

ESTIMATION OF AIR DOSE FROM THE ATOMIC BOMBS HIROSHIMA & NAGASAKI

原子爆弾からの空気線量の推定

広島・長崎

TADASHI HASHIZUME, M.D., Ph.D. 橋詰 雅

TAKASHI MARUYAMA, Ph.D. 丸山隆司

AKIHIRO SHIRAGAI, B.Sc. 白貝彰宏

EIICHI TANAKA, Ph.D. 田中栄一

MASAMI IZAWA, Ph.D. 伊沢正実

SHOICHI KAWAMURA, Ph.D. 河村正一

SHOGO NAGAOKA 長岡省吾



ATOMIC BOMB CASUALTY COMMISSION

国立予防衛生研究所－原爆傷害調査委員会

JAPANESE NATIONAL INSTITUTE OF HEALTH OF THE MINISTRY OF HEALTH AND WELFARE

TECHNICAL REPORT SERIES

業 績 報 告 書 集

The ABCC Technical Reports provide the official bilingual statements required to meet the needs of Japanese and American staff members, consultants, advisory councils, and affiliated government and private organizations. The Technical Report Series is in no way intended to supplant regular journal publication.

ABCC業績報告書は、ABCCの日本人および米人専門職員、顧問、評議会、政府ならびに民間の関係諸団体の要求に応じるための日英両語による記録である。業績報告書集は決して通例の誌上発表に代るものではない。

Approved 承認 24 March 67

Research Project 研究課題 31-63, 32-63

ESTIMATION OF AIR DOSE FROM THE ATOMIC BOMBS HIROSHIMA & NAGASAKI

原子爆弾からの空気線量の推定

広島・長崎

TADASHI HASHIZUME, M.D., Ph.D.¹ 橋詰 雅

TAKASHI MARUYAMA, Ph.D.² 丸山隆司

AKIHIRO SHIRAGAI, B.Sc.² 白貝彰宏

EIICHI TANAKA, Ph.D.² 田中栄一

MASAMI IZAWA, Ph.D.³ 伊沢正実

SHOICHI KAWAMURA, Ph.D.⁴ 河村正一

SHOGO NAGAOKA⁵ 長岡省吾



ATOMIC BOMB CASUALTY COMMISSION
HIROSHIMA AND NAGASAKI, JAPAN

A Cooperative Research Agency of

U.S.A. NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES - NATIONAL RESEARCH COUNCIL

and

JAPANESE NATIONAL INSTITUTE OF HEALTH OF THE MINISTRY OF HEALTH AND WELFARE

with funds provided by

U.S.A. ATOMIC ENERGY COMMISSION

JAPANESE NATIONAL INSTITUTE OF HEALTH

U.S.A. PUBLIC HEALTH SERVICE

原 爆 傷 害 調 査 委 員 会

広島および長崎

米 国 学 士 院 - 学 術 会 議 と 厚 生 省 国 立 予 防 衛 生 研 究 所
と の 日 米 共 同 調 査 研 究 機 関

米国原子力委員会、厚生省国立予防衛生研究所および米国公衆衛生局の研究費による

Head, Division of Physics, Japanese National Institute of Radiological Sciences (JNIRS) and Senior Consultant to ABCC¹; Division of Physics, JNIRS²; Head, Division of Chemistry, JNIRS³; Chief, Third Laboratory, Division of Chemistry, JNIRS⁴; Former Director, Hiroshima Peace Memorial Museum⁵

放射線医学総合研究所（放医研）物理研究部長およびABCC顧問¹；放医研物理研究部²；放医研化学研究部長³；放医研化学研究部第3研究室長⁴；元広島市平和記念資料館館長⁵

ACKNOWLEDGMENT

感謝のことば

We would like to express our profound appreciation to those concerned at the Health Physics Division of Oak Ridge National Laboratory for graciously agreeing to carry out the various experiments necessary in our dose calibrations as well as to the U.S. National Academy of Sciences for its assistance over the years.

We are also indebted to Mr. Oda for his assistance in chemical analysis, to Mr. Kato for his cooperation in manufacturing the thermoluminescence apparatus and his assistance in mathematical analysis, to Mr. Saito, Mr. Tanaka and others of the ABCC Field Section for their assistance in collecting the specimens, to Mr. T. Shohoji, ABCC Department of Statistics for his assistance in statistical computation, and particularly to Mr. J. S. Cheka of ORNL-HP for kindly reviewing the manuscript and offering many helpful suggestions. We express our appreciation also to the citizens of Hiroshima and Nagasaki for their kindness during this study.

線量較正に必要な各種実験を快よく引き受けて下さった Oak Ridge National Laboratory 保健物理部の関係各位と、数年間にわたり援助をいただいた米国学士院のかたがたに深く感謝する。

化学分析の面では織田氏、熱ルミネッセンス装置の製作と数学的解析では加藤氏、試料の採集にはABCC統計部調査課の齊藤氏、田中氏ほか課員諸氏、統計的計算にはABCC統計部正法地氏の援助をあおいだ。特に原稿の作成にあたっては、Oak Ridge National Laboratory 保健物理部の J. S. Cheka 氏の校閲と多くの有益な助言をいただいた。ここに感謝の意を表する。なお、調査実施にあたって広島・長崎両市の市民のかたがたの示されたご好意に深く感謝するものである。

A paper based on this report was published in the following journal:

本報告に基づく論文は下記の雑誌に発表した。

Health Physics 13:149-61, 1967

CONTENTS

目 次

Introduction 緒 言	1
Estimation of Fast Neutron Dose 速中性子線量の推定	2
Estimation of Gamma Dose ガンマ線量の推定	7
Experiments and Results 実験と結果	11
Discussion 考 察	14
Summary 要 約	16
Appendix 付 録	18
Globe Operation グローブ作業	18
Calculation of Q_θ Q_θ の計算	19
References 参考文献	21

Table 1. Neutron air dose in both cities	
表 両市の中性子線空気線量	13
2. Gamma air dose in both cities	
両市の γ 線空気線量	14
3. The parameters of Hurst's empirical formula	
Hurst の実験式のパラメーター	16
A1 The value of $\phi f \varphi$ at each section	
各区画の $\phi f \varphi$ 値	19
A2 The value of $\sum_{\psi} f_{\theta \varphi \psi}$ calculated by "Globe operation"	
グローブ作業で計算された $\sum_{\psi} f_{\theta \varphi \psi}$ の値	21

Figure 1. Coincidence Type β -Ray spectrometer	
図 同時型 β 線スペクトロメーター	6
2. Block-Diagram of Electronic Circuit	
電子回路の立体線図	6
3. Pulse height distribution for low level ^{60}Co sample	
微量 ^{60}Co 試料の波高分布	6
4. Furnace for heating the sample	
試料加熱用炉	9
5. Block-Diagram for the measurement of thermoluminescence	
熱ルミネッセンス測定用装置の立体線図	9
6. Typical Glow Curve of thermoluminescence	
熱ルミネッセンスの典型的グロー曲線	10

7. Distribution of thermoluminescence in sample 試料内の熱ルミネッセンス分布	10
8. $C\psi$ and $C\theta$ values vs incident angle $C\psi$, $C\theta$ 値と入射角との関係	11
9. Light emitted vs elapsed time after exposure to 1000 rad of ^{60}Co 1000 rad の ^{60}Co 照射後の経過日数と放出光量との関係	11
10. Glow Curve immediately after irradiation and 40 days post-irradiation 照射直後と照射40日後のグロー曲線	11
11. $K\psi$, $K\theta$, $H\psi$, and $P\theta$ values vs incident angle $K\psi$, $K\theta$, $H\psi$, $P\theta$ 値と入射角との関係	12
12. $Q\theta$ and $N\theta$ values vs incident angle $Q\theta$, $N\theta$ 値と入射角との関係	12
13. Air dose due to neutron in Hiroshima and Nagasaki 広島・長崎における中性子による空気線量	13
14. Air dose due to γ -radiation in Hiroshima and Nagasaki 広島・長崎における γ 線による空気線量	13
15. Total air dose in Hiroshima 広島における総空気線量	17
16. Total air dose in Nagasaki 長崎における総空気線量	17
17. Air dose estimated with new parameter values 新しいパラメーター値を用いての推定空気線量	17

ESTIMATION OF AIR DOSE FROM THE ATOMIC BOMBS HIROSHIMA & NAGASAKI

原子爆弾からの空気線量の推定広島・長崎

INTRODUCTION

In August 1945, atomic bombs were exploded over Hiroshima and Nagasaki, and a very large number of residents were exposed to the radiation released by the bombs. Since then and even today some survivors suffer from leukemia and other malignancies attributable to radiation exposure. In addition, survivors and their offspring worry about the possibility that there are genetic effects of radiation exposure.

The knowledge of individual dose is necessary not only in explaining the relationship between the disturbances appearing to date and radiation dose, but also in determining the future risk of each individual. Such information is also essential for peaceful utilization of atomic energy which will see greater development in the future. Since the bombing dose estimation has been attempted by many scientists of Japan and the United States.¹⁻⁹

In 1956, Oak Ridge National Laboratory (ORNL) in collaboration with Los Alamos Scientific Laboratory participated in experiments with nuclear weapons and estimated the dose from the total energy of atomic bombs. These large scale experiments were considered necessary in order to exclude the uncertainty due to nonreproducibility of atomic explosions and the error due to difference in environmental and atmospheric conditions.

At the end of 1961 the Japanese National Institute of Radiological Sciences (JNIRS) began work to estimate air dose at the request of ABCC. Our approach was to estimate the dose from data on materials collected at the sites of the bombings. The air dose at ground level is considered to be due to fast neutrons, slow neutrons, and gamma rays directly associated with the nuclear explosion.

Nothing that ^{59}Co present as an impurity in irradiated iron is activated by thermal neutrons and becomes ^{60}Co , Saito applied this and estimated thermal neutron dose from iron collected near the hypocenter in Hiroshima.¹⁰ However, as the contribution of slow neutrons to the total neutron dose is known to be negligibly small,¹¹ it was considered of little significance to simply measure ^{60}Co activity in surface samples. On the assumption that thermal neutrons are produced by moderation when fast neutrons strike a concrete wall and

緒言

1945年8月に原子爆弾が広島、長崎両市の上空で爆発し、非常に多数の住民がその放射線にさらされた。以来今日に至るもなお被爆者の一部は放射線被曝に起因する白血病その他の悪性疾患に苦しんでいる。なお、被爆者とその子孫は放射線被曝による遺伝的影響の可能性についても心配をいっている。

個人の被曝線量を知ることは、現在までに発生した各種障害と被曝線量との関係を説明するためだけでなく、被爆者の将来の危険を予知するうえでも重要である。このような知見は今後さらに開発されてゆく原子エネルギーの平和利用の面でも必要である。原爆投下以後多数の日米両国科学者¹⁻⁹が線量推定を試みてきた。

1956年に Oak Ridge National Laboratory (ORNL) は Los Alamos Scientific Laboratory と共同で核兵器実験に参加し、原爆の総エネルギーから線量の推定を行なった。原子爆弾の爆発を再現することができないため生じた不明な点、および環境、気象条件による誤差をなくするためにこのような大規模の実験が必要とされた。

1961年の終わりごろに放射線医学総合研究所(放医研-NIRS)はABCCの依頼により空気線量を推定する作業を始めた。われわれはいくつかの原爆被爆地点において採集した試料に関するデータから線量を推定する方法を採った。地表における空気線量は核爆発と直接関係のある速中性子、遅中性子およびγ線によるものと考えられている。

齊藤は、鉄中に不純物として存在している ^{59}Co が放射線照射を受け、その熱中性子により放射化されて ^{60}Co となることを発見し、これを応用して広島爆心地近くから採集された鉄材の熱中性子線量を推定した。¹⁰ しかし、遅中性子の総中性子線量に対する寄与がきわめて微量であることが知られているので¹¹ 建物の表面にある鉄材の ^{60}Co の放射能を測定するだけではあまり意味がないものと考えられた。速中性子がコンクリート壁に当たり減速されて、熱中性子が生産され、表面から深部へ進むにつれて ^{60}Co の放射能が増加し、ある深さで最大に達し、以

^{60}Co activation increases as it goes in deeper from the surface, reaches the maximum at a certain depth, and then decreases, we decided in 1962 to estimate fast neutron dose by measuring ^{60}Co activity in iron collected from an appropriate depth in walls of ferroconcrete buildings.

It was also considered possible to estimate gamma dose from thermoluminescence emitted from substances containing ionic crystals. In 1962 dosimetry was made by Higashimura on 10 roof tiles collected by us within 1000 m from the hypocenter in Hiroshima. Results showed that considerably strong thermoluminescence is released by roof tiles collected at 1000 m, but there was very great variation in luminescence between the roof tiles. Subsequently, Higashimura attempted precise dosimetry on roof tiles he collected in Nagasaki and Hiroshima, but the error was so large that it was not definitive.¹² We also conducted precise dosimetry on approximately 200 roof tiles whose places of collection were known, but variation between the samples was great and we could not obtain values that were better than York's values. The reason possibly was that since roof tiles are used only on Japanese houses, and all Japanese houses within 1500 m from the hypocenter were destroyed by the A-bomb blast, the exposure history of scattered roof tiles was not accurately known. Therefore, bricks and ornamental tiles of existing buildings, walls, etc., whose exposure factors could be known accurately today, were used in our present study.

Next, irradiation with the Health Physics Research Reactor (HPRR)^{13,14} of ORNL was necessary for dose correction and calibration. Data on the atomic bomb were also necessary. With the ready cooperation of ORNL-HP in these areas, we were able to estimate the air dose at the time of the A-bomb detonation in Hiroshima and Nagasaki with unexpectedly good precision.

ESTIMATION OF FAST NEUTRON DOSE

Method Measurement of ^{60}Co activity induced by the atomic bombs was utilized in estimating fast neutron dose for the following reasons: ^{60}Co is one of the most intense radionuclides still detectable today 20 years after the bomb; and Co is contained in iron as an impurity though in very minute quantity, and iron samples could be obtained at various places in both cities.

However, since (n, γ) reaction of ^{59}Co is dominant for thermal neutrons, the iron samples imbedded in a neutron moderator (i.e., in concrete of buildings) were used, and the contribution of incident thermal

後下降するとの推測のもとで、われわれは1962年に鉄筋コンクリート建造物の適当な深さにある鉄材を採取して、その中の ^{60}Co の放射能を測定して速中性子を推定することにした。

また、イオン結晶を含んでいる物質から発せられる熱ルミネッセンスから γ 線量を推定することができると考えられた。東村は1962年にわれわれが広島県の爆心から1000m以内の場所で採集したかわら10枚について線量測定を行なった。その結果、1000m離れたところのかわらからは相当量の熱ルミネッセンスが放射されることが判明したが、各かわら間に非常な差異があった。その後、東村は長崎と広島で採集したかわらについて精密な線量測定を実施したが、誤差があまりにも大きく決定的な結果は得られなかった。¹² また、われわれも採集場所のはっきりわかっていた約200個の屋根がわらについて精密な線量測定を行なったが、各試料間の差は大きく York の推定値にまざる結果は得られなかった。その理由はおそらく、かわらはすべて日本家屋にのみ使用されていて、爆心から1500m以内の家は原爆で全壊し、飛散したかわらの被曝履歴がはっきりつかめていないことによるものであろう。そのため、今日なお存在し被曝歴のはっきりしている建造物、壁などのれんがや化粧タイルをこのたびの研究に使用した。

次に線量値補正と較正のために ORNL の Health Physics Research Reactor (HPRR - 保健物理部用研究原子炉)^{13,14} で照射を行なうことが必要となり、また原子爆弾そのものに関するデータも必要であった。この面で、ORNL 保健物理部 (ORNL - HP) が進んで協力を提供したので、予期以上の精密度で広島・長崎の原子爆弾爆発時の空気線量を推定することができた。

速中性子の推定

方法 速中性子の推定には、原爆により誘導された ^{60}Co の放射能を次の理由で測定に用いた。(1) ^{60}Co は原爆後20年を経過した今日なお探知できる最も強い放射性核種の一つであること。(2) Co はきわめて微量ながらも鉄材中に不純物として存在しており、しかも鉄材の試料は両市各所で入手できること。

しかしながら、 ^{59}Co の (n, γ) 反応は熱中性子に対して最も優勢であるので、中性子減速材(すなわち建造物のコンクリート)中に包まれていた鉄材が使用され、入射熱

neutrons was corrected for. The detail of the method will be described.

Neutrons released from the atomic bomb are for the most part fast neutrons, but before reaching the ground a fraction of them interact with nitrogen, oxygen, and other components of the atmosphere and are slowed down to thermal energy. As a result, the energy spectrum and angular distribution of neutrons at ground level is quite complicated.

However, according to the nuclear tests,¹⁵ the energy spectrum of neutrons on the ground is almost independent of the source spectrum beyond 500 m from the point of explosion and it well resembles that of HPRR except for the region of slow neutrons.

Hence, it can be assumed that the spectrum of neutron radiation beyond 500 m was composed of a "fast neutron component" having a similar energy spectrum to that from the HPRR and a "slow neutron component" consisting of thermal and slow neutrons, and the dose due to the fast neutron component was estimated from the specific activity of ^{60}Co in iron imbedded in concrete "moderator". Since the thermal neutron flux in concrete exposed to the fast neutron component was maximum at about 8 cm from the surface as described elsewhere,¹⁶ the iron samples imbedded at a depth of 8 cm from the surface of ferroconcrete buildings and those at the surface were used for neutron dose estimation. However, since a considerable fraction of the activity in iron samples at a depth of 8 cm was induced by incident slow neutrons, the fraction of the contribution of the fast neutron component to the total activity was determined using the data on iron samples located at the surfaces of buildings. Therefore, let the angle of the normal to the wall of the building to the epicenter be θ , the ^{60}Co activity at a depth of 8 cm be A_θ , the ratio of the activity due to fast neutrons be Q_θ and the dose per cpm/mg Co be N_θ . Then, the neutron air dose $D_{n\theta}$ at the surface of the building can be given by the equation:

$$D_{n\theta} = A_\theta \cdot Q_\theta \cdot N_\theta \cdot T \quad \dots\dots\dots (1)$$

where T is the correction factor for decay of ^{60}Co . When the distance from the explosion is large, such as in Hiroshima and Nagasaki, radiation is received not only from the direction of the hypocenter but also from other directions so that Q_θ and N_θ must be corrected for this. This was done by the "globe operation", using the angular distribution of the incident radiation which has been determined by ORNL-HP as shown in the Appendix. Calculation

中性子からの寄与については補正がなされた。以下にその方法を詳述する。

原爆により放出された中性子は大部分速中性子であるが、それらが地上に到達するまでにそのごく一部は窒素、酸素その他大気中の物質との相互作用により減速して熱エネルギーになる。その結果、地表におけるエネルギー・スペクトルと中性子の角度分布は相当複雑になる。

しかしながら、核実験の結果¹⁵によれば、爆央(さく裂点)から 500 m 以遠の地点では地上の中性子エネルギー・スペクトルはほとんど線源のスペクトルとは無関係であり、遅中性子の域を除けば HPRR のそれに非常によく似ている。

したがって、500 m 以遠の中性子のスペクトルは、HPRR から発せられる中性子に似たエネルギー・スペクトルを有する「速中性子部分」と、熱中性子および遅中性子とからなる「遅中性子部分」とからなり、速中性子はコンクリート「減速材」に包まれている鉄材中の ^{60}Co の比放射能から推定できる。速中性子線の照射を受けたコンクリート内にできた熱中性子束は別の報告書¹⁶で説明したように表面から 8 cm のところで最大であるので、鉄筋コンクリート建造物の表面から 8 cm の深さにあった鉄材と表面にあったものとの採取して中性子線量の測定に使用した。しかし、8 cm の深さにある鉄材中の放射能は入射遅中性子により誘導されたもののがかなりあるので、建造物表面にある鉄材試料のデータを使用して総放射線量に対する速中性子の寄与分量を測定した。そこで、建造物の壁面に対する垂線と爆央との角度を θ とし、8 cm の深さにおける ^{60}Co の放射能を A_θ 、速中性子による放射能の比率を Q_θ 、1 cpm / mg - Co に対する線量を N_θ とするとその建造物の表面の中性子空気線量 $D_{n\theta}$ は次の方程式で表わせる。すなわち、

ただし、T は ^{60}Co 崩壊に対する補正係数である。広島・長崎のように爆央からの距離が大きい場合は、放射線は爆心地方向からだけでなく、他の方向からも来るので、 Q_θ と N_θ は補正されなければならない。これは付録に示すように ORNL - HP で測定された入射放射線の角度分布を使用して「グローブ作業」により行なわれた。

of $Q\theta$ is complicated and is also shown in the Appendix.

Collection of Samples Iron samples were collected from the walls of existing ferroconcrete buildings, so that the place and condition of irradiation were known definitely and the iron samples of the building satisfied the following conditions:

The walls of the buildings were exposed directly to the radiation from the bomb without the interference of any large objects to scatter the radiation. This was ascertained by aerial photographs taken before the bomb;

The angle formed by the wall surface and the direction of hypocenter was 70° - 90° ;

The sample was located at least 1 m above ground level or the surface of a roof top;

Concrete buildings had a wall thickness greater than 25 cm;

Iron rods were imbedded in the concrete wall at nearly 8 cm from the surface or located on the surface of the building.

To satisfy these conditions, iron rods in concrete were collected from five places in Hiroshima. Iron rods on the surface were collected from four places in Hiroshima, but could not be collected in Nagasaki under conditions as good as in Hiroshima. Only samples in concrete with similar conditions to those in Hiroshima were selected so that there are only two collection sites in Nagasaki (See Table 1).

Separation and Quantitative Determination of Cobalt and ^{60}Co A study was made of methods to determine the ratio of ^{60}Co to Co by separating the Co contained in iron samples collected in the two cities. The separation and purification methods will be briefly described:

About 50 g of iron material is dissolved in concentrated hydrochloric acid, and iron is extracted and removed by isopropyl ether;

The Co fraction is separated by a method which changes the concentration of hydrochloric acid of the eluant using an IRA-400 anion exchanger;

If a large amount of copper is present, it is removed by Dowex 50 cation exchanger;

Colorimetric determination of cobalt is conducted by taking a portion of the Co fraction and developing color by o-nitrosoresorcin mono-

$Q\theta$ の計算は複雑であり、これは付録に示した。

標本の採集 鉄材試料は被曝の場所と状態が明確な、現存する鉄筋コンクリート建造物の壁から採取し、しかも次の諸条件にかなったものを選んだ。

建造物の壁は直接原爆放射線にさらされたもので、大きな障害物による放射線の散乱がなかったもの、このことは被爆前の空中写真で確認した。

壁の表面と爆心地との間の角度が 70° - 90° であったもの;

試料は少なくとも地表または屋根面より 1 m 離れた位置にあったもの。

コンクリート建造物の壁の厚さが 25 cm 以上のもの。

建造物の表面にあったものならびにコンクリート壁の表面から 8 cm の深さにあったもの。

これらの条件をみたすため、広島では 4 か所からコンクリート内にあった鉄材を採集し、また表面にあった鉄材も 4 か所から集めた。しかし、長崎では広島ほどよい条件のものを採集することはできなかった。長崎では広島に類似した試料のみを選んだので、2 か所だけで採集が行なわれたにすぎない(表 1)。

Co と ^{60}Co との分離と定量 両市で採集した鉄材中の Co と ^{60}Co との比率を測定する方法について検討を行った。その分離と精製法について簡単に説明する。

約 50 g の鉄材を濃塩酸で溶解し、その鉄分はイソプロピル・エーテル液で分離除去した。

IRA-400 陰イオン交換体を使用して溶出液中の塩酸濃度を変化させる方法を用いて Co のフラクションを分離した。

多量の銅が存在する場合は Dowex 50 陽イオン交換体で除去した。

コバルトの比色測定には Co のフラクションの一部を o-nitrosoresorcin monomethyl ether で発色さ

methyl ether. The remainder of the Co fraction is deposited on a platinum planchet by electroplating, and the radioactivity is determined.

If necessary, a part or all of these procedures was repeated. The coefficient of variation of $^{60}\text{Co}/\text{Co}$ obtained by the above method was less than 0.05. Details of the method will be published separately.

Measurement of Activity For the measurement of extremely weak activity of the samples, a coincidence type β -ray scintillation spectrometer was utilized. This spectrometer has the following advantages over the conventional low background counter of anticoincidence type. It possesses a better signal to background ratio, stable background counting rate, and the possibility of identifying nuclides. The last property was sometimes very useful in rejecting error due to radioactive contamination of samples during their preparation. The detector consists essentially of a scintillation counter and a window GM tube placed in the hollow of the scintillator, and only the scintillation pulses are recorded by the pulse-height analyzer.

The background of the spectrometer is thus restricted by that of the GM tube, and discrimination against a cosmic ray particle background (muons) is made by pulse height selection. The detailed performance of a detector of this type has already been reported.¹⁷⁻¹⁹

The detector used in this study is shown schematically in Figure 1. The disk-shaped GM tube has an inner diameter of 28 mm and a thickness of 6 mm, and the anode is a looped stainless steel wire of 0.05 mm in diameter. The cathode is a thin Mylar film coated with gold by vacuum evaporation and has a thickness of approximately 0.9 mg/cm². The plastic scintillator (NE 102) is coupled to a 3 inch photomultiplier tube (Du Mont K-1758). The detector is entirely shielded with lead of 10 cm thickness. A block diagram of this apparatus is shown in Figure 2.

The plateau of the GM tube lies between 1000-1200 V with a slope of about 3% per 100 V. At the middle of the plateau, the intrinsic efficiency of the GM tube* for β -rays is approximately 95%. The energy resolution was about 16% at half height for internal conversion electrons from $^{137}\text{m}\text{Ba}$ (0.63 Mev). A pulse height distribution of the background obtained in a 24 hr run is shown in Figure 3 together with that of a ^{60}Co sample from Hiroshima.

せ、残りのフラクシオンは電鍍によって白金板に付着させて放射能を測定した。

必要に応じてこの要領の一部または全部をくり返し行なった。以上の方法で得られた $^{60}\text{Co} / \text{Co}$ の測定誤差は 0.05 以下であった。この方法についての詳細は別の報告で発表する。

放射能の測定 試料における非常に弱い放射能の測定には、同時型 β 線シンチレーション・スペクトロメーターを使用した。このスペクトロメーターは通常の逆同時型の低バックグラウンド計数器に比べて次の利点がある。すなわち、よりよい信号バックグラウンド比を示し、バックグラウンド計数率が安定しており、核種の判別もできる。最後の特性は、試料準備の段階における放射性汚染による誤差を除くために非常に有益であった。検出器はシンチレーション計数器とシンチレーター内に挿入された窓形 GM 管とからなり、シンチレーション波形のみが波高分析器によって記録されている。

したがって、スペクトロメーターのバックグラウンドは GM 管のそれによって制限され、波高選別器によって宇宙線粒子のバックグラウンド(ミュオン)と判別する。この型式の検出器の性能についての詳細はすでに報告した。¹⁷⁻¹⁹

この研究で使用した検出器は図 1 に図解した。円盤状の GM 管の内径は 28 mm、厚さは 6 mm で陽極は径 0.05 mm のステンレス鋼線を輪状にしたものである。陰極は厚さ約 0.9 mg/cm² の薄いマイラー膜に真空内蒸発による金メッキを施したものである。プラスチック製のシンチレーター (NE 102) は 3 インチの光電子増倍管 (Du Mont K-1758) に連結してある。検出器は厚さ 10 cm の鉛で全体が遮蔽されている。図 2 にこの器械の立体線図を示した。

GM 管の水平域(プラトー)は 1000-1200 V の間にあり 100 V につき約 3% の傾斜を有する。水平域の間では β 線に対する GM 管の固有効率* は約 95% である。 $^{137}\text{m}\text{Ba}$ (0.63 Mev) からの内部転換電子の半波高におけるエネルギー分解能は約 16% であった。24 時間の連続運転後のバックグラウンド波高分布と、広島 ^{60}Co 試料の結果をそれぞれ図 3 に示す。

*The intrinsic efficiency was determined as the ratio of the coincidence counting rate to the scintillation counter counting rate for β -rays of ^{90}Sr - ^{90}Y .

固有効率は ^{90}Sr - ^{90}Y の β 線のシンチレーション計数器計数率に対する同時計数率の比と定めた。

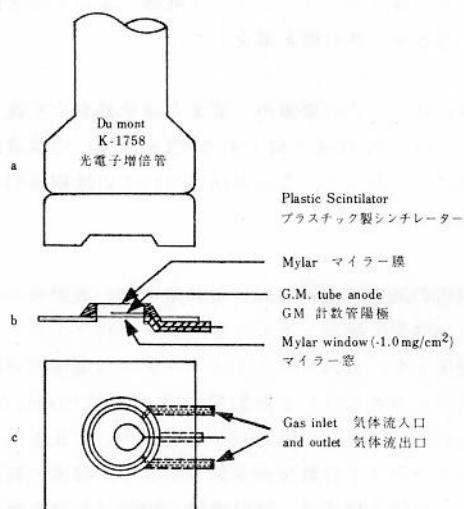


FIGURE 1 COINCIDENCE TYPE β -RAY SPECTROMETER
 図 1 (a) AND (b) ARE SIDE VIEWS OF THE DETECTOR [THE GM TUBE (b) SHOULD BE INSERTED IN THE HOLLOW CUT OF THE SCINTILLATOR OF (a).] (c) IS A TOP VIEW OF THE GM TUBE (b)

同時型 β 線スペクトロメーター (a) と (b) は検出器の側面図. [GM 計数管 (b) はシンチレーター (a) の切り欠き部分に挿入する]. (c) は GM 計数管 (b) の上面図.

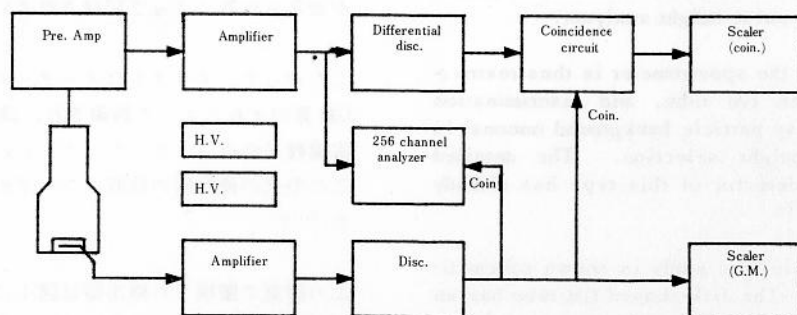


FIGURE 2 BLOCK DIAGRAM OF ELECTRONIC CIRCUIT

図 2 電子回路の立体線図

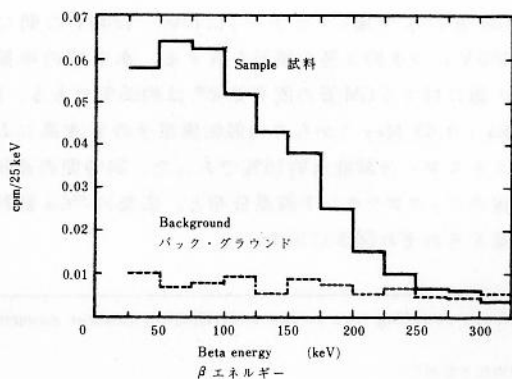


FIGURE 3 PULSE HEIGHT DISTRIBUTION FOR LOW LEVEL ^{60}Co SAMPLE

図 3 微量 ^{60}Co 試料の波高分布

For the measurement of ^{60}Co , the number of counts in the energy interval between 0.025 and 0.25 MeV was used. The detection efficiency for Co deposited on platinum planchets at 5 mm from the window was 12%, and the background counting rate was 0.069 ± 0.002 cpm for the above energy range.

ESTIMATION OF GAMMA DOSE

Method When thermoluminescent material is exposed to ionizing radiation, some of the freed electrons are trapped at lattice imperfections in the crystalline solid. They remain trapped for long periods at ambient temperatures. If the temperature is increased, electrons are thermally released from the traps and light is emitted as they recombine with oppositely charged centers. The total quantity of light emitted as the material is heated can be measured and related to the absorbed dose in the material.

Thermoluminescence of brick and tiles of buildings were utilized to estimate the gamma dose in Hiroshima and Nagasaki for the following reasons:

Ionic crystals in these materials are sensitive to gamma rays, but negligibly so to neutrons;

These materials had been freed from their irradiation history before the bomb by having been heated when they were baked; and

It was ascertained from the owners that the structures were recent (less than 70 years old), and that none of the structures were repaired since the bomb.

The following preliminary experiment for bricks and tiles was performed. First, the linearity between amount of luminescence and gamma ray dose was checked with a $2\text{kCi } ^{60}\text{Co}$ source over a range of 50-50,000 rad, and linearity was confirmed for the above range.

The gamma dose is much greater in Nagasaki when compared with Hiroshima, but even at that the dose in Nagasaki is only about 24,000 rad at the hypocenter. Therefore, there is no problem in the determination of dose.

Second, the dose rate dependency was determined using an X-ray apparatus, up to 100 rad/sec, but no rate dependency could be observed. Although the above dose rate is smaller than in the case of the atomic bombs, it was assumed that the dose rate dependency was negligible in the present study, taking into account the data of Karzmark²⁰ which

^{60}Co の測定には0.025と0.25 MeV との間のエネルギー計数を使用した。窓から5 mm離れた白金台上に付着したCo の検出効率率は12%で、同じエネルギー範囲におけるバックグラウンド計数率は 0.069 ± 0.002 cpmであった。

ガンマ線量の推定

方法 熱ルミネッセンスを出す物質を電離放射線で照射した場合に、遊離された電子の一部はその物体の結晶の格子欠陥で捕獲され、環境気温のもとでは長期間捕獲されたままの状態にある。温度が上昇すると電子はその熱で捕獲状態から解放され、反対の電荷を有する電子と再び結合し、その際に発光する。加熱のさい試料から出る全発光量を測定することによって、その試料内に吸収されていた線量を求めることができる。

広島・長崎における γ 線量の推定には、次の理由で建造物のれんがとタイルの熱ルミネッセンスを使用した。

これらの物質内のイオン結晶は γ 線に敏感であるが、中性子に対しては無視できる程度のものである。

これらの物質は、製作の過程において高温で加熱されるので、それまでの放射線履歴をすでに放出している。

建造物はあまり古くないもの(70年以下のもの)でしかも被爆後は補修されていないことを所有者について確認した。

れんがとタイルについて次の予備的実験を行なった。最初に2 kCi ^{60}Co 線源を使用して、50—50,000 rad 範囲にわたってルミネッセンス量と γ 線量との関係を調べた結果、上述範囲内では直線的関係が存在することが確認された。

長崎における γ 線量は広島のもそれよりもはるかに多いにもかかわらず、爆央の線量は24,000 rad にすぎなかった。したがって線量の測定には何ら問題はない。

第二に線量率依存性についてはX線装置を使用して100 rad / 秒まで測定したが、依存性は認められなかった。上記の線量率は原爆のそれに比べて少ないが、LiFは 5×10^2 から 2×10^8 rad / 秒までの範囲では線量率効果はないとのKarzmarkのデータ²⁰をもとに考えるな

shows LiF has no dose rate effect over the range 5×10^2 to 2×10^8 rad/sec.

It is considered that prompt gamma rays released at the instant of explosion are equal to about 1/100 the amount of delayed gamma rays, and that about 1/2 of the total amount of delayed gamma rays are released during the first one second following the explosion. Therefore, the dose rate in the Nagasaki hypocenter area can be estimated to be about 12,000 rad/sec and, hence, no problem in dosimetry is expected.

Finally, the sensitivity of the samples to neutrons was evaluated by comparing thermoluminescence from two identical samples, one of which was irradiated with neutrons and gamma rays and the other with gamma rays only. The sensitivity per unit air dose to fast and slow neutrons was found to be negligibly small (about 1%) as compared with that to gamma rays within the accuracy of the experiment. In addition, it was concluded that the effect of induced activity produced in the material was also negligible in the dose estimation by thermoluminescence.

Thus, it was concluded that the air dose of gamma rays could be determined by the equation:

$$D_{\gamma\theta} = L \cdot G \cdot C_{\theta} \cdot R \quad \dots\dots\dots (2)$$

where L is the amount of luminescence per unit weight of the sample, G is the gamma dose per unit amount of luminescence, C_{θ} is the correction factor for incident angular distribution of gamma rays, and R is the fading factor.

Collection of Samples Bricks and polished wall tiles attached to concrete buildings satisfying the conditions described were collected from seven places in Hiroshima and from seven places in Nagasaki (See Table 2).

Measurement of Thermoluminescence The amount of thermoluminescence was determined by an apparatus as described below.

The heating device and the block diagram are shown in Figures 4 and 5. The pulverised sample was uniformly spread in a silver crucible inside a furnace. The furnace was so designed as to provide heat uniformly to the sample. The temperature was determined by a thermocouple placed on the surface of the sample. The temperature was increased from room temperature to about 300°C in 3 minutes by supplying a constant voltage to the heater of the

らば、この研究においては線量率依存性は無視してもよい程度であると推定される。

爆発の瞬間に放出された即発 γ 線は、遅発 γ 線の約100分の1に相当し、全遅発 γ 線量の約2分の1は、爆発後最初の1秒内に放出されたものと考えられている。したがって、長崎の爆心地における γ 線量は約12,000 rad / 秒と推定され、線量測定には問題はないと思われる。

最後に、これら試料の中性子に対する感度を調べるため、2個の全く同じ標本について、その一つには中性子と γ 線を照射し、他の標本には γ 線だけを照射して、それから発する熱ルミネッセンスを測定した。単位空気線量に対する速中性子および遅中性子の感度は、 γ 線に比べて実験の精度の範囲内では無視してよいほど小さいもの(約1%)であった。なお、熱ルミネッセンスによる線量推定では、試料内に生成された誘導放射能の効果も無視してよい程度のものであるとの結論に達した。

そこで、次の方程式で γ 線の空気線量は測定できるという結論に達した:

ただし、Lは試料の単位重量に対するルミネッセンスの量、Gはルミネッセンスの単位量に対する γ 線量、 C_{θ} は γ 線の入射角度分布の校正係数、Rはフェーディング係数。

試料の採集 鉄筋コンクリート建造物の壁に使用されていたれんが化粧タイルで、上記の諸条件にかなったものを、広島で7か所と、長崎で7か所から採集した(表2)。

熱ルミネッセンスの測定 熱ルミネッセンスの量は、次に説明する器具で測定した。

加熱装置と、立体線図は図4、5に示す。粉末化した試料は、銀製のつば内に均一の厚さに広げた。電気炉は試料に対して均等に加熱が行なわれるように設計され、熱電対を試料の上において温度の測定を行なった。炉の発熱器に一定の電流を約3分間供給して、室温から約 300°C まで温度を上昇させた。加熱により発生した光は3イン

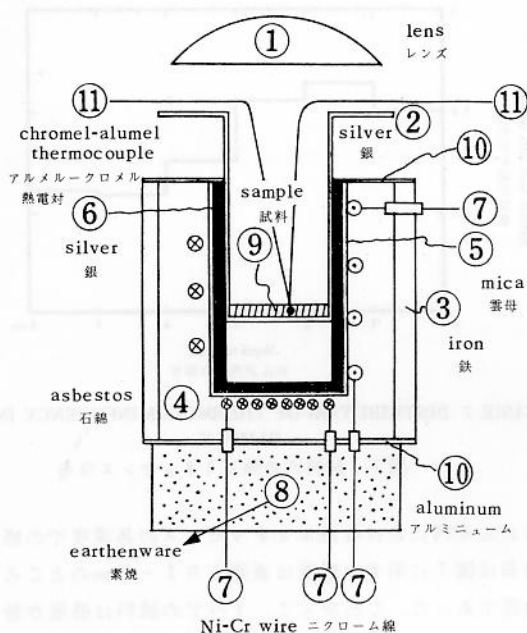


FIGURE 4 FURNACE FOR HEATING THE SAMPLE

図4 試料加熱用炉

furnace. Light emitted from samples during the heating process was focussed on a 2 inch photo-multiplier tube (Toshiba 7309), through a 3 inch condenser lens and a lucite light pipe.

The glow curve was recorded on an X-Y recorder by plotting the photoelectric current on the Y-axis and heating time on the X-axis. A typical glow curve obtained from a sample is shown in Figure 6. As shown here, the shadow area under the glow curves is L.

Determination of Coefficients of Correction and Calibration The gamma rays of the atomic bombs include those of high energy produced by neutron capture as well as those of medium energy produced by fission and fission products.

In order to obtain the values of $C\theta$, R and G in equation (2), a gamma source spectrally equivalent to the atomic bombs was prepared by X-rays produced by a 6MeV Linear Accelerator for a high energy source and gamma rays from ^{60}Co and ^{137}Cs for a medium energy source. Results obtained by use of the equivalent source follow:

Dose Distribution in Sample A $6 \times 10 \times 20$ cm brick was exposed to the equivalent gamma radiation source from the normal direction. The depth

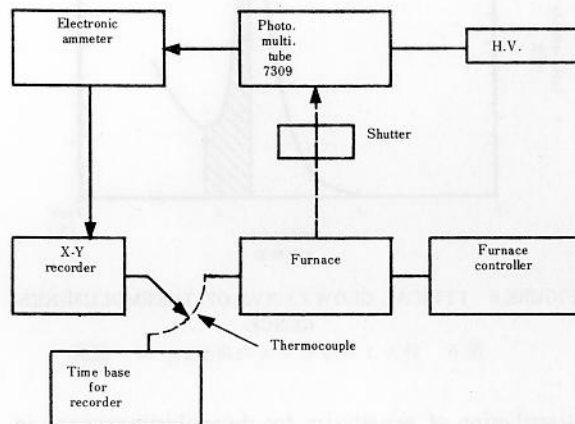


FIGURE 5 BLOCK DIAGRAM FOR THE MEASUREMENT OF THERMOLUMINESCENCE

図5 熱ルミネッセンス測定用装置の立体線図

チ集光レンズとルサイト・ライト・パイプ(アクリル樹脂製光導管)を通して、2インチ光電子増倍管(東芝7309)に集光された。

グロー曲線は光電流をY軸に、加熱時間をX軸にとってX-Y記録計で記録した。ある試料から得た典型的なグロー曲線の一例を図6に示した。ここで示すようにグロー曲線の下の方の斜線の部分がLである。

補正および校正係数の決定 原爆の γ 線は中性子捕獲により得られる高エネルギーのものと、核分裂および核分裂生成物によって得られる中エネルギーのものからなる。

方程式(2)における $C\theta$, R, Gの値を求めるために6 MeV線形加速装置で得られたX線を高エネルギー源とし、 ^{60}Co , ^{137}Cs などからの γ 線を中エネルギー源とし、原爆に相当する γ 線源スペクトルを作った。この原爆に相当する線源を使用して得た結果を次に示す。

試料内における線量の分布 $6 \times 10 \times 20$ cmのれんが1個に対して直角方向から原爆に相当する γ 線を照射した。

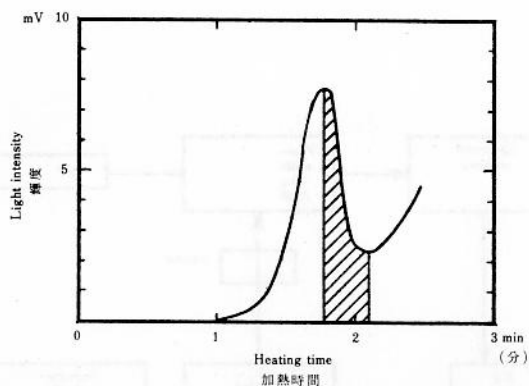


FIGURE 6 TYPICAL GLOW CURVE OF THERMOLUMINESCENCE

図6 熱ルミネッセンスの典型的グロー曲線

distribution of sensitivity for thermoluminescence in the brick was as shown in Figure 7. The sensitivity was maximum at 1-2 cm from the surface. Therefore, all samples were obtained from the volume of maximum sensitivity. Since the G value differs for individual material, each sample was separated into two parts, one for the measurement of the L value and the other for determination of the G value from the luminescence after exposure to a known gamma dose from an equivalent source.

Incident Angular Distribution Bricks were arranged to form a wall sized 60 x 30 cm and the relative sensitivity for the incident angle of gamma rays was determined by irradiating the wall at various angles with the equivalent source of radiation. The result is shown as curve C_ψ in Figure 8 (ψ is the angle between the normal direction to the surface of wall and the beam direction). As gamma ray scatter in air took place resulting in angular distribution C_ψ values were corrected by the globe operation using the data of ORNL-HP on the angular distribution of gamma rays from the atomic bombs. The result is shown as curve C_θ in Figure 8.

Fading Effects The relationship between amount of luminescence and fading time after the irradiation with 1000 rad of ^{60}Co gamma rays is shown in Figure 9. The glow curves (a) immediately after irradiation and (b) 40 days postirradiation are as shown in Figure 10. From these it can be observed that the amount of luminescence in the p peak of Figure 10 decreases markedly from immediately after exposure to 40 days later, but there was no significant change in the q peak. The thermal activation energy of the q peak obtained by changing the heating rate was 1.32 eV. If the frequency factor were 10^{10} , the mean life time would become 6.7×10^5 years by the method of Randall,²¹ showing that the fading during the past 20 years is negligible.

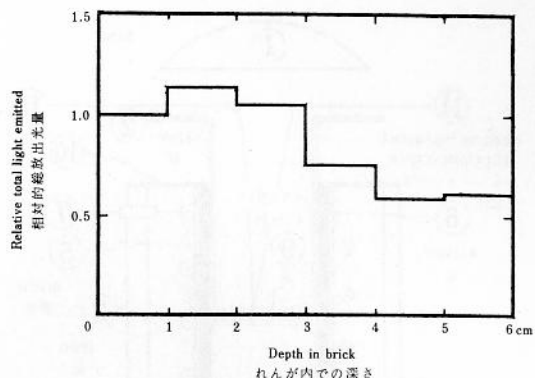


FIGURE 7 DISTRIBUTION OF THERMOLUMINESCENCE IN SAMPLE

図7 試料内の熱ルミネッセンス分布

そのれんが内における熱ルミネッセンスの各深度での感度分布は図7に示す。感度は表面より1-2 cmのところで最高であった。したがって、すべての試料は感度が最高であるところから採集した。各試料でG値が異なるので、試料はそれぞれ二つに分けて、一つはL値の測定に、他の一つは原爆に相当する線源により既知の γ 線量で照射した後に生じたルミネッセンスからG値を測定した。

入射角分布 れんがを積み重ねて60×30cmの壁を作り、これに原爆に相当する線源で各種の角度から照射を行ない、 γ 線の入射角度に対する相対的感度を測定した。その結果は図8の C_ψ 曲線に示した(ψ とは、壁に対して直角の方向と放射線束方向との間の角度である)。 γ 線は空中で散乱し、それによって角度分布が生じたので、原爆からの γ 線の角度分布にORNL-HPのデータを用いてグローブ作業により C_ψ 値を補正した。その結果を図8の曲線 C_θ として示す。

フェーディング(退光)の影響 1000 radの ^{60}Co γ 線照射後のルミネッセンスの量とフェーディングに要する時間との関係を図9に示した。照射直後のグロー曲線(a)と、照射後40日のグロー曲線(b)をそれぞれ図10に示した。これら両曲線から、図10のp頂点のルミネッセンス量は照射直後から40日後までは著しく下降するが、q頂点では有意の変化はない。加熱率を変えることによって得られるq頂点の熱活性化エネルギーは1.32 eVである。度数係数が 10^{10} であった場合、Randallら²¹の方法を用いれば平均寿命は 6.7×10^5 年となり、過去20年間のフェーディングの影響は無視してよい程度のものであることを示す。

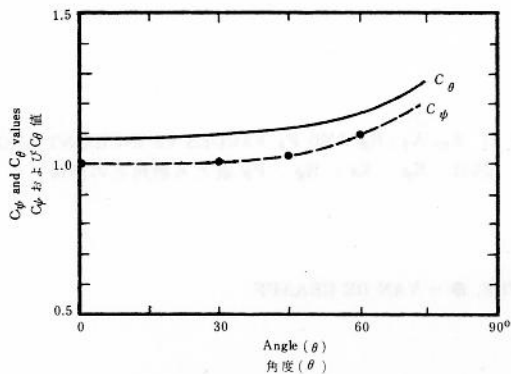


FIGURE 8 C_ψ AND C_θ VALUES VS INCIDENT ANGLE
図8 C_ψ , C_θ 値と入射角との関係

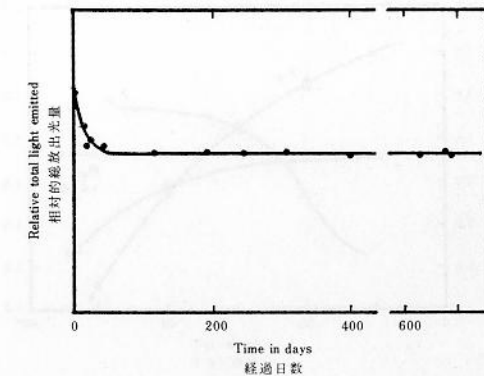
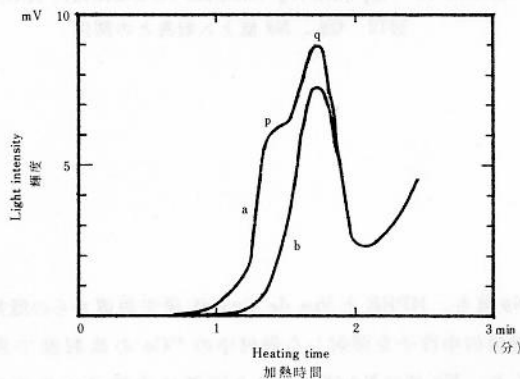


FIGURE 9 LIGHT EMITTED VS ELAPSED TIME AFTER
EXPOSURE TO 1000 rad OF ^{60}Co
図9 1000 rad の ^{60}Co 照射後の経過日数
と放出光量との関係

FIGURE 10 GLOW CURVE IMMEDIATELY AFTER
IRRADIATION AND 40 DAYS
POST-IRRADIATION

図10 照射直後と照射40日後のグロー曲線

EXPERIMENTS AND RESULTS

Holes 1.5 mm in diameter were drilled at various depths from the surface of the concrete block taken from the Bank of Hiroshima building and Co needles of 1 mm in diameter were inserted into them and also placed on the surface. The K_ψ value was determined from ^{60}Co activity after the concrete was irradiated with neutrons from the HPRR at various irradiation angles (ψ), which is the angle formed by the normal direction to the surface of concrete and the direction of incidence of neutrons. The H_ψ value was similarly determined by irradiating with slow neutrons produced by the Van de Graaff neutron generator [Be(d,n)B] reaction provided with paraffine moderator. The values of H_ψ and K_ψ are shown in Figure 11. Since H_ψ remains constant regardless of ψ , $H_\theta = H_\psi$. Application of the globe operation of formula (7a) to K_ψ in Figure 11 will give us K_θ . The value was determined from the activities of iron samples collected in Hiroshima and Nagasaki. These values are shown in Figure 11, and the value of $\sum_\psi f_\theta \phi \psi$ is shown in Table A2.

実験と結果

広島銀行の建物から入手したコンクリート塊の表面からいろいろの深さに直径 1.5 mm の穴をドリルであけ、直径 1 mm のコバルト針をそれらの穴に挿入すると同時にコンクリートの上にも並べた。HPRR で中性子をいろいろの角度 (ψ) からコンクリート面に照射した後、 ^{60}Co の放射能を測定して K_ψ 値を求めた。 ψ とはコンクリート面に直角の方向と入射中性子の方向との間に形成された角度のことである。 H_ψ 値も同様にして、パラフィン減速材を有する Van de Graaff 中性子発生装置を用いて [Be(d,n)B] 反応で発生した遅中性子を照射して測定した。 H_ψ と K_ψ の値は図 11 に示す。 H_ψ は ψ に関係なく一定であるため、 $H_\theta = H_\psi$ となる。図 11 の K_ψ にグローブ作業の方程式 (7a) を適用すると K_θ が得られる。この値は広島と長崎で採集した鉄材試料の放射能を測定して得たものである。これらの値は図 11 に示し、また $\sum_\psi f_\theta \phi \psi$ の値は表 A2 に示す。

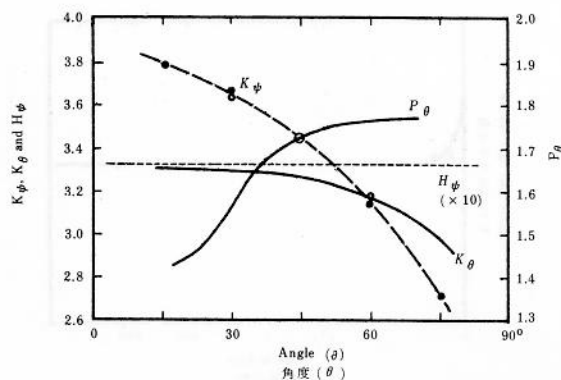


FIGURE 11 K_{ψ} , K_{θ} , H_{ψ} AND P_{θ} VALUES VS INCIDENT ANGLE

図11 K_{ψ} , K_{θ} , H_{ψ} , P_{θ} 値と入射角との関係

○ = HPRR, ● = VAN DE GRAAFF

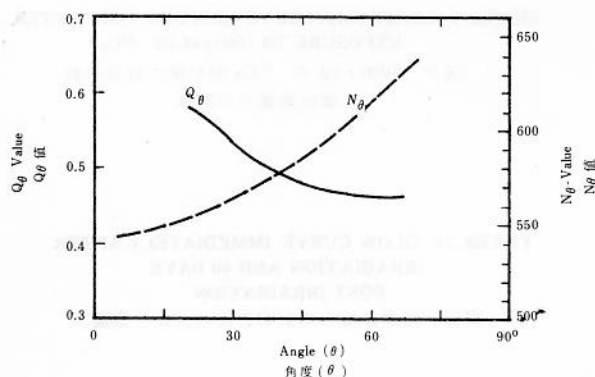


FIGURE 12 Q_{θ} AND N_{θ} VALUES VS INCIDENT ANGLE

図12 Q_{θ} , N_{θ} 値と入射角との関係

The N_{θ} value was also determined from the ^{60}Co activity in iron irradiated with a known dose of neutrons from the HPRR and Van de Graaff, N_{θ} value was corrected for the angular distribution of neutrons by equation (8a) in the same way as described K_{θ} . The Q_{θ} value was obtained from equation (5a) using the values of K_{θ} , H_{θ} and P_{θ} . These results are shown in Figure 12. T is the correction factor for decay of ^{60}Co , considering the half life to be 5.24 years.

The 5th column of Table 1 shows the measured activity of ^{60}Co in iron imbedded in concrete as listed by distance from the hypocenter. The neutron dose at the time of the explosion as calculated by equation (1) with these values and the values of Q_{θ} and N_{θ} in Table 1 considering the half-life of ^{60}Co to be 5.24 years is shown in Table 1 and Figure 13. York's and ORNL values are given for reference. The measured values of thermoluminescence of exposed bricks, etc., by distance from the hypocenter are as shown in Table 2. By applying the values of G, the dose per unit luminescence of the samples, and the values corrected by the Globe Operation (Table A2) we obtain the gamma dose for the various locations. The gamma dose as calculated by equation (2) is shown in Table 2 and Figure 14. York's and ORNL values are given for reference.

N_{θ} 値も, HPRR と Van de Graaff 発生装置からの既知の線量の中性子を照射した鉄材中の ^{60}Co の放射能で求められ, N_{θ} 値は K_{θ} 値の場合と同様に中性子の角度分布の方程式 (8a) で補正された. Q_{θ} 値は K_{θ} , H_{θ} と P_{θ} の値を用いて (5a) 方程式により計算された. その結果は図12に示す. T は半減期を5.24年とした場合の ^{60}Co 崩壊の補正係数である.

表1の5欄は, コンクリート内に埋包された鉄材に含まれている ^{60}Co の放射能を爆心地からの距離別に示したものである. ^{60}Co の半減期を5.24年とした場合に, 原爆爆発の際の中性子線量は, これらの値と表1の Q_{θ} , N_{θ} の値を用いて式(1)で計算した. それを表1の最終欄と図13に示す. York の値とORNL の値を参考のために掲載する. 表2の5欄に被曝れんがの熱ルミネッセンス測定値を爆心地からの距離別に示した. G の値, すなわち表2の6欄に示す単位試料当たりのルミネッセンス量と表A2のグローブ作業による補正值とを適用して各場所別の γ 線量を求めた. 方程式(2)で計算した γ 線量を表2の最終欄と図14に示す. York の値とORNL の値を参考のために掲載する.

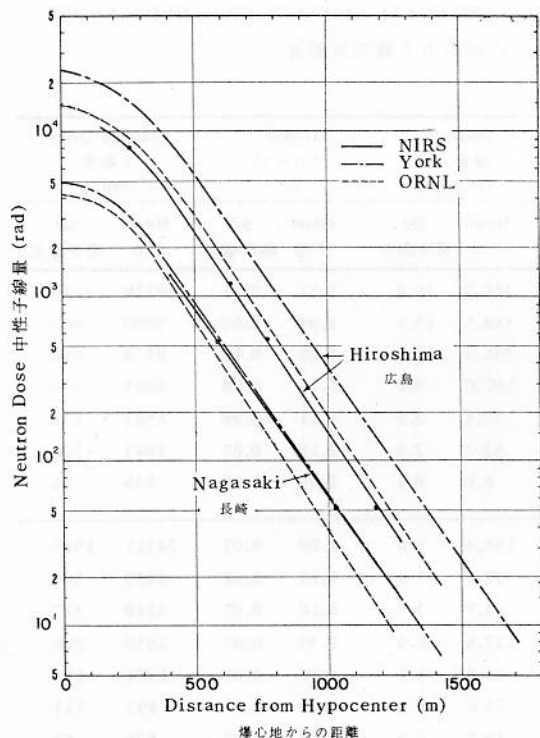


FIGURE 13 AIR DOSE DUE TO NEUTRON IN HIROSHIMA AND NAGASAKI AS A FUNCTION OF HORIZONTAL DISTANCE FROM GROUND ZERO

図13 地上での水平距離の関数としての広島・長崎における中性子による空気線量

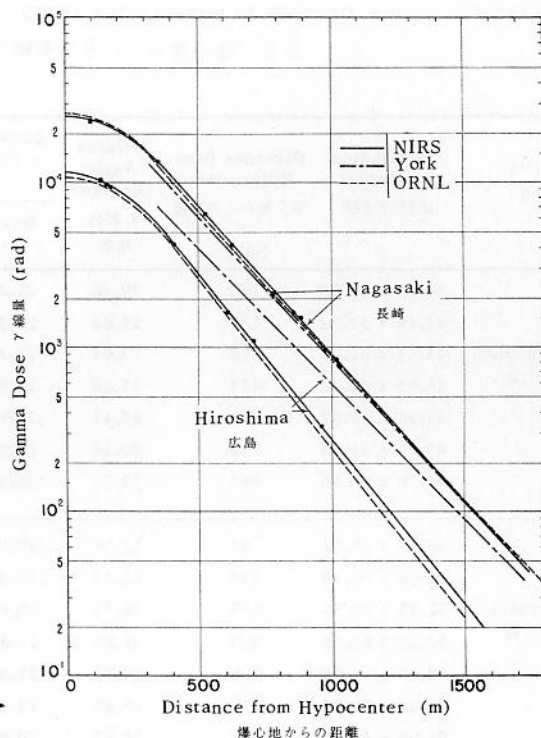


FIGURE 14 AIR DOSE DUE TO γ -RADIATION IN HIROSHIMA AND NAGASAKI AS A FUNCTION OF HORIZONTAL DISTANCE FROM GROUND ZERO

図14 地上での水平距離の関数としての広島・長崎における γ 線による空気線量

TABLE 1 NEUTRON AIR DOSE IN BOTH CITIES AS A FUNCTION OF HORIZONTAL DISTANCE FROM HYPOCENTER

表1 爆心地からの水平距離の関数としての両市の中性子線空気線量

City 市	Coordinates of Iron Samples 鉄材試料の座標	Distance from Hypocenter 爆心地からの距離 (m)	Incident Angle (Degree) 入射角度 (度数)	Activity 放射能 (cpm/mg Co)		Q (rate) 率		N (R per cpm/mg Co) (cpm / mg Co 当たりの R)		Neutron Dose 中性子線量 (rad)	
				Mean 平均	SD 標準偏差	Mean 平均	SD 標準偏差	Mean 平均	SD 標準偏差	Mean 平均	SD 標準偏差
Hiroshima 広島	44.59 x 61.67	260	66.60	2.09	0.170	0.463	0.059	630	32.8	7864	1250
	44.68 x 61.38	640	44.54	0.324	0.0204	0.485	0.044	586	29.3	1188	144
	44.17 x 62.56	779	41.69	0.146	0.0013	0.495	0.059	580	29.6	541	85
	44.54 x 62.99	1180	27.65	0.0124	0.0023	0.560	0.117	562	27.0	51	13
Nagasaki 長崎	94.23 x 65.66	590	42.55	0.140	0.0066	0.480	0.033	593	30.0	514	49
	92.72 x 66.45	1030	31.79	0.0127	0.0010	0.535	0.058	568	27.3	52	8

The coordinates of hypocenter and the height of epicenter in Hiroshima²² are 44.28 x 61.70 and 590 m, and in Nagasaki²³ are 93.63 x 65.95 and 500 m. These coordinates are expressed in terms of the coordinates of the wartime US Army Map of Nagasaki series AMS L902, 138353 dated August 1945 and Hiroshima series AMS L902, 138449 dated September 1946.

広島²²における爆心地の座標、爆央の高さは44.28 x 61.70と590 mであり、長崎²³では93.63 x 65.95と500 mである。これらの座標は戦時中の米陸軍地図の座標で表わしたもので、長崎の地図は昭和20年8月現在のAMS L 902 #138353で、広島地図は昭和21年9月現在のAMS L 902 #138449である。

TABLE 2 GAMMA AIR DOSE IN BOTH CITIES AS A FUNCTION OF HORIZONTAL DISTANCE FROM HYPOCENTER

表2 爆心地からの水平距離の関数としての両市の γ 線空気線量

City 市	Coordinates of Samples 試料の座標	Distance from Hypocenter 爆心地からの距離 (m)	Incident Angle (Degree) 入射角 (度数)	Luminescence ルミネッセンス L*		Dose/L 線量 / L G* (rad)		Globe グローブ C*		Gamma Dose γ 線量 (rad)	
				Mean 平均	SD 標準偏差	Mean 平均	SD 標準偏差	Mean 平均	SD 標準偏差	Mean 平均	SD 標準偏差
Hiroshima 広島	44.19 x 61.80	140	79.46	21.4	1.4	360.9	14.8	1.31	0.11	10118	1130
	44.44 x 61.72	155	11.64	26.3	1.0	348.5	15.7	1.09	0.07	9990	869
	44.13 x 61.63	170	73.44	20.4	1.1	336.4	12.8	1.25	0.10	8578	892
	44.65 x 61.42	415	57.60	18.9	0.9	187.0	9.0	1.15	0.08	4065	390
	44.96 x 61.62	605	45.41	24.0	1.2	59.4	2.9	1.11	0.08	1582	158
	45.07 x 61.65	710	40.46	29.0	2.4	32.7	2.3	1.10	0.07	1043	127
	44.28 x 60.66	965	34.76	38.8	2.3	8.0	0.4	1.09	0.07	338	34
Nagasaki 長崎	93.72 x 65.92	95	12.00	160.0	4.0	139.4	5.6	1.09	0.07	24311	1945
	94.08 x 66.23	520	46.75	213.0	6.0	27.2	1.4	1.11	0.08	6435	595
	92.95 x 66.34	635	38.73	40.8	0.2	94.5	3.7	1.10	0.07	4240	377
	92.68 x 66.08	860	31.69	11.8	1.1	127.4	8.4	1.09	0.07	1639	226
	92.65 x 66.07	875	30.72	21.8	1.3	61.9	3.1	1.09	0.07	1471	150
	94.04 x 65.00	970	27.65	12.0	1.0	71.6	3.8	1.09	0.07	937	111
	94.03 x 64.95	1020	26.57	70.0	1.4	10.8	0.8	1.09	0.07	824	83

*See equation (2) 方程式(2)参照

Note注: The estimates of epicenters are same as Table 1. 爆心の推定値は表1と同じ

DISCUSSION

More than 99% of neutrons from the atomic bomb are released at the instant of explosion (within 10^{-8} sec.), and therefore the dose rate should be very great. Since we are unable to experiment with such a high dose rate, in the present study dose estimation was done on the assumption that there was no dose rate dependency.

Only two iron samples were used for neutron dose estimation in Nagasaki and two or three additional samples will be necessary to determine the dose at various places.

However, from the fact that the neutron dose decreased exponentially beyond 500 m in Hiroshima, the curve was drawn on the assumption that the same would apply to the situation in Nagasaki. There are two buildings located within 1000 m from the hypocenter which are going to be demolished within a year. Iron samples from these will be available.

Although the effect of dose due to induced activity produced in the material itself was negligible as described earlier, the dose due to induced activity

考 察

中性子線の99%以上は原子爆弾炸裂の瞬間(10^{-8} 秒以内)に放出されるので、線量率は非常に大きいはずである。このような高い線量率を用いて実験することはできないので、この研究での線量推定においては、線量率依存性はないものと仮定して行なった。

長崎における中性子線量の推定には2個の鉄材試料のみが使用されたので、他の場所での線量の推定には、さらに2-3個の試料が必要である。

広島では、中性子線量は500 m以遠の地点では指数的に減少するが、長崎においても同じことが起きるものと仮定して曲線を描いた。爆心地から1000m以内の所に1年以内にとり壊される予定になっている建造物が二つあるので、これから鉄材試料を入手することになっている。

前述のように試料内に生じた誘導放射能による影響は無視してもよい程度のものである。しかし、その周囲の材

of the surrounding material may not be negligible and its value is contained within the amount of G . Therefore to get the true value of the primary gamma dose, it is necessary to deduct the value produced by induced radiation from the gamma dose (D_γ) estimated by equation (2). The amount of induced radiation in Hiroshima and Nagasaki is being studied now. However Arakawa's report²⁴ is available concerning the induced radiation of surrounding material. The conclusion of this report is that it is negligible.

The absolute dose for ^{60}Co gamma rays used in correction and calibration was determined within the error of 3%. However, because the absolute dose could not be calculated for gamma rays of higher energy, it was determined by applying the reference chamber of England (Baldwin Farmer) and the calibration factor of National Physical Laboratory (NPL). With regard to neutrons, the spectrum of the atomic bomb explosion could not be known precisely. If the problematic points concerning the spectrum and others can be resolved, it will be possible to express the error of air dose in terms of "accuracy", not "precision".

The coefficient of variation of precision H_θ , P_θ and K_θ are 0.03, 0.1 and 0.05 respectively, and the precision of Q_θ obtained by applying partial differential to equation (5a) is 0.12. The coefficient variation of precision A_θ , N_θ , and T are 0.09, 0.05 and 0.01. The precision of $D_{n\theta}$ ($=A_\theta Q_\theta N_\theta T$) is 0.159. Assuming that the precision of $L \cdot C_\theta R$ and G of formula (2) is 0.06, 0.07, 0.02 and 0.05, respectively, and the precision of gamma dose ($D_{\gamma\theta}$) is 0.106.

While the coefficient of variation of the estimated dose is 0.159, that of the ratio of the estimated Hiroshima dose to the estimated Nagasaki dose is considerably less. This is because components " Q_θ , N_θ and T " of the dose estimation expression:

$$D_{n\theta} = A_\theta \cdot Q_\theta \cdot N_\theta \cdot T$$

will have identical effects upon the dose estimates of the two cities. The coefficient of variation of the ratio between the Hiroshima and Nagasaki dose estimates, due to the estimation of estimator component " A_θ " independently for each city, is about 0.1 of the computed ratio at a given distance from hypocenter. By the same method as mentioned above, the error of the ratio between the two cities in the gamma air dose can be obtained by formula (2) and is approximately 0.07.

料の誘導放射能による線量は G 値の中に含まれており、無視できないほどの量であるかもしれない。したがって、一次 γ 線量の真の値を求めるには、誘導放射線によって生じた値を方程式 (2) で推定した γ 線量 (D_γ) から差し引かなければならない。広島・長崎の誘導放射線の値は現在研究中である。周囲の材料の誘導放射線に関しては Arakawa の報告²⁴ があり、この報告では誘導放射線は無視してさしつかえない程度のものであると結論している。

補正と校正に使用された ^{60}Co γ 線の絶対線量の誤差は 3% 以内で測定できた。しかし、高エネルギーの γ 線の絶対線量は測定できなかったのもので、そのものについては英国の reference chamber (標準電離箱) (Baldwin Farmer) と National Physical Laboratory (NPL) の校正係数を適用して決定した。原爆の中性子のスペクトルは、はっきり知ることはできなかった。もし、スペクトルその他の問題を解消することができれば、空気線量の誤差は「精度」でなく「正確度」で示すことができる。

精度 H_θ , P_θ および K_θ の変動係数はそれぞれ 0.03, 0.1 および 0.05 であり、方程式 (5a) に偏微分を適用して得た Q_θ の精度は 0.12 である。精度 A_θ , N_θ , T の変動係数は 0.09, 0.05 および 0.01 である。方程式 (2) における $L \cdot C_\theta \cdot R$ と G の正確度がそれぞれ 0.06, 0.07, 0.02 および 0.05 であって、 γ 線量 ($D_{\gamma\theta}$) の正確度は 0.106 であるとすれば、 $D_{n\theta}$ ($=A_\theta Q_\theta N_\theta T$) の精度は 0.159 である。

推定線量の変動係数が 0.159 であるのに、広島と長崎の推定線量の長崎の推定線量に対する比率は相当低い。これは下に示した線量推定のための式の $Q_\theta \cdot N_\theta$ および T が両市の推定線量に同じような影響を及ぼすからである：

推定量 A_θ を両市別々に推定したため、広島と長崎の推定線量の間における比率の変動係数は、爆心地からある距離における計算比率の約 0.1 である。この方法で両市の γ 空気線量における比率の差は式 (2) によって求められる。その結果は約 0.07 であった。

Our estimates are not much different from those of York for Nagasaki (see Figure 14) but very different (50% or more) from those for Hiroshima. Therefore, in evaluating biological effects based on York's values, the effects of radiation will have to be reevaluated by a factor of 2 or more for Hiroshima. Our gamma dose values are almost in agreement with the ORNL values, but the neutron dose estimates differ from ORNL estimates by 35%–20% at 500–1500 m in Hiroshima and by 5%–40% at 500–1200 m in Nagasaki. In Nagasaki, a difference in neutron dose estimates does not pose too great a problem because the amount of neutron rays is very much smaller than the amount of gamma rays. However, in Hiroshima, a difference of approximately 30% in neutron dose is equivalent to a difference of more than 10% in terms of total dose.

In the cases which Hurst and Ritchie's empirical equation¹ as a dose distance relationship for gamma rays and neutrons are applied, the estimates of G_0 and L are shown in Table 3. They were estimated by Shohoji by the least square method based on the curves of Figures 15 and 16, and are shown in Table 3. The values obtained by York and ORNL are also given in Table 3. The air doses for the 0–1500 m range obtained by using the coefficient of these values are shown in Figure 17.

長崎については、われわれの得た推定値と York の値との間には大きな差はなかったが(図14)、広島については非常に大きな差があった(50%以上)。したがって、York の値に基づいて生物学的効果を評価するには、広島の放射線効果を2またはそれ以上の因子で再評価しなければならない。われわれが得た γ 線量値はほとんどORNLの値と合致するが、中性子については、広島で500–1500mにおいて35%–20%、長崎では500–1200mにおいて5%–40%ほどORNLの推定値と相違があった。長崎の場合は中性子線量が γ 線量に比べてはるかに少ないので、中性子線量の推定値における誤差は大して問題にならない。しかし広島では、中性子線量の差が約30%あれば、これは全線量で10%の差に相当する。

γ 線と中性子線の線量と距離との関係として Hurst と Ritchie の実験式を適用すると、 G_0 と L の推定値は表3に示すとおりとなる。これらは図15と16の曲線をもとに正法地によって最小2乗法で推定された。その結果を表3に示す。York とORNLの測定値を表3に示す。また、これらの値の係数を用いて得た、0–1500mの間の空気線量を図17に示した。

TABLE 3 THE PARAMETERS OF HURST'S EMPIRICAL FORMULA

表3 Hurst の実験式のパラメーター

City 市	Radiation 放射線の種類	J NIRS 放医研		ORNL		York	
		G_0	L	G_0	L	G_0	L
Hiroshima 広島	Gamma rays γ 線	3.38×10^{10}	256	3.45×10^{10}	250	2.16×10^{10}	346
	Neutrons 中性子線	8.62×10^{10}	193	8.70×10^{10}	198	8.64×10^{10}	218
Nagasaki 長崎	Gamma rays γ 線	3.30×10^{10}	323	2.75×10^{10}	350	2.68×10^{10}	346
	Neutrons 中性子線	1.06×10^{10}	225	1.30×10^{10}	198	1.25×10^{10}	218

Note: Hurst's empirical formula¹ is $D(R) = \frac{G_0 \exp(-R/L)}{R^2}$

注 Hurst の実験式¹

SUMMARY

The air dose outside of buildings due to primary and scattered radiation released by atomic bombs in Hiroshima and Nagasaki was estimated as a function of distance from the hypocenter. Neutron dose was estimated from ^{60}Co activity in iron imbedded in concrete and gamma dose from thermoluminescence in bricks and tiles.

要 約

広島・長崎の原爆から放出された一次放射線や散乱放射線による屋外の空気線量は、爆心からの距離の関数として推定された。中性子線量の推定はコンクリート内の鉄材中の ^{60}Co の放射能により、また、 γ 線量はれんがやタイルの中の熱ルミネッセンスによって推定された。

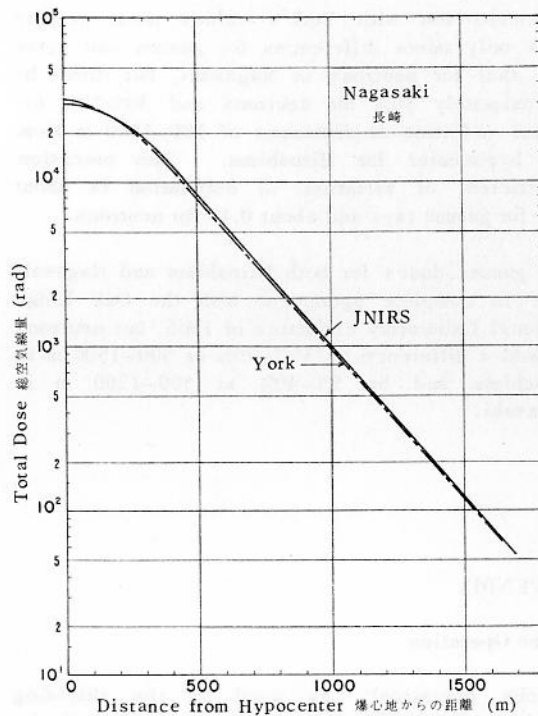
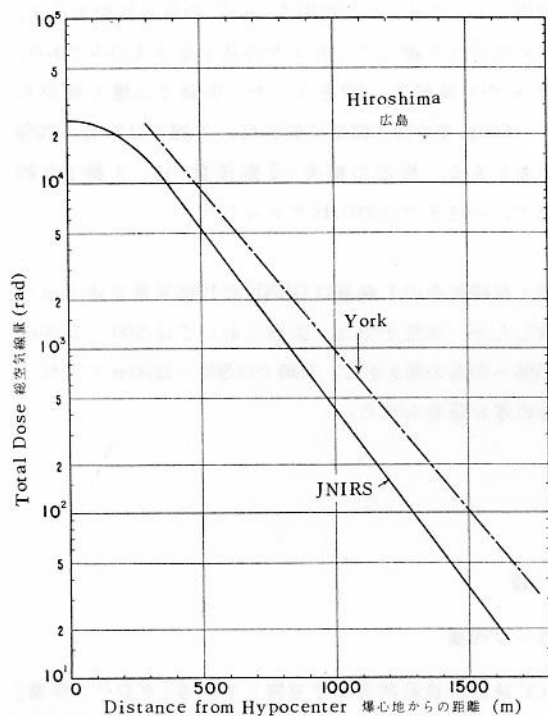


FIGURE 15 TOTAL AIR DOSE IN HIROSHIMA AS A FUNCTION OF HORIZONTAL DISTANCE FROM GROUND ZERO
図15 地上での水平距離の関数としての広島における総空気線量

FIGURE 16 TOTAL AIR DOSE IN NAGASAKI AS A FUNCTION OF HORIZONTAL DISTANCE FROM GROUND ZERO
図16 地上での水平距離の関数としての長崎における総空気線量

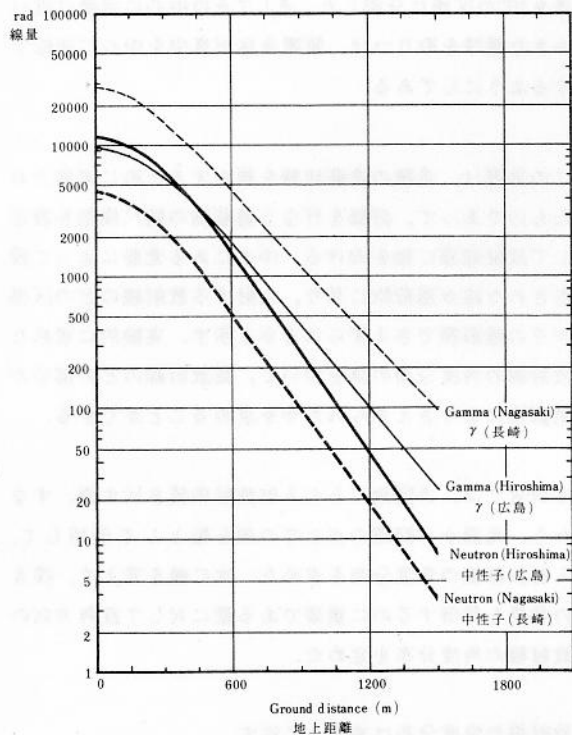


FIGURE 17 AIR DOSE ESTIMATED WITH NEW PARAMETER VALUES

図17 新しいパラメーター値を用いての推定空気線量

In comparison with York's values these results show only minor differences for gamma and agree with that for neutrons in Nagasaki, but differ by approximately 50% for neutrons and 30%-70% for gamma radiation at distances of 500-1500 m from the hypocenter for Hiroshima. The precision (coefficient of variation) of estimation is about 0.11 for gamma rays and about 0.16 for neutrons.

The gamma doses for both Hiroshima and Nagasaki were in complete agreement with the Oak Ridge National Laboratory estimates of 1966, but neutrons showed a difference by 35%-20% at 500-1500 m in Hiroshima and by 5%-40% at 500-1200 m in Nagasaki.

APPENDIX

Globe Operation

"Globe operation", as used by the shielding sections of ABCC, characterizes the use of the spherical coordinate projector. The latter is a sphere (globe) of transparent plastic, on the surface of which are drawn lines, similar to parallels of latitude, dividing the surface into 10° zones; another set of lines, similar to longitude lines, divide each zone into 10° sections; in the center of which is a small bulb approximating a point source; the whole being so mounted that it can be rotated about its center.

It was designed to be used in shielding configurations. The axis is pointed in the direction of the radiation source relative to a scale model of the shield to be evaluated. The lines, projected by the central light, appear on the shield and show which sections of incoming radiation are blocked by the shield. With the use of the values of angular distribution of radiation, experimentally determined, the fraction of total radiation intercepted by the shield could be determined.

In the present case, the tables of values of incoming radiation per section, referred to the axis as a line from the source to the point of interest, were used to determine the angular distribution of incident radiation. A transformation of axes was then made, to determine the angular distribution of radiation referred to the normal to the wall, as this was the significant one for evaluating effects in depth.

The angular distribution of radiation is shown in Table A1.

本研究によって得られた結果を York の値と比較すると、長崎の場合は γ 線にごくわずかの差を認めるのみであり、中性子でも長崎と一致をみたが、広島では爆心地から 500-1500m で中性子線量に約50%, γ 線では30%-70%もの差がある。推定の精度(変動係数)は、 γ 線では約0.11で、中性子では約0.16であった。

広島・長崎両市の γ 線量は ORNL の1966年推定値と全く一致したが、中性子では、広島においては 500-1500m で35%-20%の差を示し、長崎では500-1200m で5%-40%の差が認められた。

付 録

グローブ作業

ABCC 統計部遮蔽調査課で実施している「グローブ作業」の特徴は、球形座標投光器(グローブ)を使用している点にある。投光器は透明なプラスチック製の球から成り、表面には経度になぞらえて縦の線が刻まれ、これにより 10° の区分帯に分割し、緯度になぞらえて横の線で各区分帯を 10° の区画に分割した。そしてその中心に点源に近い小さな電球を取りつけ、装置全体が真中を中心に回転できるようにしてある。

この装置は、各種の遮蔽状態を推定するために考案されたものであって、評価を行なう遮蔽物の縮尺模型を設定して放射線源に軸を向ける。中心にある光源によって投影された線が遮蔽物に写り、入射する放射線のどの区画がその遮蔽物でさえぎられるかを示す。実験的に求めた放射線の角度分布の値を用いて、総放射線のどの部分が遮蔽物によりさえぎられたかを求めることができる。

本研究では、各区画ごとの入射放射線値を示す表、すなわち、光源から問題の点までの線を軸として使用して、入射放射線の角度分布を求めた。次に軸を変えて、深さの効果を評価するのに重要である壁に対して直角方向の放射線の角度分布を定めた。

放射線の角度分布は表 A 1 に示す。

TABLE A1 THE VALUE OF $\psi f \phi$ AT EACH SECTION ESTIMATED BY ORNL-HP表A1 ORNL - HP で推定された各区画の $\psi f \phi$ 値

Zone 区分帯	Neutrons 中性子線		Gamma γ 線	
	Above Horizon 地平線上	Below Horizon 地平線下	Hiroshima 広島	Nagasaki 長崎
0- 10	.2099		.3239	.3796
10- 20	.2474		.3500	.3952
20- 30	.2591		.2774	.2958
30- 40	.2950	.1475	.2478	.2525
40- 50	.3116	.1558	.2176	.2126
50- 60	.3121	.1560	.1963	.1865
60- 70	.2900	.1450	.1806	.1680
70- 80	.2695	.1347	.1681	.1546
80- 90	.2382	.1191	.1536	.1401
90-100	.2058	.1029	.1396	.1266
100-110	.1754	.0877	.1241	.1117
110-120	.1440	.0720	.1065	.0955
120-130	.1197	.0598	.0899	.0803
130-140	.0951	.0475	.0736	.0654
140-150	.0726	.0363	.0570	.0504
150-160	.0542	.0271	.0401	.0353
160-170		.0179	.0237	.0208
170-180		.0058	.0078	.0068

Source: Unpublished memorandum, J. S. Cheka to H. Hayashi; "Evaluation of an Irregularity in the Use of the Spherical Coordinate Projector (Globe), and a Modification of Original Instructions", 24 March 1966.

出 所: J. S. Cheka より林 寿あての未発表のメモ。"球形座標投影器(グローブ)の使用における不完全性の評価および最初の指示の修正"1966年3月24日づけ

Calculation of Q_θ

Let the quantity of Co activated by fast and slow neutrons striking the wall, where the direction of the epicenter is at angle θ to the normal direction of the wall, be, at the surface and at the depth of 8 cm, ${}_oF_\theta$, ${}_8F_\theta$, ${}_oS_\theta$ and ${}_8S_\theta$, respectively, and their ratio be (1a) and (2a):

$${}_8F_\theta / {}_oF_\theta = K_\theta \quad \dots\dots\dots (1a)$$

$${}_8S_\theta / {}_oS_\theta = H_\theta \quad \dots\dots\dots (2a)$$

and let P be the ratio of measured values of Co activity at the surface and at the depth of 8 cm in walls of concrete buildings in Hiroshima and Nagasaki, as actual measurement is possible. Then we have:

$$P_\theta = \frac{{}_oF_\theta + {}_oS_\theta}{{}_8F_\theta + {}_8S_\theta} \quad \dots\dots\dots (3a)$$

Next, the rate of contribution (Q_θ) of fast neutron to the overall activity of ${}^{60}\text{Co}$ 8 cm deep will be:

Q_θ の計算

壁に対して直角の方向と爆央の方向との間の角度を θ とし、壁に当たった速中性子および遅中性子によって放射化された Co の量を壁の表面と深さ 8 cm のところにおいて、それぞれ ${}_oF_\theta$, ${}_8F_\theta$, ${}_oS_\theta$, ${}_8S_\theta$ とするならば、その比率は (1a) および (2a) となる:

広島と長崎の鉄筋コンクリート建造物の壁の表面および深さ 8 cm のところでの ${}^{60}\text{Co}$ 放射能の実測は可能であるので、その測定値の比率を P_θ とすれば:

次に、8 cm の深さにおける ${}^{60}\text{Co}$ の放射能に対する速中性子の寄与 (Q_θ) の比率は次のようになる。

$$Q_{\theta} = \frac{K_{\theta} \cdot 8F_{\theta}}{8F_{\theta} + 8S_{\theta}} \quad \dots\dots\dots (4a)$$

According to (1a), (2a) and (3a), formula (4a) becomes:

$$Q_{\theta} = \frac{(H_{\theta} \cdot P_{\theta} - 1) K_{\theta}}{H_{\theta} - K_{\theta}} \quad \dots\dots\dots (5a)$$

Therefore, once activity A (cpm/mg Co) of ^{60}Co in iron 8 cm deep in concrete building at a certain location is obtained, the following formula will give $D_{n\theta}$ the air dose at the location:

$$D_{n\theta} = A_{\theta} \cdot Q_{\theta} \cdot N_{\theta} \cdot T \quad \dots\dots\dots (6a)$$

Here, T is the correction coefficient for decay of ^{60}Co , whose half-life was considered to be 5.24 years in the present dosimetry study. N_{θ} is neutron dose (rad per cpm/mg Co) corresponding to unit specific activity of ^{60}Co and can be experimentally obtained.

Since the K value was a strong function of incident angle, it had to be considered that, at places several hundred meters from the epicenter of the A-bomb, the angular distribution of radiation at the surface of the building was considerably complicated as the result of the scattering of radiation in the atmosphere. Using the direction to the epicenter as the polar axis, the respective zones were divided into 36 sections and by the globe operation where φ is the angle between the midpoint of a zone and the polar axis, the percentage (f_{φ}) of the total neutron flux entering each section was obtained from the tabulation of the ORNL-HP Group as shown in Table A1. What was necessary in the present study was the sum of the fluxes for each angle (ψ) obtained when the normal direction to the surface of concrete was used as the polar axis. Table A2 shows the flux value ($f_{\theta\varphi\psi}$) of each section with the epicenter in θ direction by the new polar coordinates, as calculated from Table A1. Using this value, K_{θ} in formula (1) will be obtained by the following formula:

$$K_{\theta} = \sum_{\varphi} \sum_{\psi} f_{\theta\varphi\psi} \cdot K_{\psi} \quad \dots\dots\dots (7a)$$

Here, K_{ψ} is the ratio of ^{60}Co activity at the surface of concrete and at the depth of 8cm when the incident angle of fast neutrons is ψ to the normal direction of the surface of concrete. Similarly N_{θ} can be obtained by the following formula from N_{θ} ,

式(1a), (2a), (3a)により, 方程式(4a)は次のようになる。

したがって, ある場所におけるコンクリート建造物の壁面より8cmのところに鉄材中の ^{60}Co の放射能A (cpm / mg. Co) が得られたならば, 次の方程式でその場所における空気線量 ($D_{n\theta}$) が得られる。

Tは ^{60}Co の崩壊に対する補正係数であり, その ^{60}Co の半減期はこの線量測定調査では5.24年であると考えた。 N_{θ} は ^{60}Co の単位比放射能に相当する中性子線量 (cpm / mg. Co 当たりの rad) で実験的に得られる。

K値は入射角度の強力な関数であったので, 爆央から数百メートルの距離における建造物表面の放射線の角度分布は, 大気中に散乱した放射線のためかなり複雑化したと考えねばならない。爆央方向を極軸として各区分帯を36の区画に分割した。グローブ作業で一つの区分帯の中心と極軸の間の角度を φ とした場合, 各区画にはいつてくる全中性子束の百分率(f_{φ})は, 表A1に示すORNL-HPの研究者らから提供された表によって求めた。この研究で必要であったのは, コンクリートの表面に対する直角方向を極軸とした場合に得られた各角度(ψ)に対する線束の合計であった。表A2は, 表A1で計算して得た新極座標に基づいて爆央を θ 方向にした場合の各区画の線束値($f_{\theta\varphi\psi}$)を示す。この値を用いて方程式(1)の K_{θ} は次の式で得られる。

ただし, K_{ψ} はコンクリートの表面に対して直角方向と速中性子の入射角との間の角度が ψ の場合のコンクリート表面と8cmの深さのところに ^{60}Co 放射能の比率である。同じく N_{θ} は N_{θ} から次の式によって得られ

the neutron dose per unit activity from neutron rays from various directions as determined by the globe operation:

$$N_{\theta} = \sum_{\psi} \sum_{\phi} f_{\theta\phi\psi} \cdot N_{\psi} \dots\dots\dots (8a)$$

る。ただし、 N_{ψ} はグローブ作業で求められた各方向からの中性子線からの単位放射能当たりの中性子線量である。

Similarly, H_{θ} can be obtained from H_{ψ} .

同じく H_{θ} も H_{ψ} から得られる。

TABLE A2 THE VALUE OF $\sum_{\psi} f_{\theta\phi\psi}$ CALCULATED BY "GLOBE OPERATION"

表A2 グローブ作業で計算された $\sum_{\psi} f_{\theta\phi\psi}$ の値

θ	ψ								
	5°	15°	25°	35°	45°	55°	65°	75°	85°
30°	2.0	6.9	14.2	17.1	13.9	13.4	12.5	10.7	9.2
45°	1.8	5.5	8.7	14.0	17.8	15.2	13.4	13.0	10.7
60°	1.5	4.6	7.5	10.0	12.1	17.9	19.0	14.6	12.8

θ is the angle between epicenter to normal of wall.

爆央と壁に対する垂線との間の角度

ψ is the angle between each section to normal of wall.

壁に対する垂線と各区画との間の角度

REFERENCES

参考文献

1. RITCHIE RH, HURST GS: Penetration of weapons radiation: Application to the Hiroshima-Nagasaki studies. Health Phys 1:390-404, 1959; ABCC TR 26-59
(核兵器放射線の透過性-広島・長崎調査への応用)
2. AUXIER JA, CHEKA JS, et al: Free-field radiation-dose distributions from the Hiroshima and Nagasaki bombings. Health Phys 12:425-9, 1966
(広島および長崎の原爆投下による無遮蔽放射線分布)
3. 山崎文男, 杉本朝雄: 広島における硫黄中にできた放射性燐 P^{32} について. 原子爆弾災害調査報告集. 東京, 日本学術振興会, 1953年. 第1分冊, pp 18-9
(YAMAZAKI F, SUGIMOTO A: Radioactive phosphorus P^{32} produced in sulfur insulators in Hiroshima. In Collection of Investigation Reports on the Atomic Bomb Disaster. Tokyo, Japan Society for the Promotion of Sciences, 1953. Vol 1)
4. 山崎文男, 杉本朝雄, 木村一治: 広島における人骨中に生じた放射性燐 P^{32} について. 同上. 第1分冊, pp 16-8
(YAMAZAKI F, SUGIMOTO A, KIMURA K: Radioactive P^{32} induced in human bones in Hiroshima. Ibid.)
5. 杉本朝雄: 広島原子爆弾一次中性子数の決定について. 同上. 第1分冊, pp 19-20
(SUGIMOTO A: Determination of the number of primary neutrons of the Hiroshima atomic bomb. Ibid.)
6. 玉木英彦, 浜田達二: 原子爆弾よりのおそい中性子の大气中における拡散と吸収. 同上. 第1分冊, pp 20-4
(TAMAKI H, HAMADA T: Scattering and absorption in the atmosphere of slow neutrons from the atomic bombs. Ibid.)
7. HARRIS PS: Biological effectiveness of nuclear radiation from fission weapons. USAEC LA-1987, 1955
(核分裂兵器からの放射能の生物学的効果)

8. WILSON RR: Nuclear radiation at Hiroshima and Nagasaki. Radiat Res 4:349-59, 1956
(広島・長崎における核放射線)
9. US DEPARTMENT OF DEFENCE: The Effects of Nuclear Weapons. Ed by GLASSTONE S. US Atomic Energy Commission, 1962
(核兵器の効果)
10. 齊藤信房: 広島および長崎の原爆に伴う中性子束の推定. 昭和35年度文部省研究報告集録, 放射線編 - 総合研究. 東京, 日本学術振興会, 1961年. p 142
(SAITO N: Estimation of neutron flux from atomic bombs of Hiroshima and Nagasaki. In *Collection of Investigation Reports on Radiation, Ministry of Education*, 1960. Tokyo, Japan Society for the Promotion of Sciences, 1961)
11. AUXIER JA, CHEKA JS, Oak Ridge National Laboratory: Personal communication
(私信)
12. HIGASHIMURA T, ICHIKAWA Y, SIDEI T: Dosimetry of atomic bomb radiation in Hiroshima by thermoluminescence of roof tiles. Science 139:1284-5, 1963
(屋根かわらの熱ルミネッセンスによる広島原爆放射線の線量測定)
13. AUXIER JA: The health physics research reactor. Health Phys 11:89-93, 1965
(ORNL 保健物理部の研究用原子炉)
14. AUXIER JA, HAYWOOD FF, GILLEY LW: General cooperative studies - Operation BREN. USAEC CEX-62.03, 1963
(全関連調査 - BREN 作戦)
15. AUXIER JA, CHEKA JS, Oak Ridge National Laboratory: Personal communication
(私信)
16. MARUYAMA M, HASHIZUME T: Neutron distribution in concrete. Manuscript in preparation
(コンクリート内の中性子分布)
17. TANAKA E, HIRAMOTO T: Background of coincidence type beta-ray scintillation spectrometer. Nucl Instr Meth 22:292-300, 1963
(同時型 β 線シンチレーションスペクトロメータのバックグラウンド)
18. TANAKA E: A low background beta-ray scintillation spectrometer using a coincidence method with a Geiger counter. Nucl Instr Meth 13:43-9, 1961
(ガイガー計数管との同時法を使用する低バックグラウンド β 線シンチレーションスペクトロメータ)
19. TANAKA E, HIRAMOTO T, MARUYAMA T: Beta-spectroscopy of low level samples by a coincidence type scintillation spectrometer. J Nucl Sci Tech 1:305-10, 1964
(同時型シンチレーションスペクトロメータによる微量放射能試料の β 線スペクトル解析)
20. KARZMARK CJ, WHITE J, FOWLER JF: Lithium fluoride thermoluminescence dosimetry. Phys Med Biol 9:273-86, 1969
(弗化リチウム熱ルミネッセンス線量計測)
21. RANDALL JT, WILKINS MHF: Phosphorescence and electron traps. 1. The study of trap distributions. Proc Roy Soc 184:366, 1945
(りん光と電子トラップ. 1. トラップ分布の研究)
22. ARAKAWA ET, NAGAOKA S: Determination of the burst point and hypocenter of the atomic bomb in Hiroshima. ABCC TR 12-59
(広島における原子爆弾の炸裂点および爆心地点の決定)
23. 長岡省吾: 長崎における原子爆弾炸裂点ならびに爆心点決定について. 第2回原子爆弾後障害研究会講演集. 長崎原子爆弾後障害研究会, 1962年. pp 12-4
(NAGAOKA S: Determination of the burst point and hypocenter of the atomic bomb, Nagasaki. The 2nd Late A-bomb Effects Research Meeting Papers. Nagasaki, Research Society for the Late Effects of the Atomic Bombs, 1962)
24. ARAKAWA ET: Residual radiation in Hiroshima and Nagasaki. ABCC TR 2-62
(広島および長崎における残留放射能)