メッシュ状タングステンのガンマ線および X 線に対する放射線遮蔽効果

八高 隆雄^{*1}, 坂本 智^{*1}, 大谷 忠^{*2}, 印南 輝久^{*3}

Shielding effect of tungsten mesh on gamma ray and X-rays irradiations

Takao YAKOU^{*1}, Satoshi SAKAMOTO^{*1}, Tadashi OHTANI^{*2} and Teruhisa INNAMI^{*3}^{*1} Yokohama National University

79-1 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 240-8501, Japan

^{*2} Tokyo Gakugei University

4-1-1 Nukuikitamachi, Koganei-shi, Tokyo 184-8501, Japan

^{*3} Eco Solutions Company Panasonic Co.

1048 Kadoma, Kadoma-shi, Osaka 571-8686, Japan

Received: 21 March 2017; Revised: 10 May 2017; Accepted: 18 July 2017

Abstract

The radiation shielding effects on the gamma ray with the effective energy $E_e = 661.7$ keV and X-rays with that of $E_e = 74$ keV and 38 keV were examined by using the tungsten-mesh (W-Mesh) made of the tungsten wires of 18 μ m and 50 μ m, as candidate for radiation shielding materials having breathability and flexibility. The results showed that the radiation shield rate “ η ” of W-Mesh sample material represented by mass “ Ma ” per unit area was almost the same value as in that of the tungsten plate and the lead plate, excepted for the irradiation of gamma-ray at the range under $Ma = 1$ kg/m². The value of η at the region of less than $Ma = 0.3$ kg/m² also transited to the negative range on the gamma ray irradiation. Therefore, we found that use of W-mesh in the region of $Ma = 0.3$ kg/m² or below should be avoided.

Key words : Materials properties, Tungsten, Radiation shielding, Mesh, X-ray, Gamma ray, Material design

1. 緒 言

放射線の遮蔽材料としては、コンクリート、水、鉛および鋼などが用いられているが (ICRP, 1971) (飯田, 1978), 融点が低く安価で加工が容易なこと, さらに厚さに対する遮蔽効果が高いことから鉛 (Pb) が多く利用されてきた. ところが, 鉛の密度が高くそれによって作られる製品の質量が大きくなること, Pb に対する毒性への嫌悪感の問題, および材料自体の強度が低いことなどの根本的な問題を有している (深野, 2014) (Pulford and Fergsson, 2016)(Cho et al., 2015). しかし, 適切な代替材が手配できないため現在でも Pb が放射線遮蔽材の中心である. Pb の融点が低いことや加工性が良いことは製作上の利点ではあるが, 材料の強度が弱いことは構造強度が必要とされる場合には欠点にも成りえる. そのため Pb はブロックや板, さらに粒子として高分子やガラスの材料に含浸させるような形で利用されている. Pb と同程度の放射能遮蔽材としてタングステン (W) が以前から注目されている (深野, 2014). ところが W は強度が高いものの融点が高く, 粉末冶金法で作製後の塑性加工性に乏しく, Pb 製品に比べて W 製品のコストを著しく高めていた. ところが, W 繊維の電球工業分野での需要に応じて塑性加工技術も進展し, 直径数 10 μ m の繊維が製作可能になってきた.

そこで, 本研究では 18 μ m および 50 μ m の W 繊維により作製した格子状のメッシュを用いて, その放射線遮蔽材料としての可能性を検討した. W メッシュ材は, Pb に比べて高価であるが, 毒性は認められず, 高温でも

十分な強度を有すること、さらにはメッシュ状に組むことによって柔軟な折り曲げ特性や通気性が得られ、被服用材料、袋の材料、あるいは移動機器や摩耗を伴う場所等では価格に見合う利用分野が期待できる。そこで特にメッシュ状タングステン繊維を中心にガンマ (γ) 線と X 線に対する遮蔽効果を調べた。

2. 実験方法

2・1 供試材

本研究では、タングステン (W) ワイヤーをメッシュ状にした 2 種類の W メッシュ材 (W-Mesh) を用いた。図 1 にはそれら W-Mesh の顕微鏡写真を示す。それらはいずれもパナソニック製であり、(a) の W-Mesh (18 μ m) は直径 18 μ m の W ワイヤーを平均 60 μ m 間隔のメッシュ状に編み込んだもの (W18J60)、および (b) の W-Mesh (50 μ m) は直径 50 μ m の W ワイヤーを平均 150 μ m 間隔のメッシュ状に編み込んだもの (W50C150) である。実験にはこれらの W-Mesh を 1 枚および、2 枚、3 枚、4 枚と重ねた状態での効果を調べた。ここでメッシュの網目間隔には、図 1 に示すようなばらつきがあるため、メッシュ同士を網目空間の位置を正確に合わせて重ねることは不可能であった。その為、ここではメッシュの網目を合わせることなく重ねて実験を行った。また比較のため板状のバルク材として、0.1 mm のタングステン板 (W-Plate (0.1 mm))、並びに 0.2 mm の板材として鉛 (Pb-Plate)、銅 (Fe-Plate)、銅 (Cu-Plate)、アルミニウム (Al-Plate)、およびタングステン (W-Plate (0.2 mm)) を用いた。

Fig.1 3D micrographs of (a) W-Mesh (18 μ m) and (b) W-Mesh (50 μ m).

2・2 照射実験

放射線照射実験は国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所の γ 線発生装置および X 線発生装置を利用した。 γ 線照射実験では、線源は 8 TBq の ^{137}Cs で、線源から丁度 10 mGy/h になる位置に電離箱型のセンサーを置き、センサーの周りを厚さ 50 mm の鉛で覆い、150 mm $\times$ 150 mm の開口部前面に試料を置き、各試料に対して 300 s の照射実験を行った。ここで電離箱による計測は気圧の影響を受けやすいので、実験中常に気圧の変動を監視した。実験開始前に数回の原点計測（試料を設定しない状態での線量計測）を行い、原点が安定した状態で計測を開始し、さらに実験の中間および最後に原点計測を行い、測定結果の原点変動を補正した。照射実験は各試料 6 回を繰り返した。ここで γ 線照射量は放射線汚染事故を起こした立ち入り規制区域の線量を想定した。また、この時の実行エネルギーは 661.7 keV であった。

一方、X 線に対する遮蔽効果は医学的な検査基準（日本工業規格, 1997）を参考にして、タングステンターゲットを用いて加速電圧 150 kV で電流 12.5 mA (0.5 mm の Cu フィルターと 0.5 mm の Al フィルター使用；線量は 15 Gy/h；実効エネルギー 74 keV) と加速電圧 100 kV で電流 10 mA (1.0 mm の Al フィルター使用；線量は 27 Gy/h；実効エネルギー 38 keV) の 2 条件で調べた。この場合にも電離箱型のセンサーを利用し、照射時間はいずれの条件でも 60 s であった。X 線の場合にも、原点が安定した状態で計測を開始し、実験の中間および最後の原点計測結果から、原点の変動を補正した。実験はこの場合にも 6 回繰り返した。

なお、放射線の遮蔽率 η は、サンプルが無いときの電離箱の測定値 I_0 と、サンプルを前に置いた時の測定値 I から、

$$\eta = (I_0 - I) / I_0 \quad (1)$$

として求めた。

3. 結果および考察

3・1 ガンマ線に対する W-Mesh の遮蔽性

W-Mesh (18 μ m) と W-Mesh (50 μ m) に対して、 ^{137}Cs の線量 10 mGy/h を 300 s 照射した時の W-Mesh の遮蔽率 η を調べた結果を図 2 に示す。結果は W-Mesh (18 μ m) では白丸 (○) で、W-Mesh (50 μ m) では白三角 (△) で示した。いずれの場合にも、図中には 6 回の実験の平均値、平均値 + 標準偏差および平均値 - 標準偏差を各 3 個のマークで示した。図 2 において、W-Mesh 1 枚をセンサーの前に置いた場合には、W-Mesh (50 μ m) では η は約 0.3% となりわずかに遮蔽の効果が表れている。これに対して W-Mesh (18 μ m) では η が -0.3% となり、メッシュを置くことによってセンサーへの放射線量が増加している。しかしメッシュを 2 枚、3 枚と重ねると増加量は減少し、W-Mesh (18 μ m) を 4 枚重ねると η はほぼゼロになった。一方 W-Mesh (50 μ m) では、メッシュを置くことにより放射線量が増加する現象は認められず、メッシュの枚数とともに η は増加している。ここで W-Mesh (18 μ m) をセンサーの前に置いた場合に放射線量が増加した理由は以下の様に考えられる。

タングステンの様な重金属では、アルミニウムなどの軽金属に比べて光電効果によって放射線を吸収する割合が高いが、照射する放射線の実効エネルギーが高くなるとコンプトン散乱が著しくなる (小佐古, 笹本, 2010) (飯田, 1978)。今、図 3 の様に、断面が円形のタングステンワイヤーに γ 線が入射した場合を考える。図 3(a) の A 点に入射した場合にはほぼ対称な前方散乱 (江藤他, 1965) となるが、図 3(b) の B 点の様な側面に入射した場合には前方散乱は大きく曲げられる。ワイヤーではこのような側面での前方散乱がほとんどである。その結果、側面で前方散乱した放射線はワイヤー間の空間を通してメッシュを透過できる。この現象はワイヤー径が細く、ワイヤー間隔が狭い W-Mesh (18 μ m) の方が著しくなる。さらに今回の γ 線の照射実験では、厚さ 50 mm の鉛ブ

Fig.2 Relationship between radiation shield rate η and number of W-Mesh at effective energy 661.7 keV. The values of η increases with the number of meshes, but the η of W-Mesh(18 μ m) showed a negative value at the number of mesh of 3 or less.

Fig.3 Schematic illustrations of the forward scatter of the radiation in the circular sections.

Fig.4 Change of radiation shield rate η with mass per irradiation area of specimen at effective energy 661.7 keV. The solid(black) circle, solid(black) square and open circle are the η of W-Mesh(18 μ m), that of W-Mesh(50 μ m), and that of various metals plates, respectively. The dotted line is the calculated η value of W-Plate, that is agree with the experimental value of W-Mesh at the range of over $M_a = 1 \text{ kg/m}^2$.

ロックで囲んだ 150 mm×150 mm の断面内に電離箱型のセンサーを設定し、測定するための W-Mesh は木枠で固定して鉛ブロック前に設置し、ガンマ線を照射した。すなわち γ 線は 150 mm×150 mm よりも広い面積に照射した。この測定している断面積よりも広い範囲に照射された γ 線が散乱されて測定空間 (150 mm×150 mm) に回り込んだ線量が透過線量として計測されたものと考えられる。W-Mesh (18 μ m)の方が側面での前方散乱がより著しく生じ、入射 γ 線よりも計測する放射線の方が強くなる現象が生じたものと考えられる。

ここで γ 線や X 線の様な光子は板状の金属に当たると光電効果やコンプトン効果によって物質に吸収および散乱されて、物質への透過を妨げられる (江藤他, 1965) (小佐古, 笹本, 2010)。このような場合の透過線量 I は、

$$I = I_0 \exp(-\mu_m \rho x) \quad (2)$$

で与えられる．ここで， I_0 は入射線量， μ_m は質量減弱係数， ρ は物質の密度，および x は物質の厚さである（小佐古，笹本，2010）．また ρx は単位照射面積当たりの質量になるのでこれを Ma と置き，式(1)の η との関係性を求めると，

$$\eta = 1 - \exp(-\mu_m Ma) \quad (3)$$

となる．従って η と Ma の関係をグラフ化すれば，同じ質量の下での放射線遮蔽率が比較できることになる．そこで，図2の結果に，各種金属板材の結果を含めて η と Ma の関係で整理したのが図4である．

図4において，黒丸（●）および黒三角（▲）はそれぞれ W-Mesh (50 μ m)および W-Mesh (18 μ m)の η の平均値を，白丸は板状金属の η 値を示す．また図中の点線はタングステンの質量減弱係数 $\mu_m = 0.0094 \text{ m}^2/\text{kg}$ として，式(3)を適用して求めた板状のタングステンの η 値である．ここで用いた μ_m はアイソトープ便覧の値($E_e = 600 \text{ keV}$ で $0.01093 \text{ m}^2/\text{kg}$ ， $E_e = 800 \text{ keV}$ で $0.008063 \text{ m}^2/\text{kg}$ ；日本アイソトープ協会 1984)ともほぼ一致している．図4の W-Mesh の値 η は，W-Mesh (18 μ m)と W-Mesh (50 μ m)の場合を含めて，第一次近似としては， Ma に対して連続して変化している．しかし，詳しくは $Ma = 1 \text{ kg/m}^2$ 以下では点線の W の板材の理論値から外れ， $Ma = 0.3 \text{ kg/m}^2$ 以下ではマイナスである．さらに，W-Plate (0.1mm)，W-Plate (0.2mm)および Pb-Plate (0.2mm)の η の実験値は点線の W 板材の計算値とほぼ一致しているが，Al-Plate (0.2mm)，Cu-Plate (0.2mm)および Fe-Plate (0.2mm)の η 値は点線の W-Plate の計算値より低い．従って，質量を重視した設計に対して利用する場合， $Ma = 1 \text{ kg/m}^2$ 以上であれば，W-Mesh は Pb-Plate や W-Plate と同様の放射線遮蔽性をもつとして利用できることが分かる．また，W-Mesh (18 μ m)の ^{137}Cs に対する遮蔽特性は1枚から3枚まで (Ma が 0.3 kg/m^2 以下)では負となり，入射した放射線がメッシュを通過することにより強められることになる．そのため，この範囲では W-Mesh の利用は避けるべきであることがわかる．

3・2 X線に対する W-Mesh の遮蔽性

W-Mesh (18 μ m)と W-Mesh (50 μ m)に対して実効エネルギー $E_e = 74 \text{ keV}$ （加速電圧 150 kV）の X 線を照射した時の遮蔽率 η と W-Mesh 枚数との関係を図5に，および $E_e = 38 \text{ keV}$ （加速電圧 100 kV）の X 線を照射した時の同様の関係を図6に示す．図5および図6のいずれにおいても，W-Mesh (18 μ m)および W-Mesh (50 μ m)の η の値は正であり，Mesh の枚数とともに η 値が増加している．さらに E_e が低いほど， η は大きくかつ W-Mesh (50 μ m)

Fig.5 Relationship between radiation shield rate η and number of W-Mesh at effective energy 74 keV. In any of meshes, the η values are positive.

Fig.6 Relationship between radiation shield rate η and number of W-Mesh at effective energy 38 keV. In any of meshes, the η values are positive.

と W-Mesh (18μm)との η 値の差は縮まっている。これらの結果は、いずれの W-Mesh も遮蔽材として有効に作用していることを示している。

図 7 および図 8 は X 線に対する各試料の遮蔽率 η と各試料の単位面積当たりの質量 M_a の関係である。いずれも図中の点線は W-Plate の結果を基に、W の板材が式(3)に従うとして求めた W-Plate の計算値である。この場合にも式(3)から質量減弱係数 μ_m を求めて利用した。Ee = 74 keV の場合には $\mu_m = 0.377 \text{ m}^2/\text{kg}$ (アイソトープ便

Fig.7 Change of radiation shield rate η with mass per irradiation area of specimen at effective energy 74 keV. The solid(black) circle, solid(black) square and open circle are the η of W-Mesh(18 μ m), that of W-Mesh(50 μ m), and that of various metals plates, respectively. The dotted line is the calculated η value of W-Plate, that is agree with the experimental value of W-Mesh in all the range.

覧では, $E_e = 60 \text{ keV}$ で $\mu_m = 0.3712 \text{ m}^2/\text{kg}$, $E_e = 80 \text{ keV}$ で $\mu_m = 0.7809 \text{ m}^2/\text{kg}$; 日本アイソトープ協会, 1984) であり, $E_e = 38 \text{ keV}$ の場合には $\mu_m = 1.075 \text{ m}^2/\text{kg}$ (アイソトープ便覧では, $E_e = 40 \text{ keV}$ で $\mu_m = 1.067 \text{ m}^2/\text{kg}$; 日本アイソトープ協会 1984) であった. 図 7 の $E_e = 74 \text{ keV}$ の X 線を照射した場合にも, 図 8 の $E_e = 38 \text{ keV}$ の X 線を照射した場合にも, 2 種類の W-Mesh の η 値は点線の W の板材の計算値とほぼ一致し, Al-Plate, Cu-Plate および Fe-Plate の η に比べて明らかに大きな値を示している. さらに W-Plate の計算値曲線上には W-Plate や Pb-Plate の結果もほぼのっており, 質量を基準に利用を考えるならば, W-Mesh の X 線遮蔽特性は W 板や Pb 板と同様なものとして扱えることを示している

Fig.8 Change of radiation shield rate η with mass per irradiation area of specimen at effective energy 38keV. The solid(black) circle, solid(black) square and open circle are the η of W-Mesh(18 μm), that of W-Mesh(50 μm), and that of various metals plates, respectively. The dotted line is the calculated η value of W-Plate, that is agree with the experimental value of W-Mesh in all the range.

4. 結 言

通気性および柔軟性を有する放射線の遮蔽材料の候補として, W-Mesh (18 μm)と W-Mesh (50 μm)のタングステンワイヤー製のメッシュに対して, ^{137}Cs による γ 線 (有効エネルギー $E_e = 661.7 \text{ keV}$) と X 線 ($E_e = 74 \text{ keV}$ (W ターゲットで加速電圧 150 kV, 電流 12.5mA) および 38 keV (W ターゲット加速電圧 100kV, 電流 10mA)) に対する放射線遮蔽率 η を調べ, 得られた結果を試料の単位面積当たりの質量 Ma に対して整理し, 以下の結論を得た.

- (1) 2 種類の W-Mesh に対する放射線遮蔽率の単位面積当たりの質量に対する変化は, $E_e = 661.7 \text{ keV}$ の γ 線に対する $Ma = 1 \text{ kg/m}^2$ 以下の条件を除けば, γ 線に対しても X 線に対しても, Pb や W の板材とほぼ同様の値をとる.
- (2) W-Mesh (18 μm) の γ 線に対する遮蔽率はメッシュ 1 枚から 3 枚まで (Ma が 0.3 kg/m^2 以下) では負の値が認められた. この範囲では W-Mesh の利用は避けるべきであることが分かった.

謝 辞

最後に, 放射線照射実験に協力された 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所・加

速器工学部静電加速器運転室主任研究員の石川剛弘氏に謝意を表する。

文 献

- Cho, J.H., Kim, M.S. and Rhim, J.D., Comparison of radiation ratios of nano-sized bismuth trioxide and molybdenum, Radiation effects and defects in solids, Incorporating Plasma Science and Plasma Technology, Vol.170 (2015), pp.651-658.
- 江藤秀雄, 熊取敏之, 飯田博美, 伊澤正實, 田中栄一, 吉澤康雄, 放射線の防護 (1965), pp11-64, 丸善.
- 深野重男, タングステンによる ^{192}Ir の遮蔽計算, Isotope News, No.720, (2014), pp.58-61.
- 飯田博美, 放射線安全管理学 (1978), pp.75-87, 通商産業研究会.
- ICRP (国際放射線防護委員会), 国際放射線防護委員会の 1990 年勧告, Publication 60 (1991), 日本アイソトープ協会.
- 日本アイソトープ協会, アイソトープ便覧改訂 3 版 (1984), pp.35-42, 丸善.
- 日本工業規格協会, 医療用 X 線装置通則, JIS4701 (1997).
- 小佐古敏荘, 笹本宣雄, 放射線遮蔽 (原子力教科書) (2010), pp.72-81, オーム社.
- Pulford, S. and Fergusson, M., A textile platform for non-lead radiation shielding apparel, The journal of the textile institute Vol.107 (2016), pp.1610-1616.

References

- Cho, J.H., Kim, M.S. and Rhim, J.D., Comparison of radiation ratios of nano-sized bismuth trioxide and molybdenum, Radiation effects and defects in solids, Incorporating Plasma Science and Plasma Technology, Vol.170 (2015), pp.651-658.
- Eto, H., Kumatori, T., Iida, H., Izawa, M., Tanaka, E. and Yoshizawa, Y., Protection of radiation (1965), pp11-64, Maruzen (in Japanese).
- Fukano, S., Shielding calculation of ^{192}Ir by tungsten, Isotope News, No.720, (2014), pp.58-61 (in Japanese).
- Iida, H., Radiation safety control science (1978), pp.75-87, Trading industry research company (in Japanese).
- International commission on radiological protection, Advice of International commission on radiological protection, ICRP Publication 60 (1991), Japan Radioisotope Association.
- Japanese industrial standards committee, general rule for medical X-ray equipment, JIS4701 (1997) (in Japanese).
- Japan Radioisotope Associate, Handbook of Radioisotope Revised 3rd edition (1984), pp.35-42, Maruzen (in Japanese).
- Kosako, T. and Sasamoto, N. ed., Radiation shelter (atomic textbook) (2010), pp.72-81, ohmsha (in Japanese).
- Pulford, S. and Fergusson, M., A textile platform for non-lead radiation shielding apparel, The journal of the textile institute Vol.107 (2016), pp.1610-1616.