高性能化に対応した X線 CT 装置の遮蔽評価法の開発

目次

1.背景	2
2.課題	3
3. 方法	5
(1) X線のエネルギーの測定	5
(2) 鉛と石膏ボードに関する透過割合の実測	6
(3) X 線診療室での漏えい放射線の実測	6
① サーベイメータを用いた方法	6
 0SL 線量計を用いた方法 	6
(4) エックス線診療室のダクトからの漏えい線量	6
4. 結果	8
(1) X線CT装置のエネルギースペクトルの評価	8
(2) 鉛と石膏ボードの透過割合の実測での検証	.14
(3) 実際の X 線診療室での漏えい放射線の量の評価	.18
③ 半導体サーベイメータ	.18
④ 0SL で 3 週間測定	.18
(4) エックス線診療室のダクトからの漏えい線量	.22
5. 考察	24
(1) X線CT装置のエネルギースペクトルの評価	.24
(2) 鉛と石膏ボードの透過割合の実測での検証	.27
① 鉛	.27
② 複合遮蔽	.28
(3) 実際の X 線診療室での漏えい放射線の量の評価	.28
 X線CT 室でのOSL線量計を用いた実測 	.28
② X 線透視室での 0SL 線量計を用いた実測	.28
(4) エックス線診療室のダクトからの漏えい線量	.29

1. 背景

2014 年 3 月 31 日に X 線装置の遮蔽計算も含めて改正通知(「医療法施行規 則の一部を改正する省令の施行について」の一部改正について(平成26年3 月31日付け医政発0331第16号。以下、改正通知と略す))が発出された。 これまで日本での X 線施設の遮蔽計算の指針は、米国の National Council of Radiation Protection and Measurements (米国放射線防護審議会 (民間団 体)。以下 NCRP と略す。)の刊行物を参考にして作成されてきた経緯があ る。この改正通知でも X 線装置の遮蔽計算に関して NCRP Report No. 147 に準 拠した方法を示していた。NCRP は、放射線の防護及び放射線の測定方法につい ての調査、研究開発等を行い、その成果は、NCRP Report にまとめられ連邦政 府や社会に提供されている。NCRP Report No.147 以前に、NCRP による X 線装 置の遮蔽計算指針で日本の規制の参考とされてきたのは、1976 年に発行された Report No. 49 Structural Shielding Design and Evaluation for Medical Use of X Rays and Gamma The Rays Energies up to 10 MeV である。その後、 NCRP は 2004 年に No. 49 を改訂して No. 147 を発行している。日本では遮蔽計算 が省令の解説通知で示されており、2001年に NCRP Report No.49を取り入れた 通知(医療法施行規則の一部を改正する省令の施行について(平成 13 年 3 月 12日付け医政発第188号))が発出された。この際には管電流に照射時間を乗 じた実効稼働負荷[mAs]が照射する放射線量を決定するパラメータの一つとさ れた。その後、改正通知が発出されが、X線CT装置に関して、NCRP Report No.147 で示されていた DLP (Dose length product) 法を取り入れなかった。

これは当時、日本で行われた検証で懸念が生じたからである。NCRP Report No. 147 は、X線 CT 装置に関する遮蔽計算モデルも線源のパラメータとして DLP を用いる方法として示しているが、患者の体格差などに由来すると考えられる 散乱係数の過小評価の懸念があったために、当時、X線 CT 装置に関する遮蔽計 算モデルの採用が見送られた経緯がある。このようにX線 CT 装置の特性の考 慮が現場で課題になっていることから、2017 年度に日本放射線技術学会とも連 携し、DLP を用いた実測に基づき再評価した散乱係数を適用した放射線事前安 全評価のガイドラインのドラフトを作成した。この取り組みは、日本画像医療 システム工業会(以下、JIRA と略す。)でのX線診療室しゃへい計算マニュア ルの作成とも連携したものであり、医療機関で必要に応じてより合理的な評価 が行えるような方策を提案することを目指したものである。

2. 課題

得られた成果物は日本放射線技術学会のウェブページで 2019 年 1 月に公開 した(X線 CT 室の漏えい線量計算マニュアル第 1版)。公開された計算手法 は、NCRP Report No. 147 を改良したもので、室内での実測値に基づいている が、壁での透過は従来の考え方をそのまま用いていた。一方、NCRP Report No. 147 では、X線 CT 装置の遮蔽体の透過に関して、より安全側となる考え方 を適用している(図 1、図 2)。

しかし、日本での計算手法では、その考慮がなされていないままであった。 ここで、ガントリによる減衰とビーム硬化による遮蔽体外側での線量評価はト レードオフの関係になり、遮蔽体が厚くなると、ビーム硬化への配慮がより必 要になると考えられることから、X線CT装置の性能向上による1次ビーム硬化 への対応などが課題となっている。

これまでの検討で、非保守的にならないことを徹底するために、ガントリ方 向ではビームの硬化の効果を考慮し、1次遮蔽体に関しても硬くなったスペク トルを考慮した透過係数を用いる方法も2018年度の研究班で提案した。





Fig. A.3. Transmission through concrete of secondary radiation from CT scanners [data of Simpkin (1991) fitted to Equation A.2].

図 1 NCRP Report No.147 での X 線CT 装置に対する鉛の透過割合 図 2 NCRP Report No.147 での X 線 CT 装置に対するコンクリートの透 過割合 DLP 法が結果としてより合理的になっているのは、以下の理由であると考えられる。

- 装置の改良とともに1次ビームのろ過に使われるフィルタの厚みが増した。
 - ▶ その結果、単位実効稼働負荷あたりの空気カーマが減弱した。
 - ▶ しかし、この要素は従来法では考慮されて来なかった。
 - このため従来法において装置が進歩したことでもたらされた変化は、非安全側の評価をもたらすことはなかった。
- 一方、フィルタの厚みが増したことは透過率を増加させることになる。
- ここで用いられた評価法を現行の日本の通知(病院又は診療所における 診療用放射線の取扱いについて(平成31年3月15日付け医政発0315第 4号)、以下単に通知と略す。)で使われている透過率データと比較す ると、以下のようになっている。
 - ▶ 硬くないビームデータを使うと半分以下の透過となり非安全側
 - ▶ 硬くなったビームと仮定すると日本の方が倍程度、保守的な評価

このため、ガントリによるビームの硬化に関して、通知での硬くなったビームを仮定した透過率を用いることで十分に安全側になると考えられる。遮蔽体の透過率は光子のエネルギーに依存するが、フィルタが厚くなると、線質は硬くなる。それに伴い散乱線のエネルギーもより透過性が増すことになる。このため、今後、よりフィルタが厚い装置が使われるようになる場合には、用いる評価法が安全側になっているか、検証が求められることになる。また、この際に透過率の評価として鉛当量を用いると、鉛は蛍光X線を発生させるためにエネルギーに対して透過力が単調には変化しないことにも注意が求められる。

ここまでの検討では壁での透過に関して実測による評価が行えていなかった ので、実測による壁での透過の検討も試みた。また、X線室に設けたダクトの 扱いが現場で課題となっていたことから、その計算での評価法を検討した。

3. 方法

(1) X線のエネルギーの測定

3社のX線CT装置(各社各2モデル計6台)を用いて、管電圧120kVの1次 X線エネルギースペクトルについて、ガントリ透過分と散乱線分のX線エネル ギースペクトルを測定し、得られたスペクトルデータを用いて遮蔽体の透過割 合を計算した。1次X線エネルギーはカーボン散乱体を用いた90度散乱法で測 定した。ガントリ透過分のエネルギースペクトルは、ガントリ方向のアイソセ ンタ位置にX線スペクトロメータを配置し、散乱体無しの状態でガントリを透 過してくる漏えいX線を測定した。散乱線分のX線エネルギースペクトルは、 全身人体ファントムの胸から骨盤までの範囲を臨床使用条件にて撮影を行い、 ガントリ方向以外の方向(0度、45度、135度、180度、225度、315度)につ いて測定した。測定されたスペクトルはガントリ透過分と散乱線分それぞれに ついて平均化し、平均X線スペクトル(ガントリ透過分では6台の内3台につ いては漏えい線量は検知されなかった)とした。

得られた平均 X 線スペクトルを入力値とし、モンテカルロシミュレーション コード PHITS (3.17)¹で用いられている EGS を用いて鉛(11.34g/cm³)、コンク リート(2.35g/cm³及び 2.10g/cm³)、鉄(7.86g/cm³)における透過率を計算した。

コンクリートの組成は以下の通りとした。

- 2.35 g/cm³: H:0.0056 0:0.4983 Na:0.0171 Mg:0.0024 A1:0.0456
 Si:0.3158 S:0.0012 K:0.0192 Ca:0.0826 Fe:0.0122
- 2.10 g/cm³: H:0.0103 C:0.001 0:0.5446 Mg:0.0022 A1:0.0348
 Si:0.346 Ca:0.0446 Fe:0.0143

また、120 kV 2.5mmA1 で発生させた X 線を半径が異なる円柱の水ファントム に入射させ、散乱線のスペクトルを計算した。さらに、室内の散乱線に含まれ るガントリを透過してくる 1 次 X 線の割合を推定した。密度補正の保守性も検

¹ Tatsuhiko Sato, et al. Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02, J. Nucl. Sci. Technol. 55, 684-690 (2018)

証した。1次X線のガントリ透過が検出された3台のX線CT装置について、ガントリ方向以外の散乱線量を室内の散乱線と見なし、室内の散乱線に含まれる ガントリを透過してくる1次X線の割合を推定した。

(2) 鉛と石膏ボードに関する透過割合の実測

一般撮影装置を用いて同じようなエネルギースペクトルになる照射条件を検 討して、照射した。

(3)X線診療室での漏えい放射線の実測

以下の方法により、実際のX線診療室での漏えい放射線の量を評価した。

- ① サーベイメータを用いた方法
- OSL 線量計を用いた方法

(4) エックス線診療室のダクトからの漏えい線量

放射線輸送コードとして PHITS3.240 を用いてエックス線診療室のダクトか らの漏えい線量を計算した。壁はコンクリートで厚み15 cmとし、ダクトの直 径を6 cmとし、ダクトの高さは地表から2 mとした(図3、図4、図5)。 120 kV 2.5 mmA1 で発生させた X 線を高さ150 cmから下方に100 cm 先で直径 20 cmになるように照射し、半径10 cm長さ1mで地表に平行に置かれた水の円 柱で散乱線を発生させた。



図 3 ダクトから漏えい X 線の計算のための幾何学的設定(上から見た図)



図 4 ダクトから漏えい X 線の計算のための幾何学的設定(鉛ガラスとの比較部分)



図 5 ダクトから漏えい X 線の計算のための幾何学的設定(横から見た図)

4. 結果

(1) X線CT装置のエネルギースペクトルの評価

装置の高性能化に伴いビーム硬化への対応が必要と考えられることから、フィルタリング効果としてはもっとも顕著であると考えられるガントリ方向に関して3台のX線CT装置でエネルギースペクトルを測定し、平均エネルギーが高くなることを確認した(表1及び図6)。

得られたスペクトルを基に壁の透過割合をモンテカルロ法により計算した。 その結果、通知の硬化した X線の透過割合だけでなく保守的に見積もりがなさ れている NCRP のリポートでの X線 CT 装置に由来した硬化した散乱線よりも透 過度が増していることが確認された(図7、図8、図9)。ただし、ガントリ を透過する割合は少なく、全体としては保守的な見積もりになっていると考え られた。 散乱線の壁の透過割合が安全側になっているかどうかを検証するために、1 次ビームへの付加フィルタを変化させ、モンテカルロ法により散乱線の壁の透 過割合を計算したが、1次ビームへの付加フィルタが厚みを増すことによる壁 の透過割合影響は限定的であると考えられた(図 7、図 8、図 9)。

ファントムのサイズにより散乱線のエネルギースペクトルは変化するが、透 過割合の差異としては1.4倍程度に留まると考えられた。

ガントリ方向のスペクトル測定の結果を散乱線スペクトル測定での225度方 向の測定値と比較した。X線スペクトロメータで測定された全光子数を照射条 件である管電流時間積(mAs)値で規格化し、散乱線量に対するガントリ透過 成分の含有を推定した(表 2)。散乱成分に対する1次X線のガントリ透過の 推定含有割合は最大でも0.26%であった。

表	1	平均 X 線エネルギーの変化	î

1次X線(keV)	ガントリ透過分(keV)	散乱線分 (keV)
62. 3	88.4	55. 3



図 6 X線スペクトル

赤い実線は、ガントリ透過を測定したもの 黒い実線は、散乱線を測定したもの





図7 鉛の透過割合

図 8 コンクリートの透過割合



図 9 鉄の透過割合



図 10 散乱線のエネルギースペクトル(ファントムの半径別)



図 11 散乱線の相対的なエネルギースペクトル (ファントムの半径別)



図 12 散乱線の相対的なエネルギースペクトル(ファントムの半径別), 60 keV 以上

	ガントリ透過成分	散乱線成分	推定含有割合
	Counts/mAs	Counts/mAs	[%]
装置 A	0.10	39.28	0.26
装置 B	0.18	112. 33	0.16
装置C	0.03	28.79	0.11

表 2 ガントリを透過する1次X線の室内散乱線中の割合の推定

なお、装置 B においてエネルギースペクトルを測定した結果を考慮して計算 すると、ガントリ透過成分が占める割合は、実効線量として 2.06E-03、1 セン チメートル周辺線量当量として 1.72E-03、ICRP/ICRU から提唱されている新し い実効線量として 2.02E-03 であった。

<密度補正の保守性の検証>

- コンクリートで密度が 2.35 g/cm³ (医療法の通知で提示)を2.10 g/cm³ (多くの遮蔽計算書の設定であると推測される)にして密度補 正すると、それぞれ異なる組成のコンクリートである本計算設定の 場合に、密度のみで補正した厚みでは、遮蔽効果を過小評価してお り、40cmの厚みでは単純な密度補正では 1.7 倍程度の透過となって いた。
- ・ 密度補正法での透過割合の計算結果(密度 2.35g/cm³を基準として厚 みを変えた場合(変えた厚みを()内に示す)の相対的な透過割合)

10 cm: 1.34 (11.19 cm) 20 cm: 1.45 (22.38 cm) 30 cm: 1.69 (33.57 cm) 40 cm: 1.73 (44.76 cm)

- ・ 組成を同一にするとコンクリート 30cm では 2%の違いに圧縮された。
- ・ 遮蔽体の材質のバラツキを考慮し、施工業者が責任を取れないとして鉛密度:11.00g/cm³や鉄密度:7.70g/cm³で安全評価している例があった。

(2) 鉛と石膏ボードの透過割合の実測での検証

一般撮影装置を用いて同じようなエネルギースペクトルになる照射条件を目 視で検討した。X線CT装置と照射する線質を合わせるためにスペクトルから求 められる線質を比較した。比較した結果を図 13に示す。探索された一般撮影 装置での照射条件を表 3に示す。



図 13 各照射条件でのエネルギースペクトルの比較

	平均エネルギー	実効エネルギー	第1半価層	第2半価層
	keV	keV	mmA1	mmA1
CT 散乱線 120kV	55.1	49.7	6. 9	15
一般撮影 110kV	55.3	48.6	6.6	14.9
CT primary	61.2	54. 7	8.0	17.2

表 3 各照射条件の比較

得られた条件で一般撮影装置を使用し、100cmの位置で鉛1、2、3mmと石膏ボ ード9.5 mm - 50 mmの透過割合を実測した。



鉛での透過割合を図 14と表 4に示す。

図 14 鉛の透過割合

表 4 鉛	の透過割合
-------	-------

鉛の厚み	電離箱	半導体	通知	通知
mm	1800 cc	survey	120 kV	110 kV
1	1.31E-02	1.11E-02	1.03E-02	9.44E-03
2	1.19E-03	1.08E-03	8.03E-04	7.58E-04
3	1.42E-04	1.28E-04	7.89E-05	7.30E-05

石膏ボードの透過割合の実験のレイアウトと実験の様子を図 15 と 図 16 に示す。



図 15 石膏ボードの透過割合実験レイアウト



図 16 石膏ボードの透過割合の実験の様子

得られた結果を図 17と表 5及び表 6に示す。



図 17 石膏ボードの透過割合

石膏ボードの	電離箱	半導体	通知	通知
厚み mm	1800 cc	survey	120 kV	110 kV
9.5	6.37E-01	6.18E-01	6.97E-01	6.68E-01
12.5	5.71E-01	5.39E-01	6.32E-01	5.99E-01
22.0	4.26E-01	4.07E-01	4.77E-01	4.40E-01
25.0	3.99E-01	3.75E-01	4.40E-01	4.03E-01
34. 5	3.18E-01	2.91E-01	3.48E-01	3.12E-01
44.0	2.58E-01	2.34E-01	2.81E-01	2.48E-01
50.0	2.29E-01	2.07E-01	2.48E-01	2.17E-01

表	5	石膏ボー	ドの透過割合
2	0		

	電離箱	半導体	通知	通知
	1800 cc	survey	120 kV	110 kV
石膏 22mm+Pb2mm+air10cm+石膏 22mm	4.36E-04	4.72E-04	3.80E-03	3.23E-03
Pb2mm+石膏 22mm+air10cm+石膏 22mm	4.35E-04	4.77E-04	4.66E-04	4.21E-04
石膏 22mm+air10cm+石膏 22mm+Pb2mm	4.52E-04	4.45E-04	3.80E-03	3.23E-03
石膏 22mm+Pb2mm+石膏 22mm(隙間なし)	4.69E-04	4.89E-04	3.80E-03	3.23E-03

表 6 石膏ボードの透過割合測定結果

(3) 実際の X 線診療室での漏えい放射線の量の評価

③ 半導体サーベイメータ

金沢大学附属病院の CT 室で人体ファントムを胸部一骨盤スキャンを用いて 半導体サーベイメータを用いて実測したところ透過割合は、4.59E-04 と通知 が安全側であることが確認できた。電離箱 1800 cc では感知しなかった。

④ OSL で 3 週間測定

金沢大学附属病院2つのX線CT室で17日間、素子を設置して測定した。測 定の幾何学的な条件を図18と図19にそれぞれ示す。

それぞれの X線 CT 装置の実効稼働負荷と検査件数は以下の通りである。

- 実効稼働負荷: 4, 481, 294.1 mAs, 601件(1日平均 33.4件)
- 実効稼働負荷: 4,443,241.0 mAs, 635件(1日平均35.3件)

金沢大学附属病院2つのX線透視室で17日間、素子を設置して測定した。 測定の幾何学的な条件を図 20 と図 21 にそれぞれ示す。

それぞれのX線透視装置の平均管電圧と透視時間は以下の通りである。

- 平均管電圧 82 kV, 透視時間 77.3 min 95 件(1 日平均 5.3 件)
- 平均管電圧 82 kV,透視時間 511.9 min 49 件(1 日平均 2.7 件)



図 18 X線CT室での測定の幾何学的な条件1



図 19 X線CT室での測定の幾何学的な条件2

		測定部位	測定値(mSv)	計算(通知) (mSv)
X線CT室1	外	Z1-1	ND	0.6985
	内	Z1-2	24. 76	786.3
X線CT室2	外	Z1-3	ND	0.2965
	内	Z1-4	19. 28	1047.8

表 7 X線CT室での測定結果



鉛ガラス2.0mmPb

図 20 X線透視室1での素子の設置場所



鉛ガラス2.0mmPb

図 21 X線透視室2での素子の設置場所

		測定部位	測定値(mSv)	計算(通知) (mSv)
透視室1	外	Z1-5	ND	0.0009
	内	Z1-6	0.32	3. 189
透視室2	外	Z1-7	ND	0.0128
	内	Z1-8	0.47	45.872

表 8 透視室での測定結果

室内での実測に対する計算の比は X線 CT 室1 で 31.75、 X線 CT 室2 で 54.3、また、透視室1 で 9.96、透視室2 で 97.6 となった。

Z1-6の線量率は 320 µSv/(77.3 min /60 min/h) = 248.4 µSv/h であり、壁 での透過が 1/1E3 で 0.248 µSv/h、壁での透過が 1/1E4 で 0.0248 µSv/h となっ た。

Z1-8 の線量率は 470 μSv/(511.9 min /60 min/h) = 55.1 μSv/h であり、壁 での透過が 1/1E3 で 0.055 μSv/h、壁での透過が 1/1E4 で 0.0055 μSv/h とな った。

(4) エックス線診療室のダクトからの漏えい線量

計算結果として、上から見た放射線の漏えいを図 22 に示す。左の図は、 ダクトの高さの断面図を拡大したものであり、ダクトからの放射線の漏えい が確認できる。散乱線は上方に向かう成分が支配的であるためにダクト内で さらにダクトの内面に衝突して散乱している。真ん中の図はダクトの高さの 断面図であり、建屋から右側にダクトからの漏えい線が確認でき、ダクトの 付近では明瞭である。しかし、遠ざかると明確ではなくなり、ダクトから離 れるとその影響は視認が困難である。右側の図は鉛ガラスの高さであり、左 側に鉛ガラスからの漏えいが確認できる。もっともこの計算ではファントム として1mの長さの円柱ファントムを用いたので、鉛ガラス方向はファント ムにより自己遮蔽が効いており、むしろ図の上下の方向の方が漏えいする線量 が大きくなっている。この高さではエアコンのダクトからの漏えい放射線の影 響は明確ではない。

図 23 は、正面から見たもので、左の図は全体を示している。ここでは上方 との境界を 10cm のコンクリートとしたので厚みが薄い分、漏えいする放射線 の量が大きくなっている。右の図は、ダクト付近を示す。ダクト付近の漏えい 線量には、室内での散乱線の壁への入射方向とダクトのサイズが影響をもたら すことが理解できるだろう。ダクト内を直進した場合には漏えいする放射線量 が大きくなるが、ダクトの内面に入射した場合、そこから壁の外側までの距離 が短いと漏えい線量は増加しうる。このことも考えて、扉のつなぎ目では隙間 から壁に入射した放射線が外部に漏えいしないように必要な施工がなされてい る。図 24 は、線量当量率の水平面での分布を正面から見たものである。高さ を変化させた結果が示されているが、この高さの範囲ではダクトの影響は確認 が困難である。



図 22 エアコンの穴からの放射線の漏えい(上から見た図)



図 23 エアコンの穴からの放射線の漏えい(正面から見た図)



50-70 cm:黒、70-90 cm:赤、90-110 cm:青、110-130 cm:緑、130-150 cm:茶色

図 24 線量率の水平面での分布

5. 考察

(1) X線CT装置のエネルギースペクトルの評価

ガントリ透過後のX線は高度に硬化し、透過度が増していた。ただし、ガン トリを透過する割合が小さく、ガントリ方向でもガントリ透過X線の寄与は限 定的だと考えられたが、ガントリの構造の多様性を考慮すると通知の想定を超 えることも想定すべきであり、NCRP Report No.147で提示している透過割合デ ータを用いることが適切ではないかと考えられた。

散乱線のスペクトルは、散乱体のサイズにも依存すると考えられ、患者の体格が小さくなると硬くなるとの報告もあるが²、確かに小さいファントムでは散乱線の透過割合が増加するものの、その程度は限定的であると考えられた。

ガントリ透過成分のX線エネルギーの線質は硬くなっており、NCRPのX線 CT装置に由来した透過割合データよりも透過度が増しているが、室内散乱線に

2

https://pdfs.semanticscholar.org/d500/b55843afb30881040c6ea03db514239e63f0.pd f

比較すると、その寄与割合は 0.3%未満であり、ガントリを透過する 1 次線の割 合は少なく、ガントリ透過で線質が硬くなる効果の考慮は事実上不要であると 考えられる。ただし、今後、遮蔽体がより厚くなるとコンクリートでは透過割 合が想定以上に増す可能性がある。

遮蔽体の透過割合を空気カーマと実効線量のどちらで表現するかで、透過割 合が異なった。空気カーマによる透過割合は、実効線量のエネルギー依存性が 考慮されておらず、非保守的となっていた。空気カーマから実効線量への換算 係数が保守的に設定されていることで相殺されうると考えられるが、原子力安 全技術センター編著発行の放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル(2007、 2015)同様に、実効線量を指標とすることも考えられる。

作業環境管理上は、室内で放射線診療従事者の線量推計も重要であり、その モデル提示も必要ではないかと考えられた。

通知のコンクリートの密度が実際に施工される建築材料より高いものとなっ ていると考えられ、コンクリートの密度補正法が示されているが、通知の参照 文書が古いままとなっており、参照先を「放射線施設のしゃへい計算実務マニ ュアル 2007」から「放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル 2015」とすべ きであると考えられる。

放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル 2015 で引用されている放射線施 設の遮蔽計算実務(放射線)データ集 2015 でコンクリート密度は 2.10 g/cm³ と設定されているが(I-36)、医療法施行規則の通知では、米国 NCRP Report No. 147 で標準コンクリートが 2.4 g/cm³で軽量コンクリートが 1.8 g/cm³とあ ることもあり、2.35 g/cm³と設定されている。

多くの遮蔽計算書では 2.10 g/cm³となっていることから、医療分野での評価 法の標準も 2.10 g/cm³とすることが考えられた。なお、関係者からの情報で は、エックス線診療室の遮蔽計算では通知に則って 2.10g/cm³を用いているも のが多いとのことであった。もっとも現行の評価法で線量限度に近い施設が少 なからずあるので、何らかの考慮が必要かもしれない。医療法の通知で提示し ている 2.35 g/cm³を 2.10 g/cm³ (多くの遮蔽計算書の設定)にして密度補正す ると³、コンクリート組成の違いを考慮しないと補正した厚みでは透過する線量 が、1.3から1.7倍程度大きくなるという結果になった⁴が、コンクリート組成 を考慮すると、この差異は圧縮された。いずれにしても、コンクリートの密度 に関しては、実態に応じた数値を示すようにすることが望ましいが、限界を理 解した上で密度補正することも許されるところかもしれない。加速器に関して は全国調査で遮蔽計算のパラメータ設定が主だったパターンに分類されること が確認されており、雛形が用いられていることが示唆されている⁵。地方によっ て、骨材など組成が異なり、統一的に評価するのは容易ではないと考えられ る。また、X線は重い元素に敏感であり、組成の違いも効いていることが考え られる。実態調査としては、コンクリートの密度として2.10を採用している 割合や地域別のコンクリート組成を調べることが考えられる。日本の現状をデ ータで示すことで通知の基準を2.10g/cm³に変更するように働きかけることも 考えられる。

2014(平成 26)年に X 線装置の遮蔽計算(米国 NCRP Report No. 147 が取り入 れられた)も含めて改正通知が発出されたが、散乱係数への懸念のために X 線 CT 装置部分は先送りされていた。このため、日本放射線技術学会とも連携し、 実測に基づき再評価した散乱係数を適用し、DLP を用いたマニュアルを 2019 年

³密度ごとに異なる組成を用いる場合は以下のようにした。
mat[2] H 0.0056 0 0.4983 Na 0.0171 Mg 0.0024 Al 0.0456
Si 0.3158 S 0.0012 K 0.0192 Ca 0.0826 Fe 0.0122
\$ Concrete 2.35 g/cm³
mat[3] H 0.0103 C 0.001 0 0.5446 Mg 0.0022 Al 0.0348
Si 0.346 Ca 0.0446 Fe 0.0143 \$ Concrete 2.10 g/cm³
⁴密度補正法での透過割合の計算結果 (密度 2.35g/cm³を基準として厚みを 変えた場合の相対的な透過割合)
10 cm: 1.34 (11.19 cm)
20 cm: 1.45 (22.38 cm)
30 cm: 1.69 (33.57 cm)
40 cm: 1.73 (44.76 cm)

⁵ https://link.springer.com/article/10.1007/s12194-010-0083-0

1月に公表した。このマニュアルは JIRA で作成し 2019 年 4 月に公表された X 線診療室しゃへい計算マニュアルとも調和が取れたものとなっているが、壁の 透過割合に関して、装置の高性能化に対応した安全評価が必要だと考えられ る。そこで遮蔽壁の透過割合を安全側で評価しつつ、より合理的な評価が行え るような方策を提案する必要があると考えられる。

X線 CT 室において壁の透過割合を実測したところ、壁は鉛 2 mmと石膏ボード 22 mm (9.5mm+12.5mm) が 2 面張り合わせで合計 44mm となっているが、実測で確 認された透過割合は 5.5E-04 であった。通知では鉛 2 mmは 8.03E-04 の透過割 合であり、石膏ボード分が効いて通知より低くなっていた。石膏ボードの分 は、鉛が内側であれば、その硬化効果も計算では考慮する必要がある。

計算では遮蔽体での2次電子の扱いが結果に影響を与えていた。評価領域を 遮蔽体から離すのが現実的であるが、遮蔽体直下を評価領域とした場合には、 空気カーマから実効線量などへの換算で、空気カーマがどの範囲の放射線を対 象としたかが結果に影響を与えうる。

実効線量への換算で、光子のエネルギースペクトルに対する換算係数を用い ると、皮膚が遮蔽体に近接していると、遮蔽体で生成される二次電子によるエ ネルギー付与の考慮が欠落することになる。

モンテカルロ計算で皮膚への電子線へのエネルギー付与を考慮するには、エ ネルギー沈着量を計算する deposit を用いて、エネルギー沈着を評価するため に皮膚の領域を作って検討することも考えられる。

ただし、その影響は限定であり、皮膚の等価線量限度と実効線量の比から考慮は不要であると考えられた。

(2) 鉛と石膏ボードの透過割合の実測での検証

①鉛

通知では 120 kV Pb 2mm: 8.03E-04 だが、測定で得られた鉛の透過割合は、 電離箱が 1.19E-03、半導体検出器が 1.08E-03 と通知より遮蔽割合が小さくな った。ほぼ同じエネルギーで、モンテカルロ計算したものは 2mmPb で 1.1E-03 だったので、電離箱では、それよりも遮蔽する割合が小さくなった。測定において遮蔽体の二次電子が影響を与えていたのかもしれない。

2 複合遮蔽

鉛,石膏それぞれ単体で測定したものを掛け合わせても実測とは一致しない。これは、遮蔽体を透過することでのスペクトルの変化が無視できないことによる(単純に掛け合わせると1/2程度、透過する割合を過小評価する)。

サーベイメータのエネルギー応答について、使用した TCS-171 は、エネルギ ー補償がなされ、比較的フラットな応答となっていると考えられるが、それで も、100 keV 付近だと 1.3 倍程度の違いがありそうなので、遮蔽体を透過する ことで、低いエネルギー成分がカットされることで単位線量あたりの応答が低 下することも考えられる。

それぞれのエックス線 CT 装置の室外の測定で検出できなかったのは、室内の測定からはガントリの遮蔽も効いていると考えられた。

それぞれの透視室の室外となる鉛ガラスの外側でも検出されなかったのは、 室内の結果からは散乱線の量も計算値と比較して小さかったことが考えられ た。

(3) 実際の X 線診療室での漏えい放射線の量の評価

X線CT室でのOSL線量計を用いた実測

X線CT室内の散乱線の線量の計算値との差異は、これまでの研究成果とほぼ 同程度であった。

X 線透視室での 0SL 線量計を用いた実測

室内での計算値の乖離が大きかったのは、両透視室とも、スタッフ立ち位置 がちょうど装置と鉛ガラスの間になっていることがその原因として考えられ た。透視室2では、検査室内に医師・看護師が入室して行う手技が多いためだ と考えられた。素子の設置場所から半分の場所で鉛プロテクタの防護能力が 97%だとすると この期間の線量は 5mSv 程度になり得ると考えられた (4) エックス線診療室のダクトからの漏えい線量

ダクト付近では明らかな放射線の漏えいが確認できたが、ここでの設定では 人が滞在する範囲では、ダクトからの漏えい放射線の影響は確認できなかっ た。ダクトへの侵入した放射線が直進してダクトを通過することなくダクト内 で散乱し、ダクトの近くに人が滞在するのでなければ、ダクトからの漏えい放 射線への特段の考慮は不要だと考えられた。

この構造はドアの沓摺りの隙間も同様である。一方、隙間に入射する放射線 の量が多い場合に、隙間から壁に侵入した放射線が壁内を短い飛程で外部に脱 出できる構造だと外への漏えいが多くなるので配慮が必要である。免震構造の 建屋では注意が必要かもしれない。

この他にも、設備の進歩への対応が必要である。管理区域を小さくして放射 線診療を行う想定の設備も開発されている。装置の近くに遮蔽体が置かれた場 合に X 線 CT 装置のように X 線管が移動するものでは、X 線管容器からの漏えい で X 線管の位置の設定の影響が大きくなる。もっとも安全側になるのは、評価 点近くに X 線管がとどまり続けると想定する場合であるが、あまりにも過大な 評価となるときには、使用係数の考え方を用いて X 線管の位置別の評価を加算 することが考えられる。

6. 結論

- ・ 壁の透過割合も含めて NCRP Report No. 147 の考え方で放射線安全は確保 されうる。
- 2. 計算モデルで提示するコンクリートの密度は 2.10g/cm³とするのが妥当 である。
- 3. X線診療室内に労働者が滞在する条件下での作業環境モニタリングでは 室内にとどまる労働者の人体の遮蔽の影響を考慮する必要がある。
- エアコンのダクトは、エックス線診療室のサイズが十分に大きければ放 射線防護上の問題を与えない。