ウランとプルトニウム

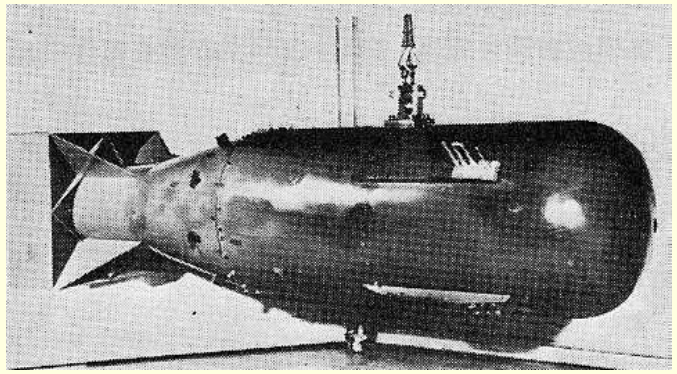
広島平和記念資料館の知り合いから、『ウランとプルトニウムの違いを小学生にもわかるように教えてほしい』との質問が資料館ボランティアさんから来ているので知恵を貸してほしい、との依頼があった。

原爆材料という観点から話をまとめてみた。

2018年12月4日

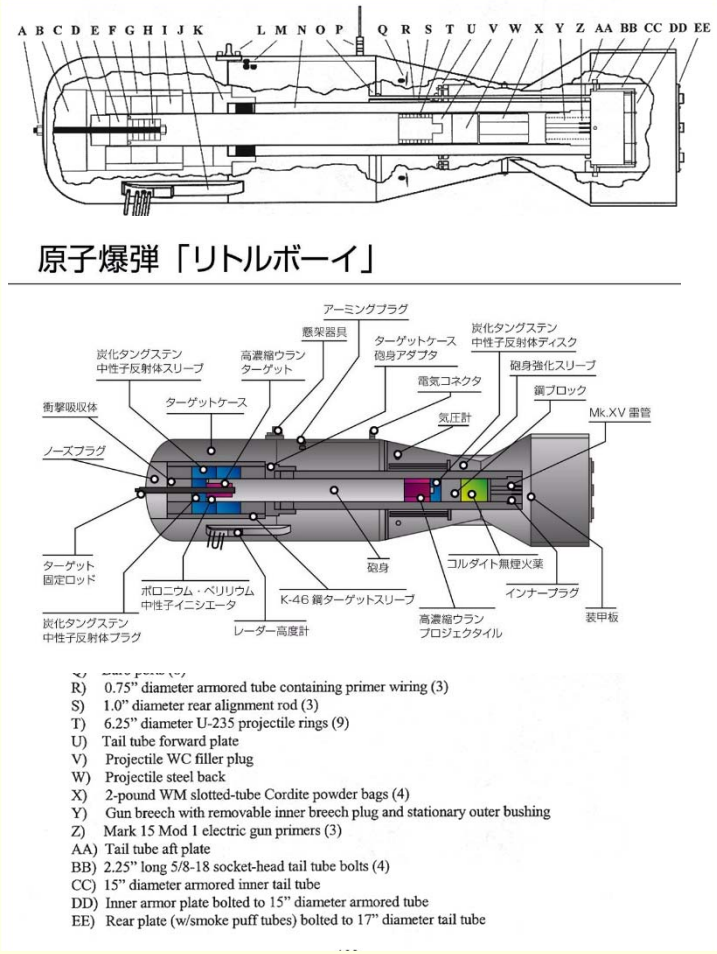
今中哲二
京都大学複合原子力科学研究所

＜どちらも原爆の材料＞
広島原爆　リトルボーイ



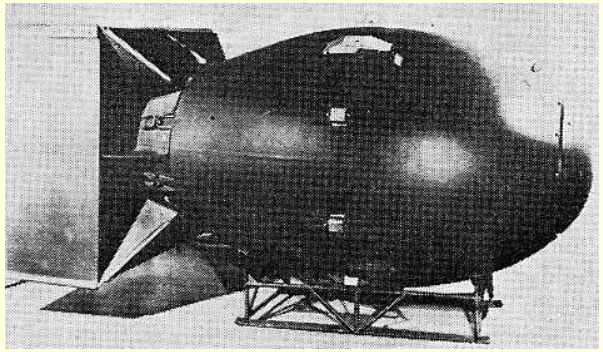
（長さ3m 直径0.7m 重さ4トン）

- 原爆材料：ウラン235
  - ウランの量は62kg
- 大砲型
- 爆発力：TNT火薬16キロトン相当
- 爆発高さ：600 m

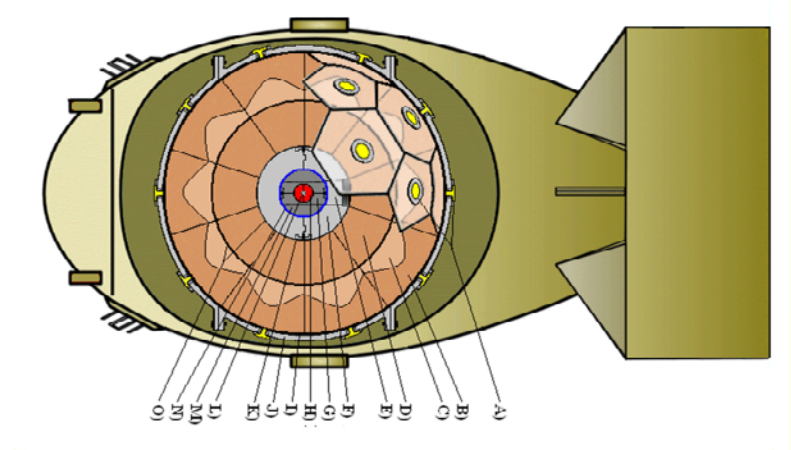


大砲型とは：原爆材料を２つに分け、片方を大砲の後ろの部分（尾側）から火薬で発射し、先端で合体させて、核分裂連鎖反応を発生させる.

＜どちらも原爆の材料＞
長崎原爆　ファットマン



（長さ3.5m 径1.5m 重さ4.5トン）

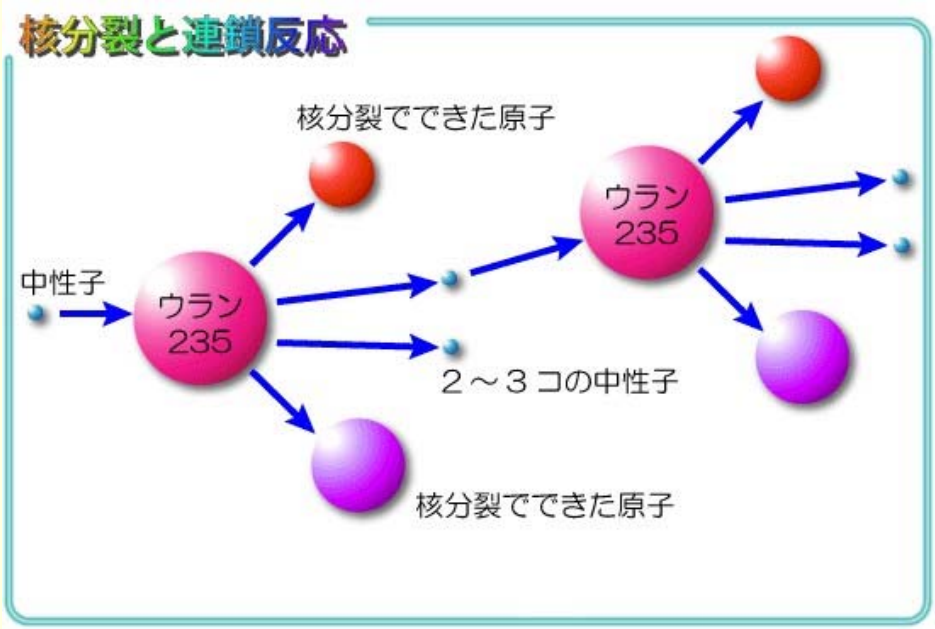


A. 起爆電橋線型雷管 32個
B. コンポジションB(早い爆薬) 32個
C. バラトール(遅い爆薬) 32個
D. コンポジションB(早い爆薬) 32個
E. 取り外し可能なアルミニウム合金の蓋
F. アルミニウム合金製プッシャー
G. 天然ウラン(U-238)で出来た中性子反射体 兼 タンパー(Tamper)
H. プルトニウムの塊
I. コルク製の外殻
J. 7個の部品から構成されるアルミニウム製の外殻
K. アルミニウム合金製プッシャーを固定するためのキャップ
L. 中性子点火器
M. 天然ウラン(U-238)
N. ホウ素合金のカバー
O. フェルト樹脂

- 原爆材料：プルトニウム239
  - プルトニウムの量は6.2kg
- 爆縮型
- 爆発力：TNT火薬21キロトン相当
- 爆発高さ：503 m

爆縮型とは：中心の原爆材料の回りに球形に爆薬を配置し、衝撃波で原爆材料を圧縮して核分裂連鎖反応を発生させる.

核分裂の発見と原爆の開発



◇第2次大戦直前の1938年、ドイツのハーンらは、ウランの原子核に中性子を当てる実験をしていて、原子核が２つに分裂する現象（核分裂）を発見した.

◇その後、核分裂にともなって、新たな中性子が２つか３つ発生することがわかり“核分裂連鎖反応”を実現できる可能性が出てきた.

◇自然界には、ウラン235とウラン238という２種類のウランがあって、核分裂を起こしやすいのはウラン235の方であることもわかった. しかし、天然のウランでは、ウラン238の割合が99.3％で、ウラン235は0.7％しか存在しない. 原子爆弾を作るには、ウラン235の割合を増やす（ウラン濃縮する）必要があった.

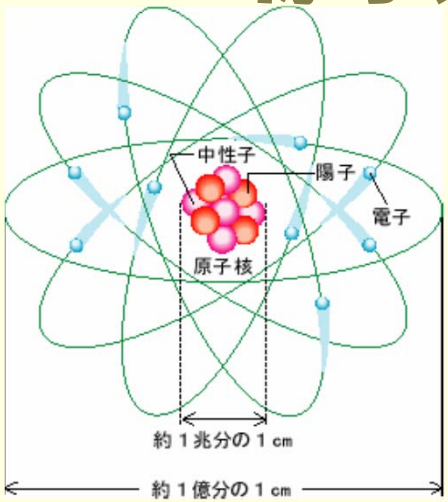
元素の周期表

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	*1	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	*2	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo

*1 ランタノイド:	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
*2 アクチノイド:	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

元素とは、“それ以上に分けられない物質”のことで、19世紀には、元素にはそれぞれ特有の原子があることが分かった．原子を軽い順番に並べたのが周期表で、原子番号92番のウラン（U）は、自然に存在する元素では最も重たい原子である．94番のプルトニウム（Pu）は人工的に作られた元素．

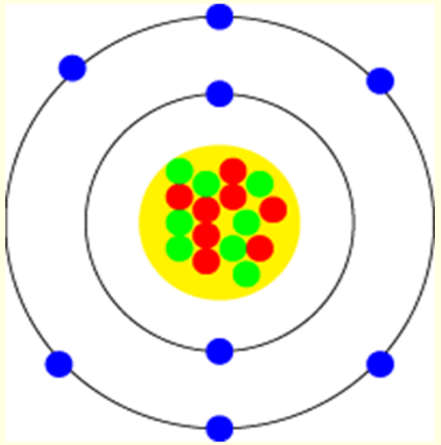
原子、原子核の仕組み



原子核の中の陽子の数で元素がきまる

酸素の原子：陽子が８つ

$^{16}_{8}O$

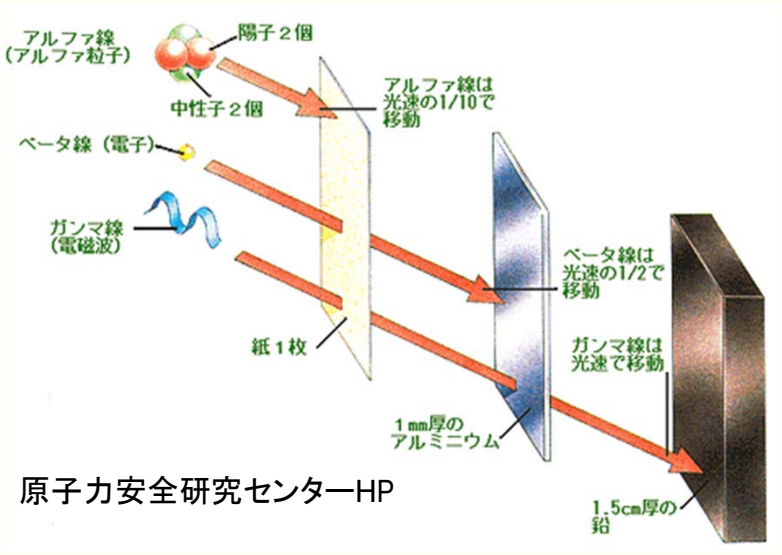


- 原子は、真ん中の原子核とまわりの電子でできて、
- 原子核には、陽子と中性子が集まっている

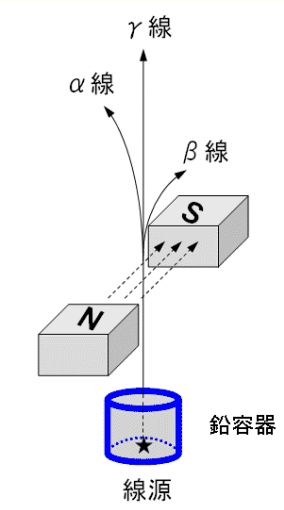
◇19世紀の終わりに、放射線・放射能が発見され、その研究を通じて、原子や原子核の仕組みが解明されて行った.
◇元素の性質を決めているのは、原子核の中の陽子の数だった. **原子番号**92のウランの原子核には92個の陽子が含まれている.
◇原子核の中では、中性子が（電気的に反発する）陽子を束ねる役割をしていることも分かった.
◇陽子と中性子の数を合わせたものが**質量数**で、ウラン235には、235−92＝143個の中性子があり、ウラン238には146個の中性子がある.
◇ウラン235とウラン238のように、周期表で同じ位置（元素）にあり、中性子の数が異なるものを“**同位体**（アイソトープ）”と呼ぶ.

放射能とは、放射線とは

アルファ線、ベータ線、ガンマ線



原子力安全研究センターHP



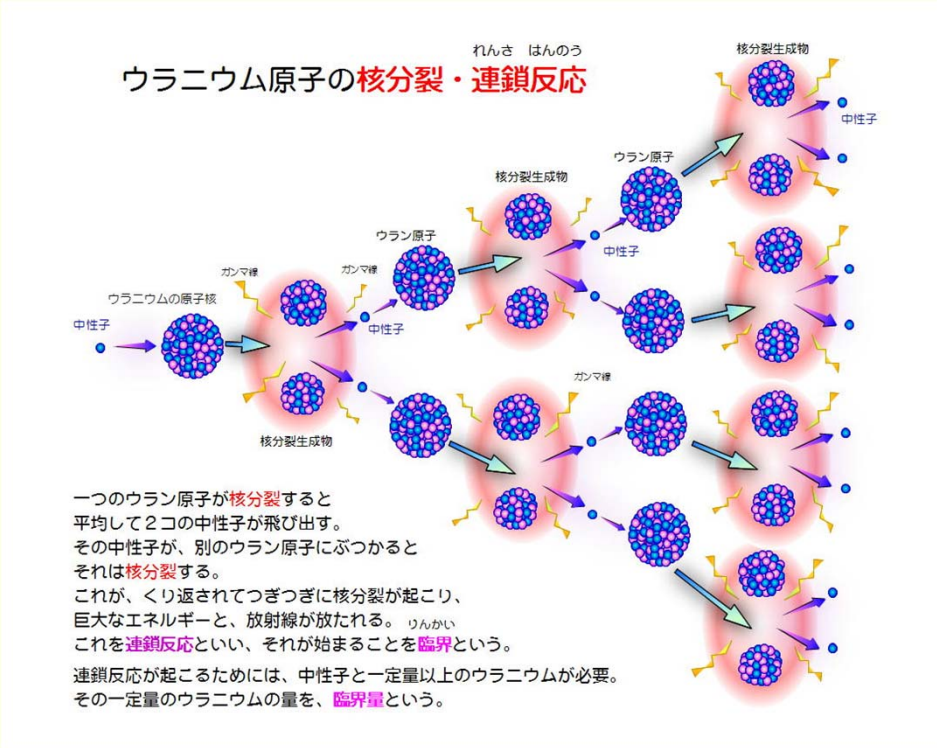
◇陽子の数と中性子の数のバランスが悪く不安定な原子核（放射性同位体）は、アルファ線、ベータ線、ガンマ線といった放射線を出しながら、別の元素の原子核に変身する.

●アルファ崩壊：陽子２個と中性子２個の塊（アルファ粒子）を放出するので、崩壊後の原子核は、原子番号は２つ、質量数は４つ小さくなる.

●ベータ崩壊：中性子のひとつが電子を放出（ベータ粒子）して、陽子に変身する. 原子番号は１つ増えて、質量数は変わらない.

●ガンマ線：アルファ崩壊やベータ崩壊を起こした原子核の余分なエネルギーが電磁波（ガンマ線）として放出される.

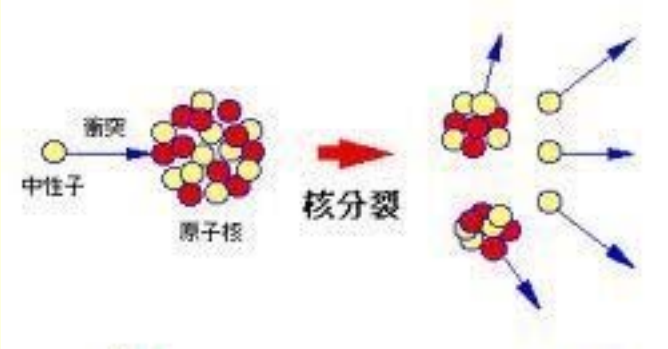
核分裂連鎖反応を起こすには



◎未臨界：中性子が漏れたり他の物質に吸収され、連鎖反応は持続しない状態
◎臨界：中性子は増えも減りもせず、連鎖反応のバランスがとれた状態
◎超臨界：中性子がどんどん増える、つまり核分裂が増える状態

A.　中性子が、（爆弾や原子炉といった）装置から外へもれたり、装置を構成するウラン以外の物質に吸収されにくいようにする.
　→ウランを大きな塊にしたり、中性子を吸収しにくい物質で装置を作る
B.　核分裂を起こしにくいウラン238に吸収される中性子を減らす.
　→ウラン濃縮をしてウラン235の割合を増やす
C.　核分裂で出来たての中性子は、速度が大きく（光の20分の１程度）ウランと反応しにくいが、速度が落ちると核分裂反応を起こしやすくなる.
　→減速材（水や黒鉛など）を用いて中性子の速度を落とす

核分裂で発生するエネルギー量



ウラン235の原子核には、92個の陽子と143個の中性子が、１兆分の1cmという狭い空間に押し込まれ、陽子どうしには強い電気的反発力が働いている。原子核がバラバラにならないのは中性子が強い力でつなぎ止めているからである。
原子核が割れてしまう、２つの破片（核分裂生成物）は電気的な力により、猛スピードで運動をはじめる。つまり、大きなエネルギーが発生する。

◇１グラムのウラン235が核分裂を起こしたときに発生するエネルギーの量は、約1700万キロカロリー

◇１グラムの炭素が空気中で燃焼したときに発生するエネルギー量は約８キロカロリー

◇つまり、ウランの核分裂で発生するエネルギー量は、同じ重さの石炭（炭素）を燃やしたときの、1700万÷８＝約200万倍になる。

マンハッタン計画(1)

1939年9月にヨーロッパで第２次大戦がはじまり、1941年12月の日本の真珠湾攻撃をきっかけに、米国も参戦するに至った．ナチスドイツが連合国に先駆けて原子爆弾の開発に成功することを危惧した、亡命ユダヤ人科学者の働きかけもあって、1942年夏に米国で、原爆開発を目的とする巨大プロジェクト『マンハッタン計画』がはじまった．

＜原爆材料を作る２つの方法＞

- その１：ウランの中の核分裂を起こしやすいウラン235のみをよりわけた塊を、ウラン濃縮によって作る方法
- その２：ウラン235と同じく、中性子によって核分裂を起こすことが明らかになった“人工放射性同位元素プルトニウム239”を原子炉を使って作る方法

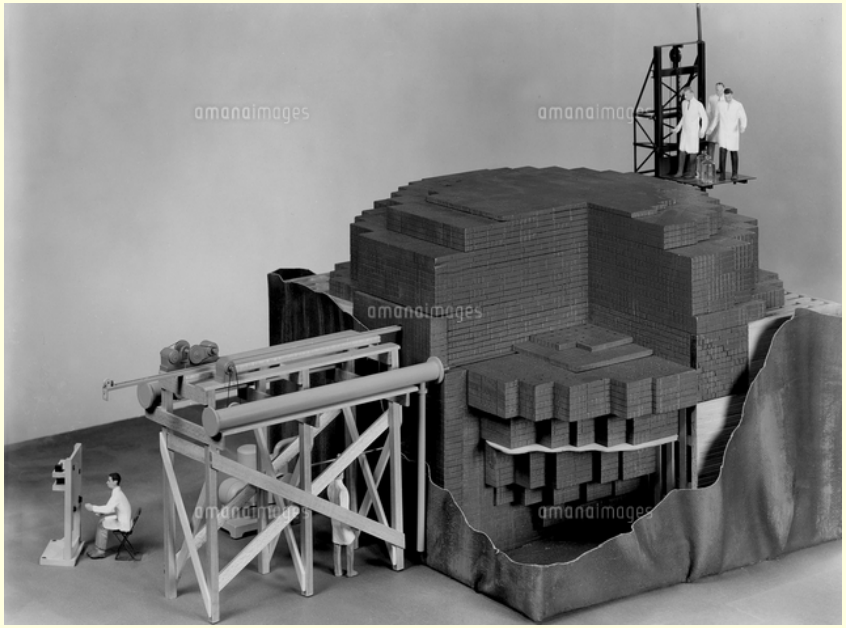
マンハッタン計画では、どの方法が容易かということではなく、原爆ができる可能性をもつあらゆる方法が試された．

マンハッタン計画(2)
世界最初の原子炉：シカゴパイル１の臨界

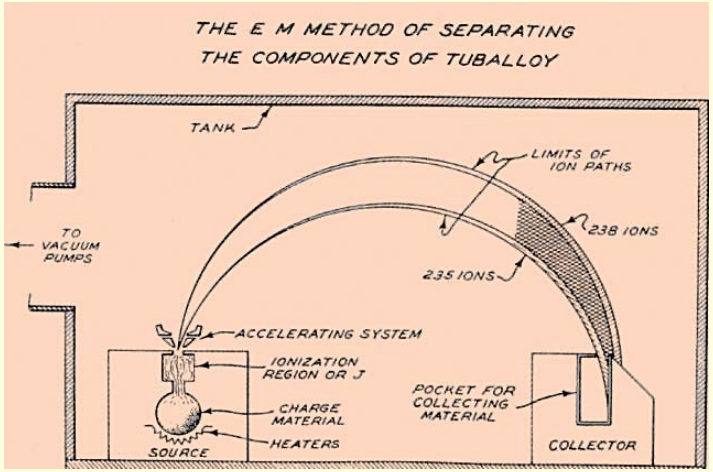
　ファシスト政権から逃れて米国に亡命していたイタリアの物理学者フェルミは、マンハッタン計画が始まる前から原子炉の研究をしていた.

　マンハッタン計画に参加したフェルミらのグループは、1942年12月2日、シカゴ大学の体育館で組み立てた原子炉の臨界に成功した.

　燃料は天然ウラン35トン、減速材は黒鉛350トン、空気冷却の原子炉により、核分裂連鎖反応を実現した.



マンハッタン計画(3)
オークリッジのウラン濃縮工場

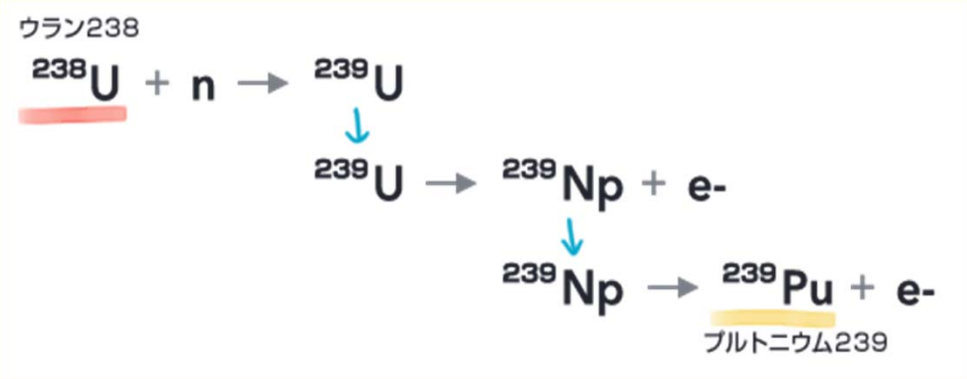


マンハッタン計画では、米国各地に秘密の研究所や工場が作られた.

ウラン濃縮の中心になったのが,テネシー州のオークリッジ研究所だった. 左の写真と図は、ウラン濃縮の主な施設であった電磁分離工場Y-12である.

化学的な性質が同じウラン235とウラン238を分離するため、磁場を通過するときの重さの違いにともなう軌道のわずかな違いを用いた.

マンハッタン計画(4)
ハンフォードのプルトニウム生産原子炉と再処理工場



原子炉の中では、核分裂連鎖反応を維持するため、大量の中性子が飛び交っている.
◎核分裂連鎖反応に寄与しないウラン238は、中性子を吸収するとウラン239になる.
◎ウラン239は半減期20分でβ崩壊しネプツニウム239になる.
◎ネプツニウム239は半減期2日でβ崩壊しプルトニウム239になる. プルトニウム239は半減期が2万4000年と長いので、原子炉にドンドン蓄積される.

1938年に92番元素であるウランの核分裂が発見された直後から、人工的に94番元素ができれば核分裂性であることが予測された.

マンハッタン計画のはじめに、加速器を用いて94番元素が作られ核分裂性であることが確認され、“プルトニウム（Pu)”と命名された.

原爆用のプルトニウムを生産するための原子炉がワシントン州のハンフォードに建設され、1944年9月に臨界となった。ハンフォードには、照射燃料からプルトニウムを取り出すための再処理工場も建設された.

マンハッタン計画(5)
ロスアラモス原爆研究所とトリニティ実験

1943年、原爆の設計と組立のための秘密研究所がニューメキシコ州のロスアラモスに建設された。

ロスアラモス研究所長のオッペンハイマーらは、さまざまなデータから、ウラン原爆については、実験なしで核爆発に自信をもっていたが、プルトニム爆弾については、不確かさが大きかく実験することになった。

そこで、1945年7月16日、ニューメキシコ州アラモゴルド砂漠でプルトニウム原爆の爆発実験が実施された（トリニティ実験）。この原爆は長崎に投下された原爆と同型だった。

マンハッタン計画(6)

原爆投下

8月6日広島 ウラン原爆16Kt　8月9日長崎 プルトニウム原爆21Kt

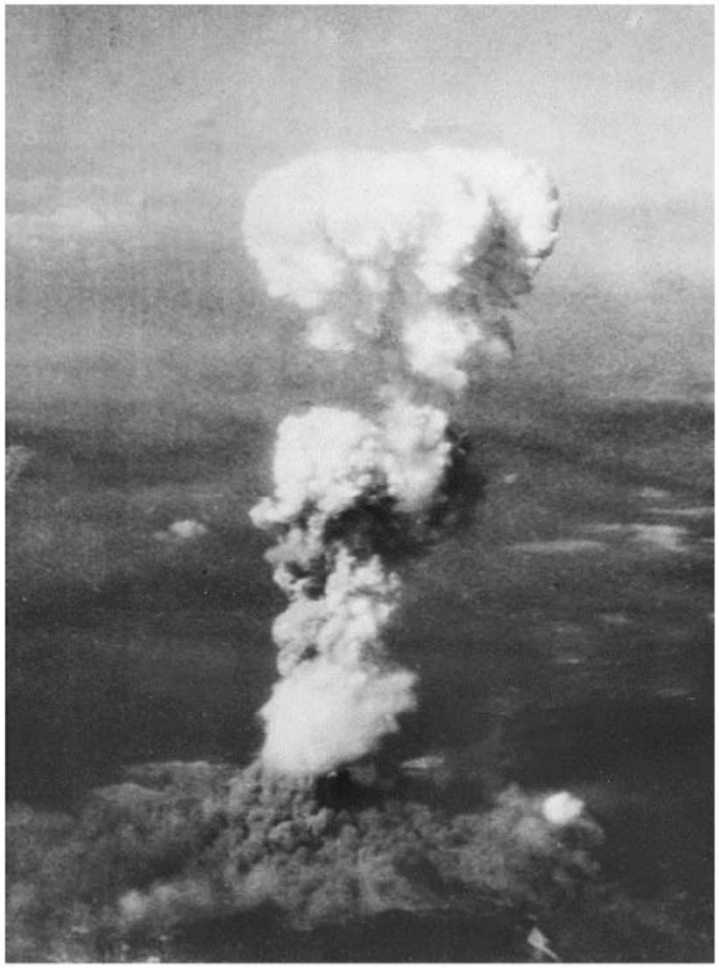


Fig. 6. Photograph of the cap of the mushroom cloud, gap between the cap and cumulus cloud at top of dust stem, dust stem, and dust pedestal (or dust base) of the Hiroshima explosion (National Archive).

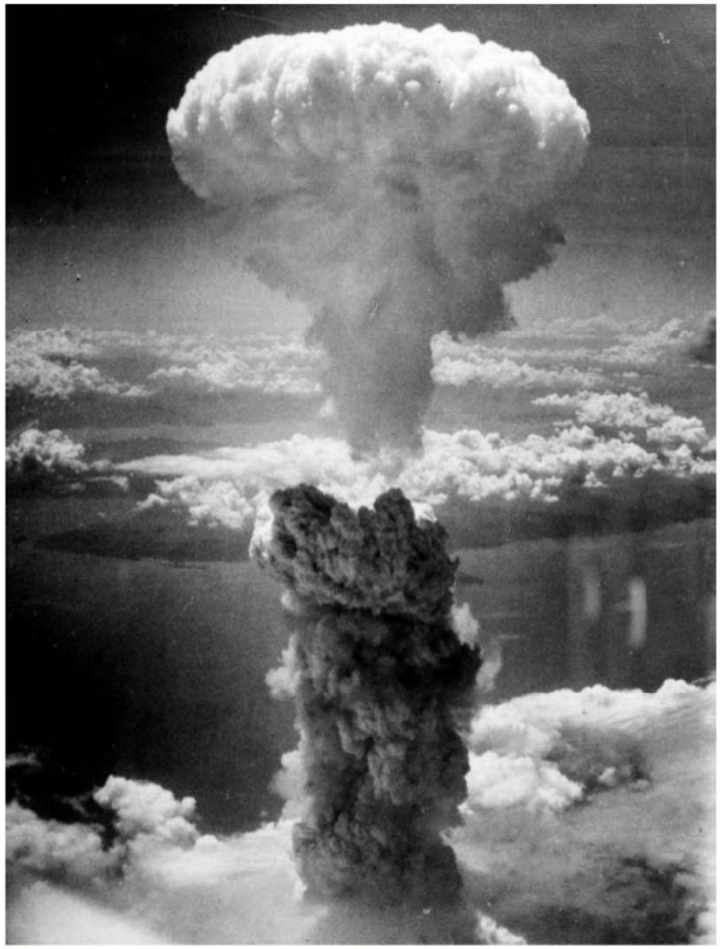
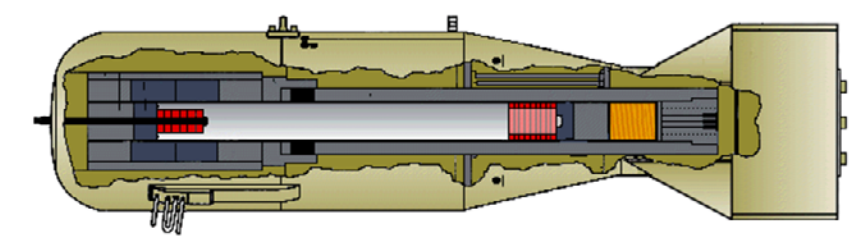
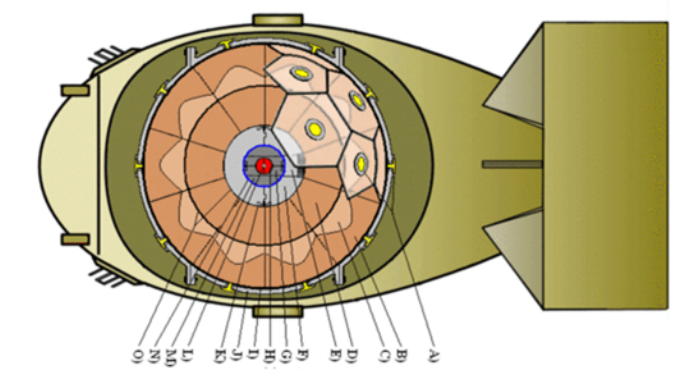


Fig. 7. Picture of the cap of mushroom cloud, gap between the cap and cumulus cloud at the top of dust stem, and the dust stem of the Nagasaki explosion (National Archive).

マンハッタン計画(7)

広島（リトルボーイ）と長崎（ファットマン）でなぜ形が違う？





- 左の大砲型では、尾側から発射された円筒型ウラン塊が、左の円柱型ウラン塊に十分に合体してから、筒先にある中性子線源（アルファ線を出すポロニウム210とベリリウムを衝撃で混合させると中性子が発生）が作動し核分裂連鎖反応がはじまる.
- プルトニウムも最初は大砲型の原爆で使う予定だったが、プルトニウム239とともに微量に生成するプルトニウム240が中性子を自然に放出していることが分かった．大砲型では、２つが十分に合体する前に核分裂連鎖反応がはじまって『未熟爆発』になってしまう．そこで、プルトニウムの回りに火薬を配置し、衝撃波で３次元的に一気に圧縮して、中心にある中性子源で中性子を発生して核分裂連鎖反応を開始させる爆縮型が考案された.

ウラン原爆とプルトニウム原爆

- ウラン原爆を作るには、ウラン濃縮が必要になる．化学的な性質が同じウラン235とウラン238を選り分けるには、大変な手間とエネルギーが必要になる．広島原爆では、核分裂を起こしたのは使ったウランのうち２％足らずで『効率が悪かった』．
- プルトニウム原爆を作るには、原子炉と使用済み燃料からプルトニウムを取り出す化学工場（再処理工場）が必要となる．いったん原子炉が動き始めると大量のプルトニウムの生産が可能になる．また、爆縮型は大砲型に比べ設計製作が難しい．長崎原爆では、使ったプルトニウムのうち約16％が核分裂を起こし、広島に比べ『効率がよかった』．
- 現代の原爆は、ほぼすべて爆縮型で、ウランを材料にしているパキスタンの原爆も爆縮型であろう．