

Organ Doses to Examinees during Photofluorography, Fluoroscopy and Computed Tomography

Kazuo Kato, Ph.D.; Shigetoshi Antoku, Ph.D.;
Shozo Sawada, Ph.D.; Takuro Wada, D.D.S., Ph.D.;
Walter J. Russell, M.D., D.M.Sc.



Radiation Effects Research Foundation

A Cooperative Japan-United States Research Organization

RERF Technical Report Series

Technical reports are the basic medium for reporting of original research carried out at the Radiation Effects Research Foundation. Reports in this series receive both internal and external peer review and may serve as the basis for publication in the open scientific literature, in part or in toto. Although they may be quoted and cited, these reports are considered to be internal publications of the Foundation. Copies are available upon request from: Editorial Office, RERF, 5-2 Hijiyama Park, Minami-ku, Hiroshima, 732 Japan.

The Radiation Effects Research Foundation (formerly ABCC) was established in April 1975 as a private nonprofit Japanese Foundation, supported equally by the government of Japan through the Ministry of Health and Welfare, and the Government of the United States through the National Academy of Sciences under contract with the Department of Energy.

X線間接撮影，透視検査並びにCT検査における 臓器被曝線量[§]

Organ Doses to Examinees during Photofluorography, Fluoroscopy and Computed Tomography

加藤一生^{*}，安徳重敏^{**}，澤田昭三^{***}，和田卓郎[†]，Walter J. Russell

臨床研究部放射線科

要 約

第2次世界大戦以降，広島と長崎の放射線診療活動の実態は着実に変化してきた。例えば，肺結核の胸部集団検診，胃癌の集団検診，消化器異常の検出のための透視及び撮影検査が多く使用されてくるようになった。また，新たに開発されてきた撮影法，例えば computed tomography (CT) などの利用が現在増加しつつある。こうした放射線診断の普及は被検者の受ける被曝線量の増加をもたらしている可能性がある。更に，今日放射線影響に関する知識は増加し，その影響は様々な部位に及ぶことが判明しつつある。その結果，最初に生殖器官，次に活性骨髄，そして他の多くの臓器へと線量推定の対象とすべき臓器・組織は広がってきた。

本研究では胃集団検診，胸部集団検診，上部胃腸管検査並びにCT検査における唾液腺，甲状腺，乳房，肺，胃そして大腸への線量を実験によって求めた。CT検査では生殖腺並びに活性骨髄への線量も測定した。実験では地元病医院で行われている検査を模擬した検査を人体ファントムに対して行い，ファントム内に挿入した熱蛍光線量計で各部位ごとの線量を測定した。CT検査における被曝線量は他の検査で受ける線量よりも著しく大きかった。例えば，胸部CT検査で受ける肋骨の骨髄線量は1検査当たり50 mGyであった。

本研究で得られた結果は，成人健康調査対象者が放射線診断で受けた線量を記録するために用いられる。その線量記録は原爆被爆者とその比較対象者の癌，他の異常発生に診断用X線撮影による被曝線量がどのように寄与しているか解明する上で役に立つと考えられる。

[§]全文の日本語訳は別に発行する。

^{*}放影研来所研究員；鈴峯女子短期大学。 ^{**}放影研顧問；九州大学医学部放射線基礎医学教室。

^{***}放影研顧問；広島大学原爆放射能医学研究所障害基礎研究部門。 [†]広島大学歯学部歯科放射線学教室

Organ Doses to Examinees during Photofluorography, Fluoroscopy and Computed Tomography[§]

Kazuo Kato, Ph.D.^{1*}; Shigetoshi Antoku, Ph.D.^{1**};
Shozo Sawada, Ph.D.^{1***}; Takuro Wada, D.D.S., Ph.D.[†];
Walter J. Russell, M.D., D.M.Sc.¹

¹*Department of Clinical Studies, Division of Radiology*

Summary

Doses to the salivary glands, thyroid gland, breast, lung, stomach and colon during mass radiologic gastric screening, mass radiographic chest screening, upper gastrointestinal series, and computed tomography were determined by exposing a phantom female human to simulated radiological X-ray examinations in community hospitals. The doses were measured using thermoluminescent dosimeters, and the results will be used to document organ doses received by participants in the ABCC/RERF Adult Health Study.

Introduction

At RERF, the medical X-ray doses received by Adult Health Study (AHS) participants are routinely documented to facilitate evaluating any late A-bomb radiation effects in the low dose region.¹

Due to the high incidence of gastric cancer in Japan, mass radiologic gastric screening has been widely used for its early detection. In addition, mass radiographic chest screening is still frequently conducted in Japan. Thus, many healthy people can receive these examinations, and these examinations contribute to the cumulative doses of many AHS participants. In Japan, examinations such as fluoroscopy during upper gastrointestinal (GI) series and

[§]Full Japanese text will be available separately.

RERF visiting research associate; Suzugamine Women's Junior College, Hiroshima. **RERF consultant; Department of Experimental Radiology, Faculty of Medicine, Kyushu University, Fukuoka. *RERF consultant; Department of Radiation Biology, Research Institute for Nuclear Medicine and Biology, Hiroshima University, Hiroshima. [†]Department of Oral Radiology, Hiroshima University School of Dentistry, Hiroshima*

computed tomography (CT), are generally conducted only when indicated by symptoms, physical signs and/or abnormal results of laboratory examinations. These radiological procedures constitute a high risk because of the relatively high radiation doses they incur per examination.

Estimating organ doses received by examinees during such examinations is mandatory, particularly for RERF subjects. In the present study, doses to the salivary glands, thyroid gland, breast, lung, stomach and colon facilitate efforts to determine the role of medical X rays in the development of various cancers and any other abnormalities among AHS participants. Doses to the active bone marrow and gonads during mass radiologic gastric screening and upper GI series have already been estimated.²⁻⁴

The results reported here will be used in estimating and documenting organ doses based on the responses of AHS participants who were interviewed about their previous medical X-ray examinations.

Materials and Methods

Experimental equipment

The X-ray equipment used in this study included A) a Toshiba DC-15K X-ray tomography unit (Toshiba Medical Systems, Tokyo), B) a Toshiba Model DTP-OD photofluorographic and fluoroscopy unit, C) a Hitachi Model DR-125-22 TV photofluorography and fluoroscopy unit with an over-table tube (Hitachi Medical Corporation, Tokyo), and D) a Siemens SOMATIC Model DRH CT unit (Siemens, Erlangen, Federal Republic of Germany).

To simulate X-ray examinations in community hospitals and clinics, an Alderson Rando adult female phantom human (Alderson Research Laboratories, Stamford, Conn, USA) was exposed to a variety of X-ray examinations using these apparatus. Thermoluminescent dosimeters (MSO-S, Kasei Optonix, Odawara) were used to measure doses to the phantom. The sites where the thermoluminescent dosimeters were inserted are described in a previous report.⁵ Thermoluminescence was measured using a 2000A Thermoluminescence Readout System and a 2000B Automatic Integrating Picoammeter (Harshaw/Nuclear Systems, Cleveland, Ohio, USA). The coefficient for converting thermoluminescence to exposure was obtained by simultaneously irradiating the detectors and the Exradin A2 Shonka-Wyckoff chambers using the X-ray equipment (described above in A).⁶ Regardless of tube voltage, 0.87×10^{-2} (Gy/R*) was used as the coefficient for converting exposure to absorbed dose. This conversion factor is appropriate for 30–50 keV photons in muscle.⁷

**Although current RERF technical reports employ the International System of Units, certain reports related to medical X-ray exposures retain the traditional unit of R due to equipment calibration.*

Results

Mass radiologic gastric screening

The apparatus studied is described above in B, and it was actually being used for mass gastric screening. It was equipped with an image-intensifier and a television (II-TV) and a pulse regulator delivering X rays; however, the present study was conducted without operating the pulse regulator. The resulting measurements are shown in Table 1. Experiments were conducted by using: 1) fluoroscopy only for positioning the examinee before each radiographic exposure and 2) fluoroscopy combined with photofluorographic filming.

Table 1. Organ doses during mass radiologic gastric screening.
Unit: 10^{-2} mGy per examination

Organs	Doses measured for II-TV type*			Dose estimated for mirror-camera type**
	Fluoroscopy	Fluorography	Total	Total
Salivary glands	0.078	0.15	0.23	1.1
Thyroid gland	0.29	0.19	0.48	2.2
Breast	1.7	0.64	2.3	11.0
Lung	2.8	0.54	3.3	15.2
Stomach	96	95	191	874
Colon	63	64	127	584
Gonad (female)	12	21	33	152

*Doses are from 35-sec fluoroscopy for positioning and 6-film fluorography. Technical factors: Focus-to-screen distance, 82 cm; added filter, 2.9 mm Al; irradiation field, 9 inch ϕ ; tube voltage, automatic change.

**Mean output of mirror camera-type apparatus with fluoroscreen was assumed to be 4.6 times that for the machine used in the present study.²

Mass radiographic chest screening

The output, X-ray quality, and doses incurred by use of the chest photofluorography apparatus used in Hiroshima have already been reported by Antoku et al.⁸ In the present study, organ doses were estimated based on the results of that investigation and by phantom dosimetry using equipment A (transformer-type apparatus). The results obtained are shown in Table 2.

Upper GI series

The upper GI series examinations were simulated using X-ray II-TV-type apparatus (described above in C). Three radiologists conducted examinations of the phantom human using their own techniques. During a 1974 investigation of hospital records of medical X-ray examinations, the average fluoroscopy time was found to be 4.5 minutes, and the average number of spot films was 14 in Hiroshima and Nagasaki.⁴ The organ doses per examination using average technical exposure factors are shown in Table 3. Surface and active bone marrow doses were 14.90 and 1.75 mGy/examination, respectively.

Table 2. Organ doses during mass radiographic chest screening

Organs	Measured dose rate (10^{-2} mGy/mAs)	Dose per examination* (10^{-2} mGy)
Salivary glands	0.039	5.5
Thyroid gland	0.048	6.8
Breast	0.28	40
Lung	1.2	165
Stomach	0.0038	0.54
Colon	0.011	1.6

*Doses per examination were adjusted so that the surface dose was 6.46 mGy, which was the average dose obtained by Antoku et al.⁸ The measured surface dose rate was 4.6×10^{-2} mGy/mAs.

Table 3. Organ doses during upper GI series examinations.
Unit: 10^{-2} mGy per examination

Organs	Measured doses*				Dose calculated**
	A	B	C	Average	
Salivary glands	0.64	20	0.77	6.8	9.3
Thyroid gland	0.95	46	1.1	16	22
Breast	40	153	28	74	102
Lung	22	103	27	51	70
Stomach	443	953	370	589	813
Colon	120	258	195	191	264
Gonad (female)	7.6	36	80	41	56
Time (min)	1.3	5.5	0.8	2.6	4.5
Number of spots	20	15	13	16	14

*Experiments were performed by three radiologists: A, B, and C.

**Doses for II-TV-type apparatus. Technical factors are averages for Hiroshima and Nagasaki.⁴ In the present experiments, exposure rates for fluoroscopy and spot filming at the surface in the irradiation field were 504 mR/min and 60.5 mR/spot filming, respectively. The doses for the average technical factors were calculated by using these experimental data, on the assumption that the dose distribution from fluoroscopy is the same as that from spot filmings.

CT examinations

Examination sites were categorized as those of the head, chest, upper and lower portions of the abdomen, and the entire abdomen. Whole-body CT apparatus (equipment D) was used to "examine" the phantom human, employing the technical factors which were in practice. Active bone marrow doses were

measured at 14 locations in the active bone marrow. As with the other organs, the mean active bone marrow doses were calculated by compartmentalizing the bone marrow so that each resulting portion contained one location for thermoluminescent dosimeter measurement. This facilitated obtaining the mean value weighted by the mass of each part. The total weight of the active bone marrow was considered to be 1.0466 kg, based on the study by Russell et al.⁹ Characteristics of the equipment and the technical factors common to all examinations are shown in Table 4. Doses resulting from topography conducted before scanning, were less than 1/10 those from scanning. Table 5 shows doses per examination, including topography.

Table 4. Computed tomography exposure factors

Specifications of Equipment D (Siemens SOMATIC Model DRH)

Added filters: 2.2 mm Al, 0.2 mm Cu

Focus size: 1.6 × 1.6 mm

Distance between focus and center of the gantry: 70 cm

Number of detectors: 704

Focus to detector distance: 113.5 cm

Effective X-ray range: 51 cm ϕ

Gradient of gantry: $\pm 25^\circ$

Exposure Factors

Scanning slice width: 8 mm

Scanning feed width: 8 mm

Slice number/scanning: 1

Scanning time: 5 sec

mAs/scanning: 410 mAs

Topograph slice width: 2 mm

Topograph time: 7 sec

mAs/topograph: 220 mAs

Tube voltage: 120 kVp (examination of the head)

125 kVp (organs other than the head)

Number and site of scans:

14 scans, brain (CT examination of the head)

35 scans, lung (CT examination of the chest)

19 scans, T10–L3 (CT examination of the upper abdomen)

25 scans between L3 and L4 to symphysis pubica (CT examination of the lower abdomen)

48 scans from T10 to symphysis pubica (CT examination of the entire abdomen)

Table 5. Organ doses during CT

Organs	Doses (mGy per examination)				
	Head	Chest	Upper abdomen	Lower abdomen	Whole abdomen
Salivary glands	3.16 (1.45)*	4.60	0.34 (0.45)	0.07 (0.04)	0.31
Thyroid	1.65 (9.60)	6.67	0.47 (0.54)	0.07 (0.04)	0.40
Breast	0.19 (0.15)	48.09	2.97 (14.80)	0.57 (0.21)	2.96
Lung	0.47 (0.18)	42.97	6.99 (6.80)	0.36 (0.11)	6.66
Stomach	-	5.32	35.33 (7.60)	2.66 (0.43)	42.06
Colon	-	0.83	5.39 (0.26)	17.00 (12.10)	38.14
Gonads (female)	-	0.20	0.43 (0.18)	24.18 (9.50)	25.40
Active bone marrow	4.08 (1.41)	7.28	5.56 (1.74)	4.59 (2.60)	10.32
Surface**	41.98	47.59	45.03	37.17	46.97

*The doses measured by Nishizawa et al¹⁰ are shown in parentheses. The values in parentheses under "salivary gland" indicate doses to the sublingual gland. Eight scans per examination were used for every examination site. Seven CT scanners were used in their experiments, using tube voltages ranging from 120 to 140 kVp, a slice thickness of 10–13 mm and scanning time of 4.5–105 sec.

**Surface doses represent doses on the surface at the center of the examination site (see Table 4).

Discussion

Mass radiologic gastric screening

Mass gastric screening has been widely used in Japan since the mid-1960s, beginning with the use of mirror-camera-type apparatus. However, II–TV units have been popular since 1970.

According to Antoku et al,² under average conditions for normal persons, the female gonadal dose during mass gastric screening using an II–TV unit was 0.16 mGy per examination in which 5.7 fluorography films were exposed and 49 sec of fluoroscopy exposure was used for positioning. In the present study, a dose of 0.33 mGy per examination was obtained. This is about 1/4 the 1.40 mGy mean for Hiroshima City obtained by Antoku et al.² The national average obtained by Hashizume et al¹¹ was 1.50 mGy, the mean female gonadal dose when a mirror-camera apparatus was used. In the present study, no experiment was performed to measure doses received during the use of a mirror-camera apparatus with fluoroscreen. The active bone marrow dose from fluoroscopy used only for positioning the examinee was about 4.6 times less than that found when a mirror-camera apparatus with fluoroscreen was used.²

Mass radiographic chest screening

Chest photofluorography units were categorized as condenser and transformer types. They differed markedly as to their characteristics, although Antoku et al observed little difference between them in respect to the surface and bone marrow doses they incurred. However, doses to the gonads were slightly higher when using the transformer-type units, for which beam collimation was frequently

inadequate.⁸ The doses shown in Table 2 are, therefore, not precisely correct for examinations performed with inadequate collimation. The collimation techniques have since been improved. Thus, the doses obtained in the present study are considered conservative, regardless of apparatus type, providing the beam collimation is sufficient.

Upper GI series

Fluoroscopy techniques vary with medical institution and by physician. Fluoroscopy time and the number of spot films used likewise differ according to the examinees' health status. In 1969, Takeshita et al³ showed that mean bone marrow doses received during upper GI series performed by radiologists using X-ray TV fluoroscopy varied widely—from 0.55 to 0.66 mGy per examination. The present estimates (Table 3) are for X-ray TV fluoroscopy using the techniques employed at major hospitals. The errors in estimates for individual examinations appear to be relatively large. The active bone marrow doses obtained agree with those estimated by Antoku et al.⁴ Good agreement was observed between the values obtained by Yamamori et al¹² and the present thyroid gland and stomach doses for the same techniques (Table 6). However, the mean bone marrow dose obtained by Yamamori et al¹² was 15.20 mGy per examination, which was six times higher than the 2.59 mGy per examination estimated from the present results for their fluoroscopy times and number of spot films. Their active bone marrow dose was greater than the maximum surface dose obtained in the present study.

Table 6. Comparison of organ doses during upper GI series

Organs	Doses (mGy per examination)*	
	Calculated**	Reported†
Thyroid	0.32	0.50
Lung	1.04	5.10
Stomach	12.04	24.0

*Fluoroscopy time: 7.6 minutes, 13 spots per examination (used by Yamamori et al)¹²

**Calculated from the measured doses shown in Table 3

†After Yamamori et al¹²

In NCRP Report 33,¹³ the air exposure rate at the anterior surface of the phantom human is reportedly approximately 0.6 R/min during fluoroscopy when the exposure field is fixed. The measured exposure rate was 0.5 R/min, thus the present X-ray tube is similar to the standard one. Our imaging system permits using a long focus-to-screen distance (100 cm). Such relatively large distances are commonly used with recently developed fluoroscopy apparatus. Before the advent of the II-TV-type apparatus, doses from upper GI series examinations were

greater than those shown in Table 3. Takeshita et al.³ showed that 3.02-minute conventional fluoroscopy and 6.6 spot films caused examinees to receive 3 mGy active bone marrow doses, which were three times greater than those of the present study using II-TV-type apparatus, the same fluoroscopy times and the same number of spot films.

CT examinations

Table 5 shows organ doses incurred during CT examinations, as determined in the present study, and organ doses estimated by Nishizawa et al.¹⁰ Their values were obtained assuming that eight scans were made uniformly during examinations of the head and the upper and lower portions of the abdomen. However, in the present study, 14 scans were made, even for CT of the head. The values obtained by Nishizawa et al are, therefore, generally lower than those obtained in the present study. However, their estimates of thyroid doses during head CT, and breast doses during CT of the upper portion of the abdomen are much higher than those obtained in the present study. Their average thyroid dose from CT head scanning is greater than each of their measured values. Their breast dose from upper abdominal scanning is greater than the other doses from the same scanning, probably because their scanning position differed from ours. Table 7 shows the organ doses per scan during head CT, as obtained in the present study and those obtained by Nishizawa et al.¹⁰ Exposures per scan were similar when examinations were conducted under similar conditions of exposures and using similar types of apparatus, as illustrated in Table 7.

Table 7. Doses per scan during CT examinations of the head

Organs	Doses (mGy per scan)*	
	Present	Reported**
Active bone marrow	0.29	0.34
Salivary glands	0.23	0.16 [†]
Thyroid gland	0.12	0.12
Breast	0.013	0.022
Lung	0.034	0.017

*See Table 5

**The doses were measured by Nishizawa et al.¹⁰ with a CT apparatus using a tube voltage of 120 kVp, tube current of 350 mA, a scanning time of 9 sec, one slice per scanning, a gantry diameter of 60 cm, an added 2.5 mm Al filter and a slice thickness of 10 mm, which was similar to ours.

[†]Doses to the sublingual gland

The active bone marrow dose incurred during CT is relatively high because the tube voltage is also relatively high (120 kVp), and the body is irradiated in nearly all projections. In the present study, doses to the bone marrow within

the irradiation field were more than half the doses to the body surface within that field. Also, doses differed greatly for exposures inside, as compared to those outside the exposure field, because a relatively small beam was used. For example, relatively high doses, such as 50 mGy were incurred to a rib per examination during chest CT, and 30 mGy to T12 and L3 vertebrae per examination during CT of the entire abdomen. The active bone marrow dose during CT of the entire abdomen was about 60 times greater than the active bone marrow dose during AP radiography of the abdomen using technical factors employed at RERF.¹⁴ Although CT scanning has recently become widely used, it should be used carefully, because it exposes examinees to very high radiation doses.

Data obtained in the present study will be used to document medical X-ray doses received by subjects who reported they were exposed to these radiological examinations.

Acknowledgments

The authors are grateful to the Atomic Bomb Health Center for the use of its fluoroscopic apparatus. They appreciate the technical assistance of Yumiko Sano, RT, Masayoshi Mizuno, RT, Takayuki Enami, RT, Hiromichi Fukuchi, RT, Tadashi Sunayashiki, RT, Yumiko Yamane, RT, and Michiko Ikejiri, RT, throughout this study. The assistance of Mrs. Grace Masumoto in preparing the manuscript is deeply appreciated.

References

1. Ihno Y, Russell WJ: Doses to the gonads and bone marrow in radiographic examinations at ABCC. ABCC TR 24-63
2. Antoku S, Sawada S, Russell WJ: Doses from Hiroshima mass radiologic gastric surveys. *Health Phys* 38:735-42, 1980 (RERF TR 12-78)
3. Takeshita K, Antoku S, Sawada S: Exposure pattern, surface, bone marrow integral and gonadal dose from fluoroscopy. *Br J Radiol* 45:53-8, 1972 (ABCC TR 19-69)
4. Antoku S, Hoshi M, Sawada S, Russell WJ: Hospital and clinic survey estimates of medical X-ray exposures in Hiroshima and Nagasaki. Part 2. Technical exposure factors. RERF TR 6-86
5. Kato K, Antoku S, Sawada S, Russell WJ: Organ doses to atomic bomb survivors from radiological examinations at the Radiation Effects Research Foundation. RERF TR 19-89
6. Kato K, Antoku S, Sawada S, Russell WJ: Calibration of $Mg_2SiO_4(Tb)$ thermoluminescence dosimeters for use in determining diagnostic X-ray doses of Adult Health Study participants. RERF TR 11-89
7. International Commission on Radiation Units and Measurements: Quantitative concepts and dosimetry in radiobiology. ICRU Report 30, Washington, DC, ICRU, 1979
8. Antoku S, Russell WJ, Milton RC, Yoshinaga H, Takeshita K, Sawada S: Dose to patients from roentgenography. *Health Phys* 23:291-9, 1972 (ABCC TRs 4-67, 5-68, 21-70)
9. Russell WJ, Yoshinaga H, Antoku S, Mizuno M: Active bone marrow distribution in the adult. *Br J Radiol* 39:735-9, 1966 (ABCC TR 28-64)
10. Nishizawa K, Maruyama T, Iwata T, Furuya Y, Hashizume T: Estimation of stochastic risk from computed tomographic examinations in Japan. 2. Organ or tissue doses by computed tomographic examinations. *Nippon Acta Radiol* 41:242-9, 1981
11. Hashizume T, Kato Y, Maruyama T, Kamata R, Urahashi S: Estimation of population doses from stomach mass screening, 1975. *Nippon Acta Radiol* 37:578-89, 1977
12. Yamamori K, Kuramochi Y, Kawaharada A, Nakamura A, Iba S, Kawana M: Estimation of risks and exposure in the examination of upper gastrointestinal tract. *JJART* 35:244-50, 1988
13. National Council on Radiation Protection and Measurements: Medical X-ray and gamma-ray protection for energies up to 10 MeV—equipment design and use. NCRP Report No. 33. Bethesda, Md, NCRP, 1968
14. Antoku S, Russell WJ: Dose to the active bone marrow, gonads, and skin from roentgenography and fluoroscopy. *Radiology* 101:669-78, 1971 (ABCC TR 20-70)

X線間接撮影，透視検査並びにCT検査における臓器被曝線量
Organ Doses to Examinees during Photofluorography,
Fluoroscopy and Computed Tomography

加藤一生，安徳重敏，澤田昭三，和田卓郎，Walter J. Russell

放影研業績報告書シリーズ

RERF Technical Report Series

業績報告書は、放射線影響研究所で行われたオリジナルな研究を報告するためのものである。このシリーズに含まれる報告書は、研究所内外の専門家による検討を受けたものであり、その一部又は全文は学術雑誌への投稿原稿としても用いられる。本報告書を引用したり、参考文献として言及しても差し支えないが、本報告書自体は当研究所の内部出版物である。報告書の入手を希望される場合は、〒732 広島市南区比治山公園5-2 放影研編集課あてにお申し込み下さい。

放射線影響研究所(元 ABCC)は、昭和50年4月1日に公益法人として発足した。その経費は日米両国政府の平等分担とし、日本は厚生省の補助金、米国はエネルギー省との契約に基づく米国学士院の補助金とをもって充てる。

X線間接撮影，透視検査並びにCT検査における臓器被曝線量 Organ Doses to Examinees during Photofluorography, Fluoroscopy and Computed Tomography

加藤一生^{1*}，安徳重敏^{1**}，澤田昭三^{1***}，和田卓郎[†]，Walter J. Russell¹

¹臨床研究部放射線科

要 約

胃集団検診，胸部集団間接撮影，上部胃腸管透視検査並びにCT検査による唾液腺，甲状腺，肺，乳房，胃及び結腸に対する臓器被曝線量を推定するために，実際の医療機関で行われているこれらのX線検査について，女性人体ファントムを患者に見立てた模擬検査を行い，熱蛍光法による線量測定を行った．本研究の測定結果は成人健康調査参加者の受けたX線被曝線量を推定し記録する上で役立つものである．

緒 言

放影研では，成人健康調査(AHS)対象者が受けた医用X線被曝線量を，低線量領域における原爆後影響の評価に役立てるため常に記録している.¹

日本では胃癌発生率が高いため，胃癌の早期発見に胃集団検診が広く行われている．また，胸部集団間接撮影もまだ頻繁に行われている．このように，多くの健常者が検診を受けることができ，こうした検診は多くのAHS対象者の被曝線量集積の一因となっている．日本では，上部胃腸管透視(GI)検査及びコンピューター断層撮影(CT)などの透視検査は一般的に，症状，身体的徴候又は臨床検査結果に異常が認められた場合にしか行われない．これらのX線検査は，その1回当たりの被曝線量が比較的高いため高リスクを伴う．

本報告の英語版は別に発行した．

*放影研来所研究員；広島，鈴峯女子短期大学．**放影研顧問；九州大学医学部放射線基礎医学教室．***放影研顧問；広島大学原爆放射能医学研究所障害基礎研究部門．†広島大学歯学部歯科放射線学教室．

上記の検査で被検者が受ける臓器線量の推定をすることは、特に放影研対象者について必要不可欠である。本研究では、唾液腺、甲状腺、乳房、肺、胃及び結腸の臓器被曝線量を推定し、AHS 対象者に認められる種々の癌及びその他の異常の発生に果たす医用X線の役割の解明に役立たせる。胃集団検診及び上部胃腸管透視検査による活性骨髄及び生殖腺の臓器被曝線量は既に推定値が算出されている。²⁻⁴

本報で報告する結果は、これまでに受けた医用X線検査について AHS 対象者を面接し、その回答から判明した検査による臓器線量を推定し、記録するために用いる。

材料及び方法

実験装置

本調査で使用したX線装置は以下のとおりである。A) 東芝 DC-15 K X線断層撮影装置 (東芝メディカルシステム), B) 東芝モデル DTP-OD 間接X線撮影及び透視装置, C) 日立モデル DR-125-22 オーバーチューブ方式テレビ間接X線撮影及び透視装置 (日立メディカル社), 及び D) シーメンス SOMATIC モデル DRH CT 装置 (西ドイツ, Erlangen, シーメンス社)。

病医院で実際に行われているX線検査の模擬検査を行うため、上記の装置を用いて、Alderson Rando 女性人体ファントム (米国コネチカット州 Stanford, Alderson Research Laboratories) に様々なX線検査を行い、熱蛍光線量計 (小田原, 化成 Optonix, MSO-S) を用いて人体ファントムの線量測定を行った。熱蛍光線量計を挿入した部位は前回述べたとおりである。⁵ 熱ルミネッセンスは、2000 A 熱蛍光線量測定読み取りシステム及び2000 B 自動集積 Picoammeter (米国オハイオ州 Cleveland, Harshaw/Nuclear Systems) を使って測定した。熱ルミネッセンスを照射線量に変換する係数はX線装置を用いて、線量計と Exradin A2 Shonka-Wycoff 電離槽を同時に照射して求めた (上記A)。⁶ 照射線量を吸収線量へ変換するときの係数として管電圧に関係なく $0.87 \times 10^{-2} (\text{Gy/R}^*)$ を使った。この変換係数は30~50 keV の光子の筋肉における変換係数として適切なものである。⁷

結 果

胃集団検診

用いた装置は上記Bに示したとおりであり、実際の胃集団検診に用いている。これはイメージインテンシファイアー及びテレビ (II-TV), それにX線放射のパルス調整器を備えているが、本研究ではパルス調整器は作動させなかった。測定結果は表1に示した。測定は以下の方法で行った: 1) 各間接撮影前の被検者の位置決めのための透視検査のみを行い、次に 2) 間接撮影を含む透視検査を行い、各々で線量を測定した。

*現在放影研の業績報告書では国際単位システムを用いているが、医用X線被曝に関する報告書の中には装置の目盛りの都合上、従来の単位Rを使用することがある。

胸部集団間接撮影

広島で使用されている胸部間接撮影装置の出力，X線の線質及び線量については既に安徳ら⁸により報告されている．本研究では，その調査結果と装置A（変圧器型装置）による人体ファントム線量測定を基に，臓器線量を推定した．得た結果を表2に示す．

表1 胃集団検診による臓器線量．単位：1検査当たり 10^{-2} mGy

臓 器	II-TV型装置による線量(測定値)*			ミラーカメラ付装置における線量(推定値)**
	透視検査	透視撮影	計	計
唾液腺	0.078	0.15	0.23	1.1
甲状腺	0.29	0.19	0.48	2.2
乳房	1.7	0.64	2.3	11.0
肺	2.8	0.54	3.3	15.2
胃	96	95	191	874
結腸	63	64	127	584
生殖腺(女性)	12	21	33	152

*位置決めのための透視時間35秒と間接撮影数6回による線量．照射条件：焦点-スクリーン間距離 82 cm，濾過板 2.9 mm Al，照射野 9インチ ϕ ，管電圧 自動切替．

**蛍光板付ミラーカメラ装置の平均出力は本研究で使用する装置の4.6倍とした．²

表2 胸部集団間接撮影による臓器線量

臓 器	線量率測定値 (10^{-2} mGy/mAs)	1検査当たりの線量* (10^{-2} mGy)
唾液腺	0.039	5.5
甲状腺	0.048	6.8
乳房	0.28	40
肺	1.2	165
胃	0.0038	0.54
結腸	0.011	1.6

*1検査当たりの線量は表面線量を安徳ら⁸が得た平均値である6.46 mGyになるよう調整した．表面線量率の測定値は 4.6×10^{-2} mGy/mAsであった．

上部胃腸管透視検査

上部胃腸管透視模擬検査をX線II-TV型装置(上記C)を用いて行った。3名の放射線科医師がそれぞれ独自の方法で、人体ファントムの透視検査を行った。1974年に医用X線検査の病院記録を調査したところ、広島及び長崎における平均透視検査時間は4.5分、平均狙撃撮影数は14であることが判明した。⁴ 標準照射条件を用いた1検査当たりの臓器線量を表3に示した。1検査当たりの表面及び活性骨髄線量は各々14.90, 1.75 mGyであった。

表3 上部胃腸管透視検査による臓器線量
単位: 1検査当たり 10^{-2} mGy

臓 器	線量(測定値)*				(線量計算値)**
	A	B	C	平均	
唾液腺	0.64	20	0.77	6.8	9.3
甲状腺	0.95	46	1.1	16	22
乳房	40	153	28	74	102
肺	22	103	27	51	70
胃	443	953	370	589	813
結腸	120	258	195	191	264
生殖腺(女性)	7.6	36	80	41	56
時間(分)	1.3	5.5	0.8	2.6	4.5
狙撃撮影回数	20	15	13	16	14

*実験は3名の放射線科医師(A, B及びC)により行われた。

**II-TV型装置を使用した場合の線量。照射条件は広島及び長崎で標準的なものである。⁴ 今回の研究では、透視検査及び狙撃撮影による照射野内の表面照射線量率は各々504 mR/分, 60.5 mR/撮影であった。透視検査及び狙撃撮影による線量の分布は同じであると想定し、測定データを用いて標準照射条件による線量を算出した。

CT 検査

検査部位は頭部、胸部、上下腹部及び腹部全体に分類し、全身CT検査装置(装置D)を使って人体ファントムの線量を測定した。その際、実際に用いられている照射条件を採用した。活性骨髄線量は骨髄の14か所で測定した。他の臓器と同様に平均活性骨髄線量は、各部分につき1か所、熱蛍光線量測定箇所を含むように骨髄を区分して計算した。この方法では各部の骨髄量で荷重した平均値を容易に得ることができる。Russellらの調査⁹に基づくと、活性骨髄の総質量は1.0466 kgと考えられた。検査全体に共通する装置及び照射条件の特徴を表4に示した。スキャンの前に行ったトポグラフィーによる線量は、スキャンによる線量の10分の1以下だった。トポグラフィーを含む検査当たりの線量を表5に示した。

表 4 コンピューター断層撮影照射条件

装置 D の仕様 (シーメンス SOMATIC モデル DRH)

濾過板	2.2 mm Al, 0.2 mm Cu
焦点	1.6 × 1.6 mm
焦点-ガントリー中心間距離	70 cm
検出器数	704
焦点-検出器間距離	113.5 cm
X線有効範囲	51 cm ϕ
ガントリー傾度	±25°

照射条件

スキャンスライス幅	8 mm
スキャンフィールド幅	8 mm
スライス数/スキャン	1
スキャン時間	5 秒
mAs/スキャン	410 mAs
トポグラフスライス幅	2 mm
トポグラフ時間	7 秒
mAs/トポグラフ	220 mAs
管電圧	120 kVp (頭部検査) 125 kVp (頭部以外の臓器)

スキャン数及び部位

14回	脳 (頭部 CT 検査)
35回	肺 (胸部 CT 検査)
19回	T10～L3 (上腹部 CT 検査)
25回	L3, L4～恥骨結合 (下腹部 CT 検査)
48回	T10～恥骨結合 (全腹部 CT 検査)

表 5 CT 検査による臓器線量

臓 器	線量 (mGy/検査)				
	頭部	胸部	上腹部	下腹部	腹部全体
唾液腺	3.16 (1.45)*	4.60	0.34 (0.45)	0.07 (0.04)	0.31
甲状腺	1.65 (9.60)	6.67	0.47 (0.54)	0.07 (0.04)	0.40
乳房	0.19 (0.15)	48.09	2.97 (14.80)	0.57 (0.21)	2.96
肺	0.47 (0.18)	42.97	6.99 (6.80)	0.36 (0.11)	6.66
胃	-	5.32	35.33 (7.60)	2.66 (0.43)	42.06
結腸	-	0.83	5.39 (0.26)	17.00 (12.10)	38.14
生殖腺 (女性)	-	0.20	0.43 (0.18)	24.18 (9.50)	25.40
活性骨髄	4.08 (1.41)	7.28	5.56 (1.74)	4.59 (2.60)	10.32
体表面**	41.98	47.59	45.03	37.17	46.97

*西沢ら¹⁰⁾による推定線量値を括弧内に示した。「唾液腺」の括弧内の値は舌下腺線量である。各検査部位に対し、1回の検査当たり8回のスキャンが行われた。検査には、7台のスキャナーが用いられた。管電圧120～140 kVp。スライス幅10～13 mm、スキャン時間4.5～105秒であった。

**表面線量は検査部位中央の表面被曝線量を示す (表 4 参照)。

考 察

胃集団検診

胃集団検診は、1960年半ばから日本で広く行われてきた。最初はミラーカメラ付装置が使用されたが、1970年以降は II-TV 型が普及した。

安徳ら²によれば、健常人の平均的照射条件下では、II-TV型装置を用いた胃集団検診による女子生殖腺線量は、1回の検査当たり0.16 mGyで、透視撮影数は5.7、体位決定に要した時間は49秒であった。本研究では、1検査当たり0.33 mGyの線量を得た。この値は安徳ら²が得た広島市の平均線量1.40 mGyの約4分の1である。橋詰ら¹¹が、ミラーカメラを使用して得た曝射1回当たりの全国平均女子生殖腺線量は1.50 mGyであった。今回の調査では、蛍光板付ミラーカメラ装置を用いた検査の線量測定は行わなかった。被検者の位置決めによる透視による活性骨髄線量は、蛍光板付ミラーカメラを使用した場合の約1/4.6であった。²

胸部集団間接撮影

胸部間接撮影装置には蓄放式と変圧式のものが用いられている。両装置は極めて異なった特徴を有するが、安徳らの測定では、両装置による表面及び骨髄線量にほとんど差が見られなかった。しかし、生殖腺線量は変圧式を用いた場合の方が幾分か大きかった。これは線束の絞りが十分でなかったためである。⁸したがって、表2に掲げた線量は、線束の絞りが不十分な装置で行った検査については正確ではない。絞りの技術はその後改善されている。線束絞りが十分な場合に関して、今回の調査で得た線量は、装置の型に関係なく従来の撮影による線量と同じと考えられる。

上部胃腸管透視検査

透視検査条件は医療機関及び医師によって異なり、また、透視時間及び狙撃撮影数も被検者の健康状態に応じて異なる。1969年竹下ら³は、放射線科医師がTV透視検査装置を用いて行った上部胃腸管透視検査で被曝した骨髄平均線量は、幅広く分布し、1検査当たり0.055～0.66 mGyであったことを示した。今回の推定値(表3)は、主要な病院で採用されている技術を用いて行ったTV透視検査から得たものである。各検査についての推定値の誤差は比較的大きいと思われる。今回測定した活性骨髄線量は安徳らの推定値と一致している。⁴山森ら¹²が得た推定値と同じ条件で得た今回の甲状腺及び胃線量推定値も一致した(表6)。ところが、山森ら¹²の平均骨髄線量は1検査当たり15.20 mGyで、今回透視時間及び狙撃撮影数から推定した1検査当たりの線量2.59 mGyの6倍であった。彼らの活性骨髄線量は、本調査で得た最大表面線量より大きかった。

NCRP 報告書第33報¹³によれば、照射野を固定した場合、透視検査による人体ファントムの前身表面部の照射線量率は約0.6 R/分である。今回の測定照射線量率は0.5 R/分であり、使用したX線管球は標準に近いものである。我々の映像装置は、焦点とスクリーン間の距離を

表6 上部胃腸管透視検査による臓器線量の比較

臓 器	線量 (mGy/検査)*	
	計算値**	報告値†
甲状腺	0.32	0.50
肺	1.04	5.10
胃	12.04	24.0

*透視検査時間：7.6分

1検査当たりのスポット撮影枚数：13枚(山森らによる)¹²

**表3の線量測定値より計算。

†山森らによる。¹²

長く(100 cm)できるが、こうした比較的長い距離は最新型の透視検査装置に共通して採り入れられている。II-TV型装置導入以前の上部胃腸管透視検査による線量は表3に示した値より大きかったと考えられる。竹下ら³は、従来の透視検査装置で被検者に対し透視を3.2分、狙撃撮影を6.6回行った場合、活性骨髄線量は3 mGyになることを報告した。この値はII-TV型装置を用いて同じ透視時間及び狙撃撮影数で検査を行ったときに今回の研究結果から予想される値の3倍である。

CT 検査

表5にCT検査による臓器線量を示したが、これは本研究で得た推定値と西沢ら¹⁰による推定値である。西沢らの値は頭部及び上下腹部検査の際、同じ条件で8回スキャンを行うことを想定して得たものである。ところが本研究では、頭部CT検査でさえもスキャンを14回行ったので、西沢らの値は全般的に本研究の値に比べ低いと言える。ただし、頭部CTによる甲状腺線量及び上腹部CTによる乳房への線量の推定値は、本研究での推定値よりかなり高い。また、西沢らの頭部CT検査による平均甲状腺線量は個々の測定値より高い。また、上腹部スキャンによる乳房の線量は同じ上腹部スキャンによる他の臓器線量に比べ高い。この理由は恐らく、スキャンの位置が我々のものと異なっていたことにあると考えられる。表7には、本研究及び西沢ら¹⁰による1回の頭部CTスキャン当たりの臓器線量を示した。表7に示したように、1スキャン当たりの被曝線量は、同一の照射条件及び同型の装置で検査を行った場合、ほぼ同じ値を示した。

CTによる活性骨髄線量が比較的高いのは、管電圧も比較的高く(120 kVp)、ほぼ全方向から照射されるためである。本研究では、照射野内の骨髄線量は同じ照射野内の表面線量の半分以上だった。また、照射野内の線量は照射野外に比べ変動が大きい、これは線束が比較的小さかったからである。例えば、胸部CT検査1回当たりで、肋骨は50 mGy、全腹部CT検査1回当たりでT12、L3脊椎は30 mGyの比較的高い線量を受けていた。腹部全体の

表 7 頭部 CT 検査によるスキャン当たりの線量

臓 器	線量 (mGy/スキャン)*	
	本研究	他の報告**
活性骨髄	0.29	0.34
唾液腺	0.23	0.16†
甲状腺	0.12	0.12
乳房	0.013	0.022
肺	0.034	0.017

*表 5 参照.

**線量値は西沢ら¹⁰による. 使用 CT 装置は今回使用した装置と類似のもの: 管電圧 120 kVp, 管電流 350 mA, スキャン時間 9 秒, スキャン当たりのスライス数 1, ガントリー直径 60 cm, 濾過板 2.5 mm Al, スライス幅 10 mm.

† 舌下腺線量.

CT 検査による活性骨髄線量は, 放影研で採用されている照射条件で行った腹部の腹背方向撮影による活性骨髄線量の約60倍であった.¹⁴ CT 検査は最近広く行われているが, 被検者が高線量に被曝するため検査には注意が必要である.

本研究データは, 前述の検査を受けたことを報告する対象者の医療用 X 線被曝線量を記録するために用いられる.

謝 辞

X 線透視装置の使用に際し, 多大なご協力をいただいた広島原爆被爆者健康管理所に深甚なる謝意を表する.

本研究の実験中, 技術のご援助をいただいた, 佐野由美子技師, 水野正義技師, 恵南高之技師, 福地弘道技師, 砂屋敷 忠技師, 山根由美子技師ならびに池尻道子技師また, 原稿の作成にあたってご助力下さった舛本幸江氏に深く感謝する.

参考文献

1. Ihno Y, Russell WJ: Doses to the gonads and bone marrow in radiographic examinations at ABCC. ABCC TR 24-63
2. Antoku S, Sawada S, Russell WJ: Doses from Hiroshima mass radiologic gastric surveys. *Health Phys* 38:735-42, 1980 (RERF TR 12-78)
3. Takeshita K, Antoku S, Sawada S: Exposure pattern, surface, bone marrow integral and gonadal dose from fluoroscopy. *Br J Radiol* 45:53-8, 1972 (ABCC TR 19-69)
4. Antoku S, Hoshi M, Sawada S, Russell WJ: Hospital and clinic survey estimates of medical X-ray exposures in Hiroshima and Nagasaki. Part 2. Technical exposure factors. RERF TR 6-86
5. Kato K, Antoku S, Sawada S, Russell WJ: Organ doses to atomic bomb survivors from radiological examinations at the Radiation Effects Research Foundation. RERF TR 19-89
6. Kato K, Antoku S, Sawada S, Russell WJ: Calibration of $\text{Mg}_2\text{SiO}_4(\text{Tb})$ thermoluminescence dosimeters for use in determining diagnostic X-ray doses of Adult Health Study participants. RERF TR 11-89
7. International Commission on Radiation Units and Measurements: Quantitative concepts and dosimetry in radiobiology. ICRU Report 30, Washington, DC, ICRU, 1979
8. Antoku S, Russell WJ, Milton RC, Yoshinaga H, Takeshita K, Sawada S: Dose to patients from roentgenography. *Health Phys* 23:291-9, 1972 (ABCC TRs 4-67, 5-68, 21-70)
9. Russell WJ, Yoshinaga H, Antoku S, Mizuno M: Active bone marrow distribution in the adult. *Br J Radiol* 39:735-9, 1966 (ABCC TR 28-64)
10. Nishizawa K, Maruyama T, Iwata T, Furuya Y, Hashizume T: Estimation of stochastic risk from computed tomographic examinations in Japan. 2. Organ or tissue doses by computed tomographic examinations. *Nippon Acta Radiol* 41:242-9, 1981
11. Hashizume T, Kato Y, Maruyama T, Kamata R, Urahashi S: Estimation of population doses from stomach mass screening, 1975. *Nippon Acta Radiol* 37:578-89, 1977
12. Yamamori K, Kuramochi Y, Kawaharada A, Nakamura A, Iba S, Kawana M: Estimation of risks and exposure in the examination of upper gastrointestinal tract. *JJART* 35:244-50, 1988
13. National Council on Radiation Protection and Measurements: Medical X-ray and gamma-ray protection for energies up to 10 MeV—equipment design and use. NCRP Report No. 33. Bethesda, Md, NCRP, 1968
14. Antoku S, Russell WJ: Dose to the active bone marrow, gonads, and skin from roentgenography and fluoroscopy. *Radiology* 101:669-78, 1971 (ABCC TR 20-70)