

**MEASUREMENT OF THE RESIDUAL RADIATION INTENSITY
AT THE HIROSHIMA AND NAGASAKI ATOMIC BOMB SITES**

広島および長崎の原子爆弾被爆地域における残留放射能の強さの測定

N. PACE AND R. E. SMITH

**PENETRATION OF WEAPONS RADIATION: APPLICATION
TO THE HIROSHIMA-NAGASAKI STUDIES**

核兵器放射線の透過性：広島—長崎調査への応用

R. H. RITCHIE AND G. S. HURST



EDITOR'S NOTE
編集者の言葉

The ABCC Bilingual Technical Report series began in 1959. In order that manuscripts which have never been published or are available only in one language may be made a matter of record for reference purposes, the 1959 series is being kept open and items will be added from time to time.

1959年から日英両文によるA B C C業績報告書の作成を開始した。これまでに発表されなかった原稿，又は一方の国語だけで作成されたものも，参考用記録とするために1959年度集の中に随時追加される。

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。

**MEASUREMENT OF THE RESIDUAL RADIATION INTENSITY
AT THE HIROSHIMA AND NAGASAKI ATOMIC BOMB SITES**

広島および長崎の原子爆弾被爆地域における残留放射能の強さの測定

N. PACE AND R. E. SMITH

Naval Medical Research Institute National Naval Medical Center, Bethesda, Maryland
Maryland 州 Bethesda 市 米国海軍医学研究所 米国海軍医学センター

**PENETRATION OF WEAPONS RADIATION: APPLICATION
TO THE HIROSHIMA-NAGASAKI STUDIES**

核兵器放射線の透過性：広島—長崎調査への応用

R. H. RITCHIE AND G. S. HURST

Health Physics Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee
米国 Tennessee 州, Oak Ridge 市, Oak Ridge 国立研究所, 保健物理学部

(Originally published 1959 既発表)



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)

TABLE OF CONTENTS

目 次

MEASUREMENT OF THE RESIDUAL RADIATION INTENSITY AT THE HIROSHIMA AND NAGASAKI ATOMIC BOMB SITES	
広島および長崎の原子爆弾被爆地域における残留放射能の強さの測定	
Summary	<i>Page</i> 1
総 括	
Background	3
背 景	
Method	4
調査方法	
Results	5
調査結果	
Discussion	16
考 按	
Acknowledgments	29
感謝の言葉	
References	30
参考文献	
PENETRATION OF WEAPONS RADIATION: APPLICATION TO THE HIROSHIMA-NAGASAKI STUDIES	
核兵器放射線の透過性：広島一長崎調査への応用	
Abstract	<i>Page</i> 1
要 約	
Introduction	1
緒 言	
Dose vs. Distance	3
線量と距離との関係	
Angular Distribution of Weapons Radiation	8
核兵器放射能の角分布	
(a) Collimators	9
コリメーター	
(b) Measurements	10
測 定	
Application to Determination of Dose Received by Residents of Hiroshima and Nagasaki	14
広島および長崎市民の被爆線量の測定への応用	
Acknowledgments	19
感謝の言葉	
References	20
参考文献	

LIST OF TABLES AND FIGURES

挿入図表一覧表

MEASUREMENT OF THE RESIDUAL RADIATION INTENSITY AT THE HIROSHIMA AND NAGASAKI ATOMIC BOMB SITES

広島および長崎の原子爆弾被爆地域における残留放射能の強さの測定

	Page
Table 1. Conversion of Japanese and United States dates to number of days following the explosion at Hiroshima (H+) and Nagasaki (N+)	8
表 日本側および米側調査団の測定実施年月日の広島 (H+) および長崎 (N+) における原爆後の日数への換算	
2. Calculation of equation for expression of residual activity at Hiroshima in terms of the distance from the air burst point (height assumed to be 570 meters) of the bomb. This equation is for the residual activity as of 1 November 1945, 87 days following the explosion (H+87)	11
広島における残留放射能を炸裂点 (推定高度 570m) からの距離で表わす方程式の計算。この方程式は1945年11月1日すなわち原爆後87日 (H+87) 現在の残留放射能に関するものである	
3. Calculation of equation for expression of residual activity at Nagasaki in terms of the distance from the air burst point (height assumed to be 490 meters) of the bomb. This equation is for the residual activity as of 18 October 1945, 70 days following the explosion (N+70)	17
長崎における残留放射能を炸裂点 (推定高度 490m) からの距離で表わす方程式の計算。この方程式は1945年10月18日即ち原爆後70日 (N+70) 現在の残留放射能に関するものである	
4. Summary of the blood findings on inhabitants of the village of Nishiyama approximately 100 days following the explosion (N+99 to N+102)	18
原爆後約100日 (N+99~N+102) の西山の住民の血液所見の概要	
5. Leucocyte counts of 25 residents of Nishiyama who were not exposed to the atomic bomb explosion but who resided in Nishiyama continuously since the explosion. The data on 1, 15, and 28 October 1945 (N+53, N+67, and N+80) were obtained by Japanese investigators from the Kyushu Imperial University	21
原爆を受けなかったが、その後引き続き西山に居住した25名の白血球数。1945年10月1日、15日および28日 (N+53, N+67およびN+80) の資料は九州帝国大学の日本側調査団が得たものである	
6. Calculation of half-life of residual activity at Nagasaki based on data obtained by Nav Tech Jap Team 11-100 on 18 October 1945 (N+70) and data obtained by Japanese investigators ⁶ on 27 December 1945 (N+140)	22
1945年10月18日 (N+70) に米側海軍技術調査班が得た資料および1945年12月27日に日本側調査団 ⁶ が得た資料に基づいて計算した長崎における残留放射能の半減期	
7. Calculation of equation for expression of residual activity at Nagasaki in terms of the distance from the air burst point (height assumed to be 490 meters) of the bomb. The equation is for Japanese residual activity data ⁶ as of 27 December 1945, 140 days following the explosion (N+140)	23
長崎における残留放射能を炸裂点 (推定高度 490m) からの距離で表わす方程式の計算。この方程式は1945年12月27日すなわち原爆後140日 (N+140) 現在の日本側の残留放射能に関する資料 ⁶ に対するものである	
8. Calculation, from Equation 13, of the total radiation intensity, I, in roentgen units produced by gamma rays, I_{γ} , fast neutrons, I_{fn} , and slow neutrons, I_{sn} , as a function of the distance in meters, x , from the explosion center, at the time of the explosion at Nagasaki	26
長崎における原爆時のガンマ線 I_{γ} 速中性子 I_{fn} 、および緩中性子 I_{sn} によって生じた総放射線量 I (r 単位) につき炸裂点からの距離 x (m 単位) を関数とする方程式13の計算	

	<i>Page</i>
Figure 1. Residual radioactivity in Hiroshima data taken 1-2 Nov 45 (H+87-H+88)	6
図 広島における残留放射能 1945年11月1~2日 (H+87, H+88) に測定した資料	
2. Drift of radioactive material in Nagasaki area	6
長崎地区における放射性物質	
3. Residual radioactivity in Urakami and Nishiyama areas of Nagasaki	7
長崎の浦上および西山地区における残留放射能	
4. Residual radioactivity at Nagasaki atomic bomb site. Radioactivity measurements made in the period 15-27 Oct 45 (N+67-N+79)	7
長崎の爆心地域における残留放射能。1945年10月15日~27日 (N+67, N+79) の間に行なわれた放射能の測定	
5. Mean leucocyte count on 25 residents of Nishiyama and summated roentgen dosage received as a function of days following the Nagasaki atomic bomb explosion. The leucocyte data for days 53, 68 and 80 are from Japanese sources and the value at 0 days was assumed to be normal. The vertical bars represent plus and minus one standard deviation	16
西山居民25名の平均白血球数および長崎原爆後の日数の関数としてのr単位の線量の合計。原爆後53日, 68日および80日の白血球に関する資料は日本側から得たものであり, 0日の数値は正常と仮定した。垂直の線は標準偏差を表わす	
6. Residual activity in bone at Hiroshima from data of Yamasaki and Sugimoto	20
山崎および杉本の資料より得た広島の人骨の残留放射能	
7. Residual activity in sulfur at Hiroshima from data of Yamasaki and Sugimoto	24
山崎および杉本の資料より得た広島の硫黄の残留放射能	
8. Contribution of gamma rays, fast neutrons, and slow neutrons to the total roentgen dosage received immediately at various distances from the explosion of a plutonium bomb	27
プルトニウム爆弾の炸裂点から各距離における総レントゲン線量に対するガンマ線, 速中性子および緩中性子の割合	

PENETRATION OF WEAPONS RADIATION: APPLICATION TO THE HIROSHIMA-NAGASAKI STUDIES

核兵器放射線の透過性: 広島—長崎調査への応用

	<i>Page</i>
Figure 1. Diagram illustrating the geometry of field measurements	2
図 野外測定の幾何学的条件の図示	
2. γ -Air dose vs. slant range for a typical nuclear detonation	3
代表的核爆発における γ 線の空中線量対距離の関係	
3. Neutron air dose and flux vs. slant range for a typical nuclear detonation	4
代表的核爆発における中性子の空中線量および線束対直線距離の関係	
4. Diagram showing the construction of neutron and γ -ray collimators	5
中性子および γ 線コリメーターの構造を示す図	
5. Diagram illustrating the co-ordinates θ' and ψ' used in presenting angular distributions	5
角分布を表わすに用いた座標 θ' および ψ' を示す図	
6. Angular distribution of neutrons above plutonium threshold for a typical nuclear detonation. The heights of the columns are proportional to the flux entering the collimators oriented as indicated by the location of the columns	6
代表的核爆発におけるプルトニウム閾値以上の中性子の角分布。柱の高さは, 柱の位置が示す如く配置されたコリメーターに入る線束に比例する	
7. Angular distribution of neutrons above neptunium threshold for a typical nuclear detonation. The heights of the columns are proportional to the flux entering the collimators oriented as indicated by the location of the columns	7
代表的核爆発におけるネプトニウム閾値以上の中性子の角分布。柱の高さは, 柱の位置が示す如く配置されたコリメーターに入る線束に比例する	

8.	Angular distribution of neutrons above uranium threshold for a typical nuclear detonation. The heights of the columns are proportional to the flux entering the collimators oriented as indicated by the location of the columns	8
	代表的核爆発におけるウラニウム閾値以上の中性子の角分布。柱の高さは、柱の位置が示す如く配置されたコリメーターに入る線束に比例する	
9.	Angular distribution of neutrons above sulphur threshold. The heights of the columns are proportional to the flux entering the collimators oriented as indicated by the location of the columns	9
	硫黄閾値以上の中性子の角分布。柱の高さは柱の位置が示す如く配置されたコリメーターに入る線束に比例する	
10.	Angular distribution of γ -rays for a typical nuclear device. The numbers on the columns are proportional to the doses entering the collimators indicated	10
	代表的な核装置の γ 線の角分布。柱の数字は示されたコリメーターに入る線量に比例する	
11.	Representative plot of neutron angular distribution for nuclear weapons measured. Experimental results have been grouped into two categories: (1) those above the horizon (corresponding to $0^\circ < \psi < 90^\circ$), and (2) those below the horizon (corresponding to $90^\circ < \psi < 180^\circ$)	11
	測定した核兵器の中性子の代表的角分布図。実験結果を(1)水平線以上のもの ($0^\circ < \psi < 90^\circ$ に相当する) と(2)水平線以下のもの ($90^\circ < \psi < 180^\circ$) の2群に区分した	
12.	Representative plot of angular distribution of γ -dose for nuclear weapons measured. Experimental results have been grouped into two categories: (1) those above the horizon (corresponding to $0^\circ < \psi < 90^\circ$), and (2) those below the horizon (corresponding to $90^\circ < \psi < 180^\circ$)	12
	測定した核兵器の γ 線量の代表的角分布図。実験結果を(1)水平線以上のもの ($0^\circ < \psi < 90^\circ$ に相当する) と(2)水平線以下のもの ($90^\circ < \psi < 180^\circ$ に相当する) の2群に区分した	
13.	York's estimate of neutron and γ -air dose in Hiroshima as a function of horizontal distance from ground zero	13
	Yorkの推定による爆心地からの水平距離の関数としての広島における中性子および γ 線空中線量	
14.	York's estimate of neutron and γ -air dose in Nagasaki as a function of horizontal distance from ground zero	14
	Yorkの推定による爆心地からの水平距離の関数としての長崎における中性子および γ 線空中線量	
15.	Veranda side of light frame structure	16
	縁側から見た軽構造家屋	
16.	North side of light frame structure	16
	軽構造家屋の北側	
17.	Plan of house showing dosimetry stations	17
	線量測定位置を示す家屋の平面図	
18.	Attenuation of fast neutrons by typical single story Japanese houses	18
	代表的平屋建日本式家屋による速中性子の減弱	
19.	Attenuation of γ -radiation by typical single story Japanese houses	18
	代表的平屋建日本式家屋による γ 線の減弱	

MEASUREMENT OF THE RESIDUAL RADIATION INTENSITY AT THE HIROSHIMA AND NAGASAKI ATOMIC BOMB SITES

広島および長崎の原子爆弾被爆地域における残留放射能の強さの測定

NELLO PACE AND ROBERT E. SMITH*

SUMMARY

1. Measurements of the residual radioactivity at the Hiroshima and Nagasaki atomic bomb sites were made by means of a portable Geiger-Müller counter during the period 70 to 100 days following the explosions. Most of the measurements were made at Nagasaki; those at Hiroshima being made only on the 87th and 88th days following the explosion there.

2. A series of maps is presented giving the results of this study. A characteristic feature of each of these explosions was that two distinct areas of residual activity were produced: an approximately circular area 600 to 1000 meters in radius about the point on the ground directly beneath the point of explosion in the air, and an elongate bilaterally symmetrical area of residual activity starting approximately 2 kilometers downwind from the hypocenter. The former area of residual activity is believed to have been caused primarily by the intense neutron bombardment of the ground, resulting in radioactive isotope transformation of several of the elements present in the earth. The downwind area of activity is believed to be the result primarily of deposition of fission products from the radioactive cloud which is known to have passed over the area under consideration.

3. Equations are given describing approximately the intensity of the residual radioactivity as a function of distance from the explosion center for the central areas at Hiroshima and Nagasaki. The intensity of residual activity, even at the hypo-

総 括

1. 広島および長崎の被爆地域において原爆後70から100日目にかけて、携帯用ガイガー・ミュラー計数管を使用して残留放射能の測定を行なった。測定は主として長崎で行なわれ、広島での測定は原爆後87日目と88日目に行なっただけである。

2. この調査の結果を示す一連の地図を添付する。両市における原爆の特徴として、明確な残留放射能のある区域が2カ所あった。すなわち、炸裂点直下の半径600~1,000m円形の殆どどの区域、および爆心地より約2km風下から始まる細長い左右対称的な地域に残留放射能があった。前者は主として地面に対する強度の中性子照射のために、地中の元素の幾つかに放射性同位元素変換が生じたことに起因し、後者は主として、この区域の上空を通過したことが判明している放射能雲からの核分裂生成物の落下の結果生じたと考えられる。

3. 広島および長崎の中心地域における残留放射能の強さの概算のために炸裂点からの距離を関数とする方程式を掲げる。これらの地域では、爆心地においてさえ、残留放射能の強さは、認知し得る程度の生理的

Reprinted with permission of Department of Navy, Bureau of Medicine and Surgery, Washington, D. C.
米国海軍省、外科医学局の許可により再発表

* Naval Medical Research Institute National Naval Medical Center, Bethesda, Maryland
Maryland州 Bethesda市 米国海軍医学研究所 米国海軍医学センター

center of these areas, was found to be far below the dose necessary to produce perceptible physiological effects. The highest values recorded were 70 to 80 micro-roentgens per hour.

4. A striking difference was noted, however, between the downwind areas at Hiroshima and Nagasaki. At Hiroshima the maximal residual activity observed in the downwind area was slightly less than that in the central area. At Nagasaki, on the other hand, downwind near the small village of Nishiyama, a maximal value of 1080 micro-roentgens per hour was recorded. This value approaches the magnitude of the maximal tolerance dose of 4200 micro-roentgens per hour. It is believed that the difference between the downwind areas at Hiroshima and Nagasaki might be due to the fact that a different type of bomb was employed at each city.

5. In order to determine the effect on exposed personnel of the relatively high residual activity in the Nishiyama area, blood studies and case histories were obtained on a group of 60 inhabitants of Nishiyama 100 days following the explosion. The topography of the region is such that the village was in the shadow of a ridge with respect to the explosion proper and yet is in the area of maximal residual activity. The blood findings and histories of the inhabitants were normal.

6. A group of Japanese investigators from the Kyushu Imperial University made a similar study on the inhabitants of Nishiyama 3 times during October 1945 on days 53, 67, and 80 following the explosion. It was possible to study 25 individuals of their series 100 days following the explosion. A plot of the composite data reveals that a significant peak leucocytosis occurred in these individuals 70 to 80 days following the explosion. A mean leucocyte count of 16,200 per mm^3 was observed at 80 days. Thus, significant, although slight, physiological effects were produced. It was possible to estimate the total integrated roentgen dosage received by the inhabitants of Nishiyama to be 56 roentgens. It would appear, therefore, that this quantity of radiation is capable of producing a measurable physiological change.

7. An equation was derived empirically giving approximately in roentgens the intensity of the

影響を生ずるに必要な線量を遙かに下回っていると認められた。測定の最高値は70~80 $\mu\text{r/hr}$ であった。

4. しかし、風下の区域には広島と長崎の間に著しい差が認められた。広島では、風下の区域で観察された最大残留放射能は中心地域よりもやや低かったのに対し、長崎では、風下にあった西山地区付近では測定の最高値は1,080 $\mu\text{r/hr}$ であった。この測定値は最大許容線量4,200 $\mu\text{r/hr}$ に近い。広島と長崎の風下の区域の間の差は、それぞれの都市に投下された原子爆弾の種類が違うことに起因しているかも知れない。

5. 西山地区の比較的高い残留放射能を受けた者にいかなる影響があるかを決定するために、原爆後100日目に同地区の住民60名より成る一群につき血液検査を行ない、病歴を記録した。この地区の地形としては山の陰にあって原爆の直接放射線を受けなかった。それにもかかわらず最大の残留放射能が認められた。この住民の血液所見および病歴は正常と認められた。

6. 九州帝国大学より派遣された日本側調査団の一行が原爆後53日目、67日目および80日目の三回に亘り西山地区の住民につき同様の調査を行なっているが、今回その対象中25名について原爆後100日目に調査を行なうことができた。両者の資料をまとめて見ると原爆後70~80日目に有意な白血球増多症が起った。原爆後80日目の平均白血球数は1 mm^3 につき16,200であった。このように軽度ではあるが有意な生理的影響が現われた。西山地区の住民が受けた積算線量は56rと推定することができた。従って、この程度の放射線量は測定可能の生理的变化を生じ得るように思われる。

7. 経験に基づいて、New Mexico型・プルトニウム爆弾について放射線疾患を起す放射線の強さを炸裂

radiation, producing radiation-sickness, released by the explosion of a plutonium bomb of the New Mexico type as a function of distance from the explosion. The radiation considered is of three types, gamma rays, fast neutrons, and slow neutrons. The equation follows:

$$I = \frac{2.72 \times 10^9 e^{-0.0015x}}{x^2} + \frac{4.84 \times 10^9 e^{-0.00237x}}{x^2} + \frac{2.33 \times 10^{10} e^{-0.0078x}}{x^2}$$

(gamma rays)
(fast neutrons)
(slow neutrons)
ガンマ線
速中性子
緩中性子

I is the total radiation in roentgens at distance x in meters from the explosion. The equation is valid for distances greater than 800 meters, and gives low values at shorter distances. A table is presented giving the radiation intensities calculated from the above equation for the Nagasaki explosion.

BACKGROUND

The atomic bombs exploded at Hiroshima on 6 August 1945 and at Nagasaki on 9 August 1945 liberated tremendous quantities of energy, both mechanical, in the form of the air blast, and electromagnetic, in the form of thermal and ionizing radiations. In addition, large numbers of high energy neutrons were released which formed artificial radioactive isotopes of elements of substances in their paths. Isotope production is also possible by gamma ray absorption. This, however, was estimated to be several orders of magnitude less than the isotope production by neutron capture.

As a consequence of the explosions, a residual radioactivity was induced in the areas of Hiroshima and Nagasaki. The residual activity probably resulted from one or both of 2 causes: (a) the production of radioactive isotopes in the ground materials by the extremely intense neutron and gamma ray production incident to the explosion, and (b) the deposition on the ground of radioactive explosion products, e. g., fission products.

The purpose of this investigation was to make physical measurements and computations of the intensity and distribution of the residual activity, and to determine its relation to possibly harmful physiological effects.

点からの距離を関数として r 単位で概算する方程式を求めた。ここで考えられた放射線としてはガンマ線、速中性子および緩中性子の3種である。その方程式は次の通りである。

ここで I は炸裂点からの距離 x (m単位) における総放射線量を r 単位で示す。この方程式は 800m 以上の地点に対して有効でそれ以下の距離では低い値を示す。長崎の原爆について、この方程式を用いて計算した放射線の強さを表に示した。

背 景

広島では1945年8月6日、長崎では同年8月9日に原子爆弾が投下され、その爆発により爆風としての機械的エネルギーおよび熱放射線並びに電離放射線としての電磁エネルギーが極めて大量に放出された。そのほか、多数の高エネルギー中性子が放出され、中性子の道にあった物質の元素に人工放射性同位元素ができた。同位元素はガンマ線吸収によってもできるが、中性子捕獲による同位元素生成よりも数段階劣っているものと推定された。

原爆の爆発の結果、広島および長崎に残留放射能が生じた。この残留放射能は恐らく次の2つの原因の一方又は双方のためであろう。

(a)原爆の爆発に付随して極めて強度の中性子およびガンマ線が放出されたことにより地上の物質に放射性同位元素ができた。(b)放射性爆発生成物、例えば核分裂生成物が地表に降下した。

この調査の目的は、残留放射能の強さと分布の物理学的測定および計算を行ない、かつ有害と思われる生理的影響との関係を決定することであった。

METHOD

Measurements of the residual activity were made by means of the Naval Research Laboratory Portable Radioactivity Dosage Meter*, employing a selfquenching copper cathode Geiger-Müller counter tube. The counter was calibrated in terms of micro-roentgens per hour ($\mu\text{r/hr}$) against 24.35 mg of radium enclosed in a platinum capsule of 0.5 mm wall thickness. It was assumed that 1 mg radium through 0.5 mm of platinum produces 8.4 r/hr at a distance of 1 cm. Thus the radium standard used to calibrate the counter was assumed to produce 204.5 r/hr at 1 cm. The radiation intensity at various distances was calculated by the formula:

where I is the r/hr at distance x cm ここで I は距離 x cm における r/hr

$$I_0 = 204.5 \text{ r/hr}$$

$$\mu = 4.64 \times 10^{-5}$$

(for gamma radiation from Radium C through air at 15°C) (15°CにおけるラジウムCの空中ガンマ線量)

Meter readings at various distances from the standard were plotted against the calculated radiation intensities for those distances, and the resulting curve was used to convert meter readings obtained in the field into $\mu\text{r/hr}$ values. The sensitivity of the counter varied from day to day so that frequent re-calibration was necessary. In general however, the sensitivity remained constant during a given sequence of measurements. During use in the field the counter was placed at a fixed distance of 1 meter above the ground by means of a suitable rigid support. A few measurements were also made with the counter 5 cm above the ground.

Whenever possible the location of each point of measurement was accurately fixed on aerial photo mosaics of the area being surveyed. When photographs were not available, positions were plotted on maps. Adequate photo coverage was available for most of the Nagasaki measurements.

* The counter was constructed by Lt. (jg) M. Eicher, H (S), USNR, under the supervision of Dr. H. Friedman and his staff at the Naval Research Laboratory, Anacostia, and was modified by Captain D. L. Collins, AUS, of the Manhattan District.

この計数管は、Anacostia 市 米国海軍研究所において Dr. H. Friedman およびその部下の指導の下に M. Eicher が作成し、Manhattan 計画の D. L. Collins が改造したものである。

調査方法

残留放射能の測定は米国海軍研究所の自己消滅型銅陰極ガイガー・ミュラー計数管を使用した携帯用放射能線量計*で行なった。壁の厚さが0.5mmの白金製カプセルに封入したラジウム 24.35mg を用いて計数管の感度 ($\mu\text{r/hr}$) の基準化を行なった。0.5mmの白金を通過したラジウム 1mg の放射線は 1cm 離れた所で 8.4r/hr と仮定した。従って、計数管の感度調整に使用したラジウム標準の放射能は 1cm 離れた所で 204.5r/hr と仮定した。各距離における放射線の強さは次の式により計算した。

標準からの各距離における線量計の読みと、各距離における放射能の強さの計算値とを図表に記入して求められた曲線を使用して実地測定で得た読みを $\mu\text{r/hr}$ 単位に換算した。計数管の感度は日によって変わったので度々感度調整を行なう必要があった。しかし、全般的に一連の線量測定を行なう間は変化はなかった。実地測定に当っては、計数管を適当に堅固な支持器で地上 1 m の所に固定した。計数管を地上 5 cm の所に置いて測定を少数行なった。

各測定点の正確な位置は、でき得る限りその地区の空中写真に記録した。空中写真がない時には、その位置を地図に記入した。長崎における測定点の大部分には、適当な写真があった。この調査では、約 1,000 カ所で測定を行なった。すなわち、長崎地区で 900 カ所、

The survey comprised about 1000 individual measurements, 900 in the Nagasaki area and 100 in the Hiroshima area. Earth samples were collected in many locations for further study in the United States.

In addition to the physical measurements, a brief evaluation of the physiological effects of the residual radiation was made by obtaining case histories and blood studies on some 60 persons residing in the Nagasaki area of activity but who were not exposed to the bomb explosion proper.

RESULTS

The areas of residual activity at both Hiroshima and Nagasaki were found to be of 2 forms: a well-defined, roughly circular area about the hypocenter of the explosion, and a diffuse and generally larger bilaterally symmetrical area some distance downwind from the hypocenter. The term "center" will denote the exact site of the bomb explosion in the air above the ground, and the term "hypocenter" will denote the point on the surface of the ground directly beneath the explosion center. The geographical areas of residual activity about the hypocenters will be known as the Hiroshima center area and the Nagasaki center area, respectively. The geographical area of activity downwind from the hypocenter at Hiroshima, which exhibited the highest radiation values near the village of Takasu 3.2 kilometers west of the hypocenter, will be termed the Takasu area. The corresponding area at Nagasaki began near the Nishiyama Reservoir 2.7 kilometers east of the hypocenter and its area of maximal intensity will be termed the Nishiyama area.

The geographical distribution and intensity of the residual radioactivity at Hiroshima and Nagasaki are shown in a series of 4 maps. Figure 1 shows the distribution of the activity in the Hiroshima area and Figure 2 shows the distribution in the Nagasaki area. Figures 3 and 4 show in more detail the distribution of the activity in the Nagasaki area, Figure 3 stressing the Nishiyama area and Figure 4 the center area.

It is to be emphasized that the values shown on all of these maps are for the dates indicated and that the activity is diminishing steadily. For

広島地区で100カ所の測定が行なわれた。米国でさらに調査を行なうために多くの場所で土の標本を収集した。物理的測定のほかに長崎で放射能の認められた地区に居住しているが原爆には直接被爆しなかった約60名について病歴および血液検査資料を求めて残留放射線の生理的影響の簡単な評価を行なった。

調査結果

広島並びに長崎において残留放射能のある区域はそれぞれ2カ所あると認められた。その1つは爆心地周囲の輪廓の明瞭な殆んど円形の区域で、他の1つは爆心地より風下へある程度離れて境界のやや不鮮明なより大きい左右対称的な区域である。炸裂点とは空中における原子爆弾の正確な爆発点を意味し、爆心地は炸裂点の真下にある地点である。爆心地周囲の残留放射能のある地理的區域はそれぞれ広島中心地域および長崎中心地域とする。広島爆心地より風下へ離れた地区で放射能が最高であったのは爆心地の西方3.2kmの高須付近で、この残留放射能地域を高須地区と称する。長崎のこれに相当する区域は爆心地の東方2.7kmの西山貯水池より始まり、最大の放射能の認められたこの区域を西山地区と称する。

広島および長崎における残留放射能の地理的分布および強さは4枚の地図に示した。図1は広島における放射能の分布を示し、図2は長崎における放射能の分布を示す。図3は西山地区に重点をおき、図4は中心地域に重点をおいて長崎における放射能の分布を一層詳しく示した。

各地図に示した数値はそこに記入してある測定日の観察値であり、放射能は漸次減少しつつあることを強調

Figure 1

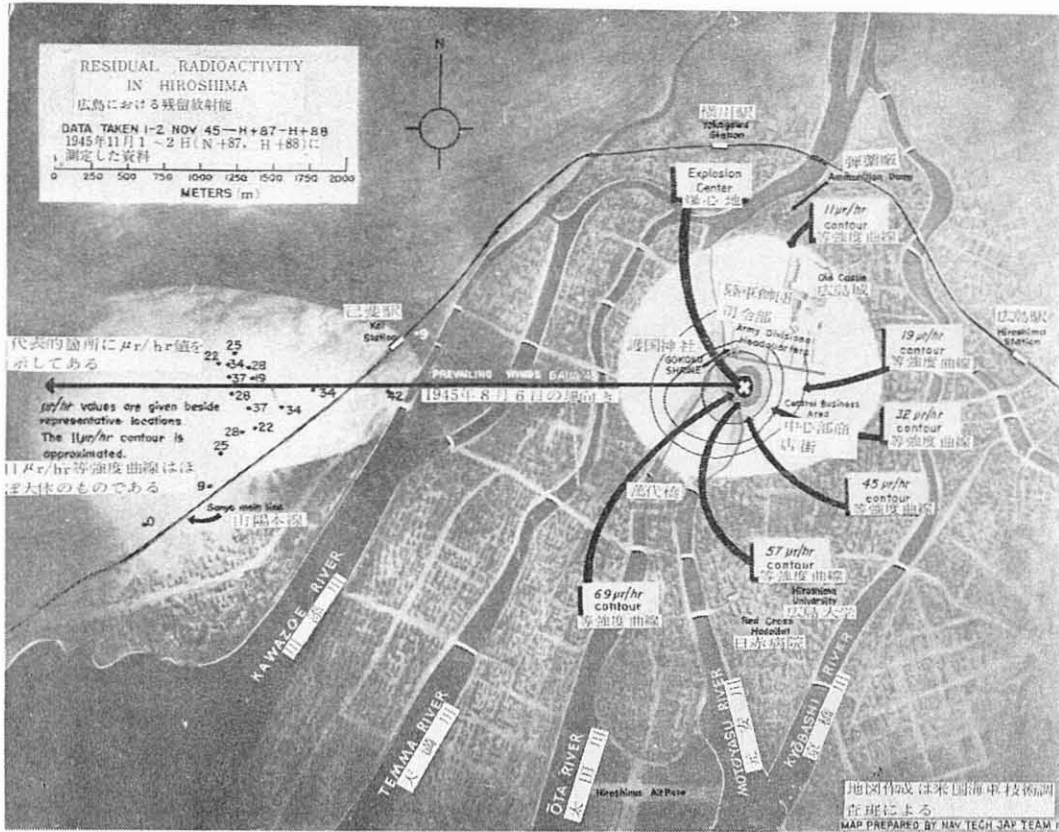


Figure 2

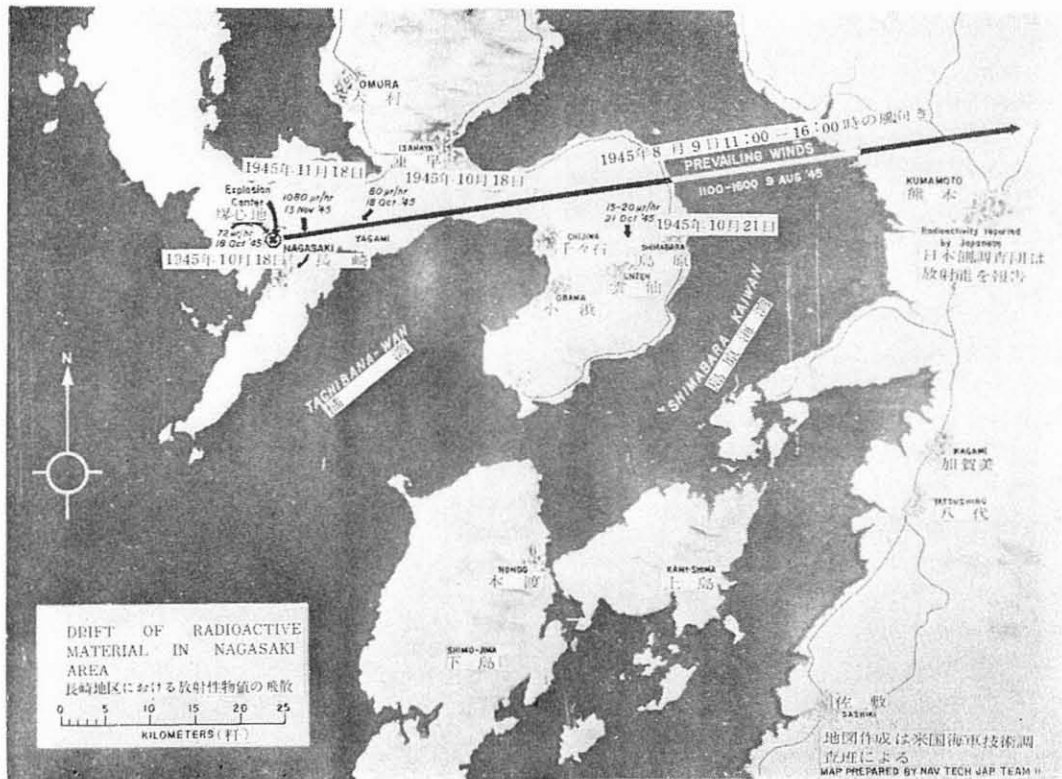


Figure 3

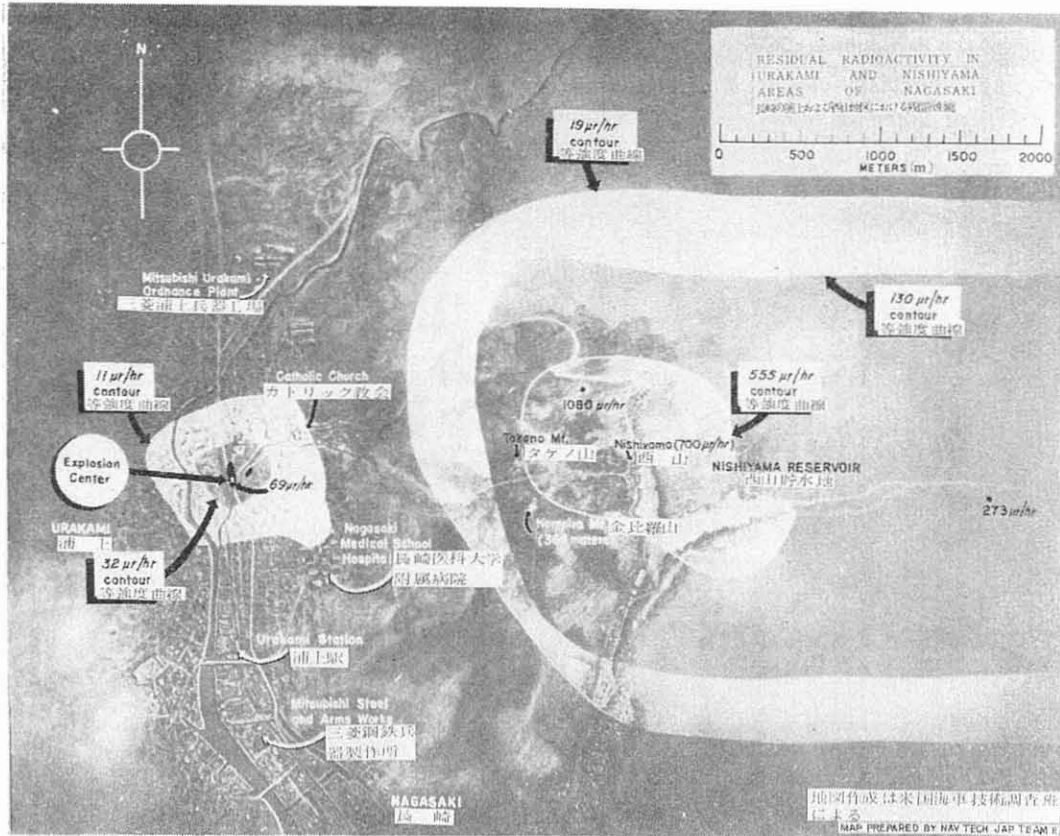


Figure 4

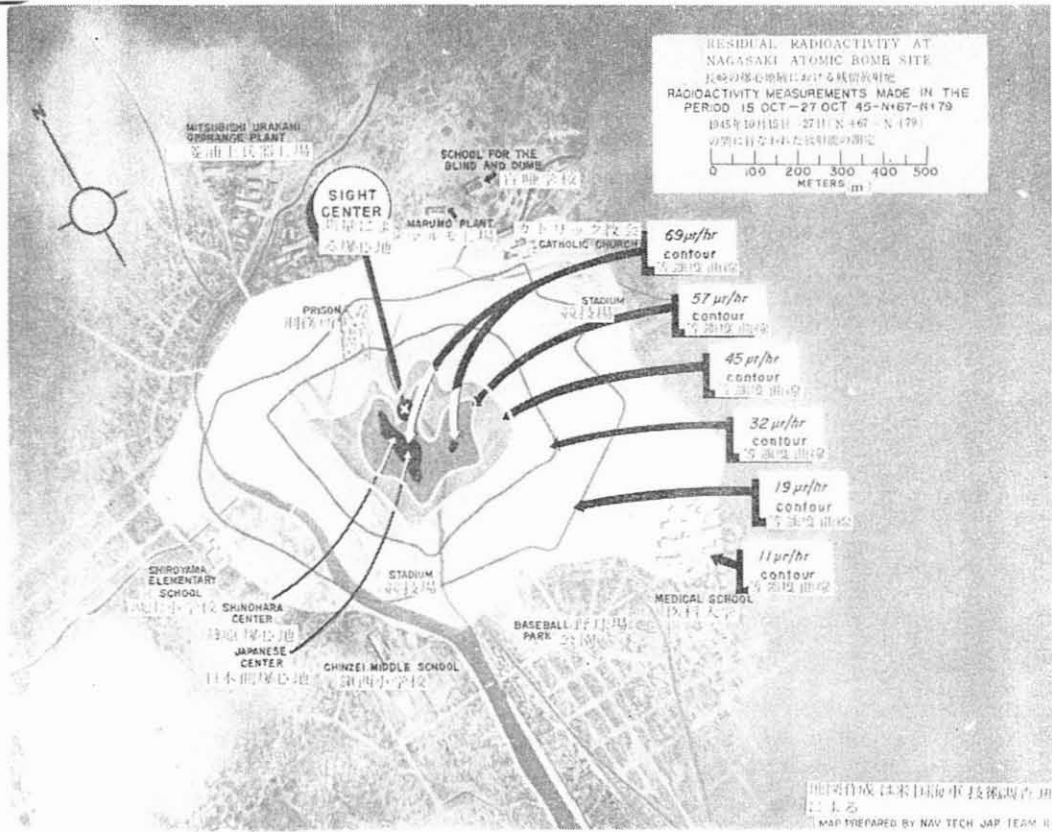


Table 1 Conversion of Japanese and United States dates to number of days following the explosion at Hiroshima (H+) and Nagasaki (N+)

表 1 日本側および米国側調査団の測定実施年月日の広島 (H+) および長崎 (N+) における原爆後の日数への換算

Date 年月日		H+	N+	Date 年月日		H+	N+	Date 年月日		H+	N+
Jap. 日本側	U. S. 米国側			Jap. 日本側	U. S. 米国側			Jap. 日本側	U. S. 米国側		
6 Aug 45	5 Aug 45	0		19 Sep	18 Sep	44	41	2 Nov	1 Nov	88	85
7	6	1		20	19	45	42	3	2	89	86
8	7	2		21	20	46	43	4	3	90	87
9	8	3	0	22	21	47	44	5	4	91	88
10	9	4	1	23	22	48	45	6	5	92	89
11	10	5	2	24	23	49	46	7	6	93	90
12	11	6	3	25	24	50	47	8	7	94	91
13	12	7	4	26	25	51	48	9	8	95	92
14	13	8	5	27	26	52	49	10	9	96	93
15	14	9	6	28	27	53	50	11	10	97	94
16	15	10	7	29	28	54	51	12	11	98	95
17	16	11	8	30	29	55	52	13	12	99	96
18	17	12	9	1 Oct	30	56	53	14	13	100	97
19	18	13	10	2	1 Oct	57	54	15	14	101	98
20	19	14	11	3	2	58	55	16	15	102	99
21	20	15	12	4	3	59	56	17	16	103	100
22	21	16	13	5	4	60	57	18	17	104	101
23	22	17	14	6	5	61	58	19	18	105	102
24	23	18	15	7	6	62	59	20	19	106	103
25	24	19	16	8	7	63	60	21	20	107	104
26	25	20	17	9	8	64	61	22	21	108	105
27	26	21	18	10	9	65	62	23	22	109	106
28	27	22	19	11	10	66	63	24	23	110	107
29	28	23	20	12	11	67	64	25	24	111	108
30	29	24	21	13	12	68	65	26	25	112	109
31	30	25	22	14	13	69	66	27	26	113	110
1 Sep	31	26	23	15	14	70	67	28	27	114	111
2	1 Sep	27	24	16	15	71	68	29	28	115	112
3	2	28	25	17	16	72	69	30	29	116	113
4	3	29	26	18	17	73	70	1 Dec	30	117	114
5	4	30	27	19	18	74	71	2	1 Dec	118	115
6	5	31	28	20	19	75	72	3	2	119	116
7	6	32	29	21	20	76	73	4	3	120	117
8	7	33	30	22	21	77	74	5	4	121	118
9	8	34	31	23	22	78	75	6	5	122	119
10	9	35	32	24	23	79	76	7	6	123	120
11	10	36	33	25	24	80	77	8	7	124	121
12	11	37	34	26	25	81	78	9	8	125	122
13	12	38	35	27	26	82	79	10	9	126	123
14	13	39	36	28	27	83	80	11	10	127	124
15	14	40	37	29	28	84	81	12	11	128	125
16	15	41	38	30	29	85	82	13	12	129	126
17	16	42	39	31	30	86	83	14	13	130	127
18	17	43	40	1 Nov	31	87	84	15	14	131	128

Table 1 (Continued)
表 1 (続き)

Date 年月日		H +	N +	Date 年月日		H +	N +	Date 年月日		H +	N +
Jap. 日本側	U. S. 米国側			Jap. 日本側	U. S. 米国側			Jap. 日本側	U. S. 米国側		
16 Dec 45	15 Dec 45	132	129	31 Jan	30 Jan	178	175	18 Mar	17 Mar	224	221
17	16	133	130	1 Feb	31	179	176	19	18	225	222
18	17	134	131	2	1 Feb	180	177	20	19	226	223
19	18	135	132	3	2	181	178	21	20	227	224
20	19	136	133	4	3	182	179	22	21	228	225
21	20	137	134	5	4	183	180	23	22	229	226
22	21	138	135	6	5	184	181	24	23	230	227
23	22	139	136	7	6	185	182	25	24	231	228
24	23	140	137	8	7	186	183	26	25	232	229
25	24	141	138	9	8	187	184	27	26	233	230
26	25	142	139	10	9	188	185	28	27	234	231
27	26	143	140	11	10	189	186	29	28	235	232
28	27	144	141	12	11	190	187	30	29	236	233
29	28	145	142	13	12	191	188	31	30	237	234
30	29	146	143	14	13	192	189	1 Apr	31	238	235
31	30	147	144	15	14	193	190	2	1 Apr	239	236
1 Jan 46	31	148	145	16	15	194	191	3	2	240	237
2	1 Jan 46	149	146	17	16	195	192	4	3	241	238
3	2	150	147	18	17	196	193	5	4	242	239
4	3	151	148	19	18	197	194	6	5	243	240
5	4	152	149	20	19	198	195	7	6	244	241
6	5	153	150	21	20	199	196	8	7	245	242
7	6	154	151	22	21	200	197	9	8	246	243
8	7	155	152	23	22	201	198	10	9	247	244
9	8	156	153	24	23	202	199	11	10	248	245
10	9	157	154	25	24	203	200	12	11	249	246
11	10	158	155	26	25	204	201	13	12	250	247
12	11	159	156	27	26	205	202	14	13	251	248
13	12	160	157	28	27	206	203	15	14	252	249
14	13	161	158	1 Mar	28	207	204	16	15	253	250
15	14	162	159	2	1 Mar	208	205	17	16	254	251
16	15	163	160	3	2	209	206	18	17	255	252
17	16	164	161	4	3	210	207	19	18	256	253
18	17	165	162	5	4	211	208	20	19	257	254
19	18	166	163	6	5	212	209	21	20	258	255
20	19	167	164	7	6	213	210	22	21	259	256
21	20	168	165	8	7	214	211	23	22	260	257
22	21	169	166	9	8	215	212	24	23	261	258
23	22	170	167	10	9	216	213	25	24	262	259
24	23	171	168	11	10	217	214	26	25	263	260
25	24	172	169	12	11	218	215	27	26	264	261
26	25	173	170	13	12	219	216	28	27	265	262
27	26	174	171	14	13	220	217	29	28	266	263
28	27	175	172	15	14	221	218	30	29	267	264
29	28	176	173	16	15	222	219	1 May	30	268	265
30	29	177	174	17	16	223	220	2	1 May	269	266

purposes of comparison of time periods the convention is adopted of expressing time in terms of days following the explosion. In the case of Hiroshima this will be given as H+ the number of days, and in the case of Nagasaki as N+ the number of days. Table 1 is given for convenience in effecting this transformation. All dates given in the text, unless otherwise noted, are Japanese time.

As shown in Figure 1, the central area of activity at Hiroshima on 1 November 1945 (H+87) exhibited a maximum intensity of 81 μ r/hr and was roughly radially symmetrical about the hypocenter. The displaced area of radioactivity near the village of Takasu lay downwind along the path of the prevailing winds on the day of the explosion and probably represents the site of deposition of the radioactive fission products formed in the explosion process. The highest intensity recorded was 42 μ r/hr. Therefore, the residual activity in the Hiroshima area as a whole was far below physiologically significant intensity.

In order to express the residual activity as a function of distance from the center each of the areas enclosed by the intensity contour lines was measured with a planimeter and a mean radius about the hypocenter was thereby obtained. It was assumed that the residual activity in the central area resulted largely from the neutron bombardment which occurred at the time of the explosion and that the activity induced reflected this neutron intensity. As a first approximation it might be expected that neutron intensity would follow the inverse square law and also that some attenuation would occur as a result of passage through air. The relationship of distance and neutron intensity, and hence residual activity, might be expressed by an equation of the type:

$$I = \frac{I_0 e^{-\mu x}}{x^2}$$

where I_0 is the hypothetical residual activity at the explosion site proper, and μ is an attenuation coefficient. Table 2 includes the data from which such an equation was empirically derived for the residual activity in the Hiroshima central area. The equation follows:

したい。各時期を比較するために、これを原爆後の日数で表わす方法を採用した。広島の場合にはこれをH+日数として示し、長崎の場合にはN+日数として示す。表1はこの換算の便宜のために掲げられたものである。別に記入のない限り本文中に示す年月日はすべて日本時間である。

図1に示す通り、1945年11月1日(H+87)には広島中心地域の放射能は81 μ r/hrで最大と認められた。この地域は爆心地の周囲にほぼ左右対称的に放射状に拡っていた。中心を離れた高須付近に放射能があったがこの地区は原爆当日風下にあったので、恐らく爆発によってできた放射性核分裂生成物の落下した地区であろう。記録された最大の強さは42 μ r/hrであった。従って、広島における残留放射能の強さは全体として生理的に有意な線量よりも遙かに低かった。

残留放射能を炸裂点からの距離の関数として表わすために、等強度曲線で囲まれた区域をそれぞれ面積計で測定し、爆心地からの平均半径を求めた。中心区域の残留放射能は主として原爆時の中性子照射の結果生じたものであり、誘発放射能はこの中性子の強さを反映していると推測される。第一回の概算には、中性子の強さは距離の2乗に反比例し、空中を通過する時、ある程度の減弱も起ると考えられよう。距離と中性子の強さとの関係、さらには残留放射能との関係は次の方程式で表わされるであろう。

ここで I_0 は炸裂点における理論的残留放射能で、 μ は減弱係数である。広島中心区域における残留放射能を示す方程式を経験に基づいて求めるために使用した資料を表2に示す。その方程式は次の通りである。

$$I = \frac{1.01 \times 10^8 e^{-0.00276x}}{x^2} \quad (2)$$

Where I is the residual activity in $\mu\text{r/hr}$ and x is the distance from the air burst in meters. A height of 570 meters above the ground was assumed¹ for the point of explosion so that distance from the center could be computed from the distance from the hypocenter. The intensity values calculated from equation (2) agree fairly well with those actually observed, and attenuation coefficient, μ , should agree with that for the neutron intensity as a function of distance.

この式では I は $\mu\text{r/hr}$ 単位の残留放射能で、 x は炸裂点からの距離を m 単位で示したものである。炸裂点は地上 570m の高さであったと推定されており¹⁾、炸裂点からの距離は爆心地からの距離より算出し得た。方程式(2)で計算した強さの数値は実際の観察値とかなりよく一致しているので、減弱係数 μ は距離の関数として中性子の強さの減弱係数と一致するはずである。

Table 2 Calculation of equation for expression of residual activity at Hiroshima in terms of the distance from the air burst point (height assumed to be 570 meters) of the bomb. This equation is for the residual activity as of 1 November 1945, 87 days following the explosion (H+87)

表 2 広島における残留放射能を炸裂点(推定高度570m)からの距離で表わす方程式の計算。この方程式は1945年11月1日すなわち原爆後87日(H+87)現在の残留放射能に関するものである。

Distance, d, from hypo-center 爆心地からの距離 d (meters)	Distance, from air burst point x 炸裂点からの距離 x (meters)	x^2	Intensity, I, of residual activity 残留放射能の強さ I ($\mu\text{r/hr}$)	Calculated μ μ の計算値	Calculated I_0 I_0 の計算値 ($\mu\text{r/hr}$)	Calculated* I I の計算値 ($\mu\text{r/hr}$)
73.4	574.7	330,288	69.3	—	1.12×10^8	62.6
130.4	584.7	341,900	57.3	0.00342	0.99×10^8	58.8
247.6	621.5	386,300	44.8	0.00209	0.96×10^8	47.0
379.8	684.9	469,050	32.0	0.00278	0.99×10^8	32.5
532.3	780.4	609,100	18.9	—	0.99×10^8	19.2
869.0	1039.3	1,080,060	10.7	—	—	5.3
Mean 平均値				0.00276	1.01×10^8	

* Calculated from equation:
次の方程式から計算

$$I = \frac{1.01 \times 10^8 e^{-0.00276x}}{x^2}$$

Where I is the residual activity in $\mu\text{r/hr}$ and x is the distance from the air burst point in meters
この方程式では I は残留放射能を $\mu\text{r/hr}$ 単位で示したものであり、 x は炸裂点からの距離を m 単位で示したものである。

As may be seen in Figure 2 the general pattern of residual activity at Nagasaki was similar to that at Hiroshima. The central area of activity at Nagasaki on 18 October 1945 (N+70) exhibited a maximum value of $72 \mu\text{r/hr}$, and the extent of the residual activity in the center area was comparable to that at Hiroshima. An area of residual activity displaced downwind approximately the same distance as at Hiroshima was found in the Nishiyama area in the direction of the winds prevailing on the day of the explosion. One important difference may be observed between the situation at Hiroshima and that at Nagasaki. The activity in the Nishiyama area at Nagasaki was considerably greater than that in the Takasu area at Hiroshima. Many values in excess of $800 \mu\text{r/hr}$ were obtained, and the highest value measured was $1080 \mu\text{r/hr}$. This difference may in part be due to the fact that the bomb exploded at Hiroshima was U^{235} , whereas the Nagasaki bomb was plutonium.

The activity in the Nishiyama area is almost certainly the result of fission products deposited from the cloud formed by the explosion. The weather at 11:00 on 9 August 1945 at Nagasaki was clear and warm with a light west southwest wind of a velocity of 3 meters per second.² Residents in the Nishiyama area tell of the cloud passing over the region and droplets of yellow-brown liquid falling after the explosion occurred. A range of hills is interposed between the Nishiyama Reservoir and the explosion hypocenter (Fig. 3), and the east side of the Nishiyama valley is well out of the direct line from the explosion center, yet relatively high residual radioactivity was observed in the area. Furthermore, definite traces of residual activity were detected on the Shimabara Peninsula (Fig. 2) some 20 miles west of the Nagasaki hypocenter, and the Japanese reported traces of activity in Kumamoto some 50 miles west of the hypocenter.

Figure 3 indicates the relationship between the Nagasaki center area and the Nishiyama area more clearly. It may be seen that at the time of measurement the two areas were distinct. The $11 \mu\text{r/hr}$ contour represents the lowest activity which was significantly different from background by the instrument used in the study. Aside from the

図2に見られる通り、長崎における残留放射能の様子は一般に広島のものに類似している。1945年10月18日(N+70)には長崎の中心区域における最大値は $72 \mu\text{r/hr}$ で、中心区域における残留放射能の範囲は広島に匹敵するものである。原爆当時、風下に離れていた西山地区に残留放射能を認め、その爆心地からの距離は広島の場合と殆んど同じであった。広島における事情と長崎における事情との間に一つの重要な差異が認められる。長崎の西山地区における放射能は広島の高須地区の放射能よりもかなり強かった。 $800 \mu\text{r/hr}$ 以上の測定値が多く得られ最高は $1080 \mu\text{r/hr}$ であった。この差の1部は、長崎の原子爆弾はプルトニウムであったが、広島で爆発した原子爆弾は U^{235} であったためであるかも知れない。

西山地区の放射能は原爆により生じた雲から降下した核分裂生成物に起因することは殆んど確実である。1945年8月9日午前11時の長崎の天候は晴れて暑く、西南西の風速1秒間3mの微風が吹いていた。²⁾西山地区の住民は原爆後に雲が上空を通過し、黄褐色の細かい水滴が降ってきたと話している。西山貯水池と爆心地との間に山が連なっている(図3)ので西山盆地の東側は炸裂点からの直照線上より全く外れているが、この地域では比較的強い残留放射能が認められた。その上、残留放射能の明確な痕跡が長崎の爆心地の西方約20マイルの島原半島(図2)で認められた。又日本側の調査団は爆心地の西方約50マイルの熊本で放射能の痕跡が認められたと報告した。

図3は長崎の中心地域と西山地区との関係をより明瞭に示している。測定時には両区域とも境界が鮮明であった。ここに示した $11 \mu\text{r/hr}$ 等強度曲線は、調査に使用した測定器により自然放射能とは有意差のあった最少量の放射能を示している。両地域に認められた放

large difference in intensity of radiation noted in the 2 areas, certain other differences were observed. In the center area no difference in counter reading was detectable whether the counter was held 1 meter above the ground or 5 cm above the ground. Furthermore, the counter tube was equipped with a bubble window for beta ray measurements, and only a slight increase in meter reading (not more than 5%) was noted when the bubble window was exposed. In the Nishiyama area on the other hand, the meter reading was almost doubled when the counter was moved from 1 meter above the ground to within 5 cm of the ground. On exposing the bubble window the reading could be increased by approximately 20% thus indicating appreciable beta ray activity in the Nishiyama area. Finally it was observed that some variation in radiation intensity occurred in the Nishiyama area depending on whether the counter was held over a relatively undisturbed area such as open fields, or over areas such as roads and well-used trails. The readings were consistently higher in the former case than in the latter.

The distribution of residual activity in the Nagasaki center area is shown in detail in Figure 4. The contour lines were drawn on the basis of approximately 600 individual measurements in this area, and they may be seen to be roughly radially symmetrical, although not as clearly as in the Hiroshima center area. The departure from true symmetry may be explained in large part by the broken nature of the terrain in this area. It is believed that the elongated shape of the 69 $\mu\text{r/hr}$ contour is due to the fact that a hill, on which the Urakami Prison was located, is in that area. Likewise a smaller isolated 69 $\mu\text{r/hr}$ contour occurred on the side of a hill to the southeast of the hypocenter. It is readily seen that although one point may be further removed from the hypocenter than another point, the former may actually be closer to the center by being on a hill, and hence would be exposed to a higher intensity of incident radiation.

As discussed previously for Hiroshima it was again assumed that in the Nagasaki center area the residual activity resulted from neutron bombard-

射線の強さに大きな差があるほか、その他の面にも差が認められた。中心区域では、計数管を地上1 mの所に置いても、地上5 cmの所に置いても読みに差は認められなかった。計数管にはベータ線測定用の球状の窓が取り付けられていたが、この窓を開いた時にはメーターの読みに僅かな増加(5%以下)が認められたに過ぎない。他方、西山地区では、計数管を地上1 mの所から地上5 cmの所へ移した時にはメーターの読りは殆んど倍増した。球状の窓を開くとメーターの読りは約20%増加した。従って、これは西山地区ではかなりのベータ放射能があることを示す。最後に西山地区では計数管を空き地のような比較的人の入らない地域又は道路および人通りの多い道のような地域に置くかどうかによって放射線の強さにある程度の変化が認められた。メーターの読みは後者よりも前者において一貫して高かった。

長崎の中心区域における残留放射能の分布は図4に詳細に示してある。この区域で行なわれた約600件の測定に基づき等強度曲線を引いた。広島を中心区域程明瞭ではないが、この等強度曲線は大略放射状に左右対称的である。正確に左右対称的ではないことの原因は主としてこの区域の地形が起伏しているためであろう。69 $\mu\text{r/hr}$ 等強度曲線が細長く伸びているが、これは浦上刑務所のある岡がその区域にあるということに起因しているものと思う。又これよりも小さい範囲の孤立した69 $\mu\text{r/hr}$ 等強度曲線が爆心地の南東の山腹に認められた。ある1つの地点が別の地点よりも爆心地から遠方にあっても、前者が岡の上にあるために実際は後者よりも炸裂点に近く、従ってより強度の直接放射線を受けるであろうことは容易にわかる。

前に広島について述べた通り、長崎の中心区域における残留放射能も中性子照射の結果生じたものと推定

ment, and the relationship of residual activity to distance from the center could be expressed as a first approximation by the equation:

$$I = \frac{I_0 e^{-\mu x}}{x^2}$$

The data from which the constants for this equation were obtained are given in Table 3, and the equation describing the relation between distance from the center and residual activity at Nagasaki follows:

$$I = \frac{5.24 \times 10^8 e^{-0.0070 x}}{x^2} \quad (3)$$

where I is the residual activity in $\mu\text{r/hr}$, and x is the distance from the center in meters. A height of 490 meters above the hypocenter was assumed for the center in this case.¹⁾ The calculated intensity values agree moderately well with those observed, and the I_0 and μ values are comparable with those calculated for Hiroshima.

Shown in Figure 4 are also the various estimates of the exact location of the hypocenter, and these may be seen to fall within a reasonable cluster. The "sight center" was located by sighting along fallen tree trunks around the periphery of the explosion area, and plotting the intersection of the cross bearings obtained by means of a transit. This hypocenter falls within the zone of highest residual activity. The Japanese group from the Kyushu Imperial University estimated the "Shinohara center" from their residual activity measurements, and the "Japanese center" was estimated by a Tokyo group from triangulation studies of the physical damage. These hypocenters also fall within the area of highest residual activity.

Of all the 4 areas exhibiting residual activity at Hiroshima and Nagasaki only 1 appeared to possess activities of physiological significance, namely the Nishiyama area. By chance the small village of Nishiyama, comprising several hundred in population, was situated along the west shore of the reservoir. As may be seen in Figure 3 this location is very near the region of highest activity. It exhibited a mean radiation intensity of 700 $\mu\text{r/hr}$ on N+96, and was also out of direct line

され、第1回の概算のため残留放射能と炸裂点からの距離との関係は次の方程式で表わすことが出来る。

この方程式の常数を求めるために使用した資料は表3に示してある。長崎の炸裂点からの距離と残留放射能との関係を示す方程式は次の通りである。

この方程式では I は残留放射能を $\mu\text{r/hr}$ 単位で示したものであり、 x は炸裂点からの距離を m 単位で示したものである。爆心地の上空 490m の所がこの場合の炸裂点と推定された。¹⁾ 放射能の強さの計算値は観察値とかなりよく一致しているので、 I_0 と μ の数値は広島 of 計算値に匹敵する。

図4には、いくつかの調査で求められた爆心地の正確な位置の推定が示してある。これらの推定位置はかなり一致している。転鏡儀を用いて爆心地周辺の倒れた樹木の幹に沿って観測を行ない、これによって求められた方向線の交点を「測量による爆心地」としたがこれは最大の残留放射能のあった地域内にある。九州帝国大学より派遣された日本側調査団は残留放射能を測定して「篠原爆心地」を推定し、東京よりの調査団は物理的損害の三角調査の結果「日本側調査団の爆心地」を推定した。これらの爆心地も最強度の残留放射能のあった区域内にある。

広島および長崎で残留放射能のあった4つの区域中、生理的に有意の放射能があるように思われたのは1カ所に過ぎない。すなわち、西山区域である。人口数百の西山地区は貯水池の西岸に沿っている図3に見られる通り、ここは最も強度の放射能の認められた区域に極めて近い。N+96における放射線の平均強度は700 $\mu\text{r/hr}$ であり、炸裂点からの直射線上より外れている。これらの条件から考えると、西山の住民は、原爆

of the explosion. In view of these conditions the population of Nishiyama represented an ideal group for observation of the effects of the residual activity uncomplicated by the immediate effects of the explosion. It was possible to obtain case histories and blood studies on 60 men, women, and children in Nishiyama and a summary of the blood findings is presented in Table 4*. It may be seen that on 16 to 19 November 1945, approximately 100 days following the explosion (N+99 to N+102), the blood picture was essentially normal. The mild normochromic normocytic anemia was apparently not unusual in the Japanese rural population, and this is likewise true of the mild eosinophilia. However, a group of Japanese investigators from the Kyushu Imperial University had obtained leucocyte counts from the inhabitants of Nishiyama on 1 October, 15 October and 28 October 1945, representing respectively N+53, N+67, and N+80. It was possible to identify 25 persons in their series with corresponding persons in the series examined at N+100. These data are given in Table 5, and a variation in mean leucocyte count with time is plotted in Figure 5. It may be seen that a significant peak leucocytosis occurred 70 to 80 days following the explosion, but that the condition had regressed 100 days following the explosion. A wide individual variation in the response was characteristic as indicated by the large increase in standard deviation. The case histories yielded no further significant findings. The temporary leucocytosis at about 3 weeks indicates that the maximal tolerance dose of radiation was exceeded for a sufficient length of time in Nishiyama to produce significant physiological effects, but that it fell below the maximal tolerance dose fairly quickly.

In the Nagasaki central area, 6 to 12 weeks after the explosion, interviews with residents revealed that a considerable number of them had re-entered the area within a day or two following

の直接の影響とは無関係に残留放射能の影響を観察するのに理想的な集団であった。西山の男女合わせて60名の病歴を求め、血液検査を行なった。血液所見の概要は表4*に示してある。1945年11月16日より19日、すなわち、原爆より約100日目(N+99ないしN+102)には、血液像は本質的に正常であった。軽度の正色素性正常赤血球性貧血は日本の農村人口には珍らしくないようで、軽度の好酸球増多症もそうである。しかし、九州帝国大学より派遣された日本側調査団は1945年10月1日、15日および28日に西山の住民の白血球数を検査したが、これはそれぞれN+53、N+67、およびN+80に相当する。この白血球数算定を受けた者の中25名はN+100に検査を受けた。この資料は表5に示してあり、時の経過による平均白血球数の変化は図5に示してある。有意な白血球増多症が原爆の70~80日後に起ったが、この状態は原爆後100日目には後退していた。標準偏差が大ききことによって示される通りこの反応に大きな個人差があることが特徴である。病歴にはそのほかに有意な所見は認められなかった。原爆後約3週間目に一過性の白血球増多症が生じたことは、西山において最大許容量を越える放射線が有意な生理的影響の発生に必要な期間を継続したが、かなり急速に最大許容量以下に低下したことを示す。

原爆の6~12週間後に長崎の中心区域の住民に面接した結果、住民の中、かなり多くの者が幸いにも原爆当日は不在で、原爆後一兩日以内にこの区域に帰って

* Thanks are due Major S. Berg, AUS, under whose guidance the laboratory studies were made, and to W. Blagg, CPhM, USN, M. Saltsman, PhM2c, USNR, J. J. McManus, PhM2c, USNR, and T. C. Lohnes, PhM2c, USNR, for the actual determinations.

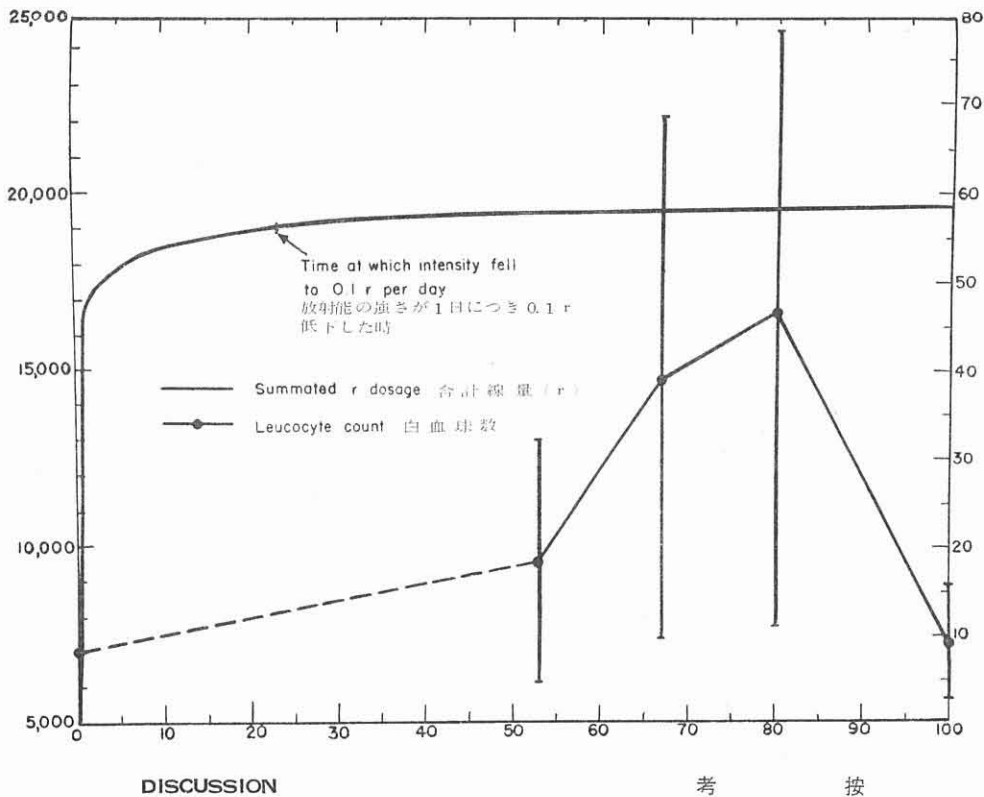
臨床検査を指導された S. Berg 少佐並びに実際に検査を行なった W. Blagg 氏, M. Saltsman 氏, J. J. McManus 氏および T. C. Lohnes 氏に感謝の意を表す。

the explosion, having been fortunate enough to be away on that day. Many of these persons had rebuilt their homes and replanted their small truck gardens, and careful questioning could elicit no subjective symptoms that might be associated with the bomb or its after effects. In fact, an almost invariable result of the questioning was the voluntary information that the truck gardens were considerably more fertile than before the explosion. It seemed remarkable that the average Nagasaki resident apparently viewed the atomic bomb as merely another implement in the armamentarium of war and did not appreciate its full import.

来たことが判明した。これらの者の多くは家屋を再建し、野菜畑を作り直していた。慎重な質問を向けても原爆又はその後影響と関係があるように思われる自覚症状は聴かれなかった。事実上、質問の結果殆どの者は野菜畑は原爆以前よりもかなり肥沃になったという自発的な発言があった。一般に長崎の住民は原子爆弾を単に新式の戦争用兵器のひとつと考え、その意義を十分認識していなかったことは驚くべきことである。

Figure 5 Mean leucocyte count on 25 residents of Nishiyama and summated roentgen dosage received as a Function of days following the Nagasaki atomic bomb explosion. The leucocyte data for days 53, 68 and 80 are from Japanese sources and the value at 0 days was assumed to be normal. The vertical bars represent plus and minus one standard deviation.

図 5 西山居民25名の平均白血球数および長崎原爆後の日数の関数としてのr単位の線量の合計(原爆後53日、68日および80日の白血球に関する資料は日本側から得たものであり、0日の数値は正常と仮定した。垂直の線は標準偏差を表わす。



In order to obtain measurements of the residual activity at a later date, permission was obtained for 2 groups of Japanese scientists from the Kyushu Imperial University and the Tokyo Institute

後日、残留放射能の測定を行なうために、九州帝国大学および東京理化学研究所の日本側科学者の2つの調査団が広島および長崎において調査を行なうことに

Table 3 Calculation of equation for expression of residual activity at Nagasaki in terms of the distance from the air burst point (height assumed to be 490 meters) of the bomb. This equation is for the residual activity as of 18 October 1945, 70 days following the explosion (N+70)

表 3 長崎における残留放射能を炸裂点(推定高度490m)からの距離で表わす方程式の計算。この方程式は1945年10月18日即ち原爆後70日(N+70)現在の残留放射能に関するものである。

Distance, d, from hypo- center 爆心地から の距離 d (meters)	Distance, x, from air burst point 炸裂点から の距離 x (meters)	x^2	Intensity, I, of residual activity 残留放射能の 強さ I ($\mu\text{r/hr}$)	Calculated μ μ の計算値	Calculated I_0 I_0 の計算値 ($\mu\text{r/hr}$)	Calculated* I I の計算値 ($\mu\text{r/hr}$)
46.9	492.2	242,300	69.3			69.0
118.2	504.1	254,070	57.3	0.01200	5.27×10^8	60.5
180.1	522.0	272,535	44.8	0.00983	4.96×10^8	49.7
260.0	554.7	307,700	32.0	0.00657	4.72×10^8	35.1
408.5	637.9	406,970	18.9	0.00297	4.78×10^8	14.8
534.1	724.9	525,470	10.7	0.00360	6.69×10^8	6.2
Mean 平均値				0.00700	5.24×10^8	

* Calculated from equation:
次の方程式より計算

$$I = \frac{5.24 \times 10^8 e^{-0.0070x}}{x^2}$$

Where I is the residual activity in $\mu\text{r/hr}$. and x is the distance from the air burst point in meters
この方程式では I は残留放射能を $\mu\text{r/hr}$ 単位で示したものであり, x は炸裂点からの距離を m 単位で示したものである。

of Physics and Chemistry to make such observations at Hiroshima and Nagasaki. Their findings are reported separately,^{3,4} and half-life estimates for the residual activity at Nagasaki and Hiroshima were obtained. The best estimate for the half-life at the Hiroshima center area on 7 February 1946 (H+185) appears to be between 180 and 300 days³. The half-life at the Nagasaki center area on 28 October 1945 (N+80) according to the Kyushu group⁵ was 70 days, and on 23 December 1945 (N+136) according to the same group⁴ it was 90 days. According to the calculations in Table 6, which were based on composite data, on 27 December 1945 (N+140) the Nagasaki center area exhibited a half-life of 82 to 260 days, mean 146 days, depending on the distance from the hypocenter. It is of interest that according to calculations of the Japanese³ for Hiroshima the half-life increases with distance from the hypocenter, whereas from Table 6 it is seen that the reverse is true at Nagasaki. The meaning of

許可が与えられた。これらの調査団の所見について別に報告がある。^{3,4)} それによって長崎および広島における残留放射能の半減期の推定値が得られた。1946年2月7日(H+185)の広島を中心区域における半減期の最良の推定値は180日と300日の間にあるようである。³⁾ 九州帝国大学調査団の報告⁵⁾によると、1945年10月28日(N+80)の長崎を中心区域における半減期は70日で、同調査団の報告⁴⁾によれば1945年12月23日(N+136)のそれは90日であった。この2つの資料をまとめて作成された表6の計算では、1945年12月27日(N+140)には長崎の中心区域における半減期は82~260日、平均146日で、爆心地よりの距離によって異なった。広島に対する日本側調査団の計算³⁾によれば、半減期は爆心地よりの距離が遠くなる程長くなるのに対して表6から分るように長崎ではその逆であるという事は興味深い。この相違の意義は明白ではなく、この相違は真実ではないかも知れない。西山地区にお

this variation is not clear, and the variation may not be real. Japanese estimates are also available for the half-life of the activity in the Nishiyama area.^{4,5} On 28 October 1945 (N+80) the half-life was estimated to be 44 days, and on 23 December 1945 (N+136) it was 90 days.

It is clear that the half-life of the residual activity at both Hiroshima and Nagasaki is steadily increasing as the intensity of the radiation is decreasing with time. This is in accord with the well-recognized phenomenon of decay of mixtures of radioactive substances. As the shorter half-life components disappear, the over-all half-life of the mixture approaches that of longest half-life component present. This is undoubtedly the case in Hiroshima and Nagasaki.

The rate of decay of complex mixtures of radioactive substances may be expressed by the general equation:

$$I_0 = I t^n \quad (4)$$

Table 4 Summary of the blood findings on inhabitants of the village of Nishiyama approximately 100 days following the explosion (N + 99 to N + 102)

表 4 原爆後約100日 (N+99~N+102) の西山の住民の血液所見の概要

Variable examined 調査項目	No. of cases 症例数	Range 範囲	Mean 平均値
Age in years 年齢	61	2-86	37.24
Erythrocyte count per mm ³ 赤血球数/mm ³	61	1,470,000-4,980,000	4,139,500
Hemoglobin, grams per 100 cc 血色素量 g/100 cc	61	<7.0-14.2	12.0
Leucocyte count per mm ³ 白血球数/mm ³	61	4,750-13,000	7,356
Differential leucocyte count 白血球分類比			
Segmented neutrophils, percent 分葉核好中球 %	61	34-76	57.6
Lymphocytes, per cent リンパ球 %	61	16-50	32.7
Monocytes, per cent 単球 %	61	0-12	4.7
Eosinophiles, per cent 好酸球 %	61	0-28	4.7
Basophiles, per cent 好塩基球 %	61	0-2	0.2
Hematocrit, per cent ヘマトクリット %	28	32-43	37.2
Mean corpuscular volume, μ ³ 平均血球容量 μ ³	28	70-107	89.1
Mean corpuscular hemoglobin, μμgm 平均血球血色素量 μμg	30	21-36	29.4
Mean corpuscular hemoglobin concentration, per cent 平均血球血色素量 μμg	28	19.5-39	33.3
Volume index 容積指数	28	0.80-1.24	1.034
Color index 色素指数	30	0.73-1.12	1,032

ける放射能の半減期についても日本側の推定値がある。^{4,5} 1945年10月28日 (N+80)には、半減期は44日であると推定され、1945年12月23日 (N+136)には90日であった。

広島並びに長崎における残留放射能の半減期は放射線の強さが時の経過につれて減弱して行くに従い、長くなって行くことが明らかである。このことは衆知の放射性物質の混合物の崩壊の現象と一致している。半減期の短かい成分が消失するに従い、混合物全体の半減期は半減期の最も長い成分の半減期に接近する。広島および長崎でもそうであることは殆んど疑いがない。

放射性物質の複雑な混合物の崩壊率は次の一般方程式によって表わされる。

where I_0 may be considered in this case to be the radiation intensity in roentgens per hour (r/hr) at one hour following the explosion, I the intensity in r/hr at t hours following the explosion, and n as a specific decay constant. Through the courtesy of Dr. Joseph Hoffman, the value for n for the downwind cloud track at New Mexico was estimated at 1.21. It is assumed that the same value for n obtained in the Nishiyama area at Nagasaki.

As stated earlier, measurements at the village of Nishiyama on 13 November 1945 (N+96) yielded values of approximately 700 μ r/hr for the residual radiation intensity. Substituting the values for I , t , and n in equation 4 yields the value I_0 as follows:

$$I_0 = 7.0 \times 10^{-4} \text{ r/hr } (96 \text{ days} \times 24 \text{ Mr/day})^{1.21} = 8.7 \text{ r/hr}$$

Therefore, the time intensity relationship for the village of Nishiyama may be expressed by the equation:

$$I = 8.7 t^{-1.21} \quad (5)$$

$$\log I = 0.9395 - 1.2110 \log t \quad (6)$$

Solution of equation 6 for t when the intensity reached 0.1 r/hr yields a value of 554 hours. Thus, the residual intensity at Nishiyama was above the maximal tolerance dose for approximately 23 days. In order to estimate the total roentgen dosage received by the inhabitants of this area, the time intensity curve was integrated. The simplifying assumption was made that because of time lag in the transport of the cloud by the wind and for the condensate to fall from the cloud, the radiation intensity on the ground at Nishiyama was zero for 6 minutes (0.1 hr) following the explosion, and then the intensity rose instantly to its full value at 6 minutes. This obviously is an idealized representation; however, it serves as an approximation. Thus a total r dosage for Nishiyama may be computed by integrating Equation 5 between the limits of 0.1 hour and 554 hours.

$$\int_{0.1}^{554} I dt = 8.7 \left(\frac{t^{-0.21}}{-0.21} \right) \Big|_{0.1}^{554} = 56.1 \text{ r}$$

(19)

この場合 I_0 は原爆後 1 時間の放射線の強さを r/hr 単位で示し, I は原爆後 t 時間の放射線の強さを r/hr 単位で示すもので, n は特定の崩壊定数である。Dr. Joseph Hoffman の厚意により, New Mexico における風下の雲跡に対する n の数値は 1.21 と推定された。長崎の西山地区において n は同じと仮定した。

前述の通り, 1945年11月13日 (N+96) に西山で行なった測定では残留放射線の強さとして約700 μ r/hrの数値が得られた。方程式4の I , t および n に数値を代入すると I_0 の数値は次の通りになる。

従って, 西山における時間と放射線の強さとの関係は次の方程式で表わされる。

放射線の強さが 0.1 r/hr に達するまでの時間 t について方程式 6 を解けば 554 時間の数値が得られる。従って, 西山における残留放射線の強さは, 約 23 日間最大許容量を越えていた。西山地区の住民が受けた総放射線量を推定するために, 時間と放射線の強さとの関係を示す曲線を積分した。風による雲の移動および雲から凝縮物の落下までの時間的ずれのために, 西山地区における地表の放射線の強さは原爆後 6 分 (0.1 時間) までは 0 で, 原爆 6 分後に放射線の強さは直ちに最大値に上昇したものと簡単に仮定した。この仮定は明らかに理想化された想像であるが, 近似値を求める上に役立つ。このようにして西山における r 単位の総放射線量は, 0.1 時間から 554 時間までの間に方程式 5 の積分を求めることによって算出される。

From this value it may be concluded that a total dosage of 56 r received over a period of 23 days is sufficient to produce a significant leucocyte response. There is some question as to whether the leucocytosis represents a primary stimulatory response to the radiation, or whether it represents a compensatory rise following a period of leucopenia. However, in view of the lag in the leucocyte response the latter conjecture would appear to be favored. The summated roentgen dosage received by the inhabitants of Nishiyama is plotted in Figure 5, and it may be seen that the bulk of the total roentgens was received in the first few days following the explosion. Unfortunately, blood studies are not available for the first 53 days following the explosion, so that only a tentative conclusion concerning blood changes during this period can be drawn.

Data of the Tokyo group⁶ concerning the distribution of residual activity about the hypocenter in the Nagasaki center area on N+140 was analyzed as a function of distance from the center. A conversion factor of $1 J = 1.726 \mu r/hr$ was used to convert the intensity values, and the treatment of the data is shown in Table 7.

この数値から考えて、23日間に亘り総量56rを受けると有意な白血球反応を生ずるに充分である。白血球増多が放射線に対する一次的刺激反応であるか、又は白血球減少の時期、後の代償性増加であるかについてはある程度の疑問がある。しかし、白血球反応にずれがある点から見て、後者の可能性が強いように思われる。西山地区の住民が受けたr単位の合計線量は図5に示してあり、総放射線の大部分は原爆後の最初の数日間に受けた。不幸にして、原爆後53日間は血液検査を行なうことが出来なかつたので、この期間の血液変化については暫定的結論のみを下すことが出来る。

N+140における長崎中心区域の爆心地附近の残留放射能の分布に関する東京よりの調査団の資料⁶⁾について炸裂点からの距離の関数として解析した。換算係数 $1 J = 1.726 \mu r/hr$ を使用して残留放射能の強さの数値の換算を行なつた。又資料についての計算は表7に示してある。

Figure 6 Residual activity in bone at Hiroshima from data of Yamasaki and Sugimoto
 図 6 山崎および杉本の資料より得た広島の人骨の残留放射能

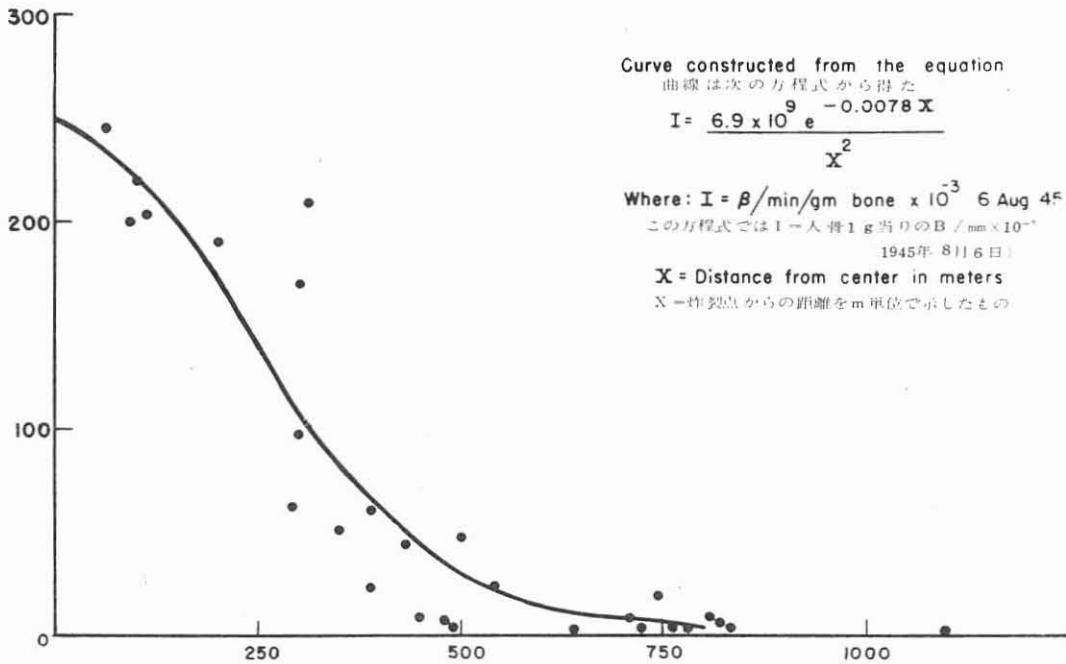


Table 5 Leucocyte counts of 25 residents of Nishiyama who were not exposed to the atomic bomb explosion but who resided in Nishiyama continuously since the explosion. The data on 1, 15, and 28 October 1945 (N+53, N+67, and N+80) were obtained by Japanese investigators from the Kyushu Imperial University

表 5 原爆を受けなかったが、その後引き続き西山に居住した25名の白血球数。1945年10月1日、15日および28日(N+53, N+67およびN+80)の資料は九州帝国大学の日本側調査団が得たものである。

Name 氏名	Age 年齢	Sex 性別	Jap. No. 日本側調査番号	Leucocyte count/mm ³ 白血球数/mm ³				
				N+53 1 Oct 45 1945年10月1日	N+67 15 Oct 45 1945年10月15日	N+80 28 Oct 45 1945年10月28日	N 100 17 Nov 45 1945年11月17日	
	65	F 女	124	6,800	16,400	10,600	9,000	
	48	M 男	123	5,200	6,400	8,500	4,800	
	41	F 女	135	11,600	14,800	12,000	10,000	
	18	F 女	122	17,000	23,100	25,000	8,800	
	11	M 男	88	12,600	17,400	30,700	6,600	
	68	M 男	—	8,200	8,700	13,500	6,200	
	60	M 男	—	4,900	5,200	4,500	5,800	
	60	M 男	—	5,900	9,300	8,800	6,900	
	58	M 男	2	7,600	10,300	9,800	6,400	
	51	F 女	—	4,500	7,700	9,300	4,900	
	45	F 女	106	7,200	9,200	5,200	5,800	
	44	F 女	63	7,500	11,100	13,000	8,600	
	44	M 男	3	16,200	30,800	27,700	7,200	
	41	F 女	13	11,400	37,800	36,300	8,400	
	39	F 女	112	11,700	16,100	19,600	7,100	
	38	M 男	126	11,400	20,800	12,200	8,200	
	30	F 女	26	7,800	6,600	8,600	5,100	
	25	F 女	121	6,500	12,100	20,000	6,200	
	25	F 女	105	12,400	18,900	23,400	11,500	
	17	F 女	—	15,500	10,200	11,900	10,400	
	15	M 男	—	9,100	15,300	14,800	7,800	
	14	M 男	—	8,200	13,200	18,900	6,100	
	13	M 男	—	9,700	15,300	18,800	6,400	
	11	M 男	—	12,600	17,400	30,700	7,500	
	7	M 男	—	8,300	15,900	10,800	6,800	
N = 25				Mean 平均値	9,592	14,800	16,184	7,300
				S. D. 標準偏差	3,439	7,404	8,430	1,691

Table 6 Calculation of half-life of residual activity at Nagasaki based on data obtained by Nav Tech Jap Team 11-100 on 18 October 1945 (N+70) and data obtained by Japanese investigators⁶ on 27 December 1945 (N+140)

表 6 1945年10月18日 (N+70) に米国海軍技術調査班が得た資料および1945年12月27日に日本側調査団⁶⁾ が得た資料に基づいて計算した長崎における残留放射能の半減期

Distance, d, from hypo center 爆心地からの距離 d (meters)	Distance, x, from air burst 炸裂点からの距離 x (meters)	Intensity, I ₇₀ , at N+70 H+70におけるI ₇₀ の強さ (μr/hr)	Intensity, I ₁₄₀ , at N+140 N+140におけるI ₁₄₀ の強さ (μr/hr)	λ	Half-life 半減期 (days 日数)
99.5	500	63.4	52.6	0.00267	259.6
249.8	550	36.9	28.3	0.00379	182.9
346.3	600	21.8	15.5	0.00487	142.3
427.1	650	13.1	8.5	0.00618	112.2
499.9	700	8.0	4.8	0.00730	95.0
567.8	750	4.9	2.7	0.00851	81.5
Mean 平均値					145.6

* Calculated from equation:
次の方程式より計算

$$I_{70} = \frac{5.24 \times 10^8 e^{-0.0070x^2}}{x^2}$$

** Calculated from equation:
次の方程式より計算

$$I_{140} = \frac{9.73 \times 10^8 e^{-0.00861x^2}}{x^2}$$

where I = intensity of residual activity in μr/hr and x = distance from air burst point in meters (height of burst = 490 meters)
これらの方程式では I は残留放射能の強さを μr/hr 単位で示したものであり、x は炸裂点 (高度490m) からの距離を m 単位で示したものである。

The constants of the empirically derived equation were found to be closely similar to those obtained in Equation 3 for this relationship at N+70. The equation for t=N+140 follows:

$$I = \frac{9.73 \times 10^8 e^{-0.0086x^2}}{x^2} \quad (7)$$

where I is the residual activity in μr/hr, and x is the distance from the center in meters.

In view of the wide divergence in technic of measurement and of the variability of the intensities owing to differences in terrain, the agreement between Equations 3 and 7 is very good. Such agreement tends to substantiate the original assumption that the residual activity reflects the original neutron intensity occurring as a result of the explosion.

N+70におけるこの関係については実験式の常数と方程式3で求められた常数とは極めて類似している。
t = N+140 についての方程式は次の通りである。

この方程式では I は残留放射能を μr/hr 単位で示したものであり、x は爆心よりの距離を m 単位で示したものである。

測定の技術に大きな差があり、地形上の相違のために放射能の強さに差があることなどの点から見て、方程式3と方程式7との間に一致が認められたことは極めてよい。このような一致が認められたことは残留放射能が原爆の結果生じた最初の中性子の強さを反映するという最初の仮定を立証する傾向がある。

Table 7 Calculation of equation for expression of residual activity at Nagasaki in terms of the distance from the air burst point (height assumed to be 490 meters) of the bomb. The equation is for Japanese residual activity data (6) as of 27 December 1945, 140 days following the explosion (N+140)

表 7 長崎における残留放射能を炸裂点(推定高度490m)からの距離で表わす方程式の計算。この方程式は1945年12月27日すなわち原爆後140日(N+140)現在の日本側の残留放射能に関する資料(6)に対するものである。

Distance, d, from hypo-center 爆心地からの距離 d (meters)	Distance, x, from air burst point 炸裂点からの距離 x (meters)	x^2	Intensity, I, of residual activity 残留放射能の強さ I ($\mu r/hr$)	Calculated μ μ の計算値	Calculated I_0 I_0 の計算値 ($\mu r/hr$)	Calculated* I I の計算値 ($\mu r/hr$)
62	493.9	243,944	56.6		9.69×10^8	56.8
106	501.3	251,336	52.2	0.00676	9.83×10^8	51.8
163	516.4	266,669	43.5	0.00814	9.90×10^8	42.5
218	536.3	287,624	34.8	0.00742	10.13×10^8	33.5
271	559.9	313,541	26.1	0.00853	10.15×10^8	25.1
323	586.9	344,429	17.4	0.01153	9.38×10^8	18.1
415	642.1	412,325	8.7	0.00930	9.03×10^8	9.4
Mean 平均値				0.00861	9.73×10^8	

* Calculated from equation:
次の方程式より計算

$$I = \frac{9.73 \times 10^8 e^{-0.00861x}}{x^2}$$

where I is the residual activity in $\mu r/hr$ and x is the distance from the air burst point in meters
この方程式では I は残留放射能を $\mu r/hr$ 単位で示したものであり, x は炸裂点からの距離を m 単位で示したものである。

To further substantiate this view it was possible to derive equations describing the intensity of radioactivity induced in human bone and in elemental sulfur as a function of distance from the explosion center at Hiroshima. The original data were obtained from the report of Yamasaki and Sugimoto⁷, and these data together with the fitted curves are shown in Figures 6 and 7. The radioactivity induced in bone is due to the capture of slow neutrons by phosphorus, yielding P^{32} by the reaction $P^{31}(n\gamma)P^{32}$. The radioactivity induced in sulfur is due to the capture of fast neutrons by the sulfur with the loss of a proton, yielding P^{32} by the reaction $S^{32}(np)P^{32}$.

この見解をさらに裏付けるために、広島における人間の骨および硫黄元素の誘発放射能の強さを炸裂点からの距離の関数として示す方程式を求めることが出来た。最初の資料は山崎および杉本の報告書⁷⁾から得たもので、この資料とそれにあてはめられた曲線は図6および7に示してある。骨の誘発放射能は緩中性子が磷に捕獲された結果生じたものであり、 $P^{31}(n\gamma)P^{32}$ の反応により P^{32} を生じた。硫黄の誘発放射能は硫黄が速中性子を捕獲して陽子を放出して $S^{32}(np)P^{32}$ の反応により P^{32} ができたためである。

The equation for the activity of bone as a function of distance was found to be:

$$I = \frac{6.9 \times 10^9 e^{-0.0078x}}{x^2} \quad (8)$$

where I is the number of beta particles $\times 10^{-3}$ emitted per minute per gram of bone corrected to 6 August 1945, and x is the distance from the center in meters.

The equation for the activity of sulfur as a function of distance was found to be:

$$I = \frac{3.47 \times 10^6 e^{-0.00237x}}{x^2} \quad (9)$$

where I is the number of beta particles $\times 10^{-3}$ emitted per minute per gram of sulfur corrected to 6 August 1945, and x is the distance from the center in meters.

There is striking agreement between the attenuation coefficients (μ values) in Equations 8 and 9, and the coefficients in Equations 2, 3, and 7.

骨の放射能について距離を関数とする方程式は次のようになる。

この方程式では、Iは1945年8月6日まで補正された骨1gにつき1分間に放出されるベータ粒子の数を 10^{-3} 倍したもので、xは炸裂点からの距離をm単位で示したものである。

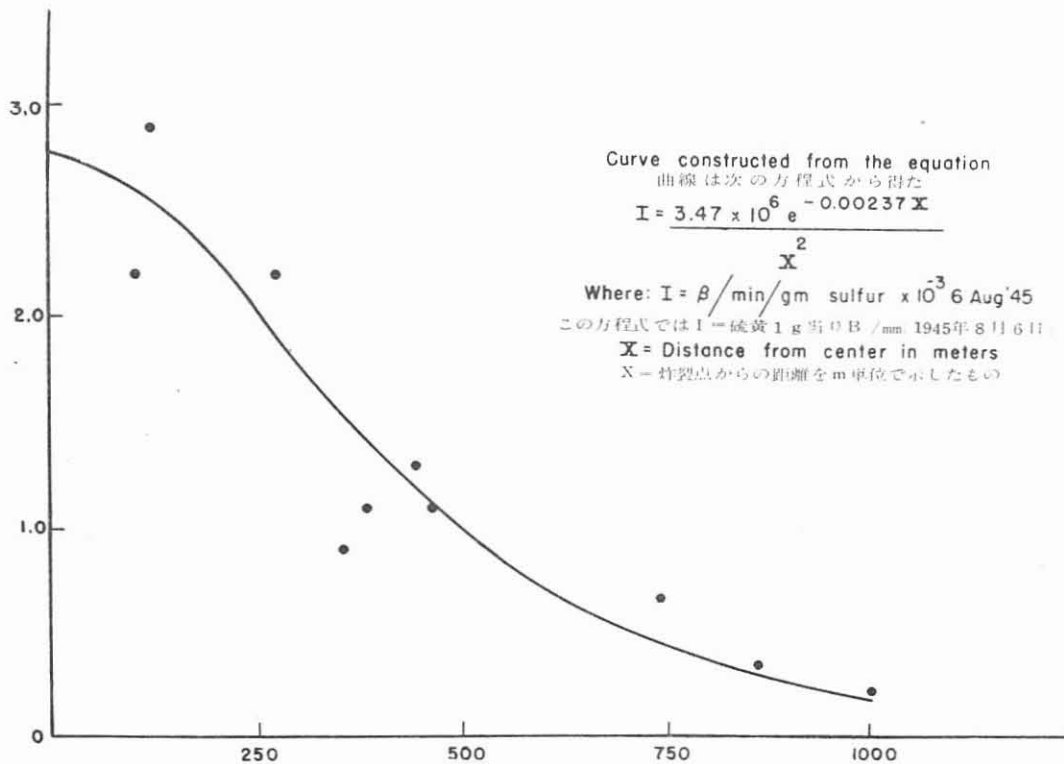
硫黄の放射能についての距離を関数とすると方程式は次のようになる。

この方程式では、Iは1945年8月6日まで補正された硫黄1gにつき1分間に放出されるベータ粒子の数を 10^{-3} 倍したものであり、xは炸裂点からの距離をm単位で示したものである。

方程式8および9の減弱係数(μ 数値)と方程式2、3および7の減弱係数とは極めて近似している。

Figure 7 Residual activity in sulfur at Hiroshima from data of Yamasaki and Sugimoto

図 7 山崎および杉本の資料より得た広島硫黄の残留放射能



Thus, the assumption that the distribution intensity of residual activity mirrors the distribution of neutron intensity produced by the blast is still further strengthened.

An attempt can now be made to approximate the relationship between neutron intensity and distance at the time of the explosion, and then to express the neutron intensity in terms of roentgen units so that the biological effects may be estimated. It is convenient to separate the neutrons into 2 categories, slow and fast, and for the present purposes slow neutrons are considered to have a mean energy of 200 electron volts, and fast neutrons of greater than 3 million electron volts. Finally, the relationship between gamma radiation intensity and distance from the explosion may be approximated and expressed in terms of roentgens, and the bulk of the radiation responsible for the production of radiation sickness may thus be accounted for.

The fast neutrons are considered first. According to a Manhattan District Project Report by Klema,⁸ a total of 6.5×10^{21} fast neutrons (energies above 3 Mev) passed through a sphere 202 meters in radius in the New Mexico explosion. Such a sphere has a surface of 5.13×10^9 cm². Therefore, the intensity at 202 meters was 1.27×10^{12} fast neutrons/cm². As discussed previously, neutrons are expected, as a first approximation, to obey the inverse square law with the incorporation of an attenuation factor thus:

$$I = \frac{I_0 e^{-\mu x}}{x^2} \quad \text{or} \quad I_0 = \frac{I x^2}{e^{-\mu x}}$$

In this case, I is the fast neutron intensity, 1.27×10^{12} /cm², at distance x of 202 meters, and μ is considered to be the constant 0.00237 obtained from the analysis of the Japanese sulfur data previously discussed. Solution for I_0 , the fast neutron intensity at 1 meter, gives a value of 8.37×10^{17} fast neutrons/cm². This value corresponds to the total number (1.05×10^{23}) of fast neutrons that passed through a sphere 1 meter in radius. It is of considerable interest at this juncture to note that the Japanese⁴ on the basis of their residual activity measurements, are in agreement among themselves that the total number of fast neutrons liberated was 1×10^{23} .

従って、残留放射能の強さの分布は爆発によって生じた中性子の強さの分布を反映するという仮定はさらに強化された。

ここで中性子の強さと原爆時の距離との関係を概算し、次に生物学的影響を推定するために中性子の強さをレントゲン単位で表わす試を行なうことができる。中性子を遅いものと早いものとの2種類に分けるのが便利である。この研究では、緩中性子は200電子ボルトの平均エネルギーを有するものと考え、速中性子は3,000,000電子ボルト以上の平均エネルギーを有するものとする。最後に、ガンマ放射線の強さと炸裂点からの距離との関係を概算し、レントゲン単位で表わすことができる。放射線疾患の原因となる放射線の大部分はこのようにして計算できる。

先ず、速中性子を考えてみよう。Klema⁹のManhattan計画研究報告書によれば、New Mexicoの原爆実験では合計 6.5×10^{21} の速中性子(エネルギー3Mev以上)が半径202mの球を通過した。このような球の表面積は 5.13×10^9 cm²である。従って、202mの距離で1cm²当りの中性子は 1.27×10^{12} であった。前述の通り最初の概算を行なう上に中性子は距離の自乗に反比例し、減弱係数も加って次の通りの関係になると考えられる。

ここでIは距離 x 、すなわち202mにおける速中性子の強さ 1.27×10^{12} /cm²で、 μ は前述の日本側の硫黄に関する資料の解析の結果得られた常数0.00237である。 I_0 すなわち、1mの距離における速中性子の強さを求めると速中性子 8.37×10^{17} /cm²の数値が得られる。この数値は半径1mの球を通過した速中性子の総数(1.05×10^{23})に相当する。日本側調査団⁴は残留放射能測定の結果に基づき、放出された中性子の総数は 1×10^{23} であったことについて互に意見が一致していることはかなり興味のあることである。

Table 8 Calculation, from Equation 13, of the total radiation intensity, I, in roentgen units produced by gamma rays, I_γ , fast neutrons, I_{fn} , and slow neutrons, I_{sn} , as a function of the distance in meters, x , from the explosion center, at the time of the explosion at Nagasaki

表 8 長崎における原爆時のガンマ線 I_γ 速中性子 I_{fn} , および緩中性子 I_{sn} によって生じた総放射線量 I (r 単位) につき炸裂点からの距離 x (m 単位) を関数とする方程式13の計算

Distance, from hypo-center 爆心地からの距離 (meters)	Distance from center (x) 炸裂点からの距離 x (meters)	x^2	I_γ (r units 単位)	I_{fn} (r units 単位)	I_{sn} (r units 単位)	Total I I の合計 (r units 単位)
500	700	490,000	1943	1880	202	4025
750	896	802,816	883	721	27	1631
1000	1114	1,240,996	413	278	3	694
1250	1343	1,803,649	201	111	1	313
1500	1577	2,486,929	103	46		149
1750	1816	3,297,856	54	20		74
2000	2059	4,239,481	29	9		38
2250	2303	5,303,809	16	4		20
2500	2549	6,497,401	9	2		11

The daily minimum tolerance dose of fast neutrons was estimated by Professor G. H. Dessauer of the University of Rochester as being 200 fast neutrons/cm²/second. In one day, then, a total of $200 \times 60 \times 60 \times 24 = 1.728 \times 10^7$ fast neutrons/cm² may be tolerated, and this is equivalent to the roentgen tolerance limit of 0.1 r. Therefore, it may be said that $1r = 1.728 \times 10^8$ fast neutrons/cm². Converting the neutron intensity value at 1 meter to intensity in terms of r, a value of 4.84×10^9 r is obtained, and this may be considered to be I_0 . Using the value of 0.00237 for μ , the equation

$$I = \frac{4.84 \times 10^9 e^{-0.00237x}}{x^2} \quad (10)$$

may be written where I is the number of γ occurring at a distance of x meters from the explosion owing to fast neutrons.

The effect of slow neutrons may be expressed in like manner. According to 2 Manhattan District Project Reports^{8,9} a total of 3.8×10^{24} slow neutrons (mean energy 200 electron volts) passed through a sphere 1 meter in radius. Again

Rochester大学の G. H. Dessauer 教授によれば速中性子の1日間最小許容線量は速中性子 $200/\text{cm}^2/\text{sec}$ と推定されているので、 1cm^2 当り速中性子合計 $200 \times 60 \times 60 \times 24 = 1.728 \times 10^7$ が1日間に許容されることになり、これはレントゲン単位の許容線量 $0.1r$ に相当する。従って、 $1r = \text{速中性子 } 1.728 \times 10^8/\text{cm}^2$ と言い得る。1mの距離における中性子の強さの数値をr単位の強さに換算すれば、 $4.84 \times 10^9 r$ になる。これを I_0 と考える。 μ に 0.00237 の数値を使用すれば、方程式は次の通りになる。

この方程式では、Iは速中性子のために距離 x m で生ずる γ の数を示す。緩中性子の影響も同様に表わし得る。2つの Manhattan 計画研究報告書^{8,9} によれば合計 3.8×10^{24} の緩中性子 (平均エネルギー 200 eV) が半径 1 m の球を通過した。日本側調査団¹⁰ は緩中性子の総数は 6×10^{24} と推定したことは興味のあることである。半径 1 m の球の表面積は $1.26 \times 10^8 \text{cm}^2$ であるの

it is of interest to note that the Japanese⁴ have estimated the total number of slow neutrons to be 6×10^{24} . Since a sphere 1 meter in radius has a surface area of $1.26 \times 10^5 \text{ cm}^2$, it is readily calculable that an intensity of 3.02×10^{19} slow neutrons/cm² occurred at 1 meter. Again according to Professor Dessauer, the daily minimum tolerance dose of slow neutrons was estimated to be 1500 slow neutrons/cm²/second. Thus in one day a total of $1500 \times 60 \times 60 \times 24 = 1.296 \times 10^8$ slow neutrons/cm² may be tolerated, and this value is equivalent to 0.1 r. Assuming the conversion factor $1 \text{ r} = 1.296 \times 10^9$ slow neutrons/cm², the slow neutron intensity at 1 meter may be expressed as 2.33×10^{10} r. Using this value as I_0 , and the value for μ as 0.0078 which was obtained by analysis of the Japanese bone activity data, it is possible to write the equation:

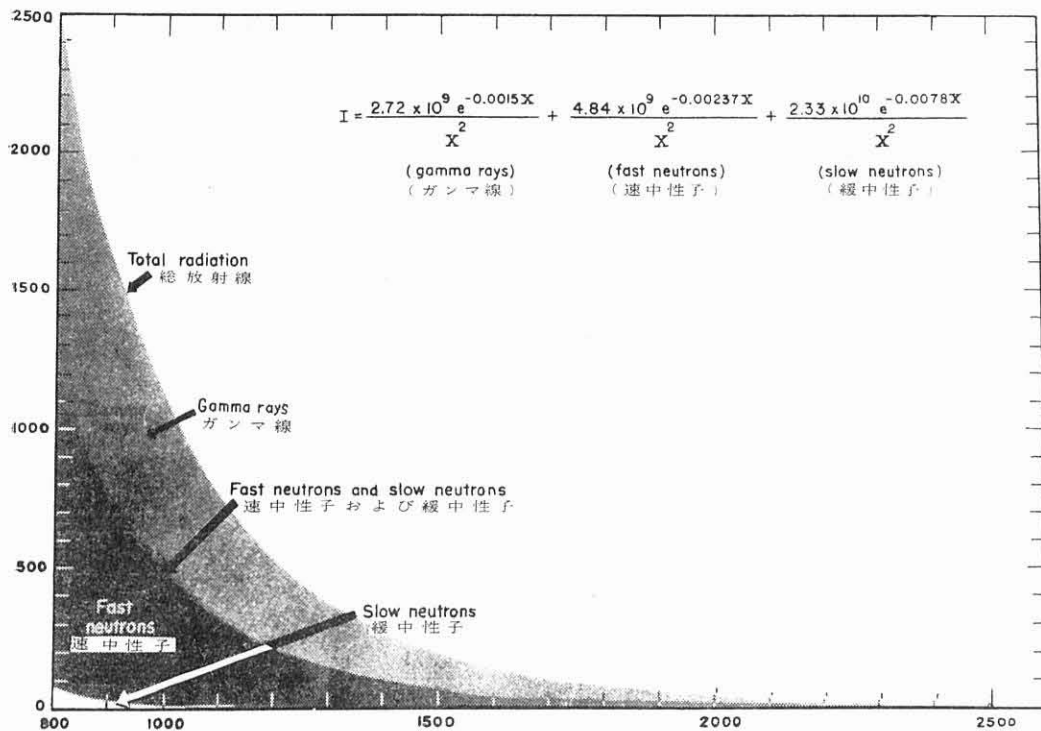
$$I = \frac{2.33 \times 10^{10} e^{-0.0078x}}{x^2} \quad (11)$$

で1 mの距離で緩中性子の強さは $3.02 \times 10^{19}/\text{cm}^2$ であると容易に計算できる。Dessauer 教授によれば、緩中性子の1日間の最小許容線量は緩中性子 $1,500/\text{cm}^2/\text{sec}$ と推定されている。従って、1日に遅い中性子合計 $1,500 \times 60 \times 60 \times 24 = 1.296 \times 10^8/\text{cm}^2$ が許容される。又、この数値は0.1 r に相当する。換算係数 $1 \text{ r} =$ 遅い中性子 $1.296 \times 10^9/\text{cm}^2$ と推定すれば1 mの距離での遅い中性子の強さは $2.33 \times 10^{10} \text{ r}$ として表わされる。

この数値を I_0 とし、 μ の数値として日本側の骨の放射能に関する資料の解析により得られた0.0078を使用すれば、方程式は次のようになる。

Figure 8 Contribution of gamma rays, fast neutrons, and slow neutrons to the total roentgen dosage received immediately at various distances from the explosion of a plutonium bomb

図 8 プルトニウム爆弾の炸裂点から各距離における総レントゲン線量に対するガンマ線、速中性子および緩中性子の割合



where I is the number γ occurring at a distance of x meters from the explosion owing to slow neutrons.

The last major factor responsible for the production of radiation sickness is the gamma rays produced by the explosion of the bomb. The exact relation between gamma ray intensity and distance from the explosion has been formulated by Weisskopf⁹ and includes several factors which are important at distances less than 800 meters, such as the secondary gamma ray production of the radioactive isotopes produced in the ground by the neutron bombardment. For the present purpose, however, it is possible to formulate a more simple relationship which will serve as an approximation for the longer distances, these being of more importance medically. Values for I_0 and μ were derived from the data in a Manhattan District Memorandum Report¹⁰ for distances greater than 800 meters, and the relationship between gamma ray intensity in γ units, I, and distance in meters from the explosion, x , may be expressed by the equation:

$$I = \frac{2.72 \times 10^9 e^{-0.0015x}}{x^2} \quad (12)$$

The value of 0.0015 for μ in Equation 12 is somewhat lower than expected, and corresponds to an extremely penetrating gamma radiation of energy considerably in excess of 1 Mev. This value, however, was obtained empirically from the best data available, and may be modified by future findings.

The total radiation received immediately in the form of fast neutrons, slow neutrons, and gamma rays may be expressed in γ units as a function of distance from the explosion by a summation of Equations 10, 11, and 12 thus:

$$I = \frac{2.72 \times 10^9 e^{-0.0015x}}{x^2} + \frac{4.84 \times 10^9 e^{-0.00237x}}{x^2} + \frac{2.33 \times 10^{10} e^{-0.0078x}}{x^2} \quad (13)$$

(gamma rays)
(fast neutrons)
(slow neutrons)
ガンマ線
速中性子
緩中性子

where I is the radiation in γ units received immediately at a distance of x meters from the explosion. This equation is valid for distances greater than 800 meters, and for distances less than 800 meters it yields minimal values for I. Figure 8

この方程式では、Iは遅い中性子のために距離 x mで生ずる γ の数を示す。

放射線疾患発生の最後の主要因子は原爆により生じたガンマ線である。ガンマ線の強さと炸裂点からの距離との正確な関係を示す式が Weisskopf⁹⁾により求められており、これには中性子照射により地中にできた放射性同位元素による二次ガンマ線の発生など爆心より800m未満のところで重要な要因がいくつか含まれている。しかし、この調査の目的のためには医学的により重要である。もっと遠距離についてこの関係をより簡単に示す概算式を求めることができる。I₀および μ の数値は800m以遠のところについて Manhattan 計画に関する覚書¹⁰⁾の資料より求めた。 γ 単位で示されたガンマ線の強さ I と m単位で示された炸裂点からの距離 x との関係は次の方程式で表わされる。

方程式12における μ の数値0.0015は予想したよりも稍低く、これは1 Mevよりかなり大きいエネルギーを有する透過性の強いガンマ放射線に相当する。しかしこの数値は経験に基づいて入手し得た最善の資料から求めたもので、将来の所見により修正されるかも知れない。速中性子、緩中性子およびガンマ線として直接に受けた放射線の総線量は方程式10、11および12の総和により炸裂点からの距離の関数として γ 単位で表わされる。従って、次の方程式が得られる。

この方程式ではIは炸裂点から x mのところから直接に受けた放射線を γ 単位で示したものである。この方程式は800m以遠のところに対して有効であり800m未満のところではIには極めて低い数値が得られる。原

has been constructed from Equation 13 to indicate graphically the contribution of each of the 3 factors to the total radiation emitted at the time of the explosion, and Table 8 shows the relative importance of the 3 factors at various distances from the explosion center and hypocenter at Nagasaki.

Substantiation of Equation 13 is expected to come from a study of the radiation effects observed in the bomb victims at Nagasaki, and some modification of the constants may have to be made. This study is being carried out under the supervision of Captain Shields Warren, (MC), USNR, and the results are to be reported later. In addition, correlated studies on the nature of the residual radioactive materials in the ground at Nagasaki and Hiroshima are being carried out in this laboratory and will be reported separately. Finally, estimates of the heat intensity as a function of distance at Nagasaki are being made in collaboration with the Bureau of Standards, and these results will also be reported separately.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to express their most sincere thanks to Captain Shields Warren, (MC), USNR, who as Officer-in-Charge of NavTechJap Team 11 facilitated this study in every regard. Acknowledgment is due the members of the Naval Technical Mission to Japan and of the Second Marine Division, in particular the Mapping and Reproduction Section, who cooperated wholeheartedly in the prosecution of the field measurements. We should also like to thank CPhM M. J. Haddon, USN, for the rendering of the figures in this report. Finally, we wish to express our appreciation to the Manhattan District, and specifically to Colonel Stafford L. Warren and Captains H. L. Barnett, R. A. Tybout, and D. L. Collins, for information and assistance during the course of this study.

爆時に放出された総放射線におけるこれらの3要因の割合をグラフによって示すために方程式13より図8を作成した。表8は長崎で炸裂点および爆心地からの各距離におけるこの3要因の相対的重要性を示している。

方程式13は長崎の原爆罹災者における放射線の影響の研究で立証されるであろう。又、常数がある程度変更する必要があるかも知れない。この研究は Shields Warren 軍医大佐により行なわれているので、その結果は後日報告される筈である。なお、長崎および広島の中にある残留放射性物質の性質に関する関連研究がこの研究所において行なわれており、その結果は別に報告される。最後に、米国基準局と共同して長崎における熱線の距離の関数としての強さの推定を行っており、この結果も別に報告する予定である。

感謝の言葉

著者は、すべての点でこの調査に便宜を計って下された、米国海軍技術調査班団長 Shields Warren 氏に衷心より感謝の意を表する次第である。又、実地測定に全幅の協力を与えられた日本派遣米国海軍技術団および米国第2海兵師団、特に製図複製班の全員に感謝する。なお、この報告書で使用した数字を提供して下された M. J. Haddon 氏にも感謝する。最後に、この調査に当って資料および援助を頂いた Manhattan 計画の Stafford L. Warren 氏、H. L. Barnett 氏、R. A. Tybout 氏並びに D. L. Collins 氏に感謝の意を表する。

REFERENCES

参考文献

1. Kimura, M., Tazima, E.: Epicentre (centre in the air) and hypocentre (vertical projection of epicentre on the earth) of explosion and the size of the fire ball. Naval Medical Research Institute and Naval Technical Mission to Japan. Series of Japanese Reports on the Atomic Bomb, Report No. 17, 6 Dec 1945.
2. Harnsberger, H. F., McKnight, F. G., and Wheeler, O. R.: Daily weather data, Nagasaki City, 11 July-31 August 1945, Naval Medical Research Institute and Naval Technical Mission to Japan Series of Japanese Reports on the Atomic Bomb, Report No. 29, 1 Sep 1945.
3. Miyazaki, Y., and Masuda, T.: Radioactivity due to the atomic bomb at Hiroshima and its surrounding districts, Naval Medical Research Institute and Naval Technical Mission to Japan Series of Japanese Reports on the Atomic Bomb, Report No. 16, Jan 1946.
4. Shinohara, K., Morita, S., and Kohra, K.: Radioactivity of the ground at Nagasaki City and its neighborhood, Part II, Naval Medical Research Institute and Naval Technical Mission to Japan Series of Japanese Reports on the Atomic Bomb, Report No. 13, Jan 1946.
5. Shinohara, K., Okada, T., Morita, S., Kohra, K., Inoue, K. and Kawai, N.: Radioactivity of the ground at Nagasaki City and its neighborhood, Naval Medical Research Institute and Naval Technical Mission to Japan Series of Japanese Reports on the Atomic Bomb, Report No. 11, Nov 1945.
6. Masuda, T., Sakata, T., and Nakane, R.: Radioactivity due to the atomic bomb at Nagasaki and its surrounding districts, Naval Medical Research Institute and Naval Technical Mission to Japan Series of Japanese Reports on the Atomic Bomb, Report No. 14, Jan 1946.
7. Yamasaki, F., and Sugimoto, A.: Radioactive phosphorus P³² produced in the human bones and sulfur insulators in Hiroshima, Naval Medical Research Institute and Naval Technical Mission to Japan Series of Japanese Reports on the Atomic Bomb, Report No. 17, 6 Dec 1945.
8. Klema, E. D.: July 16th nuclear explosion: fast neutron measurements using sulfur as the detector, Manhattan District Report LA-361, 1 Oct 1945.
9. Weisskopf, V.: Neutron and gamma ray effects after the nuclear explosion, II, Manhattan District Report LAMS-250, 31 May 1945.
10. Weisskopf, V., Hoffman, J., Aebersold, P., and Hempelman, L.: Manhattan District Memorandum to C. Kistiakowsky, 5 Sep 1945.