高性能化に対応した X線 CT 装置のしゃへい評価法の開発

1. 背景

2014(平成26)年3月31日にX線装置のしゃへい計算も含めて改正通知が発出 された。これまで日本でのX線施設のしゃへい計算の指針は、米国のNational Council of Radiation Protection and Measurements(米国放射線防護審議会 (民間団体))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線装置のしゃへい計算に関して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線装置のしゃへい計 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Report No. 49を改訂してReport No. 147を発行している。日本では、 2001年にNo. 49を取り入れた。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、2014年にNo. 147を取り入れたが、X線CT装置に関して、DLP (Dose length product) 法を取り入れなかった。

NCRP Report No. 147は、X線CT装置に関するしゃへい計算モデルも線源のパ ラメータとしてDLPを用いる方法を示しているが、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 るしゃへい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線診療室のしゃへい 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て検討が進められて きた成果である。

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。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装置のしゃへい体の透過に関 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。このため、ガントリによる減衰とビーム硬化によるしゃへい体外側での線量評価がトレードオフ関係になり、しゃへい体が厚くなると、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一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、一次しゃへい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。





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法がより合理的になっているのは、一次ビームのろ過に使われるフィ ルタの厚みが増したことでの単位実効稼働負荷あたりの空気カーマが減弱し たことに従来法が対応していないことに対して、その要素が含まれているこ ととの差異によると考えられる。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で使わ れている透過率データと比較すると、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 守的な評価となっている。このため、ガントリによるビームの硬化に関して、 現行の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た。しゃへい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。

昨年度の検討では以下のことが明らかになった。

- (1) 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現行通知の想定を超えることも想定すべきであり、NCRPのリポート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。
- (2) 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、体格が小さくなると硬くなるとの報告もあるが¹、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。
- (3) 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一 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、しゃへい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。

1

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

- (4) しゃへい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。
- (5) 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。
- (6)現行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、現 行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の2015とすべきであると考えられる(2007ではな く)。
- 放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル 2015 で用いられている放射線 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。
- ② 多くのしゃへい計算書では 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しゃへい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。
- ③ 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。
- ④ 医療法の通知で提示している 2.35 g/cm³を 2.10 g/cm³(多くのしゃへい計算書の設定)にして密度補正すると²、コンクリート組成の違いを考慮しな
- (1) ² 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
- (2) mat[3] H 0.0103 C 0.001 0 0.5446 Mg 0.0022 A1 0.0348 Si 0.346 Ca 0.0446 Fe 0.0143 \$ Concrete 2.10 g/cm³

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³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しゃへい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⁴。
- 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 2.1 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 2.1g/cm3に変更するように働きかけることも考えられる。

これ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、今年度は実測による壁での透過の検討を試みた。

3. 方法

- (1) 鉛と石膏ボードの透過割合を実測で検証した。
 - 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。

- 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)
- ⁴ https://link.springer.com/article/10.1007/s12194-010-0083-0

³ 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)

- (2) 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
 - ② OSL線量計を用いた方法

4. 結果

- (1) 鉛と石膏ボードの透過割合の実測での検証
- (ア) 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

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3に示す。探索された一般撮影装置での照射条 件を表1に示す。



図 3 各照射条件でのエネルギースペクトルの比較

表 1 各照射条件の比較

	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

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4と表2に示す。



図 4 鉛の透過割合

表 2 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 5 と図 6 に示す。



図 5 石膏ボードの透過割合実験レイアウト



図 6 石膏ボードの透過割合の実験の様子

得られた結果を図7と表3、表4に示す。



図 7 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 3 石膏ボードの透過割合

表 4 石膏ボードの透過割合測定結果

	電離箱	半導体	通知	通知	
	1800 cc	survey	120 kV	110 kV	
石膏22mm+Pb2mm+air10cm+	4 265 04	4 795 04	2 205 02	2 225 22	
石膏 22mm	4.300-04	4.720-04	5. OUE-05	3.23E-03	
Pb2mm+石膏 22mm+air10cm+	4 255-04	4 775 04	4 GGE 04	4.21E-04	
石膏 22mm	4.550-04	4. //L=04	4.001-04		
石膏 22mm+air10cm+石膏	4 595 04	4 455 04	2 205 02	2 225 02	
22mm+Pb2mm	4.02E-04	4.43E-04	5.00E-05	3. Z3E-03	
石膏 22mm+Pb2mm+石膏	4 60F-04	4 905 04	2 205-02	3.23E-03	
22mm(隙間なし)	4.056 04	4.096 04	5. OUE '05		

(2) 実際の X 線診療室での漏えい放射線の量の評価

(ア) 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。

- (イ) OSL で 3 週間測定
 - 金沢大学附属病院の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8と図9にそれぞれ示す。
 - 1. 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。
 - (ア) 実効稼働負荷: 4,481,294.1mAs, 601件(1日平均33.4件)
 - (イ) 実効稼働負荷:4,443,241.0mAs,635件(1日平均35.3件)
 ② 金沢大学附属病院の2つのX線TV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 10 と図 11 にそれぞれ示す。
 - 1. それぞれの X 線 TV 装置の平均管電圧と透視時間は以下の通りである。
 - (ア) 平均管電圧 82 kV,透視時間 77.3 min95件(1日平均 5.3件)
 - (イ) 平均管電圧 82 kV,透視時間 511.9 min49 件(1日平均 2.7 件)



図 8 X線 CT 室での測定の幾何学的な条件1



図 9 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 5 X線 CT 室での測定結果



鉛ガラス2.0mmPb

図 10 X線透視室1での素子の設置場所



鉛ガラス2.0mmPb

図 11 X線透視室2での素子の設置場所

表 6 X 線透視室での測定結果

		測定部位	測定值(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

測定結果をそれぞれ表5と表6に示す。

室内での実測値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、TV 室 1 で 9.96, TV 室 2 で 97.6 となった。

X線TV室1のZ1-6の線量率は320 μ Sv/(77.3 min /60 min/h) = 248.4 μ Sv/h であり、壁での透過が1/103 で 0.248 μ Sv/h、壁での透過が1/104 で 0.0248 μ Sv/h となった。

X線TV室2のZ1-8の線量率は 470 μ Sv/(511.9 min /60 min/h) = 55.1 μ Sv/h であり、壁での透過が 1/103 で 0.055 μ Sv/h、壁での透過が 1/104 で 0.0055 μ Sv/h となった。

- 5. 考察
- (1) 2014(平成 26)年に X 線装置のしゃへい計算(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 1 月に公表した。このマニュアルは日本画像医療 システム工業会で作成し 2019 年 4 月に公表された X 線診療室のしゃへい 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 しゃへい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。

- (2) 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2mmと石膏ボード22mm(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2mm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。
- (3)計算ではしゃへい体での2次電子の扱いが結果に影響を与えていた。評価 領域をしゃへい体から離すのが現実的であるが、しゃへい体直下を評価領 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。
 - (ア)実効線量への換算で、[Multiplier]を用いると、皮膚への電子線 によるエネルギー付与の考慮が欠落することになる。
 - 皮膚への電子線へのエネルギー付与を考慮するには、depositで皮 膚の領域を作って検討することも考えられる。
 - ② ただし、その影響は限定的であり、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。
- (4) 鉛と石膏ボードの透過割合の実測での検証
 - (ア) 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 りしゃへいする割合が小さくなった。ほぼ同じエネルギーで、 PHITS で計算したものは 2mmPb で 1.1E-03 だったので、電離箱で は、それよりもしゃへいする割合は小さくなった。測定においてし ゃへい体の 2 次電子が影響を与えていたのかもしれない。
 - (イ) 複合しゃへい
 - 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、しゃへい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)。
 - ② 検出器のエネルギー応答 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、しゃへい体を透

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。

- ③ 室外の測定で、C で検出できなかったのは、室内の測定からはガン トリのしゃへいも効いていると考えられた。
- ④ 室外のAの地点で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。
- (5) X線CT 室でのOSL線量計を用いた実測
- (ア) 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。
- (イ)短期間の計測では積算型の素子では漏えい線量の検出は困難であった。
 鉛ガラス外側では線量率計で漏えい放射線を検出したが、線源の移動に
 伴い線量率が変化した。このため線量率計を用いた線量の評価では、この線量率の変化を考慮する必要がある。また、3月間の線量を評価するには、品質管理照射も考慮する必要がある。
- (6) X線TV室でのOSL線量計を用いた実測
- (ア)室内での計算値の乖離が大きかったのは、TV 両部屋とも、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。
- (イ) TV 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。
- (ウ)線量素子を設置した測定では、スタッフによる放射線吸収の考慮も必要 になることがあるかもしれない。
- 6. 結論
- (1) 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 されうると考えられた。
- (2) 室内に労働者が滞在する場合には人体もしゃへい体として働くので測定ポ イントの選定で配慮が必要になるかもしれない。