

核兵器の科学的・技術的分析

目次

(要約)

§ 1 はじめに―核爆発の物理学―

§ 2 非ブースター型核分裂兵器(長崎原爆)の原理

§ 3 ブースター型核分裂兵器(DT核融合により威力強化された核分裂兵器)

§ 4 核分裂-核融合-多段階型核兵器としての「水爆」

§ 5 「核拡散」とその防止のための措置等

(要約)

1) 1942年、ゼロから出発して、米国マンハッタン計画により、1945年、8月に投下された広島原爆、長崎原爆は、ともに核兵器の第一世代であるが、両者の仕組み、性能は大きく異なり、その後の核兵器設計に与えた影響は両極端であった。

1.1) 広島原爆は砲弾式という単純な仕組みであったが、爆発効率は約1.5%、長崎原爆は爆縮という複雑な仕組みで爆発効率は約15%であった。

1.2) 砲弾型原爆はその後はほとんど製造されていないが、爆縮型はその技術的改良が続けられ、核兵器設計の流れを先導した。

2) 1950年代に開発された「水爆」は、核兵器の第二世代であるが、その歴史的呼称が与える印象とは異なり、1次系として原爆を用い、その超高温・超高压を活用して、2次系の核融合反応を実現する仕組みであった。さらに、外側に配置されるウラン238による核分裂によるエネルギーも利用して威力強化を図る。

(強化型原爆)

3) 「水爆」とほぼ同時期に開発された技術がブースター核分裂兵器である。

3.1) 少量の核融合物質の添加により、核分裂連反応が高効率化され、威力の強化、核兵器の小型化・軽量化、出力可変性を可能にした。

3.2) 「水爆」の一次系を純粋な核分裂装置からブースター核分裂装置に置き換えることにより、「水爆」の威力の強化、小型化・軽量化、出力変化が可能になった。

§ 1 はじめに一核爆発の物理学一

核分裂兵器の場合を例として、核爆発の物理的過程を説明する。

- 1) どんな起源かに拘わらず，爆発は制限された領域内における，大量のエネルギーの時間的に非常に急速な解放と関連している．
- 2) 1回の核分裂により発生するエネルギーは，原子分子の反応の際に出入りするエネルギーに比べて，少なくとも百万倍に達する．
- 3) 核分裂の際，核分裂物質と中性子エネルギーに依存して、数個の中性子が発生して，それがまだ核分裂していない核分裂性物質に吸収されて，新たに核分裂する可能性がある(核分裂連鎖反応)．
- 4) 中性子発生率は系としての核分裂性物質の体積に比例する．他方，中性子の系外への漏洩率は核分裂性物質の表面積に比例する．従って，核分裂連鎖反応が継続するための最小質量，すなわち臨界質量が存在する．
- 5) 核分裂連鎖反応に対する臨界量は核分裂性物質の密度の2乗に反比例^{5,6}する．臨界量以上の状態であっても，膨張すれば臨界未満になり，核分裂連鎖反応は止まる．逆に，圧縮できれば臨界量は少なくて済み，さらに爆発効率も増加する．

6)核分裂兵器の場合，最初、核分裂性物質を未臨界状態になっており，起爆装置が起動すると高性能爆薬により中心部に向けて急速に圧縮され，臨界超過状態になるように設計される．

爆縮(implosion)

7) 爆発的な核分裂連鎖反応により解放されるエネルギーの大部分は最後の数世代の核分裂により発生する．

8) 従って，核爆発が想定された威力で起こるかどうかは，爆発的エネルギーを生み出す核分裂連鎖反応と，先行して起こる部分の核分裂連鎖反応のエネルギーに起因する熱膨張との競争で決まる．

9) このため，核分裂連鎖反応が十分に進行するまで膨張をできるだけ長く抑える装置(tamper, タンパー)が必要不可欠である．

10) 核爆発が十分な威力を発揮すれば、極短時間(百万分の1秒以下)に核兵器自体は蒸発し、ガンマ線、X線を含む電磁波により巨大な「火の玉」と化し、そのエネルギーの大部分は周辺の空気などに吸収され、強烈な爆風を生じる。

中性子点火器(a modulated neutron initiator)

- ◎核兵器の適切な運用における重要な要素の1つは、
適切な「瞬間」での核分裂連鎖反応の開始である。
かなりの核分裂連鎖反応回数を得るためには、
適切な「瞬間」に十分な量の中性子が超臨界核内に存在しなければならない。

△連鎖反応があまりにも早く開始されると(「事前爆発」)、結果は設計仕様をはるかに下回る「ほんの少しの収量」になるため、ピット材料の自発的中性子放出が低いことが重要である。

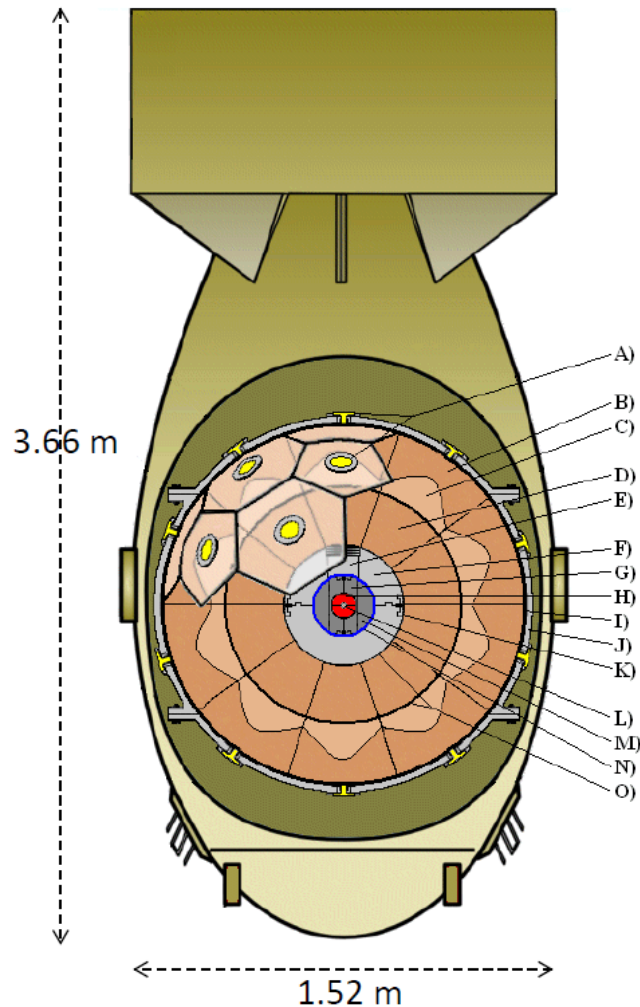
△それが遅すぎると、コアは膨張してより低密度の状態に分解し始め、歩留まりが低下するか(コア材料の分裂を受けることが少なくなる)または全く歩留まりがなくなる(コアはもはや臨界質量ではなくなる)。

- 中性子点火器は、活性化時に中性子のバーストを発生させることができる中性子源である。その役割は、決定的に重要である最適な「瞬間」に連鎖反応を「開始する」ことであるので、それはいくつかの核兵器の重要な部分である。

中性子点火器は典型的にはプルトニウムピット(*)の中心に配置され、収束する衝撃波の衝撃によって活性化される。

§ 2 非ブースター型核分裂兵器(長崎原爆, 爆縮型)

§ 2.1 長崎原爆(爆縮型)の構造, 大きさと重さ 出典³⁾



A. 起爆電橋線型雷管 **32**個. **32**個の雷管が点火するタイミングの許容誤差は**0.1**マイクロ秒以下になる。このため原爆用に新しい原理の雷管が開発された。

B. 速い爆薬 **32**個.

C. 遅い爆薬 **32**個. **32**個の遅い爆薬の中で衝撃波がレンズの中の光のように屈折する.

D. 速い爆薬 **32**個. (B,C,Dがいわゆる爆縮レンズを構成する.)

E. アルミニウム合金の蓋.

F. アルミニウム合金製プッシャー(Pusher).

爆薬と天然ウラン, プルトニウムの間の密度差があまりにも大きいため, 爆縮による衝撃波の反射波が大きくなる. するとレイリー・テイラー不安定性などの流体力学的不安定性が大きくなって衝撃波の

高い球対称性が崩れてしまうため、一旦アルミニウム合金製プッシャーで衝撃波を受け止める。

G. 天然ウラン(^{238}U が99.3%)で出来た中性子反射体兼タンパー(Tamper).
核分裂物質から発生した中性子が外部に逃げてしまつて連鎖反応が止まらないようにするために中性子反射体が必要。

H. プルトニウムの塊。

I. コルク製の外殻。

J. 7個の部品から構成されるアルミニウム製の外殻。

K. アルミニウム合金製プッシャーを固定するためのキャップ。

L. 中性子点火器. プルトニウムが核分裂反応を起こすために必要な最初の中性子線を出すための装置。

M. 天然ウラン。

N. ホウ素合金のカバー。

O. フェルト樹脂。

§ 2.2 非ブースター型核分裂兵器の原理

[Serber1992] [岡本・中原・森1984A]

核分裂の平均自由行程 ℓ_f , 中性子の質量 m , 平均の速さを v_n とすると,
核分裂の平均自由行程を中性子が移動する時間 τ は

$$\tau \approx \frac{\ell_f}{v_n}.$$

核分裂性の原子核の数密度を n , 核分裂の断面積を σ_f とすれば,

$$\ell_f = \frac{1}{n\sigma_f}$$

と書ける. 従って,

$$\tau \approx \frac{1}{n\sigma_f v_n}.$$

次に、中性子と核分裂性原子核との衝突あたり生成される中性子数の平均値(第二世代数, the number of secundaries)を c と記すと、高速中性子による誘起核分裂の連鎖反応の場合、1回の核分裂で放出される中性子数の平均値 ν を用いて

$$c \equiv \frac{\sigma_s + \sigma_f \cdot \nu}{\sigma_{total}},$$

$\sigma_{total} \equiv \sigma_s + \sigma_f + \sigma_c$, σ_s : 散乱(scattering)の断面積

σ_f : 核分裂(fission)の断面積

σ_c : 捕獲(capture)の断面積

系外への漏洩 (leak, escape) などにより,
核分裂ごとに消失する中性子の平均数を ℓ として,
任意の時刻 t における中性子数を $N(t)$ とすると

$$\frac{1}{N(t)} \frac{dN(t)}{dt} \approx \frac{c - \ell - 1}{\tau}$$

$$\rightarrow \frac{dN(t)}{dt} = \alpha(t)N(t),$$

$$\alpha(t) \equiv \frac{c - \ell - 1}{\tau} : \text{実効増倍率 (effective multiplication rate),}$$

時刻 t における1個あたりの中性子数の時間的变化率

以上の結果をまとめれば,

$$\alpha(t) = v_n n \sigma_f \left[\left(\frac{\sigma_s + \sigma_f v}{\sigma_{total}} \right) - \ell - 1 \right]$$

α の値を大きくするためには,

$c - \ell - 1$ を大きく, τ を小さくすることが必要.

→ 圧縮によって, n を大きくし, 中性子の入射エネルギーを

高くして, v と v_n を大きくする, タンパーや中性子反射体により

ℓ を小さくする.

「α実験」の実験の重要性とその経過について、マンハッタン計画にも参加した物理学者、ロッシの自伝[ロッシ1993]にある。

さらに、2011年に機密解除された資料[JASON2011]にも、ロッシの見解と統合的な記述がある。

Of central importance to the energy output of the primary is the rate of the Neutron production due to fission. This often characterized by plotting the Logarithmic derivative with respect to time of the neutron population $N(t)$ and is denoted by

$$\frac{dN(t)}{dt} = \alpha(t)N(t)$$

This reactivity or “alpha curve” is a key indicator of primary performance.

直観的な理解のために，まず α が時間的に一定と仮定すると

1) 時刻 t における中性子数

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

2) 1回の核分裂により放出されるエネルギーを E_f として，

時刻 t までに放出される全エネルギー，すなわち威力(yield) $Y(t)$;

$$\begin{aligned} Y(t) &\equiv \int_0^t E_f \cdot \frac{dN}{dt} dt = \int_0^t E_f \cdot \alpha e^{\alpha t} dt = \frac{E_f N_0}{\alpha} (e^{\alpha t} - 1) \\ &\cong \frac{E_f N_0}{\alpha} e^{\alpha t}, \end{aligned}$$

$$\frac{dY(t)}{dt} = E_f N_0 e^{\alpha t}$$

α の値が一定である限り，上記の関係式は， α の値が正の値か負の値かによらず，正しい。

α の典型的な値の概算^[ロッシ1993]

$$K = \frac{1}{2}mv_n^2 = \frac{1}{2}mc^2 \left(\frac{v_n}{c} \right)^2 \rightarrow \frac{v_n}{c} = \sqrt{\frac{2K}{mc^2}} \quad [\text{NWA2001-4.3}]$$

もし高速中性子の運動エネルギーとして、 $K = 2\text{MeV}$ を採用すれば
中性子の静止エネルギー、 $mc^2 \approx 940\text{MeV}$ であるから

$$\frac{v_n}{c} \simeq \sqrt{\frac{2 \times 2\text{MeV}}{940\text{MeV}}}, c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$\rightarrow v_n \simeq 1.4 \times 10^9 \text{ cm/s.}$$

$$\ell_f = \frac{1}{n\sigma_f}, n = \left(\frac{\rho}{M_A} \right) N_a \simeq \left(\frac{19\text{g/cm}^3}{239\text{g}} \right) \times (6 \times 10^{23}) = 0.5 \times 10^{23} / \text{cm}^3,$$

$$\sigma_f \simeq 2 \times 10^{-24} \text{ cm}^2,$$

$$\rightarrow \ell_f \approx 10\text{cm} \rightarrow \tau = \frac{\ell_f}{v_n} \approx 10^{-8} \text{ s.}$$

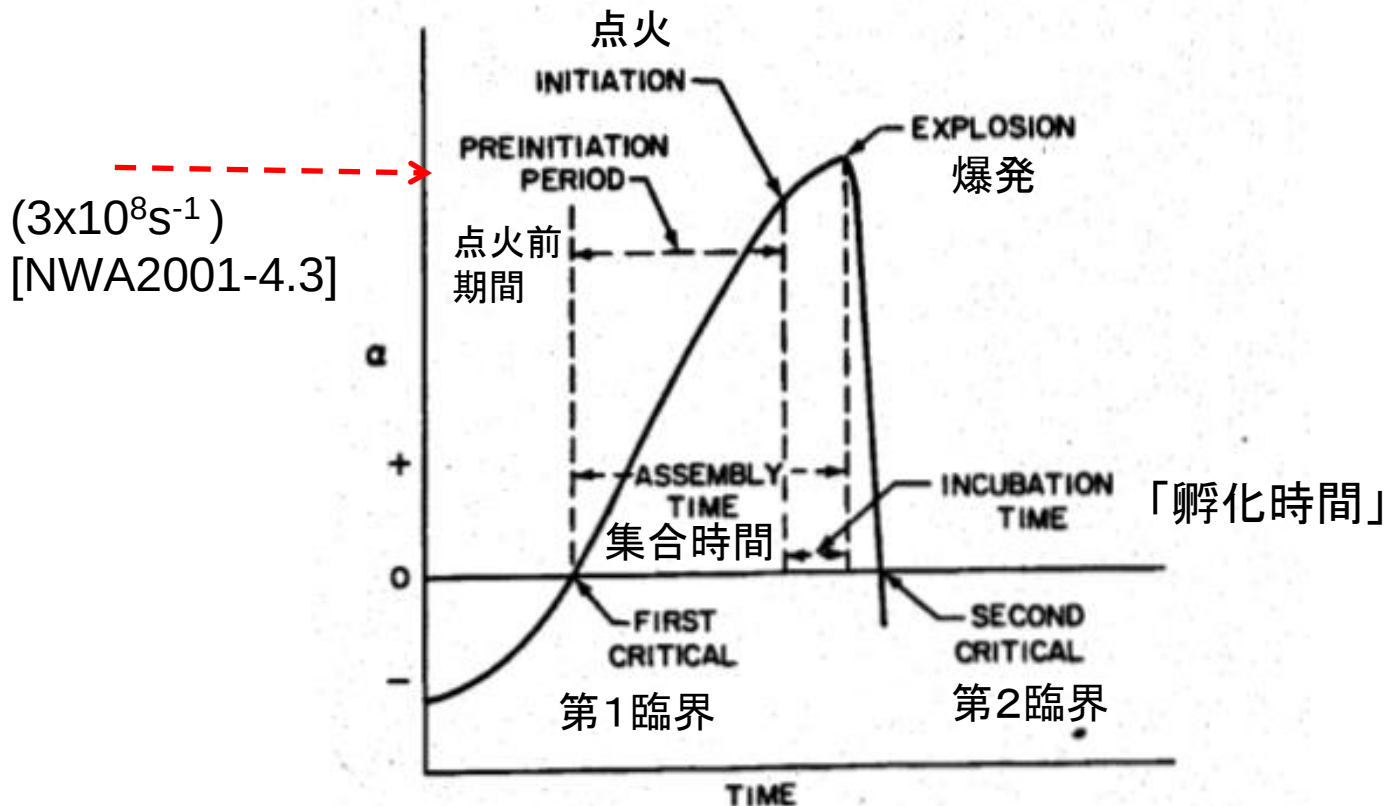
$$\rightarrow \alpha \approx 10^8 \text{ s}^{-1}, \frac{1}{\alpha} \approx 10^{-8} \text{ s} (\equiv \text{shake}).$$

爆縮型ではPuが圧縮されるので、密度が増加し、平均自由行程は減少する、
すなわち、 α の値は増大する！

中性子エネルギー $E_n = 1 \text{ MeV}$, 圧縮されていない最大の密度に対する
 c と α の例示的な値 [NWA2001-4.1]

核分裂性同位核	c	α
U-235	1.27	$1.78 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$
Pu-239	1.40	$3.15 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$

増倍率 α とその時間的变化(非ブースター型核分裂兵器の場合)



出典:[Glasstone1972A]のFig.21.

縦軸: α の値, 横軸:経過時間. α の値はマイナス(臨界未満)からゼロ(臨界)になり, その後, 非常に短い時間幅の間だけ, 極めて大きい正值(臨界超過)になり, さらに急速にゼロになり, 最後はマイナスになる. 従って, 縦軸の下部はそのままの値で, 上部は α の対数値であると理解した方がよい.

各時刻における α の具体的数値は, 多分2017年の現在でも, (高度な)軍事機密であるかもしれない.

爆発的エネルギーを生み出す核分裂連鎖反応と熱膨張との競争

- ・中性子数の単位時間あたりの増加率 α の値は実は、中性子注入から、爆発の最終段階までの時間経過により大きく変わる！

→機密解除された文献[Glasstone196][JASON2011]の α の具体的な挙動について記述に多数の空白ページがあるように、この情報は現在も軍事機密であると推測される。

- ・核爆発が想定された威力で起こるかどうかは、爆発的エネルギーを生み出す核分裂連鎖反応と、先行して起こる部分の核分裂連鎖反応のエネルギーに起因する熱膨張との競争で決まる[ロッシ1993][Goodwin2015] .

すなわち、Pu-240の自発核分裂による中性子の意図しない注入による事前点火(pre-initiation)があれば、核爆発の威力は実質的に削減される。というのは兵器(の核分裂性部分)それ自体が破裂し、エネルギーを放出するはずの核分裂連鎖反応を途中で打ち切ることになるから[ロッシ1993] [US-DOE1997] .

あるいは、爆縮過程またはタンパー(tamper, 慣性重量)のような装置が組み込まれていなければ、先行して起こる部分の核分裂連鎖反応のエネルギーに起因する熱膨張により、核分裂性物質自体が極短時間の間に飛散して、臨界未満になり、核分裂連鎖反応は直ちに止まる。

核爆発の原動力は高速中性子である

[Glasstone1963?]の引用

- ・(ほとんど)すべての発電用原子炉の原動力は、核分裂により発生する高速中性子が水などの減速材でエネルギーを大幅に低下された遅い中性子(熱中性子)である。

[Goodwin2015]

- ・特に、原子炉の出力制御は、核分裂とほぼ同時に発生する中性子(即発中性子, 全中性子数の約99%)ではなく、平均約13秒後に遅れて放出される中性子(遅発中性子, 残り約0.6%程度)によりなされる。このため、遅発中性子による核分裂連鎖反応の臨界状態の、人間による制御が可能となる。

- ・チェルノブイリ原発事故などで起こった即発臨界、すなわち核出力暴走(nuclear excursion)について;

核出力暴走と核爆発の違いについて、文献[石川1996]にやや詳しい解説がある。
(しかし、[石川1996]では原爆と水爆が区別されていない!)

原子炉の出力強度、または核爆発の威力密度に対応する物理量として、中性子数密度 n と速さ v の積として定義される中性子束(ϕ)がある。

$$\phi \equiv nv$$

www.physics.isu.edu/radinf/Files/Okloreactor.pdf

$$\rightarrow \phi(\text{原子炉}) \approx (10^{13} - 10^{14}) \text{ neutrons}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}),$$

$$\rightarrow \phi(\text{核爆発}) \approx 10^{30} \text{ neutrons}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}). \quad [\text{Serber1992}]$$

$$\therefore \frac{\phi(\text{核爆発})}{\phi(\text{原子炉})} \approx (10^{16} - 10^{17})$$

§ 3 ブースター型核分裂兵器

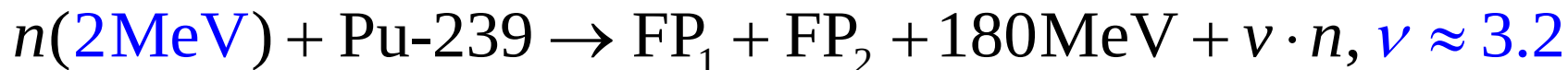
(DT核融合により威力強化された核分裂兵器)

§ 3.1 ブースター原理

核融合で強化された弾頭(ブースター核弾頭)とは, より具体的にはトリチウムが関与するDT核融合反応を媒介として, 核分裂反応を強化する仕組みをもつ弾頭であり, 専門的用語としてはTritium-boosting と呼ばれる事もある. [岡本・中原・森1984A,B] [Wilkie1984] [NWA2001-4.3][Gsponer2008]

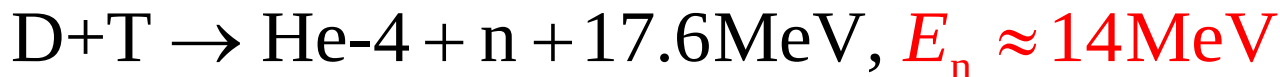
ブースター原理(核融合物質の添加による核分裂の高効率化)

核分裂生成核



高速中性子
による核分裂

超高温
超高压

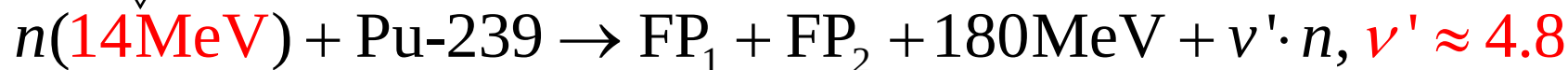


核融合

中性子
高速化
2.65倍

中性子
増倍率
1.5倍

超高温
超高压



強化された
核分裂

§ 3.2 ブースター型核分裂兵器の利点

DT核融合により威力強化された爆縮型核分裂兵器の利点[Gsponer2008]

- 1) 相対的に薄い中性子反射体・タンパーでよいという低い重量と小さい形状
- 2) 本質的安全性(トリチウムが装荷されなければ, ゼロまたは無視出来るほどの低威力)
→トリチウムの量により, 爆発威力を調節することが可能. **核兵器の出力可変技術**
- 3) **(意図しない) 事前爆発を心配しなくてもよい事**(=Pu-240などの自発核分裂または他の核弾頭の核分裂から飛散する中性子に対する抵抗性)
→原子炉級Pu (Pu-240などの自発核分裂性物質を有意に含む)でも核分裂兵器と同様!
[Garwin1998][Gsponer2009] [Goodwin2015]
- 4) X線に対する高度の透明性

効率向上の定量的な目安[Barnaby2004],[Chochran1994]

広島原爆の威力(約15 kT), 長崎原爆の威力(約20 kT)
核分裂爆弾による最大威力は約50 kT



ブーストされた核分裂爆弾の効率は通常の核分裂爆弾の約5-10倍, 最大500 kT.

→軍事的な費用効果比の観点からは, 過剰破壊である「水爆」よりも非常に有利.



(それ以上の爆発威力は(2段階以上の方式)水爆によってしか得られない

中性子1個が核燃料に吸収されたときに核分裂を起こす割合を P_f

$$P_f \equiv \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_c}, (\sigma_f: \text{核分裂の断面積}, \sigma_c: \text{中性子捕獲の断面積})$$

核分裂に際して平均 ν 個の中性子が放出されるので、核燃料により中性子が再生される割合を記号 η を用いて次のように定義する。

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

η は再生率(reproduction factor)と呼ばれる。

考えている系(核兵器の中核部)の中の中性子の最初の個数を N_0 とすれば、高速中性子による連鎖反応の n 世代までに発生する中性子の総数 $N(\eta, n)$

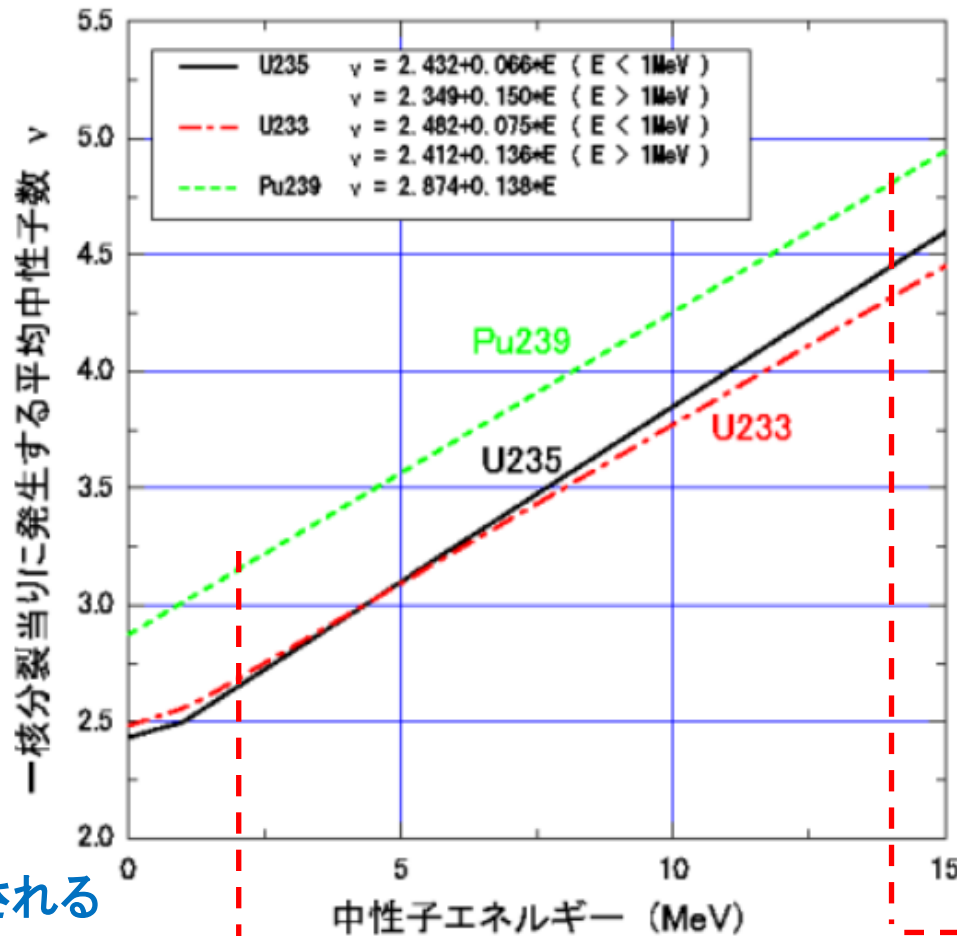
$$N(\eta, n) = N_0(1 + \eta + \eta^2 + \cdots + \eta^n)$$

$$= N_0 \frac{\eta^n - 1}{\eta - 1}, \quad (\text{for } \eta > 1)$$

$$\cong N_0 \frac{\eta^n}{\eta - 1} \simeq N_0(\eta^{n-2} + \eta^{n-1} + \eta^n), \quad (\text{for } \eta > 2, n \gg 1)$$

爆発威力は中性子の総数に近似的に比例する。

ブースター原理で効率が飛躍的に向上する理由の1つ



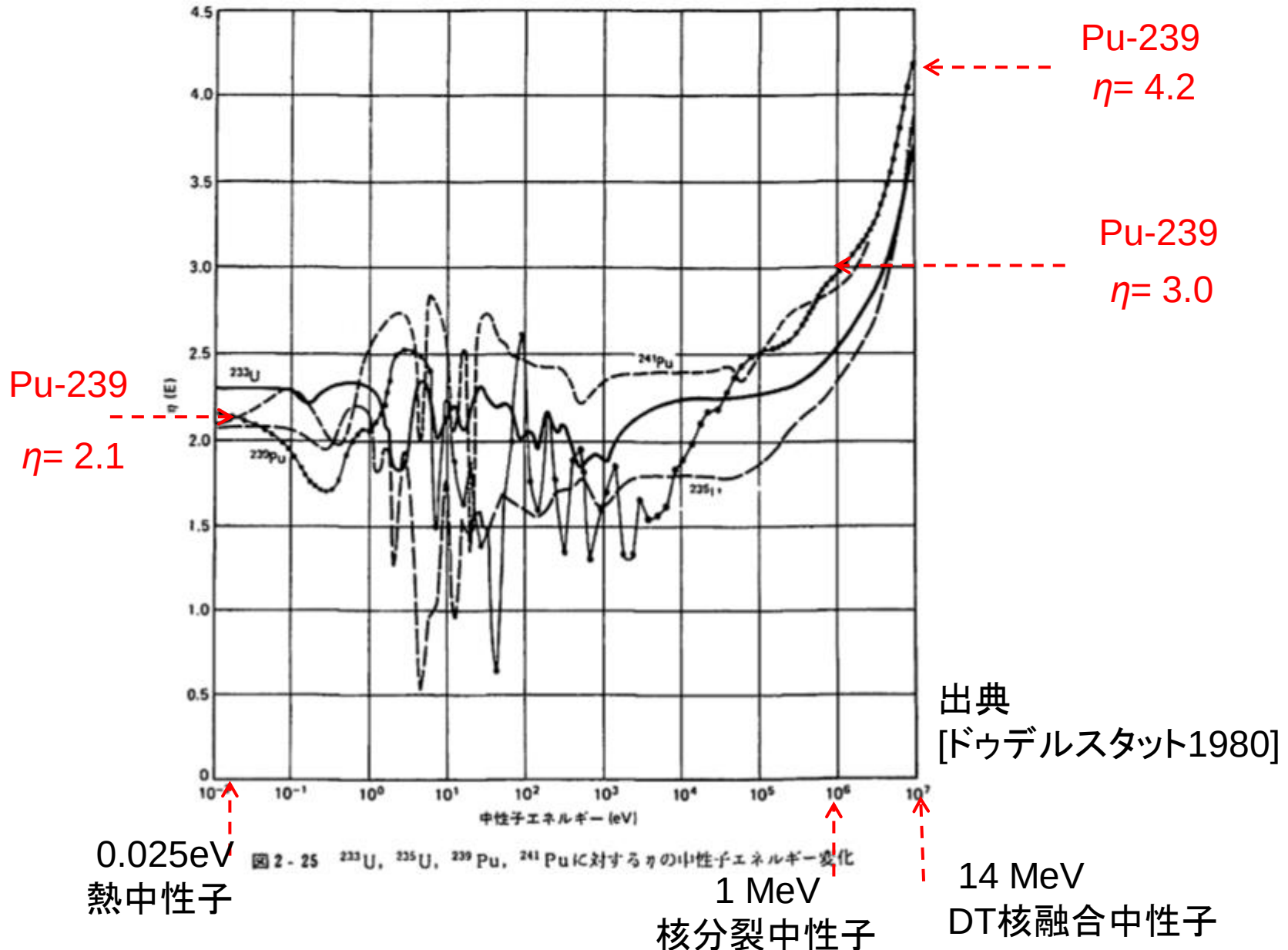
核分裂で放出される
中性子(平均2 MeV)

DT核融合で放出される
中性子(14 MeV)

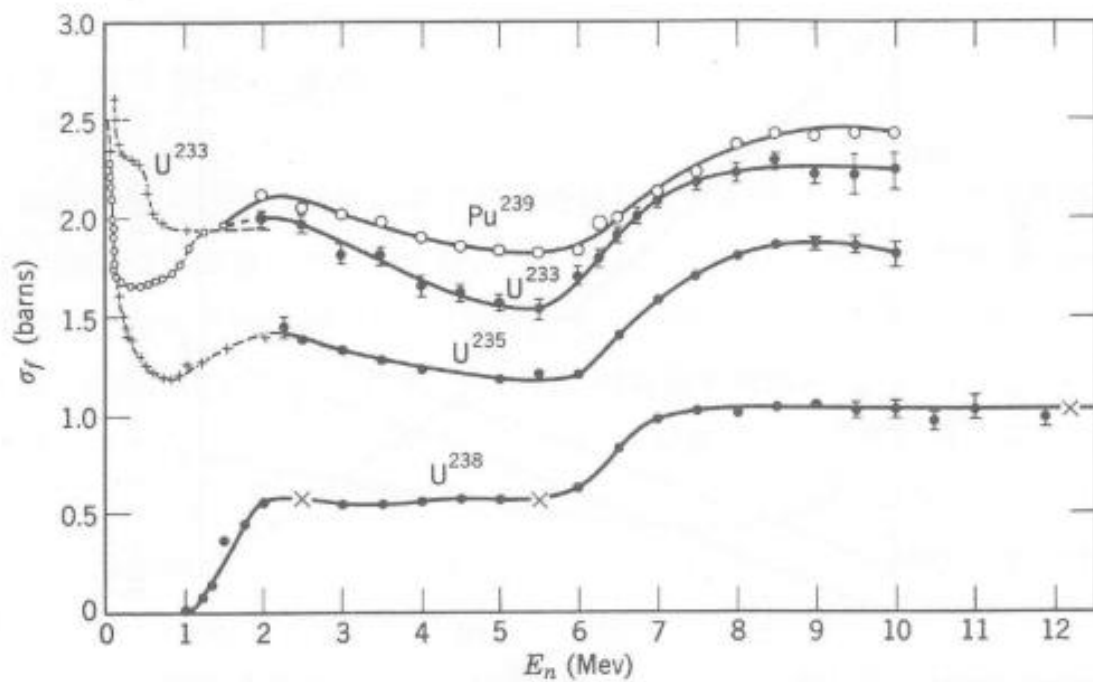
入射中性子エネルギーに対する1核分裂あたりに
発生する中性子数 ν の変化

[出典]平川直弘、岩崎智彦:原子炉物理入門、東北大学出版会、p.20

中性子の再生率 η のエネルギー依存性, 核種依存性



高速中性子による核分裂の断面積



Pu-239に対して; $\sigma_f = 1.0 - 2.2$ barns ($E_n = 1 \sim 2$ MeV)
 $\sigma_f = 2.5$ barns ($E_n = 14$ MeV)

ブースター原理における核融合反応の役割

1) DT核融合物質の量は約4gで、威力への寄与は高々2%程度である.
[NWF2001-4.3] [Gsponer2009][Chalmers2016]

TD核融合物質1モルの場合の核融合エネルギー E_{fusion} ;

$$E_{fusion} \approx 17.6 \text{ MeV} \times (6 \times 10^{23}) = 1.06 \times 10^{25} \text{ MeV}.$$

核爆発威力の単位 (1キロトン, 1 KT, TNT火薬1000トン相当)

$$1 \text{ KT} \equiv \text{Fission of } 1.45 \times 10^{23} \text{ nuclei} = 4.18 \times 10^{12} \text{ J (4.28)} \equiv 2.6 \times 10^{25} \text{ MeV}.$$

$$\rightarrow E_{fusion} \approx 0.4 \text{ KT}.$$

ブースター型核分裂兵器の全威力 $E_{fission+fusion} = 20 \text{ KT}$ ($\approx$ 長崎原爆の威力) とすれば,

$$\left(\frac{E_{fusion}}{E_{fission+fusion}} \right) \times 100 = 2 \text{ \%}.$$

「水爆」(=核分裂・核融合2段階の熱核融合兵器)における核融合エネルギーの寄与;
核実験の規模, 形式, 兵器の種類にも依存するが,
おそらく全威力の40%~50%が核融合エネルギーと推定される.

残りはPu-239(and/or U-235)の核分裂エネルギーが10%以下, 3次系(最外側)
のU-238 の核分裂エネルギーが約50%であろう[ムラ-2006].

TD核融合反応が起こるための条件の達成

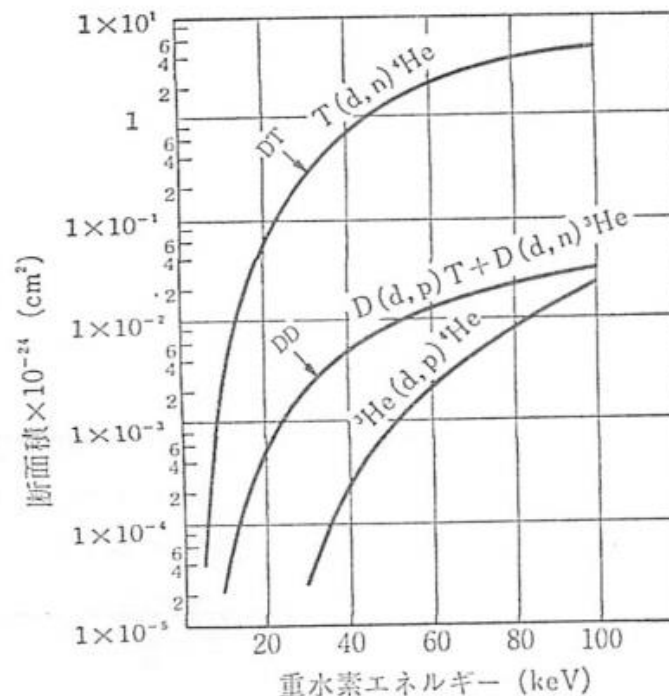
超高压；

高性能爆薬(10kg以上)の爆縮レンズの爆縮により、核分裂性物質が2.5分の1に圧縮され、理論的にはDT核融合物質は3分の1から4分の1に圧縮される[Gsponer2009] .

超高温；

核分裂連鎖反応から200KeV(=0.2MeV)以上のエネルギーが供給されれば、そのエネルギー領域において、TD核融合反応の断面積が最大に大きくなる.

核融合の 断面積



2) DT核融合(から発生する高速中性子)による核分裂連鎖反応の高効率化 ブースター原理による α の最大値の増加[NWA2001-4.3]

$$\alpha(\text{non-boosted}) = 3 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$$

$$\rightarrow \alpha(\text{boosted}) = 2.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$$

$$\rightarrow \frac{\alpha(\text{boosted})}{\alpha(\text{non-boosted})} \approx 8$$

$$E_n = 1 \text{ MeV}; N(\eta = 2.9, n) = N_0 \frac{\eta^n - 1}{\eta - 1} \approx N_0 \frac{\eta^n}{\eta - 1}$$

$$\rightarrow \frac{N(\eta = 3.0, n = 70)}{N_0} \approx \frac{3^{70}}{3 - 1} \approx 1.25 \times 10^{33}$$

$$E_n = 14 \text{ MeV}; N'(\eta' = 4.2, n) = N_0 \frac{\eta'^n - 1}{\eta' - 1} \approx N_0 \frac{\eta'^n}{\eta' - 1}$$

$$\rightarrow \frac{N'(\eta' = 4.2, n' = 53)}{N_0} \approx \frac{4.2^{53}}{4.2 - 1.0} = 1.37 \times 10^{33}$$

$$\therefore \frac{n'}{n} = \frac{53}{70} \approx 0.76$$

中性子の入射エネルギー
増加による核分裂断面積の増大化

DT核融合(から発生する高速中性子)
による核分裂連鎖反応の加速

Pu-239に対して;

$$\sigma_f = 1.0 \sim 2.2 \text{ barns}$$

$$(E_n = 1 \sim 2 \text{ MeV})$$

$$\sigma_f = 2.5 \text{ barns} \quad (E_n = 14 \text{ MeV})$$

平均 1.85倍化

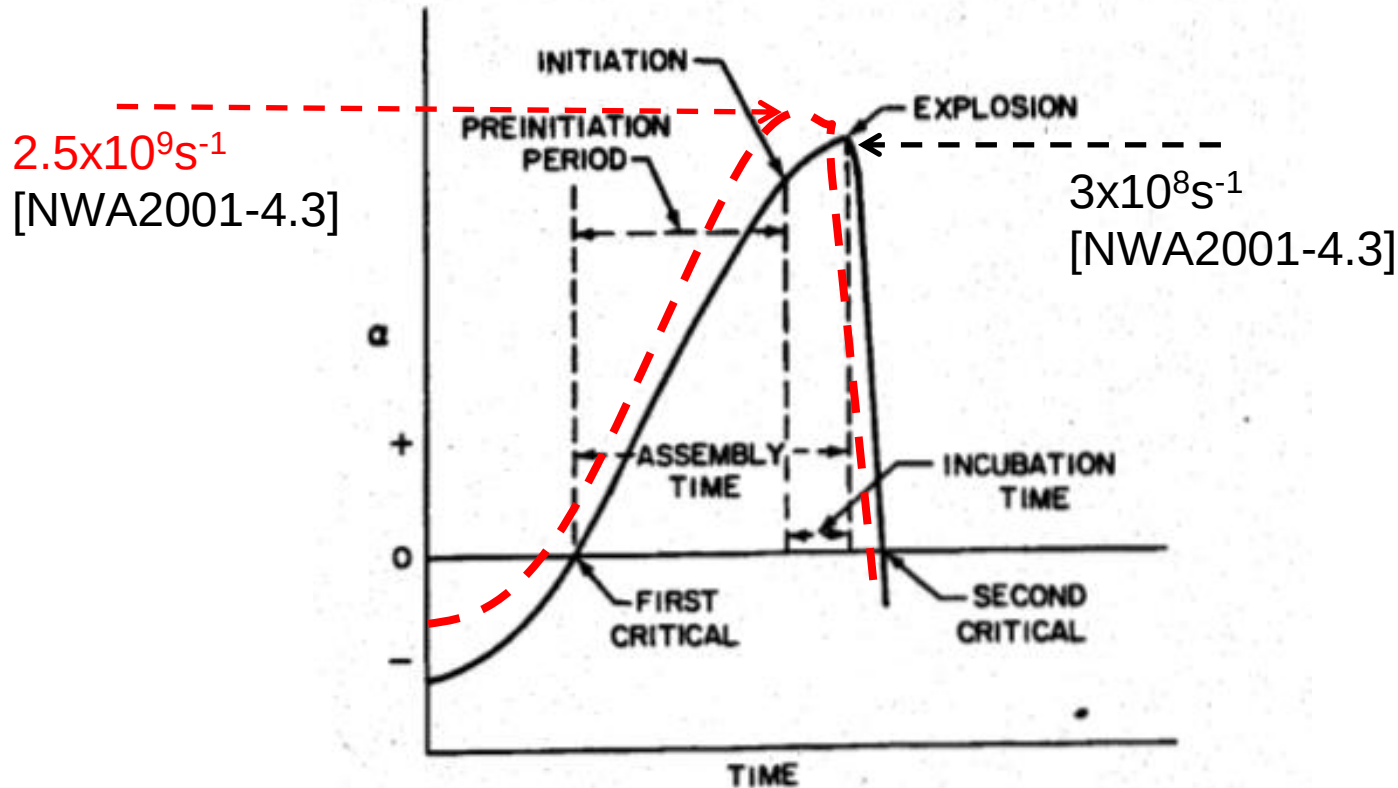
$$\frac{\alpha'}{\alpha} \approx \left(\frac{\eta' - 1}{\eta - 1} \right) \left(\frac{\sigma_f'}{\sigma_f} \right) \left(\frac{v_n'}{v_n} \right),$$

$$\text{for } \eta = 3.0, \eta' = 4.2, v_n' / v_n = 2.65, \rightarrow \frac{v_n'}{v_n} = \sqrt{\frac{K'}{K}} \approx \sqrt{\frac{14 \text{ MeV}}{2 \text{ MeV}}} = 2.65$$

$$\sigma_f' / \sigma_f \approx 1.85$$

$$\rightarrow \frac{\alpha'}{\alpha} \approx 7.84$$

増倍率 α とその時間的变化(ブースター型核分裂兵器の場合の推定(点線))



実線図の出典[Glasstone1972A]のFig.2.1 (non-boasted, implosion-type weapons) ;

縦軸: α の値, 横軸:経過時間. 増倍率 α とその時間的变化(ブースター型核分裂兵器の場合の解説を参照のこと. [Glasstone1963]には, *In modern boosted, implosion-type weapons, the situation is quite different from that described above.*

と記述されている. that described aboveとはnon-boasted, implosion-type weaponsのことである.

核融合燃料(T,Dガス)はできるだけ圧力が高い事が重要

[NWA2001-4.3]

核融合反応率は、与えられた温度の下で、核融合燃料の密度の2乗に比例する。

→密度がより高く達成される程、ブーストを開始するのに必要な温度はより下がる。

→より低いブースト開始温度では、ブースト前に必要な核分裂数がより少なくて済む

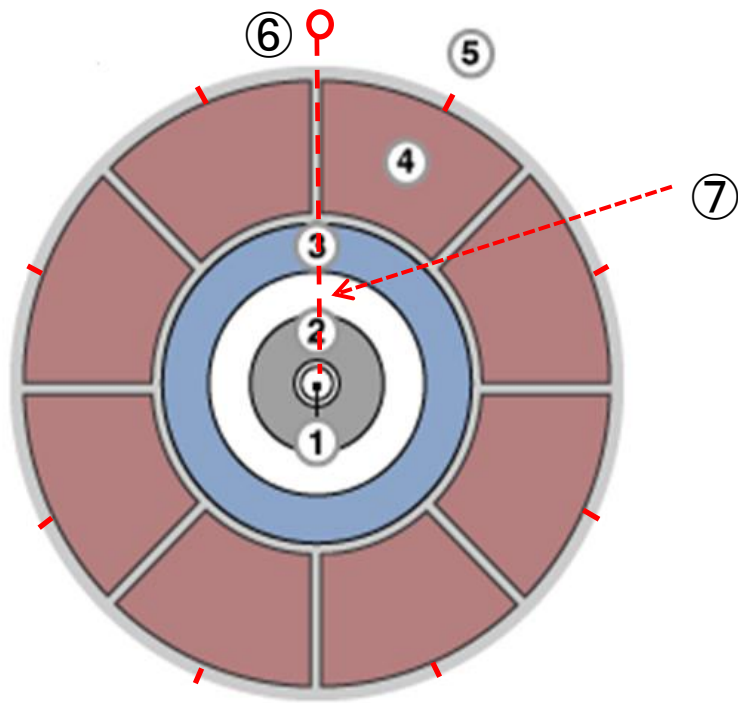
→より低い α の値(を持つコア)でも可能になる！

核融合燃料の密度を高くするには、

- 1) 最初から高い密度にする(高压ガス),
- 2) 爆縮時間中の実効的な圧縮.

最もありそうなことは上記の両方による.

北朝鮮のブースター型核分裂弾の構造の推定



- ①: 点火装置(中性子源または中性子発生装置),
- ②: 核分裂性物質(Pu-239あるいはU-235またはそれらの併用),
- ③: タンパー(tamper)または中性子反射体(Be-9など)
- ④: 爆縮レンズ(高速爆薬と低速爆薬の組み合わせ)
- ⑤: 雷管(detector)
- ⑥: 重水素(D)と三重水素(T)のガスの保管容器
- ⑦: 最適の時間帯に兵器中心部に注入されるTDガス(無色の部分は間隙であり, 爆縮による圧縮効果を高めるため.)

ブースター型核分裂兵器の構造(概念図)

[Barnaby2004]と下記情報を元に作図

http://defense-update.com/wp-content/uploads/2016/03/nuclear_bomb_schematic_view.gif

「TDガスの保管容器が中心部以外にあり、使用前に目的に合わせ、適量(充填する量によって核威力を調節する)が中心部に注入されること」について補足

ブースター型核分裂兵器が知られはじめた頃、天然にはほとんど存在しない三重水素核Tのベータ崩壊半減期が約12.3年であるために、三重水素が不足すると、核超大国に備蓄された核兵器は静かに滅びて行くのではないかという分析がなされた[Wilke1984]。当時は引用者もその通りであると感じていた。

しかし、TDガスの保管容器を中心部以外に付ければ、ベータ崩壊して劣化する三重水素を容易に交換できる。

それだけではなく、**注入する三重水素の有無または量の調節により、威力を設定できるという核兵器技術の革新をもたらしたことになる。**



図6 核弾頭を視察するキム・ジョンウン第1書記.
出典²⁵⁾).

図6に見える核弾頭にはトリガーが連結されている穴がある.
雷管の重水素・三重水素の混合ガスボンベをその穴に接続させて、
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.

§ 4核分裂-核融合-多段階型核兵器としての「水爆」

- ・2段階熱核融合兵器(「水爆」)の原理はかなり複雑か、または意外に複雑ではない:
核分裂物質は、核爆発の際、固体から瞬時にガス化するので、その物理的過程は複雑である。
しかし、「水爆」の核融合が起こる直前に、ガス状態になっているので、その物理的過程は、
相対的には、単純であると推定される。

[岡本・中原・森1984B] [Gsponer2009]

＜核融合反応が起こるためには、超高温*¹⁾と超高圧*²⁾が必要不可欠＞

→超高温と超高圧を発生する仕組みをどうするか？

→核分裂連鎖反応により発生する超高温と超高圧を活用する

→しかし、核融合が起こるまで、核融合物質の飛散は避ける必要あり



1) 核分裂中心の部分(1次系,primary)と

核融合中心の部分(2次系,secondary)とに概念的および空間的に分離する、

2) 1次系と2次系を空間的に隔てておき、

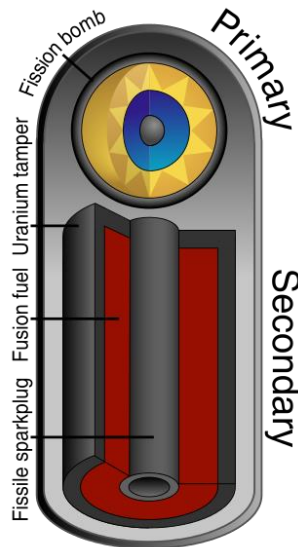
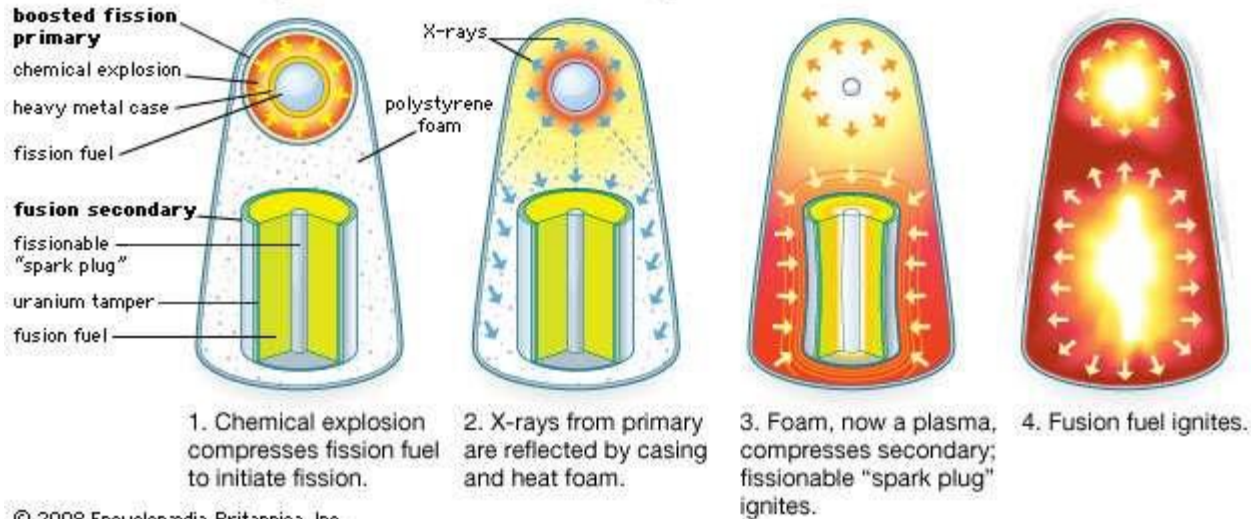
1次系で発生する超高エネルギー電磁波(ガンマ線、X線)と超高圧を、
核融合が起こるように、2次系にできるだけ集中する配置にする。

3) タンパーの役目を兼ねる3次系として、ウラン238を配置し、1MeV以上の中性子
に対しては核分裂するという性質を利用して、さらに爆発威力を増加させる。

爆発プロセスが核分裂(fission)→核融合(fusion)→核分裂(fission)と3段階の
核反応を経ることから、3F爆弾と呼ばれ、現在実用化されている水素爆弾はほ
ぼこの形式である。

複層化された2段階の核分裂・核融合の混成兵器 (hybrid weapon)としての「水爆」

Teller-Ulam two-stage thermonuclear bomb design



1) 初期の1次系は核分裂物質のみを用いたが、その後、ブースター技術を採用し、核融合により強化された核分裂装置 (boosted fission primary) に改良されている。

2) また、2次系の周辺部にウラン238を配置し、高速中性子によるウラン238の核分裂によるエネルギー (全放出エネルギーの約50%) も追加される。

出典: Britannica

Thermonuclear bomb, FUSION DEVICE

<https://www.britannica.com/technology/thermonuclear-bomb>

北朝鮮“水爆実験”の衝撃 危機の行方は NHKテレビ・クローズアップ現代＋2017年9月4日(月)



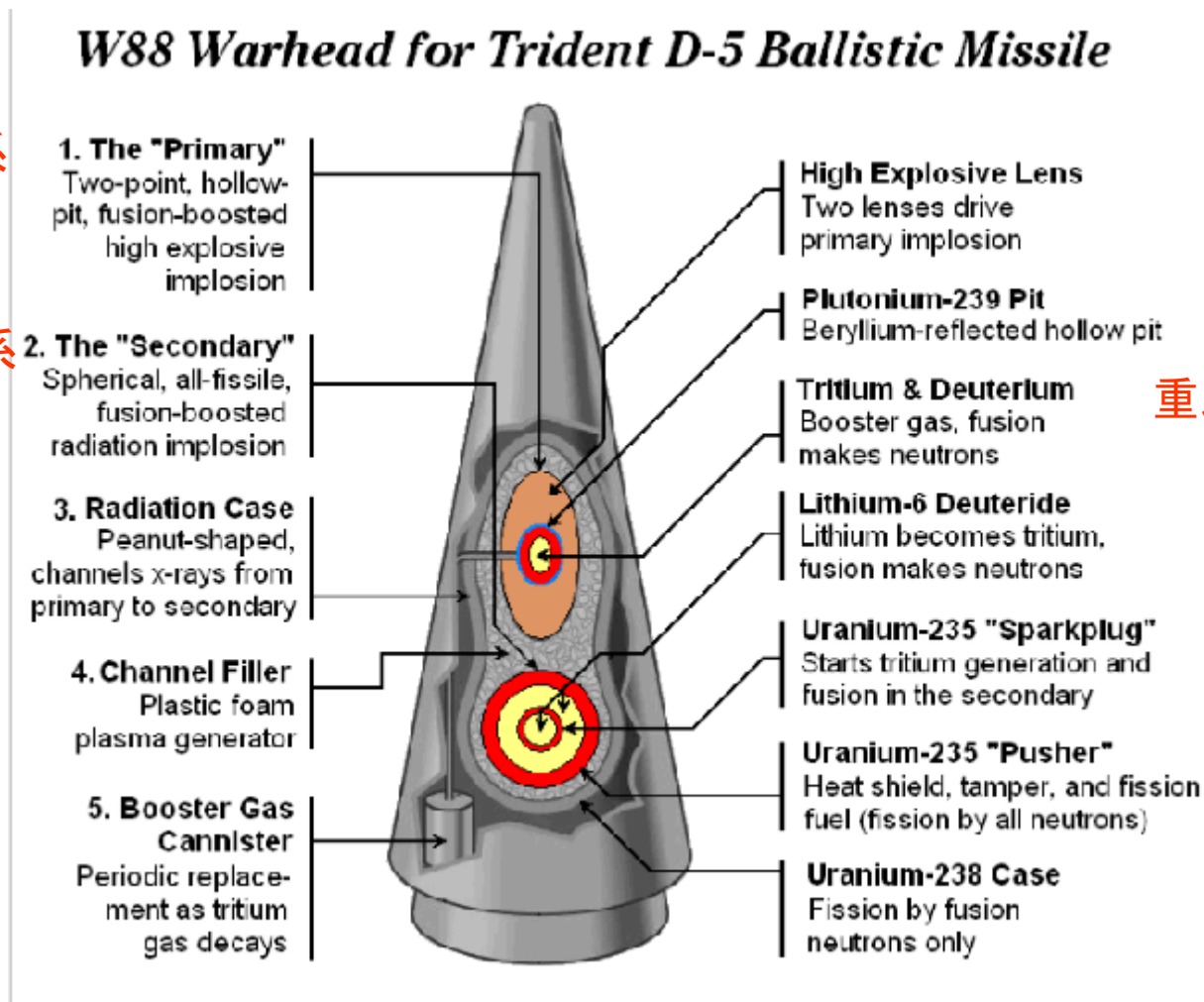
ソウル大学 原子核工学科 ソ・ギョヌニョル氏
「前が核融合させる部分、そして後ろが起爆装置。この形はまさしく水素爆弾といえます。
旧ソ連が開発した水爆の形状に非常によく似ています。」

出典 <https://www.nhk.or.jp/gendai/articles/4026/index.html>2017

米国の代表的な熱核弾頭W88(最大威力, 475キロトン)

1次系

2次系



重水素・三重水素のガス

出典 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1f/W88_warhead_detail.png

§ 5 「核拡散」とその防止のための措置等

- 1) 核拡散(核兵器拡散、nuclear proliferation)には核兵器を保有する国(またはグループ等)が増えることを意味する水平拡散(horizontal proliferation)と、核兵器を保有している国の核兵器の量・種類が増え、または質的改良を意味する垂直拡散(vertical proliferation)の2種類がある。
多くの場合、水平拡散だけを含意するが、本来は独立に、同等に、考察すべき。
- 2) 核不拡散条約(nuclear Non-Proliferation Treaty, NPT)は1970年に発効したが、
①核兵器の水平拡散防止、②核兵器の垂直拡散防止、③原子力平和利用促進、
の3つである。②については第6条で核保有国に核軍縮義務を課していると解釈されているが、実効性に欠ける。すなわち、核兵器保有国(公式)と非核兵器保有国の間に明確な格差が存在するという意味で不平等条約である。
- 3) 核兵器の水平拡散防止については、国際原子力機関(International Atomic Energy Agency, IAEA)が技術的査察の任務も持つ。

§ 5.1 核兵器の水平拡散の「条件」または「要素」

A 技術的条件

A1 核分裂性物質

適切な、質的水準と量の核分裂性物質の入手、
またはその生産のための制度・インフラ・人材

A2 核兵器の設計技術

1945年長崎原爆の設計技術から核保有国の現代的設計技術までの
スペクトルの中でどこを想定するべきか

B 政治的条件

政府の戦略・政策

国内世論の傾向・動向←広島・長崎への原爆投下、マグロ漁船のビキニ水爆被ばく
国際世論や外交的影響・効果←核拡散防止条約から脱退の場合の影響など
←周辺国の核開発

類似の事情は「原発＝潜在的核抑止」論
の条件についても存在するかもしれない。

§ 5.2 核兵器用の核分裂性物質について:

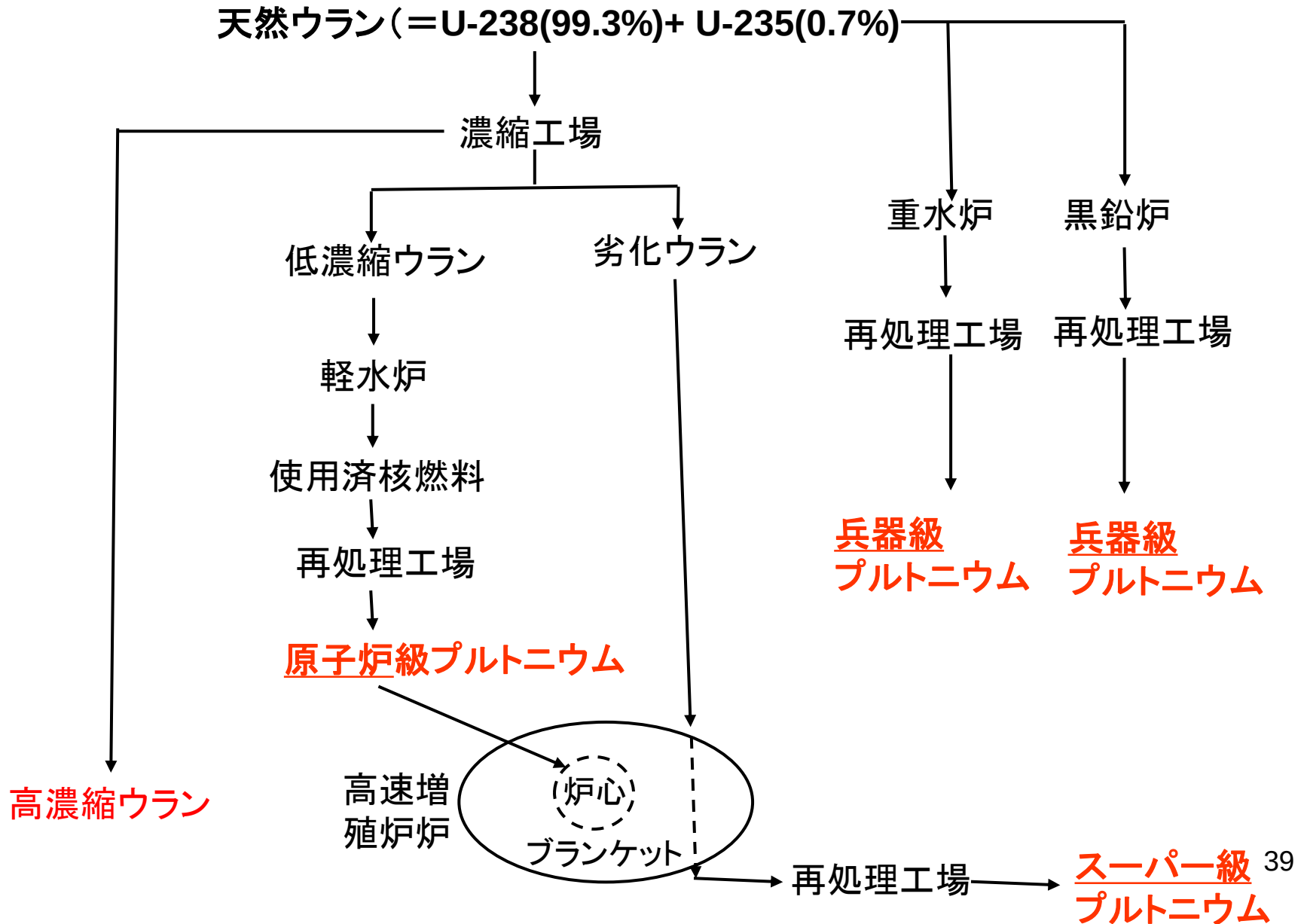
高濃縮ウラン: 多段階多数の遠心分離機などが必要

商用原子炉またはプルトニウム生産炉における プルトニウムの品位分類

分類	Pu_240の含有率	兵器への利用可能性
スーパー級	<3%	最適
兵器級	3~7%	標準的材料
燃料級	7~18%	利用可能、核実験実績あり
原子炉級	18~30%	利用可能?
MOX級	>30%	現実的に利用不可能?

プルトニウム240は、中性子の吸収により誘起される核分裂とは異なり、自発的に核分裂して、その際、中性子を放出する確率がかなり大きく、核爆発を不発弾にする可能性が大きい。

§ 5.3 核兵器の水平拡散の技術的経路(核分裂性物質の生産)



プルトニウム生産炉

1) 黒鉛炉:

減速材に黒鉛(炭素)を用いる原子炉のこと。黒鉛減速原子炉 (Graphite moderated reactor)とも言われる。黒鉛は安価で大量に入手でき、中性子の吸収が少なく減速能力も比較的大きい優秀な減速材である。中性子吸収量が少ないため、黒鉛炉は濃縮していない天然ウランを燃料として使用できる。

世界ではこの炉が約12%使われている(原子炉基数ベース、1999年現在)。

E.フェルミの世界最初の原子炉「シカゴ・パイル1号」がこの形式。

現在の商用黒鉛炉の直接のルーツはプルトニウム生産炉(原子爆弾の材料を作る為の炉)である。

2) 重水炉:

重水炉(HWR:Heavy Water Reactor)は、減速材に重水を用いる原子炉のこと。加圧水型がほとんどであり、この場合はPHWRとよばれる。重水は高価で、高速中性子の減速能力は軽水に劣る。しかし、中性子吸収量が小さく(軽水の300分の1)減速材として優れており、燃料として安価な天然ウランを使用できる。

このため、天然ウラン資源が豊富なカナダが開発に取り組み、1960年代に重水減速重水冷却圧力管型炉(CANDU炉)を実用化した。

現在商業運転されている重水炉は全てこのCANDU炉およびその発展型であり、2010年1月末現在、運転中43基、建設中7基、計画中4基となっている。

3) 高速増殖炉(プルトニウム増殖炉):

§ 5.4 原子炉級プルトニウムは核兵器に使えないか？

日本は「再処理技術とウラン濃縮技術」を獲得しようとしている過程にあり、2018年末時点で、非核兵器保有国中で最多の約45.7トンの原子炉級プルトニウムを保有¹⁾ していて、米国政府関係者のみならず、周辺諸国からも警戒の見解が表明されている²⁾。

一方、日本原子力研究開発機構が運営する原子力百科事典「原子炉級プルトニウムは原子炉の燃料としては使用できるが、原子爆弾の原料には適していない」³⁾ と記されている。日本国内では、原子炉級Puを用いた核兵器の可能性を低く評価する見解は原発に対する立場の違いを超えて、一部の識者たち⁴⁻⁷⁾ から表明されている。

これらの主張が正しければ、国際的な懸念は杞憂になるが、真相はどこにあるだろうか。

原子炉級Puを用いた核兵器の可能性が十分に評価されていない理由の1つは、議論が長崎原爆水準の設計による核兵器にのみ焦点を当てていることと思われる。しかし、これはまったく非現実的である。今日そのような水準の設計を最初の核兵器として使用する国はない⁸⁾。

→岡本良治「原子炉級プルトニウムは核兵器に使えないか」

<http://jsa.gr.jp/04pub/2021/JJS202101okamoto.pdf>

「原子炉級プルトニウムと核兵器」ノート

41

<http://rokamoto.sakura.ne.jp/fukushima/reactor-grade-Pu-and-nuclear-weapon-note.pdf>

元原子力工学者のリアルな推測

出典：小川雅生「福島原子力災害を経た原子力のあり方」

<http://oceangreen.jp/>

<http://oceangreen.jp/kaisetsu-shuu/Tomodachi-Q&A-Monju-Saishori.html>

Q 日本の原発は核兵器用のプルトニウム入手のため、核兵器保有の潜在力保持のためだとも言われていますが？

(中略)

ソビエト連邦が崩壊した後、ソビエトが保有していた古い核兵器の解体に日本が協力しました。プルトニウムを取り出すためです。そのとき、解体に参加した人は核兵器の構造を見たわけですが、プルトニウムを爆縮する起爆装置を見たはずで、その仕組みをほぼ理解したと思います。

さらに、日本は高速炉「常陽」と高速増殖炉「もんじゅ」の運転をした結果、プルトニウム239の濃縮度が90%を超える兵器転用が可能なプルトニウム239を少量ですが保有しています。少量とは言っても化学分離をすれば核兵器を約10個作ることができる量です。起爆装置のノウハウらしきものに加えてが原料物質があると考えてよさそうです。

参考文献情報

<広島原爆・長崎原爆>

3) ファットマン, ウィキペディア (フリー百科事典).

岡本良治, 中原純, 森 茂康「核分裂兵器と爆縮技術」

『日本の科学者』19(3), 21-25 (1984).

[http://rokamoto.sakura.ne.jp/research/okamoto_nakahara_mori_JSA19\(1984\),21.pdf](http://rokamoto.sakura.ne.jp/research/okamoto_nakahara_mori_JSA19(1984),21.pdf)

<水爆>

•4) 岡本良治, 中原純, 森 茂康「水爆とは何かーブースター効果とテラー・ウラム配置ー」『日本の科学者』19(10), 45-51 (1984)

•[http://rokamoto.sakura.ne.jp/research/okamoto_nakahara_mori_JSA19\(1984\)45.pdf](http://rokamoto.sakura.ne.jp/research/okamoto_nakahara_mori_JSA19(1984)45.pdf)

[Wikipedia] 水爆, ウィキペディア

https://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%B4%E7%B4%A0%E7%88%86%E5%BC%BE#/media/File:Teller-Ulam_device_3D.svg

<ブースター核分裂兵器>

- 1) 岡本良治「北朝鮮核開発の到達点の科学的・技術的分析ノート1」(随時更新).
<http://rokamoto.sakura.ne.jp/fukushima/North-Korea-nuclear-weapon-analysis-note-1.pdf>
- 2) 岡本良治, 中原純, 森 茂康「核分裂兵器と爆縮技術」
『日本の科学者』19(3), 21-25 (1984).
- 3) ファットマン, ウィキペディア (フリー百科事典).
- 4) 岡本良治, 中原純, 森 茂康「水爆とは何かーブースター効果とテラー・ウラム配置ー」『日本の科学者』19(10), 45-51 (1984).
- 5) Gsponer, A.: *Fourth Generation Nuclear Weapons Military effectiveness and collateral effects*, February 2, 2008.
<https://arxiv.org/pdf/physics/0510071.pdf>
- 6) Chochran, T.B. : *Hydronuclear Testing or a Comprehensive Test Ban?*, April 10, 1994.
http://web.archive.org/web/20160304061947/http://docs.nrdc.org/nuclear/files/nuc_04109401a_122.pdf
- 7) kT(キロトン)とは高性能火薬の千トン相当のエネルギーであり, 10^{12} カロリー(1兆カロリー)のこと.
- 8) Glasstone, S. T. : *An Introduction to Nuclear Weapons*, March 1963,(WASH-1037);
http://www.alternatewars.com/WW3/Glasstone_Intro/Introduction_MAR-1963.pdf
- 9) Goodwin, B. T. 「核爆発装置における原子炉級プルトニウムの有用性」日米原子力エネルギープロジェクトシンポジウム, 東京, 2015年11月6日.
http://kakujo.net/npt/pu_nd.html

- 10) 北朝鮮核実験, ウィキペディア (フリー百科事典) .
- 11) Wilkie, T. :*Old age can Kill the bomb*, New Scientist, 1984年2月16日, p.27.
- 12) Sublette, C. :*Nuclear Weapon Archive*(Version 2.25) 9 , August 2001. 4.3 Fission-Fusion Hybrid Weapons.
<http://nuclearweaponarchive.org/Nwfaq/Nfaq4-3.html#Nfaq4.3>
- 13) Barnaby, F. :*How to Build a Nuclear Bomb:And Other Weapons of Mass Destruction* (Nation Books) , Nation Books; First Trade Pap., 2004.
- 14) Garwin, R. L. :*Reactor-Grade Plutonium Can be Used to Make Powerful and Reliable Nuclear Weapons: Separated plutonium in the fuel cycle must be protected as if it were nuclear weapons*. August 26, 1998.
<https://fas.org/rlg/980826-pu.htm>
- 15) Gsponer, A. and Jean-Pierre Hurni, *The physical principles of thermonuclear explosives, inertial confinement fusion, and the quest for fourth generation nuclear weapons*, January 20, 2009. <https://cryptome.org/2014/06/wmd-4th-gen-quest.pdf>
- 16) Mark, J. C. appendix by von Hippel and E. Lyman, *Explosive Properties of Reactor Grade Plutonium*, Science and Global Security, 17:170-185, 2009.
<http://scienceandglobalsecurity.org/archive/sgs17mark.pdf>
- 17) 社団法人 原子燃料政策研究会「原子炉級プルトニウムと兵器級プルトニウム調査報告書」2001年5月. <http://www.cnfc.or.jp/j/proposal/reports/>
- 18) 河田東海夫「日本が保有するプルトニウムでは核武装はできない」2017年3月30日. <http://www.gepr.org/ja/contents/20161108-01/>

- 19) 日本国際問題研究所「9月9日の北朝鮮における事象に関するとりあえずの解析結果」2016年9月15日.
<http://www.cpdnp.jp/pdf/DPRK2016/dprk-2016.9.15.pdf>
- 20) Kelly Kiloton Index of Earthquake Moment Magnitudes,
<http://www.english.ucla.edu/all-faculty/335-kelly-kiloton-index-of-earthquake-moment-magnitudes>
- 21) Kang, J. and Hayes, P.: *Technical Analysis of the DPRK Nuclear Test*, October 20, 2006. <http://nautilus.org/napsnet/napsnet-special-reports/technical-analysis-of-the-dprk-nuclear-test>
- 22) R. L. ガーウィン, F. N. フォン ヒッペル「北朝鮮核実験の技術的分析」『世界』2006年12月, pp. 68－71. 原文
https://www.armscontrol.org/act/2006_11/tech
- 23) Vishwanathan, A. , Chandrashekar, S. , Krishnan, L.V. and Sundaresan, L.: *North Korea's 2016 Nuclear Test: An Analysis*, ISSSP Report No. 1-2016, January 10, 2016.
<http://issp.in/north-Koreas-2016-nuclear-test-an-analysis/>
- 24) Chalmers, H. : *Producing Tritium in North Korea*,
Trust & Verify, January-March 2016, Issue Number 152, pp.1-6.
<http://www.vertic.org/media/assets/TV/TV152.pdf>
- 25) ハンホソク (韓 浩錫, 米国統一学研究所所長) 「核兵器兵器化工場の強化型核分裂弾と核融合弾」2016年3月14日. (ハングル語表記であるが、自動翻訳により大意は理解できる.)
<http://m.jajusibo.com/a.html?uid=26414§ion=sc38§ion2=>
- 26) Albright, D. : *North Korea's Nuclear Capabilities: A Fresh Look*, April 28, 2017.
<http://isis-online.org/isis-reports/detail/north-Koreas-nuclear-capabilities-a-fresh-look>
- 27) 鈴木達治郎「北朝鮮核実験にどう対応すべきか」朝日新聞WEB RONZA、2016年1月20日.

<原子炉級プルトニウム関係>

- 1) 内閣府原子力委員会「我が国のプルトニウム管理状況」2019年7月30日.
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2019/siryo28/05.pdf>
- 2) H.A.ファイブソン, A.グレーザー, Z.ミアン, F.フォン・ヒッペル「核のない世界への提言－核物質から見た核軍縮」(鈴木達治郎監訳, 富塚 明訳, 法律文化社, 2017)
- 3) 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構(JAEA)編, 原子力百科事典「原子炉級プルトニウム」
https://atomica.jaea.go.jp/dic/detail/dic_detail_1950.html
- 4) 原子燃料政策研究会「原子炉級プルトニウムと兵器級プルトニウム調査報告書」2001年5月. <http://www.cnfc.or.jp/j/proposal/reports/>
- 5) 河田東海夫「日本が保有するプルトニウムでは核武装はできない」2016年11月8日.
<http://www.gepr.org/ja/contents/20161108-01/>
- 6) 野口邦和「原子力発電と核兵器との関係をめぐって」NERIC NEWS, No.419, 2019年11月号, pp.2-3.
- 7) 核開発に反対する会編「増補新版 隠して核武装する日本」影書房, 2013年.
- 8) Jones, G., *Reactor-Grade Plutonium and Nuclear Weapons: Exploding the Myths*, February 20, 2018, Nonproliferation Policy Education Center.
<http://www.npolicy.org/thebook.php?bid=37>