



Title	医療被曝のリスクと低減
Author(s)	橋詰, 雅
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1981, 41(5), p. 445-474
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/17994
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

宿題報告

医療被曝のリスクと低減

放射線医学総合研究所物理研究部

橋 詰 雅

(昭和55年12月27日受付)

Medical Irradiation in Japan

—Stochastic Risk Estimation and its Reduction—

Tadashi Hashizume

Division of Physics, National Institute of Radiological Sciences

9-1 Anagawa 4-Chome Chiba-Shi 260 Japan

Research Code No.: 302

Key Words: Population dose, Medical irradiation, Risk estimation, Carcinogenesis, Organ and tissue dose

Nationwide surveys have been carried out on medical uses of ionizing radiations and radioisotopes in Japan since 1957. The recent data showed that the annual frequency of diagnostic X-ray examinations and the annual number of radiographs was about 95 million and about 340 million, respectively, in 1979, and that the annual frequencies of other radiological procedures were about 0.54 million for administrations of radiopharmaceuticals in 1977, about 0.077 million for radiotherapeutic treatments in 1978, about 33 million for chest mass screenings in 1975, about 4.1 million for stomach mass screenings in 1975 and about 100 million for dental X-ray examinations in 1980, respectively. In Japan, the radiological examinations, particularly X-ray diagnostic examinations go on increasing in frequency. The aim of medical and dental radiology being to provide maximum benefit to the population served, any increase in frequency of radiological examinations must be justified.

With increasing emphasis in recent year on the somatic effects of radiations, somatic risks to an individual and the population from medical irradiations were estimated using risk factors determined from the data on excess deaths due to leukemia and malignant diseases for atomic bomb survivors in Nagasaki, leukemia and malignancy significant factors determined taking into consideration the latent periods of these diseases after radiation exposures and the life expectancies of persons received medical irradiations, and organ or tissue doses related to the diseases. On the other hand, the benefits to the population were defined as life-saving rates of patients expected from X-ray diagnoses. As an example of results of risk-benefit assessments for X-ray diagnoses, it was recognized that both chest and stomach mass screenings cannot be justified for persons less than 30 years old.

The stochastic risks to the whole population of Japanese were estimated using the population doses such as the genetically significant dose and risks from radiological procedures. The results showed that about 340 persons for genetic effects, about 300 persons for leukemia and about 1,260 persons for malignant diseases will annually receive some fatal risks from diagnostic X-ray examinations, respectively.

In order to reduce patient exposures as low as reasonably achievable, the physical and biological studies were made on the possibility of dose reduction in the specific X-ray diagnoses. The cost for the dose reductions was estimated socioeconomically to be 2,000 to 3,000 yens per man rad for male to the X-ray diagnoses.

The results of risk-benefit and cost-benefit assessments showed that for all the X-ray diagnoses, particularly for stomach mass screening and other X-ray radiographys of digestive organs, the uses of image intensifier system and higher sensitive recording systems should be urgently promoted, and that education in patient protection for radiologists and radiographers, researchs and developments of X-ray diagnostic technology, and physical and biological studies on the reduction of patient exposures should be actively encouraged.

1. 緒 言

放射線の大量被曝によって皮膚に障害がおこったり、癌が発生することは早くから報告されていたが、統計的観察を必要とする遺伝や白血病等が広く検討され始めたのは1955年の国連科学委員会(UNSCEAR)からである。

同委員会は各国に対しX線診断による患者の生殖腺線量の推定を要請した。日本でも1957年に最初の推定を行い、日本人1人平均13.5m radと言う試算値を報告した¹⁾。当時米国では約170m radと推定しており²⁾、その間に10倍以上の差があり問題にされた。その後我が国では文部省の助成研究で宮川班が出来、第1回の全国調査が1958～1959年に行われ、X線診断による遺伝有意線量として将来生まれてくる子供一人あたり年間38.6m radと言う値³⁾を(38.6m rad person⁻¹ year⁻¹)推定し国連に報告した⁴⁾。この値は国連の1962年の報告書に掲載されている。その後広島・長崎で白血病の発生が続発するにおよんで、骨髄線量が問題になり、文部省の宮川班は引き続き1960年から放射線治療による患者の骨髄線量を推定し第11回の国際放射線学会に報告した⁵⁾。文部省の班研究は1963年に終わったが、我々はX線診断についても白血病の発生を、又放射線治療についても遺伝有意線量に対する寄与を検討する必要を感じ、

その線量推定を行うと共に集団検診、放射性医薬品、歯科、密封小線源による遺伝並びに白血病有意線量の推定を行った⁶⁻¹⁶⁾。一方X線の利用は年々増加する一方その内容も変化するため始めは10年間隔で遺伝有意線量(GSD)と白血病有意線量(LSD)を推定していたが、1969年から約5年間隔でこれ等を推定することにした¹⁷⁻³⁹⁾。国連もこれと同調した形となり国連の報告書も第2回のまとめを1972⁴⁰⁾年に、又第3回のまとめは1977⁴¹⁾年に行われた。しかし国連では我々が長年主張している被曝時の年令と白血病発生のパターンを考慮した白血病有意因子を加味した白血病有意線を正式に採用しておらないため、日本以外の国は単に骨髄線量の合計を人口で割った平均骨髄線量(per caput mean marrow dose)しか出していなかった。一方最近になって広島・長崎で悪性腫瘍の発生が有意に高くなり総数では既に白血病を凌駕するに至り、がんのリスクが問題になった。悪性腫瘍は潜伏期間が長い年齢による影響が非常に大きく、年齢と発生パターンを考慮した有意因子を考えざるを得ない状態になり、次回の1982年国連の報告書には我々が長年主張している有意因子が使用される予定である。本報告書では白血病有意因子と同様な考えにしたがったがん有意因子を示し、これによって医療被曝によるがん有意

線量とリスクを最近の実態調査を対象に推定した。現在まで日本では診断用X線4回(1959²⁾, 1969¹⁰⁾, 1974¹⁷⁾, 1979年^{31, 34, 35)}, 集検(1965⁴⁾, 1969¹⁰⁾, 1975年^{22) 23)}, 放射線治療(1962⁴⁾, 1971^{11) 16)}, 1978年^{29) 32)}, 歯科(1959⁵⁾, 1973²¹⁾, 1980年³⁹⁾のそれぞれ3回, 放射性医薬品(1971¹³⁾, 1977²⁵⁾年)の2回である。この中, 診断関係の放射線の利用は年々増加をたどり, 1960年頃に比較して現在ではX線診断が約10倍, 歯科が約80倍にもなっている。諸外国の場合も先進国ではいづれも類似のパターンを示している。このためICRPでは医療被曝についても, 職業人に適用している「線量制限体系」の中, 被曝の「正当性」と「最適化」についてその必要性を強調している⁴²⁾。これ等の点を考慮し本報告では, まず医療被曝の過去と現在の「実態」を, 次いで医療被曝による「リスク」を, 続いて利益と損失面から「正当性」を, 最後に線量低減と経済面から「最適化」の問題を検討する。

2. 医療被曝の過去の実態と現状

医療被曝の中で特に件数の多いのはX線診断, 集団検診, 遠隔放射線治療, 放射性医薬品, 歯科診断および密封小線源治療であるので, その各々について過去並びに現状の調査結果を報告する。

(1) X線診断

X線撮影と透視は放射線の医学利用の中最も代表的なものであり, その診断技術も年々向上し,

それに共ない件数も急激に増加している。撮影枚数は1957年2700万枚¹⁾だったものが1979年には34,000万枚³¹⁾を越え又透視1770万件に達している。その5~10年如の増加をTable 1に示す^{9) 10) 17) 37)}。1979年の性別年齢別の撮影回数をTable 2に示す。又診断部位別の撮影回数, 件数及びその比を示すとTable 3の如く回数では胃が15,500万回, 件数では胸部が3,910万件とそれぞれ最多である。なお透視件数はその78%が胃で, 胆, 直腸がそれぞれ8%, 4.6%と続き, 胸部は僅か2.7%に減少している。

UNSCEARの報告書による人口1000人あたりの各国の撮影件数をTable 4に示す。

(2) 集団検診

X線で集団検診が行われるのは, 結核を対象にした胸部, 胃がんを対象にした胃, 先天性股関節脱臼を対象にした股関節, 乳がんを対象にした乳房であるが, 乳がんは日本では少ないことと治療率がよいことで殆んど行われていない。又股関節は乳幼児の生殖腺線量が問題になり現在は殆んど行われていないのでここでは胸部と胃部の集検について報告する。

(i) 胸部集検

胸部集検は戦前から行われていたが, 件数は少なかった。戦時中は軍隊が相当数行っていたが, 国民全体にゆきわたったのは戦後で特に結核予防法によって義務づけられてからは急激に増加している。我々の推定では昭和30年からの5年毎の件数は2100, 4200, 4600, 5400万件と急激に増加した。しかし遺伝有意線量に寄与の大きい小児の生殖腺線量が問題になり, 昭和49年より小学生は原則としてツベルクリン陽転者の1年生(一部4年生), 中学では原則として2年生(一部3年生)に限ったことと, 結核の化学療法が進歩したことに

Table 1 Frequency of X-ray exposure, examination and fluoroscopy (×10⁴)

	1959	1969	1974	1979
exposure	3800	17800	20400	34300
examination	1570	6400	7300	9600
fluoroscopy	480	1400	1450	1770

Table 2 Frequency of X-ray exposure sex and age (×10⁶)

Age	0—9	10—19	20—29	30—39	40—49	50—59	60—69	70—	Total
Male	5.6	11.8	19.6	29.7	39.2	35.8	28.7	22.8	194.5
Female	4.1	8.4	12.0	16.8	28.3	28.9	26.4	23.4	148.3

Table 3 Frequency of X-ray examination and exposure by sex and type of examination ($\times 10^6$)

		Male			Female		
		examination	exposure	ration exp/exam	examination	exposure	ration exp/exam
1	Head	2.3	7.3	3.2	1.6	5.6	3.4
5	Chest	22.5	30.2	1.3	16.3	21.8	1.3
7	Barium meal	7.7	89.3	11.6	6.1	66.0	10.8
8	Gall	1.2	4.8	3.9	1.4	5.2	3.7
10	Barium enema	0.4	4.0	9.5	0.5	5.1	9.9
12	Lumbar spine	3.2	9.3	2.9	2.7	8.1	3.0
14	Urography	1.0	3.7	3.7	0.6	2.2	3.8
17	Pelvimetry	—	—	—	0.3	0.4	1.4
20	Hip & Joint	0.7	1.0	1.4	1.1	1.4	1.3
24	Angio Cardio.	0.04	0.5	13.9	0.02	0.3	15.9
25	Tomography	0.6	3.8	6.8	0.3	1.9	6.8
28	Computer Tomo.	0.9	8.9	10.2	0.5	5.8	10.3
	Others	11.9	31.7	2.7	11.6	24.5	2.1
	Total	52.4	194.5	3.7	43.0	148.3	3.4

Table 4 Annual frequency of X-ray examination by country

country	1962	1972	1977
France	150	—	—
USSR	—	171	—
UK	280	310	—
Sweden	290	—	540
Switzlands	310	—	1350
Japan	410	610	676
USA	—	475	669
Germany	560	601	1550
Neterlanes	350	810	1186
Egypt	—	35	—
Taiwan	—	39	—
Tailand	—	43	—
India	36	—	—

より、一般人にも危機感が少なくなったため、昭和50年には3300万件に減少した。1975年の受検者の年齢分布をみると Table 5 上欄の如くなる²³⁾。

Taiwan 5 Annual frequency of photofluorographic examination by age and sex.

Age		—10	11—15	16—18	19—24	25—29	30—34	35—39	40—44	45—49	50—54	55—59	60—	Total
Chest ($\times 10^6$)	Male	0.7	0.6	2.3	3.3	2.4	2.1	1.8	1.8	1.6	1.1	0.5	0.5	18.4
	Female	0.6	0.6	2.3	2.2	1.8	1.6	1.4	1.4	1.3	1.1	0.3	0.4	15.1
Stomach ($\times 10^4$)	Male		0.5		2.2	7.1	14.0	31	49	50	37	27	73	238
	Female		0.2		1.1	3.0	9.5	22	33	33	28	19	61	174

高校生以上は今だに毎年法律によってX線検査を受けているが、現在のような化学療法の進歩を考えると問題がある。労働者は男56%、女44%が受診しているのに対し高校生や大学生は95%以上の受診率を示している。

(ii) 胃集検

胃がんは国によって発生率に相当の差があり、日本、チリーとヨーロッパの一部の国に特に多い。一方早期に発見されれば完全治癒の確率も高いので、間接撮影による胃の集団検診が検討され、1969年の調査では年間180万件¹⁰⁾行われていたのが1975年には男238万、女174万合計412万件と急増した²²⁾。その性別、年齢別の件数を Table 5 下欄に示す。

(3) 放射線治療

放射線治療は大きく別けて遠隔放射線治療と密封小線源による治療と^{131I}等による放射性医薬

品によるものがある。

(i) 遠隔放射線治療

X線による深部治療は、戦前から広く行われていたが、戦後 ^{60}Co による遠隔治療装置が普及してからは次第にX線治療は減少した。その後、昭和35年頃からは加速器の利用が普及してきたが現在でも ^{60}Co が最も多く利用されている。その年度別の比率を Table 6に示す。1977年の治療患者数は77,000人²⁹⁾、その照射回数は1,775,000回である。この回数は1971年の1,779,000回¹¹⁾と殆ん

Table 6 Percentage of irradiation source

	Co-60	Conv. X	HE-X	HE-E
1961	24	66	—	—
1971	63	7	18	12
1977	55	1	38	6

Table 7 Annual frequency of patients by sex and type of disease.

Type of disease	Male	Female
Buccal cav. and Pharynx	2680	1530
Digestive organs	5930	2270
Respiratory system	12790	3520
Bone, Skin and Breast	1490	9090
Genito-Urinary organs	3330	15700
Lymphatic Tissue	3240	1870
Others and unsp. sites	6110	5960
Non Malignant	600	930
Total	36170	40860

Table 8 The annual frequency of brachytherapy treatments by age-group and type of sealed source.

Type of source	Male					Female					Total
	0—14	15—29	30—44	45—	Subtotal	0—14	15—29	30—44	45—	Subtotal	
Radium 226	—	—	40	470	510	120	120	570	8,420	9,230	9,740
Cobalt 60	—	—	—	460	460	—	—	460	8,820	9,280	9,740
Cesium 137	—	—	—	50	50	—	—	520	3,460	3,980	4,030
Strontium 90	—	40	190	410	640	—	—	220	650	870	1,510
Gold 198	—	—	120	100	220	—	—	—	20	20	240
Total	—	40	350	1,490	1,880	120	120	1,770	21,370	23,380	25,260

ど変わりはないが、その病気別の治療患者数には相当の差がある、1977年の数を Table 7 に示す。

(ii) 密封小線源

^{226}Ra の密封小線源の治療は戦前から婦人科、および皮膚科で多く使用されていた。しかし ^{60}Co や加速器による遠隔治療の進歩にともない、術者の被曝の多い密封小線源治療は次第に敬遠され、1978年の調査で²⁹⁾では年間の治療件数は1971年¹⁹⁾の約半数の25,300件であった。性別、年齢別、線源別の件数を Table 8 に示す。

治療部位別では子宮が最も多く全体の85%を占めている。咽喉、消化器は男女合わせてそれぞれ4%、3%で、呼吸器は0.3%である。又年齢別では45歳以上が90%強である。最近リモートアフターローダが子宮癌の治療に多く用いられるようになり、最近では全国で80台を越え、治療全体の30%近くになっている。又 ^{252}Cf の中性子線源を用いたものが僅かではあるが使用されている。

(iii) 非密封放射性同位元素による治療

治療に使用されている非密封放射性同位元素は殆んど ^{131}I でその件数は年間約5600件である²⁹⁾。その性別、年齢別の件数を Table 9に示す。その他僅かではあるが ^{198}Au が約30件使用されていた。1件あたりの使用量は平均4.8mCi である。

(4) 放射性医薬品

放射性医薬品は初め ^{131}I が主体で1965年に約10万件、1971年に17万件¹³⁾と少しずつ増加していたが、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ が一般に容易に使用出来るようになってから急増し、1977年には54万件²⁵⁾に達し、使

Table 9 Annual frequency of treatments of Thyroid using I-131 by sex and age.

Age	—14	15—29	30—44	45—59	60—	Total
Male	0	72	462	708	136	1378
Female	0	377	2593	2196	441	5607

Table 10 Annual frequency of diagnostic examination and annual amount of Radiopharmaceuticals.

		^{99m} Tc	¹³¹ I, ¹²³ I	²⁰¹ Tl	¹⁹⁸ Au	⁷⁵ Se	⁶⁷ Ga	¹⁹⁹ Hg	¹³³ Xe	¹¹¹ In	^{81m} Kr	Others	Total
Number of Patients	Male	164	48	5	24	13	18	4	2	1	1	1	282
	Female	119	94	3	13	9	12	4	1	2	—	1	258
Activity (Ci)	Male	952	5	10	8	3	35	1	16	2	5	—	1037
	Female	743	9	5	9	6	24	1	8	2	2	2	811

Table 11 Annual frequency of X-ray Dental examination by sex and age (10³)

	0—14	15—29	30—44	45—59	60—	Total
Male	4.0	10.8	13.5	10.6	4.8	43.8
Female	3.9	15.3	18.1	13.1	4.9	55.3

Table 12 Annual frequency of X-ray Dental examination by sex and age

	Molar	Pre. M	Canine	Incisor	Panorama	Total
Male	8.3	9.0	5.6	7.4	5.0	43.8
Female	20.9	15.9	4.7	9.1	4.7	55.3

用量は1875Ci になった。

1977年の使用件数と使用量を Table 10 に示す。

(5) 歯科

歯科の診療施設は1980年の調査では約35,000施設³⁹⁾あり年間の撮影枚数は口内法で約9000万枚ペノラマで約1000万枚撮影している。その性別、年齢別の枚数を Table 11 に示す。

(6) 放射線による診断および治療の年間件数および回数

(1)~(5)に示した医療被曝の件数を回数をまとめて Table 13 に示す。

3. 医療被曝によるリスク

放射線が人体にあたると大別して2種類の影響があるが、いずれも放射線特有なものではない(非特異性)。その一つは皮膚にあたったときに

おこる悪性でない損傷とか、水晶体におこる白内障のように、ある線量までは影響はないが、ある「しきい値」を超えると必ず現われ、その重篤度が線量に比例する「非確率的影響」と、白血病や悪性腫瘍又は遺伝的障害のように、線量の増加がその障害の重篤度ではなく、その影響の発生する確率の増加に関係し「しきい値」のない「確率的影響」である⁴²⁾。(それ等の影響の出る危険度をここではリスクと言う)。

非確率的影響の中、皮膚の悪性でない損傷というのは、紅斑とか潰瘍で、これ等は1回線量で数百 rem 以上であり、白内障では1回線量が1500 rem 程度とされている。医療被曝では治療の場合には問題になるが、診断ではこの様な大線量は問題にならない。

Table 13 Annual frequency of medical irradiation (10⁴)

		Date	Examination	exposure
X-ray Diagnosis		1979	9800	34000
Fluorocopy		1979	1770	1770
Mass-screening	Chest	1975	3300	3300
	Stomach	1975	412	2400
Dental		1980		9800
Radiopharmaceutical	Diagnosis	1977	54	(1950 Ci)
	Therapy	1977	0.6	(27 Ci)
Beam Therapy		1978	7.7	178
Brachy Therapy		1978	2.5	6

確率の影響はこれを遺伝的影響と身体的影響に別けて考えられる。遺伝的欠陥をもたらず放射線誘発による遺伝子突然変異と、ある種の染色体異常疾病の頻度は線量に正比例するとされている⁴¹⁾。又身体的障害は直接本人に関係する白血病や肺、胃、甲状腺の悪性腫瘍である。これ等の障害は非特異性であるため、放射線による影響を判定するには、被曝線量の異なったグループ間の影響発生の確率を比較する以外に方法がない。一方線量(D)と影響(E)の関係は(1)、(2)式の如く考えられ⁴²⁾二次の項は大線量、大線量率で支配的となるので、医療被曝のような小線量(1rad以下)では大線量で求めた影響から、直線的に外挿した影響は過大評価になる恐れがある。

$$E = aD + b G(\tau) D^2 \quad \dots\dots (1)$$

$$G = 2 \cdot \frac{T/\tau - 1 + e^{-T/\tau}}{(T/\tau)^2} \quad \dots\dots (2)$$

ここで

a, b は定数

τ : 平均回復時間

T : 照射時間

医療被曝による確率的リスク(R)を推定して、まず放射線の影響が殆んどなくなるまで生きている[ここでは規準人と言う]について100万人あたり 1rad あたりのリスク[これをここではリスク係数(R₀)と言う]を求め、次いでそのリスクに関係する臓器(例えば遺伝ならば生殖腺)の吸収線量(D)を乗じ、更に年齢による有意因子(S)[例えば遺伝ならば将来生む子供の数に関係する]を乗じて第3式の如くして求められる。

$$R = R_0 \cdot D \cdot S \quad \dots\dots (3)$$

医療被曝による遺伝および身体的リスクについてこの R₀・D・S を求める。

(1) 遺伝的リスク

(i) リスク係数

遺伝的影響の量的評価方法には配偶子に予想される損傷の大きさによって定める直接法と、突然変異を起こす因子をすべて自然のままにしておき、放射線照射によってその値を2倍に高める線量、即ち倍加線量を動物によって求めヒトにあてはめる方法とがある。UNSCEAR では倍加線量を平均0.3Gy (30rem) と推定⁴³⁾しており、この値を低線量、低線量率になおして国連科学委員会では1Gy (100rem) としている、倍加線量を1Gy としたときの生まれてくる子供(第一世代)のリスクは、1rad あたった親から生まれてくる100万人の子供(F₁)あたり63人、平衡状態で185人としている。ここではこの値をリスク係数(gR_0)とし、それぞれ $63 \cdot 10^{-6} \text{rad}^{-1}$ 、 $185 \cdot 10^{-6} \cdot \text{rad}^{-1}$ と表す。又国際放射線防護委員会(ICRP)では個人のリスクとして孫の代まで考えリスク係数を $100 \cdot 10^{-6} \cdot \text{rad}^{-1}$ としている⁴²⁾。

(ii) 遺伝有意因子(G_k)

将来子供を生まない被曝者の遺伝的リスクは被曝線量に関係なく零である。このリスクは被曝者が将来子供を生む確率に明らかに関係している。k 歳の人の将来生む子供の数を規準人の子供の数で割った値を遺伝有意因子(G_k)とする。日本人の1979年の G_k^{*}の値を Table 14に示す³⁴⁾。

Table 14 Genetically Significant Factor

Age	17	22	27	32	37	42	47	52	57	62
Male	0.99	0.97	0.72	0.34	0.092	0.019	0.004	0.001	0.0003	—
Female	0.99	0.92	0.48	0.13	0.007	0.003	0.0001	—	—	—

(iii) 生殖腺線量

各種医療被曝の1件(平均撮影枚数の被曝と透視の被曝を含む)あたりの生殖腺線量を Table 15, 16, 17に示す³⁴⁾.

Table 15 Gonadal dose per examination for X-ray Diagnosis. (mrad)

	Male	Female
Head	0.08	0.06
Chest	0.02	0.11
Photofluorography	0.06	0.21
Stomach	8.5	302
Photofluorography	7.4	106
Lumbar spine	8.4	150
Pelvis	57	162
Urography	23	360
Hip & Joint	285	130
Femur	63	30
Tomo (Chest)	0.7	0.5

Table 16 Gonadal dose per examination for pharmaceuticals (mrad)

	Male	Female
^{99m} Tc Pertechnetate	160	186
Phytate	6	19
Pyrophosphate	145	186
¹³¹ I NaI	18	20
Albumin	230	190
¹²⁵ I NaI	2	3
¹⁹⁸ Au Colloid	13	130
⁶⁷ Ga Acid	570	680
⁷⁵ Se Methyonine	2600	6500
¹³³ Xe in soline	18	14

(iv) 個人のリスク

生殖腺に 1rad あった k 歳の人のリスクは $gR_o \cdot G_k$ であり, 生殖腺の被曝線量を gD_k とすればその人のリスク (gR_k) は (4)式の如くなる.

$$gR_k = gR_o \cdot G_k \cdot gD_k \dots (4)$$

Table 17 Gonadal dose in mrad per 100 rad at the surface for field size 10cm×10cm.

	Co-60	200 kV-X	10 MV-X	10 MeV-E
Lung	90	109	92	62
Stomach	134	209	120	68

X線診断による規準人のリスクは Table 14 の値に生殖腺線量と遺伝の個人のリスク係数($100 \cdot 10^{-5}$)を乗ずればよい. 男性の胃の検査では規準人のリスクは $0.0085 \times 100 \times 10^{-6}$ となるから 0.85×10^{-6} となる. 42歳の人はその値に Table 14 の値0.019を乗じ 1.6×10^{-4} となる.

(v) 集団のリスク

被曝した集団の場合のリスクは (5)式の如く求められる.

$$gR_P = \left\{ \sum_j \sum_k (gD_{jk}^{(M)} \cdot G_{jk}^{(M)} \cdot N_{jk}^{(M)}) + \sum_j \sum_k (gD_{jk}^{(F)} \cdot G_{jk}^{(F)} \cdot N_{jk}^{(F)}) \right\} \times gR_o \dots (5)$$

ここで

j は照射のタイプ

N は人数

(M), (F) はそれぞれ男性, 女性

集団の場合のリスク係数 (gR_o) は $185 \cdot 10^{-6} \cdot \text{rad}^{-1}$ を使用する. なお在来使用されていた遺伝有意線量 (GSD) は (2)式の { } の値をそのグループから将来生まれて来る子供の数で割った値である.

X線診断による遺伝有意線量の主なものを Table 18 に示す.

その他の医療被曝, 放射性医薬品²⁹⁾, 遠隔放射線治療³⁰⁾, 密封小線源治療³²⁾, 集団検診^{22) 23)}, 歯科診断³⁹⁾ による 遺伝有意線量の 各合計を Table 19に示す.

国連科学委員会の報告書に掲載されている遺伝有意線量を比較のため Table 20 に示す^{41) 42) 43)}.

Table 18 GSD for X-ray Diagnosis in mrad person⁻¹ year⁻¹ ($\times 10^{-2}$)

	Male	Female	Total
Head	0.16	0.08	0.24
Chest	0.13	0.55	0.86
Photoflu.	0.007	0.025	0.032
Esophagus	0.16	0.07	0.23
Ba. Meal	25.3	295.5	320.8
Photoflu.	0.03	0.123	0.14
Abdomen	24.3	70.9	95.2
Ba. enema	70.3	206.8	277.1
Lumbar spine	18.1	115.4	133.5
Pelvis	52.5	12.7	65.2
Urography	34.3	18.2	51.5
Bladder	3.6	42.4	46.0
Hystero	—	35.4	35.4
Pelvi. & Obst.	—	34.0	34.0
Hip & Joint	184.4	113.1	297.5
Femur	41.6	3.5	45.1
Comp. Tomo.	13.6	3.5	16.2
Others	25.4	6.0	341.4
Total	535.6	965.2	1501.2

(2) 白血病のリスク

(i) リスク係数

長崎の被爆者（中性子線が非常に少ない）の白血病による致死のリスクは平均335radの被爆者グループで $36 \cdot 10^{-6} \cdot \text{rad}^{-1}$ （100万 man rad で36人）であるが、145, 70および20radの被爆者グループのリスクはそれぞれ21, 16, $14 \times 10^{-6} \text{rad}^{-1}$ となっている⁴³⁾。この値から1 rad 程度の被爆者の

Table 19 GSD for medical irradiation. ($\mu \text{ rad person}^{-1} \text{ year}^{-1}$)

	Male	Female	Total
X-ray Diagnosis	5400	9600	15000
Radiopharmaceuticals	180	180	360
Beam Therapy	40	20	60
Brachy The.	0.3	1.2	1.5
Mass-survey Chest	8	24	32
Stomach	30	123	153
Dental	8	64	72
Total	5666	10012	15678

リスクを外挿すると $13 \cdot 10^{-6} \cdot \text{rad}^{-1}$ となる。ここでいう線量は人体にあたるカーマである。

長崎の被爆者の場合、被爆者のカーマ値と骨髄線量との比は屋外で平均0.61, 日本家屋内で0.69になるので⁴⁴⁾⁴⁵⁾, 1rad あたりのリスクは約 $20 \cdot 10^{-6} \cdot \text{rad}^{-1}$ となる。この値を規準人のリスク、即ち白血病に対するリスク係数 (bR_0) とする。

(ii) 白血病有意因子

広島・長崎の原爆被爆者の中の白血病死亡者の年次分布は Fig. 1の a(t) 曲線の如くなる⁴⁶⁾。この被爆者のグループは生残曲線は A(t) の如くであるので、もし放射線による白血病がなくなるまで死亡しないグループ（規準人）を考えると白血病での死亡は C(t) 曲線の如くなると推定される。今あるグループの生残曲線を B(t) とすればこのグループが放射線を被曝すれば白血病の発生は b(t) 曲線の如くなることが推定される。規準人

Table 20 Frequency of X-ray examination and GSD by country.

country	1962		1972		1977	
	N*	GSD**	N	GSD	N	GSD
Germany	560	18	601	14	1530	41
USA	250	55	475	27	669	20
Japan	410	39	610	26	676	17
Netherland	350	7	810	20	1186	28
UK	280	14	310	9	540	46

N*; Number of examination per 1,000 of population group.
GSD**; m rad.

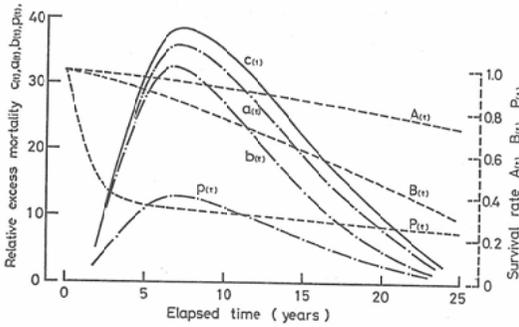


Fig. 1 Schematic drawing for explanation of derivation of leukemia significant factor. The relative excess mortality was estimated from absolute mortality risk⁵⁰⁾ for leukemia in Hiroshima and Nagasaki. $c(t)$ represents the hypothetical mortality on the basis of assumption that no persons received ionizing radiations died at all. $a(t)$ and $b(t)$ show the relative excess mortality for a group of survival rate $A(t)$ and $B(t)$, respectively. $p(t)$ represents the relative excess mortality for a patient group of survival rate $P(t)$. The elapsed time represents a number of years after exposure.

の致死白血病に対する、Bグループの致死白血病の比を白血病有意因子 (L_G) とすれば L_G は (5) 式で与えられる^{18) 19) 22) 34)}。

$$L_G = \int_0^{25} b(t) dt / \int_0^{25} c(t) dt \dots \dots \dots (5)$$

L_G の値を Table 21 に示す。

(ii) 骨髄線量

放射線による白血病の誘発は赤色骨髄の被曝が最も影響すると考えられるが、赤色骨髄は全身に分布しており、その密度、容積とも部位によって異なる。橋本氏等の資料⁴⁸⁾から算出した日本人の赤色骨髄の体内分布を Table 22 に示す。医療被曝の場合は局所被曝になるので、ある部分の骨髄だけが低い値になる。もし白血病のリスクが線量に直線的に比例し、どの赤色骨髄も放射線に対し

Table 22 Active bone marrow distribution

Parts	Bone marrow weight (g)
Skull	55.6
Mandible	1.8
Cervical vertebrae	22.3
Sternum	20.6
Thoracic vertebrae	101.0
Lumbar vertebrae	85.8
Sacral vertebrae	65.8
Ribs	104.5
Scapulae	16.7
Clavicles	5.6
Iliac bone	170.2
Femur	87.0
Arm	28.0
Total	765.0

て同一の感受性があるとすれば、リスクは第6式の赤色骨髄線量 (bD) に比例するとみてよい。

$$bD = \sum_i m_i d_i / \sum m_i \dots \dots (6)$$

ここで

m_i は部位 i の赤色骨髄の線量

d_i は部位 i の赤色骨髄の吸収線量

X線診断³⁴⁾、放射性医薬品²⁸⁾等の1件使用あたりの平均の bD を Table 23, 24, 25, に示す。

(iv) 個人のリスク

医療被曝を受けた K 歳の人の個人の白血病に対するリスク (L_{Rk}) を求めるには、第7式の如くその人の赤色骨髄線量 (bD_k) と、年齢による有意因子 (L_k) にリスク係数 (bR_0) を乗ずればよい⁴⁹⁾。

$$L_{Rk} = bR_0 \cdot L_k \cdot bD_k \dots \dots (7)$$

各X線診断による規準人のリスクは Table 23, 24, 25 の骨髄線量にリスク係数 $20 \cdot 10^{-6}$ を乗ずればよいから、胃では 16.3×10^{-6} となり、40歳の人

Table 21 Leukemic significant factor by age.

Age	12	22	32	42	52	62	72
Male	0.99	0.98	0.97	0.93	0.87	0.56	0.38
Female	0.99	0.99	0.98	0.95	0.90	0.69	0.46

Table 23 Bone marrow dose in mrad per examination

	Male	Female		Male	Female
Head	26	25	Pelvis	36	36
Chest	9	8	Urography	90	76
Photoflu.	33	31	Hip & Joint	12	29
Ba. meal	815	760	Femur	8	9
Photoflu.	450	390	Tomography	68	61
Lumbar spine	44	45	CT (Head)	240	240

Table 24 Bone marrow dose in mrad per investigation

	Male	Female		Male	Female
^{99m} Tc Pertechnetate	220	186	¹²³ I NaI	5	5
Phytate	56	56	¹⁹⁸ Au Colloid	1040	2400
Pyrophosphate	510	500	⁶⁷ Ga Acid	1370	1400
¹²⁵ I Na I	44	44	⁷⁵ Se Methyonine	2900	7300
Albumine	230	185	¹³³ Xe in soline	18	14

Table 25 Bone marrow dose (rad) per treatment (100rad at the surface, Field size)10cm×10cm)

	Co-60	200 kV-X	10 MV-X	10 MeV-E
Lung	2.8	3.1	4.2	1.4
Stomach	7.0	7.9	8.1	1.3
Uterus	6.2	6.8	6.9	1.05

はそれに Table の42歳の L_k 0.93を乗じて15.2×10⁻⁶となる。

(v) 集団のリスク

集団を対象にしたリスク (L_{RP}) は第8式によって求められる⁴⁹⁾。

$$L_{RP} = \{ \sum ({}_b D_{jk}^{(M)} \cdot L_{jk}^{(M)} \cdot N_{jk}^{(M)} + {}_b D_{jk}^{(F)} \cdot L_{jk}^{(F)} \cdot N_{jk}^{(F)}) \} {}_b R_0 \dots (8)$$

Table 26 LSD by type of examination for X-ray Diagnosis (mrad person⁻¹ year⁻¹)

	Male	Female	Total		Male	Female	Total
Head	0.37	0.28	0.65	Urography	0.55	0.32	0.87
Chest	1.20	0.94	2.14	Bladder	0.14	0.11	0.25
Esophagus	1.28	1.05	2.33	Histero	—	0.30	0.30
Ba. meal	34.8	25.0	60.8	Pelyimetry Obstetric	—	0.15	0.15
Abdome	0.91	0.82	1.73	Hip & Joint	0.12	0.13	0.25
Ba. enema	4.09	4.32	8.41	Tomography	0.22	0.11	0.33
Lumnar spine	0.99	0.86	1.85	Computer Tomo.	1.73	0.79	2.52
Pelvis	0.05	0.07	0.12	Others	1.61	2.55	4.16
				Total	48.1	37.8	85.9

なお在来使用されていた白血病有意線量 (LSD) は第8式の { } 内を人口で割ればよい。日本人のX線診断による LSD³⁴⁾ を Table 26 に示す。その他放射性医薬品²⁸⁾、歯科³⁹⁾、遠隔放射線治療³⁰⁾、密封小線源治療³²⁾による LSD の合計を Table 27 に示す。

なお国連科学委員会の報告書では *per caput* mean marrow dose (CMD) として、白血病有意因子を乗じていない各国の値 (${}_b R_0 \cdot {}_b D_k$) が出ているので、比較のため Table 28 に示す⁴¹⁾。

日本は最も高い値を示しているが、その大部分が消化器であり、胃の値を除いて比較するとオランダや英国とはほぼ同じである。米国は尿路系や脊椎の線量が多い。

Table 27 Leukemia significant dose for medical irradiation (mrad person⁻¹ year⁻¹)

	Male	Female	Total
X-ray Diagnosis	48.1	37.8	85.9
Radioharmaceuticals	0.9	1.1	2.0
Beam Therapy	6.8	23	29.8
Brachy Therapy	0.12	2.5	2.6
Mass-survey	Chest	4.1	9.3
	Stomach	5.6	14.5
Dental	0.54	0.64	1.2
Total	70.6	74.7	145.3

Table 28 *per caput* mean bone marrow dose for X-ray diagnosis by country. (mrad P⁻¹ Y⁻¹)

	Japan	Netherland	Sweden	UK	USA
Chest	2.8	8.1	—	1.8	3.2
Photoftu.	9.7	3.8	9.9	7.8	3.2
Ba. meal	76.7	0.1	12.0	1.2	24.3
Photoftu.	16.5	—	—	—	—
Rectum	10.8	3.1	15.0	2.2	21.2
Others	16.2	14.9	53.1	21.1	54.3
Total	132.7	30	90	32.3	103.0
Total(except for)stomach	39.5	29.1	78	31.1	78.7

(3) 悪性腫瘍のリスク

(i) がん有意因子 (MSF-M_k-)

広島・長崎の原爆被曝者の中から白血病以外の悪性新生物の患者が1960年頃から始め次第に増加したその死亡者の合計を person year rad あたりで示すと Fig. 2 の実線の如くなる。将来更らにどのように死亡するかは不明であるが、白血病のように次第に減少して規準人の場合 Fig. 2 の C(t) 曲線の如くなるとすると、年齢 k 歳の人の規準人に対する有意因子 (M_k) は第7式で与えられる⁴⁹⁾。

$$M_k = \int_0^{\infty} b(t) \int_0^{\infty} c(t) \dots \dots \dots (9)$$

この値を Table 29 に示す。

(ii) リスク係数 (mR)

長崎の被曝者の中で昭和32年~35年頃から甲状腺、胃、肺、乳がん等が発生し、放射線によるがんによる超過死亡率が有意の差となって現れ始めた。放射線影響研究所 (RERF) の研究⁵⁰⁾による

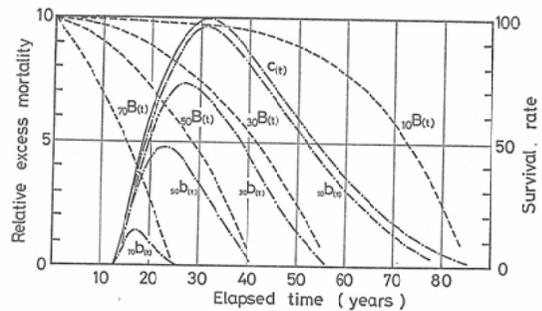


Fig. 2 Schematic drawing for explanation of derivation of malignancy significant factor. The relative excess mortality risk⁵⁰⁾ for malignant diseases in Hiroshima and Nagasaki. b(t) represents the hypothetical mortality on the basis of assumption that no persons received ionizing radiations died at all. b(t) shows the relative excess mortality for a group of survival rate B(t). The figure the right-hand side of the symbols b and B represent the age at which a person received medical irradiation. The elapsed time shows a number of years after exposure.

Table 29 Malignancy significant factor by age and sex

Age	2	12	22	32	42	52	62	72
Male	0.93	0.87	0.74	0.54	0.34	0.18	0.05	0.004
Female	0.94	0.91	0.82	0.65	0.45	0.26	0.10	0.02

Table 30 Risk of fatal malignancies

Organ or tissue with respect to malignant disease	Absolute mortality risk 10^{-6} PYR ^{a)}	Risk per kerma R/K (10^{-6} rak ⁻¹) 1945—1978	Risk per kerma R/K (10^{-6} rad ⁻¹) 1945— ^{b)}	RATA ^{c)}	Risk per dose R/D	Weighting factor W_T
Lung	0.34	9.5	23	0.75	30	0.20
Stomach	0.48	13.4	32	0.65	50	0.30
Larpe intestine	0.09	2.5	6.1	0.60	10	0.06
Other digestive	0.21	5.9	14.1	0.66	23	0.14
Bladder & Urinary organs	0.13	3.6	8.7	0.63	15	0.08
Lymphatic & Hema topietic (except Leukemia)	0.12	3.4	8.1	0.64	13	0.08
Thyroid	0.04	1.1	2.7	0.69	4	0.02
Breast	0.23	6.4	15.4	0.71	(20)	(0.12)
Total					165	1.00
Leukemia		13.0	13.0	0.69	20	

- a) PYR: per pear year per rad in tissue kerma in air.
- b) The total number of death in future including the numbers up to date.
- c) RATA represents the ratio of organ or tissue dose to tissue kerma in air.

と1978年まで Person year Rad (PYR) あたりの絶対超過死亡数は Table 30 の2行目の如く、例えば肺がんで $0.34 \cdot 10^{-4}$ PYR となり、1978年までの超過死亡数は第3行目の如くなる。今後もし Fig 2 の如く死亡者が出るとすると規準人の死亡者の数は今の2.4倍となるので、Table 30 の4行目の如くなる。ここで使用している線量はカーマであるから、これを長崎の原爆の各臓器の吸収線量になおすには第5行目の RATA⁴⁹⁾ を使用し各臓器 1 rad あたりのリスク係数として第6行目の値を得ることが出来る。その合計は女性で $165 \cdot 10^{-6}$ で男性で $145 \cdot 10^{-6}$ である。

(iii) 実効線量

放射線を全身に均等に照射されたときも、医療被曝のように局所被曝であった場合も、そのリスクを平等に評価するための実効線量 (mD) は第8式によって与えることが出来る⁴⁰⁾。

$$mD = \sum_T D_T \cdot W_T$$

ここで D_T は各臓器の吸収線量、 W_T は、全身が均等に照射されたとき、組織 (T) の照射による確率的影響のリスクの、リスク全体に対する割合を表わす荷重係数で、医療被曝の場合ここでは前項の Table 30 の第7行目の W_T 値を用いる。

X線診断1回あたりの各臓器、組織の吸収線量 (D_T) を Table 31 に示す³⁴⁾。又放射性医薬品 1mCi 投与あたりの臓器・組織線量を Table 32 に示す⁵¹⁾。

これ等の臓器又は組織線量と荷重係数との積和として求めた検査1件あたりの実効線量 (eD) を Table 33, 34, 35に示す。

(iv) 個人のリスク

医療被曝を受けた k 歳の人の個人の悪性腫瘍に対するリスク (mR_k) を求めるには、第9式の如く、その人の実効線量 (mD_k) と、年齢によるが

Table 31 Organ and tissue dose and effective dose per exposure (mrad) —Male—

Organ or Tissue	Radiography								Fluoro.
	Thy.	Lung	Stomach	L. Int-	O.D.	Blad.	Lym.	D _T W _T	D _T W _T
Head	32	1.8	0.02	0.02	15	0.03	12	4	57
Chest (P-A)	1	11	3.5	0.02	1.0	0.01	7	5.9	168
(Lateral)	7	36	9	0.05	3	0.03	15		
Barium meal	0.3	17	50	3	51	5	23	29	850
Barium enema	0.04	0.63	19	150	23	40	39	23	680
Lumbar Spine	0.31	31	105	105	54	65	8	59	890
Urography	0.25	3.1	155	95	69	33	9	66	740
Hip & Joint	0.14	0.1	10	110	9.6	49	7	16	210
Tomography (Chest)	0.2	240	177	0.7	65	0.3	40	112	—
CT (Head)	26	3	0.3	0.17	40	0.1	26	10	—
Photofluography Chest Stomach	5	94	15	6.8	10	1	33	28	—
	3	70	210	10	195	15	43	110	165

Thy.: Thyroid, L. Int.: Large intestine (except for rectum), O.D.: Othe. digestive organ,
Blad.: Bladder and Other organ in the pelvic region, Lym.: Lymphatic and hematopoietic.

Table 32 Organ or tissue dose for pharmaceuticals (marad/mCi)

	Thy.	Lung	Stomach	L. Int.	O.D.	Blad.	Lym.	Breast
^{99m} Tc Pertechnetate	384	18	73	22	20	20	23	11
Phytate	14	18	20	21	20	20	16	11
Phyrophosphate	16	25	25	25	150	18	62	13
¹³¹ I NaI	23	550	260	240	230	230	470	320
Albumin (× 10 ²)	21	22	24	24	23	24	22	18
Hippuran	11	10	12	12	12	10	10	9
¹²³ I NaI	2610	129	28	26	25	26	50	26
¹⁹⁸ Au	87	790	710	840	4600	790	3420	39
⁷⁵ Se (× 10 ²)	113	130	94	94	87	90	91	45
⁶⁷ Ga	210	260	360	300	670	240	790	180

Table 33 Effective dose per examination of X-ray diagnosis by type of examination (mrad)

	Male	Female		Male	Female
Head	16	17	Pelvis	67	51
Chest	10	10	Urography	155	266
Photoflu.	28	31	Hip & Joint	28	25
Ba. Meal	1140	1010	Angio Cardio	1200	1430
Photoflu.	1190	915	Femur	11	12
Ba. enema	1200	1020	Tom. (Chest)	950	1090
Lumbar Sp.	183	165	Computer Tomo.	102	113

Table 34 Effective dose per examination of pharmaceuticals by (mrad)

		Male	Female			Male	Female
^{99m} Tc	Pertechnetate	440	380	¹³¹ I	Hippuran	0.5	0.6
	Phytate	180	140	¹²³ I	NI	57	59
	Phyrophosphate	160	160	¹⁹⁸ Au		1360	1020
¹³¹ I	NaI	4170	4170	⁷⁵ Ga		5300	2200
	Albumine	186	245	⁶⁷ Se		610	620

Table 35 Effective dose in rad per 100rad at the surface for the field size 10cm×10cm.

	Co-60	200 kV-X	10 MV-X	10 MeV-E
Lung	3740	3380	3820	170
Stomach	8530	6450	11610	420
Uterus	3425	3140	4250	340

Table 36 Malignancy significant dose for X-ray diagnosis (mrad person⁻¹year⁻¹)

	Male	Female	Total		Male	Female	Total
Head	0.3	0.2	0.5	Urography	0.9	0.4	1.3
Chest	0.5	0.4	0.9	Bladder	0.05	0.05	0.1
Photoflu.	2.9	2.3	5.2	Hystero	—	0.26	0.26
Ba. Meal	16.6	12.6	29.2	Plevimetry & Obsteric	—	0.11	0.11
Photoflu.	0.6	0.5	1.1	Hip & Joint	0.06	0.07	0.13
Abdomen	0.3	0.2	0.5	Femur	0.01	—	0.01
Ba. Enema	0.9	1.2	2.1	Compjter T.	0.73	0.29	1.02
Lumbar Sp.	1.6	1.3	2.9	Others	2.15	1.82	3.97
Pelvis	—	0.1	0.1	Total	28.0	21.9	49.9

有意因子 (M_k) の積に、がんのリスク係数 mR₀ を乗ずれば求められる⁴⁹⁾。

$$mR_k = mR_0 \cdot M_k \cdot mD_k \quad \dots\dots (9)$$

X線診断による規準人の致死的悪性腫瘍のリスクは Table 33 の実効線量の値に 165・10⁻⁶ を乗ずれば求められるから、胃では 188・10⁻⁶ となり、42 歳の人のリスクはこの値に Table 29 の M_k 0.34 を乗じて 64×10⁻⁶ となる。

(v) 集団のリスク集団を対象にしたリスク mR_p は第10式で求められる⁴⁹⁾。

$$mR_p = \left\{ \sum_j \sum_k (\epsilon D_{jk}^{(M)}, M_{jk}^{(M)}, N_{jk}^{(M)}) + \sum_k \epsilon D_{jk}^{(F)}, M_{jk}^{(F)}, N_{jk}^{(F)} \right\} \cdot mR_0 \dots\dots (10)$$

なおがん有意線量 (MSD) は第10式の { } を人口で割れば求められる。日本人のX線診断による MSD を Table 36 に示す。

その他、放射性医薬品⁵¹⁾、歯科⁵⁰⁾、遠隔放射線治療⁵²⁾、密封小線源療⁵³⁾による MSD を Table 37 に示す。

(4) 個人の総リスク

放射線による診断、又は治療を受けると前項までに検討した如く大なり小なり遺伝的リスクと身体的リスクを同時に受けることになるので、個人としてはそれ等の合計のリスクを考える必要がある。遺伝のリスクは第4式、白血病は第7式、がんは第9式によって求められる。即ちk才の人の総リスク (TR_k) は第11式の如くなる。

$$TR_k = gR_k + lR_k + mR_k = gR_0 \cdot G_k \cdot gD_k + bR_0 \cdot L_k \cdot bD_k + mR_0 \cdot M_k \cdot mD_k \quad \dots\dots (11)$$

ここで gR₀、bR₀、mR₀ はそれぞれ 100, 20, 165 (×10⁻⁶) である。

Table 37 Malignancy significant dose for Medical irradiation (mrad person⁻¹ year⁻¹)

	Male	Female	Total		Male	Female	Total
X-ray Diagnosis	24.1	19.0	43.1	Mass survey Chest	2.7	2.8	5.5
Radiopharmaceuticals	1.7	1.5	3.2	Stomach	0.6	0.5	1.1
Radiation Therapy	1.0	3.0	4.0	Dental	0.4	0.6	1.0
Total						27.4	57.9

Table 38 Total RISK for X-ray examination ($\times 10^{-6}$)

Age	SM	12	22	32	42	52	62
Head	2.9	2.5	2.2	1.8	1.3	0.9	0.5
Chest	1.7	1.6	1.3	1.1	0.7	0.5	0.3
Photoflu.	5.2	4.4	4.0	2.7	1.6	0.8	0.2
Ba. Meal	205	176	156	117	79	48	19
Photoflu.	73	65	56	42	28	17	7
Ba. Enema	222	199	176	130	88	58	30
Lumbar Sp.	32	28	24	18	11	6	2
Uuography	59	52	44	32	20	11	4
Hip & Joint	41	40	39	19	3	2	0.5
Tomo (Chest)	140	122	104	76	48	26	8

Table 39 Total RISK for Radiopharmaceuticals Mal ($\times 10^{-6}$)

Age	SM	12	22	32	42	52	62
^{99m} Tc pertechnetite	93	84	74	48	29	17	6
Phytate	31	27	23	17	11	6	2
Phyrophosphate	43	41	38	25	16	12	7
¹³¹ I NaI	690	600	513	373	235	125	35
Albumine	58	54	49	28	14	9	4
¹²⁵ I NaI	9.7	8.5	7.3	5.3	3.5	1.8	0.5
⁷⁵ Se	418	406	384	199	94	69	37
¹⁶⁷ Ga	959	835	728	517	324	182	59
¹⁹⁸ Au	246	217	188	141	96	58	23

Table 40 Total RISK of isometric irradiation for whale body (10^{-6})

		SM	2	12	22	32	42	52	62	72
Male	Leukemic	20	20	20	20	19	19	17	14	6
	Malignant	145	135	126	107	78	49	26	7	0.6
	Genetic	100	100	100	97	34	2	0.2	—	—
	Total	265	255	246	224	121	70	43	21	7
Female	Leukemic	20	20	20	20	20	19	18	16	11
	Malignant	165	155	150	135	108	75	43	17	2
	Genetic	100	100	100	92	12	0.3	—	—	—
	Total	285	275	270	247	140	94	61	33	13

X線診断の場合の rR_k を Table 38 に、放射性医薬品を Table 39 に示す。

全身的等照射を受けた場合の個人の総リスクは Table 40 の如くなる。

(iii) 胎児被曝

妊娠中のリスクは着床前と胚および胎児の3つの時期に分けて考えられる⁵²⁾。

1) 着床前

受精卵が子宮に着床する前の時期の主なリスクは着床不能、つまり子宮内死亡である。動物実験データから ICRP⁴⁹⁾ では $8 \times 10^{-3} \text{rad}^{-1}$ と考え、その時期の長さを8日程度としている。

2) 胚

胚発生期の主なリスクは、主要器官形成期中に起こる損傷による奇形のリスクである。即ち局所器官系の損傷であって、発育が妨げられることは余りないが、広島・長崎のデータでは小頭症や精神薄弱者が有意に増加している。主要器官形成期は着床からほぼ35日とされている。ICRP ではリスクを $5 \times 10^{-4} \text{rad}^{-1}$ としている。

3) 胎児

妊娠4ヵ月以後の時期での胎児被曝では10歳以下の小児期におこる悪性疾患による死亡率の増加が示されている。その後の成長に多少の鈍化と、奇形も起こることが考えられるが、放射線診断程度の被曝で起こる可能性のあるものは小児白血病等の悪性疾患である。ICRP ではリスクとして $2.3 \times 10^{-4} \text{rad}^{-1}$ と考え、時期は7ヵ月としている。

以上のリスクの中着床前のリスクを除いて胚と胎児のリスクについてX線診断の場合について検討してみる。「つわり」を胃腸障害と間違えて透

視する場合が多い。このときは主に胚のリスクで、胚には Table 41 にあるように約 300m rad あたる。したがってリスクは 1.5×10^{-4} となる。大腸の透視ではリスクは3倍程度になる。即ち1万人中1~2人が奇形になると考えられる。妊娠初期に行われる胸部直接撮影は胚にあたる線量は0.1m rad 程度であるので問題はないが、不注意に大照射野で照射すると100倍後リスクが増える。最も問題になるのは骨盤計測等の産科撮影である。被曝線量も1~2 rad にもなるからリスクは $2 \sim 5 \times 10^{-4}$ となる。日本全体でも年間40万枚撮影されているから、リスクは120即ち年間120人の致死的小児性疾患が出ることになりこれは年間出生児数0.01%近くなる。

(5) 医療被曝による日本人全体のリスク

放射線による診断と治療によって受ける医療被曝全体によって日本人がどの程度のリスクを受けているかを算出してみる。算出方法は前項までに求めた遺伝、白血病、悪性腫瘍の各有意線量にそれぞれのリスク係数を乗じた値に日本人の人口を乗ずれば求められる。その値を Table 42 に示す。

3. 医療被曝の正当性

放射線による診断、治療は直接被検者個人に対する利益をもたらすものである。他の多くの被曝とその評価はやや異にしている。しかしたとえ被検者自身になんらかの利益があるとしても、それが正当化されるには放射線を受けたことによる損失よりも、利益が大きくなってはならない。又もし放射線以外の診断、治療方法があれば、その損益をも考慮して比較する必要がある。ここでは集団検診と一般診断のいずれも胸部と胃部の場

Table 41 Radiation-induced effects during Pregnancies.

Phase	Prior to implantation	Embryo	Foetus
Risk	8×10^{-3}	5×10^{-4}	2.3×10^{-4}
Ba. meal (morning sickness) 300 mrad		150×10^{-6}	
Chest 0.1 mrad	1×10^{-6}		
Pelvimetry and Obstetric exam. 1—2 rad			$230—460 \times 10^{-6}$

Table 42 Total RISK for Medical Irradiation.

		Male	Female	Male	Female	Male	Female	Total
X-ray Diagnosis.	Radiography	4.5	5.5	18.5	14.3	9.5	7.0	
	Fluoroscopy	0.8	4.2	29.6	23.5	14.6	12.0	
Radiation Therapy		0.04	0.02	6.8	15.9	1.0	3.0	
Radiopharmaceutical		0.2	0.2	0.9	1.1	1.7	1.5	
Mass survey.	Chest	0.01	0.02	5.2	4.1	2.7	2.8	
	Stomach	0.03	0.12	5.9	3.8	4.8	4.0	
Dental		0.008	0.006	0.5	0.6	0.4	0.6	
Total		5.6	10.1	67.4	63.3	34.7	30.9	
Risk factor		185	185	20	20	165	165	
Risk per 10 ⁶ person		1.04	1.87	1.35	1.27	5.73	5.10	16.4
Risk of all Japanese		339		305		1261		1905

合について検討する。

X線検査をおこなった場合の損益の評価の対象は種々ある。例えば生死の問題、遺伝的問題、費用の問題、代替方法の問題、更らに精神的な問題までであるが、ここでは生命の延長と短縮、並びに一部費用の面で検討する。まず一般人を対象にしたX線間接撮影による集団検診で「がん」が発見され、それによって救命された年数と、X線を使用することによって骨髄および臓器、組織に受けた放射線によって発生した白血病又は悪性腫瘍によって死亡することによる損失年数を比較してみる。

(1) 胸部集検

(i) 損失

胸部間接撮影による骨髄線量は Table 23 により男33m rad, 女31m rad, 実効線量は Table 33により男28m rad, 女31m rad である。放射線による白血病と悪性腫瘍（以下がんと言う）によるリスク係数はそれぞれ $20 \cdot 10^{-6} \cdot \text{rad}^{-1}$ [2 (2) (i)], $165 \cdot 10^{-6} \text{rad}^{-1}$ [2 (3) (i)] である。したがって間接撮影による規準人のリスクは白血病では男 $0.66 \cdot 10^{-6}$ 女 $0.64 \cdot 10^{-6}$, がんでは男 $4.6 \cdot 10^{-6}$, 女 $5.1 \cdot 10^{-6}$ である。各年齢のリスクはこの値にそれぞれ白血病有意因子とがん有意因子を乗ずれば求められる⁴⁹⁾。次に白血病やがんになったk歳の人の生命の損失年数は被曝した人の被曝時の年

齢の平均余命 (e_k) から、白血病又はがんで死亡した人の被曝後の平均生存年数 (t_k) を除去すれば求められる。 e_k は厚生省の統計情報部の簡易生命表の値を用い、 t_k は Fig. 1, 2 から求めた各年齢の平均死亡年数を用いて、胸部間接撮影による余命の損失 (cF_k) は第12式で与えられる。

$$cF_k = {}_bR_o \cdot {}_bD_k \cdot L_k (e_k - t_k) + {}_mR_o \cdot {}_mD_k \cdot M_k (e_k - m t_k) \dots\dots (12)$$

ここで

${}_bR_o, {}_mR_o$ は白血病とがんのリスク係数でそれぞれ $20 \cdot 10^{-6} \text{rad}^{-1}$, $165 \cdot 10^{-6} \cdot \text{rad}^{-1}$

${}_bD_k, {}_mD_k$ はk歳の人の骨髄線量と実効線量

L_k, M_k はk歳の人の白血病およびがん有意因子

第12式で計算した値を Table 43 に示す。

(ii) 便益

集検による便益は集検によって見つけられた限局型の肺結核が進展型に進まず治癒されたために延びた余命 (Y) とすると第13式によって求められる。

$$Y = (e_k - t_k) P \cdot {}_mP (\gamma_a - \gamma_m) \dots\dots (13)$$

ここで

P は限局型から進展型への移行率

${}_mP$ は限局型の発見患者数

γ_a, γ_m はそれぞれ進展型、限局型の超過死亡率

Table 43 Life loss and life-saving as a function of age for chest mass screening. ($\times 10^{-6}$)

Age		12	22	32	42	52	62
Life loss	Male	119	73	42	22	11	4
	Female	181	130	78	45	17	6
Life-saving	Male	6	16	40	90	190	340
	Female	6	13	30	60	120	190

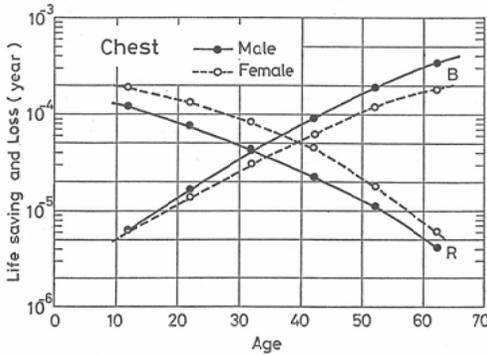


Fig. 3 Comparison of life-saving and life-loss as a function of the age as which a person received a chest mass screening. The symbols B and R represent the benefit of life-saving and radiation risk from the chest mass screening.

第13式で計算した延命を10歳間隔で Table 43 に示す。

Table 43 の余命の損失と延命の関係を Fig. 3 に示す。損益のバランスのとれるのは男で32歳、女で39歳程度である。高校生、大学生等の若年層が結核予防法により強制的に受診されていることを早急に改める必要がある。

(iii) 医療費の便益について検討すると早期発見による医療費の節約は入院医療費を1カ月約0.5万円とすると人口10万人あたり男150~1,600万円、女150~620万円となりこれに感染予防分の10%を加えても、10万人の集検費3,170万円より遙かに安い。これ等の値を Fig. 4 に示す。

(ここで使用した便益、医療費は昭和53年厚生助成研究費橋詰班の報告にある森享氏の資料から計算したものである。

(2) 胃集検

(i) 損失

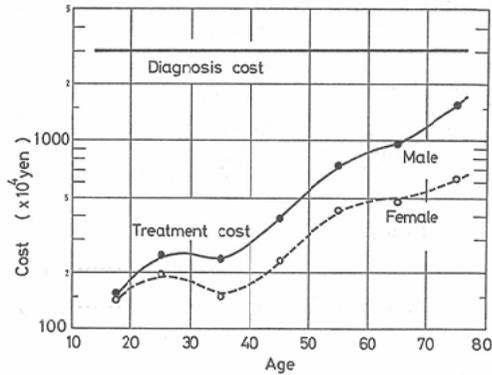


Fig. 4 Comparison of cost for chest mass screening and cost for treatment of tuberculosis as a function of age of patients.

胃間接撮影による骨髄線量は Table 23 により男450m rad、女390m rad、実効線量は Table 33 により男1190m rad、女985m radである。したがって間接撮影による規準人のリスク(リスク係数)は白血病では男 9.0×10^{-6} 、女 7.8×10^{-6} 、がんでは男 196×10^{-6} 、女 162×10^{-6} である。胸部集検の場合と同様にして第14式によって余命の損失が求められる。

$$sF_k = {}_bR_o \cdot {}_bD_k \cdot L_k (e_k - L_k) + {}_mR_o \cdot {}_mD_k \cdot M_k (e_k - m_k) \dots (14)$$

記号は第13式と同じである。第14式で計算した値を10歳間隔で示すと Table 43の如くなる。

(ii) 便益

胃集検により発見された胃がん患者の中には治療出来ずに死亡する人がいる。それ等の人達の平均余命をAとする。一方罹患する患者で死亡する人と同じ年齢の人の平均余命をBとすれば便益はB-Aとなる。A、Bはそれぞれ第15、16式で与えられる。

Table 44 Life loss for stomach mass screening (10^{-6})

Age	12	22	32	42	52	62
Male	450	290	170	70	20	5
Female	490	350	200	100	30	10

Table 45 Life-saving for stomach mass screening.

Age		12	22	32	42	52	62	72
Disease rate (10^{-5})	Male	0.63	1.26	4.76	18.5	78.0	222	452
	Female	0.63	1.26	6.47	18.7	43.7	95	200
Life expectancy	Male	62	53	43	34	25	18	10
	Female	67	58	48	38	29	21	12
Life-saving (10^{-5} year)	Male	19	34	103	317	1008	2014	2278
	Female	22	37	156	358	640	1000	1200

$$A = PD_k \{f(1-w) + (1-f)(1-w')\} e_k \dots (15)$$

$$B = PD_k (1-W') e_k \dots (16)$$

ここで

Pは検受診人口

D_k はk歳の人の胃がん罹患率

fは胃間接撮影の有がん正診率

Wは集検で発見された胃がん患者の治癒率

W'は病院外来胃がん患者の治癒率

したがって便益(Y)は第17式の如くなる。

$$Y = B - A = P \cdot D \cdot f \cdot e_k (W - W') \dots (17)$$

これ等の値について必ずしも十分な精度のものはないが、ここでは次の様に仮定する。

$$f = 0.9, w = 0.73, w' = 0.17$$

DはTable 45の2, 3列目

これ等の値から計算した便益をTable 45の6, 7行目に示す。

Table 44の損失とTable 45の便益をFig. 5に示す。損失と便益は男女共31~32歳で交叉する。但しこの骨髄線量と実効線量は平均値であり、我々が実態調査で測定したものの中にはこの2倍以上の線量を必要としているものもあるので、損益判定は十分注意が必要である。又逆に高分解能、高感度のIIを使用している場合はその線量は1/10以下になる場合もあるので、20歳前後でもバランスがとれることになる。

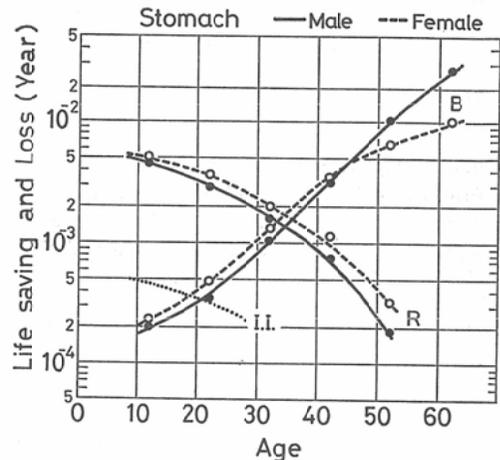


Fig. 5 Comparison of life-saving and life-loss received as a function of the age as which a person received a stomach mass screening. The symbols B and R represent the benefit of life-saving and radiation risk. The real lines and the broken lines represent the life-saving and radiation risk from the stomach mass screening by means of mirror camera systems. The dotted line represents life-saving and risk from the stomach mass screening by means of imaging intensifier system for male.

以上は 逐年検診の結果であるが1年間隔、2年間隔とすると、胃がんの発見率がそれぞれ1.4倍、2倍となる。しかし一方集検によって見つけた患者の治癒率は0.65、0.57となるので第17式のB-Aの値は1.45倍、1.73倍となる。2年以上間

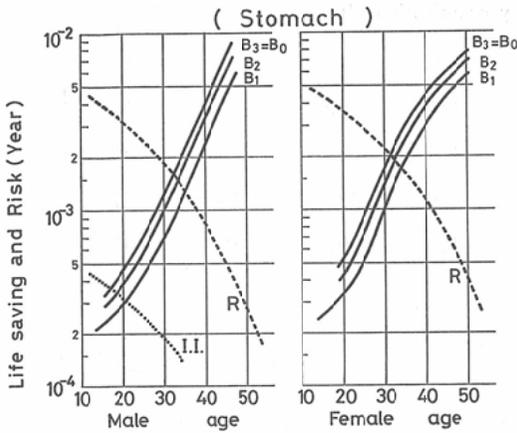


Fig. 6 Comparison of life-saving and life loss as a function of age for chest and life loss as a function of age for chest and stomach mass screenings. B₁, B₂ and B₃ represent the life-saving from stomach mass screening received once a year, once two years and once three years, respectively

隔をあけても、利益は殆んど変わらない。逐年、1年間隔、2年間隔の値を Fig. 6 に示す。この図から集団として胃集検の効率を考えるとある一定の検査能力（例えば年間500万とか）しかない場合は、毎年同じ集団を検査するより少なくとも同じ集団を2年以上間隔をあけて検査した方が有効である。被検者個人について考えると、初回は相当若い年齢でも有効であるが、次回からは損益

は $(B_n - R)/n$ の値を考え (n は間隔年数) 最も効率よくするのがよい。例えば2回目は3年後、その次は2年後として40歳過ぎたら逐年と言う方法もある（ここで使用した便益は (1) の場合と同じ橋詰班の報告にある飯沼氏の資料から計算したものである）。

(3) 一般診断

(i) 損失

X線による直接撮影、又は透視による寿命の損失 (F_k) は集検の場合と同様に第18式により求められる。

$$F_k = {}_bR_0 \cdot {}_bD_k \cdot L_k (e_k - L_k) + {}_mR_0 \cdot {}_mD_k \cdot M_k (e_k - M_k) \dots (18)$$

ここで各記号は第12式と同じである。

各年齢の寿命の損失を胃と胸部について、性別に Table 46 に示す。

胃の診断によるリスクは単純平均で 1.6×10^{-3} で間接撮影の平均 1.1×10^{-3} より約45%高いが、胸部のリスクは単純平均で 1.5×10^{-5} で、間接撮影の 4.5×10^{-5} の約1/3である。

(ii) 便益

胃のX線検査を受けた人の中で他の部位に主病変の存在を知られていない場合、X線によって異常が認められた人は平均30%であった。その中20%が悪性腫瘍とし、胃の検査を受けた人数に集検のときの年齢別罹患率を用い、荷重平均を6%

Table 46 Life loss for X-ray Diagnosis

Age		12	22	32	42	52	62
Stomach (10 ⁻³)	Male	4.5	2.8	1.5	0.61	0.19	0.08
	Female	7.2	5.2	3.2	1.7	0.47	0.03
Chest (10 ⁻⁵)	Male	4.0	2.6	1.4	0.57	0.19	0.08
	Female	6.9	5.0	3.0	1.5	0.45	0.03

Table 47 Disease rate of out patient (10⁻²)

Age		22	32	42	52	62
D.R.	Male	0.09	0.40	1.3	3.1	15.4
	Female	0.09	0.52	1.3	3.0	6.6

Table 48 Life-saving for X-ray examination (10⁻²)

Age		12	22	32	42	52	62
Stomach	Male		0.7	2.6	6.0	11	38
	Female		0.8	3.7	7.6	13	19
Chest	Male	0.36	3.2	8.0	10.6	15	17
	Female	0.46	2.1	5.0	9.1	13	18

(0.3×0.2) としたときの罹患率を Table 47に示す。

胃がんが発見され、治癒した人の余命の延長 (Y) は第19式で与えられる。

$$Y = D \cdot f \cdot e_k \cdot W \quad \dots\dots (19)$$

ここで

D は胃 X 線被検者の胃がんの罹患率

f は有病正診率 (0.9)

e_k は k 歳の人の余命

W は治癒率 (0.17)

胸部撮影の場合は間接の場合と同様に、余命の延長 (Y) は第20式で与えられる。

$$Y = (e_k - t_k) P \cdot mP (\gamma_a - \gamma_m) \quad \dots\dots (20)$$

mP (限局型の発見率) は限局型の発見に年間胸部撮影者の1/20を要したとする。他の係数は集団検診の場合と同じとする。

年齢別の延命の長さを Table 48 に示す。

Table 46, 48を Fig. 7に示す。

胸部の場合は20歳を過ぎれば1000倍以上の利益があるが、胃の場合は10倍以上の差のつくのは30歳以上である。しかし実際には胃の場合は潰瘍の発見等ががんの発見の数倍ある。胸部の場合も結核以外に肺がんの発見もあるが、肺門部の場合は陰影が重なり、発見しにくく、又発見しても治癒率が悪いので損益曲線の差 (B_c-R_c) には大きな違いはない。これにひきかえ胃潰瘍の治癒率は大変よいので、これを0.6とし、潰瘍による余命の短縮を仮りに10%として便益を計算する Fig. 7の鎖線の如くなり、25歳以下の人でもその利益は100倍程度になる。その他の部位についても検討したが、いずれの場合も一般診断では利益が相当上まわっている。

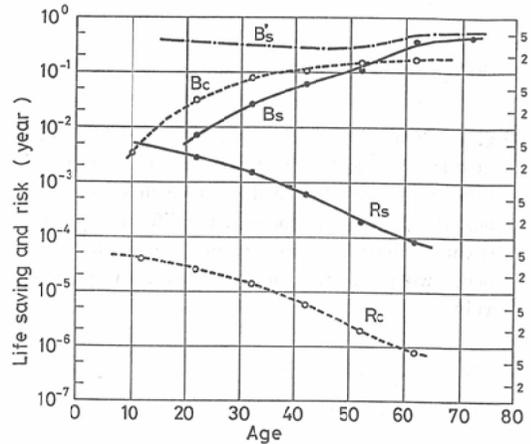


Fig. 7 Comparison of life-saving and life-loss as a function of age for chest and barium meal radiographic examinations. The symbol B_s' represents life-saving for stomach diseases other than stomach cancer. B_s and B_c represent lifesavings expected from barium meal and chest radiographic examinations, respectively. R_s and R_c represent life-loss from barium meal and chest radiographic examinations, respectively.

(4) 医療被曝以外のリスクとの比較

(i) 他の放射線による被曝

1) 宇宙線や大地からの放射線は地球上どこにいても受けているが、場所によって相当の差がある。年間100 mrad を越えている県は、岐阜、滋賀、石川、愛媛県等である。地区別に空間照射線量を Table 49に示す⁵³⁾。

2) この外、我々の体内にも ⁴⁰K 等があり年間生殖腺に20 mrad 近い値の被曝がある。

3) 原子核爆発の実験によるフォールアウトの影響も一時は年間数 m rad になったが、現在は 0.1m rad 以下である。

Table 49 Back ground dose in mrad of various districts in Japan.

District	Dose	District	Dose	District	Dose
Hokkaido	70	Hokuriku	93	Shikoku	90
Tohoku	67	Chubu	90	North Kyusnu	85
North Kanto	84	Kinki	90	South Kyushu	77
South Kanto	56	Chugoku	84	Okinawa	70

Table 50 Occupationale exposures in Japan

		Number of workers (10 ³)	Collective Dose (man rem)	Mean Dose (mrem)	
Medical	Male	75.2	5125	68.2	
	Female	28.6	888	31.0	
Industry	NDI	Male	3.7	446	
		Female	—	—	
	Others	Male	22.0	274	12.5
		Female	0.93	8.6	9.3
Reserch & Education	Male	18.7	61.5	3.2	
	Female	1.9	2.8	1.5	
Atomic Energy	Male	18.0	430	24	
	Female	0.24	0.41	1.7	
Nuclear Power	Male	34.2	13320	389	
	Female	—	—	—	

Table 51 Population doses from occupational exposure. (μ rad person⁻¹ year⁻¹)

		GSD	LSD	MSD	
Medical	Male	24.1	18.3	7.0	
	Female	1.1	3.4	1.9	
Industry	NDI	Male	2.7	3.6	3.4
		Female	—	—	—
	Others	Male	3.1	3.3	1.9
		Female	0.02	0.13	0.04
Research & Education	Male	0.7	0.47	0.24	
	Female	0.014	0.02	0.014	
Atomic Energy	Male	3.2	3.0	1.6	
	Female	—	0.002	—	
N. Power	Male	102.7	104.5	51.9	

4) 原子力発電によるものは少なく週辺の住民の線量でさえ自然放射線の1/1000以下である。

5) 生活流通物品では時計が昔は Ra の使用で高かったが、現在は0.02~0.1m rad 程度である。テレビも家庭用の物では殆んど無視出来る。以外に高いのは陶磁器で物によっては1m rad を越えるものもある。又建築資材には相当に高いも

のがあり、コンクリートも素材によっては自然放射線を大きく越えるものもある。

6) 放射線職業者は相当量の被曝を受けている。業種別に年間総被曝線量と平均線量を Table 50 に示す^{59) 59)}。職業者の国民線量への寄与を Table 51 に示す。

各種放射線源による国民線量を Fig. 8 に示

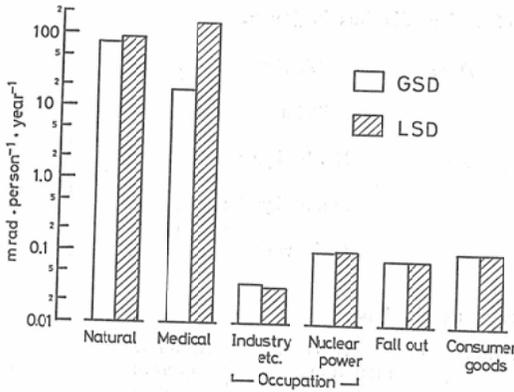


Fig. 8 Genetically significant doses and leukemia significant doses from natural radiations and various man made radiation sources.

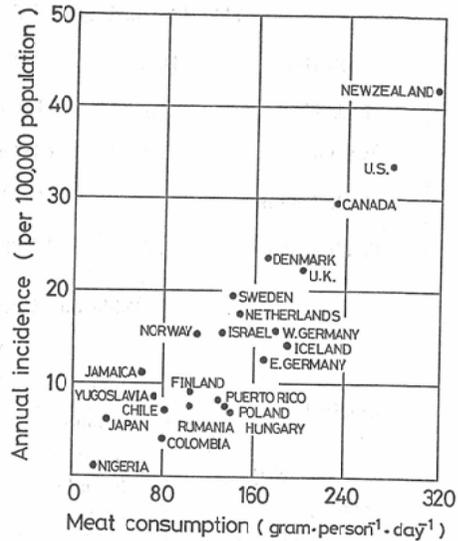


Fig. 9 Correlation between the annual incidence rates of large intestine cancers for women and meat-consumption rate for 23 countries⁵⁷⁾.

す。

(ii) 他の発がん物質との比較

嗜好品や食品の中にも発がん性のあるとされているものが数多くある。その中の2, 3の物について、その摂取量と放射線量とを比較する。

1) 煙草は平山氏の報告によれば、毎日8.3本吸う人のがん発生率は原爆被爆者の 86rad 相等であるとされている。もし直線的に低線量まで延長出来るとすると、1rad で約0.1本となる。一方胃のX線検査の実効線量は1.2rad であるので、1検査あたり毎日0.2本の煙草と同等と考えられ、煙草によるがんの潜伏期を40年とすると約3000本に相当することになる。

2) 牛肉摂取量と大腸がんの関係は Carins 氏⁵⁷⁾によると Fig. 9 の如くなる。これによると 100g の肉を毎日食べれば年間の発がんのリスクは $10 \cdot 10^{-5}$ となる。これから計算すると胃のX線

検査1回は毎日200g 牛肉を食べつづけるのと同じリスクになる。

3) その他余命を縮める因子は数多くある。

B.L. chohen 氏の調査⁵⁸⁾による短縮された余命とその原因を Table 52 に示す。但し医療被曝は日本人の値で今回計算したものである。

5. 医療被曝の最適化

医療被曝は集検等一部を除いて ICRP の言う線量制限体系の「正当性」は満足している。しかし正当の範囲内であればいくら放射線を照射してもよいかと言うと否定せざるを得ない。外科の手術の場合でもただ直ればよいと言うのではなく、手術による患者の受ける負担を出来るだけ少なく

Table 52 Loss of life expectancy due to various causes

Cause	days	Cause	days
Being unmarried (male)	3500	Pipe smoking	330
Cigarette smoking	2250	Motor bicycle accident	207
Being unmarried (female)	1600	Alcohol (UAS)	130
Being 30% over weight	1300	Average job (accident)	74
Being a coal miner	1100	Medical irradiation (Japan)	11
Being 20% over weight	900	Natural Radiation	8
Army in Vietnam	400	Coffee	6

するために最大限の努力をしている。放射線の場合も同じ事が言えるが、放射線の場合は手術と違って短日時に障害の結果がわからないうえ、障害が非特異性であるため、放射線によるものかどうか判定し難いので一層医師のモラルが重要になる。

放射線の被曝を低減する方法には経済的に負担が殆んどかからないものもあるが、大部分は大なり小なり経済的負担が術者側にかかる。微量の線量低減のために、べらぼうな費用がかかるのでは問題である。ここでは最適化の問題を割りきって線量低減と経済的負担と言う面から取りあげて検討してみる。

そのためには現在日本人の被曝線量を1man rad 減少することにどれだけの価値があるかを第2章で論じたリスク算出方法を用いて計算してみる。

(1) 被曝線量 man rad の経済的価値

放射線による障害にも色々の度合があり、死亡から始まり精神的なものまでであるが、ここでは死亡に限って考え、その金銭的価値を評価してみる。

日本人の20~60歳の男子の年収を150~850万円とし、それから生活費を引いた「可処分所得」を Table 53の2行目の如く50~400万円とする。定年は60歳とし、定年時に退職金を2000万円とする。定年以後の所得を200万円とすれば、72歳で死亡するまでの総所得は Table 52の6行目の如く0~20歳は12,650万円となる。年を取る如に減少し、30歳以後10歳間隔の総所得は Table 52の

6行目の如く11,400~400万となる。

次に例えば20歳の方が死亡した場合上記の金額をそのままあてはめることは出来ない。本来この金額は将来50年間に得られるものであるから、もし現時点でもらうとすれば、50年間の先取りの利子を引かなければならない。その利子を年7%として計算した値は Table 52の7行目の如く12,110万~10万円となる。したがって純所得(これを便益とする)は40歳で最高の4,970万円となる。全体の単純平均で2,340万円、日本人の年齢分布を考慮して計算すると平均2,440万円となる。利子を考えなければ3,830万円となる。

次に放射線による致死的风险は Table 40の如く、男2~72歳で $(265\sim7)\times 10^{-6}\text{rad}^{-1}$ である。

各年齢の便益と死亡を Table 54の2,3行に示す。但し放射線の場合は被曝後10年で死亡すると仮定し各年齢の便益は Table 52の10歳上の価値を入れる。3行目のB・Rがman・radあたりの便益となるから0歳-70歳の単純平均はman radあたり3250円、最高は20歳の8110円となる。医療被曝の年齢による撮像件数で重みづけをするとman radあたり2450円となる。女性の場合は一般にこれより低くなる。以後の計算ではman radあたりの便益を2000円とする。

(2) 記録系による線量の低減

(i) 胃間接撮影へのII導入

胃の集検は大部分が未だにミラーカメラによって行われている。ミラーカメラによる1件あたりの被検者の受ける実効線量は Table 33の如く約

Table 53 Benefit per person (Male)— $\times 10^6$ yen—

Age	Income	T. income	RIS	61—72	Total	Interest	Benefit
0	0	82.5	20	24	127	121	5.4
10	0	82.5	20	24	127	116	10.7
20	0.5	82.5	20	24	127	105	21.5
30	1.0	75	20	24	114	78	36.2
40	2.0	60	20	24	104	54	49.7
50	3.0	35	20	24	79	35	44
60	4.0	0	0	24	24	8	16
70	2.0	0	0	0	4	0.1	3.9
Average					88.3		23.4

Table 54 Benefit per person (Japaneses)

Age	Benefit/P (10 ⁶) (B)	Risk (10 ⁻⁶) (R)	Benefit/P. rad (10 ³) (B × R)	Ratio of Examination (n)	B × R × n (10 ³)
0	10.7	255	2.73	2.2	6.01
10	21.5	246	5.29	1.8	9.52
20	36.2	224	8.11	3.1	25.14
30	49.7	121	6.01	4.5	27.05
40	44.0	70	3.08	6.6	20.33
50	16.0	43	0.69	6.2	4.28
60	4.0	21	0.08	5.3	0.42
70	—	7	0	4.5	0
Total			26.0	37.7	92.7
Average			3.25		2.45

1200 mrad である。もし高解像、高感度の II とすれば線量は1000 mrad 以上低減出来る。もし年間1万人の検査をすれば10000man rad の低減である。man rad 当り2000円とすれば年間2000万円となる。又日本中では400万人が検査を受けているから線量の低減は400×10⁴man rad となるから80億円の便益があることになる。日本中のミラーカメラを早急に高感度 II に切り替えるべきである。

(ii) 増感紙

直接撮影の場合数年前から希土類の増感紙とオルソタイプのフィルムを組合せた高感度システムが出ているが、これは粒状性の問題と高価であるために思いの外利用されていない。消化器系の検査では粒状性は殆んど問題ないので価格の点で取り替える価値があるかを検討してみる。

胃の検査では在来の記録系で実効線量29 mrad (Table 31) である。これを21 mrad 減少出来たとし、1日に10枚即ち210m rad, 年間52.5rad の減少となるから、man rad あたり2000円とすれば1年間に約10万円となる。実際には3年間以上使用出来るし、増感紙は1組2～3万円のものであるから、最適化を考えれば、消化器の撮影には希土類を使用すべきである。

(iii) 蛍光増倍管 (II)

胃腸の診断で II を使用すると患者の被曝線量は1/10以下になる。

胃腸診断に1回実効線量で1.2rad 必要であるから1回に約1rad 低減出来る。1日に20人の患者を見るときに年間5000人即ち5000rad となる。1man rad 2000円とすれば年間1000万円となる。数年間使用するとすれば数千万円ならば価値がある。尚 II の輝度は5000人位胃腸透視をすると約20%位おちる。したがって3年位で約半分になり同じ明るさにするためには3～4倍の線量が必要であるので注意が必要である。

(iv) 蛍光板による低減

蛍光板の前面のガラスを反射防止のコーティングによって透視線量を1/2にすることが出来る。又ミラーカメラの場合蛍光板を希土類にするとコントラストが強くなりグリッド比を減少させることが出来るので、線量を1/2にすることが出来る。これ等の損益計算は明らかに利益が大きいので早急に実行すべきである。

(3) 専門技術者の養成と線量低減の研究

医療被曝は人工放射線の中では他の被曝に比較して桁違いに高い。そのために線量低減については十分に神経を使う価値がある。現在日本でX線診断によって1350人が致死的风险を受けている。ここで一番問題なのはX線写真が悪く診断出来ない場合である。次に写真は良く撮影されていても医師に診断能力がない場合である。又病院によっては1人の胃の検査に平均20枚以上の撮影をしている。Fig 10に撮影枚数と情報量との関係を示している。

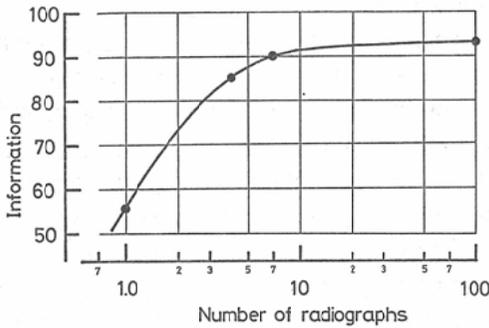


Fig. 10 Relationship between the number of radiographs and the relative amount of medical information expected from the radiography.

示す。1枚では情報量が60%程度であるが、数枚で90%近くまであがる。10枚以上になるとその1枚の情報量の増加は非常に少ない。しかし、被曝量は最初の1枚も最後の1枚も同じである。何十枚撮影してもX線写真で得られる情報量には限度があり、正診率を100%にすることは不可能であることを考え合わせ、最も効率のよい枚数で妥協後は別の手段にまかせるべきである。メーカーや物理学者の研究開発も最も重要なものの一つであることは勿論であるが、放射線生物学の面からの問題もある。例えば同一のX線量を与えても線量率によって障害が異なることを第2式に示した。ヒトの血液の染色体異常と線量率の関係を測定した結果を Fig. 11 に示す。障害が急激に上昇する線量率 (Ds) は実験対象によって異なり、長崎の被曝者の染色体異常の Ds 点は200rad 程度と

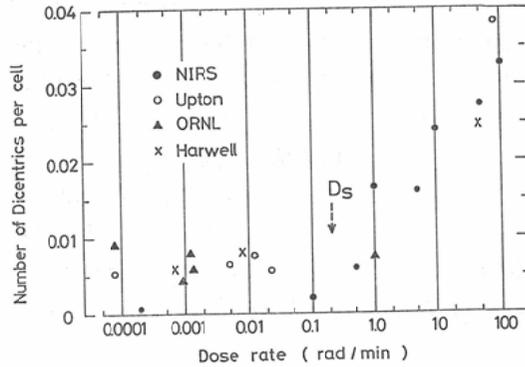


Fig. 11 Biological data on the number of dicentric chromosomes per cell for human lymphocytes irradiated with 80kV X-rays of various dose rates.

なっている。もしこの Ds 点が明らかにされればそれ以下の線量率で照射すれば障害は少なくなるが、この Ds 点の生物学的データが不足している。これ等のことを感嘆するに、放射線の専門医や優秀な技師、それにメーカーや物理学者、生物学者の研究がいかに必要であることを痛感する。それではこれ等の線量低減にどの程度の費用を投入しても損益のバランスがとれるかを検討してみる。

Table 41で示したようにX線診断による日本人の遺伝有意線量 (GSD), 白血病有意線量 (LSD), がん有意線量 (MSD) はそれぞれ15, 86, 43 mrad p⁻¹y⁻¹ である。これを上記関係者の協力で4分の1程度にまで減少させることが出来たとすれば, GSD, LSD, MSD はそれぞれ約10, 60, 30

Table 55 Benefit due to the decreased population dose for X-ray Diagnosis.

	Genetic	Leukemic	Malignant	Total
Present (mrad p ⁻¹ y ⁻¹)	15	86	43	
Aim (mrad p ⁻¹ y ⁻¹)	5	26	13	
Decrease "	10	60	30	
All Japanese (10 ⁴ rad)	115	696	348	
Risk factor (10 ⁻⁶)	100	20	165	
Death	115	140	575	
Benefit (10 ⁸ yen)	27	33	135	195

mrads $p^{-1}y^{-1}$ の低減となる。1人の便益を Table 52 の如く2340万円とすると Table 55の如く年間195億円となる。即ち線量低減のために年間200億近い金を投入しても損にはならないことになる。

6. 結 論

(1) 日本では X線写真を年間3.4億枚撮影している外、歯科1億枚、胸部間接3000万件、胃間接400万件、放射性医薬品54万件の放射線検査を受け、7.7万人が遠隔放射線治療、2.5万人が密封小線源治療を受けている。

(2) 長崎の被曝者の線量を推定し、放射研の白血病並びにがんによる致死数から、X・ γ 線によるリスク係数を

白血病 $20 \cdot 10^{-6} \text{rad}^{-1}$

がん $165 \cdot 10^{-6} \text{rad}^{-1}$

と推定した。

(3) 「白血病並びにがん有意因子」の考え方を導入し、これにリスク係数と臓器線量を乗じて、個人及び集団のリスクを容易に推定出来るようにした。

(4) 個人のリスクを推定し医療被曝の正当性を検討した結果、胸部集検、胃集検とも30歳以下の人には損失が大きく正当性は認め難い。

(5) 集団のリスクを推定すると、日本人は医療被曝により年間1900人、胎児は120人の致死的风险がある。

(6) 医療被曝を低減するために最適化の計算の目安になる 1man rad 低減するための経済的価値は2,000~3,000円で、最高は約8000万円である。

(7) man rad 2,000円としても胃間接撮影の完全 II 化とか、高感度増感紙への切替えは早急にすべきである。

(8) 現在の医療被曝を1/4に低減するために放射線専門医並びに技師の再教育と、医療被曝低減の開発、研究のためにメーカーや物理学者、生物学者への助成に年間200億程度を投入する価値がある。

本宿題報告は第37回河村文夫教授により指名され、第39回星野文夫教授によって発表の機会を与えられた

ものである。厚く感謝の意を表す。

本研究について放射線医学総合研究所御園生圭輔前所長、熊取敏行所長、愛知がんセンター高橋信次総長、がん研究所梅垣洋一郎部長の御援助と、放射線医学総合研究所物理研究部丸山隆司、松沢秀夫、川島勝弘、田中栄一、各室長、河内清光、白貝彰宏各主任研究官、野田 豊、千葉美津恵各研究員、臨床研究部館野之男、飯沼 武各室長、技術部福久健二郎室長、がんセンター山田達哉部長、結核研究所森 享科長、放射線影響研究所玉木正男理事長、加藤寛夫副部長、信州大学丸山静男技師長、畜産試験所村松 晋室長、杏林大学西沢かな枝助手の研究面での御協力を感謝する。

又実態調査にあたっては日本医師会武見太郎会長、日本医学会熊谷 洋会長、日本医学放射線学会野辺地篤郎総務理事、酒井邦夫教授、日本放射線技師会中村実会長、石坂正綱副会長、橋本 実部会長並びに日本医師会、日本医学放射線学会、日本放射線技師会、放射線取扱主任者部会の会員諸兄に深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 宮川 正, 江藤秀雄, 柄川 順, 橋詰 雅: エックス診療による生殖腺の被曝量の統計についての考え方。日本医放会誌, 17 (7): 838—843, 1957
- 2) Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York, 1958
- 3) Research group on GSD by medical use of X-ray: The genetically significant dose by X-ray diagnostic examination in Japan. Nippon Acta Rad., 21: 565—616, 1961
- 4) Report of UNSCEAR, New York, 1962
- 5) Bone marrow dose research group: The bone marrow dose in Tele-radiotherapy in Japan. Nippon Acta Rad., 130: 368—384, 1970
- 6) Murai, T., Kikuchi, A., Nakagawa, T., Ishikawa, M., Aoki, H. and Ueda, M.: The genetically significant radiation dose from Dental X-ray diagnosis in Japan. The Bulletin of Tokyo Medical and Dental University, 6: 121—125, 1959
- 7) 橋詰 雅, 加藤義雄, 丸山隆司, 白貝彰宏, 丸山静雄, 滝沢正臣: X線診断における骨髄線量の推定。日本医放会誌, 24: 1087—1093, 1964
- 8) 橋詰 雅, 加藤義雄, 丸山隆司, 白貝彰宏, 鈴木茂雄, 丸山静雄: 間接撮影による骨髄線量の推定。日本医放会誌, 25: 991—997, 1965
- 9) 橋詰 雅, 加藤義雄, 丸山隆司, 白貝彰宏, 丸山静雄, 鈴木茂雄: 透視診断による骨髄線量の

- 推定. 日本医放会誌, 25: 1410—1418, 1965
- 10) Hashizume, T., Kato, Y., Maruyama, T., Kumamoto, Y., Shiragai, A. and Nishimura, A.: Genetically significant dose from diagnostic medical X-ray examination in Japan 1969. *Health Phys.*, 23: 845—853, 1972
 - 11) Hashizume, T., Kato, Y., Kumamoto, Y., Yamaguchi, H. and Nishizawa, K.: Genetically significant dose from Beam Therapy in Japan 1971. *Health Phys.*, 26: 449—460, 1974
 - 12) Hashizume, T., Kato, Y., Maruyama, T., Kumamoto, Y., Shiragai, A. and Nishimura, A.: Population mean marrow dose and leukemia significant dose from beam therapy 1971. *Health Phys.*, 26: 461—467, 1974
 - 13) 橋詰 雅, 加藤義雄, 丸山隆司, 隈元芳一, 白貝彰宏, 西沢かな枝: 放射性医薬品による遺伝有意線量の推定. 日本医放会誌, 33: 46—48, 1973
 - 14) 橋詰 雅, 加藤義雄, 丸山隆司, 隈元芳一, 白貝彰宏, 西村明久: 診断用X線による国民平均骨髄線量および白血病有意線量, 1969, 日本放技師会誌, 19: 9—17, 1973
 - 15) 橋詰 雅, 加藤義雄, 丸山隆司, 隈元芳一, 白貝彰宏, 西村明久: 日本における診断用X線検査による遺伝有意線量(1969年). 日本放技師会誌, 19: 3—13, 1973
 - 16) 橋詰 雅, 丸山隆司, 西沢かな枝, 福久健二郎, 隈元芳一: 密封小線源による国民線量の推定. 日本医放会誌, 35: 1222—1031, 1975
 - 17) 橋詰 雅, 丸山隆司, 隈元芳一: 診断用X線による国民線量の推定. 1. X線診断の件数, 日数および透視件数. 日本医放会誌, 36: 47—55, 1976
 - 18) 橋詰 雅, 丸山隆司, 隈元芳一: 診断用X線による国民線量の推定. 2. 遺伝有意線量の推定. 日本医放会誌, 36: 47—55, 1976
 - 19) 橋詰 雅, 丸山隆司, 隈元芳一: 診断用X線による国民線量の推定. 3. 平均骨髄線量の推定. 日本医放会誌, 36: 216—224, 1976
 - 20) 橋詰 雅, 丸山隆司, 隈元芳一: 診断用X線による国民線量の推定. 4. 胎児の被曝線量の推定. 日本医放会誌, 36: 645—665, 1976
 - 21) 丸山隆司, 橋詰 雅, 西沢かな枝, 安藤正一, 篠田宏司, 相沢 恒: 歯科口内法撮影による国民線量の推定. 日本歯放会誌, 17: 52—63, 1977
 - 22) 橋詰 雅, 加藤義雄, 丸山隆司, 鎌田力三郎, 浦橋信吾: 胃集団検診による国民線量の推定. 日本医放会誌, 37: 578—789, 1977
 - 23) 橋詰 雅, 丸山隆司: 胸部集団検診による国民線量の推定. 日本医放会誌, 37: 594—599, 1977
 - 24) 丸山隆司, 野田 豊, 橋詰 雅, 西沢かな枝, 安藤正一, 御影文徳, 西岡敏雄, 本城谷孝, 木村一之: 歯科口内法撮影およびオルソパントモグラフィにおける臓器線量の測定. 日本歯放学会誌, 18: 271—278, 1978
 - 25) 橋詰 雅, 丸山隆司, 山口 寛, 館野之男, 西沢かな枝: 放射性医薬品による国民線量の推定. 1. 放射性医薬品の年間投与件数. 日本医放会誌, 39: 267—276, 1979
 - 26) 西沢かな枝, 岩田猛男, 古屋儀郎, 丸山隆司, 橋詰 雅: EMI 5005 による生殖腺, 甲状腺, 水晶体および骨髄線量の推定. 日本医放会誌, 39: 144—151, 1979
 - 27) 丸山隆司, 野田 豊, 橋詰 雅, 西沢かな枝, 安藤正一, 御影文徳, 西岡敏雄, 岩井一男: 歯科X線撮影によるリスクの推定. 日本歯放学会誌, 19: 1—7, 1979
 - 28) 橋詰 雅, 丸山隆司, 山口 寛, 館野之男, 西沢かな枝: 放射性医薬品による国民線量の推定. 2. 遺伝有意線量および白血病有意線量. 日本医放会誌, 39: 747—760, 1979
 - 29) 橋詰 雅, 松沢秀夫, 丸山隆司, 河内清光, 館野之男: 遠隔放射線治療による国民線量の推定. 1. 治療照射回数, 門数および患者数. 日本医放会誌, 40: 52—61, 1980
 - 30) 橋詰 雅, 松沢秀夫, 丸山隆司, 河内清光, 館野之男: 遠隔放射線治療による国民線量の推定. 2. 遺伝有意線量と白血病有意線量. 日本医放会誌, 40(5月): 466—475, 1980
 - 31) 橋詰 雅, 丸山隆司, 野田 豊, 福久健二郎: 診断用X線によるリスクの推定. 1. 診断用X線の件数, 回数, 日本医放会誌, 40(9月): 885—897, 1980
 - 32) 橋詰 雅, 丸山隆司, 西沢かな枝: 密封小線源治療による国民線量の推移. 日本医放会誌, 40(9月): 878—884, 1980
 - 33) 橋詰 雅, 松沢秀夫, 丸山隆司, 河内清光, 野田 豊, 白貝彰宏, 館野之男: 遠隔放射線治療による国民線量の推定. 3. がん有意線量について. 日本医放会誌, 41: 158—167, 1981
 - 34) 橋詰 雅, 丸山隆司, 野田 豊, 館野之男: 診断用X線によるリスクの推定. 2. 各種X線診断のリスク, 日本医放会誌, 41: 59—70, 1981
 - 35) 橋詰 雅, 丸山隆司, 野田 豊, 岩井一男, 福久健二郎, 西沢かな枝: 診断用X線によるリスクの推定. 3. 国民線量と集団のリスク. 日本医放会誌, 41: 132—143, 1981
 - 36) 西沢かな枝, 橋詰 雅, 丸山隆司: CT 検査によるリスクの推定. 1. スキャン回数及び検査数. 日本医放会誌, 41: 45—49, 1981
 - 37) 西沢かな枝, 橋詰 雅, 丸山隆司: CT 検査によるリスクの推定. 2. 臓器組織の線量. 日本

- 医放会誌, 41 (3月) 1981
- 38) 西沢かな枝, 橋詰 雅, 丸山隆司: CT 検査によるリスクの推定. 3. 個人と集団のリスク. 日本医放会誌, 41: (4月) 1981
- 39) 岩井一男, 橋詰 雅, 丸山隆司, 安藤正一: 歯科用X線による国民線量の推定. 日本歯放学会誌, 41: 1981
- 40) Report of UNSCEAR, New York, 1972
- 41) Report of UNSCEAR, New York, 1977
- 42) Recommendation of the International Commission Radiation Protection Publication 26, Pergamon Press Oxford 1977
- 43) Kellerer, A.M. and Rossi, H.H.: Current topics in radiation Research. Quarterly, 8: 85—158, 1972
- 44) Hashizume, T. and Maruyama, T.: Mean bone marrow dose of A-bomb survivors in Hiroshima and Nagasaki. J. of Radiation Research, 18: 67—83, 1977
- 45) Hashizume, T. and Maruyama, T.: Determination of organ or tissue doses to survivors in Hiroshima and Nagasaki. J. of Radiation Research, 22: 1981
- 46) 橋詰 雅, 丸山隆司, 館野之男: がん有意因子について. 日本医放会誌, 40: 815—822, 1980
- 47) 橋詰 雅, 丸山隆司: X線診断によるリスクの推定. 日本医放会誌, 39: 170—173, 1979
- 48) 橋本義智雄: Pathology of Bone Marrow. J. of Kyushu Hema. Society, 9: 386—474, 1957
- 49) 橋詰 雅, 丸山隆司: 医療被曝のリスク推定方法. 日本医放会誌, 40 (12): 1175—1182, 1980
- 50) Kato, H. and Schull, G.J.: Life span study. Report 9, Cancer Mortality among Atomic Bomb Survivors 1950—1978. Technical Report RERFTR 1980
- 51) 橋詰 雅, 丸山隆司, 山口 寛, 館野之男, 西沢かな枝: 放射性医薬品による国民線量の推定. 3. がん有意線量の推定. 日本医放会誌, 41: 1981
- 52) Recommendation of ICRP Publication 27 Problems of development and Index of Harm, Pergamon Press Oxford 1977
- 53) 阿倍史郎: 原子力学会誌, 22: 23—27, 1980
- 54) Maruyama, T., Kumamoto, Y., Nishimura, A. and Hashizume, T.: Estimation of genetically significant dose equivalent from occupational exposure to external sources of Radiation in Japan. Health Physics, 21: 563—9, 1971
- 55) Maruyama, T., Nishizawa, K., Noda, Y., Takeda, E., Fukuhisa, Y. and Hashizume, T.: Estimation of population doses and Risk estimation from occupational exposure in Japan. 1978. Part 1. Determination of organ or tissue doses and effective dose equivalent. Radiation Research, 22: 1981
- 56) Maruyama, T., Nishizawa, K., Noda, Y., Takeda, E., Fukuhisa, Y. and Hashizume, T.: Estimation of population doses and Risk estimation from occupational exposure in Japan 1978. Part 2. Population doses and risk estimation. Radiation Research, 22: 1981
- 57) Cairns, J.: The cancer problem. Scientific American, 233 Vo Nov.: 63—78, 1975
- 58) Chohen, B.L. and Lee, L.S.: A catalog of risks. Health Physics, 36: 707—722, 1979