubik, P. W., Gove, H. E., Sharma, P., Hoshi, M. Neutron discrepancies in the new (DS86) Hiroshima dosimetry. *Health Phys.* 63, 421-426, (1992).
15. Straume, T., Harris, L. J., Marchetti, A. A., Egbert, S. D. Neutrons confirmed in Nagasaki and at the army pulsed radiation facility, Implications for Hiroshima. *Radiat. Res.* 138, 193-200, (1994).
16. Arakatsu, F., Kimura, K., Shimizu, S., Hanatani, T., Ueda, R., Ishiwari, R., Takagi, I., Kondo, S., Takase, H., Aoki, K., Ishizaki, K., Ueda, R., Hondo, E., Nishikawa, Y. Takai, S., Horishige, T. Murao, M. Report on survey of radioactivity in Hiroshima several days after the atomic bomb explosion. In the Science Council of Japan, Collection of Investigation Reports on the Investigation of Atomic Bomb Casualties. ed. Committee for Publication of Investigation Reports on the Atomic Bomb Disaster. Japan Science Promotion Society. Tokyo. pp.5-10, (1953).
17. Yamasaki, F., Sugimoto, A. Radioactive  $^{32}\text{P}$  produced in sulfur in Hiroshima. In the Science Council of Japan, 1953, Collection of Investigation Reports on the Investigation of Atomic Bomb Casualties. ed. Committee for Publication of Investigation Reports on the Atomic Bomb Disaster. Japan Science Promotion Society, Tokyo, pp. 16-18, (1953).
18. Yamasaki, F., Sugimoto, A. Radioactive  $^{32}\text{P}$  produced in sulfur in Hiroshima. 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. 2, 246-247, (1987).
19. Shimizu, S., Saigusa, T. Estimation of  $^{32}\text{P}$  induced in sulfur in utility-pole insulators at the time of the Hiroshima atomic bomb. 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. 2, 266-268, (1987).
20. Hamada, T. Measurements of  $^{32}\text{P}$  in sulfur. 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. 2, 272-279, (1987).
  21. 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).
  22. Kerr, G. D., Dyer, F. F., Emery, J. F., Pace III, J. V., Brodzinski, R. L., Marcum, J. Activation of cobalt by neutrons from the Hiroshima bomb. Oak Ridge, TN, Oak Ridge National Laboratory, Report No. ORNL-6590, (1990).
  23. Hoshi, M., Sawada, S., Nagatomo, T., Neyama, Y., Marumoto, K., Kanemaru, T. Meteorological observations at Hiroshima on days with weather similar to that of the atomic bombing, Validity of the estimated atmospheric data in DS86 for neutron dose calculations. *Health Physics* 63, 656-664, (1992).
  24. Briesmeister, J. F. MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, version 4A. LA-12625-M, Manual UC-705 and 700, (1993).
  25. Hoshi, M., Hiraoka, M., Hayakawa, N., Sawada, S., Munaka, M., Kuramoto, A., Oka, T., Iwatani, K., Shizuma, K., Hasai, H., Kobayashi, T. Benchmark test of transport calculations of gold and nickel activation with implications for neutron kerma at Hiroshima. *Health Physics* 63, 532-542, (1992).
  26. Iwatani, K., Hoshi, M., Shizuma, K., Hiraoka, M., Hayakawa, N., Oka, T., Hasai, H. Benchmark test of neutron transport calculations, II. Indium, nickel, gold, europium and cobalt activation with and without energy moderated fission neutrons by iron simulating the Hiroshima A-bomb casing, *Health Physics* 67, 354-362, (1994).
  27. Hoshi, M., Takada, J., Oka, T., Iwatani, K., Shizuma, K. and Hasai, H. A possible explanation for the DS86 discrepancy between the data and calculation in Hiroshima. In, Nagataki, S. and Yamashita, S. ed. Nagasaki symposium radiation and human health. Elsevier Science B. V. 175-191 (1996).
  28. Shibata, K., Nakagawa, T., Asami, T., Fukahori, T., Narita, T., Chiba, S., Mizumoto, M., Hasegawa, A., Kikuchi, Y., Nakajima, Y. and Igarashi, S. Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Version-3 -JENDL3-. Japan Atomic Energy Research Institute, JAERI-13 19, (1990).
  29. Gritzner, M. L., Woolson, W. A. Sulfur activation at Hiroshima. 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. 2, 283-292 (1987).
  30. Hoshi, M., Sawada, S., Nagatomo, T., Neyama, Y., Marumoto, K. and Kanemaru, T. Meteorological observations at Hiroshima on days with weather similar to that of the atomic bombing. *Health Phys.* 63, 656, (1992).

31. Hoshi, M., Endo, S., Takada, J., Nitta, Y.,  
Ishikawa, M., Iwatani, K., Oka, T., Fujita,  
S., Shizuma, K. and Hasai, H. A crack  
model of the Hiroshima atomic bomb:

explanation of the contradiction of  
"Dosimetry system 1986". J. Radiat. Res.  
40 suppl., 145-154, (1999).

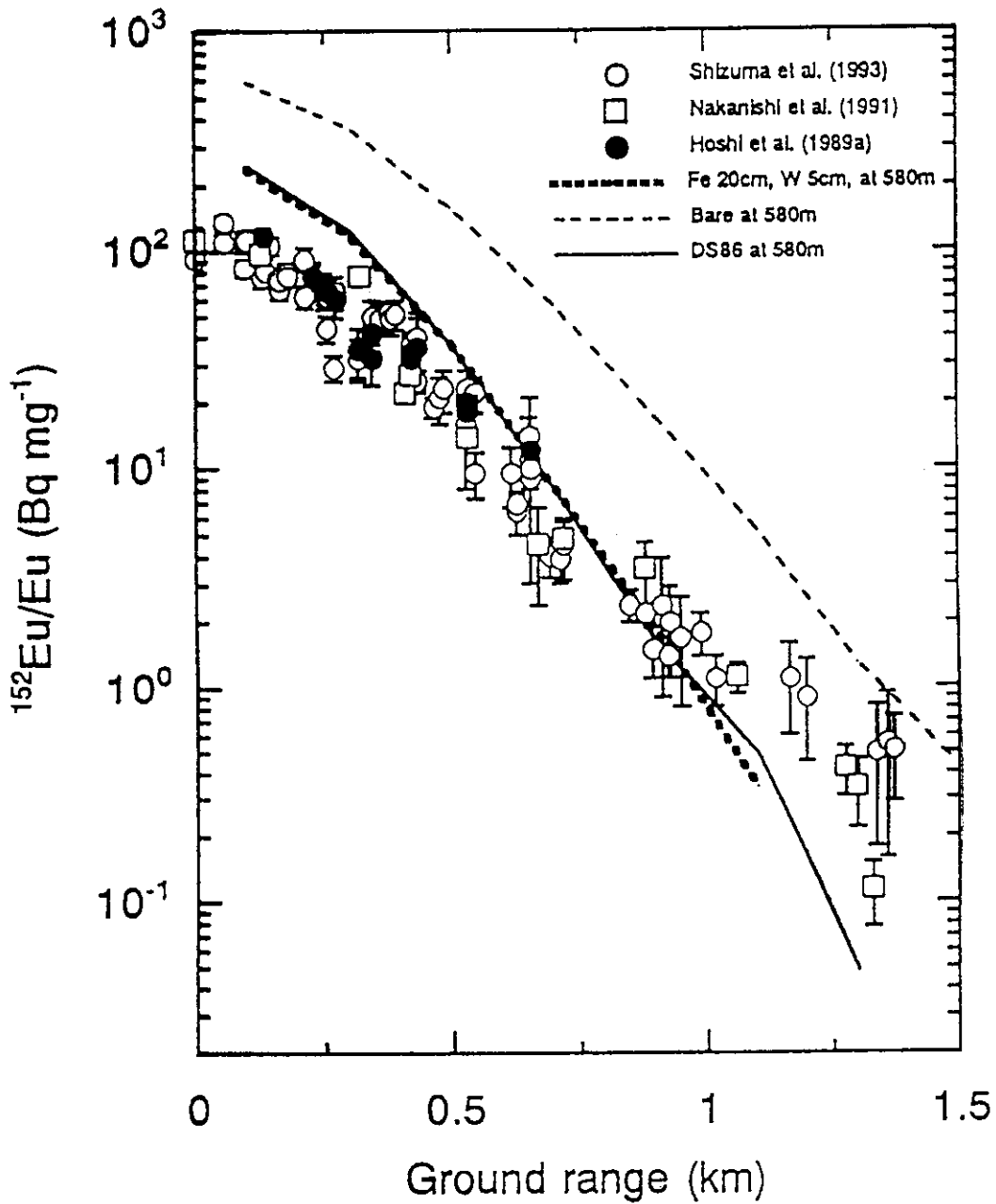


図1. 広島のエウロピウム 152 の比放射能の測定結果と計算。太い点線は内側にタングステン 5cm 外側に鉄 20cm の球殻を考え、中心にウラン 235 の核分裂中性子を考えた場合のモデルによる計算。実線は DS86。太い実線と DS86 が一致している。球形のモデルでも DS86 の計算として使えることを示している。細い点線（一番上）は DS86 のフルエンスで裸の核分裂中性子を考えた場合。<sup>(27)</sup>

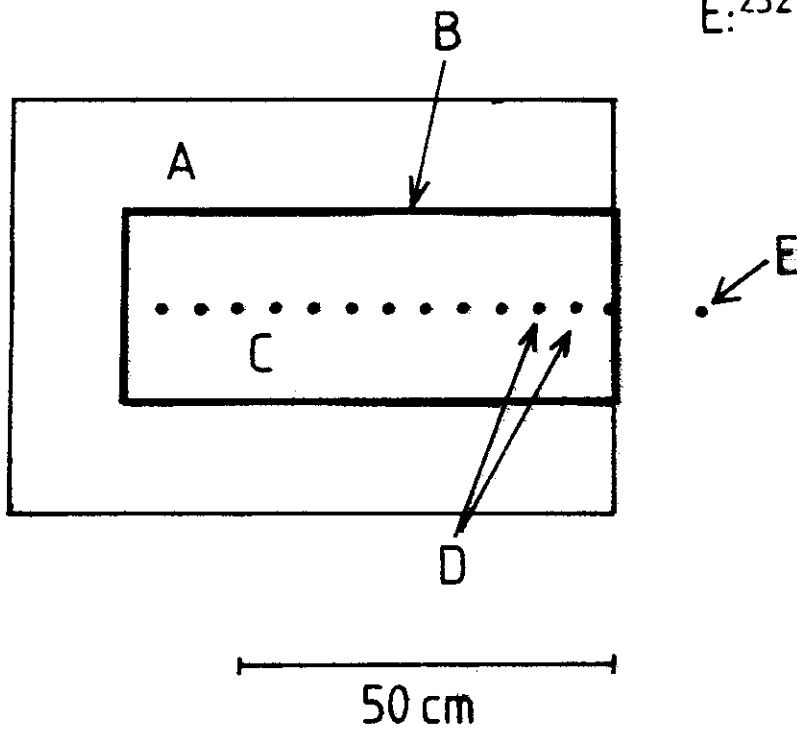
A : polyethylene + B(3.7%)

B : Cd

C : water, granite, A

D : Ni, Au

E :  $^{252}\text{Cf}$



## Cross sectional view of the bench mark test

図2. ベンチマークテストに使ったシステムの断面図。Aはカリフォルニウム252線源 ( $^{252}\text{Cf}$ )。Bは中性子スペクトルを計算した場所を示す。Cは中性子の検出に使った金属箔の位置。Dはいろいろな材質を使った吸収体(モデレータ)。Eは0.5mmの厚さのカドミウム板。Fはボロン(3.7%)入りのポリエチレン(商品名ニューライト)。



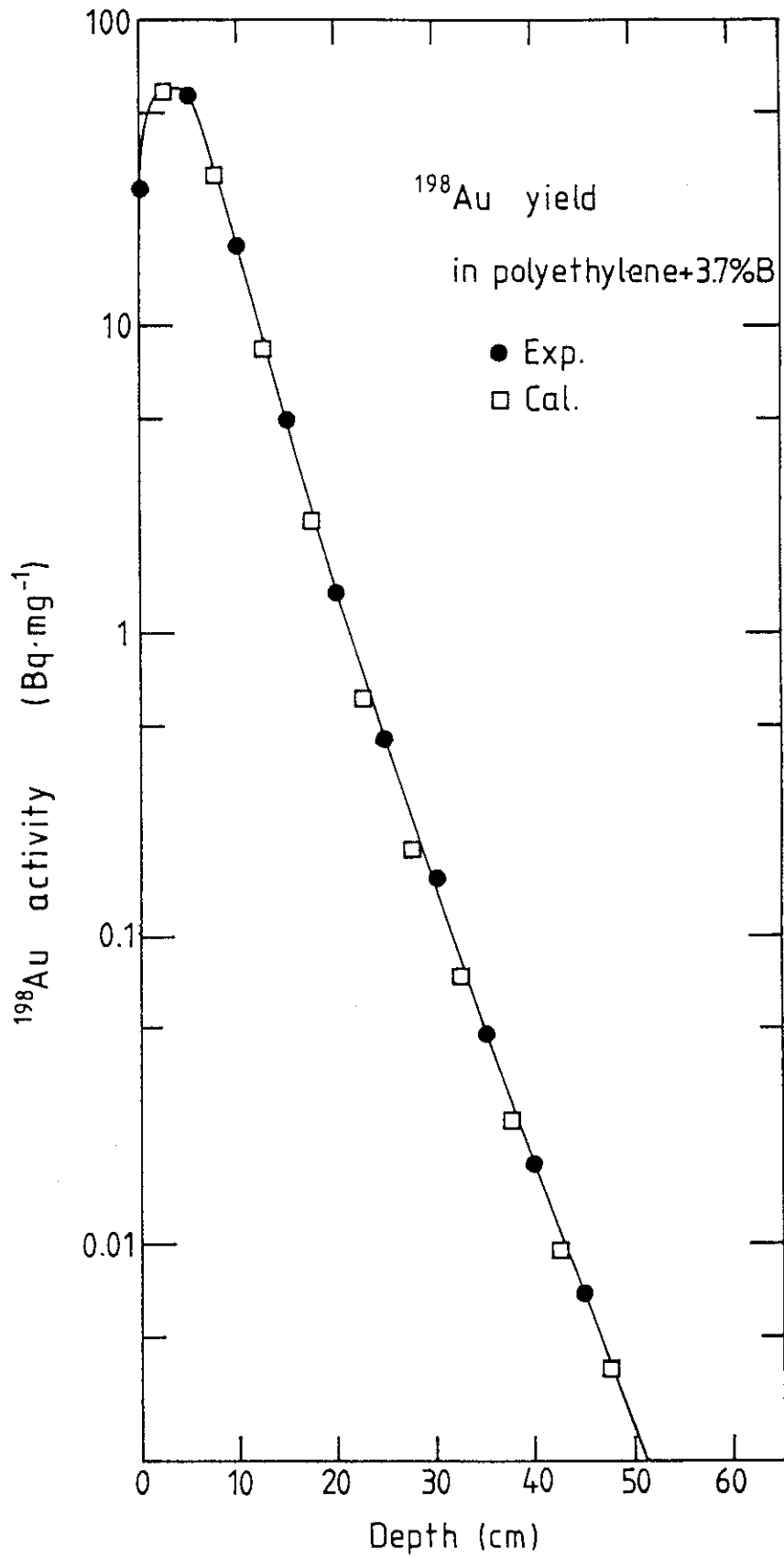


図 3. ボロン入りのポリエチレン（ニューライト）を使った場合の計算と実験値の比較。放射化箱は金で熱、熱外中性子を検出した。これ以外の水、岩石、塩化アンモニウムなど各種の材質においてもよい一致を示す。<sup>(25)</sup>

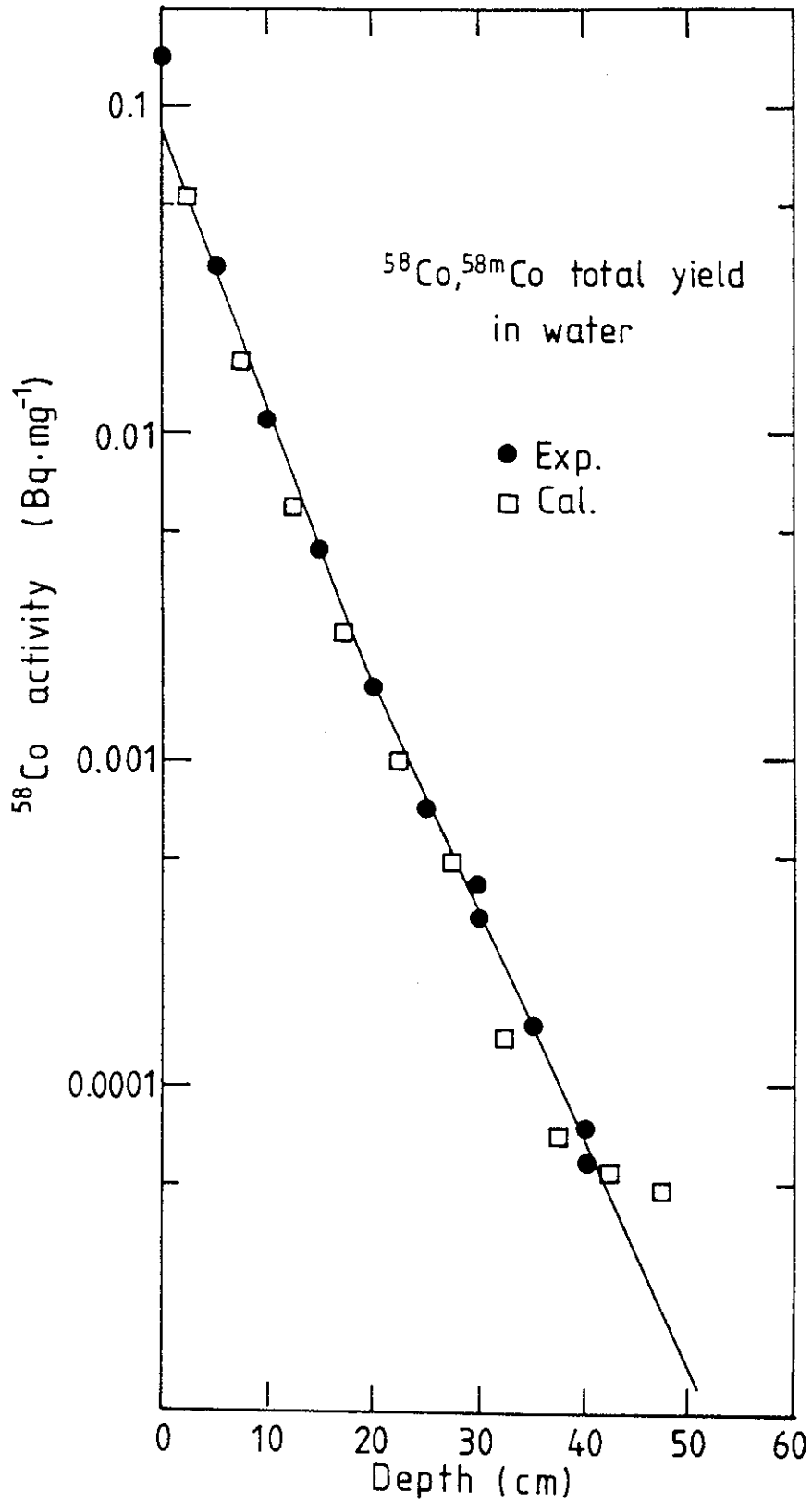


図4. 図3と同様な比較。Ni(n,p)反応による速中性子を検出した。これは水の場合であるが、いろいろな材質においてもよい一致を示した。<sup>(25)</sup>

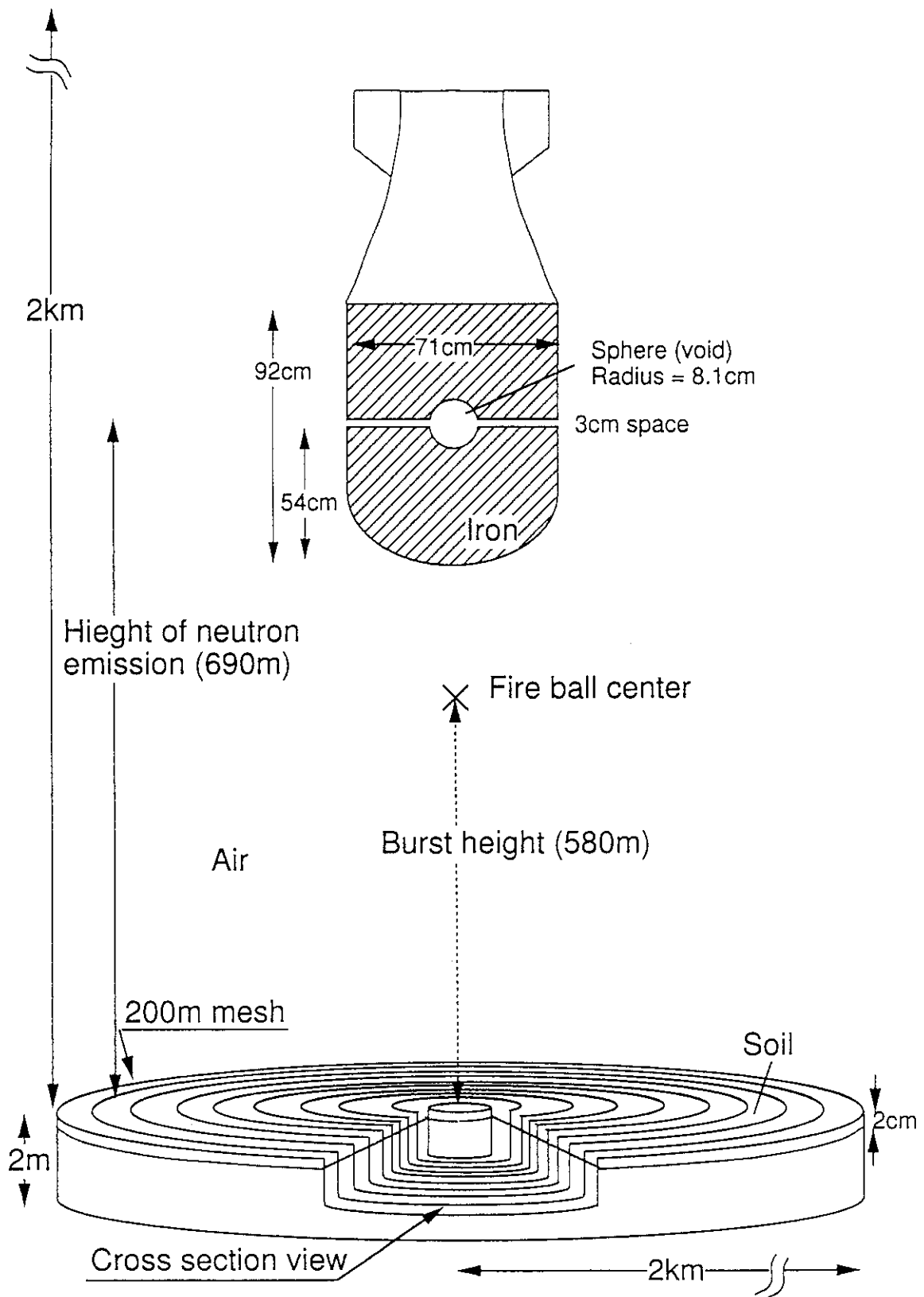


図5. 広島原爆の輸送計算に使ったジオメトリー。ユーロピウム生成量計算に使う中性子のスペクトルは地表から地面の中に2cm入ったところまで、すなわち2cmの厚さの部分の計算結果を使った。ガンマ線の場合は地表1mの位置を使った。爆発点の高さはDS86では580mである。90m引き上げた場合の670mの位置での計算も行った。

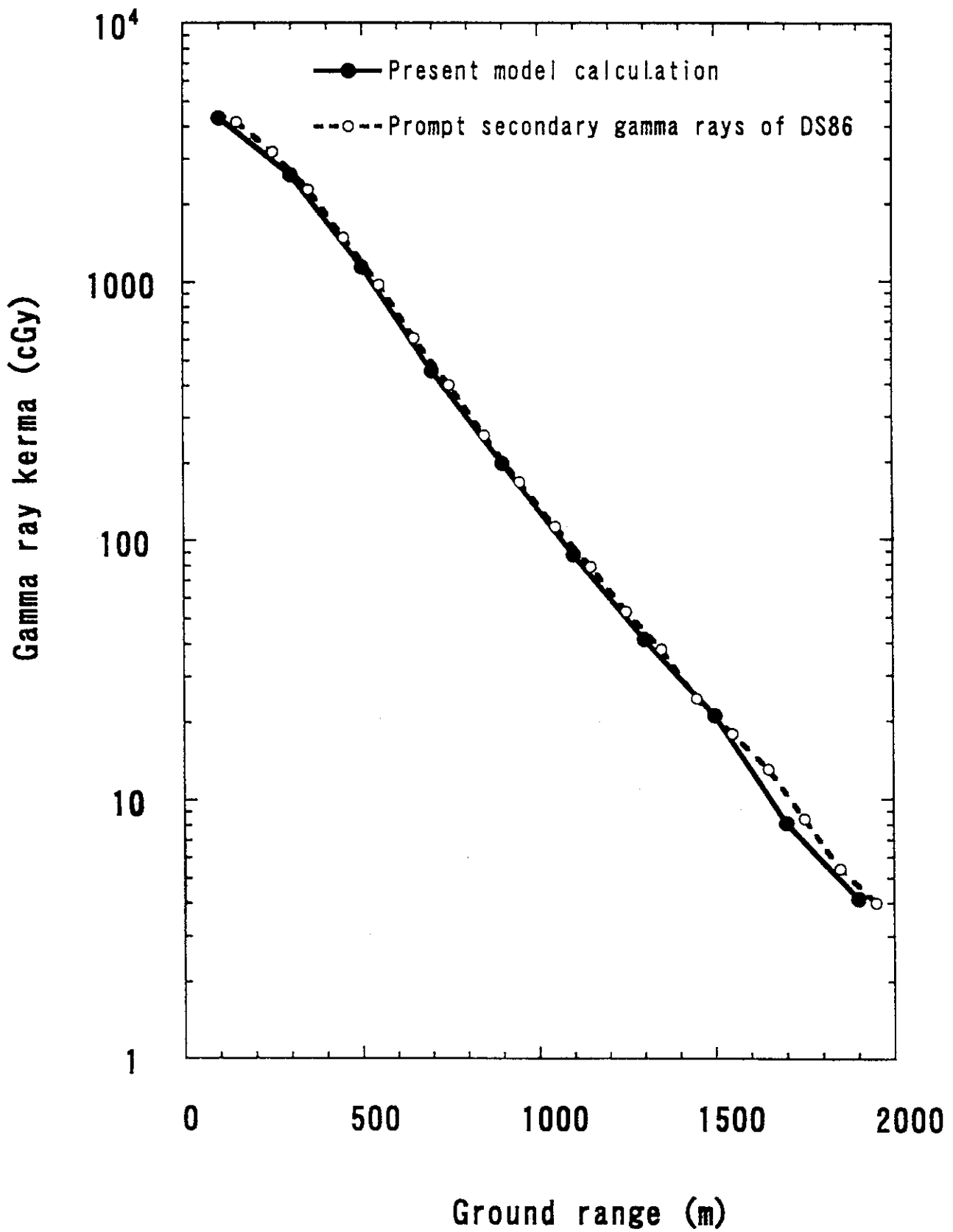


図6. 即発中性子が空気や土と反応して発生した2次ガンマ線（即発2次ガンマ線）のDS86との比較。DS86と一致している。そのほかの成分についてもDS86の計算と矛盾はない。

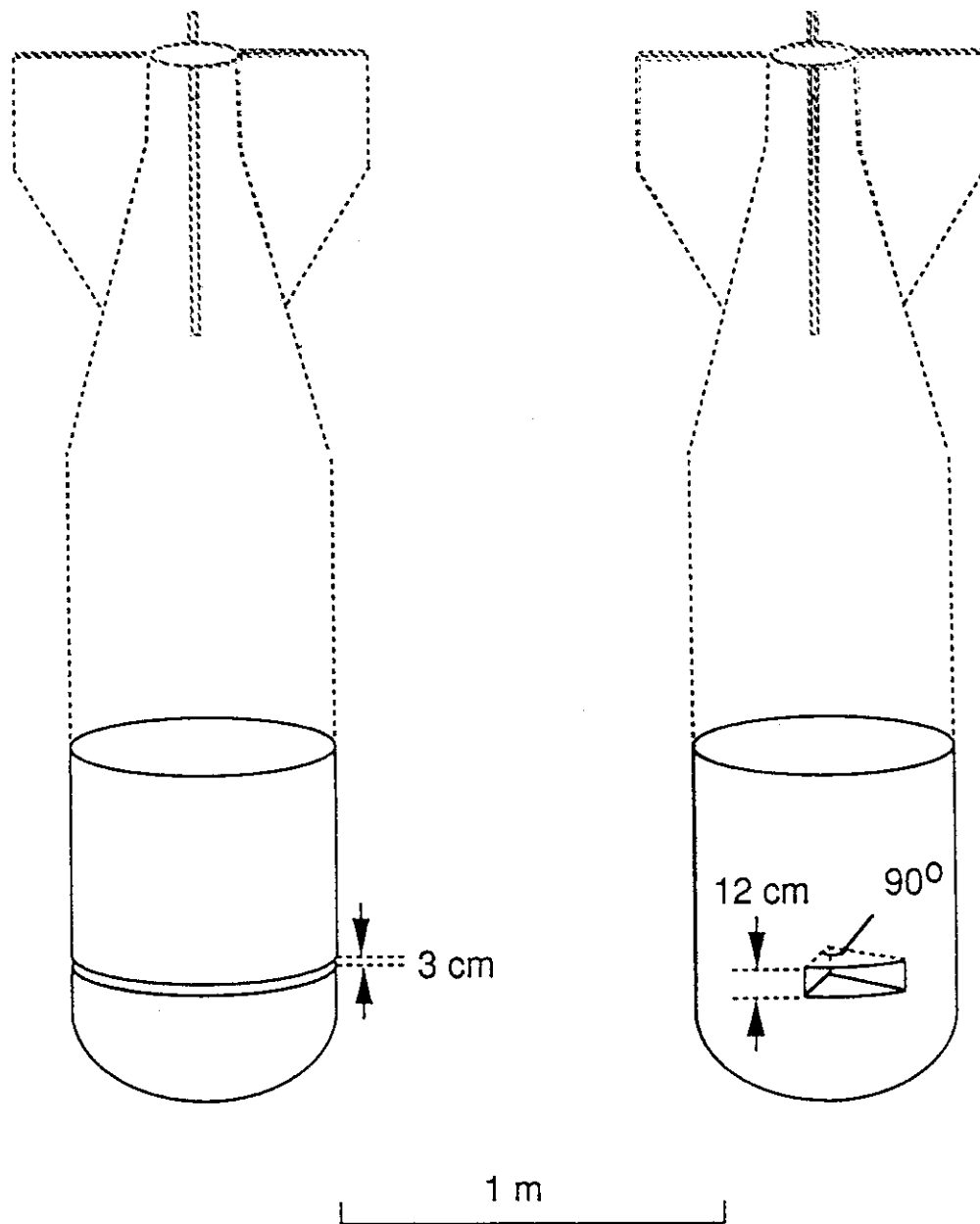


図 7. より詳細な広島原爆の形を再現した場合の、クラックの仮定。左側はウランの位置を含む形で水平に割れた場合。割れ目の幅は 3cm ぐらいで計算とデータが合ってくる。右側は 90 度方向のみにクラックができた場合。文献 30 を参考に改変。

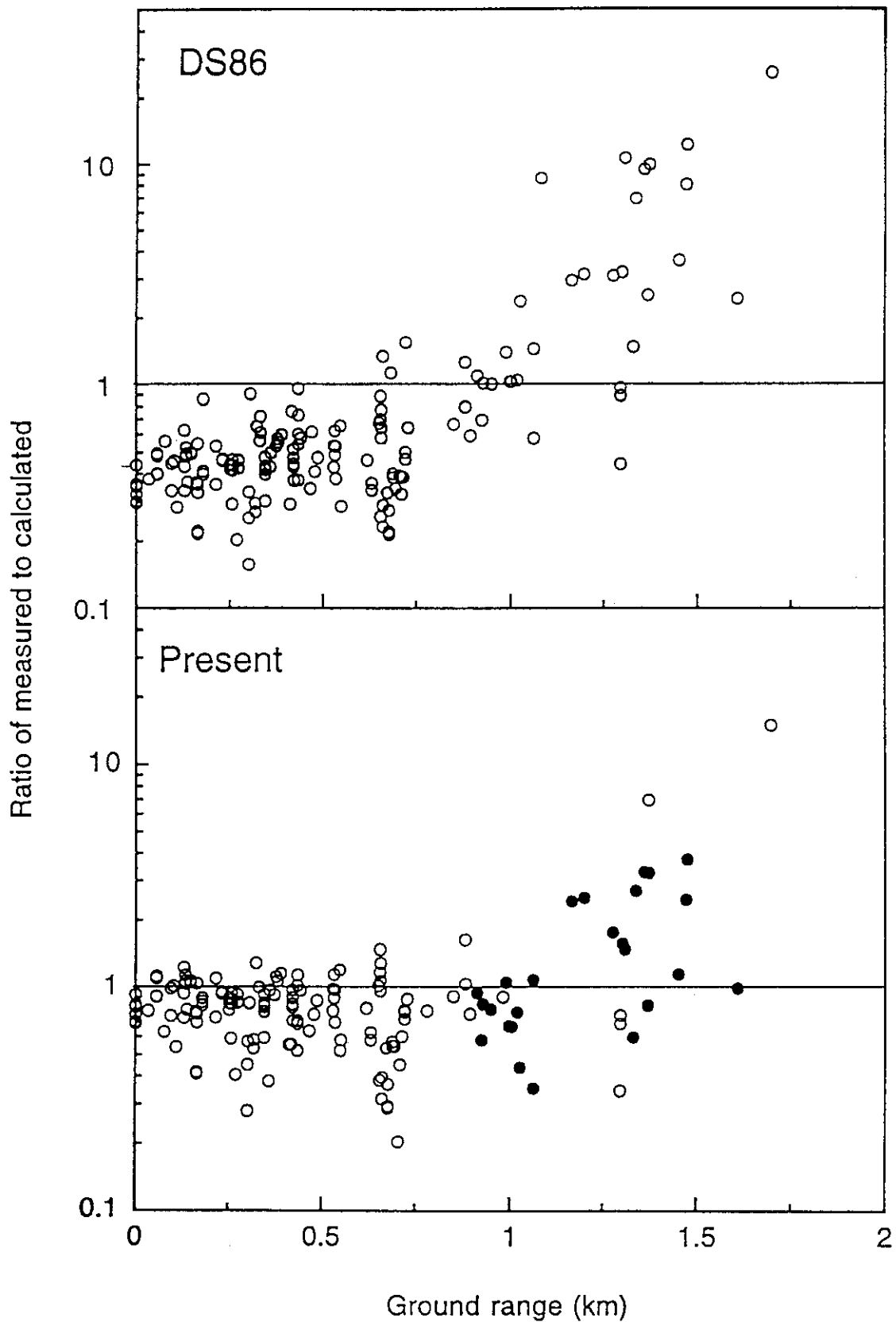


図 8. 実験値と計算値との比。上の図は DS86 との比較で、系統的なずれがある事が分かる。下の図は図 7 のようなクラックを仮定した場合。白丸が図 7 左の等方的な割れ方の場合。黒丸は非等方で、割れた中心を南東方向に向けた場合の計算。非等方の計算は遠距離をよく合わせるが、そのほかの方向で 10 倍前後高いデータも存在する。文献 30 より引用。

## 速中性子反応で生成される放射能測定による速中性子線の評価

分担研究者 小佐古敏荘（東京大学原子力研究総合センター助教授）  
研究協力者 飯本武志（東京大学原子力研究総合センター助手）

### 1. はじめに

広島・長崎の原子爆弾被爆者の線量評価において用いられる線量計算モデルを、実測データによって検証することは重要である。実測による線量評価手法の一つとして、被爆者の歯のエナメル質を用いた電子スピン共鳴法（ESR）が知られている。現在、ESR の研究が進んでおり、信号強度と線量の関係が得られつつある。しかし、人体に対して入射した放射線の指向性が極めて強いときには、測定に供する歯の位置によって当該者の実効線量の評価値が大きく変わる可能性があると考えられる。したがって、ガンマ線による体外被ばくがあったケースに ESR 測定を適用するには、口腔内線量分布の情報が重要となる。本研究では TLD 素子を検出器とし、成人の頭部ランドファントムを用いて、歯の裏側部分の線量分布を測定した。

### 2. 実験方法

ファントムファントムの歯の裏側部分に TLD (UD-110S) を埋め込み（右上 7 本、左下 7 本；図 1） $^{137}\text{Cs}$  ガンマ線(662KeV) 80mGy 程度をファントム頭部に照射（図 2；左下の歯の裏側に TLD を埋め込んだ例）した。指向性の強い放射線被ばくを想定し、照射の方向は線源に正対した時を  $0^\circ$  として右回りに、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ （左頬が線源に対して正対）、 $135^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$ （右頬が正対）また、前方上方  $45^\circ$  を放射線の入射角とした。線源とファントムの距離を 150cm 以上確保し、各歯に対する放射線の入射

角を揃えるとともに、照射中は室内の放射線散乱にも留意した。

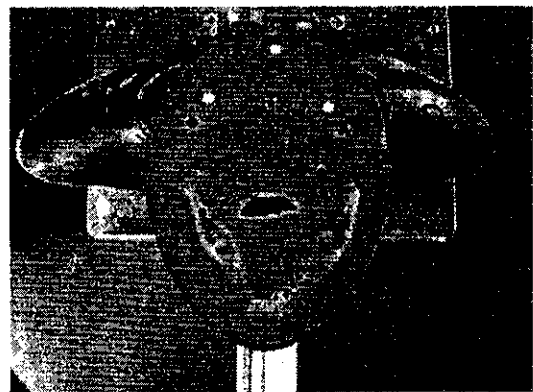


図 1 ファントム断面図（歯部）

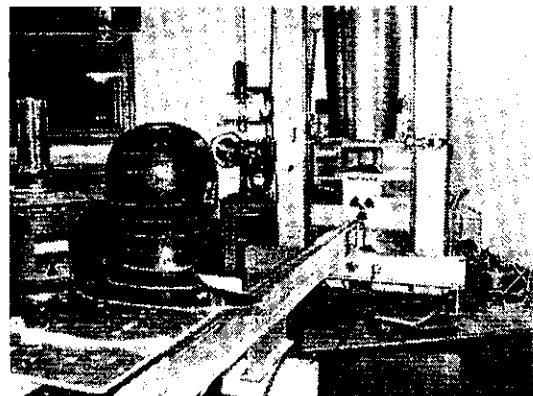


図 2 線源とファントムの位置

### 3. 研究結果と考察

顔面の皮膚表面における線量を 1 と規格化した線量の分布を次頁の表に示す。

本研究により、指向性の強い体外被ばくのケースでは、測定に供する歯の位置によって線量の評価値が 30%の幅が生じることが明らかになった。

表 歯の位置における線量と照射方向との関係

		線量 (相対値)						
		0°	45°	90°	135°	180°	270°	上方45°
右 上	1	1.00	0.95	0.92	0.89	0.62	0.80	1.00
	2	0.99	0.82	0.84	0.81	0.61	0.88	1.03
	3	1.00	0.89	0.82	0.81	0.65	0.89	1.07
	4	0.94	0.90	0.80	0.77	0.64	0.88	1.05
	5	0.91	0.81	0.83	0.79	0.71	0.90	1.10
	6	0.80	0.80	0.81	0.76	0.76	0.90	0.85
	7	0.81	0.72	0.86	0.81	0.79	1.00	0.83
左 下	1	0.99	0.89	0.90	0.83	0.63	0.83	0.91
	2	0.95	0.93	0.93	0.87	0.66	0.80	0.92
	3	0.98	0.97	0.98	0.93	0.68	0.80	0.93
	4	0.94	0.93	0.95	0.91	0.68	0.79	0.97
	5	0.99	0.98	1.02	1.00	0.69	0.77	0.92
	6	0.94	1.00	0.99	0.98	0.74	0.75	0.88
	7	0.96	0.96	1.00	1.00	0.80	0.72	0.76

\*1→7 の順に 前歯→奥歯  
 数値 は線源に最も近い部分



厚生科学研究費補助金（厚生科学特別研究事業）  
分担研究報告

1986年線量評価体系DS86再評価における研究活動の総括

分担研究者 平良 専純（放射線影響研究所常務理事）  
藤田 正一郎（放射線影響研究所副部長）  
研究協力者 陶山 昭彦（放射線影響研究所長崎疫学部長）  
赤星 正純（放射線影響研究所長崎臨床研究部長）  
丸山 隆司（財団法人放射線影響協会企画部長）

研究要旨

DS86は、基本的には今日の科学的知見からみて最良のものであるものの、広島の中性子に関する計算値と測定値の不一致の問題を中心に不確定性が存在する。DS86の発表後14年の間に、計算能力および測定技術は再び大きく向上した。その結果、原爆被爆試料における計算値と測定値の不一致をはじめとする、DS86について以前指摘されていた問題について一部を除いては解決することが可能になってきた。そこで、このDS86に関する不確定性を解消し、新しい原爆線量評価体系を作成するために、日米両国に線量再評価実務研究班を設置し、日米合同会議を開催して研究成果の検討し、日米共同歩調による将来計画について討議した。米国側は、広島原爆のソーススペクトルに関する詳細な計算とこのペクトルに基づいた放射線の空気中輸送計算を行った。さらに、測定データに合わせるための数々の計算技法も紹介しかつ必要に応じて実行することを約束した。そのためにも、遠距離の測定データについての理解を深め、その距離別分布の変動幅を減少させることの必要性が強調された。再度の日米合同会議を経て、2002年の前半には新しい線量体系（DS86の改訂版）を完成させる予定である。この体系は日米それぞれの上級委員会（今後設置の予定）により承認されるべきものと考えられている。本報告はその基礎資料の一部に資するものと考えられ、また、その成果は世界の放射線防護対策にも影響を与えるものとする。

**A. 研究目的**

原爆被爆者の被曝線量の評価には、1986年に日米合同の委員会によってまとめられたDS86（1986年線量評価体系の略）が現

時点における最良のものとして、国際放射線防護委員会（ICRP）の基準の根拠として用いられるなど、世界の放射線防護の基本的資料となっている。一方、厚生行政においても、広島・

長崎における原子爆弾による放射能や熱線等に起因する病気やけがについて、全額国庫負担での医療給付を受けるためには厚生労働大臣の認定を受ける必要があり、この認定の過程でもDS86は個々の申請者の被曝線量評価に用いられている。しかしこのDS86に関しては、広島の中性子に関する計算値と測定値の不一致を中心とする不確定性が存在する。そこで、本研究は、この中性子に関する計算値と測定値の不一致問題を解決すると共に、DS86に関するその他の不確定性を解消し、新しいモデルによる新しい線量体系を日米共同で作成するために、新しいモデルを開発することを目的とする。本報告書では、この問題を解決するために行った最近の日本での研究成果を報告すると共に、日米の研究成果の検討と新しい線量評価体系の作成の方向性を討議するために広島で開催した日米の線量評価実務研究班による合同会議の要約について報告する。

## B. 研究方法

現在使用されている原爆線量評価体系DS86は、核物理学の理論に基づく空気中カーマ、遮蔽カーマ、臓器線量の計算モデルを統合した線量計算方法に、被爆者の遮蔽データを入力として被爆者の被曝線量を計算するコンピュータ・システムである。この計算値の妥当性は、実際に広島・長崎で被曝した物理学的な試料（瓦、タイル、岩石、鉄、コンクリート、硫黄、など）の中の残留放射能の測定値対応する計算値との比較により検討された。現在提起されている広島の中性子に関する計算値と測定値の不一致の問題を解決するために、日米の物理学者により、日本側は主として測定、米国側は計算を中心にしてDS86に関するすべての要因について再検討を行ってきた。不一致問題を中心とするDS86の不確定性を早急に解消し、新しい原爆線量評価体系を作成するために、本年度、日米両国に線量再評価実務研究班を設置して研究活動を行い、日米合同会議を開催す

ることにより話し合いを密にして共同歩調を確認してゆくこととした。具体的には、測定面からすると、これまでに得られた多くの測定値から見られる爆弾からの距離とDS86からのズレの傾向の変動幅を減少させるための測定のみには今後は限定し、計算面からすると、コンピュータの進歩による爆弾のスペクトルの再計算を手始めに、計算値を測定値に一致させる理論的に可能な計算を追及して行く、ことにより問題解決に対処する。

## C. 結果と考察

原爆線量評価体系DS86について、2000年3月13-14日放射線影響研究所主催により広島で日米線量ワークショップが開催された。この会議では、広島の中性子に関する計算値と測定値の不一致を中心とする問題解決の方策と方向性が討議された。これを踏まえて、日米双方に線量再評価のための実務研究班が両国政府の援助のもとに設置され、DS86線量再評価の研究活動を行ってきた。2000年12月4-5日には、日米線量実務研究者代表会議を広島で開催し、これまでの研究項目の簡単な検討と今後の研究方向および時間的な予定について討議した。2001年3月21-23日には放射線影響研究所主催により広島で、日米線量実務研究班の合同会議を開催した。問題解決のための研究方向と今後の研究の日米分担と予定表などについて討議し合意した。さらに、DS86報告書（グリーン・ブック）を更新する方法、DS86報告書の改訂版について日米双方の執筆責任者および協力者の選出、についての討議もなされた。

特に最近の研究を中心に詳細な検討を行い、中性子不一致問題に関しては、測定値と計算値が一致する部分、学術的な不一致と不確実性が認められる部分、および、このような不確実性を解消するための方策を確認し、これについて検討を行った。近距離（概ね、爆心地から1km以内）の測定データについては、その距離との

関係 (DS 8 6 との不一致の傾向) がはっきりしており、測定値と計算値を一致させる方向へ努力することで合意したが、遠距離 (爆心地から 1 km 以遠) の測定値については、その距離との関係 (DS 8 6 との不一致の傾向) についての変動幅が大きく、まず、測定値の側だけでこの変動幅を縮小させる努力をし、その後合意した合理的な測定値の傾向に対して計算値を合わせる努力をすることとなった。

遠距離で測定データが DS 8 6 からずれることに関して、1) 放射能の測定データは間違っていないだろう、2) 但し、放射能は原爆からの直接の中性子線によるのではないだろう、というのが遠距離の測定データに対するアメリカ側の解釈である。その理由として、遠距離での放射能の減衰が中性子の減弱距離から説明できないこと、塩素-36 の深さ分布が表面で高く、距離とともに急激に減少していて中性子の減衰で説明できないこと、これを説明できる可能性として他のところで作られた放射能が運ばれて表面に付着したことが考えられること、また、塩素-36 の深いところの放射能は DS 8 6 に近いこと、などをあげている。この説明は説得力があるが疑問点もある。主としてアメリカ側が測定している塩素-36 の場合は自然界にたくさんあると思われるが、日本側が測定しているコバルト-60 やユーロピウム-152 について、表面に他のところのコバルト-60 やユーロピウム-152 が付着したと考えるのは無理がありそうだ。他のところで作られたものとして宇宙線起源の中性子が考えられるが、検討結果からすると説明に無理がある。重要な論点であり、今後検討を深めて行く必要がある。

研究成果については、再評価の最近の研究項目を見るためにも、合同会議での報告項目を以下に示す。日本側からは、1) 環境中性子により誘発された自然界 Eu-152、Eu-154、Eu-155、Co-60 およびそれらの広島・長崎原爆被爆試料

への寄与、2) ND 標識を付けた原爆被爆鉄試料の Co-60 比放射能の解析、3) 長崎原爆の爆発点から約 1.6km 地点における Eu-152 比放射能：実測値と DS86 との比較、4) 低バックグラウンド液体シンチレーション計数器を用いた Ni-63 の測定、5) Si-NaI 反同時分光計による銅中の Ni-63 の測定、6)  $63\text{Cu}(n,p)63\text{Ni}$  反応の断面積の測定、7) 亀裂モデルを用いた Ni-63 出力の計算、についての報告があり、米国側からは、1) 米国ワーキンググループのプログラム計画、2) ソースタームの計算、3) 空中輸送、4) 測定値データベースおよび不確定性の計算、5) 試料のモデリング、6) 塩素とニッケルの測定および結果、7) 家屋および地形による遮蔽、8) 長崎の工場遮蔽、についての報告があった。日本側の報告については、本報告書の最後に、報告の際に用いたスライドをそのままの形で参考資料として添付しておいた。

米国側の報告の中で特に注目すべきものとしては、世界最速のコンピュータを用いて行われた広島型爆弾のソーススペクトルに関する詳細な計算結果、および、このスペクトルに基づいて現在計算中である放射線の空气中輸送計算に関する結果の一部である。アメリカ側が今回の再評価実務班の研究活動により絶対に問題を解決するのだとの覚悟が感じられる。今回のもっとも新しいことは、1 km 以内で、爆発の高度を変えずに、計算値を測定値に合わせてきたことである。これにより、少なくとも測定データは輸送計算で合わせられるということである。米国側が考えている計算からの測定データとの一致への方向付けに関する要点を以下に列挙する。

1) 今回の改善は全面的であり、窒素と酸素の断面積を変更したことである。今まで日本側では ENDF-B 6 を使っていたが ENDF-B 6.2 を使って計算すると近距離が合ってくることである。爆心で 30% 熱中性子を減少させ、その反応による塩素 36 などの生成量を減らし、測定値に合わせるができるということである。この

窒素と酸素の断面積については、2-5 MeV 付近の弾性散乱など変更したとのことである。

2) 広島型爆弾のソーススペクトルは詳しくなったが本質的な変更はない。

3) 広島の1 km以遠では測定データがDS 86 計算値よりも大きく、データや計算の見直しをする必要がある。(ソーススペクトルが変わらずに近距離が低くなれば、計算値はそのままでは遠距離ではDS 86 よりも低くなる方向となり矛盾する。)

4) 測定データの再評価により1 km以遠のデータが低くなればそれで良いが、もし低くならなければ、散乱断面積をまず変更する可能性が考えられる。

5) もしそれでも測定値と合わなかったら、データの距離分布から逆算してでも、ソースタームを変更する可能性もある。再評価による測定データの距離分布が確定すれば、最終的には計算により測定データに合わすことが可能である。

しかし、今回示された結果については疑問点もあり、日本側としては今後、1) 上述のENDF B-6.2 と変更があるというMCNP 4Cのプログラムを早期に入手し、すでに米国側から入手済みのソースタームを使って計算をして結果を確認すること、2) 輸送計算のみでこのような変更が可能ならば、今までのカリフォルニウムを使ったベンチマークの実験の計算が変わらないのか、東海村の事故の計算と測定値の一致は再現できるのか、長崎の計算は変更なしで済むのか、それとも静岡の測定データのとおりなのか、など早期に検討する必要がある。

時間的な制約から、できるだけ多くの機会に日米実務班が会合することの必要性が強調された。2001年6月には米国保健物理学会(原爆再評価のセッション有り)を利用して、少数の日本人研究者の参加による日米合同会議を開き(オハイオ州クリーブランド)、新しい測定値および計算値に関する進捗状況の評価を行う。さらに、2001年秋には日米の実務

研究班会議を開催する(広島)予定である。これらの実務研究班による活動を経て、2002年前半には新しい線量評価体系(DS 86の改訂版)を完成させる予定である。その後、この線量計算プログラムは放射線影響研究所に導入されて、個々の被爆者の被曝線量が計算される。この被曝線量を使用して、原爆放射線の健康後影響の再評価が行われることになる。この被曝線量に有意な変更が行われた場合には、国際放射線防護委員会(ICRP)の勧告の基礎の大きな変更となり、世界の放射線防護対策に多大な影響を与えるものと考えられる。また、被爆者援護法における認定業務の適正な実施に資するものと考えられる。ただし、再評価が行われている現在においても、現在のDS 86を、放射線による被曝線量の決定とその健康後影響を検討することに用いることは妥当であると考えられており、新方式が完成し、日米合同の上級線量委員会により新方式が承認されるまで、現在のDS 86の使用を続けることが2000年3月の日米線量ワークショップで確認されている。

日米で合意している現状認識を以下に示す。  
1) 日米線量実務班合同会議でも一部示された、広島型原爆からの放射線アウトプットに関する新しい計算を行い、この結果を用いて新しい放射線量計算方式を完成させる。  
2) これまでの測定値に加え、焦点を絞って新しい測定を行い、爆心地から1 km以遠における放射線量をより明確にし、その精度を高める。これらの測定は2001年中に終える。  
3) 新しい測定値および計算値に関する進捗状況の評価のため、2001年6月に少数の日本人研究者の参加による会合を開き(オハイオ州クリーブランド)、2001年秋に日米の実務研究班会議を開催する(広島)予定である。  
4) 2002年前半までに測定値と計算値の不一致を解消するよう努める。

日本側の研究成果としては次のようなものがある。