

# 水爆とは何か

—ブースター効果とテラー・ウラム型配置—

岡本良治／中原 純／森 茂康

〔解説〕本論文は、本誌3月号に掲載された「核分裂兵器と爆縮技術」の続編である。著者らは、単に水爆の原理を解説しただけではなく、核分裂・核融合混成兵器という新しい概念を提示し、核軍備史上の事実認識の通説に対する疑問や、中性子爆弾をふくむ小型水爆から超大威力水爆までの水爆の全スペクトルの統一的理解の可能性を提示し、また、核実験の包括的禁止の重要性を提起するなど、重要ないくつかの論点をも提示しており、これらは今後の討議をすすめる上で有用であると考え。

(編集委員会)

## 1 はじめに

水爆の物理的原理と構造は、水素の同位体などによる核融合反応を用いること<sup>1)</sup>以外には公表されておらず、現在に到るまで最高の機密の一つとして扱われている。この点、原爆の原理と構造がその爆発方式まで公表されていること<sup>2)</sup>と著しく対照的である。

しかし、最近、水爆についての新しい情報が入手できるようになった<sup>3)~6)</sup>。また慣性核融合の研究も進展してきた<sup>6)</sup>。それらによれば水爆の原理と構造についての通説、すなわち球形で引金用の原爆を埋め込んだ構造<sup>7)</sup>は原理的に無理があるように思われる。

本稿では歴史的事情を考慮しつつ水爆と呼ばれる核兵器に共通した原理と構造を分析し、核分裂・核融合混成兵器の概念を提唱し、そしていくつかの具体例を提示する。

公表された資料と公刊された文献を用いての水爆さらには核兵器など軍事技術の科学的分析は的確な判断を下すための基礎であり、科学者の社会

的責任の一つの果たし方でもある。核兵器の実態を直視すること、より深く理解することで、多くの人びとの、核軍拡競争への反対の意思がいっそう鋭くなることを、筆者らは期待する。

## 2 核分裂と核融合における協力的相互反応—ブースター効果—

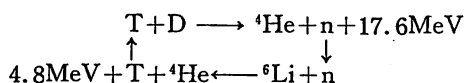
周知のように、核分裂反応により解放されるエネルギー約 180 MeV に比べて核融合反応により解放されるエネルギーはその10分の1以下である。しかし、単位質量あたりの解放エネルギーは約4倍にもなりうる。また、重要な核融合元素である重水素(D)の単位質量あたりの生産価格はウラン235の約300分の1であるらしい<sup>8)</sup>。すなわち、核融合が核分裂より効率的かつ経済的にすぐれている。

ところが核融合を起こし持続させ、促進させることは核分裂に比べてはるかに困難である。まず反応をする原子核同士が電気的反発力を及ぼし合う。そのために外部から運動エネルギーを熱の形で加えねばならない。このため核融合反応を熱核反応と呼ぶことが多い。核融合の点火に核分裂爆弾が使用されることはよく知られているとおりである。その際に二つの効果が利用される<sup>9)</sup>。すなわち核分裂爆発により発生する超高温と大きな中性子束である。後者が利用されるのは、中性子が非弾性散乱により、および中性子が誘起する核反応によって大量の熱を発生させるからである。

中性子のより重要な役割は、後述のように、リチウム6と反応して天然に存在しない三重水素(T)を生成することである。核融合の自己点火温度は、反応により生成されるエネルギーが制動

輻射などを通じて失われるエネルギーを越える最低温度として定義される。DT反応が最低で約5000万度 ( $5 \times 10^7$  K) である。さらに自己点火温度の達成に加えて、すべての核融合反応が満たすべき臨界条件(ローソン条件)がある。すなわち、核の数密度と閉じ込め時間の積が絶対温度の関数として与えられるある値より大きくなければならない。

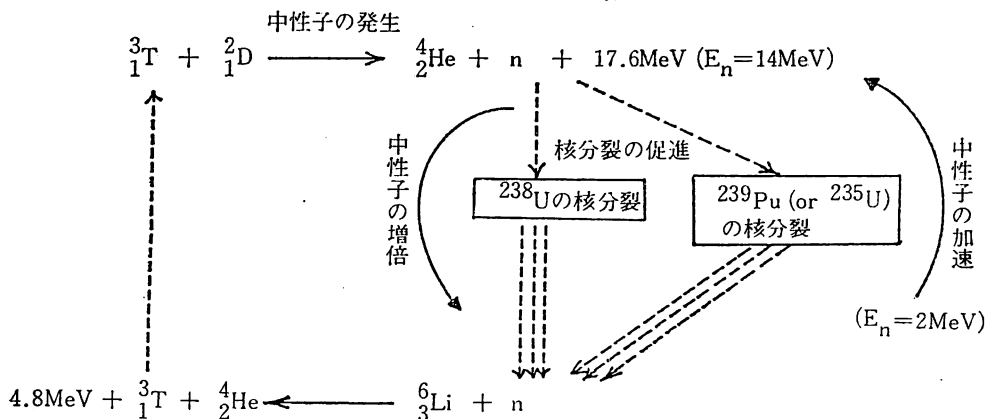
自己点火温度が最低のDT反応が最も有望であるが、Tが天然に存在せず、人工的に生成したとしても半減期12.3年という欠点がある。この欠点を克服するために1950年前後に米ソ独で独立に次のような閉じた連鎖反応が発見された<sup>10), 11)</sup>。



上段の反応では高速中性子(n, エネルギー  $E_n = 14\text{MeV}$ ) が新たに発生する。従来の説明では<sup>12)</sup>, 下段のnが核分裂による高速中性子 ( $E_n = 2\text{MeV}$ ) として供給され、水爆の原理とされていた。

ここで我われは次のことを強調したい。上段の反応で生成された高速中性子が、もしウラン238が近くにあると、それにも吸収されて核分裂を容易に引き起こすことができるということ。核分裂の際に高速中性子が約4個放出される。結局、中性子が増倍されるだけでなく、そのエネルギーが2MeVから14MeVに増加させられる効果がある(図1参照)。すなわち、核分裂と核融合の間に協力的相互反応—ブースター効果—が存在しう

図1 核分裂と核融合の協力的相互反応=ブースター効果



る。これは第二次大戦後から本格的に着手された熱核反応研究の一方の基本的目標、相対的に大きな核分裂爆発で放出されるエネルギーを使って、相対的に少量の熱核反応の燃料に点火するという目標として米国で1951年に達成され、続いて53年ソ連も達成した<sup>13)</sup>。そして、実際に核分裂反応の効率を高める目的で使われ、“boosted” fission weapons (威力を強化された核分裂兵器)<sup>14)</sup> という形で実現されている。これが1951年のジョージ爆弾であり、威力数百キロトンとみつもられている<sup>15)</sup>。

### 3 核分裂・核融合混成兵器(水爆)

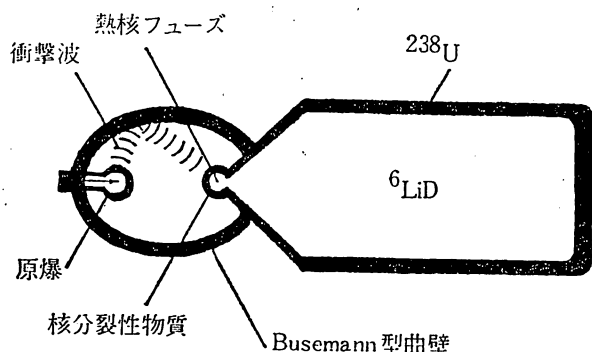
この節では、従来、水爆と呼ばれている、いわゆる3F爆弾、中性子爆弾などをできるだけ統一的理解するために、核分裂・核融合混成兵器という概念を提案する。核分裂以外の方法で核融合反応に点火することはレーザー核融合などで実験室規模では研究されている。しかし、兵器としては不可能であろう。核融合反応だけの水爆、“純粋の水爆”は近い将来実現されることはないと思われる。核分裂・核融合混成兵器の構造を、その機能に応じて三つの系、1次系、2次系そして3次系に分ける。図2にその構造図を示す。

#### (1) 引金としての1次系の複合構造

1次系の機能は相対的に大量の核融合反応への引き金(燃料への点火)になることである。前稿<sup>16)</sup>と前節で述べたことから、核融合燃料を内部に埋

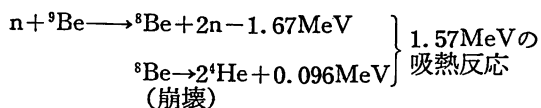
め込んだ爆縮型の“強化された”核分裂爆弾で、中心あるいは中間に空洞をもった同心球状構造であると我われは推測する。空洞は慣性によって爆縮の効率を高めるために必要である。球状構造の決定的重要性は、爆縮をうまく起こすには球対称性からのずれが5%以内の

図2 水爆の概念図



ここへ—は軟X線, ))))))は衝撃波を意味する。楕円のような曲壁は Busemann の理論にもとづく楕円状の曲壁である。文献6) の図11をもとに作図。

衝撃波を実現しなくてはならない、という数学者フォン・ノイマンの計算<sup>17)</sup>より推測される。1次系の構造については Morland の論文<sup>4)</sup>が Winterberg の説明<sup>6)</sup>より説得力をもつ。ベリリウム製の中性子反射体とは  $^9\text{Be}$  の中性子増倍反応



を利用したものと思われる。中性子増倍には有利だが爆発力を低下させる働きをもつ。この点は次節で再びふれる。文献<sup>4)</sup>では核分裂燃料として  $^{239}\text{Pu}$  と  $^{235}\text{U}$  の共存方式を採用しているが、その理由は理解しにくい。

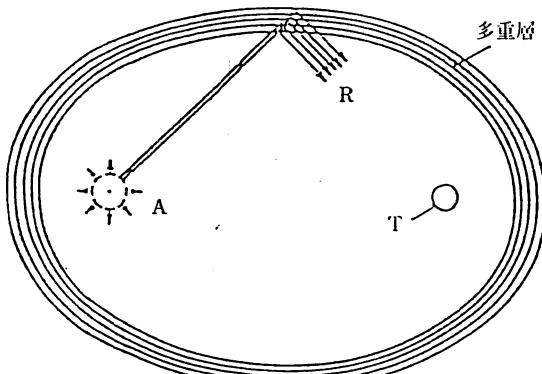
## (2) 主要な核融合反応部分としての2次系

はじめに述べたように水爆の構造についての通説は引金用の原爆を中心に埋め込み、核融合物質で囲んだ同心球状構造である。しかし、この構造では核分裂爆発からの巨大な外向きの輻射圧によって核融合反応が十分進行する以前に核融合物質そのものが飛散してしまう。その点、前節で述べた核融合物質を内部に埋め込む方式は、内向き球対称の爆縮波によって圧縮され<sup>18)</sup>、慣性閉じ込めの時間を増加させ、かつ温度も高めるという長所がある。ただし、次の二つの短所がある。任意の量の核融合物質に点火させることができないことと、核分裂物質の臨界量を非常に増加させること。もっとも第2の短所は適当な中性子増倍材、たとえば図4の  $^9\text{Be}$ 、を組み合わせることにより

補償される。結局、大きな威力を与えるような核分裂および核融合物質の間の幾何学的配置を見出すことが決定的な問題となる。この問題が歴史的には、相対的に小規模な核分裂爆発によって非常に大量の核融合反応燃料に点火するという熱核反応研究の第2の基本的目標であり、第1の目標よりはるかに困難であった<sup>19), 20)</sup>。1952年にアメリカ、1955年にソ連が達成した。通常、この問題については、いわゆるテラー・ウラム型配置が引き合いに出される。しかし、その配置は間接的に言及されることがあっても高度の軍事機密のため具体的には明らかではない。我われは文献<sup>6)</sup>にしたがって、点火に必要な性質をすべて備えている二つの配置について述べることにする。この二つの配置、おそらくそれらを組み合わせたものがテラー・ウラム型配置と密接な関連をもっていると推測するからである。第1の配置(図2)は、流体力学の研究者 Prandtl, Meyer, そして Busemann が研究したもので、楕円状の曲率をもつ空洞の一方の焦点で核分裂爆発が起こり、そこからの衝撃波が他方の焦点に収束する。第2の配置(図3)は核分裂爆発から生じる軟X線を多種の金属薄膜を重ねた、回転楕円形の曲壁(K $\alpha$  X線共鳴鏡)によって他方の焦点に収束させる。よく知られているように、X線は物質を透過しやすく反射しにくい。たとえば1~2 keV程度のX線に対して全反射の臨界角は1°~2°程度と非常に小さく、かつ反射率も100%よりかなり低い。実際には核分裂時に発生した $\gamma$ 線およびX線はタンパーなどの物質にまず吸収され、ただちに軟X線として再放出される<sup>21)</sup>。軟X線であれば、限られた条件の下ではあるが、金属によって反射させることは可能であり、多層膜構造は反射率の向上を狙ったものであると我われは推測する<sup>22)</sup>。さらに楕円体構造であれば、第1の焦点から第2の焦点までの到達時間が、さまざまな経路について等しくなるという利点がある。さらに、実際には衝撃波などによる曲壁表面の溶発(ablation)も考慮して、その構造を決定せねばならないようである。修正された形状を決めるために非常に多くの複雑な数値計算

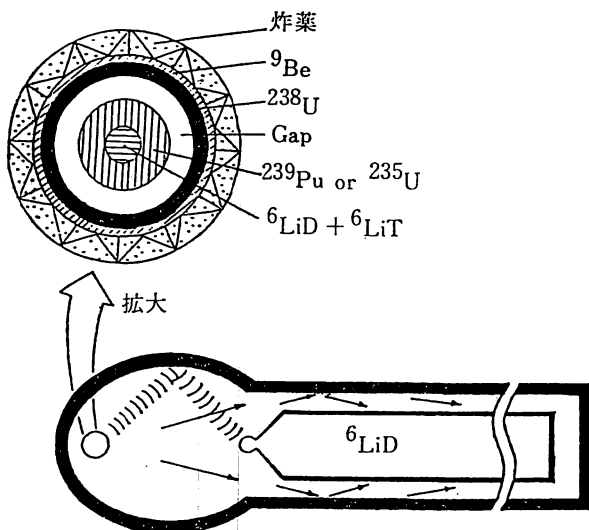
と、そしておそらく多くの核爆発実験が必要であったと思われる<sup>23), 24)</sup>. 当時あらゆる方法で入手できる計算機を利用したこと<sup>25)</sup>, 水爆開発に必要な四つの要件の一つに, 高速の計算機を H. Bethe が挙げていること<sup>26)</sup>はこの推測を裏付けているように思う. 2次系は熱核フューズ部分, 核融合反応領域を広げる円錐形構造, そして高い核融合反応収率を得るための円柱状の核融合物質本体の三つの部分からなる. 円柱部分の長さを加減することにより核融合反応の出力を調節する. 多核弾頭ミサイルにはロケットの頭部に何個もの水爆を詰め込む必要があるが, そのためには, この円柱構

図3 多層膜構造をもつ回転楕円体のK $\alpha$ X線共鳴鏡



Aというのは引金用原爆でTは熱核フューズを意味する. RはAから放出される軟X線の光子. 異なる波長をもつ光子は異なる層から反射される. 文献6)の図41をもとに作図.

図4 現実的な水爆の構造



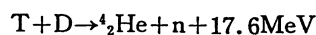
文献6)の図16をもとに作図. ここで引金用原爆は<sup>238</sup>Uのライナーと<sup>6</sup>LiD核融合燃料の間の間隙Gを通して軟X線を送り込む. 引金用原爆の図は文献4)をもとに作図.

造は好都合である. 2次系のより現実的なデザインを図4に示す. 核融合の反応速度が燃料の密度の二乗に比例することを考慮して, 核分裂爆発から生じる軟X線の輻射圧によって燃料を予備的に圧縮するのである. ライナー (liner, 燃料被覆材) に原子番号の大きい材料を用いると, プラズマ状態になった時の制動輻射が2次的な軟X線源となり, 圧縮の効果を強める. この効果を詳細に解析するには, 多大な数値計算が必要である. 予備的圧縮の可能性はもう一つある. それは, 間隙を伝播する軟X線の比率が高く——間隙が特殊な形状になっているらしい——, しかも, それが前方の未燃焼の部分の表面に吸収されるならば, そこが溶発爆縮 (ablative implosion) によって圧縮される. これらを自己触媒過程 (autocatalytic process) という. 溶発爆縮とは, 表面が溶かされると, 運動量保存則に基づく反跳効果により圧縮されることを意味する. もちろん前稿<sup>16)</sup>で述べた直接的な爆縮 (direct implosion) とは異なる. また同様の予備的な圧縮を大きな中性子束によって行なうこともできる. 適当な中性子増倍材, たとえば<sup>9</sup>Beあるいは<sup>235, 238</sup>Uを燃料の被覆材として用いれば, その効果が強められる<sup>27)</sup>.

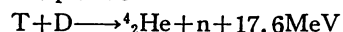
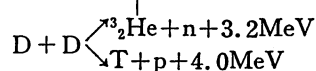
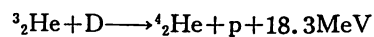
### (3) 選択枝としての3次系

2次系での基本的反応は図1のDT, <sup>6</sup>Li+n反応である. その際, 高エネルギーの中性子が大量に発生する. 我われは他の反応系列の可能性を考慮して, 2次系での高エネルギーの中性子束の利用の形態を次のように分類する.

1) 液体重水素三重水素使用, 3次系なし: これはいわゆる湿式水爆で1952年11月1日エニウエトク環礁でのマイク爆弾で, 約10メガトンの威力を持ち, テラー・ウラム型配置第1号であった<sup>28)</sup>. 反応系列としては次の可能性が考えられる. まず



が起こり, 続いて点火温度の高い反応



が起こる。

D T反応に比べて発火温度が1桁高いDD反応も反応系列を考慮すると爆発波の進行が十分可能である<sup>29)</sup>。<sup>6</sup>LiDを用いなかったのは、DD反応の方が理論的解析が簡単であったことと、天然リチウムに7.4%しか含まれていない<sup>6</sup>Li同位体の分離の必要がないという二つの理由からであった<sup>30)</sup>。その中心的目的はテラー・ウラム型配置の先駆的実証であって実用的で運搬可能な兵器を目的としたものではないと言えよう。1953年8月ソ連の史上発の<sup>6</sup>LiDを使用した乾式水爆は基本的には“boosted” fission bombであって推定威力は数百キロトンといわれ、テラー・ウラム型配置をソ連として初めて用いたのは1955年11月23日の、推定2~3メガトンといわれる爆弾であるようだ<sup>31), 32)</sup>。運搬可能な乾式はソ連が先行したが、テラー・ウラム型配置を用いた本格的な水爆は米が先行した。この点、水爆開発史についての通説を修正する必要があるかもしれない。

2) 2次系<sup>6</sup>LiD, 3次系<sup>238</sup>U使用：重水素化リチウム(<sup>6</sup>LiD)が固体であるために乾式と呼ばれる。1954年3月1日ビキニ環礁におけるブラボー爆弾である。これは、次の小節に述べるように、主として<sup>235</sup>Uまたは<sup>239</sup>Puの核分裂(fission), 続いて<sup>6</sup>LiDにもとづく核融合(fusion), 最後にタンパー(tamper, 充填材)の役割を兼ねる<sup>238</sup>Uの核分裂(fission)という反応過程で特徴づけられ、3F爆弾と呼ばれることが多い。安価な<sup>238</sup>Uによって威力を増大させる。

3) 2次系に<sup>6</sup>LiDおよび少量の<sup>6</sup>LiT使用, 3次系に<sup>9</sup>Beを使用：放射線強化弾頭(enhanced radiation warhead)と呼ばれ、いわゆる中性子爆弾である。次節で詳細に述べる。

#### (4) 爆発過程の素描

以上の話を理解しやすくするために3F爆弾を典型例として爆発過程を定性的に述べる。まず1次系の高性能化学爆薬に高い時間精度(約百万分の1秒)でスイッチが入れられ爆縮が始まる。臨

界超過時間を長くするようなタイミングで高速中性子が中性子発生装置から入射される<sup>33)</sup>。続いて1次系の、主として核分裂反応が一方の焦点で爆発的に進行する。そこから発生した軟X線の流れが多層構造の共鳴鏡で反射されて、他方の焦点におかれた核融合点火用フューズに到着しそれを予備圧縮する。続いて中性子により核融合反応が始まる。その際、衝撃波は核融合燃料を圧縮し慣性閉じ込めの時間を増加させる。続いて核融合燃料本体の反応が予備的に圧縮されていたために爆発的に進行し大量の高速中性子を発生させる。高速中性子がタンパーの<sup>238</sup>Uに吸収されると大量の核分裂が起こり、莫大なエネルギーとともに多量の核分裂生成物(死の灰)をまき散らす。

#### 4 中性子爆弾(放射線強化弾頭)について

中性子爆弾は威力数キロトン以下の小型水爆であると言われている。しかし、その原理と構造については具体的に説明されていないように思われる。問題になるのは次の2点、爆発力をどうして低く抑えるか、そして、いかにして高速中性子を増加させるか、である。第2の点については<sup>9</sup>Beを用いていることは確実である。この理由については前節(1)で述べた。争点になっているのは第1の点である。1次系の引金用原爆から放出されるエネルギーが0.1キロトン程度と極めて低いと推定されていることから、臨界量の非常に小さいアメリカシウムとかカリフォルニウムの同位体を使用しているとの推定も少なくない<sup>34)</sup>(表1を参照)。しかし、我われはAm, Cfなどの同位元素が使用されている可能性は少ないと考える。理由の第1は半減期が<sup>235</sup>Uや<sup>239</sup>Puと比べて極めて短いため、燃料物質を定期的に精製する必要があり、また被曝の危険性が高いため管理が困難であること。理由の第2は、非常に小さいと伝えられる臨界量が実は最も適切に減速され、かつ水による反射体で囲まれている場合に対してであって、高速中性子に対する臨界量はそれほど小さくないと考えられること。理由の第3は、それらの生産コス

表1 ウラン, プルトニウムなどの臨界量と寿命

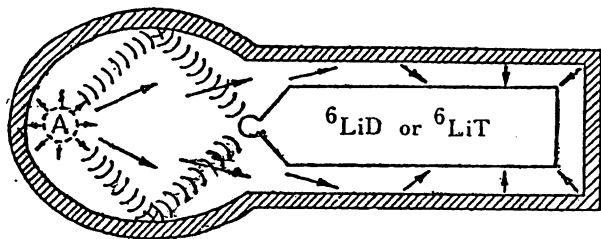
核種	臨界量 (爆縮なし)		半減期		
	高速中性子系	熱中性子系	$\alpha$ 崩壊	自発核分裂	$\beta$ 崩壊
$^{235}_{92}\text{U}$	49 kg	820 g	$7.1 \times 10^8 \text{ y}$	$1.8 \times 10^{17} \text{ y}$	
$^{239}_{94}\text{Pu}$	10 kg	530 g	$2.4 \times 10^4 \text{ y}$	$5.5 \times 10^{15} \text{ y}$	
$^{240}_{94}\text{Pu}$	158 kg		$6.6 \times 10^3 \text{ y}$	$1.3 \times 10^{11} \text{ y}$	
$^{241}_{95}\text{Am}$	113 kg		458 y	$2.3 \times 10^{14} \text{ y}$	
$^{242}_{95}\text{Am}$	6 kg (*)	23 g	152 y ( $^{242m}\text{Am}$ )		16 h
$^{245}_{96}\text{Cm}$		42 g	$9.3 \times 10^3 \text{ y}$		
$^{247}_{96}\text{Cm}$		159 g	$1.6 \times 10^7 \text{ y}$		
$^{249}_{98}\text{Cf}$		32 g	360 y	$1.5 \times 10^9 \text{ y}$	
$^{251}_{98}\text{Cf}$		10 g	800 y		
$^{252}_{98}\text{Cf}$		1.5~2g (*)	2.7 y	85 y	

(\*)印を除いて文献(42)より引用, (\*)印は同(8)の132ページより. 半減期は多くの文献に記載されている. 空欄は不詳.

態に変えられるように, 最初の点火用の高速中性子の注入の時刻と爆縮の開始時刻を調節するのではないかと考える<sup>36)</sup>. 次に答えるべき疑問は, 極めて低い爆発威力で2次系の発火は可能か, ということであろう. 前節(2)で述べたように, 1次系の爆発から発生する軟X線を, 多層構造をもつ共鳴鏡によって楕円の第2の焦点に向けて収束させれば, 溶発爆縮による圧縮によって可能のようである<sup>37)</sup>. 図5に中性子爆弾の構造を示す.

## 5 まとめ

図5 中性子爆弾の構造



文献(6)の図18をもとに作図. 図中の説明は図2と同じ. 核融合燃料の組成については, 熱核フェーズ側に $^6\text{LiT}$ を少し混入させているかもしれない. 文献(43)の第31図も参照のこと.

トが $^{235}\text{U}$ などより約1000倍と桁はずれに高いこと<sup>35)</sup>による. それでは核分裂爆発の威力をどうして低く抑えるのか. 我われは前稿<sup>16)</sup>で強調したように爆縮によって, そのことが可能であろうと推測する. ほんの短い時間だけ臨界状態を越えたときに, 熱と中性子がごく瞬間的に発生し, これを2次系の核融合フェーズの方だけに反射させてやり, ただちに1次系を, 臨界超過から臨界未満の状

(1)水爆の原理と構造について. いわゆる水爆, 3F爆弾および小型水爆の一種と言われる中性子爆弾は, ブースター効果およびテラー・ウラム型配置などを考慮して, 核分裂・核融合混成兵器とみなせば, 統一的に理解しやすい. また, その構造は球状というより, むしろ回転楕円体プラス円柱といった形状をしていると推定される.

(2)核兵器の垂直拡散について. ブースター効果とテラー・ウラム型配置などの精緻化と多様化により, MIRV弾頭のような軽量, 小型で爆発力の小さい兵器が開発され生産されてきた<sup>38)</sup>. そして, 平均して核物質使用の効率が極めて高いために, その生産量が何万という数に達した核爆弾が生まれた<sup>39)</sup>. 核軍縮・核廃絶運動との関連では, 部分的でなく包括的な核爆発実験の禁止の重要性を, 我われは改めて訴えたい<sup>(40)</sup>も参照). どんな新しい兵器でも実戦配備をする前に, その核弾頭を実験してみることは欠かすことのできない手順である. したがって核兵器実験を全面的に禁止

することは核兵器技術の本格的な進歩を阻むことになる。

最後に、W. Heisenberg とその弟子 F. Winterberg の対話を引用して筆をおくことにする。

「1954年アメリカが湿式水爆の実験を行ったとき、多くの物理学者はそのとき爆薬に  ${}^6\text{LiD}$  が使用されている可能性を知っていた。しかし、閉じ込めと点火の概念はもちろん知られていなかった。(ゲッチンゲンのマックスプランク物理学) 研究所のお茶の時間に私 (Winterberg) は W. Heisenberg に『このことは衝撃波楕円体配置によって可能であると信じている。』と言った。ちょっとの間考えた後、Heisenberg は答えた。『そうだ、この方法によって可能であることは全くよく想像できる。』しかし、彼はほほえんで付け加えた。『そういう恐いことは考えないほうがいい。』……」<sup>41)</sup>。

引用文献

- 1) S. Glasstone and P. J. Dolan, eds., *The Effects of Nuclear Weapons*, 3rd ed., *US Departments of Defence and Energy*, 1977, p. 21.
- 2) 前掲, pp. 15~17.
- 3) H. F. York, 塩田・大槻訳『[ドキュメント] 大統領指令「水爆を製造せよ」 科学者たちの論争とその舞台裏』, 共立出版, 1982年.
- 4) H. Morland, 水爆の秘密をあばく, 『朝日ジャーナル』, 1979年11月16日号, 12月28日号.
- 5) H. A. Bethe, Comments on the History of the H-Bomb, *Los Alamos Science*, Fall 1982, Vol. 3, No. 3, p. 43.
- 6) F. Winterberg, *The Physical Principles of Thermonuclear Explosive Devices*, *Fusion Energy Foundation*, New York, 1981. 抄訳は *COSMO* 82, 1982年5, 7, 9, 11月号.
- 7) H. F. York, The Great Test-Ban Debate, *Scientific American*, Vol. 227, No. 5 (1972), p. 15.
- 8) 倉田英世『核兵器』教育社入門新書, 1979年, p. 56.
- 9) 前掲6, p. 15.
- 10) 前掲3, p. 37.
- 11) 前掲6, p. 4.
- 12) 日本科学者会議編『核——知る・考える・調べる』合同出版, 1982年, p. 54.
- 13) 前掲3, pp. 29~31.
- 14) 前掲1, p. 22.
- 15) 前掲3, p. 104, p. 129.
- 16) 岡本, 中原, 森, 『日本の科学者』, Vol. 19, No. 3, (1984), p. 21.
- 17) ピーター・グッドチャイルド『ヒロシマを壊滅させた男 オッペンハイマー』池沢夏樹訳, 白水社, 1982年, p. 100.
- 18) 前掲16, p. 24.
- 19) 前掲3, p. 30.
- 20) *Los Alamos Science*, Vol. 4, No. 7, (40th Anniversary Issue), Winter/Spring, 1983, p. 112.

- 21) J. Rotblat『核戦争と放射線』小野周監訳, 安齋他訳, 東大出版会, 1982年, p. 13.
- 22) A. V. Vinogradov and B. Ya. Zeldovich, *Applied Optics* 16 (1977), p. 89. (反射率0.5という理論的可能性の指摘). J. H. Underwood and T. W. Barbee Jr., *Nature*, Vol. 294, 3, Dec. 1981, p. 429. (多層構造膜の技術的実証). *Physics Today*, April (1984), pp. 44~52 に解説あり.
- 23) 前掲6, p. 30.
- 24) 前掲20, p. 112.
- 25) 前掲3, p. 107.
- 26) 前掲5, p. 50.
- 27) 前掲6, p. 70, p. 74.
- 28) 前掲3, p. 126.
- 29) 前掲6, p. 48.
- 30) 前掲3, p. 112.
- 31) 前掲3, pp. 126~127.
- 32) 前掲5, p. 53.
- 33) 前掲16, p. 24.
- 34) 服部学『核兵器と核戦争』大月書店, 1982年, p. 112 など.
- 35) 前掲8, p. 133.
- 36) ミエッチネン『戦術核兵器』原水爆禁止資料センター(準備会)編, 核問題シリーズ[3], 1979年, p. 28.
- 37) 前掲6, pp. 137~140.
- 38) 前掲3, p. 116.
- 39) 前掲3, p. 181.
- 40) 服部学『日本の科学者』Vol. 16, No. 9, (1981), p. 11.
- 41) F. Winterberg, Some Reminiscences About the Origins of Inertial Confinement, *Fusion*, (1980), 41.
- 42) E. D. Clayton, *Nucl. Sci. Eng.* 52 (1973), p. 417.
- 43) 安齋育郎『中性子爆弾と核放射線』連合出版, 1983年.

(日本科学者会議福岡支部・核問題研究委員会)  
 岡本良治 九州工業大学・物理学  
 中原 純 (ペンネーム) 九州大学  
 森 茂康 九州大学・物理学

