The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	2次電子に関する研究 その1 320 kVp 連続X線による2次電子スペクトルについて
Author(s)	星野, 一雄; 稲田, 哲雄; 川島, 勝弘 他
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1962, 22(4), p. 306-315
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/20570
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

2次電子に関する研究（その1）
(320 kVp 連続 X 線による2次電子スペクトルについて)

放射線医学総合研究所物理研究部
星野一雄 稲田哲雄 川島勝弘
高久祐治 佐方周防 松沢秀夫

（昭和37年5月28日受付）

Study on Secondary Electrons (1)
(On the Energy Spectrum of Secondary Electrons Produced in Matter by 320 kVp White X-rays.)

By

K. Hoshino, T.Inada, K. kawashima Y.Takaku
S. Sakata and H. Matsuzawa.

Physics Division, Naitonal Institute of Radiological Sciences

The energy loss of monochromatic energy electron (624 keV) in medium and the secondary electron spectrum generated in various medium by 320 kVp x-rays were measured with the double-focusing magnetic beta-spectrometer having high resolution.

In this paper, only the energy spectrum of electrons emerging into the same direction as the incident x-ray beam is described.

1) Average energy loss of 624 keV electron in polyethylene foils agrees with theoretical one.

2) For the various medium (Pb, Cu, Al and Lucite) exposed by whith x-rays, the forward energy spectrum of electrons is not so different each other, but the electron flux (the total number of electrons passing through unit area) increases rapidly with increasing atomic number of medium.

3) The average LET of these secondary electrons by 320 kVp x-rays in Lucite is estimated at 0.73 keV/μ.

4) The calculations of the secondary electron spectra are carried out by the approximation procedure which takes into consideration of the initial electron spectrum generated by 320 kVp x-rays, the effective volume for the electrons capable of passing through the area of inerst and the effect of the slowing-down of electrons. These calculated results are compared with the experimental ones and are in good agreement with them for the recoil electrons in the Compton process in Lucite. Therefore in practice, it seems to be more reasonable to estimate the secondary electron spectrum by our approximation procedure.

1. 緒言

既に知られている通り，X・γ線と物質との相互作用においては，二次的に発生する2次電子が重要な役割を演ずる．従つて，X・γ線の作用を正確に理解するためには，これら2次電子の空間的・時間的分布，エネルギー分布およびエネルギー消費（または energyloss，エネルギー損失）の過程などに関する充分な知見が必要であろう．これは，吸収線量やLETなどを求める場合とくに欠くことのできぬものである[1]．

物質内（とくに水中）における2次電子のエネルギー分布（以下スペクトルと呼ぶ）については，理論的に近似計算[1~5]がなされ且つ平均のLETも算出されているが，これらの値は計算方式の相違によつて著るしく異り，見解の一致はみられない．例えば，水中のLETは Table 1 に示す如くである[2)6)7)]．また，計算値が実際の2次電子スペクトルに一致すると云う証拠も未だ不充分と思われる．

他方，2次電子スペクトルの実験的研究は，Aglintsev ら[8]が電磁石式β・スペクトルメーターを用い，織田ら[9]，Bruce ら[10]がシンチレーション・スペクトルメーターを用いて行つたが，これらの実験は單一エネルギーγ線（主に Co^{60}，Cs^{137} γ線）に限られ，連続X線に関するデータを欠いている．

Table 1. Mean L.E.T. values in water (keV per micron of water)[7].

Radiation	Mean L.E.T.		
	Gray[6]	Cormack & Johns[2]	Burch[7]
200 kVp X	3.25	1.79	25.8
220 kVp X	2.6	1.48	24.4
Co^{60} γ	0.36	0.254	19.6
25 MVp X (betatron)	0.28	0.202	18.4

以上の理由から，我々は連続X線によつて発生する2次電子のスペクトルおよびエネルギー損失などに関する実験的研究を始めた．すなわち，高分解能を持つ電磁石式二重収斂β・スペクトルメーターを試作し，先ず 624KeV の單一エネルギー電子線（$Ba^{137}m$ のK内部転換電子）のポリエチレン膜によるエネルギー損失について実験を試

Fig. 1a. Schematic diagram of beta-spectrometer construction.

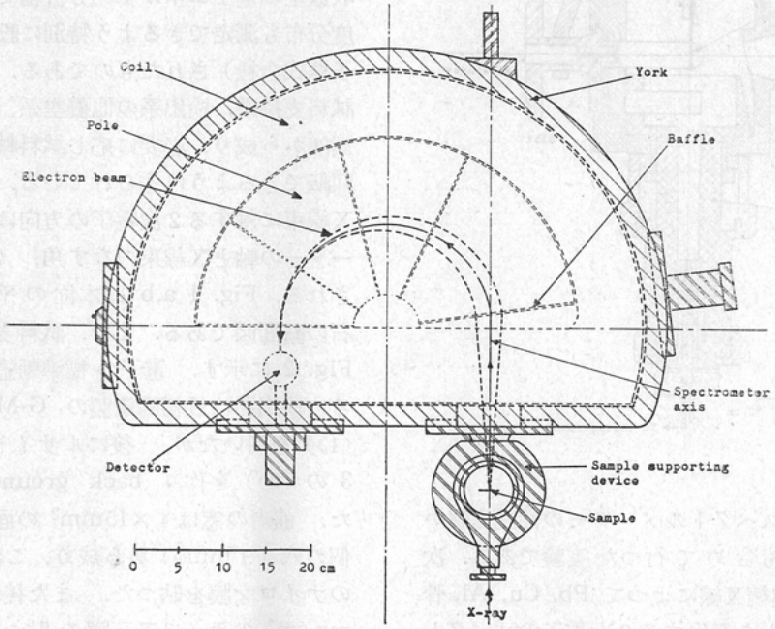


Fig. 1b. Schematic diagram of magnet, with baffles and diaphragm (vertical cross section).

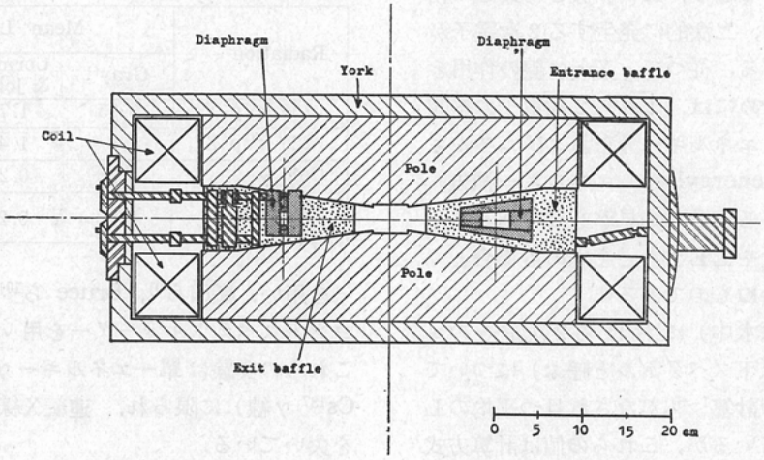
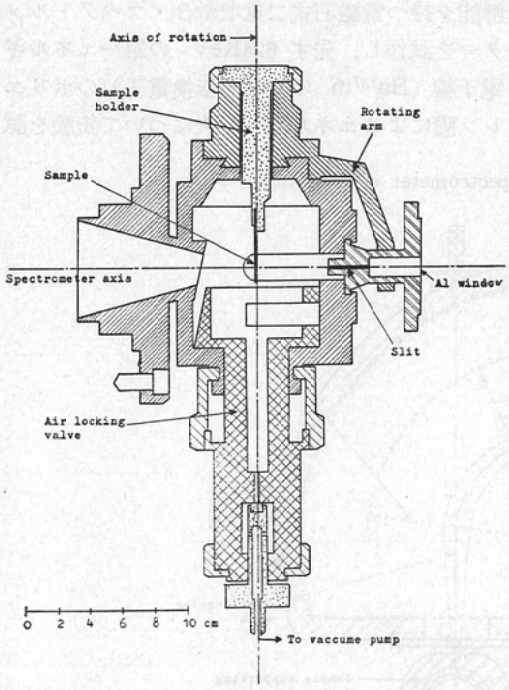


Fig. 2. Schematic diagram of sample supporting device (vertical cross section).

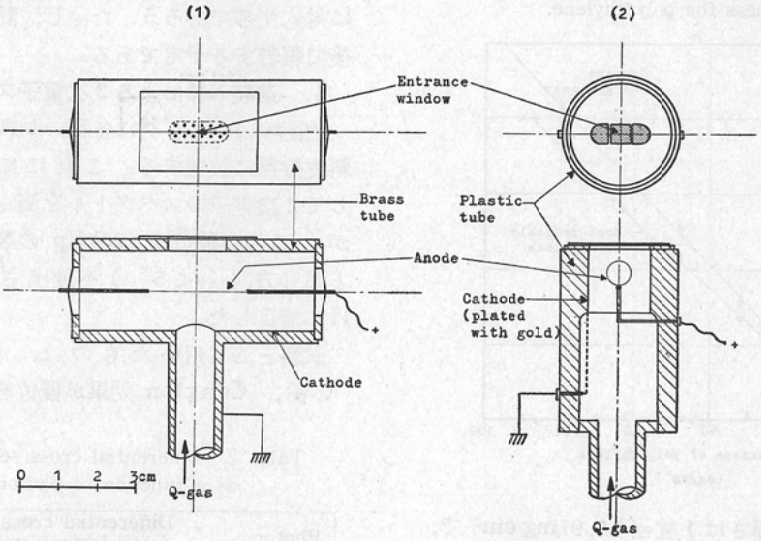


みた．これは，スペクトルメーターの性能を確かめると云う目的も含めて行つた実験である．次に，320kVp 連続X線によつて Pb, Cu, Al, 骨およびルサイトから発生する2次電子のスペクトルを測定し，理論的近似計算との比較を試みた．たゞし，今回の実験は入射X線の方向と同じ向きへ放出される2次電子についてのみ行つた．各方向への強度分布やスペクトルなどについては続いて報告する予定である．

2. β．スペクトルメーター

これは，電磁石を主体とする 180°偏向，二重収斂型の電子エネルギー分析器で，2次電子の角度分布も測定できるよう特別に設計製作（日本電子株式会社）されたものである．本体は電磁石，試料支持系，検出系の他眞空系，鉛遮蔽などの附属部から成り，必要に応じ試料軸のまわりを水平回転できるように作られている．この場合，入射X線束に対する2次電子の方向は，スペクトルメーターの軸とX線束のなす角，θ，としてあらわされる．Fig. 1 a,b は本位の平面図および電磁石の断面図である．また．試料支持系の断面図を Fig. 2 に示す．電子の標準軌道半径は12cmである．検出器は最初眞鍮製の G-M 管（Fig. 3 の (1)）を用いたが，後にルサイト製のもの（Fig. 3 の (2)）を作り back ground を減少せしめた．前者の窓は 4 ×15mm^2 の面積内に開けた28個の穴（1 mmφ）から成り，これに0.23mg/cm^2 のナイロン膜を貼つた．また後者の窓には0.20 mg/cm^2 のライフアン膜を貼つた．各の陽極電

Fig. 3. Schematic diagram of G-M tube, (1): metal tube, (2): plastic tube.



圧は1125V，900V，またQガス圧は400mmHg，300mmHgである．測定値はX-Y記録計上に励磁電流対計数率として自動的に記録されるが，必要に応じ手動でも求めることができる．エネルギーの較正は I^{131}, Cs^{137} の内部転換電子（45.6keV, 74.7keV, 330keV, 624keV）によつて行つた．

3. ポリエチレン膜による電子のエネルギー損失

直径16mmのAlリングに0.5mg/cm² のライフアン膜を張り，その中心に放射性 Cs^{137} を含む塩化セシウム溶液をつけた．乾燥した後，これを試料支持器（Fig. 2 の sample holder）に装置して電子源とした．線源からスペクトルメーターの軸方向へ放出された電子は，電磁石の入口にあるバツフルを通過した後，磁場の強さに応じて分析される．本実験では，624keV のK内部転換電子（$Ba^{137}m$）のみに着目して実験を行つた．624keV の primary 電子のスペクトルは Fig. 4 に示すごとくであり，これに対するβ・スペクトルメーターの分解能は1.5%であつた．

さて，線源の電磁石側にポリエチレン膜を置くと，電子はこれを通過する間にエルギー損失および straggling を蒙りながら slow downする．ポ

Fig. 4. Energy loss spectrum for 624 keV electrons after passing through polyethylene foil of O-79.7 mg/cm².

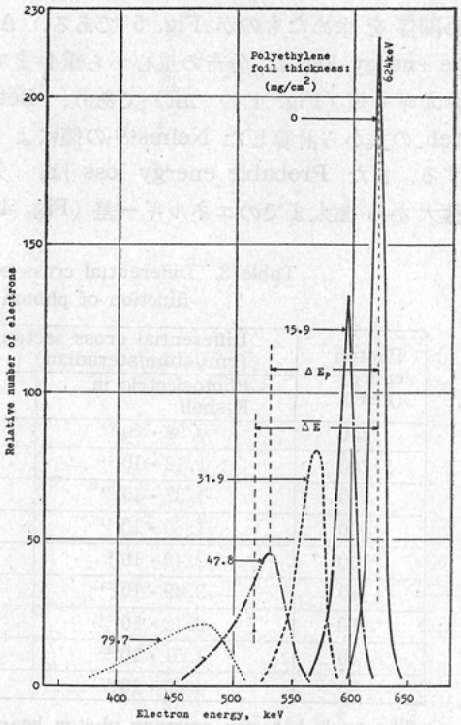
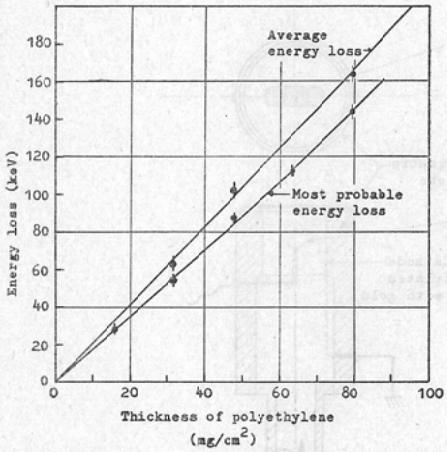


Fig. 5. Energy loss of electrons as a function of foil thickness for polyethylene.



リエチレン膜の厚さは1枚当り7.97mg/cm² で，これを1～10枚重ねた．これらの結果を Fig. 4に示す．すなわち，ポリエチレン膜を通過した電子のスペクトルは膜厚の増加に従つて低エネルギー側へ移り，しかも一層広いエネルギー域に散布するようになる．これより膜厚と平均エネルギー損失の関係を求めたものが Fig. 5 である．Average energy loss は，分布の重心から重心までのエネルギー差 (Fig. 4 の $\overline{\Delta E}$) であり，Bethe-Bloch の式から計算した Nelms[11] の値によく一致する．また Probable energy loss は，分布の極大から極大までのエネルギー差 (Fig. 4 の ΔEp) を示し，Landau[12]，Blunck ら[13]の理論に対応するであろう．たゞし．計算値については後で報告する予定である．

4. 連続X線による2次電子スペクトル

前記の Al リングに各種の試料を取りつけて試料支持器に装着する．これに細いX線束を照射して2次電子のスペクトルを測定するわけであるが，この実験では 320kVp のX線によつてこれと同じ方向 ($\theta < 5°$) へ放出される2次電子だけに着目した．

試料として用いたものは，光電効果の大きい鉛，Compton 効果が優位を占めるルサイト

Table 2. Differential cross section for lucite as a function of photon energy ($\theta=5°$)

Photon energy (keV)	Differential cross section*) (cm²/electron/steradian)	
	Photoelectric in K-shell	Compton recoil
250	$4.39 \cdot 10^{-28}$	$2.24 \cdot 10^{-25}$
200	$4.99 \cdot 10^{-28}$	$2.27 \cdot 10^{-25}$
150	$6.44 \cdot 10^{-28}$	$2.34 \cdot 10^{-25}$
130	$7.59 \cdot 10^{-28}$	$2.39 \cdot 10^{-25}$
100	$1.15 \cdot 10^{-27}$	$2.48 \cdot 10^{-25}$
80	$1.70 \cdot 10^{-27}$	$2.56 \cdot 10^{-25}$
60	$3.08 \cdot 10^{-27}$	$2.66 \cdot 10^{-25}$
40	$7.91 \cdot 10^{-27}$	$2.79 \cdot 10^{-25}$

*) The angle between primary photon beam and direction of secondary electrons is assumed to be 5.

Table 3. Differential cross section and electron energy for copper as a function of photon energy ($\theta=5°$).

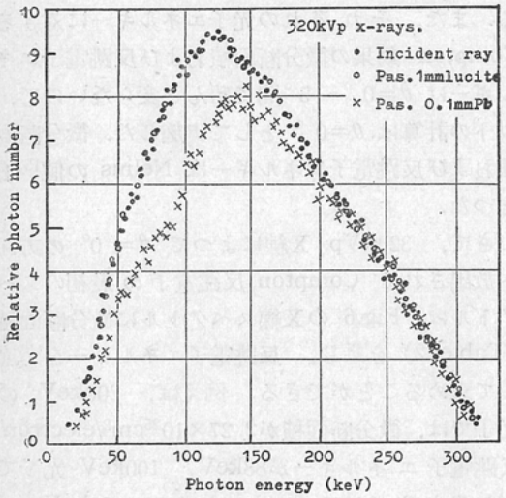
Photon energy (keV)	Differential cross section *) (cm²/atom/steradian)		Electron energy (keV)	
	Photoelectric in K-shell	Compton recoil	K-photoelectron	Compton electron
250	$0.98 \cdot 10^{-24}$	$6.48 \cdot 10^{-24}$	241	123
200	$1.12 \cdot 10^{-24}$	$6.58 \cdot 10^{-24}$	191	88
150	$1.37 \cdot 10^{-24}$	$6.78 \cdot 10^{-24}$	141	56
130	$1.60 \cdot 10^{-24}$	$6.92 \cdot 10^{-24}$	121	43
100	$2.40 \cdot 10^{-24}$	$7.19 \cdot 10^{-24}$	91	28
80	$3.49 \cdot 10^{-24}$	$7.42 \cdot 10^{-24}$	71	19
60	$6.12 \cdot 10^{-24}$	$7.70 \cdot 10^{-24}$	51	10
40	$1.51 \cdot 10^{-23}$	$8.08 \cdot 10^{-24}$	31	5.4
20	$4.80 \cdot 10^{-23}$	$8.57 \cdot 10^{-24}$	11	1.5

) The angle between primary photon beam and direction of secondary electrons is assumed to be 5°.

(Table 2) のほか，中間の物質として銅 (Table 3)，アルミニウム，骨(豚の大腿骨)などである．試料の厚さは2次電子の最大飛程よりもやゝ大きく選んだ(Pb：0.1mm，Cu：0.1mm，Al：0.5mm，骨：1mm，ルサイト：1mm)．

X線発生装置は東芝製 EX-300型を用い，320 kVp 連続X線を発生させた．附加フイルターは 2.0mmCu＋0.5mmAl，半価層は 3.0mmCu である．X線束は銅および鉛のスリットで絞り，試料面における照射野を3 mmφ とした．実験は焦点一試料間距離70cmで行つた．なお，Fig. 6 に

Fig. 6. X-ray spectra obtained with 320-KVp tube potential, added 2.0 mm Cu and 0.5 mm Al. HVL =3.0 mm Cu.



X線スペクトルを示す．これは 1" φ×1" NaI を用いRCL製 128チャンネル波高分析器によつて測定した結果である．

Fig. 7a,b はこの様な条件で測定した emerging electron (試料から $\theta<5°$ の方向へ飛出す2次電子) のスペクトル (相対値) である．emerging surface を通る2次電子の総数は分布曲線の面積に比例するから，ルサイトから発生する2次電子数に対する各試料の比率を求めることができる一骨：1.19倍，Al：1.29倍，Cu：6.15倍，Pb：29.5倍．また，各スペクトルの重心を与えるエネルギーをその電子群の平均エネルギー(Average energy) とすれば，それぞれ次の値が得られる一ルサイト：73keV，骨：75keV，Al：76keV，Cu：94keV，Pb：93keV．以上の結果から，連続X線照射によつて発生する2次電子のうち單位断面積を通過する電子の総数 (強度) は原子番号が大きくなるに従つて著るしく増加するが，その

Fig. 7a. Energy spectra of secondary electrons for O 5, which are produced in various materials by 320 kVp white X-rays.

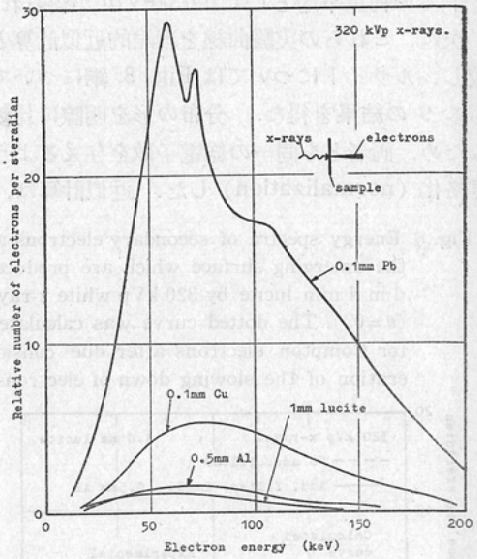
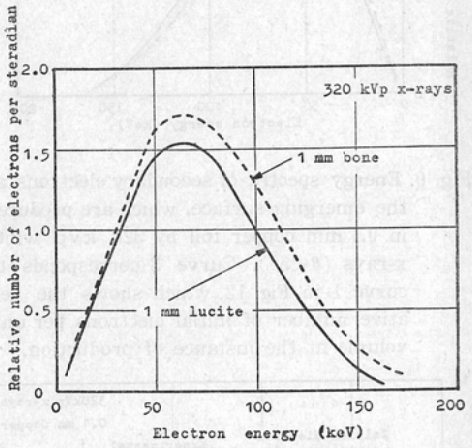


Fig. 7b. Energy spectra of secondary electrons or O 5, which are produced in lucite or bone by 320 kVp x-rays.



平均エネルギーは余り変らないと云うことが判る．また，ルサイト中のLETは，2次電子スペクトルの荷重平均として0.73keV/μが得られた．

次に，これらの実験曲線を理論的近似計算と比較し，ルサイトについてはFig. 8，銅についてはFig. 9の結果を得た．分布の形を明瞭に比較するため，両者とも同一の総電子数を与えるように規格化（normalization）した．近似計算は，最初に発生する電子（Initial electron）のスペクトル，最後のスペクトルに寄与できる有効体積および電子のslowing downなどを考慮して行つたが，詳細は次項に述べる．測定されたスペクトルは一般に計算値よりも高エネルギー側にあるが，ルサイトのコンプトン電子については両者が比較的よく一致している．

Fig. 8. Energy spectra of secondary electrons at the emerging surface which are produced in 1 mm lucite by 320 kVp white x-rays ($\theta=0°$). The dotted curve was calculated for Compton electrons after due consideration of the slowing down of electrons.

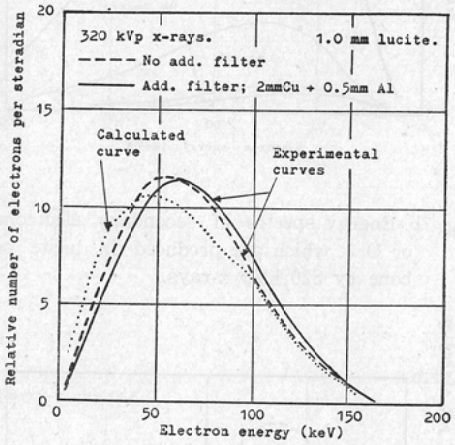
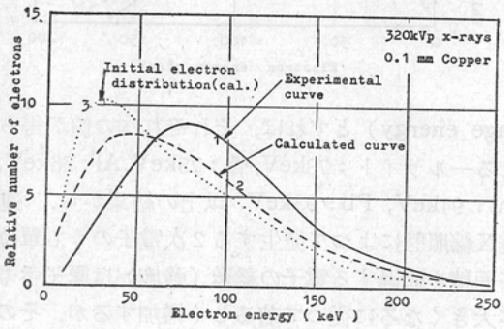


Fig. 9. Energy spectra of secondary electrons at the emerging surface, which are produced in 0.1 mm copper foil by 320 kVp white x-rays ($\theta<5°$). Curve 3 corresponds to curve 1 in Fig. 12, which shows the relative number of initial electrons per unit volume at the instance of production.



5. 2次電子スペクトルの近似計算

鉛については別に報告[14]したので，こゝではルサイトおよび銅について計算を行つた．

ルサイト：Table 2に示す如く，$\theta=5°$ではCompton効果の微分断面積が光電効果のそれに比して著るしく大きい．したがつて，$\theta<5°$の方向へ放出される光電子は無視することにする．また，それぞれの光子エネルギーに対するCompton効果の微分断面積および反跳電子エネルギーは$\theta=0°\sim5°$間で殆んど変らないので，以下の計算は$\theta=0°$として実施した．微分断面積および反跳電子エネルギーはNelmsの値[15]をとつた．

さて，320kVp X線によつて$\theta=0°$の方向へ放出されるCompton反跳電子の最初のスペクトルは，Fig.6のX線スペクトルに微分断面積（Table 2）を乗じ，反跳電子エネルギーを考慮して求めることができる．例えば，200keVの光子では，微分断面積が2.27×10^{25}cm^2/electron，反跳電子エネルギーが88keV，100keV光子でそれぞれ2.48×10^{-25}cm^2/electron，28keV……等々である．Table 4の(2)またはFig. 12のCurve 1に，Compton電子の最初のスペクトル（單位体積当りの相対値）を示す．なお，厚さ1mmのルサイト中ではX線強度の減弱もスペクトルの変化も無視できる程度（Fig. 6）であるから，最初に発生するCompton電子の密度およびスペクトルはルサイト中で一定と考えることができる．

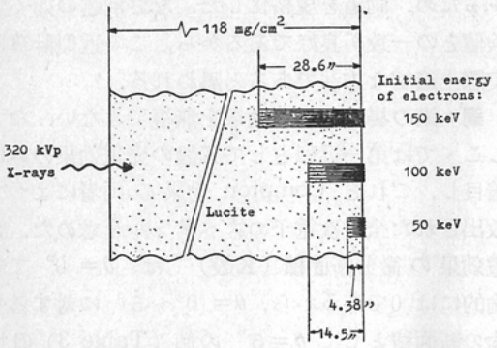
次に，これらのCompton電子のうちemerging surfaceを通過できるものについて考える．これは各電子の飛程[11]に依存するであろう．例えば，初期エネルギー150keVの電子はem-

Table 4. Slowing-down electron distribution at the emerging surface for Compton electrons produced in lucite by 320 kVp white x-rays ($\theta=0°$).

Initial electrons / Slowing down electrons	(1)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	
	(2)	700	930	1100	1120	1080	980	870	790	710	630	560	490	400	310	220	130	40	
	(3)	0.25	0.85	1.78	2.95	4.38	6.02	7.88	9.92	12.1	14.5	17.1	19.8	22.7	25.6	28.6	31.8	35.1	Total
	(4)	18	79	196	330	473	590	686	784	859	914	958	970	908	794	629	413	142	9742
(5) (6)																			
0— 10 0.25		18	23	28	28	27	25	22	20	18	16	14	13	10	8	5	3	1	279
10— 20 0.60			56	66	68	65	59	53	48	43	38	34	30	25	19	13	8	2	627
20— 30 0.93				102	104	100	91	81	73	66	58	52	46	37	29	20	12	4	875
30— 40 1.17					131	126	114	102	93	83	74	65	57	47	37	26	15	5	975
40— 50 1.43						154	140	124	113	101	91	81	70	57	44	31	19	6	1031
50— 60 1.64							160	143	129	117	103	92	81	65	51	36	22	7	1006
60— 70 1.86								162	147	132	117	104	91	75	58	41	24	8	957
70— 80 2.04									162	145	129	114	100	82	64	45	26	8	875
80— 90 2.18										155	137	123	107	87	68	48	28	9	762
90— 100 2.40											152	134	117	96	75	53	31	10	668
100— 110 2.60												146	127	104	81	57	34	11	560
110— 120 2.70													132	108	83	59	35	11	428
120— 130 2.80														112	87	62	36	11	308
130— 140 2.90															90	64	38	12	204
140— 150 3.00																66	39	12	117
150— 160 3.20																	42	13	55
160— 170 3.30																		13	13

(1): Energy of initial electrons (keV). (2): Relative number of initial electrons produced in lucite per cc. (3): Range of initial electrons in lucite (mg/cm²). (4): Relative number of emerging electrons per cm² for each initial energy. (5): Energy interval of slowing-down electrons (10 keV interval). (6): Range interval of slowing-down electrons (mg/cm² per 10 keV in lucite).

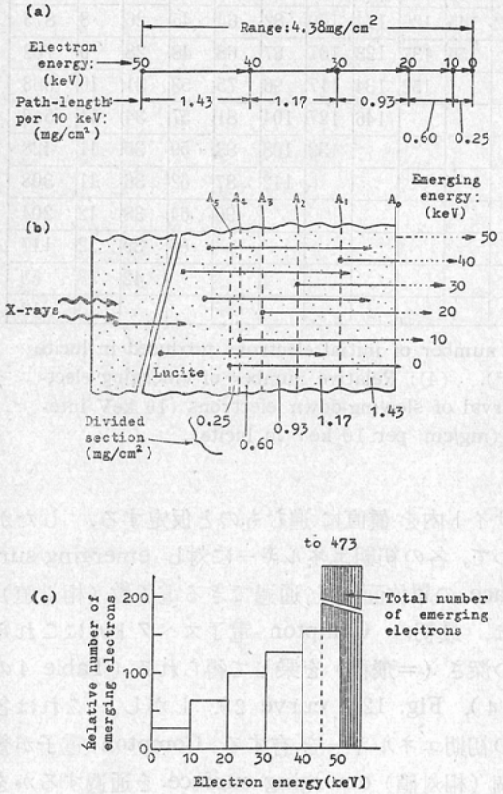
Fig. 10. Schematic diagram fo effective volume which contributes to the resulting spectrum of emerging electrons for lucite.



erging surface から28.6mg/cm² 以内の深さに発生したものだけがこれを通過するであろう. 100keV では14.5mg/cm², 50keV で 4.38mg/cm²……等々である(Fig. 10). たゞし, 電子はルサイト内を眞直に進むものと仮定する. したがつて, 各の初期エネルギーに対し emerging surface の單位面積を通過できる電子数(相対値)は, 最初の Compton 電子スペクトルにこれらの深さ(=飛程)を乗じて得られる(Table 4の(4), Fig. 12の curve 2). しかし, これは各の初期エネルギーを有する Compton 電子が幾個(相対値) emerging surface を通過するかを示すだけである. 実際には, ルサイト中でエネルギーを失うから, たとえ初期エネルギーが同一であつても, emerging surface では発生時の深さに応じて slowing down スペクトルを呈するであろう.

それゆえ, 電子がルサイト中を眞直ぐに進むと仮定して slowing down スペクトルを求めよう. 例えば, 50keV の電子は Fig. 11 (a) のよ

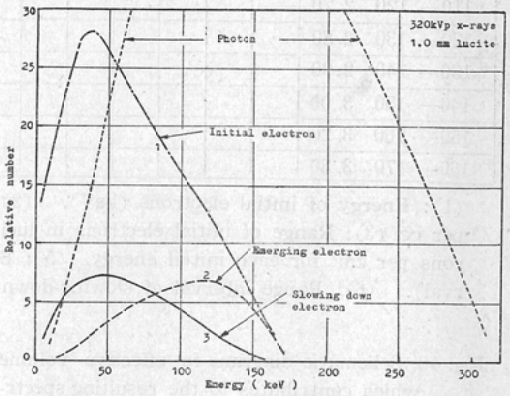
Fig. 11. Illustration which is necessary to calculate the slowing down distribution of secondary electrons for lucite.
(a): Slowing down process of an electron with the initial energy of 50 keV in lucite.
(b): Effective volume in lucite contributing to the electron spectrum at the emerging surface, when secondary electrons of 50 keV are produced uniformly in lucite by 320 kVp x-rays.
(c): Slowing down spectrum of emerging electrons, if they had the same initial energy of 50 keV in lucite.



うな過程でエネルギーを失うから，ルサイトを同図 (b) の如くに分割すると A_0-A_1 間に発生した初期エネルギー50keV の電子は emerging surface, A_0, を通過する時50～40keV のエネルギーを有するであろう．同様に，A_1-A_2 間に発生した50keV の電子は A_0 で40～30keV，A_2-A_3 間で発生したものは30～20keV……等々のエネルギーを有するであろう．A_0-A_1 は50keV 電子と40keV 電子との飛程差，A_1-A_2 は40keV 電子と30keV 電子との飛程差……等々である．したがつて，有効体積内に発生した初期エネルギー50 keV の Compton 電子は A_0 において同図 (c) の slowing down スペクトルを呈するであろう．

それぞれの初期エネルギーについて同様の計算を行い (Table 4)，最後に集計した値を同表の最終縦列および Fig. 12 の curve 3 に示す．また，Fig. 8 においては実験値との比較を容易に

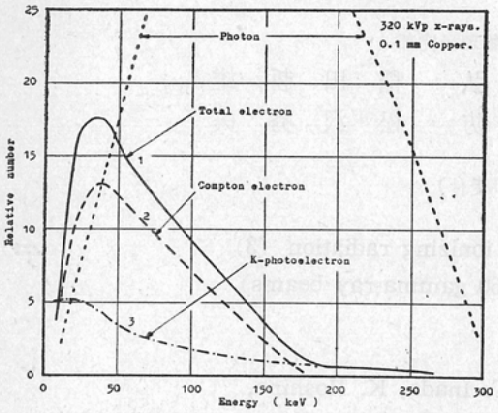
Fig. 12. Various energy spectra for initial, emerging and slowing down electrons, when 1.0 mm lucite is irradiated with 320 kVp white x-rays.



するため，両者を規格化した．なお前述の如く実験値との一致が良好であるから，この近似計算は実際上適切な方法であると思われる．

銅：銅の場合は光電効果を無視できない．たゞしこゝでは第一近似としてK殻の光電効果のみに着目し，これと Compton 効果の両者によつて放出された全2次電子のスペクトルを求めた．光電効果の微分断面積（K殻）*)は，$\theta=0°$ で理論的には 0であるから，$\theta=0°\sim5°$ に対する平均の断面積として $\theta=5°$ の値 (Table 3) の $1/2$ をとつた．光電子のエネルギーを考慮しつゝこの断面積を光子スペクトル (Fig. 6) に乗ずれば，最初に発生する光電子スペクトル（單位体積当りの相対値）が得られる (Fig. 13 の curve 3).

Fig. 13. Initial electron distribution for O 5, which is produced in copper foil by 320 kVp white x-rays. Curve 1 shows a summation of curve 2 and 3.



Compton 電子についてはルサイトの場合と同様な方法でスペクトルを求めることができる．したがつて，最初に発生する全2次電子スペクトルは両者の和としてあらわされる（Fig. 13 の curve 1). 以後の計算法はすべてルサイトの場合に同じであり，Fig. 9 の破線が得られる． 実験との一致が良好でない理由は，K殻以外の光電効果を無視したことおよび微分断面積の選定が適当でなかつたことなどであると思われる．これについては今後検討する予定である．

*) K殻の光電効果微分断面積は次式による[16]．たゞし，$d\sigma_k/d\Omega_\theta$ は θ 方向への微分断面積(cm²/steradian). e は電子の荷電，m_0c^2 は電子の静止エネルギー(=0.51 MeV)，$h\nu$ は光子のエネルギー，Zは試料の原子番号，θ は入射光子と光電子とのなす角とする．

$$\frac{d\sigma_k}{d\Omega_\theta}=\left(\frac{e^2}{m_0c^2}\right)^2\cdot\frac{Z^5}{137^4}\cdot\left(\frac{m_0c^2}{h\nu}\right)^{7/2}\cdot\frac{4\sqrt{2}\sin^2\theta}{(1-\beta\cos\theta)^4}$$

6. 結論

高分解能の電磁石型β・スペクトルメーターを用いて，單一エネルギー電子線(624keV)のエネルギー損失および 320 kVp 連続X線により被照射体中に発生する2次電子のスペクトルを測定した．たゞし今回は，入射X線の方向と同じ向きへ進む2次電子にのみ着目した．1) 624KeV 電子線のポリエチレン膜による平均エネルギー損失は理論値と良く一致した．2)連続X線の照射を受けている各試料（Pb, Cu, Al, ルサイトなど）中において，入射X線の方向と同じ向きへ進む2次電子が單位断面積を通過する時のエネルギー・スペクトルは物質の相異によつて余り変らない．しかし，その電子束（單位断面積を通過する電子の総数）は原子番号が大きくなるに従つて著るしく増加する．3)この2次電子群の平均ＬＥＴはルサイトについて 0.73keV/μ と算定された．4) 320kVp X線によつて最初に発生する電子のスペクトル，問題とする断面積を通過できる電子に対する有効体積および電子の slowing down などを考慮した近似計算によつて，2次電子スペクトルを求めた．次にこれと実験値を比較し，ルサイトの Compton 電子については両者の一致が良好であることを確かめた．したがつて，この近似計算は実際上適切であると思われる．5)物質内の全2次電子スペクトルは各方向のスペクトルの集成として与えられねばならぬが，これについては今後実験を続行する予定である．

文　献

1) Report of ICRU, 1959, NBS Handbook 78 (1961). —2) D.V. Cormack and H.E. Johns: Brit. J. Radiol. 25 (1952) 369. —2) M. Danzker, N.D. Kessaris & J.S. Laughlin: Radiology 72 (1959) 51. —4) J.S. Laughlin: Brit. J. Radiol. 25 (1952) 12. —5) P.R.J. Burch: Radiation Research 3 (1955) 361. — 6) L.H. Gray: Brit. J. Radiol. Suppl. 1 (1947) 7. —7) P.R.J. Burch: Brit. J. Radiol. 30 (1957) 524. —8) K.K. Aglintsev, V.P. Kasatkin, V.V. Mitrofanov and V.V. Smirnov: Proceedings of the Second United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy 21 (1958) 165 —9) N. Oda and H. Suzuki: J.Phys. Soc. Japan 15 (1960) 2365. —10) W.R. Bruce and H.E. Johns: Brit. J. Radiol. 28 (1955) 443. —11) A.T. Nelms: Suppl. to NBS Circular 577 (1958) —12) L. Landau: J. Phys. USSR 8 (1944) 201. —13) O. Blunck and S. Leisegang: Z. Physik 128 (1950) 500. —14) T. Inada et al.: J. Phys. Soc. Japan; to be published. —15) A.T. Nelms: NBS Circular 542 (1953). —16) W. Heitler: The Quantum Theory of Radiation 3rd ed. (Oxford University Press, 1954) 206p.