

鉛を含まない放射線遮蔽体の診断領域の X 線の遮蔽能力

研究分担者 山口 一郎 国立保健医療科学院 生活環境研究部 特任研究官

目次

A.	背景	3
1.	環境負荷を減らすための鉛の使用制限に関する動向	3
2.	放射線遮蔽能力の評価の課題	3
B.	目的	4
C.	方法	4
1.	質量減弱係数の比較	4
2.	モンテカルロ計算による比較	4
3.	鉛を含まない遮蔽体の設定	4
①	鉛を含まない単層構造の遮蔽体	4
②	鉛を含まない二層構造の遮蔽体	5
	(ア) タングステンパウダーからなる層	5
	(イ) ビスマスを主成分とする層	5
4.	X 線照射の条件設定	5
①	エネルギー	5
②	X 線ビームの幾何学的条件	5
D.	結果	8
1.	質量減弱係数の比較	8
2.	モンテカルロ計算による比較	9
①	「鉛」と「鉛を含まない」遮蔽体の比較	9
	(ア) 管電圧 120 kV 加速した電子をタングステン陽極に衝突させて X 線を発生させ、さらに 2.5 mm の Al で余分なエネルギーを取り除いた（濾過した）X 線	9
	(イ) 30 keV の単色 X 線	10
	(ウ) 70 keV の単色 X 線	11
	(エ) 110 keV の単色 X 線	12
3.	入射する光子のエネルギー別の遮蔽体の種類別の遮蔽能力の違い	14

①	鉛の遮蔽体	14
②	鉛を含まない遮蔽体（ビスマス主体の単層構造）	15
③	鉛を含まない遮蔽体（タングステンとビスマス主体の二層構造）	16
4.	入射する光子の人体の深さ別の遮蔽体の種類別の遮蔽能力の違い	16
①	鉛の遮蔽体	17
②	鉛を含まない単層構造の遮蔽体（ビスマスが主成分）	17
③	鉛を含まない二層構造の遮蔽体（タングステンとビスマスが主成分）	18
E.	考察	18
1.	遮蔽能力を提示する際に求められる配慮	18
2.	遮蔽体の選択	19
F.	結論	20
G.	謝辞	20
H.	文献	20

A. 背景

1. 環境負荷を減らすための鉛の使用制限に関する動向

欧州連合（EU）では、廃棄物に由来した化学物質が地下水へ浸出することによる環境汚染に対応するために、「RoHS (Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment) 指令」を制定している。また、廃棄物に関して、「WEEE (Waste of Electrical and Electronic Equipment Directive) 指令」を制定している。

これら指令では、鉛も対象とされている。ただし、電気・電子機器の部品の合金として使われる鉛に関して代替品が得がたいことから、適用除外期限が設定されているものがある。RoHS 指令は、EU で販売する電気・電子機器の有害物質を非含有とさせることを目的として制定されているが、環境負荷を減らす試みであるので、適切な処分、リサイクルでも対応ができると考えられる。資源を有効に活用する観点から、レアメタル・リサイクル[1]や鉛板のリサイクル[2]も推進されている（『鉛は90%以上が再利用されている』との記述がある[3]）。

なお、「RoHS 指令」や「WEEE 指令」による鉛規制は、電子・電気機器に使用されている鉛が、廃棄された時に溶出し、環境を汚染することを懸念して設けられたもので、鉛板は対象ではない。

いずれにしても、RoHS 指令を背景として、遮蔽体を鉛が含まれていない素材に切り替える動きがある[4, 5]。

ただし、鉛は診断領域の X 線に対する遮蔽体として優れた特性を持つ。診断領域の X 線のエネルギー領域における X 線減衰は主に光電効果による。光電効果の断面積は光子のエネルギーだけでなく原子番号に大きく依存する。鉛（原子番号 82）の原子番号はビスマス（原子番号 83）と同等だが、鉛は単体で高密度を保てるのに対して、鉛を含まない遮蔽材はポリマー中に重たい元素を分散させることから、質量が等しい場合、鉛は単位厚さあたりより多くの電子を保持することになる。

2. 放射線遮蔽能力の評価の課題

歴史的に診断領域の X 線に対して放射線シールドに関する放射線の遮蔽能力は、鉛当量で示されてきた。しかし、鉛の線減弱係数のエネルギー依存性は単純ではないこともあり、鉛当量で示す場合に、どのような照射条件で鉛と同等かを仮定しないと、鉛当量の値は一致しない。PET 検査用の遮蔽体では、用いる放射線のエネルギーに

「鉛当量」が大きく依存する。このため、鉛当量の定義がメーカーにより見直されている例¹がある。

鉛を含まない素材の遮蔽体を設ける場合でも、放射線遮蔽能力を評価する条件を考慮する必要性が指摘されている [6]。

B. 目的

鉛を含まない素材の遮蔽体について、放射線の照射条件ごとに鉛の遮蔽能力と比較する。

C. 方法

1. 質量減弱係数の比較

鉛と鉛以外の元素としてビスマス (Bismuth:Bi)、アンチモン (Antimony:Sb)、タングステン (Tungsten:W) の光子に対する質量減弱係数を米国の国立標準技術研究所 (National Institute of Standards and Technology : NIST) の提供情報²を用いて比較した。

2. モンテカルロ計算による比較

また、放射線挙動を、乱数を用いて模擬するモンテカルロ計算コードである PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System)⁸⁾ を用いて、放射線遮蔽体の放射線遮蔽能力を調べた。

3. 鉛を含まない遮蔽体の設定

単層構造と二層構造の二つを仮定した。それぞれの厚みは、鉛 0.25 mm と遮蔽能力が同じになるようにした。

① 鉛を含まない単層構造の遮蔽体

元素の組成は以下のようにし、密度を 4.5 g/cm^3 とした。厚みは 0.63 mm とした。

¹ PET 施設用ガンマ線遮蔽鉛ガラス Pro-GR

<https://www.newglass.jp/mag/TITL/maghtml/82-pdf/+82-p065.pdf>

² <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab3.html>

Bi (Bismuth) : Sb (Antimony) : O (Oxygen) : C (Carbon) : H (Hydrogen) : Cl (chlorine) =
2.0 : 1.0 : 4.5 : 10 : 15 : 5

② 鉛を含まない二層構造（下記の（ア）と（イ）からなる）の遮蔽体

下記の（ア）と（イ）をそれぞれ一層ずつの計二層の構造とした。

（ア） タングステンパウダーからなる層

元素の組成は以下のようにし、密度を 8.0 g/cm³とした。厚みは 0.218 mm とした。

W (Tungsten) : O : C : H = 1.0 : 1.5 : 3.0 : 6.0

（イ） ビスマスを主成分とする層

元素の組成は以下のようにし、密度を 5.0 g/cm³とした。厚みは 0.218 mm とした。

Bi : O : C : H = 1.0 : 1.0 : 2.5 : 5.0

4. X線照射の条件設定

① エネルギー

照射条件として 30 keV から 110 keV（10 keV 毎の 9 通り）の単色 X 線、および 120 kV で加速した電子をタングステン陽極に衝突させて発生させた制動放射線（2.5 mm の Al で濾過）の照射を比較した。

② X線ビームの幾何学的条件

拡がりを持つ X 線ビーム（点から発生させ 50 cm 先で半径 10 cm の円になる）及び細い線状の X 線ビームを照射した場合の光子又は電子の飛程の違いを比較した。

照射した X 線ビームの形状の違いによる光子と電子の飛跡の違いを図 1 から図 4 に示す。提示したのは 120 kV で加速した電子をタングステン陽極に衝突させて発生させた制動放射である光子を入射させた場合である。また、遮蔽体として、鉛を含まない単層構造の遮蔽体を用いている。密度は 4.5 g/cm³で、厚みは 0.63 mm とした。

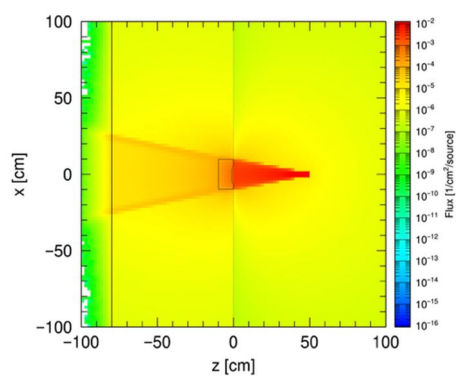


図 1 拡がりを持つ X 線ビームを照射した場合の光子の飛跡（遮蔽体は 0.25 mm の鉛）

X 線は Z 軸上の 50 cm の位置から照射している。Z 軸上の 0 cm に遮蔽体が置かれている。Z 軸上の -10 から 0 cm の間には半径 10 cm の水の円柱が配置されている。水吸収線量は $Z=-5$ cm を軸とした周囲の半径 5 cm の円柱の領域で評価した。

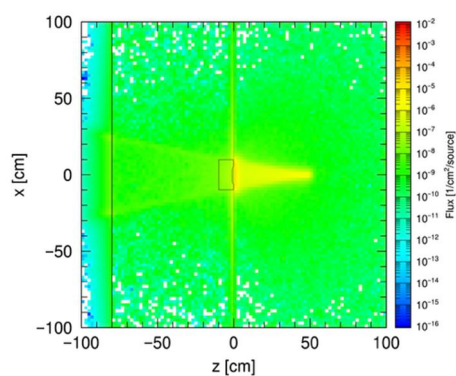


図 2 拡がりを持つ X 線ビームを照射した場合の電子の飛跡

遮蔽体に光子が入射し相互作用で電子が飛び出していることが観察される。

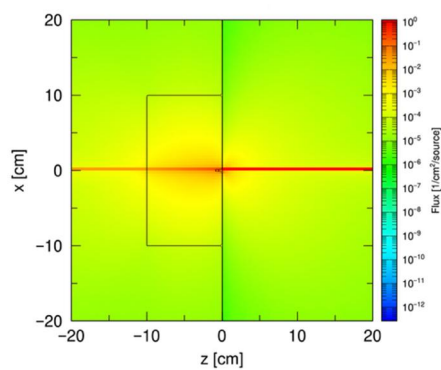


図 3 細い X 線ビームを照射した場合の光子の飛跡（遮蔽体は 2 層構造）

X 線は Z 軸上の 50 cm から照射している。Z 軸上の 0 cm に遮蔽体が置かれている。Z 軸上の -10 から 0 cm の間には半径 10 cm の水の円柱が配置されている。水吸収線量は Z 軸周囲の半径 0.1 cm の円柱の領域で評価した。

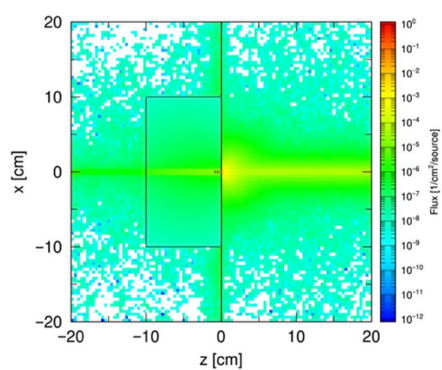


図 4 細い X 線ビームを照射した場合の電子の飛跡

遮蔽体に光子が入射し相互作用で電子が飛び出していることが観察される。

D. 結果

1. 質量減弱係数の比較

鉛(Lead)と鉛以外の元素としてビスマス(Bismuth)、アンチモン(Antimony)、タングステン(Tungsten)の光子に対する質量減弱係数を米国の NIST の提供情報³を用いて比較した結果を図 5 に示す。それぞれの元素は、X 線の遮蔽体として特有のエネルギー特性を持ち、組み合わせることでメリットを生み出す余地があることを示している。

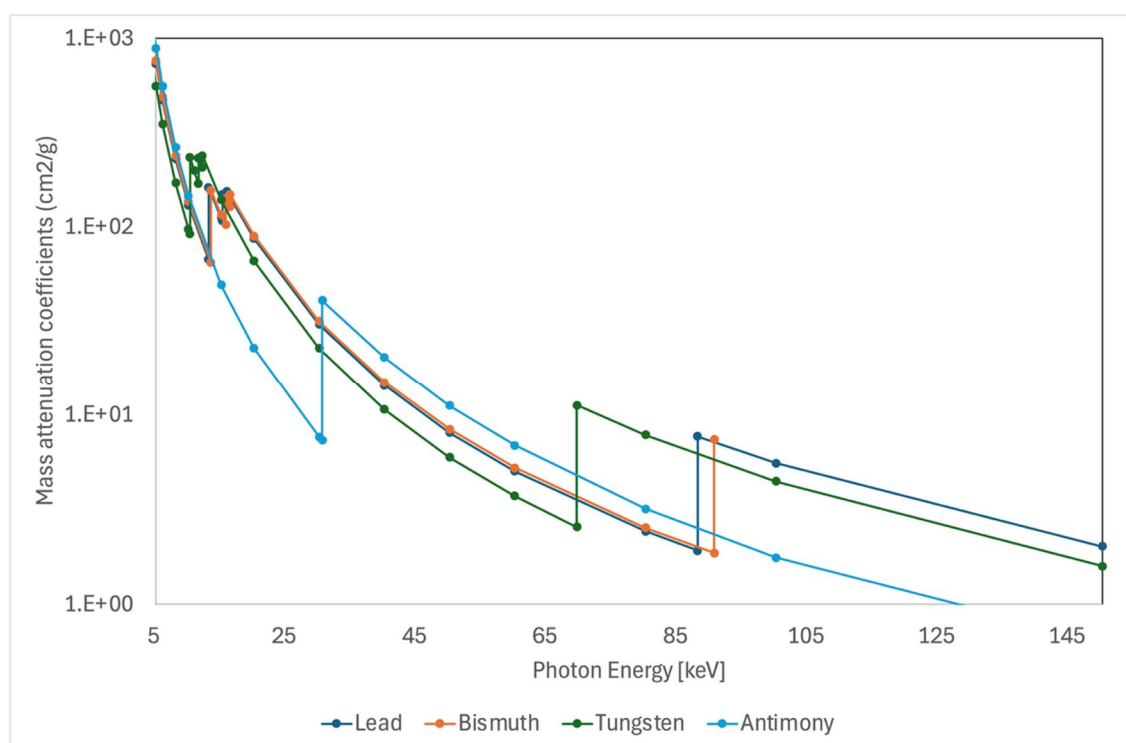


図 5 鉛と鉛以外の元素（ビスマス、アンチモン、タングステン）の光子に対する質量減弱係数

³ <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab3.html>

2. モンテカルロ計算による比較

① 「鉛」と「鉛を含まない」遮蔽体の比較

(ア) 管電圧 120 kV 加速した電子をタングステン陽極に衝突させ発生させた制動放射を 2.5 mm の Al で濾過した X 線

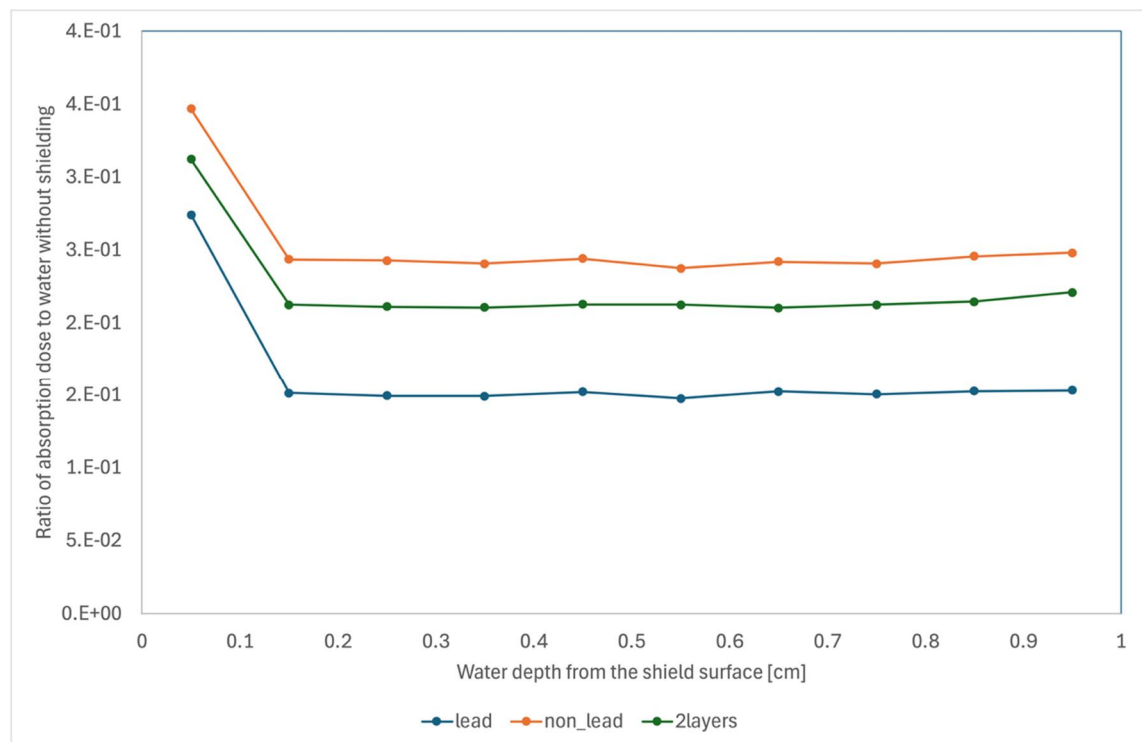


図 6 「鉛」と「鉛を含まない」遮蔽体の放射線の透過割合の比較【管電圧 120kV で 2.5 mmAl で濾過した X 線】

縦軸は遮蔽体なしの場合に対する遮蔽体ありの場合の水の円柱の吸収線量の比を表し、横軸は遮蔽体と水の円柱の距離を表している（以下、図 10 まで同様）。鉛を含まない単層構造（non lead）又は二層構造（2 layers）の遮蔽体と比べて、鉛の遮蔽体は透過率が最も小さかった（図 6）。

(イ) 30 keV の単色 X 線

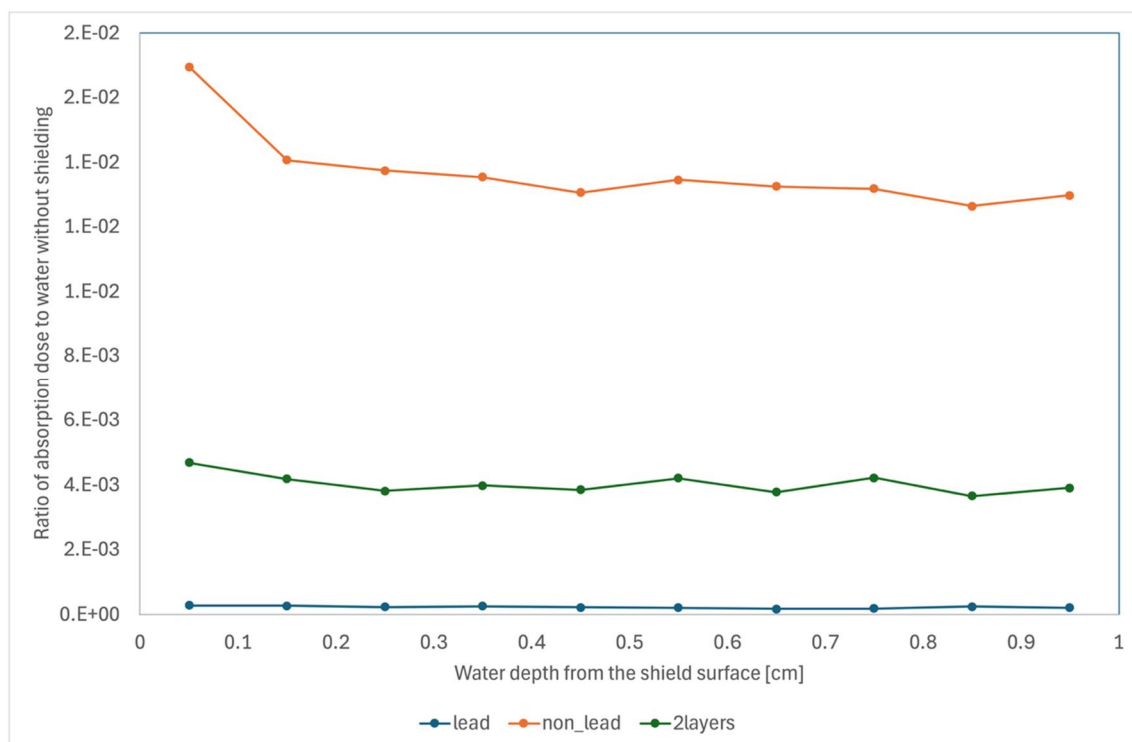


図 7 「鉛」と「鉛を含まない」遮蔽体の放射線の透過割合の比較【30 keV の拡がりを持つ X 線ビーム】

鉛を含まない単層構造又は二層構造の遮蔽体と比べて、鉛の遮蔽体は透過率が最も小さかった（図 7）。同じ質量でも遮蔽能力の違いが大きい。

(ウ) 70 keV の単色 X 線

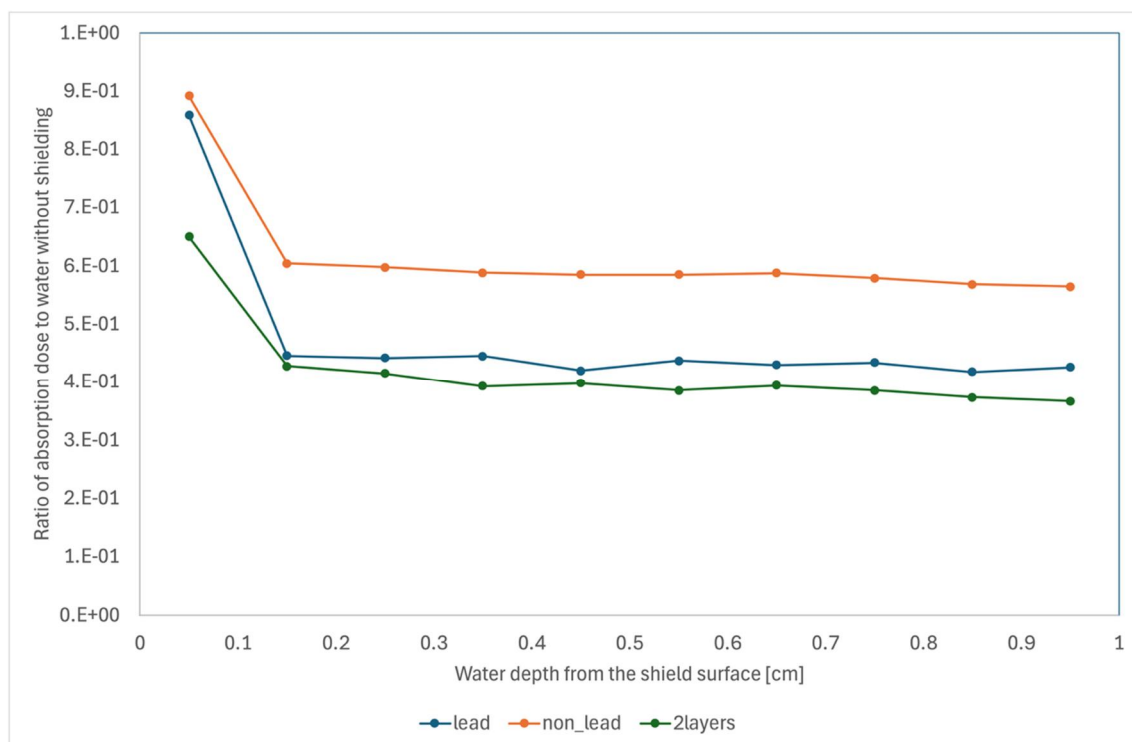


図 8 「鉛」と「鉛を含まない」遮蔽体の放射線の透過割合の比較【70 keV の拡がりを持つ X 線ビーム】

60 keV までは鉛の遮蔽能力が最も優れていたが 70 keV ではタングステンとビスマス主体の二層構造の方が、遮蔽能力が優れていた（図 8）。また、鉛単体では遮蔽体で発生した低透過性の放射線が遮蔽体付近の水吸収線量を高めていた。ただし、これらは鉛防護衣のカバーでも吸収され、ほとんど皮膚基底細胞層には到達しない（カバーとして厚さ 1 mm の水を仮定すると体を模擬した水の表面の吸収線量は半分程度にまで低下する）。

(エ) 110 keV の単色 X 線

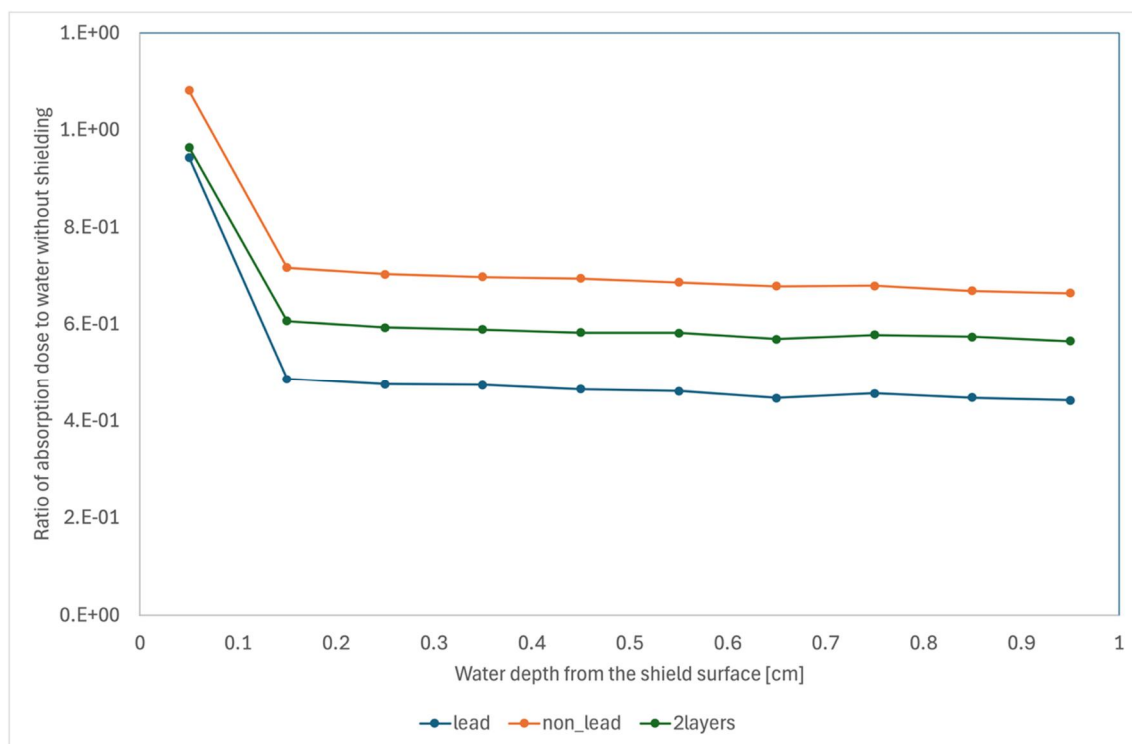


図 9 「鉛」と「鉛を含まない」遮蔽体の放射線の透過割合の比較【110 keV の拡がりを持つ X 線ビーム】

90 keV からは再び鉛の遮蔽能力が最も高くなった。水の円柱の位置が遮蔽体に近い領域では遮蔽体によりかえって線量が増えることがあった（図 9）。

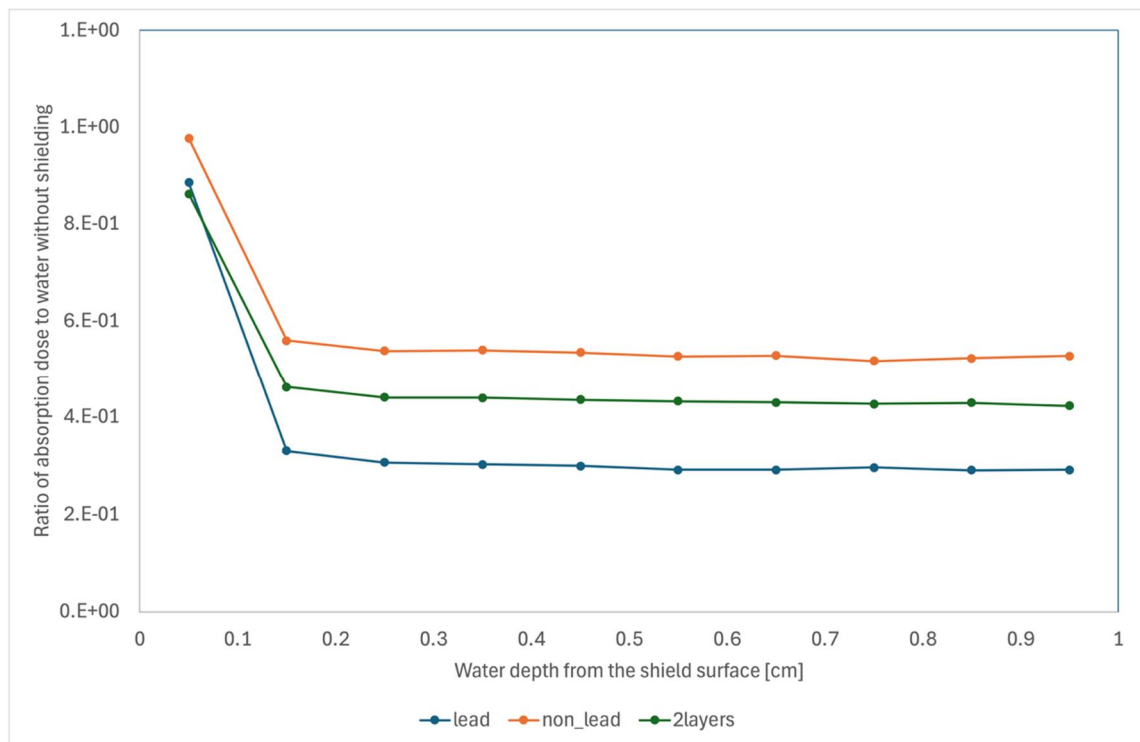


図 10 「鉛」と「鉛を含まない」遮蔽体の放射線の透過割合の比較【110 keV の細い X 線ビームの場合】

細いビームではビルドアップ効果が低下するので透過率が小さくなった（図 10）。

3. 入射する光子のエネルギー別の遮蔽体の種類別の遮蔽能力の違い

① 鉛の遮蔽体

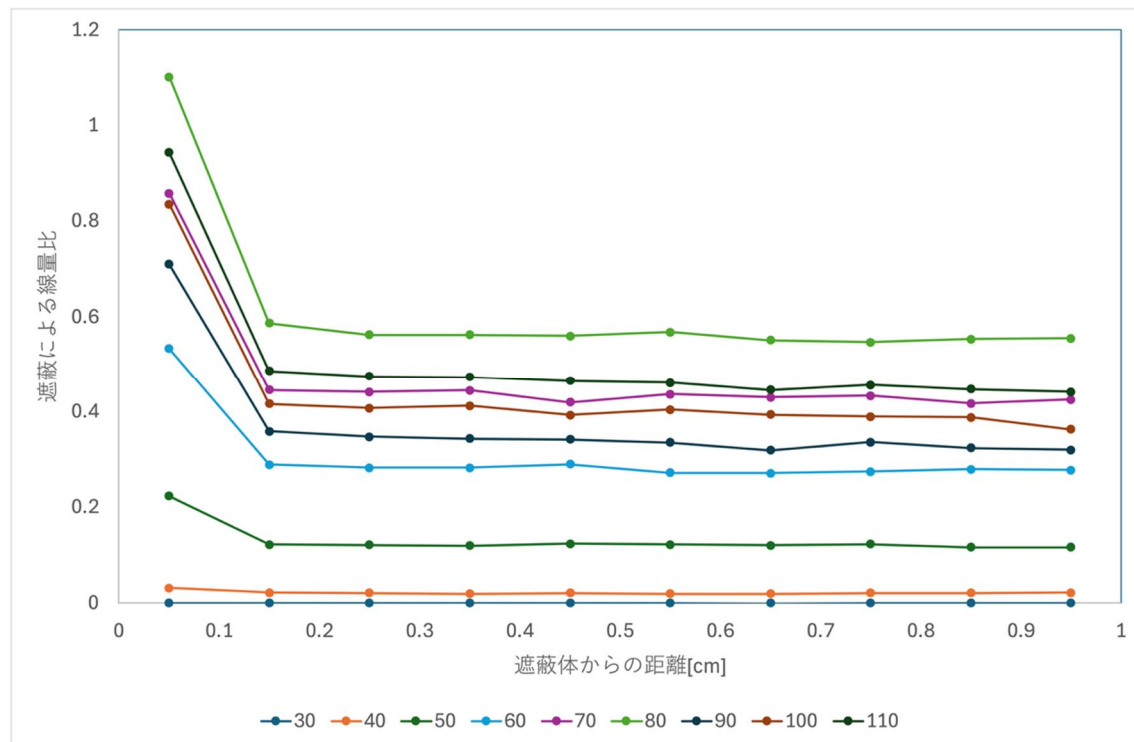


図 11 入射する光子のエネルギー別の鉛の遮蔽能力

単色 X 線 30 keV から 110 keV (10 keV 毎) のエネルギーの範囲では、80 keV の光子が鉛の遮蔽体をもっとも透過した (図 11)。

② 鉛を含まない遮蔽体（ビスマス主体の単層構造）

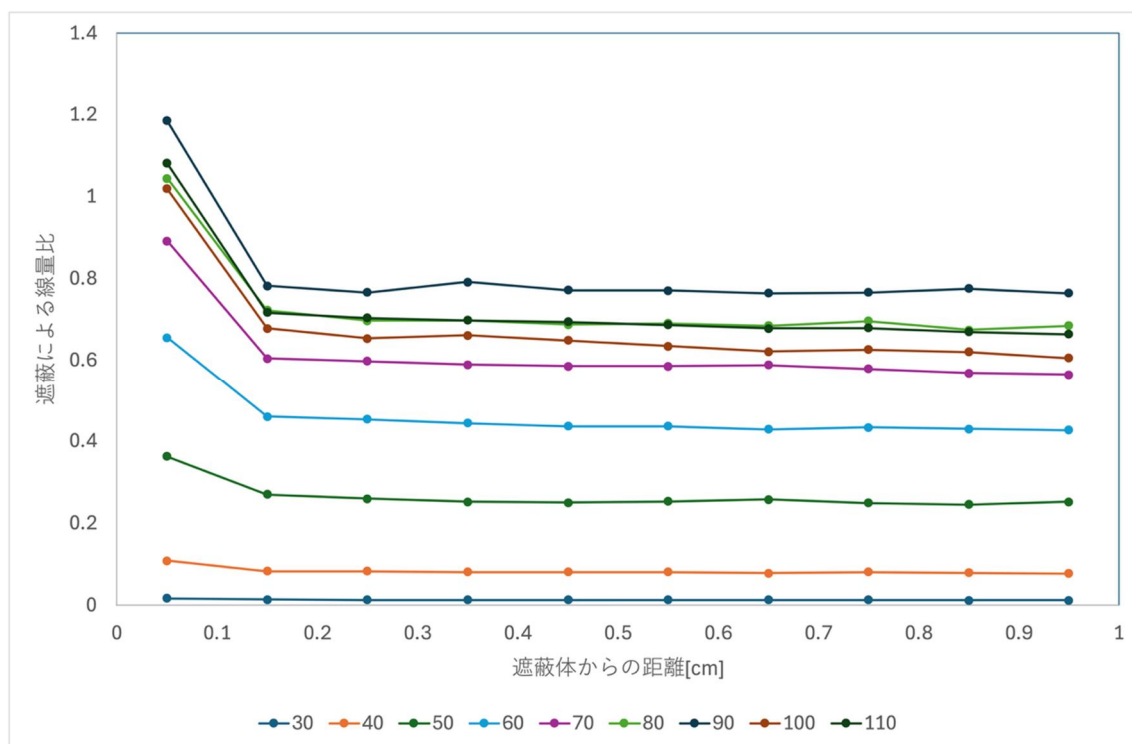


図 12 入射する光子のエネルギー別の Bi 主体の鉛を含まない遮蔽体の遮蔽能力

単色 X 線 30 keV から 110 keV (10 keV 毎) のエネルギーの範囲では、90 keV の光子が鉛を含まない単層構造の遮蔽体をもっとも透過した。

③ 鉛を含まない遮蔽体（タングステンとビスマス主体の二層構造）

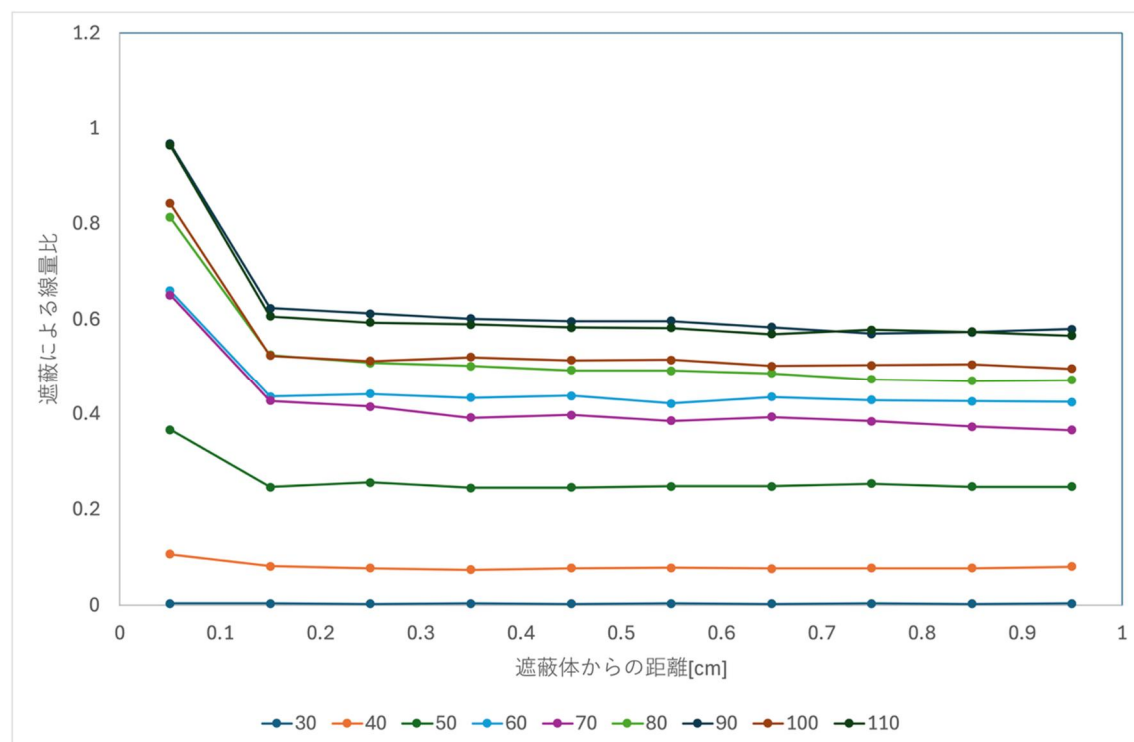


図 13 入射する光子のエネルギー別の二層構造の遮蔽体の遮蔽能力

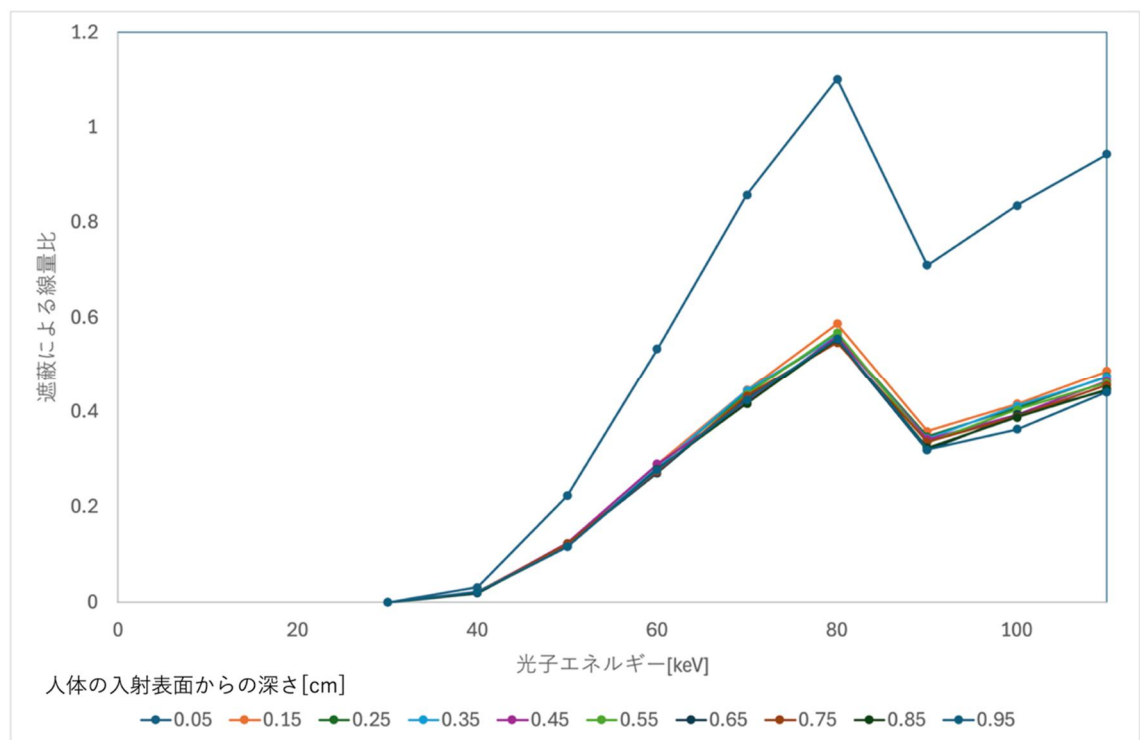
単色 X 線 30 keV から 110 keV（10 keV 毎）のエネルギーの範囲では、90 keV と 110 keV の光子が鉛を含まない二層構造の遮蔽体をもっとも透過した。

4. 入射する光子の人体の深さ別の遮蔽体の種類別の遮蔽能力の違い

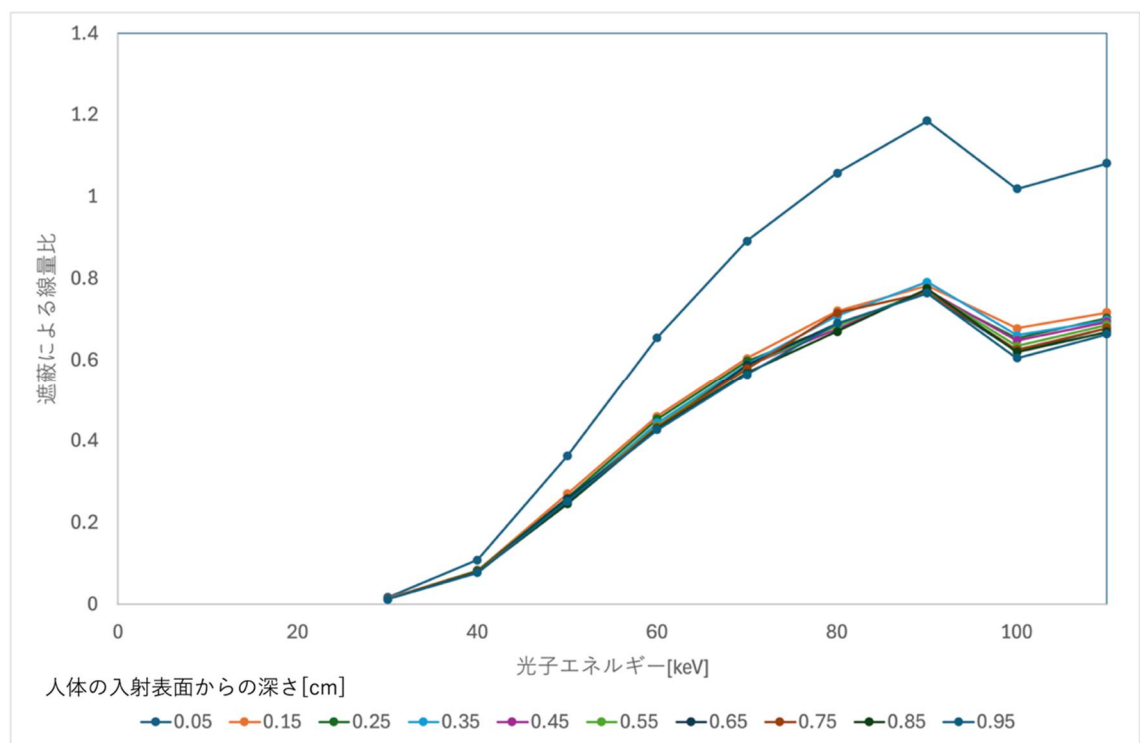
人体に入射する光子の遮蔽体の効果は、人体の深さ別に異なると考えられる。このため、遮蔽体の種類別に、それぞれの遮蔽能力の違いを人体の深さ別でも示す。遮蔽能力は、遮蔽による線量比で示す。

いずれの遮蔽体でも入射する光子のエネルギーが低いと遮蔽能力が大きい。その一方で、入射する光子のエネルギーが高くなると遮蔽能力が低下する。遮蔽体の直下では遮蔽体での放射線の相互作用に由来して逆に線量が高くなることもある。

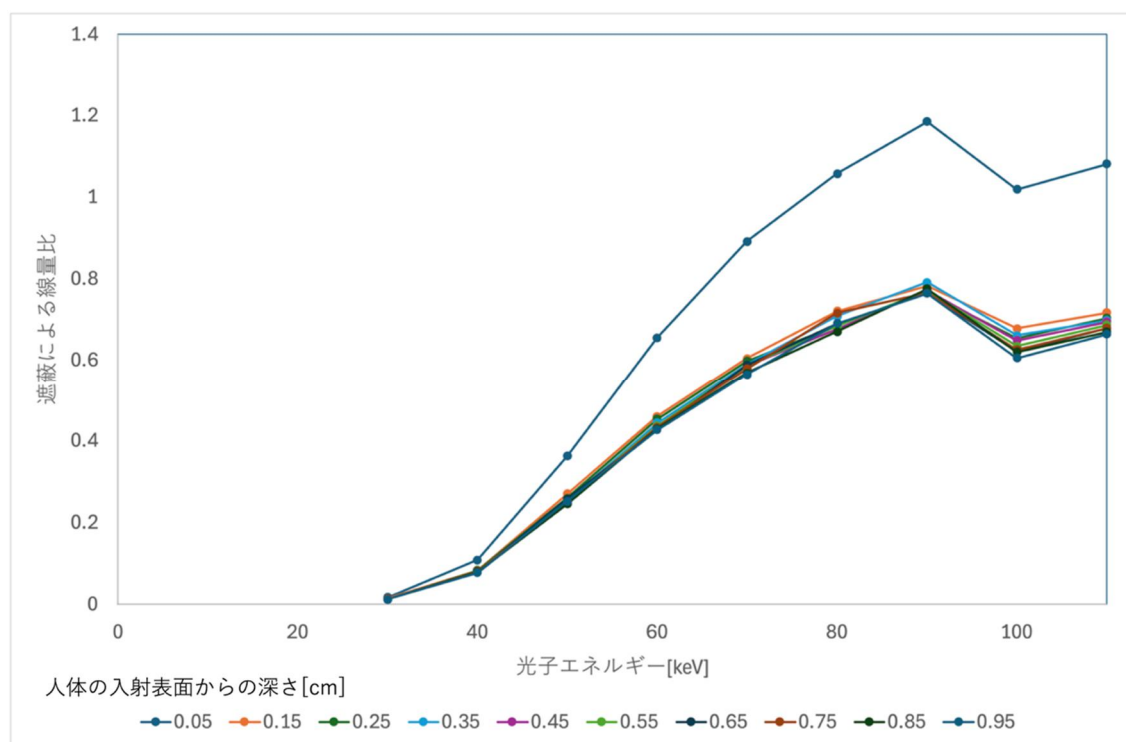
① 鉛の遮蔽体



② 鉛を含まない単層構造の遮蔽体（ビスマスが主成分）



③ 鉛を含まない二層構造の遮蔽体（タングステンとビスマスが主成分）



E. 考察

1. 遮蔽能力の評価の条件の依存性

遮蔽体の能力は、入射する光子のエネルギー（エネルギー分布）に依存する。このため、遮蔽体としてどのような元素組成が最適であるかは、一律には決定できず、想定される放射線場の条件を特定しなければ検討できない。また、X線のエネルギー分布の形状そのものが遮蔽効果に影響を及ぼすことから、何らかの定義に基づく単一の指標である実効エネルギーの概念のみで評価するのは適切ではないことも考えられる。

また、人体に対する遮蔽効果は、光子が到達する人体の深さによって異なる点に注意が必要である。これは、遮蔽体での相互作用（散乱や二次電子の発生など）に起因し、特に浅い層では遮蔽体による効果が小さくなったり、むしろ、線量を増やすことになりかねないが、実際には遮蔽体のカバーでこの効果は低減され、皮膚のバリア効果もあるので、基底細胞層でのこの影響は限定的である。

ただし、エネルギーが高い光子を用い、かつ、遮蔽体と放射線感受性の高い細胞層との距離が近い条件下では、このような遮蔽体との相互作用への配慮を求められることがあるかもしれない。

2. 遮蔽能力を提示する際に求められる配慮

放射線を遮蔽する能力は、放射線と物体の相互作用に依存することから、光子のエネルギー（最大エネルギーやエネルギー分布）、ビームの幾何学的条件などに依存するが、その関係が単純ではないことがある。そのため、放射線生物学の実験でX線を照射する場合に、X線の照射条件を示すことが推奨されている[7]。遮蔽能力の表記でも、これらを明示する必要がある。また、遮蔽能力の評価は、実際に用いられる放射線場と類似したものとするのがよい。

遮蔽体の放射線の遮蔽能力は遮蔽体の品質にも依存すると考えられる。このため、遮蔽体の販売会社は製品の品質に関する情報を提供することが望ましい。なお、遮蔽体にはNORMが含まれることがある⁴。放射線を照射した際に遮蔽体は散乱体として散乱線の線源となるが、放射線管理測定で混乱をもたらすことがあるので、その情報の提供も求められる。

3. 遮蔽体の選択

遮蔽体の選択にあたっては、必要な程度に放射線を低減できることだけでなく、労働者の負荷をできるだけ低減させることが望ましい。IAEAでは放射線業務従事者を対象にした健康診断で放射線防護具が問題なく使えるかどうかの確認を求めており、日本の健康診断でもそのような機能を持たせる必要がある。その一方で体に着用しないタイプの個人放射線防護器具は、術者等の体への負担を大きく軽減しうるが、手技の妨げになることも考えられる。つまり、医療安全との間でトレードオフになりえるので、その観点での吟味も必要である。

4

<https://warp.ndl.go.jp/web/20180619161119/www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/iyaku/kaisyuu/2007/kaisyuu2007-2-2681.html>

https://warp.ndl.go.jp/web/20150811220017/www.nsr.go.jp/archive/mext/a_menu/anzenkakuho/news/trouble/1268624.htm

<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/gen-comm/info-notices/1997/in97050.html>

さらに、遮蔽体の選択では環境負荷などを考えた Life cycle assessment も求められる。鉛は、比較的リサイクルの利用が推進されているが、放射線防護用の鉛でも再利用や素材のリサイクルのさらなる推進が求められる。

F. 結論

X線遮蔽体の遮蔽能力は、X線の照射の条件のような評価の手法に依存した。医療機関で用いる遮蔽体の放射線遮蔽能力の評価では、評価条件を臨床現場の状況にあったものとする必要がある。放射線遮蔽体の遮蔽能力を提示する際には評価条件を明示すべきである。

G. 謝辞

この課題の検討で、国際放射線防護学会の教育・訓練タスク・グループの教育講演 Webinar 検討ワーキング・グループ・メンバーからの示唆を得た。

H. 文献

1. 一般社団法人産業環境管理協会 資源・リサイクル促進センター. レアメタルリサイクル [Internet]. 2026 [cited 2026 Feb 15].
<https://www.cjc.or.jp/raremetal/>. Accessed 15 Feb 2026
2. 日本鋳業協会 鉛亜鉛需要開発センター. 遮音・遮蔽用鉛板のリサイクル [Internet]. [cited 2026 Feb 15].
<https://jlzda.gr.jp/lead/recycle/recycling>. Accessed 15 Feb 2026
3. 日本鋳業協会 鉛亜鉛需要開発センター. 放射線遮蔽用途向け鉛製品について [Internet]. 2018 [cited 2026 Feb 15].
<https://jlzda.gr.jp/news/2018/p209>. Accessed 15 Feb 2026
4. Karimi M, Ghazikhanlou-sani K, Mehdizadeh AR, Mostaghimi H. Lead-free transparent shields for diagnostic X-rays: Monte Carlo simulation and measurements. Radiol Phys Technol. 2020;13(3):276-87.
<https://doi.org/10.1007/s12194-020-00580-5>
5. Li Z, Zhou W, Zhang X, Gao Y, Guo S. High-efficiency, flexibility and lead-free X-ray shielding multilayered polymer composites: layered

structure design and shielding mechanism. Sci Rep. 2021;11(1):4384.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-83031-4>

6. Safari A, Rafie P, Taeb S, Najafi M, Mortazavi SMJ. Development of Lead-Free Materials for Radiation Shielding in Medical Settings: A Review. J Biomed Phys Eng [Internet]. 2024;14(3):229-44.
<https://doi.org/10.31661/jbpe.v0i0.2404-1742>
7. Stern W, Alaei P, Berbeco R, DeWerd LA, Kamen J, MacKenzie C, et al. Recommendations for harmonized reporting of radiation Dosimetry by adoption of Compatibility in Irradiation Research Protocols Expert Roundtable (CIRPER). Int J Radiat Biol. 2024;100(6):821-3.
<https://doi.org/10.1080/09553002.2024.2331130>
8. Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code System – PHITS version 3.33, J. Nucl. Sci. Technol. 61, 127–135, 2024