

放射線・放射能と被曝についての 基礎講座（Ⅰ）



今中哲二

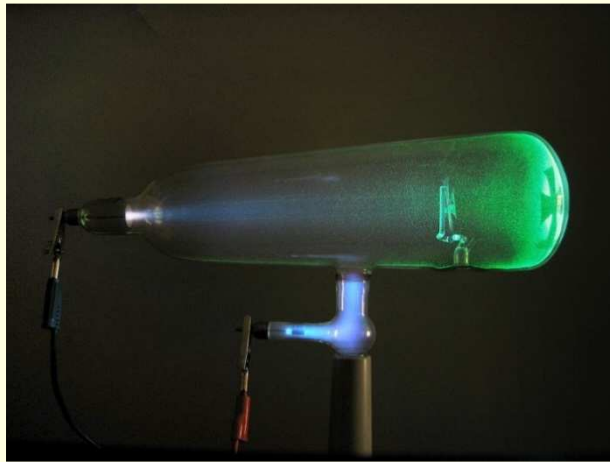
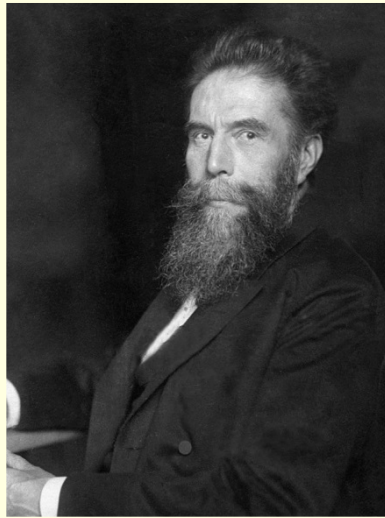
京都大学複合原子力科学研究所

2023年3月2日
ZOOM

今日の話題

- 放射線・放射能の研究のはじまり
- 核分裂の応用：原爆と原発
- 放射線とは：X線、 α 線、 β 線、 γ 線

1895年 レントゲンによるX線の発見



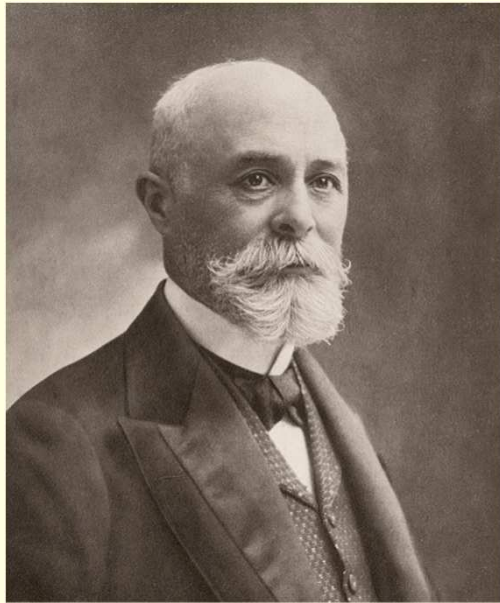
陰極線の実験



1896年1月23日にレントゲンが撮影

レントゲンは、陰極線の実験から、紙を透過し蛍光板を光らせる何かが発生していることを発見し、正体が分からないので『X線』と名付けた。

1896年 ベクレルによる放射能の発見



レントゲンの報告を受けてベクレルは、太陽光の刺激によってウラン化合物が、燐光とともにX線を出していることを確認する実験を始めた。

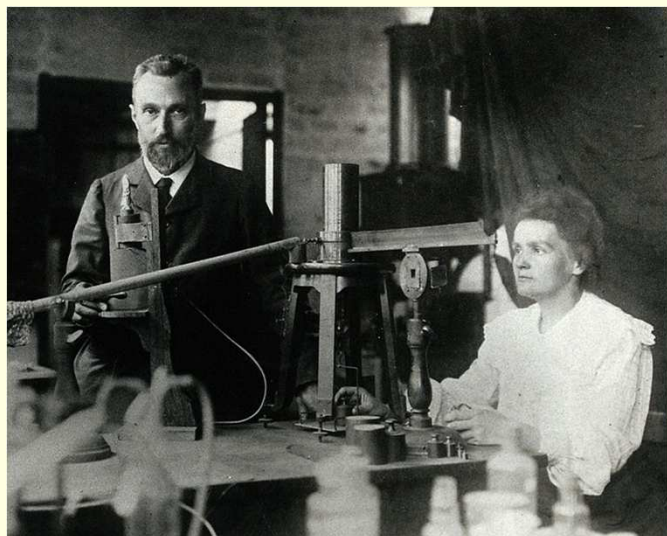


曇天のため机の中にしまっておいた、太陽光を受けていない試料でも写真乾板の感光が認められた。

ベクレルは、ウラン化合物やウランそのものが、『自発的に見えない光のようなもの』（ベクレル線）を出していることを発見した。

1898年 キュリー夫妻によるポロニウム、ラジウムの発見

マリー・キュリーは、ベクレル線の正体を明らかにする研究をはじめ、精錬後のウラン化合物より、ウラン鉱石の方が強くベクレル線を出していることを発見した。



ピエールが考案した測定器による放射能測定風景



ラジウムが新元素であることを証明するため、チェコのウラン鉱山より鉱滓を譲り受け、化学処理しているシーン(映画より)

<1903年の論文の結び>

- ・ベクレル線のエネルギー源は何であろうか？
- ・それを放射体物質の内部に求めるべきだろうか、あるいは、外部に求めるべきか？

放射線、放射能、原子力研究のはじまり

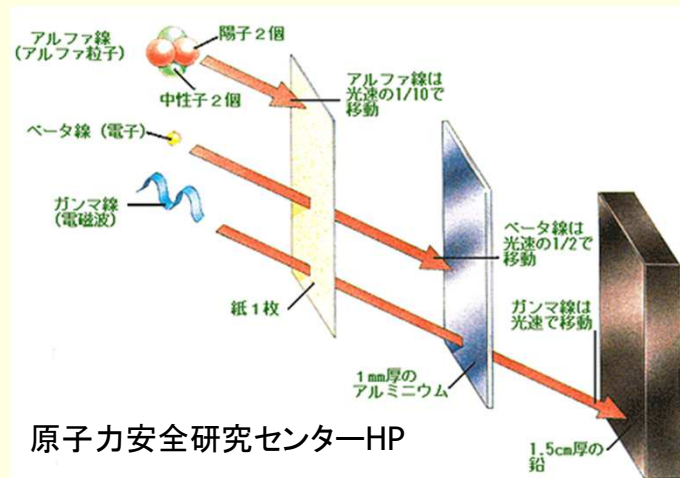
- 1895 レントゲンによるX線の発見
- 1896 ベクレルによる放射能の発見
- 1897 トムソンによる電子の発見
- 1898 キュリー夫妻によるRa、Poの発見
- 1903 ソディ、ラザフォードによる放射性壊変法則の発見
- 1912 ラザフォードによる原子核の発見
- 1913 モーズリーによる元素と原子核電荷数の関係の発見
- 1932 チャドウィックによる中性子の発見
- 1938 ハーン、シュトラスマン、マイトナーによるウラン核分裂の発見

放射能、放射線は地球が出来たときからそこら中にあったが、人類がその存在を知ったとは、約130年前のことだった。それから40年の間に、原子の仕組みを知り、核分裂を発見した。

ラザフォード： α 線、 β 線、 γ 線の名付け親

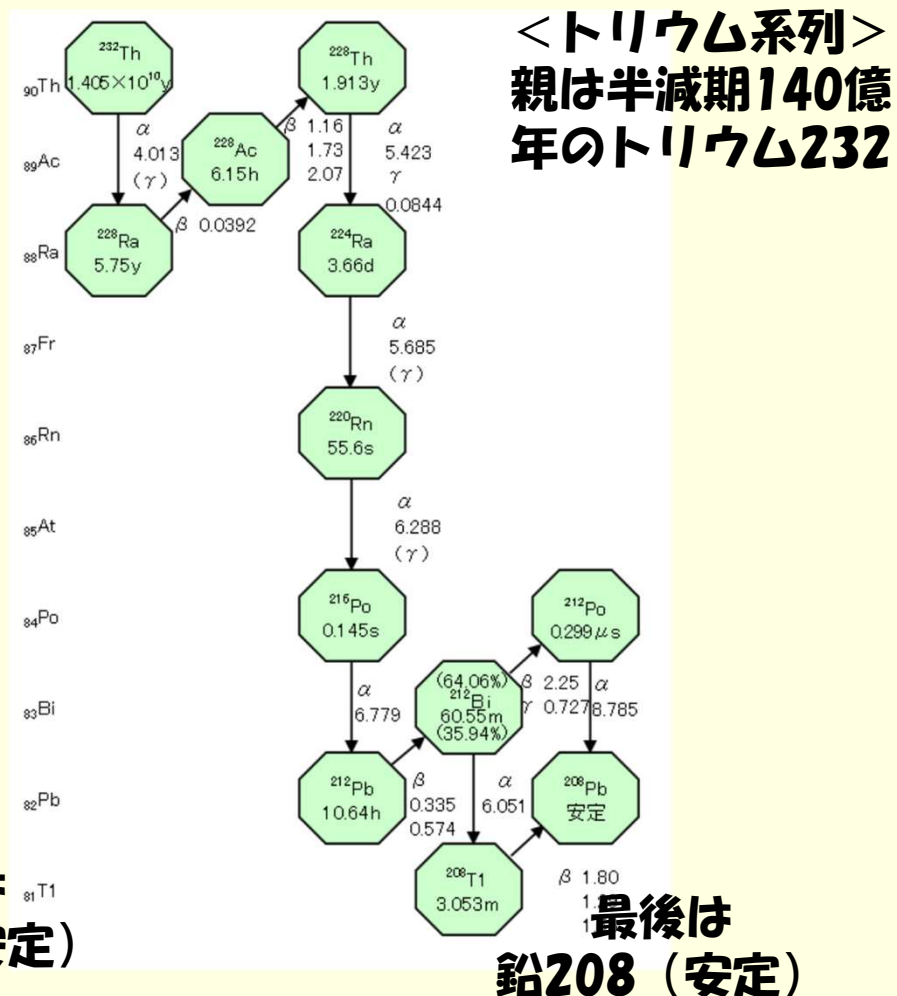
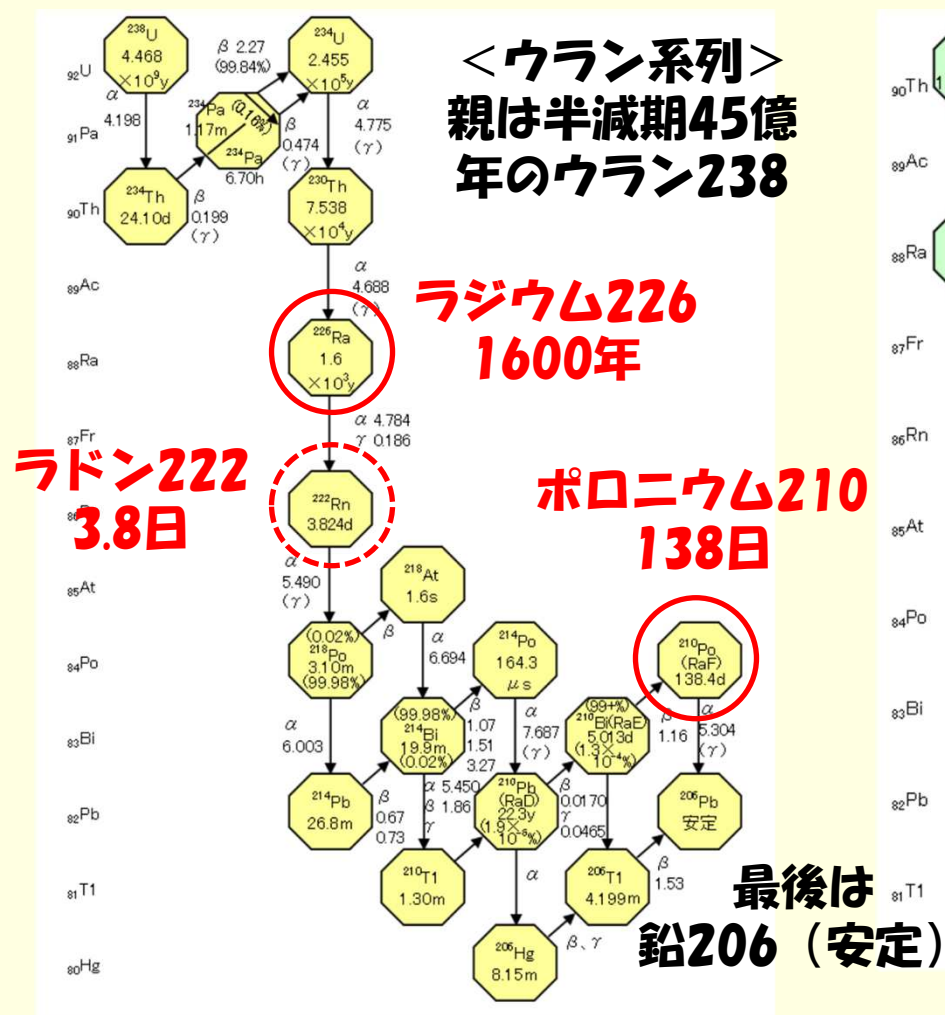


ロンドンのポートレイト
博物館 (2014)

[illegible]

1902年ラザフォードとソディは、放射線放出現象の正体として、『原子壊変説』を提唱 → 『原子は不変』ではなかった

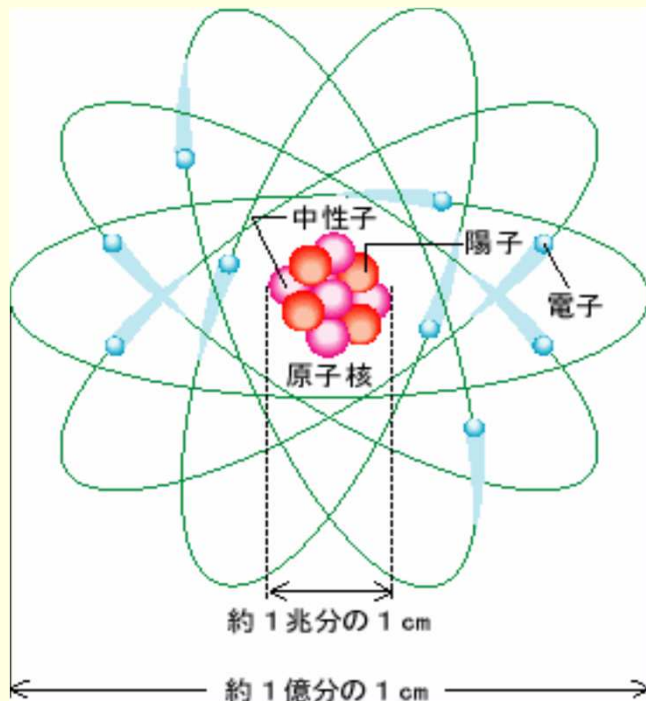
自然界に元々存在している放射能



放射平衡：

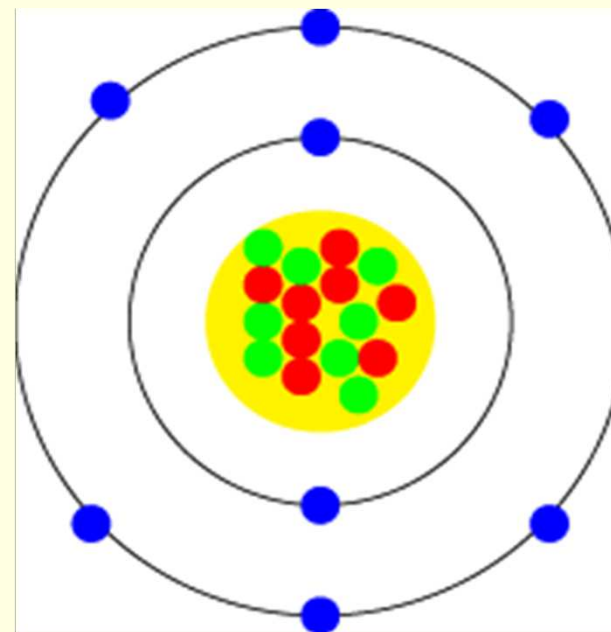
親の半減期は、子や孫に比べずっと長いので、地下深くにあるウランやトリウムでは、子や孫の放射能の強さ（ベクレル数）は、親と同じになる。⁸

放射線・放射能の研究を通じて 原子、原子核の仕組みが解明された



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

原子核の中の陽子の数で
元素がきまる



酸素の原子核：陽子が8つで

ふつう中性子も8つ $^{16}_{8}\text{O}$

物質世界は『陽子と中性子、それに電子
の3つ』で出来ている

地球上の万物は原子の組み合わせで出来ている

周期表：原子を軽い順に並べた表

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

水素の同位体

^1_1H : 普通の水素 (軽水素)

^2_1H : 重水素

^3_1H : 三重水素 (トリチウム)

*1 ランタノイド:

57 57 <u>La</u>	58 58 <u>Ce</u>	59 59 <u>Pr</u>	60 60 <u>Nd</u>	61 61 <u>Pm</u>	62 62 <u>Sm</u>	63 63 <u>Eu</u>	64 64 <u>Gd</u>	65 65 <u>Tb</u>	66 66 <u>Dy</u>	67 67 <u>Ho</u>	68 68 <u>Er</u>	69 69 <u>Tm</u>	70 70 <u>Yb</u>	71 71 <u>Lu</u>
-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

*2 アクチノイド:

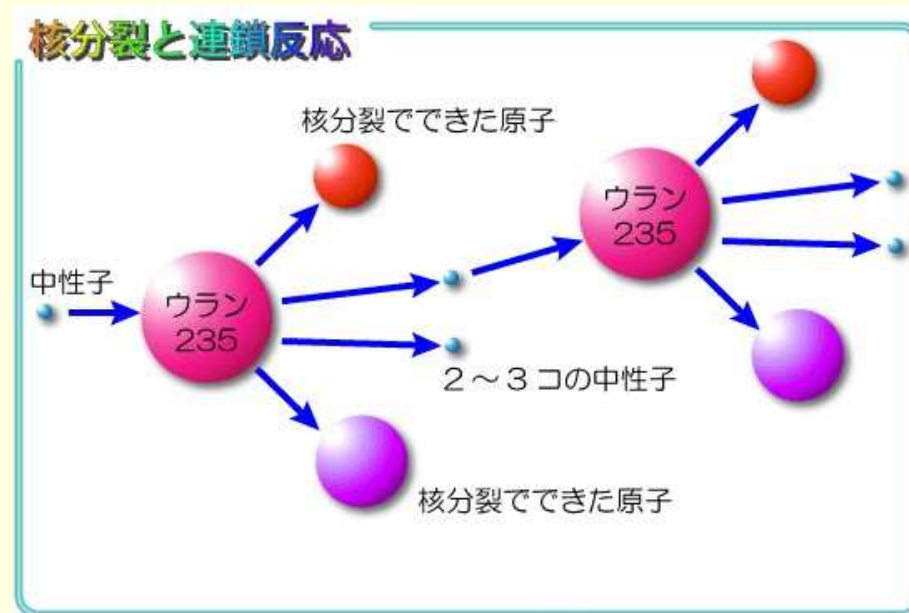
89 89 <u>Ac</u>	90 90 <u>Th</u>	91 91 <u>Pa</u>	92 92 <u>U</u>	93 93 <u>Np</u>	94 94 <u>Pu</u>	95 95 <u>Am</u>	96 96 <u>Cm</u>	97 97 <u>Bk</u>	98 98 <u>Cf</u>	99 99 <u>Es</u>	100 100 <u>Fm</u>	101 101 <u>Md</u>	102 102 <u>No</u>	103 103 <u>Lr</u>
-----------------------	-----------------------	-----------------------	----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------

周期表の順番 (元素番号) は、原子核の中に陽子が何個含まれているかで決まる。ウランは自然界に存在している最も重たい元素。ウラン238の原子核には、92個の陽子と146個の中性子が含まれている。

原爆と原発

第2次大戦直前の1938年、ドイツのハーンらは、ウランに中性子を当てると原子核が分裂する現象を発見した。

各国の物理学者が、核分裂連鎖反応の研究に取り組みはじめた。



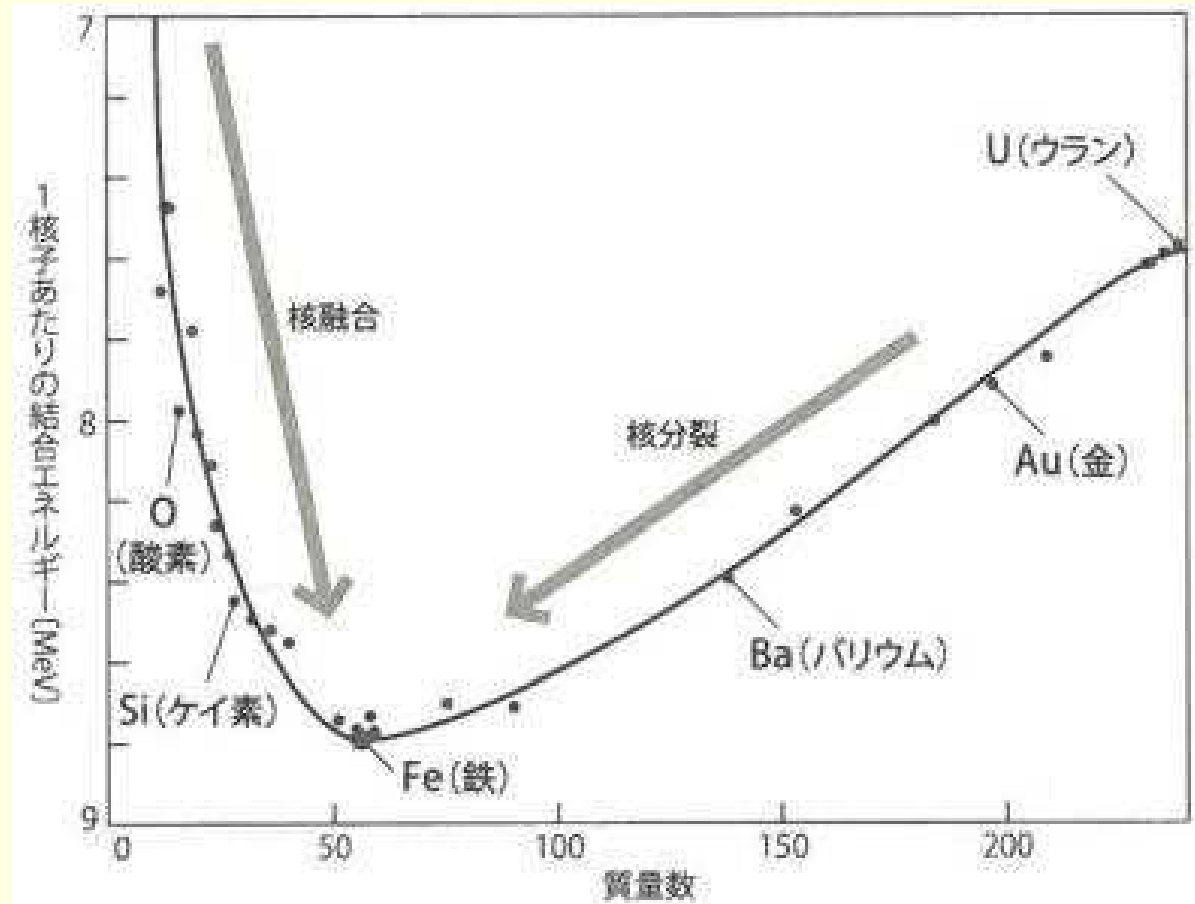
<原爆>

連鎖反応を瞬間的
(100万分の1秒) に行う。

<原発>

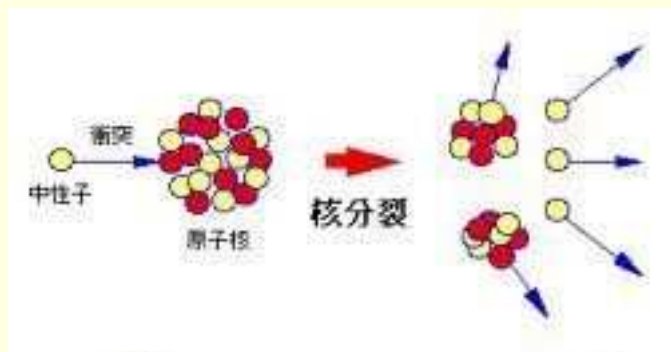
制御棒を用いて
連鎖反応を制御する。

核子（陽子と中性子のこと）の結合エネルギー



鉄あたりの核子結合エネルギーが大きい。つまり、ウランが割れたり（核分裂）や水素原子核の結合（核融合）でエネルギーが発生する。

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氣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）は電氣的な力により、猛スピードで運動をはじめめる。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

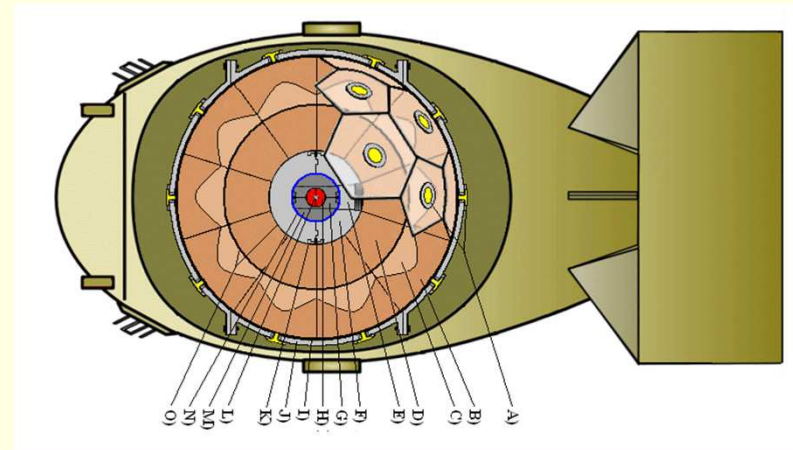
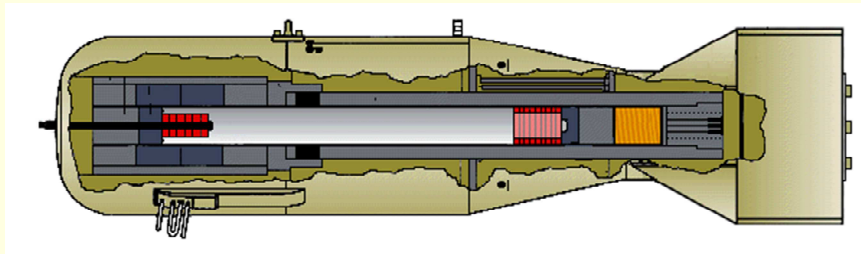
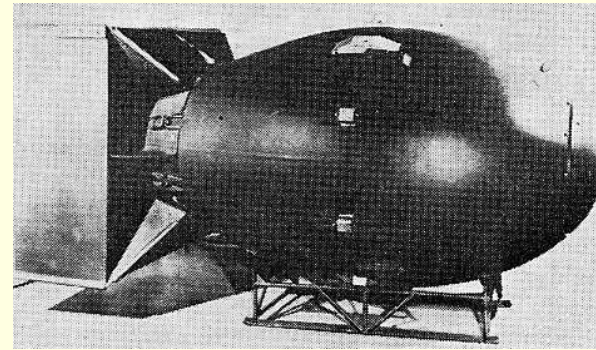
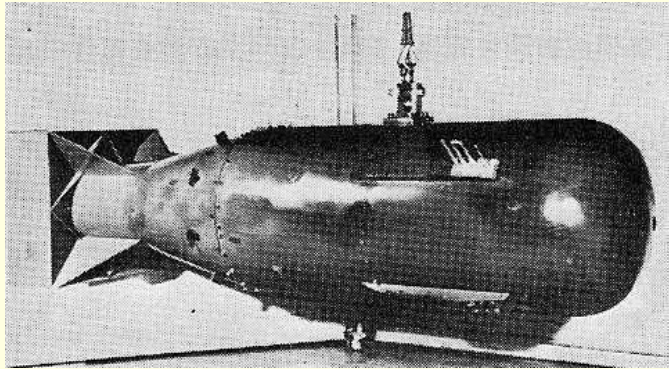
◇ 1グラムの炭素が空気中で燃焼したときに発生するエネルギー量は約8キロカロリー



『炭が燃える』といった化学反応では、電子をやりとりにより、原子の結合状態が変わるが、原子核は関与しない。

◇ 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、 $1700万 \div 8 =$ 約200万倍になる。

広島原爆リトルボーイと長崎原爆ファットマン



大砲型 16キロトン
原爆材料：ウラン235
ウラン62kg（濃縮度80%）

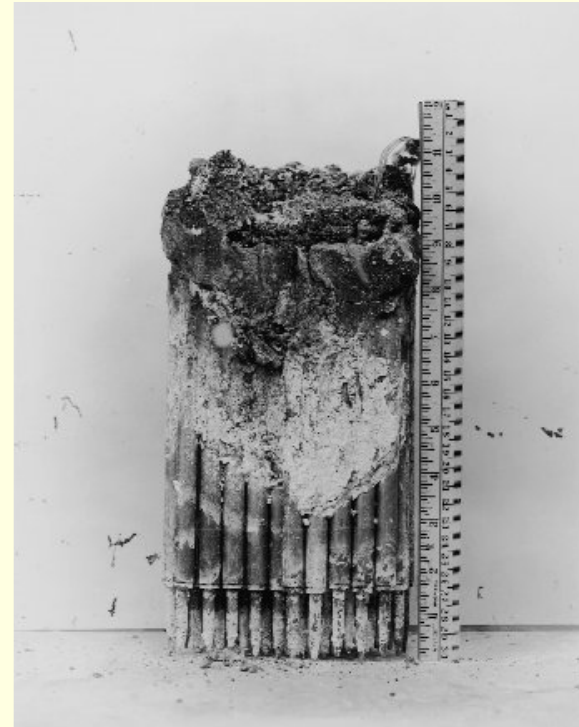
爆縮型 21キロトン
原爆材料 プルトニウム239
プルトニウム量6.2kg

世界最初の原子力発電は 高速増殖炉だった

EBR-1 : 濃縮U金属燃料、NaK冷却、電気出力200kW



1951年12月20日
EBR-1が灯した4つの電球



1955年11月29日
炉心の部分溶融事故

**増殖炉の目的は、ウランの99.3%であるウラン238を
プルトニウムに変えてエネルギー源として有効利用すること**

プルトニウム増殖の条件

中性子吸収反応当りに放出される中性子数： η 値 > 2.5

$$\eta = \frac{\sigma_{fis}}{\sigma_{cap} + \sigma_{fis}} \nu$$

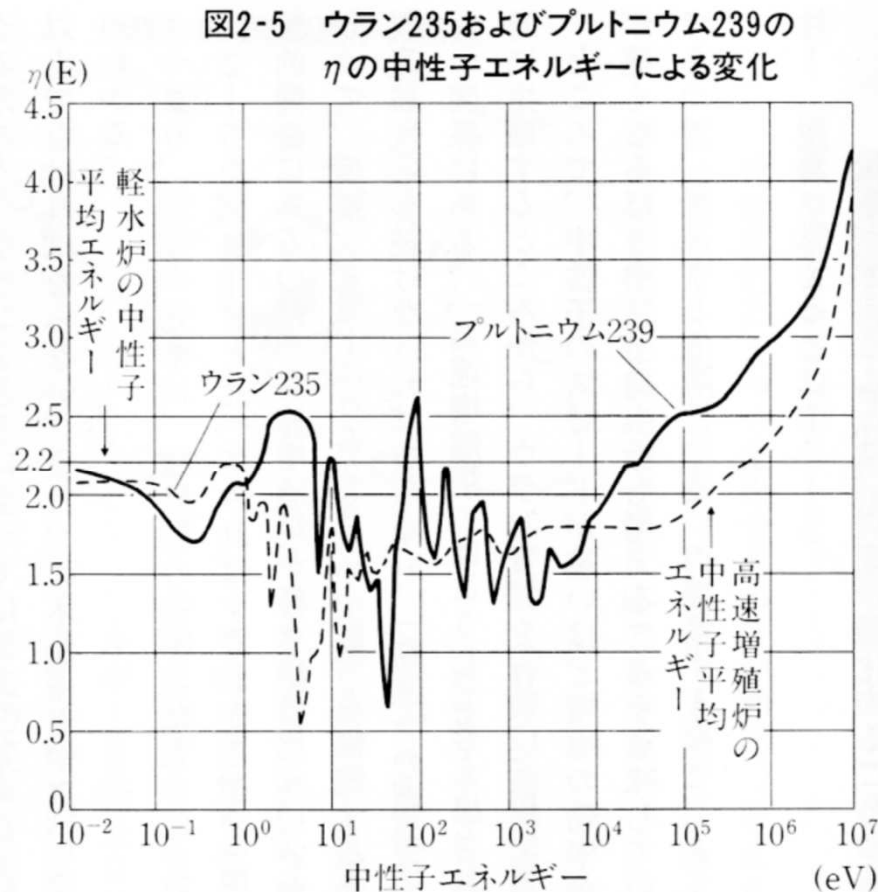
ν : 核分裂当りに放出される中性子数

<増殖の条件>

●核分裂連鎖反応の維持に中性子ひとつが必要.

●増殖のためにはU238に吸収されるもうひとつ中性子が必要.

●漏れたり構造材に吸収される分を考えると『増殖には $\eta > 2.5$ 』が必要.

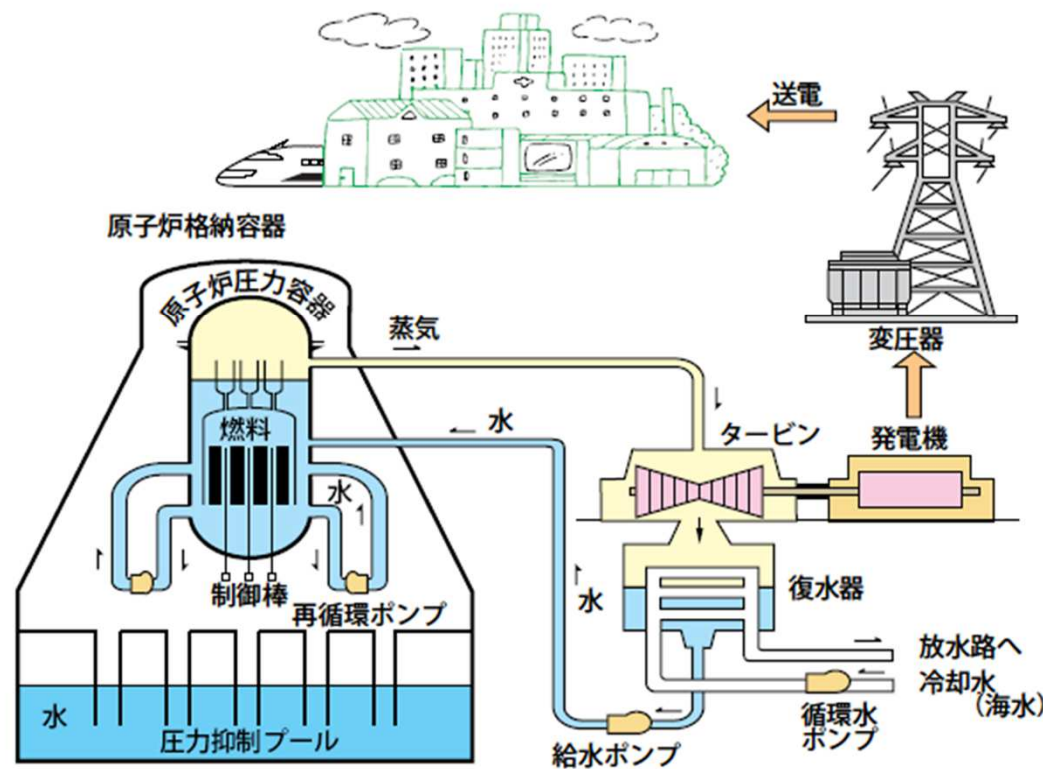


J・J・ドゥデルスタット, L・J・ハミルトン, 成田・藤田共訳
『原子炉の理論と解析(上)』現代工学社, 1982より作成

小林圭二「高速増殖炉もんじゅ: 巨大技術の夢と現実」
七つ森書館 1994

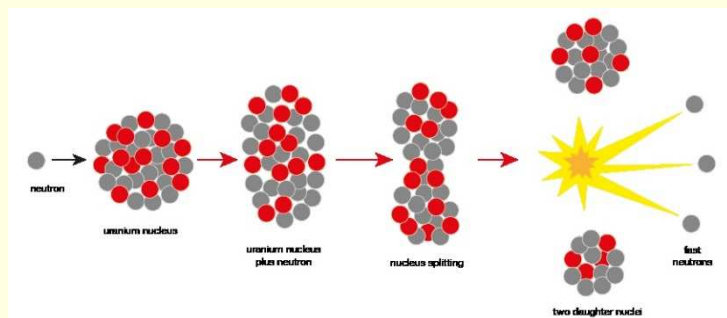
軽水炉原発の仕組み（BWR原発）

沸騰水型炉(BWR)原子力発電のしくみ

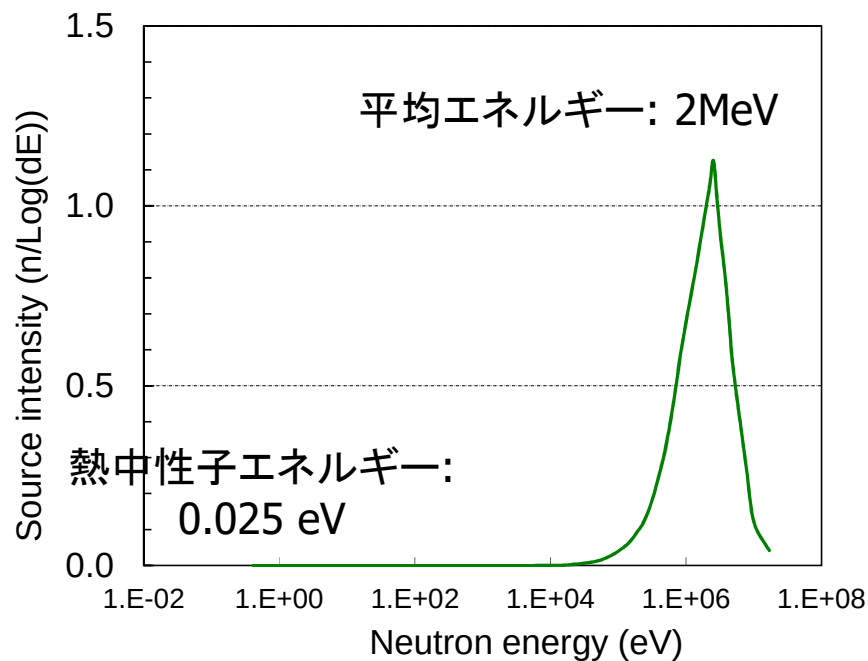
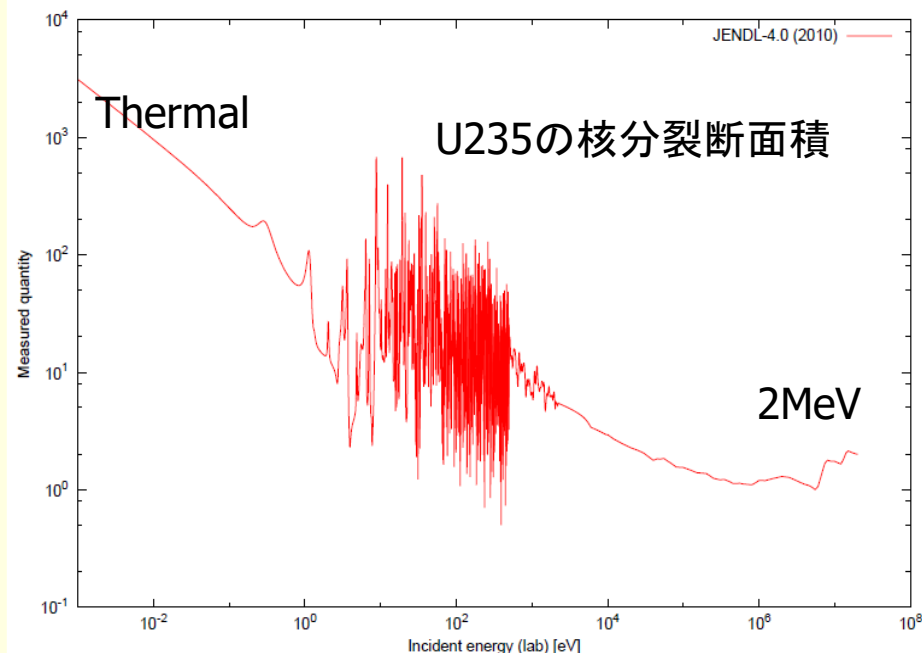


核分裂の熱で、水を沸騰させて、その蒸気でタービンを回して発電する。余
分な熱は温廃水として海に出す。

中性子エネルギーと核分裂断面積



断面積の単位
 $1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$

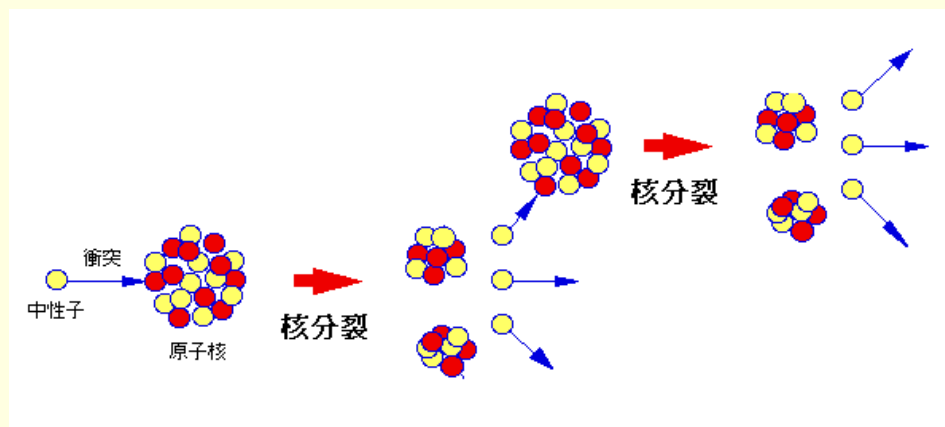


核分裂で発生する中性子のエネルギースペクトル

中性子エネルギー

- 軽水炉では、中性子を減速して、熱中性子領域で連鎖反応を維持する。
- 高速炉では、中性子を減速させず、数100keV領域で連鎖反応を維持する。

核分裂と核分裂生成物



92個の陽子と144個の中性子が2つの破片に分布する

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

元素の番号は原子核に含まれる陽子の数で決まる：ウランは92個

原子核の割れ方は決ま
っていない！

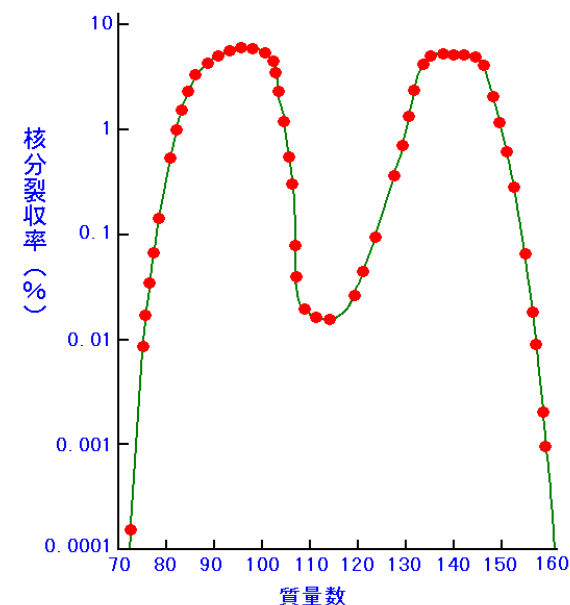
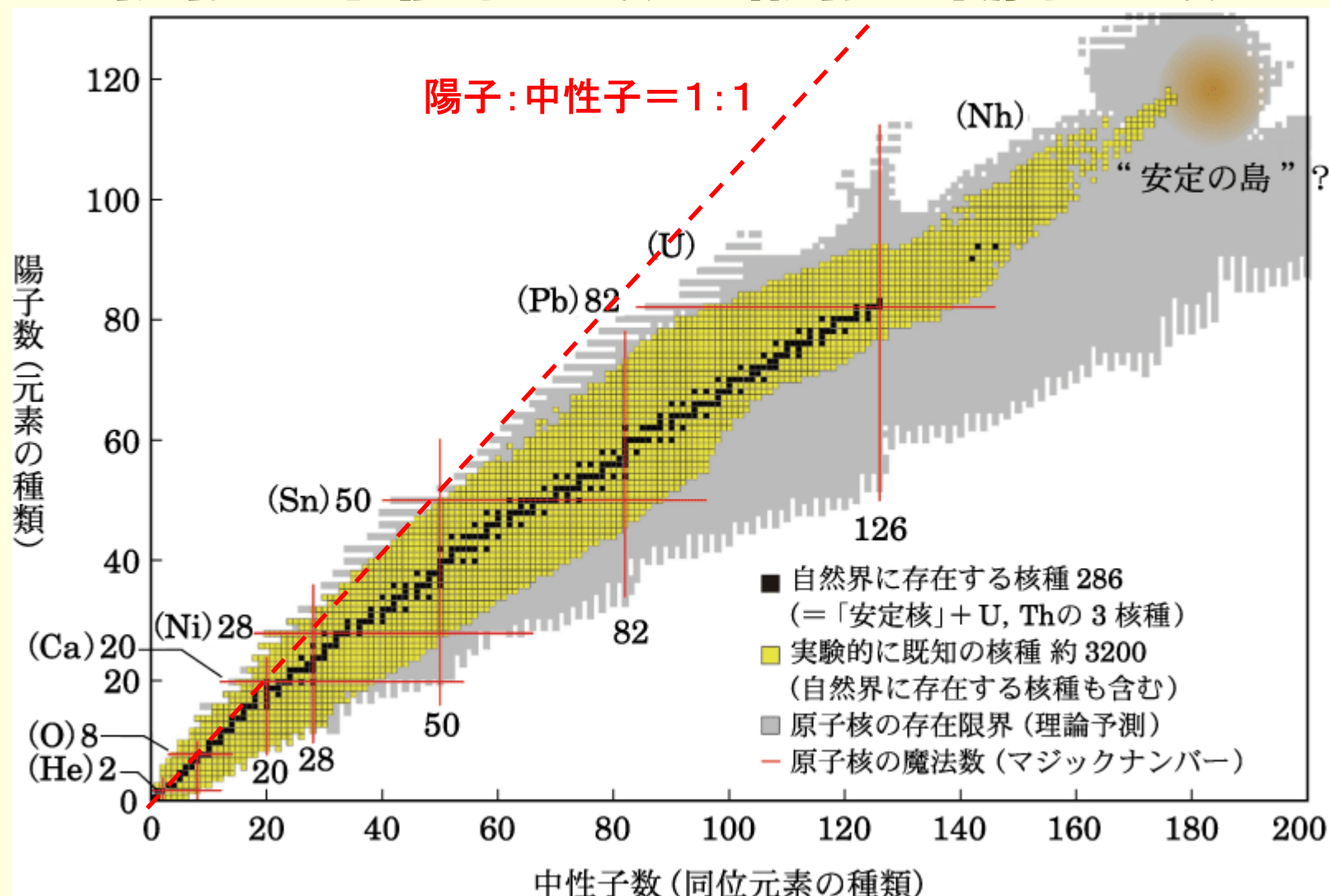


図1 ^{235}U の核分裂生成物収率曲線

原子核の割れ方によって、様々な核分裂生成物が生まれる。核分裂生成物のほとんどは、放射性物質（放射性同位元素）である。

核図表

横軸：中性子の数 縦軸：陽子の数



元素番号が大きくなるほど、陽子に比べ中性子が増える 20

核分裂生成物の大部分は β 崩壊する



< β 崩壊 >

原子核の中性子が多めなので、中性子のひとつが電子（ベータ線）を出して陽子になる。

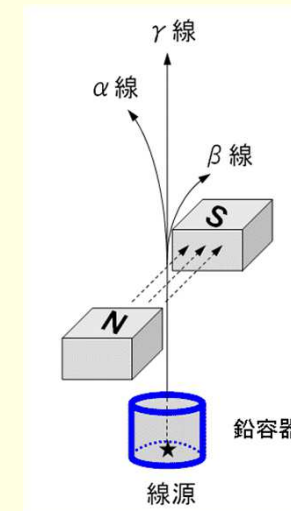
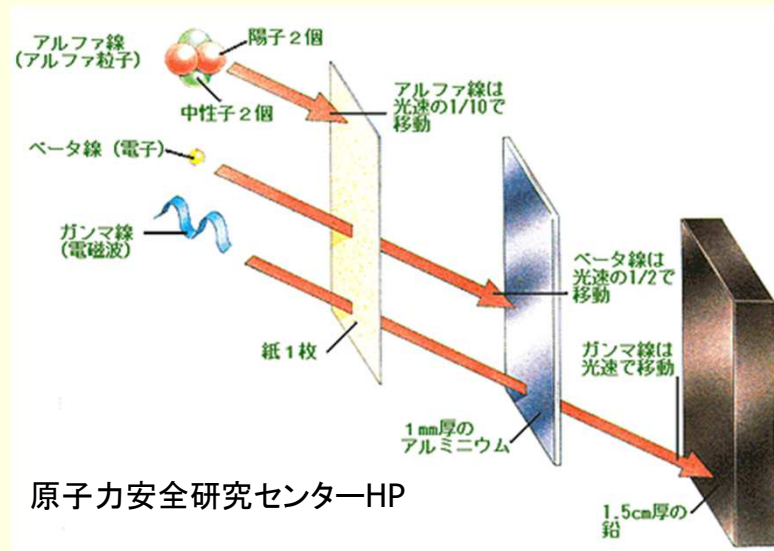


陽子数（元素番号）がひとつ増えて、中性子がひとつ減る。

陽子 + 中性子は同じ

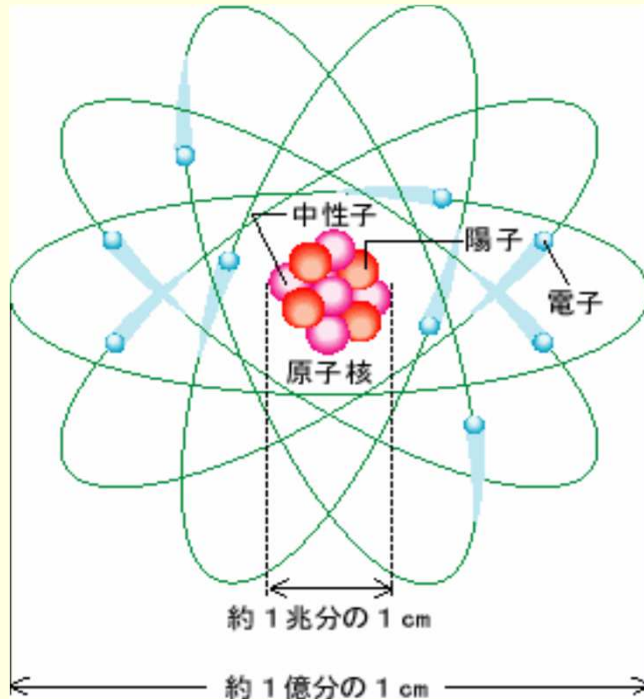
安定同位体と放射性同位体

- 同位体とは、陽子の数が同じ（周期表の同じ場所）だが、中性子の数が異なる原子核のこと。
- 放射性同位体：陽子と中性子の数のバランスが悪いので、放射線を出して別の原子核に変身する。



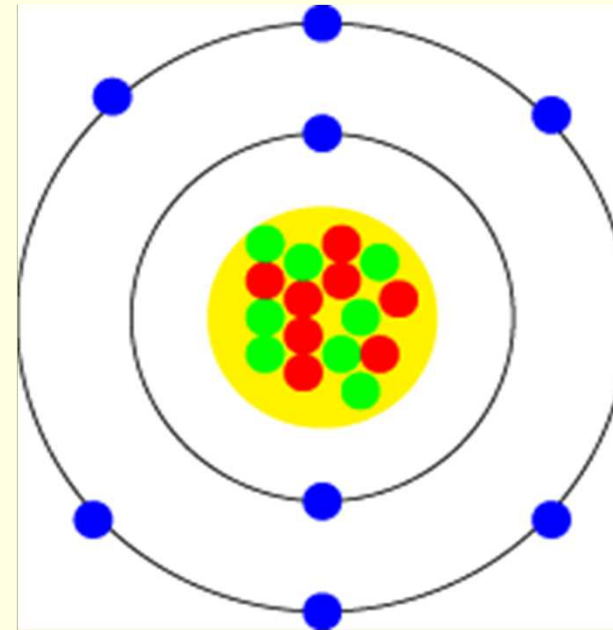
- ベータ崩壊：中性子のひとつが電子を放出（ベータ粒子）して、陽子に変身する。原子番号は1つ増えて、質量数は変わらない。
- アルファ崩壊：陽子2個と中性子2個の塊（アルファ粒子）を放出するので、崩壊後の原子核は、原子番号は2つ、質量数は4つ小さくなる。
- ガンマ線：アルファ崩壊やベータ崩壊を起こした原子核の余分なエネルギーが電磁波（電波や光と同じ）として放出される。

放射線・放射能の研究を通じて 原子、原子核の仕組みが解明された



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

原子核の中の陽子の数で
元素がきまる



酸素の原子核：陽子が8つで

ふつう中性子も8つ $^{16}_{8}\text{O}$

物質世界は『陽子と中性子、それに電子
の3つ』で出来ている

地球上の万物は原子の組み合わせで出来ている

周期表：原子を軽い順に並べた表

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

水素の同位体

^1_1H : 普通の水素 (軽水素)

^2_1H : 重水素

^3_1H : 三重水素 (トリチウム)

*1 ランタノイド:

57 57 <u>La</u>	58 58 <u>Ce</u>	59 59 <u>Pr</u>	60 60 <u>Nd</u>	61 61 <u>Pm</u>	62 62 <u>Sm</u>	63 63 <u>Eu</u>	64 64 <u>Gd</u>	65 65 <u>Tb</u>	66 66 <u>Dy</u>	67 67 <u>Ho</u>	68 68 <u>Er</u>	69 69 <u>Tm</u>	70 70 <u>Yb</u>	71 71 <u>Lu</u>
-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

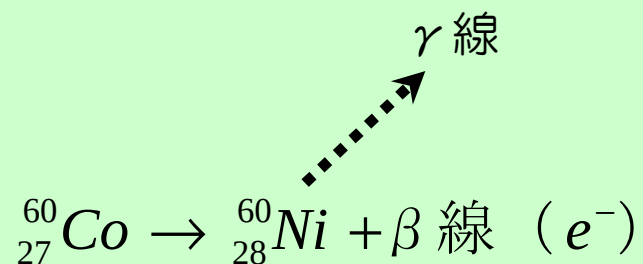
*2 アクチノイド:

89 89 <u>Ac</u>	90 90 <u>Th</u>	91 91 <u>Pa</u>	92 92 <u>U</u>	93 93 <u>Np</u>	94 94 <u>Pu</u>	95 95 <u>Am</u>	96 96 <u>Cm</u>	97 97 <u>Bk</u>	98 98 <u>Cf</u>	99 99 <u>Es</u>	100 100 <u>Fm</u>	101 101 <u>Md</u>	102 102 <u>No</u>	103 103 <u>Lr</u>
-----------------------	-----------------------	-----------------------	----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------

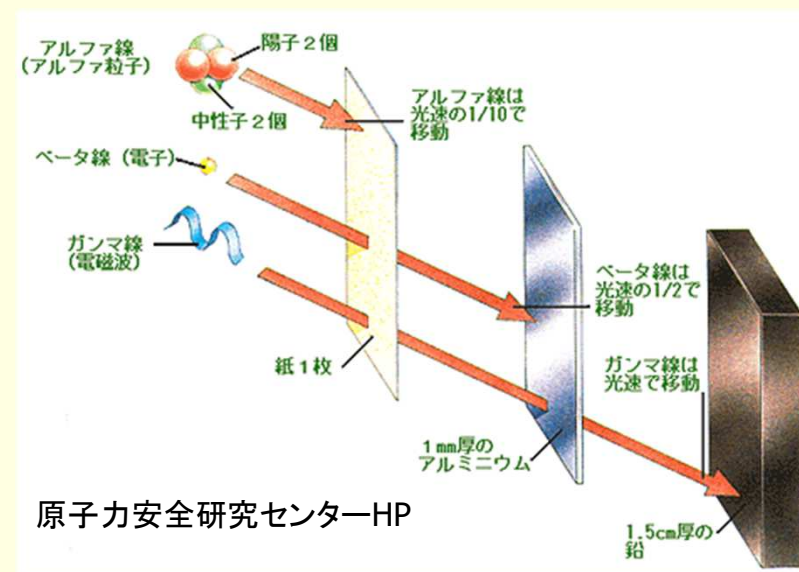
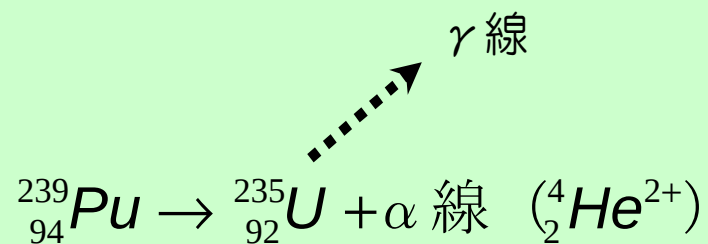
周期表の順番（元素番号）は、原子核の中に陽子が何個含まれているかで決まる。ウランは自然界に存在している最も重たい元素。ウラン238の原子核には、92個の陽子と146個の中性子が含まれている。

アルファ線、ベータ線、ガンマ線

ベータ崩壊: 例えば、コバルト 60

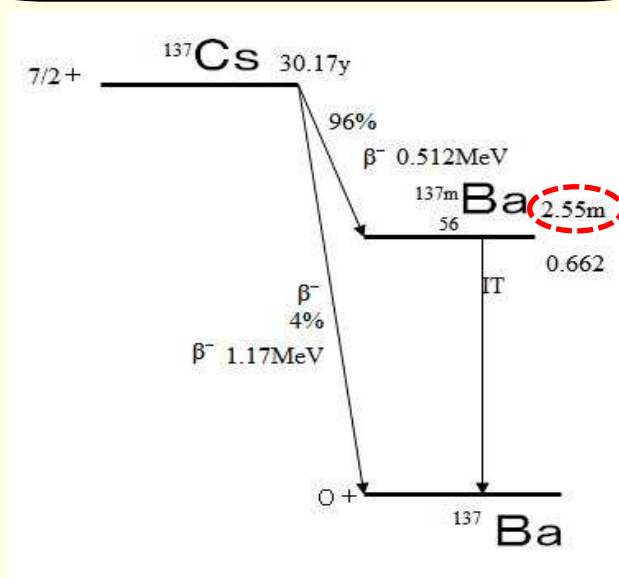
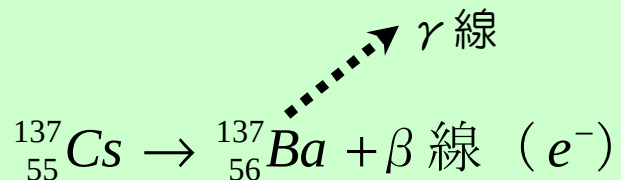


アルファ崩壊: 例えば、プルトニウム 239

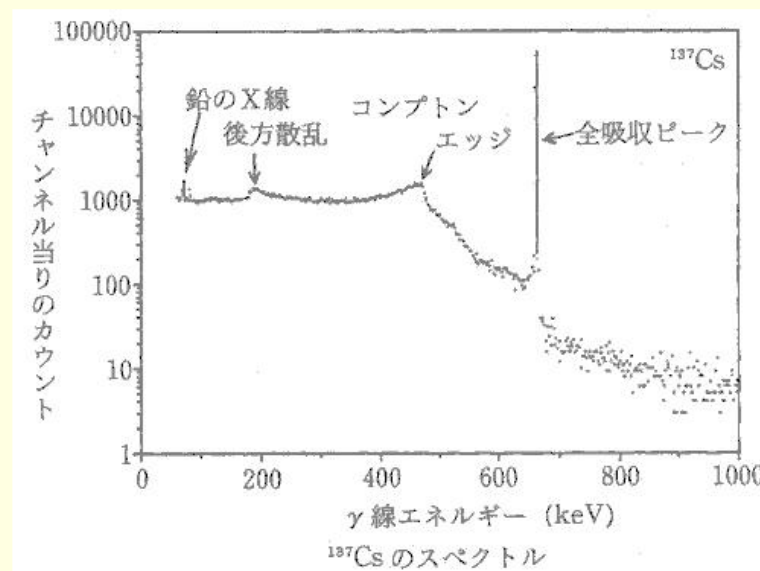


セシウム137の壊変図とガンマ線スペクトル

ベータ崩壊:例えば、セシウム 137



いわゆる“セシウム137のガンマ線”を放出するのは、励起状態にあるバリウム137の原子核

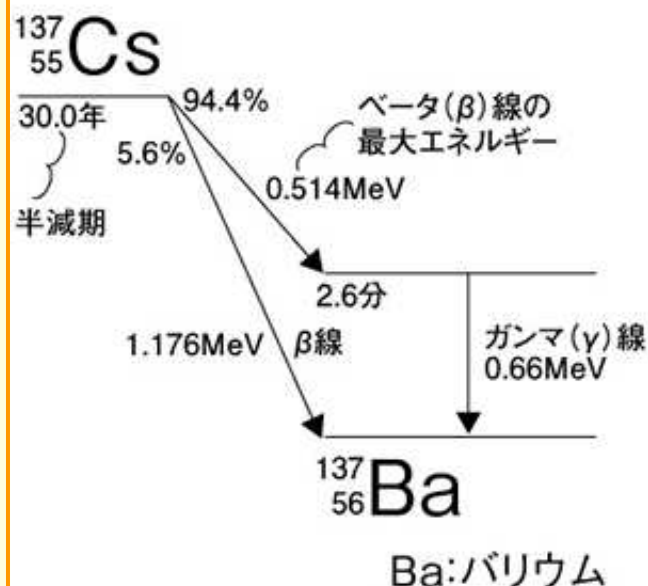


ガンマ線スペクトル:Ge半導体測定

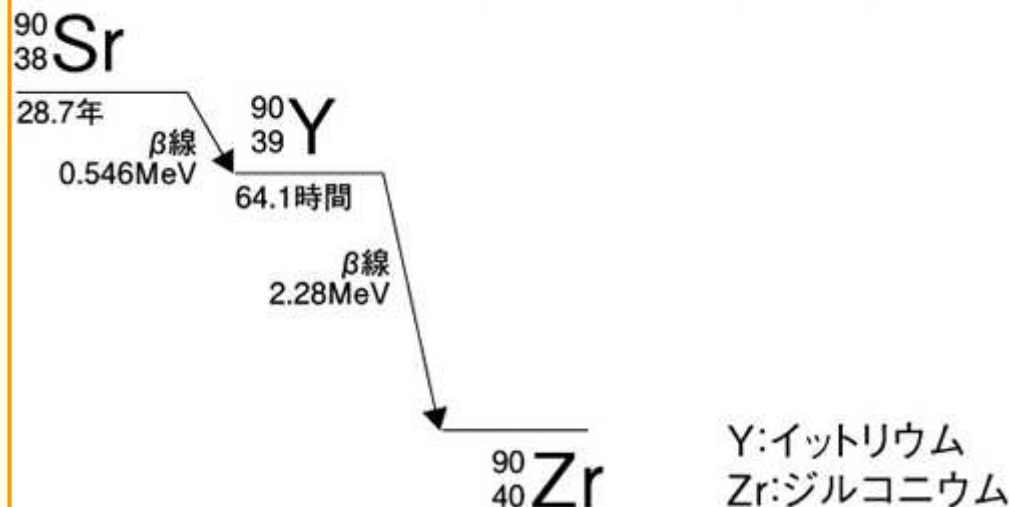
セシウム137（半減期30年）は代表的な核分裂生成物であり、揮発性が大きいため事故で放出されやすく、**長期的な放射能汚染の主役**となる。26

セシウム137とストロンチウム90の崩壊図

◆セシウム(Cs)137の壊変(崩壊)

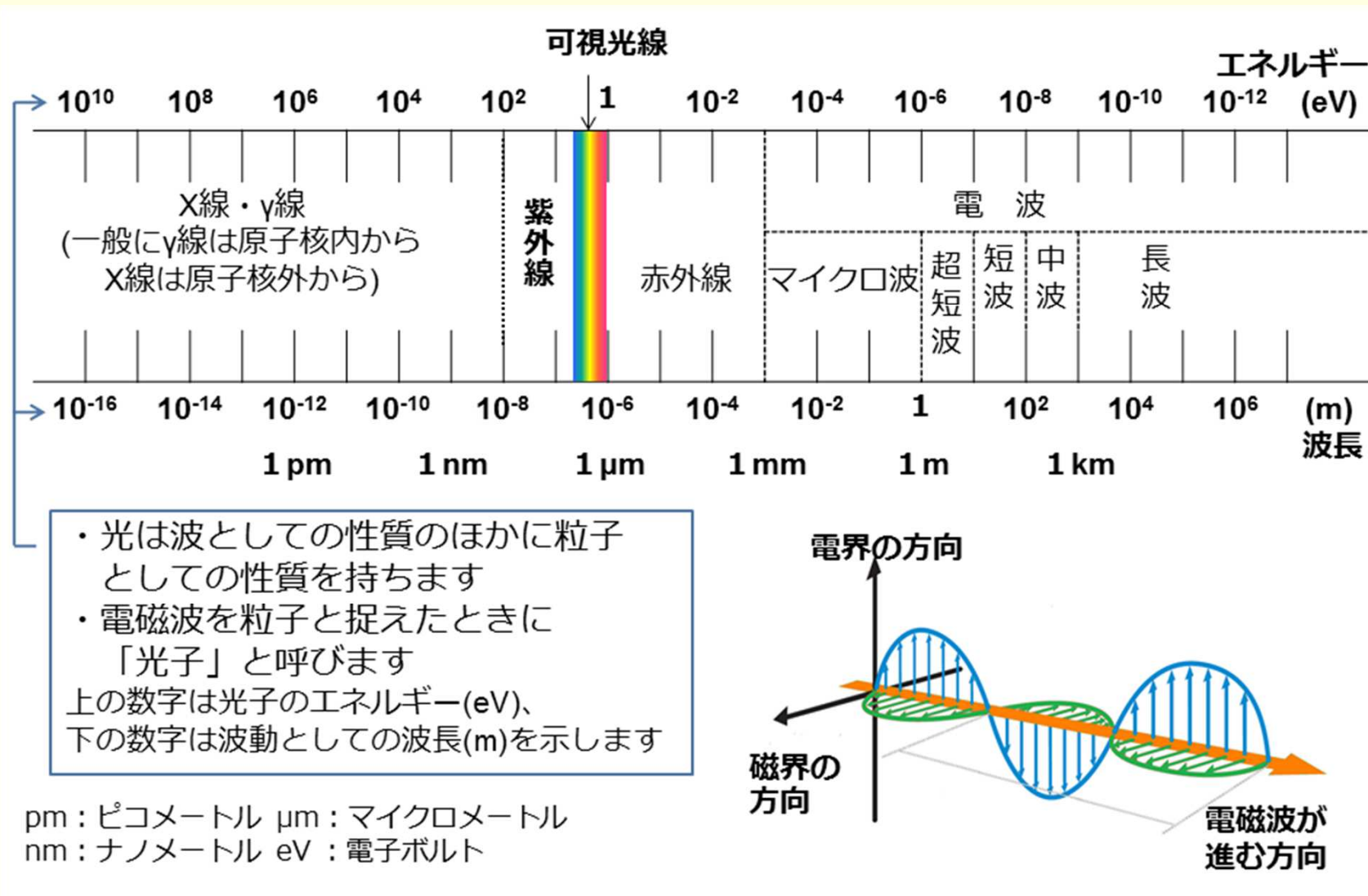


◆ストロンチウム(Sr)90の壊変(崩壊)

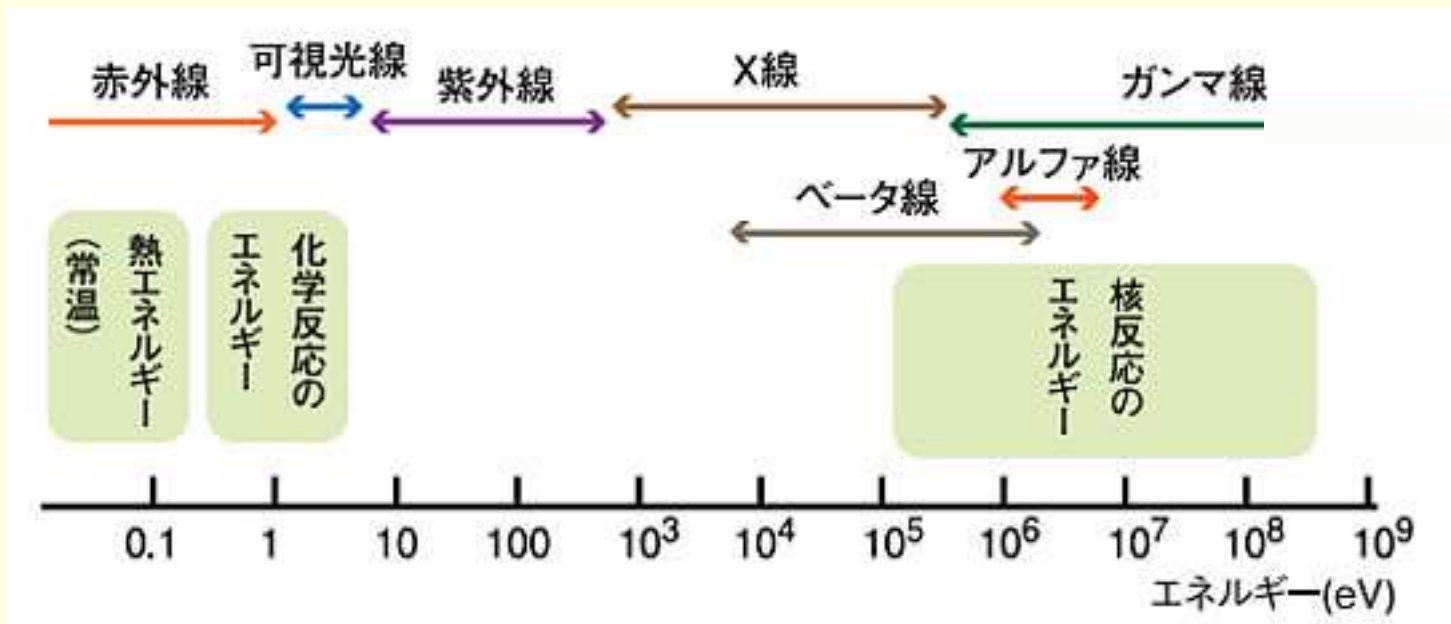


どちらもベータ崩壊で、セシウム137は（バリウム137の原子核から）ガンマ線が放出されるが、ストロンチウム90からガンマ線は放出されない。

電磁波の仲間：電波、光、X線・γ線



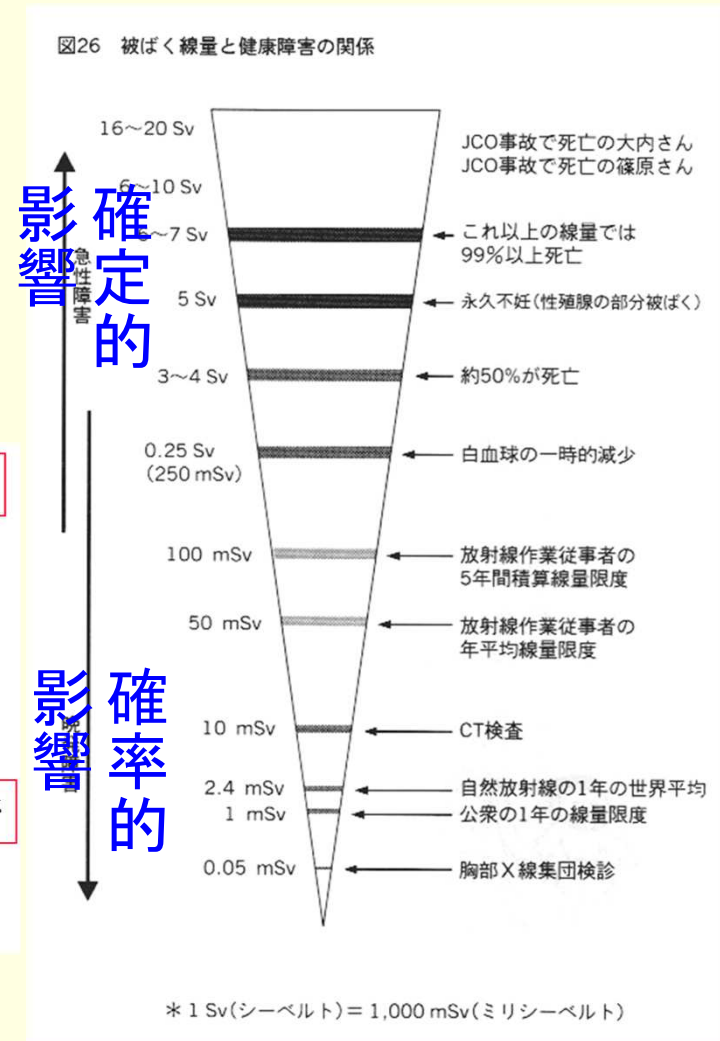
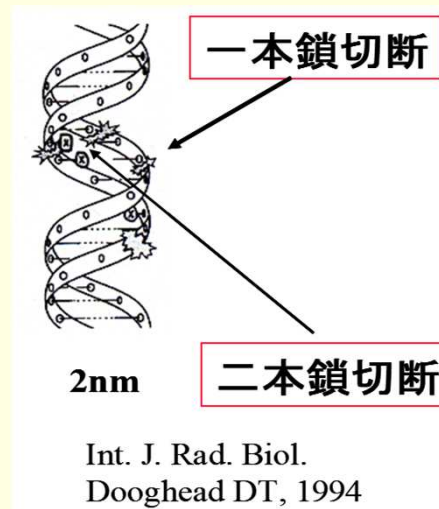
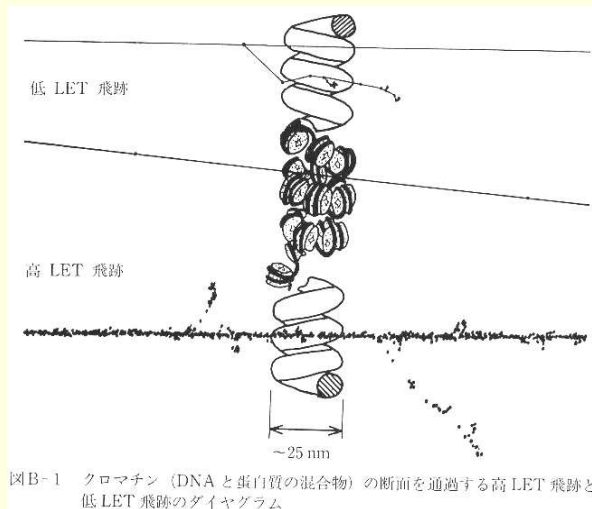
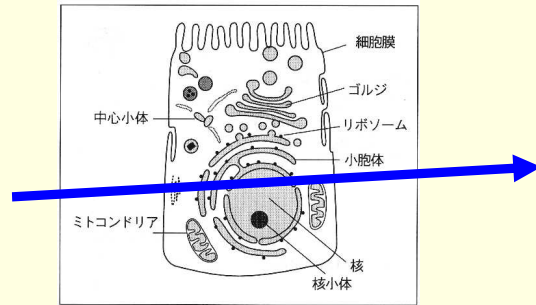
放射線が持っているエネルギー



eV(電子ボルト): 粒子や電磁波のエネルギーの単位

生物体内で原子・分子が結合しているエネルギーは数eVからせいぜい10eV. 一方、放射線のエネルギーは数十万eVから数百万eV.

放射線に被曝すると！



一度にたくさん浴びると“急性障害”（確定的影響）が起き、被曝が少なくてもガン・白血病といった“晩発障害”（確率的影響）の恐れがある。

放射線障害

■ 急性放射線障害(確定的影響)

- 大量の被曝により多くの細胞が死亡し臓器機能がやられる



広島 爆心から1kmの兵隊さん



チェルノブイリ原発の
職員と消防士

■ 晩発性放射線障害(確率的影響)

- 細胞の突然変異により、後になってガン・白血病や遺伝的障害として現われる

とりあえず、今夜はここまで

ウクライナに平和を！

