

PNC TN852 81-65

PNC TN852 81-20(Rev)

β線被ばくの防護対策に関する手引(改訂版)

Safety Guide for the Protection of β -ray Exposure

1981年11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下さい。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松 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

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, 4-33 O-aza-Muramatsu, Tokai-mura, Naka, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

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

1981年11月

β線被ばくの防護対策に関する手引

Safety Guide for the Protection of β-ray Exposure

実施責任者	北原義久*
報告者	中田啓**
	岸本洋一郎*
	鹿志村攻**
	吉村征二*
	丸山進*
	薄井貞次*
	椿裕彦*

目的 β線による被ばくの防護を適切に実施するために手引書を作成する。
要旨 一般にβ線による被ばくについては、γ線や中性子線による被ばくに比較して軽視されがちである。

しかし、β線と言えども防護対策を適切に実施しなければ予想外の局部被ばくを受ける事になる。そこでβ線による被ばくの防護をより適切に実施するために手引き書を作成した。

本書では、外部被ばくの防護について一般的な原則をβ線の特性も加味しながら記載している。

又、β線場における作業に当っては事前モニタリングの原則にしたがって計画目標線量の設定を行なうためにその算定方法と手順を記載した。

一方、放射線作業は被ばく管理を念頭におき実施する必要があるので、機器の特性をふまえて線量率のモニタリング方法を記載した。最後に実際の放射線作業を実施する場合に放射線防護の3原則を適用してβ線被ばくの低減化方法について触れた。

尚、本手引き書の作成に当って安全対策課石黒秀治氏及び現大洗工学センター安全管理部放射線管理課武田伸莊氏に助言を頂いた。

*安全管理部放射線管理第2課

**安全管理部安全対策課

目 次

1. まえがき	1
2. 外部被ばく防護の一般的原則	2
3. β 線被ばく防護の原則	3
3.1 β 線の特性	3
3.2 事前モニタリングの原則	3
3.3 被ばく管理についての流れ図	4
4. β 線被ばく防護対策の具体的な実施	5
4.1 事前モニタリング	5
4.1.1 TLD の場合	5
4.1.2 電離箱サーベイメーターの場合	6
4.1.3 スミヤ法の場合	8
4.1.4 モニタリング上の注意事項	8
4.2 吸収線量率の予測・評価法	9
4.2.1 距離による補正	9
4.2.2 遮蔽による補正	9
4.3 無限平面線と仮定できる有限平面線源の半径	11
4.4 計算例	12
4.5 防護対策の検討	15
4.5.1 計画目標線量の設定	15
4.5.2 β 線被ばく低減の手段	15
4.5.3 遮蔽	16
4.5.4 距離	17
4.5.5 作業時間の短縮	17
4.5.6 制動放射等	18
5. 作業モニタリング	19
5.1 被ばく線量	19
5.2 線量の測定	19
5.2.1 測定方法	19
5.2.2 作業計画時および作業開始前の線量計の測定	19
5.2.3 作業中の線量率の測定	19

5.3 被ばく線量の測定	20
5.3.1 全身被ばく線量計	20
5.3.2 手部被ばく線量計	20
5.4 被ばく線量の比較	20
5.4.1 全身被ばく線量	20
5.4.2 手部被ばく線量	20
5.5 被ばく線量の制限	21
5.5.1 除 染	21
5.5.2 遮蔽、移動等	21
5.5.3 手先(指先)の汚染の被ばく	21
5.6 眼の被ばくの防護	21
6. 参考文献	22
7. 記録用紙	23
7.1 β 線モニタリング記録用紙	23
7.2 作業管理モニタリング記録用紙	24
8. 別添資料	25

1. まえがき

一般に β 線による被ばくの問題は、 γ 線や中性子にくらべて、遮蔽が簡単なこと、被ばくが表皮など局所的で造血臓器、生殖腺などに影響する事が少ないなどの理由から軽視されがちである。

しかし、我々は防護対策を怠ると手部等の局部に思わぬ被ばくを受ける事をいくつかの非定常作業等を通じて経験してきた。

そこで、今後その管理を適切に行なう事を目的として β 線による被ばくの防護対策に関する「手引書」を作成した。

本手引きの作成に当っては文献を参考に、現場における放射線作業の計画と実施に際して利用しやすいようにするためにある部分では、いくつかの過大な仮定を置いている。

しかし、それらはいずれも結果として大きく不安全側にならない様にする前提で行なったものである。

今後、この手引書が現場における放射線作業の計画と実施に大いに活用され、 β 線被ばくの問題が改善されることを期待している。

なお、将来実作業に基づいてデータがさらに蓄積された段階で本手引きの見直しを行なう必要がある事を付記しておく。

2. 外部被ばく防護の一般的原則

外部被ばくの防護を行なうには、次の基本的な方法がある。

- (1) 放射線源との間に距離をとること
- (2) 放射線源との間に遮蔽をおくこと
- (3) 作業時間を短縮すること

放射線作業にあたっては、これら3つの基本原則の意味をよく理解して、それぞれを適用するための具体的な方法を習得し有効に活用することが必要である。

普通、これらの基本原則のうち、どれか一つだけで防護の目的を達することは困難である場合が多く、三つの基本原則を適正に組み合わせることによって、より効果的な防護が期待できる。

これらのうち、どの手段を重視すべきかは線源や作業に関するいろいろな条件によって異なるが一般的には遮蔽と距離を第一に、次に時間を考慮するという順に行なうのが普通である。

基本原則の適用にあたっては、被ばくを受ける地点の放射線場に関する知識をもっていることが前提となっている。

即ち、①放射線の種類、②入射方向、③線量率などを測定、計算、あるいは、その他の何らかの手段により、予め知った上で防護対策等の検討を行うものとする。

3. β 線被ばく防護の原則

3.1 β 線の特性

β 線は γ 線に比べて物質との相互作用が大きい。これは β 線の被ばくは、局部的ではあるが、大きな吸収線量を対象部位に与えることを意味している。^[*]

それはまた被ばくの防護対策を考える時、 γ 線などに比べて遮蔽が容易であるということでもある。

例えば、再処理工場内に通常存在する最高エネルギーの β 線核種の $^{106}\text{Ru} - ^{106}\text{Rh}$ (3.5MeV)を例にすると、この線源に対して約14mm厚のアクリル板を遮蔽として用いた場合、線量率は約1/100程度に減衰する事でも理解できる。

即ち、 β 線の存在を予測し、防護対策を工夫することによって、 β 線被ばくを大きく軽減することができる。

なお、ここに再処理施設内の主な β 核種のエネルギーと各燃料におけるそれぞれの比放射能および β 線最大エネルギーの平均値を別添表-1と表-2に示す。

3.2 事前モニタリングの原則

β 線被ばくの防護対策を考慮する場合、被ばくを受ける地点の放射線場に対する知識が必要である。

この要請に応えるものとして、事前モニタリングの原則を設定する事とする。作業に先立ち、被ばくを受けると考えられる地点の線量率について、事前モニタリング等による実測データを得ておく。そしてこれに基づいた作業計画を立てるものとする。

事前モニタリングの実施に当っては、次の点に注意することが必要である。

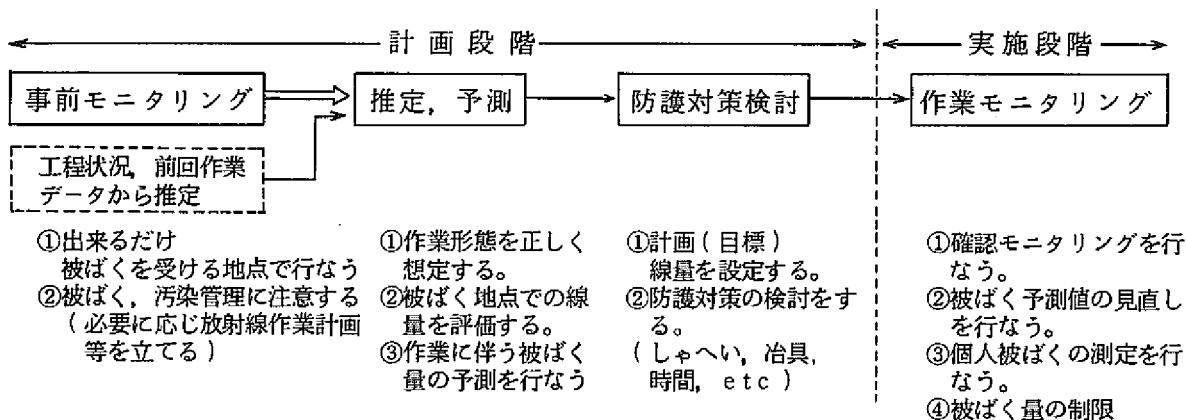
- ① 可能な限り、実施時に想定される作業形態から、被ばくを受ける地点のそれぞれについて実施する。
- ② 施設、設備の状況を調べ、モニタリングに伴う被ばく、汚染等のない方法を検討する。
- ③ モニタリングに伴う被ばく、汚染管理等の必要がある場合は、モニタリング実施についての放射線作業計画を立てた上で実施する。

(*) 単位フルエンス率当りの線量当量率で比較すると β 線は γ 線の100倍以上である。

(1 MeV の電子線(β 線)の場合の 1 mrem/h 当りのフルエンス率; 4.8 electrons/cm² · sec)
" 光子 (γ 線)の " " " ; 5.6 × 10² photons/cm² · sec)

3.3 被ばく管理についての流れ図

放射線作業を実施する場合のβ線被ばく管理は、次の流れ図に従って行うものとする。



勧告レベルに係る外部被ばく線量

レベル 被ばくする部位	要警戒の勧告レベル	作業制限の勧告レベル
皮ふのみに対する被ばく	2.5 レム/月	8 レム/3か月 30 レム/年
手, 前ばく, 足又は足関節のみに対する被ばく	6 レム/月	20 レム/3か月 75 レム/年

4. β線被ばく防護対策の具体的な実施

4.1 事前モニタリング

1) モニタリング機器等による測定

- ① TLD (バッジ・指リング等)
- ② 電離箱型サーベイメータ
- ③ スミヤ法

2) モニタリング方法

作業形態を想定して、出来るだけ最大の被ばくを受ける地点の放射線場のモニタリング（測定値、位置等）結果を記録する。

なお、事前モニタリングが不可能な場合は前回作業実績より判断する必要がある。

4.1.1 TLDの場合

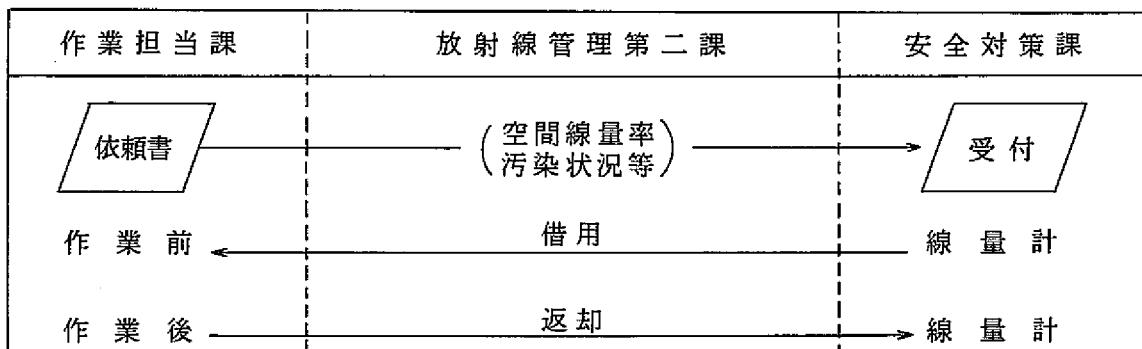
- ① 非定常モニタリング用線量計配布依頼書を作成し、線量計を安全対策課（線量計測係）より借り受ける。
- ② 線量計の汚染防止（ビニール二重梱包）を講じ、現場に取付ける。
- ③ 安全対策課に測定依頼をする。
- ④ 測定位置での線量結果

i) _____ mrad/h at _____ cm
ii) β/γ : _____

－注意事項－

- 線量計のβ線入射窓を線源の方向に向けて測定すること。
- 線量計の測定範囲は 300mrad ~ 1,000radである。
- 作業場所の核種が不明の場合は推定核種を記入の上、安全対策課へ依頼すること。

非定常モニタリング用線量計配布依頼書の経路



4.1.2 電離箱サーベイメータの場合

β 線検出用の窓を備えたサーベイメータを用い、その指示値の差 (mR/h) から皮膚不感層 ($7 mg/cm^2$)、または手不感層 ($4.0 mg/cm^2$) の直下における β 線の吸収線量率 ($mrads/h$) を求める。

サーベイメータ指示値と β 線吸収線量率

$$D_\beta (mrads/h) = R_\beta (mR/h) \times k' \times K \left(\frac{mrads/h}{mR/h} \right) \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここで R_β : β 線に対するサーベイメータの正味の指示値 (窓の開閉時の指示差)

k' : サーベイメータの校正定数

K : 換算係数

1) 各種測定法および換算係数

a) 線源 (汚染皮膚面も含む) の表面吸収線量率 ($d = 0$)^{9)*}

① 照射線量率の値と別添図-1に示した換算係数を(1)式に代入して求める。

測定は、被測定面とサーベイメータのプローブ先端との距離を $\approx 1 cm$ にとり、平行に保って行う。

なお、1 cm離して測定しても、別添図-1の換算係数を乗じて得られる値はあくまでも線源表面の値であることに注意する。

② 線源表面での皮膚不感層 ($7 mg/cm^2$) における吸収線量率

_____ $mrads/h$

b) 点 (または点とみなしえる面または体線源) 線源から離れた位置 ($d \geq 2r$)^{9)*} の吸収線量率

① 照射線量率の値に別添図-2に示した換算係数を(1)式に代入して求める。

線源のエネルギーが不明の場合の換算係数

皮膚対象 ($7 mg/cm^2$) $6 (mrads/h)/(mR/h)**$

手部対象 ($4.0 mg/cm^2$) $4 (mrads/h)/(mR/h)$

② 測定位置での対象部位における吸収線量率

対象部位 _____ : _____ $mrads/h$ at _____ cm

* 測定条件を表わし、($d : cm$)が線源の表面からの距離で ($r : cm$)が線源の見掛けの半径である。

** 換算係数 $6 (mrads/h)/(mR/h)$ の選定は別添表-2の燃料ごとの β 線最大エネルギーの平均値の値 $0.8 MeV$ から算出した。

2) β/γ 比の算出方法

a) γ 線線量率の求め方

(1)式におけるサーベイメータの正味の指示値 R_β (mR/h)は、次式で求められる。

$$R_\beta = R_{\text{op}} - R_{\text{cl}}$$

R_{op} : β 線検出用の窓を "open" にしたときの線量率

R_{cl} : β 線検出用の窓を "close" にしたときの線量率

ここで、 R_{cl} は γ 線線量率であるが、1 MeV以上の ^{106}Ru - ^{106}Rh (3.5MeV)および ^{144}Ce - ^{144}Pr (3 MeV)などの β 線は窓を閉じてもほとんど電離箱壁を通過してしまうので、正味の γ 線線量率を測定する際には塩ビカバー (1,000mg/cm²)を用いて測定する。

b) β 線吸収線量率の求め方

(1)式によって算出した D_β (mrad/h)とする。

c) β 線と γ 線線量率の比の求め方

上記の γ 線線量率、 β 線吸収線量率から β/γ 比を求める。

4.1.3 スミヤ法の場合

- ① 表面汚染レベル測定のためのスミヤを採取する。
- ② スミヤろ紙の放射能測定
- ③ 拭き取り効率、拭き取り面積を考慮して、表面汚染密度 ($\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$)を算出する。
- ④ 表面汚染密度から作業位置での β 線吸収線量率への換算係数は、未知核種の最大エネルギーを $^{106}\text{Ru} - ^{106}\text{Rh}$ の3.5MeVとして下記に示す。⁴⁾

距離	換算係数 (mrad/h) / ($\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$)	
	全身皮膚 (7mg/cm ²)	手 (40mg/cm ²)
0 cm	1.0 × 10 ⁴	6.0 × 10 ³
10 cm	7.0 × 10 ³	5.0 × 10 ³
100 cm	3.0 × 10 ³	3.0 × 10 ³

⑤ 測定位置での各表皮層厚に対する線量結果

_____ mrad/h at _____ cm

なお、不感層 7mg/cm², 40mg/cm²における β 線最大エネルギーと皮膚吸収線量率との関係を別添図-3および図-4に示す。

4.1.4 モニタリング上の注意事項

- ① モニタリングに伴なう必要な被ばく管理、汚染管理を行なうこと。
- ② モニタリングの実施方法、予測される放射線レベルによっては、事前モニタリング自体が放射線作業相談（第1種、第2種）の範囲となる場合もありうる。

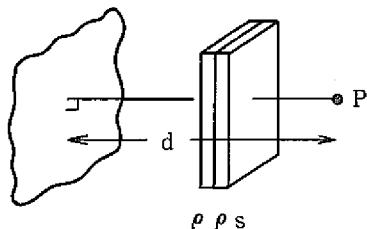
4.2 吸収線量率の予測、評価法

事前モニタリング結果からある被ばく位置で吸収線量率を予測する場合距離および遮蔽による補正を次のとおり行う。

4.2.1 距離による補正

(1) 無限平面線源の場合

$$D = f \cdot E \frac{S_A' C}{2} e^{-\mu(\rho_s + \rho)} \cdot E_1(h) \quad \dots \dots \dots (2)$$



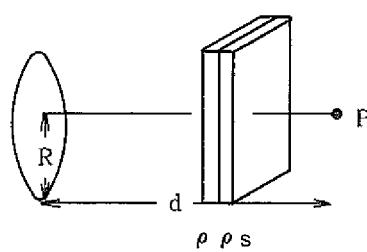
$$h = \mu \rho_a d$$

$$\mu = 17 E_m^{-1.43}$$

$$C = 3.7 \times 10^{10}$$

(2) 有限平面線源の場合

$$D = f \cdot E \frac{S_A' C}{2} e^{-\mu(\rho_s + \rho)} \left\{ E_1(h_1) - E_1(h_2) \right\} \quad \dots \dots \dots (3)$$



$$f = 9.8 \times 10^{-4} E_m^{-1.43}$$

$$h_1 = \mu \rho_a d$$

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

$$\mu = 17 E_m^{-1.43}$$

$$C = 3.7 \times 10^{10}$$

記号

D [rad/hr]	吸収線量率	E_m [MeV]	β 線の最大エネルギー
f [rad·sec·cm ² /MeV·hr]	変換係数	E [MeV]	β 線の平均エネルギー
d [cm]	距離	ρ_a [g/cm ³]	空気の密度
R [cm]	半径	ρ_s [g/cm ²]	皮膚の不感層の面密度
μ [cm ² /g]	β 線の質量吸収係数	ρ [g/cm ²]	遮蔽体の面密度

上式(2)・(3)より距離の関数の項は、無限の場合が $E_1(h)$ で有限の場合が $\{E_1(h_1) - E_1(h_2)\}$ である。

それぞれの測定位置に関する作業位置の比を距離の FACTOR とする。

なお、 $h - E_1(h)$ 線図を別添図-5 に示す。

4.2.2 遮蔽による補正

無限平面線源の式(2)より遮蔽効果の項は $X = e^{-\mu(\rho s + \rho)}$ により遮蔽をしない場合と遮蔽を有する場合の比から吸収線量率を算出する。

$$X = e^{-\mu(\rho s + \rho)}$$

ここで X : 減衰効果

$$\mu = 1.7Em^{-1.43} [\text{cm}^2/\text{g}]$$

ρs : 皮膚の不感層の面密度 (全身皮膚 : 0.007 g/cm^2 , 手 : 0.04 g/cm^2)

ρ : 遮蔽体の面密度 (g/cm^2)

なお、遮蔽については第4章の5項で詳細に述べる。

4.3 無限平面線源と仮定できる有限平面線源の半径

無限平面線源（式-2）と有限平面線源（式-3）の吸収線量率を比較すればよい。

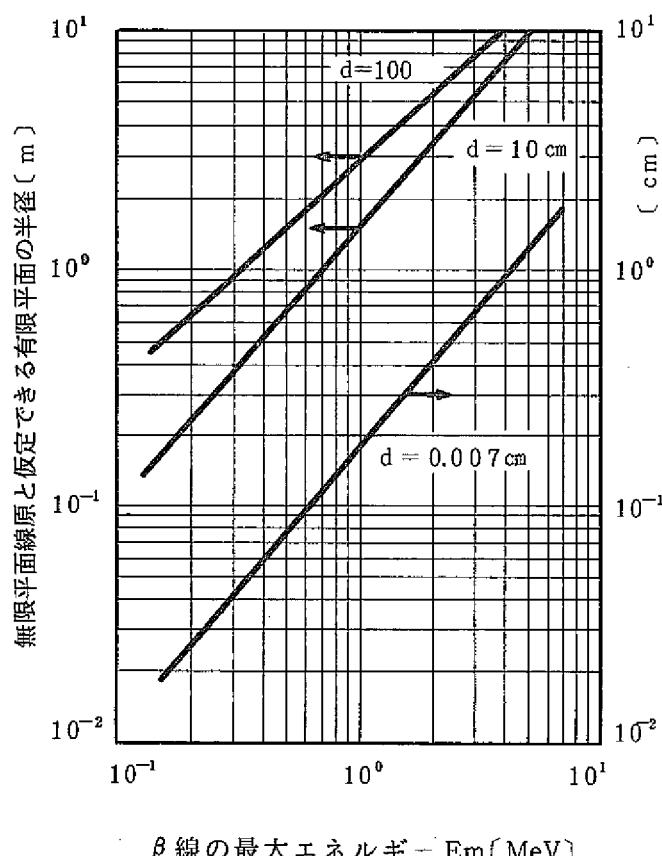
そこで、有限線源の吸収線量率Dが無限線源の吸収線量率 D_{∞} の99%である場合の有限線源の半径Rを求める。

$$\frac{D}{D_{\infty}} = \frac{E_1(h_1) - E_1(h_2)}{E_1(h_1)} = 0.99$$

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

上記の関係を、dをパラメータとして最大エネルギー E_m について示したものが下図である。

同図より例えば、 $^{106}\text{Ru} - ^{106}\text{Rh}$ ($E_m = 3.5 \text{ MeV}$)の皮膚汚染は、その半径が7 mm以上、又 ^{137}Cs ($E_m = 1.18 \text{ MeV}$)の場合は2.5 mm以上の広がりがある場合は無限平面線源と見なすことができる。



参考のため、空気中の距離における
 $^{106}\text{Ru} - ^{106}\text{Rh}$ の減弱曲線を無限平面線源及び有限平面線源（線源半径(R)：50, 25 cm）について別添図-6に示す。

4.4 計 算 例

1) 測定位置から作業位置の予測 (距離の補正)⁸⁾

a) 対象核種 : $^{106}\text{Ru} - ^{106}\text{Rh}$

b) 最大エネルギー : 3.5 MeV

c) 距離 : 測定位置 (0 cm) から作業位置 (10 cm) を評価する。

d) 線源形状 : 無限平面

$$E_1(h) = \int_h^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy \quad \dots \quad (4)$$

$$h = \mu \cdot \rho_a \cdot d \quad \mu = 1.7 E_m^{-1.43} \quad (E_m: \text{最大エネルギー})$$

$$\rho_a = \text{空気密度} (0.001293 \text{ g/cm}^3)$$

$$d = \text{距離 (cm)}$$

$$\mu = 1.7 \times (3.5)^{-1.43}$$

$$= 2.83 [\text{cm}^2/\text{g}]$$

$h = \mu \cdot \rho_a \cdot d$ から求める

○測定位置の h は ($d = 0$)

$$h = 2.83 \times 0.001293 \times 0 \\ = 0$$

○作業位置の h は ($d = 10$)

$$h = 2.83 \times 0.001293 \times 10 \\ = 3.6 \times 10^{-2}$$

$h \rightarrow E_1(h)$ 変換式 3 は別添図-5 から読み取る

$$E_1(0) = 4.32$$

$$E_1(0.036) = 2.7$$

すなわち、表面の線量が距離 10 cm で減衰する割合は

$$\frac{E_1(0.036)}{E_1(0)} = \frac{2.7}{4.32} = 0.6$$

この $E_1(\text{作業位置}) / E_1(\text{測定位置})$ を距離の FACTOR とする。

2) 作業環境より採取したスマアロ紙から、汚染面近傍の被ばく線量率を評価する。⁸⁾

スマアロ紙の核種分析結果は、次のとおりとする。

核種	汚染密度
¹⁰⁶ Ru	$1.0 \times 10^{+1} \mu\text{Ci}/100 \text{ cm}^2$
¹³⁷ Cs	$1.4 \times 10^{-1} \mu\text{Ci}/100 \text{ cm}^2$
⁶⁰ Co	$4.7 \times 10^{-2} \mu\text{Ci}/100 \text{ cm}^2$

上記の分析結果から、考慮すべき β 線源は ¹⁰⁶Ru, ¹³⁷Cs の 2 種類である。また、これらの娘核種からの β 線も評価しなければならない。

それぞれの核種からの β 線について表にまとめる。

核種	Em [MeV]	E [MeV]	放出割合	Em*	E*	放出割合*
¹³⁷ Cs	1.18	0.421	0.08	0.573	0.192	1.0
	0.52	0.172	0.92			
¹⁰⁶ Ru	0.039	0.	1.00	0.039	0.013	1.0
	3.5	1.47	0.68			
¹⁰⁶ Rh	3.1	1.29	0.11	3.00	1.25	0.91
	2.4	0.95	0.12			

* は計算を簡単化するため、最大エネルギー(Em), 平均エネルギー(E)を放出割合で加重平均したものである。

放射平衡が成り立っているので、¹⁰⁶Ru 1 崩壊あたり Em = 0.039 MeV の β 粒子 1 個と ¹⁰⁶Rh Em = 3.00 MeV の β 粒子 1 個が放出することになる。従って、各エネルギーの β 線の強度 [Ci/cm²] を含め、計算に必要なデータをまとめる。

核種	Em [MeV]	E [MeV]	S'A [Ci/cm ²]	μ [cm ² /g]	f [rad·sec·cm ² /hr·MeV]
¹³⁷ Cs	0.573	0.192	1.4×10^{-9}	3.77	2.17×10^{-3}
¹⁰⁶ Ru	0.039	0.013	1.0×10^{-7}	1760	1.01×10^{-1}
¹⁰⁶ Rh	3.00	1.25	1.0×10^{-7}	3.53	2.04×10^{-4}

ここで

$$\mu = 17 Em^{-1.43} \quad (\beta \text{ 線の質量吸収係数})$$

$$f = 9.80 \times 10^{-4} Em^{-1.43} \quad (\text{吸収線量率変換係数})^8)$$

無限平面線源の式を用いて、

$$D = f \cdot E \frac{S' A \cdot C}{2} e^{-\mu(\rho_s + \rho)} \cdot E_1(h)$$

$$C = 3.7 \times 10^{10} [1/Ci]$$

$$\text{手直下 } \rho_s = 0.04 [g/cm^2]$$

$$h = \mu \cdot \rho \cdot d (^{106}\text{Rh の場合})$$

$$= 3.53 \times 1 (\text{手の密度}) \times 0.04 (\text{対象部位までの距離})$$

$$= 0.1412$$

$h \rightarrow E_1(h)$ 変換 図-5 より

$$E_1 = 1.55$$

$$\text{手+鉛グローブ } \rho_s + \rho = 0.04 + 0.22 [g/cm^2] \quad \dots \dots \dots \text{ 鉛グローブ厚さ } 0.1 \text{ cm}$$

$$h = \mu \cdot \rho \cdot d (^{106}\text{Rh の場合})$$

$$= 3.53 (0.04 \times 1 + 0.22 \times 0.1) (\text{鉛グローブ})$$

$$= 0.2188$$

$h \rightarrow E_1(h)$ 変換 図-5 より

$$E_1 = 1.20$$

計算結果

核種	手直下 ($40mg/cm^2$)	手+鉛グローブ
^{137}Cs	0.004	0.000
^{106}Ru	0	0
^{106}Rh	0.635	0.226
計	0.639 [rad/h]	0.226 [rad/h]

4.5 防護対策の検討

4.5.1 計画目標線量の設定

特作計画その他の放射線作業の立案に当っては、事前モニタリングなどによって、 γ 線被ばくと共に β 線の寄与も考慮することは冒頭で述べた通りである。

実際の作業においては、どの程度までの被ばく量を計画線量として予定するかについては、作業の能率、人員の計画などに大きな影響を与える。

可能な限り低く設定する事を原則として再処理施設の作業環境の状況、作業の種類と頻度を考慮して、下記の値を1回当たりの作業における計画被ばく線量の上限とする。（月2回作業に従事する可能性を含める）

皮膚（全身）に対する値	1.2 rem (β , γ , 辺り)
手指、足、前ばく、足関節	3.0 rem (" ")

4.5.2 β 線被ばく低減の手段

β 線被ばく線量を低く抑えるには、被ばく部位に入射する β 粒子束密度を小さくすればよい。

入射粒子数は線源強度と比例する（同一ジオメトリーにおいて）から根本的には作業に先立ち可能な限り除染して線源を減少させることである。

実際にはこれが困難であることが多いために、通常は次の3つの方法の中から1つ又は各々組合せて被ばくの低減化をはかる方法がとられる。

点状線源よりの被ばく線量Dは次式で表わされる。

$$D = f \cdot E \cdot \frac{S \cdot C}{4\pi r^2} e^{-\mu\rho} \cdot T \quad [\text{rad}] \dots \quad (4)$$

a) 遮蔽 $e^{-\mu\rho}$ の減少

b) 治具の使用など（距離） r の増大

c) 作業時間 T の短縮

ここで

D = 吸収線量 $[\text{rad}]$

E = β 線の平均エネルギー $[\text{MeV}]$

S = 線源の放射能強度 $[\text{Ci}]$

C = 3.7×10^{10} $[\text{dps/Ci}]$

f = 変換係数 $(\text{rad} \cdot \text{sec} \cdot \text{cm}^2 / \text{MeV} \cdot \text{hr})$

T = 被ばく時間 $[\text{hr}]$

μ = 吸収係数 (cm^2 / g)

ρ = 面密度 (g/cm^2)

r = 線源から部位までの距離 [cm]

この式で示す $\frac{SC}{4\pi r^2}$ は遮蔽の無い場合の被ばく部位に入射する β 粒子束密度であるが、遮蔽に 2 種類の物質が関与するものと仮定して（式-4）を一般式の形に書き直すと次のようになる。

$$D = f \cdot E \cdot \phi \cdot e^{-\mu(\rho_1 + \rho_2)} \cdot T \quad [\text{rad}] \quad (5)$$

ただし $\left\{ \begin{array}{ll} \phi = \text{遮蔽なしの場合の入射 } \beta \text{ 粒子束密度} & [\text{sec}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}] \\ \rho_1 = (\text{遮蔽物質: 1}) \text{ の面密度} & [\text{g/cm}^2] \\ \rho_2 = (\text{遮蔽物質: 2}) \text{ の面密度} & [\text{g/cm}^2] \end{array} \right.$

変換係数 f と β 線最大エネルギーとの関係を別添図-7に示す。

4.5.3 遮蔽

β 線の遮蔽は γ 線が一担、物質との相互作用を介して電子となり間接的に皮ふを電離して被ばくさせる場合と異なり、直接電離するから同一のエネルギーと入射粒子束密度をもつ γ 線に比較して、被ばく効果は非常に大きくなる。

特に線源近傍では空気による吸収もあまりないことを留意しなくてはならない。

換言すれば、物質中での一定の長さにおける吸収（被ばく効果）は、 γ 線がその部分で「運動電子エネルギー」となる割合“エネルギー吸収係数”であり、これは 1 より小さい（ β 線：1）からこの差だけ β 線の方が大きい事になる。

すなわち薄い遮蔽物でも阻止できることを意味する。

また、一定のエネルギーの β 線の電離吸収は、近似的に吸収物質の密度が関係し、物の種類にはあまり関係しないから β の遮蔽に用いる物質は目的とする $e^{-\mu\rho}$ なる値が得られる厚さならば、どのような物質でもよい。

しかし、厳密には遮蔽材の制動 x 線や、核励起による γ 線となって被ばくに寄与することもあるが、これは非常に高エネルギー β 線を使用したり、金属などの高原子番号物質を使用した際に考慮すればよい事であるから、これについては別記する事とする。

遮蔽は前述のように、人体と線源の間に β 線を吸収する物体を入れて入射する β 粒子を $e^{-\mu x}$ なる値に減少させることであるから、一応どの位置で遮蔽してもよいことになるが、遮蔽材の必要量からなるべく線源に近い点で遮蔽する事を原則としなければならない。

又作業環境の特殊性などから人体側を防護する場合も多い。

遮蔽材の選定は以上の条件でなされるが、一般的には線源の β 核種のもつエネルギーにより固有の「吸収係数」を考慮して、材質と厚さを決めるといつてよい。

また、被ばく量の大小はこの他に線源の形状が関係する。

遮蔽計算を行うため必要な吸収係数はその実験的証明が現在非常に困難で各種の経験式

が提唱され使われているが、本項では GLEASON et al の式¹⁾ $\mu = 17 E m^{-1.43} (\text{cm}^2/\text{g})$ を使用する。

この式を用いて計算した再処理工場における代表的 β 核種 4 種の μ と $e^{-\mu x}$ を別添図-8 に示した。

例えば、 $^{90}\text{Sr} - ^{90}\text{Y}$ の場合 0.87 g/cm^2 程度で約 $1/100$ に減弱することが分る。

また、別添表-3 に通常使用されている各種遮蔽材の単位長さ当たりの減弱率を示した。

この使用方法は、例えば $^{106}\text{Ru} - ^{106}\text{Rh}$ に対して、アクリル板 0.1 cm の場合表で 0.718 に減弱することは知れるが、 10 倍厚の 1 cm のもので遮蔽するなら $0.718^{(\frac{1}{10})} = 0.0364$ となる。

n 倍 ($1/n$ 倍) 厚の遮蔽はそれの n 乗 ($1/n$ 乗) の減弱ファクターをもたらす。

4.5.4 距 離

被ばく線量と距離との関係は一般的には距離をとれば被ばく線量は低下するが、その比率はモニタリングの項で示した。

β 線など荷電粒子には、必ず最大飛程があり、当然これ以上の距離をとる必要がないが（式-4）はこれを示していないから線量は距離を最大飛程以上にとってもゼロにならない。

この理由は指數函数に近似させて計算したからであるが、最大飛程以遠で見かけ上失われるエネルギーは、全エネルギーの 0.1% 程度で問題は生じない。

別添図-9 に各種の物質中における β 線最大飛程を示す。

実際の作業においては距離をとる手段として、トング、ピンセットなど治工具の使用を行う。

4.5.5 作業時間の短縮

遮蔽・距離のいずれによっても入射 β 粒子束を減少させることが困難な場合に、最終的に行なうもので 1 人当たりの作業時間を短かくして、その代りに作業者数を増すことによって 1 人当たりの被ばく線量を低減させようとする方法である。しかし、全体の被ばく線量 (total man rem) は減少しないから作業環境が著しく劣悪で除染や距離をとることが不能な場所又は遮蔽をしていたら逆に被ばくしてしまうというような場合のみに適用されるべきである。

積極的方向としては、作業のモックアップテストなどを実施して可能な限り短時間に実施できるように努めることは被ばく防止のみならず、安全側から見たすべての面から望ましいことである。

放射線作業を実施する場合、通常 1 人で実施する事はないが、必ず補助者等に時間の確認を依頼しておくことが必要である。

4.5.6 制動放射等

β 線が原子核付近を通過する際、強いクーロン電場によって急に減速されて X 線を放出したり、原子核を励起して γ 線を放出したりする。

これらの現象は原子番号に従っており、一定面積内に存在する原子数に比例している。

また、これは β 線のエネルギーが高ければそれだけクーロン場に打勝って原子核に近づくことができるから制動放射の確率は高くなる。

β 線のエネルギー損失のうち、制動放射分と電離分が同じになる点を臨界エネルギーといい、およそ $800/Z$ [MeV] である。遮蔽材に $Z = 82$ の鉛を使用するが、このような高エネルギー β 線は加速器を使用しない限り存在しないので $^{106}\text{Ru} - ^{106}\text{Rh}$ では鉛遮蔽に対して 3 % 程度の電磁波を発生するにすぎない訳である。

別添図-10 に遮蔽物質の原子番号と（制動放射損失／全エネルギー損失）の関係を示す。¹⁾

5. 作業モニタリング

5.1 被ばく線量

測定と計算に基づいて、あらかじめ β 線吸収線量率の評価を行い、それによって作業操作方法をきめ、防護上の措置をとる必要がある。

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する。また、取扱う全キューリ数よりも比放射能 (Ci/g) の大小が被ばく管理上問題となる。

従ってゴム手袋をしているときでも直接手でつかまないようにすると共に、止む得ずそのような操作を行うときは、あらかじめ十分被ばく線量の評価を行って、操作時間を決める必要がある。

5.2 線量の測定

5.2.1 測定方法

電離箱型サーベイメータの β 線測定用窓を開いた場合と閉じた場合の値の差から求めることができるが、サーベイメータには γ 線の線量率について目盛ってあるからサーベイメータの mR/h の表示が必ずしも β 線の mrad/h の指示を示さないことに注意しなければならない。特に β 線に近づけて測定する場合は、 β 線の mrad/h は、サーベイメータの mR/h の表示値と大幅に異なる値になる。

β 線の線量率は、前に記述した $\beta + \gamma$ 線量率と γ 線量率の差にある係数（換算係数）を乗じることにより、求めることができる。（4.1.2 項参照）

5.2.2 作業計画時および作業開始前の線量率の測定

電離箱型サーベイメータを使用して、作業場所の β 線線量率を測定する。

この測定は、作業の計画を行う段階と作業を開始する直前に行い、両者の値に大差のないことを確認しておく。

もし大きな差があった場合は、その原因を調査して、作業の計画段階で測定した値に復帰させるか、作業の計画を再調整したのち、作業を開始する。

5.2.3 作業中の線量率の測定

作業中廃棄物の移動、線源遮蔽物の開閉等、線量の変化があったと思われたとき、または必要であると判断したときには、線量率を測定し、作業者への被ばく線量の変化を把握する。

もし、計画被ばく線量を越えるおそれがあると思われるような変化があれば、作業員を退出させ、作業前の線量率か、それ以下に低減する等の操作を行ってから作業を再開する。

5.3 被ばく線量の測定（個人モニタリング）

作業者の全身および手部被ばく線量の測定器として、ポケット集積線量計（P.D.）、警報付集積線量計（アラームメータ）、TLD線量計、指リング等がある。これらの測定器は、 γ 線または $\beta + \gamma$ 線吸収線量計であるためPD、アラームメータの表示値がそのまま β 線吸収線量値とはならないで注意を要する。

5.3.1 全身被ばく線量計

作業者の全身被ばく線量計として、PD、アラームメータがある。これらは前にも述べたように、 β 線吸収線量値を表示していないので、この二つの測定器の値を使って、全身の β 線吸収線量を算出する。³⁾

$$\beta\text{線吸収線量値} = 4 \times [(PD\text{値}) - (\text{アラームメータ値})] \text{ mrad}$$

5.3.2 手部被ばく線量計

作業者が通常使用しているTLDバッヂ、指リングの他に非定常用として、TLD線量計、指リングが借用できる。

これは、予測被ばく線量が高いと思われる場合（300 mrad を越えると予想された場合）の作業に使用する。

借用方法は所定の用紙（非定常モニタリング用線量計配布依頼書）にその旨を記入し、放管のコメントを添書きし、安全対策課線量計測係に申請する。使用後（作業終了後）同係へ返却し、測定を依頼する。

5.4 被ばく線量の比較

5.4.1 全身被ばく線量

先に測定した β 線量率より算出した被ばく線量と、実作業でうけた被ばく線量を比較する。これは、作業者各人について、作業ごとに行い、両者に大差があった場合、または予想被ばく線量を大きく上回った時には、その原因を調査し、さらに被ばく線量を低減させる操作（原因の徹去、遮蔽、時間の短縮）を行った上で作業を再開する。

5.4.2 手部被ばく線量

手部被ばく線量が300 mrad を越えると予想された場合、または計画被ばく線量を越えるおそれがあると判断した場合は、非定常用指リングを装着し、作業者の作業終了後、ただちにその指リングを測定して（1 rad）および計画被ばく線量を越えていないことを確認する。

5.5 被ばく線量の制限

5.5.1 除染

セル内作業等の室内作業において、床、壁等に多量の汚染があり、その影響により室内の線量率が高い場合には、できる限りの除染を行う。

この除染作業は簡単に素早く行うことが必要である。

なぜならば除染作業中に手部、足部等に汚染を生ずる恐れがあり、高密度の汚染の場合、被ばく線量が無視できなくなる事があるためである。

5.5.2 遮蔽、移動等

局部的な汚染または固体状のもので除染が困難な場合であって、遮蔽、移動、撤去が容易な場合には、この操作を行う。

5.5.3 手先（指先）の汚染による被ばく

手先だけで放射性物質を取り扱う作業においては、鉛入グローブ、トング、ピンセット等を使用して作業を行う。

なお細かな作業であって、上記の防護措置ができない場合には、作業時間を調整（短縮）する必要がある。

もしゴム手袋が汚染している場合には、早めに交換しなければならない。

今、ゴム手袋に放射能面密度 $1\text{ }\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ の汚染があったと想定すると手部に $10\text{ rad}/\text{h}$ の被ばくを受ける事になる。

この状態で、もし10分間作業を継続した場合には約 1.7 rad の被曝を受ける事となる。

したがって、できる限り早めにゴム手袋を交換して、手部被ばく量をおさえる必要がある事が分る。

5.6 眼の被ばく防護

高いエネルギー（3 MeV以上）の β 線源に接近して、 β 線密度の高い位置で作業をする場合には、外部被ばく防護の意味から眼鏡が必要である。

この場合、厚さが $500\text{ mg}/\text{cm}^2$ （1.8 mm）の眼鏡で大体の吸収線量は、2桁以上さがる事がわかる。したがって、この程度以上の厚さがあれば、普通の作業においては防護上の目的は十分達せられる。

なお、現在、特殊放射線作業等で使用している全面マスクの場合はアクリルの厚さから考慮してこの防護上、十分な遮蔽能力を有している。

注) 比放射能 (specific activity)

放射性核種単位質量当りの放射能をいう。しかしこの用語は、非放射性核種を含む場合に用いられることが多く、一般には、その元素、化合物、水溶液など 1 g 又は 1 cm^3 当り何mCi, 1 mol 当り何Ci等で示される。

6. 参考文献

- 1) 福田, 神永, 井沢 「外部被ばくによる β 線吸収線量の評価」 JAERI 1,065
- 2) 武田, 石黒, 野村, 加藤 「TLDによる局部被ばく線量評価法」 N-843-80-17
- 3) β 線被ばく評価 W.G 「 β 線被ばく線量評価の現状」 SN-143-80-01
- 4) 備後, 南 「点積分核法による β 線皮フ線量の評価」 JAERI-M-7,354
- 5) W. G CROSS 「Table of Beta Dose Distributions」 1,967 AECL-2,793
- 6) 備後, 他 「電離箱およびGM計数管型サーベイメータの校正(1)
保健物理 V01-13-279 (1,978)
- 7) " 「電離箱およびGM計数管型サーベイメータの校正(2)
保健物理 V01-14-1 (1,979)
- 8) 青柳, 権田 「再処理工場運転員のための線量計算演習」 PNCT-852-79-13
- 9) 吉田, 他 「放射線管理マニュアル」 JAERI-M-4,621
- 10) ICRP-Pub-15 "

PNC TN852 81-65

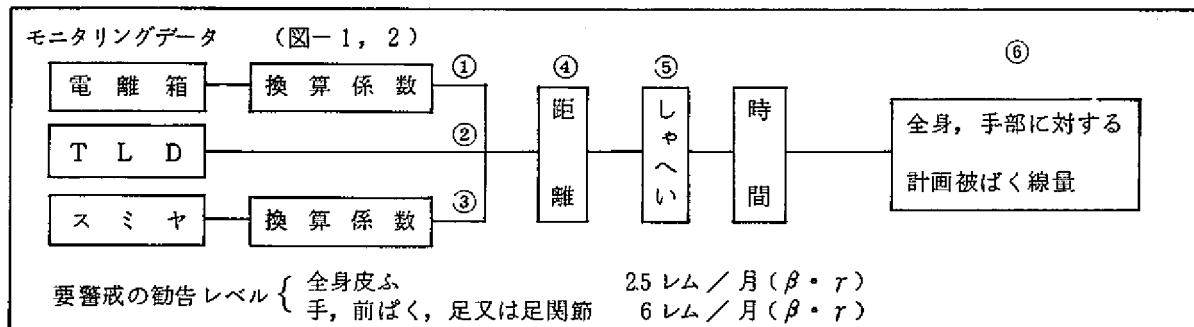
PNC TN852 81-20 (Rev)

7. 記 錄 用 紙

7.1 β線モニタリング記録用紙

β線モニタリング記録用紙

I β線計画被ばく線量算出手順



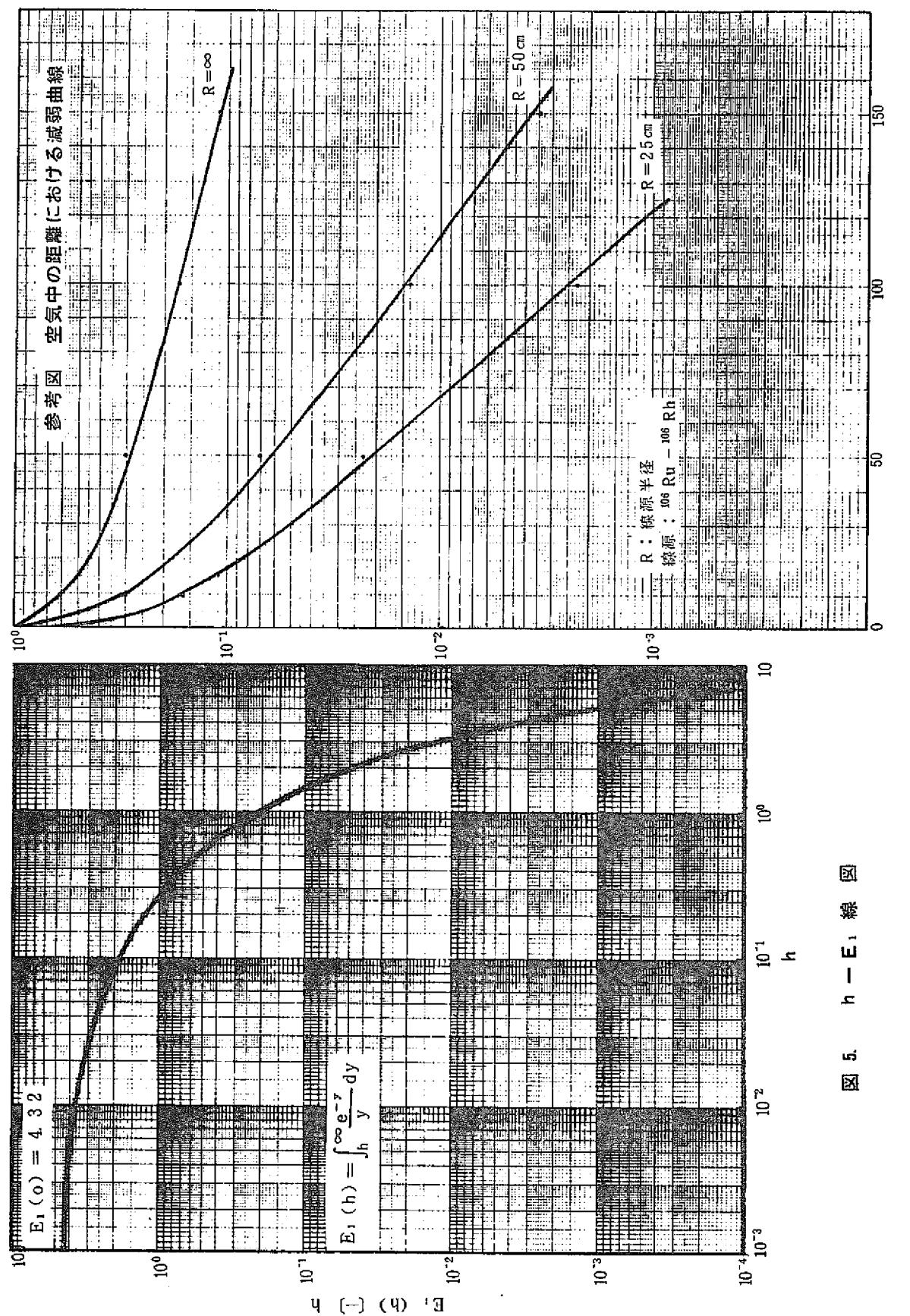
II モニタリングデータ (β線被ばく防護対策の具体的な実施参照)

① 電離箱 対象部位	全身	mrad/h at	cm (β/γ :)
	手部	mrad/h at	cm (β/γ :)
② TLD 対象部位	全身	mrad/h at	cm (β/γ :)
	手部	mrad/h at	cm (β/γ):)
③ スミヤ 対象部位	全身	mrad/h at	cm (β/γ :)
	手部	mrad/h at	cm }	スミヤ法は目安値である。

III 線量の算出 (下記④, ⑤の FACTOR は主に手部の評価とする)

④ 距離	測定位置と作業位置が異なる場合は無限平面線源の式から導いた次の方法により距離の FACTOR を求める。
	測定位置 (d_1) _____ cm • 作業位置 (d_2) _____ cm (線源間距離) $h_1 = \mu \cdot \rho_a \cdot d$ (ここで $\mu : 2.83^*$ (吸収係数)) d : 距離 $h_2 = (\mu \cdot \rho_a \cdot d \sqrt{(R/d)^2 + 1})$ $\rho_a : 0.001293$ (空気密度) R : 線源半径 ≪ $h = E_1(h)$ 線図参照 ≫
	線源形状 無限 有限
	測定位置 $E_1(h_1)$ _____ • $E_1(h_1) - E_1(h_2)$ _____ 距離の FACTOR
	作業位置 $E_1(h_1)$ _____ • $E_1(h_1) - E_1(h_2)$ _____
	◎ 作業位置 / 測定位置 = 距離の FACTOR
⑤ しゃへい	全身に対するしゃへい材 : _____ 手部に対するしゃへい材 : _____
	各しゃへい物質の密度と厚さを本文表 3 から読み取り、各物質に対する ρ (面密度) の合計から、エネルギー減弱曲線本文図 8 の減弱 FACTOR を求める。 尚、しゃへいの一般式: $e^{-\mu}(\rho_1 + \rho_2) =$ 減弱 FACTOR
	減弱 FACTOR
線量の算出	
各モニタリングにおける評価値 × 距離の FACTOR × 減弱 FACTOR × 時間	
= 予想被ばく線量	全身 _____ 手部 _____
⑥ 計画被ばく線量	全 身 _____ mrem 手 部 _____ mrem

* 印の μ の値は ^{106}Ru - ^{106}Rh の最大エネルギー 3.5 MeV としたので、他核種については、注意する。

図 5. $h - E_1$ 線 図

PNC TN852 81-65

PNC TN852 81-20 (Rev)

別添資料(I)

(表 及 び 図)

表-1 再処理工場取扱物質中の主要 β 線放射能組成

核種	半減期	崩壊形式	核データ		使用済燃料中の主要 β 線放射能組成								
			β 線の最大エネルギー(MeV)	放出割合	島銀(中国)1号(B) 12,000MWD/T 1634day冷却	美浜(関西)1号(P) 16,000MWD/T 2,672day冷却	玄海(九州)1号(P) 33,000MWD/T 940day冷却	定格燃料 28,000MWD/T 180day冷却	比放射能 (Ci/T)	相対強度 (Ci/T)	比放射能 (Ci/T)	相対強度 (Ci/T)	
^{90}Sr	28y	β^-	0.544	0.21	1.0	2.4×10 ⁴	0.11	2.8×10 ⁴	0.18	6.4×10 ⁴	0.06	6.7×10 ⁴	0.04
^{90}Y	64h	β^-	2.25	0.93	1.0	2.4×10 ⁴	0.11	2.8×10 ⁴	0.18	6.4×10 ⁴	0.06	6.7×10 ⁴	0.04
^{95}Zr	65d	β^-	0.360	約0.120	0.43	2.6×10 ⁴	-	-	-	7.6×10 ⁴	-	7.1×10 ³	0.04
^{95}Nb	35d	β^-, γ	1.60	約0.53	1.0	2.6×10 ⁻²	-	-	-	1.7×10 ⁴	-	1.5×10 ⁴	0.09
^{106}Ru	1y	β^-	0.039	約0.013	1.0	1.0×10 ⁴	0.05	2.6×10 ³	0.02	9.8×10 ⁴	0.10	2.2×10 ⁵	0.13
^{106}Rh	30S	β^-, γ	3.5	1.47	0.7	1.0×10 ⁴	0.05	2.6×10 ³	0.02	9.8×10 ⁴	0.10	2.2×10 ⁶	0.13
^{137}Cs	30y	β^-	1.18	0.421	0.08	3.5×10 ⁴	0.17	4.3×10 ⁴	0.27	8.9×10 ⁴	0.09	1.0×10 ⁵	0.06
^{144}Ce	282d	β^-, γ	0.320	0.102	0.72	9.7×10 ³	0.05	1.4×10 ³	0.01	1.3×10 ⁴	0.13	3.2×10 ⁵	0.18
^{144}Pr	17.5m	β^-, γ	0.240	0.077	0.08	9.7×10 ³	0.05	1.4×10 ³	0.01	1.3×10 ⁵	0.13	3.2×10 ⁵	0.18
その他 (^{89}Sr , ^{103}Ru , ^{147}Pm 他)		β^-, γ	0.186	0.057	0.2	9.7×10 ³	0.05	1.4×10 ³	0.01	1.3×10 ⁵	0.13	3.2×10 ⁵	0.18
合計	35d 30y	β^-, γ	0.90	0.31	0.02	約0.49 (0.217他)	約0.07 (0.99他)	約5.6×10 ⁴	0.41	約3.3×10 ⁵	0.33	3.8×10 ⁵	0.22
			0.225	"0.08	1.0	2.1×10 ⁶	1.0	1.6×10 ⁶	1.0	1.7×10 ⁶	1.0	4.4×10 ⁶	1.0

* 軌道電子捕かく

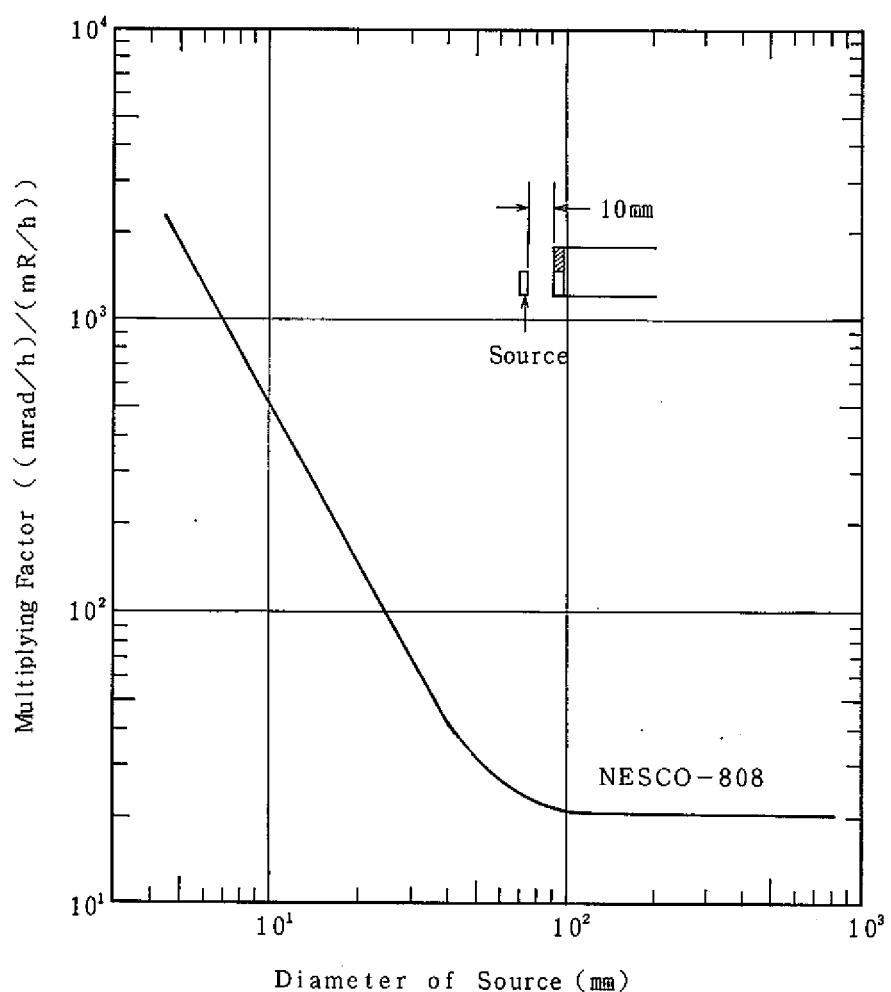


図-1 表面吸収線量率(不感層 $7\text{mg}/\text{cm}^2$ 直下)と線源の直径に係わる実用換算表

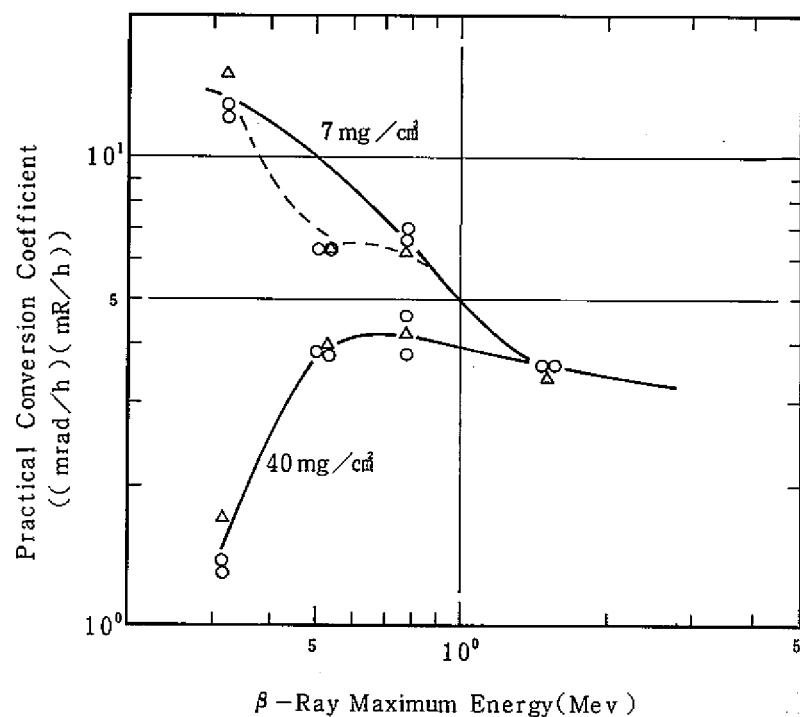


図-2 電離箱を用いた場合の各最大エネルギーにおける
不感層での換算係数

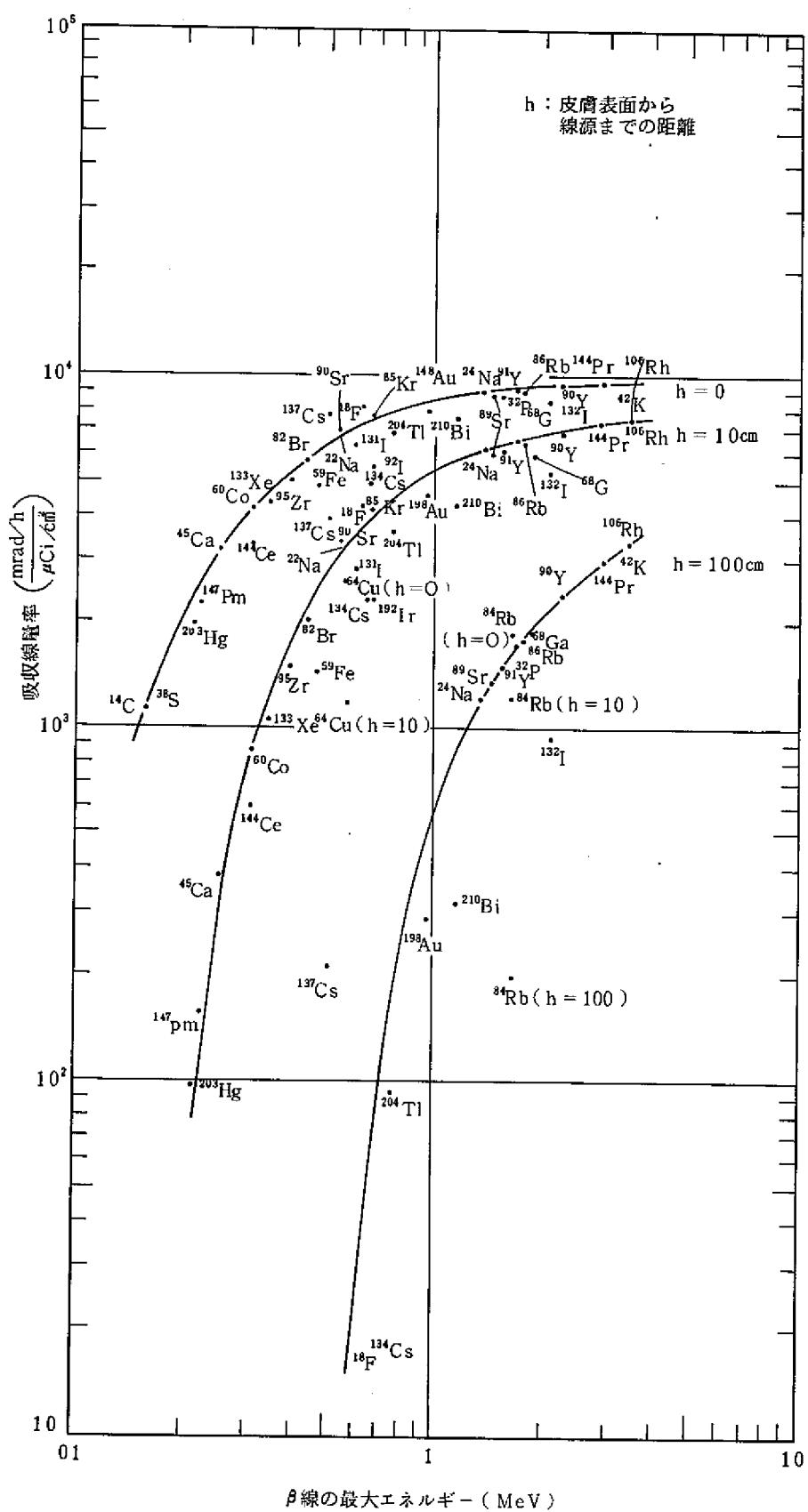


図-3 β 線最大エネルギーと皮膚吸収線量率との関係
(不感層 $7\text{mg}/\text{cm}^2$, 線源半径無限大)

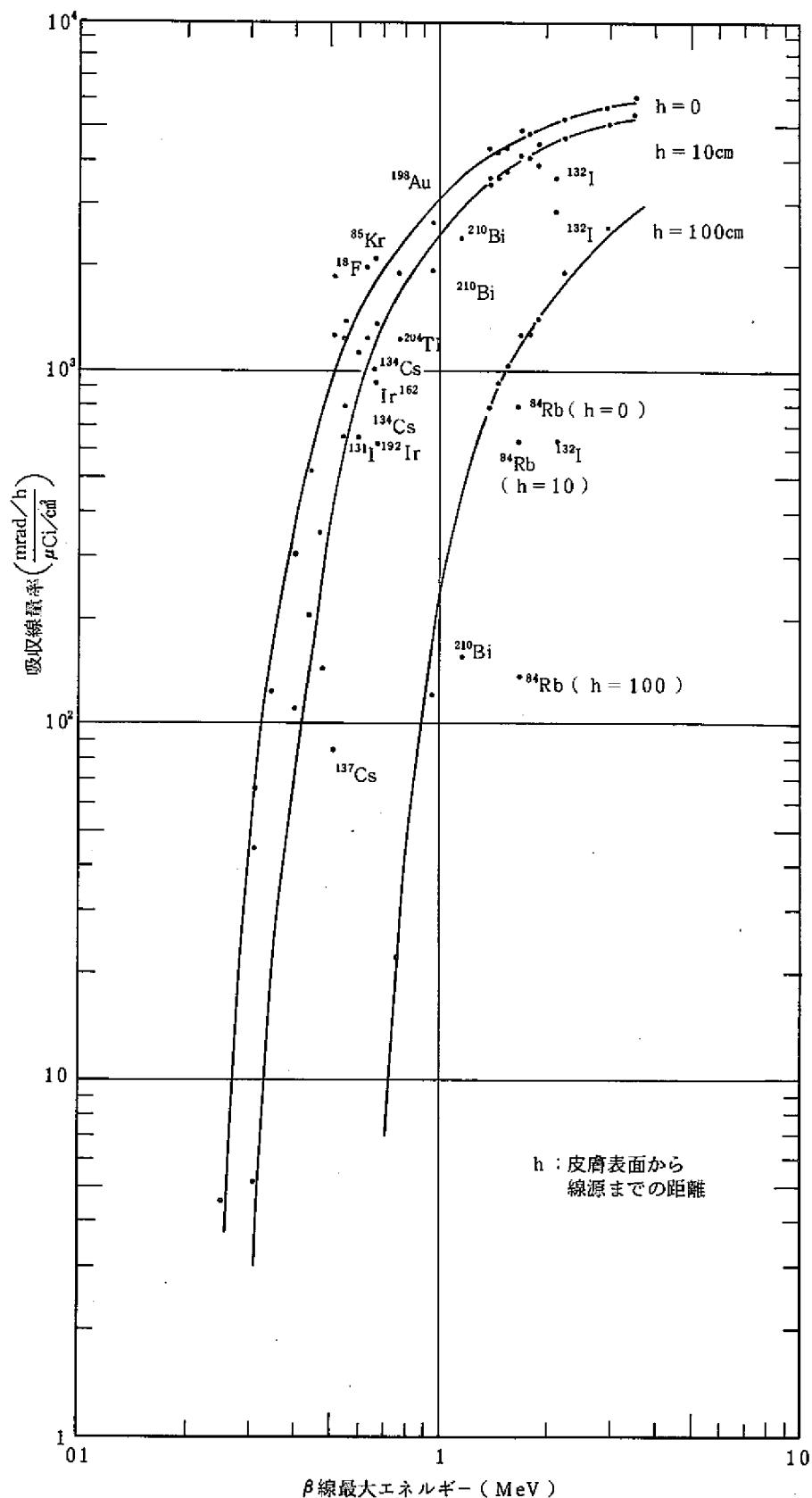


図-4 β 線最大エネルギーと皮膚吸収線量率との関係
(不感層 $40 \text{mg}/\text{cm}^2$, 線源半径無限大)

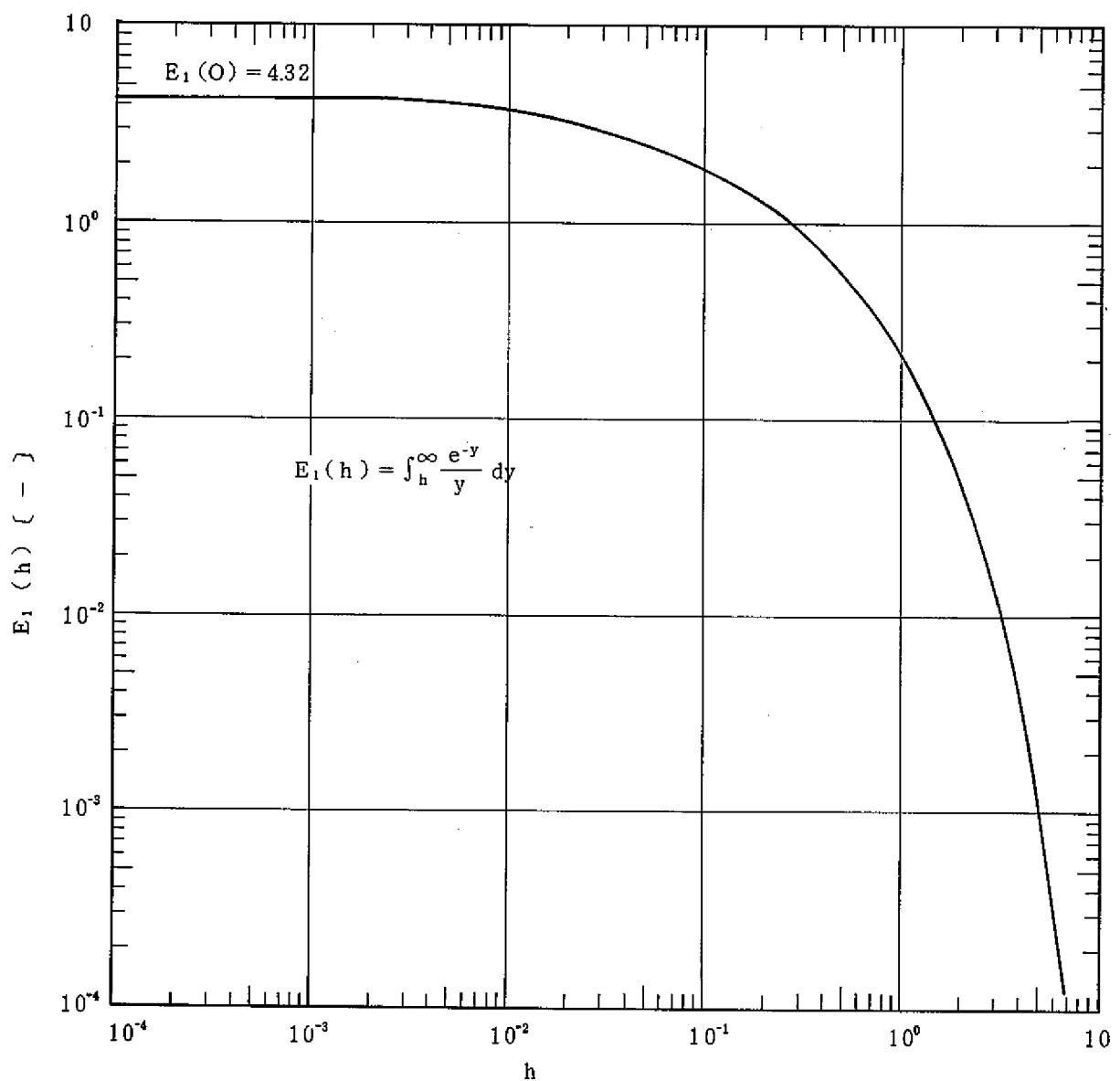


図 - 5 $h - E_1$ 線図

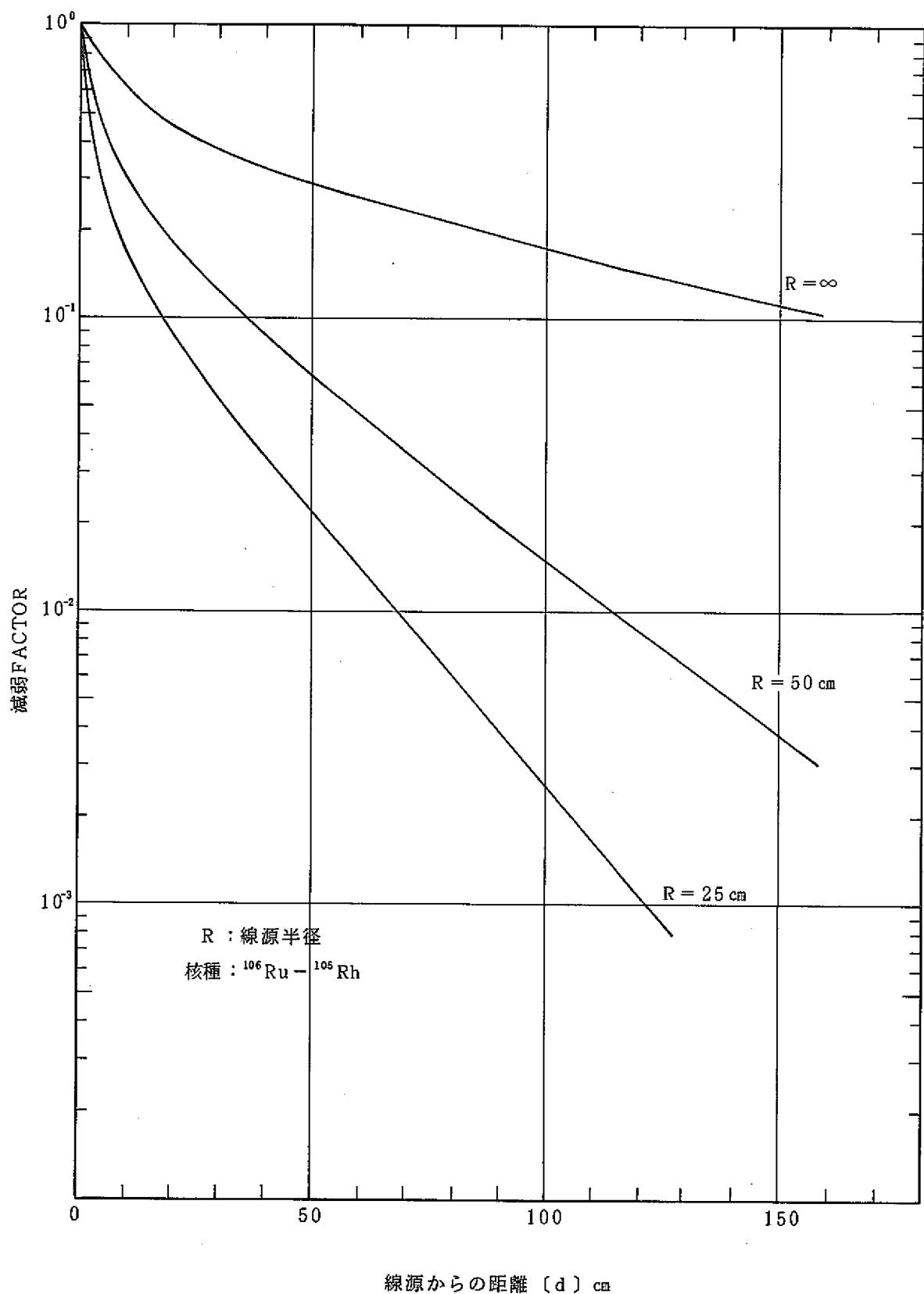


図-6 空気中の距離における減弱曲線

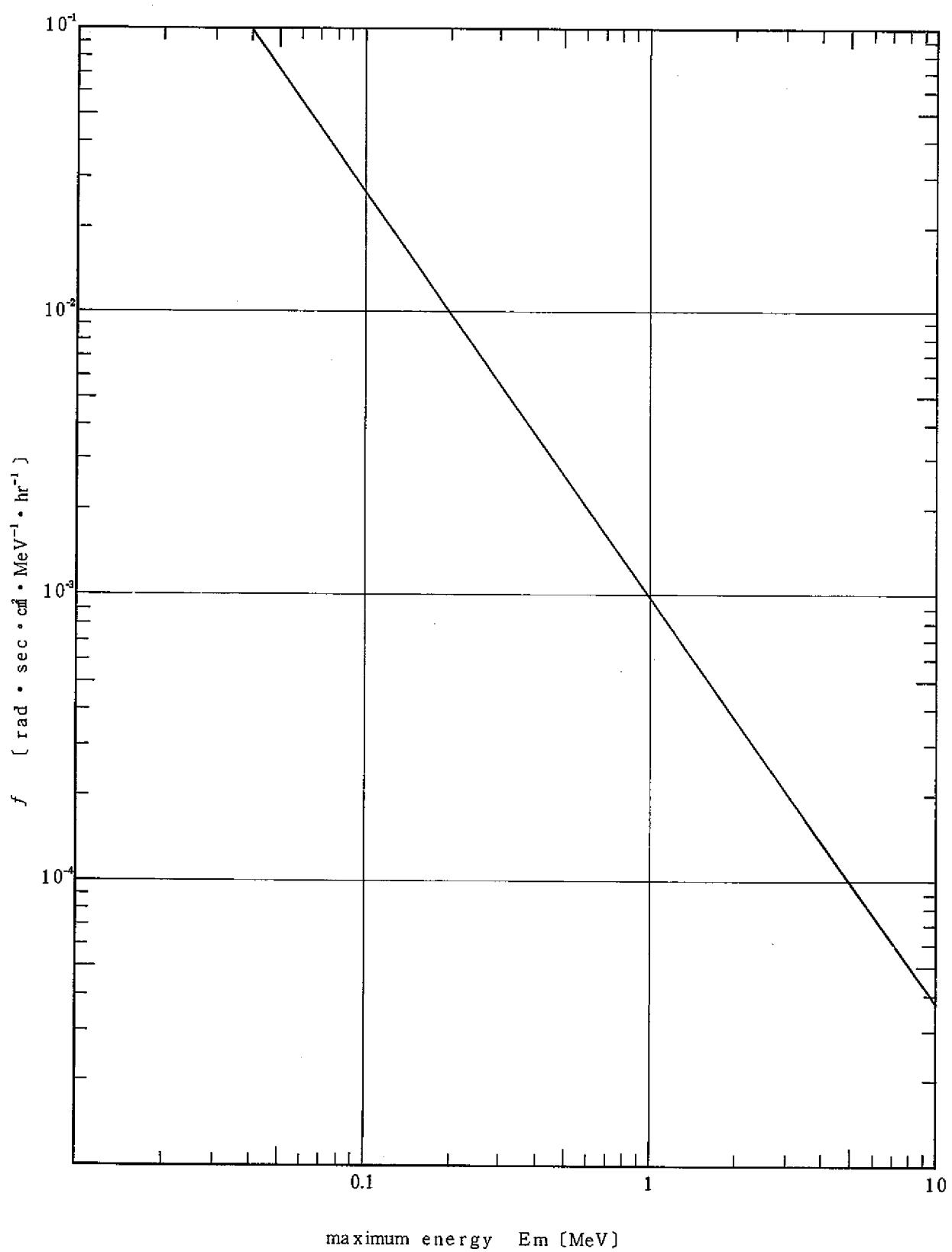


図-7 β 線最大エネルギーと変換係数

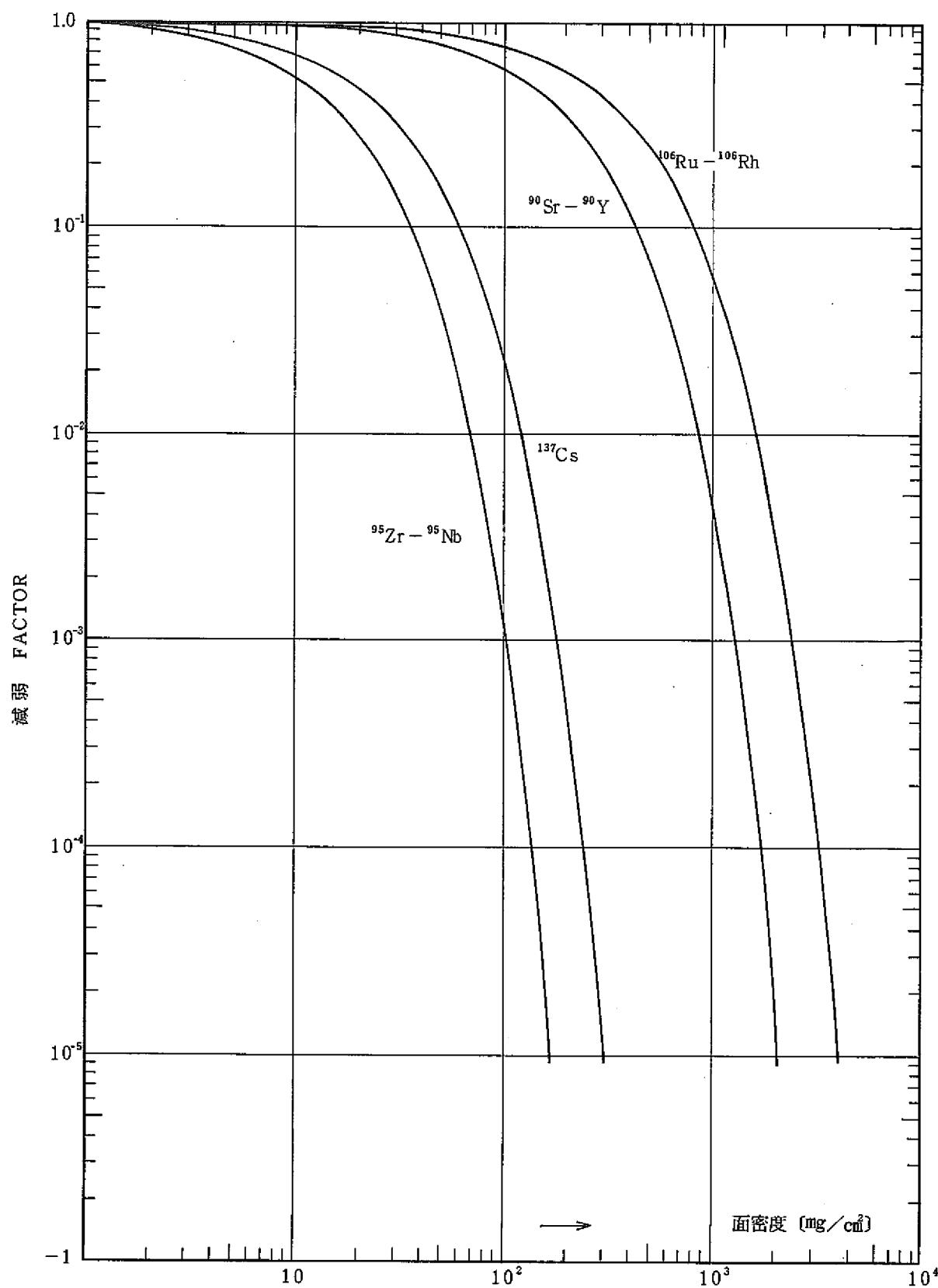


図-8 エネルギー-減弱特性

表-3 日常使用される β 線遮蔽材の減弱ファクター

物 質	厚 さ (cm)	密 度 (g/cm ³)	⁹⁵ Zr- ⁹⁵ Nbの 減弱ファクター	¹³⁷ Cs の 減弱ファクター	⁹⁰ Sr- ⁸⁹ Y の 減弱ファクター	¹⁰⁶ Ru- ¹⁰⁶ Rhの 減弱ファクター	備 考
チオックス	0.02	0.93	0.298	0.496	0.906	0.949	
透明塩ビシート	0.1	1.4 (1.3~1.7)	10^{-4}	0.0051	0.476	0.673	
アクリル板	"	1.17	5×10^{-4}	0.0121	0.538	0.718	
ポリエチシート	"	0.94	2.2×10^{-3}	0.0289	0.608	0.766	
水	"	1.0	1.5×10^{-3}	0.0231	0.589	0.754	
ネオプレングローブ	0.04	1.51	0.02	0.103	0.726	0.843	
鉛入ネオプレン グローブ	0.1	2.2	6×10^{-7}	2.5×10^{-4}	0.312	0.537	
家庭用ゴム手袋	0.07	0.81	0.24	0.115	0.741 (0.791)	0.86	カッコ内安対課 線計係実測
FTELON手袋(清)	0.1	0.84	0.004	0.046	0.642 (0.815)	0.78	"
ベステロン手袋(黒)	0.15	0.99	5.8×10^{-5}	0.0015	0.456 (0.631)	0.65	"
含 鉛 手 袋 (")	0.12	3.23	(1×10^{-11})	4.5×10^{-7}	0.127 (0.048)	0.33	"
鉛	0.1	11.3	(9×10^{-33})	(2.6×10^{-19})	2.4×10^{-3}	0.04	
綿 手 袋	0.03	0.4	0.458	0.595	0.938	0.967	
アンバー服	0.04	0.5	0.595	0.938	0.967	0.945	
タイベックスーツ	0.013	0.3	0.79	0.86	0.98	0.99	
空 気	10cm	0.001293	0.43	0.611	0.932	0.961	
皮 フ , 筋 肉	0.04	1.0	1.5×10^{-3}				
骨	(0.1)	1.85	10^{-6}	9.4×10^{-4}	0.375	0.592	
脂 肪	(0.1)	0.91	0.0027	0.0324	0.617	0.773	

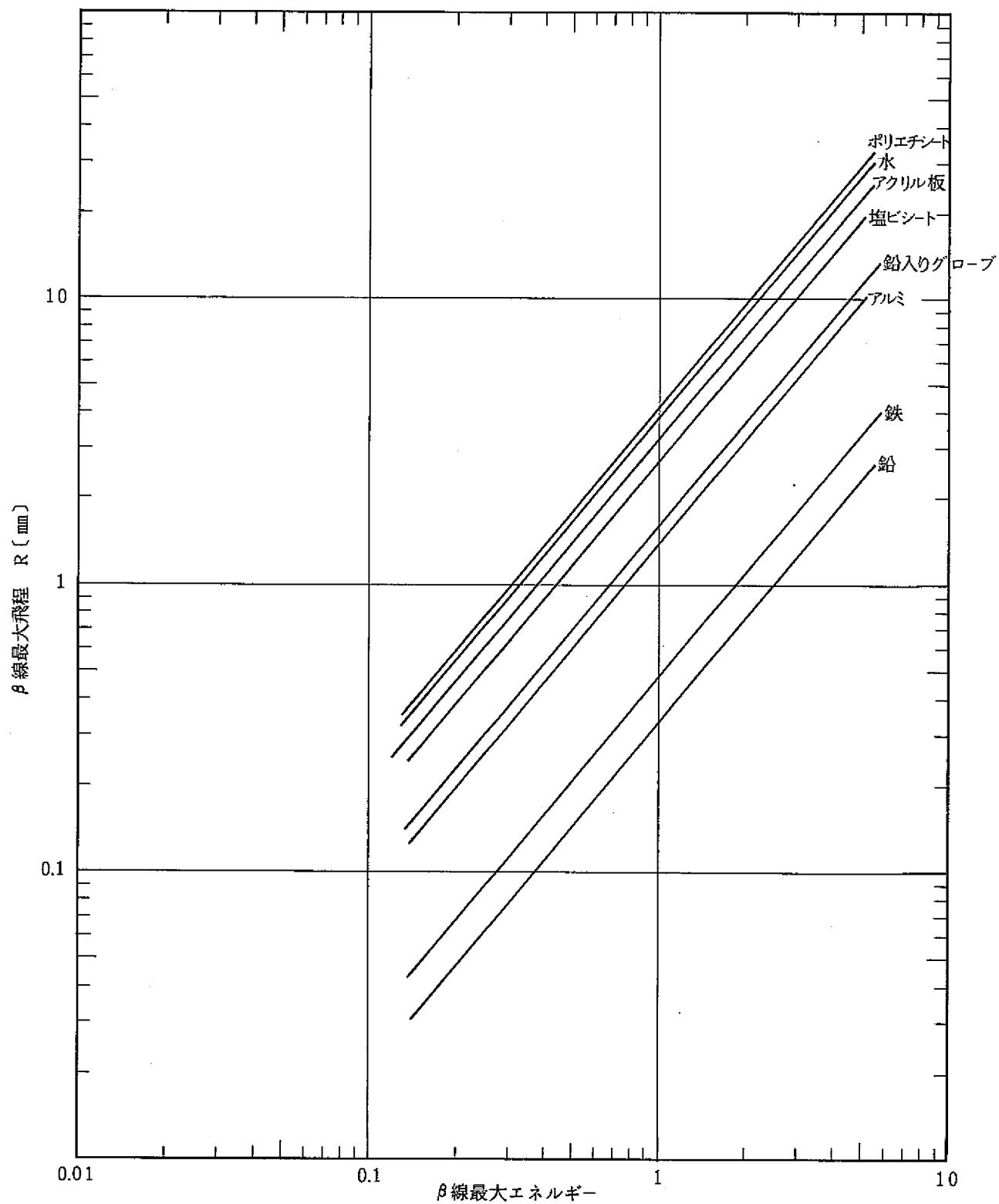


図-9 最大飛程-最大エネルギー特性

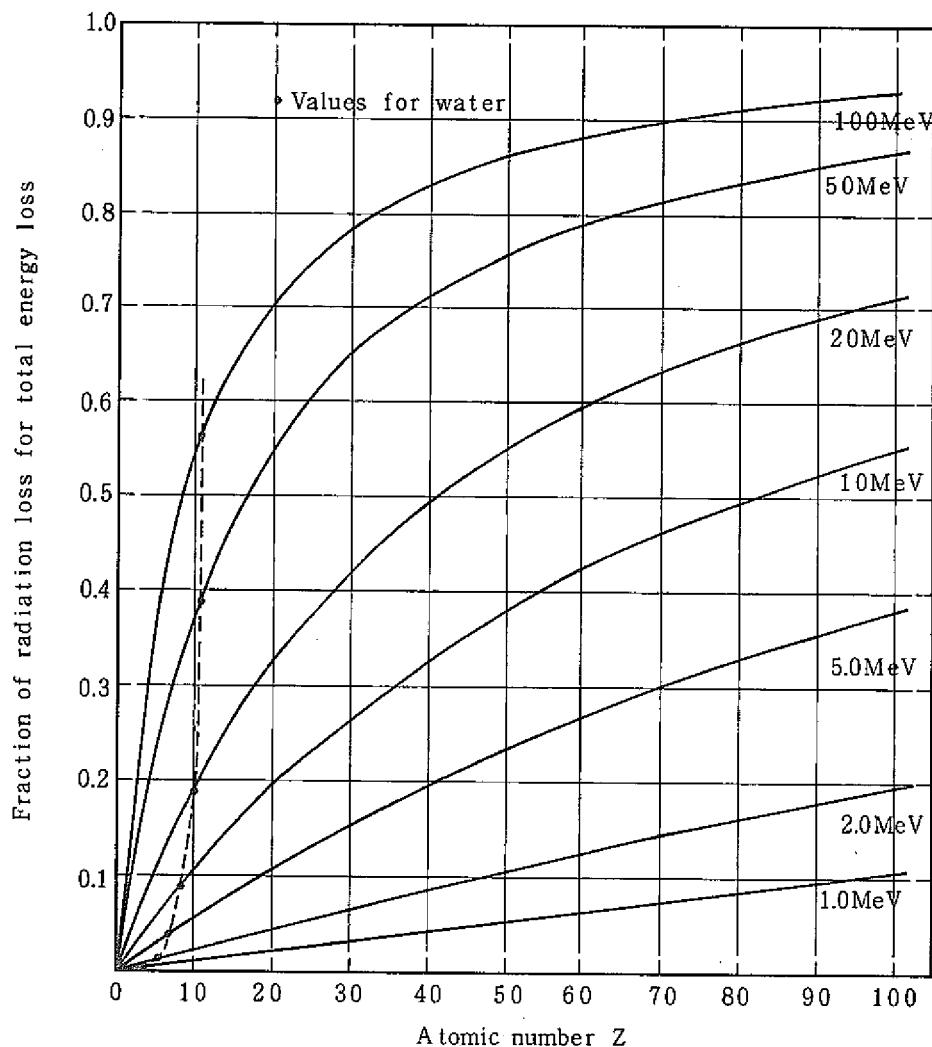


図-10 Fraction of radiation loss for total energy loss of β ray.

制動X線の割合を知る図表の説明

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。

$$\frac{(\text{dT}/\text{dx})_{\text{rad}}}{(\text{dT}/\text{dx})_{\text{coll}}} = \frac{TZ}{1600m_0c^2}$$

ここに、 $T = \beta$ 線の運動エネルギー $= m_0c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right)$

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

ここに、 Z : 原子番号, $\beta = \frac{v}{c}$

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。