

T L D による局部被曝線量評価法

(皮膚不感層直下の γ 線, β 線吸収線量評価)

Evaluation Method of Extremity-Dose using
the Thermoluminescent Dosimeter.

(Evaluation of the Absorbed Dose for Gamma
rays and Beta rays under Epidermis of Skin)

1980年5月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村村松4-33
動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所
技術開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel
Development Corporation 4-33, Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki,
319-11, Japan

© 動力炉・核燃料開発事業団
(Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

1980年5月

TLDによる局部被曝線量評価法

皮膚不感層直下の γ 線， β 線吸収線量評価

Evaluation Method of Extremity Dose Using the Thermoluminescent Dosimeter

Evaluation of the Absorbed Dose for Gamma rays and Beta rays under Epidermis of Skin

実施責任者	加藤仁三*
報告者	武田伸荘*
	野村幸広*
	石黒秀治*

期間 1978年10月1日～1980年3月31日

目的 ($\beta+r$)線混在場での β 線， r 線分離測定可能なTL指リング線量計の作製及び r 線用TL指リング線量計の作製を行い，各線量計による線量評価法を定める。

要旨

再処理工場においてFP等による β 線， r 線混在場での局部被曝線量のうち， β 線による被曝量が増えている。この為市販型のTL指リング線量計を使用して来たが，線量計の構造上防水性が悪く，線量評価上も測定精度に問題点があった。これに対処する為，新たに β 線 r 線分離測定可能である($\beta+r$)線用TL指リング線量計の概念設計及び作製を行った。特に β 線， r 線の分離測定精度を得る為，線量計の構造について各種の特性試験を実施した。更に作製した指リング線量計の r 線応答， β 線応答及び各種の混在照射試験結果より β 線 r 線の分離評価式を算出した。

又，プル燃部等でのPuを取扱うグローブボックス作業に従事する作業員の局部被曝線量は，従来，ガラス指リング線量計を用いて r 線による被曝量を評価して来たが，測定にかなりの時間と労力を要した。この為，より迅速測定可能でかつ測定精度の向上を計る目的で，新たにTLDを用いた r 線用TL指リング線量計の概念設計及び作製を行った。この線量計の特性試験及び線量評価式を算出した。

これらのTL指リング線量計を用いて特に皮膚不感層直下部位での吸収線量評価上の問題点について検討した。

* 安全管理部，安全対策課

目 次

1. 結 言	1
1.1 β 線量評価及び線量計の現状	2
2. 新型 ($\beta + \gamma$) 線用 TL 局部被曝線量計 (指リング)	6
2.1 β 線, γ 線混在場での分離測定用シールド材の特性試験	6
2.1.1 γ 線照射場の条件	6
2.1.2 シールド材の種類による TLD への影響	10
2.2 新型 ($\beta + \gamma$) 線用 TL 局部被曝線量計 (指リング) の作製	27
2.2.1 β 線 γ 線分離測定用シールド材の構成	27
2.2.2 指リング線量計の概念設計及び作製	30
2.3 線量計の防水試験	31
3. TLD による β 線, γ 線混在場での β 線吸収線量評価式	33
3.1 基本式の算出	33
3.2 γ 線に対する感度	34
3.3 β 線に対する感度	41
3.4 β 線, γ 線混在場での分離性能試験	48
4. γ 線用 TL 局部被曝線量計 (指リング) の作製及び特性試験	53
4.1 γ 線用 TL 局部被曝線量計 (指リング) の作製	53
4.2 光子エネルギー応答特性及び線量評価式	55
4.3 BG 式の算出	58
4.4 作業場での曝射試験	58
5. 結 論	63
附 A 各種シールド材の γ 線に対する質量吸収係数	65
附 B β 線のしゃへい計算法及び β 線吸収線量評価式	73
謝 辞	102
参考文献	103

1. 緒 言

β 線による人体への被曝を考えると、 γ 線に比較して物質との相互作用が大きく局部的となり、その部位で多大な吸収線量を与える結果となる。

又 β 線は γ 線に比べてしゃへいが簡単であるという理由から β 線被曝の問題を軽視されがちであるが、皮膚等の局部皮曝は、 γ 線による被曝よりも慎重に考慮されねばならない。たとえば β 線、 γ 線どちらもエネルギー1 MeVである場合、対象部位での単位フルエンス当りの表面吸収線量は、 β 線の方が2桁程度大きいことを十分理解しておく必要がある。

動燃・東海事業所では、再処理工場での核分裂生成物等による β 線被曝が予想され、この施設に作業する従事者等に昭和50年より皮膚 β 線用TLD及び局部($\beta + \gamma$)線用TL指リング線量計を着用させ、局部線量の評価を実施してきた。

昭和52年9月より再処理工場でJPDR燃料によるホット試験が開始され、FP等による β 線被曝が無視しえない状況となった。特にグローブボックス作業に従事する作業員の手部($\beta + \gamma$)線量が高く有意被曝者が増加した。又、作業終了後の手の水洗時に誤って指リング線量計をぬらす場合が多く、線量計の構造上防水性が悪い為にケース内のTLD素子の使用不能となり線量評価が困難となるケースが発生した。

特にセル内作業に到っては、3重の薄いゴム手袋を着用した密封状態のため、汗がケース内に浸透しTLD素子使用不能となる場合が続出した。

この為従来使用してきた指リング線量計の改良開発が急務となった。この改良では特に β 線、 γ 線混在場での分離測定精度を上げることも目的の一つに加え検討し作製した。 $(\beta + \gamma)$ 線用TL指リング線量計作製上の問題点、特性試験結果、 β 線吸収線量評価法について、第2章、第3章にてのべる。

又、動燃・東海プル燃部に於いてのグローブボックス作業に従事する作業員の γ 線による局部被曝線量計として、ここ十数年東芝製のガラス線量計を使用してきた。この線量計の長所として、積算線量が測定可能であり使用開始当時としては測定精度が優れていたこと、指リング線量計として使用可能であったことがあげられるが、反面測定精度維持の為に多大な労力を費すことが欠点であった。この為、今回ガラス線量計からTLDへの使用変更の可能性を検討し、TL指リング線量計の作製を実施した。第4章では γ 線用TL指リング線量計の作製及び特性試験結果についてのべる。

1.1 β 線量評価及び線量計の現状⁽¹⁾

β 線による吸収線量に関して皮膚への最大許容線量は常に全身に対する線量より大きく、ICRP (1977)⁽²⁾は全身に対する最大許容線量が年5レムであり、皮膚に対しては年50レムと勧告している。

Chabot et al.(1978)⁽³⁾によって報告された最近の個人線量計の紹介の中で透過性(Penetrating)放射線及び非透過性(non-Penetrating)放射線の割合によって局部線量計の必要性について議論している。又線量計のカバー厚について電子線を評価する上で重要であり、多くの使用者がこれについて無感心であり、カバー厚が厚い場合、低エネルギー β 線量との比例関係を無視する結果となることを指摘している。

皮膚線量への評価は軟放射線又は非透過性放射線の成分が多いような環境で作業する場合特に重要であり、この様な条件は非密封性混合核分裂生成物、軟X線及び β 線源を取扱う場合に生じる。

O'Neal (1973)⁽⁴⁾は、汚染した実験室の除染中に、 β/r 比で6から20ぐらいの範囲となることをのべている。

Hajnal and McLaughlin(1977)⁽⁵⁾は、高 β/r 比が再処理施設内の保修作業時に得られることを指摘する。

更に、非透過性放射線が優位であるような条件下では、皮膚表面で強く減衰され、線量評価上生物学的に損傷を与える深度について定義することが重要である。

皮膚表面から内部方向に向って不感層(anouter dead lay)、その下に表皮(epidermis)内に含まれる基底細胞層(basel cell)があり更にその下の真皮(dermis)より構成されている。以前は不感層表皮の厚みは放射線に対して不感であると仮定される部位で 7 mg/cm^2 であるとされていた。Whitton(1973)⁽⁶⁾は、Drosdoff(1979)⁽⁷⁾によって報告されている男性、女性の皮膚厚の測定において、彼の測定値やその他初期の不感層厚の測定値が、切除後の試料の収縮等により誤差が生じていることを指摘した。

彼は又、表皮(epidermal)厚は広く頭部、胴体部、腕、足部に対して 5 mg/cm^2 、手の裏、手首に対して 10 mg/cm^2 、指先上で 40 mg/cm^2 となることを報告している。

表皮の下部表面に表皮の基底細胞層があり、皮膚ガンの約90%がここで生じ、放射線防護の立場からも決定細胞であると考えられている。

又Whittonは、表皮厚の測定について基底細胞層を含め放射線防護の立場から人の頭、胴体、上腕、上部足に対し近似的に皮膚線量を算出する為に3と 5 mg/cm^2 間での吸収線量を平均すべきであることをのべている。

しかし最近のICRP(1977)⁽²⁾の勧告では5から 10 mg/cm^2 間の平均線量をとるべきであるとしている。

ここでわずかな例外を除いて“ 7 mg/cm^2 下で”の皮膚線量と定義した過去の勧告と大差はない

が、極端に低エネルギー放射線のみの場合では 7 mg/cm^2 下での線量と 5 から 10 mg/cm^2 間での線量との間には明らかな差異が見られると考えられる。

次に皮膚上の生物学的放射線効果について示す。

Vennart and Cryer (1972)⁽⁸⁾ は、人間の皮膚への曝射特に数千ラドの線量では皮膚潰瘍、皮膚ガンを誘発することは疑う余地もないことを指摘している。放射線による皮膚腫瘍は、又動物でも観察されており、ラット、マウスの皮膚腫瘍がしばしば発ガン物質の研究に使用されている。表皮細胞の基底細胞層が決定細胞であることに関連して初期には放射線学者、放射線治療患者、原子炉事故犠牲者等から得られた人間のデータは全て $5 \sim 10 \text{ mg/cm}^2$ をはるかに越えるような透過性放射線も含まれているが、明らかに表皮の基底細胞層への曝射がガン発生の原因となりを指摘している。しかし動物のデータでは表皮の基底細胞層の深度に丁度曝射される場合でもガン発生が生じることを実証することが困難であるといわれている。Gluksmann (1963)⁽⁹⁾ は 0.3 MeV の電子線でマウスに皮膚腫瘍を誘発しないが、 0.7 MeV の電子線では誘発しようと報告している。 0.3 MeV の電子は最大飛程が 75 mg/cm^2 で、 0.7 MeV の電子では 240 mg/cm^2 である。Albert et al. (1967)⁽¹⁰⁾ はラットに陽子線で 0.17 mm ($\sim 17 \text{ mg/cm}^2$) 浸入度をもつ放射線で、 9500 ラドの曝射線量でもいかなる皮膚腫瘍も観察されなかったと報告している。

Albert は又電子線で曝射されたラットについて報告している。彼は 36 mg/cm^2 までの浸入度をもつ電子線で腫瘍が発生し、更に 140 mg/cm^2 の飛程に等価な電子線では 8 倍の腫瘍発生が生じていると報告している。しかし 36 mg/cm^2 の浸入度をもつ電子線でも表面に 2510 ラドの曝射した 17 匹のラット中腫瘍発生が観察されなかったと報告している。

次に色々検討されている線量計について示す。

INEL* での皮膚線量計は 2 つの TLD-700 チップ線量計を使用している。一つはマイラー箔約 4 mg/cm^2 の薄窓下にセットされ、もう一方は Al 約 540 mg/cm^2 下にセットされている。チップ線量計の厚みは 0.9 mm で 240 mg/cm^2 である。線量計の校正は γ 線に対して ^{226}Ra 線源を用い、 β 線源に対しては無限厚みのウランスラブにて実施されている。これにより本質的に測定値は 4 から 244 mg/cm^2 での平均線量となり、もし作業場の周りの β 線フィールドが校正線源による β 線の浸入度と著しく異なる場合は、明らかな誤差となる。又、線量評価用素子の実効厚と同様にフィルタ厚が 7 mg/cm^2 以上の場合更に大きなエネルギー依存性をもつことになると予想される。この為改良型皮膚線量計の開発が検討されている。線量計自身を非常に薄く作製することは、エネルギー依存性の改良となる。しかし光学写真用フィルムは薄く適切な感度を有するが、低エネルギー X 線に対し過大応答、フェーディング、疑似信号の問題点をもつことが指摘されている。

LiF チップ TLD は、商品的に 0.38 mm 、 100 mg/cm^2 程度の薄い線量計の作成可能であるが、定常使用に於いて高い破損率となることが指摘されている。又、最終の皮膚線量計厚 5 mg/cm^2 に

* IDAHO NATIONAL ENGINEERING LABORATORY

はまだ程遠いと言える。Jones and Webb (1968)⁽¹¹⁾, Marshall and Docherty (1971)⁽¹²⁾らはLiFTLDをテフロン材に混入させ効率的に薄くてゆらぎの少ない線量計の作製を試みているが、アニール温度 400 °Cでの耐熱性に問題点が残っている。

Charles (1977)⁽¹³⁾は熱的にテフロン厚 0.2 から 0.5 mmのベースに接着させた超薄型 (6 mg/cm²) テフロン線量計を作製した。柔軟性についてはやや良くなったが、400 °Cのアニールができない欠点がある。又、この接着線量計は低感度であり高検出限界となると予想された。

Kocznski et al. (1974)⁽¹⁴⁾, Pradhaw and Bhatt (1977)⁽¹⁵⁾らは、線量計物質に光学的密度を増加させる為にグラファイトと混合し、これより商品として標準的な厚みにすることが可能であり、特性としてはより薄い線量計の特性を備えている。又チップ面の β 線照射側とその反対面の測定により、この両者の読値の比が放射線の浸入度の関数として得られることを指摘している。

Lasky and Moran (1977)⁽¹⁵⁾は、TLD-100にホウ素を拡散させた線量計について報告している。ホウ素は、約 185 °Cから 290 °Cに主グローブピークをシフトさせる。又、ホウ素は非常に薄く表面に拡散するので、線量計は全容積曝射応答に伴う 185 °Cのピークと表面曝射応答による 290 °Cピークが生じる。このように単一チップから直接的に皮膚線量を評価しうる線量計の工夫が可能であると報告している。

Charles (1977)⁽¹³⁾は、皮膚線量計として2つのチップの使用から線量評価が可能であることを指摘している。一つは、5 mg/cm²厚の窓下にもう一つを10 mg/cm²厚の窓下にセットする。この2つの線量計読値の差が皮膚線量に関係づけられると報告している。

次に線量評価上の問題点と手法について述べる。

β 線からのDepth Dose (深度線量) を計算する為に様々の方法が検討されている。一般には指数関数近似法が用いられ、これに基づいて望ましい量 5 ~ 10 mg/cm² の積分線量を算出する。しかし、 β 線はエネルギー的に広がったスペクトルをもち β 線用線量計に対して最も不正確な因子となっている。 β 線量評価上の問題点の中心は、深度線量が、 β 線スペクトルの関数であるということであり、一般に得られる β 線スペクトルは最大エネルギー E_{max} によって特徴づけられている。

英国放射線単位測定委員会 (BCRU 1974)⁽¹⁶⁾は、 β 線を取扱うための適切な方法として、ラド単位での空気吸収線量を基準とし、この時の測定値に基づいて、ある深度での皮膚線量を推定する方法として次の3点に注目している。

- (i) ある必要とする深度での透過線量 (Transmission Factor)
- (ii) 後方散乱係数
- (iii) 皮膚と空気との相対的質量阻止能 (Owen 1973)

又、 β 線から深度線量を評価する方法がいくつかあるがそのうちの一つは非均質媒質中に於けるモンテカルロ法を用いて最も適切な解が得られるが多くの電算機処理時間を要する。

Spencer (1959)⁽¹⁷⁾ は、連続減衰理論を用いて、単色エネルギー電子によって生じるエネルギーを計算している。Cross (1967)⁽¹⁸⁾ は、Spencer による無限均質媒体中の単色エネルギー電子放出点線源がある場合の電子のエネルギー付与の空間線量分布を得る。彼は空気と水を各々媒質として選り40種類の β 線源について解いている。O'Brien et al. (1964)⁽¹⁹⁾、O'Brien⁽²⁰⁾ (1964)は、 β 線深度線量問題を一群輸送理論に適用させている。

又、Loevinger (1954, 1969)^{(21), (22)}とLoevinger et al. (1956)⁽²³⁾ は、 β 粒子の点線源による線量計算法を経験的表現にて記述している。

龍福ら (1977)⁽²⁴⁾ は、非均質媒質即ち全体の領域が物質の種類や密度が異なる幾つかの領域に分かれている場合の解を求めるために点積分核法を用いて解いている。

ここで β 線深度線量を求める最も単純な式は指数関数近似であり、(Fitzgerald 1967)、この近似は多くの研究者達によって利用されている。(Marshall and Docherty 1971⁽¹²⁾、O'Neal 1973⁽⁴⁾、Paliwal and Almond 1975⁽²⁶⁾)更に備後ら (1969⁽³⁵⁾、1973⁽³⁹⁾、1976⁽³⁸⁾、1978⁽⁴⁰⁾、1979⁽⁴¹⁾)は独自に β 線吸収線量計の開発を行い、これを用いて校正された照射場でサーベイメータ、電離箱等の校正を実施し、これらによる β 線吸収線量算出法について検討している。

2. 新型($\beta+\gamma$)線用TL局部被曝線量計(指リング)

動燃・東海事業所に於いて従来から使用している局部被曝線量計は、松下産業機器KK製のUD-611F指リング及びTLD素子UD-100M8である。

過去数年間この線量計を使用してきたが、以下この線量計の問題点について述べる。

- (1) 線量計リングが折れやすい。
- (2) 線量計リングと本体線量計との接着が悪くはずれるケースが多い。
- (3) 防水性が良くない。
- (4) 線量計の構造上TLD素子にトリボルミネセンス(疑似発光)の発生の原因となる要因がある。
- (5) 線量評価上 β 線 γ 線を分離する為のシールド材からTLDへの二次放射線の影響があると推定される。

これらの問題点を解決する為に(1)から(4)については、新しい形状の線量計を設計し作製する。(5)についてはシールド材の特性試験を実施し β 線、 γ 線混在場でより精度良く β 線評価しうる様に検討する。(5)の問題点が解決されれば、この結果を線量計の作製に反映させる。

以下各節で問題点について検討する。

2.1 β 線 γ 線混在場での分離測定用シールド材の特性試験

2.1.1 γ 線標準照射場の条件

β 線吸収線量を評価する為に用いられる熱ルミネセンス線量計(TLD)は、 β 線の飛程が短くStopping Powerが大きい理由から主に薄いフィルム状かつ裸状のTLDが使用される。本研究で用いたTLDはUD-100M8であり、厚みが $30\mu\text{m}$ ($8\text{mg}/\text{cm}^2$)直径6mmのAl基板に厚み約 $60\mu\text{m}$ ($14.5\text{mg}/\text{cm}^2$)になる様に $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ のTL素材を塗布したものであり、放射線感度は数KeVの低エネルギー γ (X)線にもかなり感度を示す。又 $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ 系TL素子の光子エネルギー応答特性により100KeV以下では過大応答を示す。よって低エネルギー γ (X)線が混在する場合、TLDへの発光寄与分としてこの低エネルギー γ (X)線の存在量によって大きく影響される。

今、UD-100M8の γ 線感度を得るために ^{60}Co 等の γ 線源による標準照射を行う場合、照射場の状況について検討する必要がある。

照射は、東海事業所安全管理部の校正室にて行い、使用線源は ^{60}Co 100mCi、 ^{137}Cs 100mCiである。ここで一次放射線に対し散乱線の混在の有無が照射線量及びTLD発光量に最も大きく影響する。更にその散乱線のエネルギー分布についての情報を得ることが必要である。逆に、TLD:UD-100M8素子が、低エネルギー成分の γ 線に感度を有することを利

用して、散乱線の有無について検討する。即ち散乱線のみをカット可能と考えられるシールド材を検討し、シールドした場合としない場合でのTLD発光量の差について検討する。測定法は散乱線をシールドするためにAl板1mm^t(270 mg/cm²)をTLDの前面にセットする。セットの構成を図2.1に示す様にAtypeとBtypeに区別する。

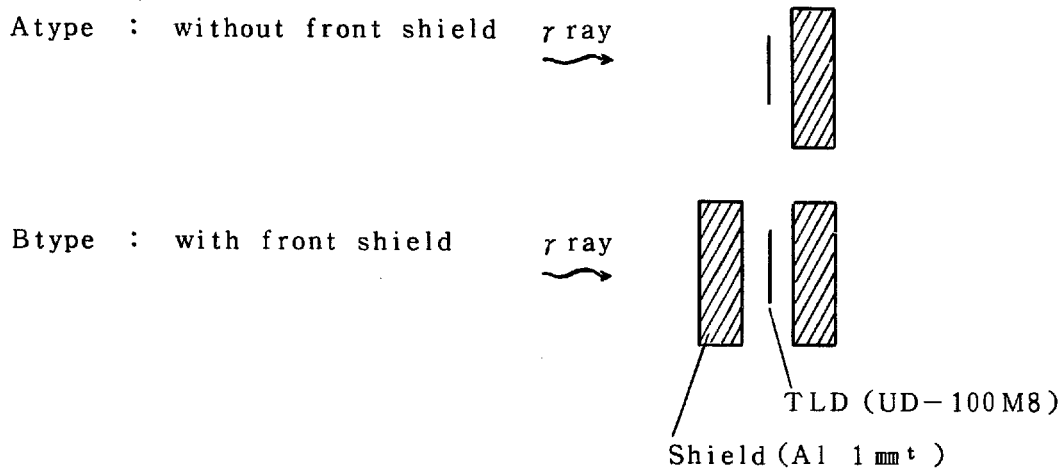


図 2.1 照射時での TLD : UD - 100 M 8 の構成

Atype, Btype の TLD の読取線量に有意差があれば、その差が一次放射線以外の寄与による発光量であると推定される。尚 Al 1mm^t による ⁶⁰Co γ 線源の一次放射線の減衰率は 0.005 (0.5%) であり、これによる TLD の発光量の減衰はほぼ無視しえる。

又、高エネルギー γ 線照射に伴う Al からの特性 X 線のエネルギーは 1.5 KeV の放射線が放出されるがこれによる TLD の発光寄与増分は少ないと考えられるので考慮しないことにする。照射場の散乱線の有無及び状況を把握するための測定点を図 2.2 に示す。各測定点には Atype と Btype の線量計を対にしてセットした。測定結果を図 2.3 に示す。

この結果より Atype と Btype の方法による TLD の発光量はどの測定点でも明らかな有意差が見られた。これよりこの照射場条件では散乱線と考えられる二次放射線の存在を確認することができた。又、TLD : UD-100M8 を照射する場合、この散乱線にも感度を有するため、裸状の状態では照射することは問題があると言える。更に裸状条件で照射することは電子平衡条件を満たすことができずこれからも好しくないと言える。特に電子平衡の不足条件では ⁶⁰Co γ 線からの電離による二次電子が散乱電子線として TLD に感知する為、過大応答となると予想される。

以下 TLD UD-100M8 を γ 線照射する場合は TLD の前面に Al 1mm^t にてシールドした条件で実施する。

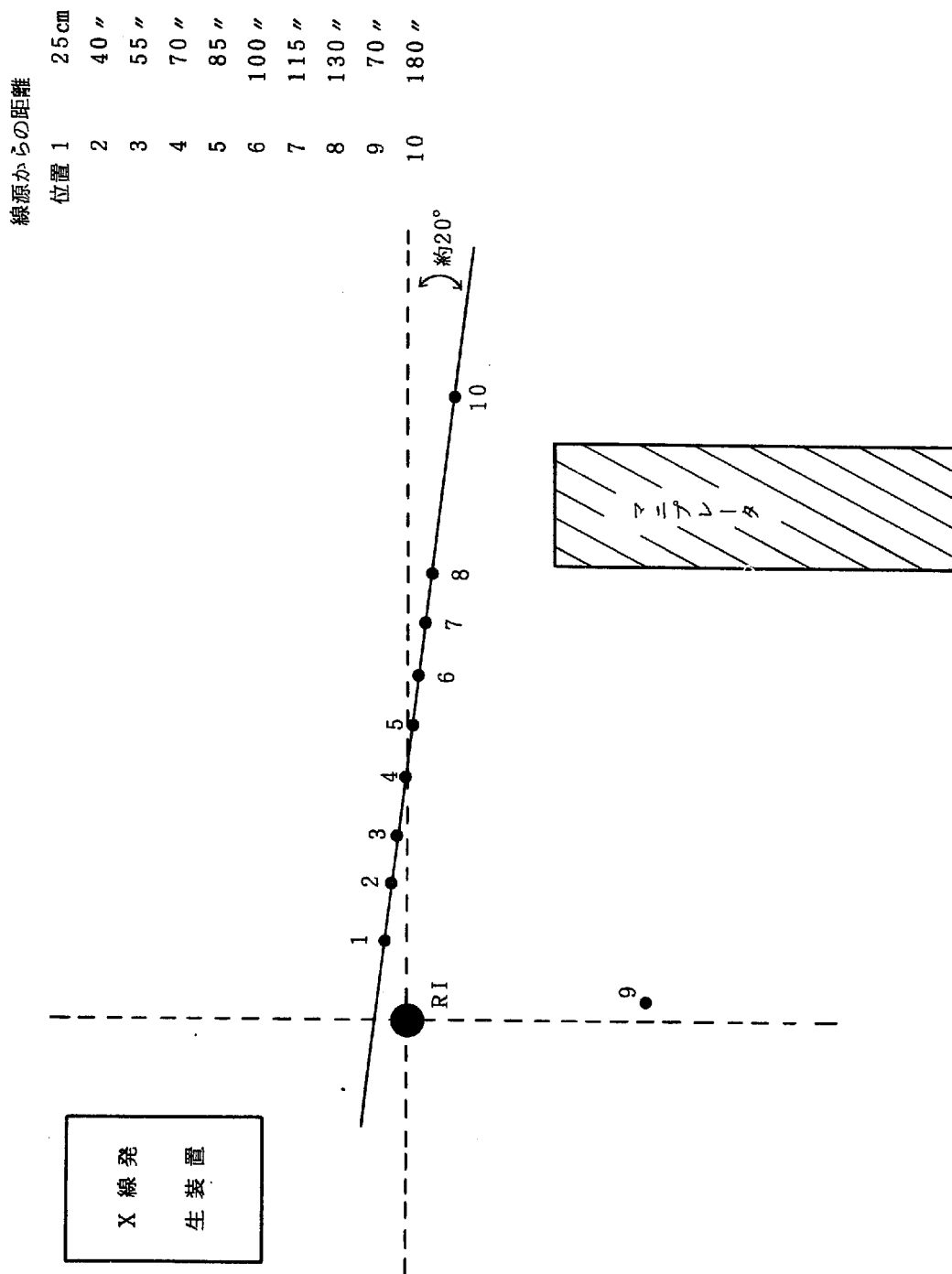


図 2.2 測定点と配置平面図

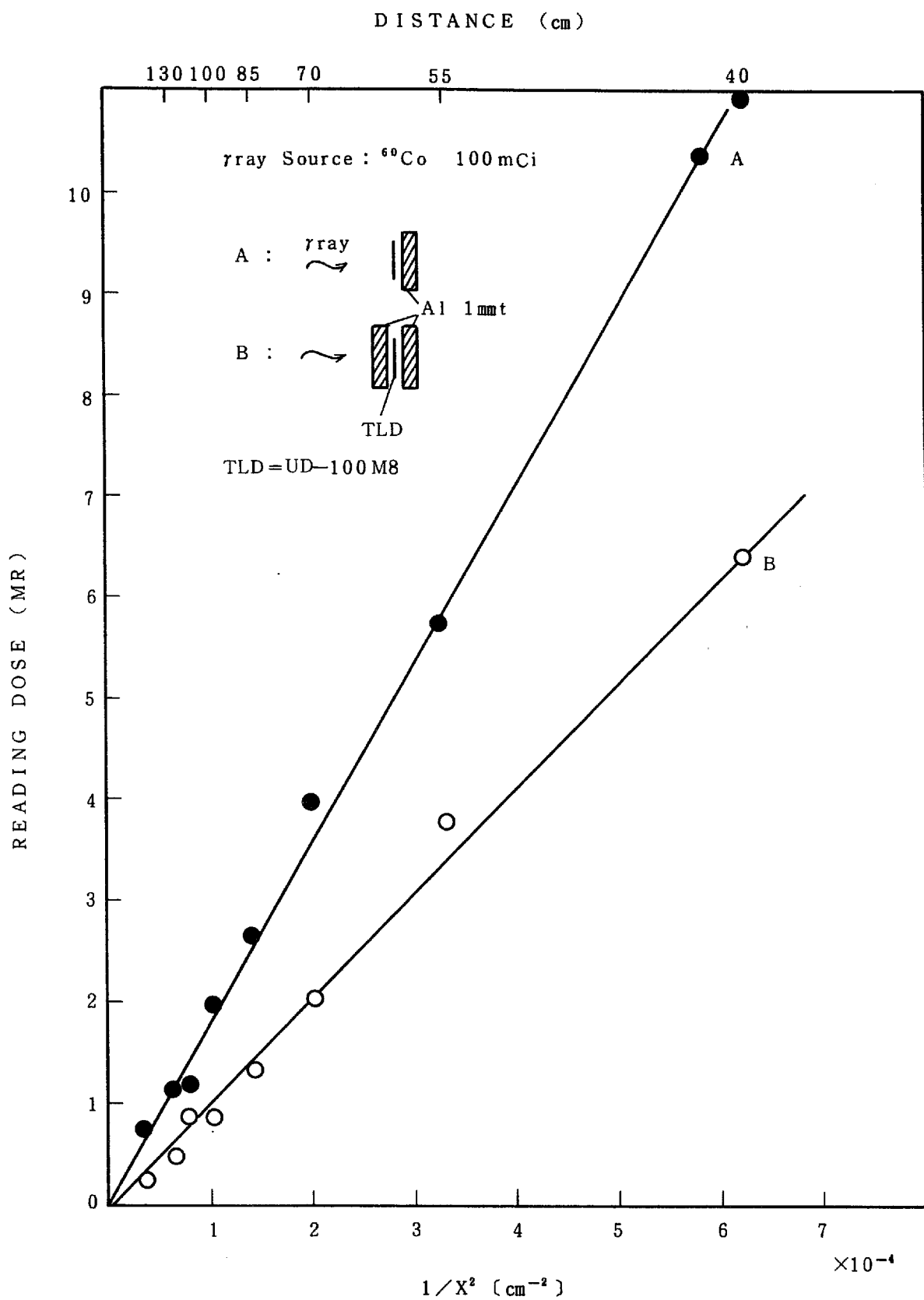


図 2.3 照射場での距離と A 型及び B 型線量計の読取線量の関係

2.1.2 シールド材の種類によるTLDへの影響

過去数年間使用してきた指リング線量計UD-611Fケース内の β 線、 γ 線分離測定用シールド材(0.7mm t Pb+0.3mm t Al \times 2)を用い、前節の照射場の散乱線影響分を除去する為指リング線量計前面にAl 1mm t 板にてシールドした条件で ^{60}Co 100mCi γ 線源による標準照射を行った。この場合でもTL素子の構成位置(TLD-1, TLD-2, TLD-3)によって発光量に明らかな有意差が見られた。例えば ^{60}Co 100mCi線源により210mR照射を行った場合各TLDのリーダ読取線量はTLD-1が3.23MR, TLD-2が3.28MR及びTLD-3が2.51MRでTLD-1, 2とTLD-3とではほぼ0.7MRの差があり約30%の増分であった。(MRの単位はTLDの読取線量を示す。)

TL指リング線量計及び照射条件について図2.6に示す。

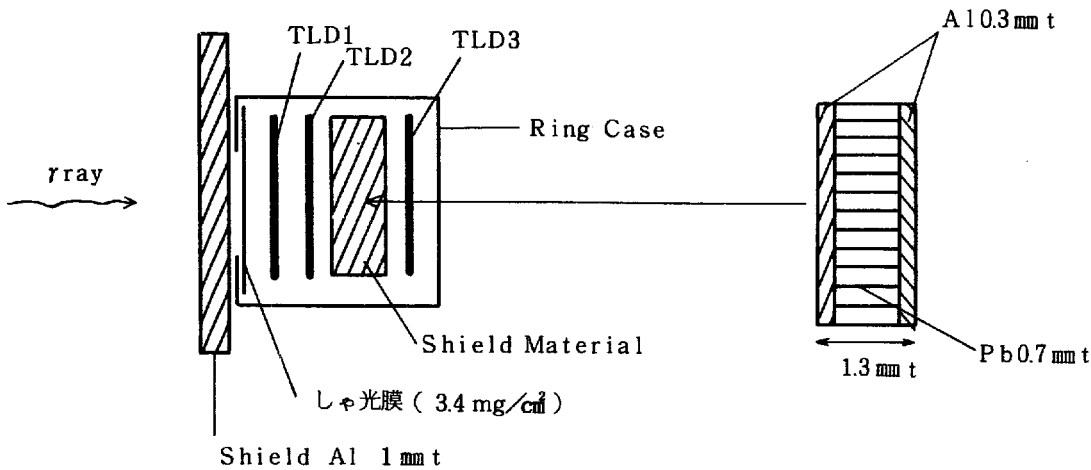


図 2.6 照射条件下の線量計配置図

よって照射場の低エネルギー成分の散乱線及び散乱電子線を遮蔽しているにもかかわらず、TLD-1, TLD-2とTLD-3との発光量に明らかな有意差があることに注目する。又TLD-3の発光量に対してそのTL素子の前面にある β 、 γ 線分離用シールド材による減衰は ^{60}Co γ 線で4%以内であり、これによるTLD-1, 2と3との差は無視しえる程度であり、先の有意差の説明とはならない。故にこの差が現指リング線量計の構造に起因していると考えられた。即ち、 β 線 γ 線分離シールド材による線量計ケース内部での散乱線の発生及び二次放射線(特性X線, 電子線等)の発生が考えられる。よって、このシールド材の種類によるTLDへの影響について検討する為以下の特性試験を実施した。ここでシールド材の種類によって γ 線照射に伴う特性X線の発生があり、その関係を表2.1と図2.7に示す。

これによりPbで75KeV, Alで1.49KeVの特性X線が放出する。

表 2.1 各元素によって発生する特性X線エネルギー

Nuclide	Atonic Number Z	Specific Gravity	Xray Energy (KeV)
U	92	18.7	98.4
Pb	82	11.3	75.0
Ta	73	16.6	57.5
Dy	66	8.56	46.0
Sn	50	7.3	25.3
Cd	48	8.65	23.2
Mo	42	10.2	17.5
Nb	41	8.60	16.6
Zr	40	6.40	15.8
Zn	30	7.10	8.64
Fe	26	7.86	6.40
Al	13	2.70	1.49
Teflon	7	2.1	-

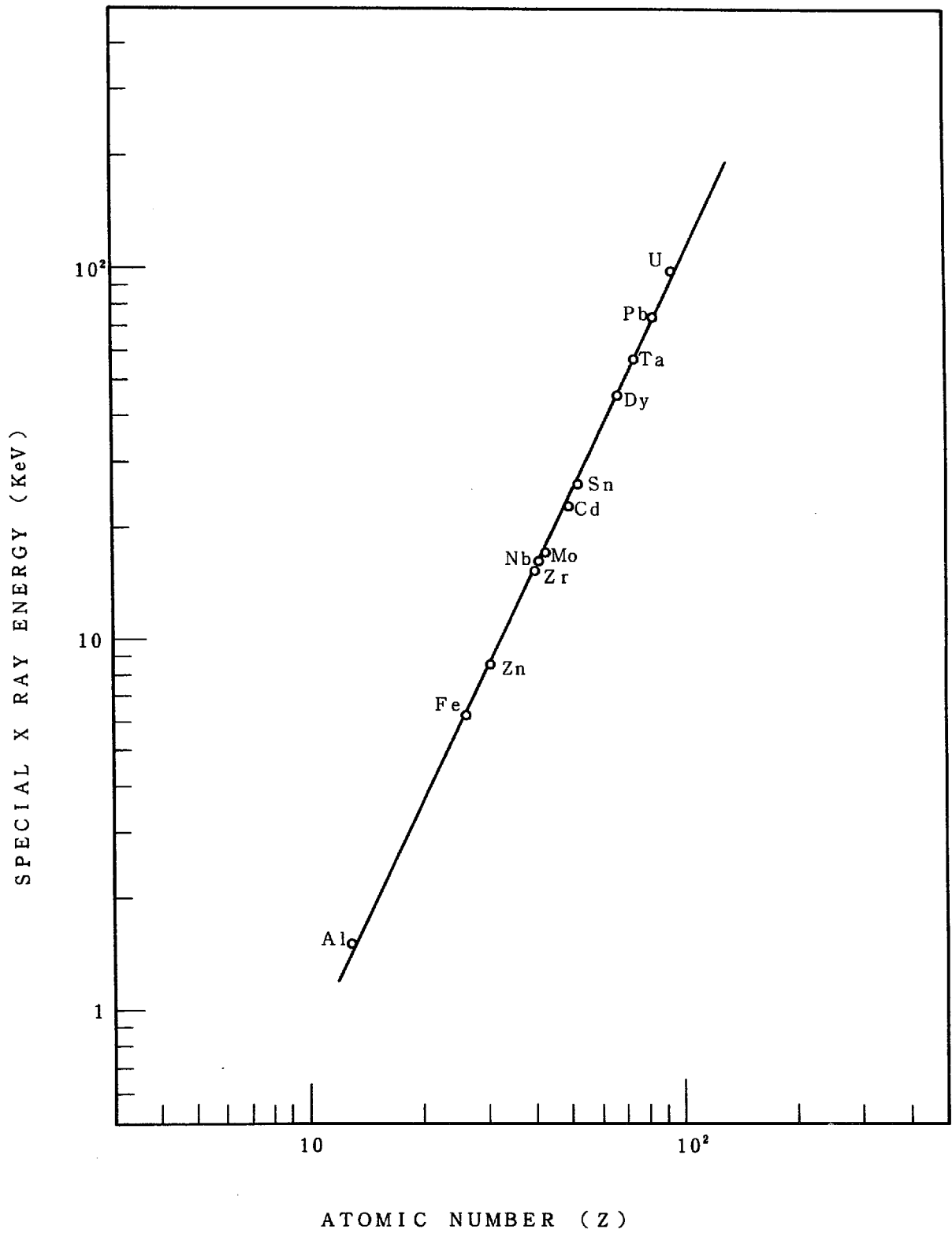


図 2.7 各材質の光子照射に伴う特性 X 線のエネルギー

次に、吸収線量を測定する場合、照射 γ 線との電子平衡が成立している必要がある。低エネルギーの X 線、 γ 線に於いては照射物質から生じる二次電子のエネルギーも低く、飛程も短い。しかし X 線、 γ 線のエネルギーが高くなると二次電子のエネルギーも高くなり、最大飛程も大きくなる。その為電子平衡を成立させるための壁厚を考慮する必要がある。

又、TLDの発光量はTLD素子の吸収線量に比例する。更に素子の吸収線量は空洞理論が成立する時、そのシールド材（又は壁材）の吸収線量に比例する。

ある物質の吸収線量は、その物質への照射線量と関係し次式によって与えられる。

$$D_{(rad)} = 0.869 \left[\frac{(\mu_{en}/\rho)_{med}}{(\mu_{en}/\rho)_{air}} \right] \cdot X \dots\dots\dots (2.1)$$

μ_{en}/ρ : 質量エネルギー吸収係数 (cm^2/g)

X : 照射線量 (R)

もしここで照射線量が一定であるとする

$$D_{(rad)} = K \cdot (\mu_{en}/\rho)_{med} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\therefore K = \frac{0.869 \cdot X}{(\mu_{en}/\rho)_{air}}$$

となる。即ちTLDの発光量 (L) はシールド材の吸収線量 (D) に比例する。故に、

$$L \propto (\mu_{en}/\rho)_{med} \dots\dots\dots (2.3)$$

となる。つまりTLDの発光量は照射される X 線、 γ 線のエネルギーが高いときシールド材の質量エネルギー吸収係数に比例することになる。

今、 ^{60}Co γ 線による照射の場合、平均 γ 線エネルギーは 1.25 MeV であり、この時の各物質 (シールド材) の $(\mu_{en}/\rho)_{med}$ 及び $(\mu_{en}/\rho)_{med}/(\mu_{en}/\rho)_{air}$ を表 2.2 に与える。

表 2.2 各シールド材の媒質中及び空気中での質量吸収係数

Material	$(\mu_{en}/\rho)_{med}$ (cm^2/g)	$\frac{(\mu_{en}/\rho)_{med}}{(\mu_{en}/\rho)_{air}}$
air	0.02685	—
Teflon	0.02195	0.818
Al	0.0259	0.965
Fe	0.0254	0.946
Sn	0.0255	0.946
Pb	0.0355	1.322

次に実験によって以下検討する。

今、UD-100M8のフィルム状TLDをシールド材で前後を遮蔽した場合、シールドの材質によって同一条件下でTLDの読取線量に有意差が見られるかどうか検討する。更にあるとすればTLD前のシールド材による影響なのか又は後のシールド材による影響なのかどうか検討する。次にそれぞれの二次放射線による発光量の増分を吸収させるための吸収材を検討する。

これらの考えに基づいて以下の様なTLDとシールド材及び吸収材との組合せにて γ 線照射を実施した場合、TLDの読取線量（発光量）の差について検討する。

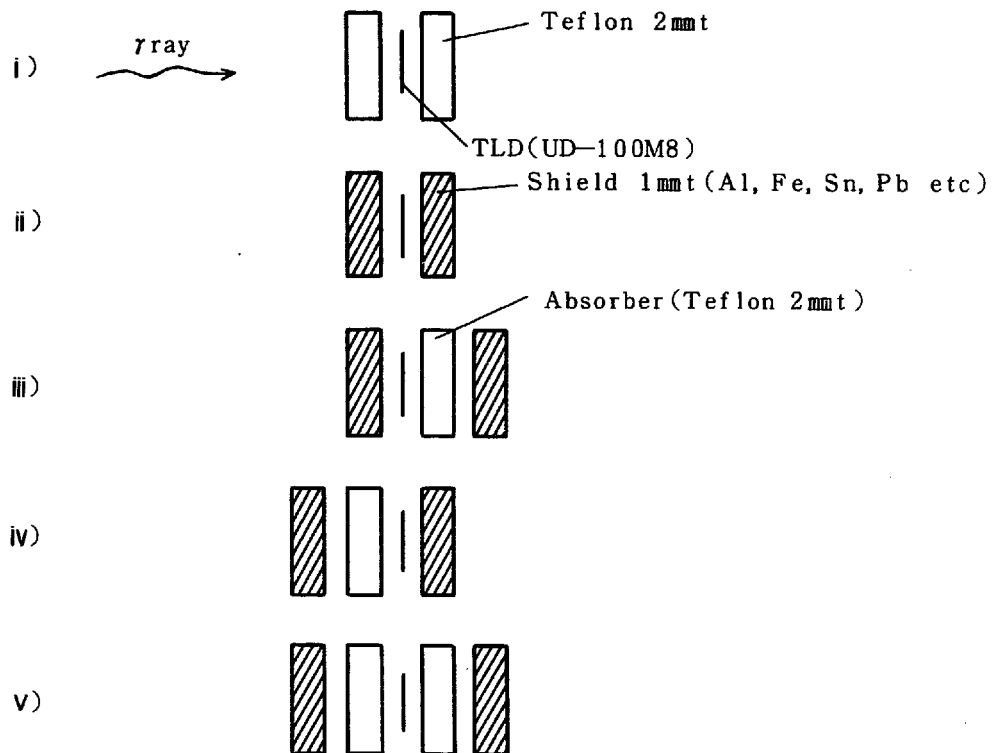


図 2.8 シールド材と吸収材の組合せ

ここで前後のシールド材としてPbを使用した場合、二次放射線の増分による発光量が大きくなることが予想されるのでこれを用いて図 2.8 に示す吸収材との構成による発光量について検討する。

二次放射線の吸収材としてテフロンを使用した場合、その放射線の吸収効果からテフロンの厚みを検討する。実験方法として吸収材であるテフロンの厚みを0mmから20mmまで変化させ逐次照射を行い、その結果TLD発光量が一定になる厚みを見いだす。その結果を図 2.9 に示す。

これにより、 ^{60}Co 100 mCi γ 線源にて照射した場合発生する二次放射線をシールドするためには、少くとも約 1 mm 厚以上のテフロンが必要であることが判明した。よって安全を見積ってテフロンの厚みを 2 mm^t (420 mg/cm²) とした。

又テフロンのみで前後をシールドした TLD は、テフロンがほぼ人体組織等価物質であり、二次放射線の影響が無視しえると考えられるので、この時の TLD の発光量を照射による基準量とする。

更に図 2.8 に示すシールド材の構成として Pb, Sn, Fe, Al のそれぞれ 1 mm 厚テフロン 2 mm 厚及び吸収材としてテフロン 2 mm 厚を使用し、 γ 線標準照射を ^{60}Co 100 mCi, ^{137}Cs 100 mCi 及び ^{226}Ra 50 mCi 線源を用いて行った結果を表 2.4～表 2.7 及び図 2.10～図 2.13 に示す。これらの条件下では高エネルギー γ 線照射時に於いてシールド材との電子平衡が得られていると考えられる。ここで各相対感度は、テフロン 2 mm^t で前後をシールドした TLD の発光量を 1 として規格化する。又各シールド材による一次放射線の減衰量は各 γ 線源に対しその都度補正を行う。各シールド材及び γ 線源による質量吸収係数及び減衰率を表 2.3 に示す。又、2.1 節で議論した照射場の散乱線（特に散乱電子線）は各シールド材で充分遮蔽されていると見なしうる。これより図 2.10 を見ると吸収材を用いない条件下で前後のシールド材の種類によって明らかな発光量の有意差が見られる。たとえば Pb シールドの場合、テフロン又は Al シールドと比較して約 1.6 倍発光量が高い。又図 2.11 より各シールド材の間に二次放射線の吸収材としてのテフロン 2 mm^t を入れた場合、ほぼどのシールド材の場合も相対感度 1 近傍となり、明らかにシールド材の種類によって発生した二次放射線のみが吸収シールドされていると言える。又、シールド材の種類によって TLD: UD-100M8 への二次放射線による影響度は実効原子番号が大きい程大きいと言える。

次に図 2.12 と図 2.13 との比較より各シールド材による二次放射線の起因について検討する。前面のシールド材による TLD への影響分が大きいのか又は後面のシールド材による TLD への影響分が大きいかを比較すると、シールド材 Pb の場合の相対感度比は、約 1.35 倍後面シールド材からの TLD への影響度が大きい結果が得られた。これは、一次放射線による後方散乱線の寄与が大きいと推定される。又シールド材の実効原子番号が大きい程後方散乱線量が多いと推定される。図 2.12 に於いて後方シールド材からの影響分を差引く為、後側に吸収材テフロン 2 mm^t をセットし、前面のシールド材からの TLD への寄与分を見た場合、テフロンのみでシールドした TLD の発光量を 1 として、Al 及び Sn シールド材の TLD への見掛けの相対感度が 1 よりも小さくなっている。この理由については、再現性も見られたが定かではなく今後の検討課題とする。又、もし各シールド材からの特性 X 線によると考えると、シールド材の前面及び後面にほぼ等方的に放出されるはずであり、図 2.12 と図 2.13 との相対感度比は、各シールド材で比較するとほぼ等しい値となるはずであるが、明らかに前面からのシールド材と後面シールド材からの TLD への発光量の寄与分に差が見られることより、特

性 X 線による発光量増分が第 1 原因でないと言える。但し Pb の場合の特性 X 線は 75 KeV で TLD : UD-100M8 の TL 成分 $\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$ へのエネルギー応答特性が、過大応答を示す領域であるが、これによる発光量増分の寄与率は、特性 X 線がほぼ各シールド材の厚みで遮蔽されていると考えられ小さいと推定する方が妥当である。

以上の考察より、結論としてシールド材による TLD への発光量増分としては、一次放射線による後方散乱線の影響が大きいと言える。又前に議論した様にシールド材の質量吸収係数の差による TLD への発光量の寄与は、シールド材の実効原子番号が大きい程大きい、これは今回の実験値とも一致する。

更に、後面シールド材の実効原子番号が大きい程、後方散乱線分が多く TLD への発光寄与量が多くなることも一致する。

よって実際の β 線 γ 線分離測定用シールド材として β 線のみがシールド可能であり、かつ β 線による制動放射線の発生が少く、更に高エネルギー γ 線による後方散乱線の発生の少ないもの及び β 線をシールドする為の実効厚をできる限り薄くすることができるものとして Al 及び Fe を使用すべきであると結論される。

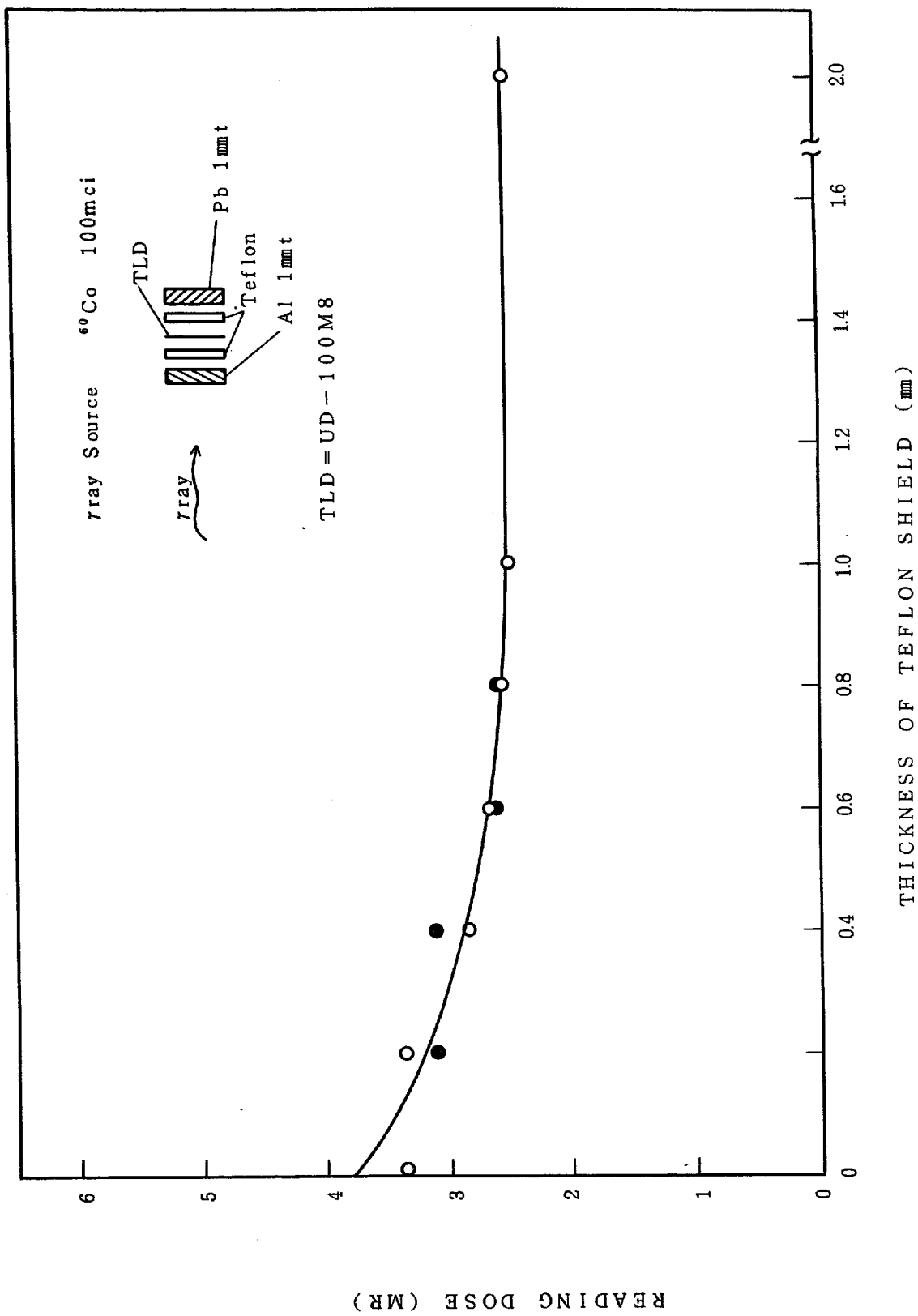


図 2.9 2次放射線のテフロン厚による吸収効果

表 2.3 各種シールド材の厚みと γ 線源核種による質量吸収係数及び減衰率

Shielding Material	Specific Gravity	Thickness (mm)	Plane Density (g/cm ²)	μ (cm ² /g)*			$f = e^{-\mu x}$		
				¹³⁷ Cs	²²⁶ Ra	⁶⁰ Co	¹³⁷ Cs	²²⁶ Ra	⁶⁰ Co
Pb	11.3	1	1.13	0.0713	0.0525	0.0355	0.923	0.942	0.961
Fe	7.86	1	0.786	0.0284	0.0275	0.0254	0.973	0.979	0.980
Sn	7.3	1	0.73	0.0343	0.0302	0.0255	0.975	0.979	0.982
Al	2.7	1	0.27	0.0296	0.0279	0.0269	0.992	0.992	0.993
Teflon	2.1	1	0.21	0.0241	0.0237	0.0220	0.995	0.995	0.995
"	"	2	0.42	"	"	"	0.9899	0.990	0.991

* NBS - 29 data

表 2.4 ^{60}Co γ 線照射に伴う各種シールド材構成と読取線量の関係

Radiation Source	Shielding Material	Shielded Condition	Reading Dose (MR)	Average Reading Dose \bar{x} (MR)	S.Dev of \bar{x} (%)	$\bar{x} - \text{BG}$ (MR)	Corrected \bar{x} (MR)	Relative Sensitivity Ratio	
^{60}Co 100 mCi at 70 cm	Teflon 2 mm t		5.45 5.74	5.58	2.6	5.03	5.08	1.00	
			5.66 5.46						
	Al 1 mm t + Teflon 2 mm t		5.22 5.57	5.61	8.4	5.00	5.02	0.988	
			6.28 5.36						
			4.30 4.47	4.88	11.8	4.27	4.29	0.844	
			5.46 5.28						
	Fe 1 mm t + Teflon 2 mm t		5.79 5.54	5.88	5.8	5.27	5.30	1.043	
			5.97 6.23						
			6.05 5.69	5.77	3.8	5.16	5.19	1.022	
			5.62 5.72						
	Fe 1 mm t + Teflon 2 mm t		5.94 6.08	5.39	15.7	5.13	5.24	1.031	
			5.72 5.20						
4.88 5.02			5.37	10.1	4.77	4.86	0.957		
5.51 6.08									
Fe 1 mm t + Teflon 2 mm t		5.80 6.38	5.46	14.1	4.85	4.95	0.974		
		4.89 4.75							
		5.49 5.67	5.75	5.0	5.15	5.25	1.033		
		5.69 6.16							

表 2.5 ^{60}Co γ 線照射に伴う各種シールド材構成と読取線量の関係

Radiation Source	Shielding Material	Shielded Condition	Reading Dose (MR)	Average Reading Dose \bar{x} (MR)	S.Dev. of \bar{x} (%)	$\bar{x} - \text{BG}$ (MR)	Corrected \bar{x} (MR)	Relative Sensitivity Ratio	
^{60}Co 100 mCi at 70 cm	Sn 1 mm ^t +		5.60	6.40	5.7	5.32	5.42	1.067	
			5.92	5.80					
		Teflon 2 mm ^t		4.47	4.25	2.4	3.79	3.86	0.760
				4.47	4.40				
				6.56	7.41	6.2	6.52	6.64	1.301
				6.99	7.54				
	Pb 1 mm ^t +		4.85	5.32	5.4	4.63	4.72	0.929	
			5.52	5.28					
		Teflon 2 mm ^t		7.94	8.13	4.4	7.29	7.58	1.492
				8.11	7.39				
				4.80	5.21	7.0	4.37	4.55	0.895
				5.32	4.58				
	7.53	8.19	7.4	6.84	7.12	1.402			
	7.14	6.94							
	5.68	5.24	5.8	4.84	5.04	0.992			
	5.12	5.76							

表 2.6 ^{137}Cs γ 線照射に伴う各種シールド材構成と読取線量の関係

Radiation Source and Dose	Shielding Material	Shielded Condition	Reading Dose x (MR)	Average Reading Dose \bar{x} (MR)	S.Dev. of x (%)	$\bar{x} - \text{BG}$ (MR)	Corrected \bar{x} (MR)	Relative Sensitivity Ratio
^{137}Cs 100 mCi at 70 cm 3 hr 228.2 mR	Teflon 2 mm ^t		2.89 3.11	2.95	4.6	2.61	2.01	1.000
	Al 1 mm ^t +		2.72 2.37	2.90	5.9	2.56	2.58	0.981
			2.70 2.40	2.55	6.8	2.25	2.27	0.870
	Teflon 2 mm ^t		2.80 2.69	2.71	3.3	2.36	2.38	0.912
			2.86 2.94	2.77	6.4	2.43	2.45	0.937
	Fe 1 mm ^t +		2.26 2.65	2.66	0.9	2.32	2.38	0.912
			2.65 2.69	2.66	0.9	2.32	2.38	0.912
			2.50 2.61	2.55	5.0	2.20	2.26	0.866
			2.95 2.98	2.90	4.0	2.48	2.55	0.977
			2.67 3.25	2.78	4.3	2.44	2.51	0.962
			2.77 2.91	2.78	4.3	2.44	2.51	0.962

表 2.7 ^{137}Cs γ 線照射に伴う各種シールド材構成と読取線量の関係

Radiation Source and Dose	Shielding Material	Shielded Condition	Reading Dose x (MR)	Average Reading Dose \bar{x} (MR)	S. Deviation of x (%)	$\bar{x} - \text{BG}$ (MR)	Corrected \bar{x} (MR)	Relative Sensitivity Ratio
^{137}Cs 100 mCi at 70 cm 3hr 228.2 mR	Sn 1 mm ^t + Teflon 2 mm ^t		2.67	2.98	8.0	2.63	2.70	1.034
			3.25	2.98	3.00	2.63	2.42	0.927
			2.80	2.63	9.7	2.36	2.42	0.927
			2.44	2.63	9.7	2.36	2.42	0.927
			2.98	2.92	5.1	2.69	2.76	1.057
			3.10	2.92	5.1	2.69	2.76	1.057
	Pb 1 mm ^t + Teflon 2 mm ^t		2.46	2.50	5.2	2.24	2.29	0.877
			2.33	2.50	5.2	2.24	2.29	0.877
			4.51	4.38	2.7	4.15	4.50	1.724
			3.74*	4.38	2.7	4.15	4.50	1.724
			3.01	3.07	3.0	2.84	3.08	1.180
			2.98	3.07	3.0	2.84	3.08	1.180
	2.83	2.90	2.6	2.67	2.89	1.107		
	3.00	2.90	2.6	2.67	2.89	1.107		
	2.25	2.32	4.0	2.09	2.26	0.866		
	2.38	2.32	4.0	2.09	2.26	0.866		

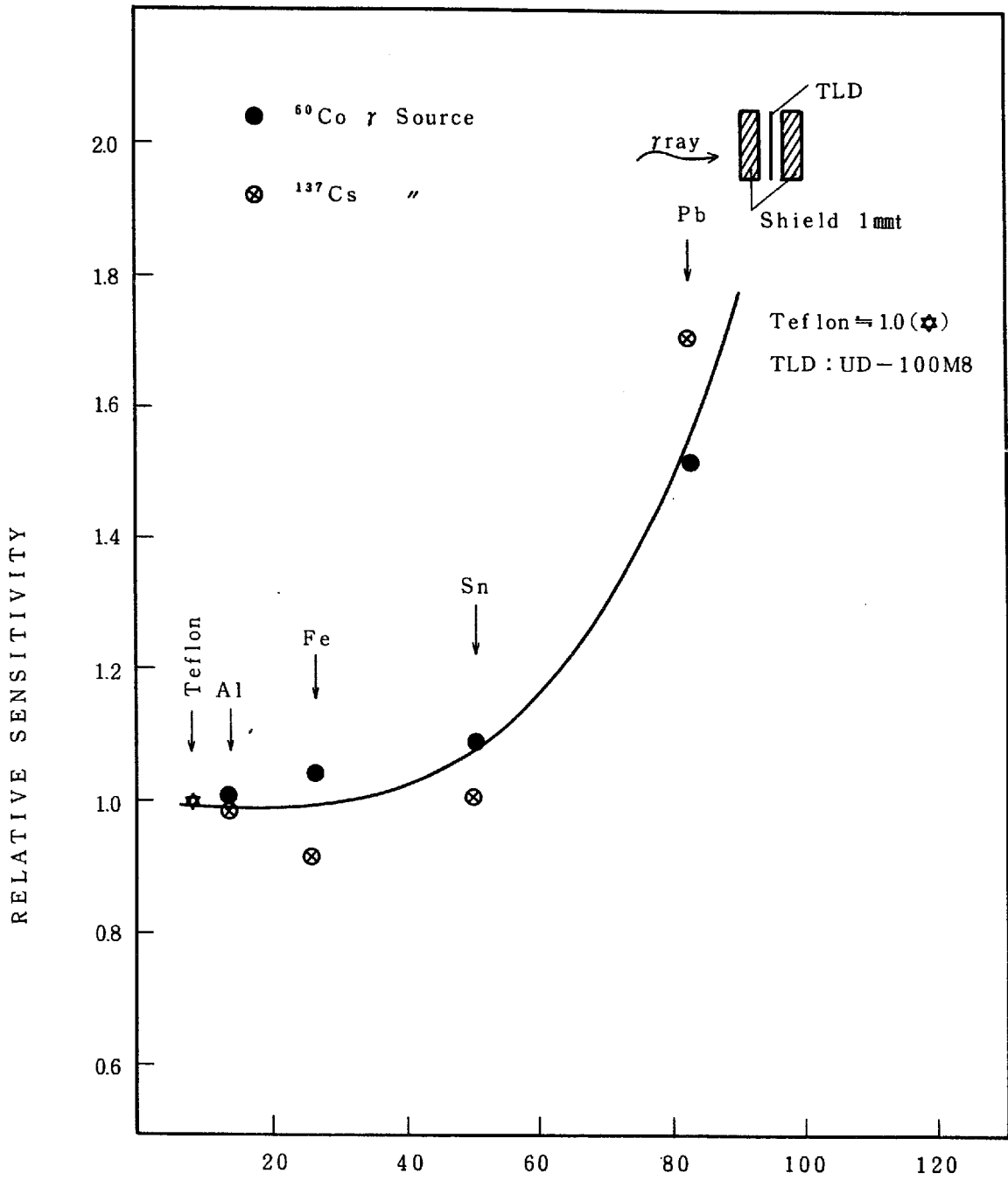


図 2.10 γ 線照射に伴うシールド材の実効原子番号と TLDの相対感度(吸収材なし)

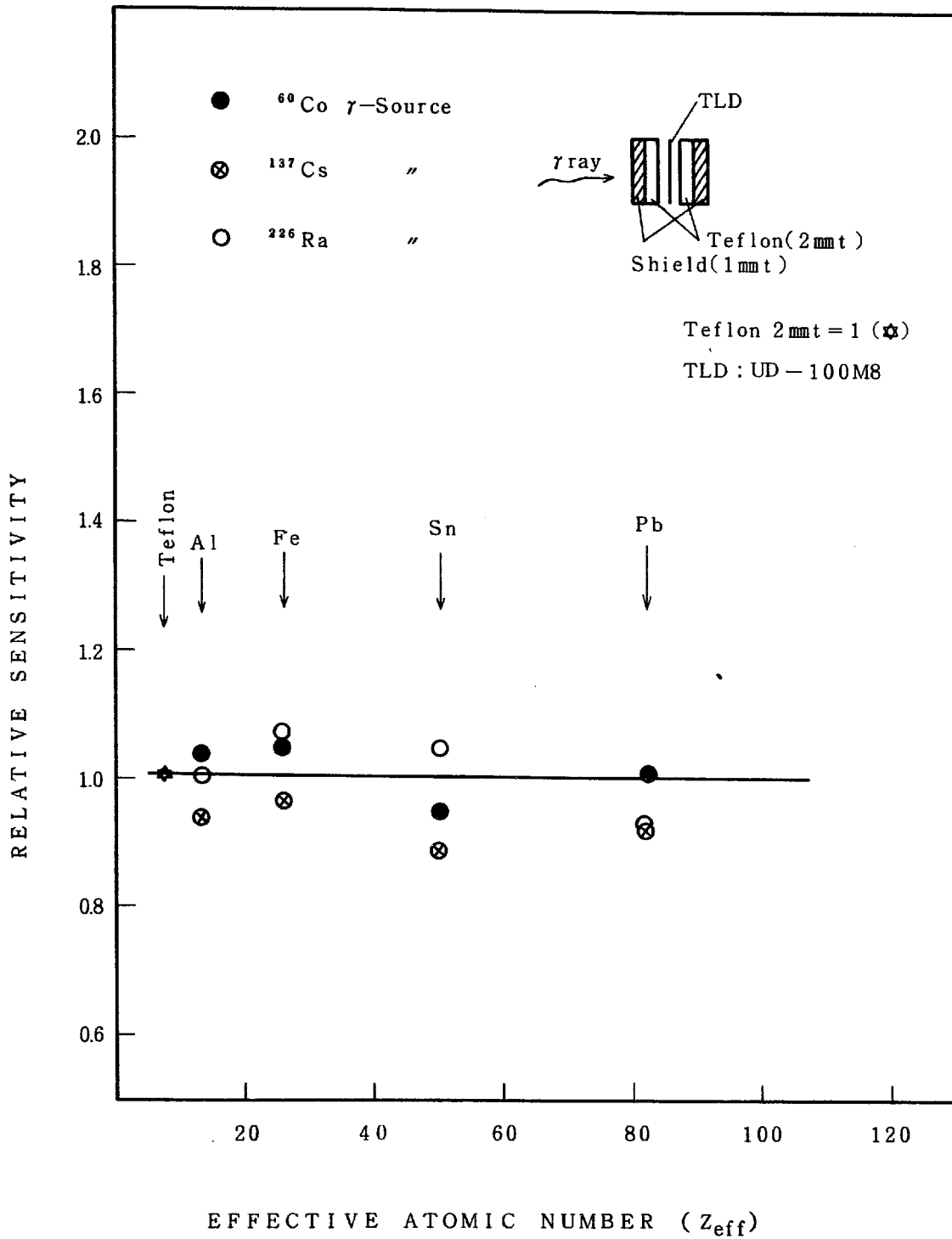


図 2.11 γ 線照射に伴うシールド材の実効原子番号と TLDの相対感度(シールド材の前後に吸収材)

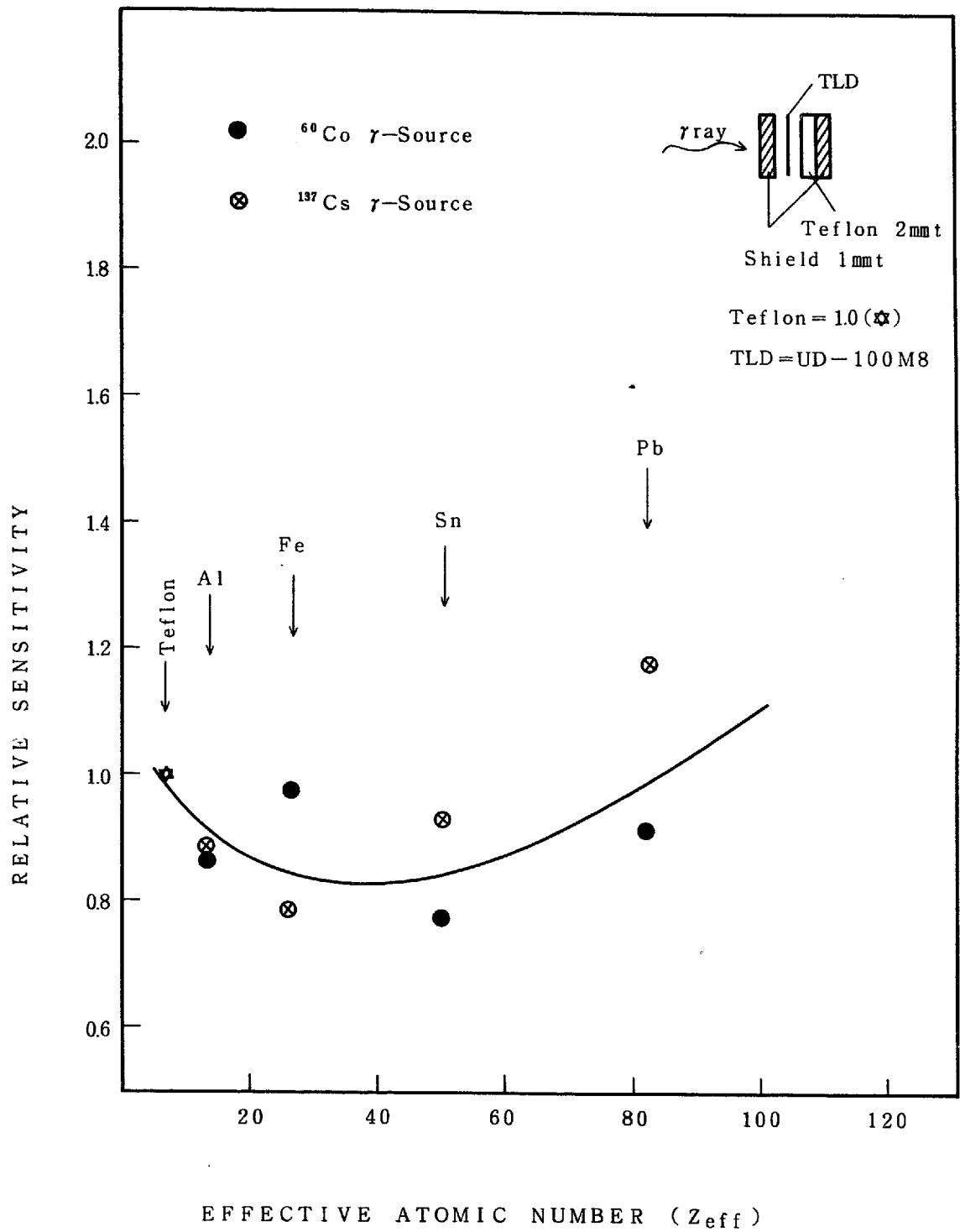


図 2.12 γ 線照射に伴うシールド材の実効原子番号とTLDの相対感度 (後面シールド材とTLD間に吸収材)

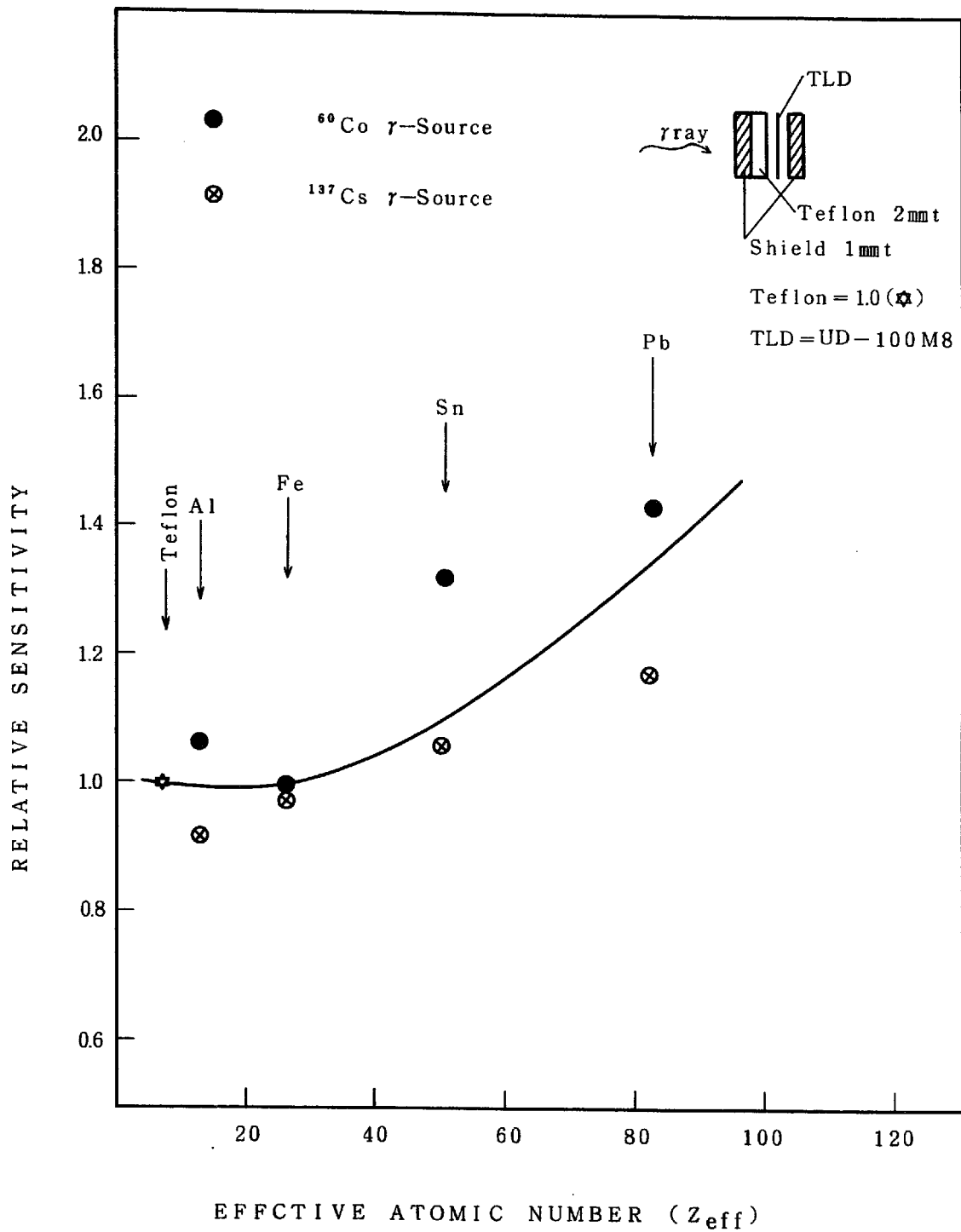


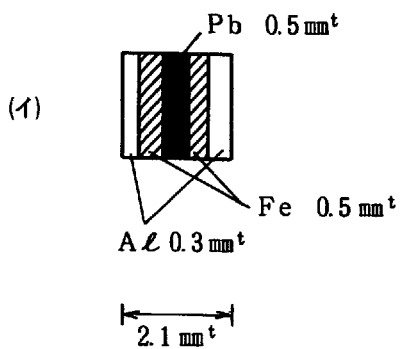
図 2.13 γ 線照射に伴うシールド材の実効原子番号とTLDの相対感度 (前面シールド材とTLD間に吸収材)

2.2 新型 ($\beta + \gamma$) 線用 TL 局部被曝線量計 (指リング) の作製

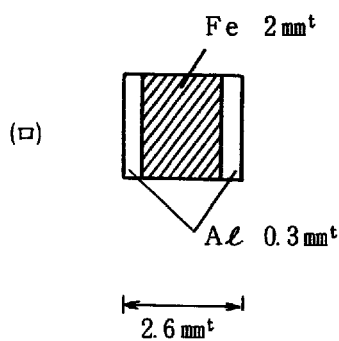
2.2.1 β 線 γ 線分離測定用シールド材の構成

β 線, γ 線の混在場での局部被曝線量評価を実施する為には, β 線, γ 線の分離測定による各放射線の評価線量を算出する必要がある。ここで混在場での γ 線量算出の為には, β 線による影響を無視しえる線量計と組合せる。即ち, β 線 γ 線混在場での β 線 γ 線の分離測定の為には β 線のみ感度を有する線量計及び γ 線のみ感度を有する線量計を組合せることによって得られるが, 実際には ($\beta + \gamma$) 線に感度を有する線量計 (TLD-1, 2) 及び β 線を遮蔽した条件による γ 線のみ感度を有する線量計 (TLD-3) との組合せることにより, β 線量は, ($\beta + \gamma$) 線量から γ 線量を差引くことによって得られる。よって前節で議論した結論に基づいた β 線, γ 線分離測定用シールド材の構成について以下に述べる。

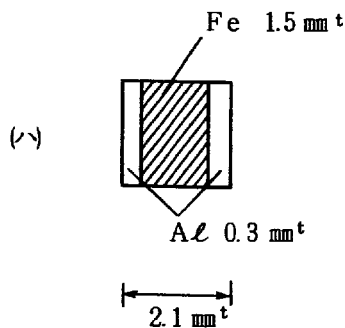
β 線の遮蔽条件は β 線のエネルギーに依存する。今, 再処理工場で取扱う放射線核種 FP からの β 線の最大エネルギーとして $^{106}\text{Ru-Rh}$ 等による 3.5 MeV 前後であると推定される。故に安全に見積って β 線最大エネルギー 4 MeV を遮蔽しうるシールド材の材質及び厚みの使用を検討する。ここで β 線最大エネルギー 3 MeV と 4 MeV の場合について, 各シールド構成での遮蔽効果 (減衰率 $f = 1 - e^{-\mu x}$) を計算する。この β 線減衰率として 0.98 (98%) 前後を目標値とする。更に前節の議論に基づいて二次放射線, 後方散乱線等の影響を無視しえるシールド構成を検討し, その組合せによる β 線及び γ 線の減衰率の試算結果を図 2.14 に示す。



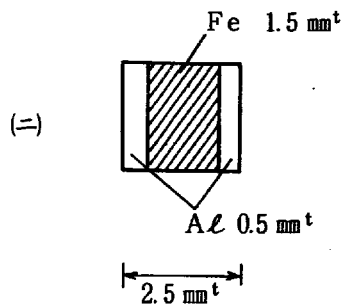
- i) $E_{\beta_{\max}} = 4\text{MeV}$ 時での減衰率 0.971 (97.1%)
- ii) $E_{\beta_{\max}} = 3\text{MeV}$ " 0.995 (99.5%)
- iii) ^{60}Co γ 線による減衰率 0.038 (3.8%)
- iv) ^{137}Cs γ 線 " 0.047 (4.7%)



- i) $E_{\beta_{\max}} = 4\text{MeV}$ 時での減衰率 0.983 (98.3%)
- ii) $E_{\beta_{\max}} = 3\text{MeV}$ " 0.998 (99.8%)
- iii) ^{60}Co γ 線による減衰率 0.043 (4.3%)
- iv) ^{137}Cs γ 線 " 0.049 (4.9%)



- i) $E_{\beta_{\max}} = 4\text{MeV}$ 時での減衰率 0.964 (96.4%)
- ii) $E_{\beta_{\max}} = 3\text{MeV}$ " 0.999 (99.9%)
- iii) ^{60}Co γ 線による減衰率 0.033 (3.3%)
- iv) ^{137}Cs γ " 0.038 (3.8%)



- i) $E_{\beta_{\max}} = 4\text{MeV}$ 時での減衰率 0.976 (97.6%)
- ii) $E_{\beta_{\max}} = 3\text{MeV}$ " 0.994 (99.4%)
- iii) ^{60}Co γ 線による減衰率 0.036 (3.6%)
- iv) ^{137}Cs γ 線 " 0.041 (4.1%)

図 2.14 各種シールド材の構成による β 線及び γ 線の減衰率

又、指リング線量計を作製する上で、できる限り小さくコンパクトにすることが一つの条件であり、シールド構成についても同様なことはいえる。ここで図 2.14の(=)のシールド構成では β 線最大エネルギー 4 MeV の減衰率が 97.6 %で ^{60}Co γ 線の減衰率が 3.6 %であり、かつ γ 線による二次放射線及び後方散乱による TLD への影響がほぼ無視でき、又 β 線による制動放射線の発生もかなり押えることが可能であると期待される。よってこのシールド構成を採用する。このシールド構成の妥当性については、前節の議論に従って以下の特性試験を行う。即ち前節と同様に図 2.15に示す条件下で ^{60}Co 100 mCi γ 線源を用いた標準照射を行った。

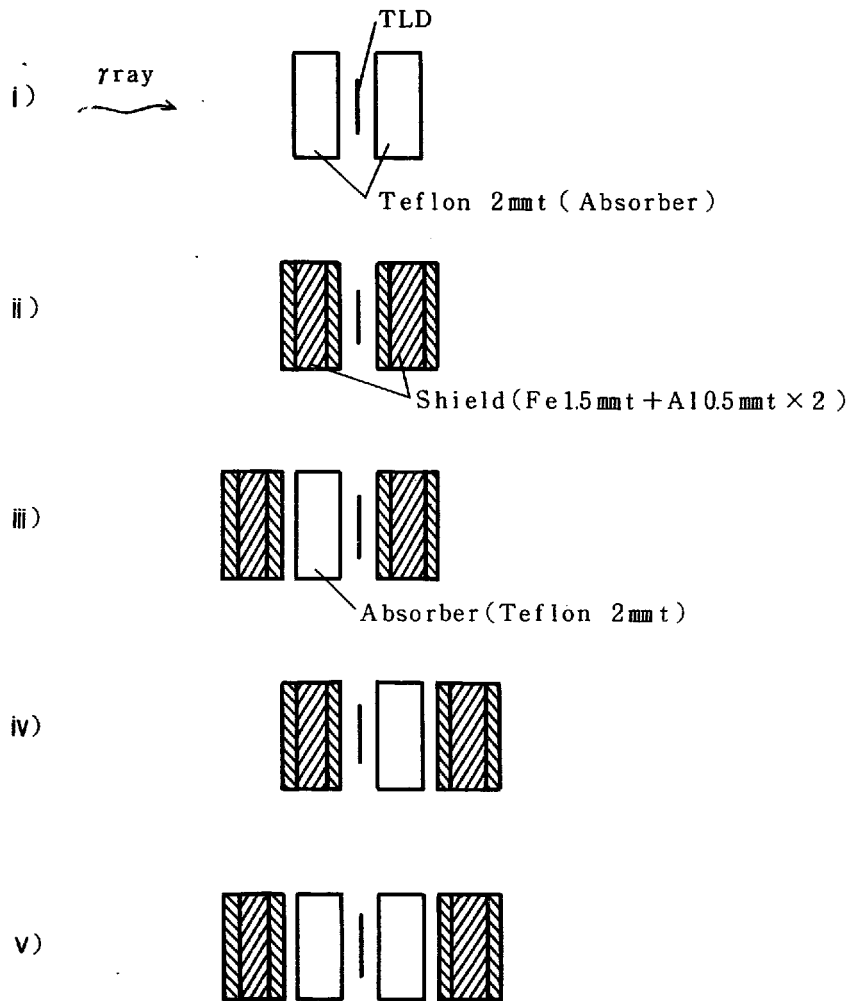


図 2.15 γ 線照射時のシールドと吸収体の組合せ

この照射による各 TLD の読取線量の結果は、どの組合せの場合でもテフロンのみ遮蔽による発光量にはほぼ等しい値が得られた。これより TLD へのシールド材による二次放射線、後方散乱線等の影響が無視しえることを確認できた。

又 β 線照射に伴う制動放射線の影響は $^{90}\text{Sr}-\text{Y}$ 1mCi を用いてシールド材の後面に TLD : UD-100M8 素子をセットして照射した結果, TLD の発光量はほぼ BG 値に等しく, 制動放射線による影響は無視しえることを確認した。

2.2.2 指リング線量計の概念設計及び作製

($\beta + \gamma$) 線用 TL 指リング線量計を作製するに際し, 従来の線量計の構造上の問題点のうち(5)についてはすでに 2.1 節でのべたのでここでは(1)から(4)について以下検討する。

まず(4)の TLD へのトリボルミネセンスの発生については, シールド材及び線量計表面からの押えによる接触摩擦によるものと考えられた。これを防ぐ目的で以下の配慮を行う。シールド材の囲りに図 2.16 に示すような支持リングを取りつける。これより特にシールド材の後面になる TLD-3 への押え込みによる接触摩擦を防ぐことが可能となる。

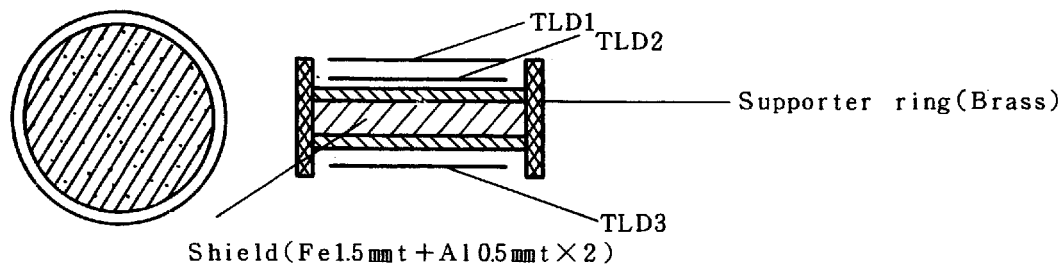


図 2.16 シールドと支持リングの断面図

又, 指リング線量計表面からの押え込みによる TLD への接触摩擦を少なくする為, シャ光膜マイラーの厚みを 3.4 mg/cm^2 から 40 mg/cm^2 とした。これは局部被曝線量の評価上, 手足の皮膚不感層厚が 40 mg/cm^2 であることによった。これよりシャ光膜の強度がかなり補強される結果となる。

(3)の防水性については, 従来使用してきたリングケース本体が ABS 樹脂製であり, 上蓋ケースは, はめ込み方式で全く防水対策が施こされていないものであった。特にセル内作業等で着用する場合, 2~2重の薄いゴム手袋及び綿手袋を着用しガムテープでの固定により密封状態となり, 汗等がケース内に浸み込み, TLD 素子の汚れによる測定不能のケースが多く発生した。この為この改良点としてリングケースの材質を加工性強度面からステンレス製とし更にねじ込み式及びゴムパッキングの使用により防水対策を行った。

(1)及び(2)についてはリングもステンレス製に切换え, 本体とはアークスポット溶接法を取り入れ, 接着性の補強及びリング折れの問題を改良した。

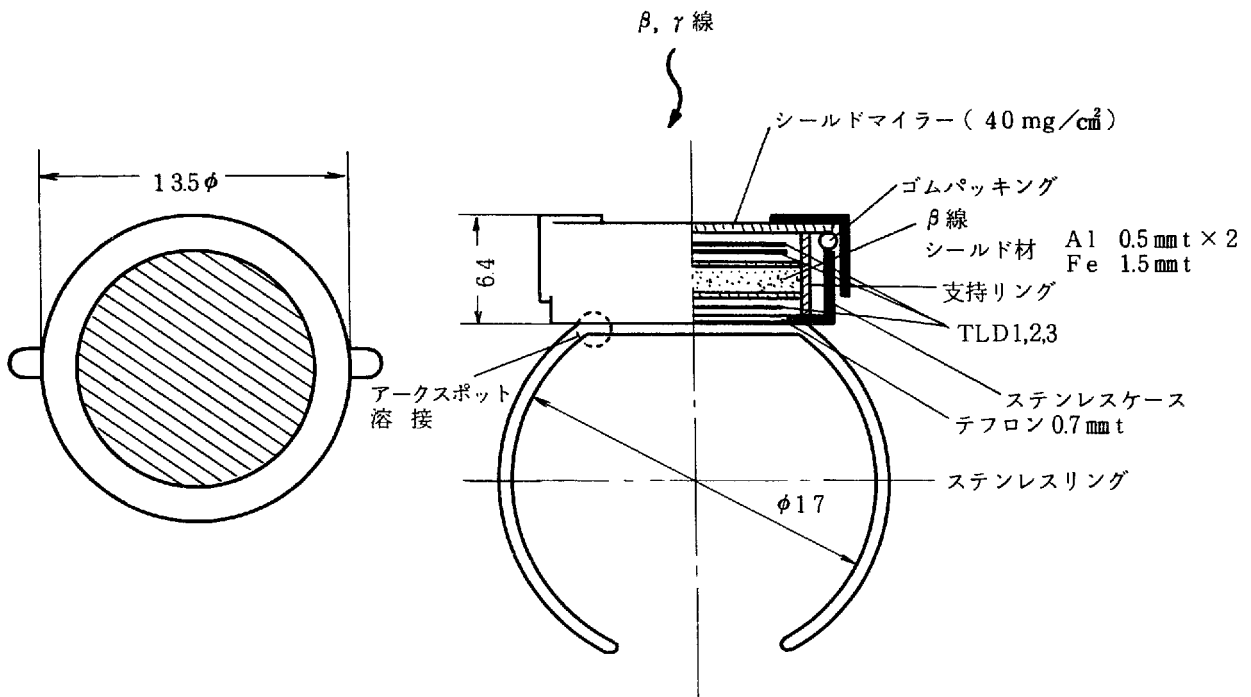
これらの条件を満たした指リングケースの概念図を図 2.17 に示す。ここで β 線 γ 線分離評価

を行うには、TLD-1、TLD-2及びシールド材後面のTLD-3の各TLDの発光量より算出可能であるが、リングケースをステンレス製に切替えたことによるTLDへの影響について検討した。まずシールド材と同様TLD-3については、後面がステンレスであることから、これによる γ 線の後方散乱線による影響の有無について問題となる。この為試作したリングケースTLD素子をセットし、 ^{60}Co γ 線照射を行った結果、TLD-1、2と比較しTLD-3には、ステンレスからの後方散乱線によると考えられる有意な発光量の増分が観測された。よってこの対策としてTLD-3の後面に0.7mm^tのテフロン吸収材を設置することにより解決することができた。又リングケースの囲りからの二次放射線による影響はほとんど無視され、 γ 線照射によるTLD-1、TLD-2及びTLD-3の発光量がほぼ等しい値が得られた。作製した指リング線量計の写真を写真2.1に示す。又指リング断面図を図2.17に示す。松下の商品名はUD-611Aである。尚TLD測定用リーダはUD-502Bを使用した。

2.3 線量計の防水試験

新しく作製した($\beta + \gamma$)線用TL指リング線量計についての防水試験を以下の要領で行った。指リング線量計内にTLD素子をセットし、石けん水及び水道水の入ったビーカー中に浸し、温度50℃で8時間一定に保ち、その後室温にて2週間放置した。水中より取り出し、指リング表面を乾燥させた後リングケース内のTLD素子の状況を目視及び充分素子の乾燥させた後、TLDリーダにて測定を行う。

この結果、目視時でも異常は見られず測定結果もほぼBG値であることが確認できた。よって防水性は良好に保たれていると結論された。



リングケース材質 ステンレス

TLD : UD100M8

図 2.17 新型 (β + γ) 線用 TLD 指リング線量計断面図



写真 2.1 新型 (β + γ) 線用 TL 指リング線量計 (UD-611A)

3. TLDによるβ線, γ線混在場でのβ線吸収線量 評価式

3.1 基本式の算出

β線吸収線量の分離測定原理については、N841-78-54⁶⁶⁾で報告されている通りである。ここで基本式について再度以下に示す。

β線及びγ線の混合被曝によるTLD-1, 2, 3に生じる熱蛍光量(発光量=リーダー読取線量)はそれぞれ次式で示される。

$$L_1 = F_1 b_1(E) D_\beta + F_1 g_1(E) D_\gamma + C_{BG} \dots\dots\dots (3.1)$$

$$L_2 = F_2 b_2(E) D_\beta + F_2 g_2(E) D_\gamma + C_{BG} \dots\dots\dots (3.2)$$

$$L_3 = F_3 g_3(E) D_\gamma + C_{BG} \dots\dots\dots (3.3)$$

$$C_{BG} = aX + C_0$$

- L_n : TLD-nの蛍光量(MR)
- F_n : TLD-nの⁶⁰Co-γ線当量換算係数(MR/mReq⁶⁰Co-γ)
- $b_n(E)$: TLD-nの E_{max} (MeV)のβ線に対する感度(mReq⁶⁰Co-γ/mrad)
- $g_n(E)$: TLD-nの E_{max} (MeV)のγ線に対する感度(mReq⁶⁰Co-γ/mR)
- D_β : β線吸収線量(mrad)
- D_γ : γ線照射線量(mR)
- C_{BG} : TLD-nのバックグラウンド値(MR)
- X : 日数
- C_0 : アニール時の残読取線量(MR)

(3.1) (3.2) (3.3)式を更に次式で示す

$$Q_1 = b_1(E) D_\beta + g_1(E) D_\gamma \text{ (mReq}^{60}\text{Co-}\gamma\text{)} \dots\dots\dots (3.4)$$

$$Q_2 = b_2(E) D_\beta + g_2(E) D_\gamma \text{ (")} \dots\dots\dots (3.5)$$

$$Q_3 = g_3(E) D_\gamma \text{ (")} \dots\dots\dots (3.6)$$

ここで

$$Q_n = \frac{L_n}{F_n} \dots\dots\dots (3.7)$$

$$L_n = L_n - C_{BG} \dots\dots\dots (3.8)$$

(3.6) 式より γ 線量は

$$D_{\gamma} = \frac{Q_3}{g_3(E)} \quad (\text{mR}) \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

又 (3.9) (3.4) 式より β 線吸収線量は

$$D_{\beta-1} = \frac{Q_1 - g_1(E)D_{\gamma}}{b_1(E)} = \frac{Q_1 - (g_1(E)/g_3(E))Q_3}{b_1(E)} \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

同様に (3.9) (3.5) 式より

$$D_{\beta-2} = \frac{Q_2 - g_2(E)D_{\gamma}}{b_2(E)} = \frac{Q_2 - (g_2(E)/g_3(E))Q_3}{b_2(E)} \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

ここで (3.10) (3.11) 式より

$$D_{\beta-1} = D_{\beta-2}$$

$$\therefore \frac{Q_1 - (g_1(E)/g_3(E))Q_3}{b_1(E)} = \frac{Q_2 - (g_2(E)/g_3(E))Q_3}{b_2(E)} \quad \dots\dots\dots (3.12)$$

よって

$$\frac{b_2(E)}{b_1(E)} = \frac{g_3(E)Q_2 - g_2(E)Q_3}{g_3(E)Q_1 - g_1(E)Q_3} = EI \quad \dots\dots\dots (3.13)$$

EI は β 線の最大エネルギーを推定しうる値であり、 β 線最大エネルギー指標と定義されている。次に実測値に基づいて上式の各 γ 線感度 (g_n)及び β 線感度 (b_n)を求める。

3.2 γ 線に対する感度

β 線局部被曝線量計の γ 線感度及びエネルギー依存性について調べるために、 ^{60}Co γ 線源、X線発生装置を用いて照射を行った。照射条件はFree air 中と手部ファントムに装着時での結果である。TLD-nの ^{60}Co - γ 線当量係数 F_n については以下の通り得られた。(1979.6月現在)

$$F_1 = 1.00 \times 10^{-2} \text{ MR/mReq}^{60}\text{Co}-\gamma$$

$$F_2 = 1.00 \times 10^{-2} \text{ MR/mReq}^{60}\text{Co}-\gamma$$

$$F_3 = 9.52 \times 10^{-3} \text{ MR/mReq}^{60}\text{Co}-\gamma$$

即ち

$$1/F_1 = 99.9 \text{ mReq}^{60}\text{Co}-\gamma / \text{MR}$$

$$1/F_2 = 99.9 \text{ mReq}^{60}\text{Co}-\gamma / \text{MR}$$

$$1/F_3 = 105.0 \text{ mReq. } ^{60}\text{Co} - r / \text{MR}$$

又、この線量計の γ 線エネルギー特性の結果は、フリーエア中及び指ファントム装着時について、それぞれ表3.1、3.2及び図3.1、3.2に示す。これは指ファントムあり、なしではほぼ誤差内で一致し差は見られなかった。更に種々の γ 線に対する感度をまとめて表3.3に示す。

表 3.1 新型 ($\beta + \gamma$) 線用指リング線量計の X 線照射結果及び相対感度 (With Finger Phantom)

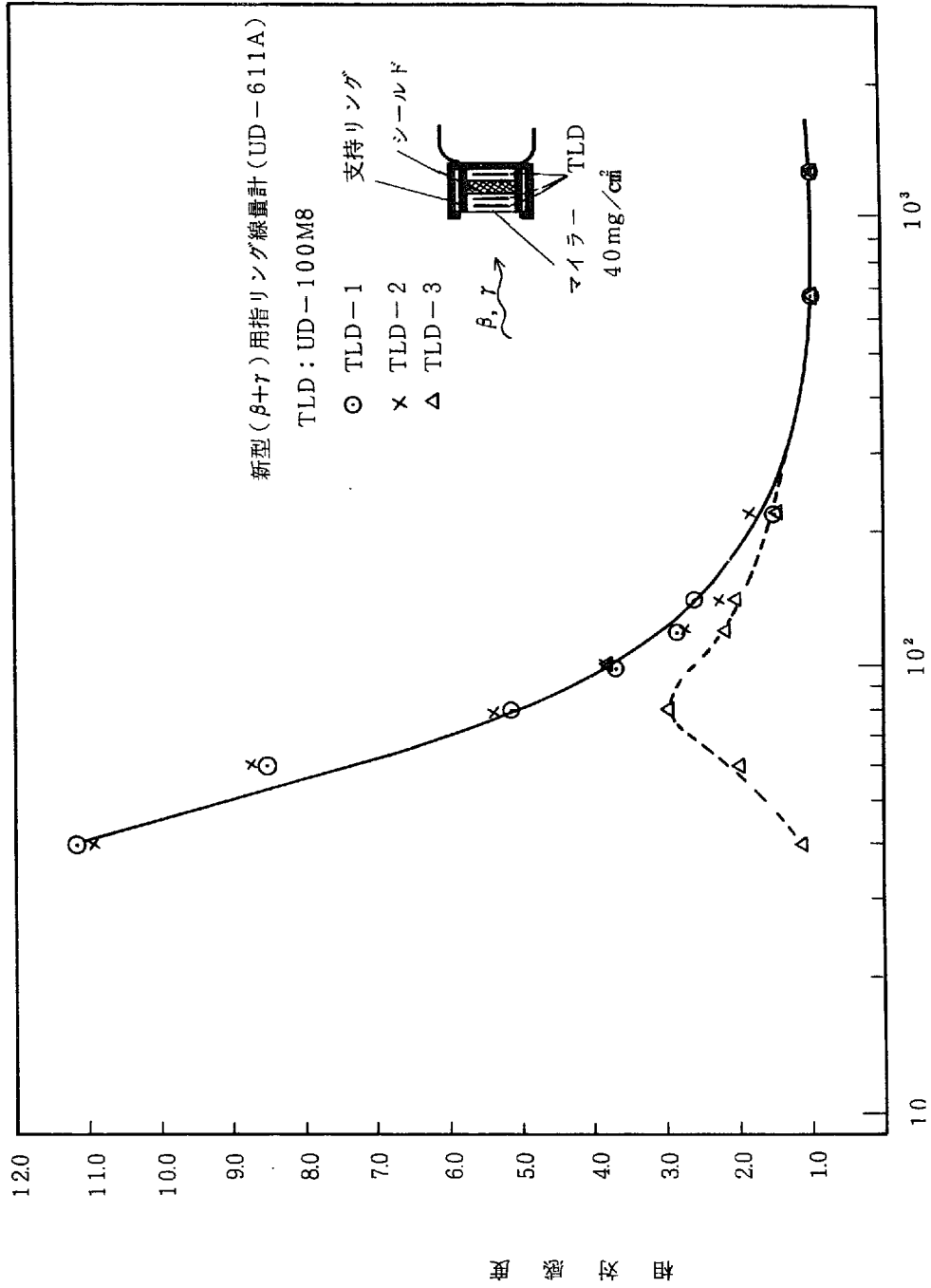
実効エネルギー (KeV)	Rメーター値 (MR)	照射線量 (mR)	TLD-n	平均読取線量 \bar{x} (MR)	\bar{x} の S.DEV (MR)	相対誤差 (%) S.DEV/ \bar{x}	\bar{x} の ^{60}Co 換算 γ 線 当量 (mReq. $^{60}\text{Co}-\gamma$)	\bar{x} (mReq $^{60}\text{Co}-\gamma$) 照射線量
40	200	197.3	TLD-1	22.04	1.06	4.8	2201.8	11.16
			2	21.59	0.85	3.9	2156.8	10.93
			3	2.10	0.15	7.1	220.5	1.12
60	194	191.3	TLD-1	16.30	1.22	7.5	1628.4	8.51
			2	16.74	1.17	7.0	1672.3	8.74
			3	3.59	0.42	11.7	376.9	1.97
80	115	113.4	TLD-1	5.82	0.76	13.1	581.4	5.13
			2	6.08	1.07	17.6	607.4	5.36
			3	3.17	0.01	0.3	332.9	2.94
100	210	207.1	TLD-1	7.72	0.52	6.7	771.2	3.72
			2	7.88	0.30	3.8	787.2	3.80
			3	5.51	0.16	2.9	578.6	2.79
120	213	210.1	TLD-1	5.92	0.06	1.0	591.4	2.81
			2	5.79	0.05	0.9	578.4	2.75
			3	4.44	0.48	10.8	466.2	2.22
140	219	216.4	TLD-1	5.58	0.13	2.3	557.4	2.58
			2	4.89	0.56	11.5	488.5	2.26
			3	4.26	0.23	5.4	447.3	2.07
220	149	147.2	TLD-1	2.17	0.14	6.5	216.8	1.47
			2	2.65	0.12	4.5	264.7	1.80
			3	2.12	0.03	1.4	222.6	1.51

表 3.2 新型 ($\beta + \gamma$) 線用指リング線量計の X 線照射結果及び相対感度 (in Free air)

実効エネルギー (KeV)	Rメーター値 (MR)	照射線量 (mR)	TLD-n	平均読取線量 \bar{x} (MR)	\bar{x} の S. DEV. (MR)	S. DEV./ \bar{x} (%) 相 対 誤 差	\bar{x} の ^{60}Co 換算 γ 線 当量(mReq. $^{60}\text{Co}-\gamma$)	\bar{x} (mReq. $^{60}\text{Co}-\gamma$) 照 射 線 量
40	200	197.3	TLD-1	23.05	2.14	9.28	2302.7	11.67
			2	21.69	1.99	9.17	2166.8	10.98
			3	2.25	0.26	11.56	236.3	1.20
60	194	191.3	TLD-1	15.74	1.00	6.35	1572.4	8.21
			2	16.21	1.11	6.85	1619.4	8.47
			3	3.45	0.36	10.43	362.3	1.89
80	115	113.4	TLD-1	5.64	0.49	8.69	563.4	4.97
			2	5.18	0.65	10.52	617.4	5.44
			3	2.84	0.27	9.51	298.2	2.63
100	210	207.1	TLD-1	7.11	0.55	7.74	710.3	3.43
			2	7.54	0.25	3.32	753.2	3.64
			3	4.82	0.63	13.07	506.1	2.44
120	213	210.1	TLD-1	6.43	0.65	10.11	642.4	3.06
			2	5.99	0.56	9.35	598.4	2.85
			3	4.46	0.28	6.28	468.3	2.23
140	219	216.4	TLD-1	5.17	0.21	4.06	516.5	2.39
			2	5.01	0.21	4.19	500.5	2.31
			3	4.04	0.25	6.19	424.2	1.96
220	149	147.2	TLD-1	2.42	0.27	11.16	241.8	1.64
			2	2.27	0.16	7.05	226.8	1.54
			3	2.05	0.12	5.85	215.3	1.46

表 3.3 新型 ($\beta + \gamma$) 線用 TL 指リング線量計の γ 線感度

Radiation Source		Finger phantom	r - ray Sensitivity (mReq ⁶⁰ Co- γ /mR)		
			g ₁	g ₂	g ₃
⁶⁰ Co	7 Ci		0.90	0.90	0.91
⁶⁰ Co	100 mCi		1	1	1
¹³⁷ Cs	100 mCi		1	1	1
x-rays	40 KeV		11.67	10.98	1.20
	40 KeV	with	11.16	10.93	1.12
	60 KeV		8.21	8.47	1.89
	60 KeV	with	8.51	8.74	1.97
	80 KeV		4.97	5.44	2.63
	80 KeV	with	5.13	5.36	2.94
	100 KeV		3.43	3.64	2.44
	100 KeV	with	3.72	3.80	2.79
	120 KeV		3.06	2.85	2.23
	120 KeV	with	2.81	2.75	2.22
	140 KeV		2.39	2.31	1.96
	140 KeV	with	2.58	2.26	2.07
	220 KeV		1.64	1.54	1.46
	220 KeV	with	1.47	1.80	1.51



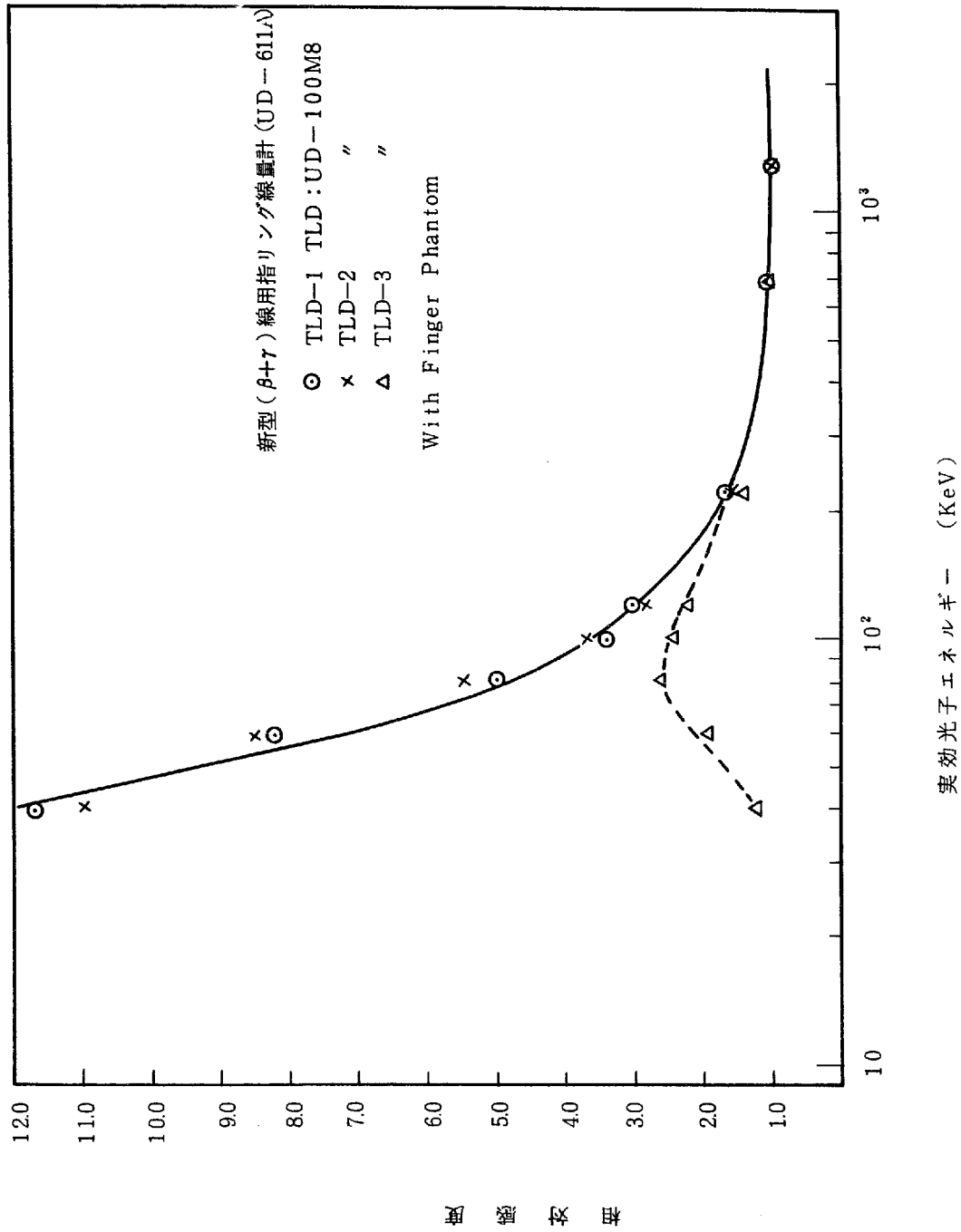


図 3.2 新型 ($\beta + \gamma$) 線用 TL 指リング線量計の指ファントム装着時の実効光子エネルギー応答特性

3.3 β 線に対する感度

$^{90}\text{Sr}-\text{Y}$ 1mCi の β 線源を用いて実施した β 線に対する感度特性の測定結果を表 3.4 に示す。又このデータより β 線に対する線量直線性について図 3.3 に示す。この結果よりこの TL 指リング線量計は精度よく線量直線性が得られていると言える。

更に ^{204}Tl , ^{147}Pm 1mCi の β 線源を用いての β 線感度特性の測定結果を $^{90}\text{Sr}-\text{Y}$ のデータを含めて表 3.5 に示す。各エネルギーの β 線に対する感度 $b_n(E)$ を β 線最大エネルギーとの関係について指リング線量計のマイラー厚 40 mg/cm^2 (不感層厚に相当) である時の測定結果を図 3.4 に示す。ここで高エネルギーの β 線に対して UD-611F 型線量計では、TLD-3 に対して β 線感度 (制動放射線によるもの) が見られた。しかし今回作製した新型 TL 指リング線量計では、ほとんど無視しえる程度の感度であった。これより β 線と γ 線混在場に於ける β 線線量評価上 γ 線線量を補償する方法に対しても改善されたと言える。即ち線量計内部のシールド材であった Pb から発生した制動放射線の影響がシールド材の変更により無視しえる結果が得られたと言える。更に TLD-1 と TLD-2 の β 線感度差が見られ、この新しい線量計からも (3.13) 式で定義される β 線最大エネルギーの指標を得ることができる。その結果を図 3.5 に示す。

又、 β 線最大エネルギーに対する β 線感度特性 (図 3.4) をエネルギー指標に対する β 線感度特性で示したのが図 3.6 である。尚 β 線源の値づけについては N841-78-54 にて詳細に報告しているのでここでは省く。

更に今回の値づけの信頼度を得る為に原研・東海線量計測課が所有している β 線源と動燃側所有の β 線源 $^{90}\text{Sr}-\text{Y}$ を用いて、TLD を媒体として各線源より曝射し、その結果、同一リーダーにて測定し、リーダーの読取線量から得られる相対感度の比較を実施した。その結果 $\pm 3\%$ 以内での一致が見られた。これより動燃側所有の β 線源の値づけは、原研・東海で実施されている評価法に基づく値づけに一致していることの確認を得ることができた。又 β 線感度の検出限界については、 $^{90}\text{Sr}-\text{Y}$ β 線核種である場合、表 3.4 より TLD の最低読取線量を 0.5 MR であるとすれば約 $4\text{ mrad}/0.1\text{ MR}$ より $20\text{ mrad} \pm 100\%$ であると言える。

表 3.4 新型 ($\beta + \gamma$) 線用 TL 指リング線量計に対する $^{90}\text{Sr} - \text{Y}$ β 線源
による各種曝射線量での相対感度とエネルギー指標

Exposure D_{β} (mrad)	Light Emitted Net (MR) (Error %)			Equivalent $^{60}\text{Co} - \gamma$ (mR)			Relative Sensitivity of β ray $\frac{\text{Req. } ^{60}\text{Co}}{\text{Rad}}$			EI b_2/b_1
	L_1	L_2	L_3	Q_1	Q_2	Q_3	b_1	b_2	b_3	
621	12.68 (8.1%)	11.88 (5.0%)	0 (17.6%)	1267	1187	0	2.04	1.91	0	0.936
1567	35.71 (0.8%)	32.01 (1.7%)	0	3567	3198	0	2.276	2.040	0	0.896
2847	61.29 (4.2%)	59.33 (7.9%)	0	6123	5927	0	2.151	2.082	0	0.968
2832	59.21 (4.9%)	56.96 (2.5%)	0	5915	5690	0	2.088	2.009	0	0.962
4484	94.2 (9.5%)	89.9 (8.7%)	0.06 (19.5%)	9407	8977	6.3	2.098	2.002	1.40×10^{-3}	0.954
51	1.07 (4.3%)	0.98 (6.7%)	0	107	98	0	2.096	1.921	0	0.916

av 0.9388±0.028

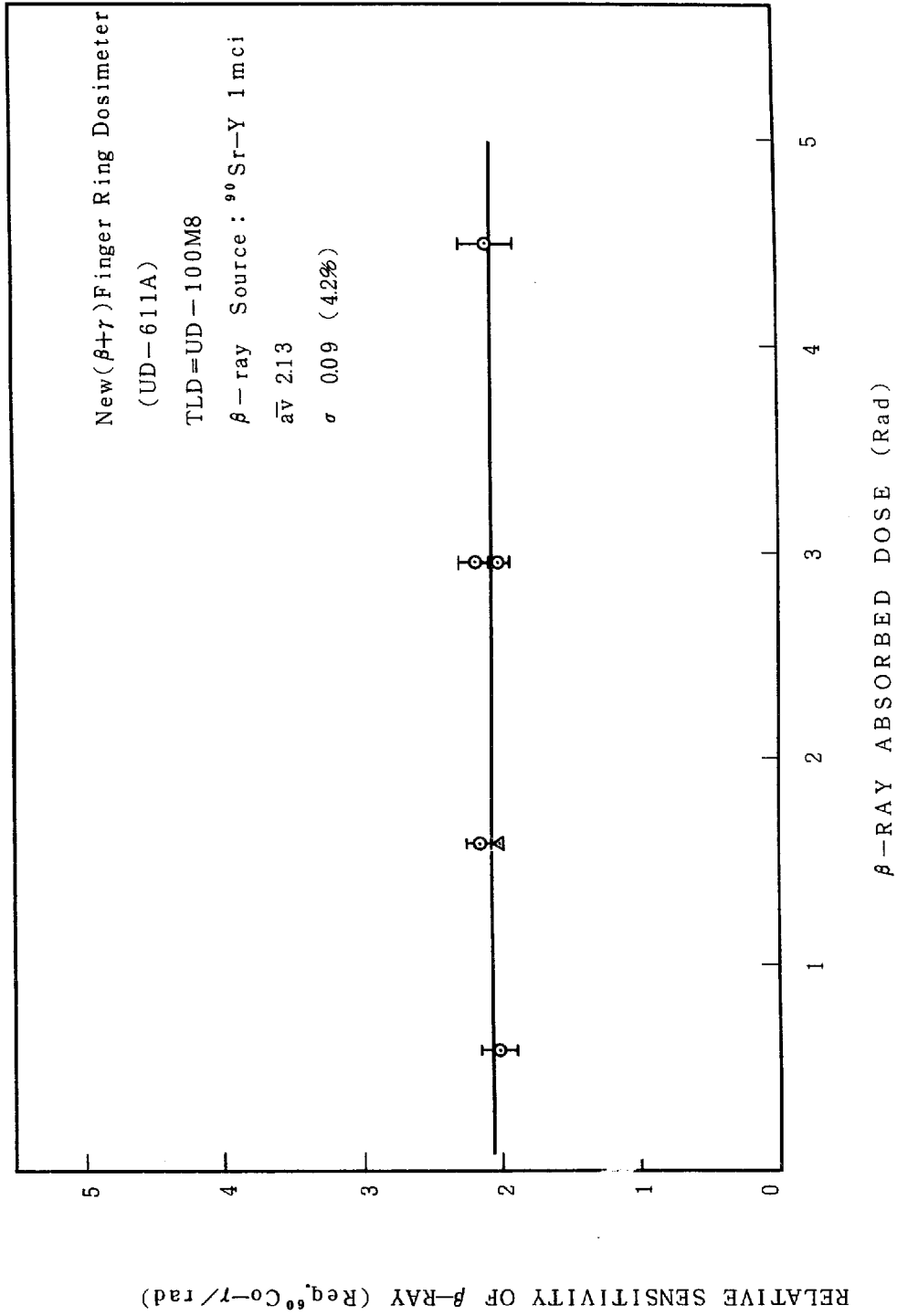


図 3.3 新型($\beta + \gamma$)線用TLD指リングの β 線量に対する直線性

表 3.5 新型 ($\beta + \gamma$) 線用 TL 指リング線量計に対する各種 β 線源
 による相対感度とエネルギー指標

Nuclide (E_{max} (MeV))	Exposure $D\beta$ (mrad)	Light Emitted Net (MR) (Error %)			Equivalent $^{60}Co-\gamma$ (mR)			Relative Sensitivity of β ray ($\frac{Ref. Co}{rad}$)			EI b_2/b_1
		L_1	L_2	L_3	Q_1	Q_2	Q_3	b_1	b_2	b_3	
$^{90}Sr - Y$ (2.25)	4484	94.2 (9.5%)	89.9 (8.7%)	0.06 (19.5%)	9406.5	8977	6.3	2.098	2.002	0	0.954
^{204}Tl (0.764)	413	2.99 (11.5%)	2.58 (17.5%)	0	298.7	257.7	0	0.723	0.624	0	0.862
^{147}Pm (0.22)	612	0.49 (3.7%)	0.18 (9.1%)	0	49.0	18.0	0	0.080	0.029	0	0.367

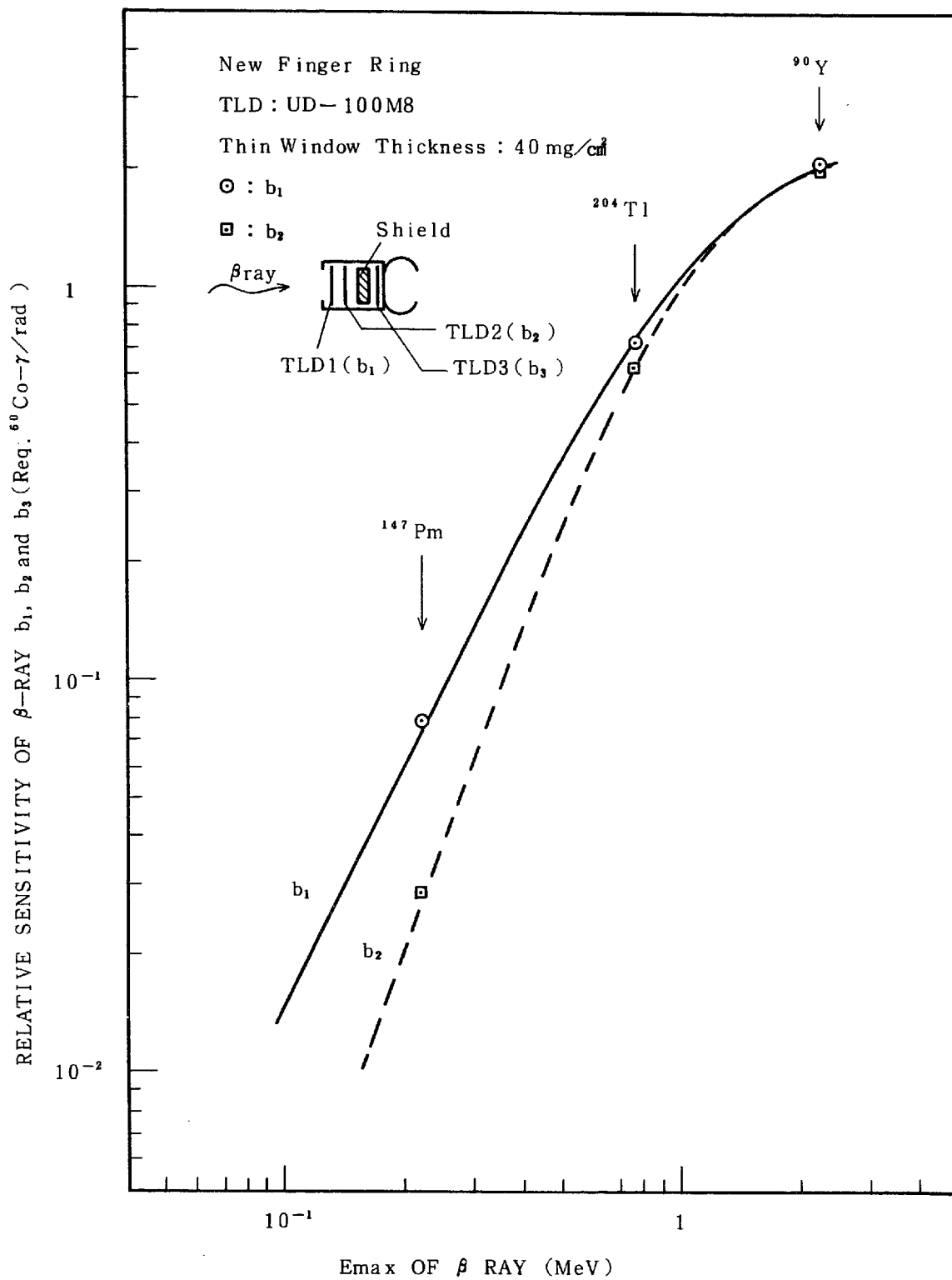


図 3.4 40 mg/cm²下での最大β線エネルギーに対するTLDの相対感度

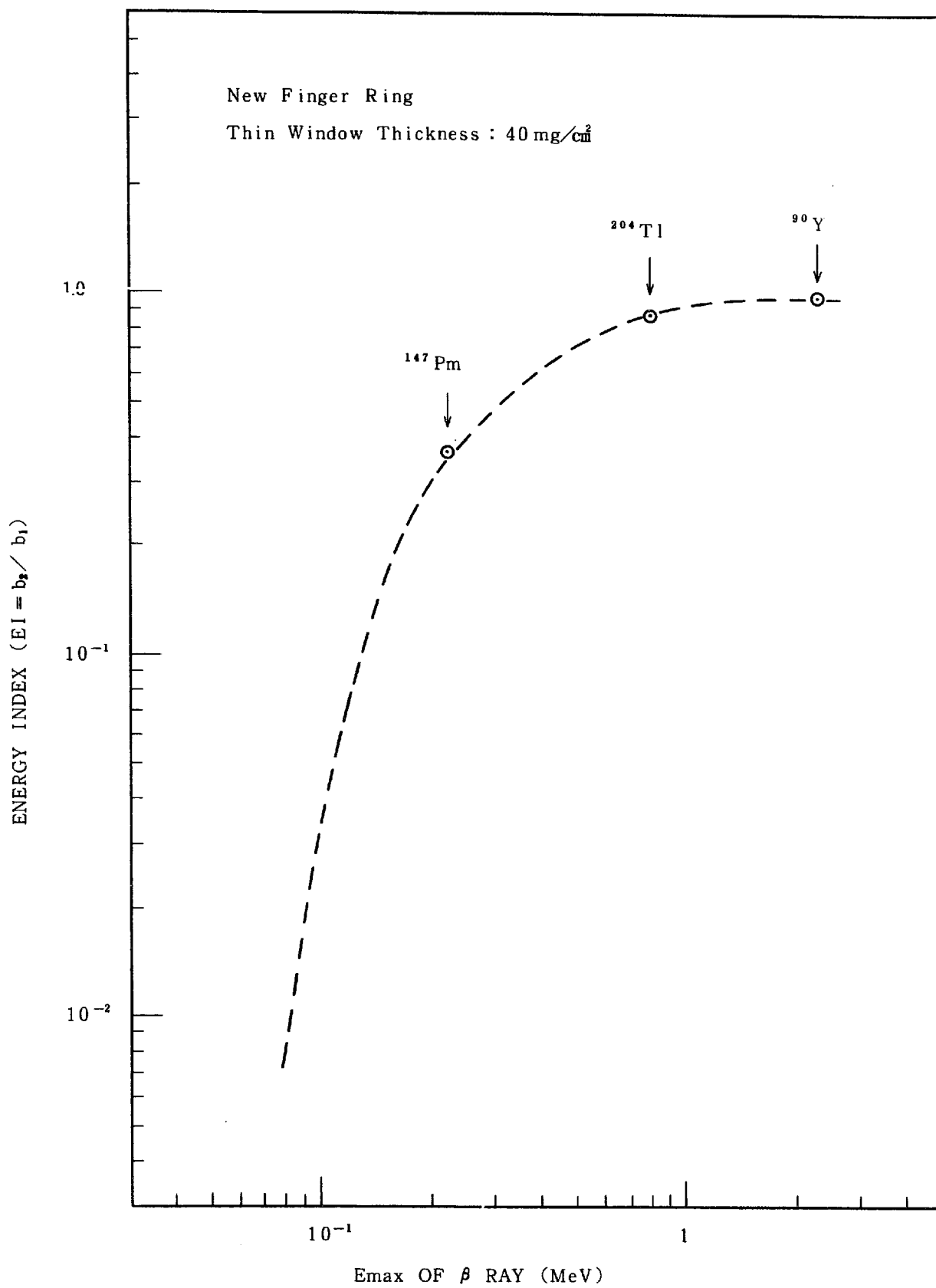


図 3.5 β線最大エネルギーとエネルギー指標の関係

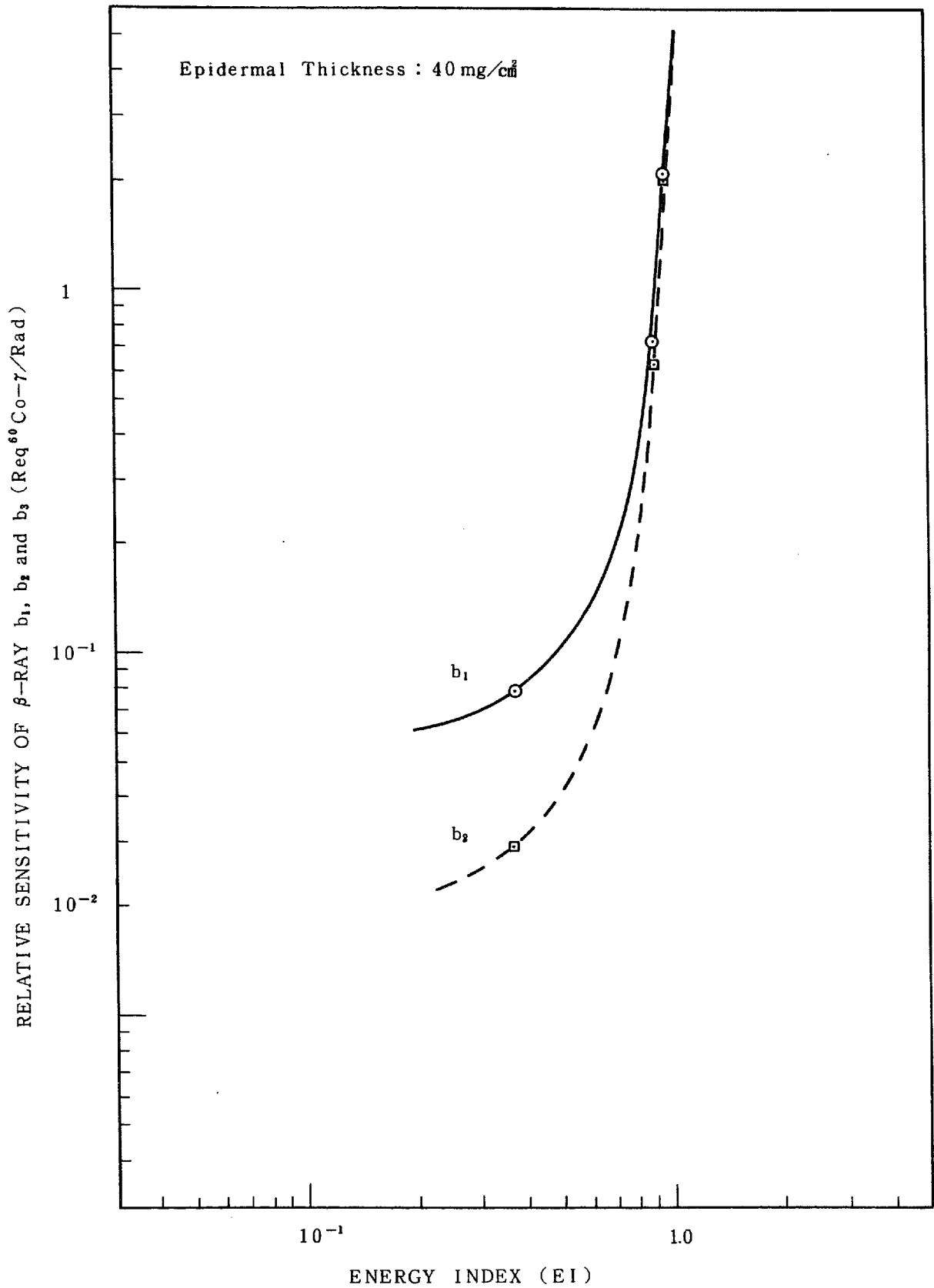


図 3.6 エネルギー指標と各TLDの相対感度

3.4 β線, γ線混在場での分離性能試験

実際の作業場の放射線場は, β線, γ線の混在場であり, この放射線の分離性能が線量評価上の測定精度に大きく左右される。この為既知量のβ線量及びγ線量を混合照射し, 3.1節で示した評価式に基づいて評価した結果を表 3.6 に示す。この結果, 単一β線源と単一γ線源との混合照射による評価結果は, β線量が±30%以内で評価可能であり, 又γ線量は±15%以内で評価可能であった。

しかし実際の混在場は更に複雑であり, 例えば再処理工場のセル内では核分裂性物質の多核種のβ線, γ線の混在場となる。

この為実験的に模擬する目的で2核種のβ線, γ線の混合照射を行なった。この結果を表 3.7 に示す。使用したβ線源は⁹⁰Sr-Yと²⁰⁴Tlである。しかしTLD-1とTLD-2の発光量の比から得られるエネルギー指標(EI)を用いて評価したβ線量D_{β-1}は, 大幅に照射線量からはずれ最大4倍近くの過大評価となる場合が見られた。これについて検討した結果, 実測値から得られるエネルギー指標に問題があると判断し, β線核種と存在量の荷重を考慮した混在場でのβ線実効最大エネルギーを算出し, このエネルギーのβ線感度を図 3.4 より読み取り, この値より補正したβ線吸収線量D_{β-2}を再評価した。その結果を同様に表 3.7 に示す。

ここでβ線実効最大エネルギーの算出式を以下に示す。

混合β線核種1, 2の条件を下記に示す。

β線核種 1	最大エネルギー	E _{max} (β - 1)	(MeV)
	放出率	f ₁	(%)
	存在量	x ₁	(rad)
β線核種 2	最大エネルギー	E _{max} (β - 2)	(MeV)
	放出率	f ₂	(%)
	存在量	x ₂	(rad)

よって混合核種でのβ線実効最大エネルギー E_{eff} は

$$E_{eff} = \frac{E_{max}(\beta - 1) \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \frac{x_1}{x_1 + x_2} + E_{max}(\beta - 2) \cdot \frac{f_2}{100} \cdot \frac{x_2}{x_1 + x_2}}{\frac{f_1}{100} \cdot \frac{x_1}{x_1 + x_2} + \frac{f_2}{100} \cdot \frac{x_2}{x_1 + x_2}}$$

このβ線実効最大エネルギーでのβ線感度bを用いて評価を行った結果, ±20%以内で照射線量と良い一致が得られた。

この結果について補正しない場合とβ線実効最大エネルギーを用いて補正した評価線量を図 3.7

に示す。

よって、実際の混在場に於ける線量評価を行うには、 β 線実効最大エネルギーの情報が得られないと過大応答の傾向に評価することになると考えられる。実際にはこの情報を放管側からも必ずしも満足しえる情報を得ることが困難な場合が多い。

この為、得られる情報を最大限に検討し、 γ 線の実効エネルギー及び β 線の実効最大エネルギーを固定することにより現場の混在場での線量評価を実施する。この方法によって評価した場合でもかなり良い分離評価が期待されると考える。

表 3.6 β 線, γ 線の混合照射による実測評価線量

Source of mixed exposure		Exposure Dose (at 40 mg / cm ²)						Energy Index (β)		Error *(%)	
		Calculated			Measured						
		β - ray	γ - ray	β (mrad)	γ (mR)	β / γ	β (mrad)	γ (mR)	β	γ	
⁹⁰ Sr - Y		175	225	0.78	185	196	1.07	6	-13		
"	"	916	225	4.07	967	216	1.04	6	-4		
"	"	189	423	0.45	221	437	1.00	17	3		
"	¹³⁷ Cs	277	128	2.16	280	127	1.00	1	-1		
"	"	888	128	6.93	930	115	0.95	5	-10		
"	X ray (140 Kev)	873	234	3.73	839	257	1.03	-4	10		
"	X ray (40 Kev)	873	212	4.12	1119	204	1.06	28	-4		

$$* \text{Error} (\%) = \frac{\text{Measured} - \text{Calculated}}{\text{Calculated}} \times 100$$

表 3.7 各種 $^{90}\text{Sr}-\text{Y}$ と ^{204}Tl の混合照射による実測評価線量

	照射線量 (mrad)		全照射線量 (mrad)	Sr-Y/Tl 比	実効最大エネルギー (MeV)	指標	実測値 (mrad)		$D_{\beta-1}$ / 全照射線量	$D_{\beta-2}$ / 全照射線量
	$^{90}\text{Sr}-\text{Y}$	^{204}Tl					$D_{\beta-1}$	$D_{\beta-2}$		
1	173	547	720	0.316	1.14	0.95	1147 ± 395	678 ± 6	1.6 ± 0.55	0.94 ± 0.008
2	101	741	842	0.136	0.95	0.91	1103 ± 267	756 ± 78	1.31 ± 0.32	0.90 ± 0.09
3	1409	1416	2835	0.995	1.53	0.98	9356 ± 6148	2777 ± 134	3.30 ± 2.16	0.98 ± 0.05
4	703	3363	4067	0.21	1.03	0.92	10219 ± 1120	4446 ± 220	2.51 ± 0.28	1.09 ± 0.05
5	346	228	574	1.52	1.68	0.99	479 ± 72	519 ± 5	0.83 ± 0.13	0.90 ± 0.009
6	692	247	939	2.80	1.88	0.99	1562 ± 356	771 ± 31	1.66 ± 0.38	0.82 ± 0.03

$D_{\beta-1}$: TLD-1, TLD-2 の発光量比によるエネルギー指標から評価した β 線吸収線量

$D_{\beta-2}$: 実効最大エネルギーから得られる TLD1, TLD2 の β 線感度 b_1, b_2 より評価した β 線吸収線量

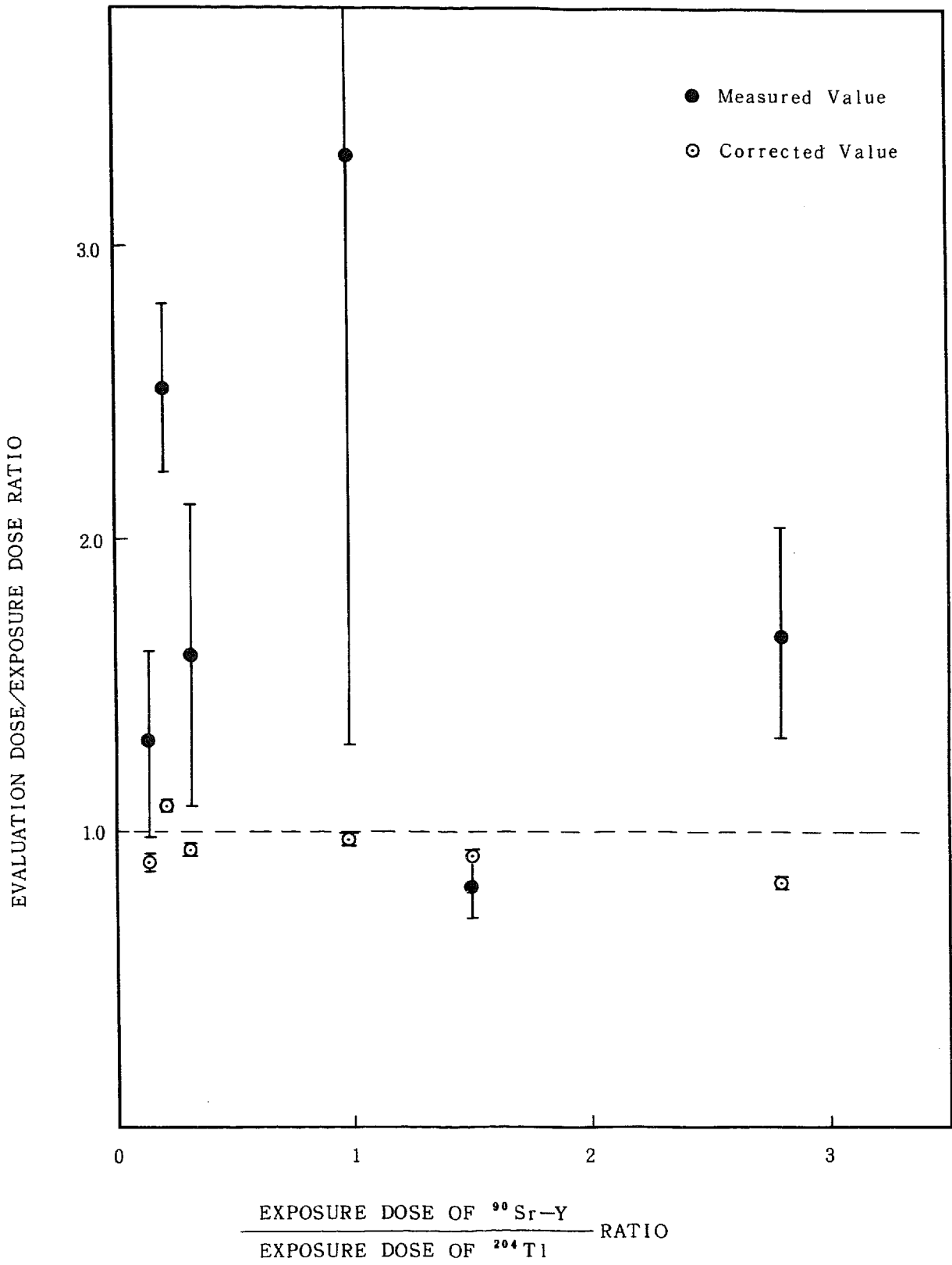


図 3.7 各種⁹⁰Sr-Yと²⁰⁴Tlの混合照射比による相対評価線量

4. γ 線用TL局部被曝線量計(指リング)の作製及び特性試験

4.1 γ 線用TL局部被曝線量計(指リング)の作製

過去数十年に渡って東海事業所、プルトニウム燃料開発室に於いては、プルトニウム燃料取扱う為のグローブボックス作業に従事する作業員の局部被曝線量(手指)を評価する為、東芝社製のガラス指リング線量計を使用して来た。この線量計は、 γ 線感度も優れており数 mR 以上の変化についての被曝線量を評価することが可能であり、又、集積線量を逐次測定可能である等の利点をもつ。しかし測定に際しガラスの汚れが極度に測定値に影響を及ぼすことからガラスの洗浄条件が最もキーポイントとなる。この為、数回繰返し測定により測定値の信頼度を高める必要があった。又測定評価には、Pre Dose と Post Dose を測定し、その差から評価線量の算出する。更にガラス線量計の光子エネルギー応答特性は、低エネルギー側でかなりの過大応答を示し、エネルギー補償を行なう必要があった。この結果、一連のデータを得るには、かなりの労力と時間を要して評価を行なって来た。

今回これらの改善を行なう目的で、ガラス線量計に変わりうる線量計の模索を行ない TL 指リング線量計について検討した。

前章で試作作製した($\beta + \gamma$)線用 TL 指リング線量計でも γ 線量を評価することは可能であるが、検出限界(DL)が高く又測定精度の安定性も必ずしも良いとは言えず、ガラス線量計に匹敵する線量計とは言えない。この為、 β 線量を除く γ 線量のみを評価しうる TL 指リング線量計についての検討を行なった。

γ 線用 TLD として松下産業機器 KK 製の UD-200 S 素子が全身 γ 線量計として安定性もよく 1 mR 程度の低線量から測定可能である。故にこの TLD を用いた γ 線用 TL 指リング線量計の概念設計を行う。TL 素子は UD-200 S と同じ $\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$ である UD-110 S のガラスアンブル型を使用する。TLD, $\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$ の光子エネルギー応答特性のエネルギー補償は UD-200 S に使用されているシールドフィルターの使用により行う。

主な着用条件は、グローブボックス作業時に伴うものであり、グローブ着用による作業者が不便を感じないもの、又線量計によってグローブの破損しない形状でなければならない。特にグローブ破損に伴うプルトニウム汚染は絶対に避けなければならない。

これらの点を考慮し、以下の様な概念設計を行い作成した。まず指リング線量計の大きさ及び長さをできる限り小さく押さえること。角度はできる限りアールを取ること。指リングのリングは指に違和感を与えず、鋭利でないものとする。リングと本体との接着条件を良くするため、スポット溶接法とすること等に着目して試作した。概念図を図 4.1 に示す。又作成した γ 線用 TL 指リング線量計の写真を写真 4.1 に示す。

尚、現在市販されている松下の商品名は、UD-615 A である。

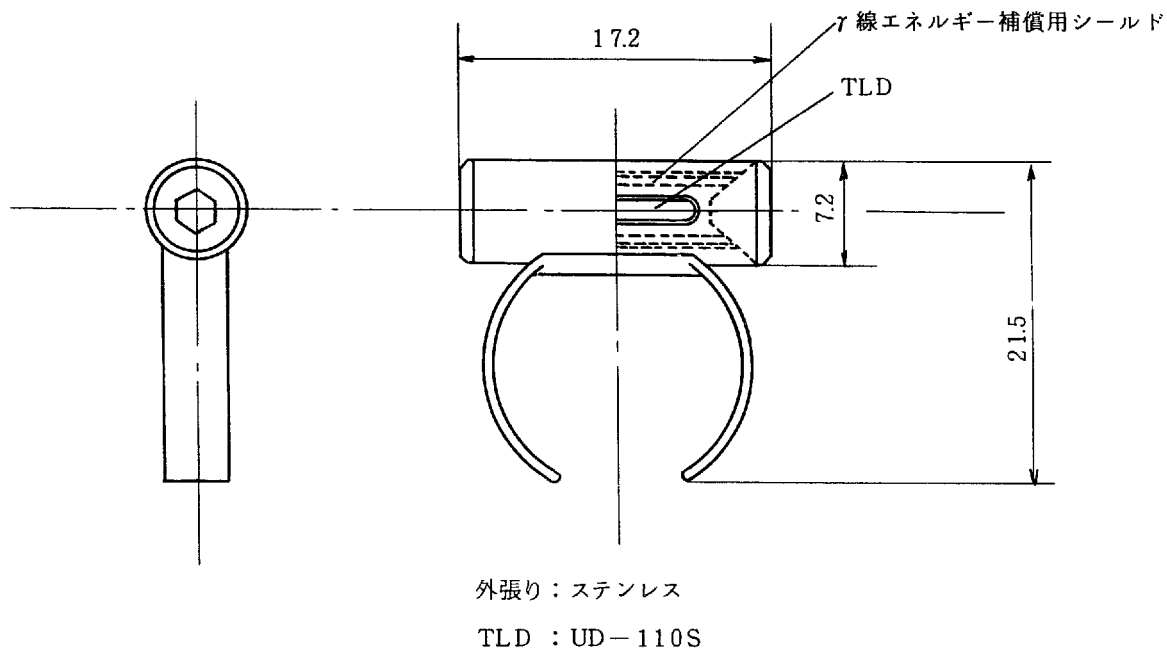


図 4.1 γ 線用 TL 指リング線量計断面図



写真 4.1 γ 線用 TL 指リング線量計 (UD-615A)

4.2 光子エネルギー応答特性及び線量評価式

新しく作製した γ 線用 TL 指リング線量計の光子エネルギー応答特性を得るため、X線及び γ 線照射を行った。X線は実効エネルギー 40 KeV から 220 KeV の範囲で照射を行い、 γ 線は ^{60}Co 100 mCi と ^{137}Cs 100 mCi 線源を使用した。X線発生装置は東芝社製である。得られた結果を表 4.1 及び図 4.2 に示す。

この結果よりプルトニウム燃料部施設での γ 線は主に ^{241}Am 核種から放出される 60 KeV の特性 X 線であり、現場での実効エネルギーは 70 KeV ~ 80 KeV であると想定される。この γ 線エネルギーによる局部破曝線量を算出するには次式によって得られる。

$$D_{\gamma} = \frac{(D_R - BG) \times Q}{1.06} \quad (4.1)$$

D_{γ} : γ 線局部被曝線量 (mrem)

D_R : TLD リーダによる読取線量 (MR)

BG : 測定時に於ける TLD のバック
グラウンドの読取線量 (MR)

Q : TLD 読取線量の ^{60}Co 線量当量換算係数 (mReq. $^{60}\text{Co} - \gamma/\text{MR}$)
= 1.273 mReq. $^{60}\text{Co} - \gamma/\text{MR}$

(1979.9.1 現在)

表 4.1 γ 線用 TL 指リング線量計の γ 線応答

Effective Energy (Kev)	Irradiated Dose D_I (mR)	Average Reading Dose \bar{x} (MR)	S. DEV of x (MR)	Relative Error $S. DEV / \bar{x}$ (%)	^{60}Co Equivalence Dose of \bar{x} (mReq. $^{60}Co-r$)	\bar{x} / D_I Ratio
Xray 40	171.9	105.0	25.7	24.5	133.8	0.78
60	164.2	114.7	14.9	12.9	146.2	0.89
80	98.5	82.7	4.2	5.1	105.4	1.07
100	180.1	150.5	12.2	8.1	191.8	1.07
120	161.3	143.7	9.0	6.3	183.2	1.14
140	236.7	197.1	6.3	3.2	251.2	1.06
220	156.5	146.4	5.8	4.0	186.6	1.19
^{137}Cs 660	228	165.1	8.1	4.9	210.4	0.92
^{60}Co 1250	101.4	79.6	2.9	3.7	101.4	1.00

$f = 1.274 \text{ mReq. } ^{60}Co - r / MR$

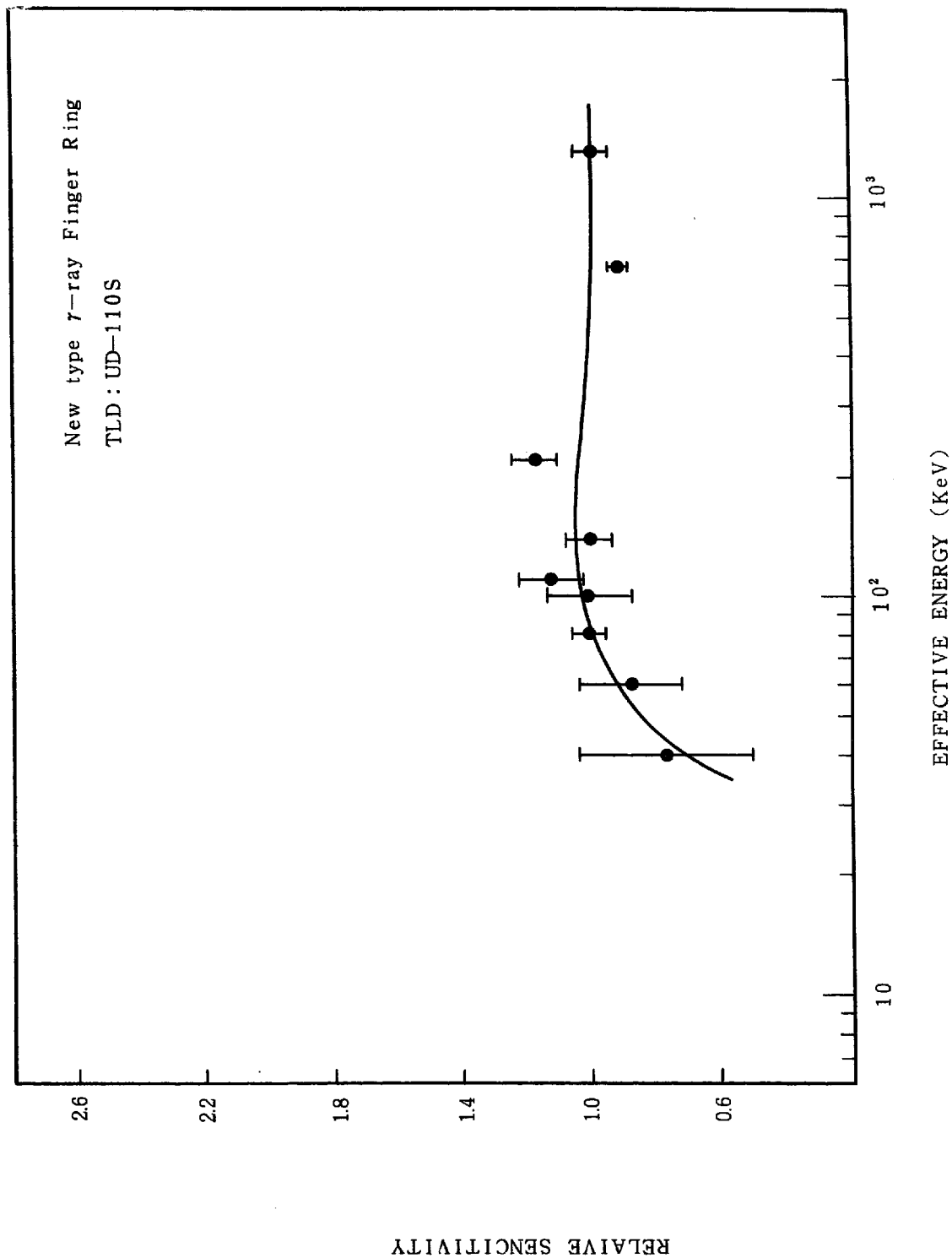


図 4.2 γ 線用 TLD 指リング線量計の実効光子エネルギー応答特性

4.3 BG式の算出

UD-615A指リング線量計ケース内にTLD素子UD-110Sをセットした条件で室内に設置した場合、日数の経過によるBG式算出の為の測定を実施した。

その結果を表4.2及び図4.3に示す。又同時にPbブロックによるシールド内に設置した場合のBGの変動について図4.3に示す。

表4.2 室内での経過日数によるBG読取線量の変動

経過日数 (d)	$\log d$ (D)	読取線量 (y)(mReq. ⁶⁰ Co-r)	相対偏差 (%)	$\log y$ (Y)
1日	0	0.33	19.2	-0.481
2日	0.301	0.65	17.6	-0.187
4日	0.602	1.44	15.0	0.158
5日	0.699	1.52	14.2	0.182
8日	0.903	2.41	4.2	0.382
14日	1.146	4.28	23.5	0.631
22日	1.34	5.16	4.4	0.712

得られた評価式は次の通りである。

室内では

$$y = 0.36 d^{0.91} \quad (4.2)$$

Pbブロック5cm厚のシールド下では

$$y = 0.24 d^{0.68} \quad (4.3)$$

であった。

4.4 作業場での曝射試験

4.2節で得られた評価式を用いてガラス指リング線量計とTL指リング線量計による線量評価の比較検討を行う為、作業場に同一条件で各線量計を設置し照射を行った。

設置箇所を主にグローブボックス表面とし、図4.4及び図4.5に示す。

各線量計の結果を表4.3に示す。この時の設置位置に於ける γ 線量率及び中性子線量率をそれぞれNESCO社808型電離箱式サーベイメータ及びスティヴィクス社製レムカウンタにて測定を行った。この結果も表4.3に示す。これらよりガラス線量計とTL線量計による評価線量の比は約±30%前後で一致が見られた。

尚、幾分ガラス線量計での値の方が高い傾向であった。

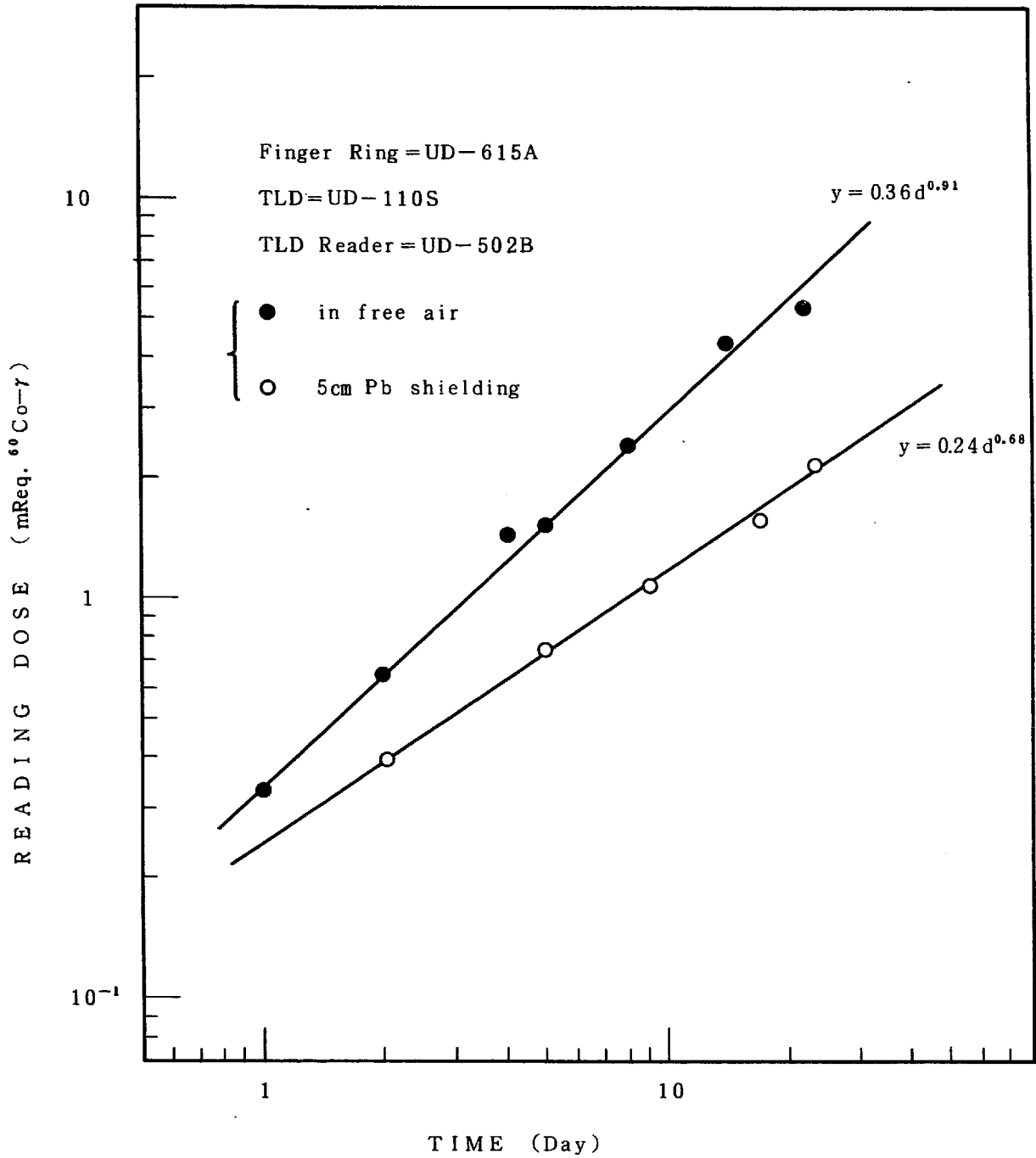


図 4.3 経過日数とバックグラウンド線量の変動

表 4.3 プル燃部に於ける各種 Glove Box 表面でのガラス線量計と TLD 指リングとの測定比較

No	取付け場所	取付け時の表面線量率		核種の形状	線量計の種類	曝射時間 (hr)	平均測定値 (mR)	測定値の 標準偏差(mR)	測定値の 相対誤差(%)	測定値より得た 線量率(mR/hr)	ガラス /TLD 比
		$\dot{\gamma}$ (mR/hr)	n (mrem/hr)								
1	F-101 (Pu-2) GB : D-27	1.0	<0.1	Pu, U混合 酸化物粉末	ガラスリング	163	98.5	36.1	36.6	0.60	0.99
					TLDリング			9.4	9.5	0.61	
2	F-102 (Pu-2) GB : D-19	2.5	<0.1	"	ガラスリング	"	298.5	94.1	31.5	1.83	1.22
					TLDリング			1.8	0.7	1.50	
3	F-103 (Pu-2) GB : D-7	2.3	<0.1	"	ガラスリング	"	236.5	47.4	20.0	1.45	1.13
					TLDリング			7.6	3.6	1.28	
4	A-101 (Pu-2) GB : D-24	2.0	1.0	ペレット	ガラスリング	"	399.5	34.7	8.6	2.45	0.97
					TLDリング			19.0	4.6	2.52	
5	A-102 (Pu-2) GB : D-18	1.2	1.0	"	ガラスリング	"	235.0	15.6	6.6	1.44	1.14
					TLDリング			18.2	8.8	1.27	
6	A-103 (Pu-2) GB : D-8	2.4	0.1	PuO ₂ 粉末 UO ₂ 粉末	ガラスリング	"	198.5	13.4	6.8	1.21	1.05
					TLDリング			3.1	1.7	1.16	
7	A-103 (Pu-2) GB : D-2	0.8	<0.1	Pu, U混合 酸化物粉末	ガラスリング	"	46.0	15.6	33.8	0.28	0.53
					TLDリング			11.1	12.9	0.53	
8	A-105 (Pu-2) GB : A-5	<0.1	<0.1	"	ガラスリング	"	0	-	-	-	~1
					TLDリング			0.01	4.3	0.00	
9	R-125 (Pu-1) GB : 81	2.8	<0.1	Pu硝酸溶液	ガラスリング	"	234.0	5.7	2.4	1.44	0.87
					TLDリング			16.5	6.1	1.65	
10	R-125 (Pu-1) GB : 9B	4.0	<0.1	Pu, U混合 酸化物粉末	ガラスリング	"	459.0	38.2	8.3	2.82	1.05
					TLDリング			84.3	19.2	2.67	

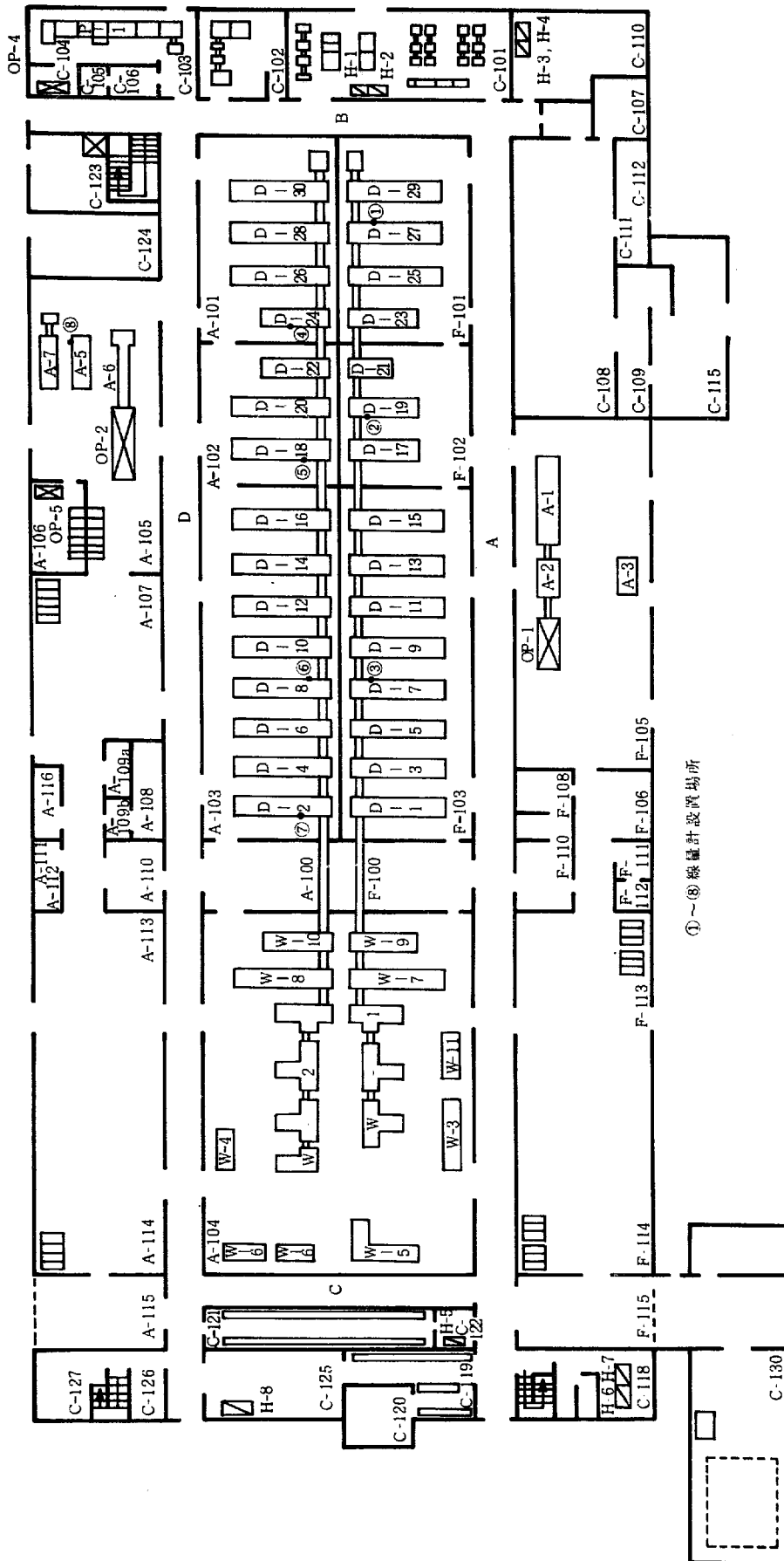


図 4.4 プルトニウム燃料第2開発室1階(平面図)

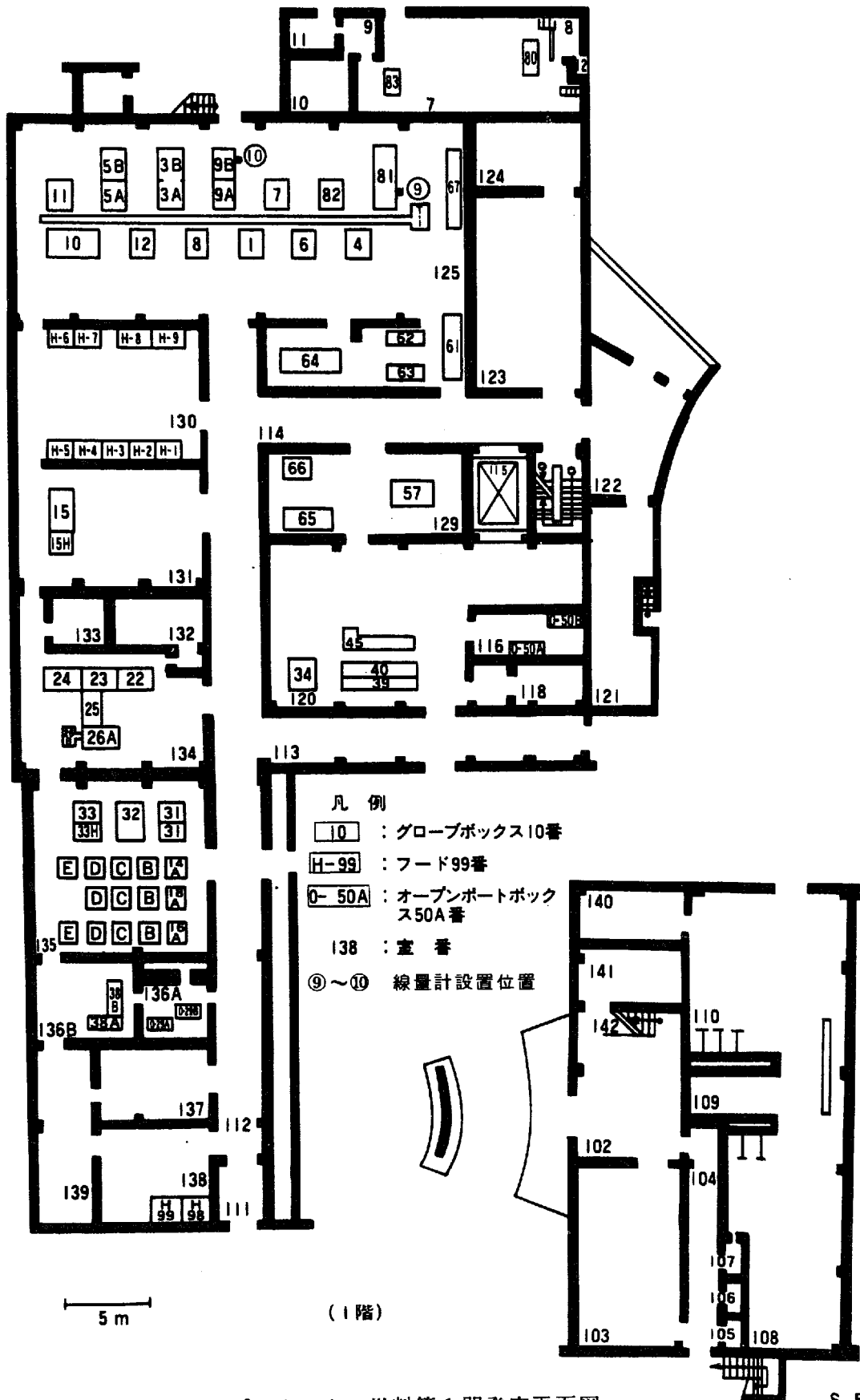


図 4.5 プルトニウム燃料第1開発室平面図

S. 53. 4. 1

5. 結 論

β 線、 γ 線混在場に於いて分離測定による局部被曝線量を評価する為、従来から使用してきた指リング線量計 (UD-611F) の問題点を改良し、新たに ($\beta + \gamma$) 線用 TL 指リング線量計の作製を行った。この結果次の改良点が得られた。又これら改良作製した TL 指リング線量計を用いて、 β 線、 γ 線混在場での β 線吸収線量評価式を算出した。

- ① 線量計リングの折れ及びリングと線量計本体とのはずれについてはリングケース及びリングをステンレス製とし、リングと本体とはアークスポット溶接法に切換えることにより従来の接着剤法と比較し充分使用に耐えるものが得られた。又リング折れについても見られなくなった。
- ② 防水性については、ケースをステンレス製とし上蓋と本体とはねじ込み方式及びゴムパッキングの使用により完全に防水性を維持することが可能となった。
- ③ 外部要因による TLD 素子へのトリボルミネセンスの原因については内部構造の変更によって β 線 γ 線分離用シールド材の囲りに支持リングを作製し、上部からの押えによる TLD 素子への圧着に起因する機械的トリボルミネセンスの発生を減少させることが可能となった。
- ④ β 線、 γ 線分離測定用シールド材からの二次放射線発生による TLD 素子発生による TLD 素子への影響については、シールド材の特性試験の結果に基づいて $Al 0.5mm^t + Fe 1.5mm^t + Al 0.5mm^t$ のサンドウィッチタイプ構成のシールド材により二次放射線の発生を押えることが可能となった。

特にこの二次放射線の成分として一次放射線の後方散乱線が優位であると想定された。

又、改良したシールド材の使用により、高エネルギー β 線照射による TLD - 3 への発光寄与量が無視しえる程度になった。特に $^{90}Sr - Y$ β 線照射による制動放射線による TLD - 3 への発光寄与量が無視しえることが確認できた。

これより β 線、 γ 線混在場での分離性能が向上し、線量評価もより容易となった。

- ⑤ ステンレスケースからの二次放射線発生による TLD - 3 への影響は、TLD - 3 とステンレスケースとの間に $0.7mm^t$ のテフロン吸収材をセットすることで無視しえることが確認できた。
- ⑥ 各種のエネルギーの β 線が混在する場では、 β 線実効最大エネルギーの概念を導入し、そのエネルギーでの各 TLD 素子の β 線感度を用いることで β 線吸収線量評価の精度を向上しえることが確認できた。
- ⑦ $40mg/m^2$ 下での $^{90}Sr - Y$ 単一核種による β 線吸収線量の検出限界は、 20 ミリラド $\pm 100\%$ まで測定可能であることが確認できた。

次に γ 線用局部被曝線量計として従来から使用してきたガラス指リング線量計に換りうる γ 線用

TL 指リング線量計の作製を実施した。この線量計は、ガラス線量計と比較して迅速にかつより精度高く測定可能であることが確認できた。光子エネルギー応答特性は UD-200STLD 相当に匹敵するレスポンスが確認され、低エネルギー側での TLD の過大応答がなく 1 近傍に補償されていることを確認できた。

測定精度及び検出限界として $5\text{mR} \pm 50\%$ までの測定が充分行えることを確認できた。

以上 β 線、 γ 線による局部被曝線量を評価しうる指リング線量計を得ることができた。

今後、これらの指リング線量計を用いることで作業者の局部被曝管理に充分適用しうるであろうと考える。

附A 各種シールド材の γ 線に対する質量吸収係数

表 A-1 μ_x/ρ データ (その1) Ref. NBS-29⁽⁴⁴⁾

Energy (MeV)	μ_x/ρ (cm ² /g)									
	¹ ₁ H	⁶ C	⁸ O	¹¹ Na	¹³ Al	¹⁶ S	²⁰ Ca	²⁶ Fe	²⁹ Cu	⁵⁰ Sn
0.01	0.00991	1.98	5.39	14.9	25.6	50.1	95.4	171.0	223.0	139.0
0.015	0.0110	0.538	1.44	4.20	7.48	15.0	29.4	55.5	73.2	45.2
0.02	0.0136	0.208	0.575	1.70	3.06	6.24	12.4	24.9	32.8	20.0
0.03	0.0186	0.0596	0.165	0.475	0.868	1.77	3.65	7.72	10.5	40.5
0.04	0.0231	0.0307	0.0734	0.199	0.357	0.729	1.51	3.31	4.56	18.8
0.05	0.0271	0.0234	0.0438	0.106	0.184	0.372	0.770	1.69	2.35	10.2
0.06	0.0305	0.0212	0.0322	0.0669	0.111	0.218	0.447	0.989	1.39	6.20
0.08	0.0362	0.0205	0.0249	0.0382	0.0562	0.101	0.197	0.422	0.593	2.78
0.10	0.0406	0.0216	0.0237	0.0297	0.0386	0.0610	0.109	0.223	0.311	1.49
0.15	0.0481	0.0246	0.0251	0.0260	0.0286	0.0357	0.0498	0.0821	0.108	0.485
0.20	0.0525	0.0266	0.0268	0.0265	0.0276	0.0311	0.0371	0.0498	0.0602	0.226
0.30	0.0569	0.0288	0.0288	0.0278	0.0283	0.0300	0.0318	0.0342	0.0371	0.0892
0.40	0.0586	0.0296	0.0296	0.0284	0.0287	0.0301	0.0309	0.0308	0.0318	0.0550
0.50	0.0590	0.0298	0.0298	0.0285	0.0288	0.0300	0.0304	0.0295	0.0298	0.0428
0.60	0.0587	0.0297	0.0296	0.0284	0.0286	0.0298	0.0300	0.0287	0.0287	0.0361
0.80	0.0574	0.0290	0.0289	0.0277	0.0279	0.0290	0.0291	0.0275	0.0273	0.0302
1.00	0.0555	0.0280	0.0280	0.0268	0.0270	0.0280	0.0281	0.0264	0.0261	0.0271
1.50	0.0507	0.0257	0.0257	0.0346	0.0248	0.0258	0.0259	0.0243	0.0240	0.0239
2.00	0.0465	0.0238	0.0239	0.0230	0.0233	0.0243	0.0245	0.0233	0.0230	0.0234
3.00	0.0399	0.0210	0.0213	0.0208	0.0213	0.0225	0.0231	0.0225	0.0225	0.0243
4.00	0.0353	0.0191	0.0196	0.0195	0.0201	0.0216	0.0226	0.0225	0.0228	0.0259
5.00	0.0319	0.0178	0.0185	0.0186	0.0194	0.0211	0.0224	0.0228	0.0233	0.0275
6.00	0.0293	0.0169	0.0177	0.0181	0.0190	0.0209	0.0225	0.0232	0.0239	0.0290
8.00	0.0254	0.0156	0.0166	0.0174	0.0186	0.0208	0.0229	0.0242	0.0251	0.0319
10.0	0.0228	0.0147	0.0160	0.0171	0.0185	0.0210	0.0234	0.0252	0.0264	0.0344

[$\mu_x/\rho \doteq \mu_a/\rho$]

表 A-2 μ_x/ρ データ (その2)

NBS - 29⁽⁴⁴⁾

Energy (MeV)	μ_x/ρ [cm ² /g]				テフロン		
	⁸² Pb	⁹² U	H ₂ O	Air	^(0.136) C	^(0.764) F	CF ₂
0.01	128	173	4.79	4.63	0.269	6.51	6.78
0.015	112.0	60.2	1.28	1.27	0.0732	1.81	1.89
0.02	83.3	68.3	0.512	0.512	0.0283	0.704	0.732
0.03	28.2	39.4	0.149	0.148	8.11-03	0.191	0.199
0.04	13.0	18.6	0.0678	0.0669	4.18 "	0.0799	0.0841
0.05	7.10	10.3	0.0419	0.0406	3.18 "	0.0452	0.0484
0.06	4.31	6.34	0.0320	0.0305	2.88 "	0.0315	0.0344
0.08	1.96	2.94	0.0262	0.0243	2.79 "	0.0222	0.0250
0.10	5.12	1.61	0.0256	0.0234	2.94 "	0.0203	0.0232
0.15	1.80	2.39	0.0277	0.0250	3.35 "	0.0208	0.0241
0.20	0.869	1.15	0.0297	0.0268	3.62 "	0.0220	0.0256
0.30	0.322	0.425	0.0319	0.0288	3.92 "	0.0236	0.0275
0.40	0.168	0.222	0.0328	0.0295	4.03 "	0.0242	0.0282
0.50	0.108	0.140	0.0330	0.0297	4.05 "	0.0243	0.0283
0.60	0.0793	0.100	0.0329	0.0296	4.04 "	0.0243	0.0283
0.80	0.0525	0.064	0.0321	0.0289	3.94 "	0.0237	0.0276
1.00	0.0407	0.0479	0.0311	0.0280	3.81 "	0.0229	0.0267
1.50	0.0303	0.0337	0.0285	0.0257	3.50 "	0.0210	0.0245
2.0	0.0286	0.0310	0.0264	0.0238	3.24 "	0.0195	0.0228
3.0	0.0300	0.0322	0.0234	0.0212	2.86 "	0.0175	0.0204
4.0	0.0324	0.0346	0.0214	0.0194	2.59 "	0.0162	0.0188
5.0	0.0350	0.0372	0.0200	0.0182	2.42 "	0.0154	0.0178
6.0	0.0372	0.0394	0.0190	0.0174	2.30 "	0.0148	0.0171
8.0	0.0411	0.0433	0.0176	0.0162	2.12 "	0.0140	0.0161
10.0	0.0446	0.0468	0.0168	0.0156	2.00 "	0.0136	0.0156

表 A-3 μ_x/ρ データ (LA-3753)⁽⁴⁵⁾ (その3)

Energy (MeV)	μ_x/ρ (cm ² /g)					^(0.143) H	^(0.857) C	CH ₂
	Li	F	Sr	Ba	Ta			
0.01	0.142	7.54	59.7	186.0	241.0	1.42-03	1.70	1.70
0.015	0.0356	2.10	18.7	61.0	130.0	1.57 "	0.461	0.463
0.02	0.0167	0.815	62.9	27.8	60.9	1.94 "	0.178	0.180
0.03	0.0106	0.222	20.6	8.95	20.4	2.66 "	0.0511	0.0538
0.04	0.0109	0.0925	9.28	24.1	9.42	3.29 "	0.0263	0.0296
0.05	0.0122	0.0523	5.00	13.2	5.09	3.88 "	0.0201	0.0240
0.06	0.0135	0.0365	2.97	8.11	3.07	4.36 "	0.0182	0.0226
0.08	0.0158	0.0257	1.29	3.69	7.19	5.18 "	0.0176	0.0228
0.10	0.0177	0.0235	0.694	1.99	3.96	5.81 "	0.0185	0.0243
0.15	0.0209	0.0241	0.223	0.658	1.36	6.88 "	0.0211	0.0280
0.20	0.0229	0.0255	0.109	0.307	0.642	7.51 "	0.0228	0.0303
0.30	0.0248	0.0273	0.0513	0.116	0.236	8.13 "	0.0247	0.0328
0.40	0.0255	0.0280	0.0377	0.0675	0.124	8.38 "	0.0254	0.0338
0.50	0.0257	0.0281	0.0326	0.0487	0.0822	8.44 "	0.0255	0.0339
0.60	0.0256	0.0281	0.0301	0.0399	0.0612	8.39 "	0.0255	0.0339
0.80	0.0250	0.0274	0.0274	0.0316	0.0429	8.20-03	0.0249	0.0331
1.00	0.0242	0.0265	0.0256	0.0278	0.0349	7.94 "	0.0240	0.0319
1.50	0.0221	0.0243	0.0234	0.0241	0.0278	7.25 "	0.0220	0.0293
2.00	0.0204	0.0226	0.0226	0.0235	0.0267	6.65 "	0.0204	0.0270
3.00	0.0177	0.0203	0.0227	0.0246	0.0281	5.71 "	0.0180	0.0237
4.00	0.0159	0.0188	0.0238	0.0267	0.0307	5.05 "	0.0164	0.0215
5.00	0.0146	0.0178	0.0249	0.0286	0.0330	4.56 "	0.0153	0.0199
6.00	0.0135	0.0171	0.0259	0.0302	0.0349	4.19 "	0.0145	0.0187
8.00	0.0120	0.0162	0.0276	0.0331	0.0386	3.62 "	0.0134	0.0170
10.00	0.0110	0.0157	0.0296	0.0358	0.0426	3.26 "	0.0126	0.0159

表 A-4 μ_x/ρ データ (その4)

Energy (MeV)	μ_x/ρ (cm^2/g)										
	(Li)	(F)	LiF	^(0.470) O	^(0.236) S	^(0.294) Ca	CaSO ₄	^(0.274) O	^(0.137) S	^(0.588) Ba	BaSO ₄
0.01	0.0381	5.52	5.56	2.533	11.82	28.0	42.4	1.48	6.86	109.0	117
0.015	9.54-03	1.54	1.55	0.677	3.54	8.64	12.9	0.395	2.05	35.9	38.3
0.02	4.48-03	0.597	0.601	0.270	1.473	3.65	5.39	0.157	0.855	16.3	17.3
0.03	2.84	0.163	0.166	0.0776	0.418	1.07	1.57	0.0452	0.243	5.26	5.55
0.04	2.92	0.0677	0.0706	0.0345	0.172	0.444	0.650	0.0201	0.0998	14.2	14.3
0.05	3.27	0.0383	0.0416	0.0206	0.0878	0.226	0.335	0.0120	0.0510	7.76	7.82
0.06	3.62	0.0267	0.0303	0.0151	0.0514	0.131	0.198	8.80-03	0.0298	4.77	4.81
0.08	4.23	0.0188	0.0230	0.0117	0.0238	0.0579	0.0934	6.82 "	0.0138	2.17	2.19
0.10	4.74	0.0172	0.0219	0.0111	0.0144	0.0320	0.0575	6.47 "	8.36-03	1.17	1.18
0.15	5.60	0.0176	0.0232	0.0118	8.43-03	0.0146	0.0348	6.88 "	4.89 "	0.387	0.399
0.20	6.14	0.0187	0.0248	0.0126	7.34-03	0.0109	0.0308	7.35 "	4.26 "	0.181	0.193
0.30	6.64	0.0200	0.0266	0.0135	7.08-03	9.35-03	0.0299	7.87 "	4.11 "	0.0682	0.0802
0.40	6.83	0.0205	0.0273	0.0139	7.10-03	9.08-03	0.0301	8.10 "	4.12 "	0.0397	0.0519
0.50	6.89	0.0206	0.0275	0.0140	7.08-03	8.94-03	0.0300	8.16 "	4.11 "	0.0286	0.0409
0.60	6.86	0.0206	0.0275	0.0139	7.03-03	8.82-03	0.0298	8.10 "	4.08 "	0.0235	0.0357
0.80	6.70	0.0201	0.0268	0.0136	6.84-03	8.56-03	0.0290	7.93 "	3.97 "	0.0186	0.0305
1.00	6.49	0.0194	0.0259	0.0132	6.61-03	8.26-03	0.0281	7.70 "	3.84 "	0.0163	0.0278
1.50	5.92	0.0178	0.0237	0.0121	6.09-03	7.61-03	0.0258	7.05 "	3.54 "	0.0142	0.0248
2.00	5.47	0.0165	0.0220	0.0112	5.73-03	7.20-03	0.0241	6.53 "	3.33 "	0.0138	0.0236
3.00	4.74	0.0149	0.0196	0.0100	5.31-03	6.79-03	0.0221	5.83 "	3.08 "	0.0145	0.0234
4.00	4.26	0.0138	0.0181	9.21-03	5.10-03	6.64-03	0.0210	5.37 "	2.96 "	0.0157	0.0240
5.00	3.92	0.0130	0.0169	8.70-03	4.98-03	6.59-03	0.0203	5.07 "	2.89 "	0.0168	0.0248
6.00	3.62	0.0125	0.0161	8.32-03	4.93-03	6.62-03	0.0199	4.85 "	2.86 "	0.0178	0.0255
8.00	3.22	0.0119	0.0151	7.80-03	4.91-03	6.73-03	0.0194	4.55 "	2.85 "	0.0195	0.0269
10.00	2.95	0.0115	0.0144	7.52-03	4.96-03	6.88-03	0.0194	4.38 "	2.88 "	0.0211	0.0284

Li = 6.94 , O = 16.00 Ca = 40.08 Ba = 137.36
 F = 19.00 , S = 32.066 Sr = 87.63

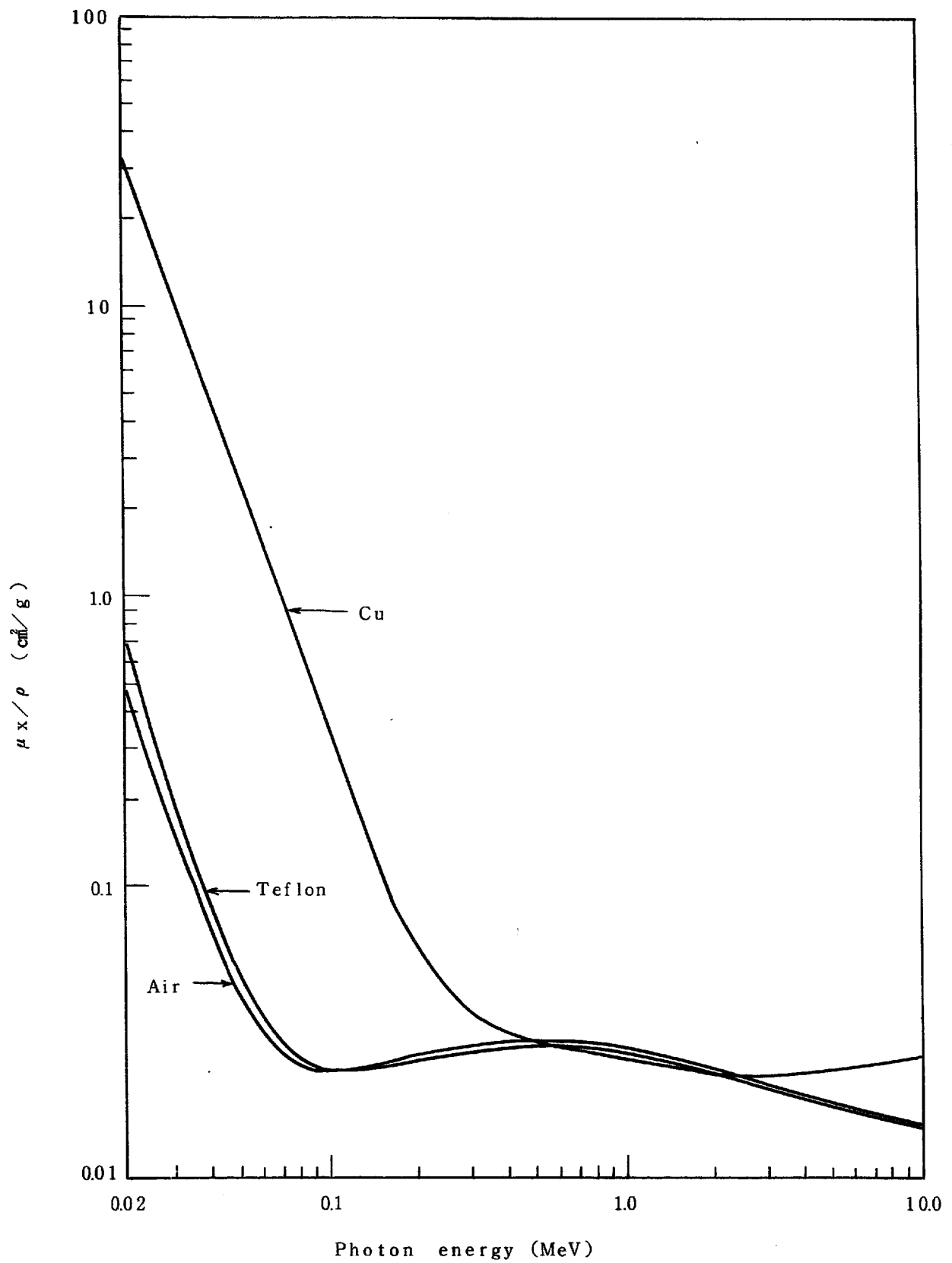


図 A. 1 光子エネルギーによる質量吸収係数曲線

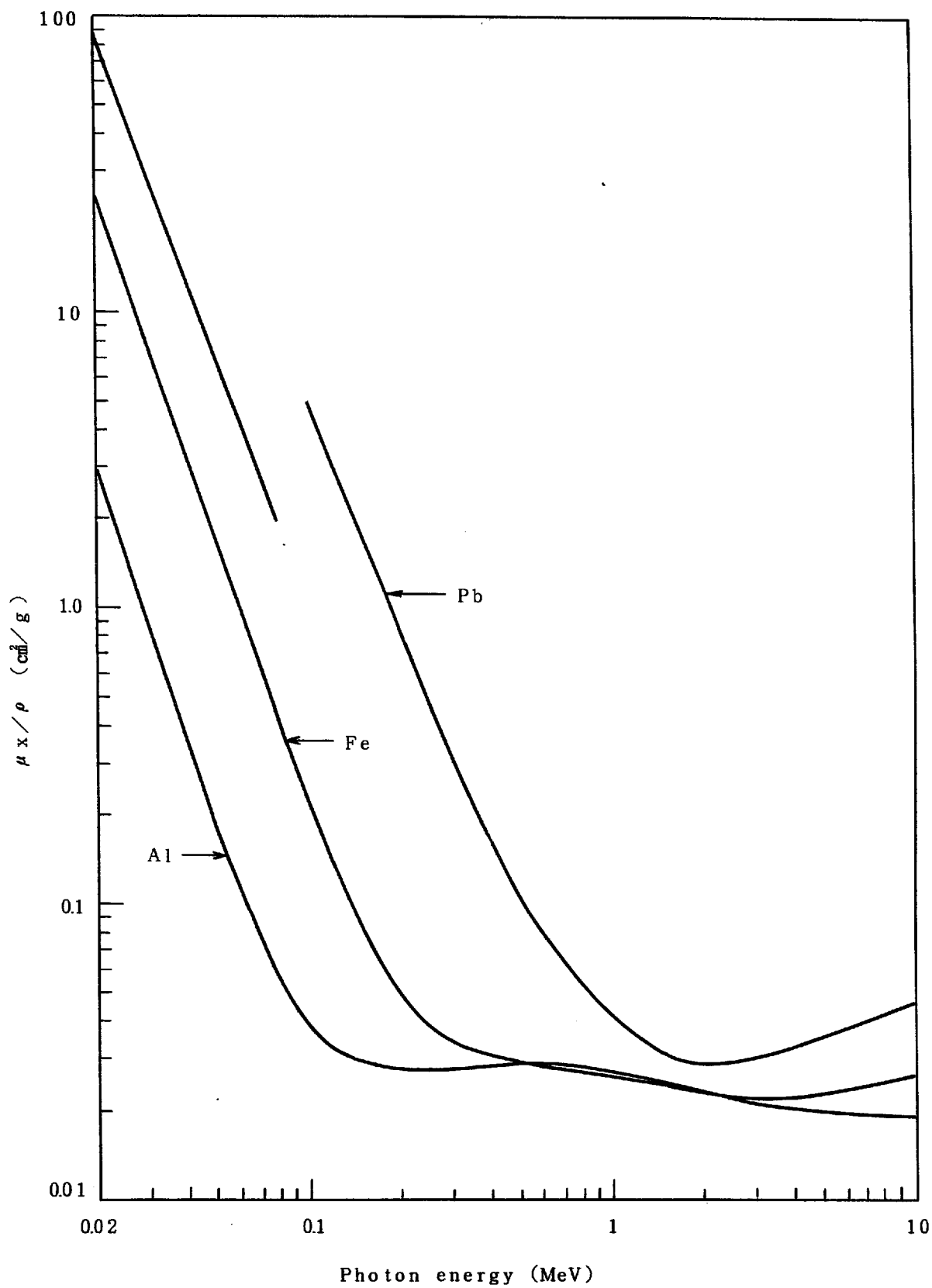
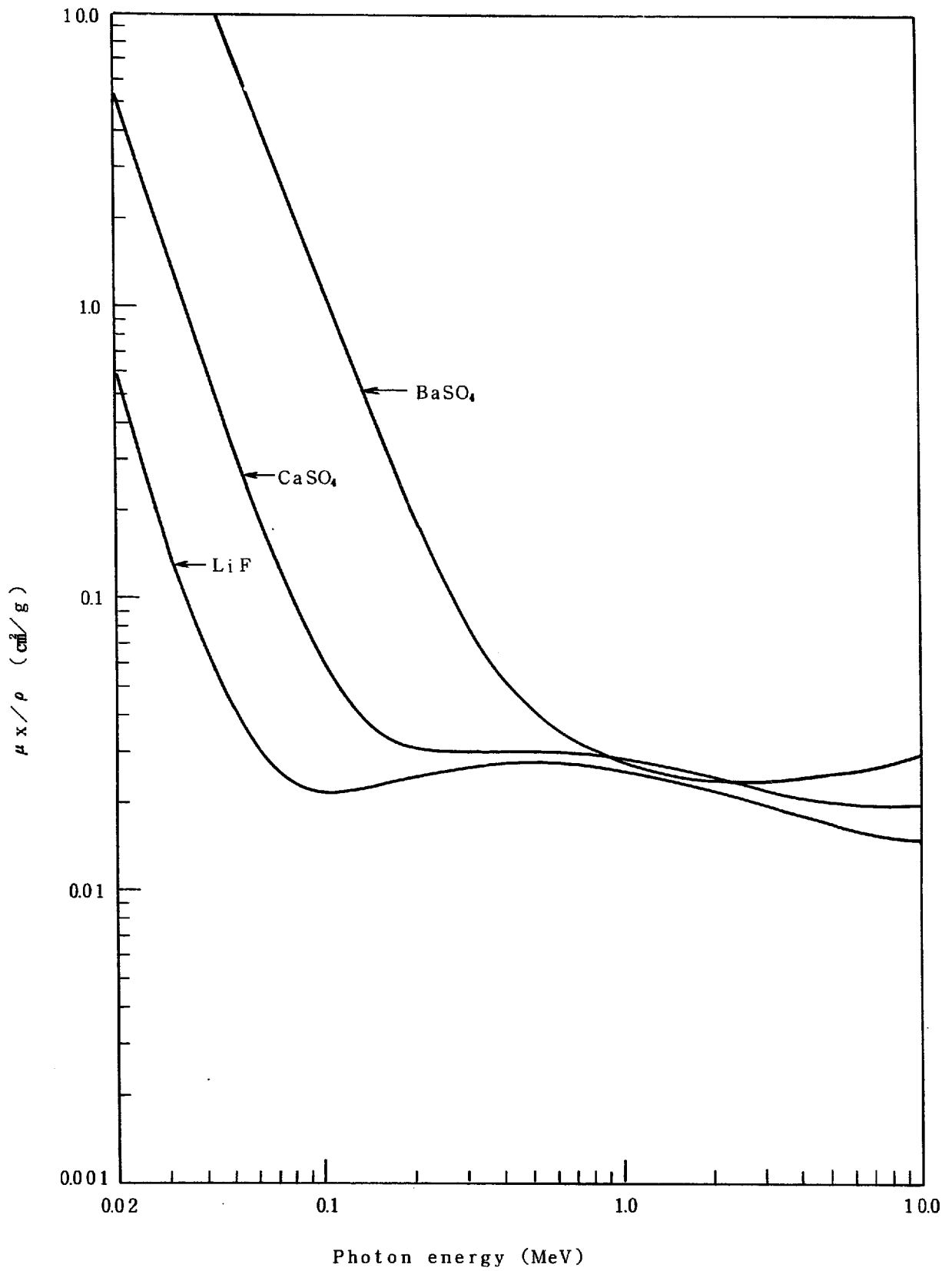


図 A. 2 光子エネルギーによる質量吸収係数曲線



図A. 3 光子エネルギーによる質量吸収係数曲線

附B β 線のしゃへい計算法及び β 線吸収線量評価式

B β 線しゃへい計算法及び β 線吸収線量評価式 (34)(42)

β 線源のしゃへいを伴う吸収線量の評価及び人体の汚染等による皮膚 β 線量の評価を行う為の計算法について述べる。

吸収線量率の基本式は (B.1) 式で与えられる。

$$D \text{ (rad/hr)} = g \cdot E \cdot \phi \quad (\text{B.1})$$

g : 最大エネルギーに相当する変換係数

E : 平均エネルギー (MeV)

ϕ : β 線粒子束

ϕ は以下に述べる計算体系によって求められる。

平均エネルギーが不明の場合は最大エネルギーの $1/3$ を平均エネルギーと仮定して用いる。

変換係数 g はエネルギー粒子束 $E\phi$ [MeV/sec cm^2] を吸収線量率 D [rad/hr] に変換する為の係数である。

B.1 変換係数(g)の求め方

変換係数 (g) の求め方について以下に検討する。

平均エネルギー E MeV, 最大エネルギー E_m MeV の β 線粒子が, 単位面積時間当り ϕ ケ (1/sec cm^2) 入射した場合の吸収線量率を求める。

核種によっては何種類かのエネルギーを放出している場合は平均化を行う。放出率を f_i とすると

$$\bar{E}_m = \frac{\sum_i E_{mi} \cdot f_i}{\sum_i f_i} \quad (\text{B.2})$$

$$\bar{E} = \frac{\sum E_i \cdot f_i}{\sum f_i} \quad (\text{B.3})$$

$$\approx \frac{1}{3} \bar{E}_m$$

吸収係数 μ [cm 2 /g] は最大エネルギー E_m より Gleason et al. の式を用いて得られる。

$$\mu = 17 E_m^{-1.43} \quad [\text{cm}^2/\text{g}] \quad (\text{B.4})$$

次に入射するエネルギー束を求める。エネルギー束はエネルギー E と粒子数 ϕ の積より得られる。

$$\phi_E = \phi E \quad [\text{MeV}/\text{sec cm}^2] \quad (\text{B.5})$$

よって吸収されるエネルギーは

$$\mu \phi E = 17 E m^{-1.43} \phi E \quad [\text{MeV}/\text{sec} \cdot \text{g}] \quad (\text{B. 6})$$

単位の変換を行う。

$$\begin{aligned} \mu \phi E \left[\frac{\text{MeV}}{\text{sec} \cdot \text{g}} \right] &= \mu \phi E \left[\frac{\text{MeV}}{\text{sec} \cdot \text{g}} \right] \times 1.66 \times 10^{-6} \left[\frac{\text{erg}}{\text{MeV}} \right] \times 60^2 \left[\frac{\text{sec}}{\text{hr}} \right] \\ &= 5.76 \times 10^{-3} \mu \phi E \left[\frac{\text{erg}}{\text{hr} \cdot \text{g}} \right] \\ &= 9.80 \times 10^{-2} E m^{-1.43} \phi E \left[\frac{\text{erg}}{\text{hr} \cdot \text{g}} \right] \end{aligned}$$

故に吸収線量率は

$$\begin{aligned} D \left[\text{rad}/\text{hr} \right] &= \left(9.80 \times 10^{-2} E m^{-1.43} \right) \phi E \left[\frac{\text{erg}}{\text{hr} \cdot \text{g}} \right] \cdot \frac{1}{100} \left[\frac{\text{rad}}{\text{erg}} \cdot \text{g} \right] \\ &= \left(9.80 \times 10^{-4} E m^{-1.43} \right) \phi E \quad (\text{B. 7}) \end{aligned}$$

となる。ここで () 内を変換係数 g として定義する。 β 線の最大エネルギー E_m に対して g との関係を図 B.1 に示す。

B.2 β 線粒子束の計算

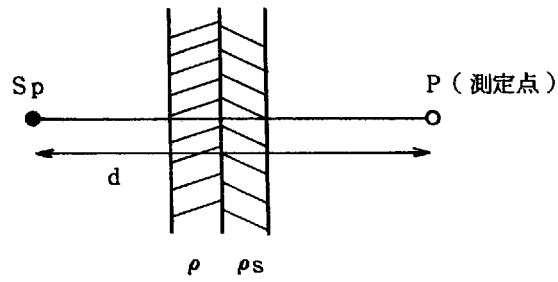
β 線粒子束の算出は β 線源の形状によって異なる。今、5 種類の形状について β 線粒子束 ϕ を求める。

ここで粒子束の減衰は γ 線と同様に減衰核積分法で取扱う。又、遮蔽効果の減衰項は $e^{-\mu r}$ とし指数関係が用いられると仮定する。

但し、 β 線の最大エネルギーは有限であり、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えないが指数関数形を用いると最大飛程以遠でもエネルギーの吸収があるという不合理が生じるが最大飛程以遠で見掛け上吸収されるエネルギーの割合は平均約 0.1% 程度で実質的には問題がない。

更に、 β 線は物負中での減衰が大きいため積分計算で遠距離からの効果を見捨てる計算の簡略化を見る。

B.2.1 点線源からのβ線粒子束



$$\phi = \frac{Sp \cdot C}{4\pi d^2} e^{-\mu(\rho_s + \rho + \rho_{ad})} \quad [1/\text{sec} \cdot \text{cm}] \quad (\text{B. 8})$$

$$\mu = 17E\bar{m}^{-1.43}$$

Sp : 点線源の強さ mCi

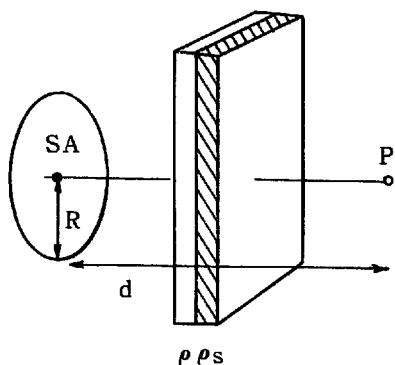
ρ : g/cm² } 媒質の面密度
 ρ_s : g/cm² }

ρ_a : 0.00129 g/cm³ (空気の密度)

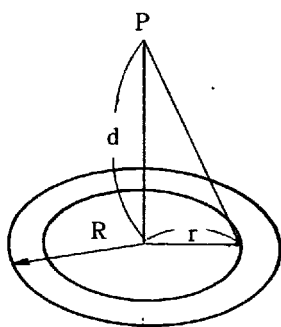
C : 3.7×10^7

ここで皮フ表面でのφを求めるときは、 $\rho + \rho_s = \rho_{\text{tissue}} = 0.007$ (g/cm²) を代入する。

B. 2.2 平面線源からのβ線粒子束（遮蔽体を含む）



Em	MeV
ρ	g/cm ²
ρ _s	g/cm ²
ρ _a	g/cm ³
S _A	mCi
d	cm
R	cm
ρ _a	air の ρ _a = 0.00129 g/cm ³
S	mCi



円板上で半径 r の微小円線源を考える。

全放射能が S より

$$dS = S' 2\pi r dr$$

$$S' = S / \pi R^2$$

P 点での微小粒子束 $d\phi$ は

$$d\phi = \frac{S' 2\pi r dr \cdot C}{4\pi(r^2 + d^2)} e^{-\mu \rho_a \sqrt{r^2 + d^2}} \quad (\text{B. 9})$$

これを r について 0 から R まで積分を行う。

ここで r を変数変換を行う。

$$y = \mu \rho_a \sqrt{r^2 + d^2} \quad \text{とおく}$$

$$dy = \mu \rho_a (r^2 + d^2)^{-\frac{1}{2}} r dr$$

$$\therefore d\phi = \frac{S' C}{2} \frac{e^{-y}}{y} dy$$

r が 0 から R までより, y は $\mu\rho_a d$ から $\mu\rho_a \sqrt{R^2 + d^2}$ となる。従って粒子束 ϕ は

$$\phi = \int_{\mu\rho_a d}^{\mu\rho_a \sqrt{R^2 + d^2}} \frac{S' C}{2} \frac{e^{-y}}{y} dy \quad (\text{B.10})$$

ここで $E_1(h) = \int_h^\infty \frac{e^{-y}}{y} dy$ (図 B.2 参照)
とすると

$$\phi = \frac{S' C}{2} \left\{ E_1(h_1) - E_1(h_2) \right\} \quad (\text{B.11})$$

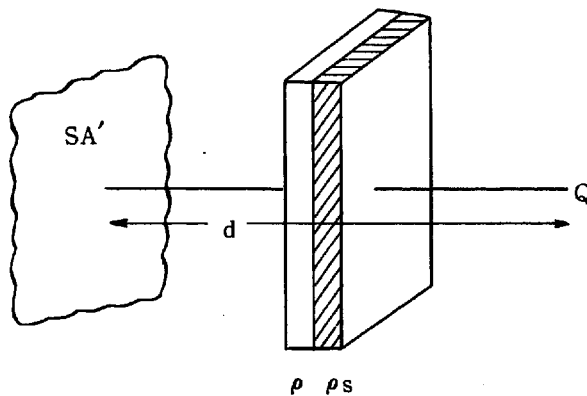
但し $h_1 = \mu\rho_a d$

$$h_2 = \mu\rho_a d \sqrt{1 + \left(\frac{R}{d}\right)^2}$$

更に遮蔽体による減衰を考慮して

$$\phi = \frac{S' C}{2} e^{-\mu(\rho_s + \rho)} \left\{ E_1(h_1) - E_1(h_2) \right\} \quad (\text{B.12})$$

B.2.3 無限平板線源による β 線粒子束



E_m	MeV
ρ	g/cm^2
ρ_s	g/cm^2
ρ_a	$g/cm^3 = 0.00129 g/cm^3$
d	cm

平面線源の式より

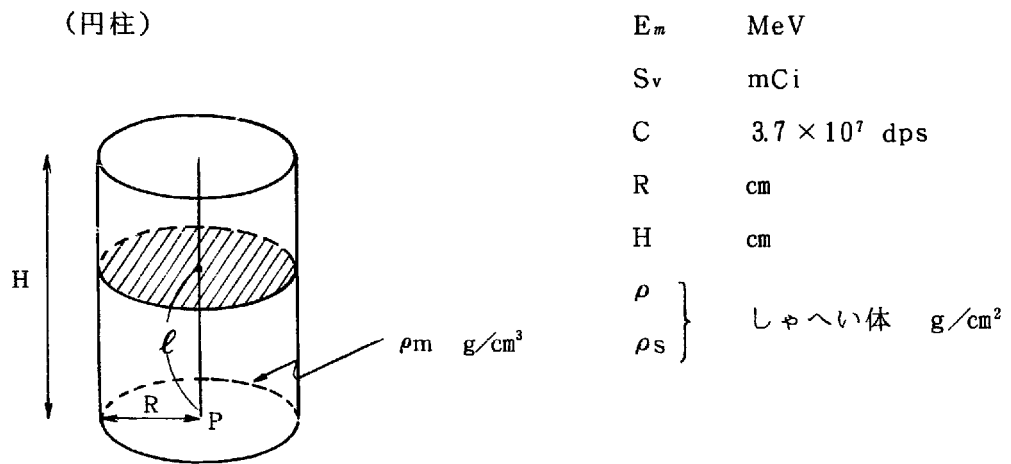
$$\phi = \frac{S' C}{2} e^{-\mu(\rho_s + \rho)} \int_{\mu \rho_s d}^{\mu \rho_s d} \sqrt{1 + \left(\frac{R}{d}\right)^2} \frac{e^{-y}}{y} dy \quad (\text{B.13})$$

無限平板では $R \rightarrow \infty$ となる。

$$\begin{aligned} \therefore \phi &= \frac{S' C}{2} e^{-\mu(\rho_s + \rho)} \int_{\mu \rho_s d}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy \\ &= \frac{S' C}{2} e^{-\mu(\rho_s + \rho)} E_1(h) \end{aligned} \quad (\text{B.14})$$

但し $h = \mu \rho_s d$

B 2.4 体積線源からのβ粒子束（遮蔽体あり）



体積線源を円柱と仮定する。円柱の底部の中心P点でのβ粒子束を求める。

円柱を円板線源の積重ねとすると、B.2.2節の(B.11)式を用いることが可能である。

円柱底部からl離れた円板線源による粒子束dφは

$$d\phi = \frac{dS \cdot C}{2} \int_{\mu \rho_m l}^{\mu \rho_m l} \sqrt{R^2 + l^2} \frac{e^{-y}}{y} dy \quad (\text{B.15})$$

但し

$$\begin{aligned}
 dS &= \frac{Sv}{\pi R^2 \cdot H} d\ell \\
 &= S'v d\ell \\
 \therefore d\phi &= \frac{S'v C}{2} d\ell \int_{\mu\rho_m\ell}^{\mu\rho_m\sqrt{R^2+\ell^2}} \frac{e^{-y}}{y} dy
 \end{aligned} \tag{B.16}$$

ここで ℓ について0からHまで積分を行う。

$$\phi = \frac{S'v C}{2} \int_0^H d\ell \int_{\mu\rho_m\ell}^{\mu\rho_m\sqrt{R^2+\ell^2}} \frac{e^{-y}}{y} dy \tag{B.17}$$

よって積分区間は ℓ について0からHまでであるから x は0から $\mu\rho_m H$ である。

$$\begin{aligned}
 \phi &= \frac{S'v C}{2\mu\rho_m} \int_0^{\mu\rho_m H} dx \int_0^{\sqrt{(\mu\rho_m R)^2+x^2}} \frac{e^{-y}}{y} dy \\
 &= \frac{S'v C}{2\mu\rho_m} \int_0^{\mu\rho_m H} \left\{ E_1(x) - E_1\left(\sqrt{(\mu\rho_m R)^2+x^2}\right) \right\} dx
 \end{aligned} \tag{B.18}$$

一般に $E_1(x) \gg E_1\left(\sqrt{(\mu\rho_m R)^2+x^2}\right)$ であるので第2項を無視する。
従って

$$\begin{aligned}
 \phi &= \frac{S'v C}{2\mu\rho_m} \int_0^{\mu\rho_m H} E_1(x) dx \\
 &= \frac{S'v C}{2\mu\rho_m} E_2(h)
 \end{aligned} \tag{B.19}$$

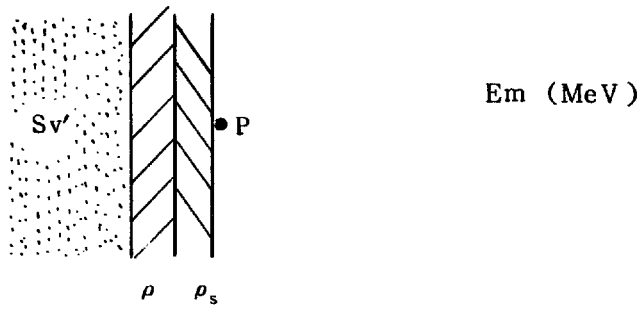
$$\text{但し} \quad E_2(h) = \int_0^h E_1(x) dx \quad (\rightarrow \text{図 B.3 参照})$$

$$h = \mu\rho_m H$$

遮蔽体による減衰を考慮すると

$$\phi = \frac{S'v C}{2\mu\rho_m} e^{-\mu(\rho_s+\rho)} E_2(h) \tag{B.20}$$

B. 2. 5 半無限体積線源によるβ線粒子束



B 2. 4 の体積線源で $H \rightarrow \infty$ とすればよい
ここで

$$\lim_{H \rightarrow \infty} E_2(\mu \rho_m H) = 1 \quad \text{より}$$

$$\phi = \frac{Sv' C}{2\mu \rho_m} e^{-\mu(\rho_s + s)} \quad (\text{B. 20})$$

$$\therefore Sv' = \frac{Sv}{\pi R^2 \cdot H}$$

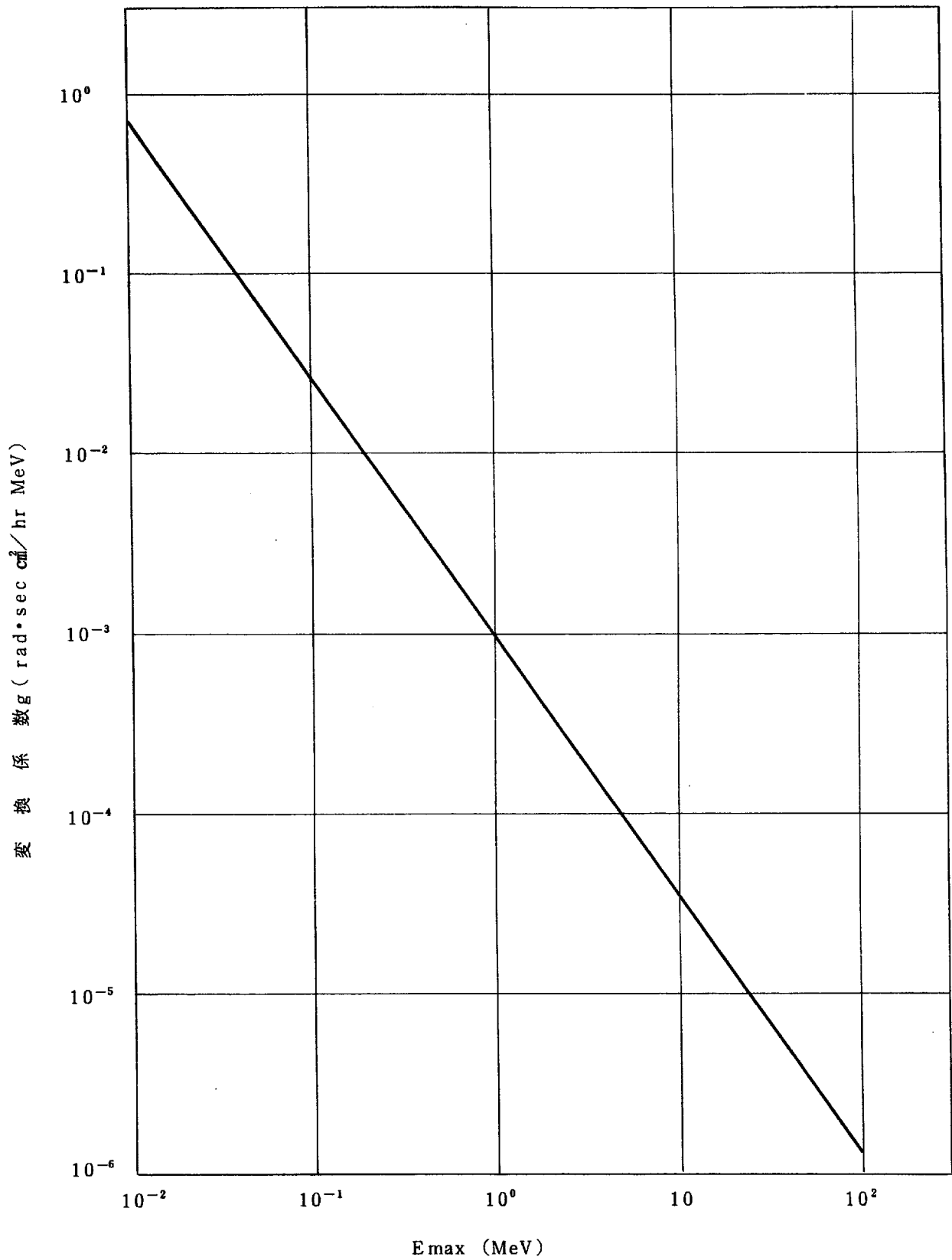


図 B.1 β線最大エネルギー Emax と変換係数 g との関係

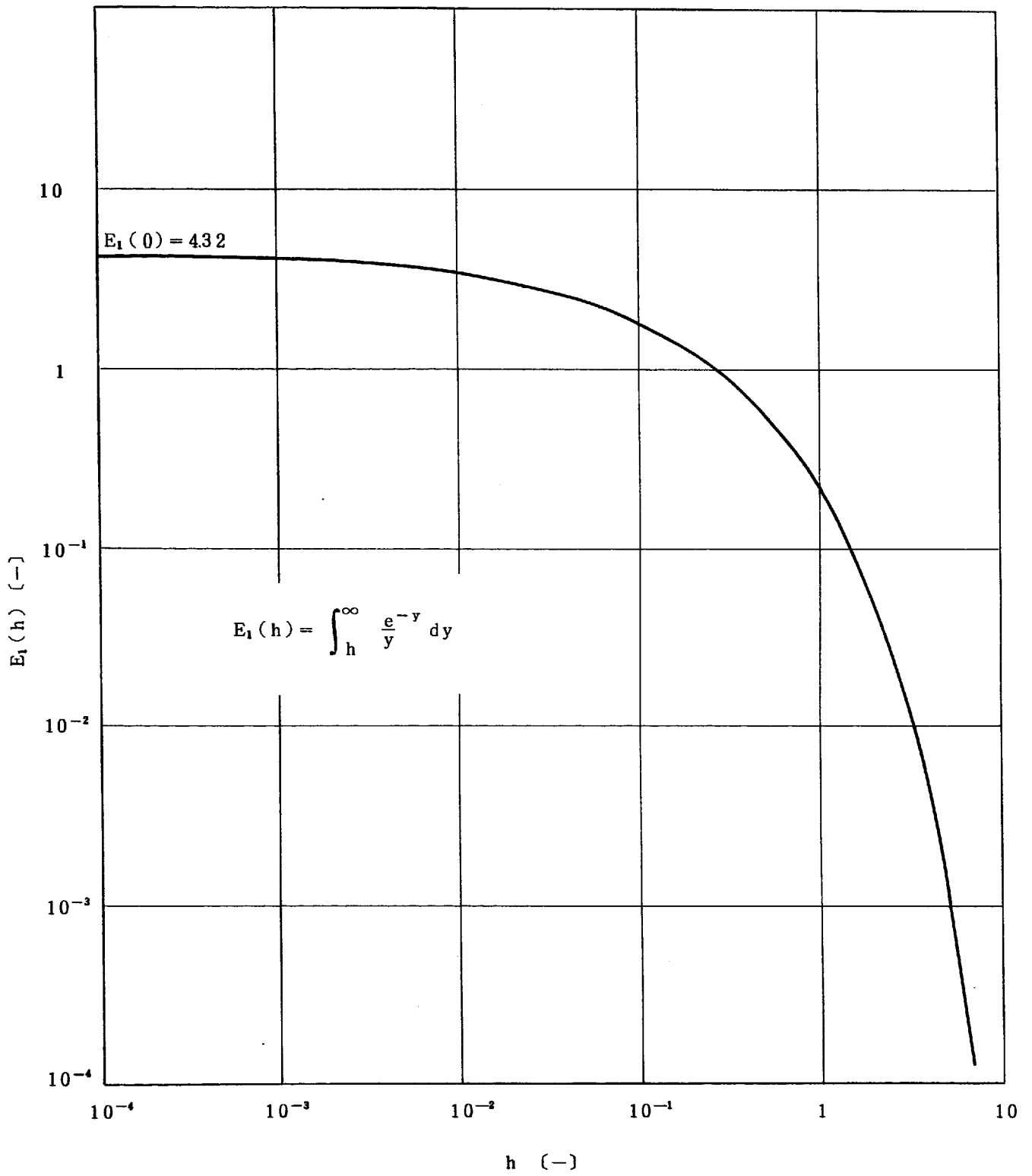
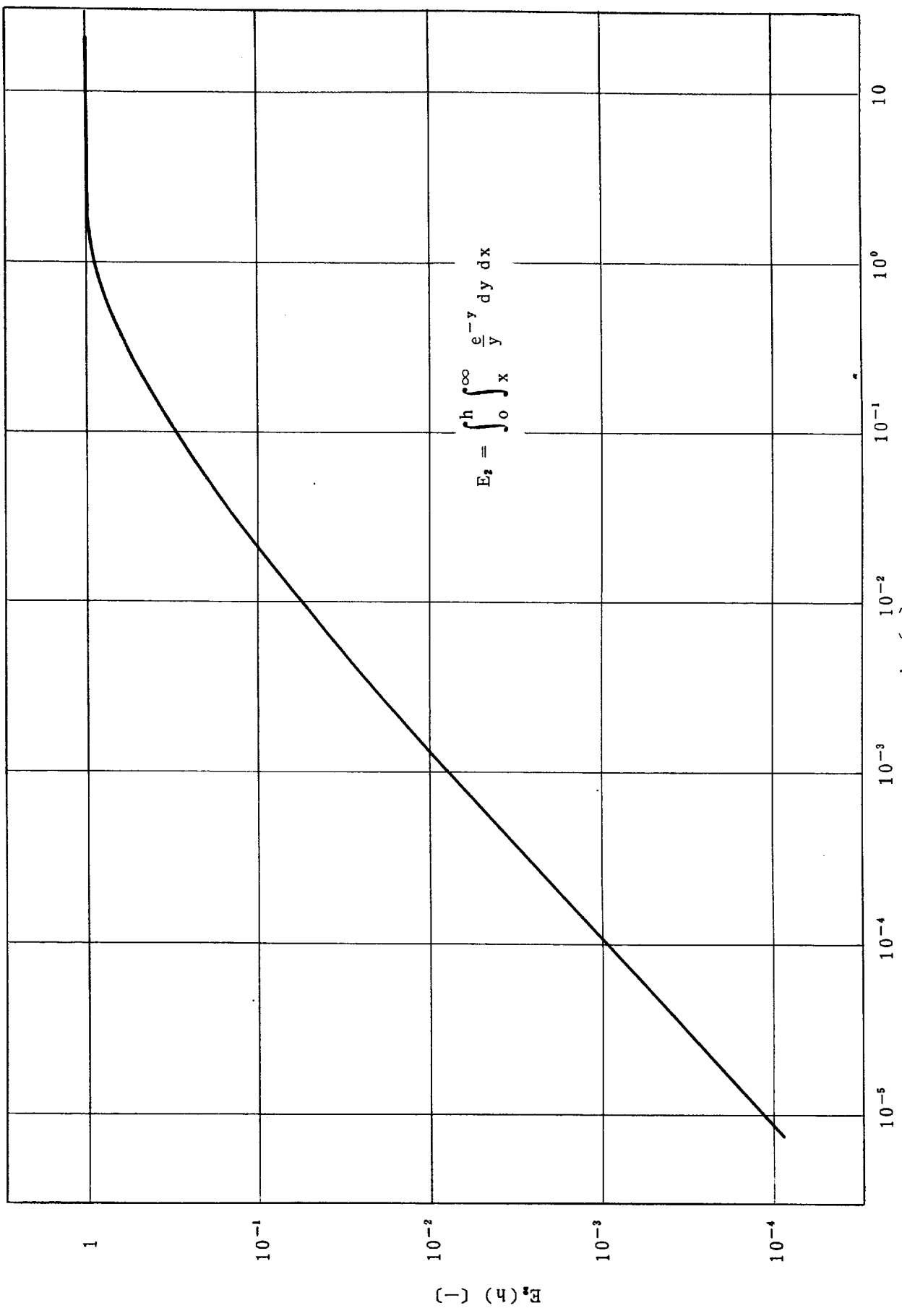


図 B. 2. $h - E_1$ 線 図



図B.3 h - E₂線

例) 有限平面汚染が無限平面線源と仮定できる場合の汚染面の広がりやを円板線源の半径として、算出及び説明せよ。

<解> 円板平面線源と無限平面線源の β 粒子束を比較する。

$$\text{円板平面線源} \quad \phi = \frac{S_A' C}{2} e^{-\mu(\rho_s + \rho)} \left\{ E_1(h_1) - E_1(h_2) \right\}$$

$$\text{無限平面線源} \quad \phi_\infty = \frac{S_A' C}{2} e^{-\mu(\rho_s + \rho)} \cdot E_1(h_1)$$

$$h_1 = \mu \rho_a d$$

$$h_1 = \mu \rho_a d \sqrt{\left(\frac{R}{d}\right)^2 + 1}$$

ϕ が ϕ_∞ の99%である場合の円板線源の半径Rを求める。

$$\frac{\phi}{\phi_\infty} = \frac{E_1(h_1) - E_1(h_2)}{E_1(h_1)} = 0.99$$

$$\therefore \frac{E_1(h_2)}{E_1(h_1)} = \frac{E_1(\mu \rho_a d \sqrt{\left(\frac{R}{d}\right)^2 + 1})}{E_1(\mu \rho_a d)} = 0.01 \quad (\text{B. 22})$$

$$\mu = 17 \text{ Em}^{-1.43}$$

上記の関係をdをパラメータとして、最大エネルギーEmについて示したのが図B.4である。

(H = 0.007 cm 皮フ汚染の場合)

故に皮フ汚染の場合 Em = 1 MeVで半径約1.7 mmの汚染面積があると無限平面として取り扱える。

更に例えば ^{137}Cs (Em = 0.52 MeV)で0.7 mm以上

$^{106}\text{Ru} - \text{Rh}$ (Em = 3.5 MeV)で2.5 mm以上の広がりのある場合無限平面と見ることが出来る。

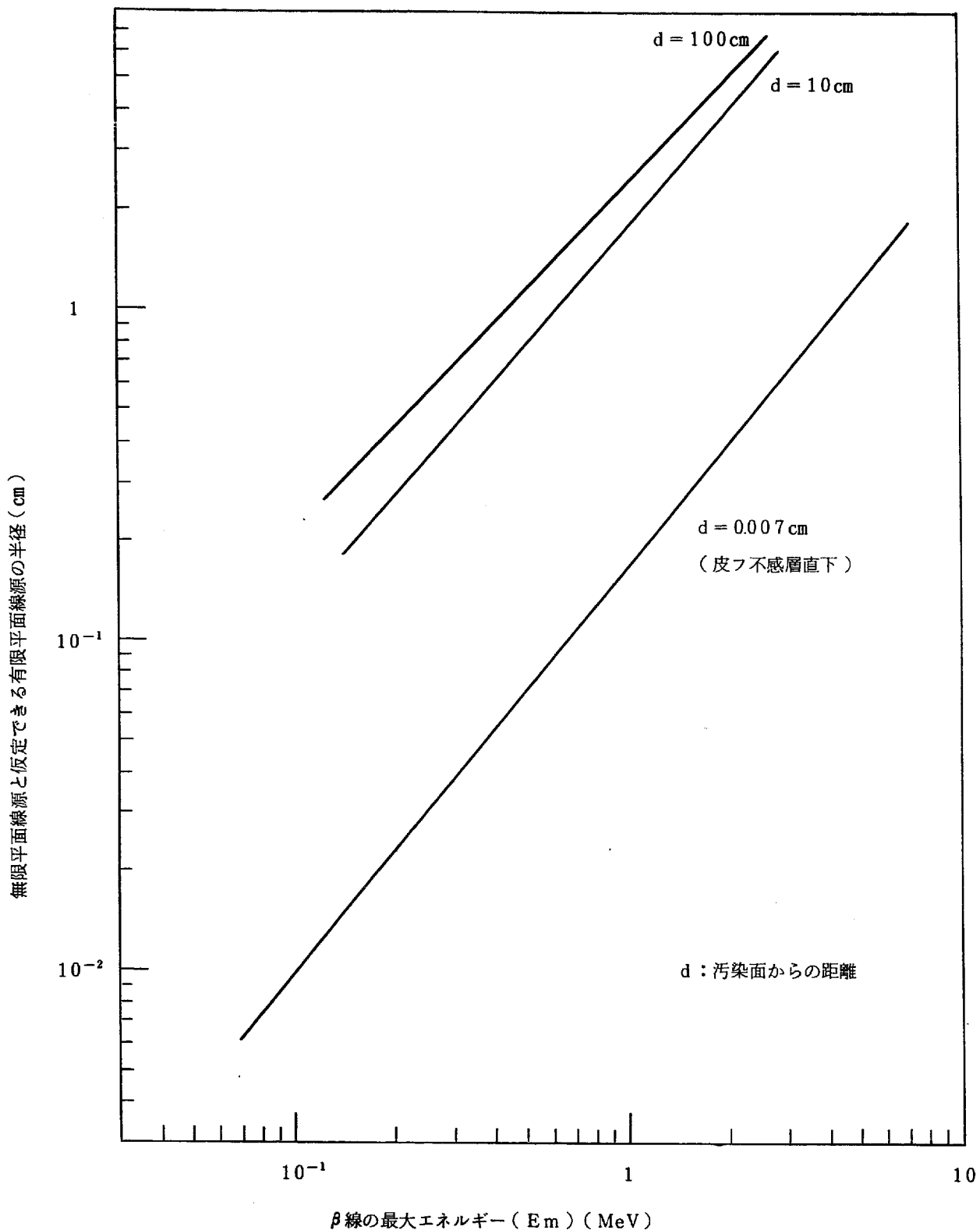


図 B.4 β 線最大エネルギーの関数による無限平面線源と仮定できる有限平面線源の半径

B.3 皮フ汚染に伴う線量評価計算式

皮フ汚染に伴う不感層（ 7 mg/cm^2 ， 40 mg/cm^2 ）での β 線被曝線量の計算式は、除染効果も考慮して下記の式で与えられる。

$$D = \sum_i S_i \times A_i(E_m) \times T_i(A_i) \times f_i \quad (\text{B. 23})$$

D：被曝線量 [rad]

0.3 MeV 以上の β 線については rem になる。

S_i ：i核種の単位面積当りの放射能 [$\mu\text{Ci/cm}^2$]

$A_i(E_m)$ ：i核種の最大エネルギー E_m に対する $1\mu\text{Ci/cm}^2$ 当りの吸収線量率 [rad/hr/ $\mu\text{Ci/cm}^2$]

$T_i(A_i)$ ：汚染が0になるまでの時間 [hr]

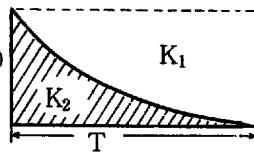
f_i ：汚染量の時間変化に対する補正項

A_i については、B.2 節に基づいて算出する。

更に現場での汚染に伴う計算入力データの為の情報及び判断は次に示す表1で示される。

尚現場での汚染放射能の測定はGM サーベイメータ等で行うとする。

表B.3.1 β線被ばく計算入力データ

記号	項目	入力データ	単位	備考	担当係
	汚染した核種			単一か? 複合か?	放管
	汚染した核種のβ線最大エネルギーの放出割合		(%) at Em		放管
	核種の半減期		hr	単一か? F.P.か? 放射平衡か?	放管
	汚染部位(不感層)			不感層は(7, 40)mg/cm ² か?	線計
Si	s 汚染面積		[cm ²]	ポイントか? 一様か? 無限線源か?	線計
	C GMサーベイメータの測定結果		[cpm]	$Si = 4.5 \times 10^{-5} \times \frac{C}{\eta \cdot s}$ [μCi/cm ²]	線計
	η GMサーベイメータのEmに対する検出効率		(%) at Em		
Ti(Ai)	汚染が0になるまでの時間		[hr]	C (cpm) 	線計
fi	汚染量の時間変化に対する補正		(-)	$f_1 = \frac{k_2}{k_1 + k_2}$ (面積比)	線計
Ai(Em)	最大エネルギーEmの核種1μCi/cm ² の吸収線量率		$\left[\begin{array}{l} \text{rad/hr} \\ \hline \mu\text{Ci/cm}^2 \end{array} \right]$	複合核種の場合は, それぞれのEiについて計算する	線計

他に, 汚染物の分析値(全α, 全β核種の放射能濃度(μCi/cc))を環境安全課 分析担当より入手し総合評価を行う。

B.4 種々の核種による β 線吸収線量率

主な核種について点積分核法により龍福らが²⁴⁾不感層 7 mg/cm^2 及び 40 mg/cm^2 直下での皮膚 β 線量率を求めている。

これらの結果に基づいて点線源及び面線源での値を図B.4.1～図B.4.10に示す。

これより即座に皮膚 β 線量を得ることが可能である。更にまとめとして図B.4.11及び図B.4.12には、線源半径 1 cm と無限大について β 線最大エネルギーと皮膚吸収線量率との関係を示す。²⁴⁾図B.4.13⁽²⁴⁾には β 線最大エネルギーに対する吸収係数との関係を示す。点線は一般に用いられている Gleareon et al. により得られている関係式である。

β 線吸収線量率を現場にて測定する場合、各種のサーベイメータにて簡便に測定可能であるが β 線最大エネルギーに対する検出効率又は校正定数を知る必要がある。

参考文献(40)、(41)にこれらについて値づけされているので参照できる。

又、 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。即ち、面又は体線源からの β 線吸収線量率は、線源の広がり 5 mm 程度及び厚さにして $2\sim 3\text{ mm}$ 程度になると、その形状、大きさに無関係となり、単位面積あたり又は単位体積あたりの放射能の量だけに関係する。

更に、皮膚での吸収線量については β 線吸収線量の方が β 線にそれをはるかに上まわる。例えば点線源での比較において、普通に用いられている β 線のエネルギー $E_m = 0.5\sim 2.0\text{ MeV}$ に対して、不感層直下の吸収線量率は D_β/D_r 比 $=50\sim 500$ 程度となる。又点線源から数 10 cm 離れた所では両者による吸収線量はほぼ同じ程度になる。

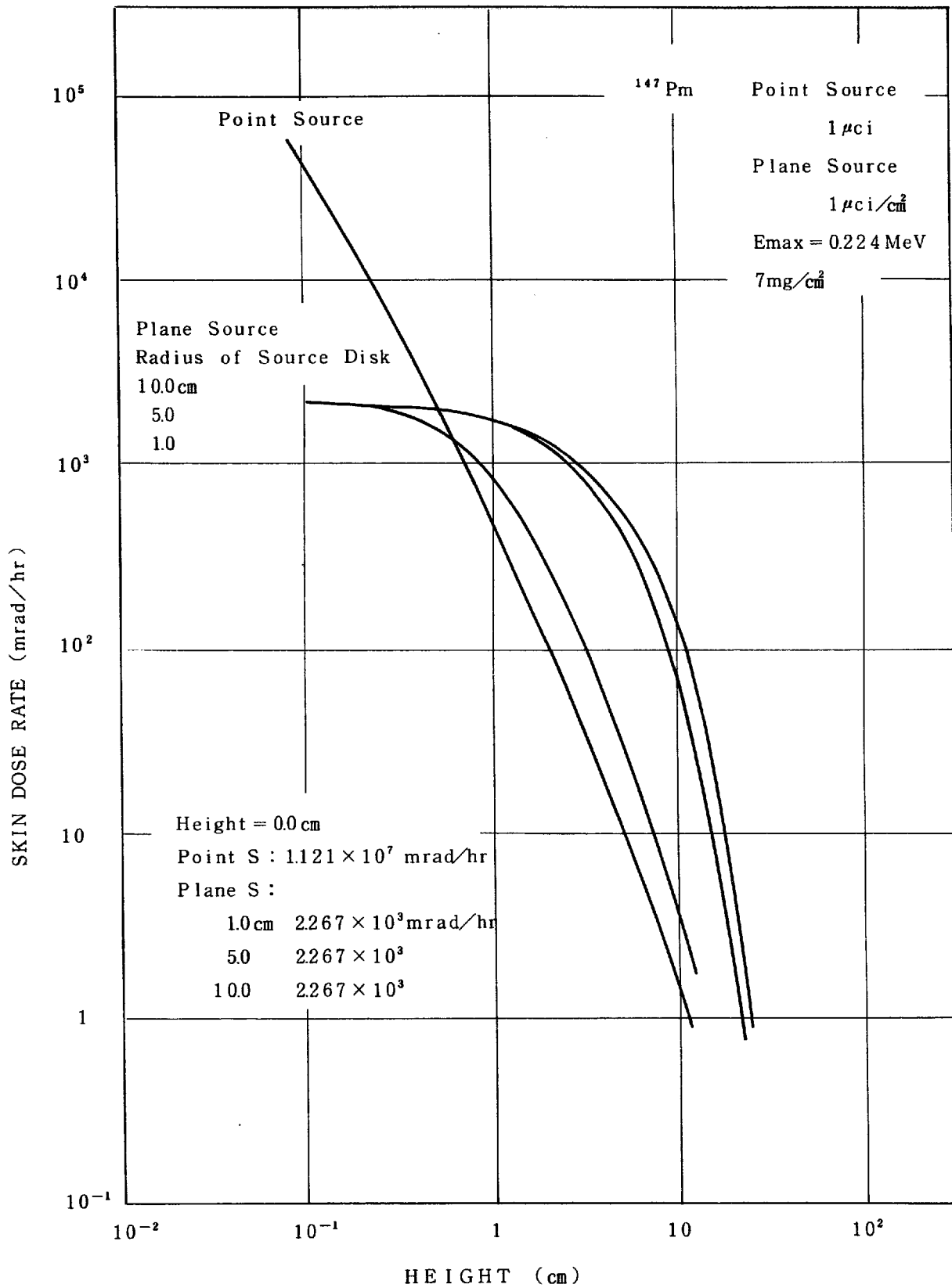
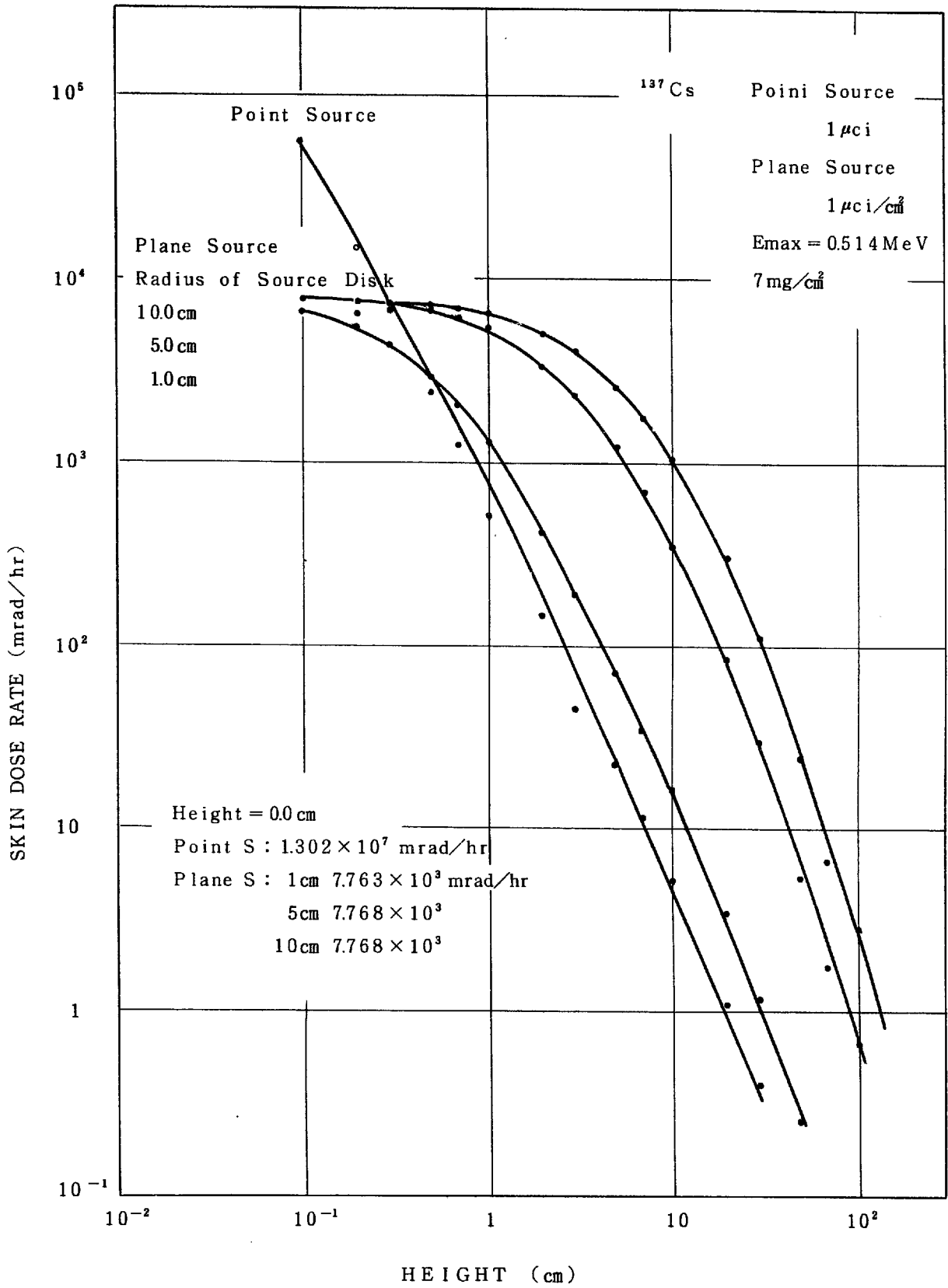
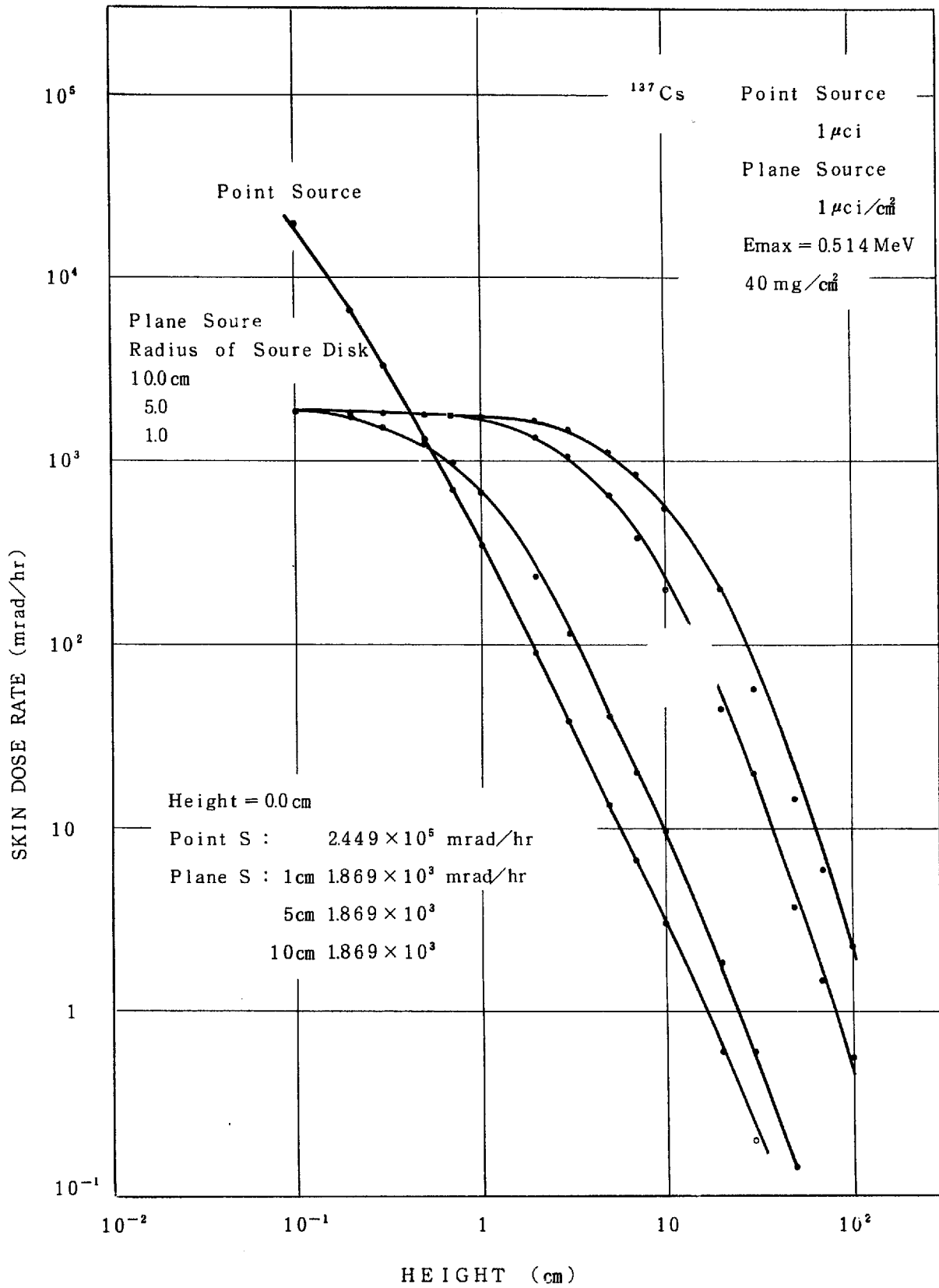


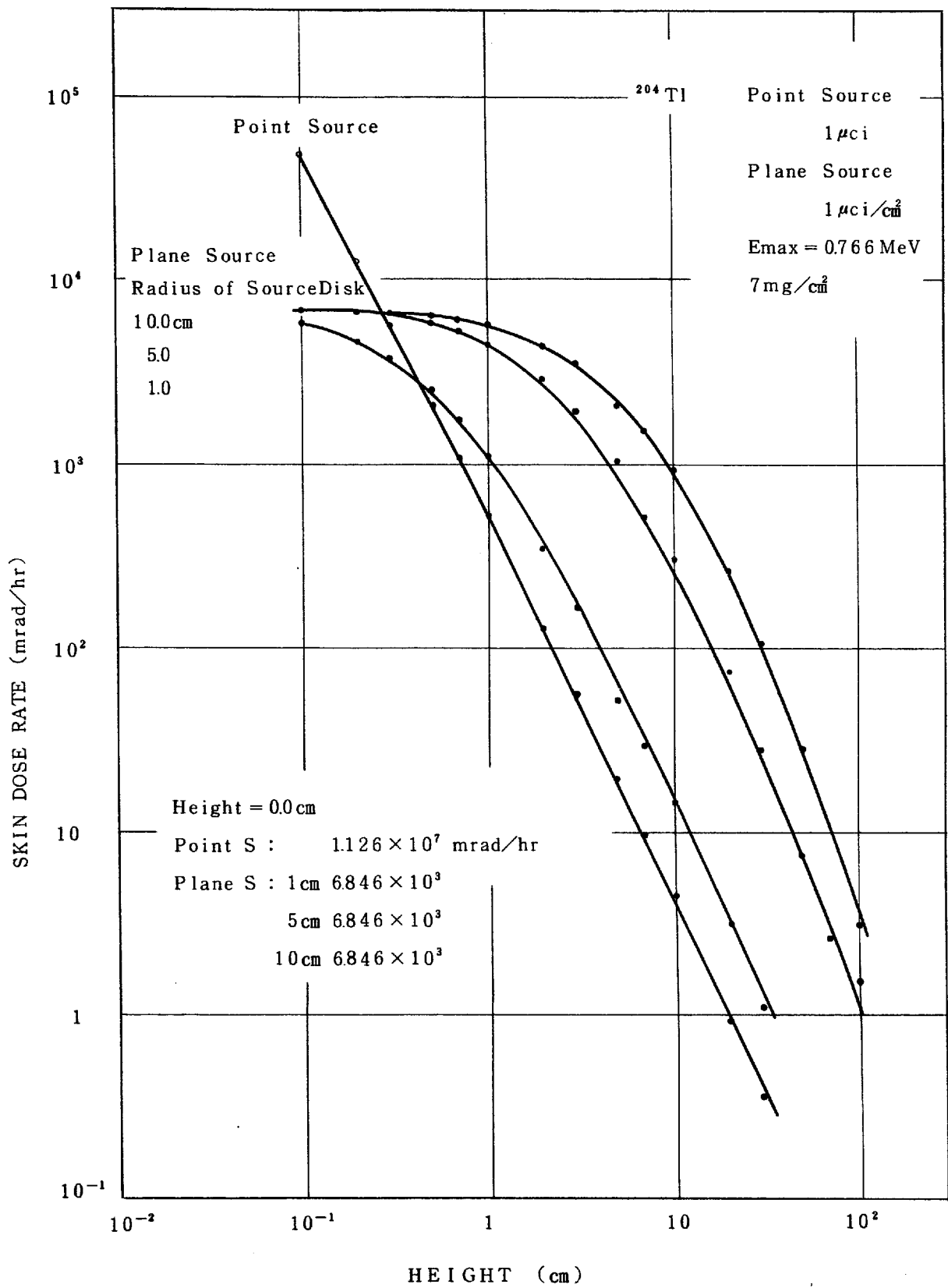
図 B. 4.1 ^{147}Pm 点線源及び面線源による $7\ \text{mg}/\text{cm}^2$ 下の皮膚線量率



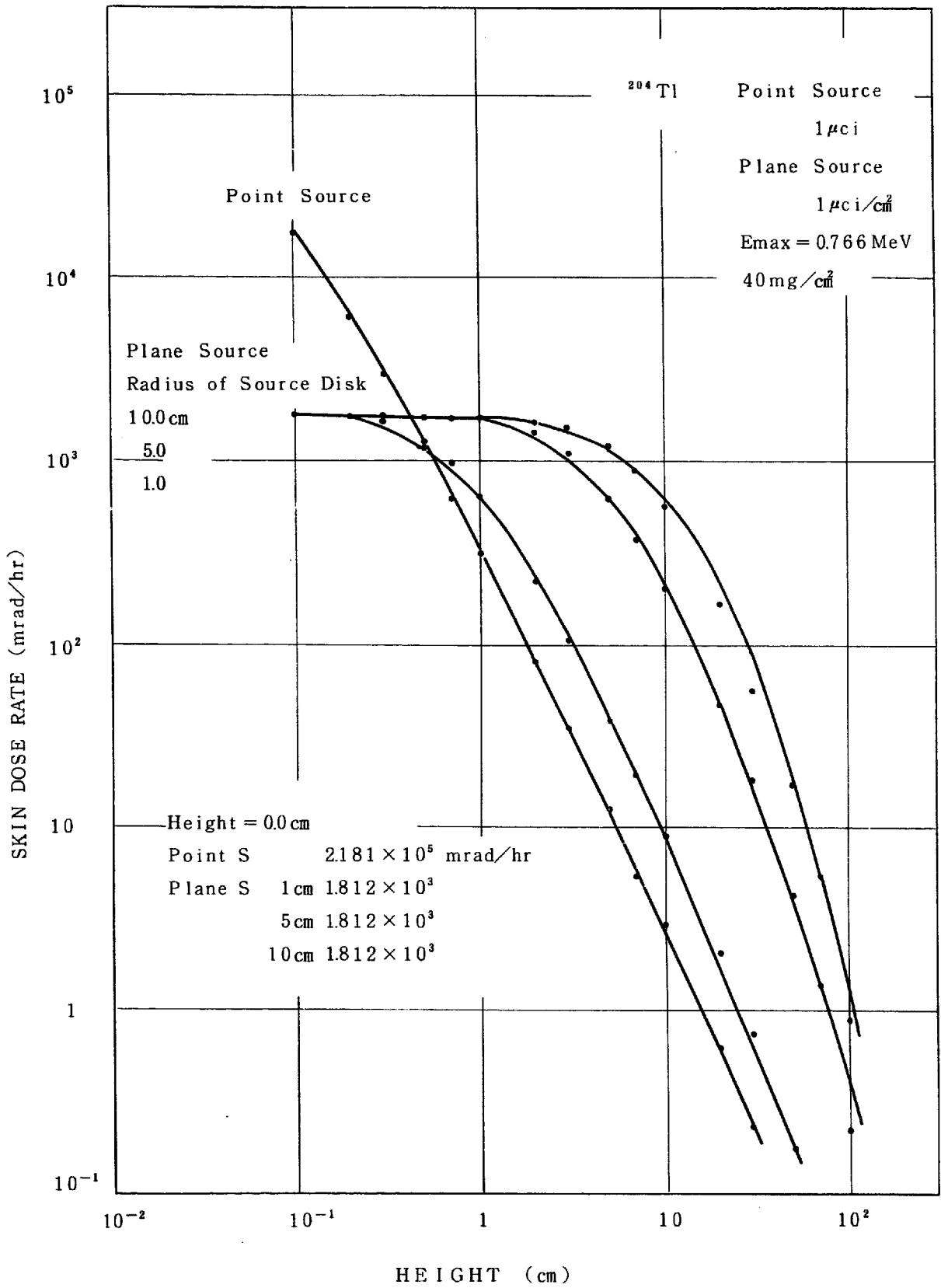
図B.4.2 ^{137}Cs 点線源及び面線源による $7\text{mg}/\text{cm}^2$ 下での皮膚線量率



図B.4.3 ^{137}Cs 点線源及び面線源による $40\ \text{mg}/\text{cm}^2$ 下での皮膚線量率



図B.4.4 ^{204}Tl 点線源及び面線源による $7\ \text{mg}/\text{cm}^2$ 下での皮膚線量率



図B.45 ²⁰⁴Tl点線源及び面線源による40 mg/cm²下での皮膚線量率

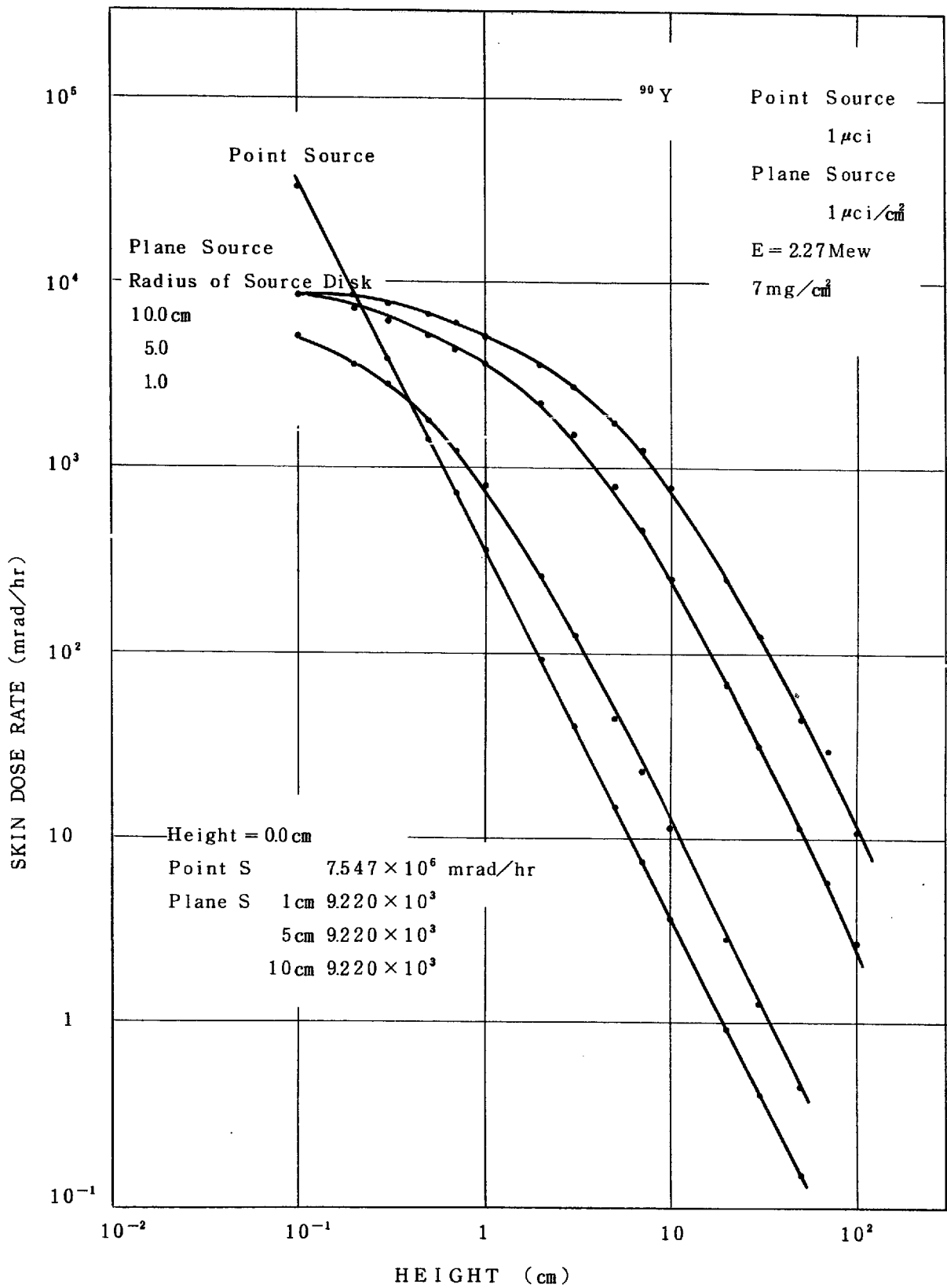
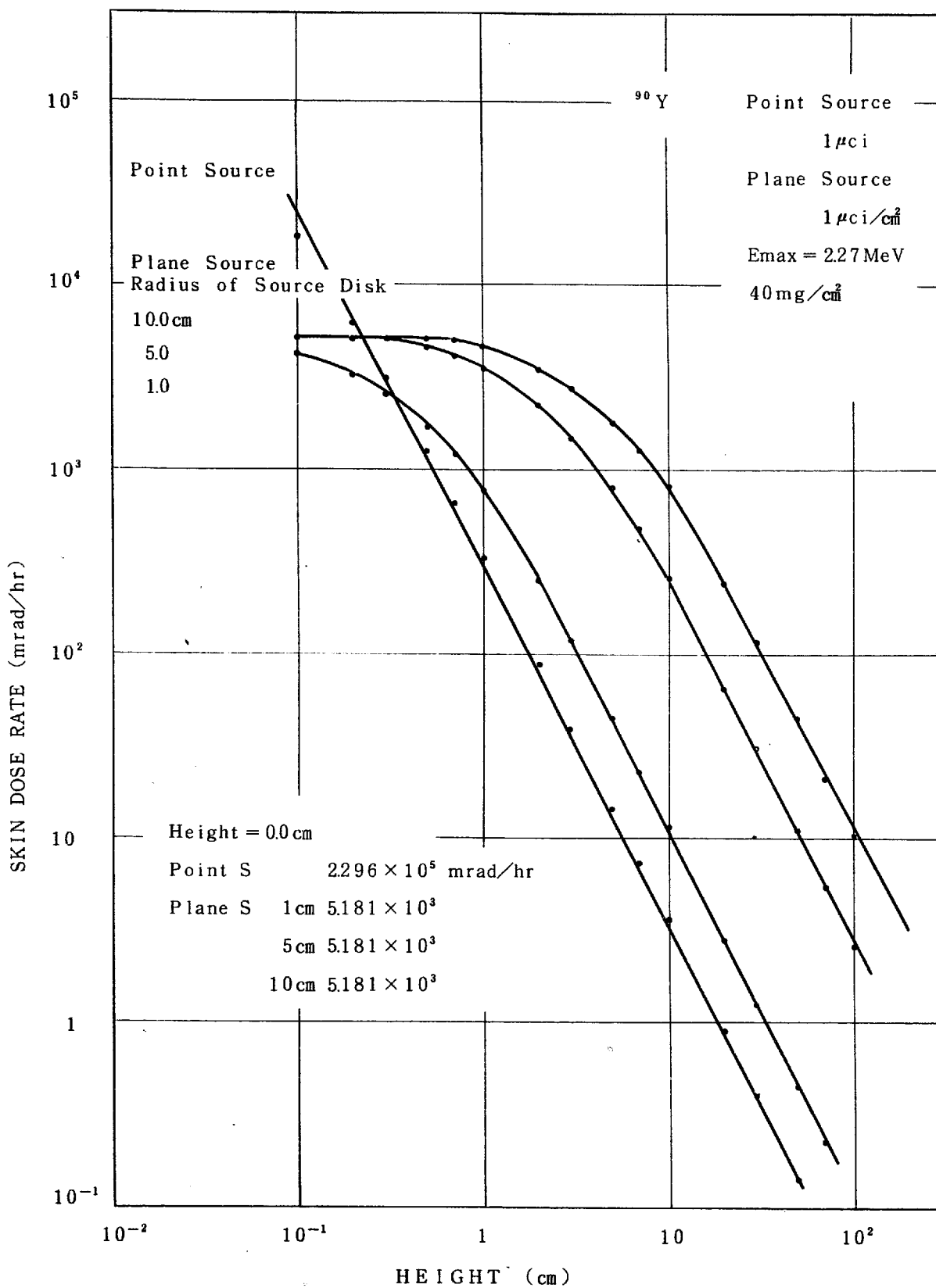


図 B. 4.6 ⁹⁰Y 点線源及び面線源による 7 mg/cm² 下での皮膚線量率



図B.4.7 ^{90}Y 点線源及び面線源による $40\text{mg}/\text{cm}^2$ 下での皮膚線量率

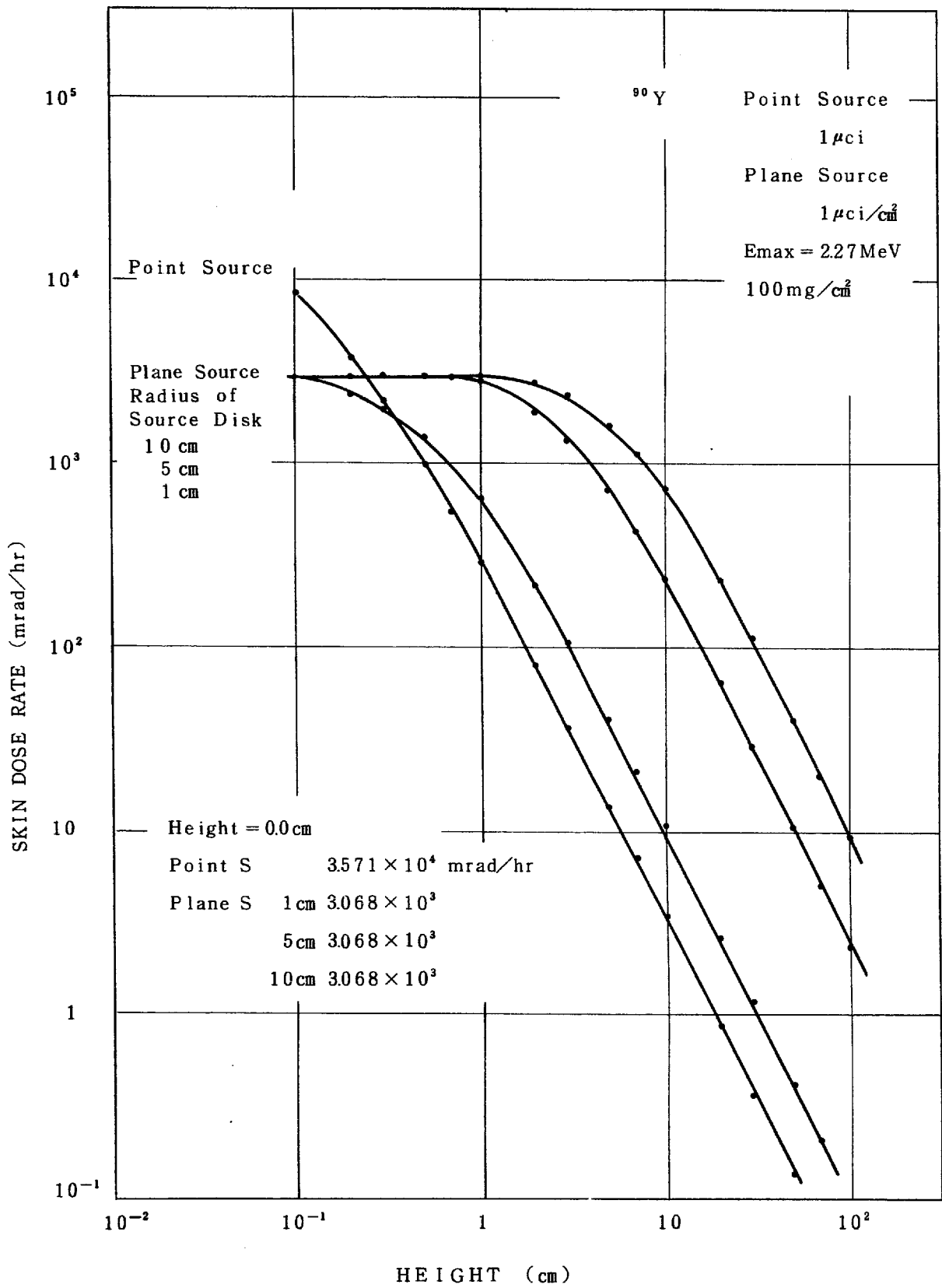
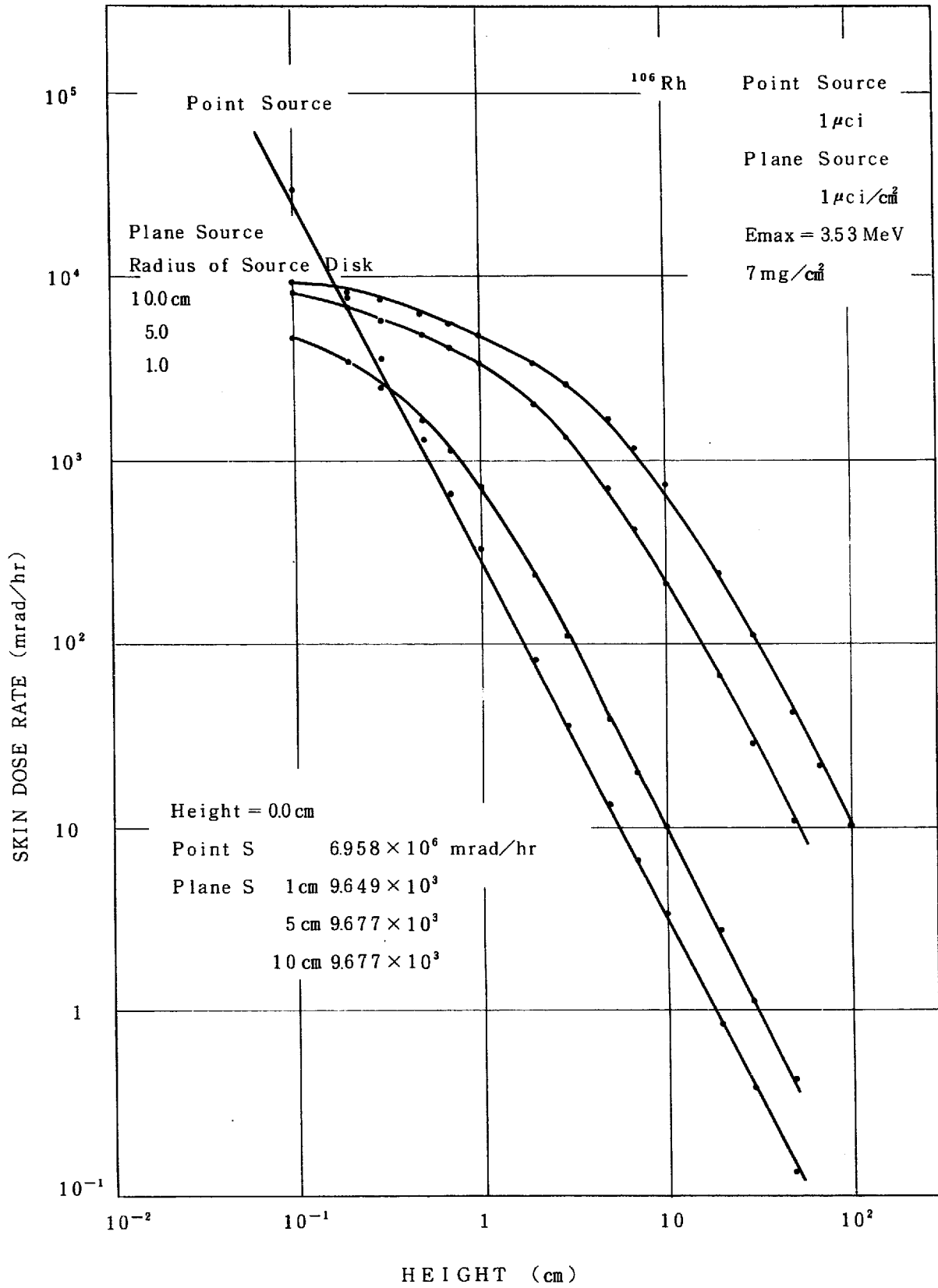


図 B.48 ^{90}Y 点線源及び面線源による $100\text{mg}/\text{cm}^2$ 下での皮膚面線量率



図B.4.9 ^{106}Rh 点線源及び面線源による $7\text{ mg}/\text{cm}^2$ 下での皮膚線量率

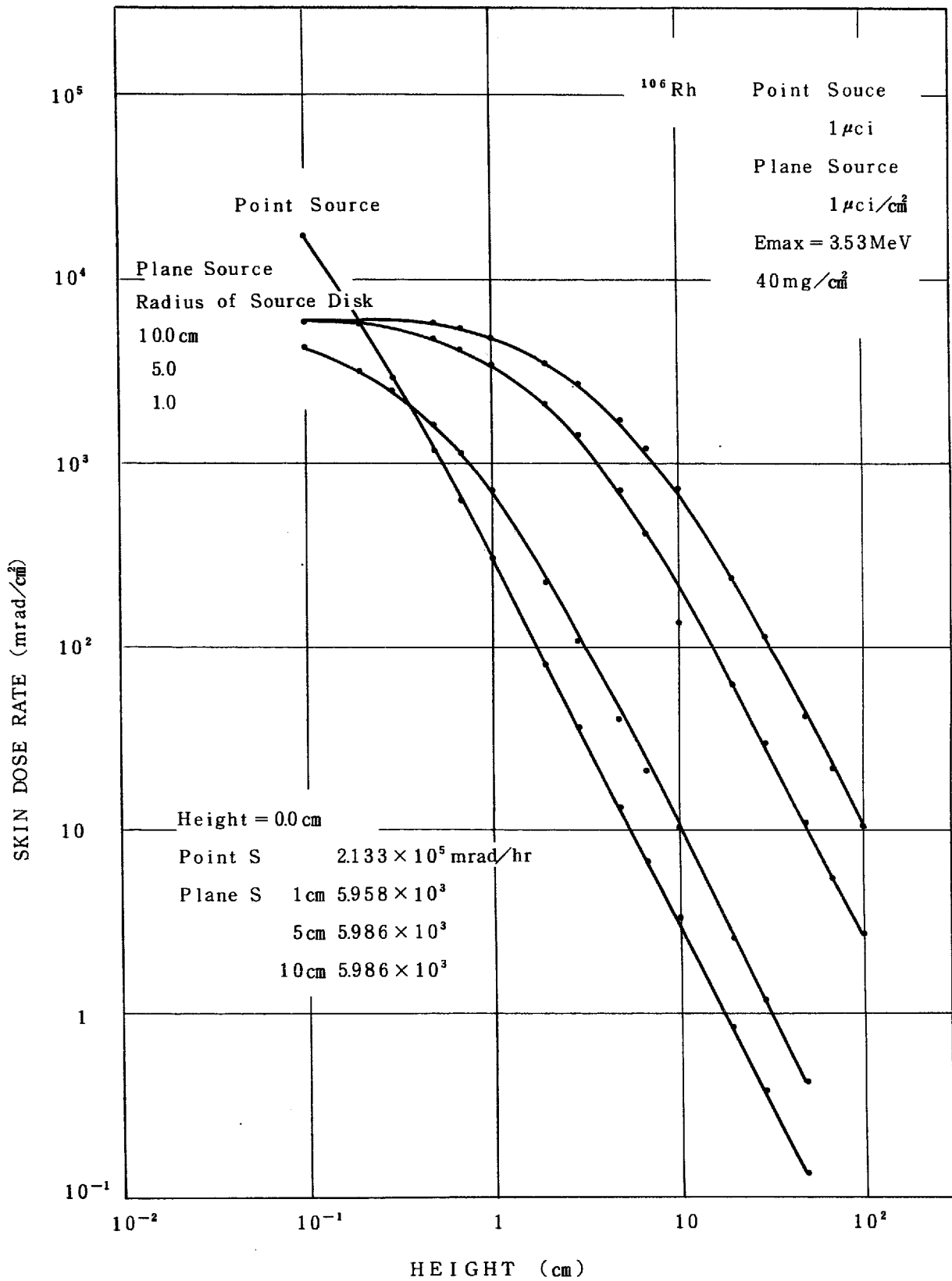


図 B. 4.10 ¹⁰⁶Rh 点線源及び面線源による 40 mg/cm² 下での皮膚線量率

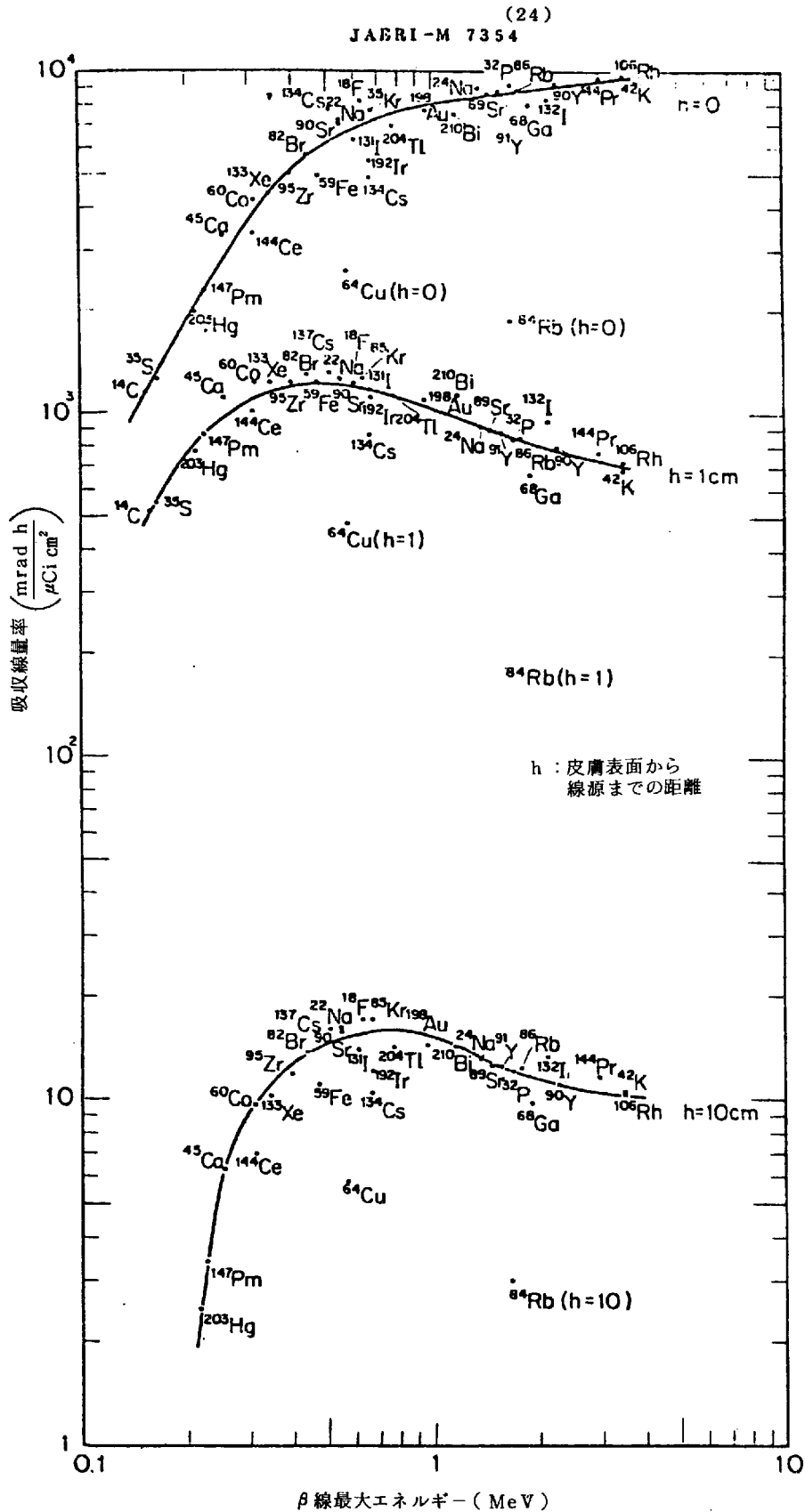


図 B. 4.11 β線最大エネルギーと皮膚吸収線量率との関係
(不感層 7 mg/cm², 線源半径 1 cm)

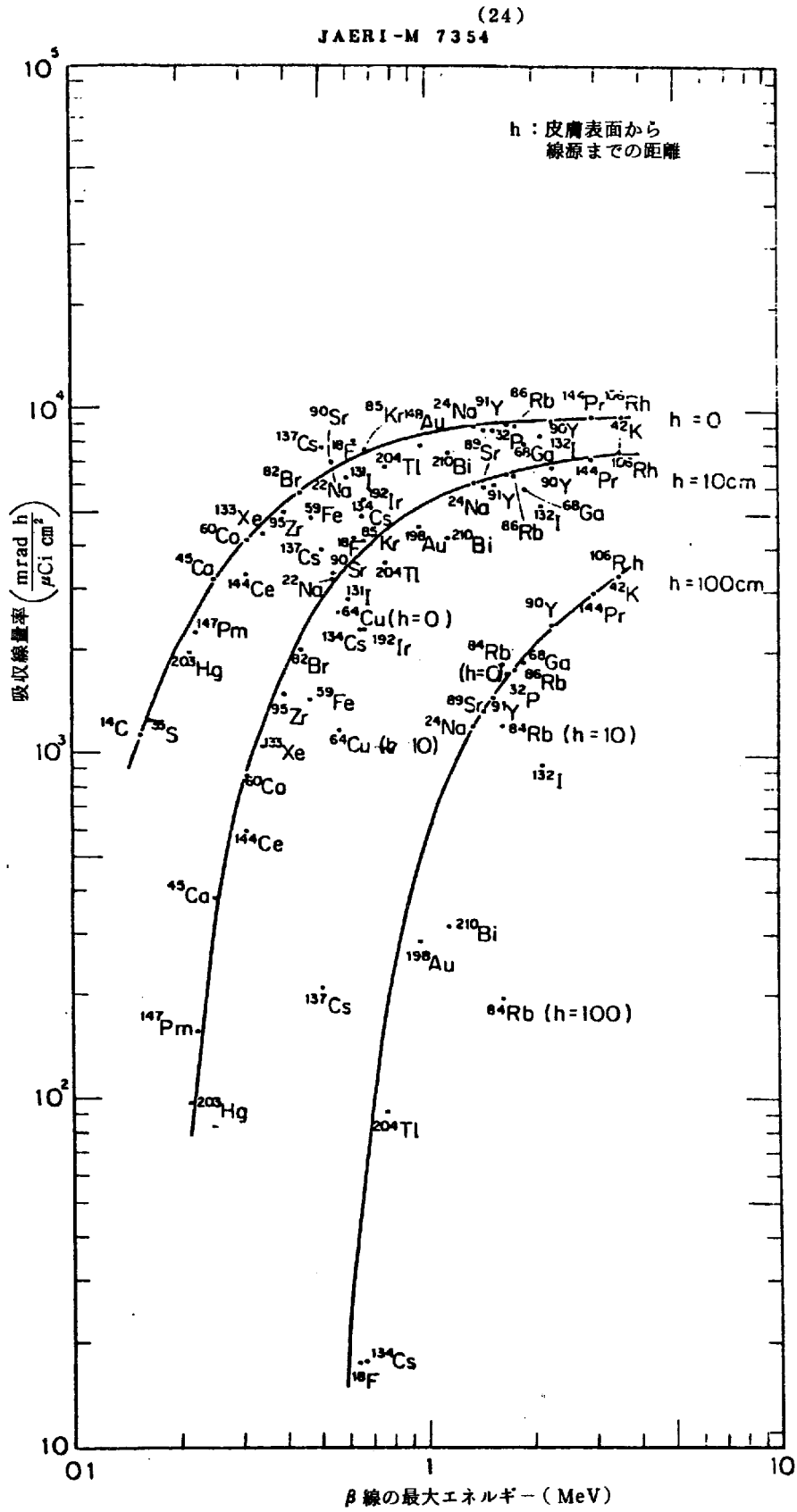
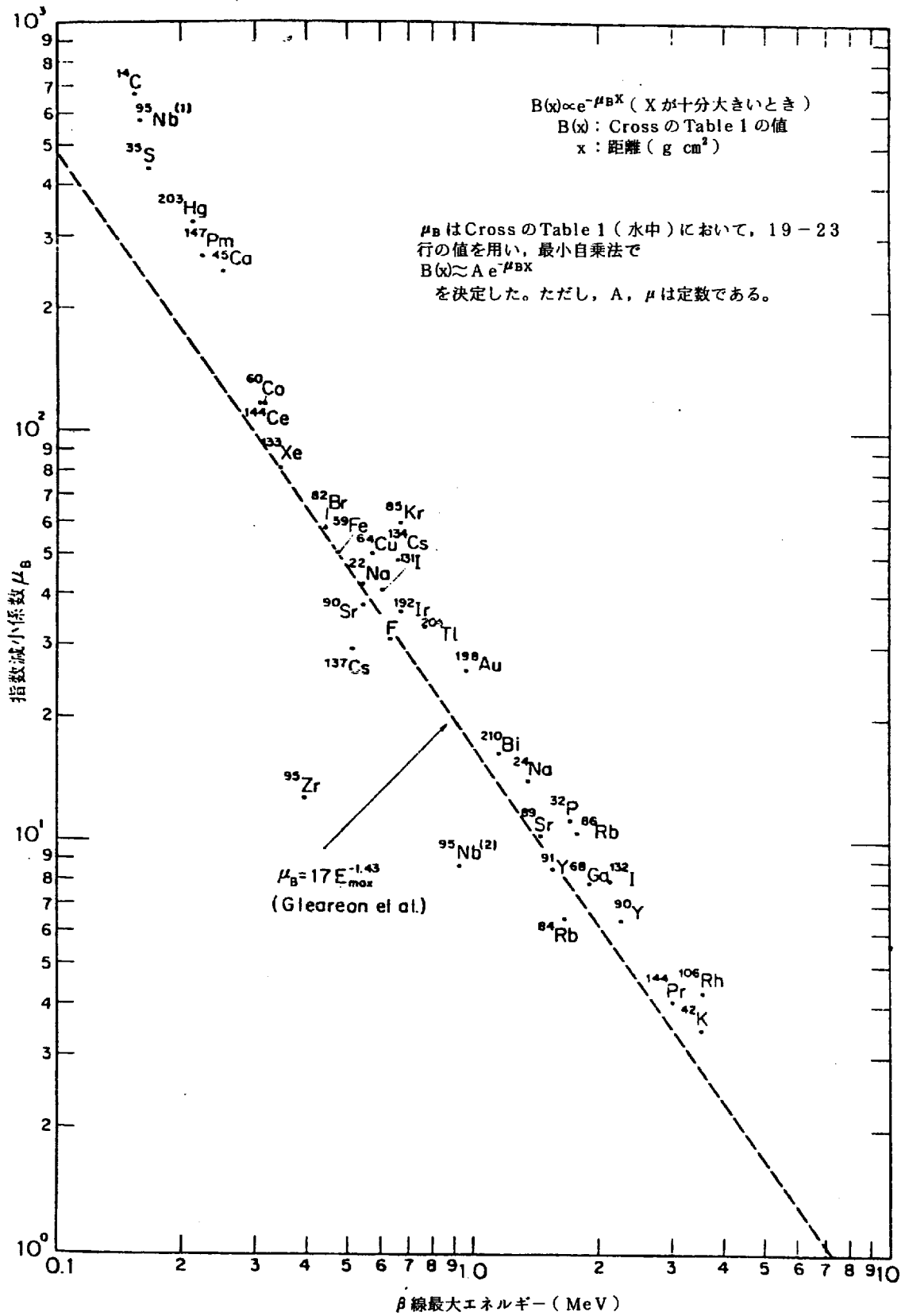


図 B. 4.12 β線最大エネルギーと皮膚吸収線量率との関係
(不感層 7 mg/cm², 線源半径無限大)

(24)
JAERI-M 7354



図B.4.13 指数减小係数

謝 辞

今回新しい ($\beta + \gamma$) 線用 TL 指リング線量計を作成するにあたり β 線 γ 線の混在場に於いて分離測定する為の β 線シールド材の材質による問題点等について助言を載いた原研・東海・遮蔽研究室，田中俊一博士に感謝します。

又， β 線源の校正について協力載いた原研・東海線量計測課の備後一義氏及び上沢輝雄氏に感謝します。

更に実験上色々協力補助して載いた常陽産業 K K の磯野矢一氏に感謝します。

線量計の試作に於いて多大な協力を載いて松下産業機器 K K 様に深く感謝します。

最後に54年度 " β 線被曝線量評価検討会 " のワーキンググループメンバーの方々に色々有意義な討論助言を載いたことを感謝します。

参 考 文 献

1. T.F. Gesell et al.,
ID0-12090 (1979)
A Personnel β -Dosimetry Method for Reducing Energy Dependence.
2. ICRP Pub 26 (1977)
Recommendation of the International Commission on Radiation Protection
#26
3. Chabot, G.E., M.A. Jimens and K.W. Skrable, Health Phys. 34 311-321 (1978)
Personnel Dosimetry in the U.S.A.
4. O'Neal, B.L.,
CONF 730907-P λ USAEC, 700-706 (1973)
Evaluation of Personnel Exposures in a High-Energy, High-Intensity
Beta-Gamma Field.
5. Hajnal, F. and J.E. McLaughlin,
IEEE Trans. on Nucl. Sci. NS-24 596-598 (1977)
6. Whitton, J.T.,
Health Phys. 24 1-8 (1973)
New Values for Epidermal Thickness and Their Importance.
7. Drosdoff,
Archives de Physiologic Mormale et Path.II Serie Tome VI P124
8. Vennart, J and M.A. Cryer,
Britisch. J. of Radiology 45 610-620 (1972)
Radiobiology Forum on Radiological Protection and the Skin.
9. Glucksmann, A.,
Academic Press, London and New York, 121-123 (1963)
"Carinogenesis" in Cellular Basis and Hetiology of Late Somatic
Effects of Ionizing Radiation.
10. Albert, R.E., F.J. Burns and R.E. Heimbach,
Radiation Resarch 30 515-524 (1967)
Effect of Penetration Depth of Electron radiation on Skin Tumor
Formation in the Rat.
11. Jones, D. and G. Webb,
CONF-680920 (TID-4500) USAEC, Oak Ridge Tennessee, 807-813
Proceeding of the Second International Conference on Luminescence Dosimetry
A Thermoluminescence Personnel Dosimeter Badge.

12. Marshall, M. and J. Docherty,
Phys. Med. Bio. 16 503-510 (1971)
Measurements of Skin Dose from Low Energy Beta and Gamma Radiation
Using Thermoluminescent Discs.
13. Charles, M.W.,
Proceedings of the Fifth International Conference on Luminescence Dosimetry
San Paulo, Brazil (A. Scharmann, ed) Justus-Leibig-Universitat Giessen,
Germany, 313-323 (1977)
The Development of a Practical 5 mg/cm² Skin Dosimeter.
14. Kocznski, A., M. Wolska-Witer, L. Botter-Jensen and P. Christense,
Proceedings of the Forth International Conference on Luminescence Dosimetry,
Krakow, Poland.
Institute of Nuclear Physics, Krakow, 641-650 (1974)
Graphite-Mixed Non-Transparent LiF and LiBO₄ : Mn Tl Dosimeters
Combined with a Two Side Reading System for Beta-Gamma Dosimetry.
15. Lasky, J.B. and P.R. Moran.,
Proceedings of the Fifth International Conference on Luminescence Dosimetry.
San Paulo, Brazil (A. Scharmann)
Justus-Liebig-Universitat, Giessen, Germany, 122-123 (1977)
TLD-100 Diffused with Boron : A New Surface-Sensitive TL Phosphor.
16. BCRU (British Committee on Radiation Units and Measurments)
Phys. Med. Biol. 19 748-752 (1974)
Conversion of Beta-ray Dose Rates Measured in Air to Dose Rates in
Skin
17. Spencer, L.V.,
National Bureau of Standards Monograph 1, Washington. (1959)
Energy Dissipation by Fast Electrons.
18. Cross, W.G.,
Report AECL-2793 Atomic Energy of Canada Limited, Chalk River, Ontario
(1967)
Tables of Beta Dose Distributions.
19. O'Brien, K., S. Samson, R. Sanna and J.E. McLanghlin,
Nuclear Science and Engineering 18 90-96 (1964)
The Application of "One Group" Transport Theory to Beta-ray Dosimetry.
20. O'Brien, K.,
Health Phys. 26 122-127 (1974)
The Subcutaneous Beta-Ray Dose Rate from Fission Products Deposited
on the Skin.

21. Loevinger, R.,
Radiology 62 74-82 (1954)
The Dosimetry of Beta Radiations.
22. Loevinger, R.,
Radiation Dosimetry III (F.H. Attix and E. Tuchlin, Eds), Academic Press,
New York 51-90 (1969)
Distributed Radionuclide Source, In.
23. Loevinger, R., E.M. Japha and G.L. Brownell,
Discrete Radioisotope Sources, In : Radiation Dosimetry (G.J. Hine and
G.L. Brownell, Eds), Academic Press, New York 694-799 (1956)
24. 龍福廣, 中戸喜寄, 備後一義, 立田初己, 福田整司, 南賢太郎
JAERI-M-7354 (1977)
点積分核法による β 線皮膚線量の評価
25. Fitzgerald, J.J., G.L. Brownell and F.J. Mahoney, Mathematical Theory of
Radiation Dosimetry Gordon and Breach, New York, 497-594 (1967)
26. B.R. Paliwal and P.R. Almond
Phys. Med. Biol. 20 547-558 (1975)
Applications of Cavity Theories for Electrons to LiF Dosemeters.
27. D.F. White and T.M. Francis
Phys. Med. Biol. 22 1209-1212 (1977)
A Unified Method of Measuring β and Photon Radiation for Radiation
Protection Purpose.
28. M.W. Charles and Z.U. Khar,
Phys. Med. Biol. 23 972-975 (1978)
Implementation of the ICRP, Recommendation on Skin Dose Measurement
using Thermoluminescent Dosimeters.
29. F. Hajnal and J.E. Mclaughlin
International Symposium on Advances in Radiation Protection Monitoring.
Stockholm, Sweden June 26-30 (1978)
IAEA-SM-229/57
Dosimetry of Mixed Beta and Gamma Radiation in Work Area.
30. J.B. Lasky and P.P. Moran.
Proceedings of the Fifth International Conference on Luminescence Dosimetry
14-17 Feb. (1977)
San Pavlo-Brazil P451-458
Thermoluminescent Response of LiF (TLD-100) to 70KeV-30KeV Electrons.

31. G. Busuoli and H.W. Julius
Proceedings of the Fifth International Conference on Luminescence Dosimetry
14-17 Feb. (1977)
San Pavlo-Brazil P225-236
Possible Use of BeO in Beta-Gamma Personal Dosimetry.
32. A.S. Pradhaw and R.C. Bhatt,
Phys. Med. Biol. 22 873-879 (1977)
Graphite-Mixed CaSO₄ : Dy Teflon TLD Discs for Beta Dosimetry.
33. R. Yokota, Y. Muto and T. Miyake,
Proceedings of the Third International Conference on Luminescence Dosimetry
(1977) P773-782.
Beta Dosimetry with Silver-Activated Phosphates Glass.
34. 福田整司
JAERI-1065 (1964)
外部被曝による β 線吸収線量の評価
35. 備後一義
JAERI-memo-3591 (1969)
 β 線表面吸収線量の評価
36. 斎藤節子, 石黒秀治, 野田喜美雄
N841-78-54 (1978)
TLDによる β 線吸収線量測定法の開発
37. 西健雄, 藤岡克治, 上島正好, 望月民三, 三戸規生
未公開資料
38. 備後一義, 千田徹, 三河勝雄
JAERI-M-6753 (1976)
直読式 β 線吸収線量率測定器の開発(I)
(特定波高値パルスの選択パルスによるエネルギー依存性の平均化)
39. 備後一義
日本原子力学会誌 19 51-58 (1973)
 β 線吸収線量率の直読式測定法
40. 備後一義, 梶本与一, 須賀新一
保健物理 13 279-285 (1978)
電離箱およびGM計数型サーベイメータの校正(I)
(作業環境の β 線量率測定のための試験)
41. 須賀新一, 備後一義, 梶本与一
保健物理 14 1-10 (1979)
電離箱型およびGM計数管型サーベイメータの校正(II)
(皮膚汚染の β 線量率測定のための試験)

42. 青柳春樹, 権田浩三

PNCT852-79-13 (1979)

再処理工場運転員のための線量計算演習

43. 宮永一郎, 沼宮内弼雄, 備後一義, 千田徹

JAERI-M 6842 (1976)

漁網海岸砂及び船体の表面線量率測定評価に関する業務

44. Hubbell J.H.,

NS RDS-NBS 29 (1969)

45. Storm E.,

LA-3753 (1967)