

SECTION B

RADIATION IN HIROSHIMA AND NAGASAKI

By

Richard A. Tybout

Captain, Corps of Engineers

6 April 1946

セクションB

広島と長崎の放射線

技術部長、リチャード A チボート

1946年4月6日

Section B.
RADIATION IN HIROSHIMA AND NAGASAKI
CONTENTS

セクションB. 広島と長崎の放射線

目 次

	Page		頁
I Summary.....	164	第 I 章 要旨.....	164
II Gamma Radiation Measured in Japan	165	第 II 章 日本でのガンマ線の測定	165
A. Hiroshima	165	A. 広島.....	165
B. Nagasaki	165	B. 長崎.....	165
C. Integrated Dose from Residual Radiation	167	C. 残留放射線による積算線量.....	167
III Sample Analysis	173	第 III 章 試料の分析.....	173
A. Photographic Films	173	A. 写真フィルム.....	173
B. Human & Animal Bone Samples	178	B. ヒトと動物の骨試料.....	178
C. Soil & Metallic Samples	192	C. 土壌試料と金属試料.....	192
IV Conclusions	204	第 IV 章 結論.....	204
V Acknowledgements	205	第 V 章 謝辞	205
VI Table of Nomenclature	206	第 VI 章 専門用語	206
VII References.....	207	第 VII 章 文献	207
Appendix A		付録 A (省略)	
Appendix B		付録 B (省略)	
Appendix C	208	付録 C	208

[訳注] 本文中「省略」及び「略」とあるのは、内容が専門的であるため省略した。関心のある人はオリジナル英文原稿を読まれることを勧める。

I . Summary

Gamma ray intensities are given for Hiroshima and Nagasaki about 6 weeks after the atomic bombing. The trail of radioactivity left by the cloud of fission products at Nagasaki was traced for 30 miles. Integrated radiation doses were calculated. The highest doses that would have been received in Hiroshima was between 6 and 25 roentgens of gamma radiation and the highest in Nagasaki was between 30 and 110 roentgens of gamma radiation. To get these doses, one would have had to remain at the point of highest radioactivity, as shown on Maps 1 and 3, respectively, from 1 hour until about 6 weeks after the atomic bombings.

The gamma ray intensity from the Hiroshima atomic bomb was measured using samples of x-ray film from the Hiroshima Red Cross Hospital. An intensity of 12 roentgens at 2300 meters from the bomb was indicated, as compared with a theoretically predicted maximum of 3 roentgens.

Neutron intensities were calculated from the induced radioactivity of phosphorous in bones picked up in the Japanese cities. In both Hiroshima and Nagasaki, neutron intensities exceed by at least a factor of 10 the maximum theoretical values. Figures obtained from the most reliable Japanese report on induced radioactivity exceed the maximum theoretical values by a factor of 7 in the center of Hiroshima.

Soil and metallic samples were analyzed to account in detail for the residual radioactivity. Fission products were quantitatively separated from two of soil samples. The residual radioactivity at Nagasaki, even in the area directly below the bomb, originated almost entirely from deposited fission fragments rather than from elements normally present made artificially radioactive.

Copies of all available Japanese reports on radioactivity are inclosed in Appendix C.

第1章 要旨

広島と長崎では原爆投下後およそ6週間、強いガンマ線を確認した。長崎では核分裂生成物を含む原爆の「きのこ雲」によってもたらされた放射能が50km遠方に広がっていた。この期間の積算線量を計算すると、広島でガンマ線に被曝した最高線量は6レントゲンから25レントゲンであり、長崎では30レントゲンから110レントゲンであったと推定した。ただし、これらの被曝線量は、図1と図3（Maps 1, 3）に示す最も放射線の強い地点に、原爆投下後1時間から約6週間にわたって留まるときに受けるものであった。

広島の原因によるガンマ線の線量は広島赤十字病院にあったX線フィルムを用いて求めた。その結果、爆心地から2,300mの地点では12レントゲンを示した。これに対し、理論的に求めた線量は3レントゲンであった。

中性子の強さは広島と長崎で採集した骨に含まれる燐の誘導放射能をもとにして求めた。中性子の強さは広島と長崎において、理論的に求めた値の少なくとも10倍以上であった。日本人科学者の報告では、広島爆心地における誘導放射能は理論的に求めた値の7倍以上であった。

残留放射能を詳細に求めるために土壌と金属の試料を分析した。核分裂生成物を2つの土壌試料からそれぞれ定量的に分離した。長崎における残留放射能は爆心直下の地域であっても、中性子による誘導放射能というより、核分裂生成物を含む放射性降下物によるものであった。

放射能に関する入手可能なすべての日本人科学者の報告書は付録Cに掲載した。

II. Gamma Radiation Measured in Japan

A. Hiroshima

1. Two Lauritsen-Wollen electroscopes and two portable counters with attached earphones, developed by the University of Chicago, and made by the Victoreen Instrument Company were used in the survey.

2. Calibration of Instruments

a. Gamma Ray

A radium capsule was used and the calibration was made in terms of roentgens per hour.

b. Beta Ray

No beta ray calibrations were made. In some cases, the readings were noted with the 1/16" brass window opened in front of the tube.

3. Method of Monitoring

The measurements were recorded at specific points throughout the city in order to plot contours of equal radioactivity and measurements were made almost every street and intersection to be sure that radiation intensity changed evenly between contour lines.

4. Result

All measurements were made from October 3 through October 7, 1945. The data are given in the Appendix C. Map #1, page 3b, shows isodose lines which connect points of equal radiation intensities at Hiroshima.

B. Nagasaki

1. Instruments

All measurements were made with one of two portable G.M. counters. These counters were made by Victoreen Instrument Company, serial # 263-10 and 263-0. The counting tube was mounted inside a brass probe (1/16" wall thickness) with a removable window for measuring beta radiation. It was not possible to use direct reading ionization chamber instruments because none of sufficient sensitivity were available. It was attempted to make measurements with L & W electroscopes but the

第II章 日本でのガンマ線の測定

A. 広島

1. ローリッツェン・ウォーレン検電器2台と、シカゴ大学が開発しヴィクトリーン社が製作したイヤホン付の携帯用GM計数管2台を用いて測定した。

2. 測定器の校正

a. ガンマ線

ガンマ線の校正はラジウム線源を測定し、1時間あたりのレントゲン単位で示した。

b. ベータ線

ベータ線の校正は行わなかった。測定条件によっては、測定器の前部に取り付けてある1.6mm厚の真鍮製の窓をはずして測定した。

3. モニタリングの方法

同じ放射線の強さの地点を等高線で結べるように、都市の全域で数多くの測定を実施した。等高線の間で放射線の強さが変化していないかを確かめるため、全ての道路や交差点で測定を行った。

4. 結果

測定は、1945年の10月3日から7日にかけて行った。結果は付録Cに示した。広島における同じ放射線の強さを示す等線量分布を図1 (Map #1) に示した。

B. 長崎

1. 測定器

測定は2台の携帯用GM計数管のうち、どちらかの1台で行った。GM計数管はベータ線を測定するための取りはずし可能な真鍮管（壁の厚さ1.6mm）の中に装着されていた。直読式の電離箱は十分な感度がなかったために使用しなかった。ローリッツェン・ウォーレン検電器を用いたが、校正した値の変動が大きかったために測定に使用しなかった。

calibrations of the electroscopes did not remain consistent from day to day, therefore such measurements were discarded.

2. Calibration of Instruments

a. Gamma Ray

The instruments were calibrated using 24.35 mg of Ra in a 1/2 mm platinum wall capsule. A careful calibration was made 3 times and spot checks were made every day during the two weeks period that the instruments were in use. All calibrations curves are given in Appendix B.

b. Beta Ray

No beta ray calibrations were made. In some cases, meter readings were made with the window of the probe open to the tube. The only significant information that can be obtained from such readings is the relative intensity of beta and gamma radiation in different localities.

3. Method of Monitoring

- a. All measurements were made with the instrument 2" above the ground unless otherwise specified. The area directly below the bomb explosion (north Nagasaki) and the reservoir area were explored by foot parties. The rest of the measurements were made by monitoring crews riding in jeeps. These crews took reading at regular intervals along the sides of the roads where the ground was not ordinarily disturbed by vehicles or travellers.
- b. The measurements were made using the direct readings on the meters if the radioactive intensity was relatively strong, and in counts/minute using an ear phone and stop watch if the activity was weak.

4. Results

- a. All of the original monitoring data are given in Appendix B.
- b. Maps 2 and 3, each showing contours of radiation

2. 測定器の校正

a. ガンマ線

校正は0.5mm厚のプラチナの容器に入ったラジウム線源(24.35mg)を使用した。測定は3回行った。校正は測定器を使用していた2週間の間、毎日行った。すべての校正曲線を付録B(省略)に示した。

b. ベータ線

ベータ線の校正は行わなかった。測定条件によっては、測定器の窓を外して測定した。それぞれの測定地点でのベータ線とガンマ線の放射線強度の比のみがこの測定から得られる情報である。

3. モニタリングの方法

- a. すべての測定は、特に記していなければ地上5cmの高さで行った。原爆直下の地域を含む長崎北部と西山水源地付近は徒歩で調査した。他の地域の調査はジープを用いた。この調査は自動車や人があまり来ない道路にそって一定間隔ごとに測定を行った。
- b. 放射能が比較的強い場合は、GM計数管の指示計の値を測定値とした。放射能の強さが弱い場合は、イヤホンとストップウォッチを使って1分間あたりの計数値の測定を行った。

4. 結果

- a. すべての測定結果を付録B(省略)に示した。
- b. 図2と図3(Map #2, #3)及び図4(Map #4)

intensities measured in the Nagasaki area, are given on pages 3c and 3d.

1. Map #2 covers a large section of the southern Nagasaki Prefecture. It should be noted that the path of fission products trailing eastward from Nagasaki was traced to the point where it disappeared into the bay. It is possible that the cloud trail could be picked up again on the mainland of Kyushu, across the bay.
2. Map #3 is an enlarged section of Map #2; it shows in more detail the radiation intensities in and around the city of Nagasaki.

c. Integrated Dose from Residual Radiation

1. The total intensity, I , of beta or gamma radiation from fission products changes with time, t , in accordance with the relation

$$I = k \left(\frac{1}{t} \right)^n \quad (1)$$

where k is a constant and n is 1.2 for fission products in the laboratory and 1.5 for fission products distributed on the ground at the New Mexico test (3). If equation (1) is integrated from 1 hour after the Nagasaki atomic bomb explosion to infinity.

$$I = k \left(\frac{I_t \times t^n}{1-n} \right) (t_1^{(1-n)} - t_\infty^{(1-n)}) \quad (2)$$

2. A decay curve was plotted for sample 43, as shown in Figure 11, page 44. From this curve, it is evident that $n = 1.2$, but the value for n when the fission products are subject to soil erosion, as in Nagasaki, is probably closer to the figure of 1.5 found in New Mexico (3). If $n = 1.2$, the gamma radiation values, shown on Maps 2 and 3 in mr/hr, should be multiplied by 15 to get the total integrated dose in r/hr. If $n = 1.5$, multiply by 60. Thus, the total roentgen dose is somewhere between 15 and 60 roentgens for each mr/hr shown on the maps. There is no reason to think that the same factor should not apply at Hiroshima.

に長崎地区で測定した放射線の等線量分布を示す。

1. 図2は長崎県南部を示す。核分裂生成物を含む原爆雲の進路は長崎の東の方向に続いて、最後は島原湾の中に消えていた。原爆雲の跡は島原湾を横切り、九州本島でもう一度確認できると推定した。
2. 図3は図2の部分拡大である。この図に長崎市周辺における放射線の強さを詳細に示した。

C. 残留放射線による積算線量

1. 核分裂生成物からのベータ線とガンマ線の全放射線強度 I は、時間 t の関数で次の式のように変化する。

$$I = k \left(\frac{1}{t} \right)^n \quad (1)$$

k は定数、 n の値は実験室系における核分裂生成物では 1.2、ニューメキシコの核実験で地面に広がった核分裂生成物では 1.5 であった (文献 3)。式 (1) を長崎の原爆の爆発後 1 時間から無限時間までを積分すると、次の式で示される。

$$I = k \left(\frac{I_t \times t^n}{1-n} \right) (t_1^{(1-n)} - t_\infty^{(1-n)}) \quad (2)$$

2. 図 5 (Figure 11) に示す土壌試料 No.43 の測定値から崩壊曲線を求めた。この曲線から、 n は 1.2 であった。長崎のように放射性降下物が雨などにより浸食を受けやすい場合は、 n の値はニューメキシコの核実験の 1.5 に近い値と考えられた (文献 3)。もし n が 1.2 であれば、図 2 と図 3 に mr/hr で示したガンマ線の線量率の値を 15 倍すれば、積算線量 (r) が得られる。もし n が 1.5 であれば、60 倍する。よって、地図に mr/hr で示したガンマ線の線量率の値から全積算線量は 15~60 倍することによって得られる値であると推定した。広島においても同じ係数を使った。

3. It was attempted to use the radiation intensities reported by the Japanese in Nagasaki and Hiroshima with the intensities in this report to get a better value for n . The values found by Masuda, Sakata and Nakane, Appendix C VI, come closest to being satisfactory for this comparison, but the relation between the data in their report and those in this report is not consistent enough from place to place to fix n any more definitely. It is recommended that an attempt be made to evaluate n using the data obtained by Capt. Warren's Navy Group.

3. 正確な n 値を得るために、日本人科学者が報告した長崎と広島での放射線の強さの測定結果を比較した。付録Cの第VI章にある増田、坂田および中根の値と我々の結果は非常に近い値であった。しかし、測定点によっては大きな違いが認められた。したがって、ワレン大佐の海軍隊が得た結果を用いて n 値を評価することが望ましいと考えた。

図1 (Map #1) 広島における放射線の等線量分布図
(1924年10月3 - 7日測定)

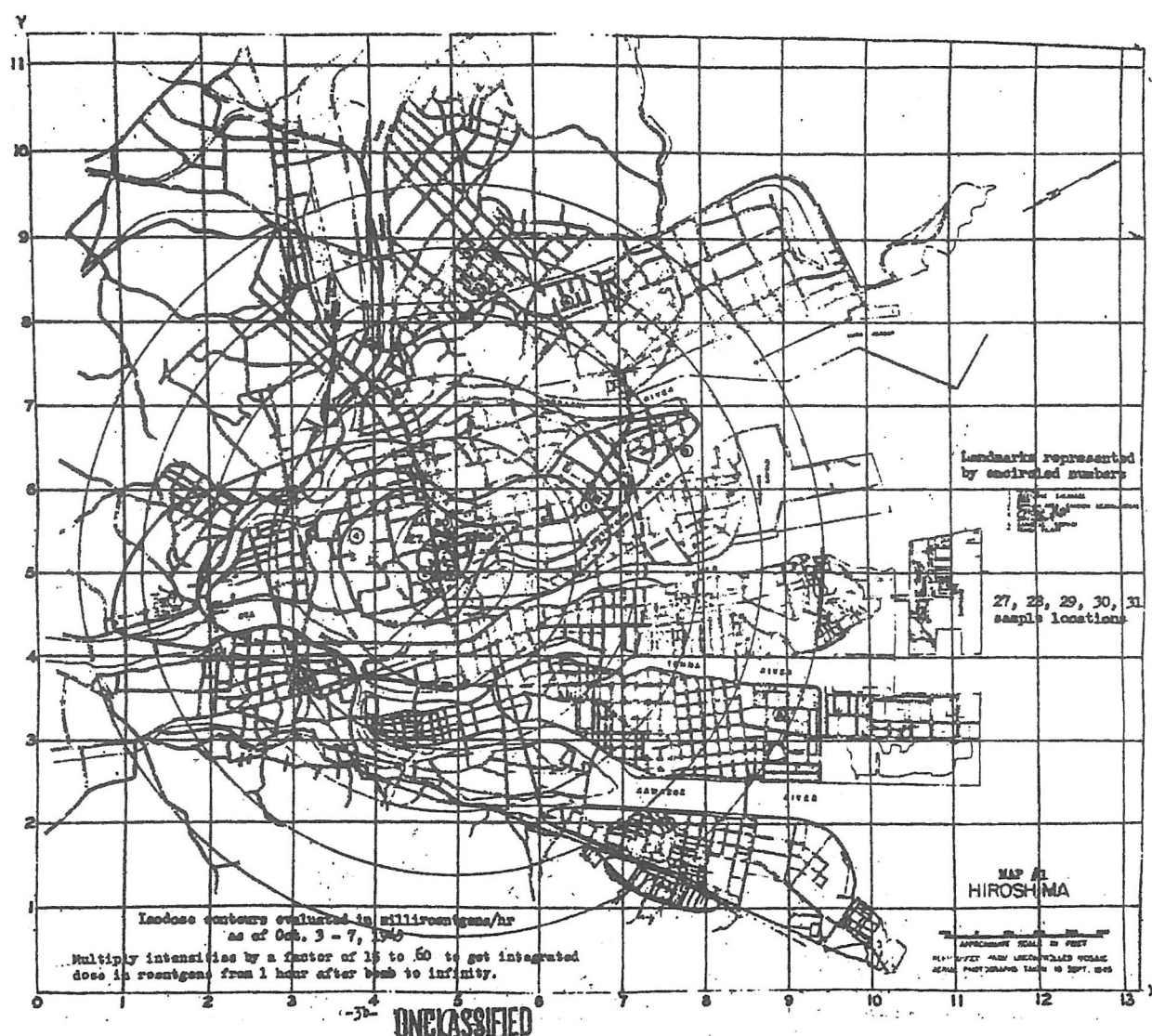


図2 (Map #2) 長崎南部における放射線の等線量分布図

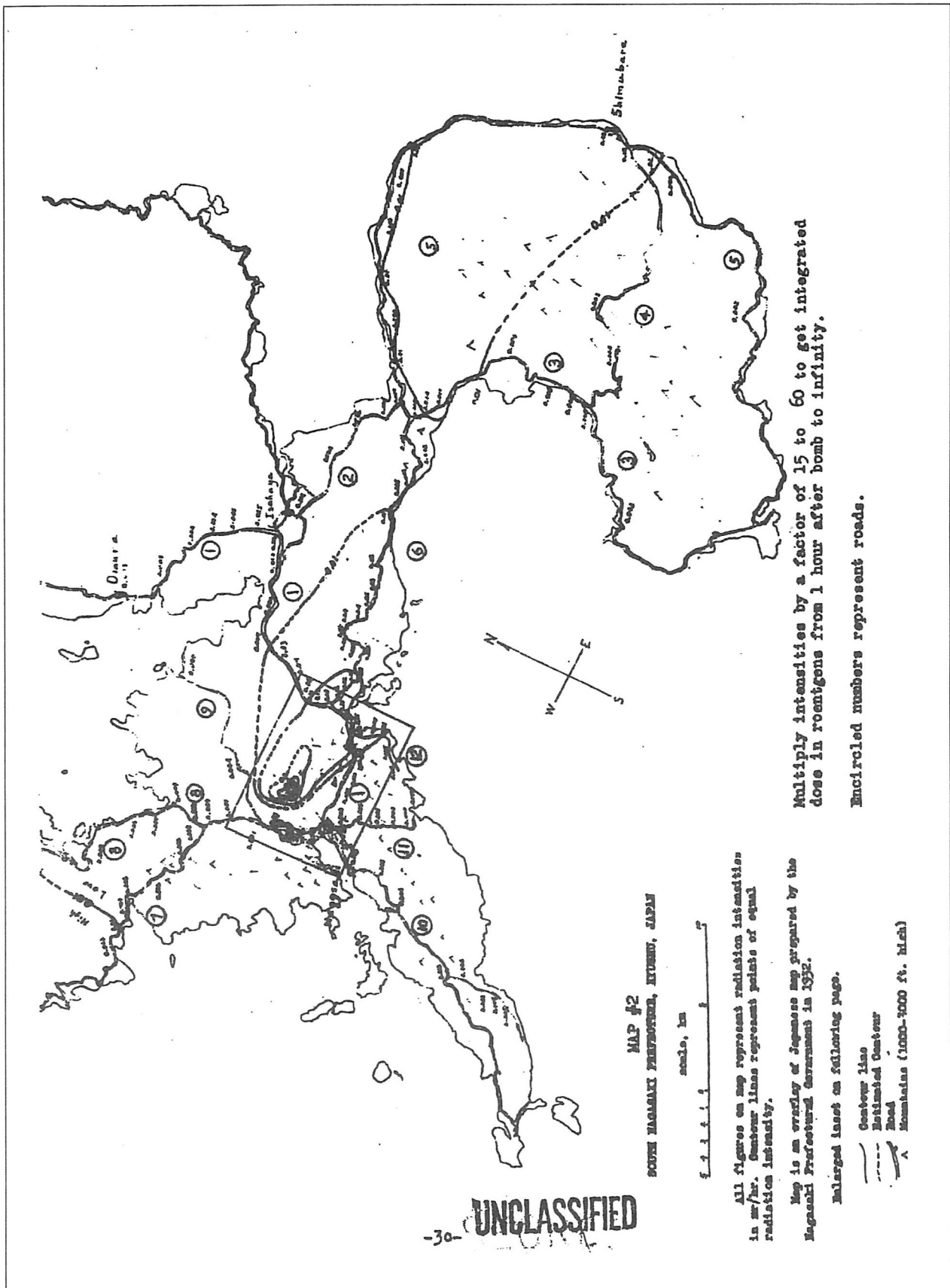
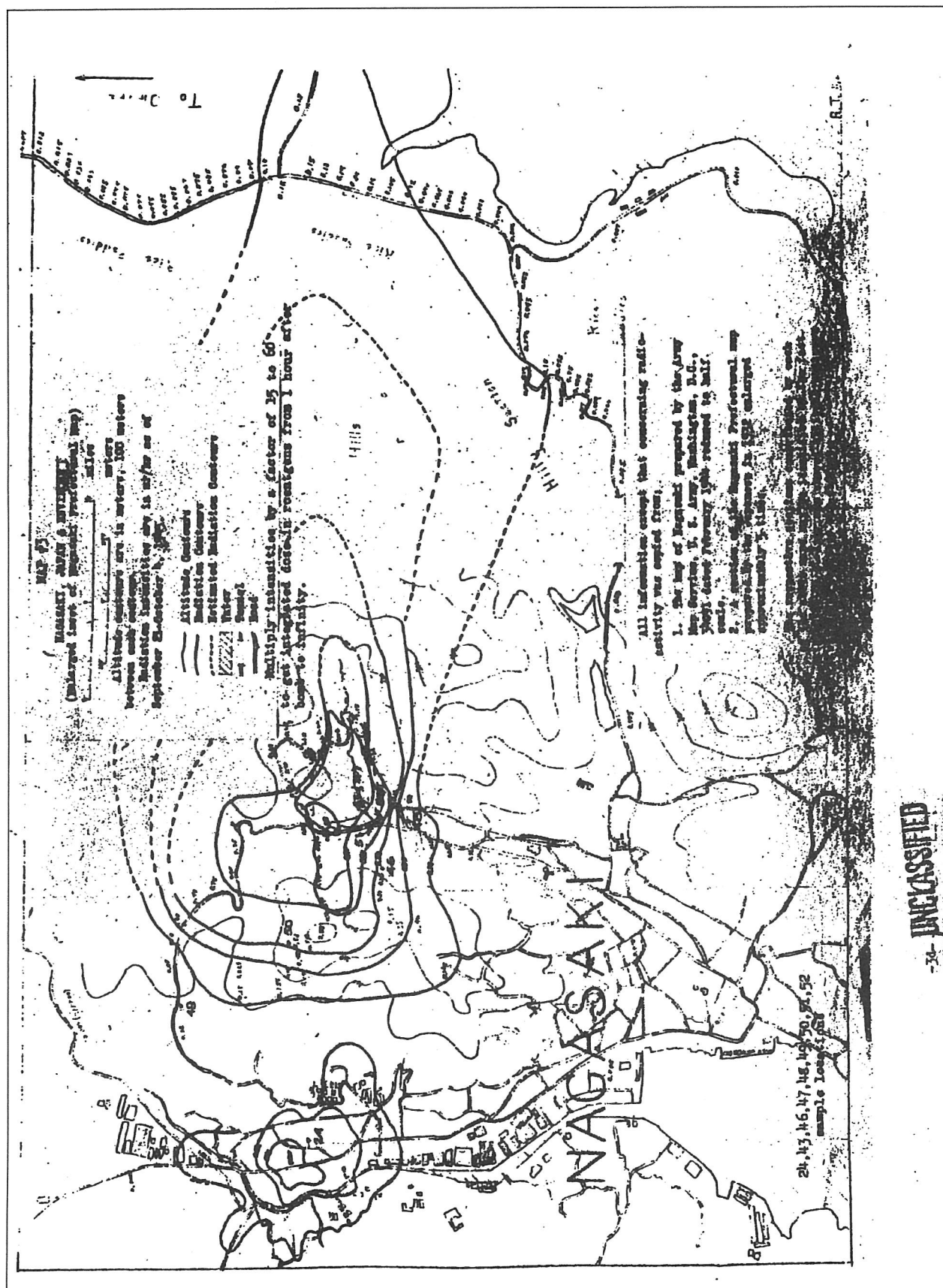


図3 (Map #3) 図2の部分拡大図(長崎の爆心地、西山地区および東長崎地区)



UNCLASSIFIED

図 4 (Map #4) 長崎原爆の爆心地から東方向への海拔と放射線量の関係

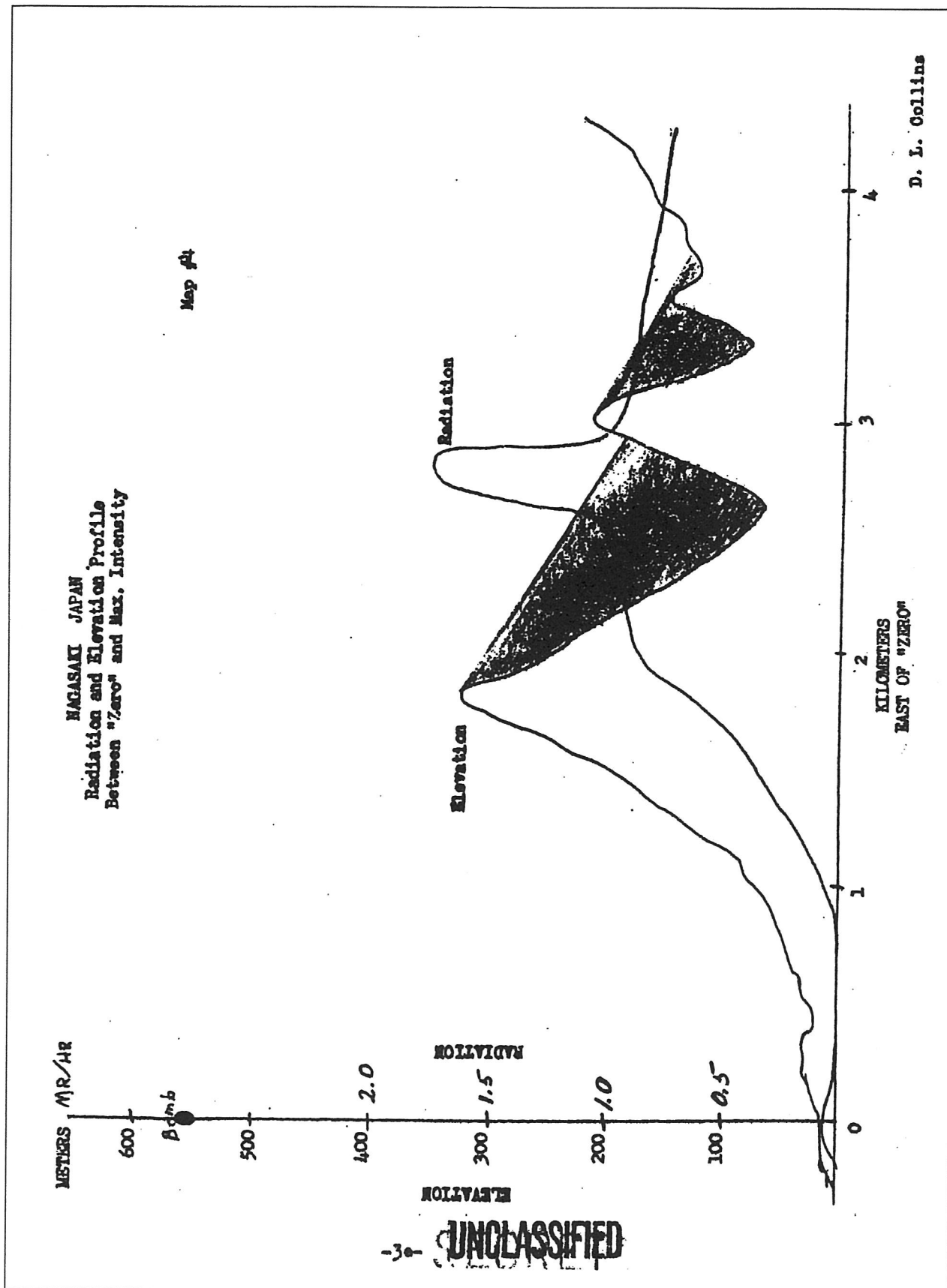
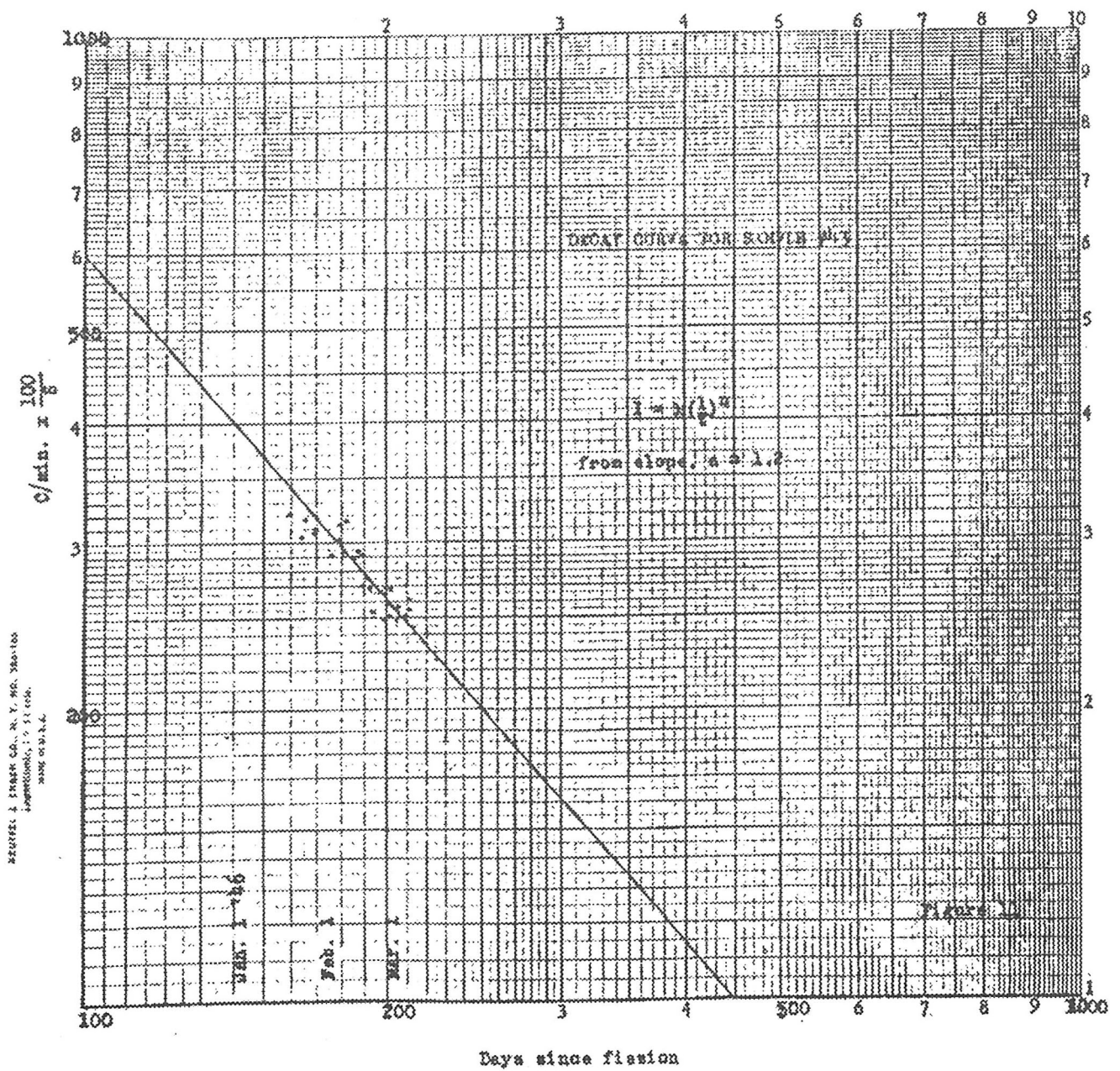


図5 (Figure 11) 土壌試料No.43の放射能の崩壊曲線



III. Sample Analyses

A. Photographic Films

Gamma radiation, which is similar in nature to x-radiation, will produce a blackening on photographic film. By measuring the blackening and determining certain characteristics of films picked up in Hiroshima, an estimate is made of the amount of gamma radiation they received.

1. Location of Films

Five boxes of films were obtained from the Red Cross Hospital in Hiroshima. The films of three of these boxes could be used in this experiment. The other two films from the same hospital and films from the Nagasaki Medical School could not be used because they had been exposed to daylight or because the age limit of the film had been exceeded by several years. The films that were used were manufactured by the Fuji Xerox Co.; a translation of the Japanese legend on each box was as follows:

a. Film #1

Series No. 3099-5-NF

Effective Period: November 44

b. Film #3

Series No. 3118-2-NS

Effective Period: July 45

c. Film #4

Series No. 3129-10-NZ

Effective Period: September 45

The location of the Red Cross Hospital is shown on Map I, page 3b. It is listed among the key buildings on that map. The amount of shielding material between the film and the bomb is shown on Plate I, page 7. Each package of film was found unopened and contained one dozen or two dozen unused films. All of the films were found in dark rooms in boxes that apparently had been constructed for film storage. The dark rooms were located near x-ray laboratories and there were emulsions on both sides of the film base, which indicates that they were x-ray films.

第三章 試料の分析

A. 写真フィルム

ガンマ線はX線に似た性質を持っていて写真フィルムを感光させることができる。広島で採取した写真フィルムの特性と写真濃度を測定し、それらが受けたガンマ線量を推定した。

1. フィルムの採取場所

広島の赤十字病院から5箱のフィルムを手に入れた。これらのフィルム箱のうち3箱がこの分析に使うことができた。この病院の他の2つのフィルムと長崎医科大学のフィルムは、太陽光にさらされたり製造後何年も経過したものであったために分析に使うことができなかった。

分析した写真フィルムは富士フィルム社製で、箱の説明書には以下のように記されていた。

a. フィルムNo.1

製造番号3099-5-NF

有効期限：1944年11月

b. フィルムNo.3

製造番号3118-2-NS

有効期限：1945年7月

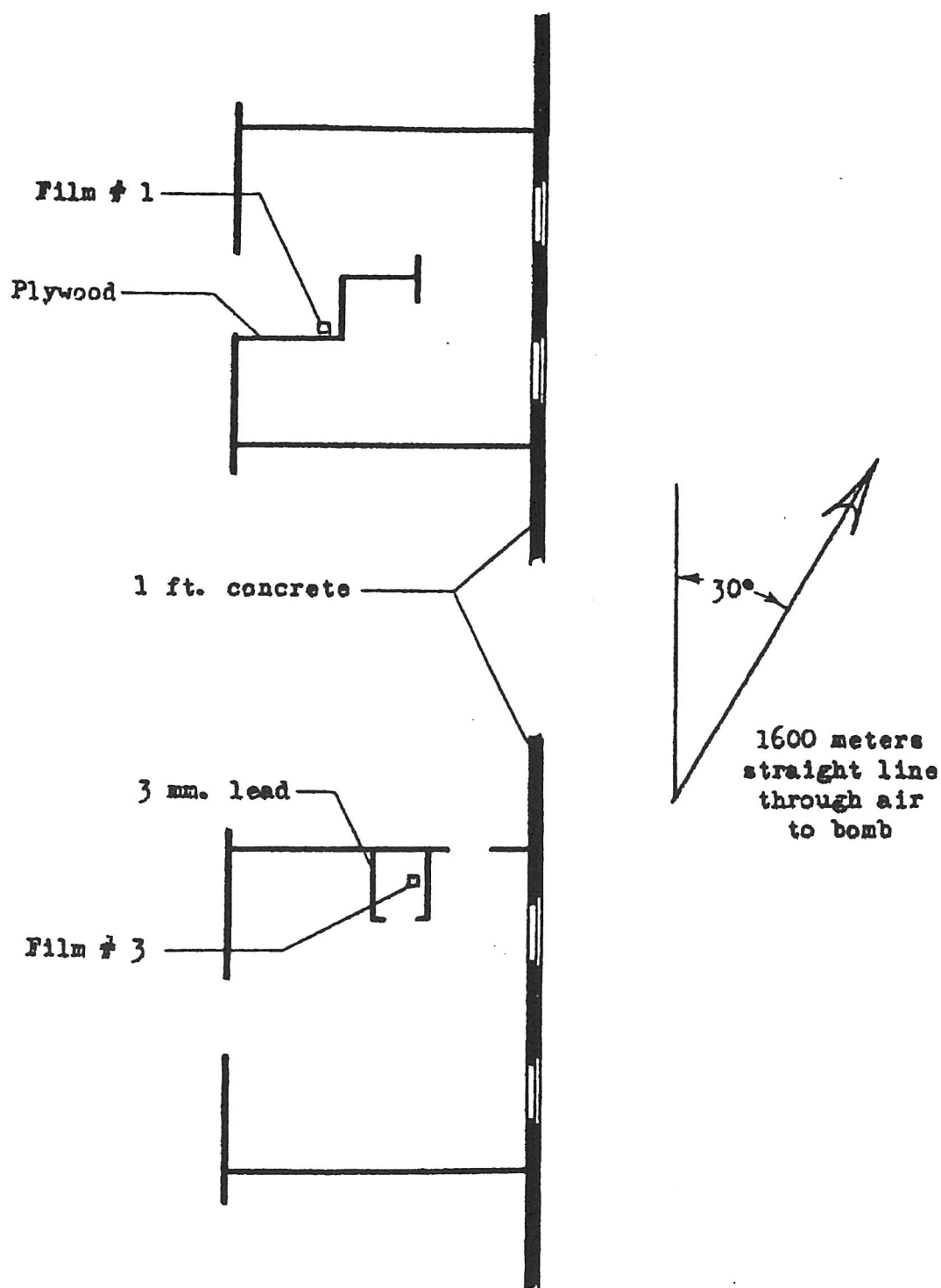
c. フィルムNo.4

製造番号3129-10-NZ

有効期限：1945年9月

赤十字病院の場所を図1 (Map #1) に特別な建物として示した。原爆の放射線からフィルムを遮蔽していた建物の構造を図6 (Plate 1) に示した。それぞれのフィルムの包みは未解放で中に未使用のフィルムが12枚又は24枚入っていた。全てのフィルムは暗室内のフィルム保存用の箱に入ったまま見つかった。それらは暗室がX線照射室の近くにあり、フィルムのベースの両側に乳剤が塗布されていたことから、X線フィルムであることがわかった。

図 6 (Plate 1) 写真フィルムの採取場所 (広島赤十字病院)



LOCATION OF HIROSHIMA FILM

Plate 1

2. Experimental Procedure

a. Preliminary investigation was made by developing a few sheets of film from each package. Developing was done by an experienced individual in the manner prescribed by the Eastman Kodak Company for developing type K x-ray film. Samples of each of the films from the same packages (1,3,4) showed the same density (blackening, expressed as log of reciprocal of transmission of incident light) throughout the entire surface.

b. Dr. H. E. Seeman of the Kodak X-ray Research Department was consulted determine whether there could have been any effect other than that of short wave radiation that would have produced the density on the films. The only important effect other than that of an exposure to visible light (films were found in sealed packages) was that of a breakdown in the chemical constituents of the film, known as "fog". There are two ways in which the densities caused by fog and x-rays differ:

1. The grain structure of a fogged film is finer than that of a film which has been exposed to gamma radiations.

2. The rate of development of a normal radiation exposure is faster than that of a fogged film until 5-8 minutes after development has started.

Then, both films develop at about the same rate.

c. Under the auspices of Dr. Seeman, experiments were carried out to determine whether the film was fogged or exposed to short wave radiation.

1. A comparison of the grain structure of film #3 was made with that of a Japanese film that was known to have been exposed to gamma radiation. The Japanese film exposed to gamma radiation was obtained by superimposing five roentgens of gamma radiation from radium on top of the very slight Hiroshima exposure (about 0.3 roentgens) already on film 4. This brought

2. 実験方法

a. それぞれのフィルムの包みから数枚ずつ取り出し現像し、予備実験を行った。現像はイーストマン・コダック社のKタイプX線フィルムの現像方法に従い、経験者が行った。同じ包みから取り出したフィルム (No.1,3,4) は、全表面で同じ写真濃度であった。

b. コダック X線研究所のシーマン博士は、高エネルギー放射線以外にフィルムを感光させるようなものがなかったかどうかについて調査を依頼された。フィルムの感光は可視光線の暴露以外の影響である「かぶり」として知られているフィルムの化学成分の劣化によるものがある。かぶりと X線による感光との違いを見分ける方法は2つある。

1. かぶりによるフィルムの粒子構造はガンマ線に暴露された場合よりも細かい。

2. 現像を始めてから5～8分までは放射線照射による現像の方がかぶりによる現像より早い。それ以後の現像速度は同じになる。

c. フィルムがかぶりをおこしたのか、それとも高エネルギー放射線に暴露されたのかを、シーマン博士の援助のもとで調べられた。

1. フィルムNo.3の粒子構造をガンマ線で照射された日本製のフィルムと比較した。ガンマ線で照射された日本製のフィルムは、広島ですでに少量の放射線を受けた(約0.3レントゲン)フィルムNo.4に、ラジウムからのガンマ線をさらに5レントゲン照射してつくられた。この操作でフィルムNo.4はフィルムNo.3とほぼ同じ写真濃度になった。

film 4 up to about the same density as film 3. Dr. Seeman made a comparison of the grain structure of the two films. In his opinion, the density was due to short wave radiations, not fogging.

2. Twenty-eight pieces of film, 1/2" X 3", were cut from each of the unexposed Japanese films and from a sheet of Kodak type K industrial x-ray film. Two pieces of each film were developed simultaneously for fourteen different times of development ranging from 1-40 minutes. Density measurements were made and the results averaged for the two samples of each film. The densities and times of the development are listed in Table 1, page 8 and plotted Figure 1, page 10.

Figure 1 shows that the density of Hiroshima films #1 and 3 is due to short wave radiation exposures rather than fog. The density of Kodak type K film was known to have been due to fogging. It is questionable whether Hiroshima film #4 manifested a density due to radiation or fogging; therefore #4 was not used for evaluating gamma radiation at Hiroshima, but it was used to obtain the most complete characteristic curve for the Japanese film since it had such a low original density. Compare Figure 4, page 13, with Figures 2 and 3, pages 11 and 12.

- d. Having established that short wave radiation was responsible for the film densities, the amounts of radiation were evaluated in the following manner:

1. Pieces of film 1/2" X 3" were cut from some of the remaining undeveloped sheets of film 1, 3 and 4. Each piece was exposed to gamma radiation from radium at the rate of 0.3 r/hr for lengths of times ranging from 1-64 hrs.
2. The entire group of films was developed simultaneously with a pre-exposed strip of Kodak type K x-ray film that had been exposed to known dosages of radiation to check the development. The densities of the films were measured on an

この2つのフィルムの粒子構造を比較した結果、シーマン博士はフィルムの感光をかぶりによるものではなく高エネルギー放射線によるものと判断した。

2. 未照射の日本製のフィルムとコダックのKタイプ工業用X線フィルムを1.3cm×7.6cmの大きさの28片に切った。フィルム2片ずつを1～40分の14通りの異なった現像時間で同時に現像した。写真濃度を測定し、それぞれの現像時間について2片のフィルムの濃度の平均値として結果を出した。濃度と現像時間は、表 (Table 1, 略) と図 (Figure 1, 略) に示した。

図 (略) より、広島フィルムNo.1とNo.3の感光はかぶりによるものではなく、高エネルギー放射線によるものであった。コダックのKタイプX線フィルムの感光は、かぶりによるものであることがわかっている。広島フィルムNo.4は感光がかぶりによるものか、それとも放射線によるものか明らかでないために広島のガンマ線の評価をするために用いなかった。しかし、写真濃度が非常に低かったので、日本のフィルムの特性曲線を得るために使った。

- d. 高エネルギー放射線によってフィルムの感光が起こることが確認されたので、ガンマ線量は次の方法で推定することができた。

1. 現像していないフィルムNo.1、No.3およびNo.4を1.3cm×7.6cmの大きさに切った。それぞれのフィルム片は0.3 レントゲン/時の照射線量率のラジウム線源のガンマ線で1～64時間の範囲で照射した。
2. 現像状態を調べるために、あらかじめ定められた線量を暴露しておいたコダックのKタイプX線フィルムとすべてのグループのフィルムを同時に現像した。フィルムの写真濃度はアンスコ・スイート濃度計で測

AnSCO Sweet densitometer. The results are listed in Table 2, page 8.

3. Calculations and Results

- a. The total exposure, E , to the film was due to E_H , the exposure at Hiroshima, and E_R , the exposure at Rochester. Values of E_H ranging from 0-24 roentgens were assumed. $\log E$, ($\log(E_H + E_R)$), was calculated for each family of curves corresponding to an assumed E_H value and was plotted vs. density units as shown in Figures 2, 3 and 4 on pages 11, 12, and 13.
- b. By comparing the characteristic curves shown in Figures 2 and 3 with those in Figure 4 (Hiroshima 4) and those in Figure 5, page 14, (typical characteristic curves for Kodak Industrial x-ray films), the following estimates can be made as to which assumed value of E_H is best:
 1. Film #1: 6-9 roentgen of gamma radiation
 2. Film #3: 15-24 roentgen of gamma radiation
- c. It was recommended by Dr. R. E. Marshak that the thickness of the concrete wall shielding the films at the Hiroshima Red Cross Hospital be expressed in terms of an equivalent amount of air. The equivalent of 2 ft of concrete is 1400 meters of air as found by multiplying by the inverse ratio of densities. When the effect of the inverse square law is taken into account, the reduction in radiation due to absorption in 1400 meters of air is the same as the reduction of radiation proceeding from the Hospital at 1600 meters to a point 2300 meters from zero. Then, a radiation dosage of 12 roentgens (average of films 3 and 4) of gamma radiation would have been received at 2300 meters from the bomb at Hiroshima as compared with an upper limit of 3 roentgens predicted by Dr. V. F. Weisskopf in his report LA-250.

定した。結果を表 (Table 2, 略) に示した。

3. 計算と結果

- a. フィルムが受けた放射線量 E は、広島の原因による放射線量 E_H とロチェスターで照射された放射線量 E_R の和である。線量 E_H は 0 ~ 24 レントゲンの範囲にあると推測された。 $\log E$ 、つまり $\log(E_H + E_R)$ は、推定した E_H の値に対して計算し、図 (Figures 2, 3, 略) に示したように、写真濃度に対する曲線を得た。
- b. 図 (Figures 2, 3, 略) に示した特性曲線を図 (Figures 4, 広島フィルム NO.4, 略) と図 (Figures 5, コダックの K タイプ X 線フィルムの特性曲線、略) を比較し、 E_H の値が最も信頼できる次の推定値を得た。
 1. フィルム NO.1: ガンマ線 6-9 レントゲン
 2. フィルム NO.3: ガンマ線 15-24 レントゲン
- c. マーシャク博士は、広島赤十字病院でフィルムを遮蔽していたコンクリートの壁の厚さを同量の空気の厚さに換算した。厚さ 61 cm のコンクリートは、密度の逆関数から計算すると 1,400 m の空気の厚さに相当する。逆二乗の法則から計算して、1,400 m の空気中での吸収による放射線の減少は、広島において爆心から 1,600 m の地点を 2,300 m の地点に移すことによる放射線の減少と同じであった。したがって、広島爆心から 2,300 m 離れた地点でのガンマ線量は、12 レントゲン (フィルム NO.3 と NO.4 の平均値) と推定した。一方ウイスコフ博士が LA-250 報告書で推定した 2,300 m 地点での線量は最大値で 3 レントゲンであった。

B. Human and Animal Bone Samples

Phosphorous, which makes up 6.3% by weight of bone tissue, can be made artificially radioactive by neutron capture. The purpose of the following work was to measure the radioactivity of the phosphorous in bones picked up in Hiroshima and Nagasaki and to estimate the neutron intensities that would have been responsible.

1. Location of Bones

The location of each sample at the time of atomic bomb explosion is given in Table 3, page 23, in terms of the arbitrary coordinates shown on Maps #1, 2 and 3, pages 3b, 3a and 3d.

2. Experimental Procedure

a. Apparatus

All of the radioactivity measurements were made on one of two Geiger Muller Counters differing only in window thickness. The counters were designed and built by Dr. W.F. Bale and Mr. J.F. Bonner of the University of Rochester. Each counter tube was surrounded by $1\frac{1}{2}$ " of lead, which was found to cut down the cosmic radiation to about $1/2$ of what it would otherwise be. A cross sectional view of the counting tube and lead shielding is shown in Plate 2, page 21.

b. Preparation of Samples

Each of the bones from Japan was washed and the dirt was saved to check it for radioactivity. The outside of each bone was sandpapered off to get rid of adsorbed material. The bones were individually ashed and ground to a fine powder. 2% (by weight) of gum arabic was added and thoroughly mixed with each sample and enough water was added to form a thick paste. Samples thus prepared were spread in flat stainless steel cups with inside diameter $1\frac{1}{4}$ " and $1/8$ inch deep. A drawing of a cup (or disc, as it will henceforth be referred to) and the stand to hold it for counting are shown on plate 3, page 23. Samples were dried in an oven at 50°C and

B. ヒトと動物の骨試料

骨組織中に重量あたり6.3%含まれる燐は、中性子捕獲によって放射化される。この測定は広島と長崎で採集した骨に含まれる燐の放射能を調べることから、正確な中性子の量を求めるために行った。

1. 骨試料の採取場所

採取した骨があった場所を図1と図3に試料番号で記入して示した。採取した骨の詳細なデータを表1 (Table 3) に示した。

2. 実験方法

a. 測定器

すべての放射能測定は、窓厚の異なる2台のGM計数管のどちらか1台で行なった。GM計数管はロチェスター大学のバレ博士とボナー氏により設計・製作がなされた。GM計数管はバックグラウンドを約半分に減らすために3.8cmの鉛で遮蔽した。GM計数管の断面図と鉛遮蔽の構造を図7 (Plate 2) に示した。

b. 試料の調整

日本で採取した骨は、付着した泥を洗い落とした。付着した泥は放射能を調べるために残しておいた。骨の表面は、サンドペーパーで磨いて吸着した物質を取り除いた。骨は灰にして細かい粉末にした。骨の灰に重さあたり2%のアラビア糊を加えて混ぜ、水を加えて厚いペースト状に整形した。調整した試料は、内径が3.2cm、深さ0.32cmのステンレス製の試料皿に平になるように広げた。試料皿と測定のための支持台を図(Plate 3, 略)に示した。試料は 50°C に設定した乾燥器で乾かし、測定しないときは乾燥器の中で保存した。

Table 3 LOCATION OF BONES AT TIME OF ATOMIC BOMB EXPLOSION

表 1. 原爆が爆発した時に骨のあった場所

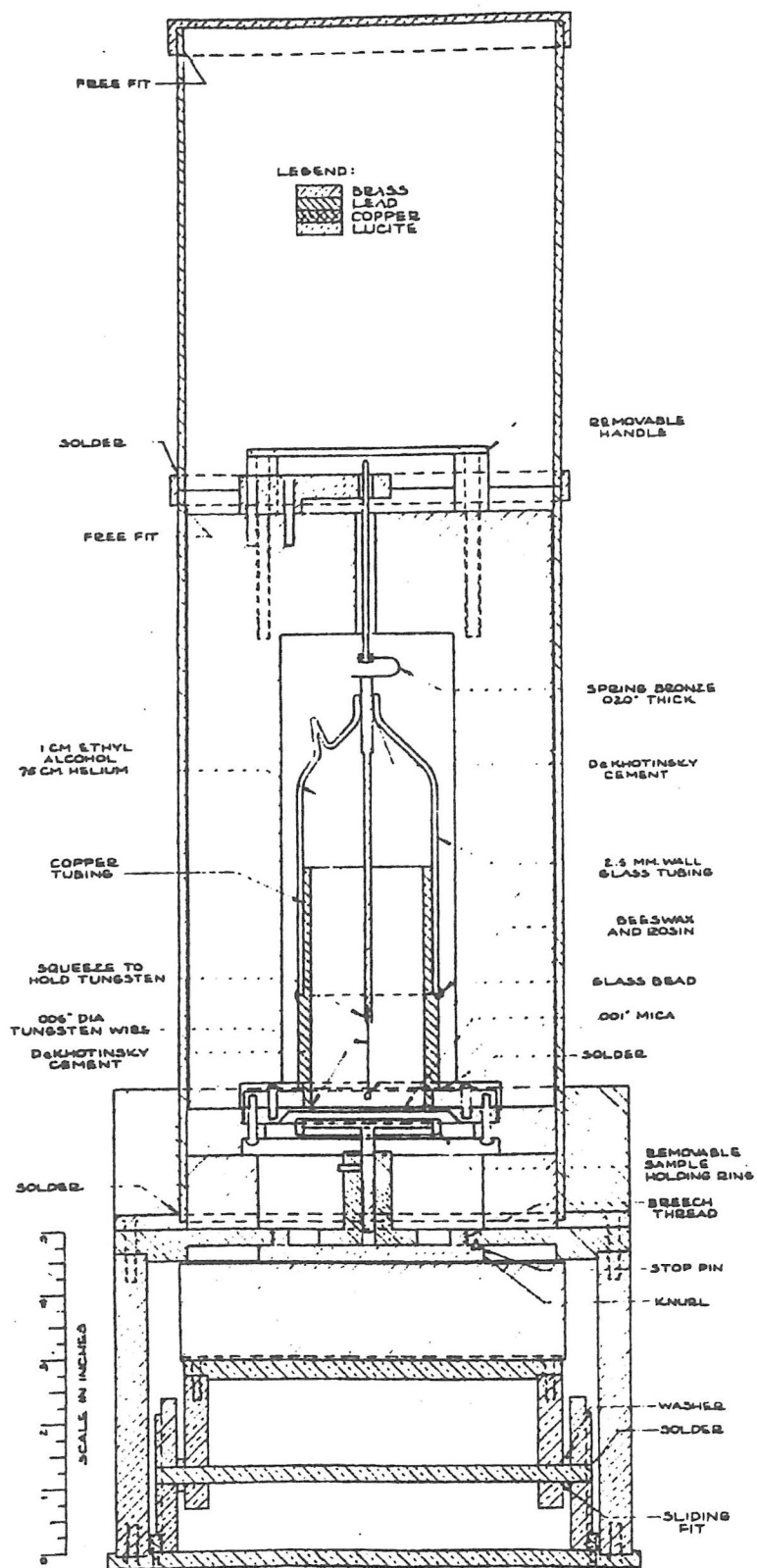
Sample No.	Location, grid coordinates	Distance from ground		Type of bone
試料番号	対応する 格子の位置	Zero, meters	爆心地からの距離 (m)	骨の種類
Hiroshima				
広島				
3	unknown 不明	probably 1000 たぶん1000	Geisha Girl 芸者	
16	5.4-4.8	200	Found inside plaza St. car, already partly ashed. 広場の路面電車の中で発見され、すでに一部灰になっていた	

Nagasaki				
長崎				
4	unknown 不明		Thigh 大腿骨	
5	〃		Vertebra 脊椎骨	
6	D.3-6.4	800	Jawbone 顎骨	
8	unknown 不明		Horse nose or upper jawbone	鼻骨または上顎骨
10	〃		Adult fibula	成人の腓骨
11	〃		Fibula	腓骨
14	〃		Tibia of child	子供の頸骨
17	〃		Atlas	第一頸椎
25	〃		Pelvic bone at upper leg joint	脚の関節の上部の骨盤
26	〃		Rib	肋骨
35	〃		Rib	肋骨
37	〃		Fibula	腓骨

Maximum amount of shielding between samples 6 and 16 and the bombs was about $\frac{1}{2}$ " of wood

原爆と試料番号の6及び16の間にあった最大の遮蔽は約1.3cm厚の材木であった。

図 7 (Plate 2) GM 計数管の断面図と鉛遮蔽の構造



ASSEMBLY

Plate 2

kept in this even whenever they were not in use.

c. Counting Technique

1. All counts were made for 10 minutes at a time and were alternated with background sample counts, also 10 minutes long.
 - a. The background sample was an animal bone that had never been exposed to any radiation and which was prepared in the same manner as the Japanese bone samples.
 - b. Whenever it was necessary to count a sample for more than 10 minutes in order to get a greater accuracy, the length of time that the sample should be counted was predicted by being the formula derived by Bale and Bonner (1).

$$T = \frac{80000M}{9 (\%E) (M-m)^2} \quad (3)$$

Where T is the total time in minutes for counting the sample that gives N counts/minute with a background of m counts/minute if a percent error, % E, is desired.

2. At the beginning and at the end of each counting day, a KCl sample (Known as the "standard") was counted to check the operation of the counters. Whenever there was any question about the accuracy of either counter, standard counts were alternated with background counts.
- d. 1. The radiation from a disc of phosphorus was measured through successively increasing thicknesses of Aluminum foil. The atomic weight of Al is the same as the average atomic weight of $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, which makes up 80% (by weight) of the bone ash (2). The rest of the bone ash is Ca, C and O. Therefore, it was assumed that the absorption coefficient of the Al was the same as that of bone ash, and that the radiation from the phosphorous was cut down by the same fraction with each layer of aluminum as it was by each layer of bone ash of the same thickness in the

c. 測定技術

1. 測定は骨飼料とバックグラウンドを同じ時期に、それぞれ10分間測定した。
 - a. バックグラウンド測定用の試料は、放射線に照射されていない動物の骨を用い、日本で採取した骨と同じ調整方法にて準備した。
 - b. 高い測定精度を得るために、試料を10分以上測定する必要があるときは、測定時間をベールとボナーの式(3)を使って求めた。

$$T = \frac{80000M}{9 (\%E) (M-m)^2} \quad (3)$$

Tは試料の測定時間(分)、Mは試料の計数率(計数/分)、mはバックグラウンドの計数率(計数/分)、%Eは希望する測定誤差を示す。

2. 測定日の初めと終わりに、塩化カリウム線源(標準線源)をGM計数管の動作検査として測定した。GM計数管の精度に問題が生じた時は、バックグラウンド試料と標準線源の測定を交互に行った。
- d. 1. 試料中の燐からの放射線は、アルミニウム板の厚さを増しながら測定した。アルミニウムの原子量は、骨の灰に重量あたり80%以上含まれるリン酸カルシウム $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ の平均原子量と同じである。骨の灰の残りはカルシウム、炭素、酸素である。アルミニウムの吸収係数は骨の灰とほぼ同じであるとした。また、燐からの放射線は測定試料と同じ厚さと形状のアルミニウム板で減弱した。

sample disc.

2. The ratio

$$\frac{nC_0}{\Sigma C} = A \quad (4)$$

where A is the number of beta ray disintegrations within the sample per beta ray leaving the surface of the sample disc. C is counts. C_0 is the counts without any foils covering the sample, and n is the number of Aluminum foils equivalent to the depth of the discs. $A=13.3$

3. The number of beta rays leaving the surface per count was determined using a foil on which 1.000 mg of Uranium had been plated one year previously. The plated surface was $1\frac{1}{4}$ " diameter, the same as the area of the sample in the discs. From the surface of this disc, it was known that there were 711 beta radiations per minute of 2.3 MeV from UK_2 and the same number of beta radiations of 0.23 MeV from UK_1 . The beta radiation from UK_1 did not penetrate through the counter window, as shown by an absorption experiment. It was found that 3.64 beta radiations from the Uranium metal surface corresponded to one count on the counter.
4. That, if $0.57/0.828$ is the ratio of the radiation from UK_2 to that of P^{32} absorbed in the counter window, there are

$$3.64 \times A \times \frac{0.87}{0.828} = 48$$

beta disintegrations of P in bone ash per count with the experimental procedure previously described.

3. Experimental Data and Calculations

- a. All experimental data are given in Tables 4A and 4B, pages 24 and 25.

The net mean sample counts shown in Column 5

2. 割合

$$\frac{nC_0}{\Sigma C} = A \quad (4)$$

Aは試料表面から出てくるベータ線あたりの試料内の崩壊数、Cは計数、 C_0 は試料のアルミニウム箔がない場合の計数、nは測定試料の厚さと等価のアルミニウム箔の枚数を示す。Aは13.3であった。

3. 1計数あたりに試料表面から出てくるベータ線の数は、1年前に作成したウラン線源(1.000mg)を使って求めた。作成したウラン線源の大きさは、調整した骨試料と同じ直径3.2cmであった。このウラン線源の表面からは、 UK_2 (^{234}Pa) の2.3MeVのベータ線が1分間あたり711個が放出されることがわかっている。 UK_1 (^{234}Th) の0.23MeVベータ線は、アルミニウム吸収測定で示されたように、GM計数管の入射窓を通さない。GM計数管の1計数は、ウラン線源表面からのベータ線3.64個分に相当することがわかった。

4. もし割合 $0.87/0.828$ がGM計数管の入射窓で遮蔽された UK_2 (^{234}Pa) のベータ線の個数に対する ^{32}P のベータ線の個数の割合であるとする、

$$3.64 \times A \times \frac{0.87}{0.828} = 48 \quad (4の2)$$

が、1計数あたりの骨の灰中の ^{32}P のベータ崩壊数を求めることができる。

3. 実験結果と計算

- a. すべての実験結果は、表2Aと表2B (Tables 4A, 4B) に示した。

表の第5欄に示した正味の計数の平均値は、

Table 4A BETA RADIOACTIVITY OF ASHED BONE

表2A. 灰にした骨中のベータ線を放出する核種の放射能 Counter # 450 G M計数管 # 450

Sample No.	Date	Counts/minute Mean-Bkg.	Net Mean Std.	Net Mean Sample	Col.5 x 48 x $\frac{170}{\text{Col.4}}$ x 102* Radioactive P atoms/gm-atom P in bones	Col.6 corrected to date of explosion**	Pe. %
試料 番号	採取 月日	バックグラウンド の平均値 (計数/分)	標準線源の正 味の平均値 (計数/分)	試料の正味 の平均値 (計数/分)	放射性の燐の原子数/骨の 中の燐のグラム原子数 5欄×48×(170/4欄)×102*	6欄を経 過日数で 補正した値	PE (%)
1	2	3	4	5	6	7	8
3	11/28			0			
4	12/6			0			
5	12/4	29.84	158.60	31.26	16.09×10^4	5×10^7	4.9
5	12/18	31.48	165.68	15.63	7.70×10^4		
5	1/11	30.65	177.55	3.24	1.49×10^4		
6	12/3	30.64	170.15	2.96	1.42×10^4	4.5×10^6	41.3
7	12/6	31.21	166.00	13.30	6.54×10^4		
8	12/5	30.08	170.92	2.10	1.00×10^4	3.4×10^6	57.0
9	12/6	31.21	167.30	187.93	91.6×10^4		
9	12/21	32.43	171.22	96.92	46.2×10^4		
9	1/3	30.61	173.22	48.04	22.6×10^4		
9	1/17	32.52	172.72	20.78	9.81×10^4		
9	1/31	32.13	179.13	9.98	4.55×10^4		
16	12/7	29.31	169.38	85.38	41.1×10^4	1.8×10^8	3.5
17	12/17	31.59	174.48	25.30	11.8×10^4	4.4×10^7	6.4
26	12/22	31.89	173.85	18.23	8.56×10^4	7.0×10^7	9.8

* Refer to Paragraph III B3 a for explanation factors. ** See Figure 10 *係数の説明は第Ⅲ章B3aを参照せよ。

were multiplied by:

1. 48: - P^{32} beta rays in the sample discs per count per minute, as determined by the above calibration.
2. S_c/S_u : - the ratio of standard at the time of calibration to standard at the time of sample measurement, to correct for differences in counter sensitivity. By experiment, it was found that the ratio of the standard (KCl) counts to bone sample counts was the same on both counters.
3. 102: - the number of discs of bone ash required to supply 1 gm-atom of phosphorous. This factor was calculated from the total weigh of bone ash in the discs and the phosphorous content of bone ash, given by Morgulis (2), as 15.75% by weight.

The results will be in terms of P^{32} beta rays per minute

以下の係数を掛けて求めた。

1. 48: 先に述べたウラン線源の測定によって求めた、1分間、1計数あたりの円盤状試料中の ^{32}P のベータ線の個数。
2. S_c/S_u : G M計数管による感度の違いを補正するための値。試料を測定したときの標準線源に対する測定器を校正したときの標準線源の割合。実験では、骨試料の計数に対する標準線源の計数の割合は2台のG M計数管で同じであった。
3. 102: 燐の1グラム原子量を得るために必要な骨の灰の量。この係数は、測定試料中の骨の灰重量と、モーグリリスによって与えられた重量あたり骨の灰に含まれる燐の含有量15.75%から求めた。

結果を骨中の燐の1グラム原子あたりの1分間

Table 4B BETA RADIOACTIVITY OF ASHED BONE

表 2 B. 灰にした骨中のベータ線を放出する核種の放射能 Counter # 170 G M 計数管 # 170

Sample No.	Date	Counts/Minute Mean Bkg.	Net Mean Std.	Net Mean Sample	Col.5 x 48 x $\frac{170}{\text{Col.4}}$ x 102* Radioactive P atoms/gm-atom P in bones	Col.6 corrected to date of explosion**	Pe. %
試料 番号	採取 月日	バックグラウンド の平均値 (計数/分)	標準線源の正 味の平均値 (計数/分)	試料の正味 の平均値 (計数/分)	放射性の燐の原子数/骨 中の燐のグラム原子数 5欄×48×(170/4欄)×102*	6欄を経 過日数で 補正した値	PE (%)
1	2	3	4	5	6	7	8
7	12/6	20.35	196.25	12.88	5.35×10^4		
7	12/22	17.09	171.50	3.81	1.81×10^4		
7	1/3	15.79	182.42	1.76	0.787×10^4		
11	12/8			0			
14	12/11	19.32	203.15	55.08	22.1×10^4	9.4×10^7	8.9
14	12/28	16.12	172.08	24.07	11.4×10^4		
14	1/8	15.05	181.45	16.93	1.61×10^4		
14	1/18	14.36	168.16	10.36	5.03×10^4		
14	2/2	15.04	180.17	5.53	2.51×10^4		
16	12/21	15.13	175.60	50.38	23.4×10^4	1.8×10^8	8.4
16	1/4	16.28	175.70	26.73	12.4×10^4		
16	1/18	14.46	168.16	17.62	8.55×10^4		
16	2/2	15.04	180.17	9.65	4.37×10^4	5.8×10^7	14.5
25	12/17	15.67	167.00	20.95	10.27×10^4	7.0×10^7	8.0
26	12/18	16.51	165.38	26.04	12.85×10^4	8.4×10^6	111.0
35	12/31	19.88	205.28	1.67	0.66×10^4		
37	12/31			0			

*Refer to Paragraph III B3 a for explanation factros. ** See Figure 10 *係数の説明は第Ⅲ章B3aを参照せよ。

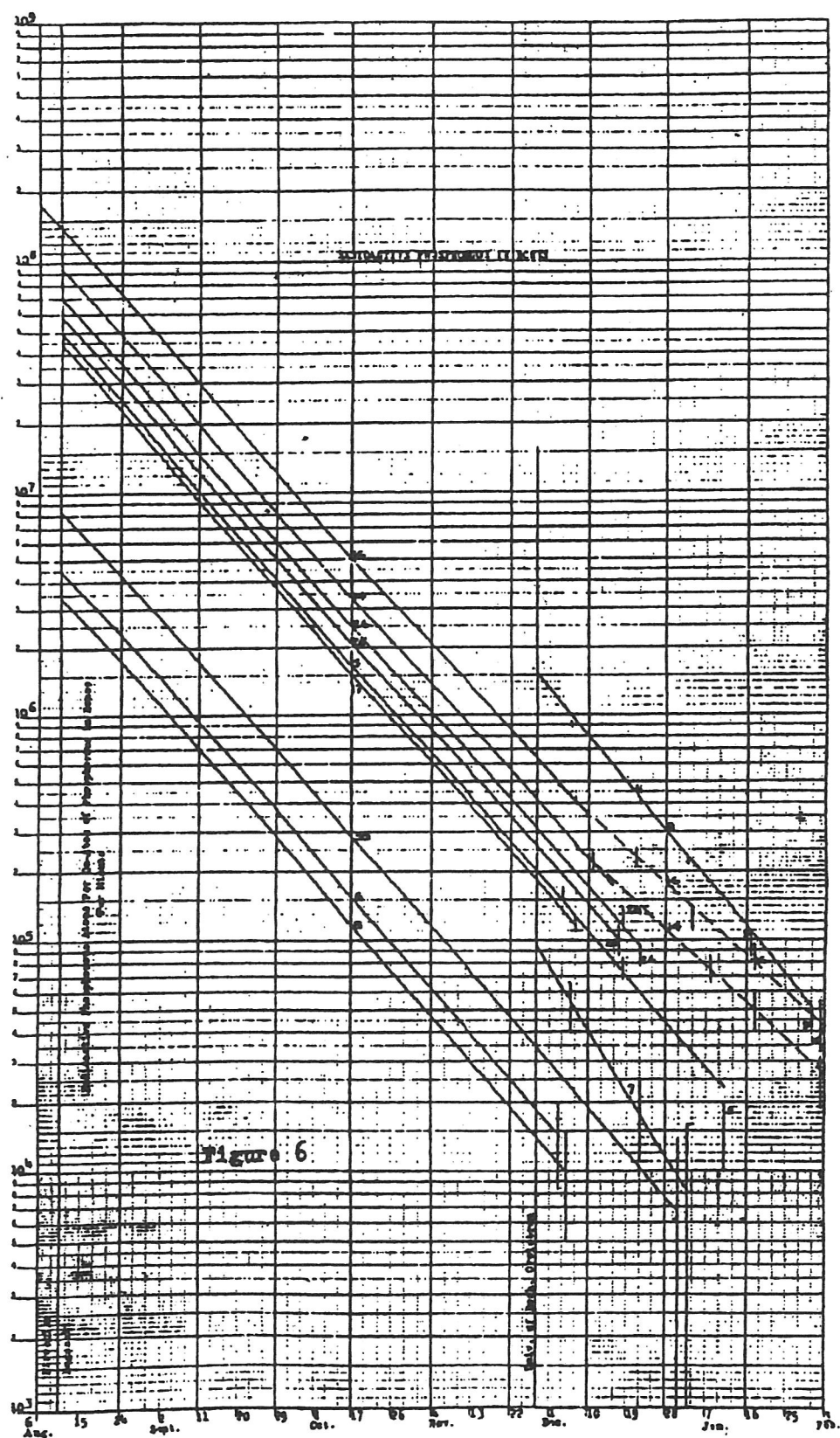
per gm-atom of phosphorous in the bones. They are then corrected back to the time of the atomic bomb explosion by graphical means in Figure 6, page 26.

- b. It was assumed that all of the radioactivity in the samples was due to the radioactivity of the phosphorous. The degree to which this assumption is in error may be determined by an analysis of the bone ash decay curves for samples #14 and 16 shown on Figure 6. The over-all half life for samples #14 and 16 ranges roughly from 16-18 days, which would correspond to a contribution of about 10% of the counts due to radioactive Ca^{45} with a 180 day half life. It is not important that the ratio of Ca^{45} to P^{32} beta rays may have been much larger in the sample disc because the calibration

の ^{32}P ベータ線として表した。その値は図 8 (Figure 6) の減衰曲線により原爆が爆発した時点に減衰補正した。

- b. 骨試料の放射能は燐の誘導放射能によるものと思われた。これは図 8 の試料 No.14 と No.16 の骨の灰の減衰曲線の分析からわかった。試料 No.14 と試料 No.16 の半減期はおおよそ 16 日から 18 日の範囲であった。これは半減期が 180 日である放射能同位元素 ^{45}Ca の半減期の約 10% に相当した。 ^{32}P に対する ^{45}Ca のベータ線の割合は円盤状の試料の場合、もっと大きな割合であるが、測定器の校正やその他のデータが G M 計数管の感度に大きく影響しているので、それほど重要ではない。

図 8 (Figure 6) 骨試料中の燐の放射能の減衰曲線



and all data were obtained in terms of counter response.

- c. A rough idea of the relative radioactivities per atom for phosphorous and calcium may be obtained using the equation

$$A/x = (1/t) (e^{-\frac{0.693}{t}d}) \sigma p \quad (5)$$

in which A/x is the radioactivity per atom, t is the 1/2 life in days, d is the time in days since the atomic bomb explosion and is σ the cross section for slow neutron capture by each isotope of abundance p . All data was obtained from the Project Handbook Chapter IV. The results for the calcium and phosphorous are given in figure 7, page 26. It is probable that the relative radioactivities of the calcium and phosphorus did not show up on the counters in the proportions that would be predicted from Figure 7 because the energy of the radiation from Ca^{45} is so much softer (0.2 MeV) than the energy from P^{32} (1.7 MeV). Figure B, page 27, shows the relation between the energy and the penetration of radiation through different thicknesses of counter window.

- d. Decay curves for samples 7, 9, and 12 are plotted on Figure 9, page 29.

1. Sample 7 was prepared by bombarding a fresh clean bone with the neutron beam from 4.6 MeV deuterons on lithium using the Rochester cyclotron. It received a fast neutron dose of 500 roentgen equivalents as measured on a Victoreen meter. The radioactive decay curve shows a half life of around 10 days. It is suspected that the radioactivity arises from the decay of Ca^{41} with an 8.5 half life produced by an $n, 2n$ reaction and the decay of P^{32} with its 14.3 day half life.
2. Sample 9 was produced by bombarding a bone inside a jar of water under exactly the same conditions as sample 7. It shows a decay rate

- c. 燐とカルシウムの原子あたりの相対放射能のおおよその値は次の式で得られる。

$$A/x = (1/t) (e^{-\frac{0.693}{t}d}) \sigma p \quad (5)$$

A/x は原子あたりの放射能、 t は半減期、 d は原爆が爆発してからの経過日数、 σ はそれぞれの元素の同位体存在比 p あたりの低速中性子捕獲の核反応断面積である。すべてのデータは企画便覧から得た。カルシウムと燐の結果を図 (Figure 7, 略) に示した。 ^{45}Ca のベータ線エネルギーが (0.2MeV) は ^{32}P のベータ線エネルギー (1.7MeV) より弱いので、GM計数管で測定すると、カルシウムと燐の相対放射能は、はっきりわかることはないと思われた。図 (Figure 8, 略) にベータ線のエネルギーとGM計数管の入射窓厚の違いによるベータ線の透過の関係を示した。

- d. 試料No. 7、No. 9、No.12の減衰曲線を図 (Figure 9, 略) に示した。

1. 試料No. 7はロチェスター大学のサイクロトロンを用いて、4.6MeVの重陽子とリチウムの核反応による中性子線で骨を照射して作成した。この骨試料をビクトリーン社製の「メーターで測定すると、500レントゲンに相当する高速中性子が照射された。放射能の減衰曲線は約10日の半減期を示した。その放射能は (n, 2n) 核反応で生じた半減期が8.5日の ^{41}Ca と半減期が14.3日の ^{32}P によるものと考えた。
2. 試料No. 9は試料No. 7とまったく同じ条件で、骨を水の入った容器に入れて中性子照射を行った。この試料の減衰割合は ^{32}P によ

which was due entirely to P^{32} .

3. Sample 12 was dirt washed from bone sample #8 from Nagasaki. It shows a half life about 30 days long. It is not known what radiations were responsible for this half life.

e. Determination of error in counting data

1. The probable error, PE, of each standard measurement, S, in counts per minute was determined using the formula

$$PE=0.677 \sqrt{\frac{N (S)^2 + (\sum S)^2}{N (N-1)}} \quad (6)$$

where N is the number of ten minute intervals that the standard was counted. To predict the probable error of each unknown, U, it was assumed as that

$$\frac{PE_u}{PE_s} = \frac{\sqrt{U}}{\sqrt{S}} \quad (7)$$

because the Poisson statistical distribution predicts that $PE=0.677\sqrt{S}$. The probable error of the net unknown was then found using the expression

$$PE_{net\ u} = \sqrt{(PE_s)^2 + (PE_B)^2} \quad (8)$$

where the subscript B refers to the background counts per minute. If more than one ten minute count was made, the $PE_{net\ u}$ was divided by the \sqrt{N} .

2. This procedure was used because in most cases N was so small that equation (6) could not be applied directly to the net sample. In those cases where N was above 4, equation (6) was applied directly, and the results were compared with these predicted using (6), (7) and (8) on the same sample. Probable errors predicted from (6) were lower in all cases than those predicted from (6), (7) and (8).

4. Calculation of neutron flux

- a. The phosphorous atoms disintegrating per minute per gm-atom of phosphorous in bones is given for each

るものであった。

3. 土の試料No.12は長崎の骨試料No. 8 に付着していた泥である。半減期は約30日であった。この半減期がどの核種の放射線によるものかはわからなかった。

e. 測定値における誤差の決定

1. 標準線源 (S) を測定した時の、1 分間当たりの計数における確率誤差 P E は式 (6) を用いて求めた。

$$PE=0.677 \sqrt{\frac{N (S)^2 + (\sum S)^2}{N (N-1)}} \quad (6)$$

Nは標準線源を測定した回数である。それぞれの未知の確率誤差 U を予測するため、次のように仮定した。

$$\frac{PE_u}{PE_s} = \frac{\sqrt{U}}{\sqrt{S}} \quad (7)$$

ポアソン分布から $PE=0.677\sqrt{S}$ となるので、正味の確率誤差は式 (8) で表される。

$$PE_{net\ u} = \sqrt{(PE_s)^2 + (PE_B)^2} \quad (8)$$

ここで、下付きの B は 1 分間あたりのバックグラウンドの計数である。もし、10分以上の測定をする場合は、 $PE_{net\ u}$ を \sqrt{N} で割って正味の確率誤差を求める。

2. ほとんどの場合、N の値は小さいので、式 (6) は直接、正味の計数値に適用できないため、以下の手順が必要である。N が 4 より大きな場合は、式 (6) を直接適用して得た結果を式 (6)、(7)、(8) を使った予測値と比較した。式 (6) を用いて得た確率誤差は、式 (6)、(7)、(8) を使った予測値よりも小さかった。

4. 中性子束密度の計算

- a. 骨中の燐のグラム原子あたりの 1 分間に崩壊する燐原子数は、表 2 A と表 2 B にそれぞれの試

sample in Table 6. Since the figures in Column 7, Table 6 are expressed as a rate disintegration.

$$\frac{dn}{dT} = n_0 \left(\frac{0.693}{t} \right) e^{-\frac{0.693}{t} d} \quad (9)$$

料について示した。表の第 7 欄の値により崩壊率を求めると、

$$\frac{dn}{dT} = n_0 \left(\frac{0.693}{t} \right) e^{-\frac{0.693}{t} d} \quad (9)$$

表 3

Bone No.	Location	n_0 Neutrons captured per gm-atom of phosphorous $3 \times 10^4 (dn/dT)$	Neutrons captured per gm-atom of phosphorous Col.3 6.06×10^{23}	Neuts/cm ² Col.4 σ
骨番号	場所	n_0 燐のグラム原子 あたりの中性子捕獲 $3 \times 10^4 (dn/dT)$	燐の原子あたりの 中性子捕獲 3欄 6.06×10^{23}	中性子数/cm ² 4欄 σ
16	600 meters from Hiroshima bomb 広島の爆心から 600m	5.35×10^{12}	8.9×10^{-12}	3900×10^{10}
6	1000meters from Nagasaki bomb 長崎の爆心から 1,000m	1.07×10^{11}	0.18×10^{-12}	78×10^{10}

the total number of radioactive atoms per gm-atom of phosphorous

$$n_0 = \frac{dn/dT}{\left(\frac{0.693}{t} \right)} = 3 \times 10^4 (dn/dT) \quad (10)$$

There is no correction for exponential decay since $d=0$. The following results were obtained for sample #6 and 16.

となる。燐のグラム原子あたりの放射性の原子数は、

$$n_0 = \frac{dn/dT}{\left(\frac{0.693}{t} \right)} = 3 \times 10^4 (dn/dT) \quad (10)$$

$d = 0$ であるので、対数減衰の補正はしない。表 3 の結果は、試料No. 6 と試料No.16について得たものである。

b. Neutron flux predicted from theory of gadget

1. Dr.F.K Marshak of the University of Rochester stated that the delayed neutron flux from the atomic bombs at Hiroshima and Nagasaki could be calculated using

b. 理論による中性子束の推定

1.ロチェスター大学のマーシャク博士は、広島と長崎の原爆からの遅発中性子束を、式 (11) を用いて計算できるとした。

the equation

$$\text{Neuts/cm}^2 = \frac{Qe^{-\frac{r^2}{4\tau}}}{(4\pi\tau)^{3/2}} \frac{1}{a} \quad (11)$$

in which

$\sqrt{\tau}$ - slowing down length for epithermal neutrons from an energy of 600 k.v. (average energy of delayed neutrons ~ 150 m.)

1 - scattering mean free path of neutrons in air at epithermal energies ~ 25 m

a - average log energy loss of neutrons in air ~ 0.16

q - no. of delayed neutrons emitted by gadget $\sim 4 \times 10^{22}$

r - straight line distance from bomb

ここで、

$$\text{Neuts/cm}^2 = \frac{Qe^{-\frac{r^2}{4\tau}}}{(4\pi\tau)^{3/2}} \frac{1}{a} \quad (11)$$

$\sqrt{\tau}$ - 遅発中性子の平均的エネルギー600KVから熱外中性子まで減速する長さ、約150m

1 - 空気中での熱外中性子の散乱平均自由行路、約25m

a - 空気中での中性子の平均対数エネルギー損失、約0.16

Q - 装置より放出した低速中性子の数、約 4×10^{22}

r - 爆発点からの直線距離

2. To obtain the maximum predicted value at 600 meters from the Hiroshima bomb, Dr. Marshak recommended that the neutrons/cm² be multiplied by 2 to take into account the prompt neutrons, by 3 to correct for the size of the ball of fire and that $\sqrt{\tau}$ be changed to 200 meters.

3. The maximum predicted value at 1000 meters from the Nagasaki bomb should be obtained by multiplying the neutrons/cm² by 20 to correct for the size of the ball of fire and by changing the $\sqrt{\tau}$ to 200. At Nagasaki,

2. マーシャク博士は、広島爆心から600m離れた地点の最適推定値を求めるために、即発中性子を考慮して中性子束密度を2倍にし、火の球の大きさの補正のために中性子数を3倍にし、さらに $\sqrt{\tau}$ の値を200mに変更した。

3. 長崎の爆心から1,000mのところでの推定値を得るために、 $\sqrt{\tau}$ の値を200mに変更し、火の球の大きさを補正するため中性子束密度を20倍にした。1,000mの地点での中性子束密度は、2つの原爆

表 4

Location 場 所	Neutrons/cm ² 中性子束密度 (個/cm ²)	Maximum Predicted Neutrons/cm ² 最大推定中性子束密度 (個/cm ²)
600 meters from Hiroshima bomb 広島爆心から 600m	8.3×10^{10}	120×10^{10}
1000 meters from Nagasaki bomb 長崎爆心から 1,000m	0.0083×10^{10}	7.0×10^{10}

the same equation could be used because the differences of the two bombs cancelled out in so far as neutrons at 1000 meters was concerned.

4. Calculations indicated in the above paragraphs were made and the following results obtained.

c. From a table of values for beta rays per minute per gm of bone ash, (see Appendix C II -4), obtained from the Japanese scientist Dr. Koiti Murati of the Institute of Physical and Chemical Research in Tokyo, the following figures were calculated. The phosphorous content of the bone ash was calculated using the figure 15.75% P per gm ash (2) instead of phosphorous content of whole bones because the figure of 6.4 gms of bone per gm ash is unusually high. The data given by Dr. Koiti Murati were, in Dr. Narshak's opinions, the only Japanese data sufficiently consistent to be worth using in a comperison of neutron flux.

の違いを考えなくてもよいので、長崎でも同じ式を使って求めた。

4. 上にあげた係数を代入して計算を行い、表4の結果を得た。

c. 東京の理化学研究所の村地孝一博士が得た骨の灰1グラムあたりのベータ線の測定値から表5の値を得た。骨の灰中の燐の含有量は灰1グラムあたり骨6.4グラムとすると多すぎるため、全骨に含まれている燐の値の代わりに、1グラムの灰あたり15.75%の燐が含まれる（文献2）として計算した。マーシャク博士は、村地孝一博士による結果を原爆の中性子束を求めるための価値ある測定値であると評価した。

表5

Bone No.	Straight line distance from Hiroshima atomic bomb, meters 広島原爆から直線距離 (m)	n_0 Neutrons captured per gm-atom of phosphorous 燐のグラム原子あたりの中性子捕獲	Neutrons captured per atom of phosphorous Col.3 6.06 x 10 ²³ 燐の原子あたりの中性子捕獲	Neuts/cm ² Col.4 中性子束密度 (個/cm ²)
骨試料番号				
1	550	12.4 × 10 ¹¹	2.05 × 10 ⁻¹²	890 × 10 ¹⁰
2	590	15.0 × 〃	2.5 × 〃	1100 × 〃
3	610	10.3 × 〃	1.70 × 〃	740 × 〃
4	780	2.9 × 〃	0.47 × 〃	200 × 〃
5	820	0.88 × 〃	0.127 × 〃	55 × 〃
6	890	0.031 × 〃	0.005 × 〃	2.2 × 〃

5. Results

A summary of the results calculated in the above paragraph.

5. 結果

上述の方法で計算した結果の要約を表6に示す。

表 6

Location Straight line distance from bomb, meters 場所 爆心からの直線距離 (m)	Experimental Neuts/cm ² 実験値 (中性子数/cm ²)	Japanese Neuts/cm ² 日本の値 (中性子数/cm ²)	Predicted Neuts/cm ² 推定値 (中性子数/cm ²)	Maximum Predicted Neuts/cm ² 最大推定値 (中性子数/cm ²)
Hiroshima 広島				
550		890×10^{10}		
590	3900×10^{10}	$1100 \times \text{〃}$	8.3×10^{10}	120×10^{10}
740		$740 \times \text{〃}$		
780		$200 \times \text{〃}$		
820		$55 \times \text{〃}$		
890		$2.2 \times \text{〃}$		
Nagasaki 長崎				
1000	78×10^{10}		0.083×10^{10}	7.0×10^{10}

It may be seen that the neutron flux given in this report for 600 meters from the Hiroshima bomb is about 30 times the maximum predicted theoretical value and that the Japanese figures are about 7 times the maximum predicted theoretical at the same point. Also, the experimental value for the neutron flux 1000 meters from the Nagasaki bomb was 10 times the maximum predicted theoretical.

本報告書で求めた広島爆心から直線距離600mの地点の中性子束密度は、理論的に推定した値の約30倍であった。一方、同じ地点での日本側の値は約7倍であった。同様に、長崎の1,000mの地点の中性子束密度は約10倍であった。

C. Soil and Metallic Samples

The radioactivity remaining in Nagasaki and Hiroshima could have originated from (a) elements made artificially radioactive and (b) fission fragments from the bomb deposited on the ground. The soil and metallic samples were analysed to determine the extent of each effect.

1. Location and description of Samples

All samples are listed, described, and their locations given in Table 5, pages 35, 36 and 37. Locations are in terms of grid coordinates which refer to the coordinates on Maps #1 and 2, pages 3b and 3c.

2. Relative activities

Prediction of the relative activity of all elements was made by listing, in the order of their half life, all beta radioactive isotopes produced by n, γ reactions, then applying equation (5) to the element with isotopes of half life between 14 days and 20 years. Data were obtained from the Project Handbook, Chapters IV and V. Only n, γ reactions were considered since it was suspected that slow neutrons made up by far the largest fraction of all neutrons reaching the ground. Values for the relative radioactivities per mole of element are given in Table 6, pages 38 and 39. The only elements represented in this table that could be obtained in sufficient quantities from the samples were Ca, P and Fe. In Figure 6, page 26, the relative activities of Ca, P and Fe are plotted vs. the calendar date in such a manner that they total 100 on December 19, 1945.

3. Experimental Procedure

a. General

1. The apparatus and counting technique used in the soil and metallic sample analyses was the same as that described in paragraph III., B.,
2. for the bone sample analyses.
2. Gross sample counts were made on the samples as they were taken from the box

C. 土壌試料と金属試料

長崎と広島に残留放射能は、(a) 中性子による誘導放射能と、(b) 原爆の地表に降下した核分裂生成物からなっている。土壌と金属の試料は誘導放射能と核分裂生成物の分布を求めるために分析した。

1. 試料の採取場所

採取した試料は、表 7 (Table 5) に一覧表として示した。採取場所は図 1 と図 2 に対応した番号で表した。

2. 相対放射能

(n, γ) 核反応によって誘導されたベータ線放出核種の相対放射能の推定値は、半減期の順に一覧表にして示した。この値は半減期が14日から20年までの同位元素の元素を式 (5) に代入して得た。これらのデータは、企画便覧から得た。地上に届いた中性子のうち大部分は低速中性子であったので、(n, γ) 核反応だけに注目した。元素のモルあたりの相対放射能を表 (Table 6, 略) に示した。この表より試料から測定可能な放射能が得られた元素は、カルシウム、燐と鉄だけであった。

3. 実験方法

a. 一般事項

1. 土壌試料と金属試料の分析に用いた器具と測定技術は、骨の試料の分析と同じである。
2. 日本から受け取った試料はすべて測定を行った。測定試料はそのままの形状で測

TABLE 5 LOCATION OF SAMPLES FROM JAPAN

表 7. 日本からの試料の採取場所

Sample No. 試料番号	Grid Coordinates 格子の対応する場所	Description 説 明	NET COUNTS/MIN FROM GROSS SAMPLE 正味の計数率 (cpm)
HIROSHIMA 広 島			
27	5.2-4.7	Dirt from eastern Parade Ground Bomb Monument 原爆ドームの東の歩道からの土	4.7
28	5.5-5.3	Place of steel imbedded in concrete telephone pole. (Front of Marine Fire Insurance Building) コンクリートの電柱に埋め込まれていた鋼鉄 (海上火災の建物の前)	14.3
29	5.1-4.8	3 pcs. of steel from Bomb Monument 原爆ドームからの鋼鉄 3 片	12.5 (biggest piece) (一番大きい片)
30	5.3-4.9	Rubble near street 道路近くの瓦礫	4.5
31	5.4-4.8	Plaza St. car - Wrist watch and partly ashed bone. (See Table 3) 広場の自動車道路—時計と一部灰になった骨 (表 3 参照)	46.1

NAGASAKI 長 崎			
12	D.6-5.8	Earth & gravel washed from bone sample 8 試料 8 の骨から洗った土とじゃり	10.0
18	D.9-6.7	Brass cup 真ちゅうのコップ	28.0
19	D.9-6.7	2 Aluminum chopsticks 2 本のアルミニウムの箸	0
20	D.9-6.7	2 Steel coins 2 枚の硬貨	6.7
21	D.9-6.7	2 Brass coins 2 枚の銅貨	2.6
22		Sulfur from insulators 碑子の硫黄	2.6
23		Fused lead 溶けた鉛	6.0
24		Fused earth 溶けた土	
	E.0-6.4		17.9
	D.3-6.4	Can of gravel a. gravel b. jawbones with (see Table 3, page 23) じゃりの缶 a. じゃり b. 顎骨 (表 1)	
32		1. gold teeth 1. 金歯	0
33		2. silver teeth 2. 銀歯	0

TABLE 5 (conts.)

表 7. (続き)

Sample No. 試料番号	Grid Coordinates 格子の対応する場所	Description 説 明	NET COUNTS/MIN FROM GROSS SAMPLE 正味の計数率 (cpm)
		c. compass c.コンパス	0
		3 dixie cups with dirt samples 泥の試料のついた3つの湯沸かしコップ	
43	G.6-5.9	a. Soil sample, west end of dam a. 土の試料、ダムの西端	over 200
46	G.2-5.8	b. Soil sample from pavement across top of dam, in center of dam. b. ダムの中央部分でダムの上を横切っている舗装道路からの土	over 200
47	G.6-5.9	c. Dirt from bottom of reservoir at spillover c. 貯水池の水吐き口の底の泥	over 200
		5 pill boxes of dirt samples 泥の試料のついた5つの丸薬容器	
48	G.6-5.6	a. Dirt from bottom of 1st filter bed a. 第一濾過床の底の泥	
49	F.1-7.5	b. Dirt from path near rice field b. 水田の畔の泥	All radioactive. but record not kept
50	F.57-6.6	c. Dirt from near top of mountain side toward the bomb. c. 墓場側の山の頂上付近の泥	of gross activity
51	G.55-6.09	d. Dirt from path approaching bridge d. 橋につながる小道の泥	すべて放射能があったが、全体の放射能が記録されて
52	G.66-5.84	e. Dirt from center of dam across walk highest beta activity e. ベータ放射能が最も高い、ダムの中央の歩道からとった泥	いない。
	D.9-5.5	48 Identification badges 48の身分証明バッジ	0
		Fused bronze-looking material とけた骨のように見える物	0
	E.3-5.9	Metal front door hinge, Med. School entrance on south side of S Bldg. 8 x 8 opening steel frame set in granite and door blown in. 玄関の蝶番の金具、S ビルディングの南側の医科大学の入り口。みかげ石についた8' x8' の開放鉄枠と吹き飛んだドア	0

TABLE 5 (conts.)

表 7. (続き)

Sample No. 試料番号	Grid Coordinates 格子の対応する場所	Description 説 明	NET COUNTS/MIN FROM GROSS SAMPLE 正味の計数率 (cpm)
	E.3-5.9	Metal front door hinge in Med. School entrance facing south 8 x 8 opening steel door and frame set in granite. Door blown in. みかげ石についた8' x8' の開放鉄枠に面した医科大学の入り口の玄関の蝶番の金具。吹き飛んだドア	0
	E.3-5.9	Iron fragment in operating room - 4th bldg, from south at Med. School. It apparently had been effected by a small explosion within the hospital. Probably part of water or steam pipe connection. 手術室の鉄片－医科大学の南から 4 番目の建物。病院の中の小さな爆発を受けたことが明らかである。たぶん水か蒸気の管の結合部分であろう。	
	D.8-7.3	Blue prints from Torpedo Wks. Res. Lab. in Normal School. 普通の学校にあるトルペド研究所からの青写真	
	D.9-6.7	Forceps ピンセット 1 pair of pliers ペンチ 1 丁 Brass turn key 真鍮のねじ鍵 Aluminum lid, minus knob 棒状の取っ手のついたアルミニウム製の蓋 Piece of porcelain with a yellowish material in center. 中央が黄色がかった部分のある陶器のかけら 2 lenses for microscope 顕微鏡の2枚のレンズ Machined piece of stainless steel ステンレス製の機械の部分 Lead key 鉛の鍵	

TABLE 5 (cont.)

表 7. (続き)

Sample No. 試料番号	Grid Coordinates 格子の対応 する場所	Description 説 明	NET COUNTS/MIN FROM GROSS SAMPLE 正味の計数率 (cpm)
		<p>Copper pipe - (original shape) South wall of penthouse of Medical Clinic 150' above ground and no overhanging cave. Bent at right angles to original direction and pointing toward zero.</p> <p>9' above roof of building and parallel to floor of roof.</p> <p>銅製パイプ。もとは地上150'上の病院の塔屋の南側の壁につけられており上部には穴がないもの。あるべき方向から90度屈曲し爆心地を指していた。建物の壁の9'上にあり屋根面と平行に並んでいた。</p> <p>More pipe. West wall of penthouse of Medical Clinic about 5' above roof end (original shape)</p> <p>他のパイプ。もとは病院の塔屋の屋根端の5'上の西側の壁についていた。</p>	0

received from Japan. No attempt was made to standardize the geometry of the counting position, but rather, it was desired to get only an indication as to which samples could be used. The gross sample counts are listed with the sample descriptions in Table 5. No counts were made on samples that were duplicates of other samples, that were not located on the map, or that obviously would not have been radioactive, e. g. microscope lens.

定し、どの試料が分析に利用できるかがわかった。表7に試料の測定値を示した。他の試料と重複しているもの、採取位置が地図に載っていないもの、そして顕微鏡のレンズのように明らかに放射能がないものは測定を行わなかった。

3. On the basis of the gross sample measurements and the predicted induced radioactivities listed in Table 6, the following samples were chosen for more thorough investigations:

3. 上に示した試料の測定結果と推定した誘導放射能をもとにして、表 8 の試料について詳細な解析を行った。

表 8

Sample No. 試料番号	Grid Coordinates 対応する格子の場所	Sample Description 試料の説明
Hiroshima		
広島		
28T	5.5-5.3	Triangular piece of steel inbedded in concrete telephone pole コンクリートの電柱に埋め込まれていた三角の金属片
28R(29)	5.1-4.8	Piece of steel pipe from Bomb Monument 原爆ドームの金属パイプ片

Nagasaki		
長崎		
24	E.0-6.4	Fused earth とけた土
43	G.6-5.9	Soil sample, west end of dam ダムの西の端の土壌
46	G.2-5.8	Soil sample from pavement across top of dam, in center of dam ダムの中央部分で、ダムの上を横切っている舗装道路の土
47	G.6-5.9	Dirt from bottom of reservoir at spillover 貯水池の水吐き口の底の泥
48	G.6-5.6	Dirt from bottom of 1st filter bed 第一濾過床の底の泥
49	F.1-7.5	Dirt from path near rice field 水田の畔の泥
50	F.57-6.6	Dirt from near top of mountain side toward the bomb 墓場側の山の頂上付近の泥
51	G.55-6.09	Dirt from path approaching bridge 橋につながる小道の泥
52	G.66-5.84	Dirt from center of dam across walk highest beta activity ベータ放射能が最も高い、ダムの中央の歩道からとった泥

4. Aluminum absorption measurements were made on the samples to determine whether there were any obvious differences in the radiation energies from sample to sample. No such difference was found. The results are plotted in Figure 10, page 43, and tabulated in Table 7.

b. Steel Samples (28T and 28R)

1. Each sample was cut up and a piece of it machined to fit in the conating discs.
2. Counts were made over several weeks' time and a decay curvs was plotted (Figure 9, page 29) for 28T. A half life between 30 and 50 days was indicated.
3. A comparison was made of the energy of radiation from samples 28T and 28R with the energy of radiation from a sample of Fe^{59} by measuring the absorption of the radiation from each in different thicknesses (0.05-0.10mm.) of aluminum. To get the Fe^{59} , Dr. Fuille and his associates at the University of Rochester Medical School chamically separated the iron from an iron salt that had been bombarded with deuterons by Dr. R. D. Evans at M. I. T. One of the reactions in the iron was $\text{Fe}^{58} + d = \text{Fe}^{59} + p$. The radioactive measurements are tabulated in Table 5, page 41, and plotted in Figure 10, page 43.

The absorption coefficients of 28T and 28R that are shown on Figure 10 are quite different from the absorption coefficient of Fe^{59} , indicating that the radiation from the former is not due to the induced radioactivity of the iron in these samples. No satisfactory explanation has been made for the radioactivity of 28T and 28R. It is not considered possible that fission products would be responsible, since the surface of these samples had been machined off. There is no element other than iron normally presant in steel in sufficient quantities and with large enough cross section (as indicated in Table 6) to have still been radioactive at the time of the counting, four months later.

4. 試料間で放射線のエネルギーに違いがあるかどうかを調べるために、アルミニウム吸収測定を行った。試料間には、放射線のエネルギーの違いは見つからなかった。結果を図9 (Figure 10) と表9 (Table 7) に示した。

b. 金属試料 (No.28TとNo.28R)

1. 試料は測定皿に合うように、機械を用いて小片に切断した。
2. 測定は数週間かけて行い、試料No.28Tについての減衰曲線を求めた。その結果、半減期は30日と50日の間であった。
3. 試料No.28TとNo.28Rからの放射線のエネルギーと ^{59}Fe からの放射線のエネルギーを比較するために、異なった厚さ (0.05-0.10mm) のアルミニウム板による吸収測定を行った。 ^{59}Fe はユイリ博士とロックフェラー大学の研究者、およびマサチューセッツ工科大学のエバンス博士によって重陽子を当てて放射化した鉄塩から鉄を化学的に分離することで得た。鉄の核反応は $^{58}\text{Fe} (d, p) ^{59}\text{Fe}$ である。放射能の測定結果を表7と図9に示した。

図9に示した試料No.28TとNo.28Rの吸収係数は ^{59}Fe の吸収係数と全く異なっていた。これは、試料No.28TとNo.28Rからの放射線が鉄から誘導された ^{59}Fe でないことを示した。試料No.28TとNo.28Rの放射能の種類はわからなかった。核分裂生成物が金属表面に付着していると考えられなかった。4か月後まで測定できるほど十分な量の放射能が鋼鉄の中に存在しているのは、鉄以外の元素では考えられなかった。

図 9 (Figure 10) 試料中の放射能のアルミニウムによる吸収

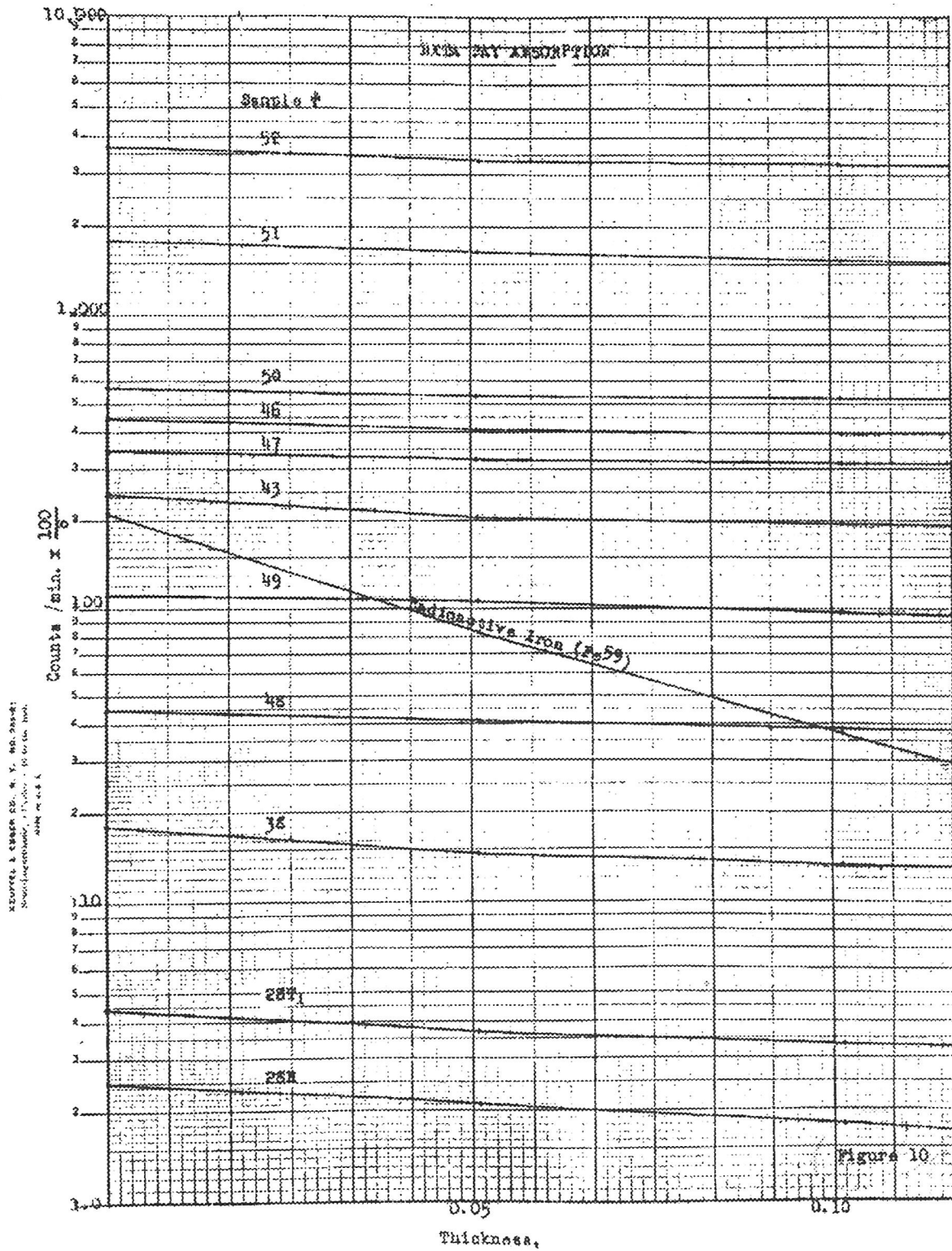


Table 7 ALUMINUM ABSORPTION OF RADIATION

表 9. 放射線のアリミニウムによる吸収

Sample No.	Date	Counts/minute x $\frac{100}{S}$		
		計数/分×100/s		
試料番号	日付	0 mm Al	0.05 mm Al	0.10 mm Al
Counter #450				
GM計数管450				
52	3/1	3707.2	3342.8	3289.0
51	3/1	1791.4	1641.8	1556.2
50	3/8	570.8	533.7	512.0
46	2/27	444.7	408.1	395.4
47	2/28	347.1	323.3	314.7
49	3/8	111.9	105.7	98.7
48	2/26	44.5	41.0	38.6

Counter #170				
GM計数管170				
43	2/19	244.2	207.4	196.1
⁵⁹ Fe	2/7	212.5	83.6	37.9
38	1/21	18.1	14.3	13.2
28T	2/5	4.4	3.7	3.2
28R	3/8	2.5	2.1	1.8

c. Earth sample #24

1. Sample #24 was only 300 meters from the ground zero; therefore, if there was any induced activity to be found in the earth samples, it would have been in this one.
2. A qualitative spectroscopic analysis of the soil showed that the principle elements present were silicon, iron, and aluminum, with traces of calcium and magnesium. On the basis of Table 6, however, iron was the most likely element to be radioactive at the time the separations were made.
3. A chemical separation of the constituents of the soil was made by Dr. J. F. Flagg. His exact procedure is given in Appendix A.

Dr. Flagg found that sample #24 contained 64% SiO_2 , 26.5% Al_2O_3 , and 6.5% Fe_2O_3 . The remaining 3% was calcium, and magnesium. The silicon, obtained as SiO_2 was found to be inactive. The iron and aluminum fraction (sample #38) contained a

c. 土壤試料No.24

1. 爆心地からわずか300mしか離れていない所で採取した試料No.24は、中性子による誘導放射能が確認できる唯一の試料であった
2. 土壤の分光分析測定で確認できた元素はケイ素、鉄、そしてアルミニウムと、わずかなカルシウムとマグネシウムであった。化学的分離により、放射能を持っていそうな元素は鉄であった。
3. 土壤からの化学的分離はフラッグ博士が行った。その方法の詳細は付録A（省略）に記されている。

試料No.24には64%のケイ素 SiO_2 、26.5%の酸化アルミニウム Al_2O_3 、6.5%の酸化第二鉄 Fe_2O_3 が含まれていた。残りの3%はカルシウムとマグネシウムであった。酸化ケイ素 SiO_2 として分離した分離抽出物には放射能がなか

mixture of Fe_2O_3 and Al_2O_3 and accounted for the entire activity of sample #24. No worthwhile separation of magnesium and calcium could be made.

Since there could have been fission products in the previously prepared iron-aluminum fraction, a second separate portion of sample #24 was digested with hydrochloric acid and a solution obtained that contained iron and aluminum as the principal constituents. The solution was concentrated, then extracted with ether to remove the iron. It was expected that the minute amounts of fission fragments present would not be extracted by the ether. The iron sample prepared in this way was inactive, and, as other neutron induced activities were not expected, it is probable that the activity of the samples was due to fission fragments.

d. Sample #43

The iron-aluminum fraction of sample #43 was separated by ether extraction using the same procedure as for sample #24, and was analysed for radioactivity. None was found. This test was made to be sure that none of the radioactivity in the reservoir area was due to induced radioactive elements present in particles of dirt that were swept up by the heat wave following the blast in Nagasaki and subsequently deposited with the fission products.

e. Soil samples #43, 46, 47, 50, 51 and 52

1. A quantitative separation of the fission fragments was attempted to account in detail for the radioactivity in different localities and under different conditions. All chemical work involved was done by Dr. J. F. Flagg, and the complete procedure that Dr. Flagg developed for making the separations is given in Appendix A.

2. Four fractions were separated from one gram of each of the soil samples:

- Strontium as $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$
- Zirconium as $\text{ZrO}(\text{NO}_3)_2$

った。鉄とアルミニウムの分離抽出物（試料No.38）は酸化第二鉄 Fe_2O_3 と酸化アルミニウム Al_2O_3 の混合物で、この部分に試料No.24のほとんどの放射能が含まれていた。マグネシウムとカルシウムは十分な分離ができなかった。

鉄とアルミニウムの分離抽出物には核分裂生成物が含まれていたかもしれない。したがって、試料No.24を2回目に分離した部分を塩酸で溶解し、鉄とアルミニウムを含んだ溶液を得た。溶液を濃縮し、エーテルで鉄を分離抽出した。エーテルでは微量の核分裂破片も抽出できないと思われた。分離した鉄の試料には放射能がなく、他の中性子が誘導した放射能であると考えられなかった。試料の放射能は核分裂断片によるものと思われた。

d. 土壌試料No.43

試料No.43の鉄とアルミニウムの分離抽出物は試料No.24と同じ方法でエーテル抽出し、放射能を測定したが、なにも検出できなかった。この測定は西山水源地付近における「黒い雨」によってもたらされたと考えられた誘導放射能と核分裂生成物による放射能の有無を確かめるために行った。

e. 土壌試料No.43、46、47、50、51、52

1. 核分裂生成物の定量的な分離は、異なった場所や異なった状態で採取した試料の放射能に対して細心の注意を払って行なわれた。すべての化学的分離はフラッグ博士が行った。フラッグ博士が用いた詳細な化学分離の方法は付録A（省略）に示した。

2. それぞれの土壌試料1グラムを4つの分離抽出物に分けた。

- 化学形 $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ として、ストロンチウム
- 化学形 $\text{ZrO}(\text{NO}_3)_2$ として、ジルコニウム

c. Cerium as $\text{Ce}(\text{IO}_3)_4$

d. Yttrium as $\text{Y}(\text{NO}_3)_3$ and Ruthenium as Ru of RuO_2

Each fraction contained carrier equivalent to 20 mg of Sr, Zr, Ce, and Y, respectively, plus submicroscopic quantities of the radio elements. The fractions were weighed and thoroughly mixed with three or more times as much American soil of approximately the same chemical composition as the original Japanese soil sample to reduce the mean atomic weight and hence self-absorption coefficient to approximately the same value as in the original soil samples. It was calculated that the difference in the radiation due to a difference of self-absorption in the original soil samples and in samples thus prepared would be no more than 5%. One gram of the mixture representing each fraction was placed in a disc and counted. Then, the corrected number of counts/minute from each fraction.

$$F = C_f(W_f + W_{\text{soil}}) \left(\frac{100}{S} \right) \quad (12)$$

where C_f is the net counts / minute of the mixture at the time that S , the net counts / minute of the standard sample, is measured. W_f is the weight of the fraction, and W_{soil} is the weight of the soil mixed with it. W_{soil} was always great enough so that $(W_f + W_{\text{soil}})$ was at least one gram.

3. Values of f for samples #43 and 47 are given in Table 9, page 42 and compared with the values predicted using the equation

$$A = (1/t) \left(e^{-\frac{0.693}{t}d} \right) \sigma q \quad (13)$$

in which all the symbols have the same significance as in equation (5) except that "p", isotope fraction in equation (5), has been replaced by "q", percent of fission fragments

c. 化学形 $\text{Ce}(\text{IO}_3)_4$ として、セリウム

d. 化学形 $\text{Y}(\text{NO}_3)_3$ として、イットリウムおよび化学形 Ru か RuO_2 として、ルテニウム

それぞれの分離抽出物は、20mgのストロンチウム、ジルコニウム、セリウムおよびイットリウムの担体と微量の放射能を含んでいた。日本で採取した土壌試料の原子量を減らすことと、ほぼ同じ自己吸収係数にするために、各抽出物は重さを計り、日本の土とはほぼ同じ化学的組成のアメリカの土を3倍以上加えてよく混ぜた。日本の土の試料と調整した試料による自己吸収の違いが、放射能の測定値に及ぼす誤差は5%以内であった。混合して作ったそれぞれの試料の1グラムを試料皿にのせて測定した。それぞれの分離抽出物の測定値の補正値は次式で示される。

$$F = C_f(W_f + W_{\text{soil}}) \left(\frac{100}{S} \right) \quad (12)$$

C_f は標準試料 S を測定した時の混合物の正味の計数率(計数/分)である。 W_f は、その分離抽出物の重量で、 W_{soil} は、それに加えた土の重量である。 W_{soil} は、十分に大きいので、 $(W_f + W_{\text{soil}})$ は少なくとも1グラムである。

3. 表(略)に試料No.43と試料No.47の f 値を示し、次の方程式を用いて予測した値と比べた。

$$A = (1/t) \left(e^{-\frac{0.693}{t}d} \right) \sigma q \quad (13)$$

全ての記号は式(5)のものと同じである。ただし、式(5)では同位元素部分であった p が、企画便覧に示されて同位元素49からの核分裂生成物の割合である q とおきかえられている。

from "49" for each isotope given in the Project Handbook, Chapter III, D1.

4. Sample 43 was from the ground along the dam of the reservoir and sample 47 was silt from 2 ft under water at the same point. The difference in the two should be due to any difference in solubility or in settling rate in water of the fission fragments. To check the solubility of the radio elements in Sample 43, 1 gm of the sample was treated with 20 ml of water for 15 minutes, centrifuged, the clear solution evaporated, and the residue measured for radioactivity. None was found.

5. Gross sample measurements were made by counting 1 gm of each soil sample from the portion that had been ground up for chemical fractionation. It should be noted that the total radioactivities of the fractions check with the radioactivity found by gross sample measurement. Since the radio elements account for such a small quantity of the entire sample, it was suspected that the mortar mixing may have been insufficient to affect their homogeneous distribution. To check their homogeneity, four new gross sample measurements were made using different portions of the same samples. In all cases, the results were within 10-15% of the original gross sample measurements.

6. There is reason to believe that the results for samples #46, 50, 51 and 52 were in error; therefore, they are not reported.

4. 試料No.43は西山水源地の岸辺の地表から採集した。また試料No.47は同じ採取地点の水面から61cm下の湖底土である。この2つの試料の放射能の違いは、放射性物質の溶解性の違いか、あるいは核分裂生成物の水の中での沈殿の割合の違いによるものと考えた。試料No.43の放射性物質の溶解性を調べるために、1グラムの試料を20mlの水に15分間つけておき、遠心して上澄みの液の部分を蒸発させて残渣の放射能を測定した。放射能は検出されなかった。

5. 全体の試料の測定は化学的分離に用いた試料と同じものから1グラムを取り出して行った。放射能を調べた部分を合計した放射能を試料全体の測定値とした。測定した部分の割合が、全体の試料の極く少量にあたるので、全体を推定する量としては不十分であったと思われる。試料中の放射能の均一性を調べるために、4つの測定試料を取り出し、それぞれ測定した。結果はもとの試料の測定値に対し10%から15%以内であった。

6. 試料No.46、50、51と52の分析は失敗したために報告しなかった。

IV. Conclusions

- A. The highest intensity of gamma radiation in Hiroshima was found in the center of town at the ground zero. Two months after the atomic bombing, the intensity at this point was 0.4 milliroentgens per hour. The corresponding integrated dose from 1 hour until about 6 weeks after the explosion would be somewhere between 6 and 24 roentgens.
- B. The highest intensity of gamma radiation at Nagasaki was found in the Nishiyama reservoir district, about a mile north east of town where there had evidently been a precipitation of radioactive materials from the cloud of fission fragments. The trail of radioactive material was traced from this point 30 miles eastward before it disappeared into the bay. Six weeks after the atomic bomb, the highest intensity at the reservoir was 1.8 milliroentgens per hour of gamma radiation, which corresponds to an integrated dose of 27 to 110 roentgens. The radioactivity in the center of town was only $1/10$ that in the Nishiyama reservoir area.
- C. The gamma ray intensity at Hiroshima 2300 meters from the atomic bomb was 12 roentgens as found from an analysis of x-ray film picked up in the Hiroshima Red Cross Hospital. This is four times higher than the maximum theoretical value.
- D. The neutron flux 600 meters from the Hiroshima bomb was 3900×10^{10} neutrons per cm^2 and that 1000 meters from the Nagasaki bomb was 78×10^{10} neutrons per cm^2 . These figures are 30 and 10 times, respectively, higher than the maximum predicted theoretical values. The neutron flux calculated using data from the most reliable Japanese report was 7 times the maximum predicted theoretical in the center of Hiroshima.

第IV章 結 論

- A. 広島で最も強いガンマ線が測定された場所は爆心地である街の中心地にあった。原爆の2か月後、この地点のガンマ線の線量率は0.4ミリレントゲン／時であった。爆発の1時間後から約6週間までの積算線量は約6から24レントゲンと推定された。
- B. 長崎で最も強いガンマ線が測定された場所は、原爆雲からの放射性降下物が落下した、市街から約1.6 km北東に位置する西山水源地付近であった。この地点から50 km東の方向の島原湾まで放射性降下物が残留していた。原爆から6週間後、水源地での最も強いガンマ線の線量率は1.8ミリレントゲン／時であった。これは、27から110レントゲンの積算線量に相当する。爆心地での放射能は西山水源地付近の約 $1/10$ であった。
- C. 広島原爆の爆心地から2,300mの地点でのガンマ線の強度は広島の赤十字病院で採集したX線フィルムから分析して12レントゲンであった。この値は理論的に求めた最大値より4倍高かった。
- D. 広島原爆の爆心地より600mの所の中性子束密度は $3,900 \times 10^{10}$ 個/ cm^2 であり、長崎原爆の爆心地から1,000mでは 78×10^{10} 個/ cm^2 であった。これらの数字は推定した理論値より、それぞれ30倍および10倍高い値であった。日本の最も信頼できる報告のデータを使って計算した広島の爆心地の中性子束密度は、理論的に推定した値より7倍高かった。

E. The residual radioactivity even in the area directly below the bomb originated almost entirely from deposited fission fragments rather than from elements normally present made artificially radioactive.

F. The source of radioactivity in sample 12, dirt washed from bones picked up in Nagasaki, and the source of radioactivity in samples 28T and 28R, pieces of iron from Hiroshima, has yet to be explained.

G. The significance of the percentages of the radioactivity found by quantitative separation of fission fragments from samples 43 and 47 above and below water at the Nishiyama reservoir is not known. There are available in Rochester 3 or 4 dirt samples containing about 1 lb, of dirt each. These samples are sufficiently radioactive for use in determining the efficiency of the Nagasaki atomic bomb by the Anderson-Sugarman method.

E. 爆心直下の地域での残留放射能は、中性子による誘導放射能よりは、むしろ大部分が放射性降下物による核分裂生成物によるものであった。

F. 試料No.12の放射能は長崎で採集した骨に付着していた泥の中に存在した。金属試料No.28Tと金属試料No.28Rの放射能は広島鉄片中に存在した。

G. 西山水源地の湖底と岸辺から採取した土壌試料No.43と土壌試料No.47から定量的に分離した放射能の構成割合はわからなかった。これらの土壌試料はアンダーソン・シュガーマンの方法により長崎の原子爆弾の威力を決定するための試料として十分な放射能があった。

V. Acknowledgements

The author wishes to thank Dr. W. F. Bals for his aid in radioactivity counting, interpretation of data, and suggestions in matters of policy, Dr. J. F. Flagg for his many weeks of work on chemical separations, Dr. H. R. Seeman for his help in x-ray film interpretation, Mr. M. J. Wantman for statistical work and advice in statistical problems, Dr. G. H. Dessauer for advice in physical and mathematical problems, Dr. R. E. Marshak for theoretical neutron intensities and advice in calculation of results, Dr. J. Hoffman for information concerning the residual radioactivity in New Mexico, Dr. V. F. Weisskopf for suggestions concerning interpretation of data, Capt. H. L. Barnett for procurement of Japanese reports and other reference material, Capt. W. Youngs for help in preparation of maps, Capt. D. L. Collins for contribution of Map #4, and many workers in Rochester

第V章 謝 辞

放射能測定、データの解釈、そして研究方針に関する助言などをいただいたW. F. バール博士、化学的分離のために何週間も働いていただいたJ. F. フラッグ博士、エックス線フィルムの解釈を助けていただいたH. N. シーメン博士、統計的な研究と統計的な分析に助言していただいたM. J. ワントマン氏、物理的な問題や数学的な問題に対して助言していただいたG. H. デセウアー博士、理論的な中性子束密度の計算についての助言をいただいたR. E. マーシャク博士、ニューメキシコでの残留放射能に関する情報をいただいたJ. ホフマン博士、結果の解釈についての助言をいただいたV. F. ウェイスコフ博士、日本の報告書とその他の参考文献を調達していただいたH. L. バーネット大佐、地図の準備をしていただいたヤングス大佐、図4 (Map # 4) に貢献

who contributed to the completion of this report.

していただいたD. L. コリンズ大佐、そしてこの報告書を完成するにあたって御尽力いただいたロチェスター大学の皆様に感謝する。

VI .Table of Nomenclature

A	- number of beta ray disintegrations
a	- average log energy loss of neutrons in air $\approx .16$
B	- background counts/minute
C	- counts
Co	- counts without any foils covering the samples
d	- days since fission
E	- error
l	- scattering mean free path of neutrons in air at epithermal energies $\sim 25\text{m}$.
M	- total counts/minute
m	- background counts/minute
N	- number of ten minute intervals counts were made
n	- number of radioactive atoms, same as number of neutrons captured
p	- isotope fraction
PE	- probable error
Q	- theoretically predicted number of delayed neutrons emitted by gadget, 4×10^{22}
q	- percentage of each isotope in the fission fragments from "49" as given in the Project Handbook, Chapter III D 1
r	- straight line distance bomb, meters
S	- standard measurement, net counts/minute
T	- time, minutes
t	- half life, days
Z	- mole of element
σ	- cross section for slow neutron capture ($0.23 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ for P^{31})
\sqrt{e}	- slowing down length for epithermal neutrons from an energy of 600 k. v. (average energy of delayed neutrons $\approx 150\text{m}$.)

第VI章 専門用語

A	ベータ線の崩壊数
a	空気中の中性子の平均対数エネルギー損失、約0.16
B	バックグラウンドの計数率（計数／分）
C	試料の計数
Co	試料をアルミフォイルで包まないときの計数
d	爆発からの経過日数
E	誤差
l	熱外中性子のエネルギーでの空気中の散乱平均自由行程、約25m
M	試料の計数率（計数／分）
m	バックグラウンドの計数率（計数／分）
N	10分間隔で測定した回数
n	放射性同位元素の原子の数、中性子捕獲と同じ数
p	同位元素の断片
PE	確率誤差
Q	装置より放出した遅発中性子の推定数、 4×10^{22}
q	企画便覧に掲載されている同位元素49からの分裂断片のそれぞれの同位元素の存在化
r	原爆までの直線距離（m）
S	標準測定（正味の計数／分）
T	時間（分）
t	半減期（日）
Z	元素のモル
σ	低速中性子捕獲に対する反応断面積（ P^{31} に対して $0.23 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ ）
\sqrt{e}	熱外中性子が600kVのエネルギーから減速する長さ（平均のエネルギーの遅発中性子、約150m）

VII .References

1. Weissberger, Ed., Physical Methods of Organic Chemistry, Vol. II, Interscience publishers, 1945.
2. Morgulis, J., J. Biol. Chem. 93 (455-466).
3. Private communication from Dr. Joseph Hoffman.

第VII章 文 献

1. Weissberger, Ed. , Physical Methods of Organic Chemistry, Vol. II, Interscience Publisher, 1945.
2. Morgulis, J. , J. Biol. Chem. 93(455-466).
3. Dr. Joseph Hoffman. からの私信