

JAERI-M
4578

^{170}Tm 線源の r , X線線量率およびその
エネルギースペクトルの理論計算

1971年9月

前田 頌・近藤新助

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

^{170}Tm 線源の γ , X線線量率およびそのエネルギースペクトルの理論計算

日本原子力研究所アイソトープ事業部利用開発室

前田 頌・近藤新助

(1971年9月受理)

要旨 ラジオグラフィ用 $^{170}\text{Tm}_2\text{O}_3$ 線源について、線源厚さとX, γ 線線量率およびそのエネルギースペクトルとの関係を計算によって求めた。結果として一般に使用されている $3\text{mm}\phi \times 3\text{mm}$ の $^{170}\text{Tm}_2\text{O}_3$ 線源の場合、 1Ci の出力線量率は Rhm 値で表わすと 0.0025 であり、全出力線量のうち制動輻射線が 78% をしめることがわかった。

Calculation of the Radiation Intensity and
Photon Energy Spectrum for a ^{170}Tm Source

Shō MAEDA and Shinsuke KONDO
Application and Development Section,
Radioisotope Center, JAERI

(Received Sept. 1971)

Abstract

The radiation intensity and the photon energy spectrum of a $^{170}\text{Tm}_2\text{O}_3$ source for radiography were calculated theoretically. For the $^{170}\text{Tm}_2\text{O}_3$ source of $3\text{mm}\phi \times 3\text{mm}$, 8.3 in density, the proportion of bremsstrahlung to the total radiation was 0.78 in radiation intensity, and the out put radiation intensity was 0.0025 in Rhm value.

目 次

1. はしがき	1
2. ^{170}Tm 線源物質	1
3. ^{170}Tm 線源の放射線	2
3.1 84 keV γ 線	2
3.2 52 keV Yb K X線	5
3.3 制動放射線	6
3.4 50.7 keV Tm K X線	7
4. 考 察	11
5. ま と め	11
参考文献	17

1. は し が き

^{170}Tm をラジオグラフィ線源として利用する場合、まず問題とされるのはその γ 、X線エネルギースペクトルと出力線量率である。とくに ^{170}Tm は多種類の γ 、X線を放射しているので、それら成分の量的構成が利用上問題になる。一般には ^{170}Tm 線源の放射する γ 線およびX線はその壊変図からみて、84 keVの γ 線(3.5%)と52 keVのYb KX線(5%)を主体とし、さらに β 線が線源内で吸収されるときそれにともなって放射される制動輻射線がそれに加わったものであるとみられることが多い。またそのエネルギースペクトルをみても、その多くは低エネルギー範囲に集中しているので、制動輻射線成分は比較的少ないと思われる。しかし52 keVのX線と84 keVの γ 線だけを考慮して ^{170}Tm 線源の遮蔽を計算すると、実測値から大きくはずれることからみても、制動輻射線成分の全体に与える影響は大きい。本報告はラジオグラフィ用 ^{170}Tm 線源について、各X線および γ 線がそれぞれどんな割合で放射されているかを理論的に計算したものである。この結果は ^{170}Tm 線源を製造する場合の形状を決定するうえにあるいは ^{170}Tm 線源を利用する立場からみると大きな助けになることと思われる。

なお筆者らは、ラジオグラフィ用 ^{170}Tm 線源の開発^{1)~3)}をその利用研究²⁾⁴⁾⁵⁾をも含めて行っており、すでにJMTRによる照射で、3 mm ϕ \times 3 mmの約30 Ci ^{170}Tm 線源を試作している。本報告はそれら一連の ^{170}Tm 線源の開発研究の内の一つとして行なったものである。

2. ^{170}Tm 線源物質

^{170}Tm 線源物質としては、金属ツリウムおよび酸化ツリウムが考えられる。しかし線源の試作を行ない検討した結果、加工性、経費の点からみて Tm_2O_3 が優れていることがわかり、また線源としての性能も金属ツリウムを用いた場合と比較してほとんど遜色ないことが認められた。 Tm_2O_3 ペレットの加工については、詳細な内容を近くまとめて報告する予定であるので、ここでは概略の説明にとどめる。まず Tm_2O_3 粉末をプレスで成形し、仮焼後、2100~2300°Cで30分~1時間焼成する。焼成後の Tm_2O_3 ペレットは密度8.3(理論密度9.3%)のセラミック状となる。これを原子炉で熱中性子照射し、 ^{170}Tm 線源とする。

1. は し が き

^{170}Tm をラジオグラフィ線源として利用する場合、まず問題とされるのはその γ 、X線エネルギースペクトルと出力線量率である。とくに ^{170}Tm は多種類の γ 、X線を放射しているので、それら成分の量的構成が利用上問題になる。一般には ^{170}Tm 線源の放射する γ 線およびX線はその衰変図からみて、84 keVの γ 線(3.5%)と52 keVのYb KX線(5%)を主体とし、さらに β 線が線源内で吸収されるときそれにもなって放射される制動輻射線がそれに加わったものであるとみられることが多い。またそのエネルギースペクトルをみても、その多くは低エネルギー範囲に集中しているので、制動輻射線成分は比較的少ないと思われる。しかし52 keVのX線と84 keVの γ 線だけを考慮して ^{170}Tm 線源の遮蔽を計算すると、実測値から大きくはずれることからみても、制動輻射線成分の全体に与える影響は大きい。本報告はラジオグラフィ用 ^{170}Tm 線源について、各X線および γ 線がそれぞれどんな割合で放射されているかを理論的に計算したものである。この結果は ^{170}Tm 線源を製造する場合の形状を決定するうえにあるいは ^{170}Tm 線源を利用する立場からみると大きな助けになることと思われる。

なお筆者らは、ラジオグラフィ用 ^{170}Tm 線源の開発^{1)~3)}をその利用研究²⁾⁴⁾⁵⁾をも含めて行っており、すでにJMTRによる照射で、3 mm ϕ \times 3 mmの約30 Ci ^{170}Tm 線源を試作している。本報告はそれら一連の ^{170}Tm 線源の開発研究の内の一つとして行なったものである。

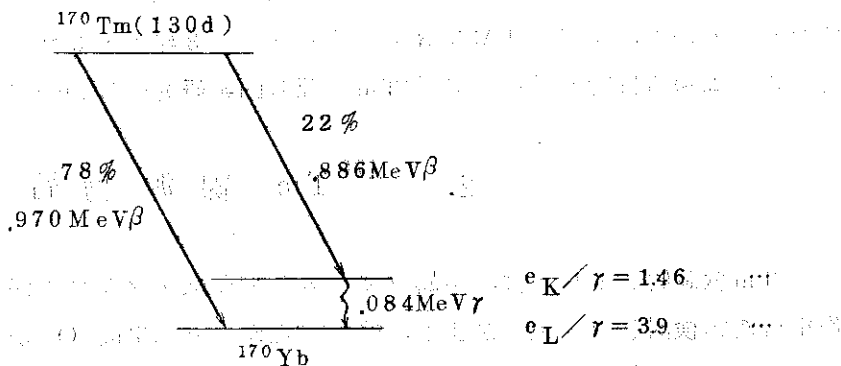
2. ^{170}Tm 線源物質

^{170}Tm 線源物質としては、金属ツリウムおよび酸化ツリウムが考えられる。しかし線源の試作を行ない検討した結果、加工性、経費の点からみて Tm_2O_3 が優れていることがわかり、また線源としての性能も金属ツリウムを用いた場合と比較してほとんど遜色ないことが認められた。 Tm_2O_3 ペレットの加工については、詳細な内容を近くまとめて報告する予定であるので、ここでは概略の説明にとどめる。まず Tm_2O_3 粉末をプレスで成形し、仮焼後、2100~2300°Cで30分~1時間焼成する。焼成後の Tm_2O_3 ペレットは密度8.3(理論密度93%)のセラミック状となる。これを原子炉で熱中性子照射し、 ^{170}Tm 線源とする。

3. ^{170}Tm 線源の放射線

^{170}Tm は第1図の壊変図にみられるように、その放射線は0.968 MeV および0.884 MeV の β 線、84 keVの γ 線、内部転換による5.2 keVのYbのKX線(この他に7 keVのLX線が放射されるが、これは実用上無視できる)などである。しかしラジオグラフィ用 ^{170}Tm 線源からは、これらの放射線の他に β 線が線源内でエネルギーを吸収され、それにともなって放射される制動輻射線、そして β 線、制動輻射線および84 keVの γ 線が線源内で光電効果による吸収を受けて、そこから発生する線源物質すなわちTmのKX線などが放射される。したがって ^{170}Tm 線源からの放射線は ^{170}Tm 固有のものだけでなく、これらの放射線の混合したものである。

一般に ^{170}Tm 線源の形状としては3 mm ϕ \times 3 mmの円柱状が用いられるので、ここでは3 mm ϕ \times 長さTの ^{170}Tm 線源を考へてTの変化にともなり放射線強度およびエネルギースペクトルの変化について計算を行なった。なお線源強度は円柱方向だけについて考へ線源から1 mの位置における線量率(R/hr)であらわした。



第1図 ^{170}Tm の壊変図

3.1 84 keV γ 線

第2図に示すように、長さTの円柱状 ^{170}Tm 線源から距離1 mにあるP点における線量率(R/hr)を求める。いま線源の表面から深さtで巾 Δt の部分の γ 線強度は、

$$C_0 \Delta t e^{-(r_1 \mu_\gamma + r_2 \mu'_\gamma) t} \alpha_\gamma \beta_\gamma \quad (1)$$

と表わせる。したがって線源全体の γ 線強度は(1)式を積分して、

$$A_\gamma = \int_0^T C_0 \alpha_\gamma \beta_\gamma e^{-(r_1 \mu_\gamma + r_2 \mu'_\gamma) t} dt$$

$$= \frac{C_0 a_\gamma \beta_\gamma}{r_1 \mu_\gamma + r_2 \mu'_\gamma} (1 - e^{-(r_1 \mu_\gamma + r_2 \mu'_\gamma) T}) \quad (2)$$

ここで r_1 および r_2 は $Tm_2 O_3$ の Tm および O の成分比 (重量比) で 0.867 および 0.133, μ_γ および μ'_γ は 84 keV γ 線の Tm および O 中の吸収係数 (cm^2/g) で 5.7 および 0.069, C_0 は単位厚さの放射能で $1/2.49 (Ci \cdot cm^2/g)$ ($Tm_2 O_3$ 3 mm t すなわち $2.49 g/cm^2$ で 1 Ci とする) である。 a_γ は ^{170}Tm 1 Ci の場合の線源より 1 m の位置における 1 時間当りの 84 keV γ 線の光子密度 (n/cm^2) であり,

$$a_\gamma = \frac{y_\gamma 3.7 \times 10^{10} \times 3600}{4\pi \times 100^2} \quad (3)$$

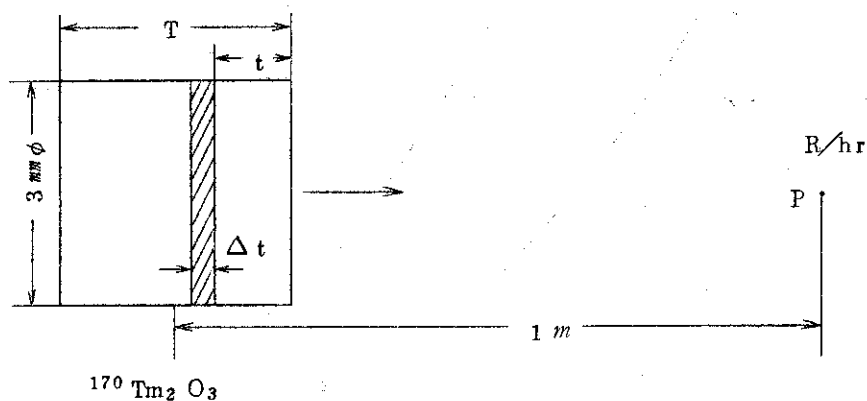
ここで y_γ は ^{170}Tm 1 壊変当りの 84 keV γ 線光子の収率で 0.035 である (第 1 表)。また β_γ は 84 keV γ 線光子 1 個の R で表わした線量であり,

$$\beta_\gamma = \frac{1.6 E \times 10^{-6}}{84 \mu_{air \cdot \gamma}} \quad (4)$$

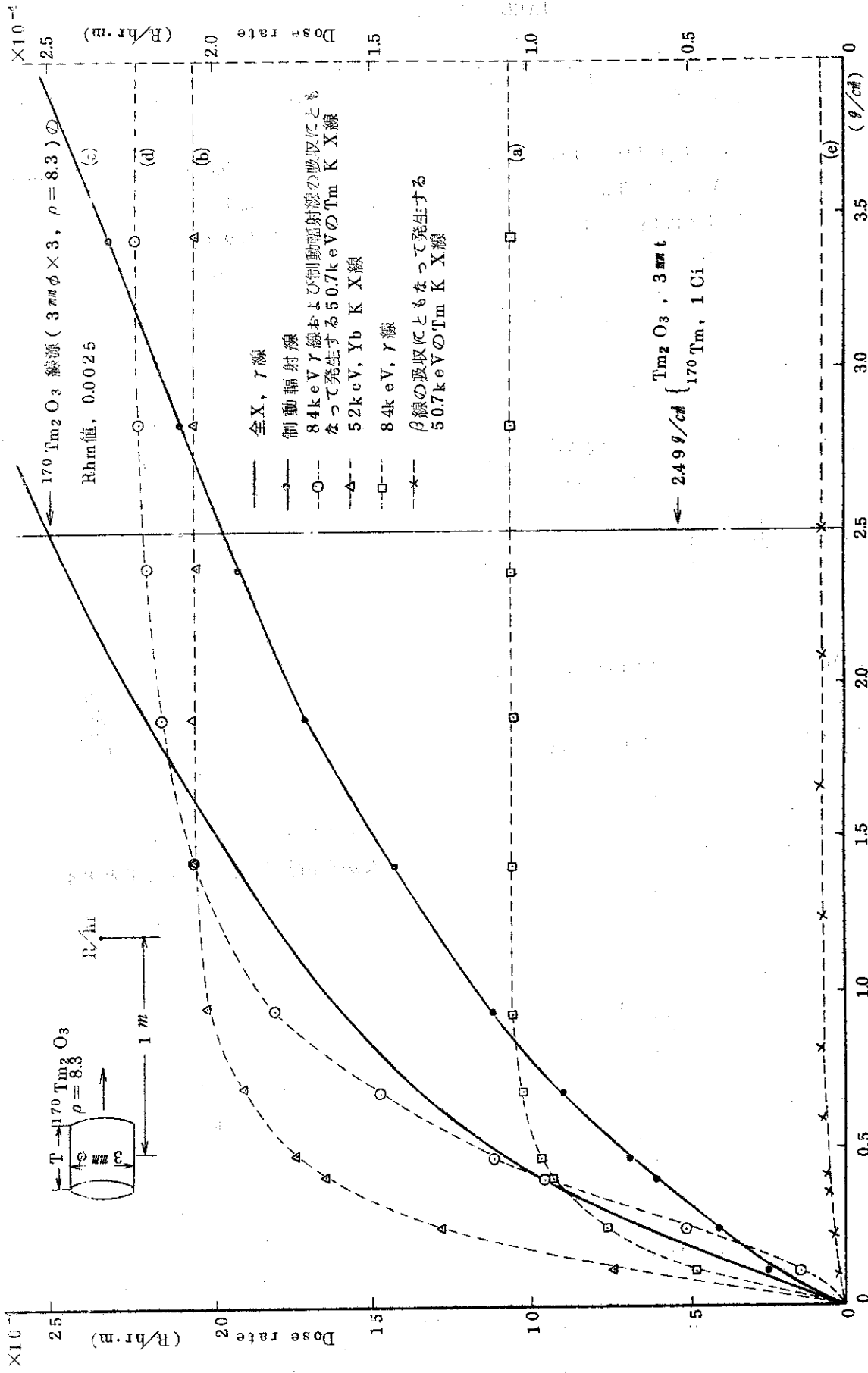
ここで E は MeV で表わした 84 keV γ 線のエネルギーで,

$$E MeV = E \times 1.6 \times 10^{-6} \text{ erg} \quad (5)$$

また $\mu_{air \cdot \gamma}$ は 84 keV γ 線の空気中の真吸収係数で $0.0235 cm^2/g$, $\frac{84}{\mu_{air \cdot \gamma}}$ は 1 R に必要なエネルギー束 ($erg/cm^2/R$) である。第 3 図の曲線 (a) は (2) 式から計算した線源厚さ T と 84 keV γ 線強度 A_γ の関係を示す。



第 2 図 $^{170}Tm_2 O_3$ 線源の線量率計算説明図



第3図 3 mm の $^{170}\text{Tm}_2\text{O}_3$ 線源 (比放射能 $1/3\text{ Ci/mm}$) の厚さ

変化に対応する線源から 1 m における X, γ 線量率

第1表 ^{170}Tm の壊変当りのX線および γ 線光子数
(文献⁷⁾より引用)

放射線	エネルギー keV	壊変当りの光子数
γ 線	84	3.459×10^{-2}
X 線	52	5.050×10^{-2}
X 線	9	1.349×10^{-1}
制動放射線	50	5.574×10^{-2}
"	100	2.014×10^{-2}
"	150	9.857×10^{-3}
"	200	5.430×10^{-3}
"	250	3.169×10^{-3}
"	300	1.903×10^{-3}
"	350	1.155×10^{-3}
"	400	6.992×10^{-4}
"	450	4.180×10^{-4}
"	500	2.441×10^{-4}
"	550	1.377×10^{-4}
"	600	7.386×10^{-5}
"	650	3.700×10^{-5}
"	700	1.683×10^{-5}
"	750	6.669×10^{-6}
"	800	2.136×10^{-6}
"	850	4.778×10^{-7}
"	900	4.897×10^{-8}
"	950	1.713×10^{-10}

3.2 52 keV Yb K X線

3.1と同様な考えで全出力 A_x を求めると、

$$A_x = \frac{C_0 \alpha_x \beta_x}{r_1 \mu_x + r_2 \mu'_x} (1 - e^{-(r_1 \mu_x + r_2 \mu'_x) T}) \quad (6)$$

ここで μ_x および μ'_x は52 keV X線のTmおよびO中での吸収係数で $4.4 \text{ cm}^2/\text{g}$ および $0.087 \text{ cm}^2/\text{g}$ である。また ^{170}Tm 1壊変当りの52 keV Yb X線の収率 y_x は0.051であり、(3)式から $\alpha_x = 5.85 \times 10^7$ である。さらに52 keV X線の空気中の真吸収係数 $\mu_{\text{air},x}$ は $0.0376 \text{ cm}^2/\text{g}$ であり、(4)式より $\beta_x = 3.73 \times 10^{-11}$ が得られる。第3図曲線(b)は(6)式から計算された

線源厚さ T と 52 keV Yb X線 の出力強度 A_x との関係である。

3.3 制動放射線

^{170}Tm の β 線が線源内でエネルギーを吸収されるとき、それにもなってエネルギーが β 線エネルギーの最大値以下の制動放射線が発生する。Wyard⁶⁾ によると、運動エネルギー E の電子によって発生するエネルギー K の制動放射線の相対的エネルギー量 I は次式で表わされる。

$$I = C \left[4 \left(1 - \frac{K}{E} \right) + 3 \frac{K}{E} \log \left(\frac{K}{E} \right) \right] \Delta K \quad (7)$$

ここで C は任意定数である。またエネルギー E の電子によって発生する全制動放射線エネルギーは(7)式の K について 0 から E まで積分することによって与えられる ($1.25 CE$)。またこの制動放射線の発生のために失われるエネルギーを E_{rad} とすると、エネルギー E の β 線の電離のためのエネルギー損失 E_{ion} との間に次式の関係⁷⁾がある。

$$\frac{E_{\text{rad}}}{E_{\text{ion}}} = \frac{Z_a E}{800} \quad (8)$$

Z_a は電子の吸収体物質の原子番号である。(7)式および(8)式を考慮すると、エネルギー K で ΔK 巾の制動放射線の全エネルギー $S(K)$ ⁷⁾ は β 線の全エネルギーすなわち $\sum_{E=0}^{E_0} EP(E)$ で除して β 線の単位エネルギーに対する割合で表わすと、

$$S(K) = \frac{E_0}{\sum_{E=0}^{E_0} EP(E)} \left[\frac{EP(E)}{E} \right] \left[\frac{Z_a E}{Z_a E + 800} \right] \left[\frac{1}{1.25 E} \right] \left[4 \left(1 - \frac{K}{E} \right) + 3 \frac{K}{E} \log \frac{K}{E} \right] \Delta K \quad (9)$$

ここで E_0 は β 線の最大エネルギー、 $P(E)$ は β 線のエネルギー分布であって、

$$P(E) = G C(E) F(Z, W) P W (E_0 - E)^2 \quad (10)$$

ここで、

- $F(Z, W)$: Fermi 関数で放射される電子に対するクーロン効果を示すもの
- E : β 線の運動エネルギー, MeV
- W : $\frac{E}{0.511} + 1$, 静止質量単位の β 線全エネルギー, MeV
- P : $(W^2 - 1)^{1/2}$, β 線運動量
- Z_a : β 放射性核種の原子番号
- $C(E)$: β 壊変型によってきまる因子, 許容遷移型では $C(E) = 1$ である。
- G : 任意定数

ここで β 壊変当り、エネルギー K , 巾 ΔK の全制動放射線の光子数を $N(K)$ とすると、

$$N(K) = S(K) \frac{E}{K} \quad (11)$$

\bar{E} は β 線の平均エネルギーであり、

$$\bar{E} = \frac{\sum_{E=0}^{E_0} EP(E)}{\sum_{E=0}^{E_0} P(E)} \quad (12)$$

で定義される。

第1表は第(11)式を用いて計算した¹⁷⁰Tm 1壊変当りの制動輻射線の収率⁷⁾である。この制動輻射線が¹⁷⁰Tm₂ O₃線源内で自己吸収を受けることを考慮して出力線量率を求めると、

$$\sum_{i=0}^{E_0} A_{xi} = \sum_{i=0}^{E_0} \frac{C_0 \alpha_{xi} \beta_{xi}}{r_1 \mu_{xi} + r_2 \mu'_{xi}} (1 - e^{-(r_1 \mu_{xi} + r_2 \mu'_{xi})T}) \quad (13)$$

ここで μ_{xi} および μ'_{xi} はTmおよびO中のi番目の ΔE 巾中の制動輻射線の吸収係数である。 α_{xi} および β_{xi} はそのエネルギーのX線に応じた¹⁷⁰Tm 1壊変当りの収率 Y_{xi} および空気中の真吸収係数 $\mu_{air \cdot xi}$ から(3)式および(4)式によって求められる。

3.4 50.7 keV Tm K X線

TmのK吸収端は59.4 keVであり、したがってそれ以上のエネルギーのX線、 γ 線あるいは β 線がTm中で光電効果によって吸収されると、それにもなってTmのKX線が発生する。第4図は¹⁷⁰TmのSSD(Si)で測定した光子エネルギースペクトルであるが、吸収体としてTmを用いると¹⁷⁰Tm γ 線およびX線(正確にはYbのKX線)が吸収され、TmのKX線が発生していることがわかる。ことに吸収断面積の大きな84 keV γ 線はTm, 1.15 g/cm³の吸収体によってほとんど吸収されてしまっている。なおYbおよびTmのKX線は微細にみると K_{α_1} , K_{α_2} , K_{β_1} , K_{β_2} などさらにまたいくつかにわかれているが、その発生収率の大きな K_{α_1} 線をもってKX線としても実用上はさしつかえない。

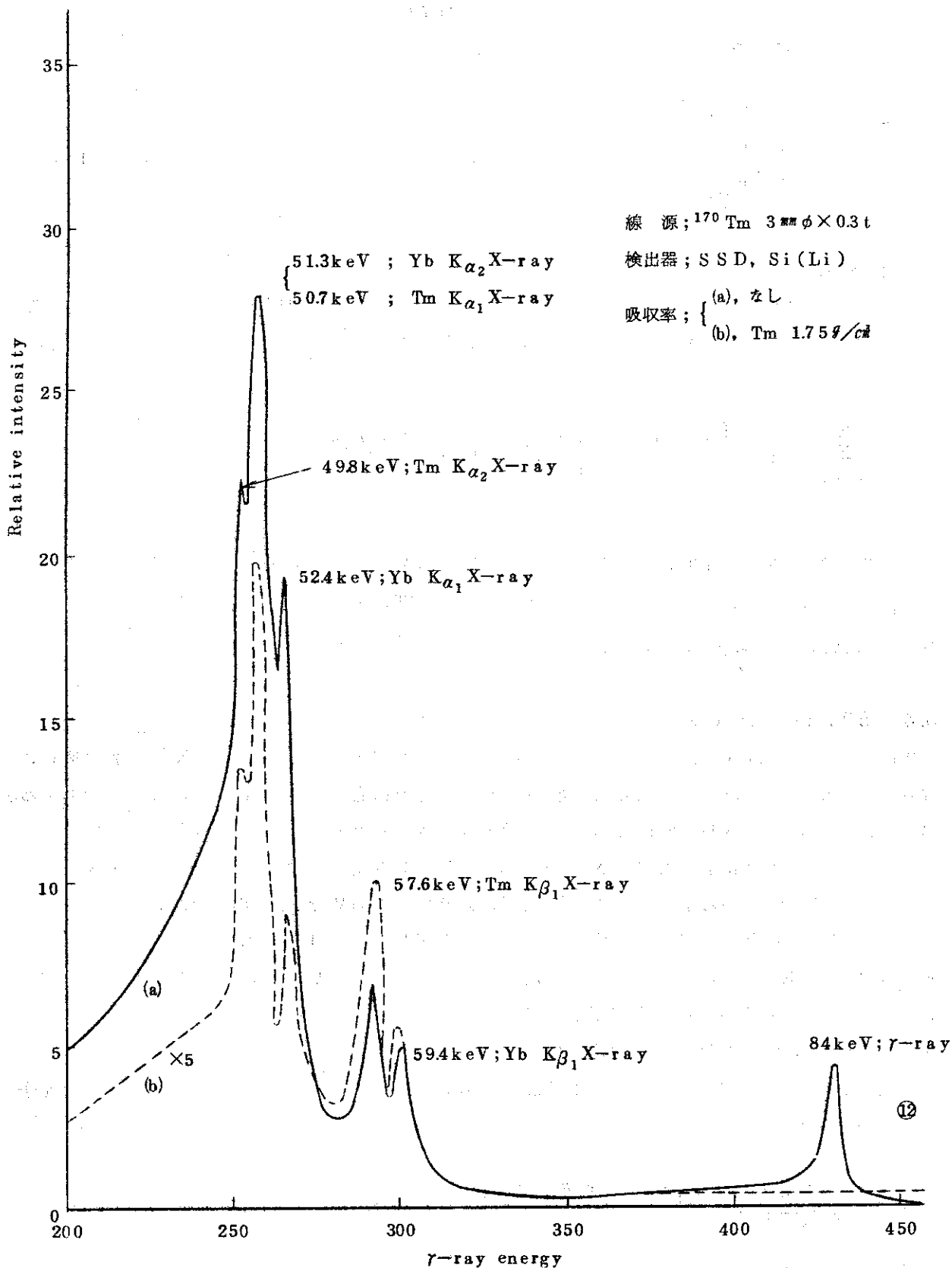
i) 84 keV γ 線の吸収に起因するもの

第2図において前方表面から深さtにおける84 keVの γ 線強度は1mの位置における光子密度であらわすと、

$$\frac{C_0 \alpha_{\gamma}}{r_1 \mu_{\gamma} + r_2 \mu'_{\gamma}} (1 - e^{-(r_1 \mu_{\gamma} + r_2 \mu'_{\gamma})(T-t)}) \quad (14)$$

いまこの位置で厚さ Δt の部分によって γ 線が吸収され、それにもなってTmのKX線が発生し、線源の自己吸収を受けて外部に放射される線量率H(R/hr·m)は、

$$H = \frac{C_0 \alpha_{\gamma} \beta_{KX}}{r_1 \mu_{\gamma} + r_2 \mu'_{\gamma}} (1 - e^{-(r_1 \mu_{\gamma} + r_2 \mu'_{\gamma})(T-t)}) \cdot \mu_{\gamma \cdot \text{phat}} \cdot \left(\frac{C_K}{\mu_{\gamma \cdot \text{phat}}} \right)$$



第4図 ^{170}Tm によるSSDによる γ , X線エネルギースペクトル

$$\cdot \omega_k \cdot e^{-(r_1 \mu_{kx} + r_2 \mu'_{kx}) t} \cdot \Delta t \quad (15)$$

ここで

μ_γ, μ'_γ : 84 keV γ 線の Tm および O 中の吸収係数, cm^2/g

μ_{kx}, μ'_{kx} : 84 keV γ 線の吸収によって発生した Tm の 50.7 keV の KX 線の Tm および O 中の吸収係数, cm^2/g

$\mu_{\gamma \cdot phat}$: 84 keV γ 線の Tm 中の光電効果による吸収係数, cm^2/g

$\frac{\sigma_k}{\mu_{\gamma \cdot phat}}$: 84 keV γ 線の Tm 中の光電効果による吸収のうち K 電子の電離に要する割合

ω_k : Tm に対する Tm KX 線の蛍光収率 (K Fluorescence yield) で 0.903

T : $^{170}Tm_2 O_3$ 線源の厚さ, g/cm^2

α_γ : ^{170}Tm 1 Ci の場合の線源から 1 m の位置における 1 時間当りの 84 keV γ 線の光子密度 (n/cm^2) で (3) 式で示される。

β_{kx} : 50.7 keV の Tm KX 線の光子 1 個の線量 (R) で

$\beta_{kx} = (1.6 E \times 10^{-6}) / (84 / \mu_{air \cdot kx})$, ここで E は MeV で表わした放射線のエネルギーでこの場合 0.0507, $\mu_{air \cdot kx}$ は 50.7 keV X 線の空気中の真吸収係数, cm^2/g

線源全体から放射される Tm の KX 線線量率は (15) 式を線源厚さ T にわたって積分して,

$$H_\gamma = \int_T^0 H$$

$$= \frac{C_0 \alpha_\gamma \beta_{kx}}{r_1 \mu_\gamma + r_2 \mu'_\gamma} \cdot \mu_{\gamma \cdot phat} \cdot \left(\frac{\sigma_k}{\mu_{\gamma \cdot phat}} \right) \cdot \omega_k \left[\frac{1 - e^{-(r_1 \mu_{kx} + r_2 \mu'_{kx}) T}}{r_1 \mu_{kx} + r_2 \mu'_{kx}} \right.$$

$$\left. - \frac{e^{-(r_1 \mu_\gamma + r_2 \mu'_\gamma) T} - e^{-(r_1 \mu_{kx} + r_2 \mu'_{kx}) T}}{(r_1 \mu_{kx} + r_2 \mu'_{kx}) - (r_1 \mu_\gamma + r_2 \mu'_\gamma)} \right] \quad (16)$$

となる。

ii) 制動放射線の吸収に起因するもの

制動放射線をエネルギー巾 ΔE ずつ区切って, i) の場合と同様にしてそれら X 線の吸収にともなう発生する Tm の KX 線線量率を求め, さらにそれらを合計すると,

$$H_x = \sum_{i=E_k}^{E_0} \left[\frac{C_0 \alpha_{xi} \beta_{kx}}{r_1 \mu_{xi} + r_2 \mu'_{xi}} \cdot \mu_{x \cdot phat \cdot i} \cdot \left(\frac{\sigma_{ki}}{\mu_{x \cdot phat \cdot i}} \right) \cdot \omega_{ki} \right]$$

$$\left[\frac{1 - e^{-(r_1 \mu_{kx} + r_2 \mu'_{kx})T}}{r_1 \mu_{kx} + r_2 \mu'_{kx}} - \frac{e^{-(r_1 \mu_{xi} + r_2 \mu'_{xi})T} - e^{-(r_1 \mu_{kx} + r_2 \mu'_{kx})T}}{(r_1 \mu_{kx} + r_2 \mu'_{kx}) - (r_1 \mu_{ki} + r_2 \mu'_{ki})} \right] \quad (17)$$

となる。第3図曲線(d)は(16)式および(17)式より求めた、 γ 線および制動輻射線が $^{170}\text{Tm}_2\text{O}_3$ 線源内で吸収され、それにもなって発生したTmのKX線線量率の分布である。ここで*i*は制動輻射線エネルギースペクトルを ΔE で区切ったときの順番を示し、 E_k はTmのK吸収端エネルギーを示す。

iii) β 線の吸収に起因するもの

β 線の吸収にもなって発生するTmのKX線線量率 H_β は1)と同様な考えで求めると、

$$H_\beta = \frac{C_0 \alpha_\beta \beta_{kx}}{\mu_\beta} \cdot K_\beta \cdot \omega_k \left[\frac{1 - e^{-(r_1 \mu_{kx} + r_2 \mu'_{kx})T}}{r_1 \mu_{kx} + r_2 \mu'_{kx}} - \frac{e^{-\mu_\beta T} - e^{-(r_1 \mu_{kx} + r_2 \mu'_{kx})T}}{(r_1 \mu_{kx} + r_2 \mu'_{kx}) - \mu_\beta} \right] \quad (18)$$

ここで α_β は $^{170}\text{Tm}1\text{Ci}$ の場合の線源から1mの位置における1時間当りの β 線密度(n/cm^2)
 μ_β は β 線の吸収係数⁸⁾で β 線の最大エネルギー E_0 (MeV)に関して実験的に
 $\mu_\beta = 22/E_0^{1.33} \text{ cm}^2/g$ で与えられる。 K_β は β 線のK捕獲断面積⁹⁾であって、K吸収端以上のエネルギーをもつ β 線に対しておよそ $10^6 Z_a^{-4} \text{ cm}^2/g$ で与えられる。第3図曲線(e)は(18)式によって求めた β 線の吸収の結果発生したTm KX線線量率の線源厚さTに対する分布である。

4. 考 察

$^{170}\text{Tm}_2\text{O}_3$ 線源の β 線のうち線源中で吸収されないで表面から放射される β 線量は、発生する全 β 線に対する割合で示すと、 $^{170}\text{Tm}_2\text{O}_3$ の厚さに応じて第5図のようになる。第3図の制動放射線の生成量曲線の計算にはこのことを考慮して、線源表面から放射される β 線を差引いて補正をした。実用線源である 3mm t の $^{170}\text{Tm}_2\text{O}_3$ の場合、表面から放射される β 線量は全 β 線量に対して約2%であり、さらに線源は 0.5mm t のTiカプセルに封入されるので実用上表面からの β 線は無視できる。

線源のX、 γ 線の自己吸収については再生係数を1として計算したが、光子エネルギーの低い範囲であり、Tmに対する吸収断面積をみてもコンプトン散乱成分は少なく、吸収体厚さもうすい範囲なので、再生係数を1としても結果に与える影響は少ないと思われる。

第3図をみると ^{170}Tm より放射される 52keV のX線および 84keV の γ 線は、それぞれ $^{170}\text{Tm}_2\text{O}_3$ 0.9g/cm^2 および 0.7g/cm^2 の厚さでその線量強度はだいたい飽和に達し、それ以上の厚さはこれら放射線の強度には関係しない。したがって 52keV および 84keV のX、 γ 線だけが必要ならば 0.9g/cm^2 (1.08mm)以上の厚さは無意味である。一方ラジオグラフィ用 ^{170}Tm 線源としては、線量率をできるだけ大きくしたいという要請があり、現在一般に使用されている ^{170}Tm 線源は $3\text{mm}\phi \times 3\text{mm}$ のものである。この厚さでの出力線量率を第3図でみると $0.0025\text{R/hr}\cdot\text{m}\cdot\text{Ci}$ であり、その78%が制動放射線である。一般には ^{170}Tm 線源は 52keV および 84keV のX、 γ 線であるとみられているが、以上の結果からみると制動放射線源であるといつてよい。

第6図～第9図は $^{170}\text{Tm}_2\text{O}_3$ 線源厚さ 0.41 , 1.42 , 2.37 , 4.56g/cm^2 の場合の計算で求めた光子エネルギースペクトルであるが、線源厚さを増すごとに光子エネルギーの高い成分が増加することがわかる。

5. ま と め

$^{170}\text{Tm}_2\text{O}_3$ 線源についてその厚さを変えた場合、X、 γ 線量率およびそのエネルギースペクトルがいかに変化するかを計算によって求めた。結果として線源厚さを大きくするにしたがって全体にしめる制動放射の割合が多くなり、現在一般に使用されている $3\text{mm}\phi \times 3\text{mm}$ の $^{170}\text{Tm}_2\text{O}_3$ 線源の場合、表面から放射される光子線はその78%が制動放射線であり、 52keV のX線は8%、 84keV の γ 線4%、 50.7keV のTm KX線は9%であることがわかった。このことからラジオグラフィ用 ^{170}Tm 線源は β 線を利用した制動放射線源であるといえる。また線源から 1m の位置における 1Ci の線量率は 0.0025R/hr と計算されたが、この値は従来使われていたRhm値と一致する。

4. 考 察

$^{170}\text{Tm}_2\text{O}_3$ 線源の β 線のうち線源中で吸収されないで表面から放射される β 線量は、発生する全 β 線に対する割合で示すと、 $^{170}\text{Tm}_2\text{O}_3$ の厚さに応じて第 5 図のようになる。第 3 図の制動放射線の生成量曲線の計算にはこのことを考慮して、線源表面から放射される β 線を差引いて補正をした。実用線源である 3 mm t の $^{170}\text{Tm}_2\text{O}_3$ の場合、表面から放射される β 線量は全 β 線量に対して約 2% であり、さらに線源は 0.5 mm t の Ti カプセルに封入されるので実用上表面からの β 線は無視できる。

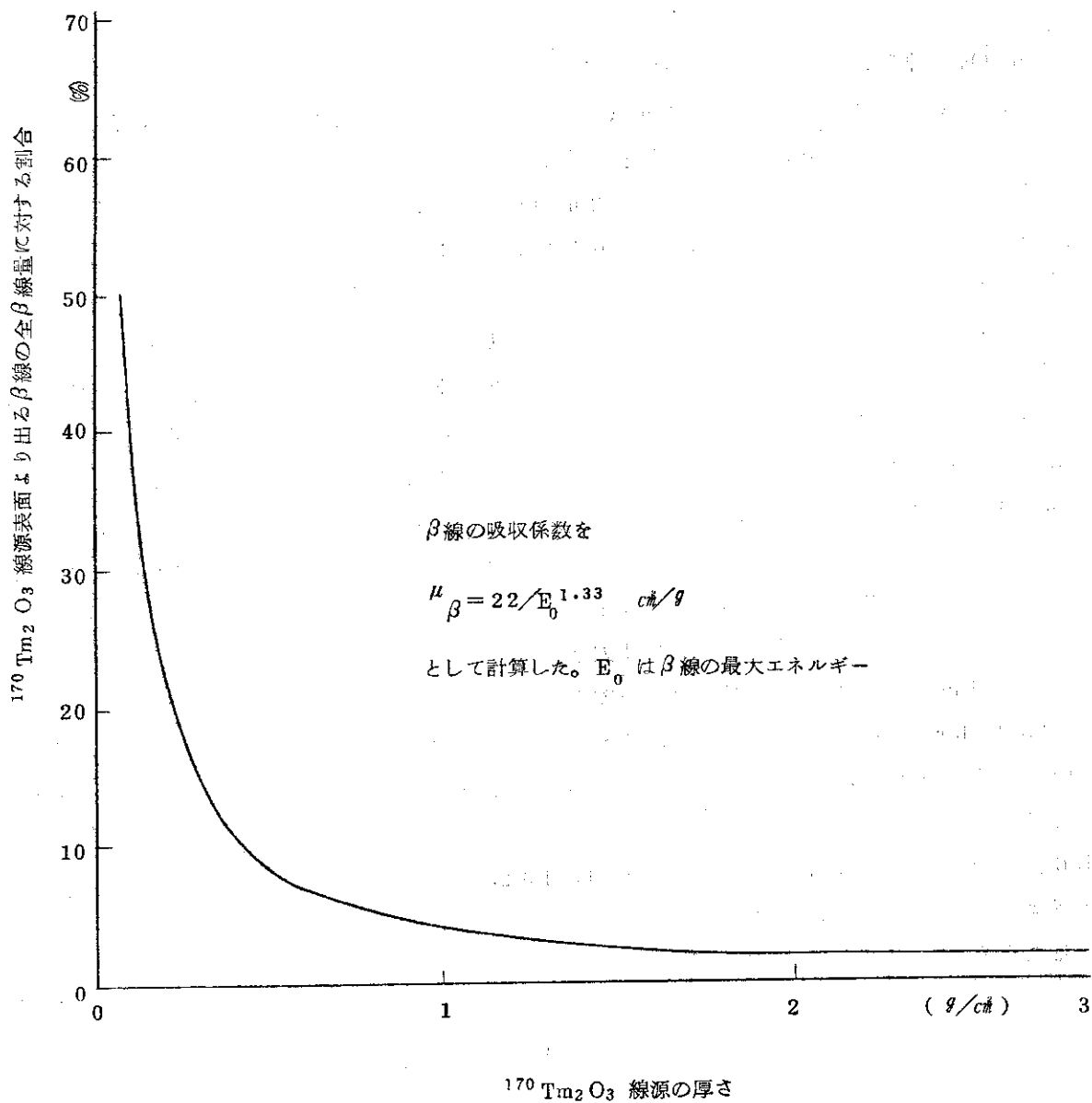
線源の X, γ 線の自己吸収については再生係数を 1 として計算したが、光子エネルギーの低い範囲であり、Tm に対する吸収断面積をみてもコンプトン散乱成分は少なく、吸収体厚さも薄い範囲なので、再生係数を 1 としても結果に与える影響は少ないと思われる。

第 3 図をみると ^{170}Tm より放射される 52 keV の X 線および 84 keV の γ 線は、それぞれ $^{170}\text{Tm}_2\text{O}_3$ 0.9 g/cm^2 および 0.7 g/cm^2 の厚さでその線量強度はだいたい飽和に達し、それ以上の厚さはこれら放射線の強度には関係しない。したがって 52 keV および 84 keV の X, γ 線だけが必要ならば 0.9 g/cm^2 (1.08 mm) 以上の厚さは無意味である。一方ラジオグラフィ用 ^{170}Tm 線源としては、線量率をできるだけ大きくしたいという要請があり、現在一般に使用されている ^{170}Tm 線源は $3\text{ mm } \phi \times 3\text{ mm}$ のものである。この厚さでの出力線量率を第 3 図でみると $0.0025\text{ R/hr} \cdot \text{m} \cdot \text{Ci}$ であり、その 78% が制動放射線である。一般には ^{170}Tm 線源は 52 keV および 84 keV の X, γ 線であるとみられているが、以上の結果からみると制動放射線源であるといつてよい。

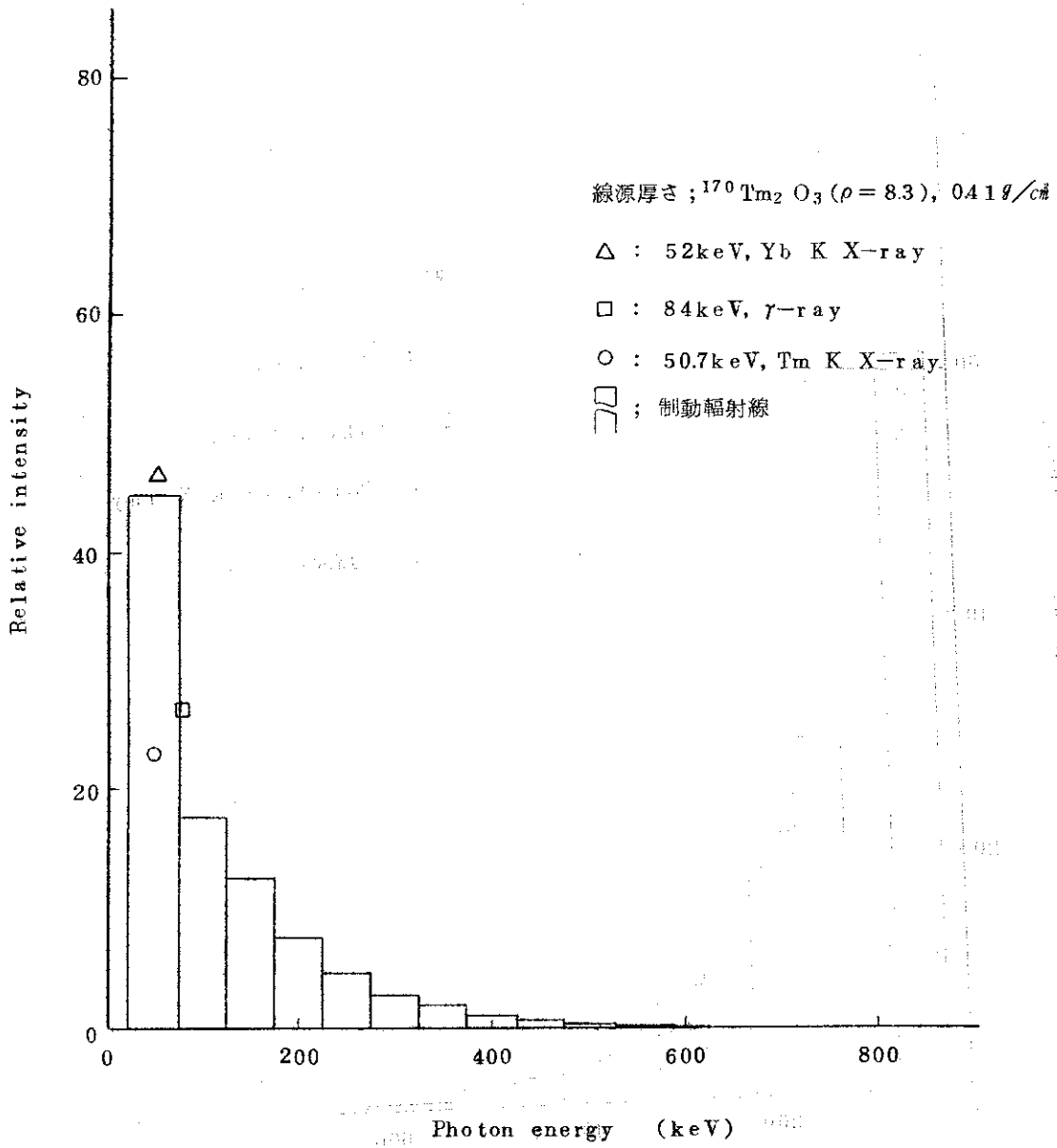
第 6 図～第 9 図は $^{170}\text{Tm}_2\text{O}_3$ 線源厚さ $0.41, 1.42, 2.37, 4.56\text{ g/cm}^2$ の場合の計算で求めた光子エネルギースペクトルであるが、線源厚さを増すごとに光子エネルギーの高い成分が増加することがわかる。

5. ま と め

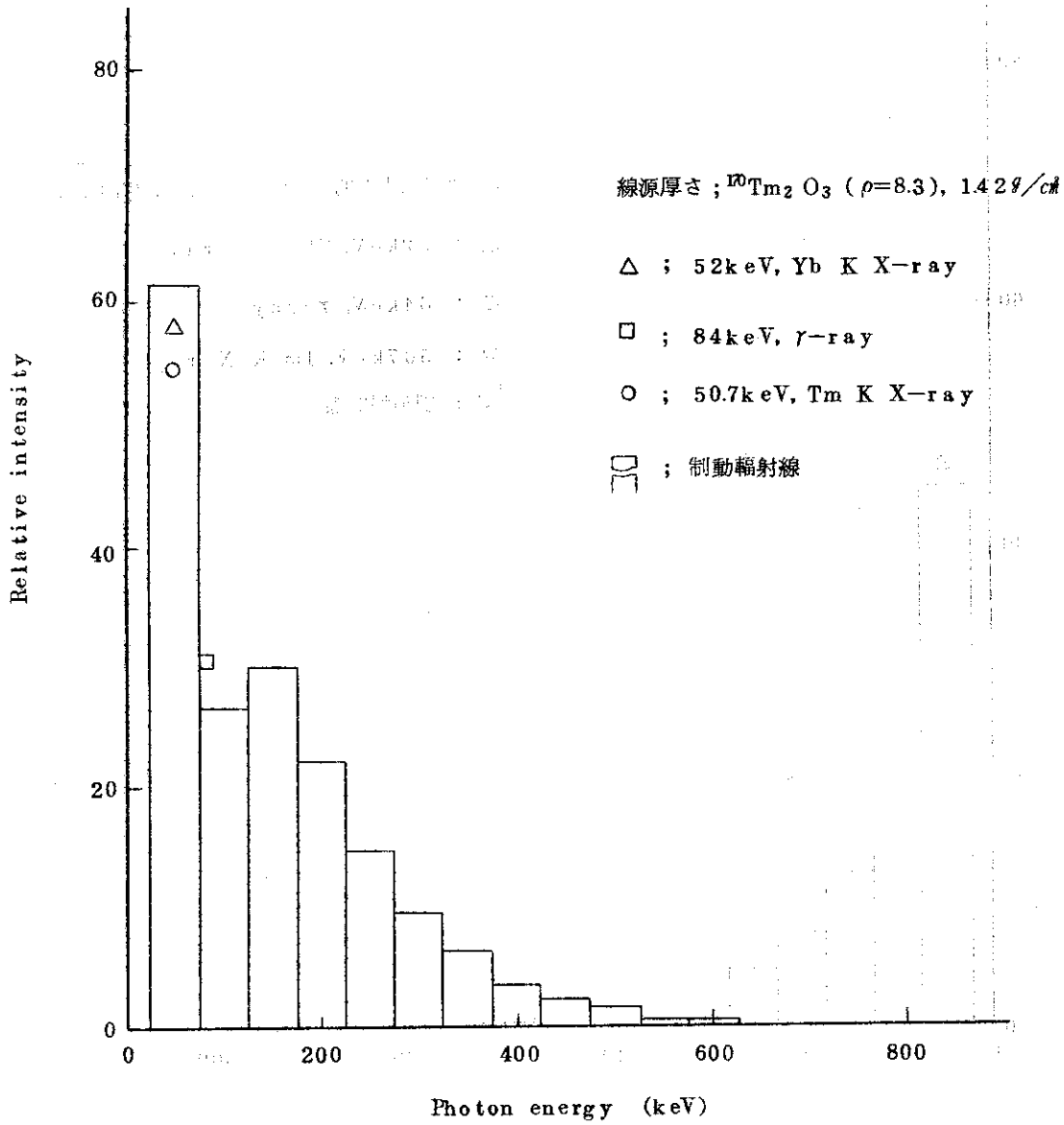
$^{170}\text{Tm}_2\text{O}_3$ 線源についてその厚さを変えた場合、X, γ 線量率およびそのエネルギースペクトルがいかに変化するかを計算によって求めた。結果として線源厚さを大きくするにしたがって全体に占める制動放射の割合が多くなり、現在一般に使用されている $3\text{ mm } \phi \times 3\text{ mm}$ の $^{170}\text{Tm}_2\text{O}_3$ 線源の場合、表面から放射される光子線はその 78% が制動放射線であり、 52 keV の X 線は 8%、 84 keV の γ 線 4%、 50.7 keV の Tm K X 線は 9% であることがわかった。このことからラジオグラフィ用 ^{170}Tm 線源は β 線を利用した制動放射線源であるといえる。また線源から 1 m の位置における 1 Ci の線量率は 0.0025 R/hr と計算されたが、この値は従来使われていた R h m 値と一致する。



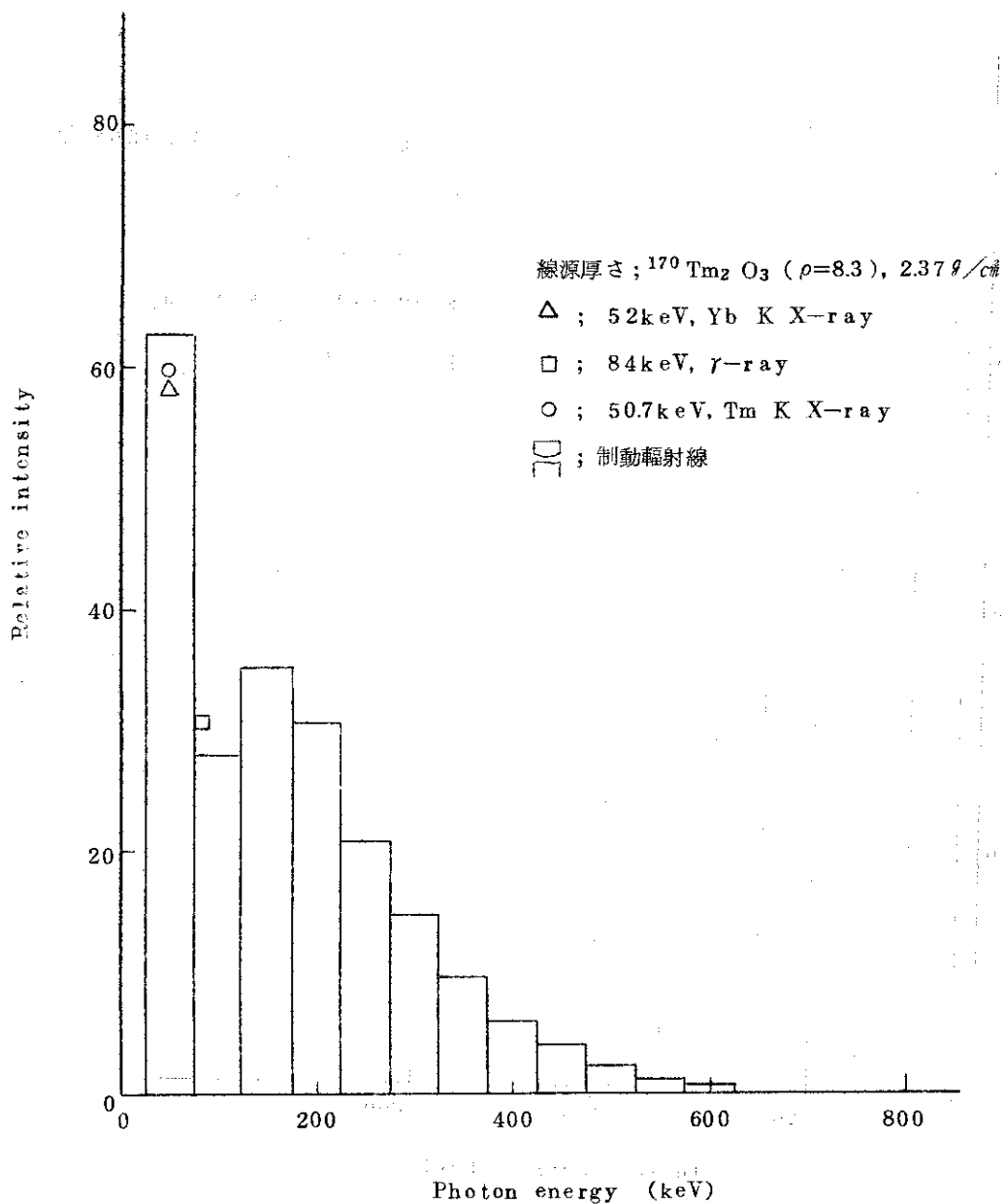
第5図 ¹⁷⁰Tm₂O₃ 線源の厚さ変化に対応する表面から出るβ線の全β線量に対する割合



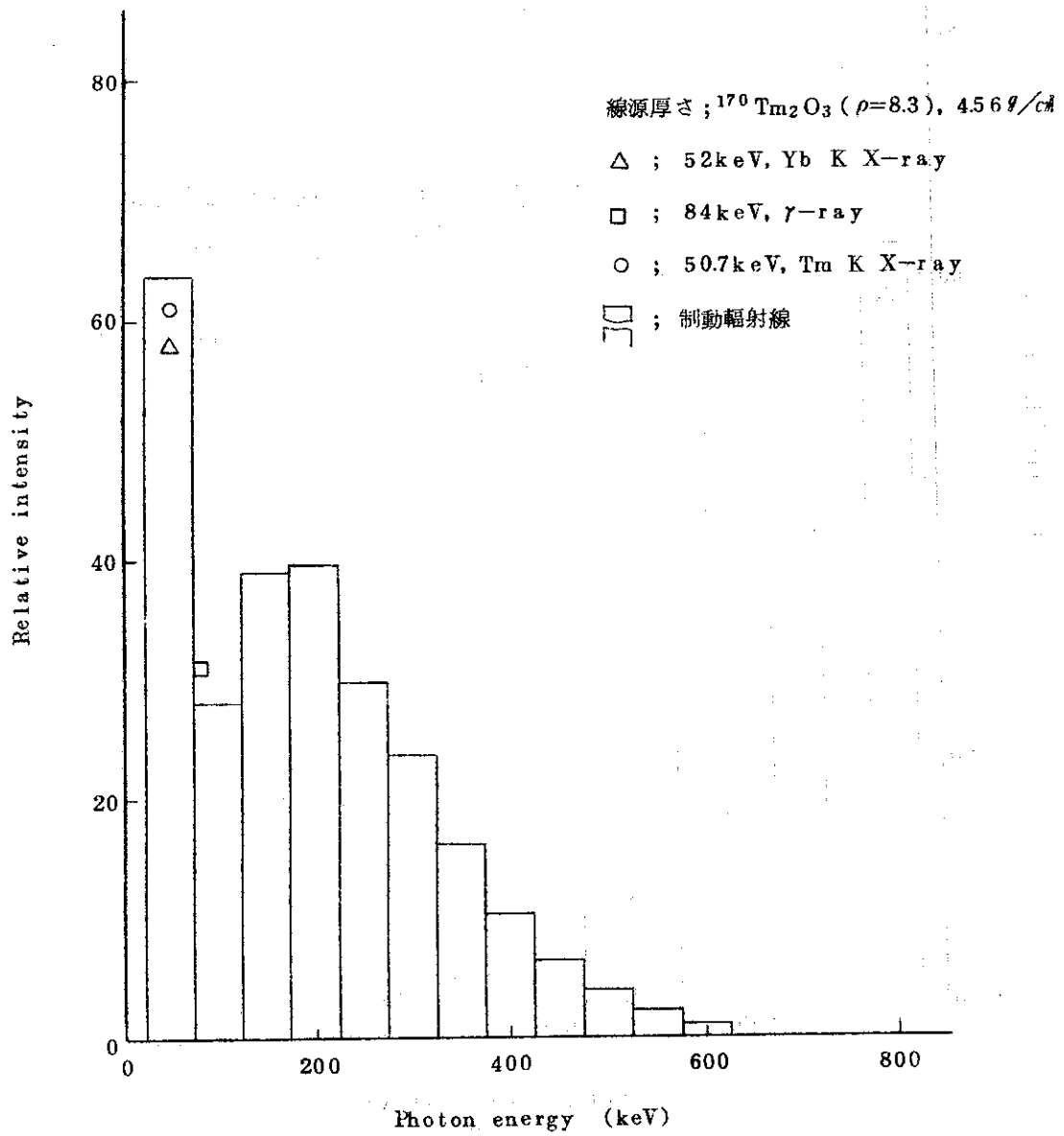
第6図 計算によって求めた $^{170}\text{Tm}_2\text{O}_3$ 線源
の γ , X線エネルギースペクトル



第7図 計算によって求めた $^{170}\text{Tm}_2\text{O}_3$ 線源
の γ , X線エネルギースペクトル



第8図 計算によって求めた $^{170}\text{Tm}_2\text{O}_3$ 線源の γ , X線エネルギースペクトル



第9図 計算によって求めた $^{170}\text{Tm}_2\text{O}_3$ 線源の γ , X線エネルギースペクトル

参 考 文 献

- 1) 前田 頌, 大野 明: JAERI-memo 3795 (1969)
- 2) 利用開発室, 日本航空(株)技術部: JAERI-memo 4163 (1970)
- 3) 前田 頌: NDI資料 1466 (1970)
- 4) 前田 頌, 近藤新助: NDI資料 1459 (1969)
- 5) 小林昌敏, 榎本茂正, 前田 頌, 土井達夫, 中村信治: 非破壊検査, 20, 121~126 (1971)
- 6) Wyard, S.J.: Proc. Phys. Soc., (London) A 65, 377 (1952)
- 7) Arnold, E.D.: ORNL-3576 (1964)
- 8) Libby, W.F.: Anal. Chem., 19, 2 (1947); Phys. Rev., 56, 21 (1936)
- 9) Voyvodic, L., Filosofo, I. and Klippert, T.: Armour Research Foundation (1959) 1122-13