

鉛遮蔽体による γ 線の減弱特性

酒井 貴文 田上 聖子 山田 晶子 岩谷 和夫

広島県立保健福祉大学保健福祉学部放射線学科

2006年 9月12日受付

2006年12月12日受理

抄 録

低エネルギー γ 線を測定する遮蔽体付きの検出システムを製作するにあたり、準備実験として鉛遮蔽体による減弱効果実験を行った。その過程で、 γ 線スペクトル中に存在する全エネルギーピーク領域（光電領域と称す。）とコンプトン端以下のエネルギー領域に広がるコンプトン領域の減弱効果が異なるのではないかという実験データが得られた。そこで両者の減弱効果の差に関して、これが両者の減弱特性によるものなのか、それとも他の要因によるものなのかという点について検討を行った。

その結果、測定データに現れた光電領域とコンプトン領域の減弱効果の差は、ビルドアップといわれる現象によって生じたものであり、それを補正すると両者の減弱はほぼ同様であるという一般的な意見と一致するデータが得られた。ただし、その補正に用いるビルドアップ係数 B は一般に、 μ を減弱係数、 x を遮蔽体厚として、 $B=1+\mu x$ という式で表されているが、これは遮蔽体が無限媒体である場合に近似的に成り立つものであるとされている。そこで本実験では、遮蔽体の形状・配置によって決まると考えられる形状ファクターを κ として、ビルドアップ係数を $B=1+\kappa\mu x$ で表すこととした。すると本実験の幾何学的配置では $\kappa=0.4$ のとき光電領域とコンプトン領域の減弱効果がほぼ等しくなるというデータが得られた。

キーワード：放射線測定、自然放射線、遮蔽、全エネルギーピーク領域、コンプトン領域

1 緒言

半導体検出器を用いて試料中に含まれる微量の γ 線放出放射能を高感度に検出しようとするとき、検出器の周囲から検出器に入ってくるバックグラウンド（自然放射線）を適当な物質で囲って遮蔽するという手法が使われる。今回、比較的低いエネルギー、200keV以下の微弱 γ 線を検出するシステムを作るにあたり、その低いエネルギー領域に寄与するバックグラウンドの減弱特性を調べる目的で、鉛遮蔽体の厚さを変えて減弱実験を行った。そして遮蔽効果に影響を及ぼすコ

ンプトン散乱光子について詳細に議論し、また、遮蔽体の形状ファクターという考え方を提出した。

2 方法

半導体検出器としては低エネルギー γ 線・X線測定用の高純度ゲルマニウム検出器（PGT社製、Model IGP1013360型）を用いた。この検出器は窓膜が0.381mm厚のベリリウムであることが特徴で、低エネルギー仕様になっている。仕様の詳細を表1に示す。検出器のエンドキャップから検出器の中心軸上の離れ

表1 高純度ゲルマニウム検出器の仕様の詳細

高純度半導体ゲルマニウム検出器	PGT社製、Model IGP 1013360型	
ゲルマニウム結晶	有効面積	1000mm ²
	直径	35.7mm
	厚さ	13mm
ベリリウム窓	面積	1464 mm ²
	厚さ	0.381mm
結晶-窓間距離	3.5mm	
印加バイアス	-800V	

た位置に γ 線密封点線源を置いた。使用した線源はCs-137、370 kBqで、 γ 線エネルギーは662 keVである。ここではこの核種から放出される単一エネルギー γ 線をバックグラウンド γ 線の一例とし、検出器の出力波高分布を議論することにした。エネルギー662 keVの γ 線がゲルマニウム検出器に入射した結果、 γ 線はゲルマニウム結晶中で光電効果とコンプトン散乱という相互作用をして、それぞれの反応で結晶原子の電子にエネルギーを与え、その電子が結晶中で走り停止する間に電荷キャリアを生成し、それが波高分布

（以下、「スペクトル」と称す。）として測定されることになる。この分布は図1に見るように、光電効果に起因するシャープな全エネルギーピークと、全エネルギーピークより低チャンネルにあるコンプトン端からゼロエネルギーまでのコンプトン散乱に起因するブロードな分布とをもつ。ここでは、遮蔽体なしで測定したスペクトルにおける全エネルギーピーク領域を光電領域（649～672keVに相当）、コンプトン端から最低エネルギー（計測下限、45keVに相当）までの領域（45～443keV）をコンプトン領域と称して議論を行って

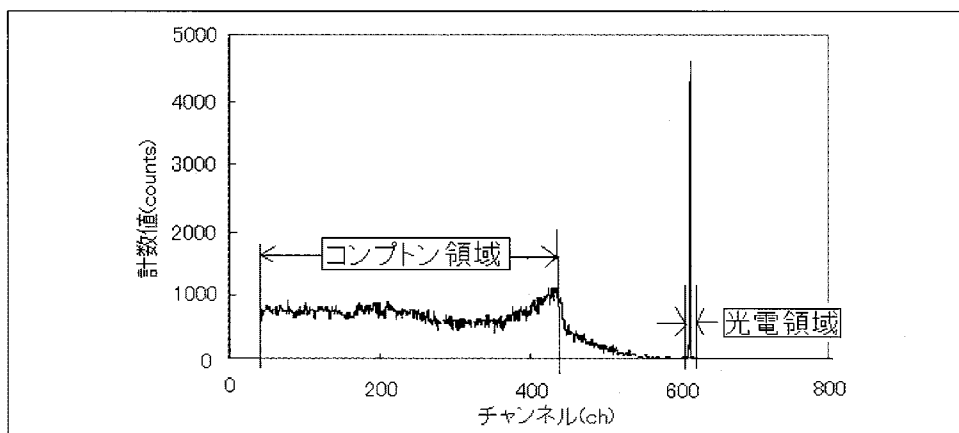


図1 Cs-137の γ 線スペクトル（模式図）

いくことにする。

以下に実験手順の概略を述べる。

- (1) 使用した線源の強度を考慮して線源—検出器間距離を 8cm に設定し、そのスペクトルを測定時間 1 分で測定する。
- (2) スペクトルに見られる光電領域、コンプトン領域の計数率を算出する。
- (3) 線源—検出器間に遮蔽体として用いる鉛板（厚さ 3mm，広さ 5cm × 10cm）を 1 枚から 10 枚まで挿入し、(1) と同様の条件で測定する。
- (4) 測定したスペクトルから、遮蔽体なしのときの光電領域・コンプトン領域と同じ範囲に関心領域

(ROI) を設定し、計数率を算出する。これを遮蔽体がないときの計数率と比較し、どの程度減弱されているか見る。

3 結果

表 2 に、実験手順 (2), (4) で得た計数率および、遮蔽体を挿入したときに γ 線がどの程度遮蔽されたかを示す。後者は各遮蔽体厚の時に得られた計数率と遮蔽体なしの時の計数率との比、すなわち透過率比で表している。またこの透過率比の鉛厚依存性を図 2 に示す。

表 2 Cs-137 γ 線の鉛による減弱特性

鉛厚(cm)	光電領域の計数率(cps)	コンプトン領域の計数率(cps)	光電領域の透過率比	コンプトン領域の透過率比
0.0	139.6±1.5	1044.5±4.2	1	1
0.3	99.5±1.3	705.7±3.4	0.713±0.012	0.6756±0.0042
0.6	74.5±1.1	551.0±3.0	0.5333±0.0099	0.5275±0.0036
0.9	51.84±0.93	425.9±2.7	0.3713±0.0078	0.4078±0.0030
1.2	36.92±0.78	324.9±2.3	0.2644±0.0063	0.3111±0.0026
1.5	27.15±0.67	251.1±2.0	0.1945±0.0053	0.2404±0.0022
1.8	18.19±0.55	196.1±1.8	0.1303±0.0042	0.1877±0.0019
2.1	13.44±0.47	147.1±1.6	0.0962±0.0036	0.1408±0.0016
2.4	8.95±0.39	115.7±1.4	0.0641±0.0029	0.1108±0.0014
2.7	6.44±0.33	88.8±1.2	0.0461±0.0024	0.0850±0.0012
3.0	5.09±0.29	68.2±1.1	0.0364±0.0021	0.0653±0.0011

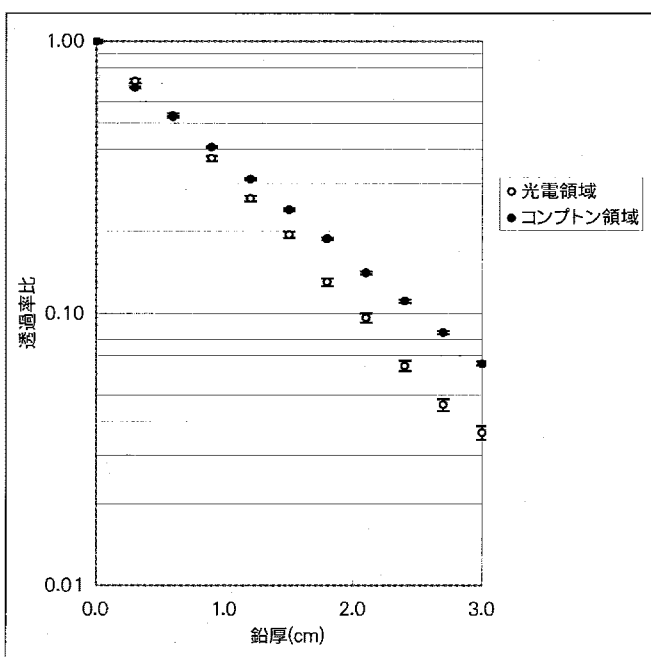


図 2 Cs-137 γ 線の鉛による減弱特性

図 2 を見ると、光電領域・コンプトン領域ともに片対数グラフでほぼ直線的に減弱しているのが読み取れる。両者を比較すると、鉛厚 0.9cm 以上では、コンプトン領域の透過率比が光電領域より大きくなっている。すなわち遮蔽体による減弱が小さいことが分かる。この減弱を、それぞれの直線から線減弱係数を算出して比較する。片対数グラフに表しているので直線の式は $y = Ae^{-\mu x}$ で表され、この線減弱係数 μ が直線の傾きである。

直線の式を求めるために、全測定点のデータを用い統計誤差を使って重みとした、非線形最小二乗法によるフィッティングを行った。その結果、線減弱係数について、

光電領域 : $\mu = 1.12 \text{ cm}^{-1}$

コンプトン領域 : $\mu = 0.90 \text{ cm}^{-1}$

という値が得られた。

この実験で得られた光電領域のデータは文献値¹⁾である線減弱係数 $\mu = 1.22 \text{ cm}^{-1}$ とほぼ等

しいが、コンプトン領域のデータは一般的に考えられているものとは異なり、約74%の値となった。以下で、このデータが示す減弱の差が生じた要因について検討する。

4 考察

まず、遮蔽体による光電領域・コンプトン領域それぞれの減弱について考えるが、ここでいう減弱というのは、 γ 線が遮蔽体に入射した時に、光電効果・コンプトン効果の相互作用を起こして、入射した光子が検出器まで到達できなくなることに起因する。そこで、遮蔽体中で光電効果・コンプトン効果が起こったときに、検出器に入射する光子がどう減弱するか検討する。図3に検出器と線源、遮蔽体（鉛板）の幾何学的

配置を示した。ただし鉛板は10枚重ねた時の最も内側のものと、最も外側のもののみ表示した。このとき(a)図は横から見た図で、(b)図は上から見た図である。また、(a)図において遮蔽体の位置が検出器に対して上下対称の配置になっていないことに特別な意味はない。図3には、遮蔽体がない時に検出される γ 線の代表的な飛跡①（実線で示す）、遮蔽体を挿入した時に検出され得る γ 線の代表的な飛跡②（破線で示す）を示している。

遮蔽体がない時には①のように入射した γ 線より、ゲルマニウム結晶内で光電効果によってエネルギーを与えられた電子は光電領域に計数され、コンプトン散乱によってエネルギーを与えられた電子はコンプトン領域に計数される。

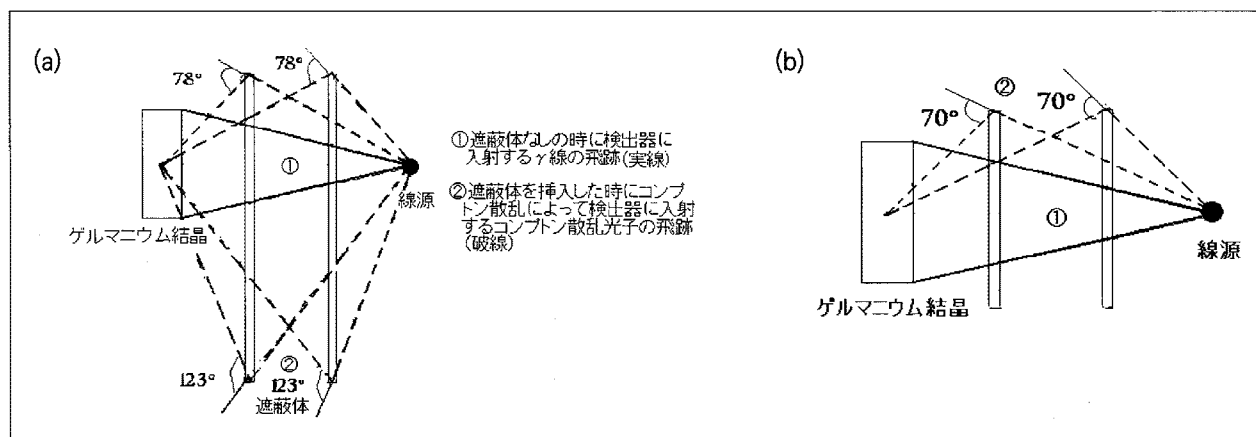


図3 検出器と線源、遮蔽（鉛板）の幾何学的配置
(a) 横から見た図と (b) 上から見た図

次に線源—検出器間に遮蔽体を挿入したときの、①の飛跡をとる γ 線について考える。遮蔽体内で光電効果が起こった場合は光子が消滅するので検出器によって検出されることはなく、コンプトン散乱が起こった場合にも、散乱によって生じたコンプトン散乱光子が検出器へ入射しなかったものは検出されない。そのため、測定するスペクトルに影響を及ぼすのは、コンプトン散乱を起こして検出器に入射したものだけである。なお、散乱光子のエネルギーは次式で与えられる。

$$E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + (1 - \cos\theta)E_{\gamma}/mc^2}$$

ただし、 E_{γ} は入射光子のエネルギー、 $E_{\gamma'}$ はコンプトン散乱光子のエネルギー、 θ は散乱角、 mc^2 は電子の静止質量エネルギー 511keV である。

①の飛跡では散乱角は比較的小さいためコンプトン

散乱光子のエネルギーは入射光子のエネルギーに近い値となる。そのため、検出器に入射すると、遮蔽体なしの時の全エネルギーピークとほぼ同じ位置にピークを持つスペクトルを得る。よって①の飛跡をとる γ 線については、遮蔽体なしのときのスペクトルとほぼ同じ位置にピークを持つが、ピークの計数率は小さくなったスペクトルが得られる。

次に②の飛跡をとる γ 線について考える。ここで考えるコンプトン光子は①の時と異なり、散乱角が大きくなっている（70°～123°程度）。そのためコンプトン光子の持つエネルギーは入射光子よりかなり小さくなる。具体的には、今回使用したCs-137線源の放出 γ 線662keVを入射光子のエネルギー、散乱角を123°として計算を行ってみると、コンプトン光子のエネルギーは約221keVとなる。このエネルギーは散乱角によって異なるので、散乱角によって様々なエネルギーの光子が検出器に入射することになり、その大

部分はコンプトン領域に寄与することとなる。

遮蔽体を挿入した時のスペクトルは、これらすべての和となる。これまでで述べたことをふまえて光電領域とコンプトン領域の減弱について考える。光電領域は遮蔽体を挿入すると、遮蔽体中で光電効果を起こしたものを、コンプトン散乱を起こし、散乱光子が検出器へ入射しなかったものの分が減弱される。しかし、コンプトン領域については、遮蔽体の端のほうで起こったコンプトン散乱によってエネルギーが低下して検出器に入射した光子のスペクトルがコンプトン領域に混入されることになるので、その分計数率が高くなり、減弱の程度は光電領域と比較して小さくなる。

検出器へのγ線の到達量が多くなる現象は一般的にはビルドアップといわれるもので、ビルドアップ係数

をB、遮蔽がないときの放射線量をI、遮蔽があるときの放射線量をI'とすると、

$$I' = B \cdot I \cdot e^{-\mu x}$$

で表される。ここでxは遮蔽体厚さ、μは減弱係数である。このビルドアップ係数Bは遮蔽体の材質や厚さ、γ線エネルギー、線源と遮蔽体の幾何学的配置条件などによって変化するが、無限媒体中での点状等方線源のビルドアップを考える場合には、近似的に $B = 1 + \mu x$ と表すことができる²⁾。このビルドアップが影響を及ぼすのは前述したようにコンプトン領域のみであり、ビルドアップ係数とそれによって補正したコンプトン領域の計数率、透過率比を表3に示す。そしてその計数率の変化と表2に示している光電領域の計数

表3 ビルドアップ係数とコンプトン領域の計数率

鉛厚(cm)	ビルドアップ係数	コンプトン領域の計数率(cps)	コンプトン領域の透過率比
0.0	1.00	1044.5±4.2	1
0.3	1.21	583.2±3.1	0.5584±0.0037
0.6	1.42	388.0±2.5	0.3715±0.0029
0.9	1.63	261.3±2.1	0.2502±0.0022
1.2	1.84	176.6±1.7	0.1690±0.0018
1.5	2.04	123.1±1.4	0.1178±0.0015
1.8	2.25	87.1±1.2	0.0834±0.0012
2.1	2.46	59.8±1.0	0.0572±0.0010
2.4	2.67	43.32±0.85	0.04148±0.00083
2.7	2.88	30.82±0.72	0.02951±0.00070
3.0	3.09	22.07±0.61	0.02113±0.00059

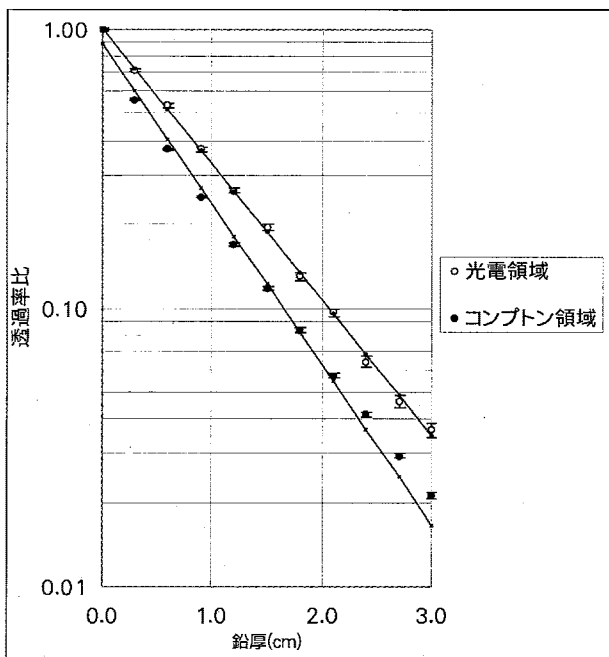


図4 Cs-137 γ線の鉛による減弱特性 (無限媒体によるビルドアップ補正あり)

率の変化を図4に並べて示し比較する。なお、表3のビルドアップ係数は線減弱係数に鉛の662 keV γ線(Cs-137)に対するコンプトン線減弱係数の文献値¹⁾を用い、 $\mu = 0.696\text{cm}^{-1}$ として計算を行った。

図2のときと同様にして、図4からコンプトン領域の線減弱係数を求め、図2で求めた光電領域の線減弱係数と比較すると、

光電領域 : $\mu = 1.12\text{cm}^{-1}$

コンプトン領域 : $\mu = 1.33\text{cm}^{-1}$

となる。この傾きを図4上に直線で示す。

この結果ではビルドアップ補正をする前と比較して両者がかなり近い値になっているが、逆に、コンプトン領域の減弱が大きくなっている。これは、用いたビルドアップ係数が無限媒体中に線源がある場合のものであり、この度の実際の測定では有限の大きさの遮蔽体を使用しているため、ビルドアップ係数が過大評価されているためだと考えられる。ここで、ビルドアップ係数中の μx は遮蔽体の大きさによって変化すると考えられるため、この遮蔽体の形状ファクターをκと

において、ビルドアップ係数を $B = 1 + \kappa \mu x$ と置き換えて検討することにする。ただし、 κ は遮蔽体厚に依存しないものと仮定した。光電領域とコンプトン領域の線減弱係数が等しくなるように κ を算出すると、 κ

$= 0.4$ で両者の線減弱係数が $\mu = 1.12\text{cm}^{-1}$ でほぼ一致した。 $\kappa = 0.4$ で算出したビルドアップ係数とそれで補正を行ったコンプトン領域の計数率とを表4に示し、光電領域と合わせて図5に鉛厚依存性を示した。

表4 ビルドアップ係数(補正後)とコンプトン領域の計数率

鉛厚(cm)	ビルドアップ係数	コンプトン領域の計数率(cps)	コンプトン領域の透過率比
0.0	1.00	1044.5±4.2	1
0.3	1.08	651.3±3.3	0.6235±0.0047
0.6	1.17	472.1±2.8	0.4520±0.0037
0.9	1.25	340.6±2.4	0.3261±0.0029
1.2	1.33	243.5±2.0	0.2332±0.0023
1.5	1.42	177.1±1.7	0.1696±0.0019
1.8	1.50	130.6±1.5	0.1251±0.0016
2.1	1.58	92.8±1.2	0.0888±0.0013
2.4	1.67	69.3±1.1	0.0664±0.0011
2.7	1.75	50.68±0.92	0.04852±0.00092
3.0	1.84	37.17±0.79	0.03558±0.00078

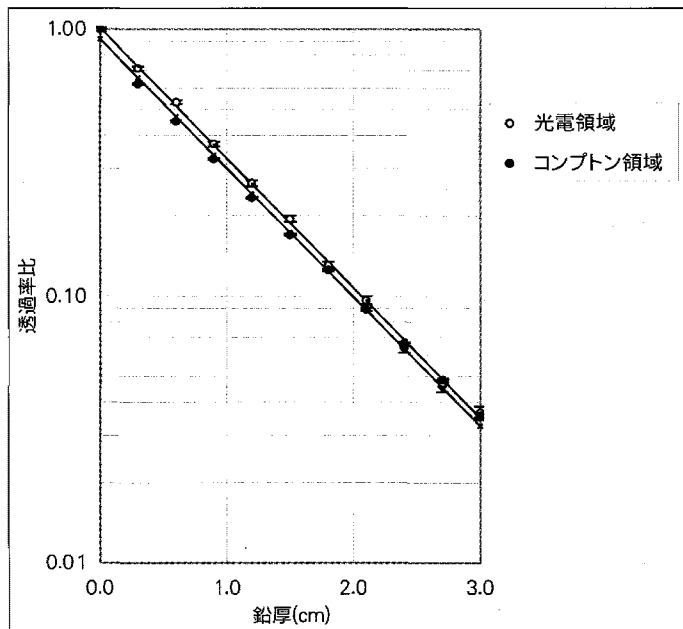


図5 Cs-137 γ 線の鉛による減弱特性 (本実験の幾何学的配置におけるビルトアップ補正あり)

図4と同様に、算出した傾きを図5上に直線で示す。図4と図5を比較して両者の線減弱係数の差が、遮蔽体の形状ファクター κ を考慮することによって、より改善されたのが確認できる。

このようにして、本実験の遮蔽体のサイズ・配置条件における遮蔽体の形状ファクター κ が0.4と求められた。

以上の実験により、測定の際に邪魔になるバックグラウンドの遮蔽を目的として遮蔽体を設置しても、図3で示した①の範囲外に遮蔽体を設置すると、コンプトン散乱光子の影響により必ずしも期待通りの遮蔽効果を発揮せず、その面積が大きくなるほどビルドアップ係数Bが大きくなることがわかった。しかし、実際にバックグラウンドの遮蔽を行うときには、バックグラウンドとなる自然放射線は検出器の周囲のあらゆる角度から入射するので、どうしても広範囲を遮蔽体で覆わざるを得ない。そのため、出来る限り遮蔽体を検出器に密着させ、形状ファクター κ が小さくなるように遮蔽体を作成するのが望ましいといえる。また、厚さに関してもビルドアップを考慮した遮蔽体厚を設定することが大切になってくる。

5 結論

比較的低エネルギー、200 keV 以下の微弱 γ 線を検出するシステムを作るにあたり、そのエネルギー領域におけるバックグラウンドの減弱特性を調べるために、鉛による低エネルギー領域 γ 線の減弱特性を測定した。その際、高純度ゲルマニウム検出器 (PGT 社製, Model IGP1013360 型), Cs-137 線源 (370 kBq), 鉛板 (厚さ 3mm, 広さ 5 × 10cm) 10 枚を使用し、線源-検出器間距離を 8cm に固定し、その間に鉛板を 1 枚ずつ挿入して計数率の変化を測定するという手法で行った。この計数率値の算出は、 γ 線スペクトルの全エネルギーピーク領域 (ここでは光電領域と称した。) と、コンプトン端から最低エネルギーまでの領域 (コンプトン領域と称した。) との 2 つの領域について行った。すると光電領域・コンプトン領域における減弱に大きな差が見られ、これが 2 つの領域の減弱特性の違いによるものなのか、それとも他の要因によるものなのかについて検討を重ね、実際にはビルドアップといわれる現象によるものであるという結論に至った。ビルドアップの補正は、ビルドアップ係数を一般に $B = 1 + \mu x$ と表し、その数値を用いて行うことが出来る。しかしこのビルドアップ係数は遮蔽体を無限媒

体としたときのもので、この数値で補正を行うと、かなり改善されるものの、まだ差が生じる。そこで今回遮蔽体の形状によって決まると考えられる係数 κ を μx にかけることでビルドアップ係数を表すことにした。本実験の幾何学的配置では $\kappa = 0.4$ のときに光電領域・コンプトン領域の減弱効果がほぼ等しい値となることが確認できた。

本実験を通して、低エネルギー領域の γ 線を測定する際には、設置した遮蔽体が必ずしも期待通りの遮蔽効果を示さないことを頭に入れておかなければならないということがはっきりした。目的とする減弱効果を得るためには、あらかじめビルドアップの影響を考慮して遮蔽体厚や遮蔽体の配置を決める必要がある。

6 文献

- 1) 社団法人 日本アイソトープ協会. アイソトープ手帳 10 版. 東京, 丸善株式会社, 126, 2001
- 2) 社団法人 日本放射性同位元素協会. 新版 アイソトープ便覧. 東京, 丸善株式会社, 538-540, 1970
- 3) Fano, U. : Gamma-Ray Attenuation. PART II ANALYSIS OF PENETRATION. NUCLEONICS, 11 (9) : 55-61, 1953

The Characteristics of γ -ray Attenuation by a Lead Shield

Takafumi SAKAI Shoko TANOUE Akiko YAMADA
Kazuo IWATANI

Department of Radiological Sciences, Faculty of Health and Welfare,
Hiroshima Prefectural College of Health Sciences

Received 12 September 2006

Accepted 12 December 2006

Abstract

In constructing a low energy γ -ray detection system with a shield, a γ -ray attenuation experiment was preparatorily carried out using a lead shield. In the experiment, we obtained data which may indicate that the attenuation effects in the total energy peak region (called the "photoelectric region") and in the lower energy region (called the "Compton region") are different from each other. Then, we examined whether these differences originate in each attenuation characteristic itself or in other factors. As a result, we found that the attenuation effect difference between the photoelectric region and the Compton region occurs by build-up phenomena. And, we also found that both attenuation properties are almost similar when corrected by the build-up coefficient and data, which agreed with general opinions. The build-up factor usually used for correction is $B=1+\mu x$, and this is for the infinite shield medium, where, μ is the attenuation coefficient and x is the thickness of the shield material. To explain the results of this experiment, we introduce a new expression $B = 1 + \kappa \mu x$, where κ is a form factor of the shield material. In the case of this experimental geometry, attenuation coefficients for the photoelectric region and the Compton region become almost equal when $\kappa = 0.4$.

Key words : radiation measurement, natural radiation, shield, total energy peak region, Compton region