

## 第 9 章

H P 『海軍砲術學校』公開資料

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

## 第9章 残留放射線とフォールアウト

### 第1節 残留放射線源

#### 序　論

**9.01** 残留放射線は爆発の瞬間から1分後に放出される放射線と定義される（§ 8.02）。この放射線の発生源や、特性は核分裂および核融合反応が核兵器エネルギーに寄与する相対的な割合如何にしたがって変化する。核分裂兵器の空中爆発時の残留放射線は主として、核兵器破片残渣、すなわち、核分裂生成物からと、少量ではあるが、核分裂をしなかったウランおよびプルトニウムかや発生する。さらに、破片残渣は核分裂によってではなく、中性子反応によって核兵器構成材料中に作られた放射性同位元素をいくらか含むのが通常である。特に地表及び地下爆発の場合のもう1つの発生源は、爆発の周囲にある土壤・海水・空気または他の物質中の元素と中性子との相互作用によって誘導される放射性物質である。これに反して、主として核融合による核兵器の破片残渣は、同じエネルギー放出量の核分裂兵器に相当するだけの核分裂生成物を含まない。しかし、多量の高いエネルギー中性子が発生する（§ 1.72）ので、核融合兵器からの残留放射線は、もし、核分裂出力比が十分少いならば、主として核兵器及びその周囲の物質中における中性子反応により発生する。

**9.02** 残留放射線の第1次的な傷害は、放射性の核兵器残渣および爆発周囲の土・水・および他の物質中にできた誘導放射性物質からなるフォールアウト粒子の生成（§ 2.18）による。これ等の粒子は風によって大きな面積にひろげられ、その効果は核爆発時に他の効果が及ばなかった遠方にまで達する（§ 9.113）。

第2次的な傷害は、爆心付近の地表における中性子誘導放射能により起こる（§ 8.16）。これら核分裂生成物および誘導放射能の絶対的および相対的に寄与するものは、核兵器の全威力および核分裂の出力比・爆発の高度・爆心付近の地表

および爆発後の経過時間に依存する。

**9.03** (§ 2.28) 述べたように、フォールアウトは便宜上初期及び後期フォールアウトの2つの部分に区分して考察する。初期フォールアウト又は局地的フォールアウトは核爆発後最初の24時間の間地上に到達するものと定義する。地表・地下または低空爆発による初期フォールアウトは広範囲に広がり臨床的な生物学的傷害を及ぼす。最初の1日以降に地表に到達する後期フォールアウトは非常に小さく目に見えない粒子から成り地球表面のかなりの部分に低濃度で分布する。核分裂生成物及び他の物質からの放射線強度は、この後期フォールアウトの場合、大気中に浮遊している時間が比較的長いので放射性崩壊のため著しく減少する。したがって、後期フォールアウトからの放射線は長期間の影響はあるけれども、健康上直接の危険をもたらすものではない。人体や植物及び動物に対する初期、並びに後期フォールアウトの生物学的な効果については第12章で述べる。

**9.04** 空中爆発の場合で、特に火の玉が地表より十分高いときは、前章で考察した初期放射線と残留放射線は非常に明瞭に区別することができる。というのは、核兵器残渣は非常に小さい粒子であるので、爆発後1分経過すれば上空に上昇し、もはやそれからの放射線が地表には到達しない。その後、小さい粒子は広く大気中に分裂し、非常にゆっくり地球上に降下してくるからである。

**9.05** 雨天の場合 (§ 9.67) の地表爆発や、特に地下爆発・低空爆発では、初期放射線と残留放射線の区別は明確でない。核兵器残渣は地表近くにあり、それからの放射線のあるものは常に飛程内にあるので、初期放射線と残留放射線とは連続的に混在することになる (§ 2.82・2.100)。非常に深い地下及び水中爆発の場合には、核分裂や、核融合過程において生ずる初期 $\gamma$ 線及び中性子は周囲の物質によって吸収されるので無視してもよい。この際、考えなければならないのは核分裂生成物及び中性子相互作用によって作られた放射性同位元素からの残留放射線のみである。しかし、地表爆発では初期放射線・残留放射線の両方を考えなければならない。

## 初期フォールアウト

**9.06** 核兵器による初期フォールアウトの放射線学的に見た特性は、核分裂生成物及び生成された誘導放射線の特性からでてくる。残留放射線におけるこれら 2 つの発生源では兵器の全威力に対する核分裂出力の百分比及び（§ 9.02）で述べた他の要素とが相対的に重要である。しかし、ここではさらに初期フォールアウトの放射能に影響を及ぼす“分別”と“添加”という 2 つの現象について次に述べることにする。

**9.07** 火の玉が冷えるにつれて、核分裂生成物及び他の蒸気は、火の玉が空中に上昇する間に下から吸い上げられた土など他の粒子の上にゆっくり凝結する。陸上の爆発では、粒子は主として土壤無機物からなり核分裂生成物の蒸気は、土及び溶けた土の粒子、又はそこにある何か他の粒子の上に凝結する。核分裂生成物の蒸気は、他の物質の蒸気とともに凝結して小さな混合された固体の粒子を作ることもある。これらの凝結の過程において、核分裂生成物の成分比が放射性崩壊とは別の原因で変化するということがある。これが、“分別”とよばれる現象である。この“分別”現象の顕著な例として、地表爆発においてゼロ地点に火の玉から早い時期に落ちてくる大きな粒子と、しばらくして遠くの風下に放射能雲から落ちてくる小さな粒子とでは放射線的に異なる特性をもつ。

**9.08** “分別”についての詳細はよくわかっていないが、これを現象的に説明できるいくつかのモデルが考えられている。たとえば、“分別”は核分裂生成物が物理的な状態変化をするときに起こる。放射性崩壊の結果、ガス状のクリプトンとキセノンはそれぞれルビジウムとセシウムになり、これらは続いて小さな固体状粒子に凝結する。それゆえ、ゼロ地点の近くで降下する最初の固体粒子にはクリプトンやキセノンは勿論、それらの崩壊娘核種も含まれていない。しかし、しばらくの間、放射能雲中に滞留していた小さな粒子は、ルビジウムおよびセシウムを含み、かつその娘核のストロンチウムおよびバリウムをその上に凝結させるであろう。このように、遠距離でのフォールアウトは近くのフォールアウトにはないいくつかの元素を比較的多く含むことになる。

**9.09** “分別”の原因となるもう一つの現象は、上昇する火の玉や雲の中で核分裂生成物が凝結する際、各元素の沸点が異なるため、いつの時点で凝結するかによって元素が分離されることである。したがって、溶けにくい元素は、温度が非常に高い、早い時期、したがってまだ比較的大きな粒子が浮遊している時点で、それらの上に凝結する。それに反して、低い沸点を持つ揮発性の元素は、火の玉が冷えてしまって、しかも大きな粒子はなくなつてはじめて凝結する。溶けにくい元素はかなり大きな、近くの距離に降下する初期フォールアウト粒子の中に比較的多く含まれ、小さくて遠くに到達するものには比較的小ないと考えられる。これと反対のことが、より揮発性の元素について言えるであろう。原子雲の中の粒子の大きさは地表物質により異なるので地表物質の種類も“分別”に影響を及ぼすことになる。

**9.10** 海の表面における大威力の爆発の場合には、凝結した粒子は海水中の塩及び水から成り、フォールアウトの“分別”は地表面爆発にくらべて非常に小さい。その理由は、蒸発した水が凝固するまでに雲は、100°C (212°F) 以下に冷えなければならないからである。この場合、冷却時間が長く、存在する水滴は非常に小さいので気体状のクリプトンやキセノンの娘核種は他の核分裂生成物とともに放射能雲から離れることになる。この時、放射性フォールアウト（またはレインアウト）の成分が爆発地点からの距離とともに変化するということはほとんどない。

**9.11** フォールアウトの成分はまた核兵器を、“添加物入り”にすることにより変化させることができる。これは、誘導放射能を作る目的のため、ある種の元素をできるだけ精製して、かなりの量を含ませることである。核兵器を添加物入りにする理由はいくつかある。たとえば、核実験において、初期および後期フォールアウトの経路や相対的成分の研究をするような目的のため、いわゆる放射性トレーサーとするために使用してきた。

## 早期フォールアウトの放射能および崩壊

**9.12** 核分裂生成物は、36種類の元素の300以上の異なる同位元素から成り、非常に複雑な混合物である（§ 1.62）。これらの同位元素の大部分は放射能であり、

- 注：(1) 実際の値は分裂物質やその他の兵器の要素により変化する。ここにおける値は平均値とし妥当なものである（§ 9.159）。
- (2) フォールアウトからの放射線の測定や計算は通常、 $\gamma$ 線のレントゲン単位として照射線量（率）で求められる。しかし、他の章との関連もあり、この章における値は、身体表面組織（§ 8.18）に対する吸収線量（率）とした。この章を通じて以下、組織という言葉は省略する。

$\beta$ 線を放出して崩壊する。そして $\gamma$ 線をともなう場合が多い。威力1 KT当り原子数には約 $3 \times 10^{23}$ 個、重量は約2オンスの核分裂生成物がつくられる（又は、1 MT当り125ポンド作られる）。核分裂生成物の全放射能は、はじめ非常に大きいが、放射性崩壊のため、かなり速みやかに減少する。

**9.13** 残留放射線が放出される爆発1分後は、核分裂生成物の放射能は毎秒 $10^{21}$ 個を崩壊し、これはほぼ $3 \times 10^{10}$ キュリーにあたる（§ 9.141）。小威力の爆発の場合でも、この放射能は非常に大きく、したがって核爆発以外にこのような大きな放射能をもつ線源はなかった。1日後には、1分後の値の約2,000分の1以下に減少する。そして $\gamma$ 線の放射能はなお大である。

**9.14** 仮に、分裂威力が1 KTの原爆からの全部の核兵器生成物が、1平方マイルの平面に一様に分布したと仮定すると地上3フィートの高さの地点における組織吸収線量は<sup>(2)</sup>、爆発1時間後で約2.900ラド／時間<sup>(1)</sup>となることが計算されている（§ 9.159）。しかし、実際の場合には、核分裂生成物は、GZの付近には遠くの地点よりも多く降下するというように均一に分布するものではない。したがって、爆心地点付近における線量率は平均値よりも更に大きくなり、遠方の地点では通常小さくなると考えられる。更に、“分別”現象により、ある核分裂生成物の核性は、局地フォールアウトにはないこともあるので、理論的に計算された先の線量率は大きめである。もう1つ、実際の地表は平坦ではない。（§ 9.95）に述べるが、この地表の起伏を考慮するならば無限に広い平面とした線量率の計算値は、大きくなっている。このように、実際には、計算値より小さくなるが、それでも、爆発後、最初の数時間は、非常に高い線量率が測定された。

**9.15** 初期フォールアウトは、核分裂生成物ばかりでなく汚染された粒子から成り立っている。ある量の実際の混合物からの線量率が、時間とともにいかに減少するかについて、近似的につぎの法則がある。爆発後の時間が7倍経過するごとに、線量率は $\frac{1}{7}$ に減少する。例えば、爆発後、1時間の線量率を基準点とすれば、爆発後7時間では、1時間の値の $\frac{1}{7}$ に減少するであろう。さらに、 $7 \times 7 = 49$ 時間（約2日）後には、 $\frac{1}{49}$ となる。 $7 \times 7 \times 7 = 343$ 時間（約2

注:(3) “ $t^{-1/2}$ ”のマークがついている点線については§9.146に述べる。そこで単位時間後の基準線量率の物理的意味が説明されている。ここでは点線は考えなくてよい。

週間)後には線量率は、%<sub>000</sub>となっている。この法則の他の見方としては、1週間(7日)の終りでは、放射線線量率は、1日後の値の%<sub>0</sub>となるということである。この法則は2週間ぐらいまでは、25%以内で正確であり、核爆発後、約6ヶ月までは、この2倍の誤差の範囲内で適用できる。したがって、実際の線量率はこの法則により予想されるよりも更に速みやかに減少する。分別や誘導放射能のある場合は複雑となり、先の近似的な法則は単に例として参照し、あるいは単にある計画段階について有効である。粒子が引き続き落下し、逆に飛散し、あるいは、多重爆発などのためフォールアウトの量に何らかの変化がある場合には当然線量率は影響を受ける。したがって、実際のフォールアウト状況において、放射能の崩壊のレベルや割合を知るためにには、適当な時間間隔で測定をくりかえすことが必要である。

**9.16** 核分裂生成物やその他、いくらかの残った兵器構成材料(§9.32)から成るある量の初期フォールアウトの線量率の減少は、図-9.16 a・bに示された連続曲線から知ることができる。この曲線は、(§9.146)に述べる方法により計算された。この図においては、爆発後任意の時刻における、概略の線量率(ラド/時間)対、“単位時間の基準線量率”とよばれる便利な基準値との比が時間(単位・時間)に対して示されている。<sup>(3)</sup>基準線量率を使用することにより、次に述べる様に結果の表現やそれに基づく計算を簡単にすることができます。以下述べる取扱いは、 $\gamma$ 線源による体外からの照射線量のみに適用できる。確かに、吸入や摂取によって多少のフォールアウトが体内に入り、体内からの照射量が増加するということが考えられる(§12.163その他)。この際の有害なものは、主として放射性ヨードである。これはフォールアウトにより汚染された草を食べた牛のミルクを介して人体に入る。体内からの照射線量は専ら環境に左右されるのでこれを前もって予測することはできない。

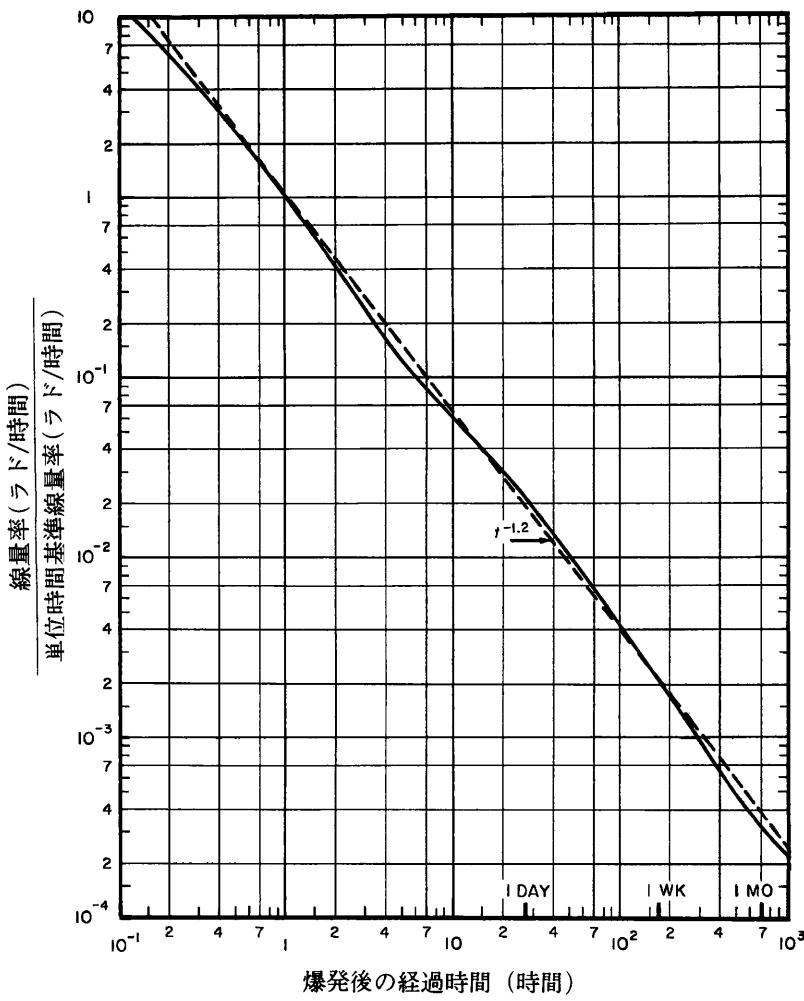


図-9.16 a 初期フォールアウト線量率の爆発後の時間変化

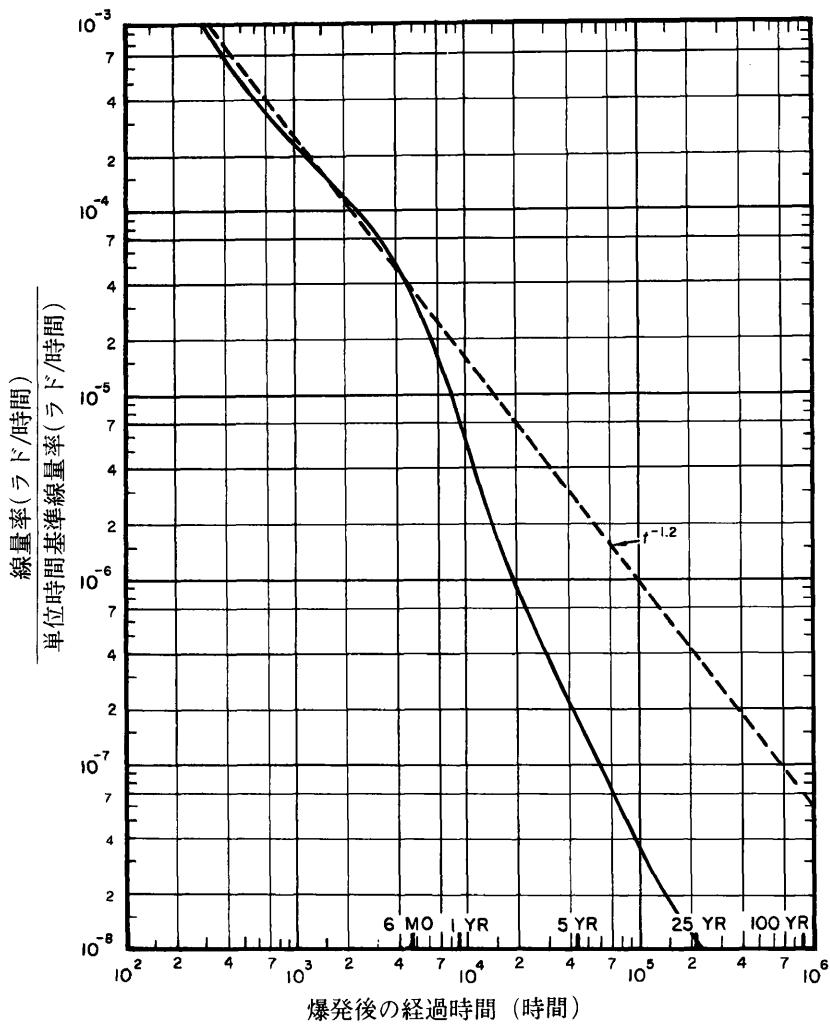


図-9.16 b 初期フォールアウト線量率の爆発後の時間変化

9.17 一つの例について考察する。爆発5時間後にフォールアウトの降下が始まったある地点について降下が終了した15時間後の外部線量率が、4.0ラド／時間(rads / hr.)とする。図-9.16 a の曲線もしくは、図-9.19のデータから15時間後の実際の線量率の基準線量率に対する比は、0.040であることがわかる。した

# HP『海軍砲術学校』公開資料

注:(4) 計算尺のような器材がフォールアウトの崩壊の計算を迅速に行なうためにつくられている。

がって基準線量率は、 $4.0 / 0.040 = 100 \text{ rad} / \text{hr}$  であるはずである。この基準線量率と図-9.16 a・b の曲線からこの地点におけるフォールアウト降下終了後の任意の時刻について実際の線量率を計算することができる。そこで、24時間後の値が求めたいときは、図-9.16 a の横軸の24時間を表わす点に着目する。点線もしくは連続曲線に交るまで垂直に上りたどると、単位時間基準線量率に0.023を乗ずればその線量率が求まることがわかる。即ち、 $0.023 \times 100 = 2.3 \text{ rads} / \text{hr}$ .

**9.18** 仮に実際の測定により任意の時刻の線量率が求まっている時には、他の時刻における値は計算により求めることができる。このためには、与えられた2つの時間に対して単位時間基準線量率との比を、図-9.16 a もしくは、図-9.16 b から求めて比較すればよい。例えば、爆発後3時間での線量率が $50 \text{ rads} / \text{hr}$ . であることがわかっているとする。この場合、18時間後の値はいくらとなるかについて考えてみる。図-9.16 a の曲線からそれぞれ対応する単位時間基準線量率に対する比は0.23と0.033である。したがって爆発18時間後の線量率は、 $50 \times 0.033 / 0.23 = 7.2 \text{ rads} / \text{hr}$ . と求まる。

**9.19** 図-9.16 a と b の結果を、やや不完全ではあるが更に簡便な型に表わしたのが表-9.19である。爆発後1時間における線量率は任意の単位で1,000とする。同じ初期フォールアウト量について、それ以降の時刻での線量率は同じ単位で図に示された値となる。仮に1時間後もしくは他の時間でもよいが実際の線量率が分っていれば1,000時間までの必要な任意の時刻における線量率は簡単な比例法で求めることができる。(4)

表-9.19 核爆発後の各経過時間における初期  
フォールアウトの相対線量率

時 間 (hr)	相対線量率	時 間 (hr)	相対線量率
1	1,000	3 6	1 5
1½	610	4 8	1 0
2	400	7 2	6.2
3	230	1 00	4.0
5	130	2 00	1.7
6	100	4 00	0.69
10	63	6 00	0.40
15	40	8 00	0.31
24	23	1,000	0.24

9.20 図-9.16 a 及び図-9.16 b 並びに表-9.19は線量率の計算に使用されるということを注意しておかなければならぬ。ある時間内に受ける全体の放射線量を求めるためには、平均線量率に被爆時間を乗じてやればよい。しかし、線量率は常に減少しているので、これに対する考慮をしなければならない。図-9.16 a から計算された結果が図-9.20の曲線に示されている。この曲線は、初期フォールアウトから受ける全線量を、爆発後1分から任意の他の時刻までについて求めて単位時間基準線量率との比で示している。

9.21 図-9.20の使用法を示すために、ある個人が爆発後2時間経ったフォールアウトから被爆することを考えてみよう。そして、2時間後の線量率が1.5 rads / hr. と測定されたとする。これから12時間の間受ける全線量、即ち爆発後14時間までに受ける全線量はいくらになるか。第1段階は、単位時間基準線量率を求めることである。図-9.16 a から、

$$\frac{\text{爆発2時間後の線量率}}{\text{単位時間基準線量率}} = 0.40$$

であり、かつ2時間後の線量率は1.5 rads / hr. であることがわかっているので基準値は、 $1.5 / 0.40 = 3.8$  rads / hr. であることがわかる。次に、図-9.20から、爆発2時間及び14時間後に対して、それぞれ、

$$\frac{\text{爆発2時間後の全線量}}{\text{単位時間基準線量率}} = 5.8$$

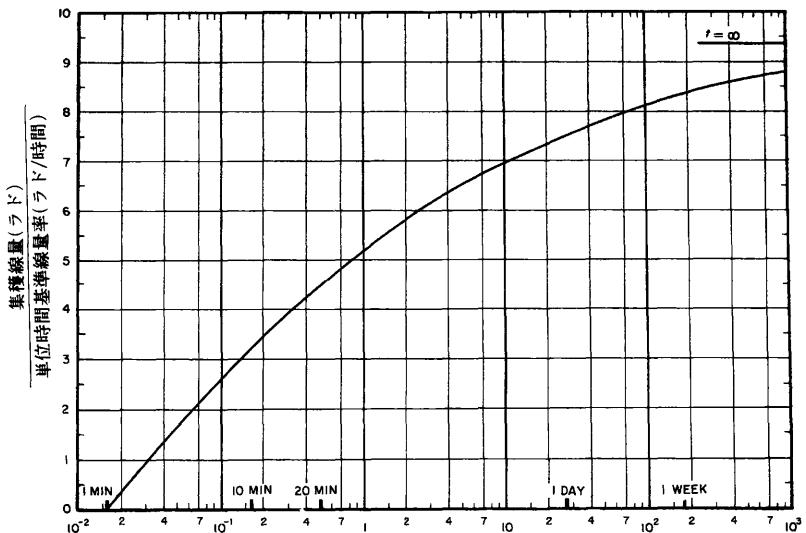


図-9.20 初期フォールアウトによる集積線量を爆発後の各時間で  
もとめた曲線

および、

$$\frac{\text{爆発14時間後の全線量}}{\text{単位時間基準線量率}} = 7.1$$

であることがわかる。従つて、減算によって、

$$\frac{\text{爆発2時間後から14時間後までに受ける線量}}{\text{単位時間基準線量率}} = 1.3$$

となる。単位時間基準線量率は、3.8 rads / hr. であるので、爆発2時間後から14時間後の間の12時間で受ける全線量は、 $3.8 \times 1.3 = 4.9$  ラドとなる。

**9.22** ある与えられた量の初期フォールアウトから受ける線量の“無限大線量”もしくは“無限時間線量”に対する百分比を爆発後1分から種々の時刻に至るまでについて計算したものを表-9.22に示す。計算された無限時間線量というのは、本質的には、ある量の初期フォールアウトからの被爆で長年蓄積された集積線量である。これらのデータは、初期フォールアウトが完全に沈積した後から任意の時刻までに受ける線量の無限時間線量に対する比を求めるのに用いることができる。勿論、フォールアウトの沈降が不完全であったり、ある部分が飛散するような場合には表-9.22は、適用できない。

表-9.22 爆発1分後から各時間までの無限時間残留放射線量百分率

時 間 (hr)	無限時間線量に対する百分比	時 間 (hr)	無限時間線量に対する百分比
1	55	72	86
2	62	100	88
4	68	200	90
6	71	500	93
12	75	1,000	95
24	80	2,000	97
48	83	10,000	99

9.23 例えば、もし、個人がある量の初期フォールアウトに爆発2時間後から14時間後までの間被爆する場合は、無限時間線量に対する百分比は表-9.22の中の（または表から計算された）それぞれの値の差を引くことにより求まる。即ち、（14時間後に対する）76から（2時間後に対する）62の差引いて、無限時間線量の14%、即ち、0.14倍となる。爆発1分後から計算された無限時間線量の実際の値は、表-9.20に  $t = \infty$  で示されている通り、単位時間基準線量率（rads / hr.）の9.3倍である。したがって、もし、基準値が前の例のとおり 3.8 rads / hr. であるなれば、爆発2時間後と14時間後の間で受ける線量は、 $0.14 \times 9.3 \times 3.8 = 4.9$  rads となり、前の例と同じである。

9.24 図-9.16 a 及び図-9.16 b 並びに図-9.20（または同等の表-9.19および表-9.22）を用いて、初期フォールアウトから受ける放射線の線量率及び全線量に関して多くのいろいろな計算をすることができる。しかし、方法としては、下記に示す特別な図により簡単に行うことができる。その結果は、先にも述べたように、ある決った量のフォールアウトに適用できるものである。もし、それ以上の汚染または汚染除去のいずれかにより事情が変化するならば、結果は無意味となる。

9.25 もしも、初期フォールアウトからの放射線線量率が、ある場所において求まっているならば、図-9.25におけるノモグラフを用いて、同一場所の他の時刻

における線量率を求めることができる。この時、通常の放射能崩壊以外には、フォールアウトに変化がないと仮定する。同じこのノモグラフを用いて、線量率がある値になる爆発後の時間を求めることもできる。ノモグラフは、図-9.16 a と図-9.16 bにおいて“ $t^{-1.2}$ ”と書かれた直線から求められている。この直線の連続崩壊曲線からのずれは、約6ヶ月の間はわずかである。図-9.25から近似的に求まる線量率は、爆発後200日間について、図-9.16 a・b の実線から求める値の25%以内とすることが可能である。

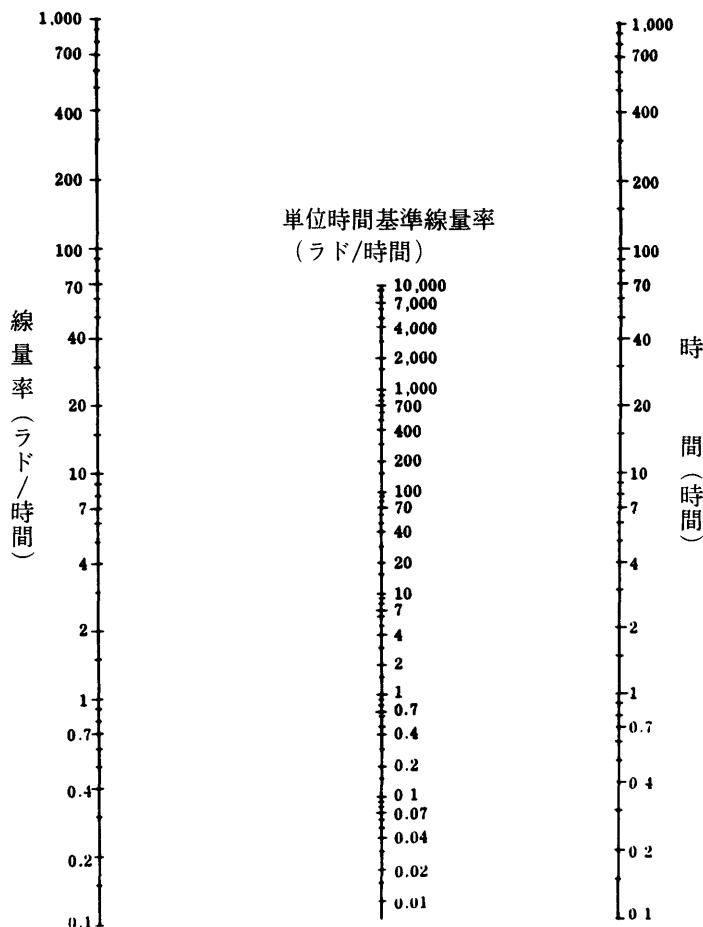


図-9.25 初期フォールアウトからの線量率概算のためのノモグラフ

**9.26** 初期フォールアウトで汚染された地域に、ある決った時間滞留する間に受ける全放射線量を求めるために、もし、任意の与えられた時刻での線量率が求まっているならば図-9.25と図-9.26を使用することができる。この図はまた、ある全線量を越えないで、特定の仕事をするために汚染地域に侵入できる時刻をもとめるためにも使用できる。

図-9.25に示したノモグラフは爆発後任意の時刻における線量率と単位時間基準値との間の概略の関係を表わしている。ある時間における線量率が得られれば、この図から他の任意の時間での線量率を求めることができる。逆にある線量率になる爆発後の時間を換算することができる。図-9.25が使用できるための条件については、§ 9.30を参照。

#### 例 題

条件：ある場所における核爆発 6 時間後のフォールアウトによる線量率は、8 rads / hr. である。

問題：(a) 24時間後の線量率

(b) 線量率が 1 rads / hr. となる爆発後の時間を求めよ。

解答：定規を用いて左目盛上の 8 rads / hr. の点と右目盛上の 6 時間を示す点を結ぶ。この直線は中央の目盛を 69 rads / hr. の点で横切る。この線量率は単位時間基準値である。

(a) 定規を用いて、この基準点 (69 rads / hr.) と右側目盛の爆発後の 24 時間を表わす点を結ぶ。この直線を左側に延長して対応する左側目盛の点 1.5 rads / hr. を得る。

(b) 左側目盛の 1 rads / hr. の線量率の点と中間目盛上の基準値 69 rads / hr. の点を右側目盛に延長する。この直線は爆発後 34 時間の点で交わる。

汚染地域にある期間滞留する場合、初期フォールアウトから受ける全集積線量は、ある時間における線量率が得られている場合は図-9.26から求めることができる。逆に、一定の期間を要する作業で、全放射線量が定められている時、この作業が開始できる時間を計算することができる。図-9.26が使用できる条件につ

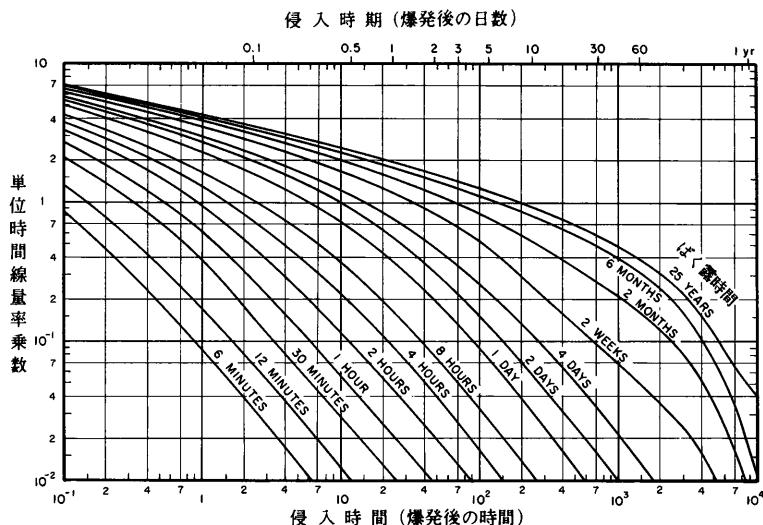


図-9.26 単位時間基準線量率をもとにして初期フォールアウトからの集積線量を求めるための曲線

いっては § 9.30 を参照のこと。

### 例 題

条件：核爆発 4 時間後の線量率は 6 rads /hr. である。

問題：(a) 爆発 6 時間後から作業を始めて 2 時間の間に受ける全集積線量

- (b) 作業が 5 時間を要する時、もし全線量を 4 rads とするために作業するための立入り時期

解答：まず、単位時間基準線量率 ( $R_1$ ) を求める。図-9.25 から、左目盛の 6 rads /hr. の点と右目盛の 4 時間の点と直線を結べば、この直線は中央の目盛を 32 rads /hr. で横切る。これが  $R_1$  の値である。

- (a) 図-9.26 から爆発 6 時間後（横軸）の点を 2 時間の滞溜を示す曲線まで上りたどる。対応する縦軸の値は、 $R_1$  から全線量を求めるための乗数であり 0.19 である。したがって集積線量は  $0.19 \times 32 = 6.1$  rads
- (b) 集積線量は 4 rads と与えられており、 $R_1$  は 32 rads /hr. であるので、乗数は  $4 / 32 = 0.125$  である。図-9.26 の縦軸の 0.125 の点から

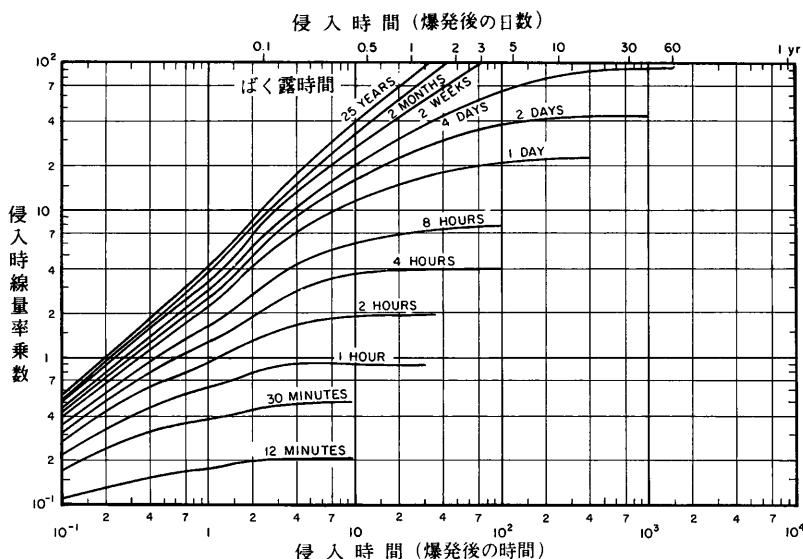


図-9.27 侵入時の線量率をもとに初期フォールアウトからの集積放射線量を求めるための曲線

滞溜時間、5時間 を示す（内隙）双曲線に交るまで水平に移行する。

この点に対応する横軸の値は爆発後の時間を表わし21時間であることがわかる。（答）

図-9.27における曲線は、汚染地域内に定められた時間滞溜する場合、侵入時の線量率をもとに初期フォールアウトからの全集積線量を求める時に使用する。又、逆に全線量が定められている時、滞溜時間を求めることもできる。図-9.27の適用条件については § 9.30を参照のこと。

#### 例 題

条件：核爆発12時間後に汚染地域に立入り、この時の線量率が5 rads / hr. である。

問題：(a) 2時間の滞溜した場合の全集積線量

(b) 全集積線量が20 rads となる滞溜時間

解答： (a) 図-9.27の横軸で爆発後12時間を表わす点から上にたどって滞溜時間2時間を示す曲線まで伸ばす。縦軸の目盛から侵入時の線量率に対する乗数は、1.9である。したがって、全集積線量は、

$$1.9 \times 5 = 9.5 \text{ rads}$$

(b) 全集積線量は20radsであり、侵入時の線量率が5 rads/hr.である。したがって乗数は $20 / 5 = 4.0$  図-9.27の縦軸4.0を示す点から水平に延長した直線と、横軸の爆発12時間後の点から上方に延長した直線とが交るようとする。2つの直線は、滞溜時間は約4½時間を示す点で交る。（答）

**9.27** 汚染地域で（ある決った量のフォールアウトから）受ける放射線量に関する他の種類の計算には、その地域に立入る時期における線量率がもととなる。図-9.25も使用するけれども、図-9.26の使用法の例で述べた方法は、あるきまった滞溜時間内に受ける全線量の計算、またはある線量を受ける滞溜時間の計算を行うために使用することができる。しかし、この計算には図-9.27を用いるならば簡単である。この場合、仮に汚染地域に侵入する時期における線量率が得られているならば単位時間基準線量率をもとめる必要がない。

**9.28** 図-9.27は仮に初期フォールアウトの全体が、短時間に与えられた地域に到達すると仮定すれば、防護なしでその地域内に立入る場合の受線量が時間とともにいかに増加するか知るために使用することができる。例えば、初期フォールアウトが、爆発6時間後に到達し、その時における線量率がR rads/hr.と仮定する。1日間に受ける全線量は9 R ラド、2日間では12 R ラド、5日間では16 R ラドとなる。

**9.29** 初期フォールアウトからの残留放射線による照射に関するかぎり、爆発後最初の1日目までが最も危険であることは明らかである。先に述べた、例え、爆発6時間後にこの初期フォールアウトが飛来すると仮定した特別なものであったが、得られた結果は、あらゆる場合に適用できる。最初の1・2日間に受ける線量はそれ以降に受ける線量よりも大きい。したがって、フォールアウトに対する

防護が重要なのは爆発後早い時期である。

**9.30** 今までに出てきた図・表それにこれを使用して行った放射線量や線量率の計算においては次に述べる仮定が入っていることを知っておかねばならない。即ち、個人は、ある決った量の初期フォールアウトに、連続的に（防護なし）ある時間引き続き照射されるという仮定である。しかし、実際のフォールアウトの状況ではこういう条件に恐らく存在しないであろう。一つには、放射作用のシエルターがあれば照射線量率（および線量）を計算でも与えられたように減少する。さらに、風や気象の作用によりフォールアウト粒子はある地域では飛散し、他の地域では集まる。したがって、ある地域内の初期フォールアウトの量は被爆している間に変化することがあり得る。これにともなって、放射線量率（及び線量）も変化する。同様なことは、他の爆発があってフォールアウトが増した時も勿論言える。

### 中性子誘導放射能

**9.31** 核分裂により発生した中性子で、核分裂連鎖反応の継続のために費やされなかった中性子は、最終的には、外部に放出するまでに通過する核兵器を構成する物質、空気中の窒素（主として）・酸素、その他地表の種々の元素などによって捕獲される。多くの物質は中性子を捕獲して放射能をおびる。したがって、これらは爆発後相当期間 $\beta$ 線を放出し、通常 $\gamma$ 線も放出する。このように、中性子誘導放射能は残留放射線の一部である。

**9.32** 核兵器を構成する物質中に誘導される放射能の程度は一定でない。なぜならば、核兵器を構成する物質はその設計や構造的な特性により異なるからである。未分裂物質の中に中性子捕獲によってできた放射性同位元素は全て核分裂生成物と同様になる。今までに出て来た曲線や図は、このようにしてできたウラン-237・239そしてネプツニウム239・240を含むものとして示している。核兵器を構成する物質にもよるけれども、爆発20時間後から2週間後の間は、これらの同位元素の放射能は残渣全放射能の40%を占める。この他の時間では、これらの放射能は核分裂生成物のものにくらべて無視しうる。

**9.33** 中性子が空気中の酸素や窒素と相互作用をする時、初期残留放射線を考える限りでは、その結果による放射能はほとんど、または、全然考慮しなくてよい。例えば、酸素16は、速中性子とわずかではあるが相互作用をするが、その結果である窒素の同位元素は半減期わずか7秒のものである。したがって、1～2分の間に完全に崩壊してしまう。

**9.34** 中性子と窒素14との相互作用で放射性の炭素14ができる（§ 8.110）が、この炭素14は低エネルギーの $\beta$ 線を放出し、 $\gamma$ 線は放出しない。炭素14は長い半減期（5,730年）を有するので、その崩壊、したがって $\beta$ 線の放出はゆっくりである。これは二酸化炭素の形で容易に植物体の中に摂取され、人体に入ることになる。全ての生体組織の中の炭素は、大気中の窒素が自然の宇宙線や核実験からの中性子を捕獲してできた炭素14がある割合で含んでいる。海洋・大気及び生物（生体有機組織）を含む自然界に貯蔵されている炭素14は全部で50ないし80 tであることが知られている。この量のうち、約1 tは大気中にあり、0.2 tは生体の中にある。1961年11月以前の核実験で0.65 tの炭素14ができ、そのうち約半分が海洋に溶けてしまったと見積られている。1961年～1962年にかけて大気圏内において大威力の核実験が何回も行なわれた結果、大気圏内における炭素14が1963年春までに余分に1.6（弱）tにまで増加した。1969年の中頃までにこの余分の炭素14は約0.74 tに減少してしまった。もしも、核実験による新たな、大量の増加がなければ炭素14は時間とともに次第に海洋に移行して、大気中の量は減少するはずである。1963年～1969年にかけて減少したような速さで大気中の余分の炭素14が減少していくならば、40～80年間で自然の平常値の1%増の水準にまで減少するはずである。

**9.35** 残留放射能に寄与し得る重要なものとして、土壤や海水中において中性子捕獲によって誘導される放射能がある。この各種の放射能には大きな差異がある。中性子誘導による環境放射能に関する限り、最も注目に値する元素は、恐らくナトリウムであろう。これは通常の土壤の中には少量しか含まれていないが中性子捕獲によって作られる放射性ナトリウム24の量はかなりの量になりうる。この同

注:(5) ナトリウム24の崩壊のたびに1.4 Mevと2.8 Mevの2つの $\gamma$ 線を放出する。生成されて1時間後の核分裂生成物からの光子の平均エネルギーは約1Mevである。

位元素は半減期15時間で、 $\beta$ 線と $\gamma$ 線を放出し、ことに重要なことはこの $\gamma$ 線のエネルギーが比較的高いことである。<sup>(5)</sup>

**9.36** 誘導放射能のもう一つの発生源はマンガンである。これは植物の成長に不可欠のものであり土壤の中に少量ではあるが必ず含まれている。中性子の捕獲によって、半減期2.6時間の放射性マンガン56ができる。この崩壊により $\beta$ 線とともに高エネルギーの $\gamma$ 線をいくつか放出する。このようにマンガン56の半減期はナトリウム24よりも短いので、その放射能はより速く減衰する。しかし、爆発後最初の数時間までは土壤中のマンガンはナトリウムよりも更に有害である。

**9.37** 土壤の主成分は、シリコンであるが、これが、中性子捕獲をすると放射性シリコン31となる。これは、2.6時間の半減期をもち、 $\beta$ 線を放出するが、 $\gamma$ 線は崩壊あたり約0.07%以上放出しない。後でわかるが、 $\beta$ 線はある限られた条件の時のみ放射線危害を及ぼす。もう一つ土壤の成分であるアルミニウムは半減期わずか2・3分の放射性アルミニウム28となる。このように短半減期の同位元素は初期の高い放射能に寄与するが、爆発後1時間以内で非常に少なくなってしまう。

**9.38** 中性子が水の中の水素核によって捕獲されるとき、生成物は非放射性（安定）同位元素の重水素であり放射能はない。§9.33により判明したように、水中的酸素が誘導される放射能は生成物が非常に短い半減期をもっているので無視することができる。しかし、水に溶ける物質と特に海水中の塩（塩化ナトリウム）は、かなりの誘導放射能の発生源となり得る。既に述べた通り、ナトリウムはナトリウム24となり、塩素は $\beta$ 線と高エネルギーの $\gamma$ 線を放出する塩素38となるしかし、塩素の半減期はわずか37分であるので、4～5時間以内にその放射能は初めの値の約1%に減ってしまうであろう。

**9.39** 土壤及び水中に存在する元素と中性子の相互作用以外に、核爆発からの中性子は構造材料及び他の材料中の他の核によって捕獲されることがある。金属のうちでは、誘導放射能の主たる発生源は多分亜鉛・銅・マンガンである。最後のマンガンは多くの銅の成分である。そして鉄も、わずかではあるが、誘導放射能

の発生源となる。木材及び衣服が中性子捕獲の結果として、多くの放射能を示すことはあり得ない。しかし、ガラスはナトリウム及びシリコンを多く含んでいるので、放射性になり得る。食料品は主としてナトリウムの中性子捕獲により誘導放射能をうることがある。しかし、この放射能が重要となるような、核爆発からの距離において、又そのような条件においては、食料品は爆風とか火災による損傷などの理由により、恐らく使用できないと考えられる。硼素のようないくつかの元素は、放射化されることなく中性子を吸収するので、これらがあることによって誘導放射能は少なくなる。

### ウラン及びプルトニウム

**9.40** さらに残留放射線源の可能性のあるものとして核兵器の中で分裂しなかったウラン及びプルトニウムがある。これら元素の同位元素は、大抵 $\alpha$ 粒子及びいくつかの低エネルギー $\gamma$ 線を放出する。しかし、半減期が長いので、放射能は核分裂生成物の放射能に比べて非常に小さい。

**9.41** ウラン及びプルトニウム、又は一般の放射線源からの $\alpha$ 粒子は、1インチまたは2インチの空気中で完全に吸収される(§1.66)。 $\alpha$ 粒子が通常の衣服を貫通することができないということと、上記のことは地上に堆積されたウラン及びプルトニウムが重大な外部傷害を与えるものでないことを示している。たとえ、それらが人体と直接に接触したとしても、放出する $\alpha$ 粒子は皮膚に傷害がないかぎりこれを貫くことはできない。

**9.42** ウラン及びプルトニウムの体外からの危険は無視できるけれども、危険量のこれら元素が、肺・消化器、又は皮膚の傷害を通して体内に入る可能性はある。例えば、プルトニウムは骨や肺に蓄積し易い。 $\alpha$ 粒子がここで長期間作用すれば、ひどい障害を引き起こす可能性がある(第12章)。

**9.43** 非常に多数回の核爆発が行なわれたならば大量のプルトニウムが分布して世界中に危害をもたらすかもしれないということがかつては指摘された。現在では、核分裂生成物——とくに放射性同位元素ストロンチウム-90がプルトニウム以上にはげしい障害を与えるであろうということがわかっている。さらに、より

検知し易い核分裂生成物はより検知が容易であるが、これから防護する各種の処置が、同時に、プルトニウムからの害をも少なくするであろう。

## トリチウム

**9.44** 宇宙線中の速中性子と空気中の窒素原子核との相互作用により自然大気中にいくらかトリチウムが生ずる。この水素の放射性同位元素は半減期が約12.3年である。少量のトリチウムは分裂によりつくられるが、熱核兵器の爆発によってはこれより多量にできる。重水素とトリチウムの融合反応は他の熱核反応より速みやかに進行する(§1.69)ので、そこに存在する(もしくはD-D反応やLi-N反応で作られる)。トリチウムは爆発で消費される。しかし、若干はそのまま残る。この他、トリチウムは空気中の窒素核と融合反応で放出される高速中性子との反応によってもつくられる。核爆発後残ったトリチウムは宇宙線によりできるものと同様、そのほとんどがすぐ三重水素HTOに変る。この三重水は化学的には普通の水(H<sub>2</sub>O)と同じであるが、これは普通の水素(H)の代りに放射性トリチウム(T)が置きかわっている点のみが異なる。もしも、三重水が自然水のあるところでできれば、それとともに移動する。

**9.45** 地球上におけるトリチウムはほとんどが三重水として存在するが、その全体の量は米国とソビエトが大気圏実験を中止した後1963に最大に達した。この時の量は平常時の16~18倍であったが放射性崩壊により減少しつつある。仮に、今後、数回以上の大気圏内核実験がおこなわれなければ今世紀末までには最大だった頃の $\frac{1}{8}$ 程度にまで減少するであろう。生成されたトリチウムのある部分は、大気圏でも低い対流圏にあり、残りは上昇して成層圏に入る(図-9.126参照)。対流圏にある三重水は気象の影響により落下物となる。核実験がひんぱんに行なわれた後の1958年と1963年には雨水中の三重水の量は平常時の約100倍になった。成層圏にあるトリチウムはゆっくり移行するので、その大部分は未だ成層圏に残っている。一般的にはトリチウム(その他核兵器残渣)は雨や雪として降下する前にまず対流圏に落下して来なければならない(§9.135)。

**9.46** トリチウムが崩壊するならば低エネルギーのβ粒子を放出するがγ線は放出

しない。したがって、これは外部から放射線障害を起こすようなことはない。しかし、主として内部から障害を起こす可能性がある。自然水は生成物の中を移動し、幾分でも三重水が含まれておれば急速に分散し、食物や飲物として人に摂取されるようになる。しかし、三重水が自然環境の中で普通の水にうすめられるので危害は少なくなっている。結局トリチウムによる内部被爆線量は核分裂生成物による外部（もしくは内部）被爆線量にくらべて重要ではない。

## きれいな核兵器ときたない核兵器

**9.47** 核融合兵器（または水爆）によって生ずる放射能の量をあらわすために、“通常”核兵器からの放射能の量に対する相対値を考え“きれいな”又は“きたない”という言葉がしばしば使われる。きたない核兵器という言葉は、与えられた爆発放出量から作られる放射能の量を増やしたりまたは減らしたりするため何等の特別な手段がなされていない核兵器と定義される。“きれいな”核兵器とは、同じ威力の通常核兵器よりいちじるしく少ない放射能しか出さないように設計された核兵器である。しかし、きれいな核融合兵器もいくらかの放射性物質を作ることはきけられないということは注意しなければならない。たとえ、核分裂のない真の核融合のみの兵器ができたとしても、空中で爆発すれば炭素14、トリチウムができ、また、他の中性子誘導放射能も恐らくできるであろう。もし、核融合装置の設計に、添加（§ 9.11）のような特別な手段をとって爆発に際して同威力の通常兵器より大きな放射能ができるようにすれば、それは“きたない”といえるだろう。核分裂兵器は本質的にきたないと見なさなければならない。

## 第2節 核爆発による放射能汚染

### 空中爆発

**9.48** 定義によると、空中爆発とは、地表の物質が火の玉の中にほとんど上って行かない程度の地上高で起こる爆発である。核兵器の放射能残渣は、爆発後、直徑が $0.01\sim20\mu\text{m}$ （§ 2.27 フットノート参照）の範囲の非常に小さな粒子に凝

結する。原子雲はこれらの粒子を、爆弾の威力や上空の条件で決まるある高度にまで持上げる。粒子の大部分は非常に小さいので重力により極めてゆっくり落下してくる。しかし、下方に分散し、大気の循環により堆積する。堆積するまでには長時間かかり、粒子は広範囲に分布するので、濃度は小さい。又一方で放射能は自然の崩壊により小さくなる。したがって、空中爆発による初期フォールアウトの堆積は、雨とか雪の降下物（§ 9.67）がなければ一般にはそう問題にならない。

**9.49** しかし、空中爆発におけるG Zの近くは土壤中の元素が中性子捕獲として誘導放射能汚染を起こす。汚染の程度は、分裂や融合のエネルギー放出力など兵器の特性・爆発高度、それに地表物質の成分などにより異なる。このようにして生ずる残留放射能は非常に変動するものであるが、この誘導放射能が問題となるような場所では、恐らく地下構築物を除いて全ての建物は爆風と火災により崩壊しているだろう。

### 地表爆発と地下爆発

**9.50** 爆発高度が低くなり地表から土壤・ちりその他の破片が火の玉の中に持上げられるにつれ、核分裂（及び他の放射能）生成物が、かなり大きな粒子に凝結する割合が増加してくる。これら汚染された粒子の大きさの範囲は、直径にして1ミクロン以下のものから数ミリメーターまでである。大きなものは放射能雲が最高高度に達する以前にすでに地上に落下をはじめる。しかし非常に小さなものは長期間大気中に浮遊する。このようなことから大きな粒子で24時間以内に地上にくる初期フォールアウトが考えられる。典型的なフォールアウト粒子の写真を図-9.50 a～図-9.50 dに示した。粒子中での放射能の分布状態は、それぞれが放出する放射線それ自身の写真、オートラジオグラフにより示されている。通常一般的には、汚染は粒子の表面にあるけれども、汚染が粒子の中に一様になっていることもある。これは粒子が放射性物質と一緒になる時、溶けこんだことをあらわしている。

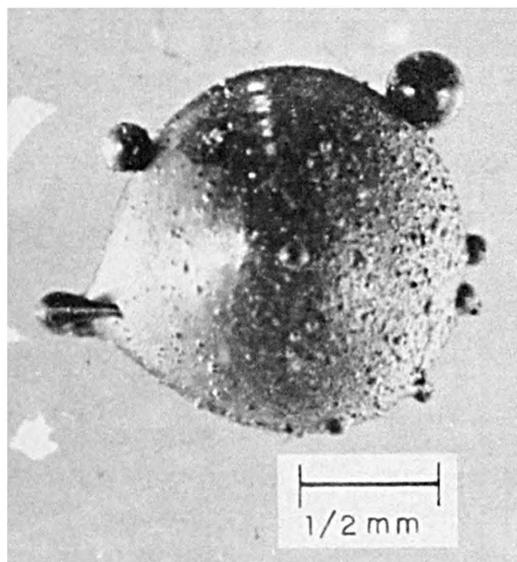


図-9.50 a ネバダにおける塔からの爆発時の典型的なフォールアウト粒子。粒子は丸みをもち金属的な光沢をもっている。沢山の小さな粒子が付着しているのが分かる。

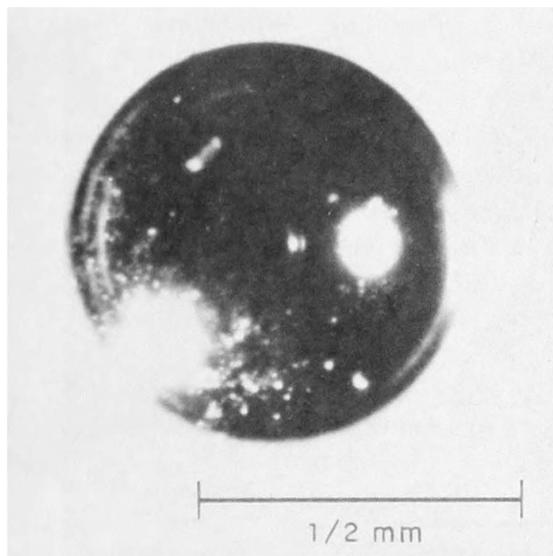


図-9.50 b ネバダにおける塔からの爆発時のフォールアウト粒子の例。粒子は球状で、表面は光沢をもっている。

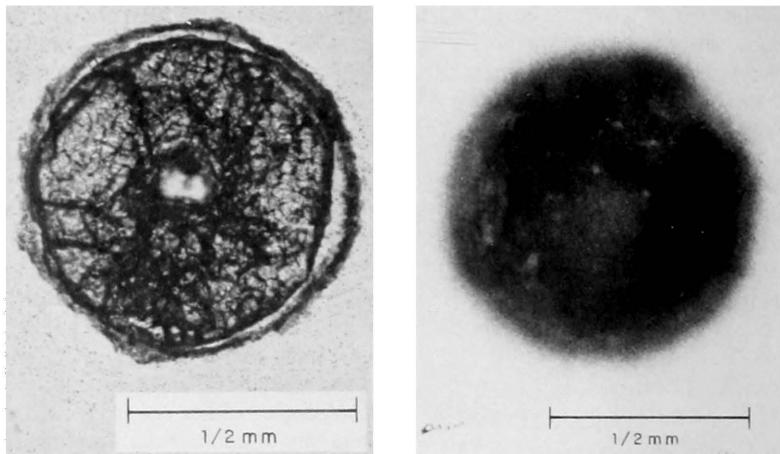


図-9.50c エニウェトックにおける地表爆発時の球状の粒子の写真（左）と薄い断面のオートラジオグラフ（右）。放射能は粒子の中で一様に分布している。

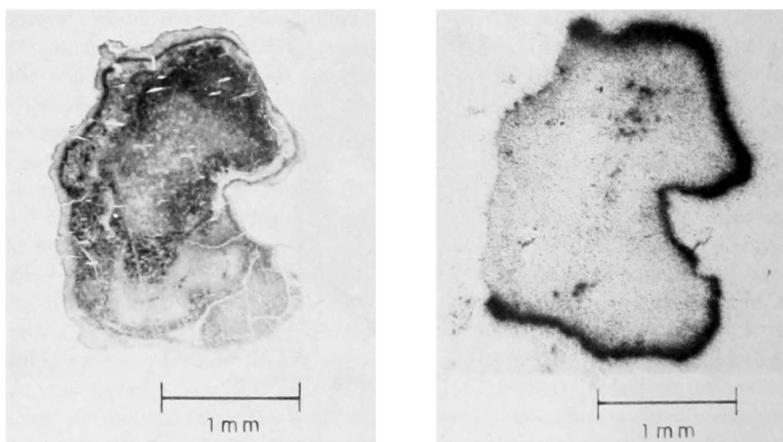


図-9.50d ビキニでの地表爆発時の不規則な形をした粒子の写真（左）と薄い断面のオートラジオグラフ（右）。放射能は粒子の表面に集まっている。

9.51 地表爆発や地下爆発にともなう残留放射能による地表の汚染の広がりは主として爆発位置により決まる。放射能残渣の挙動は、高空爆発の場合で全ての放射能残渣が大気の中に入る極端な例があり、深い地下爆発の場合で全ての放射性物質が地下に止るという極端な例もある。このいずれの場合も大量の局地的フォールアウトはないだろう。この2つの極端な場合の間に地表爆発や地表近くの爆発があり初期フォールアウトによる多量の汚染をともなう。浅い地下爆発の場合で、火の玉の一部が地表に出るような時には、地表爆発と本質的に同じである。地表爆発やその類似な爆発のときの初期フォールアウトの分布状態は全威力や分裂による出力・爆発の深度・高度・土壤の性質それに風や気象条件により決定される。この事についてはこの章の後で少しくわしく述べる。

9.52 地下爆発で、あまり深くはないけれども火の玉が外に出ない程度の深さの場合にはある程度のちりは、空中に柱状に放出され、またクレーターも形成される。放射性物質の大部分はクレータの部分にとどまる。その理由はそれが外に放出されないことや空気中に出てきた汚染された岩石や、土壤などの破片の大部分は爆発地点の近くに降下する（第6章）ためである。直接出来た小さな粒子や、あるいはベースサーボ（§2.96）によりできる小さい粒子は空気中に浮遊しGZからいくらか離れたところにフォールアウトとして降下することになる。

### 水面爆発と水中爆発

9.53 海面や浅い海面下における爆発によって大気中にできる粒子は主として海の塩と水滴から成る。これらの粒子が乾いたときは通常、地表面爆発によるフォールアウト粒子よりも小さく又軽い。この差異のために海水爆発の場合には、地表爆発にくらべて近傍フォールアウトが少ない。特に、水面爆発や浅い水中爆発では表面ゼロ付近でも強い残留放射能を示す領域がないことがしばしばある。しかし、例外として、大気が非常に温度が高いか、浅い水系での爆発の時には強残留放射能域ができる可能性がある。仮に、湿度が高い時には、塩の粒子が吸湿性、即ち水を吸収する性質があるので、塩の粒子は雲の種となり局地的な放射能雨の原因となる可能性がある。

# H P『海軍砲術学校』公開資料

注:(6) フォールアウトが堆積している時、連続して水を甲板上を流して船の汚染を除去する技術がビキニ BAKER 試験時の観測により開発された。

## 9.54 水面における爆発では初期残留放射能には2つの原因が考えられる。

(1) 仮りに形成されるならば、ベースサージ(§ 2.72)と、(2) 水中に残った誘導放射能を含む放射性物質の2つが考えられる。ベースサージは風の影響を強く受け、その時の風の速さと方向にしたがって移動する。最初、ベースサージは非常に放射性をおびているけれども、それが広がり、うすめられるので核分裂生成物などの濃度が減少する。このことと放射性崩壊とによりベースサージによる線量率は爆発後30分後までは(§ 2.77)低くなる。

9.55 水中の放射能は通常、当初海面300フィートより深くない円板状プール内に存在し場所の流れにしたがって移動する。プールは次第にほぼ円環状に広がり時間を経過するにしたがい変形するがもとの円板状にもどる。同時に下方への混合や水平方向への拡散が起り放射能濃度が急速に薄くなり時間とともに危険性は少なくなる。

9.56 ビキニ BAKER 試験(§ 2.63)における汚染されたフォールアウト(もしくはレインアウト)は固体粒子や水滴中の塩の結晶のスラリーから成っている。この汚染は除去することが困難であるが、フォールアウトがすぐ取り除かれなかつたとすると、(6)その船に人が乗っていたなれば、大線量の放射線を受けたにちがいない。BAKER 試験は浅い水面で爆発されたので底の物質が放射能雲の浄化を助け汚染が増加した。深い水系における浅い爆発では雲からのフォールアウトはビキニ環礁での実験の時より少ないことが予想される。

9.57 浅い水中爆発後の放射性物質の拡散速度、線量率の減少の様子を表-9.57に示した。これはビキニ BAKER 実験で得られたものである。水中における線量率は4時間後でもかなり高いけれども、船の材料による減衰があるので、汚染域を通過する間に受ける全線量は小さいだろう。BAKER 試験の2・3日後で放射能は50平方マイル程度の領域に広がるが放射線量率は水中で非常に小さく、その領域は再び安全となるはずである。

表-9.57 ピキニにおける20 K Tの水中爆発後の  
汚染水の広がりと線量率

爆発後の経過時間 (hr)	汚染された面積 (平方マイル)	平均直径 (マイル)	最大線量率 (ラド/hr)
4	16.6	4.6	3.1
38	18.4	4.8	0.42
62	48.6	7.9	0.21
86	61.8	8.9	0.042
100	70.6	9.5	0.025
130	107	11.7	0.008
200	160	14.3	0.0004

9.58 水中爆発によるベースサージやプールからの残留放射線量率や線量は、核兵器の威力・爆発深さ・爆発地点から海底までの距離・風速それと海流の速さにより著しく変化する。したがって、水中爆発による残留放射能の分布は複雑であり、地表爆発（§ 9.79以降）の場合に考えられたような、一般性のある簡単な予報システムはない。

### 第3節 地表面爆発におけるフォールアウト分布

#### 汚染の分布

9.59 地表爆発や地表付近の爆発によるフォールアウトについては、他の爆発型式よりよく知られている。そこで本章の残りの部分で主として地表もしくは地表付近の爆発による放射能汚染について述べる。核兵器残渣の全放射能のうち初期フォールアウト中にある割合は、時に“初期フォールアウト部分”とよばれるが、核実験ごとに異なる。地表爆発に対する初期フォールアウト部分は地表物質の性質によって決定されるが40～70%の範囲と見積られている。浅い地中爆発の場合にはこれよりも少し大きな値となる。しかし、水面上における爆発では、この部分は一般に少なく20～30%程度である。この理由は、§ 9.53に述べている。与えられたある爆発型式についてのフォールアウト部分は環境や気象条件の差に

よりいくらか変化する。しかし、ここでは地表爆発による全放射能の60%が初期フォールアウトに入ると仮定する。残りは後期フォールアウトになるが、その大部分は引き続き放射能崩壊をして100マイルも1,000マイルも離れた地上に到達する時にはその放射能は減少している（§ 9.121以下）。

**9.60** 初期フォールアウトによる地上の放射能分布、即ち“フォールアウトパターン”は同じ核威力のものについても全て同一でない。風の影響は勿論、放射能雲の大きさ・キノコ雲中の放射能分布・粒子の大きさの分布などがフォールアウトパターンを予測する場合の不確かさの原因となる。

**9.61** 雲の中の放射能の空間的分布については正確にはわかっていないが概略については観測や理論的な計算により知られている。上昇する全放射能のうちキノコ雲の頭部に含まれるものは地表爆発の場合、ほぼ90%であり残りは幹部分に含まれる。幹部分に含まれる放射能の割合は水面爆発ではさらに少くなり空中爆発に対してはほとんどゼロとなる。しかし、いくらかの放射能粒子はキノコ雲が未だ最高高度に達する前に雲の頭部から落下したり、下降する空気の流れによって低空にもたらされたりするようである。キノコ雲の頭部や幹部分の放射能に加えて、地表爆発ではかなりの量の放射能がクレーターの中のフォールバックや、G Zのまわりあらゆる方向にとび散った射出物（第6章）の中に含まれる。MT級の爆発に際しては放射能の最高濃度は、最初キノコ雲頭部の低い方の $\frac{1}{3}$ の所にあるということが証明されている。又、低威力の爆発では、比較的放射能濃度の高い層がこの雲のどこかにあるということもまた確からしい。最高濃度となる場所は爆発ごとに異なり、大気の条件により決定されるようである。

**9.62** 粒子の大きさが異なれば落下速度も、又、放射能汚染量も異なるのでフォールアウトパターンは、雲の中にある凝結が終った粒子の粒径分布に著しく左右される。一般的には、大きな粒子はより早く落下し放射能も大きいので、このような粒子の分布はG Z近傍で多くなり、小さな粒子の多い場合より汚染度は高くなる。離れた場所ではこの反対となる。

**9.63** 放射能雲中の粒径分布は火の玉によって巻き上げられる物質の性質に大き

く左右される。例えば、市街地における地表爆発においては、ネバダや太平洋における実験条件の粒径分布やこれに従うフォールアウトパターンと異なるであろう。しかし、反対にはつきりした確証もないで、一般的には大都市での地表爆発のフォールアウトパターンもネバダにおける地表爆発やタワーでの爆発との場合と大きく変わらないだろうと推定される。これは太平洋環礁での実験で観測されたパターンとは同一ではない。

## 汚染の地域

**9.64** 大きな粒子は爆発後直ちに放射能雲及び幹部分から地面に降下するので、これらはゼロ地点の付近に存在する。これに反して、小さな粒子は地球に落下するのに長時間要する。この間に小さな粒子ははげしい風によって爆発地点より数百マイルもの遠方まで運ばれるであろう。非常に小さな粒子はほとんど降下速度をもたないので、通常雨または雪とともに地面に落下する前に地球のまわりを何回も廻るかもしれない。

**9.65** 放射能雲からの小さな粒子が爆発地点から離れた地点に到達することができるという事実は、地表爆発からのフォールアウトが、爆風・衝撃・熱線及び初期放射線など他の効果の範囲よりも遠い所に重大な汚染を生ずることが可能であることを意味する。雲中の粒子が空気中に留っている時間が長ければ長い程、地面に達した時、その放射能が小さいだろうということは確かである。しかし、分裂が占める割合の高いMT級の兵器の地表爆発では、生ずる汚染物の全体の量が非常に多いので、爆発後約24時間までに降下するフォールアウトは危険な濃度であろう。1回の爆発による放射能汚染でもこのように広大な地域に影響を及ぼす可能性があり、フォールアウトは核兵器の重要な効果の一つとみなさなければならぬ。

**9.66** 相当量のフォールアウトで覆われる汚染地域内の分布を決定する重要な要因は、地面から放射能雲の頂上までの風のパターンである。雲の高さによる風の方向と速度は雲自身の運動と広がりに影響する。さらに、時間的そして空間的に変化する。更に低空での風は、フォールアウト粒子が地表に落ちてくる間に各方

向に流動させるであろう。この時の状態は雨（次を参照）や不規則な地形の影響によりさらに複雑となる。雲の中の放射能分布が一様でないこととともに、風の速度と方向が常に変化していることにより、周囲よりも更に放射能の高い“hot spot”ができるのである。

## 気象変動による放射性粒子の落下

**9.67** 仮に、核爆発による浮遊塵が雨・雪の降っている地点に到達すると放射性粒子の大部分はこの雨や雪と共に地面に落下する。この場合の地表面のフォールアウト分布は雨などのない時に比べておそらく複雑となるであろう。ひどい降雨があれば汚染地域内に部分的なホットスポットを作ったりする。空中爆発では通常、初期フォールアウトを生じないけれども原子雲の中や上部に降水があれば雨や雪によって放射性粒子が取りこまれ、地表が非常に汚染されることになる。降雨は地表爆発や地下爆発のフォールアウトに対しても、両者の部分的な汚染分布を変えるなどの影響を与える。大威力の地表爆発においては、雲の幹部からのフォールアウトは降雨の有無にかかわらず比較的短時間に地表に落下するので降雨の影響をあまり受けいれない。

**9.68** いくつかの環境条件は降雨が安定した原子雲を浄化させることに影響を及ぼす第一の必要な条件として、原子雲は、雨雲の中か下になければならぬのは勿論である。もしも、原子雲が雨雲の上にあれば浄化はないであろう。雨（もしくは雪）雲の高度はほぼ10,000～30,000フィートの範囲であり、少量の降雨は通常低い高度で起こる。降雨は雨雲の底部からであるが高度は通常約20,000フィートである。しかし、雷雨は60,000フィートの高さから降ってくる。低空や地表爆発の際の原子雲の頂上と底部の高さは図-9.96から得られるが、このデータからこの原子雲の降雨にかかわり合う部分の割合を計算することができる。10KT程度の爆発に対しては原子雲の全部が、そして威力100KTまでの雲は少なくともその一部は降雨による浄化の対象となる。威力100KT以上で降雨浄化は重要でなくなるはずである。しかし、仮に、原子雲が雷雨雲に遭遇する場合を考察するならば、数100KTの原子雲の全部が、そして威力MT級からのものはその一部が

降雨の影響を受ける可能性がある。

**9.69** 雨雲の水平方向の直径が原子雲の直径よりも小さい場合には原子雲の雨雲の下（もしくは範囲内）の部分だけが降雨净化の対象となるであろう。雨雲が原子雲よりも大きい時には原子雲の全体が降雨净化にあずかることになる。原子雲が净化に関係する時間的な長さは原子雲と雨雲が移動する相対的な方向と速度により左右される。

**9.70** 爆発して原子雲が降雨域に遭遇するまでの時間は降雨净化による地表汚染に大きな影響を及ぼすと考えられる。もしも、爆発がはげしい降雨の時に起こったり、もしくははげしい降雨が爆発地点で原子雲が安定した頃に始まったとすれば、地上の小さい面積が汚染される。しかし、その線量率は原子雲が更に遅くに雨雲に遭遇した場合よりずっと高い。このように早く遭遇した場合ですらG Z付近の線量率は、降雨の有無にかかわらず地表爆発にくらべれば低い。小雨の時は降雨净化の影響は少なく、地表の分布は、もし原子雲が降雨の領域内で風により流されると細長いパターンとなる。

**9.71** 原子雲が爆発後ある時間を経過して降雨域に入ったとすると降雨净化による地表の汚染は少なくなる。第1の理由は、雲が移動している間放射性核（§ 1.30）は崩壊し続けている。したがって、原子雲が降雨域にくるまでの時間が長ければ長い程全体の放射性物質の量は少なくなる。次の理由により、特に低空爆発の場合の原子雲は、風や渦流のため、もしも降雨净化がなければ垂直方向にはそれ程大きくならないが、水平方向の大きさは時間とともに大きくなるということがある。この水平方向のサイズが大きくなることは降雨净化にあずかる放射性粒子の濃度を下げる結果となる。最後に、降雨净化による粒子は地上に直ちに到達するのではなく雨や雪とともに落下するということである（典型的には雨で毎分800～1,200フィート、雪の時は毎分200フィート）。粒子が降雨净化されるのは、時間的にも高度も広がりがあるので落下する間に水平方向に移動し、地上における放射能濃度（線量率）を低下させることになる。落下・堆積の間の水平方向の移動は、正確な形は風によるけれども表面のフォールアウトパターンを細長いも

のにする。

**9.72** 放射性粒子が降雨浄化によって地面にもたらされた後、それらはそこに止るかもしれないし、そうでないかもしれない。水はけによってある地域にホットスポットを作ったり、逆に他の場所の放射能を少なくする可能性がある。放射性物質のあるものは雨によって溶出され地面の中に浸み込む。この場合、土壤によって放射線が減少し地表面上の線量率は小さくなる。

**9.73** 今まで述べてきた地表爆発や空中爆発のフォールアウトに対する雨の影響の可能性について、その大部分は理想的な考察によっている。核実験は、レイアウトの危険性がない方法で行われてきた。レイアウトが起こったという記録は2～3あるが、放射能汚染のレベルは非常にわずかであった。又、適当な条件であれば強い放射能汚染が起こる可能性があるということは確認されていない。それにもかかわらず、適当な威力範囲の空中及び地表爆発では降雨による浄化が多くの変数要素であるため、予想される表面汚染の範囲やレベルをはっきりすることはできない。しかし、原子雲からある割合の放射性粒子を取り除くのに必要なレインフォールの量に関する計算がいくつかなされている。この計算では、粒子を浮遊させての野外実験結果や電子計算による数学的モデルに基づいていいる。したがって、結果には粒子の大きさの分布などモデルの細部の事柄が影響する。

**9.74** この方法においては2つの降雨浄化の型が考慮されている。一つは“レイアウト”（もしくはスノウアウト）で原子雲が雨（もしくは雪）雲の内にある場合で、他の一つは“ウォシュアウト”で原子雲が雨（もしくは雪）雲の下にある時考えられるものである。降雨速度はレイアウトにはほとんど影響を及ぼさないようであるが、ウォシュアウトには著しく影響を及ぼす。表-9.74aとbに計算された雨量の概略値を示した。ここでは雨量として、レイアウトやウォシュアウトで、ある割合の粒子を原子雲の中から浄化するのに必要な降雨時間で表わしている。表-9.74bにおける小雨・中程度・はげしい雨とは、地表で1時間当たりの雨がそれぞれ0.05・0.20、そして0.47インチの雨である。このように、ウ

注:(7) エニウエット実験場は1955年以前には太平洋実験場とよばれ太平洋におけるビキニ・エニウエット環礁における実験場とクリスマス島を含む

オシュアウトはレインアウトよりも降雨浄化の影響を受けないようである。この図の中の値を求める際、雨雲の大きさは少なくとも原子雲の大きさと同じで(§ 9.69)、同じ相対位置にとどまっているという仮定をしている。表-9.74 a と b の中の時間について注意すべきことは、これら時間は放射性粒子が雨により除かれるために必要な時間であり、実際に地面が放射性物質で覆るのはさらにある時間を過ぎてからである。この推積時間は粒子が浄化される高さや、雨の落下速度によりきまる。

表-9.74 a レインアウトのための  
降雨時間の計算値

浄化される 雲の百分率	降 雨 時 間 (hr)
25	0.07
50	0.16
75	0.32
90	0.53
99	1.1

表-9.74 b ウオッシュアウトのための  
降雨時間の計算値

浄化される 雲の百分率	降 雨 時 間 (hr)		
	小 雨	中程度の雨	激しい雨
25	8	1.6	0.8
50	1.9	3.8	1.9
75	3.8	7.7	3.6
90	6.4	13	6.4
99	12.8	26	13

### フォールアウトパターン

9.75 フォールアウトの分布に関する知識はネバダ実験場及びエニウエット実験場(7)での核兵器実験の期間中の観測から得られた。しかし、これら結果の分析や解釈、から大都市での地表爆発の状況を予想することは困難なことが多い。これは特にエニウエット実験場におけるMT級の爆発の場合に言えることである。

フォールアウトは太平洋の広大な面積上に落ちるので、広い地球の汚染パターンは比較的少ない放射線量測定結果から推定しなければならない（§9.105。）さらに、海水があるので、後でわかるように結果に影響を及ぼす。

9.76 ネバダ地域における核実験は、100KT以下の威力のものに限られ、また爆発の大部分は高さ100～700フィートの鋼鉄タワーの上か、又は、400ないし1,500フィートの高さの気球によりおこなわれた。これらの爆発のいずれも本当の意味での地表爆発を表わしていない。いずれにしても、タワーの爆発ではフォールアウトがタワーの影響を受けることは明らかである。地表爆発も2・3あったが、そのエネルギー出力が約1KTかそれ以下であって、その結果から高エネルギー兵器から期待される効果の情報は得られなかった。TNT換算出力15MTまでの核融合兵器の実態は太平洋実験場でおこなわれた。ごくわずかの爆発は礁島の上で行なわれたが、1958年のビキニやエニウェットーク環礁でのほとんどの爆発は礁湖の伝馬船の上やさんご礁の上で行われた。しかし、すべての場合、大量の海水が、放射能雲の中に吸い込まれるので、フォールアウトは真の地表爆発とは多分全く異なるものであったと考えられる。

9.77 2つのネバダ実験におけるフォールアウト分布の不規則な性質が図-9.77 aとbのパターンで示されている。等高線は爆発後12時間の線量率をもつ点を接続したものである。図-9.77 bは1955年5月28日のボルツマン爆発（12KT、500フィートタワー）を示し、図-9.77 bは1955年3月7日のターグ爆発（43KT、500フィートタワー）を示している。風の条件が異なれば、フォールアウトパターンは全く異なる。さらにボルツマン実験で観測された、ネバダ実験場の北境界の北北東約60マイルのところのホットスポットに注意しなければならない。この区域は周囲より7倍も放射能が強いことがわかった。その場所は山地のすぐ風下であり、フォールアウトが降下した時、付近で雨が降ったと報告されている。この要因のどちらか、または両方のために放射能が増加した可能性がある。

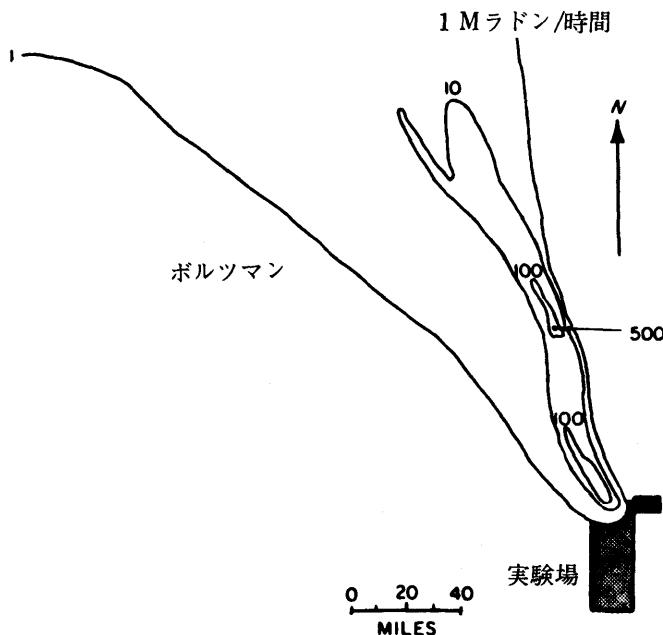


図-9.77 a ネバダ実験場でのポルツマン爆発の初期フォールアウト線量率等高線

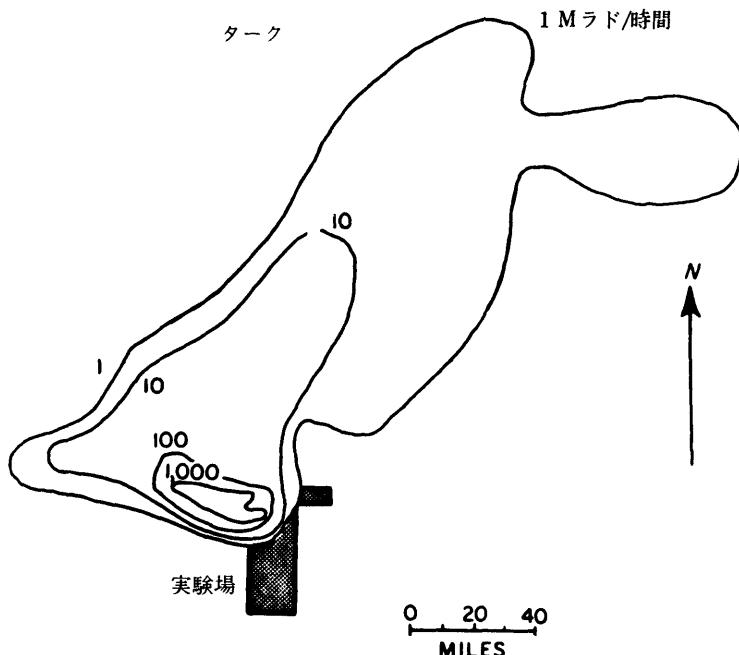


図-9.77 b ネバダ実験場でのターク爆発の初期フォールアウト線量率等高線

**9.78** 太平洋におけるMT級威力の核兵器フォールアウト放射能の測定結果は、全体としてのパターンの中に顕著ないくつかの不規則性を示している。これらのうちいくつかはデータを集収したり、限られたデータでの処理が困難であることによるのかもしれない。それにもかかわらず、爆発地点から風下のある距離（50～75マイル）に明らかにホットスポットがあることが、エニウェトック実験の典型であり、事実、いくつかのフォールアウト予報の方法でこの特徴を再現することが計画されている。このホットスポットができるることは特殊な風の状態（§9.66）の結果であるかもしれない。エニウェトックにおけるほとんどの実験の時間では、安定した雲の高さから表面へ複雑な風が吹く時であった。多くの方向に風が変化しながら吹いているならば、一定方向の風の場合よりフォールアウトはより局地的となつた。

## 第4節 地表面爆発のフォールアウト予報

### フォールアウトパターンの予報

9.79 GZから種々の距離でのフォールアウトによる線量率や積分（全）線量を予報するため、複雑さの異なるいくつかの方法が開発されている。これらの方法は4つの一般的分類に分けられる。これらは、複雑な順序に示すと、数学的フォールアウトモデル・解析的方法・危険区域予報、そして理想化されたフォールアウトパターンの4つである。この方法ではいずれも爆発の全体の威力および分裂出力・爆発高度、及び爆発地点付近での放射能雲の頂上にいたるまでの風の構造に関する情報は勿論必要である。さらに複雑な処理をするためには、局地点な風や気象の予報が爆発後数時間から2・3日間について得られていなければならない。この予報のためには、風のパターンの考えられる気象的な変動に注意しなければならない。

9.80 フォールアウト・モデルの方法ではフォールアウトを数学的に表わし、いくつかの特定の仮定のもとでの等高線量率曲線をその場合について予想しようとするものである。種々な周囲の状況に対してこの方法を用いる時、信頼性のある計算をしようとすると複雑になり大型の電子計算が必要となる。したがってこの方法は主として、フォールアウト過程の理論的確立や、見積りの計画をする時、その他解析的な予報の方法でパターンをきめたりするのに使用される。2・3の場合を除いて、電子計算機を必要とせず数学的にあまり精密でないモデルが核実験時のフォールアウト分布の予想に用いられている。

9.81 本質的には比較処理をする解析的方法は、広範囲にわたる核威力・風の条件でのフォールアウト等高線パターンのカタログから選んだ一つのパターンを使用する。この選択は与えられた条件とカタログパターンについて類似した威力及び風から決定される。カタログは実際のフォールアウト図形及びこれらから内挿または外挿されたパターン、もしくは数学的フォールアウトモデルから計算で得ら

れるパターンから成る。

**9.82** 危険区域予報の場合には、概略のフォールアウト地域の定性的な形を与え、又予想到達時間を決めるため、最小限の細部情報が必要である。これで大ざっぱな相対的危険度の目安を与えるけれども、種々の場合により予想される実際の線量率は不明である。この方法は、予報を速やかに、かつ簡単に与え、爆発威力、それに作戦（野外）状況における気象情報の正当性と同じくらい正確であろう。理想化されたフォールアウトパターンの使用が基本となる第4番目の予報の方法を以下いくらくか詳細に述べる。ここでの理想化されたパターンは§9.80に述べたような平均的もしくは最もあり得る条件について詳細な数学的モデルから出てくるものである。

#### 典型的なフォールアウトパターン

**9.83** 特定の核威力と風の条件について標準的なフォールアウトの広がりを表わす典型的なフォールアウト等高線パターンがきめられている。実際のフォールアウトには必ずある不規則性は表われない。なぜならば、この不規則性を決める条件は非常に変動しやすくまた確認されていないからである。このような限定されたものではあるが、理想的なパターンは、大規模な核攻撃について概略のフォールアウトの効果を評価するような計画段階の目的のためには有効である。これらは、ある場合においてフォールアウトは過少評価し、他の所では過大評価していることが必ずあるけれども、影響を受ける全域について、全体としてのフォールアウト問題の見積りに対しては大きな誤りはないはずである。

**9.84** 詳細なフォールアウト予報のためには、地表面から放射能雲のすべての高さの風を考慮しなければならない。しかし、典型的なパターンでは、実際の複雑な風は、近似的に同等な“実効風”によっておきかえる。典型的なパターンを表わすための実効風・風速と風向、を決定するため種々な方法が用いられている。次に述べる典型的なパターンに使用される実効風として適当なものは、まず、地表から安定した雲の下部と頂上に至る平均的な風をきめることにより得られるべきである（§2.15）。次に、これら2つの平均的な風の中間として実効風が決定され

る。

**9.85** 風のずれがわずかしかないか又は全くない、即ち、高度がかわっても風向は変わらないと仮定すれば、すぐ後でわかるように典型的フォールアウト等高線パターンは通常の葉巻の様な型となる。しかし、もしも風の方向が高度により変るならば、フォールアウトは図-9.77 a のようにより広い角度に広がる。そして、G Z からある距離までの放射能、即ち放射線量率は、同じ量の放射能汚染物が広い地球に分布するため小さくなるであろう。風速が小さい時、粒子が地表に落ちてくる前にあまり遠方まで移動しないので、パターンは風下方向に短くなる。そして爆発地点から離れた地点における放射能は比較的低く、G Z のすぐ風下の高線量率の場所はさらに大きくなるだろう。仮に風速が大きくなれば汚染地域は大きくなり、G Z から遠く離れた地点でも放射能は比較的大きく、G Z のすぐ風下では放射能は比較的小さくなる。

### フォールアウトパターンの生成

**9.86** 典型的フォールアウト分布パターンを示す前に、地表爆発から数時間の間にこのパターンが広い地域にどのように広がっていくかを知ることは重要なことである。この状況は、分裂比50%の 2 M T 爆発について、図-9.86 a と b に示されている。実効風速は、毎時15マイルである。図-9.86 a は、地表でのいくつかの（任意の）丸められた線量率値に対する等高線が爆発後 1・6 そして 18 時間後について示されている。図-9.86 b は引き続いての全（集積された）線量が同じ時間について示されている。勿論、各線量率と線量はその等高線から次の線に連続的に変ってゆくことは知ることができる。同じく、最後の等高線は、線量率（線量）が距離とともに連続的に小さくなるものであり、汚染限界を示すものではない。

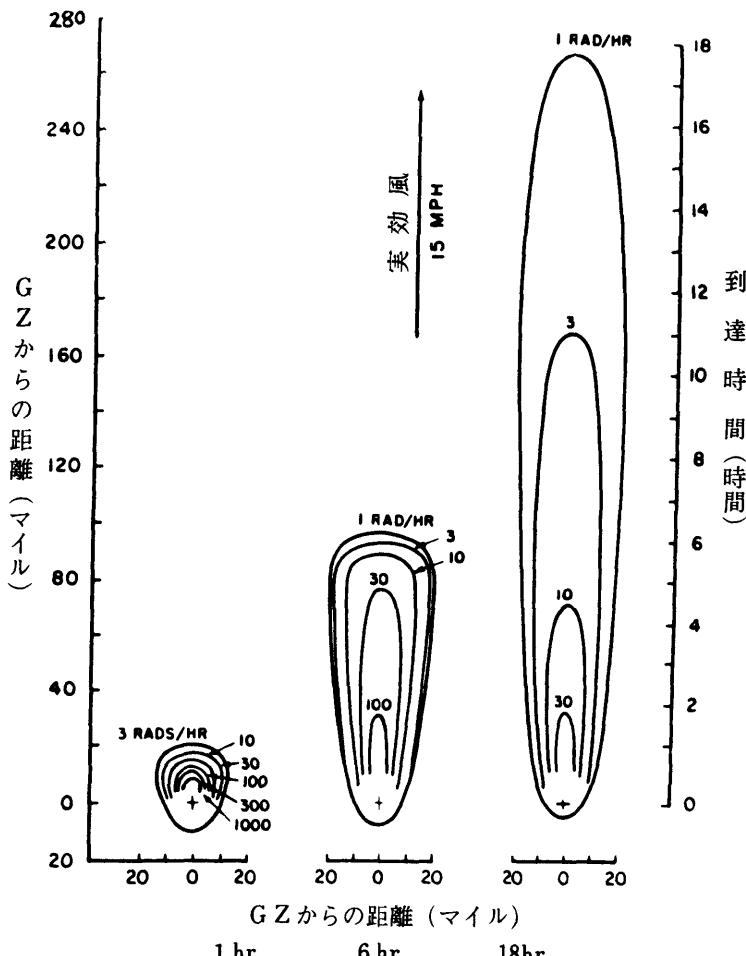


図-9.86 a 全威力が2MTでうち1MTが分裂出力である兵器が地表爆発をした時1、6及び18時間後の初期フォールアウト線量率等高線（実効風速は15mph）

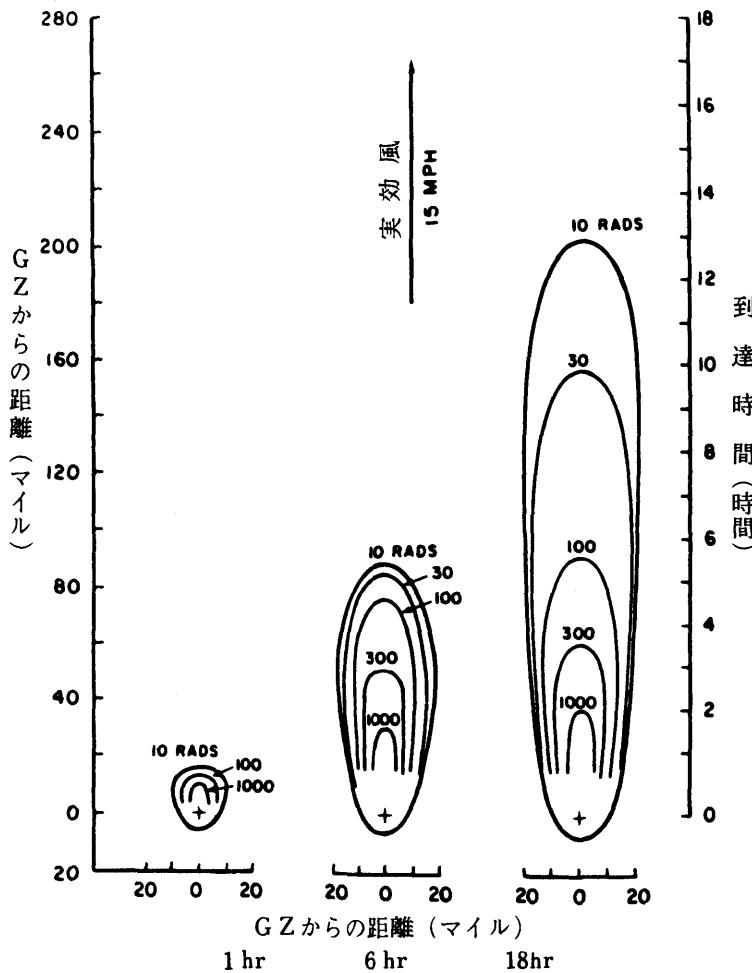


図-9.86 b 全威力が2MTうち1MTが分裂出力である兵器が地表爆発をした時、1、6及び18時間後の初期フォルアウトによる全線量等高線（実効風速は15mph）

9.87 最初ゼロ地点から風下20マイルの場所を考えよう。爆発1時間後では、観測される線量率は約3rads/hr.であるが、これは非常に急激な増加をし、1時間から2時間後のある時には500rads/hr.以上になるであろう。この線量率は6時間後では約200rads/hr.にまで減少し、18時間後にはほぼ50rads/hr.にま

で減少する。1時間後に線量率が増加しているということは、その場所でフォールアウトがこの時未だ終了していないことを意味する。2時間後に減少していくのは核分裂生成物の自然崩壊によるものである。図-9.86 bにかえると、ある場所における爆発1時間後までの全被爆線量は、フォールアウトが開始した直後であり小さい。6時間後までに全線量は1,000ラド以上に、18時間後までにほぼ2,000ラドとなる。全線量は引き続き増加しつづけ、ゆっくりと無限時間における値に近づく(図-9.22参照)。

**9.88** 次にG Zから風下100マイルの地点を考えよう。爆発1時間後では、図-9.86 aに示されているように線量率はゼロである。それは、フォールアウトがその場所に未だ到達していないからである。6時間後では1 rads / hr.、18時間後約5 rads / hr.となる。フォールアウトは爆発後6時間を越えてから動き始め、本質的には9時間で終了する。けれども等高線からは直接決められない。図-9.86 bから全被爆線量は爆発1時間後ではゼロ、6時間後で1ラド以下、そして18時間で約80ラドであることが得られる。全(無限)線量はG Zの近傍における値ほど大きくない。なぜならば、地表に到達する核分裂生成物の量は爆発地点から遠くなればなるほど減少するからである。

**9.89** 一般に、地表爆発地点からある距離ではどこでも、爆発時からフォールアウトが到着するまでにはある時間が必要である。この時間の長さは、G Zからの距離と実効風の速度により決定される。最初のフォールアウトが到達した時は線量率は小さいがフォールアウトが堆積するにしたがい増加する。フォールアウトが終了した後は核分裂生成物の放射性崩壊のため線量率は減少する。フォールアウトが開始するまでに堆積線量は勿論小さいが到達後は、最初速くその後ゆっくりと連続的に増加する。この期間は何カ月又は何カ年にも及ぶことがある。

**9.90** 図-9.90 aとbの曲線はこれを定性的に表わしている。これらの曲線は線量率と集積線量の時間的な変化を、地表爆発の風下方向の近い点と離れた地点の両方についてそれぞれ表わしている。線量率も線量もフォールアウト粒子がその地点に到達するまではゼロである。その後、線量率は増加し、最大に達する。引

き続き短半減期の同位元素の減衰は最初速く、次第にゆっくりと減少していく。全集積線量はフォールアウトが到達した時から限界（無限）の時間まで連続的に増加する。

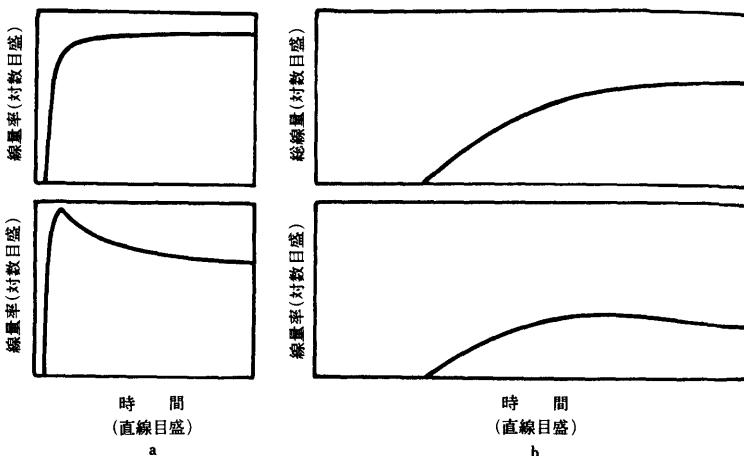


図-9.90 a G Zから遠くない  
風下の点でのフォールアウト  
による線量率と集積線量の爆  
発からの経過時間に対する定  
性的な関係

図-9.90 b G Zから遠く離れた風下の  
点でのフォールアウトによる線量率と  
集積線量の爆発からの経過時間に対する  
定性的な関係

9.91 キノコ雲は半径方向に急速に成長し、風がこれに大きく作用する前に安定した高度に達する。したがって、ある地点にフォールアウトが到達するまでの時間は、その場所に最も近い雲の部分までの距離と実効風の速さにより決めることができる。到達時間はG Zから考えている地点までの距離から雲の半径を引きこれを実効風速で割ることにより求まる。この目的のためには、威力の関数である安定した雲の半径は図-2.16から求めることができる。半径は大気の特性特に圧昇面の高さによりある程度の影響を受ける。図-2.16の曲線は中間の高さに対する平均値として妥当な値を示している。安定した雲の半径は、G Zに比較的近い場所に到達する時間を、大威力の核について計算する場合にのみ重要である。もしも、雲の半径がG Zから考える地点までの距離に比べて小さい、即ち小威力も

しくは距離が大きい時には、雲の半径はフォールアウト到達時間を計算する際無視することができる。

### 単位時間基準線量率

**9.92** 図-9.86 a と b のような線量率及び集積線量曲線を核爆発後の全ての時間について表わすことは明らかに非常に複雑なことである。幸いに、§ 9.16以降で述べた単位時間基準線量率で典型的なフォールアウトパターンを記するならば簡単に表すことができる。この章の初めに出てきた曲線（図-9.16 a と b それに表-9.20）を用いることにより、爆発地点から風下のある距離における、任意のフォールアウト線量率や全線量を計算することができる。この計算は、その時までに初期フォールアウトが全て落下している時にのみ意味がある。

**9.93** 典型的な単位時間基準線量等高線の一般的な型が地表爆発に対して図-9.93に示されている。種々の等高線の形状は 1 rads / hr. の線に対して示されている。実際の場合には、全ての等高線は風上の方向においても 1 rads / hr. の線のように閉じるはずである。WKT の威力の地表爆発（§ 2.127 欄外注）に対する、典型的な単位時間線量率等高線の風下距離・最大巾、そして GZ 巾を求めるための換算の関係を表-9.93に示した。いずれの場合も、風のすれば 15° で実効風速は毎時 15 マイルである。風上距離は雲の半径によって決定される。それは概略 GZ 巾の  $\frac{1}{2}$  と考えられる。即ち風上の等高線は GZ を中心とする半円で表わされる。等高線の換算の関係は地表の特性により変化する。表-9.93 の値は合衆国大陸のほとんどの表面物質に対して適用できる（§ 9.63 参照）。

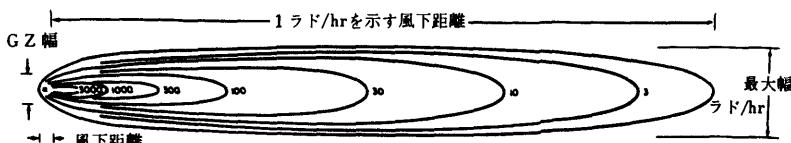


図-9.93 地表爆発における初期フォールアウトの理想的な単位時間線量率パターンの一例（等高線の形状は 1 ラド/hr の線量率曲線に対して示されている。）

表-9.93 威力WKT、15mphの風の場合地表爆発に対する  
単位時間基準線量率等高線に対する換算

基準熱量線 (ラド/時間)	風下距離 (標準マイル)	最大幅 (標準マイル)	G Z 幅 (標準マイル)
3,000	$0.95 W^{0.45}$	$0.0076 W^{0.86}$	$0.026 W^{0.58}$
1,000	$1.8 W^{0.45}$	$0.036 W^{0.76}$	$0.060 W^{0.57}$
300	$4.5 W^{0.45}$	$0.13 W^{0.66}$	$0.20 W^{0.48}$
100	$8.9 W^{0.45}$	$0.38 W^{0.60}$	$0.39 W^{0.42}$
30	$16.0 W^{0.45}$	$0.76 W^{0.56}$	$0.53 W^{0.41}$
10	$24.0 W^{0.45}$	$1.4 W^{0.53}$	$0.68 W^{0.41}$
3	$30.0 W^{0.45}$	$2.2 W^{0.50}$	$0.80 W^{0.41}$
1	$40.0 W^{0.45}$	$3.3 W^{0.48}$	$1.5 W^{0.41}$

9.94 理想的な等高線の型とか大きさは兵器の全威力により決定できるが、線量率等高線の値は核分裂による出力に左右される。したがって、出力の全てが核分裂によらない兵器の典型的なフォールアウトパターンを求める場合、その等高線の線量率の値は、全体として同じ威力の兵器に対する値に核分裂出力比率をかけてやらなければならない。例えば、エネルギーの50%が核分裂出力率で、全威力WKTの爆発については、まず、WKTに対する等高線の形状を表-9.93から求める。次に、単位時間基準線量率に0.5をかける。GZのごく近傍の孤立した地点を除き、単位時間基準線量率が約5,000 rads / hr. より大きくなるようなことは観測からもないようである。いずれにしても、そんなに高基準値になる場所は他の効果で完全に破壊される領域であろう。

9.95 今まで述べた方法により得られる典型的基準線量率は全く平坦な平面上における裸の地点が受ける線量である。このような表面は計算上は便利であるけれども、実際にはあまりないことである。比較的平坦な地形のところでも実際の値は典型的な値よりも小さくなる。この環境条件では減少（地形遮蔽）率は約0.7が適当である。丘のある地形などでは減少率として0.5~0.6がより適当である。又いかなるシエルターでも初期フォールアウトからの線量を少なくする（§9.120）。

## 実効風に対する補正

**9.96** 実効風の速さと方向は、雲が安定した時その頂上や底部の高さにより変化する(§9.84)。威力が与えられれば、これらの高さは、大気の密度や相対温度、それの界面の高さなどいろいろなファクターにより決定される。しかし、典型的単位時間基準線量率等高線の精度の範囲では、雲の高さは概略値が使用される。図-9.96の曲線は、§9.93での換算の関係や線量率等高線を求める時に使用した同じモデルについて求めたものである。曲線の値は、各種威力の地表(もしくは低空)爆発に対し合衆国全域にわたって予想される雲の高度の平均値で代表値を考えてよい。

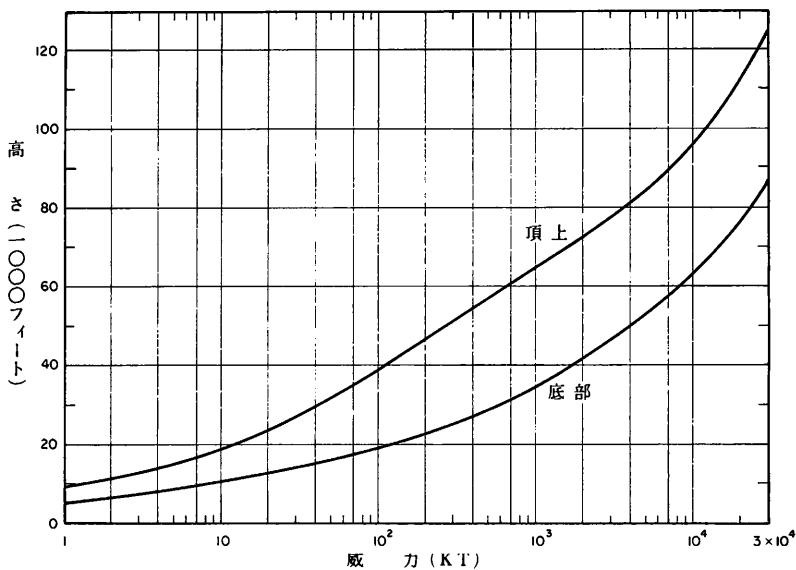


図-9.96 地表低空爆発の時、安定した雲の頂上と底部の高さ及び全エネルギー威力の関係

**9.97** 仮に、方向成分のずれがなく、実効風速が2倍となれば、雲の中のある部分から運動をはじめるある大きさの粒子のGZから地上に到達するまでの距離は2倍となる。したがって大ざっぱに粒子は2倍の面積に広がる。しかし、大きな原子雲の中の各部分から地上のある点に到達する粒子の浮遊時間は種々あるので、

その地点における粒子の大きさは種々ある。したがって、風速に対する簡単な補正の関係を求めることは出来ない。実験データーや電子計算機による計算結果を検討した結果、次の近似的な補正法がよさそうであることがわかった。実効風速が毎時  $V$  マイルの時、風下距離は表-9.93の値にファクター  $F$  を乗ずる。ここで  $F$  は、毎時15マイル以上の実効風速に対して、

$$F = 1 + \frac{V - 15}{30}$$

毎時15マイル以下の実効風速に対しては、

$$F = 1 + \frac{V - 15}{30}$$

この関数は、方向成分のずれがほとんどなく、実効風速が毎時8マイル～45マイルの間の単純な風の状況で成立する。§9.84に述べた如く一般に、実効風は毎時45マイル以上ではなく、又毎時8マイル以下の速度になるのは高度の増加に対して、風の方向によるずれが大きい時である。この時、フォールアウトパターンを典型的な線量率等高線で表わすことは複雑すぎて困難である。

**9.98** 風速が大きくて単位時間基準線量率等高線図の風下距離が伸びれば最大巾はいくらか小さくなる。反対に、風下距離が小さくなれば最大巾は大きくなる。単純な風の構造の範囲で、典型的な等高線が使用でき風速の範囲では風速の増加による等高線の最大巾の変化はわずかであり、風による補正是無視できる。このことは風上距離についても、したがってGZ巾に対しても同じことがいえる。

風上距離については、風速が増加すると、粒子が落下する時にGZの方向に流されるので小さくなる。 $100 \text{ rads/hr.}$  以下の比較的低い単位時間基準線量率では風上距離は風速が増加すれば確かに減少する。しかし、近くの高線量率に寄与する大きな粒子は速やかに落下し、高線量率等高線は風速にあまり影響されない。したがって、風の補正是簡単でなく、又、風上距離が比較的短いので、安全サイドとして風速は風上距離（そしてGZ巾）に影響を与えるないと仮定される。

## フォールアウトの例

条件：10MTの地表爆発、50%の分裂出力比、実効風は毎時30マイル。

問題：典型的な単位時間基準線量率、フォールアウト到達時間、そしてGZか

ら風下100・200、そして300マイルの地点においてフォールアウト到達後1週間まで滞留する人員の受ける集積線量

解答：表-9.93から予備的な見積りをすれば、典型的な単位時間基準線量率は300～3,000 rads / hr. である。全威力が10M T、即ち  $W=10^4$  K Tで実効風速は30 mph (§ 9.97から  $F=1.25$ ) の時、表-9.93から風下距離は、次のように求まる。

線量率	3,000	1,000	300 rads / hr.
距離	75	142	355 miles.

内挿することにより、単位時間基準線量率は100マイルの地点で1,800 rads / hr.、200マイルの地点で620 rads / hr.、そして300マイルの地点では360 rads / hr. と求まる。うまく内挿するには既知の点を対数用紙にプロットしこれをスムーズな曲線で結び、これから値を読みとればよい) 50%が分裂出力率の場合、対応する典型的な基準線量率はめいめい900・310、そして180 rads / hr. である。

図-2.16から10M Tに対する雲の半径は約21マイルである。フォールアウトの到達（もしくは侵入）時間を求めるためには、G Zからその地点までの距離からこの半径を差し引かなければならない。30 mphの風の時100マイルの地点では  $(100-21)/30 = 2.6$  時間であり、200マイルの地点では  $(200-21)/30 = 6$  時間、そして300マイルの地点では、 $(300-21)/30 = 9.3$  時間である。

典型的な単位時間基準線量率等高線図の精度から考えて、図-9.26に対する侵入時間はめいめい3・6、そして9時間とまとめることができます。フォールアウト到達後1週間の被爆に対する倍率ファクターは100マイルの地点で約2.3であり、200マイルの地点で1.6、そして300マイルの地点で1.4であることがわかる。したがって求める距離で全集積線量の概略値は、

<u>距離(マイル)</u>	<u>線量(ラド)</u>
100	$900 \times 2.3 = 2.070$
200	$310 \times 1.6 = 496$
300	$180 \times 1.4 = 252$ (答)

これらの線量値は適当な地表起伏（もしくは地形遮蔽）ファクターにより減少されるはずである（§9.95）。

### 典型的等高線の使用上の制限

**9.99** 典型的な毎時15マイルのパターンの形状とか風に対する換算法はいずれも風のずれが全くないと仮定しているので、線量率等高線の風下の広がりは最大となる場合の値となっている。この仮定は、合衆国大陸では風のずれが、フォールアウトの関係する高度では小さいので妥当といえる。仮に、キノコ雲の頂上と底部で $20^{\circ}$ もしくはそれ以上の大きな風のずれがあったならばフォールアウトパターンは図-9.93からのものより広くかつ短くなるであろう。したがって、ある実効風速の時、GZから与えられた風下距離の地点における単位時間基準線量率の実際の値は予想されたものより小さくなる。しかし、ある距離においては、風に対して直角方向の値は増加するはずである。GZから2つ以上の方に向にパターンが拡がる極端な場合もある。このような場合には、風下の方向を決定することができず、典型的な等高線はパターンの型を決定するには役に立たない（図-9.77 b 参照）。

**9.100** ここで典型的なフォールアウトパターンの制限を強調するために図-9.100 a と図-9.100 b を示した。前者は10MT、50%が分裂による地表爆発の時、実効風速毎時30マイルにおける典型的な単位時間基準線量率等高線を表わしている。図-9.100 b は局地的に気象や地表の条件が変化している時、その結果として実際に起こり得る状況を表わそうとしている。GZ付近における風の方向は南西であるが数百マイルにわたって次第に西向きに変化し、次に北西方向になっている。途中の風のこのような変化は図-9.100 b に表われているが、典型的なパターンではただ一つの実効風にのみ基づくので途中における風の変化は図-9.100

a では表われていない。両者の場合、全体の汚染面積はほとんど等しいけれども分布の細部は、例えば図-9.100 b の陰をつけた部分のようにホットスポットができることなど全く異なる、図-9.100 b のパターンは仮想のものであり実測によるものではない。この図の目的は、典型的なフォールアウトパターンに欠陥のあることを喚起することである。しかし、典型的な場合との差異の原因をなすファクターは、場所ごとに、さらにその日によっても変化するので前もって知ることは不可能である。したがって、ここでできる最善の方法は、典型的な一つのパターンを出し、汚染全体の状態を知るためにそれがどのように使用されるかを示し、同時に、実際の分布では細部において非常に差異があることを示すことである。

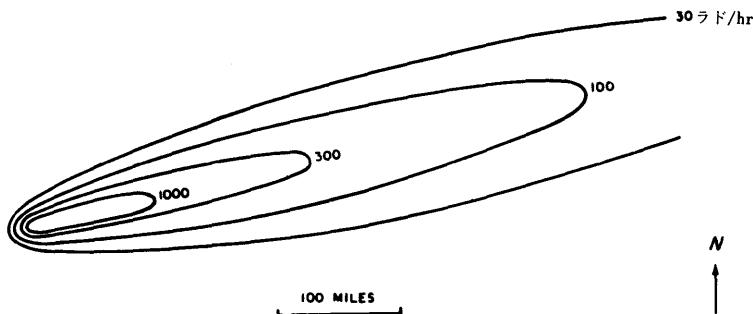


図-9.100 a 10M T、分裂出力比50%の表面爆発の際の典型的な単位時間基準線量率等高線(実効風速は30mph)

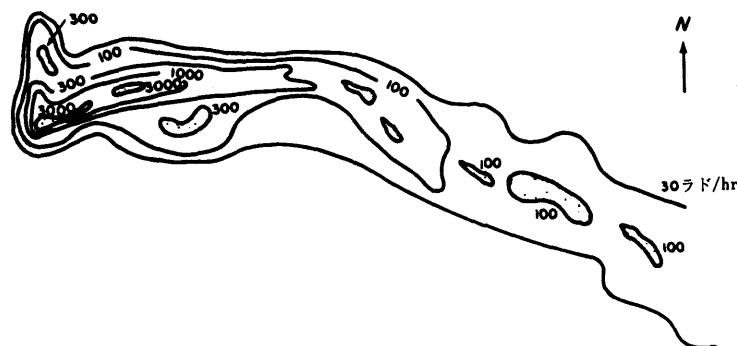


図-9.100 b 比較するための実際の線量率等高線(仮想的)

## フォールアウトパターンに影響する要因

9.101 今まで述べた典型的なフォールアウトパターンを求める操作は強いていうならばただ全体としての計画のためにのみ実施するものである。初期フォールアウト分布の細部や放射能の減少速度に影響を及ぼすいくつかのファクターがある。G Zの近傍では、土壤の中にできる中性子誘導放射能は、フォールアウトによるものとは異なり大きくなることがある。しかし誘導放射能の程度は非常に差異があり、又評価が困難である（§ 9.49）。予想できないホットスポットの存在は又局地的な放射線強度に影響を及ぼすであろう。さらに、降雨による浄化はフォールアウトパターンに重要な効果があろう（§ 9.67以下）。前節で述べたデータは、非常に広く平坦な地表に適用できるものである。§ 9.95に述べたように、通常平坦と考えられるような田舎にある地表の起伏ですら、線量率は平坦平面としての予想値の70%程度となる。市街地においては、建物・樹木等が平均強度をさらに減少するであろう。

9.102 初期フォールアウト放射能の減少速度やこれにともなうある期間の集積線量は気象条件によって影響をうける。風はフォールアウトのある場所から他の場所に移動し、局地的な変動をつくる。フォールアウトが落下後の雨は、粒子を土壤の中に侵入させ、地上で観測される線量率は小さくなる。この減少の度合は勿論気象条件や地表の状況で異なる。雨の少ない温かい地域では、爆発後約1ヶ月間は気象の効果は小さいであろう。しかし、1年間経過するならば線量率は他の所で予想される値のほぼ半分に減少すると考えられる。

9.103 核爆発後、放射線線量率が減少して、再び市街に入ることができたり、農作業を再び始めることができるまでの時間を予測するためには図-9.16 a や b の（連続的な）崩壊曲線もしくはこのようなデータを使用する。しかし、この方法には不確実な点もあるので、この方法だけを完全に頼らない方が賢明である。崩壊曲線は、必ずしも常に確かではないが、仮にこれが完全に信頼できるとしても、フォールアウトの実際の成分はG Zからの距離により異なり（§ 9.08）、したがって崩壊速度も場所により異なる。核爆発後3ヶ月では、線量率は1時間後の

0.01%、即ち10,000分の1に減少してしまう。したがって、ほとんどの汚染地域は、その後汚染されなければ、線量率計で測定のために侵入しても安全であろう。

### 1954年3月1日の大威力爆発

9.104 先に述べた初期フォールアウト分布に関する議論は、1954年3月1日ビキニ環礁の大威力爆発実験（B R A V O）の際のマーシャル諸島での汚染状況の測定結果を述べることにより補足することができる。この爆発の全出力エネルギーはTNT換算でほぼ15MTであった。核兵器はサンゴ礁の表面から7フィートの高さで爆発した。フォールアウトは1,000分の1から50分の1インチ直径の放射性粒子から成り、風下330マイル（標準）巾は最大60マイルまでの細長い地域を汚染した。この外、爆発地点から風上約20マイル程度まで非常な汚染の地域が形成された。全体で7,000平方マイルを越す地域で汚染度が大きく、死亡とか放射線傷害からまぬがれるためにはその地域から避難するか防護の処置が必要であった。

9.105 B R A V O爆発の96時間後までに受けた全線量をいくつかの地点で計算し、結果を図-9.105に示した。これらの地点のデータとよく合うようにいくつかの等高線を引いてある。しかし、他のパターンも考えられる。例えば、ロングラップ環礁北方の島々の高線量の地点はホットスポットであるとし、3,000ラドの等高線はビキニ環礁にもっと接近しているとするパターンも考えられる。海上の広い領域における観測データは少ないので、図-9.105に示したようなフォールアウトパターンを書くためには多分に推定の要素が入る。しかし、爆発地点から風下300マイル以上離れた地点においても高い放射能汚染があるという事実は確かである。

9.106 図-9.105の等高線上の線量値は測定器の記録から計算したものである。この値は、その時間中放射線に対し何らの防護手段も実施せず、外部においてさらされている人が受ける最大の線量値である。建物の中に入るなど、いかなる遮蔽でも又は、その地域外に出れば受ける線量は減少するはずである。反対に、その人が爆発後96時間以上とどまっていれば残留放射線からより多くの線量を受け

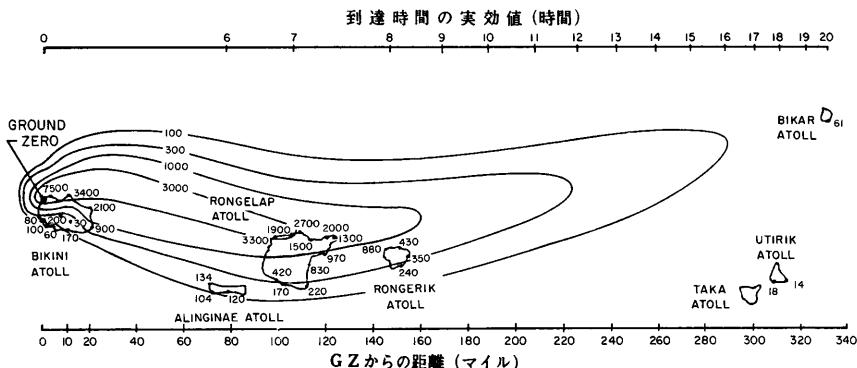


図-9.105 BRAVO爆発実験後96時間までの全（集積）線量の値、単位ラド

ことになる。

**9.107** 700ラドもの放射線線量を96時間で受ければ多くの場合致命的である。したがって、1954年3月1日の実験では、何らの防護手段をしなければ、少なくとも爆発後96時間は風下約170マイル、巾35マイルにわたるベルトはほとんどの人々の生命に重大な危険を及ぼす地帯になることは明らかである。風下約300マイル以上の地点では、一時的不能となるような宿醉症状は多分多く発生するにしても、瞬間的な放射線効果で死亡することは無視できよう。

**9.108** 爆発後96時間という期間、図-9.105はこの間の集積線量を示しているがどちらかを言えば任意に選んだものである。この章の最初に何度も述べた様にフォールアウトの放射線は、除々に減少するが長時間にわたって放出されるということを理解しておかねばならない。外部γ線の持続性は、BRAVO実験におけるロングラップ環礁における2つの地点での状況を考察することにより示すことができる。2つの地点とも爆発後約4～6時間からフォールアウトが開始し、数時間降り続いた。

**9.109** 環礁の北西の先端、爆発地点から100マイルの地点ではフォールアウトが開始して96時間の間に3,300ラド受けた。この値は、同じ距離で記録されたうちで最も多いフォールアウトであり、先に述べたようにホットスポットかもしれな

い。そこから25マイル南でG Zから115マイルでは同じ時間までの線量はわずかに220ラドであった。ロングラップの住民はこの地域にいた。避離していた彼らは、フォールアウト開始後約44時間の間に最高175ラドの放射線を受けた（§ 12.124・12.156）。これら2つの地域における最大被爆線量を、爆発後いくつかの異なる期間で計算した。結果は表-9.109に示されている。この計算には本章の初めに述べた崩壊曲線を使用した。

表-9.109 1954年3月1日のビキニ実験時ロングラップ環礁の二つの地点におけるフォールアウトによる放射線線量の計算値

期間中の集積線量(ラド)		
爆破後の被ばく期間	居住地域	非居住地域
最初の96時間	220	3,300
96時間から1週間	35	530
1週間から1ヶ月	75	1,080
1ヶ月から1年	75	1,100
1年間の合計	405	6,010
1カ年から無限	About 8	About 115

9.110 表-9.109の計算値はその場所における最大線量であることを強調しておく。その理由は、計算に際し、人は毎日24時間ずっと外にいて又、放射能汚染を除くための何らの処理もしなかったと仮定したからである。さらに、気象的なことや、可能性のある風による粒子の分散も考慮していない。マーシャル諸島で爆発後25日目に測定した線量率の例では、予想値の約40%であった。第2週目に雨が降ったことが知られており、これが汚染を減少させた主たる理由と考えられる。

9.111 このセクションの結論として、表-9.93からの典型的な単位時間基準線量率等高線は勿論、表-9.105に示した1954年3月1日のビキニ環礁における大威力爆発のフォールアウトパターン、96時間線量等高線などは典型的な例とみなすべきものであり、計画の目的のために使用できるものだということである。さらに、これらは絶対的な手本と見なされるべきでないことも知っておくべきである。マーシャル諸島で得られた状況は、爆発のエネルギー出力、非常に低い爆発高

注：(8)  $\alpha$  粒子はヘリウム元素の原子核と全く同じである（§ 1.65）。これが（運動）エネルギーを失つてしまったら 2 つの電子を捕獲して（中性の）ヘリウム原子になる。

度（§ 9.104）、爆発地点下の表面の特性、広い地域と高い高度までの風の組合せ、その他気象的な条件を含む外的条件の組合せにより発生したものである。これらの一つのファクターでも変ればフォールアウトパターンの細部は非常にちがったものとなる可能性がある。

9.112 換言すれば、上に述べた高分裂出力の地表爆発のフォールアウトの状況は、起こる可能性のある一例であって必ず起こる例ではないことを理解すべきである。フォールアウトが移動する一般方向は、風のパターンさえ分ればかなりよく見積ることができる。しかし、核攻撃の際、爆発の全体の威力や分裂による出力、それに爆発高度は予想することができない。したがって、ある場所でフォールアウトが開始する時間は実効風の速度と方向から計算できるけれども、重大な汚染地域がどう広がるかを前もって決定することは不可能である。

9.113 正確なフォールアウトパターンに関しては不確かであるが、今までのことから非常に重要な結論が言える。一つは、地表爆発による残留放射線は、条件によっては、重大な傷害を引き起こし、その距離は、爆風や、衝撃・熱線、そして初期放射線によるものよりはるかに大きいことがあるということである。もう一つは、被害を最少限にするために計画は作られるが、これには融通性をもたせるべきであるということである。それによってそれらの計画が攻撃後に発生する個々の状況に適応させることができる。

## 第 5 節 残留放射線の減衰

### アルファ粒子とベータ粒子

9.114  $\alpha$  粒子が物質の中を通過する際、直接多くの電離してエネルギーを急激に失なう。 $\alpha$  粒子は“飛程”とよばれるある一定の距離を通過すれば止まり安定した状態となる。(8)  $\alpha$  粒子の飛程はその最初のエネルギーにより変るが、プルトニウムからの  $\alpha$  粒子のようにかなり大きなエネルギーのものでも平均飛程は空気中でわずか 13/16 インチ強である。水とか人体組織のようにもっと密度の高いものの中

では飛程はさらに小さく空気中の千分の1程度となる。したがって、放射性線源からの $\alpha$ 粒子は無傷の皮膚の層（表皮）さえも通過できない。それゆえ体の外部の線源から出る $\alpha$ 粒子に関する限り減衰は問題にしなくてもよいことがわかる。

**9.115**  $\alpha$ 粒子と同じく、 $\beta$ 粒子は物質を通過する際、直接に電離をすることが可能である。しかし、 $\beta$ 粒子は、そのエネルギーをそれほど速やかに失なわないので、空気中及び他の物質中では $\alpha$ 粒子よりも大きな飛程をもつ。核分裂生成物から放出される $\beta$ 粒子は、空気中では全体として10フィート（またはそれ以上）通過すれば吸収される。しかし、 $\beta$ 粒子は物質中の電子や核により連続的に方向を変えられるのでその経路は曲ったものとなる。したがって電子の実効（または正味の）飛程はいくらか小さくなる。

**9.116**  $\beta$ 粒子の飛程は、媒質の密度が大きい程短くなり、与えられたエネルギーの $\beta$ 粒子の水・木材、または人体組織中での平均の正味距離は空気中における距離の概ね $\frac{1}{1000}$ である。したがって家屋内にいる人は外部の核分裂生成物から出る $\beta$ 線から保護されるであろう。通常着用する衣服でさえ、 $\beta$ 線を著しく減衰し、その正確な程度は、例えば重さとか枚数により変ることがわかっている。障害を及ぼすのは体内に摂取したり皮膚に接触している物質からの $\beta$ 線のみである。

## ガンマ線

**9.117** 残留 $\gamma$ 線は異なった様子を示す。この $\gamma$ 線は初期放射線の一部をなす $\gamma$ 線と同様に、空気中のかなりの距離、及び体の中まで透過することができる。フォールアウトの状態で大抵の場合、放射線量を許容レベルまで減らすのに遮蔽が必要である。 $\gamma$ 線を減少させるための全ての方法は、同時に $\alpha$ 及び $\beta$ 粒子と共にさらに多く減衰させるであろう。

**9.118** 核分裂生成物の $\gamma$ 線、及び例えばナトリウム・マンガン、それに兵器残渣の中で中性子捕獲によって生成された放射性同位元素の $\gamma$ 線の遮蔽体による吸収（もしくは減衰）の原理は、初期 $\gamma$ 線に関して第8章で述べたものと全く同じである。崩壊のごく初期の間は別として、フォールアウトから放出される $\gamma$ 線の平均エネルギーは、爆発後1分以内に吸収される初期 $\gamma$ 線よりもエネルギーが小さい。し

たがって残留 $\gamma$ 線は遮蔽が容易である。換言すれば、残留 $\gamma$ 線は初期放射線に比べて同じ物質であれば薄くても同じ程度に遮蔽することができる。

**9.119** 核分裂生成物からの $\gamma$ 線の遮蔽計算は初期放射線とは異なる点があり多少複雑である。初期放射線は爆発地点から放出されるが、残留放射線は屋根・樹木等広く分布したフォールアウト粒子から放出される。複雑性が生ずる理由は、ある厚さの物質の遮蔽度はフォールアウト分布状態（もしくは幾何学的条件）が影響し、したがって遮蔽度は汚染の場所と防護が必要な場所との相対的な位置によって決まるという事実のためである。残留放射線に対する種々の構造物の遮蔽能力の評価が計算やシミュレートフォールアウトによる実験を基になされてきた。

**9.120** 評価の結果のいくつかを、線量透過係数（§ 8.72）として表—9.120に示した。値が範囲で示されているものは、評価に不確かさがあるためと同じ構造物の内部でも場所によって遮蔽度が異なるためである。（同じ構造物の初期放射線に対する遮蔽データは表—8.72に示した）。全ての構造物は、単独にあるものとし、したがって、隣接建物の効果は無視した。車両・バス、そしてトラックなど乗物の防護係数はほぼ0.5～0.7である。フォールアウトに対する遮蔽の概略評価を各種の状況で行うことができる。建物のある市街地で屋外にいる人は、建物がない場合に比べて、その人の場所にもよるが受ける線量は約20～70%となる。建物区画の中ほどで建物近くの人が受ける線量は、交差点に立っている人より少ない。汚染された農地では、フォールアウト粒子が埋まる様に堀り返すことにより地表における $\gamma$ 線線量は少なくなる。

表-9.120 フォールアウト $\gamma$ 線に対する種々の構造物の線量透過係数

構造物	線量透過係数
3フィート地下	0.0002
フレームハウス	0.3 - 0.6
地下室	0.05 - 0.1
多層式のビルディング (アパート型)	
上層部	0.01
下層部	0.1
コンクリートブロック構造シェルタ	
壁厚 9インチ	0.007 - 0.09
壁厚 12インチ	0.001 - 0.03
壁厚 24インチ	0.0001 - 0.002
シェルター 上部構造	
土かぶり厚さ 2フィート	0.005 - 0.02
土かぶり厚さ 3フィート	0.001 - 0.005

## 第6節 後期フォールアウト

### 序論

9.121 爆発後24時間で、初期フォールアウトが終り後期フォールアウトが始まるとした（§9.03）が、勿論この時間で明瞭な変化があるものではない。しかしながら、この2つのタイプのフォールアウトの間には重要な差異がある。初期フォールアウトによる傷害は、内部被爆の可能性もいくらかはあるが、主として体外の線源からの $\gamma$ 線被爆による。次に傷害をなすのは皮膚に付着したフォールアウトからの $\beta$ 線である。一方、後期フォールアウトの場合の傷害は、食物、特にミルクから摂取するヨー素・ストロンチウム、そしてセシウムの同位元素による内部からのものがほとんどである。初期フォールアウトも後期フォールアウトも、

長期的な遺伝学的效果を及ぼすけれども、他の効果に比べれば恐らくそれ程重要でない。このようなフォールアウトの生物学的な効果については第12章で述べる。

**9.122** 空中爆発では初期（もしくは局地的）フォールアウトはほとんどないので爆発残渣は全て後期フォールアウトとなる。地表爆発では約40%の放射能が初期フォールアウトの後でも大気中に残り、水面爆発ではこれはほぼ70%と見積られている（§ 9.59）。残渣粒子が地上に落下するまでの時間や、その間に浮遊する距離は粒子の大きさや原子雲の中で上昇した高さにより決まる。半径が数ミクロンもしくはそれ以下の非常に小さな粒子は極めてゆっくり落下する。したがって長い間、空中に滞留し、風によって遠くに運ばれる。しかし最終的には、粒子は降雨浄化（§ 9.67以下）によって地上にもたらされ、後期フォールアウトは地球表面の広い部分に分布するであろう。

**9.123** ほぼ100 K T 以上の低空爆発や地表爆発では残渣の大部分（全部でないかもしれない）は約30,000 フィートより高くは上らない（図—9.96）。そしてやがて降雨により地上に落下する。これは多くの場合、爆発後数週間で降るはずであるので、フォールアウトは長半減期の元素は勿論、未だかなりの量の半減期の短い同位元素を含んでいる。したがって傷害は主として半減期8日のヨー素-131の摂取によって起こる。他のヨー素の同位元素と同じくヨー素131は体内に入ると甲状腺に集る傾向がある（§ 12.169以下）。ヨー素131は、同じ半球の爆発地点から数1,000マイル離れた所でも、汚染された草を食べた牛の牛乳や雨の中から見つかっている。核威力が増大すると兵器の残渣は高度30,000～40,000 フィート以下すぐに浄化される大気中には始んどとどまらない。それでも、特に威力が大きい場合には、地上汚染をするのに十分な量のヨー素131を含んでいる。

**9.124** 威力が中程度もしくはそれ以上に大きくなると放射能残渣の大部分は成層圏に入り、ゆっくりと落下してくる。成層圏内の小さな粒子はすぐ後で（§ 9.135以下）述べるが数カ月から数年間、その中にとどまっている。この間に半減期のあまり長くない同位元素はほとんど完全に崩壊してしまう。1カ月から1年位の中程度の半減期をもつ放射性核種は核爆発後数週間の間は地上でも観測されて

いる。しかし、後期フォールアウトの主要な生物学的な傷害はストロンチウム90（半減期27.7年）やセシウム137（半減期30.0年）のような長寿命で、年間を通じて食物から体内に入る可能性のあるものから受ける。ストロンチウム90は骨の中に蓄積し、放射性崩壊と自然の代謝でゆっくり減少し長時間にわたって内部傷害を与える代表的なものである（§12.188）。ストロンチウムとセシウムの同位元素はゆっくり崩壊するだけでなく、分裂生成物の中で比較的大きな収率をもつ。数字で示せば1,000個の原子が分裂すれば30～40個のストロンチウム90ができる、セシウム137は50～60個生成される。これら2つの同位元素の祖先の核はガス状である。したがって、分別現象の結果（§9.08）後期フォールアウト中の割合は、少なくとも地表爆発については、もともとの分裂生成物よりも多くなるであろう。

**9.125** 後期フォールアウトの地球表面にわたる最終的な分布は初期フォールアウトの場合ほど爆発時の風の条件に影響されない。最も重要な要素は、汚染粒子が上層大気に入りゆく方法である。この状況を理解するために、大気の特性を調べる必要がある。

## 大気の構造

**9.126** 大気の最も重要な特性の一つは、温度が高度により変化することと、その変化が緯度と季節に依存することである。地球の表面から大気の低い所では上昇すると気温は連続的に下る。そして一般には最低値となる。このように温度が下る領域は“対流圏”とよばれ、温度がそれ以上低下しなくなる頂上は“圏界面”として知られている。対流圏の一方は“成層圏”であって、この温度は温帯や極地方では高度が増加してもほぼ一定に保たれている。圏界面のすぐ上は通常成層圏とよばれているが状態が異なるいくつかの領域がある（図—9.126）。赤道区域では、成層圏の温度は高度とともに高くなる。この逆転現象は温帯及び極地方でもずっと高い所では起こっている。“中間圏”では高度が増加すると温度は再び下る。もっと高いところには“熱圏”があり、そこでは高度とともに温度は急激に高くなる。

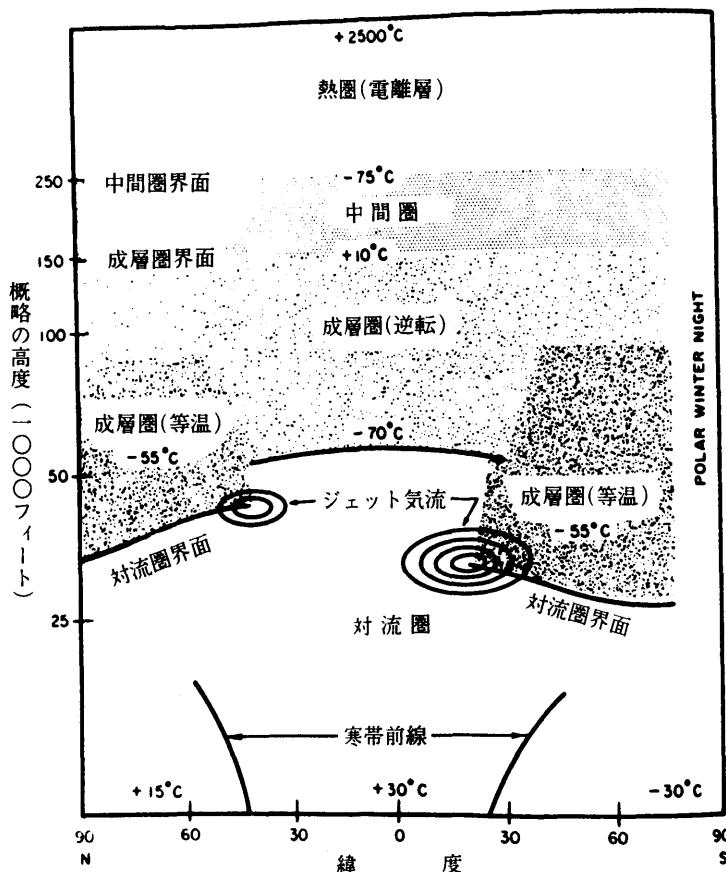


図-9.126 7月から8月にかけての大気の構成

**9.127** 気象に関係して目に見える現象の大部分は対流圏で起こる。高い温度、地球表面で比較的温度が高いこと、そして温度差による空気の対流（または不安定性）は雲を作ったり雨を降らせたりする。冷い極地方の空気を熱帯の暖かい空気がとが接触するところは夏は約45°、冬は30°あたりの温度であるが、ここには“寒帶前線”とよばれる曲った波状の暴風雨前線の帯ができる（図-9.126）。この地方は平均降雨量が多い。

**9.128** 対流圏の頂上である圏界面は、極地方や温帶では熱帯より低い。前考の

高さは、緯度・年内の時期、及びその日の条件により変化するが25,000～45,000フィートの間である。一般に、圏界面の高度は極地方で最低である。圏界面は極地方の冬の夜では完全になくなることがある。熱帯では、圏界面は通常全ての季節で、55,000フィート付近である。熱帯の圏界面の上では、温度は高さにより一定でなく上昇するので、温帯や極地方より圏界面は明らかである。図-9.126に見られるように異常な乱流の区域となる圏界面のギャップもしくは不連続なところが各温帯にある。この2つのギャップは季節によって北と南に動く。このギャップで対流圏の空気と成層圏の空気がかなり入れ代わると考えられている。空気の早い流れをなし地球の周囲をまわっているジェット気流は各半球における極地圏界面の熱帶側の端に位置している。

**9.129** 温度構造のため、成層圏ではほんの僅かしか対流運動がないし、空気は非常に安定している。このことは特に熱帯において著しい。ここでは、核爆発による放射能雲の上下方向の移動は少なく、地球の周囲を3回、即ち70,000マイル浮遊する間に2マイル以下のこともある。この安定性は、再び乱流が著しい中間圏まで続く。極地成層圏は、特に極地の冬の夜のように、成層圏高度構造の逆転がなくなる時には熱帯の成層圏ほど安定していない。このような時は、高高度の所まで空気の対流的混合がかなり起こるだろう。

## 後期フォールアウトの大気経路：対流圏フォールアウト

**9.130** 大気中に浮遊している放射能雲中の非常に小さな粒子によるフォールアウトパターンは、最初にそれらが対流圏でとどまって滞留したか、成層圏にまで到達して安定したかにより異なる。この放射性物質の対流圏と成層圏に対する分布の方法は爆発エネルギー出力・爆発高度、それに爆発のまわりの状態など多くのファクターにより変ってくる。この他、地表爆発では塵介もしくは降雨による浄化や分別現象によりさらに複雑となる。浄化効果により初期フォールアウト中の放射能残渣は増加し雲の中の量は少なくなる傾向にあり、分別作用により空中に浮遊するストロンチウム-90やセシウム-137の相対的な量が多くなる。このように、対流圏と成層圏とに分配される量を予測することは今のところできず、成

層圏に入る。ただ定性的な結論が出ているに過ぎない。

**9.131** 一般的に、爆弾残渣の割合は、条件が同じならば空中爆発の方が地上爆発の場合より多い。この理由の一つには、前者の場合には局地的もしくは初期フォールアウトが本質的ないということ、その他の理由として、後者の場合には雲の中にもち上げられた表面物質が到達高度を下げる傾向にあるから、温帯及び極地方では同じ規模の空中爆発であれば熱帯地方より多量の放射性粒子を成層圏にもたらす。この理由は、圏界面が熱帯地方以外では低く又成層圏の安定性もより少ないので、低出力爆発では、放射性物質の大部分は対流圏にとどまり、成層圏に入るのはほんの僅かである。しかし、爆発エネルギー放出量が増加すると雲の上昇高度が高くなるので塵の成層圏に入る割合が多くなるであろう。

**9.132** 対流圏にとどまる小さな粒子は、数カ月の間に、除々に地球上に落下する。これが“対流圏フォールアウト”を形成する。このフォールアウトを生ずる最も重要な機構は雨と雲による浄化効果であるらしい。細かい粒子は水滴（もしくは雪片）が出来る時、中に入り、一諸に落下してくる。近接した地域に堆積する後期フォールアウトの量は、特に乾燥もしくは多湿の地方を除けばフォールアウト期間中の降雨（雪）量と密接な関係がある。雨等にともなわれない乾いたフォールアウトも記録されてはいるが、これらは大抵の場合、対流圏フォールアウトのうちの一部であろう。

**9.133** 対流圏から物質が除去される時間あたりの量は、その時、対流圏に存在する量にほぼ比例する。したがって、“半滞留時間”という概念が意味をもつ。これは、その場所から浮遊物質の半分が除去されるまでの時間と定義されている。もしも、雲の粒子が最初対流圏の上端に達したとすると、対流圏フォールアウトの半滞留時間は約30日である。大気中に滞留する間、対流圏にある粒子は一般に西風により大体1カ月で地球のまわりを一周する。この時、フォールアウトの平均的主要部分は緯度30°の幅に広がる比較的狭い帶状の部分と限定される。

**9.134** 風や雨は一様でないのが通常であり、初期フォールアウトパターンに対する対流圏フォールアウトパターンは変化し極めて不規則であろう。対流圏フォ

ールアウトの分布が気象特に（雪）により変化することからすれば、可能性のあるある分布を理想的なものとして表わすことも実際的でない。

### 成層圏フォールアウト

**9.135** 成層圏に入った放射能粒子は対流圏フォールアウトよりゆっくり降下してくる。これは、主として、先に述べた如く成層圏中をゆっくりと垂直移動しており、また粒子の除去に役立つような水蒸気がないためである。成層圏から放射能粒子が除去されるほとんど唯一の方法は、まず空気団が粒子を対流圏に運び、ここから降雨（雪）により落下する方法のようである。空気が成層圏から対流圏にもたらされるのは少なくとも次の3つの方法がある。(1) 圏界面を通って直接下方に移動する。(2) 圏界面が上方に移動するか、より高いところに圏界面が再生される。(3) 圏界面のギャップを通しての大規模な水平循環・乱流、これら3つの機構のうちの相対的な重要性は、粒子が成層圏に入っていた時の高度・緯度、そして年間の時期により異なる。最初の方法は極地方の冬期に重要であり、第2の方法は低い極地方成層圏での早春の時期に重要である。第3の機構はギャップに近い成層圏の低い部分の物質にあてはまる。赤道区域ではごく少しの粒子しか圏界面から落下してこない。

**9.136** 成層圏が比較的複雑な構造をもつことや、汚染粒子が成層圏から出る機構が幾つかあることにより全ての成層圏粒子に対してある半滞留時間を決めるることは不可能である。しかし、モデルが半経験的に考えられており、成層圏の蓄積量、地表近くの空气中濃度、そして成層圏や中間圏もしくはそれ以上に入った塵の量などを計算することができる。考えられたモデルを用いて1961年以来の大気圏内核実験で放出された放射性同位元素のフォールアウトの予測をうまく行うことができた。このモデルは1964年の人工衛星の事故でS N A P - 9 A 発電機の焼失で放出されたプルトニウム-238の実質的な量も予測した。

**9.137** このモデルは、地球の（北及び南）両半球の成層圏を2つの区域に区分する。即ち70,000フィート以上と以下の領域である。最初放射能塵が入るのが、70,000フィート以上の所であれば、いわゆる上層大気の循環によって他の半球へ

も急速に移行する。この放射能塵は約1年も経過すると冬期や春期にそれぞれの半球の70,000フィート以下のところに達する。これに反して70,000フィート以下の成層圏に入ったとすれば、放射能塵の対流圏への流入は最初の冬もしくは春に始まる。このように成層圏の低い所では半球間の移行は先の場合より緩慢に行なわれる。70,000フィート以下における成層圏の風は場所と時期により東又は西のいずれか一方向であり、大部分の放射能塵は最初地球のまわりにガードリングのような狭い帯状になる傾向がある。この帯状はしばらくすると拡散し、放射能塵は冬期や春期には極方向や下方に移行する。

**9.138** 70,000フィート以下の成層圏の低いところでは、半球間を移行する半滞留時間は約60ヶ月であるが対流圏へ移行する半滞留時間は約10ヶ月である。対流圏における半滞留時間は僅か1ヶ月（§ 9.133）であるから、成層圏の低い部分に入った兵器残渣はその入った時の半球に落ちることは明らかである。核実験の大部分は北半球で行なわれ、成層圏に入った放射能塵でもほとんど70,000フィート以上には到達しなかった。したがって、北半球の地上におけるフォールアウト量は南半球の量よりはるかに多い。一方70,000フィート以上の上層大気では半球間の移行が低い所より速やかであり、対流圏へ落下するのは緩慢である。故に、数回起こった70,000フィート以上における進入ではフォールアウトは両半球により等分に落下した。

**9.139** 成層圏にもち込まれる場所がいずれであっても、成層圏フォールアウトの大部分は温帶地方の地上に落下するであろう。この主たる理由は寒帶前線付近が雨の多い地域になるということである（§ 9.127）。対流圏における半滞留時間は非常に短いので、圏界面ギャップを通して落下してくる空気や、極地側に落下した空気のうち赤道方向に移動するものは赤道に到達する前にその中の汚染粒子を降雨（雪）によって失なう。したがって赤道付近における成層圏フォールアウトは雨が多いのにかかわらず少ない。

#### 核実験による後期フォールアウト

**9.140** 後期フォールアウトを評価は、いくつかの理由により、ストロンチウム

# H P『海軍砲術学校』公開資料

注:(9) 1 M Tの核分裂威力ではストロンチウム-90をほぼ0.11メガキュリーを作る。

**90**の量により決定することが一般に行なわれている。その半減期は成層圏における滞留時間に比べて長く、地球上に沈積する前に大きく減衰する事がない。又核分裂によって比較的大量に生成されること、そして通常の放射化学的な方法で容易に固定・測定ができるなどの理由による。さらにストロンチウム-90の濃度は後期フォールアウトによる障害の尺度をなすもので特に関心がある。

**9.141** ストロンチウム90の放射能は、一般の放射性物質と同じく、“キュリー”という単位で表わすのが便利である。これは毎秒 $3.7 \times 10^{10}$ 個の崩壊をする放射性物質の放射能（もしくは量）と定義されている（この特別な速度が選ばれた理由は、ラジウムの1gが崩壊する速度に近いことによる）。大量の放射性物質が含まれているときには“メガキュリー”単位が用いられる。これは百万キュリーに等しく毎秒 $3.7 \times 10^{16}$ 個の崩壊に相当する。<sup>(9)</sup>

**9.142** 1954年以来、核実験による対流圏や成層圏の空気、雨水や土壌中の放射能の量を測定するために世界中の各場所にサンプリングのための多くのネットワーク地点ができている。得られた結果は後期フォールアウトのいくつかの機構を証明した。このような情報と、その同位元素の食品・動物及び人体中の濃度を調査する生物学的な研究とを合わせて考察するならば、世界的な規模で、傷害の可能性の評価をすることができる（第11章参照）。

**9.143** 図-9.143 a と b におけるプロットは、ストロンチウム-90の成層圏蓄積量、即ちその時に未だ成層圏に残っている放射能と地上に沈積した地上蓄積量の経年変化をメガキュリーで表わしたものである。1961～1962年にわたっての米国とソ連が行なった多数の大気圏実験により成層圏蓄積量は大きな山をなしており（図-9.143 a ）1962年の暮に最大となっている。1962～1965年までの地上高積量の急激な増加（図-9.143 b ）は先の間のストロンチウム-90が地表に沈積した結果である。

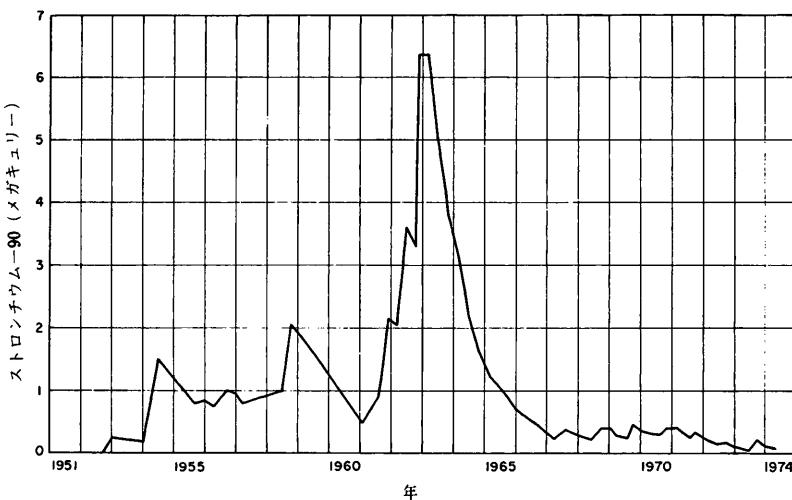


図-9.143 a ストロンチウム-90の成層圈蓄積量（保有量）

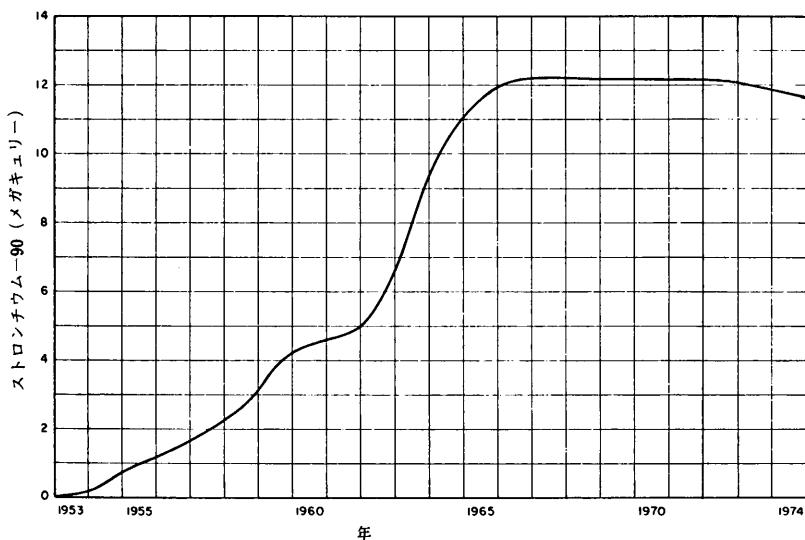


図-9.143 b ストロンチウム-90の地表蓄積量（保有量）

# HP『海軍砲術学校』公開資料

注：(10) この章の残りの節は省略しても関連性は失なわれない。

**9.144** 地表のストロンチウム-90が最大量となる時期は後期フォールアウトにより同位元素が地上に落下してくる速度より放射性崩壊の速度が速くなる時であろう。1960年代と1970年代の当初に行なわれたフランスと中国の大気圏核実験は地上蓄積量の大きな増加をもたらさなかった。仮に、大気圏の実験が続けられなかつたら地表蓄積量はゆっくり減少したにちがいない。

**9.145** ストロンチウム-90の次に世界的なフォールアウトの生物学的見地から最も重要なのはセシウム-137である。短時間後の核分裂生成物中のセシウム137原子数はストロンチウム-90のほぼ1.5倍である（§ 9.124）。これら2つの同位元素は本質的にお互いの分別現象がなく、半減期も大きな差異がないので地上におけるセシウム-137の放射能の概略値は例えば図-9.143 b のストロンチウム-90の値に乗ずれば得られる。

## 第7節 残留放射線に対する技術的考察<sup>(10)</sup>

### フォールアウト放射能の崩壊速度

**9.146** 放射性フォールアウトの $\gamma$ 線線量率の減少を示す図-9.16 a と b の曲線は核分裂生成物中の300以上の同位元素と兵器構成材料の中性子誘導放射能の寄与を爆発後の各時間について合計して得たものである。ガス状のクリプトンやキセノン（とその娘核種）の部分的損失やその他の状態による分別現象の効果も考慮した（§ 9.08）。この方法で得られた線量率は兵器の性質により変化するが、図-9.16 a と b の値はフォールアウト放射能が主として核分裂生成物による場合の平均的なものと見なしてさしつかえない。線量率の時間に対する減少を、全ての時間にわたり一つの簡単な式で表わすことはできないが30分後から5,000時間（200日）までの間については2.5%以内で " $t^{-1.2}$ " の破線となる。200日を越えるとフォールアウトの減衰は  $t^{-1.2}$  の線よりも速い。したがってこの時期におけるフォールアウトの線量率を求めるには連続曲線が使用される。

**9.147** 約200日以内については、その場所におけるフォールアウト放射能の減衰

注：(1) 物理的には、単位時間基準線量率は単位時間たとえば爆発後1時間において、与えられたフォールアウトから受ける線量率である。ただし、この量は実際にはその時移動中であったりその場所に到達していないかもしれない。

の状態は簡単な次式で表わされる。

$$R_t \approx R_1 t^{-1.2} \quad (9.147.1)$$

ここで、 $R_t$  は爆発  $t$  時間後の  $\gamma$  線量率を表わし  $R_1$  は単位時間後の線量率を示す。これは先に図-9.16 a や b、そして図-9.20や9.25に使用したもので単位時間基準線量率である。 $R_1$  の実際の値は時間の単位、例えば分・時間・日などにより決まる。この章において時間の単位は通常時間とする。したがって、基準線量率  $R_1$  に対する単位時間は1時間<sup>(1)</sup>である。

**9.148** 式 (9.147.1) は、考えている期間中にはフォールアウトの量に変化がない場合に適用できることを十分理解しておくべきである。したがって、この式はフォールアウトが未だ落下しつつある時には使用できず、フォールアウトが完全に終了したと考えられる時のみ使用できる。もしも、フォールアウト物質がその期間  $t$  に気象や流失など何らかの方法でなくなった時、または逆に風や他の核爆発により新たに物質が増加した場合には式 (9.147.1) はフォールアウト放射能の減衰計算のために適用することができない。

**9.149** (9.147.1) 式を対数に変形するならば、

$$\log \frac{R_t}{R_1} \approx -1.2 \log t \quad (9.149.1)$$

となる。したがって、 $t$  に対して  $R_t/R_1$  を両対数でプロットするならば、勾配-1.2の直線となる。 $t = 1$ 、即ち爆発1時間後では  $R_t = R_1$  もしくは  $R_t/R_1 = 1$  となる。この点は、図-9.16 a や b における勾配-1.2の直線で結ぶ場合、ここを通る基準点となる。

**9.150** ある量のフォールアウトから受ける全集積線量は § 9.21に述べた方法を使用して図-9.20から求めることができる。図-9.20の曲線は、図-9.16 a と b に示した実際の（連続的な）線量率曲線を時間に対して数値的に積分して得られた。しかし、爆発後0.5時間（30分）と5,000時間（200日）の間の期間であれば、その間に受ける線量の近似的な式は (9.147.1) 式を直接積分して求めることができる。時間  $t_a$  と  $t_b$  の間に受ける集積線量を  $D$  とすれば、

$$D \approx R_1 \int_{t_a}^{t_b} t^{-1.2} dt = 5 R_1 (t_b^{-0.2} - t_a^{-0.2}) \quad (9.150.1)$$

したがって、単位時間基準線量率 $R_1$ が図-9.25を使用するか爆発後任意の時刻についての線量率を測定することにより知ることができれば、全体の（集積された）線量はどの期間についても計算することができる。この際、その期間ではフォールアウト放射能は $t^{-1.2}$ の式で減衰するという仮定が入っている。

**9.151** 実際の核実験でのフォールアウトの測定によれば、 $t^{-1.2}$ は平均値としての減衰の状態を表わしているが、指数は-1.2というより-0.9と-2.0の範囲の値とすべき例があった。事実、爆発後の時間によって異なる指数が必要なことはよくある。このような差異は多分その爆発の特殊な環境によるものであり、これをあらかじめ予想することは、特に中性子による誘導放射能が大量に出来るような場合を除いては不可能である。この他に、爆発時間が異なる2つ以上の爆発によるフォールアウトがある場合も、見かけ上の減衰速度は全く異なったものとなる。又、一般に爆発後長期間の間には気象的なことが予想できることにより線量率を変えることがあり得る。したがって、核爆発に続く実際の計算では $t^{-1.2}$ 法則によるにせよ、図-9.16 a と b の連続曲線を使用してもこの点に注意してできるだけ何回も実測し確認をすべきである。

**9.152**  $t^{-1.2}$ 減衰法則が適用できる限りにおいては、(9.150) 式を使用して、人が核分裂生成物汚染地域においてある特定量の放射線量を受けないための滞留可能時間を求めることができる。この場合、集積線量は与えられ、 $t_0$ は与えられた汚染地域への侵入時間、 $t_0$ はその人がこの時間（前）までに出なければならない時間である。(9.150.1) 式を用いてこの問題を解く場合、単位時間基準線量率 $R_1$ を知ることが必要である。これは式 (9.149.1) により、爆発 $t$ 時間後、例えば侵入時の線量率 $R_t$ が測定できるならば求めることができる。結果は図-9.26と9.27のようにグラフに表わすことができる。

**9.153** 仮に、フォールアウト全体が非常に短時間の間に飛来すると仮定すれば原理的には式 (9.150.1) からフォールアウト汚染地域で受ける全集積線量を求めることができる。実際には、汚染粒子は数時間の間に落下するだろうし、フォールアウト粒子の地上への落下速度が得らなければ、意味のある計算をすること

は困難である。しかし、フォールアウトが終了するならば、爆発後200日までの間については、線量率を1度測定することにより式(9.149.1)と式(9.150.1)を使用してある期間内の集積線量の概算をすることが出来る。

### 汚染表面上の放射線線量

**9.154** § 9.141で放射性物質の放射能を表わす単位としてキュリーとかメガキュリーが有用であることを述べたが、これを地域の汚染に関連してここで利用しよう。外部線量を問題にする限り、 $\gamma$ 線が $\beta$ 線に比べて生物学的に重要であるので初期フォールアウトの放射能を $\gamma$ メガキュリーで表わすことができる。 $1\text{ }\gamma\text{メガキュリー}$ は毎秒 $3.7 \times 10^{10}$ 個の光子を放出することを表わし $\gamma$ 線放出速度の程度を示す。

**9.155** 仮に、ある区域が任意の放射性物質で一様に汚染されていて、与えられた時刻における放射能が( $\gamma$ メガキュリーで)得られているならば、 $\gamma$ 線の平均エネルギーは与えるとして平面上各高さにおける $\gamma$ 線線量率を計算することが可能である。汚染密度が1平方マイル当たり $1\text{ }\gamma\text{メガキュリー}$ とした場合の計算結果を図-9.155に示した。汚染密度が $1\text{ メガキュリー/平方マイル}$ と異なる時は図の縦軸の値に比例的に乗ずればよい。

**9.156** 図-9.155を求める計算では、空気中のビルドアップの効果(§ 8.103)も考慮している。さらに、汚染面は完全な無限平面を仮定している。実際の地形ではある程度の起伏があり。各種の放射線遮蔽物があるので地上ある高さにおける線量率は無限平面の場合よりも少なくなるはずである。勿論この減少ファクターは地形や汚染地域の広さにより変る。中程度の起伏をもつ地形であれば、地形による減少ファクターとして通常0.7がとられ線量率を概算するには図-9.155の値にこれを乗じて求める(§ 9.95)。

**9.157** 航空機の中のように地表からより高い点における線量率は図-9.157を使用して計算できる。この曲線は初期フォールアウトに対する減少ファクターの概略値を地上高の関数として表わしている。この曲線は、航空機の高度に比較して十分広い一様汚染の地域で特に適用できる。地表付近、即ち高さ3フィートにお

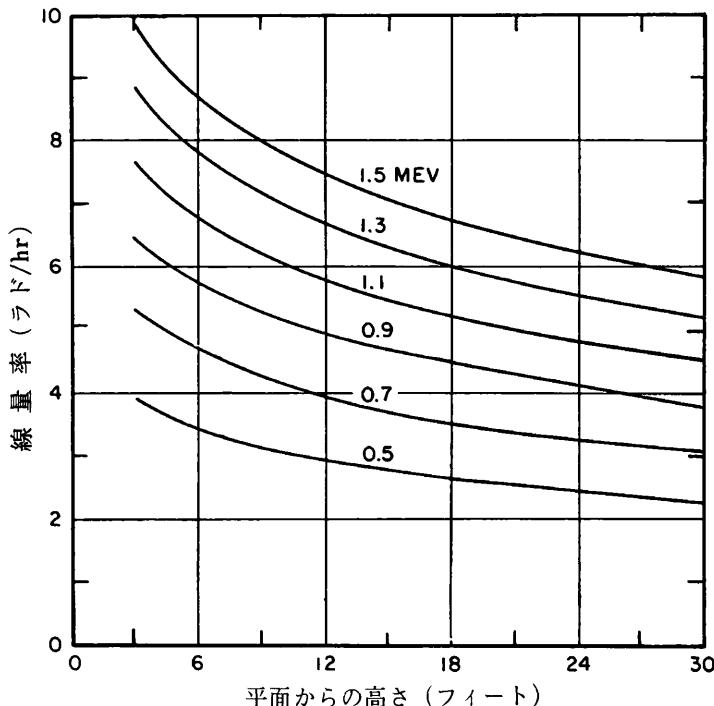


図-9.155 汚染密度が $1 \gamma MK/\text{平方マイル}$ の時、各エネルギーの $\gamma$ 線による理想平面上の線量率

ける線量率が得られておる場合には、任意の地上高における値はその高さに対する減少ファクターで割ることにより求めることができる。一方、ある高さにおける線量率が測定されるならば、それに減少ファクターを乗ずることにより地上3フィート高でのその時の線量率となる。

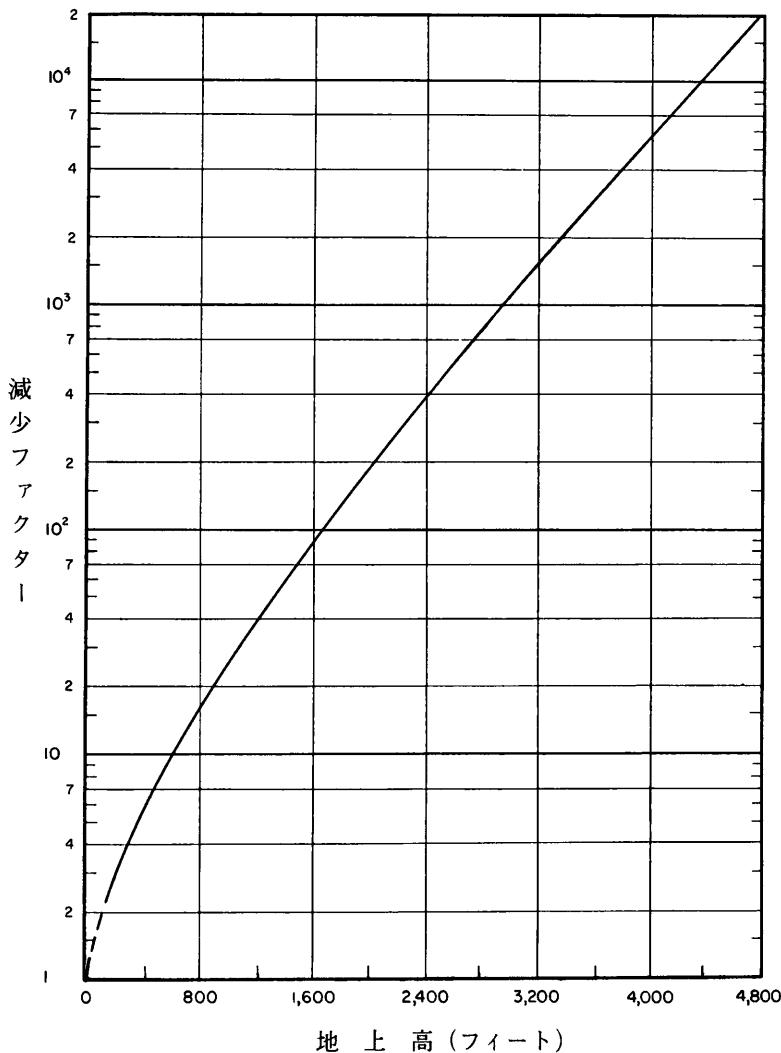


図-9.157 初期フォールアウトについて地上高 3 フィートにおける線量率に対する高度減少ファクター

9.158 図-9.157の曲線の使用法の一つとして、空中サーベイにより得たデータをもとに汚染密度や地表付近の線量率を決ることがある。例えば、測定器は高さ 1,000 フィートとなるように航空機に吊るされており、線量率が  $0.24 \text{ rads / hr.}$

# H P『海軍砲術学校』公開資料

注: (12) 報告されている論文によれば核分裂物質や中性子スペクトルにより2,700から3,100 rads/hr. の間の値が平均値として妥当である。ここに得られた線量率は良い平均値と考えられる。

とする。又、爆発後の経過時間から $\gamma$ 線の平均エネルギーは0.8 Mev とする。高度1,000 フィートにおける減少ファクターはほぼ27であるので、観測時地上3 フィートにおける線量率は約 $0.24 \times 27 = 6.5$  rads / hr. である。図-9.155から。0.8 Mev の $\gamma$ 線のエネルギー汚染密度が1 メガキュリー / 平方マイルの時、地上3 フィートにおける線量率は約5.9 rads / hr. となる。したがってこの場合の汚染密度は約 $6.5 / 5.9 = 1.1$  メガキュリー / 平方マイルとなる。

**9.159** 核分裂生成物の $\gamma$ 線放射能は分裂物質の性質により異なるが、計算によれば威力1 KT 当り爆発1 時間後では約530 γ メガキュリーというものが平均値として妥当な値である。 $\gamma$ 線の平均エネルギーも分裂物質により異なるが爆発1 時間後では約0.7 MeV が妥当である。このように、分別現象核分裂威力1 KT の核分裂生成物が全て1 平方マイルの平坦面上に一様に分布するとすれば、平面上3 フィートで受ける放射線量は図-9.155から $5.3 \times 530$ 、即ち約2,800 rads / hr. となる。中性子捕獲による兵器構成材料中における誘導放射能のためこの値に約100 rads / hr. を加えて爆発1 時間後において、全体として2,900 rads / hr. となるであろう。(12)

**9.160** 仮りに、兵器の破片中の放射能が全て1 平方マイルの平面上に一様に分散すれば、その地域上の1 時間後の線量率は分裂威力1 KT 当り約2,900 rads / hr. となる。この残渣が面積A 平方マイルの平坦な面上に一様に分散すれば、1 時間後の線量率は $2,900 / A$  rads / hr. となる。したがって、1 時間後の線量率と平方マイル単位での面積との積は2,900となりその単位は (rads / hr.) (miles)<sup>2</sup> / kt fission である。仮りに、核分裂威力1 KT の全ての残渣が一様ではなく初期フォールアウトパターンのように濃度差をなして沈積した時は1 時間後の線量率と面積との積は次のように1 時間後の線量率の“面積積分”でおきかえることができる。

$$\text{面積積分} = \int_A R_1 dA$$

ここで、R<sub>1</sub>は面積要素dA上における1 時間後の線量率、A 平方マイルは残渣が覆う全面積である。このように定義するならば、濃度パターンに拘らず平面上

の1時間後の線量率の面積積分は、全てのフォールアウトがその時完全に沈積しているとすれば常に $2,900 \text{ (rad/hr.) (miles)}^2/\text{kt fission}$ となる。

**9.161** いくつかの核実験の測定値は広い範囲にわたっているが、平均値として妥当なものとして約 $1,000 \text{ (rads/hr.) (miles)}^2/\text{kt fission}$ が得られている。測定は爆発後の種々な時刻に放射線監視装置を使用しおこなった。この値は先に示した $2,900 \text{ (rads/hr.) (miles)}^2/\text{kt fission}$ と異なっているが、この主な理由は二つある。まず、放射性爆弾残渣の一部しか初期フォールアウトに寄与しないこと、次に測定値は測定器の感度や地形による遮蔽の補正がなされなければならぬことである。測定に使用したのは一般的な電離箱式の監視装置でごく普通の方法で較正されており、 $\gamma$ 線のエネルギーに対する感度が直線的でないこと、方向に対する感度、それに操作員の遮蔽効果などのため測定値は約25%少なくなる。この補正をすれば“測定された”面積積分値は、 $1,000$ から $1,300 \text{ (rads/hr.) (miles)}^2/\text{kt fission}$ となる。地形の遮蔽ファクターを $0.7$ （§ 9.156）とすれば、理想的な平面における遮蔽なしの場合には1時間後線量率面積積分は $1,300/0.7$ 即ち $1,900 \text{ (rads/hr.) (miles)}^2/\text{kt fission}$ となるはずである。

**9.162**  $1,900 \text{ rad/hr.}$  と理論的な値 $2,900 \text{ (rads/hr.) (miles)}^2/\text{kt fission}$ との比は、地表爆発（§ 9.59）の時、兵器残渣の全 $\gamma$ 線放射能のうち約60%が初期フォールアウトとして沈積することを示している。しかし、この値は、データ数も少なく、変化しやすいデータから得たもので、概略値とみるべきである。例えば、この値は表面物質の性質によりある程度変化する。さらに、兵器破片のうち局地的フォールアウトとして沈積する割合は、火の玉がもはや地表面に到達しなくなる高さまでは爆発高度とともに減少するであろう。

### 粒子の落下速度

**9.163** 与えられた大きさ、密度の粒子がある原子雲の高さから地上に落下する時間は空気力学的な運動方程式から計算できる。空気の垂直方向の運動による効果は普常無視される。なぜなれば、これは予想ができないし、特に24時間以内に落下する粒子に対しては一般的に小さいと信じられているからである。しかし、

野外実験のデータは理論的に計算した落下時間としばしば異なる。このことは、風の垂直成分や他のファクターが粒子の落下に大きな影響を及ぼす可能性を示している。そのようなファクターの一つとして降雨（雪）（§ 9.67以下）があるが、ここでは無視しよう。

**9.164** 落下時間に関するいくつかの理想的な計算結果を図-9.164に示した。この曲線は、各大きさの粒子が異なる高さから地上まで落下するに要する時間を示している。粒子の密度は乾いた砂の密度とほぼ等しい $2.5\text{g/cm}^3$ とし、落下する粒子は球形でその半径がマイクロメーター ( $\mu\text{m}$ ) で示されている。実際のフォールアウト粒子では形が不規則で時々角ばっていることがある。しかし、粒子は土壤や兵器残渣の溶けた、丸い滴状のものが凝固して出来たもので大部分がなめらかで球状となる傾向にある（参照図-9.50 a から b まで）。粒子が変形していても、有効半径で表わすことができ落下時間の計算では球状としての取扱が出来る。

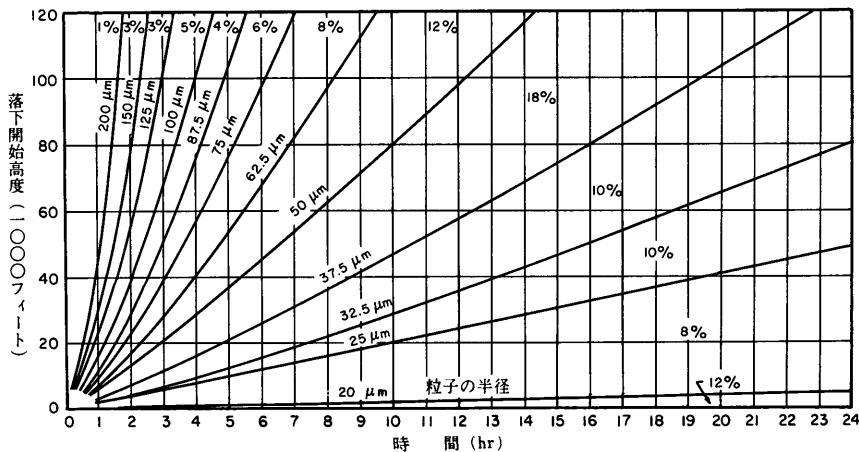


図-9.164 各サイズの粒子が種々の高度からの落下に要する時間  
と全放射能に占める100分率

**9.165** 図-9.164に示したバーセンテイジはそれぞれ対の直線間を占める大きさの粒子の放射能が全放射能に対する割合を見積ったものである。したがって、 $200\mu$ 以上の粒子の放射能は1%であり、 $150\mu\sim200\mu$ の粒子のもつ放射能は全体

の3%であるということである。小さい方は半径 $200\mu$ 以下の粒子の放射能は全体の12%をもっている。この放射能の分布は、変数である粒子半径の対数に対して正規（ガウス）分布にしたがうので“ログー正規”として知られている。放射能分布は爆発の型式、G Z 地点における地形の性質により変化するので全ての場合に厳密に言えることではない。しかし、フォールアウトの理論的解析ではこの放射能分布の特性を仮定している。

**9.166** フォールアウトの風下地点までの到達時間求めめる方法は§ 9.91に示した。いま爆発地点から300マイル風下の地点までの到達時間を20時間とする。原子雲が60,000フィートで安定するものとすれば図—9.164から次のことが得られる。この時、半径 $30\mu$ より小さい全ての粒子は未だ空中に存在し、この粒子は初期フォールアウト中の全放射能のほぼ28%の放射能をもっている。したがって、浮遊中に崩壊するけれども、風下300マイルで爆発後約20時間経ってもかなりの放射能をもつフォールアウトが予想されることがわかる。

## 参考文献

- BUNNEY, L. R., and D. SAM, "Gamma-Ray Spectra of Fractignated Fission Products," Naval Ordnance Laboratory, June 1971, NOLTR 71-103.
- BURSON, Z. G., "Fallout Radiation Protection Provided by Transportation Vehicles," EG & G, Inc., Las Vegas, Nevada, October 1972, EGG-1183-1566.
- CRAWFORD, T. V., "Precipitation Scavenging and 2BPUFF," University of California, Lawrence Livermore Laboratory, December 1971, UOPKA 71-14.
- CROCKER, G. R., "Fission Product Decay Chains: Schematics with Branching Fractions, Half-Lives, and Literature References," U.S. Naval Radiological Defense Laboratory, June 1967, USNRDL-TR-67-111.
- CROCKER, G. R., and T. TURNER, "Calculated Activities, Exposure Rates, and Gamma Spectra for Unfractionated Fission Products," U.S. Naval Radiological Defense Laboratory, December 1965, USNRDL-TR-1009.
- CROCKER, G. R., and M. A. CONNORS, "Gamma-Emission Data for the Calculation of Exposure Rates from Nuclear Debris, Volume I, Fission Products," U.S. Naval Radiological Defense Laboratory, June 1965, USNRDL-TR-876.
- CROCKER, G. R., J. D. O'CONNOR, and E. C. FREILING, "Physical and Radiochemical Properties and Fallout Particles," U.S. Naval Radiological Defense Laboratory, June 1965, USNRDL-TR-899.
- "Department of Defense Land Fallout Prediction System," Defense Atomic Support Agency, Washington, D.C.; U.S. Army Nuclear Defense Laboratory; U.S. Naval Radiological Defense Laboratory; Technical Operations Research, Burlington, Massachusetts, 1966, DASA 1800-I through 1800-VII.
- DOLAN, P. J., "Gamma Spectra of Uranium-235 Fission Products at Various Times After Fission," Armed Forces Special Weapons Project, Washington, D.C., March 1959, AFSWP 524.
- DOLAN, P. J., "Calculation of Abundances and Activities of the Products of High-Energy Neutron Fission of Uranium-238," Defense Atomic Support Agency, Washington, D.C., May 1959, DASA 525.
- DOLAN, P. J., "Gamma Spectra of Uranium-238 Fission Products at Various Times After Fission," Defense Atomic Support Agency, Washington, D.C., May 1959, DASA 526.
- \*ENGLEMANN, R. J., and W. G. N. SLINN, Coordinators, "Precipitation Scavenging (1970)," AEC Symposium Series No. 22, U.S. Atomic Energy Commission, December 1970.
- FEELY, H. W., et al., "Final Report on Project Stardust, Volumes I through III," Isotopes, A Teledyne Company, Westwood, New Jersey, October 1967, DASA 2166-1 through 2166-3.
- FERBER, G. J., "Distribution of Radioactivity with Height in Nuclear Clouds," Proceedings of the Second Conference sponsored by the Fallout Studies Branch, U.S. Atomic Energy Commission, November 1965.
- FREILING, E. C., and N. E. BALLOU, "Nature of Nuclear Debris in Sea Water," *Nature*, 195, 1283 (1962).
- KNOX, J. B., T. V. CRAWFORD, and W. K. CRANDALL, "Potential Exposures from Low-Yield Free Air Bursts," University of California, Lawrence Livermore Laboratory, December 1971, UCRL-51164.
- \*KREY, P. W., and B. KRAJEWSKI, "HASL Model of Atmospheric Transport," Health and Safety Laboratory, U.S. Atomic Energy Commission, New York, N.Y., September 1969, HASL-215.
- KREY, P. W., and B. KRAJEWSKI, "Comparison of Atmospheric Transport Model Calculations with Observations of Radioactive Debris," *J. Geophys. Res.*, 75, 2901 (1970).
- \*KREY, P. W., M. SCHONBERG, and L. TOON-KEL, "Updating Stratospheric Inventories to April 1974," Fallout Program Quarterly Summary Report, Health and Safety Laboratory, U.S. Energy Research and Development Administration, New York, N.Y., July 1975, HASL-294.
- LEE, H., P. W. WONG, and S. L. BROWN, "SEER II: A New Damage Assessment Fallout Model," Stanford Research Institute, Menlo Park, California, May 1972, DNA 3008F.
- MARTIN, J. R., and J. J. KORANDA, "The Importance of Tritium in the Civil Defense Context," University of California, Lawrence Livermore Laboratory, March 1971, UCRL-73085.
- National Academy of Sciences, Advisory Committee on Civil Defense, Subcommittee on Fallout, "Response to DCPA Questions on Fallout," Defense Civil Preparedness Agency, Research Report No. 19, May 1973.
- PETERSON, "An Empirical Model for Estimating World-Wide Deposition from Atmospheric Nuclear Detonations," *Health Physics*, 18, 357 (1970).

# H P『海軍砲術学校』公開資料

- \*SLINN, W. G. N., "Aerosol Particle Size Dependence of the Rainout Rate," Battelle Pacific Northwest Laboratories, AEC Research and Development Report, June 1971, BNWL-1551 Vol. II, Part 1.
- STEWART, G. L., and R. K. FARNSWORTH, "United States Rainout and Hydrologic Implication," *Water Resources Research*, 4, 273 (1968).
- \*\*Sr-90 and Sr-89 in Monthly Deposition at World Land Sites," Fallout Program Quarterly Summary Report, Appendix A, Health and Safety Laboratory, U.S. Atomic Energy Commission, New York, N.Y., April 1973, HASL-273 Appendix.
- VOLCHOK, H. L., "Strontium-90 Deposition in New York City," *Science*, 156, 1487 (1967).
- \*VOLCHOK, H. L., "Worldwide Deposition of <sup>89</sup>Sr Through 1974," Fallout Program Quarterly Summary Report, Health and Safety Laboratory, U.S. Energy Research and Development Administration, New York, N.Y., October 1975, HASL-297.

\* これら刊行物は米国商務省National - Technical Information Serviceで購入可能。

Spring field, Virginia, 22 161

H P 『海軍砲術學校』公開資料