

論文

高比重ゴムを用いた放射線遮へい材の開発

山田隆博^{*1)} 鈴木隆司^{*1)} 中込雅晴^{*2)} 荒井慎二^{*2)} 中込佑介^{*2)}

Development of radiation shielding materials using high specific gravity rubber

Takahiro YAMADA, Takashi SUZUKI, Masaharu NAKAGOME, Shinji ARAI and Yusuke NAKAGOME

Abstract Lead has been used mainly as a radiation shielding material. However, from the viewpoint of environmental health, the development of an alternative radiation shielding material is called for. Therefore, 63 elements were simulated to choose a shielding material possessing a higher ability to shield radiation than that of lead. Based on the simulation, chloroprene rubber was mixed with a metal powder (bismuth or bismuth oxide) and a high specific gravity rubber was made. A tensile strength test was carried out on the rubbers irradiated to ⁶⁰Co γ -rays(0, 21, 51, 90kGy). From these results, it was found that the high specific gravity rubber containing bismuth or bismuth oxide, which is lead-free, was effective as a radiation shielding material.

Keywords Radiation shielding material, Simulation, Bismuth, High specific gravity rubber, Lead-free

1. はじめに

近年, 環境問題の高まりから, 鉛を利用したハンダや水道管の使用をさける動きが強まっている。放射線遮へい材においても, これまで主として鉛が使用されてきたが, 鉛に代わるものが求められつつある。現在, PET(陽電子断層法)に用いる放射性物質の遮へい容器としてタンゲステンが使用されているが, 鉛より比重が高いため, 容器が重くなる問題がある。

そこで, 鉛を使用せず, 鉛と同等以上の放射線遮へい効果があり, 環境上の問題がなく, 軽量な放射線遮へい材, およびその製造方法の開発を行った。

2. 方法

2.1 シミュレーションによる金属材料の評価

ある物質の遮へい効率は(1)式に示すように, 質量減弱係数¹⁾, 密度及び厚さから計算できる。

$$\text{遮へい効率} = \{1 - \exp(-\mu \cdot \rho \cdot t)\} \times 100 \quad \text{---(1)}$$

μ : 質量減弱係数 (cm²/g) ρ : 密度 (g/cm³)

t : 厚さ (cm)

63 種類の元素について, 遮へい効率計算シートを Excel 上に作成した。その際, 質量減弱係数については, 文献 1) に掲載されている原子減弱係数より計算して求めた。また, 密度については化学大辞典²⁾を参照した。

この計算シートを用いて, 金属材料とクロロプレンゴムの重量比が 10:1 で, 厚さ 2mm の高比重ゴムについて種々の (X) 線エネルギーに対する遮へい効率を求めた。

2.2 高比重ゴムの試作

クロロプレンゴムに加硫剤, 補強性充てん剤, 軟化剤等をロールにて混練りする。その未加硫ゴムにビスマス粉末又は酸化ビスマスを添加し更に混練りをした。

ただし, クロロプレンゴムに加硫剤, 補強性充てん剤等を混練りする場合ゴム自体の圧縮熱に加えて, ビスマス粉末同士の加圧接触により未加硫ゴムに高い発熱が生ずるので, 未加硫ゴムの中の加硫剤の作用によって架橋反応が急速に進行してしまう。このような急速な架橋反応はビスマス粉末を均一に分散させる妨げとなる。そこで加硫剤を混入した未加硫ゴムを冷却し, 冷却後再度ロールにてビスマス粉末を混入して均一に分散させた。ロール作業では, 最初は極少量ずつ投入して十分に分散させて, 徐々に投入量を多くした。

クロロプレンゴムとビスマス粉末および酸化ビスマスの配合比率(重量比)は, クロロプレンゴム 1 に対して 10 とし, それぞれ混練りして 2mm 厚のシート状にした後, 170 °C で 15 分間加硫して高比重ゴムを試作した。製造工程を図 1 に示す³⁾。

*1) 放射線応用技術グループ *2) (株)フジックス

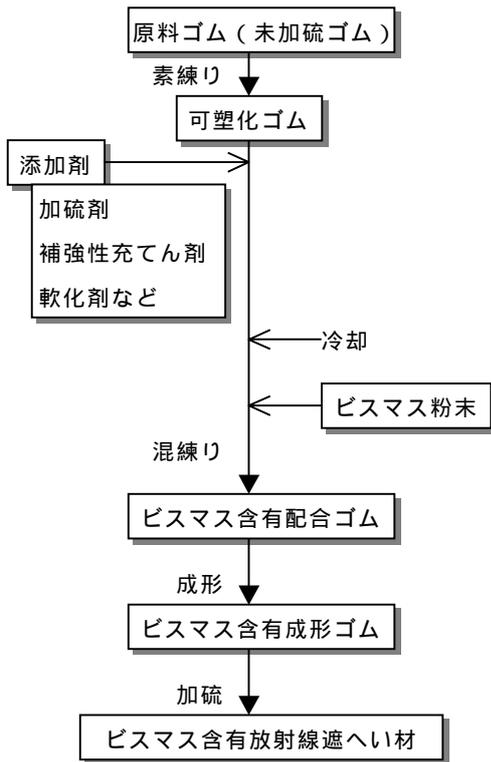


図1 放射線遮へい材の製造工程図

2.3 高比重ゴムの物性測定

10cm×10cmの高比重ゴムに⁶⁰Co線を照射(21,51,90kGy)した場合と照射を行わなかった場合について、硬さ試験および引張試験を行い、耐放射線性を評価した。

引張試験はJIS K 6251(加硫ゴムの引張試験方法)に定められている試験を行った。

硬さ試験はJIS K 6253(加硫ゴム及び熱可塑性ゴムの硬さ試験方法)に定められている国際ゴム硬さ試験を行った。国際ゴム硬さは、試験片表面に、下端が球面の垂直なプランジャを、一定の押込み力で押し付けたときのプランジャの押込み深さから、換算して得られる。

2.4 放射線遮へい効果および鉛当量の測定

放射線遮へい試験および鉛当量試験に使用した装置の概略図を図2に示す。

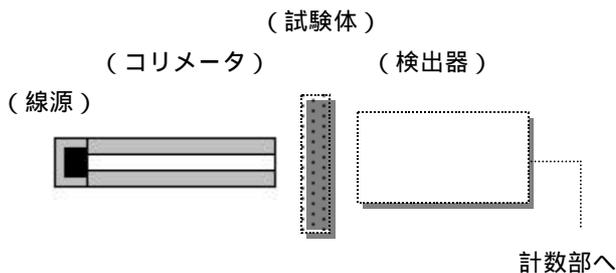


図2 放射線遮へい試験の概略図

鉛遮へい体内に⁶⁰Co線源(公称値370MBq)を設置し、10mmのコリメータで線束を絞った。検出器は電離箱(アロカ製シーベルトメータ)を用いた。X線による鉛当量試験は、JIS Z 4501(X線防護用品類の鉛当量試験方法)によると検出器として電離箱を使用するように記述されている。そこで、電離箱を用いて遮へい試験および鉛当量試験を行った。

線源と検出器との間に、試験体がない場合の計数値と、それらの間に試験体を置いた場合の計数値から遮へい効率を求めた。また、試験体の鉛当量は厚さ既知の鉛板により厚さと計数値の校正曲線をあらかじめ求め、試験体の計数値から計算により求めた。

3. 結果および考察

3.1 種々の元素の遮へい効率の計算

主な高比重ゴム(2mm厚)の遮へい効率を数種のエネルギーについて計算した結果を各含有金属元素の密度とともに図3に示す。

遮へい効率は原子番号の増加とともに単調に増加するのではなく、元素の周期表の周期に連動した変化がみられた。それは、密度と非常に相関がある。

同一厚さの場合、鉛に代わる遮へい材としてイリジウム、ロジウムなどの白金族が良く、ビスマスも次善の物質であることがわかった。また、低エネルギーの場合では、鉛より密度の低い物質でも遮へい材として利用できるという結果を得た。

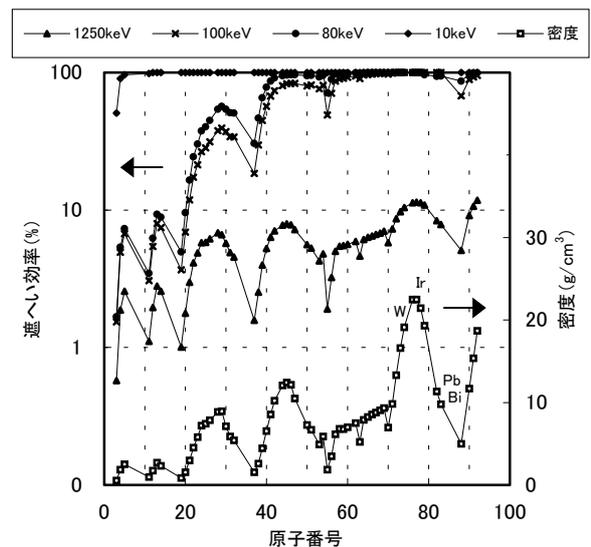


図3 高比重ゴムの遮へい効率と含有金属元素密度の関係

横軸は含有金属の原子番号を示す。遮へい効率は(X)線のエネルギー4種類の結果を示す。

3.2 高比重ゴムの物性

放射線照射前後の引張強さの変化について図4に示す。縦軸は引張強さの変化、横軸は照射量である。ビスマスは照射量の増加に対して、引張強さが増加する傾向であることがわかった。一方、酸化ビスマスに関しては、照射量の増加に対する引張強さの変化は顕著には現れなかった。

放射線照射前後の硬さについて図5に示す。縦軸は国際ゴム硬さ(IRHD)の差、横軸は照射量である。ビスマスおよび酸化ビスマスは照射量の増加に対して、共に硬さが増加する傾向であることがわかった。放射線照射後のデータを照射前と比較すると、引張強さ、また硬さが上昇していることから、放射線照射後は加硫が進行しているためであった。

以上のことから、照射後高比重ゴムは硬くなるが、原子力関係、X線関係の放射線遮へい材として十分に使用できるものと思われる。

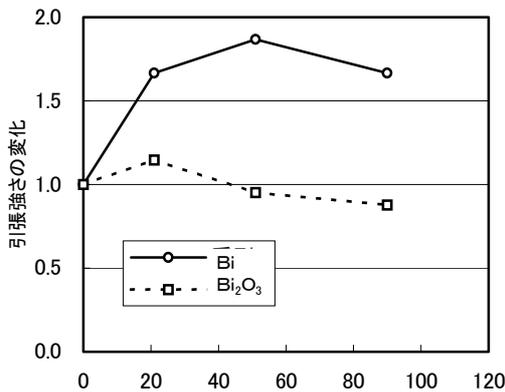


図4 放射線照射による高比重ゴムの引張強さの変化
縦軸は照射前後の引張強さの変化を示す。

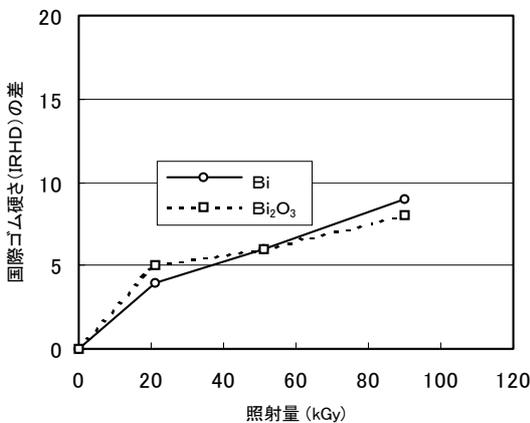


図5 放射線照射による高比重ゴムの国際ゴム硬さの差
縦軸は照射前後の国際ゴム硬さの差を示す。

3.3 遮へい効率および鉛当量の測定

JIS Z 4501 (X線防護用品類の鉛当量試験方法)に検出器として記述されている電離箱を用いて、遮へい効率および鉛当量を測定した結果を表1に示す。

鉛、ビスマス、酸化ビスマスの順に遮へい効率が減少する傾向であった。

鉛当量は、鉛およびビスマスについては、ほぼ同様の結果が得られた。酸化ビスマスについては、やや減少する傾向であった。

表1 高比重ゴムの遮へい効率および鉛当量

高比重 ゴム	遮へい効率 (%)	鉛当量 (mmPb)
鉛	7.7	1.3
ビスマス	7.6	1.3
酸化ビスマス	6.4	1.1

3.4 遮へい効率の実験値と計算値との比較

要求される遮へい効率の数値に応じて、金属のゴムへの混合割合、高比重ゴムの最適な厚さを Excel のゴールシーク機能を用いて、シミュレーションした。

高比重ゴム(鉛、ビスマス、酸化ビスマス)の遮へい効率を実測し、シミュレーション計算と比較した結果を表2に示す。

計算値と実験値の遮へい効率は、10%以内でほぼ一致した。このことより、シミュレーション計算の妥当性が確かめられた。したがって、要求される遮へい効率の数値に応じて、金属の混合割合、遮へい材としての最適厚さを、シミュレーションで算出することが可能となった。

表2 高比重ゴムの遮へい効率(計算値と実験値の比較)

高比重ゴム	重量比		密度 (g/cm ³)	厚さ (cm)	密度×厚さ (g/cm ²)	遮へい効率 (%)	
	金属	クロロ pren ゴム				計算	実験
鉛	10	1	7.42	0.20	1.48	8.4	7.7
ビスマス	10	1	6.79	0.20	1.36	7.9	7.6
酸化ビスマス	10	1	5.77	0.20	1.15	6.7	6.4

例えば、シミュレーション計算を用いると、鉛含有高比重ゴムでの遮へい効率 8.4%をビスマスあるいは酸化ビスマスで作成するには、ビスマスあるいは酸化ビスマスのゴムとの配合割合が、それぞれ 13:1 および 27:1 となる。また、配合割合を変化させずに厚さを変化させて同様の遮へい効率を得るには、それぞれ 2.1mm および 2.5mm となる。

3.5 ビスマスの遮へい効果

ある厚さの鉛と同じ遮へい効果を得るタングステンやビスマスの厚さを種々のエネルギーの場合について計算し、鉛に対する厚さの比を求めた。結果を図6に示す。

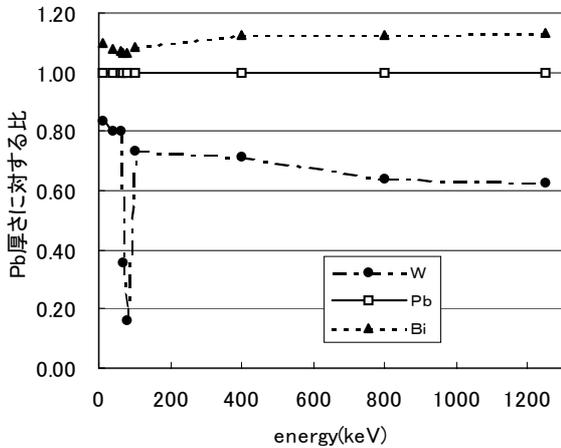


図6 同じ遮へい効果を示すのに必要なビスマスとタングステンの鉛に対する厚さの比

ビスマスは鉛より10%程度厚くなることがわかる。一方、タングステンは、すべてのエネルギーで鉛より20~30%薄くできることがわかる。

次に、ある厚さの鉛と同じ遮へい効果を得るタングステンやビスマスの厚さを種々のエネルギーの場合について計算し、鉛に対する重量比を求めた。結果を図7に示す。

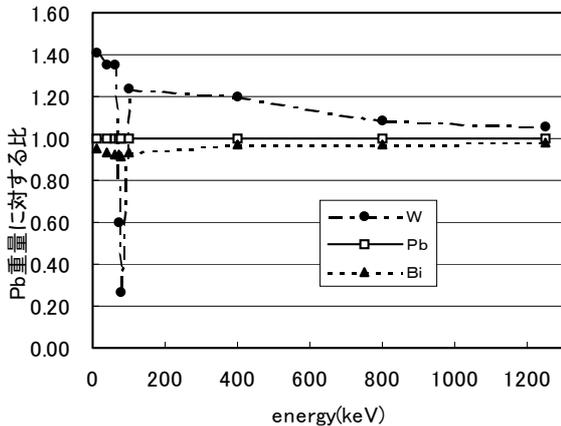


図7 同じ遮へい効果を示すのに必要なビスマスとタングステンの鉛に対する重量比

ビスマスは、すべてのエネルギーで鉛より軽くなることがわかる。また、タングステンでは80keV近傍でのみ非常に良い場合があるが、他のエネルギーではビスマスがタングステンに比べさらに軽くできることがわかる。これらの結果から、同じ遮へい効果を持つ容器を製作すると、ビスマスでは厚くはなるが重量が小さいものが可能であることがわかる。

現在、核医学の分野で使用されている放射性医薬品の遮へい容器として鉛あるいはタングステンが使用されている。高比重ゴム(ビスマス、酸化ビスマス)は、これらに置き代わる遮へい材として期待される。

また、原子力施設で点検時に使用されている鉛入りの遮へいマット(鉛当量で2から5mmPb程度)、空港の手荷物検査用X線装置用遮へい材の代替品としても製品化が可能である。

4. まとめ

鉛に代わる遮へい材として高比重ゴム(ビスマス、酸化ビスマス)が利用可能であることがわかった。

高比重ゴムの遮へい効率、実験と計算結果がほぼ一致した。このため、シミュレーション計算を用いることにより、最終製品に要求される性能に合わせて、原料の配合割合や遮へい材の厚さを精度よく決定することが可能となり、放射線遮へい材の効率的な製造が可能である。

参考文献

- 1) G.L.Simmons and J.H.Hubbell: Comparison of Photon Interaction Cross Section Data Sets. VII. BIGGS and LIGHT HILL (Rev.) ENDF/B(1973).
- 2) 大木道則他: 化学大事典, (株)東京化学同人(1989).
- 3) 中込雅晴他: 放射線遮へい材及びその製造方法, 特願 2001 - 327154(2001).

(原稿受付 平成14年8月1日)