10 MV 医療用直線加速器からの漏洩放射線について (山口・阿部・清水)

原 著

10 MV 医療用直線加速器からの漏洩放射線について
—第3報 使用室迷路内および入口扉外側の
中性子と X 線の線量当量分布—

北海道大学医学部附属診療放射線技師学校

山 口 成 厚

国立札幌病院放射線科

阿 部 勝 彦・清 水 治 芳

(論文受理 1982年9月6日)

(最終論文受理 1983年10月15日)

(Code No. 43121, 51510, 420)

Key words: Medical linear accelerator, Treatment room, Dose equivalent distribution.

LEAKAGE RADIATION FROM A 10 MV MEDICAL
LINEAR ACCELERATOR
—III NEUTRON AND X-RAY DOSE EQUIVALENT
DISTRIBUTION IN THE MAZE AND OUTSIDE OF THE
ENTRANCE DOOR OF A TREATMENT ROOM—

SHIGEATSU YAMAGUCHI

School of Radiological Technicians, School of Medicine, Hokkaido University

KATSUHIKO ABE and HARUYOSHI SHIMIZU

Department of Radiology, National Sapporo Hospital

(Article received; Sep., 6, 1982)

Summary

Measurements of neutron and X-ray dose reduction were performed along the central line of the maze in the treatment room of a Mitsubishi ML-15MIB medical linear accelerator (10 MV photon mode) located at the National Sapporo Hospital. When measured value was plotted on a logarithmic graph paper against the reduced distance from the mouth of the maze (a ratio of real distance to a diameter of a circle with the same cross section as the rectangular opening, the reduction in the 2nd leg of the maze was able to be fitted to a linear function, and the gradients of -3.00 for neutrons and -3.17 for the X-ray were able to be found. It

was also found that this plotting method was excellent to express the dose reduction properties in a maze.

Neutron dose distributions over some cross sections of the maze were measured. From the results, it was found that the doses reduced in the direction of the maze barrier, and vertical dose distributions were nearly equal in the area of the height up to 2 m. As the measurement location approached to the entrance door, the dose distributions was gradually uniformized over the whole of the cross section. The tendency of above distributions were nearly independent to beam directions.

The dose reduction of neutrons by the entrance door (about 3 mm thickness steel + 6 mm thickness lead) was 8.7%. It became clear that the capture of thermal neutrons in iron was the main cause for the dose reduction by the door.

1. はじめに

10 MV 医療用直線加速器からの漏洩放射線に関し、第1報¹⁾では使用室迷路入口扉位置において「遮蔽計算指針」²⁾による計算値を大きく上回るX線漏洩が見出され、それが中性子漏洩に起因すること、ならびに当使用室に施されたX線漏洩低減対策について、第2報³⁾では治療室内の中性子線量当量分布、加速器内部の中性子発生個所の特定と発生比率の推定、ならびにターゲット材質を銅に変えることによる発生量の低下、加速器ヘッド部からの全中性子漏洩量について報告した。

今回は、迷路内における中性子線量当量の減衰状態を詳細に測定し、分析の結果から中性子遮蔽対策を実施する上で迷路に関し有益な知見を得たので報告する。

2. 使用装置、機器および中性子測定法

2.1 医療用直線加速器

三菱 ML-15 MIB: X線エネルギー 10 MV, 厚さ 1.0 mm (0.3 放射長) 白金ターゲット, 鉛イコライザー, 加速器遮蔽主材—鉛, 焦点—アイソセンター間距離 100 cm

2.2 X線・γ線測定器

IONEX 線量計 TYPE 2500/3, 0.6 cc および 600 cc 電離箱

2.3 中性子測定に使用した計器

- a) Neutron Dose Rate Meter 2202D (Studsvik)
- b) 端窓型 GM 計数装置 (富士電機 NKG 510)

2.4 ヨウ素放射化を利用した中性子測定法

$^{127}\text{I}(n, \gamma)^{128}\text{I}$ 反応を利用し, $5'' \phi$, $8'' \phi$ Bonner 球, 1.0 mm 厚カドミウム・フィルタを併用して中性子フルエンス率と線量当量率を評価する方法であり, 詳細は既に第2報³⁾において述べたので省略する。

3. 方法および結果

3.1 迷路中心線に沿う測定

Fig. 1. Room layout and measurement locations.

Fig. 1. のように迷路中心線に沿い8~19までの測定位置を設定した(1~7は第2報で治療室内の測定位置に使用している)。測定点は各位置の床上高さ 100 cm とし, 9~14 と 17~19 は入口扉表面を基準としてそれぞれ 100 cm 間隔, 15 と 16 はそれぞれ外側へ 12, 30 cm の位置で, 8 は垂れ壁の迷路側直下の位置である。2.3. a) の neutron dose rate meter 2202D (以後レムカウンタと呼ぶ)を用い, 16を除く8~19の各位置で測定し8~15については2.4の放射化法による測定も行った。さらに, すべての測定位置で2.2のIonex線量計と600cc電離箱を用いてX(γ)線の照射線量測定を行った。加速器の照射条件は, モニタ線量計表示 3.00 Gy/min (SSD 100 cm, 照射野 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ の基準深吸収線量率で2.2のIONEX線量計と0.6cc電離箱により測定した値), コリメータ全閉, 照射方向下向きとした。なお, 測定にあたりファントムは使用していない。

Table 1にヨウ素放射化法による中性子フルエンス

10 MV 医療用直線加速器からの漏洩放射線について (山口・阿部・清水)

Table 1. Measured neutron fluences in maze with an iodine activation method.

Location No.	Φ_{th} $\times 10^5 \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}/\text{Gy}$	Φ_{epi} $\times 10^5 \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}/\text{Gy}$	$\bar{E}$ keV
7	4.47	8.60	67
8	2.73	4.11	28
9	1.63	1.98	31
10	1.38	1.27	<25
11	0.84	0.67	<25
12	0.57	0.32	<25
13	0.42	0.16	<25
14	0.20	0.15	<25
*15	0.15	0.05	<25

* Entrance door close.

Table 2. Measured neutron dose-equivalents in maze with an iodine activation method.(1 $\mu\text{Sv}=0.1 \text{ mrem}$)

Location No.	H_{th} $\mu\text{Sv}/\text{Gy}$	H_{epi} $\mu\text{Sv}/\text{Gy}$	H_{tot} $\mu\text{Sv}/\text{Gy}$	$(CF)_{epi}$ $\times 10^4 \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}/\mu\text{Sv}$
7	4.80	34.2	39.0	3.72
8	2.46	11.1	13.6	7.28
9	1.74	2.71	4.45	6.75
10	1.47	1.88	3.35	9.25
11	0.90	0.73	1.63	9.25
12	0.61	0.35	0.96	9.25
13	0.45	0.17	0.62	9.25
14	0.22	0.16	0.38	9.25
*15	0.16	0.06	0.22	9.25

* Entrance door close.

の測定結果と熱中性子部分を除くスペクトル部分の平均エネルギーの評価結果を, **Table 2** には同法による中性子線量当量の評価結果を示す. また, **Table 3** にはレムカウンタによる中性子線量当量の測定結果を, **Table 4** には電離箱による照射線量の測定結果を示す. **Table 1**, **2** 中, Φ_{th} , H_{th} はそれぞれ熱中性子フルエンス, 線量当量を, Φ_{epi} , H_{epi} はそれぞれ epi-cadmium 中性子フルエンス, 線量当量を表わし, $\bar{E}$ は平均エネルギー, $(CF)_{epi}$ はヨウ素放射化法により評価した epi-cadmium 中性子に対するフルエンス-線量当量変換係数を表わす. **Table 3** 中の未補正值はレムカウンタからの計数出力値を $0.33 \text{ cps}/\mu\text{Sv}/\text{h}$ で割って算定した数値であり, 補正值は数え落とし等の補正に加え, ヨウ素放射化法との比較測定から推定された感度補正係数 (第4欄に示す) による補正を行った数値である. なお, 今回使用したレムカ

Table 3. Measured neutron dose-equivalents in maze with a Dose rate meter 2202D.(1 $\mu\text{Sv}=0.1 \text{ mrem}$)

Location No.	uncorrected values $\mu\text{Sv}/\text{Gy}$	corrected values $\mu\text{Sv}/\text{Gy}$	sensitive correction factors
7	13.8	17.5	1.0
8	9.25	10.4	1.0
9	4.94	4.80	1.0
10	3.08	3.26	1.0
11	1.52	1.56	1.0
12	0.69	0.97	1.0
13	0.41	0.55	1.4
14	0.26	0.40	1.5
15	0.15	0.23	1.5
*15	0.14	0.21	1.5
17	0.11	0.16	1.5
*17	0.085	0.13	1.5
18	0.067	0.10	1.5
*18	0.053	0.079	1.5
19	0.053	0.080	1.5
*19	0.041	0.061	1.5

* Entrance door close.

Table 4. Measured exposures of X(γ)-ray in maze.(1 $\text{nC}/\text{kg}=3.876 \times 10^{-3} \text{ mR}$)

Location No.	values of exposure $\text{nC}/\text{kg}/\text{Gy}$	Location No.	values of exposure $\text{nC}/\text{kg}/\text{Gy}$
7	403	15	1.81
8	168	*15	1.31
9	48.3	17	1.05
10	25.2	*17	0.79
11	12.9	18	0.72
12	6.89	*18	0.48
13	4.13	19	0.60
14	2.76	*19	0.45

* Entrance door close.

ウンタは低エネルギー中性子に対し感度が低下することが知られており, 熱中性子領域では50~60%の感度低下があるとされている⁴⁾. 以上の各表中, フルエンス, 線量当量, 照射線量はすべて単位X線出力あたりの数値で表わした. なお, 測定位置7の値は第2報の結果を引用した.

3.2 迷路断面の中性子線量当量分布

Fig. 1 の測定位置 11, 13, 16 とその両側 60 cm の位置

Table 5. Cross-sectional distribution of neutron dose-equivalent in maze.

Equipment conditions: Beam direction, vertically downward (gantry angle 0°), field size 0×0 cm².

Height from the floor (cm)	Location No. 11			Location No. 13			Location No. 16*		
	L	C	R	L	C	R	L	C	R
250	0.72	0.67	0.48	1.03	0.96	0.81	—	—	—
200	0.92	0.84	0.59	1.07	0.98	0.87	—	—	—
150	1.01	0.98	0.66	1.13	0.98	0.88	0.97	1.05	0.86
100	1.07	1.00	0.71	1.06	1.00	0.87	1.02	1.00	0.91
50	1.07	1.00	0.72	0.97	0.95	0.83	1.01	0.92	0.82

* Entrance door close.

Fig. 2. Schematic diagram of cross-sectional distributions of neutron dose equivalent in maze.

に床から 50 cm 間隔で測定点を設け、2.3. a) のレムカウンタにより各点の中性子線量当量を測定した。照射条件は 3.1 と同じであるが Gantry angle 90°, 180°, 270° の測定を加えた。Table 5 に照射方向下向き (Gantry angle 0°) の測定結果を示す。表の中で C は迷路中心線上, R は迷路隔壁側, L はその反対側を表わし, 測定結果は各断面について迷路中心線上, 床上高さ 100 cm の点の測定値を基準として比率で表わした。また, Fig. 2 は測定した全データを図式化し各断面毎の分布の概略を示したものである。

4. 考 察

4.1 迷路中心線に沿う線量当量減衰に関する考察

当使用室の迷路は Fig. 1 に点線で示すように迷路隔壁延長部に垂れ壁を設けてあり, また, 入口扉位置では厚さ 70 cm のコンクリート遮蔽体が扉の上端まで降り

ている。このように, 場所により迷路断面が相違するので, 中心線に沿う実距離をパラメータとして測定値をプロットしても, 統一的な記述は困難であろうと考えられる。一方, 円形断面を持つダクトのストリーミングに関する理論的考察では, ダクト入口から計った距離をダクト直径で割った量をパラメータとして記述されている。その考えは長方形断面を持つダクトへも, 等価円形断面の直径 d を,

$$d = 2\sqrt{\frac{WH}{\pi}}$$

と定義することにより, 原則的には適用できるとされている⁵⁾。ただし, H はダクトの高さ, W は幅である。今回, 測定値と迷路長を関係づけるにあたり同様な考え方を採用する。

迷路入口 (Fig. 1 の測定位置 7) を原点とし中心線に沿って距離を計測する。各測定点に至るまでに異なった断面の区間が存在するときには, その区間毎に距離の差 L を求めて L/d を計算し, それらの総和で測定点までの距離 x を表わす。Table 6 に当使用室の迷路における L , W , H および L/d の値を示す。ただし, 迷路断面の算定にあたっては内装を無視し, また, 空調用ダクトの遮蔽体貫通部からの中性子漏洩の影響は無視する (この部分の面積は全開口面積に対し, 垂れ壁部分で 5.6%, 入口扉位置で 4.2% である)。Table 7 には以上のようにして算定した各測定点の x の値を実距離 ΣL と共に示す。

Table 6. Cross-sectional dimensions of maze and real and reduced distances between each locations in Fig. 1.

Interval	L (m)	W (m)	H (m)	L/d
7~8	1.20	1.51	2.00	0.612
8~9	0.925	1.51	3.50	0.357
9~10	1.00	1.85	3.50	0.348
10~11	1.00	1.85	3.50	0.348
11~12	1.00	2.00	3.50	0.335
12~13	1.00	2.00	3.50	0.335
13~14	1.00	2.00	3.50	0.335
14~15	1.00	2.00	3.50	0.335
15~16	0.12	2.00	2.03	0.053
16~17	0.18	2.00	2.03	0.079
17~18	0.40	2.00	2.03	0.176
18~19	0.30	3.30	4.54	0.069
19~20	1.00	3.30	4.54	0.229
20~21	1.00	3.30	4.54	0.229

10 MV 医療用直線加速器からの漏洩放射線について (山口・阿部・清水)

Table 7. Real distance and reduced distance along the central line of the maze from the entrance to the point of interest.

Location No.	ΣL (m)	x
7	0	0
8	1.2	0.612
9	2.13	0.969
10	3.13	1.32
11	4.13	1.67
12	5.13	2.00
13	6.13	2.34
14	7.13	2.67
15	8.25	3.06
16	8.43	3.14
17	9.13	3.38
18	10.13	3.61
19	11.13	3.84

Table 8. Dose-equivalent ratios in maze.

Location No.	neutron dose equivalent ratio	X-ray exposure ratio
7	1.0	1.0
8	0.349	0.417
9	0.114	0.120
10	0.086	0.063
11	0.042	0.032
12	0.025	0.017
13	0.016	0.010
14	0.010	0.0069
15	0.0059	0.0045
*15	0.0054	0.0033
17	0.0041	0.0026
*17	0.0033	0.0020
18	0.0026	0.0018
*18	0.0020	0.0012
19	0.0021	0.0015
*19	0.0016	0.0011

* Entrance door close.

次に、各測定点の線量当量減衰比を測定点7の値を基準として算定する。Table 3の測定点7, 8の値はレムカウンタの光子パイルアップの影響が大きく信頼できないが、9~15の値は感度補正を施すことにより、Table 2のヨウ素放射化法による評価値と±10%のばらつきの範囲で一致する。そこで以後の考察では測定点7~14まではTable 2の値を、15~19はTable 3の中の補正値を採用する。このようにして求めた中性子線量当量減衰比と、Table 4から得た照射線量減衰比をTable 8に示す。これらの値を x に対して両対数紙にプロットし、Fig. 3を得た。図中、中性子に関する値は○印、照射線量に関する値は×印で示した。中性子、照射線量共に測定点8までの曲線は測定点7からの指数関数減衰を仮定しているが、その間の距離が短い(1.2 m)こともあり、文献データ⁵⁾⁶⁾からみて妥当と考えられる。測定点8と10の間は迷路の屈曲部になるが、線量当量の減衰傾向は上記文献データおよびFig. 4に示す他施設の測定例と矛盾しない。測定点10はほぼ迷路隔壁先端部にあたり、以後15までは一様な減少が認められる。なお、この図には入口扉を開放した場合の値のみをプロットした。測定点10から入口扉位置までは関数 $y=ax^b$ に極めて良く適合し、中性子に関しては $a=0.197$, $b=-3.00$ (相関係数0.9995)となり、照射線量に関してもほぼ同じ傾向で、同一範囲において $a=0.159$, $b=-3.17$ (相関係数0.9995)となった。この部分の線量当量減衰の傾向は、従来 Tochilin, et al.⁷⁾, 山口他⁸⁾, 阿部他⁹⁾および川島他¹⁰⁾などにより指

Fig. 3. Neutron and X-ray dose equivalent reduction along the central line of the maze.

8 etc.: measurement locations.

数関数的であるとされてきたが、今回の分析では指数関数よりもむしろ、べき乗関数への適合性が良いという結

果が出、測定結果を指数関数にあてはめることには疑問がある。また、測定点15~19についても10から入口扉までと傾きは異なるが同様な減衰傾向が見られる。全体的な傾向としては中性子またはX線の伝播状況が相違してくるであろうと思われる部分の境界で曲線の傾きが変化し、迷路の屈曲部では距離に対する線量当量の変化がゆるやかな部分が存在するという特徴が表われている。以上のように迷路中心線に沿う線量当量減衰の特徴は、迷路入口からの距離をパラメータとして両対数紙上にプロットすることにより鮮明となり、加えて迷路壁からの散乱成分が主となる領域では、このプロットの方法で直線となることが明らかになった。また、実距離の代りに等価円形断面の直径に対する実距離の比をパラメータとすることにより、断面が相違する迷路で測定された結果を相互に比較することが可能になると考えられ、このような処理の方法は迷路設計に必要なデータの集積に極めて有意義であると言える。

同じ方法で文献にある他施設の測定例を当使用室の測定結果と共にプロットしたのが Fig. 4 である。ただし、迷路断面の詳細が明らかでないため実距離をパラメータとしている。図の中で、A, B は「速中性子線使用室に対する遮蔽計算指針」¹¹⁾にある迷路内の測定例で、A は Van de Graaff 2.8 MeV 重陽子の $^9\text{Be}(d, n)^{10}\text{B}$ 反応による中性子線の使用室、B は 14 MeV 中性子線使用室の迷路である。ただし、B の迷路は屈曲部と入口の間に別の迷路口が設けられている。C は内田¹²⁾による東芝 LMR-13 使用室の迷路における測定例、D は川島他¹⁰⁾によるシーメンス Mevatron 77 使用室の迷路における測定例である。また、E は当使用室迷路における結果で比較のためプロットした。いずれも迷路壁からの散乱中性子が主となると思われる領域では、このプロットで直線になるという前述の主張を裏づけていると共に、線量当量減衰の特徴を鮮明に表現している。医療用直線加速器使用室である C, D, E の迷路の屈曲部から外側の減衰曲線の勾配を求めると、それぞれ、 -2.52 , -2.77 , -2.57 となった。なお、曲線を決めるときに得られた相関係数はそれぞれ、 0.9965 , 0.9997 , 0.9992 であった。

4.2 入口扉外側の線量当量減衰に関する考察

入口扉外側の線量当量減衰については第1報で指数関数的であると報告したが、4.1 で述べたように迷路内ではべき乗関数に適合するという結論を得たので再測定を行った。Table 3, 4, 8 において15~19が入口扉外側の測定点で*印を付した値は扉を閉じた場合、付していない値は扉を開いた場合の測定値である。4.1 と同じ方法

Fig. 4. Examples of dose equivalent reduction along the central line of some mazes.

- A: Maze in a room of Van de Graaff (Neutrons through $^9\text{Be}(d, n)^{10}\text{B}$ reactions, deuteron energy 2.8 MeV).
- B: Maze in a room of a neutron generator (14 MeV neutrons).
- C: Maze in a treatment room of a Toshiba LMR-13 Linac. (10 MV photon mode).
- D: Maze in a treatment room of a Siemens Mevatron 77 Linac. (10 MV photon mode)
- E: Present work.

で迷路にひき続いて入口扉外側の値をプロットして Fig. 5 に示す。ここで、○印が扉開、△印が扉閉の場合の中性子線量当量減衰比を、×印が扉開、□印が扉閉の場合の照射線量減衰比であり、図には距離目盛に対応した迷路構造も合わせて示す。

測定点15の中性子線量当量は扉を閉じることにより8.7%減少し、照射線量に関しては28%減少している。扉は厚さ約3mmの鋼板と厚さ6mmの鉛板から構成されている。この扉による熱中性子フルエンスの透過率を概算すると93.3%となり、従って、減少比は6.7%となる。ただし、散乱による減弱は無視し、単純な指数関数減弱として計算した。また、鋼材の密度を 7.7 g/cm^3 ,

10 MV 医療用直線加速器からの漏洩放射線について (山口・阿部・清水)

Fig. 5. Neutron and X-ray dose equivalent reduction in outside of the entrance door.
▲ etc.: measurement locations.

Table 9. Thermal neutron absorption cross sections at the neutron velocity 2,200 m/s.¹³⁾

Nuclide	Natural abundance (%)	Absorption cross section barn
⁵⁴ Fe	5.84	2.3±0.2
⁵⁶ Fe	91.68	2.7±0.2
⁵⁷ Fe	2.17	2.5±0.2
²⁰⁴ Pb	1.48	0.8±0.6
²⁰⁶ Pb	23.6	0.025±0.005
²⁰⁷ Pb	22.6	0.70±0.03
²⁰⁸ Pb	52.3	<0.030

鉛の密度を 11.34 g/cm³ とし、構成各核種の熱中性子吸収断面積は Table 9¹³⁾ の数値を使用した。この結果は、前述の中性子線量当量減少比とほぼ一致しており、計算減少比に与える鉄の寄与の割合は96%となる。このことから、扉による中性子線量当量の減少は、主として鉄材による熱中性子捕獲にその原因があると言える。

入口扉外側の線量当量の減少傾向は中性子と照射線量について互に平行な関係にあることが判明した。また、扉外側の測定値のみについては測定点19の値を除き指数関数にあてはめることも可能であるが、図のように両対

数紙にプロットする方が迷路構造との対応を表現する上で優れていると言える。なお、測定点19は図のように壁(材質はコンクリート)に近いので、壁による散乱の影響を受けているように思われる。

4.3 迷路断面の中性子線量当量分布に関する考察

迷路断面の中性子線量当量分布は Fig. 2 に示したが、分布におよぼす要因が複雑であり定量的な考察は困難なためここでは定性的考察にとどめる。

Gantry angle を変えたときの中性子スペクトルの相違などによりレムカウンタの感度変化が考えられ、同一測定点における測定値の±10%程度の変化は誤差の範囲内と考える。この観点から Fig. 2 の結果を解析すると、測定位置11の床上高さ 200 cm 未満の測定結果と測定位置13, 16の結果から鉛直方向の中性子線量当量分布は Gantry angle によらずほぼ一様であり、水平方向へは迷路隔壁側に向って一様に減少するが入口扉に近づくにつれて均一化する傾向にある。また、測定位置11の床上高さ 200 cm 以上の結果には垂れ壁の影響が大きく表われ、上方に向って線量当量が減少することが分る。しかし、水平方向の分布については高さ 200 cm 未満の場所と大きな差異はない。このような分布の特徴は、主として、一次散乱面から直接測定器に入射する散乱中性子の割合に関係しているために表われると考えられる。

5. 結 論

1. 迷路中心線に沿う線量当量減衰は、迷路入口からの距離に対し線量当量を両対数紙にプロットすることで迷路構造との対応が鮮明に表現される。特に、迷路壁による散乱が主となる領域ではプロットした値が直線となる。また、実距離の代りに迷路断面を等価円形断面に置き換え、その直径に対する実距離の比をパラメータとすることにより断面の異なる迷路で得られた結果を相互に比較できる可能性を見出した。後者のプロット方法で当使用室迷路の屈曲部以後入口扉までの線量当量減衰はべき乗関数に良く適合し、中性子に関しては、べき指数-3.00、照射線量に関しては、べき指数-3.17となった。

2. 入口扉による中性子線量当量減衰は実測値で 8.7 %であるが、これは主として扉を構成する鉄材の熱中性子捕獲による減衰であると結論された。

3. 迷路断面の中性子線量当量分布は垂れ壁の影響を受ける附近を除いて、ほぼ鉛直方向に一様であり、水平方向は迷路隔壁に向って減少するが、入口扉側へ近づくにつれて均一化する傾向にある。

稿を終るにあたり、レムカウンタを御貸しいただいた

三菱電機株式会社通信機製作所, ならびに本研究を実施するために御配慮をいただいた当院放射線科桜井智康医長に深謝いたします。

なお, 本研究の一部は第38回日本放射線技術学会総会, 第43回日本医学放射線学会物理部会において発表した。

文 献

- 1) 阿部勝彦, 清水治芳, 山口成厚, 他: 10 MV 医療用直線加速器からの漏洩放射線について, (第1報) 使用室迷路からの異常漏洩とその原因. 日放技学誌, **38**, 211-218, (1982).
- 2) 医療用加速器使用室遮蔽計算指針委員会: 医療用高エネルギー加速器使用室に対する遮蔽計算指針. 日医放会誌, **28**, 622-634, (1968).
- 3) 山口成厚, 阿部勝彦, 清水治芳: 10 MV 医療用直線加速器からの漏洩放射線について, (第2報) 加速器ヘッド部分からの中性子漏洩と治療室内中性子線量当量およびフルエンス分布. 日放技学誌, **39**, 10-17, (1983).
- 4) 小佐古敏荘, 中村尚司, 道川太一, 他: 減速材つき線量計による中性子線量当量測定 of 標準化とその移行法の検討. 日本原子力学会誌, **24**, 139-149, (1982).
- 5) Jaeger RG, Blizard EP, Chilton AB, et al.(edit.): Engineering Compendium on Radiation Shielding Vol. 1, Shielding Fundamentals and Methods, 522-524, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg and New York, (1968).
- 6) 兵藤知典: 放射線遮蔽入門(第2版). 産業図書(株), 東京, (1979).
- 7) Tochilin E and LaRiviere PD: Neutron leakage characteristics related to room shielding, Proceeding of a conference on neutrons from electron medical accelerator. NBS Special publication 554, 145-154, (1979).
- 8) 山口成厚, 阿部勝彦, 高橋敬一, 他: 医療用直線加速器使用室における中性子遮蔽対策2. 日医放会第43回物理部会, (1982).
- 9) 阿部勝彦, 清水治芳, 山口成厚: 迷路における中性子線量当量率の変化とアクリル板による遮蔽実験. 第38回日放技学総会, (1982).
- 10) 川島勝弘, 星野一雄, 平岡 武, 他: メバトロンX線治療室における中性子線量当量の測定. 日医放物理会誌, **2**, 103-115, (1982).
- 11) 中性子遮蔽専門委員会: 速中性子線使用室に対する遮蔽計算指針. 日医放会誌, **32**, 689-697, (1972).
- 12) 内田 勲: 10 MV Linac X線による光中性子線に関する研究. 日医放会誌, **41**, 633-653, (1981).
- 13) Beckurts KH and Wirts K: Neutron Physics. 409 & 415, Springer-Verlag, Berlin, Goettingen, Heidelberg and New York, (1964).