



Title	RaおよびCo60 γ 線の遮蔽についての考察とその計算圖表
Author(s)	塚本, 憲甫; 尾内, 能夫
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1954, 14(3), p. 190-196
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/16997
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

Ra および Co^{60} γ 線の遮蔽についての 考察とその計算圖表

癌研究會附屬病院放射線科

塚 本 憲 甫・尾 内 能 夫

(昭和28年11月11日受付)

I. 緒 言

最近 Ra および放射性同位元素特に Co^{60} による γ 線治療が各所において行われるようになると同時に、それによる放射線障害の問題がやかましくいわれるようになってきた。放射性物質は X 線と異り常時放射線を出しているからその遮蔽については特に注意する必要がある。ラジウムの場合の遮蔽については山川氏等^{1,2}が述べているし、その他のエネルギーの γ 線についての遮蔽も Gamertsfelder C.G.^{3,4,5} に依つて計算表が作られているが、この表は一般的で、一崩壊に、ある決つたエネルギーの一つの γ 光子を放出するものとして計算してあるので個々の放射性同位元素についてこの表を用いる時にはその同位元素の崩壊方式 (Decay Scheme) を適當に考慮しないと誤りをおかしやすい。更にこの表は後に述べる散乱 γ 線を考慮してないため実際の遮蔽の場合には大きな値をとる必要がある。そこで我々は Ra と Co^{60} について、その崩壊方式を考慮し、その γ 線の吸収を理論的に考察し、従來の實驗結果と比較して有効な吸収係数を求め、それによつて簡単に遮蔽物を選べるような計算圖表を作つてみた。

II. γ 線の吸収

0.1 MeV から 3 MeV のエネルギー範囲にある Ra および Co^{60} の γ 線は物質中で三つの獨立した相互作用、即ち光電効果、Compton 効果、電子對創生によつてエネルギーを吸収される。それらによる吸収係数をそれぞれ τ , σ , κ とすると、強度 I_0 (光子数 n_0 , X 光子のエネルギー $h\nu$) なる γ 線は x なる厚さの物質を通過するとき強度 I (光子

数 nx 光子のエネルギー $h\nu$) なる γ 線となり

$$I = I_0 e^{-(\tau + \sigma + \kappa)x} \quad (1)$$

$$\text{又は } n = n_0 e^{-(\tau + \sigma + \kappa)x} \quad (2)$$

なる式で表わされる。全吸収係数を μ_0 とすると $\mu_0 = \tau + \sigma + \kappa$ で (1) 式は

$$I = I_0 e^{-\mu_0 x} \quad (3)$$

となる。 τ , σ , κ の理論的な計算は多くの人々によつてなされ、實驗的にも μ_0 が理論値と一致することが確められている。これらのことについては Heitler,⁶ Davisson と Evans⁷ がよくまとめている。

ところで光電吸収と電子對創生による吸収は光子のエネルギーを全部電子に與えるのであるが、Compton 吸収の場合には一部は電子に、一部は散乱 γ 線にそのエネルギーを與えるのであるから、吸収係数も散乱される光子のエネルギーに對するもの (σ_s) と電子によつて吸収されるエネルギーに對するもの (σ_a) との和で表わされる。即ち

$$\sigma = \sigma_s + \sigma_a \quad (4)$$

従つて吸収係数の理論値と實驗値が一致するのは散乱 γ 線が全く測定器に入つてこないようにした、いわゆる「Good Geometry」あるいは「Narrow Beam」の場合のみである。そのような装置は Davisson, Evans³ 清水氏⁹ 等が述べている如く特別なものであつて、普通の場合には散乱 γ 線が相當入つてくる。更に上に述べた Compton の散乱線の他に吸収體で生じた二次電子によつて阻止線 (Bremsstrahlung), 陽電子の消滅による消滅線 (Annihilation Radiation), 光電効果によつて光子を吸収した原子からの X 線等の一次 γ 線と

は波長の異つた三次線が放出される。従つてこれらの散乱線が測定器に入つてくると、測定される吸収係数 μ は理論値 μ_0 より小さくなる。即ち

$$\mu < \mu_0 = \tau + \sigma_s + \sigma_a + \kappa \quad (5)$$

そして場合によつては散乱 γ 線が全部入つてきて $\sigma_s = 0$:

$$\mu = \tau + \sigma_a + \kappa \quad (6)$$

となつたり、あるいは吸収體のある時の方がかえつて放射線の強度が増加して

$$\mu < 0 \quad (7)$$

となることさえ起り得る。このように $\mu < \mu_0$ となるような条件の時を「Poor Geometry」あるいは「Wide Beam」という。

我々が γ 線を遮蔽する場合はこの「Poor Geometry」に相當するので散乱 γ 線の量が問題となる。三次線は少量と考えられるから、Comptonの散乱 γ 線についてのみ考慮すればよい。このCompton散乱についてはTarrant,^{7,10} Hirschfelder^{11,12} 等によつて計算されているが、ある點の散乱線の量は線源と吸収體との幾何學的條件によつて變つてくる。従つてすべての遮蔽にあてはまるような有効な吸収係数は存在し得ないわけであるが、一般的には $\mu_0 = \tau + \sigma_s + \sigma_a + \kappa$ と $\mu = \tau + \sigma_a + \kappa$ の中間の値を選んでおけばよいと思われる。しかしながら Hirschfelder 等によつて計算された値に近く、又 Poor Geometry の場合の實驗結果からも離れすぎていない値であることが望ましいので、以下 Ra と Co⁶⁰ についてこの點を考察してみる。吸収係数 $\tau, \sigma_s, \sigma_a, \kappa$ の理論値は Davisson と Evans^{7,13} の與えているものを基礎にして線吸収係数を求めた。

III. Ra γ 線の吸収

Raとその崩壊生成物が平衡にある時、それらから放出される γ 線のスペクトルと強度分布は Ellis と Aston¹⁴, Latyshev¹⁵, および三輪, 影山兩氏¹⁶ の與えているものによつて多少異なるがその差は僅かであり、Davisson⁷ が吸収の實驗によつてしらべたところでは、何れが正しいとも云い得ない。我々は Ellis, Astonのものに従つて吸収係数を計算した。(第1表)

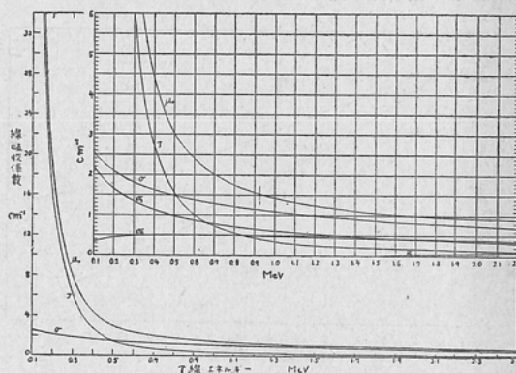
第1表 ラジウムおよびそれと平衡にある崩壊生成物の γ 線スペクトルおよび空気, 白金, 鉛の線吸収係数

崩壊線	放射線 (MeV)	崩壊線 の強度 (%)	全電子 の平均 自由行程 (cm)	空気中の 線吸収係数 (10 ⁻⁴ cm ⁻¹)	白金中の線吸収係数 (cm ⁻¹)			鉛中の線吸収係数 (cm ⁻¹)		
					μ_0	σ_s	$\mu_0 - \sigma_s$	μ_0	σ_s	$\mu_0 - \sigma_s$
Ra $\rightarrow$ Rn	0.184	0.012	0.0022	3.35	23	17	21.3	13.4	0.9	12.5
	0.241	0.115	0.0217	3.56	12.3	1.5	10.8	7.18	0.79	6.39
	0.294	0.258	0.0718	3.68	8.1	1.35	6.75	4.60	0.70	3.90
	0.350	0.450	0.1515	3.77	5.6	1.22	4.38	3.12	0.64	2.78
RaC $\rightarrow$ RaC'	0.607	0.658	0.4090	3.81	2.31	0.87	1.50	1.34	0.46	0.88
	0.766	0.685	0.4418	3.94	1.83	0.73	1.10	1.02	0.39	0.63
	0.933	0.677	0.4615	3.66	1.52	0.64	0.88	0.84	0.34	0.50
	1.120	0.206	0.2310	3.51	1.30	0.56	0.74	0.72	0.30	0.42
	1.238	0.663	0.4710	3.44	1.21	0.53	0.68	0.67	0.27	0.40
	1.374	0.664	0.4812	3.37	1.12	0.48	0.64	0.62	0.25	0.37
	1.761	0.258	0.4550	3.13	0.98	0.40	0.58	0.53	0.21	0.32
	2.198	0.074	0.1626	2.93	0.90	0.32	0.58	0.49	0.17	0.32

1. 白金中の吸収

醫療用ラジウムは白金容器に入つたものが多いから、先づ白金中の Ra γ 線の吸収を考察する。0.1 MeV から 2.2 MeV の γ 線に對する白金の線吸収係数を計算すると第1圖の如くなる。それによつて強度の吸収を求めると第2表の如くなり、

第1圖 白金の吸収係数



第2表 Ra γ 線の白金中の吸収

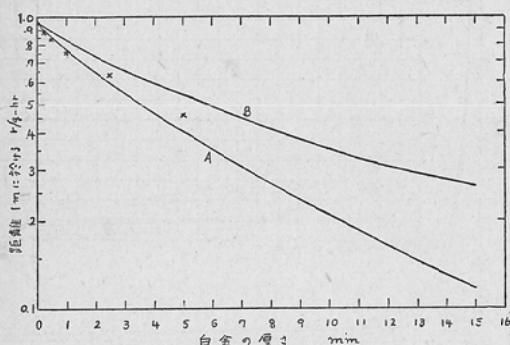
白金中の線吸収係数		0	0.25	0.5	1.0	2.5	5.0	10.0	15.0
吸収係数 μ 計算	強度	1.789		1.604	1.454	1.124	0.771	0.410	0.232
	比	1		0.897	0.813	0.628	0.431	0.229	0.129
	線量	0.969		0.865	0.777	0.597	0.402	0.212	0.117
吸収係数 $\mu_0 - \sigma_s$ 計算	強度	1.789		1.659	1.547	1.298	1.02	0.676	0.469
	比	1		0.926	0.864	0.725	0.57	0.378	0.262
	線量	0.969		0.892	0.825	0.691	0.538	0.352	0.242
線量測定値 $\log_{10} \mu_0 - \log_{10} \mu$	強度			0.92	0.852	0.713	0.556	0.363	0.25
	比			1					
	線量			0.88	0.83	0.73	0.63	0.46	

白金 1.0 mm の測定値は山田氏, 鉛の値は Hirschfelder 等による

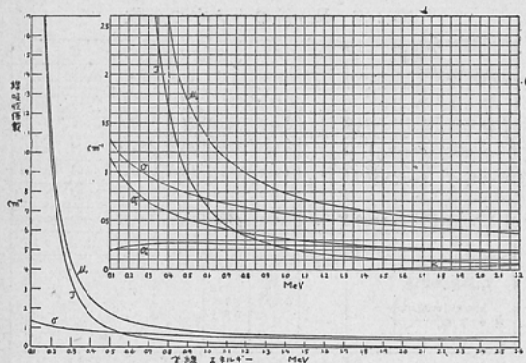
更に「r」単位で表わした線量の吸収を計算すると第2表および第2圖の如くなる。吸収あるいは散亂によつて波長分布が變つてくると強度の吸収と線量 (r 単位) の吸収とは異なるのが當然であるが¹², 0.08 MeV から1.2 MeV 位のエネルギー範囲では1「r」當りの energy flux (一平方厘米當りの光子の數X光子當りのエネルギー) は殆んど一定であつて^{4,17}, Ra γ 線の場合にも第2表に示してある如く殆んど變らない。白金の種々の厚さの場合の線量は測定されているが^{1,17, 18, 19}, それらと理論値と比較してみると白金1 mm 以下では測定値の方が小さくでており, 2 mm 以上では吸収係数を μ_0 とした場合と $\mu_0 - \sigma_s$ とした場合の中間の値となつてゐる。(第2圖)

2. 鉛中の吸収

鉛の吸収係数を第3圖に示す。それによつて白
第2圖 Ra γ 線の白金中の吸収 白金容器入り1 g Ra
より1メートル離れた點の1時間當りのr線量 (r/g-hr)
と容器の厚さとの關係。曲線A, 吸収係数 μ_0 , 曲線B $\mu_0 - \sigma_s$
として計算した値, ×印は測定値

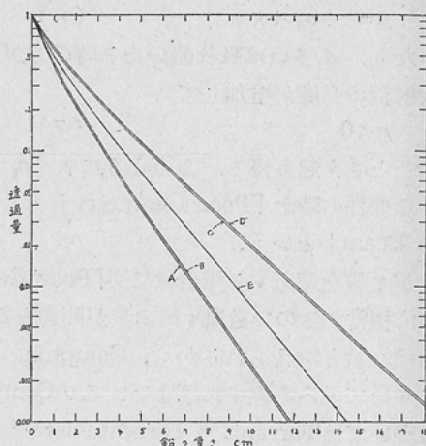


第3圖 鉛の吸収係数



第4圖 Ra γ 線の鉛中の吸収

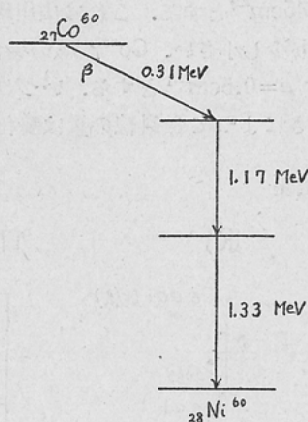
- 曲線A 白金0.5mm 透過 γ 線を1, 吸収係数 $\mu_0 = \tau + \sigma_s + \sigma_a + \kappa$
曲線B 白金1mm 透過 γ 線を1, 吸収係数 $\mu_0 = \tau + \sigma_s + \sigma_a + \kappa$
曲線C 白金0.5mm 透過 γ 線を1, 吸収係数 $\mu_0 - \sigma_s$
曲線D 白金1mm 透過 γ 線を1, 吸収係数 $\mu_0 - \sigma_s$
曲線E 遮蔽用計算圖表作成に用いた吸収曲線



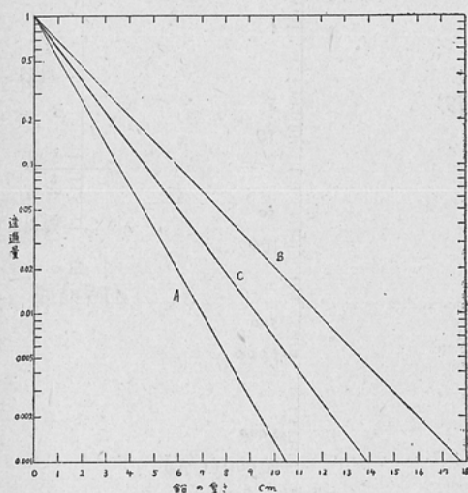
金 0.5mm および 1.0mm を通過した γ 線の鉛中の吸収を計算すると第4圖の如くなる。Ra γ 線は0.1MeV から2.2MeV の間の種々のエネルギーのものであるので吸収係数は次第に小さくなる, 鉛1 cm で RaB $\rightarrow$ C の γ 線は殆んど吸収されてRaC $\rightarrow$ C' の γ 線となり, 5 cm のあたりから大體 $\mu_0 = 0.54\text{cm}^{-1}$ および $\mu_0 - \sigma_s = 0.34\text{cm}^{-1}$ の曲線に従つて吸収されている。 $\mu_0 = 0.54\text{cm}^{-1}$ になる γ 線のエネルギーは1.7MeV 位である。H. Merewether 等²⁰ は白金0.5mm 透過 γ 線について鉛9.0mm で強度が半分に減少するとしているが, これは μ_0 と $\mu_0 - \sigma_s$ の中間の吸収係数に相當している。また Evans 等¹³ は硬 γ 線について $\mu = \tau + k + \sigma_a + 0.4\sigma_s$ となつてゐるが, 前に述べた Ra γ 線の有効なエネルギーを1.7MeV とすると, 鉛の吸収係数は 0.43cm^{-1} となる。

IV. Co⁶⁰ γ 線の鉛中の吸収

Co⁶⁰ の崩壊方式は第5圖に示す如く一崩壊に1.17MeV と1.33MeV の2本の γ 線を放出する。その平均のエネルギー 1.25MeV に対する鉛の線吸収係数は $\mu_0 = 0.66\text{cm}^{-1}$, $\mu_0 - \sigma_s = 0.39\text{cm}^{-1}$ で

第5圖 Co^{60} の崩壊圖第6圖 Co^{60} γ 線の鉛中の吸収

- 曲線A 吸収係数 $\mu_0 = 0.66 \text{ cm}^{-1}$
 曲線B 吸収係数 $\mu_0 - \sigma_s = 0.39 \text{ cm}^{-1}$
 曲線C 吸収係数 $\mu = 0.5 \text{ cm}^{-1}$



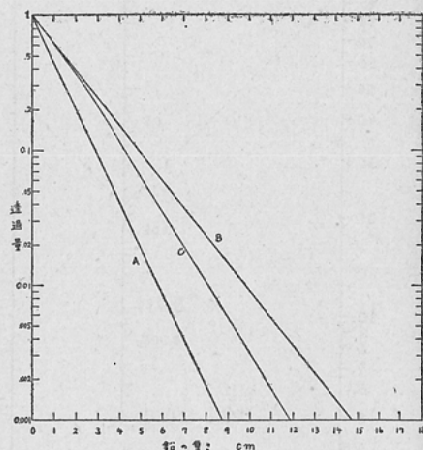
吸収曲線は第6圖の如くなる。Evans 等¹⁸は線源を圓筒形および板狀の鉛で遮蔽して測定し、いずれの場合も $\mu = 0.45 \text{ cm}^{-1}$ になるといつている。又 Merewether 等²⁰は鉛14.9mm で強度が半分に減少するとしているが、これは $\mu = 0.47 \text{ cm}^{-1}$ に相當する。Green 等²¹は1000キュリーの大量照射用の Co^{60} について鉛の吸収係数を 0.6 cm^{-1} とどしているが、これは線源の自己吸収を考慮していないために大きな値がでたものと考えられる。

V. 1 MeV γ 線の鉛中の吸収についての Hirschfelder の計算

Hirschfelder 等^{11,12}は幅の廣い平行な γ 線が吸収體に當つた場合の多重散亂について一般的に計算し、更に 1 MeV, 3 MeV, 5 MeV の γ 線の吸収を數值的にだしているが、Ray と Co^{60} γ 線に近いエネルギーの 1 MeV について Narrow Beam の場合と比較してみる。鉛の吸収係数 $\mu_0 = 0.79 \text{ cm}^{-1}$, $\mu_0 - \sigma_s = 0.47 \text{ cm}^{-1}$ と Hirschfelder の計算によるものから吸収曲線をつくると第7圖の如くなる。Hirschfelder の計算では吸収體の厚さが増加するに従つて吸収係數も増加している。(第3表) これは吸収體の薄い間は散亂線が全部入ってくるが、厚くなるに従いその散亂線が吸収體によつて再び吸収されることを示している。

第7圖 1 MeV γ 線の鉛中の吸収

- 曲線A 吸収係数 $\mu_0 = 0.79 \text{ cm}^{-1}$
 曲線B $\mu_0 - \sigma_s = 0.47 \text{ cm}^{-1}$
 曲線C 多重散亂を考慮した Hirschfelder の計算値



第3表 1 MeV 線の鉛中の吸収

多重散亂を考慮した Hirschfelder の計算値					
鉛の厚さ (cm)	1.4	4.23	8.11	11.91	23.12
強度の減少 I/I_0	0.5	0.1	0.01	0.001	10^{-6}
質量吸収係數 $\frac{\mu}{\rho} (\text{cm}^2/\text{g})$	0.0437	0.048	0.0501	0.0512	0.0527
線吸収係數 $\mu (\text{cm}^{-1})$	0.496	0.544	0.568	0.587	0.598
$\mu = 0.22 + 0.25 \sigma_s$	0.026	0.074	0.098	0.117	0.128
$\mu_0 = 0.22 + 0.25 \sigma_s + 0.32 \mu$	0.08	0.23	0.31	0.37	0.4
1 MeV 線の鉛の線吸収係數の理論値 $\mu_0 = J + \sigma_s + K$ $J = 0.22$, $\sigma_s = 0.25$, $\sigma_s = 0.32$, $K = 0.0$ $\mu_0 = 0.79$, $\mu_0 - \sigma_s = 0.47 (\text{cm}^{-1})$					

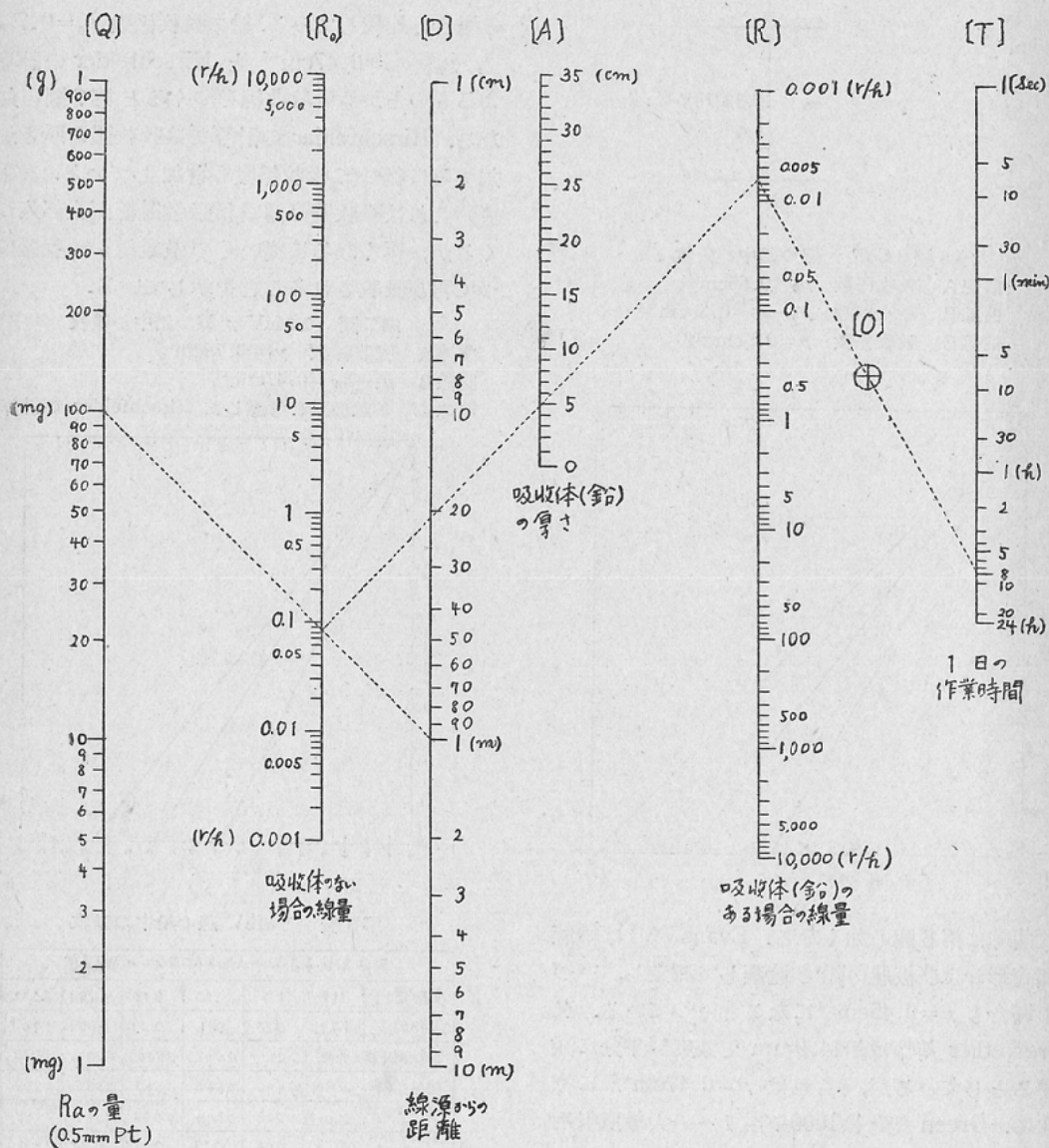
VI. 鉛で遮蔽する場合の計算圖表

1. 鉛についての有効な吸収係數

以上の考察から Rar 線も Co^{60} γ 線も Poor Geometry の場合には Compton の散亂線が半分以上入ってくる事がわかる。我々は Rar 線の場合

鉛中の吸収を第4圖(E)の如くとり、5 cm 以上では $\mu=0.45\text{cm}^{-1}$ とする。これは山川氏¹の表の 0.5cm^{-1} より少し小さい。 $\text{Co}^{60}\gamma$ 線の場合は、 $0.4\sigma_0$ をとつて $\mu=0.5\text{cm}^{-1}$ とする。いずれの場合も吸収體の厚さによつて散亂線の量は變化しないも

第8圖 Rar 線線量及び遮蔽計算圖表



のとして計算圖表をつくる。

2. 「レントゲン」線量

Ra の場合は 0.5mm 白金容器入りの 1 g の點源から 1 m 離れた點で 1 時間に 0.84 レントゲンと

式は次の通りである。

「Q」「D」「R₀」

$$R_0(r/h) = \frac{13.5(r/h \cdot mc)(1 \text{ cm}^2)}{D^2 (\text{cm}^2)} \cdot Q(\text{mc})$$

「R₀」「R」「A」

$$R(r/h) = R_0(r/h)e^{-\mu(\text{cm}^{-1}) \cdot A(\text{cm})}$$

$$\mu = 0.5 \text{ cm}^{-1}$$

「T」「O」「R」

$$R(r/h) \cdot T(h/d) = 0.05(r/d)$$

VII. 結 語

これらの計算圖表を用いて Rar 線および Co⁶⁰γ線を安全な程度に遮蔽し得る鉛の厚さを簡単に求めることができるが、Comptonの散乱線が約半分(0.4σ_s)入つてくるとして圖表がつくられているし、又人體の後方あるいは近傍の物體から入つてくる散乱線については全く考慮されていないので實際の場合には安全のためにこの値の一割程度厚さを増し、更に線量を實地に測定しておく必要がある。

終りに種々御教示下さつた東京教育大學物理學教室の三輪光雄教授ならびに影山誠三郎氏に深く感謝する。

文 獻

- 1) 山川保城: ラジウム療法の實際(昭13) 32頁, 446頁, 39頁. —2) Radium: (Belgium). —3) 放射性同位元素の安全取扱法 21頁: 科學技術行政協議會譯編. —4) W.V. Mayneord: Brit. J. Radiol. supplement No. 2(1950). p. 136, p. 142. —5) H. Schwiegk: Künstliche Radioaktive Isotope in Physiologie Diagnostik und Therapie (Berlin, 1953) p. 129 —6) W. Heitler: The Quantum Theory of Radiation(London, 1936). —7) C.M. Davisson & R.D. Evans: Rev. Mod. Phys. 24, 79(1952). —8) C.M. Davisson & R.D. Evans: Phys. Rev. 81, 404 (1951). —9) S. Shimizu, T. Hanai & S. Okamoto: Phys. Rev. 85, 290(1952). —10) Tarrant: Proc. Camb. Phil. Soc. 28, 475(1932). —11) Hirschfelder, Magee & Hull: Phys. Rev. 73, 852(1948). —12) J. O. Hirschfelder & E.N. Adams, II.: Phys. Rev. 73, 863(1948). —13) R.D. Evans. & R. O. Evans: Rev. Mod. Phys. 20, 305(1948). —14) C.D. Ellis & G.H. Aston: Proc. Roy. Soc. (London) 1294. 180(1930). —15) G.D. Latyshev: Rev. Mod. Phys. 19, 132(1947). —16) M. Miwa & S. Kageyama: Jour. Phys. Soc. Japan 5, 416(1950). —17) Siri: Isotopic Tracers and Nuclear Radiations With Applications to Biology and Medicine(1949) p. 410, p. 420. —18) 山崎文男: 科學20, 224頁(1950). —19) P.F. Hahn: A Manual of Artificial Radioisotope Therapy (1951) p. 20. —20) H. Merewether, S.B. Osborn & S.J. Wyard: Acta Radiologica 37, 459(1952). —21) D.T. Green, & R.F. Eslington: Brit. J. Radiol. 25, 309(1952).

Some Considerations on the Problem of Shielding γ-Ray from Radium and Co⁶⁰ with its Nomograms.

Kempo Tsukamoto M.D., Chief Radiologist and Yoshio Onai, Physicist.

Radiological Division, Hospital of Japanese Foundation for Cancer Research, Tokyo, Japan.

With the increasing use of radioactive substance such as radium and Co⁶⁰ in the field of medicine or industry, it becomes also quite necessary to our country to know how the shielding of those γ-radiations should be done.

Theories for the different types of γ-ray absorption have been studied by many workers and the values which they predict are in good agreement with those obtained by experiment, provided that the scattered radiations are prevented from reaching the detector.

But in the case of shielding geometry, it is to be expected that the effective absorption coefficient is much less than the theoretical one, because the considerable amount of scattered radiation from the shielding itself should be added. And also this effective absorption coefficient may be varied with the geometry of absorber. Recently numerous works on Compton multiply-scattered radiation have been made both theoretically and experimentally. On considering these points, we selected the adequate absorption coefficient to make our nomogram for shielding. Effective absorption coefficient which we adopted for Radium γ-ray, after passing through 5 cm lead is 0.45 cm⁻¹ and for Co⁶⁰ is 0.5cm⁻¹.