研究論文

1074. 空層層を含む反射・吸収効果を考慮した
多層構造体による放射線遮蔽性能の向上

白形弘文*, 真木 紘一**, 上出 泰生*

*Improvement in Radiation Shielding Property by the Multi-Layered
Structure with Narrow Gaps due to Reflection and
Absorption before and behind the Gaps*By Hirofumi SHIRAKATA,
Koichi MAKI and Taisei UEDE

A new type of radiation shield structure with narrow gaps is proposed and its shielding property is shown to be improved by taking the effects of reflection and absorption before and behind the gaps into consideration.

The present shield structure consists of the multi-layered structure of shield materials. The thickness of one unit shield layer is about one mean free path of the incident X-ray in the shielding material. Three basic elements are applied to the present shield structure as follows. The first element is to equip narrow gaps between the shield layers. The second element is to use scattering/absorbing composite materials. The third element is to enclose the outside of multi-layered shield structure with absorbing materials.

In the present paper the basic concept for the present shield structure is proposed as the X-ray shielding design and simplified equations are derived by considering X-ray energy flow. Using the derived equations, shielding calculations are made as to a simple multi-layered structure model. Furthermore, the fundamental X-ray penetration experiments and calculations by the Monte Carlo code EGS4 are performed in order to prove the improvement in shielding property due to the present multi-layered structure with gaps. From these investigations, we obtained the result that the present multi-layered structure with narrow gaps can improve effectively shielding property.

KEYWORDS : radiation shielding, radiation protection, X radiation, Compton scattering, multi-layered shield structure, reflection, fundamental X-ray penetration experiment, penetration depth, shielding materials, Monte Carlo method, Computer code EGS4, absorption

I. 緒 言

最近、大型の加速器、核融合実験装置、放射光発生装置、自由電子レーザーなどの開発建設が各国で行われ、先端的開発研究に供せられている。一方、工業・医療分野などに利用される中小型の量子ビーム機器の応用範囲も広がり、多種多様の高度な機器が使用されるようになってきた。

これらの装置からは、従来のレベルを越える高エネルギー・高強度のX線などの放射線が発生するようになってきた。そのため、これらの放射線を防護する高性能の遮蔽構造体が必要となり、放射線遮蔽技術開発の重要性が再認識されるようになってきた。

従来から放射線遮蔽の考え方は、放射線の物質通過に伴う粒子的振舞いの解析を基礎としており、また、放射線発

生源を単層または多層の放射線吸収材で単純に取り囲む手法をとっている。衆知のごとく、これら粒子的手法による遮蔽研究開発は、多数の先達の方々によってすでに多くの成果が得られており^{(1)~(4)}、ミクロな機構解明も進んでいる。

さて、放射線遮蔽研究の進め方には、次の2つのアプローチがある。第1は、原子力施設のような大規模設備を対象とした遮蔽安全解析を行う方法で、多くの研究者達によって高度化された断面積セットや解析コードの開発が精力的に行われている⁽⁵⁾。第2は、量子ビーム機器など中小の装置を対象にした遮蔽設計を行うもので、ミクロな機構の解明は若干省略しても、簡易方程式によるマクロな解析手法と小規模モデル実験の併用により、より速く実施設計を可能にする方法である。本報で述べる放射線遮蔽法は、後者のアプローチに属するものである。

本報は、X線の遮蔽を具体例として取り上げ、遮蔽構造体を多層物質層と空層層を組み合わせたもので構成し、X線の遮蔽物質通過に伴うコンプトン効果による吸収、散乱、

* 日立製作所 国分工場 (Kokubu Works, Hitachi, Ltd.)

** 日立製作所 電力・電機開発本部 (Power & Ind. Systems
R&D Div., Hitachi, Ltd.)
(1997年 10月15日 受理)

透過現象を区別して用い、準(擬)光学的類推の下で機能させることによって、遮蔽性能の向上を図る新しい遮蔽方法を提案するものである。

II. 放射線遮蔽構造体の基本概念

本報で提案する新しい放射線遮蔽構造体は、遮蔽物質層を多層構成とし、遮蔽性能を向上させるため、下記の3種類の手段を採用した。

- (1) 遮蔽物質層間に狭い空隙層(真空またはガス)を設ける。
- (2) 遮蔽物質層材として、散乱性物質と吸収性物質を組み合わせた複合構成材を使用する。
- (3) 多層遮蔽物質層の表面を吸収性物質で覆う。

ここで、遮蔽物質層の厚さは、空隙への散乱X線の反射効率を大きくとる必要があるため、1mfp(平均自由行路)程度またはそれ以下の薄いものとする。

次に、高強度X線ビームが遮蔽物質に垂直に入射する場合を例にとり、第1図により、新遮蔽構造体の動作原理を述べる。

高強度のX線ビームは、まず遮蔽物質第1層に入射される。ここで、遮蔽物質層の厚さは1mfp程度であるから、第1層内での入射X線全エネルギー束 $I_0(E_0)$ の物質通過に伴う現象は、次の4つの反応過程に分けられる。

- ① 無衝突透過X線全エネルギー束 $I_P(E_0)$

- ② 1回衝突前方散乱X線全エネルギー束 $I_F(E_1)$

- ③ 1回衝突後方散乱X線全エネルギー束 $I_R(E_1)$

- ④ 1回衝突後の吸収X線全エネルギー束 $I_A(E_1)$

ただし、 E_0 、 E_1 は、それぞれ入射、1回衝突後の平均X線エネルギーである。

さて、この遮蔽構造体を準光学的類推の下に有効に機能させるためには、反射・屈折現象をつかさどる散乱性物質と吸収現象をつかさどる吸収性物質の選択が重要である。そこで遮蔽物質を、その性質に応じて、次の2種類に分類する。

散乱性物質……前方散乱②、後方散乱③が多いもの。

吸収性物質……X線吸収④が多いもの。

なお、これらの現象を起こす割合は、物質の種類やX線エネルギーによって変化する。また、これらの分類は、物質固有の性質ではなく、入射X線エネルギーによって、同じ物質でも、その区分が変わることに留意すべきである。

現在実用化されているCT装置や放射光装置など、利用用途の多いX線エネルギー範囲は数keV～数MeVである。この領域での物質中のX線通過に伴う反射現象は、主にコンプトン効果であるから、遮蔽物質の散乱と吸収の割合とX線エネルギーとの関係は容易に計算でき、その結果を第2図に示す。この図から、散乱性物質と吸収性物質の選択が可能となる。例えば、鉄(Fe)は100keV程度以

第1図 新遮蔽構造体の基本概念

$$\eta_F(E_i) + \eta_R(E_i) = \frac{(\sigma_{sf} + \sigma_{sb})}{\sigma_t}$$

第 2 図 X 線の物質通過に伴う正味の散乱と吸収の割合 (各記号は文中の記述参照)

上のエネルギー領域で散乱性物質としての挙動を示し、それ以下のエネルギー領域では吸収性物質としての働きをする。

ここで、話を第 1 図による原理説明に戻す。

第 1 層の遮蔽物質は吸収または散乱性物質を用い、入射 X 線を衝突低エネルギー化させる。使用物質の選択は、層内 X 線吸収熱量や X 線発生装置側への X 線反射の可否などによって決められる。なお、前述①と②の透過 X 線は後の空隙に放出され、③の X 線は入射側に反射される。

第 2 層以降の物質は、散乱性物質と吸収性物質を組み合わせた複合構成材か、または散乱性物質*を用い、入射側の空隙への X 線反射量を多くするとともに層内 X 線吸収量を加減制御する。

残りの透過 X 線量が線量当量限度近くまで低減された最終層および外周層の物質は吸収性物質を使用する。

各層間の空隙に放出された X 線は、X 線照射領域外の空隙層を含んだ多孔の散乱性・吸収性物質内に導き、多重反射をさせつつ吸収熱化させ、遮蔽層内に捕獲する。

新提案の放射線遮蔽法の特徴は、放射線の反射・吸収特性を有効に機能させた多層遮蔽構造体等の採用により、遮蔽体に入射した放射線エネルギーを、散乱性物質や空隙によって、そのエネルギーを下げながら遮蔽体内全体に分散し、その後吸収性物質に吸収させ閉じ込めて、外部への漏洩をできるだけ少なくすることを可能としたことである。

新放射線遮蔽法の手段と作用の要約を第 1 表に示す。

*ここで使用する散乱性物質は、有意の吸収特性を有する範囲で使用する必要がある。

第 1 表 新放射線遮蔽法の 3 要素

手 段	作 用
(1) 遮蔽物質層を多層構成とし、層材として、放射線散乱性物質、または散乱/吸収性物質の複合構成材を使用する。(層厚 ~1 mfp)	遮蔽物質層の種類と層構成の選択により、放射線の吸収などの準光学的特性を有効に機能させる。
(2) 各遮蔽物質層間に真空、またはガスの空隙層を設ける。	散乱された放射線エネルギーを遮蔽体内に非常に速く分散、平均化する。
(3) 多層遮蔽物質層の最外層を吸収性物質で覆う。	低エネルギー化した放射線を遮蔽構造体内部に閉じ込める。

III. 新遮蔽構造体成立の可能性検討

1. 簡易方程式の導出

前章で述べた新遮蔽構造体の基本構想を具体化するため、X 線のエネルギー・フローに着目した簡易方程式を、第 3 図に示すカスケード法に基づいて導いた。

一般の放射線関連機器の遮蔽を考える場合、機器の内蔵部品に衝突散乱した 2 次放射線が線源となることも多く、遮蔽体に入射する放射線量、場所、方向などを特定することが困難であるので、入射 X 線の強度を示す量としてエネルギー束 $I_0(E_0)$ を用いることとした。全エネルギー束 I_0 は、エネルギー束密度と入射面積との積である (以下、

第3図 物質層を通過するX線エネルギー束の流れ

エネルギー束と略称する)。したがって、後述の方程式には、エネルギー保存則が適用される。

(1) 定義

方程式の導出に先立って、次の諸量を定義する。

$$\Phi_n(E_i) = \exp[-\mu_n(E_i)d_n], \quad (1)$$

ここで、 $\mu_n(E_i)$ 、 d_n は、それぞれ第 n 層物質の線減衰係数および厚さである。また、 E_i は入射X線エネルギーである。

なお、入射X線束が斜入射の場合は、(1)式の厚さ $d_n \Rightarrow d_n / \langle \cos \phi \rangle$ 置き換える。ただし、 $\langle \cos \phi \rangle$ は散乱角の平均余弦である。さらに、

$$\psi_{Fn}(E_i) = \{1 - \Phi_n(E_i)\} \eta_{Fn}(E_i), \quad (2)$$

$$\psi_{Rn}(E_i) = \{1 - \Phi_n(E_i)\} \eta_{Rn}(E_i), \quad (3)$$

$$\psi_{An}(E_i) = \{1 - \Phi_n(E_i)\} \eta_{An}(E_i), \quad (4)$$

ここで、前方散乱効率 $\eta_{Fn}(E_i) \equiv \{\sigma_{sf}/\sigma_t\}$

後方散乱効率 $\eta_{Rn}(E_i) \equiv \{\sigma_{sb}/\sigma_t\}$

吸収効率 $\eta_{An}(E_i) \equiv \{\sigma_a/\sigma_t\}$

ただし、 σ_t 、 σ_{sf} 、 σ_{sb} 、 σ_a は、それぞれ遮蔽物質のX線全衝突断面積、前方散乱断面積、後方散乱断面積、吸収断面積であ

り、

$$\sigma_t = \sigma_{sf} + \sigma_{sb} + \sigma_a$$

である。これらの関係から、

$$\eta_{Fn}(E_i) + \eta_{Rn}(E_i) + \eta_{An}(E_i) = 1 \quad (5)$$

(2) 遮蔽物質層を通過するX線エネルギー束の流れ

X線エネルギー束の第 n 層通過に伴う現象について考える。

第 n 層に入射されるX線束群は、 $I_{n-1}(E_0)$ 、 $I_{n-1}(E_1)$ 、 $I_{n-1}(E_2)$ 、 $\dots$ 、 $I_{n-1}(E_{n-1})$ の n 種類である(第3図参照)。また、第 n 層物質を透過するX線束群は、 $I_n(E_0)$ 、 $I_n(E_1)$ 、 $I_n(E_2)$ 、 $\dots$ 、 $I_n(E_n)$ の $(n+1)$ 種類である。

帰納的に求めた、一般化した方程式を以下に示す。

(a) 第 n 層透過X線束

無衝突；

$$I_n(E_0) = I_{n-1}(E_0) \Phi_n(E_0), \quad (6a)$$

1回衝突；

$$I_n(E_1) = I_{n-1}(E_0) \psi_{Fn}(E_0) + I_{n-1}(E_1) \Phi_n(E_1), \quad (6b)$$

2回衝突；

$$I_n(E_2) = I_{n-1}(E_1)\psi_{Fn}(E_1) + I_{n-1}(E_2)\phi_n(E_2), \quad (6c)$$

$n-1$ 回衝突;

$$I_n(E_{n-1}) = I_{n-1}(E_{n-2})\psi_{Fn}(E_{n-2}) + I_{n-1}(E_{n-1})\phi_n(E_{n-1}), \quad (6d)$$

n 回衝突;

$$I_n(E_n) = I_{n-1}(E_{n-1})\psi_{Fn}(E_{n-1}) \quad (6e)$$

(b) $(n-1) \sim (n)$ 層間の空隙に放出される全反射X線束

$$I_{Rn} = \sum_{i=1}^n I_{Rn}(E_i) = \sum_{i=0}^{n-1} \{I_{n-1}(E_i)\psi_{Rn}(E_i)\} \quad (6f)$$

(c) 第 n 層物質に吸収される全X線束

$$I_{An} = \sum_{i=1}^n I_{An}(E_i) = \sum_{i=0}^{n-1} \{I_{n-1}(E_i)\psi_{An}(E_i)\} \quad (6g)$$

また、エネルギー保存則から、

$$\phi_n(E_i) + \psi_{Fn}(E_i) + \psi_{Rn}(E_i) + \psi_{An}(E_i) = 1 \quad (6h)$$

となる。

これらの関係式を用いて、多層構成の物質層を通過するX線エネルギー束が、遮蔽物質の層内あるいは層間に、どのような割合で分配されるかを簡単に計算できる。

ここで、本方程式を用いて計算する際の留意点を下記に示しておく。

- (1) 今回導いた方程式は、多種多様の放射線機器に適応した新遮蔽構造体の概念設計をするため、遮蔽層厚を ~ 1 mfp程度に限定して使用する簡易計算式である。したがって、層数 n をあまり大きくすると、誤差が増大する可能性があるため、モデル実験等の併用によるクロスチェックが必要である。
- (2) 本方程式の導出にあたっては、空隙を挟む物質層間の反射X線の多重散乱成分は、両端物質層に吸収されると仮定している。それは、入射X線の主反応成分に比べて、多重散乱X線のエネルギーが低くかつ量も少ないので、概念検討段階では、多重散乱成分が後段の遮蔽層に与える影響が少ないと判断したためである。

2. 新遮蔽構造体の設計計算例

新提案のX線遮蔽構造体の有効性を調べるため、第3、4図に示すような無限平行平板多層構造を代表例にとり、簡易方程式を用いて、遮蔽構造体概念の設計検討を行った。

(1) 基本的設計条件

入射X線に関する基本的設計条件として、CT装置などで利用範囲の広いと考えられる下記の条件を設定した。

入射X線エネルギー E_0 : 1および0.56MeV

遮蔽物質第1層へのX線入射方向: 垂直入射

入射X線エネルギー束: $I_0(E_0) = 100$

遮蔽構造体については、第2図を参考にして、吸収性物質として鉛(Pb)、散乱性物質としてFeを選んだ。また本提案の基本要素である複合構成材はFe/Pbとした。その

構成は、いずれも5層の平板多層構造とし、下記の3種類について遮蔽計算を実施した。各層の厚さは入射エネルギー E_0 に対し1mfp相当とし、層間には空隙を設けた。新遮蔽構造体の代表例として、

(1) 遮蔽物質第1層をFeとし、第2～5層の物質を複合構成材Fe/Pbとしたもの

を選択し、比較する遮蔽構造体として、次の2つを取り上げた。

(2) 遮蔽物質第1～5層のすべてをFeとしたもの

(3) 遮蔽物質第1～5層のすべてをPbとしたもの

(2) 設計計算の遂行に際して考慮した事項

遮蔽設計計算に用いる散乱効率や吸収効率などの算出にあたって、各種反応断面積等の基本的数値は文献(1),(6)から引用した。また、下記の事項を考慮した。

(a) 散乱X線の平均エネルギーの減衰と角度分布

X線の物質層通過に伴う散乱X線のエネルギーと角度分布の関係は、コンプトン効果の式

$$E_\gamma' = E_\gamma / \{1 + 1.96 E_\gamma (1 - \cos \phi)\} \quad (7)$$

で求められる。ここで、 E_γ' , E_γ は、それぞれ散乱X線、入射X線のエネルギー(MeV)であり、 ϕ はX線の散乱角である。

コンプトン散乱による入射X線の平均エネルギーの減衰は文献(1)で求められており、1MeVの場合を例にとると、下記ようになる。

$$\begin{array}{ccccccc} & (1 \text{ 回衝突}) & & (2 \text{ 回衝突}) & & & \\ E_0 = 1 \text{ MeV} & \longrightarrow & E_1 = 0.56 \text{ MeV} & \longrightarrow & E_2 = 0.36 \text{ MeV} & & \\ (3 \text{ 回衝突}) & & (4 \text{ 回衝突}) & & (5 \text{ 回衝突}) & & \\ \longrightarrow & E_3 = 0.25 \text{ MeV} & \longrightarrow & E_4 = 0.19 \text{ MeV} & \longrightarrow & & \end{array}$$

$$E_5 = 0.15 \text{ MeV}$$

次に、散乱X線の角度分布について考える。入射X線に対する平均散乱角 $\langle \phi \rangle$ は、

$$E_0 = 1 \text{ MeV} \longrightarrow E_1 = 0.56 \text{ MeV} \text{ のとき、} \langle \phi \rangle = 53^\circ$$

$$E_1 = 0.56 \text{ MeV} \longrightarrow E_2 = 0.36 \text{ MeV} \text{ のとき、} \langle \phi \rangle = 61^\circ$$

となり、2回以上衝突するX線は、次の物質層への方向が大幅に変わるので、平均散乱角 $\langle \phi \rangle$ の指向性が判別しにくくなる。

これらの結果から判断して、今回の遮蔽計算では、以下の条件のもとで実施した。

(1) 1回衝突X線透過束は、次の物質層に上記の平均散乱角 $\langle \phi \rangle$ で斜入射するものとする。

(2) 2回以上衝突の透過X線束は、過大評価ではあるが垂直入射を仮定し、そのかわり散乱X線は前方と後方に等分配されたとした。

(b) 空隙層の取扱い

本提案の特徴の一つである空隙層の取扱いについては、次のような考え方を導入した。

(1) 後方散乱(反射)X線束は、手前の空隙層に流入すると仮定する。

(2) 無衝突および1回衝突透過X線束は、すべて次の

第4図 各遮蔽層および空隙に吸収・散乱されるX線エネルギー束の割合

遮蔽物質層に流入するものとする。

- (3) 2回以上衝突の透過X線束は、その1/2が遮蔽物質層で吸収され、残りの1/2が前方の空隙層に入ると仮定する。

- (4) 空隙層厚は遮蔽物質層の1mfp相当以下とし、層厚の効果はほとんどないものと仮定する*。

- (c) 遮蔽物質2重層(散乱-吸収)の取扱い

第1図の第2～4物質層に示すような散乱物質Aと吸収物質Bを組み合わせた複合遮蔽材を考える。今回の設計例では、各遮蔽物質の厚さは、入射X線エネルギー E_0 に対する1mfpとしているから、

$$\mu_A l_A + \mu_B l_B = \mu l_{1/e} = 1 \quad (8)$$

として計算した。また、遮蔽物質の厚さ $l_A + l_B = l_{1/e}$ 、ただし、 $l_{1/e}$ は平均自由行程、 μ, μ_A, μ_B は、それぞれ複合材、物質A、Bの線減衰係数である。

また、A、B層の間に空隙はないので、A層を透過したX線束はすべてB層に流入するものとし、B層から後方散乱したX線束はA層で吸収されると仮定した。

(3) 設計計算結果

ここで、前述の3種類の遮蔽構造体について実施した設計計算の結果について、 $E_0 = 0.56 \text{ MeV}$ の場合を代表例にとり説明する。

* 空隙層厚の変化を無視しても遮蔽効果に対する影響がほとんど無いという検討結果は、第V章に記述している。

まず、各遮蔽層および空隙に吸収・散乱されるX線エネルギー束の割合を第4図に示す。散乱効果が著しい場合を除き、空隙層に分配されたエネルギー束の大部分は、最終的には両端の遮蔽物質層に吸収されと考えられる。

次に、第5図に、遮蔽効果を示す指標の一つである全エネルギー束に対するビルドアップ係数 B (以下、エネルギー・ビルドアップ係数と称する)の計算結果を示す。なお、遮蔽物質第 n 層を通過したエネルギー・ビルドアップ係数 B_n は、散乱線を含めた全X線束と無衝突透過X線束の比であるから、下記の式から計算できる。

$$B_n = \left\{ \sum_{i=0}^n I_n(E_i) \right\} / I_n(E_0) \quad (9)$$

(4) 計算結果の考察

まず最初に、エネルギー・フローの観点から、上記3種類の遮蔽構造体の遮蔽効果について考える。

1次反射によって空隙層へ流入するX線エネルギー束の入射全エネルギー束に対する割合は第4図から求められ、散乱性物質Fe層(ケース①)、吸収性物質Pb層(ケース②)、複合構成材Fe/Pb層(ケース③)の場合、順に

$$E_0 = 0.56 \text{ MeV} \text{ のとき } \rightarrow 42\%, 12\%, 27\%$$

となっている。予想通り、1次反射エネルギー量は、散乱性物質Fe層(ケース①)の場合が大きく、複合構成材Fe/Pb層(ケース③)は中間の値となっている。なお、吸収性物質Pb層(ケース②)の場合でも10%を越える値が得られており、どのケースでも有為の1次反射効果はあることが

第5図 空隙を考慮した物質層のX線遮蔽効果 ($E_0=0.56\text{ MeV}$)

わかる。

しかしながら、これだけで遮蔽性向上に結び付く空隙層の効果があると即断することはできない。なぜなら、2次・3次……等多重反射し、リターンした低エネルギーX線の行方がどうなるかを見極める必要があるからである。

ここで、吸収性物質(ケース②)の場合を考えると、多重反射したX線は、大部分が近傍の物質層内に吸収され、密着構造の遮蔽性能とほとんど変わらないと思われるので、空隙層の効果は期待できない。

一方、散乱性物質層(ケース①)の場合は、X線の低エネルギー部分でも吸収効果が小さく、多重反射し、リターンしたX線が後方の物質層まで生き残り(ビルドアップ係数 $B \gg 1$)、空隙層の存在はビームを広げる凹レンズ効果による局所的な照射線量の減少に寄与するものの、透過全エネルギー量としての遮蔽性能の向上は、あまり期待できないのではないと思われる。しかし、最外層に薄い吸収性物質層を追加すれば(第1表(3)項の手段)、低エネルギーX線を捕獲できるので、総合的な遮蔽性能の向上が期待できるだろう。

さて、本報で新提案した複合構成材層(ケース③)の場合を考えてみよう。第4図から明らかなように、77%の高価な吸収性物質を、安価な散乱性物質に置き換えても、その遮蔽性能は、すべてを吸収性物質層(ケース②)とした場合の性能と、ほとんど変わっていない。これは、反射(散乱)層の存在によって、空隙層の放射線拡散効果が増すとともに、薄い吸収層の存在によって多重反射したリター

ンしたX線が吸収され、この両者の相乗効果によって遮蔽性能の向上が図られたものと考えられる。

次に、この現象をビルドアップ係数の観点から考えてみよう。第5図に示されているように、Fe層やPb層の単一遮蔽物質層のビルドアップ係数は、その値と関数曲線が、文献(1)等に記載されている密着型遮蔽構造体の場合とほぼ同様の傾向を示している。この結果は、単純に遮蔽物質層と空隙層の組み合わせた構造体を作っただけでは、遮蔽性能の向上につながらないことを示唆している。

さて、本報の主題である複合構成材Fe/Pb層(ケース③)の場合を見てみると、図から明らかなように、遮蔽層が増加するにつれて、複合構成材Fe/Pb層のビルドアップ係数が、吸収性物質Pb層の係数値とほぼ同じか、またはその係数値を下回る傾向を示している。この事象は、散乱性/吸収性物質の組合せによる遮蔽構造が放射線の遮蔽性能を改善するため非常に有効であることを裏付けている。

3. 新遮蔽構造体利用の物理的イメージ

これまでの考察に基づいて、新遮蔽構造体実用化のための物理的イメージを描いてみよう(第6図参照)。

第6図(a)に見られるように、従来の物質密着型遮蔽方式では、遮蔽物質層内の入射面付近に、X線遮蔽に有効利用されていない領域が相当ある。この領域をうまく利用すれば、遮蔽構造体の遮蔽性能の向上が期待できる。

ここで、新遮蔽構造体を用いた遮蔽構造壁の構成概念の一例を第6図(b)に示す。その遮蔽構造壁は多数の遮蔽材セグメントを組み合わせた構成となっている。この小さい遮蔽材セグメントは、周囲を吸収性物質で取り囲み、内部は散乱性物質や散乱・吸収性物質複合材および空隙層から構成され、その働きは「散乱X線エネルギーを内部の遮蔽物質内に分散平均化して閉じ込める」という新提案の遮蔽構造体の機能をすべて含んでいる。したがって、遮蔽構造壁全体が遮蔽目的に有効利用でき、遮蔽性能の向上が図れると考えられる。

IV. 原理検証実験

これまでの解析結果で示された新遮蔽構造体の有効性を確かめるため、非破壊検査用のX線発生装置を用いて原理検証実験を実施した。

1. 実験方法

(1) 実験機器の配置

第7図に実験機器の配置を示す。本装置は、X線発生装置(印加電圧150 kV)、測定対象となる多層遮蔽構造体、透過X線を測定するX線フィルムおよびPN接合型Si半導体検出器(サーベイメータ)で構成されている。

(2) 遮蔽構造体の構成

遮蔽構造体の断面図を第8図に示す。いずれも平板多層

め、第Ⅲ章記載の方法を用いて遮蔽計算を行った。その計算結果のうち、遮蔽層厚の増加に伴うエネルギー・ビルドアップ係数の変化を第9図に示す。この結果は、Al/Fe複合構成材の使用がX線遮蔽効果をの改善に役立つことを示唆している。ここで、本計算に使用した平均自由行路、吸収および散乱効率を第2表に示しておく。

第9図 空隙を考慮した物質層のX線遮蔽効果 ($E_0=0.15\text{ MeV}$)

第2表 角度分布を考慮したX線による遮蔽物質の平均自由行路、吸収および散乱効率 ($E_0=0.15\text{ MeV}$ の場合)

X線平均 エネルギー: E_i (MeV)	平均自由行路 $l_{1/\rho}$ (cm)		吸収効率: η_A		前方散乱効率: η_F		後方散乱効率: η_R	
	Fe	Al	Fe	Al	Fe	Al	Fe	Al
0.15	0.58	2.7	0.43	0.21	0.37	0.51	0.20	0.28
0.12	0.45	2.4	0.51	0.21	0.27	0.44	0.22	0.35
0.10	0.34	2.2	0.59	0.22	0.205	0.39	0.205	0.39
0.086	0.24	1.95	0.67	0.25	0.165	0.375	0.165	0.375

(注) $\eta_A + \eta_F + \eta_R = 1$

第3表 複合材効果(空隙層付)確認試験におけるX線透過線量率比
(X線管電圧: 150 kV)

遮蔽構造体の 種類	サーベイメータ 測定値	X線フィルム 測定値	簡易方程式 による概略 計算値	EGS4計算値	
				$r_0 \leq 15\text{ cm}$	$r_0 \leq 5\text{ cm}$
5層 Al/Fe†	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
5層 Al	2.52	2.62	2.5	2.36	2.50
5層 Fe	1.15	1.03	1.3	0.92	0.95
3層 Al/Fe†	1.0	—	1.0	—	—
3層 Al	2.34	—	1.9	—	—
3層 Fe	0.8	—	1.2	—	—

†: 第1層はAl層

複合材効果確認試験は、5層および3層構成の上記3種類の遮蔽構造体について実施した。なお、この試験では、層間空隙は6mmとした。第3表に、各遮蔽構造体通過後のX線線量率比の測定値と事前に求めた概略計算予測値を示し、写真1に、5層遮蔽構造体の場合のX線フィルムによる測定結果(感光時間は5min間)を示す。これらの測定結果は、本試験計画時に予想したX線透過度の関係

Al遮蔽構造体 > Fe遮蔽構造体,

Fe遮蔽構造体 ~ Al/Fe複合遮蔽構造体,

とよく一致しており、本提案の遮蔽方法の考え方が正しかったことを示している。

V. モンテカルロ計算コードによる検証

新遮蔽構造体の有効性を再確認するため、モンテカルロ計算コードEGS4⁽⁷⁾を用いて、空隙層を含む構造体の遮蔽効果を中心に検証計算を実施した。

1. 計算条件

数値計算に用いた、X線線源、遮蔽構造体(空隙層を含む)および検出器の基本配置を第10図に示す。

計算に使用した主な前提条件は、下記の通りである。

- ・線源……等方点状源(一部直入射ペンシルビーム源)
点状線源—遮蔽構造体全面間距離: 10cm
遮蔽構造体後面—検出器の距離: 1mfp-Al(Air)
- ・入射X線エネルギー E_0 : 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 MeV
- ・検出器位置における透過X線の照射X線量: 照射断面半径 $r_0 \leq 15, 45, 75\text{ cm}$ として計算
- ・遮蔽構造体の基本形状

写真 1 X線フィルムで測定した複合材効果確認試験結果(5層)

遮蔽効果の相互比較のために用いた多層遮蔽構造体の基本形状は、下記に定義した7種類の無限平行平板構造である。散乱性物質としてはAlを、吸収性物質としてはPbを選択した。

ここで、 n 倍 mfp の Al 層を n mfp-Al, n mfp-Al 相当の空気層を n mfp-Al(Air), n 倍 mfp の Pb 層を n mfp-Pb と記す。

① Case [a]...

$$L_0 = (1 \text{ mfp-Al} + 1 \text{ mfp-Al(Air)}) * 4 + 1 \text{ mfp-Pb}$$

② Case [b]...

$$L_0 = (2 \text{ mfp-Al} + 2 \text{ mfp-Al(Air)}) * 2 + 1 \text{ mfp-Pb}$$

③ Case [c]...

$$L_0 = (4 \text{ mfp-Al} + 4 \text{ mfp-Al(Air)}) + 1 \text{ mfp-Pb}$$

④ Case [d]...

$$L_0 = (0.5 \text{ mfp-Al} + 0.5 \text{ mfp-Al(Air)}) * 8 + 1 \text{ mfp-Pb}$$

⑤ Case [e]...

$$L_0 = (0.2 \text{ mfp-Al} + 0.2 \text{ mfp-Al(Air)}) * 20 + 1 \text{ mfp-Pb}$$

⑥ Case [a*]...

$$L_0 = (1 \text{ mfp-Al} + 0.5 \text{ mfp-Al(Air)}) * 4 + 1 \text{ mfp-Pb}$$

⑦ Case [g0]...

$$L_0 = 4 \text{ mfp-Al} + 1 \text{ mfp-Pb} \text{ (遮蔽物質層密着)}$$

第10図に計算に使用した遮蔽体形状図を示す。多層遮蔽構造体①～⑦は、いずれも上流部を散乱性物質層、最終層を吸収性物質とした遮蔽構造体である。なお、最終層を吸収性物質としたのは、新遮蔽構造体3要素の一つ第1表(3)項の手段を採用したものである。

このうち、①～⑤は空隙率一定の遮蔽構造体である。いずれのケースも全Al層厚をAlの4 mfp相当(4 mfp-Al), 全空隙層厚をAlの4 mfp相当分の空気層(4 mfp-Al(Air)), および最終のPbの1 mfp相当(1 mfp-Pb)の同一とした。⑥は空隙率を半分にした構造体、⑦は空隙率ゼロの遮蔽物質を密着させた構造体である。

2. 計算結果

遮蔽構造体の遮蔽効果を相互比較する場合には、

- (i) 線源からのX線ビームの発散の影響……線源と検出器間距離を一定とする
- (ii) X線ビームの遮蔽構造体内での多重散乱による発散の影響……遮蔽構造体後面と検出器間距離を一定とする

の2点に留意する必要がある。

上記①Case[a]～⑤Case[e]の計算コードEGS4による計算結果は、これら(i), (ii)の比較条件を満足しているので、単純に遮蔽効果の相互比較が可能である。

(1) 空隙率一定の場合の遮蔽効果

空隙率一定の条件を満たしている遮蔽構造体①Case[a]～⑤Case[e]に、X線ビーム(等方点状源)を入射した時の遮蔽体を透過したX線の照射線量比(以下透過線量比と略称)の計算結果を第11図に示す。これらの図を見ると、各Caseの透過線量比(Case[c]を基準とする)は、

$$\text{Case[d]} \approx \text{Case[e]} \leq \text{Case[a]} \\ < \text{Case[b]} \approx \text{Case[c]}$$

となっている。この結果を言葉で表現すると、「最終層を吸収物質とした空隙率一定の多層遮蔽構造体では、遮蔽物質(空隙)の一層の厚さを薄くしていき～1 mfpに近づけると、透過線量比が急に減少する(遮蔽性能の改善)。しかし、さらに物質(空隙)層厚を薄くしていても、透過線量比は変化せず一定である(性能改善度は変わらない。)」となる。

次に、X線源を直入射ペンシルビーム源に変更して、遮蔽構造体①Case[a]～③Case[c]のX線透過線量比の計算結果を比較したが、前述の等方点状源の結果と同様であった。

遮蔽物質層厚が1 mfp以下の領域で遮蔽性能が改善され

第10図 数値計算用の線源、遮蔽構造体、検出器の構成

点状線源—EGS4数値計算

第11図 5層遮蔽構造体(空隙率一定)の遮蔽効果 (Case [a]~[e] の比較)

ること、およびX線ビームの透過線量比がほぼ一定となるという数値計算結果は、本報提案の新手法のアイデア発案時の直感的予想と一致している。なぜなら、物質層厚が $\sim 1\text{ mfp}$ 以下では、物質層から反射される後方散乱X線の大部分は無衝突で空隙に放出されるので、光学材料類似の表面反射を利用したマクロな準(擬)光学的手法による取扱が可能であると考えられる。この場合のエネルギー交換量が、物質層間空隙の厚さに無関係として取り扱えることは、「放射伝熱の概念」などから容易に類推できることである。第Ⅲ章の簡易方程式を導く際、空隙層の厚さをほとんど考慮しなかったのは、この理由による。

(2) 空隙層の厚さ短縮効果

もし前述の第11図の結果の考察が正しければ、遮蔽物質層厚を 1 mfp 程度にした場合、空隙層厚を 1 mfp 以下に縮めても、遮蔽構造体の遮蔽性能がほぼ一定となる領域が存在するはずである。

これを確かめる計算結果の一例を第12図に示す。これは、各遮蔽物質層厚を 1 mfp (全5層)とし、空隙層厚を変化させた遮蔽構造体① Case[a], ⑥ Case[a*], ⑦ Case[g0]の透過線量比(Case[a]を基準)を比較したグラフである。このグラフを見ると、

最小空隙値 $\leq$ 空隙層厚 $\leq 1\text{ mfp-Al(Air)}$

の範囲で、予想通り、透過線量比一定の領域が存在することは明らかであり、実用上、この「最小空隙値」がどの値になるかは重要であるとともに興味のあることである。今回の試算(第11, 12図)の範囲では、 0.2 mfp-Al(Air) 近傍にあるように見える。だが、一般化した結論を出すには、遮蔽構造体の構成やX線入射条件などの各種パラメータ依存度の検討が必要であり、今後の研究を待たねばならない。

しかし、これまでの検討で、遮蔽物質層間に僅かの隙間

をつくることにより、遮蔽構造体の遮蔽性能が改善されることは結論できる。

(3) 散乱性物質のみで構成した構造体の遮蔽効果

上記遮蔽構造体の基本形状の特徴を明確にするための参考までに、散乱性物質(Al)のみで構成した空隙層を含む多層遮蔽構造体(全4層)の遮蔽効果について検討した。

計算した遮蔽構造体は、次の3種類である。

⑧ Case [f]...

$$L_0 = (1\text{ mfp-Al} + 1\text{ mfp-Al(Air)}) \times 3 + 1\text{ mfp-Al}$$

⑨ Case [g]...

$$L_0 = (2\text{ mfp-Al} + 2\text{ mfp-Al(Air)}) + 2\text{ mfp-Al}$$

⑩ Case [h]... $L_0 = 4\text{ mfp-Al}$ (遮蔽物質層密着)

計算のための機器配置を第13図に示す。

第14図に、遮蔽構造体⑧ Case[f]~⑩ Case[h]についての透過線量比(Case[h]を基準)を比較したグラフを示す。これらのグラフを見ると、各Caseの透過線量比の傾向は、X線エネルギーによって若干異なり、

$E_0 = 0.1, 0.2\text{ MeV}$ の場合、

Case [f] ~ Case [g] ~ Case [h]

$E_0 = 0.5, 1.0\text{ MeV}$ の場合、

Case [f] < Case [g] ~ Case [h]

となっている。

さて、その解釈であるが、まず $E_0 = 0.1, 0.2\text{ MeV}$ の場合、このエネルギー領域では、散乱性物質Alの正味の散乱効果が80%を越えており(第2図参照)、X線ビームを広げる効果はあるが、本報提案のような遮蔽効果はほとんど期待できない。この現象は、散乱性物質をビーム軸上に挿入してペンシルビームを拡大する手法として、医学分野などですでに利用されている。

次に $E_0 = 0.5, 1.0\text{ MeV}$ の場合について考えてみる。こ

点状線源—EGS4数値計算

第12図 5層遮蔽構造体の空隙層厚の短縮効果(Case[a], [a*], [g0]の比較)

第13図 散乱性物質のみで構成した遮蔽構造体および配置

の場合は、Alの物質層厚が1 mfpのCase [f]の性能が、他のCaseより向上しており、遮蔽効果が認められる。この遮蔽性能の改善は、入射X線のエネルギーが高くなると、コンプトン散乱による非弾性衝突効果が増加して、発生した低エネルギーの多重散乱X線が近くの物質層に吸収され、物質Alの正味の散乱効率が～60%と低下するためと考えられる。

これらの考察から、空隙層を含む多重遮蔽構造体の遮蔽効果を有効に機能させるには、散乱性物質といえども適度の吸収特性(数10%程度)を持たせる必要があることを示唆している。

なお、この第14図のデータを解釈するにあたって注意すべき点は、前述の比較条件(ii)を満足していないことである。すなわち、Case [f]→Case [g]→Case [h]の順に、遮蔽構造体後面と検出器間距離が長くなっているから、距離による透過線量の減衰効果が現れている。例えば、比較条件(ii)を満足させると、第14図の曲線は若干左下がりになるはずである。しかしながら、この影響は前述のデータ解釈を変えるほど大きくはない。

(4) 実験結果との照合

この段階で、第IV章で述べた検証実験結果と照合するため、実験に使用した5層Al/Fe系遮蔽構造体の形状および実験条件に基づいて、計算コードEGS4を用いた数値計算を行った。

その結果を第3表の右欄に追加記入した。実験遮蔽体が外径20 cmの円筒形であるので、 $r_0 \leq 15$ cmの計算値と、検出部の大きさにほぼ近い $r_0 \leq 5$ cmの推定計算値を記入した。これらの計算値は、実験結果とほぼ一致している。さらに、第三章で導いた簡易方程式の結果ともほぼ一致しており、この簡易方程式が遮蔽構造体の概念検討に使用可能であることが確認できた。

第14図 散乱性物質のみで構成した構造体の遮蔽効果(Case [f]～[h]の比較)

(5) 検証計算結果のまとめ

モンテカルロ計算コード EGS4 による検証計算の結果、新遮蔽構造体の有効性が再確認された。その具体的内容を下記に要約する。

- ・最終層を吸収性物質層とした空隙率一定の多層遮蔽構造体では、遮蔽物質層の厚さを $\sim 1\text{ mfp}$ に近づけると、急に遮蔽性能が改善される。さらに物質層厚を薄くしていくと、遮蔽性能改善度が変わらない領域がある。
- ・遮蔽物質層厚を 1 mfp 程度に保ち、空隙層厚を 1 mfp 以下に縮めても、遮蔽構造体の遮蔽性能がほぼ一定となる領域が存在する。今回の計算例では、その領域は

$$0.2\text{ mfp} \leq \text{空隙層厚} \leq 1\text{ mfp}$$

の範囲であった。

- ・空隙層を含む多層遮蔽構造体の遮蔽効果を有効に機能させるには、各遮蔽層に使用する散乱性物質に適度の吸収特性(数10%程度)を持たせる必要がある。
- ・5層 Al/Fe 系遮蔽構造体の実験に相当する EGS4 の計算結果は、実験結果および簡易方程式による概略計算値と一致した。

VI. 結 言

本報では、放射線遮蔽性能向上のため、反射・吸収効果を機能させた物質層と狭い空隙層を組み合わせた新しい放射線遮蔽構造を提案した。

その放射線遮蔽構造体は、遮蔽物質を多層構成(各層厚は目安として $\sim 1\text{ mfp}$)としたもので、基本的には、①各遮蔽層間への狭い空隙層の設置、②遮蔽物質層材として散乱/吸収性複合構成材の採用、③多層遮蔽物質層の最外層を吸収性物質で覆う、という3要素から成り立っている。

さらに、散乱性物質と吸収性物質の選択にあたって、元素固有のものとの考え方でなく、コンプトン効果による物質の特性変化を利用して使用物質の選択の幅を広げようとの考え方を提案した。

X線による遮蔽設計を具体例として取り上げ、新遮蔽構造体の基本概念の提案、X線のエネルギー・フローに着目した簡易方程式の導出、簡単なモデルによる遮蔽計算、および原理検証実験を行った。その結果、新提案の遮蔽構造体の採用によって、大幅な遮蔽性能の向上が図れること

が判明した。その後、モンテカルロ計算コード EGS4 による検証計算を実施し、その結論が再確認された。

ここで、その意義と将来展望について若干考えてみよう。技術的視点からは、新放射線遮蔽法の利点として、

- ・遮蔽物質の選択の幅の拡大によって、遮蔽性能および経済性の向上が期待できる。
- ・脱着自由の遮蔽ボード(セグメント)の採用により、工場生産による品質向上と、遮蔽設備機器の修理・改造が容易となる。
- ・中性子線や高エネルギー荷電粒子線の遮蔽手段としても応用できる可能性がある。

等が挙げられる。

また、本遮蔽法の利用分野としては、放射線を発生・利用する加速器、医療機器、工業応用などが考えられる。

一方、研究方法論の視点からは、従来の遮蔽設計において毒であった空隙の存在(ストリーミング現象)が、新提案の遮蔽法では発想の転換によって薬になった。また、完成度が高くなり衆目を集め難くなった研究・技術分野でも、少し視点を変えるとブレイクスルーの要素が潜んでいることが見い出せたことは興味深い。

終わりに、本研究の遂行にあたり、モンテカルロ計算コード EGS4 による計算を実施して頂いた高エネルギー加速器研究機構の平山英夫教授に深く感謝の意を表します。また、ご助言、ご支援頂いた(株)日立製作所の堀 康郎、椿 徹、西 政嗣、平本和夫の各氏、ならびに実験の遂行に協力して頂いた大竹文雄氏、前田 宏氏に感謝の意を表します。本報の執筆にあたり貴重なコメントを頂いた日本原子力研究所の笹本宜雄氏、および神戸商船大学の三宅 寛教授に感謝いたします。

—参考文献—

- (1) 日本RI協会編: "アイソトープ便覧", 丸善, (1962).
- (2) 山口恭弘, 岩井 敏: 原子力誌, **37**, 1087 (1995).
- (3) Harima, Y., Hirayama, H.: *Nucl. Sci. Eng.*, **113**, 367 (1993).
- (4) Shin, K., Hirayama, H.: *Nucl. Sci. Eng.*, **118**, 91 (1994).
- (5) 原研「核燃料施設安全性研究」委員会, 遮蔽安全性実証解析専門部会編: *JAERI-Tech 94-036*, (1994).
- (6) Veigele, W. M. J.: *At. Data*, **5**, 64 (1973).
- (7) Nelson, W. R., Hirayama, H., Rogers, D. W. O.: *The EGS4 Code System, SLAC-265*, (1985).