The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	RaおよびCo60γ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碍の問題がやかましくいわれるようになつてきた．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光量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亂γ線を考慮してないため實際の遮蔽の場合には大きめ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線の吸收を理論的に考察し，從來の實驗結果と比較して有效な吸收係數を求め，それによつて簡單に遮蔽物を選べるような計算圖表を作つてみた．

II. γ線の吸收

0.1 MeV から 3 MeV のエネルギー範圍にある 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，即ち光電效果，Compton效果，電子對創生によつてエネルギーを吸收される．それらによる吸收係數をそれぞれ τ, σ, κ とすると，强度 I_0 (光子數 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强度 I (光子數 nx 光子のエネルギー $h\nu$)なるγ線となり

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

又は

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

なる式で表わされる．全吸收係數を μ_0 とすると $\mu_0 = \tau+\sigma+\kappa$ で(1)式は

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

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 Evans[7] がよくまとめている．

ところで光電吸收と電子對創生による吸收は光子のエネルギーを全部電子に與えるのであるが，Compton 吸收の場合には一部は電子に，一部は散亂γ線にそのエネルギーを與えるのであるから，吸收係數も散亂される光子のエネルギーに對するもの(σ_s)と電子によつて吸收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

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

從つて吸收係數の理論値と實驗値が一致するのは散亂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．そのような裝置は Davisson, Evans[3] 清水氏[9] 等が述べている如く特別なものであつて，普通の場合には散亂γ線が相當入つてくる．更に上に述べた Compton の散亂線の他に吸收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)，光電效果によつて光子を吸收した原子からの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．従つてこれらの散亂線が測定器に入つてくると，測定される吸收係數 μ は理論値 μ_0 より小さくなる．即ち

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

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

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

となつたり，あるいは吸收體のある時の方がかえつて放射線の強度が增加して

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

となることさえ起り得る．このように $\mu<\mu_0$ になるような條件の時を「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」に相當するので散亂 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の散亂 γ 線についてのみ考慮すればよい．このCompton散亂についてはTarrant.[7,10] Hirschfelder[11,12] 等によつて計算されているが，ある點の散亂線の量は線源と吸收體との幾何學的條件によつて變つてくる．從つてすべての遮蔽にあてはまるような有效な吸收係數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 Co^{60} についてこの點を考察してみる．吸收係數 τ, σ_s, σ_a, κ 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收係數を求めた．

III. Raγ 線の吸收

Raとその崩壞生成物が平衡にある時，それらから放出される γ 線のスペクトルと强度分布は Ellis と Aston[14], Latyshev[15], および三輪，影山兩氏[16] の與えているものとによつて多少異るがその差は僅かであり，Davisson[7] が吸收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のものに從つて吸收係數を計算した．(第1表)

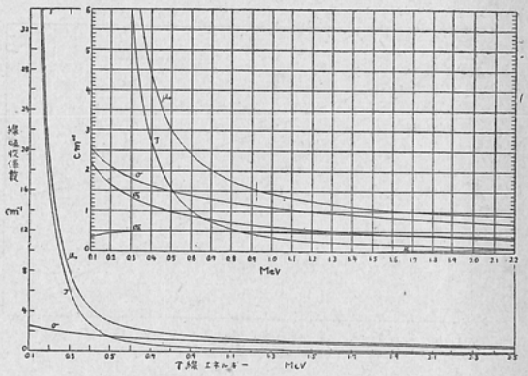
第1表　ラジウムおよびそれと平衡にある崩壞生成物からの γ 線スペクトルおよび空氣，白金，鉛の線吸收係數

崩壞	光子のエネルギー (MeV) $h\nu$	Raの1g当りの平均光子數 n	全光子エネルギー (MeV) $n\cdot h\nu$	空氣のコンプトン吸收係數 (10^{-5} cm^{-1}) σ_c	白金の線吸收係數 (cm^{-1}) μ_0	σ_τ	$\mu_0-\sigma_\tau$	鉛の線吸收係數 (cm^{-1}) μ_0	σ_τ	$\mu_0-\sigma_\tau$
Ra → Rn	0.184	0.012	0.0022	3.35	23	1.7	21.3	13.4	0.9	12.5
RaB → RaC	0.241	0.115	0.0277	3.56	12.3	1.5	10.8	7.18	0.79	6.39
	0.294	0.258	0.0758	3.68	8.1	1.35	6.75	4.60	0.70	3.90
	0.350	0.450	0.1575	3.77	5.6	1.22	4.38	3.22	0.64	2.58
RaC → RaC″	0.607	0.658	0.4000	3.81	2.37	0.87	1.50	1.34	0.46	0.88
	0.766	0.065	0.0498	3.74	1.83	0.73	1.10	1.02	0.39	0.63
	0.933	0.067	0.0615	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	0.063	0.0780	3.44	1.21	0.53	0.68	0.67	0.27	0.40
	1.379	0.064	0.0882	3.37	1.12	0.48	0.64	0.62	0.25	0.37
	1.761	0.258	0.4540	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. 白金中の吸收

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 Raγ 線の吸收を考察する．0.1 MeV から2.2 MeV の γ 線に對する白金の線吸收係數を計算すると第1圖の如くなる．それによつて强度の吸收を求めると第2表の如くなり，

第1圖　白金の吸收係數



第2表　Raγ線の白金中の吸收

白金の厚さ mm			0	0.25	0.5	1.0	2.5	5.0	10.0	15.0
吸收係數 μ_0	强度	全光子エネルギー (MeV)	1.789$_3$		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
計算	線量	1gRa 1mm 当 γ/s	0.969		0.865	0.777	0.597	0.402	0.212	0.117
		比	1		0.892	0.801	0.615	0.415	0.219	0.122
吸收係數 $\mu_0-\sigma_\tau$	强度	全光子エネルギー (MeV)	1.789$_3$		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
計算	線量	1gRa 1mm 当 γ/s	0.969		0.892	0.825	0.691	0.538	0.352	0.242
		比	1		0.92	0.852	0.713	0.556	0.363	0.25
「γ」線量測定値 1gRa+5lm 離れた点の γ/Ra				0.88	0.816 0.839 0.834 0.847	0.73 0.75 0.756 0.762 0.794	0.63	0.46		

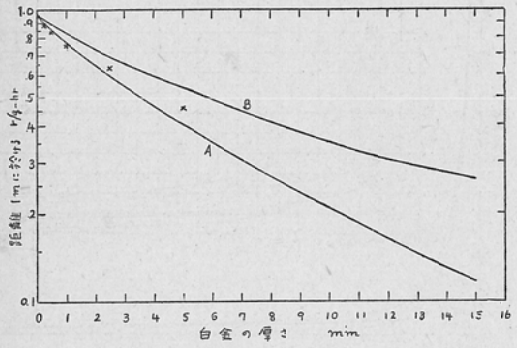
白金 1.0mm の測定値は山川氏，その他は Hahn[17] の書書による

更に「r」單位で表わした線量の吸收を計算すると第2表および第2圖の如くなる．吸收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收と線量（r 單位）の吸收とは異なるのが當然であるが[12]，0.08 MeV から1.2 MeV 位のエネルギー範圍では1「r」當りの energy flux（一平方糎當りの光子の數X光子當りのエネルギー）は殆んど一定であつて[4,17]，Raγ 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 以上では吸收係數を 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いる．（第2圖）

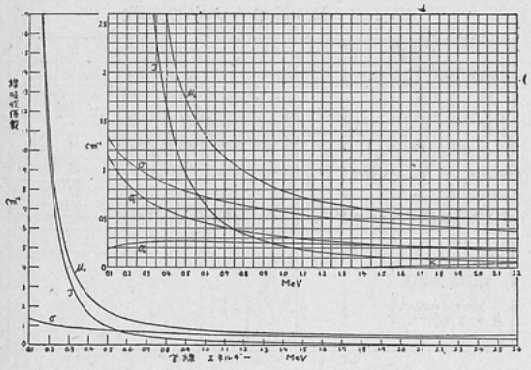
2．鉛中の吸收

鉛の吸收係數を第3圖に示す．それによつて白

第2圖　Raγ線の白金中の吸收　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γ線量（γ/g-hr）と容器の厚さとの關係．曲線A，吸收係數μ_0，曲線 Bμ_0-σ_s として計算した値，×印は測定値



第3圖　鉛の吸收係數



第4圖　Raγ線の鉛中の吸收

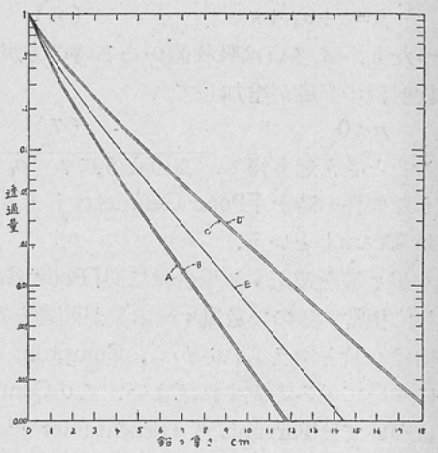
曲線A　白金0.5mm 透過γ線を1，
　　吸收係數 $\mu_0=\tau+\sigma_s+\sigma_a+\kappa$

曲線B　白金 1 mm 透過γ線を1，
　　吸收係數 $\mu_0=\tau+\sigma_s+\sigma_a+\kappa$

曲線C　白金0.5mm 透過γ線を1，吸收係數 $\mu_0-\sigma_s$

曲線D　白金1 mm 透過γ線を1，吸收係數 $\mu_0-\sigma_s$

曲線E　遮蔽用計算圖表作成に用いた吸收曲線

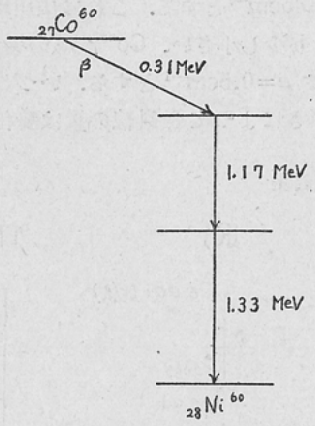


金 0.5mm および 1.0mmを通過したγ線の鉛中の吸收を計算すると第4圖の如くなる．Raγ線は0.1MeV から2.2MeV の間の種々のエネルギーのものがあるので吸收係數は次第に小さくなる，鉛1 cm で RaB→Cのγ線は殆んど吸收されてRaC→C′ のγ線となり，5 cm のあたりから大體$\mu_0=0.54\text{cm}^{-1}$ および $\mu_0-\sigma_s=0.34\text{cm}^{-1}$ の曲線に從つて吸收されている．$\mu_0=0.54\text{cm}^{-1}$になるγ線のエネルギーは1.7MeV 位である．H. Merewether 等[20]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$\mu_0-\sigma_s$の中間の吸收係數に相當している．また Evans 等[13]は硬γ線について $\mu=\tau+k+\sigma_a+0.4\sigma_s$ となるとしているが，前に述べた Raγ 線の有效なエネルギーを1.7MeV とすると，鉛の吸收係數は0.43cm^{-1} となる．

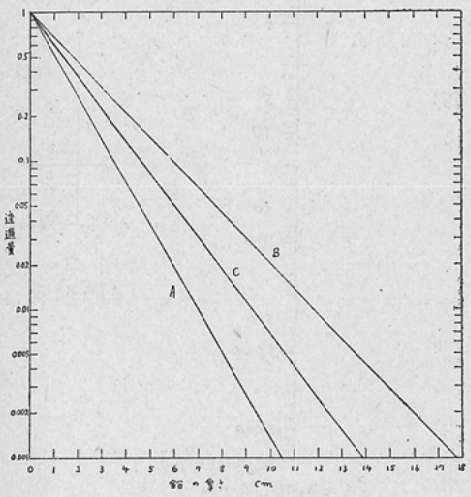
IV．Co^{60} γ 線の鉛中の吸收

Co^{60} の崩壞方式は第5圖に示す如く一崩壞に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 に對する鉛の線吸收係數は $\mu_0=0.66\text{cm}^{-1}$，$\mu_0-\sigma_s=0.39\text{cm}^{-1}$で

第5圖 Co^{60} の 崩 壊 圖



第6圖 Co^{60} γ 線の鉛中の吸收
曲線A 吸收係數 $\mu_0=0.66cm^{-1}$
曲線B 吸收係數 $\mu_0-\sigma s=0.39cm^{-1}$
曲線C 吸收係數 $\mu=0.5cm^{-1}$

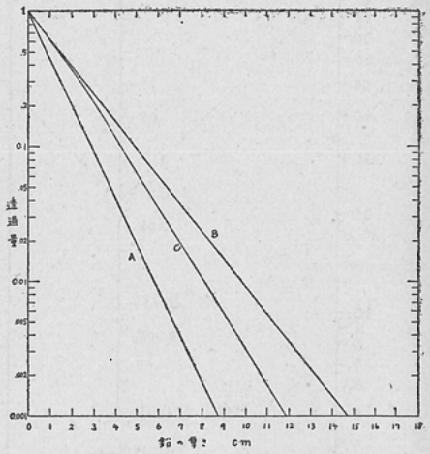


吸收曲線は第6圖の如くなる. Evans 等[13] は線源を圓筒形および板狀の鉛で遮蔽して測定し, いづれの場合も $\mu=0.45cm^{-1}$になるといつている. 又 Merewether 等[20] は鉛14.9mm で强度が半分に減少するとしているが, これは $\mu=0.47cm^{-1}$ に相當する. Green 等[21] は1000キュリーの大量照射用の Co^{60} について鉛の吸收係數を$0.6cm^{-1}$ とだしているが, これは線源の自己吸收を考慮していないために大きな値がでたものと考えられる.

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

Hirschfelder 等[11,12] は幅の廣い平行な γ 線が吸收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1MeV, 3MeV, 5MeV の γ 線の吸收を數値的にだしているが, Raγ と Co^{60}γ線に近いエネルギーの 1MeV について Narrow Beam の場合と比較してみる. 鉛の吸收係數 $\mu_0=0.79cm^{-1}$, $\mu_0-\sigma_s=0.47cm^{-1}$ と Hirschfelder の計算によるものとから吸收曲線をつくると第7圖の如くなる. Hirschfelder の計算では吸收體の厚さが增加するに從つて吸收係數も增加している. (第3表) これは吸收體の薄い間は散亂線が全部入つてくるが, 厚くなるに從いその散亂線が吸收體によつて再び吸收されることを示している.

第7圖 1MeV γ 線の鉛中の吸收
曲線A 吸收係數 $\mu_0=0.79cm^{-1}$
曲線B $\mu_0-\sigma_s=0.47cm^{-1}$
曲線C 多重散亂を考慮した Hirschfelder の計算値



第3表 1MeV 線の鉛中の吸收

多重散乱を考慮した Hirschfelder の計算値						
鉛の厚さ	(cm)	1.4	4.23	8.11	11.91	23.12
强度の減少	I/I_0	0.5	0.1	0.01	0.001	10^{-6}
質量吸收係數	μ/ρ (cm^2/g)	0.0437	0.048	0.0501	0.0512	0.0527
線吸收係數	μ (cm^{-1})	0.496	0.544	0.568	0.587	0.598
$\mu_s=0.22+0.25+\sigma_s$	σ_s (cm^{-1})	0.026	0.074	0.098	0.117	0.128
$\mu_s=0.22+0.25+0.32k$	k	0.08	0.23	0.31	0.37	0.4

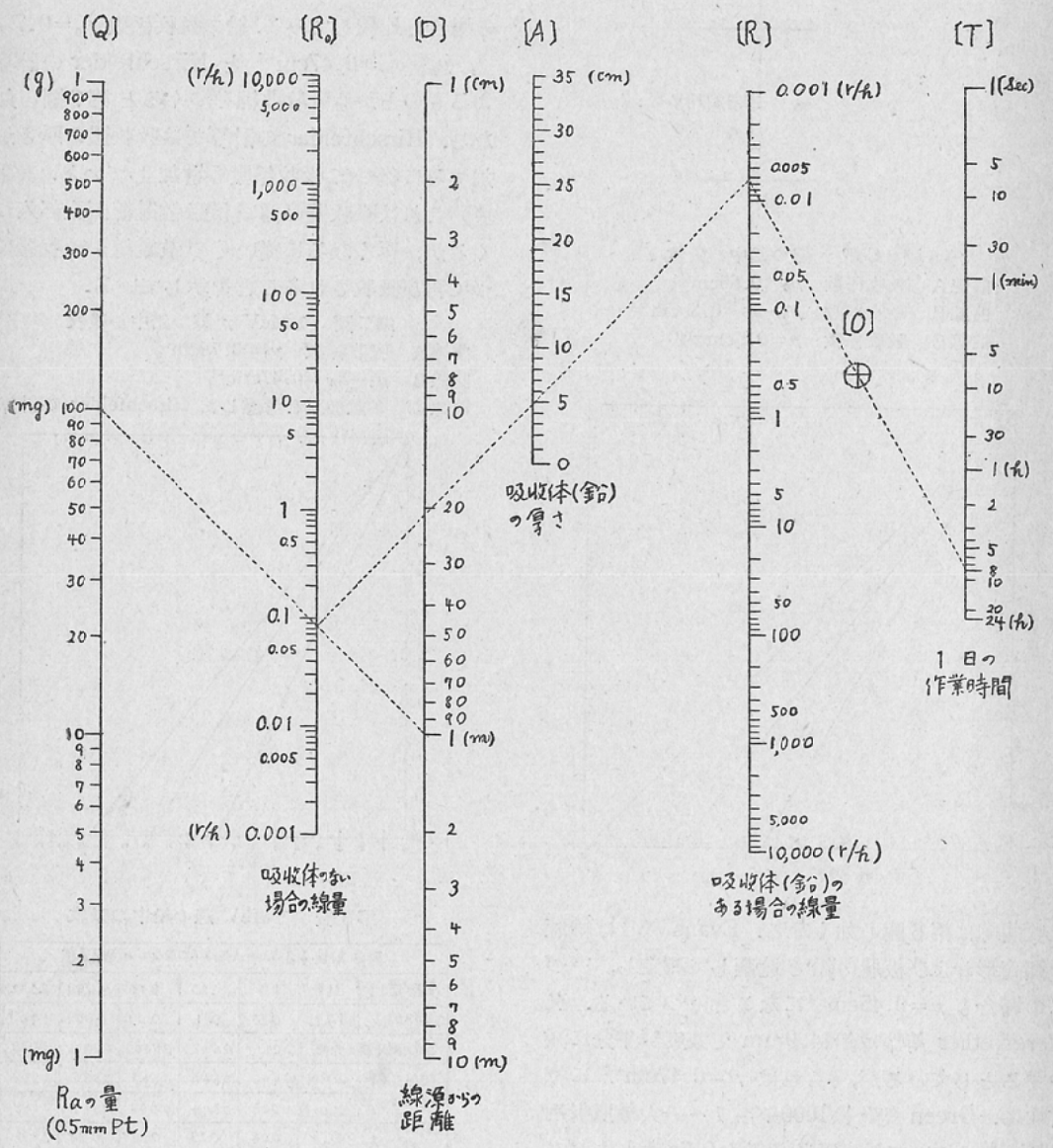
1MeV γ線の鉛の線吸收係數の理論値 $\mu_0=J+\sigma_a+\sigma_s+K$
$J=0.22$, $\sigma_a=0.25$, $\sigma_s=0.32$, $K=0.0$
$\mu_0=0.79$, $\mu_0-\sigma_s=0.47$ (cm^{-1})

VI. 鉛で遮蔽する場合の計算圖表

1. 鉛についての有效な吸收係數

以上の考察から Raγ 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つてくることがわかる．我々は Raγ 線の場合鉛中の吸收を第4圖（E）の如くとり，5 cm 以上では $\mu=0.45cm^{-1}$とする．これは山川氏[1] の表の $0.5cm^{-1}$より少し小さい．$Co^{60}\gamma$ 線の場合は，0.4 σ_s をとつて $\mu=0.5cm^{-1}$ とする．いづれの場合も吸收體の厚さによつて散亂線の量は變化しないものとして計算圖表をつくる．

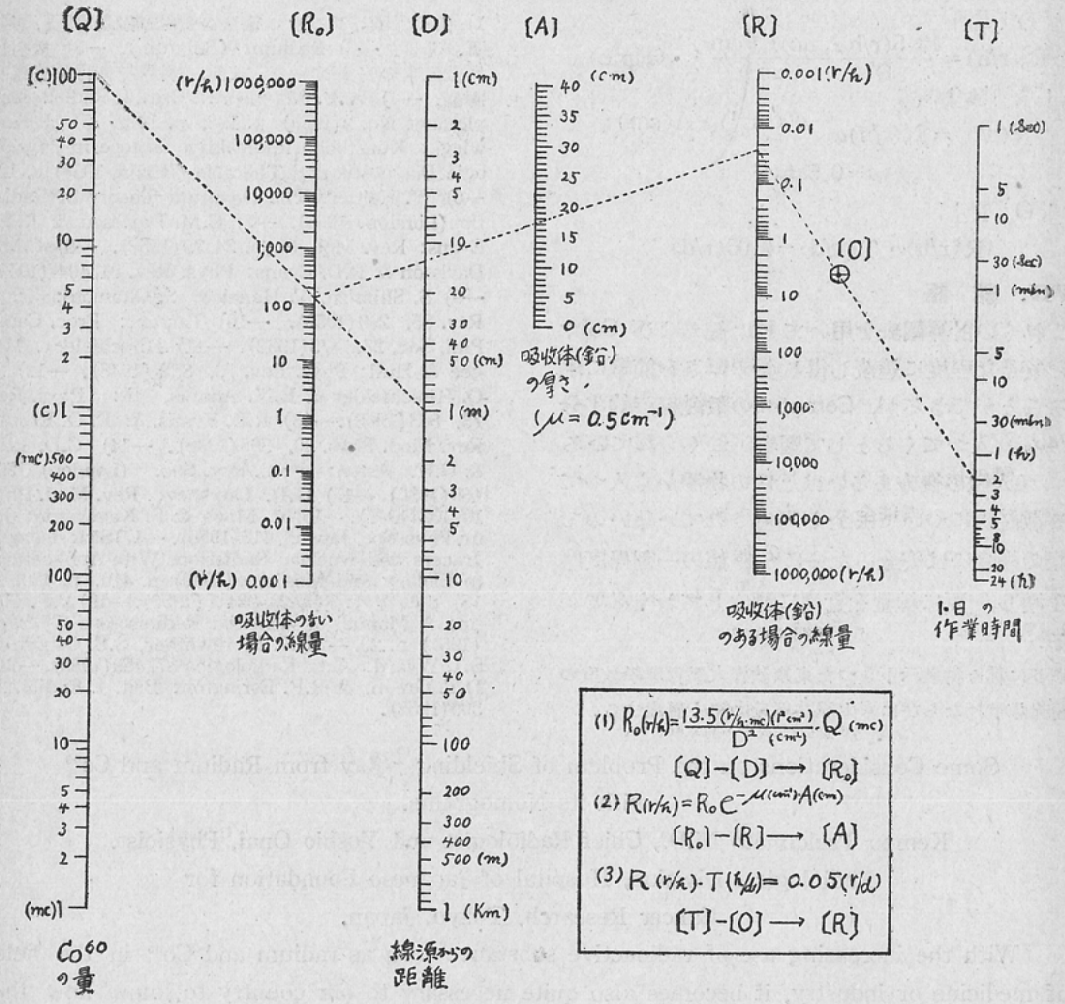
第8圖　Raγ 線線量及び遮蔽計算圖表



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

第9圖 $Co^{60}\gamma$ 線線量及び遮蔽計算圖表(癌研，放射線科)



いう一般に採用されている値をとる.[18,19] Co^{60}の場合は1キュリーで1m離れた點の1時間當りの線量を1.35レントゲンとする.[4,17,19]

3. 計算圖表とその使用法

線源は Ra の場合は 0.5mm 白金容器入りの點源とし，Co^{60} の場合はなんら遮蔽をしない點源とした．いづれの場合も1日の許容量を0.05レントゲンとして計算圖表をつくる．第8圖および第9圖にそれを示す．

Co^{60}の場合についてその使用法を述べる．今Co^{60} 100キュリーがあつて線源から1m離れたところで1日2時間働けるように鉛の厚さをこの圖から選んでみる．先づ「Q」尺の100(キュリー)の點と(D)尺の1(m)の點を結んで「R_0」尺と交わる點135 (r/h) を求める．これは100キュリーの線源から1m離れた點の線量は135r/hになることを意味する．次に「T」尺の2(時間)の點と「O」點を結んで「R」尺と交わる點 0.025(r/h)を求める．これは1日2時間照射されて1日に0.05r となるためには1時間に 0.025r 照射されてよいことを示す．そこで今求めた「R_0」尺の135 (r/h) の點と「R」尺の0.025 (r/h) の點を結び「A」尺と交わる點が求める鉛の厚さで約17cm とでる．以上のように「Q」「R_0」「D」尺を一組，「R」「O」「T」尺を一組，「R_0」「A」「R」尺を一組として使用しさえすれば順序には關係なく求められる．尙各組の指尺の關係

式は次の通りである.

「Q」「D」「R_0」

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

「R_0」「R」「A」

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

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

「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Raγ線および $Co^{60}\gamma$ 線を安全な程度に遮蔽し得る鉛の厚さを簡單に求めることができるが, Comptonの散亂線が約半分 ($0.4\sigma_s$) 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亂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. Japan5, 416 (1950). —17) Siri: Isotopic Jracers 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. Esrington: Brit. J. Radiol. 25, 309 (1952).

Some Considerations on the Problem of Shielding γ-Ray from Radium and Co^{60} 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 Co^{60} 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 Co^{60} is 0.5cm^{-1}.