

北朝鮮核開発の到達点の科学的・技術的分析ノート1^{*1)} ーブースター型核分裂兵器^{*2)}の小型化・標準化・規格化ー

(最終更新年月日:2017.9.6)

岡本良治^{*3)}

目次

- § 1. なぜ今, 北朝鮮の核兵器技術を問題にするか
- § 2. 核兵器の世代
- § 3. ブースター型核分裂兵器
- § 4. 北朝鮮による核実験・ミサイル実験の経過と到達点
- § 5. 北朝鮮による核実験・ミサイル実験をめぐる直近または
近未来の事態
- § 6. まとめと課題

引用文献・情報

*1)日本科学者会議編「日本の科学者」(本の泉社)2017年8月号に掲載予定の論文主題とその関連事項への補足ノート. 日本科学者会議福岡支部・核問題研究会例会2017.3.25の報告に加筆.

*2)boosted implosion-type fission weapon, DT核融合により威力を強化された爆縮型核分裂兵器. 「強化原爆」, 「ブースト型核分裂兵器」, 「ブースター型核分裂兵器」などの表現がある.

*3)九州工業大学・名誉教授(原子核物理学, 核・原子力問題)

Filename=North-Korea-nuclear-weapon-analysis-note20170602A.ppt

(要約)

- ・北朝鮮の軍事機密に関わることだけに、確定的評価を下すには、客観的証拠が不足している。
- ・しかし、核実験の経過と政府指導部の言明を総合的に考慮すれば、北朝鮮は高効率の洗練された核兵器としてのブースター型核分裂弾頭の生産と配備を開始できるようになった可能性が高い。このまま放置すれば、質・量の両面で、北朝鮮の核兵器能力はここ数年のうちに飛躍的に高まる可能性が高い
- ・しかし、ブースター型核分裂弾頭は米国を初め、核兵器保有国の全てがすでに獲得し、実戦配備している核軍事技術システムであり、核兵器の第二世代に属するものであって、北朝鮮が初めて到達した核兵器技術ではない。
- ・ブースター型核分裂兵器は原子炉級プルトニウムの、実効的な核兵器としての使用も可能にすると考えられる。

「ほとんどの人々について言えば、問題なのは無知ではなく、知っているという思い込みである」[ムラ-2010]

§ 1. なぜ今、北朝鮮の核兵器技術を問題にするか

- ・偵察衛星写真から、北朝鮮が6度目の核実験の準備がほぼ完了したとの報道。
[38Notrh20170412], [NY-Times20170412]
- ・北東アジアの政治的・軍事的緊張の重要な震源のひとつとしての北朝鮮の核兵器実験・ミサイル実験の動向とその背後にある北朝鮮指導部の戦略の分析の緊急性があると筆者は考える。北朝鮮問題については社会科学的な分析[久古2013]だけではなく、科学的・技術的な分析も必要であると筆者は考える。
- ・米国における北朝鮮への自衛的先制攻撃論の高まりと米韓合同軍事演習(2017年3月－4月)。
- ・2017.4. 6米軍によるシリア空爆とそれへの北朝鮮指導部の強い反発。
- ・第三次世界大戦(全面核戦争)の可能性の高まりについての具体的で系統的な分析に裏付けられた論考もある[Schlosser2013] [Schlosser2016]。
- ・実戦における唯一の被爆国としての日本では核兵器への反対の世論は根強いと考えられている。しかし、必ずしも核兵器の理解を深めること、あるいは科学的・技術的分析や核戦争の想定される被害の具体的検討は、残念ながら、十分には行われていない。この点, [NY-Times20170412]など, 米国内の報道と対照的。

・もちろん、日本国内では広島原爆、長崎原爆による被害と被爆者の長期にわたる体験は繰り返されてはならず、世代を超えて継承すべきことである。

しかし、1960年代から米ソ冷戦時代に核兵器の垂直的拡散がおり、恐怖の均衡が続いただけでなく、1990年代以降も、インド、パキスタンが核兵器を保有するという核兵器の水平的拡散が起こった。

・核兵器技術についての共著論文(1984年)[岡本・中原・森1984A,B]の更新の必要性；発表当時には非常に限られた文献しか参考にできなかったが、その後、単行本だけではなくインターネット上に関連する基本的情報や機密解除された情報等が公開されている。機密解除された情報の要所要所が空白になっていることも少なくないが。

・拡散している核兵器の科学的・技術的分析や核戦争の想定される被害の具体的検討[岡本1985]などは核兵器廃絶の運動の発展、特に節目ごとの課題設定の的確度および精度を高めるためには必要不可欠ではないかと筆者は考える。原発問題と同様に、無知、無関心が危険性を拡大する背景にもなったのではないだろうか。約30年におよぶ核兵器技術の進展について不勉強であったことへの自戒を込めて、特に、北朝鮮の最初の核実験(2006年)の評価を、「設計の20分の1以下の不完全爆発で、失敗だった」という思い込み[ムラー2010]と北朝鮮指導部の核兵器開発についての戦略的決意の過小評価が国内外でなされたことが、その後の外交交渉の低調化の背景となって、2016年1月以降の脅威の新段階を迎えたと筆者は思える。

・文献 [防衛省2016]ではミサイル問題の記述に主眼が置かれている。しかし、北朝鮮のミサイル問題は、宇宙開発と弾道ミサイル開発の両用技術の問題として捉え、すべての国に求められる基準から議論を整理することが必要である。大量破壊兵器(とりわけ核兵器)の問題が解決すれば、弾道ミサイル問題自体は相対的に重要ではなくなる[長大RECNA2015]。

・北朝鮮の4度目の核実験(2016.1.6)がブースター型核分裂兵器の実験ではないかという報道や論考[長大RECNA2016][防衛省2016], [JNES2016]が国内でも出ているが、その科学的・技術的分析は十分ではないように筆者には思える。

・この小論考は、筆者のオリジナルな寄与はほとんどないが、関連する公開された資料、文献を踏まえて、科学的・技術的に分析したものである。関心のある人びとにとって、現在と近未来の動きをより深く理解する一助となれば幸いである。

もちろん、北朝鮮の核ミサイル危機問題には、しばしば報道されているように、政治的分析等も必要不可欠であるが、この小論は相補的な目標を目指したものである。

§ 2.大量破壊兵器としての核兵器とその世代

核兵器は、爆発的な核分裂連鎖反応または核融合連鎖反応のいずれか、またはそれらの両方を用いた兵器で、通常兵器と比べて桁違いに強い爆風、さらに熱線、初期放射線、残留放射線と電磁パルスをも発生する大量殺戮兵器である。そして、航空機、ミサイルなど、それらの運搬手段の高度化、多様化により、現代世界における広く、深い危機の源でもある。

核兵器の世代分類[Gsponer2008]

核兵器の第1世代[岡本・中原・森1984A]：

広島原爆(砲弾型, U-235, 約15kT), 爆発効率; 約1.5%
長崎原爆(爆縮型, Pu-239, 約20kT), 爆発効率; 約15%

第二次世界大戦で使用された
2つの原爆の爆発効率の
1桁違いに注目！

核兵器の第2世代[岡本・中原・森1984B]：

ブースト型核分裂兵器,
「水爆」または核分裂核融合2段階核兵器

核兵器の第3世代：

特定の目的のためにあつらえられた核弾頭,
1960年代から1980年代にかけて,
戦術的目的または弾道ミサイル防衛として,
放射強化弾頭(中性子, 硬X線)など
→大量の生産, 配備はなかった。

核兵器の第4世代：

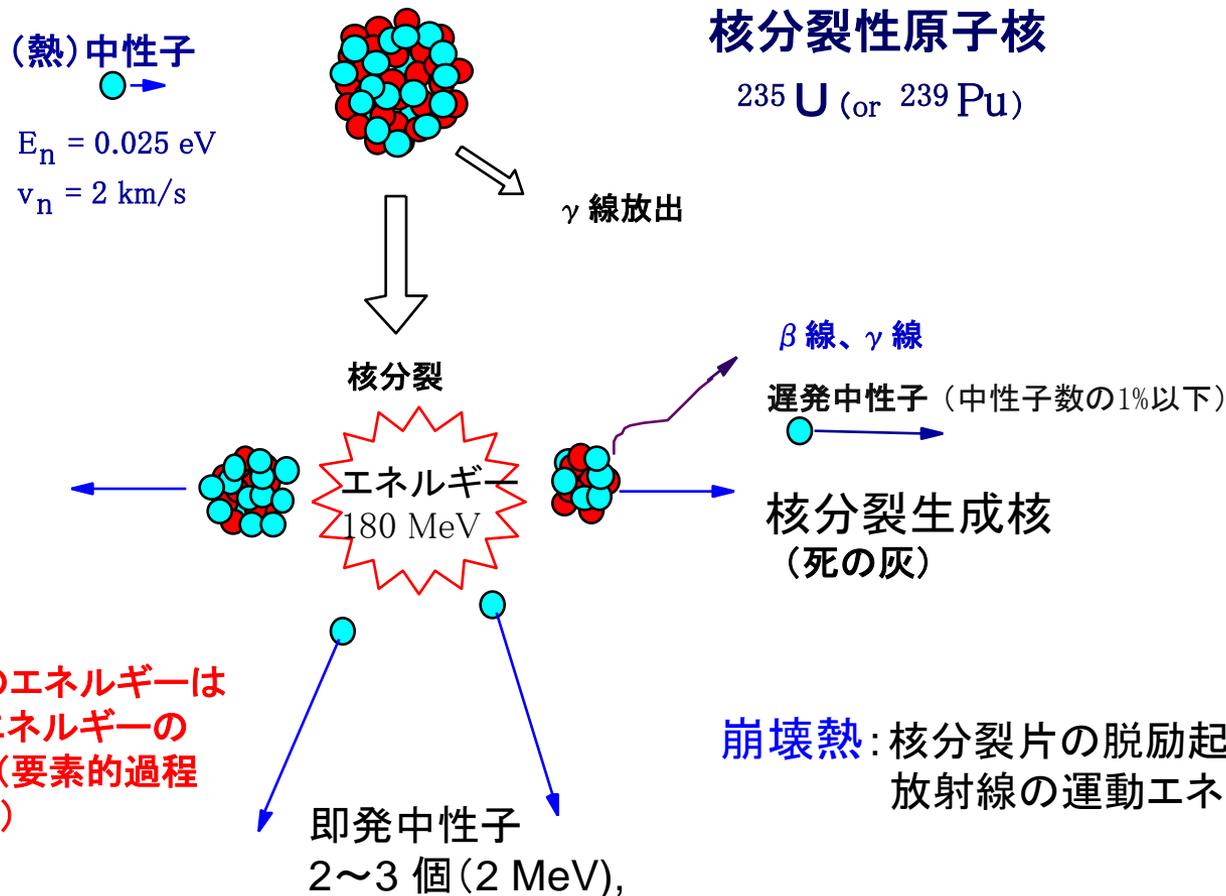
包括的核実験禁止条約(CTBT)に抵触しない核兵器

核分裂の基本的特徴

核分裂には2種類ある:

- (1) 誘起核分裂 (induced nuclear fission)
- (2) 自発核分裂 (spontaneous nuclear fission)

(1) 誘起核分裂: 外から入射する中性子により誘起される核分裂

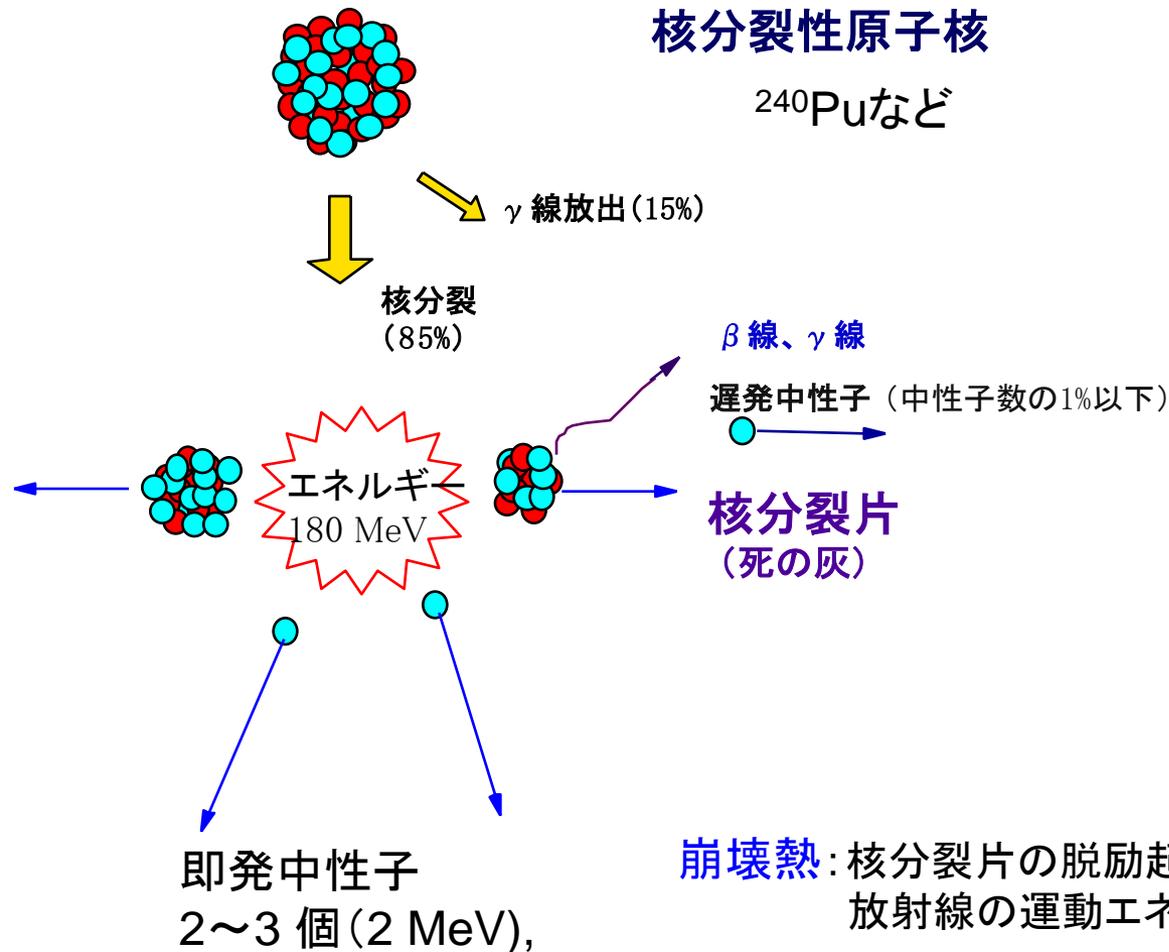


(2) 自発核分裂

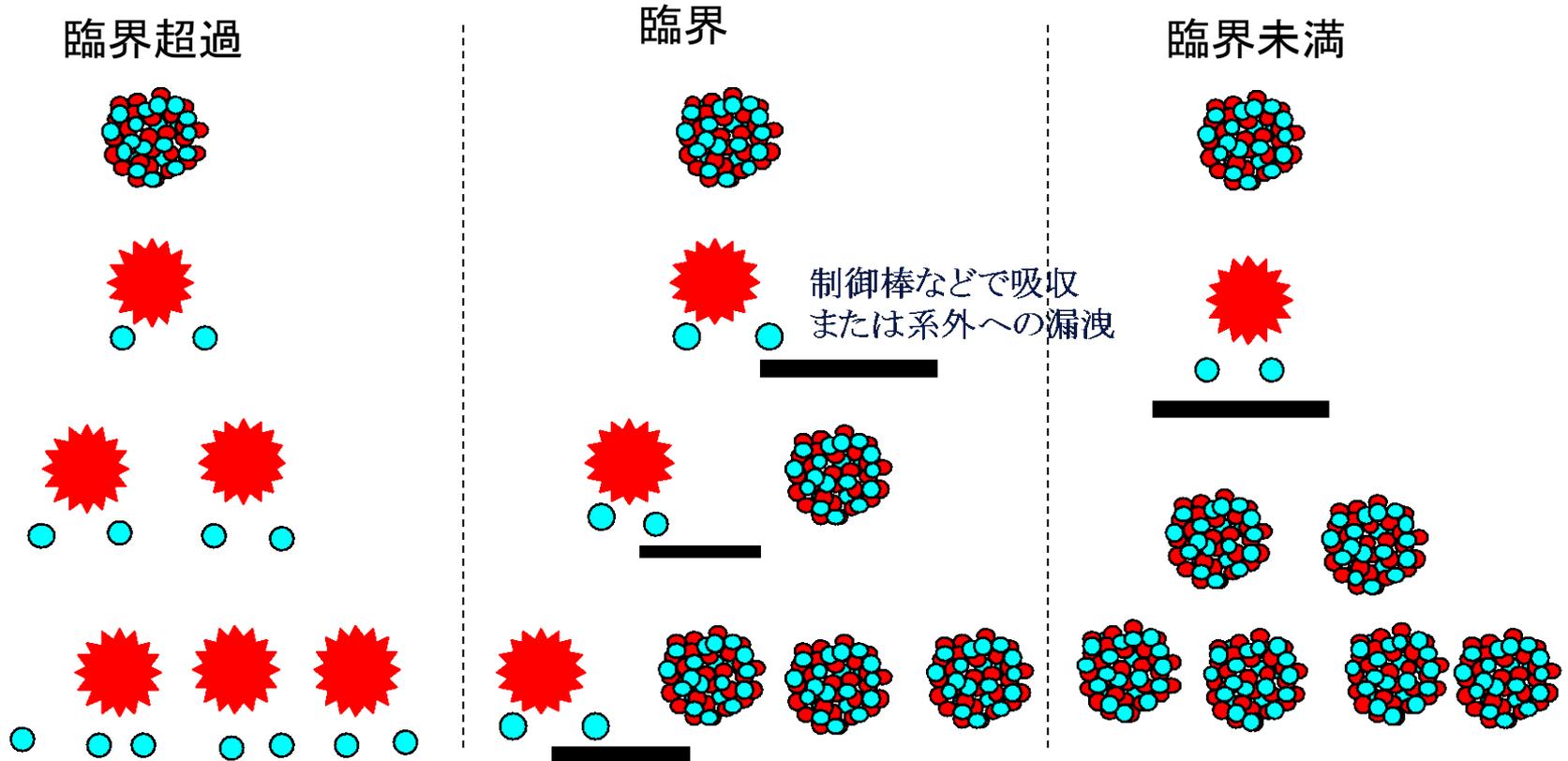
→事前爆発の可能性が大きい

→プルトニウム使用の場合、広島原爆の砲弾型では不可能で、長崎原爆における爆縮型が開発された！

自発核分裂の割合が相対的に高い原子核： ^{240}Pu など



核分裂連鎖反応の臨界条件



連鎖反応の各世代において発生する中性子の個数は核分裂により発生するエネルギーに比例する

§ 2.1 非ブースター型核分裂兵器(長崎原爆, 爆縮型)の原理

[Serber1992] [岡本・中原・森1984A]

・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非常に急速な解放と関連している[Glasstone1963]. 従って, 発生するエネルギー総量よりも, 単位時間あたりのエネルギー(エネルギー発生率), 単位体積あたりのエネルギー(エネルギー密度)が重要である.

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

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

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,

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

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

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

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

$$\sigma_f : \text{核分裂 (fission) の断面積}$$

$$\sigma_c : \text{捕獲 (capture) の断面積}$$

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

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

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

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

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,

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

α の値を大きくするためには,

$c-l-1$ 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 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_{fN8t} 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) $Y(t)$;

$$Y(t) \equiv \int_0^t E_f \cdot \frac{dN}{dt} dt = \int_0^t E_f \cdot \alpha e^{\alpha t} dt = \frac{E_f N_0}{\alpha} (e^{\alpha t} - 1)$$

$$\cong \frac{E_f N_0}{\alpha} e^{\alpha t},$$

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

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]

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

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

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

$$\rightarrow v \approx 1.4 \times 10^9 \text{ cm/s.}$$

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

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

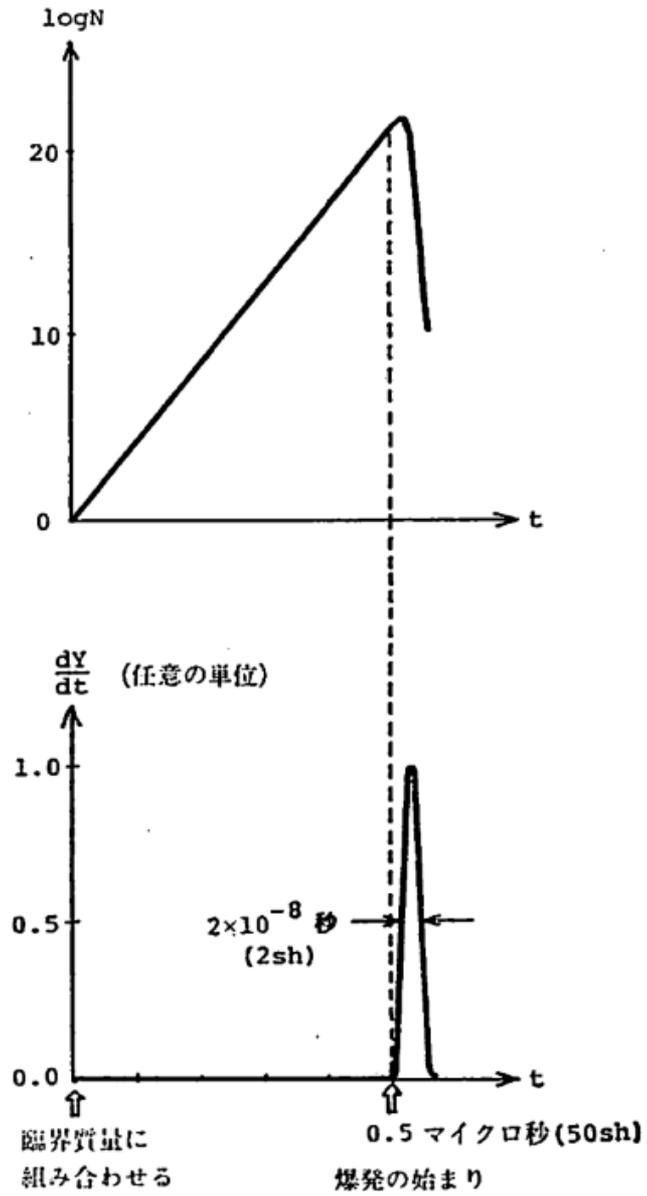
$$\rightarrow \ell_f \approx 10\text{cm} \rightarrow \tau = \frac{\ell_f}{v} \approx 10^{-8} \text{ s.}$$

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

爆縮型ではPuが圧縮されるので、密度増加、平均自由行程の減少、すなわち、 α の値は増大する！

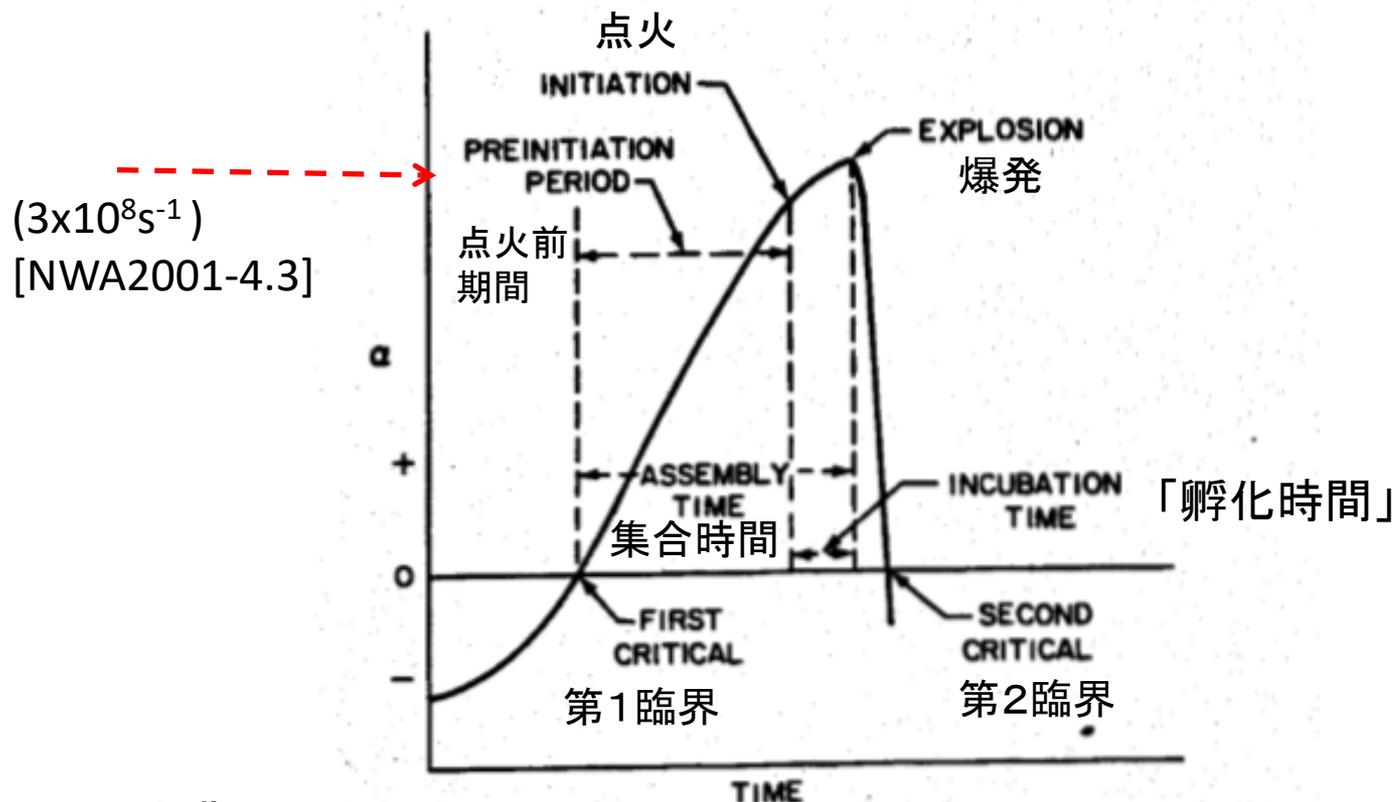
中性子エネルギー $E_n = 1 \text{ MeV}$, 圧縮されていない最大の密度に対する
 c と α の例示的な値 [NWA2001-4.1]

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	$3.15 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$



[岡本・中原・森1984A]

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.

§ 2.2. 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。

熱膨張による速度の近似的な計算

$$\begin{aligned}\varepsilon_f \cdot \left(\frac{\Delta M}{239g} \right) N_a &\approx 2 \times \frac{1}{2} \left(\frac{M - \Delta M}{2} \right) v^2 \\ &= \left(\frac{M - \Delta M}{2} \right) c^2 \left(\frac{v}{c} \right)^2\end{aligned}$$

$$\rightarrow \frac{v}{c} = \sqrt{\frac{\varepsilon_f \cdot \left(\frac{\Delta M}{239g} \right) N_a}{\left(\frac{M - \Delta M}{2} \right) c^2}} \approx \sqrt{\frac{\varepsilon_f \cdot \left(\frac{\Delta M}{239g} \right) N_a}{\left(\frac{M}{2} \right) c^2}}$$

1回の核分裂により発生するエネルギーを ε_f ，核分裂性物質の質量を M ，すでに核分裂した質量を ΔM ，アボガドロ数を N_a ，質量 $(M-\Delta M)$ の質量となる残りの膨張速度を v ，光速を c とする。

ここで， $M=6.3 \text{ kg}$ ， $\Delta M=M/10,000=0.63\text{g}$ として，具体的数値を代入して計算すると

$$\varepsilon_f \approx 180\text{MeV}, N_a \approx 6 \times 10^{23}, Mc^2 \approx 6.2\text{kg} \times (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2,$$

$$\begin{aligned}\rightarrow \frac{v}{c} &= \sqrt{\frac{180\text{MeV} \cdot \left(\frac{0.62\text{g}}{239\text{g}} \right) \times 6 \times 10^{23}}{\left(\frac{6.2\text{kg} \times (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2}{2} \right)}} = \sqrt{\left(\frac{1.8 \times 0.62 \times 6 \times 2 \times 1.6}{239 \times 6.2 \times 9} \right) \times 10^{23+2-19+6-16}} \\ &= \sqrt{1.61 \times 10^{-3} \times 10^{-4}} \approx \sqrt{0.16 \times 10^{-8}} \approx 0.4 \times 10^{-4}\end{aligned}$$

$$\rightarrow v \approx 1.2 \times 10^4 \text{ m/s} = 12 \text{ km/s}.$$

参考：音速 $v_{\text{sound}} \approx 340 \text{ m/s} = 0.34 \text{ km/s}$

§ 2.3 核爆発の原動力は高速中性子である

・(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

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

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

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

参考:JCO臨界事故(1999年)において核分裂連鎖反応した質量 ΔM

文献[原子力学会2005]によれば, この事故は即発中性子により臨界事故で, 総核分裂数は 2×10^{18} で, これに関与した質量は

$$\begin{aligned} & 2.5 \times 10^{18} \\ \rightarrow & \left(\frac{\Delta M}{235\text{g}} \right) \times (6 \times 10^{23}) \approx 2.5 \times 10^{18} \\ \rightarrow \Delta M \approx & \left(\frac{235 \times 2.5 \times 10^{18}}{6 \times 10^{23}} \right) \text{g} \\ & = 0.996 \times 10^{-3} \text{g} \\ \therefore \Delta M \approx & 0.001\text{g} \end{aligned}$$

この核分裂量により, 作業に従事した2人は, 当時の最先端医療が施されたにも拘わらず, 死去した.

Fat Man の総重量と構成比とその科学的, 技術的な背景

Fat Man の総重量と構成比:

$$\begin{aligned} \text{総重量 (4670kg)} = & \text{爆縮レンズ用の通常爆薬 (2500kg)} \\ & + \text{起爆装置 (1000kg)} + \text{プッシャー (pusher, 120kg)} \\ & + \text{タンパー (tamper, 慣性重量, 120kg)} + \text{Pu-239 (6.2Kg)} \end{aligned}$$

核分裂の爆発的連鎖反応が達成されれば, 発生する超高温のために, 極短時間内に構造物はガス化(気体になる!)すること[NWA2001-3.0]

化学爆薬, 天然ウランとプルトニウムとの間の密度差が大きい

→爆縮による反射波が大きくなる

→流体力学的な不安定性(レーリー・テラー不安定性)

→衝撃波の高い球対称性が崩れる

その克服のため, いったん(密度が中間的な)アルミニウム合金製プッシャーで障壁波を受け止めるように配置してある.

Pu のデルタ相(δ 相)とアルファ相(α 相)の高温高圧下の物性の相違;

常温でデルタ相になるが, 熱力学的に不安定で加工が困難[Hecker2000]

→3.4%のガリウム(Ga)を加えたPu-Ga合金の採用[Wilkie1984]

§ 2.3 核分裂-核融合2段階型熱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であること

[岡本・中原・森1984B] [Gspomer2009]

核融合発電の実現にむけての科学的, 技術的課題—または障壁—

- 1) 科学的課題: プラズマ物理学, 特にプラズマの不安定性の制御[宮本1994],
- 2) 技術的課題: 核融合炉の設計, 放射線損傷の基礎研究, 対策 [原子力学会誌2008]

核融合発電に挑むベンチャー企業

Nature ダイジェスト Vol. 11 No. 10 | doi : 10.1038/ndigest.2014.141012

原文: *Nature* (2014-07-24) | doi: 10.1038/511398a | [THE FUSION UPSTARTS](#)

M. Mitchell Waldrop

<http://www.natureasia.com/ja->

[ndigest/v11/n10/%E6%A0%B8%E8%9E%8D%E5%90%88%E7%99%BA%E9%9B%BB%E3%81%AB%E6%8C%91%E3%82%80%E3%83%99%E3%83%B3%E3%83%81%E3%83%A3%E3%83%BC%E4%BC%81%E6%A5%AD/56044](http://www.natureasia.com/ja-ndigest/v11/n10/%E6%A0%B8%E8%9E%8D%E5%90%88%E7%99%BA%E9%9B%BB%E3%81%AB%E6%8C%91%E3%82%80%E3%83%99%E3%83%B3%E3%83%81%E3%83%A3%E3%83%BC%E4%BC%81%E6%A5%AD/56044)

核融合発電の実現にむけての科学的, 技術的課題についての新しい挑戦

W.ギブズ「巨大科学に挑む参入者—核融合ベンチャーの勝算」

日経サイエンス, 2017年3月号, pp.70-78

http://www.nikkeibpm.co.jp/content/files/download/316/2017_03.pdf

§ 3. DT核融合により威力強化された爆縮型核分裂兵器

§ 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][Gspomer2008]

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
増倍率
1.5倍

中性子
高速化
2.65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 $N(\eta, n)$

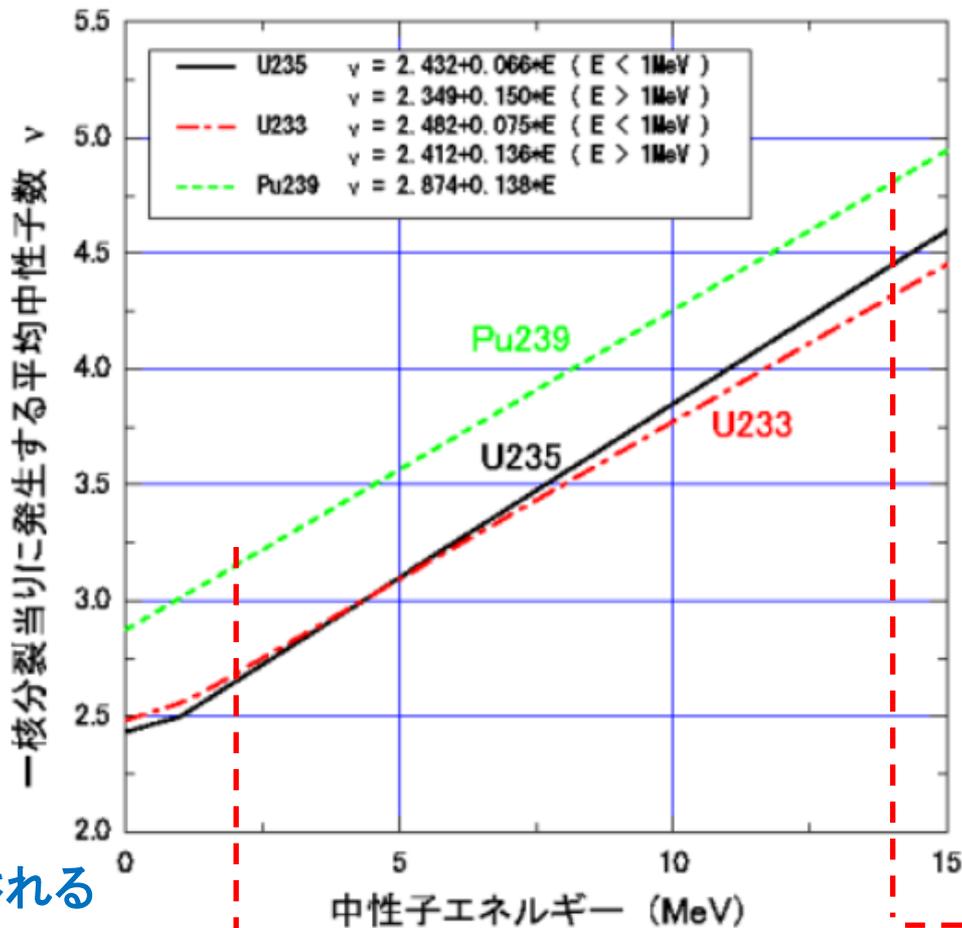
$$N(\eta, n) = N_0 (1 + \eta + \eta^2 + \cdots + \eta^n)$$

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

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

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



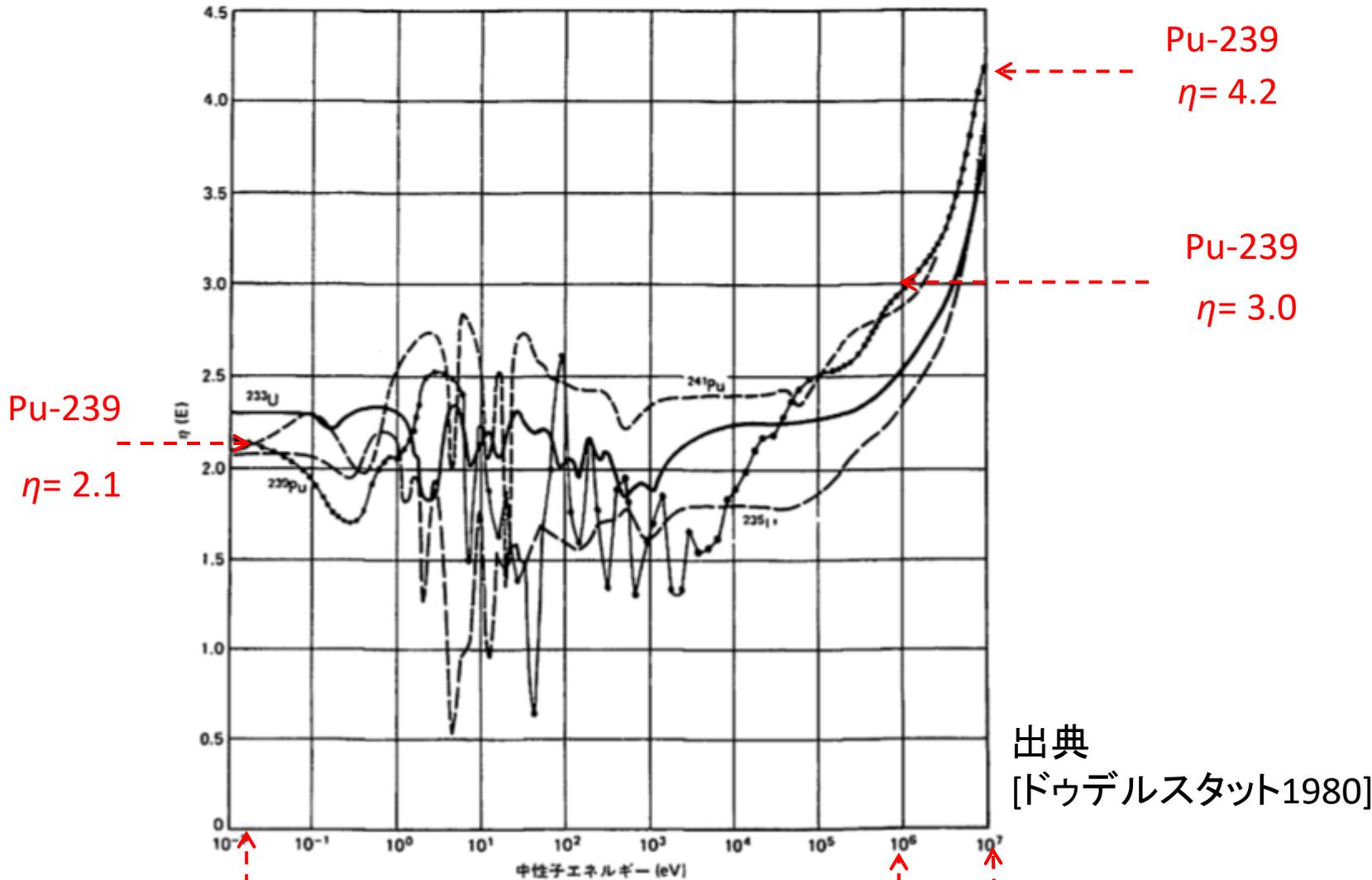
核分裂で放出される
中性子(平均2 MeV)

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



Pu-239
 $\eta = 2.1$

Pu-239
 $\eta = 4.2$

Pu-239
 $\eta = 3.0$

出典
[ドゥデルスタット1980]

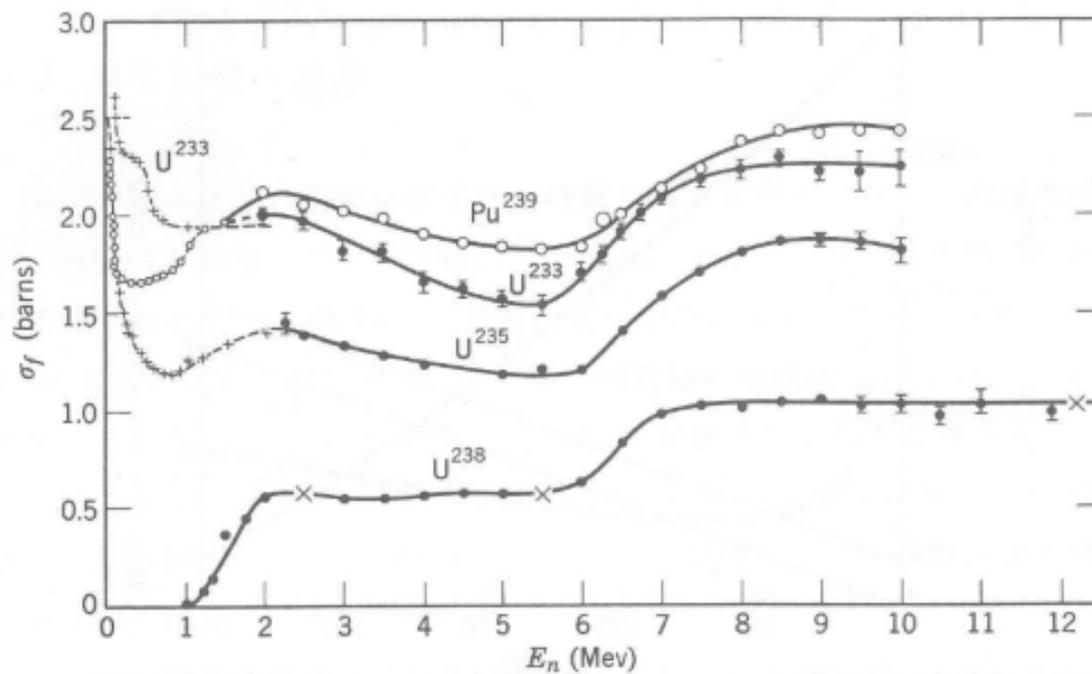
0.025eV
熱中性子

1 MeV
核分裂中性子

14 MeV
DT核融合中性子

図 2 - 25 ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu に対する η の中性子エネルギー変化

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] [Gspomer2009][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

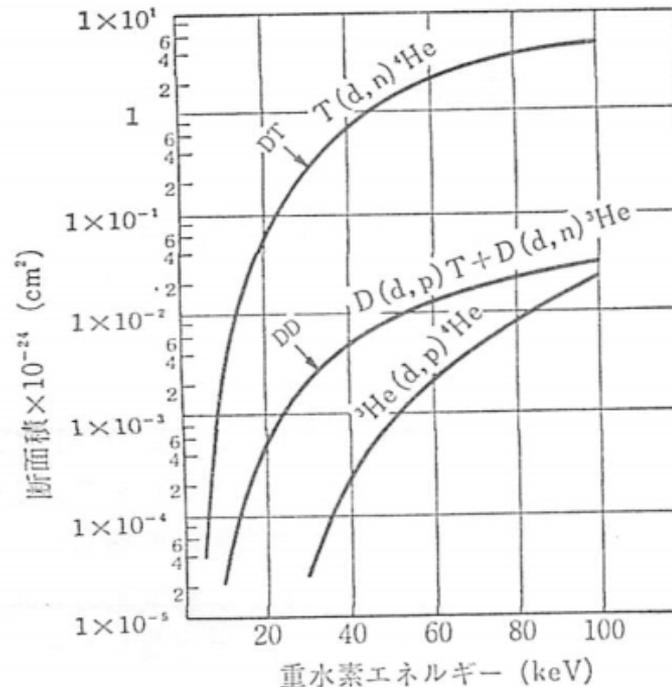
超高压;

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;

$$\sigma_f = 1.0 \sim 2.2 \text{ barns} \quad (E_n = 1 \sim 2 \text{ MeV})$$

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

平均 1.85倍化

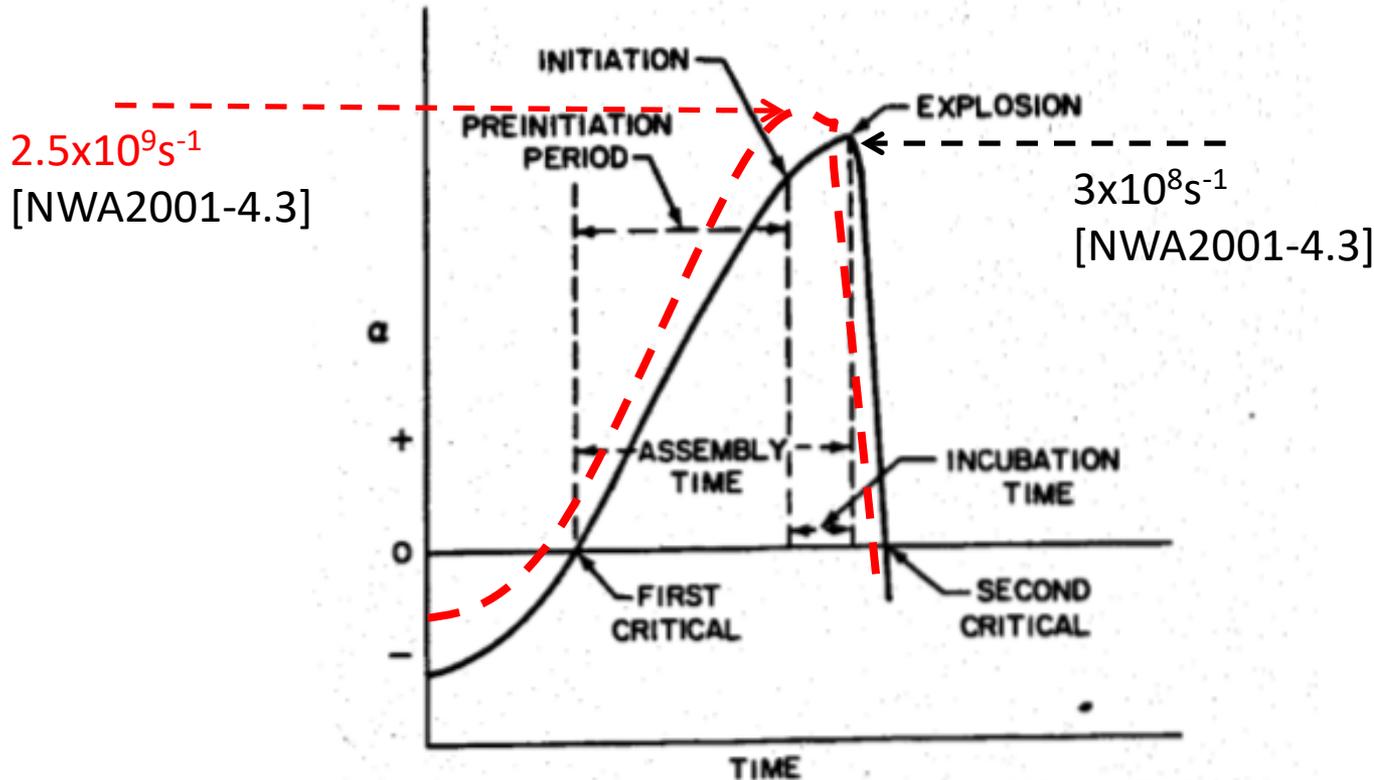
$$\frac{\alpha'}{\alpha} \approx \left(\frac{\eta' - 1}{\eta - 1} \right) \left(\frac{\sigma_f'}{\sigma_f} \right) \left(\frac{v_n'}{v_n} \right), \quad K = \frac{1}{2} m v^2 \rightarrow v = \sqrt{\frac{2K}{m}}$$

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

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

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

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。

§ 4. 北朝鮮による核実験・ミサイル実験の経過

北朝鮮の核実験 (2006年10月) 0.7 - 2 kt

北朝鮮の核実験 (2009年5月) 2 - 5.4 kt

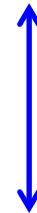
北朝鮮の核実験 (2013年2月) 6 - 16 kt

北朝鮮の核実験 (2016年1月) 7 - 10 kt

「水爆」？ブースター型核分裂爆発装置？の実験成功

北朝鮮の核実験 (2016年9月) 20 - 30 kt

ブースター型核分裂弾頭？の実験成功 (20—30)



ウランの砲弾型？
プルトニウムの爆縮型？

初めは核物質の節約のために
小威力の実験？



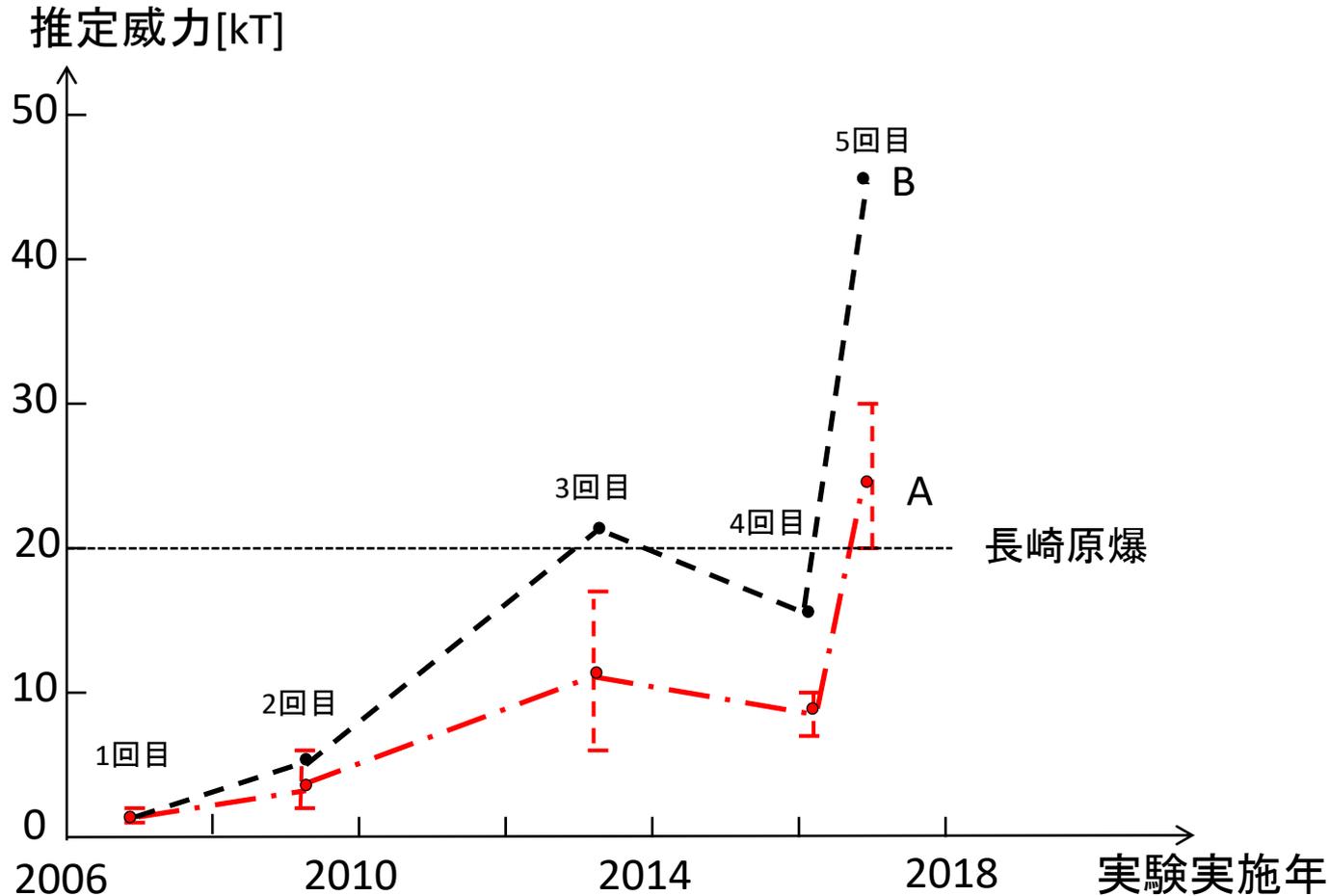
ブースター型？

List of nuclear weapons tests of North Korea

https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_nuclear_weapons_tests_of_North_Korea

North Korea and weapons of mass destruction

https://en.wikipedia.org/wiki/North_Korea_and_weapons_of_mass_destruction⁶



図：北朝鮮核実験における推定威力の経時変化

推定A(一点鎖線): ウィキペディア(フリー百科事典)記載の情報より作図. 推定値に不確定な幅がある.
 推定B(破線): 文献[国際問研2016]と[Kelly-Kiloton2006]に基づいて作図. 地震の強さを示すマグニチュード(Richter Scale)と爆発エネルギーを示すキロトン(kiloton)の相関関係を示したケリーキロトン指標(Kelly Kiloton Index).

北朝鮮核実験における推定威力の経時変化の含意

人工地震の強さを測定した資料を持って爆発エネルギー強度を推定することも非常に難しい。なぜなら人工地震波が放射される地形や地質に応じてその振幅が変形されるので、測定所の位置や測定器の性能に応じて、測定値が異なって出てくる。人工地震の被害を憂慮した残りの爆発エネルギーを抑制する特殊な工法で地下核試験場を建設して、トンネルを強固なブロック物質で完全に密閉した場合は、人工地震波の振幅が実際より大きく減るからである。

北朝鮮の地下核実験場は咸鏡北道吉州万塔山に建設された、海拔高価2,205mの山は土の山ではなく、花崗岩層が発達した石山である。土壌層を掘り下げること造岩を掘って入ることが何倍も大変なのにも、朝鮮があえて石山に地下核試験場を建設した理由は、国土が狭い朝鮮で核弾試験やスソタン試験を行う際に発生する人工地震の被害を極力防止しなければならないからと推測される。

従って、個別の実験における爆発威力の外部からの推定に不確定性が避けられない。しかし、核実験の系統的分析はこの種の不確定性を相対的に避けることができるかもしれない。

- 1) 1回目の威力は、過去の核墾開発国の実例に比べて著しく低い。
→「実験は失敗」という楽観論が流布した。
→4kTの設計であったとすれば、部分的失敗ではあるが、部分的成功
- 2) 推定威力の不確定さはあるが、威力はほぼ着実に増加していること、
爆発実験装置の設計(基本, 詳細)の信頼性の高さを反映している、
- 3) 1-3回目の傾向と、4, 5回目の傾向は質的に異なる、
すなわち相互に別系列, 別目的の実験ではないかと推定される。
- 4) 4回目と5回目の威力変化は倍増以上で、威力可変性の定量的信頼度の検証目的もあったのではないか。

北朝鮮の1回目の核実験 (2006年10月) の評価

—その後の対応の分水嶺？—

- 1) 北朝鮮の原爆実験は失敗だった, 設計の20分の1以下の不完全爆発[ムラー2008]
この理由としては, 核兵器保有国の最初の核実験の威力は以下のように,
19KT(米), 25KT(旧ソ連), 25KT(英), 60KT(仏), 22KT(中国), 12KT(インド),
9KT(パキスタン)であった事実[Kang-Hays20061020]から, 20KT以上を「標準」と
思い込んだことであろうと推測される.
- 2) 多くのコメンテーターが想定しているよりも低威力の設計を実験していたのかもしれない.
北朝鮮は, 4KT程度の威力の実験を行うと事前に中国に伝えていたと報じられている.
[ガーウィン-ヒッペル200612]
- 3) 実験は部分的失敗とも部分的に成功とも呼べ, 北朝鮮は実験で多くを学んだ可能性
があり, それを次の実験で活かそうとするであろう[Kang-Hays20061020].
部分的に成功と言える理由
 - (1)爆発的核分裂連鎖反応の臨界[超過]を達成したこと,
 - (2)北朝鮮は, この装置がより大きな核爆発を可能にすること, 配備可能な長距離
ミサイルに配備できる小型化の開発を開始した可能性,
 - (3)北朝鮮が当時, 使用できるプルトニウムの量が限られていたので, 節約する必要が
あった.
 - (4)放射性物質の漏洩のリスクを最小限にすることを試行していた可能性.

北朝鮮核開発に関与した科学者集団について:

「寧辺の核科学者」と題する2008年の中央日報日本語版[中央日報2008]より:

「1950年7月、一群の科学技術者が平壤(ピョンヤン)行きの列車に乗って38度線を越えた。その中には当時のソウル工科大学長だった**李升基(イ・スンギ)**博士も含まれていた。李博士は1939年、合成繊維「ビニロン」(北朝鮮式名称はビナロン)を発明し、日本の京都大で博士学位を受け、教授として在職していたが、解放と同時に帰国した化学者だった。(中略)

李升基博士は北朝鮮核開発の草創期過程にも参加した。60年代に寧辺(ニョンビョン)に設立された原子力研究所の初代所長を務めたのだ。北朝鮮は当時、ソ連の支援を受けて研究用原子炉を建設・稼働し、その経験を基礎に79年、5000キロワット級の原子炉に着工し、86年から稼働に入った。現在まで2度の核危機を招きながらプルトニウムを作り出したその原子炉だ。

李博士のような第1世代の越北科学者が種をまいた北朝鮮核開発を本格軌道に乗せたのは、ソ連に留学した第2世代の科学者だった。北朝鮮は寧辺原子力研究所設立以前の56年、ソ連と原子力研究協定を結び、モスクワ近隣のドゥブナ研究所に科学エリートを集中的に派遣した。90年代初めまでソ連で核技術を習得した人材は300人ほどになる。その代表的な人が、2006年10月に北朝鮮の核実験を主導したと伝えられる**ソ・サングク**金日成(キム・イルソン)総合大学物理学部講座長だ。」

李升基(イ・スンギ)博士自身の手記[李1971]に記されているように、日本に留学時に差別を受けた体験もあり、熱烈な愛国主義者となり、当時から北朝鮮の研究所が当時の米軍による爆撃を避けるために地下に建設されていたことも分かる。地下に巨大なインフラをつくる技術が進展することは、狭い国土内で地下核実験場を建設、維持する技術も巧緻化した可能性を強く示唆する[澤田2016]。

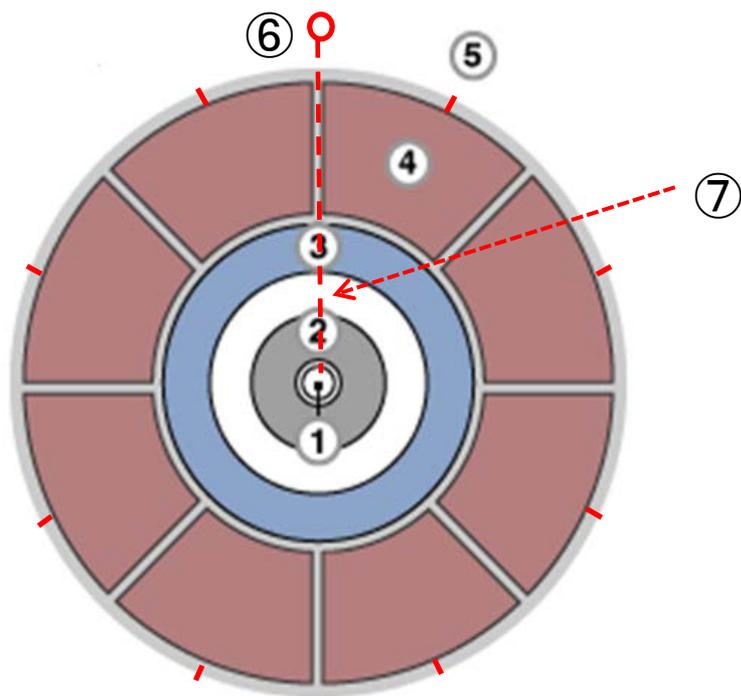
北朝鮮はかなり以前から核開発に着手していた！[ハンホソク2016]

「朝鮮パキスタンに核弾頭の小型化技術を伝授してくれるときア、ブドゥルカーンに見せてくれた3発の完璧な核弾頭はそれから3年前の1996年に完成された核弾頭だと思われる。そう判断する理由は、金正日国防委員長が朝鮮人民軍最高司令官に推戴された5周年にあたり、1996年12月24日に開かれた中央報告大会で、当時の朝鮮人民総政治局長趙明禄次官は祝う報告を通して朝鮮人民軍は今「軍の建設期の最盛期を広げている」としながら「人民軍は敵の任意の不意の侵攻も適時に打撃して粉碎しうることがある川威力攻撃手段と防御手段を備えた無敵必勝の戦闘隊伍になった」と指摘したからである。この引用は、1996年に朝鮮が核弾頭の小型化技術を完成し、大陸間弾道ミサイルに装着したことを強く示唆したものである。この文脈を理解すれば、今回キム・ジョンウン第1書記は、朝鮮が核弾頭の小型化技術を完成した20周年に際し、核兵器兵器化工場を現地指導したものである。」

筆者のコメント：

技術的な内容を多数含む論考[ハンホソク2016]はハングル語のみ書かれている。著者ハンホソク氏(韓浩錫, 米国統一学研究所所長)は在米で、ハングル語でのみ論考を精力的に発表している。表現からみると、北朝鮮政府に批判的なニュアンスはほとんどないので、同氏の論考が宣伝の一環と見なすことも可能である。しかし、爆縮レンズ(特に、高速爆薬レンズ)の構成数について、長崎原爆が32、それから北朝鮮は64, 72, 96を約20年間にわたって開発した、北朝鮮は禁止された約30種の高性能爆薬の中、約20種を独自の技術で開発したなど、記された内容の技術的な精度の高いことから、批判的に解読すれば、有益で貴重な論考ではないかと、筆者は肯定的に評価する。

北朝鮮のブースター型核分裂弾の構造 推定 (1)



- 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 (detonator)
- 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

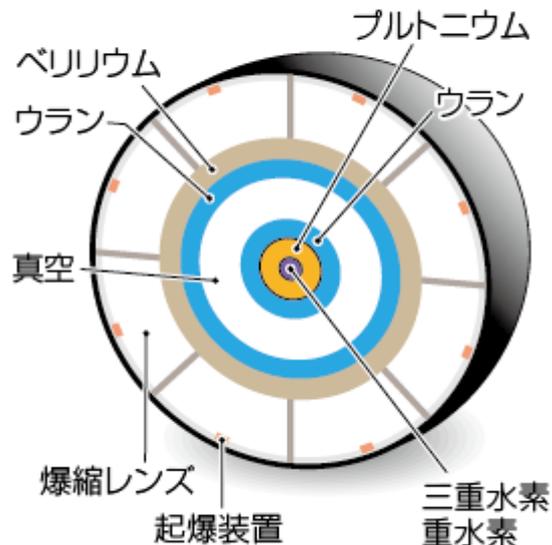
「TDガスの保管容器が中心部以外にあり、使用時に目的に合わせ、適量(充填する量によって核威力を調節する)が中心部に注入されること」について補足

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減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心していた。

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。

推定 (2)とコメント

ブースト型核分裂弾の構造 (断面図)

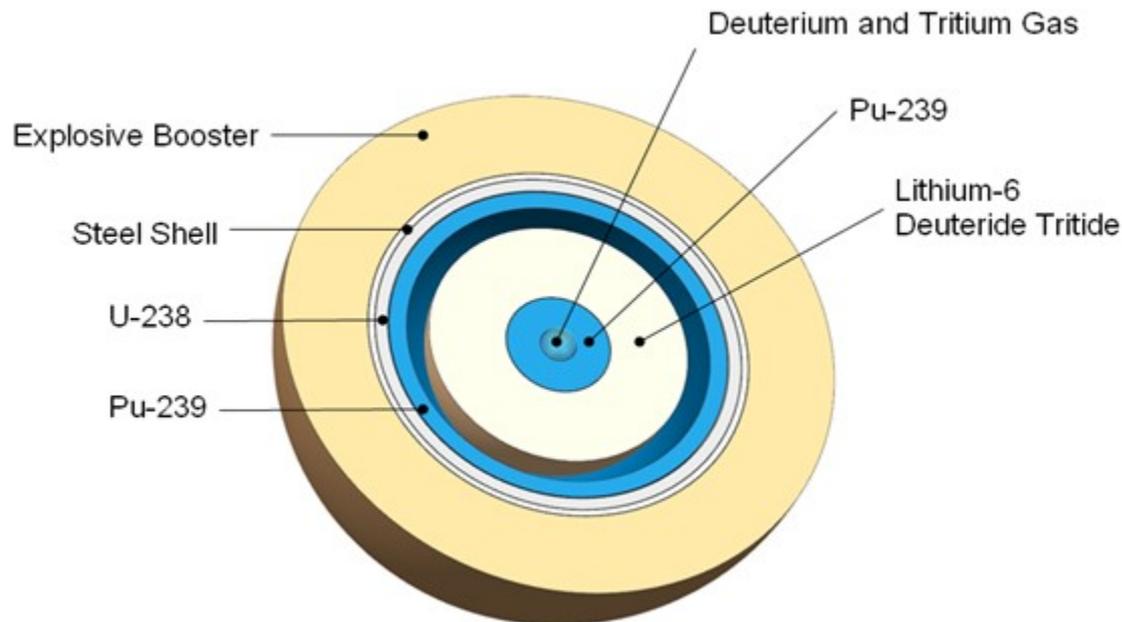


(韓国メディアなどによる)

出典 [時事ドットコム2013]

引用者コメント

- 1) プルトニウム, ウランの質量数を明示していないことは不十分.
- 2) 重水素と三重水素が中心部に置かれる事を記していることは妥当だが, 爆発開始直前まで中心部とは別の保管容器に保持されていることは無理解であると推測される.

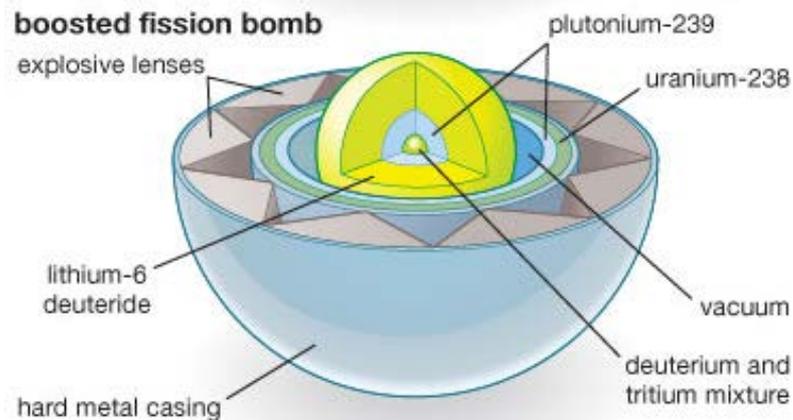
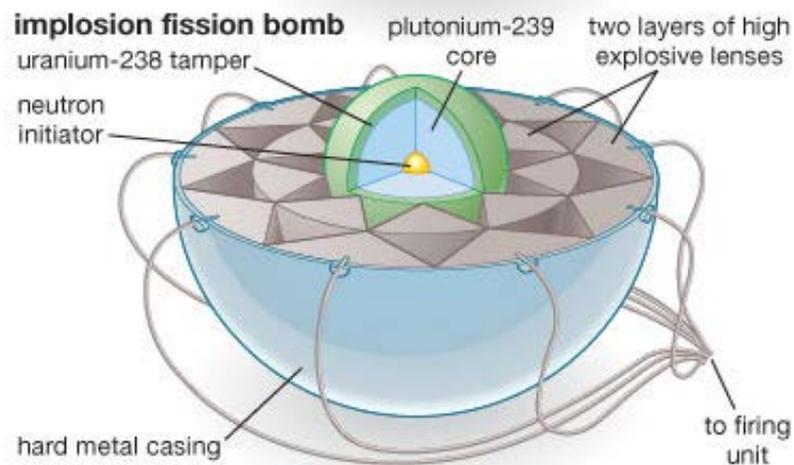


出典[Nuclear Knowledge]

引用者コメント

- 1) ExplosiveBoosterはExplosive(高性能爆薬)の誤り?
- 2) 重水素と三重水素が中心部に置かれることを記していることは妥当だが, 爆発開始直前まで中心部とは別の保管容器に保持されていることは無理解であると推測される.

推定 (3)とコメント



© 2008 Encyclopædia Britannica, Inc.

出典;ブリタニカ百科事典
[Britannica2016]

爆縮型原爆(長崎原爆など)

ブースター型核分裂爆弾

引用者コメント

- 1) 爆縮型の仕組み上, 球対称性が必要不可欠であることを明示していることは妥当,
- 2) TDガスの保管容器が中心部以外にあり, (爆発のタイミングに合わせて) 中心部に注入されることを明示していないことは不十分.
- 3) 核分裂性物質を明示していることは妥当.
- 4) 中性子反射体を明示していないのは不十分
- 5) タンパーとしてのU-238の慣性効果を増すための真空(間隙)を明示していることは妥当.
- 6) 核融合反応のさらなる効率化のために, 重水素化リチウム(LiD)を明示してあることは妥当.

2016年1月(4回目)の北朝鮮による核実験を、「水爆実験」ではなく、「ブースター型核分裂爆発装置実験」と解釈する理由

- 1) 北朝鮮政府の「水爆実験」という声明は正確とはいえない。水爆であれば、威力それを反映する地震の推定エネルギーが2桁ほど大きくなるはずである。[Chalmers2016] 熱核兵器の地下核実験における威力は、1000KT(米), 1001KT(旧ソ連), 660KT(中国) [Vishwanathan20160110]
- 2) 後発の核兵器開発国としては、他国で過去に開発された核兵器の中で、相対的により効率が 高く、失敗のリスクが低いものを選択する可能性が高い。過去の推定威力が着実に増加していることは強固で緻密な核兵器開発戦略が策定され、技術的に着実な段階を踏まえていると推定される。もちろん、核兵器保有国も過去に失敗を繰り返したように、国際的探知が困難な極小威力の事例(Fizzle)もあったと推測される。
- 3) 北朝鮮が保有する核分裂性物質の保有量は長崎型の数発-10数発分程度で、年間生産能力は数発分相当と推定されるので、毎回使用する核分裂性物質の量はできるだけ節約したいという意向は強いと考えられる。過去の核爆発実験の推定威力が既存の核開発国のそれらに比べて、かなり小さい理由であろう。
- 4) 2006年の初めての核実験の際、推定威力は1キロトン前後であったとしても、核兵器設計者らが4キロトンの威力を予測していたこと[ガーウィン2006],
- 5) ブースト型であれば、威力調節、小型化、軽量化は困難ではないこと[澤田2016],
- 6) ブースト型であれば、爆縮技術の障壁がかなり低下する。
- 7) 北朝鮮のトリチウム生産能力はブースト型核分裂爆発装置には十分である[Chalmers2016]
- 8) ブースト型であれば、北朝鮮政府の「水爆実験」という声明とは少なくとも部分的にDT核融合反応を利用していることと論理的には矛盾しない。北朝鮮政府の「水爆実験」という声明は誇張である可能性が高い。しかし、熱核融合爆発実験の出力を計画的に抑えた可能性も完全には否定できない。

北朝鮮の「核兵器兵器化工場」における ブースター核分裂兵器の標準化・規格化



TDガスの保管容器が中心部以外
にあり、使用時に目的に合わせ、
適量が中心部に注入されることが
読み取れる。

▲<写真8>キム・ジョンウン第1書記が火星-13号分類された立体に装入される核弾頭を詳しく調べている。実物核弾頭をそのように詳細を確認する国の指導者は、全世界で、金正日国防委員長とキム・ジョンウン第1書記しかないだろう。そのような点では、上記の写真は、世界政治史に特記する非常に特別な写真である。上の写真に見える核弾頭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ポ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。©統一時報、ハンホソク所長[ハンホソク2016]

[ハンホソク2016]

標準化・規格化とは何か

標準化とは、核分裂兵器の基本型をブースター型核分裂弾頭と定め、熱核融合兵器を開発する場合の1次系にも使用することを意味すると、引用者は推定する。

規格化とは、ブースター型の出力可変性により、爆発威力を、例えば、1KIT, 5KT, 10KT, 20KT, 50KT, 150KTなど分類して製造することを意味するであろう。



物理学者で、核拡散問題の専門家であるAlbrightによる、北朝鮮の核能力についての最近の評価[Albright2017],

「北朝鮮は毎年3-5発の核兵器を製造する能力を有し、2020年までに25-50発、最悪の場合、60発保有する」

と整合的である。

米国トランプ政権の大統領補佐官で国家通称会議議長のナヴァロ氏の評価も整合的である[ナヴァロ2017].

「北朝鮮は何度も地下核実験を行い、北朝鮮の核爆弾は次第に破壊力と完成度を増していった。これら一連の核実験に基づいて、大半の専門家は現在、北朝鮮は正真正銘の核保有国としての『臨界点』に原則的に達していると判断している」

論考[ハンホソク2016]における核兵器世代論についてのコメント:

1) 爆縮レンズ(特に, 高速爆薬レンズ)の構成数について, 長崎原爆が32個, 北朝鮮は64, 72, 96個を開発したことについて, 著者は長崎原爆32個を第一世代, 64, 72, 96個をそれぞれ, 第二世代, 第三世代および第四世代と呼んでいるが, 従来の多くの核兵器世代論[岡本・中原・森1984B] [Gsponer2008]とは大きく異なる.

2) しかし, 従来の多くの核兵器世代論[岡本・中原・森1984B] [Gsponer2008]における第二世代に属するブースター型核分裂兵器を2B世代, 熱核融合兵器を2T世代と分類して, 長崎原爆32個を2B.1世代, 64, 72, 96個をそれぞれ, 2B.2世代, 2B.3世代および2B.4世代と呼ぶことにすれば, [ハンホソク2016]の主張と部分的には整合的と思われる.

これらの核兵器の世代論は生物の進化において, 多様な生物種が出現したにもかかわらず, 環境の変化とそれへの適応能力の差違のために, 継続的に生存できず, 絶滅したことと似ているように思われる.

すなわち, 砲弾型の核分裂兵器は広島原爆1発だけで以後は採用されていないし, 爆縮型は1945年7月のTrinity実験と長崎原爆から始まり, ブースター化され, 多くの兵器として進化して, 論考[ハンホソク2016]の記述が基本敵に正しければ, 北朝鮮は, 爆縮レンズ(特に, 高速爆薬レンズ)の構成数を64, 72, 96個と増加させて, その洗練度, 効率を高めたと理解するべきかもしれない.

§ 5. 北朝鮮による核実験・ミサイル実験をめぐる直近の事態

2017.2 潜水艦発射ミサイル, 2段階点火方式を陸上で発射成功

2017.3 4発同時発射で日本海領域の狭い領域に着弾

2017.3 新型ロケットエンジンの地上実験の成功

2017年3月, 北朝鮮指導部が次の核実験実施段階に入ったとの報道増加.
可能性として, ブースター型核分裂弾頭または爆発装置として, 2016.9実験の推定威力(20-30)KTを有意に増加, 原子炉級プルトニウムを使用することなど.

大陸間弾道ミサイルの弾頭の大気圏への再突入体 (re-entry vehicle;
RV)の実験がいつか不明であるが, それに成功すれば...

弾道ミサイルでは、弾頭(主に核弾頭)は先の尖った円錐状の耐熱カプセルである再突入体 (re-entry vehicle、RV) に搭載される。再突入時の速度はIRBMでも秒速2km程度、ICBMであれば秒速約7km程度になるので、着弾までにRVの大部分が損耗し半球状になってしまう。

さらに、米国など核兵器保有国が1970年代から開始したように、ミサイルの多弾頭化(MIRV化, mutually-independent-reentry-vehicle)や進路修正可能な再突入体(MaRV化, Maneuverable reentry vehicle)も目指すかもしれない[Aldridge1978].

「再突入カプセル」と「空力加熱」

<http://spaceinfo.jaxa.jp/hayabusa/about/principle3.html>

はやぶさのカプセルは、およそ12km/sという超高速で大気圏に再突入。

再突入の際にカプセルは、1万度を超える超高温の環境にさらされることとなる。

なぜ、高温になるのか？

よく空気との摩擦によりカプセルが高温になるといわれることがあるが、摩擦による温度上昇はごくわずかで、温度上昇は、超高速の空気とカプセルが衝突して、空気の流れがせき止められる(圧縮される)ことにより空気の運動エネルギーが熱エネルギーに変換されることが要因。これを空力加熱という。

高速で前に進むカプセルからみると、同じ速度で空気がぶつかってくることになる。空力加熱率は速度の3乗に比例する(*)ことになり、再突入時の速度が、カプセルに与える空力加熱に大きく影響を及ぼす。このため再突入速度の大きなはやぶさカプセルでは、スペースシャトルの30倍とも言われる空力加熱を受ける。(実際には機体形状の違いや高温での化学反応等もあり、速度に対しては3乗よりもわずかに大きい値で比例。)

(*) 再突入体の進行方向の実効断面積 A , 速さ v , 空気密度 ρ ,

→ Δt 時間の押しのけられる空気の質量 $\Delta M = Av\rho \Delta t$,

→ この間の運動エネルギーの変化 $\Delta K = \frac{1}{2} \Delta M \cdot v^2 = \frac{1}{2} A\rho v^3 \Delta t$

∴ 空力加熱率 $\propto \frac{\Delta K}{\Delta t} = \frac{1}{2} A\rho v^3$

§ 6. まとめと関連する当面の課題

§ 6.1 北朝鮮の核兵器開発の到達段階

・北朝鮮は高効率の洗練された核兵器としてのブースター核分裂弾頭の生産と配備を開始できるようになった可能性が高い。

・しかし、ブースター型核分裂弾頭は米国を初め、核兵器保有国の全てがすでに獲得し、実戦配備している核軍事技術システムであり、核兵器の第二世代に属するものである。

[Gspomer2009], [ブースト型核分裂兵器@Wikipedia]

(今後の動きについての可能性)

1) 北朝鮮が今後、ブースト型核分裂兵器よりもさらに技術的に洗練された、メガトン級威力をもつ2段階式熱核兵器(いわゆる「水爆」)の開発に進む可能性もある。

そのための不可欠のステップとして、ベータ崩壊するトリチウムの備蓄を保持するために、トリチウム生産能力を高めるかもしれない[Chalmers2016] [Braun-et al2016]。この徴候または事実が確認されるかどうかは重要であろう。

2) 逆の可能性: 2段階式熱核兵器が過剰破壊の可能性が高く、費用対効果比はかならずしも高くはないと思われる。ブースター型核分裂兵器は費用対効果比が高く、の効率向上、安定性の向上、上限と推定される500KTに向かうなど、威力の増大に向かう可能性。核弾頭のMIRV化などに注力する可能性。

§ 6.2北朝鮮指導部の核兵器開発の戦略的決意について

- 1) 1960年代から核開発のための核科学者の集団的な育成が着手されていたこと[中央日報2008]
- 2) 金正恩(キム・ジョンウン)の北朝鮮が憲法を改定し、序文に「核保有国」であることを明記した。1992年に発効された南北非核化宣言を20年後に完全に否定した[北朝鮮憲法2012]。
- 3) 北朝鮮の金正恩(キム・ジョンウン)第1書記が6～7日に開かれた第7回朝鮮労働党大会の中央委員会事業総括報告で、「共和国(北朝鮮)は責任ある核保有国」と宣言[北朝鮮労働党2016]
- 4) 実録小説「野戦列車」(2016年)の一節:

正日氏 米国の本心はわれわれが経済強国建設で失敗すれば、改革、開放をするはずで、そのときはたやすくわが社会主義制度を転覆させることができるというものだ。米国はその荒唐無稽(むげい)な夢を実現させるため、これからも制裁と対話、大規模軍事演習を並行させながら情勢を緊張させ、機会を見て戦争も辞さないだろう。

正恩氏 封建王朝の朝鮮は統治者が吟風弄月(ろうげつ)(月夜に詩を詠んで楽しむこと)で歳月を過ごし、安保の剣が鈍ったままでした。それで北方の蛮人や島国の蛮人が衰弱した封建朝鮮を侵略したのです。首領さま(金日成主席)は軍事力を育てられ、日本と米国をやっつけ、社会主義朝鮮を打ち立てられました。将軍さま(正日氏)は先軍政治で帝国主義と強力に対決されたため、朝鮮が核保有国として世に光り輝くようになったのです。[毎日20170420]

- 5) 北朝鮮指導部が、核開発を放棄した。旧リビアのカダフィ政権や旧イラクのフセイン政権が米軍の攻撃で崩壊したことの教訓を繰り返して述べていること。

これらの相互に整合的な情報を考慮すると、北朝鮮指導部の核兵器開発についての戦略的決意の過小評価をすべきではない⁵³

北朝鮮はなぜ、国際的な非難と孤立という代価を払ってまで、核・ミサイルの開発を継続するのか

朝鮮半島の人々による関連する論評[三千里2016]より引用：

「すべての国は、その国益に沿って政策を立案し展開します。

中国政府にとって、北朝鮮の核開発は「既得権である核兵器の寡占体制を脅かし地域の緊張を高める」故に、国益とは相容れません。それでこの間、国連安保理の制裁決議に賛同してきました。しかし「朝鮮半島の安定と核問題の平和的解決」こそが中国の国益であって、米日韓の三国が追求する「制裁強化による北朝鮮の体制転換」は決して受容できないシナリオです。朝鮮半島が韓国主導で吸収統一されれば、駐韓米軍基地が中朝の境界線まで迫ってきます。中国にとっては最悪の結果であり、どんな犠牲を払ってでも回避すべき事態です。朝鮮戦争に大規模な義勇軍を派遣して参戦したのも、そのような「戦略的利害」のためです。

北朝鮮はなぜ、国際的な非難と孤立という代価を払ってまで、核・ミサイルの開発を継続するのでしょうか。その動機は、世界最大最強の核軍事大国である米国の脅威が発端であり、米国からの体制保全が目的だと言えます。対テロ戦争に際し「先制的自衛戦略」を導入したブッシュ政権以降、米政府は“テロ支援国家”や“悪の枢軸国”というレッテルを貼って、アフガニスタン・イラク・リビアなどを先制攻撃し体制転換を断行しました。そうした事態を目撃し、米国と半世紀以上にわたって対峙している北朝鮮が得た教訓は、「核保有だけが米軍の先制攻撃を抑止する」というものです。」

§ 6.3 北朝鮮の核の脅威にどう対処すべきか

北朝鮮の核兵器開発能力はほぼ着実に向上している。

「このまま放置すれば、質・量の両面で、北朝鮮の核兵器能力はここ数年のうちに飛躍的に高まる可能性が高いといえることができる。今回の核実験は、その推測を裏付けるものとも見ることができ、現状を放置しておくことの脅威を改めて世界に見せつけたといえることができる。」[鈴木達治郎201601]

「対米外交の道具」を超え、実戦配備を整えつつある北朝鮮の核兵器開発

制裁や抑止力の拡大はかえって軍事的緊張を相互に高める可能性

米韓合同軍事演習ではB52戦略爆撃機の飛行演習が展開されたが、この制裁や圧力に頼る政策に限界が見え始めている。

[鈴木達治郎201609]

根本的な対応策は「信頼醸成」と「非核化への対話」

制裁や軍事力強化だけでは解決が難しいだけでなく、軍事的緊張を高める可能性が高く、関係国は相互に慎重な対応を積み重ねて緊張低減の努力すべきである。

[鈴木達治郎201609]

当面の緊急課題

「(前略)(中国の)王外相は朝鮮半島情勢について、
「2つの列車がお互いに向かって加速しながら走り、どちらも譲る意思がない」
ような状態にたとえ、
「お互い本当に衝突するつもりなのか」と懸念を示した。
王外相は、双方による軍事活動の停止が、緊張を和らげ交渉を再開する最初
の一步になると述べた。(以下、略)」[BBC-News-Japan20170308]

**「王毅外相、核・ミサイル実験と合同軍事演習『同時停止』を提案」: 韓米が合
意すれば、成立するかも (2017年3月8日 「Global Times」)**
中国の王毅外相が、北朝鮮が核・ミサイル活動を停止し、米韓が合同軍事演
習を停止した上で、朝鮮半島の非核化に向けた協議(六者会談)を始めること
を提案した。[Global Times20170308]

・日本国内でも、北朝鮮と米国の双方による軍事活動の停止などを求めるな
ど、軍事的緊張を高める機運や試みには慎重で抑制するように、時宜を逸せ
ずに運動すべきであろう。

北朝鮮「有事」後のシナリオについて

そもそも、9.11の衝撃が生々しく残っていた2002年1月、ジョージ・W・ブッシュ(当時、米国大統領)が一般教書演説で「悪の枢軸」と呼んだ三カ国の中で、「未だ処理されざる課題」として残っているのは、北朝鮮である。

イラクはブッシュ政権下の軍事行動の結果として、イランがオバマ(米国前大統領)政権下の外交交渉の結果として、それぞれ「悪の枢軸」として語られる理由を消滅させた後では、北朝鮮が最後に残された「宿題」である。[櫻田2017]

(1)朝鮮半島の「分断」が継続するシナリオ

- 1-a) 金正恩体制の「だらだらとした存続
- 1-b) 国際社会への「恭順」を示した北朝鮮
- 1-c) 「非金正恩化」を経た北朝鮮

(2)朝鮮半島が「統一」されるシナリオ

- 2-a) 中国の圧倒的な影響の下での統一朝鮮
- 2-b) 「対中防波堤」としての朝鮮半島
- 2-c) 「厳正中立地域」としての朝鮮半島

日本の最善、次善のシナリオ

以上の議論を踏まえれば、次善として「1-b」、最善として「1-c」の状態に表れた朝鮮半島の「分断」の固定が、日本にとっては、最も受け入れやすいものだという結論に落ち着く、のか？ 1-a)金正恩体制の「だらだらとした存続か？

現在の朝鮮半島における危機や脅威が突然出現したのではなく、8年間の旧オバマ政権の「戦略的忍耐」という無関心さ、または日本を含む国際社会の10年以上にわたる「圧力」と「制裁」が北朝鮮には有効ではなかったことを深く認識すべきである。

北朝鮮政府関係の声明や米国大統領のツイッターなどにおいて、過激な表現が頻繁に表明され、マスコミ報道により、意図せずにはあっても、客観的には過剰に「危機」が演出されているが、軍事的な合理性が関係国の指導層に貫徹している限り、「危機」が軍事的応酬など「有事」に進展する可能性は低いと考えられる。その点、市民としても冷静かつ沈着な対応をするべきである。

しかし、約75年前、米国から石油禁輸された日本が真珠湾奇襲を行い、戦争に突入したこと、「窮鼠猫を咬む」という諺もあり、想定された「制裁」、「抑止力」が結果的に捨て身の反撃を誘発する可能性を決して無視するべきではない。

約12年間の6カ国交渉の末に、2015年に妥結したイラン核問題の教訓は何か。

イラン核問題と比較して、北朝鮮の核開発問題は

- 1)すでに核兵器を保有して、量産体制に入りつつ可能性があること、
- 2)これまで長期にわたる国際社会からの経済的制裁や軍事的圧力だけでは北朝鮮に核開発を翻意させることが出来なかったこと、

など、基本的な違いもある。

本分析の結論的部分(ブースター型核分裂兵器の小型化・標準化・規格化)が基本的に正しければ、**たとえ「圧力」と「制裁」を強化した結果、北朝鮮が新たな核実験を実施しないとしても、関係国の実効的な話合い・外交交渉がないかぎり、設計上の信頼性がすでに確認された兵器の量産化は進行し、継続するであろう。**

イラン核問題とほぼ同程度の年月、またはそれ以上の年月にわたる「答えの出ない事態に耐える力」^[帚木2017]を国内外で持つ必要があるかもしれない。

平岩俊司氏(南山大学教授〈現代朝鮮論〉)の見通し [平岩2017]

「金正恩氏は11年12月に権力を継いでから中国を訪れたことはなく、関係は冷えています。とはいえ、韓国には2万8千人余りの米軍が駐留しており、中国は緩衝地帯である北朝鮮を締め上げて崩壊させることは絶対にしません。中国は核実験に際して北朝鮮を強く批判する一方、米国や日本、韓国などには冷静に対処し、話し合いで解決せよという立場を繰り返す。北朝鮮もそれを見越してミサイルや核実験を繰り返す。根本的解決の難しさがそこにあります。

ロシアというプレーヤーもいます。中朝関係が冷え込めば、北朝鮮は、天然ガスなど資源が豊かなロシアとの関係強化に乗り出すでしょう。米国と対立するロシアも、北朝鮮問題をカードとして国際的な発言を強めたい。ウラジオストクと北朝鮮の羅津港を結ぶ定期航路が新設されるという報道もあり、制裁の抜け穴となります。」

核兵器は非人道的な極みの大量破壊兵器であり、 国際的、法的に禁止すべきである。

核兵器禁止条約が本年3月から国連において議論が開始されている。7月に予定される議決をめぐって、大多数の国々と、核保有国とその「核の傘」に入る少数の国々の間で鋭い意見の対立が生じている。

北朝鮮指導部は主権国家として核兵器を保有する権利をもつとより一層強く主張するであろう。

化学兵器(毒ガス)は大量破壊兵器として国際法で禁止されているように、核兵器も大量破壊兵器であり、非人道の極みである。

単に北朝鮮指導部に対してだけではなく、米国を初め、核兵器保有国の全てに対して廃棄を要求するべきであろう。

§ 6.4 原子炉級プルトニウムの核兵器転用問題

・原子炉級プルトニウムの核兵器転用問題は、核兵器設計の経験もあるJ.C.Markが原子炉級プルトニウムの爆発的性質について詳細に分析して以来、国内外で大いに議論されてきた[Mark1990] .

・日本国内には、原子炉級プルトニウムの核兵器転用問題に否定的な見方もある[今井2001] [河田20170330] .

その理由は、放射能の強さ、発熱量、中性子出力における原子炉級プルトニウムの相対的な欠点などである。 [Mark1990] [今井2001] [Gsponer2009]

	兵器級プルトニウム	原子炉級プルトニウム
放射(キュリー/g)	3	10
発熱(ワット/g)	3	10
中性子出(n/sec/g)	100	500

[Goodwin2015]

・確かに、軍用としては、品位が劣ることは否めず、成形加工、取り扱いはいくらか困難で、配備と使用前に長期間保有しつづけることは困難である[Gsponer2009].

核兵器級プルトニウムと原子炉級プルトニウム同位体重量比の例

核兵器級と原子炉級プルトニウム同位体重量比の例

単位：重量(%)

プルトニウム同位体	^{238}Pu	^{239}Pu	^{240}Pu	$^{241}\text{Pu}(\beta)$	^{242}Pu	合計
核兵器級	0.07	93	7	0.7	—	100
沸騰水型原子炉(BWR)	1.7	52	28	12	6	100
加圧水型原子炉(PWR)	2	63	19	12	4	100
高速増殖炉(FBR)	0.03	74	23	3	0.5	100

[出典]松岡 理:プルトニウムの安全性評価、日刊工業新聞社(1993.6)、p.9-10

<http://www.rist.or.jp/atomica/data/pict/13/13050107/01.gif>

しかし、Markは「これらの問題にもかかわらず、原子炉グレードのプルトニウムを用いて核兵器を製造することができる。最も単純なタイプの効果的な設計を開発することの難しさは、原子炉グレードのプルトニウムでは、兵器級のプルトニウムを使用するために満たさなければならない難しさに比べてそれほど大きくはない」と言明している [Mark1990].

- ・取り扱いを大きく阻害するには、放射能における数十倍の差が必要 だろう.
 - ・新しく建設された施設では、原子炉級プルトニウムの扱いは基本的には兵器級プルトニウムの扱いと同じであると評価される [Goodwin2015] [Gsponer2009].
 - ・**ブースター型核分裂兵器は原子炉級プルトニウムの、実効的な核兵器としての使用も可能にすると考えられる.** [Garwin1998] , [今井2001] [Gsponer2009], [Goodwin2015] [R-Pu-wiki]
- これは核兵器と原発の関係の評価に、原発推進の立場と原発廃止の立場の双方にとって新しい光を当てることになるかもしれない.

謝辞

中原純氏に文献[Wilkie1984]とこれへのコメントを1984年当時、御教示いただいたことについて.

Serge Franchoo氏に論文[Hecker2000]を御教示いただいたことについて.

福岡核問題研究会メンバー諸氏と坂田研究会会員諸氏に本論考を発表する機会を与えていただき、コメントをいただいたことについて.

北岡逸人氏にハングル語で表記された貴重な論考[ハンホソク2016]を教示していただいたことについて.

林弘文氏に文献[ロッシ1993]を教示していただいたことについて.

引用文献・情報 (日本語は50音順, 英文はアルファベット順)

- [石川1996] 石川迪夫「原子炉の暴走 SL1からチェルノブイリまで」日刊工業新聞社, 1996年.
- [今井2001] 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/>
- [岡本・中原・森1984A] 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, Vol.19, No.3(1984), 21-25.
[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)
- [岡本・中原・森1984B] 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, Vol.19, No.10(1984), 45-51.
[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)
- [岡本1985] 岡本良治「核兵器使用の効果と核戦争の影響」,
九州大学公開講座11「核を考える」所収, 九州大学出版会1985年.
- [岡本・三好・中西2014] 岡本良治, 三好永作, 中西正之「炉心溶融物とコンクリートとの相互作用による水素爆発, CO爆発の可能性」, 科学, 84巻3号(2014), 355-362.
- [Aldridge1978] R.C.オールドリッチ「核先制攻撃症候群-ミサイル設計技師の告発-」岩波新書, 1978年.
- [河田20170330] 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/>
- [ガーウィン-ヒッペル200612] リチャード. L. ガーウィン, フランク. 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

[Goodwin2015] B. T. Goodwin(グッドウィン)*「核爆発装置における原子炉級プルトニウムの有用性」,* 米国・ローレンス・リバモア国立研究所国家安全保障・政策研究担当統 合副所長. 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.

<https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=forums&srcid=MDI4Mzc0NzQ5MTEwNTA2MTAyMTYBMDI2NzcyMDY5MTQwNzA2Nzc1OTkBVmtKV2FCZFICZ0FKATAuMgEBdjl>

[北朝鮮憲法2012] 北朝鮮、新憲法に「核保有国」明記.

中央日報/中央日報日本語版, 2012年05月31日.

<http://japanese.joins.com/article/940/152940.html>

[北朝鮮労働党2016] ソウル聯合ニュース「自主権侵害なければ先に核兵器は使用しない」=金第1書記, 2016年5月8日.

<http://japanese.yonhapnews.co.kr/northkorea/2016/05/08/0300000000AJP20160508000900882.HTML>

[久古2013] 久古聡美「北朝鮮の核問題をめぐる経緯と展望—金正恩体制下の動向を中心に—」国立国会図書館, ISSUE BRIEF NUMBER 775(2013.3.14.),

http://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_8091645_po_0775.pdf?contentNo=1

[原子力学会2005] 日本原子力学会JCO事故調査委員会「JCO臨界事故その全貌の解明—事実・要因・対応」東海大学出版会, 2005年. 特に, p.101.

[原子力学会誌2008] 「今, 核融合炉の壁が熱い! —数値モデリングでチャレンジ」, 「日本原子力学会誌」連載講座 (2008年6月~2009年7月) Vol.50, No.6(2008), 36 他

http://www.aesj.or.jp/~fusion/aesjfmt/rensai2/rensai2_all.pdf

[国際問研2016] 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>

[坂井2017] 坂井隆, 平岩俊司「独裁国家・北朝鮮の実像—核・ミサイル・金正恩体制」朝日新聞出版, 2017年.

[櫻田2017] 櫻田淳「北朝鮮「有事」後の6つのシナリオを考える」朝日新聞WEB RONZA2017年04月26日.

- [澤田2016] 澤田哲生「原子力工学者の分析する北核実験ーリスクは拡大」
2016年01月18日 <http://www.gepr.org/ja/contents/20160118-04/>
- [三千里2016] 三千里コラム@NPO法人 三千里鐵道「北朝鮮の核実験と国連安保理の制裁決議」
2016年09月30日
http://blog.goo.ne.jp/sanzenri2010/e/4b19141450c6cbeebb802ec826cde6c3?fm=entry_awp
- [時事ドットコム2013] 時事ドットコムニュース,北朝鮮のブースト型核分裂弾の構造(2013年2月)
http://www.jiji.com/jc/graphics?p=ve_int_northkorea20130208j-03-w310
- [鈴木達治郎201601] 鈴木達治郎「北朝鮮 核実験」にどう対応すべきか
これまでの政府間交渉の無力さ露呈、今こそ非核化に向けて民間外交を」
朝日新聞 WEB RONZA 2016年1月20日.
- [鈴木達治郎201609] 鈴木達治郎「北朝鮮の核の脅威にどう対処すべきかー
北東アジア6カ国で信頼外交を進めよ」, 朝日新聞 WEB RONZA 2016年9月20日.
- [多田2015] 多田 将「ミリタリーテクノロジー物理学<核兵器>」イースト新書Q, 2015年. 特に,
pp.180-181.
- [中央日報2008] 中央日報日本語版「寧辺の核科学者」
2008年07月07日. <http://japanese.joins.com/article/156/102156.html>
- [ドゥデルスタット1980] J.ドゥデルスタット, L. J. ハミルトン「原子炉の理論と解析(上)」現代工学社,
1980年.
- [帚木2017] 帚木蓬生「ネガティブ・ケイパビリティ 答えの出ない事態に耐える力」(朝日選書)ー朝日
新聞出版, 2017年.
- [ハンホソク2016] 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
<http://m.jajusibo.com/a.html?uid=26414§ion=sc38§ion2=>
- [平岩2017] 「(耕論)緊迫の朝鮮半島 佐橋亮さん、平岩俊司さん」朝日新聞
2017年4月29日.

[藤岡1] 藤岡 惇「軍事攻撃されると原発はどうなるか」

<http://www.peaceful.biz/contents/2-5.html>

[藤岡2] 木村朗, 高橋博子編「核時代の神話と虚像」2015年, 所収の13章2節.

[ブースト型核分裂兵器@Wikipedia] ブースト型核分裂兵器, ウィキペディア.

[毎日20170420] 小説が語る金王朝、核信奉の「胸中」 正日氏「強い拳に言葉は不要」 正恩氏「肝に銘じます」

毎日新聞2017年4月20日 <https://mainichi.jp/articles/20170420/dde/012/030/002000c>

[ムラー2008] リチャード・A. ムラー「今この世界を生きているあなたのためのサイエンス 1」楽工社, 2010年.

[長大RECNA2015] 長崎大学核兵器廃絶研究センター(RECNA)

「北東アジア非核地帯設立への包括的アプローチ」, 2015年3月.

[] ピーター・ナバロ「米中もし戦わば一戦争の地政学」文藝春秋, 2017年. :

特に, 21章 問題児・北朝鮮.

http://naosite.lb.nagasaki-u.ac.jp/dspace/bitstream/10069/35475/1/Proposal_J_original.pdf

[長大RECNA2016] 長崎大学核兵器廃絶センター「北朝鮮の核実験をうけて:解説と見解」

2016年1月8日. <http://www.recna.nagasaki-u.ac.jp/recna/report20160108>

[防衛省2016] 防衛省「2016年の北朝鮮による核実験・ミサイル発射について」2016.11.9

http://www.mod.go.jp/j/approach/surround/pdf/dprk_bm_20161109.pdf

[JAEA2016] 日本原子力研究開発機構「北朝鮮核問題」2017年2月.

https://www.jaea.go.jp/04/iscn/archive/nptrend/nptrend_01-05.pdf

[宮本1994] 宮本健郎「プラズマ物理入門」岩波書店, 1994年.

宮本健郎「核融合をめざしたプラズマの研究」, 日本物理学会誌, 第51巻8号(1996年)

http://www.jps.or.jp/books/50thkinen/50th_08/001.html

[李1971] 李升基「ある朝鮮人科学者の手記」未来社, 1971年.

[ロッシ1993] ブルーノ・ロッシ「物理学者ブルーノ・ロッシ自伝—X線天文学のパイオニア」(中公新書) 1993年. 特に, 4章 ロスアラモス—原子爆弾—

[Albright2017] David Albright, *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>

[Barnaby2004] Frank Barnaby, *How to Build a Nuclear Bomb: And Other Weapons of Mass Destruction* (Nation Books) , Nation Books; First Trade Pap.版, 2004年.

[BBC-News-Japan20170308] BBC news Japan, 中国、北朝鮮にミサイル・核実験の停止を提案. 2017年3月8日. <http://www.bbc.com/japanese/39202260>

[Braun-et al2016] Chaim Braun, Siegfried Hecker, Chris Lawrence, Panos Papadiamantis, *North Korean Nuclear Facilities After the Agreed Framework*,

Center for International Security and Cooperation, Stanford University, May 27, 2016.

http://cisac.fsi.stanford.edu/sites/default/files/khucisacfinalreport_compressed.pdf

[Brown1995] Nuclear Weapon Diagrams By Richard K. Brown, The B28 Type Thermonuclear Bomb

<http://www.nuclearweaponarchive.org/Library/Brown/B28bomb.gif>

[Britannica2016] Encyclopedia Britannica, Inc. Nuclear weapon WRITTEN BY: [Robert S. Norris, Thomas B. Cochran](#), LAST UPDATED: 12-13-2016

<https://global.britannica.com/technology/nuclear-weapon/Gun-assembly-implosion-and-boosting>

[Chalmers2016] Hugh Chalmers, *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>

[Chochran1994] T.B. Chochran, *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

[Garwin1998] Richard L. Garwin, *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>

[Glasstone1962] Samuel T. Glasstone,
An Introduction to Nuclear Weapons(December 1962), (WASH-1038);

http://www.alternatewars.com/WW3/Glasstone_Intro/Introduction_DEC-1962.pdf

[Glasstone1963] Samuel T. Glasstone, *An Introduction to Nuclear Weapons* by Samuel Glasstone (March 1963), (WASH-1037);

http://www.alternatewars.com/WW3/Glasstone_Intro/Introduction_MAR-1963.pdf

[Glasstone1972A] Samuel T. Glasstone, *An Introduction to Nuclear Weapons* by Samuel Glasstone and Leslie M. Redman (June 1972) (WASH-1037 Revised)

http://www.alternatewars.com/WW3/Glasstone_Intro/Introduction_JUN-1972-REV.pdf

[Glasstone1972B] Samuel T. Glasstone, *An Introduction to Nuclear Weapons* by Samuel Glasstone and Leslie M. Redman (June 1972) (WASH-1038 Revised)

http://www.alternatewars.com/WW3/Glasstone_Intro/Introduction_JUN_1972.pdf

[Global Times20170308] Global Times, 2017.3. 8, China proposes “double suspension” to defuse Korean Peninsula crisis,

<http://www.globaltimes.cn/content/1036620.shtml>

[Goodwin2015] B. T. Goodwin「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.

<https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=forums&srcid=MDI4Mzc0NzQ5MTEwNTA2MTAyMTYBMDI2NzcyMDY5MTQwNzA2Nzc1OTKBVmtKV2FCZFICZ0FKATAuMgEBdjl>

[Gspomer2008] A. Gspomer, *Fourth Generation Nuclear Weapons Military effectiveness and collateral effects*, February 2, 2008.

<https://arxiv.org/pdf/physics/0510071.pdf>

[Gspomer2009] A. Gspomer 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>

[Hecker2000] Siegfried S. Hecker, *Plutonium and Its Alloys -From atoms to microstructure -*, Los Alamos Science Number 26, 2000, pp.290-335.

<https://fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/lib-www/pubs/00818035.pdf>

[Izawa-et al2012] system Kazuhiko Izawa a , Yuriko Uchida a , Kiyoshi Ohkubo a , Masayoshi Totsuka a , Hiroki Sono a & Kotaro Tonoike,

Infinite multiplication factor of low-enriched UO₂-concrete system, J. of Nucl. Sci. Tech. Volume 49, No. 11, November (2012) pp. 1043-1047.

<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00223131.2012.730893?scroll=top&needAccess=true>

[JASON2011] JASON advisory-panel, *Hydrodynamic-and-Nuclear-Experiments*, JSR-11-340. November 2011.

<https://fas.org/irp/agency/dod/jason/hydro.pdf>

See also <https://fas.org/blogs/secretcy/2015/02/jason-hydro/>

[Kang-Hays20061020] Jungmin Kang and Peter Hayes, "Technical Analysis of the DPRK Nuclear Test", NAPSNet Special Reports, October 20, 2006.

<http://nautilus.org/napsnet/napsnet-special-reports/technical-analysis-of-the-dprk-nuclear-test/>

[Kelly-Kiloton2006] **Kelly Kiloton Index of Earthquake Moment Magnitudes**

<http://www.english.ucla.edu/faculty/kelly/kellyearthquakescale.htm>

[Mark1990] J. Carson Mark, appended by Frank von Hippel and Edward Lyman, *Explosive-Properties-of-Reactor-Grade-Plutonium*, Science and Global Security, 17:170-185, 2009.

<http://scienceandglobalsecurity.org/archive/sgs17mark.pdf>

[Nuclear Knowledge] Nuclear Knowledge, <http://nuclear-knowledge.com/boosted.php>

[NWA2001] Nuclear Weapon Archive by Carey Sublette: Version 2.25: 9 August 2001

<http://nuclearweaponarchive.org/Nwfaq/Nfaq0.html>

[NWA2001-3.0] Nuclear Weapon Archive by Carey Sublette: Version 2.25: 9 August 2001. 特に, 3.0 Matter, Energy, and Radiation Hydrodynamics

<http://nuclearweaponarchive.org/Nwfaq/Nfaq3.html>

[NWA2001-4.1] Nuclear Weapon Archive by Carey Sublette: Version 2.25: 9 August 2001. 特に, 4.1 Elements of Fission Weapon Design.

<http://nuclearweaponarchive.org/Nwfaq/Nfaq4-1.html>

[NWA2001-4.3] Nuclear Weapon Archive by Carey Sublette: Version 2.25: 9 August 2001. 特に, 4.3 Fission-Fusion Hybrid Weapons.

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

[R-Pu-wiki] Reactor-grade plutonium From Wikipedia, the free encyclopedia.

https://en.wikipedia.org/wiki/Reactor-grade_plutonium

[Schlosser2013] Eric Schlosser, *Command and Control: Nuclear Weapons, the Damascus Accident, and the Illusion of Safety*, Penguin Books; Reprint版 (2013/9/17)

[Schlosser2016] Eric Schlosser, *WORLD WAR THREE BY MISTAKE-*

Harsh political rhetoric, combined with the vulnerability of the nuclear command-and-control system, has made the risk of global catastrophe greater than ever.

December 23, 2016.

<http://www.newyorker.com/news/news-desk/world-war-three-by-mistake>

[Serber1992] Robert Serber (著), Richard Rhodes (編集)

The Los Alamos Primer: The First Lectures on How to Build an Atomic Bomb, 1992.

University of California Press

