

## 第 8 章

H P 『海軍砲術學校』公開資料

<http://navgunschl.sakura.ne.jp/>

## 第8章 初期放射線

### 第1節 放射線の特性

#### 中性子とガンマ線

8.01 第1章で述べたように放射線を放出することは、核爆発の特徴である。ここで述べる放射線は前章で述べた熱線とは異なるもので、 $\gamma$ (ガンマ)線・中性子・ $\beta$ (ベータ)線とわずかではあるが $\alpha$ (アルファ)線を含んでいる。大部分の中性子線と $\gamma$ 線の一部は分裂現象や融合現象の時、爆発と同時に発生する。残りの $\gamma$ 線は中性子の2次的な相互作用や核分裂生成物の崩壊にともなって放出される。 $\beta$ 線も核分裂生成物の崩壊にともなって放出される。 $\alpha$ 線の一部は爆発のとき分裂しなかったウランやプルトニウムの崩壊によって発生し、またあるものは核融合にともなって放出されるものもある。

8.02 空中または地表爆発のいずれでも核爆発の特性上放射線を2つのグループに分けて取扱った方が実際には便利である。この2つのグループとして、初期放射線と残留放射線と考えられる。この区切りは、§2.43に述べた理由により爆発約1分後である。初期放射線とは、爆発後1分以内に放出されるものをいう。地下爆発や水中爆発の場合には、初期放射線と残留放射線とに区分することはあまり意味がない。

8.03  $\alpha$ 線や $\beta$ 線の飛程は比較的短かく空中爆発のときは地上に到達しない。「また $\alpha$ 線及び $\beta$ 線は、火の玉が地表に接する場合でも重要ではない」としたがって初期放射線とは爆発後1分以内に放出される $\gamma$ 線及び中性子のみを考慮すればよい。この2つの放射線はその性質は異なるが、いずれも空中の長い距離を透過する。さらにこの $\gamma$ 線と中性子は生体に対して傷害を及ぼす(12章)。この $\gamma$ 線と中性子の透過及び障害を生ずる状況は核爆発の大きな特色である。初期中性子及び初期 $\gamma$ 線として放出されるエネルギーは全放出エネルギーのわずか3%である。これは、空中爆発で

熱エネルギーとして放出される割合35～45%に比べて少ないが、爆発の時に初期放射線により大部分の負傷者を出す可能性がある。また、後で述べるが初期放射線はある種の電子機器に対しても損傷を与え得る。

**8.04** 核分裂の際の $\gamma$ 線の大部分は兵器構成材料により吸収され、そのエネルギーは他の形に変換される。そして、ごくわずか（～1%）の $\gamma$ 線のみが外部に放出される。しかし、この他にもいくつかのものが初期 $\gamma$ 線となる。中性子も同じく分裂や融合の時に発生するものは、兵器構成材料や空気中を通過する間に、そのエネルギーを失ない、または吸収される。それでも高エネルギーの中性子は爆発領域からかなりの距離まで透過し、そこで傷害を与える。

## 核兵器から放出される放射線の比較

**8.05** 爆発地点からごく近い距離を除き、熱線の遮蔽は比較的容易であるが、 $\gamma$ 線や中性子の場合は容易ではない。例えば、1 MTの場合1マイル離れた地点では、24インチのコンクリートで遮蔽している人に対して、初期放射線は致命的な傷害を与える。しかし、熱線はもっと簡単な遮蔽で人は完全に防護される。このように、熱線と放射線に対する遮蔽は非常に異なっている。

**8.06** また、傷害半径も熱線と放射線では非常に異なる。中規模または大威力の爆発では、熱線は放射線よりも大きな傷害半径を有する。たとえば、20 KTの空中爆発・1½マイルの距離では、放射線に対しては遮蔽をしない場合でもこれから臨床的な障害をうけない。しかし、熱線はこの地点でも、皮膚に対して過度の火傷を負わせることができる。一方、爆発の威力が小さくなると（数KT）、初期放射線は熱線よりも大きな傷害半径をもつ。

**8.07** 初期放射線の特性は、中性子線と $\gamma$ 線に区分し考察するのがよい。究極的に、これらの生物に対する効果はほとんど同じであるが、異なる性質をもつからである。そこで、 $\gamma$ 線について次の節で、中性子については§ 8.49以降で述べる。

- 注:(1) “散乱”という言葉(§7.10参照)は核との相互作用の後、低くなった中性子が衝突前の入射方向は異なる方向に進行するので用いられる。
- (2) ある核が核異性体である時、その核はある半減期をもつ高いエネルギー(もしくは励起)状態にある。ここで重要なアイソマーは崩壊の際、余分の(または励起)エネルギーをγ線として放出する。その半減期は千分の1秒又はそれ以下の短かいものである。

## 第2節 ガンマ線

### ガンマ線の起源

**8.08** 実際に分裂にともなって発生するγ線以外に、初期放射線となるγ線発生源がいくつか考えられる。分裂により発生するある中性子は次の分裂を起こすために使われるが、また、あるものは兵器の外に放出される。大部分の中性子は兵器の中で分裂しないものに吸収される。このように中性子を捕獲すると、その核は励起された複合核となる。この余分のエネルギーはほとんど瞬間にγ線として放出される。この放出されるγ線は中性子が捕獲された結果出るので“捕獲ガンマ線”とよばれる。

**8.09** これと同じように、発生した中性子と原子核との相互作用によるもう一つのγ線発生源を考えることができる。大きな運動エネルギーをもつ高速中性子が核と衝突すると、その中性子のエネルギーの一部を核に与えて、これを励起する。励起された核は余分のエネルギーをγ線として放出し基底状態となる。このような速中性子と核との相互作用は“非弾性衝突”とよばれている。そして、放出されるγ線のことを“非弾性衝突ガンマ線”(1)といっている。分裂や融合現象の際、発生する速中性子は、このような非弾性衝突を兵器構成材料の中だけでなく、空気中の核とも行なう。

**8.10** 分裂の過程でできる核分裂生成物や核兵器生成物のあるものは核異性体(アイソマー)(2)であることがある。この核異性体のあるものは最初γ線を放出して崩壊し、次いでβ線を放出する。この時、再びγ線をともなうことが多いこのうち最初にでてくるγ線は一つの独立した初期γ線発生要素と考えることができる。あとから放出されるγ線は一般に核分裂生成物の崩壊によりでてくるγ線と同じように取扱われている。

**8.11** 分裂や融合の際、発生する中性子は兵器構成材料や空気中の窒素などの核によって捕獲される。この相互作用によりγ線が放出され初期γ線の一部となる。

このうち、窒素核による捕獲作用ででてくる $\gamma$ 線はそのエネルギーが大きく、したがって、ほかの初期 $\gamma$ 線に比べて吸収されることが少ないので重要なものである。

**8.12** 分裂の際の $\gamma$ 線や、兵器構成材料と中性子との相互作用で発生する2次的 $\gamma$ 線は非常に短時間( $<~/\mu\text{sec}$ )の間に放出される。そこで、これらは即発ガンマ線といわれている。

**8.13** 核分裂片やその崩壊生成物の大部分は放射性核種であり $\gamma$ 線を放出する。これらの半減期は1秒以下のものや長年のものがある。しかし崩壊は分裂直後から始まり単位時間内の崩壊数は初めのうちが大きいので、核分裂生成物からの $\gamma$ 線も爆発1分以内の初期放射線の中にかなり入っている。換言すれば、核分裂生成物から放出される $\gamma$ 線は初期 $\gamma$ 線の大部分を占めている。しかし、放射性崩壊は連続的なものであり、 $\gamma$ 線の放出は瞬間的ではないので、この $\gamma$ 線と、最初にできる核異性体からの $\gamma$ 線・中性子と空気中の核との相互作用により発生する $\gamma$ 線とをあわせて“遅発ガンマ線”とよんでいる。

**8.14** ある想定をした爆弾から発生する $\gamma$ 線の時間的な変化を計算してその結果を図-8.14に示した。放出エネルギー量はMeV/sec.ktで示している。空気中の窒素からの捕獲 $\gamma$ 線の発生は他の $\gamma$ 線より時間的に遅い。これは窒素の中性子捕獲断面積が何回も散乱して遅くなった中性子に対して大きいからである。図-8.14の中での点線は、高空爆発で周囲を真空中とした場合の結果を示している。この時には、空気中にある核との非弾性散乱による $\gamma$ 線や窒素による捕獲 $\gamma$ 線は発生しない。

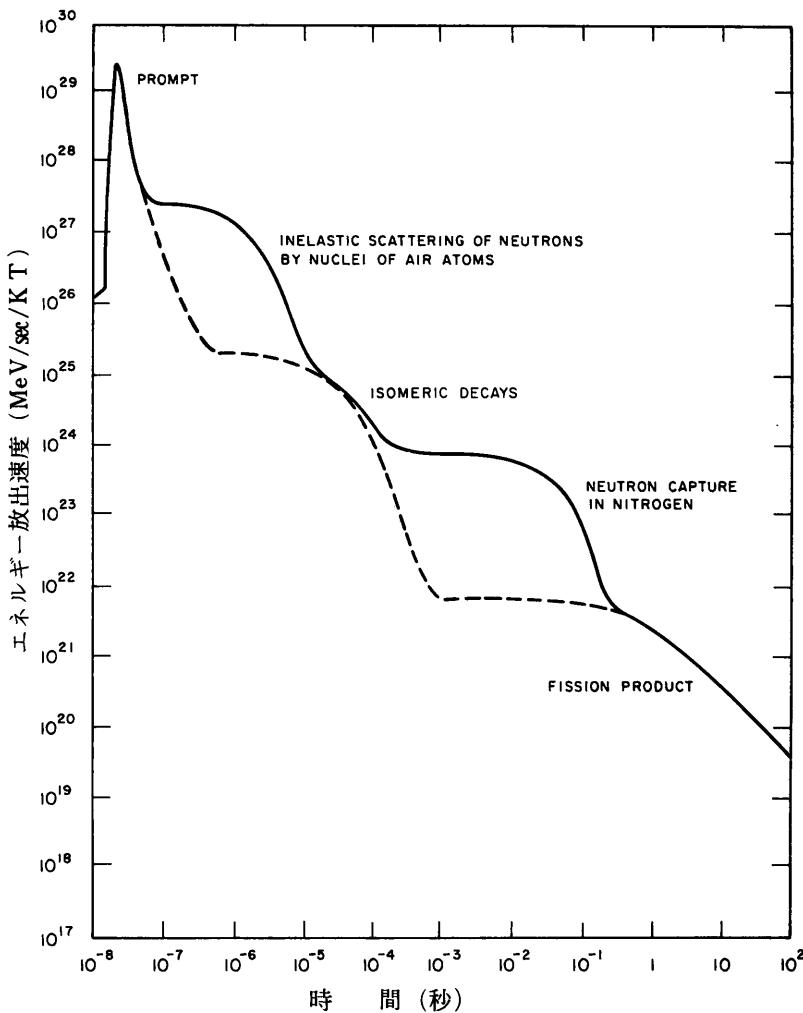


図-8.14 想定した核爆発の際、1 K T 当り発生する  $\gamma$  線エネルギーの時間的な変化の計算曲線。点線は超高空での爆発の場合を示す。

8.15 初期放射線中の即発  $\gamma$  線と遅発  $\gamma$  線とはほとんど同量できるけれども、兵器から外に放出される量は決ずしも等しくはない。即発  $\gamma$  線が出る頃は兵器は未だ飛散する前である。したがって、重い材料により吸収されるので少量しか実際

# H P『海軍砲術学校』公開資料

注:(3) 正式の定義にしたがえば1レントゲンとは1 kgの乾燥空気中に $2.58 \times 10^4$  クーロンの電子のイオン対を作る量である。

には外に放出されない。一方、遅発 $\gamma$ 線は、兵器が高温のため蒸発して、希薄なガス状に広がった後から出てくる。このため、これらはほとんど、もしくは全く吸収されずに外部に放出される。この結果、空中(表面)爆発の場合、爆発地点から離れた場所では遅発 $\gamma$ 線は窒素との捕獲 $\gamma$ 線を加えれば、爆発後1分間にうける全放射線量は即発 $\gamma$ 線の約100倍となる(§ 8.47)。

**8.16** 今まで述べたもの以外にも $\gamma$ 線の発生源を考えられる。爆発が地上附近で起これば、放出中性子が地面(もしくは水)などの中の物質をいわゆる放射化する。その結果、爆発直後から $\gamma$ 線が発生し、その後も引き続き放出される。しかし、この $\gamma$ 線はGZに近くない限り、他の発生源からの $\gamma$ 線の方が多い、これが占める割合は少ない。したがって、この中性子による地表附近の誘導 $\gamma$ 線については次章の残留放射線の項にゆずる(§ 9.31以降)。

## 放射線量と線量率

**8.17**  $\gamma$ 線はX線と同じように電磁波の放射線であるが、一般に $\gamma$ 線のほうが波長が短かく、したがってエネルギーは大きい(§ 1.74)。 $\gamma$ 線やX線の場合、測定単位は特に“レントゲン”とよばれるものがある。この単位は、§ 1.38で述べたように放射線が物質の中を通過する際に、その中に電子と正のイオンからなるイオン対をつくるいわゆる電離作用の能力によりきめられる量である。 $\gamma$ 線やX線の1レントゲンは標準状態即ち0℃、1気圧の乾燥空気1cm<sup>3</sup>中に $2.08 \times 10^9$ 個のイオン対をつくることのできる量のことである。また、これは1レントゲンの $\gamma$ 線が照射された場合、標準状態の乾燥空気1grの中でほぼ88エルグのエネルギーが失なわれるということもできる。(3)

**8.18** レントゲンは $\gamma$ 線やX線の照射量の単位である。しかし、身体やある特定臓器など生体に対する影響又は電子器材などの器材に対する効果などは放射線の照射の結果それぞれの物質中に吸収されたエネルギー量に左右される。このエネルギー吸収量をあらわす単位として $\gamma$ 線だけでなく $\alpha$ 線や $\beta$ 線・中性子線など全ての放射線に対して適用できるものとして“ラド”という単位がある。1ラドとは、物質/grあたり100エルグのエネルギーを吸収したことをあらわす。そこで、ある放

注:(4)  $\gamma$ 線の照射線量の1レントゲンは光子エネルギーが0.3から3MeVの中程度のエネルギーの場合に身体組織に対して1ラドの吸収線量に対応する。0.3から3MeVまでのエネルギー以外の光子については、このレントゲン単位の照射線量とラド単位の吸収線量との関係は複雑となる。

射線の線量をラド単位でいう場合には、対象とする吸収物質をはっきりさせておかなければならない。なぜならば物質が吸収するエネルギーはその物質の特性により異なるからである。身体の表面の組織に1レントゲンの $\gamma$ 線もしくはX線が照射されれば、ほぼ1ラド(4)吸収されることになるが他の物質には決ずしも適用できない。さらに、これは身体の深部の組織の吸収に対しても適用できない。しかし、この本の中で放射線の生物学的效果を述べる際のラド単位のエネルギー吸収量は身体表面における組織を対象としたものである(§12.108)。

**8.19 生体に対する影響や物質に対する損傷を考える場合に、放射線を測定する上で重要な2つの基本的な量がある。1つはある時間内のレントゲン単位の $\gamma$ 線の“照射線量”あるいは、各種の放射線についてラド単位の全吸収線量である。さらにもう1つはそれぞれに対応する“照射率”もしくは“線量率”である。ここでいう率とは単位時間当りの照射線量や吸収線量のことである。照射線量率は、レントゲン/時間、もしくは低線量率の場合にはミリレントゲン/時間であらわすことができる。1ミリレントゲンは1レントゲンの1,000分の1である。これに対応して吸収線量率はラド/時間もしくは1ミリラド/時間であらわされる。電子機器に対する損傷は、一般に照射線量率はレントゲン/秒、吸収線量はラド/秒であらわしている。**

### ガンマ線の測定

**8.20 核爆発とともに熱線は熱として感ずることができるし可視領域の光は目で見ることもできる。しかし放射線の場合は、かなり高い線量率の時に、皮膚がひりひりしたりかゆみを覚えるほか人の五感に感じることはない。このため放射線と物質との相互作用を利用する測定法が各種の放射線の検知・測定用としてできている。次に述べるいくつかの測定器は $\gamma$ 線のみならず中性子に対してもやや反応する。したがって、 $\gamma$ 線の測定には、測定器を中性子に対して遮蔽する必要がある。装置の基本的な作動原理は以下に述べるが、線量や線量率の実際の測定方法については§8.29と§8.30に述べる。**

**8.21 通常、ガスは電気を通過させないが、その中を $\alpha$ 線・ $\beta$ 線・ $\gamma$ 線のよう**

な放射線が通るとイオン対が生じて、ガスはある程度電気を通過させるようになる。ガイガー計数管・ポケット電離箱（線量計）は $\gamma$ 線などの放射線を測定するが、これらはガスの中に電荷をもつイオン対ができるで電気を通過させるようになることを利用している。

**8.22** 半導体（固体）検出器はガス中ではなく固体中の電離を利用するものである。この検出器は三つの領域からできている。まず、電流に寄与する電子過剰のNegative域、単にn領域、次に電子欠乏のPositive域、単にp領域、最後に正負平衡している領域の3つである。検出器では平衡領域はnとp領域の間にはさまれる。両端の領域の電位差を打消すように電圧をかける。この時、電流は流れない。放射線がこの検出器に入ると平衡領域の中でイオン化が生じ、放射線強度に比例した電流パルスが発生する。常温で作動する半導体検出器はシリコンで作られる。シリコンは不純物が入っていないもの（平衡領域）と規定量の不純物が入っているものがある。たとえばヒ素・アンチモンを入れる場合（n領域）とボロン・アルミニウムを入れる場合（p領域）がある。

**8.23** 固体・液体・気体の物質と放射線の相互作用は他に“励起作用”があり放射線の測定に利用される。この場合は、電離作用のように電子が原子から完全に自由にならずに原子が余分のエネルギーを受け取る。その結果、原子は高いエネルギー状態もしくは励起状態になる。このように原子や分子の電子が励起されると一般には過剰のエネルギー（励起エネルギー）をほぼ $10^{-6}$ sec以内に放出する。通常、固体や液体のある種の物質はこの過剰の励起エネルギーを可視光のパルス即ちシンチレーションとして放出することができる。シンチレーション検出器では、この発光を光電子増倍管やこれの附属電子装置を用いて計数する。

**8.24** 蛍光線量計では放射線照射により安定な蛍光中心が作られる。この蛍光中心は近紫外を照射することにより刺激され可視光を放出する。例えば、銀を添加した磷酸ガラスの棒や板に $\gamma$ 線やX線をあてた後、紫外線を照射すると蛍光を発する。この蛍光は光電検出器を用いて測定が可能である。熱ルミネッセンス線量計は放射線照射により準安定な状態になる。これに熱を加えると光を放出する。

一般に放射線線量計に使用される熱ルミネッセンス材料は少量のマンガンを含んだLiFである。蛍光線量計や熱ルミネッセンス線量計から放出される全光量はそれらの受感部分の吸収線量を測定する手がかりとなる。

**8.25** ほとんどの物質は放射線を吸収するとそのエネルギーは最後には熱となる。したがって放射線の入射により発生した熱量から吸収線量を測定することが出来る。細い吸収物体を用いたCalメータ線量計にはこの原理を利用したものもある。ここで放射線から吸収したエネルギーは、吸収物体の熱容量が判明しているので温度上昇を測定することにより測定できる。

**8.26** 特に化学的な変化のような放射線の間接的効果も放射線の測定に利用されている。一つの例は写真フィルムの現像後の黒化（かぶり）である。放射線の測定に使用するフィルムパッチは歯医者がX線写真に使用するのと同様のフィルムを通常2・3枚組で使用する。フィルムを薄い紙等で包み $\gamma$ 線は透すが光は通さないようにする。フィルムを現像した後に黒化度を測定し、 $\gamma$ 線の照射量を知ることができる。

**8.27** この他、光学的線量計として、放射線照射によりできる安定な色彩を利用するものもある。この色彩は特定な波長の光を吸収する。一つの放射線測定の例として、コバルトガラスに光をあてた時の透過率の変化を見るものがある。ビスマスを含む鉛ガラスは高レベルの放射線、特に $\gamma$ 線と中性子線が混合している場合の測定用として開発されている。このように色の変化を利用して放射線が測定できる材料としてブルーセロファンのような着色プラスチックや“シネモイド”とよばれて赤色のセルロイド状のフィルムなどがあげられる。

**8.28** 実際に測定器で放射線を測定する時、照射線量はレントゲン単位で吸収線量はラド単位でそれらの値を直接決められるものではない。実際の数値をきめるために使われるのは電離や発光による電流パルスや、光に対する応答量の変化、あるいは温度の上昇などの測定器で観測できる現象である。測定器は標準 $\gamma$ 線源で較正されてはじめてレントゲン単位で照射線量が、ラド単位で吸収線量が測定できる。この際の標準線源としては適当なエネルギーの $\gamma$ 線を既知の速度で放出す

る、いわゆる放射能の判明している線源が使用される。

**8.29** 全放射線量と線量率の両方とも測定できる器材もあるが、通常はこのいずれかを測定できるように製作されている。全放射線量は個人用線量計で測定でき、作業中に異常な被爆をしないように各個人に装着させる。ポケット電離箱・フィルムバッヂのような光学的濃度を利用するもの、光刺激もしくは熱ルミネッセンス線量計・色の変化による線量計などが個人用線量計の例である。Calメータも全放射線量を測定できる。半導体検出器は電荷の移動時間が短かいのでパルス状の瞬間的な $\gamma$ 線の全線量や線量率の測定に適している。

**8.30** 線量率は通常、サーベイメータとよばれる測定器で測定される。これらは、附属計数回路は同じであるが検出部としては電離箱・G-M管あるいはシンチレーション検出器など各種のものがある。そしてほとんどが携帯可能であり電源として電池を使用している。線量率の測定値から全線量をもとめるには、被曝時の平均線量率に被曝時間を乗じればよい。

## 威力及び距離とガンマ線線量率との関係

**8.31** 種々な $\gamma$ 線放射線量の生物学的效果については12章で更に詳しく述べる。しかし、これから記述する評価の概要として、例をあげれば、一回25ラド（身体組織に対して）の吸収線量以下では人は臨床的な効果は受けない。線量が多くなれば、それだけ重傷となるが、全身照射で1,000ラドを受けた場合には、ほとんど致命的であり数日以内に死亡する。

**8.32** 爆発地点から離れるにしたがい、そこで受ける $\gamma$ 線の線量は小さくなることが予想できる。放射線量と距離との関係は、熱線の場合と同様に2つの要素で決定できる。1つは、中心から離れるために、放射線がより広い面積にわたって広がりそのために減少する。熱線の場合も（§7.07）同様であったが、受線量は距離の2乗に逆比例して減少するので、いわゆる“逆2乗の法則”にしたがうといわれている。第2のファクターは介在する大気中での吸収や散乱による減少である。

**8.33** 今まで、いくつかの各種威力の核実験により既知の距離における $\gamma$ 線量が

# H P『海軍砲術学校』公開資料

注:(5) この場合(そして以後)に関係する密度は爆発により擾乱するがその前の空気の密度である(§8.36と比較)。

測定されている。一方、空気中の $\gamma$ 線の透過についても計算機による大規模な研究が実施されてきた。これら計算結果は、ある線源からの $\gamma$ 線の透過の測定結果及び核実験による観測結果に適合する。空中爆発に対する結果をまとめて2つのグラフに示した。はじめに(図-8.33 a)核分裂兵器の威力と斜距離の関係につ

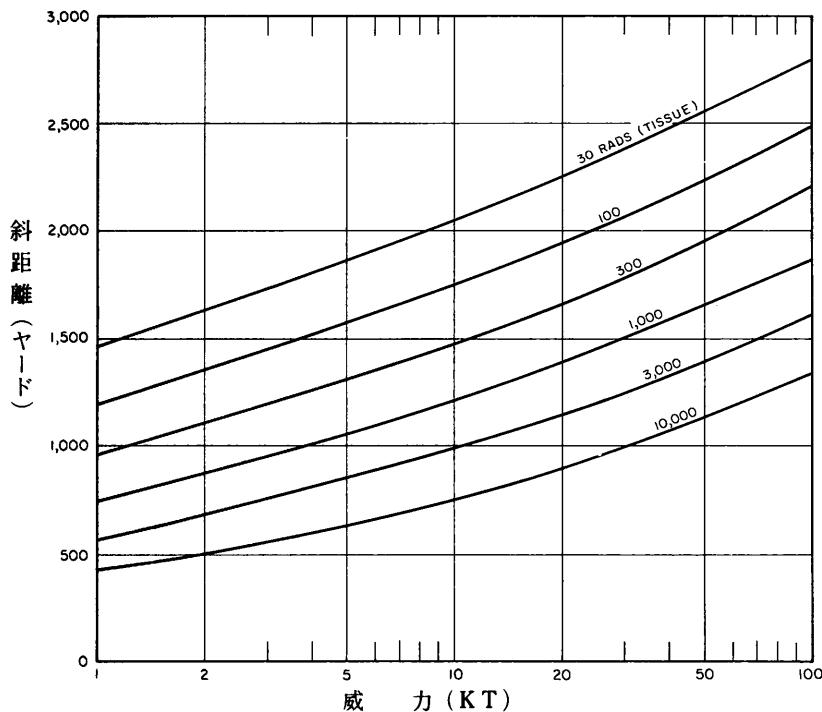


図-8.33 a 地表付近における規定の $\gamma$ 線となる斜距離と空中での核分裂兵器の威力との関係。空気密度を標準大気の0.9とした。(ほとんどの核分裂型兵器について信頼ファクターは0.5から2である)

いて種々な吸収 $\gamma$ 線量(身体表面附近の組織・参照§8.18)に対して示した。次に、(図-8.33 b)同じことを50%核分裂出力の(§1.72)熱核兵器について示した。これらの結果をもとめるにあたり、 $\gamma$ 線が透過する爆発地点から観測点の間の大気の平均密度を一様に標準大気の(5)0.9であると仮定している。図-8.33 a, bからもとめられる $\gamma$ 線量は爆弾の構造やその他の理由によりかわるので

(§ 8.127)、全ての場合について正しいとは限らない。図-8.33 a は、ほとんどの核分裂兵器について信頼ファクター0.5~2以内と考えられるが、図-8.33 b はほとんどの熱核兵器に対して0.25~1.5である。この図に示されていない線量については内隙法を用いることができる。

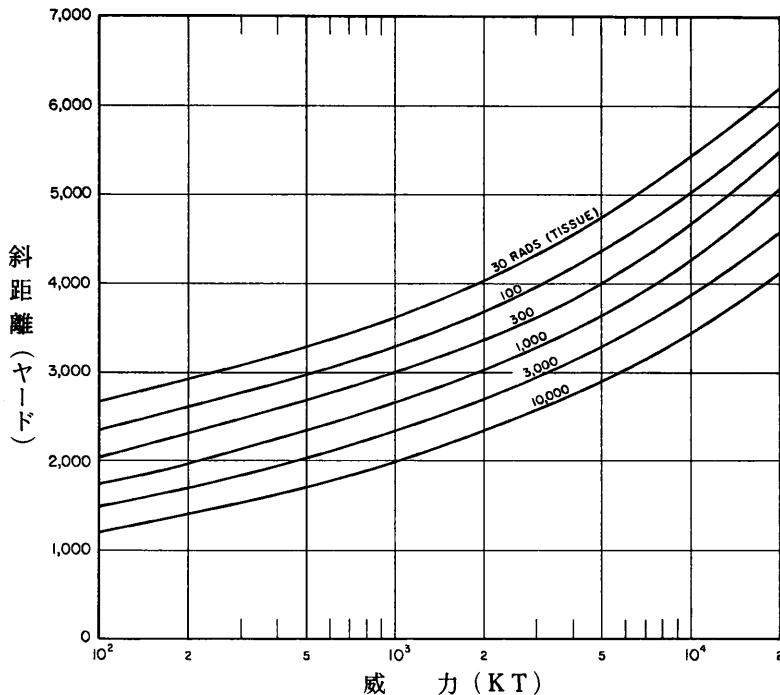


図-8.33 b 50%核分裂出力熱核兵器の場合、地上付近における規定の $\gamma$ 線量を与える斜距離と威力との関係。空気密度は標準大気の0.9の空中爆発とする。(ほとんどの熱核兵器に対する信頼ファクターは0.25から1.5である。)

8.34 この $\gamma$ 線量曲線の使用法について、例えば50KTの低空の核分裂兵器の場合2,000ヤード離れた地点で被曝する吸収線量をもとめてみる。図-8.33 a から、この場合の線量は300ラド弱であることがわかる。内挿すれば250ラド程度になると思われる。

8.35 図-8.33 a と b の中のデータの値は爆発地点から放射線をうける地上の点

までの間に存在する空気の密度により変化する。これは $\gamma$ 線の一部が、透過してゆく過程で空気に吸収されることによる。地表近くの密度の高い空気中では、上空の希薄な空気中よりも多く吸収される。図一8.33の曲線は空気密度を標準大気の0.9と仮定しているので、実際の平均密度がこれよりも大きいか、または小さいかにより $\gamma$ 線の線量は、それぞれ小さくなるか、大きくなるであろう。

**8.36** 図一8.33 b の中で注目すべき点がある。ある特定の線量について考えるならば、その斜距離が大威力の領域に急激に大きくなる即ち曲線の勾配が大きくなっていることである。これは威力が大きくなれば特に衝撃波の正圧部の後側に密度の小さい層ができるからである（§ 3.04）。核分裂生成物からの $\gamma$ 線の放出は時間的に少し遅いので（§ 8.13）、これらの $\gamma$ 線はある離れた地点に衝撃波が到達して、空気密度が減少した後くることになる。したがって大威力の爆弾から出る $\gamma$ 線は小威力のものに比べて吸収される割合が少ない。この効果は“流体力学的強化”とよばれている。

**8.37** 前の2つの図は爆発高度200 W<sup>1/4</sup> フィートでの空中爆発に対する計算結果である。この結果は、たとえ火の玉が地上に接するくらいであっても爆発高度が300フィート以上あれば使用できる。地上爆発に対しては（§ 2.127のフットノート）、ある爆発威力で、ある距離における線量は図一8.33 a と b の中の対応する線量値に、威力と距離によって決まるある係数を乗ずればよい。表一8.37の値はいくつかの威力について、問題となる距離でかなり良い近似値を示す平均値である。表になる中間の威力に対する係数は内挿によりもとめることができる。ま

表一8.37 地表面爆発に対する換算係数

| 図一8.33 a  |               | 図一8.33 b  |                |
|-----------|---------------|-----------|----------------|
| 威 力       | 係 数           | 威 力       | 係 数            |
| 1 ~ 50 KT | $\frac{2}{3}$ | 100 KT    | 1              |
| 100 KT    | 1             | 300 KT    | $1\frac{1}{4}$ |
|           |               | 700 KT    | $1\frac{3}{4}$ |
|           |               | 2 MT      | 2              |
|           |               | 5 ~ 20 MT | 3              |

注:(6) 半価層が使用されることもある。これは入射放射線量を $\frac{1}{2}$ にする物質の厚さと定義される。したがって半価層の2倍ならば線量を $\frac{1}{4}$ に、3倍ならば $\frac{1}{8}$ となる。

(7)  $\lambda_{10}$ 価層は物質に対して垂直に入射する $\gamma$ 線によるものである。 $\gamma$ 線が垂線に対して角度 $\theta$ で入射するときは、 $\lambda_{10}$ 価層は、0か45°より小さい場合には、近似的には表の値に $\cos\theta$ を乗じて得ることができる。

た、300フィート以下の地上爆発までの場合の線量をもとめるため表の値と1の中間の値を使用することもできる。

### ガンマ線の遮蔽

**8.38**  $\gamma$ 線はいかなる物質でも、その中を通る際に吸収される。概要としていい得ることは、放射線強度の減少度は線源と考慮する地点までの間にある物質の単位面積あたりの質量に左右される。したがって、ある規定量にまで減少させるためには水のように小さい密度の場合は鉄など密度の大きいものより必要な厚さは大きくなる。厳密には $\gamma$ 線を完全に吸収してしまうことは不可能である。しかし、必要な厚さの物質を放射線を放出する爆発地点と隊員が存在する場所の間に設置するならば被曝線量は無視できるまで小さくすることができる。

**8.39**  $\gamma$ 線の遮蔽を考察する場合の最も簡単な例は単一のエネルギーの細いビーム状の $\gamma$ 線が比較的薄い遮蔽体を通過する時である。このように理想的な特定条件の時、理論的にあるエネルギーの $\gamma$ 線に対する物質の遮蔽能力をあらわすものとして“10分の1価層”という概念を導入することができる (cf. § 8.95その他)。10分の1価層とは放射線量もしくは線量率をその物質に入射する前にくらべて、 $\lambda_{10}$ に減少できる物質の厚さと定義されている。したがって放射線が $\lambda_{10}$ 価層を通過すると $\lambda_{10}$ に減少する。したがって、もしある人員が遮蔽なしで初期 $\gamma$ 線の500ラド(組織の吸収線量)の地点に立入る場合も、 $\lambda_{10}$ 価層のある物質を設置するならば線量をほぼ50ラドに減少することができる。その上に $\lambda_{10}$ 価層の物質を設置するならば、さらに $\lambda_{10}$ に減少するので最後は被曝する量は約5ラドとなる。このように $\lambda_{10}$ 価層の物質が続いて存在する場合、いずれも放射線をさらに $\lambda_{10}$ に減少させる。このように1個の $\lambda_{10}$ 価層の物質は放射線量を $\lambda_{10}$ にし、2つの $\lambda_{10}$ 価層は $10 \times 10$ 既ち $\lambda_{100}$ に、3つの場合は $\lambda_{1000}$ というように(6)減少させる。

**8.40** 核爆発からの $\gamma$ 線を遮蔽するような条件では、 $\lambda_{10}$ 価層(7)の概念は考えられない。第一 $\gamma$ 線のエネルギーは広い範囲にわたっており、放射線は広い空間に放出され、さらに問題としている場所では厚い遮蔽物が必要となるからである。したがって、遮蔽物の能力を評価するには複雑な問題がある。しかし電子計算機を使

用していくつかの計算がなされてきた。放射線の遮蔽に対して表面から数インチを除けば遮蔽物の有効%値層の考え方が多くの場合かなり正確に適用できることか知られている。この結論は、§ 8.39で考察した単純な条件に反するいくつかの要素が要領よく相消去されるために生まれるものであろう。遮蔽物の最初の数インチでは遮蔽度は有効%値層の考え方からの値よりも一般に大きく、有効%値層の考え方を使用するならば安全側となる。

**8.41** 遮蔽の際よく使用されているいくつかの材料の有効%値層を表-8.41に示した。この値は爆発1分後の核分裂生成物から放出される広い $\gamma$ 線束や、空気中の窒素に対する中性子捕獲 $\gamma$ 線（§ 8.11）について得られたものである。これら、特定の $\gamma$ 線は初期 $\gamma$ 線の代表的な主成分である。窒素の捕獲（2次） $\gamma$ 線を%に減少させるに必要な厚さは、核分裂生成物からの $\gamma$ 線よりも、物質のいかんによらず、ほぼ50%大となる。これは、前者の $\gamma$ 線のエネルギーが非常に大きいためである。

表-8.41 核分裂生成物の $\gamma$ 線及び窒素捕獲 $\gamma$ 線に対する有効%値層の近似値

| 物質名    | 密度<br>(ポンド/ $\text{ft}^3$ ) | 核分裂生成物             |                                       | 窒素捕獲               |                                       |
|--------|-----------------------------|--------------------|---------------------------------------|--------------------|---------------------------------------|
|        |                             | %値層<br>厚さ<br>(インチ) | $D \times T$<br>(ポンド/ $\text{ft}^2$ ) | %値層<br>厚さ<br>(インチ) | $D \times T$<br>(ポンド/ $\text{ft}^2$ ) |
| 鋼（鉄）   | 490                         | 3.3                | 135                                   | 4.3                | 176                                   |
| コンクリート | 146                         | 11                 | 134                                   | 16                 | 194                                   |
| 土      | 62.4                        | 16                 | 133                                   | 24                 | 200                                   |
| 水      | 62.4                        | 24                 | 125                                   | 39                 | 201                                   |
| 木材     | 40                          | 38                 | 127                                   | 63                 | 210                                   |

**8.42** 各々の $\gamma$ 線に対する第2行に $D \times T$ （ポンド/平方フィート）と書かれているのは、物質の密度D（ポンド/立方フィート）に%値層（フィート）を乗じた積である。この量は $\gamma$ 線に対してほとんど一定であることは注目すべきことである。この事は、§ 8.38に述べたように、 $\gamma$ 線の遮蔽は近似的には遮蔽材の質量（単位面積あたり）により決まるということによる。もしも特定のある物質について%値層が求められていないが、密度が求められている場合には、 $D \times T$ が核

分裂生成物  $\gamma$  線に対して 130 ポンド / 平方フィート、窒素捕獲  $\gamma$  線に対して 200 ポンド / 平方フィートであると仮定してもとめればよい推定値を得ることができる。核爆発での初期  $\gamma$  線の防護のため、ある遮蔽物の有効性を考察するときは、これらの値の大きい方を使用する方がよい。その結果、防護能力は実際よりも小さく見積まれるけれども、遮蔽の有効性は過大視するよりも安全側にしておく方がよい。

**8.43** 放射線源と標的例えば人間との間にある特定の遮蔽物を設置した場合の防護性をより正確に評価するには、いくつかのファクターを考慮する必要がある。これらは、遮蔽物に入射する  $\gamma$  線のエネルギー分布、 $\gamma$  線の入射角、遮蔽材の幾何学的条件（形）などである。このようなファクターを考慮するには、たとえ簡単な構造の遮蔽物の計算でも電子計算機が必要となる。初期  $\gamma$  線（中性子）を遮蔽するための一般的なシェルターの有効性の評価が表-8.72になされている。（同じ構造物に対する残品（フォールアウト） $\gamma$  線のデータは表-9.120に示した。）

**8.44**  $\gamma$  線は、真空中は光速度で直進する。しかし、大気中を通過する時は、熱線と同様に、 $\gamma$  線は、とくに酸素および窒素により散乱される。したがって、 $\gamma$  線は地上の標的に對していろいろな方向から到達する。被曝する線量の大部分は、爆発の方向から到達するが、かなりの量の放射線が他の方向から到達する。空気中の散乱の結果により標的に到達する  $\gamma$  線を“スカイシャイン”とよぶ。

**8.45**  $\gamma$  線が爆心以外の方向からも標的に到達しうるということは、遮蔽の問題において重要なことである。壁・堤防または丘の後方に退避している人員は、直接  $\gamma$  線に対しある程度遮蔽されているが、図-8.45 a において破線で示したように、散乱された放射線（スカイシャイン）にさらされている。 $\gamma$  線からの適切な防護は、遮蔽物がその人員を囲み、その人員があらゆる方向に對して遮蔽されているときにのみ確保される（図-8.45 b）。この場合には、直接の放射線及び散乱線の両方とも減少する。ある標的がうける放射線の方向に對する変化の度合は“角度分布”とよばれている。初期  $\gamma$  線の角度分布は爆弾の種類や標的の爆発地点からの距離には無関係であることが知られている。

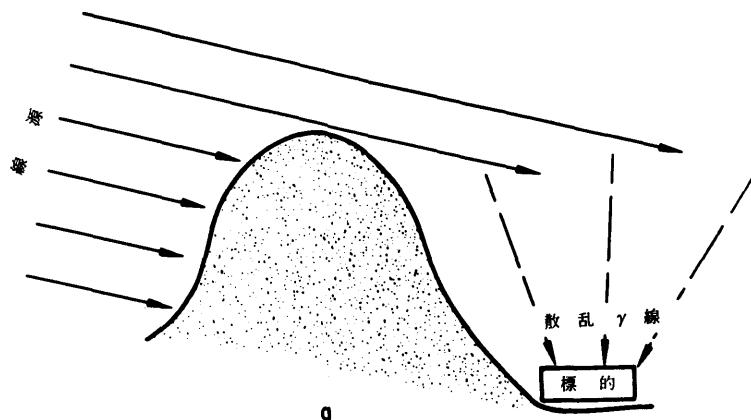


図-8.45 a 散乱  $\gamma$ 線にさらされている標的

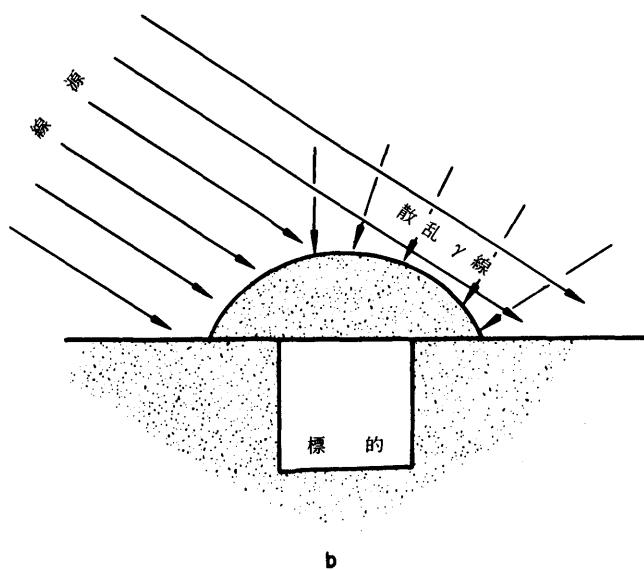


図-8.45 b 散乱  $\gamma$ 線から遮蔽されている標的

### 初期ガンマ線の放出速度

**8.46** 図-8.33 a 及び b により放射線量を計算する場合は、初期放射線は 1 分間の間はずっとさらされていると仮定している。しかし、放射線が爆発した兵器か

ら放出される速度について知っておくことは重要なことである。もしこの放出速度に関する情報があるならば、仮に爆発の閃光をみてから、1～2秒後にシェルターの中に避難した場合、放射線の一部から逃れることができて結果として被爆する線量を知ることもできる。

**8.47** 図-8.47に核兵器から発生する $\gamma$ 線エネルギーの放出速度で示した。しかし、ある位置でエネルギーを受ける時間的割合は、いくつかのファクターで決定するが最も重要なのは爆発威力と爆発地点までの距離である。これら2つの量は初期 $\gamma$ 線に関するいくつかの要素に相対的な影響をもつ。威力が大きいほど、また距離が大となるほど、それだけ核分裂生成物からの $\gamma$ 線に対する流体力学的強化の効

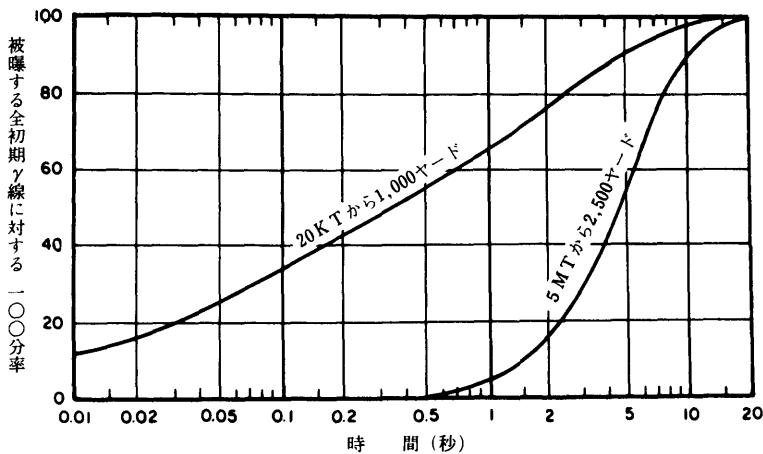


図-8.47 20 KTと5 MTの空中爆発の場合について、被ばくする初期 $\gamma$ 線100分率の時間に対する関数

果は大きくなる（§8.36）。この強化が大きくなれば核分裂生成物からの $\gamma$ 線の重要性が強大することになる。このように、大威力で大きな距離の場合には、他の成分にくらべて比較的遅い時間に重要な核分裂生成物からの $\gamma$ 線が全初期 $\gamma$ 線のうちの大部分を占めるようになる。2つの異なる場合について、種々の時間までに全線量のうちの何%を被曝するかについては図-8.47に示した。一つの例は20 KTの空中爆発で、1,000ヤード離れた場合であり、もう一つは5 MT爆発から

2,500ヤード離れた場合についてである。図から、爆発後最初の1秒間のうちに受ける線量を考えるならば、前者の例の場合には初期 $\gamma$ 線全体の約65%をうけ、後者の例では約5%をうけることを知ることができる。

**8.48** 爆発の閃光をみてから1秒以内にしっかりした物のかげに伏せるなどの避難動作ができるならば、場合によっては本来死亡するところを助かることもある。図-8.47の曲線は、この初期 $\gamma$ 線に対する部分的避難が大威力の爆発の場合により実行可能であることを表わしている。

### 第3節 中性子

#### 中性子の発生源

**8.49**  $\gamma$ 線は電磁波（§8.17）であり、中性子はある質量をもった粒子であるが、生体に対する影響や、他の物質に対する損傷などの性質は似ている。 $\gamma$ 線の場合と同じように、中性子も極めて大線量受けた時のみ人体に感じることができる。中性子は空気中の長距離を透過することができるので、中性子が爆発全エネルギーの約1%を占める割には大きな傷害をおよぼす。

**8.50** 本質的には、核爆発にともなう全ての中性子は核分裂か、または核融合の過程において放出される（§1.42, 1.69）。融合の際の全ての中性子、分裂の際の99%以上の中性子は爆発とほとんど同時、おそらく100万分の1秒以内に発生する。これらの中性子は“即発中性子”とよばれている。さらに“遅発中性子”とよばれる分裂中性子のうちの1%以下のわずかの中性子が引続いて放出される。この遅発中性子の大部分は1分以内に放出され初期放射線の中に入る。MT級の爆発で2,000ヤード以上離れた地点では、遅発中性子は流体力学的強化をうけるので、これをうけない即発中性子よりも線量として大きくなる（§8.36）。しかし大威力の兵器の時、この両線量とも $\gamma$ 線の線量より小である。中性子はまた高エネルギーの $\gamma$ 線を爆弾構成材料との相互作用によっても発生するがその寄与は少ない。

**8.51** 即発中性子は爆発とほとんど同様に放出されるけれども、これが爆発して

いる爆発領域から外に放出されるのは少しおくれる。これは中性子が、核兵器残滓の中の原子核と多重散乱をするためである。このため、中性子は最終的に外に放出してくるまでに複雑なジグザグ運動をする。しかし、中性子の運動は非常に速いので、このおくれはせいぜい1,000分の1秒以下である。中性子が障害を起こすような爆発地点からの距離の位置には、ほとんどの中性子が爆発後1秒以内に到達し核分裂生成物からの $\gamma$ 線よりもはやい。したがって、§ 8.48で述べた $\gamma$ 線に対する退避動作は中性子に対してはあまり効果がない。

**8.52** 核分裂の過程で放出される中性子のエネルギーは、ある巾をもっているが実際的には高エネルギー域のものである。この高エネルギーの中性子は§ 8.09に述べた速中性子とよばれるものでエネルギーは力学的な運動エネルギーである。しかし核との衝突の過程で速中性子と核との間にエネルギーの授受がある。中性子のあるものはウランのような重い核がある爆弾自身の中で非弾性散乱をして、そのエネルギーを失なう。与えられたエネルギーは $\gamma$ 線として放出される（§ 8.09）。他の衝突とくに軽い核との衝突の場合には、単に速中性子から衝突核と運動エネルギーを移行するのみで、これは弾性衝突であり $\gamma$ 線の放出をともなわない。このような、種々な核との各種の衝突の結果、爆発領域から他に放出される中性子は高速から中速、低速までの広いエネルギー範囲に分布している。最も低エネルギー（もしくは速度）の中性子は熱中性子とよばれ、周囲のものと熱的（もしくは温度的）にほぼ平衡している。

**8.53** 上に述べた種々の相互作用の結果、爆発の領域から放出する中性子のエネルギー分布、即ち“中性子エネルギースペクトル”は分裂や融合の際発生した時のものと非常に異なっている。さらにエネルギースペクトルは空気中を伝播する間に変化する可能性がある。たとえば爆発領域から放出した中性子は大気中の窒素核や酸素、その他の核に衝突する。これらの衝突は、兵器の中にくらべて、密度・濃度が小さいのでひん度は小さい。しかし、このため衝突の結果は重要である。理由の一つは、1回の衝突あたりに減少する中性子のエネルギーの平均的割合は軽い核の方が大きいことによる。酸素や窒素の核は比較的軽く、中性子は空気中での

弾性散乱によって大きく減速される。次に窒素との衝突により、非弾性散乱をする場合があり、中性子から移行したエネルギーは結局 $\gamma$ 線の発生源となる（§ 8.09、図-8.14）。高速中性子と酸素との非弾性散乱も $\gamma$ 線源となるがあまり重要でない（§ 8.107）。

**8.54** 特に窒素核との衝突の場合では、中性子は捕獲され（§ 8.11）、中性子は完全に消滅することがある。捕獲される確率は遅い（低エネルギー）中性子の方が非常に大きい。爆発地点から、たとえば地上のある場所まで中性子が空気中を通過する間に何回もの相互作用をする。そして速（高エネルギー）中性子がそのエネルギーを失なって遅くなっていく。同時に、遅い中性子は捕獲される確率が増大し、その結果、通常 $\gamma$ 線を放出するが中性子は放射線ではなくなる。

**8.55** 核爆発からの中性子の測定や、それらの生体への効果を知るうえで中性子のエネルギー分布と、その爆発地点からの距離による変化を知ることは重要なことである。野外で核実験をした頃の測定結果や、較正された線源による室内実験、それに電子計算機による大がかりな計算結果によれば、核分裂兵器からの中性子のエネルギー分布は、兵器が決定するならば、生物学的効果が問題となる距離の範囲では変化しないと考えてよい。このことは“平衡スペクトル”として知られている。

**8.56** この平衡スペクトルになるということは、中性子が空気中を伝播してゆく際起こる現象の組合せの結果である。遅い中性子は窒素核によって捕獲されてしまうが、この減少分は速中性子の減速によって補なわれる。したがって、あるエネルギー巾の中にある中性子の割合（もしくは部分）は、問題にするあらゆる距離で一定とみなされる。しかし、単位面積あたりにうける中性子の全体数は、爆発地点から離れればそれだけ少なくなる。それに、距離による広がり（§ 8.32比較せよ）とともに捕獲による中性子が吸収されてしまうためである。

**8.57** 重水素と三重水素との熱核反応の結果 $14.1\text{MeV}$ のエネルギーの中性子を発生する。このエネルギーは分裂による中性子よりもはるかに大きく、また他の熱核反応を放出するものよりも大きい（§ 1.69）。この非常に高エネルギーの中性子は§ 8.52

# HP『海軍砲術学校』公開資料

注:(8) 高速中性子と生体組織中の水素との相互作用によるイオン化と励起作用は、中性子による生物学的障害の主たる原因と考えられている。

に述べたと同じ相互作用を爆発中の弾の中でおこなう。したがって、一部の中性子は爆発領域から放出する時には $14.1\text{MeV}$ よりも低いエネルギーとなっている。とはいっても高エネルギーで放出される中性子も多く、 $12\sim14\text{MeV}$ にピークをもつ分布をなす。このことは、分裂中性子のエネルギー分布はエネルギーが高くなるにしたがって連続的に減少するのと比べて対照的である。熱核兵器からの中性子のように高エネルギーにピークをもつような場合には、平衡スペクトルの状態は中性子が長距離伝播した後でなければ起こらない（§ 8.117以降）。

## 中性子線束の測定

**8.58** 中性子は、電気を帯びていない粒子であり、物質の中を通過する時も直接電離をしたり励起したりすることはない。しかし、中性子は軽い元素との相互作用の結果をもとに2次的な電離・励起作用をする。たとえば高速中性子が水素原子に衝突すると、その大部分のエネルギーをその原子核に与える。その結果、水素原子核は、それに属する電子の束縛を離れて、高エネルギーの陽子として飛び出す。このような陽子はガス中を通過するとき、その径路に多くのイオン対をつくり電気的に励起をしたりすることができる。このように、高速中性子は水素（もしくは水素を含む物質）と相互作用をして、間接的に電離したり励起したりすることが可能である。<sup>(8)</sup>この中性子と水素との相互作用は、検出器としての電離式カウンターとかシンチレーションカウンターに応用することができる。例えば、仮りに、含水素物質を蛍光物質に混合させることができるとすれば、中性子と水素原子との相互作用で放出される陽子はシンチレーション物質を励起することができる。

**8.59** 遅い中性子や中速の中性子は別 の方法で間接的に電離したり励起したりすることができる。このような中性子が硼素の軽い方の同位元素 ( $^{10}\text{B}$ ) に捕獲されると高速のヘリウムの原子核 ( $\alpha$ 粒子) とリチウムの核が2次的に発生する。中性子はまたリチウムの軽い方の同位元素 ( $^6\text{Li}$ ) に捕獲されて三重水素と  $\alpha$ 粒子を発生する（§ 1.70）。この他中性子は窒素の核に捕獲されて高エネルギーの粒子が発生される（§ 8.110）。いずれの相互作用においても、2次的に発生する荷電

# H P『海軍砲術学校』公開資料

注:(9) あるエネルギーの中性子フルエンスとは、そのエネルギーの中性子に対する照射量を考えてよい。吸収線量は、その物質に付与されるエネルギーからもとめることができる。

粒子はイオン対をつくったり励起したりすることができる。中性子による間接的な電離はウラニウムやプルトニウムの同位元素の分裂の結果でもありうる。分裂片は高エネルギーの荷電粒子（イオン）であり、その径路にそって多くの荷電粒子をつくる。

**8.60** 今まで述べた間接的な電離や励起作用は中性子強度の測定に利用することができる。直接、あるいは間接的にもとめられるその量は“中性子束”とよばれ、これは中性子密度、即ち単位体積中の数と平均速度の積である。中性子束の測定に用いられる硼素計数管やファッショングランバーは、原理的には、一般に用いられる $\gamma$ 線量率計（サーベイメタ）（§ 8.30）とある程度同じである。“組織等価”電離箱が開発されているが、この場合には、中性子による間接電離量と、動物組織に付与するエネルギーとの間の関係が知られている。したがって、ラド（組織）単位での吸収線量がこの方法でもとめることが可能である。

**8.61** 上記の方法のみならず、“節放射化”法が種々のエネルギー範囲における中性子の検知及び測定に広く使われてきた。この方法は、ある元素が中性子捕獲の結果、放射性になるという現象による（§ 8.16）。放射線（ $\beta$ 線または $\gamma$ 線もしくは両方）の放出速度の測定からわかる放射能の量は入射中性子の“積分束”もしくは“フルエンス”、即ち単位面積あたりの中性子数（neutrons/cm<sup>2</sup>）で表わされる線束と時間との積との間にある条件で関係づけられる。したがって、適当な変換係数を使用することにより中性子フルエンスが計算できる。(9) 実際の場合、物質片として薄いシートや箔が使用されるので、中性子の場をみだすようなことはほとんどない。この方法は“放射化検知”といわれ使用される物質片を“放射化検出体”という。中性子のエネルギーが、特定の（しきいの）値をこえるときのみ、反応の確率が大きい放射化検出体は“しきい検出体”とよばれる。この方法は“しきい検出体法”とよばれ、あるしきい値をこえるエネルギーの中性子数をもとめるのに使用される。

**8.62** “核分裂箔”方法はその名称のとおり、核分裂反応を利用している。ウラン又はプルトニウムの同位元素のような分裂性物質のうすい層に中性子があてら

れる。できる核分裂生成物は高い放射能をもっており $\beta$ 線や $\gamma$ 線を放出する。このようにしてできた放射能を測定することにより、核分裂数、したがって分裂物質に入射した中性子フルエンスを知ることができる。

### 中性子線量の威力と距離による変化

**8.63** 核威力、爆発地点からの距離と中性子線量との間の関係を表わすことは、爆弾の特性により大きく異なるということがあり基本的にむづかしいことである。例えば、爆弾の材料により中性子の捕獲の量も非常に異なり、爆発の外に放出する中性子のエネルギー分布や数がかわる。さらに重水素と三重水素の融合のような熱核兵器の場合には高速の中性子の発生をともなう(§ 8.57)。したがって、部分的に熱核(融合)反応を含む爆発の場合には、純粹に核分裂による爆発のものにくらべて高エネルギー(高速)中性子の割合が多いと考えてよい。

**8.64** したがって、爆発エネルギー、1 KTあたりに放出される実際の中性子の数は、そのエネルギー分布は勿論であるが、兵器の種類即ち、融合型か分裂型かによって異なるのは勿論であるが、同じ種類でも兵器により異なることは明らかである。したがって、中性子線量が出力や距離により、いかに変化するかを示す曲線は考えられる全ての場合に正しいとは限らない。図-8.64 a は分裂型、図-8.64 b は出力の50%が熱核兵器によるものであるが、この中の曲線は全てこの制限つきのものである。信頼性は § 8.33 にある図-8.33 a, 8.33 b とそれぞれ同じである。これ等の曲線は、低空爆発の時、地上付近の人体表面組織のうける吸収線量を示している。このデータは通過する空気の平均密度は標準大気の0.9と仮定している。もしも、実際の空気の密度がこれよりも大きかったり小さかったりするとこれに対応して中性子線量は減少、もしくは増加する。

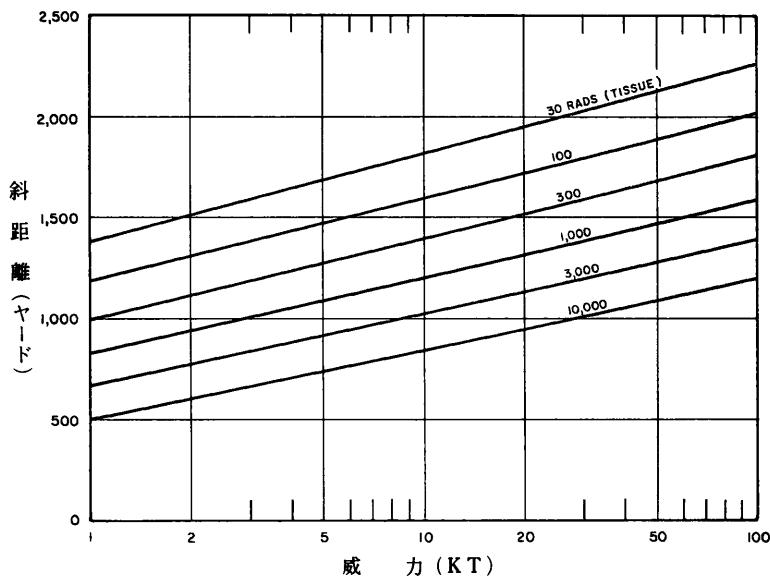


図-8.64 a 地表付近の標的に規定の中性子線量を与える斜距離の爆発威力による変化。核分裂兵器の空中爆発の場合で、空気密度は標準大気の0.9としている。(ほとんどの分裂兵器について信頼性ファクターは0.5から2である。)

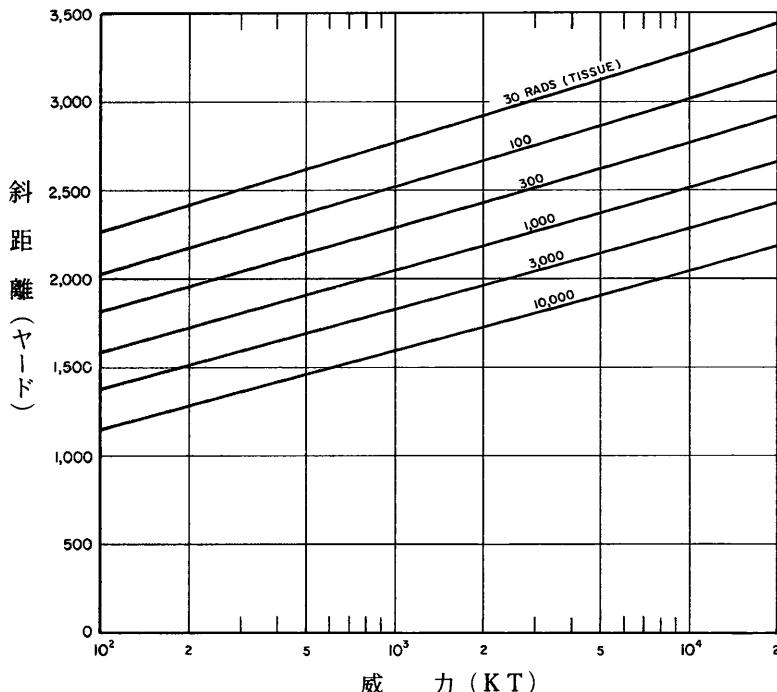


図-8.64 b 地表付近の標的に規定の中性子線量を与える斜距離の爆発威力による変化。熱核兵器の空中爆発の場合で空気密度は標準大気の0.9とした。(ほとんどの熱核兵器について信頼性あるファクターは0.25から1.5である。)

8.65  $\gamma$ 線による線量(図-8.33 a, b)と中性子の線量を比較したり、合わせて考える場合、ある組織に吸収されたあるラド数の中性子線量は、同じ量の $\gamma$ 線量より生物学的效果が大きいということに注意すべきである(§ 12.97)。 $\gamma$ 線の場合と同じように、中性子線量は、大気の吸収・散乱による減衰の結果と逆2乗則のため爆発地点からの距離をともない減少する。しかし、速中性子は非常に短時間に放出され(§ 8.51)、また、生物学的に影響を与えるような大部分は衝撃波よりもずっと速やかに伝播するので、核分裂 $\gamma$ 線についてあったような流体力学的強化は速中性子に対してはない。中性子線量にくらべて $\gamma$ 線量が威力の増加とともに、より急激に増加する理由はこのためである。図-8.64 a, bにおけるデ

ータは空中爆発に適用されると考えられる。地上爆発の場合の速中性子線量は空中爆発の場合の $\frac{1}{2}$ となる。300フィート以下の低空爆発の場合には、地上爆発と空中爆発に対する値を内挿することによりもとめることができる。

### 中性子に対する遮蔽

**8.66** 中性子に対する遮蔽は、 $\gamma$ 線に対する遮蔽とは異なる問題であり、 $\gamma$ 線の場合より困難である。 $\gamma$ 線の遮蔽の場合には、 $\gamma$ 線の発生源と被曝地点の間に必要なだけの物質質量を設置するということにつきる。鉄とか鉛のような重い物質は密度が大きく $\gamma$ 線の遮蔽によい。しかし中性子の場合には、このような物質だけでは十分でない。鉄の遮蔽も核兵器からの中性子に対していくらかの効果はあるが、以下に述べる物質よりは効果が少ない。

**8.67** 核爆発からの中性子の減少にはいくつかの異なる現象が関係する。まず、非常に速い高速中性子は、中程度の速さの速中性子に減速しなければならない。このためには、(非弾性) 衝突のためバリウムや鉄を含む適當な物質が必要となる。次にこの中程度の速中性子は、原子番号(質量数)の小さな物質との弾性散乱によって減速しなければならない。この点、水はその成分である酸素・水素はともに小さい原子量であり非常に適している。遅くなった(熱)中性子を次に吸収しなければならない。しかし、中性子の非弾性散乱や、ことに中性子捕獲は $\gamma$ 線の放出をともなう(§ 8.53, § 8.54)。したがって、遮蔽体から、この $\gamma$ 線をできるだけ出さないようにするために十分な $\gamma$ 線の遮蔽物を含めなければならない。

**8.68** コンクリートや湿った土壌は、 $\gamma$ 線の遮蔽のときと同様に一般に中性子に対してもかなり有効である。これらの物質は通常大きい原子量の元素を含まないけれども、 $\gamma$ 線を吸収するためのカルシウム・ケイ素及び酸素と同様に、中性子を減速して捕獲するための水素を大きな比率で含んでいるからである。例えば、12インチの厚のコンクリートは熱核兵器からの中性子フルエンスを約10分の1に、また24インチ厚では100分の1に減少させる。高エネルギーの初期 $\gamma$ に対しても、これ程減少することはできないが(表-8.41参照)、厚さを増加させるならば、コ

ンクリートは、核爆発からの中性子や $\gamma$ 線の遮蔽用材料として用いることができる。湿った土壌の場合は、必要な厚さは50%増となるけれども、同じような効果が期待できる。

**8.69** コンクリート混合物に多量の鉄（酸化鉄）鉱物、たとえば褐鉄鉱を加えたり、打抜鋼のような小粒の鉄を混ぜて、改良（良）コンクリートにすれば放射線の吸収を増大させることができる。その他、バリウムの化合物である重品石をコンクリートに混合してもよい。重い元素があれば、その材料の与えられた厚さ（または体積）での中性子及び $\gamma$ 線に対する遮蔽特性をよくする。熱核兵器からの中性子フルエンスを10分の1にするには、この重コンクリートは7インチ必要である。

**8.70** 中性子遮蔽物に硼素または硼素化合物を入れると、かなり利点がある。その元素の軽い方の同位元素（硼素10）は低速中性子を吸収しやすく（§ 8.59）、この過程で中程度のエネルギー（0.48MeV）の $\gamma$ 線が放出されるが、これは簡単に遮蔽できる。したがって、中性子吸収能力を向上するために、コンクリートに大量の硼素を含む灰硼石を入れることは可能である。

**8.71** 遮蔽を十分にするためには、 $\gamma$ 線の散乱も考慮して、防護は全ての方向にしなければならないことが§ 8.45で指摘された。同じようなことが、中性子の場合にもいうことができる。先に述べたように、中性子は空気中で数回の散乱をする。したがって、爆発地点からの距離が中くらいであっても、地上に到達するまでには、その方向はほとんど無秩序に分布することになる。爆発方向からの中性子に対して遮蔽物によって障害から、ある程度防護することができるが、 $\gamma$ 線の場合と同様に、全ての方向に対し遮蔽したシェルターがよい防護手段である。

**8.72** 中性子は、あらゆる方向から到達するために複雑となるが、さらに、それぞれの方向から到達する中性子のエネルギーが分布するということもあり、簡単な構築物といえども、その遮蔽能力の計算には複雑な計算機コードが必要である。種々の構築物の遮蔽性能を“線量透過係数”という量でもとめて表-8.72に示した。この線量透過係数とは遮蔽体の中の線量と、もし遮蔽体がない場合の同じ場所で

うける線量との比と定義されている。このうちのいくつかの透過係数は核実験で実際にもとめられたものもしくは実験値からの外挿値である。また、あるものは比較的詳細な計算によりもとめられたものもある。しかし単に見積り程度のものもいくつかはある。線量透過係数がある巾で与えられているが、この理由は2つある。1つには値そのものが正確でないこと。もう1つには同じ構築物の中でもその場所により遮蔽度が異なることがあるからである。

表-8.72 各種の構築物の線量透過係数

| 構築物                   | 初期γ線        | 中性子        |
|-----------------------|-------------|------------|
| 地中3フィート               | 0.002-0.004 | 0.002-0.01 |
| フレームハウス               | 0.8-1.0     | 0.3-0.8    |
| 地下室                   | 0.1-0.6     | 0.1-0.8    |
| 多層式のビルディング<br>(アパート型) |             |            |
| 上層部                   | 0.8-0.9     | 0.9-1.0    |
| 下層部                   | 0.3-0.6     | 0.3-0.8    |
| コンクリートブロック構造シェルタ      |             |            |
| 壁厚 9インチ               | 0.1-0.2     | 0.3-0.5    |
| 壁厚 12インチ              | 0.05-0.1    | 0.2-0.4    |
| 壁厚 24インチ              | 0.007-0.02  | 0.1-0.2    |
| シェルター<br>上部構造         |             |            |
| 土かぶり厚さ 2フィート          | 0.03-0.07   | 0.02-0.08  |
| 土かぶり厚さ 3フィート          | 0.007-0.02  | 0.01-0.05  |

## 第4節 電子装置に対する瞬間的放射線の効果

### T R E E の一般的な特性

8.73 初期放射線のうちでも特にγ線や中性子は、無線機・レーダー・ジャイロスコープ・慣性誘導装置・電子計算機などの電子装置の部品に影響を及ぼす。核爆発放射線に対するこれら装置のぜい弱性は吸収する放射線の特性・装置の構成

部品や作動している状態によって異なる。実際の効果は、電子装置パッケイヂの中の回路の特性、回路を構成する実際の部品、装置の組立方法、部品の材料などにより決定される。

**8.74** 今、考えている効果は“電子装置に対する一時的放射線の効果”(Transient-radiation effect in electronics) 一般に頭文字をとって簡単に T R E E とよばれているものである。一般とは、T R E E といえば、核爆発からの瞬間的な初期放射線にさらされたために電子装置がうける効果を意味する。ここで特に“瞬間的”といっているのは、放射線は1分間より短かい短時間しか持続しないので、これは放射線に対する形容詞である。しかし、効果は決ずしも一時的でない。電子装置や材料について研究する時、核兵器からの瞬間的放射線を実験室の内でシミュレートするため定常的な線源や瞬間的な放射線発生を制御する手段をとる。

**8.75** T R E E での“electronics”という言葉は次に示すもの全て、もしくはどれかをさす。個々の電子部品、回路を構成する電子部品そして完全な装置とするための回路である。T R E E 研究の中にはチャイロスロープや慣性誘導装置のように電子装置に結合される電子機械的な構成品も含ませることができる。純粹に機械的もしくは構造部品は、それらの作動が電流(圧)に左右されず、放射線に対する感受性が少ないので除外する。

**8.76** 電子装置に対する放射線効果は一時的なものあるいは大なり小なり永続的なものがある。ある特定の部品、例えばトランジスターに対する効果が一時的であるとしても、その結果、回路の外の部分に永続的な損傷を残すことがあり得る。構成部品の瞬間的な効果は $\gamma$ 線による電離の結果であり、その程度は通常、線量よりも線量率、即ちラド/秒できる。さらに永続的な効果は全部ではないが一般的には、高速中性子による結晶格子の原子の変位が原因である。このような場合の損傷の程度は中性子数/ $\text{cm}^2$ であらわされる中性子フルエンスできる(§ 8.61)。 $\gamma$ 線で電子構成部品が永続的効果をうけたような場合には、重要なのは一般にはラドで表わされる線量である。電子装備品のいくつかの構成部品に対

# H P『海軍砲術学校』公開資料

注:⑩ エネルギごとの中性子フルエンスが出力や核爆発地点からの距離によってどう変わるかということについては、図-8.117 aとbを参照。

する効果について次に簡単に説明する。放射線との相互作用のことについては後述する（§ 8.133他）。

## 電子装置構成部品に対する観測される効果

### 半導体装置

**8.77** ダイオード・トランジスター・その他集積回路のような半導体装置は電子装置に広く使われている。これらは放射線に対し非常に感じやすい半導体からできている。一時的な効果としては、固体が $\gamma$ 線を吸収して電流パルスを発生するということがある。この現象を逆に利用して放射線を測定するために半導体検出器が作られた（§ 8.22）。電流パルスの大きさは、放射線の線量率に依存し、また、ダイオードよりもトランジスターの方が大きい。それはトランジスターの中では、イオン化によってできた1次的な電流パルスが増幅されて2次電流をつくるからである。

**8.78** 半導体の中にできた原子の変位によるいくつかの変化は短時間のうちに回復するか“もと通り”（§ 8.142）になるが持続する変化もある。材料の物理的特性の変化が永続的なものであれば、ダイオードやトランジスターの動作特性に影響を及ぼす。通常、トランジスターの方が放射線の影響を受けやすいので、ここではトランジスターについてのみ述べることにする。多くの場合、トランジスターの電流増幅率（利得）が低下することは半導体素子を含む電子装置の使用上、決定的な欠陥となる。

**8.79** 電子装置の中でたとえ同じ働きをするトランジスターであっても、放射線に対する感受性はその種類によって大いに異なる。速中性子のフルエンスに対して、小さい場合には $10^{11} \text{ neutrons/cm}^2$ で利得の減少が認められなくなるものもあれば $10^{15}$ （もしくはそれ以上） $\text{neutrons/cm}^2$ でも利得の低下が問題にならないものもある。（このセクションでいう速中性子フルエンスとは $10\text{KeV}$ 、即ち $0.01\text{MeV}$ 以上のエネルギーをもつ分裂中性子に対するものである）。トランジスターの耐放射線性はその構造により大いに異なる。一般に言えることは高周波素子のようにベースの薄いものや接合部面積の小さいものは、放射線に対して強い。

例えば、拡散接合型トランジスターは接合面積が小さいので合金接合型素子よりも耐放射線性においてすぐれている。接合型トランジスターや特に薄層電界効果トランジスターは使用法によっては放射線に対して極めて強い。後者の型のあるものは速中性子フルエンス  $10^{15}$  neutrons/cm<sup>2</sup> の照射後でも未だ作動した。

**8.80 MOS (Metal-oxide semiconductor)** 電界効果トランジスターの損傷は、1次的には中性子によるよりもむしろγ線によるので放射線による効果はラド単位（シリコン）の線量に対する値として報告される。この素子の場合、放射線の効果が最も顕著にあらわれるのが臨界電圧である。臨界電圧とは、ドレインとソースの間に丁度電流が流れはじめる時の電圧のことである。一般に臨界電圧の低下は  $10^4$  ラド（シリコン）程度からゆっくりはじまり（0.5ボルト変化）、線量が多くなると急速に変化してゆく。しかし、MOSトランジスターに対する放射線の効果は酸化物中の不純物により異なる。この酸化物をつくる技術が発達してきたので  $10^6$  ラド（シリコン）程度の線量に対しても耐え得るものができるている。

### 真空管とガス封入管

**8.81 真空管**における一時的効果は主としてγ線によって（§ 8.89）管の材料から真空部分に放出される（コンプトン）電子による。この電子はエネルギーが高いので真空管内の電場によってひどく影響されるようなことはない。しかし、真空管内の材料の表面に衝突して低エネルギーの2次電子ができる。これは管内の電場の影響をうけ真空管の動作特性は一時的に変わることが考えられる。特にグリッドはこの点非常に影響される。このため、もしも電子数が減少したとすると、グリッドの電圧はより正となるだろう。そうすると、プレート電流が一時的に増加する。速中性子のフルエンスが  $10^{16}$  neutrons/cm<sup>2</sup> 程度の大きさの時、真空管の周囲のガラス部分に機械的に欠陥ができ、永続的な損傷をうける。しかし、核爆発の場合、このようなフルエンスの場所では爆風や火災による損傷の方が決定的である。

**8.82 ガス封入管**（サイラトロン）にγ線を照射されるとクセノンなどガスの一

# HP『海軍砲術学校』公開資料

注：(1) この場合や他の時も損傷は、 $\gamma$ 線の（線量よりむしろ）線量率できる。

部が電離のため一時的に疑放電をする。さらに、イオンとガス中の中性子との衝突のため電離する。真空管の場合と同じように、大きな熱中性子フルエンスはガス封入管のガラスを破壊したり、ガラスと金属の接合部のシールがわるくなり使用できなくなる。

## コンデンサー・抵抗及び電池

**8.83** 放射線はコンデンサーの電気的特性に対しても、いくらか影響を及ぼす。容量値、損失係数そして漏洩抵抗の変化が照射の結果観測されている。これらの効果は速中性子束が $10^{15}$  neutrons/cm<sup>2</sup>以下では、通常それほど大きな影響を与えるとは考えられていない。強力な放射線パルスをあてている時には、コンデンサーに対する効果としてよく言われていることは、誘電体（絶縁体）の電導率が一時的に変化してコンデンサーを通る漏洩電流が増大することである。

**8.84** 放射線の抵抗に対する効果は半導体やコンデンサーにくらべて小さく、通常、無視してもよい。しかし、回路において高精度の炭素抵抗が必要なとき $\gamma$ 線量率 $10^7$  ラド（炭素）/秒<sup>(1)</sup>や中性子フルエンス $10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>では一時的效果は大きいかもしれない。一時的な効果は一般に $\gamma$ 線が物質と相互作用をして電子を放出するためであるがエネルギーの大きい中性子でも反跳核によって多量の電離を起こす。抵抗に対する一時的な効果としては次のものがある。

(1) 絶縁材料やその周囲の材料のリークによる有効抵抗値の変化

(2) 絶縁物質による2次電子の放出、吸収の差による誘導電流

永続的な効果は通常中性子による原子の変位による、これによって材料の抵抗が変化する。

**8.85** 電池は他の部品より放射線に対して影響をうけない。ニッケル・カドミニウム電池は $\gamma$ 線量率が $10^7$  rad（空気）/秒まで影響しない。いくつかの電池や標準セルについて速中性子 $10^{13}$  neutrons/cm<sup>2</sup>においても放射線損傷はなかった。水銀電池は速中性子が $10^{16}$  neutrons/cm<sup>2</sup>まで耐えることができる。

## ケーブルと配線

**8.86** 同軸ケーブルや3軸ケーブルのような電線や配線に強力な放射線パルスが

あたると大きな変動が発生する考えられている。ケーブルに電圧をかけていなくても、放射線パルスがあたると信号が発生する。この信号の電流は置換電流とよばれる。その理由は、この電流は放射線が電子やその他の荷電粒子をもとの位置からはじき出した時、そこをうめるため見かけ上外部回路に流れなければならぬ電流だからである。この他、これはケーブルに加えられている電圧により変化するが、電導電流とよばれる信号もある。これは放射線によって絶縁誘電体が電導性を有するようになることによる。しかし、電導電流の中には誘電体の物質変化によるものもかなり含まれている。これらは、操りかえし照射した後、次第になくなったり（飽和したり）することで区別できる。また、この他さらに照射した時、加える電圧をとったり変化させたりすることにより大きく変化するかどうかで区別することもできる。

**8.87** 放射線はケーブルの絶縁体に一時的效果と永続的な效果とを与える。もしも、物質の中で電離が起これば、自由電子が発生し電導性となる。したがって、絶縁体は電離性放射線のあるところでは一時的に電導性が増加すると考えられる。絶縁体の電導電流は2つの成分によることが、しばしばいわれる。

- (1) 極めて短かい放射線パルスに対して、その大きさが瞬間的な照射率のみによりきまる速い成分。
- (2) 短時間の放射線照射の後、しばしばあらわれる遅い成分これはほぼ指數関数的に減少する。即ち最初のうち速くその後しだいにゆっくり減少する。

**8.88** ケーブルや配線における永続的損傷は絶縁材料の電気的特性の変化である。この損傷が大きくなり、例えば抵抗が非常に小さくなったような時には電気的な特性が変化するだろう。絶縁材料の損傷は中性子フルエンス（もしくは $\gamma$ 線線量）、湿度、照射温度の上昇とともに大きくなる。ある種の絶縁材料で永続的な損傷をうけやすいものがある。例えば、シリコンゴムは $2 \times 10^{15}$  neutrons/cm<sup>2</sup>の速中性子フルエンスでひどくひび割れしたり粉をふいたりする。通常の3つのケーブル絶縁材料について、損傷に対する臨界 $\gamma$ 線線量の概略値を次に示す。ポリエチレン、 $1 \times 10^7$  ラド（炭素）：テフロンTFE、 $1 \times 10^4$  ラド（炭素）：テフロンFEB、

# HP『海軍砲術学校』公開資料

注：(12) この章のこれ以降は他との関連がないので読まなくともさしつかえない。

$2 \times 10^6$  ラド（炭素）一方、あるポリオレフィンはあらかじめ照射しておけば  $5 \times 10^9$  ラド（炭素）まで耐えることができる。絶縁抵抗については非常によく回復するのである程度の物理的損傷の後でも適当な電気部品として使用できる。

## 第5節 初期放射線に関する技術的考察<sup>(12)</sup>

### ガンマ線と物質との相互作用

**8.89**  $\gamma$ 線と物質との相互作用として重要なものが3つあり、この結果、光子（§1.74）は散乱されるかもしくは吸収される。まず“コンプトン効果”とよばれるものがある。この相互作用で、 $\gamma$ 線（1次）は電子に衝突し、エネルギーの一部を電子に与える。一方（2次）光子は、エネルギーが小さくなり入射方向とある角度をもつ新しい方向にとび出す。したがって、コンプトン効果は $\gamma$ 線の方向を変えてエネルギーが小さくなる。入射 $\gamma$ 線と衝突して、エネルギーと運動量の保存則にしたがって反跳される電子はコンプトン（反跳）電子とよばれる。

**8.90** 物質中で $\gamma$ 線がコンプトン散乱をする場合の程度は、その原子に附隨する電子、したがって原子量（§1.09）に比例する。したがって、原子量の大きい元素では小さい元素より原子あたりの破率が大きい。原子番号には関係なく、全ての物質についてコンプトン散乱は $\gamma$ 線のエネルギーが大きくなると少なくなる。

**8.91**  $\gamma$ 線と物質との相互作用では次に“光電効果”がある。その原子の電子に対する束縛エネルギーよりもいくらか大きなエネルギーをもつ光子は、そのエネルギーを全て電子に与えて、電子を原子からはじき出す。光電効果をする光子はエネルギーを全て失ない完全に消滅する。この点はコンプトン効果と異なるところで、コンプトン効果の場合には光子はエネルギーは小さくなるが相互作用の後でも存在する。原子あたりの光電効果の確率はコンプトン効果の場合と同じように、 $\gamma$ 線が通過する物質の原子番号とともに増加し、光子のエネルギーが大きくなると減少する。

**8.92** 第2番目の $\gamma$ 線と物質との相互作用は“電子対生成”とよばれる。

1.02MeV以上のエネルギーをもつ $\gamma$ 線が原子の核の近傍を通過すると、光子は2つの粒子をつくり物質に変換される。この時、出来る2つの粒子は正及び負の電子である。光電効果の場合と同じように電子対生成では最初の $\gamma$ 線はなくなる。しかし、正の電子はやがて負の電子と作用して最初の $\gamma$ 線よりは小さいエネルギーの2本の $\gamma$ 線をつくる。原子あたり、電子対生成をする確率は他の2つの相互作用と同じように物質の原子番号とともに増加する。しかし、これは1.02MeV以上であれば光子のエネルギーが大きくなるほど増大する。

**8.93** 今までの3つの相互作用についてふりかえれば、全てについて原子あたりの確率は $\gamma$ 線が通過する物質の原子番号（または原子量）が大きくなるにしたがい増大する。又、どの相互作用でも光子は完全に消滅するかエネルギーが小さくなるかである。結果として $\gamma$ 線の強度もしくは線量率がいくらか減少する。原子量と密度とは概略の相関関係があるので単位体積あたりの原子数は物質によって大きくかわらない。したがって、ある体積（厚さ）で $\gamma$ 線の遮蔽をする場合、原子量が大きい材料（“重い元素”）を含む時は原子量の小さい（“軽い元素”）材料のみの場合より同じ体積（厚さ）ならば遮蔽効果は大きい。このような違いの例を次に示す。

**8.94** もう一つ重要なことは、コンプトン・光電両効果の（原子あたり）確率が $\gamma$ 線のエネルギーの増大とともに減少するということである。しかし、一方で電子対生成は1.02MeVでおこり始めエネルギーが大きくなるとともに増加する。これら種々の減衰効果の相乗作用について考察するとき、1つはエネルギーの増加とともに減少し、他の1つは増加する。このことから特定の物質についての $\gamma$ 線の減衰は1.02MeVを越えたあるエネルギーに対して最少となる。このような最小値があるということについては後で簡単に説明する。

## ガンマ線に対する減衰係数

**8.95**  $\gamma$ 線の細い（コリメートされた）ビームが物質を透過する時、光子は光電効果や電子対生成によるのと同様コンプトン散乱によっても除かれる。言い換えれば、散乱された光子は、その一部分のエネルギーを物質に与えるに過ぎな

注：(13) この式で強度は  $1 \text{ cm}^2$ 、 $1 \text{ sec}$ あたりの衝突しなかった光子数である。ここで線減衰係数のわりに“線エネルギー吸収係数”でおきかえた同じ形の式は  $1 \text{ cm}^2$ 、 $1 \text{ sec}$ あたりの光子の全エネルギーをもとめるのに用いられる。

いがビームからはなくなると見なす。もしも、はじめの強度（もしくは束） $I_0$ （光子数/ $\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ ）の特定のエネルギーをもつ $\gamma$ 線のコリメートされたビームがある物質の中を厚さ  $X$  だけ進むとき何の相互作用もせずに出てくる強度  $I$  は次の式であらわされる。

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (8.95.1) \text{ (13)}$$

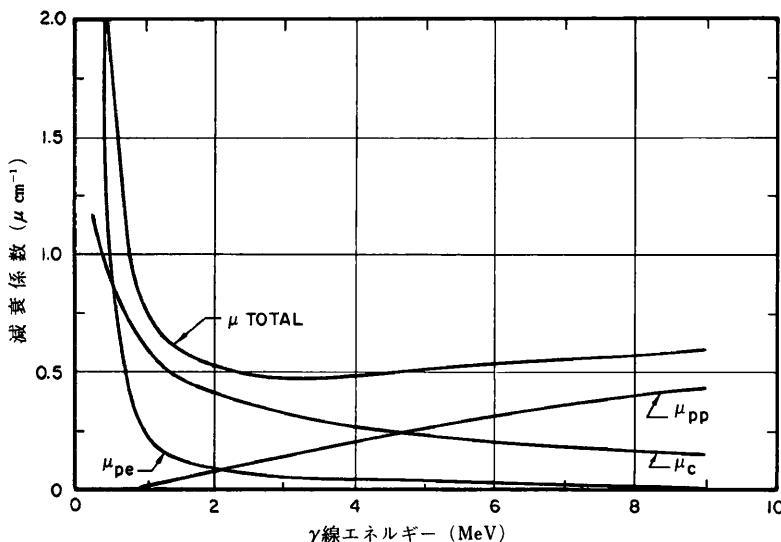
ここで  $\mu$  は“線減衰係数”とよばれる。距離  $X$  は通常  $\text{cm}$  単位であらわされるので  $\mu$  の単位は  $\text{cm}$  の逆数 ( $\text{cm}^{-1}$ ) であらわされる。式 (8.95.1) から、厚さ  $X$  が与えられるならば  $\mu$  の値が大きくなれば出てくる  $\gamma$  線の強度  $I$  は小さくなることがわかる。このことは線減衰係数  $\mu$  は、单一エネルギーのコリメートされた  $\gamma$  線に対してある材料の  $1 \text{ cm}$  又は  $1 \text{ フィート}$  の厚さ当たりの遮蔽能力を表わす一つの尺度とみなすことができる。

**8.96** ある条件下における  $\mu$  の値をもとめるには、既知の厚さの物質を通過する前後の  $\gamma$  線強度 ( $I_0$ ) と ( $I$ ) をきめれば、式 (8.95.1) からもとめることができる。エネルギー  $0.5 \text{ MeV}$  から  $10 \text{ MeV}$  の单一エネルギーの  $\gamma$  線について、この方法でもとめたデータを表-8.96 に示した。このコンクリートに対する値は比重  $2.3 \text{ gr/cm}^3$  ( $144 \text{ pounds/ft}^3$ ) のごく普通のものに適用できる。鉄・酸化鉄・重品名を含む特殊重コンクリートについては係数はほど密度に比例して大きくなる。

表-8.96  $\gamma$  線に対する線減衰係数

| $\gamma$ 線のエネルギー<br>(MeV) | 線減衰係数( $\mu$ )単位 $\text{cm}^{-1}$ |       |        |      |      |
|---------------------------|-----------------------------------|-------|--------|------|------|
|                           | 空 気                               | 水     | コンクリート | 鉄    | 鉛    |
| 0.5                       | $1.11 \times 10^{-8}$             | 0.097 | 0.22   | 0.66 | 1.64 |
| 1.8                       | $0.81 \times 10^{-4}$             | 0.071 | 0.15   | 0.47 | 0.80 |
| 2.0                       | $0.57 \times 10^{-4}$             | 0.049 | 0.11   | 0.11 | 0.52 |
| 3.0                       | $0.46 \times 10^{-4}$             | 0.040 | 0.088  | 0.28 | 0.47 |
| 4.0                       | $0.41 \times 10^{-4}$             | 0.034 | 0.078  | 0.26 | 0.48 |
| 5.0                       | $0.35 \times 10^{-4}$             | 0.030 | 0.071  | 0.25 | 0.52 |
| 10.0                      | $0.26 \times 10^{-4}$             | 0.022 | 0.060  | 0.23 | 0.55 |

**8.97 適当な測定及び理論計算により、全線減衰係数に対するコンプトン効果 $(\mu_c)$ 、光電効果 $(\mu_{pe})$ 及び電子対生成 $(\mu_{pp})$ のそれぞれの寄与を $\gamma$ 線エネルギーの関数として決めることが可能である。重い元素（高原子番号）で減衰係数の大きなものの代表である鉛に対する結果が図-8.97 aに、軽い物質（低原子番号）で減衰係数の小さな空気に対する結果を図-8.97 bに示した。極端に低いエネルギーは別として、空气中における光電効果は無視できるので図の中には示していない。低エネルギー域で鉛と空気の線減衰係数はエネルギーの増加とともに減少する。これはコンプトン効果、光電効果によるものが減少するからである。1.02MeVより高くなると電子対生成が次第に増加して大部分を占めるようになる。したがって十分高いエネルギーになると、減衰係数は一たん最少になって後、増加しはじめる。このことは鉛に対する表-8.96の最後の行とともに図-8.97 aでも明らかである。原子量の小さい元素に対しては非常に高エネルギーになるまで増加しはじめる。例えばコンクリートでは17MeVで水では50MeVである。**

図-8.97 a 鉛の線減衰係数の $\gamma$ 線エネルギーによる変化

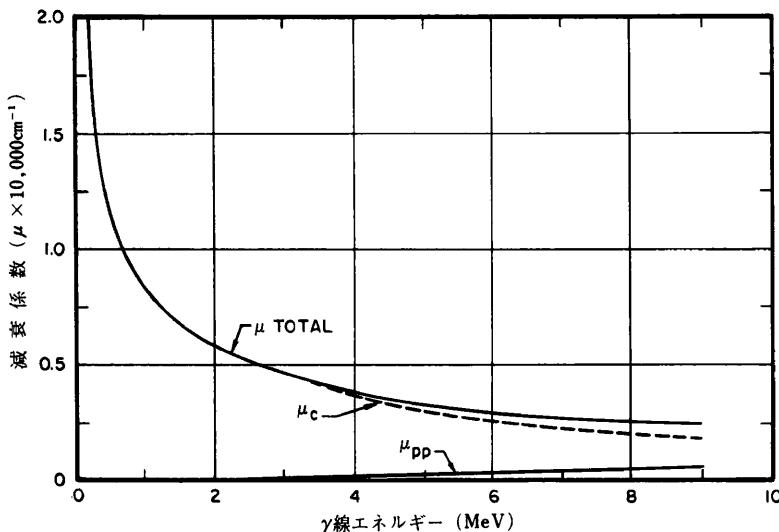


図-8.97 b 空気の減衰係数のγ線エネルギーによる変化

8.98 遮蔽の問題に対して、この減衰係数がγ線のエネルギーの増加とともに減少して最少値をもつということは重要なことである。例えば、1 MeVのγ線を減衰させるための遮蔽物は、それがいかなる材料から作られていても、10 MeVのγ線に対しては、減衰係数が小さくなるので効果は少ない。

8.99 表-8.96についてみると、ある特定のエネルギー値に対して、左欄から右欄の物質に移行するにしたがい、即ち物質の密度が増加するにつれて線減衰係数が増加することがわかる。このように、厚さが決定しているとき、密度の大きい物質は密度の小さい物質より厚さが同じであるならばγ線を多く減衰させる。このことは、(§ 8.38) 密度の大なるうすい物質は密度の小さい厚い物質と同じ程度にγ線を遮蔽するという定量的な概念と一致する。

### 質量減衰係数

8.100 おおよその値として、特定のエネルギーのγ線に対する線減衰係数は吸收(遮蔽)材料の密度に比例するということが知られている。いいかえれば、線減衰係数を密度で割ったものはいわゆる“質量減衰係数”であるが、これはある

$\gamma$ 線のエネルギーに対して考察するならば、全ての物質に対してほぼ同じとなる。このことは鉄（約56）までの小または中原子量の元素に対して特に言えることである。これらの物質ではコンプトン効果が数MeVに至るまでのエネルギー範囲で減衰係数に大きな寄与をしている（図一8.97 b）。高エネルギーの初期 $\gamma$ 線に対して、有効な質量減衰係数（§ 8.104）は水・木材・コンクリート・土に対して、0.023に近い。ここで密度はgr/cm<sup>3</sup>で表わしている。鉄に対しては、同じ単位（g/cm<sup>2</sup>）で表わすと約0.027である。

8.101 もしも、遮蔽物質の密度を記号 $\rho$ で表わせば、式（8.95.1）は、

$$I/I_0 = e^{-\mu x} = e^{-(\mu/\rho)\rho x} \quad (8.80.1)$$

として書き直すことができる。ここで $I/I_0$ は厚さXの遮蔽物の透過率であり、 $\mu/\rho$ は定義により質量減衰係数である。 $\mu/\rho$ の初期 $\gamma$ 線に対する値0.023g/cm<sup>2</sup>をとれば、式（8.101.1）から

$$\text{透過率} \approx e^{-0.023\rho x} \approx 10^{-0.01\rho x} \quad (8.101.2)$$

となる。この式は、小または中程度の原子量の（既知密度の）物質X cm厚で§ 8.72に定義された線量透過係数の概略値をもとめる場合に、くわしいデータがない時に使用することができる。

8.102 § 8.39に述べた簡単な $\lambda_{10}$ 価層の概念は式（8.95.1）による。この厚さでは透過率は0.1であり、その厚さを $X_{0.1}$ で表わすと

$$0.1 = X_{0.1}^{-\mu x_{0.1}}$$

もしくは、

$$X_{0.1} = \frac{2.30}{\mu} \text{cm} \quad (8.102.1) \quad \text{となる。}$$

もしも、 $\mu/\rho$ の初期 $\gamma$ 線に対する値として0.023g/cm<sup>2</sup>とすると、指數関数則から、

$$X_{0.1} (\text{cm}) \approx \frac{100}{\rho (\text{g/cm}^3)}$$

もしくは、

$$T (\text{ft}) \approx \frac{203}{D (\text{lb}/\text{ft}^3)} \quad (8.102.2)$$

ここで、§ 8.42と同じようにTはフィートで表わした $\lambda_{10}$ 価層、Dはlb/ft<sup>3</sup>で表わした物質の密度である。したがって、むしろ密度の小さい物質の時、 $\mu/\rho$ の値

は $0.023\text{g/cm}^2$ に近いので積 $D \times T$ は高いエネルギーの $\gamma$ 線に対して $200\text{lb/ft}^2$ にはほぼ等しくなる。このことは、表-8.41の最後の行に出てきた窒素の捕獲（2次） $\gamma$ 線に対する値に一致している。鉄や（鋼）に対する $D \times T$ の値は、 $\mu/\rho$ が高エネルギーの $\gamma$ 線に対して大きくほぼ $0.027\text{g/cm}^2$ であるので、他の物質より小さい。

### 厚い遮蔽物：再生係数

**8.103** 式（8.95.1）は厳密には光子がコンプトン散乱をした時には、その $\gamma$ 線がビームからは外に出てしまうとみなしうる場合にのみ適用できる。このような条件は細いビームであるか、あまり厚くない遮蔽体の場合にはかなりよく満たされるが広いビームや遮蔽体が厚い場合には満たされない。後者の場合には、光子が遮蔽体から外に出るまでに数回散乱する。核爆発からの放射線の遮蔽が関係する。広いビームで厚い遮蔽体の場合には、透過する放射線の強度（もしくは線量）の値 $I$ は式（8.95.1）からもとめるものより大きくなる。放射線の多重散乱を考慮するために $B(X)$ で表わされる。“再生係数”を導入することができる。この $B(X)$ の値は、遮蔽厚、材料の特性そして入射放射線のエネルギーなどによりきまる。ここで式（8.95.1）は次のように表わすことができる。

$$I = I_0 B(X) e^{-\mu x}$$

各条件における再生係数の値は、光子の電子による散乱と関する理論的考察から、いくつかの元素について計算されている。これらの値は、しばしば、10から100までの範囲になり、もし、式（8.95.1）を厚い遮蔽体の減衰をもとめるのに使用するならば、重大な誤りを生ずる可能性があることを示している。

**8.104** したがって、式（8.95.1）やこの式から導かれた（8.101.2）（8.102.1）及び簡単な $\gamma$ 価層の考えなどは、再生係数が1となる単一エネルギーで薄い遮蔽体の場合以外は適用できないことは明らかである。先に述べたように、質量減衰係数を軽い物質に対して0.023（鉄に対しては0.027）とする。これは核爆発からの $\gamma$ 線が多くのエネルギーのものからなること及び光子の多重散乱による再生係数などを考慮した近似的（経験的）なものである。また、この結果は単に簡単な平たい遮蔽物の場合にのみ適用できる。さらに、実際の場合には $\gamma$ 線のみならず中性

子も吸収しなければならない。中性子の捕獲や非弾性散乱により遮蔽体の中で発生する $\gamma$ 線は入射 $\gamma$ 線よりも多くなるかもしれない。したがって、 $\gamma$ 線の遮蔽の問題は、特に中性子が混在する場合、比較的簡単な構造物であっても複雑で、適当な計算機コードが減衰量の近似値を得るために必要である。しかし、より良いデータがない場合は、表-8.41にある有効%値層の考え方や、これから導かれる式(8.102.2)は $\gamma$ 線遮蔽能力の概略値をもとめるのに有効である。

### 初期ガンマ線のスペクトル

**8.105** 爆発地点から離れた地点でうける初期 $\gamma$ 線の大部分は、中性子と大気中の窒素との相互作用による捕獲 $\gamma$ 線のほか、核分裂生成物から爆発後1分以内に放出される $\gamma$ 線とからなる。非弾性散乱や、空気中の捕獲 $\gamma$ 線の実効エネルギーは7.5MeV(もしくはそれ以上)までの領域であり、核分裂生成物からのものは主として1~2MeVの範囲である。しかし、空気中をある距離伝播した後は、光電効果や電子対生成によりいくつかの $\gamma$ 線は吸収され、他のあるものはコンプトン散乱を何回か、くりかえしてエネルギーを失なう。したがって、 $\gamma$ 線のエネルギー分布、即ちスペクトルは変わる。

**8.106** 初期放射線中の $\gamma$ 線のエネルギー分布に関する情報は重要である。なぜなれば、生体や電子部品に対する影響、空気や遮蔽材の吸収特性および検出器の感度などが全てこれに依存するからである。 $\gamma$ 線のスペクトルを左右する $\gamma$ 線や中性子と空気との相互作用は複雑であるが、爆発地点から種々の距離におけるスペクトルを計算することは可能である。この計算方法は、後に述べる(§8.125以降) $\gamma$ 線の線量の計算にも利用される。例として、図-8.106に威力20KTの核分裂兵器の2,000ヤード離れた地点で受ける初期 $\gamma$ 線のエネルギー分布を示す。この距離では、ほぼ70%の $\gamma$ 線が0.75MeV以下のエネルギーである。しかし、高エネルギーの $\gamma$ 線が最も危険であり、さらに遮蔽も困難であることを知らねばならない。

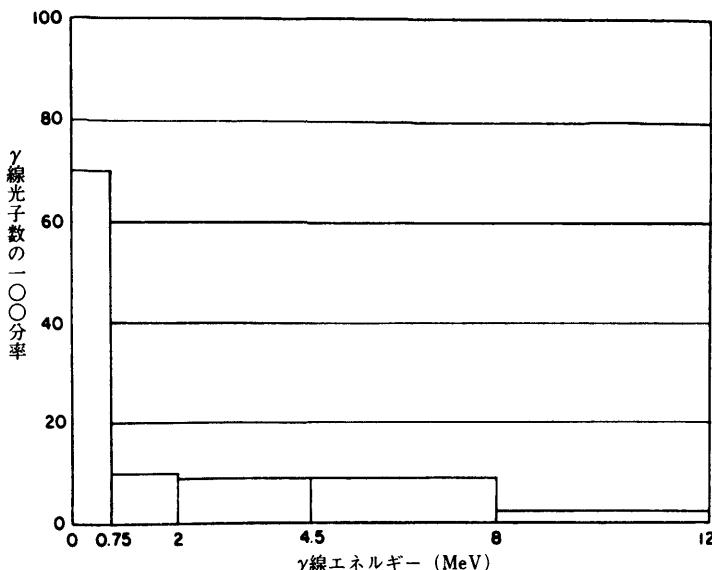


図-8.106 20KTの2,000ヤード離れた点における初期γ線スペクトル

### 中性子と物質との相互作用

8.107 中性子と物質との相互作用はγ線の場合とは全く異なる。γ線と異なり、中性子は電子の影響をうけず、全ての物質中にある原子核と各種の相互作用をする。中性子と核との相互作用は主として2つの型があり、1つは散乱であり、もう1つは吸収である。即に述べた様に散乱には非弾性散乱（§ 8.09）と弾性散乱（§ 8.52）の2つがある。非弾性散乱の場合には中性子の運動エネルギーの一部が衝突核の内部エネルギー（もしくは励起）に変換される。そして、このエネルギーがγ線として放出される。非弾性散乱が起こるためにには、核を励起するために必要なエネルギーを中性子が最初にもっていなければならない。この量は、核種により決まり元素により大いに異なる。しかし、多くの場合に、概ね（全てについていえることではないが）重い核（鉄・ウラン）との非弾性散乱は数10MeVから低い方は数10KeVのエネルギーの中性子に対して起こる。軽い核に対しては非弾性散乱は中性子のエネルギーが高い場合でなければ起こらない。窒素との非弾性散乱は約1.6MeV以上、酸素との場合は約6 MeV以上のエネルギーの中性子のみ多く起

くる。その物質中の原子核によりきまる臨界エネルギー以下のエネルギーをもつ中性子の場合は、非弾性散乱は起こらない。

**8.108** 弹性散乱が起きた時、中性子と核との相互作用は丁度2つのビリヤードボールの衝突のように運動エネルギーは保存されただ一方から他方にやりとりが行なわれるだけである。中性子のエネルギーは相手の原子核の励起のためには用いられず、したがって $\gamma$ 線をともなうようなことはない。非弾性散乱と異なり、弾性散乱は全てのエネルギーの中性子について、どの原子核とも生起する可能性がある。ある方向の衝突に対して、中性子の運動エネルギーのうちいくらか衝突核に与えられるかは原子核の質量のみによってきまる。核の質量が小さい程、移行する中性子のエネルギーは大きくなる。理論的には中性子の全運動エネルギーが水素の原子核（プロトン）と正面衝突をした時失なわれる。実際的にも、水素は最も軽い元素で0.5MeV程度より低いエネルギーの速中性子を速く減速させるための最も良い材料である。このことが水素即ち水が中性子の遮蔽材の成分として重要であるということの理由である（§ 8.67）。0.5MeVよりも高いエネルギーの中性子に対しては減速させるには非弾性散乱をさせるのがよい。§ 8.69に述べた特殊コンクリートの中の重い元素はこの働きをしている。

**8.109** 中性子と物質との相互作用の2つめは捕獲による完全な吸収である。放射捕獲（§ 8.08）はこの最も一般的な捕獲で、ほとんど全ての原子核について少なくもある程度生ずる。捕獲の確率はおそい中性子の方が高いエネルギーのものよりも大きい。炭素や酸素のような軽い原子核の場合には中性子について捕獲反応を殆んどしない。しかし窒素はその確率が大きくはないが、その傾向がある（§ 8.11）。このほか、カドミニウムのような中程度もしくは質量の大きい核に対して放射捕獲は起こりやすい。場合によっては、反応の結果できるものが放射能をもつことがあり（§ 8.61）、9章で述べるけれども核兵器の効果の面からは重要なことである。

**8.110** 他の相互作用として中性子が標的核に入り複合核をつくり、それが十分励起されプロトン・重陽子それに $\alpha$ 粒子のような（荷電）粒子を放出するものが

ある。残りの原子核はしばしば励起されており、この余分のエネルギーを $\gamma$ 線として放出する。この相互作用は通常軽い原子核と速中性子の間で起こる。リチウム-6、崩素-10が遅い中性子を作用するのはいくつかの例外的な反応である。窒素は高速中性子と荷電粒子を放出する（§9.34・§9.44）作用を少なくとも2つ行う。1つは放射性の炭素-14（これと陽子）を作るものであり、他の1つは水素の放射性同位元素であるトリチウム（これと安全な炭素-12）をつくるものである。

**8.111** 分裂現象も、勿論中性子と物質との相互作用のうちの1つである。しかし、これはごく少数の限られた原子核についてのものであり、第1章でくわしく述べたのでここではふれない。

**8.112** 中性子と原子核との相互作用の発生率は、定量的には、原子核の“断面積”により示すことができる。断面積とは、与えられた反応に対し特定の原子核についての有効な標的の面積と考えることができ、これによって、あるエネルギーの中性子と原子核との相互作用に対する確率で表わす。このように、全ての原子核はいずれも個別の散乱断面積・捕獲断面積といった断面積を与えられた中性子のエネルギーについてもっており、そのエネルギーに対する全断面積は、個々の相互作用に対する断面積の和である。この全断面積と個々の断面積は中性子のエネルギーに対して、非常に複雑な変化をすることが多い。

**8.113** 中性子と原子核との相互作用に対する核断面積は、（ $\gamma$ 線の場合に対する）線減衰係数をその物質単位体積あたりの原子核の数で割った値に類似している。式（8.95.1）と同じ式により細い单一ビームの中性子の物質中における減衰量を表わすこともできる。しかし、初期放射線中の中性子は單一ではなく、断面積が中性子エネルギーにより非常に異なるので、式（8.95.1）を中性子遮蔽の目的での減衰を計算することはできない。遮蔽計算においては断面積、その場所に方向ごとの中性子のエネルギー分布などのデーターを用いて可能となる。しかし、多くの計算のため電子計算機コードが必要である。そのような計算方法は複雑なのでここでは述べない。

## 中性子のエネルギースペクトル

8.114 爆発地点から離れたある地点における中性子のエネルギーは数MeVからeV以下の広い範囲にわたっている。このエネルギースペクトル（§ 8.53）を完全に決めることは計算又は、実験を行うとしても極めて困難である（§ 8.53）。しかし、スペクトルを有限個のエネルギーグループに分け、それぞれのグループにくる中性子線束を爆発地点からの各距離について計算することは可能である。この計算結果は、既知の中性子線源を用いて、線源からの距離による線束の変化を測定することにより調べることができる。

8.115 大気圏における核実験が禁止される前には、現在のように超大型の高速電子計算機や精巧な測定器もなかった。したがって、ただ2・3のエネルギー領域内にくる中性子束を測定することのみが起こなわれ、その結果からスペクトルについての概略の知識が与えられていた。この種の測定には放射化箇や分裂箇型（§ 8.61・8.62）の臨界検出器が用いられた。

8.116 中性子は分裂や融合の過程に放出されるものであるが、ここで問題にするのは爆弾領域から外に出てゆく中性子である。中性子の総数も、スペクトルもこれが兵器構成材料の中を通過する間に変化する。分裂型と熱核型の兵器について外に出てゆくスペクトルの例を図-8.116 a と b にそれぞれ示した。先に述べたように中性子発生源はその兵器について実際の設計がわかつてはじめて決まるものである。したがって、これらの図に示されたスペクトルは単に1つの例であり一般に応用できるものではない。

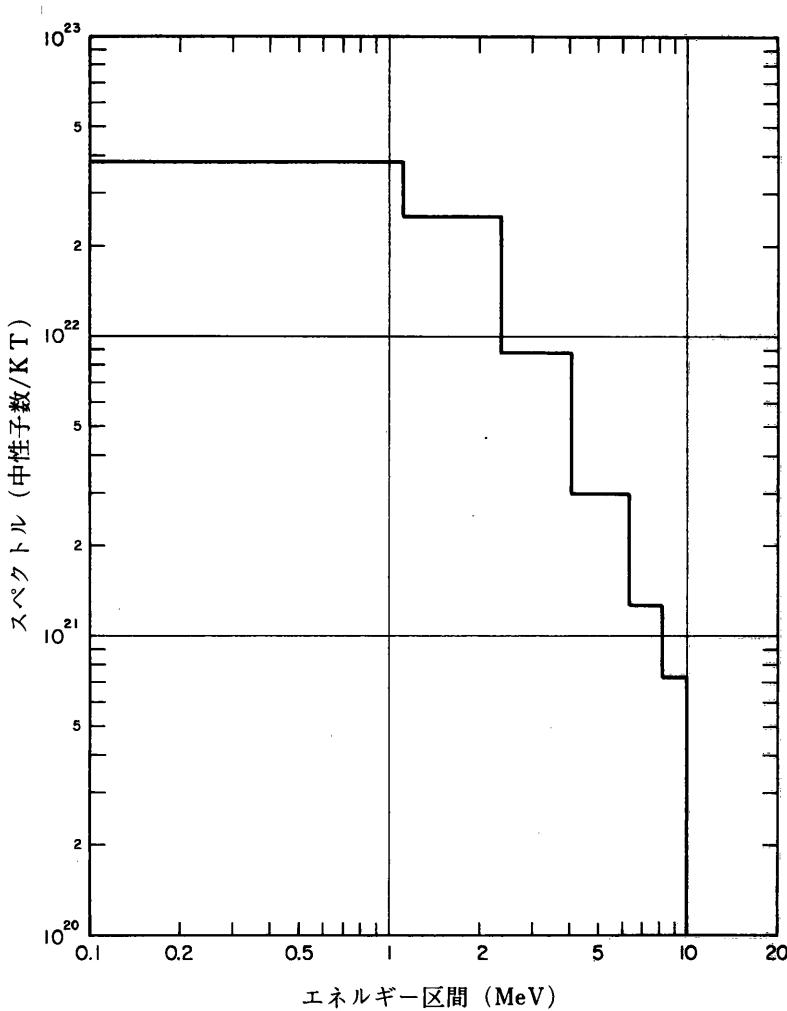


図-8.116a 核分裂型兵器について全威力の1KT当たりの中性子スペクトル

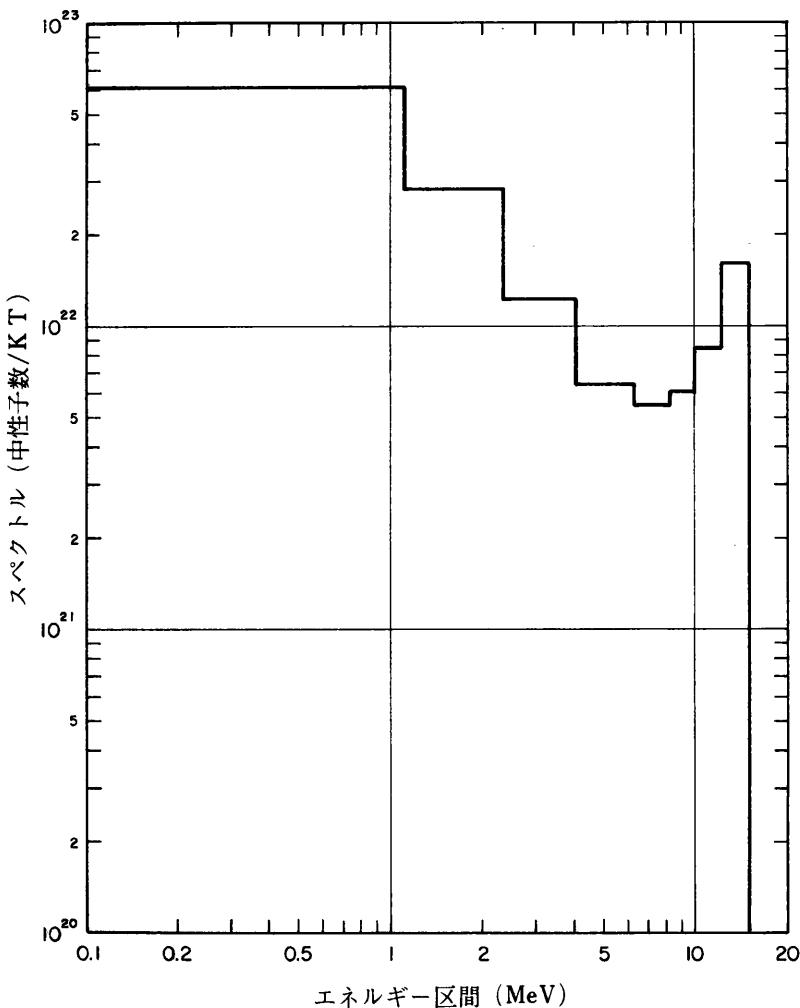


図-8.116b 热核兵器について全威力の1KT当りの中性子スペクトル

8.117 中性子が空气中を伝播して爆発地点から離れた地点にくる間に空気中の原子核と相互作用をして減少したりエネルギーが変化したりする。したがって、離れた地点における中性子スペクトルは兵器から外に出た時のものとは異なることが考えられる。現在、電子計算機による地表（もしくは近く）における中性子フ

ルエンスの計算結果が得られ分裂型と熱核型について、それぞれ図-8.17 a・bに示した。これらの図では核威力1 KT当りの中性子フルエンスをいくつかのエネルギーグループごとに斜距離の関数として示している。いずれの場合も、最も上段の曲線は、(KT当り) エネルギー0.0033MeV即ち3.3KeV以上の中性子の全フルエンスを示している。

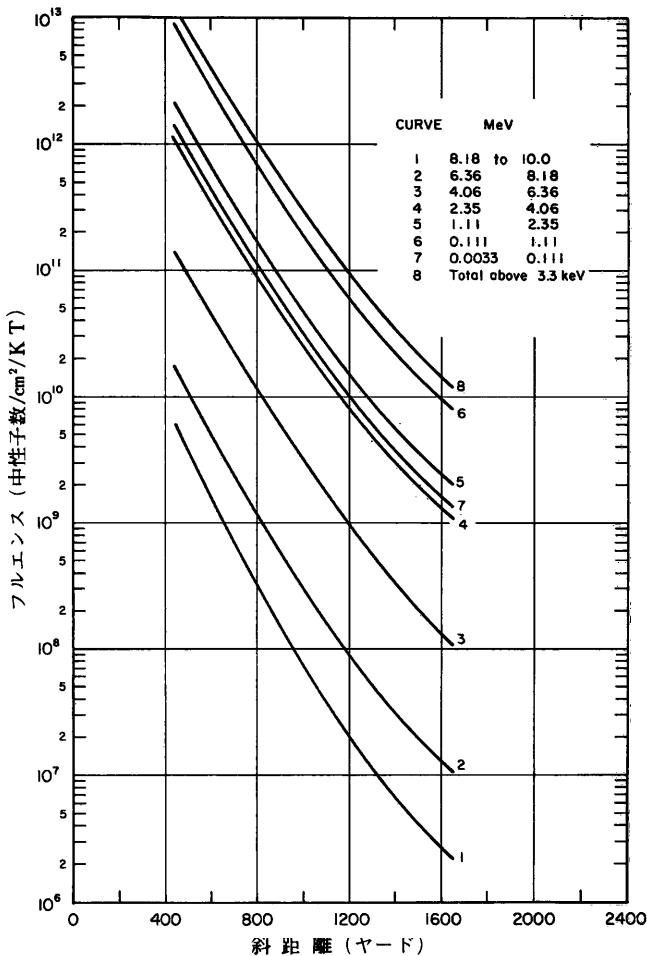


図-8.117 a 図-8.116 a に示した核分裂型スペクトルの場合、地上もしくは地上付近の標的に到する 1 KT 当りの中性子フルエンス

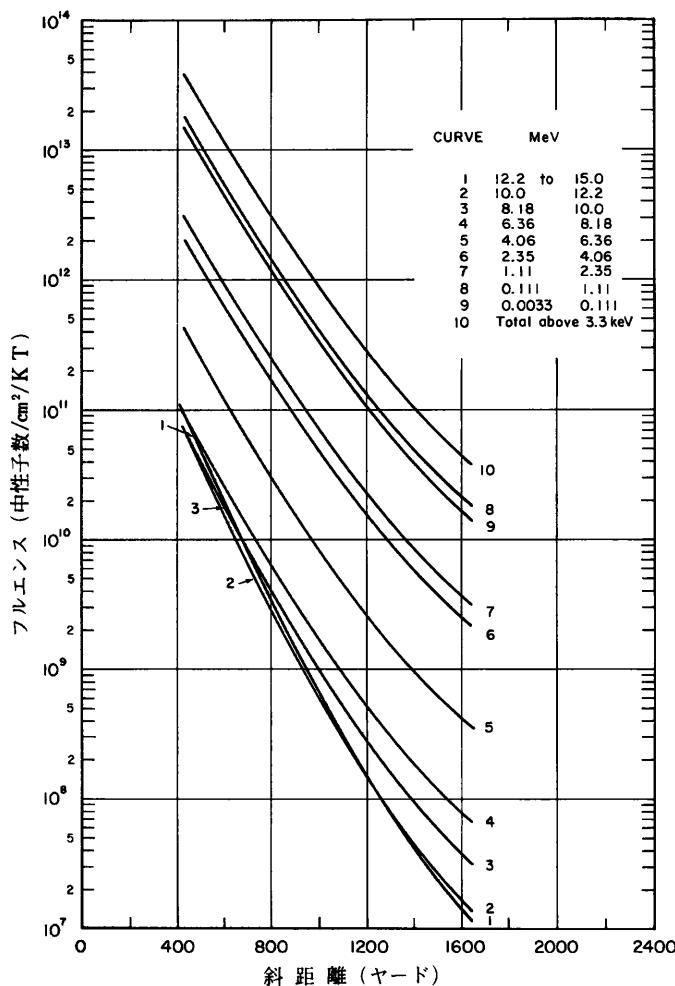


図-8.117 b 図-8.116 b に示した熱核型スペクトルの場合、地上もしくは地上付近の標的に到達する 1 KT 当りの中性子フルエンス

8.118 分裂性爆弾に対する図-8.117 aにおいては全てのエネルギーグループに対する曲線の傾斜はほぼ同じである。このことに、それぞれのグループのエネルギーフルエンスは爆発地点からの距離が大きくなると減少するが、各エネルギーグループの全体に対する割合は変わることを示している。そして、中性子スペクトルは距離により大きくは変化しないと言い換えることもできる。さらに、図-8.117 a

注: (14) 緩和距離はある物質の中で放射線強度が $1\%$ となる距離である。ここで $e$ は自然対数の底(2.718)である。物質中心の緩和距離は、中性子エネルギーと考えるフルエンスが直接線だけが全(直接線と散乱線)フルエンスをさすかにより決まる。

から直ちにわからないが、スペクトルは図-8.116 a の兵器から出た場合のスペクトルとほとんど同じである。これが§ 8.55で述べた核分裂兵器からの中性子平衡スペクトルの説明である。更に低いエネルギー域では、中性子のスペクトルは変化するけれども重要でない。

**8.119** 熱核兵器に対する図-8.117 b をみると 1 つの特異な現象に気がつく。曲線 5 から 9 まで即ち中性子エネルギー 0.0033 から 6.36 MeV までは、ほとんど平行である。したがって、この領域ではスペクトルは距離によってあまり変化しない。しかし、8.18 から 15.0 MeV の高いエネルギーでは特に曲線ごとに傾斜が非常に異なっている。グループ 1・2・3 の中性子のうちグループ 1 は最もエネルギーが高いが、これは斜距離 400 ヤード付近では多く支配的であるが、1,600 ヤードでは最も少ない割合となる。空気中における伝播の間に速い中性子はエネルギーが小さくなり、その相対的な割合が少なくなり、エネルギーの低い中性子の割合が増える。このように、中性子スペクトルは、特に高エネルギー域で距離により変化する。斜距離が大きくなると図-8.16 b のもとのスペクトルにある 12 から 14 MeV までのピークは低くなり 6 から 12 MeV 附近的谷はなくなる。非常に長い距離になると、高エネルギーの中性子がエネルギーを失ない平衡スペクトルに近づく。

**8.120** 図-8.117 a と b は低空爆発の場合について、地上もしくは地上附近での中性子フルエンスと中性子スペクトルを表わす。土による反射・吸収により、空気と土の境界は中性子フルエンスを、空気の無限空間の同じ距離での値にくらべて 10 倍も大きく、または小さくする。線源と観測点との距離が緩和距離<sup>(14)</sup>以下であれば土からの反射のため高エネルギーの中性子は通常増加する傾向にある。しかし、このような短距離において、大威力兵器の場合他の効果が一般に支配的であるので、初期放射線は非常に小威力の場合のみ関係がある(§ 8.06 参照)。距離が長くなると、線源と観測点が地面上かこれに近い場合即ち地表爆発か近接した爆発の場合、高いエネルギーの中性子強度は無限の空气中とくらべて 5 分の 1 もしくはそれ以下に減少する。図に示した値をもとめる計算ではこのような効果も考慮している。

## 初期放射線の生体吸収線量

8.121 地上附近における人員が受ける初期放射線量をもとめるため、簡単かつ十分正確な方法が考えられている。この方法では、中性子捕獲や空気中の非散乱による2次 $\gamma$ 線(§8.11)。そして核分裂生成物からの $\gamma$ 線について別々に区分してもとめている。ある離れた点における分裂の際の1次 $\gamma$ 線が放射線量の中で占める量は無視できる(§8.04)。全ての場合、爆発地点から観測地点までの空気の平均密度は標準大気の0.9を仮定して求めたデータである。

## 初期中性子吸収線量

8.122 図-8.116 a や b に示したようなスペクトルを発生源として、中性子輸送の電子計算機コードを用いて、核爆発による中性子線量のある爆発高度、測定地点の高さ、それと空気の密度などの幾何学的条件によって計算することが可能である。空気の密度は爆風によって空気が乱れる前の爆発地点と観測地点との間の平均密度とした。その理由は、中性子は爆発領域から爆風ができる前に放出され、観測地点には爆風よりも先に到達するから。

8.123 実験データによっても確認された計算結果を、核分裂兵器・熱核兵器について夫々図-8.123 a と b に示した。いずれの場合も、地表附近における1KT当たりの(生体組織に対する)吸収線量を爆発高度300フィート以上の場合について、斜距離の関数として示されている。便宜上曲線は2つの部分に区分した。左側の縦軸スケールは短かい距離に対するものであり、右側のそれは距離の長い場合のものである。核分裂兵器については図の中は2つの曲線になっている。これらは、決ずしも設計の差による中性子線量の両極端の値を表わすのでなく、ほとんどの核分裂兵器について、この間にいると見えるべきである。図-8.123 a の対の曲線のうち上部の曲線は、防御のために安全をみた核分裂兵器からの中性子線量をもとめ、下の曲線は攻撃のためにひかえめな見積りに使用することがよいであろう。

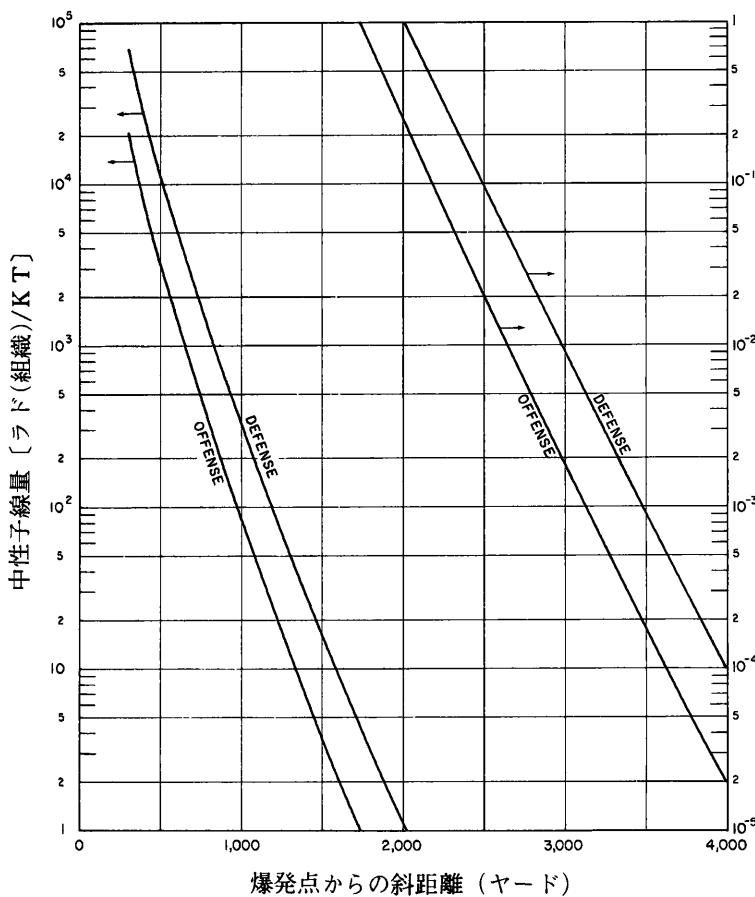


図-8.123 a 核分裂型兵器の場合、全威力の1 KT当りの初期中性子線量の斜距離による変化。空中爆発で空気密度は標準大気の0.9とした。

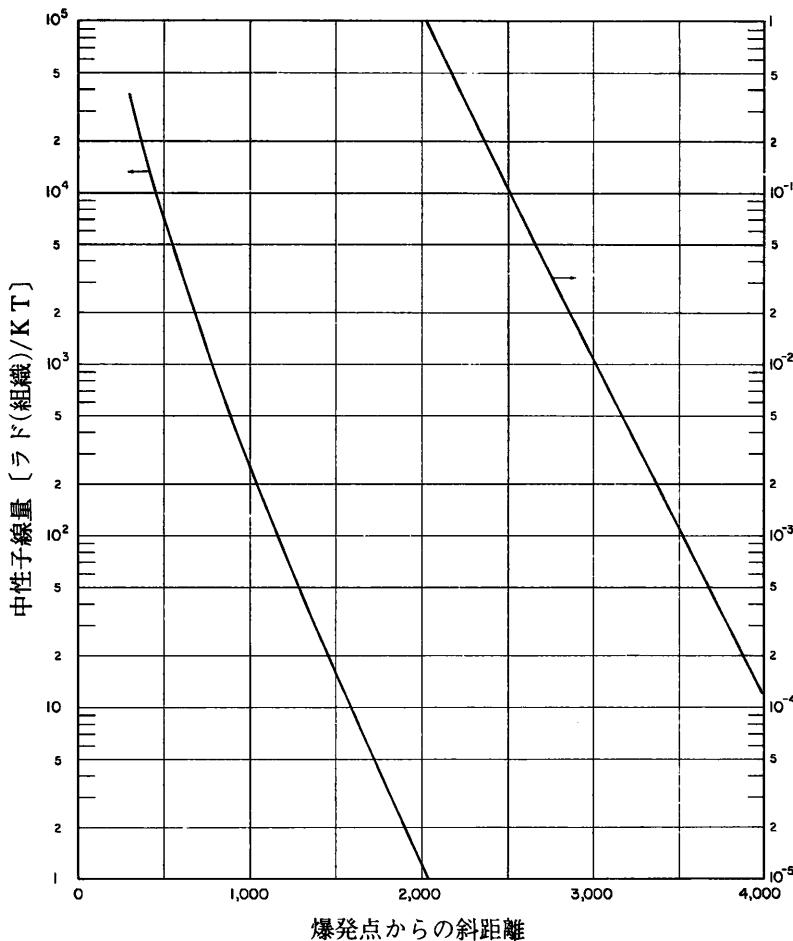


図-8.123 b 熱核兵器の場合、全威力 1 KT 当りの初期中性子線量の斜距離による変化。空中爆発で空気密度は標準大気の0.9とした。

8.124 WK T の空中爆発の場合の中性子線量をもとめるには図-8.123 a と b からその距離における線量をもとめ、これにWを乗ずればよい。地表爆発の場合には図-8.123 a と b の値に0.5をかけなければならない。地表から300フィートの間の爆発における中性子線量の概略値は地表爆発の値と300フィート以上における値を直線的に内挿すればよい。図-8.123 a における“防御”曲線が図-8.64 a

をつくるのに使用され、図-8.123 b における曲線が図-8.64 b をつくるのに使用された。

#### 例 題

図-8.123 a と b における曲線は威力 1 KT 当りの生体に対する中性子線量を爆発高度 300 フィート、もしくはそれ以上の場合について爆発地点からの斜距離の関数として示したもので a・d 2 つの図は夫々核分裂及び熱核兵器に対するものである。

換算：図-8.123 a と b のデータを WKT のエネルギーの爆発に対して適用するには、図-8.123 a と b における与えられた距離の値に W を乗じてやればよい。地表爆発に対しては図-8.123 a と b から得られる線量値に 0.5 をかけること。地表と 300 フィートの間での爆発による中性子の概略の線量は地表爆発に対する値に 300 フィート以上の値の比例的な内挿によりもとめることができる。

#### 例 題

条件：10 KT の核分裂兵器が 300 フィートの高さで爆発した。

問題：斜距離 1,500 ヤードにおける中性子線量を防御の見地から安全側の値でもとめよ。

解答：爆発高度は 300 フィートであるので、高さに対する補正は不要である。

図-8.123 a における上方の（“防御用”）曲線から爆発地点から 1,500 ヤードの斜距離における中性子線量は 1 KT 当り 16 ラドである。したがって 10 KT からの線量 Dn は

$$D_n = 10 \times 16 = 160 \text{ ラド} \quad (\text{答})$$

#### 2 次ガンマ線による吸収線量

**8.125** 空気中の原子核と中性子との種々な相互作用により放出される 2 次（もしくは、空気による 2 次） $\gamma$  線は、通常の見積計算をつくる時、核分裂生成物からの $\gamma$  線とは分離して考察しなければならない。その理由はこれら 2 つの相対的な重要性が全核威力、分裂出力が全体に占める割合、爆発高度そして爆発地点か

注：(15) 図-8.14における縦軸はエネルギーの放出率を表わしており、全体のエネルギーは有効放出時間について積分することによりもとめられる。異性体崩壊 $\gamma$ 線の時間は核分裂の時間にくらべ非常に短かい。

ら観測地点までの斜距離など、いくつかのファクターにより異なるからである。大気圏における核実験では単に全体の $\gamma$ 線線量が線源からの距離の関数としてもとめられたので、電子計算機の計算は、2つの $\gamma$ 線発生源からの線量を分離してもとめるためにおこなわれた。計算によって求められた空気による2次 $\gamma$ 線量（そして全線量）は核兵器の実験での測定値と比較された。低い大気圏における爆発に対しては、異性体崩壊による $\gamma$ 線は全体の $\gamma$ 線のエネルギーに比較して少なく生体組織に対する全線量を計算する際には無視できる。(15)

**8.126** 図-8.116 a や b に示されたような中性子スペクトルを用いて2次 $\gamma$ 線量を計算することができる。この2次 $\gamma$ 線量を用いて、核爆発による2次 $\gamma$ 線量を各幾何条件でもとめることができる。中性子の場合と同じように、空気の密度は、爆風によって空気が乱れる前の爆発地点と観測地点の間の空気の平均値とする。なぜなれば2次 $\gamma$ 線は爆風がとどく前に遠くに到達するからである（図-8.14参照）。

**8.127** 今まで述べてきた方法を用いての（組織における）2次 $\gamma$ 線による吸収線量の計算結果を図-8.127 a と b に示す。これらは、それぞれ図-8.123 a と b における中性子線量曲線に対応している。空中爆発か地表爆発であるか、観測地点の位置、それに攻撃・防御のいずれの使用目的かなど、この図を利用する条件は§ 8.123 8.124に示した場合と全く同じである。統一するために、与えられた状況で中性子線量をもとめる際、図-8.123 a における“攻撃用”もしくは“防御用”的いずれかを選んだ際、2次 $\gamma$ 線量をもとめる際、図-8.127 a のうちの対応する曲線を選ばなければならない。

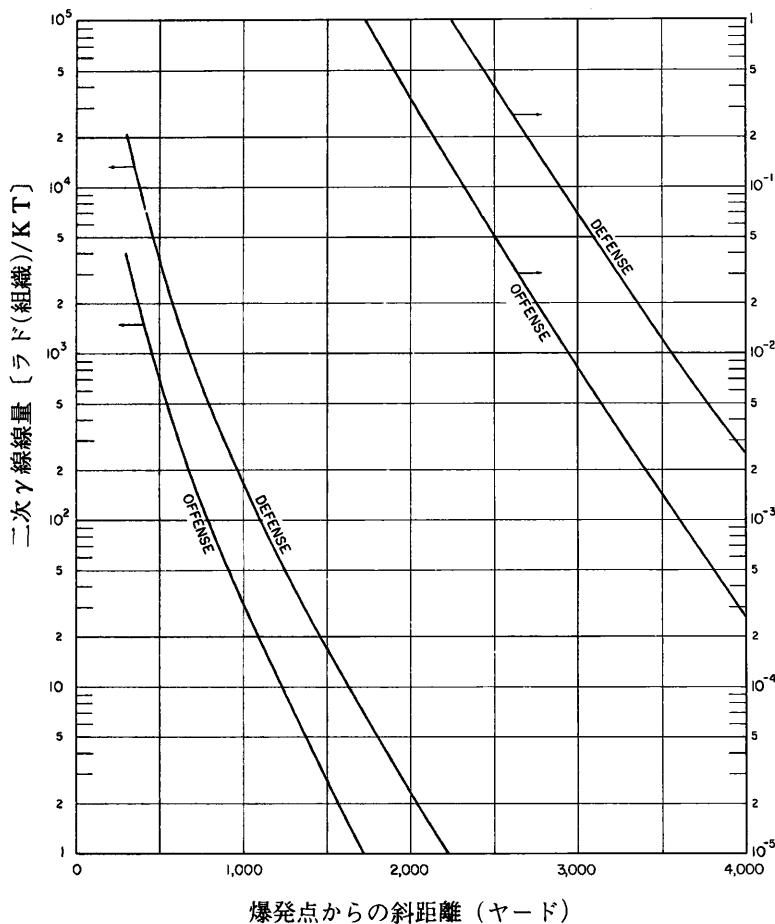


図-8.127 a 核分裂兵器の場合、初期放射線中の空気二次 $\gamma$ 線成分による線量（威力1KT当り）の斜距離による変化。  
空中爆発で空気の密度は標準大気の0.9とする。

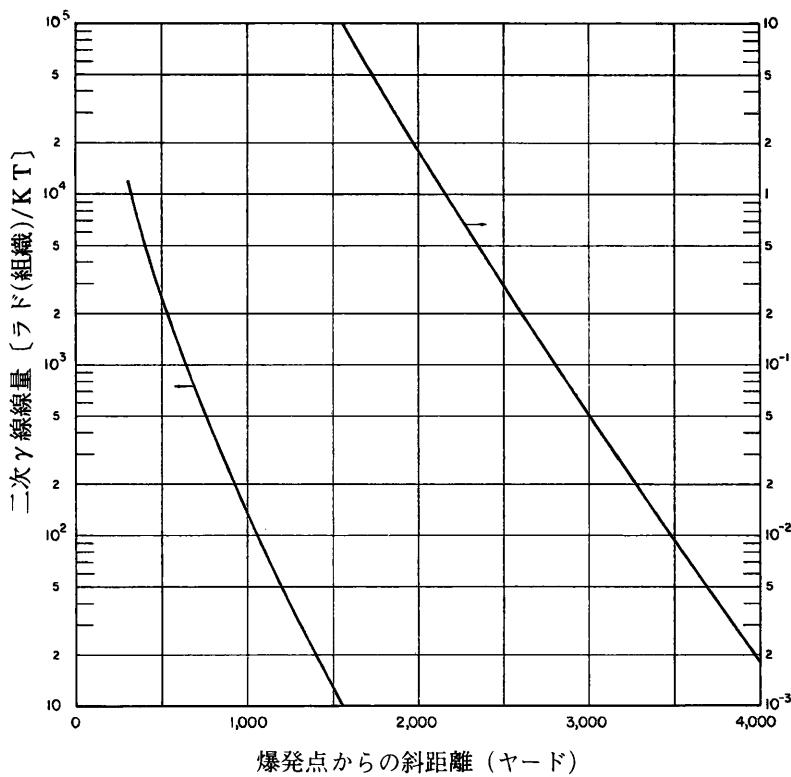


図-8.127 b 热核兵器の場合、初期放射線中の空気二次γ線成分による線量（威力1 KT当り）の斜距離による変化。空中爆発で空気の密度は標準大気の0.9とする。

### 核分裂生成物によるガンマ線吸収線量

**8.128** 核分裂生成物からのγ線量を計算するにはγ線の空气中透過に関する電子計算機コード以外に核分裂生成物を含む雲の発達やこれの上昇を評価できるコードも必要である。核分裂生成物からのγ線は十分長い時間連続し図-8.127 aとbにおける曲線は、威力1 KT当りの生体における2次γ線線量を爆発高度300フィートもしくはそれ以上の場合について、斜距離の関数として表わしている。図aとbはそれぞれ核分裂及び熱核兵器に対応する。

換算：図-8.127 a と b におけるデータをエネルギーWKTの爆発に適用するには、与えられた距離に対する値を図-8.127 a もしくは b からもとめて W を乗じてやればよい。地表爆発に対しては図-8.127 a もしくは b の値に 0.5 を乗ずること。地表と 300 フィート高までの間の爆発に対する概略の 2 次 γ 線線量は比例的な内挿によりもとめることができる。

### 例題

条件：20 KT の核分裂兵器が地表で爆発した。

問題：斜距離 1,000 ヤードにおける 2 次 γ 線線量を攻撃的な見地から安全側としてもとめよ。

解答：これは地表爆発であるので、図-8.127 a から得られる値に 0.5 を乗じなければならない。図-8.127 a における下方の（“攻撃用”）の曲線から、300 フィート以上の爆発で、斜距離 1,000 ヤードの時 2 次 γ 線線量は KT 当り 30 ラドである。地上における 20 KT 爆発に対する線量 Drs は

$$Drs = 20 \times 0.5 \times 30 = 300 \text{ rads} \quad (\text{答})$$

で放出されるので、考える地点から爆発地点までの空気の密度に対する爆風による流体力学的效果（§ 8.36）を考えなければならない。流体力学的強化は高エネルギー威力の場合、そして距離の大きいときは重要となる。このとき、衝撃波面の後方に大量の低い密度の空気ができるからである。

**8.129** 小威力核兵器の場合のように、流体力学的強化が小さい時、核分裂生成物からの γ 線と 2 次 γ 線とは距離約 3,000 ヤードまでほぼ同じ線量である。しかし、核分裂生成物からなる γ 線の平均エネルギーは 2 次 γ 線にくらべて小さい。又、核分裂生成物からなる γ 線の角度分布は雲の上昇とともに広がっていく。これらのファクターのために小威力核でしかも距離が大きくなると核分裂生成物からの γ 線量は 2 次 γ 線線量より小さくなる。しかし、高威力の場合には、流体力学的強化のため、特に長距離では核分裂生成物 γ 線量が 2 次 γ 線量より大きくなる。

**8.130** 地上附近でうける核分裂 1 KT 当りについての、核分裂生成物による生体組織吸収線量の計算値が爆発地点からの斜距離の関数として図-8.130 a に示

されている。実際にWKT威力の核分裂兵器の空中爆発の場合、初期放射線中の核分裂生成物から出る $\gamma$ 線量をもとめるには、図-8.130 a によってその距離における値をもとめて、これに図-8.130 b からもとまる“有効”威力値を乗ずればよい。実際の威力値の代りに有効威力値を乗することにより、全出力エネルギーにより変わる雲の上昇速度や流体力学的強化などに対する必要な補正をすることができる。

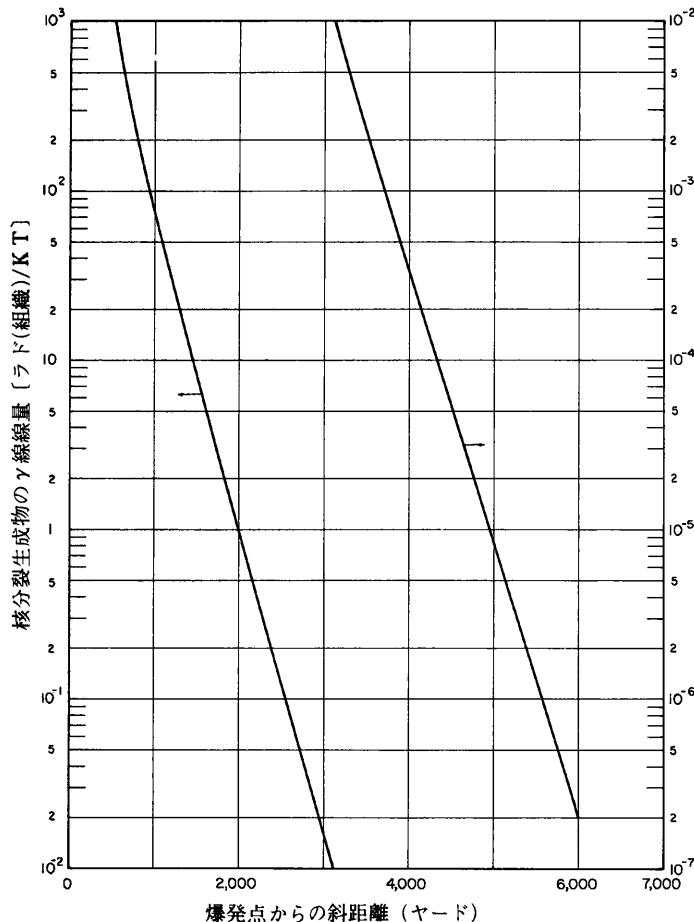
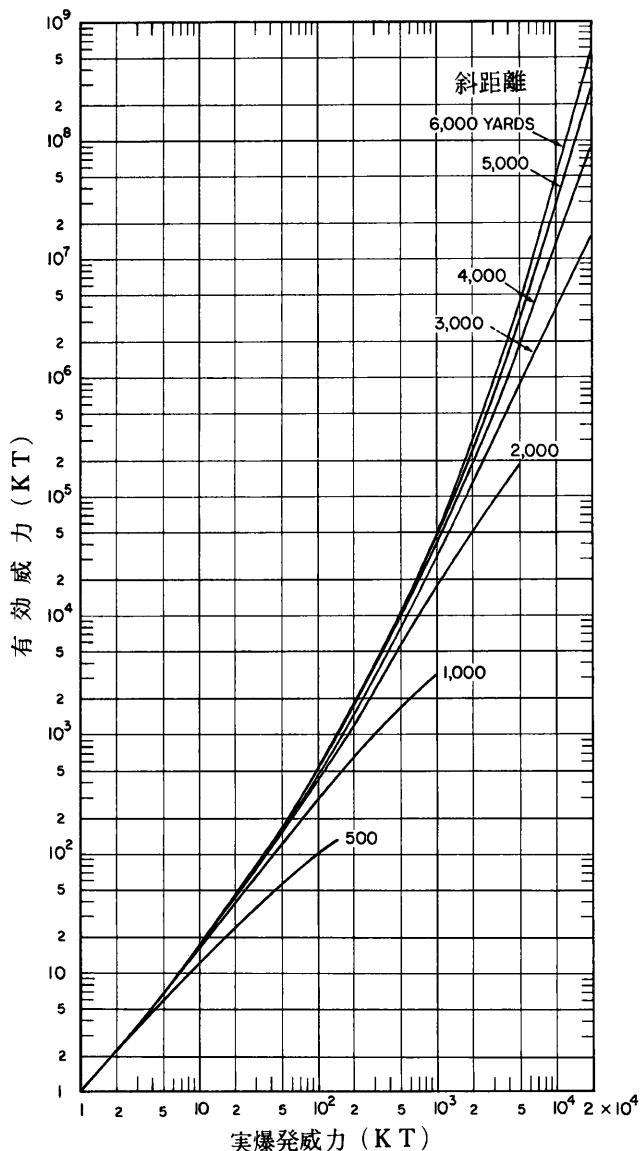


図-8.130 a 核分裂型兵器の場合、初期放射線中の核分裂生成物から出る $\gamma$ 線成分による線量(威力 1 KT 当り)の爆発点からの斜距離による変化。空気密度は標準大気の 0.9 とする。



図一8.130 b 低空爆発の場合、核分裂生成物から出る $\gamma$ 線線量を求める際の有効威力と実威力との関係。空気密度を標準大気の0.9とした。

**8.131** 热核兵器に対しては、図一8.130 a から得られるその距離に対する値に、まず核分裂の全体の威力に対する割合、たとえば50%分裂出力の兵器では0.5を乗じた後、図一8.130 b からの有効出力を乗じてやらねばならない。図一8.130 b を用いる場合には、雲の出昇速度や流体力学的強化が放出される全エネルギーにより決定されるので、必ず全核威力から有効威力をもとめなければならない。図に示されていない斜距離における有効威力をもとめるためには内挿法によればよい。図一8.130 b における曲線は、 $200W^{0.4}$  フィートの基準爆発高度に対する計算値である。ここで、WはKT単位の全威力エネルギーの値である。各斜距離に対する曲線は、この爆発高度が斜距離と等しくなるような威力で終る。

**8.132** 図一8.132における有効威力のデータは、図一8.130 b と同じであるけれども、これは地表爆発の場合に適用される。核分裂生成物からの $\gamma$ 線のこのような曲線に対して、他の高度の爆発に対する内挿や外挿をする簡単な方法はないが、図一8.130 b はほとんどの低空爆発に対して十分に正確と考えられ、図一8.132は地表爆発は勿論地表附近の爆発に適用できる。図一8.33 a に示された結果は、図一8.127 a (2次 $\gamma$ 線用) 図一8.130 a における曲線はKT当りの初期放射線中の核分裂生成物 $\gamma$ 線量を爆発地点からの斜距離の関数として示している。

換算：図一8.130 a におけるデータをエネルギーW KTの核分裂兵器の爆発に適用するには、図一8.130 a から与えられた距離における値をもとめて、これに低空爆発では図一8.130 b をもちいて、地表爆発では図一8.132から得られる有効威力Weffを乗ずればよい。热核兵器に対しては図一8.130 a の値に、全威力に対するWeffを乗ずるのは勿論であるが威力の分裂による割合を乗じなければならない。

#### 例 1

条件：20 KTの核分裂兵器が地上で爆発した。

問題：斜距離1,000ヤードでの核分裂生成物からの $\gamma$ 線線量をもとめよ。

解答：図一8.130 a から初期放射線中の核分裂生成物の $\gamma$ 線量は1 KT当り斜距離1,000ヤードで75ラドである。図一8.132から、20 KTの地上爆発で

斜距離1,000ヤードでの有効威力は45KTである。したがって、求める条件での核分裂生成物の $\gamma$ 線線量は

$$Dr_f = 75 \times 45 = 3,375 \text{ rads} \quad (\text{答})$$

(この値は同じ条件で先に求めた2次 $\gamma$ 線線量の10倍以上である。しかし、相対的な値は全体の威力、分裂による威力そして爆発高度が異なるならば変化する)。

## 例 2

条件：分裂のエネルギー率が50%である1MTの熱核兵器が3,200フィートの高さで爆発した。

問題：斜距離4,000フィートにおける全初期放射線線量をもとめよ。

解答：全初期放射線線量は初期中性子線量、2次 $\gamma$ 線線量そして核分裂生成物からの線量の合計である。図-8.123 b からKT当たりの中性子線量は、低空爆発について斜距離4,000ヤードで $1.2 \times 10^{-4}$ radである。1MTに対する線量は

$$D_n = 1.2 \times 10^{-4} \times 10^3 = 0.12 \text{ rad}$$

図-8.127 b から、低空爆発で斜距離4,000ヤードの時KT当たりの2次 $\gamma$ 線線量は $1.8 \times 10^{-3}$ radである。1MTに対する線量は

$$D_{rs} = 1.8 \times 10^{-3} \times 10^3 = 1.8 \text{ rad}$$

図-8.130 a から、爆発地点から4,000ヤードの斜距離での分裂1KT当たりの分裂生成物からの $\gamma$ 線線量は $3.2 \times 10^4$ radである。爆発高度3,200フィートは基準の高さ $200W^{0.4}$ 、即ち3,170フィートに十分近い。したがって、図-8.130 b から有効威力として正確な値を求める。図-8.130 b から1MTの低空爆発で斜距離4,000ヤードにおける有効威力は $4 \times 10^4$ KT（もしくは40MT）である。全出力のうちの50%だけが分裂によるものであるから補正ファクターは0.5である。核分裂 $\gamma$ 線線量は

$$Dr_f = 0.5 \times 3.2 \times 10^{-4} \times 4 \times 10^4 = 6.4 \text{ rads}$$

全初期放射線線量は

$$\begin{aligned} D &= D_n + D_{rs} + D_{rf} \\ &= 0.12 + 1.8 + 6.4 \\ &= 8.3 \text{ rads} \quad (\text{答}) \end{aligned}$$

線量を加える時、中性子 1 ラドは生物学的には  $\gamma$  線の 1 ラドと等価でないということを思い出すべきである (§ 8.64)。上の曲線と図-8.130 a と b における曲線からもとめられた。図-8.33 b における結果は図-8.127 b と図-8.130 a と b における曲線からもとめられた。

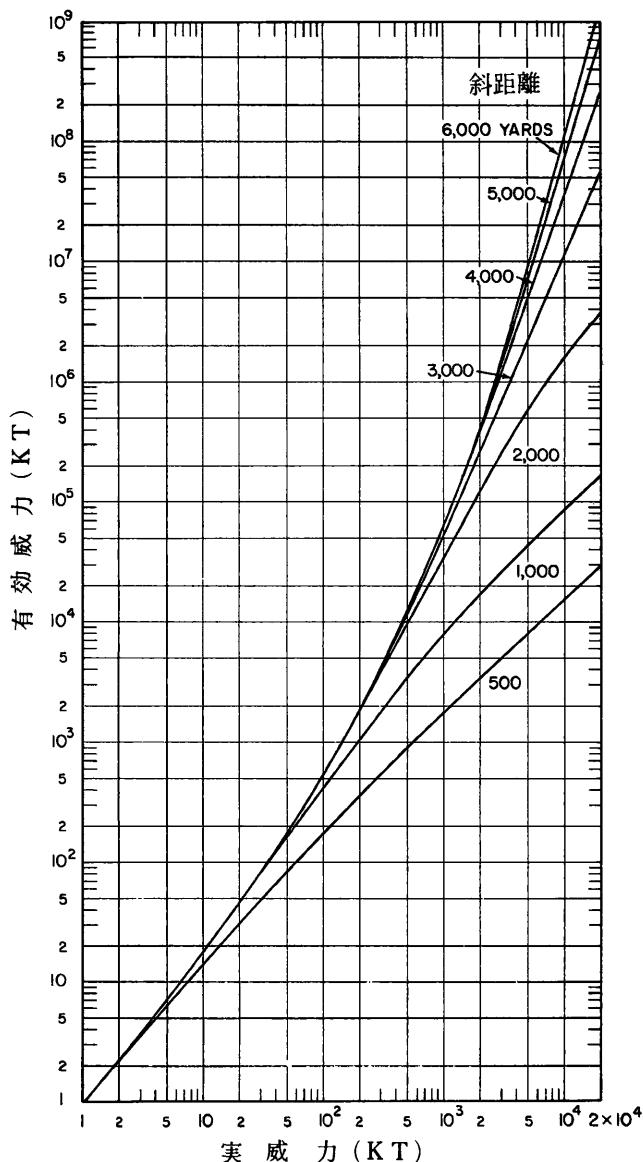


図-8.132 地表面爆発の場合、核分裂生成物  $\gamma$  線線量を求める際の有効威力と実威力の関係。空気密度を標準大気の0.9とした。

## T R E Eの機構：電離

**8.133** 電子機器に対する瞬間的な放射線による効果（T R E E）に関連し、放射線と物質との相互作用として重要なものが2つある。1つは電離であり、他は原子変位（§ 8.76）である。電離によってできた電子とかイオンなどの荷電粒子は結局は結合するけれどもその結果物質の中に起こる変化は永久的である。T R E Eに関するいくつかの問題は、放射線パルスの持続時間と回復時間との相対的な大小関係により左右される。もしも、パルスの持続時間が長ければ、効果はすぐ表われる。効果の度合は通常、電離によってできる荷電粒子の密度の関数であり、これはエネルギーの吸収速度、即ち線量率により決定される。一方、パルスの持続時間は回復時間にくらべて短かいなれば、効果はおくれて表われる。そして、損傷の度合は通常、全吸収エネルギー即ち線量の関数である。したがって、放射線の電子機器に対する効果を評価する場合には、多くの場合、線量率が決定的なファクターとなるが線量率と線量の両方を考えなければならない。一般に効果の持続性は回復時間に関係がある。

**8.134** 電離による主たる現象は、(1)電荷の移動、(2)体積電気伝導率の増加、(3)余分の少数キャリアーの発生、(4)電荷の捕獲、(5)化学的変化である。以下これらの効果について調べてみよう。

**8.135** 電荷移動は電離された物質の表面から電離により生じたいくつかの電子が遊離することにより起こる。もしも、差し引きの電子の流れが電離された物質から隣接した他物質の方向にあれば、前者は正の電荷をもち、後者は負の電荷をもつことになる。したがって2つの物質の間には電位差が生じる。この電位差の最も顕著な効果は2つの物質を結ぶ電子回路を通じて電流を流すことである。そしてこの電流が電磁場をつくり出す。もしも、これら2つの物質の間に物があれば、電荷移動は電離し、そこに電場があるならば電荷が流れることになる。最後に、もしも電荷が絶縁体から出たり、これに入ったりした時には長い寿命の局部的な空間電荷ができる。このように、電荷移動の効果は一時的もしくは半永久的となる。

8.136 電離による自由電荷キャリアーは、加えられた電場にそった電流となる。したがって、電気伝導率が一時的に増加する。この効果は特に、コンデンサーにとって重要である。電荷を貯わえておけるのは、誘電体の電気伝導率が小さいためであり、電離している状況中で体積伝導率が増加すれば、コンデンサーにたくわえられる電荷は少なくなる。

8.137 トランジスタやダイオードのような半導体素子の中には正（孔）と負（電子）のキャリアーがあり、どちらかが少数キャリアーである。電離の効果としては、主として多くの半導体素子の少数のキャリアーを増加させる。通常、これが電離による T R E E として最も重要なことである。半導体素子のいくつかの特性は、素子の中の種々な領域において少数キャリアーの瞬間的な濃度によりきまる。電離放射線は大量（そして同量）の正と負のキャリアーをつくるので、少数キャリアーも相対的に増加する。したがって、素子の電気的な動作は非常に影響をうける。半導体検出器が放射線にさらされると電流パルスが観測されるのも少数キャリアー過剰の効果の例である。ただし、これはそれを利用した例である。

8.138 絶縁体の中にできた自由電荷キャリアーが、その中に時にある不純物準位に捕獲された場合、反対の電荷のキャリアーも他に捕獲されて、多くの自由電荷キャリアーは再結合しない。このような場合には、材料の中に余分の電荷がないにもかゝらず、材料の性質は半永続的に変わる。この電離による効果は電荷捕獲として知られている。電荷が捕獲されると、ハロゲン化アルカリの F (カーラー) 中心とか、ガラスの着色などにある物質の光学的な特性を変えることができる。捕獲されたキャリアーは照射された時の温度を上げることにより熱的に解放される。いずれの場合にも、自由電荷キャリアーができるて伝導度が増加したり、またある時には光を放出したりする (§ 8.24)。

8.139 電荷が再結合した結果、エネルギーが放出されて化学結合を切ることができる。材料はその結果、電荷がなくなった後も残るような化学変化をする。この化学変化は同時にその材料の電気的或はその他の特性を永続的に変える。しかし、

化学的に大きな効果を及ぼすために必要な放射線量は、器材が爆風や火災による損害からまぬがれる距離のところでうける線量より大きい。

## T R E E の 機 構：原 子 変 位

**8.140** 放射線が電子素子に損傷を与えるものにもう1つ、電気的に中性な原子の変位がある。結晶格子中の、原子の正常な位置からの変位により格子欠陥ができる。欠陥の通常の型は原子が正常な格子点から離れて2つのつまつた格子点の間の“格子間”位置に移動することにより起こる。原子が移動すれば、その後は、少し位置が動くかもしれないが、空の正常な格子点（もしくは空孔）ができる。結晶性物質に対するこのような方法による損傷は少なくとも一部は永続する。多くの電子装置はシリコンやゲルマニウムのような結晶性の半導体材料を使用しているので、この変化による損傷がT R E E に特に関係する。

**8.141** 特に、速中性子は原子変位を起こさせやすい。中性子による欠陥の全（一時的なもの及び永続的なもの）発生数はそのエネルギーに左右される。たとえば、14MeVの中性子（熱核兵器）は1 MeVの中性子（核分裂兵器からの概略の平均エネルギー）の約2.5倍の欠陥をつくる。中性子のエネルギー（もしくはエネルギー分布）が与えられれば、欠陥数は中性子のフルエンスによりきまり、半導体材料の特性の変化は直接欠陥数に関係する。したがって、中性子フルエンスは半導体の原子変位による損傷を評価するのに重要な要素となる。

**8.142** 変位によってできる欠陥は永続的なものもあれば一時的なものもある。一時的な欠陥は、空孔と格子間にある対と再結合することにより、言い換えれば格子間原子が空孔の方に移動したり、もしくは先にあった格子欠陥と結合することにより、又は材料の自由表面からとび出したりすることにより消滅する。欠陥が除々になくなることは“アニーリング”とよばれ、その速さは温度が上れば増加する。結晶性半導体の変位による損傷の度合は時間とともに急激に増加し、最大となり、アニーリングの効果があらわれると減少していく。アニーリングによって材料が改良されたり又はさらに悪くなったりする。それは、ある場合には熱的に安定な欠陥ができるからである。これらの欠陥は不安定なものより、ある特

性の変化に対する程度の差はあるがより効果的である。

**8.143** アニーリングの過程は、概略2つの時間的な区分よりなる。急速（もしくは短期）アニーリングは約100分の1秒の間に起こり、長期アニーリングは10秒のオーダーの間続く。実況では一時的損傷のアニーリングは本質的には2分の1時間で完全に終る。最初の損傷（存在する損傷の数）と長期間後においても未だ残っている損傷の割合は“アニーリングファクター”とよばれ、これは温度、材料の電気的な条件のみならず観測する時期により決まる。速中性子の照射後の早い時期にできる欠陥の最大数はしばしば電子装置の動作にとって重要である。素子のアニーリングファクターの最大値は、それが作動しつづけるために永久損傷に加えて耐えられる最大限の損傷を表わしている。

**8.144** 原子変位による格子欠陥は、捕獲中心の増加、散乱または電荷キャリアーが再結合により半導体の特性を悪くする。捕獲中心が増加することにより、キャリアーがなくなり電流が減少する。さらに散乱センターは半導体材料を通してのキャリアーの移動を妨たげる。最後に再結合センターは、少数キャリアーが電流として寄与できる時間を短かくする。少数キャリアーの寿命を短かくする最後の効果は、原子変位を起こすような放射線場での半導体装置の特性を決めるのに重要なファクターである。少数キャリアーの寿命は、半導体に損傷を与えるような大きなフルエンスの場合には、中性子フルエンスに概ね逆比例する。さらに大きなフルエンスでは、寿命は非常に短かくなり半導体装置の作動は正常でなくなる。

## 參 照 文 獻

- ABBOU, I. S., "Shielding Against Initial Radiations from Nuclear Explosions," Oak Ridge National Laboratory, July 1973, ORNL-RSIC-36.
- \*AUXIER, J. A., et al., "Nuclear Weapons Free-Field Environment Recommended for Initial Radiation Shielding Calculations," Oak Ridge National Laboratory, February 1972, ORNL-TM-3396.
- "Basic Radiation Protection Criteria," NCRP Report No. 39, National Council on Radiation Protection, Washington, D.C., 1971.
- ETHERINGTON, H. (Ed.), "Nuclear Engineering Handbook," McGraw-Hill Book Co., Inc., 1958.
- FRENCH, R. L., "A First-Last Collision Model of the Air/Ground Interface Effects on Fast-Neutron Distributions," *Nuclear Sci. and Eng.*, **19**, 151 (1964).
- FRENCH, R. L., and L. G. MOONEY, "Initial Radiation Exposure from Nuclear Weapons," Radiation Research Associates, Fort Worth, Texas, July 1972, RRA-T7201.
- \*FRITZSCHE, A. E., N. E. LORIMIER, and Z. G. BURSON, "Measured Low-Altitude Neutron and Gamma Dose Distributions Due to a 14-MeV Neutron Source," E. G., and G., Inc., Las Vegas, Nevada, 1969, EGG 1183-1449.
- \*FRITZSCHE, A. E., N. E. LORIMIER, and Z. G. BURSON, "Measured High-Altitude Neutron and Gamma Dose Distributions Due to a 14-MeV Neutron Source," E. G., and G., Inc., Las Vegas, Nevada, 1969, EGG 1183-1438.
- GWYN, C. W., D. L. SCHAFETTER, and J. L. WIRTH, "The Analysis of Radiation Effects in Semiconductor Junction Devices," Sandia Corporation, Albuquerque, New Mexico, July 1967, SC-R-67-1158.
- JONES, T. D., and F. F. HAYWOOD, "Transmission of Photons Through Common Shielding Media," Oak Ridge National Laboratory, October 1974, ORNL-TM-4728.
- \*KEITH, J. R., and F. H. SHELTON, "Neutron Transport in Non-Uniform Air by Monte Carlo Calculations, Volume I," Kaman Nuclear, Colorado Springs, Colorado, January 1969, DASA 2236-I, KN-774-69-1.
- \*KUKHTEVICH, V. I., et al., "Protection from Penetrating Radiation of Nuclear Explosions," English translation, Joint Publications Research Service, U.S. Department of Commerce, July 1971, JPRS 53498.
- LARIN, F., "Radiation Effects in Semiconductor Devices," John Wiley and Sons, Inc., 1968.
- MARSHALL, J. D., and M. B. WELLIS, "The Effects of Cut-Off Energy on Monte Carlo Calculated Gamma-Ray Dose Rates in Air," Radiation Research Associates, Fort Worth, Texas, 1966, RRA-M67.
- MOONEY, L. G., "Calculations of Weapon Radiation Doses in Single-Compartment Above-Ground Concrete Structures," Radiation Research Associates, Fort Worth, Texas, November 1969, RRA-M93.
- National Bureau of Standards, "Measurement of Absorbed Dose of Neutrons and Mixtures of Neutrons and Gamma Rays," NCRP Report No. 25, U.S. Government Printing Office, 1961, National Bureau of Standards Handbook 75.
- "Protection Against Neutron Radiation," NCRP Report No. 38, National Council on Radiation Protection, Washington, D. C., 1971.
- "Radiation Damage and Defects in Semiconductors," Conference Series, No. 16, July 1972, The Institute of Physics (London), 1973.
- "Recommended Techniques for the Measurement of Selected Nuclear Radiation Effects on Electronic Components," IBM Electronics Systems Center, Owego, New York, August 1967, DASA 627, Vol. II.
- \*SCHAFFER, N. M. (Editor), "Reactor Shielding for Nuclear Engineers," U.S. AEC Report TID-25951, 1973.
- \*STRAKER, E. A., "Time-Dependent Neutron and Secondary Gamma-Ray Transport in an Air-Over-Ground Geometry, Volume II. Tabulated Data," Oak Ridge National Laboratory, September 1968, ORNL 4289.
- \*STRAKER, E. A., "Status of Neutron Transport in the Atmosphere," Oak Ridge National Laboratory, July 1970, ORNL-TM-3065.
- VOOK, F. L. (Editor), "Radiation Effects in Semiconductors," Proceedings of the Santa Fe Conference on Radiation Effects in Semiconductors, Plenum Press, 1968.