

# 日米による原爆線量評価システム（DS86）の 再評価と人の放射線影響解析

（課題番号：10480136）

平成10～12年度科学研究費補助金（基盤研究（B）（2））  
研究成果報告書

平成13年3月

研究代表者： 星 正治  
（広島大学原爆放射能医学研究所 教授）

# 日米による原爆線量評価システム（DS86）の 再評価と人の放射線影響解析

（課題番号：10480136）

平成10～12年度科学研究費補助金（基盤研究（B）（2））  
研究成果報告書

平成13年3月

研究代表者： 星 正 治  
（広島大学原爆放射能医学研究所教授）

# 日米による原爆線量評価システム（DS86）の再評価と 人の放射線影響解析

## 目次

はしがき	.....	1
研究組織	.....	3
研究経費	.....	3
研究発表	.....	5
研究成果	.....	21
発表論文, および資料	.....	39

## はしがき

原爆被爆者の放射線の線量を推定するシステムを放射線量評価体系 (Dosimetry System 1986 (DS86)) とよんでいる。1989年頃、このシステムに関し被曝した試料の測定値とDS86の間に矛盾があることを見だし、その理由を追及してきた。データにはユーロピウム152、コバルト60、塩素36などの熱中性子の放射化によるデータと隣32の速中性子のデータとがある。特徴は全てのデータに対してDS86の計算が近距離で高く、1000以上の遠距離で低いというものである。

たとえば、1500mで3-10倍データが高く、このことがもし被曝線量に直接関係するならばDS86が大きく改訂されなければならない。

その後、問題点を明確にするための実験や計算をいろいろ試みながら繰り返してきた。実験的には、(1)原爆の爆発地点からの中中性子の輸送計算が正しかったかどうかのベンチマークテスト、(2)その計算に使った空気や水分の密度の検証、(3)ユーロピウムやコバルトの測定に関する実験値の検証、などである。これらに対して10年近くの研究を重ねても全て問題はないとの結論であった。

そこで残された問題は、広島原爆の中中性子の線源項(スペクトルなど)であろうという結論となった。本来我々にとって原爆の爆発の研究は目的ではない。したがって自らが爆発の問題を研究することは気が進むものではない。しかしアメリカ側は問題ないとしている以上、納得させ研究を進める状況を作る必要があった。

計算を開始して10年弱の時間が経過したが、(1)原爆が割れたと仮定しそこから速中性子が外に漏れ出たとした、さらに(2)中性子の発生地点を90mひきあげ、その後90m落下した後火球が形成されたとした。そうすると遠距離でまだ少しデータが高い傾向があったが、全体がほぼ説明できた。

アメリカ側は、未だにこれらの仮定は納得していない。しかし昨年(平成12年)3月にほぼ全ての日米の関係者が集まったワークショップが開催された際、DS86を計算した責任者であるカウル博士が『そう仮定する以外に説明の方法がない。』と認めた。その年の12月にも小さい関係者だけのワークショップがあり、話し合いを持った。そのとき本年(平成13年)3月にもう一度ワークショップを開き、その際アメリカ側が何らかの計算結果を持ってくと約束した。また同時に日本側の研究者が納得いく形でまとめるとも約束した。そのとき筆者はアメリカのグループに入るように要請され、承諾した。3月である程度の合意が得られると、本年の後半に大きいワークショップを開いて新しい原爆線量評価体系が生み出されることになる。原爆開発の秘密性も高くどこまで納得のいく説明が得られるかどうか分からないが、しっかり監視し納得がいくものを共同で作るようにしたい。これらの結果は広島長崎の被爆者の疫学調査の結果と共に解析に使われ、人の放射線に対するリスクが決定される。被曝後

50年以上経過し、ちゃんとした線量評価体系を作る最後のチャンスとなると思われる。  
最善を尽くして納得のいく結果を出したい。

## 研究組織

研究代表者： 星 正 治（広島大学原爆放射能医学研究所 教授）

研究分担者： 大 瀧 慈（広島大学原爆放射能医学研究所 教授）  
高 田 純（広島大学原爆放射能医学研究所 助教授）  
遠 藤 暁（広島大学工学部 助教授）

研究協力者： 葉佐井博巳（広島国際学院大学工学部）  
岩谷 和夫（広島県立保健福祉短期大学）  
静 間 清（広島大学工学部）  
藤田正一郎（放射線影響研究所）  
岡 隆 光（呉大学社会情報学部）  
中 西 孝（金沢大学理学部）  
長友 恒人（奈良教育大学教育学部）  
石川 正純（広島大学原爆放射能医学研究所）  
Tore Straume（ユタ大学）

松浦 正明（広島大学原爆放射能医学研究所）  
片山 博昭（放射線影響研究所情報技術部）  
隅田 治行（広島大学原爆放射能医学研究所）  
平岡 正行（広島大学原爆放射能医学研究所）

## 研究経費

平成10年度	1,900千円
平成11年度	1,700千円
平成12年度	1,200千円
計	4,800千円

# 研究発表

(1) 学会誌等

1. Nikjoo, H., Uehara, S., Wilson, W. E., Hoshi, M., Goodhead, D. T.: Track structure in radiation biology: theory and applications. *Int. J. Radiat. Biol.*, 73, 355-364, 1998.
2. 芦澤潔人, 山下俊一, 伊東正博, 難波裕幸, 和泉元衛, 星 正治, 柴田義貞, 長瀧重信: チェルノブイリ周辺地域における小児甲状腺疾患: スクリーニング5年間のまとめ. *広島医学*, 51, 340-343, 1998.
3. 鎌田七男, 早川式彦, 峠 哲哉, 木村昭郎, 星 正治: 近距離被爆生存者に関する総合医学的研究. 第25報 25年間の追跡調査結果. *広島医学*, 51, 355-357, 1998.
4. 藤本成明, 新田由美子, 遠藤 暁, 伊藤明弘, 星 正治: 低ヨード食投与ラットでの<sup>131</sup>I投与後の血中T<sub>3</sub>, TSHの変化 -加齢による差異の検討-. *広島医学*, 51, 376-378, 1998.
5. 佐藤健一, 大瀧 慈, 新田由美子, 高田 純, 星 正治: 繰り返し測定データに基づく生物学的効果比の区間推定. *広島医学*, 51, 439-441, 1998.
6. Kato, K., Antoku, S., Russell, W. J., Fujita, S., Pinkston, J. A., Hayabuchi, N., Hoshi, M., Kodama, K.: Radiation therapy among atomic bomb survivors, Hiroshima and Nagasaki. *Radiat. Res.*, 149, 614-624, 1998.
7. Yoshikawa, I., Takastuji, T., Hoshi, M., Takada, J., Endo, T.: Relative biological effectiveness of accelerated carbon ions with different LET for the induction of somatic mutations in *Drosophila* larvae. 1997 Annual Report Research Project with Heavy Ions at NIRS-HIMAC, 253-258, 1998.
8. 星 正治, 岩谷和夫, 岡 隆光, 遠藤 暁, 静間 清, 高田 純, 藤田正一郎, 葉佐井博巳: 広島原爆の中性子およびガンマ線の輸送計算. *JAERI-Review*, 98-010, 210-222, 1998.
9. Yoshikawa, I., Takastuji, T., Hoshi, M., Takada, J., Kanai, T., Furusawa, Y., Nikjoo, H., Ikenaga, M.: The relative biological effectiveness of accelerated carbon ions with different LET for inducing mitotic crossing over and intragenic reversion of the white-ivory allele in *Drosophila* larvae. *Int. J. Radiat. Biol.*, 74, 239-248, 1998.



10. Hoshi, M., Takada, J., Endo, S., Shizuma, K., Iwatani, K., Oka, T., Fujita, S., Hasai, H.: Problems of radiation dose evaluation in Hiroshima and Nagasaki and their explanation. *Radiation Protection Dosimetry*, 77, 15-23, 1998.
11. 星 正治, 遠藤 暁, 高田 純, 高辻俊宏: 軟X線照射装置を用いた放射線の細胞への物理作用の検討. 京都大学放射線生物研究センター年報1997, 48-49, 1998.
12. 吉川 勲, 星 正治: 宇宙放射線および重粒子線誘発突然変異の解析. 京都大学放射線生物研究センター年報1997, 57, 1998.
13. Shizuma, K., Iwatani, K., Hasai, H., Oka, T., Endo, S., Takada, J., Hoshi, M., Fujita, S., Watanabe, T., Imanaka, T.: Residual  $^{60}\text{Co}$  activity in steel samples exposed to the Hiroshima atomic-bomb neutrons. *Health Phys.*, 75, 278-284, 1998.
14. Endo, S., Nitta, Y., Ohtaki, M., Takada, J., Stepanenko, V., Komatsu, K., Tauchi, H., Matsuura, S., Iaskova, E., Hoshi, M.: Estimation of dose absorbed fraction for  $^{131}\text{I}$ -beta rays in rat thyroid. *J. Radiat. Res.*, 39, 223-230, 1998.
15. 高田 純, 保木本彰, 荻野由紀子, 谷 省蔵, 遠藤 暁, 新田由美子, 星 正治, 葉佐井博巳, 佐藤 斉, 高辻俊宏, 吉川 勲: 広島市内のCs-137放射能密度“その場”測定. 広島医学, 51, 437-438, 1998.
16. 高田 純, 遠藤 暁, 星 正治, 高辻俊宏: 放射線生物研究センターに導入された低線量ガンマ線照射装置の線量評価. 京都大学放射線生物研究センター年報1997, 56, 1998.
17. 新田由美子, 遠藤 暁, 藤本成明, 神谷研二, 大瀧 慈, 早川式彦, 高田 純, 星 正治: 放射線による甲状腺癌誘発機構の解析.  $^{131}\text{I}$ を内部被爆したラット甲状腺および全身の吸収線量推計とその年齢依存性. 広島医学, 51, 379-384, 1998.
18. Shintani, T., Hayakawa, N., Hoshi, M., Sumida, M., Kurisu, K., Oki, S., Kodama, Y., Kajikawa, H., Inai, K., Kamada, N.: High incidence of meningioma among Hiroshima atomic bomb survivors. *J. Radiat. Res.*, 40, 49-57, 1999.
19. 星 正治, 高田 純, 遠藤 暁, 静間 清: 軟X線の線量測定. 医用標準線量, 4, 17-22, 1999.

20. 遠藤 暁, 星 正治, 菅 慎治, 高田 純, 静間 清: C-CO<sub>2</sub>電離箱(IC17G)の中性子感度の測定. 医用標準線量, 4, 29-33, 1999.
21. Endo, S., Iwatani, K., Oka, T., Hoshi, M., Shizuma, K., Imanaka, T., Takada, J., Fujita, S., Hasai, H.: DS86 neutron dose: Monte Carlo analysis for depth profile of <sup>152</sup>Eu activity in a large stone sample. J. Radiat. Res., 40, 169-181, 1999.
22. 山本政儀, 星 正治, 高田 純, 塚谷恒雄, Sekerbaev, A. Kh., Gusev, B. I.: 旧ソ連セミパラチンスク核実験場及びその周辺地域におけるPu同位体と<sup>137</sup>Csの分布. クロスオーバー研究シンポジウム「放射性物質の環境移行研究の新たな展開」報告集1998, JAERI-Conf, 99-001, 59-80, 1999.
23. Endo, S., Stevens, D. L., Bonner, P., Hill, M. A., Nikjoo, H., Vecchia, M. D., Komatsu, K., Hoshi, M., Goodhead, D. T.: Reduction of the gamma-ray component from <sup>252</sup>Cf fission neutron source-optimization for biological irradiations and comparison with MCNP code. Phys. Med. Biol., 44, 1207-1218, 1999.
24. Yoshikawa, I., Takatsuji, T., Nagano, M., Hoshi, M., Takada, J., Endo, S.: The induction of somatic mutations by high-LET radiation observed using the Drosophila assay system. Proceedings of the International Workshop on Responses to Heavy Particle Radiation, Chiba, July 9-10, 1998, Risk Evaluation of Cosmic-Ray Exposure in Long-Term Manned Space Mission. Edited by Fujitaka, K., Majima, H., Ando, K., Yasuda, H., Suzuki, M., Kodansha Scientific LTD., 89-99, 1999.
25. Yamamoto, M., Hoshi, M., Takada, J., Sekerbaev, A. Kh, Gusev, B. I.: Pu isotopes and <sup>137</sup>Cs in the surrounding areas of the former Soviet Union's Semipalatinsk nuclear test site. J. Radioanal. Nucl. Chem., 242, 63-74, 1999.
26. 山下俊一, 柴田義貞, 星 正治, 藤村欣吾, ほか: チェルノブイリ原発事故被災児の検診成績 I - “チェルノブイリ笹川医療協力プロジェクト1991-1996”より-. 放射線科学, 42, 303-309, 1999.
27. 山下俊一, 柴田義貞, 星 正治, 藤村欣吾, ほか: チェルノブイリ原発事故被災児の検診成績 II - “チェルノブイリ笹川医療協力プロジェクト1991-1996”より-. 放射線科学, 42, 338-348, 1999.

28. 山下俊一, 柴田義貞, 星 正治, 藤村欣吾, ほか: チェルノブイリ原発事故被災児の検診成績Ⅲ - “チェルノブイリ笹川医療協力プロジェクト1991-1996” より - . 放射線科学, 42, 381-386, 1999.
29. Endo, S., Hoshi, M., Takada, J., Tauchi, H., Matsuura, S., Takeoka, S., Kitagawa, K., Suga, S., Komatsu, K.: Neutron generator (HIRRAC) and dosimetry study. *J. Radiat. Res.*, 40 (Supl.), 14-20, 1999.
30. Fujikawa, K., Endo, S., Itoh, T., Yonezawa, Y., Hoshi, M.: Dose estimations of fast neutrons from a nuclear reactor by micronuclear yields in onion seedlings. *J. Radiat. Res.*, 40 (Supl.), 28-35, 1999.
31. Tanaka, K., Gajendiran, N., Endo, S., Komatsu, K., Hoshi, M., Kamada, N.: Neutron energy-dependent initial DNA damage and chromosomal exchange. *J. Radiat. Res.*, 40 (Supl.), 36-44, 1999.
32. Yoshikawa, I., Takatsuji, T., Nagano, M., Takada, J., Endo, S., Hoshi, M.: RBE-LET relationships of high-LET radiations in drosophila mutations. *J. Radiat. Res.*, 40 (Supl.), 106-116, 1999.
33. Shizuma, K., Hoshi, M., Hasai, H.: Uncertainties of DS86 and prospects for residual radioactivity measurement. *J. Radiat. Res.*, 40 (Supl.), 138-144, 1999.
34. Hoshi, M., Endo, S., Takada, J., Ishikawa, M., Nitta, Y., Iwatani, K., Oka, T., Fujita, S., Shizuma, K., Hasai, H.: A crack model of the Hiroshima atomic bomb: Explanation of the contradiction of "dosimetry system 1986." *J. Radiat. Res.*, 40 (Supl.), 145-154, 1999.
35. Endo, S., Shizuma, K., Fujita, S., Umehara, N., Harima, T., Takada, J., Hoshi, M.: Study of burst height and neutron emission height of the Hiroshima atomic bomb. 広大原医研年報, 40, 183-194, 1999.
36. Takada, J., Stepanov, V. E., Yefremov, D. P., Shintani, T., Akiyama, A., Fukuda, M., Hoshi, M.: Radiological states around the Kraton-4 underground nuclear explosion site in Sakha. *J. Radiat. Res.*, 40, 223-228, 1999.

37. Takada, J., Hoshi, M., Nagatomo, T., Yamamoto, M., Endo, S., Takatsuji, T., Yoshikawa, I., Gusev, B. I., Sakerbaev, A. K., Tchajjunusova, N. J.: External doses of residents near Semipalatinsk nuclear test site. *J. Radiat. Res.*, 40, 337-344, 1999.
38. 新田由美子, 遠藤 暁, 藤本成明, 神谷研二, 伊藤明弘, 高田 純, 星 正治: [内部被ばく発がんとその修飾]  $^{131}\text{I}$ 内部被ばくによる甲状腺発がんモデルの開発. *放射線科学*, 42 (Supl.), 140-144, 1999.
39. Tanaka, K., Tchajjunusova, N. J., Takatsuji, T., Gusev, B. I., Sakerbaev, A. K., Hoshi, M., Kamada, N.: High incidence of micronuclei in lymphocytes from residents of the area near the Semipalatinsk nuclear explosion test site. *J. Radiat. Res.*, 41, 45-54, 2000.
40. 星 正治: 広島原爆の被曝線量評価の問題点. *放射線化学*, 69, 2-9, 2000.
41. Takatsuji, T., Sato, H., Takada, J., Endo, S., Hoshi, M., Sharifov, V. F., Veselkina, I. I., Pilenko, I. V., Kalimullin, W. A. F., Masyakin, V. B., Kovalev, A. I., Yoshikawa, I., Okajima, S.: Relationship between the  $^{137}\text{Cs}$  whole-body counting results and soil and food contamination in farms near Chernobyl. *Health Phys.*, 78, 86-89, 2000.
42. Endo, S., Hoshi, M., Shizuma, K., Takada, J., Goodhead, D. T.: Calculation of the neutron W value for neutron dosimetry below the MeV energy region. *Phys. Med. Biol.*, 45, 947-953, 2000.
43. Zhumadilov, Zh., Kimura, A., Hoshi, M., Zhumadilova, A., Asahara, T.: Clinical value of erythrocyte pharmacocytes in hepato-biliary surgery. *HPB*, 2, 272, 2000.
44. Komura, K., Yamamoto, M., Muroyama, T., Murata, Y., Nakanishi, T., Hoshi, M., Takada, J., Ishikawa, M., Takeoka, S., Kitagawa, K., Suga, S., Endo, S., Tosaki, N., Mitsugashira, T., Hara, M., Hashimoto, T., Takano, M., Yanagawa, Y., Tsuboi, T., Ichimasa, M., Ichimasa, Y., Imura, H., Sasajima, E., Seki, R., Saito, Y., Kondo, M., Kojima, S., Muramatsu, Y., Yoshida, S., Shibata, S., Yonehara, H., Watanabe, Y., Kimura, S., Shiraishi, K., Ban-nai, T., Sahoo, S. K., Igarashi, Y., Aoyama, M., Hirose, K., Uehiro, T., Doi, T., Tanaka, A., Matsuzawa, T.: The JCO criticality accident at Tokai-mura, Japan : an overview of the sampling campaign and preliminary results. *Journal of Environmental Radioactivity*, 50, 3-14, 2000.

45. Endo, S., Tosaki, N., Hoshi, M., Shizuma, K.: Neutron dose equivalent estimation from the specific activity of  $^{51}\text{Cr}$ . *Journal of Environmental Radioactivity*, 50, 89-96, 2000.
46. Endo, S., Tosaki, N., Shizuma, K., Ishikawa, M., Takada, J., Suga, S., Kitagawa, K., Hoshi, M.: Radioactivity of  $^{51}\text{Cr}$  in stainless steel collected from residences in the JCO neighborhood. *Journal of Environmental Radioactivity*, 50, 83-88, 2000.
47. 前田直子, 小味昌憲, 村尾信夫, 遠藤 暁, 星 正治: 定位放射線照射における頭部 (RSVP) ファントムを用いた線量評価. *医学物理*, 20, 38-45, 2000.
48. Hoshi, M., Konstantinov, Y. O., Evdeeva, T. Y., Kovalev, A. I., Aksenov, A. S., Koulikova, N. V., Sato, H., Takatsuji, T., Takada, J., Endo, S., Shibata, Y., Yamashita, S.: Radiocesium in children residing in the western districts of the Bryansk Oblast from 1991-1996. *Health Phys.*, 79, 182-186, 2000.
49. 松浦正明, 大瀧 慈, 星 正治, 早川式彦: 原爆被爆者乳ガン死亡の相対リスクの最近の増加に関して. *長崎医誌*, 75, 163-167, 2000.
50. Takada, J., Hoshi, M., Endo, S., Stepanenko, V. F., Kondrashov, A. E., Petin, D., Skvortsov, V., Ivannikov, A., Tikounov, D., Gavrilin, Y., Snykov, V. P.: Dosimetry studies in Zaborie village. *Applied Radiation and Isotopes*, 52, 1165-1169, 2000.
51. Takada, J., Hoshi, M. : External doses to 350m zone residents around the Tokai-mura criticality accident site. *Journal of Environmental Radioactivity*, 50, 43-48, 2000.
52. 高田 純, 星 正治, 山本政儀, 長友恒人, 高辻俊宏, 吉川 勲, Gusev, B. I., Sakerbaev, A. K.: セミパラチンスク核実験場周辺住民の外部被曝線量. *長崎医誌*, 75, 190-194, 2000.
53. Takada, J., Sharov, V., Konstantinov, Yu. O., Ramzaev, P. V., Moroz, G., Kovtun, A., Hoshi, M., Bougrov, N. G., Shishkina, H. A., Premyslova, L., Shagina, N., Degteva, M. O.: Mission for the study of radiation protection and hygiene for residents around Mayak plutonium production facilities in Russia 2000. *Distribution and Speciation of Radionuclides in the Environment, Proceedings The International Workshop on Distribution and Speciation of Radionuclides in the Environment*, Edt.by J. Inaba, S. Hisamatsu & Y. Ohtsuka, Institute for Environmental Sciences, 233-238, 2000.

54. Nugent, R. W., Zhumadilov, Z. S., Gusev, B. I., Hoshi, M.: Health Effects of Radiation Associated with Nuclear Weapons Testing at the Semipalatinsk Test Site. Editors Nugent, R. W., Zhumadilov, Z. S., Gusev, B. I. and Hoshi, M., pp95, 2000.

## (2) 口頭発表

1. 遠藤 暁, 新田由美子, 高田 純, 小松賢志, 星 正治: 甲状腺中 $^{131}\text{I}$ β及びγ線 Absorbed fractionの計算. 第75回日本医学放射線物理学会, 神戸, 1998. (放射線医学物理, Suppl.56, 68, 1998.)
2. 遠藤 暁, 田内 広, 松浦伸也, 小松賢志, 高田 純, 星 正治: HIRACを用いた陽子線照射装置の開発. 日本放射線影響学会第41回大会, 長崎, 1998. (J. Radiat. Res., 39, 337, 1998.)
3. 高田 純, 星 正治, 遠藤 暁, 山本政儀, 高辻俊宏, 吉川 勲, 岩谷和夫, Gusev, B. I., Sekerbaef, A., Tachaijunusova, N. J.: セミパラチンスク核実験場周辺都市の外部被曝線量. 日本放射線影響学会第41回大会, 長崎, 1998. (J. Radiat. Res., 39, 354, 1998.)
4. 山本政儀, 星 正治, 高田 純, 吉川 勲, 高辻俊宏, 及川真司, Gusev. B. I., Sekerbaef, A.: セミパラチンスク核実験場周辺の残留放射能(2). 日本放射線影響学会第41回大会, 長崎, 1998. (J. Radiat. Res., 39, 354, 1998.)
5. 藤原 恵, 栗原寛治, 伊藤明弘, 星 正治, 早川式彦: 胎内被爆者に発生した悪性腫瘍についての臨床病理学的検討. 日本放射線影響学会第41回大会, 長崎, 1998. (J. Radiat. Res., 39, 428, 1998.)
6. 張 文藝, 藤川和男, 遠藤 暁, 高田 純, 伊藤哲夫, 星 正治: タマネギ発芽種子を用いた生物効果の中性子エネルギー依存性. 日本放射線影響学会第41回大会, 長崎, 1998. (J. Radiat. Res., 39, 342, 1998.)
7. 高辻俊宏, 永野匡昭, 吉川 勲, 星 正治, 高田 純, 遠藤 暁, 金井達明, 古澤佳也: 重イオンビームによるショウジョウバエ体細胞突然変異断面積のLET依存性. 日本放射線影響学会第41回大会, 長崎, 1998. (J. Radiat. Res., 39, 343, 1998.)
8. 高田 純, 竹岡清二, 遠藤 暁, 星 正治, 谷口金吾, 伊藤勝陽, ステパネンコ, V. F., コンドラショウ, A. E.: Cs-137汚染茸を摂取した日本人の体内半減期の測定例. 第75回日本医学放射線物理学会, 神戸, 1998. (放射線医学物理, Suppl., 56, 69, 1998.)

9. Takada, J., Hoshi, M., Nagatomo, T., Yamamoto, M., Takatsuji, T., Yoshikawa, I., Iwatani, K., Endo, S., Gusev, B., Sekerbaef, A., Apsalikov, K., Tchajjunusova, N.: Thermoluminescence dosimetry study in Semipalatinsk. The 2nd International Conference on "Ecology-Radiation-Health", Semipalatinsk, 1998.
10. Takada, J., Hoshi, M., Endo, S., Stepanenko, V., Kondrashov, S., Skovortsov, Y., Gavrillin Y., Snykov, V.: Dosimetry studies in Zaborie Village, Bryansk region. International Conference on Biodosimetry and 5th International Symposium on ESR Dosimetry and Applications. Obninsk, Russia, 1998.
11. 新田由美子, 遠藤 暁, 藤本成明, 神谷研二, 伊藤明弘, 高田 純, 星 正治: I-131内部びばくによる甲状腺発がんモデルの開発. 第30回放医研シンポジウム, 千葉, 1998.
12. 田中憲一, 櫻井良憲, 古林 徹, 中川義信, 遠藤 暁, 星 正治:  ${}^7\text{Ti}(n,p){}^7\text{Be}$  加速器中性子源によるファントム内中性子束分布の測定. 第77回日本医学放射線物理学会, 東京, 1999.
13. Kobayashi, H., Sakaguchi, H., Yasubuchi, S., Ogura, K., Yasuda, N., Yanagie, H., Hoshi, M., Miyata, K.: Fast neutron radiography using track detector. The Sixth World Conference on Neutron Radiography. Osaka, 1999.
14. Tanaka, K., Sakurai, Y., Kobayashi, T., Nakagawa, Y., Endo, S., Hoshi, M.: The comparison of dose distributions in a water phantom for accelerator-based and reactor-based neutron irradiation fields for NCT. Second Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics (JKMP99), Chiba, 1999.
15. 星 正治: セミパラチンスク核実験場近郊住民の放射線影響調査研究の動向. 日本放射線影響学会第42回大会, 広島, 1999.
16. Zhumadilov, Z., Hoshi, M., Kimura, A., Kim, R., Takeichi, N., Bobokhidze, D., Vasjkovsky, G., Zhigitaev, T., Hayakawa, N.: Changes in the trend and behavior over time for breast cancer and thyroid cancer in the Semipalatinsk region of Kazakhstan. 日本放射線影響学会第42回大会, 広島, 1999.
17. 星 正治: モデル計算と今後の展望. 日本放射線影響学会第42回大会, 広島, 1999.



18. 伊藤 寛, 今村峯雄, 上菘義朋, 柴田誠一, 柴田徳思, 静間 清, 野川憲夫, 藤田正一郎, 星 正治: Ni-63測定による速中性子束の評価の現状. 日本放射線影響学会第42回大会, 広島, 1999.
19. 星 正治: 広島・長崎の被曝線量再評価の現状. 第24回日本医学放射線学会医療標準線量研究会, 広島, 1999.
20. Ivannikov, A. I., Gusev, B. I., Hoshi, M.: Results of the individual dose reconstruction for the residents of the Semipalatinsk region using ESR spectroscopy of tooth enamel. Fifth Hiroshima International Symposium—Radiation Effects on the Residents near Semipalatinsk Nuclear Test Sites—, Hiroshima, 1999.
21. Zhumadilov, Z., Land, C., Hartshorne, M., Crooks, L., Hoshi, M., Kimura, A., Gusev, B. I., Abisheva, G., Lukyanov, N., Musinov, D., Takeichi, N., Asahara, T.: Radiation-associated thyroid abnormalities in the Semipalatinsk Region of Kazakhstan. Fifth Hiroshima International Symposium—Radiation Effects on the Residents near Semipalatinsk Nuclear Test Sites—, Hiroshima, 1999.
22. Yamamoto, M., Hoshi, M., Takada, J., Oikawa, S., Yoshikawa, I., Takatsuji, T., Sekerbaev, A. K., Gusev, B. I.: Some aspects of local fallout plutonium at the former Semipalatinsk nuclear test site and its surrounding areas. Fifth Hiroshima International Symposium—Radiation Effects on the Residents near Semipalatinsk Nuclear Test Sites—, Hiroshima, 1999.
23. Tanaka, K., Tchajjunusova, N. J., Takatsuji, T., Gusev, B. I., Sekerbaev, A. K., Hoshi, M., Kamada, N.: High incidence of micronucleus and chromosome aberrations in lymphocytes from the residents living near Semipalatinsk nuclear explosion test sites. Fifth Hiroshima International Symposium—Radiation Effects on the Residents near Semipalatinsk Nuclear Test Sites—, Hiroshima, 1999.
24. Takada, J., Hoshi, M., Nagatomo, T., Yamamoto, M., Endo, S., Takatsuji, T., Yoshikawa, I., Ishikawa, M., Gusev, B. I., Sakerbaev, A. K., Tchajjunusova, N. J.: External exposure on residents due to Semipalatinsk nuclear tests. Fifth Hiroshima International Symposium—Radiation Effects on the Residents near Semipalatinsk Nuclear Test Sites—, Hiroshima, 1999.

25. Takeichi, N., Hoshi, M., Hayakawa, N., Zhumadilov, Z.: Medical examination for thyroid among the residents in Semipalatinsk : Comparison with Hiroshima and Chernobyl. Fifth Hiroshima International Symposium - Radiation Effects on the Residents near Semipalatinsk Nuclear Test Sites -, Hiroshima, 1999.
26. 高田 純, 星 正治, 遠藤 暁, Stepanenko, V. F., Kondrashov, A. E., Snykov, V. P.: ロシアザボリエ村における被曝線量調査. 第34回日本保健物理学会, 大分, 1999.
27. 高田 純, 星 正治, 山本政儀, 高辻俊宏, 吉川 勲, グジェフ, B. I., サケルバエフ, A. K., チャイジュンヌソバ, N. J.: セミパラチンスク核実験場近郊住民の被曝線量. 日本放射線影響学会第42回大会, 広島, 1999.
28. 高田 純, 遠藤 暁, 竹岡清二, 北川和英, 菅 慎治, 星 正治: 原医研におけるWBCの現状及び比較校正結果. 日本放射線影響学会第42回大会, 広島, 1999.
29. Nitta, Y., Endo, S., Fujimoto, N., Kamiya, K., Ito, A., Takada, J., Hoshi, M.: Internal exposure to  $^{131}\text{I}$  and thyroid carcinogenesis. Eleventh International Congress of Radiation Research, Dublin, Ireland, 1999.
30. 遠藤 暁, 石川正純, 星 正治, 静間 清: 中性子低エネルギー領域におけるTE-TE電離箱の中性子感度の計算. 第79回日本医学物理学会, 横浜, 2000.
31. 鬼塚昌彦, 遠藤 暁, 古林 徹, 櫻井良憲, 星 正治, 高田 純, 上原周三, 高辻俊宏, 内海博司, 山口 寛, 高田真志, 藤川和男, 前田直子, 早渕尚文: 頭部ファントム (A150) 内における熱外中性子線の線質・線量の変化. 第79回日本医学物理学会, 横浜, 2000.
32. 田中憲一, 櫻井良憲, 古林 徹, 中川義信, 遠藤 暁, 星 正治: しきい値近傍の $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$ 直接中性子によるファントム内線量分布の測定. 第79回日本医学物理学会, 横浜, 2000.
33. Zhumadilov, Zh., Land, C., Hartshorne, M., Crooks, L., Gusev, B. I., Hoshi, M., Kimura, A., Takeichi, N., Zhumadilova, A., Asahara, T.: Thyroid gland status among population living around the Semipalatinsk nuclear test site. The 10th International Congress of the International Radiation Protection Association. "Harmonization of Radiation, Human Life and the Ecosystem", Hiroshima, 2000. (Proc., IRPA-10, P-2a-s3)

34. Konstantinov, Y. O., Bruk, G. Y., Ershov, E. B, Evdeeva, T. Y., Kovalenko, V. I., Lebedev, O. V., Ramzaev, P. V., Hoshi, M., Shibata, Y., Yamamoto, S.: Establishment of a cohort for the long-term clinical follow-up with dose reconstruction under the joint medical research project conducted by Sasakawa Memorial Health Foundation (Japan) and the Research Institute of Radiation Hygiene (Russia). The 10th International Congress of the International Radiation Protection Association. "Harmonization of Radiation, Human Life and the Ecosystem", Hiroshima, 2000. (Proc., IRPA-10, P-2a-81)
35. Shizuma, K., Endo, S., Hoshi, M., Takada, J., Ishikawa, M., Hasai, H., Iwatani, K., Oka, T., Fujita, S., Imanaka, T.: Residual radioactivity measurement in Hiroshima and Nagasaki for the evaluation of DS86 neutron fluence. The 10th International Congress of the International Radiation Protection Association. "Harmonization of Radiation, Human Life and the Ecosystem", Hiroshima, 2000. (Proc., IRPA-10, P-3b-153)
36. Hoshi, M., Endo, S., Takada, J., Nitta, Y., Ishikawa, M., Iwatani, K., Oka, T., Fujita, S., Shizuma, K., Hasasai, H.: A crack model of the Hiroshima atomic bomb: Explanation of the contradiction of "Dosimetry system 1986". The 10th International Congress of the International Radiation Protection Association. "Harmonization of Radiation, Human Life and the Ecosystem", Hiroshima, 2000. (Proc., IRPA-10, P-3b-151)
37. Endo, H., Nikjoo, H., Uehara, S., Hoshi, M., Shizuma, K.: A Monte Carlo track structure code for low energy protons. The 10th International Congress of the International Radiation Protection Association. "Harmonization of Radiation, Human Life and the Ecosystem", Hiroshima, 2000. (Proc., IRPA-10, P-2b-208)
38. Yamamoto, M., Hoshi, M., Takada, J., Oikawa, S., Yoshikawa, T., Takatsuji, T., Sekerbaev, A. K., Gusev., B. I.: Some aspects of environmental radioactivity at the former Soviet Union's Semipalatinsk nuclear test site. Low-level Measurements of Actinides and Long-lived Radionuclides in Biological and Environmental Samples, Oarai, 2000.
39. Takada, J., Hoshi, M., Nagatomo, T., Yamamoto, M., Endo, S., Takatsuji, T., Ishikawa, M., Gusev, B. I., Sakerbaev, A. K., Tchajjunusova, N. J.: Radiation exposure on residents due to Semipalatinsk nuclear tests. The 10th International Congress of the International Radiation Protection Association. "Harmonization of Radiation, Human Life and the Ecosystem", Hiroshima, 2000. (Proc., IRPA-10, P-3b-210)

40. 小村和久, Ahmed, M. Y., 村田祥全, 三頭聰明, 関 李紀, 今中哲二, 星 正治 : JCO臨界事故による金の放射化. 第43回日本放射線影響学会, 東京, 2000. (J. Radiat. Res., 41, 223, 2000.)
41. 高辻俊宏, 吉川 勲, 星 正治, 高田 純, 遠藤 暁 : 過重力の突然変異に対する乗数効果. 第43回日本放射線影響学会, 東京, 2000. (J. Radiat. Res., 41, 452, 2000.)
42. 松浦正明, 大瀧 慈, 星 正治, 早川式彦 : 広島県在住原爆被爆者における各種の悪性新生物死亡のリスク評価. 第43回日本放射線影響学会, 東京, 2000. (J. Radiat. Res., 41, 478, 2000.)
43. 鬼塚昌彦, 石川正純, 高田真志, 遠藤 暁, 星 正治, 上原周三, 松藤成弘, 金井達明, 山口 寛, 早瀬尚文 : 放医研カーボンビームのマイクロドジメトリー. 第80回日本医学物理学会, 東京, 2000.
44. 松浦正明, 大瀧 慈, 星 正治, 早川式彦 : 原爆被爆者乳ガン死亡の相対リスクの最近の増加に関して. 第41回原子爆弾後障害研究会, 長崎, 2000.
45. 高田 純, 星 正治, 長友恒人, 山本政儀, 高辻俊宏, 吉川 勲, Gusev, B. I., Sakerbaev, A. K.: セミパラチンスク核実験場周辺住民の外部被曝線量. 第41回原子爆弾後障害研究会, 長崎, 2000.
46. 高田 純, 菅 慎治, 北川和英, 石川正純, 星 正治 : 東海村JCO臨界事故350m避難区域住民の被曝線量. 第43回日本放射線影響学会, 東京, 2000. (J. Radiat. Res., 41, 378, 2000.)
47. Takada, J., Yamamoto, M., Hoshi, M.: Radiological states in Rongelap Island 1999. Low-level Measurements of Actinides and Long-lived Radionuclides in Biological and Environmental Samples, Oarai, 2000.
48. 高田 純, 菅 慎治, 北川和英, 石川正純, 星 正治 : JCO臨界事故における漏えい中性子の方向分布. 第37回理工学における同位元素研究発表会, 東京, 2000.
49. 新田由美子, 吉田和子, 神谷研二, 星 正治 : 染色体2番中間部を欠失するミュータントマウスの急性骨髄性白血病モデルとしての有用性. 第43回日本放射線影響学会, 東京, 2000. (J. Radiat. Res., 41, 443, 2000.)

50. Takada, J., Sharov, V., Konstantinov, Yu. O., Ramzaev, P. V., Moroz, G., Kovtun, A., Hoshi, M., Bougrov, N. G., Shishkina, H. A., Premyslova, L., Shagina, N., Degteva, M. O.: Mission for the study of radiation protection and hygiene for residents around Mayak plutonium production facilities in Russia 2000. The International Workshop on Distribution and Speciation of Radionuclides in the Environment, Rokkasho, Aomori, 2000.
  
51. Takada, J., Suga, S., Kitagawa, K., Ishikawa, M., Takeoka, S., Hoshi, M., Watanabe, H., Ito, A., Hayakawa, N.: Directional distribution of radiation around an accident at a uranium fuel factory in Tokai-mura, 1999. *J. Radiat. Res.*, 42, 47-50, 2001.

### (3) その他

1. 高田 純, 星 正治 : [FIELD NOTE] セミパラチンスク核実験と住民の放射線被曝. サイアス, 3, 34-35, 1998.

## 研究成果

# 広島原爆の被曝線量評価の問題点

広島大学原爆放射能医学研究所

星 正 治

## 1. はじめに

広島長崎の原爆の放射線量見直しが 1986 年に行われた。この被爆者個人の線量を評価するシステムのことを線量評価体系(Dosimetry System 1986(DS86))と呼んでいる。<sup>(1)</sup> その線量再評価の作業は日米の共同研究で進められた。日本側は被曝試料を使って実測をすることによりデータを取った。アメリカ側はスーパーコンピュータを使って計算により被爆者個人個人の線量推定した。その結果日本側はアメリカ側の計算と比較する事を主な目的とした。まず花崗岩、コンクリートなどの原爆の被曝試料を収集し中性子で誘導され生成した放射能(コバルト 60、ユーロピウム 152)を測定した。<sup>(3-12)</sup> これは中性子の線量評価に使うためである。またガンマ線に対しては屋根瓦やレンガ、タイルを収集し、熱蛍光法により線量を評価した。ここでの問題点は、ガンマ線は熱蛍光法での線量評価は直接ガンマ線の線量ができる。しかしながら、人体への被曝は数 100keV 以上の中性子が中心であるのに、これらの放射化は熱中性子による。従って直接中性子の被曝線量を評価するデータとならない。従って被爆者の線量を決定する上ではこの熱中性子の量から速中性子の線量評価をしなければならないことであった。

またアメリカ側は当時のスーパーコンピュータを使った計算を行った。それらは、1. 原爆の爆発地点での中性子やガンマ線のスペクトルの計算(線源項)、2. 爆発地点から地表までの輸送計算、3. 地面、日本家屋での透過計算、4. 被爆者の計算モデルを使った各臓器の線量計算、である。これらには、過去のネバダでのデータなどが参考にされ、日本家屋も集合体としていろいろなタイプが試された、膨大な仕事であった。

この DS86 が出来上がった後、私どもの広島グループや金沢、長崎のグループ、放射線影響研究所、などで引き続き被曝試料の測定を行ってきた。データがある程度集まってくると、図1にユーロピウムの測定と DS86 に基づいた計算との比較を示すが、系統的なずれが見出された。<sup>(6)</sup> その後原因を解明するため MCNP による計算を行うことにした。原因解明の上で、問題となるのは爆発地点のガンマ線や中性子のスペクトルのチェックが基本的にできないことである。すなわち核爆弾の構造を調べたりすることは私どもの仕事ではない。したがって他の原因を一つ一つチェックし正しいかどうかつぶしてゆく方法で進めることにした。<sup>(23,25,26,27)</sup> まず計算精度を確かめる作業を行った。1. ベンチマークテストを MCNP コード<sup>(24)</sup>を使っておこないその精度



を確認した。その後原爆本体から出た中性子のスペクトルに問題があるとの確信を得たので、2. いろいろなスペクトルや放射線の放出方法を考えて輸送計算を行いどういふスペクトルでどういふ放出方法を考えたら良いかを検討した。これら1、2について報告する。

この作業全体において使用したコードは MCNP3A、MCNP4A、MCNP4B である。主として使用した核データは ENDF/B-IV、V、VI であり、その他の MCNP につけてあるデータ及び JENDL3<sup>(28)</sup>も必要に応じて使った。

## 2. ベンチマークテスト

原爆の放射線源からの地表、そして放射化までの過程の計算を行う上で MCNP がどこまでどれくらいの精度で計算できるのかチェックするため、ベンチマークテストを行った。<sup>(25,26)</sup> 計算で使った中性子の放出数は  $10^5$  から  $5 \times 10^6$  個である。

広島大学原爆放射能医学研究所には 2Ci のカリフォルニウム 252 核分裂中性子線源がある。これはもともと原爆放射線と同様な線源での生物影響を調べる目的で導入された。

この装置で核分裂中性子の物質中での透過、放射化の実験を行い、MCNP の計算と比較検討をした。図 2 がその実験系である。中心には 5cm の厚さで 25cmx25cm の広さを持つ板を 65cm の厚さになるようならべた。その周りは 0.5mm のカドミウムの板で覆った。中性子の入口以外はボロン 3.7%入りのポリエチレン(商品名ニューライト)で実質の厚さが 15cm 以上になるようならべた。

中心の吸収体はいろいろな成分を持った材質を試した。ナイロン、アクリライト、水、塩化アンモニウムの粉末、花崗岩、ニューライトなどである。それぞれの板の中心に放射化のための金属箔などを貼り付け 5cm 毎の放射化量を測定した。これにより空気や材質中での輸送計算放射化の計算精度の検討を行った。相対的な厚みとしては、空気中の透過としてみると、65cm の厚さは大体爆心から 1500m くらいに相当する。放射化箔には熱中性子や熱外中性子の検出を行うためのものと、速中性子を検出するためのものを用意した。前者には中性子を吸収する金、ユーロピウム、コバルトを使い、後者には(n,p)や(n,n')反応をみる、ニッケルやインジウムを使った。照射した金属箔ゲルマニウム検出器で測定し放射能の生成量を求めた。

この実験系の問題は散乱して横から入射する速中性子があることであり、入口から入射した中性子のエネルギースペクトルに追加されることであった。目的は入射した中性子の変化であり、横から入射する中性子の遮蔽を効果的に行う必要があった。この遮蔽のため 15cm 厚のニューライト中の、ポリエチレンの成分で速中性子を減速し同時にボロンで熱中性子を吸収した。速中性子がほぼなくなったところでカドミウムにより熱中性子を吸収する。これらにより横からの入射を徹底的になくした。そうして入射の時と比べて 100 分の 1 から 10000 分の 1 近くまでの減衰するところまで測定

と計算とを比較した。これらの結果は星ら、岩谷らに示している。<sup>(25,26)</sup>

次に大きな問題は金属箔の自己吸収の問題であった。これには最終的には実験で求めた。放射化の実験には 50 ミクロン程度の厚さの金などを使った。自己吸収の見積もりには 1 ミクロンまでの各種の厚さの箔を放射化しゼロの厚さの場合を外挿して求めた。この自己吸収の解決は 2-3 倍の自己吸収があるので重要であった。詳しくは星らに示す。<sup>(25)</sup>

図 3、図 4 に一部の例を示す。結果として減衰しても全体として 30% ぐらい以内で合っていることがわかった。これは驚くほど合ったといった印象である。実験の方だけでも手続きとして多くの事柄がある。まずカリフォルニウム線源のフラックスの実験的な決定がある。これは電離箱の測定を基に決定した。次に減衰体のジオメトリーの精度、放射化箔のゲルマニウムの測定による生成放射能の絶対値の決定、等々である。また MCNP 計算では何回も散乱する際使用される核データの精度の問題、計算の精度の問題、結果の統計精度の問題、等々がある。これらをすべて含めて大体 30% 以内で合った。

これらのベンチマークテストにより MCNP で輸送計算を行い放射化の計算をする上で十分な精度があると結論した。

### 3. 広島原爆の中性子の輸送計算と中性子の吸収に伴うガンマ線の計算

中性子の輸送計算に使ったジオメトリーを図 5 に示す。空気や土壌の成分には DS86 (RERF 1987) で使われた値を使用した。この空気の密度についてもチェックをした。原爆投下の気象状態に近いときを選んで上空まで実測した。この結果使用した空気の密度のデータは正しいことが分かった。<sup>(30)</sup>

原爆の中心には核分裂中性子を置き、その周りに 5cm 厚の球殻状のタングステン、その外側に 20cm 厚の球殻状の鉄をおいた。これらは DS86 のスペクトルを再現する事を星ら<sup>(27)</sup>が示している。全体は 2km の高さで半径 2km の円筒形の空気を考える。原爆の高さは DS86 で使われているものが 580m で爆発の中心とした。仮説を考える場合は 670m の高さも試した。土壌は 2m の厚さとし 200m 毎の半径の円筒を考えその中での中性子のエネルギースペクトルを計算した。(100m メッシュの場合も試したが、200m メッシュでも問題無かった。) 計算結果はそれぞれの同心円の間 100m、300m、500m、700m.....を計算点としプロットした。ガンマ線の場合は地表 1m の点でも計算を出した。

図 1 にはこの球状の模式的原爆で計算したユーロピウムの生成量と、DS86 で計算したユーロピウムの生成量との計算の比較が示されている。図 1 のように模式的原爆で計算しても DS86 と良く一致する。<sup>(27)</sup>

中性子の空気や、土壌による捕獲に伴って発生する 2 次ガンマ線の計算についても同様に DS86 と比較した。ガンマ線の種類は 4 通りに分類されていて、それらは 1.

即発ガンマ線、2. 即発2次ガンマ線、3. 遅発ガンマ線、4. 遅発2次ガンマ線である。しかしながら主な成分はそのうち遅発ガンマ線と、即発2次ガンマ線である。遅発ガンマ線は分裂後の核子から出るガンマ線が主でファイアボールやきのご雲から放出される。即発2次ガンマ線は核分裂の際発生する即発中性子が空気や土壤の成分と作用して発生する2次ガンマ線である。他の2成分はこれらの10分の1以下である。ここでは即発2次ガンマ線についてDS86との比較を図6に示す。これらもよい一致を示している。

#### 4. 広島原爆の系統的なずれの問題

図1に示すように、DS86で計算した広島原爆の中性子はユーロピウムの生成量を説明できない。それだけでなくコバルト60の測定結果もうまく説明していない。以上は熱及び熱外中性子による反応である。その他のデータとして最近加測器マス(AMS)方式で測定した塩素36もある。<sup>(13,14,15)</sup>これも熱中性子で生成したもので同様な系統的ずれを示している。

広島原爆の中性子により生成した放射能には当時電柱の碍子に使われていた硫黄との(n,p)反応で生成した、燐32もある。この反応は速中性子によっておこされるので今までの反応と違う。また被爆者への被曝線量はこの速中性子によって主として決まり熱中性子の影響は小さい。この放射能燐32の半減期は短くもう存在していないが、当時のデータは残っていて、DS86の際には再評価された。そしてこのデータはDS86と合っていた。測定により求められた値と計算値との比を取ると、熱中性子の結果は一致して系統的なずれがある事が分かる。近距離でデータが計算より小さく遠距離で大きい。このことは図8の上を示されている。もし実験値と計算値が一致していたらこの比は1になるはずである。

そこで問題を検討していたが、解決のための良い方法がなかなか見付からなかった。1996年および1997年に日米の再検討のための会議が開かれたがアメリカ側も原因は分かっていた。問題点は何らかのパラメータを変更し、熱中性子のデータを合わせると、速中性子が合わなくなることである。両者を同時に合わすことが困難であった。そうしているうちに球形のシンプルな原爆にそこが割れたと考えがうかんだ。広島原爆はガンタイプといわれ、出口をふさいだ大砲の出口側と砲弾の入口側に2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。この仮定は隣 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>(27)</sup> しかしながら 1km より以遠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>(31)</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 8 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. 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資料に示す。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隣 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  $\beta$  線測定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がその方向に放

出された。2. 中性子の発生地点の高さを 90m 引き上げその後 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 の仮説を認めただけではない。

- 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。

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が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)、静間清(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

### REFERENCES

1. 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).
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. B52*, 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).

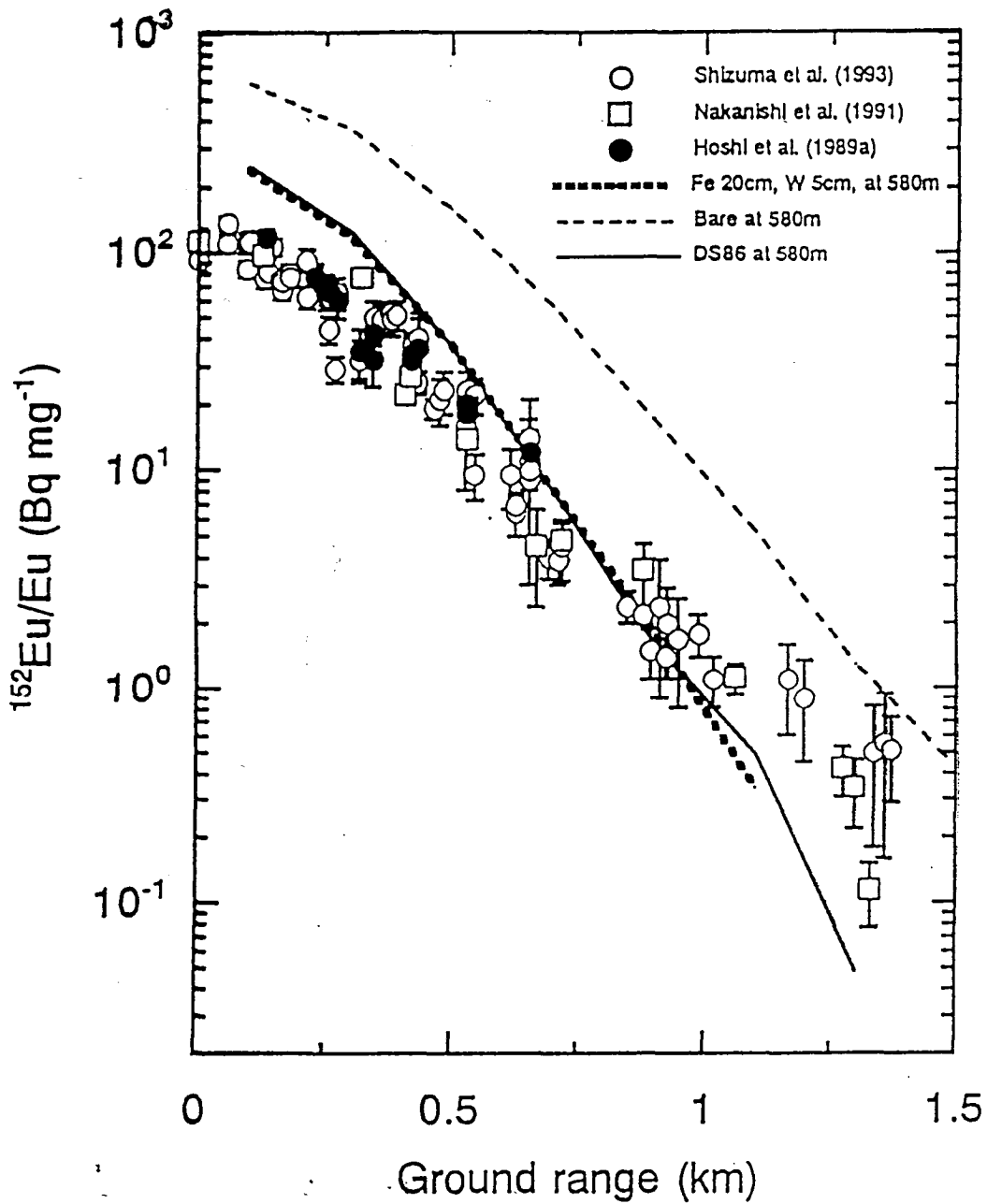


図1. 広島のエウロピウム152の比放射能の測定結果と計算。太い点線は内側にタングステン5cm外側に鉄20cmの球殻を考え、中心にウラン235の核分裂中性子を考えた場合のモデルによる計算。実線はDS86。太い実線とDS86が一致している。球形のモデルでもDS86の計算として使えることを示している。細い点線(一番上)はDS86のフルエンスで裸の核分裂中性子を考えた場合。<sup>(27)</sup>

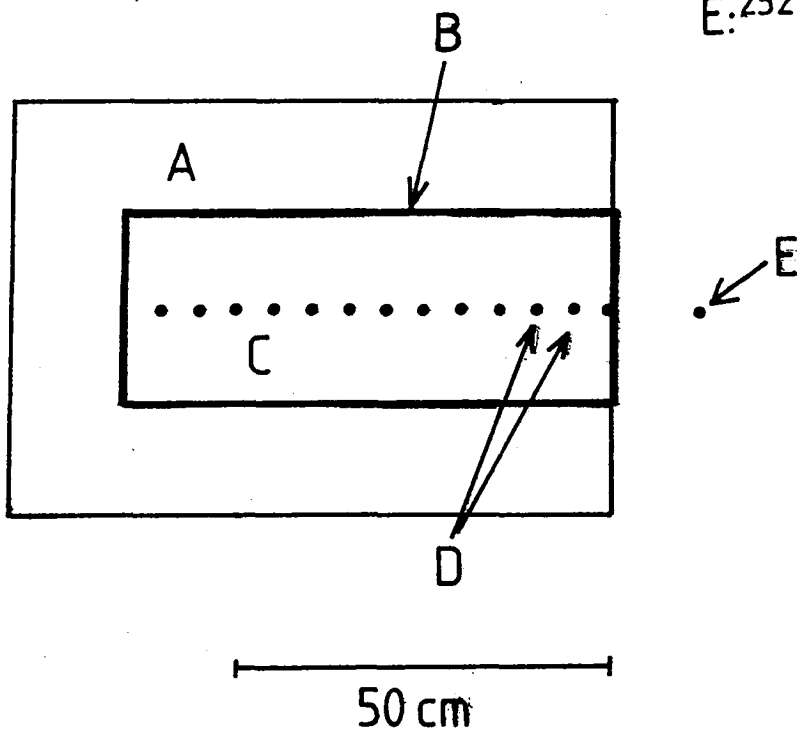
A : polyethylene + B(3.7%)

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)。

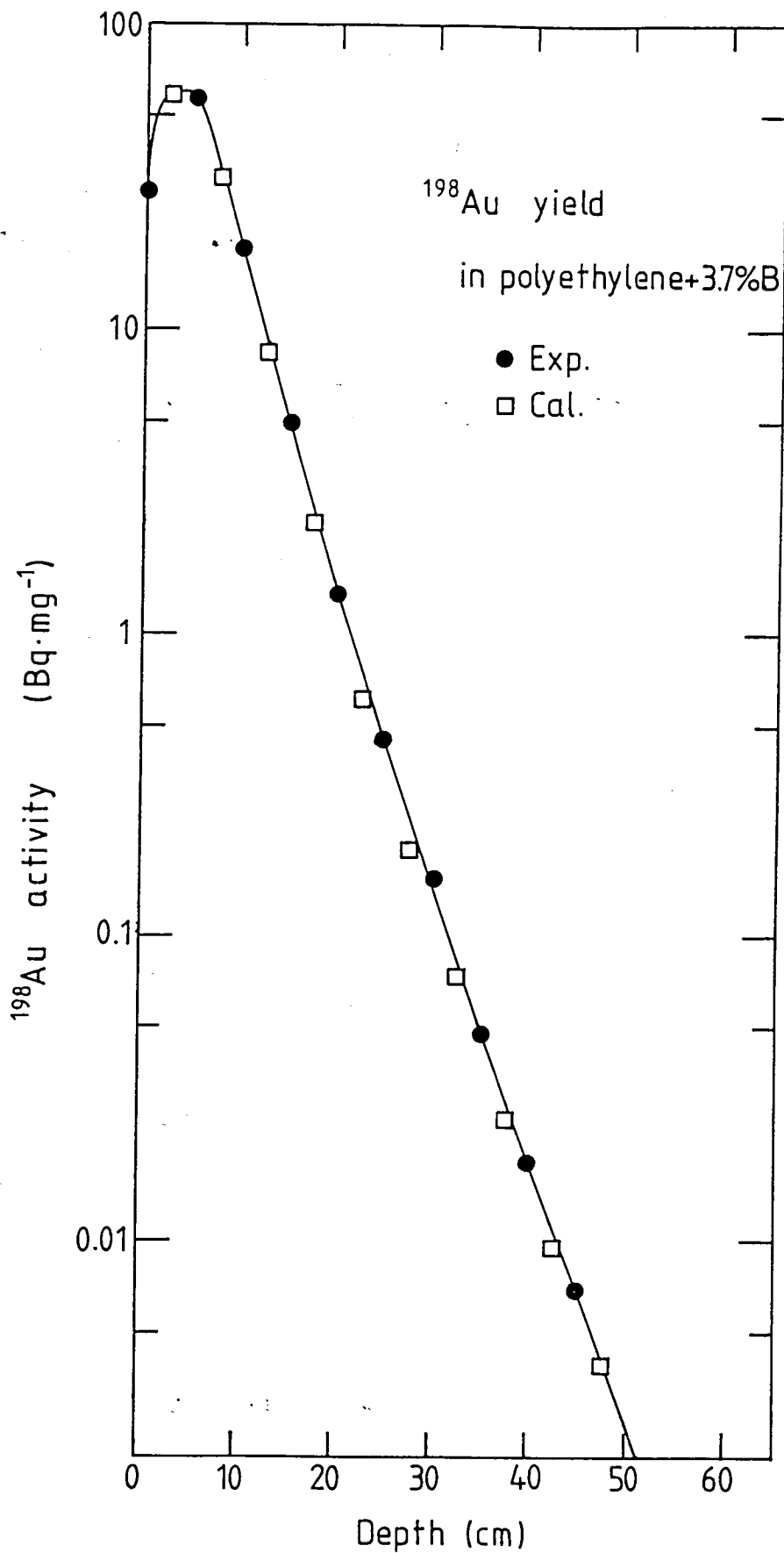


図 3. ボロン入りのポリエチレン（ニューライト）を使った場合の計算と実験値の比較。放射化箔は金で熱、熱外中性子を検出した。これ以外の水、岩石、塩化アンモニウムなど各種の材質においてもよい一致を示す。<sup>(25)</sup>

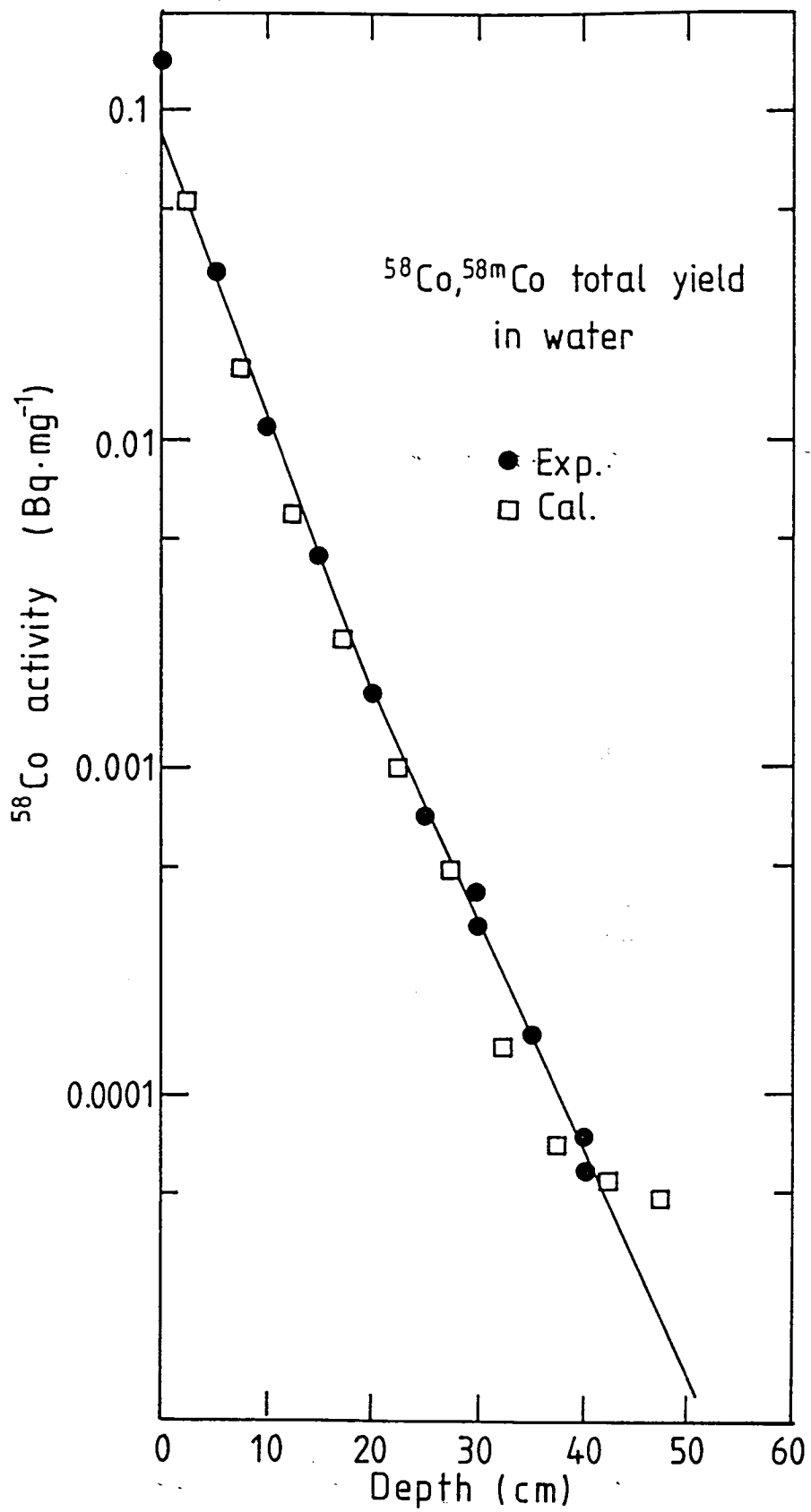


図4. 図3と同様な比較。Ni(n,p)反応による速中性子を検出した。これは水の場合であるが、いろいろな材質においてもよい一致を示した。<sup>(25)</sup>

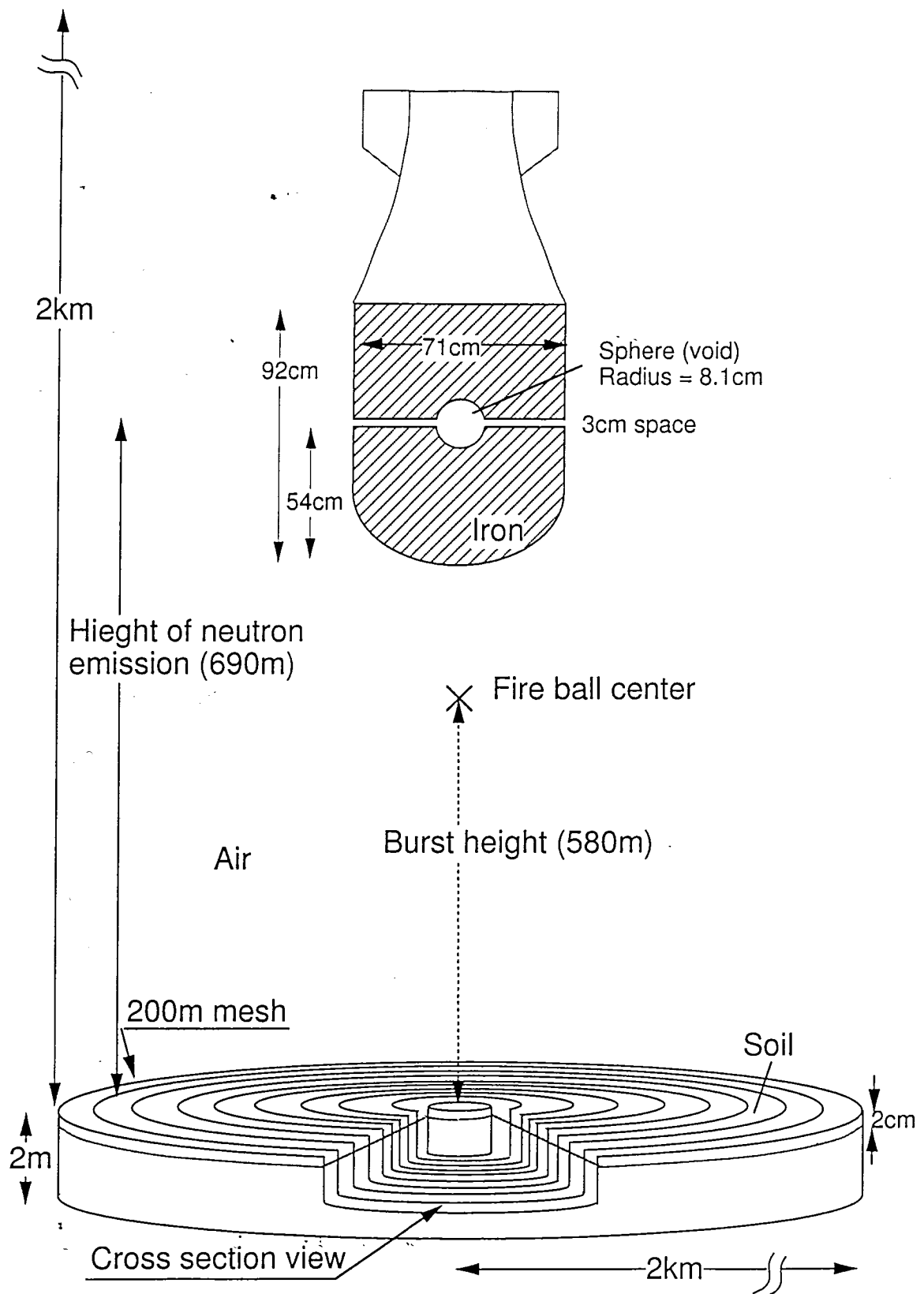


図5. 広島原爆の輸送計算に使ったジオメトリー。ユーロピウムの生成量計算に使う中性子のスペクトルは地表から地面の中に2cm入ったところまで、すなわち2cmの厚さの部分の計算結果を使った。ガンマ線の場合は地表1mの位置を使った。爆発点の高さはDS86では580mである。90m引き上げた場合の670mの位置での計算も行った。

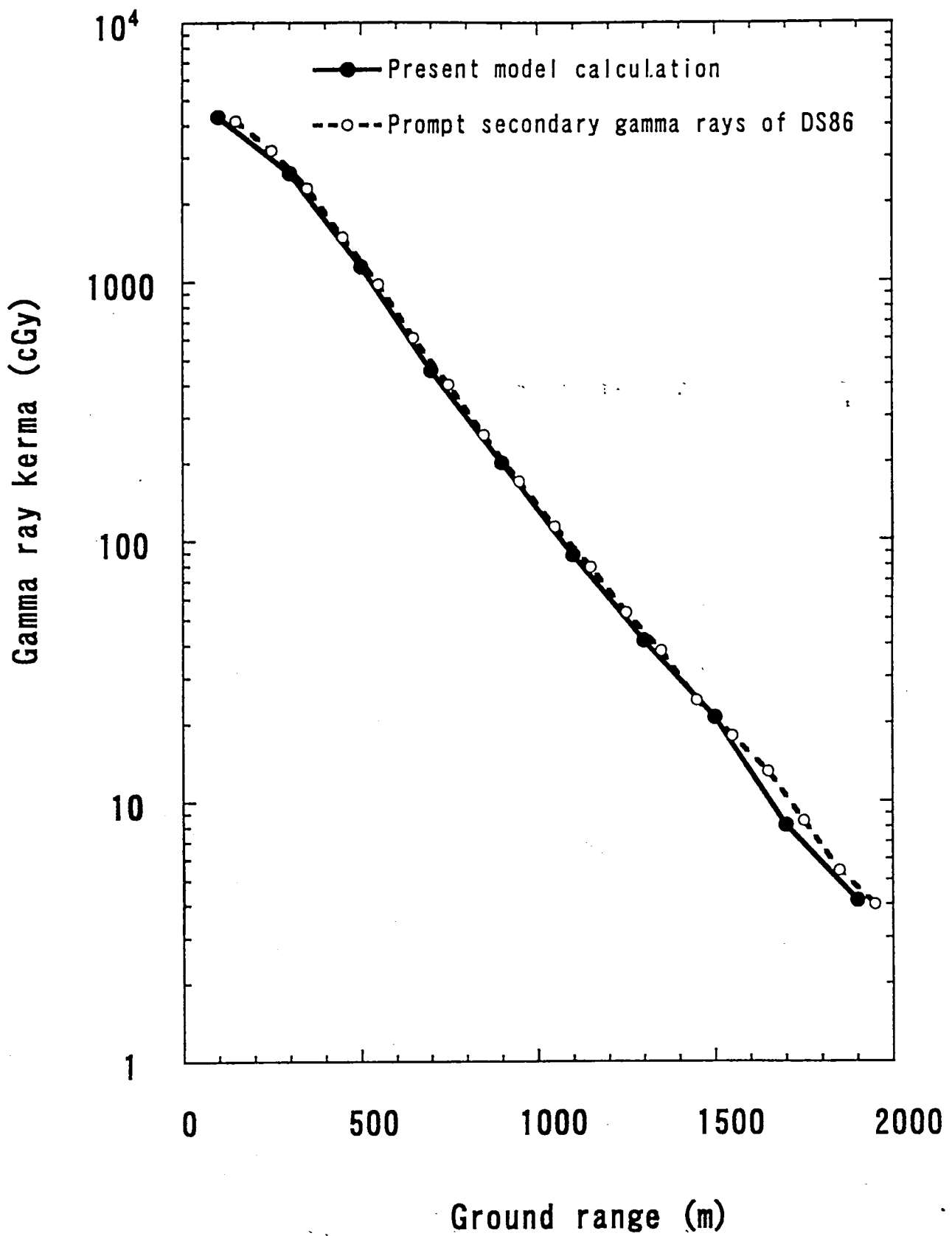


図6. 即発中性子が空気や土と反応して発生した2次ガンマ線（即発2次ガンマ線）のDS86との比較。DS86と一致している。そのほかの成分についてもDS86の計算と矛盾はない。

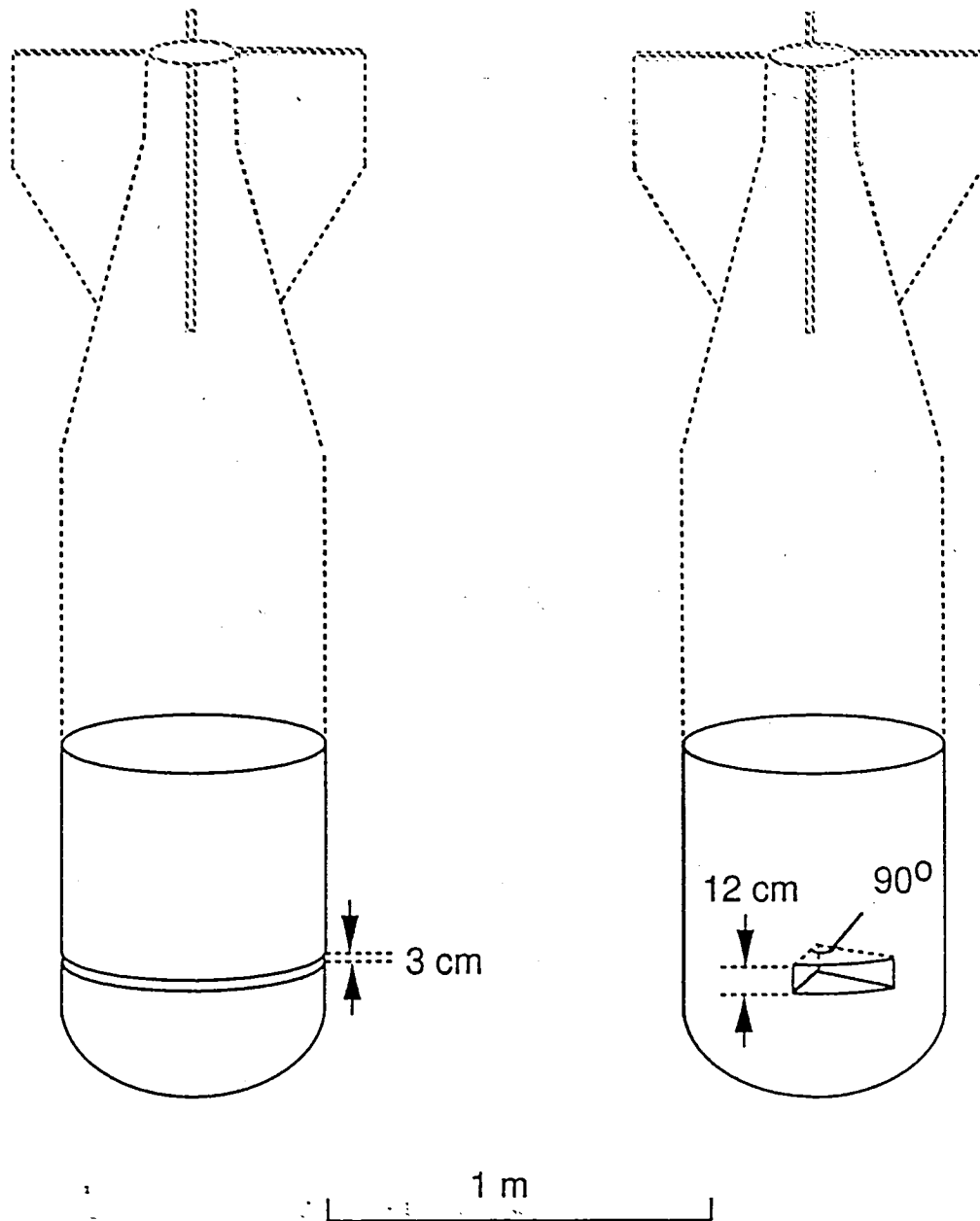


図 7. より詳細な広島原爆の形を再現した場合の、クラックの仮定。左側はウランの位置を含む形で水平に割れた場合。割れ目の幅は 3cm ぐらいで計算とデータが合ってくる。右側は 90 度方向のみにクラックができた場合。文献 30 を参考に改変。



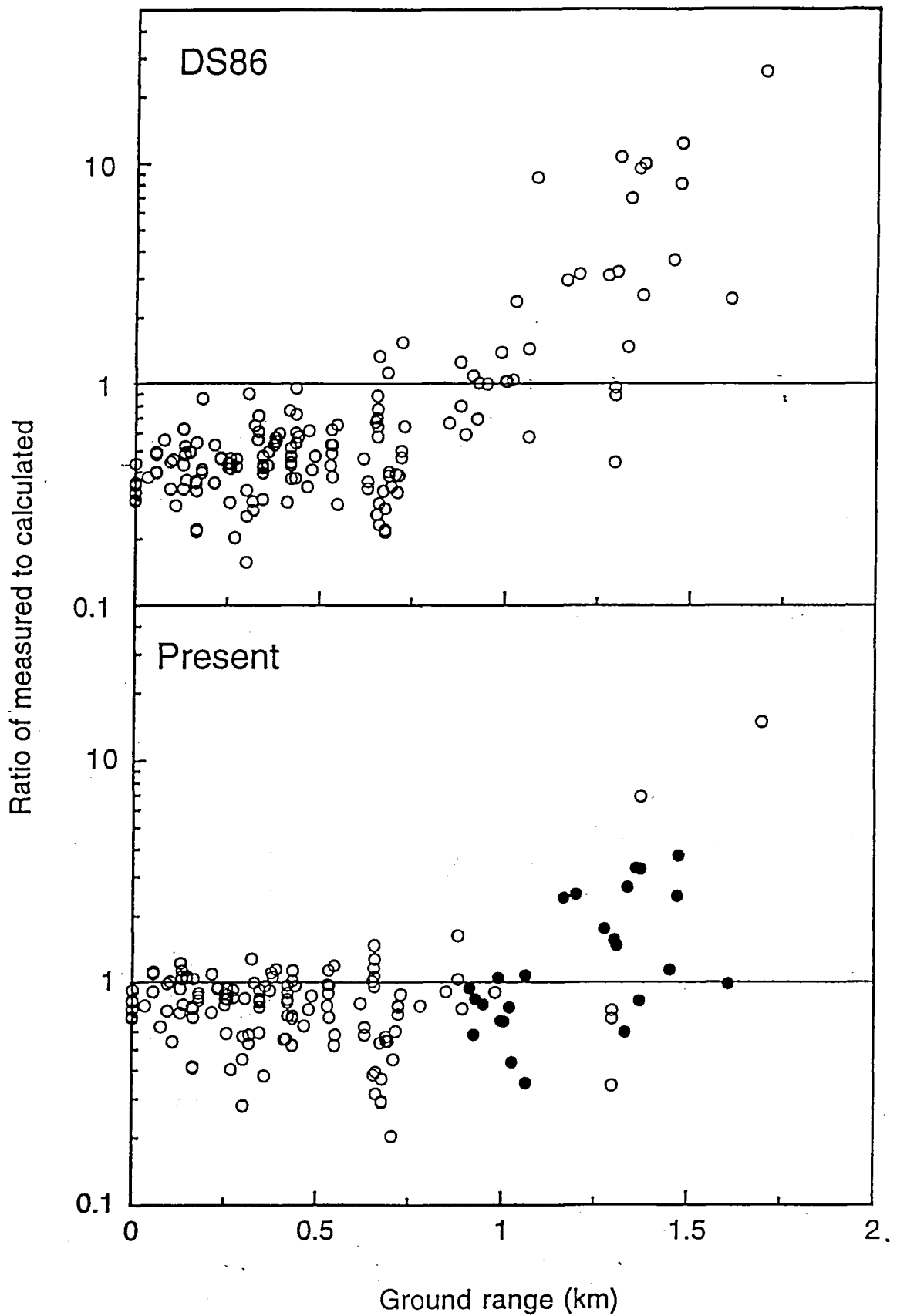


図8. 実験値と計算値との比。上の図はDS86との比較で、系統的なずれがある事が分かる。下の図は図7のようなクラックを仮定した場合。白丸が図7左の等方的な割れ方の場合。黒丸は非等方で、割れた中心を南東方向に向けた場合の計算。非等方の計算は遠距離をよく合わせるが、そのほかの方向で10倍前後高いデータも存在する。文献30より引用。

## 発表論文, および資料