

3 MeVをこえる電磁放射線,  
ならびに電子,中性子  
および陽子に対する防護

(1962年採択, 1963年改訂)

社団法人 日本放射性同位元素協会  
財団法人 仁科記念財団

本冊子は ICRP の了解のもとに、仁科記念財団と日本放射性  
同位元素協会が翻訳したものである。

国際放射線防護委員会勧告

3 MeV をこえる電磁放射線，ならびに  
電子，中性子および陽子に対する  
防護に関する専門委員会 IV (1953  
-1959) の報告

(1962年採択，1963年改訂)

**ICRP Publication 4**

社団法人 日本放射性同位元素協会

財団法人 仁科記念財団

Nishina Memorial Foundation | Japan Radioisotope Association

Japanese Translation Series of ICRP Publications  
*Publication 4*

本書の翻訳は下記の方々によりなされたものである。  
This translation was undertaken by the following colleagues.

翻 訳*	Translated by
濱田 達二	Tatsuji HAMADA

校閲協力*	Peer-Reviewed by
伊澤 正實	Masami IZAWA (ICRP, C2)
田島 英三	Eizo TAJIMA

責任編集	Supervised by
山崎 文男	Fumio YAMAZAKI
玉木 英彦	Hidehiko TAMAKI

\* 推定 (presumed)

# 目 次

## 専門委員会Ⅳの報告

まえがき	(1)
報 告	(3)
A. 緒 論	(3)
B. RBE と $QF$	(4)
C. 許容線束密度	(7)
(a) 中性子および陽子（ただし熱中性子および中間エネルギー中性子を除く）	(7)
(b) 熱中性子および中間エネルギー中性子	(9)
(c) 3 MeV をこえる電磁放射線，および電子	(10)
D. 作業条件およびモニタリングに関する原則	(10)
(a) 一般論	(10)
(b) モニタリング	(10)
E. 装置および作動条件に関する勧告	(12)
(a) 一般的考慮	(12)
(b) 施設（構造上の詳細）	(13)
(c) 施設（作動上の詳細）	(15)
付 録	(19)
I 電離密度と線エネルギー付与	(19)
II 電磁放射線の吸収のデータ	(21)
III 粒子の飛程	(27)
IV 中性子の吸収のデータ	(27)
参考文献	(31)



## ま え が き

この報告は W. V. Mayneord 教授を委員長として作業が開始され、H. E. Johns 教授を委員長とする1956—1959年専門委員会Ⅳの手で草案ができあがった。

Bo Lindell, H. H. Rossi 両博士が、1958年の出版専門委員会の委員としてこの最初の草案の改訂にあたって示された協力を深く感謝する。最終の編集は B. M. Wheatley 博士によって行なわれたが、その間、この報告はこの専門委員会の1959—1962年の委員によって検討が加えられた。

この出版物には国際放射線防護委員会勧告の再録も含まれている。\*

### 専門委員会の委員構成

(3 MeV をこえる電磁放射線、ならびに電子、中性子および陽子に対する防護)

1953—1956

W. V. Mayneord, 委員長 (イギリス)

L. H. Gray (イギリス)

H. E. Johns (カナダ)

H. W. Koch (アメリカ)

P. Lamarque (フランス)

J. S. Laughlin (アメリカ)

J. S. Mitchell (イギリス)

B. Moyer (アメリカ)

C. A. Tobias (アメリカ)

F. Wachsmann (ドイツ)

---

\* 訳注：国際放射線防護委員会勧告(1959年修正, 1962年改訂) ICRP Publication 6 として邦訳出版されているので、本書では省略した。

1956—1959

- H. E. Johns, 委員長 (カナダ)  
J. S. Mitchell, 副委員長 (イギリス)  
L. H. Gray (イギリス)  
F. Herčík (チェコスロバキア)  
G. Joyet (スイス)  
H. W. Koch (アメリカ)  
J. S. Laughlin (アメリカ)  
W. V. Mayneord (イギリス)  
C. A. Tobias (アメリカ)  
M. Tubiana (フランス)  
F. Wachsmann (ドイツ)

1959—1962

- G. J. Neary, 委員長 (イギリス)  
J. W. Boag (イギリス)  
F. Herčík (チェコスロバキア)  
G. S. Hurst (アメリカ)  
H. E. Johns (カナダ)  
G. Joyet (スイス)  
H. W. Koch (アメリカ)  
J. S. Laughlin (アメリカ)  
C. A. Tobias (アメリカ)  
M. Tubiana (フランス)  
B. M. Wheatley (イギリス)  
K. G. Zimmer (ドイツ)

## 3MeVをこえる電磁放射線, ならびに電子, 中性子および陽子に対する防護に関する専 門委員会Ⅳの報告

### A. 緒 論

(1) 体外放射線について勧告される最大許容線量は ICRP Publication 6 の第4部に記されており, これはこの報告書に再録されている。\*

(2) 高エネルギーX線および重粒子(中性子と陽子を含む)の使用に伴う危険性は, もつと低い電圧で発生するX線に伴うものと多くの点で似ているけれども, 別にくわしく論ずる必要のある特殊な危険および状況が存在する。そこで, これらの問題点を以下で考察する。この報告では, 電子, 量子エネルギー 3MeV をこえる電磁放射線, ならびにエネルギー 1000 MeV までの中性子と陽子を取り扱う。

(3) この報告で考察している電磁放射線のエネルギーの下限は3MeVであることに注意されたい。この値は国際放射線単位および測定委員会(ICRU)によって, レントゲン単位の使用されるべきエネルギー範囲の上限とみなされたものである。したがって, この値は専門委員会ⅢとⅣの活動範囲の間に論理的な区分を与えるものであった。この値で区分したことは, 大多数の放射性物質からの $\gamma$ 線の諸問題がわれわれの考察から除かれているという点でも便利である。しかしながら, 専門委員会Ⅲの報告\*\*中にある一般的な勧告の多くは高エ

\* 訳注: 国際放射線防護委員会勧告(1959年修正, 1962年改訂)ICRP Publication 6として邦訳出版されているので, 本書では省略した。同書35—73ページを見られたい。

\*\* ICRP Publication 3. Report of Committee III on Protection Against X-Rays up to Energies of 3MeV and Beta- and Gamma-Rays from Sealed Sources(1960). 邦訳: エネルギー 3 MeV までのX線ならびに密封線源からの $\beta$ 線および $\gamma$ 線に対する防護, ICRP シリーズ3, 日本放射性同位元素協会, 仁科記念財団, 1962.

( 4 )

エネルギー放射線にも適用できるものであるから、読者はその報告を参照されたい。

## B. RBE と QF

(4) 委員会の勧告中に規定されているすべての線量はレム\*であらわされる。このことは吸収線量(ラドであらわされる)に適切な荷重因子を乗ずべきことを意味する。以前はこの荷重因子を“RBE”と名づけた。しかしこの用語を放射線生物学にも放射線防護のためにも用いることは、「RBEに関する ICRP/ICRU専門委員会の報告」(*Health Physics*, Vol. 19, No. 4(1963))\*\*にくわしく論じられているように、あるいくつかの問題を提起している。

(5) 委員会はここに、国際放射線単位および測定委員会(ICRU)の報告 10a<sup>(4)</sup>からとった次の文章を認める：

“RBE”線量という用語は、委員会(ICRU)の過去の刊行物中では定義のリストには含まれず、単に“認められた記号”として述べられていたにすぎなかった。委員会はまた1959年報告中で、“RBE”という同一の用語を放射線生物学にも放射線防護にも使用することに対する疑念を表明もした。委員会はここに用語 RBE は放射線生物学だけに使用すること、および、放射線防護の目的で被曝者がうける照射をすべての電離放射線について共通のものさしで表現できる1つの量を得るために、吸収線量とかけあわすべき、線エネルギー付与(LET)に依存する係数には別の名称を使用すべきであることを勧告する。この係数に対し勧告される名称は、線質係数(quality factor, QF)である。他にもいくつかの係数が考えてある。すなわち、分布係数(distribution factor,

---

\* 本書において“線量”という言葉を使用したときには、今は“線量当量”であると理解されたい(以下の議論参照)。

\*\* 訳注：邦訳、国際放射線防護委員会ならびに国際放射線単位および測定委員会に対する RBE 専門委員会の報告、ICRP シリーズ別冊 1、日本放射性同位元素協会、仁科記念財団、1964。

DF) は、体内に沈着した同位元素の不均等分布にもとづく生物効果の修正をあらわすのに用いられる。吸収線量といろいろな修正係数との積は線量当量 (dose equivalent, DE) とよばれる。ICRU と ICRP の間の討議の結果、次のように成文化することに意見の一致をみた。

#### 線量当量

1. 防護の目的に対しては“線量当量”(DE) と名づける1つの量を定義するのが有用である。

2. (DE) は、吸収線量D, 線質係数(QF), 線量分布係数(DF), およびその他の必要な修正係数の積と定義される。

$$(DE) = D (QF) (DF) \dots$$

3. 線量当量の単位はレムである。線量当量はラドであらわした線量に適切ないくつかの修正係数を乗じたものと数値的に等しい。

(6) 放射線防護の計算上用いべき QF の実際の値について、委員会は1955年に発表した“RBE”値<sup>②</sup>を認めることにする。これらの値は、被曝に関する他の因子とは無関係に、放射線の LET と関係づけられている。放射線の線質を特性づけるための基本的なパラメーターは LET。(すなわち“阻止能”)とすることを勧告する。LET。は電磁放射線または中性子によって運動をはじめた荷電粒子、または放射線源から発生した荷電粒子(α線、β線など)の、単位距離あたりのエネルギー損失と定義されるものであり、すなわちδ線を別の飛跡としては数えていない。DE (レムであらわされた) は、任意の LET で与えられた線量とその LET に該当する QF 係数および委員会が勧告したその他の係数、たとえば“n”係数(以下の議論参照)の積を加え合わせて得られる。この手続を簡略化することは、その結果、真の DE を過小評価することにならない場合には許される。このような簡略化の一例は、すべての高速中性子に対して QF のただ一つの値を用いることである。

(7) 放射線防護の計算のために勧告された QF と LET の関係は次のとおりである。

表 I LET—QF の関係

LET <sub>∞</sub> (keV/μ水中)	QF
3.5 以下	1
3.5 — 7.0	1 — 2
7.0 — 23	2 — 5
23 — 53	5 — 10
53 — 175	10 — 20

(8) 実際上は、X線およびγ線に対するQFは1とする。電子に対しては、非常に低いエネルギーの場合にのみ1より大きい。

(9) 実際的なDEの問題の多くは、中性子とγ線の混合被曝による危険の評価の際におこる。中性子エネルギーの関数としてあらわされた中性子のQFは10MeVまでの中性子エネルギーに対して算出されている<sup>(9)</sup>。したがって、中性子のエネルギー分布がわかっているならば、それに該当するQFを中性子による吸収線量に乗じてDEを得ることができる。もし中性子エネルギーがくわしくはわかっていないならば、中性子による吸収線量とγ線による吸収線量とを別々に算出しなければならない。中性子線量を10倍した値と、γ線線量を1倍した値との合計がDEの上限と考へ得る。最後に、最も簡単なやり方は、全吸収線量をはかり、これに10というQFを単に乗ずることである。この方法は最も簡単ではあるが、10倍にもおよぶような過大評価をもたらすかもしれない。

(10) 重い反跳核ではLETは175keV/μよりも大きいことがある。しかし、この場合でもQFはおそらく20をこえないであろうという実験的証拠がある。そこで、重い反跳核に対してはこの値が適切であると考えられる。

(11) 高エネルギーにおいては、放射線生物学の実験的研究<sup>(4,5)</sup>で得られた値をそのまま防護の問題に適用することはできないこともあろう。というのは、全身照射と小さい試料の照射の場合との、線量ならびにLET分布の物理

的な差を考へに加えなければならないこと、および、この2つの場合の線量レベルの大きさが桁ちがいであることのためである。

### C. 許容線束密度

#### (a) 中性子および陽子（ただし熱中性子および

#### 中間エネルギーの中性子を除く）

(12) 中性子および陽子の吸収線量は、広いエネルギー範囲にわたって、身体表面またはその近傍において最大となる<sup>(9)</sup>。水晶体や男性の生殖腺のようなあの種の決定臓器は身体表面の近傍にあるので、後に示す最大許容線束の勧告値は身体の表面における吸収線量と関連して決められる。身体のある限られた部分がコリメートされた放射線ビームに曝されるような状況のもとでは、この規準はあてはまらないであろう。このようなときには、最大許容線束に被曝することは、その被曝に対して決定臓器となるような身体の特定の部分に、最大許容吸収線量より少ない線量を与えることになる。専門委員会Ⅳは、最大許容線束のただ一つの表によっては主委員会の勧告をせまくしか解釈できず、限られた被曝あるいは一様でない種々の型の被曝に対する諸因子を包含した複数の表が望ましいことを承知している。しかし、生物効果および中性子線量測定法の現在のデータからして、十分に信頼のおけるやり方で、より精密な計算をすることはできない。

(13) 一次粒子が身体に吸収されると、一次粒子のエネルギーより低いエネルギーをもつ数多くの二次粒子をつくり出す。従って局所的な生物効果は、観測しているその点にすべての方向から到達する数多くの粒子の効果の総和によるものである。これらの二次粒子のLETは一般に一次粒子のそれと異なるであろうし、個々の粒子のLETは勿論その飛跡に沿って変化するであろう。従っ

て  $QF$  は吸収線量に寄与する種々の粒子の LET の荷重平均によってきまる。

図 1 は中性子と陽子に対する  $QF$  の、現在得られる最善の推定値を示す<sup>(3,6)</sup>。

(14) 組織線量と入射粒子束との対応は、すべての粒子のエネルギー損失から生ずる線量当量を、問題としている体積内について積分することによって計算することができる。通常この体積は、垂直入射で照射されるファントムの表面の近傍にとる。図 2 は線量率 2.5 mrem/時に対応する粒子束を示す。この粒子束の値は遮蔽を通過する結果として二次粒子と平衡にあると仮定したときの、ビーム中の一次粒子の値である。これらの粒子束に週 40 時間の割合で被曝すると 50 週に 5 rem の線量となる。図 2 は 10 MeV までのエネルギーに対しては Snyder<sup>(3)</sup> の結果を示し、10 MeV 以上のエネルギーに対しては、Neary

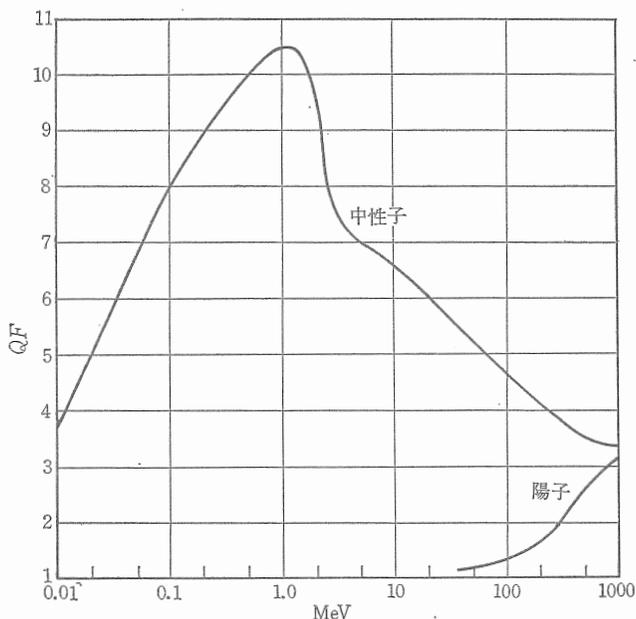


図 1 種々のエネルギーの中性子および陽子に対する  $QF$  値。曲線は Snyder<sup>(3)</sup> と Neary および Mulvey<sup>(6)</sup> の表の値をもとにして、なめらかに引いたものである。

と Mulvey<sup>(6)</sup>の結果を用いた。高エネルギーの場合には、二次粒子の平均自由行程は一次粒子のそれに匹敵するほどの長さをもつので、二次粒子が入射ビームの中に既に存在するか否かに依って一定の吸収線量に対応する一次粒子束の異った値が導き出される。最も限定的であるのは、二次粒子が一次ビームと平衡状態にあるような場合——例えば遮蔽を通過する結果——であろう。計算の示すところによると、遮蔽の厚さが平均自由行程より厚い場合には、それをつくっている材料はあまり重要ではない。

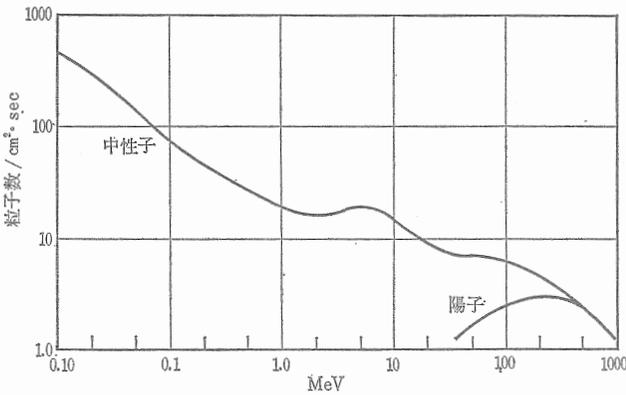


図2 線量率 2.5 mrem/時に相当する粒子束密度。粒子束の値は、遮蔽を通過する結果、二次粒子と平衡にあると仮定したときのビーム中の一次粒子の値である。曲線は Snyder<sup>(3)</sup> と Neary および Mulvey<sup>(6)</sup> の表の値をもとにして、なめらかに引いたものである。

(b) 熱中性子および中間エネルギー中性子

(15) 図2に含まれている中性子より低いエネルギーの中性子はその大部分の線量を中性子吸収によって与える。最も重要な二つの過程は  $H(n, \gamma)D$  と  $N^{14}(n, p)C^{14}$  反応である。

便宜のため、図2のデータとつながるように、表Ⅱには中間エネルギー範囲より上の 0.02 MeV 中性子のデータをも含ませてある。

表 II QF 値および 2.5 mrem/時に相当する粒子束の値  
(Snyder<sup>(3)</sup>による)

中性子エネルギー(MeV)	熱中性子	0.0001	0.005	0.02
QF	3	2	2.5	5
2.5 mrem/時に相当する 中性子数/cm <sup>2</sup> /sec	670	500	570	280

(c) 3 MeV をこえる電磁放射線, および電子

(16) 主委員会の勧告を解釈するにあたり, ICRU の諸報告<sup>(1,7)</sup>は有用である。光壊変過程は, 吸収線量に少しの寄与を加え, 遮蔽問題に影響するほどの中性子をつくり出すことがある(付録Ⅳ参照)。

D. 作業条件およびモニタリングに関する原則

(a) 一般論

(17) 委員会の勧告(この報告に再録), 特にそのD章を参考とすべきである。\*

(18) 各施設に放射線防護担当者を任命すべきであり, その任務は危険について職員および訪問者の注意を喚起すること, および適切な安全対策がとられているかどうかを見ることである。

(19) 施設の日常作業の開始は, 完全なサーベイが行なわれてその施設が満足すべきものとわかるまでは, 延期されなければならない。

(b) モニタリング

(20) 放射線防護担当者は, 加速器の運転に関係のあるすべての職員の1人

\* 訳注: 国際放射線防護委員会勧告(1959年修正, 1962年改訂) ICRP Publication 6 として邦訳出版されているので, 本書では省略した, 同書35—37ページを見られたい。

1人が、フィルムバッジ、ポケット線量計、あるいはその他の適切な方法、たとえば中性子に対しては中性子用飛跡乾板で、連続的にモニターされることを要求しなければならない。

(21) 職員は、放射線の危険の存在が予想される区域には、その区域のモニタリングがすみ、放射線防護担当者が適切な作業条件を指定するまでは、だれも立ち入ってはならない。

(22) この報告で扱われているすべての放射線を測定することのできる単一の計器は存在しない。したがって本質的に大切なことは、その方面の専門家が、与えられた施設でどんな放射線の発生が予想されるかを決定しなければならないが、その結果によって測定器を指定しなければならないということである。その専門家が決定するにあたっては、通常の作業状況ばかりでなく、異常な状況、あるいは誤操作の状況も考えに入れるべきである。遮蔽用物質如何で放射線のスペクトルばかりでなく種類も変わり得ることを念頭におくべきである。

(23) 電離箱を用いる場合には、壁の厚さと組成、充填ガスの種類と圧力が測定すべき放射線の型に適したものでなければならない。

(24) すべてのモニタリング用計器は校正すべきであり、その不変性をたしかめる何等かの簡単な方法を工夫すべきである。校正は実際に遭遇する状況に合わせたものであるか、または、エネルギー—応答曲線の形にして特定の状況に適した校正係数をみちびき得るようにすべきである。

(25) この報告で扱っているいろいろな放射線を測定する技術は数多いから、えらんだモニタリング装置が目的にとり適切かつ十分なものであることをたしかめるには、文献<sup>(3,7-17)</sup>を参考にすべきである。

(26) 適切と思われるときは、エリアモニタリングは、誘導放射能により生ずる空気その他の汚染の危険性の測定を含むべきである。ある場合には、体外放射線の危険性を生ずるのに十分な放射能が装置に誘導されることがあるので、これを評価すべきである。

## E. 装置および作動条件に関する勧告

### (a) 一般的考慮

#### X線発生装置

##### (27) 空間および距離の考慮

X線ビームの方向づけは、可能な場合いつでも制限すべきである。高エネルギーX線は圧倒的部分がかなり狭い円錐内につくられ、高エネルギー放射線の二次放射線も大部分前方に放出される。加速器のX線ターゲットから作業員のいるところまでの距離はできるだけ大きくとって、一次ビームの強度が距離とともに減ることを利用し、防護障壁の必要な厚さを減らすことができるようにすべきである。どの方向へのビーム強度も、近似的にターゲットからの距離の二乗に反比例する。

##### (28) 実用的な防護用材料

永久的な施設のための最も経済的な材料としてコンクリートを選ぶことを勧告する。スペースが貴重であって、普通のコンクリートで与えられるよりも大きな減弱が必要である場合には、コンクリートに原子番号のもつと高い材料（例えば屑鉄、鉄鉱石、バリウム鉱石）を均一に分布するように混入してもよい。

##### (29) 必要な遮蔽体の厚さ

遮蔽の厚さは、付録Ⅱに概説した方法に従って計算することができる。

#### 電子線発生装置

(30) 電子のビームをつくる加速器の遮蔽に使われる材料は、X線の発生を最小ならしめるように原子番号の低いものであるべきである。この注意を無視すると、そうとう大きなX線遮蔽問題をひきおこすことがある。経済、効率お

よび構造上の適応性の観点から、コンクリートの使用を勧告する。

(31) 電子ビーム中の線量率は極めて高いことがあり、一秒よりもずっと短い時間に致死効果を生じ得るということを銘記しなければならない。また、電子は容易に散乱されるものであるから、電子ビームが存在するどんな部屋の中にも入るべきではない。

#### 中性子および重粒子の発生装置

(32) 重粒子加速器はX線も発生するという事実注意到し、この放射線について特別に検査をすべきである。

(33) 水素を含んだ材料は通常最も実用的な中性子遮蔽体である。コンクリート、水およびワックスは水素を高い割合で含むので、高速中性子の良い減速材である。コンクリートは構築上の理由およびそれがまたX線遮蔽にも適した材料であるという理由から、一般に最も便利なものである。

(34) どんな状況のもとでも粒子ビームの道筋を直接に眼で見えて調整してはならない。白内障をおこす危険があるからである。

#### (b) 施設（構造上の詳細）

(35) ビームに曝されるどのような区域に対しても一次防護障壁が設けられなければならない。高エネルギー加速器を置く位置を、その一次ビームが地中に向かうように選ぶのが有利であることに注意すべきである。付録ⅡおよびⅣに与えられたデータは、個々の状況において必要とされる障壁の厚さを決定するのに役立つであろう。

(36) 建築請負業者に対し、コンクリート障壁が均質であることおよび指定された密度をもつことの必要性を銘記させることがきわめて望ましい。

(37) 放射線室の扉に対する遮蔽上の要求は、この扉を制御室へ通ずる迷路の末端におくことによって、軽減することができる。

(38) 加速器の制御装置のある区域は、放射線室から隔離しなければならない

い。

(39) 配管、配線およびルーバのために障壁にあけた孔は、そこから出てくる放射線が周囲の障壁を通して出てくるものより実質的に大きくはならないように、バッフルを備えていなくてはならない。

(40) 窓および扉は、それらに隣接する障壁部分に要求されているのと実質的に同程度の減弱を与えるものでなくてはならない。

(41) 扉のような構造物に鉛を用いる必要があるならば、それが自分の重さでクリープすることのないような仕方を取りつけないとなければならない。鉛は機械的損傷に対して保護されているべきである。

(42) 鉛の継目は、熔接あるいは焼きつぎすることが許される。ただし、継目の鉛当量はその鉛板に必要なとされている鉛当量とすくなくとも同じ大きさであることを要する。

(43) 異なる防護障壁のあいだの接合部においては、重ね合わせの幅は、厚いほうの障壁の厚さとすくなくとも同じ大きさでなければならない。

(44) ターゲットだけが放射線を出す唯一の源ではないことを銘記すべきである。電子加速器でも陽イオン加速器でも、ビームは通常真空箱の壁とか電極の支持棒とかのようなターゲット以外のものにあたる。陽イオン加速器においては、二次電子が加速器の中を逆の方向に進んで、真空箱の壁および電極にあたるさいに放射線を出すであろう。

(45) 実験装置を挿入するために防護障壁を切りとってある場所で加速器の周囲に放射線が漏れ出る可能性に対して注意が払われるべきである。電子ビームに対して大きな角度でターゲットから放出される放射線に対しても充分な防護がなされるよう留意すべきである。

(46) 放射線防護上の要求は、周囲の区域における居在の度合に大いに依存する。それゆえ、放射線施設は人のいる他の区域から実施できるかぎり遠く離して位置させるべきである。もし利用ビームがしばしば床に向けられるのであ

れば、この施設はなるべく最下階におき、放射線室の床の下は直接地盤であるようにするべきである。一階建ての建物を用いると、放射線室の天井の遮蔽は最小になし得るので、防護上の要求は軽減されるであろう。さらに、ビームを動かす範囲を制限することによって、一層経済的にすることができよう。

(47) もし可能ならば、すべての作業員はターゲットから相当の距離をとり、かつ利用ビームに対して大きな角度をなす方向のところにいるべきである。こうするならば、構造的防護は比較的すくなく済む。なぜならこの方向における一次放射線の強度は、他の方向に比較して小さいからである。また、散乱放射線も、小さい角度におけるものよりも透過性が小さい。加速器自体の構造によって与えられる遮蔽もまた利用するようにすべきである。

(48) 障壁は施設が作動するさいのあらゆる可能な状況（例えばビームの位置、ターゲットの物質）のもとでも適切な遮蔽を与えることができるほど充分厚いものであるべきである。

(49) 一次ビームに対する防護障壁を備えていないすべての壁、床および天井の部分は二次防護障壁で遮蔽し、人のいる区域における減弱され散乱された放射線が最大許容レベル以下になるように充分なものとしなければならない。

### (c) 施設（作動上の詳細）

(50) 正常な作動のあいだにおこる、利用ビームに付随した放射線の危険に加えて、他の危険も存在し得る。誘導放射能および異常な迷放射線の場合を評価するための測定がなされるべきである。加速器の作動を止めた後でも、著しいレベルの誘導人工放射能が持続することがありうる。装置の部分、ことに真空箱およびターゲットは、適切な注意をもって取り扱われなければならない。空気が放射化されて、窒素13、酸素15、あるいはアルゴン41が生じるので、特別な換気設備をつくる必要があるかも知れない。ある状況、たとえばトリチウムターゲットを用いるような状況では、真空装置および排気が、加速器の

放射線出力には無関係に汚染されることもあり得る。

(51) 加速器が異常な状況で作動しているときには、予期しない方向に迷放射線が存在することもある。制御回路の或る種の誤調整によって生じる迷放射線ビームは、利用ビームの強度がゼロのときでさえも、放射線の危険を生じ得る。

(52) 専門委員会は、放射線による以外の危険も存在することに注意を喚起したいと思う。そして、電気的、機械的および毒物による危険に関する知識は、それぞれの国内実施規則に求めるよう示唆する。毒物による危険は高出力の加速器が不十分な換気で作動した場合に顕著となり得る。これは、オゾンおよび種々の窒素酸化物をふくむ有毒ガスの発生によっておこるものである。

#### 医療上の使用のための施設

(53) 治療中、たえず患者を観察し、かつ患者と通話するための手段が備えられるべきである。

(54) 観察用の窓は、それが利用ビームにさらされるおそれのないような位置におかれるべきである。

(55) 線源から1mの距離における漏洩放射線の線量率が1R/時または線源から1mにおける利用ビームの線量率の0.1%のいずれか大きいほうをこえないような容器を使用しなければならない。

(56) 利用ビームをコリメートするのに使用される常設しほりあるいはコーンは、X線管容器と同程度の防護効果をもつものでなければならない。調節可能な、あるいは取りはずし可能なビーム決定しほりあるいはコーンは、患者への積算線量を実施しうるかぎり減らすような構造でなくてはならない。どんな場合でも、それらは利用ビームの5%以上を通すことがあってはならない。

(57) 放射線強度を観察するため、利用ビーム内に透過型モニター用電離箱をおくことを勧告する。このモニタリング装置の信頼できる点検を定期的に行なうべきである。

### 工業用施設

(58) 工業用施設のばあいにおこり易い状況が広範囲にわたることにかんがみ、放射線防護担当者は、従業員たちが危険を心得ているようにするという特別な責任を負わなければならない。上方遮蔽をかぶせることが容易にはできないような装置のある大きい仕事場の中で、多くの工業上の照射がおこなわれるであろうから、散乱放射線の危険を軽視すべきではない。

(59) 従業員たちのうける線量が最大許容値をこえないよう保証するために、モニタリングの設備を備えることがきわめて重要である。

(60) 放射線ビームの動かしうる範囲はできるだけせまくすべきであり、利用ビームは操作員室または人が働いている隣接の場所へ実施しうるかぎり向けないようにすべきである。

(61) 利用ビームの方向は、放射線が二次防護障壁の開孔部を通り抜ける前にすくなくとも2回散乱されるように向けるべきである。

(62) 障壁の厚さ全体に通った隙間が決していないように設計されたむくのコンクリートブロックを使用することはたいへん有利である。利用ビームのあたるところでは、障壁の厚さの25%以上に通った隙間はないようにすべきである。

(63) 放射線室の直接上方に行くことが時としておこりうるような従業員(たとえばクレーン運転士のような)の防護に考慮を払うべきである。一例としては、充分防護されていることを放射線サーベイが示しているような場所にしかクレーンが行かないように制限するインターロックが備えられるべきである。

### 研究用施設

(64) 研究用の施設においては、普通にはないような放射線の危険がおこり得る。研究用施設の近くで働いている人々は、適当な個人モニタリングをうけること、および機械のまわりの放射線レベルのサーベイが行なわれることが肝

( 18 )

要である。それぞれの特定の場所での許容就業時間を決定するにあたっては、その放射線レベルを考慮に入れなければならない。

(65) 装置の作動時間およびビームの方向をも含む作動条件に関する記録が保存されるべきである。

## 付 録

$QF$  値を考慮するさい、あるいは遮蔽を設計するさいに役立つ諸データを以下に付録として示す。

### 付録 I 電離密度と線エネルギー付与

この報告の表 I に、電離性粒子について、 $QF$  値を平均線エネルギー付与 (LET) の関数として示した。与えられたエネルギーを持つ与えられた型の粒子に、一つの平均 LET 値を持たせることは可能ではあるが、よく知られているように、このような粒子によって衝撃されている生体材料は、実際は LET 値の全スペクトルに曝されているのである。これらの LET 値のスペクトル分布が知られば、単一の平均 LET 値からよりもっと多くの知識が得られる。

ある電離性放射線について完全な LET スペクトルを決定するという事は、決して簡単ではない。例えば、陽子のような重粒子の飛跡に沿っての LET という単純な場合においても、飛跡に沿って間隔をおいて生ずる  $\delta$  線のために、LET は変化する。LET 値は 0.1 から 500 keV/ $\mu$  以上にわたるので、 $\lambda = \log_{10}$  (LET) とおいた対数尺度で LET スペクトルを表わすのが最も便利である。低エネルギー  $\delta$  線の発生する個数にも、また低エネルギー電子 (100 eV) の LET にも、かなりの不確かさがある。この問題について検討を行なった Howard-Flanders<sup>(12)</sup> は、この理由から、1000 eV 以下の電子の失なうすべてのエネルギーをそれに相当した面積の長方形で表わし、これらの低エネルギー電子に対する LET 値の分布を示すことはしなかった。彼のデータを図 3 に示す。

飛跡の長さが (飛跡に沿って) 100, 200, 500 もしくは 1000 Å に満たない  $\delta$  線飛跡によって失なわれる X 線または  $\beta$  線のエネルギーの割合は、 $\delta$  線の長方形の

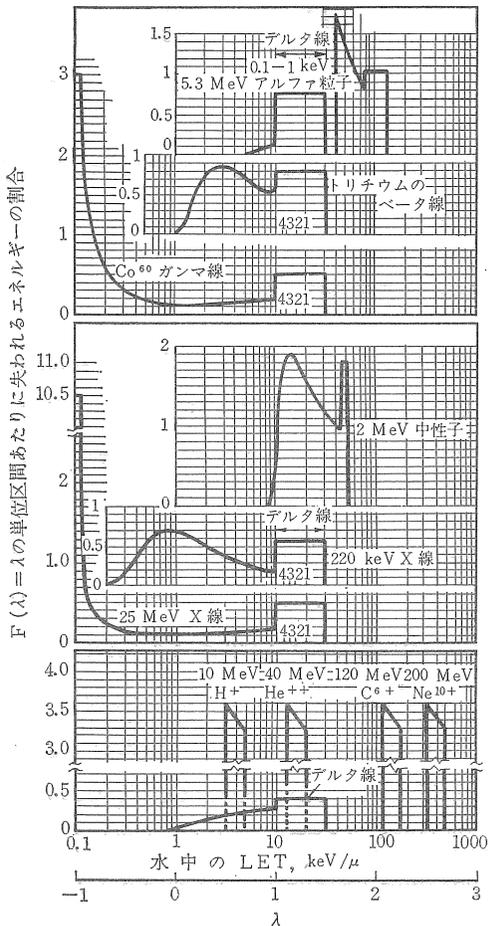


図3 ふつうに用いられる種々の電離性放射線の水における LET スペクトル。 $\lambda$ の単位区間あたりに失われるエネルギーの割合  $F(\lambda)$  が  $\lambda$  の関数として直線尺度で記入されている。ただし  $\lambda = \log_{10} \text{LET}$  である。便宜上、横軸にはまた、水中における LET を直接に  $\text{keV}/\mu$  で表わして、対数尺度で記してある。任意の二つの LET 値の間で失われたエネルギーの割合は、これらの限界の間における曲線下の面積にひとしい。長方形の面積は  $1000 \text{ eV}$  以下の  $\delta$  線によって失われるエネルギーの割合を表わす。飛跡の中心部と  $100 \text{ eV}$  以上の  $\delta$  線とに対する LET 値は別々に示されている。これらのスペクトルは、飛跡のセグメントを  $100 \text{ \AA}$  より短かくとった場合に適用される。セグメントを  $100 \text{ \AA}$  より長くとった場合には、本文に説明されているように、1, 2, 3, 4 と記された点で  $\delta$  線スペクトルの右側を切り捨てるべきである。(Howard-Flanders<sup>(12)</sup> による。)

うち、1, 2, 3および4と記された点の右側の面積でそれぞれ表わされる。短い飛程の $\delta$ 線が効果を持たないと考えられる物質に関するデータを扱うときには、LET スペクトルからこれらの面積を削ってよい。

図3上図に $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 線のLET分布を示す。同図に見られるように、LET値は可能な最小値から約10 keV/ $\mu$ まで拡がり、ついで $\delta$ 線が10から30 keV/ $\mu$ のLETを持つ飛跡を作る。中図には25 MeV X線のLET分布が示され、その全体としての形は $^{60}\text{Co}$ のそれと非常に類似しているのが見られる。220 keV X線もLET値の広いスペクトルを示す。

上図にはまた、もとのエネルギーが5.3 MeVの $\alpha$ 粒子のLET分布も示されている。この $\alpha$ 粒子は40から130 keV/ $\mu$ のLETを持つ飛跡を生じ、一方それによって作られた $\delta$ 線の飛跡は10から30 keV/ $\mu$ の低いLET値のところでのエネルギーを付与する。

下図はエネルギーの高い水素、ヘリウム、炭素およびネオンの原子核のLET分布を示す。図中の $\delta$ 線のスペクトルは4種の粒子のすべてにあてはまる。このように、荷電数1の200 MeVのネオン核は300—500 keV/ $\mu$ のLET値でそのエネルギーの約60%を失ない、残りを1—30 keV/ $\mu$ のLET値をもつ $\delta$ 線として失なう。このグラフは、高エネルギービームを用いる生物実験を計画している人々にとって価値がある。LET分布はまた、これと独立に、Danzker, Kes-saris および Laughlin<sup>(13)</sup>により、多くのX線スペクトルについて、Spencer, Attix および Fano<sup>(14,15)</sup>の方法で得られた全電子スペクトルを用いて計算された。上の結果との比較は、両方に共通の場合において、よい一致を示している。

## 付録Ⅱ 電磁放射線の吸収のデータ

単色放射線の細いビームは吸収体中で、次式によって表わされる指数法則に従って減弱する：

$$I/I_0 = \exp(-\mu d)$$

ここで、 $I$  は測定点における強度、

$I_0$  は同じ点における、吸収体なしのときの強度、

$\mu$  は入射放射線に対する吸収体の吸収係数、

$d$  は吸収係数を表わすのに用いられた単位の逆単位で測られた、障壁の厚さ。(すなわち、もし  $\mu$  が  $\text{cm}^2/\text{g}$  を単位とする質量吸収係数ならば、 $d$  は  $\text{g}/\text{cm}^2$  の単位でなければならず、また  $\mu$  が  $\text{cm}^{-1}$  を単位とする線吸収係数ならば、 $d$  は  $\text{cm}$  の単位でなければならない。)

この式を用いるときの誤差の大きな原因の一つは、使用した材料とくに流し込みコンクリートを用いるさいの密度の不確かさである。

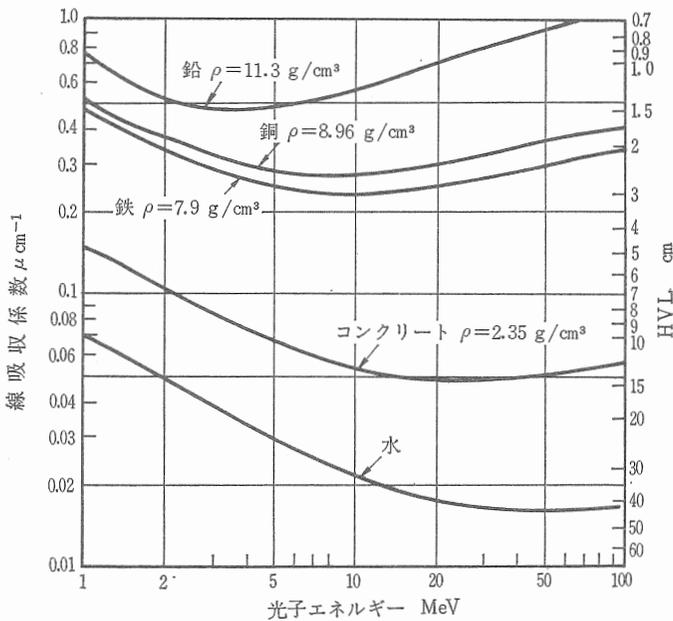


図4 ふつうに用いられる遮蔽材料の線吸収係数と半価層。(Grodstein<sup>(18)</sup>による。)

いくつかのふつうに用いられる材料についてのデータを、Grodstein<sup>(16)</sup>の発表した数値にもとづいて、図4に示す。

実際には、単色放射線のビームが上式を満足するほど充分細いことは少なく、吸収体で散乱された放射線が測定点に到達する。それで、この点に到達するビームの強度あるいは線量率は、上式から期待されるよりも、ビルドアップ係数として知られている係数だけ大きくなる。ビルドアップ係数は吸収体の厚さおよび材料ばかりでなく、照射のジオメトリーにも依存する。遮蔽によって完全に囲まれた、あらゆる方向に均一に放射する線源は点状等方ジオメトリーとして代表されるし、一方、壁に垂直に入射する広いビームは板状一方向ジオメトリーで代表されるであろう。ビルドアップ係数の値は Goldstein と Wilkins<sup>(17)</sup>によって数表にされておき、その一部を表Ⅲに示す。ビルドアップ係数を無視すれば大きな誤りを招くことがあるということは明かである。

吸収体の中で生じた散乱放射線は広がったスペクトル分布を持つ。そして、線量率と強度との関係はエネルギーに依存するから、線量率の計算と強度の計算とはそれぞれ異なったビルドアップ係数が用いられる。放射線防護の目的には線量率のビルドアップ係数の方が役立つので、表Ⅲにはそれだけが与えられている。

入射ビームが単色でないときには、細いビームの吸収係数も広いビームのビルドアップ係数もエネルギーに依存することを考慮しながら、障壁の透過をスペクトル分布にもとづいて計算しなければならない。単一エネルギーの電子が種々のターゲットと作用して生ずるX線のスペクトル分布は計算することができ、計算例が発表されている<sup>(18)</sup>。それゆえ、厚い吸収体中のX線ビームの透過の完全な計算は、指数関数的吸収の項とビルドアップ係数との積の、計算されたスペクトルの全域にわたる積分を含むことになるであろう。実際には、入射ビームが、ピークエネルギーの1/3のエネルギーをもつ単色ビームとして振舞いと仮定して、透過の近似値を計算することができる。

表Ⅲ 水、鉄および鉛に対する線量ビルドアップ係数 (Goldstein と Wilkins<sup>(17)</sup> による)

MeV	(a) 点状等方ジオメトリー $\mu d$							MeV	(b) 板状一方向ジオメトリー $\mu d$						
	1	2	4	7	10	15	20		1	2	4	7	10	15	
水								水							
0.5	2.52	5.14	14.3	38.8	77.6	178.0	334.0	0.5	2.63	4.29	9.05	20.0	35.9	74.9	
1	2.13	3.71	7.68	16.2	27.1	50.4	82.2	1	2.26	3.39	6.27	11.5	18.0	30.8	
2	1.83	2.77	4.88	8.46	12.4	19.5	27.2	2	1.84	2.63	4.28	6.96	9.87	14.4	
3	1.69	2.42	3.91	6.23	8.63	12.8	17.0	3	1.69	2.31	3.57	5.51	7.48	10.8	
4	1.58	2.17	3.34	5.13	6.94	9.97	12.9	4	1.58	2.10	3.12	4.63	6.19	8.54	
6	1.46	1.91	2.76	3.99	5.18	7.09	8.85	6	1.45	1.86	2.63	3.76	4.86	6.78	
8	1.38	1.74	2.40	3.34	4.25	5.66	6.95	8	1.36	1.69	2.30	3.16	4.00	5.47	
10	1.33	1.63	2.19	2.97	3.72	4.90	5.98								
鉄								鉄							
0.5	1.98	3.09	5.98	11.7	19.2	35.4	55.6	0.5	2.07	2.94	4.87	8.31	12.4	20.6	
1	1.87	2.89	5.39	10.2	16.2	28.3	42.7	1	1.92	2.74	4.57	7.81	11.6	18.9	
2	1.76	2.43	4.13	7.25	10.9	17.6	25.1	2	1.69	2.35	3.76	6.11	8.78	13.7	
3	1.55	2.15	3.51	5.85	8.51	13.5	19.1	3	1.58	2.13	3.32	5.26	7.41	11.4	
4	1.45	1.94	3.03	4.91	7.11	11.2	16.0	4	1.48	1.90	2.95	4.61	6.46	9.92	
6	1.34	1.72	2.58	4.14	6.02	9.89	14.7	6	1.35	1.71	2.48	3.81	5.35	8.39	
8	1.27	1.56	2.23	3.49	5.07	8.50	13.0	8	1.27	1.55	2.17	3.27	4.58	7.33	
10	1.20	1.42	1.95	2.99	4.35	7.54	12.4	10	1.22	1.44	1.95	2.89	4.07	6.70	
鉛								鉛							
0.5	1.24	1.42	1.69	2.00	2.27	2.65	2.73	0.5	1.24	1.39	1.63	1.87	2.08	—	
1	1.37	1.69	2.26	3.02	3.74	4.81	5.86	1	1.38	1.68	2.18	2.80	3.40	4.20	
2	1.39	1.76	2.51	3.66	4.84	6.87	9.00	2	1.40	1.76	2.41	3.36	4.35	5.94	
3	1.34	1.68	2.43	3.75	5.30	8.44	12.3	3	1.36	1.71	2.42	3.55	4.82	7.18	
4	1.27	1.56	2.25	3.61	5.44	9.80	16.3	4	1.28	1.56	2.18	3.29	4.69	7.70	
6	1.18	1.40	1.97	3.34	5.69	13.8	32.7	6	1.19	1.40	1.87	2.97	4.69	9.53	
8	1.14	1.30	1.74	2.89	5.07	14.1	44.6	8	1.14	1.30	1.69	2.61	4.18	9.08	
10	1.11	1.23	1.58	2.52	4.34	12.5	39.2	10	1.11	1.24	1.54	2.27	3.54	7.70	

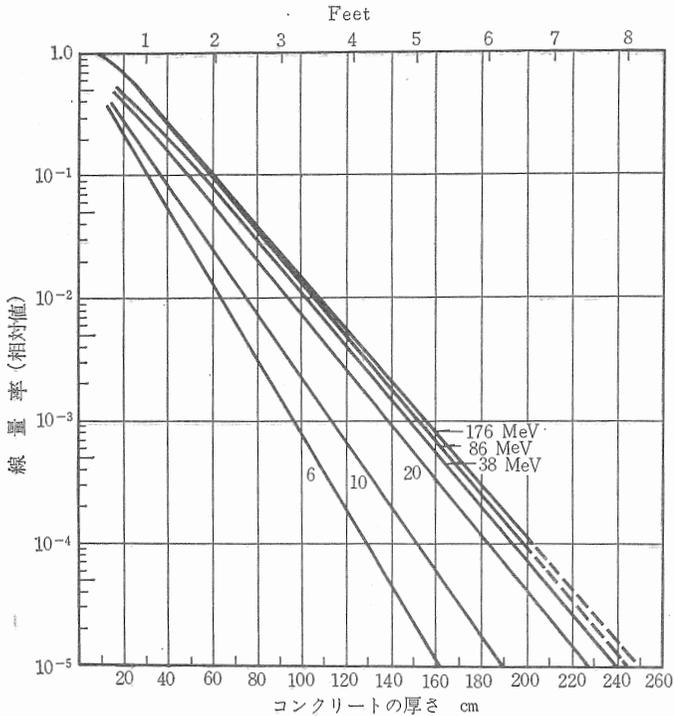


図5 種々のピークエネルギーをもつX線の広いビームのコンクリート中における吸収 (コンクリートの密度  $147 \text{ lb/ft}^3$ ,  $2.35 \text{ g/cm}^3$ )。 (Kirn および Kennedy<sup>(19)</sup> による。)

X線について実験的に定められた広いビームの吸収曲線<sup>(19,20)</sup> を図5および6に示す。

遮蔽の設計には、前方ビーム中の一次放射線ばかりでなく、あらゆる方向の一次放射線をも考慮すべきである。多くの場合、中心軸から外れた放射線は、ターゲット近傍のコリメーターによって除かれる。高いエネルギーにおいては、散乱電磁放射線の遮蔽は大して問題にならない。高エネルギー光子についてはコンプトン吸収係数は小さいが、そのような光子は多重コンプトン散乱に

よって急速にエネルギーを減少し、その結果、吸収係数は増加する。一例を挙げると、15および22 MeV の一次ビームが1gの水で散乱されているとき、一次ビームに対して45°の方向1mの距離における散乱放射線の強度は、一次ビームのおよそ  $3 \times 10^{-7}$  と計算されている。このことは直接の観測によっても確認された。<sup>(21)</sup>

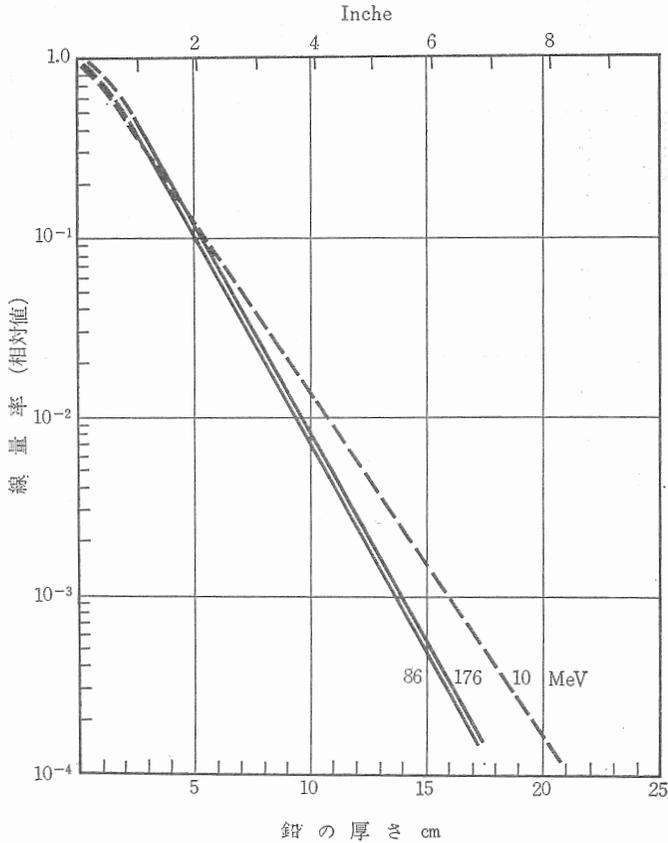


図6 種々のピークエネルギーを持つX線の広いビームの鉛中における吸収 (鉛の密度  $11.35 \text{ g/cm}^3$ )。 (Miller および Kennedy<sup>(20)</sup> による。)

## 付録Ⅲ 粒子の飛程

異なったエネルギーの粒子に対する遮蔽上の要求を推定するために、最も有用なパラメーターは水、空気および鉛といった物質中でのその粒子の実用飛程である。図7は Wachsmann と Dimotsis<sup>(22)</sup> から引用したもので、電子、陽子、重陽子および $\alpha$ 粒子の水、鉛および空気中における飛程を、エネルギーの関数として示してある。

## 付録Ⅳ 中性子の吸収のデータ

多くの場合、中性子遮蔽の仕様は、障壁に入射する中性子束密度が近似的に

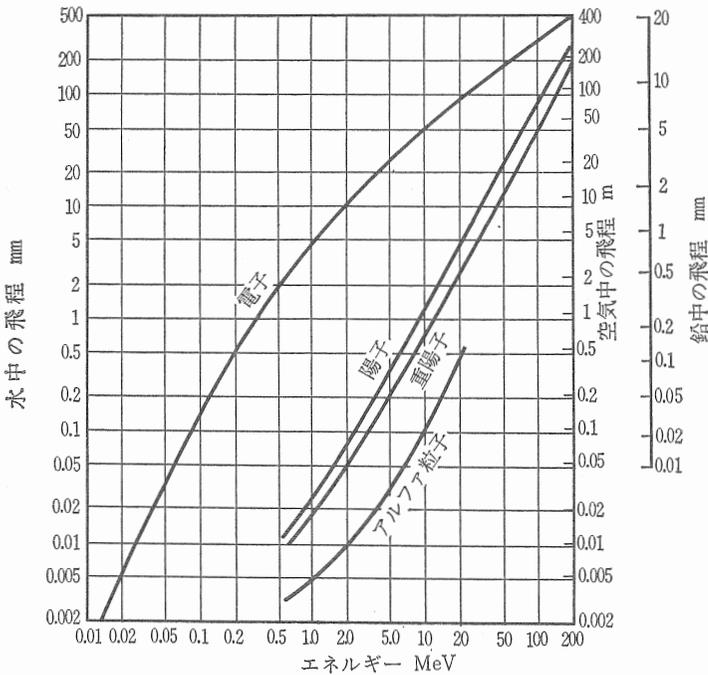


図7 水、空気および鉛中における粒子の飛程。(Wachsmann と Dimotsis<sup>(22)</sup> による。)

しか予示できないので、決めることが困難である。推定された中性子発生率、エネルギー分布および空間分布は従って単なる目安として扱い、また個々の施設について測定によって確認すべきである。光中性子発生率を含む中性子発生データの文献<sup>(3)</sup>を参考にすべきである。

$\gamma$ 線と同じように、中性子の吸収は広いビームと細いビームとで異なった法則に従う。高速中性子に対しては吸収係数は原子量とともに規則正しく変化する。しかし、熱中性子の吸収は、原子量とともになめらかなには変化しないような過程で行なわれる。どんな中性子遮蔽の問題においても、遮蔽中での $\gamma$ 線の発生とその後の吸収を考慮する必要がある。遮蔽体が著しい熱中性子の照射を受けると遮蔽体自身が放射性となり、もう一つの防護の問題を持ちこむことになる。中性子遮蔽の計算はX線に対する場合のように簡単ではなく、そのような計算はいつも種々の過程<sup>(23,24)</sup>の完全な理解にもとづくべきであることを強調しなければならない。

単一エネルギーの細い高速中性子ビームは次式に従って減弱する：

$$I/I_0 = \exp(-\mu_i d) \quad (1)$$

ここに  $I$  は測定点における強度、

$I_0$  は同じ点における吸収体のないときの強度、

$\mu_i$  は問題にしている特定のエネルギーの中性子に対するマクロ全断面面積、

$d$  は障壁の厚さで、断面積を示すのに用いた単位の逆単位ではかる。

通常  $\mu_i$  は  $\text{cm}^2/\text{g}$  で、 $d$  は  $\text{g}/\text{cm}^2$  で示す。特定の物質に対するマクロ全断面積の値は、元素のマイクロ（原子）断面積の表<sup>(25)</sup>の値から次の諸式によって計算できる。

純物質に対してはマクロ全断面積は次式で与えられる：

$$\mu_i = 0.602 \sigma_i \rho / A \quad (\text{cm}^{-1}) \quad (2)$$

ここに  $\sigma_i$  は問題にしている特定のエネルギーの中性子に対するマイクロ全断面

積 (barn),

$\rho$  = その物質の密度 ( $\text{g/cm}^3$ ),

$A$  = その物質の原子量.

いくつかの元素から成る物質については、断面積はその成分についての簡単な総和で与えられる：

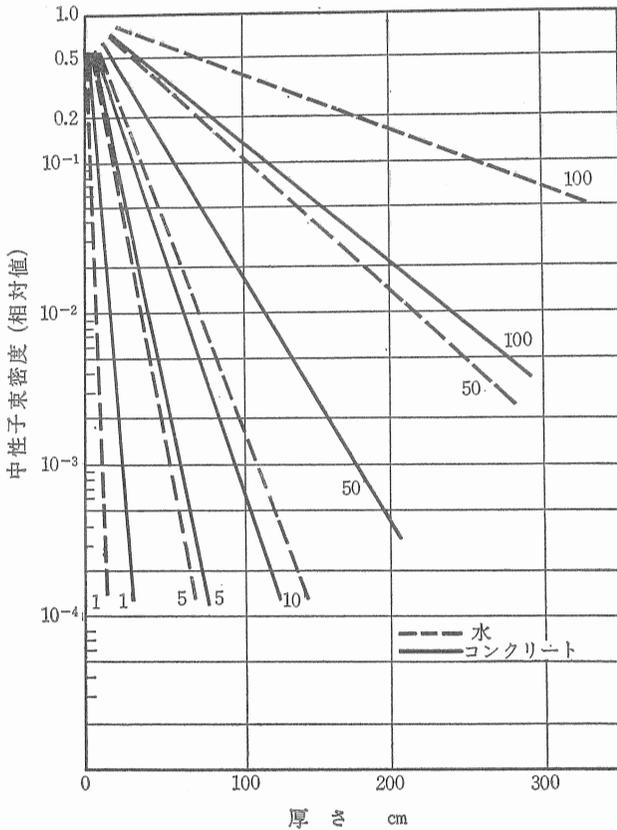


図8 水中とコンクリート (コンクリート密度 $148 \text{ lb/ft}^3$ ,  $2.37 \text{ g/cm}^3$ ) 中の広いビームの高速中性子の概算的な吸収。曲線は中性子束密度の減少を示すもので、線量率の減少ではないことに注意。

$$\mu_t (\text{化合物}) = \mu_t' p' + \mu_t'' p'' + \dots \quad (3)$$

ここに  $\mu_t'$ ,  $\mu_t''$  等は各元素について (2) 式から計算され、

$p'$ ,  $p''$  等はその物質中の各元素の比率 (重量による) である。

これらの式の計算例は文献<sup>(3)</sup>に見られる。

高速中性子の広いビームは (1) 式でしばしば十分よく示される法則に従って減弱する。ただしこの式で全断面積  $\mu_t$  はマクロ除去断面積  $\mu_r$  でおきかえられ、 $\mu_r = k \mu_t$  である。1 MeV と 8 MeV との間では  $k = 0.7$  ととることができる。8 MeV 以上では  $k$  は減少し、実験的事実<sup>(26)</sup> は 100 MeV では  $k = 0.35$  の値をとることを示唆している。図 8 は以上の基礎の上にならって計算された吸収のデータである。8 MeV と 100 MeV との間のエネルギーにおける  $\mu_r$  と  $\mu_t$  との間の比例定数は、直線的補間で推定した。

## 参 考 文 献

1. *Radiation Quantities and Units*, ICRU Report 10a (1962), National Bureau of Standards Handbook 84. Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington, D. C., U. S. A. (1962).
2. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP), *Brit. J. Radiol.* Suppl. 6 (1955).
3. *Protection Against Neutron Radiation up to 30 MeV*. Report of National Committee on Radiation Protection and Measurements, National Bureau of Standards Handbook 63. Superintendent of Documents, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C., U. S. A. (1957).
4. P. BONET-MAURY, A. DEYSINE, M. FRILLEY and C. STEFAN, Efficacité biologique relative des protons de 157 MeV, *Comptes rendus* **251**, 3087 (1960).
5. B. LARSSON and B. A. KIHLMAN, Chromosome aberrations following irradiation with high energy protons and their secondary radiation : a study of dose distribution and biological efficiency using root-tips of *Vicia faba* and *Allium cepa*, *Int. J. Radiat. Biol.* **2**, 8 (1960).
6. G. J. NEARY and J. MULVEY, Maximum Permissible Fluxes of High Energy Neutrons and Protons in the Range 40-1000 MeV, Unpublished (revised by Neary, 1958).
7. *Report of the International Commission on Radiological Units and Measurements (ICRU)*, 1959, National Bureau of Standards Handbook 78. Superintendent of Documents, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C., U. S. A. (1962).
8. *Measurement of Neutron Flux and Spectra for Physical and Biological Applications*. Recommendations of the National Committee on Radiation and Measurements, National Bureau of Standards Handbook 72. Superintendent of Documents, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C., U. S. A. (1960).
9. *Measurement of Absorbed Dose of Neutrons and of Mixtures of Neutrons and Gamma Rays*. Recommendations of the National Committee on Radiation Protection and Measurements, National Bureau of Standards Handbook 75. Superintendent of Documents, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C., U. S. A. (1961).
10. *Health Physics in Nuclear Installations*. Proceedings of a Symposium organized by the European Nuclear Energy Agency at the Danish Atomic Energy Commission, Riso, 1959. Organization for European Economic Cooperation (1959).
11. *Selected Topics in Radiation Dosimetry*, Proceedings of a Symposium sponsored by the International Atomic Energy Agency, Vienna 1960. IAEA (1961).
12. P. HOWARD-FLANDERS, Physical and chemical mechanisms in the injury of

- cells by ionising radiations. *Advances in Biological and Medical Physics*, VI, Academic Press, New York (1958).
13. M. DANZKER, N.D. KESSARIS and J.S. LAUGHLIN, Absorbed dose and LET in radiation experiments, *Radiology* **72**, No. 1, 51 (1959).
  14. L. V. SPENCER and U. FANO, Energy spectra resulting from electron slowing down, *Phys. Rev.*, **93**, 1172 (1954).
  15. L. V. SPENCER and F.H. ATTIX, A theory of cavity ionisation, *Radiation Research* **3**, 239 (1955).
  16. G. W. GRODSTEIN, *X-ray Attenuation Coefficients from 10 keV to 100 MeV*. National Bureau of Standards Circular 583. Superintendent of Documents, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C., U. S. A. (1957).
  17. H. GOLDSTEIN and J. E. WILKINS, Calculations of the Penetration of Gamma Rays. USAEC Report, NYO 3075 (1954).
  18. *Protection Against Betatron-Synchrotron Radiations up to 100 MeV*. National Bureau of Standards Handbook 55. Superintendent of Documents. U.S. Government Printing Office, Washington, D. C., U. S. A. (1954).
  19. F. S. KIRN and R. J. KENNEDY, Betatron X-rays : How much concrete for shielding ?, *Nucleonics* **12**, No. 6, 44-48 (1954).
  20. W. MILLER and R. J. KENNEDY, Attenuation of 86 and 176 MeV synchrotron X-rays in concrete and lead, *Radiation Research* **4**, 360 (1956).
  21. H. E. JOHNS, M. TUBIANA and J. L. HAYBITTLE, Unpublished.
  22. F. WACHSMANN and A. DIMOTISIS, *Graphs and Tables for Radiotherapy*, Hirzel, Stuttgart (1957).
  23. B. T. PRICE, C. C. HORTON and K. T. SPINNEY, *Radiation Shielding*, Pergamon Press, London (1957).
  24. A. F. AVERY, B. E. BENDALL, J. BUTLER and K. T. SPINNEY, *Methods of Calculation for Use in the Design of Shields for Power Reactors*. AERE-R 3216(SWP/P 52) HMSO, London (1960).
  25. D. J. HUGHES and R. B. SCHWARTZ, *Neutron Cross Sections*. BNL 325, 2nd Edition. Superintendent of Documents, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C., U. S. A. (1958) (see also BNL 325, 2nd Edition, Supplement No. 1 (1960); for angular distribution, see Hughes, D. J. and Carter, R. S. BNL 400 (1956).
  26. R. W. WILLIAMS, *Conference on Shielding of High Energy Accelerators*, USAEC Report TID 7545, Office of Technical Services, Department of Commerce, Washington, D. C., U. S. A. (1957).

3 MeV をこえる電磁放射線，ならびに  
電子，中性子および陽子に対する防護

---

昭和40年7月15日 第1刷発行

編 集 山 崎 文 男  
責 任 者 玉 木 英 彦

---

社団法人 日本放射性同位元素協会  
財団法人 仁科記念財団

東京都文京区駒込上富士前町31  
理化学研究所内  
電話 (946) 7111 (代表)

---

印刷・製本 富士美術印刷KK (891)6126~9