

原爆線量の再評価問題について.

(I) 放射線の人体への晩発性影響データ.

- ・原水爆被爆者 --- 広島・長崎 (ABCCデータ), 核実験被爆者.
- ・医療被曝 --- 診断放射線 (胎児X線白血病データ)
治療X線 (強直性脊髄炎)
- ・原子力産業 --- ウラン鉱山労働者
核兵器産業 (Hanford data, Portsmouth data)
原発関連 (Stern glass 瓶等)

中でも、広島・長崎データは、大規模、線量範囲、年齢構成、調査期間
という点において優れており、risk評価の基本データとなっている。

放射線 (PERF, 19ABCC) は 国定集団についての追跡調査 Life Span Study を続けている。そして、被曝線量算出の基本になり、このあと
後に述べる T65D (1955年暫定線量) である。

・Life Span Study report # (1977)

- ・sample size 109,000人 ; 期間 1950-74
- ・死亡者数 20,270人
- ・がん患者 3,957 内 白血病 144

(II) 線量再評価問題以前の risk factor 評価.

II-1 ICRP --- Pub 26, 27

・Pub 26 (1977) 27.

- ・白血病に因る risk は、赤血骨髄に $20 \times 10^{-6} \text{ rem}^{-1}$
- ・全身均等照射に因る全がん risk は $100 \times 10^{-6} \text{ rem}^{-1}$
a) として報告している。(ただし、上の数値を導くに至る前提データは
明瞭に示していない。

・Pub 27 (1977) 272. 実指標という概念を導入し、詳細な議論のもとに、

(74) すべての作業者が ICRP の限度、 5 rem y^{-1} で連続して被曝すれば、
指標は $0.4 + 7.5 + 2.0 + 1.6 = 11.5$ となり、これは致死事故率が $340 \times 10^{-4} \text{ y}^{-1}$ の
職業に相当し、多くの国々での建設業または石炭鉱業の事故による致死率と同
程度である。

としている。

- ICRP 第 60 号委員 松平寛通に依り、(1979 年 放射線学会シンポジウム) ICRP の risk 係数は 2×10^{-2} 以下を示すに説明している。

- 表 1 から白血病的 risk を求めた。

0~9 rad に対する群と、 10^6 yr 当りの 10 rad 以上の超過率は

$$\left(\frac{12}{114,388} - \frac{8}{142,261} \right) \times 10^6 = 48.7 / 10^6 \text{ yr}$$

10 rad 以上の群の平均線量は 105.5 rad であり、その 5 分の 1 量に $105.5 \times 0.65 = 68.6 \text{ rad}$ 。

従って、 $10^6 \text{ rad} \cdot \text{yr}$ 当りの超過率は $48.7 / 68.6 = 0.71 / 10^6 \text{ rad} \cdot \text{yr}$
白血病的な超過率は 25 年後に発生するとして

$$0.71 \times 25 = 17.8 / 10^6 \text{ rad} \approx 20 \times 10^{-6} / \text{rad}$$

- 白血病以外の癌については、発生期間を 30 yr とし、上と同様に
(2) $\left(\frac{220}{77573} - \frac{303}{113906} \right) \times 10^6 = 92.5 / 10^6 \text{ rad}$
88.7

$$\approx 100 \times 10^{-6} / \text{rad}$$

(表 1)

表 1 長崎の白血病 (森山, 加藤; ABCC-TR15-73)

線量	空中での組織 カーマ(ラド)	人	人・年	死亡数
200 rad 以上	334.7	1,110	22,248	8
100~199	145.7	1,030	20,720	2
50~99	70.5	983	19,504	0
10~49	21.0	2,719	51,922	2
平均/計	105.5	5,842	114,388	12
0~9		8,855	142,261	8

(表 2) 第 2 表 白血病以外の癌のリスク計算
(BEEBE, 加藤, LAND; RERF 1-77 より)

線量	平均カーマ	人	人・年	死
300~399	340	132	3,258	9
200~299	241.4	352	9,152	19
100~199	144.2	671	16,254	42
50~99	70.8	609	14,219	44
10~49	21.5	1,687	34,690	106
平均/計	88.7	3,451	77,573	220
1~9	3.9	3,185	64,935	188
0	0	2,038	49,051	115
		5,223	113,986	303

長崎, 1959~1974 年までの調査。原爆被爆時の年齢 10 歳以上, 400 ラド以上を除く。

II-2. UNSCEAR (国連科学委員会報告 1999) の risk factor
・白血病/長崎・長崎ラド。表 3.4。

長崎については leukemia があつたため、長崎に基づいて評価。

よって、吸収線量/空中線量 = 0.55 とし、

$$\frac{18 \times 10^{-6}}{0.55} = 33 \times 10^{-6} \approx 70 \times 10^{-6} \text{ rad}^{-1}$$

・他ガン

・肺がん

・骨髄線照射

・口内癌

・子供頭部白化病治療

・以上より白血球について

$$25212 \times 10^{-6} \text{ rad}^{-1}$$

$$17 \times 10^{-6} \text{ rad}^{-1}$$

$$50 \sim 55 \times 10^{-6} \text{ rad}^{-1}$$

$$50 \times 10^{-6} \text{ rad}^{-1}$$

$$(15 \sim 25) \times 10^{-6} \text{ rad}^{-1}$$

・他ガン

(他ガン)/白血球に 4~6 倍推定

・全ガンリスクは白血球の 5~7 倍と推定

$$(175 \sim 175) \times 10^{-6} \text{ rad}^{-1}$$

$$= 100 \times 10^{-6} \text{ rad}^{-1}$$

表3 寿命調査の線量グループにおける推定カーマと被曝対象数

線量グループ (rad)	平均カーマ (rad)	中性子線のパーセント	平均人数	平均カーマ (rad)	中性子線のパーセント	平均人数
10-49	21.9	20	9,533	21.0	0.0	3,302
50-99	70.2	19	2,350	70.5	0.3	1,120
100-199	138.6	22	1,473	145.7	1.0	1,127
>200	363.2	26	1,301	334.7	1.7	1,191
出典: 引用文献 7			71.7	146.7	105.5	6740

表4 広島、長崎における1950-1972年の白血病による経過死亡数

線量グループ (radカーマ)	被曝数	経過数	経過率	単位カーマ当り経過率 (10 ⁻⁴ rad ⁻¹)	単位追加照射量当り経過率 (10 ⁻⁴ rad ⁻¹)
広島					
0-9 radグループとの比較					
10-49	17	92	7.8(1.6-18.5)	37(5-80)	-
50-99	7	22	4.8(1.1-11.0)	29(7-67)	-
100-199	12	15	10.5(3.4-27.9)	51(26-88)	-
>200	26	13	26.7(18.6-37.1)	57(39-79)	61(41-84)
>100	40	28	37.2(27.2-49.5)	55(40-73)	47(34-63)
> 50	47	50	42.0(31.3-54.9)	50(37-65)	38(22-59)
> 10	64	142	48.8(36.7-65.1)	47(35-61)	31(22-39)
日本の統計との比較					
10-49	17	62	10.8(4.6-19.3)	32(22-42)	-
50-99	7	15	3.5(1.8-11.7)	33(11-71)	-
100-199	12	10	11.0(5.9-18.4)	54(29-90)	-
>200	26	09	27.1(19.0-37.5)	57(40-79)	62(43-86)
>100	40	19	28.1(20.3-40.2)	56(52-74)	50(35-67)
> 50	47	34	43.6(32.9-56.5)	52(39-67)	42(32-54)
> 10	64	96	54.1(41.8-69.2)	52(40-66)	38(29-48)
長崎					
0-9 radグループとの比較					
10-49	2	35	-1.5(neg-13)	-22(neg-47)	-
50-99	0	12	-1.2(neg-1.9)	-15(neg-24)	-
100-199	3	12	1.8(neg-6.7)	11(neg-41)	-
>200	15	12	13.8(8.0-24.4)	35(20-52)	61(35-91)
>100	18	21	15.6(9.2-23.5)	38(16-44)	48(28-76)
> 50	18	26	14.4(8.0-23.1)	22(12-36)	38(20-61)
> 10	20	21	12.9(6.1-22.0)	18(6-33)	30(10-55)
日本の統計との比較					
10-49	2	20	0.0(neg-4.3)	0(neg-22)	-
50-99	0	07	-0.7(neg-2.3)	-9(neg-39)	-
100-199	3	07	2.3(0.1-7.1)	14(1-43)	-
>200	15	07	14.3(8.5-22.4)	38(21-56)	63(37-98)
>100	18	14	16.6(10.2-25.3)	38(18-45)	50(31-78)
> 50	18	21	15.9(9.5-24.6)	24(15-38)	42(23-64)
> 10	20	11	15.9(9.1-25.0)	22(13-35)	37(22-59)

出典: 引用文献 7
注: 90%信頼区間はカーマ内に示してある

II-3. BEIR III report, 1980

Dose-Response model についても委員会内部で意見の対立があり、統一した見解はない。3種の Dose-Response curve model を考え、3種の被曝モデルについて risk estimate した。

• Dose-Response curve.

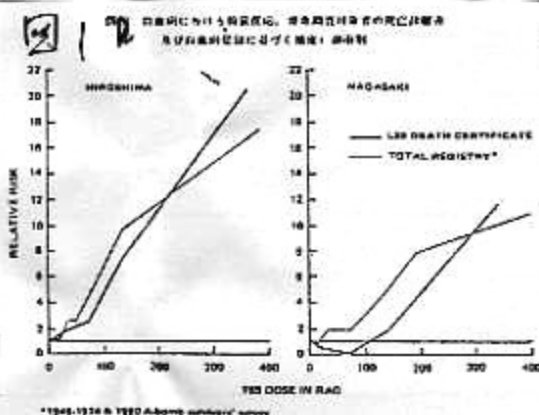
• 1線に712. L: linear, LQ: linear-quadratic
Q: pure quadratic の3種類

• Neutron に712. L and

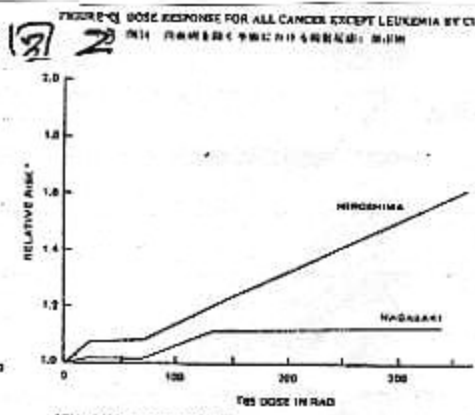
$$(L-L) F = \alpha_0 + \alpha_1 D_r + \beta_1 D_n$$

$$(LQ-L) F = \alpha_0 + \alpha_1 D_r + \alpha_2 D_r^2 + \beta_1 D_n$$

$$(Q-L) F = \alpha_0 + \alpha_2 D_r^2 + \beta_1 D_n$$



* 1945-1974 & 1950 Atomic survivors' survey



* Risk at 100% and relative to 0-50 rad

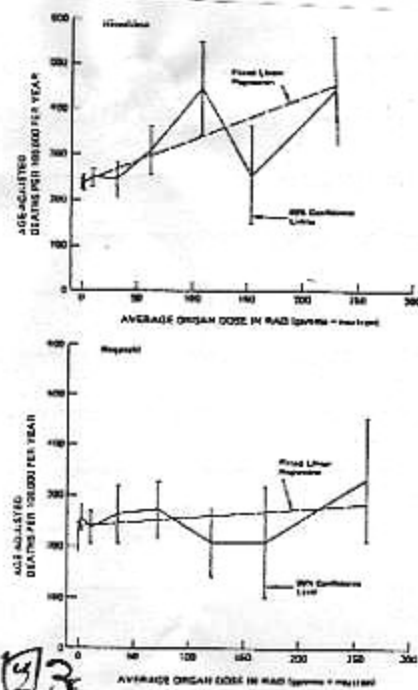


FIGURE 3% Dose-response plots and fitted linear regressions for deaths from all cancer except leukemia, fibrosis and myeloid, 1955-1974.

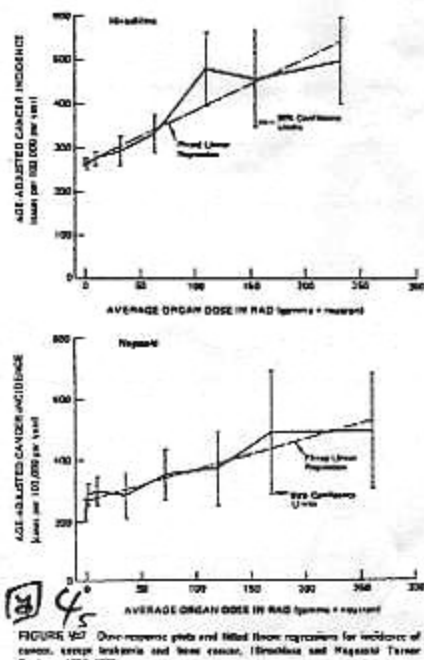


FIGURE 4% Dose-response plots and fitted linear regressions for incidence of cancer, except leukemia and bone cancer, fibrosis and myeloid, 1955-1974.

- Subcommittee の多数意見は LQ-L を支持し、L-L, Q-L は 70% 支持。これは upper bound, lower bound ではない。

表 5

TABLE 5 Comparative Estimates of the Lifetime Risk of Cancer Mortality Induced by Low-LET Radiation—Excess Deaths per Million, Average Value per Rad by Projection Model, Dose-Response Model, and Type of Exposure

Source of Estimate	Dose-Response Models*	Projection Model			
		Single Exposure to 10 Rads		Continuous Lifetime Exposure to 1 Rad/Yr	
		Absolute	Relative	Absolute	Relative
BEIR, 1980 ^b	LQ-L, LQ-L	77	226	67	169
1972 BEIR report factors ^c	Linear	117	621	115	568
UNSCEAR 1977 ^d	Linear			75-175	

* For BEIR 1980, the first model is used for leukemia, the second for other forms of cancer. The corresponding estimates when the other models are used (thereby providing an envelope of risk estimates) are:

L-L, L-L	167	501	158	403
Q-L, Q-L	10	28		

^b The values are average values per rad, and are not to be taken as estimates at only 1 rad of dose.

^c 1972 BEIR⁸⁴ postnatal, age-specific risk factors used with 1969-1971 life tables, with plateau extending throughout the lifetime remaining after irradiation, estimate (b) in the 1972 report. The average age of the 1969-1971 life-table population exceeds that of the 1967 U.S. population used for the 1972 BEIR report. For this reason, the numbers shown here for continuous exposure are larger, on a per-rad basis, than those obtainable from Tables 3-3 and 3-4 of the 1972 BEIR report.

^d UNSCEAR range of estimates for low-dose, low-LET radiation (p. 414, para. 318).⁸²

- Radford 意見.
 - other than leukemia 1-70% 支持。linear を用いたことは 70% 支持。linear model は underestimate の可能性あり。
 - linear model 20 cancer incidence risk 17.
 - 100 Rads まで female 20 ~ 1000 (550 ~ 1620)
 - male 20 ~ 500 (260 ~ 880)

• Rossia 意見

- Q-L model 20 過大評価 20% あり。
- Hiroshima 20% 支持 20% Neutron 1-8% 支持。Nagasaki 17% 支持 LQ-L を用いた。
- $$M_{neutron} = 1.7 \times 10^{-4} D_n$$

$$M_{xray} = 1.7 \times 10^{-8} D_x^2$$
- 17% 支持。

II-4. Mancuso, Kneale & Stewart report.

原子力産業として最も歴史の古い Hanford の労働者について、
ガン死者の平均被曝線量が、他の要因の死者と比べて有意に
大きいことを見出した。

・データ、保険の死亡証明と被曝管理記録

・追跡期間 1944-77

表 6

	death		mean dose (rad)	
	all	cancer	all	cancer
male	3742	743	2.03	1.66
female	291	89		

・種々のガンについて有意性を検定し、cancer sensitive 臓
器の doubling dose として、

bone marrow 3.6 (1.7~10.3) rad

lung 13.7 (7.3~20.7)

Pancreas, Stomach, L.I 15.6 (7.3~55.0)

All male cancer 33.7 (15.3~79.7)

All female cancer 8.7 (2.6~ ∞)

と、male cancer death 743 中 35 case の
radiation induced としている。

・この値は、ACRP 勧告値の約 60 倍であり、APCC
data と相入不相入といえる改善工事は必要である。

Ⅳ. 原爆線量評価.

Ⅳ-1. T65D (Tentative 1965 Dose)

• "ICHIBAN" project 1956 ~

ABCC, ORNL, LANL 等を中心として、広島・長崎の線量推定を行った大規模な project.

i) 核実験

ii) operation BREN ... 500m の距離に設置した ^{60}Co source を用いた線量測定

iii) operation HENRIE ... BREN の距離に加速器を用いた 14 MeV の neutron 発生.

iv) ICHIBAN critical assembly ... Little Boy を模擬した critical assembly

v) Little Boy mockup ... 模擬 Little Boy に ^{152}Eu source を入れた実験.

• T65D.

上の i, ii, iv を用いた線量推定値を Auer 等が Health Phys.

12 (1966) に発表

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

R : start distance (m)

L : Relaxation length (m)

G_0 : source term ($\text{rad} \cdot \text{m}^2$)

表 7

	neutron		γ	
	G_0	L	G_0	L
Hiroshima	8.70×10^{10}	198	3.45×10^{10}	250
Nagasaki	1.30×10^{10}	198	2.75×10^{10}	350

・上の値算出に用いたデータは示されたいものがあり、T65D の根拠には明らかにされていない部分がある。

• 測定データ.

・ Hashizume et al. ... コンクリート中 ^{60}Co , 91 TL } T65D と
 ・ Higashimura et al. ... カラクリ TL } consistent.

- ABCCでは, Life Span Study の対象者一人一人について面談し, 被爆時点での位置, 天気等について T65D に基づいて推定を算出している。

Ⅳ-2. T65D を見直し.

- 1976 Los Alamos の Preeg が Little Boy と Fatman の output spectrum を private letter の形で発表
 ... あわせて, 中性子爆弾開発の問題と関連する。
- Lawrence Livermore の Loewe, ORNL の Kerr 等が推定計算を private に circulate.
- May 1982 "Science" 記事.
 T65D に大巾な error 有り. ϵ は広島 neutron dose を小さくする, risk factor を見直さなければならない。

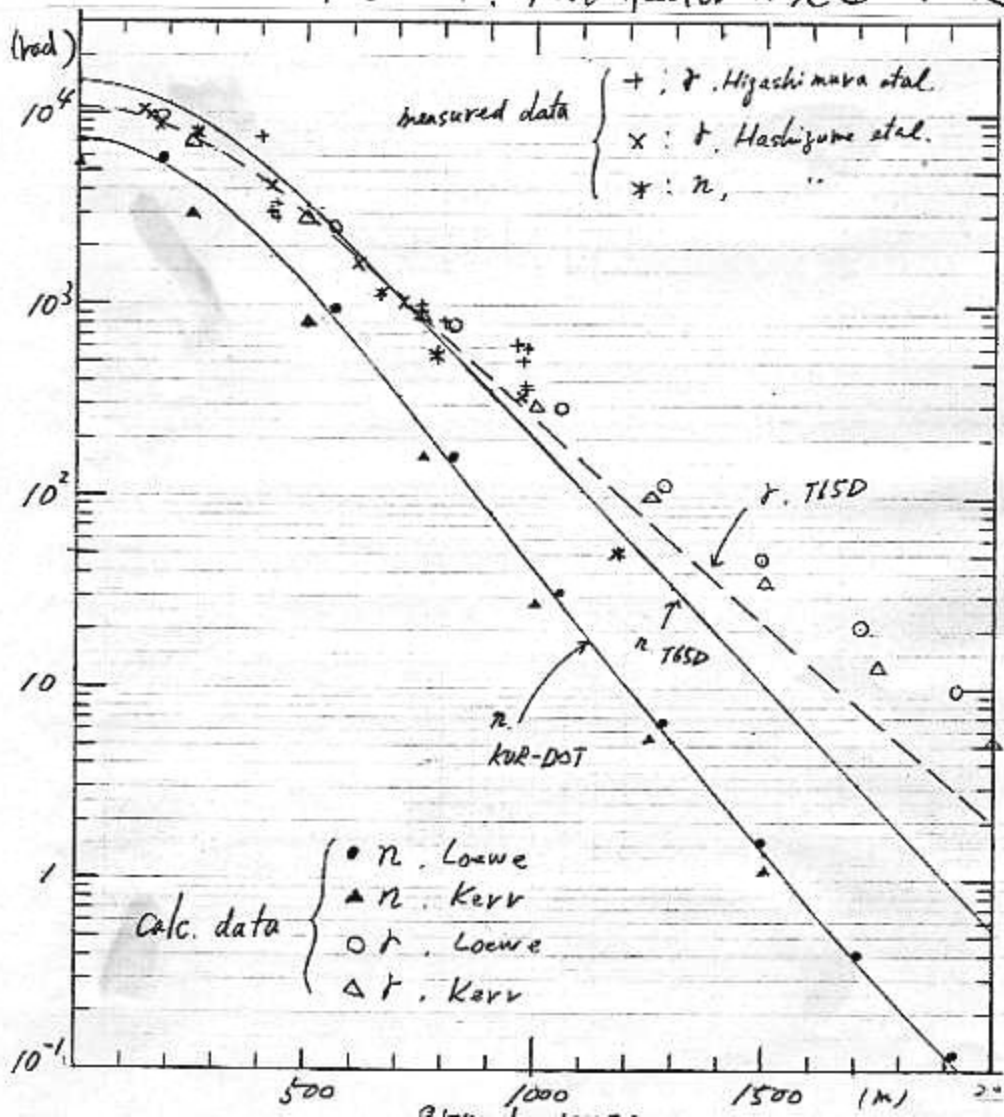


図5
広島原爆 Little Boy の
dose-distance curve.

yield:

- T65D 12.5 kton
- LLNL 15 kton
- ORNL 12.5 kton
- KUR 15 kton

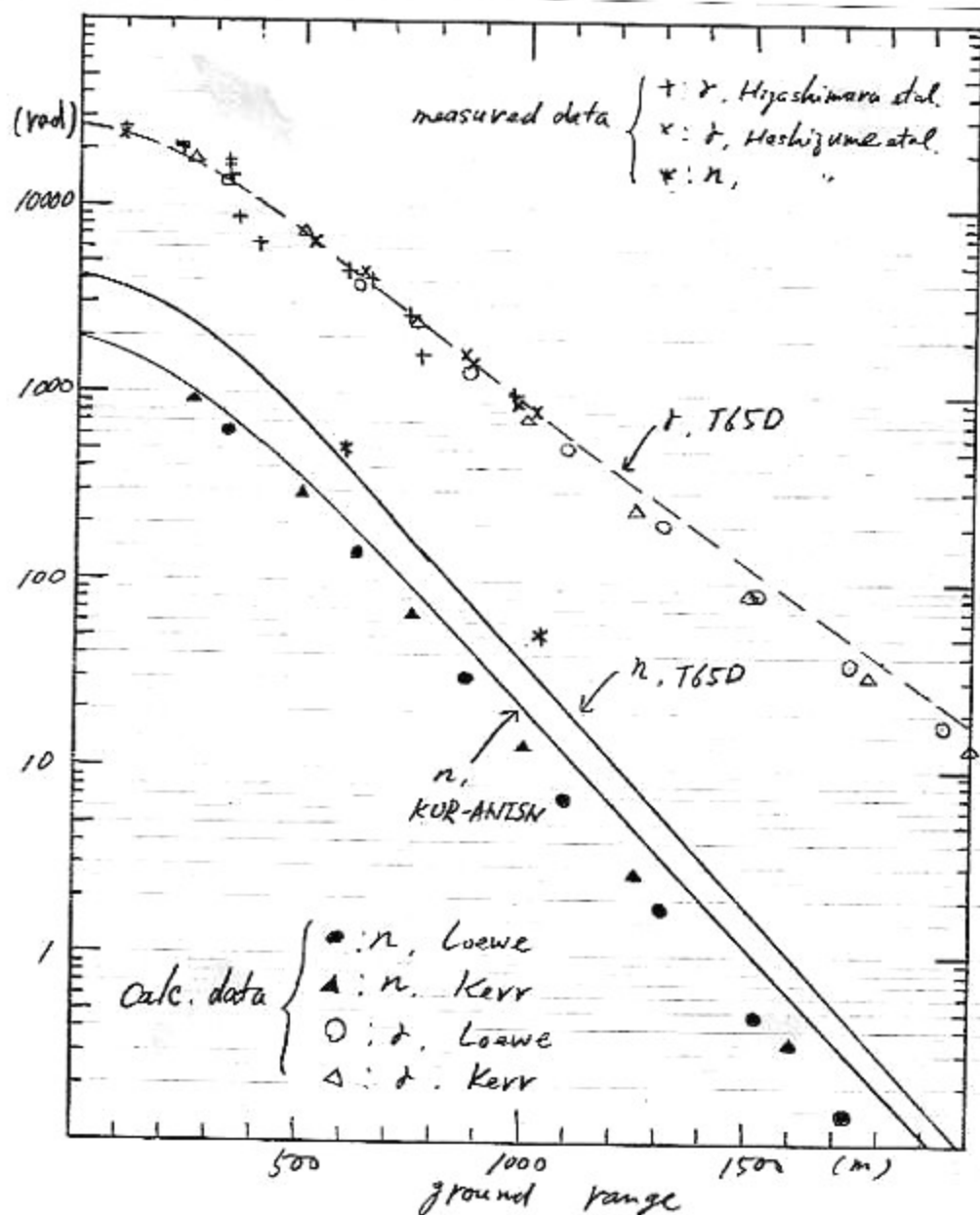


図 6

長崎原爆

Fatman の
dose-distance curve

(yield;
全 22 kton.

o Loewe, Kerr, KUR の改訂計算の主な点.

• neutron; 広島. 長崎にて減少

• 長崎にて. T65D 2% negligible とした事は 広島より数分の一.

• 広島にて. δ と comparable とした事は neutron dose の大巾に減少. 500m 2' 1/2, 1000m 1/5, 1500m 1/7, 2000m 1/8

• δ : 広島にて増大, 長崎にて減少

• 長崎にて. 1000m 以上にて 20~30% 減少

• 広島にて. 1000m 2' 1.2~4, 1500m 2' ~2, 2000m 2' 3~4 倍

・ T65D の問題点

・ Neutron :

- ・ relaxation length : T65D では constant とし、 γ は source spectrum に依存しない、と仮定している。

~~実際~~ 計算結果は、dose-dependant であり、
source spectrum に依存する。

・ Source term G_{01} :

- ・ Fatman では、 G_{01} と G_{02} は同じ。T65D の G_{01}/G_{02} 比を用いて G_{01} を決定している。この場合、Nagasaki と Nevada の humidity 差が反映している。

- ・ Little Boy では、ICHIBAN critical assembly の source term は、BREN は β Build Up factor を掛けた値を出。更に検討する必要がある。

・ β :

- ・ Fatman, Little Boy とは遠距離では、Loewe 等と T65D は一致、遠距離 (>100) では、Fatman は T65D より大きく Little Boy は反対。

- ・ Fatman の β は核実験データから求めたらしい、 G_{01} と同様。

Little Boy は β については、 β , G_{01} と不明。

Ⅳ-3. 線量再評価にあたっての問題

- ・ neutron source spectrum : ... Presg a spectrum は γ の取扱説明書には γ と β についている。

- ・ β - dose 計算の取扱... F.P cloud model 化。

- ・ Shield effect : 周辺状況、建屋は β shield、
空気 Dose/吸収 dose。

IV. 線量評価の意味.

IV-1. risk factor の影響.

- 今回の線量評価問題は、単に Free-in-air dose の問題だけではなく、shield factor を始め、ABCC data 等についても、我々自身の眼で見直しをすべき必要があることを提起している。今の段階で risk factor について結論を付けるのは早計であるが、二十二年と二十三年で明らかとなり、事実上この risk factor 評価にどのような変化してくるのか、その程度の見直しを待つ必要がある。

今のところ以下 3 点を重要である。

- (a) 広島 neutron dose の大巾に減少した
- (b) (LLNL, ORNL に基いて) 広島 neutron dose の数倍に増えた
- (c) 今後は、Hiroshima data を取り扱うに際しては、変化する可能性を念頭に、(b) のように、10 倍の差を考慮する。

- T65D に基づく Hiroshima 2 の neutron 評価は、Hiroshima 2 の neutron を取り扱う (吸収線量 20~36%) のため、Nagasaki data に重点を置かれていた。

(ICRP, UNSCEAR --- Nagasaki only
 BEIR IV --- Hiroshima & Nagasaki 並に neutron RBE

- ・ Hiroshima neutron の減少 (吸収線量 2~5%) の結果、Hiroshima data を取り扱うには、次の 2 つの考え方が可能
 - (a) neutron RBE は小さく (< 10) Hiroshima 2 を主線とする。
 - (b) RBE は大きく (> 10)、neutron を effective とする。

• LLNLの改訂線量に沿って、白血病の risk について考えてみる。

• T65D に基づく ~~data~~ dose-response

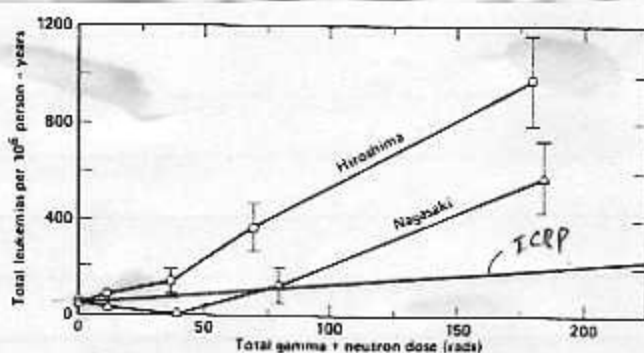


Fig. 3. Leukemia incidence vs marrow dose using T65D data (R078).

図7

• LLNLの改訂線量とそれに基づく dose-response.

表1. Reconstruction of Rossi and Mays analysis with LLNL data
(Dose in Units of Rads)

Total Dose Range	T65D Based Data						Ground Range (m)	Leukemia Incidence ²	Leukemia Cases	LLNL Based Data ¹					
	F+T Data	Shielded Data	Marrow Data							F+T Data	Shielded Data	Marrow Data			
	n	n	n	n	n	n				n	n	n	n	n	n
Hiroshima															
200+	310	240	269	94	155	24	260	90.7	28	440	56	387	22	211	5.7
100-199	125	80	108	30	62	7.8	1150	368	12	195	15	169	5.6	93	1.5
50-99	66	37	57	13	32	3.6	1390	134	7	114	6.1	90	2.3	54	0.60
10-49	22	10	18	4.3	10	1.1	1500	80	17	49	1.5	39	0.80	21	0.18
1-9	2.7	0.8	2.9	0.8	0.5	0.1	1800	45	27	10.8	0.09	8.8	0.09	5.4	0.02
Nagasaki															
200+	410	31	325	5.8	181	1.5	1200	656	15	300	3.6	241	1.7	133	0.44
100-199	158	2.3	160	1.4	80	0.4	1400	120	3	130	1.0	100	0.40	55	0.10
50-99	84	1	78	0.2	38	0.1	1600	0	0	50	0.30	49	0.05	27	0.01
10-49	28	0.15	21	-	11.7	-	1510	27	2	18	0.045	15	-	8.3	-
1-9	4.0	-	4.0	-	1.3	-	(2420) ⁴	48	11	2.9	0.002	2.5	-	1.9	-

1) See text for uncertainties

2) F+T = F+T tissue dose

3) Per 10⁶ person-years

4) LLNL data extrapolated

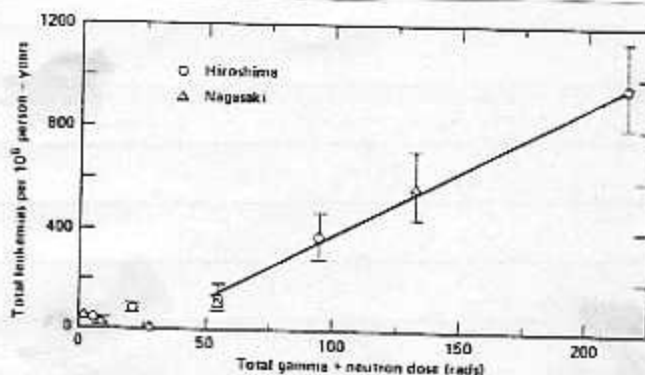


図8.

Fig. 4. Leukemia incidence vs marrow dose using LLNL data. (The error bars on leukemia incidence represent one standard deviation based on the sample size. The uncertainties for dose values are not shown on this figure.)

- ・図7に見られる Hiroshima と Nagasaki の差は解消し、
とくに高線量部においてその直線性が認められる

(a) の考え方の一例。

低線量部を取扱ひ、線量0で値は123と見做し、 $h(x)$ の
 $RBE=1$ とし、直線部を87 risk と直した。

5.2 leukemias / 10^6 yr. rad とした。

発症期間 25 yr とした。

$$5.2 \times 25 = 130 \quad (\times 10^{-6} / \text{rad}) \quad \text{と見た。}$$

∴ 他は、ICRP の 6.5 倍と見た。

(b) の考え方の一例。

- ・表4の政府統計と比較 Data を、表8の dose data を用いた。

- ・ >10 group の超過数を用い、その risk 係数 P と $h(x)$ の
 RBE, W の内数を考へた。

Hiroshima data を見た。

$$R_H = \frac{74.1}{1 + 0.0170W}$$

Nagasaki data を見た。

$$R_N = \frac{57.4}{1 + 0.0023P}$$

$R_H = R_N$ とし、連立方程式を解き、

$$P = 55$$

$$W = 22 \quad \text{と見た。}$$

∴ 他は、ICRP の 2.8 倍。

白血病 - 70 以上と、Hiroshima data の risk estimate に
取入れたとすると 2157、結果の 3~6 倍という値が
出てきた。

IV-2. その他の問題。

ABCC data の評価 etc.