

核分裂兵器と爆縮技術

岡本良治 中原 純 森 茂康

1 なぜ、いま核兵器の原理と構造を問題にするか

1945年8月広島および長崎への投下以来、原爆の物理的原理と構造は、その概念図を通じて広く知られ、新たに調べなおす余地はないかのようにある。

例えば、広島原爆は砲身型のウラン爆弾であり、長崎原爆は爆発圧縮（爆縮と略す）型のプルトニウム爆弾であると紹介されると、それ以上の考察は技術的に煩瑣であるので無意味であるとして一般に思われている。

しかも近年、核兵器の運搬手段の一つとしてのミサイルの命中精度の著しい向上が先制第一撃戦略と限定核戦争構想の軍事技術的基盤であるとしてしばしば主張されている。しかし、このような状況の中で、戦術核兵器、戦域核兵器、戦場核兵器、そして中性子爆弾などが話題になるとき、それらの政治的、軍事的意図はかなり議論されるが、それらの物理的原理と構造の具体的分析が不足している。そのため、これらの兵器が初期の原爆や、水爆との間にどのような技術的な関連をもっているか必ずしも明らかではない。さらに1963年の部分的核実験禁止条約以来、現在まで米ソを中心にして続けられている地下核実験では一体何がなされているのか理解しにくい。

われわれは次のような基本的な問題意識のもとづいて、この小論を展開する。日本の従来への平和運動、原水爆禁止運動は核兵器完全禁止と被爆者援護という理念を明確に打ち出してきた点に特色があって、世界各地での運動にも大きな影響を与えたといってもよいであろう。しかし、運動の広

がりと深まりは十分とは言えない。われわれは、具体的な問題についての科学的分析が不十分であったことが、その主要な原因の一つであると考えている。理念と行動の間を埋める精密で具体的な理論が不足していたために、運動が広範な人々に深くは浸透していないと考える。具体的な問題の一つがさまざまな核兵器の物理的原理・構造の相互関連である。その科学的分析は核兵器の特徴的な残酷性をリアルに理解することに重要な役割を果たすであろうと、われわれは考える。その他に5で述べるように、広島・長崎の原爆の構造の相違に関連して原爆線量の見直しが始まっている。これは放射線被曝の影響評価の基準そのものを変更させる可能性が大きいと言われている。だから、われわれは理論的により深く理解することはいつか実際に役立つであろうと期待している。

周知のように核兵器の物理的原理と構造の詳細は現在も機密事項ではあるが、最近すこしずつ情報の入手が可能になってきた¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。さらにロスアラモス研究所は創立40周年を迎えている⁶⁾。このような状況で、核兵器の物理的原理と構造について現在、一定の理論的整理を行なうことは意味のあることと思われる。

われわれは、核弾頭自体の性能の向上とその運搬手段の命中精度の向上とが相俟って核戦争の可能性が高まってきたと考えている。核弾頭の性能の向上は次の4種に分類される（文献1の45ページ、1-45と略す、以下同様）。(1)爆発威力の向上、(2)爆発効率の向上、(3)爆発威力の低減化、(4)爆発のエネルギー配分比の変更。その他に、これらの組み合わせと想像されるフルフュージング化（full fusing option bomb）(7-133)あるいは威

力可変性 (versality) (8-80) など。ここではまず原点に戻って原爆(核分裂兵器)を調べる。ここでは上の(2)と(3)を考えて(1)と(4)については別に述べる⁹⁾。まず過去の事実をふりかえってみる。広島原爆は砲身型のウラン爆弾であった。これには核分裂性物質として高濃縮ウランの約60kgが用いられ、爆発威力は15キロトン (TNT火薬換算) であったと推定されている (4-32)。1 kgのウラン235が核分裂するときに解放されるエネルギーは、約17.5キロトン (10-13) であることを考えれば、この広島原爆の爆発効率は約1.5%という低いものとなる。他方、長崎原爆は、爆発圧縮型 (implosion type) のプルトニウム爆弾であり、核分裂性物質としてはプルトニウム239を主成分として約8kgが使用され、その爆発威力は約22キロトンであったと推定されている (4-33)。この爆発効率は約15%である。1945年7月アラモゴードにおける最初の核爆発実験、中国およびインドの最初の核爆発実験は、いずれも爆発圧縮 (爆縮) 型であった (11-18)。さらに水爆の引金用原爆にも爆縮型が用いられているようである⁹⁾。これらの事実から爆縮型はかなり斬新な設計原理に基づくものであってその後の核弾頭の開発に重要な役割を果たしたこと、砲身型は、あらかじめ実験する必要があるほど単純な設計原理に基づくものであったことなどが推測される。

2 爆縮による臨界量の節約効果

1回の核分裂の際、2ないし3個の高速中性子が発生する。その平均数は ν と略記される。したがって、分裂により放出された高速中性子が、まだ分裂していない他の核へ吸収されたら、ネズミ算式に核分裂が起こる (核分裂連鎖反応)。このような連鎖反応を起こすためには、分裂の際に放出される中性子が、他の核分裂性の核に吸収される前に、体系の外に逃げ出したり、その他の過程で失われることをできるだけ防ぐ必要がある。大まかに言えば、この中性子の漏洩率は表面積に比例し、その発生率は体積に比例する。したがって

連鎖反応が持続する核分裂性物質の量と大きさには最小値があり、臨界質量 ($M_{critical}$) と臨界半径 ($R_{critical}$) と呼ばれる。一般に $M_{critical}$, $R_{critical}$ は物質の物理的、化学的純度、幾何学的形状、中性子反射体の存否、性能に依存する。簡単のため、純度100%、球形、反射体なしと仮定すれば、定性的考察により、次の関係式が導出される。

$$R_{critical} = \frac{M_A}{N} \cdot \frac{1}{\sigma_f \cdot (\eta - 1) \cdot \rho},$$

$$M_{critical} = \frac{4\pi}{3} R_{critical}^3 \cdot \rho$$

$$= \frac{4\pi}{3} \left(\frac{M_A}{N} \right)^3 \frac{1}{\sigma_f^3 \cdot (\eta - 1)^3 \cdot \rho^2}$$

ここで、 M_A は質量数 A の核をもつ原子のグラム原子、 N はアボガドロ数、 ρ は核分裂性物質の密度である。核分裂のマイクロ断面積 σ_f と中性子捕獲のマイクロ断面積 σ_c によって、中性子再生率 η は次式で与えられる。

$$\eta = \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_c} \right) \cdot \nu$$

筆者らの知る限りでは、高速中性子に対する臨界量 ($M_{critical}$, $R_{critical}$) についての具体的な表現は、初めて提出されたと思われる。例として、核分裂性物質 ^{239}Pu とエネルギー 2MeV の高速中性子という系を考える。適当な文献によって

$$\sigma_f = 2.2 \text{バーン}$$

$$\eta = 3.0$$

$$\rho = 19.5 \text{ g/cm}^3$$

という数値を採用すると

$$R_{critical} \approx 4.5 \text{ cm}$$

$$M_{critical} \approx 8.3 \text{ kg}$$

となる。この値は、伝えられる値¹²⁾、約10kgに近い。ここで注目したいのは、臨界質量が密度の自乗に反比例するという性質である。すなわち、これは圧縮により臨界質量をかなり節約することができることを意味する。例えば、もし何らかの方法で半分に圧縮することができたとすれば、臨界量は約2.5kgに減少する。ところが、通常の固体の金属の圧縮率は1気圧あたり 10^{-6} (100万分の1) 程度であることを考慮すれば、意味のある程度の

圧縮は著しく困難であると思われるがちである。例えば、鉛を半分に圧縮するには約22万気圧が必要となる。無論、ここでは通常の圧縮率の定義が、超高压の下でも適用できると仮定した。しかし、高性能爆薬を使用すれば圧縮は十分に可能であると、われわれは考える。例えば、松ダイナマイトの爆轟圧力は22.2万気圧である(13-1039)。TNT火薬はより高性能と思われる。なお、爆縮による固体の圧縮については文献14、15および16を参照のこと。

3 爆発的核分裂連鎖反応と中性子入射のタイミング

簡単に言えば、臨界量を越える量の核分裂物質が集合するや否や、中性子がただの1個もあれば核分裂連鎖反応が起こる。しかし、重要な最後の数世代の核分裂が起こる前にきわめて急速に集合させないと、初期の核分裂の際に放出されるエネルギーによって核分裂性物質自身が飛散してしまう(事前爆発, pre-detonation)。一種の不完全燃焼であり、その結果、爆発威力は非常に小さくなってしまいます。すなわち、爆発効率を上げるには大量の高速中性子を外部から入射することが必要である。さらに、中性子入射のタイミングをうまく選ばなければ、同様の事前爆発が起こる。この事情を理解しやすくするために以下の例を述べる。核分裂の際に放出される高速中性子は、平均して毎秒 2×10^7 m進む。核と衝突するまでに数cmを移動し、その所要時間は1億分の1秒(10^{-8} 秒)以下である。爆発的連鎖反応を考えてみる。最初にあった中性子数 N_0 が、時刻 t において $N(t)$ になったとすると

$$\frac{dN}{dt} = \alpha \cdot N$$

が成立する(10-17)。 $\alpha(t)$ は幾何学的形状、物質および時間の複雑な関数である。 α は最初 10^8sec^{-1} の程度である。 α が定数とみなされる限り、中性子の数は指数関数的に増加する。

$$N(t) = N_0 e^{\alpha t} \equiv N_0 e^{t/t_0}$$

($t_0 \cong 10^{-8} \text{sec} \equiv 1 \text{shake (sh)}$, 世代時間)。

時間の関数としての中性子の数の対数グラフと単位時間あたりに放出されるエネルギーを図1に示す。爆発が始まるまでの経過時間は100万分の1秒以下であり、全エネルギーの99%以上は、最後の数世代の、約0.05マイクロ秒(5sh)の間に放出される。だから、外部からの中性子入射は1マイクロ秒よりずっと短い時間のずれでも、放出されるエネルギーには著しい違いを生じるとということがわかる。この事情は、核分裂性物質を集合させて臨界超過状態を達成し持続させる方法に重大

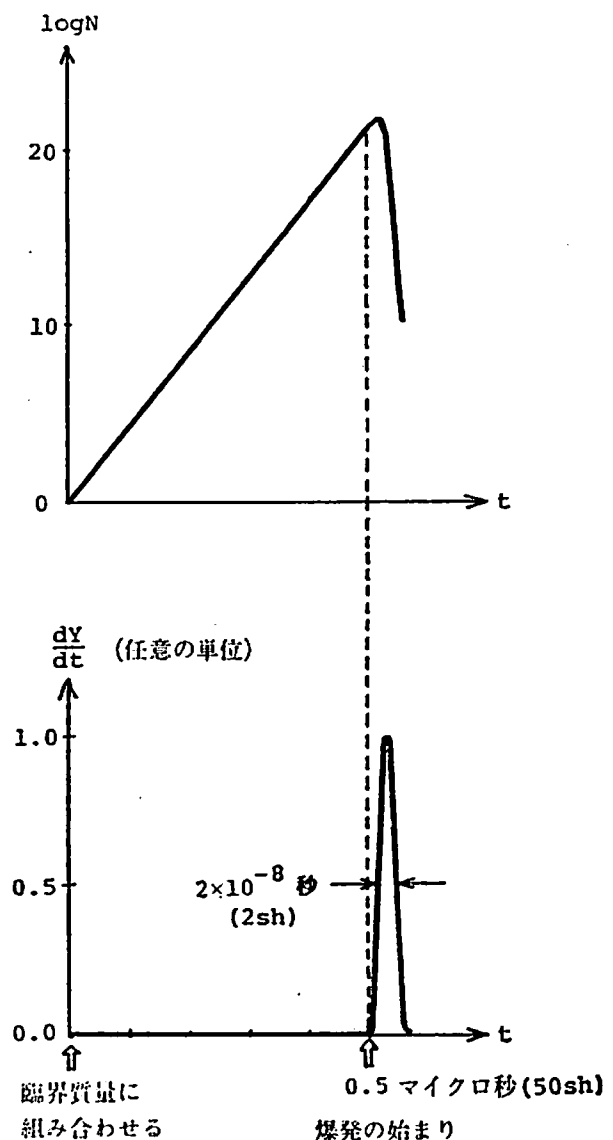


図1 核分裂爆発物における、時間の関数としての中性子数 N と、単位時間に解放されるエネルギー dY/dt 。ただし、 Y は威力(yield)を意味する。文献21とその原典、H. A. Sandmeir et al., *Nucl. Sci. Eng.* 48 (1972), 343を参考に作図。爆発威力は24.5キロトン相当である。 $N_0=1$ とする。

な影響をおよぼす。

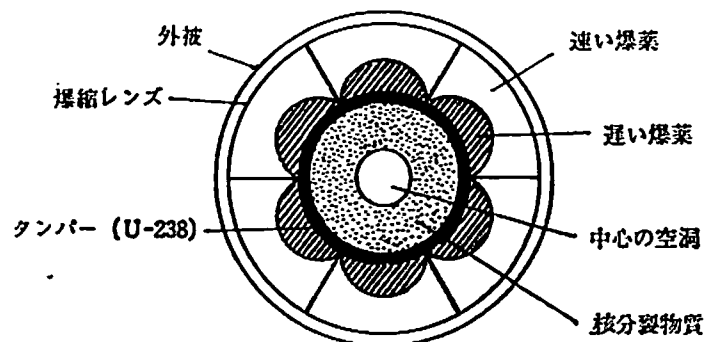
協道にそれるが、次の2点を指摘したい。まず、信管と同様に高度の時間的精度が要求される高速中性子の入射装置を考える。おそらく、純粹な α 粒子放出体としての ^{210}Po を金箔で包み外側に ^9Be を配置したものであろう。金箔を電子的制御で破る—その時間精度は 10^{-9} 秒位まで可能らしい—と、 α 粒子が飛びだし、 ^9Be と反応して高速中性子が放出される。ただし、 ^{210}Po の半減期が約140日と短いために、核兵器の管理上の観点からも、外部に付置されているだろう。

次に、熱中性子を用いた連鎖反応は兵器には無理と思われること。理由は、減速材を含めた装置が大きくなることと、高速中性子を減速させるのに 10^{-3} 秒程度の時間を要することの二つである。したがって臨界量は高速中性子に対するものか、それとも熱中性子に対するものかの区別をすることは重要であると、われわれは考える⁷⁾。

4 爆縮方式の斬新さと重要性

核分裂性物質を集合させる方法として、これまで次の2種類があった。ひとつは砲身法、もうひとつは爆縮法である。 ^{235}U は自発核分裂の確率は無視しうる程度なので、集合速度はそれほど重要ではない。だから、2つの方法のいずれでも可能であった。他方、プルトニウムは ^{239}Pu とともに、有意の大きさの自発核分裂の確率がある ^{240}Pu という同位元素を含み、事前爆発の恐れが強いことがわかった(17-12)。このためプルトニウム爆弾には爆縮法しか適用されないことが1944年夏頃判明したようである(4-100)。化学爆発による必要な爆縮速度は、約10cmを1マイクロ秒で移動させるとして、秒速10km以上ということになる(18-410, 19-11)。これは成形爆薬レンズによって辛うじて可能である(図2)。必

要な集合速度を得るための大がかりな試行錯誤的実験と膨大な量の数値計算が実行された(4-108)。その結果、いくつもの爆縮レンズを組み合わせる方式が開発された。現在では、従来の高性能爆薬の場合は、爆発波調整の技術が進歩し、「今や芸術の域に達している」と言われている(19-117)。これまで述べたことから明らかのように、臨界量の節約効果と、高速中性子入射のタイミングの選択を通じての爆発威力の調節の2点に爆縮法の爆発機構としての斬新さがあると言うことができよう。威力の調節の範囲を例として述べる。まず、



“ファットマン”の断面図

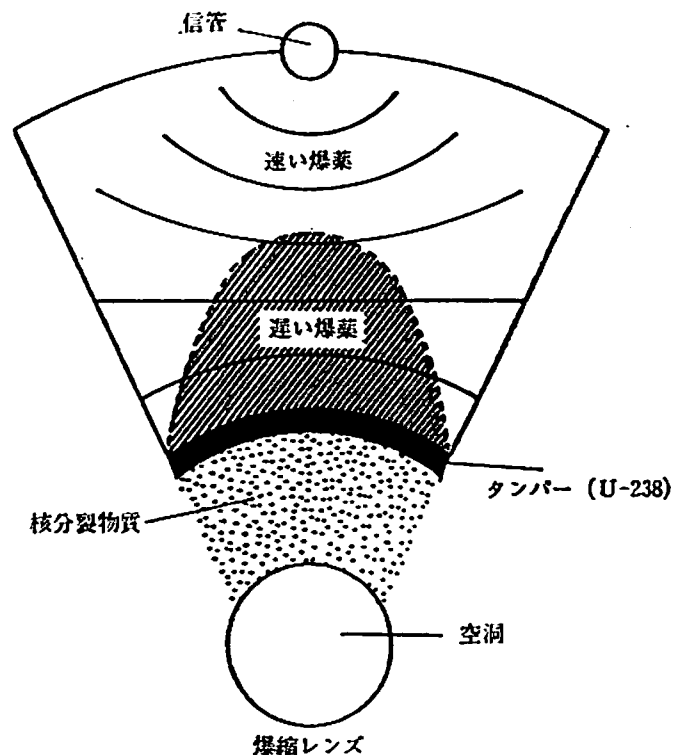


図2 爆縮レンズ。文献4と25をもとに作図。中心部の空洞は、慣性により爆縮の効果を高める。 ^{238}U はタンパー(充填材)、中性子反射体、高速中性子に対する核分裂性物質としてのエネルギー増強材という3つの役割がある。爆薬との組み合わせは、他の可能性もある。

爆縮技術を改良することによって、集合させられる量を増加させ、より効率的に核分裂性物質を利用することが可能である。爆縮型原爆の威力の上限は、1953年のキング爆弾の約500キロトンである(3-115)。他方、逆の方向として、核分裂性物質の量と集合方法を精密に制御することによって、爆発威力を著しく低くすることもできる。例えば、W54核地雷の威力は10トン(0.01キロトン)と言われている(20-40)。さらに、H. Bethe が水爆開発への4つの要件の中の最も重要なこととして、十分発展した高い効率の核分裂爆弾を挙げていること(2-40)からも推測されるように、爆縮方式は、その後の核兵器の開発に重要な役割を果たしたと、われわれは考える。爆縮法を提案し、完成させた S. N. Neddermeyer が、核エネルギーの分野では米国政府が与える最高の名誉といわれるフェルミ賞(1982年度)を受賞したこと(24-80)を参考までに記す。

5 砲身型原爆の構造とその放射線量分布への効果

終わりに、最近の広島・長崎の原爆の放射線量見直しに関連して明らかになったことについて述べておく。非等方的な配置をもつ砲身型原爆の構造に関する情報は、線量評価の基礎となる核爆発時の中性子とガンマ線の源スペクトルを解析する上で、必要とされる。

この詳細は依然として機密事項であるが、原爆線量再評価日米ワークショップ(1983年2月、長崎)等で、弾頭および弾尾に分厚い鉄と重金属(タングステンか)が使用されていることが明らかになった²²⁾。図3に推定配置図を示す。このように、原子番号の大きな金属が多量に使われているために中性子およびガンマ線の非弾性散乱が強く効き、その漏洩スペクトルおよび角分布は爆縮型のそれらと大きく異なる²³⁾。米国での再評価作業が、これまでモデル計算中心であったこと、しかし広島型と同型の構造物を使用した野外での臨界実験が本年(1983年)2月中旬からロスアラモス研究所で行なわれ、実験データが得られ始めて

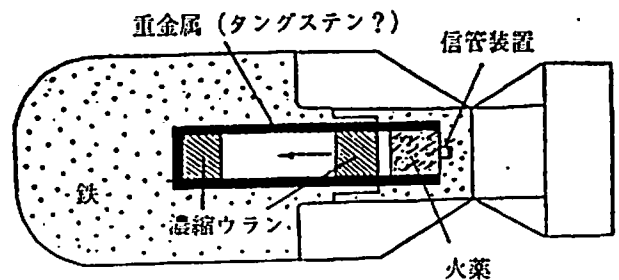


図3 広島原爆の構造。文献22と23より作図。

いることを考えると、近い将来にこの問題に関して何らかの新しい情報が出ることも予想され、成り行きが注目される。

〔付記〕

著者たちは、有益な議論について核問題研究委員会の他のメンバーに感謝する。さらに文献2, 6, 15を提供あるいは教示していただいた方々にも感謝する。本小論の準備段階の内容は第4回総合学術研究集会の分科会において発表された。

参考文献

- 1) J. Carson Mark, *The Bulletin of the Atomic Scientists*, March 1983.
- 2) H. A. Bethe, Comments on the History of H-Bomb, *Los Alamos Science*, Fall 1982, Vol. 3, No. 2, p. 43. 1954年に執筆されたが機密情報として分類され(classified), 1982年秋、機密ではなくなった(declassified).
- 3) H. A. York, *The advisors: Oppenheimer, Teller, and the superbomb*, 1976, W. H. Freeman & Company, San Francisco. 邦訳は塩田・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, 1982年, 共立出版.
- 4) ピーター・グッドチャイルド, 『ヒロシマを破壊させた男 オッペンハイマー』, 白水社, 1982年.
- 5) 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.
- 6) *Los Alamos Science*, 40th Anniversary Issue.
- 7) 倉田英世, 『核兵器』, 教育社(入門新書), 1979年.
- 8) 日本科学者会議編, 『核—知る・考える・調べる』, 合同出版, 1982年.
- 9) 岡本良治, 中原純, 森茂康「核分裂・核融合混成兵器におけるブースター効果とテラー・ウラム配置」(仮題), 発表予定.
- 10) S. Glasstone and P. J. Dolan, *The Effects of Nuclear Weapons* (U. S. Departments of Defense and Energy, 3rd edition, 1977).
- 11) 岸田純之助, 『核』, 学陽書房, 1975年.
- 12) E. D. Clayton, *Nucl. Sci. Eng.* 52 (1973), 417.
- 13) 『化学便覧(応用編)』, 丸善書店.