



Title	122keV γ 線の後方散乱
Author(s)	諸住, 高; Morozumi, Takashi; 大橋, 弘士 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 87, 161-168
Issue Date	1978-06-05
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41464
Type	departmental bulletin paper
File Information	87_161-168.pdf



122 keV γ 線 の 後 方 散 乱

諸 住 高* 大 橋 弘 士* 岡 林 栄 二**

(昭和 52 年 9 月 30 日受理)

Backscattering of 122 keV Gamma-Ray

Takashi MOROZUMI Hiroshi OHASHI Eiji OKABAYASHI

(Received September 30, 1977)

Abstract

The 122 keV photon backscattering, which occurred on the surfaces of various kinds of metallic and non-metallic materials, was investigated by irradiating these materials with Co-57 gamma-ray and measuring the energy spectrum of backscattered photon. Among the materials tested, lead behaved very differently, namely the backscattering occurred predominantly by the evolution of K-X ray on its surface. As a consequence, the backscattering from lead was almost comparable to that from low atomic number materials, such as aluminium, titanium, concrete block and organic plastics. Coating with thin copper or cadmium plate was effective to cut the backscattering from lead. For practical purposes, it is of interest to cover a concrete wall with very thin layer of lead or lead compound in which the thickness of layer is less than that which corresponds to saturated scattering.

1. 緒 言

医療用, 研究用放射線装置の普及により, これを取扱う放射線業務従事者の被曝にたいする防護措置が重要になっている¹⁾. とくに装置室内の被曝は散乱放射線によるものであって, これを軽減するには, 壁, 天井および床などの内張する散乱低減材に性能のよいものを使用しなければならない。

X 線, γ 線などの光子の散乱は, 一般論として, Compton 効果によるものであり, 散乱線は光電吸収により材料外への放出が防止される。したがって, 原子番号の大きな元素を含む材料, たとえば鉛などは散乱は少いと考えられている。事実, Cs-137 の 662 keV γ 線ではそのような結果がえられているが²⁾, 低エネルギーの光子は必ずしもそのようにならず³⁾, 検討すべき点が残されている。ことに, 100 keV 付近のエネルギーを持つ光子が照射されると, たとえば鉛の場合には K_{α} と K_{β} など K-X 線発生による強い散乱が起こる。通常の医療 X 線装置で問題がないとしても, 硬い X 線を使用する医療用特殊 X 線装置, 研究あるいは材料検査用装置の場合には, 鉛板を内張とすることは, 散乱防止にたいし逆効果となることもありうる。

100 keV 程度のエネルギーを持つ X 線, γ 線装置室の設計, 内装施工の参考資料をうる目的で, 各種金属と実用内装材による Co-57 線源からの 122 keV γ 線の後方散乱実験を行ってみた。

* 原子工学科 原子炉材料学講座

** 北日本レイスイ工業株式会社

2. 実験方法

線源にはメスバウア分光測定用の Co-57 を使用し、電子捕獲によって生ずる Fe-57 の第2励起状態から第1励起状態に落ちるとき放出する 122 keV のエネルギーを持つ γ 線にたいする散乱を測定した。比較のため、医療 X 線装置による 30~40 keV のエネルギーの X 線を一部の実験の線源として使用した。

散乱線の測定には、JIS, Z-4508 を準用した Fig. 1 に示すような散乱比測定箱を使用した。測定箱は鉛板で作られており、その最頂部に線源をとりつけ、底部の円形窓の下に密着した試料板の表面に垂直方向に照射する。照射面に対し、15, 30, 45 と 60° の角度の方向にあけた窓のところに放射線測定用のプローブを置いて、散乱線束とスペクトルを測定する。122 keV γ 線の場合には NaI (Tl) シンチレーションカウンタ、これよりエネルギーの低い X 線測定の場合には電離箱式のサーベイメータを使用した。後者は JIS, Z-4309 にならったものである。シンチレーションカウンタの場合は、512 チャンネル波高分析器によってエネルギースペクトルを求めた (使用チャンネル数 256)。

放射線計測器の種類、光子のエネルギー、また個々の検出器によって計数効率が変わるので、各試料の散乱線計数率を同じ計測系で測った鉛板 (あるいは他の標準試料) の飽和散乱線計数率を規準にした比率として求めると、比較が便利である。この比率を散乱比と呼んでいる。JIS, Z-4308 によれば、放射線防護材の散乱比は

$$\text{散乱比} = \frac{\text{試験品からの散乱 X (または } \gamma \text{) 線量率}}{\text{標準鉛板からの散乱 X (または } \gamma \text{) 線量率}}$$

と定義されている。

Fig. 1 の測定箱底部の試料窓を開放したまま放射線を出して、測定箱壁からの散乱などによるバックグラウンドをまず測定する。つぎに、3 mm 厚の標準鉛板を試料窓の下にあてて、散乱線を求め、両者の差から上式の分母の値がえられる。さらに、標準鉛板の上面に防護材を重ねて試料窓にあてて同様の測定を行い、上述のバックグラウンド値を差引き分子にあたる値を求める。最後に、上式によって散乱比を計算する。検出器の取付け位置を変えて、以上の測定を繰返すことによって、散乱角による散乱比の変化がわかる。

測定試料として、カドミウム板 (原子番号 48, 0.7 mm 厚)、銅板 (原子番号 29, 1 mm 厚)、タン板 (原子番号 22, 1 mm 厚)、アルミニウム板 (原子番号 13, 13 mm 厚) などの金属板、塩化ビニル板 (3 mm 厚)、耐火ボード、コンクリートブロック、その他 2, 3 の実用散乱防止用壁材など

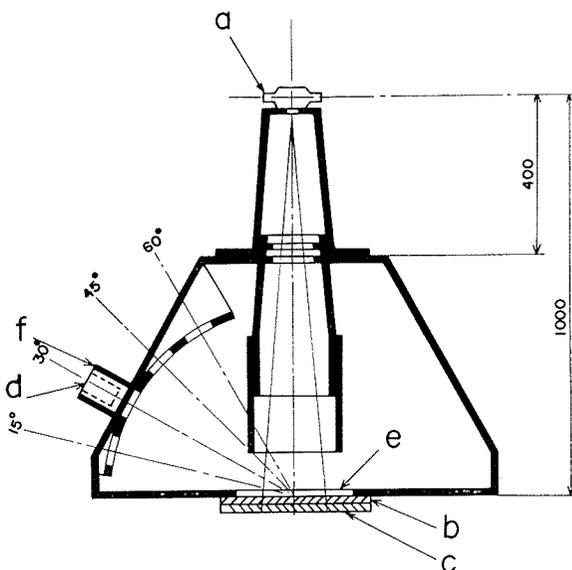


Fig. 1. Shielded chamber for measuring gamma-ray backscattering.

- | | |
|------------------------|----------------------|
| a: radiation source | b: specimen |
| c: standard lead plate | d: counter |
| e: window | f: lead plate shield |

非金属材料を使用した。板材の重ね合わせ枚数を変えることによって、試料層の厚さを変化させ、散乱量への影響をしらべた。

3. 実験結果と考察

3.1 各種材料からの散乱線スペクトル

Co-57 線源からの γ 線そのものと、これを 3 mm 厚の標準鉛板に照射して得られる散乱線のスペクトルを Fig. 2 に比較して示している。測定体系が異なるため、縦軸の計数率そのものの比較は意味はなく、任意単位で示してあり、ピークに相当するエネルギーのみを比較の対象にしている。鉛板からの散乱線は 76 keV のところに極大があるが、これは K_{α} , K_{β} を含めた K-X 線である。このほかに 86.6 keV 位置に Compton 散乱のピークが寄り添って観測されている。ちなみに、Compton 散乱則によれば、試料面にたいしそれぞれ、 15° , 30° , 45° , 60° の方向への散乱線のエネルギーは、122 keV の入射光子の場合、93.8, 89.8, 86.6, 84.4 keV となる。したがって、K-X 線と Compton 散乱線は図に示すようにほとんど重って観測される。

標準鉛板の照射面上に、他種類の金属板を重ねて被覆すると、金属の種類と重ね合せの厚さによって散乱線のスペクトルは変化する。Fig. 3 はその数例を示している。

曲線 a は標準鉛板からの散乱線であり、b は 1 mm チタン板をこれに重ねた場合、c は 1 mm アルミニウム板、d は 1 mm 銅板、e は 0.7 mm カドミウム板を重ねた場合の散乱線スペクトルで

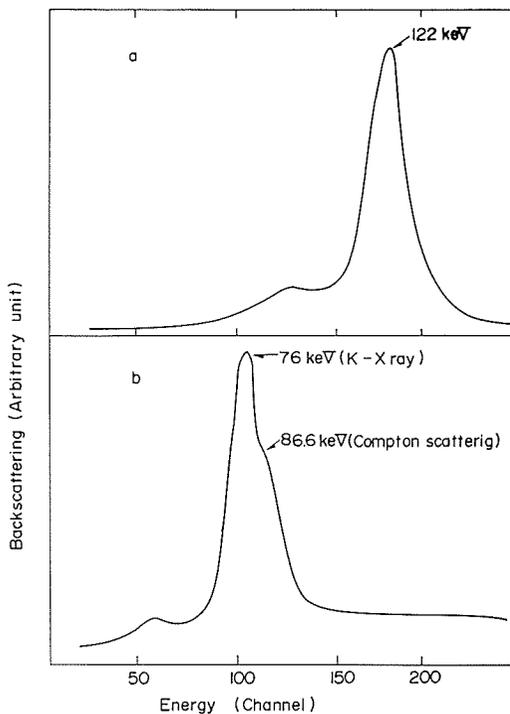


Fig. 2. Gamma-ray spectra of photon from Co-57 radiation source (a) and backscattered photon from standard lead plate (b).

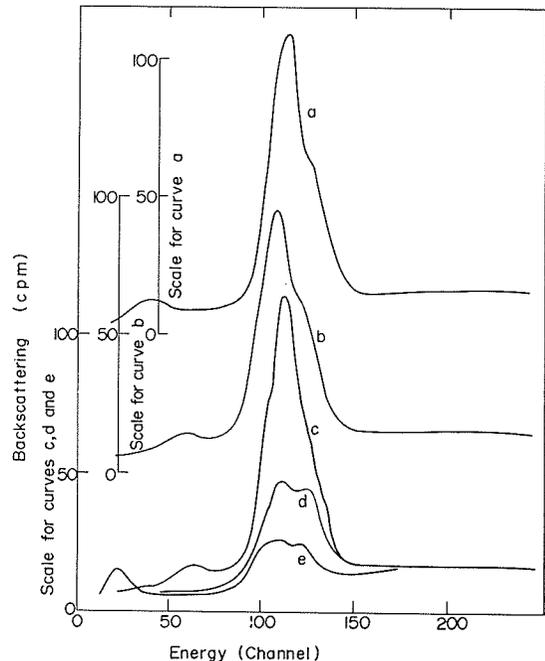


Fig. 3. Gamma-ray backscattered from various specimens.

- Curve a: standard lead plate (SLP)
- b: 1 mm thick titanium on SLP
- c: 1 mm thick aluminium on SLP
- d: 1 mm thick copper on SLP
- e: 0.7 mm thick cadmium on SLP

ある。チタンとアルミニウムの重ね合せは散乱線の軽減はほとんど見られないが、銅とカドミウムは鉛板の散乱を著しく減ずることがわかった。

アルミニウムについて 0.5 mm 厚さの板を枚数を変えて重ね、全体の厚さと散乱量の関係をしらべてみたものが Fig. 4 である。厚さとともに散乱量が増大し、やく 50 mm 程度のところで飽和する傾向がみられる。鉛板上に重ねた場合には 1 mm 程度の厚さでは γ 線にたいする遮蔽効果はなく、鉛板からの散乱はほとんど減じない。厚くなるにつれて、遮蔽効果が現れてくるが、一方、アルミニウム層からの散乱が増し、鉛とアルミニウムの飽和散乱量がほぼ等しいため、全体として、散乱減少の効果がみられない。チタンの重ね合せの場合も同様である。

銅板の場合は 1 mm 程度で鉛からの散乱はほとんど抑制している一方で、自身からの Compton 散乱が少く、結果としてむき出しの鉛板にくらべ半分以下の散乱量となっている。カドミウムはさらに効果は著しく、0.7 mm の厚さの被覆で鉛板にくらべ 20% 以下の散乱量となっている。その 3 倍程度の厚さにすると鉛板からの散乱はほとんど測定に

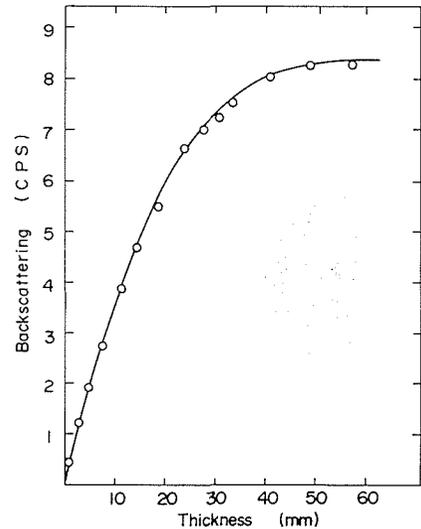


Fig. 4. Effect of thickness on 122 keV photon backscattering from aluminium.

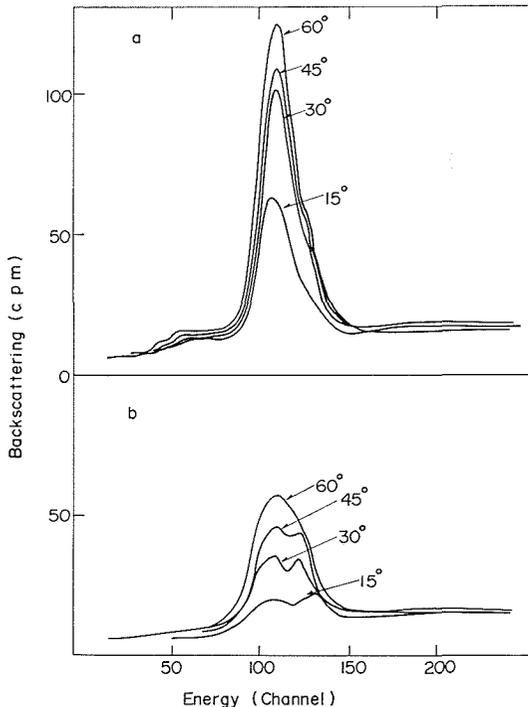


Fig. 5. Effect of scattering angle on 122 keV photon backscattering.

a: SLP b: 1 mm thick copper on SLP

かからなくなる。カドミウム自身から 26 keV のエネルギーを持つ K-X 線の発生があるが、その量は鉛の K-X 線にくらべるとはるかに小さい。

散乱角によって散乱量とエネルギーの変化がある。Fig. 3 の場合は試料面にたいし 45° の方向の散乱線のスペクトルを示したものであるが、Fig. 5 は標準鉛板と、標準鉛板上に 1 mm の銅板を重ねた場合を例として、散乱角による散乱線スペクトルの変化を示している。散乱角の小さい方向ほど散乱量が小さい。

非金属材料を標準鉛板に重ねた場合の例を Fig. 6 に示してある。3 mm の厚さの塩化ビニール板を標準鉛板に重ねたものは、標準鉛板のみの場合とほとんど散乱線スペクトルは変化しない。塩化ビニールにかえて耐火ボードを重ねた場合も同様である。また、医療用 X 線装置室の壁内張用に開発されたレーザー試供品数種についても測定を行った。一部に低散乱角の散乱を最大 20% 程度減じた例も見られたが、大部分は

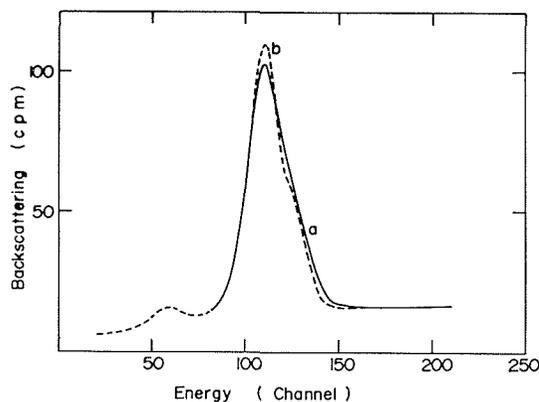


Fig. 6. Backscattering from PVC-covered lead plate.

Curve a: PVC-covered lead plate
b: uncovered

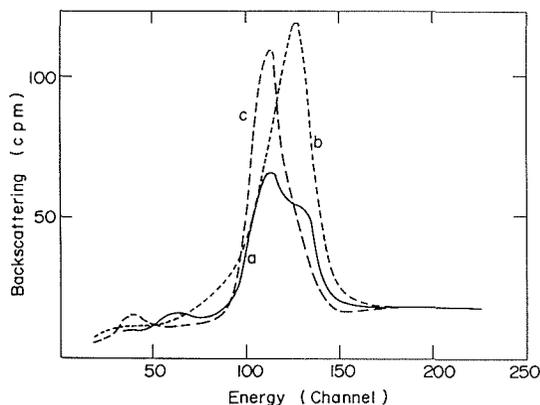


Fig. 7. Backscattering from concrete block.

Curve a: lead-treated concrete block
b: ordinal concrete block
c: SLP

下地の鉛板からの散乱を軽減する能力はなく、100 keV 程度の光子にたいしては単に装飾的な効果しか期待できないことがわかった。

Fig. 7 は厚さやく 100 mm のコンクリートブロックからの散乱を標準鉛板と比較して示している。通常の建材として使用されているもの (曲線 b) と、その表面に薄く鉛を被覆加工したもの (曲線 a) についての測定結果が示されている。前者のほうは標準鉛板にくらべピークエネルギーが若干高めであり、散乱量が僅かに多い。Cs-137 の 662 keV γ 線を線源とした中田らの実験によれば²⁾、このエネルギー領域では鉛であっても Compton 散乱が支配的であるため、原子番号の高い鉛はコンクリートブロックにくらべ後方散乱は著しく小さい。飽和散乱量でやく 1/10 程度である。Fig. 7 に示した 100 keV 領域では両者の差は極めて僅かであるとするほうが妥当である。コンクリート壁の内側に鉛板を厚目に貼ることは 100 keV 程度の光子を対象とするかぎりでは散乱軽減の効果はない。むしろ興味を持たれるのは曲線 a の場合である。この場合はコンクリートの上に飽和散乱に相当するよりはかなり薄く鉛化合物を塗布したものであって、もとのコンクリートブロックにくらべて、1/2 程度にまで減少している。表面の鉛層からの後方散乱をあまり大きくしない程度の厚さでも、その内部のコンクリート部分からの Compton 散乱を有効に遮断できることがあることを示唆している。このことは 3.4 節でさらに詳しく論ずる。

3.2 Number albedo による比較

散乱量を比較するにあたって、albedo という概念で数値化したものによることが多い。albedo には、各エネルギーごとの散乱線束にエネルギーを掛けて積分した energy albedo と、線束を単純に積分した number albedo がある。前述の各測定例にみるように、散乱線はある拡がりを持ったスペクトルを示したが、鉛の K-X 線と各材料の Compton 散乱のピークエネルギーが近く、スペクトルの形があまり大きく変わらないので、number albedo で比較しても energy albedo によるのとあまり差違がないと言える。標準鉛板を基準として、number albedo 値の比として散乱比を求めることができれば、波高分析器に記憶した計数値を所定のエネルギー範囲にわたって積算した値で代用でき、energy albedo を求める場合よりかなり簡便になる。

Fig. 8 は以上の計算によって各材料の標準鉛板を基準とする散乱比を、各散乱角について示したものである。

それぞれの場合、散乱角によって散乱比が、若干変化するが材料による散乱比の大きさの順位はほとんど変わらない。K-X線の著しい鉛を除けば、平均原子番号の大きなものほど後方散乱が小さいという関係が満足されている。一般に対生成以下の光子エネルギー領域では、Compton効果でエネルギーを減じながら散乱し、光電効果で光子が吸収される。これらの効果の相対的な関係で後方散乱量が支配される。いずれの効果も材料の電子密度、したがって、おおよその傾向として、材料の平均原子番号の大きなものほど大となるが、光電効果のほうが原子番号依存性が大きいので、原子番号の大きな材料ほど後方散乱が少なくなる。BergerとRaso⁴⁾は、Monte Carlo法によって多重散乱を考慮して、各散乱角にたいする後方散乱の計算を行っているが、200 keV光子にたいする計算値の原子番号依存性とFig. 8の結果とは大方の傾向として一致している。

3.3 30 keV 近傍の X 線の散乱

以上に述べた100 keV領域の光子の後方散乱と、通常の医療用の20~40 keV X線のそれとの特徴的な差を知る目的で以下の実験を行った。後者の測定にはFig. 1の散乱比測定箱を用いたほか、線源には40~80 kV_pの加速可能な医療用 X線装置、散乱線の計測には電離箱を使い、JIS, Z-4508に従った。測定結果をTable 1に示してあるが、厚さ3 mmの標準鉛板の散乱を基準として、各材料をこの上面に重ねたときの測定値の比率を散乱比として表わしてある。60 kV_p(光子エネルギーはおおよそ30 keV)と80 kV_p(約40 keV)の測定値が比較されているが、この X線エネルギー30%の増加による標準鉛板の後方散乱量の増加はやく1.7倍である。他の材料についてもほぼ同一の傾向にある。

前述の122 keV γ 線の場合とは異なり、各材料の原子番号と散乱比の関係は単純ではなく、鉛板よりも、原子番号25前後の材料がもっとも後方散乱が少ないという結果がえられている。このことは経験的にすでに知られているところであり³⁾、実用の散乱線低減材料の原料構成をこの事実を基礎にして決定している例もある。光電吸収とCompton効果の兼合いによる解釈は単純には適用できず、理論的な面で重要な検討課題となっている。

このエネルギー領域ではカドミウムはK-X線の発生による散乱が優勢になって、標準鉛板のやく4倍の後方散乱が起こる。壁の表面に使用することは適当でない。

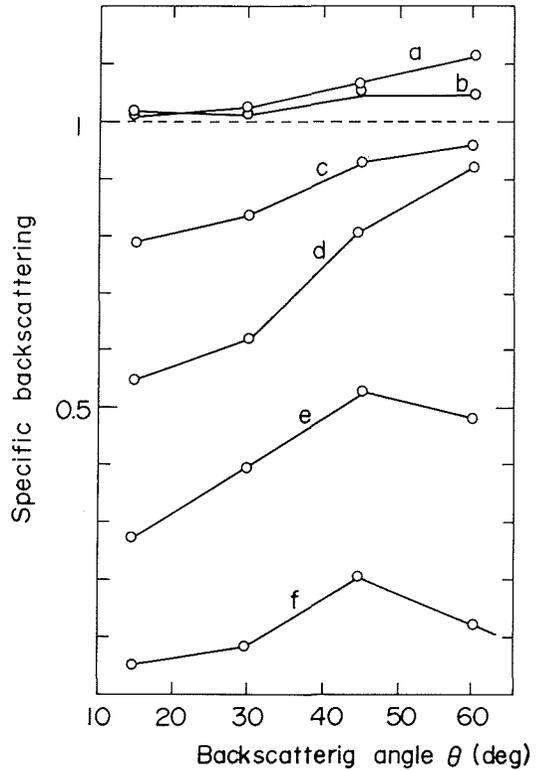


Fig. 8. Specific number albedo versus backscattering angle (normalized in reference to that of SLP at each angle).

- a: fire-proof board on SLP
- b: aluminium on SLP
- c: titanium on SLP
- d: concrete block
- e: copper on SLP
- f: cadmium on SLP

Table 1. Backscattering of soft X-ray

Specimen	Backscattering flux (mr/h)	Specific backscattering*	
(a) 60 kV _p X-ray	3 mm lead (SLP)	13.5	1.0
	0.5 mm Cd on SLP	45	3.3
	1 mm Cu on SLP	5.5	0.4
	1 mm Al on SLP	4.0	0.3
	0.5 mm Ti on SLP	1.5	0.11
	0.7 mm Fe on SLP	1.5	0.11
	5.5 mm Wood on SLP	11	0.8
(b) 80 kV _p X-ray	1 mm Lead	22.5	0.98
	3 mm Lead (SLP)	23	1.0
	0.5 mm Cd on SLP	84	3.6
	1 mm Al on SLP	7.0	0.3
	3 mm Al on SLP	11.5	0.5
	0.5 mm Ti on SLP	3.5	0.15
	0.7 mm Fe on SLP	3.5	0.15
	5.5 mm Wood on SLP	19.5	0.85
	Fire proof board on SLP	11.0	0.5
	1 mm Cu on SLP	9.0	0.4

* normalized in reference to standard lead plate.

3.4 鉛によって表面処理したコンクリートブロックの散乱低減効果について

3.1 節の末尾に述べた飽和散乱厚さ以下の鉛被覆は、コンクリート壁による後方散乱低減策として簡便であり、実用的にも興味を持てる。その効果を解釈する以下の模型による考察を試みた。

Fig. 9 は 2 層からなる板材に光子を照射した場合の後方散乱を表わす模型である。今の場合、上の層は鉛被覆の薄層であり、下の層はコンクリート壁に相当する。表面にたいし垂直方向に入射した線束 I_0 の光子は第 1 層 (鉛層) を通過中に、散乱と吸収によりその線束を減ずる。散乱線は再びこの層を通り抜けて外に出てくるとき消衰する。厚さ L の第 1 層を通り抜けて入射光子束は I_L に消衰して第 2 層に入る。第 1 層の場合と同様に、通過中に散乱と吸収によって入射光子は消衰する。散乱光子は試料中を通り抜けて試料外に出て後方散乱線となるまでには、再び第 2 層次いで第 1 層中で消衰作用をうける。全後方散乱線は第 1 層からのものと第 2 層からのものの合計になる。

厚さ x の層を通過する際の光子の消衰は、よく知られた $I_x/I_0 = \exp(-\mu x)$ という式が適用する。 μ は消衰係数と呼ばれ、材料の種類と放射線のエネルギーに関係す

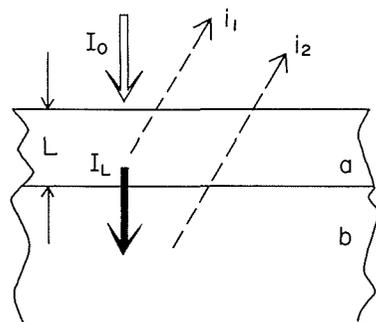


Fig. 9. Schematic illustration of backscattering at dual layer material.

- a: top layer b: bottom layer
- I_0 : incident gamma-ray
- I_L : gamma-ray passed through top layer
- i_1 : backscattering from top layer
- i_2 : backscattering from bottom layer

る。後方散乱線の散乱角 θ 方向の線束をと i すると、第1層からの寄与 i_1 と第2層からの寄与 i_2 の和となる。通過中の消衰作用により材料内部の入射光子束は位置によって上式による変化がある。各部分における散乱は入射光子の線束に比例すると考えてよいので、層内の位置に応じて散乱線の量は変る。しかも、材料の表面に戻る間にそこまでの距離に応じて再度消衰するので、第1層からの後方散乱の線束 i_1 は、これらに関する諸因子を含んだ積分量となる。第2層のほうは、通常、飽和散乱をこえる厚い壁を想定しているので、第2層からの全散乱量は入射線が両層の境界 L を通過するときの線束 I_L に比例している。ただし、材料表面に戻って後方散乱線となるまでには再度 $L \cdot \text{cosec } \theta$ に相当する厚さの第1層を通過しなければならず、ここで消衰する。以上のことを式で表わすと、

$$\begin{aligned} i &= i_1 + i_2 \\ &= kI_0 \int_0^L \exp \left\{ -(\mu_0 + \mu' \text{cosec } \theta) x \right\} dx + KI_0 \exp \left\{ -(\mu_0 + \mu'' \text{cosec } \theta) L \right\} \\ &= \frac{kI_0}{\mu_0 + \mu' \text{cosec } \theta} \left[1 - \exp \left\{ -(\mu_0 + \mu' \text{cosec } \theta) L \right\} + KI_0 \exp \left\{ -(\mu_0 + \mu'' \text{cosec } \theta) L \right\} \right] \end{aligned}$$

となる。ここで、 μ_0 と k は第1層における入射光子の消衰係数と微分散乱係数、 μ' は第1層における散乱光子の消衰係数、 μ'' は第2層で発生した散乱光子が第1層を通過するときの消衰係数、 K は第2層における入射光子の積分散乱係数である。

形式的には、この式を微分して i が最小となる L_{\min} を求めればよいことになるが、実際には、入射、散乱光子ともにエネルギーが広い幅のあるスペクトルを持ち、エネルギーによって散乱および消衰係数が大幅に変化する。散乱は単純のものばかりでなく、多重散乱も相当に含まれる。これらに関する詳細なデータは、まだなく、またたとえあったとしても、正確を期するとすれば複雑な計算が必要となり厄介である。そこまでの手順を踏まなくとも、定性的ではあるが上式は次のことを示唆している。まず、散乱光子は入射光子よりエネルギーがかなり小さくなっており、消衰係数 μ' と μ'' は μ_0 にくらべて著しく大きいと考えられる。さらに、散乱光子は入射光子にくらべ、少くとも $\text{cosec } \theta$ に相当する長い距離を飛ぶことになる。したがって、第1層の厚さが飽和散乱に相当するよりも相当薄い場合でも第2層からの散乱線を有効吸収できるので、Fig. 7 の曲線 a にみたような後方散乱低減効果が期待できる根拠がある。

4. 結 言

122 keV γ 線の低減材料として、鉛板は K-X 線の発生のために必ずしも有効でなく、飽和散乱量で比較するとコンクリートブロックなどと同等である。K-X 線の発生数の少ない原子番号が大きい材料、たとえば、銅、カドミウムなどを内張するほうが低減効果が大きい。

しかし、鉛被覆はコンクリート壁の後方散乱低減に全く無効であるわけではなく、飽和散乱に相当する厚さにくらべ薄く被覆すると、むしろ顕著な低減効果がえられる。最適の厚さの決定については今後の研究にまわつところが多い。

文 献

- 1) Falci, C., Susanna, A. and Zampini, F.: J. Appl. Cryst. 5 (1972) p. 375.
- 2) 中田正也, 布施卓嘉, 竹内 清: 運輸技術研究所報告 11 (昭36) p. 561.
- 3) 技研興業(株): 放射線防護材に関する技術資料 (昭46).
- 4) Berger, M. J. and Raso, D.J.: Rad. Res. 12 (1960) p. 20.