

原子炉級プルトニウムは核兵器に使えるのか



岡本良治

使用済み核燃料から分離されるプルトニウムは核兵器に使用できないという一部の識者による言説がある。種々の分析と関連事実を踏まえれば、長崎原爆の設計技術を用いても原子炉級プルトニウムからつくられる兵器でも0.5キロトンから数キロトンの威力をもつ可能性がある。1950年代以降の設計技術を使えば、原子炉級プルトニウムを用いて兵器級プルトニウムの場合と同等の性能をもつことが可能である。

はじめに

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(Pu)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には、「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⁾。しかし、以下議論するように、長崎原爆水準の設計を用いても長崎原爆の威力の3%弱(通常爆弾で約500キログラム相当)以上の威力の可能性もある。

本稿の中間段階の内容は原水爆禁止2019年世界大会・科学者集会 in 福岡⁹⁾において発表された。関連する詳細な情報と分析については関連するノート¹⁰⁾を参照されたい。

以下、節題名、見出しを除き、プルトニウムをPu、ウランをUと略記する。

1 核分裂兵器の物理学

以下の内容の物理的背景として、原爆(核分裂兵器)における核爆発の物理学について説明する。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。

UやPuなど重い核は、中性子を吸収した後、中性子エネルギーに依存した確率で核分裂(誘起核分裂)し、莫大なエネルギーと2次的な中性子を2, 3個発生する。1回の核分裂

キーワード：使用済み核燃料 (spent nuclear fuel), プルトニウム240 (plutonium 240), 自発核分裂 (spontaneous nuclear fission), 爆縮 (implosion), ブースター (booster)
著者連絡先：okamoto.ryoji.munakata@gmail.com

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 100 万倍に達する。中性子がまだ核分裂していない核分裂性の原子核に吸収されると、同様に核分裂を起こし、連鎖反応が可能になる（核分裂連鎖反応）。また、重い原子核は一般に不安定であるので、中性子を吸収せずに自発的に核分裂することもある（自発核分裂）。もちろん、その際にも 2 次的な中性子を 2, 3 個発生する。

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。

核分裂連鎖反応に対する最低の質量（臨界量）は、核分裂性物質の密度の 2 乗に反比例^{11,12)}するので、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済み、さらに爆発効率も増加する。

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圧倒的な部分は最後の数世代の核分裂により発生する。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。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^{11,13-15)}。

核兵器の製造のために解決すべき原理的課題は次の通りである。

- 1) 爆発前には核分裂性物質を未臨界状態に保つ、
- 2) 中性子がない状態を保ったまま、核分裂性物質を超臨界状態にする、
- 3) 最適の配位の時、中性子を臨界質量に注入

する。

しかし、課題 1, 2 および 3 を同時に解決することは、自然に発生する中性子が避けられないため、非常に複雑である。宇宙線は大気中の分子との核反応により中性子を生成するが、核分裂連鎖反応への「バックグラウンド」中性子のほとんどすべては、自発核分裂のプロセスを通じて核分裂性物質自体から発生する。

2 なぜプルトニウムが問題になるのか

2 つの核分裂性物質、Pu と U の基本的な性質を以下に比較する。

- 1) Pu の爆発的核分裂連鎖反応に対する臨界量は U のその 4 分の 1 程度である。
- 2) U 濃縮には高精度の大規模施設が必要だが、Pu は原子炉の稼働により徐々に生成し、使用済み核燃料から再処理により Pu を抽出する方が U を濃縮するより技術的に相対的に容易である。
- 3) U 使用の核分裂兵器は砲弾型という単純な合体方式でも可能であるが、Pu 使用の核分裂兵器は、自発核分裂の確率が大きい Pu-240 などの混入のため、砲弾型では不可能で、爆縮方式が必要不可欠であった。

原子炉における Pu 生成の仕組みは次の通りである。U 核燃料中の約 96% を占める U-238 が中性子を吸収し、2 回のベータ崩壊の結果、Pu-239 が得られる。Pu-239 は核兵器の製造に最も有用な Pu 同位体であり、原子炉の運転を通じて生産される。原子炉内の燃料がより長い期間中性子の照射に晒されると、Pu 同位体の一部が更に中性子を吸収して、一部はベータ崩壊を経て、中性子をより多く含む同位体、すなわち、より高次の同位体に転換する：

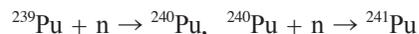
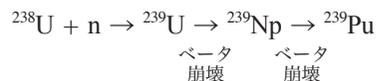


表1 プルトニウム同位体の性質

Pu 同位 元素	中性子率 [n/gS] ¹⁵⁾	崩壊熱 [W/kg] ¹⁵⁾	含有率の例 [%] ⁴⁾	
			兵器級 Pu	原子炉 級 Pu
Pu-238	2600	567	0.012	1.3
Pu-239	0.03	1.9	94	60
Pu-240	1000	7.0	5.8	24
Pu-241	0.049	4.5	0.35	9.1
Pu-242	1700	0.1	0.022	5.0

[n/gS] は 1 グラムあたり毎秒 1 個の中性子の発生単位。

[W/kg] は 1 キログラムあたり 1 ワットの発熱単位。

しかし、Pu-238 は U-235 に中性子が吸収された後に、放射崩壊系列において生成される。核兵器製造に当たって、Pu-239 の比較的純粋な組成が選ばれるため、核燃料棒は短期間の照射後に原子炉から取り出され、使用済み核燃料の再処理により Pu が分離される。発電用を目的とする原子炉の場合、核燃料はより長い期間原子炉内に置かれ、これによってより高次の同位体をより多く含む Pu が得られる。

自発核分裂の確率が大きい Pu-240 の含有率により、Pu の品位がスーパー級 (SGPu, <3%), 兵器級 (WGPu, 3 ~ 7%), 燃料級 (FGPu, 7 ~ 18%), 原子炉級 (RGPu, 18 ~ 30%) に分類されてきた⁸⁾。表 1 に、本稿に関連する Pu 同位体の性質を示す。

3 古典的な核兵器としての長崎原爆

—兵器級プルトニウム使用の爆縮型—

しかし、Pu を使用した原爆の場合、Pu-240 の自発核分裂の確率が有意に大きいため、自発核分裂により発生する中性子が、期待するタイミングではなく、過早爆発 (predetonation) を引き起こし、その結果、極めて低威力にしなければならない。この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¹²⁻¹⁵⁾。

広島原爆はウランを用いた砲弾型であったが、その爆発効率は約 1.5% と非常に低かつ

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) の爆発効率は約 17% である¹⁵⁾。しかし、その総重量は 4670 kg で、爆縮レンズ用の通常爆薬は 2500 kg にもなった。従って、長崎原爆型ではミサイルの核弾頭を作るのは不可能であったが、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。

4 原子炉級プルトニウムで核兵器は作れないと言説への批判的分析

4.1 核兵器の性能は設計水準に依存して決まる

マンハッタン計画においても砲弾型では U-235 は使えるが、Pu の場合には使えず、爆縮という斬新な設計が考案されて、その技術的信頼性は 1945 年 7 月 15 日の Trinity 実験 (最初の原爆実験) で実証された¹⁵⁾。爆縮型の主な利点は次の通りである¹⁵⁾。

- 高い挿入速度。これにより、自発核分裂率の高い材料 (Pu など) を使用できる。
- 高密度が達成され、非常に効率的な爆弾につながり、比較的少量の材料で爆弾を作成できる。臨界量が核分裂性物質の密度の 2 乗に反比例^{11,12)}するので、爆縮型では、核分裂性物質を圧縮できれば、臨界量は大幅に減少する。
- 軽量設計の可能性。最適な設計ではコアを圧縮するのに数 kg の爆薬しか必要ない。

1950 年代初頭の米国の核兵器は、その性能を向上させるために、ピット内に空隙を導入した浮上型ピット (levitated pit)¹⁵⁾ を使用したが、欠点があった。これを改良した中空型ピット (hollow pit) は、Pu を球殻状に成形したもので、ハンマーで釘を打つような効果を得るため、タンパー (抑え) とピットの間に関隙が設けられた。これは爆縮の効果を高め、結果として Pu の量が少なくて済むようになった。

た。この結果、後述する崩壊熱問題がかなり緩和された⁸⁾。このように、核兵器の性能は設計水準に依存して決まる¹⁶⁻¹⁸⁾。

4.2 過早爆発の対処法 1

(1) 低水準の設計を用いても有意の爆発威力

1947年から1972年までロスアラモス国立研究所理論部の所長を務めたMark¹⁹⁾は、原子炉級Puの爆発的性質について、関係する諸現象の複雑さを避けて、物理的に単純化したモデルに基づく解析により、原子炉級Pu、兵器級Puとスーパー級Puの間の比較分析を行い、原子炉級Puの場合でも最小の爆発効率が0.027となり、25キロトンの設計威力の場合、0.5キロトン程度になり、被害面積は威力の3分の2乗に比例するので、甚大な被害を与える可能性があることなどを明かにした。

(2) その後、von Hippel と Lyman¹⁹⁾ が以下に記すような解析的な数式に表現した。

N : それぞれの級のPu 6 kg 中のPu-240などの自発核分裂により放出される1秒あたりの中性子の個数で、原子炉級Pu、兵器級Puとスーパー級Puの間で、この値が有意に異なる。例えば

$N = 20 \times 10^5/s$ (原子炉級Pu), $3 \times 10^5/s$ (兵器級Pu), $0.5 \times 10^5/s$ (スーパー級Pu)。

t_0 : 爆縮時間 (implosion time),

τ : 核分裂連鎖反応の各世代における中性子の平均走行寿命 ($\tau = 10^{-8}$ s),

設計爆発威力 Y_0 , 爆発効率 ($Y/Y_0 = x$) とする。

1) x の最小値; $x_{\min} = (90 \tau / t_0)^{3/2}$ 。

2) 過早爆発をする累積的な確率 $P_{\text{predet}}(x)$:

$$P_{\text{predet}}(x) = 1 - \exp \left\{ -(1/2) N t_0 [x^{2/3} - (x_{\min})^{2/3}] \right\},$$

ただし、 $x \geq x_{\min}$, $\exp(x) = e^x$ 。

(3) 爆縮時間の短縮による効果

Mark, von Hippel と Lyman の分析¹⁹⁾を受けて、Kang ら²⁰⁾ は、爆縮時間 t_0 を減少する

ことができれば、過早爆発をする累積的な確率 $P_{\text{predet}}(x)$ が著しく減少することを示した。

(4) 爆縮時間の短縮によるプルトニウム品位区別の無意味化。

ここで、問題をより明確にするため、 $P_{\text{predet}}(x)$ ではなく、過早爆発をしない確率 $P(x) = 1 - P_{\text{predet}}(x)$ の x への依存性を図1に示す。爆縮時間 t_0 を短くすることにより、 x の最小値 x_{\min} が0.027から0.855へと大きく増大するだけではなく、原子炉級Puを用いても、 $t_0 = 10 \times 10^{-6}$ s に対する兵器級Pu やスーパー級Puの $P(x)$ 値を有意に超える性能が得られ、プルトニウムの品位区別が実効的に無意味になることが分かる。

例えば、原子炉級Puの6 kgの場合、 $N = 20 \times 10^5/s$ で、爆縮時間 $t_0 = 10^{-6}$ s であるとする。この間に自発核分裂により発生する中性子は2個になる。しかし、爆縮により核分裂性物

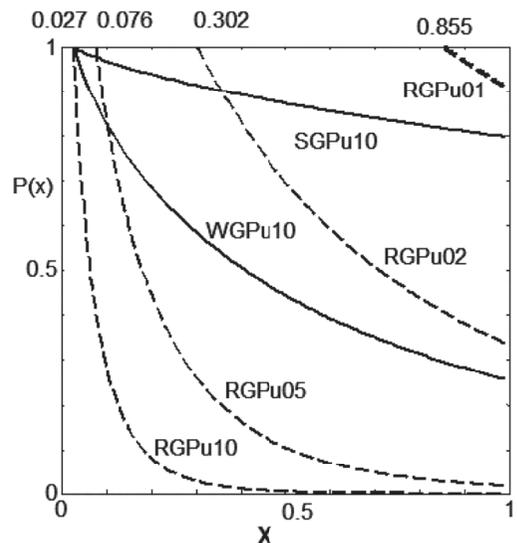


図1 爆発効率と過早爆発をしない確率
横軸 x は爆発効率 (Y/Y_0), 縦軸 $P(x)$ は過早爆発しない確率。
RGPu= 原子炉級Pu, WGPu= 兵器級Pu, SGPu= スーパー級Pu。
グラフ上部の数値はそれぞれの t_0 の値に対する x_{\min} 。各 RGPu の右側の数値の意味は以下の通り:

- 10: $t_0 = 10 \times 10^{-6}$ s,
- 05: $t_0 = 5 \times 10^{-6}$ s,
- 02: $t_0 = 2 \times 10^{-6}$ s,
- 01: $t_0 = 1 \times 10^{-6}$ s.

質は圧縮され、臨界量が少なくすむ、核分裂性物質が6 kgの半分以下ですめば、自発核分裂により発生する中性子は1個以下になる。

ここで、Markらの論文について、文献4)にかなり否定的な見解が述べられている。その要旨は「Markらの論文は、1943年にSerberがロスアラモス研究所で行った講義録¹¹⁾の爆発所要時間と達成威力の間の数学モデルを拠り所として簡略化した核兵器の数学モデルの計算結果を示したに過ぎず、実際の核爆発装置との関係が不明である、算術的な検証であって技術の証明ではない」と。

しかしこの見解は科学的に妥当であろうか。

中性子の生成・吸収・散乱という挙動(neutronics)や核爆発時におけるガス化する核兵器本体の流体力学的挙動が極めて複雑な現象に対して、解析可能なモデルを設定して分析することは物理学の基本的な方法論であり、歴史的に幾多の事例で検証されてきたことはよく知られている。もちろん、複雑な現象についてのより深い理解にはより詳細な数値計算や関連する実験結果の分析も必要である。Markらの分析内容は、広島原爆の高濃縮Uに対する砲弾型では $t_0=10^3$ sであり^{13,15)}、 x_{min} が無視できる大きさになるだけでなく、それよりも大きい x の値に対して $P(x)$ の値も無視できるほど小さいなど、砲弾型はPuには使用できないことも容易に理解される。

さらに、Markらの論文は文献13)、15)、16)と論理整合的であり、文献20)を含む諸文献に引用されるなど、原子炉級Pu問題では基準となる参照論文として評価されていると思われる。

4.3 過早爆発への対処法2

DT核融合による核分裂の高速化・高効率化: ブースター (booster) またはブースティング (boosting)。

ブースターとは相対的に少量の核融合物質、

重水素 (D) と三重水素 (T) の核融合による核分裂連鎖反応の高速化・高効率化の仕組みをいう。

核分裂兵器の爆発効率を上げるためには、核分裂を誘起する中性子の個数を適切なタイミングで、かついかに効率的に増やすかがポイントである。そのために、核分裂以外の反応として核融合反応が候補になる。しかし、核融合反応が起こるためには超高温・超高压が必要である。そこで核分裂兵器の中心部では爆縮により超高压が達成され、核分裂連鎖反応により超高温が達成されるという仕組みを活用するのである。

核融合反応が起こるためには最低温度 (点火温度) があり、核分裂連鎖反応が起きる中心部で実現する温度はDD核融合には低すぎて無理で、DT核融合には適合する¹⁴⁾。DT核融合によって放出される中性子の平均的エネルギーは14 MeVで、核分裂によって放出される中性子2 MeVの7倍も高い。その中性子がPu-239に吸収され、核分裂すると、放出される中性子は5個弱になり、DT核融合なしの場合のその1.5倍に増加するのである。その結果、ブースターがない場合の威力がブースターにより約10倍にも増加する^{14,21)}。因みに、核融合にかかる時間は1 n秒 (=10⁻⁹s)程度である (1 eVは1電子ボルト、1 MeVは100万電子ボルトというエネルギーの単位である)。

ブースターの利点は以下の通り^{8,14,21,22)}。

- 1) 相対的に薄い中性子反射体・タンパーでよいので、低い重量と小型化が可能である。
- 2) 核兵器の出力可変性。DTガスが装荷されなければゼロまたは無視出来るほどの低威になる。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である。
- 3) 自発核分裂により発生する中性子による惹起される過早爆発を実質的に心配しなくて

もよい。

4.4 Pu-238 の高い崩壊熱への対処法

Pu のコア自体で許容熱量が制限されることはない。実際の拘束条件は温度増加による Pu 同素体間の転移の可能性である。Pu には温度により熱膨張率がそれぞれ大きく異なる 6 つの同素体があり、温度変化にかなり敏感である。しかし、金属 Pu に 1 重量パーセントのガリウムを加えたプルトニウム・ガリウム合金は非常に耐熱性があり、室温から 500°C 以上の温度で安定していて、この範囲にわたって膨張率は非常に小さい^{8,23)}。

Pu コアを取り囲む、爆縮に使われる高性能爆薬に比べて、1000 倍以上高い熱伝導率をもつアルミニウムの断面積 1 cm² 以下のものを用いた熱橋（サーマルブリッジ）を使えば、発熱量を半分にするという提案もある¹⁹⁾。

他にも、中空型ピット設計などにより核兵器中の Pu の量自体を減らす、または使用数分前まで Pu コアを核兵器から離しておくなどの方法により、原子炉級 Pu の熱出力を取り扱い易くなる⁸⁾。

4.5 Am-241 のガンマ線による被曝

Pu-241 のベータ崩壊により生成される Am-241 は原子炉級 Pu 中で最強のガンマ線源である。そのエネルギーが 0.06 MeV であり、原子核の多くのガンマ線より相対的に低い。しかし、Pu コアを 0.5 cm の天然ウランでコーティングすれば、透過するガンマ線の強度は、遮蔽されていない兵器級 Pu コアからのそれよりも大幅に少なくなる⁸⁾。天然ウランはアルファ粒子を放出するが、その遮蔽は容易である。遮蔽の材料としては他の金属でもほぼ同様の遮蔽効果が得られるが、天然ウラン中の U-238 は 1 MeV 以上の高エネルギー中性子に対して核分裂するという軍事的利点もある。

4.6 「原子炉級 Pu という劣った材料を使う理由はあるか」という疑問

文献 4) に述べられているこの疑問についてどう考えるか。

原子炉級 Pu は兵器級 Pu と比べて劣った材料とは言える。しかし、兵器級 Pu はスーパー級 Pu と比べると劣った核物質である。しかし、スーパー級 Pu を大量に生産することは容易ではなく、核兵器生産に関心をもつ国々は兵器級 Pu を使用する方法を見つけた。この相対的に「劣った」核物質、すなわち兵器級 Pu から何万発もの核兵器が製造されている⁸⁾ ことを無視すべきではない。

確かに、兵器級 Pu か原子炉級 Pu のどちらかを使うという選択枝があるならば、核兵器を開発したい国または組織は常に兵器級 Pu を選ぶであろう。しかし種々の制約が強く兵器級 Pu は容易に入手できない。その場合の選択枝は、原子炉級 Pu か兵器級 Pu かではなく、むしろ原子炉級 Pu か核兵器なしかである⁸⁾。

4.7 国際原子力機関の核保障措置

核の番人と言われる国際原子力機関(IAEA)では、原子炉級 Pu を区別して規制をするわけではない。保障措置上の「有意量 8 kg」(核爆発装置に必要な Pu 重量)は、原子炉級 Pu を含む全ての Pu に当てはめて決められていること^{24,25)}は、上述の如く Pu の品位区別は実効的に無意味になるという推論と整合的である。

5 高速増殖炉におけるスーパー級 Pu 生成

前項まで、商用原子炉の大部分を占める軽水炉（軽水減速熱中性子炉）における付随的な副産物としての原子炉級 Pu について議論してきたが、Pu 生産を主目的とする、またはより適した原子炉として、黒鉛炉、重水炉と高速増殖炉がある。黒鉛炉と重水炉はともに、核分裂により放出される高速中性子を減速材により熱中性子に減速する点で、軽水炉と共通するが、それぞれの減速材が黒鉛（炭素）

と重水である点が軽水炉とは異なる。

黒鉛炉は第二次世界大戦当時の米国マンハッタン計画においてプルトニウム生産炉として開発された。重水炉により生産されるのは、原子炉級 Pu より Pu-239 の純度が有意に高い兵器級 Pu である²⁶⁾。重水炉の代表的なものはカナダが開発した CANDU 炉である。インドは CANDU 炉を平和利用目的でカナダから輸入した後、核兵器開発を始めた。

他方、高速増殖炉は高速中性子を減速させずに核分裂連鎖反応を利用し、炉心燃料として低濃縮ウランまたは MOX 核燃料を用い、それを囲むブランケット燃料として天然ウランまたは劣化ウランを用いる。高速増殖炉についての公式情報や原子力工学関係の教科書にはほとんど記載されていないが、そのブランケットにおいて、スーパー級 Pu が生産される^{7,26-28)}。しかし、日本では核燃料サイクルの要とされた高速増殖炉の原型炉「もんじゅ」が 1994 年に臨界に達した後、ナトリウム漏洩事故などにより停止したまま 2016 年に廃炉が決定された。その後、政府は増殖機能のない高速炉の開発に方針転換し、核廃棄物の減容などを目的としているが、国際協力をめざしたフランスの高速炉計画の頓挫もあり、高速炉開発の技術的な展望は不明と思われる。

おわりに

以上のように、原子炉級 Pu は核兵器に使用できないとか不適であるということは科学的、技術的には根拠薄弱であり、洗練された設計技術を用いれば、核兵器の材料としては原子炉級 Pu と兵器級 Pu は基本的に同等であると考えられる。

核兵器の水平拡散は特定の国の政府または非政府組織の政策という政治的側面と本稿で議論した関連物質の生産または入手、設計技術という技術的側面の両方が関わる。技術的

側面において、核分裂物質、特に Pu は品位を問わず必須である。しかし、TD ガスを加えなければ、実質的に核爆発は起こらないというプースターの特徴があるので、トリチウムも必須の物質と見なすべきである。核兵器の水平拡散禁止を真に目指すのであれば、爆縮技術に中核的役割を果たす高性能爆薬、Pu とトリチウム³⁰⁾を強い規制の対象にすべきである。

従って、一定量以上の原子炉級 Pu を保有することは核兵器の水平拡散への脅威である。非核兵器保有国中最大の約 45.7 トンの原子炉級 Pu を保有する日本では Pu 在庫量を大幅に削減すべきである³¹⁾。原子炉で核爆発は起こらないことについては注³²⁾を参照のこと。

謝辞：故永田忍氏の霊に本稿を捧ぐ。遺品の中からいただいた書籍も本稿で引用した。福岡支部核問題研究会における議論に感謝する。

注および引用文献 (URL 最終閲覧日:2020 年 11 月 4 日)

- 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/siry02019/siry028/05.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)。
- 8) Jones, G., *Reactor-Grade Plutonium and Nuclear Weapons: Exploding the Myths*, Nonproliferation Policy Education Center, February 20, 2018. <http://www.npolicy.org/thebook.php?bid=37>
- 9) 原水爆禁止 2019 年世界大会・科学者集会実行委員会編：『九州沖縄から東アジアの平和を一市民運動の役割と科学者の責任』(花書院, 2019)。
- 10) 岡本良治：「原子炉級プルトニウムと核兵器」ノート。<http://rokamoto.sakura.ne.jp/fukushima/reactor-grade-Pu-and-nuclear-weapon-note>
- 11) Serber, R.: *The Los Alamos Primer* (University of California Press,

- 1992).
- 12) 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)
 - 13) Reed, B. C.: *The Physics of the Manhattan Project*, Springer,2010.
 - 14) 多田 将:『核兵器』(明幸堂, 2019).
 - 15) Sublette, C.: Nuclear Weapons Frequently Asked Questions, §2, §4, §12.
<http://nuclearweaponarchive.org/Nwfaq/Nfaq0.html>
 - 16) Lovins, A. B.: Nuclear weapons and power-reactor plutonium, *Nature*, **283**, 817-823 (1980).
<https://www.nature.com/articles/283817a0>
 - 17) Committee on International Security and Arms Control, National Academy of Sciences, "Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium," National Academy Press, Washington D.C. 1994.
<https://www.nap.edu/read/2345/chapter/1>
 - 18) U.S. Department of Energy, *Nonproliferation and Arms Control Assessment of Weapons-Usable Fissile Materials Storage and Excess Plutonium Disposition Alternatives*, DOE/NN-0007, 37-39, January 1997.
<http://www.fissilematerials.org/library/doe97.pdf>
 - 19) Mark, J. C. with an Appendix by von Hippel, F. and Lyman, E. : *Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium*, Science & Global Security, 4 (1) , 1993.
<http://scienceandglobalsecurity.org/archive/sgs17mark.pdf>
 - 20) Kang, J. & Suzuki, T. & S. Pickett, S. & Suzuki, A.: *Spent Fuel Standard as a Baseline for Proliferation Resistance in Excess Plutonium Disposition Options*, *Journ. Nucl. Sci. Tech.*, **37**, 691-696 (2000).
<https://doi.org/10.1080/18811248.2000.9714945>
 - 21) Gsponer, A. & Humi, J.P.: *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>
 - 22) 岡本良治:「北朝鮮の核兵器開発はどこまで進んだか」『日本の科学者』52 (3) , 24-30 (2017).
http://rokamoto.sakura.ne.jp/fukushima/2017Okamoto_North-Korea-Nuclear-Weapon.pdf
 - 23) Hecker, S. S.: Plutonium and Its Alloys, *Los Alamos Science*, no.26, 2000, p.293.
http://www.sciencemadness.org/lanl1_a/lib-www/pubs/00818035.pdf
<https://cryptome.org/2014/06/wmd-4th-gen-quest.pdf>
 - 24) 鈴木達治郎:「プルトニウムと核拡散リスク」2015年8月3日.
https://nuclearabolitionjpn.wordpress.com/2015/08/03/plutonium_proliferation_risk_tatsuzuki/
 - 25) Japan Atomic Energy Agency: HANDBOOK OF INTERNATIONAL NUCLEAR SAFEGUARDS, October 2016, p.67.
<https://www.jaea.go.jp/04/iscn/archive/ssac/ISCN%20SSAC%20handbook.pdf>
 - 26) Willig, T. M.& Futsaether, C. & Kippel, H. H. Kippel: *Converting the Iranian Heavy Water Reactor IR-40 to a More Proliferation-Resistant Reactor*, Science & Global Security, 20:97-116, 2012
<http://scienceandglobalsecurity.org/archive/sgs20mowillig.pdf>
 - 27) ストックホルム国際平和研究所編:『核拡散は防げるか?』(木村 繁訳, 共立出版, 1980). 特に91ページと第2部総説の文献1.
 - 28) 高木仁三郎編:『プルトニウムを問う・国際プルトニウム会議・記録』(社会思想社, 1993).
 - 29) Kutt, M.& Fries, F.& Englert, M., *Plutonium Disposition in the BN-800 Fast Reactor:An Assessment of Plutonium Isotopics and Breeding*, Science & Global Security, 22:188-208, 2014. Table 7 at p.200.
<http://scienceandglobalsecurity.org/archive/sgs22kutt.pdf>
 - 30) Mark, J.C.&Davies, T.D.&Hoenig, M.M.&Leventhal, P.L. The Tritium Factors as a Forcing Function in Nuclear Arm Reduction Talk, Science, 02q Sep 1988, Vol.241, Issue 4870, pp.1166-1168.
<https://science.sciencemag.org/content/241/4870/1166.1>
 - 31) 新たな原子力核不拡散に関するイニシアチブ研究会提言, 2019年6月4日. https://www.spf.org/global-data/20190604_plutonium_v2.pdf
 - 32) 原子炉で核爆発が起こることは不可能であると思われる。以下その理由を記す。まず原子炉中の核分裂性物質(U-235)の濃縮度はかなり低い。原子炉の核燃料におけるU-235の濃縮度は約4%であるが、広島原爆のU-235の濃縮度は約90%以上である。次に原子炉では主として熱中性子(エネルギー0.025 eV)による核分裂連鎖反応が起こる。しかし、核爆発では高速中性子(平均エネルギー2 MeV)による核分裂連鎖反応である。最後に原子炉ではタンパーの機能をもつ構造物はない。

(おかもと・りょうじ:九州工業大学名誉教授,

原子核物理学)

2019年12月16日受付, 2020年5月19日

受理