

RBE OF NEUTRONS IN ATOMIC BOMB SURVIVORS  
HIROSHIMA – NAGASAKI

原爆被爆者における中性子の相対的生物学的効果 (RBE)

広島・長崎

SEYMOUR JABLON, M.A.

SHOICHIRO FUJITA, M.S. 藤田正一郎

KAZUKO FUKUSHIMA 福島和子

TORANOSUKE ISHIMARU, M.D., M.P.H. 石丸寅之助

JOHN A. AUXIER, M.S.



ATOMIC BOMB CASUALTY COMMISSION

国立予防衛生研究所 - 原爆傷害調査委員会

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

## TECHNICAL REPORT SERIES

### 業 績 報 告 書 集

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

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

RBE OF NEUTRONS IN ATOMIC BOMB SURVIVORS  
HIROSHIMA — NAGASAKI

原爆被爆者における中性子の相対的生物学的効果 (RBE)  
広島・長崎

SEYMOUR JABLON, M.A.

SHOICHIRO FUJITA, M.S. 藤田正一郎

KAZUKO FUKUSHIMA 福島和子

TORANOSUKE ISHIMARU, M.D., M.P.H. 石丸寅之助

JOHN A. AUXIER, M.S.



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

RBE OF NEUTRONS IN ATOMIC BOMB SURVIVORS  
HIROSHIMA - NAGASAKI

(RBE) 異性的な放射線に対する相対的生物学的効果 (RBE)

編者: 藤田

SEYMOUR JABLON, M.A.

SHOICHIRO FUJITA, M.S.

KAZUKO FUKUSHIMA

TORANOSUKE ISHIMARU, M.D.

JOHN A. LUKER, M.S.

This manuscript was prepared for oral presentation at the Symposium on Neutrons in Radiology,  
10-14 November 1969, Oak Ridge, Tennessee

本報告は1969年11月10-14日米国テネシー州オークリッジで行なわれた放射線生物学における中  
性子に関するシンポジウムで発表された口演原稿である。

A paper based on this report was published in:

本報告に基づく論文は下記の報告書に発表した。

Symposium on neutrons in radiobiology, November 11-14, 1969, Oak Ridge, Tennessee.  
USAEC CONF-691106. pp 547-77

# CONTENTS

## 目次

Summary 要約 .....	1
Historical Background 歴史的背景 .....	1
Materials Available 入手材料 .....	12
General Considerations 考察 .....	15
Results 結果 .....	17
Reported Discussion 討議 .....	33
References 参考文献 .....	36
Figure 1. Map of Japan	
図 日本国地図 .....	3
2. Kawaya Street pre- & post- atomic bomb 被爆前後の広島市革屋町 .....	3
3. Map of Hiroshima City 広島市街図 .....	4
4. Map of Nagasaki City 長崎市街図 .....	4
5. Estimated atomic bomb civilian casualties 原爆による民間人死傷者推定数 .....	5
6. Typical air-dose distributions for nuclear weapons of nominal size 標準収量の核爆弾の典型的空気線量分布 .....	7
7. Japanese house used during dosimetry studies 線量測定調査に用いた日本家屋 .....	8
8. Collimator devices used for measuring the angular distribution of radiation from nuclear weapons 核爆弾からの放射線の角度分布測定に用いたコリメーター .....	8
9. Angular distribution of neutron dose at 1000 yards from a typical nuclear weapon of nominal size 標準収量の典型的核爆弾から1000ヤード地点での中性子線量の角度分布 .....	9
10. Angular distribution of gamma dose at 1000 yards from a typical nuclear weapon of nominal size 標準収量の典型的核爆弾から1000ヤード地点でのガンマ線量の角度分布 .....	9
11,12 Radiation dose as a function of horizontal distance from ground zero, Hiroshima, Nagasaki 爆心地からの水平距離の関数としての放射線量, 広島, 長崎 .....	10
13. Typical array of Japanese houses used during Operation Hardtack II 実験計画で用いた日本家屋の典型的配置 .....	11
14. Extended JNIIH-ABCC Life Span Study sample 子研-ABCC寿命調査拡大対象集団 .....	13
15,16 Average neutron & gamma dose, Nagasaki, Hiroshima 中性子およびガンマ平均線量, 長崎, 広島 .....	14
17-21 Percent with epilation by T65 RBE dose, RBE = 1, 2, 3, 4, 5 脱毛の百分率: T 65 RBE 線量別, RBE = 1, 2, 3, 4, 5 .....	18

22-24 Percent with bleeding by T65 RBE dose, RBE = 1, 4, 5 出血の百分率: T 65RBE 線量別, RBE = 1, 4, 5 .....	22
25-29 Proportion with leukemia by T65 RBE dose 1950-66, RBE = 1, 2, 3, 4, 6 白血病の割合: T 65RBE 線量別, 1950 - 66年, RBE = 1, 2, 3, 4, 6 .....	24
30,31 Percent with axial opacities by T65 RBE dose, RBE = 1, 2 軸性混濁の百分率: T 65RBE 線量別, RBE = 1, 2 .....	26
32. Epilation by T65 RBE dose according to ORNL & JNIRS air-dose curves, Nagasaki, RBE = 1 ORNL および放医研の空気線量曲線による T 65RBE 線量別脱毛の百分率, 長崎, RBE = 1 .....	28
33,34 Epilation by T65 RBE dose, JNIRS, RBE = 3, 4 脱毛の百分率: T 65RBE 線量別, 放医研, RBE = 3, 4 .....	28
35. Epilation by T65 RBE dose for two gamma relaxation lengths, Hiroshima, RBE = 1 二つのガンマ線の弛緩距離における T 65RBE 線量別脱毛の百分率, 広島, RBE = 1 .....	29
36,37 Epilation by T65 RBE dose for gamma relaxation length 265 m, Hiroshima, RBE = 2, 3 ガンマ線の弛緩距離265mにおける T 65RBE 線量別脱毛の百分率, 広島, RBE = 2, 3 .....	30
38,39 Comparison of JNIRS & ORNL data, Hiroshima, Nagasaki 放医研と ORNL の資料の比較, 広島, 長崎 .....	32
40. Incidence leukemia, Hiroshima & Nagasaki 広島・長崎における白血病発生率 .....	33



Approved 承認 1 July 1970

## RBE OF NEUTRONS IN ATOMIC BOMB SURVIVORS, HIROSHIMA - NAGASAKI

原爆被爆者における中性子の相対的生物学的効果 (RBE) 広島・長崎

SEYMOUR JABLON, M.A.<sup>1</sup>; SHOICHIRO FUJITA, M.S. (藤田正一郎)<sup>1</sup>; KAZUKO FUKUSHIMA (福島和子)<sup>1\*</sup>;  
TORANOSUKE ISHIMARU, M.D., M.P.H. (石丸寅之助)<sup>1\*</sup>; JOHN A. AUXIER, M.S.<sup>2</sup>ABCC Department of Statistics<sup>1</sup> and Health Physics Division, Oak Ridge National Laboratory<sup>2</sup>ABCC 統計部<sup>1</sup> および Oak Ridge National Laboratory 保健物理部<sup>2</sup>

\*Hiroshima Branch Laboratory, Japanese National Institute of Health, Ministry of Health and Welfare

厚生省国立予防衛生研究所広島支所

**SUMMARY:** At ABCC an extensive Japanese-American cooperative study has been in progress for more than 20 years to determine the late effects of A-bomb radiation received by the Hiroshima and Nagasaki survivors. The dosimetry study conducted with the cooperation of Oak Ridge National Laboratory has made it possible to estimate the individual exposure dose by using the shielding histories, attenuation factors for various types of buildings, and air dose estimates. An attempt is being made to estimate the dose-response relationship of radiation effects using these dose estimates.

Currently efforts are being devoted toward assessing the relative biological effectiveness (RBE) of neutrons as compared with gamma rays. As there are some uncertainties involved, the estimation of RBE was studied from various angles and assessment of the validity was made by comparing results obtained by an entirely different approach. This approach was applied to such well documented human radiation effects as epilation and bleeding for acute effects and leukemia and axial opacity of the lens for late effects. The estimated RBE values ranged from 1 to 5.

**要約:** ABCC は、過去20年以上にわたって広島と長崎の被爆者が受けた原爆放射線による後影響を究明する目的で、広範囲な日米共同調査を行なっている。Oak Ridge National Laboratory の協力のもとに行なった線量調査によって、遮蔽記録、各種の建造物による減衰に関する資料、空気線量曲線の推定値などをもとにした個人推定被曝線量が求められた。これらの線量推定値を用いて、放射線の影響に対する線量反応関係を推定しようとしている。

中性子線とガンマ線をいろいろの割合で受けた被爆者において、中性子のガンマ線に対する相対的生物学的効果 (RBE) を評価すべく目下努力している。不確定な因子が若干あるので、RBE の推定問題をいろいろの方向から検討し、全く異なった方法により得られた結果を比較してその妥当性を評価した。急性障害としての脱毛と出血、および後障害としての白血病と水晶体の軸性混濁のようなよく知られた人体に対する放射線影響に対してこの方法を用いた。得られたRBEの推定値の範囲は、1から5までであった。

## HISTORICAL BACKGROUND

The 2nd World War was brought to an end 24 years ago, in 1945, with the destruction by atomic bombs of Hiroshima and Nagasaki. The relatively primitive state of knowledge at that time regarding the effects of radiation on man was

## 歴史的背景

24年前の1945年に原子爆弾による広島・長崎の破壊によって第二次世界大戦は終結した。放射線の人体に及ぼす影響に関するその当時の知識が比較的初歩的なものであ

attested by the wide-spread speculation in newspapers and elsewhere that raised the specters of the birth of deformed children, tremendously increased cancer rates, and numerous other possibilities.

Hiroshima and Nagasaki are both located in West Japan, Hiroshima near the western limit of the main island, Honshu, and Nagasaki on Kyushu (Figure 1). The destruction caused by the bombs was immense, especially in Hiroshima (Figure 2) which is situated in a bowl, formed by the delta of the river Ota, and surrounded on the east, north, and west by mountains. To the south is Hiroshima Bay, an arm of the Inland Sea. The bomb exploded almost in the center of the bowl (Figure 3) so that a circle of radius 2000 m with center at the hypocenter reaches to the mountains, and only to the south of the hypocenter were there portions of the city which were far enough distant to escape almost total destruction from blast and fire. Hundreds of fires were ignited by the heat from the fireball and also by the overturning of stoves on which housewives were cooking breakfast. In Nagasaki, on the other hand, the bomb exploded in the relatively narrow Urakami valley, walled off to east and west by fairly high hills or mountains (Figure 4). The hypocenter was more than 3000 m from the main port areas and the commercial and amusement centers of the city. Because of the differences in the geography of the two cities and in the relative locations of the hypocenters, despite the fact that the yield of the Nagasaki weapon was much larger than that of the Hiroshima bomb - about 22 kilotons vs about 12.5 kilotons<sup>1</sup> - the loss of life and physical destruction were greater in Hiroshima than in Nagasaki.

There has been continuing controversy regarding the number of persons who were killed by these bombs. The conclusion of the Joint Commission (see below) was that discrepancies and incompleteness in the data available from different primary sources were such that exact numbers would never be known. The best estimate that the Joint Commission could make was that the numbers of civilians who were either killed immediately or who died within about 2 months were about 65,000 and 39,000 in Hiroshima and Nagasaki, respectively, and that there were nearly 100,000 persons injured, who survived beyond mid-October, 1945 (Figure 5). The Joint Commission considered that estimates of military casualties, which in Hiroshima, at least, must have been large, were impossible to make with any accuracy.

Investigations of the effects of the bombs began within a few days after the explosions, when teams of Japanese investigators from various universities arrived in the two

ったことは、新聞その他で奇形児の出産と癌発生率の激増、およびその他多くの危険の可能性があると の広範な推測が報道されたことによっても証明された。

広島および長崎はいずれも西日本に位置する。すなわち、広島は本州の西端部に近く、また長崎は九州に位置している(図1)。原爆による災害は甚大なもので、特に太田川の三角洲から成っていて、東部、北部および西部を山で囲まれた盆地に位置する広島では、被害が甚大であった(図2)。市の南部は瀬戸内海の入江の一つであるところの広島湾に面している。爆弾は盆地のほとんど中央で爆発したので(図3)、爆心地を中心とする半径2000mの円は周囲の山々に達したが、爆心地から南方へ相当離れているために爆風と火災による全壊をまぬかれた地域がわずかにあった。火球の熱や、主婦が朝食の準備をしていたコンロの転覆によって無数の火災が起こった。他方、長崎では、爆弾は東西をかなり高い丘や山々で囲まれた比較的狭い浦上の谷間で炸裂した(図4)。爆心地は主要な港湾地域や市の商業および娯楽の中心地から3000m以上離れた所であった。両市の地理的な差や爆心地の相対的位置の差によって、長崎の爆弾の収量は広島の場合よりも大きかった(約22キロトン対約12.5キロトン)<sup>1</sup>にもかかわらず、死亡や負傷の数は長崎より広島のほうが多かった。

これらの爆弾による死亡者数については、絶えず議論されてきた。日米合同調査団(下記参照)は、それぞれ出所を異にする各種資料の間に差のあることや不完全さがあるために、正確な数はとうてい得られないであろうと結論している。合同調査団による最良の推定は、即死または約2か月以内に死亡した民間人の数は、広島および長崎でそれぞれ約65,000人および39,000人であり、負傷者で1945年10月中旬以後まで生存した者は約100,000人(図5)である。なお、同調査団は、軍人の被害は、少なくとも広島では大きなものであったはずであるが、正確に推定することは不可能であると考えている。

原爆の影響に関する調査は、投下後二、三日のうちに両市に到着した日本の各大学の調査団によって開始された。



FIGURE 1 MAP OF JAPAN  
図1 日本国地図

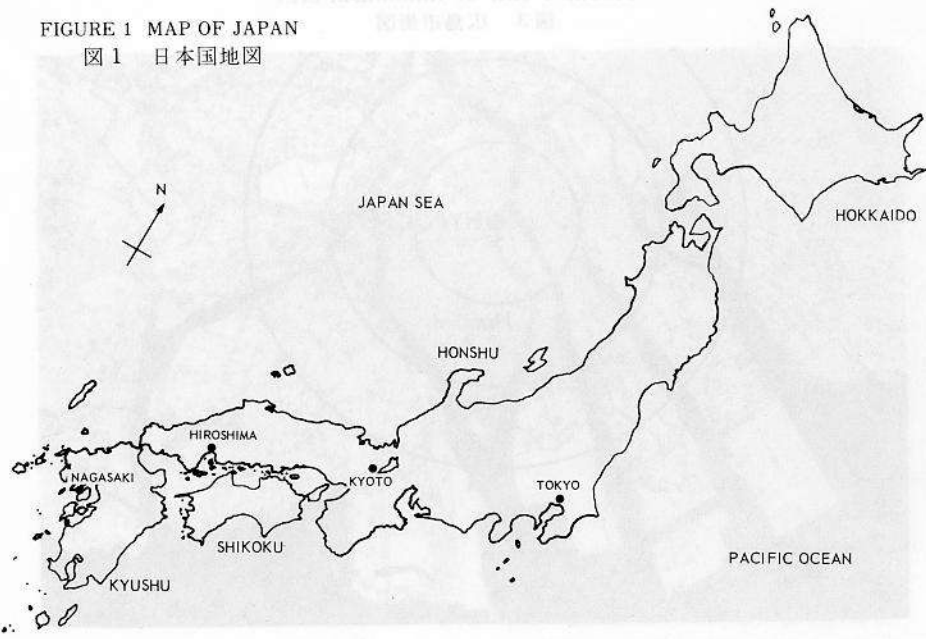


FIGURE 2 KAWAYA STREET PRE- & POST-ATOMIC BOMB  
図2 被爆前・後の広島市草屋町

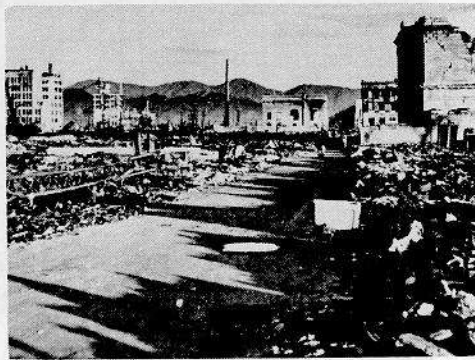
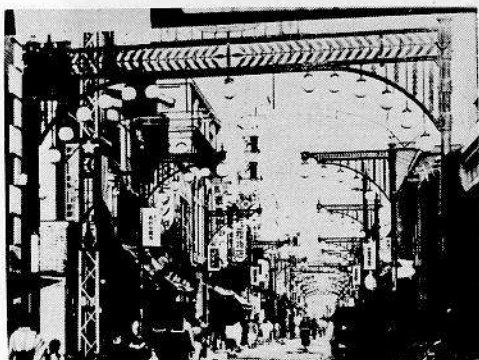


FIGURE 3 MAP OF HIROSHIMA CITY

図3 広島市街図

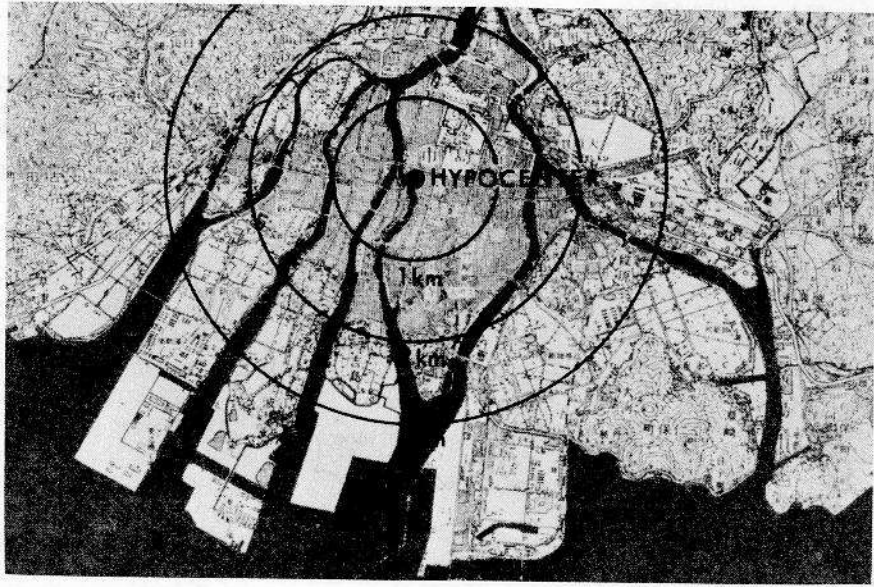


FIGURE 4 MAP OF NAGASAKI CITY

図4 長崎市街図

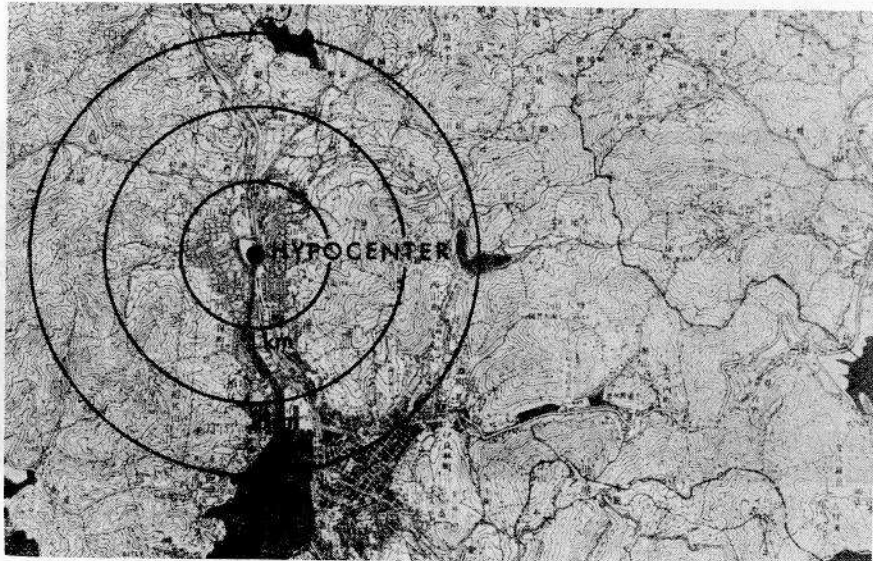


FIGURE 5 ESTIMATED ATOMIC BOMB CIVILIAN CASUALTIES

図5 原爆による民間人死傷者推定数

City 市別	Population 人口	Killed 死亡	%	Injured 負傷	%
Hiroshima 広島	255200	64600	25.3	72200	28.3
Nagasaki 長崎	195300	39000	20.0	25000	12.8

*Oughterson & Warren*

cities. By 12 October, a Joint Commission was established by order of SCAP, which ultimately was comprised of representatives from four groups: The Manhattan District, U.S. Army Forces Pacific, the U.S. Navy, and the Japanese Imperial Government team.<sup>2</sup> It is to the work of the Joint Commission during the first weeks after the bombs that we owe most of what is now known about the immediate effects. With the completion of the work of the Joint Commission, its chairman, Dr. Ashley W. Oughterson, recommended to the Surgeon General of the Army that the National Academy of Sciences-National Research Council be requested to undertake a long range study of the medical and biological effects of the atomic bomb.<sup>3</sup> In November, 1946, President Truman issued an executive order inviting the National Academy of Sciences to undertake such investigations, and with financial support of the Atomic Energy Commission, in 1947 the Academy established ABCC.\*

10月12日には、連合軍最高司令官の命により合同調査団が設立されたが、これは最終的には次の四つの調査団の代表者から組織された。すなわち、Manhattan District 計画関係者、米国陸軍太平洋方面軍、米国海軍、および日本帝国政府派遣調査団<sup>2</sup>である。現在、原爆の直接影響について得られている知識のほとんどは、原爆後の数週間にわたって行なわれた合同調査団の調査によって入手されたものである。合同調査団の調査完了と同時に、その団長 Dr. Ashley W. Oughterson は、陸軍軍医総監に対し、米国学士院-学術会議に原爆の医学的および生物学的影響について長期的な調査を行なうよう要請することを進言した。<sup>3</sup> 1946年11月、Truman 大統領は、大統領命令を発して米国学術会議にその調査の実施を要請し、学術会議は原子力委員会の財政的援助を得て1947年にABCCを創設した。<sup>\*</sup>

\*This description, prepared for oral presentation, omits some of the steps involved in the genesis of ABCC. The sequence of events was, that following Dr. Oughterson's report, Surgeon-General Norman T. Kirk of the U.S. Army, transmitted the recommendation to Dr. Lewis H. Weed, then chairman of the Division of Medical Sciences, National Research Council. In consequence, in June 1946 a conference was called by Dr. Weed. The conference recommended that action be taken to evolve a Presidential Directive to effect the study. Navy representatives forwarded this recommendation to James Forrestal, Secretary of the Navy, who presented it to President Truman. The President approved Secretary Forrestal's recommendation.

口述発表のために作成されたこの報告書には、ABCCの起原に関するいくつかの段階が省略してある。経過は次のとおりである。—Dr. Oughtersonの報告を受けたNorman T. Kirk米陸軍軍医総監は、当時の学士院医学部長Dr. Lewis H. Weedにその進言を伝達した。その結果として、1946年6月にDr. Weedによって会議が召集され、調査を実施するための大統領命令の発効を求めることが勧告された。海軍代表はこの勧告をJames Forrestal海軍長官に手渡し、海軍長官はそれをTruman大統領に提出した。そうして大統領はForrestal長官の勧告を承認したのである。



A prerequisite to the estimation of individual doses is a knowledge of the particular shielding situation for each survivor at the time of the bombs. In 1952, surveys directed at this objective were begun by Noble in Nagasaki, and these proved so successful in developing the needed information that in 1954, Woodbury began a parallel program in Hiroshima. However, the actual calculation of doses was dependent also upon knowledge of the radiation dose curves for an air-ground interface geometry having no other radiation field perturbing objects ("air-dose curves") and upon the transmission factors for various kinds of building materials and specific configurations, neither of which was available at that time.

Until 1955, the possibility of making dose estimates for the survivors appeared remote. However, after the weapons test experiments in dosimetry in 1955, the prospects appeared to improve to such an extent that a comprehensive study was commenced at Oak Ridge National Laboratory. Various important parameters were evaluated and basic relationships verified or established; e.g., that, after an initial buildup, both neutron and gamma-ray doses  $D$  varied with slant range  $R$  as

$$D(R) = \frac{G_0 e^{-R/L}}{R^2}$$

where  $G_0$  represents the apparent radiation dose at unit distance and  $L$  is the relaxation length or distance over which an apparent absorption of  $1/e$  is observed.<sup>4</sup> Air-dose distributions for typical weapons of nominal yield are shown in Figure 6.

After an initial study of the problems of dosimetry for Hiroshima and Nagasaki in the spring of 1956, emphasis of the ORNL work was on obtainment of the doses for persons exposed in "typical Japanese dwellings" because of the high structural uniformity of the houses and to the large fraction of survivors exposed in them. The overall problem was divided into three parts: (1) the documentation of the location of the survivor at the instant the bomb exploded (including detailed information on house and terrain features); (2) the establishment of the air dose vs distance curves; and (3) the shielding factors for the houses. The first of these was accomplished by ABCC shielding technicians with guidance only provided by ORNL. The two remaining parts were to be studied during weapons tests.

A pilot study of neutron and gamma radiation dose distributions in Japanese houses was conducted during Operation Plumbbob at the Nevada Test Site in 1957. Two Japanese houses were constructed of Japanese

各被爆者の線量推定に不可欠な条件は、原爆時におけるそれぞれの特殊な遮蔽状態に関する資料を入手することである。1952年に、長崎においてこれを目標とする調査が Noble によって開始され、これによって必要資料の入手に非常な成果が収められたので、1954年には Woodbury が広島でこれと並行した研究計画を開始した。しかし、実際の線量算定は、このほかに放射線野を混乱させる事物のない状況下における空気と地表との接触面に対する放射線量曲線(空気線量曲線)に関する知見によっても左右されるし、また種々の建物の材料や形状による透過因子によっても影響されるが、当時はそのいずれに関する資料も入手されてはいなかった。

1955年までは、被爆者について線量推定を行なう可能性は遠い未来のことに思われた。しかし、1955年に線量推定のための核実験が行なわれて以来、見通しが大いに開けてきたので、Oak Ridge National Laboratory (ORNL) では広範な調査が開始された。種々の重要なパラメーターが評価され、基礎的關係が立証または確立された。たとえば、最初のビルドアップ以後、中性子およびガンマ線量  $D$  は、次のように直線距離  $R$  とともに変化した。

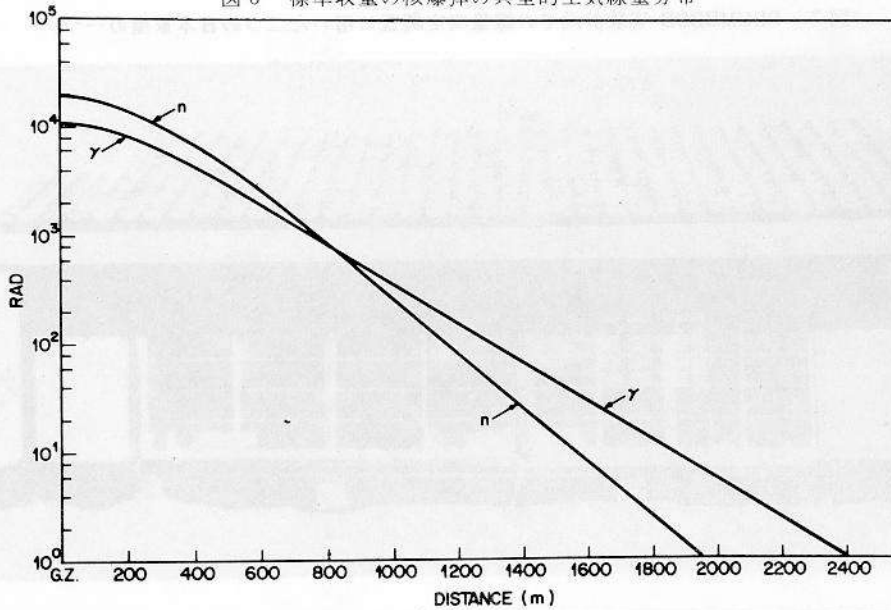
ただし、 $G_0$  は単位距離において受けたと思われる放射線量を表わし、 $L$  は弛緩距離すなわち吸収線量  $1/e$  が認められる距離である。<sup>4</sup> 標準収量を有する典型的な爆弾についての空気線量分布を図6に示す。

1956年春に広島・長崎に関する線量測定問題について最初の調査が行なわれた結果、ORNL では「典型的な日本家屋」における被爆者の線量を入手することに重点が置かれることになった。これは日本家屋の構造が非常に画一的であることと、被爆者の大部分がそのような建物の中で被爆したためである。この総括的な問題は次の三つの部分に分けられた：(1)原爆爆発時における被爆者の位置に関する記録の作成(家屋および地形に関する詳細な資料をも含む)；(2)空気線量対距離曲線の確立；(3)家屋についての遮蔽因子。これらの問題の一番目は、ABCC遮蔽技術員がORNLよりの指導のみに基づいて実施した。残りの2問題は、核実験で調べることになった。

日本家屋における中性子線およびガンマ線の線量分布に関する試験調査は、1957年、Nevada 実験場で Plumbbob 実験計画の実施中に行なわれた。日本の建材を用いた家

FIGURE 6 TYPICAL AIR-DOSE DISTRIBUTIONS FOR NUCLEAR WEAPONS OF NOMINAL SIZE

図6 標準収量の核爆弾の典型的空気線量分布



materials, and the dose from a typical bomb was measured in and near them (Figure 7). These measurements indicated that the dose distribution could probably be related to a few parameters such as house size, orientation, proximity of walls and windows, etc.

The basic studies included spatial and angular distribution for both neutrons and gamma rays and energy distributions as a function of distance and angle of incidence of neutrons. The angular distributions required the use of special collimation devices (Figure 8). Typical distributions of dose with angle of incidence for bombs of nominal yield are shown in Figures 9 and 10 for neutrons and gamma rays, respectively.

Upon completion of the analysis of data from Plumbbob, a summary of all dosimetry information applicable to the survivors was prepared and transmitted to the shielding group in ABCC. Designated T57D, this tentative dosimetry information served as a guide to establishment of techniques for determination of dose values from the shielding "histories" of the exposed individuals; it also provided an estimate of dose which supplanted the use of distance as the correlative factor for observed responses. The "air-dose" curves (Figures 11 and 12) were provided by York,<sup>5</sup> based on all weapons data available to him. The large uncertainties (probable error) in the curves are indicated by the dotted lines.

屋が2戸建てられ、その内部や近辺において典型的な爆弾による線量を測定した(図7)。これらの測定結果から、線量分布はおそらく、家屋の大きさ、方向、壁や窓からの距離などのような少数のパラメーターに関係しているだろうということが認められた。

基礎的な調査では、中性子線およびガンマ線の双方について空間分布および角度分布を調べ、距離および中性子線の入射角の関数としてのエネルギー分布を調べた。角度分布の測定には特殊なコリメーターを用いる必要があった(図8)。図9および10では、標準収量を有する爆弾の入射角による線量の典型的分布を、それぞれ中性子線およびガンマ線別に示した。

Plumbbob 計画による資料の解析完了後、被爆者に適用されるすべての線量測定資料の要約が作成され、ABCCの遮蔽調査課に送られた。T57Dと称されるこの暫定線量推定資料は、被爆者の遮蔽「歴」から線量を推定する技術を確認するための指針としての役割を果たし、また観察された影響の相関の因子としての距離の利用にかかわる線量推定値を提供した。York<sup>5</sup>は、かれの手許に入手している核兵器資料のすべてをもとにして「空気線量」曲線(図11および12)を示した。その曲線における大きな不確実性(確率誤差)は点線によって示されている。



FIGURE 7 ONE OF TWO JAPANESE HOUSES USED DURING DOSIMETRY STUDIES,  
OPERATION PLUMBBOB

図7 PLUMBBOB 実験計画での線量測定調査に用いた二つの日本家屋の一つ

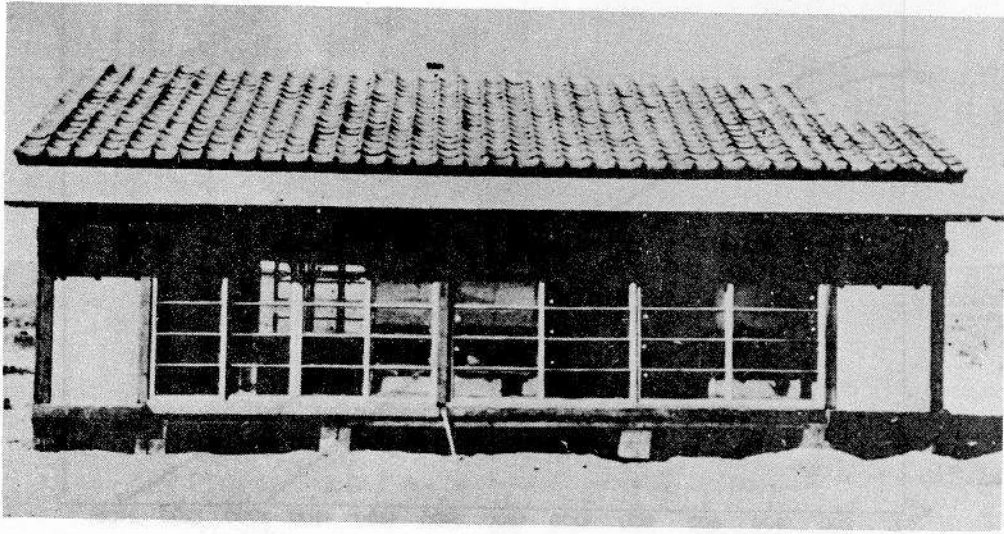


FIGURE 8 COLLIMATOR DEVICES USED FOR MEASURING THE ANGULAR DISTRIBUTION OF  
RADIATION FROM NUCLEAR WEAPONS

図8 核爆弾からの放射線の角度分布測定に用いたコリメーター

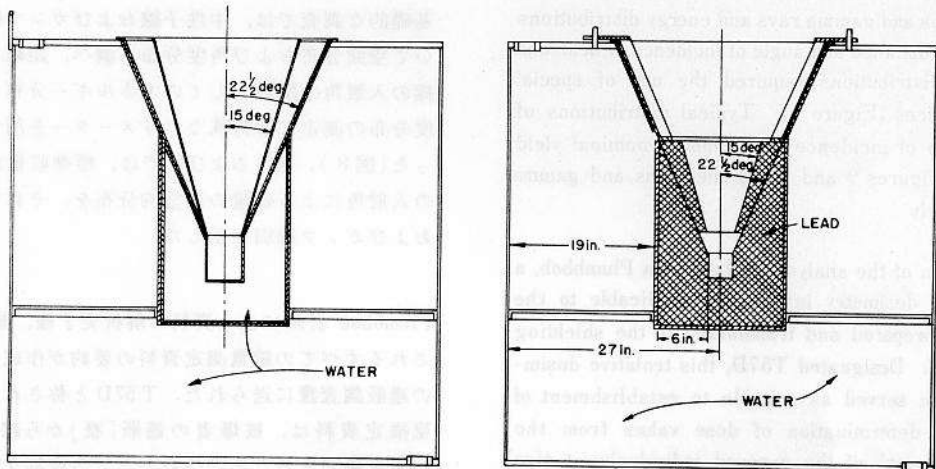


FIGURE 9 ANGULAR DISTRIBUTION OF NEUTRON DOSE AT 1000 YARDS FROM A TYPICAL NUCLEAR WEAPON OF NOMINAL SIZE

図9 標準収量の典型的核爆弾から1000ヤード地点での中性子線量の角度分布

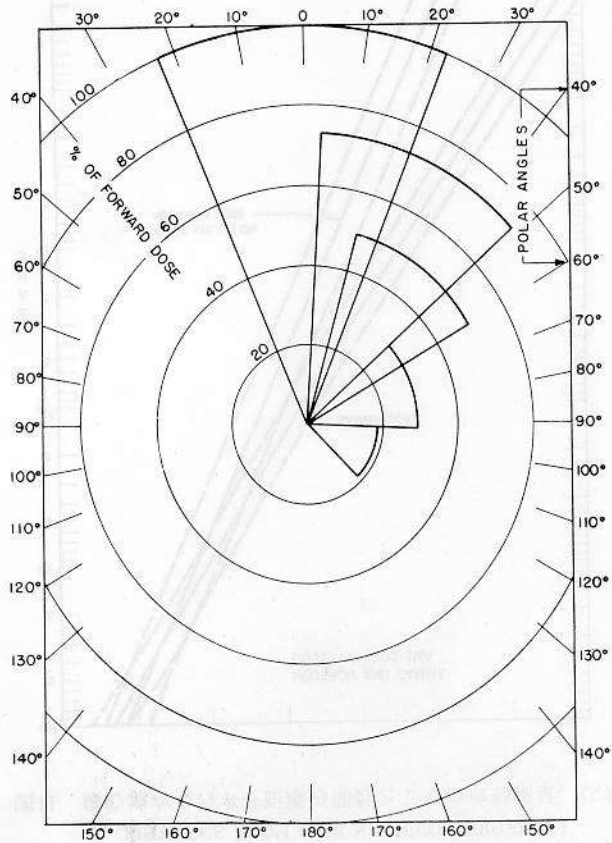


FIGURE 10 ANGULAR DISTRIBUTION OF GAMMA DOSE AT 1000 YARDS FROM A TYPICAL NUCLEAR WEAPON OF NOMINAL SIZE

図10 標準収量の典型的核爆弾から1000ヤード地点でのガンマ線量の角度分布

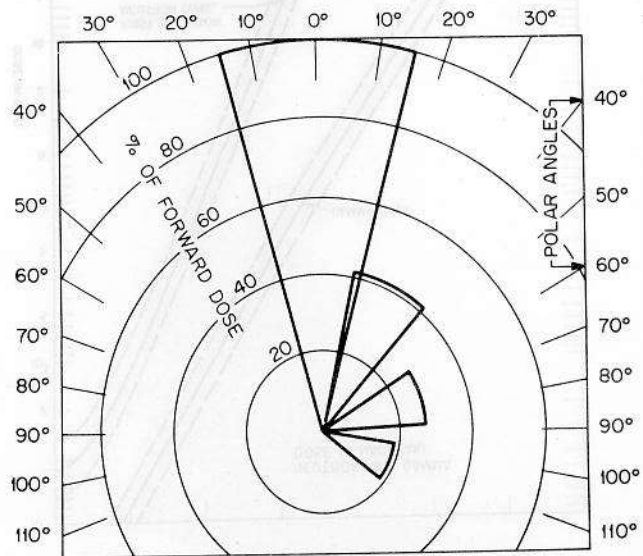


FIGURE 11 RADIATION DOSE AS A FUNCTION OF HORIZONTAL DISTANCE FROM GROUND ZERO, HIROSHIMA

図11 爆心地からの水平距離の関数としての放射線量，広島

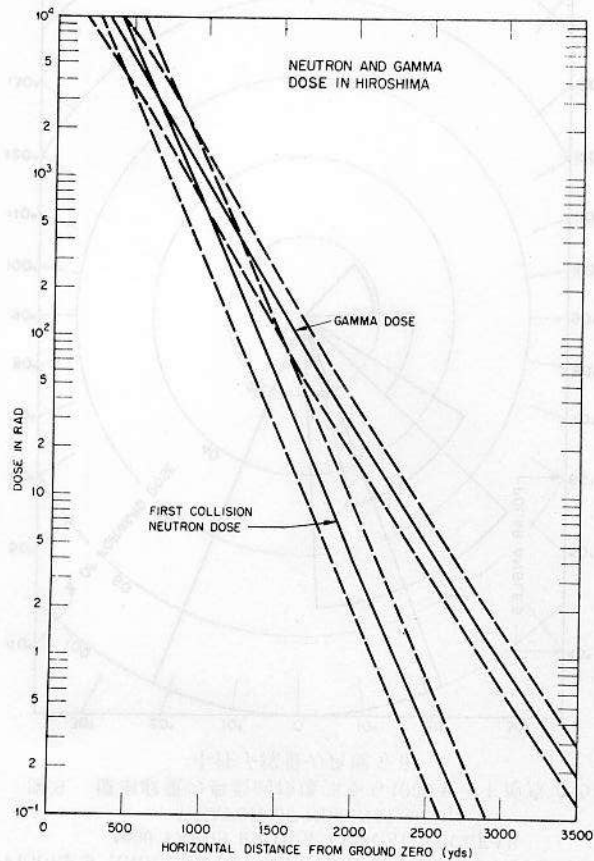


FIGURE 12 RADIATION DOSE AS A FUNCTION OF HORIZONTAL DISTANCE FROM GROUND ZERO, NAGASAKI

図12 爆心地からの水平距離の関数としての放射線量，長崎

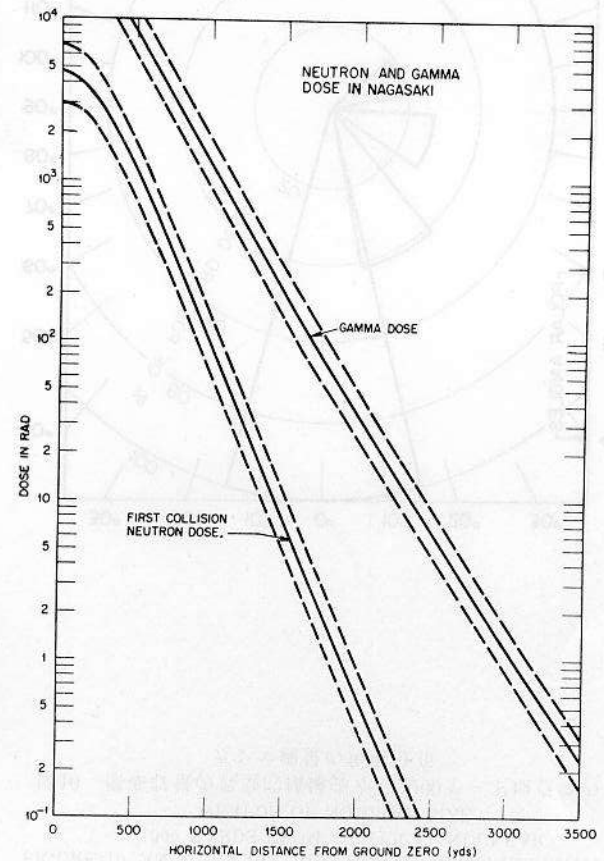
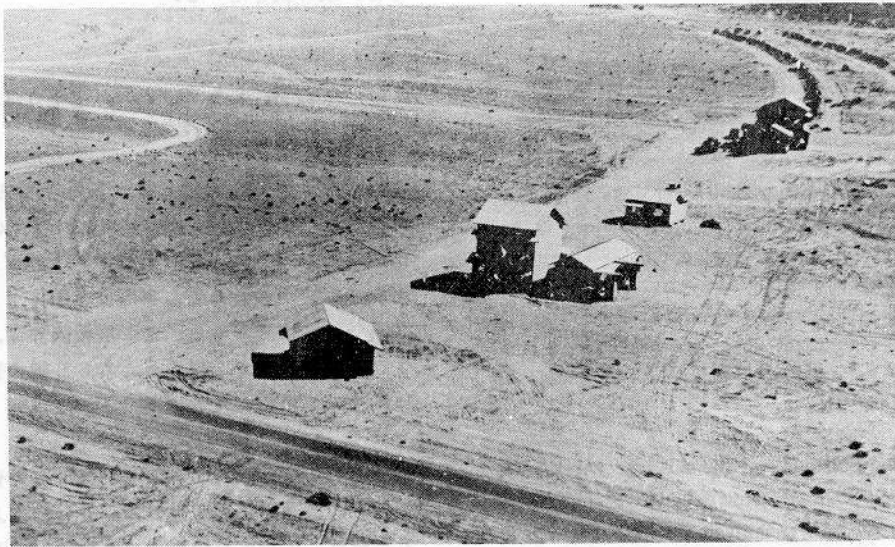


FIGURE 13 TYPICAL ARRAY OF JAPANESE HOUSES (RADIATION ANALOGS) USED DURING OPERATION HARDTACK II

図13 HARDTACK II 実験計画で用いた日本家屋(放射線アナログ)の典型的配置



The studies made during Operation Plumbbob were expanded during Operation Hardtack II in late 1958 with dose distributions obtained in 20 houses in various arrays. From the data obtained, it was possible to compute the neutron dose at any point in a Japanese house for all configurations for which measurements were made. One of the arrays of houses used is shown in Figure 13. However, the more complex problems of gamma-ray distributions was not solved adequately. As weapons tests were no longer possible, the ORNL Health Physics Research Reactor (HPRR) was mounted on a tall tower in Nevada and comprehensive studies undertaken with sensitive laboratory instrumentation. The applied and basic aspects of these studies provided the necessary dose distribution data for houses and a greatly improved understanding of the radiation fields from nuclear weapons. Of special significance was the data and understanding relative to the air-ground interface effect. By early 1964, the final equations were developed for obtainment of shielding factors for Japanese houses; i.e., technicians can use the following equations for computing shielding factors. For neutrons, the expression

1958年末ごろの Hardtack II 実験計画で、20戸の家屋をいろいろの形に配置して線量分布を求め、Plumbbob 計画で行なわれた調査をさらに拡大した。その結果、入手された資料を使用して、家屋のあらゆる配置の場合における屋内のいかなる部位の中性子線量をも算定することができた。実験に用いられた家屋配置の1例を図13に示した。しかし、ガンマ線分布にはより複雑な問題があり、まだじゅうぶんには解決されていない。核兵器による実験はもはや不可能となっていたので、ORNLの保健物理研究用原子炉(HPRR)をNevadaの高い塔の上に取り付け、高感度の実験機械によって広範囲の調査が行なわれた。これらの調査の応用的ならびに基礎的な面をもとに、家屋についての必要な線量分布資料が得られ、核兵器による放射線野に関する理解が大いに深められた。特に有意であったのは、空気と地表との接触面における影響に関する資料と知見が得られたことである。1964年の初めには、日本家屋に関する遮蔽因子を得るための最終的な方程式が開発された。すなわち、技術員は次の方程式を用いて遮蔽因子を計算することができる。中性子については、次の式を用いる。すなわち、

$$\frac{\text{Shielded Dose 遮蔽線量}}{\text{Air Dose 空気線量}} = A_1 e^{-G_1} + A_2 G_2 + A_3 G_3 + A_4 G_4 + A_5 G_5 + A_6 e^{-G_6} + A_7 e^{-G_7} + A_8 G_8 + A_9$$



yields the shielding factor to within  $\pm 6\%$  at the 50% confidence level. The constants  $A_i$  have all been determined, and the geometry factors  $G_i$  are physical dimensions taken from the shielding "history" for the case of interest. For gamma radiation

$$\frac{\text{Shielded Dose 遮蔽線量}}{\text{Air Dose 空気線量}} = A_1 + A_2 e^{-G_1} + A_3 e^{-G_2} + A_4 G_3 + A_5 G_4 + A_6 G_5 + A_7 G_6$$

is used; the 50% confidence limits are less than 6%. The constants  $A_i$  and the geometrical parameters  $G_i$  are different for each of the two equations. There are actually four equations, two for each city, because of the differences in spectra and in the ratios of neutrons to gamma rays. The confidence limits are based on a comparison with approximately 600 datum points from weapons tests and Operation BREN.

The problem of normalization of the air-dose curves was not solved until 1967 when, after exhaustive analysis of all effects data at ORNL, reanalysis of his blast data by Lord Penney of the United Kingdom Atomic Energy Authority, and a study of the radiation leakage from the Hiroshima weapon, the yields were ascertained as accurately as appears possible.

These labors have, in truth, been a very long time in reaching fruition, because of both the inherent difficulties of evaluating the role of each of the many parameters involved, and the necessity of completing some 20,000 detailed field interviews with survivors. However, the T65D system is now in use,<sup>6</sup> and, one of the benefits is that it has made possible a series of investigations directed as assessing the relative biological effects of neutrons as compared with gamma radiation.

## MATERIALS AVAILABLE

ABCC measures the effect of radiation on the Japanese survivors in terms of comparisons between irradiated survivors and various comparison groups as to the incidence or prevalence of various diseases or, more broadly, physiological changes. Mortality is, of course, a final end point. Without going into too much detail on this point, suffice it to say that most of the investigations concern a fixed cohort of about 109,000 persons, that is, each of these persons is identified as to name, date of birth, where that person was at the instant the bomb exploded and, where appropriate and possible, the estimated neutron and gamma doses in rad (Figure 14).

の式で表わせば、遮蔽因子は50%の信頼水準において $\pm 6\%$ 以内の値が得られる。定数 $A_i$ はすべて決定されており、幾何学的因子 $G_i$ は、調査対象例の遮蔽「歴」から得られた物理学的大きさである。ガンマ放射線については、次の式を用いる。

この場合、50%信頼限界は6%以下である。定数 $A_i$ および幾何学的パラメーター $G_i$ は、二つの方程式ごとに相異なる。スペクトルおよび中性子のガンマ線に対する比率に相違があるので、実際は各市につき二つずつ、合計四つの方程式がある。その信頼限界は、核兵器実験およびBREN計画から得られた約600個の資料点との比較に基づいて得られたものである。

1967年に、ORNLにおけるすべての有効資料を徹底的に解析し、英国原子力公社のPenney卿による爆風資料をも再解析して、広島原爆からの放射線漏洩について検討がなされ、できるだけ正確に収量の確認が行なわれ、それによって初めて空気線量曲線の標準化の問題が解決された。

関係ある多くのパラメーターの一つ一つの役割を評価することの本来のむずかしさと、約20,000件にわたる詳細な野外調査による被爆者面接を完了する必要性とのために、実のところ、これらの作業が実を結ぶまでには非常に長い時間がかかっている。しかし、T65D方式は現在利用中であり、<sup>6</sup> その利点の一つは、それによって、ガンマ放射線に対する中性子線の相対的生物学的効果の評価を目的とする一連の調査が可能になったことである。

## 入手材料

ABCCでは、各種疾患の発生率または有病率、あるいはもっと広く言い換えれば生理学的変化について、被爆者と各比較群との間での比較を行なうことにより、被爆者が受けた放射線の影響を調査している。死亡はもちろん終点である。これらに関してはここでは詳細には触れないで、ほとんどの調査が約109,000人の固定コホートについて実施されるものであること、すなわち、これらの各対象者が、その氏名、生年月日、原爆爆発時の所在、ならびに可能な場合には、中性子線およびガンマ線の推定線量(rad単位)をもとに分類されていると説明する程度にとどめる(図14)。



FIGURE 14 EXTENDED JNIIH-ABCC LIFE SPAN STUDY SAMPLE

図14 予研 - ABCC 寿命調査拡大対象集団

Distance 距離	Total 計	Hiroshima 広島	Nagasaki 長崎
< 2000 m	33849	26189	7660
2000-2499 m	20488	14541	5947
≥ 2500 m	28010	21268	6742
Not in city 市内にいなかった者	26571	20221	6350
Total 合計	108918	82219	26699

For some survivors who were located in heavy concrete buildings with windows or in street cars and the like, it has not yet been possible to estimate radiation doses with the requisite accuracy, but with these exceptions, estimates of dose are available for all. These estimates are believed to be accurate to within plus or minus 10% or so, based on what we believe are the characteristics of the dosimetry system.

The Hiroshima and Nagasaki weapons differed considerably from each other as to construction, and as a result the ratios of gamma to neutron dose to the survivors were very different in the two cities (Figures 15 and 16). In Nagasaki, the neutron doses were very small indeed. Even at 800 m from the hypocenter - and there were few survivors closer than that - the gamma dose was more than 30 times the neutron dose, and the neutron dose falls off more quickly with distance than does the gamma dose, so that at 1400 m the ratio is more than 100 to 1. For practical purposes, then, we can consider that the radiation received by the Nagasaki survivors was essentially gamma radiation. In Hiroshima, on the other hand, neutrons were relatively more important than in Nagasaki. The average gamma dose at 800 m was about 2.8 times the neutron dose, and even at 1400 m, where average total dose was less than 35 rad, the ratio of gamma to neutron dose was about 4.7. In Hiroshima, therefore, for any effect for which the RBE is as much as four, the

窓のある厚い鉄筋コンクリート建造物や電車などの内部にいた若干の被爆者などについては、いまだ必要とする正確度でその放射線量が推定されていないが、これらの例外を除いたすべての対象者についての線量推定値は入手されている。これらの推定値は、われわれが線量推定法の特性と考えているものをもとに考えれば、その正確度は±10%の範囲内であると考えられる。

広島と長崎の原爆は構造の点でかなりの相違があるので、被爆者が受けたガンマ線量の中性子線量に対する比率には両市間に大きな差があった(図15および16)。長崎では中性子線量は非常に小さなものであった。爆心地から800mの地点(それより近距離にいた生存者はほとんどいない)でさえも、ガンマ線量は中性子線量の30倍以上であり、また中性子線量は距離に応じてガンマ線量よりも早く減衰するので、1400mの地点では、その比率は100:1以上である。したがって実際上では、長崎の被爆者が受けた放射線はほとんどガンマ放射線であったと考えることができる。一方、広島においては、中性子線量は長崎におけるよりも比較的重要であった。800mにおける平均ガンマ線量は、中性子線量の約2.8倍であり、平均総線量が35 rad未満であった1400mでもガンマ線量は中性子線量の約4.7倍であった。したがって、広島では、RBE値が4であるような障害については、総線量中

FIGURE 15 AVERAGE NEUTRON & GAMMA DOSE, NAGASAKI

図15 中性子およびガンマ平均線量, 長崎

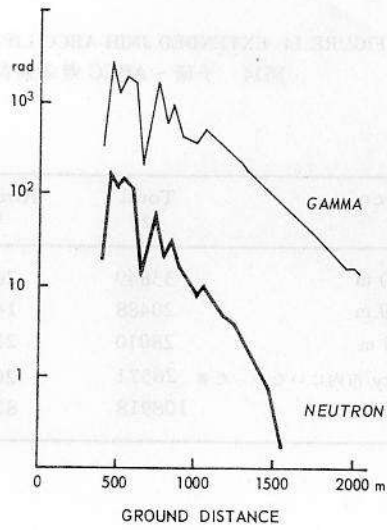
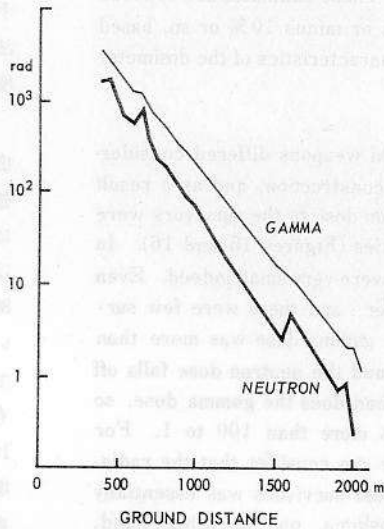


FIGURE 16 AVERAGE NEUTRON & GAMMA DOSE, HIROSHIMA

図16 中性子およびガンマ平均線量, 広島



neutron component of the total dose probably was as influential as the numerically larger gamma dose.

What are the effects that can be studied? Over the years, ABCC has studied a wide variety of possible radiation effects in these two cities. Beyond acute effects such as epilation and bleeding, well documented late radiation effects in the survivors include leukemia, changes in the optic lens that we will call "radiation cataract" for short, although few if any of those that have been found actually interfere with vision, thyroid carcinomas (usually occult), stable chromosomal aberrations in peripheral leukocytes, and among children who were in the first trimester of gestation at the time their mothers were exposed to radiation from the bombs, a syndrome consisting most prominently of mental retardation, sometimes fairly severe, accompanied by abnormally small head size. We are not yet in a position to make RBE estimates for all of these effects, and we will limit our present consideration to epilation (within 60 days) and bleeding (within 42 days) as early radiation effects, and to leukemia and radiation cataract as well-documented and reasonably numerous late effects.

## GENERAL CONSIDERATIONS

Before presenting results, it is necessary to define more precisely just what it is that we are attempting to measure, just how we propose to measure it, and what are the limitations imposed upon us both by the nature of the experience itself and by some uncertainty on our part regarding exact values for some of the parameters—uncertainties that may never be wholly resolved.

First, as mentioned above, there were no survivors who received neutron radiation only, and, in fact, those Hiroshima survivors who had the largest neutron doses had even larger gamma doses. So, we are surely not in a position to compare survivors who had neutron doses with those who had gamma doses only, although there is no lack of survivors who received essentially gamma only. Further, within each city, the estimated gamma and neutron doses are very highly correlated indeed—the correlation coefficient is of the order of .86 in each city.

Therefore, for our purposes, we define the RBE that we are trying to measure as follows:

If we call the gamma and neutron doses to a survivor  $x$  and  $y$ , respectively, then if there is a constant  $B$  such that all same values of RBE dose,  $Z$ , ( $Z = x + B \cdot y$ ) produce

の中性子は数量的にはより大きなガンマ線とおそらく同程度の影響力を持っていたと思われる。

調査できる障害とは何か? ABCCは長年にわたってこれら両市における多種多様な放射線障害と考えられるものの調査を行なっている。急性障害としての脱毛や出血のほかに、被爆者における後障害としてよく知られたものには、白血病、水晶体の変化すなわち放射線白内障(実際に視力障害の原因になっていると認められているものは、ほとんどない)、甲状腺癌(通常は潜在性)および末梢白血球における安定型染色体異常があり、また妊娠初期に胎内で被爆した者には、異常な小頭を伴う知能遅滞(時にはかなり重篤)をおもな特徴とする症候が認められる。これらすべての障害については、まだ、RBE推定値を算定することはできないので、現在のところ考慮の対象としては、急性障害としての脱毛(60日未満)および出血(42日未満)、また後障害としては、じゅうぶんな記録と、かなり多くの例数を有する白血病および放射線白内障に限定する。

## 考 察

結果を報告する前に、われわれが評価しようとしているものは何か、いかなる方法でそれを評価しようとしているのか、さらに経験上の性質そのもの、およびあるパラメーターに対する正確な値についてわれわれの側に不明確な点があること(この不明確な点は全面的には解決され得ないかもしれないが)の両者によって、われわれに課せられている制約とは何であるかということをもう少し詳しく説明する必要がある。

まず、上述のごとく、中性子線のみを受けた被爆者はなく、最大の中性子線量を受けた広島市の被爆者は、実際にはそれ以上のガンマ線量をも受けている。したがって、ほとんどガンマ線のみを受けた被爆者は相当いるけれども、中性子線だけを受けた被爆者と、ガンマ線だけを受けた被爆者とを比較することは、明らかに不可能である。さらに、両市とも、推定ガンマ線量と中性子線量とは非常に高い相関を有し、相関係数は両市とも約.86である。

そこで、われわれの目的に従って、測定しようとしているRBEを次のように定義する:

被爆者が受けたガンマ線量および中性子線量をそれぞれ  $x$  および  $y$  とするとき、RBE線量  $Z$  ( $Z = x + B \cdot y$ ) の値が同じであるものすべてに同じ効果を起こさせるよ

the same effect, then we call B the Relative Biological Effectiveness (RBE) of neutrons as compared with gamma rays. Of course, it might be the case that the RBE is constant only over some range of gamma and neutron doses, but in any case, what we require is that the effect depend only upon the value of Z, not on the individual values of x and y.

There are four problems that must be mentioned as having possible effect upon the estimated RBE's that we shall present:

(1) Individual dose estimates are not always accurate. Beyond errors that may be introduced by errors in the estimates of the air-dose curves themselves—and these are believed not to be large, of the order of  $\pm 10\%$  or so as remarked above—there is the further problem of whether the survivor has been placed accurately both as to his distance from the hypocenter and as to his exact shielding configuration. Unfortunately, survivors may have economic motivations, based on the provisions of the Atomic Bomb Sufferer's Medical Treatment Law, to declare now that they were nearer to the hypocenters than they were in fact; our only means of checking this has been to do repeated interviews with survivors whose first interview took place before enactment of this law, at a time when there was no economic motivation for being nearer or more distant. About 3% of the histories changed by a considerable amount over the years. It seems probable that a significant proportion of the estimated doses that exceed 400 rad are wrong, and that at even higher levels of dose, such as 600 or 800 rad or more, the errors may be serious although it must be kept in mind that a fraction of the people exposed to extreme stresses frequently survive.

(2) It is evident that accuracy of the estimates of RBE are dependent upon the accuracy of the estimates of the air-dose curves themselves. Hashizume and his colleagues, of the Japanese National Institute of Radiological Sciences (JNIRS) have measured the neutron and gamma doses in each city using cobalt activation in steel for measuring neutron flux and thermoluminescence of roof tiles for measuring gamma radiation.<sup>7</sup> Their results were very close to the ORNL estimates for both gamma radiation and neutron flux in Hiroshima, but they obtained estimates for Nagasaki which were a little different from ORNL values. Unfortunately, Hashizume's Nagasaki neutron estimates were based on only a very limited amount of material which was suitable, and as a result the JNIRS Nagasaki neutron estimates may be subject to relatively large observational error. However,

うな定数Bがあれば、このBをわれわれは中性子線のガンマ線に対する相対的生物学的効果と呼ぶ。もちろん、ガンマ線量および中性子線量のある範囲においてのみRBEが一定であることもありうるが、ともかく、われわれの求めるものはxおよびyの個々の値でなく、Zの値のみによる影響である。

次に、われわれが示すRBEの推定値に影響を与える可能性がある四つの問題について述べておかなばならない。

(1) 個人についての推定線量は必ずしも正確なものではない。空気線量曲線そのものの推定値における誤差—これはさほど大きくはなく、上述のように $\pm 10\%$ ぐらいと思われるが—この誤差から生ずる誤差以外にさらに問題となるのは、被爆者の爆心地からの距離および遮蔽状態が正確に記録されていたかどうかということである。残念ながら、原爆医療法の規定条件に基づく経済的な動機から、被爆者は実際に自分のいた位置よりも爆心地に近い場所にいたと申告しているかもしれない。このことを照合する唯一の方法は、この法律の制定以前で、実際より近距離または遠距離にいたと申告する経済的動機のなかった時期に最初の面接を受けた被爆者について、くりかえして面接することであった。数年間で被爆歴の約3%にかなりの変更が生じていた。400 radを越える推定線量の大部分はまちがっている可能性がかなり強く、さらに高い線量、たとえば、600または800 radあるいはそれ以上では、誤差は重大なものとなるかもしれないが、きわめて高い線量に被曝した者でもその一部はしばしば生存することがあるということも銘記する必要がある。

(2) RBE推定値の正確さが、空気線量曲線の推定値そのものの正確さに左右されることは、いうまでもない。放射線医学総合研究所(放医研)の橋詰らは、両市の中性子およびガンマ線量を測定する際、中性子束の測定には鋼鉄中のコバルトの活性を、また、ガンマ線の測定には屋根瓦の熱ルミネッセンスを用いた。<sup>7</sup> かれらが得た結果は、広島についてのガンマ線および中性子束の値はORNLの推定値に非常に近かったが、長崎についての推定値はORNLのものとはやや異なったものであった。残念ながら、橋詰の長崎における中性子線量の推定値は、目的に適合する材料が量的に非常に少ない数のものをもとにして行なわれているため、放医研による長崎の中性子推定値には、比較的大きな観測誤差が含まれているかもしれない。しかし、いずれにせよ、長崎の中性子束は非常にわずかなものであって、後に示すよう



it is fortunate that, in any case, the neutron flux in Nagasaki was quite small, and, as will be seen, the estimates of RBE do not vary much, whether the ORNL or JNIRS air-dose curve estimates are used for Nagasaki.

(3) A further point must be mentioned on the accuracy of the air-dose curves. The effective dose at distances of 1000 or more meters from the epicenter is a very sharp function of the relaxation length of the radiation concerned. Our best estimates of the relaxation lengths for gamma radiation are 350 m in Nagasaki but only 250 m in Hiroshima. Any errors in these values would be strongly reflected in changes in RBE estimates. Although we believe that 250 m is the best available figure for gamma relaxation in Hiroshima, we show the changes that would result from an assumed value of 265 m, the largest value that we consider to be credible.

(4) And finally, it must be remembered that many of the Hiroshima and Nagasaki survivors experienced more than ionizing radiation alone. Those near to the hypocenters were subjected to a very strong shock wave, and many were burned, either simultaneously by radiant heat from the fireball itself or soon afterward from the fires that were triggered by the bombs. To what extent these concomitant injuries had influence on late effects, or more particularly early effects such as epilation, we are not in a position to say.\*

## RESULTS

Figure 17 shows data that are typical of those available. It is evident that for all levels of estimated T65 dose above about 50 rad, the percent with epilation in Hiroshima is larger than the corresponding percent in Nagasaki. The total dose shown includes both neutron and gamma rays (i.e., it corresponds to an RBE of unity for the neutrons). A further point is, that at the high end of the scale, especially in Hiroshima, the percent with epilation does not increase with increasing total dose but instead varies erratically. This is, perhaps, partly due to the fact that the number of persons in each dose class is not very large at the higher dose values—the numbers vary between 65 and 100—but also, it seems likely that there is relatively more error in the dose estimates at these levels, resulting from a higher proportion of erroneous histories.

に、長崎の空気線量曲線にORNLのものをいようと、放医研のものをいようと、RBEの推定値はたいして変わらない。

(3) 空気線量曲線の正確さについて、さらに述べる必要がある。炸裂点から1000m以上の距離においては、有効線量は、その放射線の弛緩距離のきわめて鋭敏な関数となっている。ガンマ線に関する弛緩距離の最良の推定値は、長崎では350 mであるが、広島ではわずか250mである。これらの値の誤差は、RBEの推定値の変化に強く反映されるものである。広島におけるガンマ線の弛緩距離として入手されている最良の値は250 mであると思うが、われわれが信頼できるものとする最大の仮定値を265 mとした場合に生ずる変化は後に示す。

(4) 最後に、広島および長崎の被爆者の多くは、電離放射線のみを体験したのではないということを銘記する必要がある。爆心地の近くにいた者は非常に強い衝撃波を受け、また、その多くは同時に火球自体から放出された放射熱や、爆発直後に起きた火災によって火傷を受けた。これらの付随的損傷が、後障害または特に脱毛のような急性障害にどの程度まで影響を与えたかについては、述べることができない。\*

## 結果

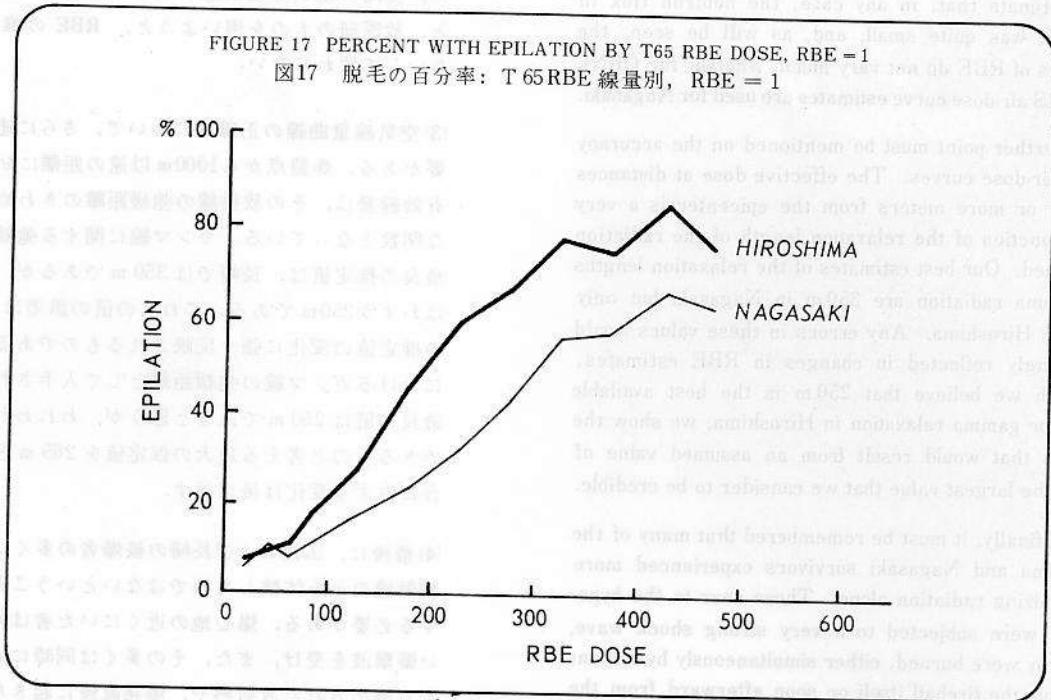
図17は、入手されている典型的な資料を示す。T 65線量が約50 rad以上であるすべての線量水準において、広島における脱毛の割合は、明らかに長崎のそれよりも大きい。この総線量には中性子線およびガンマ線の両方が含まれる(すなわち、それは中性子線の場合RBE 1に相当する)。そのうえ、線量の高いほうにおいて、特に広島の場合、総線量が増加しても脱毛の割合は増加せず、不規則に変化する。おそらくこれは、一部には、高線量領域において各線量区分に含まれる人数が少ないこと、すなわち、65人から100人までであるということによるが、さらにまた、この線量を受けた者の推定値に比較的多くの誤差があって被爆歴に誤りの割合が多くなっていることに起因しているとも思われる。

\*ABCC does of course have in its records notations of burns and other injuries to survivors. Blast injury was highly correlated with radiation dose, and it is, therefore, difficult to study radiation as a single entity: those who had large radiation doses were in areas where blast effects were also present. Burns have been studied in relation to mortality (JNII-ABCC Life Span Study, Report 3, ABCC Technical Report 15-63) without uncovering evidence that death rates up to 15 years after the bombs were materially affected by the presence or absence of burns.

ABCCの記録には、もちろん被爆者の火傷およびその他の傷害についての資料が収録されている。爆風傷害と放射線量とは高い相関があるので、放射線だけを単独のものとして調査することはむずかしい。大量の放射線に被曝した人は、爆風の影響の大きかった地域にいた人でもある。火傷と死亡率との関係についての調査(予研-ABCC寿命調査、第3報、ABCC業績報告書15-63)では、原爆後15年間の死亡率が実質的に火傷の有無によって影響されているという証拠は見いだされなかった。



FIGURE 17 PERCENT WITH EPILATION BY T65 RBE DOSE, RBE = 1  
 図17 脱毛の百分率: T 65RBE 線量別, RBE = 1



In any case, if we ascribe the differences in level between the two curves exclusively to the fact that we are using the wrong value for the RBE, we can then estimate the RBE for epilation, according to our model, by testing different values to see what value of the RBE will bring the two curves into accord. It would, of course, be possible to employ a method like maximum likelihood to obtain a definite estimate, but the computational difficulties are very great, and exactness of calculation hardly seemed to be a worthwhile objective in view of all of the other difficulties that have been mentioned.

Figure 18 shows what happens if we take an RBE of 2. The curves for the two cities come together somewhat, but Hiroshima is still higher than Nagasaki. Figures 19-21 show that an RBE of 3 is still better, but not quite large enough, while an RBE of 4 does the job pretty well—the experience of the two cities seems comparable. However, for an RBE of 5, it appears that we may have gone too far: The Hiroshima curve is generally below the Nagasaki curve. So the city differences, if wholly explainable in terms of the RBE of neutrons for epilation, seem to be accounted for by an RBE of about 4.

Let us turn now to another acute symptom—bleeding within 42 days of the radiation exposure (that is, purpura, petechiae, or other bleeding). If we simply add together the neutron and gamma doses, that is, use an RBE of 1,

ともかく、二つの曲線間の値の差が、まちがったRBE値を用いていることのみによるものとすれば、われわれのモデルにより、いろいろなRBE値をテストして、どの値が二つの曲線を一致させるかをみれば、脱毛に関するRBEを推定することができる。もちろん、確定的な推定値を出すために最尤法などを用いることも可能であろうが、計算上の困難が非常に大きく、前述した他のすべての困難をも考えあわせると、計算の正確さがほとんど無意味なものになるように思われる。

図18は、RBEを2とするとどうなるかを示す。両市の曲線はいくらか接近してはくるが、いぜんとして広島のほうが長崎より高い。図19-21によると、RBEを3にするともっとよくなるが、まだじゅうぶんな大きさではなく、RBEを4にすると、かなりよくなり、両市の結果は類似しているように思われる。しかし、RBEを5にすると、行き過ぎのように思われる。すなわち、広島曲線は総体的に長崎のそれよりも下になる。したがって、両市の差を脱毛に対する中性子のRBEで全面的に説明できるとすれば、RBEを約4にすればよいようである。

さて、別の急性障害である被爆後42日以内の出血(すなわち、紫斑、点状出血、またはその他の出血)をみてみよう。単に中性子線量とガンマ線量とを加えると、すな

FIGURE 18 PERCENT WITH EPILATION BY T65 RBE DOSE, RBE = 2  
 図18 脱毛の百分率: T 65RBE 線量別, RBE = 2

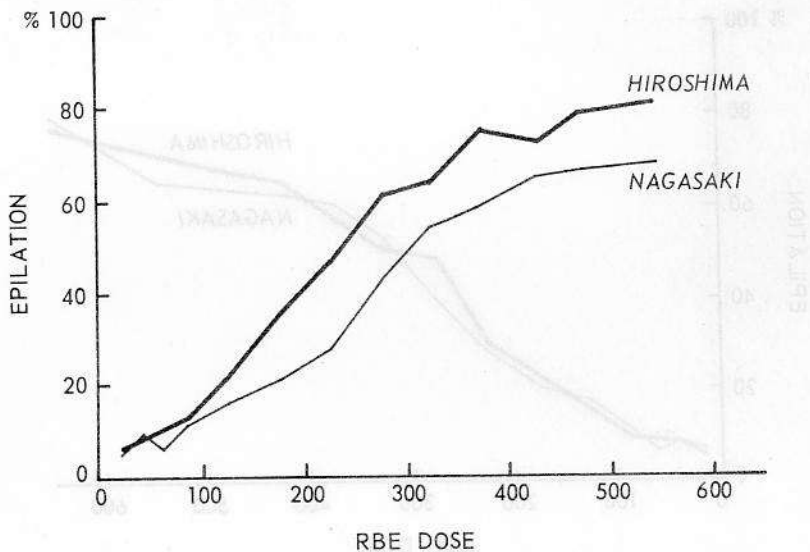


FIGURE 19 PERCENT WITH EPILATION BY T65 RBE DOSE, RBE = 3  
 図19 脱毛の百分率: T 65RBE 線量別, RBE = 3

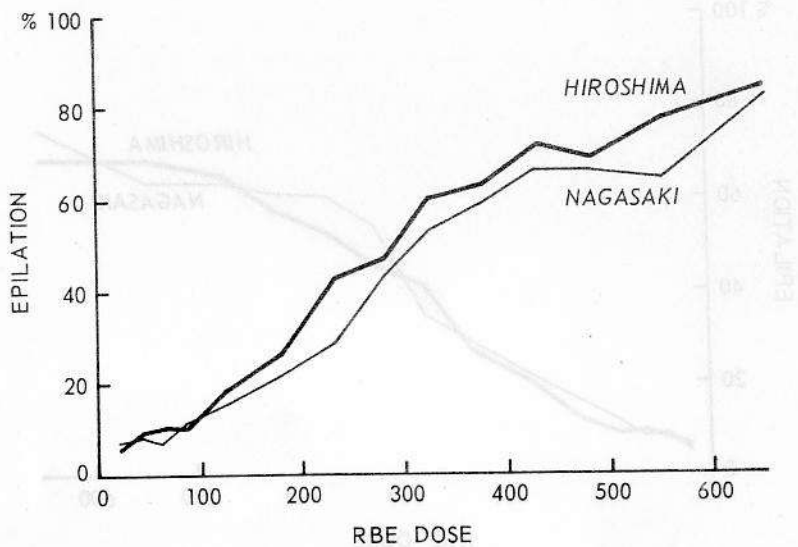


FIGURE 20 PERCENT WITH EPILATION BY T65 RBE DOSE, RBE = 4

図20 脱毛の百分率: T 65RBE 線量別, RBE = 4

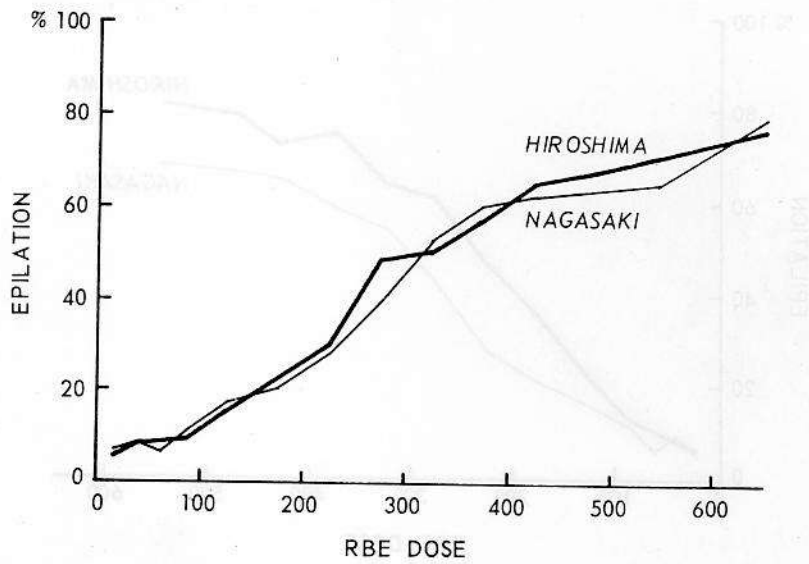
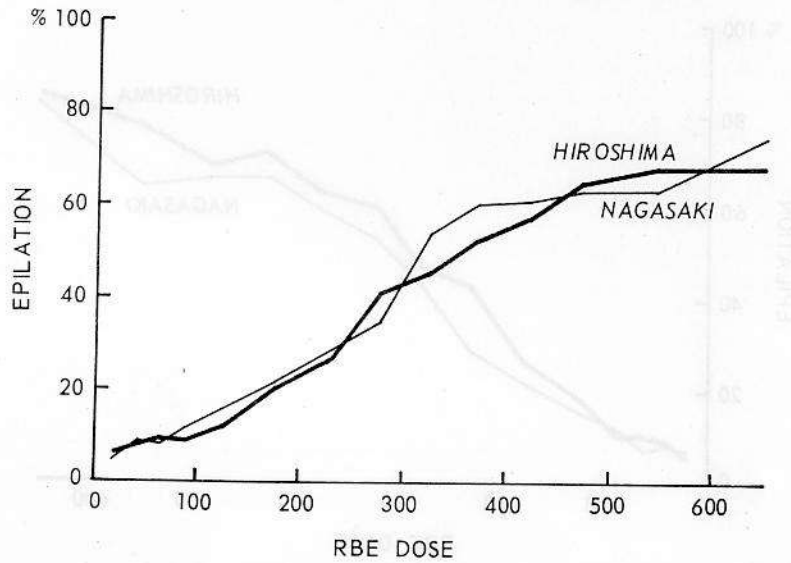


FIGURE 21 PERCENT WITH EPILATION BY T65 RBE DOSE, RBE = 5

図21 脱毛の百分率: T 65RBE 線量別, RBE = 5



as in the case of epilation, the Hiroshima curve is considerably above the Nagasaki curve (Figure 22). However, if we try an RBE of 4, the curves come together pretty well (Figure 23), and an RBE of 5 seems even better (Figure 24) and we may tentatively estimate an RBE of about 5 for bleeding.

Turning now to leukemia, which is by all odds the most striking late radiation effect which has to this time been identified in the Hiroshima-Nagasaki survivors, it can be seen immediately that the curves which show the proportions with leukemia as a function of dose are quite erratic (Figure 25). The cases used here number only 82 in total (63 in Hiroshima and 19 in Nagasaki) which had estimated gamma doses of at least one rad. The cases are those identified during 1950 to 1966 by ABCC hematologists among members of the fixed sample of 109,000 persons which is under continuing study. The leukemia proportions rise sharply with increasing dose in each city, but the level in Hiroshima exceeds that in Nagasaki almost everywhere; the single exception is at about 250 rad, where the two experiences are similar, but the number of cases in Nagasaki is so small (only six) that sampling variation forbids us to read too much significance into single points.

Trying an RBE of 2 improves the situation somewhat (Figure 26), and an RBE of 3 seems better still (Figure 27).

If we try an RBE of 4, there is more crisscrossing of the curves above 100 rad, and if we move, finally, to an RBE of 6, we obtain about the best concurrence of the curves for the two cities (Figures 28 and 29). However, the Nagasaki curve is quite erratic, betraying the relatively small number of cases upon which it is based, and, by the same token, reminds us that we can regard any conclusions that we reach as being, at best, crude approximations to the truth.

Now we turn our attention to axial opacities of the lens. The cases used are those diagnosed and reported on by Miller, et al.<sup>8</sup> Starting with the curves for an RBE of unity (Figure 30), it comes as something of a surprise that, unlike the situation for the effects examined previously, the Hiroshima curve does not lie above the Nagasaki curve. Both are peculiar, in that they fall off from RBE doses of 350 to 450. If we try an RBE of 2 (Figure 31), the Hiroshima upper peak tends to move to the right of the figure, while the Nagasaki curve changes little, as would be expected. It appears that using an RBE larger than one has worsened a fairly good fit. It must be remembered that there is one great difference between these axial opacities and the other effects that we have

わちRBEを1とすると、脱毛の場合と同様に、広島曲線は長崎の曲線よりもかなり上にある(図22)。しかし、RBEを4にすると、両曲線はかなりよく接近する(図23)。また、RBEを5にすると、さらによくなるように思われるので(図24)、出血に対するRBEの値は、暫定的に約5と推定することができる。

今度は、広島と長崎の被爆者で現在までに確認されている後障害のうち、おそらく最も注目すべきものである白血病についてみるに、線量の関数として白血病の割合を示す曲線は全く不規則であることが直ちにわかる(図25)。ここで用いられた症例の推定ガンマ線量は少なくとも1radで症例数は合計わずか82例(広島63例、長崎19例)であった。これらの症例は、1950年から1966年までの期間に、ABCCの血液学者によって発見されたものであって、現在継続中の調査の固定対象集団109,000例の中に含まれている。白血病の割合は両市とも線量の増加とともに急激にふえるが、広島の水準はほとんどの線量値で長崎より高い。ただ一つの例外として、約250radのあたりでは両者の結果が同様であるが、長崎の例数はここではわずか6例であまりに少ないので、標準変動のため一つ一つの点にあまり有意性をおくことはできない。

RBEを2にすると、いくらかよい状態になり(図26)、RBEを3にするとそれ以上によくなるように思われる(図27)。

RBEを4にすると、100rad以上では両曲線の交錯するところが多くなる。最後にRBEを6にすると両市の曲線に最良の一致が得られる(図28, 29)。しかし、長崎の曲線は全く不規則で、これは比較的少数例に基づいていることを反映している。また、そのために、われわれの到達する結論は、よくても真の値の大まかな近似値にすぎないことを示唆している。

さて、次に水晶体の軸性混濁に目を向けよう。対象例はMillerら<sup>8</sup>によって診断され、報告されたものである。RBEが1である場合の曲線(図30)から始めると、以前に調べた障害についての状態と違って、広島曲線が長崎の曲線より下にあることは、いささか意外である。また特徴としては、両市ともRBE線量が350から450のところへ下降していることである。RBEを2にすると(図31)、広島の最高点は右方へ移動する傾向があるが、長崎の曲線は期待どおりほとんど変わらない。RBEを1より大きくすると、かなりよく合っていた状態が悪くなるように思われる。ここで軸性混濁と、いままで述べてきた他の障害との間には大きな差があることを銘記する必要がある。すなわち、観察はるかに主観的である

FIGURE 22 PERCENT WITH BLEEDING BY T65 RBE DOSE, RBE = 1  
 図22 出血の百分率: T 65RBE 線量別, RBE = 1

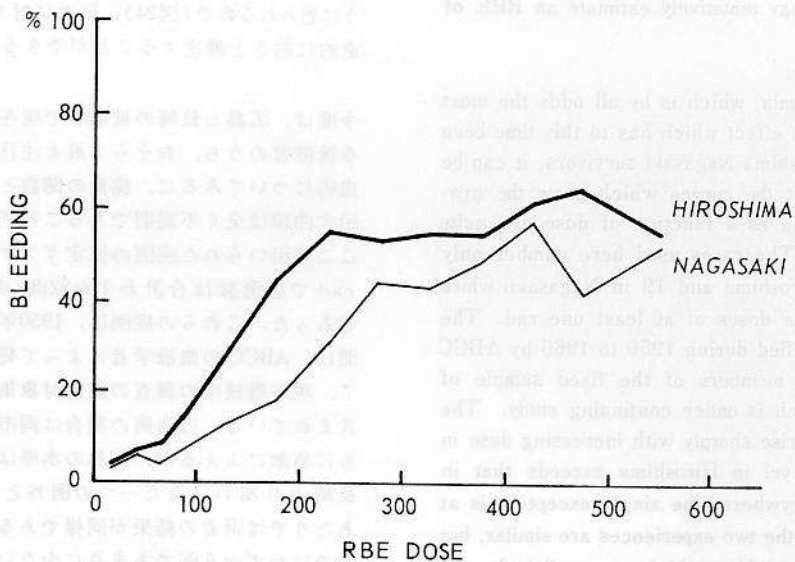


FIGURE 23 PERCENT WITH BLEEDING BY T65 RBE DOSE, RBE = 4  
 図23 出血の百分率: T 65RBE 線量別, RBE = 4

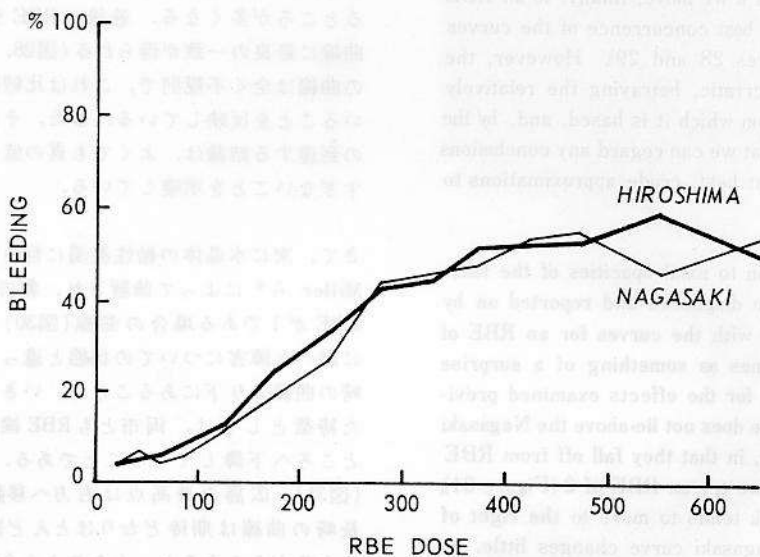




FIGURE 24 PERCENT WITH BLEEDING BY T65 RBE DOSE, RBE = 5

図24 出血の百分率：T 65RBE 線量別，RBE = 5

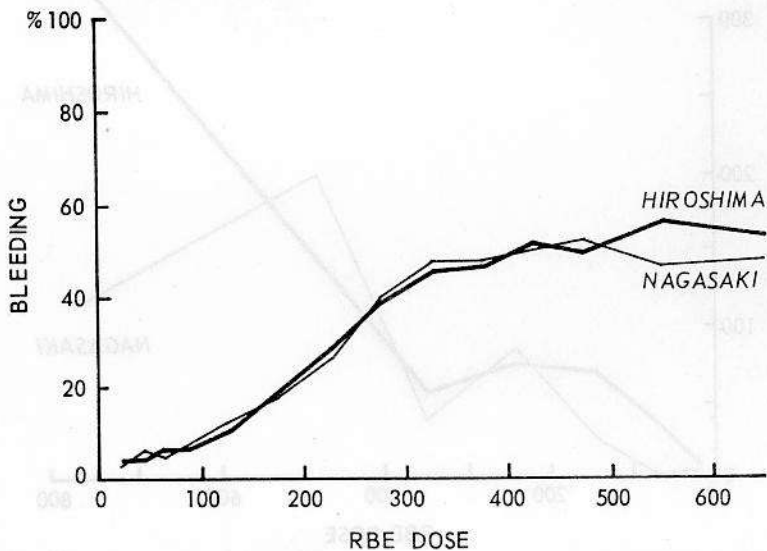


FIGURE 25 PROPORTION WITH LEUKEMIA BY T65 RBE DOSE 1950-66, RBE = 1

図25 白血病の割合：T 65RBE 線量別，1950-66年，RBE = 1

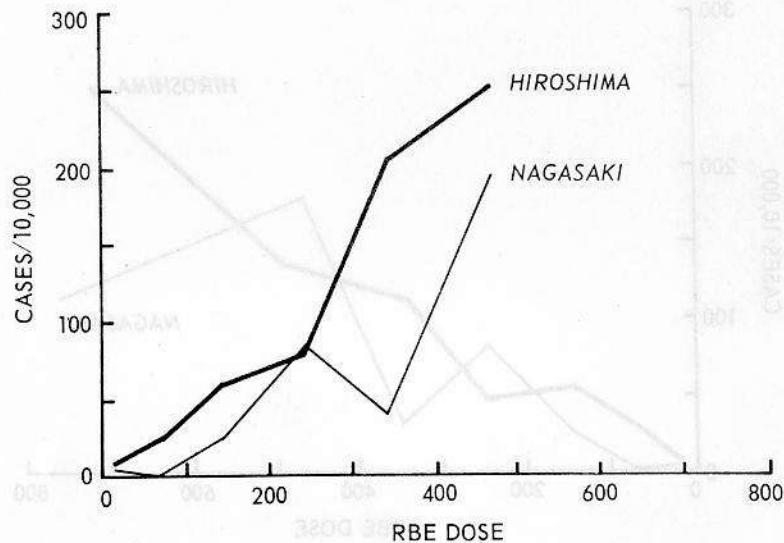


FIGURE 26 PROPORTION WITH LEUKEMIA BY T65 RBE DOSE 1950-66, RBE = 2  
 図26 白血病の割合：T 65RBE 線量別，1950 - 66年，RBE = 2

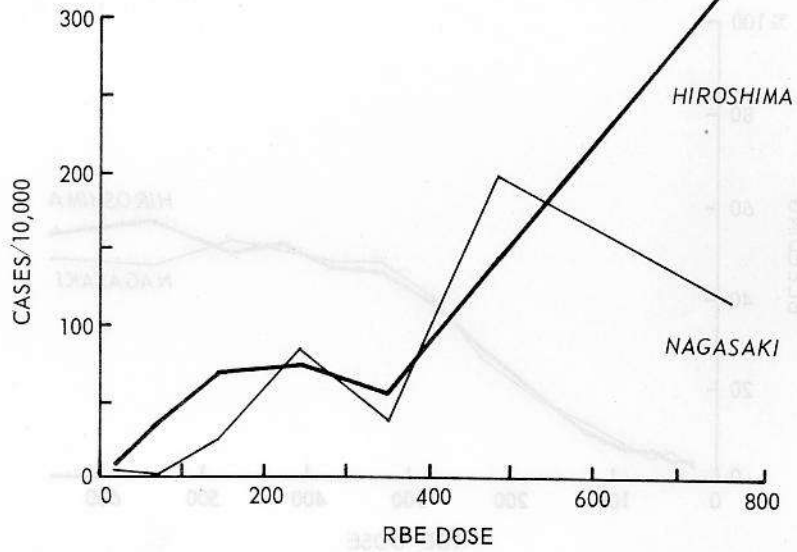


FIGURE 27 PROPORTION WITH LEUKEMIA BY T65 RBE DOSE 1950-66, RBE = 3  
 図27 白血病の割合：T 65RBE 線量別，1950 - 66年，RBE = 3

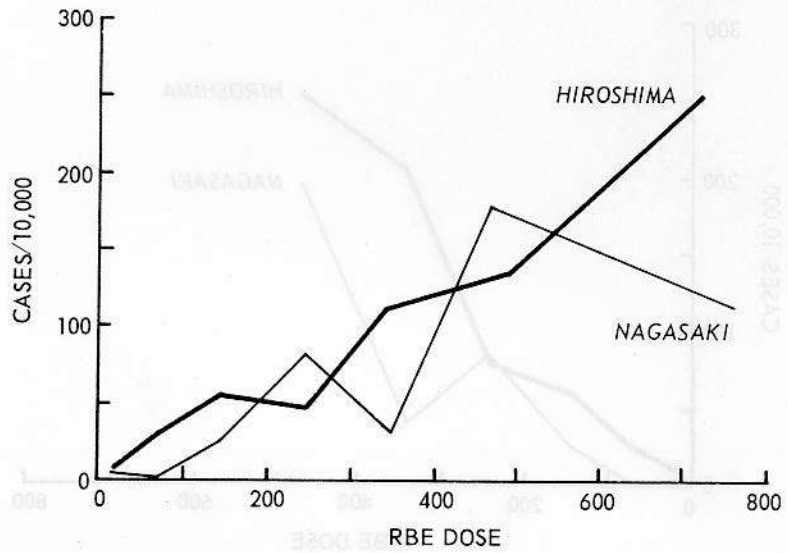


FIGURE 28 PROPORTION WITH LEUKEMIA BY T65 RBE DOSE 1950-66, RBE = 4  
 図28 白血病の割合: T 65RBE 線量別, RBE = 4

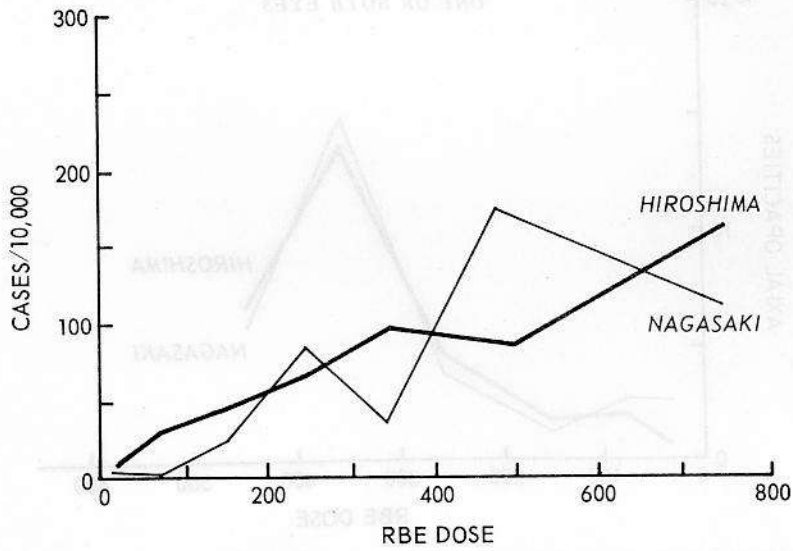


FIGURE 29 PROPORTION WITH LEUKEMIA BY T65 RBE DOSE 1950-66, RBE = 6  
 図29 白血病の割合: T 65RBE 線量別, RBE = 6

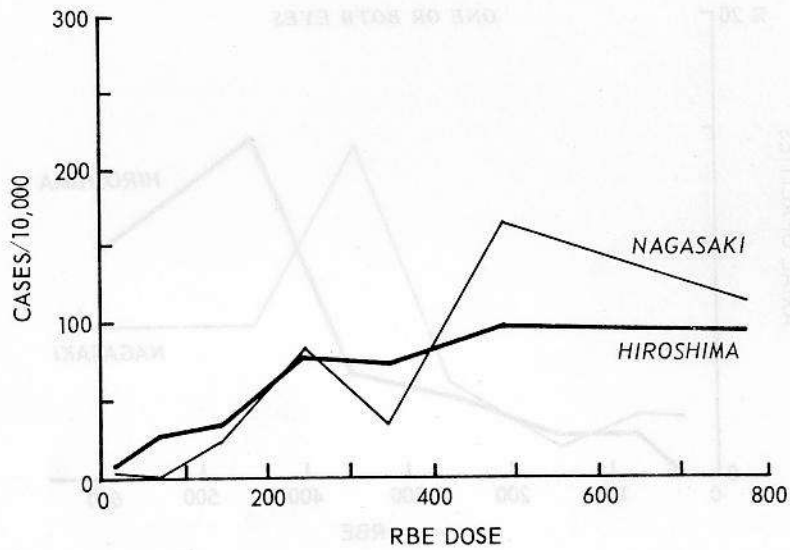


FIGURE 30 PERCENT WITH AXIAL OPACITIES BY T65 RBE DOSE, RBE = 1

図30 軸性混濁の百分率：T 65 RBE 線量別，RBE = 1

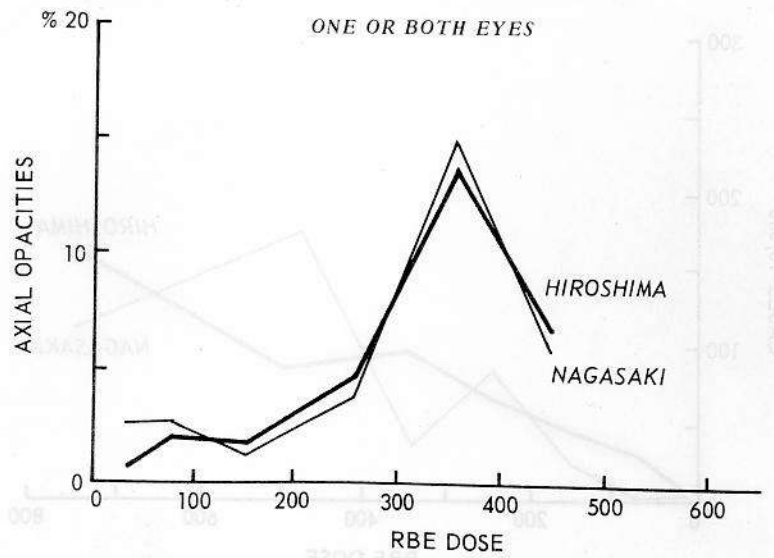
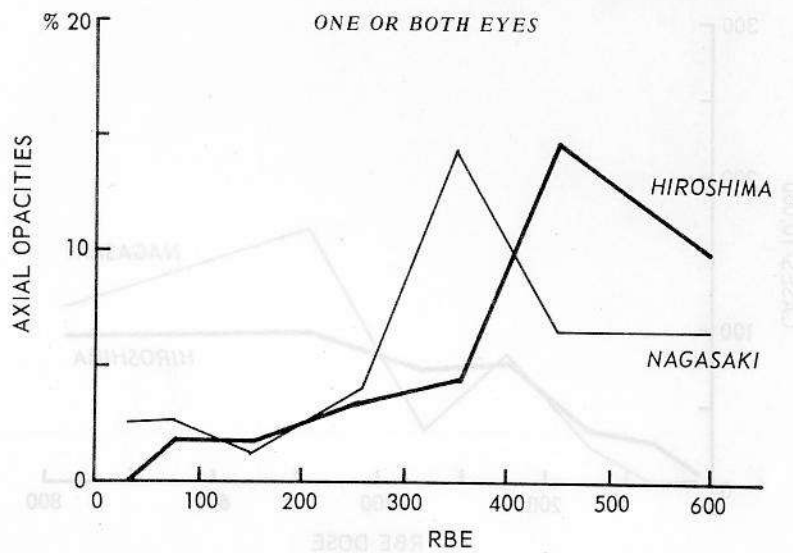


FIGURE 31 PERCENT WITH AXIAL OPACITIES BY T65 RBE DOSE, RBE = 2

図31 軸性混濁の百分率：T 65 RBE 線量別，RBE = 2





discussed: The observations are much more subjective. Drs. Miller and Fujino, who diagnosed these cases in the two cities, using first an ophthalmoscope and then examining suspicious lesions by means of a slitlamp biomicroscope, made every effort to agree on comparable criteria. Nevertheless, it cannot be guaranteed that in fact they succeeded in making the observations comparable.

There remain just two issues to be discussed: The question of how much influence on these results there would be from errors in the value for the gamma relaxation length in Hiroshima, and from variation in the air-dose curves in Nagasaki, following the data of Hashizume and his colleagues. The second point can be more quickly considered than the first. The JNIRS estimates for the Hiroshima air-dose curves are very similar to the ORNL estimates. However, as exemplified for epilation in Figure 32, even for RBE 1 we do not get the same response curve in Nagasaki from the two sets of air-dose curves. According to the JNIRS estimates, the response curve is higher than that for the ORNL estimates, that is, a little closer to the Hiroshima curve. One might expect, therefore, a lower RBE estimate to result from the JNIRS curves.

Using the ORNL curves, we obtained an RBE of about 4 for epilation; what do we get if we use the JNIRS curves instead? Figure 33 shows the curves for RBE 3, using the JNIRS curves. The fit is not bad; still, the Hiroshima curve seems in general, to lie above the Nagasaki curve.

If we try an RBE of 4 (Figure 34), the resulting fit seems to be about as good as we can get; that is, we again obtain an RBE estimate of about 4. Thus the effect of using the JNIRS air-dose curves in place of the ORNL curves is to change the RBE estimate by a very small amount—less than one unit—which is, to say the least, well within the limits of error of the method.

A more serious issue, however, is raised by any uncertainty in the relaxation length for gamma radiation in Hiroshima. As can be seen in Figure 35, the effect on the epilation response curve in Hiroshima that results from changing the gamma relaxation length from 250 m to 265 m, is very considerable. This difference, one would suppose, would surely reflect itself in the RBE estimates, and indeed it does (Figure 36). Using the relaxation length of 265 m, an RBE of 2 is not quite large enough for epilation, but the data now fit an RBE of 3 quite well (Figure 37). So, an uncertainty of only 15 m in a relaxation length estimated to be 250 m, changes the RBE estimate from 4 to 3. Put in another way, a change of

ということである。両市においてこれらの例を診断した Miller および藤野は、最初に検眼鏡を用い、次に細隙灯生体顕微鏡を用いて疑わしい病変を検査することにより、同一基準に合わせるように努力した。それにもかかわらず、事実は観測値を同一基準のものになし得たという保証はない。

まだ検討すべき問題が二つ残っている。すなわち、橋詰らの資料による広島におけるガンマ線の弛緩距離の値における誤差および長崎の空気線量曲線における変動が、これらの結果にどの程度の影響を及ぼすかという問題である。第2の問題については、第1の問題よりも簡単に検討が加えられる。広島の空気線量に対する放医研の推定値はORNLの推定値と非常によく似ている。しかし、図32で脱毛について示すように、RBEが1の場合でも、長崎における二つの空気線量曲線からは同じ反応曲線が得られない。放医研の推定値によれば、反応曲線はORNLの推定値を用いた場合よりも上方にある。すなわち、広島の曲線にやや近い。したがって、放医研の曲線からはもう少し低いRBE推定値が期待される。

ORNLの曲線を用いた場合、脱毛についてはRBEの値が約4であったが、代わりに放医研の曲線を用いばどうなるであろうか。図33は放医研の曲線を用いたときのRBE 3の場合の曲線を示す。この重なりぐあいは悪くないが、広島曲線はまだおおむね長崎曲線よりも上方にあるようである。

RBEを4にすると(図34)、重なりぐあいは一応最良のものであると思われる。すなわち、RBE推定値として、再び約4の値を得たわけである。このように、ORNL曲線の代わりに放医研の空気線量曲線を用いた結果、RBEの推定値の変化は1未満で、ごくわずかなものであり、控え目にみてもじゅうぶんこの方法による誤差の範囲内にある。

しかし、もっと重要な問題は広島のガンマ線の弛緩距離における不確かさにある。図35にみられるように、ガンマ線の弛緩距離を250 mから265 mに変えた時に生ずる広島の脱毛反応曲線の変化は、相当なものである。この差はたしかにRBE推定値に反映すると一般に予想される。そして事実そのとおりになっている(図36)。弛緩距離265 mを用いた場合には、脱毛に対するRBEは2ではじゅうぶんではないが、RBEを3にすると重なりぐあいは非常によろしい(図37)。したがって、弛緩距離が250 mからわずか15 mずれても、RBE推定値は4から3へと変わる。言いかえれば、ガンマ線の弛緩距離がわずか6%変化しても、RBE推定値は25%変わる。

FIGURE 32 EPILATION BY T65 RBE DOSE ACCORDING TO ORNL & JNIRS AIR-DOSE CURVES,  
NAGASAKI, RBE = 1

図32 ORNL および放医研の空気線量曲線による T 65RBE 線量別脱毛の百分率, 長崎, RBE = 1

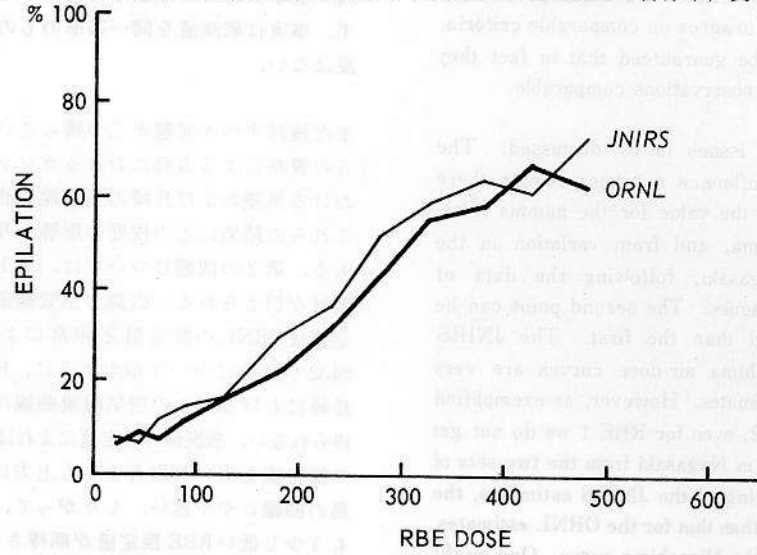


FIGURE 33 EPILATION BY T65 RBE DOSE, JNIRS, RBE = 3

図33 脱毛の百分率: T 65RBE 線量別, 放医研, RBE = 3

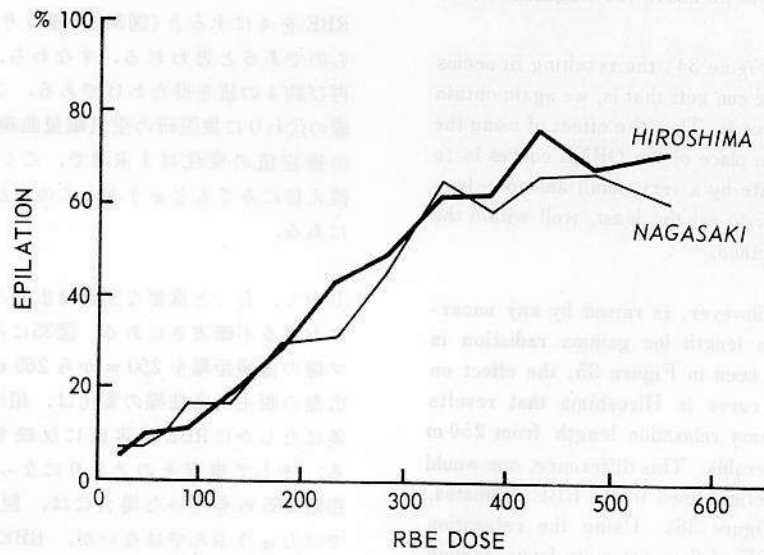


FIGURE 34 EPILATION BY T65 RBE DOSE, JNIRS, RBE = 4  
 図34 脱毛の百分率: T 65 RBE 線量別, 放医研, RBE = 4

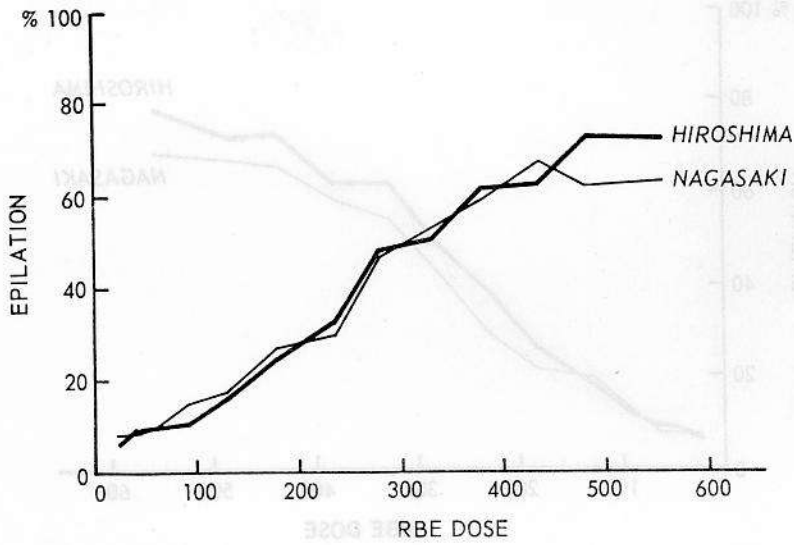


FIGURE 35 EPILATION BY T65 RBE DOSE FOR TWO GAMMA RELAXATION LENGTHS (L),  
 HIROSHIMA, RBE = 1

図35 二つのガンマ線の弛緩距離 (L) における T 65 RBE 線量別脱毛の百分率, 広島, RBE = 1

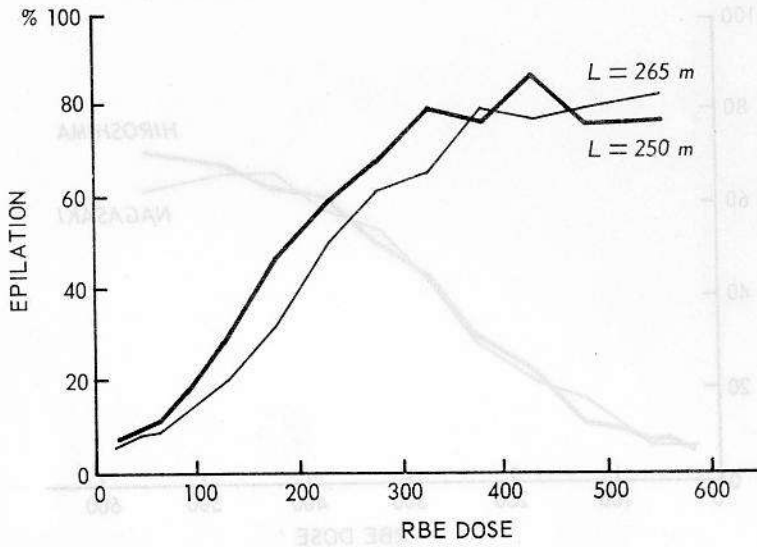


FIGURE 36 EPILATION BY T65 RBE DOSE FOR GAMMA RELAXATION LENGTH 265 m,  
HIROSHIMA, RBE = 2

図36 ガンマ線の弛緩距離265mにおけるT 65RBE線量別脱毛の百分率, 広島, RBE = 2

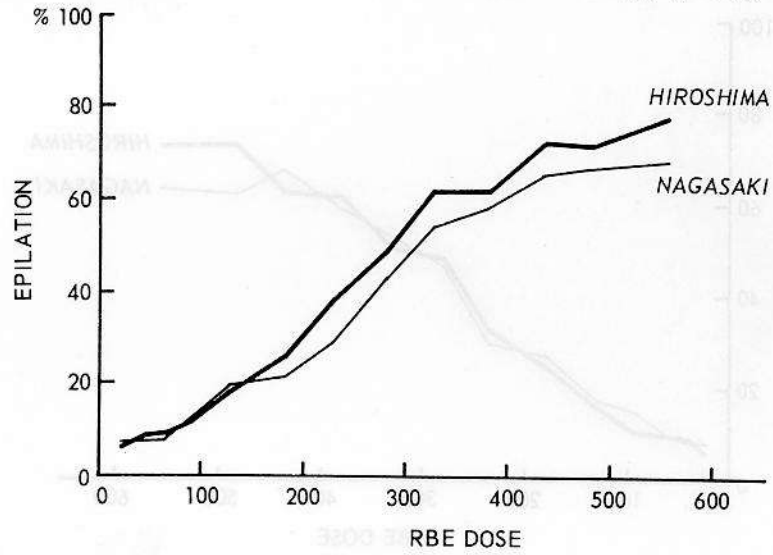
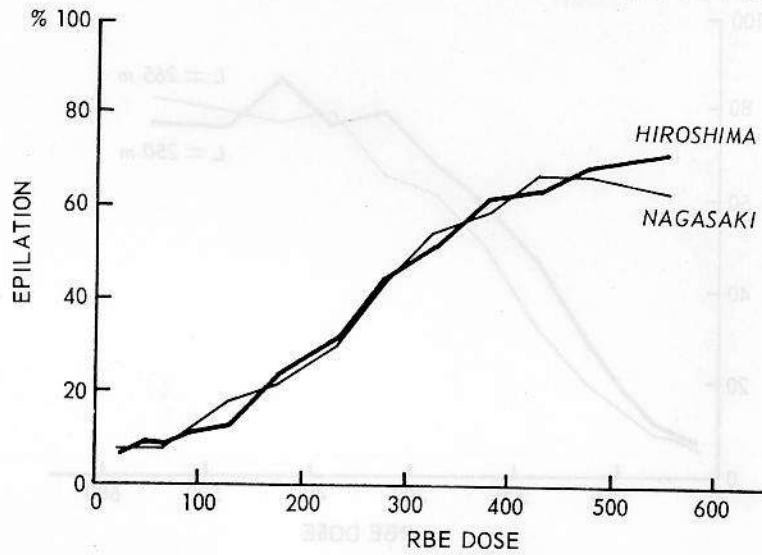


FIGURE 37 EPILATION BY T65 RBE DOSE FOR GAMMA RELAXATION LENGTH 265 m,  
HIROSHIMA, RBE = 3

図37 ガンマ線の弛緩距離265mにおけるT 65RBE線量別脱毛の百分率, 広島, RBE = 3





only 6% in the gamma relaxation length changes the RBE estimate by 25%. The RBE is a very sensitive function indeed of the relaxation length used. Given the fact that we do not know the relaxation length exactly, and probably can never be sure of it to 1% or so, it is obvious that our estimates of RBE can never be better than very crude approximations to truth, and we claim no more for them than that.

In summary, we have obtained estimates of the RBE for fission neutrons, as compared with weapons gamma radiation of about 3 to 5 for epilation and bleeding, around 6 for leukemia and 1 or 2 for axial opacities. We have tried to indicate some of the many reasons why it seems almost impossible to obtain very reliable estimates of RBE from these data, and there are, no doubt, additional problems that we have not mentioned. Nevertheless, the Hiroshima-Nagasaki experience is unique and whatever their weaknesses, the data from these cities are, and hopefully will remain, all that is available, and we shall continue to try to refine them and extract from these tragedies information which will be valuable to mankind.

*The following addition was made by J.A. Auxier during the oral presentation, and it does not necessarily reflect the views of Jablon et al with whom there was insufficient time for correspondence in advance.*

下記の追加は、J. A. Auxier が口頭発表の際に述べたものであるが、前もって連絡する時間がじゅうぶんになかったため、必ずしも Jablon らの意向を反映するものではない。

Figures 38 and 39 show a more detailed comparison of the JNIRS and ORNL data as well as some results from Ichikawa et al.<sup>9</sup> On the basis of the statistical errors inherent in the various sets of data, it is apparent that there is no significant difference in the values from the different researchers. Further, though it was not discussed above, an estimation of the RBE for an assumed relaxation length for gamma rays in Hiroshima of 235 m was not made, but such a value is as probable as is 265 m; this would tend to increase the RBE.

Another approach to the analysis of the data presented herein is based on the assumption that the RBE is of a functional form. For example, the leukemia data, analyzed with this assumption in mind, yield values of RBE which decrease with increasing dose. Figure 40 shows the incidence rates for the two cities; these incidence data were smoothed by simple smoothing techniques (i.e., averaging over adjacent increments of dose). This is a preliminary and crude approach, given here for the purpose of stimulating additional approaches to the analysis, but a dose dependent RBE ranging from about 4 at less than 100 rad to unity at about 500 rad fits the data surprisingly well.

RBE は、用いる弛緩距離に対して実に敏感な関数になる。正確な弛緩距離はわからないし、またおそらく1%前後の確実性をもって確かめることもできないと考えられるので、われわれのRBE推定値は、真の値に対する非常に大まかな近似値以上のものには決してなりえないことは明白である。また、われわれとしてもそれ以上のものであると主張もしていない。

要約すると、原爆のガンマ線に対する核分裂中性子のRBE推定値として、脱毛および出血については約3-5、白血病については6前後、また軸性混濁については1または2という値を得た。これらの資料から信頼性の高いRBE推定値を得ることは、ほとんど不可能であると思わせる多くの理由のうちのいくつかを指摘してみた。しかも、まだわれわれの言及していない諸問題がほかにもあると思われる。いずれにせよ、広島・長崎の被爆経験は比類のないものであり、資料にどのような欠点があるにせよ、両市から入手されるものはこれですべてであり、二度とこのような事態を経験しないことを望むものである。われわれはそれらの精度をよりよくし、これらの悲劇から人類にとって有益な資料を入手する努力を続ける。

図38および39は、放医研とORNLとのより詳細な比較ならびにIchikawaら<sup>9</sup>による結果の若干を示す。それぞれの調査資料特有の統計学的誤差があることを考えれば、各研究者の値に有意な差はないものと思われる。なお、上には述べていないが、広島におけるガンマ線の弛緩距離を235 mとした場合のRBE推定値は求めていない。しかし、265 mでありうると同様に、235 mという値も可能であるが、これを用いればRBE値は増加する傾向を示すであろう。

ここで述べた資料についての別の解析方法は、RBEが関数形式をとるという仮定に基づいたものである。たとえば、この仮定を念頭において白血病の資料を解析すれば、線量の増加に伴ってRBEの値は減少する。図40は両市における発生率を示す。これらの発生率資料は単純な平滑法(すなわち、隣接する数個の該当値を平均する方法)を用いてならした。これは、予備的で大まかな方法であるが、今後新しい解析方法の開発に刺激を与えるためにここで示した。100 rad未満で約4から約500 radで1までの範囲にわたって線量に依存するRBE値は驚くほどよくその資料と一致する。

FIGURE 38 COMPARISON OF JNIRS &amp; ORNL DATA, HIROSHIMA

図38 放医研とORNLの資料の比較, 広島

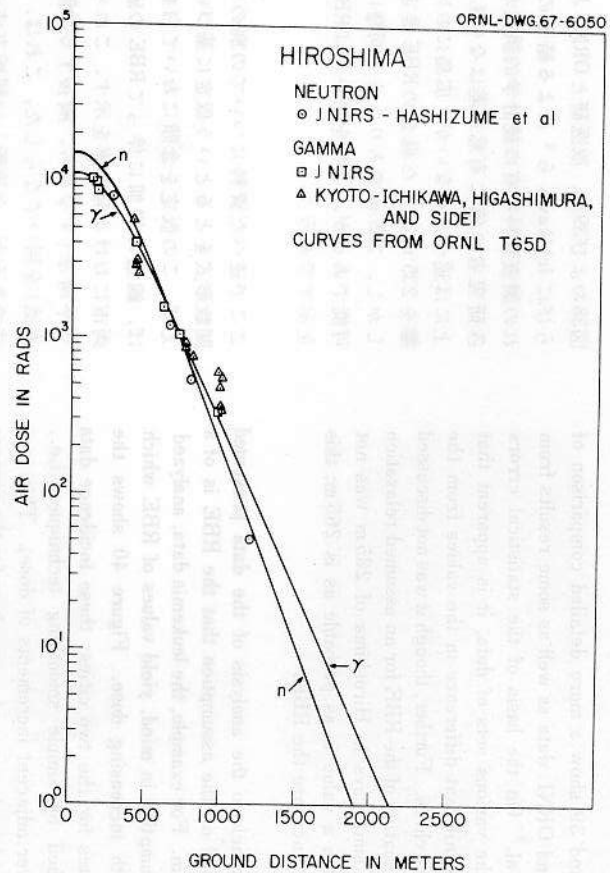


FIGURE 39 COMPARISON OF JNIRS &amp; ORNL DATA, NAGASAKI

図39 放医研とORNLの資料の比較, 長崎

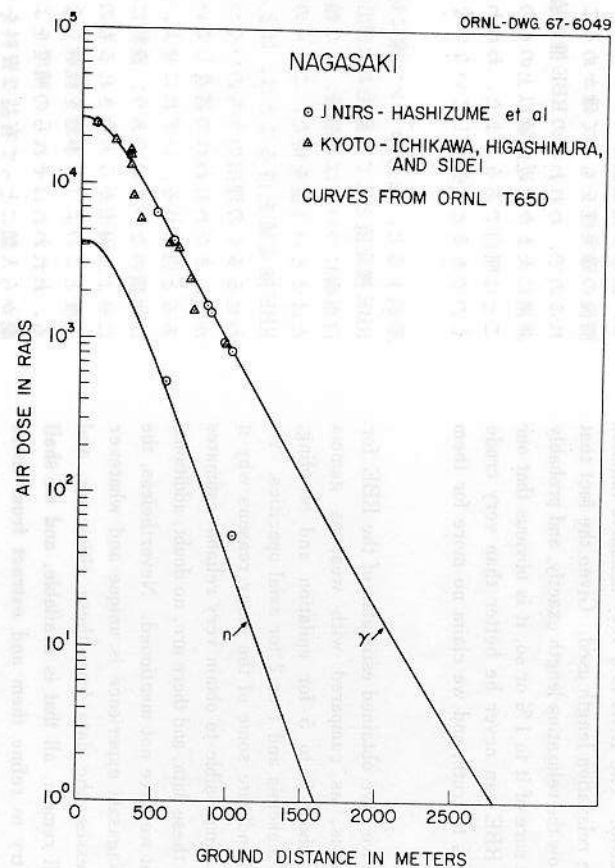
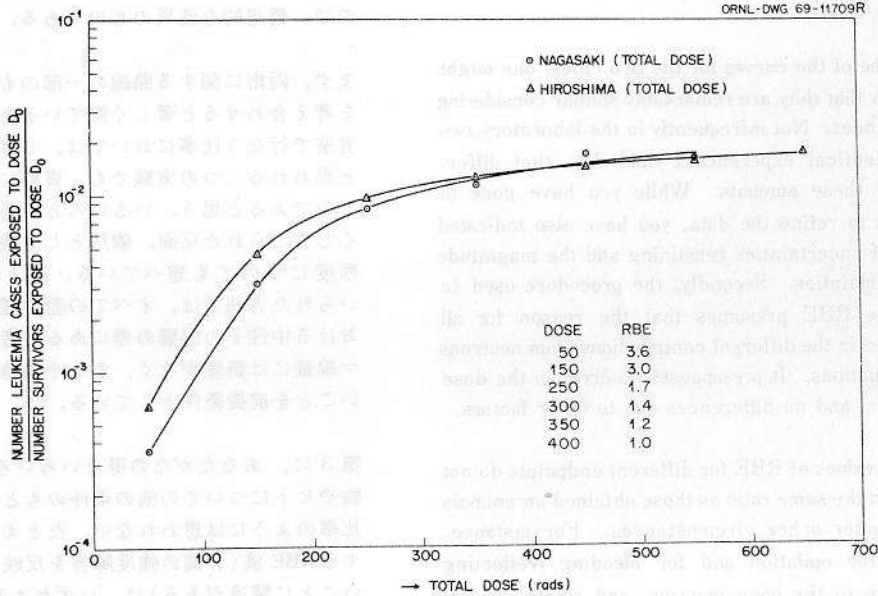


FIGURE 40 INCIDENCE LEUKEMIA, HIROSHIMA & NAGASAKI  
 図40 広島・長崎における白血病発生率



REPORTED DISCUSSION

**Quam WM:** What is the cause of the structure in the air-dose curves for the Hiroshima data?

**Hubbell HH:** The irregularities arise because the average dose per person was calculated, and if most of those survivors exposed at a given distance were heavily shielded, the point would be low, etc.

**Bateman JL:** Two comments with respect to the RBE of one found for lens cataracts. First, the problem of comparing observations of different examiners in the two cities is obvious, and I believe the author has referred to this. Second, it seems likely that the lens comparisons were probably made at appreciable levels of opacity, certainly when compared to current studies in mice (see Bateman and Snead, this symposium), and probably, therefore, at relatively high doses. If the rising RBE of the neutron component for leukemia induction with declining dose were to hold also for the lens, we might anticipate higher RBE values for the latter if compared at lower doses.

**Bond VP:** First may I compliment the authors on the manner in which they have carried out the task of obtaining and refining these important data on the effects of atomic bomb radiations in Hiroshima and Nagasaki. My comments,

討 議

**Quam WM:** 広島資料に関する空気線量曲線がこのような形をとっている原因は何か。

**Hubbell HH:** この不規則な形はひとり当たりの平均線量を計算したために生じた。したがって、ある距離で被曝した者の大半が重遮蔽を受けていたならば、点が低くなる、など。

**Bateman JL:** 水晶体白内障の場合におけるRBE値1については、二つの意見がある。第1には二つの都市で別々の研究者が行なった観察を比較するという間に問題があるのは明らかであるが、著者はこのことについてはすでに言及していたように思う。第2に、水晶体の比較はおそらく相当な程度の混濁のあるものについて行なわれたものである〔特にマウスについての最近の調査と比較したならば、これははっきりと言えることである(本シンポジウムにおけるBatemanおよびSneadの発表参照)〕。したがって、おそらく、比較的高線量に被曝した人についての調査であったものと思われる。もし、線量の減少に伴って白血病誘発に対する中性子のRBEが上昇するということが、水晶体の場合にも当てはまるとすれば、低線量での比較を行なった場合、後者についてはより高いRBE値が予想できるかもしれない。

**Bond VP:** まず、広島および長崎における原子爆弾の影響に関係あるこれらの重要な資料を入手し、精度をよくするために実施された方法に対して、著者のかたがた



which concern the RBE values reported, are of a preliminary nature since I have not had the opportunity to study the results in detail.

First, for some of the curves for the two cities, one might adopt the view that they are remarkably similar considering the circumstances. Not infrequently in the laboratory, two apparently identical experiments yield data that differ, I believe, by these amounts. While you have gone to great lengths to refine the data, you have also indicated the number of uncertainties remaining and the magnitude of these uncertainties. Secondly, the procedure used to determine the RBE presumes that the reason for all differences lies in the different contributions from neutrons in the two situations. It presupposes no error in the dose of gamma rays, and no differences due to other factors.

Thirdly, your values of RBE for different endpoints do not appear to be in the same ratio as those obtained on animals and on man under other circumstances. For instance, your RBE's for epilation and for bleeding (reflecting severe damage to the bone marrow, and related to low levels of mortality) both appear to be high; the RBE for skin effects in general in man and large animals seems to be high, that for mortality in large animals unity or less. Your RBE for lens opacification is low; the evidence from other data indicates that the RBE for this endpoint is high.

Lastly, as was brought out in this symposium, the RBE for severe bone marrow damage and mortality rate in several species of large animals is clearly unity or less. Also, I do not believe one needs to invoke an RBE greater than unity to explain the effects seen in man exposed accidentally to neutrons and gamma rays from accidental nuclear excursions in the laboratory.

I am sure that the authors are aware of most if not all of what I have said, and perhaps some of the apparent differences lie in differences in RBE as a function of dose or level of effect or in other factors. However, the results reported are at least at first glance unexpected on the basis of previous data, and I believe that some discussion of these questions is in order at this time.

**Hubbell HH:** The bleeding refers to bleeding gums; petechiae (red spots on the skin) were observed on survivors only, those who lived 42 days or more and often many years. Such symptoms often but not always indicate a fatal dose of radiation, according to ABCC records.

**Bond VP:** Bleeding into the tissues following irradiation results only from severe damage to essentially the entire

に敬意を表したい。私の意見は報告されたRBE値に關するものであるが、結果を詳細に調べる機会がなかったので、暫定的な性質のものである。

まず、両市に關する曲線の一部のものについては、状況を考え合わせると著しく似ているという見方もある。研究室で行なう仕事においては、しばしば一見同じであると思われる二つの実験でも、資料にこの程度の差は出るものであると思う。いろいろと苦心して資料の精度をよくしてこられた反面、依然として残る不明確な点とその程度についても述べている。第2に、RBEの決定に用いられた方法では、すべての差の理由は、二つの都市における中性子の影響の差にあると考えられており、ガンマ線量には誤差がなく、またその他の因子による差もないことを前提条件としている。

第3に、あなたがたの得たいろいろのRBEの値は、動物やヒトについての他の条件のもとで得られた値と同じ比率のように思われぬ。たとえば、脱毛や出血に対するRBE値(骨髄の強度障害を反映し、また死亡率が低いことに関連がある)は、いずれも高いように思われる。おむね、ヒトや大型動物における皮膚障害のRBEは高いようであり、大型動物における死亡率のそれは1またはそれ以下である。水晶体混濁に対してあなたがたの得たRBE値は低い、他の資料から得られたRBEは高いことが認められている。

最後に、このシンポジウムで発表されたように、数種の大型動物における強度の骨髄障害ならびに死亡率に対するRBEは明らかに1またはそれ以下である。また、研究室における核装置の事故による中性子線やガンマ線に偶然被曝したヒトにみられる障害を説明するのに、RBE値が1よりも大きい必要はないと思う。

著者のかたがたは、私が述べてきたことの全部ではないにしても、そのほとんどについてはご存知であると思われるが、おそらく、差異の一部は線量の関数または影響の水準としてのRBEにおける差あるいは、他の因子との差によるものとする。しかし、報告された結果は、少なくとも一見したところ、今までの資料から考えて期待されえないものであり、これらの問題についての討議は現時宜を得たものと思う。

**Hubbell HH:** 出血は齒齦出血をさす; 点状出血(皮膚における赤い斑点)は、42日以上、または数年間生存した被爆者にのみ認められた。ABCCの記録によれば、このような症状は常にではないが、多くの場合致死量の放射線量を受けたことを示す。

**Bond VP:** 被曝による組織内出血は、ほぼ骨髄全体に強度の障害があった場合にのみ起こるもので、局所的な



bone marrow and does not result from local exposure in these dose ranges. Thus if a group of individuals is selected on the basis of the appearance of petechial or other manifestations of bleeding, that group must be at least on the threshold of the bone marrow syndrome mortality dose range. Thus, bleeding can be taken to be equivalent, practically, to a low level of mortality rate.

**Wiley AL:** The RBE value given for leukemia induction was 5, and this was apparently correlated with the sudden acute bomb exposure to neutrons and gamma rays. It must be an almost impossible problem, but I wonder if any effort was made to account for effect of absorption of fallout products and fission products as contributing factors to the induction of leukemia. It would seem that such internal hazards would also contribute to this endpoint so that it would be difficult to make a simple correlation between RBE and the acute external exposure to neutrons and gamma radiation.

**Auxier JA:** The problem of internal dose has been considered many times, but no significant contribution to dose has been demonstrated. The fallout area was, in each case, sufficiently distant from the hypocenter that no added contribution to the dose of the "exposed" population need be considered. Those living in the fallout area may have received a small but non-negligible dose from internal emitters, but the only analyses now under way, for the Nishiyama area of Nagasaki, are not complete.

**Vogel HH:** Do you have any RBE analyses on the mammary carcinoma data from Hiroshima and Nagasaki?

**Auxier JA:** No. (See Dr. Storer's following remark in response to the observation made here that it was the speaker's opinion that the incidence was higher in the exposed population.)

**Shellabarger CJ:** In a follow-up of Vogel's question, we might remember that Miller in last week's Science (166:569-74, 1969) described what he (Miller) thought were or were not delayed radiation effects from these two cities. Can we expect the ABCC and/or Jablon to give us material on RBE's on additional findings in addition to what you have just described?

**Auxier JA:** Yes, ABCC will publish as promptly as possible all findings and analyses.

被曝の場合この程度の線量範囲では起こらない。したがって、点状出血またはその他の出血の発現に基づいて一つの集団を選定するとすれば、その集団の人々は、少なくとも骨髄症候群死亡線量範囲の閾値に達しているはずである。したがって、出血はほとんど低死亡率を意味するものと考えることができる。

**Wiley AL:** 白血病誘発に対するRBE値は5であるが、これは中性子線およびガンマ線に対する急性被曝と関連があるようである。ほとんど不可能な問題に違いないが、白血病誘発の有力な因子として放射線降下物および核分裂生成物の吸収による影響について調査が行なわれたかどうかお尋ねしたい。このような体内からの危険も結果に寄与すると考えられるので、単にRBEと中性子線およびガンマ線による急性体外被曝との間に相関を求めることはむづかしいように思われる。

**Auxier JA:** 体内線量の問題については何度も考慮がなされてきたが、線量に対する有意な寄与は認められていない。放射線降下地域は、いずれの場合においても爆心地から相当離れていたもので、「被爆」集団の線量がそれによって付加されると考える必要はない。放射線降下地域の居住者は、わずかではあるが無視できない体内放射物からの線量を受けているかもしれないが、現在実施中の長崎市西山地区に関する唯一の解析はまだ完了していない。

**Vogel HH:** 広島および長崎における乳房癌についてRBE解析を行なっていますか。

**Auxier JA:** いや、行なっていない。(ここで発表者の意見としての、被爆集団において発生率が高いという発言に対するDr. Storerの応答を参照されたい)。

**Shellabarger CJ:** Vogelの質問に関連することであるが、先週のScience誌(166:569-74, 1969)でMillerはかれ自身の考えをもとに両市において何が放射線の遅延性影響であって、何がそうでないかについて述べていることを思い出していただきたい。今、発表された所見以外のものに関するRBEの資料を、ABCCないしはJablonから期待できるであろうか。

**Auxier JA:** それは期待できる。ABCCはすべての所見や解析結果をできるだけ早く発表することになっている。

**Storer JB:** I disagree with Mr. Auxier's statement that all cancers have been shown to be increased in the irradiated survivors. As Miller has pointed out in his recent review (Science 166:569-74, 1969), only leukemia and thyroid tumors have been unequivocally proved to show a dose response relationship. There is the suggestion that cancer of the breast and of the lung may be increased but no dose response relationship has been established. The incidence of a number of other tumors has been examined carefully and no increases can be demonstrated.

**Auxier JA:** Dr. Storer is most familiar with this question, and I can only agree with him.

**Storer JB:** 被爆者にはすべての癌の増加が認められているという Mr. Auxier の意見には賛成できない。Miller が最近の検討 ( Science 誌166: 569-74, 1969) で指摘しているように、線量反応関係が明確に認められているのは白血病と甲状腺腫瘍だけである。乳房癌および肺癌の増加が示唆されているけれども、線量反応関係は確立されていない。他にいくつかの腫瘍の発生率についても慎重な検討が行なわれているが、増加は証明できない。

**Auxier JA:** Dr. Storer はこの問題に最も精通しておられるので、わたくしとしては、その意見に同意する。

## REFERENCES

### 参考文献

1. AUXIER JA, CHEKA JS, et al: Free-field radiation-dose distributions from the Hiroshima and Nagasaki bombings. Health Physics 12: 425-9, 1966
2. OUGHTERSON AW, WARREN S: Medical Effects of the Atomic Bomb in Japan. New York, McGraw-Hill, 1956
3. NEEL JV, SCHULL WJ: The Effect of Exposure to the Atomic Bombs on Pregnancy Termination in Hiroshima and Nagasaki. Washington, National Academy of Sciences-National Research Council, Publication No. 461, 1956
4. RITCHIE RH, HURST GS: Penetration of weapons radiation: Application to the Hiroshima-Nagasaki studies. Health Physics 1:390-404, 1959
5. E.N. York in communication from M. Morgan, Armed Forces Special Weapons Center, to G.S. Hurst, Oak Ridge National Laboratory, ORNL-CF-57-11-144, 1957
6. MILTON RC, SHOHOJI T: Tentative 1965 radiation dose (T65D) estimation for atomic bomb survivors, Hiroshima-Nagasaki. ABCC TR 1-68
7. HASHIZUME T, MARUYAMA T, et al: Estimation of the air dose from the atomic bombs in Hiroshima and Nagasaki. Health Physics 13:149-61, 1967
8. NEFZGER MD, MILLER RJ, FUJINO T: Eye findings in atomic bomb survivors of Hiroshima and Nagasaki, 1963-64. Amer J Epidemiol 89:129-38, 1969
9. ICHIKAWA Y, HIGASHIMURA T, SIDEI T: Thermoluminescence dosimetry of gamma rays from atomic bombs in Hiroshima and Nagasaki. Health Physics 12:395-405, 1966