

外部被曝による β 線吸収線量の評価

1964年10月

日本原子力研究所

Japan Atomic Energy Research Institute

日本原子力研究所は、研究成果、調査結果の報告のため、つぎの3種の刊行物を、それぞれの通しナンバーを付して、不定期に発行しております。

- | | | |
|---------|----------------------------------|-----------------|
| 1. 研究報告 | まとまった研究の成果あるいはその一部における重要な結果の報告 | JAERI 1001-3999 |
| 2. 調査報告 | 総説、展望、紹介などを含め、研究の成果、調査の結果をまとめたもの | JAERI 4001-5999 |
| 3. 資料 | 研究成果の普及、開発状況の紹介、施設共同利用の手引など | JAERI 6001-6999 |

このうち既刊分については「JAERI レポート一覧」にタイトル・要旨をまとめて掲載し、また新刊レポートは雑誌「原研」でその都度紹介しています。これらの刊行物に関する版權、複写のお問合せは、日本原子力研究所技術情報部あてお申し越してください。

なお、上記3種の報告は、日本原子力研究所生活協同組合（茨城県郡珂郡東海村）で実費頒布をいたしております。

Japan Atomic Energy Research Institute publishes the nonperiodical reports with the following classification numbers.

1. **JAERI 1001-3999** Research Reports.
2. **JAERI 4001-5999** Survey Reports and Reviews.
3. **JAERI 6001-6999** Information and Guiding Booklets.

Inquiries about these reports should be addressed to: Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

外部被曝による β 線吸収線量の評価

要 旨

放射性物質を取扱う実験または作業において、 γ 線の外部被曝の防護に対して払われる考慮の大きさにくらべて、 β 線の外部被曝はとかくおろそかにされがちである。

このような状況から、放射線作業現場における β 線被曝評価に適用できることを第1の目的として、 β の点、面および体線源からの外部被曝による吸収線量率を線源からの距離の関数として計算した。かつ日常の放射線管理に使われているGMおよび電離箱型サーベイ・メータを用いて β 線吸収線量率を求める方法を計算と実験によって検討し、サーベイ・メータの指示値から吸収線量率を求める換算係数を与えた。特に身体表面の汚染によってうける β 線と γ 線の吸収線量率、depth dose および integral dose について比較検討し、皮膚汚染に対する基準表面密度について考察をおこなった。

1964 年 7 月

東海研究所保健物理部 第一放射線管理室 福田整司
第二放射線管理室 神永博史
第一放射線管理室 井沢庄治

Evaluation of Absorbed Dose from the External β Source

Summary

In experiment or work associated with the handling of radioactive materials, consideration of protection for the external exposure from β ray is apt to be neglected, compared with the protection for γ ray. In view of such a situation, this report is primarily concerned with the radiation protection of personnel from the β ray external exposure, and its purpose is to apply the results obtained here to the evaluation of absorbed dose from the external β source on the actual spot where the radiation work is performed.

The absorbed dose rate from various sizes of external β sources were calculated as a function of distance from the source. In addition, practical method to obtain the β ray absorbed dose rate using survey instruments which are usually employed in radiation monitoring were examined and conversion factors from a reading of the instruments to the β ray absorbed dose rate were given for various measuring conditions.

Particularly, a comparison for β and γ emitters was made about the absorbed dose rate, depth dose and integral dose from the contamination on skin surface, and criterion concerning the allowable limits of the skin surface contamination due to β and γ emitters is discussed.

July 1964

SEIJI FUKUDA, HIROSHI KAMINAGA, SHOJI IZAWA
Division of Health Physics
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute

目 次

1. まえがき	1
2. 点線源からの吸収線量率	2
3. 面線源からの吸収線量率	3
3.1 無限平面線源からの被曝	3
3.2 有限平面線源からの被曝	3
4. 体線源からの吸収線量率	9
4.1 体線源表面の吸収線量率	9
4.2 表面吸収線量率が既知の場合、有限な体線源または面線源から任意の距離における吸収線量を求める近似法	12
5. β 線吸収線量率の測定	15
5.1 端窓型 GM 計数管の計数率と β 線吸収線量率との関係	15
5.1.1 面または体線源表面の吸収線量率を測定する場合	15
5.1.2 平行 β 線による吸収線量率を測定する場合	18
5.2 各種サーベイ・メータの照射率指示値と β 線吸収線量率との関係	18
5.2.1 面または体線源表面の吸収線量率を測定する場合	18
5.2.2 点線源から離れた位置における吸収線量率を測定する場合	20
6. β 線と γ 線による皮膚吸収線量の比較	26
6.1 点線源	26
6.2 面線源	26
6.3 体線源	26
7. Depth dose および integral dose の計算	28
7.1 皮膚表面の汚染	28
7.2 眼の汚染	35
7.3 体線源による depth dose	33
8. 皮膚表面の β および γ 汚染に対する基準表面密度についての考察	36
9. β 線による外部被曝の防護	39
10. あとがき	41
記号表	42
参考文献	43
付記 A β 線源の表	44
付記 B β 線に対する吸収係数 μ について	44
付記 C 面線源からの γ 線による組織吸収線量率の計算	47
付記 D 制動 X 線の割合を知る図表	48

目 次

第 1 図 a および b	点線源からの距離の関数としての吸収線量率 (不感層直下の値).....	3, 4
第 2 図	一様な表面密度の面線源からの被曝	5
第 3 図	一様な表面密度の面線源から種々の距離における吸収線量率 (不感層直下の値)	6
第 4 図	汚染面積が無限の時の吸収線量率に 99 パーセント寄与する汚染面積の拡がりの程度	7
第 5 図	皮膚表面の汚染面積と 7 mg/cm^2 における吸収線量率との関係	8
第 6 図	一様な密度と濃度の体線源からの被曝	9
第 7 図	$X = \int_0^{\infty} \int_x^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy dx$ のグラフ	10
第 8 図	表面における吸収線量率が飽和値に達する時の β 体線源の厚さ	11
第 9 図	密度が 1.0 g/cm^3 の場合に (9) 式と (11) 式で計算される体線源からの吸収線量率 の比較, および皮膚不感層の有効厚さ	12
第 10 図	体線源または面線源からの吸収線量率を距離の関数として計算する時に使用される円 板に対する立体角	12
第 11 図	表面吸収線量率が既知である場合の体線源または面線源の表面から任意の距離におけ る吸収線量率を求める近似法	13
第 12 図 a および b	面線源からの吸収線量率と SM-102 および TGS-103 型 GM サーベイ・ メータの計数率との関係 (線源または汚染面の面積が GM 管の窓面積より大きい場合)	16
第 13 図	面線源または汚染面の面積が GM 管の窓面積より小さい場合の補正係数	17
第 14 図	平行 β 線による吸収線量率と GM サーベイ・メータの計数率との関係	18
第 15 図	外挿電離箱	19
第 16 図 a ~ e	β 線源に対する種々のサーベイ・メータの感度曲線	21, 22
第 17 図	β 面線源の直径の関数として与えられる不感層直下における表面吸収線量率と種々の サーベイ・メータの照射率指示値との関係すなわち換算係数	23
第 18 図	β 点線源からの距離の関数として与えられる不感層直下における吸収線量率と種々の サーベイ・メータの照射率指示値との関係すなわち換算係数	24
第 19 図	点線源と面線源による β 線と γ 線吸収線量率の比	27
第 20 図	皮膚上の無限平面線源からの β 線 depth dose 曲線	29
第 21 図	皮膚上の有限平面線源からの β 線 depth dose 曲線	30
第 22 図	皮膚上の面線源からの γ 線 depth dose 曲線	31
第 23 図	Depth dose の計算	31
第 24 図	不感層直下から組織の任意の深さまでの β および γ 線 integral dose rate	32
第 25 図	一様濃度の半無限の体線源表面からの距離の関数として与えられる吸収線量率	34
第 26 図	身体の各部および種々の深さにおいて最大許容線量を与える表面汚染密度の大きさ	37
B-1 図	吸収係数	46
D-1 図	β 線の全エネルギー損失に対する制動 X 線によるエネルギー損失の割合	47

Contents

1. Introduction	1
2. Absorbed dose rate from a point source.....	2
3. Absorbed dose rate from a plane source	3
3.1 Exposure from the infinite plane source	3
3.2 Exposure from the finite plane source.....	3
4. Absorbed dose rate from a volume source.....	9
4.1 Absorbed dose rate at the surface of the volume source	9
4.2 Approximate method to evaluate the absorbed dose rate at any distance from the surface of the volume or plane source of which dose rate at the surface is known.....	12
5. Measurement of β ray absorbed dose rate.....	15
5.1 Relationship between the counting rate by end window type GM survey instruments and the β ray absorbed dose rate	15
5.1.1 Case to measure the absorbed dose rate at the surface of a volume or plane source	15
5.1.2 Case to measure the absorbed dose rate from a parallel β ray	18
5.2 Relationship between the exposure rate reading of the various types of survey instruments and the β ray absorbed dose rate.....	18
5.2.1 Case to measure the absorbed dose rate at the surface of a volume or plane source	18
5.2.2 Case to measure the absorbed dose rate at any distance from a point source.....	25
6. Comparison of the skin absorbed dose from β and γ sources	26
6.1 Point source.....	26
6.2 Plane source.....	26
6.3 Volume source.....	26
7. Calculation of depth dose and integral dose	28
7.1 Contamination of skin surface	28
7.2 Contamination of eyes.....	33
7.3 Depth dose due to a volume source	33
8. Discussion of criterion concerning the allowable limits of the skin surface contamination due to β and γ emitters	36
9. Protection for the β ray external exposure	39
10. Conclusion	41
Nomenclature.....	42
References	43
Appendix A Table of β sources.....	44
Appendix B On the absorption coefficient.....	44
Appendix C Calculation of tissue absorbed dose rate for γ ray from a plane source.....	47
Appendix D Graph on fraction of radiation loss for total energy loss of β ray	47

Figure Contents

Fig. 1 a and 1 b	Absorbed dose rate from a point source as a function of distance (at depth of 7 mg/cm ²)	3, 4
Fig. 2	Exposure from a plane source having constant activity per unit area	5
Fig. 3	Absorbed dose rate at various distances from the surface of plane source having constant activity per unit area (at depth of 7mg/cm ²)	6
Fig. 4	The extent of a contaminated plane area which contribute by 99 per cent of the absorbed dose rate at 7 mg/cm ² depth from an infinite plane source.....	7
Fig. 5	Relationship between the area of contaminated skin surface and the absorbed dose rate at 7 mg/cm ²	8
Fig. 6	Exposure from a volume source having uniform density and concentration.....	9
Fig. 7	Graph of $X = \int_0^{x_0} \int_x^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy dx$	10
Fig. 8	Thickness of a β volume source from which absorbed dose rate at the surface reaches to the saturated value	11
Fig. 9	Comparison of the absorbed dose rate from a volume source calculated by eq. (9) and eq. (11) in the case of the density 1.0 g/cm ³ , and effective thickness of protective layer of skin	12
Fig. 10	Solid angle subtended by circular disk which is used to calculate the absorbed dose rate from a volume or plane source as a function of distance	12
Fig. 11	Approximate method to evaluate the absorbed dose rate at any distance from the surface of a volume or plane source from which dose rate at the surface is known.....	13
Fig. 12 a and 12 b	Relationship between absorbed dose rate and counting rate by SM-102 and TGS-103 type GM survey instruments from a plane source (An area of the source or contaminated plane is greater than window area of the GM tube)	16
Fig. 13	Correction factors for the plane source or contaminated plane less than window area of the GM tube	17
Fig. 14	Relationship between absorbed dose rate and counting rate by the GM survey instruments from parallel β ray	18
Fig. 15	Extrapolation chamber.....	19
Fig. 16a~e	Sensitivity curves of the various types of survey instruments for β source.....	21, 22
Fig. 17	Conversion factors for the various types of survey instruments which gives the relationship between the surface absorbed dose rate (at 7 mg/cm ² of skin) and the exposure rate reading of instruments as a function of diameter of β plane source	23
Fig. 18	Conversion factors for the various types of survey instruments which gives the relationship between the absorbed dose rate (at 7 mg/cm ² of skin) and the exposure dose rate reading of the instruments as a function of distance from a β point source.....	24
Fig. 19	Ratio of β and γ absorbed dose rate from a point and plane source.....	27
Fig. 20	β ray depth dose curve from an infinite plane source on the skin.....	29
Fig. 21	β ray depth dose curve from a finite plane source on the skin	30
Fig. 22	γ ray depth dose curve from a plane source on the skin.....	31
Fig. 23	Calculation of depth dose	31

Fig. 24	β and γ ray integral dose rate as a function of depth from tissue under the protective layer of skin.....	32
Fig. 25	Absorbed dose rate as a function of distance from the surface of semi-infinite volume source having constant activity per unit volume	34
Fig. 26	Amounts of the activity per unit contaminated area which gives the maximum permissible dose at the various parts and depth of a body.....	37
Fig. B-1	Absorption coefficient	45
Fig. D-1	Fraction of radiation loss for total energy loss of β ray	46

1. ま え が き

最近は高中性子束密度で照射がおこなわれるようになった結果、比放射能の高いアイソトープが実験室や各種の放射線作業で取扱われるようになってきた。それに伴ってβ線による外部被曝が増える傾向にあり、その原因は殆どβ線被曝に対する正当な評価が欠けていることにあると考えられる。β粒子は物質との相互作用が大きく、そのため最大エネルギー 1 MeV のβ線でも空気中で約 3 m、水中（体の組織と大体等価）ではわずかに約 4 mm の飛程を有するにすぎない。それ故β線による被曝は局部的なものであり、かつ簡単な遮蔽で被曝が防げるという安易感から、β放射体の取扱いはおろそかになりがちである。β線の透過能が小さいということは、実は皮膚の局部における吸収線量がきわめて大きいということを意味しているから、β放射体の取扱いはγ線の場合とは別の意味で慎重な態度が必要である。β放射体だけに限らないが、放射線作業の開始に当ってはその危険度ないしは被曝線量の評価をおこなうことが最も肝要なことであり、特に現場の放射線管理にたずさわりの被曝防護の立場にある人達はβ線の外部被曝に対する正当な認識をもち、その障害評価および測定法に関する知識を身につけておかなければならない。

この報告はβ線源を取扱う実験ないしは作業がおこなわれる場合の放射線管理に当って、β線による外部被曝の評価を正しくおこない、かつそれに基づいて必要な防護手段をとるのに役立つことを主目的としている。それ故厳密な表現よりもむしろできるだけ実用的な表現をとることにし、放射線作業の現場ですぐ適用できることを意図した。ここで述べるβ線の外部被曝による吸収線量の解析は身体表面の汚染が発生した場合に、除染などを含めて応急にとられるべき処置に対する判断の1つの基準を与えることにも役立つものと考えられる。

β線の吸収線量を計算する場合に問題となるのは、線量分布関数、吸収係数およびβ線の平均エネルギーの選定である。点線源に対する線量分布関数としては、線源が吸収線量を求めようとする媒質中にある場合はかなり精度の良い実験式が求められている^{1),2)}。しかしながら外部被曝による吸収線量を計算する場合は、一般に線源のある媒質と吸収線量を求める媒質とは異なって（あるいは両方の密度が違って）いるので、一様媒質について得られた実験式は適用できない。このような場合は指数減衰関数を使うのが便利である。放射線作業現場における被曝防護の目的にはこれを用いて十分な精度の吸収線量が得られると共に数学的な取扱も容易であるので、ここでは点線源に対する線量分布関数として $\frac{1}{x^2} \exp(-\mu x)$ の形を用いた。平均エネルギーとしては理論的な計算値または実験値が得られている場合はそれらを使用することとし、不明な場合は経験式^{3),4)}により算出した（β線平均エネルギーについては付記 A の TABLE A-1 にあげてある）。吸収係数については今までにかなり多くの実験式なり経験式が与えられている（付記 B を参照）が、この計算では GLEASON *et al.*⁵⁾ によって求められた実験式 $\mu = 17 E_m^{-1.48} (\text{cm}^2/\text{g})$ を用いた。

2. 点線源からの吸収線量率

皮膚の不感層 (7 mg/cm²*) の直下における吸収線量率 $D(d)$ rad/hr は点線源からの距離 d cm の関数として次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 D(d) \frac{\text{rad}}{\text{hr}} &= \frac{I}{4\pi d^2} \left(\frac{\text{mc}}{\text{cm}^2} \right) \times 3.7 \times 10^7 \left(\frac{\text{dps}}{\text{mc}} \right) \times 3600 \left(\frac{\text{sec}}{\text{hr}} \right) \times 1.6 \times 10^{-6} \left(\frac{\text{erg}}{\text{MeV}} \right) \\
 &\times \frac{1}{100} \left(\frac{\text{rad} \cdot \text{g}}{\text{erg}} \right) \times \sum_i f_i E_i (\text{MeV}) \mu_i \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \right) \exp\{-\mu_i (\rho d + 0.007 \rho_i)\} \\
 &= 1.7 \times 10^2 \frac{I}{d^2} \sum_i f_i E_i \mu_i \exp\{-\mu_i (1.3 d + 7) 10^{-3}\} \quad (1)
 \end{aligned}$$

ここに, I = 点線源の強さ mc

ρ = 空気の密度 0.0013 g/cm³

ρ_i = 組織の密度 1.0 g/cm³

f_i = 平均エネルギー E_i の β 線を出して崩壊する割合

Fig. 1 a および Fig. 1 b に代表的な β 線源である ⁹⁰Sr + ⁹⁰Y および ³⁵S に対して計算した値を示す。この図から分かるように, ⁹⁰Sr および ⁹⁰Y がそれぞれ単独に存在するとした場合の吸収線量率は, それらの最大エネルギーが相当違っているにもかかわらず, 0.3 cm から 30 cm の範囲にわたってかなり近い値になっている。これは質量吸収係数 μ が $E_m^{-1.48}$ で減少する一方, 平均エネルギー E は最大エネルギー E_m が増加するにつれて, $1/3 E_m$ からのずれの割合が大きくなるためである。⁹⁰Sr と ⁹⁰Y の場合, すなわち原子番号 20 位の原子の場合に, 吸収線量率が大体一致するということは, E が近似的に $E = \text{const.} E_m^{1.4}$ の関係式で表わされることを示している**。 E はまた原子番号 Z にも依存するが, 特に Z の大きい原子たとえば RaE 等を除いてはあまり問題とならない程度である。それゆえ, Fig. 1 a および Fig. 1 b の ⁹⁰Sr と ⁹⁰Y の結果は E_m が 0.3 MeV から 2.5 MeV の β 線に対する吸収線量率を求める場合にも近似的に適用できる。

* 7 mg/cm² は不感層の最も薄い部分に相当しており, 手のひらの不感層は 40 mg/cm² といわれている。

** ⁹⁰Sr と ⁹⁰Y はいずれも forbidden spectrum の β 粒子を出して崩壊するから, ここで用いた allowed spectrum に対する質量吸収係数 μ は密密には適用できないが, forbidden spectrum として求めた μ と, ここで用いた μ との違いは 20% 以下と考えられるから¹⁾, 実用的には問題とならない。

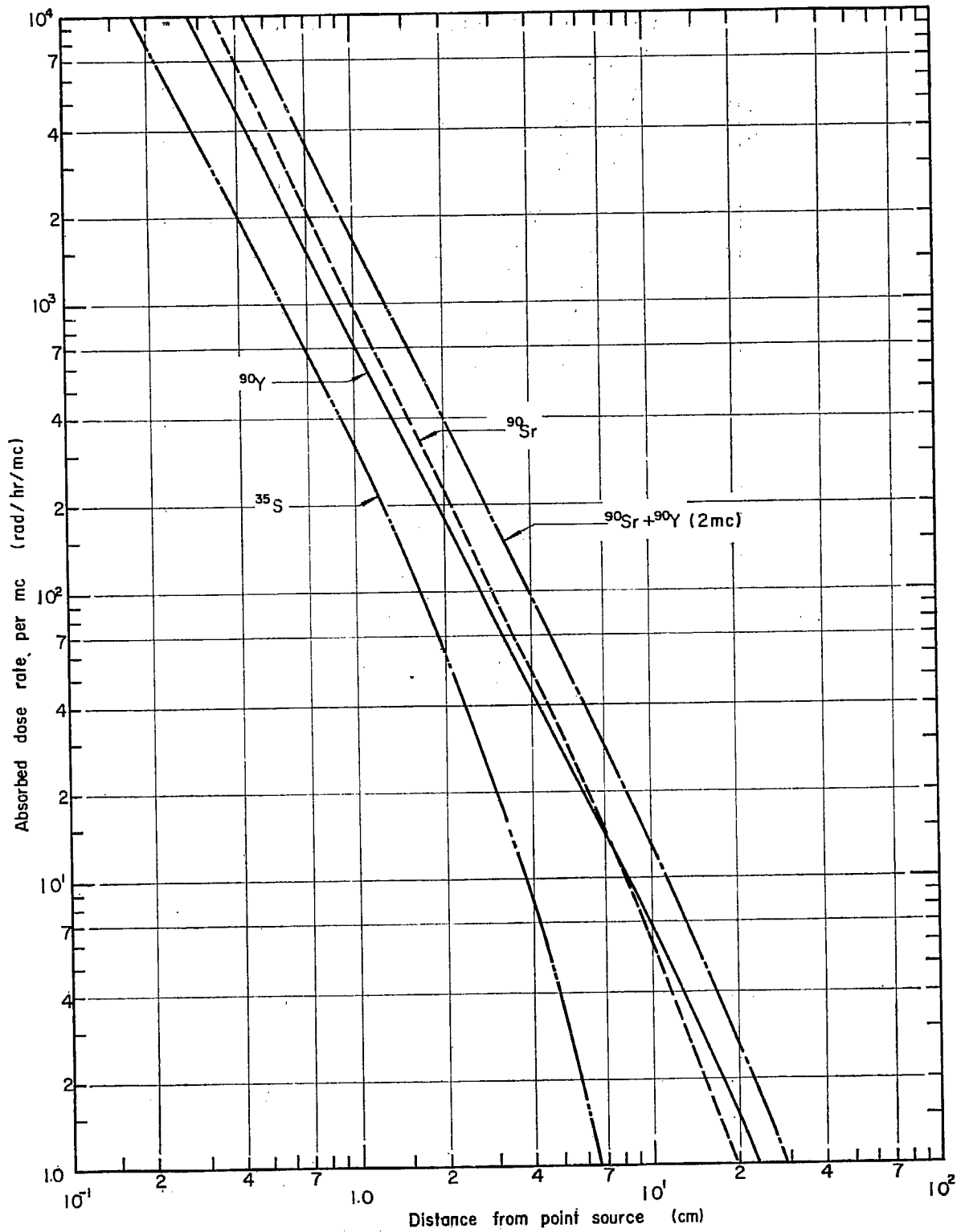


Fig. 1 a Absorbed dose rate from a point source as a function of distance. (at depth of 7 mg/cm²)

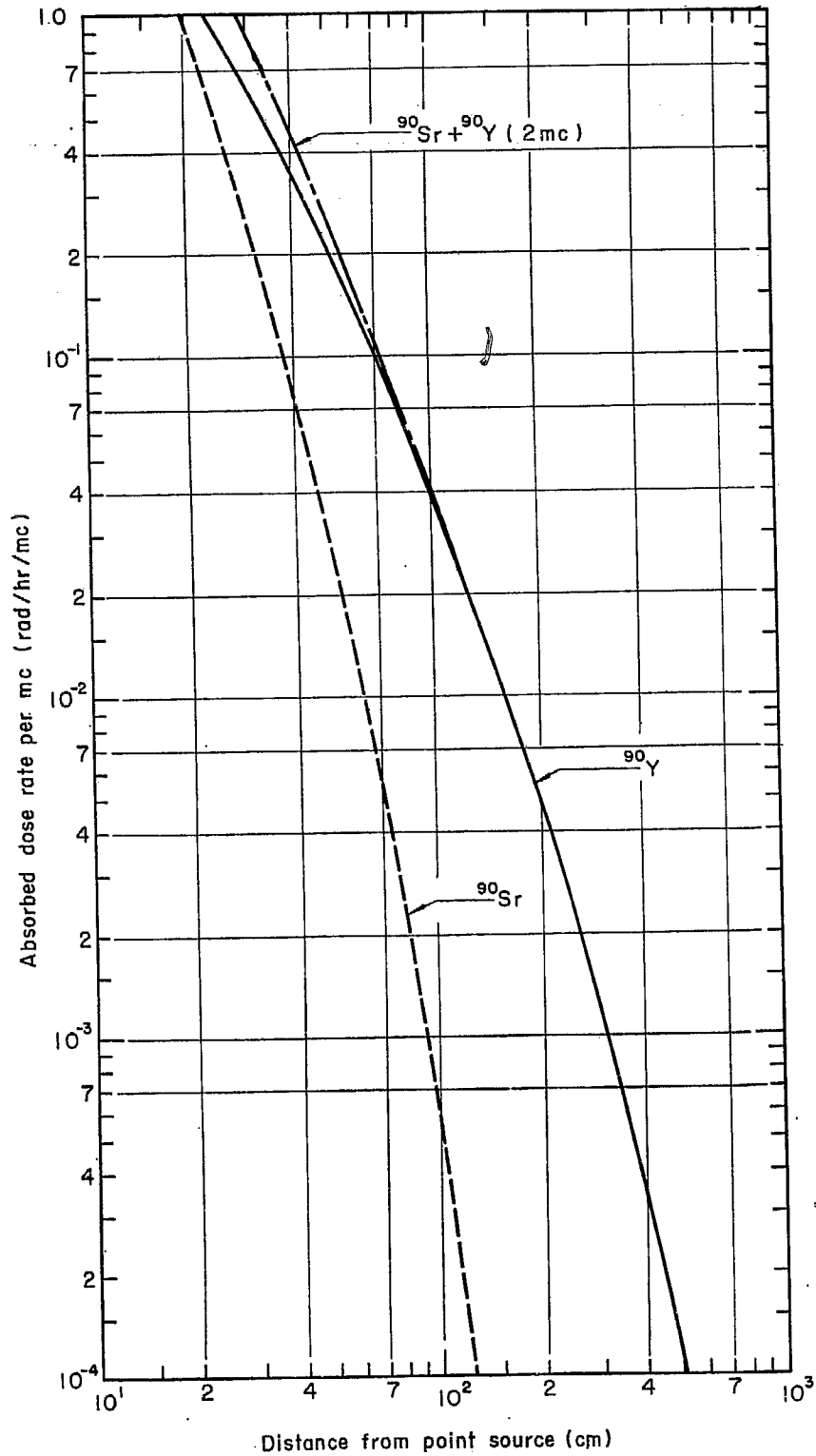


Fig. 1 b Absorbed dose rate from a point source as a function of distance. (at depth of 7 mg/cm²)

3. 面線源からの吸収線量率

3.1 無限平面線源からの被曝

一様に汚染した無限平面からの β 線によって組織のうける吸収線量率は、表面汚染密度を $S \mu\text{c}/\text{cm}^2$ とすると次式で表わされる (Fig. 2).

$$\begin{aligned} D_{\infty}(H) &= \frac{1}{100} \int_0^{\infty} \frac{E\mu}{4\pi R^2} S \cdot 2\pi x dx e^{-\mu\rho R} \times 3.7 \times 10^4 \times 3.6 \times 10^8 \times 1.6 \times 10^{-6} \\ &= 1.07 \mu ES \int_0^{\infty} \frac{x dx}{x^2 + H^2} \exp(-\mu\rho\sqrt{x^2 + H^2}) \\ &= 1.07 \mu ES \int_{\mu\rho H}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy \\ \therefore D_{\infty}(H) &= 1.07 \mu ES E_1(h) \text{ rad/hr} \quad (2) \end{aligned}$$

$$\text{ここに, } E_1(h) = \int_{\mu\rho H}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy$$

$$h = \mu\rho H$$

皮膚表面に汚染が生じた場合の吸収線量率は、直接 (2) 式に $H = 0.007 \text{ cm}$ を代入して計算すれば良い。床の表面等の汚染であって空気層を介して組織の吸収線量率を求める場合は、 H は空気層の厚さとなり、不感層直下の吸収線量率は近似的に次式で与えられる。

$$D_{\infty}(H) = 1.07 \mu ES \times E_1(h) \exp(-7 \times 10^{-3} \mu) \text{ rad/hr} \quad (3)$$

Fig. 3 に $S = 1 \mu\text{c}/\text{cm}^2$ の一様な表面密度で皮膚表面および床表面 (または地表面) が無限平面と考えられる範囲 (3.2 参照) で汚染した場合に、 β 線によってうける吸収線量率を (2) および (3) 式を用いて計算した結果を示す*。この計算に当っては近似的に $E = \frac{1}{3} E_m$ ととった。したがって、核種が分かっている場合はその平均エネルギーを3倍した値を Fig. 3 の E_m に相当するエネルギーとしてとり、それに対応する吸収線量率を求めれば良い。床、地面等が汚染した場合はそれらからの後方散乱があるので、(2) および (3) 式において後方散乱係数を考慮する必要がある (後方散乱係数については文献 6) 参照)。

Fig. 3 には比較のために γ 線による吸収線量率を併せて示してある (計算については付記 C 参照)。

3.2 有限平面線源からの被曝

普通使用する面線源とか、発生した汚染とかは有限の広がりをもつものであるので、ここでは β 線源の広がりや吸収線量率との関係を検討することにする。

いま β 線を出す面線源の半径を a とすると、その面線源の中心から H の距離にある中心軸上の点 P における吸収線量率は次式で表わされる。

$$D(H) = 1.07 \mu ES \int_{\mu\rho H}^{\mu\rho R} \frac{e^{-y}}{y} dy = 1.07 \mu ES [E_1(h) - E_1(r)] \text{ rad/hr} \quad (4)$$

$$\text{ここに, } r = \mu\rho R = \mu\rho\sqrt{H^2 + a^2}$$

* Fig. 3 に示した H は皮膚表面から線源までの距離を示すもので、同図で $H=0$ は皮膚表面の汚染を意味しており、吸収線量率としては不感層直下の値 ((2) 式) を与えている。

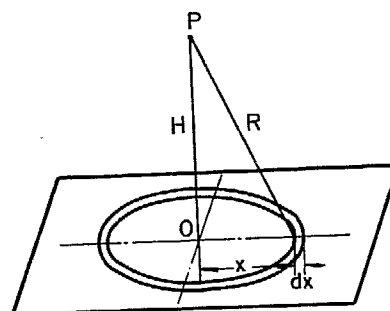
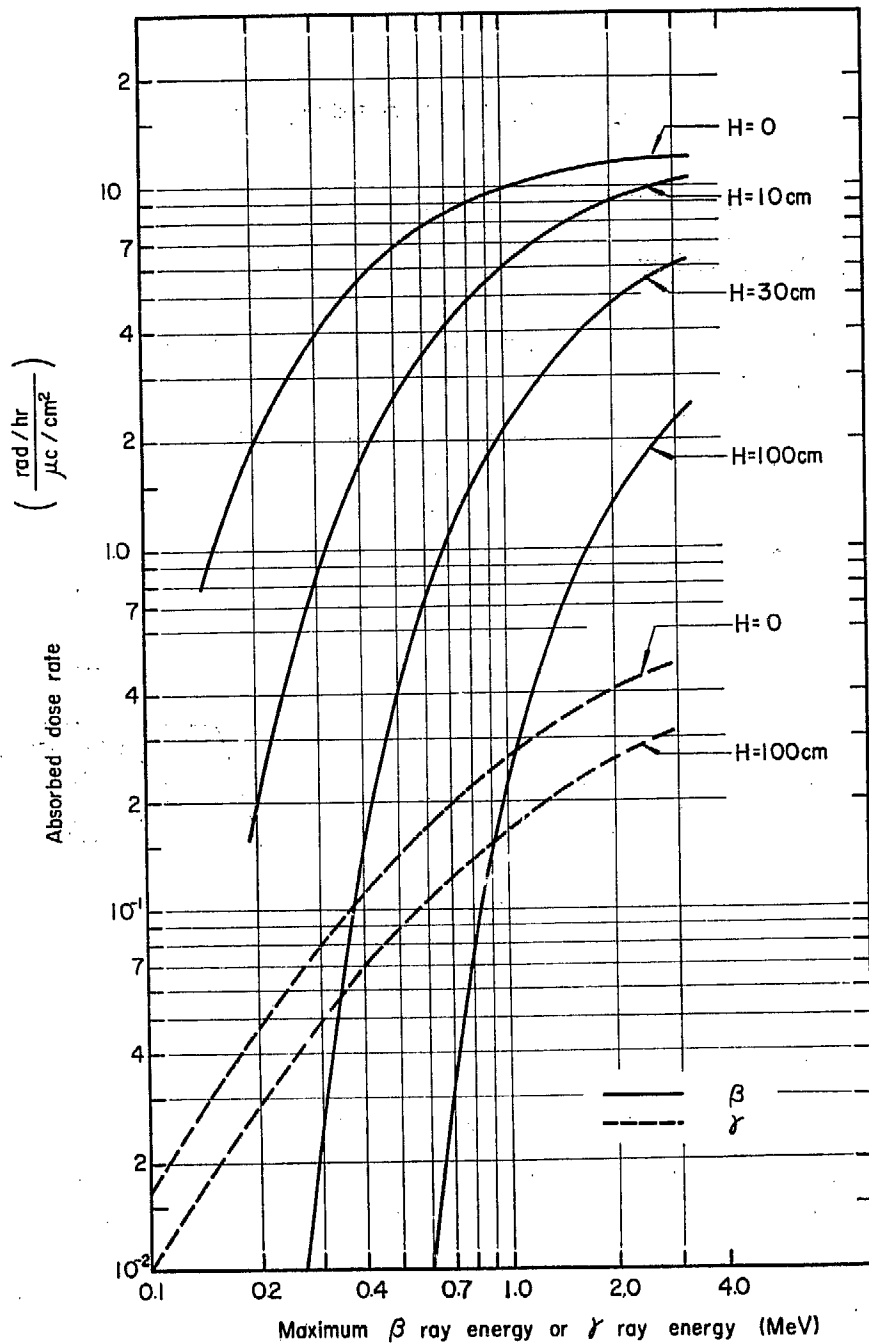


Fig. 2 Exposure from a plane source having constant activity per unit area.



H : A distance from the plane source to the skin surface

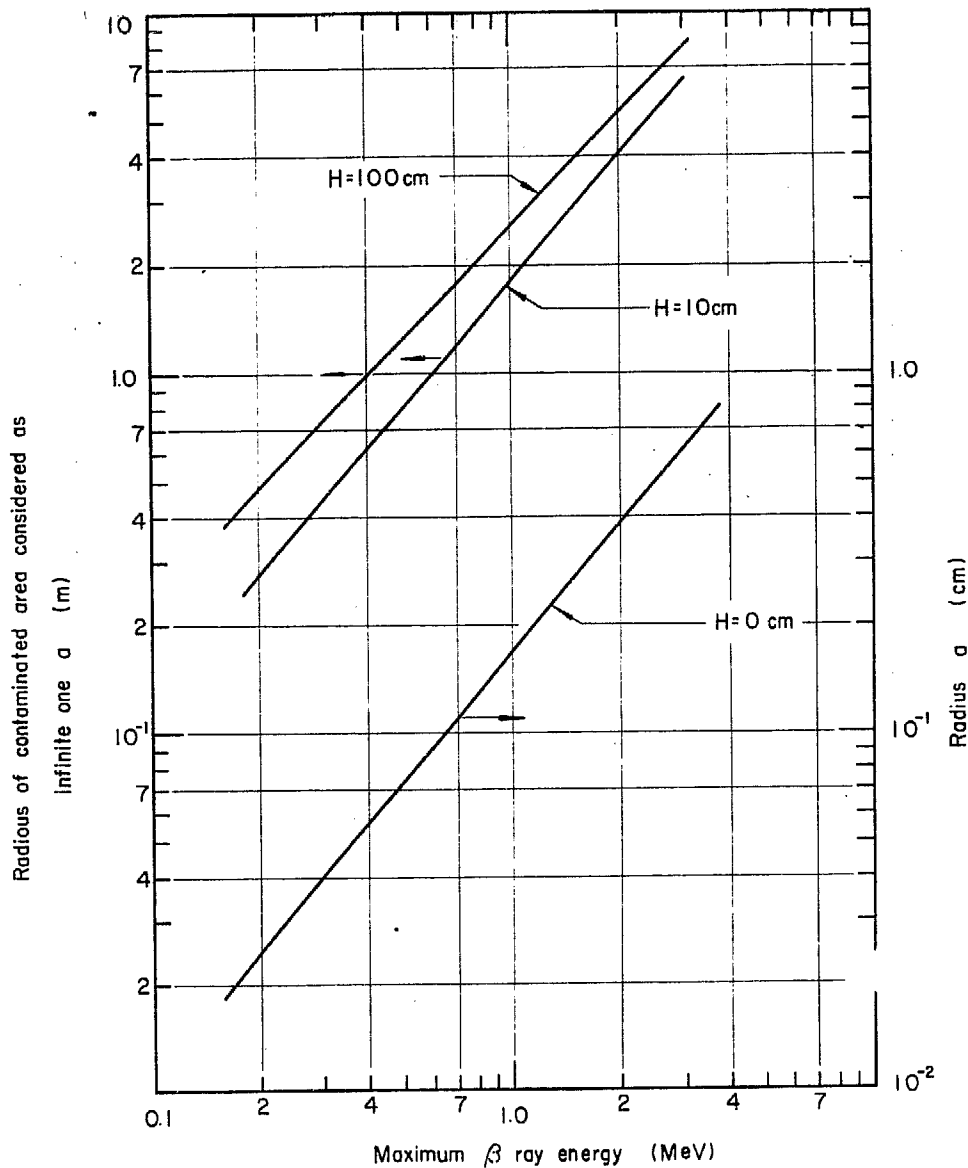
Fig. 3 Absorbed dose rate at various distances from the surface of plane source having constant activity per unit area. (at depth of $7\text{mg}/\text{cm}^2$)

また、いま無限平面から吸収線量率の 99%を与える円形の面線源の半径を a_0 、それに対応する R (または r) を R_0 (または r_0) とすると

$$\frac{D(H)}{D_\infty(H)} = \frac{E_1(h) - E_1(r_0)}{E_1(h)} = 0.99$$

$$\therefore \frac{E_1(r_0)}{E_1(h)} = \frac{E_1(\mu\rho\sqrt{H^2 + a_0^2})}{E_1(\mu\rho H)} = 0.01 \quad (5)$$

Fig. 4 に $H=0.007\text{ cm}$ (皮膚表面の汚染の場合で、Fig. 4 では便宜上 $H=0$ として示してある), 10 cm



H: A distance from the plane source to the skin surface

Fig. 4 The extent of a contaminated plane area which contribute by 99 per cent of the absorbed dose rate at 7 mg/cm² depth from an infinite plane source.

および 100 cm に対して、(5) 式を用いて得られた E_m と a_0 との関係を示す。この図から分かるように、 β 線の場合には吸収線量率に寄与する面積はきわめて限られており、皮膚表面の汚染の場合には、 $E_m=1$ MeV で半径約 1.7 mm の汚染面積があると無限平面からの被曝と考えることができる。このように吸収線量に寄与する面積の半径は E_m に対応する β 線の飛程にくらべて小さい*。これは崩壊から得られる β 線がスペクトル分布を有すること、 β 粒子の散乱があることおよび逆自乗で強度が減衰することに起因している。

(4) 式を用いて皮膚表面の汚染の広がり大きさ (汚染部は円形と仮定) と不感層直下における吸収線量率との関係を求めた結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5 には比較のために γ 線に対して計算した同様な関係が与えられている。

* $E_m=1$ MeV の場合、その飛程は組織中で約 4 mm であるから、上記有効面積の半径は飛程のわずか $1.7/4 \cong 0.4$ である。

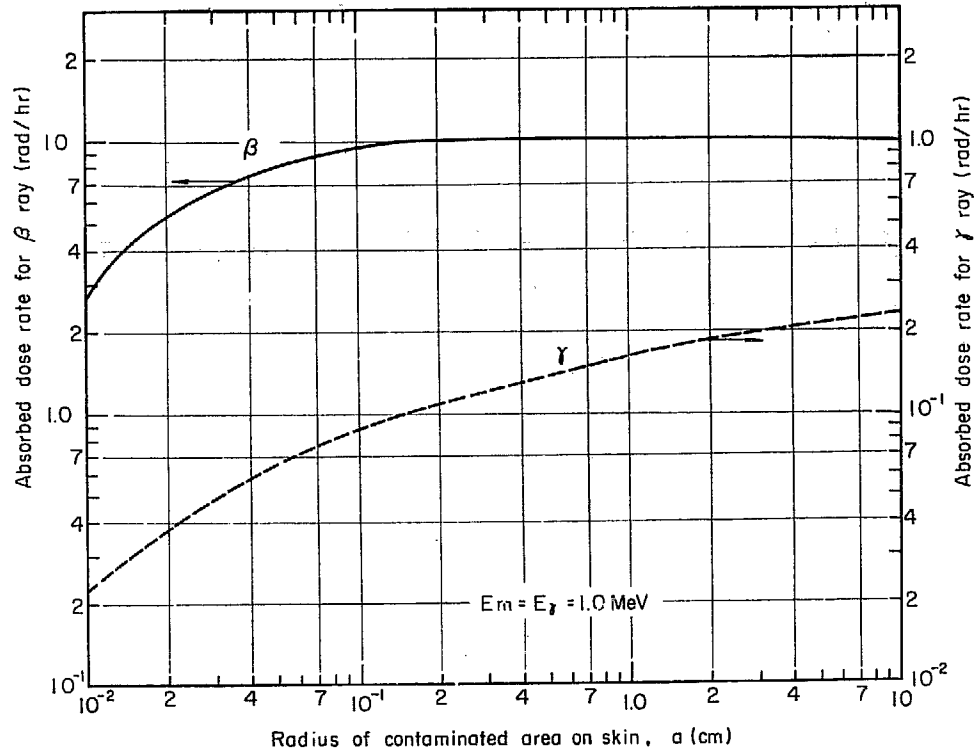


Fig. 5 Relationship between the area of contaminated skin surface and the absorbed dose rate at 7 mg/cm^2 .

Fig. 4 および Fig. 5 から分かるように、 β 線の吸収線量率は汚染の広がりよりも表面汚染密度に著しく依存している。すなわち全汚染量が少なくても汚染面積が小さい場合は吸収線量率は過大なものとなる。したがって、線量分布の広がり的大小のことを度外視して、吸収線量という点だけからいえば汚染面積よりも表面密度に注目する必要がある。きわめて限られた範囲に受けた過大な被曝線量が障害的になだちに問題となるとはいえないであらうが、被曝線量管理の立場からはその取扱いについての対策を障害の面とあわせ考慮して立てられるべきである。

4. 体線源からの吸収線量率

4.1 体線源表面の吸収線量率

β の体線源表面の吸収線量率は、その表面形状には殆ど依存しないので、計算の便宜上円筒状の体線源を考えることにする。

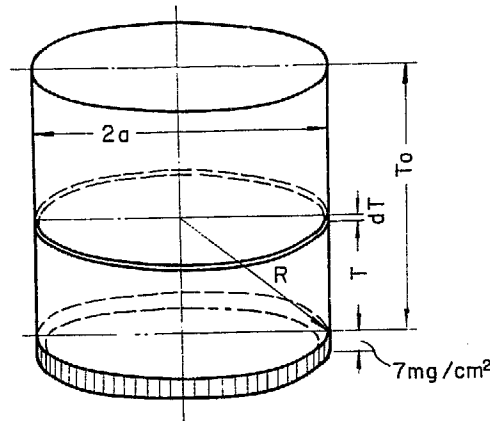


Fig. 6 Exposure from a volume source having uniform density and concentration.

Fig. 6 に示すような円筒形の T の位置における ΔT の幅の中に存在する β 線源から $(T+7 \times 10^{-3})$ cm の距離にある組織のうける吸収線量率は、濃度を $C \mu\text{c}/\text{cm}^3$ とすると (4) 式から次のように得られる。

$$\Delta D(T) = 1.07 \mu EC \Delta T \int_{\mu_s \rho_s T}^{\mu_s \rho_s R} \frac{e^{-y}}{y} dy \times \exp(-7 \times 10^{-3} \mu)$$

ここに μ_s = 体線源の吸収係数 cm^2/g

ρ_s = 体線源の密度 g/cm^3

$$R^2 = a^2 + T^2$$

$\exp(-7 \times 10^{-3} \mu)$ は不感層での減衰を近似的に考慮したものである。

したがって底面の半径 a 、高さ T_0 の円筒状線源の表面における吸収線量率は次のようになる。

$$D(T_0) = \int_0^{T_0} \Delta D(T) = 1.07 \mu EC \exp(-7 \times 10^{-3} \mu) \int_0^{T_0} \int_{\mu_s \rho_s T}^{\mu_s \rho_s R} \frac{e^{-y}}{y} dy dT$$

$$= 1.07 \mu EC \exp(-7 \times 10^{-3} \mu) \int_0^{T_0} [E_1(\mu_s \rho_s T) - E_1(\mu_s \rho_s R)] dT$$

ここに $R = \sqrt{T^2 + a^2}$ 、また $\mu_s \rho_s T = x$ 、 $\mu_s \rho_s R = r$ とおくと、

$$D(T_0) = \frac{1.07 \mu}{\rho_s \mu_s} EC \exp(-7 \times 10^{-3} \mu) \left[\int_0^{x_0} E_1(x) dx - \int_{x_0}^{x_0} E_1(r) dx \right] \text{ rad/hr} \quad (6)$$

ここに $x_0 = \mu_s \rho_s T_0$

普通 $\mu/\mu_s \approx 1$ と考えてよく、また 3.2 でもみたように、一般に $E_1(x) \gg E_1(r)$ であるので、(6) 式の第 2 項は普通の目的には省略してよい ((6) 式の第 2 項が必要な場合は数値積分で求められる)。したがって (6) 式は次のようになる。

$$D(T_0) = \frac{1.07}{\rho_s} EC \exp(-7 \times 10^{-3} \mu) \int_0^{x_0} E_1(x) dx \text{ rad/hr} \quad (7)$$

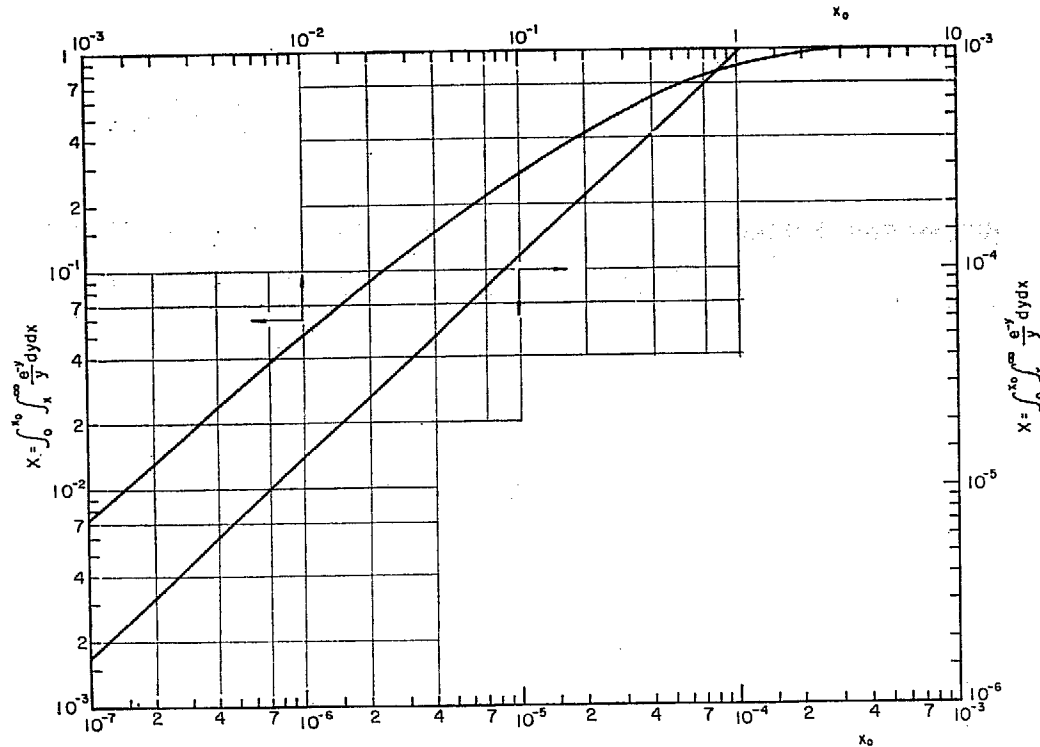


Fig. 7 Graph of $X = \int_0^{x_0} \int_x^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy dx$

Fig. 7 に、 $X = \int_0^{x_0} E_1(x) dx$

のグラフを示す。この図から分かるように $x_0 \geq 3$ では $X=1$ 、すなわち半無限空間からの被曝と同等になる。したがって、いま半無限空間と考えてよい体線源の厚さを T_0 とすると、

$$\mu \rho_s T_0 = 3$$

すなわち、 $17 \rho_s E^{-1.43} T_0 = 3$

(8)

Fig. 8 に ρ_s をパラメーターとして E_m と半無限空間と見なしてよい下限の厚さ T_0 (cm) との関係を示す。この図から $\rho_s = 1 \text{ g/cm}^3$ すなわち組織等価物質中に $E_m = 1 \text{ MeV}$ のβ線を出すアイソトープを溶かして線源を作った場合、その表面での吸収線量率は線源の厚さが約 1.7 mm 以上あれば半無限空間からの被曝として計算してよいことが分かる。このことはβ線放射体の表面吸収線量率を考えると、取扱う全キュリー数よりも比放射能 (c/g) の大小が被曝上問題となることを意味しているから、キュリー数としては少ない場合でも比放射能が高い時は危険であるから取扱いはきわめて慎重を要する。

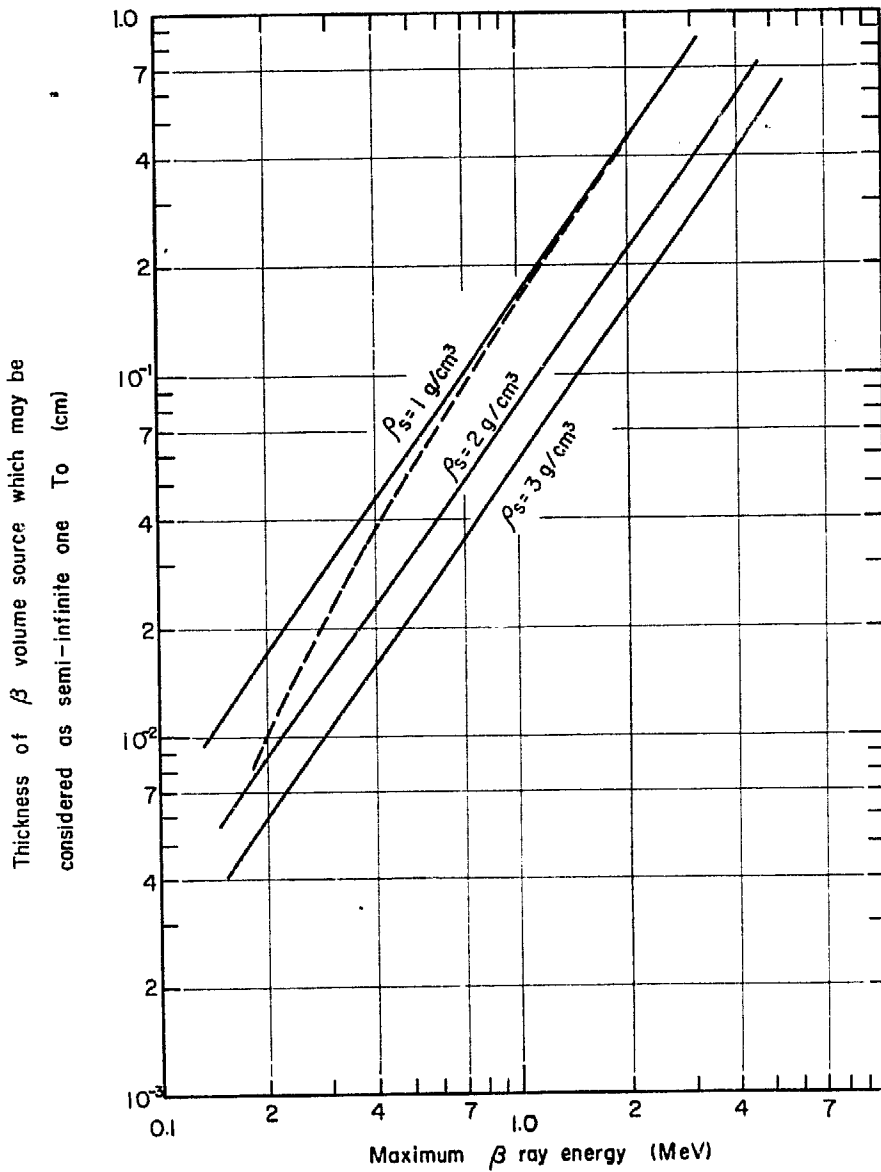
半無限の体線源の表面吸収線量率は次の式で与えられる。

$$D_{\infty} = \frac{1.07}{\rho_s} EC \exp(-7 \times 10^{-3} \mu) \text{ rad/hr} \quad (9)$$

普通取扱われる大きさのβ線源に対しては、(9)式が十分な精度で適用できる。

(7) および (9) 式では不感層による減衰を近似的に考慮したが、実際にはβ線は種々の角度で組織に入射するから実効的な不感層の厚さは 7 mg/cm^2 より大きくなる。体線源の密度が $\rho_s = 1 \text{ g/cm}^3$ すなわち組織と等価な密度の場合、不感層直下における吸収線量率は次のような厳密な計算が可能である。すなわち (6) 式を導いた同様に

$$\begin{aligned} D(T_0) &= \int_{7 \times 10^{-3}}^{T_0} JD(T) = 1.07 EC \int_{7 \times 10^{-3} \mu}^{x_0} E_1(x) dx \\ &= 1.07 EC \left[\int_0^{x_0} E_1(x) dx - \int_0^{7 \times 10^{-3} \mu} E_1(x) dx \right] \text{ rad/hr} \end{aligned} \quad (10)$$



Dotted line: Protective layer of skin is considered, i. e.
 $\mu_t(T_0 + 7 \times 10^{-8}) = 3$

Fig. 8 Thickness of a β volume source from which absorbed dose rate at the surface reaches to the saturated value.

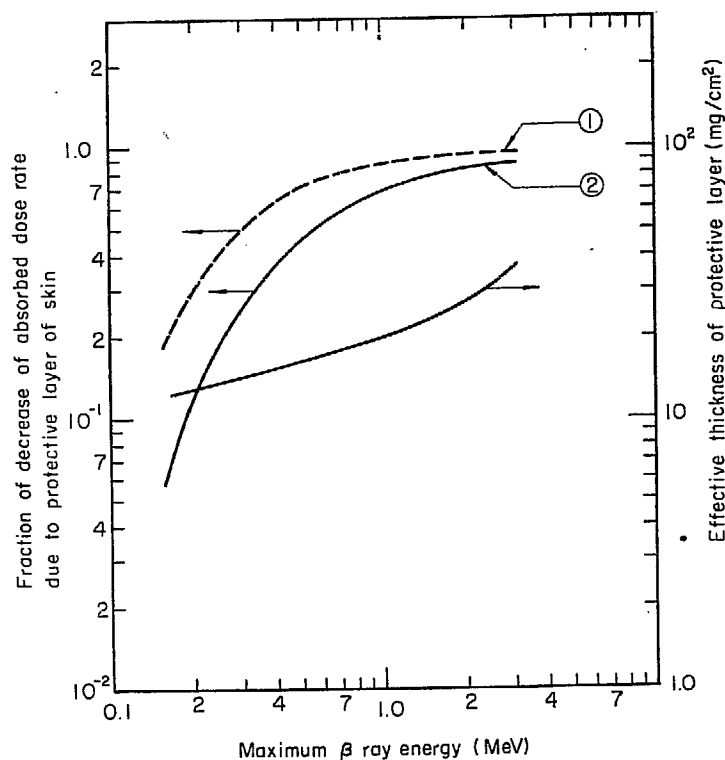
ここに $x = \mu_t \rho T$, $x_0 = \mu_t \rho T_0$
 $x_0 \rightarrow \infty$, すなわち半無限の場合は

$$D_{\infty} = 1.07 EC \left[1 - \int_0^{7 \times 10^{-3} \mu} E_1(x) dx \right] \text{ rad/hr} \quad (11)$$

(9) 式と (11) 式との比較を Fig. 9 に示す ($\rho_s = 1$). また Fig. 9 には不感層の実効厚さ t と E_m の関係* もあわせ示してある. (11) 式には線源と吸収体を含む体積分の項がなく, したがって両者の密度の違いは関係しないから, 体線源が半無限と考えられる大きさを有する限り, 不感層直下での吸収線量率としては, $\rho_s \neq 1$ の場合も一般に (11) 式の D_{∞} を ρ_s で割ったものが, (9) 式から得られるものよりさらによい近似

* 実効厚さ t は次の関係式から得られる.

$$e^{-\mu t} = 1 - \int_0^{7 \times 10^{-3} \mu} E_1(x) dx$$



$$\textcircled{1} \exp(-7 \times 10^{-3} \mu)$$

$$\textcircled{2} 1 - \int_0^{7 \times 10^{-3} \mu} E_1(x) dx$$

Fig. 9 Comparison of the absorbed dose from a volume source calculated by eq. (9) and eq. (11) in the case of the density 1.0 g/cm^3 , and effective thickness of protective layer of skin.

である。一例として硫黄を JRR-1 で照射して得られた ^{32}P ($^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$) の表面線量率を求めてみると、この場合 $C/\rho_s = 0.5 \text{ mc/g}$ ($\rho_s = 2 \text{ g/cm}^3$), $E = 0.70 \text{ MeV}$, $E_m = 1.71 \text{ MeV}$ であるから、(11) 式と Fig. 9 を用いて表面吸収線量率は次のようになる。

$$D_\infty = 1.07 \times 0.70 \times 5 \times 10^2 \times 0.82 = 3.1 \times 10^2 \text{ rad/hr}$$

4.2 表面吸収線量率が既知の場合、有限な体線源から任意の距離における吸収線量率を求める近似法

β 線源の大きさが有限である場合、線源から離れた位置における吸収線量率は問題の点から線源に張られた立体角に比例する。なぜなら線源から出る β 線のうち、吸収線量に寄与するのは表面近傍から出る β 線のみであるから、一般的には線源からの垂直距離 d だけ離れた P 点における吸収線量率 D_a は次のように表わされる (Fig. 10)。

$$D_a = k \int_a \frac{dS \cos \theta}{r^2} \text{ rad/hr}$$

簡単のために中心軸上の点 P_0 における吸収線量率 D_a を求めると、

$$D_a = k \frac{S}{R^2} \text{ rad/hr}$$

ここに、S: 半径 R の球が線源 (表面積 πa^2) によって切りとられる部分の表面積

k : 比例常数

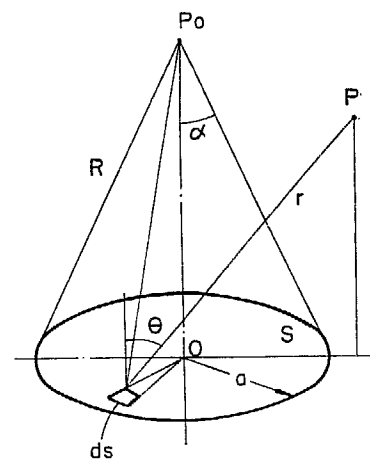


Fig. 10 Solid angle subtended by circular disk which is used to calculate the absorbed dose rate from a volume or plane source as a function of distance.

$S/R^2 \rightarrow 2\pi$ のとき, $D_a \rightarrow D$

ここに, D : (7) および (9) 式で表わされる表面吸収線量率

$\therefore D_a = \frac{S}{2\pi R^2} D$

S はよく知られているように次の式で与えられる. すなわち,

$S = 2\pi R^2 (1 - \cos\alpha) = 2\pi R^2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{a}{d}\right)^2}}\right)$

ここに, a : 線源の半径

d : 表面から中心軸上の P_0 点までの距離

したがって,

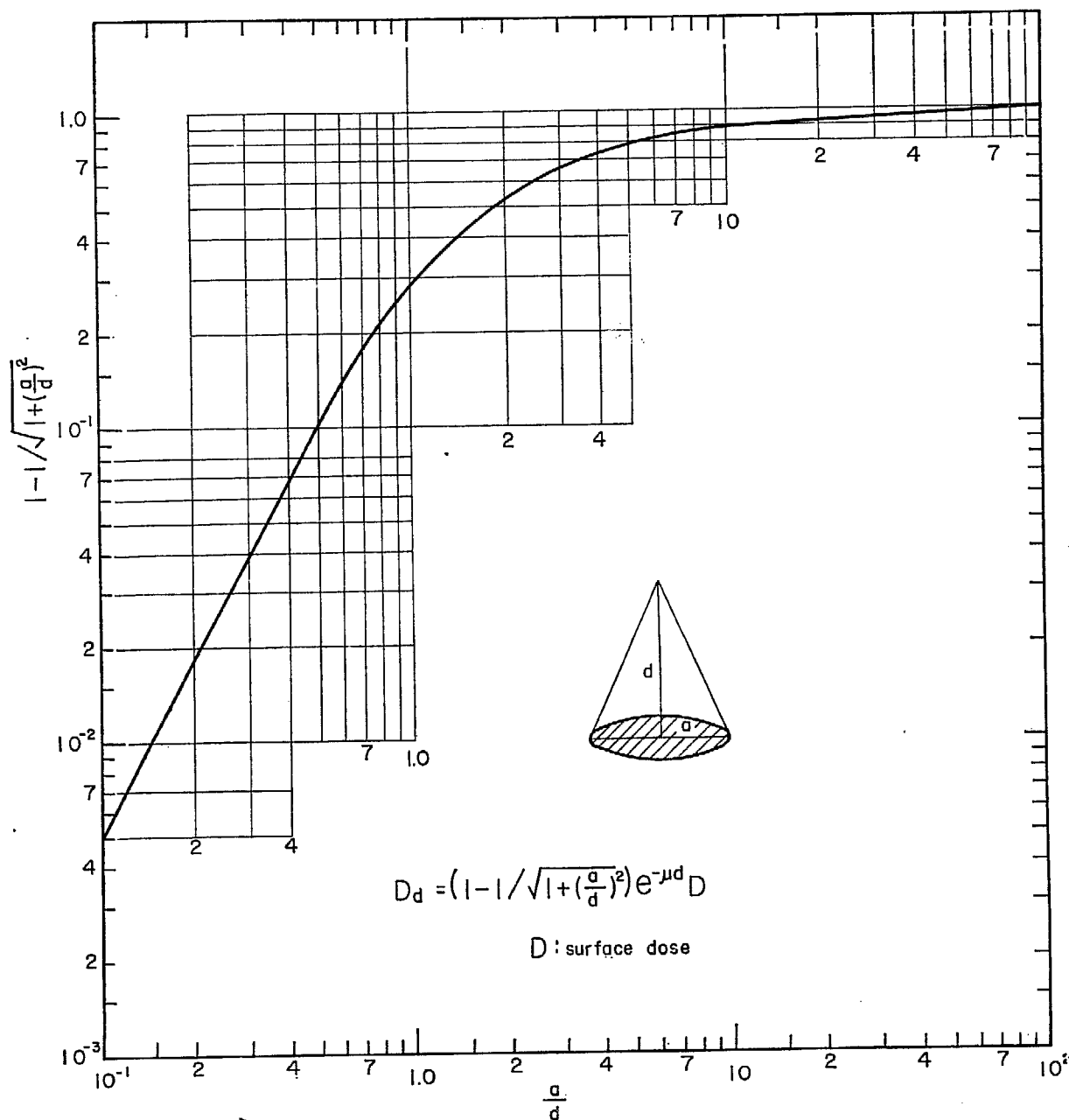


Fig. 11 Approximate method to evaluate absorbed dose rate at any distance from the surface of a volume or plane source from which dose rate at the surface is known.

$$D_a = \left[1 - \left\{ 1 + \left(\frac{a}{d} \right)^2 \right\}^{-1/2} \right] D \quad \text{rad/hr} \quad (12)$$

空気による吸収を近似的に考慮する場合は(12)式に $\exp(-\mu\rho d)$ を乗ずる。 $a/d < 1$ の場合は(12)式は次のようになる。

$$D_a = \frac{1}{2} \left(\frac{a}{d} \right)^2 \left\{ 1 - \frac{3}{4} \left(\frac{a}{d} \right)^2 \right\} D \quad (13)$$

(12)式の [] 中の関係を Fig. 11 に示す。この図から分かるように $a/d < 0.5$ 、すなわち d が線源の直径と同程度以上になれば中心軸上の吸収線量率は表面吸収線量率に対してだいたい逆自乗で減少すると考えてよい。

この計算は中心軸上に被曝点がある場合についてのものであるが、一般に被曝点が任意の場所にある時の立体角の計算については巻末文献 6) を参照されたい。管理上の目的には(12)式が利用できる。

5. β 線吸収線量率の測定

ここで述べる吸収線量測定は extrapolation chamber 等を使用しておこなう厳密な測定ではなくて、日常の放射線管理において普通に用いられている GM サーベイ・メータ、または電離箱サーベイ・メータを使用して、被曝防護の立場から作業現場において近似的であっても迅速に吸収線量率を求める必要がある時に用いる測定方法である。従来よりおこなわれているサーベイ・メータによる β 線測定は、定性的なものが殆どであって、測定というよりむしろ β 線を検出するということを主眼としている。特に吸収線量率の測定という点ではまったく無力に等しい状態であるので、計算と実験とによって各種サーベイ・メータの指示値と吸収線量率との関係を求めた。

5.1 端窓型 GM 管の計数率と β 線吸収線量率との関係

5.1.1 面または体線源表面の吸収線量率を測定する場合

—GM サーベイ・メータを被測定面に密着させて測定—

β 放射体によって一様な密度で汚染している平面に GM サーベイ・メータを密着させて測定する場合、従来の計算法 (5.1.2 参照) では平行ビームの β 線が GM 管の窓に入射すると仮定して計数率と β 線吸収線量率との関係を求めていたが、実際には平行ビームでない場合が普通である。ここでは 3.1 で得られた結果を用いて β 線が任意の方向から入射する場合の計数率と吸収線量との関係を求める。

β 放射体によって $S\mu\text{c}/\text{cm}^2$ の表面密度で少なくとも GM 管の窓面積より広い範囲にわたって一様に汚染している平面に、GM サーベイ・メータをほとんどふれるような状態に近づけたときの計数率を $N(E_m)$ cpm とすると次の関係式が得られる。

$$N(E_m) = 2.22 \times 10^6 A \eta(E_m) S \quad \text{cpm} \quad (14)$$

ここに、 A : GM 管の窓面積 cm^2

$\eta(E_m)$: β 線の最大エネルギーの関数である計数効率

(2) 式によって与えられる吸収線量率 $D_\infty(7\text{mg}/\text{cm}^2)$ と $N(E_m)$ の比、

$$K_\infty = \frac{D_\infty(7\text{mg}/\text{cm}^2)}{N(E_m)} = \frac{D_\infty(7\text{mg}/\text{cm}^2)}{2.22 \times 10^6 A \eta(E_m)} \frac{\text{rad/hr}}{\text{cpm}} \quad (15)$$

を知れば計数率を測定することにより吸収線量率を求めることができる。一般に η は幾何効率 G 、後方散乱係数 f_b 、自己吸収係数 f_a および GM の窓等による吸収係数 f_w などの関数であるが、 f_b 、 f_a は D_∞ の計算には考慮してないので、これと比較される $N(E_m)$ の中にはいって来る $\eta(E_m)$ としては G および f_w のみを考えればよい。したがって換算係数を表わす式 (15) は次のようになる。

$$K_\infty = \frac{D_\infty(7\text{mg}/\text{cm}^2)}{N(E_m)} = \frac{D_\infty(7\text{mg}/\text{cm}^2)}{2.22 \times 10^6 A G \exp(-\mu x)} \frac{\text{rad/hr}}{\text{cpm}} \quad (16)$$

ここに、 x : 吸収層の厚さ g/cm^2

Fig. 12 a, b に SM-102 型および TGS-103 型 GM サーベイ・メータに対する換算係数 K_∞ をそれぞれ与えてある。SM-102 型の幾何効率 G は計算では 0.07、ウランを電着した平面線源による測定では 0.10 の値が得られたが、この測定が GM サーベイ・メータの最低レンジでおこなわれたため精度の点で問題があるので、計算値 $G=0.07$ を採った。TGS-103 型の場合は計算値もウラン線源による測定も何れも $G=0.15$ であった。また GM 管の窓面積 A としては被測定面が測定器によってカバーされる部分の面積を採った。GM 管のマイカ窓の厚さは $2\sim 3\text{mg}/\text{cm}^2$ であるが、測定器を線源に近づけたときは窓に対して斜方向から入射する β 粒子が増加するから、実効的な窓厚は上記の値より大きく $7\text{mg}/\text{cm}^2$ に近い値となる (Fig. 9 参照)。それ故 Fig. 12 a および b には実際の窓厚に対する換算係数だけでなく、 $7\text{mg}/\text{cm}^2$ の場合も示して

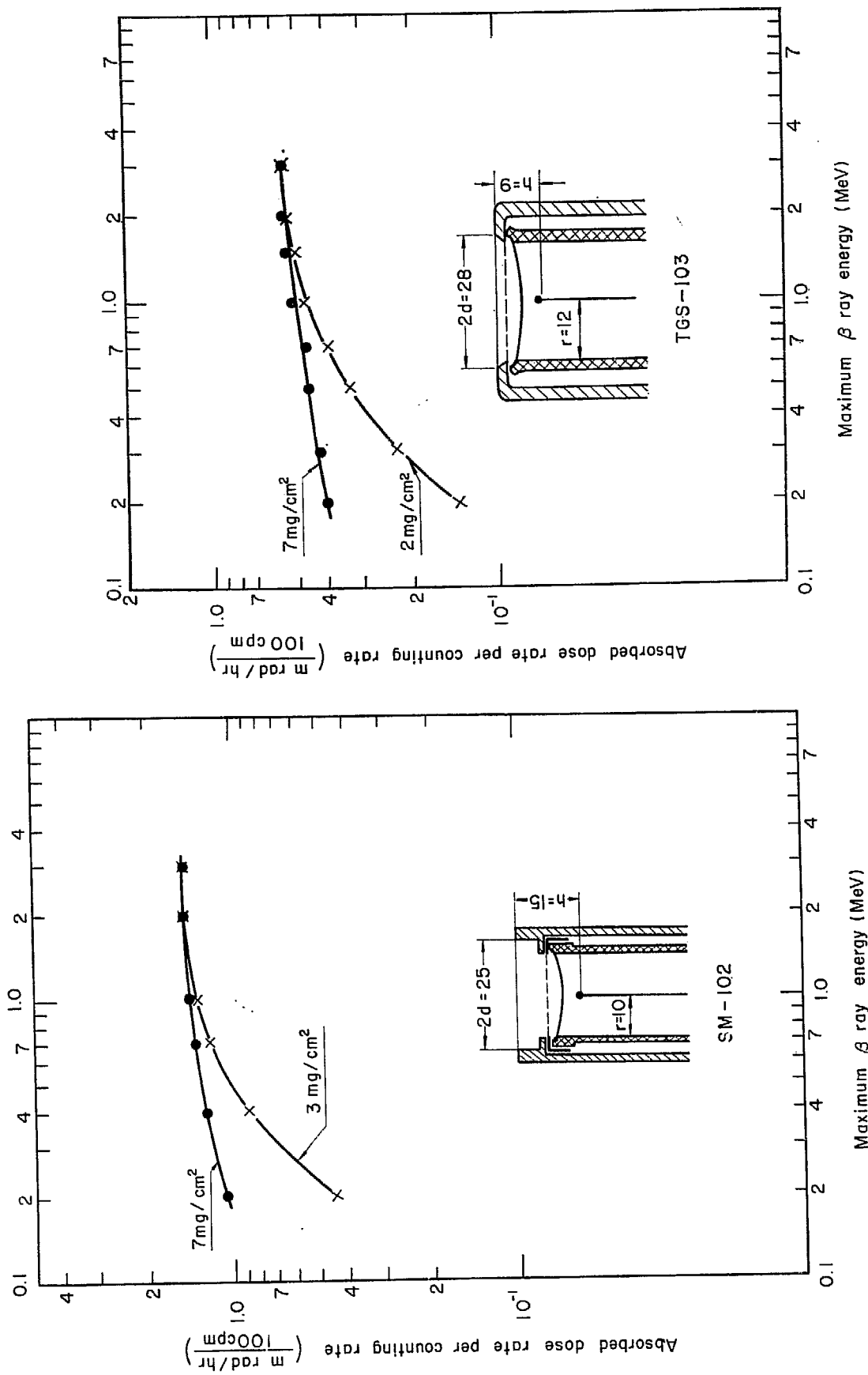
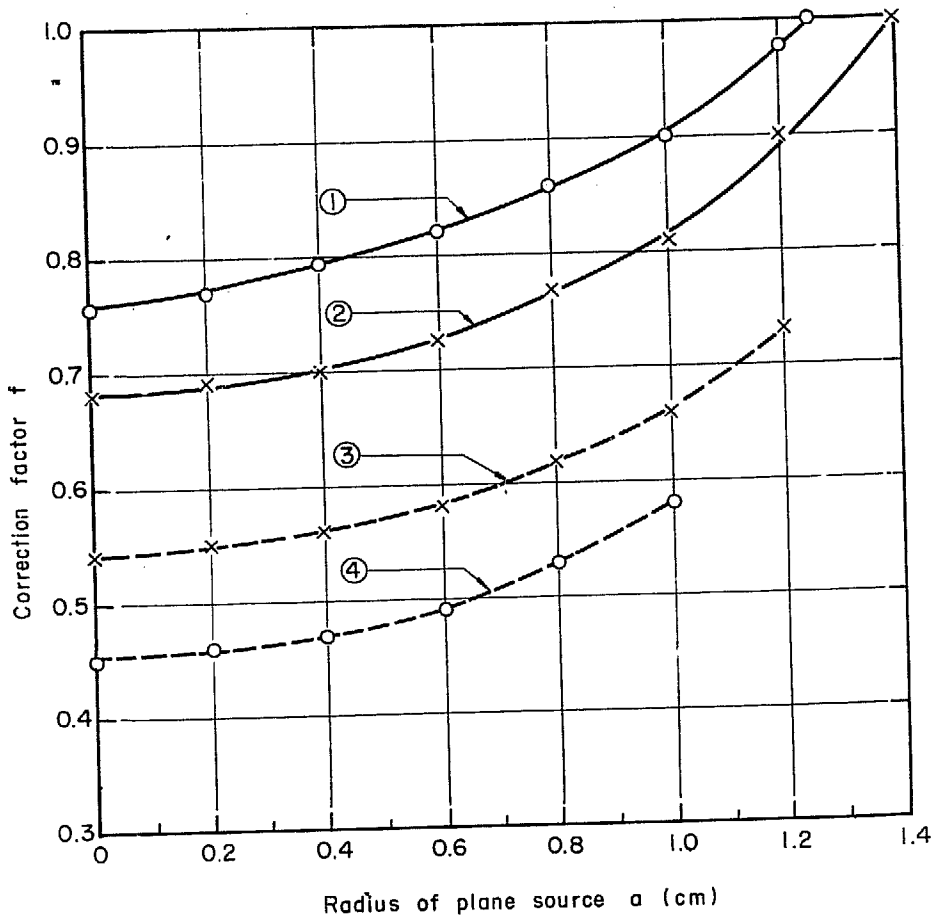


Fig. 12 Relationship between absorbed dose rate and counting rate by SM-102 and TGS-103 type GM survey instruments from a plane source. (An area of the source or contaminated plane is greater than window area of the GM tube, and the probe is placed close to the measured surface.)



Type of GM survey instrument	No.	Measuring condition
SM-102	①	$h=15$ mm
	④	$h=9$ mm (contact to the protective grid for GM tube)
TGS-103	②	$h=9$ mm
	③	$h=7$ mm (contact to the protective grid for GM tube)

h : A distance from the source to the boundary of a sensitive volume of the GM tube.

Fig. 13 Correction factor for K_∞ in the case of the plane source or contaminated plane less than window area of the GM tube.

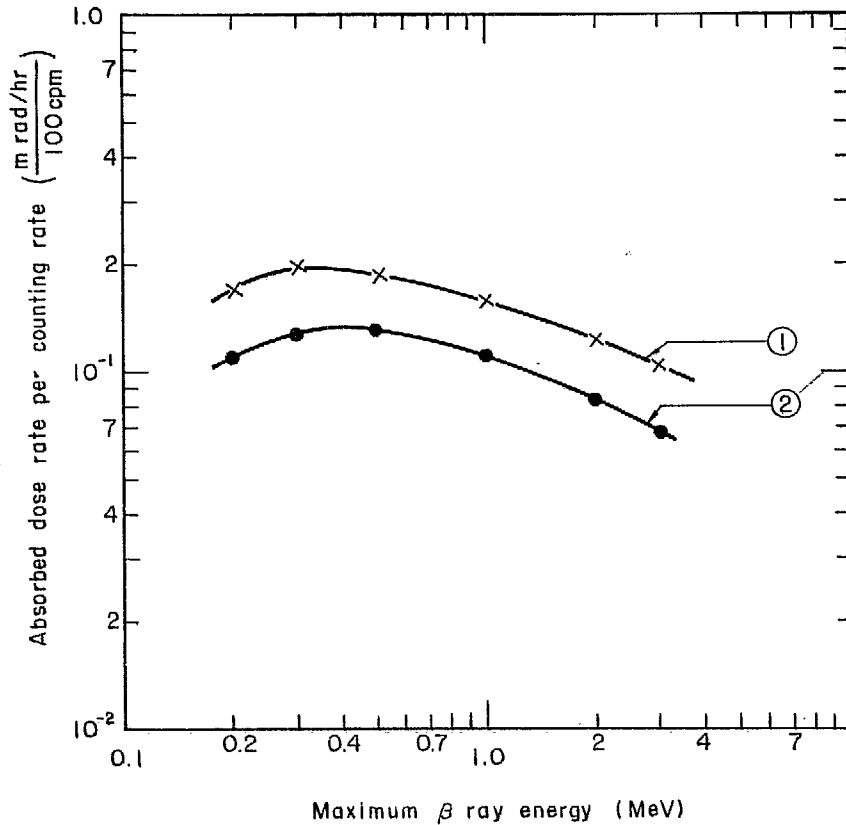
ある。一般の測定ではこの実効窓厚に対する換算係数を用いた方がよい。

以上は汚染面積が GM 管の窓面積以上の場合について適用できるが、汚染面積が窓面積より小さい場合は G の値が大きくなるからその時の換算係数 K は K_∞ と異なる。すなわち

$$K \left(\frac{\text{m rad/hr}}{100 \text{ cpm}} \right) = K_\infty \left(\frac{\text{m rad/hr}}{100 \text{ cpm}} \right) \times f \tag{17}$$

Fig. 13 に汚染面積が小さい場合に用いられる、Fig. 12 a および b に与えられた換算係数に対する補正係数 f の値を示してある。

ここに述べた方法は一般に検出感度がよいから、身体表面の汚染または器物の汚染の場合、その他照射試料などを取扱う場合にうける吸収線量率を評価する時に用いられる。特に身体汚染の場合はその広がり範囲、表面汚染密度およびそれによってうける吸収線量率の大きさを迅速に決定する上に非常に有効な方法である。しかし被測定面に密着させて測定することにより GM 管が汚染するおそれがあるような場合には、汚染防止の措置としてライフアン紙 (厚さ 0.5 mg/cm^2) で検出部を覆うことが必要である。



No.	Type	Window thickness	Window area
①	SM-102	3.0 (mg/cm ²)	3.14 (cm ²)
②	TGS 103	2.0	4.53

Fig. 14 Relationship between absorbed dose rate and counting rate by the GM survey instruments from parallel β ray.

5.1.2 平行β線による吸収線量を測定する場合

点線源からかなり離れた位置で測定するときなどには、平行ビームと考えてよい場合がある。そのときは前から知られている計算法*による換算係数 (Fig. 14) を用いればよい。Fig. 12 a と Fig. 14 の間には約 10 倍の差異があるが、これは大部分幾何効率の相違によるものである。

5.2 各種サーベイ・メータの照射率指示値とβ線吸収線量率との関係

放射線管理において、作業現場で使用されるαおよびβ線用サーベイ・メータは一般にβ線測定用の窓を備えているが、普通α線の照射率の測定を主な目的としているため mR/hr 単位で表示されている。それ故それらのサーベイ・メータを使用してβ線による吸収線量率を求めるには、mR/hr から mrad/hr への換算係数を知る必要がある。ここでは面または体線源表面の吸収線量率を測定する場合と、点線源から離れた位置における吸収線量率を測定する場合との換算係数について述べることにする。

5.2.1 面または体線源表面の吸収線量率を測定する場合

換算係数を求めるにあたって、表面吸収線量率の標準となる試料として天然ウラン金属板 (直径 4 cm,

* GM 計数管の正味計数率を N cpm, 幾何効率を 100% とすると,

$$D = \frac{0.96}{A} N \bar{E}_\beta \mu \exp[-\mu(\bar{r}-l)] \text{ rad/hr} \tag{18}$$

が得られる。

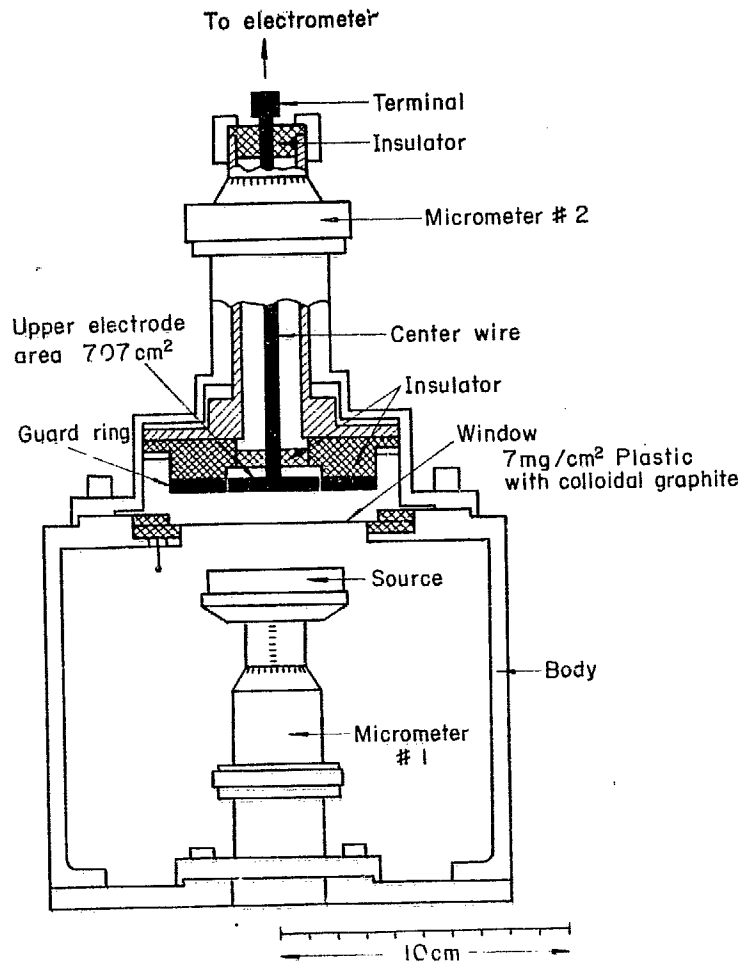


Fig. 15 Extrapolation chamber.

厚さ 0.4 cm, この場合の β 線は ^{234}Pa からのもので $E_m = 2.3 \text{ MeV}$ を用いた。このウラン板の表面吸収線量率は Fig. 15 に示したような外挿電離箱を用いて測定し、 185 m rad/hr が得られた⁹⁾。この場合の換算係数は検出部の先端を被測定物の表面から 1 cm はなして測定をおこなう場合について求めることにした。これは器物とか床または身体表面の汚染を測定する時、非固着性の汚染による測定器の汚染を防止するためである。

TABLE 1 に表面吸収線量率への換算係数を求めたサーベイ・メータの一覧をしめす。換算係数は種々の大きさの線源を作り、その表面吸収線量率 (m rad/hr) とサーベイ・メータの指示値 (mR/hr) を対応さ

TABLE 1 Survey instruments used for measurement of skin absorbed dose rate at the surface of a β source.

Type	Detector	Window area for β ray (cm ²)	Window material	Window thickness (mg/cm ²)	Reading for standard source* (mR/hr)
SM-102A	GM tube (8134 II)	30	Glass	30	3
SM-102	GM tube (M 2319)	3.14	Mica	3	9.3
DR-3	Ionization chamber (Cutie Pie)	14.3	Mica	7	6.4
DR-4	Ionization chamber (Juno)	106	Celluloid	30	11.3
ICS-101	Ionization chamber (Cutie Pie)	150	Rubber hydrochloride	4	8

* Standard source (natural uranium plate) is covered by 0.2 cm thick lead which has a hole of 1.5 cm diameter.

せることにより簡単に求めることができるが、ここでは各々のサーベイ・メータについて点線源による感度曲線を求め、それにもとづいて前述のウラン板標準線源と任意の大きさの被測定円形線源に対応する感度の積分値（線源の面積にわたっておこなったもの）の比を計算して、次に示すような式で任意の大きさの円形線源に対する換算係数 K_0 を求めた。

$$K_0 = \frac{185 (\text{m rad/hr})}{\text{標準線源に対する測定器の指示値 (mR/hr)}} \times R \quad (19)$$

ここに

$$R = \text{感度曲線の積分比} = \frac{\text{標準線源の面積に対応する感度曲線の積分値} \left(\frac{\text{mR} \cdot \text{cm}^2}{\text{hr}} \right)}{\text{任意の面積を有する円形線源に対応する感度曲線の積分値} \left(\frac{\text{mR} \cdot \text{cm}^2}{\text{hr}} \right)}$$

Fig. 16 a, b, c, d および e に各種の GM サーベイ・メータおよび電離箱型サーベイ・メータに対して得られた感度曲線を示す。GM サーベイ・メータの感度曲線は点状の $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ 線源（直径 3 mm）を用いて得られたものであり、電離箱型サーベイ・メータのそれは直径 1.5 cm の孔をもつ 0.2 cm の厚さの鉛板を標準線源の上におき、それを線源として用いて得られたものである。SM-102 A および DR-4 型サーベイ・メータについては Fig. 16 a および d を用いて円形線源に対応する感度曲線の積分値を求めることは困難であるので、標準線源と被測定円形線源をそれぞれ等面積の正方形に置きかえてその積分値を求めた。Fig. 17 に得られた感度曲線の積分比 R を用いて計算した換算係数 K を示す。Fig. 17 に示された K 値は直径 2 cm の天然ウラン線源について実測して得られた値と約 10% の誤差の範囲で一致し、Fig. 17 の値がかなりよい近似であることを示した。Fig. 17 の使用法の一例をあげる。たとえば ICS-101 型サーベイ・メータを用いて直径 5 cm の円形線源の表面吸収線量率を知りたい時は、その電離箱の端と被測定物との間の距離を 1 cm にとり平行に保つ。この場合被測定物は検出部の中央におくようにする。その時のメータの指示値が 1 mR/hr とすると、Fig. 17 から直径 5 cm の円形線源に対する $K_0 = 15 (\text{m rad/hr}) / (\text{mR/hr})$ が分かり、その表面の吸収線量率として 15 m rad/hr が得られる。

ここで述べた換算係数はウランを用いて求められたものであるから、窓厚の大きいサーベイ・メータ、たとえば SM-102 A 等を用いて低エネルギー ($E_m < 1.0 \text{ MeV}$) の β 線による吸収線量率を測定する場合にはここで与えられた換算係数では過小の値を与えるから注意を要する。

5.2.2 点線源から離れた位置における吸収線量率を測定する場合

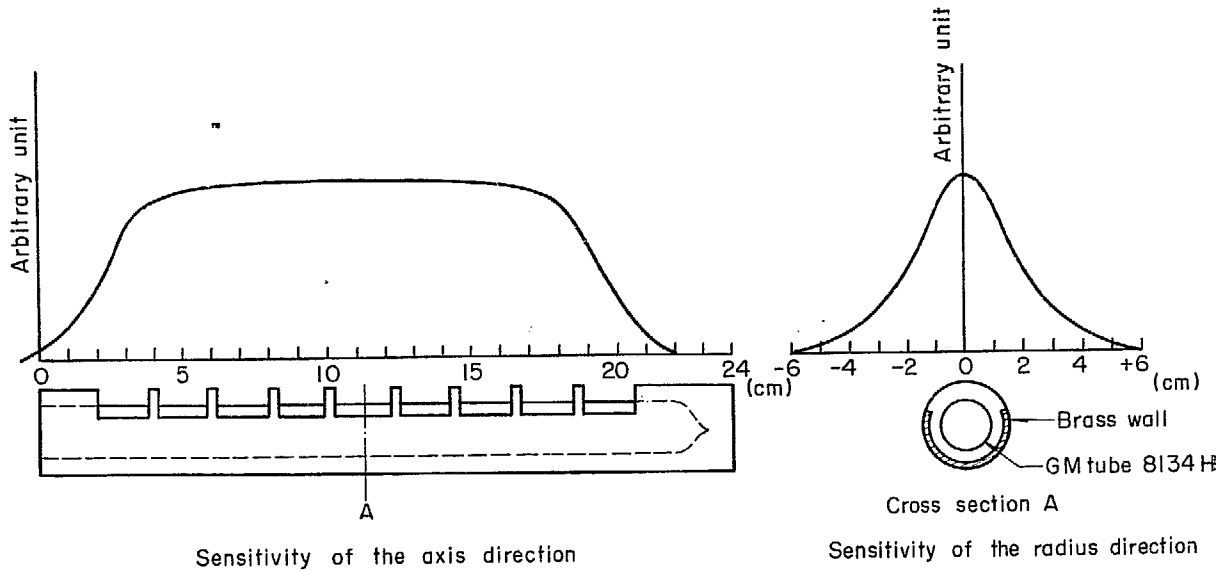
有限な大きさの線源の場合であっても線源と測定器との距離が離れている時は、点線源と見なして測定してよい場合がある。ここでは点線源から離れた位置における吸収線量率を求める場合の換算係数について述べる。

測定に用いた点線源は数 μC の $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ で、線源と測定器間の距離の基準としては、Cutie Pie 型サーベイ・メータでは γ 線に対する実効中心を、Juno 型サーベイ・メータではその端を採った。TABLE 2 にこの測定において換算係数を求めたサーベイ・メータの一覧を示す。

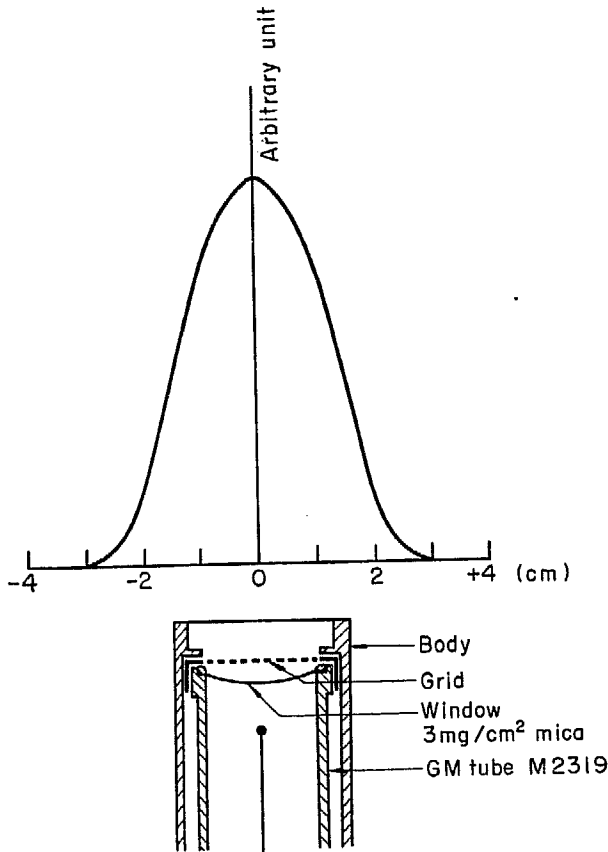
TABLE 2 Survey instruments used for measurement of skin absorbed dose rate as a function of distance from a β point source.

Type	Detector	Window area for β ray (cm ²)	Window material	Window thickness (mg/cm ²)
SBI-5221	Ionization chamber (Juno)	84	Plastic	27
SBI-52101 B	Ionization chamber (Cutie Pie)	21	Rubber hydrochloride	3.5
SBI-52101 BS	Ionization chamber (Cutie Pie)	21	Rubber hydrochloride	3.5

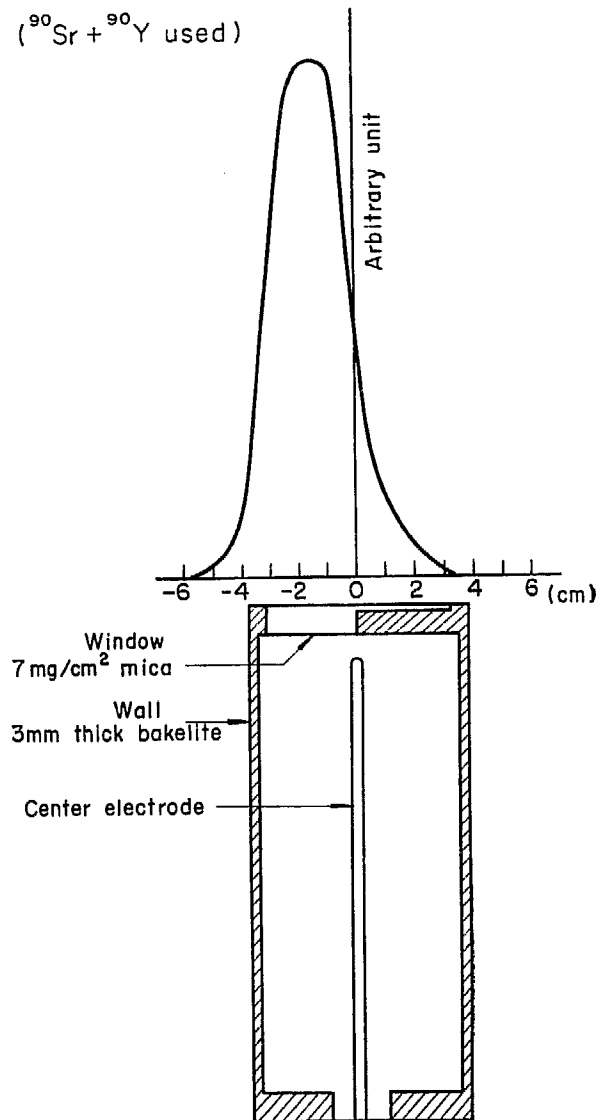
Other survey instruments DR-3, DR-4, ICS-101, SM-102 and SM-102A which are used for the measurement of β ray absorbed dose from a point source are listed in TABLE 1.



a. SM-102A GM tube ($^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ used)

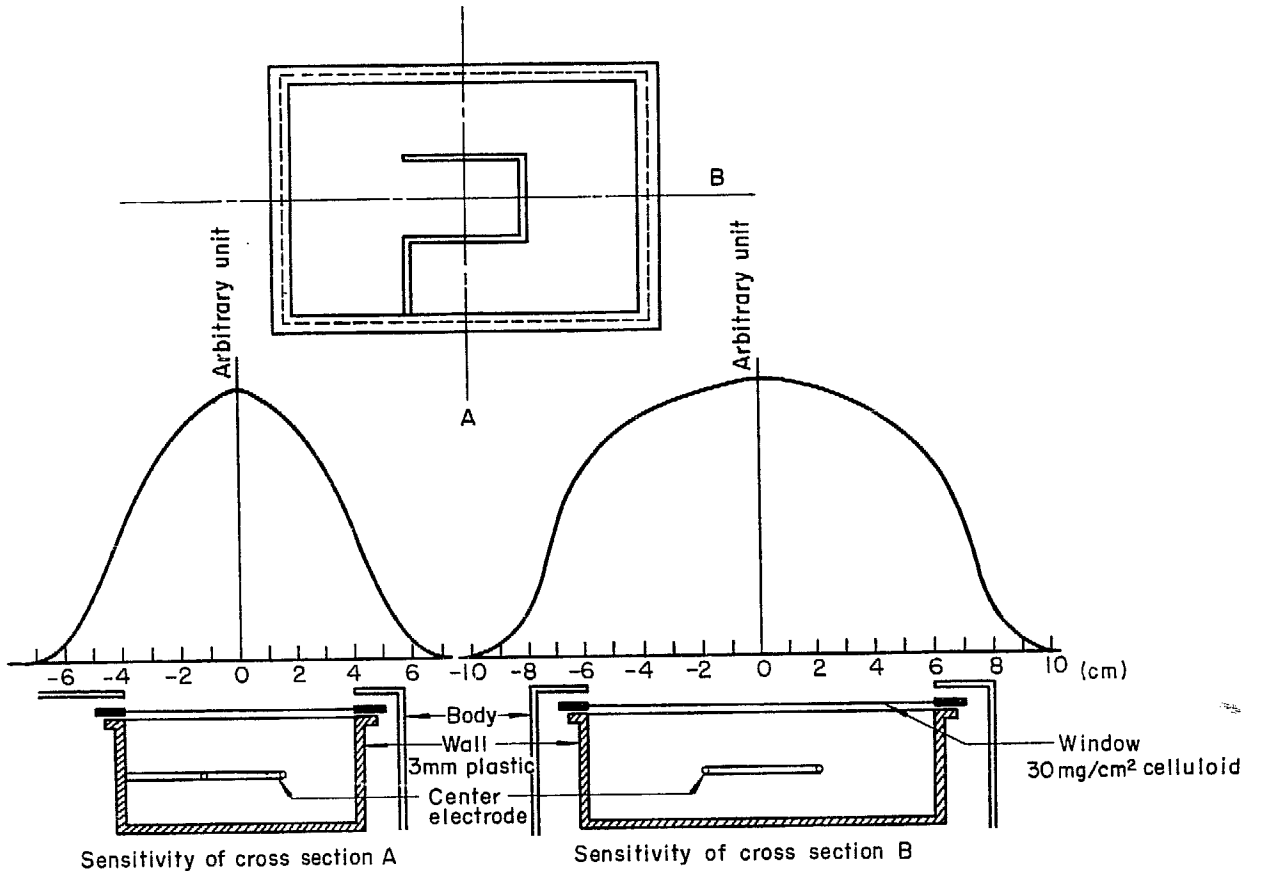


b. SM-102 GM tube ($^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ used)

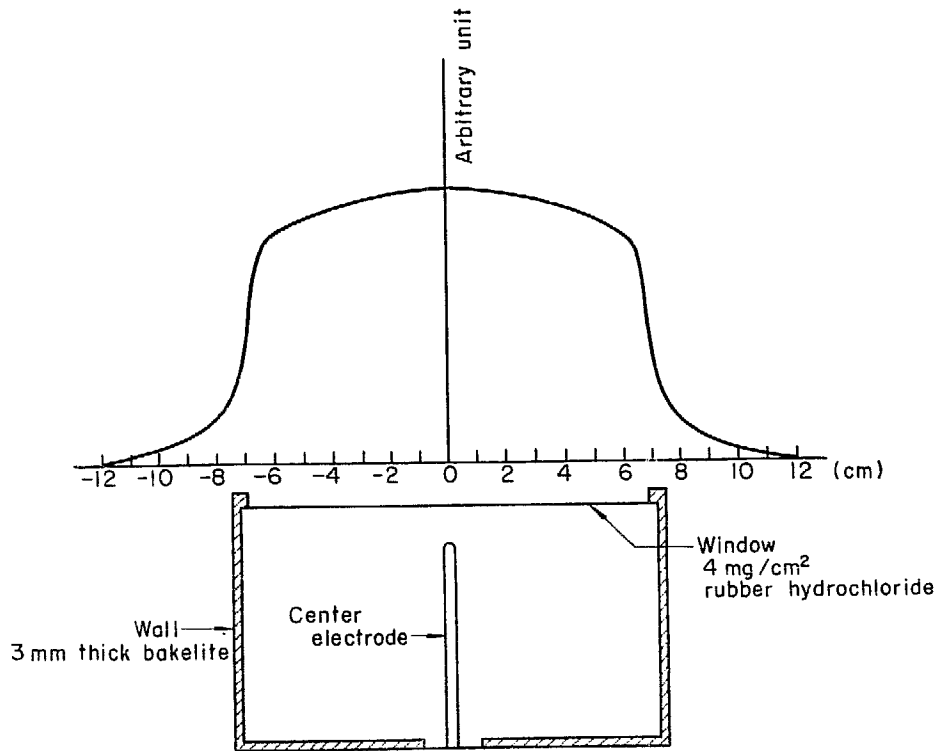


c. DR-3 chamber (Unat. used)

Fig. 16



d. DR-4 chamber ($U_{nat.}$ used)



e. ICS-101 chamber ($U_{nat.}$ used)

Fig. 16 Sensitivity curve of the various types of the survey instruments for β source.

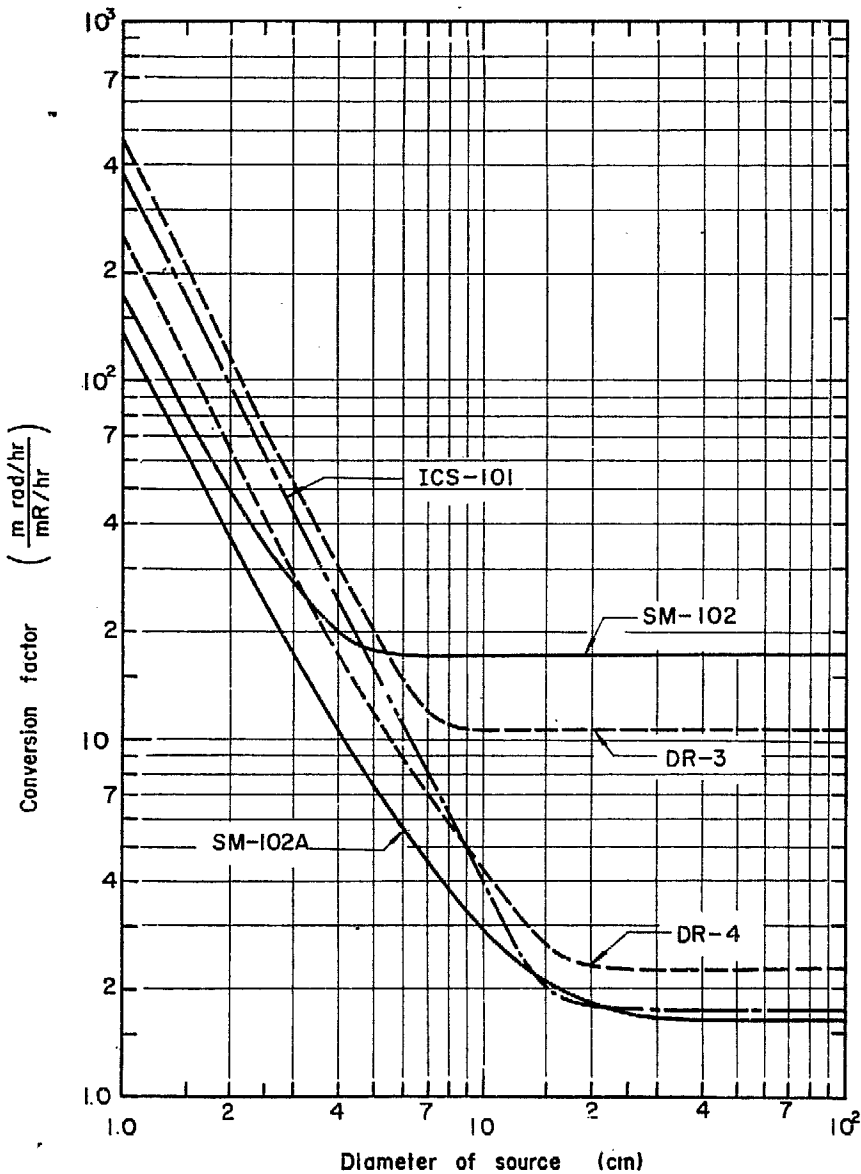


Fig. 17 Conversion factor for the various types of the survey instruments which gives the relationship between the surface absorbed dose rate (at 7 mg/cm² of skin) and the exposure rate reading of the instruments as a function of diameter of β plane source. The measured surface is located at a distance of 1 cm from the end of the probe.

点線源による吸収線量率の測定の標準としては Victoreen 社製コンデンサ R メータと Skin equivalent chamber (Model No. 576) を使用し、線源から種々の距離における吸収線量率を求めた。同時にそれらの距離における各サーベイ・メータの指示値を読みとり、それらの比から換算係数 K_0 を求めた。すなわち

$$K_0 \left(\frac{\text{m rad/hr}}{\text{mR/hr}} \right) = \frac{\text{Skin equivalent chamber で求めた吸収線量率} \left(\frac{\text{m rad}}{\text{hr}} \right)}{\text{サーベイ・メータの指示値 (mR/hr)}} \quad (20)$$

Fig. 18 a, b, c, d, e, f および g に各種サーベイ・メータに対して得られた K_0 の値を示す。Fig. 18 g に示してある GM サーベイ・メータに対する換算係数の値は大体の目安を与えるものである。Fig. 18 にみられるように K_0 値は距離の関数であると同時に、またエネルギーの関数でもあるので、窓の厚いサーベイ・メータを用いる時は 5.2.1 で述べたように K_0 のエネルギー依存性が大きくなるからそのことを考慮する必要

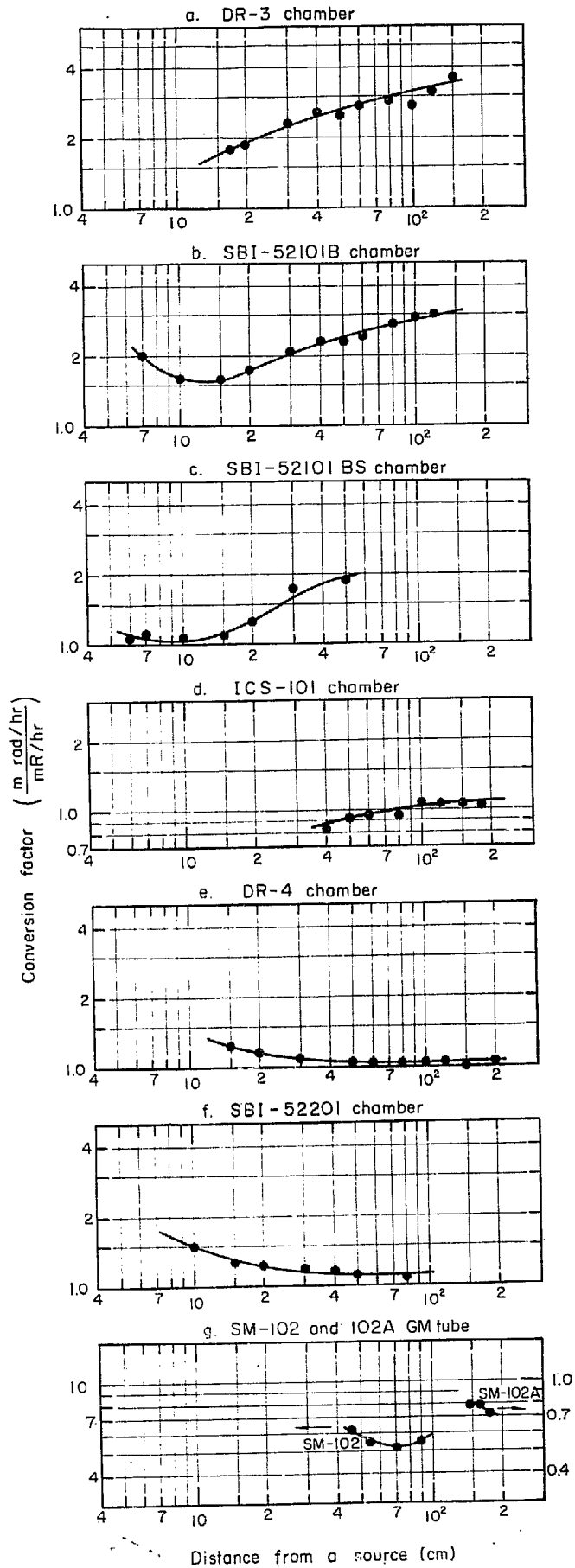


Fig. 18 Conversion factors for the various types of survey instruments which gives the relationship between the absorbed dose rate (at 7 mg/cm² of skin) and the exposure dose rate reading of the instruments as a function of distance from a β point source.

がある。窓厚の薄いサーベイ・メータ ($< \sim 4 \text{ mg/cm}^2$) を使用すれば、放射線管理上の目的には $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ を用いて得られた K_0 が他の核種の測定に対しても十分適用できると考えられる。

cpm 目盛と mR/hr 目盛の両方がある SM-102 型サーベイ・メータについて、5.1.1 と 5.2.1 とにおいて与えられた換算係数を用いて得られる吸収線量率の相違は 30% 程度であって、大体良い一致を示している。

6. β線とγ線による皮膚吸収線量の比較

β線とγ線はそれらの物質との相互作用の違いのため、外部被曝による皮膚吸収線量には著しい相違がある。この事柄を正しく認識することは各種の放射線作業に対応して適切な被曝評価をおこない、合理的な防護手段をとる意味において重要なことである。ここでは両者の皮膚吸収線量について比較検討する。

6.1 点線源

γ線の点線源の場合も(1)式と同様な式によって求められる。したがってγ線とβ線の吸収線量率の比は、媒質による吸収が効かない範囲、すなわち逆自乗が成立する範囲では次のようになる。

$$\frac{D_{\beta}}{D_{\gamma}} = \frac{\mu E \exp(-7 \times 10^{-3} \mu)}{\mu_t E_{\gamma}} \quad (21)$$

ここに μ_t : γ線に対する組織の真の質量吸収係数 (cm^2/g)

E_{γ} : γ線のエネルギー (MeV)

(21)式において $E_{\gamma} = E (=1/3E_m)$ とした場合の関係を Fig. 19 に示す。 μ_t は μ と共に Fig. B-1 に与えられている。Fig. 19 から分かるように、普通に用いられるβ線のエネルギー $E_m = 0.5 \sim 2.0$ MeV に対して不感層直下の吸収線量率を問題とするかぎり $D_{\beta}/D_{\gamma} = 50 \sim 500$ で、β線による吸収線量が著しく過大なものとなる。点線源から数 10 cm 離れた所で両者による吸収線量は大体同じ程度になる。

6.2 面線源

Fig. 3 に一様な表面密度の面線源からのγ線吸収線量率を計算した結果が示してある(付記Cを参照)。皮膚表面における汚染についてみると、汚染面積が無限と考えられる場合は Fig. 19 から分かるように、 $D_{\beta}/D_{\gamma} = 50 \sim 250$ ($E = 1/3E_m$ として $E = E_{\gamma}$ の両者の値の比をとった) で、なおβ線の吸収線量の方がγ線のそれを相当上回ることが分かるが、その程度は点線源の場合にくらべて少なくなっている。これは Fig. 4 に示したように、面線源からのβ線による吸収線量はそのごく限られた範囲からβ線のみが吸収線量に寄与するが、γ線の場合は広範囲から効いてくるためである。それ故、汚染面積が有限な場合は Fig. 5 から分かるように D_{β}/D_{γ} はさらに大きくなり、β線吸収線量が支配的となる。一方無限の広がりをもつ面線源からある距離における吸収線量率は、点線源の場合ほど減少せず、1 m 位離れた位置でγ線による吸収線量率と同程度になるので被曝防護上の考慮を要する。

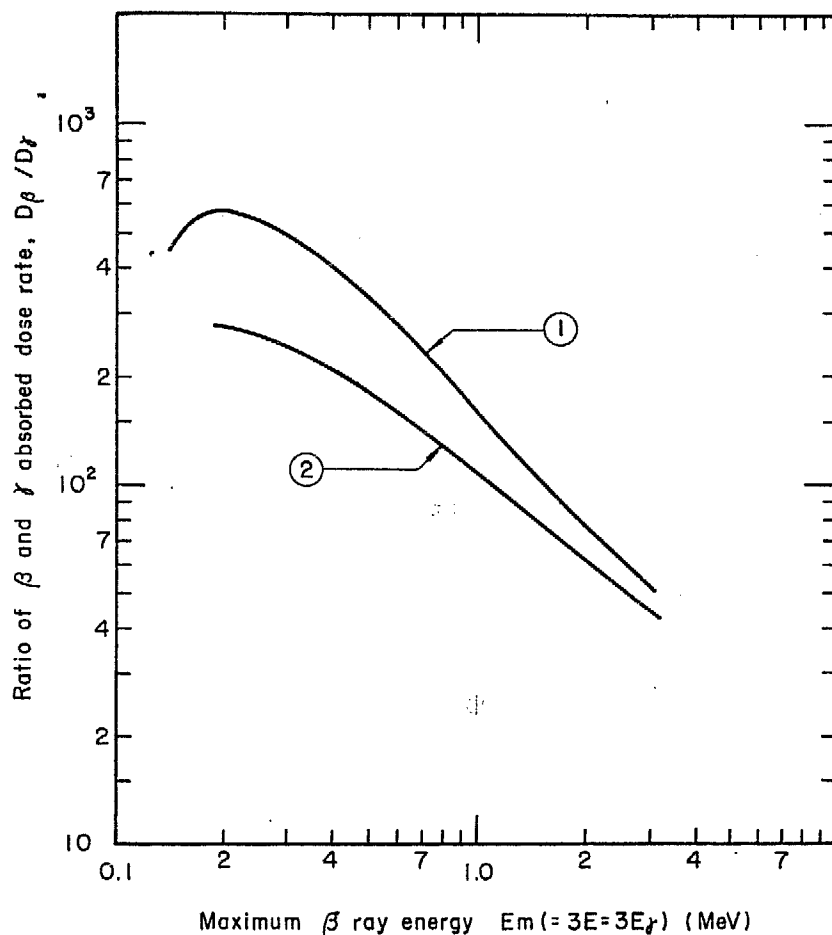
純粋なβ放射体以外の核種、たとえば ^{198}Au 、 ^{137}Cs 等による皮膚汚染の場合もγ線被曝よりもむしろβ線被曝に着目して措置されなければならない(Fig. 26 参照)。普通はγ放射体として取扱われ、その被曝管理もγ線に対しておこなわれる ^{60}Co (γ : 1.17, 1.33 MeV, β : $E_m = 0.31$ MeV) をとってみても、 ^{60}Co 溶液による皮膚汚染の場合には

$$D_{\beta}/D_{\gamma} = 4(\text{rad/hr})/0.6(\text{rad/hr}) \cong 7$$

でβ線による吸収線量率の方がγ線による吸収線量率を上回っている。

6.3 体線源

半無限の場合の表面における吸収線量率は $D_{\beta} = D_{\gamma}$ であるが、 D_{β} は線源の大きさには殆ど無関係で濃度のみ依存し、一方 D_{γ} は線源の大きさ、したがって全放射能に依存している。それ故表面における吸収線量率は一般に $D_{\beta} > D_{\gamma}$ である。体線源から離れるに従って、γ線吸収線量がβ線のそれを上回るようにな



① point source $\frac{\mu \exp(-7 \times 10^{-3} \mu)}{3 \mu_t}$

μ : absorption coefficient of β ray

μ_t : true absorption coefficient of γ ray for tissue

② infinite plane source (ratio of surface dose)

Fig 19 Ratio of β ray to γ ray absorbed dose rate from a point and plane source.

るが、この場合は部分被曝か全身被曝かを考慮すると共に適切な線量率測定により両者による被曝線量の比較評価をおこなう必要がある。

以上見てきたように線源の近傍で被曝した場合ないしは汚染が皮膚表面におきた場合の β 線吸収線量率は γ 線のそれにくらべて著しく大きいものである。普通 β 線被曝は皮膚の一部それも手の部分に限られることが多い。ICRPによると、四肢に対する年間最大許容線量は75 remで、造血臓器および全身に対する値5 remの15倍、すなわち四肢に対する放射線の生物学的効果は全身または造血臓器の1/15に考えている。このファクターを考慮してもなお皮膚汚染等の場合にうける β 線吸収線量は γ 線のそれとくらべて過大なものとなる可能性が大きいから、 β 線の被曝防護について十分に留意されなければならない。

体線源の1つである有限または半無限空間に、一様あるいは異なる濃度で分布した放射性気体の中に浸った場合にうける β 線および γ 線の外部被曝についての評価は原子炉建家等のスタックから放出される、 ^{41}Ar または ^{133}Xe アイソトープからの被曝と関連して重要な問題である。しかしこのことについてはすでいくつかの報告もあり、筆者らの1人によっても、有限空間に放射性気体が一様に分布した場合の β 線および γ 線による外部被曝の計算と解析がおこなわれ別に報告されている⁹⁾ので、ここでは触れないことにする。

7. Depth dose および integral dose の計算

放射線管理上の立場から被曝を問題とする場合は、不感層直下における吸収線量を考えれば十分であるが、実際に障害の大きさに関係するのは組織の各深さにおける線量の分布の様子である。それゆえここではβ線およびγ線による depth dose について検討することにする。

7.1 皮膚表面の汚染

Depth dose は (2) 式または (4) 式を用いて $h = \mu\rho H$ を関数として計算される。(2) 式において $S = 1 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ として種々のβ線エネルギーに対して計算した depth dose を Fig. 20 に示す。手のひらの不感層として $40 \text{ mg}/\text{cm}^2$ をとると、 $7 \text{ mg}/\text{cm}^2$ の場合における不感層直下の吸収線量率に対して $E_m = 2 \text{ MeV}$ で約 40%、 $E_m = 1 \text{ MeV}$ では 20%程度まで減少することが分かる。Fig. 20 には LOEVINGER の実験式^{1),2)}を使用して得られた ^{198}Au ($E_m = 0.96 \text{ MeV}$, $E = 0.33 \text{ MeV}$) に対する depth dose を併せて示してある。 $E_m = 1.0 \text{ MeV}$ に対して (2) 式を用いて得られた結果と $7 \text{ mg}/\text{cm}^2$ の位置において約 15%位の差がみられる。この相違の大部分は LOEVINGER の式が全散乱 (total scattering) の条件、すなわち線源をとりまく吸収体は、その大きさをさらに増しても問題の点における吸収線量率の値にならぬ影響も及ぼさない程度に十分大きいものであるという条件を満たすような状況の下で得られたものであることに起因している。したがって LOEVINGER の式は線源を支持している物体およびその周辺の媒質の密度が同一の場合以外は厳密には成立しない。皮膚表面の汚染の場合は、空気層から組織への backscatter は殆ど問題とならないから LOEVINGER の式よりも (2) 式を用いて得られた値の方が妥当性がある。一方医学上の治療に用いられる $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ や RaE 等を使用した applicator による depth dose を求める場合とか、濾紙表面に一樣に付着したアイソトープによる表面吸収線量を求める場合は LOEVINGER の式がより正確な値を与える。

汚染面積が有限な場合の depth dose は (4) 式を用いて計算される。一例として $E_m = 1 \text{ MeV}$ に対する depth dose を Fig. 21 に示す。この図から汚染密度が一定の場合、depth dose は汚染面積の大小に殆ど関係しないことが分かる。一方γ線による depth dose は汚染面積の広がりによって著しく異なっている。Fig. 22 に (C-1) 式を用いて $E_\gamma = 1.0 \text{ MeV}$ および 0.35 MeV に対するγ線 depth dose を計算した結果を示す (付記 C 参照)。

放射線が生体の機能に及ぼす影響の程度について考える場合、同一の吸収線量であってもそれが全身的であるか、ある特定の身体器管についてであるか、ないしは身体の一局部についてであるかによって著しい相違があることは良く知られていることである。ICRP の勧告においても身体の各部または各器管の被曝に応じて最大許容線量としてかなり違った値を採っている。1つの身体器管または身体部位の被曝にもとづく障害は単にその問題の組織の吸収線量の多少によるだけでなく、それに隣接する器管ないしは組織のうけた吸収線量にもかなりの程度影響される。このような効果を考慮する1つの方法として、integral dose または volume dose といわれる概念が用いられている。この事柄に立ち入ることはこの報告の主旨ではないが、ここでは局部被曝であるβ線被曝と一般に広範囲に及ぶと考えられているγ線被曝との生物学的効果を比較検討するための1つの手がかりとして integral dose をとりあげることにする。Integral dose は一般に次式に示すように線量 $D(t, V)$ の問題の体積 v についての積分として定義される (t は被曝時間)。

$$\Sigma(t, v) = \int_v D(t, V) dV \quad \text{g} \cdot \text{rad} \quad (22)$$

ここでは簡単のために照射面積として 1 cm^2 をとり、汚染面に対して平行方向の線量分布は 1 cm^2 の範囲にわたって中心軸上の値に等しいとした。任意の大きさの汚染面積に対する integral dose は (4) 式を用いて次のようになる (Fig. 23)。

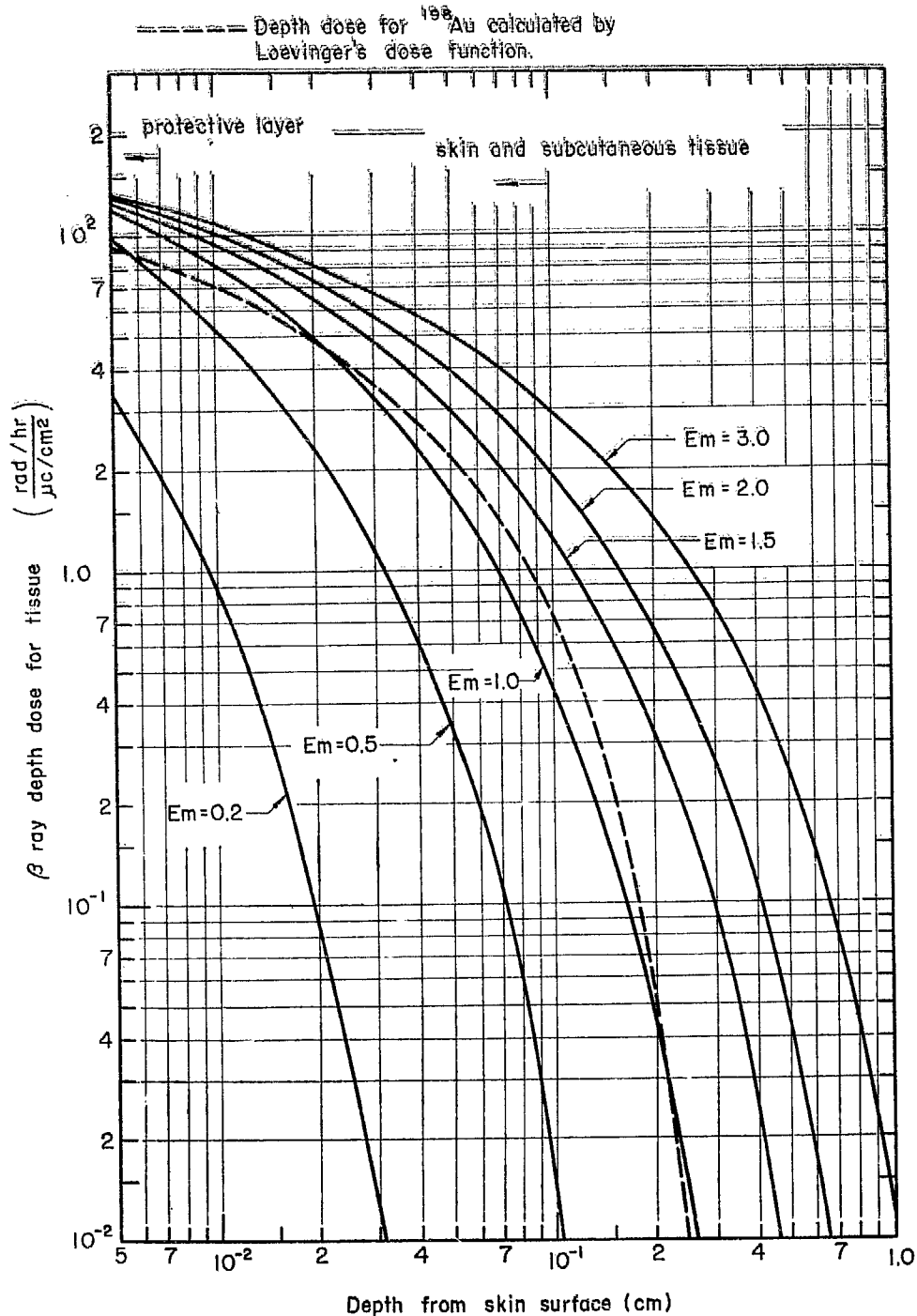


Fig. 20 β ray depth dose curves from an infinite plane source on the skin.

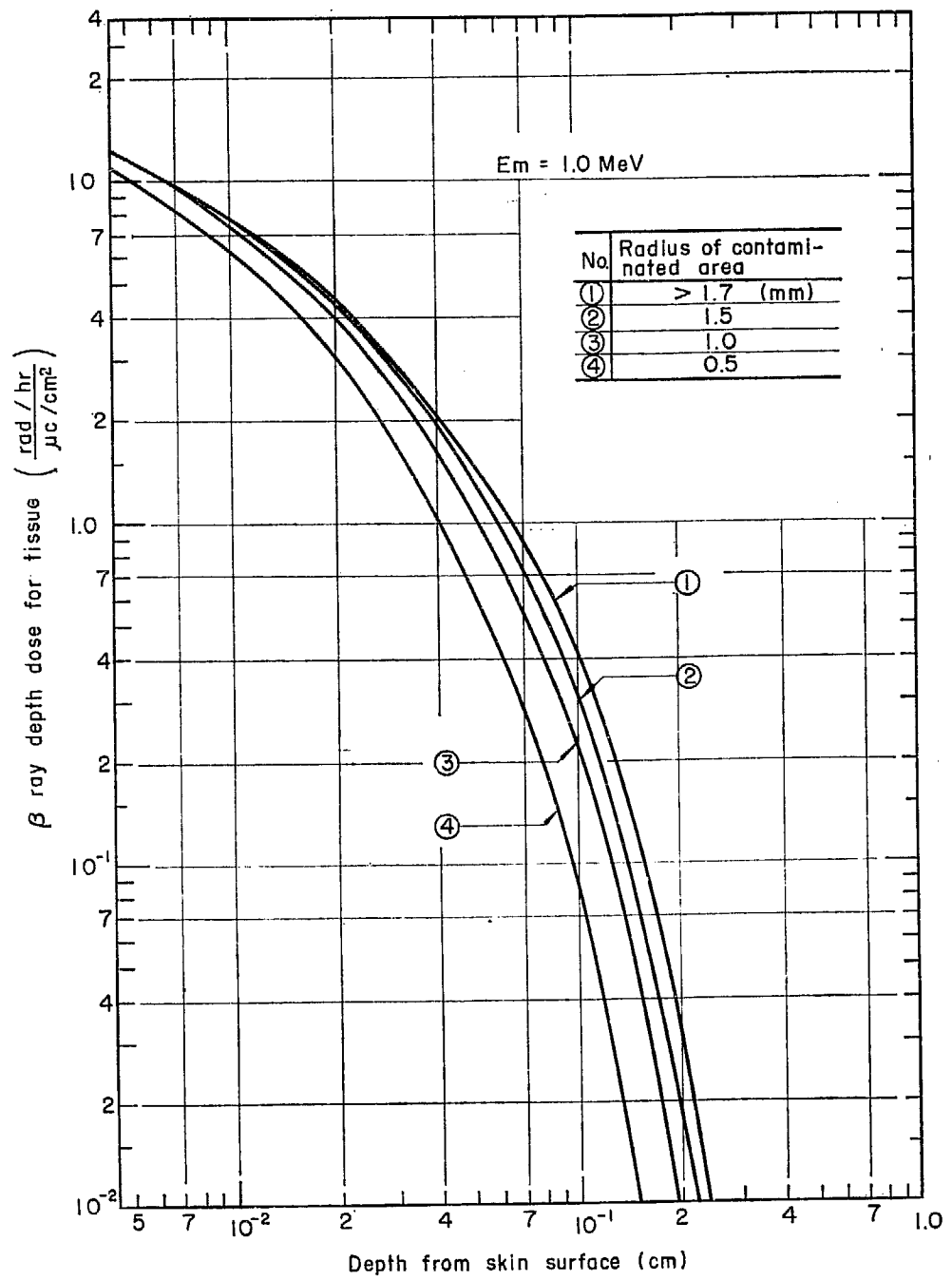


Fig. 21 β ray depth dose curves from a finite plane source on the skin.

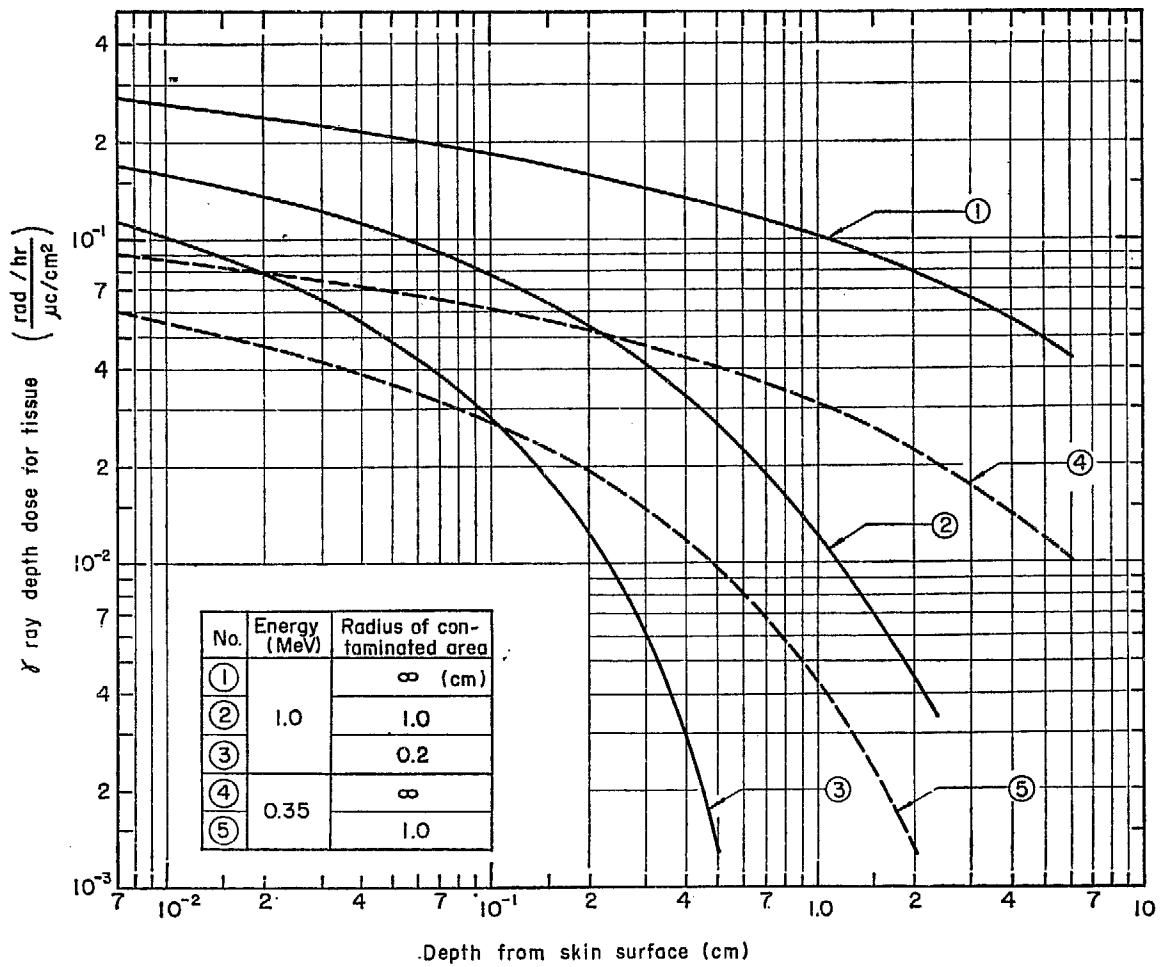


Fig. 22 γ ray depth dose curves from a plane source on the skin.

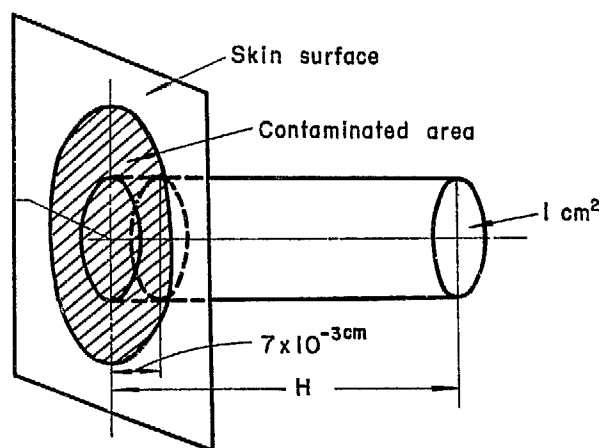


Fig. 23 Calculation of depth dose.

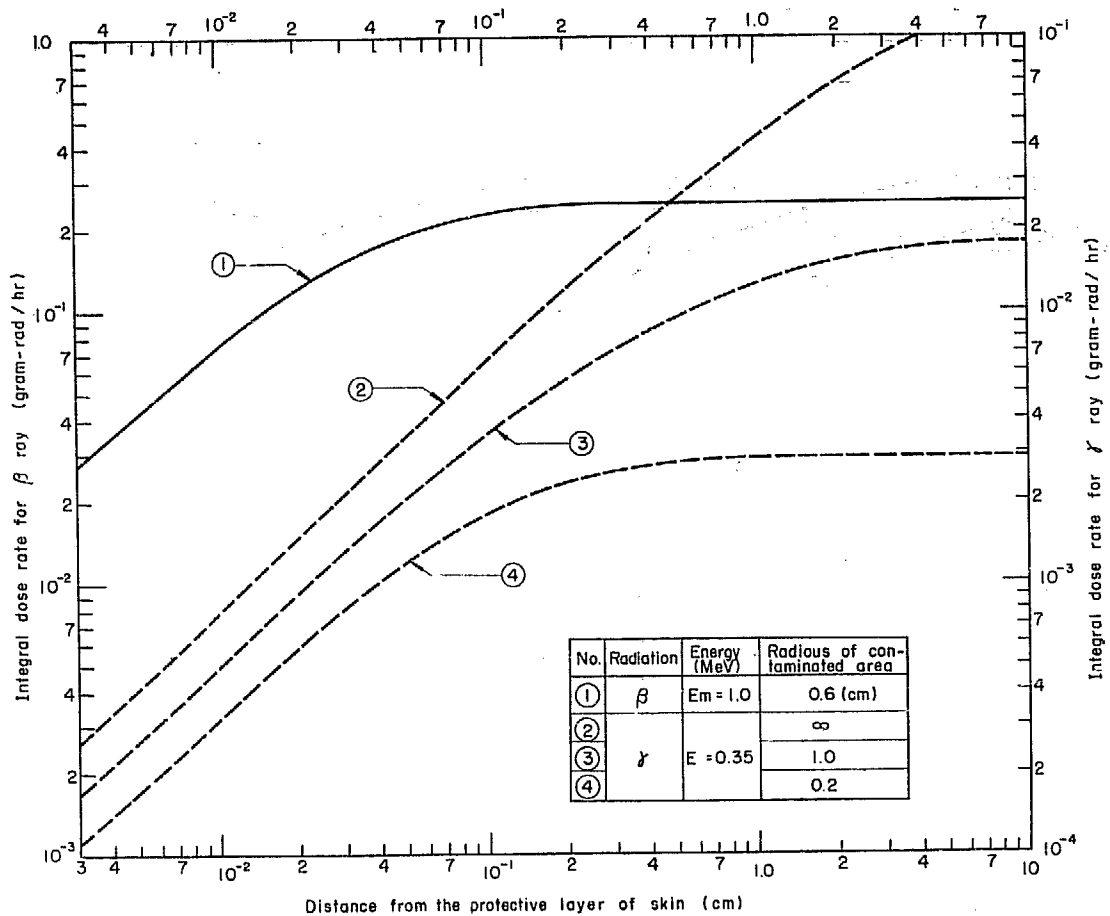


Fig. 24 β and γ ray integral dose rate as a function of depth from tissue under the protective layer of skin.

$$\begin{aligned} \Sigma(H) &= \int_{7 \times 10^{-3}}^H D(H) dH \\ &= 1.07 \mu ES \left[\int_{7 \times 10^{-3}}^H \{E_1(h) - E_1(r)\} dH \right] \text{ g} \cdot \text{rad/hr} \end{aligned} \quad (22)$$

汚染面積が 1 cm^2 以下の場合にはこの integral dose は実際より大きな値を与える。(22) 式を積分して得られた結果 ($E_m = 1.0 \text{ MeV}$) を Fig. 24 に示す。これと比較する目的で 1 MeV の β 線の平均エネルギーに相当する $E_r = 0.35 \text{ MeV}$ の γ 線に対する integral dose の計算結果も示してある。 $E_m = 1.0 \text{ MeV}$ の β 線では厚さ 2 mm の組織内で殆ど吸収されてしまい、身体内部の器管に与える影響は無視される程度である。一方 γ 線の場合、汚染面積無限大 (汚染部の半径 $a > 10 \text{ cm}$) の場合は 2 mm の深さでの integral dose は β 線のそれにくらべて小さい、すなわち

$$I(H=0.2 \text{ cm}) = \frac{\gamma \text{ 線の integral dose}}{\beta \text{ 線の integral dose}} \approx \frac{1}{20}$$

であるが、深さ H と共にその integral dose は殆ど直線的に増加する。この場合は β 線被曝にくらべて γ 線のそれの方が生物学的効果としてははるかに大きくなることが予想される。しかし身体表面の汚染面積が小さい場合 ($a \approx 1.0 \text{ cm}$) は単位面積当りの integral dose の飽和値の比は $I(\infty) \approx 1/15$ となり、β 線の integral dose が γ 線のそれを常に相当上回る。このことは汚染の広がりがない場合においては、β 線の局部被曝による生物学的効果の方が γ 線のそれより大きくなることを意味していると考えられる。それ故全身的な汚染に対しては γ 線被曝を中心として除染上の処置または医学上の処置がとられるべきであり、局所的な汚染の場合は β 線被曝に注目して処置がとられるべきである。しかしここで問題にしているのは γ 線の

吸収線量が最大許容線量以下の場合であって、局所的な汚染といえども数 $100 \mu\text{c}$ から数 mc 以上に及ぶ場合は当然全身被曝の観点から処置が考えられなければならない。

7.2 眼の汚染

普通発生する眼の汚染の多くは放射性溶液の飛沫が眼の中に飛びこんでおこるもので、固体状の放射性物質による場合はごく希である。それ故ここでは放射性液体による汚染について検討することにする。眼球（正しくは鞏膜）表面のある部分が液体で汚染された場合は、それが強度の酸性またはアルカリ性溶液でない限り、瞼および眼球的運動により恐らく短時間に眼球表面全体に広がるであらう。この場合は一様な密度の面線源からの被曝として扱うことができる。眼はその複雑な構造から云ってある限られた部分の被曝であっても眼の機能に影響を及ぼすことが考えられる。眼の各部に及ぼす放射線の生物学的効果を調べ、それらが全体として眼の機能にいかに関与するかということは放射線医学的には重要な課題であらうが、ここでは単純に ICRP⁹⁾によって全身被曝と同等に扱われている水晶体のみについて吸収線量を考察することにする。

水晶体の被曝を考える場合、 β 線に関しては無限平面からの被曝として取扱って差しつかえない。水晶体の位置は平均的にいって眼球の表面下 $3 \text{ mm}^{10)}$ とされているのでこの深さでの吸収線量を考えればよい。Fig. 20 の depth dose 曲線から分かるように、 $E_m = 1.0 \text{ MeV}$ 以下の β 線からは殆ど影響をうけない。 ^{32}P の溶液による眼の汚染を考えると $1 \mu\text{c}/\text{cm}^2$ の汚染密度で $\sim 0.15 \text{ rad/hr}$ の吸収線量率となる。13 週の最大許容線量 3 rem には約 20 時間で達する。眼球表面の面積を約 2 cm^2 とすると全汚染量は $2 \mu\text{c}$ であるから、全汚染量が $1 \mu\text{c}$ 程度以上と考えられる場合はその汚染は線量的には significant なものとして早急に除染の措置をとることが望まれる。この除染困難な場合、定期的に医学的な診断をうけることも必要であらう。他方この $1/1000$ 程度、すなわち $0.001 \mu\text{c}$ 程度以下の汚染量に対してはそれが眼球表面の局所に偏在しない限り、線量的には殆ど問題とならない。それ故眼の汚染に対する基準表面汚染密度としては $10^{-8} \mu\text{c}/\text{cm}^2$ を採用すればよいであらう。 β 線と γ 線を同時に出すアイソトープによって眼の汚染がおきた場合は γ 線からの全吸収線量への寄与も相当の割合を占めるようになるから、全吸収線量を考慮して処置を考える必要がある。たとえば ^{60}Co 溶液による汚染を考えると、その β 線 ($E_m = 0.31 \text{ MeV}$) による影響は問題とならないが、 γ 線吸収線量率は $1 \mu\text{c}/\text{cm}^2$ の密度の汚染に対して約 0.1 rad/hr となる (Fig. 22 参照)。これは ^{32}P による吸収線量率の約 $2/3$ であるが、水晶体 (厚さ約 3 mm) 全体の integral dose を考えるとむしろ ^{60}Co の γ 線の方が大きく、したがって生物学的な効果としては汚染量が同一の場合 ^{60}Co の方が大きいであらう。初めに述べたように局部 (ここでは水晶体) だけの吸収線量を考慮してもそれだけで眼球全部の障害について予測することは不可能であり、総合的な解析は現状では困難なことであって今後に残された問題と考える。ここでは水晶体のうける吸収線量を中心として、眼の汚染が発生した場合にとるべき考え方なり応急の処置に関して 1 つの試案を提起するにとどめる。TABLE 3 に種々の放射性核種によって眼の汚染 (汚染密度は $1 \mu\text{c}/\text{cm}^2$) がおきた場合の吸収線量率を参考のために示した。

TABLE 3 Absorbed dose rate from the various sorts of radionuclides for the lenses of eyes the surface of which is uniformly contaminated with $1 \mu\text{c}/\text{cm}^2$. Unit: rad/hr

Nuclide Radiation emitted	^{24}Na	^{32}P	^{60}Co	$^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$	^{137}Cs	$^{144}\text{Ce} + ^{144}\text{Pr}$	^{198}Au
	γ	0.13	—	0.1	—	0.03	?
β	0.07	0.15	—	0.40	—	0.75	0.10

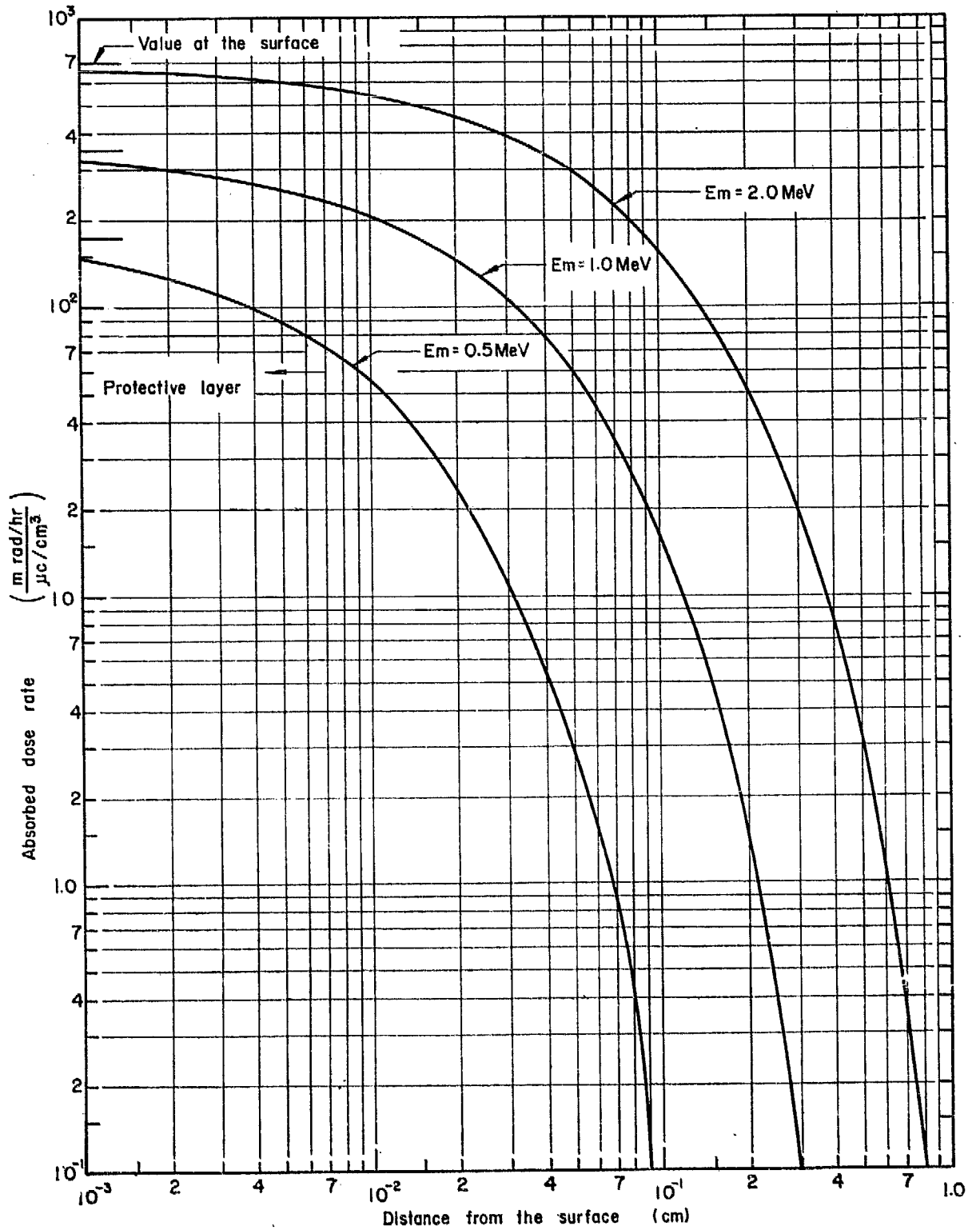


Fig. 25 Absorbed dose rate as a function of distance from the surface of semi-infinite volume source having constant activity per unit volume.

7.3 体線源による depth dose

任意の密度 ρ_s の体線源に対する depth dose を求めることは困難であり、その必要性も大きくはないので、 $\rho_s = 1 \text{ g/cm}^3$ の線源が皮膚に接している場合の depth dose を計算することにする。(10)式から

$$D_i(T_0, H) = 1.07EC \left[\int_0^{x_0} E_1(x) dx - \int_0^{H} E_1(x) dx \right] \text{ rad/hr} \quad (23)$$

ここに、 $H =$ 皮膚表面から組織内の任意の点に至る垂直距離 g/cm^2

$T_0 =$ 線源の厚さ g/cm^2

$x_0 \rightarrow \infty$ すなわち半無限の場合は

$$D_i^{\infty}(H) = 1.07EC \left[1 - \int_0^{H} E_1(x) dx \right] \text{ rad/hr} \quad (24)$$

4.1 で述べたように、体線源は厚さ 2 mm 前後で半無限線源と考えると良いので、一般の目的には安全側である半無限の場合の depth dose が分かれば十分である。(24)式を用いて得られた結果を Fig. 25 に示す。この図は沓紙に一樣に β 放射体をしみ込ませた場合とか、 β 放射体を溶かした溶液中に組織の一部がひたった時の depth dose を求めるのに役立つ。

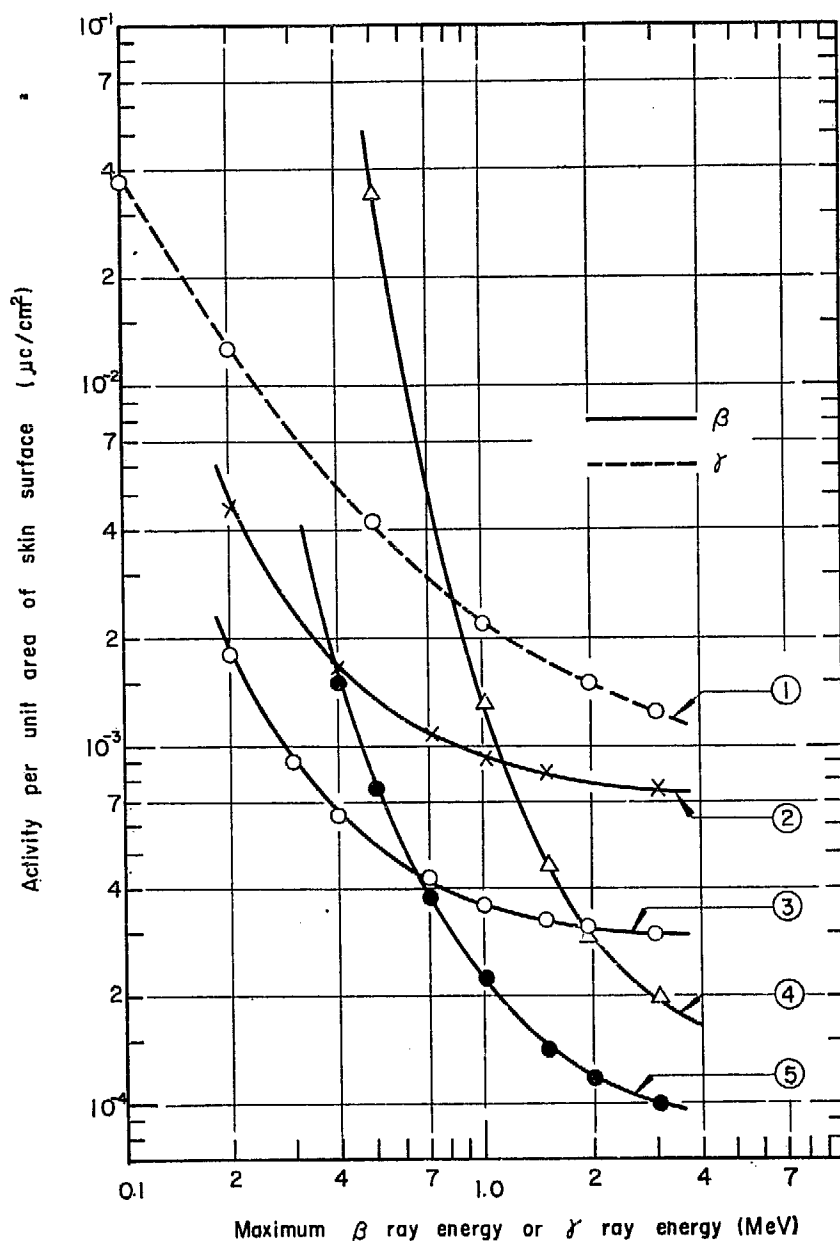
8. 皮膚表面のβおよびγ汚染に対する基準表面密度*についての考察

β・γ放射体による皮膚汚染からうける被曝線量の最大許容レベルを 5 rem/y (100 m rem/w = 0.6 m rem/hr) にとるか、純粹に皮膚の被曝だけをとりあげて 30 rem/y (600 m rem/w = 3.6 m rem/hr) にとるかは議論の別れるところである。ICRP の勧告³⁾で皮膚層と考えられる組織の有効半径は 1 mm である (ただしこの間には皮下組織も含まれている。ICRP で与えられている 30 rem/y は皮膚それ自身についての最大許容線量であるが、その有効半径については ICRP には明確な記載がないので一応ここでは表面下 1 mm までを皮膚層と考えることにする)。

Fig. 26 に皮膚表面から深さ 1 mm において 100 m rem/w, 0.07 mm においては 600 m rem/w と 1,500 m rem/w (四肢の部分に対する最大許容週線量) に対応する表面汚染密度を、β線とγ線に分けて Fig. 3 および Fig. 2D を用いて求めた値を示す。なお参考のために表面下 0.35 mm (皮膚と皮下組織との重量比は約 1/2 である³⁾) において 100 m rem/w を与える表面密度もあわせて示してある。興味あることは Fig. 26 から分かるように、β線被曝による 600 m rem/w と 100 m rem/w に対する最小の表面汚染密度はファクター 2 以内で一致している。それ故皮膚表面の汚染の場合は最大許容線量が 100 m rem/w か 600 m rem/w かに無関係に、基準表面密度として $10^{-4} \mu\text{c}/\text{cm}^2$ をとれば、γ線の寄与を考慮しても十分安全側になっている。もし皮膚の有効半径が最悪の場合 0.35 mm であるとしても、 $E_m = 3.0 \text{ MeV}$ 以上のβ線に対してのみ上にあげた表面汚染密度で最大許容線量をこえることになる (ただし半減期を無限大とした場合)。しかし、ここで皮膚層の厚さとしてとっている値は有効半径であるので、実際の厚さはこの値の 2 倍と考えてよいであらう。また皮下組織が明らかに皮膚自体と区別して考えられる場合でも、皮下組織に対する最大許容線量として全身または生殖腺の被曝と同等に 5 rem/y をとるということにはならない。局部被曝ということからむしろ単一器管に対する値 15 rem/y (300 m rem/w = 1.8 m rem/hr) をとるのが妥当であらう。これらのことを考えあわせると、どんな場合でも外部被曝を問題とする限り、皮膚表面の基準汚染密度として $10^{-4} \mu\text{c}/\text{cm}^2$ をとれば十分であることが分かる。四肢の被曝の場合は Fig. 26 から $5 \times 10^{-4} \mu\text{c}/\text{cm}^2$ を採っても、少なくともファクター 1.5 の安全度が考慮されていることになる。

今迄考察した基準表面汚染密度は外部被曝のみを考えて得られたものであるが、この値をきめる他の重要な因子として考慮されるべきものは汚染の移行に関する事柄である。その第 1 は皮膚層を透して直接体内へ移行する現象であり、第 2 は経口摂取による移行である (他に吸入による移行があるが、身体汚染の場合には殆ど問題にならないと考えられる)。皮膚層そのものは浸透現象に対して一般によい障壁となっている (ただし、 T_2O による汚染の場合は非常に迅速に浸透して体液中に混入する¹¹⁾) ので、除染時に皮膚のこの保護作用を完全に破壊しない限り、移行率は精々 0.1%/day 以下であらう¹²⁾。経口摂取の可能性としては非固着性の汚染が直接とり入れられる場合と、固着性の汚染が皮膚の代謝現象により剝離し、それがとり入れられる場合とがある。しかし管理区域から退出する場合には手を洗うのが原則であるから、普通残っている皮膚汚染は固着性と考えられるものが大部分である。いま面積 300 cm^2 の手の表裏全面が汚染した場合についてみると、その全汚染量は汚染密度を $5 \times 10^{-4} \mu\text{c}/\text{cm}^2$ として $0.15 \mu\text{c}$ である。このうちの 1%, すなわち $1.5 \times 10^{-3} \mu\text{c}$ が経口摂取により毎日体内に移行すると仮定すると、 ^{90}Sr に対する毎日の最大許容摂取量 $2.2 \times 10^{-3} \mu\text{c}/\text{day}$ と同程度になるが、面積 300 cm^2 に及ぶ皮膚汚染が定常的に続くということは考えられない。それ故皮膚汚染をコントロールするにあたって支配的要素となるのは外部被曝と考えてよいので、その場合の吸収線量を基にして基準汚染密度を決定することができる。しかしながら皮膚汚染からの吸収線量だけで

* 基準という用語は最大許容線量のような放射線防護に関する第 1 の標準と区別する意味で用いられる。というのは表面汚染密度は最大許容線量 (またそれから導かれた空中あるいは水中の MPC) にもとづいて、いくつかの仮定やら近似式を用いて導かれる 2 次または 3 次的な標準だからである。Harwell ではこのような 3 次的な標準を 'Derived working limit', ORNL では 'guide' といっている。



- ① 100 mrem/w at 0.07 mm (γ dose rate for tissue)
- ② 1500 mrem/w at 0.07 mm (β dose rate for extremities)
- ③ 600 mrem/w at 0.07 mm (β dose rate for general skin)
- ④ 100 mrem/w at 1.0 mm (β dose rate for tissue)
- ⑤ 100 mrem/w at 0.35 mm (β dose rate for subcutaneous tissue)

Fig. 26 Amounts of the activity per unit contaminated area which give the maximum permissible dose at the various parts and depth of a body.

もって、最大許容線量一杯の被曝をうけるということは好ましいことではないから、皮膚汚染を規制する基準値としての表面汚染度はここで述べた値の 1/10 をとることが望ましい。ORNL および Harwell でもこの考え方を採用しており、ORNL の場合は規制としては表面密度ではなく吸収線量率によっている。すなわち、一般的な皮膚汚染では <0.06 m rad/hr ($E_m=3.0$ MeV の β 線の場合、 $5 \times 10^{-6} \mu\text{c}/\text{cm}^2$ に対応)、手の汚染に対しては <0.3 m rad/hr ($2.5 \times 10^{-5} \mu\text{c}/\text{cm}^2$ に対応) を採っている¹³⁾。英国 (AERE の管轄下) では

β・γ 放射体による皮膚汚染に対して $10^{-4}\mu\text{C}/\text{cm}^2$ を、フランス (French AEC の管轄下) では $5 \times 10^{-5}\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ^{14), 15)}, AEET (India) では $3 \times 10^{-5}\mu\text{C}/\text{cm}^2$ を採っており¹⁶⁾, ここで考察した値の 1/10 をとったものより大きい. このように皮膚に対する基準表面密度は国によって, あるいは研究所によってかなりの違いがみられる. 現在原研で採用されている手の β・γ 汚染に対する基準表面密度は $10^{-6}\mu\text{C}/\text{cm}^2$ であり, 先に手に対して得られた値の 1/10 すなわち $5 \times 10^{-5}\mu\text{C}/\text{cm}^2$ とくらべて, さらにその 1/50 になっている.

9. β 線による外部被曝の防護

普通経験する β 線による過度の外部被曝は、不用意に線源に接近して作業ないしは実験をおこなった場合とか、身体表面の汚染などによる場合である。 β 線源の取扱いに際しては次の事柄に留意する。

(1) 吸収線量の評価 すでに 2~4 に述べた計算と、また可能なときは 5 で述べた測定に基づいて、あらかじめ吸収線量の評価をおこない、それによって実験操作をきめ、防護上の措置をとる必要がある。体線源の取扱いの場合は γ 線源による被曝と異なり、 β 線吸収線量は直接比放射能に関係しているから、取扱う全放射能の量よりも比放射能の多少に注目して作業しないと過大な局部被曝をうけることになる。ゴム手袋をしている場合でも直接手で掴まないようにし、止むを得ずそのような操作をおこなうときは十分被曝線量の評価をおこなって操作時間をきめる必要がある。できればあらかじめ模擬的なテストをおこなってから取りかかった方がよい。ゴム手袋を通して受ける吸収線量の一例を TABLE 4 に示す。 ^{32}P の体線源を取扱うときはグローブ・ボックス用の手袋を着用しても手袋をしない場合の約 1/2 しか吸収線量は下がっていない。

TABLE 4 Ratio of absorbed dose rate at 7 mg/cm² of skin with glove to one without glove.

Sort of glove	Thickness (mg/cm ²)	^{204}Tl		^{210}Bi (RaE)		^{32}P		^{90}Y	
		E=0.24MeV		E=0.32MeV		E=0.70MeV		E=0.93MeV	
		V. S. *	P. S. **	V. S.	P. S.	V. S.	P. S.	V. S.	P. S.
Glove for surgeon use	20	0.40	0.20	0.65	0.35	0.70	0.55	0.75	0.60
Glove used in glove box	50	0.10	0.07	0.20	0.15	0.45	0.30	0.55	0.35

* V. S.: Handling of volume source.

** P. S.: Handling of plane source (including the surface contamination of gloves).

(2) 体表面の汚染の防止 アイソトープを取扱うときに手袋を着用することは最も基礎的な防護手段である。皮膚表面の汚染が取除かれなまま長時間存在することは過度の局部被曝をおこすことになり、同時に内部被曝の原因ともなるから皮膚汚染の防護には特に注意を要する。殊に β 放射体の場合は全汚染量より汚染面積の多少が吸収線量に関係しているから、表面の汚染密度を正しく知って処置することが大切である。手袋を着用していても強酸または強アルカリの溶液が付着した場合は腐食浸透するおそれがあるから、汚染に気がついた場合はただちに手袋を脱いで皮膚汚染の有無を調べる必要がある。

(3) 眼の防護 7.2 でみたように、眼の中に放射性溶液がはいって汚染した場合は、その濃度によっては重要な身体器管である水晶体の被曝が問題になってくるから、眼の汚染のおそれがある時は眼がねを着用して操作する。また高いエネルギーの β 線源に接近して β 線束密度の高い位置で操作する場合は外部被曝防護の意味から眼がねが必要である*。この場合厚さが 500 mg/cm² (1.8 mm) の眼がねで大体水晶体の吸

* 眼の水晶体の被曝に対して ICRP は、 $E_m > 2.5$ MeV の β 線による外部被曝に対してのみその防護の必要性を述べており、それ以下の β 線に対する被曝の場合には遮蔽を用いることが実際的でないならば、 γ 線または中性子線に対する最大許容線量にさらにつけ加わる少量の水晶体 β 線量は、皮膚における最大許容線量をこえないかぎり許容される、としている (ICRP 51 f)。しかし、Fig. 1 から分かるように接近して作業する場合 (50 cm = 65 mg/cm² 以内) は $E_m = 2$ MeV 程度の β 線源の取扱いであっても可能な限り防護手段を考慮した方がよい (1 m で 0.5 m 離れて、水晶体に対し約 0.1 rad/hr になる)。

吸収線量は2桁以上おちる (Fig. 20 参照) から、この程度以上の厚さがあれば、普通の作業では十分防護上の目的は達せられる。特に強い β 線源の場合は鉛入りの眼がねを用いるが、この場合は制動X線に注意し、できるだけ測定により制動X線の有無を確かめる。

(4) 遮蔽 β 線の遮蔽は比較的簡単におこなえるものであるから、軽視することなく確実に実施する。高エネルギーの β 線で、かつ高い比放射能の β 線源の場合は制動X線に留意して遮蔽体を考える必要がある。プラスチック板等できるだけ原子番号の小さい物質を使用するのが基本である。Fig. D-1 に β 線が物質との相互作用によって失なうエネルギーのうち、制動X線となる部分の割合を示してある。これは制動X線によるエネルギー損失を示すものであって、吸収線量率の大きさを示すものではないから注意を要する。制動X線による吸収線量率を求めるにはそのエネルギー分布¹⁷⁾を知る必要がある。

β 線源はその不用意な取扱いによってたちまち過度の被曝をうける反面、使用する核種に応じて β 線被曝をあらかじめ正当に評価し、かつその取扱いについての基本的な原則を守ることによって容易にその被曝を防ぐことができる。

10. あとがき

おわりに得られた結果の主なものについてまとめておく。

- (1) 面または体線源からの β 線吸収線量率は、線源の広がり度で5 mm程度、厚さにして2~3 mmになると、その形、大きさには無関係になり、単位面積または単位体積あたりの放射能の量にだけ関係する。
- (2) 各種サーベイ・メータによって β 線吸収線量率を測定する場合、測定条件によって換算係数は異なるから測定器を正しく使用しないと著しく誤まった線量評価をすることになる。
- (3) 皮膚の吸収線量に関する限り β 線吸収線量の方が γ 線のそれをはるかに上回る。
- (4) 汚染面積が小さい場合、単位面積の円筒状の組織のうける integral dose は γ 線に比べて β 線の方が大きい。
- (5) 眼の水晶体に対する γ 線の吸収線量は β 線のそれに近づくから、 γ 線に対する考慮も必要になる。
- (6) 皮膚汚染に対する基準表面密度は β 線の外部被曝による吸収線量率に基づいて決定される。

現在 β 線またはX線の局部被曝によっておこる皮膚反応に関して、どの程度の線量であれば安全であるかというレベルは厳密には分かっていない。ただICRPの考えにしたがえば $100 \text{ m rad/day} (=600 \text{ mrad/w} = 8 \text{ rad/13 w} = 30 \text{ rad/y})$ の割合で被曝する時は、皮膚に対して検知され得るようなどんな変化もおこらないであらうということが云える程度である。

それ故放射線または放射性物質の取扱いに際しては慎重でなければならない。しかしながら、放射線作業にたずさわる人または現場の放射線管理をおこなう人達にとって大切なことは、個人の被曝をゼロにすることに努力を払うといったことではなくて、作業が正常に進行することを第1として無用な被曝および不慮の被曝を避けるために十分な危険評価と防護上の考慮をして、適切な被曝管理をおこなうということである。この報告では β 線の外部被曝を中心として取扱った関係で、 β 線による被曝をやや強調し過ぎた感があるかも知れないが、放射線作業ないしは放射線の管理にあたって β 線による被曝評価を正しくおこない、その防護にこの報告が役立てられれば幸である。

なお、本報告の5.2の実験に当っては立田初己氏の御教示に負う所が多かった。付記して感謝の意を表す。

記号表

本報告で用いた記号は次の通りである。

A	GM 管の窓面積 (cm^2)
a	円形線源の半径 (cm)
C	体積線源の放射性物質濃度 ($\mu\text{C}/\text{cm}^3$)
$D(d)$	点線源からの距離 d における吸収線量率 (rad/hr)
$D^\infty(H)$	無限平面線源からの距離 H における吸収線量率 (rad/hr)
$D(H)$	有限平面線源からの距離 H における吸収線量率 (rad/hr)
$D(T_0)$	高さ T_0 の円筒状体線源表面における吸収線量率 (rad/hr)
D_∞	半無限の体線源表面における吸収線量率 (rad/hr)
D_d	体線源表面から距離 d における吸収線量率 (rad/hr)
$D_i(T_0, H)$	厚さ T_0 の体線源が皮膚と接している場合、線源からの距離 H における組織の吸収線量率 (rad/hr)
D	一般的に表面吸収線量率を示す。個々の場合に於て $D(T_0)$, D_∞ , $D^\infty(H=0.007 \text{ cm})$ および $D(H=0.007 \text{ cm})$ のうちのいずれかの値をとる。
d	線源と問題の吸収体との間の距離 (cm)
E	β線の平均エネルギー (MeV)
E_m	β線の最大エネルギー (MeV)
E_γ	γ線のエネルギー (MeV)
$E_1(x) = \int_x^\infty \frac{e^{-y}}{y} dy$	
f_i	平均エネルギー E_i のβ線を出して崩壊する割合
f	線源の面積が GM 管の窓面積より小さい場合、cpm から rad/hr への換算係数 K_∞ の補正係数
G	幾何効率
H	面線源表面から問題の吸収体までの垂直距離 (cm)
I	点線源の強さ (mc または μC)
K_∞	線源の面積が GM 管の窓面積より大きい場合の cpm から rad/hr への換算係数 $\left(\frac{\text{m rad/hr}}{100 \text{ cpm}} \right)$
K	線源の面積が GM 管の窓面積より小さい場合の換算係数 $\left(\frac{\text{m rad/hr}}{100 \text{ cpm}} \right)$
K_0	サーベイ・メータの照射率指示値より吸収線量率への換算係数 $\left(\frac{\text{m rad/hr}}{\text{mR/hr}} \right)$
S	単位面積当りの放射能強度 ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)
T	体線源の厚さ (cm)
t_0	不感層の実効厚さ (cm)
$\epsilon(E_m)$	GM 管の計数効率
μ	β線の吸収係数 cm^2/g
μ_t	組織に対する γ線のエネルギー吸収係数 (cm^2/g)
ρ	空気の密度 ($0.0013 \text{ g}/\text{cm}^3$)
ρ_t	組織の密度 ($1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$)
ρ_s	体線源の密度 (g/cm^3)
$\Sigma(t, v)$	Integral dose ($\text{g} \cdot \text{rad}$)
$\Sigma(H)$	Integral dose rate ($\text{g} \cdot \text{rad/hr}$)

参 考 文 献

- 1) R. LOEVINGER *et al.*: Radiation dosimetry, Academic Press Inc. 693 (1956)
- 2) R. LOEVINGER: *Radiology*, **66**, 55 (1956)
- 3) Report of Committee II on Permissible Dose for Internal Radiation (1959 Revision), ICRP publication No. 2
- 4) K. Z. MORGAN: Radiation hygiene handbook, McGraw-Hill Book Co. 14-6 (1959)
- 5) G. I. GLEASON *et al.*: *Nucleonics* **8**, 12 (1951)
- 6) L. R. ZUMWALT: AECU-567 (1949)
- 7) 村主 進: 放射化学ハンドブック, 朝倉書店, 659 (1962)
- 8) 神永博史: JAERI-memo 1599 (1964)
- 9) 福田整司: JAERI 5003 保健物理部の活動 No. 3, p 129 (1961)
- 10) Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (1954)
- 11) C. M. PATTERSON: A/Conf. 15/p/745 (1958)
- 12) B. A. J. LISTER: *Health Phys.*, **9**, 803(1963); Health Physics Problems on Plutonium, JAERI-memo 1155 (1964)
- 13) ORNL: Procedures and Practices for Radiation Protection, Health Physics Manual (1961)
- 14) IAEA: Safe Handling of Radioisotopes (1958)
- 15) H. J. DUNSTER: *Health Phys.*, **8**, 353 (1962); *Atomics*, **6**, 233 (1955)
- 16) K. VENKATARAMAN *et al.*: *Health Phys.*, **9**, 647 (1963)
- 17) K. LINDÉN *et al.*: *Phys. Rev.*, **97**, 419 (1955)
- 18) H. H. ROSSI *et al.*: *Nucleonics*, **7**, 18 (1950)
- 19) W. J. PRICE: Nuclear Radiation Detection, McGraw-Hill Book Co. 18 (1958)
- 20) H. E. JONES *et al.*: Radiation Dosimetry, Academic Press Inc. 100 (1953)

付記 A β線源の表

TABLE A-1 に一般によく用いられるβ線源、および医療用に用いられるβ線源の一覧を示した。この表に記載してあるβ線の最大エネルギーおよび平均エネルギーは NBS handbook 78, 72 (1962) を中心として、Hine and Brownell の Radiation dosimetry および Radiological Health Handbook から採った。いずれにも載っていない平均エネルギーは K. Z. MORGAN の与えている式^{3), 4)}

$$E = 0.33 E_m \left(1 - \frac{\sqrt{Z}}{50}\right) \left(1 + \frac{\sqrt{E_m}}{4}\right) \quad (\text{A-1})$$

を用いて計算した。

付記 B β線に対する吸収係数μについて

β線の吸収線量を計算するに当って最も問題となるのは吸収係数の選定である。ROSSI *et al.*¹⁸⁾ も述べているように真の線型吸収係数を測定することは実験的に困難な内容を含んでいる。すなわち、真の吸収係数を求める場合は、注目しているβ線束から散乱して出ていった粒子が別な方から散乱してその線束にはいつて来る粒子によって補償されるという条件が満たされることと、その外に線源と検出器の間の吸収体を通過する距離が、すべてのβ粒子に対して等しくなるように検出器自体が十分小さいことが必要である。今までにβ線の吸収係数を求める式として得られている主なものを図と表にまとめて Fig. B-1 に示す。④式および⑥式は LOEVINGER *et al.*^{11), 12)} によって extrapolation chamber を用いて測定したβ線の減衰曲線から得られたもので、見掛けの吸収係数とよんでいる。②式は GLEASON *et al.* によって得られたもので、従来から最も多く用いられている。この場合は吸収体には Al を用い、吸収体の厚さ t と計数率 N_t との関係から、 $t=0$ に外挿して μ を求めた。すなわち

$$\mu = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{dt} \ln \frac{N_t}{N_{t+dt}} \quad (\text{B-1})$$

t と N との関係は実験条件すなわち線源、吸収体および計数装置の配置に関係しているから、減衰曲線の平均の勾配から μ をきめることは、真の吸収係数を与えるものではなく、上の方法のように外挿して μ を求めれば、はじめに述べた散乱の影響を少なくしてより正しい真の吸収係数を与えることになる。⑧は K. G. MORGAN⁴⁾ によって与えられたもので、この導出の根拠は明らかでないが、 $E_m = 0.1 \sim 2 \text{ MeV}$ のβ線に対して 20% 以下の誤差で組織における吸収係数を与えるとしている。③式は PRICE¹⁷⁾ によって与えられているもので、導出の根拠は明らかにされていない。いずれにしても μ として得られている値は最初に述べたような意味における真の吸収係数を表わすものではなく、β線の散乱の影響とか、実験配置によっては吸収体中のβ線の飛行距離が一定しないことなどが真の吸収係数に対する誤差として多少とも残っている。その上これらの μ は恐らく飛程の大部分にわたっての平均的な吸収係数を与えていると考えられる。しかしながら、ここで述べてきた μ の値は Fig. B-1 から分かるように $E_m = 0.1 \sim 3.0 \text{ MeV}$ の範囲で最大 30% 以内の誤差で一致している。それ故これらの μ のうちどの値を使用しても有意な差は出てこない。この報告では GLEASON *et al.* の式を用いた。

β線の減弱を表わす式としては近似形として普通指数関数が用いられる。β線の最大エネルギーは有限であるから、それに対応する最大飛程の外ではエネルギーの吸収はあり得ないけれども、指数関数形を用いる場合は、最大飛程以遠の所でもエネルギーの吸収があるという不合理なことがある。指数関数を用いることにより生ずる誤差の程度を点線源に対して求める。β線の全エネルギーのうち指数関数を用いることにより、最大飛程 R_m 以遠の所で見掛上吸収されるエネルギーの割合 F は、

$$F = \frac{\int_{R_m}^{\infty} 4\pi^2 D(x) dx}{\int_0^{\infty} 4\pi x^2 D(x) dx} = e^{-\mu R_m}$$

TABLE A-1 Table of β sources for general use and for medical use

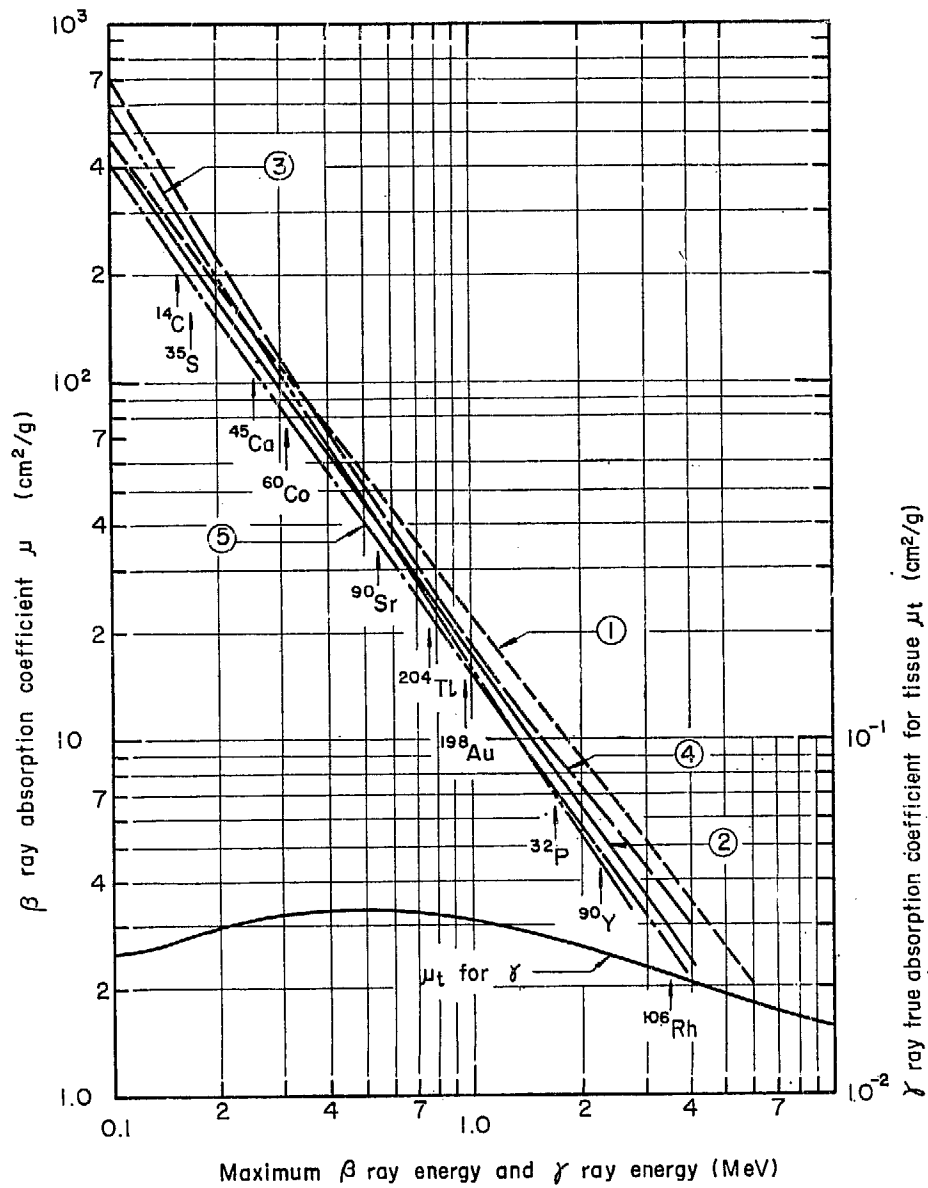
Nuclide	Radiation emitted	Half life	Max. β ray energy MeV	Average β ray energy MeV		γ ray energy MeV
				Cal.	Exp.	
^3_1H	β^-	12.3 y	0.018	0.0055	0.0057 ± 1	—
$^{14}_6\text{C}$	β^-	5568 y	0.156	0.050	0.047	—
$^{24}_{11}\text{Na}$	β^-, γ	15.0 y	1.39	0.56	0.57 ± 3	2.75(1.0) 1.37(1.0)
$^{32}_{15}\text{P}$	β^-	14.2 d	1.71	0.70	0.69 ± 3	—
$^{35}_{16}\text{S}$	β^-	87 d	0.167	0.049	—	—
$^{45}_{20}\text{Ca}$	β^-	164 d	0.256	0.077	0.075	—
$^{60}_{27}\text{Co}$	β^-, γ	5.24 y	0.314	0.093	0.107	1.17, 1.33
$^{86}_{37}\text{Rb}^*$	β^-, γ	18.7 d	1.776(0.9) 0.698(0.1)	[0.685] [0.202] 0.68	0.66	1.08 (0.1)
$^{90}_{38}\text{Sr}^*$	β^-	27.7 y	0.544	0.21	—	—
+ $^{90}_{39}\text{Y}^*$	β^-	64 h	2.25	0.93	0.90 ± 3	—
$^{106}_{44}\text{Ru}$	β^-	1.02 y	0.04	—	—	—
+ $^{106}_{45}\text{Rh}$	β^-, γ	30 s	3.5 (0.7) 3.1 (0.1) 2.4 (0.1)	[1.47] [1.29] [0.95] 1.4	—	0.73 (0.17) 0.51 (0.17)
$^{111}_{47}\text{Ag}$	β^-, γ	7.4 d	1.05 (0.91) 0.80 (0.02) 0.70 (0.07)	[0.375] [0.276] [0.241] 0.36	0.38	0.34 (0.08) 0.247(0.01)
$^{131}_{53}\text{I}$	β^-, γ	8.0 d	0.812(0.007) 0.608(0.872) 0.335(0.093) 0.250(0.028)	[0.204] [0.108] [0.079] 0.188	—	0.724(0.028) 0.638(0.093) 0.364(0.82) 0.284(0.056) 0.080(0.066)
+ $^{131m}_{54}\text{Xe}$	γ	12.0 d	—	—	—	0.164
$^{137}_{55}\text{Cs}$	β^-	30 y	1.18 (0.08) 0.52 (0.92)	[0.421] [0.172] 0.242	—	—
+ $^{137m}_{56}\text{Ba}$	γ	2.6m	—	—	—	0.662
$^{144}_{58}\text{Ce}$	β^-, γ	285 d	0.320(0.72) 0.240(0.08) 0.186(0.2)	[0.102] [0.077] [0.057] 0.093	—	many but weak
+ $^{144}_{60}\text{Pr}$	β^-, γ	17.3m	3.15 (0.95) 2.45 (0.03) 0.90 (0.02)	[1.27] [0.95] [0.31] 1.20	—	2.20 (0.008) 1.50 (0.003) 0.70 (0.02)
$^{198}_{79}\text{Au}$	β^-, γ	2.69 d	0.959(0.99) 0.282(0.01)	0.328	0.39	0.41 (~1.0)
$^{204}_{81}\text{Tl}^*$	$\beta^-(0.98)$ EC(0.02)	3.56 y	0.764	0.234	0.238	0.071
$^{210}_{82}\text{Pb}(\text{RaD})$	β^-, γ	19.4 y	0.017(0.15) ? (0.85)	0.048	—	0.047(0.85)
+ $^{210}_{83}\text{Bi}(\text{RaE})^*$	β^-	5.0 d	1.17	—	0.32	—

* Nuclide having a forbidden β ray spectrum.

Average β ray energy for each component of maximum energy is shown in bracket.

References;

- 1) NBS handbook 78,72 (1962)
- 2) HINE *et al* : Radiation dosimetry, Academic Press Inc. (1956)
- 3) Radiological Health Handbook: US Dept. of Health, Education and Welfare (1959)



No.	Absorption coefficient μ	Application	Reference
①	$22 E_m^{-1.38}$	0.5~6.0 MeV	19)
②	$17 E_m^{-1.43}$	0.15~3.5 MeV for Al	5)
③	$16 E_m^{-1.6}$	0.1~2.0 MeV for soft tissue	4)
④	$\frac{18.6}{(E_m - 0.036)^{1.37}} \left(2 - \frac{E}{E^*}\right)$	0.1~3.0 MeV for tissue	1), 2)
⑤	$\frac{16.0}{(E_m - 0.036)^{1.40}} \left(2 - \frac{E}{E^*}\right)$	0.1~3.0 MeV for air	1), 2)

E : Average β ray energy determined by experiment.
 E^* : Average β ray energy of a hypothetical allowed spectrum of the same E_m which is computed from the Fermi theory¹⁾.

Fig. B-1 Absorption coefficient.

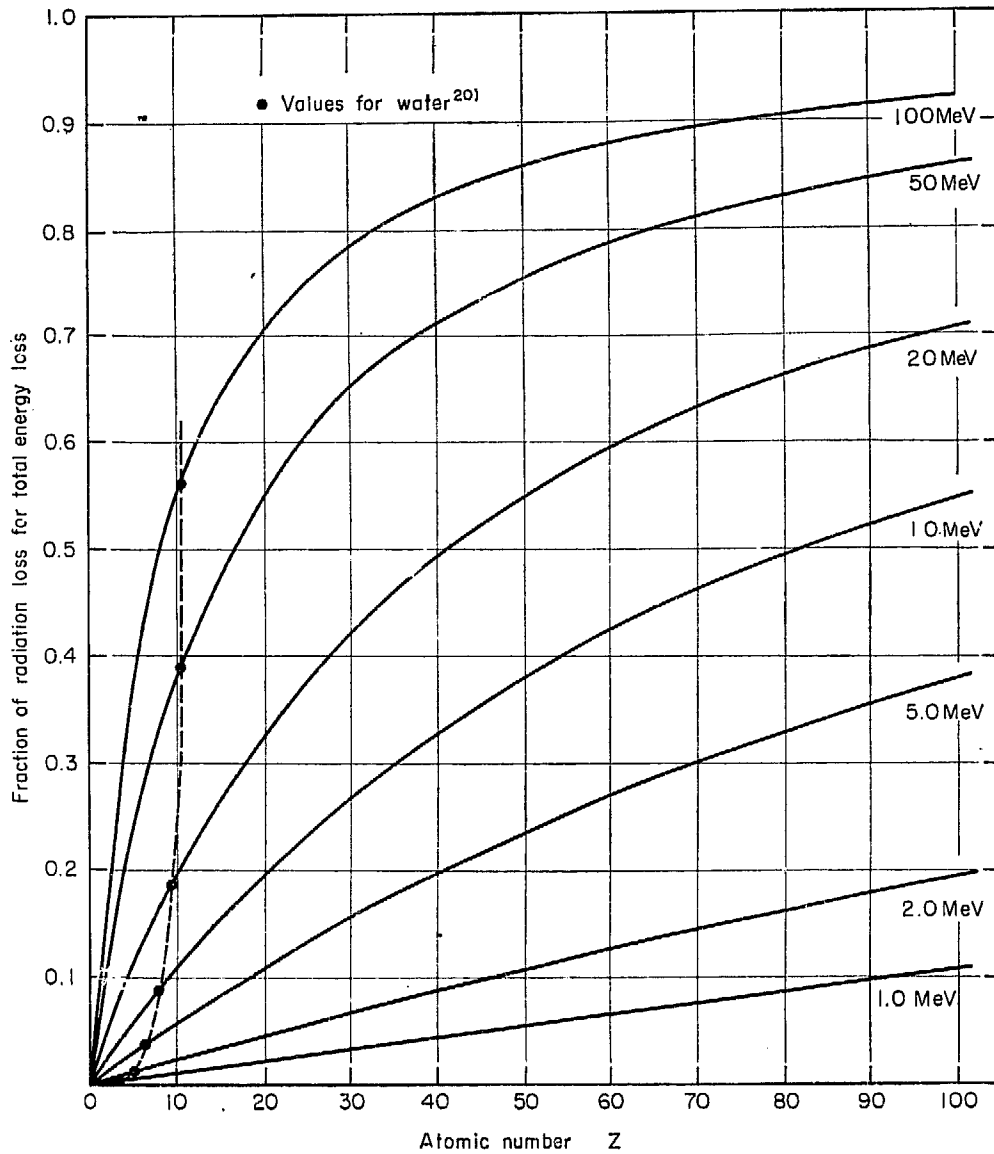


Fig. D-1 Fraction of radiation loss for total energy loss of β ray.

である。β線の最大エネルギーにより $F=0.3\% \sim 0.06\%$ 、平均して 0.1% 程度であって、実質的には問題のないことが分かる。

付記 C 面線源からの γ線による組織吸収線量の計算

一様な面密度 $S \mu\text{c}/\text{cm}^2$ の平面線源の中央から $H \text{ cm}$ の距離における吸収線量率は (2) 式と同様に次式で表わされる (Fig. 2 参照)。

$$D_r(H) = 1.07 \mu_t E_r S \int_0^{R_0} B(R) \frac{xdx}{R^2} \exp(-\mu^* \rho H)$$

ここに、 μ_t : 組織のエネルギー吸収係数 (cm^2/g)

μ^* : 組織または空気的全吸収係数 (cm^2/g)

$$B(R) = 1 + \mu^* R$$

したがって

$$D_r(H) = 1.07 \mu_t E_r S [E_1(h) - E_1(r) + e^{-h} - e^{-r}] \quad \text{rad/hr} \tag{C-1}$$

ここに, $h = \mu^* \rho H$, $r = \mu^* \rho R$

面線源が半径 a の円状の時は, $R^2 = H^2 + a^2$

無限の広がりをもつ面線源の場合, (C-1) 式は次のようになる,

$$D_r(\infty) = 1.07 \mu_t E_r S [E_1(h) + e^{-h}] \text{ rad/hr} \quad (\text{C-2})$$

Fig. 3 に $H=0.07$ mm (皮膚表面の汚染, Fig. 3 では便宜上 $H=0$ として示してある), 1 m (床ないしは地表面の汚染) に対して (C-2) 式を用いて計算した結果が示されている. (C-1) 式を用いて計算した汚染の広がり と吸収線量との関係を示すグラフを Fig. 5 に与えてある. これから分かるように手のひらの全面が汚染したような場合でも飽和値 (無限平面からの吸収線量) の約 80% 程度である.

Integral dose rate としては (C-1) 式から次式が得られる.

$$\Sigma_r(H) = 1.07 \mu_t E_r S \int_{r \times 10^{-3}}^H [E_1(h) - E_1(r) + e^{-h} - e^{-r}] dH \quad \text{g} \cdot \text{rad/hr} \quad (\text{C-3})$$

(C-3) 式を図式積分によって計算した結果を Fig. 24 に示してある.

付記 D 制動 X 線の割合を知る図表

β線の遮蔽をおこなう場合に問題となる制動 X 線の発生についてその概略を知る目的で, 次に示す式にしたがって計算をおこなった.

$$\frac{(dT/dx)_{\text{rad.}}}{(dT/dx)_{\text{coll.}}} = \frac{TZ}{1600 m_0 c^2}$$

ここに, $T = \beta$ 線の運動エネルギー $= m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right)$

$$\therefore \frac{(dT/dx)_{\text{rad.}}}{(dT/dx)_{\text{coll.}} + (dT/dx)_{\text{rad.}}} = \frac{1}{\frac{1600}{\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) Z} + 1} \quad (\text{D-1})$$

ここに, Z : 原子番号, $\beta = \frac{v}{c}$

得られた結果を Fig. D-1 に示す. 普通用いられる β 線源 (加速器で得られる β 線を除く) では, 遮蔽体に鉛を用いた場合でも電子の有するエネルギーのうちの高々 10% が制動 X 線として失なわるに過ぎない.

JAERI 1065 正誤表

頁	誤	正
10 F 2	$\int_{T_0}^{T_0 + 9 \times 10^{-3}}$	$\int_{T_0 + 9 \times 10^{-3}}^{T_0 + 9 \times 10^{-3}}$
11 上 1	$\mu P T_0$	$\mu P (T_0 + 9 \times 10^{-3})$
15	$K_{\infty} \times f$	$(15), (16) \text{ 式 } \lambda = S \epsilon \lambda h_3,$
17 (17) 式	$\exp \{-\mu (7-t)\}$	$K_{\infty} \times f \times (\frac{d}{a})^2$
18 (18) 式	Juno 型	$\exp \{-\mu (7-t) \times 10^{-3}\}$
20 F 2	Juno 型	Juno I 型 h s v G-M
20 Fig. 20	10^2	10
縦軸	$4 \pi^2$	$4 \pi \chi^2$
44 表下段式 の Δ子	$4 \pi^2$	$4 \pi \chi^2$
12 下 8	β線の出る向き、	β線の出る向きである。