

D-T 強化型原爆と水爆について

軍縮・不拡散促進センター
客員研究員 小山 謹二

1. はじめに

核兵器には種々の種類と形態の異なるものがあるが、その名称は必ずしも統一されているとは思えない。この傾向が顕著に現れたのが北朝鮮の報じた「2016年1月6日10時(現地時間)、最初の水爆実験を行った」であり、実験に用いられた水爆の定義について今回ほど議論されたのは珍しい。そこで“水爆って何なの?”と聞かれ“概ね分かりました、どうも有難う”と言ってもらえる様な解答が有るのだろうか? 答えを探してみる。

1月6日、北朝鮮で行われた核実験について、観測された地震波の解析から推定された爆発の規模は、これまでに行われた3回の核実験の規模と大差はなかった。この事から「今回の核実験に使われた核爆発装置が、いわゆる“水爆”と呼ばれるものにしては爆発の規模が小さすぎる」。

水爆は1950年代に激化した米ソの核開発競争の下で、原爆の破壊力を増強するために開発されたもので、ビキニ環礁で行われた水爆実験“Bravo”と、それによる第五福竜丸の被曝事件を思い起こせば、今回の爆発規模は如何にも小さすぎるし、水爆の爆発実験であったことを立証する事の出来る情報が検知されたとの報告もない。もし、重水素化リチウム-6 (Lithiumu-6 Deuterated ; ${}^6\text{LiD}$) を装荷している水爆の爆発実験(大気圏内)が行われたのであれば、大気中に拡散したリチウムが検出される可能性はある。しかし、今回のように、封じ込められた地下実験場で爆発実験が行われた場合、このような証拠を検知するのが難しいことから、「水爆の爆発実験に成功した」と発表している事実を否定することは出来ない。

本稿では、北朝鮮が「水爆実験に成功した」との報道が引き起こした問題の根拠を探るため、改良型原爆と水爆の構造、及び核爆発過程の概要を紹介し、各々が核兵器として担っている役割分担を明らかにする。

本稿の核兵器に関する情報は、米国が収集し、公開している“Nuclear Weapon Archive, Nuclear Weapons Frequently Asked Questions”の第1章“Types of Nuclear Weapons”及び、第4章“Engineering and Design of Nuclear Weapons”(注1)を参考にした。

2. D-T 強化方式の原爆

D-T 強化方式の原爆(Boosted fission bomb)とは、核分裂によって解放される核エネルギーを主要な核出力(kt単位で計る)とする原爆の核出力をD-T核融合反応を活用して増強し、強化した改良型の原爆である。言い換えれば、D-T核融合を起こす機能を組み込んだ原爆であり、核分裂を核出力の主要エネルギー発生源としている“原爆”である。

広島と長崎に投下された原爆には、核分裂性核物質としてウラン(U-235)、あるいはプルトニウム(Pu-239)が装填されていた。この種の原爆では、装填された核分裂性物質の全量が核分

裂を起こすことは無く、その多くは核爆発によって飛散してしまう。しかし、飛散する前に核分裂を起こさせることが出来れば、それだけ多くの核エネルギーを開放する事が可能になり、核爆発の核出力は増加し、破壊力は大きくなる。

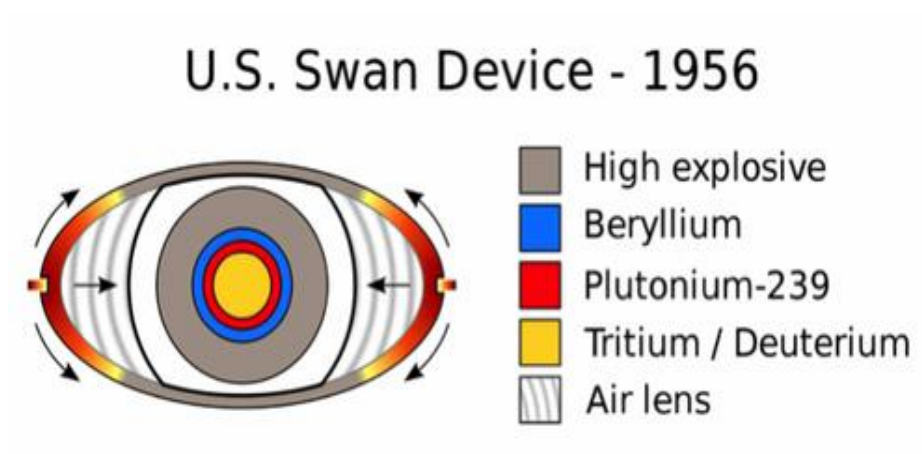
改良型原爆の活用例として、水爆の様な大きな核出力を持つ核兵器の起爆用の原爆（プライマリー）原爆に採用されている Swan シリーズ原爆の概念図を第 1 図に示しておく。この種の図面が見つかったのは、この「改良型 2 点着火方式プライマリー原爆 “U. S. Swan Device”」のみである。

図から明らかなように、Swan の外形は“ラグビーボール”の様な回転楕円体をしており、長軸の両端に点火プラグが配備され、重心には Pu ピットが配備されている。そして Pu ピットの中心は空洞になっており、その中に重水素（デュートリウム、D）と三重水素（トリチウム、T）の混合ガス（D と T の比率が 1 : 1）が少量（5 g 程度）充填されている。

この相対する 2 個の点火プラグが同時に発火しない限り、ピットを構成する全ての Pu がピットの中心に向かって圧縮されることは無く、核爆発を起こすことも無い。

この 2 点着火方式の改良型軽量原爆は、“US Swan”シリーズの核弾頭と呼ばれ、水爆の様な多段式高出力核兵器の初段（Primary）の原爆として採用することにより、自然災害あるいは事故等により誘発される誤爆発等避け、安全性を担保する機能を備え、核兵器の保管管理、あるいは輸送中の安全管理が可能になった（注 5）。

この後で紹介するが、2 ステージ型の水爆 W88（最大 475 kt）には、その第 1 ステージの起爆用プライマリーとしてこの原爆が組み込まれている。



第 1 図 改良型 2 点着火方式プライマリー原爆

[https://en.wikipedia.org/wiki/Swan_\(nuclear_primary\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Swan_(nuclear_primary))

繰り返しになるが、起爆は 2 つの点火プラグを同時に発火させる事により始まる。Swan の内壁に張り付けられている高速火薬（High explosive）の爆発による衝撃波が回転楕円体容器内の大気中に広がり、Swan 内壁で反射されながら伝搬し、中心に設置されている Pu コアを取り囲んでいる高速火薬の表面に同時に到達（図中では、この衝撃波の伝搬機構を“Air lens”と言っている）し、高速火薬が発火することにより爆縮工程が始まる。

この爆縮によってピットを構成する Pu-239 等の核燃料物質は、圧縮されて超臨界状態になると共に、ピット内に充填されている D-T 混合ガスも断熱圧縮されて、温度が約 1 億°Cのプラズマ状態になる。

この状態の D-T プラズマは、未だ D-T 核融合の自己点火状態 (注 2)には達していないが、それに近い状態になっており、量子力学の実験で観測されるトンネル効果により、僅かではあるが D-T 核融合が起き、高エネルギー (14 MeV) 中性子が生まれる。

核融合によって生まれた 14 MeV 中性子が、周囲を取り囲み、超臨界状態にある Pu-239 の核分裂を誘発し、連鎖反応が始まる。このような過程を経て、集中的に連鎖反応が起きるピットの中心部は、核分裂エネルギーによって更に加熱され、2~3 億°Cに達し、D-T 混合ガスはプラズマ状態になり、自己点火条件(注 2) を満している領域が形成される。

この領域内では D-T 核融合が起こり、ヘリウム (He) と 14 MeV の中性子 1 個が生まれる。この 14 MeV 中性子は、Pu-239 の核分裂断面積が小さなエネルギー領域にあるが、爆縮によって密度が大幅に増加している Pu-239 の実効核分裂断面積は大きく、Pu-239 は効率良く核分裂を起こす。

さらに、Pu-239 の核分裂で生まれる中性子に誘起された核分裂では、核分裂当たりに生まれる中性子は 2~3 個であり、この中性子により連鎖反応は拡大していく。他方、14 MeV 中性子によって誘起される核分裂では、核分裂当たりに生まれる中性子数が約 5 個程度に増加し、新たな連鎖反応の起点となる中性子が倍増する。

つまり、連鎖反応を起こす核分裂サイクルの時間が短くなると共に、サイクル当たりに核分裂の起きる回数も増大し、核分裂が急速に進む。このように核融合と核分裂が同時に起きる領域が現れるため、核爆発エネルギーによって加熱され、飛散する前に核分裂を起こす Pu-239 が増加する。

長崎に投下された“ファットマン”の場合、実際に核分裂した Pu-239 は、装填量の約 14%に過ぎなかったが、D-T 強化型に改良すると核分裂を起こす Pu-239 の量は約 30%にまで高まると見られている (注 3、4)。

3. トライデント II に搭載されている水爆 (W88)

米国が配備している潜水艦トライデント II が水面下から発射する弾道ミサイルに搭載されている核弾頭 W88 は、代表的な 2 ステージ型水爆 (最大核出力：475 kt) である。その構造図を第 2 図に示す。

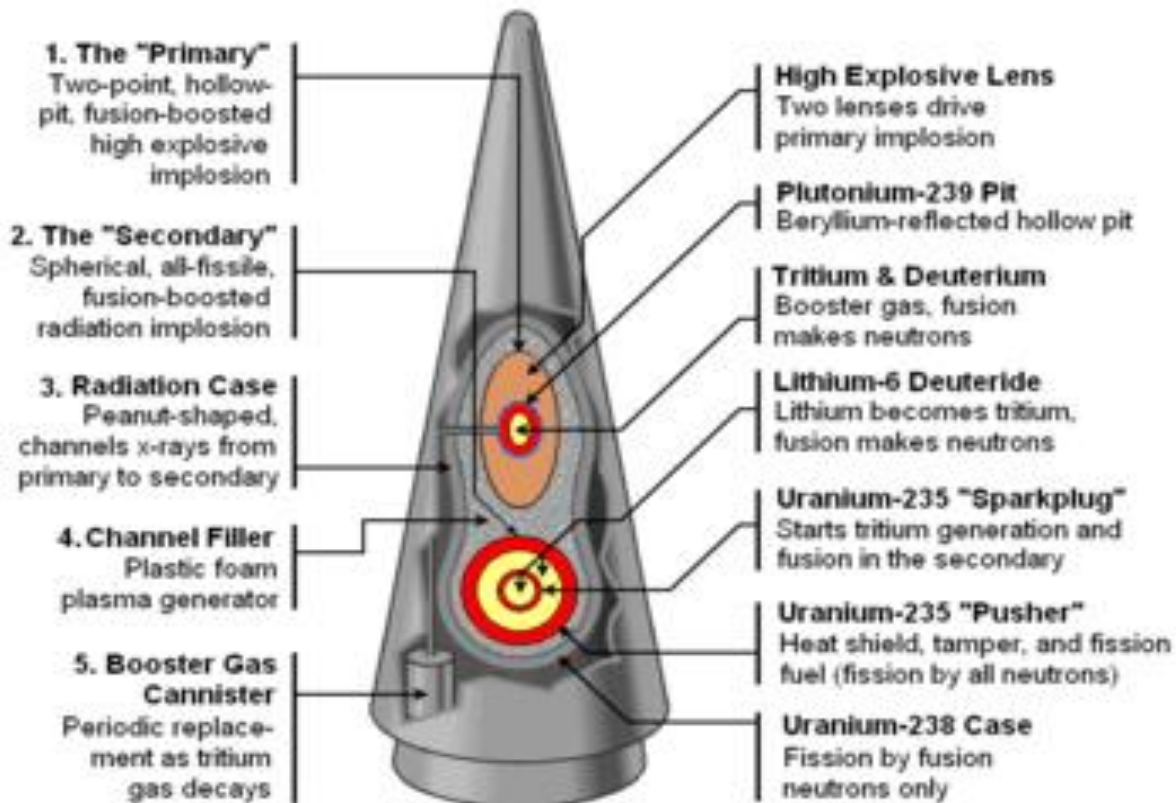
図中の “1. The “Primary”” と示されている部分が水爆 W88 の初段(primary stage) として組み込まれている D-T 強化型原爆であり、第 1 図の Swan に該当する。

また “5. Boost Gas Canister” は、D-T 混合ガスの貯蔵タンクである。初段のコアのピット中央部に “Booster Gas” と表示されている所があるが、これが Pu-239 ピットの空洞に相当し、D-T 混合ガスが充填された状態を示している。なお、この D-T 混合ガスは、使用時に目的に合わせ、適量 (充填する量によって核出力を調整) を充填することが出来る。

トリチウム (T) の半減期は 12.3 年と短く、その量は時間と共に減少する。核兵器としての機能を維持するためには、装填されている D-T 混合ガス濃度を設計通りに保って管理しなけれ

ばならない。このために“Boost Gas Canister”を設け、必要に応じて再充填が可能な構造になっている。

W88 Warhead for Trident D-5 Ballistic Missile



第2図 米国の W88 核弾頭の構造

[https://ja.wikipedia.org/wiki/W88_\(%E6%A0%B8%E5%BC%BE%E9%A0%AD\)](https://ja.wikipedia.org/wiki/W88_(%E6%A0%B8%E5%BC%BE%E9%A0%AD))

第2図で“2. The Secondary”と示される部分が水爆の2段目に該当する。しかし、この2段目は単独で核爆発を起こすことは無く、火付け役（マッチ）を担う初段の原爆が無ければ水爆にはならない。ここで注意してほしい点は、この2段目には重水素（D）とトリチウム（T）の混合ガスは充填されておらず、重水素化リチウム-6（Lithium-6 deuterated）（固体）が装荷されている事である（注6）。

この重水素化リチウム-6を取り囲む様に2つのU-235の殻が配置されている。外側の殻はタンパーの役割を果たす物であり、核分裂で発生する核エネルギーによって高圧バリヤを形成し、D-Tプラズマの膨張を抑え込むために配置されている。内側の殻は、その核分裂エネルギーでD-Tプラズマを加熱すると共に、生成された中性子をLi-6に照射し、 ${}^6\text{Li} + n \Rightarrow {}^3\text{T} + \text{He}$ 反応によってD-T核融合に必要なトリチウム（T）を供給するために設置されている。このU-235で構成されている2つの殻は、初段の改良型原爆だけでは2段目の核融合を維持・持続するために必要なエネルギー供給が出来ないため、それ自身の核分裂によって不足分のエネルギーを補い、D-Tプラズマの自己点火条件を維持するために採用された手法であると推定される。

4. おわりに

本稿では、D-T 強化型原爆と水爆の典型的な構造とその特性について概観し、各々の備えている機能と役割とについて検討した。以下にその特性を纏めておく

1) D-T 強化型原爆の特性

1.1) D-T 強化型原爆とは原爆に D-T 核融合を起こす領域を造り、そこで生成される 14MeV 高速中性子が強力な外部中性子源を挿入したのと同様な役割を果たし、Pu239 の起こす核分裂の連鎖を多重化し、核爆発によって飛散する前に核分裂を起こす Pu239 を増加させる原爆の改良型である。

1.2) 改良型原爆 Swan は多段式原爆の初段 (Primary) として採用され Swan シリーズ: Swan、Python、Robin、Tsetse、そして Kinglet 等の通称でもある

1.3) Swan に代表される 改良型原爆には起爆用点火プラグが 2 個設置されている。この点火プラグが同時に発火しない限り、核爆発が起こらないように設計されており、この種の 2 点着火方式の改良型原爆を使用することにより、原爆及び水爆の爆発事故の起きる可能性は大幅に減少し、安全性が強化された。

<http://nuclearweaponarchive.org/Usa/Weapons/W88.html>

1.4) 改良型原爆 Swan を小型軽量化した核弾頭は、戦術核兵器である The Davy Crockett Weapon System に搭載され配備されたが、兵器の使用に関する許認可条件を満たす暗号化システムを組み込むことが出来ないとの理由から全て解体された。

[https://en.wikipedia.org/wiki/Davy_Crockett_\(nuclear_device\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Davy_Crockett_(nuclear_device))

2) 水爆 (W88) の特性

2.1) 水爆は、マッチの役を担う 1 段目の改良型原爆と、マッチによって火をつけられる重水素化リチウム-6 が充填されている 2 段目が一体となった核爆弾であり、核爆発エネルギーの大部分は 2 段目で起きる水素の核融合によって生成される。

2.2) 典型的な水爆 W88 には 1 段目に起爆用の原爆 Swan が組み込まれている。

2.3) 起爆用の原爆は、重水素化リチウム-6 が充填された 2 段目で D-T 核融合を誘起するのに必要な高温・高圧領域を作るためのものであり、この領域が造れなければ水爆にはならない。

注) D-T 強化方式の改良型原爆を水爆としている場合が多々見られる。しかし、これは原爆の核分裂効率を高め、核爆発の威力を増強するために利用した D-T 核融合を重視し、核融合が主要エネルギー源の水爆と読み換えたための誤解と思われる。

脚注

注 1) “Nuclear Weapons Frequently Asked Questions”の第 1 章 “Types of Nuclear Weapons”
及び第 4 章 “Engineering and Design of Nuclear Weapons”の URL

Section 1.0 Types of Nuclear Weapons

<http://nuclearweaponarchive.org/Nwfaq/Nfaq1.html>

Section 4.0 Engineering and Design of Nuclear Weapons

<http://nuclearweaponarchive.org/Nwfaq/Nfaq4.html>

注 2) D-T プラズマの自己点火条件とは、外部からの更なるエネルギーを注入することなく、核融合が持続し得る条件である。すなわち、D-T プラズマの磁場閉じ込め方式をベースに核融合炉の研究開発を進めている国際熱核融合実験炉 (ITER) 等では、D-T プラズマの自己点火条件を満たし、維持することが可能な核融合炉の研究開発を行っていると言える。

4.3.1 Fusion Boosted Fission Weapons

<http://nuclearweaponarchive.org/Nwfaq/Nfaq4-3.html>

注 3) D-T 強化方式では、核分裂による発熱でコアが膨張して飛散する前に核反応を進めるために設置される重元素の劣化ウラン製タンパーにかわり、軽元素で中性子を反射するベリリウム (Be) 製中性子反射体に変更し、中性子の利用効率を高めている。これによって、核出力を維持しつつ、原爆を小型軽量化することも出来る。D-T 強化方式原爆の例として、1956 年に米国が開発した「スワン」がある。長崎に投下された「ファットマン」は全長：3.25 m、直径：1.52 m、そして重量：4,500 kg だったのに対して、スワンは全長：58 cm、直径：29.5 cm、重量：47.6 kg と小型軽量化されているが、核出力はファットマンの 20 kt に対して 15 kt と大差がない。

[https://en.wikipedia.org/wiki/Swan_\(nuclear_primary\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Swan_(nuclear_primary))

<http://www.damninteresting.com/davy-crockett-king-of-the-atomic-frontier/>

注 4) D-T 核融合を積極的に活用している水爆、及び D-T 強化方式を採用している改良型原爆では、核物質の分裂効率を高めるため、①核分裂物質を重い元素の劣化ウラン製のタンパーで取り囲む方法と、②中性子を反射する軽い元素のベリリウム製の中性子反射体で取り囲む方法がある。①は、核反応で発生する膨大なエネルギーによる発熱でコアが膨張するのを慣性力で抑え込むもので、D-T 核融合で生まれる 14 MeV 中性子の発生量を増やすとともに、タンパーを構成する U-238 の核分裂を誘起させて、爆発力を更に増加させることが出来る。①と②のオプションの選択は、D-T 強化方式の設計・製作時に決まる。

注 5) また、「スワン」には起爆用点火プラグが 2 個設置されているが、この点火プラグが同時に発火しない限り、核爆発は起こらないように設計されており、安全性が大幅に改善されている。2 点着火方式の改良型原爆を使用することにより、爆発事故の起きる可能性は大幅に減少した。<http://nuclearweaponarchive.org/Usa/Weapons/W88.html>

注 6) Li-6 は中性子を吸収すると T を生成し、ヘリウム (He-4) になる核変換を起こすので、D-T 核融合を起こす際に必要とする T は水爆のコア内で供給される。