HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	医療用直線加速器使用室における中性子遮蔽の実施例とその評価
Author(s)	山口, 成厚; 花田, 博之; 五十嵐, 公彦 他
Citation	北海道大学医療技術短期大学部紀要, 1, 61-72
Issue Date	1988-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/37486
Type	departmental bulletin paper
File Information	1_61-72.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

医療用直線加速器使用室における中性子遮蔽の実施例とその評価

山口　成厚，花田　博之，
五十嵐公彦*，山口　　恵*，渡辺　良晴*，古屋　輝夫*

An Example of Neutron Shield for a Treatment Room Using Medical Linear Accelerator and Evaluation for its Results

Shigeatsu Yamaguchi, Hiroyuki Hanada,
Kimihiko Igarashi*, Megumi Yamaguchi*,
Yosiharu Watanabe* and Teruo Furuya*

Abstract

It has been found that there is neutron leakage over X-ray leakage through the maze of a medical linear accelerator room. For this reason, it is needed to reduce this neutron leakage. Leakage neutron number from Linac, average energy and neutron dose equivalent in the treatment room and at the exit of the maze are measured. Using these results, a shield is designed and constructed. After the reconstruction, the distributions of neutron dose equivalent in the treatmant room, in the maze and at the exit of the maze are measured again. It is confirmed through these measurements that the new shield is successful against reducing neutron and X-ray leakage at the exit of the maze. Besides, some useful knowledges to design a shield against the neutron leakage through a maze are found as a result of the measurments.

要　旨

設置された医療用直線加速器使用室の迷路からX線漏洩量を上回る中性子漏洩が見いだされ，中性子遮蔽に関する追加対策の必要性が生じた。このため，加速器からの中性子漏洩量，漏洩中性子平均エネルギー，使用室内外の中性子線量当量の測定を行い，その結果を用いて遮蔽設計を行って遮蔽工事を実施した。遮蔽工事後，その有効性を検証するため，照射室内及び迷路内の中性子線量当量分布の詳細な測定を行った。測定の結果，実施した遮蔽対策は完全なものであることが確認された。加えて，迷路からの中性子漏洩に関する遮蔽対策を実施するために必要ないくつかの有用な知見を得た。

1．はじめに

北海道大学医学部附属病院に医療用直線加速器

北海道大学医療技術短期大学部診療放射線技術学科
*北海道大学医学部附属病院放射線部
Department of Radiological Technolgy, College of Medical Technology, Hokkaido University
*Department of Radiology, Medical Hospital, Hokkaido University

が設置されたのは1978年であるが，設置直後の漏洩放射線測定で使用室入口扉（迷路出口扉）付近の漏洩X線量が遮蔽設計の基礎とした「遮蔽計算指数」[1]による計算値を大きく上まわることが見いだされ，その原因の調査を行ったところ，設計において想定しなかった中性子漏洩に起因するものであることが確かめられた[2,3]。その後，漏洩中性子線量当量の測定法の開発と並行して入口扉位置の漏洩放射線量の評価を行った結果，法定基準を上まわるものであることが見いだされ，早急な追加対策を要することとなった。このため，1981年に中性子遮蔽のための追加工事が行われ，同年中に完成した。ここでは，その遮蔽対策の経緯とその後行った一連の測定の結果ならびに実施された遮蔽対策の評価について報告する。

2　装置並びに放射線量の測定法

2．1　加速器

東芝 MEDICAL LINAC LMR-15（発生X線エネルギー14MV及び10MV）：タングステン製ターゲット（0.86放射長厚み），鉛製線束平坦フイルタ，タングステン重合金製一次絞り及び可動絞り，鉛遮蔽材（一部タングステン重合金）

2．2　放射線量の測定法

2．2．1　X線量の測定用計器

電離箱式サーベメータ（Aloka ICS-151）

2．2．2　中性子線量測定用計器及び測定法

（1）ヨウ素放射化法[4,5]（以後，I-Act 法という）

（2）中性子線量当量率計（Studsvik 2202D）（以後，2202D 計器という）

3　医療用直線加速器使用室及び測定点

Fig. 1，Fig. 2 に使用室のレイアウトならびに測定点を示す。Fig. 1 中ハッチを付した部分は後に設置した中性子遮蔽扉である。また，各測定点の幾何学的配置は以下のようになっている。

No. 1はターゲット面内にあり，ターゲットから0.431m，No. 4～6は同様にターゲットからそれぞれ1mの点であり，No. 3はアイソセンター（ターゲットから1m），No. 2はターゲット直上0.362mの点，No. 7～9はアイソセンター面内にあってアイソセンターからそれぞれ2mの点である。また，No. 10は床に設けられたケーブルピットの位置である。

No. 11は迷路中心線上で遮蔽扉設置予定位置，No. 12はNo. 11から0.8m離れた位置，No. 13及びNo. 14は補充測定位置であり，いずれも床上高さ1mの点である。また，No. 15～22は入口扉の中心を通る線上で，それぞれ扉表面から7，6，5，4.5，4，3，2，1mの位置にあり，No. 23は使用室外へ扉表面から0.12mの位置にあって，いずれも床上の高さ1mの点である（一部1.3mの高さでも測定を行ったがその差は測定誤差の範囲であった）。

Fig.1　Room layout and mesurement locations

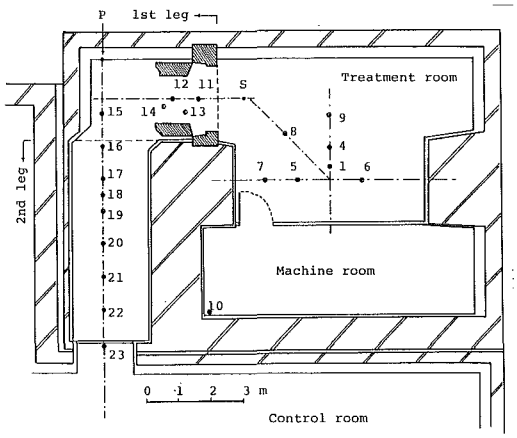
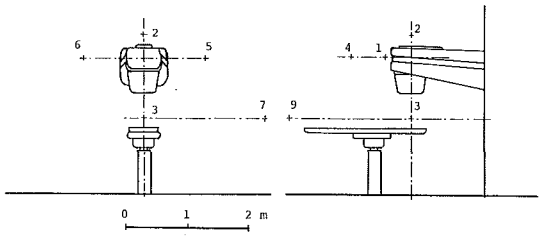


Fig.2　Measurment points around a treatment head



4　測定の結果

4．1　照射室内の測定

発生X線エネルギー14MVと10MVの各場合について，鉛直下方照射，照射野全閉の装置状態で，I-Act 法により測定した。結果を Table 1 及び Table 2 に示す。表中，Φ_{th}, H_{th}は熱中性子フルエンス及び線量当量を，Φ_{epi}, H_{epi}は，epi-cadmium 中性子フルエンス及び線量当量を示す。ここで，epi-cadmium 中性子とは cadmium カットオフエネルギー以上のエネルギーを有する中性子を言う。また，E_{av}は中性子平均エネルギーを示す。追加遮蔽工事前後で照射室内の測定結果は，測定誤差の範囲内で一致したので，各時期に測定した値を平均して表に示してある。また，Table 2 中，アンダーラインの個所は熱中性子フルエンス及び平均エネルギーが測定されていなので，エネルギーについてはNo. 1 と同一とし，熱中性子線量当量についてはNo. 2 では無視し，No. 4 ～No. 5 ではNo. 3 とNo. 8 の値の平均と仮定してある。なお，No. 1 及びNo. 3 の測定点では3年間にわたり同一条件で多数回の測定を行ったが，フルエンス評価値のばらつきは相対標準偏差で15%以下であった。

また，放射能測定における計数値統計精度は相対確率誤差で，5 %以下であった。

Table 1　Measured thermal and epi-cadmium neutron fluences per unit X-ray output (in neutrons·cm^{-2}/Gy-X) and average energies of epi-cadmium neutrons with I-Act method at each location in the treatment room.

X-ray energy	14 MV			10 MV		
Measurment location No.	Φ_{th} ×10^7	Φ_{epi} ×10^7	E_{av} Mev	Φ_{th} ×10^7	Φ_{epi} ×10^7	E_{av} Mev
1	0.17	6.71	0.49	0.023	1.03	0.47
2	—	8.39	—	—	1.33	—
3	0.15	0.89	0.40	0.012	0.13	0.21
4	—	1.23	—	—	0.21	0.35
5	—	0.99	—	—	0.15	—
6	—	1.02	—	—	—	—
7	0.15	0.49	0.15	—	—	—
8	0.14	0.46	0.15	0.016	0.064	0.15
9	0.14	0.47	0.20	—	—	—

Table 2　Measured thermal and epi-cadmium neutron dose equivalents per unit X-ray output (in μSv/Gy-X) with I-Act method at each location in the treatment room.

X-ray energy	14 MV			10 MV		
Measurment location No.	H_{th}	H_{epi} ×10^2	H_{tot} ×10^2	H_{th}	H_{epi} ×10^2	H_{tot} ×10^2
1	18	88	88.2	2.4	11	11
2	—	110	110	—	17	17
3	16	10	10.2	1.2	0.89	0.90
4	16	16	16	—	2.1	2.1
5	16	13	13	1.5	1.5	1.5
6	16	13	13	—	—	—
7	16	2.5	2.7	—	—	—
8	15	2.3	2.5	1.7	0.32	0.34
9	15	3.1	3.3	—	—	—

4．2　迷路内の測定

4．2．1　遮蔽工事前の測定結果

発生X線エネルギー14MVの場合について，4．1 と同様な装置状態で，I-Act 法により測定した。結果は Table 3 に示す。放射能の計数値統計誤差は相対確率誤差でNo. 18では6 %，他は5 %以下であった。

Table 3　Measured neutron fluences (in neutrons·cm^{-2}/Gy-X), does equivalents (in μSv/Gy-X) per unit X-ray output and average energies with I-Act method under 14MV X-ray mode in the maze before the reconstruction.

Measurment location No.	Φ_{th} ×10^5	Φ_{epi} ×10^5	E_{av} Mev	H_{th}	H_{epi}	H_{tot}
11	10	20	0.12	11	86	97
12	8.2	14	0.15	8.7	74	83
18	2.0	1.5	0.025	0.21	1.7	1.9

4．2．2　遮蔽工事後の測定結果

発生X線エネルギー14MVの場合について，4．1 と同様な装置状態で，ヨウ素放射化法と2202D計器により測定した。I-Act 法よる結果は Table 4 に，2202D計器による結果は Table 5 に示す。但し，後者の場合は発生X線エネルギー10MVに

Table 4 Measured neutron fluences (in neutrons·cm^{-2}/Gy-X), does equivalent (in μSv/Gy-X) per unit X-ray output and average energies with I-Act method under 14MV X-ray mode in the maze after the reconstruction.

Measurment location No.	Φ_{th} $\times 10^5$	Φ_{epi} $\times 10^5$	E_{av} Mev	H_{th}	H_{epi}	H_{tot}
11	—	14	0.12	—	60	—
12	—	8.8	0.15	—	4.5	—
13	3.2	7.1	0.086	3.5	23	27
14	1.8	3.9	0.095	1.9	14	16
15	1.1	1.5	0.040	1.2	2.6	3.8
16	0.76	0.84	⟶	0.81	0.91	1.7
17	0.35	0.43	under	0.38	0.46	0.84
19	0.23	0.24	0.025	0.25	0.26	0.51
20	0.17	0.14	⟶	0.19	0.15	0.34

Table 5 Measured neutron does equivalents per unit X-ray output (in μSv/Gy-X) with 2202D meter in the maze after the reconstruction.

Measurment location No.	14MV H_{tot}	10MV H_{tot}	Measurment location No.	14MV H_{tot}	10MV H_{tot}
13	26.7	—	19	0.503	0.048
14	15.9	—	20	0.321	0.048
15	3.86	0.569	21	0.206	0.033
16	1.95	0.307	22	0.154	0.023
17	0.849	0.131			

ついても測定している。なお，I-Act 法の場合の放射能測定の計数値統計誤差は相対確率誤差でNo. 17～No. 20は20%以下，他は6%以下であった。

4．3 迷路出口外の測定

4．3．1 遮蔽工事前の測定結果

No. 23の位置で鉛直下方照射，照射野全閉の装置状態のもとに，I-Act 法及び2202D計器により測定した結果を Table 6 に示す。測定は迷路出口扉を閉鎖して行った。なお，I-Act 法において，この位置における放射化量は少なく，14MVにおいては±20%，10MVにおいては±50%の測定誤差がみこまれる。

4．3．2 遮蔽工事後の測定結果

遮蔽工事後の測定は I-Act 法の測定誤差が大

Table 6 Measured neutron fluences (in neutron s·cm^{-2}/Gy-X), dose equivalents (in μSv/Gy-X) per unit X-ray output and leakage X-ray dose equivalents per unit X-ray output (in μSv/Gy-X) at the entrance door before the reconstruction for neutron shielding.

X-ray energy	X-ray		Neutrons					
	calculated	measured	Φ_{th} $\times 10^4$	Φ_{epi} $\times 10^4$	I-Act. H_{th}	I-Act. H_{epi}	I-Act. H_{tot}	2202D H_{tot}
14MV	0.0176	0.133	2.0	2.0	0.21	0.22	0.43	0.33
10MV	0.0145	0.022	0.24	0.16	0.026	0.017	0.043	0.045

きいため2202D計器のみを用いた。

（1）迷路出口扉位置における測定結果

新たに設けられた中性子遮蔽扉の効果を評価するため4．3．1と同様な条件で測定を行った。結果は Table 7 に示す。

Table 7 Measured neutron and leakage X-ray dose equivalents per unit X-ray output (in μSv/Gy-X) at the entrance door after the reconstruction for neutron shielding.

X-ray energy	case 1		case 2	
	X-ray	neutrons	X-ray	neutrons
14MV	BG	BG	0.0315	0.114
10MV	BG	BG	0.00556	0.0157

BG : background level
case 1 : Mesurements by closing the neutron shielding door.
case 2 : Mesurements by opening the neutron shielding door.

（2）迷路出口扉外中性子線量当量のガントリーアングル依存性

4．3．1と同様な条件で，中性子遮蔽扉を開放して装置の向きによる中性子漏洩量を比較測定した。結果を Table 8 に示す。

（3）迷路出口扉外中性子線量当量の照射野依存性

装置の照射野の大きさによる影響を比較するため，鉛直下方照射の条件で照射野をかえて測定した結果を Table 9 に示す。

Table 8 The dependency of neutron leakage for gantry angle.

Gantry angle	14MV	10MV
0°	1	1
90°	0.87	0.51
180°	1.3	0.98
270°	1.4	1.5

Beam direction :
0° - downward
90° - direction to maze barrier
180° - upward
270° - anti-direction to maze barrier

Table 9 A dependency of neutron lekage for the field size of useful beam.

Field size (cm^2)	14MV	10MV
0×0	1	1
10×10	0.97	0.95
20×20	0.95	0.93
30×30	0.86	0.86

測定した位置はNo. 16であるが，測定値は扉位置の線量当量に比例するので，表に示した値は扉位置でも変わらない。

（4）ダクト遮蔽の効果

4．3．1と同様な条件で中性子遮蔽扉を閉鎖してダクト遮蔽部の水をぬき，ダクトが貫通している開口部からの漏洩を測定した。その結果，遮蔽工事前の値に対する比として0.02が得られた。

5 遮蔽工事前の測定結果に関する考察と中性子遮蔽

5．1 装置内の中性子発生個所の推定

医療用直線加速器においてX線を発生している場合，中性子の主発生源はターゲット，一次絞り並びにその近辺の構造物，線束平坦用フイルター及び可動絞りである。これらからの中性子発生量を順にT，M，E，Jとすると全発生量SはS＝T＋M＋E＋Jで与えられる。上にあげた構造中容易に線束から除去できるのは線束平坦用フイルターと可動絞りである。

そこで，14MVX線発生の場合について可動絞りの状態（全閉，全開）と線束平坦用フイルターの有無を組合せ，No. 2，No. 3，No. 5及びNo. 6においてI-Act法により epi-cadmium 中性子フルエンスの測定を行った。その結果をTable 10に示す。表中第7欄は各場合について，上の行

Table 10 The measurments to estimate relative neutron yield each parts under 14MV X-ray mode in the treatment head.
(unit of Φ_{epi}, μSv/Gy-X)

	Jaws	Flattening filter	No.	Φ_{epi} $\times 10^7$	neutron source	reduction rate in each case
case1	open	+	3	1.85	S-J	0.184
	open	−	3	1.51	S-J-E	
case2	close	+	4	1.23	S	0.105
	open	+	4	1.10	S-J	
case3	close	+	5	0.986	S	0.138
	open	+	5	0.850	S-J	
case4	close	+	6	1.02	S	0.083
	open	+	6	0.932	S-J	

から下の行の数値を引き，上の行に対する比をとった値である。従って，case 1から E／(S-J)＝0.184を得る。また，case 2～4の比はそれぞれJ／Sの値を示している。これらの平均を求めるとJ／S＝0.109を得る。ここで，全発生量に対するそれぞれの部分の寄与を百分率で求めるためS＝1とおくと以上の関係から T＋M が73%，E が16%，J が11%をという結論を得る。従って，中性子は主としてターゲット及びその近辺の構造物から発生していると推定される。但し，以上の推論において中性子束はその発生源から放射された後，吸収も散乱も受けないと仮定している。また，発生源から測定点までの距離の違いも考慮にいれていない。

5．2 装置ヘッド部からの全中性子漏洩数

Table 1で示したΦ_{epi}の値をターゲットを中心とし測定点までの距離を半径とする球面上でそれぞれ積分するとTable 11を得る。No. 1～No. 6の値に比べてNo. 7～No. 9の値は明らかに大きい。これは，Table 1に示したように熱中性子

Table 11 Estimated total neutron number with the epi-cadmum neutron fluence at each location in Table 1 (in $\times 10^{12}$ neutrons／Gy-X).

No.	14MV	10MV	No.	14MV	10MV
1	1.6	0.24	6	1.3	—
2	1.4	0.22	7	3.1	—
3	1.1	0.17	8	2.9	0.40
4	1.6	0.26	9	3.0	—
5	1.2	0.19			

フルエンスが場所にあまり依存しないことから示唆されるように，室内散乱中性子の占める割合が増加するためと考えられる。そこで，散乱中性子の割合が少ないと思われるターゲットから1m以内の測定点で得られた値を平均して全中性子漏洩数とする。Table 11から，14MVで1.4×10^{12}，10MVで2.2×10^{11}（neutrons／Gy-X）が得られた。

5．3　漏洩中性子エネルギー

実測された漏洩中性子平均エネルギーの最大値はTable 1のNo. 1の点の値である。従って，14MV-X線，10MV-X線いずれを発生している場合であっても漏洩中性子平均エネルギーは約0.5 MeVと考えられる。しかし，タングステン，鉛などの重金属の（γ，n）反応のしきいエネルギー（6～7 MeV）と装置の加速エネルギーの差から考えて発生直後の中性子スペクトル中には1 MeV以上の中性子が含まれていることは疑いがない。そこで，トリウム－ポリカーボネイト飛跡検出法（誘導核分裂しきいエネルギー1.3MeV）により高エネルギー中性子の検出を試みた。その結果，少なくとも，使用した検出法の感度の範囲内では検出できなかった。このため，漏洩中性子エネルギースペクトルは約1 MeV以下の領域が大部分を占めると推測される。

5．4　中性子遮蔽

5．4．1　遮蔽実験

加速器ヘッド周囲，迷路入口部，迷路出口扉の内側の3個所にそれぞれ厚み20cmのポリタンクに水をつめて積み上げ，鉛直下方照射，照射野全閉の装置状態で14MV-X線発生時に迷路出口扉（Fig. 1，No. 23）の位置において遮蔽効果を測定した。測定は電離箱とカドミュウム板を組み合わせ，カドミュウム板の有無による電離量の差が熱中性子フルエンスに比例することを利用した方法により行った。

その結果を，遮蔽を行う前の値に対する各場合の測定値の比で表すと，加速器ヘッド周囲を遮蔽したとき0.10，迷路入口部遮蔽で0.34，迷路出口部遮蔽で0.07となった（但し，迷路出口扉は閉鎖している）。迷路入口部の遮蔽では天井裏の空間があるため遮蔽すべき空間の¾程度遮蔽されたのみであったので，完全に遮蔽すると迷路出口位置の遮蔽と同程度の効果が期待できるものと予測された。この予備的実験により，水の厚み20cm程度で充分遮蔽効果が期待できることがわかった。

5．4．2　遮蔽設計

10MV- X線発生時の中性子発生量は，5．2の結果から明らかなように，14MV-X線発生時の⅙以下であり，一方，使用X線出力は14MV-X線が2Gy／min，10MV-X線が3Gy／min，であるので14MV-X発生時の遮蔽を行うと充分である。遮蔽位置は予備実験の結果をふまえ，追加工事のしやすさ，設置される遮蔽壁からの熱中性子捕獲γ線に対する配慮が不要である等の観点からFig. 1のハッチを付した場所に決定した。

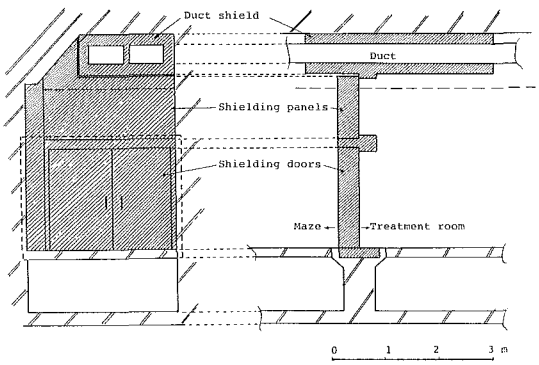
Table 3のNo. 12のH_{tot}に対するTable 6の比をとると，迷路による中性子線量当量の減少割合は0.005になると期待できるが遮蔽設計の段階では，この結果に対する信頼性が確立していなかったので，安全のため迷路による減少は無視し，遮蔽予定位置での週あたり中性子線量当量の値を100 μSvとした。この値を選択したのは迷路出口扉から外は治療患者の待合室となっていることによる。遮蔽材は水とし，その厚みは「速中性子線使用室に対する遮蔽計算の指針」[6]により計算した。計算にあたって，5．2で得られた全中性子漏洩数から1m点の中性子フルエンス率を計算

し，5．3の結果から安全のため中性子エネルギーを1 MeV単色としてICRP21に与えられる変換係数[7]を求める。以上の数値を用いて線源から1 m点の中性子線量当量率7.28mSv／min（2 Gy／min のX線出力に対し）を得た。また，ターゲットから遮蔽予定位置までの距離を4.75m，週あたり使用時間を18時間とした。以上の条件で求められた遮蔽材（水）厚みは30cmとなった。

5．4．3　遮蔽の実施

遮蔽は迷路入口部を鉄製の水厚み30cmの水槽で開口面積全面を覆うように施工された。照射室への出入りのため，床上2 mまでは両開きの電動式扉とし，他はパネル状となっている。照射室内の空調用ダクトは水厚み20cmの水槽で覆いダクト開口部からの中性子漏洩を防止した。ダクト遮蔽部は加速器からの漏洩中性子が遮蔽パネルのダクト貫通部に直接入射しない位置まで照射室内へ延長され，また，迷路内へも30cm程度延長されている。ダクト内には遮蔽のための構造を設けなかった。施工された結果を Fig. 3 に示す。

Fig.3　The constitution of the neutron shielding barrier



6　遮蔽工事前後の測定結果の分析と考察

6.1　施工後の遮蔽効果の評価

設置した医療用直線加速器の使用申請にあたって設定した装置の使用条件は，X線出力が14MV-X線の場合2 Gy／min ，10MV-X線の場合3 Gy／min で，週あたり使用時間18時間である。

この条件で Table 6及び Table 7（case 1）から週あたりの線量当量を計算すると Table 12 のようになる。この測定を行った位置で期待した

Table 12　Comparison between the values of dose equivalent at the entrance door before and after the reconstruction for neutron shielding.

		Before			After		
	Cal. X	Meas. X	Meas. n	Meas. total	Meas. X	Meas. n	Meas. total
14MV	38	290	930	1220	BG	BG	BG
10MV	47	70	140	210	BG	BG	BG

unit in μSv／week,BG ; background level

漏洩放射線の線量当量の値は 100μSv／週以下である。表から明らかな通り計算値はこの値を充分下まわっているにもかかわらず，14MV の場合はX線漏洩に限ってみても実測値はおよそ3倍の値を示している。中性子漏洩を加えると10倍を超える。管理区域境界の法定基準は 300μSv／週であるが，それさえも4倍以上超えている。このため追加遮蔽工事を要することとなった。施工後の測定では，表にみられる通り，新設された中性子遮蔽扉を閉鎖すると測定結果はバックグランドレベルとなり，予期以上の効果があることが確かめられた。次に，中性子遮蔽扉を開放した Table 7（case 2）の場合を実用状態に換算すると，14MV の場合，X線が68，中性子が 246μSv／週となり，計 314μSv／週，10MV の場合，X線が18，中性子が51μSv／週となり，計69μSv／週である。従って10MV-X線の場合は扉以外の遮蔽部分のみで目標値が達成できているが，14MV-X線の場合は，この状態では迷路出口扉の位置を管理区域境界とすることができず，中性子遮蔽扉の使用を要する。以上の結論は鉛直下方照射，照射野全閉の状態で得られているが，装置は回転型であるので他の照射方向を取ったときの状況並びに照射野をかえたときの状況も検討しておく必要がある。照射野については Table 9 に示した通り，中性子に関しては照射野を開くにつれ漏洩量が少なくなる。X線に関しても同様の傾向がみられた。

これは，X線漏洩の大部分が迷路内で熱中性子が捕獲されることによって発生した捕獲γ線の寄与であることを示唆している。X線漏洩に関し，計算方法の中に安全率がみこまれているため，本来実測値が計算値を下まわるはずのところが，予想外の実測値を得た原因がここにあると考えられる。照射方向を変えたときは Table 8 に示す通り，ガントリーアングル270° の場合が最大であり，180° の場合がこれについでいる。しかし，前者の方向利用率は0.25であり，後者のそれは0.5であるので，週あたりの線量当量は鉛直下方照射の場合の値を超すことはない。

ダクト遮蔽に関しては4．3．2（4）に示したように，遮蔽材の水をぬくと，他の部分の遮蔽が完全であっても中性子漏洩が検出されることから，やはり遮蔽を要することがわかる。

遮蔽は単にダクト周辺を厚み20cmの水で覆ったのみであるが，この結果は加速器からの漏洩中性子線が直接ダクト貫通部へ入射しないような配慮をすることで充分な遮蔽ができることを意味している。従って，ダクト内部に特別な構造物は必要なく，空調機の負担増を避けることができた。

6．2　加速器ヘッド部からの漏洩中性子の方向分布

測定の対象とした発生X線エネルギーの程度では，光核反応による中性子発生は大部分蒸発過程によるものでほぼ等方的に放射されるとされている。しかし，実際の装置においては，遮蔽材の材質，厚み及びヘッド部の内部構造により漏洩中性子フルエンスには方向分布がみられる。事実，Table 11に示すように，この装置では前方に強く漏洩（No. 1及びNo. 4）ついで上方（No. 2），両側（No. 5及びNo. 6）となり，照射野絞り全閉の状態ではアイソセンター方向が最も少ない。アイソセンター方向が最も少ないのは，この方向にタングステン重合金の厚い照射野絞りがあるためと考えられる。漏洩中性子平均エネルギーについても Table 1 の No. 1，No. 3，No. 4 に示すように遮蔽材厚みによると考えられる方向依存性が見いだされた。

6．3　照射室内の線量当量分布

中性子の発生源は，既に述べたように，主としてターゲットとその周辺の構造（特に強いX線に照射される1次絞り）と推定され，ヘッド部外部の中性子フルエンスまたは線量当量がターゲットからの距離に対し逆2乗則分布をなすことが予想される。しかし，室内で散乱された中性子を含めて測定しているため，中性子フルエンスの分布は逆2乗則に従っていないことが Table 1 の分析から判明した。

散乱中性子のフルエンスは室内の相当広い範囲にわたって均一に分布しているであろうことは Table 1 に示した熱中性子フルエンスが場所にあまり依存しないことから推測される。一方，線量当量は中性子フルエンスに変数係数を乗じて得られるが，漏洩中性子に比し平均エネルギーが低い散乱中性子は変換係数の値が小さく，全線量当量に占める散乱中性子の寄与は，フルエンスの場合よりも少なくなると期待できる。採用した測定法は上述のように散乱中性子を区別できず，Table 2 に示すように，その寄与の割合が増すにつれ測定された平均エネルギーの低下となって現れている。しかし，少なくとも照射室内においては，漏洩中性子線量当量の寄与が大きいと考えられるので，線量当量については逆2乗則の成立が期待できる。Table 2 の H_{tot} の値をターゲットからの距離に対しプロットしたのが Fig. 4 である。但し，ターゲットから同一距離にあるデータは平均して示してある。アイソセンターにおける値を除外してべき関数回帰を行い，勾配を求めると14MVの場合は−2.05（相関係数0.999），10MVの場合は−2.14（相関係数0.999）となった。この結果から，照射室内の線量当量分布は比較的良く逆2乗則に従うことがわかる。アイソセンターにおける値を除外したのは，その方向は特に遮蔽体厚みが大きく，漏洩量が少ないので，平均的な線量分布を考察するには不適当なデータのためである。

Fig.4 Neutron dose equivalent distribution in the treatment room in downward bean direction and 0×0 ㎠ field

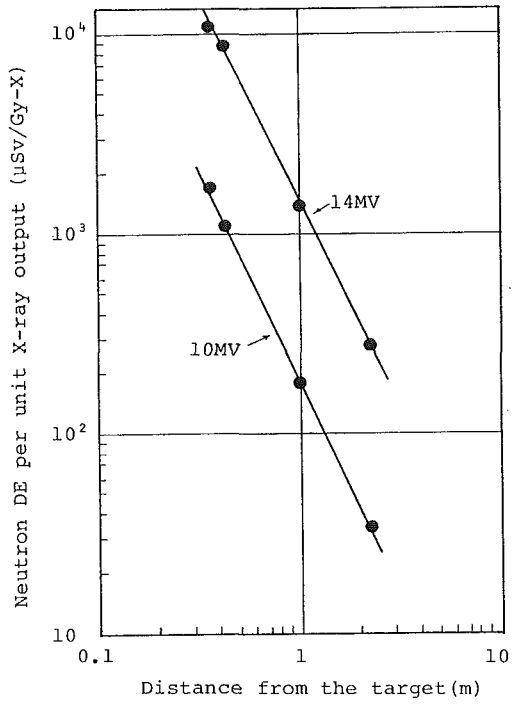
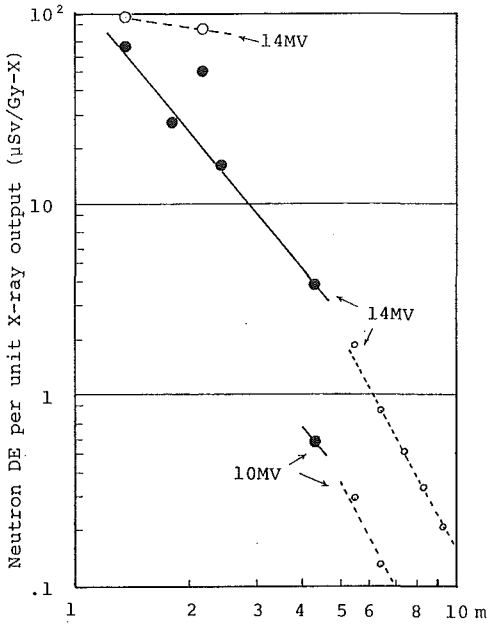


Fig.5 Neutron dose equivalent distribution in 1st leg of the maze

---○---: Before the reconstruction

—●—: After the reconstruction

·····∘·····: Data in 2nd leg of the maze after the reconstruction



6．4　迷路内の線量当量分布

遮蔽工事後の迷路内測定は中性子遮蔽扉を解放した状態で行った。

迷路の第一脚の中心線に沿う線量当量の減少は迷路入口から照射室側へ迷路幅の½の距離の位置に仮想点線源を置くと距離逆2乗則で記述されるとされている[8]。そこで，迷路入口幅の½の距離である0.8mの点Sを原点として Table 4 及び Table 5 のNo. 11～No. 15の値をプロットしたのが Fig. 5 である。

No. 11及び12以外はI-Act 法と2202D計器を用いて測定しているが，両者の一致は良い。

Fig. 5 において，No. 12の位置の値はNo. 11の位置の値とあまり大きく変わっていない。

Table 4 に示したように評価したエネルギー値が両者で逆転している。これは，No. 12が加速器から漏洩する中性子束に直接照射される中性子遮蔽扉により近い位置にあるためと考えられるが，それを確認する測定を行っていない。この位置の値を除外すると，ほぼ一直線上に配列しているのでべき関数回帰により勾配を定めると－2.37（相関係数0.996）となり逆2乗則とはならない。迷路第一脚の入口付近では，迷路の軸に垂直な断面内で，加速器からの中性子線の影になる方向へ線量当量の減少を示すような分布が予測されるので，プロットした測定点の配列から考えて逆2乗則より線量当量の減少割合が大きくなることは理解できる。10MVの場合は遮蔽工事後にNo.15の位置のみであるので参考のためその値をグラフにプロットした。

迷路第二脚における測定は，14MVの場合のNo. 18とNo. 23を除き，すべて遮蔽工事後に行っている。Table 4 ～ Table 6 の値をプロットしたのが Fig. 6 である。加速器からの中性子線が照射

Fig.6 Neutron dose equivalent distribution in 2nd leg of the maze

○ : Before the reconstruction

● ■ : After the reconstruction

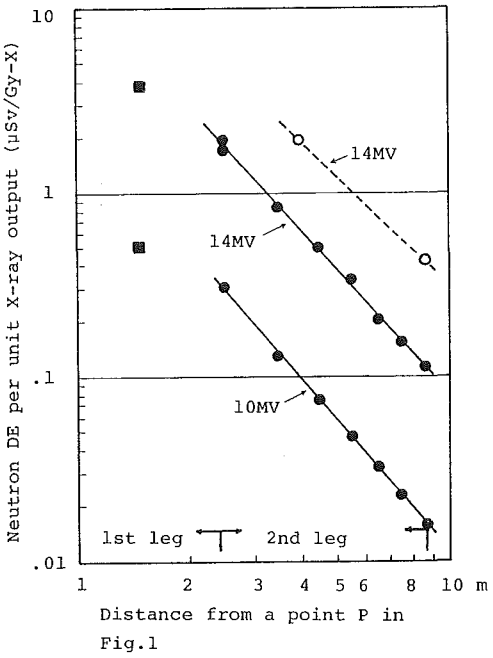


Fig.1

される迷路突きあたり壁からの散乱中性子が測定対象と思われるので，突きあたり壁上の点Pを原点として距離をとってある。ここでも I-Act 法と2202D計器による測定結果の一致性は良い。プロットの結果，全ての測定点が一直線上に配列するので，べき関数回帰により勾配を求めると，14MVの場合は－2.23（相関係数0.998），10MVの場合は－2.33（相関係数0.997）となった。10MVの場合の方が幾分早く減少する傾向にある。各測定点から見込まれる散乱面積が変わらなければ，ほぼ逆2乗則減少を示すと考えられるが，実際は，測定点から見込む散乱面積が変化し，迷路の出口に近づくほど散乱面積が減少するので，上に得られたように逆2乗則より減少割合が大きくなると考えられる。通常，迷路の遮蔽計算においては散乱面からの距離逆2乗則を仮定するが，上の結果から，この仮定は安全側にあるとおもわれる。

遮蔽工事前の2点の測定値を参考のためプロットしているが，工事後の測定とほぼ同じ傾向で減少している。

6．5 工事前後の迷路出口における漏洩量の変化

迷路突きあたりの壁からの散乱中性子が主として測定値に寄与すると考えられるので，その部分の工事前後の面積を計算すると，工事前は10㎡，工事後は3.6㎡となる。従って，散乱面積は工事前に対し36%になる。一方，Table 6及びTable 7から中性子線量当量の工事前に対する工事後の割合を求めると，14MV，10MVいづれの場合も35%となる。但し，工事後は2202D計器により測定しているので Table 6では2202Dの値を採用する。この結果は，予測した通り，突きあたりの壁の散乱面積の減少に比例して中性子漏洩線量当量も減少することを意味している。従って，迷路からの漏洩を減少させるためには迷路出口から見込まれる，加速器からの中性子線が照射される面積をできるだけ少なくすることが有効な方法の1つであると結論される。なお，X線（捕獲γ線を含む）に対しは工事前の値に対し工事後，14MVでは24%，10MVでは25%となり，中性子より大きい減少率を示している。

6．6 ガントリーアングル及び照射野依存性に関する考察

ガントリーアングルを変えると測定点から見込まれる散乱面積，ターゲットと散乱面の中心までの距離，散乱面への漏洩中性子線の入射角が変化すると共に，ヘッド部における漏洩量の方向依存性に起因する，散乱面への入射中性子フルエンスの変化など，複雑な要因に支配されて迷路出口扉位置の中性子線量当量の値が変化する。このうち，迷路つきあたり壁の散乱面積比は，0°の場合を1とすると，90°，180°，270°ではそれぞれ1.5，2.1，1.3となり，距離の2乗の逆比はそれぞれ0.82，1，1.3となる。Table 8に示した実測結果は，このうち距離の変化による影響が大きいことを示唆しているが，明確な結論を得るに至らない。

照射野依存性を示す Table 9から明らかなように照射野が大きくなるにつれ出口扉位置の中性

子線量当量が減少する。このことは，可動絞りが中性子発生に寄与していることを示唆している。5.1で述べたように，可動絞りの中性子発生量への寄与は11%であるので，照射野を全開とすると全閉の場合89%になることが期待できる。照射野全開は Table 9 の30×30㎠の場合であり，全閉の場合に対する比0.86はこれとよく一致している。従って，測定された照射野依存性は，可動絞りからの中性子発生に起因していると結論できる。

7 中性子遮蔽壁の厚みに関する再検討

以上に述べてきた設置後の測定の結果から，設置された遮蔽の厚みは安全率を見積すぎていると思われる。既に設置した遮蔽は変更することができないが，測定によって得られた知識から最適厚みがどの程度のものか検討するのも有益である。14MVの場合について計算することとし，遮蔽壁の設置位置は今回の位置と同一とする。迷路出口位置の週あたりの遮蔽設計の目標線量当量値は20 μSvとする。

Table 6 及び 7 から全線量当量に占める中性子線量当量の割合は76～78%である。従って，中性子に関する目標値として15.6μSv／週を採用する。既に，5.4.2で述べたように迷路減衰率は0.005であるので，遮蔽予定位置の，遮蔽後の中性子線量当量率は3.12mSv／週となればよい。一方，ターゲットから遮蔽予定位置までの距離は，床面斜影距離で4.8mである。漏洩中性子線の平均エネルギーを0.5MeV（実効エネルギー0.295MeV）とし，5.2に与えた全中性子漏洩数を用いて，ターゲットから１mの位置の線量当量率を求めると3.0mSv／minが得られる。これにより遮蔽予定位置の，遮蔽がない場合の週あたり線量当量を求めると，140mSv／週となる。従って，遮蔽壁は3.12／140＝0.023の減衰率を有するものが必要である。遮蔽材として水を使用することとし，減衰率から厚みを算出するため丸山等[9] のデータを使用すると11cmの値が得られる。即ち，設置した遮蔽壁の厚みは３倍程度過大評価していることになる。

9 結論

（１）実施された中性子遮蔽対策は完全なものであることが確かめられた。しかし，10MV程度の医療用直線加速器使用室における迷路からの中性子漏洩が無視できないものであることを指摘し，この種の対策を実施したのは国内では初めてのことであったので，他に参考例がなく安全を見積もりすぎた面があった。その後の測定結果から，遮蔽厚みを３倍程度過大に評価していることがわかった。

（２）一回屈曲形の迷路からの中性子遮蔽対策を行おうとする場合，迷路出口から見込む（加速器からの漏洩中性子に照射される）散乱面積は重要な要因であり，これを可能な限り減少することが有効な対策の一つであることが明らかとなった。

（３）迷路における中性子線量当量の減衰は，第一脚中では，迷路入口から迷路軸に沿って照射室側へ，迷路幅の½の距離移動した点を原点とし，第２脚中では迷路つきあたり壁の表面と迷路軸との交点を原点として距離を測定することにより，逆２乗則を仮定すると安全側の評価がなされることが明らかとなった。

（４）10MV以上の加速エネルギーを有する医療用加速器使用室の迷路出口で測定される線量当量値は中性子によるものが大きな比重を占めていることが明らかとなった。また，測定されるＸ線量には，相当量の捕獲γ線の寄与があることが明らかとなり，従って，中性子に対する対策を講じることにより，Ｘ線量も必然的に減少することが明らかとなった。

終わりに，本研究に対し御助言と御配慮をいただいた北海道大学医学部附属病院放射線部長　入江五朗教授，並びに中性子線量当量率計の貸与に多大の御配慮をいただいた三菱電機（株）通信機製作所に深謝致します。

文　献

1）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数，日医放会誌，28，622－634，1968.

2）五十嵐公彦，山口成厚，花田博之，他：リニアック照射室迷路入口の漏洩線について，日医放会第36回物理部会，1978.

3）五十嵐公彦，山口恵，渡辺良晴，他：日技学誌，35，423－428，1979.

4）山口成厚，花田博之，五十嵐公彦，他：ヨウ素放射化検出体を利用した低フルエンス率中性子束測定法，日医放会誌，41，783－791，1981.

5）山口成厚，花田博之，五十嵐公彦，他：ヨウ素放射化検出体を利用した中性子平均エネルギー及び線量当量評価法（医療用直線加速器からの中性子場への適用），日医放会誌，42，783－791，1982.

6）中性子遮蔽計算専門委員会：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.

7）ICRP publication 15 and 21：Protection against ionizing radiation from external sources and Data for protection against ionizing radiation from external sources, P52, 1971, Pergamon Press, Oxford, New York, etc.

8）放射線安全技術センター：電子加速器の使用に伴う中性子線の遮蔽等に関する基礎的調査（昭和59年度科学技術調査資料作成委託調査報告書），p81，1985.

9）T. Maruyama, A. Shiragai, K. Kawachi, et. al.：Attenuation and Scattering of Fast Neutrons Ranged from 0.5 to 14MeV by Various Shielding Materials, 日医放物理部会誌，1 (2)，45－54，1981.