

高性能化に対応した X 線 CT 装置の遮蔽評価法の開発

1. 背景（昨年度の厚労科研の報告書から）

『平成26年3月31日にX線装置の遮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線施設の遮へい計算の指針は、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線装置の遮へい計算に関して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線装置の遮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、2004年にNo. 49を改訂して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装置に関する遮へい計算モデルも線源のパラメータとしてDLPを用いる方法として示しているが、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装置に関する遮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. 本検討課題の問題意識

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。このため、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がトレードオフ関係になり、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。

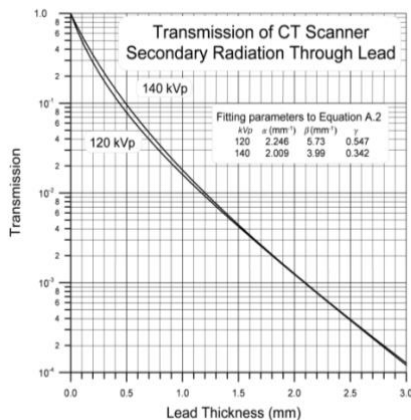


Fig. A.2. Transmission through lead of secondary radiation from CT scanners [data of Simpkin (1991) fitted to Equation A.2].

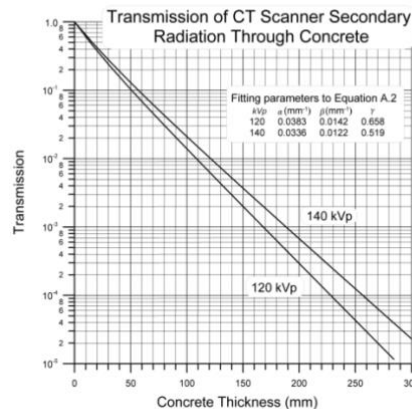


Fig. A.3. Transmission through concrete of secondary radiation from CT scanners [data of Simpkin (1991) fitted to Equation A.2].

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。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。

ここまでの検討で残った課題をガントリ方向とそうではない方向に分けて表1、表2にそれぞれに示す。

表 1 ガントリ方向の放射線の扱いの課題

ガントリ透過後の放射線成分も含まれているとして扱う
<ul style="list-style-type: none"> 安全側に考えて一次遮蔽でも硬くなったスペクトルを仮定（本研究）
ガントリ透過成分は無視できると考え、散乱線成分のみとして扱う
<ul style="list-style-type: none"> このままとする（第一版） X線CT装置でのフィルタ増加によるビーム硬化効果を反映させたNCRP 147の透過割合データを使う

表 2 ガントリ以外方向の放射線の扱いの課題

<ul style="list-style-type: none"> このままとする（第一版） X線CT装置での硬化効果を反映させたNCRP 147の透過割合データを使う

3. 方法

- (1) 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、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。
- (2) 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。
 - ① コンクリートの組成は以下の通りとした。
 1. 2.35 g/cm³: H:0.0056 O: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
 2. 2.10 g/cm³: H:0.0103 C:0.001 O:0.5446 Mg:0.0022
Al:0.0348 Si:0.346 Ca:0.0446 Fe:0.0143
- (3) また、120 kV 2.5mmAl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。
- (4) 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。
- (5) また、密度補正の保守性も検証した。

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)

- ① 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。

4. 結果

- (1) 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3及び図3)。
- (2) 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、現行通知の硬化した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4、図5、図6)。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。
- (3) 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、一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、一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)。
- (ア) 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。
- (イ) 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。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4)。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3 平均X線エネルギーの変化

1次X線 (keV)	ガントリ透過分 (keV)	散乱線分 (keV)
62.3	88.4	55.3

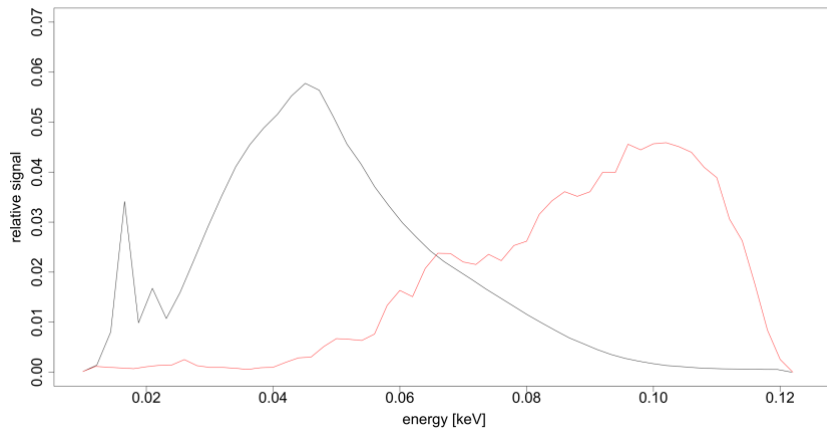


図 3 X線スペクトル

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

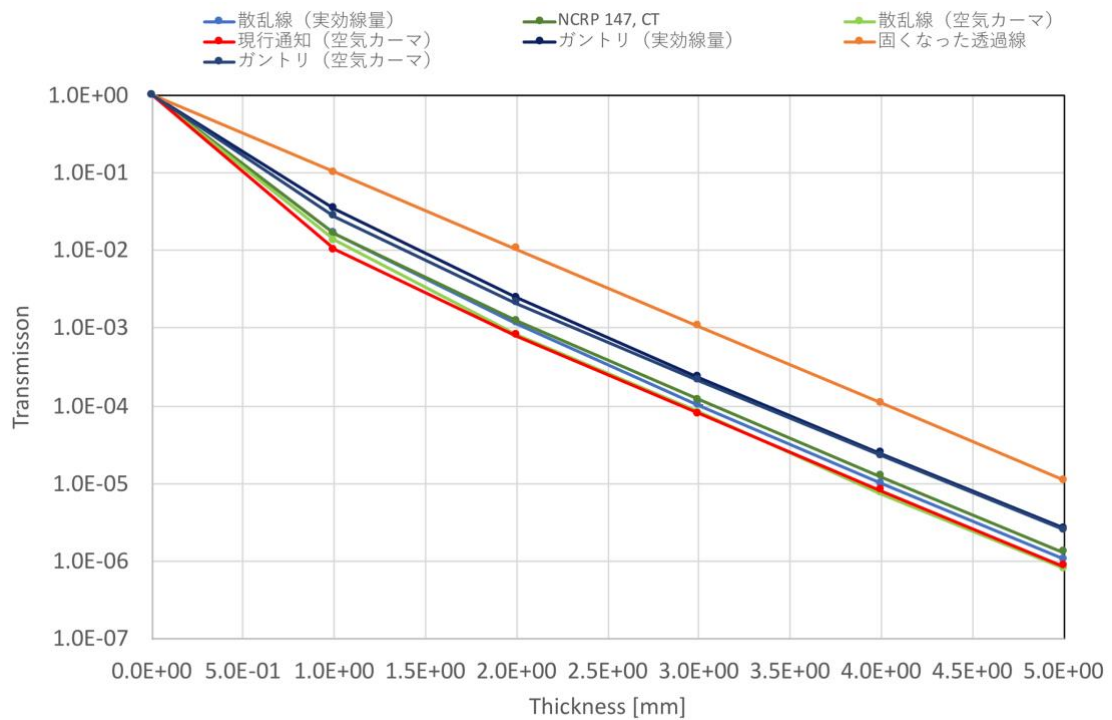


図 4 鉛の透過割合

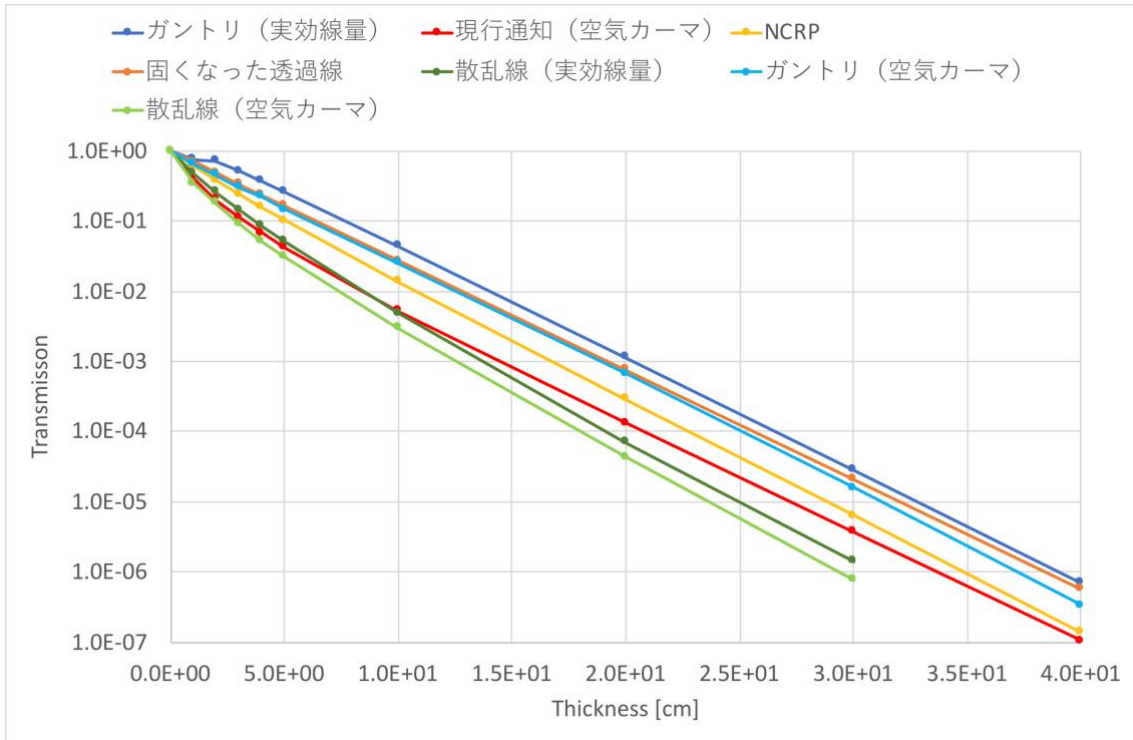


図 5 コンクリートの透過割合

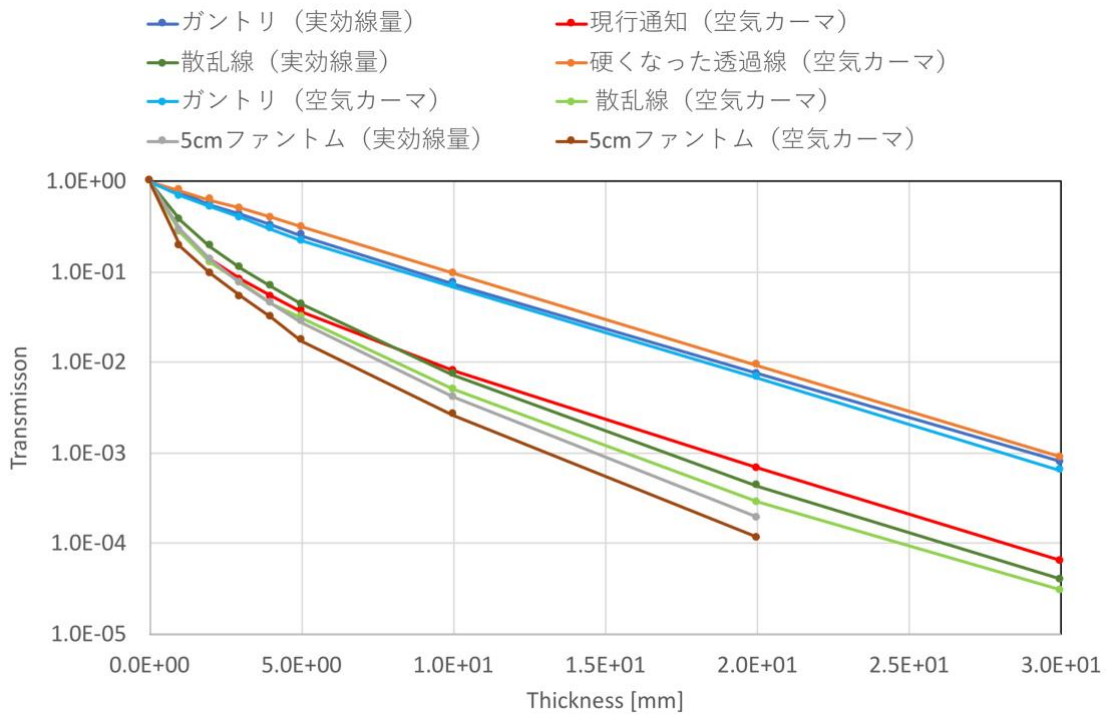


図 6 鉄の透過割合

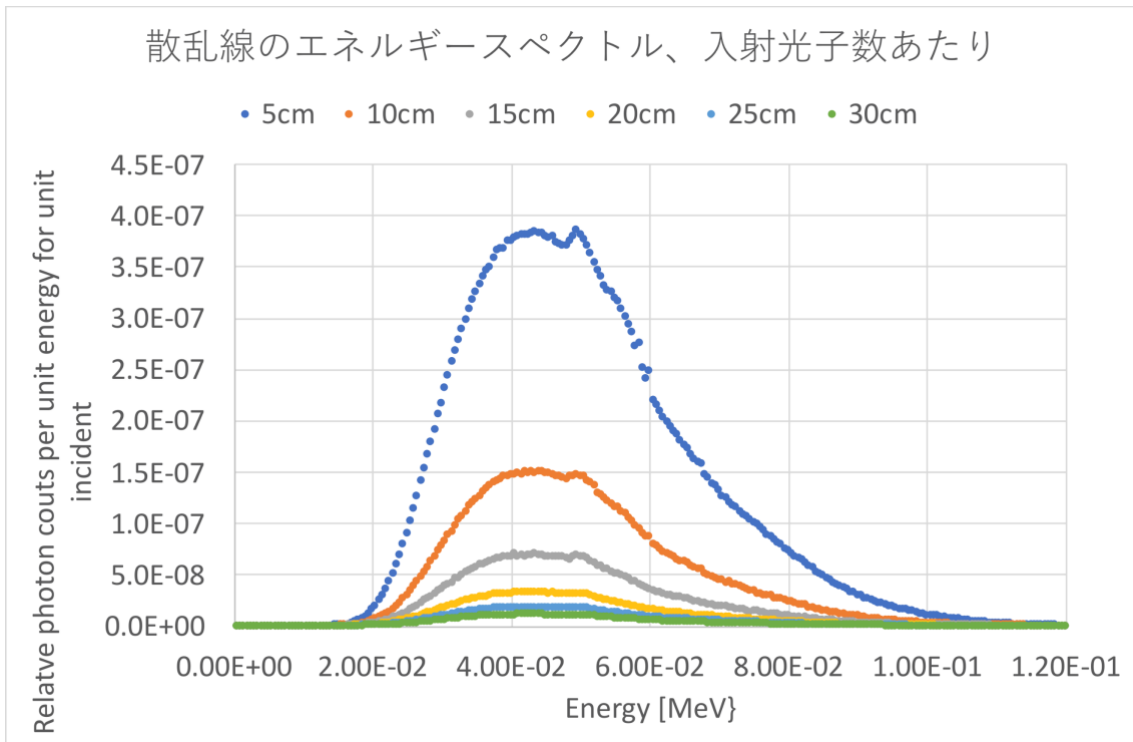


図 7 散乱線のエネルギースペクトル (ファントムの半径別)

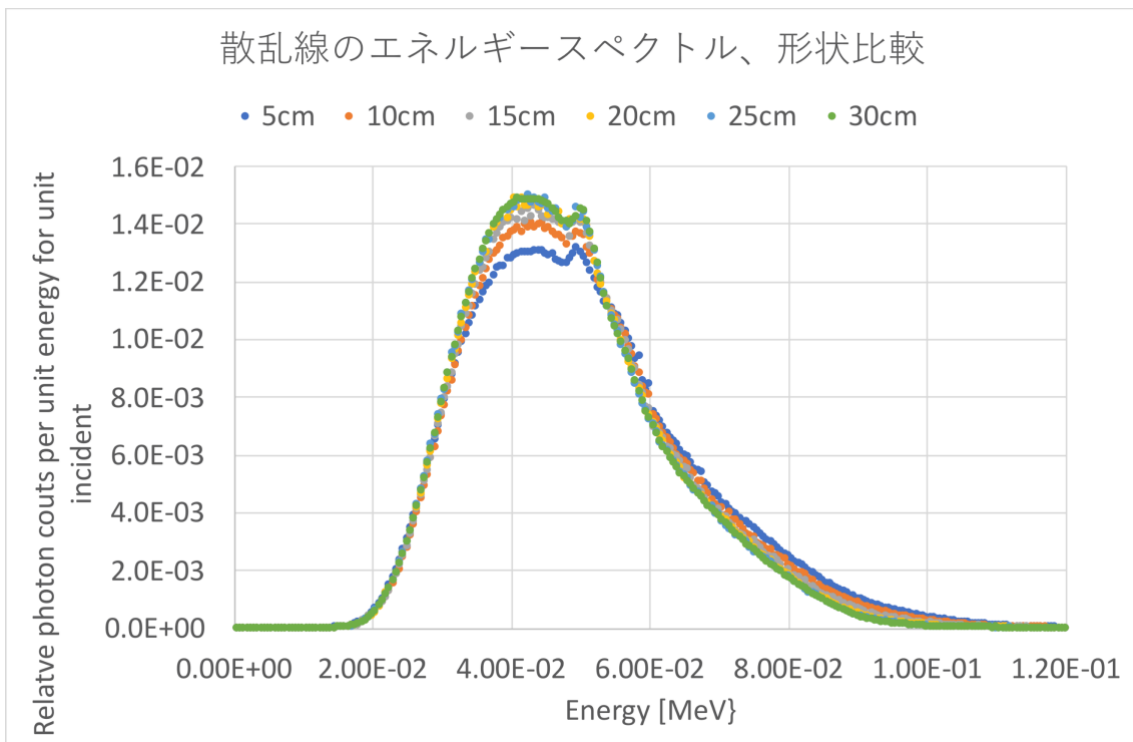


図 8 散乱線の相対的なエネルギースペクトル (ファントムの半径別)

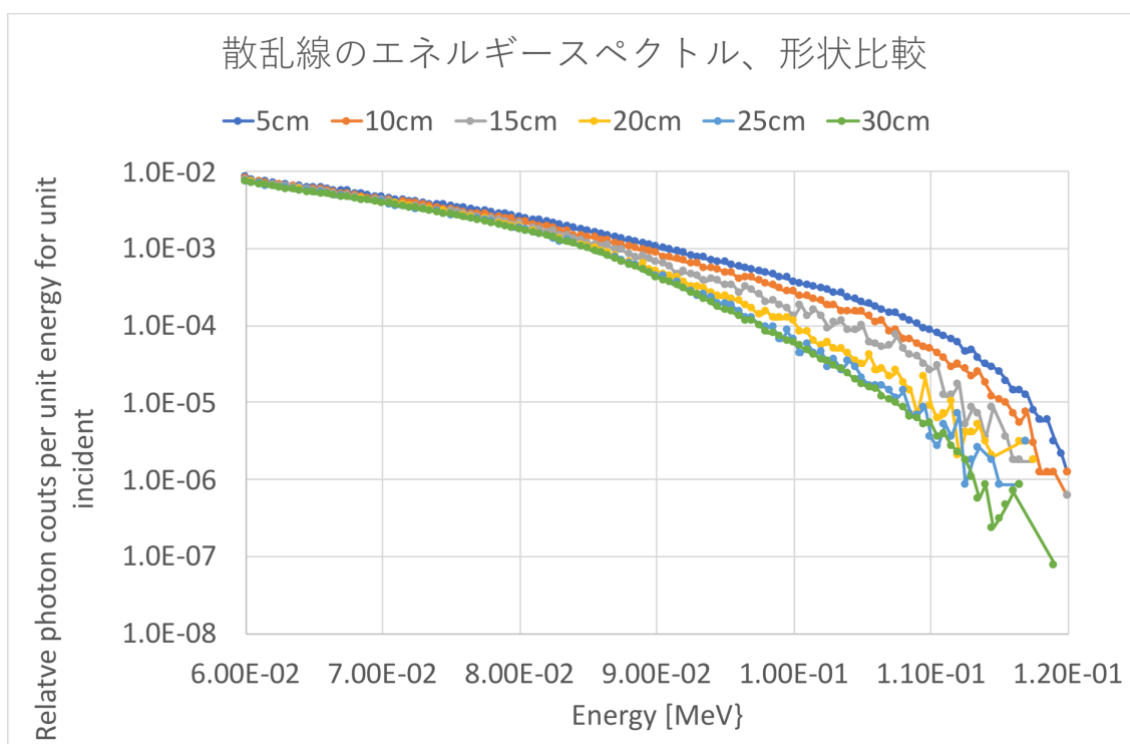


図 9 散乱線の相対的なエネルギースペクトル（ファントムの半径別），60 keV 以上

表 4 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

	ガントリ透過成分 Counts/mAs	散乱線成分 Counts/mAs	推定含有割合 [%]
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

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 $2.06E-03$ 、 $H^*(10)$ 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は、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。

5. 考察

- (1) 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 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。
- (2) 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 のレポート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。

- (3) 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、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。

- (4) 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、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。

- (5) 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るが（さらに吟味）、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。

- (6) 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。

- (7) 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）。

- ① 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。
- 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。
- ⑤ 地方によって、骨材など組成がまるで違い、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。
- (8) 昨今、遮蔽の追加事例が散見されるが、最適化の産物であれば、その選択もありうるが、被ばくしている看護師からの反発を招きかねないことも考えられ、院内での放射線防護の取り組みとしてバランスが取れているかの吟味も求められる。

(1) ³ mat[2] H 0.0056 O 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 O 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)

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。

(ア) 今後、遮蔽体がより厚くなりさらに硬化した X 線に対して、コンクリート遮蔽では線質の変化に対する考慮が必要かもしれない。