

# 第 一 章

H P 『海軍砲術學校』公開資料

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

# HP『海軍砲術学校』公開資料

注:(1) 「核」と「原子」という言葉は、兵器や爆発そしてエネルギーに関する限り同意語として用いられるが、「核」の方がむしろ常用されており、その理由は§1.11で述べる。

## 第1章 核爆発の一般原理

### 第1節 核爆発の特性

#### 序　論

1.01 一般に爆発は、限られた空間内で多量のエネルギーを極めて急速に放出する。このことは、TNTのような在来の高性能爆発についても、核（または原子）爆発同様に当てはまる事であり、ただ、エネルギーの発生の方法が異っているだけである（§1.01）。（①）

突然のエネルギーの放出にともなって、温度と圧力の著しい上昇をきたし、そのため存在する全ての物質を、高温高圧のガス体に変えてしまう。このガス体は、高温高圧のため急速に膨張し周囲の物質、例えば空気、水又は大地に衝撃波とよばれる圧力波をひきおこす。衝撃波の特長は、図-1.01に示すように、圧力は波面において急速に増加し、その後方ではしだいに減少するという点である。一般に空気中の衝撃波は爆風に似ていて、強風をともなうので爆風波と呼ばれる。しかし、水中又は地中ではその効果が急激な衝撃に似ていることから、衝撃という言葉が用いられている。

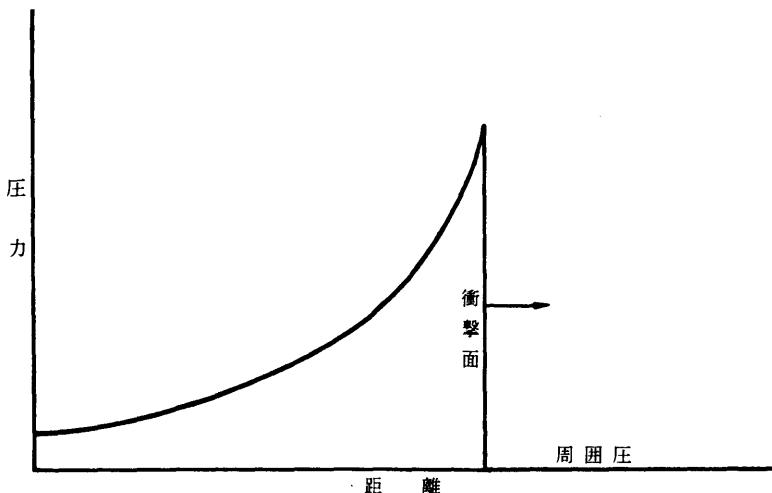


図-1.01 理想的衝撃波における距離と圧力との関係

1.02 核兵器は、その破かい作用が主として爆風または衝撃波によるものである限り、通常型の兵器と同様である。他方、核兵器と高性能爆弾との間には、いくつかの根本的な相違がある。まず第1に、核爆発は最大の通常兵器の爆発の数千（数万）倍強力であること。第2に、同量のエネルギーを放出するのに、通常の高性能爆薬より極めて少ない核爆発物質でよいこと、すなわち、前述のとおりである。このことは、爆風波の発生に対して多少異った機構を示すことになる。第3に、核爆発においては、温度は通常爆発に比較し、極めて超高温に達する。その際かなり大部分のエネルギーは、一般に熱線と呼ばれ、光および熱の形で放出される。このことは相当な距離があっても火傷あるいは火災の原因となる。第4に核爆発は、初期放射線とよばれる極めて透過性の強い有害な、目に見えない放射線をともなう。最後に、核爆発後に残った物質が、非常に長い期間にわたって放射能を帯びることである。これによる放射線を残留放射線、その性質を残留放射能と呼ばれている。

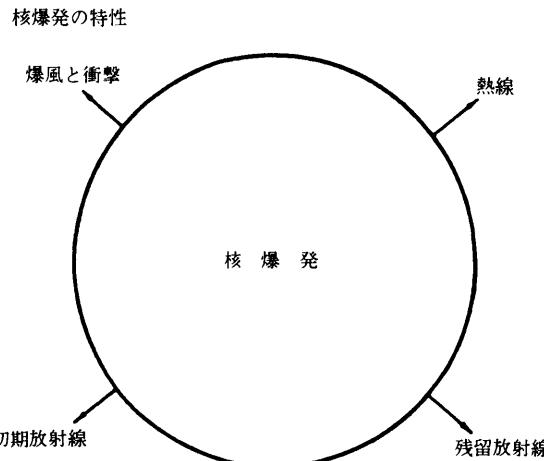


図-1.02 核爆発の効果

1.03 核爆発と通常爆発との間には、このように根本的な相違があり、また、恐ろしく強力なものであるため、核兵器の効果については、特別な考慮を払わなければならない。このような理由から核爆発にともなう機械的な現象や、種々の放射線の現象についての知識と理解がきわめて重要である。

1.04 本書の目的は、核爆発エネルギーの放出される種々の型式での相異について述べることと、それらがどのように伝ばんされるかを説明すること、また人体や物体にどのような影響を与えるかについて示すことである。特定の観測された効果に対して数値が与えられているときには、少なくとも2つの理由によってそのデータに関しては、どうにもならない不確定さが存在することに留意すべきである。その一つは、核兵器の効果を正確に測定するには、固有の難かしさがある。実際の結果は、しばしば種々の環境条件によっても左右されるがこれらの条件は、核爆発実験においてさえもコントロールは不可能ではないにしても困難である。まして核攻撃の場合には、予想することは到ていできない。さらに爆発エネルギーの同じ放出量をもつ二つの核兵器でも、組成および設計上の相違によって、異った量的効果を生じ得るであろう。

1.05 ここにおさめられた資料は、入手できる範囲内では最高のもので、防衛計

画にたずさわる責任ある人々を援助し、また核戦争によって起こるかもしれない非常事態に対処する準備をする際に役立つであろうことを希望する。さらに建築家や技術者にとっては、爆風、衝撃波、火災による被害に対してより大きな抗たん力をもち、かつ核放射線に対する遮蔽を与えるような、建築構造物を設計する場合に、これらのデータが利用できるであろう。

## 原子の構造と同位元素

**1.06** 総ての物質は、約90種類の元素として知られている単体の、一つあるいは2つ以上のものからできている。一般的な元素には、気体状の水素、酸素、窒素、非金属固体状の炭素、硫黄、リン、金属では鉄、銅、亜鉛などがある。余り身近なものではなく、核エネルギーの源として使用できるため近年注目を浴びてきた元素としてウラニウムがあり、常態では固体の金属である。

**1.07** 実在する元素の最小部分で、かつ、その元素の特性を依然として保持しているものを元素の原子と呼んでいる。したがって、水素の原子、鉄の原子、ウランの原子など総ての元素には原子が存在する。水素原子は総ての原子の中で最も軽いものであるのに対し、ウラン原子は天然に見出される原子の中で最も重いものである。人工的に造られるプルトニウムのようなウランよりも重い元素も又、核エネルギーの放出については重要である。しばしば、2つ又はそれ以上の同種又は異種の元素が結合して新物質を作ることもある。

**1.08** 総ての原子には比較的重い中心部、つまり原子核があり、周囲には電子とよばれる非常に軽い多数の粒子によって取りまかれている。この原子核は、さらに陽子と中性子とよばれる一定数の基本粒子からなりたっている。これら2つの粒子は、ほとんど同じ質量を持っているが、陽子が正の単位電荷を運ぶのに対し、中性子は、その名前が示すように、電気的に無電荷すなわち中性である点で異なっている。陽子は原子核の中に存在するので原子核自体は正の電荷をもっているが、普通の原子では、核をとりかこんでいる電子によって運ばれる負の電荷によって、完全に電荷的につりあっている。

**1.09** 異なった元素の原子間の本質的な相違は、原子核内の陽子の数（又は正電

荷)にある。これはその元素の原子番号とよばれる。例えば水素原子は1つだけ陽子をもち、ヘリウム原子は2個の陽子、ウラン原子は92個の陽子、プルトニウムは94個の陽子をもっている。しかしながら、ある元素の総ての核は、同じ数の陽子をもっているが、中性子数が異なる場合がある。このように原子番号は同一であるが質量数の異なる原子を、特定の元素の同位体とよんでいる。約20種以外の総ての元素は、2つ又はそれ以上の同位体の形で天然に存在するが、これとは別に、多くの不安定な、つまり放射性の同位体が色々な方法で得られるようになった。

**1.10** ある元素の同位体は、核内の陽子と中性子の和である質量数によって定まる。例えば、天然に見出されるウラン元素には、質量数が235と238である二つの同位体が存在する。これらは、ウラン-235とウラン-238とよばれている。

2つの同位体の核は、総てのウランの同位体と同様に92個の陽子をもつが、前者は143個の中性子を、後者は146個の中性子をもっている。一般に核という言葉は、その核の構成、すなわち、陽子の数と中性子の数によって区別される任意の原子を述べるのに使用される。ある元素の同位体は、その核内に、同数の陽子と異数の中性子をもった核種である。

**1.11** 通常の爆発の場合には、そのエネルギーは化学反応によって生ずる。化学反応は、化学的高性能爆発物質中に存在する原子、例えば水素、炭素、酸素、窒素の原子間の再配列によるが、一方核爆発の場合のエネルギーは、相互作用を及ぼし合う原子核内の陽子と中性子の配置換えによって、違った原子核が形成される結果として生成される。そこで、通常エネルギーとよばれているものは、特定の核相互作用から生ずるものであるから、厳密にいえば核エネルギーのことである。同じ理由によって、原子兵器は、むしろ核兵器とよばれる。原子核内の陽子と中性子との間の力は、原子間に働く力よりもはるかに大きく、従って核エネルギーは、同一の質量について考えてみると、通常の(又は化学)エネルギーよりも桁違いに大きいものである。

**1.12** 多くの核反応過程が知られているが、それらの総てがエネルギーの放出をと

もなうとは限らない。質量とエネルギーとの間には、一定の等価性があり、核反応の際、質量の減少が起こると、その質量の減少に応じて、ある一定量のエネルギーの放出をともなう。この質量の変化は、実際に、色々な原子核における内部力の相違によるものである。構成要素が、弱い力で結合されている体系が、結合力がより強い体系に変わる場合、エネルギーの放出をともない、それによって質量が減少するということは、自然の根本的な法則である。

1.13 爆発を引き起こすに十分な量の核エネルギーを放出するには、その核反応過程で、質量減少があることを必要とする他、一たんその反応が起こり始めた場合核反応自身が連鎖的に増加することが必要である。2種の核反応により、短時間に大量のエネルギーを生成する条件を満足させることができる。それらが、核分裂および核融合として知られているものである。核分裂反応過程は最も重い部類に属す（高い原子番号の）原子核のうちのいくつかによって起こる。

1.14 核分裂反応によって核爆発を起すのに使われる物質は、ウランとプルトニウムのある特定の同位体である。前述したように、天然に見出されるウランは、2つの同位体、すなわちウラン-235（約0.7%）とウラン-238（約99.3%）からなっている。ウラン-235は、極めて微量しか天然に存在しないが、容易に核分裂を起こすことのできる核種であり、通常、核兵器にも使用される。他の同位体ウラン-233は天然に存在しないが容易に核分裂を起こしうる。これは、トリウム-232から人工的に造られる。又天然には見出されないが、核兵器に使用される核分裂性同位体であるプルトニウム-239は、ウラン-238から人工的に作られる。

1.15 自由な（束縛されていない）中性子が、核分裂性原子の核内にはいると、その原子核を2つのより小さな部分に分裂させることができる。これが核分裂反応過程であり、大量のエネルギーの放出をともなう。反応の結果生じたより小さな（より軽い）原子核は核分裂生成物とよばれる。1ポンドのウラン又はプルトニウムが完全に核分裂したと仮定すると、約8,000トンのTNTの爆発と同じだけのエネルギーが放出される。

1.16 核融合反応では、一対の軽い原子核が結合（又は核融合）し、より重い1個の原子の原子核を作る。一例は、デュートリウム又は重水素として知られている水素同位体の核融合である。適当な条件下では、2つの重水素核が結合し、より重い元素、すなわちヘリウムを造り、その際エネルギーを放出する。核融合については、§1.69で詳しく記述する。

1.17 核融合反応は超高温の雰囲気中で引き起こすことができるので、熱核反応過程ともよばれている。反応物質のある一定量において放出される実際のエネルギーの量は、その核融合反応を起こすと、概略的にみて、TNT 26,000トンの爆発エネルギーと同量のエネルギーを放出することになる。

1.18 水素同位体の原子核間におけるある種の核融合反応過程では、高エネルギーの中性子が放出される（§1.72参照）。これらの中性子は、最も豊富に存在するウランの同位体（ウラン-238）に対しても、ウラン-235やプルトニウム-239と同様に核分裂反応を起こすことができる。したがって、天然ウランを適当な核融合反応と組合せると、エネルギー放出のために天然ウランを広範囲にわたって利用することができる。それゆえに、核分裂反応と核融合反応を組合せた装置は、爆発力をより大きくすることができます。この種の典型的な核兵器では、おおむね等量の爆発エネルギーを核分裂と核融合から生ずる。

1.19 一方エネルギーを核分裂から得る原子兵器と、他方核融合をともなう水素（又は熱核）兵器とに区別することもある。しかし、どちらの場合でも、爆発エネルギーは、核反応から生ずるのであるから、これらは、両方とも核兵器と記述することが正しい。それゆえこの本では、爆発エネルギーを生成する核反応の型にかかわりなく、核爆弾ならびに核兵器という一般的用語を使用する。

### 核爆発のエネルギー放出量

1.20 核兵器の出力は、発生する爆発エネルギー量のものさしである。これは、普通、核爆発が起った場合と同じ量のエネルギーを発生するTNT等価量をもって示す。すなわち1KTの核兵器は、1KT（又は1,000トン）のTNTが発生するエネルギーと同量のエネルギーを発生する核兵器のことである。同様に1MTの核兵

器は、100万トン（つまり1,000KT）のTNTに等価なエネルギーをもつものである。初期の核爆弾、つまり1945年に日本に投下されたものや、1946年にビキニでの実験に使用されたものは、概して20,000トン（つまり20KT）のTNT爆弾と等価のエネルギーを放出するものであった。その後、MT級のエネルギー放出量をもった、より強力な核兵器が開発されてきている。

1.21 §1.15で述べたように、1ポンドのウラン又は、プルトニウムの核分裂は、TNT8,000Tのエネルギーを出し、20KT核兵器では、2.5ポンドの核物質で核分裂を行う。しかしながら、このような核兵器に含まれるウラン、あるいはプルトニウムの実際の重量は、核分裂を行う量よりも大きい。換言すると核分裂兵器では、核物質の一部分だけが核分裂を受ける。それゆえ、その爆発の効率は、100%よりも低いと言われている。核分裂をしない物質は、爆発後残留することになる。

## 核爆発におけるエネルギー分布

1.22 核爆発と通常の（又は化学）爆発との間のもっとも重要な相違の1つは、前者の場合、相当量のエネルギーが熱線として現れることであるといわれている。この相違の根本的な理由は、核爆発で生じたエネルギーは、同じ重量の化学爆発で生じたエネルギーの数百万倍もあるということである。したがって、核爆発の場合には、温度は化学爆発の場合よりも比較にならないほどに高い。すなわち通常爆発においては数千度であるのに比べ、核爆発では、数千万度である。温度における大きな相違の結果として、爆発エネルギーの配分が全く2つの場合では異っている。

1.23 概略的に言うと、爆発エネルギーは次の3つの種類に分けられる。たとえば電子、原子および全体としての分子の運動エネルギーと、これらの粒子の内部エネルギーおよび熱線エネルギーである。熱線エネルギーの割合は、温度增加に従って急速に増加する。化学爆発で得られるあまり高くない温度では、熱線の量が比較的少量である。それゆえ、爆発の際に放出された全エネルギーは、主として運動エネルギー、および内部エネルギーとして現れる。これは、ほとんど§1.01で記述したように、爆発と衝撃波に変換される。しかし核爆発においては、超高温のため、放出

されるエネルギーのかなりの割合の部分が、熱線として放出される。熱線が起こるしくみは、§1 77で述べる。

1 24 爆発地点から一定の距離で受ける爆発エネルギーの割合は、図-1 02に示されるような型であるが、これは、核兵器の性質、出力、特に爆発の状況によって決まる。約100,000フィートの高度以下の大気圏内爆発では、爆発エネルギーのうち35～45%が、熱エネルギーとして放出される。さらに、約40,000フィートの高度では、爆発エネルギーの約50%が空気衝撃の発生に使用される。爆発する核兵器のエネルギーと反応する空気の少い比較的高い高度では、爆風を生成するエネルギーの割合は減少し、逆に熱線になる割合がしだいに増加する（§1 36）。

1 25 衝撃と熱線との間のエネルギーの正確な割合は、その爆発エネルギーの放出量、爆発高度、さらにこの章あるいは後の章で示されるように兵器の設計等と複雑に関連している。しかしながら約40,000フィート以下の高度における空中で爆発した核分裂兵器に対するおよその指針は、爆発エネルギーの35%が熱線の形で、50%が衝撃波の形で放出される。このように比較的低高度における爆発では、爆風エネルギーは、同じ全エネルギーをもつ通常の高性能爆発からの爆風エネルギーの、およそ半分である。このことは、例えば、20 K T の核分裂兵器が、40,000フィート以下の空中で爆発したならば、爆風の生成に使用されるエネルギーは、およそ10 K T のTNTにより生成されるエネルギーに等しい。

1 26 爆発高度にかかわらず、核分裂兵器の爆発エネルギーの約85%は、爆風（衝撃波）と熱線及び熱になり、残る15%は種々の核放射線として放出される。この中、5%は爆発後1分以内に発生する初期放射線となる。全核分裂エネルギーのうち最後の10%は、長期にわたって放出される残留（又は遅延）核放射線のエネルギーである。これは主として、核爆発後の核兵器残渣（又は碎片）中に存在する核分裂生成物による放射能である。全エネルギーの約半分しか核分裂から生じない熱核装置では、残留放射線は核爆発から放出されたエネルギーの単に5%にしか当らない。核は、いかなる化学反応が起こっても影響を受けないので、通常の化学爆発からは、核放射線が放出されないことに注目すべきである。

1.27 全核分裂エネルギーの約10%が、爆発後ある期間内に残留放射線の形で放出されるから、例えば、§ 1.20に述べたように核爆発のエネルギー放出量がTNT等価量によって表わされている場合には、残留放射線は含まれていない。それゆえに純粋な核分裂兵器においての爆発エネルギーは、全核分裂エネルギーの約90%であり、熱核兵器（装置）においては、平均して核分裂反応と核融合反応の全エネルギーの約95%である。

1.28 初期放射線は、主として原子核内で発生する、高エネルギーの電磁放射線である $\gamma$ （ガンマ）線と中性子線である（§ 1.73参照）。これらの放射線、特に $\gamma$ 線は、空気中で長距離走る（運動する）ことができ、また相当に厚い物質を透過することもできる。又ヒリヒリとした感じをおこすような極めて大きな線量を除いては、これらの放射線は、人間には目視することもできず又感じることもできないが、 $\gamma$ 線と中性子線は、その線源から相当な距離にあっても有害な効果を及ぼす。したがって初期放射線は、核爆発における一つの重要な特長である。

1.29 残留（遅発）核放射線は、放射能崩壊を行う過程で、 $\gamma$ 線および $\beta$ （ベータ）粒子とよばれる他の型の核放射線を放出する核分裂生成物から発生する。 $\beta$ 粒子は高速度で運動している負の電荷をもった電子で、放射性原子の核内での変化（中性子→陽子+電子）によって生成される。 $\beta$ 粒子はまた、目に見えず、 $\gamma$ 線より透過性ははるかに小さいが、 $\gamma$ 線と同じように潜在的な危険性をもっている。

1.30 放射性物質からの $\beta$ 粒子や $\gamma$ 線、換言すると核分裂生成物のような放射性核種からの自発（然）的放射は、徐々に起こる現象である。この自発（然）放射は、ある一定期間以上にわたって継続し、その発生率は放射性物質の性質と存在する量によって定まる。放射性物質の量と放射線の放出の割合は、連続的な放射性崩壊のために一定の割合で減少する。このことは、主として核分裂生成物から発生する残留放射線が、爆発直後に最も強く、時間の経過とともに減ってゆくことを意味している。

### 核爆発の型式

1.31 衝撃波・爆風・熱線および核放射線の効果は勿論のこと、そのほか核爆発

に関連し直後に起こる諸現象は、爆発点と地球表面との相対的な位置によっても変化する。説明の都合上爆発を次の5つの型に分類する。もっとも実際の場合には、これらの型の変型や中間的な型の状況が起り得る。すなわち、(1)空中爆発、(2)高空爆発、(3)水中爆発、(4)地下爆発、(5)地表面爆発である。

1.32 核爆発が、およそ100,000フィート以下の高度で起こった場合、核兵器の残渣は、周囲の媒体から物質を、ただちにとり入れて混ぜ合い、“火の玉”とよばれるほぼ球状の、極度に高温の光り輝く塊りを形成する。空中爆発とは、100,000フィート以下の高度の空中で爆発し、かつ火の玉（大ざっぱに言って、その後の段階で最大の輝きになる所）が、地表面に触れない場合をいう。たとえば、1 M T核兵器の爆発の場合、火の玉は成長して、最大輝面の距離すなわち、火の玉の直径は、5,800フィート（1.1マイル）にもなる。このことは、この例から空中爆発とよばれるためには、爆発は地表面上少なくとも、2,850フィート地上で起こらなければならないことを意味している。

1.33 空中爆発で生ずる諸現象の定量的な面は、そのエネルギー威力によるが、その一般的な現象は、総ての場合においてほとんど同じである。衝撃エネルギーのはとんどは、爆風として現われるが、一部は地表面にも伝達される。熱線は、空気中相当の距離を進み、晴れた日には1 M Tの爆発点から12マイルも遠く離れた所で、露出した皮ふに中程度の火傷を起こすに十分な強さがある。空中爆発のエネルギー威力が大きくなると、もちろんエネルギー威力に応じこの効果距離も長くなる。熱線は、普通の不透明な物質によって、そのほとんどを阻止しうるから、建物や衣類は、人体を防護しうる物質と見なしうる。

1.34 8章にみられるように、エネルギーを吸収することによって生じる物質との相互作用については、 $\gamma$ 線と中性子線とでは、まったく異なる。したがって、これら二種の放射線を、もっとも効果的に阻止するには、それぞれ異なった物質を必要とし、例えば、鉄やバリウムのような重い元素を含んだ特殊なコンクリートが、 $\gamma$ 線と中性子線の強度を同時に減少させるための、かなり現実的なものとして用いられる。1 M T核兵器の空中爆発点から1マイルの距離で、人体が初期放

射線の影響から比較的安全であるためには、約4フィートの厚さのコンクリートが必要である。しかしながら、この距離では、爆風の効果が極めて大きいので、特別に設計された耐爆風構築物中でのみ残存できるであろう。

**1.35** 中程度の高さの、あるいは高空での空中爆発の場合では、核爆発後に残留する核分裂生成分が大気中に拡散する。これらの生成物から生ずる残留放射線は、その直後では地上においては、余り重要ではないであろう。他方、もし爆発が地表面近くで起こるならば、核分裂生成物は、土の粒子と融着し、その一部は、爆発点に近い地表面に間もなく落下する。この塵や破片は、放射性物質で汚染されており、生体組織に対して危険を及ぼす可能性がある。

**1.36** 高空爆発は、100,000フィート以上の高度で起こる爆発として定義される。この高度以上では、空気密度が低いので、核兵器エネルギーと周囲の物質との相互作用は、それより低い高度での相互作用とは著しく異なっており、また高度とともに変化する。比較的空気密度が低いことが、高空爆発における火の玉の特性を、空中爆発におけるそれと異なったものにしている。たとえば、爆風や衝撃波に変えられる核分裂エネルギーの割合を少なくし、高度の増加とともに減少させる。また高空爆発で放出される熱エネルギーに影響を与える二つの要因がある。その一つは、空気密度が低いため衝撃波は余り急激に形成されないが、低空では爆風の生成に費されたであろうエネルギーを、熱として放出する。二つ目は、空気密度が低いため、低空におけるよりも遙かに遠くに爆発エネルギーを伝ばんすることである。このエネルギーのいく分かは、単に火の玉から隔たった空気をあたため得るが、短時間内に放出されるエネルギーには寄与しない（§1.79参照）。一般に、これら最初の要因は、100,000～140,000フィートの間で起こり、これより低い高度におけるよりも、爆発エネルギーが、熱線として放出される割合は大きくなる。140,000フィート以上の爆発に対しては、二つ目の要因がより重要なってくる。そして爆発的に熱線として現われるエネルギーの分布は、小さくなつゆく。

**1.37** 核放射線として核兵器から放出される爆発エネルギーの分布は、爆発の高さ

には左右されない。しかし距離ごとにうける $\gamma$ 線と中性子との間のエネルギー分布は、低空において、空気中の窒素原子と中性子の相互作用の結果によって生ずるので $\gamma$ 線の割合が、変化する。さらに、爆発点からの距離の増加にともなう初期放射線の減衰は、放射線が通り抜ける空気の全量によって決まる。このことは、一定の爆発エネルギーとすれば、地表面上で同一斜距離ならば、中程度の高さの空中爆発よりも、高空爆発の方がより多くの初期放射線を受けることを意味している。いづれの場合でも、核分裂生成物や他の兵器残渣からの残留放射能は、地表では有意なものではない（§ 1.35参照）。

**1.38 高空爆発からの初期放射線と残留放射線は、ともに、大気の構成物質と相互作用して、その原子や分子から電子を放出する。電子は、負の電荷をもつてゐるので、原子あるいは分子の残りの部分は、正の電荷をもつことになる。すなわち、正（陽）イオンである。この過程は電離といふことばで表わされている。そして、分離した電子と陽イオンの一対はイオン対とよばれている。高空における大量の電子とイオンの存在は、無線レーダ信号の伝搬効果を著しく低下させる（第10章参照）。**

高空爆発においては、空気を $\gamma$ 線が電離することによって生じる自由電子がまた地磁気と相互作用し、爆発点下面の広地域に展開する無防護な電気又は電子機器に損傷を与える強力な電磁界を作る。この現象は、電磁パルス（EMP）とよばれて、第11章で詳しく述べられている。EMPは又、地表面爆発や低空爆発においても生成されるが、影響は爆発地点周辺のごく小さな地域にかぎられる。

**1.39 爆発中心が地表面下あるいは、水面下にあるような条件のもとで爆発が起こった場合、その状況は、それぞれ地下（表面）爆発または水中爆発として記述されている。これら2つのタイプでの爆発効果は部分的に似ているので、ここでは一括して地表面下爆発と考える。地表面下爆発においては、爆発の衝撃エネルギーの大部分が、地下又は、水中での衝撃波として現われる。しかし爆発の深度が浅い場合は、エネルギーの一部分は、地表面に漏れ出て爆風をつくる。熱線および初期放射線の多くは、爆発点から短かい距離範囲内で吸収される。吸収された放**

射線のエネルギーは、単に、大地や水の塊りを熱することに寄与するだけである。爆発の深さによっては、いくらかの熱や核放射線が空中へ漏れ出てくるが、その強度は、一般的に空中爆発の場合よりも弱い。しかしながら、爆発点付近の大量の土や水が放射性核分裂生成物によって汚染されるので、残留核放射線が、かなり重要なものとなってくる。

**1.40 地表面爆発**というのは、実際に地上や水上の表面で起こるもの、又は、それらのわずか上空で起こるもの、いずれかであると見なされている。もし地表面から上方への距離が短ければ、諸現象は、表面上で起こる爆発に関するものと本質的には同じものである。爆発の高さが増大し、火の玉（爆発の過程でもっとも光輝な時の）が、もはや、地表面及び水面に接觸しなくなった時、これを遷移領域といい、この領域では、火の玉の様相が、真の地表面爆発の場合と、空中爆発の場合との中間の様相を呈する。地表面爆発において、爆風と、地面又は水中の衝撃は、爆発のエネルギーと爆発高度によって決まり、種々の割合に生成される。

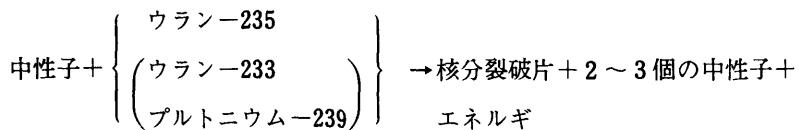
**1.41 爆発の5つの形態**について、明確に区別されているように考えられてきているが、実際には、それらの間には、はっきりした限界線があるわけではない。爆発点の高さが、減少するにしたがって、高空爆発が空中爆発になり、空中爆発が地表面爆発になることは明白である。同様に、地表面爆発でも火の玉の一部が、実際に地表面又は水面を打ち破る現象のあるときは、浅い深さでの地表面下爆発となる。それにもかかわらず、前項で定義された5つの一般的な型に分けるのは、後の章でわかるように説明上都合が良いからである。

## 第2節 核爆発の科学的基礎

### 核分裂エネルギー

**1.42 中性子によるウラン（又はプルトニウム）原子核の核分裂**についての重要な点は、多量のエネルギーを放出することの他に、その反応過程には、2個又はそ

れ以上の中性子が同時に放出されるということである。すなわち、



このようにして自由になった中性子は、更に次のウラン（又はプルトニウム）原子核の核分裂を引き起こすことができる。このように原理的には、1個の中性子が核分裂の連鎖反応を引き起こし、非常に速い速度で、多くの核を核分裂させ、エネルギーを放出させる。

**1.43** 与えられた核分裂性核種の原子核を、2つの核分裂破片に完全に分割する方法はいろいろあるが、1つの核分裂当たり解放されるエネルギーの全量は大して変わらない。このエネルギーの平均値は、大体  $200 \text{ MeV}$  である。 $100 \text{ 万電子ボルト}$ （又は  $1 \text{ MeV}$ ）単位は、核反応で解放されたエネルギーを表示するのに便利である。それは、 $1.6 \times 10^{-6} \text{ エルグ}$  又は  $1.6 \times 10^{-13} \text{ ジュール}$  に相当する。このエネルギーが、核分裂破片と核分裂にともなういろいろな放射線に配分される態様は、表-1.43 のとおりである。

表-1.43 核分裂エネルギーの分布

	MeV
核分裂破片の運動エネルギー	$165 \pm 5$
即時 $\gamma$ 線エネルギー	$7 \pm 1$
核分裂中性子の運動エネルギー	$5 \pm 0.5$
核分裂生成物からの $\beta$ 粒子	$7 \pm 1$
核分裂生成物からの $\gamma$ 線	$6 \pm 1$
核分裂生成物からの中性微子	$10$
<hr/>	
核分裂当たりの全エネルギー	$200 \pm 6$

1.44 この表の諸結果は、ウラン-233、ウラン-235又はプルトニウム-239のいずれにも適用できるものと思われる。目につく程の崩壊もなく貯蔵できるぐらいかなり安定で、あらゆるエネルギーの中性子によって核分裂を受けることができるのは、これらよく知られた3種の物質だけである。したがって、それらは又、核分裂連鎖反応を持続するのに利用できるただ3つの物質でもある。ウラン-238は天然ウランの中で最も豊富な同位元素である（§1.14）が、これとトリウム-232は、高エネルギーの中性子だけから核分裂をうけ、これより低いエネルギーの中性子では核分裂を起こさない。この理由のために、これら2つの物質は、連鎖反応を持続できないのである。しかし、これらの元素に核分裂が起こるときは、エネルギーの配分は、表に示されたものと全く同様である。

1.45 核爆発で直ちに利用される核分裂エネルギーは、その一部分にすぎない。このエネルギーは、核分裂破片の運動エネルギーと即時 $\gamma$ 線及び即時中性子のエネルギーの大部分を含むが、核分裂生成物の崩壊エネルギーはごく小量しか含まない。この他に中性子が核兵器破片による捕獲反応の際に、解放されるエネルギーもいくらかある。それで結局、核分裂の約180MeVのエネルギーが1回の核分裂当たり利用されることが、通常認められている。ウラン-235の235g（又はプルトニウム-239の239g）中には、 $6.02 \times 10^{23}$ 個の原子核があるから、既知の換算係数（§1.43参照）を使って、TNT1KTのエネルギー等価量に対して、表-1.45の結果が得られている。この計算は、これと同じ量のTNTの爆発の際に解放されるエネルギーとして $10^{12}$ カロリーという数値が基礎となっている。この数値は、多少任意性はあるが、一般に認められている。

表-1.45 TNT 1 K T のエネルギー等価量

0.057 kg (57 g 又は 2 オンス) の核分裂可能物質の完全な核分裂
$1.45 \times 10^{28}$ 個の原子核の核分裂
$10^{12}$ カロリー
$2.6 \times 10^{25}$ MeV
$4.18 \times 10^{19}$ エルグ ( $4.18 \times 10^{12}$ ジュール)
$1.16 \times 10^6$ Kw/時
$3.97 \times 10^9$ BTU

### 核分裂連鎖反応のための臨界量

1.46 核分裂をするどの原子核からも、2～3個の中性子が生成されるが、中性子の全部が全部とも、核分裂を引きおこすのに利用されるわけではない。というのは、中性子のうちいくらかは、系外に逃げ出し、他のいくらかの中性子は、非核分裂反応で除去されるからである。エネルギーを連鎖的に解放して、核分裂の連鎖反応を維持するためには、少なくとも1個の核分裂中性子が、さらに核分裂をおこさせなければならない。もし、中性子の損失速度が、核分裂によって中性子を作る速度よりも速いならば、連鎖反応は維持できない。この場合、いくらかのエネルギーが生成されるが、その量は十分に大きくなり、その解放速度は効果的な爆発を起こさせるほど速くはない。それゆえ、核爆発を達成させるには、中性子の損失が最小の条件を確立することが必要である。特に核分裂をしている物質から逃げる中性子を考えることが重要である。

1.47 中性子の逃げは、ウラン（又はプルトニウム）物質の表面で起こる。したがって、逃げによる損失速度は表面積によって決まる。一方、より多くの中性子を作り出す核分裂反応過程は、物質の全体を通じて起こるものであり、それゆえ、その速度はその質量に依存している。核分裂性物質の質量を増加することによっ

て、一定密度であれば、表面積の質量に対する比は減少する。その結果、核分裂によって作られる中性子に対し、逃げ出す中性子の相対的損失は減少する。又同じ結果が、質量は一定にして体積をより小さく（高密度）にすることによって達成される。なぜなら表面積が減少するからである。

**1.48** 前節の関係は、図-1.48を参照すれば理解されるであろう。即ち図の2つの球は核分裂性物質を表わし、一方は他方より大きい。各球内の小円は、中性子によって核分裂が始まった点を表わしている。図-1.48は、核分裂の各作用ごとに3個の中性子が放出されること、言いかえれば、1個の中性子が捕獲されて3個の中性子が追い出されることを仮定している。又矢印の先で中性子がその系から除去されることを示している。したがって、球内にある矢印の先は、核分裂が起って余分に中性子が発生することを意味するのに対し、球外の矢印の先は、中性子の損失を意味する。大きい球より小さい球の方がずっと多くの割合で中性子が失なわれていることが図-1.48から明白である。

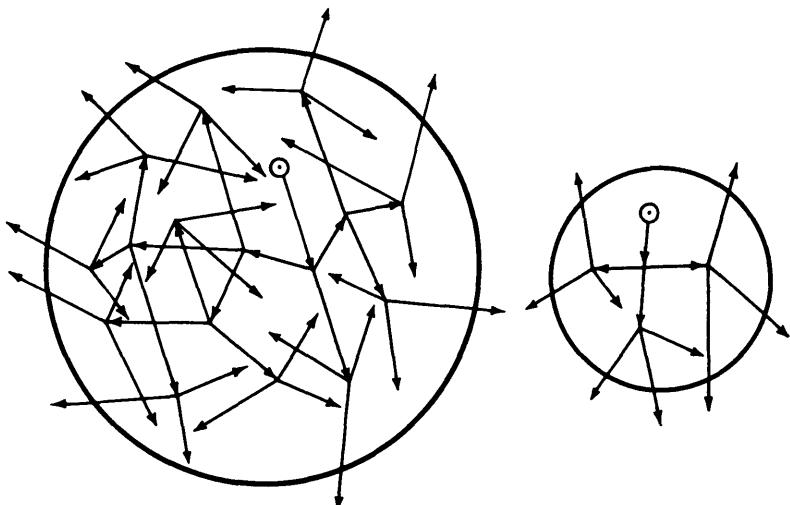


図-1.48 中性子の損耗率低下における核分裂性物質の質量増加の効果

**1.49** もしウラン（又はプルトニウム）の量が少ないならば、すなわち、もし表面積の体積に対する比が大きいならば、逃げ出しによる中性子の損失の割合が非常に大きくなるので、核分裂連鎖反応の伝ばん、及び、それによる爆発の発生が不可能になる。このような物質量を Subcritical とよんでいる。しかし、ウラン（又はプルトニウム）のかたまりが増大し（又は、体積を圧縮して減少させ）、そのための中性子の相対的損失が減少するにつれて、連鎖反応が自己持続できるような点に達する。これが、核分裂性物質の臨界質量とよばれるものである。

**1.50** 核爆発が起こるためには、核兵器が、その時の周囲条件で決まる臨界量を超える十分な量のウラン（又はプルトニウム）同位元素を含んでいなければならない。実際には、この臨界量は、特に核分裂性物質の形・組成・密度（又は圧縮度）および非核分裂反応において、中性子を除去しうる不純物の存在量に依存する。核分裂性物質を適当な中性子の反射体でとりかこむことによって、逃げ出しによる中性子の損失をへらすことができ、したがって臨界量を少なくすることができます。さらに、高エネルギーの中性子の良好な反射体となる高密度の元素は、慣性が大きいので、核分裂物質の膨張が遅くなるその時の反射体の作用は、爆破作業において良く知られているタンパーの作用のようなものである。タンパーは中性子を反射する性質及び大きな慣性をもっているので、核兵器の中の核分裂性物質より効果的に使用することができる。

## 核兵器内での臨界量の達成

**1.51** 大気中には浮遊中性子が存在しており、又中性子をいろいろの方法で発生させることもできるので、臨界量を超えるウラン（又はプルトニウム）同位元素は、融けてしまうおそれもあり、又爆発の可能性もある。それゆえ核兵器は、爆発前には一定の条件での臨界量と同程度の大きさの核分裂性物質のかたまりにならないようにしなければならない。又爆発を起こさせるためには、核分裂性物質を極めて短時間に超臨界、すなわち、臨界量より大きくして、溶融等の未爆発的形状変化を起こさせないようにしなければならない。

**1.52** 核爆発を起こさせるためには、すなわち、臨界未満の体系を速やかに超臨

界に変えるためには、一般的に2つの方法がある。第1の方法は、臨界質量以下の2個又はそれ以上の核分裂性物質のかたまりを臨界量を超える1個のかたまりに、非常な超速度で結合することである(図-1.52参照)。この方法は、ある種の砲身のような装置の中で行われるものである。すなわち、その装置の中で、高性能爆薬を用いて、砲尾端部から臨界未満の核分裂性物質の1つの弾片を、砲頭部の端に保持したもう1つの臨界未満の弾片に衝突させるのである。

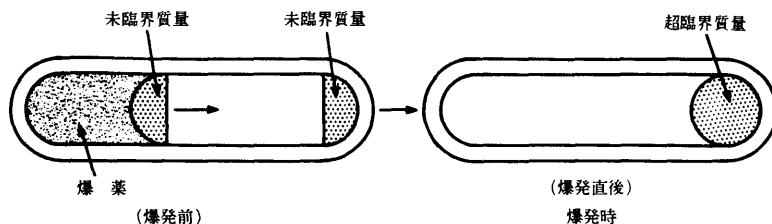


図-1.52 ガンタイプ核爆弾の原理

1.53 第2の方法は、臨界量未満のウラン(又はプルトニウム)が強く圧縮されるとき、それが臨界又は超臨界になり得るという事実を利用する。この圧縮は普通の高性能爆薬を特別に加工して、球状に配置することによって達成される。この球状に配置された爆薬の中央の穴の中に臨界量未満の球状の核分裂性物質を置く。外面に取りつけた雷管によって、高性能爆薬が爆発すると、内方爆压波が作られる。この波は、球面の多数の点でおこり、この波が、ウラン(又はプルトニウム)の球面に達すると、ウラン(又はプルトニウム)を圧縮し、臨界超過を起こす(図-1.53)。これに適当な線源から中性子を導入すると連鎖反応が起こり、爆発をひき起こす。

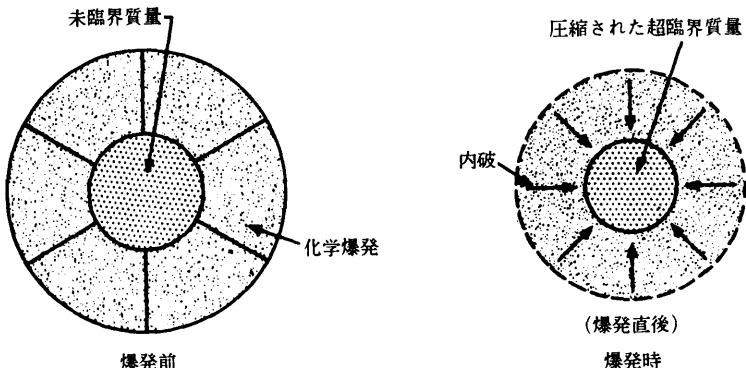


図-1.53 内破型核爆弾の原理

### 核分裂性爆発の時程

1.54 核分裂反応の連鎖的な進行状況を一連の“世代”として取扱うことによって、核分裂爆発の際に、放出されるエネルギーの放出率について、興味ある洞察が得られる。ある一定数の中性子が初めてに在って、これが核分裂性の原子核に捕獲されると考えよう。その時、核分裂反応過程で他の中性子が解放される。これらの中性子は核分裂性核により次々と捕獲され、それより多い中性子を生成し、そしてこの過程が繰返えされていく。核分裂連鎖反応の各々の段階は、一世代と見なされ、一世代時は連続的な世代の間の平均的時間間隔である。1個の原子核の実際の核分裂に必要な時間は、きわめて短く、大部分の中性子はすみやかに放出される。したがって1世代時は、中性子の解放と核分裂性核によりひき続き起こる捕獲との間の平均の経過時間に本質的には等しい。この時間は、とりわけ、中性子のエネルギー(又はスピード)に依存し、中性子の大部分が通常“高速中性子”とよばれるかなり高いエネルギーをもつと、一世代時は、1秒の約1億分の1( $10^{-8}$ )すなわち、0.01ミクロン秒である。

1.55、核分裂によって作られた全ての中性子が、逃げ出しや、非核分裂反応による除去のため、核分裂連鎖反応の維持に利用されることは前に述べた。そこで、1個の原子核が、1個の中性子を捕獲し、核分裂をさせたとき、 $f$ 個の中性子が解放されると仮定する。又、各核分裂で、いろいろの経過で損失する中性

子の平均個数を  $\ell$  とすると、核分裂連鎖反応を続けるために利用される中性子は  $(f - \ell)$  個となるであろう。もし  $N$  個の中性子が、ある瞬間に存在するとすると核分裂性核により捕獲される結果として、 $N(f - \ell) - N$  又は  $N(f - \ell - 1)$  個となる。便宜上、1核分裂当たりの中性子の増加を表わしている量  $(f - \ell - 1)$  を  $x$  とすると、もし  $g$  が1世代時であるならば、その時中性子の数が増加する割合は、中性子増加率  $(dN/dt) = Nx/g$  によって与えられる。この方程式の解は  $N = N_0 e^{xt/g}$  である。ここで  $N_0$  は最初にある中性子の数、 $N$  は時間  $t$  後における中性子の数である。分数  $t/g$  は時間  $t$  の間に経過した世代の数であり、もし  $t/g$  を  $n$  で表わすならば、 $N$  は次のように表わされる。

$$N = N_0 e^{xn} \quad (1.55.1)$$

**1.56** もし  $x$  の値が既知ならば、式 (1.55.1) は核分裂連鎖反応における、任意に推定された数の世代後の中性子の合計数か、あるいは、特定の中性子数に達するまでに必要な世代数のいずれか一方を計算するのに用いることができる。ウラン-235に対しては、 $f$  は約 2.5、 $\ell$  はおおざっぱに 0.5 にとってよい。それゆえ  $(f - \ell - 1)$  に等しい  $x$  は 1 に近い。したがって式 (1.55.1) は、次のようにかくことができる。

$$N \approx N_0 e^n \text{ 又は } N \approx N_0 10^{n/2.3} \quad (1.56.1)$$

**1.57** 表-1.45のデータによると、0.1KTに相当するエネルギーを生成するには、 $1.45 \times 10^2$  回の核分裂を必要とし、したがって、同数の中性子が必要となる。もし 1 個の中性子により核分裂連鎖反応が始まられるならば、つまり  $N_0$  が 1 ならば、式 (1.56.1) から必要な数の中性子を生成するためには、近似的に 51 世代かかることになる。同様にして、100KTのエネルギーを解放するためには、 $1.45 \times 10^5$  個の中性子が必要となり、この数は約 58 世代で達成されることになる。それゆえ 100KT 核分裂爆発のエネルギーのうち 99.9% が最後の 7 世代の間、すなわち、約 0.07 マイクロ秒の期間中に解放されることがわかる。このように核分裂エネルギーのほとんどが、ごく短時間で解放されるわけで、任意の核分裂爆発エネルギーについても同じ結果が得られる。

1.58 核分裂連鎖反応の開始後、50を少し超えた世代、すなわち約 $\frac{1}{2}$ マイクロ秒でエネルギーが多量に解放されるので、極めて高い温度（10<sup>11</sup>カロリー）に達するであろう。その結果、タンパ（§ 1.50）と核兵器ケースの抑制効果にもかかわらず、核分裂性物質のかたまりが急激に膨張はじめる。膨張はじめる時刻は爆発時とよばれる。膨張することにより中性子はより容易に逃げられるから、臨界量未満となり、自己持続的連鎖反応は止まってしまう。したがって核分裂性物質のかなりの部分が、未反応のままのこる。又、中性子捕獲の結果として、若干の核分裂は続くが、この段階で解放されたエネルギーの量は比較的少ない。

1.59 前述した論議を要約すると、核分裂反応過程には中性子の同時放出がともなって起こるので、多量のエネルギーの急速な解放をともなう自己持続的な連鎖反応をおこすことは、原理的には可能である。その結果として、数ポンドの核分裂性物質は、1秒よりずっと短い時間に、TNTの数千トンの爆発に相当する大量のエネルギーを解放することができる。これが、核分裂兵器の基礎原理である。

### 核分裂生成物

1.60 ウラン又はプルトニウムの原子核が中性子を捕獲して核分裂を受けるとき、多くの異なる核分裂片、すなわち初期生成核が作られる。そして核分裂が起こるときに原子核が完全に分割できる40種ほどの異なる過程があるので、約80種の異なる核分裂破片が生成される。核分裂片の原子核の性質及びそれらの特性には、場合によりいくらか差異があり、これらは核分裂を受ける特定の物質及び核分裂を引き起こす中性子のエネルギーに依存する。例えば、ウラン-238がある核融合反応（§ 1.72）で解放された非常に高いエネルギーをもつ中性子を捕獲した結果として核分裂を起こすとき、その生成物は普通の核分裂や中性子によるウラン-238から作られる生成物とは、特に生成物の相対量において、いく分異なっている。

1.61 約80種の核分裂生成物の大部分は、その起源の如何にかかわらず、よく知られた軽い元素の放射性原子核（放射性同位元素）である。この放射能は通常負電荷を負ひたβ粒子（§ 1.29）の放出によって明らかとなる。これは、いつもそ

うであるとは限らないが、しばしば、 $\gamma$ 線をともなって放出され、余分のエネルギーを運び去るのに役立っている。2～3の特別な場合には、ただ $\gamma$ 線だけが放出される。

**1.62 放射性物質の原子核は、 $\beta$ 粒子を放出した結果として、時には“崩壊生成物”とよばれる他の元素の原子核に変えられる。**核分裂破片の場合には、通常この崩壊生成物も放射性であって、 $\beta$ 粒子及び $\gamma$ 線を放出して順次崩壊を続ける。おしなべていうと、安定な（非放射性）原子核が作られるまでには、どの核分裂破片をとってみても、ほぼ3つの放射能の段階がある。核分裂が起こるには、多数の異なる過程があって崩壊の段階がいくつも含まれるので、核分裂生成物の混合物は、非常に複雑なものになる。核分裂生成物のなかで、亜鉛からテルビウムに至るまでの36種の軽い元素のうち約300種が、いままでに確認されている。

**1.63 放射性崩壊の割合、つまり $\beta$ 粒子及び $\gamma$ 線を放射する割合は、普通その中に含まれる特定の同位元素の半減期（§1.30）で表わされる。**この半減期は、ある一定量の特定の放射性同位元素の放射能が、始めの値の $\frac{1}{2}$ に減少（減すい）するに要する時間として定義される。どの放射性核種も、その状態や量には無関係にそれぞれ決った半減期をもっている。核分裂生成物の半減期は、1秒の何分の1から、しばしば100万年というものまであることがわかっている。

**1.64 核分裂生成物に含まれるどの放射性同位元素も、それぞれ決った半減期をもっていることは知られているが、核爆発後に作られた混合物は大変複雑であるので、全体として半減期により減衰を表わすことはできそうもない。**それにもかかわらず、従来核分裂生成物からの全放射線強度の減少が、かなり簡単な公式によって近似的に計算できることがわかっている。この公式は、第9章で説明されるが、この公式にもとづく核分裂生成物の減衰の割合について的一般的特性は、図-1.64から明らかである。この図では、核爆発1時間後の核分裂生成物からの残留放射能を100とし、その後の時間的減少を曲線で示してある。それみると、爆発7時間後における核分裂生成物の放射能は、爆発1時間後におけるその量の $\frac{1}{10}$ （10%）に減ずることがわかる。この放射能は、ほぼ2日以内に、1時間値の

1 %に減少する。

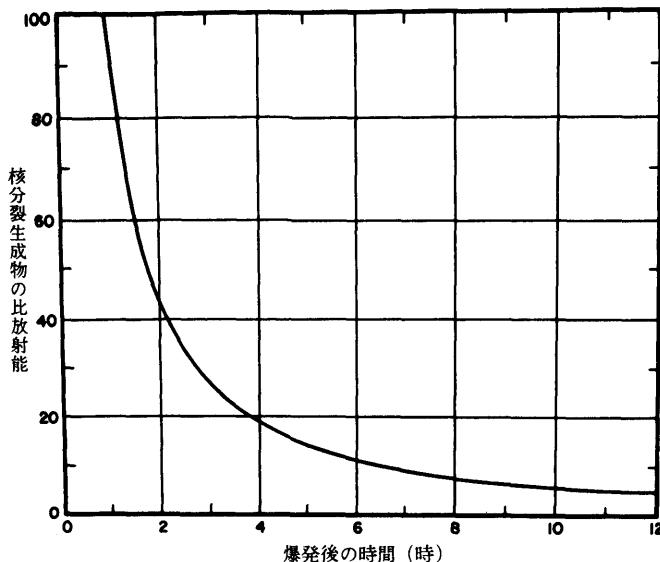


図-1.64 核爆発後の核分裂生成物の減すい曲線  
(爆発後1時間の放射能を100とした場合)

1.65 核分裂生成物による $\beta$ 粒子および $\gamma$ 線の放射能だけでなく、ここで述べておかねばならない別の種類の残留放射能がある。それは、核分裂性物質の放射能で、その一部は、§1.58で述べたように爆発後に残る核分裂性のウランもプルトニウムも共に放射性物質であり、それらの放射能は、 $\alpha$ (アルファ)粒子とよばれるものを放出する。 $\alpha$ 粒子は、原子核から放出されるので、核放射線の一種であるが、核分裂生成物から発生する $\beta$ 粒子に比べてずっと重く、また正電荷を負びている点が違っている。 $\alpha$ 粒子は、実際には、ヘリウム原子の原子核と同一のものである。

1.66  $\alpha$ 粒子は、質量や電荷が比較的大きいので同じエネルギーの $\beta$ 粒子や $\gamma$ 線よりも透過性がずっと弱い。そのため、放射線源から出た $\alpha$ 粒子で、とまるまでに1～3インチ以上の空気層を進行できるものはごく少数である。これらの粒子が、無傷の皮ふを透過するかどうかは疑わしいし、着物を透過しないことも確か

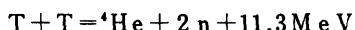
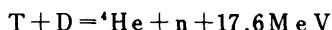
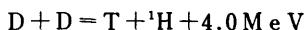
である。それゆえ、核兵器残渣中のウラン（プルトニウム）が、体外にあれば危険ではない。しかし、プルトニウムが皮ふ擦傷や特に呼吸を通じて体内に入った場合は、その影響は大きい。

### 核融合（熱線）反応

**1.67** 太陽及び星におけるエネルギーの生成は疑いもなく、いろいろの軽い（低原子量の）原子核を含んだ核融合反応によるものである。荷電粒子加速器によって実験室で行われる諸実験から、水素の同位元素の核融合が可能であるとの結論が出されている。この水素の元素には3つの同位元素があることが知られており、それらの原子核はそれぞれ1・2・3の質量数を持っている。これらは通常、水素 ( $^1\text{H}$ )、重水素 ( $^2\text{H}$ 又はD)、三重水素 ( $^3\text{H}$ 又はT)とよばれる。どの原子核も単位正電荷を負いでいるが、それらの原子核は、1個の陽子を含むが、中性子の数が異なっている。もっとも軽い ( $^1\text{H}$ ) 原子核（又は陽子）は、中性子を含んでいない。重水素 (D) の原子核は1個の、三重水素 (T) の原子核は2個の中性子を含んでいる。

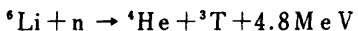
**1.68** 3種の水素同位元素の原子核の間には、数種の異なった核融合反応が観測されており、それらの原子核の中には、2つの同種類の原子核もあれば、2個の異種の原子核もある。これらの反応が認められる程度に起こるためにには、それらの原子核のエネルギーが高くなければならない。このエネルギーを得る一つの方法は、温度を非常に高温に上げることである。これらの状況における、核融合反応過程は、§1.17で述べたように熱核反応とよばれる。

**1.69** 4つの熱核融合反応がエネルギーの生成について関心を深めている。というのは、熱核反応が、実現可能な温度で十分急速に起こることが期待されるからである。すなわち、



ここで<sup>4</sup>Heは、ヘリウムの化学記号で、n（質量=1）は中性子を表わす。各各の場合に解放されたエネルギーは、百万電子ボルト（MeV）単位で与えられる。これら反応の最初の2つは、核爆発とともに温度（数千万度）で、ほぼ等しい可能性で起こる。一方3番目の反応は、非常に高い可能性で起こるが、4番目の反応の起こる可能性は低い。このように、上に述べた3番目までの反応の結果として、質量单位で10の全質量を持った5つの重水素の原子核が、核融合において24.8 MeVを解放する。一方、核分裂反応過程では、例えば、質量单位235のウラン-235は、約200 MeVのエネルギーを生成する（§1.43）。それゆえ、同じ重さで考えると、重水素原子核の核融合は、ウランやプルトニウムの核分裂のエネルギーのほぼ3倍を生成することになる。

**1.70** 他にトリチウムを生成する次のような熱核反応がある。



ここで、<sup>6</sup>Liは、天然に存在するリチウムの約7.4%を占めるリチウム-6を表わしている。又、他の反応がリチウム-6や、さらに豊富に存在するリチウム-7や、兵器中で生成される種々の粒子について起こりうる。しかし、上に示した反応は、次の2つの理由で、もっとも興味あるものの反応である。すなわち、(1)この反応は、発生の可能性が高い。(2)もしリチウムが、LiDという化合物の形で兵器中に含まれていたならば、反応で形成されるリチウムは、重水素と相互作用する可能性が高くなる。このように大量のエネルギーが、§1.69の3番目の反応で放出され、さらに中性子が生成されて<sup>6</sup>Liと反応する。

**1.71** 核融合反応を起こさせるには、数千万度程度の温度が必要である。地上でそのような温度を作りうる唯一の実用的な方法は、核分裂爆発を用いることである。従って、核分裂装置と重水素又は三重水素（あるいはその混合物）とを結合することにより、上に示した熱核融合反応のうちの一つか、又はそれより多くのものを起こすことができるはずである。もし、エネルギー放出をともなうこれらの反応が水素の同位元素（又はいくつかの同位元素）の全体に急速に拡がりうるならば、熱核反応は実現することになる。

1.72 § 1.66で与えた3つの核融合反応で、中性子が生成されることがわかる。中性子は、質量が小さいので反応エネルギーの大部分を運びさる。したがって、中性子はウラン-238の原子核の核分裂を起こすのに十分なエネルギーを持つ。最初に述べたように、この反応過程は高エネルギーの中性子を必要とする。それゆえ、核融合兵器を普通のウランのジュウタンでとりかこむことによって、熱核中性子を利用することができる。そのとき、高エネルギーの中性子は、ウラン-238の原子核に捕獲される。ウラン-238の原子核は、核分裂を起こすことにより、爆発の全エネルギー放出量及び核分裂生成物から生ずる残留放射線にも寄与する。一般に、熱核兵器の爆発で解放されるエネルギーは、個々の場合多少異なるであろうが、おざっぱに言って、核分裂及び核融合の反応過程から同等量発生する。

## 熱 線

1.73 核爆発で観測される現象及び人体や物質におよぼす影響は、熱線とその周囲のものとの相互作用に大きく影響される。それゆえ、これらのふく射線の性質をいくらかでもより深く考察することが望ましい。熱線は、電磁ふく射線として知られている広義のものに属する。熱線は、電荷及びそれにともなう磁場との振動により生ずる波動の一種で、通常の可視光線は電磁ふく射線のうち最もよく知られた種類で、このようなふく射線は、どれも皆同じ速度、すなわち、毎秒186,000マイルの速度で空気中（あるいはもっと正確にいえば、真空中）を進む。電磁ふく射線とは、非常に短い波長（つまり、非常に高い周波数）では、 $\gamma$ 線（§ 1.28）とX線、中間では、目にみえない紫外線から可視光線の領域まで、比較的長い波長（つまり低い周波数）では、レーダ波及び無線用電波にまで及ぶ範囲のものをいう。

1.74 これら種々の電磁ふく射線によって占められているおおよその波長と周波数の領域は、図-1.74に示されている。センチメートルで表わされた波長 $\lambda$ と1秒間当たりのヘルツで表わした周波数、すなわち波の数（あるいはサイクル）Vとは、 $\lambda V = C$ の関係がある。ここで、Cは光速度 $3.00 \times 10^{10} \text{ cm/sec}$ である。プランクの理論によれば、光子によって運ばれるエネルギーに相当する量子（又は単位）

のエネルギーは、

$$E(\text{エルグ}) = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.99 \times 10^{-8}}{\lambda \text{ (cm)}} \quad (1.74.1)$$

ここで  $h$  は、普偏定数で、 $6.62 \times 10^{-27}$  エルグ/秒である。いろいろの電磁ふく射線に対するエネルギー量子の数値は、図-1.74に含まれている。その数値は、MeVすなわち百万電子ボルト、KeVすなわちキロ電子ボルト、あるいはeVすなわち電子ボルトのいずれかの単位で表わされている。これらの数値は、式(1.70.1)から次の式に書き換えることにより得られる。

$$E(\text{MeV}) = \frac{1.24 \times 10^{-19}}{\lambda \text{ (cm)}} \quad (1.70.2)$$

ふく射線のエネルギーは、図において左から右へ、つまり波長が増し、周波数が減少することがわかる。

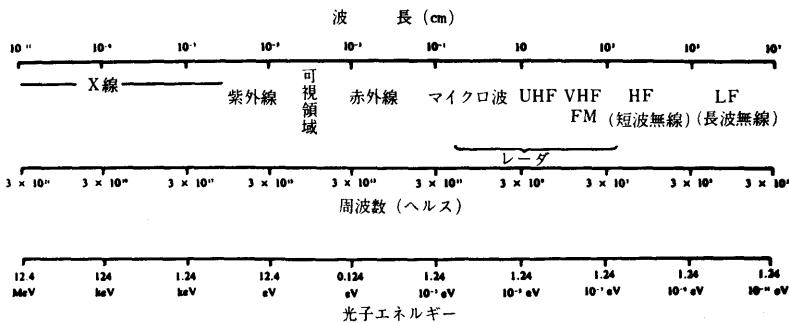


図-1.74 電磁波の波長、周波数及び光子エネルギー

1.75 温度平衡にある物質の単位体積あたりのふく射エネルギーは、 $E$ (ふく射線) =  $7.6 \times 10^{-15} T^4$  エルグ/ $\text{cm}^3$  で与えられる。ここで  $T$  は、絶対温度で表わした温度である。在來の化学爆発の温度、例えば、5,000K°におけるふく射線エネルギー密度は、物質エネルギーつまり運動エネルギーと内部エネルギー(電子・振動・回転)に対するおおざっぱな値  $10^8$  エルグ/ $\text{cm}^3$  に比べて、1 エルグ/ $\text{cm}^3$  以下の小さい値である。したがって、§ 1.23において示したように、ふく射線エネルギーは、全エネルギーのうちのごく一部分である。一方数千万度の温度に達する核爆発では、物質エネルギー密度が  $10^{14} \sim 10^{15}$  エルグ/ $\text{cm}^3$  であるのに対し、ふく射線エネルギー密度は、 $10^{16}$  エルグ/ $\text{cm}^3$  のオーダとなる。核爆発では、全エネルギーの約80%がふく射線工

エネルギーとして現われるものと考えられている。

**1.76** ふく射線エネルギー密度が温度とともに増加するだけでなく、熱線としてのエネルギー放出の速度も、また、温度とともに増加する。絶対温度で数千度の物質においては、電磁スペクトル（図-1.74）の紫外・可視・赤外領域における最大部分を占めている波長のエネルギーがゆっくりとふく射される。しかし、核爆発におけるような高い温度では、ふく射線エネルギーが非常に急速に放出されるだけでなく、エネルギーの大部分は、紫外線よりも短い波長を持つスペクトル領域にある。

**1.77** 核兵器が爆発すると、残留物質の中が急速に温度平衡に達する。そして、§1.27で記述したように、爆発後 $10^{-6}$ 秒以内に爆発エネルギーの70～80%が1次熱線として放出される。その大部分は、軟X線から成りたっている。残りのエネルギーのほとんど全ては、核兵器の破片の運動エネルギーである。第1次熱線と、周囲の破片粒子との相互作用は、爆発高度によって変るであろうし、又、ある距離での熱線と衝撃との間の分布を決定することになる。

**1.78** 核爆発が空気中で起こり、そこでの大気圧（と大気密度）が海面上における状態に近い場合は、第1次熱線における軟X線が数フィートの距離以内で完全に吸収される。放射線のうちいくらかは、それよりも低いエネルギー、例えば、紫外線領域まで低下するが、第1次熱線の大部分のエネルギーは核爆発の周囲の空気を熱するのに使われる。このようにして、火の玉が形成される。その時、そのエネルギーの一部はより低い温度での火の玉から再びふく射され、残りのエネルギーも第2章でわかるように、衝撃（又は爆風）エネルギーに変えられる。このことは、なぜ第1次熱線が全エネルギーの70～80%になるにもかかわらず、空中爆発においては、核分裂エネルギーの約35～45%のみが、熱線として受けるかということを説明している。さらに、第2次ふく射線は、比較的低い温度で放出されるので、主に比較的長い波長をもったスペクトル領域に属するものである。すなわち、第7章で記述したように、紫外・可視・赤外領域である。

**1.79** 高空爆発の場合には、空気密度が低いので、軟X線は減衰したり、吸収されるまえに長い距離飛行する。この段階では、有効なエネルギーは、空気中の原子

## HP『海軍砲術学校』公開資料

や分子の大部分が、高温にならない程の広い範囲にわたって拡がるのである。高空爆発において熱線として放出される全エネルギーは、海面により近い空中爆発におけるものよりも大きいが、その約半分は、熱せられた空気によって非常にゆっくりと再放射されるので、被害の原因としては余り重要ではない。しかし、その残りのエネルギーは低い高度の場合に比べて、非常に急速に放出される。高空爆発からも衝撃波は発生するが、同じ出力の空中爆発からの衝撃波よりも圧力増加は少ない。この様相は、第2章でより詳しく述べる。

## 參 照 文 獻

- BRODE, H. L., "Review of Nuclear Weapons Effects," *Annual Review of Nuclear Science*, 18, 153 (1968).
- 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.
- DOLAN, P. J., "Calculated Abundances and Activities of the Products of High Energy Neutron Fission of Uranium-238," Defense Atomic Support Agency, May 1959, DASA 525.
- GLASSTONE, S., "Sourcebook on Atomic Energy," D. Van Nostrand Co., Inc., Third Edition, 1967.
- HOISINGTON, D. B., "Nucleonics Fundamentals," McGraw-Hill Book Co., Inc., 1959, Chapter 14.
- LAURENCE W. L., "Men and Atoms," Simon and Schuster, Inc., 1959.
- SELDON, R. W., "An Introduction to Fission Explosions," University of California, Lawrence Radiation Laboratory, Livermore, July 1969, UCID-15554.
- SMYTH, H. DeW., "Atomic Energy for Military Purposes," Princeton University Press, 1945.
- WEAVER, L. E., P. O. STROM, and P. A. KILLEEN, "Estimated Total Chain and Independent Fission Yields for Several Neutron-Induced Fission Processes," U.S. Naval Radiological Defense Laboratory, March 1963, USNRDL-TR-633.