

「原子炉級プルトニウムと核兵器」についてのノート*

岡本良治**

- § 1 序論ー関連する背景とノート執筆の動機ー
- § 2 原子炉級プルトニウムがなぜ問題になるか
- § 3 先行する論考

*) 随時更新の予定。

**)九州工業大学名誉教授。 専門分野：原子核物理学、論考等：核・原子力問題他。

§ 1 序論ー関連する背景とノート執筆の動機ー

●日本が国内外に保有する(原子炉の使用済み核燃料から抽出された)プルトニウムは、1年間で約1.5トン減少したが、約45トンである。[朝日20190731]

これに対して、米国、中国を含め、国際的に批判、警戒の目が注がれ続けてきた。

45トンのプルトニウムは、長崎原爆で使用されたプルトニウムの量である約8kgで単純に割ると、約6千発相当になる。

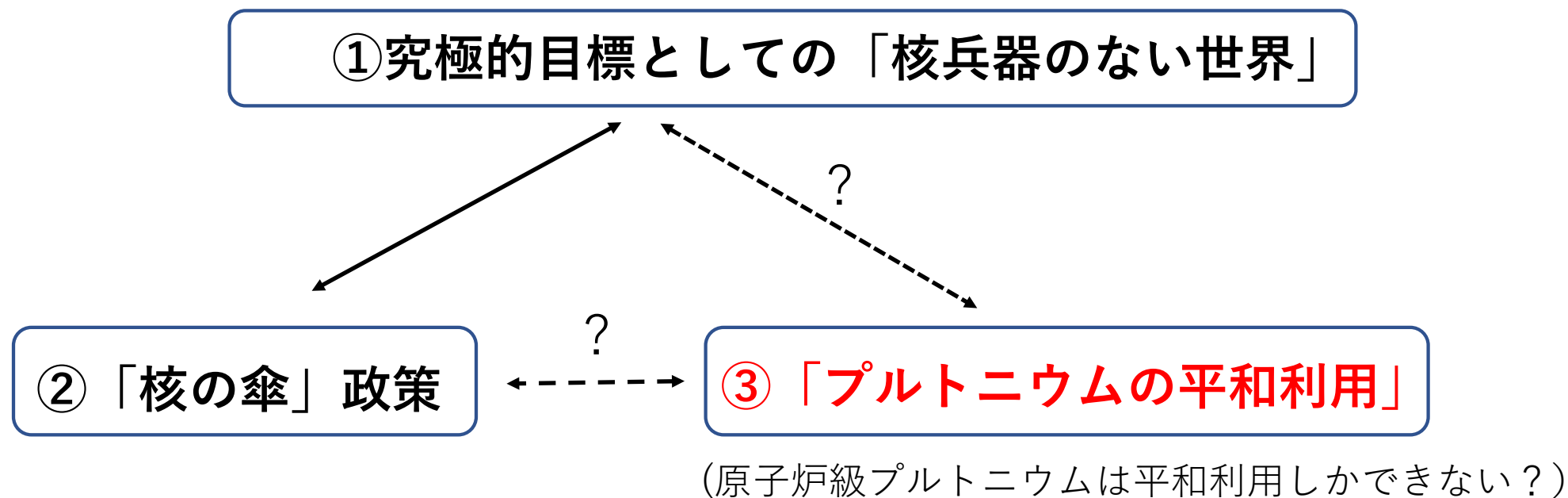
しかし、日本が保有している原子炉級プルトニウムは核兵器に使えないという見方が原子力産業界[ATOMICA]、核政策に長く関与した元外交官[]、原子力技術者[]、物理学者の一部[槌田?]から出されている。

日本政府の核政策におけるトリレンマ/核政策の概念的ねじれ

- ・1番目は核兵器のない世界を目指しているというけど、究極的目標にしていると。
- ・2番目が核の傘政策を取っていること。
- ・3番目はプルトニウムの平和利用。丁寧に言えば、原子炉級プルトニウムは平和目的にしか使えないという建前である。これが崩れたらトリレンマの一角が崩れてくることになる。

日本政府の核政策におけるトリレンマ/核政策の概念的ねじれ

唯一の戦争被爆国として、核兵器のない世界を目指して
リーダーシップをとると公言している日本政府。



参考：鈴木達治郎「核兵器と原発-日本が抱える『核の』ジレンマ」講談社現代新書、2017年。

特に、p.186～

Masakatsu Ota (2018) Conceptual Twist of Japanese Nuclear Policy: Its Ambivalence and Coherence Under the US Umbrella, *Journal for Peace and Nuclear Disarmament*, 1:1, 193-208,
<https://doi.org/10.1080/25751654.2018.1459286>

§ 2 原子炉級プルトニウムがなぜ問題になるか

§ § 2.1 プルトニウムが問題になる理由は何か

なぜプルトニウムとウランか。ウランの方は広島原爆で使われて、プルトニウムは長崎原爆で使われていることはよく知られている。しかし、プルトニウム原爆の方が技術的にはるかに優れていることは、必ずしも知られていない。

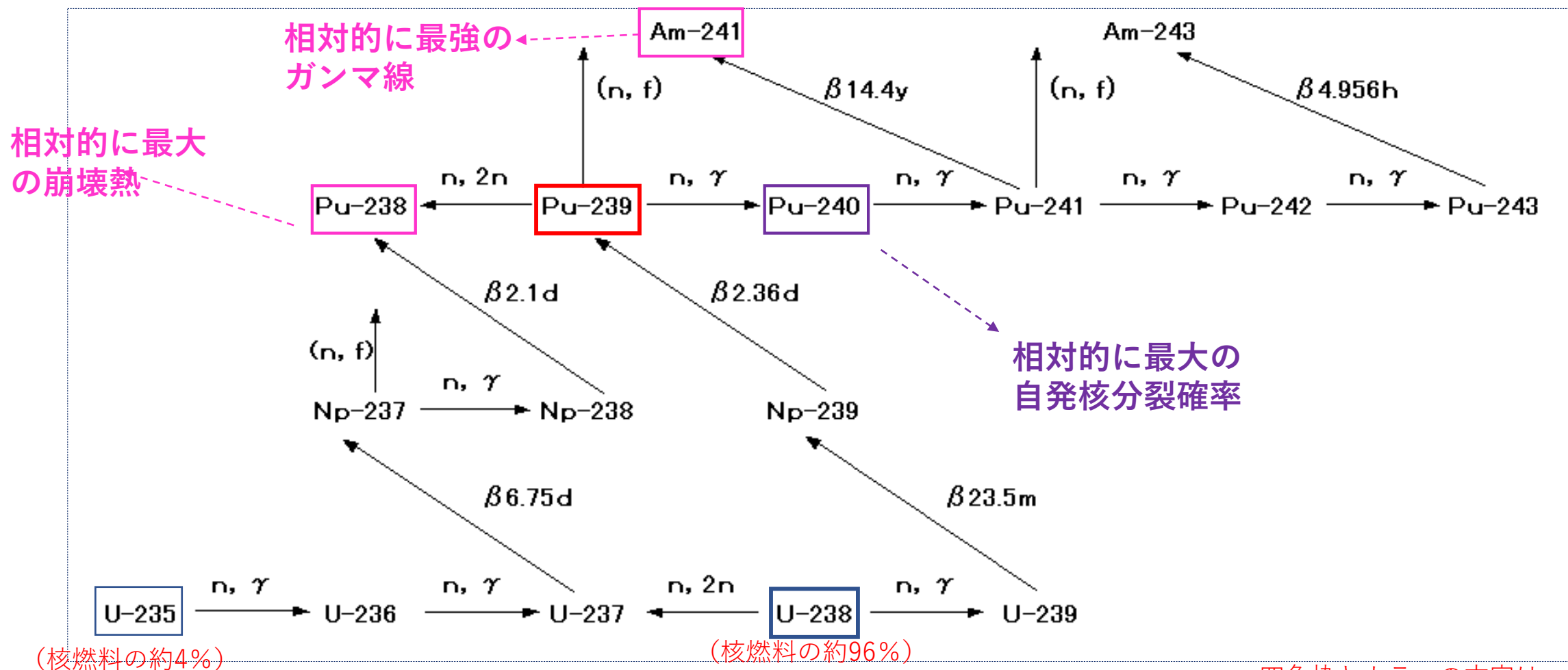
参考： 岡本良治、中原 純、森 茂康,「核分裂兵器と爆縮技術」
「日本の科学者」、1984年（昭和59年）3月、21ページ。

[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)

原子炉の中で、なぜこういうことが問題になるか。

原子炉の中には、核燃料の中で、熱中性子により核分裂をしやすいウラン235は約4%だが、分裂しにくいウラン238が約96%もある。ウラン238に中性子が吸収されて後、2回 β 崩壊してプルトニウム239ができることが重要なポイントである。プルトニウム239が、さらに中性子を吸収するとプルトニウム240になるが、この原子核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。さらに、プルトニウム241とか242などもできる。別の反応経路ではアメリシウム241もできす。主要なポイントはプルトニウム239ができるという問題と、副産物として240もできること。このプルトニウム240が有意に含まれていたために、長崎原爆の爆縮方式が開発された。

ウラン核燃料の中性子照射により生成されるプルトニウム同位体



出典：Nuclear Energy Agency: Plutonium Fuel, an assessment, OECD 1989
<https://www.oecd-nea.org/hdd/reports/1989/nea6519-plutonium-fuel.pdf>
<https://atomica.jaea.go.jp/data/pict/04/04090101/04.gif>

四角枠とカラーの文字は引用者が加筆。

加圧軽水型原子炉中に置かれた核燃料中のプルトニウム同位元素の構成の時間変化

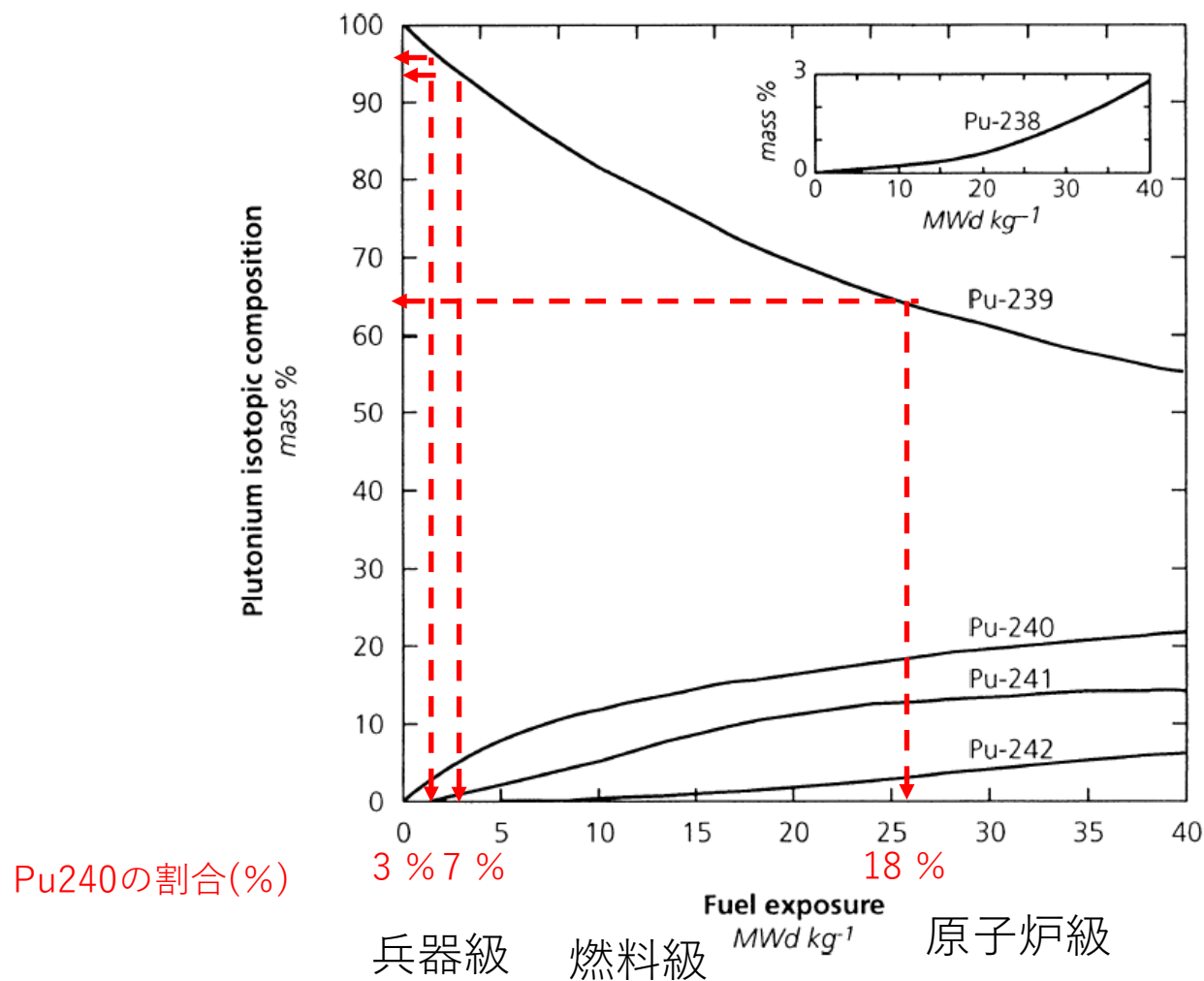


Figure 1: Plutonium isotope composition as a function of fuel exposure in a pressurized-water reactor, upon discharge.

兵器級の範囲の左端(Pu240の3%)はPu241が生成し始める時点に相当している。

横軸はkgあたりのウラン核燃料の中性子による照射時間に対応(単位[Mega-Watt-day/kg])

出典：[Mark1993] 赤(文字,点線)は引用者加筆。

§ § 2.1 原子炉級プルトニウムとは何か

原子炉級プルトニウムという名前の由来ですが、プルトニウム品位の分類の一つです。プルトニウム240の含有率で、スーパー級と兵器級と燃料級と原子炉級など分類されています。原子炉級の場合、プルトニウム240がなんと18%～30%もあります。このために原子炉級プルトニウムは核兵器への利用が不可能であると主張する人々がいます。

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？

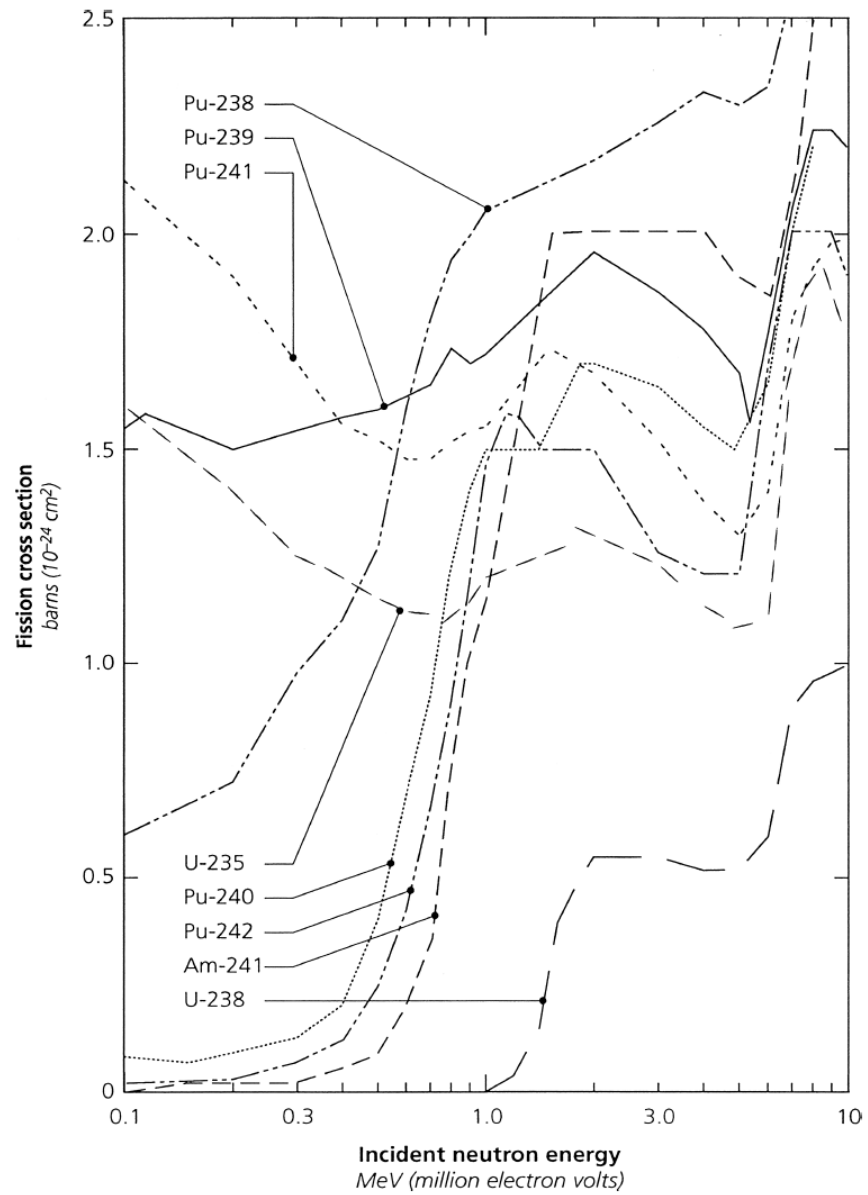


Figure 2: The neutron cross-section for fission of the principal plutonium and uranium isotopes (and americium-241, a decay product of Pu-241) against neutron energy.

出典：[Mark1993]

表に示したのは国際原子力機関(IAEA)などが考えている軍事転用のしきい値がどれくらいかを示したガイドラインである。高速中性子による核分裂連鎖反応の臨界量について、高濃縮のウランの臨界量は、中性子反射体などがない場合、約50kgである。ところがプルトニウムの臨界量は兵器級であれば10.7kg、ウランの約1/4で済む。

さらに、原子炉級プルトニウムの臨界量は14.4kgで、ウランの1/3で済む。これは、非常に限られた量しかない時、非常に重要なポイントである。

表1 核物質の核兵器への転用しきい値 (= 高速中性子による核分裂連鎖反応の臨界量)

核物質	核分裂核種の濃度	核兵器しきい値(裸の形状)	
ウラン	U-235>90%	25kg	(49kg)
	U-235 20%		(780kg)
ネプチウム	Np-237 100%	29kg	(57kg)
プルトニウム	Pu-239>94% 兵器級	4kg	(10.7kg)
	Pu-239>60% 原子炉級	8kg	(14.4kg)
アメリシウム	AM-241 100%	30kg	(60kg)

プルトニウムの臨界量ははるかに少ない！

下記出典をもとに作成

[出典]IAEA(編):IAEA SAFEGUARDS GLOSSARY.1987 Edition. International Atomic Energy Agency, Vienna(1987).p.45
 Frank von Hippel: Global Stocks of Fissile Materials, UN Secretary General's Advisory Board on Disarmament Matters, UN Conference, Feb.24, 2005.
 (<http://disarm.igc.org/Hippelpres05.pdf>)

<https://atomica.jaea.go.jp/data/pict/07/07020108/01.gif>

Fissionable reactor grade Pu and nuclear weapon
 n111ote20191216.ppt

表1-1 プルトニウム同位体の性質
(崩壊型及び半減期)

同位体	放射性崩壊		
	崩壊型 (割合)	半減期	
Pu-236	α	1	2.858 y
	SF		3.5×10^9 y
Pu-238	α	1	87.7 y
	SF		5.0×10^{10} y
Pu-239	α	1	24,110 y
	SF		5.5×10^{15} y
Pu-240	α	1	6,564 y
	SF		1.34×10^{11} y
Pu-241	α	(2.3×10^{-5})	14.29 y
	β	(0.997)	
Pu-242	α	1	373,300 y
	SF		6.75×10^{10} y
Pu-243	β		4.956 h
Pu-244	α	1	8×10^7 y
	SF		6.55×10^{10} y

SF: 自発核分裂

[出典] (1) John Wiley & Sons, inc., Table of Isotopes 7th Edition (1978)

(2) National Nuclear Data Center : Nuclear Reaction Data,
<http://www.nndc.bnl.gov/nndc/nndcnrd.html>

表1-2 プルトニウム同位体の性質
(中性子断面積等)

質量数	2200m/秒中性子との反応		
	吸収断面積(b)		核分裂時 中性子数 ν
	捕獲	核分裂	
Pu-236		170	2.22
Pu-238	540	17.9	2.90
Pu-239	269.3	748.1	2.871
Pu-240	289.5		2.143
Pu-241	358.2	1011.1	2.927
Pu-242	18.5	< 0.2	2.15
Pu-243	87	196	
Pu-244	1.7		2.30

[出典] National Nuclear Data Center : Nuclear Reaction Data ,
<http://www.nndc.bnl.gov/nndc/nndcnrd.html>

表2 核兵器級と原子炉級プルトニウム同位体重量比の例

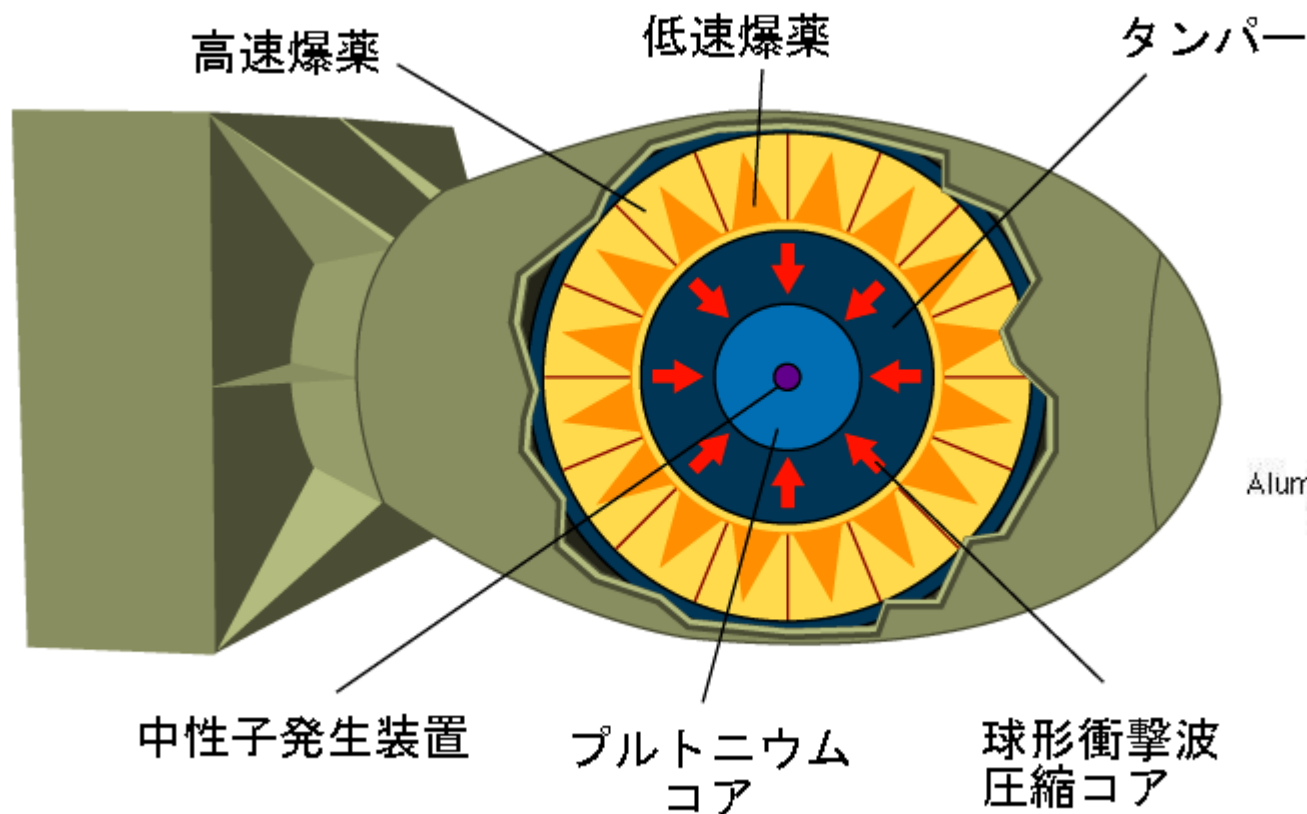
単位： 重量(%)

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

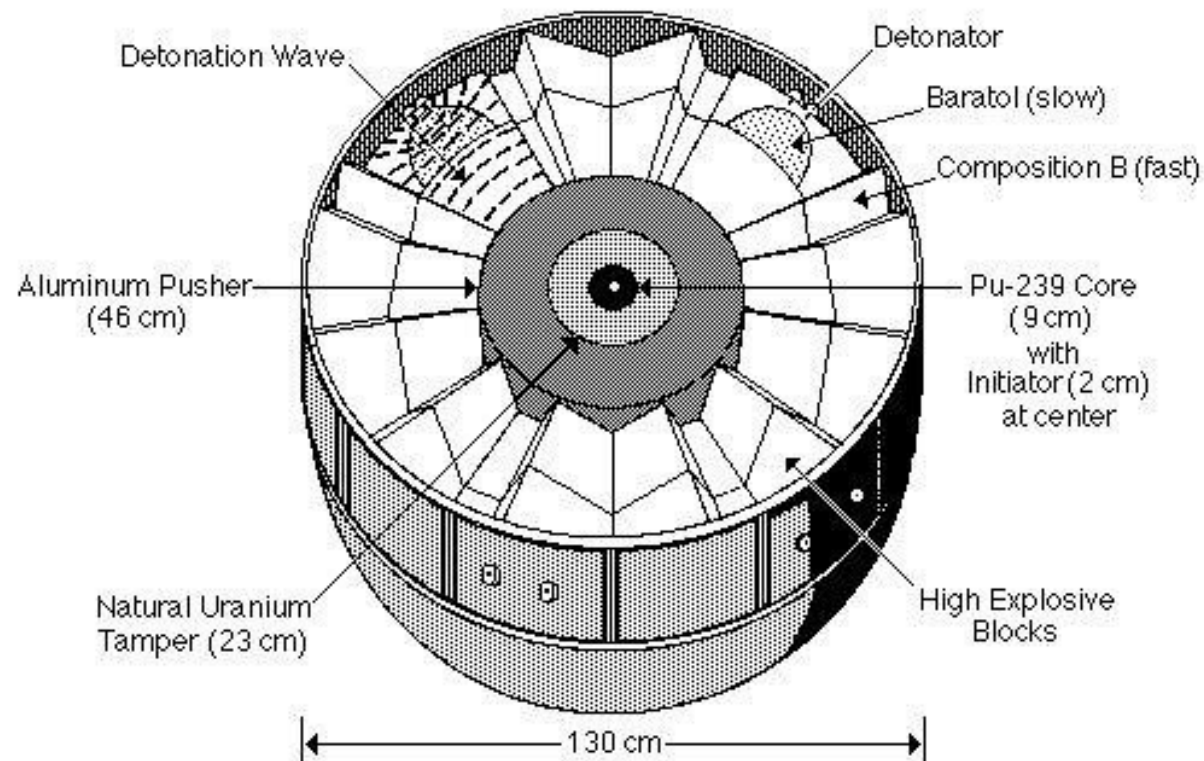
〔出典〕 松岡 理：「プルトニウムの安全性評価」日刊工業新聞社(1993.6)、p.9およびp.10

<https://atomica.jaea.go.jp/data/pict/04/04090101/03.gif>

長崎に投下された原爆（プルトニウム使用，爆縮型）



32個の爆縮レンズ
からなる球形爆縮



長崎型原爆（プルトニウム239、爆縮型）

プルトニウム239は約8kg、その約15%の純度が表。

爆発威力は約20キルトン=20,000トン爆薬相当

長崎原爆に使用された
プルトニウムの量（約 8 kg）の大きさ



爆縮型が開発された理由：

不純物としての ^{240}Pu の自発核分裂からでる中性子が事前爆発を起こす可能性があり、その効果を相殺するため。

爆縮技術に開発に寄与した主な科学者たち（＊：後にノーベル賞受賞）

・爆縮のアイデアを考案したのはNeddermeyerで1949年、指導教授のAnderson*と湯川秀樹博士*が1930年代に予言した π 中間子を発見した。

<物理学者>

- ・ Serber：原爆の原理について、最初の系統的講義(後に核力の研究)
- ・ H. Bethe *, R. Feynman * :爆縮の効率の計算
- ・ L. Alvarez：超高速点火装置の開発
- ・ K. Fuchs：英、米、旧ソ連、中国の原爆計画に関与または寄与した。1950年、旧ソ連のスパイであることを告白

<数学者>

- ・ J. von Neumann：爆縮レンズの設計

<化学者>

- ・ Kischakovsky:高性能爆薬の開発

マンハッタン計画の理論責任者：H. Bethe博士

Hans Albrecht Bethe, 1906- 2005年



第二次世界大戦の間、彼はロバート・オッペンハイマーに招かれカリフォルニア大学バークレー校での特別夏季会議に参加した。それは原子爆弾の最初の概略を説明したものであった。オッペンハイマーがロスアラモスで秘密兵器研究所を開設したとき、ベーテは理論部門の監督に任命された。

1948年～1949年までコロンビア大学に客員教授として招かれた。戦後ベーテは水素爆弾の開発計画に反対したが、ハリー・S・トルーマン大統領が開発計画を宣言し、朝鮮戦争が勃発したときベーテは計画に参加し開発に重要な役割を果たした。彼は計画の終了まで関わったが、個人的には水素爆弾の製造が不可能であることを望んだ。

1967年、「原子核反応理論への貢献、特に星の内部におけるエネルギー生成に関する発見」によってノーベル物理学賞を受賞した。

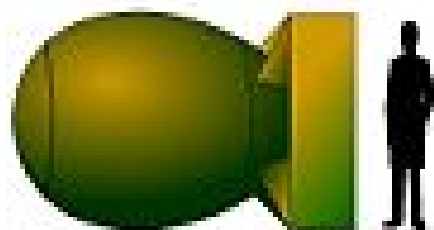
大学院生時代（1970年前半）に、研究室訪問、
物理教室にて講演

核兵器の威力・サイズ(重量) 比の変遷

長崎原爆 1945年: 威力 20kt

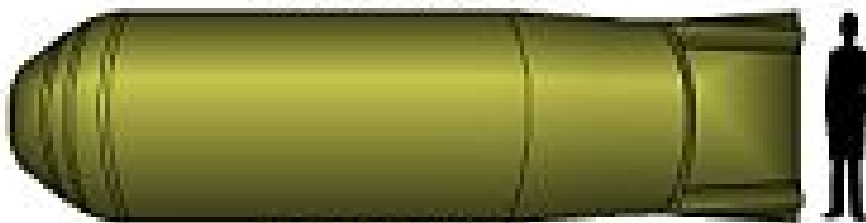
最初の水爆 1955年: 威力 15Mt=15,000kt

FIRST FISSION BOMBS



MK IV (Fat Man), 20kt (1945)

FIRST FUSION BOMBS

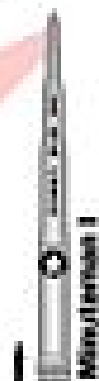


MK-17 (Bravo), 15Mt (1955)

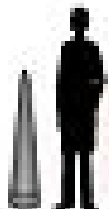
SINGLE WARHEAD DEVELOPMENT



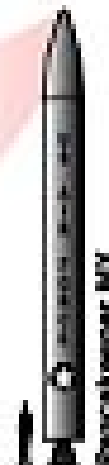
W-59, 1Mt (1962)



MULTIPLE INDEPENDENT RE-ENTRY VEHICLE (MIRV) DEVELOPMENT



W-87, 475kt (1986)



長崎原爆 1945年: 威力 20kt、
最初の水爆 1955年: 威力 15Mt=15,000kt、
単核弾頭1962年: 威力 1Mt=1,000kt、
多核弾頭1986年: 威力 475kt。

単核弾頭1962: 威力 1Mt=1,000kt

多核弾頭1986: 威力 475kt

出典:

https://in.boell.org/sites/default/files/Files/first-grade-Pic-and-nuclear-weapon-size-chart_284px.jpg

File name: first-grade-Pic-and-nuclear-weapon-size-chart_284px.jpg
n1111ote20191216.ppt

§ 3 先行する論考とそれらへの肯定的および批判コメントについて

§ § 3.1 C. Mark論文(1992 ?)

Table 2: Various properties of plutonium isotopes (and americium-241).

Half-life^a Bare critical mass

Spontaneous

fission neutrons Decay heat

Isotope years kg, α -phase (gm-sec)⁻¹ watts kg⁻¹

Pu-238 87.7 10 2.6·10₃ 560

Pu-239 24,100 10 22·10₋₃ 1.9

Pu-240 6,560 40 0.91·10₃ 6.8

Pu-241 14.4 10 49·10₋₃ 4.2

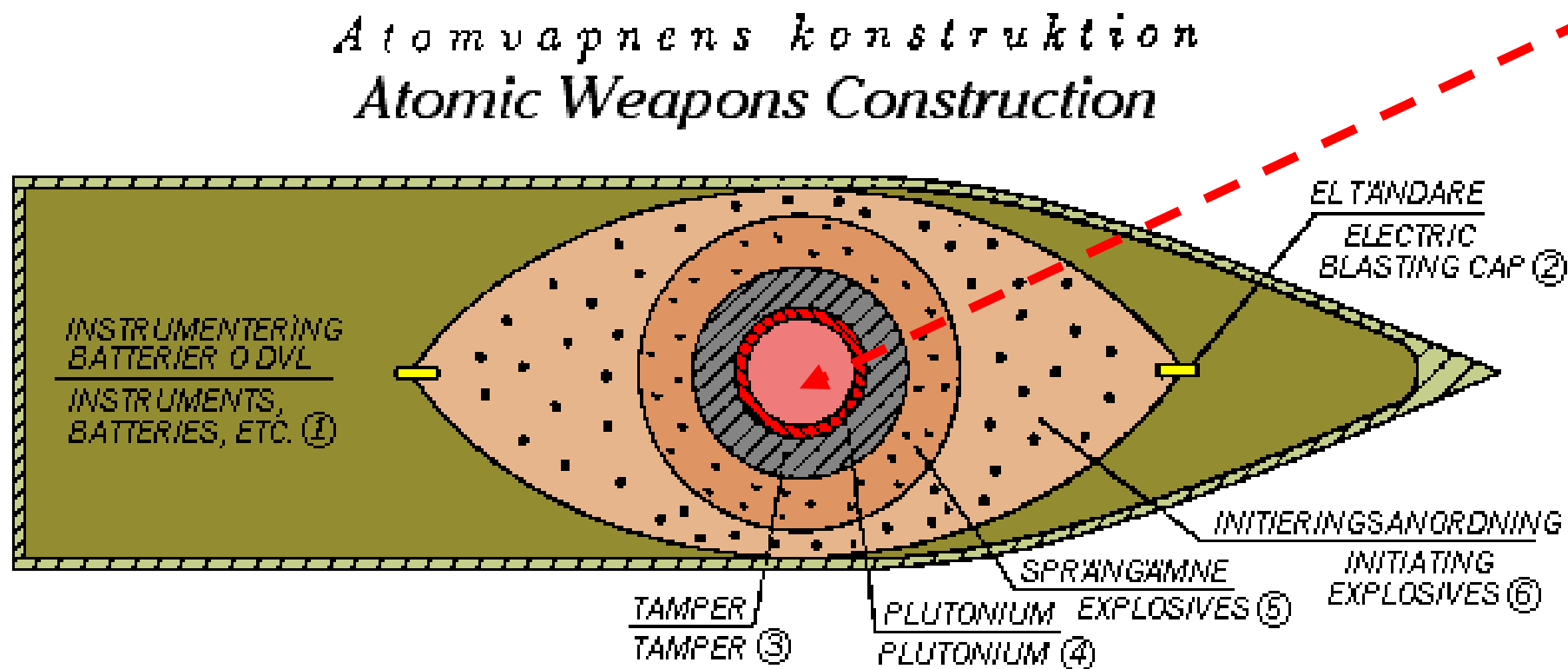
Pu-242 376,000 100 1.7·10₃ 0.1

Am-241 430 100 1.2 114

^aBy α -decay. except Pu-241, which is by β -decay to Am-241.

2点空洞ピット(Two-point hollow pit)

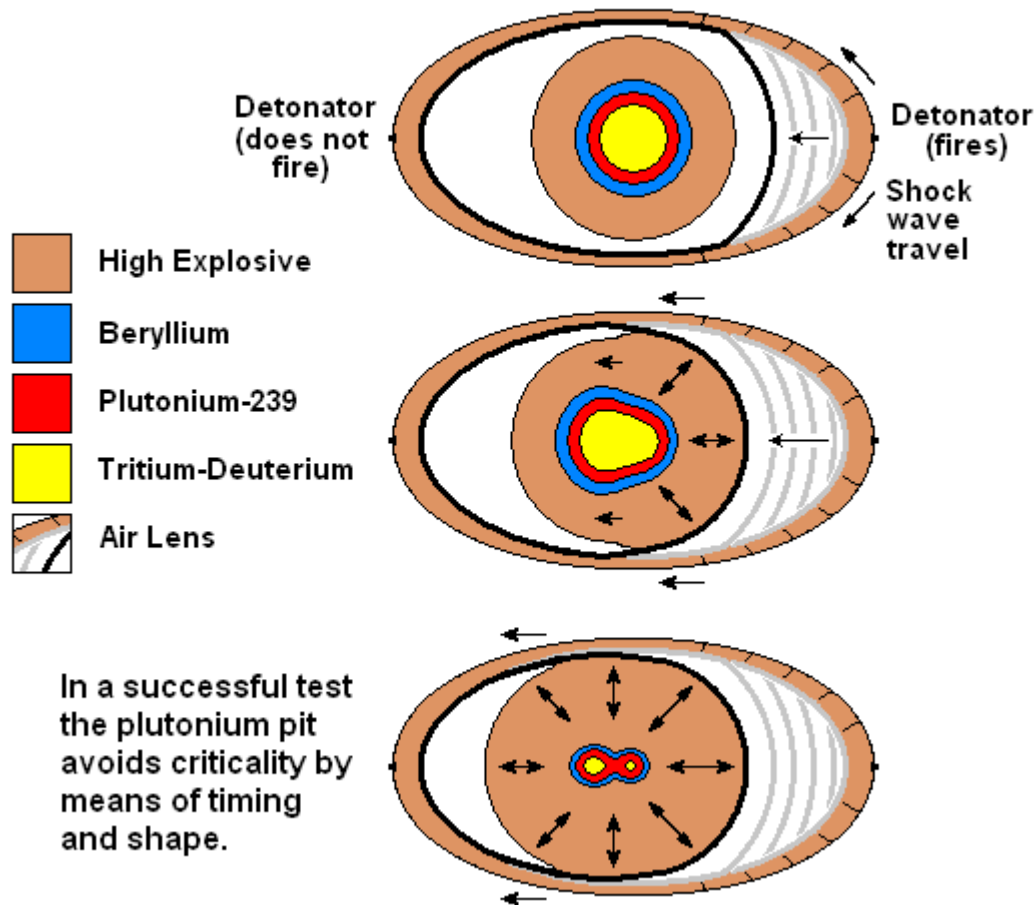
空洞 hollow



Principkonstruktion av uranbomb

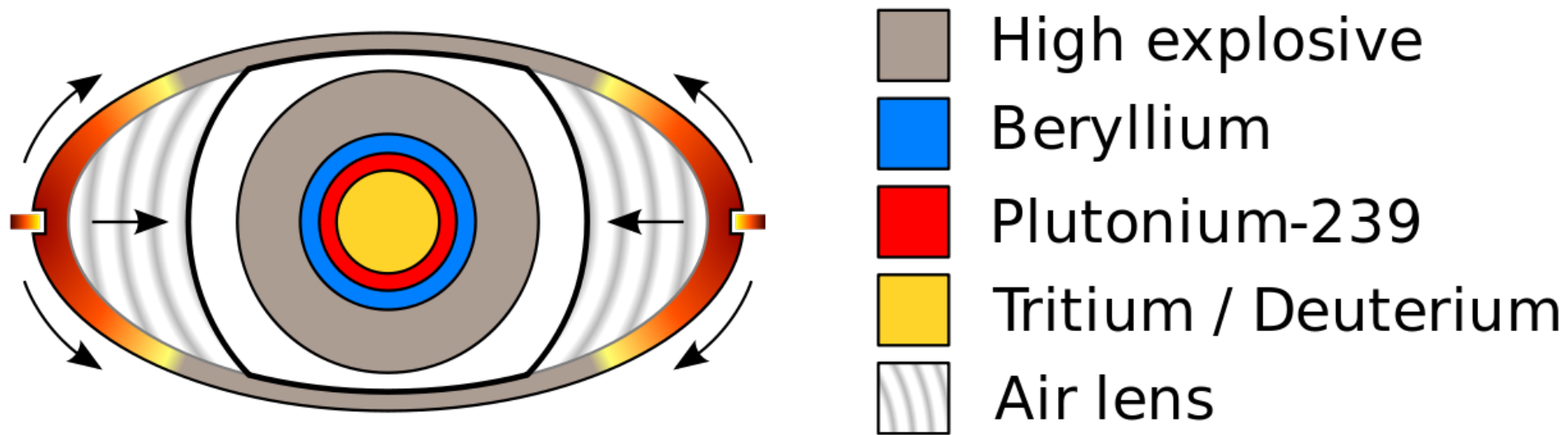
一点爆発安全性試験

One-Point Safety Test



2点安全性試験空洞ピット

U.S. Swan Device - 1956

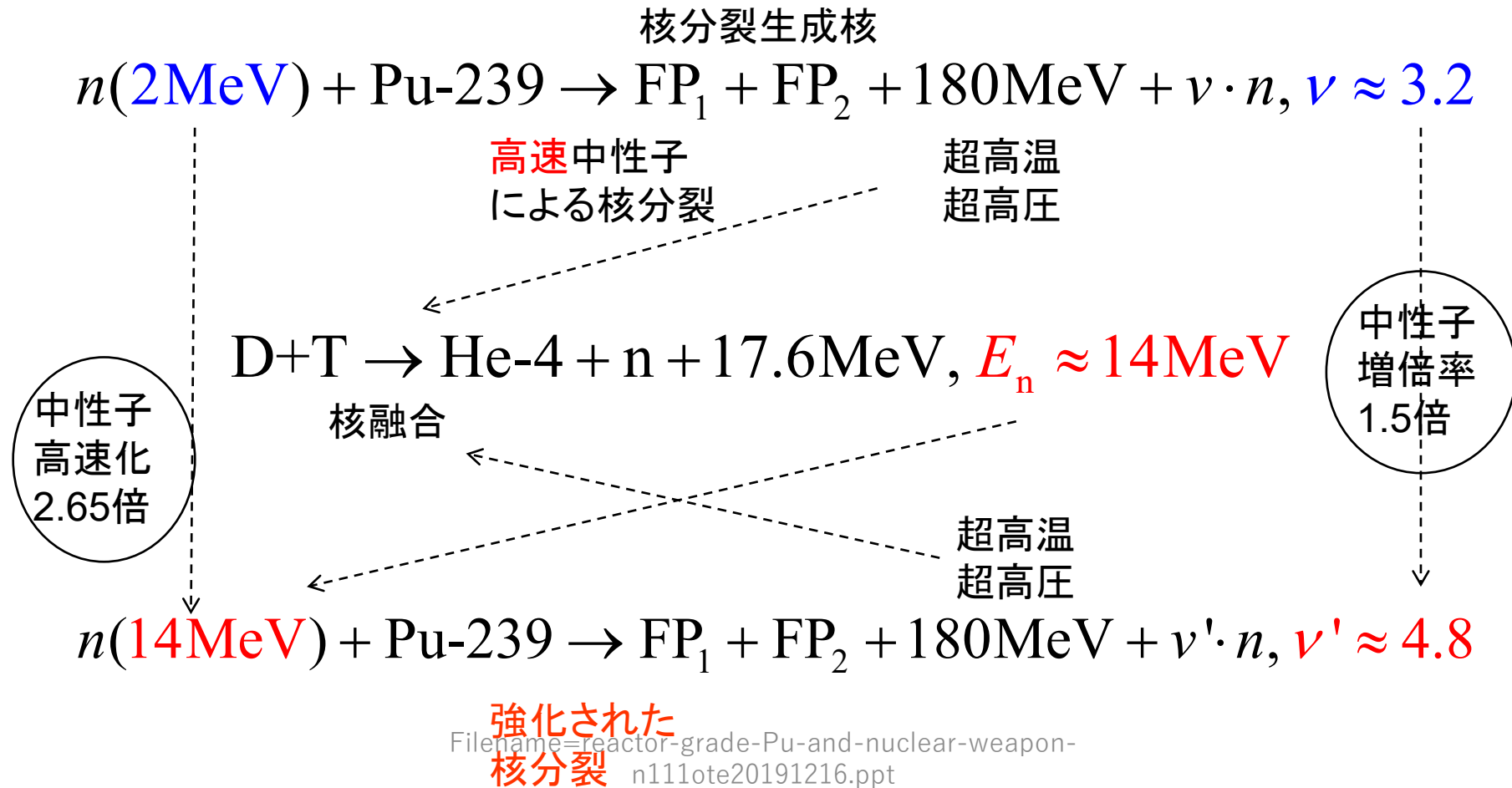


DT核融合により威力強化された核分裂兵器

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)



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**(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力)
→DTガスの量により、爆発威力を調節することが可能. **出力可変性**
- 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

Filename=reactor-grade-Pu-and-nuclear-weapon-

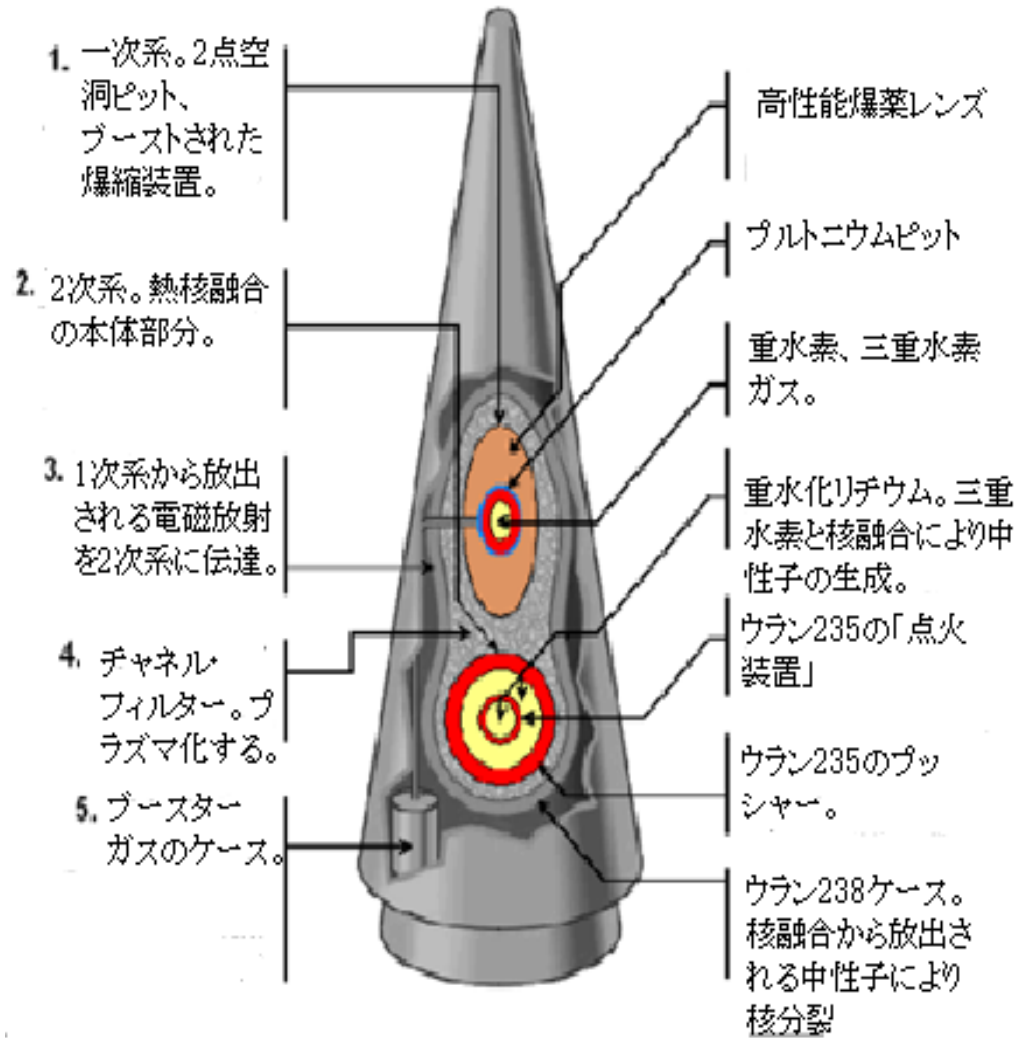


2016年

重水素・三重水素ガスの保管容器が
中心部以外にあり，中心部に注入される
ことが読み取れる．

<http://m.jajusibo.com/a.html?uid=26414§ion=sc38§ion2=>

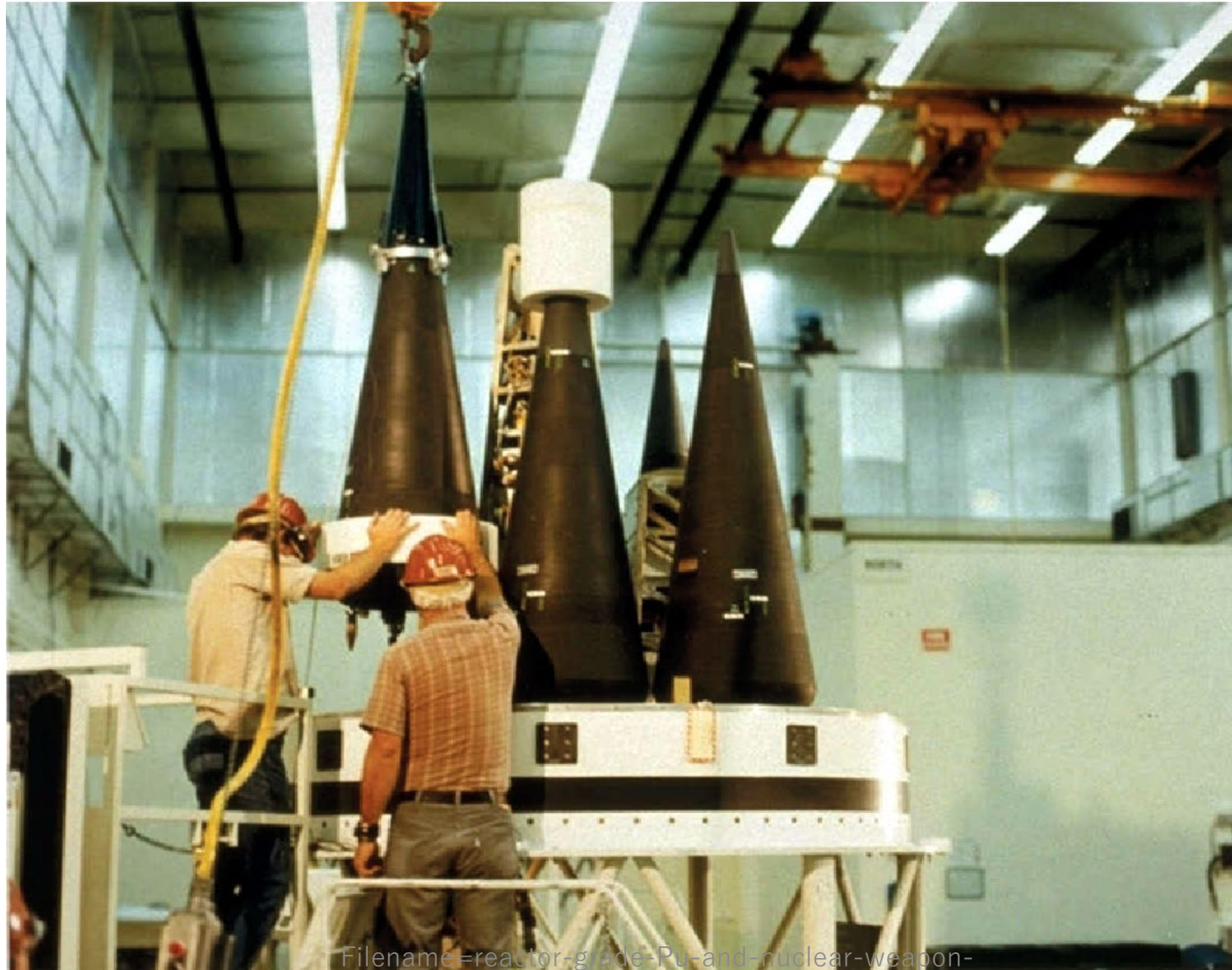
米国の代表的な熱核弾頭W88 (最大威力, 475キロトン)



出典:https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1f/W-88_warhead_detail.png

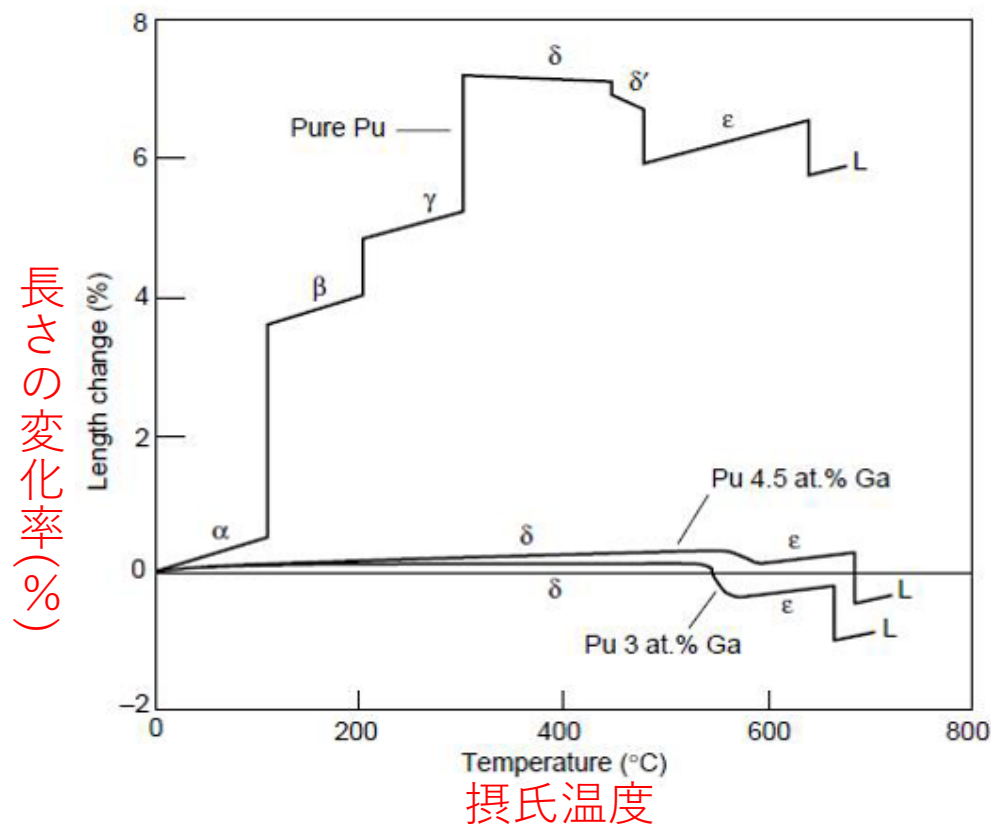
ミサイルに装荷される多核弾頭

(MIRV、multiple-independent-reentry vehicle, 多核弾頭独立再突入体)



Filename=reactor-grade-Pu-and-nuclear-weapon-
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0f/W87_MIRV.jpg

プルトニウム-ガリウム合金の利点



合金になれば約500度の温度変化により、ほとんど熱膨張しない！

出典： [Hecker2000]
赤字は引用者による。

FIGURE 2: The Benefits of a Plutonium-Gallium Alloy

附録A: 核爆発(または核兵器)の物理学

§ A1 爆発という現象の基本的特徴

- ・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[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（エネルギー発生速度）、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。

§ A2 核分裂連鎖反応とその臨界量

- ・核分裂とその連鎖反応：

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。しかし、1回の核分裂により発生するエネルギーの総量は、巨視的世界において無視できる大きさである。しかし、核分裂の際、平均2.5個から3.5個前後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)。

- ・核分裂連鎖反応に対する臨界量の存在：

中性子発生率は系としての核分裂性物質の体積、すなわち半径の3乗に比例する。他方では、中性子の系外への漏洩率は核分裂性物質の表面積、すなわち半径の2乗に比例する。従って、核分裂連鎖反応が継続するための最小質量、すなわち臨界量が存在する。

§ A3 原子炉における核分裂連鎖反応と核爆発における核分裂連鎖反応の相違

- ・ 臨界とは核分裂で誕生する中性子と吸収または漏えいによって失われる中性子の数が均衡しており、核分裂連鎖反応が持続する状態をいう。
- ・ 1個の原子核が核分裂を起こすと2～3個の中性子が生まれる。その99%以上は即発中性子(prompt neutron)として瞬時に放出されるが、極くわずかな割合の中性子(遅発中性子、delayed neutron)はやや遅れて放出される。
- ・ 核兵器における、核分裂連鎖反応は即発中性子により臨界超過状態で実現される。
- ・ 他方、原子炉では、核分裂連鎖反応が持続できない未臨界状態で制御棒を引き抜いて中性子吸収量を徐々に減少させると、まず遅発中性子の数も含めて核分裂連鎖反応が持続する状態(遅発臨界)になる。さらに、制御棒を引き抜くとやがて即発中性子のみの再生で核分裂連鎖反応が維持できる状態(即発臨界)に至る。即発臨界になるとわずかな反応度増加で急激な出力上昇が起こり原子炉の安定制御ができないため、原子炉の運転は遅発臨界の状態で行われる。

31

§ A4 核爆発において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乗に反比例するので、初め臨界量以上であっても、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、臨界量はより少なくて済み、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大部分は最後の数世代の核分裂による。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[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）それ自体が膨張あるいは破裂し、核分裂連鎖反応に対する臨界未満の状態になり、結果的に、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 $v_{\text{sound}} \approx 340 \text{m/s} = 0.34 \text{km/s}$

§ § 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、prompt neutron, 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、delayed neutron、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。

附録B：原子炉では核爆発は起こらないこと

理由：

1)核分裂性物質(ウラン235)の濃縮度がかなり低いこと：

軽水型原子炉の核燃料におけるウラン235の濃縮度は約4%

←→広島原爆のウラン235の濃縮度は約90%以上；原子炉の核燃料の濃縮度の約22.5倍

2)原子炉における核分裂連鎖反応は主として熱中性子(平均エネルギー=0.025 eV)により誘起される・

←→核爆発では、高速中性子(平均エネルギー=2 MeV=2,000,000 eV)による核分裂連鎖反応

3)原子炉では、核兵器に必須のタンパー(tamper)の役割を果たす構造物はない。

しかし、原子炉では

a)水蒸気爆発、水素爆発および一酸化炭素爆発は起こりうる。

→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、

岡本良治, 中西正之, 三好永作, 「科学」 March, 2014, Vol.84, No.3, pp.355-362.

http://jsa-fukuoka.sakura.ne.jp/shiryo/Kagaku_201403_Okamoto_et.al.pdf

b) **「2011年3月、福島第一原発3号機の爆発＝核爆発」説→根拠薄弱；**

1号機、2号機の水素爆発と異なり、黒煙が上がったことは、炉心溶融物とコンクリートとの相互作用によるCO発生とその爆発による追加であると解釈すれば、十分に理解可能

もちろん、**航空機激突や通常兵器による原子炉への攻撃、核兵器による原子炉攻撃の可能性はゼロではない。**

→J.ロートブラット「核戦争と放射線」東京大学出版会、1982年。特に、7章。

[引用文献および関連するインターネット情報URL] ー日本語資料は50音順、英語資料はアルファベット順ー

[朝日20190731] 「プルトニウム、日本保有45トン 前年比1.5トン減」、朝日新聞、2019年7月31日。

[ATOMICA] 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」 <登録年月>2012年01月。 https://atomica.jaea.go.jp/dic/detail/dic_detail_1950.html

[槌田?]

[Hecker2000] Siegfried S. Hecker, “Plutonium and Its Alloys,” *Los Alamos Science*, no.26, 2000, p. 293.
http://www.sciencemadness.org/lanl1_a/lib-www/pubs/00818035.pdf

[Jones2018] Greg Jones, *Reactor-Grade Plutonium and Nuclear Weapons: Exploding the Myths*, February 20, 2018, Nonproliferation Policy Education Center.
<http://www.npolicy.org/thebook.php?bid=37>

[Mark1993] J. Carson Mark, *Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium*, Science & Global Security, 4(1), in 1993.
J. Carson Mark with an Appendix by Frank von Hippel and Edward Lyman, *Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium*, Science and Global Security, 17:170185, 2009.
<http://scienceandglobalsecurity.org/archive/sgs17mark.pdf>