

国際放射線防護委員会勧告

体外線源からの電離放射線に対する

防護のためのデータ：

ICRP Publication 15の補遺

社団法人 日本アイソトープ協会

財団法人 仁科記念財団

国際放射線防護委員会勧告

体外線源からの電離放射線に対する
防護のためのデータ：
ICRP Publication 15の補遺

ICRP Publication 21

国際放射線防護委員会
専門委員会3の報告

1971年4月に主委員会によって採択されたもの

社団法人 日本アイソトープ協会
財団法人 仁科記念財団

本書は、

Recommendations of the ICRP, Data for Protection against
Ionizing Radiation from External Sources: Supplement to ICRP
Publication 15—ICRP Publication 21, 1971

の全訳で、国際放射線防護委員会の諒解のもとに、仁科記念財団と日本アイソトープ協会において翻訳、出版したものである。

サブタイトルにもあるように、本書はさきに翻訳の刊行された“体外線源からの電離放射線に対する防護—ICRP Publication 15”の補遺としてまとめられたものである。従って同書とあわせて読まれることを希望する。

Nishina | Japan
Memorial | Radioisotope
Foundation | Association

Japanese Translation Series of ICRP Publications
Publication 21

Translated by

The Committee for Japanese Translation of ICRP Publications,
Japan Radioisotope Association

.....
Fumio YAMAZAKI (Chair) Hidehiko TAMAKI (Vice-chair)
Masami IZAWA * Tatsuji HAMADA Eizo TAJIMA
.....

Presumed the founding committee members.

* Former ICRP member.

目 次

まえがき	(1)
ICRP Publication 15の修正	(3)
体外放射線源に関する ICRP の声明	(4)
図のリスト	(6)
表のリスト	(11)
緒 論	(12)
付録 1. 水中における荷電粒子の衝突阻止能	(14)
水中における荷電重粒子の衝突阻止能.....	(14)
水中における電子の衝突阻止能.....	(15)
付録 2. 線質係数の補間値.....	(16)
付録 3. 荷電粒子のエネルギーと線質係数との関係.....	(17)
付録 4. 身体中の吸収線量分布と線量当量分布の計算.....	(18)
中性子, および超高ないし極超高エネルギーの陽 子, 電子ならびに光子についての深部線量当量の計算 (19)	
高ないし超高エネルギー電子についての深部線量 の計算データ.....	(21)
β 粒子についての深部線量の実験データ.....	(22)
低および高エネルギー光子についての深部線量の 実験データ.....	(22)
器官線量の観点からの放射線測定結果の解釈.....	(22)
深部線量当量, 換算係数, および実効線質係数.....	(24)

付録 5	電子についての換算係数	(25)
付録 6.	中性子についての換算係数と実効線質係数	(28)
付録 7.	陽子についての換算係数と実効線質係数	(30)
付録 8.	光子についての換算係数	(32)
付録 9.	中性子源と遮蔽	(34)
	加速器中性子源	(35)
	アイソトープ中性子源	(36)
	斜めに入射する中性子ビームの透過率	(39)
	その他の資料	(39)
付録10.	飛程—エネルギー曲線	(41)
付録11.	β 線源の遮蔽	(42)
付録12.	X線および γ 線の遮蔽	(45)
	X線発生装置の出力	(45)
	γ 線源の出力	(46)
	遮蔽体中の、一次X線および γ 線の透過率	(47)
	斜めに入射するビームの透過率	(49)
	半価層値と $1/10$ 価層値	(50)
	低エネルギーX線に対する、選ばれたいくつかの	
	材料の遮蔽値	(50)
	X線および γ 線の散乱	(52)
	遮蔽体中の散乱放射線の透過率	(54)
	遮蔽体中の漏洩放射線の透過率	(55)
	散乱放射線と漏洩放射線が同時に存在する場合の	
	遮蔽	(55)

高および超高エネルギー電子加速装置に関する特

別な問題点	(56)
X線および γ 線の遮蔽設計のための公式	(57)
いくつかの線源に対する遮蔽の必要条件	(58)
X線診断用施設	(61)
引用文献	(63)
遮蔽に関する一般的な文献と情報サービス	(72)
他の ICRP 刊行物	(74)

第 1 章 文法

- (8) 文法
- (9) 文法
- (10) 文法
- (11) 文法
- (12) 文法
- (13) 文法
- (14) 文法

まえがき

1969年11月に国際放射線防護委員会 (ICRP) は、“体外線源からの電離放射線に対する防護”と題する専門委員会3の報告を採択し、これは翌年 ICRP Publication 15として出版された。この出版物のために資料を編集する仕事は、下に示す委員構成の課題グループによってなされた。この課題グループは報告書の付録とすることとなっていた諸データの収集も行っていたが、グループの幹事 B. E. Jones の死去のため作業がおくれ、付録を別冊補遺として刊行するとの決定により、そのおくれを最小にとどめることになった。主委員会はこの決定に従い、補遺のためのデータ作成を完了するため、下に示す構成の新しい課題グループを、1971年4月の会合において指名した。

課題グループ (1967—71)

- P. Grande (委員長)
- K. Becker (副委員長)
- B. E. Jones (幹事)
- J. P. Kelley
- K. Koren
- C. B. Meinhold
- P. Pellerin
- R. H. Thomas

課題グループ (1971—72)

- M. C. O'Riordan (委員長)
- M. J. Duggan
- T. O. Marshall

(2)

E. E. Smith

ICRP Publication 15 およびその補遺の作成期間中における専門委員会3の委員は次のとおりである：

B. Lindell (委員長)

E. E. Smith (副委員長)

L. E. Larsson

F. P. Cowan

S. Takahashi

J. Dutreix (1969年まで)

E. D. Trout (1969年まで)

H. O. Wyckoff (1969年まで)

J. P. Kelley (1969年より)

E. E. Kovalev (1969年より)

R. Oliver (1969年より)

P. Pellerin (1969年より)

K. A. Rowley (1969年より)

この報告書には、ICRP Publication 15の修正ならびに1971年4月に出された主委員会の声明の抜萃も含まれている。

ICRP Publication 15の修正

17項

3, 4および5番目の文章を削除し, 次の文章に代える: “入射放射線が中性子のみであり, 自由空気中での組織カーマ(ラドで表された)の値がわかっている時には, このカーマが体内のどの点におけるラドで表された吸収線量とも数値的に等しいと仮定できる。ただし, 捕獲 γ 線からの線量は無視できるものとする。もし入射中性子のエネルギーが知られていない場合には, QFを10と仮定すべきである。中性子スペクトルのかなりの部分が0.1 MeV以下のときは, 捕獲 γ 線が重要になる。なぜならば, この場合, 捕獲 γ 線は他の中性子反応で生ずる荷電粒子よりも100倍も大きい最大の吸収線量を身体に与えることがありうるからである。別のやり方は, 線量当量の適切な測定ができるようなレムメーターを使用することである。”

19項

“付録6および7”の後に, “補遺の”という語を挿入する。

84項

“20: 108”を“108”と改める。

体外放射線源に関する ICRP の声明

国際放射線防護委員会は1971年4月の会合の後で声明を発表した。その中には体外放射線源に関する二つの項目が含まれているので、それを下に再録する。

口腔内用 X 線管からの被曝

委員会は、歯科撮影における口腔内用 X 線管の使用から生じた新しい放射線防護上の問題について報告を受けた。使用 X 線管の直径が次第に小さくなる現在の傾向から見て、X 線管表面の線量は1撮影あたり50ないし100radあるいはそれ以上にさえ及ぶ可能性がある。このような X 線管の使用は明らかに反対されるべきである。しかし、口腔内用 X 線管は、適当な透過と超高感度フィルムを使用すれば、舌の限られた部分に5—10rad程度の線量を与えるにすぎないことに注意することが大切である。このような注意を払えば、口腔内用 X 線管は放射線防護の見地からむしろいくつかの長所を持つであろう。すなわち、通常の歯科用 X 線管と比べて総線量は低くなり、また職員の被曝はずっと減少する。アプリケーションに遮蔽を追加すれば、照射野を検査に必要な大きさに制限することが容易にでき、総線量はさらに減る。

消費財からの集団線量

委員会は、少量の放射性物質を含む多くの消費財の使用が増大していること、およびそれら個々の線源からの線量は現在きわめて小さくはあるが、全体として見たときこれらによって起こりうる集団線量への寄与に注目した。この寄与と集団に対する線量限度との関連を考慮して、委員会は、国家当局が有効

な管理手段を設定するためにこれらの製品の線量寄与を算定することの重要性を強調した。この点について委員会は、すべての消費財からの総個人線量および総集団線量を行政監督の下におく一例として、経済協力開発機構・原子力機関 (OECD NEA) の出版物 (一般公衆の入手しうる放射性核種含有製品の安全解析と管理についての基本的アプローチ, 1970) に注意を向けることを希望する。

図 の リ ス ト

- 図 1. 水中における陽子および電子の衝突阻止能とエネルギーとの関係76
- 図 2. 水中における衝突阻止能と線質係数との関係77
- 図 3. 荷電粒子の線質係数とエネルギーとの関係78
- 図 4. 単一エネルギー中性子の広いビームで片面から垂直に照射された厚さ30cmの平板状身体組織における、深さと線量当量との関係79
- 図 5. 単一エネルギー陽子の広いビームで片面から垂直に照射された厚さ30cmの平板状身体組織における、深さと線量当量との関係80
- 図 6. 高エネルギーないし超高エネルギーの単一エネルギー電子の広いビームが垂直に入射する水中における深部線量の百分率分布の計算値81
- 図 7. 組織類似物質に実質的に密着した大きい平面線源からの β 粒子による、物質中の深部線量の百分率分布(カッコ内の数字は MeV 単位で表された β 粒子の最大エネルギー)82
- 図 8. 無限遠方の線源からの低エネルギーおよび高エネルギー光子が楕円柱の水ファントムの短軸方向から入射する場合、短軸に沿う深部線量の百分率分布83
- 図 9. 低エネルギーおよび高エネルギー光子の広いビームが楕円柱水ファントムの短軸方向から入射する場合、ファントム表面および表面から5 cm手前の場所における後方散乱係数84
- 図10. 胴体の前側に個人被曝線量計を着けて測定した単位照射線量あたり(曲線AおよびB)、および身体の中心位置の自由空気中で測定した単位照射線量あたり(曲線C)の睪丸の平均吸収線量
 曲線A: 背後からのみ照射 曲線B: 前方からのみ照射
 曲線C: 全方向からの照射を模擬して、照射中に回転85
- 図11. 胴体の前側に個人被曝線量計を着けて測定した単位照射線量あたり(曲線AおよびB)、および胴体の中心位置の自由空気中で測定した単位照射線量あたり(曲線C)の卵巣の平均吸収線量
 曲線A: 背後からのみ照射 曲線B: 前方からのみ照射
 曲線C: 全方向からの照射を模擬して、照射中に回転86
- 図12. 胴体の前側に個人被曝線量計を着けて測定した単位照射線量あたり(曲線AおよびB)、および身体の中心位置の自由空気中で測定した単位照射線量あたり(曲線C)の骨髄の平均吸収線量
 曲線A: 背後からのみ照射 曲線B: 前方からのみ照射
 曲線C: 全方向からの照射を模擬して、照射中に回転87
- 図13. 電子についての換算係数。単一方向の広いビーム、垂直入射。曲線は ICRP

	の勧告値を示す。	88
図14.	中性子についての換算係数。単一方向の広いビーム，垂直入射。曲線は ICRP の勧告値を示す。	89
図15.	中性子についての実効線質係数，すなわち，線量当量の最大値を，それが現れる深さにおける吸収線量で除した商。曲線は ICRP の勧告値を示す。	90
図16.	陽子についての換算係数。単一方向の広いビーム，厚さ30cmのファントムに垂直入射。曲線は ICRP の勧告値を示す。	91
図17.	光子についての換算係数。単一方向の広いビーム，垂直入射。曲線は ICRP の勧告値を示す。	92
図18.	光子フルエンス率*と照射線量率との関係	93
図19.	14—15 MeV 中性子の広いビームの，コンクリート(密度2.4g/cm ³)および水の平板における線量当量透過率	94
図20.	14—15 MeV 中性子の広いビームの，鉄(密度7.8g/cm ³)，ポリエチレン(0.94g/cm ³) および鉄とポリエチレンの組み合わせの平板における線量当量透過率	95
図21.	²⁴¹ Am-Be 中性子の広いビームの，水およびポリエチレン(密度0.94g/cm ³)における線量当量透過率	96
図22.	²⁵² Cf 中性子の広いビームの，鉛(密度11.35g/cm ³) およびポリエチレン(0.94g/cm ³) 平板における線量当量透過率	97
図23.	²⁵² Cf γ 線の広いビームの，鉛(密度11.35g/cm ³)，鉄(7.8g/cm ³) およびコンクリート(2.35g/cm ³) 平板における吸収線量透過率	98
図24.	中心に1 μ g の ²⁵² Cf を含むポリエチレン(密度0.96g/cm ³)，パラフィン(0.92g/cm ³)，水およびコンクリート(2.35g/cm ³) の球体表面における中性子線量当量率	99
図25.	平板状遮蔽体いろいろな角度で入射する0.5 MeV 中性子の単一方向の広いビームに対する中性子吸収線量透過率	100
図26.	平板状遮蔽体いろいろな角度で入射する1 MeV 中性子の単一方向の広いビームに対する中性子吸収線量透過率	101
図27.	平板状遮蔽体いろいろな角度で入射する2 MeV 中性子の単一方向の広いビームに対する中性子吸収線量透過率	102
図28.	平板状遮蔽体いろいろな角度で入射する5 MeV 中性子の単一方向の広いビームに対する中性子吸収線量透過率	103
図29.	空気中における電子と陽子の飛程	104
図30.	水中における電子，陽子および α 粒子の飛程	105
図31.	鉛中における電子，陽子および α 粒子の飛程	106
図32.	金属母材中で停止した ¹⁰⁶ Rh β 粒子からの制動放射線；および，酸化母材中で停止した ⁹⁰ Y， ⁹⁰ Sr， ¹⁴⁷ Pm および ¹⁷¹ Tm β 粒子からの制動放射線	107

* (訳注) フルエンス率 (fluence rate) と線束密度 (flux density) とは同じ量である。

- 図33. 酸化物母材中で停止した ^{90}Sr - ^{90}Y β 粒子からの制動放射線の広い発散ビームの、鉄 (密度 7.8g/cm^3)、鉛 (11.35g/cm^3) およびウラン (18.9g/cm^3) 平板における吸収線量透過率. ビーム軸は遮蔽体に垂直. ウランについては本文の注を参照108
- 図34. タングステン反射ターゲットを有する定電圧X線発生装置の、ターゲットからの距離 10cm における、種々のビーム汭過に対する出力. X線管の窓は 1mm のベリリウム. 1m における出力については Glasser *et al.* (1959) を参照109
- 図35. タングステン反射ターゲットを有する定電圧X線発生装置の、ターゲットからの距離 1m における、種々のビーム汭過に対する出力. X線管の窓は 1mm のベリリウム110
- 図36. 定電圧X線発生装置の、ターゲットからの距離 1m における、種々のビーム汭過に対する出力. 上の曲線は、 2.8mm のタングステン透過ターゲットに、銅 2.8mm 、水 18.7mm 、黄銅 2.1mm が加わった場合. 他の曲線群は、タングステン反射ターゲットで、全汭過が 0.5 および 3mm の銅の場合111
- 図37. 直線加速装置の、最適厚さの高原子番号透過ターゲットから 1m における、単位平均ビーム電流あたりのX線出力. 縦軸は空気中で測定した吸収線量率. この図は、ターゲットの配置は異なるけれども、ベータトロンにも使用してよい.112
- 図38. 密度 7.8g/cm^3 の軟鋼に対する広いビームのX線の透過率. 定電圧X線発生装置, タングステン反射ターゲット; ビームの全汭過はベリリウム 1mm . 縦軸との交点は: 50kV で 8.38 ; 40kV で 6.58 ; 30kV で 4.49 113
- 図39. Perspex* (密度 1.2g/cm^3) に対するX線の広いビームの透過率. 定電圧X線発生装置, タングステン反射ターゲット; ビームの全汭過はベリリウム 1mm . 縦軸との交点については図38を参照114
- 図40. コンクリート (密度 2.35g/cm^3) に対するX線の広いビームの透過率. 50 ないし 300kV のデータは、半波整流X線発生装置; タングステン反射ターゲット; ビームの全汭過は、 50kV のときアルミニウム 1mm , 70kV のとき 1.5mm , 100kV のとき 2mm , 125kV ないし 300kV のとき 3mm . 400kV のデータは、定電圧X線発生装置; 金反射ターゲット; ビームの全汭過は銅 3mm . 縦軸との交点は、 400kV で 2.7 , 300kV で 2.4 , 250kV で 1.6 , 200kV で 1.02 , 150kV で 0.6 , 125kV で 0.45 , 100kV で 0.32 , 70kV で 0.24 , 50kV で 0.19 115
- 図41. 鉛 (密度 11.35g/cm^3) に対するX線の広いビームの透過率. 定電圧X線発生装置; タングステン反射ターゲット; ビームの全汭過はアルミニウム 2mm . 縦軸との交点は、 200kV で 3.3 , 150kV で 2.1 , 100kV で 1.1 , 75kV で 0.7 , 50kV で 0.3 116

* (訳注) 表15の脚注参照

- 図42. 鉛(密度11.35 g/cm³)に対するX線の広いビームの透過率. 250 kV のデータは, 定電圧X線発生装置; タングステン反射ターゲット; ビームの全透過は銅0.5 mm. 300ないし400 kV のデータは, 定電圧X線発生装置; 金反射ターゲット; ビームの全透過は銅3 mm. 縦軸との交点は, 400 kV で2.7, 300 kV で1.3, 250 kV で1.9.....117
- 図43. コンクリート(密度2.35 g/cm³)に対するX線の広いビームの透過率. 定電圧X線発生装置. 0.5および1.0 MV のデータは, 2.8 mm のタンングステン透過ターゲットに, 銅2.8 mm, 水18.7 mm, 黄銅2.1 mm のビーム透過が加わったもの. 2 MV のデータは, 高原子番号透過ターゲット ビームの全透過は鉛当量6.8 mm. 3 MV のデータは, 金透過ターゲット; ビームの全透過は鉛当量11 mm. 縦軸との交点は, 3 MV で850, 2 MV で300, 1 MV で20, 0.5 MV で1118
- 図44. 鉛(密度11.35 g/cm³)に対するX線の広いビームの透過率. 定電圧X線発生装置. 0.5および1.0 MV のデータは, 2.8 mm のタンングステン透過ターゲットに, 銅2.8 mm, 水18.7 mm, 黄銅2.1 mm のビーム透過が加わったもの. 2 MV のデータは, 高原子番号透過ターゲット; ビームの全透過は鉛当量6.8 mm. 縦軸との交点は, 2 MV で300, 1 MV で20, 0.5 MV で1119
- 図45. コンクリート(密度2.35 g/cm³)に対するX線の広いビームの透過率. 4 MV のデータは, 直線加速装置; 1 mm の金ターゲットに, ビームのエネルギー平坦化のためアルミニウム20 mm を加えたもの. 6 MV ないし38 MV のデータは, ベータトロン; ターゲットおよび透過に関する記述はない. 38 MV の曲線は200 MV まで使用してよい (Miller and Kennedy, 1956)120
- 図46. 鉛(密度11.35 g/cm³)に対するX線の広いビームの透過率. ベータトロン; 白金線ターゲット2 mm×8 mm; ビーム透過なし. もっと高い電圧については, Miller and Kennedy (1956) を参照121
- 図47. 種々の放射性核種からの γ 線の広いビームの, コンクリート(密度2.35 g/cm³)中における透過率122
- 図48. 種々の放射性核種からの γ 線の広いビームの, コンクリート(密度2.35 g/cm³)中における透過率123
- 図49. 種々の放射性核種からの γ 線の広いビームの, 鉄(密度7.8 g/cm³)中における透過率124
- 図50. 種々の放射性核種からの γ 線の広いビームの, 鉛(密度11.35 g/cm³)中における透過率125
- 図51. 種々の放射性核種からの γ 線の広いビームの, 鉛(密度11.35 g/cm³)中における透過率126
- 図52. 種々の放射性核種からの γ 線の広いビームの, ウラン(密度18.9 g/cm³)中における透過率. ウランについては, 付録11の本文中の注意を参照127

- 図53. 種々の物質から90°方向に散乱されたX線による, 空気中で測定された吸収線量率の, 電圧による変化. ビームは厚い散乱体に斜めに入射. 入射点における自由空気中の一次ビームの測定値に対する散乱の百分率を示す.128
- 図54. コンクリート遮蔽体に直角に入射するX線および γ 線の発散ビームの散乱の様相. 入射点における自由空気中の一次ビームの測定値に対する散乱の百分率を示す.129
- 図55. 斜めに置かれたコンクリート壁から種々の角度で散乱された ^{137}Cs γ 線の広いビームの, コンクリート (密度 2.35g/cm^3) 中における透過率130
- 図56. 斜めに置かれたコンクリート壁から種々の角度で散乱された ^{137}Cs γ 線の広いビームの, 鉛 (密度 11.35g/cm^3) 中における透過率131
- 図57. 患者を模擬したファントムから種々の角度で散乱された ^{60}Co γ 線の広いビームの, コンクリート (密度 2.35g/cm^3) 中における透過率132
- 図58. 患者を模擬したファントムから種々の角度で散乱された ^{60}Co γ 線の広いビームの, 鉛 (密度 11.35g/cm^3) 中における透過率133
- 図59. 患者を模擬したファントムから種々の角度で散乱された6 MV X線の広いビームの, コンクリート (密度 2.35g/cm^3) 中における透過率134

表のリスト

表 1. 中性子, 陽子, 電子および光子についての身体組織内の深部線量計算のまとめ	19
表 2. 垂直入射, 単一方向の電子および光子の広いビームに対する, 水中の深さと線量当量率との関係	20
表 3. 電子についての換算係数	25
表 4. 中性子についての換算係数と実効線質係数	29
表 5. 陽子についての換算係数と実効線質係数	30
表 6. 光子についての換算係数と, 水中の質量エネルギー吸収係数 (μ_{en}/ρ)	33
表 7. 軽い核の関与する種々の核反応によって生成する中性子のエネルギー	35
表 8. 数種のアイソトープ中性子源の特性	36
表 9. 1 g の ^{252}Cf から 1 m の距離における中性子フルエンス率と線量率	37
表 10. 1 g の ^{252}Cf から 1 m の距離における光子フルエンス率と線量率	38
表 11. 図25—図28の計算に用いられた材料の組成	39
表 12. 付録11に扱われている β 線源の特性	43
表 13. SrO 母材中で停止した ^{90}Sr - ^{90}Y β 粒子からの制動放射線に対する遮蔽計算のために選定された, 光子エネルギー群と放出率	43
表 14. r 線源の出力	46
表 15. X線および r 線の透過データの文献と照射のジオメトリー	48
表 16. 大幅に減弱したX線の広いビームに対する, およその半価層値と $1/10$ 価層値	49
表 17. 大幅に減弱した r 線の広いビームに対する, およその半価層値と $1/10$ 価層値	50
表 18. 低エネルギーX線に対する種々の物質の鉛当量	51
表 19. 照射面積 400cm^2 の組織類似ファントムから 1 m の距離における散乱線による吸収線量率の百分率	52
表 20. 0.1 rem/週とするのに必要な一次X線ビームの遮蔽要件	60
表 21. 0.1 rem/週とするのに必要な散乱X線および漏洩X線の遮蔽要件	61

緒 論

この出版物は、ICRP Publication 15 (1969) のまえがきに述べられている、同報告書の補遺であって、12の付録から成っており、その番号は Publication 15の本文中の引用番号と合わせてある。

これらの付録は ICRP Publication 15の勧告を履行するための資料を含み、したがって、放射線医学、放射線歯学および放射線獣医学、ならびに工業および研究において出合う体外放射線源に関するものである。材料を選択し、圧縮してこのような形に表示するのは困難なことであり、必要に応じてもとの文献を参照する必要のあることを、読者は了解されたい。

この補遺のかなりの部分は遮蔽に関するデータに割かれているが、原子炉や超高エネルギー加速器に関連したものなど、いくつかの遮蔽の問題は除かれている。しかしながら、遮蔽に関する文献は豊富にあり、また、優秀な情報サービスがオークリッジ国立研究所の放射線遮蔽情報センター(Radiation Shielding Information Center)によって用意されている。ヨーロッパ遮蔽情報サービス(European Shielding Information Service) をイスプラに設立することも発表された。両機関の所在地は遮蔽に関する一般文献とともに73ページに記してある。

1971年に国際放射線単位測定委員会(ICRU)は“放射線の量と単位”(ICRU Report 19, 1971)と題する報告書を出版した。これは1968年に出版された同じ標題の報告書に取って代わるものである。ICRU Report 19は放射線防護におけるいくつかの術語について新しい記号を提案しており、それらを本書に導入した。しかし、ICRP Publication 15は古い記号を用いているので、次の変更にご注意すべきである：線量当量、DEの代わりにH；線質係数、QFの代わ

りにQ。

ICRU は基本量に対して国際単位系 (SI) の使用を勧告しているが、いくつかの現用の特別な単位も引き続き認めている。したがって、ICRP はその特別単位およびそれらの単位の慣用されている倍数および分数を、それらの廃止が合意に達するまで、続けて使用する。次の表は SI 単位および特別単位で表した諸量を ICRU Report 19 から抜萃したものである。この点に関するもっと詳細な議論については同報告書を参照されたい。

名 称	記 号	S I 単位	特 別 単 位
吸 収 線 量	D	$J\ kg^{-1}$	rad
吸 収 線 量 率	\dot{D}	$J\ kg^{-1}\ s^{-1}$	rad s^{-1}
照 射 線 量	X	$C\ kg^{-1}$	R (レントゲン)
照 射 線 量 率	\dot{X}	$A\ kg^{-1}$	R s^{-1}
線エネルギー付与	L_d	$J\ m^{-1}$	keV μm^{-1}
放 射 能	A	s^{-1}	Ci (キュリー)

この補遺を通じて、四つのエネルギー範囲を定める。それらは次のとおりである (Cowan, 1969):

- 低エネルギー 数百 keV 以下
- 高エネルギー 数百 keV から数 MeV まで
- 超高エネルギー 数 MeV から数百 MeV まで
- 極超高エネルギー 数百 MeV 以上

この命名法はX線発生電圧にも使用する。

座標軸の説明や欄の見出しは、その量の物理的意味を明確にするように選ばれており、その理由から、指数の使用を制限した。

付 録 1

水中における荷電粒子の衝突阻止能

線質係数は水中における衝突阻止能によって定義づけられている（付録2参照）ので、荷電粒子エネルギーの関数としての衝突阻止能というパラメーターは、放射線防護において重要である。ICRU Report 16 (1970) には阻止能についての有用なまとめがなされている。

水中における荷電重粒子の衝突阻止能

荷電重粒子の衝突阻止能の広範囲にわたる表が、Rich and Madey (1954), Atkinson and Willis (1957), Barkas and Berger (1964) および Fano (1964) に見られる。

上記の諸表には陽子エネルギー 1 MeV 以上が載っている。Whaling (1958) によってまとめられた実験値には、0.01 MeV から 1 MeV までの陽子エネルギーに対するものがあり、これらの値は Phillips (1953), Reynolds *et al.* (1953), および Milani *et al.* (1958) から引用されている。図1は 0.01 MeV から 1,000 MeV までの陽子エネルギーに対するデータをまとめたものである。

水中における他の荷電重粒子の衝突阻止能は、放射線防護の通常の目的には、陽子のデータから十分な精度で容易に計算することができる。すなわち、質量 M , 荷電数 Ze の粒子に対しては、図1のエネルギー尺度を (M/M_p) 倍し、衝突阻止能の尺度を Z^2 倍する。ここで、 M_p は陽子の質量である。もっ

と高い精度を要するときは、上記の諸表を参照すべきである。

水中における電子の衝突阻止能

水中における電子の衝突阻止能はとくに重要なので、それも図1にプロットしてある。電子の衝突阻止能の表は Fano (1964) に与えられている。

電圧 (V)	衝突阻止能 (eV)
0	0
1	0.0001
10	0.001
100	0.01
1000	0.1
10000	1.0

付 録 2

線質係数の補間値

水中における衝突阻止能の関数としての線質係数の補間値は図2から得られる。この曲線は ICRP Publication 15 の表1に基づいており、線量当量を計算する上の普遍的な根拠としてここに示す。参照に便利なように、その表を下に再掲する。

 L_{∞} と Q の関係

水中の L_{∞} (keV/ μ m)	Q
3.5以下	1
7	2
23	5
53	10
175以上	20

付 録 3

荷電粒子のエネルギーと線質係数との関係

付録1および付録2のデータは、粒子エネルギーの関数として線質係数の値を計算するために使用される (Cowan *et al.*, 1964)。図3は、電子、 μ 中間子、 π 中間子、K粒子、陽子、重陽子、三重陽子、 ^3He 、および α 粒子のエネルギーの関数としての、線質係数の計算値を示す。着目点における吸収線量は広い範囲にわたって分布した衝突阻止能を持つ粒子によって与えられるので、これらのデータは付録4に述べてある方法による線量当量の計算に際して必要である。

付 録 4

身体中の吸収線量分布と線量当量分布の計算

この付録のデータは放射線防護の目的で器官線量または組織線量を決定するためのものであって、これらを放射線治療に用いるべきではない。

多くの場合、体内の吸収線量分布と線量当量分布とは等しい。たとえば、約 10MeV 以下の光子または電子による照射では、線質係数は 1 である。しかし、線質係数が 1 でない他の放射線場における全身および決定器官の線量当量を詳しく評価することは面倒である。

吸収線量および線量当量の分布にかなりの影響を与える因子は次のとおりである：

存在する放射線の型；

入射放射線の角度分布とエネルギースペクトル；

放射線場における身体の向きと、被曝中の身体の動き；

体腔あるいは骨の存在といったような、身体の不均質性。

一次粒子が体内で吸収されると、もっと低エネルギーの多数の二次粒子を生成する。したがって、局所的な生物学的効果は、着目した体積にすべての方向から到達する多数の粒子の効果の和に帰せられることになる。衝突阻止能、したがって線質係数は、一般に一次粒子のそれとは異なり、またもちろん、各粒子の衝突阻止能はその飛跡に沿って変化する。問題としている組織の体積に適用できる実効線質係数は、それゆえ、ICRP Publication 15 (1969) の13項に論じられているように、適切な荷重平均から求められなければならない。

中性子, および超高ないし極超高エネルギーの陽子,
電子ならびに光子についての深部線量当量の計算

横方向に無限に広がった, 厚さ 30cm の軟組織等価の平板が前面から単一エネルギーの中性子, 陽子, 電子および光子によって照射されたときの深部線量当量分布について, 広汎な計算がなされている。表 1 に示すように, 中性子の計算は熱エネルギーから極超高エネルギーまでわたっており, 中性子以外についての計算は, 超高および極超高エネルギーの範囲にわたっている。

表 1 中性子, 陽子, 電子および光子についての身体組織内の深部線量計算のまとめ

粒 子	エネルギー範囲	入射角度分布	ファントム	著 者 名
1. 中性子	熱中性子	垂	直半無限平板	Snyder (1950)
2. 中性子	熱中性子-10 MeV	垂	直半無限平板	Snyder (1957)
3. 中性子	熱中性子-15 MeV	垂	直円 柱	Auxier <i>et al.</i> (1968)
4. 中性子	熱中性子-14 MeV	垂	直円 柱	Snyder (1971)
5. 中性子	0.5-60 MeV	垂直および等方	半無限平板	Irving <i>et al.</i> (1967)
6. 中性子	60-400 MeV	垂直および等方	半無限平板	Zerby and Kinney (1965)
7. 中性子	60-3,000 MeV	垂	直半無限平板	Alsmiller <i>et al.</i> (1970)
8. 中性子	600-2,000 MeV	垂直および等方	半無限平板	Wright <i>et al.</i> (1969)
9. 陽 子	100-400 MeV	垂	直半無限平板	Turner <i>et al.</i> (1964)
10. 陽 子	100-400 MeV	垂直および等方	半無限平板	Neufeld <i>et al.</i> (1966)
11. 陽 子	250-660 MeV	垂	直半無限平板	Dudkin <i>et al.</i> (1972)
12. 陽 子	400-3,000 MeV	垂	直半無限平板	Alsmiller <i>et al.</i> (1970)
13. 陽 子	600-2,000 MeV	垂直および等方	半無限平板	Wright <i>et al.</i> (1969)
14. 電 子	100 MeV-20 GeV	垂	直半無限平板	Alsmiller and Moran (1968)
15. 電 子	100 MeV-20 GeV	垂	直半無限平板	Beck (1970)
16. 光 子	10 MeV-20 GeV	垂	直半無限平板	Alsmiller and Moran (1968)
17. 光 子	150 MeV-20 GeV	垂	直半無限平板	Beck (1970)

中性子と陽子については, 実用上重要な場合における線量当量の上限と下限を計算することにより, 入射粒子の角度分布の影響が調べられ, 0.5MeV 以上

の中性子および 100MeV 以上の陽子に対して、垂直入射および等方入射の場合につき計算が行われた。これらの結果から、両側照射についての深さ一線量当量曲線が容易に得られ、それを全方向照射の場合の近似として使うことができる。

Auxier *et al.* (1968) および Snyder (1971) は、有限の円柱ファントムの中性子照射によるいろいろな深さにおける線量当量と吸収線量の計算を報告している。これらの計算は、現在得られる最も良い断面積データに依っている

表2 垂直入射、単一方向の電子および光子の広いビームに対する、水中の深さと線量当量率との関係

入射エネルギー MeV	下に示す深さの範囲について平均した、単位フルエンスあたりの mrem/h			
	0-7.5 cm	7.5-15.0 cm	15.0-22.5 cm	22.5-30.0 cm
電 子				
1×10 ²	0.16	0.16	0.14	0.10
2×10 ²	0.16	0.18	0.19	0.18
5×10 ²	0.18	0.20	0.22	0.25
1×10 ³	0.18	0.21	0.25	0.32
5.2×10 ³	0.20	0.25	0.36	0.42
1×10 ⁴	0.21	0.27	0.37	0.49
2×10 ⁴	0.22	0.28	0.43	0.57
光 子				
1×10 ¹	0.007	0.009	0.007	0.007
2×10 ¹	0.010	0.015	0.012	0.013
5×10 ¹	0.013	0.030	0.032	0.028
1×10 ²	0.016	0.042	0.051	0.065
2×10 ²	0.019	0.049	0.077	0.095
5×10 ²	0.021	0.062	0.092	0.14
1×10 ³	0.023	0.063	0.12	0.16
5.2×10 ³	0.026	0.081	0.14	0.22
1×10 ⁴	0.029	0.088	0.16	0.24
2×10 ⁴	0.03	0.10	0.15	0.26

が、しかし、垂直入射でかつエネルギー 15MeV 以下という限定がある。これらの比較的新しい計算は、ここに示す平板モデルの計算と実質的に一致している。

図4および図5は、いろいろなエネルギーの中性子および陽子に対する、軟組織中の、半無限平板への垂直入射という条件での典型的な深さ一線量当量曲線を示している。もっと十分な資料は表1に引用した論文にある。

超高および極超高エネルギーの電子および光子に対するデータは表の形で示すのが便利であり、深さ一線量当量ヒストグラムを容易に作ることができる。表2は、半無限平板状の水に広いビームが垂直入射する場合についての、Alsmiller and Moran (1968) の計算結果を示す。表に与えられている値は、その表に示されている 7.5cm 間隔の深さにわたる平均値である。これらのデータは、付録5にある Svenson and Nelson (1970) および Beck (1970) のデータと対比されるものである。

高ないし超高エネルギー電子についての 深部線量の計算データ

単一エネルギー電子の広い平行ビームに対する、計算によって求められた水中の深部線量百分率曲線が図6に示されている (Berger and Seltzer, 1969)。ここで、電子は半無限媒質に垂直に入射するものと仮定してある。深部線量分布はビームのジオメトリーに敏感に依存するので、これらの曲線は、照射野寸法が有限で、やや発散するビームについて得られる曲線とは異なるであろう。さらに実際上は、電子ビームが単一エネルギーであることはありそうにない。それ故、問題となる状況における分布を実際に描くのが常に得策である。

高エネルギー電子の広いビームについての深部線量の実験データは Fielden and Holm (1970) にある。

β 粒子についての深部線量の実験データ

組織類似物質に実質的に密着した大きい平面源からのβ粒子による、その吸収物質中の深部線量百分率分布を図7に示す(Francis and Seymour, 1972)。このデータは $1\text{mg}/\text{cm}^2$ の窓を持つ直径 1cm の外挿電離箱を用いて得られたものである。線源は汙過の少ない薄いハク状で、厚いプラスチックで裏打ちされていた。ハクの寸法は $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ 、ただし ^{63}Ni は $3\text{cm} \times 1\text{cm}$ であった。 ^{63}Ni と ^{147}Pm については、吸収物質はポリエチレンテレフタレート*、また ^{204}Tl と ^{90}Sr - ^{90}Y についてはポリメチルメタクリレート**である。β粒子の深部線量分布は照射のジオメトリーにはなほだしく依存する。

低および高エネルギー光子についての深部線量の実験データ

低および高エネルギー光子の広いビームに対する深部線量百分率分布を図8に示す(Delafield, 1963)。これは、胴体を模擬した楕円柱水ファントムの短軸方向から放射線が入射した場合の、短軸に沿った分布であり、無限の線源距離を模擬するため表面で規格化したものであって、表面での測定は平衡条件のもとで行われた。線源はコリメートされていない放射性核種と、かなり単一エネルギーに近い放射線を与えるような、十分汙過された広いX線ビームである。

器官線量の観点からの放射線測定結果の解釈

ICRP の基本的勧告は身体の器官または組織への線量当量として示されてい

* (訳注)いわゆるポリエステル樹脂

** (訳注)いわゆるメタクリル樹脂

る (ICRP Publication 9, 1965) ので、作業場所あるいは胴体表面での放射線測定の結果を体内の着目個所での値に翻訳する必要がある。これを行う際、放射線のスペクトル、幾何学的配置および解剖学上の諸因子を考慮に入れるのはもちろん、測定がどの程度まで照射を代表するように行われたかを推定することが必要である。この問題に関する一般原則は ICRP Publication 12 (1968)に取り扱われている。

低および高エネルギー光子についてのかかる測定の解釈はとくに重要である。前節に述べた照射条件における後方散乱係数 (Delafield, 1963) を図9に示す。これによれば、身体表面における吸収線量は、身体がない場合の同一場所での値より50%も大きくなりうる事がわかる。この差は、身体からの距離の増加とともに減るが、5cm 離れてもなお 25% に達する。

実際上はたいいてい、胴体の前面に着用した個人被曝線量計の読み、または身体の占めるべき位置における自由空气中で測った照射線量のいずれかから、器官線量を推定することが必要である。図10から図12までに、このような推定を行うのに役立つ実験結果 (Jones, 1966) を示す。組織内の吸収線量は、前方から、および背後から照射された、および全方向からの照射を模擬して照射中回転した人体ファントム中の測定によって決定された。線源はいくつかの放射性核種または透過されたX線であった。結果は逆2乗法則で補正されており、遠隔の線源の場合にも直接に適用することができる。

図10と図11は、背後から(曲線A)および前方から(曲線B)ファントムを照射したとき、個人被曝線量計で測った単位照射線量あたりの睪丸および卵巣の平均吸収線量である。これらの図には、回転照射の場合、ファントムの中心位置の自由空气中で測った単位照射線量あたりの平均器官線量も示してある(曲線C)。図12は同じ照射条件および測定条件での、身体中の骨髓分布に従って荷重された、平均骨髓線量である。卵巣についての結果は腹部中心線にも適用してよい (Clifford and Facey, 1970)。

深部線量当量, 換算係数, および実効線質係数

一般に, 垂直入射粒子による身体の照射は, 単位フルエンスあたり最大の線量当量を与える。以下の付録に示す換算係数(すなわち, フルエンス率を線量当量率に換算するための係数)の値は, 垂直照射における深さ一線量当量曲線の最大の場所で計算されたものである。このやり方によれば, 委員会の基本的勧告を厳しく解釈することになるが, 実際上の放射線防護ではこのほうが適切である。後に示す実効線質係数の値も垂直照射について計算されている。

吸収線量の最大と線量当量の最大とが同じ深さに現れるときは, この深さにおける実効線質係数は線量当量の最大値を吸収線量の最大値で割ることによって得られる。しかしながら, これらの最大値は異なった深さに現れることがあろうし, したがって, 線量当量の最大が現れる深さといったような, 任意の深さにおける実効線質係数を求めるには, その深さにおける線量当量の値を, 吸収線量の値で割らなければならない。

付 録 5

電子についての換算係数

ICRP の勧告する、電子についての換算係数は、図13に曲線で、また表3にも示されている。これらは、垂直に入射する単一エネルギー電子の単一方向の広いビームによる照射に関するものであり、深さ一線量当量曲線の最大の場所において評価されている。電子の線質係数は1と仮定してある。換算係数についての一般的な議論に関しては付録4を参照。

表3 電子についての換算係数

電子のエネルギー MeV	換 算 係 数* 1 mrem/h あたりの電子数/cm ² ・s
1×10 ⁻¹	1.6
2×10 ⁻¹	2.6
5×10 ⁻¹	3.9
1×10 ⁰	4.8
2×10 ⁰	5.5
5×10 ⁰	6.2
1×10 ¹	6.7
2×10 ¹	7.2
5×10 ¹	7.2
1×10 ²	6.7
2×10 ²	5.4
5×10 ²	3.6
1×10 ³	3.0
2×10 ³	2.5
5×10 ³	2.1
1×10 ⁴	1.8
2×10 ⁴	1.5

* 深さ一線量当量曲線の最大において計算された値

100MeV 以上の場合の換算係数は, Alsmiller and Moran (1968) のモンテカルロ計算によって求められた。もっと最近, 同様な計算が Beck (1970) によって報告され, そこでは阻止能の密度効果の補正が加えられた。その結果阻止能は減少し, 導かれた換算係数はそのためかなり増加している。この改良は計算の精密化と期待されるかもしれないが, その後行われた Svensson and Nelson (1970) の実験的研究でははっきりした確認は得られていない。10GeV の電子で照射された水ファントム中のエネルギー吸収の測定は, 深さの小さい所では確かに Beck の計算との一致を示しているが, もっと深い所では Alsmiller and Moran の予想値, すなわち, 実験データから得られた深さ 30cm における補間値である mrem/h あたり $1.6 \text{ electron/cm}^2 \cdot \text{s}$ ともっとよく一致している。換算係数は体内の線量当量の最大の場所において評価されるので, Alsmiller and Moran の得た結果のほうがより適切であろう。さらに, 未解決の食い違いがある場合には, より厳しい値を用いるほうが注意深いやり方である。以前の, あまり精密でない, Tesch (1966) の推定値は, Alsmiller and Moran の値と40%以内で一致する。

100MeV から, それ以下では上皮を貫通しなくなる約 100keV までの換算係数は, Berger and Seltzer (1969) および Spencer (1959) の計算から得られる。付録4に記したように, Berger と Seltzer は半無限の水媒質に垂直入射する広いビームについて考察している。Spencer は無限のポリスチレン中の垂直板状線源について考察しているが, その結果は組織に入射する広いビームの場合に適用することができる。McLaughlin and Hussman (1969), Harder and Schulz (1972), および Rosenstein *et al.* (1972) の実験は計算が十分正確であることを示している。

皮膚, 眼の水晶体, および睪丸について主委員会の勧告する最大許容線量は1年につきそれぞれ 30rem, 15rem, および 5rem であるが, これらの器官は, 電子のエネルギーが増加するにつれて順次, 電子線照射の制限因子となる

付 録 6

中性子についての換算係数と実効線質係数

ICRP の勧告する、中性子についての換算係数は、図14に曲線で、また表4にも示されている。これらは、垂直に入射する単一エネルギー中性子の単一方向の広いビームによる照射に関するものであり、深さ一線量当量曲線の最大において評価されている。実効線質係数の勧告値は、図15に曲線で、また表4にも示されている。実効線質係数 \bar{Q} は最大の線量当量を、その現れる深さにおける吸収線量で割ることによって得られたものである。

勧告値がそのよりどころとしている公表された換算係数および実効線質係数の計算のいくつかを図14および図15にプロットしてある。図を簡単にし、またデータの利用を容易にするため、かなり任意に曲線を引いた。異なった計算のあいだの一致は 10MeV 以下では良いが、10—100MeV の領域ではいくらかの不一致が見られる。Irving *et al.* (1967) の結果と他の結果との差異は、計算に用いた原子核模型の相違によって説明される。この文章を書いている現在、客観的な選択を許すような実験データは不十分ではあるが、Irving *et al.* の用いた核模型はあまりにも慎重な答を出しそうに思われるので、彼等のデータにはあまり重きをおいていない。100MeV 以上ではまた計算のあいだに良い一致があり、より低いエネルギーでの決定と矛盾しない中間的な場所に曲線を引いた。

換算係数と実効線質係数の定義に含まれる本来の限定と、それらの計算の精度を、それらを使う際、しっかり留意すべきである。これらの点についての一般的議論に関しては付録4を参照。

表4 中性子についての換算係数と実効線質係数

中性子のエネルギー MeV	換算係数* 1mrem/h あたりの 中性子数/cm ² ・s	実効線質係数** \bar{Q}
2.5×10 ⁻⁸ (熱中性子)	260	2.3
1×10 ⁻⁷	240	2
1×10 ⁻⁶	220	2
1×10 ⁻⁵	230	2
1×10 ⁻⁴	240	2
1×10 ⁻³	270	2
1×10 ⁻²	280	2
1×10 ⁻¹	48	7.4
5×10 ⁻¹	14	11
1	8.5	10.6
2	7.0	9.3
5	6.8	7.8
10	6.8	6.8
20	6.5	6.0
50	6.1	5.0
1×10 ²	5.6	4.4
2×10 ²	5.1	3.8
5×10 ²	3.6	3.2
1×10 ³	2.2	2.8
2×10 ³	1.6	2.6
3×10 ³	1.4	2.5

* 深さ—線量当量曲線の最大において計算された値

** 線量当量の最大値を、その最大値が現れた深さにおける吸収線量で除して得た値

付 録 7

陽子についての換算係数と実効線質係数

ICRP の勧告する、陽子についての換算係数は、図16に曲線で、また表5にも示されている。これらは厚さ 30cm のファントムに垂直に入射する単一エネルギー陽子の単一方向の広いビームによる照射に関するものであり、深さ一線量当量曲線の最大において評価されている。実効線質係数 \bar{Q} の勧告値も表5に示してある。 \bar{Q} は最大の線量当量を、その現れる深さにおける吸収線量で

表5 陽子についての換算係数* と実効線質係数

陽子のエネルギー MeV	換 算 係 数** 1mrem/h あたりの陽子数/cm ² ・s	実効線質係数*** \bar{Q}
2×10 ⁰ to 6×10 ¹	0.40	1.4
1×10 ²	0.41	1.4
1.5×10 ²	0.42	1.4
2×10 ²	0.43	1.4
2.5×10 ²	2.1	1.4
3×10 ²	2.4	1.5
4×10 ²	2.5	1.6
6×10 ²	2.4	1.7
8×10 ²	2.2	1.8
1×10 ³	2.0	1.9
1.5×10 ³	1.6	2.0
2×10 ³	1.4	2.1
3×10 ³	1.1	2.2

* 厚さ 30cm のファントムについての値

** 深さ一線量当量曲線の最大において計算された値

*** 線量当量の最大値を、その最大値が現れた深さにおける吸収線量で除して得た値

割ることによって得られたものである。換算係数と実効線質係数についての一般的議論、ならびにファントムの記述に関しては付録 4 を参照。

200MeV 以下ではブラッグピークがファントム中に現れ、したがって、換算係数は 2MeV に至るまで一定である。2MeV で上皮は貫通されなくなる。ブラッグピークがファントム中に現れない 200MeV 以上では、換算係数の曲線は最初急激に立ち上がり、ついでエネルギーの増加とともに単調に減少する。

実効線質係数は 60MeV における 1.4 から 3,000MeV の 2.2 まで徐々に増加する。

付 録 8

光子についての換算係数

ICRP の勧告する、光子についての換算係数は、図17に曲線で、また表6にも示されている。これらは垂直に入射する単一エネルギー光子の単一方向の広いビームによる照射に関するものである。光子についての線質係数は1と仮定してある。換算係数についての一般的議論に関しては付録4を参照。

10MeV 以下では、換算係数は $1.734 \div E(\mu_{\text{en}}/\rho)$ から導かれる。ここで、 E は光子エネルギー (MeV), (μ_{en}/ρ) は水に対する質量エネルギー吸収係数 (m^2/kg) で、Hubbell (1970) から引用され、また表6にも示してある。

10MeV 以上では、Alsmiller and Moran (1968) のデータを用い、深さ一線量当量曲線の最大において換算係数を評価した。付録5に述べた理由から、これらのデータは Beck (1970) によるもっと最近の計算よりも適切と思われる。

1mrem/h に相当する光子エネルギーフルエンス率が知られると便利なおことがある。これは、表6または図17の換算係数の値に $(1.6 \times 10^{-9}E)$ を乗ずることによって得られる。この場合、エネルギーフルエンス率の単位は $\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ である。

光子のフルエンス率と照射線量率との関連がつけられることも便利である。空気に対する質量エネルギー吸収係数に基づいたこの関係 (Hubbell, 1970) を、10keV ないし 10MeV の光子について、図18に示す。

表6 光子についての換算係数と、水中の質量エネルギー吸収係数
(μ_{en}/ρ)

光子のエネルギー MeV	換 算 係 数 1mrem/h あたりの光子数/cm ² ・s	(μ_{en}/ρ) _水 m ² /kg
1×10^{-2}	3.6×10^2	4.79×10^{-1}
1.5×10^{-2}	9.0×10^2	1.28×10^{-1}
2×10^{-2}	1.7×10^3	5.12×10^{-2}
3×10^{-2}	3.9×10^3	1.49×10^{-2}
4×10^{-2}	6.4×10^3	6.78×10^{-3}
5×10^{-2}	8.3×10^3	4.19×10^{-3}
6×10^{-2}	9.0×10^3	3.20×10^{-3}
8×10^{-2}	8.3×10^3	2.62×10^{-3}
1×10^{-1}	6.8×10^3	2.56×10^{-3}
1.5×10^{-1}	4.2×10^3	2.77×10^{-3}
2×10^{-1}	2.9×10^3	2.97×10^{-3}
3×10^{-1}	1.8×10^3	3.19×10^{-3}
4×10^{-1}	1.3×10^3	3.28×10^{-3}
5×10^{-1}	1.1×10^3	3.30×10^{-3}
6×10^{-1}	8.8×10^2	3.29×10^{-3}
8×10^{-1}	6.8×10^2	3.21×10^{-3}
1×10^0	5.6×10^2	3.09×10^{-3}
1.5×10^0	4.1×10^2	2.82×10^{-3}
2×10^0	3.3×10^2	2.60×10^{-3}
3×10^0	2.5×10^2	2.27×10^{-3}
4×10^0	2.1×10^2	2.06×10^{-3}
5×10^0	1.8×10^2	1.91×10^{-3}
6×10^0	1.6×10^2	1.80×10^{-3}
8×10^0	1.3×10^2	1.66×10^{-3}
1×10^1	1.1×10^2	1.57×10^{-3}
1.5×10^1	1.1×10^2	1.55×10^{-3}
2×10^1	6.4×10^1	1.36×10^{-3}
3×10^1	4.4×10^1	1.31×10^{-3}
4×10^1	3.4×10^1	1.28×10^{-3}
5×10^1	2.8×10^1	1.26×10^{-3}
6×10^1	2.3×10^1	1.25×10^{-3}
8×10^1	1.7×10^1	1.25×10^{-3}
1×10^2	1.4×10^1	1.24×10^{-3}
2×10^2	9.2×10^0	
5×10^2	5.8×10^0	
1×10^3	4.9×10^0	
2×10^3	4.3×10^0	
5.2×10^3	3.7×10^0	
1×10^4	3.4×10^0	
2×10^4	3.2×10^0	

付 録 9

中性子源と遮蔽

この付録には 14—15MeV の中性子を発生するための加速器およびいくつかのアイソトープ中性子源の遮蔽に関する必要条件がおもに扱われている。

加速器またはアイソトープ中性子源は、実質的に、一次中性子、もっと低いエネルギーの散乱中性子、および、それらの中性子がターゲット、カプセル、遮蔽体その他の物体と相互作用することによって発生する γ 線から成る放射線場を作り出す。アイソトープ中性子源は一次 γ 線も放出し、また、加速器ではイオン源への電子の逆加速によって X 線の発生することがある。

中性子源の遮蔽条件については、今までにいくつかの計算が行われている。ある中性子源について、その中性子のエネルギー分布は、遮蔽体の組成と厚さ、ならびに照射の幾何学的条件の複雑な関数であり、したがって線量当量透過率の計算にはいろいろな値の線質係数を用いなければならない。さらに、これらの遮蔽計算はしばしば、たとえば遮蔽体の組成やその成分の断面積などについて異なった仮定のもとで行われているから、計算によって求められた遮蔽条件はかなりの不一致を示す。それゆえ、適切なエネルギー依存性をもつ、信頼のおける中性子線量当量率計、たとえば Andersson—Braun 型カウンターを使用した注意深い測定が遮蔽要件の決定に不可欠である。このようなカウンターは、もちろん、 γ 線成分を測るものではない。

加速器中性子源

衝撃粒子のエネルギーが約 10MeV を超えないような加速器の場合、中性子はおもに軽い核との核反応によって発生する。これらの反応によって作られる中性子の最大エネルギーを表 7 に示す (Brolley and Fowler, 1960)。もっとも普通に利用される反応は、最後の欄に示す ${}^3\text{H} (d, n) {}^4\text{He}$ であって、重陽子のエネルギーはほとんど常に、14—15MeV の中性子が得られるように選ばれる。

表 7 軽い核の関与する種々の核反応によって生成する中性子のエネルギー

ターゲット	${}^{12}\text{C}$	${}^3\text{H}$	${}^7\text{Li}$	${}^{13}\text{C}$	${}^2\text{H}$	${}^9\text{Be}$	${}^3\text{H}$
衝撃粒子	<i>d</i>	<i>p</i>	<i>p</i>	α	<i>d</i>	α	<i>d</i>
衝撃粒子のエネルギー, MeV	角度 0°における中性子のエネルギー, MeV						
0	—	—	—	2.07	2.45	5.27	14.05
1	0.69	—	—	3.20	4.14	6.68	16.75
2	1.68	1.20	0.23	4.16	5.24	7.71	18.26
5	4.64	4.22	3.33	7.00	8.24	10.60	21.98
10	9.57	9.23	8.35	11.68	13.02	15.23	27.42

14—15MeV の中性子についての線量当量透過率の実験データを図19および図20に示す。コンクリートのデータは Hacke (1967), その他は Marshall and Knight (1971) による。どちらの組の結果も、平板状遮蔽体に垂直な軸を持つ発散する広いビームに対するものである。Hacke の結果は、コンクリートについて Marshall and Knight の得たデータと良く一致しており、また数人の他の著者らによって得られた理論的および実験的結果ともかなり良く一致している。組み合わせ遮蔽体のポリエチレンによる減弱率の著しい増加は、鉄中での中性子のエネルギー低下から生じるものである。

Marshall and Knight はまた、厚い軽量遮蔽体について、透過 γ 線による

吸収線量が重要になることを指摘している。たとえば、水の厚さが 120cm になると、それは透過中性子の線量当量より大きくなる。彼等はまた、加速器室への迷路入口で散乱する多量の中性子にも注意を喚起している。職員出入用の迷路の屈曲部を 14—15MeV の中性子で全面的に照射すると、1m 下手における中性子線量当量は屈曲部中央の線量当量の約25%となり、さらに、屈曲部中央からの距離の2乗にほぼ逆比例して減少する。

10¹²n/s 以上の出力を有する 14—15MeV 中性子発生装置は、普通コンクリート製遮蔽体を含めて周囲の材料中に過大な放射能を誘導するおそれがある。しかし、普通コンクリートの代わりにカルシウムコンクリートを使用すると、放射線の減弱に大して影響を与えることなく、放射能は一ケタ減る。

アイソトープ中性子源

数種のアイソトープ中性子源の特性を表8に示す。同表の一部は NCRP

表8 数種のアイソトープ中性子源の特性

線 源	反 応	半減期	中性子の平均エネルギー MeV	1Ci あたりの収量 中性子数/s*
²¹⁰ Po-Be	α, n	138.4 d	4.2	2.5×10 ⁶
²²⁶ Ra-Be	α, n	1620 y	4.0	1.3×10 ⁷
²³⁸ Pu-Be	α, n	86.4 y	4.5	2.3×10 ⁶
²⁴¹ Am-Be	α, n	458 y	4.5	2.2×10 ⁶
²¹⁰ Po-B	α, n	138.4 d	¹⁰ B: 6.3 ¹¹ B: 4.5	6.0×10 ⁵ **
¹²⁴ Sb-Be	γ, n	60 d	0.024	1.3×10 ⁶ **, ***
²⁵² Cf	自発核分裂	2.65 y	2.35 核分裂スペクトル	2.3×10 ¹² 1 g **** より

* 圧縮した混合物についての値

** 比較的単一エネルギーに近い。

*** Radiochemical Centre (1971) のデータ。線源をベリリウムのケースに納めることによって収量を約4倍に増すことができる。

**** 比放射能 532 Ci/g

Report No. 23 (1960) のデータから作成した。

(γ, n) 型の線源は一般に 1MeV 以下のエネルギーの中中性子を発生し、 γ 線に対する遮蔽要件が通常、中性子に対する遮蔽要件を上回る。

(α, n) 反応を利用した線源はおおよそ 10MeV に達するエネルギーの中中性子を発生する。したがって、中性子の遮蔽が重要になり、 $^{241}\text{Am-Be}$ の場合のように γ 線の出力とエネルギーが低いときにはとくにそうである。(α, n) 線源の中中性子スペクトルおよびフルエンスと線量当量との関係、とくに $^{241}\text{Am-Be}$ のそれについては、数人の著者によって報告がなされている。Knight *et al.* (未発表) は $^{241}\text{Am-Be}$ 線源について、 1m^2 あたり $3.7 \times 10^{-8}\text{rem}$ という平均値を導いている。彼等はまた、 $^{241}\text{Am-Be}$ 中性子の広いビームに対する線量当量透過率の実験データを出しており、これを図21に再掲してある。平板に対する結果は遮蔽体に垂直な軸を持つ発散ビームについてのものである。

^{252}Cf は自発核分裂によって中性子を発生する。1g の線源からの中性子および γ 線の出力の詳細を、表 8 および表 9 と表 10 の中に示す (Stoddard, 1965)。

表 9 1g の ^{252}Cf から 1m の距離における中性子フルエンス率と線量率

エネルギー範囲 MeV	フルエンス率 中性子数/cm ² ·s	組織内の吸収線量率 rad/h	線量当量率 rem/h
0— 0.5	2.2×10^6	1.3×10^1	1.1×10^2
0.5— 1.0	2.9×10^6	3.5×10^1	3.5×10^2
1.0— 2.0	6.1×10^6	9.1×10^1	8.5×10^2
2.0— 3.0	3.7×10^6	5.9×10^1	4.8×10^2
3.0— 4.0	2.2×10^6	3.7×10^1	2.9×10^2
4.0— 5.0	1.3×10^6	2.6×10^1	1.7×10^2
5.0— 6.0	4.5×10^5	1.0×10^1	6.3×10^1
6.0— 7.0	3.2×10^5	8.0×10^0	4.8×10^1
7.0— 8.0	1.0×10^5	2.5×10^0	1.5×10^1
8.0—10.0	7.9×10^4	2.1×10^0	1.2×10^1
10.0—13.0	1.8×10^4	4.5×10^{-1}	2.7×10^0
0—13.0	1.9×10^7	2.8×10^2	2.4×10^3

表10 1g の ^{252}Cf から 1m の距離における光子フルエンス率と線量率

エネルギー範囲 MeV	フルエンス率 光子数/cm ² ・s	組織内の吸収線量率 rad/h
0—0.5	3.7×10^7	1.7×10^1
0.5—1.0	4.5×10^7	6.1×10^1
1.0—1.5	1.4×10^7	3.0×10^1
1.5—2.0	6.1×10^6	1.6×10^1
2.0—2.5	1.8×10^6	5.8×10^0
2.5—3.0	8.8×10^5	3.3×10^0
3.0—3.5	4.5×10^5	1.9×10^0
3.5—4.0	2.4×10^5	1.1×10^0
4.0—4.5	1.4×10^5	7.0×10^{-1}
4.5—5.0	6.5×10^4	3.4×10^{-1}
5.0—5.5	3.9×10^4	2.3×10^{-1}
5.5—6.0	1.4×10^4	8.7×10^{-2}
6.0—6.5	8.0×10^3	5.3×10^{-2}
0—6.5	1.1×10^8	1.4×10^2

平板状遮蔽体に垂直に入射する軸を持つ、 ^{252}Cf 中性子の発散する広いビームについての線量当量透過率の実験データは図22 (Wright, 1968) に示されている。また、平板状遮蔽体に垂直な軸を持つ、発散する広いビームについて計算された ^{252}Cf γ 線の吸収線量透過率のデータを図23に与えてある (U.S.A.E. C. Report No. SRO—153, 1971)。図24は、球状遮蔽体のおおのの中心に $1\mu\text{g}$ の ^{252}Cf があるときの、遮蔽体表面における中性子線量当量率の計算値を示す (Hootman, 1970; Stoddard and Hootman, 1971)。コンクリート 01 および 03 は密度 2.35 g/cm^3 の普通コンクリートであるが、コンクリート 01 は含水量が大きいので、コンクリート 03 の約 4 倍の水素を含む。これらのコンクリートについての詳細は、上に記した引用文献に見ることができる。 ^{252}Cf 線源とその遮蔽に関するこれ以上の情報については、Nichols (1968), Prince (1969), および Oliver and Moore (1970) を参照されたい。

斜めに入射する中性子ビームの透過率

単一エネルギー中性子の単一方向の広いビームが平板状遮蔽体内を通過する場合の吸収線量透過率に対する入射角の変化の影響は、Allen and Futterer (1963) によって理論的に調べられた。水、ポリエチレンおよびコンクリートに対する 0.5, 1, 2, および 5MeV の中性子についての結果を図25—図28に示す。遮蔽材の詳細については表11に与えてある。計算はホウ素を含むポリエチレンについてなされているにもかかわらず、密度 0.93g/cm^3 の純ポリエチレンについての結果もほとんど差異はない。

表11 図25—図28の計算に用いられた材料の組成

材 料	密 度 g/cm ³	含有元素	原子数/cm ³ ×10 ⁻²¹
ホウ素含有ポリエチレン (B ₄ C 8重量%)	0.97	H	76.80
		C	39.20
		¹⁰ B	0.658
		¹¹ B	2.67
水	1.00	H	66.90
		O	33.45
コ ン ク リ ー ト	2.26	H	13.75
		O	45.87
		Al	1.743
		Si	20.15

図25—図28には、ポリエチレンに対する中性子の吸収線量透過率が描かれており、さらに水およびコンクリートに適用する際の横軸に対する乗数も示してある。入射角は平板への法線から、また厚さは法線に沿って測られている。

その他の資料

場合によっては土壌が中性子遮蔽体の一部をなすことがある。種々の土壌の

遮蔽特性についての資料は Allen and Futterer (1963) および Clark(1966) から得られる。

同様な線源に対する中性子遮蔽については NCRP Report No. 38 (1971)に述べられているが、理論的方法に重点がおかれている。この Report には豊富な文献のリストも含まれている。中性子の線源、スペクトル、および測定に関するこのほかの資料については ICRU Report 13 (1969) を参照。

Source	Material	Thickness (cm)	Reduction Factor
Am-241	P	10	0.1
Am-241	P	20	0.01
Am-241	P	30	0.001
Am-241	P	40	0.0001
Am-241	P	50	0.00001
Am-241	P	60	0.000001
Am-241	P	70	0.0000001
Am-241	P	80	0.00000001
Am-241	P	90	0.000000001
Am-241	P	100	0.0000000001

付 録 10

飛程—エネルギー曲線

空気中における電子および陽子の飛程—エネルギー曲線を図29に、また水および鉛の中での電子、陽子および α 粒子の飛程—エネルギー曲線をそれぞれ図30および図31に示す。ここに示した飛程は連続減速近似(continuous slowing down approximation)による飛程 R_{csda} である。電子についての曲線は Fano (1964) から、陽子のそれは Janni (1966) から、また鉛中の α 粒子のそれは Williamson *et al.* (1966) から採った。また、水中における α 粒子の曲線は Fano (1964) の述べた方法によって計算されたものである。

重粒子についての R_{csda} は平均投影飛程にほぼ等しいが、電子についての R_{csda} は外挿投影飛程をかなり上回る。 R_{csda} と文献に記されている他の飛程との関係の一般的な論議については ICRU Report 16 (1970) を見よ。

これらの曲線には、発生するかもしれない二次放射線のことは考慮されていないので、これらのデータを実際の遮蔽計算に適用する際には注意しなければならない。

これらの飛程は長さおよび面積密度の単位で与えられており、後者は他の材料における概略の厚さを求めるのに役立つ。

付 録 11

 β 線 源 の 遮 蔽

β 線の最大エネルギーに対応する飛程を用いると、付録10に示した電子の飛程—エネルギー曲線は、数ミリキュリー以下の放射能の β 線源に普通必要とされる遮蔽について慎重な見積りを与えることになる。もっと放射能の高い線源では、 β 粒子の減速によって発生する制動放射線も遮蔽する必要があるろう。

外部制動放射線の量およびエネルギースペクトルの決定については詳しい計算がなされており (Bethe and Heitler, 1934; Elwert, 1939), なかはずく Lidén and Starfelt (1955) によって実験的に裏付けられた。遮蔽条件を決めるには通常、簡単化のための仮定がなされ (Wyard, 1952; Van Tuyl, 1961), また電算機プログラムの開発によって、もっと正確な推定 (Arnold, 1964) や、内部制動放射線の補正を含む推定 (Van Tuyl, 1964) が可能になった。

β 粒子が線源材料と相互作用する場合の、種々の β 線源からの制動放射線スペクトルの計算結果を、図32に示す。これらの曲線は、原典のヒストグラムのデータ (Arnold, 1964) から作成した。これらの線源の特性の一部を表12に掲げる。図32に示す ^{90}Sr — ^{90}Y のスペクトルから遮蔽計算のために選んだ光子エネルギー群とそれらの放出率を表13に、また、発散する広いビームについて、三つの材料中における吸収線量透過率曲線を図33に示してある。線源が γ 線を放出したり、他の放射性核種が不純物として存在したりすれば、遮蔽条件はそれによって変わることになるろう。

これらのデータはすべて、高放射能の円柱状線源について Arnold により計算されたものであるが、 ^{90}Sr — ^{90}Y の場合には広く使用されている円板状線源

についての実験データと比較を行うことができる (Haybittle, 1956—57; Naumann and Waechter, 1965)。制動放射線の出力は良く一致しており、実験値は約 11mR/Ci·h at 1 m であるのに対し、Arnold の値は約 13mR/Ci·h at 1 m である。また、鉛中の透過率曲線も合っている。しかしながら、出力も、透過率曲線の最初の部分の形も、線源の構造によって影響されるので、制動放射線の計算は個々の線源についての測定によって裏付けがなされるべきである。

ウランはそれ自体放射線を出すことに注意する必要がある。広く使用されている劣化ウランは ^{235}U 含有量が低いということだけで天然ウランと異なっ

表12 付録11に扱われている β 線源の特性

線 源	β 粒子の最大 エネルギー MeV	β 粒子の平均 エネルギー MeV	β 粒子 1 個あたりの制 動放射の全エネルギー MeV/ β 粒子	母 材
^{106}Rh	3.54	1.515	1.29×10^{-1}	金 属
^{90}Y	2.27	0.944	2.81×10^{-2}	酸化物(Sr)
^{90}Sr	0.545	0.201	1.41×10^{-3}	酸化物
^{147}Pm	0.23	0.067	2.02×10^{-4}	酸化物
^{171}Tm	0.097	0.029	3.13×10^{-5}	酸化物

表13 SrO 母材中で停止した ^{90}Sr - ^{90}Y β 粒子からの制動放射線に対する遮蔽計算のために選定された、光子エネルギー群と放出率

光子のエネルギー MeV	光子放出率 光子数/Ci·s
0.25	1.3×10^9
0.50	5.8×10^8
0.80	1.8×10^8
1.10	5.5×10^7
1.40	1.5×10^7
1.70	2.7×10^6
2.00	1.9×10^5

付 録 12

X線および γ 線の遮蔽

X線および γ 線に対する遮蔽の設計は、放射線防護においてきわめてありふれた仕事なので、この付録においてもほかより詳しく述べてある。その中には、かなりの量の、グラフの形にした出力および透過率データ、設計手続に関するいくつかの指針、いくつかの線源に対する遮蔽要件の表、およびX線診断施設に関する一節が含まれている。

X線発生装置の出力

X線発生装置の、ターゲットからある距離における出力は、電圧、電流およびビームの径過がわかっているならば、かなりの正確さで予言することができる。しかし、出力は発生装置の型、ターゲットの材質と配置の関数であるから、可能ならば、問題としている発生装置の出力を実測すべきである。

X線ビームの軸上における出力の典型的な値を図34—図37に示す。半波整流の発生装置の出力は定電圧の場合の値の約半分である。図に示された以外の距離についての出力を計算する際には、とくに低い電圧のとき、空気による減弱を考慮する必要があることが知られよう。

図34—図37の引用文献は次のとおりである。図34: O'Riordan and Catt (1968)。図35: Glasser *et al.* (1959)。図36: 上の曲線は Wyckoff *et al.* (1948); 中の曲線は Kaye and Binks (1940); 下の曲線は Miller and Kennedy (1955)。図37: MacGregor (1959) および Murray (1964)。

γ 線源の出力

この付録に透過率データを載せてある γ 線源の出力を表14に示す。他のデータについては、Nachtigall (1969) を参照されたい。

表14 γ 線源の出力*

核種	半減期	主要な γ 線のエネルギー (MeV) および1崩壊あたりの光子数の百分率**	1Ci の線源から 1m に おける照射線量率***
^{24}Na	15.0 h	γ : 1.37(100%) 2.75(100%)	1.84
^{60}Co	5.24 y	γ : 1.17(100%) γ : 1.33(100%)	1.30
^{124}Sb	60 d	γ : 0.60 to 2.09	0.98
^{181}I	8.05 d	γ : 0.08 to 0.72 x : 0.005(0.6%) 0.03(5%)	0.22 (およびX線による0.025)
^{187}Cs	30 y	γ : 0.66(85%)	0.32
^{182}Ta	115 d	γ : 0.07 to 1.23	0.60
^{192}Ir	74 d	γ : 0.30 to 0.61	0.48
^{198}Au	2.70 d	γ : 0.41 to 1.09 x : 0.009(1%) 0.07(3%)	0.23 (およびX線による0.014)
^{226}Ra および壊変生成物	1620 y	γ : 0.047 to 2.4	0.825****

* 本付録に透過率データの載せてある線源につき、いくつかの文献から Duggan がまとめたもの

** X線のデータがあるものは、それも含めた。

*** 線源の自己吸収と空気の吸収は考慮されていない。線源中に生成する制動放射線も無視してある。ただし、この注は ^{226}Ra には適用しない。次の注を参照

**** 厚さ 0.5mm の白金カプセル中の点線源を仮定し、1g の線源から 1m の距離における R/h 単位での測定値

遮蔽体中の、一次X線および γ 線の透過率

一次X線および γ 線の広いビームの透過率データを図38—図52に、またその文献と照射のジオメトリーを表15に示す。透過率は、照射線量率または空気中で測定された吸収線量率についてのものである。

これらのX線透過率グラフの大部分は定電圧X線発生装置に関するものであるが、そのデータは、大した食い違いを生じることなく、すべての型の発生装置に用いることができる。さらに、これらの曲線の大部分は、無視しうるほどわずかな γ 線透過率についてのものであり、それらは事実上ピーク動作電圧のみに依存している。もしビーム γ 線透過率を酌量する必要があるならば、図34—図36が役立つであろう。

γ 線の透過率データに関しては、照射のジオメトリーが透過率に影響するので、それぞれの核種と遮蔽体についてジオメトリーを承知しておくべきである。ここに掲げた以外の核種については、Steigelmann (1963) の作ったマニュアルを参照することができよう。

ここで考えているコンクリートは普通の骨材でできており、その密度は 2.35 g/cm^3 である。この値から局部的に変わることは、密度の比に等しい補正係数を適用することによって、普通考慮に入れることができる。しかし、光子エネルギーが低い場合にはとくに、著しく異なった骨材にまでこのやり方を広げるべきでない。低エネルギーX線に対する、いくつかの材料の遮蔽値については以下の節を見よ。

X線フィルムの長期貯蔵や全身計数のための部屋のような、ある種の区域の遮蔽には、低放射能の建築材を使用するのがよい (Lindell and Riezenstein, 1964; Hamilton, 1971)。

表15 X線および γ 線の透過データの文献と照射のジオメトリー

放射線	遮蔽材	ジオメトリー***	著者名
10-50kV	鉄, Perspex***	発散する広いビーム	O'Riordan and Catt (1969)
50-300kV	コンクリート	発散する広いビーム	Trout <i>et al.</i> (1959)
400kV	コンクリート	単一方向の広いビーム	Miller and Kennedy (1955)
50-200kV	鉛	発散する広いビーム	Binks (1943)
250kV	鉛	発散する広いビーム	Binks (1955)
300-400kV	鉛	単一方向の広いビーム	Miller and Kennedy (1955)
0.5-1MV	コンクリート, 鉛	発散する広いビーム	Wyckoff <i>et al.</i> (1948)
2MV	コンクリート, 鉛	狭いビーム	Evans <i>et al.</i> (1952)
		発散する広いビーム	Smith (未発表)****
3MV	コンクリート	狭いビーム	Goldie <i>et al.</i> (1954)
		単一方向の広いビーム	O'Riordan (未発表)****
4MV	コンクリート	発散する広いビーム	Greene and Massey (1961)
6-38MV	コンクリート	発散する広いビーム	Kirn and Kennedy (1954)
>38MV	コンクリート	発散する広いビーム	Miller and Kennedy (1956)
4-30MV	鉛	発散する広いビーム	Maruyama <i>et al.</i> (1971)
²⁴ Na	鉛	円筒形遮蔽体	Price <i>et al.</i> (1957)
	ウラン	円筒形遮蔽体	Wright (1971)
⁶⁰ Co	コンクリート, 鉄	発散する広いビーム	Kennedy <i>et al.</i> (1950)
	鉛	単一方向の広いビーム	Kirn <i>et al.</i> (1954)
	ウラン	円筒形遮蔽体	Wright (1971)
¹²⁴ Sb	コンクリート, 鉛	点状源, 無限媒質	Dealler (未発表)****
¹³¹ I	コンクリート	発散する広いビーム	Braestrup and Wyckoff (1958)
	鉛	円筒形遮蔽体	West (1963)
¹³⁷ Cs	コンクリート, 鉛	単一方向の広いビーム	Kirn <i>et al.</i> (1954)
	鉄	単一方向の広いビーム	O'Riordan (未発表)****
	ウラン	円筒形遮蔽体	Wright (1971)
¹⁸² Ta	鉛	円筒形遮蔽体	Price <i>et al.</i> (1957)
¹⁹² Ir	コンクリート, 鉄, 鉛	発散する広いビーム	Ritz (1958)
	ウラン	円筒形遮蔽体	Wright (1971)
¹⁹⁸ Au	コンクリート, 鉛	単一方向の広いビーム	Kirn <i>et al.</i> (1954)
²²⁶ Ra	コンクリート, 鉄, 鉛	発散する広いビーム	Wyckoff and Kennedy (1949)

* 発散する広いビームの軸は平板状遮蔽体に垂直である。

** 単一方向の広いビームは平板状遮蔽体に垂直に入射する。

*** ポリメチルメタクリル樹脂 ($C_5H_8O_2$)_n, 他の商品名: Lucite, Plexiglass

**** 未発表データは計算値である。

斜めに入射するビームの透過率

平板状遮蔽体にビームが斜め入射する際生ずる問題は注意に値する (Kirn *et al.*, 1954)。垂直入射のデータを用い、斜めに測った厚さに基づいて推定した遮蔽は、散乱光子の透過率が大きくなっていることを酌量して、もっと増さなければならない。たとえば、所要の透過率が 10^{-3} で、入射角が 45° ならば、必要とされるコンクリートの厚さの増加は、低エネルギーで約20%、高

表16 大幅に減弱したX線の広いビームに対する、およその半価層値と $1/10$ 価層値

X線源	半 価 層, cm		$1/10$ 価 層, cm	
	鉛	コンクリート	鉛	コンクリート
50kV	0.005	0.4	0.018	1.3
70	—	1.0	—	3.6
75	0.015	—	0.050	—
100	0.025	1.6	0.084	5.5
125	—	1.9	—	6.4
150	0.029	2.2	0.096	7.0
200	0.042	2.6	0.14	8.6
250	0.086	2.8	0.29	9.0
300	0.17	3.0	0.57	10.0
400	0.25	3.0	0.82	10.0
0.5 MV	0.31	3.6	1.03	11.9
1	0.76	4.6	2.52	15.0
2	1.15	6.1	3.90	20.1
3	—	6.9	—	22.6
4	1.48	8.4	4.9	27.4
6	1.54	10.2	5.1	33.8
10	1.69	11.7	5.6	38.6
20	1.63	13.7	5.4	45.7
30	1.57	13.7	5.2	45.7
38	—	13.7	—	45.7

表17 大幅に減弱した γ 線の広いビームに対する、およその半価層値と 1/10 価層値

核種	遮蔽材 ウラン, cm		鉛, cm		鉄, cm		コンクリート, cm	
	HVT	TVT	HVT	TVT	HVT	TVT	HVT	TVT
^{24}Na	0.9	3.0	1.7	5.6	—	—	—	—
^{60}Co	0.7	2.2	1.2	4.0	2.0	6.7	6.1	20.3
^{124}Sb	—	—	1.4	4.5	—	—	7.0	23.0
^{131}I	—	—	0.7	2.4	—	—	4.6	15.3
^{137}Cs	0.3	1.1	0.7	2.2	1.5	5.0	4.9	16.3
^{182}Ta	—	—	1.2	4.0	—	—	—	—
^{192}Ir	0.4	1.2	0.6	1.9	1.3	4.3	4.1	13.5
^{198}Au	—	—	1.1	3.6	—	—	4.1	13.5
^{226}Ra	—	—	1.3	4.4	2.1	7.1	7.0	23.3

エネルギーで10%；また、同様の状況において鉛の厚さの増加は無視しうほど小さい。British Standard 4094 (1966) および NCRP Report No. 34(1970) を参照。

半価層値と 1/10 価層値

著しく減弱したX線および γ 線の広いビームに対する半価層値 (HVT) と 1/10 価層値 (TVT) を表16および表17に掲げる。これらの値は図38—図52の透過率曲線の一番下の1ヶタから得られたものである。多くの透過率曲線の持つ形からみて、HVT および TVT は一次線に対する遮蔽要件の計算には使用できないが、漏洩放射線に要求される遮蔽の計算には用いられよう。

低エネルギーX線に対する、選ばれたいくつかの材料の遮蔽値

低い光子エネルギーでは、透過率は遮蔽体の組成に鋭敏に依存するので、X

線使用施設に普通に用いられている材料の遮蔽値を知る必要がある。これらの遮蔽値を表す伝統的な方法は、材料の鉛当量を厚さとX線発生電圧の関数として数表化することであって、粘土レンガ、バライト骨材コンクリート、および鉄について、これを表18に示してある。このデータは狭いビームと広いビーム

表18 低エネルギーX線に対する種々の材料の鉛当量*

遮蔽材	遮蔽材の 密度 g/cm ³	遮蔽材の 厚さ cm	下に示す印加電圧(kV)における鉛当量(cm)							
			50	75	100	150	200	250	300	400
粘土製レン ガ**	1.6	10	0.06	0.08	0.09	0.08	0.08	0.10	0.11	0.13
		20	0.14	0.17	0.19	0.17	0.17	0.23	0.30	0.45
		30	0.22	0.27	0.31	0.26	0.26	0.40	0.55	0.85
		40	—	0.38	0.45	0.37	0.37	0.60	0.83	1.27
		50	—	—	—	0.48	0.48	0.81	1.13	1.71
バライトプ ラスターま たはバライ トコンクリ ート**	3.2	1.0	0.09	0.15	0.18	0.09	0.07	0.06	0.06	0.08
		2.0	0.18	0.27	0.33	0.18	0.14	0.13	0.14	0.16
		2.5	0.23	0.33	0.40	0.22	0.17	0.17	0.18	0.20
		5.0	—	—	—	0.43	0.34	0.36	0.39	0.43
		7.5	—	—	—	0.59	0.50	0.56	0.61	0.68
		10.0	—	—	—	—	0.68	0.77	0.84	0.95
		12.5	—	—	—	—	—	—	1.08	1.21
鉄***,****	7.8	0.1	—	0.01	0.02	0.01	0.01	—	—	—
		0.2	—	0.03	0.03	0.02	0.02	—	—	—
		0.3	—	0.05	0.05	0.03	0.03	—	—	—
		0.4	—	0.07	0.07	0.04	0.04	—	—	—
		0.5	—	0.09	0.09	0.05	0.04	0.03	0.03	0.04
		1.0	—	—	—	0.09	0.08	0.08	0.08	0.09
		2.0	—	—	—	0.17	0.16	0.17	0.19	0.24
		3.0	—	—	—	0.25	0.23	0.28	0.33	0.43
		4.0	—	—	—	0.33	0.30	0.38	0.47	0.65
		5.0	—	—	—	0.40	0.37	0.49	0.63	0.88

* ジオメトリーについては本文参照

** Binks (1955)

*** Kaye *et al.* (1938)

**** Trout and Gager (1950)

の中間のビームジオメトリーに関するものであって、したがって遮蔽値は過大評価されている。また、表のデータは脈動電圧X線発生装置について決められているが、定電圧の場合にも用いることができよう。

X線および γ 線の散乱

被照射物体から放出される光子の一部はコンプトン相互作用に依るものではないが、ここでは便宜上、すべての放出光子を散乱放射線に含めることとする。

表19 照射面積400cm²の組織類似ファントムから1mの距離における散乱線による吸収線量率の百分率*

散乱角	100kV**	200kV**	300kV**	⁶⁰ Co***	6MV****
15°	—	—	—	—	0.65
30°	0.02	0.24	0.34	—	0.30
45°	0.03	0.23	0.26	0.18	0.14
60°	0.04	0.19	0.22	0.14	0.08
90°	0.05	0.14	0.19	0.07	0.04
120°	0.12	0.23	0.26	0.05	0.03
135°	0.17	0.30	0.33	0.04	0.03
150°	0.21	0.37	0.48	—	—

* 着目点、すなわち、ファントムの表面またはファントムの中心と同一点における自由空気中の一次ビームの測定値を基準とした、散乱線による吸収線量率の百分率

** Bomford and Burlin (1963). 幅30cm×深さ22cmの直方体ファントム。照射野面積および散乱角はファントム表面についての値である。

*** Dixon *et al.* (1952). 長軸36cm, 短軸20cmの楕円柱ファントム。照射野面積および散乱角はファントム中心についての値である。ビームは長軸の方向

**** Karzmark and Capone (1968). 直径27cmの円柱ファントム。照射野面積および散乱角はファントム中心についての値である。

散乱X線および γ 線の遮蔽体の設計には二つの段階がある：第1には、散乱放射線に由来する吸収線量の決定が必要であり、第2には、この散乱放射線を容認レベルにまで減らすのに必要な遮蔽体の厚さを推定することが必要である。典型的な状況のもとでの散乱に由来する、空気中で測定された吸収線量を、図53、図54および表19に示す。図53は種々の厚い散乱体から 90° 方向に散乱されたX線の、加速電圧に対する変化を表す (Wachsmann *et al.*, 1964)。ビームは、その実効エネルギーが最大光子エネルギーの約半分になるように透過されているから、 γ 線エネルギーの2倍に当たる点での散乱百分率を曲線から読みとれば、この図を γ 線にも使用することができよう。低い電圧では鉛からの特性X線が支配的な影響を持つことに注意されたい (Lindell, 1954)。厚いコンクリート遮蔽体に垂直に入射するX線および γ 線の発散ビームの散乱のパターンを図54に示す。引用した文献は：100~300kVは Radiological Protection Service (未発表)； ^{60}Co は Dixon *et al.* (1952)；6 MVは Karzmark and Capone (1968)である。表19には患者を模擬したファントムによる、 ^{60}Co γ 線および種々の電圧で発生したX線の、いろいろな角度への散乱放射線の量を示してある。

散乱の百分率は照射面積によって変わり、放射線医学および工学で通常使われているような照射野面積については、これら二つのパラメーターの間には近似的に直線関係が存在する。しかし、この関係を非常に大きな照射野に用いると散乱の過大評価となろう (British Standard 4094, 1971)。

散乱放射線が特別な困難をもたらすおそれのある二つの場合を注意すべきである (British Standard 4094, 1966 and 1971)。

(1) 放射線使用室への迷路の入口には多量の散乱放射線のあることがある。職員出入用迷路の屈曲部が全面的に照射されると、1 m下手における照射線量率は屈曲部中央の照射線量率の約10%となり、さらに、屈曲部中央からの距離の2乗にはほぼ逆比例して減少する。

(2) 工業用ラジオグラフィのための天井のない囲いでは、空気および作業室の上にある構築物からの散乱放射線が、囲いの壁を貫通してくる放射線の量を上回ることがある。壁の高さ3 mの囲いの外側での頭の高さにおける散乱放射線の量と線源出力との関係を述べた次の例がこの状況を物語っている。

(a) コリメートされていない γ 線源の場合、外部の照射線量率は1 mにおける線源出力の約 10^{-4} である。

(b) 40° にコリメートされた200—400kV X線装置の場合：もし利用ビームが上向きならば、外部の照射線量率は1 mにおける線源出力の約 5×10^{-5} である；もし、利用ビームが囲いから出ないならば、外部の照射線量率は1 mにおける線源出力の約 5×10^{-6} である。天井のない囲いの周囲における照射線量率は囲いおよび作業室の大きさおよび構造に非常に依存する。

遮蔽体中の散乱放射線の透過率

図55と図56は、斜めに置かれたコンクリート壁から散乱された ^{137}Cs γ 線の、コンクリートおよび鉛中における透過率を示す (Frantz and Wyckoff, 1959)。図57と図58は、患者を模擬したファントムから散乱された ^{60}Co γ 線の、コンクリートおよび鉛中における透過率を示す (Dixon *et al.*, 1952)。図59はファントムから種々の角度で散乱された6 MV X線のコンクリート中における透過率を示す (Karzmark and Capone, 1968)。以上のデータは広いビームに関するもので、かつ、照射線量または空気中で測定された吸収線量で表されている。

特定のX線の散乱データが得られないときは、Braestrup and Wyckoff (1958) によって提案された近似法を使うことができよう。典型的な遮蔽条件のもとでは、 90° 散乱線が散乱放射線の主成分を占めることが明らかにされており、三つのエネルギー領域、すなわち 0.5MV 以下、0.5—3 MV、および

3 MV 以上でのその減弱特性が考察されている。0.5 MV 以下では、90° 散乱線は一次ビームと同じ減弱特性を持つと仮定してよいので、一次ビームに対する透過率データを散乱放射線に必要な遮蔽の推定に用いることができよう。Trout and Kelley (1972) は、鉛遮蔽体について、0.3 MV までの電圧では、この方法は本来過大評価になることを示した。0.5 から 3 MV の領域では、90° 散乱線の減弱特性は 0.5 MV の一次ビームのそれと類似している (Mooney and O'Riordan, 未発表) から、0.5 MV X線の透過率データを用いてよい。3 MV 以上では、90° 散乱光子は約 0.5 MeV のエネルギーを持つと考えてよいので、散乱線に対する遮蔽を計算する際には、1 MV の一次ビームの透過率データを用いることができよう。

この方法は、MV で表した発生電圧の値が数値的に MeV で表した光子エネルギーの 2 倍であるとして、 γ 線源にも適用してよい。

遮蔽体中の漏洩放射線の透過率

X線管または線源の容器からの漏洩放射線に対する遮蔽が必要となることがある。漏洩線は容器を通過するときかなり減弱しているので、その後の減弱は実際上指数関数的である。それゆえ、漏洩放射線に対する遮蔽は、表16および表17に記した半価層 (HVT) または 1/10 価層 (TVT) の数値を用い、その所要倍数によって推定してよい。

散乱放射線と漏洩放射線が同時に存在する場合の遮蔽

散乱放射線と漏洩放射線が同時に存在する場合に必要な遮蔽を決めることは、通常必要である。散乱放射線と漏洩放射線に対する遮蔽の厚さが計算の結果 1 TVT 以上違っているときには、厚いほうの遮蔽体を採用すべきである。

しかし、もし違いが 1 TVT 以下ならば、厚いほうの遮蔽を採用した上、1 HVT の厚さをつけ加えるべきである。このやり方は労力の節約になるが、場合によっては、両方の効果による透過放射線が容認レベルになるよう、反覆計算によってもっと精密に必要な厚さを決める価値があることもあろう。

高および超高エネルギー電子加速装置に関する 特別な問題点

電子線発生方式および X 線発生方式で運転される高エネルギーおよび超高エネルギー電子加速装置に関連した特別な問題点に注目する：

引き出された電子ビームからの X 線および電子のエネルギー分布と強度分布；

加速器が故障の際、予期しない個所から発生する放射線；

中性子の発生と、中性子と X 線の相対的な重要性；

加速器の部品や遮蔽体のような材料の放射化、および、それによってさらに体外放射線障害が生じる可能性；

強力な換気を必要とするかもしれぬ、空気中の透導放射能と有害ガスの発生；

放射線損傷、とくに電子部品の；

発熱効果と、発火および爆発の危険発生の可能性。

これらの問題点をここで扱うことはできないが、次の文献にはいろいろな面についての役に立つデータがある：NCRP Report No. 31 (1964)；Less and Swallow (1964)；Reetz and O'Brien (1968)；Conf-691101；Stevenson (1969)；Berger and Seltzer (1970)；Brynjolfsson and Martin (1971)；British Standard 4094 (1971)；Baarli and Dutrannois (1971)。

X線およびr線の遮蔽設計のための公式

X線およびr線の遮蔽設計のための公式をここに記す。レントゲン、空気中のラド、およびレムは数値的に等しいと仮定する。1週間の使用期間を考える慣習をここでも踏襲してある。

一次ビームについては、遮蔽体の最大許容透過率 B は次式で与えられる：

$$B = \frac{Pd^2}{WUT} \quad (1)$$

P は設計上の週間限度すなわち、管理された作業者の居在区域については 0.1rem/週、管理されていない作業者の居在区域については 0.03rem/週、また、公衆の構成員の居在区域については 0.01rem/週；これらの値はすべて、全身照射を受ける個人の年間線量限度から導かれる。 d は線源から問題とする場所までの、メートルで表した距離。 W は週間の稼働負荷、すなわち、3 MV までの電圧で発生するX線については mA・min/週で、他の線源については 1 mの距離における空気中で測った rad/週または R/週で表した、線源の利用度、 U は使用係数、すなわち問題とする場所に向けた稼働負荷の割合。 T は居在係数すなわちその場所に居在する割合である。この二つの係数の使用はその場所の規則と合わせるべきである。3 MV までのX線については、(1)式により R/mA・min at 1 mの単位で B が求められる。他の線源については、 B は透過率になる。

B の計算値に対応する遮蔽体の厚さは、該当する透過率曲線から読み取られる。

散乱放射線については、遮蔽体の最大許容透過率 B_s は次式で与えられる：

$$B_s = \frac{100Pd_s^2}{WTS}$$

P と T は(1)式と同じである。 W も同じであるが、線源と散乱体の距離が1 mで

ないときには、逆2乗法則によって(2)式を修正しなければならない、すなわち、線源—散乱体距離が50cmならば、分母に4を乗ずる。Sは、問題とする照射面積から1mの距離へ散乱された散乱線の吸収線量率または照射線量率の入射点における自由空気中での測定値に対する百分率である。Sの値は図53と図54、および表19から導き出すことができよう。線源—散乱体距離の変化は、それによる照射面積の変化によって補償されることを知っておくとよい。散乱線の透過率に関する前節の近似的方法を高エネルギーX線に用いる際には、問題とする電圧と0.5MVでの出力の比、すなわち1MVで20、2MVで300、3MVで850、をSに乘じなければならない。 d_s は散乱体、すなわちこの場合における線源、から問題とする場所までの、メートルで表した距離である。

B_s の単位は(1)式のBの単位に対応している。

B_s の計算値に対応する遮蔽体の厚さは、該当する透過率グラフから読み取られる。

漏洩放射線については、遮蔽体の最大許容透過率に対応する1/10 価層の倍数 N_{TVT} が次式によって与えられる：

$$N_{TVT} = \log_{10} \frac{W_L T}{d^2 P} \quad (3)$$

T 、 d 、および P は(1)式と同じである。 W_L は線源から1mにおける、週間の漏洩線照射線量率または吸収線量率である。半価層の倍数 N_{HVT} は $3.3 N_{TVT}$ となる。

1/10 価層または半価層の倍数の計算値に対応する遮蔽体の厚さは、表16と表17に与えられた値を N_{TVT} または N_{HVT} に乗ずることによって得られる。

いくつかの線源に対する遮蔽の必要条件

X線の遮蔽に対する必要条件の例を、一次ビームについては表20に、また散

乱線と漏洩線の共存する場合については表21に、それぞれ示す。鉛とコンクリートの密度はそれぞれ 11.35g/cm^3 および 2.35g/cm^3 である。これらの表はこの付録中の資料から直接作られたものであるが、75kV のコンクリートのデータは補間に依っている。

すべての場合を通じて、週間の設計線量限度を 0.1rem としてある。 0.03rem/週 および 0.01rem/週 の限度に対する遮蔽要件には、表の値にそれぞれ 0.5TVT および 1TVT を加えることによって適応させることができるが、これらの限度についての公式を用いたほうが正確である。

電圧、移動負荷、および距離は、歯科、獣医学および医学上の診断、通常の治療、および大部分の工業用ラジオグラフィにおけるこれらのパラメーターの範囲をカバーするように選んである。使用係数と居在係数は実効稼動負荷の欄に含めてよい。

表21は次の典型的照射条件に基づいて作ってある：

線源—散乱体距離 50cm；

散乱角 90° ；

照射面積 400cm^2 、これは 1 m における散乱線が入射照射線量率の 0.1% であることを意味する；

X線管の最大連続定格 50kV および 75kV では $100\text{mA}\cdot\text{min/h}$ 、
100kV および 150kV では $200\text{mA}\cdot\text{min/h}$ 、
200—400kV では $1000\text{mA}\cdot\text{min/h}$ ；

ターゲットから 1 m における漏洩放射線は最大連続定格において、

50—150kV では 0.1R/h 、

200—400kV では 1R/h 。

表20も表21も 1 台の放射線源に対する遮蔽要件を示している。もし 2 台以上の線源が問題とする場所を照射するか、あるいは個人が一つの照射場所から他へ規則的に移動するならば、おのおのの線源に対する遮蔽要件を、総線量当量率

表20 0.1 rem/週とするのに必要な一次X線ビームの遮蔽要件*

電 圧 kV	実効稼動負荷 mA・min** 週	下に示す線源距離において 必要とする鉛の厚さ(cm)				下に示す線源距離において必要と するコンクリートの厚さ(cm)			
		1 m	2 m	4 m	8 m	1 m	2 m	4 m	8 m
50.	500	0.04	0.03	0.02	0.01	3.4	2.5	1.6	0.9
	125	0.03	0.02	0.01	0.01	2.5	1.6	0.9	0.4
	30	0.02	0.01	0.01	0.01***	1.6	0.9	0.4	0***, ****
	8	0.01	0.01	0.01***	0***	0.9	0.4	0***, ****	0***
75	500	0.10	0.08	0.05	0.03	9.7	7.4	5.0	3.0
	125	0.08	0.05	0.03	0.02	7.4	5.0	3.0	1.2
	30	0.05	0.03	0.02	0.01	5.0	3.0	1.2	0.2
	8	0.03	0.02	0.01	0***	3.0	1.2	0.2	0***
100	1,000	0.24	0.19	0.14	0.09	17.0	13.6	10.4	7.1
	250	0.19	0.14	0.09	0.05	13.6	10.4	7.1	4.1
	60	0.14	0.09	0.05	0.03	10.4	7.1	4.1	1.5
	16	0.09	0.05	0.03	0.01***	7.1	4.1	1.5	0***, ****
150	1,000	0.30	0.25	0.19	0.14	25.5	21.1	16.8	12.3
	250	0.25	0.19	0.14	0.09	21.1	16.8	12.3	8.0
	60	0.19	0.14	0.09	0.05	16.8	12.3	8.0	4.0
	16	0.14	0.09	0.05	0.02	12.3	8.0	4.0	0.8
200	40,000	0.66	0.58	0.51	0.43	46.3	41.0	35.9	30.6
	10,000	0.58	0.51	0.43	0.35	41.0	35.9	30.6	25.4
	2,500	0.51	0.43	0.35	0.28	35.9	30.6	25.4	20.1
	625	0.43	0.35	0.28	0.20	30.6	25.4	20.1	15.0
250	40,000	1.26	1.09	0.91	0.74	51.8	46.5	41.0	35.4
	10,000	1.09	0.91	0.74	0.59	46.5	41.0	35.4	29.8
	2,500	0.91	0.74	0.59	0.44	41.0	35.4	29.8	24.1
	625	0.74	0.59	0.44	0.31	35.4	29.8	24.1	18.6
300	40,000	2.38	2.04	1.70	1.36	58.4	52.5	46.3	40.2
	10,000	2.04	1.70	1.36	1.04	52.5	46.3	40.2	34.0
	2,500	1.70	1.36	1.04	0.76	46.3	40.2	34.0	27.8
	625	1.36	1.04	0.76	0.52	40.2	34.0	27.8	21.9
400	40,000	4.05	3.49	3.02	2.50	65.0	59.0	53.0	46.8
	10,000	3.49	3.02	2.50	2.02	59.0	53.0	46.8	40.6
	2,500	3.02	2.50	2.02	1.54	53.0	46.8	40.6	34.4
	625	2.50	2.02	1.54	1.12	46.8	40.6	34.4	28.5

* この表は図40—図42の透過率データから作成した。空気による減弱は考慮されていない。

** 表の各セクションの組版の都合上、最初の稼動負荷の正確な分数について遮蔽を計算してある。

*** 鉛とコンクリートの所要厚さに見掛け上不一致があるのは、鉛については定電圧X線発生装置の、またコンクリートについては半波整流X線発生装置の透過率データを使用したためである。

**** 図40または図41の透過率データに記されているよりもビーム総透過が少ない場合には、この数字は正しくないかもしれない。

表21 0.1 rem/週とするのに必要な散乱X線および漏洩X線の遮蔽要件*

電 圧 kV	実効稼動負荷 mA・min** 週	下に示す線源距離において 必要とする鉛の厚さ(cm)				下に示す距離において必要とする コンクリートの厚さ(cm)			
		1 m	2 m	4 m	8 m	1 m	2 m	4 m	8 m
50	500	0.02	0.01	0	0	1.0	0.3	0	0
	125	0.01	0	0	0	0.3	0	0	0
75	500	0.06	0.02	0.01	0	3.1	1.1	0.1	0
	125	0.02	0.01	0	0	1.1	0.1	0	0
	30	0.01	0	0	0	0.1	0	0	0
100	1,000	0.08	0.04	0.02	0	5.5	2.7	0.3	0
	250	0.04	0.02	0	0	2.7	0.3	0	0
	60	0.02	0	0	0	0.3	0	0	0
150	1,000	0.11	0.06	0.03	0	8.9	4.9	1.3	0
	250	0.06	0.03	0	0	4.9	1.3	0	0
	60	0.03	0	0	0	1.3	0	0	0
200	40,000	0.40	0.32	0.24	0.16	26.9	21.6	16.4	11.3
	10,000	0.32	0.24	0.16	0.09	21.6	16.4	11.3	6.4
	2,500	0.24	0.16	0.09	0.04	16.4	11.3	6.4	2.0
	625	0.16	0.09	0.04	0	11.3	6.4	2.0	0
250	40,000	0.78	0.61	0.45	0.28	30.6	25.1	19.4	13.9
	10,000	0.61	0.45	0.28	0.14	25.1	19.4	13.9	8.5
	2,500	0.45	0.28	0.14	0.05	19.4	13.9	8.5	3.4
	625	0.28	0.14	0.05	0	13.9	8.5	3.4	0
300	40,000	1.51	1.18	0.84	0.52	34.8	28.7	22.6	16.3
	10,000	1.18	0.84	0.52	0.25	28.7	22.6	16.3	10.2
	2,500	0.84	0.52	0.25	0.07	22.6	16.3	10.2	4.6
	625	0.52	0.25	0.07	0	16.3	10.2	4.6	0
400	40,000	2.33	1.85	1.37	0.91	40.8	34.7	28.7	22.5
	10,000	1.85	1.37	0.91	0.54	34.7	28.7	22.5	16.2
	2,500	1.37	0.91	0.54	0.23	28.7	22.5	16.2	9.6
	625	0.91	0.54	0.23	0.02	22.5	16.2	9.6	1.5

* この表は、本文に示した照射条件に基づいて、図40—図42の透過率データおよび表16から作成した。空気による減弱は考慮されていない。

** 表の各セクションの組版の都合上、最初の稼動負荷の正確な分数について遮蔽を計算してある。

が設計限度に等しくなるように、厳しくする。

X 線 診 断 用 施 設

医学用のX線室に対する正確な遮蔽要件は前節から得られるが、遮蔽要件を厳しくする方向の因子、すなわち、装置やその利用率と使用方法、周辺区域の居在の程度と型、などの変化を予測し、それに合わせて施設を設計するほうが

得策で、結局経済的であろう。このような将来を見越したやり方は、通常、個人の線量当量が設計限度を十分下回ることを保証することになる。

多数の診断施設の計画を日常的に検討するところでは、ある遮蔽の厚さを標準として採用し、ここに示すような簡単な一覧表の形でそれを普及させておく
と便利であろう。周辺区域の分類は国または地方の規則と合わせるべきである。室の大きさ、フィルム貯蔵場所、遮蔽の不連続部分、警告標示、遮蔽の表示、および操作者の防護に関する制限は、もし適切と考えられるならば、これ
につけ加えられてよい。

医学用X線室に対する標準遮蔽一覧表の形式

周辺区域の 分類	直接撮影用施設			間接撮影用施設	
	床	天井	壁	床と天井	壁
1					
2					
3					
4 など					

引用文献

- ALLEN, F. J. and FUTTERER, A. T. (1963) Neutron transmission data. *Nucleonics* 21, 8, 120-121.
- ALSMILLER, R. G., JR., ARMSTRONG, T. W., and COLEMAN, W. A. (1970) *The absorbed dose and does equivalent from neutrons in the energy range 60 to 3000 MeV and protons in the energy range 400 to 3000 MeV*. ORNL-TM-2924 (rev.). Tennessee, Oak Ridge National Laboratory.
- ALSMILLER, R. G., JR. and MORAN, H. S. (1968) Dose rate from high-energy electrons and photons. *Nucl. Instrum. Meth.* 58, 343-344.
- ARNOLD, E. D. (1964) *Handbook of shielding requirements and radiation characteristics of isotopic power sources for terrestrial, marine, and space applications*. ORNL-3576. Tennessee, Oak Ridge National Laboratory.
- ATKINSON, J. H. and WILLIS, B. H. (1957) *High-energy particle data 2*. UCRL-2426 (rev.). University of California, Lawrence Radiation Laboratory.
- AUXIER, J. A., SNYDER, W. S., and JONES, T. D. (1968) Neutron interactions and penetration in tissue. In: Attix, F. H. and Roesch, W. C. (eds.) *Radiation dosimetry*, 2nd ed., Vol. 1, pp. 275-316. New York, Academic Press.
- BAARLI, J. and DUTRANNOIS, J. (1971) (eds.) *Proceedings of the international congress on radiation protection against accelerator and space radiation, CERN, Geneva, Switzerland, April 26-30, 1971*, 2 vols. Geneva, European Organization for Nuclear Research.
- BARKAS, W. H. and BERGER, M. J. (1964) *Tables of energy losses and ranges of heavy charged particles*. NASA-SP-3013. Washington, D. C., National Aeronautics and Space Administration.
- BECK, H. L. (1970) A new calculation of dose rates from high energy electrons and photons incident on 30cm water slabs. *Nucl. Instrum. Meth.* 78, 333-334.
- BERGER, M. J. and SELTZER, S. M. (1969) Quality of radiation in a water medium irradiated with high energy electron beams. Presented: *12th International Congress of Radiology, Tokyo, 6-10 October 1969*. Washington, D. C., National Bureau of Standards.
- BERGER, M. J. and SELTZER, S. M. (1970) Bremsstrahlung and photon neutrons from thick tungsten and tantalum targets. *Phys. Rev.* C2, 621-631.
- BETHE, H. and HEITLER, W. (1934) On the stopping of fast particles and on the creation of positive electrons. *Proc. R. Soc.* A146, 83-112.
- BINKS, W. (1943) Protection in industrial radiology. *Br. J. Radiol.* 16, 49-53.

- BINKS, W. (1955) Protection against x rays and gamma rays in the industrial field. *Br. J. ind. Med.* **12**, 153-161.
- BOMFORD, C. K. and BURLIN, T. E. (1963) The angular distribution of radiation scattered from a phantom exposed to 100-300 kVp x rays. *Br. J. Radiol.* **36**, 436-439.
- BRAESTRUP, C. B. and WYCKOFF, H. O. (1958) *Radiation protection*. Illinois, Charles C. Thomas.
- BRITISH STANDARD 4094 *Recommendation for data on shielding from ionizing radiation*. Part 1: Shielding from gamma radiation (1966). Part 2: Shielding from x radiation (1971). London, British Standards Institute.
- BROLLEY, J. E. and FOWLER, J. L. (1960) Monoenergetic neutron sources: reactions with light nuclei. In: Marion, J. B. and Fowler, J. L. (eds.), *Fast neutron physics*. Part 1, pp. 73-111. New York, Interscience.
- BRYNJOLFSSON, A. and MARTIN, T. G., III (1971) Bremsstrahlung production and shielding of static and linear-accelerators below 50 MeV. Toxic gas production, required exhaust rates and radiation protection instrumentation. *Int. J. appl. Radiat. Isotopes*, **22**, 29-40.
- BURLIN, T. E. and WHEATLEY, B. M. (1971) A unified approach to dosimetry problems in radiological protection. *Phys. Med. Biol.* **16**, 47-56.
- CLARK, F. H. (1966) *Determination of shield requirements for neutron sources*. ORNL-TM-1655. Tennessee, Oak Ridge National Laboratory.
- CLIFFORD, C. E. and FACEY, R. A. (1970) Changes in acute radiation hazards associated with changes in exposure geometry. *Hlth. Phys.* **18**, 217-225.
- CONF-691101. *Second international conference on accelerator dosimetry and experience, Stanford Linear Accelerator Center, California, November 5-7, 1969*. Washington, D. C., U. S. Atomic Energy Commission.
- COWAN, F. P. (1969) Ultrahigh-energy radiation and uncommon types of particles. In: Attix, F. H. and Tochilin, E. (eds.), *Radiation dosimetry*. 2nd ed., Vol. III, pp. 523-555. New York, Academic Press.
- COWAN, F. P., PHILLIPS, L. F., and KING, R. J. (1964) Some dosimetry problems of the alternating gradient synchrotron (AGS). *Hlth. Phys.* **10**, 33-40.
- DEALLER, J. F. B. (unpublished) University of Birmingham, England.
- DELAFIELD, H. J. (1963) *Gamma-ray exposure measurements in a man phantom related to personnel dosimetry*. AERE-R 4430. Harwell, Atomic Energy Research Establishment.
- DIXON, W. R., GARRETT, C., and MORRISON, A. (1952) Room-protection measurements for cobalt-60 teletherapy units. *Nucleonics*, **10**, 3, 42-45.
- DUDKIN, V. E., KOVALEV, E. E., SMIRENNY, L. N., and YAKOVLEV, R. M. (1972)

- A study of the dose composition in tissue-equivalent phantoms for high-energy protons. *Hlth. Phys.* **23**, 663-669.
- DUGGAN, M. J. (unpublished) National Radiological Protection Board, Harwell.
- ELWERT, G. (1939) Verschärfte Berechnung von Intensität und Polarisierung im kontinuierlichen Röntgen Spektrum. *Annln. Phys.* **34**, 178-208.
- EVANS, W. W., GRANKE, R. C., WRIGHT, K. A., and TRUMP, J. G. (1952) Absorption of 2 MeV constant potential roentgen rays by lead and concrete. *Radiology*, **58**, 560-567.
- FANO, U. (ed.) (1964) *Studies in penetration of charged particles in matter*. Publication 1133. Washington, D. C., National Academy of Sciences-National Research Council.
- FIELDEN, E. M. and HOLM, N. W. (1970) Dosimetry in accelerator research and processing. In: Holm, N. W. and Berry, R. J. (eds.) *Manual on radiation dosimetry*, pp. 261-309. New York, Marcel Dekker.
- FRANCIS, T. M. and SEYMOUR, R. (1972) *Dose rates and depth-dose distributions for beta particles emitted by commercially available ^{90}Sr , ^{90}Y , ^{204}Tl , ^{147}Pm and ^{63}Ni sources*. NRPB-R4. Harwell, National Radiological Protection Board.
- FRANTZ, F. S., JR. and WYCKOFF, H. O. (1959) Attenuation of scattered cesium-137 gamma rays. *Radiology*, **73**, 263-266.
- GLASSER, O., QUIMBY, E. H., TAYLOR, L. S. and WEATHERWAX, J. L. (1959) *Physical foundations of radiology*. 2nd ed., pp. 245-247. New York, Paul B. Hoeber.
- GOLDIE, C. H., WRIGHT, K. A., ANSON, J. H., CLOUD, R. W., and TRUMP, J. G. (1954) Radiographic properties of x rays in the two- to six-million-volt range. *Bull. Am. Soc. Test. Mater.* pp. 49-54.
- GREENE, D. and MASSEY, J. B. (1961) Some measurements on the absorption of 4MV x rays in concrete. *Br. J. Radiol.* **34**, 389-391.
- HACKE, J. (1967) Dosimetry and shielding with a 14 MeV neutron generator. *Int. J. appl. Radiat. Isotopes*, **18**, 33-44.
- HAMILTON, E. I. (1971) The relative radioactivity of building materials. *Am. ind. Hyg. Ass. J.* **32**, 398-403.
- HARDER, D. and SCHULZ, H. J. (1972) Some new physical data for electron beam dosimetry. In: *Proceedings of the second congress of the European Association of Radiology, Amsterdam, June 14-18, 1971*, pp. 475-481. ICS 249. Amsterdam. Excerpta Medica.
- HAYBITTLE, J. H. (1965-57) The protection of multicurie strontium-yttrium (90) sources. *Phys. Med. Biol.* **1**, 270-276.
- HOOTMAN, H. E. (1970) *Estimation of ^{252}Cf shielding requirements*. DP-1232. South

Carolina, Savannah River Laboratory.

- HUBBELL, J. H. (1970) *Photon cross sections, attenuation coefficients, and energy absorption coefficients from 10 keV to 100 GeV*. NSRDS-NBS29. Washington, D. C., National Bureau of Standards.
- ICRP Publication 9 (1965) *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Adopted September 17, 1965*. Oxford, Pergamon Press.
- ICRP Publication 12 (1968) *General principles of monitoring for radiation protection of workers. A Report by Committee 4 of the International Commission on Radiological Protection. Adopted by the Commission on May 24, 1968*. Oxford, Pergamon Press.
- ICRP Publication 15 (1969) *Protection against ionizing radiation from external sources. A Report by Committee 3 of the International Commission on Radiological Protection. Adopted by the Commission in November 1969*. Oxford, Pergamon Press.
- ICRU Report 13 (1969) *Neutron fluence, neutron spectra, and kerma*. Washington, D. C., International Commission on Radiation Units and Measurements.
- ICRU Report 16 (1970) *Linear energy transfer*. Washington, D. C., International Commission on Radiation Units and Measurements.
- ICRU Report 19 (1971) *Radiation quantities and units*. Washington, D. C., International Commission on Radiation Units and Measurements.
- IRVING, D. C., ALSMILLER, R. G., JR., and MORAN, H. S. (1967) *Tissue current-to-dose conversion factors for neutrons with energies from 0.5 to 60 Mev*. ORNL-4032. Tennessee, Oak Ridge National Laboratory.
- JANNI, J. F. (1966) *Calculations of energy loss, range, path length, straggling, multiple scattering, and the probability of inelastic nuclear collisions for 0.1 to 100 MeV protons*. AFWL-TR-65-150. New Mexico, Armed Forces Weapons Laboratory.
- JONES, A. R. (1966) Proposed calibration factors for various dosimeters at different energies. *Health Phys.* **12**, 663-671.
- KARZMARK, C. J. and CAPONE, T. (1968) Measurements of 6 MV x rays. II Characteristics of secondary radiation. *Br. J. Radiol.* **41**, 222-226.
- KAYE, G. W. C. and BINKS, W. (1940) The emission and transmission of x and gamma radiation. *Br. J. Radiol.* **13**, 193-212.
- KAYE, G. W. C., BINKS, W. and BELL, G. E. (1938) The x-ray and gamma-ray protective values of building materials. *Br. J. Radiol.* **11**, 676-685.
- KENNEDY, R. J., WYCKOFF, H. O., and SNYDER, W. A. (1950) Concrete as a protective barrier for gamma rays from Cobalt-60. *J. Res. natn. Bur. Stand.*

- 44, 157-162.
- KIRN, F. S. and KENNEDY, R. J. (1954) Betatron x rays: How much concrete for shielding? *Nucleonics*, 12, 6, 44-48.
- KIRN, F. S., KENNEDY, R. J., and WYCKOFF, H. O. (1954) The attenuation of gamma rays at oblique incidence. *Radiology*, 63, 94-104.
- KNIGHT, A., MARSHALL, T. O., and HARVEY, C. L. (to be published) *Dosimetry and shielding of Am-Be neutrons*. Harwell, National Radiological Protection Board.
- LESS, L. N. and SWALLOW, A. J. (1964) Estimating the hazard due to radiolytic products from air. *Nucleonics*, 22, 9, 58-61.
- LIDÉN, K. and STARFELT, N. (1955) Internal and external bremsstrahlung accompanying the beta rays of P³². *Phys. Rev.* 97, 419-427.
- LINDELL, B. (1954) Secondary roentgen radiation. *Acta radiol.* 41, 353-376.
- LINDELL, B. and REIZENSTEIN, P. (1964) A Swedish building material for low-radioactivity laboratories. *Ark. Fys.* 26, 65-74.
- MACGREGOR, M. H. (1959) X-ray production with linear accelerators. *Nucleonics*, 17, 2, 104-105.
- MCLAUGHLIN, W. L. and HUSSMANN, E. K. (1969) The measurement of electron and gamma-ray dose distributions in various media. In: *Large radiation sources for industrial processes*, pp. 579-590. Vienna, International Atomic Energy Agency.
- MARSHALL, T. O. and KNIGHT, A. (1971) *The shielding of 14 MeV neutron generators*. RPS/1/49. Surrey, Radiological Protection Service.
- MARUYAMA, T., KUMAMOTO, Y., KATO, Y., HASHIZUME, T., and YAMAMOTO, M. (1971) Attenuation of 4-32 MV x rays in ordinary concrete, heavy concrete, iron, and lead. *Health Phys.* 20, 277-284.
- MILANI, S., COOPER, J. N., and HARRIS, J. C. (1958) Personal communication. In: Whaling, W. (q. v.) (1958)
- MILLER, W. and KENNEDY, R. J. (1955) X-ray attenuation in lead, aluminum and concrete in the range 275 to 525 kilovolts. *Radiology*, 65, 920-925.
- MILLER, W. and KENNEDY, R. J. (1956) Attenuation of 86 and 176 MeV synchrotron x rays in concrete and lead. *Radiat. Res.* 4, 360-366.
- MOONEY, R. T. and O'RIORDAN, M. C. (unpublished) Francis Delafield Hospital, New York.
- MURRAY, K. M. (1964) Shielding moderate-energy electron accelerators. *Nucleonics*, 22, 2, 61-67.
- NACHTIGALL, D. (1969) *Table of specific gamma-ray constants*. München, Thiemig.
- NAUMANN, H. H. and WAECHTER, K. H. (1965) Shielding for radioisotope brems-

- strahlung sources $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$. *Int. J. appl. Radiat. Isotopes*, **16**, 613-615.
- NCRP Report No. 23 (1960) *Measurement of neutron flux and spectra for physical and biological applications*. Washington, D. C., National Council on Radiation Protection and Measurements.
- NCRP Report No. 31 (1964) *Shielding for high-energy electron accelerators*. Washington, D. C., National Council on Radiation Protection and Measurements.
- NCRP Report No. 34 (1970) *Medical x-ray and gamma-ray protection for energies up to 10 MeV. Structural shielding design and evaluation*. Washington, D. C., National Council on Radiation Protection and Measurements.
- NCRP Report No. 38 (1971) *Protection against neutron radiation*. Washington, D. C., National Council on Radiation Protection and Measurements.
- NEUFELD, J., SNYDER, W. S., TURNER, J. E., and WRIGHT, H. (1966) Calculation of radiation dose from protons and neutrons to 400 MeV. *Hlth. Phys.* **12**, 227-237.
- NICHOLS, J. P. (1968) Design data for ^{252}Cf neutron source experiments. *Nucl. Appl.* **4**, 382-387.
- OLIVER, G. D., JR. and MOORE, E. B. (1970) The neutron-shielding qualities of water-extended polyesters. *Hlth. Phys.* **19**, 578-580.
- O'RIORDAN, M. C. (unpublished) National Radiological Protection Board. Harwell.
- O'RIORDAN, M. C. and CATT, B. R. (1968) *X-ray output: 5 to 50 kV constant potential*. RPS/I/32. Surrey, Radiological Protection Service.
- O'RIORDAN, M. C. and CATT, B. R. (1969) Low energy x-ray shielding with common materials. *Hlth Phys.* **17**, 516-518.
- PHILLIPS, J. A. (1953) The energy loss of low energy protons in some gases. *Phys. Rev.* **90**, 532-537.
- PRICE, B. T., HORTON, C. C., and SPINNEY, K. T. (1957) *Radiation shielding*, p. 304. London, Pergamon Press.
- PRINCE, A. (1969) *Nuclear and physical properties of californium-252*. BNL-50168. New York, Brookhaven National Laboratory.
- RADIOCHEMICAL CENTRE (1971) *Radiation sources for industry and research*. Amersham, The Radiochemical Centre Ltd.
- RADIOLOGICAL PROTECTION SERVICE, Surrey, Unpublished.
- REETZ, A., JR. and O'BRIEN, K. (1968) (eds.) *Protection against space radiation*. NASA-SP-169. Washington, D. C., National Aeronautics and 'Space Administration.
- REYNOLDS, H. K., DUNBAR, D. N. F., WENZEL, W. A., and WHALING, W. (1953) The stopping cross section of gases for protons, 30-600 keV. *Phys. Rev.* **92**, 742-748.

- RICH, M. and MADEY, R. (1954) *Range-energy tables*. UCRL-2031. University of California, Lawrence Radiation Laboratory.
- RITZ, V. H. (1958) Broad and narrow beam attenuation of ^{192}Ir gamma rays in concrete, steel and lead. *Nondestruct. Test.* **16**, 269-272.
- ROSENSTEIN, M., EISEN, H., and SILVERMAN, J. (1972) Electron depth-dose distribution measurements in finite polystyrene slabs. *J. appl. Phys.* **43**, 3191-3202.
- SMITH, E. E. (unpublished) Radiological Protection Service, Surrey.
- SNYDER, W. S. (1950) Calculations for maximum permissible exposure to thermal neutrons. *Nucleonics*, **6**, 2, 46-50.
- SNYDER, W. S. (1957) (Reprinted with corrections, April 1967) Depth dose. In: *Protection against neutron radiation to 30 million electron volts*. NCRP Report No. 20, pp. 39-66. Washington, D. C., National Council on Radiation Protection and Measurements.
- SNYDER, W. S. (1971) Dose distribution in a cylindrical phantom for neutron energies up to 14 MeV. In: *Protection against neutron radiation*. NCRP Report No. 38, pp. 46-84. Washington, D. C., National Council on Radiation Protection and Measurements.
- SPENCER, L. V. (1959) *Energy dissipation by fast electrons*. National Bureau of Standards Monograph 1, issued 10 September 1959. Washington, D. C., National Bureau of Standards.
- STEIGELMANN, W. H. (1963) *Radioisotope shielding design manual*. NYO-10721. Washington, D. C., U. S. Atomic Energy Commission.
- STEVENSON, G. R. (1969) (ed.) *Proceedings of the conference on radiation protection in accelerator environments, Rutherford Laboratory, March 1969*. Berkshire, Rutherford Laboratory.
- STODDARD, D. H. (1965) *Radiation properties of californium-252*. DP-986. South Carolina, Savannah River Laboratory.
- STODDARD, D. H. and HOOTMAN, H. E. (1971) ^{252}Cf shielding guide. DP-1246. South Carolina, Savannah River Laboratory.
- SVENSSON, G. K. and NELSON, W. R. (1970) Measurement of radial and longitudinal dose distribution in a water phantom irradiated with a 10 GeV electron beam. In: *Second international conference on accelerator dosimetry and experience, Stanford Linear Accelerator Center, California, November 5-7, 1969*. pp. 185-208. CONF-691101. Washington, D. C., Atomic Energy Commission.
- TESCH, K. (1966) Dosisleistung und Toleranzflussdichte hoch-energetischer Elektronen und Gammastrahlen. *Nukleonik*, **8**, 264-266.
- TROUT, E. D. and GAGER, R. M. (1950) Protective materials for field definition in radiation therapy. *Am. J. Roentg.* **63**, 396-408.

- TROUT, E. D. and KELLEY, J. P. (1972) Scattered radiation from a tissue-equivalent phantom for x rays from 50 to 300 kVp. *Radiology*, **104**, 161-169.
- TROUT, E. D., KELLEY, J. P., and LUCAS, A. C. (1959) Broad beam attenuation in concrete for 50 to 300 kVp x rays and in lead for 300 kVp x rays. *Radiology*, **72**, 62-66.
- TURNER, J. E., ZERBY, C. D., WOODYARD, R. L., WRIGHT, H. A., KINNEY, W. E., SNYDER, W. S., and NEUFELD, J. (1964) Calculation of radiation dose from protons to 400 MeV. *Health Phys.* **10**, 783-808.
- U. S. A. E. C. Report No. SRO-153 (1971) *Guide for fabricating and handling ²⁵²Cf sources*. South Carolina, Savannah River Operations Office.
- VAN TUYL, H. H. (1961) *Fission product radiation and shielding calculations*. HW-69533. Washington, Hanford Laboratories.
- VAN TUYL, H. H. (1964) *BREMSTRAD: a computer code for external and internal bremsstrahlung calculations*. HW-83784. Washington, Hanford Laboratories.
- WACHSMANN, F., TIEFEL, H., und BERGER, E. (1964) Messung der Quantität und Qualität gestreuter Röntgenstrahlen. *Fortschr. Geb. RöntgStrahl. NuklMed.* **101**, 308-317.
- WEST, R. (1963) *An isotope handling calculator (Mk. 3) for gamma-ray sources with lead shielding*. ACC-R165. Amersham, Radiochemical Centre.
- WHALING, W. (1958) Energy loss of charged particles in matter. In: Flügge, S. (ed.), *Encyclopedia of Physics*, **34/2**, 193-217. Berlin, Springer-Verlag.
- WILLIAMSON, C. F., BOUJOT, J. P., and PICARD, J. (1966) *Tables of range and stopping power of chemical elements for charged particles of energy 0.05 to 500 MeV*. CEA-R3042. Saclay, Centre d'Etudes Nucléaires.
- WRIGHT, C. N. (1968) Radiation protection for safe handling of ²⁵²Cf sources. *Health Phys.* **15**, 466-469.
- WRIGHT, H. A., ANDERSON, V. E., TURNER, J. E., NEUFELD, J., and SNYDER, W. S. (1969) Calculation of radiation dose due to protons and neutrons with energies from 0.4 to 2.4 GeV. *Health Phys.* **16**, 13-31.
- WRIGHT, P. A. (1971) In: *Industrial uranium from BNFL*. Lancashire, British Nuclear Fuels Ltd.
- WYARD, S. J. (1952) Intensity distribution of bremsstrahlung from beta-rays. *Proc. phys. Soc.* **A65**, 377-379.
- WYCKOFF, H. O. and KENNEDY, R. J. (1949) Concrete as a protective barrier for gamma rays from radium. *J. Res. natn. Bur. Stand.* **42**, 431-435.
- WYCKOFF, H. O., KENNEDY, R. J. and BRADFORD, B. S. (1948) Broad and narrow beam attenuation of 500 to 1400 kV x rays in lead and concrete. *Radiology*, **51**, 849-859.

ZERBY, C. D. and KINNEY, W. E. (1965) Calculated tissue current-to-dose conversion factors for nucleons below 400 MeV. *Nucl. Instrum. Meth.* **36**, 125-140.

遮蔽に関する一般的な文献と 情報サービス

- BLIZARD, E. P. and ABBOTT, L. S. (eds.) (1962) *Reactor handbook*. 2nd ed., Vol. III, Part B, Shielding. New York, Interscience.
- FITZGERALD, J. J., BROWNELL, G. L. and MAHONEY, F. J. (1967) *Mathematical theory of radiation dosimetry* New York, Gordon & Breach.
- GARBER, D. I., STRÖMBERG, L. G., GOLDBERG, M. D., CULLEN, D. E., and MAY, V. M. (1970) *Angular distributions in neutron-induced reactions*. BNL 400. New York, Brookhaven National Laboratory.
- GOLDBERG, M. D., MAGURNO, B. A., MAY, V. M., MUGHABGHAB, S. F., PUROHIT, S. N., STEHN, J. R., WIENER-CHASMAN, R. (1964-67) *Neutron cross sections*. BNL 325, 2nd ed., Supplement No. 2. New York, Brookhaven National Laboratory.
- GOLDSTEIN, H. (1959) *Fundamental aspects of reactor shielding*. Massachusetts, Addison-Wesley.
- HASHIZUME, T. (ed.) (1971) *Shielding of neutron rays* (in Japanese). Tokyo, Taisei-Kensetsu Giken.
- HUBBELL, J. H. (1969) *Photon cross sections, attenuation coefficient and energy absorption coefficients from 10 keV to 100 GeV*. NSRDS-NBS 29. Washington D. C., National Bureau of Standards.
- JAEGER, R. G. *et al.* (eds.) (1968, 1970) *Engineering compendium on radiation shielding*. Berlin, Springer-Verlag.
- JAPAN RADIOISOTOPE ASSOCIATION (1970) *Handbook of isotopes* (in Japanese). Tokyo, Maruzen.*
- LINDENBAUM, S. J. (1961) Shielding of high-energy accelerators. *A. Rev. nucl. Sci.* **11**, 213-258.
- LIVINGSTON, M. S. and BLEWETT, J. P. (1962) *Particle accelerators*. New York, McGraw-Hill.
- PATTERSON, H. W. and THOMAS, R. H. (1971) Experimental shielding studies at high-energy proton accelerators—a review. *Particle Accelerators*, **2**, 77-104.
- PATTERSON, H. W., THOMAS, R. H., and WALLACE, R. (1972) *Accelerator health physics*. LBL-900. California, Lawrence Berkeley Laboratory.

* (訳注) 日本アイソトープ協会編: アイソトープ便覧, 丸善, 東京 (1970)

PRICE, B. T., HORTON, C. C. and SPINNEY, K. T. (1957) *Radiation shielding*.
London, Pergamon Press.

ROCKWELL, T., III (ed.) (1956) *Reactor shielding design manual*. 1st ed. Prin-
ceton, Van Nostrand.

遮蔽に関する情報サービス

Radiation Shielding Information Center,
Oak Ridge National Laboratory,
Oak Ridge, Tennessee 37831, U. S. A.

European Shielding Information Service,
CCR Euratom,
21020 Ispra, Varese, Italy.

他の ICRP 刊行物

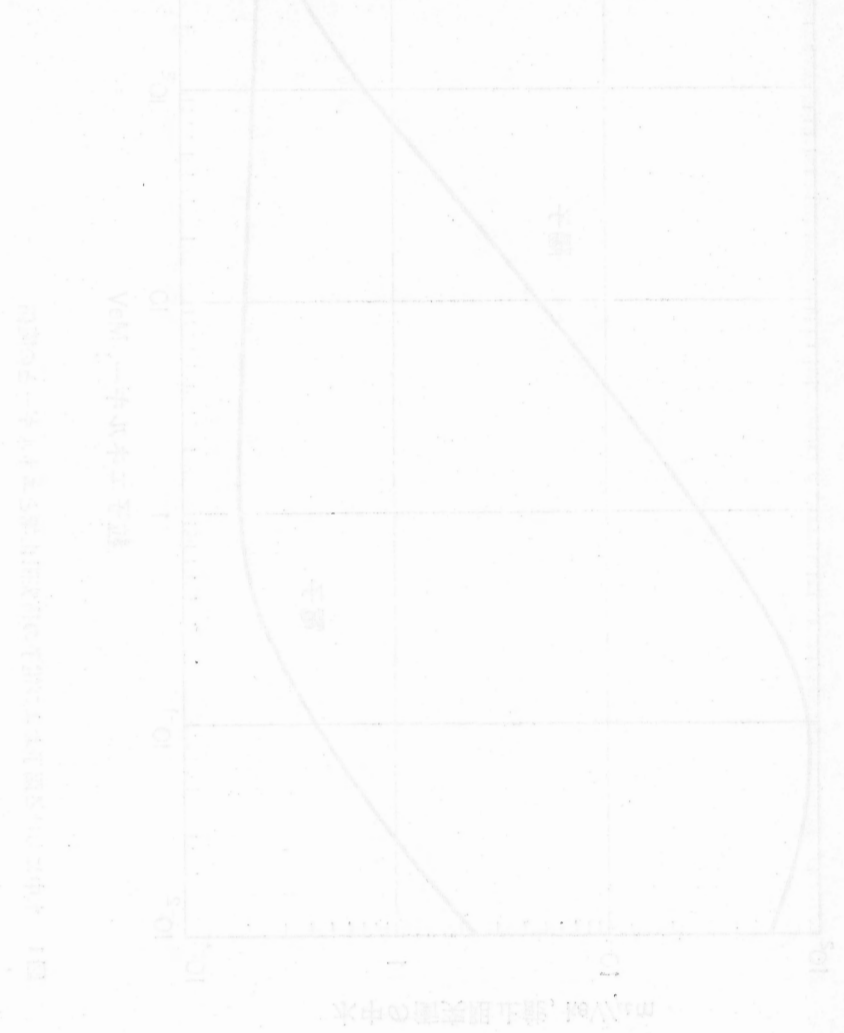
- Publication No. 5:* The Handling and Disposal of Radioactive Materials in Hospitals and Medical Research Establishments.
訳：病院および医学研究施設における放射性物質の取り扱いと廃棄—1964
- Publication No. 7:* Principles of Environmental Monitoring Related to the Handling of Radioactive Materials.
訳：放射性物質取り扱いに関する環境モニタリングの諸原則
- Publication No. 8:* The Evaluation of Risks from Radiation.
訳：放射線による危険度の評価
- Publication No. 9:* Recommendations of the ICRP (Adopted September 17th, 1965).
訳：国際放射線防護委員会勧告（1965年9月17日採択）
- Publication No. 10:* Evaluation of Radiation Doses to Body Tissues from Internal Contamination due to Occupational Exposure.
訳：職業被曝による体内汚染からの身体組織への線量の評価
- Publication No. 10a:* The Assessment of Internal Contamination Resulting from Recurrent or Prolonged Uptakes.
訳：反覆取り込みまたは長期の取り込みに由来する体内汚染の算定
- Publication No. 11:* A Review of the Radiosensitivity of the Tissues in Bone.
- Publication No. 12:* General Principles of Monitoring for Radiation Protection of Workers.
訳：作業者の放射線防護のためのモニタリングの一般原則
- Publication No. 13:* Radiation Protection in Schools.
訳：18才までの生徒に対しての学校における放射線防護
- Publication No. 14:* Radiosensitivity and Spatial Distribution of Dose.
- Publication No. 15:* Protection Against Ionizing Radiation from External Sources.
訳：体外線源からの電離放射線に対する防護
- Publication No. 16:* Protection of the Patient in X-ray Diagnosis.
訳：X線診断における患者の防護
- Publication No. 17:* Protection of the Patient in Radionuclide Investigations
訳：放射性核種を用いた検査における患者の防護

訳はすべて日本アイソトープ協会、仁科記念財団から発行されている。

Publication No. 18: The RBE for High LET-Radiations with Respect to Mutagenesis.

Publication No. 19: The Metabolism of Compounds of Plutonium and other Actinides

Publication No. 20: Alkaline Earth Metabolism in Adult Man.



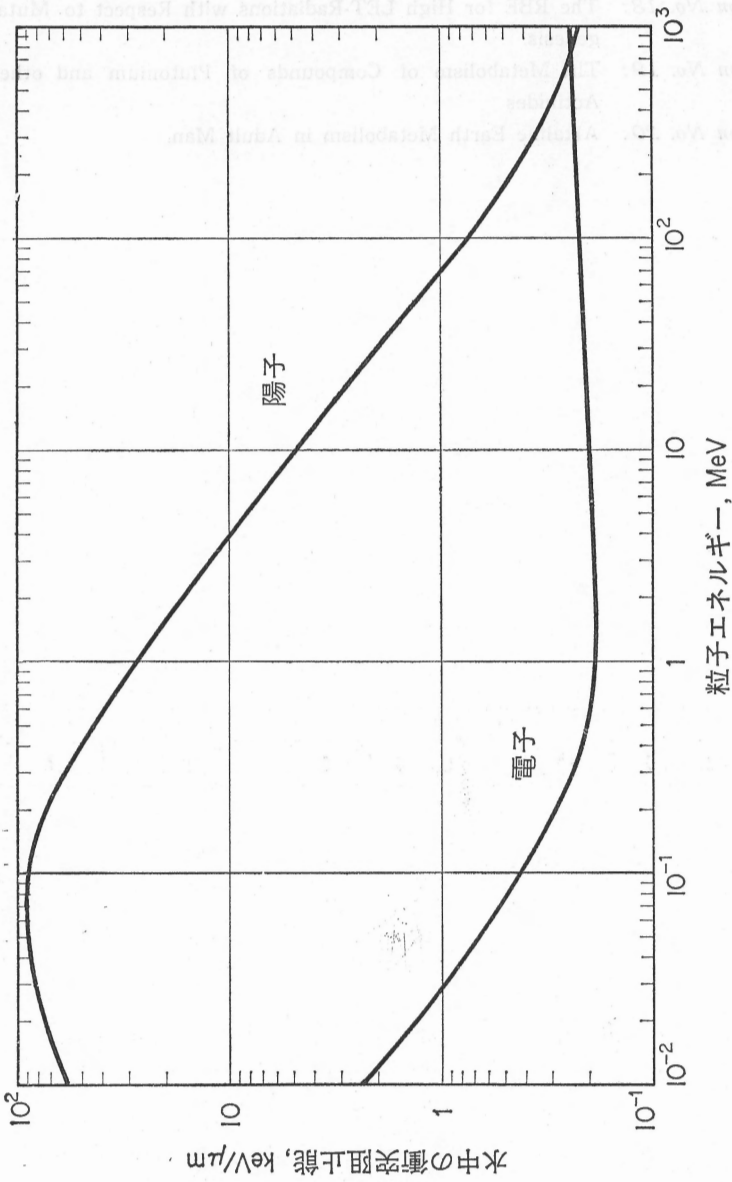


図1 水中における陽子および電子の衝突阻止能とエネルギーとの関係

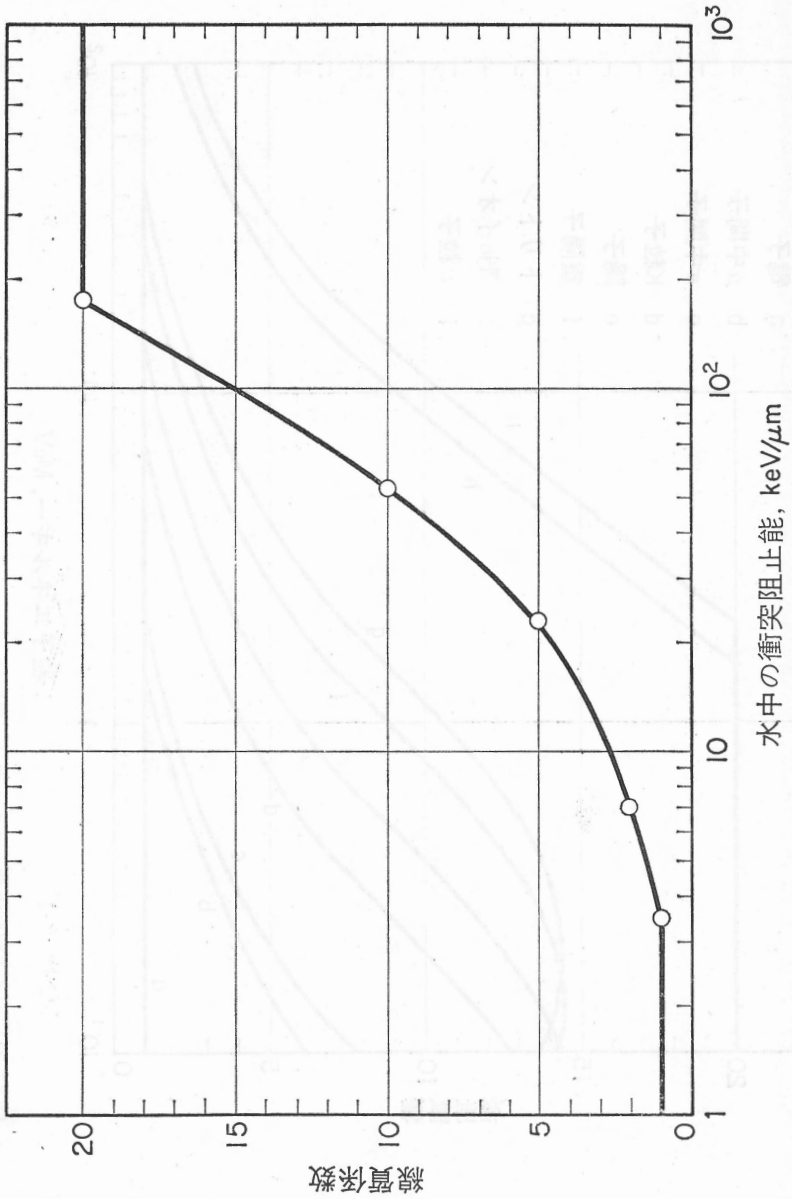


図2 水中における衝突阻止能と線質係数との関係

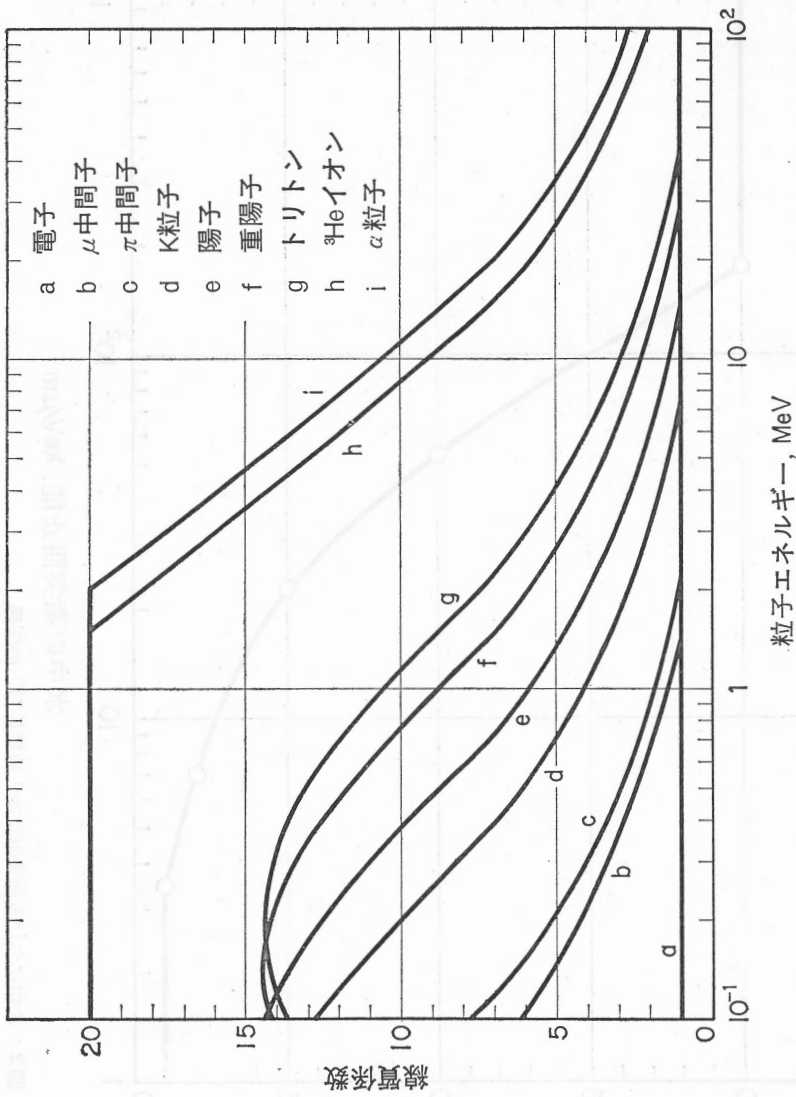


図3 荷電粒子の線質係数とエネルギーとの関係

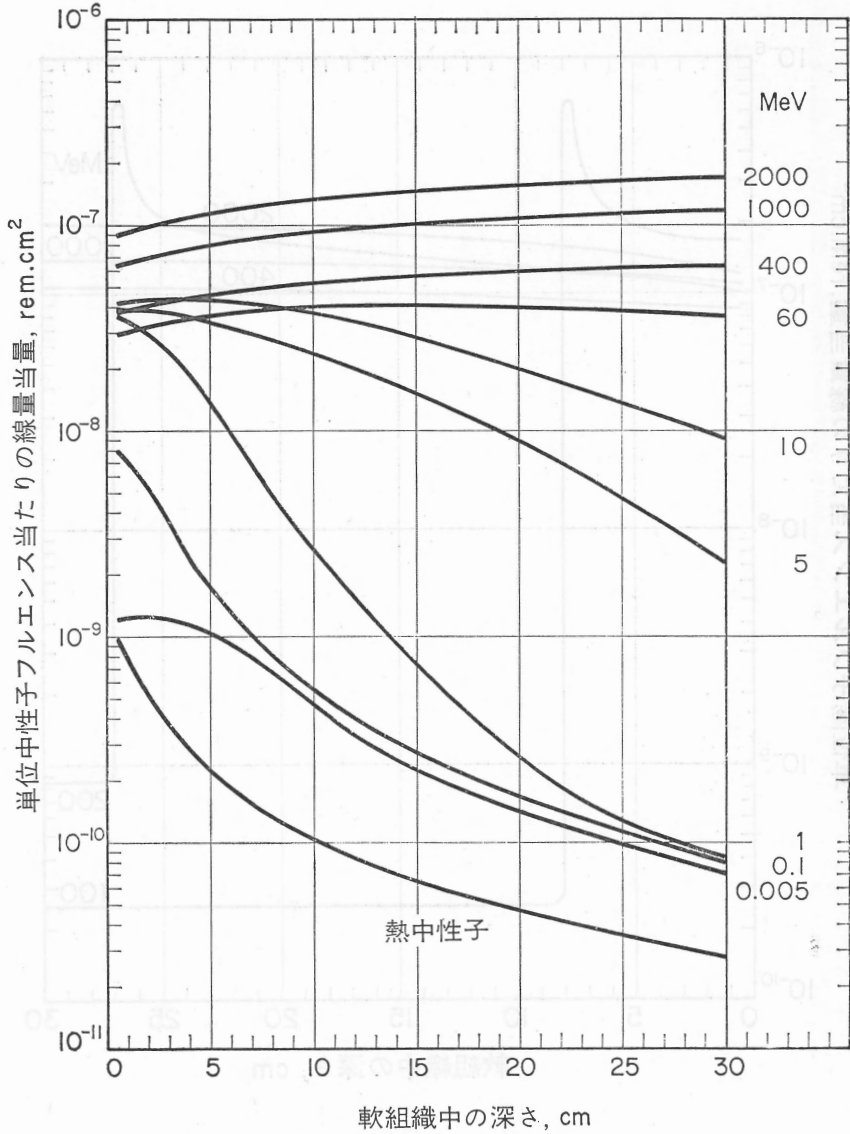


図4 単一エネルギー中性子の広いビームで片面から垂直に照射された厚さ 30cm の平板状身体組織における、深さと線量当量との関係

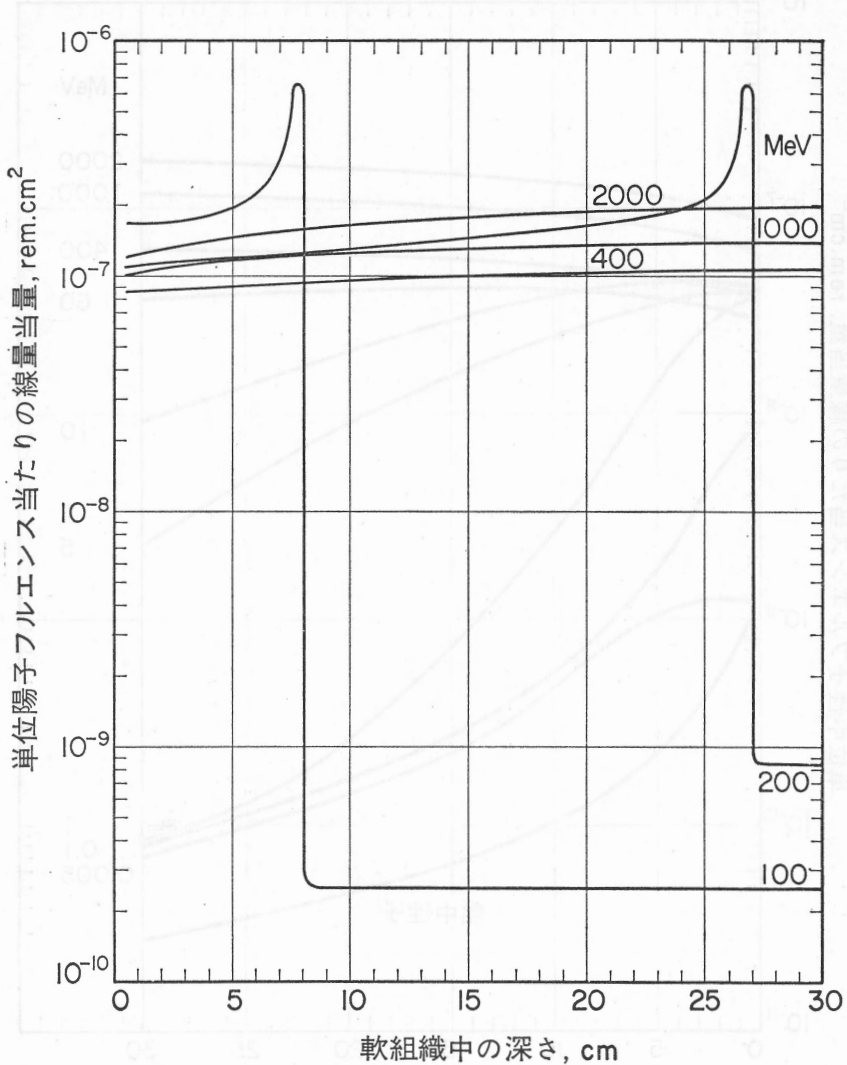


図5 単一エネルギー陽子の広いビームで片面から垂直に照射された厚さ30cmの平板状身体組織における、深さと線量当量との関係

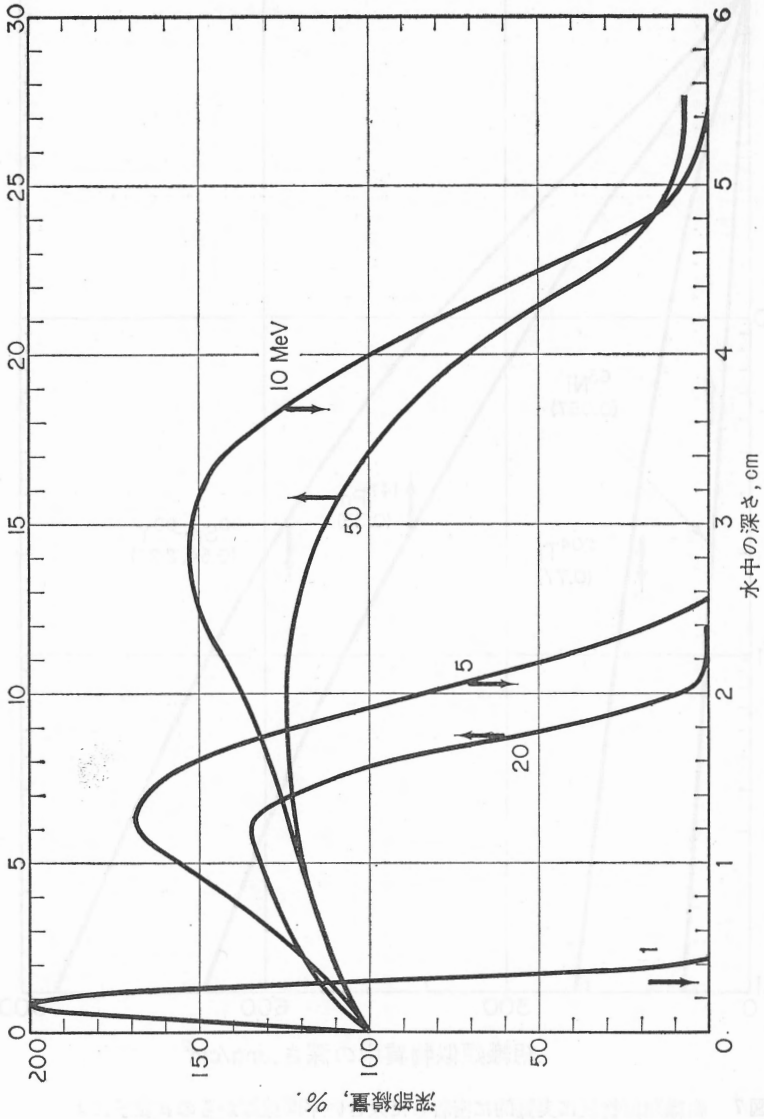


図6 高エネルギーないし超高エネルギーの単一エネルギー電子の広いビームが垂直に入射する水中における
深部線量の百分率分布の計算値

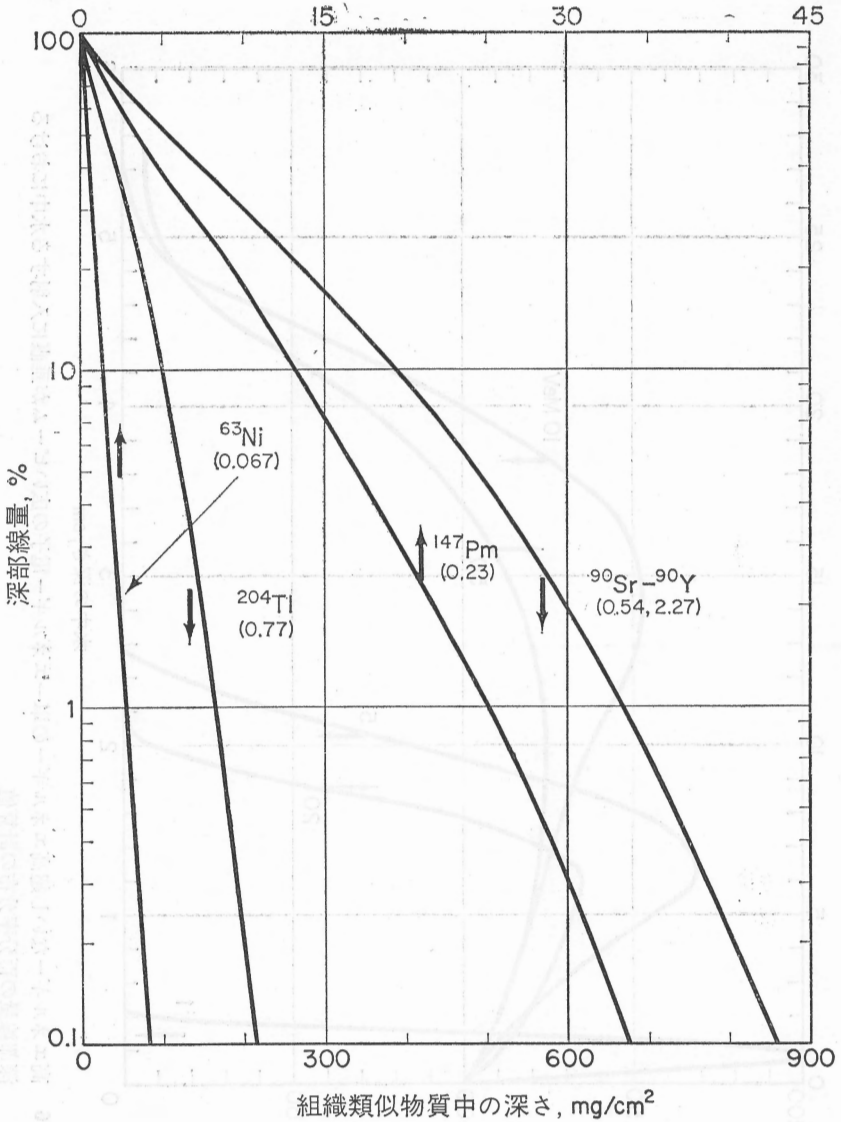


図7 組織類似物質に実質的に密着した大きい平面線源からのβ粒子による、物質中の深部線量の百分率分布 (カッコ内の数字は MeV 単位で表されたβ粒子の最大エネルギー)

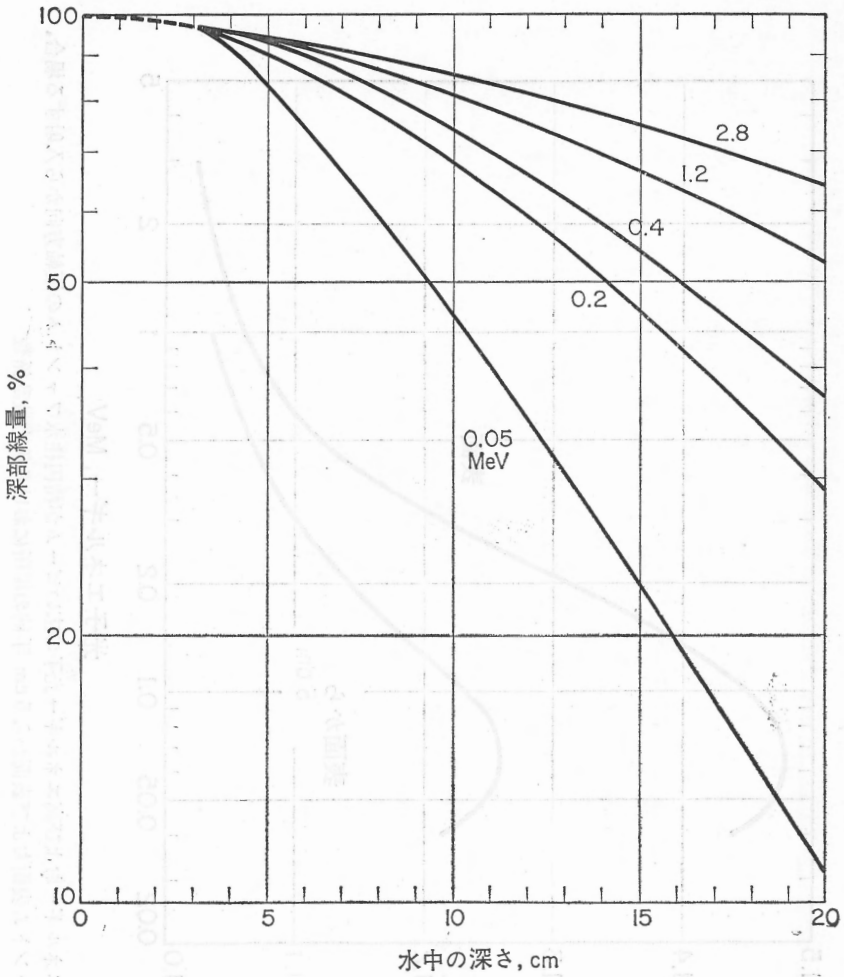
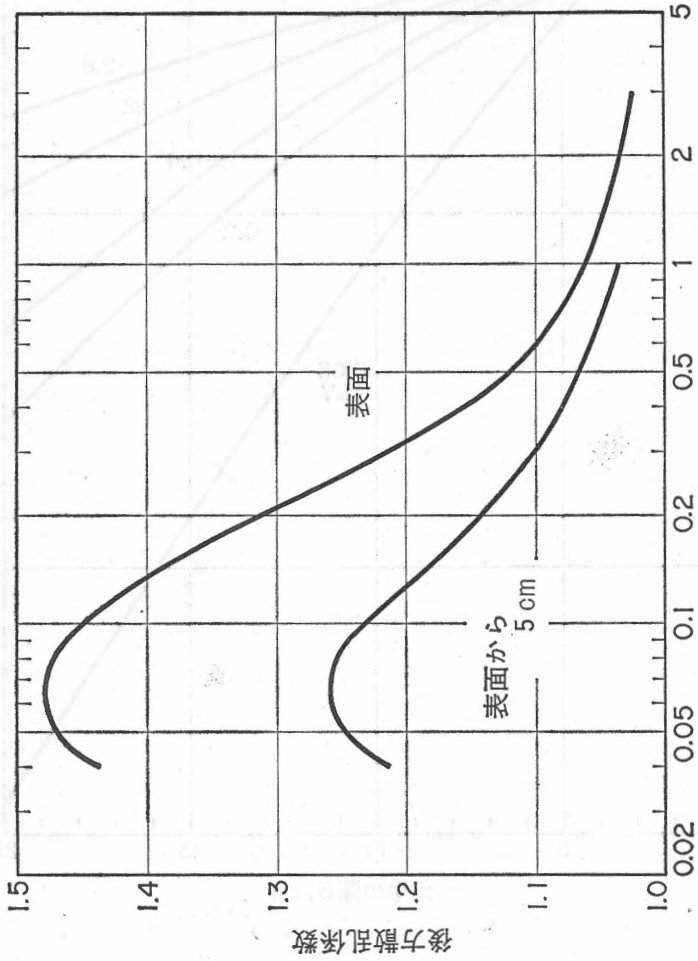


図8 無限遠方の線源からの低エネルギーおよび高エネルギー光子が楕円柱の水ファントムの短軸方向から入射する場合、短軸に沿う深部線量の百分率分布



光子エネルギー, MeV

図9 低エネルギーおよび高エネルギー光子の広いビームが楕円柱水ファントムの短軸方向から入射する場合、ファントム表面および表面から5 cm 手前の場所における後方散乱係数

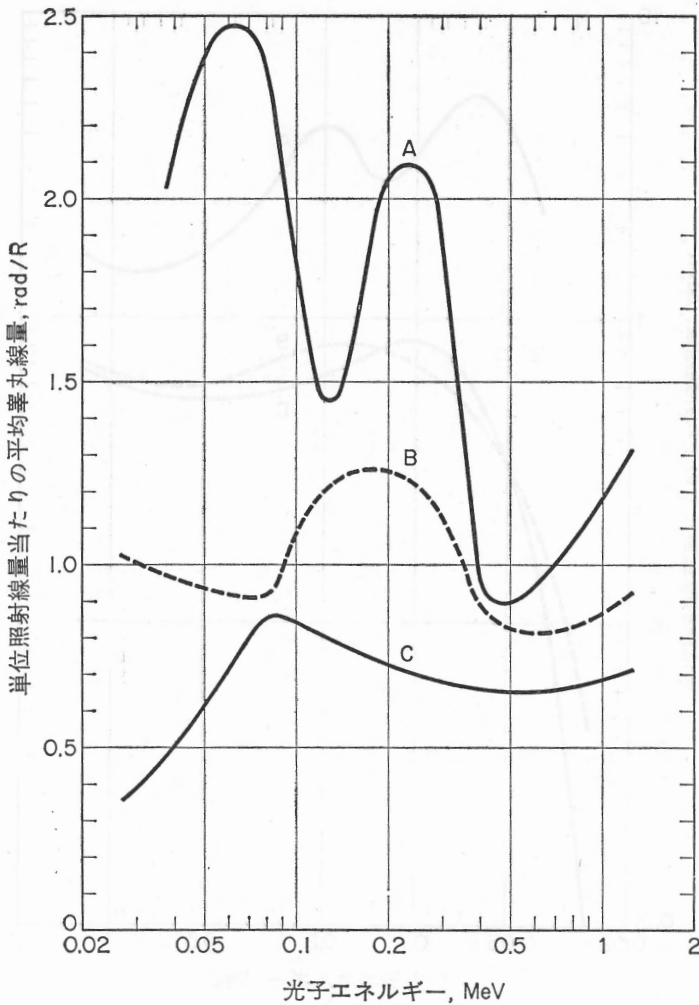


図10 胴体の前側に個人被曝線量計を着けて測定した単位照射線量あたり (曲線AおよびB), および身体の中心位置の自由空气中で測定した単位照射線量あたり (曲線C) の罫丸の平均吸収線量

曲線A: 背後からのみ照射

曲線B: 前方からのみ照射

曲線C: 全方向からの照射を模擬して, 照射中に回転

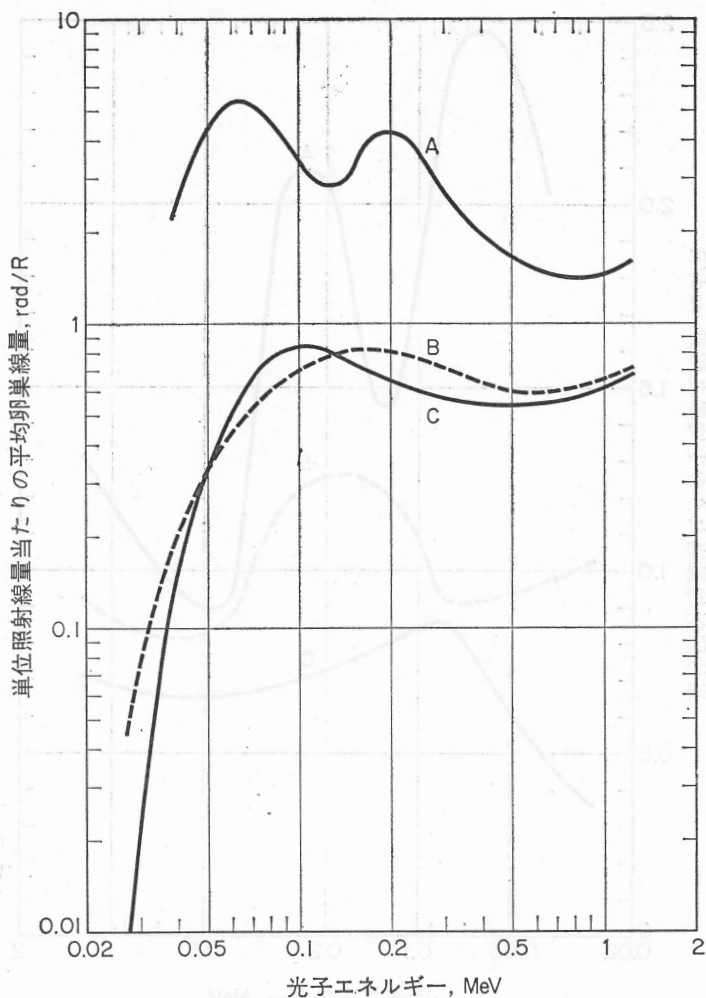


図11 胴体の前側に個人被曝線量計を着けて測定した単位照射線量あたり (曲線AおよびB), および胴体の中心位置の自由空气中で測定した単位照射線量あたり (曲線C) の卵巣の平均吸収線量
曲線A: 背後からのみ照射
曲線B: 前方からのみ照射
曲線C: 全方向からの照射を模擬して, 照射中に回転

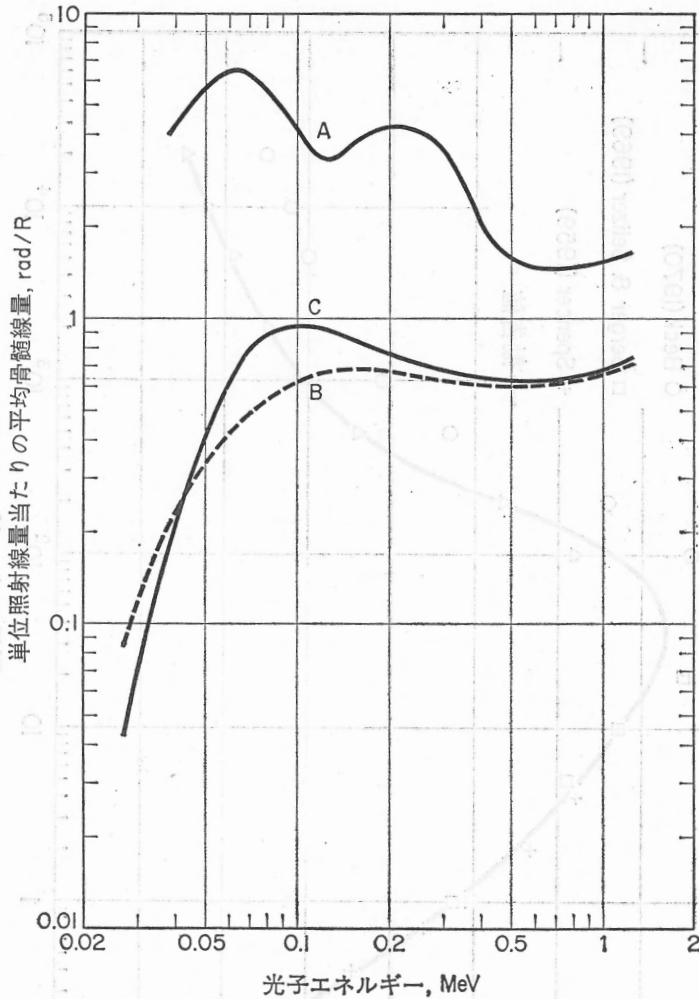


図12 胴体の前側に個人被曝線量計を着けて測定した単位照射線量あたり (曲線AおよびB), および身体の中心位置の自由空气中で測定した単位照射線量あたり (曲線C) の骨髄の平均吸収線量

曲線A: 背後からのみ照射

曲線B: 前方からのみ照射

曲線C: 全方向からの照射を模擬して, 照射中に回転

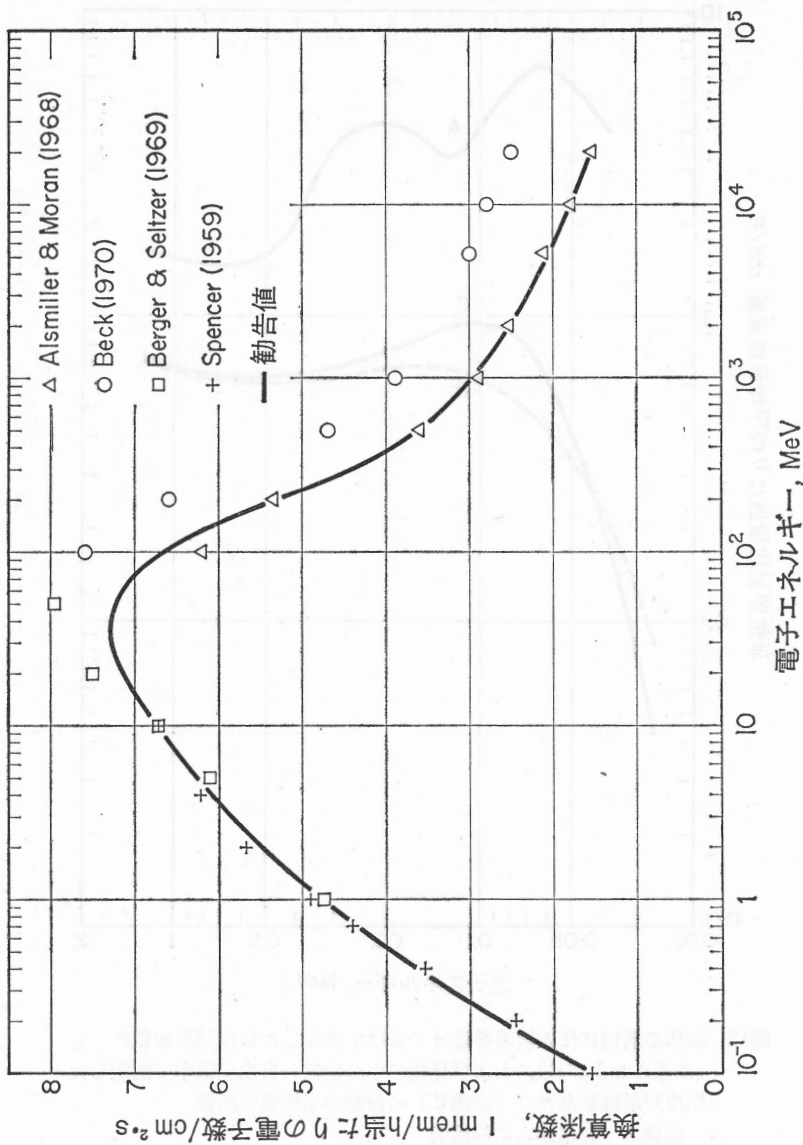


図13 電子についての換算係数. 単一方向の広いビーム, 垂直入射. 曲線は ICRP の勧告値を示す.

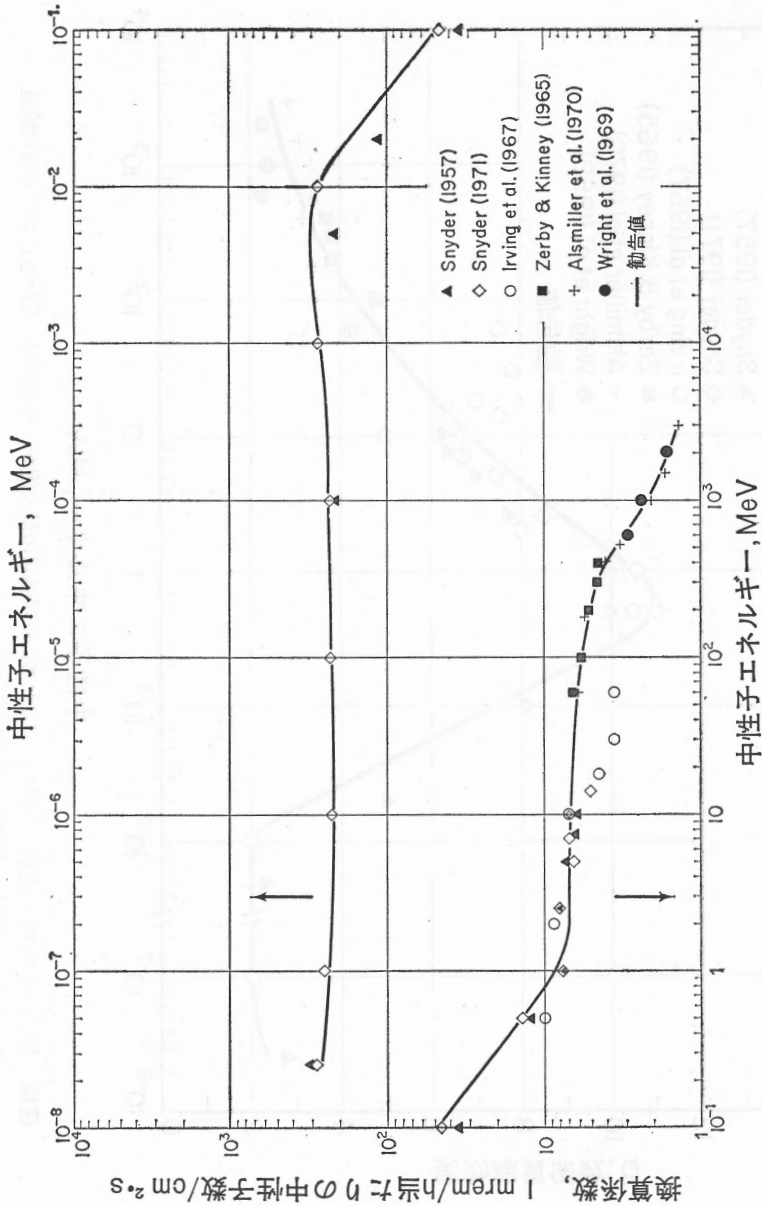


図14 中性子についての換算係数. 単一方向の広いビーム, 垂直入射. 曲線は ICRP の勧告値を示す.

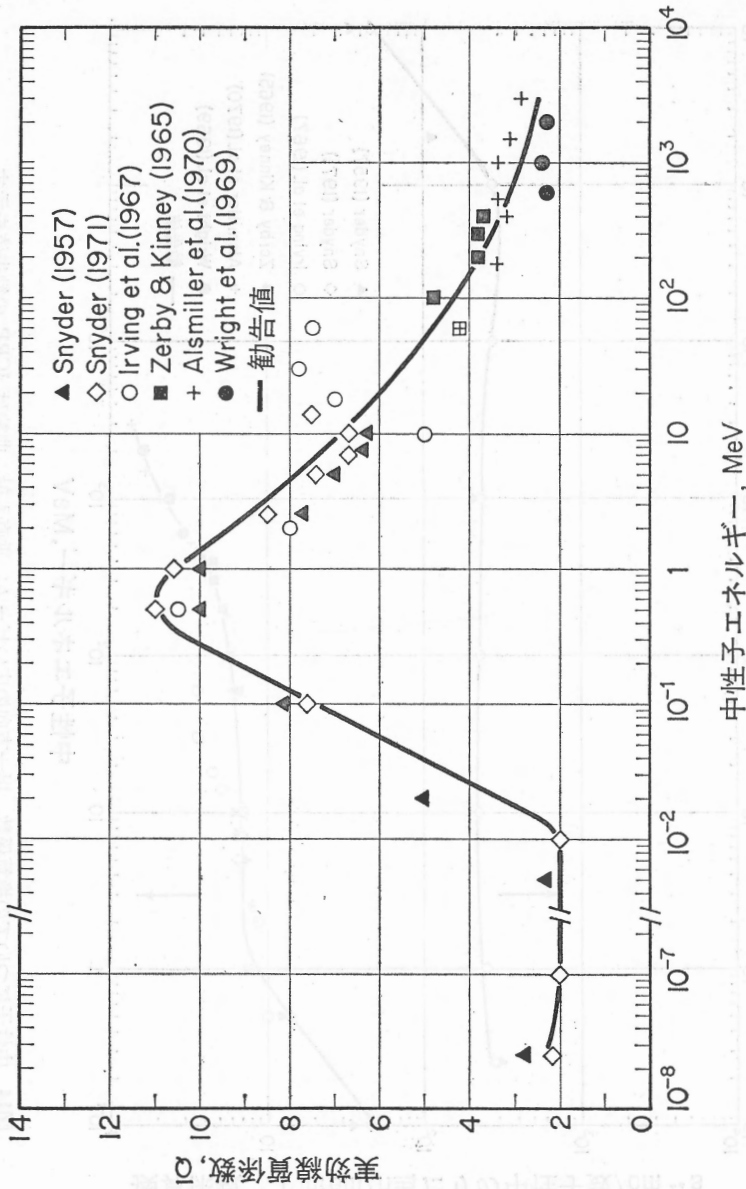


図15 中性子についての実効線質係数, すなわち, 線量当量の最大値を, それが見られる深さにおける吸収線量で除した商. 曲線は ICRP の勧告値を示す.

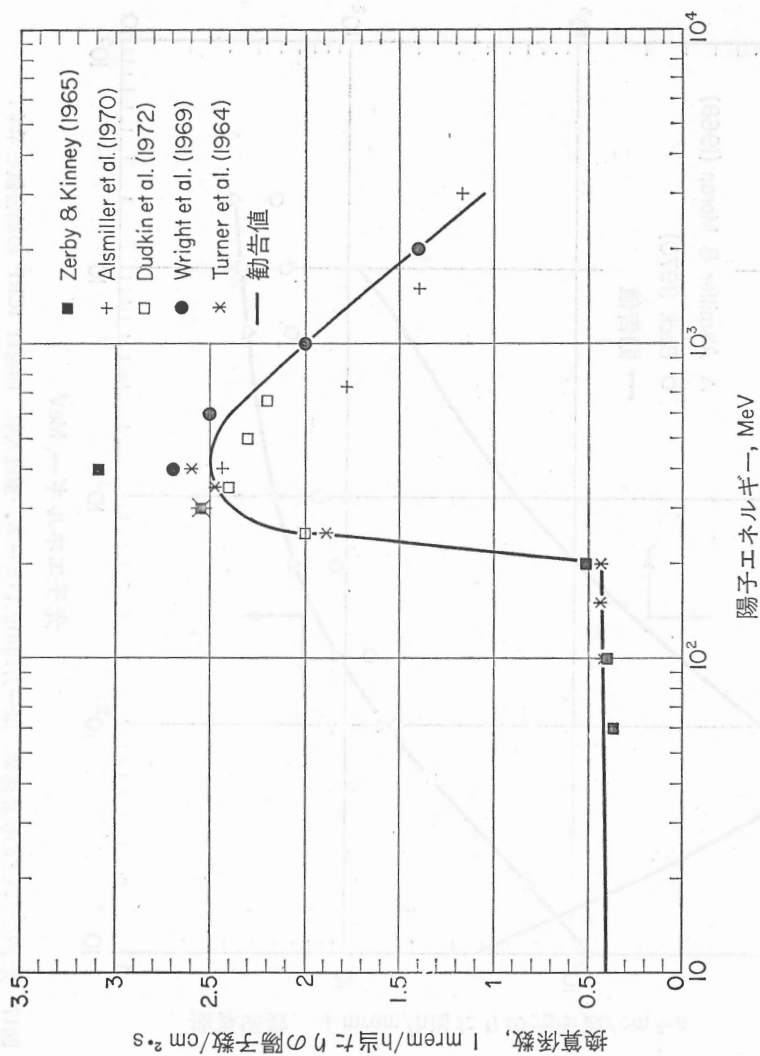


図16 陽子についての換算係数. 単一方向の広いビーム, 厚さ 30cm のファントムに垂直入射. 曲線は ICRP の勧告値を示す.

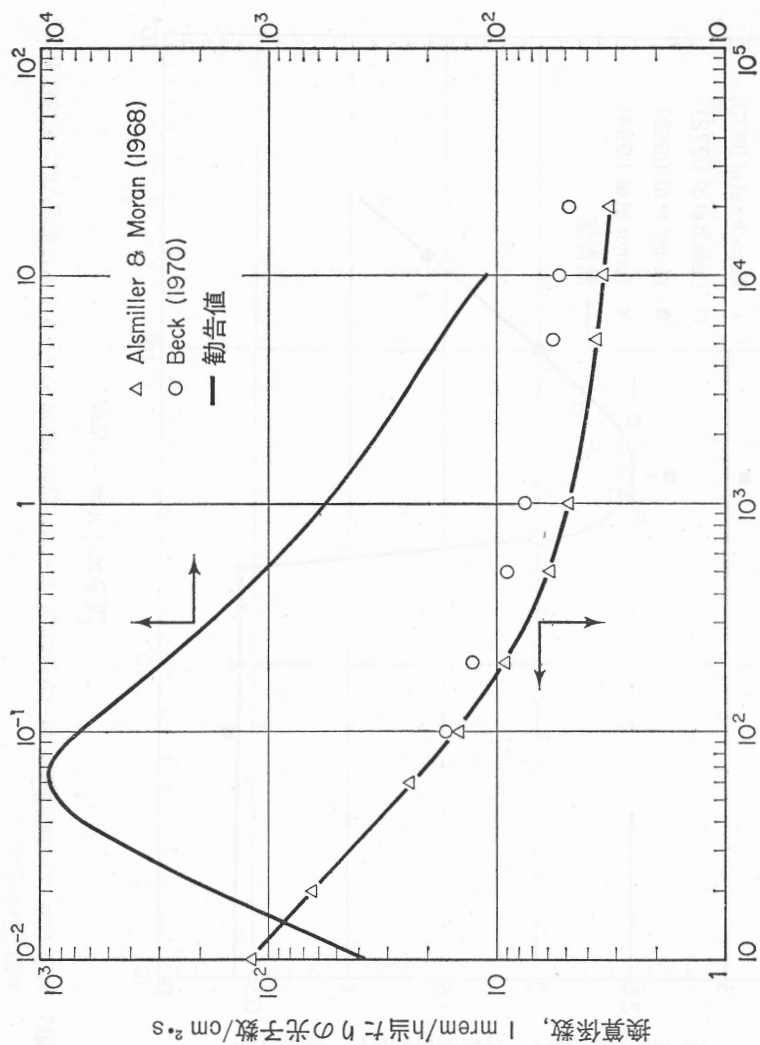


図17 光子についての換算係数. 単一方向の広いビーム, 垂直入射. 曲線は ICRP の勧告値を示す.

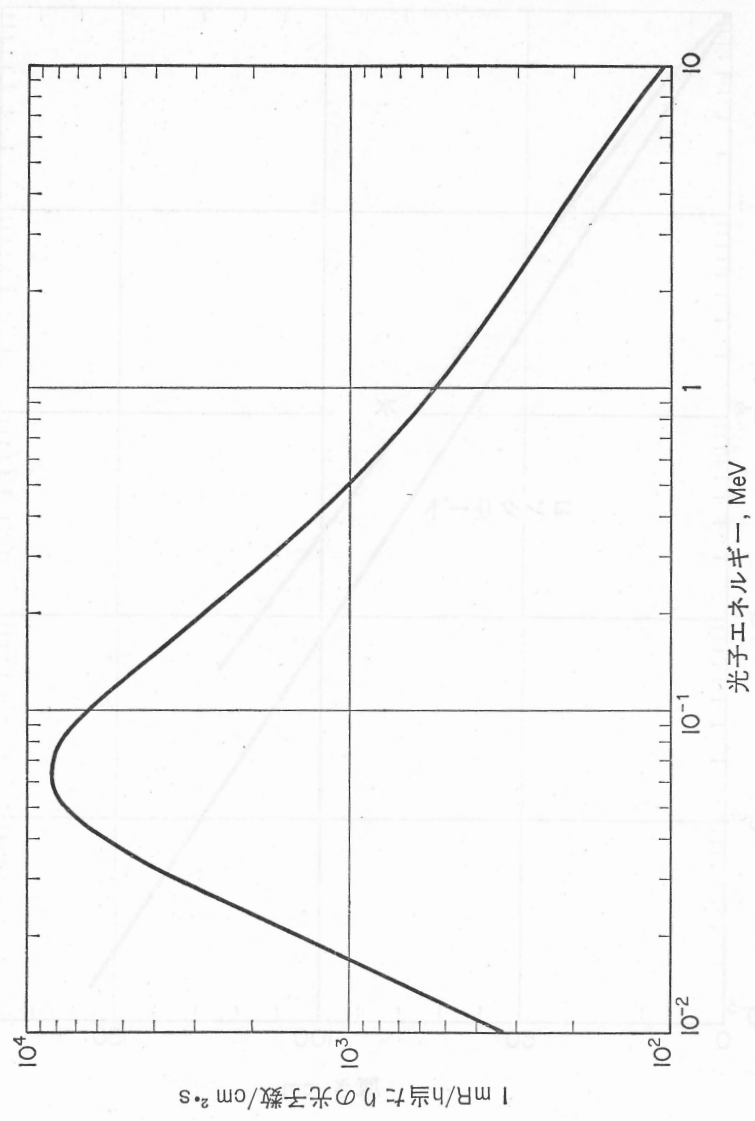


図18 光子フルエンス率*と照射線量率との関係

* (訳注) フルエンス率 (fluence rate) と線束密度 (flux density) とは同じ量である。

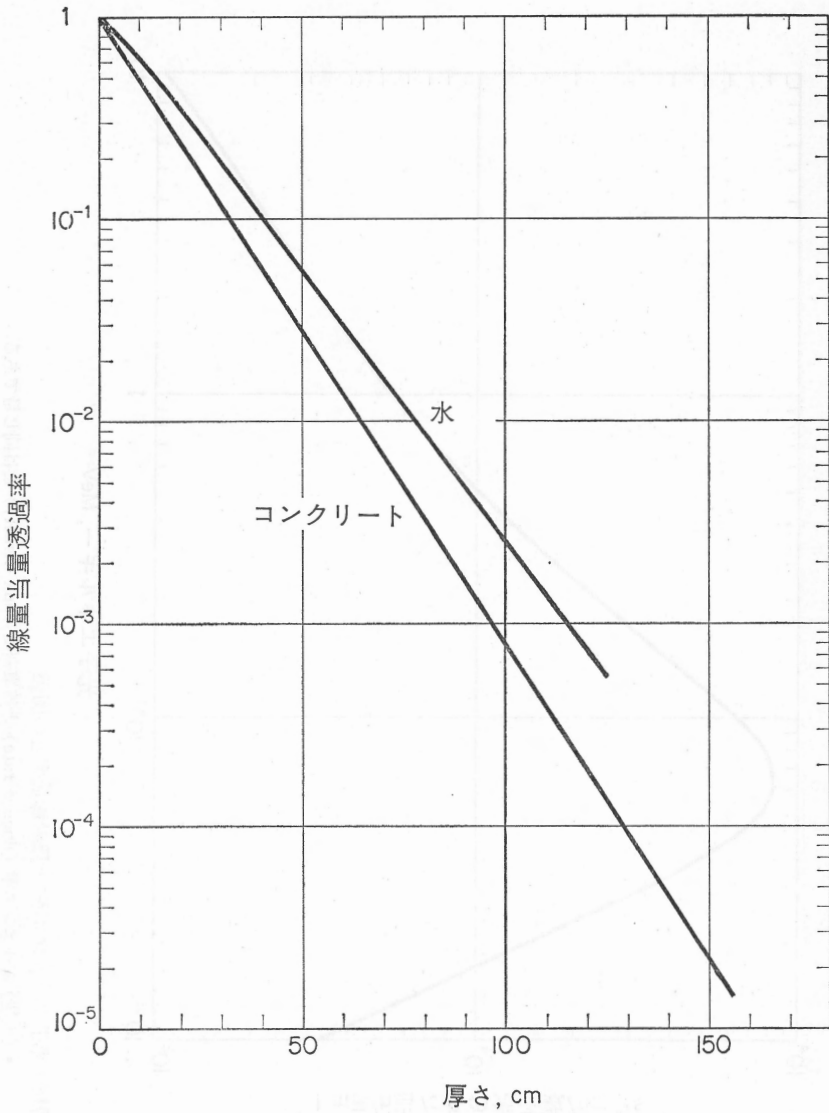


図19 14—15MeV 中性子の広いビームの、コンクリート(密度 2.4g/cm^3) および水の平板に対する線量当量透過率

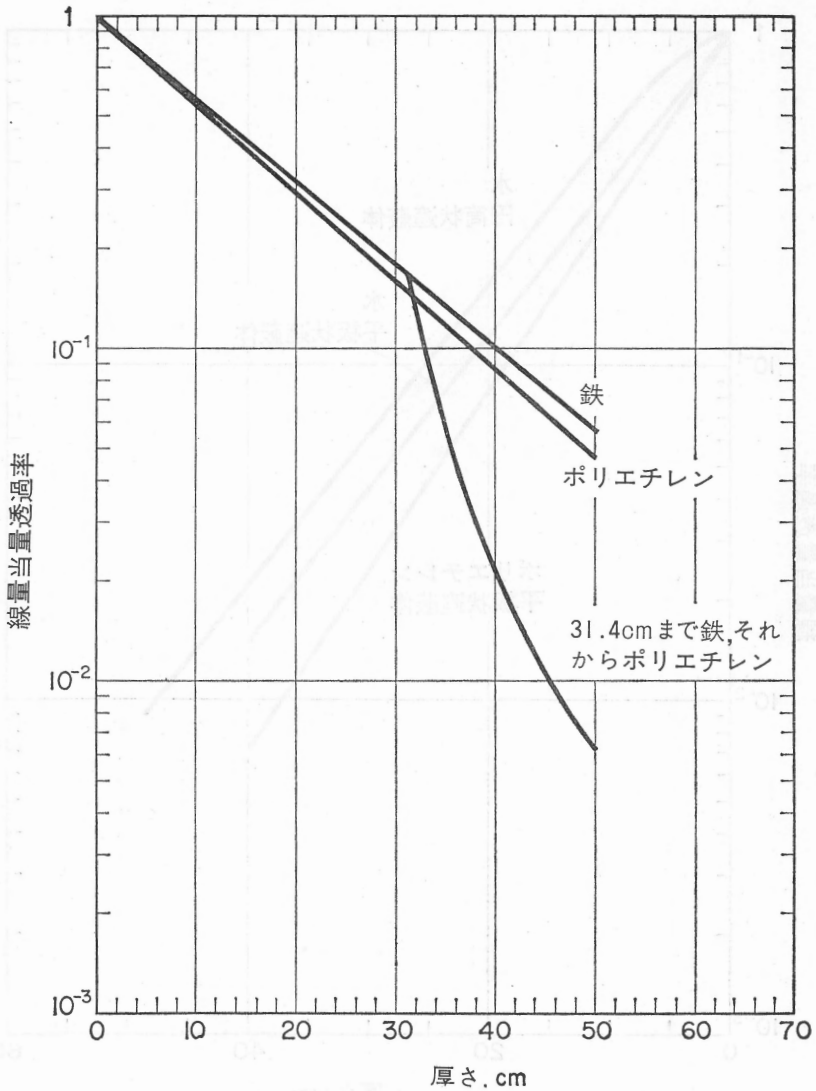


図20 14—15 MeV 中性子の広いビームの、鉄 (密度 7.8 g/cm^3)、ポリエチレン (0.94 g/cm^3) および鉄とポリエチレンの組み合わせの平板に対する線量当量透過率

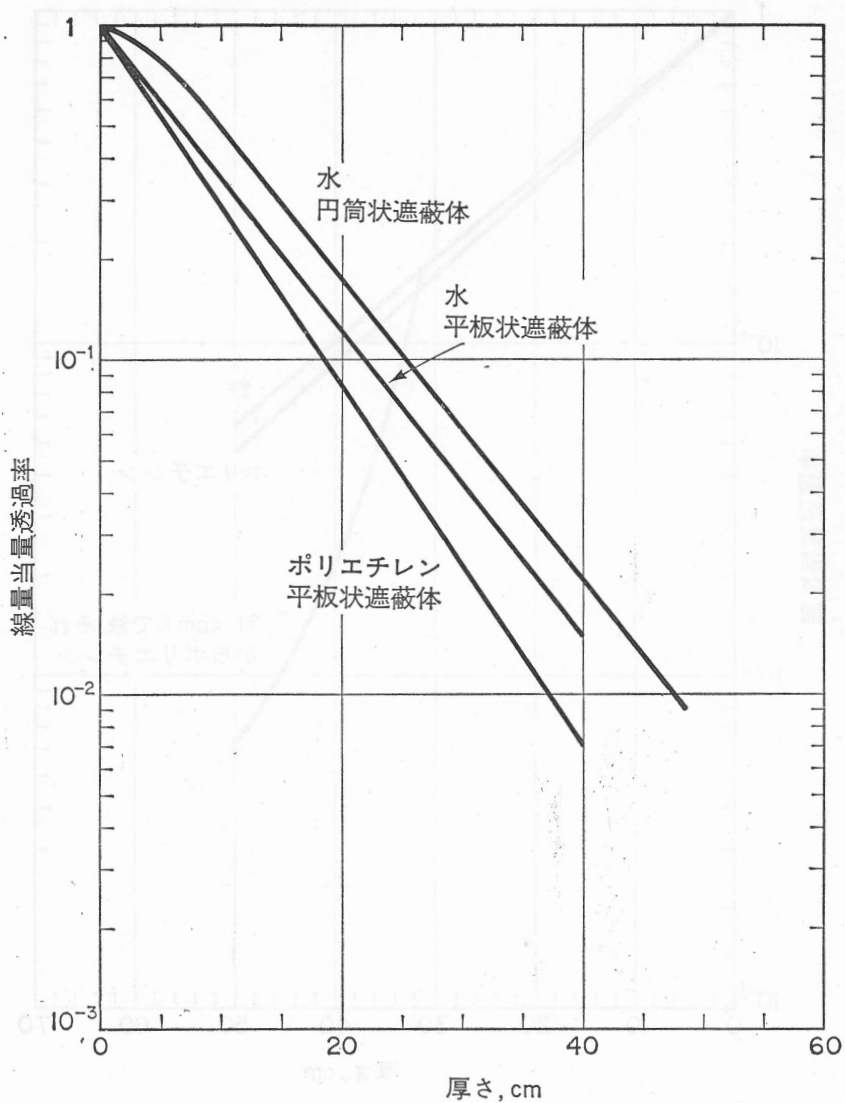


図21 $^{241}\text{Am-Be}$ 中性子の広いビームの、水およびポリエチレン (密度 0.94 g/cm^3) に対する線量当量透過率

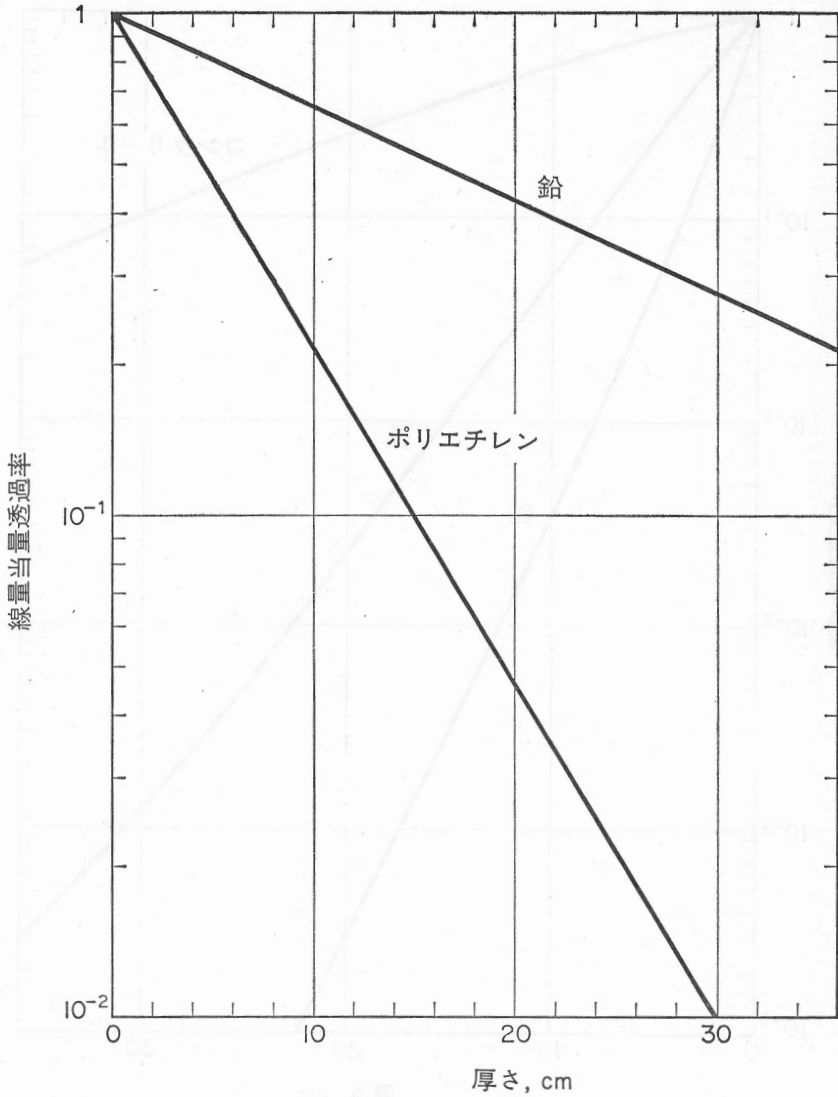


図22 ²⁵²Cf 中性子の広いビームの、鉛 (密度 11.35 g/cm³) およびポリエチレン (0.94 g/cm³) 平板に対する線量当量透過率

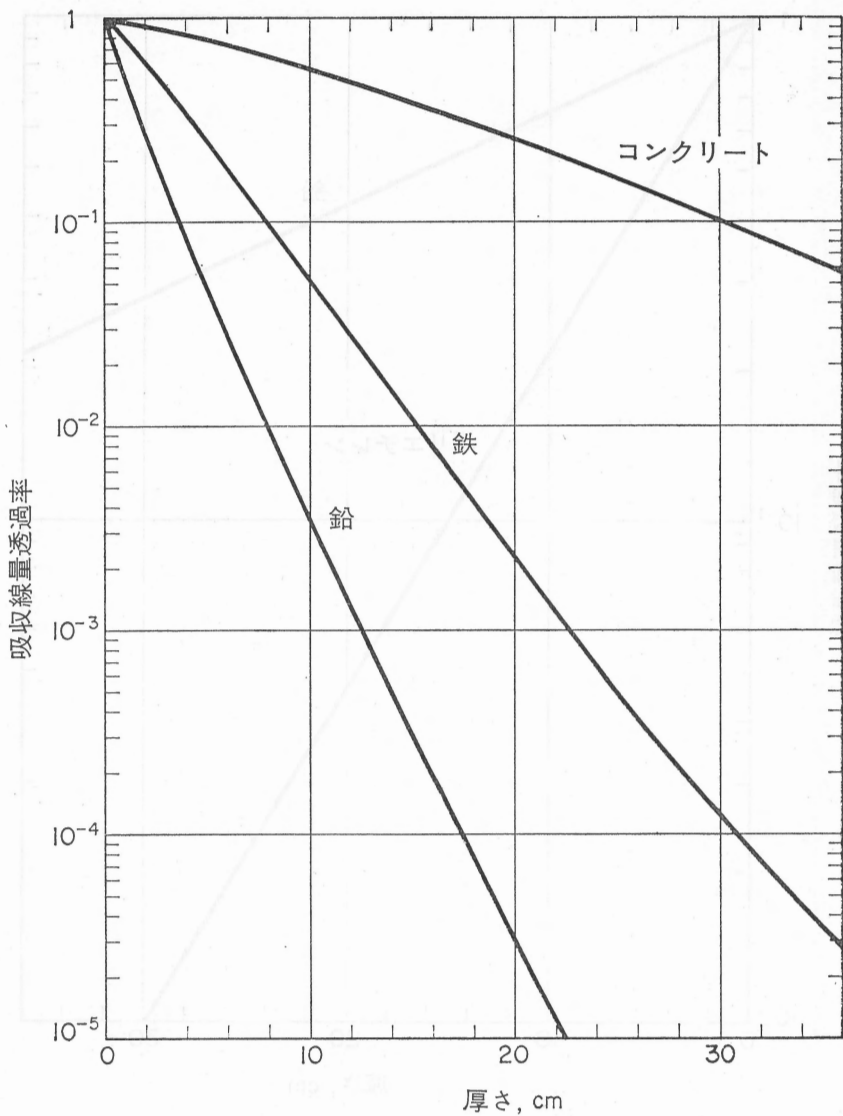


図23 ^{252}Cf γ 線の広いビームの、鉛 (密度 11.35g/cm^3), 鉄 (7.8g/cm^3) およびコンクリート (2.35g/cm^3) 平板に対する吸収線量透過率

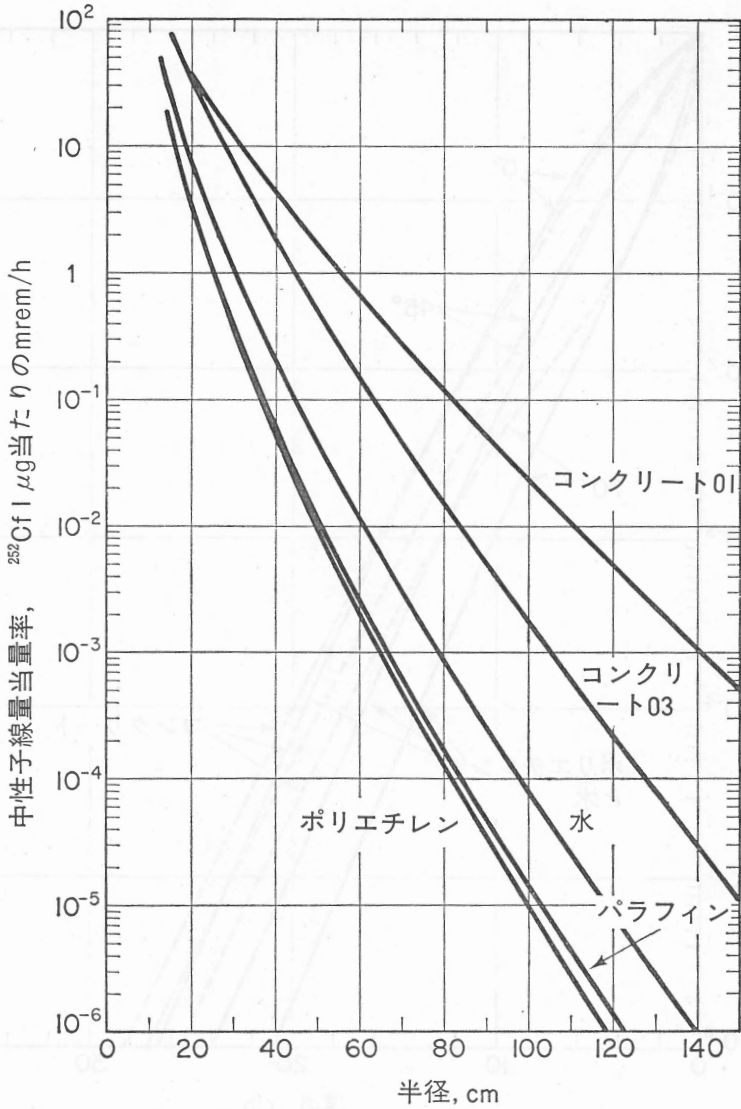


図24 中心に $1\mu\text{g}$ の ^{252}Cf を含むポリエチレン(密度 0.96g/cm^3)、パラフィン(0.92g/cm^3)、水およびコンクリート(2.35g/cm^3)の球体表面における中性子線量当量率

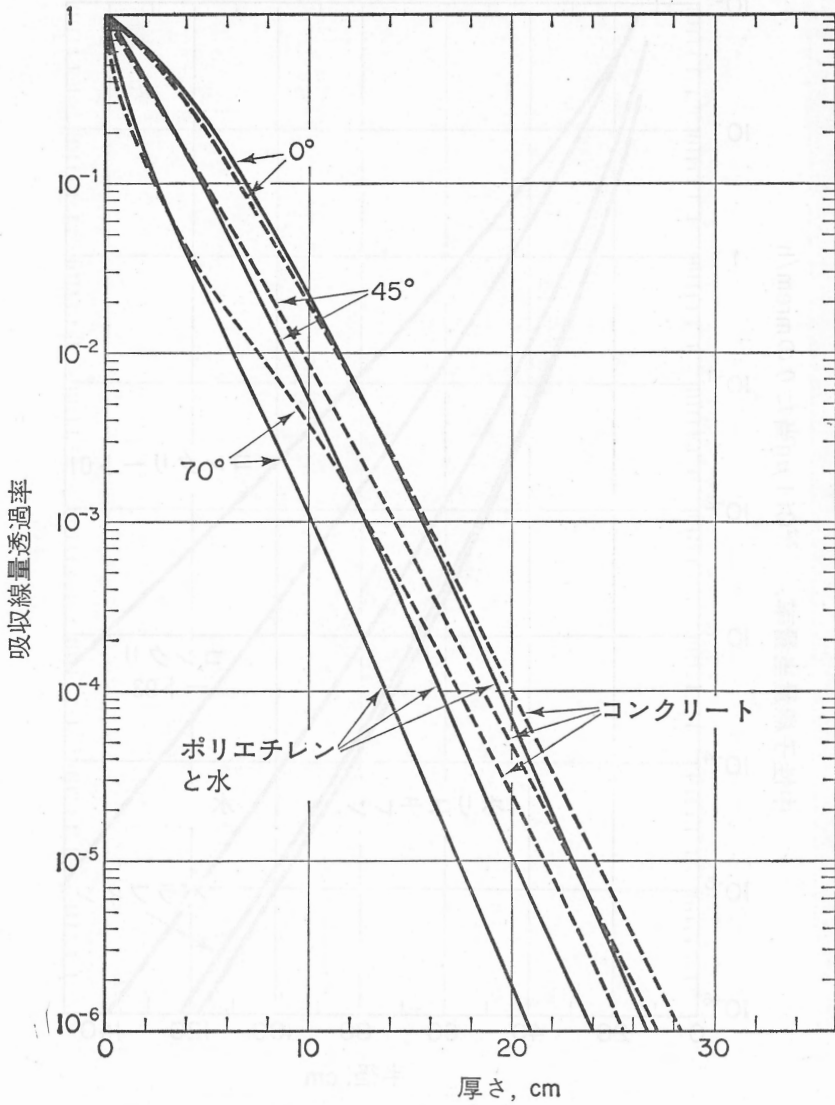


図25 平板状遮蔽体にいろいろの角度で入射する 0.5MeV 中性子の単一方向の広いビームに対する中性子吸収線量透過率

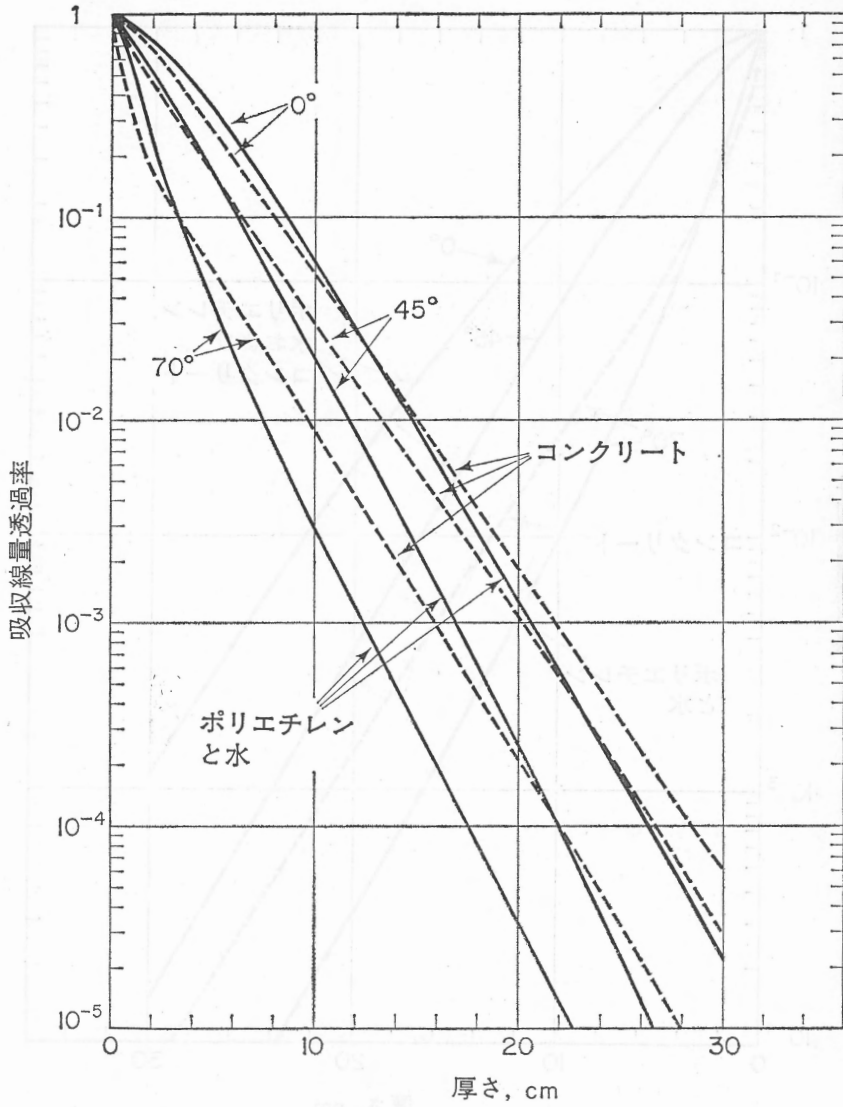


図26 平板状遮蔽体にいろいろの角度で入射する 1MeV 中性子の単一方向の広いビームに対する中性子吸収線量透過率

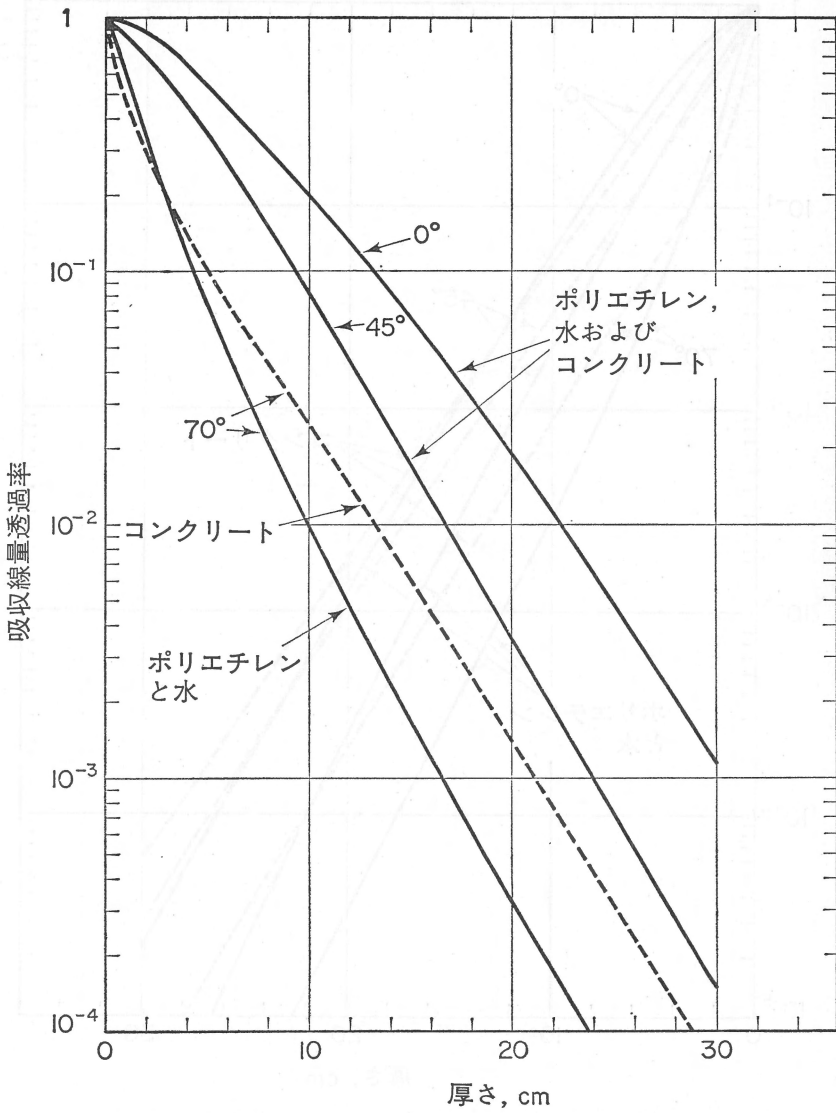


図27 平板状遮蔽体にいろいろの角度で入射する 2MeV 中性子の単一方
向の広いビームに対する中性子吸収線量透過率

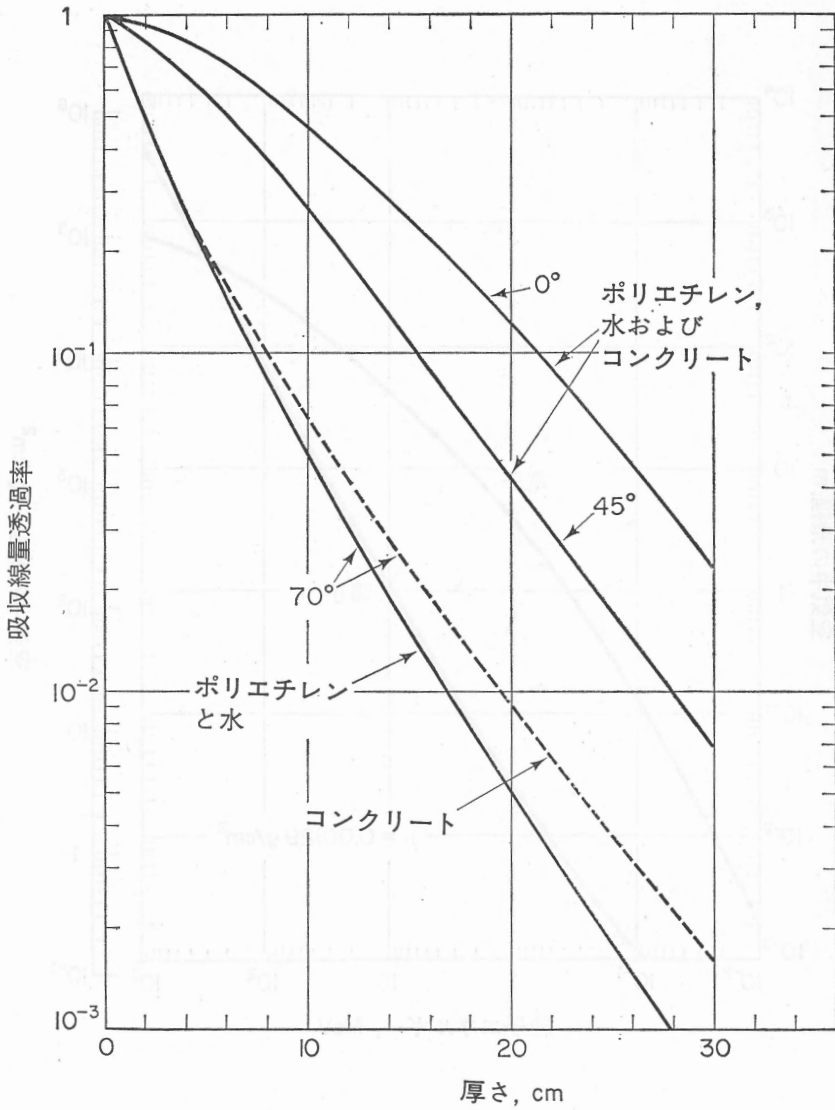


図28 平板状遮蔽体にいろいろの角度で入射する 5 MeV 中性子の単一方向の広いビームに対する中性子吸収線量透過率

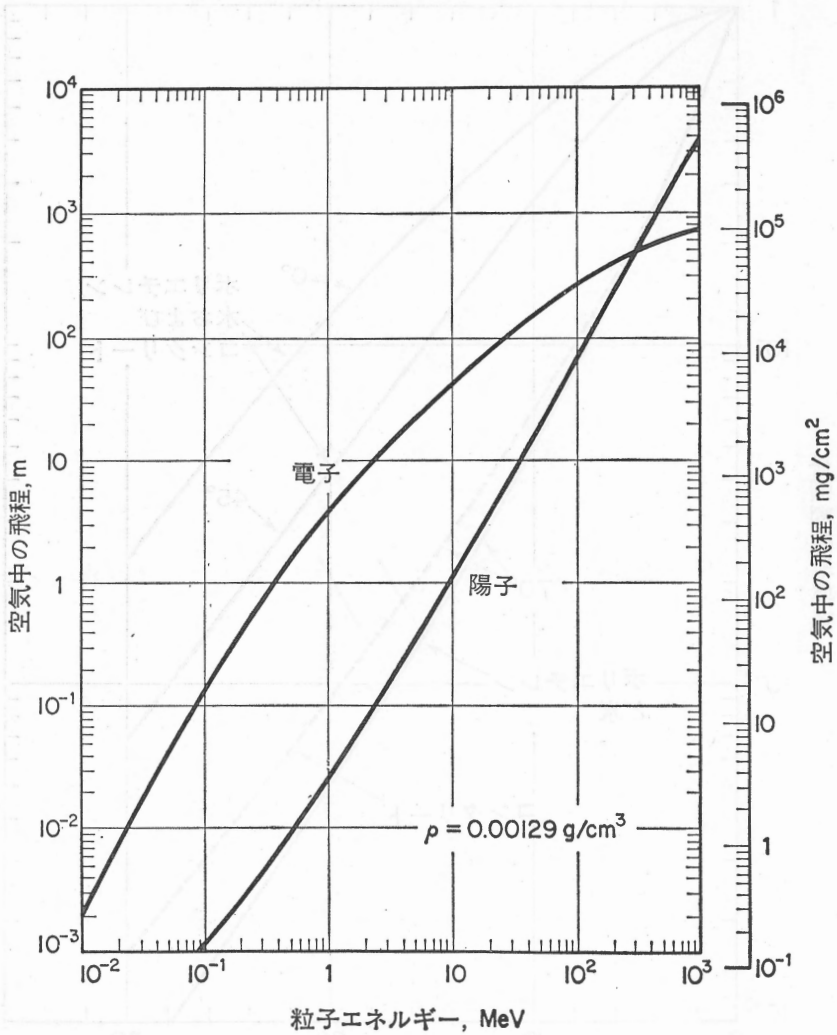


図29 空気中における電子と陽子の飛程

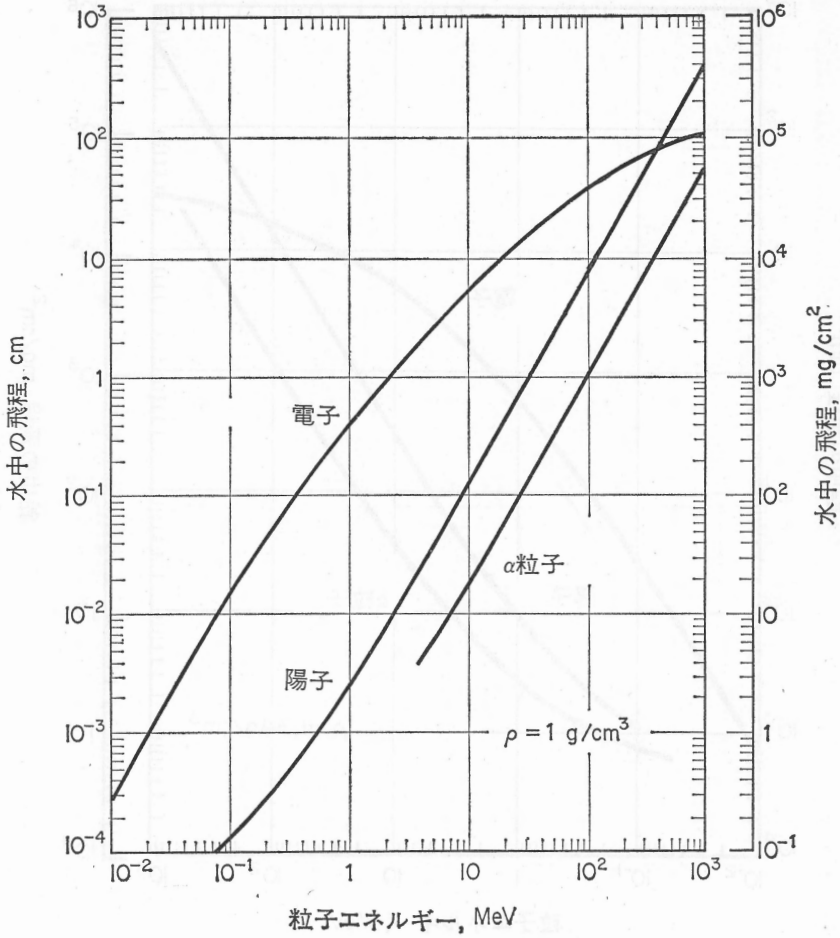


図30 水中における電子，陽子および α 粒子の飛程

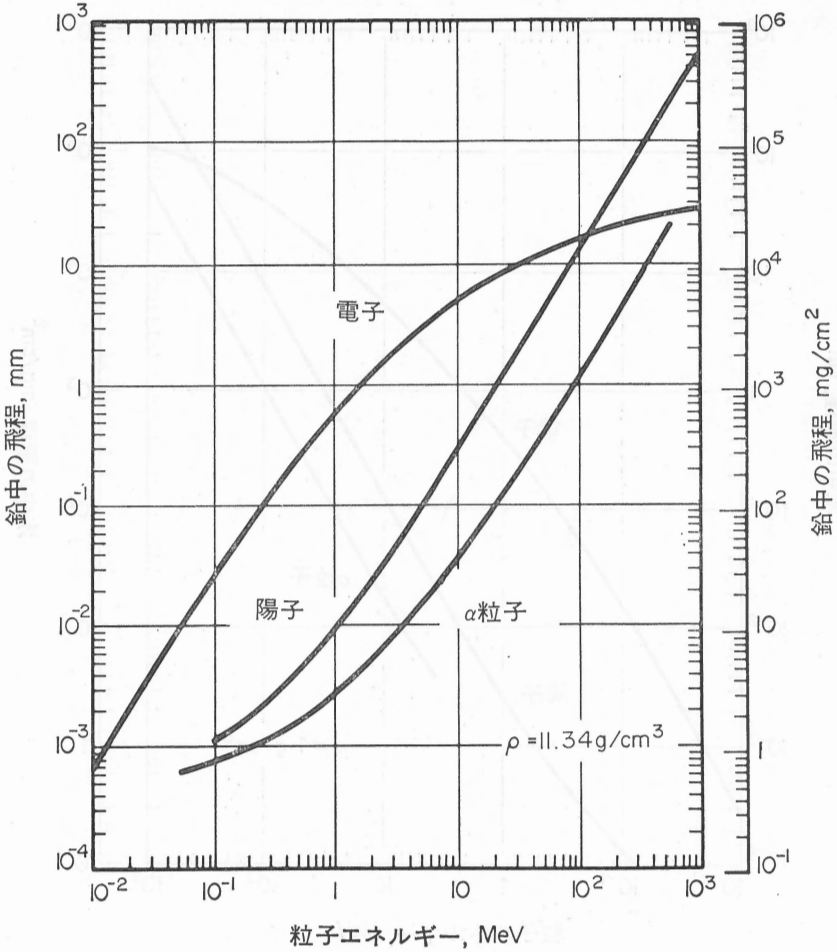


図31 鉛中における電子，陽子および α 粒子の飛程

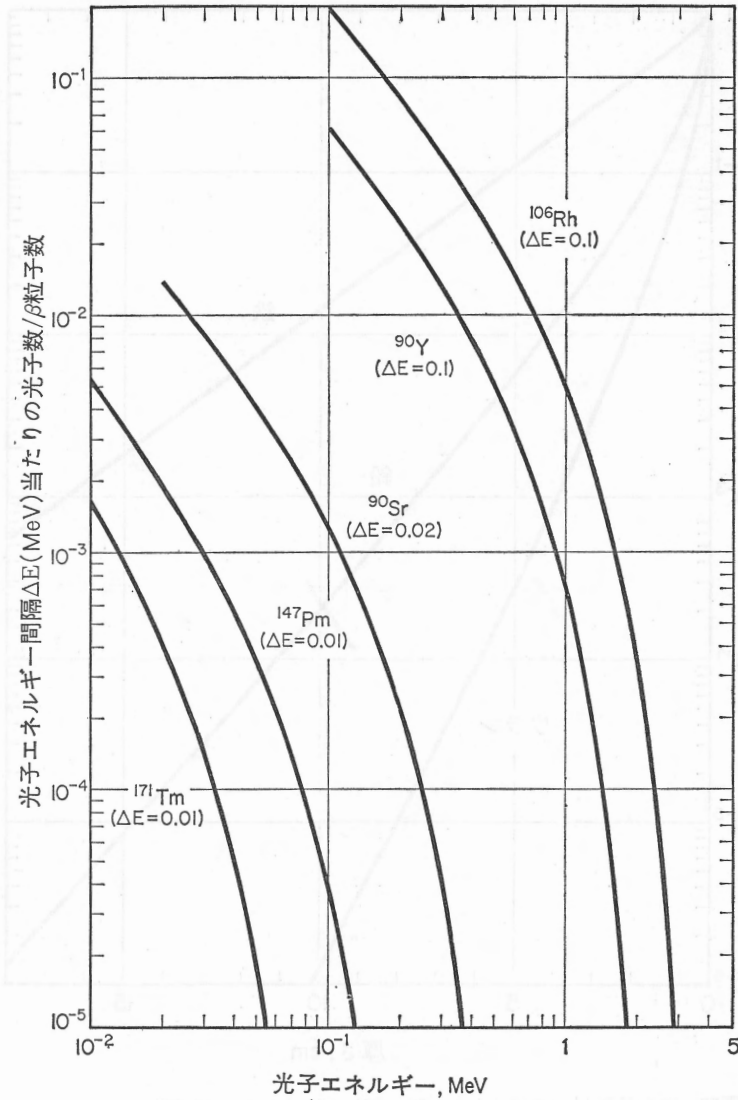


図32 金属母材中で停止した ^{106}Rh β 粒子からの制動放射線；および，酸化物母材中で停止した ^{90}Y ， ^{90}Sr ， ^{147}Pm および ^{171}Tm β 粒子からの制動放射線

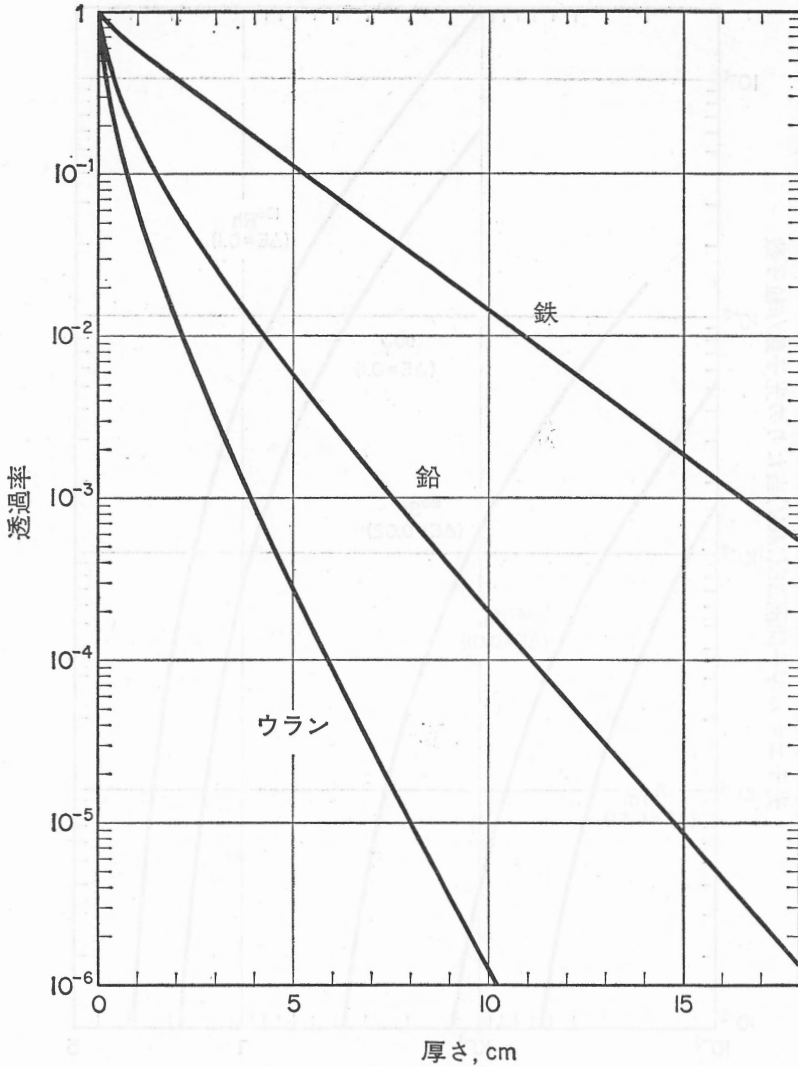


図33 酸化物母材中で停止した ^{90}Sr - ^{90}Y β 粒子からの制動放射線の広い発散ビームの、鉄 (密度 7.8g/cm^3)、鉛 (11.35g/cm^3) およびウラン (18.9g/cm^3) 平板における吸収線量透過率. ビーム軸は遮蔽体に垂直. ウランについては本文の注を参照

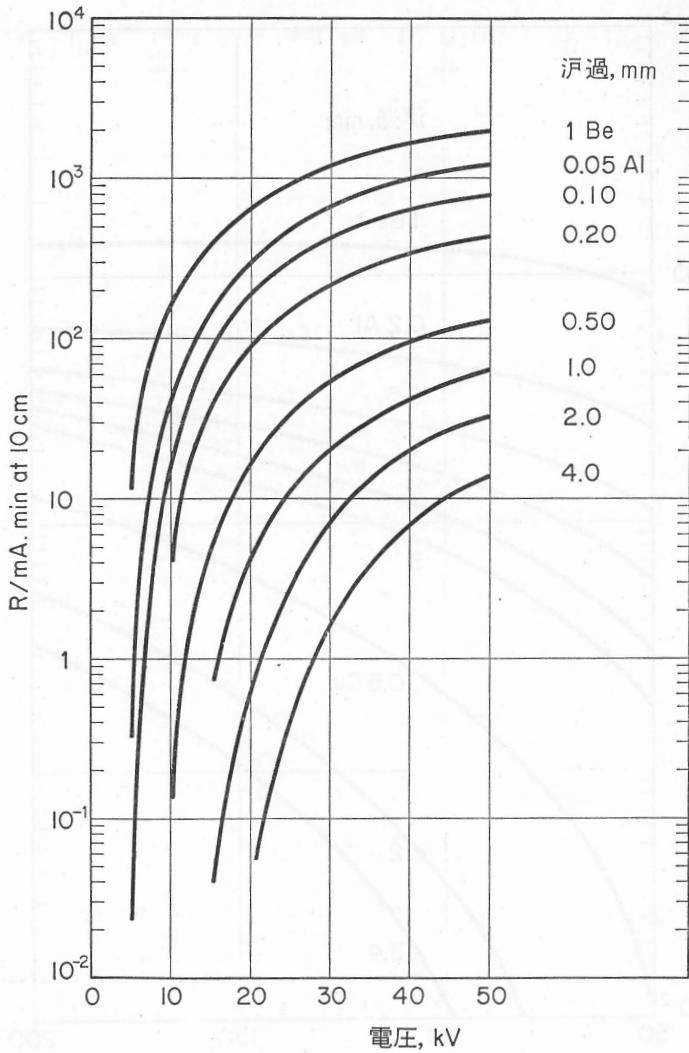


図34 タングステン反射ターゲットを有する定電圧X線発生装置の、ターゲットからの距離 10 cm における、種々のビーム 径過に対する出力。X線管の窓は 1 mm のベリリウム。1 m における出力については Glasser *et al.* (1959) を参照

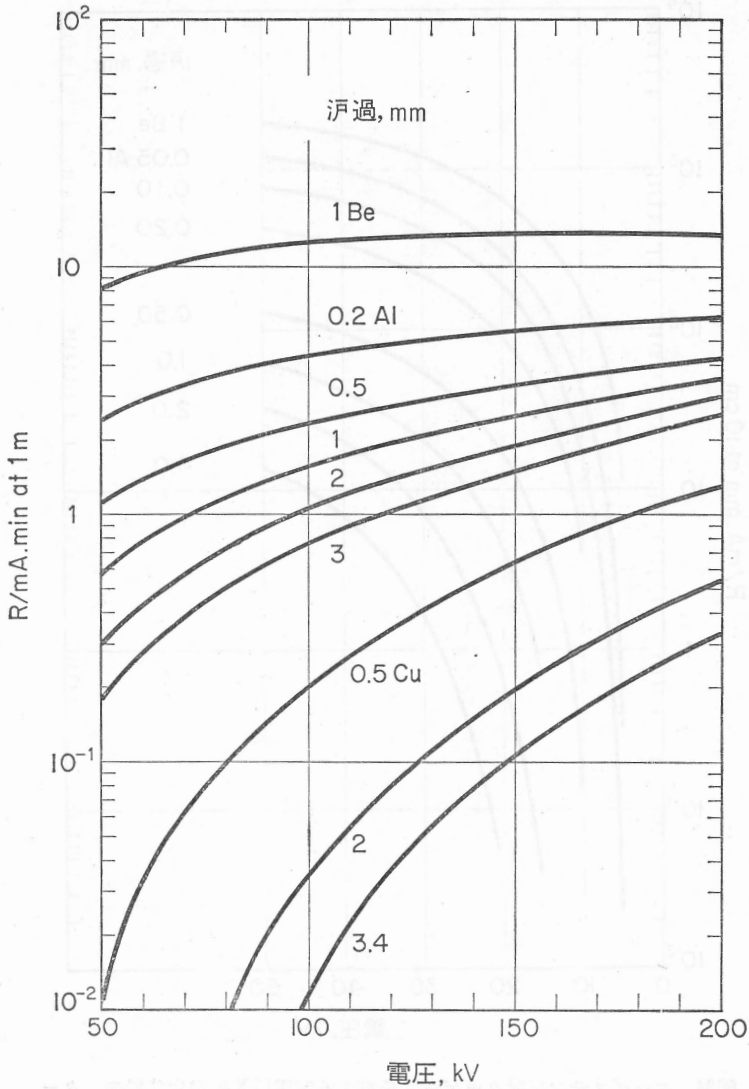


図35 タングステン反射ターゲットを有する定電圧X線発生装置の、ターゲットからの距離1 mにおける、種々のビーム 径過に対する出力。X線管の窓は 1mm のベリリウム

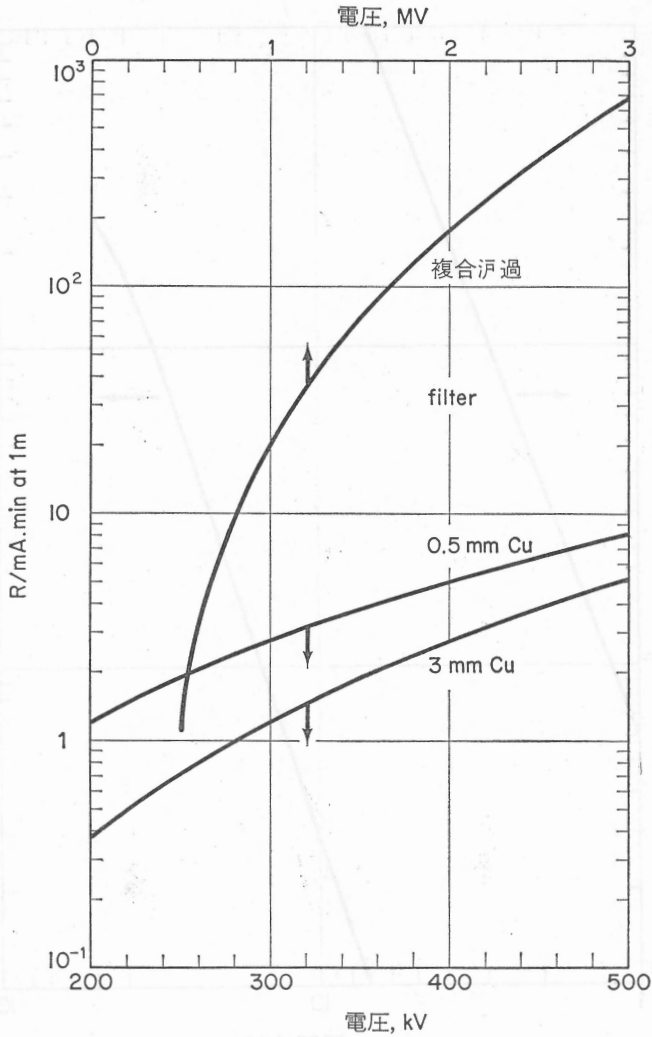


図36 定電圧X線発生装置の、ターゲットからの距離1mにおける、種々のビーム汙過に対する出力。上の曲線は、2.8mmのタングステン透過ターゲットに、銅2.8mm、水18.7mm、黄銅2.1mmが加わった場合。他の曲線群は、タングステン反射ターゲットで、全汙過が0.5および3mmの銅の場合

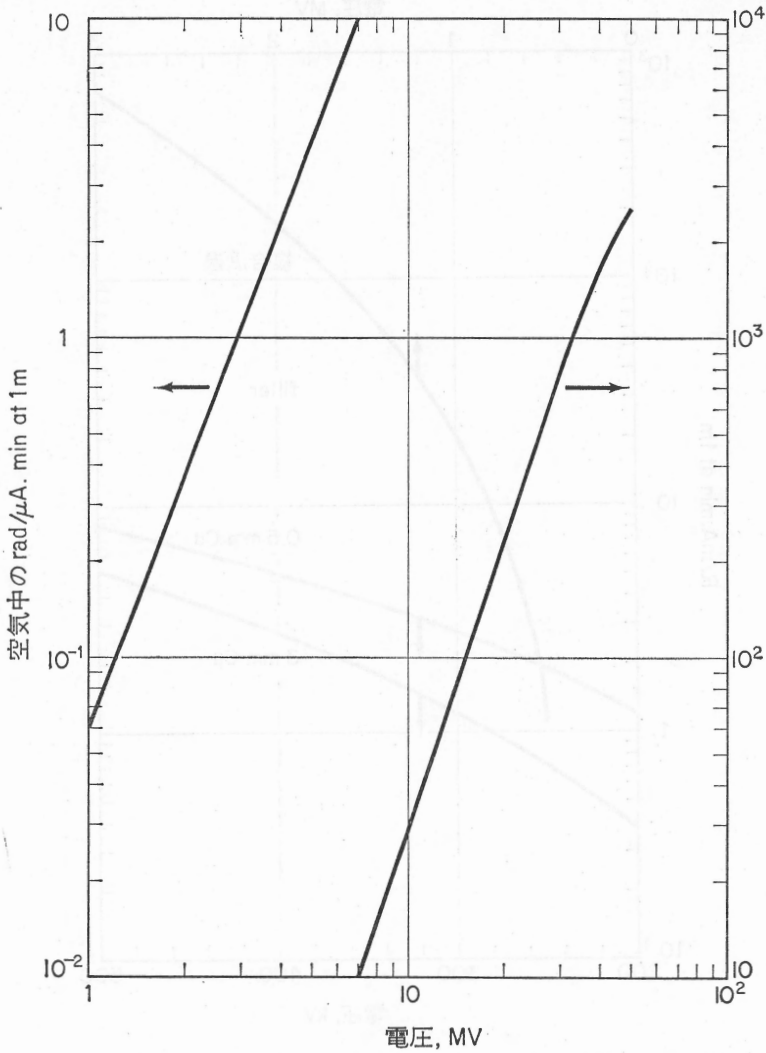


図37 直線加速装置の、最適厚さの高原子番号透過ターゲットから1mにおける、単位平均ビーム電流あたりのX線出力。縦軸は空气中で測定した吸収線量率。この図は、ターゲットの配置は異なるけれども、ベータトロンにも使用してよい。

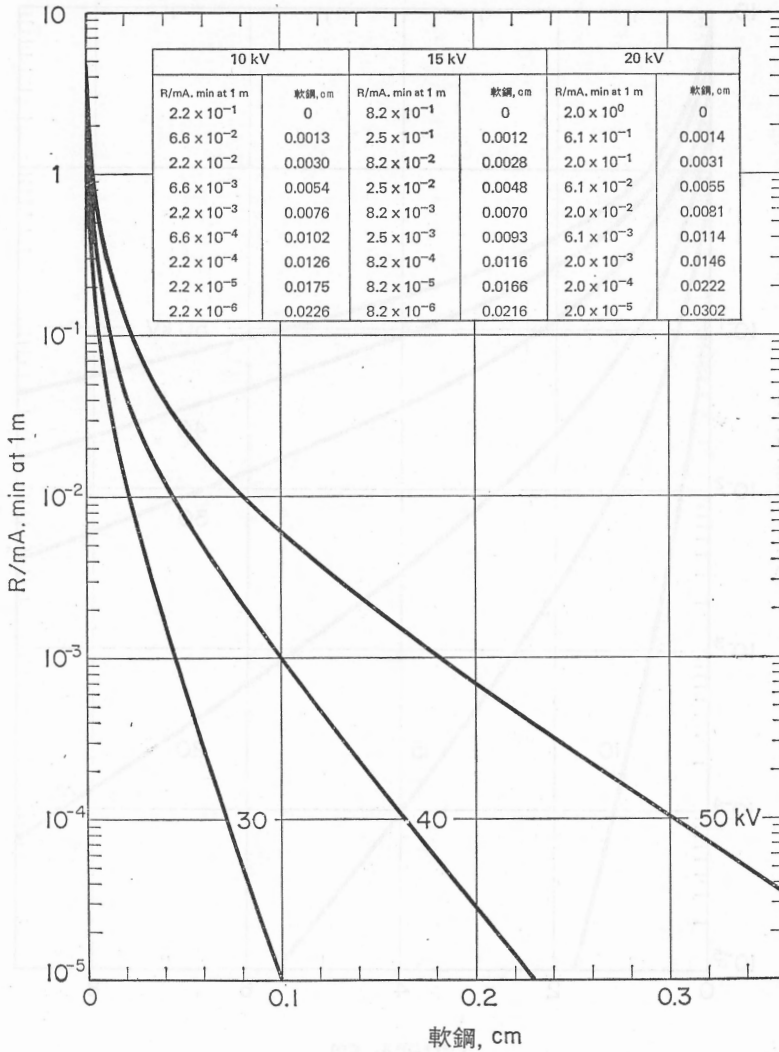


図38 密度 7.8 g/cm^3 の軟鋼に対する広いビームのX線の透過率. 定電圧 X線発生装置, タングステン反射ターゲット; ビームの全透過はベリリウム 1mm. 縦軸との交点は: 50 kV で 8.38; 40 kV で 6.58; 30 kV で 4.49

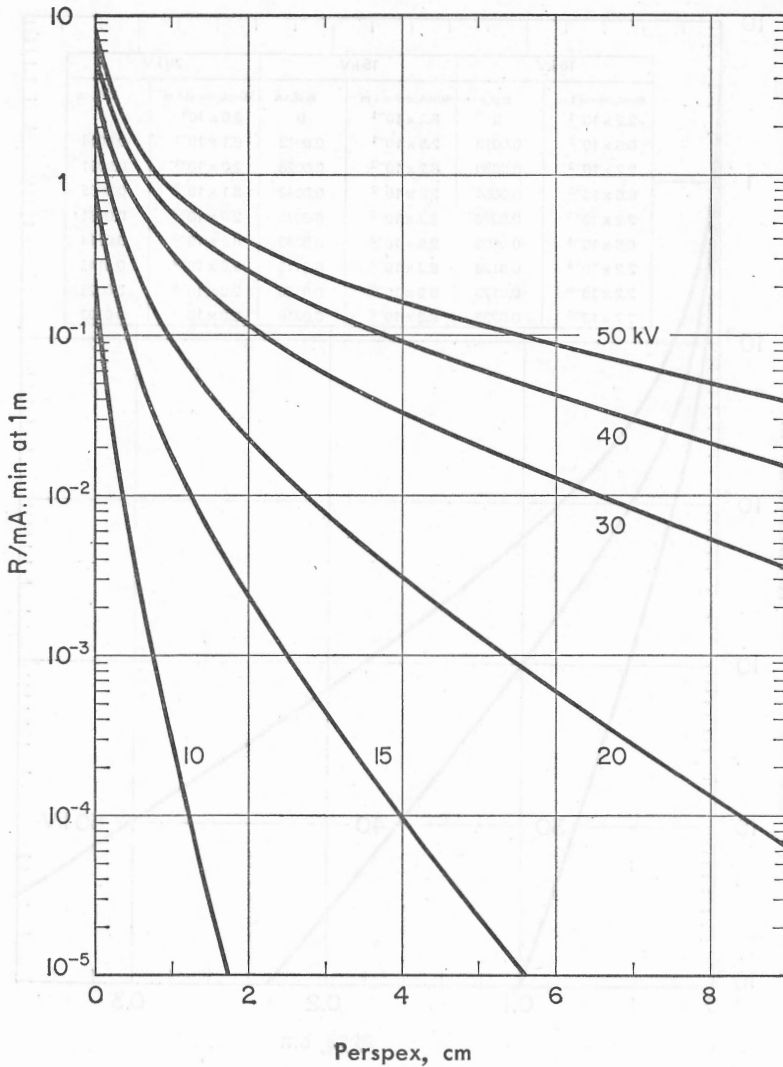


図39 Perspex* (密度 $1.2g/cm^3$) に対するX線の広いビームの透過率.
定電圧X線発生装置, タングステン反射ターゲット; ビームの全透過はベリリウム 1mm. 縦軸との交点については図38を参照
* (訳注) 表15の脚注参照

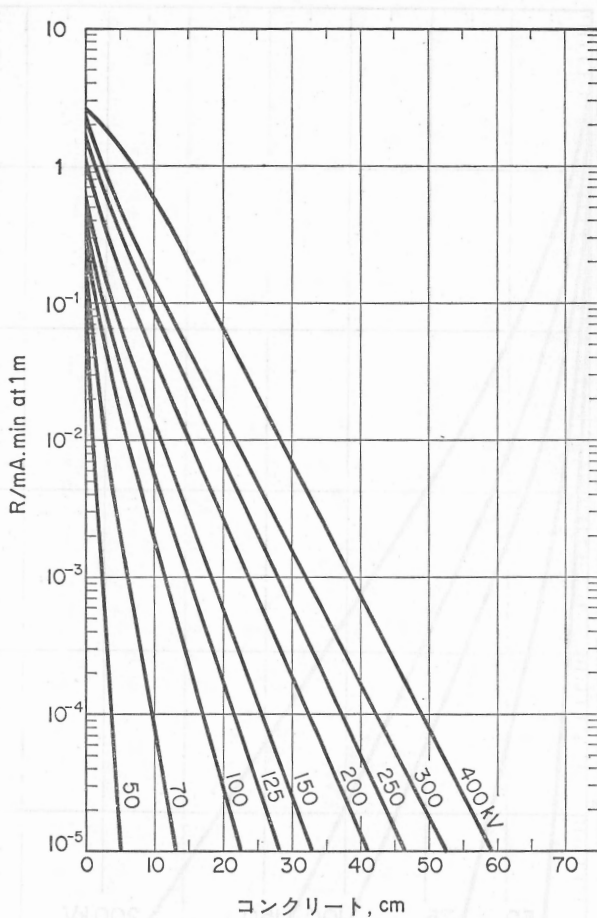


図40 コンクリート（密度 $2.35 g/cm^3$ ）に対するX線の広いビームの透過率。50ないし 300kV のデータは、半波整流X線発生装置；タングステン反射ターゲット；ビームの全透過は、50kV のときアルミニウム 1mm, 70kV のとき 1.5mm, 100kV のとき 2mm, 125kV ないし 300kV のとき 3mm。400kV のデータは、定電圧X線発生装置；金反射ターゲット；ビームの全透過は銅 3mm。縦軸との交点は、400kV で 2.7, 300kV で 2.4, 250kV で 1.6, 200kV で 1.02, 150kV で 0.6, 125kV で 0.45, 100kV で 0.32, 70kV で 0.24, 50kV で 0.19

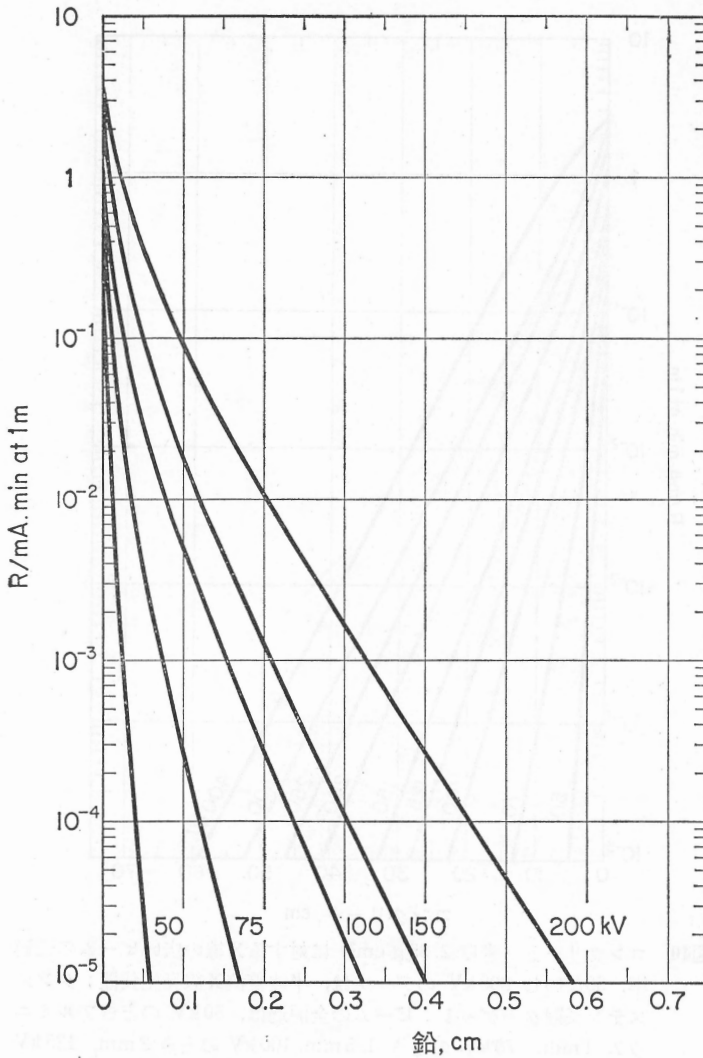


図41 鉛（密度 11.35 g/cm^3 ）に対するX線の広いビームの透過率. 定電圧X線発生装置; タングステン反射ターゲット; ビームの全透過はアルミニウム 2mm. 縦軸との交点は, 200kV で 3.3, 150kV で 2.1, 100kV で 1.1, 75kV で 0.7, 50kV で 0.3

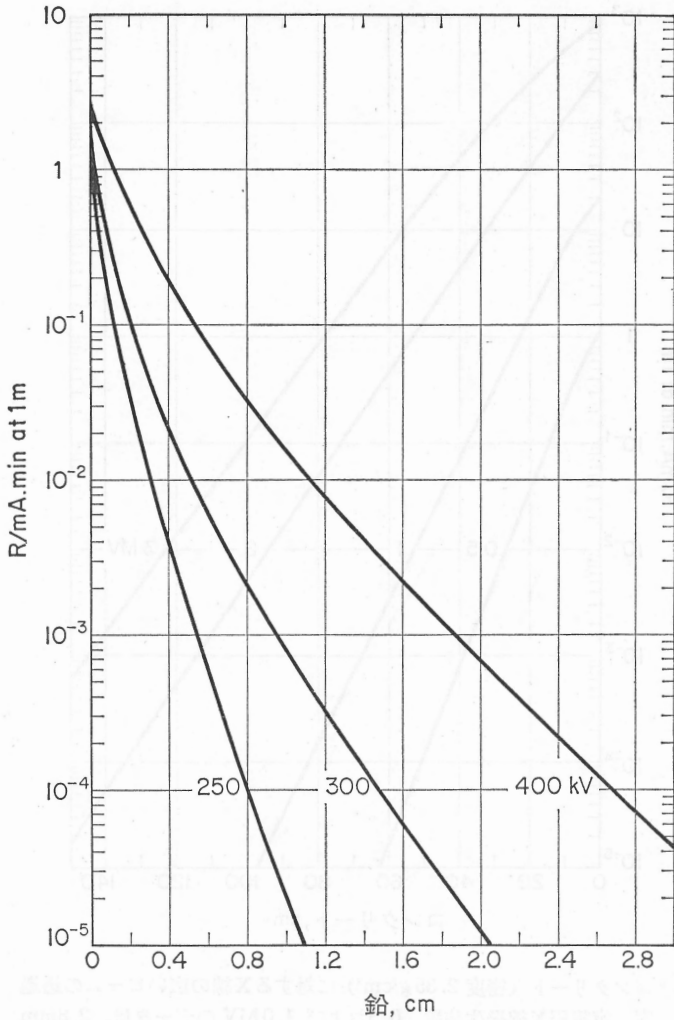


図42 鉛（密度 11.35 g/cm^3 ）に対するX線の広いビームの透過率. 250kVのデータは、定電圧X線発生装置；タングステン反射ターゲット；ビームの全透過は銅 0.5mm. 300ないし 400kVのデータは、定電圧X線発生装置；金反射ターゲット；ビームの全透過は銅 3mm. 縦軸との交点は、400kVで 2.7, 300kVで 1.3, 250kVで 1.9

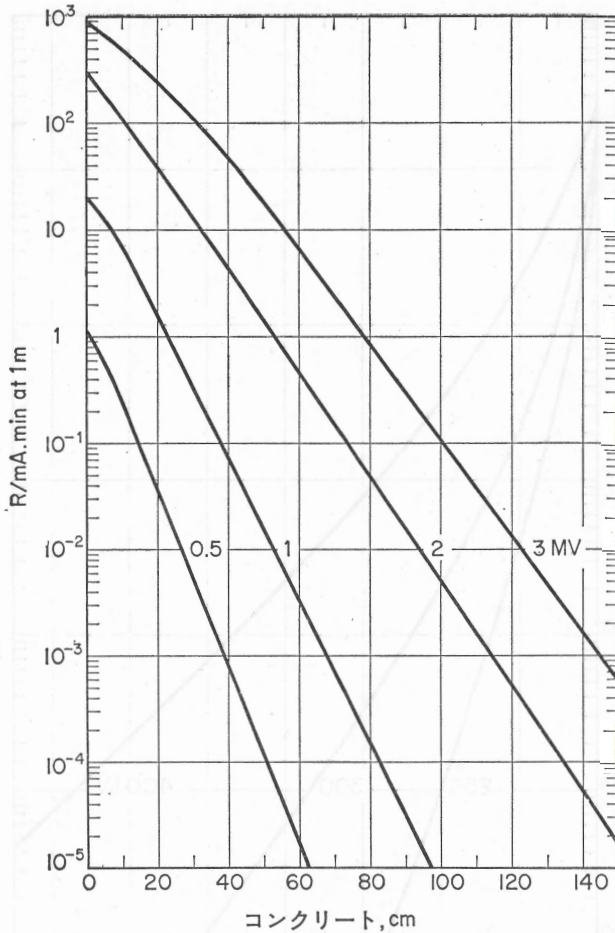


図43 コンクリート（密度 2.35g/cm^3 ）に対するX線の広いビームの透過率。定電圧X線発生装置。0.5および1.0MVのデータは、2.8mmのタングステン透過ターゲットに、銅2.8mm、水18.7mm、黄銅2.1mmのビーム透過が加わったもの。2MVのデータは、高原子番号透過ターゲット；ビームの全透過は鉛当量6.8mm。3MVのデータは、金透過ターゲット；ビームの全透過は鉛当量11mm。縦軸との交点は、3MVで850、2MVで300、1MVで20、0.5MVで1

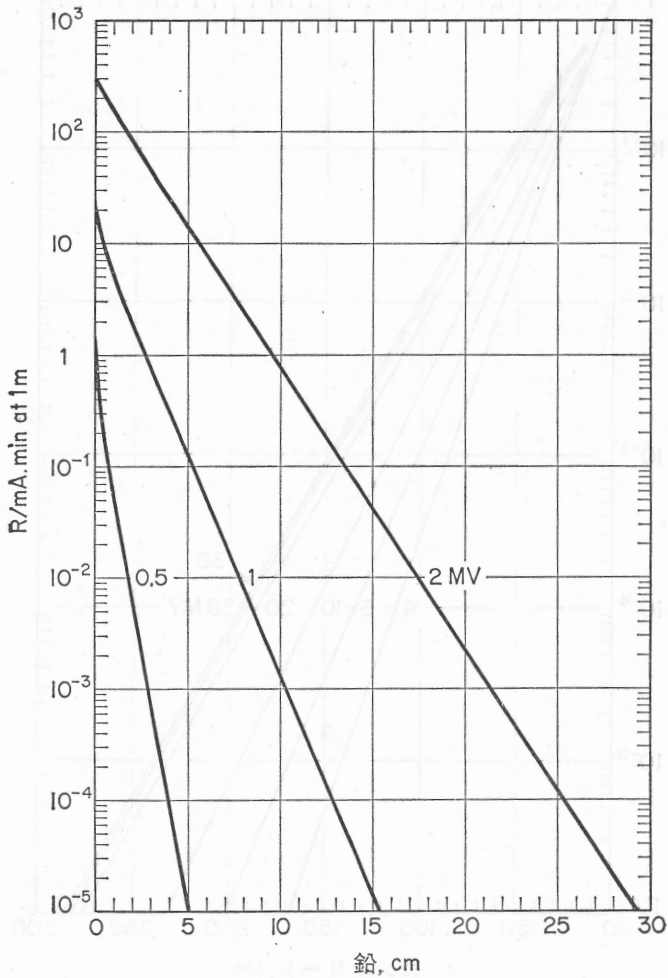


図44 鉛 (密度 11.35g/cm³) に対するX線の広いビームの透過率。定電圧X線発生装置。0.5 および 1.0MV のデータは、2.8mm のタンダステン透過ターゲットに、銅 2.8mm、水 18.7mm、黄銅 2.1mm のビーム透過が加わったもの。2MV のデータは、高原子番号透過ターゲット；ビームの全透過は鉛当量 6.8mm。縦軸との交点は、2MV で 300, 1MV で 20, 0.5MV で 1

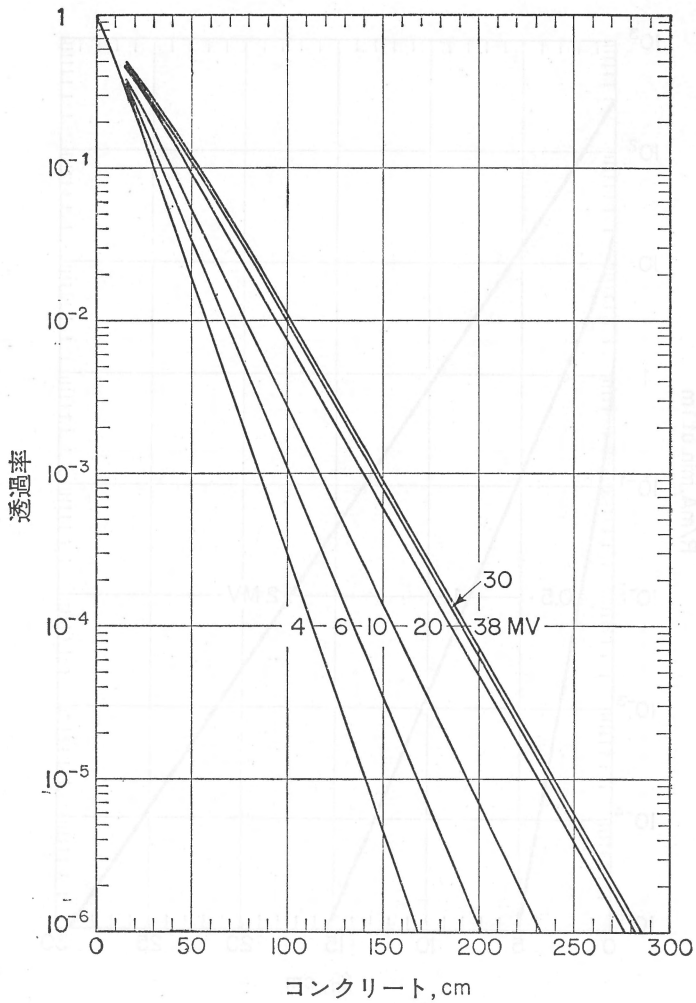


図45 コンクリート (密度 2.35 g/m^3) に対するX線の広いビームの透過率. 4MV のデータは, 直線加速装置; 1mm の金ターゲットに, ビームのエネルギー平坦化のためアルミニウム 20mm を加えたもの. 6MV ないし 38MV のデータは, ベータトロン; ターゲットおよび透過に関する記述はない. 38MV の曲線は 200MV まで使用してよい (Miller and Kennedy, 1956)

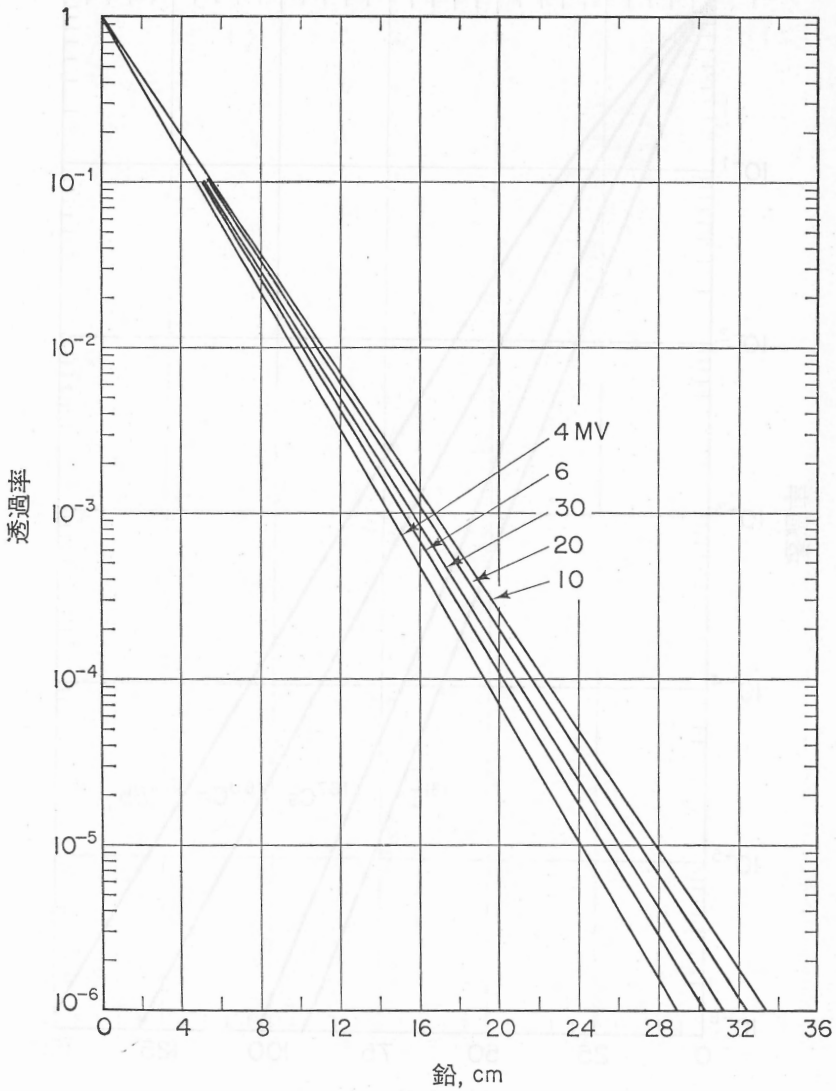


図46 鉛 (密度 11.35 g/cm^3) に対するX線の広いビームの透過率。
 ベータトロン; 白金線ターゲット $2 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$; ビーム汙過なし。
 もっと高い電圧については, Miller and Kennedy (1956) を参照

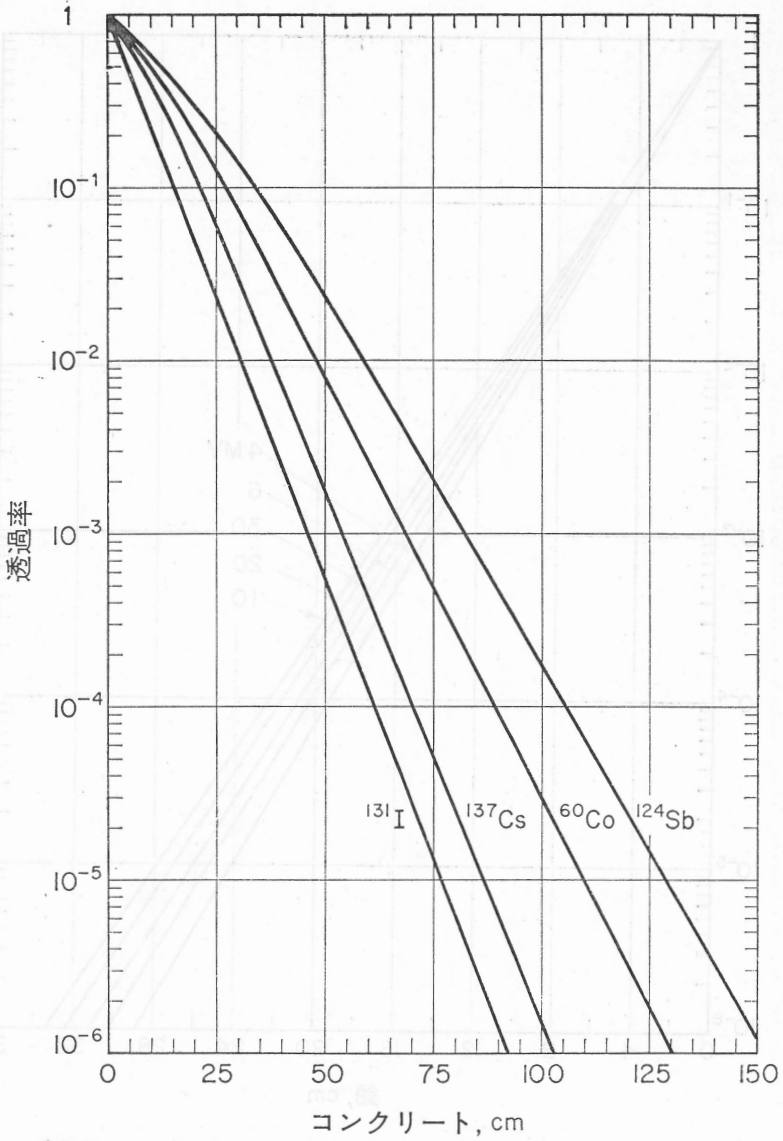


図47 種々の放射性核種からの γ 線の広いビームの、コンクリート（密度 2.35g/cm^3 ）中における透過率

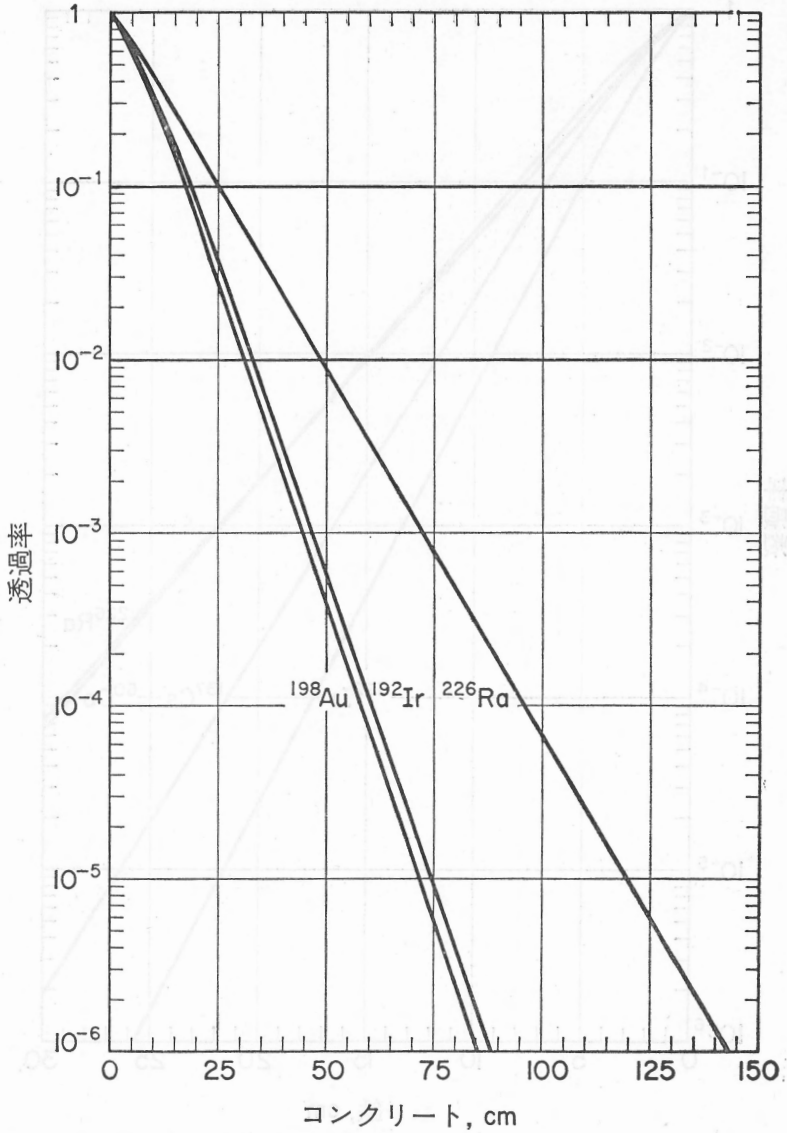


図48 種々の放射性核種からの γ 線の広いビームの、コンクリート（密度 2.35g/cm^3 ）中における透過率

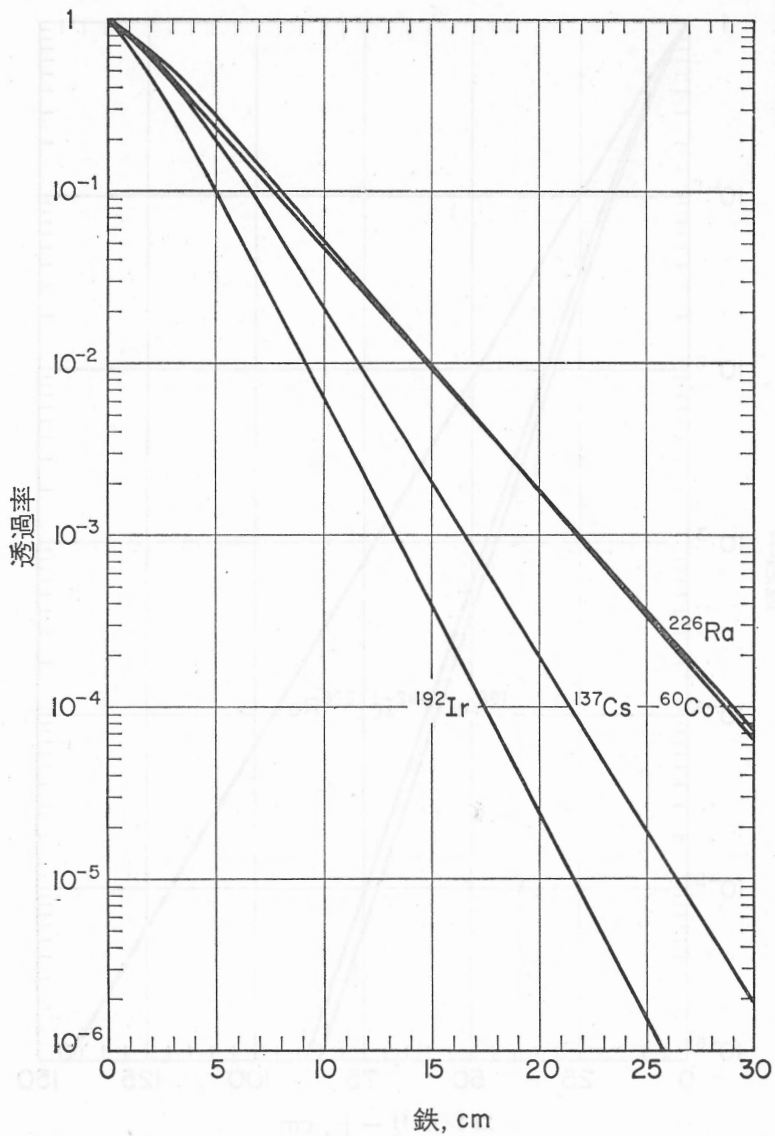


図49 種々の放射性核種からのγ線の広いビームの、鉄(密度7.8g/cm³)中における透過率

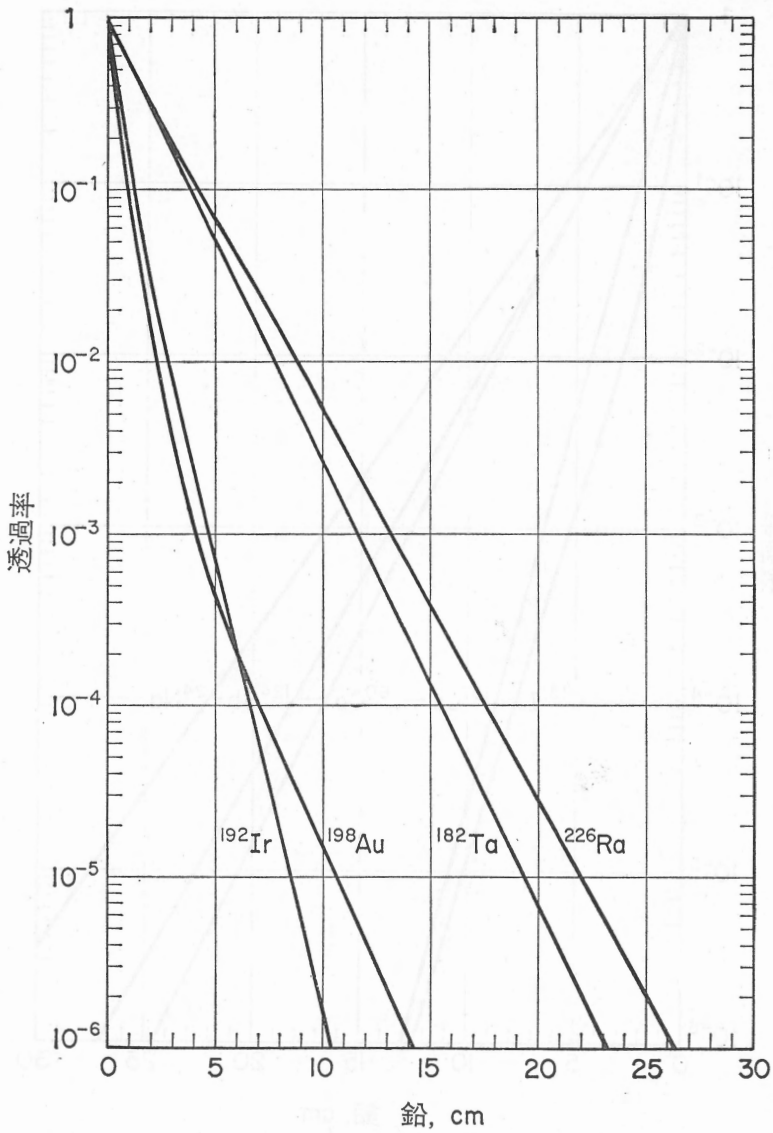


図50 種々の放射性核種からの γ 線の広いビームの、鉛(密度 11.35g/cm^3)中における透過率

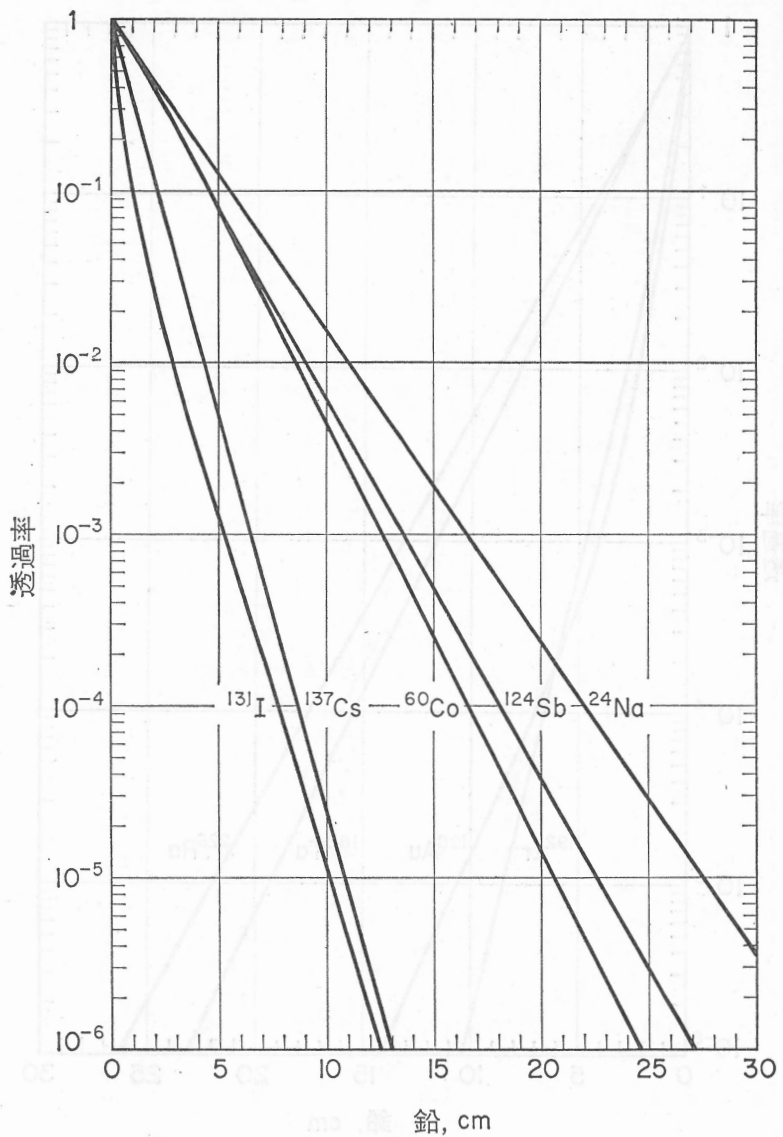


図51 種々の放射性核種からのγ線の広いビームの、鉛 (密度 11.35 g/cm³) 中における透過率

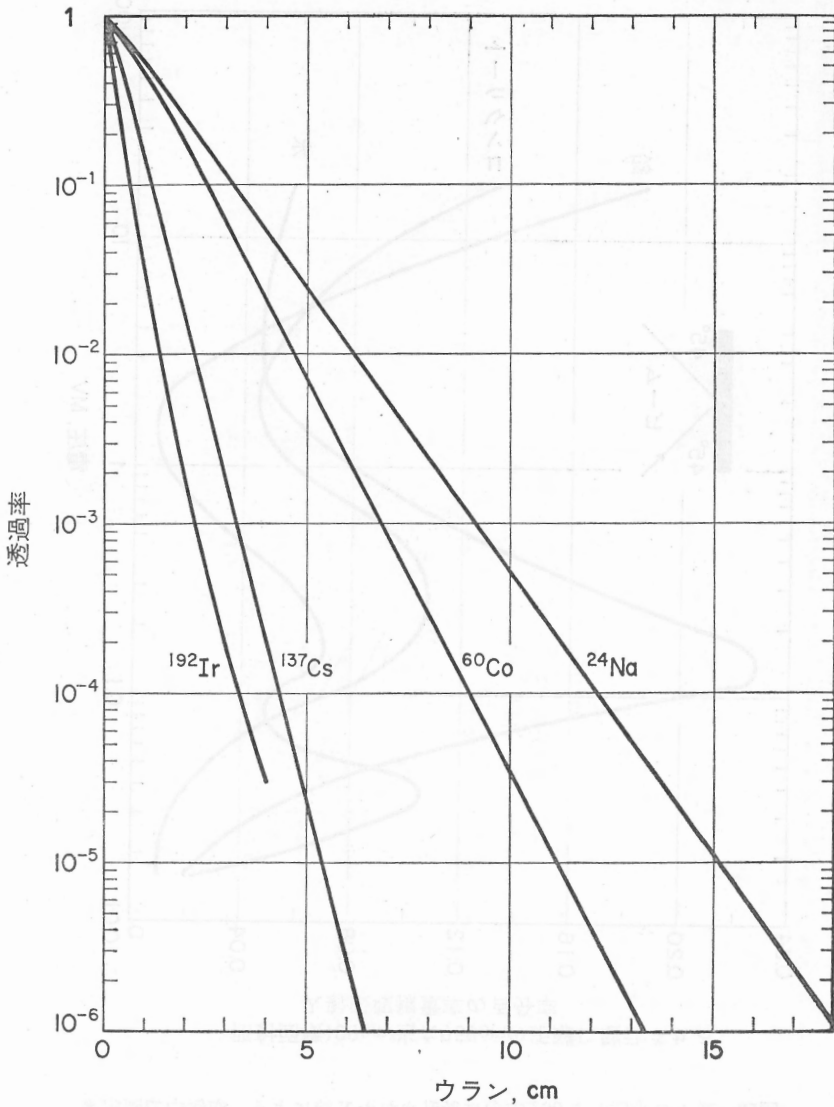


図52 種々の放射性核種からの γ 線の広いビームの、ウラン（密度 18.9 g/cm^3 ）中における透過率。ウランについては、付録11の本文中の注意を参照

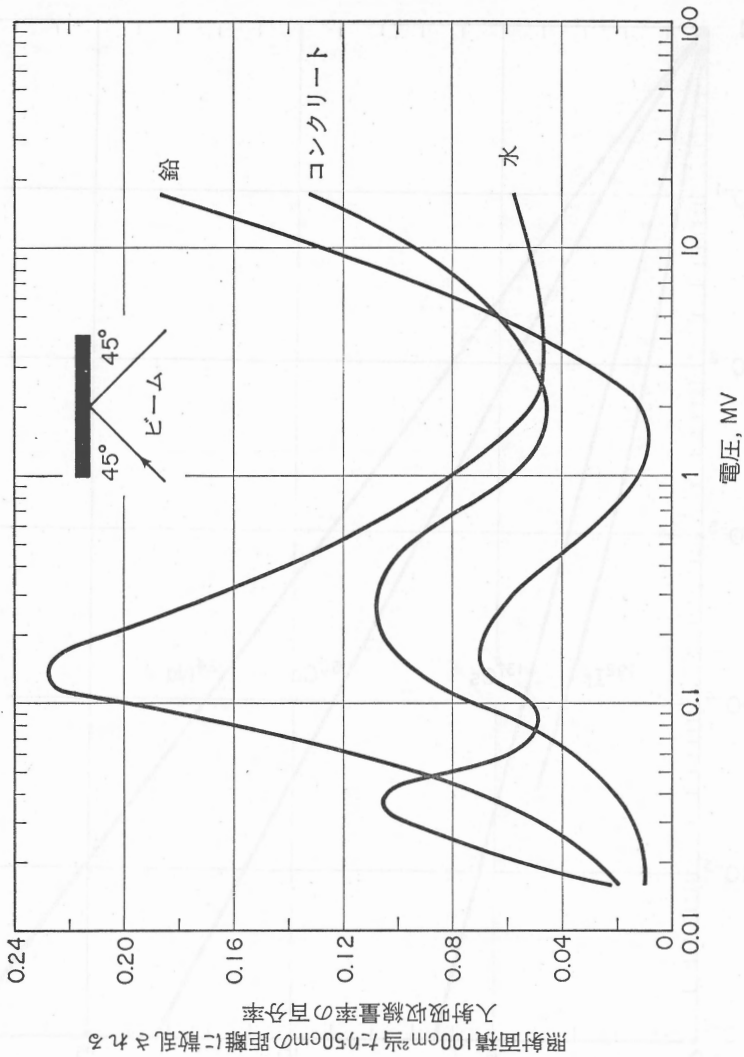


図53 種々の物質から90°方向に散乱されたX線による、空气中で測定された吸収線量率の、電圧による変化。ビームは厚い散乱体に斜めに入射。入射点における自由空气中の一次ビームの測定値に対する散乱の百分率を示す。

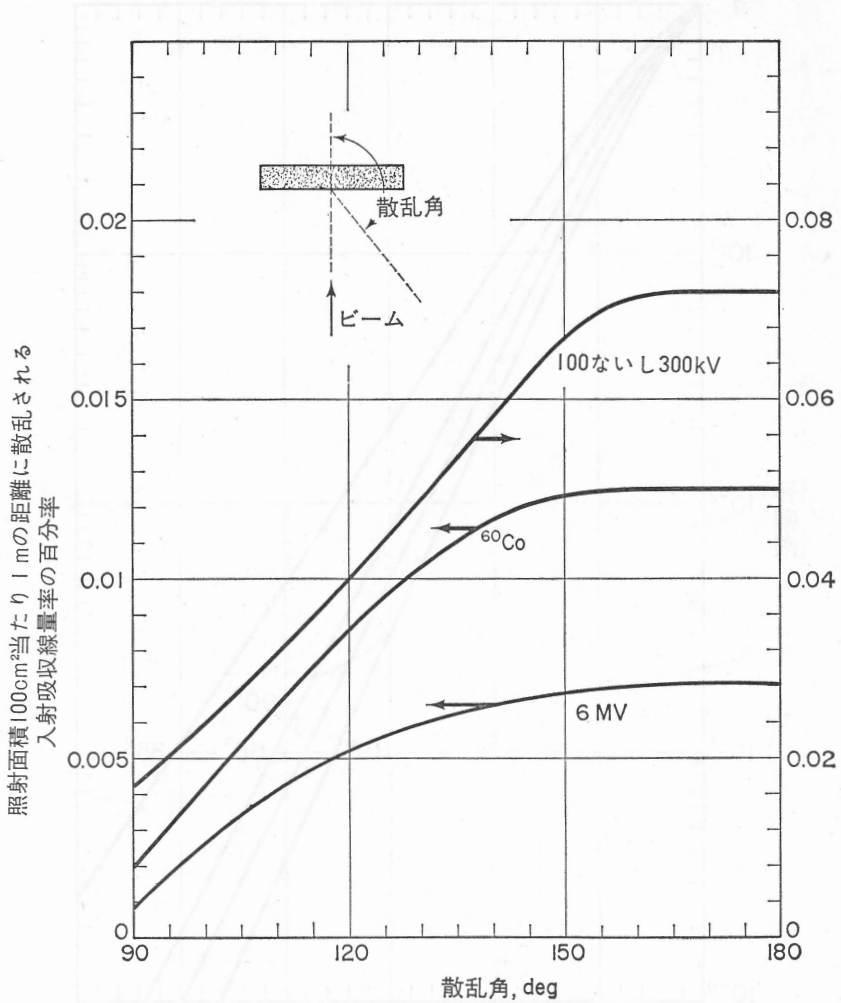


図54 コンクリート遮蔽体に直角に入射するX線および γ 線の発散ビームの散乱の様相。入射点における自由空気中の一次ビームの測定値に対する散乱の百分率を示す。

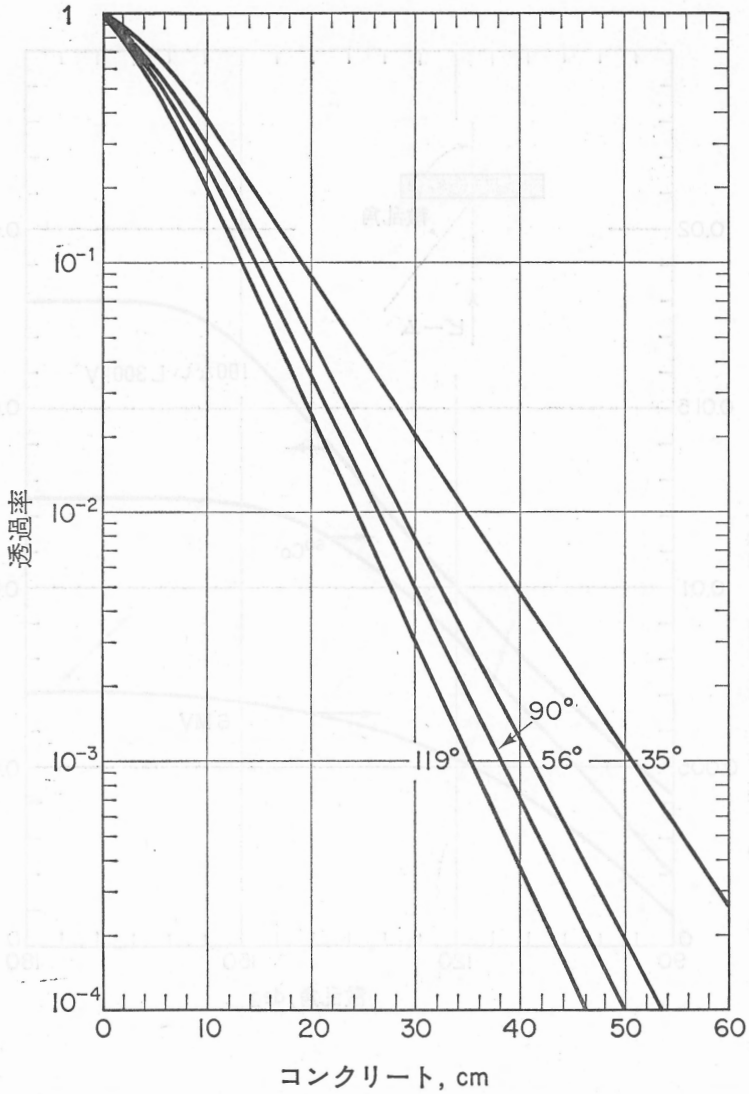


図55 斜めに置かれたコンクリート壁から種々の角度で散乱された ¹³⁷Cs γ 線の広いビームの、コンクリート（密度 2.35 g/cm³）中における透過率

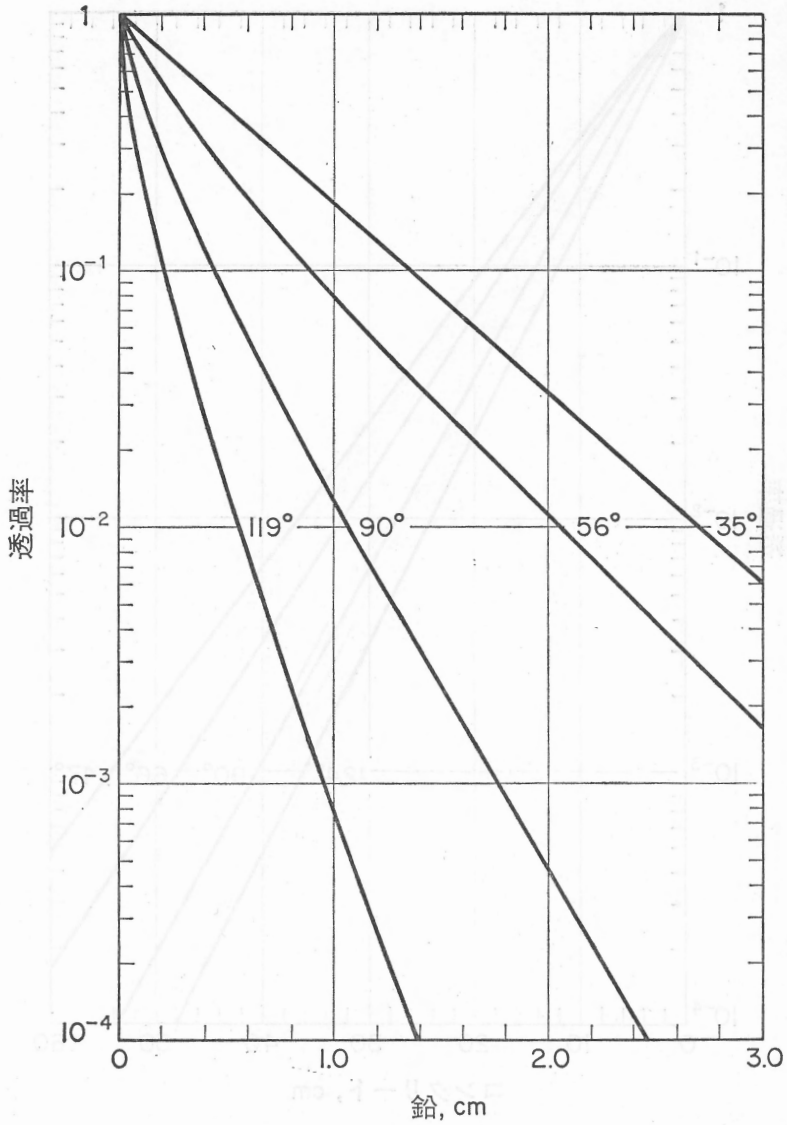


図56 斜めに置かれたコンクリート壁から種々の角度で散乱された ^{137}Cs γ 線の広いビームの、鉛 (密度 11.35g/cm^3) 中における透過率

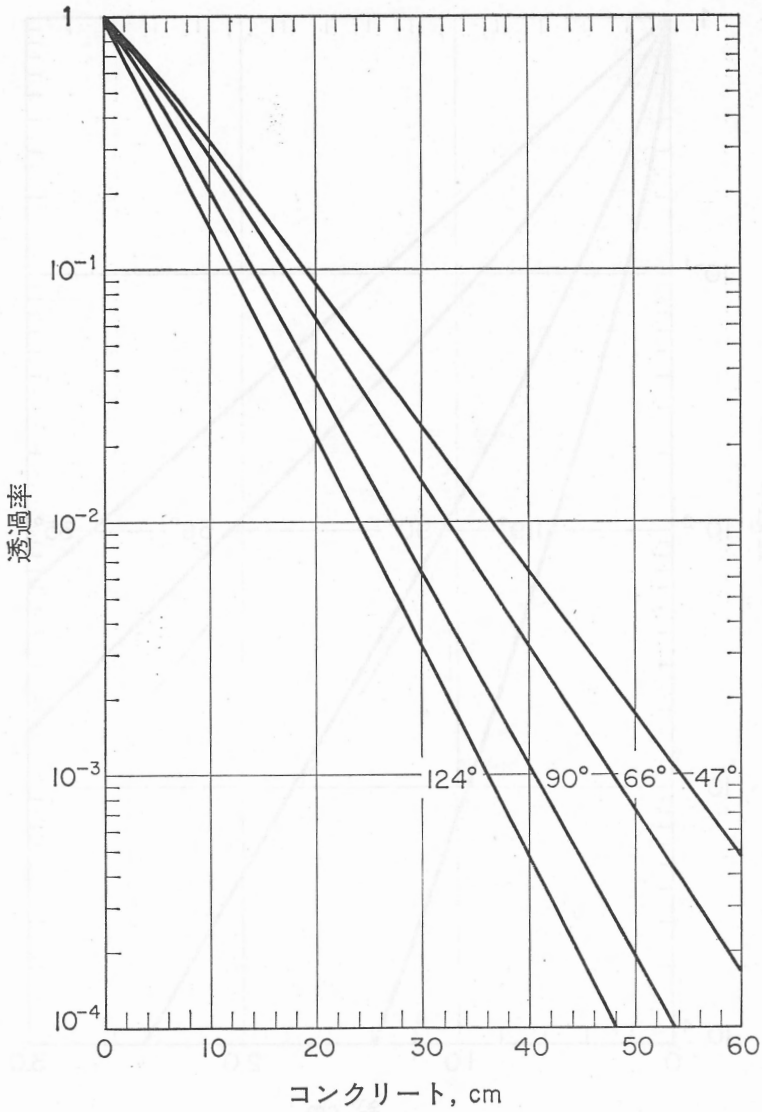


図57 患者を模擬したファントムから種々の角度で散乱された ^{60}Co γ 線の広いビームの、コンクリート (密度 2.35g/cm^3) 中における透過率

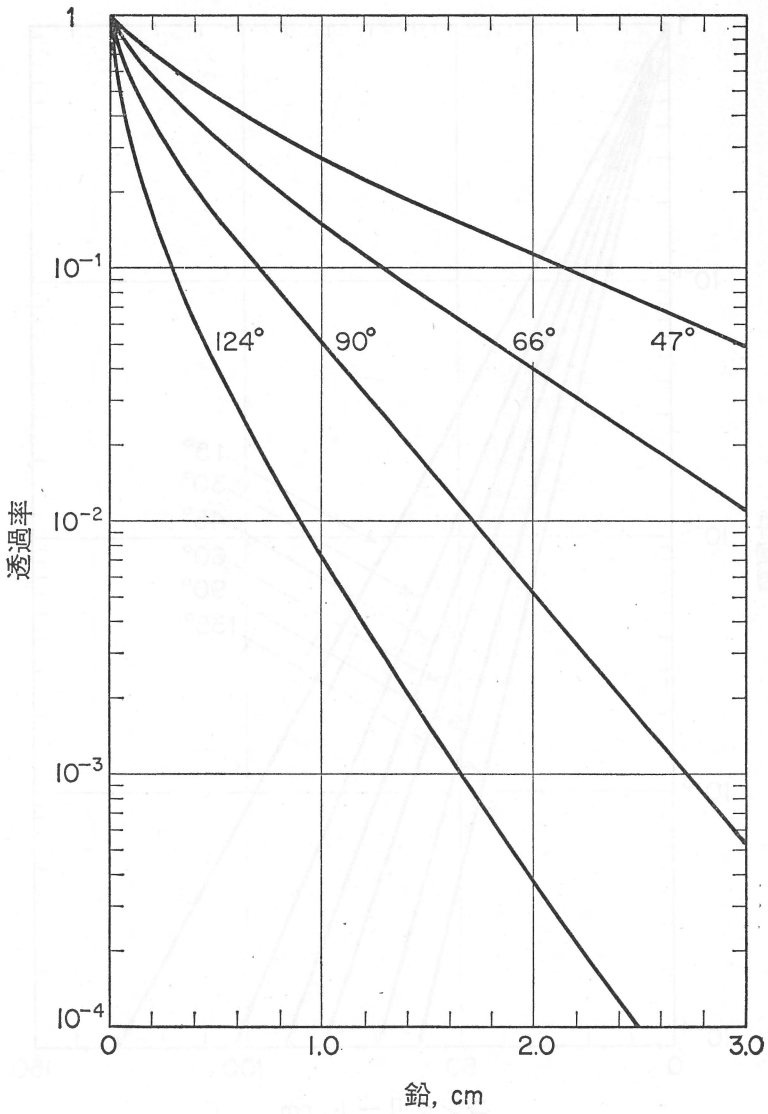


図58 患者を模擬したファントムから種々の角度で散乱された ^{60}Co γ 線の広いビームの、鉛 (密度 11.35g/cm^3) 中における透過率

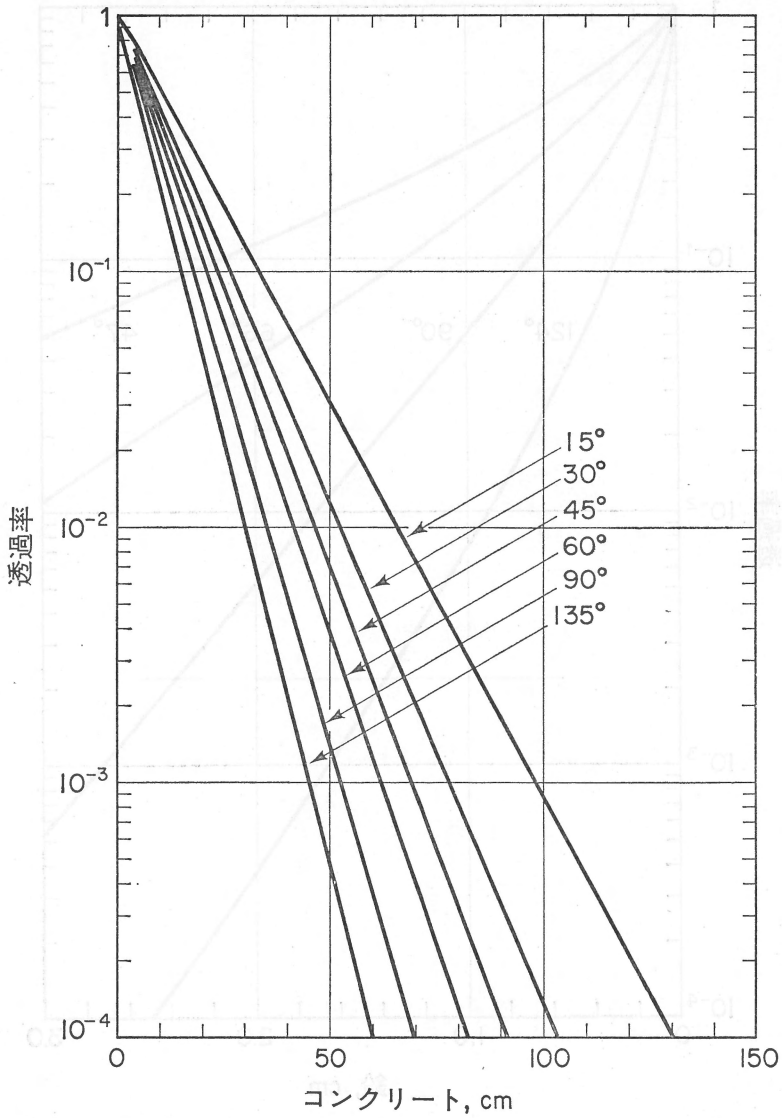


図59 患者を模擬したファントムから種々の角度で散乱された 6MV X線
の広いビームの、コンクリート (密度 2.35 g/cm³) 中における透過率

体外線源からの電離放射線に
対する防護のためのデータ

¥550

昭和49年7月15日 発行

編集
および
発行

法人
財団

日本アイソトープ協会
仁科記念財団

〒113 東京都文京区本駒込二丁目28番45号
電話 東京 (03) 946-7111 (代表)

印刷・製本 日新印刷(株)