

Ir-192 γ 線의 金屬에 對한 散亂分布에 關한 研究

高麗工業株式會社

朱 光 泰

Abstract

A Study on Scattering Distribution in Metal of Ir-192 Gamma-Ray

Gwang Tae Joo

Korea Industrial Testing Co., LTD., Seoul, Korea

The metal-plates (Aluminium, Copper, Lead) of change the variation thickness have been penetrated by the collimated beam ($450\text{mm} \times 4\text{mm}\varnothing$) of Gamma-ray from ^{192}Ir . Then, the scattered γ -ray dose in variable angle and the directly transmitted γ -ray dose were measured using the electrometer of ionization chamber.

The results were summarized as follows :

1. Obtained the mass attenuation coefficients of Al ; $0.0937\text{cm}^2\text{g}^{-1}$; Cu ; $0.0937\text{cm}^2\text{g}^{-1}$; pb ; $0.244\text{cm}^2\text{g}^{-1}$.
2. Total intensity of front scattered γ -ray follow the order of Al > Cu > pb.
3. The scattered γ -ray intensity with the lager angle of scattering was saturated after increase rapidly, and the scattering angle of the more larger was decreased.
4. The scattered γ -ray intensity through plates of aluminium or copper was saturated after increase with thicker scatterer, and the intensity was decreased at the more thicker. But the variation of scattered γ -ray dose in the lead plate made the fewest than Al and Cu.
5. The ratio of the scattered γ -ray dose and the directly transmitted γ -ray dose was saturated after increase with the thicker scatterer, and the scatterer of the more thicker was decreased.

Degree of total intensity in these ratios was followed the order of Cu > Al > Pb.

目 次

- I. 緒 論
- II. 理論的 背景

III. 實驗裝置 및 實驗方法

IV. 實驗結果 및 檢討

V. 結 論

參考文獻

I. 緒 論

放射線과 物質과의 相互作用에 關한 研究와 資料는 尙당히 많이 究明되어 있으나 特定한 核種의 放射線에 對한 相互作用에 關하여서는 研究할 餘지가 많다. 著者는 工業用 非破壞 放射線 透過試驗에 使用^{4,6,9,17)} 되고 있는 Ir-192 放射性 同位元素에 對하여 그 透過에 따르는 強度 分布를 調査하였다.

Ir-192는 0.11 MeV에서 1.38 MeV에 이르는 많은 에너지의 γ 선을 放出하는 것으로서⁵⁾ 原子番號와 密度의 差異가 있는 Al, Cu, Pb 金屬板을 透過시켰을 때의 γ 線의 減衰로 因한 散亂量과 그때의 散亂角 分布를 電離函 Electrometer 로 測定하고 그 相關關係를 調査 檢討하므로써 Ir-192 利用^{1,4,17)}에 따르는 資料를 提供하고자 한다.

II. 理論的 背景

1. Ir-192 放射性 同位元素의 特性

Ir-192는 주로 $^{191}_{77}\text{Ir}(n, \gamma)$ 反應으로 ^{192m}Ir 가 生成되고 이것은 半減期 1.42 分과 에너지 0.058 MeV의 γ 線을 放出하여 ^{192}Ir 가 된다.

^{192}Ir 는 95.5%의 β^- 崩壞와 4.4%의 軌道電子

捕獲으로 β^+ 를 放出한 後 0.11MeV에서 1.38MeV까지에 이르는 넓은 領域의 γ 線을 放出하여 安定한 $^{192}_{78}\text{Pt}$ 와 $^{192}_{76}\text{Os}$ 가 되는 同位元素이며 그 崩壞形式과 에너지는 Table 1과 같다.⁵⁾

그 에너지의 強度 分布는 대부분 310KeV, 470KeV, 600KeV에 集中되고 있으며^{2,17)} 半減期는 74.4 日이고 半價層은 DUPONT CRONEX NDT HANDBOOK에 의하면 Al ; 47.5 mm, Steel ; 15.25 mm, Pb ; 4.75 mm이고⁹⁾ 非破壞 檢査 便覽에 의하면 Al ; 24 mm, Steel ; 8.5 mm, Pb ; 1.2 mm로 報告되어 있으며⁴⁾ 1Ci의 點線源으로 부터 1 m 거리에서의 空氣中 γ 線量率은 0.55 r/hr의 다.^{9, 17, 8)}

2. 測定理論

본 實驗의 γ 線 強度 測定에는 氣體 ion化 方法에 依한 電離函 Electrometer 를 使用하였다.^{6,12,18)}

Electrometer는 Fig.1과 같은 回路를 基本으로 하고 있으며 檢査 V를 가진 電離槽內 入射한 γ 線은 전리기체와 상호 작용으로 ion化 作用을 일으킨다.^{14,16)} 이때 γ 線 強度 X[r]은

$$X[r] = \frac{Q[c]}{V[cm^3]} \cdot 3 \times 10^9 [esu/c] \cdot \frac{T[k] \cdot 760}{273 \cdot P[Torr]}$$

Table 1. Ir-192의 崩壞形式 및 放射線 Energy

崩壞形式 및 存在比	放射線 Energy (MeV)	
	β	γ
β^- (95.5%)	0.672 (46%)	0.1363 (+0.27), 0.2959 (+31.9), 0.3084 (+35.5), 0.3165 (+100), 0.417 (+0.91)
	0.536 (41%)	0.468 (+57.7), 0.5886 (+5.34), 0.6044 (+9.70), 0.6124 (+5.84), 0.885 (+0.33)
	0.24 (8%)	1.063 (+0.054)
EC (4.4%) β^+	0.24 (1.5×10^{-5} %)	0.2013 (+4.7), 0.2507, 0.2834, 0.3744 (+0.7), 0.4847 (+4.25), 0.4891 (other γ -rays)
		0.110, 0.1560, 0.173, 0.2815 (+0.33), 0.320, 0.401, 0.438, 0.745, 0.760, 0.785, 1.056, 1.090, 1.157, 1.200, 1.360, 1.380

“+” ; 放射線의 相對強度比

EC ; 軌道電子捕獲

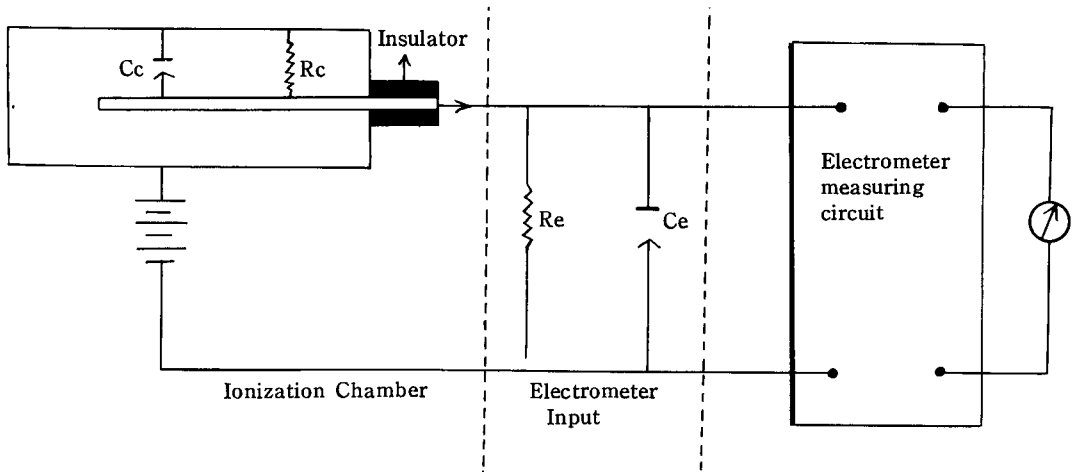


Fig. 1. Basic Circuit of Electrometer

으로 표시되며 入射 γ 線에 의하여 ion 化된 電荷量 $Q [c]$ 는

$$Q [c] = \frac{X[r] \cdot V [cm] \cdot 273 \cdot P [Torr]}{3 \times 10^9 \cdot T [k] \cdot 760}$$

로 나타낸다. 이 式을 다시 照射線量率 $[dx/dt]$ 과 電流 $[I]$ 로 表示하면,

$$I [A] = \frac{dx/dt [r/hr] \cdot V [cm] \cdot 273 \cdot P [Torr]}{3 \times 10^9 \times 3600 \cdot T [k] \cdot 760}$$

된다.

Fig. 1의 回路에서 合成抵抗 R 은

$$R = R_e R_c / (R_e + R_c)$$

가 되며 合成容量 C 는

$$C = C_e + C_c$$

가 된다. Electrometer의 入力 電壓 V 와 電離槽의 電流 I 와의 사이에는

$$RC \frac{dv}{dt} + V = RI$$

의 關係가 成立되며 電離槽의 電流가 I_1 에서 I_2 로 變換될 경우에는

$$V = RI_2 - R(I_1 - I_2)e^{-\frac{t}{RC}}$$

로 表示된다. 여기서 Rc 는 이 回路의 時定數 (time constant) 이고 反應速度에 關係한다. ^{10, 16, 19)}

3. γ 線과 物質과의 相互作用

Ir 192 γ 線이 物質속을 通過할 때는 주로 原子内

電子와의 相互作用에 의하여 吸收 또는 散亂되어 그 에너지를 잃는다 ^{13, 14)}

그 吸收과정을 살펴보면 두께 χ 인 物質을 透過하기 前의 γ 線強度를 I_0 , 透過한 後의 強度를 I 라 할때

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

로 表示되며 半價層 $d_{\frac{1}{2}}$ 는

$$d_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

가 된다. ³⁾ 여기서 常數 μ 는 線吸收係數이며 실제 吸收係數는 物質의 密度 P 로 나누어진 質量吸收係數 μ_m 가 使用된다. ^{5, 8, 14, 16)}

Ir-192 γ 線 에너지 領域에서는 電子對生成이 없으므로 質量吸收係數 μ_m 은 光電効果와 Compton 効果에 의한 두 개의 吸收係數 合으로 이루어지며 다음 式으로 表示된다. ^{5, 10, 16)}

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \left(\frac{\sigma}{\rho}\right) fc + \left(\frac{\tau}{\rho}\right) fr$$

여기서 σ 는 Compton 吸收係數, τ 는 光電吸收係數이며 fc 와 fr 는 入射 γ 線 에너지 $h\nu_0$ 의 fraction 을 나타내는 Compton 効果와 光電効果의 dimension 이 없는 因子이다.

$\left(\frac{\sigma}{\rho}\right) fc$ 는 衝突微分斷面積에 대한 Klein-Nishina 의 法則 ^{3, 10, 11, 13, 14)} 에 의거하면

$$\left(\frac{\sigma}{\rho}\right) fc = \frac{\sigma_a}{\rho} = \frac{\sigma}{\rho} - \frac{\sigma_s}{\rho}$$

가 된다. 여기서 Ta_{ν} 는 反跳電子의 平均에너지, $e\sigma_a$ 는 反跳電子로 因한 平均散亂斷面積, $e\sigma$ 는 Compton 效果로 因한 總衝突斷面積을 나타내며 다음 關係가 成立한다.

$$e\sigma_s = \int_0^\pi \frac{\pi d(e\sigma_s)}{d\Omega} 2\pi \sin\theta \cdot d$$

$$= \pi r_0^2 \left[\frac{\ln(1+2\alpha)}{\alpha^3} + \frac{2(1+\alpha)(2\alpha^2-2\alpha-1)}{\alpha^2(1+2\alpha)^2} + \frac{8\alpha^2}{3(1+2\alpha)^2} \right] \frac{\text{cm}^2}{\text{electron}}$$

$$e\sigma = \int_0^\pi \frac{d(e\sigma)}{d\Omega} 2\pi \sin\theta \cdot d$$

$$= 2\pi r_0^2 \left\{ \frac{1+\alpha}{\alpha^2} \left[\frac{2(1+\alpha)}{1+2\alpha} - \frac{\ln(1+2\alpha)}{\alpha} \right] + \frac{\ln(1+2\alpha)}{2\alpha} - \frac{1+3\alpha}{(1+2\alpha)^2} \right\} \frac{\text{cm}^2}{\text{electron}}$$

$$e\sigma_a = e\sigma - e\sigma_s = 2\pi r_0^2 \left\{ \frac{2(1+\alpha)^2}{\alpha^2(1+2\alpha)} - \frac{1+3\alpha}{(1+2\alpha)^2} - \frac{(1+\alpha)(2\alpha^2-2\alpha-1)}{2^2(1+2\alpha)^2} - \frac{4\alpha^2}{3(1+2\alpha)^2} - \left(\frac{1+\alpha}{\alpha^3} - \frac{1}{2\alpha} - \frac{1}{2\alpha^3} \right) \ln(1+2\alpha) \right\} \frac{\text{cm}^2}{\text{electron}}$$

여기서 $r_0 = \frac{e^2}{m_0 c^2} = 2.818 \times 10^{-12} \text{ cm}$ 이고

$$\alpha = \frac{h\nu_0}{m_0 c^2} \text{ 이다.}$$

Compton 效果로 因하여 散亂된 γ 線의 綠量 對角 分布는

$$\frac{d(e\sigma)}{d} = \frac{d(e\sigma)}{d\Omega} 2\pi \sin\theta \frac{\text{cm}^2}{\text{electron} \cdot \text{radian}}$$

으로 表示되며 10) γ 線의 入射에너지 $h\nu_0$ 가 3MeV 이고 散亂角 θ 가 20° 근처에서 前方 散亂線의 強度가 最大가 되며 $h\nu_0$ 가 적어질수록 角度는 더욱 커진다¹⁰⁾ 또한 $h\nu_0$ 와 散亂 γ 線의 에너지 $h\nu$ 와의 사이에는

$$h\nu = \frac{h\nu_0}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)}$$

로 되고 $h\nu_0$ 와 反跳電子의 에너지 T 와의 사이에는

$$T = h\nu_0 \left[1 - \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right]$$

로 表示된다^{3,14,16)} 光電效果로 因한 $f\tau$ 는

$$f\tau = \frac{h\nu_0 - Be}{h\nu_0}$$

이다 여기서 Be 는 光電子가 原子로 부터 放出되기 전의 結合에너지로서 電磁波나 Auger 電子를 放出한다

電磁波를 放出한다면

$$f\tau = \frac{h\nu_0 - \phi Be}{h\nu_0}$$

Table 2. Attenuation coefficients calculated from graph of Evans (Unit : $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$)

Attenuation factor	Al		Cu		Pb	
	0.3MeV	0.4MeV	0.3MeV	0.4MeV	0.3MeV	0.4MeV
Photoelectric absorption (τ/ρ)			0.011	0.004	0.263	0.131
Compton absorption (σ_a/ρ)	0.028	0.029	0.027	0.028	0.025	0.025
Compton scattering (σ_s/ρ)	0.076	0.064	0.070	0.060	0.066	0.052
Rayleigh scattering (σ_r/ρ)			0.004	0.002	0.024	0.012
Total absorption coefficient (μ_a/ρ)	0.028	0.029	0.038	0.032	0.288	0.156
Total attenuation coefficient (μ/ρ)	0.104	0.093	0.112	0.094	0.378	0.220

가 된다. 여기서 ρ 는 平均螢光 yield로서 原子番號 Z와 함께 增加하는데 Ne에서는 0.01, Cu는 0.4, Pb는 0.95의 값을 가진다. 電磁波는 平均自由行路가 짧기 때문에 다른 原子内에서 再吸收되고 吸收體가 어느 정도의 두께를 가진다면 fc의 有效置는 1이 된다.

光電吸收는 原子 전체가 作用되므로 原子衝突斷面積 a_{τ} 를 使用하며, 그 근사치는

$$a_{\tau} \left[\frac{cm^2}{atom} \right] \approx \text{const} \frac{Z^4}{(hv)^2}$$

으로 알려져 있으며 16) 光電效果만 있는 곳의 $\frac{\mu}{\rho}$ 는

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{N}{A} a_{\tau}$$

의 關係式이 된다.

質量減衰係數 $\frac{\mu}{\rho}$ 는 質量吸收係數 $\frac{\mu_m}{\rho}$ 에다 質量Compton 散亂係數 $\frac{\sigma_s}{\rho}$ 와 質量 leyleigh 散亂係數 $\frac{\mu_m}{\rho}$

가⁷⁾ 더하여진 것으로 0.3 MeV에서 0.4 MeV에 이르는 質量減衰係數 因子들을 Evans 圖表로 부터 Table 2와 같이 대략적인 값을 算出하였다. 5,7,10,16,18)

III. 實驗裝置 및 實驗方法

1. 實驗裝置와 材料

1) Ir 192 散亂 實驗裝置; Fig. 2와 같은 設計로 製作

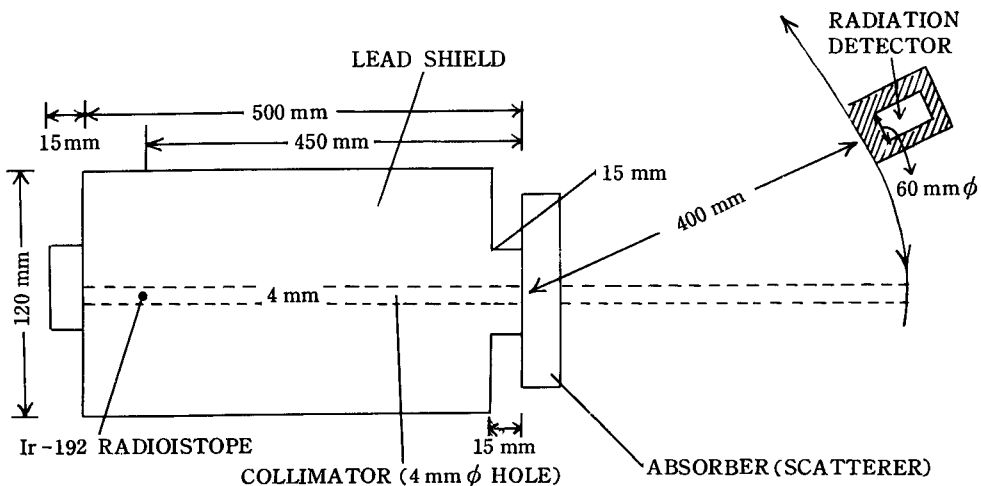


Fig. 2. Scattering apparatus & arrangement

2) 放射性 同位元素; Ir - 192

Activity : 3Ci

Focus : 0.02" x 0.1"

3) 散亂體 (吸收體);

Material	Z	A	ρ	Thickness
ALUMINIUM	13	26.98	2.7	5 mm TO 80 mm
COPPER	29	63.54	8.9	4.7 mm TO 47 mm
LEAD	82	207.21	11.3	0.1 mm TO 11.4 mm

4) 放射線 檢出器

Model; VICTOREEN ELECTROMETER 500

Precision; Within 0.01% of full scale.

Accuracy, Current & charge measurements

; Within 0.5% of full scale.

Input Impedance; Greater than $10^4 \Omega$

Input off set current; Less than $3 \times 10^{-15} A$

Amplifier Gain; $> 10^5$

Response Time; 2.3 μs

Decay Constant of Integrating Capacity;

$2 \times 10^6 \mu s$

電離槽 形態; Coaxial Cylinder

電離槽 體積; 33cc for directly transmitted γ -ray.

330 cc for Scattered γ -ray.

2. 實驗方法

Fig. 2와 같이 散亂 裝置內에 Ir-192 γ 線源을 配 置시키고 γ 線의 平行 線束을 얻기 위하여 2) Hole이 4 mm ϕ 이고 長이가 450 mm인 Collimator 를 使用하 였으며 Collimator 끝에 10 cm \times 15 cm 크기의 Al, Cu, Pb 散亂 金屬體를 設置하였다.

散亂體 後面의 Collimator 끝으로 부터 40 cm 거 리에 放射線 檢出器를 놓고 散亂體의 厚께를 變動시 키면서 直接透過된 γ 線量率과 角度變化에 따른 散亂 線量率을 電離函 Electrometer 로 測定하였다.

IV. 實驗結果 및 檢討

1. 金屬內에서 Ir-192 γ 線의 減衰

45 cm의 Collimator 를 通過한 平行 線束으로부터 40 cm 거리에서의 最初의 強度 I_0 는 360mR/10min 으로 測定되었고 金屬別 厚께 變化에 따라 直接透過 된 線量率 I 의 값을 얻은 後 I/I_0 와 厚께와의 關 係曲線을 semilog paper 에 作圖한 것이 Fig. 3 이다

Fig. 3에서 透過 γ 線의 強度는 透過 物質의 厚께가 두꺼워짐에 따라 指數函數의으로 減少되어 減衰法則의 關係式^{3,14,16}

$$\log(I/I_0) = -\mu x$$

를 만족시키며 透過物質의 種類에 따라 μ 만 다르거나 타난다.

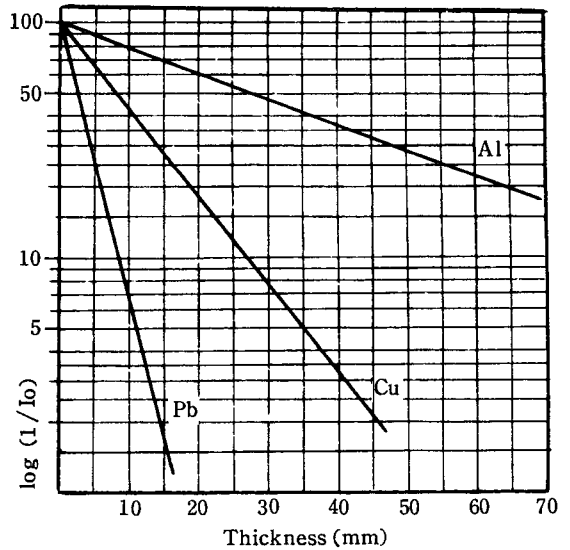


Fig. 3. Attenuation curve

Fig. 2에서 各 金屬의 半價層 $d_{1/2}$ 는 Al ; 27.5 mm, Cu ; 8 mm, Pb ; 2.5 mm이며 質量減衰係數 μ_m 은

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\ln 2}{\rho \cdot d_{1/2}}$$

의 關係^{3,14,16}로 부터 Al ; 0.0937 cm^2/g , Cu ; 0.0973 cm^2/g , Pb ; 0.244 cm^2/g 의 값을 얻었다.

文獻에 報告되어 있는^{4,9} 半價層으로부터 算出된 質量減衰係數와 이에 해당하는 γ 線 에너지의 범위^{5,10} 를 本 實驗과 比較하여 본 것은 Table 3 과 같다.

Table 3. Ir-192 特性에 對한 文獻과의 比較

文 獻 \ 特 性	元 素	半價層 (cm)	質量吸收係數 (cm^2/g)	入射 γ 線 energy 범위 (MeV)
DUPONT CRONEX NDT HANDBOOK (USA)	Al	4.75	0.054	1.0 ~ 1.5
	Pb	0.475	0.0578	0.5 ~ 0.6
非破壞檢査便覽 (日本)	Al	2.4	0.107	0.2 ~ 0.3
	Pb	0.12	0.511	0.2 ~ 0.3
本實驗 結果	Al	2.75	0.0937	0.3 ~ 0.4
	Pb	0.25	0.244	0.3 ~ 0.4
	Cu	7.5	0.0973	0.3 ~ 0.4

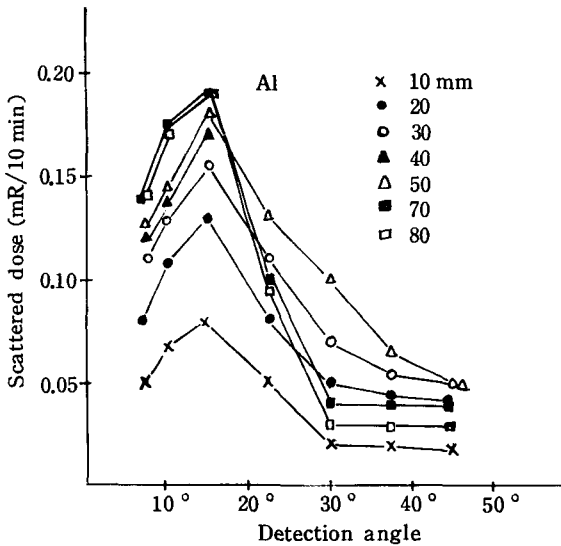


Fig. 4. Relation between the detection angle and the scattered γ -ray dose through aluminium

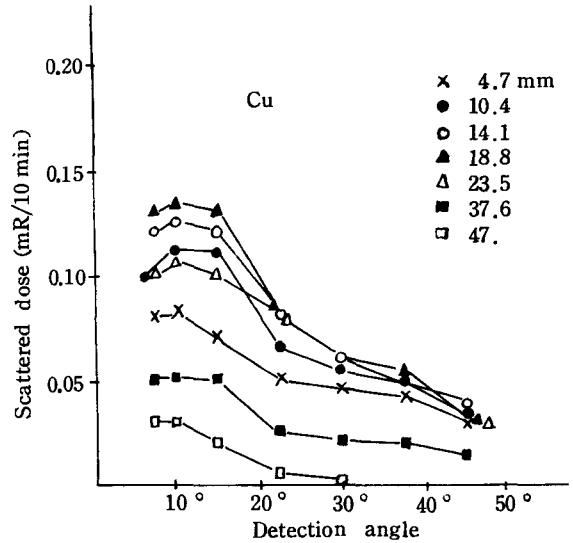


Fig. 5. Relation between the detection angle and the scattered γ -ray dose through copper

여러가지 에너지를 放出하는 Ir-192의 質量減衰係數는 그 平均에너지 범위에 해당함을 알 수 있었다.

2. 散亂體 두께에 따른 散亂 強度의 分布

散亂體 두께에 따른 散亂強度에 대한 角의 分布를 330 cc의 電離槽를 使用하여 測定한 結果는 Fig. 4, 5, 6과 같다.

전체적인 散亂強度를 세 金屬에서 比較할 때 Al > Cu > Pb의 順으로 되어 質量減衰係數가 적을수록 散亂線量이 많아졌으며 특히 Pb는 상당히 낮음을 나타내고 있다.

角度變化에 따른 強度 分布는 자기 다르며 어느 정도의 角度 變動에는 強度가 급속히 增加한 후 더욱 角이 커짐에 따라 減少하는 추세를 보이고 있으며 最高強度值에서의 角度는 Al에서 15°前後, Cu는 10°前後, Pb는 7.5° 보다 적은 곳에서 나타나고 있다.

散亂體의 두께가 두꺼워짐에 따라 散亂強度는 갑자기 增加하여 飽和值를 이룬 후 減少하는 추세를 나타내며 散亂量이 많은 角度범위에서 Al은 30 mm부터 80 mm까지, Cu는 15 mm 前後, Pb는 1.8 mm에서 3.2 mm 정도에서 飽和值를 이루고 더욱 角度가 커짐에 따라 線量은 두께의 增加와 함께 減少하는 경향이 있는데 이것은 相互作用하는 物質의 增加로 인한 吸收가 많아지기 때문이며 두께 變化에 따라 線量 變化가 적어지는 것은 에너지가 큰 散亂線이 주로 作用되기 때문이다.^{1,2)}

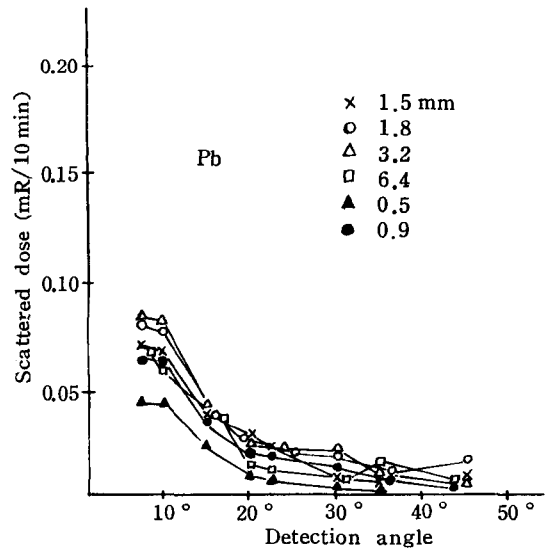


Fig. 6. Relation between the detection angle and scattered γ -ray dose through lead

3. 透過 γ 線 強度에 對한 散亂 強度의 比(S/D)

散亂體 種類와 두께 變化에 따라 直接 透過한 γ 線量과 散亂 線量과의 關係는 Fig. 3의 減衰曲線으로부터 算出하여 얻어진 線量값 D와 Fig. 4, 5, 6의 散亂強度에 對한 角 分布量 S와의 比로 求한 結果는 Fig. 7, 8, 9와 같다.

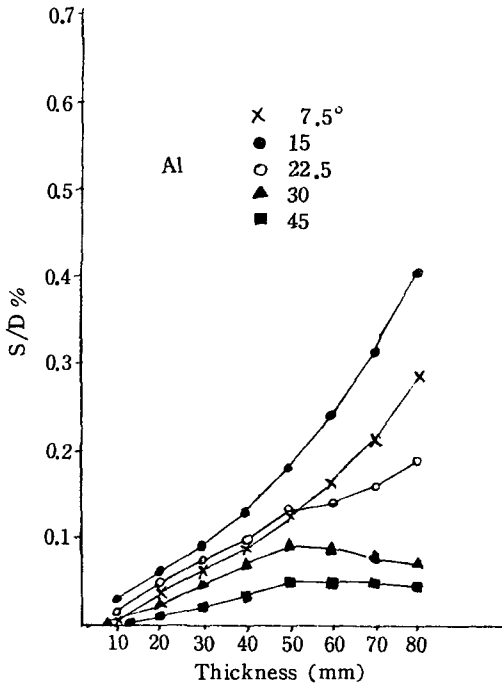


Fig. 7. Relation between the thickness of scatterer and S/D ratio for aluminium (S ; Scattered γ -ray dose, D; Directly transmitted γ -ray dose)

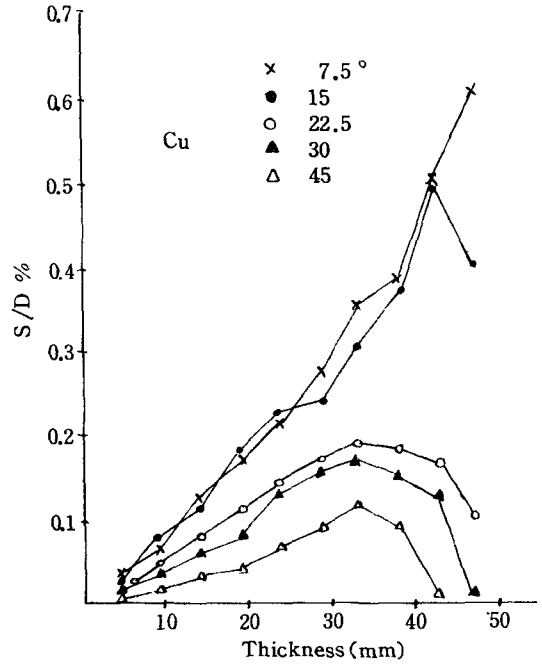


Fig. 8. Relation between the thickness of scatterer and S/D ratio for copper (S ; Scattered γ -ray dose, D; Directly transmitted γ -ray dose)

Fig. 7,8,9 에 의하면 散亂角이 적은 곳에서 두께가 두꺼워질수록 S/D는 증가하나 角度가 約 30° 以上으로 커지는 경우에는 두께와 함께 서서히 증가하여 飽和值를 이루었다. Cu는 角度가 적을수록 S/D와 그 最高值는 커지면서 두꺼운 곳으로 移動하고 있으며 最高值以後는 두께 증가와 함께 급속히 減少하는 추세를 보였다. Pb에서는 두께와 함께 증가한 후 減少하나 Al이나 Cu보다 상당히 적은 값을 나타내고 있어 直接透過 γ 線量에 對하여 散亂量이 상당히 적게 나타났다.

세 金屬을 比較할 때 S/D값의 크기는 Cu > Al > Pb의 순서이었으며 最高 散亂 強度를 나타내고 있는 角度에서의 S/D값은 크고 散亂體 두께도 두꺼워지고 있었다. Al과 Cu의 散亂體 두께가 더 두꺼워졌다면 S/D값은 어느 두께 한도내에서 飽和值를 이룬 후 減少될 것으로 예측되며 감소 추세는 Cu가 Al보다 심할 것이다.

V. 結 論

Ir - 192에서 放出되는 γ 線이 Al, Cu, Pb 金屬板

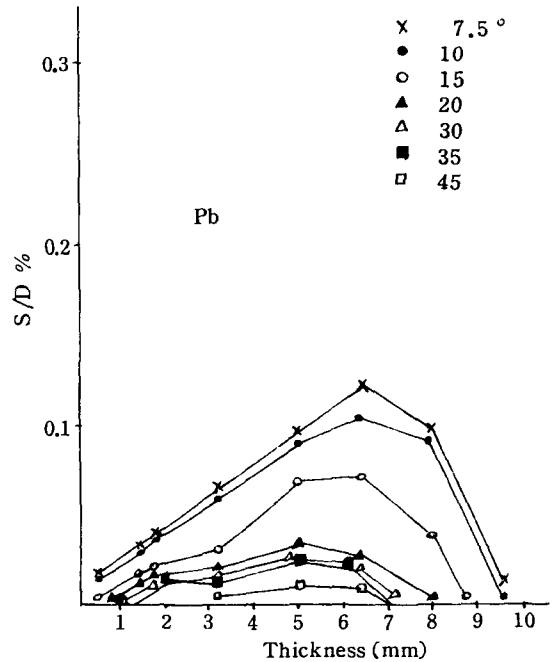


Fig. 9. Relation between the thickness of scatterer and S/D ratio for lead (S ; Scattered γ -ray dose, D ; Directly transmitted γ -ray dose)

을 通過한 後의 γ 線 強度의 分布를 電離函 Electrometer 로 測定 檢討한 바 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 質量減衰係數는 Al ; $0.0937 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$, Cu ; $0.0973 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$, Pb ; $0.0244 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ 의 값을 얻었다.
2. 前方散亂 γ 線 強度의 分布量은 Al > Cu > Pb 의 順이다.
3. 前方散亂角이 커짐에 따라 散亂 強度는 급속히 增加하여 飽和值를 이룬 후 減少하였다.
4. Al 과 Cu 는 散亂體의 두께와 함께 散亂線 強度는 增加하여 飽和值를 이룬 후 減少한데 比하여 Pb 는 散亂 強度의 變化가 적었다.
5. 直接透過 γ 線 強度에 對한 散亂 強度의 比는 두께가 커짐에 따라 增加하여 飽和值를 이룬 후 減少하였으며 그 크기는 Cu > Al > Pb 의 順으로 되었다.

參 考 文 獻

1. 吉田純一郎 : 散亂線による透過寫眞의 撮影, 日本非破壞檢査, 第2卷10號.
2. 辻本忠, 桂山辛典 : 散亂ガンマ線의 測定, 日本非破壞檢査, 第20卷3號, 第21卷9號.
3. 竹井力 : 放射線物理學, 南山堂, p87 ~ 106, 1979.
4. 日本非破壞檢査學會 : 非破壞檢査 便覽, 日刊工業新聞社, p134, 202, 1975.
5. 日本アイソトープ協會 : アイソトープ便覽, 丸善株式會社, p81 ~ 90, 1977.
6. 日本電氣學會 : 放射線工學, 科學圖書印刷(株), p37, 38, 403, 1971.
7. ASM : METALS HANDBBK VOL 11, Ameril-an metals society p.111, 1976.
8. D. J. REES : HEALTH PHYSICS, Butterworth, p. 81-82, 1967.
9. DUPONT : CRONEX NDT HANDBOOK, p.49, 1979.
10. FRANK H. ATTIX : RADIATON DOSIMETRY, ACADEMIC PRESS, NEW YORK, p. 139, 140, 142, 104-112, 125-127, 1968.
11. GREEN : Nuclear Physics, Mc GRAW HILL BOOK Co, p. 260, 1955.
12. GREEN F. KNOLL : RADLATION DETECTION AND MEASUREMENT, JOHN WILEY & SONS, p. 125, 1979.
13. HARALD A. ENGE : NUCLEAR PHYSICS, ADDISON - WESLEY PUBLISHING Co, p. 243, 1966.
14. IRVING KAPLAN : NUCLEAR PHYSICS, ADDISON - WESLEY PUBLISHING, p. 44, 68, 235, 405 ~ 407, 417, 1969.
15. LEONARD I SHIFF : QUANTUM MECHANICS, HCGRW - HILL LTD, p. 422, 530, 1968.
16. RALPH E. LAPP HOWARD : NUCLEAR RADIATION PHYSICS, PRENTICEHALL INC, p. 13, 235, 239, 241, 1972.
17. ROBERT C. MCMASTER : NON - DESTRUCTIVE TESTING HANDBOOK VOL I, 1977.
18. U. S. DEPT OF H. E & WPHS : Radiological Health Handbook, REVISED EDITIAN, p. 137, 1970.
19. Willian J. Price : Nuclear Radiation Detection, Mc Graw - Hill Book Co, p. 165, 171, 187, 1964.