

北朝鮮の核兵器開発は どこまで進んだか

岡本良治

〈『日本の科学者』2017年11月号より抜粋〉

北朝鮮の核兵器開発は どこまで進んだか



岡本良治

北朝鮮の核実験の経過と政府指導部の言明と米国の核兵器技術の限定的に機密解除された内容等を総合的に考慮すれば、北朝鮮の核開発は未熟な段階や外交の道具という段階ではなく、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、その期間の長さに応じて、北朝鮮の核兵器能力は飛躍的に高まる可能性が高い。

はじめに

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朝鮮民主主義人民共和国（以下、北朝鮮と略）の核・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を深く分析する必要がある。

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であると筆者は考える。本稿は本誌の性格と紙面の制約のため、ミサイル開発には言及できず、かつ象徴的な内容にならざるを得ないが、詳細な分析と関連資料についてはノート¹⁾を参照されたい。また、本年9月3日に実施された「ICBM用の水爆実験」については誌面の制約で記述できないことをご了解願いたい。

1 核兵器の世代と非ブースター型核分裂兵器

(1) 大量殺戮兵器としての核兵器の特徴

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、現代世界における基本的な危機の源のひとつでもある。

(2) 核兵器の世代²⁻⁶⁾

核兵器の第1世代：広島原爆（砲弾型、²³⁵U、約15キロトン以下（ktと略）⁷⁾、爆発効率は約1.5%）。長崎原爆（爆縮型、²³⁹Pu、約20kt、爆発効率は約15%）。

核兵器の第2世代：ブースター型核分裂兵器、「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開発された。放射強化弾頭（中性子、硬X線）などがあるが、大量の生産、配備はなかった。

核兵器の第4世代：核爆発を含まないか、TNT火薬の2、3kg相当の微小爆発か核分裂性物質を含むが臨界未満の実験などによる包括的核実験禁止条約に抵触しない核兵器^{5,6)}。

キーワード：核分裂（nuclear fission）、爆縮（implosion）、核融合（nuclear fusion）、ブースター型核分裂兵器（boosted nuclear fission weapon）

(3) 非ブースター型核分裂兵器 (爆縮型)

核兵器内の核分裂性物質中において、任意の時刻 t の中性子数 $N(t)$ の時間変化率は

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

と表される^{6,8)}。ここで、 α は実効増倍率と呼ばれ、核分裂連鎖反応のある世代において、生成される中性子数を C 、系外への漏洩により消失する中性子数を L 、核分裂間の平均自由行程を中性子が移動する時間を τ とすると

$$\alpha(t) = \frac{C-L-1}{\tau}$$

と与えられる。仮に、 α の値が時間的に一定値 α_0 であれば、 $N(t) = N(0) e^{\alpha_0 t}$ となる。

しかし、 α の値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、負の値 (未臨界) から始まり、ゼロ (臨界) を経て、最大約 $3 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ (超臨界) くらいまで劇的に変わる。一部が機密解除された文献⁸⁾ において、 α の具体的な値の挙動については多数の空白ページがある。

どんな起源かにかかわらず、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。爆縮およびタンパー (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ごく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り、きわめて低い威力となり⁸⁾、核兵器としての意義はない。

広島原爆はウランを用いた砲弾型であったが爆発効率が非常に低かった。その後の核兵器技術に重要な役割を果たした長崎原爆 (Fat Man)³⁾ の構造を図1に示す。総重量と構成比は総重量 (4670 kg) で、その内訳は、爆縮レンズ用の通常爆薬 (2500 kg)、起爆装置 (1000 kg)、プッシャー (120 kg)、タンパー

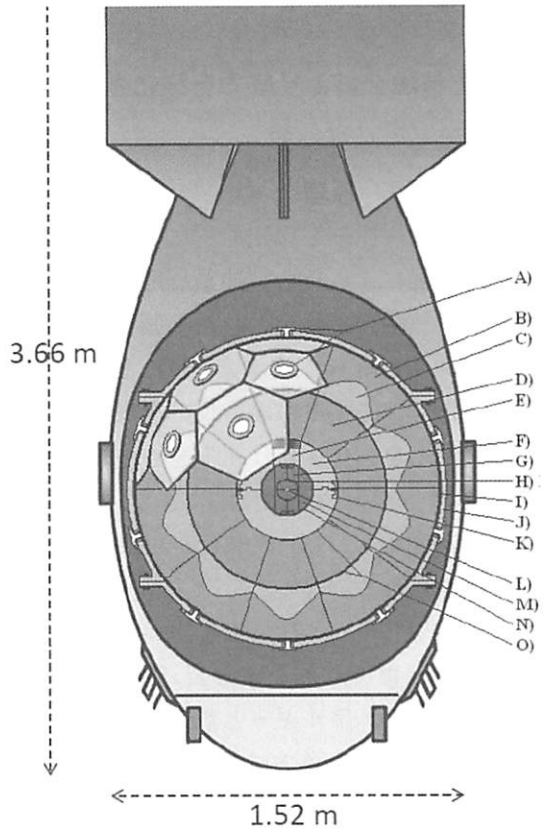


図1 長崎原爆 (爆縮型) の構造、大きささと重さ

出典：文献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 (^{235}U が 99.3%) ででき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。

(120 kg, ^{239}Pu (6.2 kg) である。重量 4.7 トンで、3.66 メートルの兵器はミサイルの弾頭としては使用不可能であったので、第 2 次世界大戦後、米国や旧ソ連などで小型化され

た核兵器が開発された。

2 DT 核融合により威力を強化された爆縮型核分裂兵器

(1) ブースター原理

ブースター原理とは相対的に少量の核融合物質の添加による核分裂連鎖反応の高効率化をいう。核融合で強化された弾頭（ブースター型核弾頭）とは、重水素（D）と三重水素（T）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る^{4,6,8,11,12}。核分裂連鎖反応により、超高温・超高压が発生し、DT核融合が可能になる条件が達成される。

ウランやプルトニウムなど重い核は、中性子を吸収した後、もし核分裂（誘起核分裂）すれば莫大なエネルギーと数個の2次的な中性子を発生する。図2に、核分裂により発生するエネルギーと2次的な中性子を示す。

入射する中性子のエネルギーが約2 MeVの場合、核分裂に伴い発生する2次的な中性子の平均個数は、入射する中性子のエネルギーと核分裂性の原子核が²³⁵Uか²³⁹Puかにも依存する。2次的な中性子のエネルギーは広い範囲の値を取るが、平均値は約2 MeVである。2 MeV級のエネルギーをもつ中性

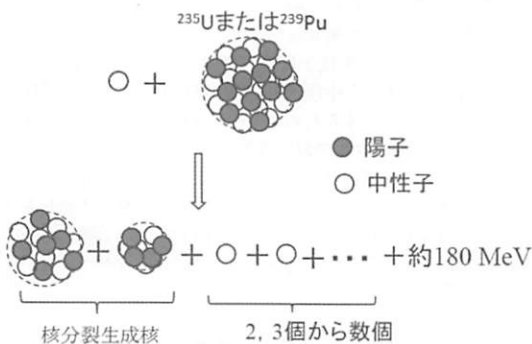


図2 核分裂により発生するエネルギーと2次的な中性子

MeVとは100万電子ボルトのことであり、化学反応で関与するエネルギーは高々数電子ボルトである。

子による²³⁹Puの核分裂の場合、平均して約3.2個の2次的な中性子が放出される。誘起核分裂とは別に、²⁴⁰Puなど一部の重い核は、中性子を吸収しなくても核分裂（自発核分裂）する確率が有意の大きさである。自発核分裂により発生する中性子が事前爆発などを引き起こし、極めて低威力にしかならないことが、高度の球対称性の保持など技術的難度が非常に高い爆縮型が発明された理由である^{2,3}。

軽い核は、もし核融合が起きればエネルギーを発生する。一般に核融合が起こる条件は厳しいが、相対的に容易な重水素の原子核²H（Dと略）と三重水素の原子核³H（Tと略）の核融合を図3に示す。

注目すべきは、この核融合により発生する中性子の14 MeVというエネルギーは、核分裂により発生する平均2 MeVの7倍であることである。このため、平均2 MeVの中性子の場合に比べて、核分裂連鎖反応が約2.6倍も高速化されるだけでなく、核分裂により発生する中性子の平均個数が約1.5倍の約4.8にもなる。すなわち、核分裂連鎖反応の高速化・高効率化には大きく寄与するのである。

ブースター原理では核融合反応を利用するが、水爆（熱核兵器）とは質的に異なること

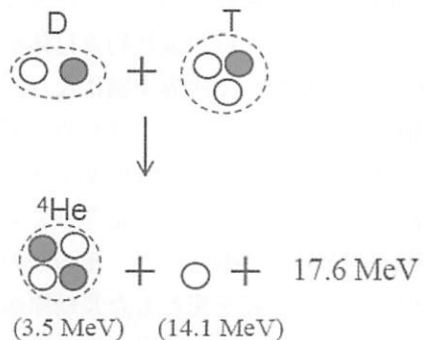


図3 重水素・三重水素の核融合によるエネルギーと中性子

この核融合により発生するエネルギーは17.6 MeVであるが、運動量保存則により、質量の軽い中性子に大部分、すなわち14.1 MeVのエネルギーが分配される。

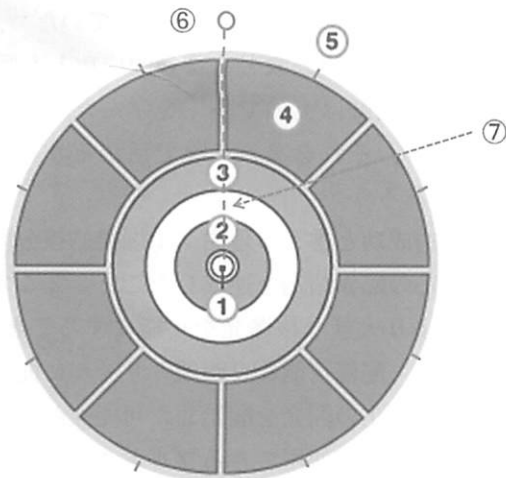


図4 ブースター型核分裂兵器の構造 (概念図)

文献13)を参考に描画。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 (^{239}Pu あるいは ^{235}U またはそれらの併用)。3: タンパー (tamper) または中性子反射体 (^9Be 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)。

に注意すべきである。すなわち、添加される核融合物質の量は数グラム、物質質量1モル程度であり、それらの核融合によるエネルギー自体の爆発威力への寄与は高々2%程度にすぎない。

(2) ブースター型核分裂兵器の構造

ブースター型核分裂兵器の構造 (概念図) を図4に示す。

(3) ブースター型核分裂兵器の利点

- 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型化が可能。
- 2) 核兵器の出力可変性。DT ガスが装荷され

効率向上の定量的な目安

広島原爆の威力 (約 15 kt)、長崎原爆の威力 (約 20 kt) など核分裂爆弾による最大威力は約 50 kt と言われている。しかし、ブースター型核分裂爆弾の場合、実効増倍率 α の最大値は、非ブースター型の約 8 倍、約 $2.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ くらいとなり¹²⁾、その爆発効率は非ブースター型核分裂爆弾の約 5~10 倍、最大 500 kt という見方もある^{13,15)}。そうであれば、軍事的な費用効果比の観点からは、過剰破壊である「水爆」よりも非常に有利となる。500 kt 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ようである。

なければ、ゼロまたは無視出来るほどの低威力になる。すなわち、DT ガスの量により爆発威力を調節することが可能。

- 3) 自発核分裂による中性子などによる (意図しない) 事前爆発を心配しなくてもよい。
 - 4) 原子炉級 Pu (^{240}Pu などの自発核分裂性物質を有意の割合で含む) でも核分裂兵器と実効的に同じ性能を実現できる^{9,14,15)}。
- ## (4) ブースター原理と原子炉級プルトニウムの兵器転用性

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 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¹⁶⁾。

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^{17,18)}。その理由は表1に示されているように、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。

第1世代の核兵器で使用された中性子源 ($^{210}\text{Po} + ^9\text{Be}$) は、半減期が短く取り扱いが困難なため、ブースターに取って代わられた¹⁷⁾。さらに、 ^{240}Pu などの自発核分裂から発生する中性子による事前爆発という困難も、ブースターにより重大な困難ではなくなる¹⁵⁾。

確かに、 ^{240}Pu のアルファ崩壊による発熱を冷却する必要があるなど、兵器級プルトニウムを選び好みするのは便利さの問題であるが¹⁵⁾、取り扱いを大きく阻害するには、自発的核分裂による中性子放出が数倍ではなく、

表1 兵器級プルトニウムと原子炉級プルトニウムの比較

	兵器級 Pu	原子炉級 Pu
放射能 (Ci/g)	3	10
発熱 (W/g)	3	10
中性子放出 (n/s/g)	100	500

出典文献9)。Ci (キュリー) は放射能の強さの単位、W (ワット) は単位時間の放出される熱エネルギーの単位、n/s/g は毎秒1グラム当たりの中性子数の意味。

数十倍の差が必要と言われる^{9,14)}。

3 北朝鮮による核実験

(1) 経過

図5に、北朝鮮の核実験の推定威力の経時変化を示す。

- 1) 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の信頼性の高さを反映している。
- 2) 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。
- 3) 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と推定される。

(2) 1回目の核実験(2006年10月)の評価

- 1) 北朝鮮の原爆実験は設計の20分の1以下の不完全爆発だったという評価が多数であった。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、19 kt (米)、25 kt (旧ソ連)、25 kt (英)、60 kt (仏)、22 kt (中国)、12 kt (インド)、9 kt (パキスタン)であった事実²¹⁾から、20 kt以上が「標準」と思い込んだことが主な理由であろう。
- 2) 北朝鮮は4 kt程度の威力の実験を行うと

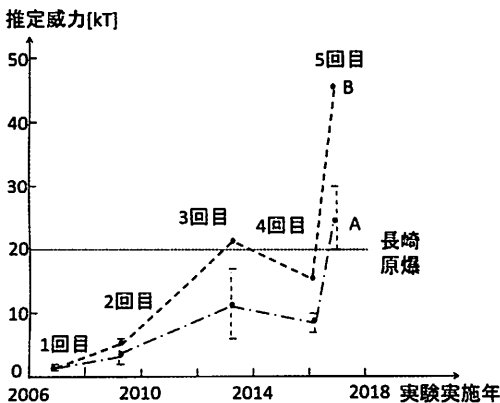


図5 北朝鮮核実験における推定威力の経時変化
推定A (一点鎖線): 文献10)より描図, 推定値に不確定な幅がある。推定B (破線): 文献19, 20)に基づいて作図。

事前に中国に伝えたと報じられていた²²⁾。

- 3) 実験は部分的失敗とも部分的成功とも呼べ、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したであろう²¹⁾。

部分的成功と言える理由: ①爆発的核分裂連鎖反応の臨界超過を達成したこと。②この装置がより大きな核爆発を可能にすること。北朝鮮は、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がある。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もある。

(3) ブースター型核分裂爆発装置実験としての2016年1月(4回目)核実験

- 1) 北朝鮮政府の「水爆実験」という声明は疑問があるという見方が大勢である。水爆であれば、威力と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。熱核兵器の地下核実験における威力は1000 kt (米)、1001 kt (旧ソ連)、660 kt (中国)²³⁾。
- 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。
- 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。
- 4) 2006年のはじめての核実験の際、推定威力は1 kt前後であったとしても、核兵器



図6 核弾頭を視察する金正恩委員長：出典：文献 25)

設計者らが4 ktの威力を計画していた²²⁾。

- 5) ブースター型であれば、威力調節、小型化、軽量化は困難ではない。
- 6) ブースター型であれば、爆縮技術の障壁がかなり低下する。
- 7) 北朝鮮の三重水素生産能力はブースター型核分裂爆発装置には十分である²⁴⁾。
- 8) ブースター型であれば、部分的にDT核融合反応を利用していることで、北朝鮮政府の「水爆実験」という声明とは論理的には矛盾しない。

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。重水素・三重水素の混合ガスポンペ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) ブースター型核分裂兵器の標準化・規格化

ハンホソク²⁵⁾が「軽量化した核弾頭が標準化、規格化された」と主張しているように、実際に配備する場合、維持管理のためには、標準化、規格化は必要不可欠である。

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、筆者は推定する。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、1 kt, 5 kt, 10 kt, 20 kt, 50 kt, 150 kt など分類して製造することを意味するであろう。ハンホソクの報告²⁵⁾は、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²⁶⁾「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」と総合的である。

まとめと課題

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。北朝鮮の核兵器開発は「対米外交の道具」を超え、実戦配備を整えつつある。このまま放置すれば、新たな核実験を続けて、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²⁷⁾。

謝辞：福岡核問題研究会メンバー諸氏と坂田研究会メンバー諸氏に議論していただいたことについて、中原純氏に文献11の教示について、北岡逸人氏に論考(文献25)の教示について、

注および引用文献(Web pageの最終閲覧日:2017年9月7日)

- 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-Korean-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—ブースター効果とテラー・ウラム配置—」『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.: *Hydroneuclear 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1000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://kakujoho.net/npl/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.html>
 - 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. appended 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://isspp.in/north-koreas-2016-nuclear-test-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.

(おかもと・りょうじ:福岡支部, 原子核物理学)
2017年5月11日受付, 9月7日受理