

PET 施設用ガンマ線遮蔽鉛ガラス Pro-GR

日本電気硝子株式会社技術部第一グループ

長寿 研

Gamma-ray shielding lead glass for PET facilities "Pro-GR"

Ken Choju

*Nippon Electric Glass Co., Ltd
No.1 Group, Technical Division*

1. はじめに

最近、がんの早期発見を目的としてPET (Positron Emission Tomography) を受ける人が増加している。PET とはがん細胞が通常細胞より 5~10 倍のエネルギーを消費するという特徴を利用した検査法である。放射性同位体である¹⁸F を標識した¹⁸F-FDG という薬剤を静脈から注射するとがん細胞の存在する病巣に¹⁸

F-FDG が集まる。この状態を PET 装置で外部から撮影すれば、がん細胞の存在や病巣の大きさが確認できる。国内では現在約 150 の医療施設で PET 診療が行われており、新たに PET を導入する施設も増加している⁽¹⁾。

がんの PET 診療に用いられる薬剤¹⁸F-FDG からは 0.511 MeV のエネルギーを持ったガンマ線が放出される。PET 診療にかかわる医療従事者は一日に何人もの診療を行うため被曝量



(a) 遮蔽窓使用例



(b) 防護衝立使用例

図 1 LX-57 B の X 線施設での使用例

の増加が大きな問題となっている。

現在、医療エックス線施設の遮蔽窓や防護衝立には酸化鉛を約 50 wt%含有する鉛ガラス（弊社製品名：LX-57 B）が用いられている（図 1）。医療に用いられるエックス線のエネルギーは 0.1~0.2 MeV であり、厚さ 9 mm の LX-57 B を用いると入射するほとんどのエックス線を遮蔽することができる。ガンマ線においても鉛ガラスを用いれば減弱させることは可能である。しかし、PET 診療で用いられるガンマ線のエネルギーは 0.511 MeV と高く、物質透過能が高いため必要な遮蔽能を得るには厚いガラスが必要となる。そのため複数枚の鉛ガラスを貼り合わせるが必要となる場合がある。また可動式の防護衝立として使用する場合には移

動が困難になる場合もある。

2. PET 施設用ガンマ線遮蔽鉛ガラス Pro-GR

弊社では、ガンマ線の遮蔽性能に優れた PET 施設用ガンマ線遮蔽鉛ガラス Pro-GR を開発した。Pro-GR はエックス線施設で広く使用されている LX-57 B に比べて酸化鉛含有率が高い。従来、鉛含有率の高いガラス材質は連続製板が極めて困難であった。今回、製造設備や製造方法など種々の改善により PET 施設用途に十分なサイズのガラスを提供できるようになった。表 1 に Pro-GR と LX-57 B の概念組成、物理特性を示す。

表 1 Pro-GR と LX-57 B の概念組成・物理特性

概念組成(wt%)	Pro-GR	LX-57B
PbO	71	55
SiO ₂	27	34
B ₂ O ₃	1	3
BaO		5
Na ₂ O		1
K ₂ O	1	2
物理特性		
密度(g/cm ³)	5.20 min.	4.36 min.
熱膨張係数(×10 ⁻⁷ /°C)	81	80
歪点(°C)	380	420
屈折率(nD:589.3nm)	1.81	1.71
0.511MeV における線減弱係数(/cm)*	0.65	0.51

*線減弱係数が大きい程、遮蔽体厚さを薄くすることができる。

3. ¹⁸F-FDG を用いる PET 施設における鉛ガラスの板厚設計概念

鉛に 0.2 MeV のエックス線と 0.511 MeV のガンマ線透過率を表 2 に示す。

0.2 MeV のエネルギーをもつエックス線は

厚さ 3 mm の鉛でほぼ遮蔽できる。一方、0.511 MeV のガンマ線では厚さ 2 mm の鉛で 78.6%、厚さ 3 mm の鉛でも 69.0% が透過する。この違いが理解されていないため PET 施設の設計においてエックス線とガンマ線が混同されたり、鉛ガラスを供給するメーカー間で統

一された板厚設計基準が示されていないかたりする問題が生じている。

弊社では Pro-GR の製品化に伴い、LX-57 B 及び Pro-GR を PET 施設のガンマ線遮蔽ガラスとして安全、適切に使用していただけるよう実効線量透過率の計算方法を見直したのでその

概念について説明する。なおガンマ線の実効線量透過率は(財)原子力安全技術センター発行の「放射線施設のしゃへい計算 実務マニュアル 2000」に則って計算することとした。

3-1. ビルドアップ係数と実効線量透過率の計算

表 2 鉛に対するエックス線とガンマ線透過率

	エネルギー	鉛 2mm の透過率	鉛 3mm の透過率
エックス線	0.2MeV	11.8%	4.1%
ガンマ線	0.511MeV	78.6%	69.0%

鉛ガラスなどの遮蔽体を透過する放射線量率は図 2 (a) の様に放射線がコリメートされている場合、一般に以下の(1)式で表される⁽²⁾。

$$I = I_0 \times e^{-\mu x} \quad (1)$$

I : 透過後の線量率 μ : 線減弱係数

I_0 : 入射時の線量率 x : 遮蔽体の厚さ

PET 診療の場合、線源はコリメートされていないため図 2 (b) のようにあらゆる方向に放射線が放射される。放射線の一部は、遮蔽体を透過する際に散乱し、方向を変えることにより検出器に入射する。よって遮蔽体を透過する放射線量率には(1)式の線量率 I に一部の散乱した光子等による線量加わる。したがって、PET 診療において放射線が遮蔽体を透過した

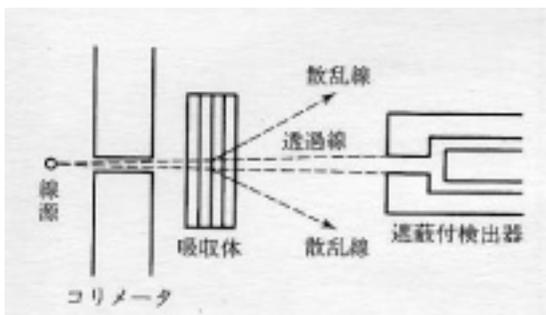
後の線量率を求める場合には、遮蔽体で散乱する線量を考慮した以下の(2)式を用いなければならない⁽²⁾。

$$I = B \times I_0 \times e^{-\mu x} \quad (2)$$

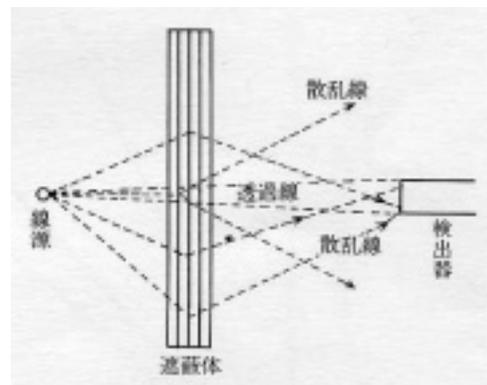
B : ビルドアップ係数

(2)式において、散乱による線量の増加分を表すのがビルドアップ係数である。検出器の方向以外に照射された放射線が遮蔽体内で散乱し、検出器へ入射することにより、実効線量が増加する。

図 3 に鉛における放射線のエネルギーと相互作用の関係を示す⁽³⁾。放射線のエネルギーが 0.2 MeV 以下の領域では、放射線と遮蔽体を構成する元素との相互作用はそのほとんどが光



(a)



(b)

図 2 放射線の遮蔽体透過イメージ

電効果である。そのため、放射線の減弱は吸収によって起こる。よって、散乱の影響は小さくビルドアップ係数は 1 として良い。しかし、エネルギーが 0.2 MeV を超える領域では光电効果の相互作用による減弱とコンプトン散乱の相互作用による減弱の大きさが近くなり散乱の影響が大きくなる。そのため、ビルドアップ係数は 1 よりも大きくなる。

図 4 に ^{60}Co を線源とした場合の各種材料のビルドアップ係数を示す⁽²⁾。

ビルドアップ係数は常に 1 より大きく、遮蔽体の材質、厚さ、入射するガンマ線のエネルギーによって変化し、密度の小さい元素ほどビルドアップ係数が大きくなる傾向がある。

遮蔽窓や防護衝立に使用される鉛ガラスは広い組成範囲で製造されており、その組成・密度によりビルドアップ係数が異なる。例えば ^{60}Co を線源とした場合、密度が 3.27 g/cm^3 と 6.22

g/cm^3 の鉛ガラスの $\text{mfp}=10$ におけるビルドアップ係数は図 4 よりそれぞれ約 8 と約 13 である。鉛ガラスを遮蔽体として用いる場合の板厚設計において、真のビルドアップ係数よりも低い値を用いた場合には実際の漏洩ガンマ線量が計算値より多くなる。逆に、高いビルドアップ係数を用いた場合は必要以上に大きい板厚となる。よって、鉛ガラスによるガンマ線の遮蔽計算を適正に行うためには、実際に使用される線源エネルギーにおける鉛ガラスのビルドアップ係数を実際のガラス組成・密度から計算して使用することが重要である。

3-2. 日本電気硝子(株)の遮蔽計算方法

ビルドアップ係数の計算方法には簡易計算コードと詳細計算コードの 2 種類がある。

弊社では、数種類の方法を選択して無限媒質中における点等方線源に対する鉛、鉄のビルドアップ係数を計算した。その各値を「ANSI

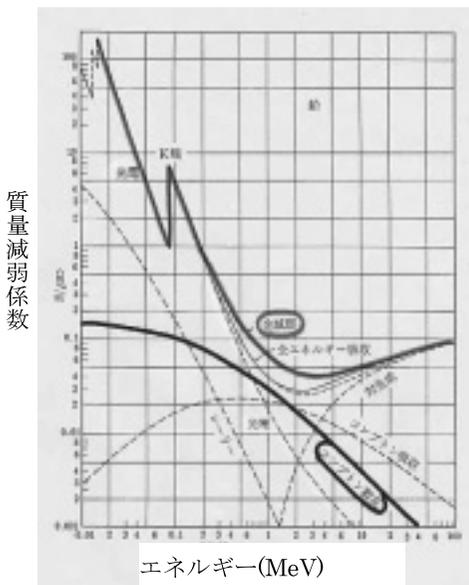


図 3 鉛の各エネルギーにおける相互作用

(American National Standard Institute) の公開データ」と比較して計算コードの信頼性を検証した。その結果、実用上の問題がないことを確認した上で、最も汎用性が高く、放射線医療

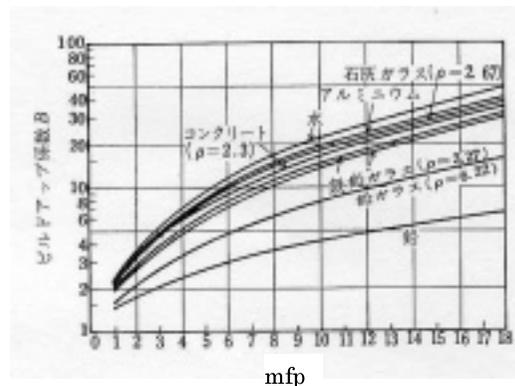


図 4 各種材料のビルドアップ係数

研究者の間で広く用いられているモンテカルロ法：MCNP (Monte Carlo Neutron and Photon Transport Code System) により計算した値を採用することにした。なお、無限媒質中にお

る点等方線源に対するビルドアップ係数は、後方からの散乱線も考慮されているので安全側の計算となっている。

今後、弊社鉛ガラス製品の板厚設計には、表1に記載の概念組成・密度値からモンテカルロ法により算出されたビルドアップ係数を用いることにする。

3-3. ^{18}F を線源とした場合の鉛当量

本来PET診療における放射線防護を考えると、放射線遮蔽材料の遮蔽能は「実効線量透過率」で議論されるべきである。しかし、一般的には「鉛当量」で表現されることが多く、弊社にも鉛ガラス製品の「鉛当量」についての問合せが頻繁に寄せられていた。これは、 ^{18}F -FDGを用いた場合の放射線遮蔽において「鉛当量」の規格がJIS等で規定されていないことが原因の一つである。

このような状況を考慮して、高鉛含有率のPET施設用ガンマ線遮蔽鉛ガラスPro-GRを開発・商品化するにあたり、これまで明確でなかった鉛ガラスの実効線量透過率計算方法を明確にした。さらに、ガンマ線遮蔽における「鉛当量」を「鉛と鉛ガラスのビルドアップ係数を用いて計算したそれぞれの実効線量透過率を比較して、鉛ガラスの遮蔽能と等価になる鉛板の板厚」と定義した。

表3に ^{18}F を線源として用いた場合の各鉛厚における実効線量透過率およびその透過率に対応するPro-GR,LX-57Bの対応板厚を示す。

鉛2mm, 3mm相当厚さはLX-57B, 鉛5mm, 7.5mm相当厚さはPro-GRを製品とする。

なお、鉛の実効線量透過率は放射線施設のしゃへい計算 実務マニュアル2000から抜粋した。

4. まとめ

^{18}F -FDGを用いるPET施設向けに従来の鉛ガラスよりも鉛含有率の高い新製品Pro-GRを製品化した。Pro-GRの製品化に伴い、弊社鉛ガラスの概念組成・特性を公表し、 ^{18}F を線源とした場合の実効線量透過率計算方法を示したうえで、「鉛当量」の定義を明確にした。これにより弊社鉛ガラスを安全・適切にかつ安心してご使用いただけるようになったものとする。

参考文献

- (1)「月刊新医療 2006年3月」(株)エムイー新興協会
- (2)「ラジオアイソトープ密封線源とその取扱 改訂5版」日本アイソトープ協会編, 丸善株式会社発行
- (3)「放射線概論」石川友清編, 通商産業研究社発行

表3 ^{18}F を線源とした場合の鉛の実効線量透過率と鉛ガラスの対応板厚

鉛厚さ(mm)	実効線量透過率(%)	左記実効線量透過率に対応するガラス厚さ(mm)	
		Pro-GR	LX-57B
2	78.6	(5.9)	8.2
3	69.0	(8.8)	12.0
5	52.6	14.2	(19.2)
7.5	36.0	21.3	(28.6)

()の数字は参考値