

**RESIDUAL RADIATION IN HIROSHIMA AND NAGASAKI**

広島および長崎における残留放射能

EDWARD T. ARAKAWA



**THE ABCC TECHNICAL REPORT SERIES**  
**A B C C 業績報告集**

The ABCC Technical Reports provide a focal reference for the work of the Atomic Bomb Casualty Commission. They provide the authorized bilingual statements required to meet the needs of both Japanese and American components of the staff, consultants, advisory councils, and affiliated governmental and private organizations. The reports are designed to facilitate discussion of work in progress preparatory to publication, to record the results of studies of limited interest unsuitable for publication, to furnish data of general reference value, and to register the finished work of the Commission. As they are not for bibliographic reference, copies of Technical Reports are numbered and distribution is limited to the staff of the Commission and to allied scientific groups.

この業績報告書は、A B C Cの今後の活動に対して重点的の参考資料を提供しようとするものであって、A B C C職員・顧問・協議会・政府及び民間の関係諸団体等の要求に応ずるための記録である。これは、実施中で未発表の研究の検討に役立たせ、学問的に興味が限定せられていて発表に適しない研究の成果を収録し、或は広く参考になるような資料を提供し、又A B C Cにおいて完成せられた業績を記録するために計画されたものである。論文は文献としての引用を目的とするものではないから、この業績報告書各冊には一連番号を付してA B C C職員及び関係方面にのみ配布する。

RESIDUAL RADIATION IN HIROSHIMA AND NAGASAKI

広島および長崎における残留放射能

EDWARD T. ARAKAWA

Department of Statistics

統計部



ATOMIC BOMB CASUALTY COMMISSION  
Hiroshima - Nagasaki, Japan

A Research Agency of the  
U.S. NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES - NATIONAL RESEARCH COUNCIL  
under a grant from  
U.S. ATOMIC ENERGY COMMISSION  
administered in cooperation with the  
JAPANESE NATIONAL INSTITUTE OF HEALTH OF THE MINISTRY OF HEALTH & WELFARE

原爆傷害調査委員会  
広島 - 長崎

厚生省国立予防衛生研究所  
と共同運営される

米国学士院 - 学術会議の在日調査研究機関  
(米国原子力委員会研究費に依る)

## ACKNOWLEDGMENTS

### 感謝の言葉

The author would like to emphasize the fact that this report summarizes the combined efforts of many individuals. In particular, he would like to thank G.W. Leddicote and J. Emery of the Analytical Chemistry Division of Oak Ridge National Laboratory for performing the activation analysis of the samples, F.W. Sanders for helpful discussions and some of the calculations, R.H. Ritchie for his kind suggestion on the method of calculation, H. Yamada and K. Noble at the Atomic Bomb Casualty Commission in Hiroshima for the survey on escape routes of survivors and numerous discussions on the matter, Drs. Borg and Conard at Brookhaven National Laboratory for their independent assessment of the soil samples, and finally to J.A. Auxier who has offered constant encouragement.

この報告は多数の人々の努力の成果を要約したものであることを著者は強調したい。特に標本における放射能分析についてはOak Ridge National Laboratory 分析化学課の G.W. Leddicote および J. Emery の両氏に、有益な意見の開陳と計数整理面の助力を得たことについては F.W. Sanders 氏に、計数整理の方法について懇篤な示唆を与えられたことについては R.H. Ritchie 氏に、被爆者の避難経路の調査およびこれに関する種々の意見の開陳を得たことについては山田広明 および K. Noble の両氏に、土壌標本についてそれぞれ独自の鑑定を得たことについては Brookhaven National Laboratory の Dr. Borg および Dr. Conard に、さらに絶えず激励の手を差し伸べられた J.A. Auxier 氏に、深甚な謝意を表すものである。

TABLE OF CONTENTS  
目次

	<i>Page</i>
LIST OF TABLES AND FIGURES 插入圖表一覽表	1
INTRODUCTION 緒言	1
FISSION PRODUCT FALLOUT 降下核分裂生成物	2
NEUTRON-INDUCED ACTIVITY 中性子誘發放射能	3
METHOD I 第I法	6
METHOD II 第II法	11
METHOD III 第III法	13
SUMMARY 總括	16
REFERENCES 參考文獻	19

LIST OF TABLES AND FIGURES  
挿入図表一覧表

	Page
Table 1. Principal gamma emitting isotopes and radioactivity produced in Hiroshima soil by thermal neutrons 表	8
熱中性子によって広島に於ける土壌中に発生したγ線を放出する主要同位元素およびその放射能	
2. Reactor induced radioactivity in Hiroshima and Nagasaki soil and tile samples 広島および長崎の土壌および瓦の標本における原子炉誘発放射能	14
3. Radioactivity of long half life isotopes induced in Hiroshima and Nagasaki soil and tile samples 広島および長崎の土壌および瓦の標本に誘発された半減期の長い同位元素の放射能	15
Figure 1. Isodose contour evaluated in milliroentgens per hour as of October 3-7, 1945 図	4
1945年10月3 - 7日現在の放射線の等線量曲線 (mr /hr)	
2. Accumulated total dose of radiation from neutron - induced Na <sup>26</sup> and Mn <sup>56</sup> in Hiroshima soil 広島に於ける土壌中の中性子誘発放射性元素Na <sup>26</sup> およびMn <sup>56</sup> 放出放射線の積算総線量	10
3. Residual radiation at hypocenter area - Hiroshima 広島に於ける爆心地における残留放射能	15
4. Escape routes of 100 survivors - Hiroshima 広島に於ける被爆生存者100名の脱出路	18

## RESIDUAL RADIATION IN HIROSHIMA AND NAGASAKI

### 広島および長崎における残留放射能

#### INTRODUCTION

The analyses of medical data on the survivors of the Hiroshima and Nagasaki atomic bombings have been mainly in terms of the immediate radiation - the gamma and neutrons released at the time of detonation. For want of a better index of radiation exposure, the medical data frequently have been analyzed as a function of distance from the hypocenter. A program now is being carried out to determine an accurate exposure dose for each survivor.<sup>1,2</sup>

A tacit assumption often has been made that negligible radiation exposure resulted from fallout of fission products and from neutron-induced radioactivity. However, the question of biological disturbances from exposure to residual radiation periodically reappears in the Hiroshima and Nagasaki studies of the Atomic Bomb Casualty Commission (ABCC). The consensus has been that the level of radiation a day or so after the event was not sufficient to cause biological damage to persons who entered the cities for rescue work, but no definite substantiation of this opinion is available. Therefore, this study of the two cities is intended to assess the range of possible radiation exposure after the detonations. From the results it is hoped an upper limit for residual radiation may be set.

In discussion of residual radiation, two sources must be considered:

Fission product fallout

Neutron-induced radioactivity

#### 緒言

広島および長崎の原子爆弾被爆生存者に関する医学的資料の解析は、主として直接放射線、すなわち爆発時に放出されたγ線および中性子を中心に行なわれてきた。照射線量を示す適切な指標がなかったため、医学的資料はしばしば爆心地からの距離の関数として解析された。現在は各被爆者について正確な照射線量を求める計画が進行中である。<sup>1,2</sup>

従来、降下核分裂生成物並びに中性子誘発放射能による照射量は無視して差支えない程度とする仮定が、しばしば暗黙のうちにに行なわれてきた。しかしながら、残留放射能による生物学的障害は広島および長崎の原爆傷害調査委員会(ABCC)の研究において時折繰り返り問題とされている。爆発後1日余を経過してからの放射線量は救助作業のため入市した人々に生物学的障害を与えるほど高くなかったと一般に考えられてきたが、この見解については別に確かな裏付けがあるわけではない。そこで、今回の両市の調査では爆発後に受け得ると考えられる放射線量の範囲を明らかにすることに目的をおいた。この調査によって残留放射能の上限が示されることを希望する。

残留放射能の問題を考えるに当たっては、2つの放射線源、すなわち

降下核分裂生成物

中性子誘発放射能

を考慮に入れなければならない。

Fission product fallout refers to the isotopes produced during the fission process from the splitting of the uranium or plutonium atoms in the nuclear weapon and from the vaporized materials used in the casing of the weapon made radioactive by the neutrons. In an air blast such as the Nagasaki and Hiroshima detonations, most of these products fall to earth in the form of tiny particulates, many of which are highly radioactive.<sup>3</sup>

Neutron-induced activity refers to the activation of matter by neutrons. In Hiroshima and Nagasaki, the neutrons released in the fission process reacted with surface substances such as soil, building materials, tile and stone. Reaction with certain elements in these materials produced radioactive isotopes, many of which decay by the emission of gamma rays.

## FISSION PRODUCT FALLOUT

The magnitude of fallout from the Hiroshima and Nagasaki bombs can be assessed relatively accurately from the measurements made in the two cities after the detonations. The fission product fallout occurred predominantly in the Koi-Takasu area of Hiroshima and in the Nishiyama district of Nagasaki, both located approximately 3000 meters from the hypocenter.<sup>4</sup> Because at this distance neutron flux was negligible these areas had no other source of radioactivity.<sup>1</sup> Radioactivity in the hypocenter areas was mainly neutron-induced with minimal fission product fallout as will be shown in the next section. The decay of fission products as a function of time is known to vary approximately as  $t^{-1.2}$  where  $t$  is time after the event. It may be argued that effects of weathering might have invalidated the  $t^{-1.2}$  decay law in Hiroshima since the city was swept by a typhoon on September 16-17, 1945. However, measurements made before this date correlate very well with subsequent measurements.<sup>4-13</sup> A complete survey of

降下核分裂生成物とは、核兵器におけるウランニウムまたはプルトニウム原子の分裂過程、および中性子によって放射能を得た核兵器被覆物が蒸発する際に発生する放射性同位元素をいう。長崎並びに広島のような大気中の爆発では、これら生成物は大部分が微粒子となって地上に降下し、その多くは高度の放射能を有する。<sup>3</sup>

中性子誘発放射能とは中性子によって物質に誘発された放射能をいう。広島および長崎においては、土壌、建築材料、屋根瓦、石などの地表物質に、核分裂反応において放出された中性子が作用した。この反応によってこれら物質中のある種元素に放射性同位元素が生まれた。これはその多くが $\gamma$ 線の放出により減衰した。

## 降下核分裂生成物

広島および長崎の原爆による降下物の量は、爆発後に両市で行なわれた線量測定により比較的正確に推定することができる。降下核分裂生成物は、広島では己斐-高須地区、長崎では西山地区ともに爆心地から約3000m離れた地域に特に多く見られた。<sup>4</sup> この距離では中性子束は無視して差支えないから、<sup>1</sup> 他の放射能発生源はこの地域には存在しない。爆心地区の放射能は次章にも示す通り主として中性子に誘発されたものから成っており、これに極めて微量の核分裂生成物が加わったものである。時間の関数としてみた核分裂生成物の減衰は爆発後の経過時間を  $t$  とすれば、ほぼ  $t^{-1.2}$  減衰の法則に従うことが判明している。広島では1945年9月16-17日に台風が襲来しているから、この気象上の影響により  $t^{-1.2}$  減衰の法則は無効になっているといえるかも知れないが、台風襲来前の計測値とその後の計測値の間には十分に相関関係が認められる。<sup>4-13</sup> 1945年10月3-7日には



the residual radiation in the two cities was made by a team of the United States and Japanese scientists on October 3-7, 1945.<sup>4</sup> These measurements were made with Geiger counters which had been calibrated with radium standards. According to Figure 1 radiation levels up to .045 mr/hr were recorded on October 3-7, 1945, as a result of fallout in the Koi-Takasu area of Hiroshima. From one hour after the burst, for persons in the open, this integrates to an infinity dose of around 1.4 r using the  $t^{-1.2}$  decay law. This dose, although not negligible, probably is not enough to cause biological disturbances.

The fallout in the Nishiyama area of Nagasaki was much higher, registering 1.0 mr/hr on October 3-7, 1945 at locations of maximum intensity. A person standing in such a location from one hour after the detonation to infinite time would be subjected to a radiation dose of approximately 30 r. More realistically, however, persons would not remain stationary but would move to locations with lower intensity and would also enter their homes during the night. On the assumption that this individual spent one third of each day at the position of maximum intensity, and using an attenuation factor of 2 for house shielding the total dose would be decreased by a factor of 4. Therefore, a realistic estimate of the exposure from fallout at Nishiyama would be at most 10 r, which again is not considered sufficient to cause obvious biological disturbances but might possibly have affected the blood picture to a small degree.

#### NEUTRON-INDUCED ACTIVITY

The magnitude of neutron-induced radiation may be estimated by several methods. The range of results obtained by these various methods illustrates the uncertainty involved in any determination of the neutron-induced activity. The results, however, indicate that the highest dose

両市において日米科学者合同調査班による詳細な調査が行なわれた。<sup>4</sup> 計測はラジウムで標準化した Geiger 計数管を用いて行なわれた。図 1 によれば、1945年10月3-7日の調査では広島の高須地区の降下物による放射線量は最高.045mr/hr が記録されている。 $t^{-1.2}$  減衰の法則を適用して爆発の1時間後から無限時まで積算すれば、戸外被爆者の場合これは約 1.4 r の線量となる。この線量はもちろん無視することはできないが、生物学的障害を起すに足る量とはいえないであろう。

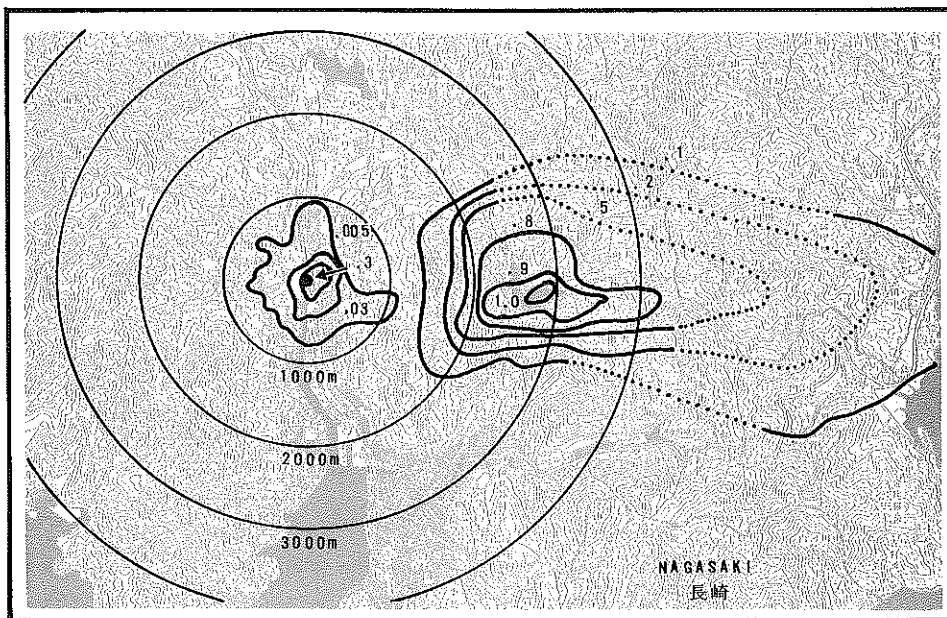
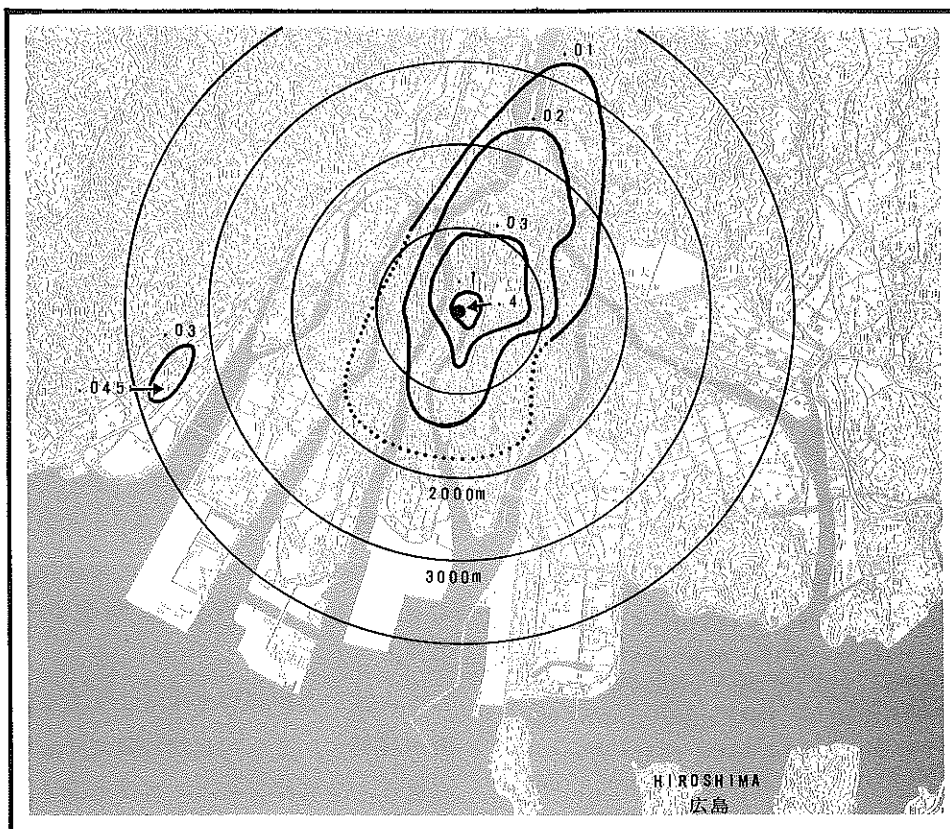
長崎の西山地区における降下量はこれに比べてはるかに多く、1945年10月3-7日の調査では最高の場所では 1.0mr/hr を記録した。このような場所に爆発1時間後から無限時までいた人があるとすれば、その人は総線量約 30 r の照射を受けることになる。しかしながら、実際問題として人は1カ所に静止することなく、低線量の場所へ移動し、さらに夜間は帰宅するであろう。この場合、最高線量を示す場所で過す時間を1日の3分の1とし、屋内遮蔽による減弱係数2を用いて計算すれば、この人が受ける総照射線量は上記の4分の1に減るであろう。従って、西山地区で受けた照射線量は実際上多く見積っても10r程度であって、これもまた明確な生物学的障害を起すに足る量とは考えられない。恐らく血液像に軽度の影響が現われた程度であろうと思われる。

#### 中性子誘発放射能

中性子誘発放射能の強さは数種の方法によって推定することができる。これらの方法を用いて得た結果は、どの方法によっても中性子誘発放射能を正確に推定することは不可能であることを示す。しかしながら、同じくこの結果によれば、い

FIGURE 1 ISODOSE CONTOUR EVALUATED IN MILLIROENTGENS PER HOUR  
AS OF OCTOBER 3-7, 1945

1945年10月3-7日現在の放射線の等線量曲線 (mr/hr)



yielded by any of the methods would not have subjected a large number of persons to significant doses of radiation. The method which is considered to give the most reliable result yields doses which definitely can be considered biologically insignificant.

Method I used known thermal neutron activation cross sections and the chemical analysis of granite, which is the underlying structure of Hiroshima, to determine activation produced per gram of soil. This activity was converted to exposure dose in air by a previously described method.<sup>3</sup> The use of granite was dictated by the fact that no chemical analysis of the soil was available during this particular phase of the study. This calculation yielded an infinity dose of 183 r in Hiroshima.

Method II utilized the above results for the activation per gram of soil and the exposure dose in air was calculated by direct integration using air dose conversions from known decay schemes of the radioactive isotopes. The infinity dose in this case was found to be 72 r in Hiroshima.

In Method III the activity was determined by irradiating samples of soil from Hiroshima and Nagasaki in a nuclear reactor. These activity values were then used to calculate exposure dose by direct integration, as in Method II, leading to an infinity dose of 24 r in Hiroshima and 4 r in Nagasaki.

Procedures in Method IV were performed at the Brookhaven National Laboratory by Borg and Conard. The amounts of stable Na and Mn in the same soil samples used in Method III were determined by neutron activation. From this result the induced activity was calculated using data obtained at nuclear weapons tests which have been reported in terms of chemical composition of the soil and yield of the weapon in kilotons. The integrated dose at the hypocenter in Hiroshima from one hour

ずれの方法の示す最高線量も多数の人に有意の放射線照射をもたらすことはないであろう。さらに結果が最も信頼できると思われる方法が示す線量は、生物学的に明らかに有意性を持たないと考えられる。

第I法では、既知の熱中性子断面積、並びに広島地盤を構成している花崗岩の化学分析の結果を利用し、土壌1g当りの誘発放射能を推定した。この放射能は先例の示す方法<sup>3</sup>に従って空中の放射線量に換算された。花崗岩を利用した理由は、この研究では土壌の化学分析ができなかったからである。その結果、広島においては爆発時より無限時までの積算線量は183 rと推定された。

第II法では、上記土壌1g当りの誘発放射能推定値に基づき、既知の放射性同位元素崩壊率を利用した空中線量換算法を用い、直接積算を行なって空中の放射線量を算出した。この場合、広島における爆発時より無限時までの積算線量は72 rと計算された。

第III法では、まず広島および長崎の土壌標本を原子炉照射した後その放射能を測定した。ついでこの測定値に基づいて第II法と同様直接積算による線量を算出したが、その結果爆発時より無限時までの積算線量は広島では24 r、長崎では4 rとなった。

第IV法は Brookhaven National Laboratory の Borg 並びに Conard により実施された。中性子による放射能誘発の方法を用いて第III法で使用した土壌中の安定した Na および Mn の量を測定した。この測定値を基礎にして、各種核兵器実験報告に現われた土壌中の化学的成分およびその核兵器の重量に対応する産生量に関する資料を参考とし、誘発放射能が算定された。爆発1時間後から

after the detonation to infinite time was calculated to be 183 r, assuming a relatively high external neutron yield for the weapon.

The results obtained by Method IV compare well with Method I. This is to be expected since the important factor in these determinations, the conversion of activity in the soil to exposure dose in air, was essentially the same for both methods.

The results obtained by Method III are considered to be the most reliable of all the four determinations since all calculations were direct, requiring no extrapolation from other data. The uncertainty of the neutron flux, of course, was a common factor in all four methods.

## METHOD I

The magnitude of radiation induced in any sample of material when exposed to a source of neutrons is dependent upon four factors:

The number of neutrons available - the neutron flux  $F$ ;

The total number  $N$  of a particular atom present to be irradiated;

The probability of this reaction occurring and leading to the radioisotope in question - the reaction cross section  $\sigma$ ;

The rate at which this particular radioisotope decays with time, commonly specified as the time required for half of the original number of atoms to decay, or the half life  $T_{1/2}$

For a particular radioisotope  $A$  the activity induced by the Hiroshima and Nagasaki nuclear detonations may be calculated using the simple formula,

$$A = F \sigma N \frac{.693}{T_{1/2}}$$

無限時に至る広島と長崎の爆心地における積算放射線量は、この核兵器としては比較的高い中性子による放射能を想定して、183 rと算定された。

第IV法による算定の結果は第I法による結果と非常によく一致している。これはこの2つの算定方法における重要因子、すなわち土壌中の放射能を空中の放射線量に換算する点がほとんど同じであることから予期されていたところである。

第III法による算定は一切の計算が他の資料による外挿を要することなく直接に行なわれるから、上記4つの算定方法中最も結果が信頼できると考えられる。中性子束の不確実性は、もちろん、これら4つの方法のいずれにも共通であった。

## 第I法

中性子発生源に曝された場合に物質に現われる誘発放射線の強さは、次の4つの要因によって決定される。

中性子の個数、すなわち中性子束  $F$

放射線照射を受ける特定原子の総数  $N$

反応が現われて当該同位元素が形成される可能性、すなわち反応断面積  $\sigma$

この特定同位元素が時間の経過とともに示す減衰率、一般に最初に存在した原子の半数が崩壊するに要する時間、すなわち半減期  $T_{1/2}$

広島および長崎の核爆発によって特定同位元素  $A$  に現われた誘発放射能は、上記4つの要因、すなわち中性子束、反応断面積、その元素の原子の個数、並びに半減期がわかれば、

if these four factors, neutron flux, reaction cross section, number of atoms of a particular element, and half life are known. The reaction cross section and half life are known very accurately for many isotopes from laboratory experiments. The number of atoms present must be determined in this instance for the Hiroshima and Nagasaki soil and roof tile samples, which were the chief constituents of the ground after the detonations.

The largest uncertainty in these calculations is F, the neutron flux. The thermal neutron flux in the soil at the hypocenter in Hiroshima (606 meters from the source of radiation) is presumed to be  $6 \times 10^{12}$  n/cm<sup>2</sup>. This was derived as follows.

The neutron dose at the hypocenter as estimated by York was  $2.4 \times 10^4$  r. The neutron flux spectrum and dose from a typical detonation in the Plumbbob Operation, Nevada, 1957, have been published.<sup>1</sup> The ratio of thermal neutron flux to total neutron dose is found to be  $2.5 \times 10^8$  n/cm<sup>2</sup> per r. Therefore, the thermal neutron flux in air at the hypocenter is:

$$\left( \frac{2.5 \times 10^8 \text{ n/cm}^2}{\text{r}} \right) (2.4 \times 10^4 \text{ r}) = 6 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2$$

It is assumed that the equilibrium neutron spectrum in air exists in the same proportion in the soil also. There are indications, however, from measurements made in the concrete shield around nuclear reactors that buildup of thermal neutrons should occur in the soil due to thermalization of fast neutrons.<sup>14</sup> It is possible, therefore, that the thermal flux used in this calculation may be underestimated by a factor of 2 or 3. However, the thermal neutron flux calculated using measurements of radioactive P<sup>32</sup> induced in human bones from the reaction P<sup>31</sup>(n,γ)P<sup>32</sup> is approximately  $10^{12}$  n/cm<sup>2</sup> at the hypocenter.<sup>15</sup> Traces of cobalt-

という単純な式を用いて算出することができる。研究室における実験の結果、多くの同位元素の反応断面積並びに半減期は現在極めて正確に判明している。従ってこの場合は、核爆発後の主要地表構成物である広島および長崎の土壌並びに屋根瓦について原子の個数を決定する必要がある。

この計算に当って最も不確実なのは中性子束 F である。広島 of 爆心地 (放射線源から 606 m) における土壌中の熱中性子束は  $6 \times 10^{12}$  n/cm<sup>2</sup> と推定されたが、これは次のような方法で算定された。

York の推定によれば爆心地の中性子線量は  $2.4 \times 10^4$  r である。1957 年ネバダ州において Plumbbob 実験に供せられた代表的核兵器における中性子束スペクトル並びに線量が公表されているが、<sup>1</sup> これによれば熱中性子束と中性子総線量の比は 1 r 当り  $2.5 \times 10^8$  n/cm<sup>2</sup> であった。従って、爆心地における空中の熱中性子束は次のようになる。

空中の平衡中性子スペクトルは土壌中でも同様の割合で存在すると考えられる。ただし、原子炉の周囲に回らしたコンクリート遮蔽物を測定した結果によれば、土壌中の熱中性子は速中性子の熱中性子化により増強すると思われる。<sup>14</sup> 従って今回の算定に用いられた熱束は 2 ないし 3 倍だけ低く見積られているかも知れない。しかしながら P<sup>31</sup>(n,γ)P<sup>32</sup> の反応によって人骨に誘発された放射性燐 P<sup>32</sup> の測定値を用いて計算した爆心地における熱中性子束は約  $10^{12}$  n/cm<sup>2</sup> であり、<sup>15</sup> 広

60 found in a metal drain pipe on the Hiroshima Exposition Hall also show the neutron flux in air to have been  $10^{12}$  n/cm<sup>2</sup>. Therefore it appears that  $6 \times 10^{12}$  n/cm<sup>2</sup> is not an underestimation for the neutron flux.

The radioactivity produced by the reaction  $Mn^{55}(n,\gamma)Mn^{56}$  may now be calculated. The cross section for this reaction is 13.4 barns (1 barn =  $10^{-24}$  cm<sup>2</sup>) and the half life of  $Mn^{56}$  is 2.58 hours. One gram of soil in Hiroshima contains 0.00093 gram of  $Mn^{55}$ .

$$A = (6 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2) (13.4 \times 10^{-24} \text{ cm}^2) \left( \frac{0.00093 \text{ gm} \times 6.02 \times 10^{23} \text{ atoms/at. wt.}}{55 \text{ gm/at. wt.}} \right) \cdot \left( \frac{0.693}{2.58 \text{ hr}} \right)$$

$A = 2.2 \times 10^8$  disintegrations per hour (dis/hr). Since  $1.32 \times 10^8$  dis/hr =  $1\mu\text{c}$ ,  
 $A = 1.66\mu\text{c}$  of  $Mn^{56}$  per gram of soil.

Similarly, the amount of radioactivity produced in the other elements of soil can be computed. Table 1 lists the most important gamma emitting isotopes produced in Hiroshima soil by thermal neutrons.

島産業奨励館の金属性雨樋に検出された微量の  $Co^{60}$  も空中の中性子束が  $10^{12}$  n/cm<sup>2</sup> であったことを示している。従って、熱中性子束を  $6 \times 10^{12}$  n/cm<sup>2</sup> とする見積りは低くないと思われる。

ここに至って  $Mn^{55}(n,\gamma)Mn^{56}$  の反応によって発生した放射能の算定も可能となる。この反応における断面積は13.4barns (1barn= $10^{-24}$ cm<sup>2</sup>) であって、 $Mn^{56}$  の半減期は2.58時間である。広島 soil 1 g 中には  $Mn^{55}$  0.00093 g を含んでいるから、

ただし

$$A=2.2 \times 10^8 \text{ 崩壊/hr}$$

$$1.32 \times 10^8 \text{ 崩壊/hr}=1\mu\text{c} \text{ であるから}$$

$$A= \text{土壌 1 g 当り } Mn^{56} \text{ } 1.66\mu\text{c}$$

同様にして土壌中の他の元素に誘発された放射能の強さも算定することができる。表1は熱中性子によって広島の土壌中に発生した最も重要なγ線放出同位元素を示したものである。

TABLE 1 PRINCIPAL GAMMA EMITTING ISOTOPES AND RADIOACTIVITY PRODUCED IN HIROSHIMA SOIL BY THERMAL NEUTRONS

熱中性子によって広島の土壌中に発生したγ線を放出する主要同位元素およびその放射能

REACTION 反応	REACTION CROSS SECTION HALF LIFE AMOUNT IN ONE GRAM OF SOIL 反応断面積 半減期 土壌 1 g 中の含有量			RADIOACTIVITY 放射能	
	BARN	HOUR	GRAM	μc/gm	μc/cm <sup>3</sup>
$Mn^{55}(n,\gamma)Mn^{56}$	13.4	2.58	0.00093	1.66	4.31
$Na^{23}(n,\gamma)Na^{24}$	0.56	15.0	0.0315	0.96	2.50
$Si^{30}(n,\gamma)Si^{31}$	0.11	2.65	0.011	0.29	7.54
$K^{41}(n,\gamma)K^{42}$	1.0	12.5	0.0024	0.09	0.23
$Fe^{58}(n,\gamma)Fe^{59}$	0.90	1060.0	0.000044	$1.2 \times 10^{-5}$	$3.1 \times 10^{-5}$

Column 4 of Table 1 lists the averages of amounts found in five samples of granite\* from the Hiroshima area analyzed by M. Mukae.<sup>16</sup> The amount of manganese, varies from trace quantities up to 2.2 per cent, whereas the other elements are fairly constant, e.g. Na varies from 2.3 per cent to 3.9 per cent by weight. The activity in  $\mu\text{C}/\text{cm}^3$  listed in column 6 was calculated from column 5, using  $2.6 \text{ gm}/\text{cm}^3$  as the density of soil.

Excluding all of the other isotopes produced for the purpose of this rough determination, a simple calculation of the external gamma dose from induced  $\text{Mn}^{56}$  and  $\text{Na}^{24}$  was performed.

#### $\text{Mn}^{56}$

The decay of  $\text{Mn}^{56}$  is accompanied by approximately 1.5 gamma rays per disintegration with an average energy of 1.2 Mev.<sup>17</sup> The relaxation length of 1.5 Mev gamma rays in soil is 18 cm and that of thermal neutrons in equilibrium with fast neutrons is approximately 8 cm. These two attenuations can be combined approximately as follows:

$$\int_0^{\infty} e^{-x/8} e^{-x/18} dx = 5.5 \text{ cm},$$

where  $x$  is the depth of soil. The gamma dose rate at the surface can therefore be approximated by the dose rate due to a uniformly activated mass of soil 5.5 cm in depth with no self attenuation of the gamma radiation in the soil.

It has been shown that a uniform density of 1 megacurie per square mile produces a dose rate of 8 r/hr at 3 ft above the ground for 1.2 Mev gamma rays.<sup>3</sup>

The amount of  $\text{Mn}^{56}$  produced in 1 square mile of Hiroshima soil activated uniformly to a depth of 5.5 cm is:

表1の第4欄は広島の花崗岩標本5片\*に検出された各物質の平均含有量を示したもので、これは迎<sup>16</sup>の分析によるものである。Mnの含有量には極微量から2.2%までの開きが認められたが、その他の元素の含有量はほぼ一定していた。たとえばNaは重量において2.3%から3.9%までの開きを見せたにとどまる。第6欄に $1 \text{ cm}^3$  当り  $\mu\text{C}$  単位で示した放射能値は、土壤の密度を $2.6 \text{ g}/\text{cm}^3$  として第5欄の数値に基づいて算出したものである。

この際発生した他の同位元素はさておき、以下誘発によって生じた $\text{Mn}^{56}$  並びに $\text{Na}^{24}$  だけについてその放出する外部 $\gamma$ 線量を簡単に計算し、次のように概算値を示してみた。

#### $\text{Mn}^{56}$

$\text{Mn}^{56}$  の減衰に当っては1崩壊当り平均1.2 Mevのエネルギーを有する $\gamma$ 線が約1.5個放出される。<sup>17</sup> 土壤中の1.5 Mevの $\gamma$ 線の緩和距離は18cmであって、速中性子と平衡状態にある熱中性子の緩和距離は約8 cmである。Xを土壤の深さとすれば、両者の減弱の合計は大体次の式によって現わすことができる。

従って地表における $\gamma$ 線量率は、一様に放射能を帯びた深さ5.5cmの土壤においてその土壤中の $\gamma$ 線に自己減弱が起らなかった場合の線量にほぼ等しい。

$1 \text{ mi}^2$  (平方哩) 当りの密度が一様に1 megacurieである場合、地表上3 ft (呎)の高さでは、1.2 Mevの $\gamma$ 線から8 r/hrの線量率が発生することが既に明らかにされている。<sup>3</sup>

5.5cmの深さまで一様に放射能を帯びた広島の土壤においては、 $1 \text{ mi}^2$  当りの $\text{Mn}^{56}$  発生量は次の式の示す通りである。

\* Footnote: Samples 1, 2, 3, 8, and 9 標本1, 2, 3, 8および9

$$(1.66 \mu\text{c/gm}) (2.6 \text{ gm/cc}) \left( \frac{2.6 \times 10^{10} \text{ cm}^2}{\text{mi}^2} \right) (5.5 \text{ cm}) = .62 \times 10^{12} \mu\text{c/mi}^2 = .62 \text{ megacurie/mi}^2$$

Therefore, the dose rate due to neutron induced  $\text{Mn}^{56}$  is:

従って、核爆発直後に中性子によって誘発された放射性元素  $\text{Mn}^{56}$  が放出した線量率は

$$\left( \frac{8 \text{ r/hr}}{\text{Megacurie/mi}^2} \right) (.62 \text{ megacurie/mi}^2) (1.5 \gamma/\text{disintegration}) = 7.4 \text{ r/hr}$$

immediately after the detonation. Thus the integrated dose as a function of time is:

かくて時間の関数として見た積算線量は

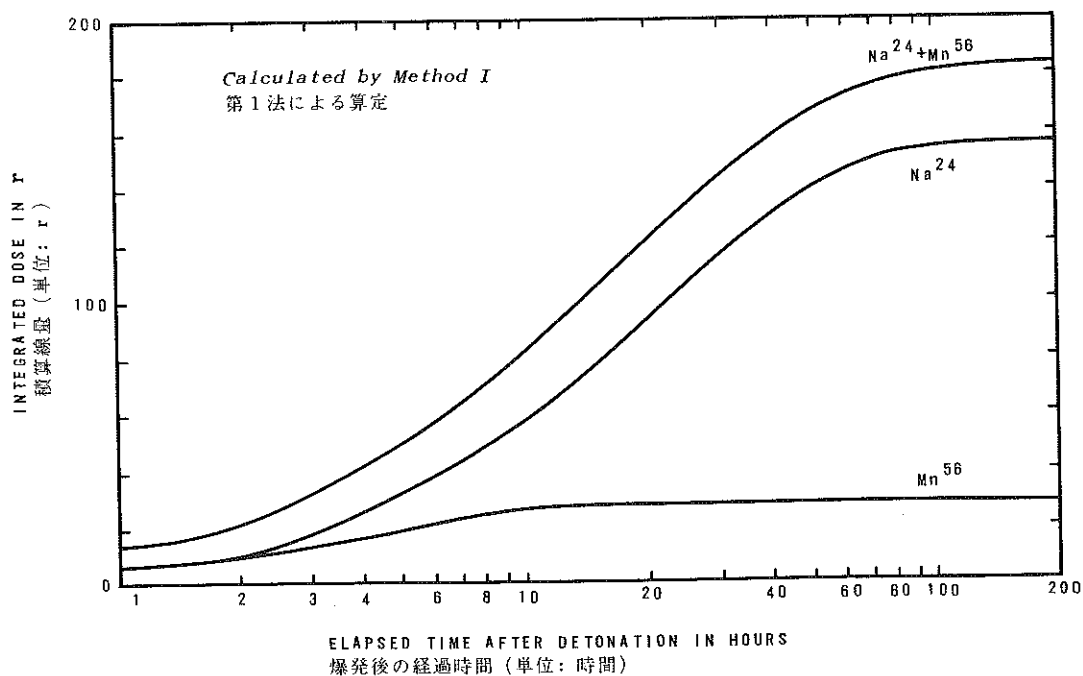
$$7.4 \text{ r/hr} \left[ -\frac{e^{-\lambda t}}{\lambda} \right]_0^t = \frac{7.4}{\lambda} \left[ 1 - e^{-\lambda t} \right] = 27.5 \left[ 1 - e^{-\frac{.693 t}{2.58}} \right]$$

This dose is plotted in Figure 2.

となる。図2にこの線量を  $\gamma$  単位のグラフをもって示した。

FIGURE 2 ACCUMULATED TOTAL DOSE OF RADIATION FROM NEUTRON - INDUCED  $\text{Na}^{26}$  AND  $\text{Mn}^{56}$  IN HIROSHIMA SOIL

広島の中核中における中性子誘発放射性元素  $\text{Na}^{26}$  および  $\text{Mn}^{56}$  放出放射線の積算総線量





Na<sup>24</sup>

Na<sup>24</sup> emits 2 gamma rays per disintegration with an average energy of 2.1 Mev. The dose rate at 3 ft above ground is 10 r/hr per megacurie/mi<sup>2</sup>. The amount of Na<sup>24</sup> produced is:

$$(0.96 \mu\text{c/gm}) \left( \frac{2.6 \text{ gm}}{\text{cc}} \right) \left( \frac{2.6 \times 10^{10} \text{ cm}^2}{\text{mi}^2} \right) (5.5 \text{ cm}) = 0.36 \times 10^{12} \mu\text{c/mi}^2 = 0.36 \text{ megacurie/mi}^2$$

The dose rate due to Na<sup>24</sup> is:

$$\left( \frac{10 \text{ r/hr}}{\text{megacurie/mi}^2} \right) (0.36 \text{ megacurie/mi}^2) (2\gamma/\text{disintegration}) = 7.2 \text{ r/hr}$$

immediately after the detonation. The integrated dose as a function of time is:

$$156 \left[ 1 - e^{-\frac{0.693t}{15.0}} \right]$$

This dose also is plotted in Figure 2.

## METHOD II

In Method II the radioactivity produced per gram of soil as calculated in Method I (Table 1) may be converted to air dose by direct integration. The integrational procedure, as suggested by R. H. Ritchie, is as follows:

At point P, h feet above the ground, the number of photons  $\phi$  due to induced activity in the soil is given by:

$$\phi = \iiint \frac{I \cdot 2\pi y \, dy \, dx}{4\pi\rho^2} e^{-\rho/\lambda - x/(18 \cos \theta)}$$

Na<sup>24</sup>

Na<sup>24</sup> は1崩壊単位当り平均2.1 Mevのエネルギーを有する $\gamma$ 線2個を放出する。地表上3ftの高さにおける線量率は1 megacurie / mi<sup>2</sup> 当り10 r / hrである。Na<sup>24</sup>の発生量は次の式によって求めることができる。すなわち

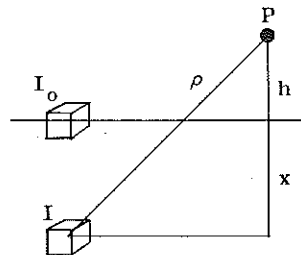
従って核爆発直後にNa<sup>24</sup>によって発生した線量率は、

であって、時間の関数として見た積算線量は

となる。図2にこの線量をグラフをもって示した。

## 第II法

第II法においては、第I法(表1)で算出された土壌1g当りの放射能を直接積算法により空中の線量に換算する。R.H.Ritchieの示唆による積算方法は次の通りである。



地上h ftの高さP点において土壌中の誘発放射能に基づいて現われる光子 $\phi$ の数は次の式によって示される。

where the term  $I 2\pi y dy dx$  is the induced activity in the volume element, and the exponential term  $e^{-\rho/\lambda}$  is the attenuation of photons due to absorption in air, and  $e^{-x/(18\cos\theta)}$  is the attenuation in soil, using 18 cm as the relaxation length of photons in soil as before. This expression is valid for this particular situation where

$$x \ll \rho$$

The radioactivity produced in the soil also decreases exponentially with depth due to the attenuation of neutrons in the soil. The activation  $I$  at any depth is:

$$I = I_0 e^{-x/8}$$

where 8 cm is used as the relaxation length of fission neutrons in soil and  $I_0$  is the induced activity at the surface. Since  $h^2 + y^2 = \rho^2$  and  $y dy = \rho d\rho$ , the complete expression is:

$$\phi = \frac{I_0}{2} \int_h^\infty \frac{d\rho}{\rho} e^{-\rho/\lambda} \int_0^\infty e^{-(1/8 + \rho/18h)x} dx$$

The evaluation of this integral is straightforward. The number of photons at point P is found to be

$$\phi = 4.8 I_0 \text{ photons/cm}^2$$

where  $I_0$  is given in  $\mu\text{c/cm}^3$  of soil as listed in Table 1. This quantity may be converted to exposure dose from the known decay schemes of the isotopes produced. This relationship is given approximately by

$$D = 69E \frac{r}{\text{hr mc}} \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^2}$$

where  $E$  is the energy of the photon in Mev per disintegration.

For  $\text{Mn}^{56}$ , the dose rate is:

$$D = 4.8 \times 4.31 \times 10^{-3} \frac{\text{mc}}{\text{cm}^2} \times 69 \times 1.8 \frac{r}{\text{hr mc}} \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^2} = 2.57 \frac{r}{\text{hr}}$$

$I 2\pi y dy dx$ は元素の単位容積における誘発放射能, 指数関数  $e^{-\rho/\lambda}$  は吸収による空中の光子の減弱,  $e^{-x/(18\cos\theta)}$  は前例の通り土壌中における緩和距離18cmに基づいて得た土壌中の光子の減弱を示すものとすれば,

であるから, この式は有効に成立する.

土壌中に発生した放射能も土壌中の中性子の減弱により深さの指数関数によって減少する. 核分裂によって生じた土壌中の中性子の緩和距離を8cm, 地表における誘発放射能を  $I_0$  とすれば, 一定の深さにおける放射能  $I$  は次の式によって示される.

しかるに,  $h^2 + y^2 = \rho^2$ ,  $y dy = \rho d\rho$  であるから, 完全式は

この積分の数値は簡単に求めることができる.  $I_0$  値が表1の通り土壌  $1 \text{ cm}^3$  当りの  $\mu\text{c}$  単位で示されているとすれば, P点における光子の数は

となる. 発生した同位元素の減衰係数が判明しているから, これを用いてこの光子の数は照射線量に換算することができる. Mev単位で表わした1崩壊単位当り光子エネルギーを  $E$  とすれば, この関係はほぼ

の式で示される. すなわち  $\text{Mn}^{56}$  の場合は

and the integrated infinity dose is 9.6 r.

For Na<sup>24</sup> the dose rate is:

$$D = 4.8 \times 2.50 \times 10^{-3} \frac{\text{mc}}{\text{cm}^2} \times 241 \frac{\text{r}}{\text{hr}} \frac{\text{cm}^2}{\text{mc}}$$

$$D = 2.88 \frac{\text{r}}{\text{hr}}$$

and the integrated infinity dose is 62 r.

### METHOD III

Samples of soil and roof tile obtained from various locations in Hiroshima and Nagasaki were exposed to the neutrons in a reactor at Oak Ridge National Laboratory. The activity induced in these samples after exposure to a total neutron flux of  $6 \times 10^{12}$  neutrons/cm<sup>2</sup> was determined by gamma spectroscopy using scintillation detectors. The results obtained are listed in Table 2. It is again seen that the most prominent isotopes produced are Na<sup>24</sup> and Mn<sup>56</sup>. Although the activity of Al<sup>28</sup> is very intense at time zero, the rapid decay due to its 2.3 minute half life causes it to be inconsequential an hour or so later. The dose due to this isotope is not included since it was nearly impossible for anyone to reach the hypocenter area within an hour after the detonation. Taking the average of Hiroshima soil samples 1 through 5, the exposure doses calculated by utilizing these activations per gram of soil with the integrational procedure of Method II are:

$$\text{Na}^{24} \quad .95 \text{ r/hr at } t = 0$$

$$\text{Mn}^{56} \quad .96 \text{ r/hr at } t = 0$$

For Nagasaki the calculations are:

$$\text{Na}^{24} \quad .0545 \text{ r/hr at } t = 0$$

$$\text{Mn}^{56} \quad .75 \text{ r/hr at } t = 0$$

であって、爆発時より無限時までの積算線量は 9.6 r となる。

Na<sup>24</sup> の場合は

### 第Ⅲ法

Oak Ridge National Laboratory における原子炉内で、広島および長崎において採取した土壌並びに屋根瓦標本に対し、中性子による照射が行なわれた。1 cm<sup>2</sup> 当り中性子数  $6 \times 10^{12}$  の総中性子束による照射を行なった後、シンチレーション検出器を用いてγスペクトルを測り、その誘発放射能を決定した。その結果は表2に示す通りである。ここでも最も多く現われた同位元素はNa<sup>24</sup>およびMn<sup>56</sup>である。Al<sup>28</sup>の放射能は誘発の瞬間にあっては極めて強烈であるが、半減期が2.3分で急速に減衰するから、約1時間後においては取るに足りないものとなる。爆発後1時間内に爆心地区に入ることは何人にとってもほとんど不可能であったから、この同位元素から発生した線量を受けたはずはない。広島の土壌標本1から5までの平均によれば、土壌1g当りの誘発放射能を基礎に第Ⅱ法で述べた積算法を用いて計算された放射線量は:

$$\text{Na}^{24} \quad t = 0 \text{ において } .95 \text{ r/hr}$$

$$\text{Mn}^{56} \quad t = 0 \text{ において } .96 \text{ r/hr}$$

同じく長崎における照射線量は

$$\text{Na}^{24} \quad t = 0 \text{ において } .0545 \text{ r/hr}$$

$$\text{Mn}^{56} \quad t = 0 \text{ において } .75 \text{ r/hr}$$

TABLE 2 REACTOR INDUCED RADIOACTIVITY IN HIROSHIMA AND NAGASAKI SOIL AND TILE SAMPLES

広島および長崎の土壌および瓦の標本における原子炉誘発放射能

SAMPLE 標本		DISINTEGRATION RATE PER GRAM OF MATERIAL 物質 1 g 当りの崩壊率 ( $\mu\text{C/gm}$ ) at $t = 0$ for nvt of $6 \times 10^{12}$ NEUTRONS/ $\text{cm}^2$		
		$\text{Na}^{24}$ $\mu\text{C/gm}$	$\text{Al}^{28}$ $\mu\text{C/gm}$	$\text{Mn}^{56}$ $\mu\text{C/gm}$
HIROSHIMA SOIL 広島の土壌	1	.205	152	.69
	2	.330	196	.77
	3	.192	107	.50
	4	.420	144	.61
	5	.438	166	.60
HIROSHIMA TILE 広島瓦	1	.101	225	3.10
	2	.117	162	2.80
NAGASAKI SOIL 長崎の土壌	1	.504	222	1.62
	2	.426	240	1.62

These values lead to integrated infinity doses of:

Hiroshima 広島  $\text{Na}^{24}(r)$  20.5     $\text{Mn}^{56}(r)$  3.6

This method is subject to the smallest number of uncertainties and should thus yield the most accurate results for calculating activity in both cities. It is also of interest to compare the results obtained by this method with the activity measured by the groups who entered Hiroshima at various times after the detonation, as shown in Figure 3. The measured activities are definitely higher than the intensities of  $\text{Na}^{24}$  and  $\text{Mn}^{56}$  extrapolated from the known decay. A second gamma ray analysis was performed on the soil samples a year after the original neutron irradiation. The  $\text{Na}^{24}$  and  $\text{Mn}^{56}$  had decayed to undetectable levels by this time. The most abundant radioisotopes present at that time, as shown in Table 3 were  $\text{Sc}^{46}$  with a half life of 85 days, and  $\text{Co}^{60}$  with a half life of 5.9 years. The exposure level due to these isotopes was calculated by Method III and plotted in Figure 3. It is seen that the experimentally measured values agree fairly well both in magnitude and rate of decay with

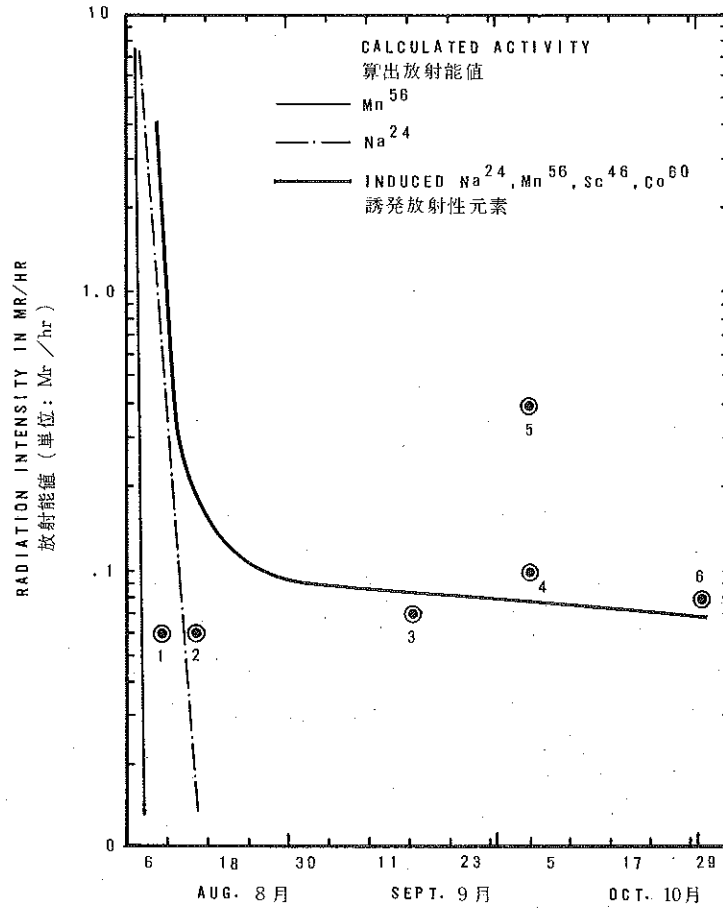
これらの数値から積算した爆発時より無限時までの積算線量は次に示す通りである。

Nagasaki 長崎  $\text{Na}^{24}(r)$  1.2     $\text{Mn}^{56}(r)$  2.8

この方法には不確実性が最も少なく、従って両市における放射能を最も正確に算出することができるはずである。また、図3に示すように、この方法によって得た結果を爆発後随時広島市に入った調査団による放射能測定値と比較してみるのも興味深い。これら測定値は、既知の減衰率に基づき補外法を用いて得た  $\text{Na}^{24}$  および  $\text{Mn}^{56}$  の放射能をはっきりと上廻っている。最初の中性子照射から1年を経て土壌標本による2回目の $\gamma$ 線分析が行なわれたが、この時は既に  $\text{Na}^{24}$  並びに  $\text{Mn}^{56}$  は検知不可能なまでに減衰していた。当時最も多量に存在した放射性同位元素は表3に示す通り半減期85日の  $\text{Sc}^{46}$ 、および半減期 5.9年の  $\text{Co}^{60}$  であった。これらの同位元素による放射線量は第III法を用いて計算し、図3にグラフをもって示した。

FIGURE 3 RESIDUAL RADIATION AT HYPOCENTER AREA - HIROSHIMA

広島の爆心地における残留放射能



- 1. Asada (Osaka) 浅田 (大阪)
- 2. Army Medical School, Tokyo 軍医学校 (東京)
- 3. Fujiwara (Hiroshima) 藤原 (広島)
- 4. Manhattan Engineering District Team, 1st isodose 曼哈頓 工学技術団
- 5. Med (Highest Value) Med (最高値)
- 6. Naval Research Laboratory 海軍研究所

TABLE 3 RADIOACTIVITY OF LONG HALF LIFE ISOTOPES INDUCED IN HIROSHIMA AND NAGASAKI SOIL AND TILE SAMPLES

広島および長崎の土壌および瓦の標本に誘発された半減期の長い同位元素の放射能

SAMPLE 標本	DISINTEGRATION RATE PER GRAM OF MATERIAL 物質 1g 当りの崩壊率 ( $\mu\text{C/gm}$ ) at $t = 0$ for nvt of $6 \times 10^{12}$ n/cm <sup>2</sup>		
	Co <sup>60</sup> $\mu\text{C/gm}$	Sc <sup>46</sup> $\mu\text{C/gm}$	
HIROSHIMA SOIL 広島の土壌	1	NOT DETECTED 検出されず	$5.1 \times 10^{-5}$
	2	$1 \times 10^{-5}$	$15.1 \times 10^{-5}$
	3	NOT DETECTED 検出されず	$3.7 \times 10^{-5}$
	4	NOT DETECTED 検出されず	$3.7 \times 10^{-5}$
	5	$.3 \times 10^{-5}$	$6.9 \times 10^{-5}$
HIROSHIMA TILE 広島の瓦	1	$.7 \times 10^{-5}$	$12.4 \times 10^{-5}$
NAGASAKI SOIL 長崎の土壌	1	$1.1 \times 10^{-5}$	$17.2 \times 10^{-5}$
	2	$1.1 \times 10^{-5}$	$16.2 \times 10^{-5}$

the activity calculated for  $\text{Sc}^{46}$  and  $\text{Co}^{60}$ . These results give added confirmation to the belief that most of the activity at the hypocenter was neutron induced and the amount of fission products was very small.

It is also interesting to compare the calculated results with the measurements which were made in Hiroshima and Nagasaki by the combined Japan-United States team<sup>4</sup> (Figure 1). The radiation level around the hypocenter due to  $\text{Na}^{24}$ ,  $\text{Mn}^{56}$ , and  $\text{Sc}^{46}$  at 60 days after the detonation was calculated to have been 78  $\mu\text{r/hr}$  in Hiroshima, and 25  $\mu\text{r/hr}$  in Nagasaki, as compared to the measured values of 100 and 30  $\mu\text{r/hr}$  around the first isodose contour lines. This remarkable agreement further strengthens the calculations used in Method III.

## SUMMARY

These results show that the fission product fallout and neutron-induced radioactive isotopes can be separated very conveniently by locations in the city, i.e. the fallout occurred in the Koi-Takasu area of Hiroshima and the Nishiyama area of Nagasaki with negligible fallout in the hypocenter area. The activity in the hypocenter areas of both cities can be accounted for as due principally to neutron induced radioactive isotopes.

The maximum exposure from fallout in Hiroshima is considered to have been a few r and in Nagasaki approximately 30 r. Again it should be emphasized that these are upper limits and that a more realistic value of an exposure dose to perhaps a few individuals is one fourth these values, due to shielding of houses and movement of individuals from the locations of maximum intensities.

From one hour to infinite time after the detonations, the maximum possible neutron induced radiation exposure dose at the hypocenter in Hiroshima is estimated to be in the range from 183 r to 24 r, depending upon the method of calculation.

これによれば、実験的に得た測定値と  $\text{Sc}^{46}$  および  $\text{Co}^{60}$  から算出した放射能値が、その強さにおいても減衰率においても共によく一致していることがわかる。このことは、爆心地における放射能の大部分が中性子の誘発によるものであって、核分裂生成物は極めて少量であったとする確信を、更に裏書きするものである。

この計算の結果をまた日米合同調査班<sup>4</sup>による広島および長崎の測定値と比較してみるのも面白い(図1)。 $\text{Na}^{24}$ ,  $\text{Mn}^{56}$ , および  $\text{Sc}^{46}$  によって生じた爆心地付近の放射線量は、爆発後60日を経過したころには長崎では25  $\mu\text{r/hr}$ , 広島では78  $\mu\text{r/hr}$  と計算されているが、最初の等線量曲線に示された測定値はそれぞれ30  $\mu\text{r/hr}$  および100  $\mu\text{r/hr}$  であった。この驚くべき一致もまた第Ⅲ法で用いた計算方法を有力化するものである。

## 総括

以上述べた事実は、降下核分裂生成物並びに中性子誘発放射性同位元素は、場所によって極めて都合よく分けることができることを示す。すなわち、広島の高須一高須地区および長崎の西山地区では降下物が認められたが、爆心地区ではその量は無視して差支えない程度であった。両市の爆心地区における放射能は主として中性子によって誘発された放射性同位元素から発生したものと見える。

降下物による最大照射線量は、広島では数 r 長崎ではほぼ 30 r であったと考えられる。ここでもまた、これらの数値はその上限を示すものであって、家屋による遮蔽、並びに最大線量の存在する場所から他の場所へ移動することにより、事実上の照射線量としてはその4分の1程度を少数の人が受けたと思われるに過ぎないことを強調しなければならない。

爆発後1時間から無限時に至るまでに、広島の高須地区における中性子誘発放射能によって受けると思われる最大照射線量は、計算方法によって異なるが、183 r から 24 r の範囲にわたるものと推定される。

Method III, which yields 24 r appears to be subject to the least number of uncertainties and thus is the most reliable figure. The excellent agreement between these calculations and the measured activities also further supports the soundness of Method III. This method gives 4 r as the infinity dose at the hypocenter in Nagasaki. These values are considered to be of such low magnitude as to be of negligible consequence.

It should also be emphasized that even for the calculation which yields a maximum dose of 183 r, the probability of an individual being exposed to this dose is very small for several reasons.

The attenuation of neutrons in air caused the neutron flux at 900 meters from the hypocenter to be a tenth of the hypocenter value.

Seventy per cent of the activity is expended in the first 24 hours after the detonation due to the short half lives of the radioisotopes produced.

In view of these conditions the most probable candidates for exposure to neutron-induced radiation were for example the survivors who were in the basement of a large building very close to the hypocenter at the time of detonation, but received very little direct radiation due to the excellent shielding of the building. A survey of the post-bomb actions of 100 survivors exposed within 2000 meters from the hypocenter showed that they all started to leave the city not too long after the detonation, and that only one survivor escaped through the hypocenter area (Figure 4). This individual spent less than one hour in the hypocenter area. All others followed routes leading away from the hypocenter area.

The city was engulfed in a sea of flames which made entry into the hypocenter area very difficult for many hours.

24 r の推定値を得た第Ⅲ法は不確実性が最も少なく、その数字にも最も信頼がおけるであろう。これらの計算値と実測値の間に高度の一致が認められることも、また第Ⅲ法の確実性を裏書きするものである。この方法によって算出した長崎の爆心地における爆発時より無限時迄の積算線量は 4 r となる。これらの数値はそれによる結果を無視して差支えないほど線量が低いことを示すものと考えられる。

更に最大線量 183 r が算出されている場合についても、次にあげる数項の理由により、個人がこの照射を受ける可能性は極めて少ないことを強調したい。

空中における中性子の減衰により、爆心地から 900m の距離における中性子束は爆心地の10分の1に減少した。

発生した同位元素の半減期が短かったため、爆発後24時間で放射能はその70%が消滅した。

これらの事情により、中性子誘発放射能を受けられる可能性が最も強かったのは、たとえば爆心至近地域の大建築物地下室にあった被爆者などであるが、これらの人々は建物が立派な遮蔽となったため極めて少量の直接放射線を受けたにとどまる。爆心地から2000m 以内の被爆者 100名について被爆後の行動を調査した結果によれば、いずれも爆発後間もなく市内から脱出しており、爆心地区を経由して避難した者が1名あったに過ぎない(図4)。この人が爆心地域で過した時間は1時間に満たない。その他の者はすべて爆心地から遠ざかる路筋を取っている。

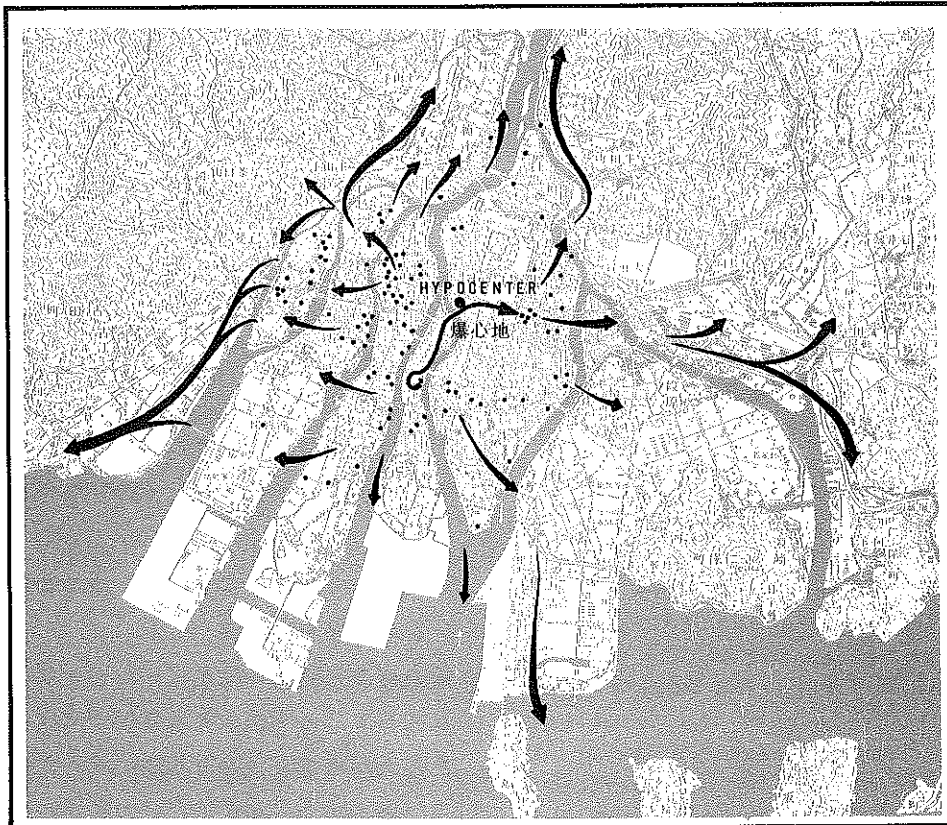
市は大火に包まれ、爆心地区に立ち入ることを長時間にわたって困難にした。

These facts suggest that after the detonations in Hiroshima and Nagasaki radiation levels were such that very few individuals, if any, received significant amounts of residual radiation from external sources.

以上の事実は、爆弾破裂後における広島および長崎の放射線量は、たとえ照射を受けた者があつたとしても、それは極めて少数の人が有意量の残留放射能による外部照射を受けたにとどまることを示唆するものである。

FIGURE 4 ESCAPE ROUTES OF 100 SURVIVORS - HIROSHIMA

広島市の被爆生存者100名の脱出路





## REFERENCES

### 参考文献

1. Ritchie RH, Hurst GS: Penetration of weapons radiation: Application to the Hiroshima Nagasaki studies. Health Physics 1:390-404, 1959.  
(核兵器放射線の透過性: 広島 - 長崎への応用)
2. Arakawa ET: Radiation dosimetry in Hiroshima and Nagasaki atomic bomb survivors. New Engl J Med 263:488-93, 1960 and ABCC TR 14-59.  
(広島および長崎被爆生存者に関する放射線量測定)
3. Glasstone S: The Effects of Nuclear Weapons, USAEC, 1957. p 409, 436.  
(核兵器の効果)
4. Pace N, Smith RE: Measurement of the Residual Radiation Intensity at the Hiroshima and Nagasaki Atomic Bomb Sites, USAEC NMRI 160 A, 1946.  
(広島および長崎爆心地付近における残留放射能強度の測定)
5. Warren S: Target Report - Atomic Bombs, Hiroshima and Nagasaki, Report of U.S. Naval Technical Mission to Japan, X-28-2, May 46.  
(広島および長崎の原子爆弾に関する報告)
6. 荒勝文策: 爆発後数日間に行なえる広島市の放射能学的調査に関する報告. 原子爆弾災害調査報告集, 東京学術振興会, 1953. p 5-10)  
(Arakatsu B: Report on radiological investigation of Hiroshima conducted for several days after the explosion, collection of investigation reports on atomic bomb disaster, Nippon Gakujutsu Shinkokai-Japan Society for the Promotion of Science)
7. 荒勝文策, 林 竹男, 西川喜良: 長崎市における残存放射能. 同上 p 11-16  
(Arakatsu B: Residual radiation in Nagasaki, Ibid. Ref 6)
8. 山崎文男: 原子爆弾爆発後広島西方に残った放射能について. 同上 p 25-33  
(Yamasaki F: Residual radiation in West Hiroshima following the atomic bomb explosion. Ibid. Ref 6)
9. 宮崎友喜雄, 増田時男, 佐々木忠義等: 原子爆弾により生じた広島市内およびその付近の放射能について. その1. 同上 p 34-8  
(Miyazaki T, Masuda T: A-bomb radiation in Hiroshima and Vicinity, Part 1, 2 Ibid. Ref 6)
10. 増田時男, 坂田民雄, 中根良平: 長崎およびその隣接地区における原子爆弾による放射能. 同上 p 38-40  
(Masuda T, Sakata T, Nakane R: Radiation due to the atomic bomb in Nagasaki and adjacent areas, Ibid. Ref 6)
11. 木村一治: ローリッツエン電気計による広島爆央地区付近における放射能の測定. 同上 p 40-1  
(Kimura M: Measurement of radiation near the hypocenter at Hiroshima by Lauritsen Electroscope, Ibid. Ref 6)
12. 篠原健一, 岡田利弘: 長崎市およびその近傍における土地の放射能, 第1, 2部. 同上 p 41-53  
(Shinohara K et al: Radiation of ground in Nagasaki and vicinity, Ibid. Ref 6)
13. 藤原武夫, 竹山晴夫: 広島市付近における残存放射能について. 同上 p 75-83  
(Fujiwara T, Takeyama H: Residual radiation around Hiroshima, Ibid. Ref 6)

14. Price BT, Horton CC, Spinney KT: Radiation Shielding. New York, Pergamon Press, 1957. p 265.  
(放射線の遮蔽)
15. 山崎文男, 杉本朝夫, 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. 前掲載 p 16-8  
(Yamasaki F: Radioactive  $P^{32}$  induced in human bones in Hiroshima, op cit Ref 6)
16. Mukae M: The chemical composition of granitic rocks in Hiroshima Prefecture, Japan. J Sci Hiroshima Univ Series C, 1:25, 32, 1954.  
(広島県における花崗岩の化学的成分)
17. Strominger D, Hollander JM, Seaborg GT: Table of Isotopes. Rev Mod Phys 30: 585-904, 1958.  
(放射性同位元素一覧表)