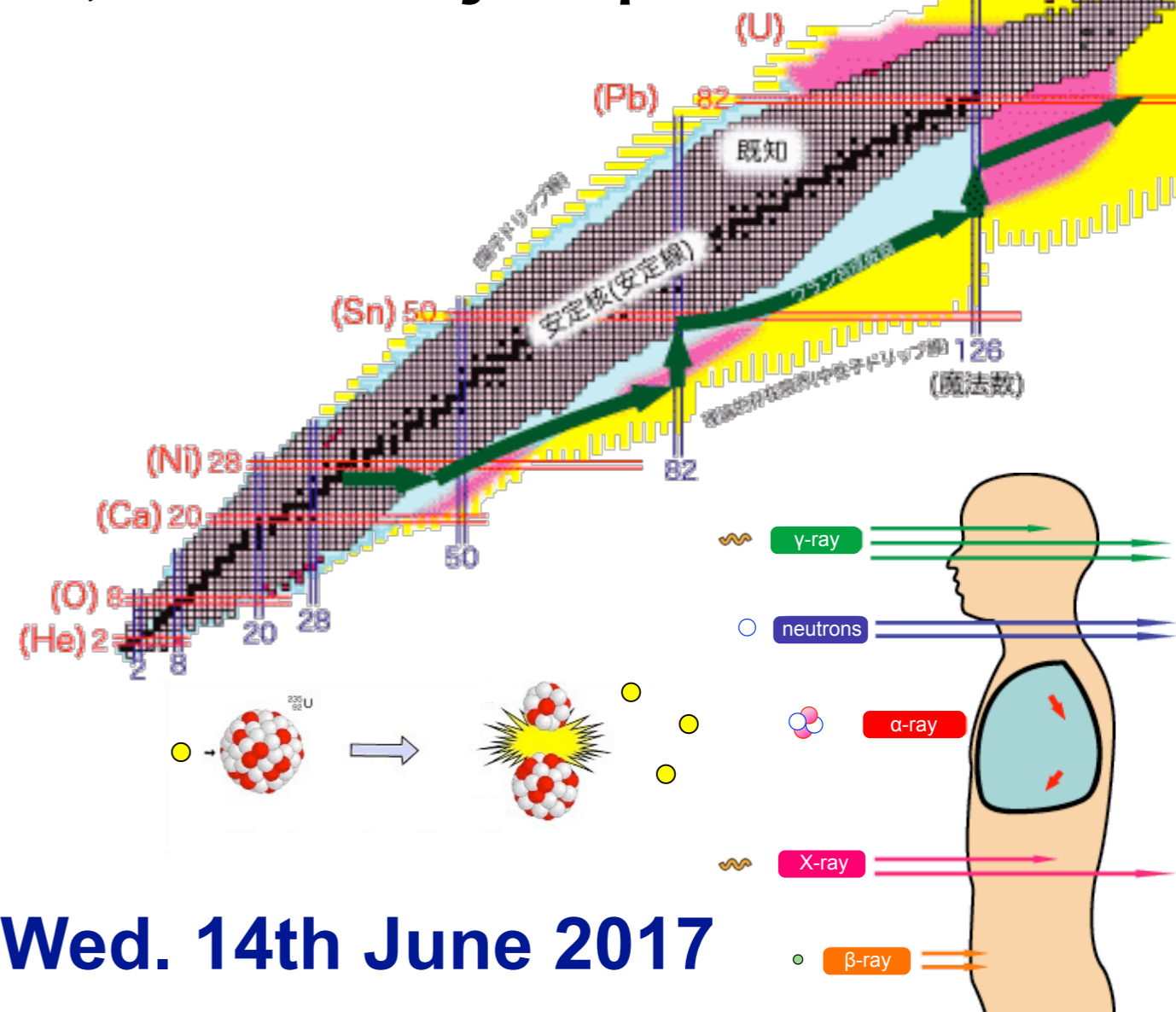


Lecture for 3rd-year students, Chemistry dept.



Wed. 14th June 2017

8th
lecture

Nuclear physics / Nuclear engineering

鳥居 寛之 (Hiroyuki A. **TORII**)

RI Lab., Dept. of Chemistry, School of Science, Univ. of Tokyo

■エックス線を発見
Discovery of X-rays.



1895年、ドイツの物理学者レントゲンは、真空放電の実験中に黒いボール紙で覆われた放電管の電極からボール紙を通り抜け、目に見えないが写真乾板を感光させ、蛍光物質を光らせる性質を持った線を発見しました。この正体の分からないものを「ナゾの」という意味でx(エックス)線と名づけました。

W. C. Röntgen



ヴィルヘルム・レントゲン
(1845-1923)

■エックス線を発見
Discovery of X-rays.
 α -rays and β -rays as well.



1896年、フランスの物理学者ベクレルは、写真乾板の上に薄い銅の十字架を置き、その上にウラン化合物の結晶を乗せて机の引き出しにしまっていました。後で乾板を現像すると、十字架の形がはっきりと写っていました。ウラン原子そのものに光を出す性質があると気づいた彼は、この線をベクレル線(後にアルファ(α)線とベータ(β)線であることが判明)と名づけ、発表しました。

A. H. Becquerel



アンリ・ベクレル
(1852-1908)

■放射性元素を発見
Discovery of
radioactive elements.



ベクレルの研究に刺激を受けたキュリー夫人は、夫のピエールとともにウランの性質を調べました。1898年にはウラン化合物の400倍もの感光作用を持つ新元素・ポロニウムを発見。この名前は、夫人の祖国であるポーランドにちなんでつけられた。彼女は、「放射線」「放射能」の名づけ親でもあります。

M. Curie



マリー・キュリー
(1867-1934)

■放射性元素を発見
Discovery of
radioactive elements.



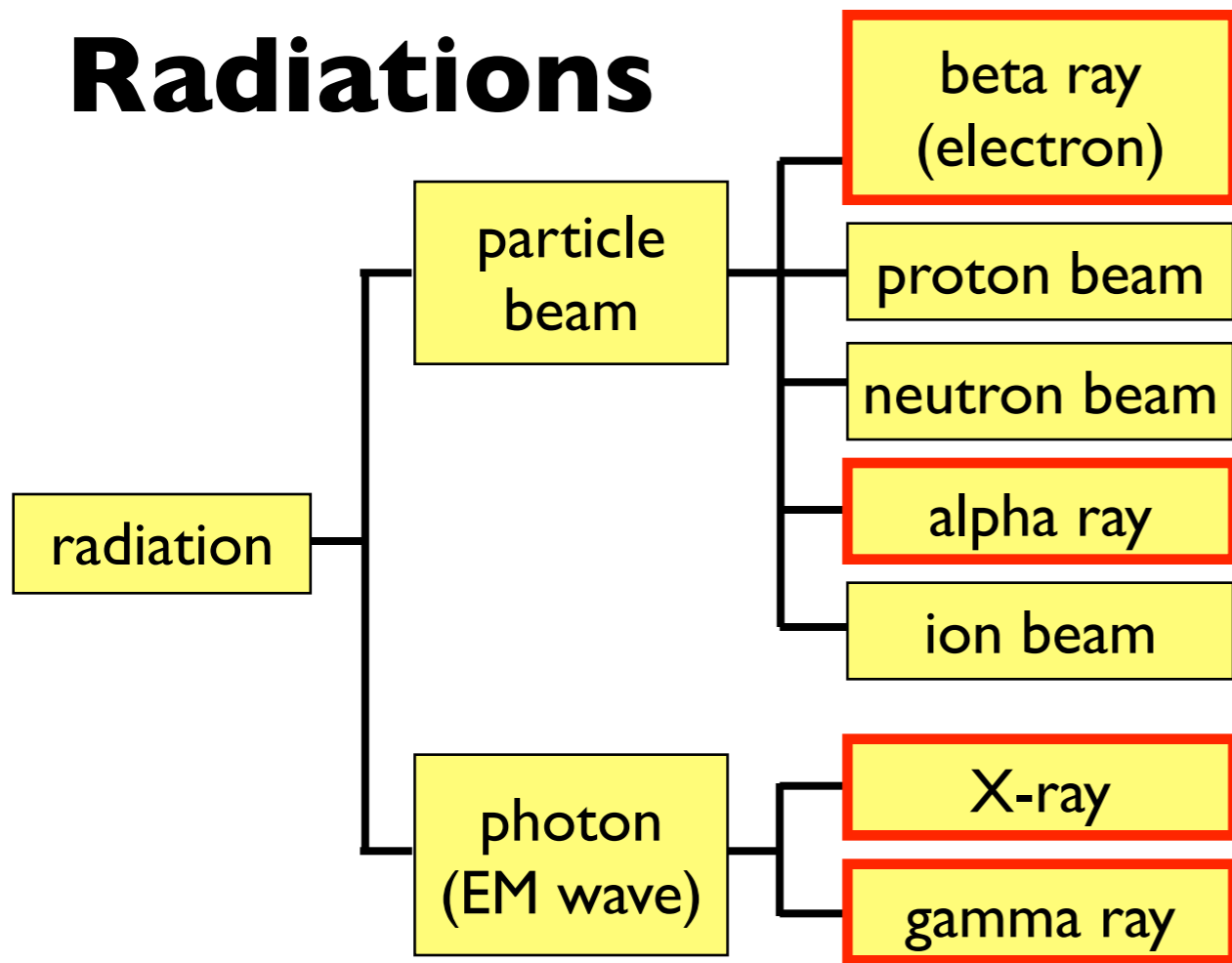
イギリスの物理学者ラザフォードは、1903年に放射性物質のラジウムを使った実験で、原子の種類が変わるときに3種類の放射線が出ることを知り、それぞれにアルファ(α)線、ベータ(β)線、ガンマ(γ)線と名づけました。原子は変わらないと信じられていた当時、この発見は大きな波紋を投げかけました。

E. Rutherford

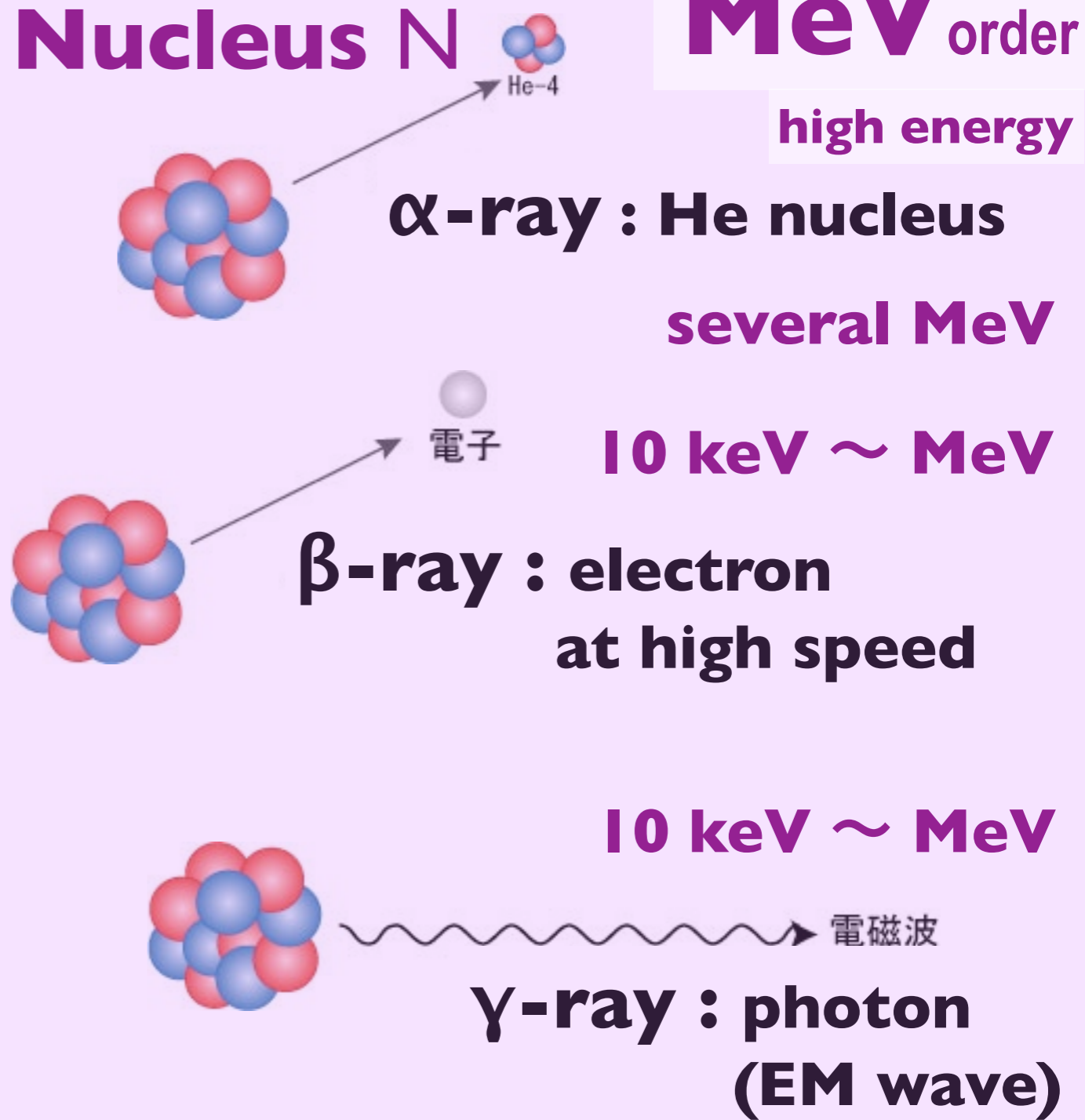


アーネスト・ラザフォード
(1871-1937)

Radiations



Nucleus N



Typical energies of radiation

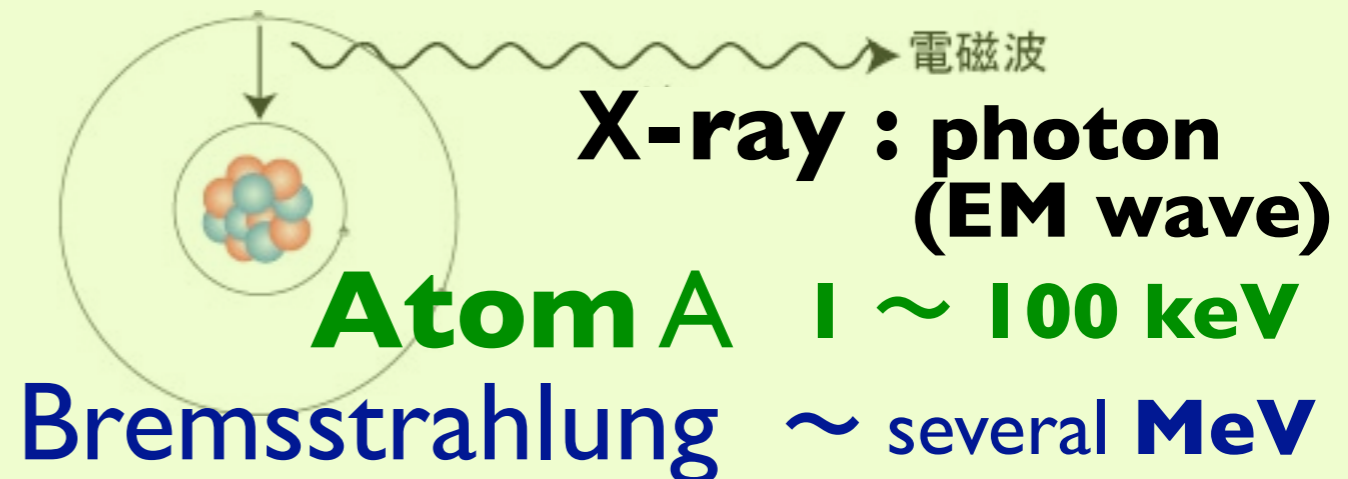
☞ **10 keV ~ several MeV**
(α, β, γ)

Cf. Atomic binding energies

☞ **around 10 eV for outermost-shell electrons**
(1 eV = 96 kJ/mol)

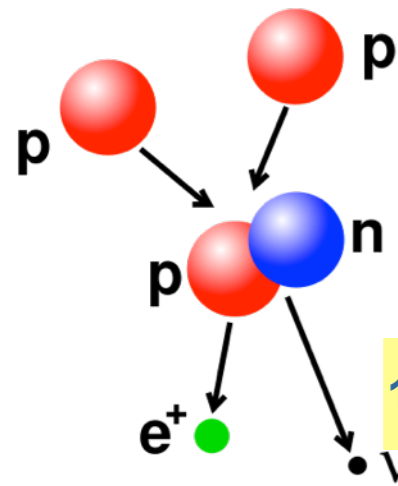
Speed of radiation

☞ **few ~ 100% of light speed**



Nuclear physics : Introduction

Periodic Table of Elements



陽子 proton p
 重陽子 deuteron pn
 三重陽子 triton pnn

nucleus

alpha particle
 $\alpha = ppnn$

${}^3\text{He}^{++} = ppn$

H	Hydrogen	水素	氫 qīng
${}^1\text{H}$ (H)	Protium	軽水素	気 piē
${}^2\text{H}$ (D)	Deuterium	重水素	気 dāo
${}^3\text{H}$ (T)	Tritium	三重水素	気 chuān
He	Helium	ヘリウム	氦 hài
${}^4\text{He}$	Helium-4	ヘリウム4	
${}^3\text{He}$	Helium-3	ヘリウム3	

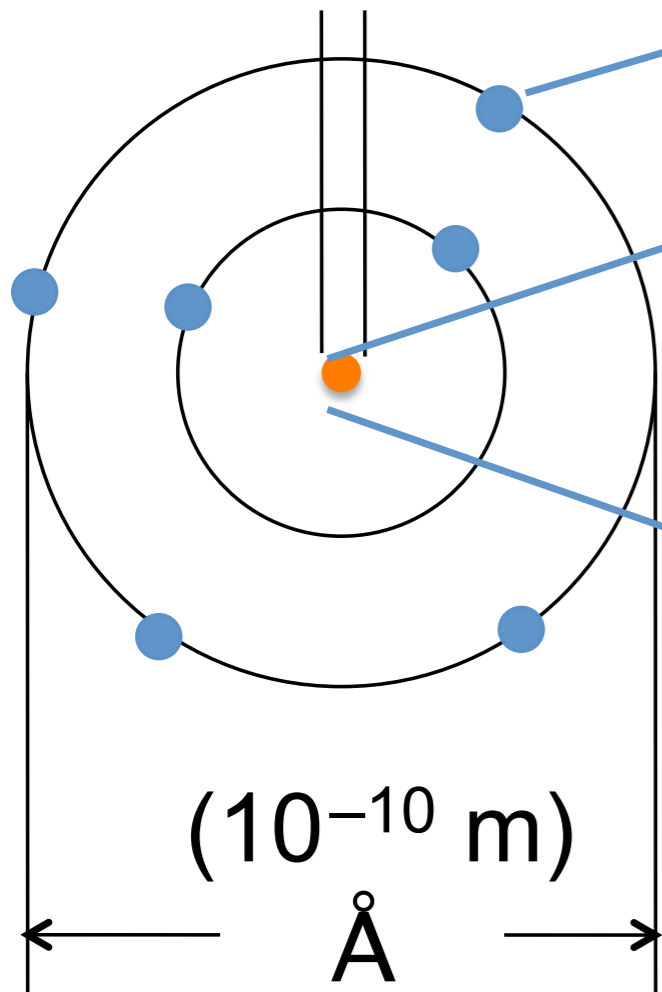
Atom and Nucleus

($10^{-15} - 10^{-14}$ m)

1 - 10 fm

orbital electron

軌道電子

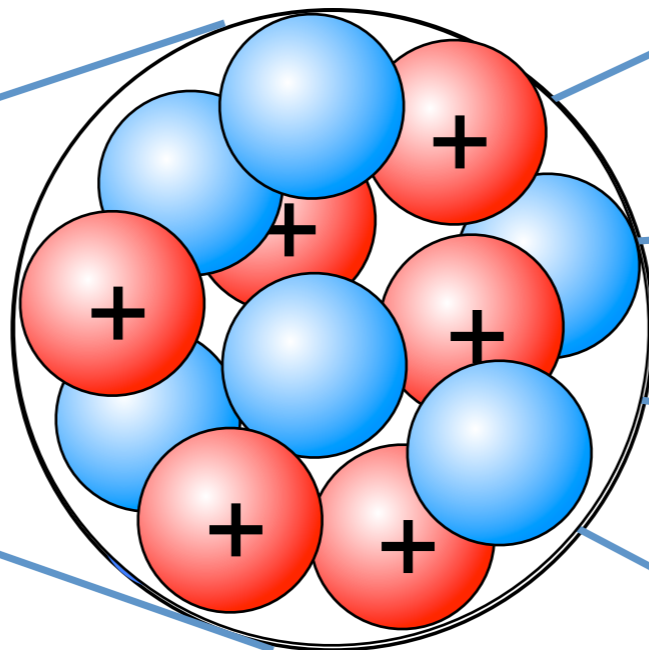


(10^{-10} m)

Å

原子

atom

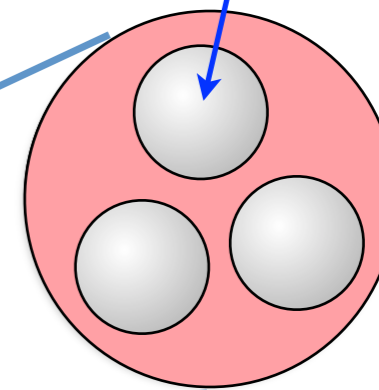


原子核

nucleus

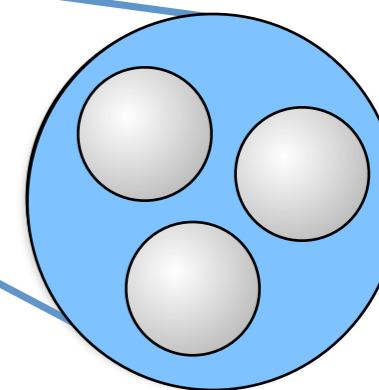
クォーク

quarks



陽子

proton



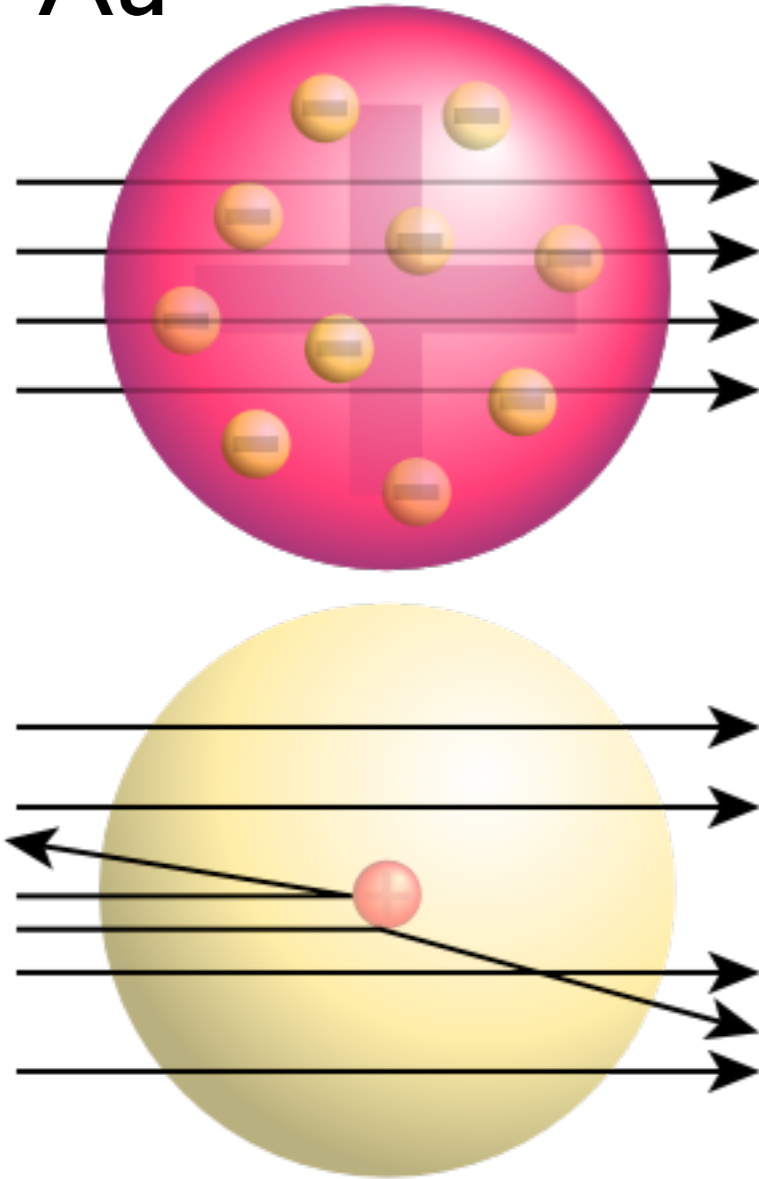
中性子

neutron

Schematic picture of $^{12}_6\text{C}$ atom

Rutherford scattering

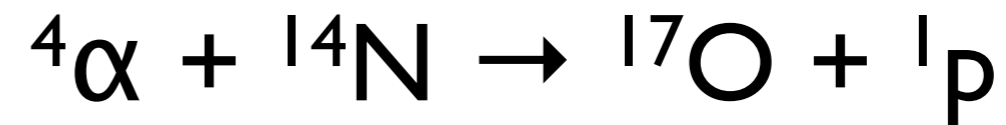
$\alpha + \text{Au}$



Rutherford atomic model
(1911)

The first nuclear transmutation

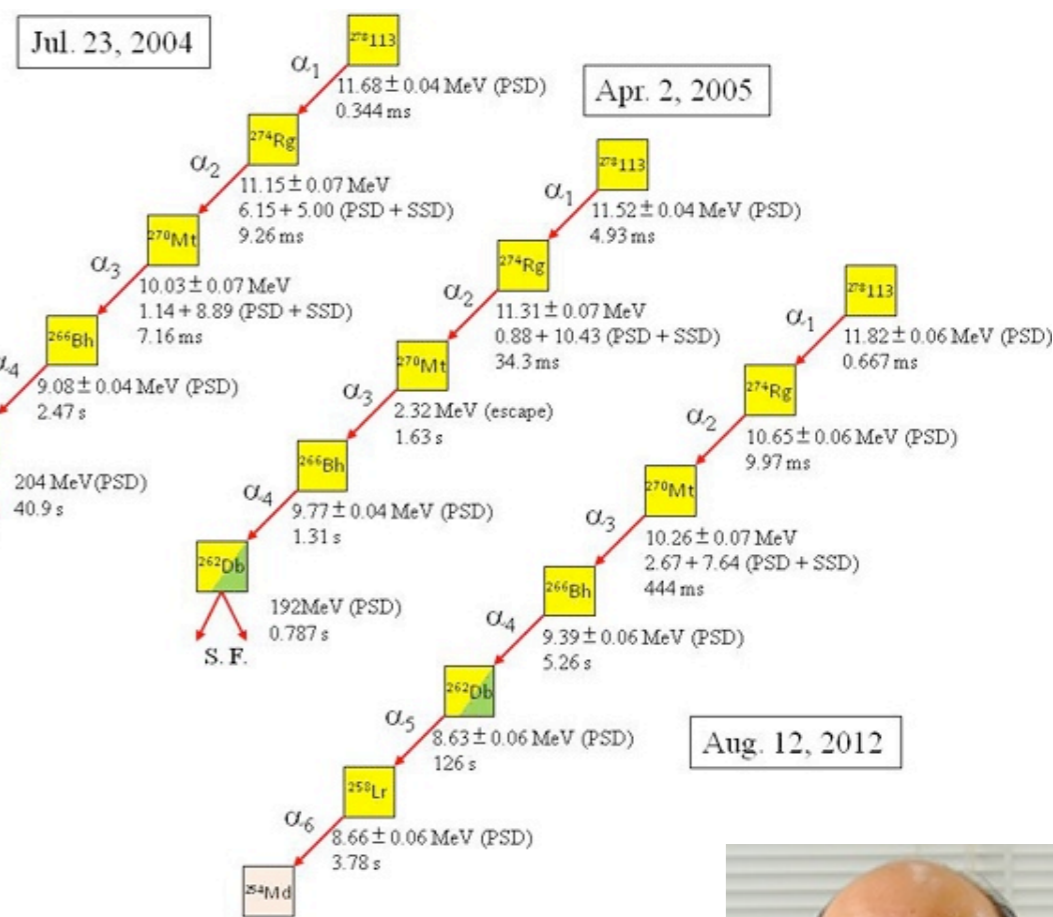
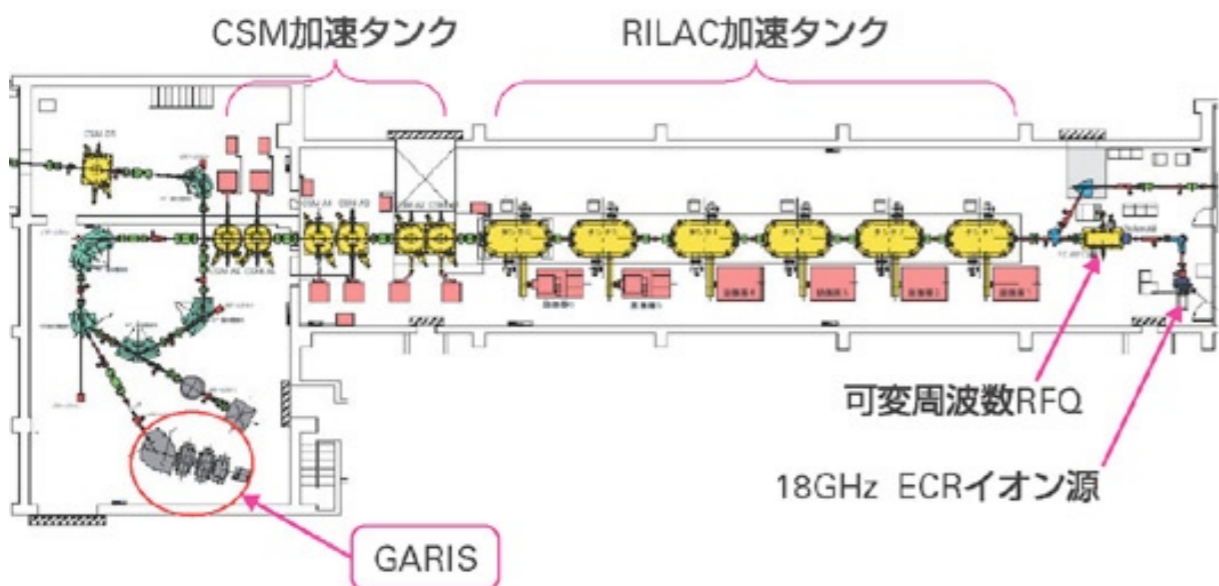
During an experiment to measure the range of alpha rays from polonium nuclei in nitrogen gas, they found that some kind of particle caused a fluorescent screen 40 cm ahead to glow. (1919)
(The ranges of alpha particles are a few – several cm in the air at 1 atm.)



E. Rutherford

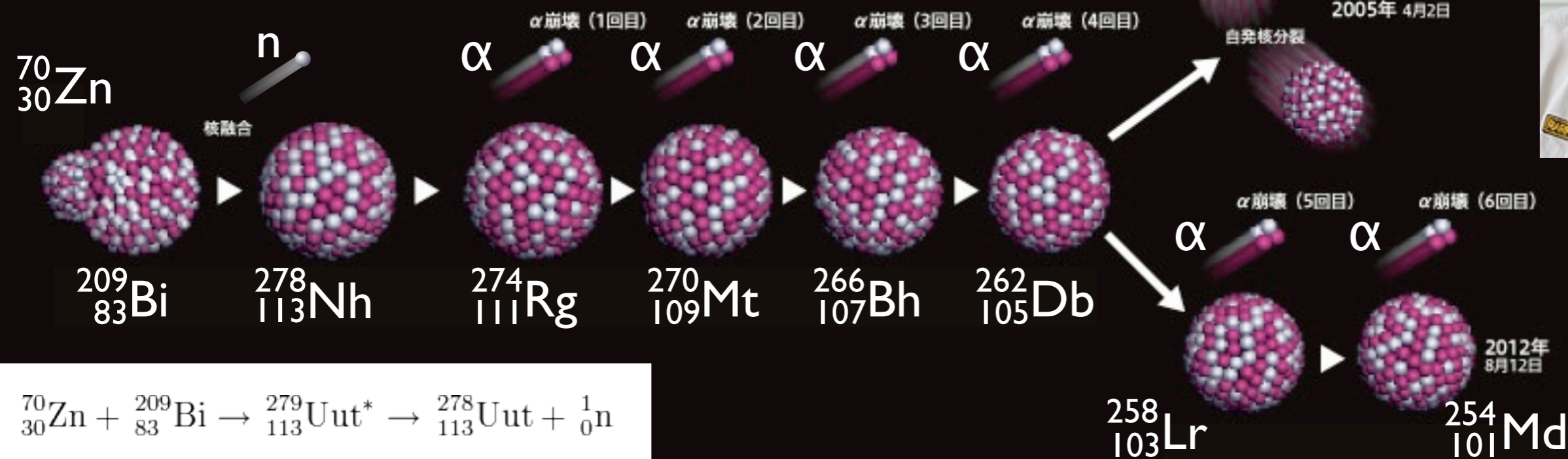
Synthesis of a superheavy element Nihonium ($_{113}\text{Nh}$)

(2004, 05, 12) by Dr. K. Morita (RIKEN) et al.

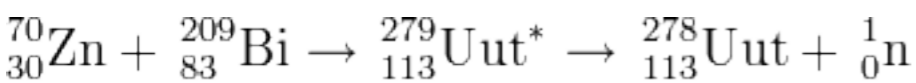


$^{278}_{113}\text{Nh}$ の合成と崩壊の様子

原子番号30の亜鉛 ($^{70}_{30}\text{Zn}$) と原子番号83のビスマス ($^{209}_{83}\text{Bi}$) が核融合を起こし、原子番号113の $^{278}_{113}\text{Nh}$ が合成された。2004年と2005年に合成した113番元素 ($^{278}_{113}\text{Nh}$) は、4回の α 崩壊を繰り返し、原子番号105のドブニウム ($^{262}_{105}\text{Db}$) は自発核分裂を起こして2個の原子核となった。2012年に合成した $^{278}_{113}\text{Nh}$ は、 ^{262}Db からさらに2回の α 崩壊を繰り返し、原子番号103のローレンシウム ($^{258}_{103}\text{Lr}$)、原子番号101のメンデレビウム ($^{254}_{101}\text{Md}$) となった。3個の $^{278}_{113}\text{Nh}$ の崩壊の様子から、113番元素の平均寿命は2ミリ秒であることが分かった。



spontaneous nuclear fission



Synthesis of $_{113}\text{Nh}$

(2004, 05, 12) by Dr. K. Morita (RIKEN) et al.

周期表 Periodic table of elements

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H 1.0079	Atomic Sym Mass																2 He 4.0026
2	3 Li 6.941	4 Be 9.0121	C 固体 Hg 液体 H 気体 Rf Unknown										5 B 10.811	6 C 12.010	7 N 14.006	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.180
3	11 Na 22.989	12 Mg 24.305	金属 アルカリ金属 アルカリ土類金属 ランタノイド 希ガス										13 Al 26.981	14 Si 28.085	15 P 30.973	16 S 32.065	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948
4	19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.955	22 Ti 47.867	23 V 50.941	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.38	31 Ga 69.723	32 Ge 72.64	33 As 74.921	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.80
5	37 Rb 85.467	38 Sr 87.62	39 Y 88.905	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.96	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.905	46 Pd 106.42	47 Ag 107.868	48 Cd 112.411	49 In 114.818	50 Sn 118.710	51 Sb 121.757	52 Te 127.60	53 I 126.905	54 Xe 131.29
6	55 Cs 132.905	56 Ba 137.327	57-71 Lanthanides	72 Hf 178.49	73 Ta 180.948	74 W 183.84	75 Re 186.207	76 Os 190.23	77 Ir 192.222	78 Pt 195.084	79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.2	83 Bi 208.980	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)
7	87 Fr (223)	88 Ra (226)	89-103 Actinides	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (264)	108 Hs (277)	109 Mt (268)	110 Ds (271)	111 Rg (272)	112 Cn (285)	113 Nh (284)	114 Fl (289)	115 Mc (288)	116 Lv (292)	117 Ts (294)	118 Og (294)

113 Nh
Nihonium

116 Lv
Livermorium

114 Fl
Flerovium

For elements with no stable isotopes, the mass number of the isotope with the longest half-life is given in parentheses.
superheavy elements

周期表 Design and Interface Copyright © 1997 Michael Dayah. <http://www.ptable.com>

57 La 138.90	58 Ce 140.11	59 Pr 140.90	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.92	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	
89 Ac (227)	90 Th 232.03	91 Pa 231.03	92 U 238.02	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)

米口の共同研究

ロシア合同原子核研究所の原子核反応研究室創設者 Georgy **Flërov**
米国 Lawrence-**Livermore** 国立研究所

元素周期表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	1 氢	Atomic Sym																	2 氦
2	3 锂	4 铍	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;"> 1 氢 Hydrogen 1.00794 1s¹ </div> <div> α A衰变 p Proton emission n Neutron emission SF Spontaneous fission </div> <div> β β衰变 β+ Beta+ decay EC Electron capture □ Stable </div> </div>															10 氖	
3	11 钠	12 镁	Selected All															18 氩	
4	19 钾	20 钙	21 钪	22 钛	23 钒	24 铬	25 锰	26 铁	27 钴	28 镍	29 铜	30 锌	31 镓	32 锗	33 砷	34 硒	35 溴	36 氪	
5	37 铷	38 锶	39 钇	40 锆	41 铌	42 钼	43 锝	44 钨	45 铼	46 钨	47 铟	48 锡	49 铊	50 铅	51 铟	52 碲	53 碘	54 氙	
6	55 铯	56 钡	57-71 镧系	72 铪	73 钽	74 钨	75 铼	76 钨	77 铱	78 铂	79 金	80 汞	81 铊	82 铅	83 铋	84 钋	85 砹	86 氡	
7	87 钫	88 镭	89-103 锕系	104 镅	105 镎	106 钚	107 镅	108 镆	109 锘	110 铈	111 铈	112 铈	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og	

铼

锝

这些原理没有一致稳定的同位素,大量的同位素最长的半衰期

元素周期表 设计版权 © 1997 Michael Dayah. <http://www.dayah.com/> d: May 30, 2008

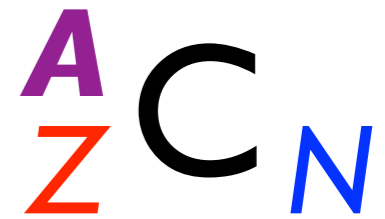
57 镧	58 铈	59 镨	60 钕	61 钐	62 铈	63 铈	64 钆	65 铈	66 铈	67 铈	68 铈	69 铈	70 铈	71 镱
89 锶	90 钪	91 钇	92 铈	93 镧	94 铈	95 铈	96 铈	97 铈	98 铈	99 铈	100 铈	101 铈	102 铈	103 铈

Radioactive materials includes atoms containing

radioactive nuclides
 = radioisotopes
 = unstable nuclei

mass number

$$A = Z + N$$



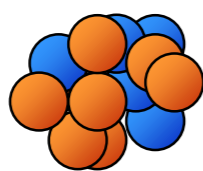
symbol of element

Same proton number Z means chemically same element

There exist many nuclides with different neutron number N .

e.g.
Carbon
nuclides

C-10



^{10}C

proton number 6

neutron number 4

C-11



^{11}C

proton number 6

neutron number 5

陽子
proton

中性子
neutron

C-12



^{12}C

proton number 6

neutron number 6

C-13

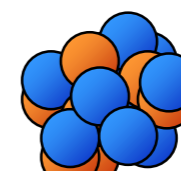


^{13}C

proton number 6

neutron number 7

C-14

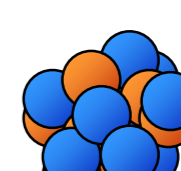


^{14}C

proton number 6

neutron number 8

C-15



^{15}C

proton number 6

neutron number 9



radioisotope
(unstable)

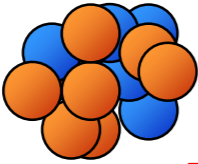
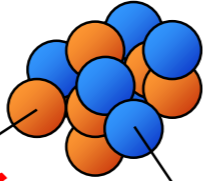
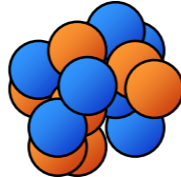
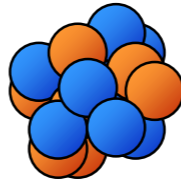
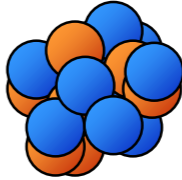
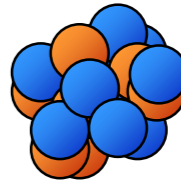


stable isotope
(infinite lifetime)



radioisotope
(unstable)

Isotope : nuclei (nuclides) with the same atomic number (= proton number) and different neutron number. Chemical properties are the same for all isotopes.

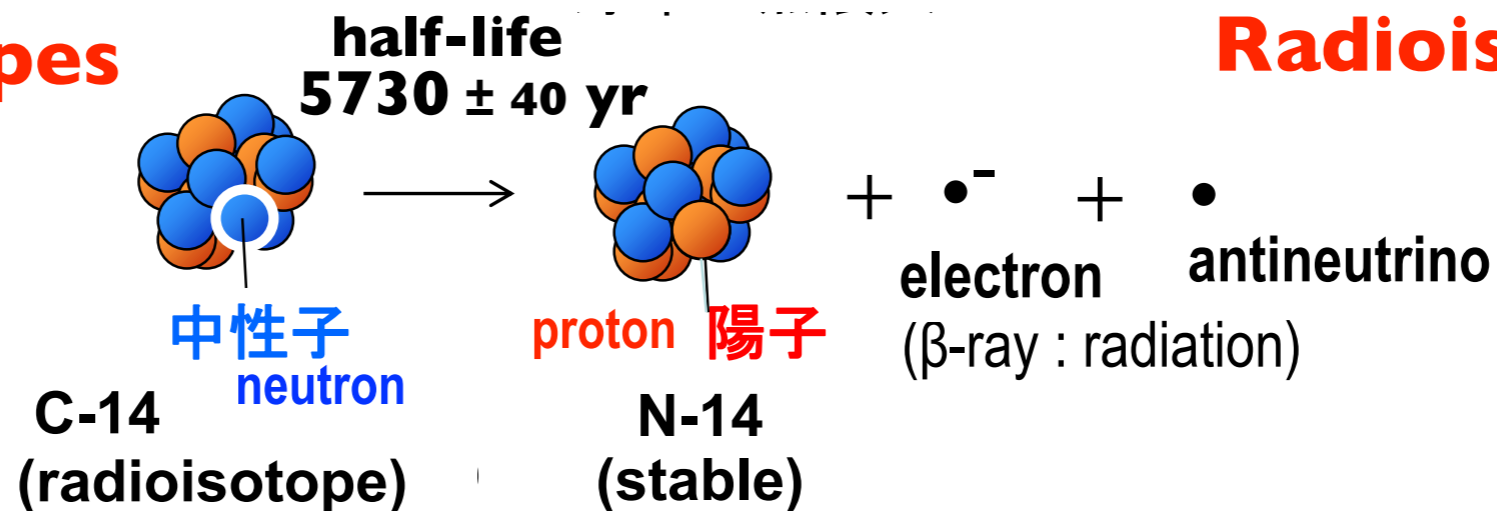
half-life	19.3 s	20.3 min	99% abundance	1%	5730 yr	2.4 s
	C-10	C-11	C-12	C-13	C-14	C-15
						
	^{10}C	^{11}C	^{12}C	^{13}C	^{14}C	^{15}C
proton number	6	6	6	6	6	6
neutron number	4	5	6	7	8	9

Proton-rich nuclei have a finite lifetime : β^+ -decay, Electron Capture

Stable isotopes have an infinite lifetime. They exist in nature.

Neutron-rich nuclei have a finite lifetime : β^- -decay.

Radioisotopes



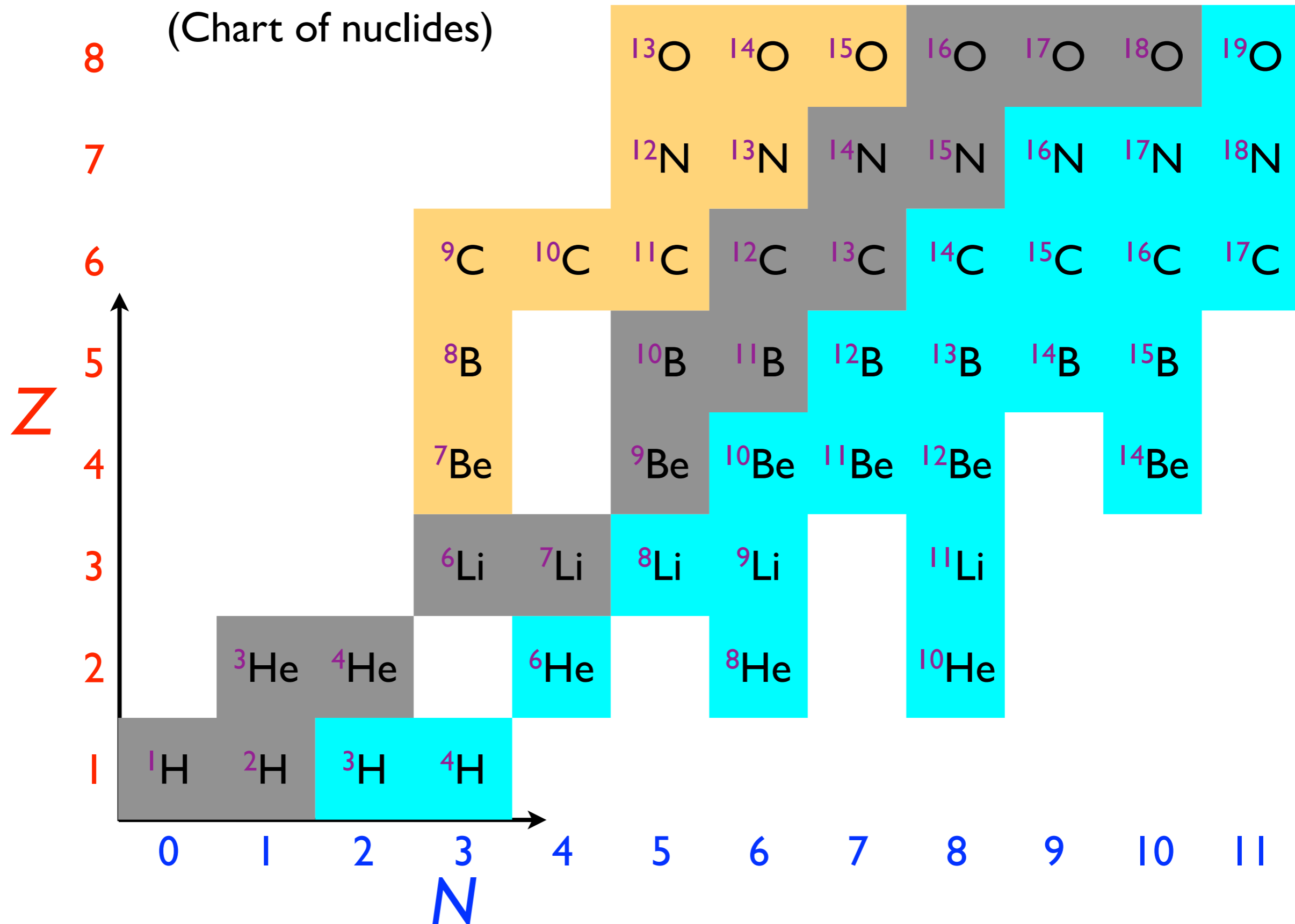
Radioisotopes

β^- (beta minus) decay



Nuclear chart 核図表

(Chart of nuclides)



Number of nuclides

Stable nuclides ca. 300

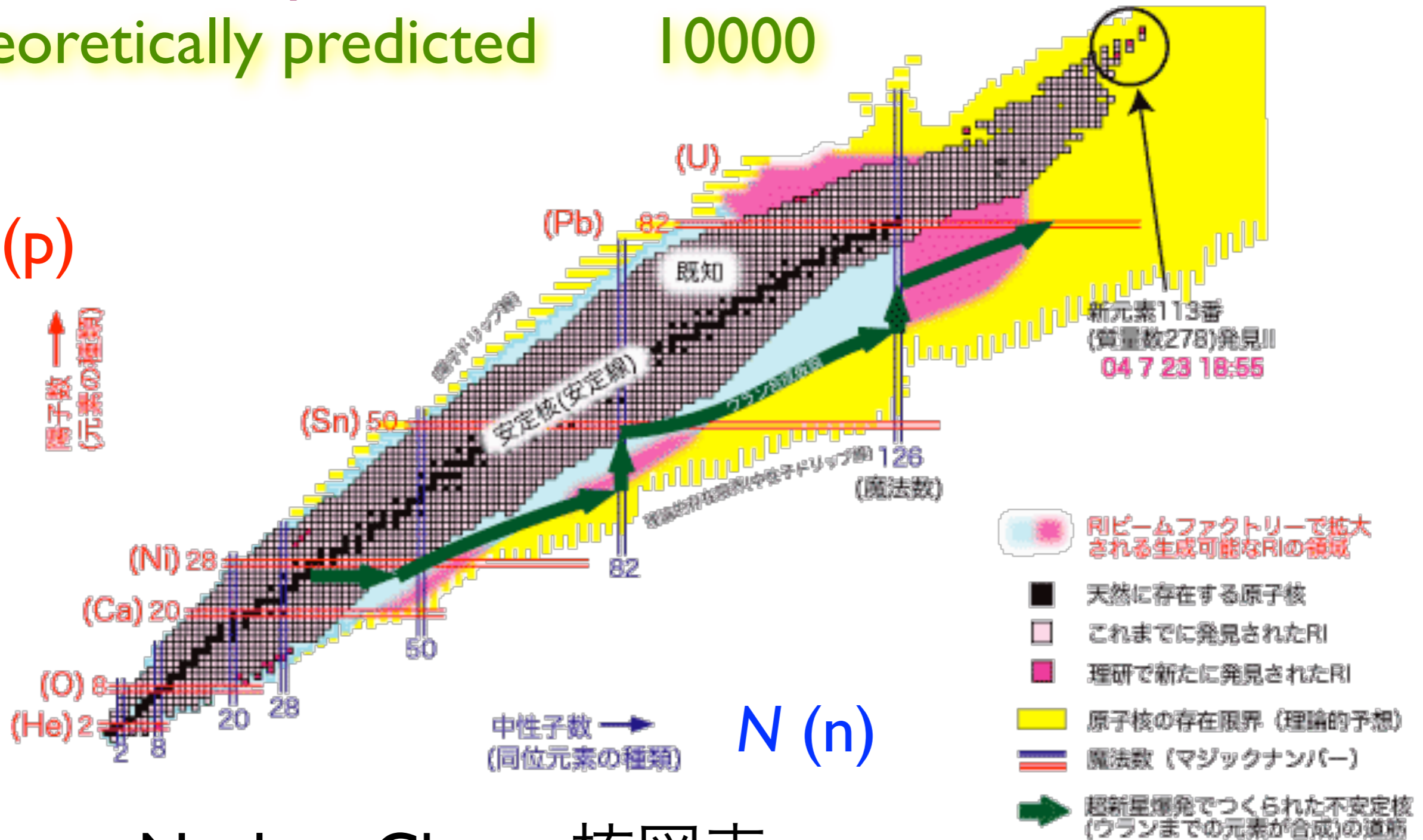
Experimentally confirmed 3000

Theoretically predicted 10000

原子核物理学

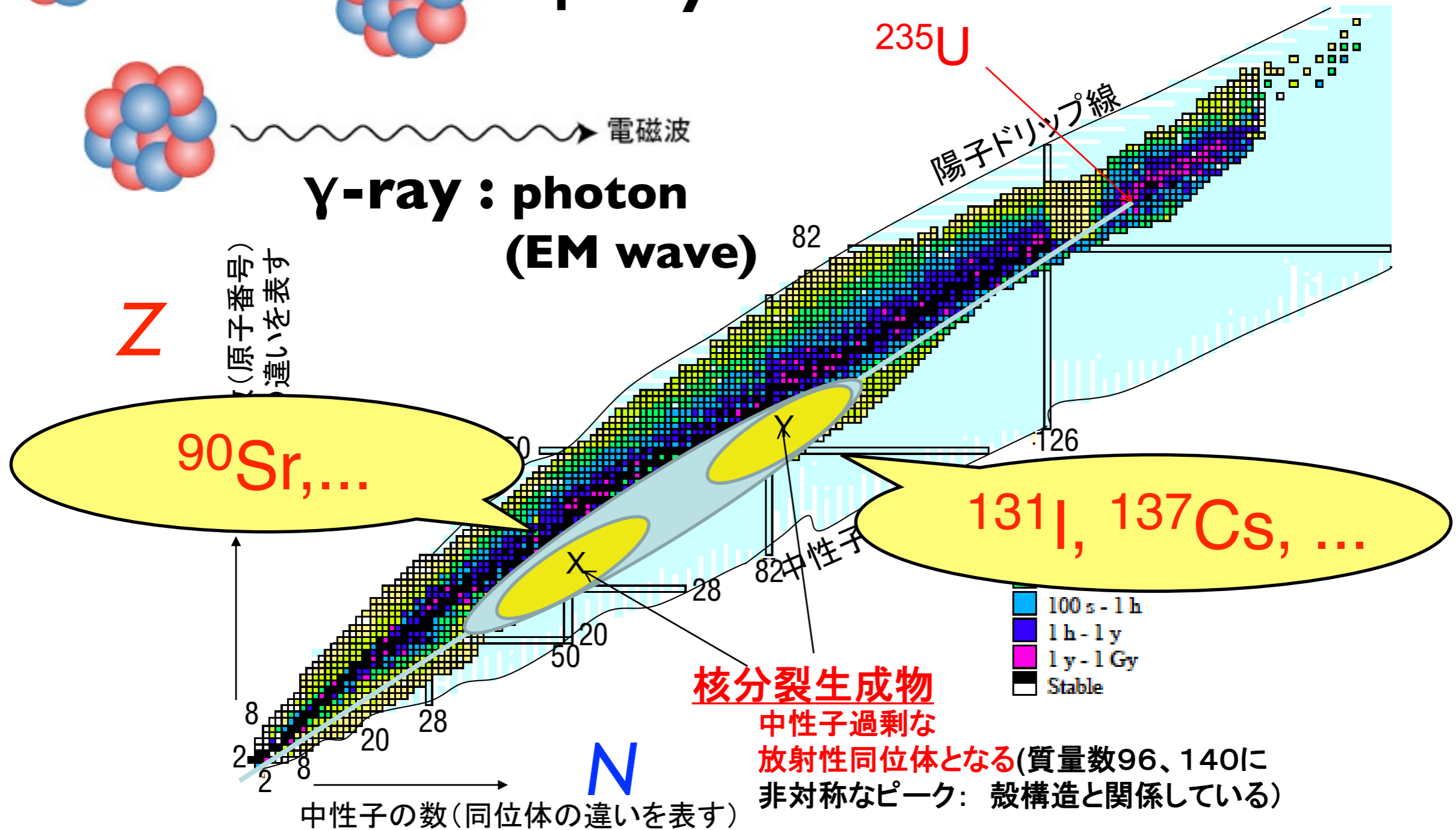
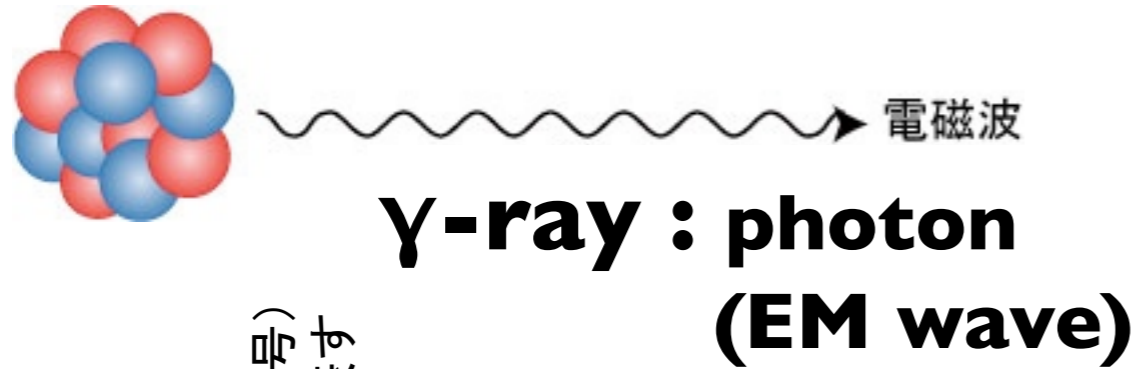
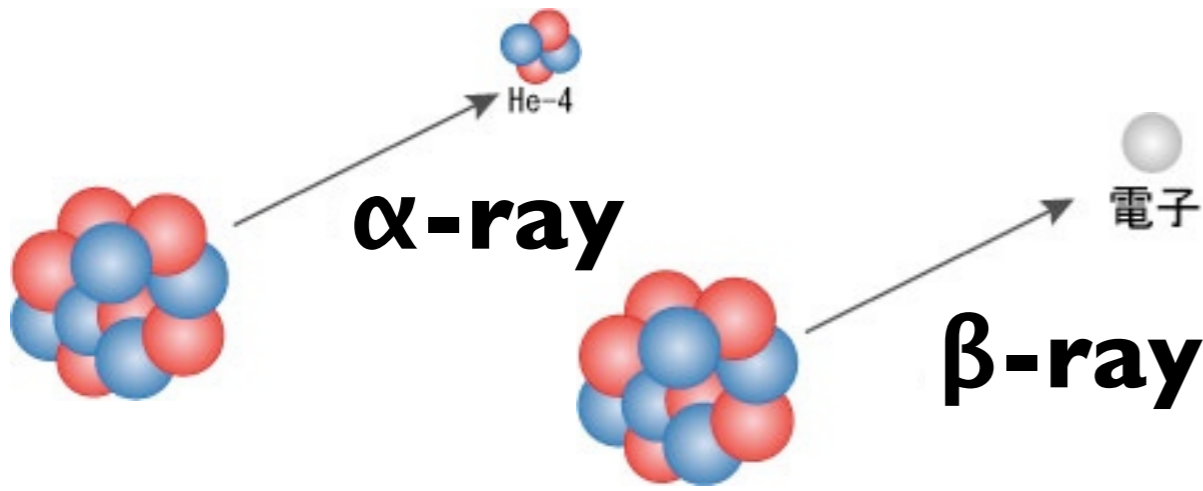
Nuclear Physics

Z (p)



Nuclear Chart 核図表

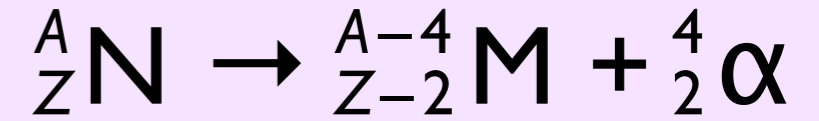
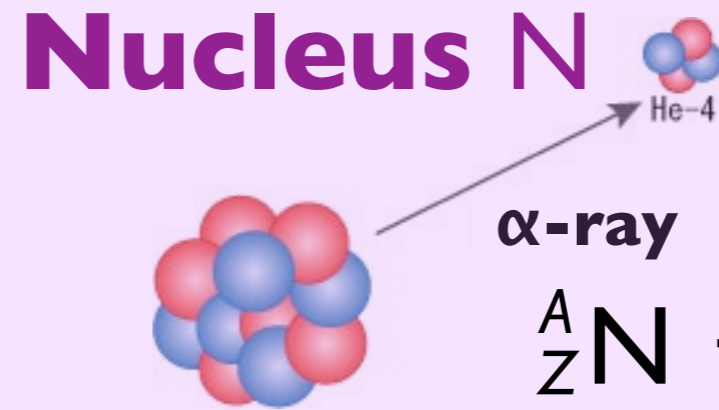
Radioactivity is the ability of radioactive materials to emit radiation.



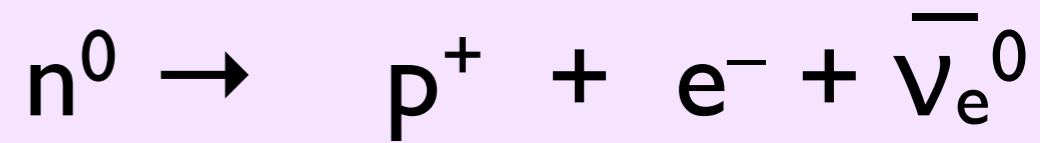
Nuclear Chart 核図表

α -decay

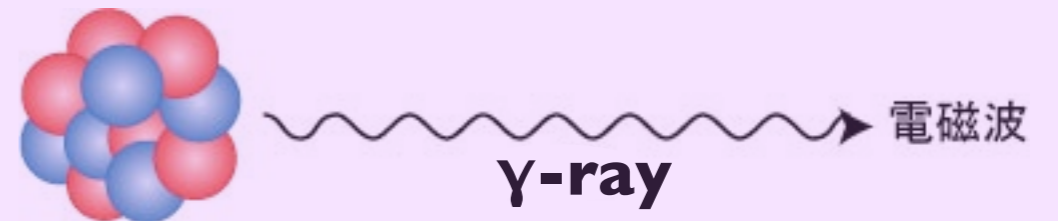
崩壞 (壞變)



β^- -decay



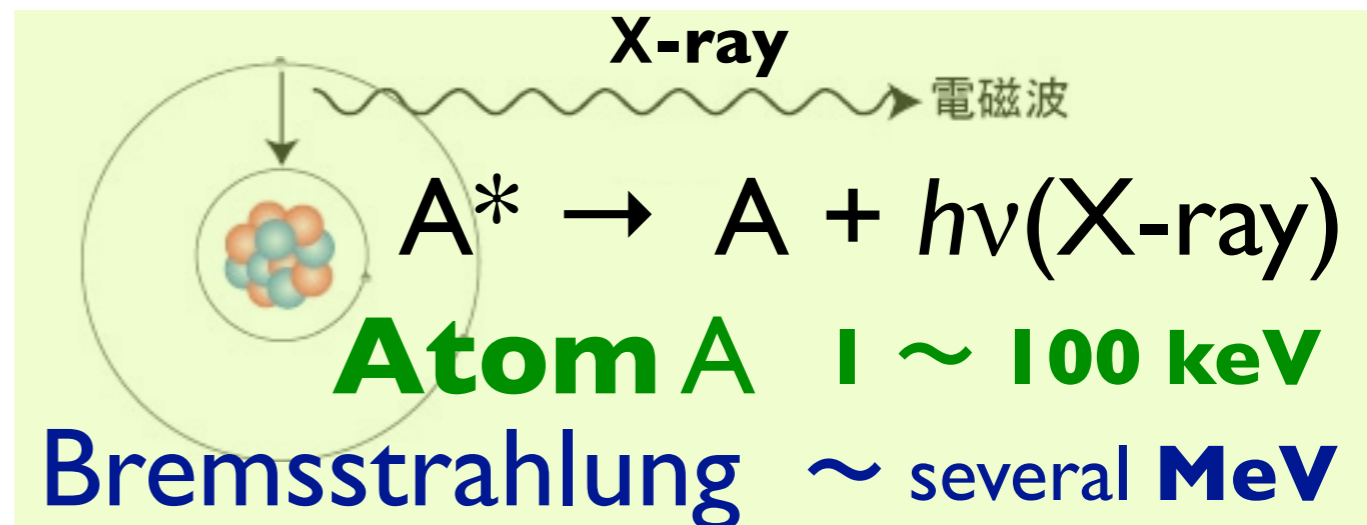
γ -decay



脱励起

deexcitation of atom

bremsstrahlung 制動放射



Grouping of nuclides

isotope	同位体	Z	${}^A_Z N_N$	${}^{A'}_{Z'} N_{N'}$	${}^{A''}_{Z''} N_{N''}$
isotone	同調体 (同中性子体)	N	${}^A_Z N_N$	${}^{A'}_{Z'} N_N$	${}^{A''}_{Z''} N_N$
isobar	同重体	A	${}^A_Z N_N$	${}^A_{Z'} N_{N'}$	${}^A_{Z''} N_{N''}$
mirror nuclei	鏡映核, 鏡像核	$A, Z \leftrightarrow N$	${}^A_Z N_N$	${}^A_{Z'} N_{N'}$	$Z' = N$ $N' = Z$
isodiapher	同余体	$N - Z$	${}^A_Z N_N$	${}^{A-2x}_{Z-x} N_{N-x}$	
isomer	核異性体	Z, N	${}^A_Z N_N$	${}^{Am_1}_{Z'} N_N^{(*)}$	${}^{Am_2}_{Z'} N_N^{(*)}$

原子核物理学

Nuclear Physics

β -decay

isobar
同重体

isotone
同調体

α -decay
isodiapher
同余体

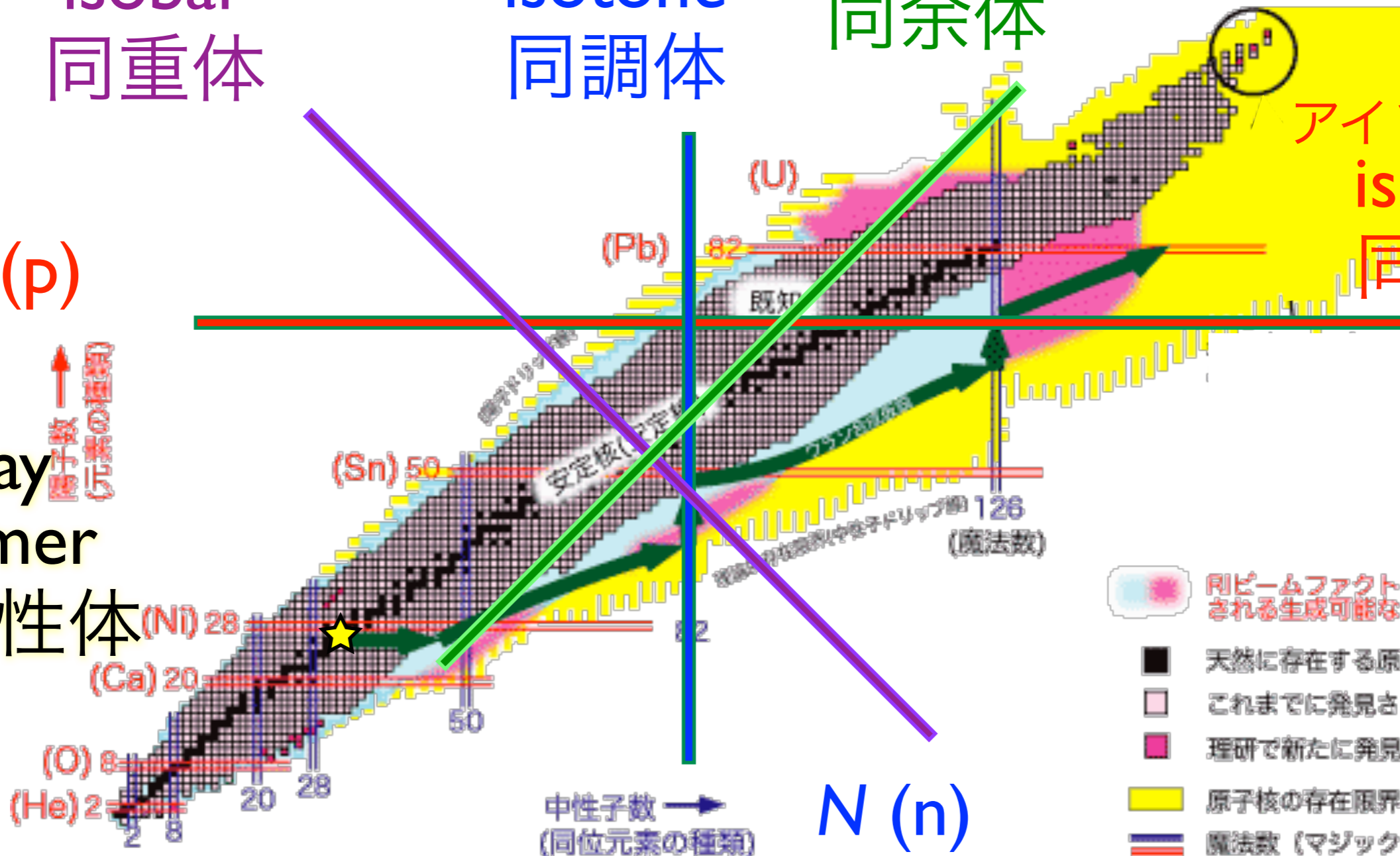
アイソトープ
isotope
同位体

Z (p)

↑ 原子序数 (元素の種類)

γ -decay
isomer

核異性体



中性子数 →
(同位元素の種類)

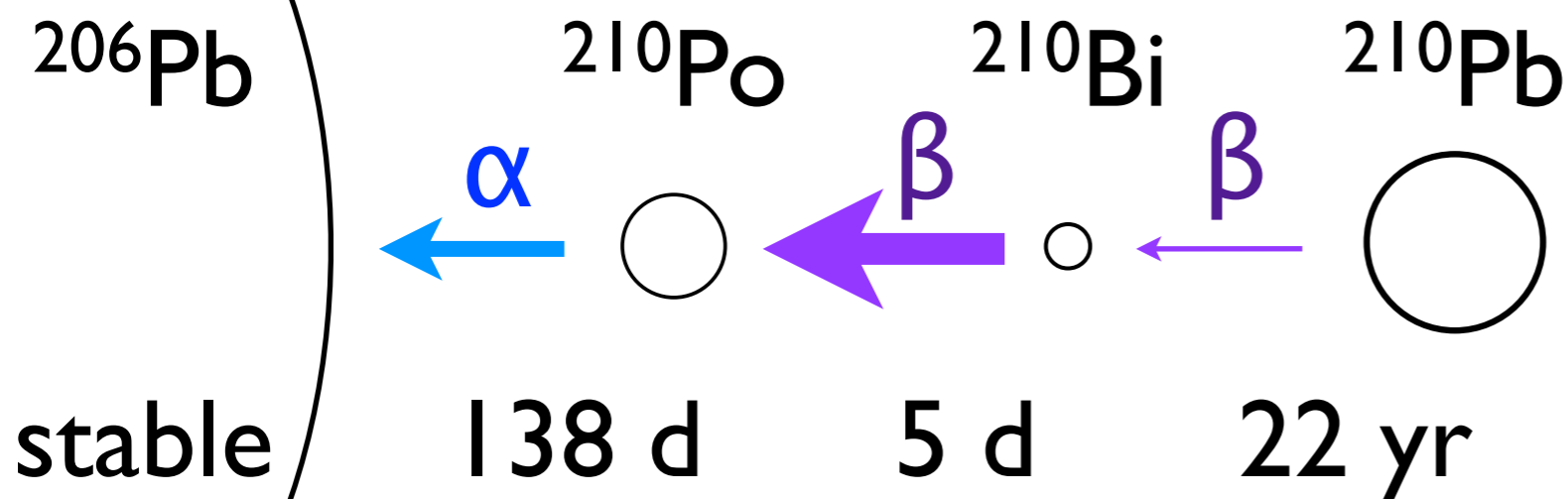
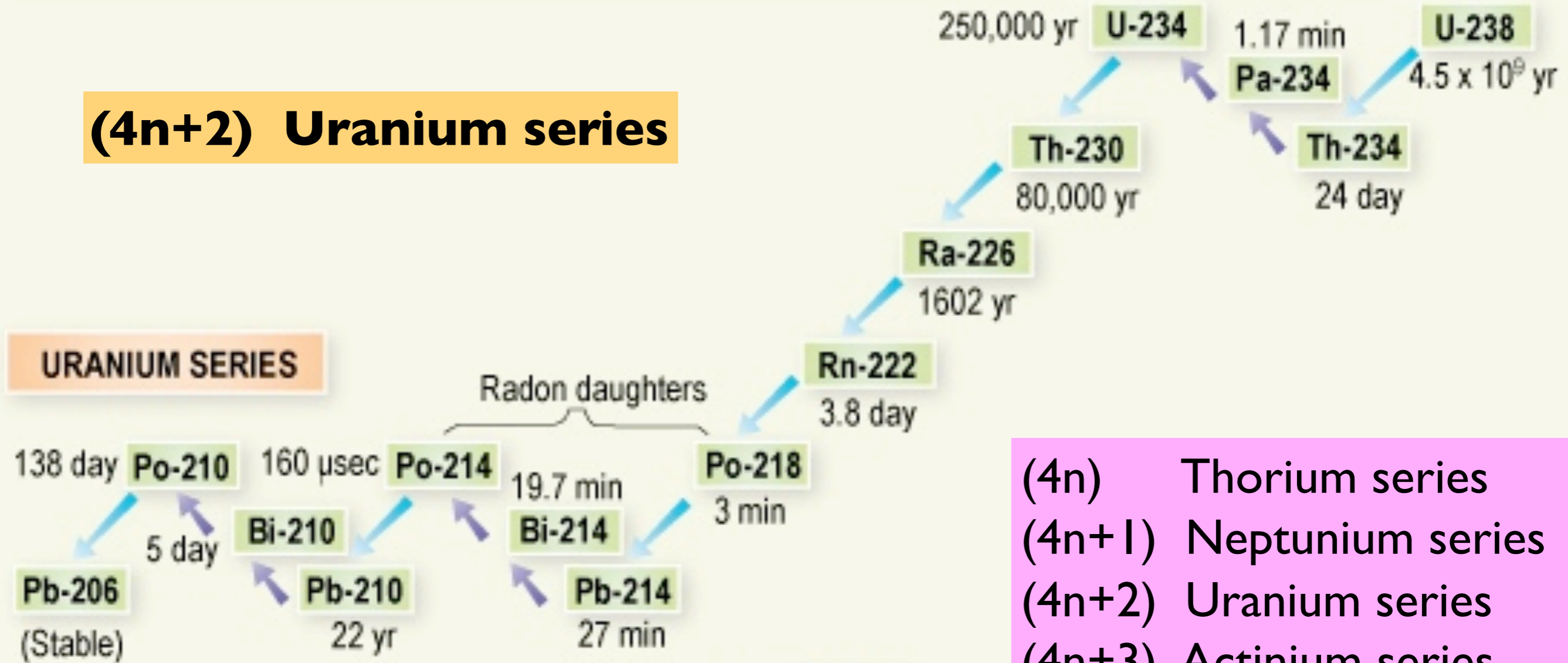
N (n)

- RIビームファクトリーで拡大される生成可能なRIの領域
- 天然に存在する原子核
- これまでに発見されたRI
- 理研で新たに発見されたRI
- 原子核の存在限界 (理論的予想)
- 魔法数 (マジックナンバー)
- 超新星爆発でつくられた不安定核 (ウランまでの元素が合成)の道筋

Nuclear Chart 核図表

Decay series

(4n+2) Uranium series



**radioactive
equilibrium**

Decay series

(4n+2) Uranium series

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3$$

$$\frac{dN_4}{dt} = \dots\dots\dots$$

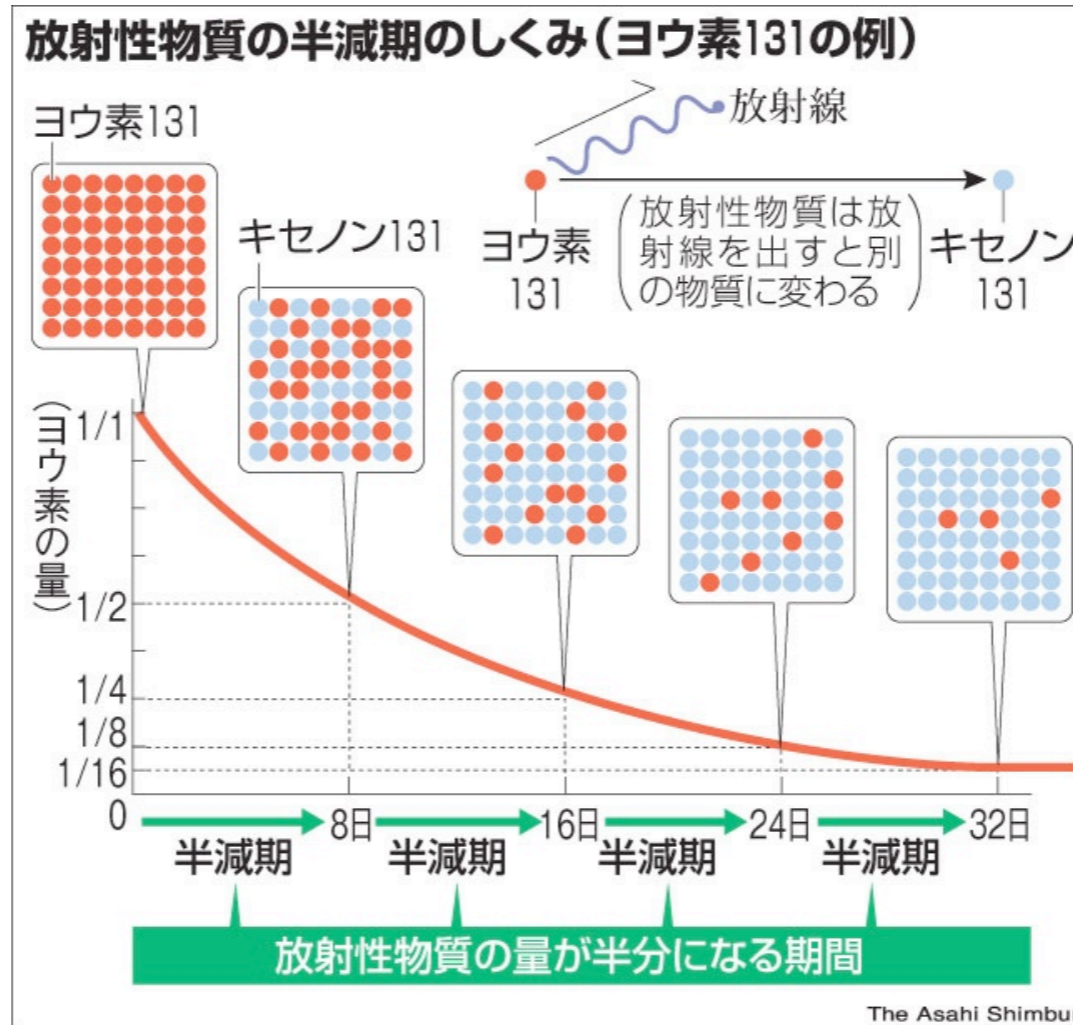
$\lambda = 1/\tau$ λ : decay rate, τ : lifetime

1.44 times half-life

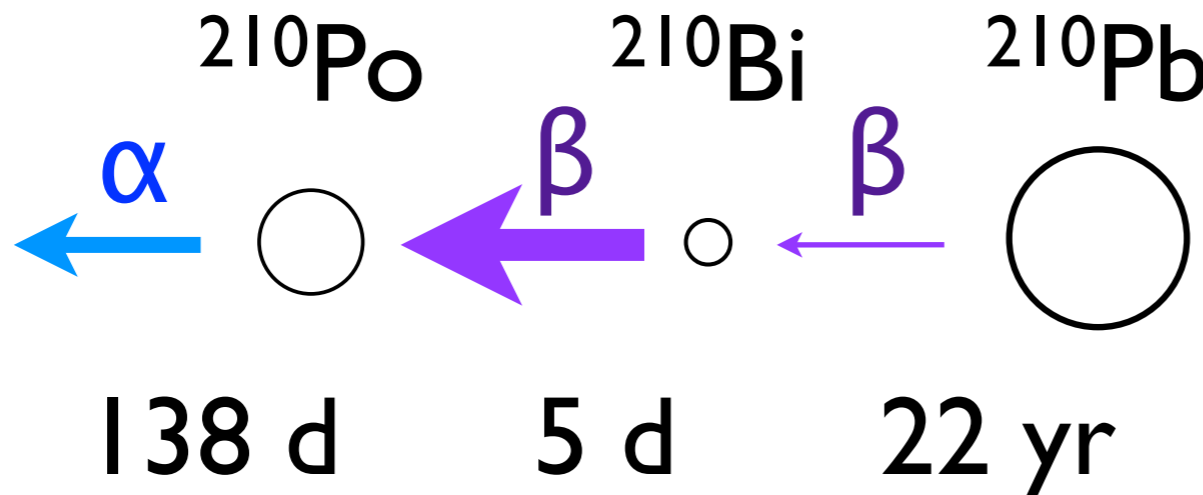
$$N_1 = N_{10} e^{-\lambda_1 t}$$

Decay rate is a constant.

Each decay occurs **stochastically** (by chance).



^{206}Pb
stable



radioactive equilibrium

Decay series

(4n+2) Uranium series

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3$$

$$\frac{dN_4}{dt} = \dots\dots\dots$$

$\lambda = 1/\tau$ λ : decay rate, τ : lifetime

1.44 times half-life

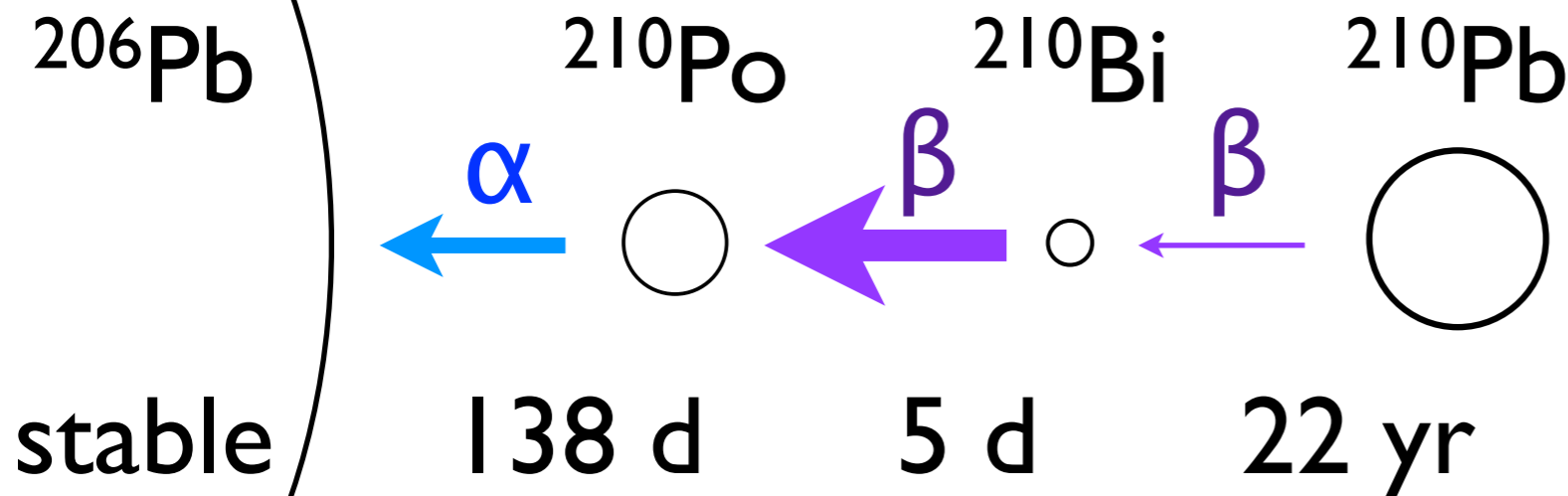
$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} \{e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\} + N_{20} e^{-\lambda_2 t}$$

$$N_2 \approx \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} e^{-\lambda_1 t}$$

transient equilibrium
($\lambda_1 < \lambda_2$, t is long enough.)

$$N_2 \approx \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1$$

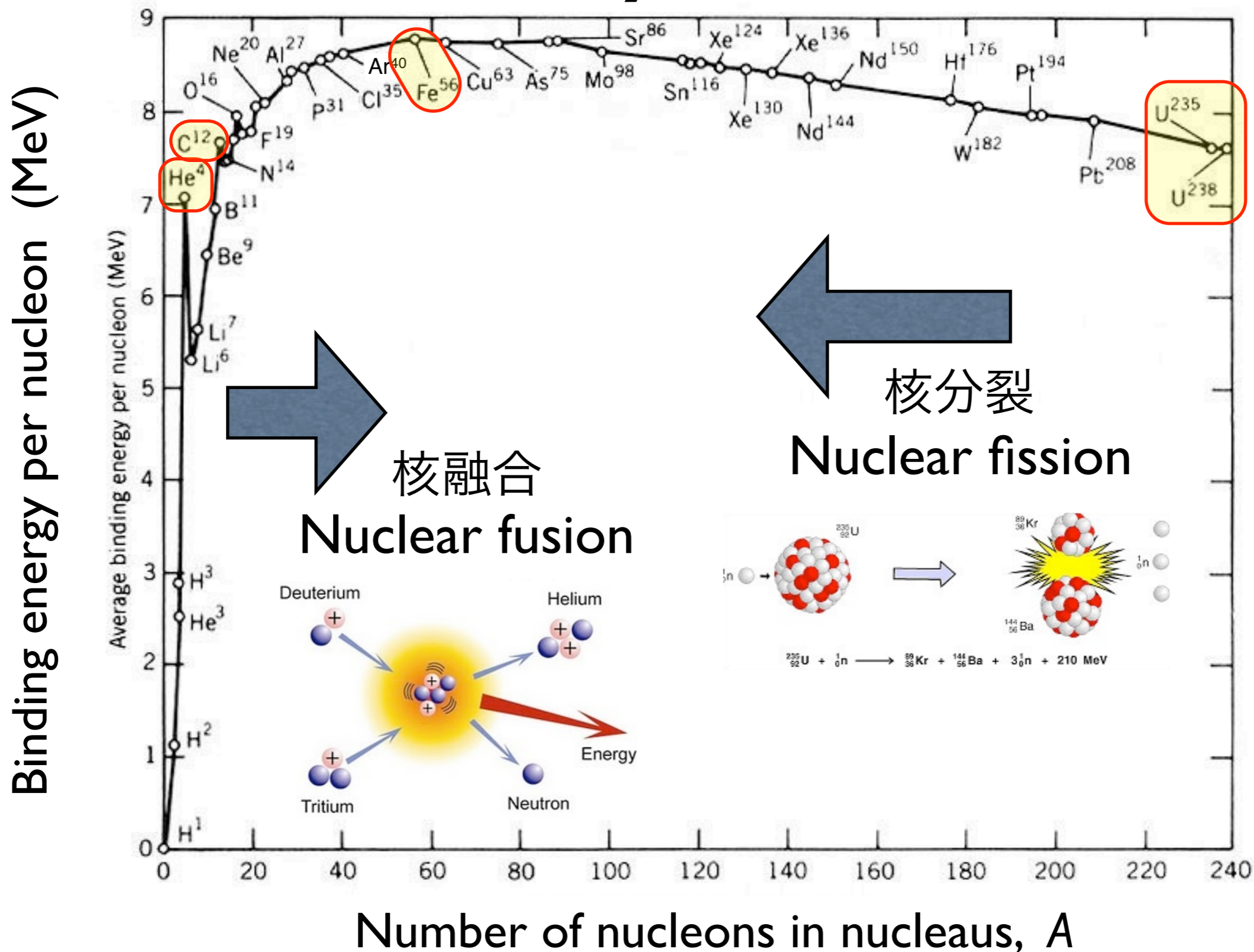
secular equilibrium
($\lambda_1 \ll \lambda_2$, τ_1 is very long.)



radioactive equilibrium

Nuclear physics : Model of nuclear structure

Stability of nuclei



Nuclear fusion

核融合

Synthesis of **helium** from **hydrogen** in **the sun**

nucleus = α

nucleus = p

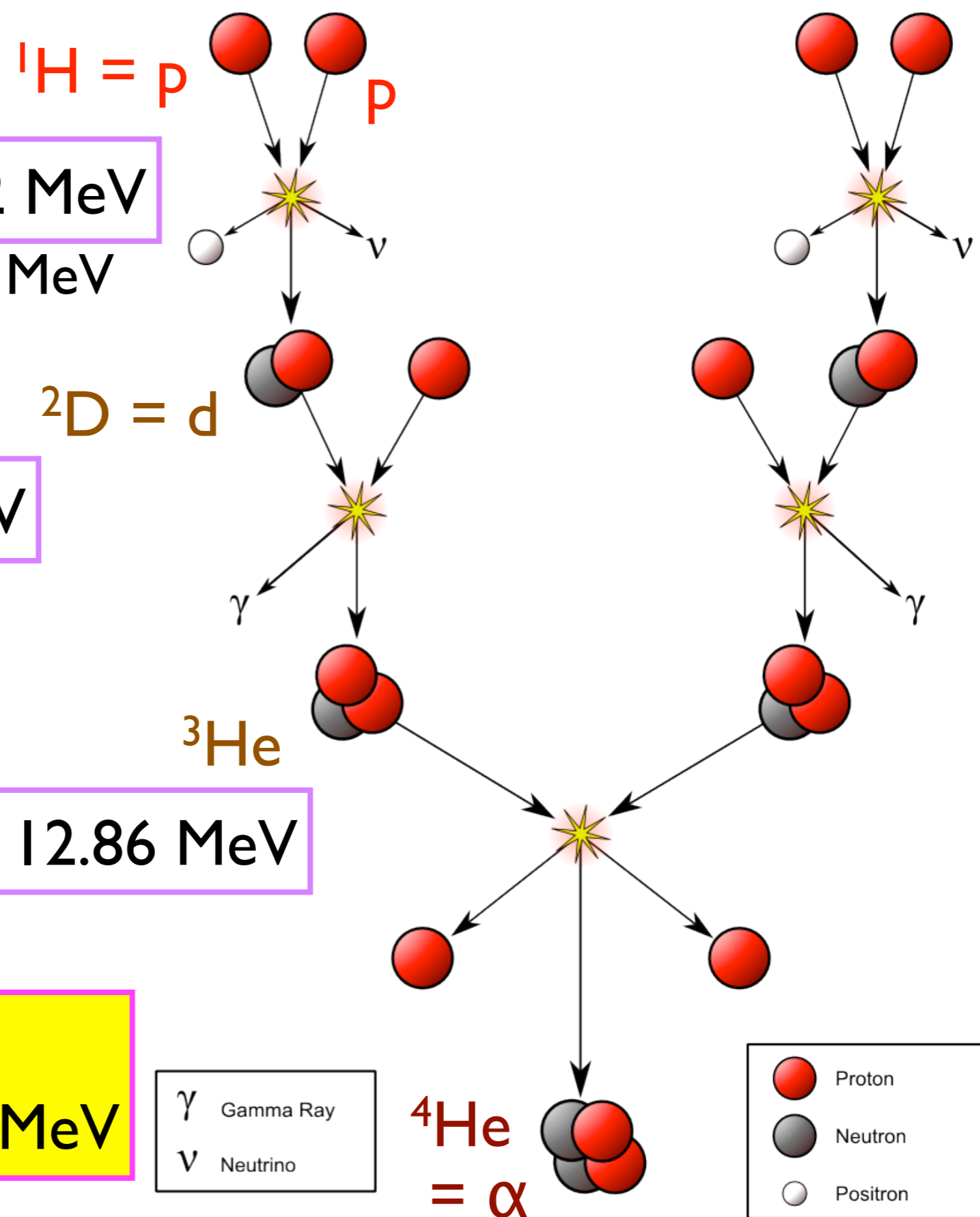
$${}^1\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{D} + e^+ + \nu_e + 0.42 \text{ MeV}$$

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma + 1.02 \text{ MeV}$$

$${}^1\text{H} + {}^2\text{D} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma + 5.49 \text{ MeV}$$

$${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^1\text{H} + {}^1\text{H} + 12.86 \text{ MeV}$$

$$4 {}^1\text{H} + 2 e^- \rightarrow {}^4\text{He} + 6 \gamma + 2 \nu_e + 26.65 \text{ MeV}$$



Weizsäcker-Bethe's (semi-empirical) mass formula

$$M_{\text{nucl}}(Z, N) = Z M_p + N M_n - E_B / c^2 \quad \text{liquid-drop model}$$

$$M_{\text{atom}}(Z, N) = Z M_H + N M_n - E_B / c^2 \quad \text{液滴モデル}$$

Binding energies of electrons are neglected.

$$E_B / c^2 = \Delta M \quad (\text{mass defect}) \quad (\text{質量欠損})$$

$$E_B(Z, N) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c Z^2 / A^{1/3} - \frac{a_a}{4} (N - Z)^2 / A - \delta$$

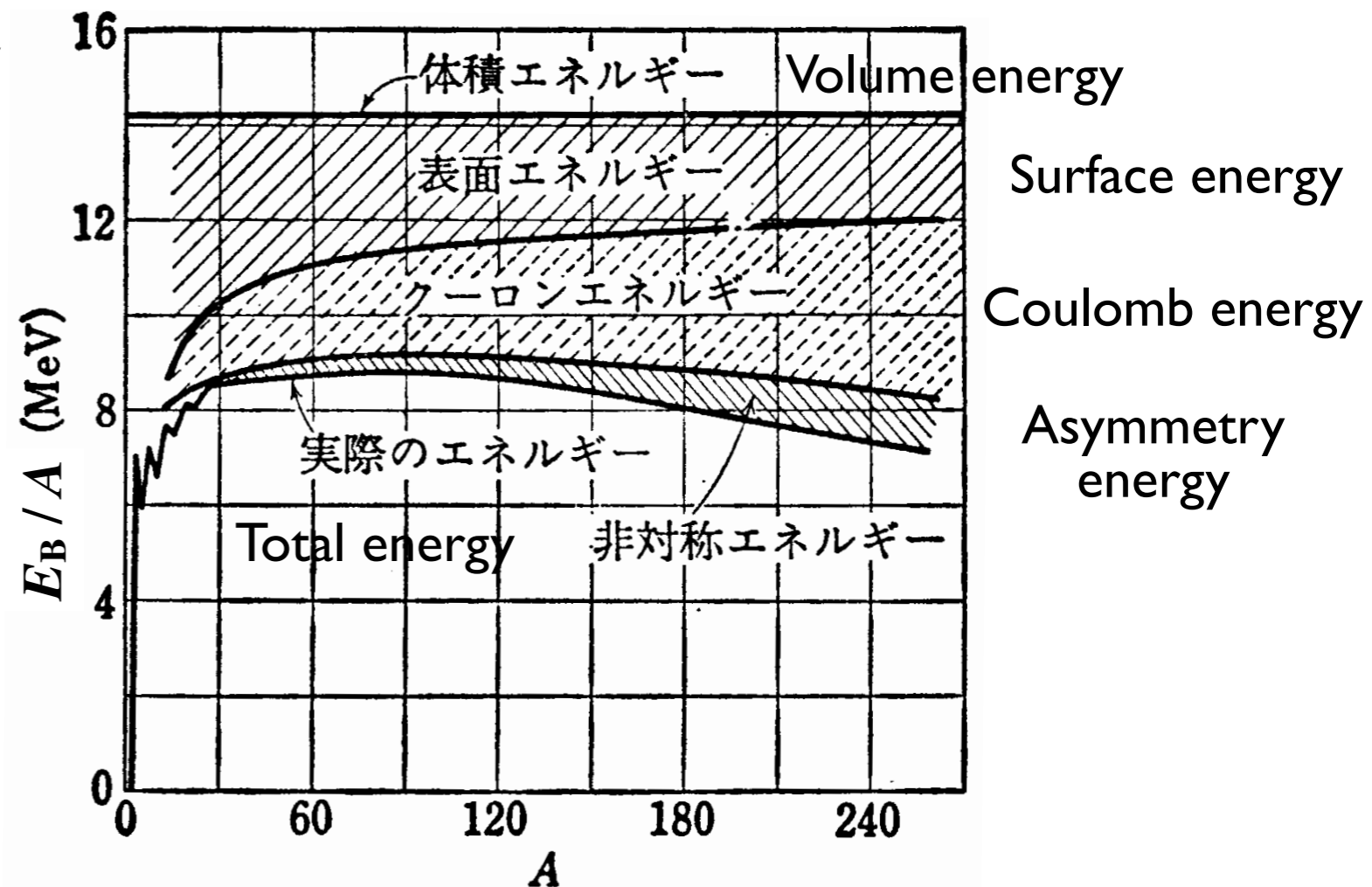
Volume energy

Coulomb energy

Asymmetry energy

Pair energy

Surface energy



「全原子核の地図」核図表とは

核図表の見かた

核図表

Chart of Nuclides

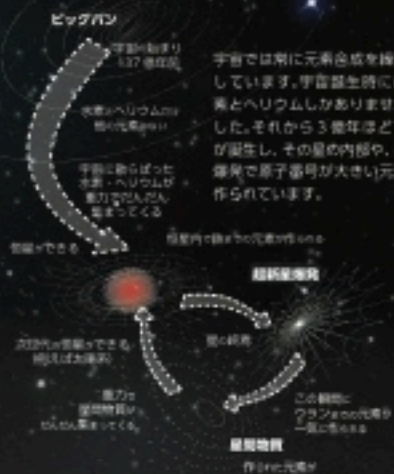
●今から 137 億年前、ビッグバンによって私たちの宇宙は生まれました。でもその時に存在した元素は水素とヘリウムだけ。それから 3 億年ほど経て星が生まれると、その中で重い元素が創られ始め、星の爆発に起きる超新星爆発で、より重い元素が一気に創られたと考えられています。私たちの体を含め、宇宙を構成する物質は全てこれらの元素から出来ています。一方、元素の本体は陽子と中性子からなる原子核です。陽子と中性子の微妙なバランスが崩れると原子核の成り立ちを崩すことは、物質の起源を調べることにはなりません。ここに核図表は全ての原子核を示した地図であり、元素合成と宇宙の歴史も対比されています。原子核は果たしてどのように生まれたのか、またどのようなものなのか、核図表と一緒に見てみましょう。

原子核の大きさ

原子の大きさは約 1000 万分の 1 mm、顕微鏡の顕微鏡でざりざり見える大きさです。しかし元素の本体は原子の中心にある原子核です。原子核の大きさは原子のさらに 10 万分の 1 ですから、まったく見ることは出来ません。たとえ見えなくても私たちは原子核が陽子 (+ の電気を持つ) と中性子 (電気を持たない) という 2 種類の粒の塊であることを知っています。



私たちの体は星くずでできている



皆さんご存知の周期表は、元素を原子番号順に並べた表です。性質の似た元素が縦に並ぶよう工夫されているから、色調という不思議な形状をしています。一方、核図表は単純に原子番号(つまり陽子)の数を増やして、陽子と中性子の数を横軸に並べた原子核の表です。原子核は陽子数と中性子数によっておよそ 1 万種類あると言われていて、同じ陽子数(元素)でも様々な中性子数の原子核が存在することがこの表からわかります。同じ元素で、違った中性子数である元素を「同位元素」と言います。この表の「高さ」というか「谷」の深さはそれぞれの原子核の結合エネルギーを示しています(深い方が強い)。結合力の強い安定核(0)が、あたかも谷筋を流れる川のようなので、これを「ハイゼンベルグ」の谷と呼びます。

縦軸は陽子数であり、元素の種類でもあります。下から上に向かって陽子数が増えていくため、周期表の表と一緒です。横軸は中性子数で左から右に向かって中性子の数が増えていきます。つまり横一線では同じ陽子数で、違う中性子数で構成される同位元素になります。

高い谷は安定核^①、という。天然に存在する原子核です。オレンジ色の所はこれまでに発見、合成された原子核です。白い所は理論的に存在するとされる原子核で未発見の原子核です。高さは結合エネルギー^②を表していて、高いほど原子核が不安定といえます。

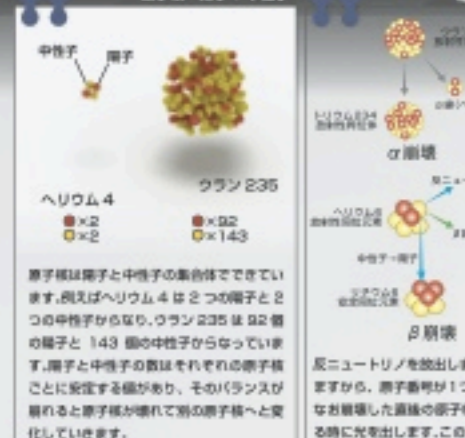
原子核の表記方法

陽子 + 中性子数 元素記号
例: 陽子 2、中性子 2 → ${}^4_2\text{He}$
例: 陽子 13、中性子 13 → ${}^{26}_{13}\text{Al}$

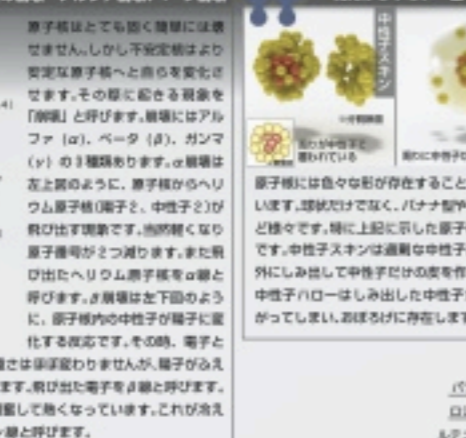
真上からみた立体核図表



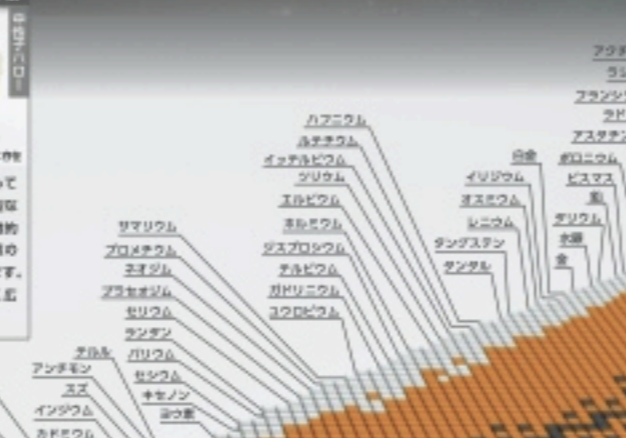
1 2 原子核 = 陽子 + 中性子



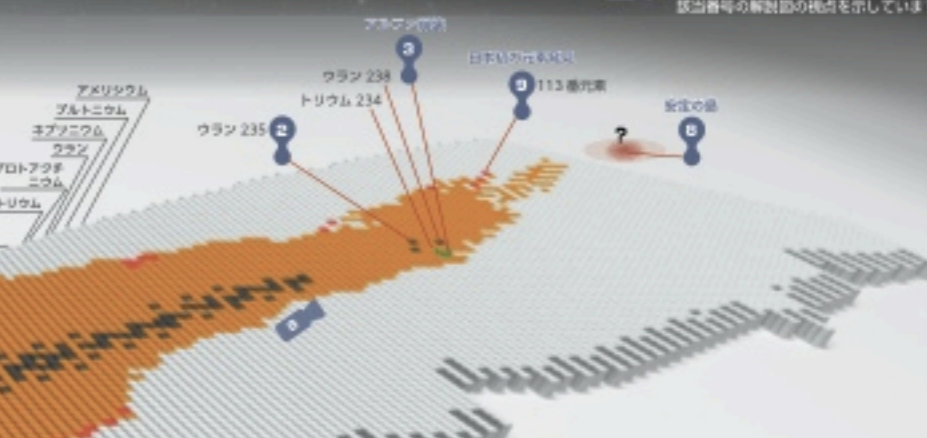
3 4 原子核の崩壊 - アルファ崩壊、ベータ崩壊



5 6 塊だけじゃない - 色々な原子核



7 8 9 10 11 不安定核を介して鉄より重い元素が出来る



7 魔法数(マジックナンバー)

原子核の安定には陽子数と中性子数のバランスが大切。これと関係がある数字が、魔法数と呼ばれる。2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 である。例えば、カルシウムは陽子数 20 ですから魔法数です。そのため、魔法数の原子核は、中性子が多くなっても、安定な原子核があるのが分かります。

10 陽子数(元素の種類)

縦軸の数字は陽子数(元素の種類)を示しています。横軸の数字は中性子数を示しています。同じ陽子数でも、中性子数が異なる原子核(同位元素)が存在します。

10 魔法数

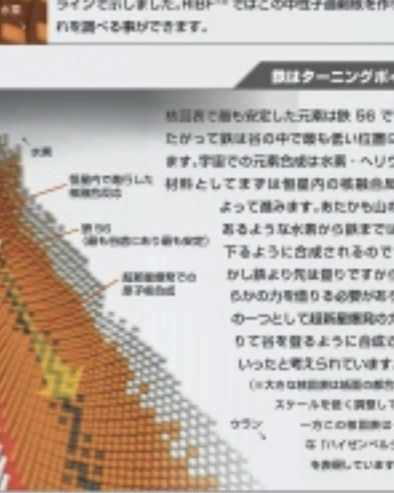
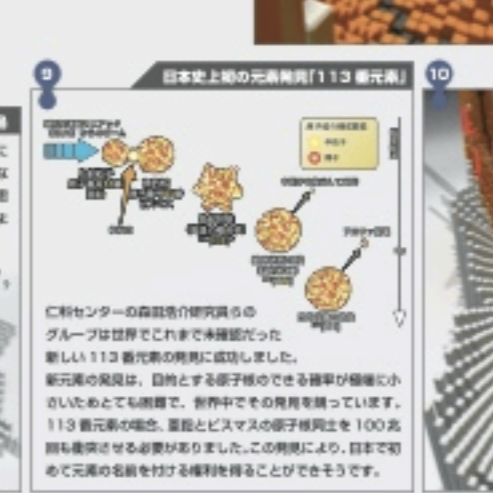
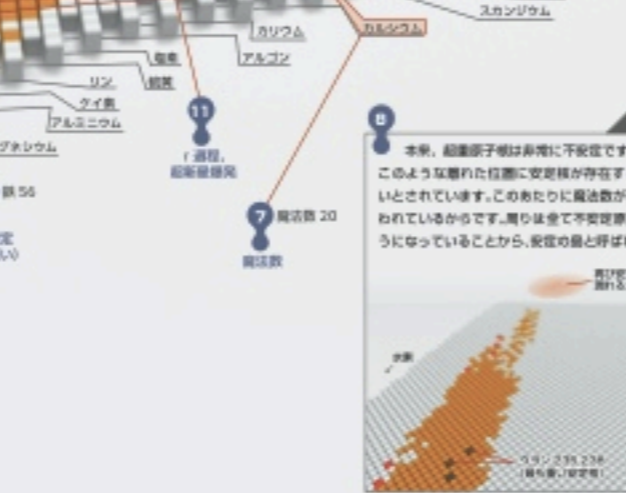
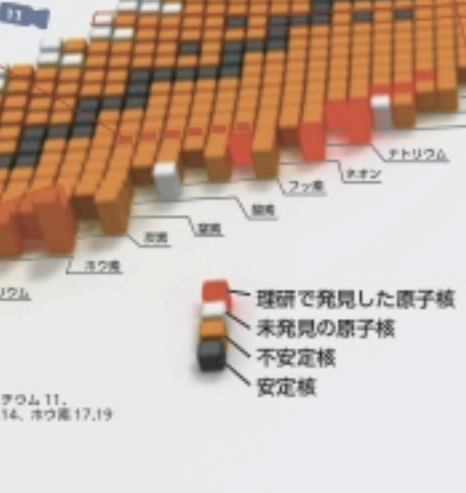
魔法数は、2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 の数字です。魔法数の原子核は、中性子が多くなっても、安定な原子核があるのが分かります。

9 日本史上初の元素発見(113 番元素)

2016 年、理研の超新星実験施設で、113 番元素(鉈)が初めて発見されました。これは、日本史上初の元素発見です。

10 鉄はターニングポイント

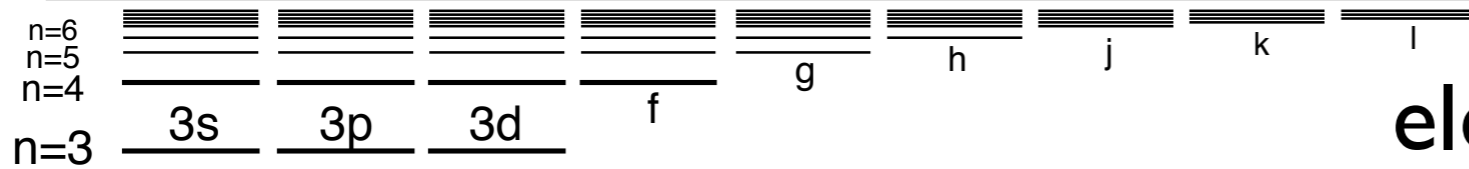
鉄はターニングポイントです。鉄より重い元素は、超新星爆発の際にのみ生成されます。鉄は、星のエネルギーを消費し、星の崩壊を引き起こす原因となります。



① 113 番元素は、理研の超新星実験施設で発見された。② 結合エネルギーは、原子核の安定性を示す指標である。③ 魔法数は、2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 の数字である。④ 日本史上初の元素発見は、2016 年に理研の超新星実験施設で行われた。⑤ 鉄は、星のエネルギーを消費し、星の崩壊を引き起こす原因となる。⑥ 113 番元素は、鉈であり、元素記号は Nh である。

Atomic energy levels

continuum 連続状態



electron mass $m_e = 511 \text{ keV}/c^2$

bound states 束縛状態

discrete energy levels 離散のエネルギー準位

difficult to memorize

$$-E_B = -\frac{2\pi^2 k_0^2 m_e e^4}{h^2} \frac{Z^2}{n^2} = -\frac{m_e e^4}{8 \epsilon_0^2 h^2} \frac{Z^2}{n^2}$$

$$-E_B = -hc R_\infty \frac{Z^2}{n^2} \quad R_\infty : \text{Rydberg constant}$$

$$\hbar \equiv \frac{h}{2\pi}, \quad \alpha \equiv \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} \approx \frac{1}{137} \quad \begin{array}{l} h : \text{Planck constant} \\ \alpha : \text{fine structure constant} \end{array}$$

$$n=1 \quad \frac{1s}{-13.6 \text{ eV}} \quad \text{(hydrogen atom)}$$

$$E_B(\text{H}) = \frac{M}{M+m} E_B$$

$$-E_B = -\frac{1}{2} m_e c^2 \alpha^2 \frac{Z^2}{n^2}$$

(dimensionless)

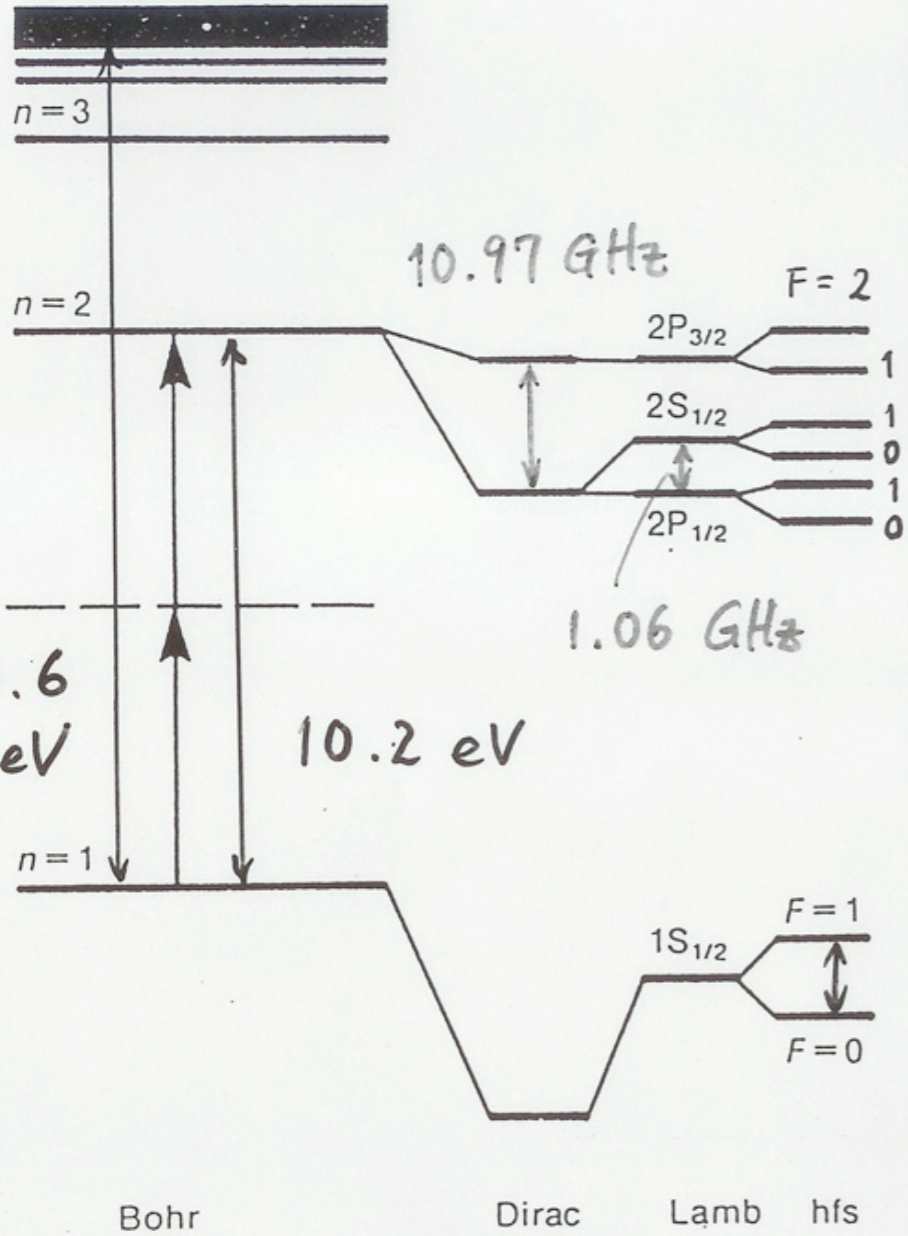
$$v_e = c \alpha \frac{Z}{n}$$

Z large $\rightarrow E_B = h\nu$ large : X-ray

Hydrogen atom

Antihydrogen atom

HYDROGEN



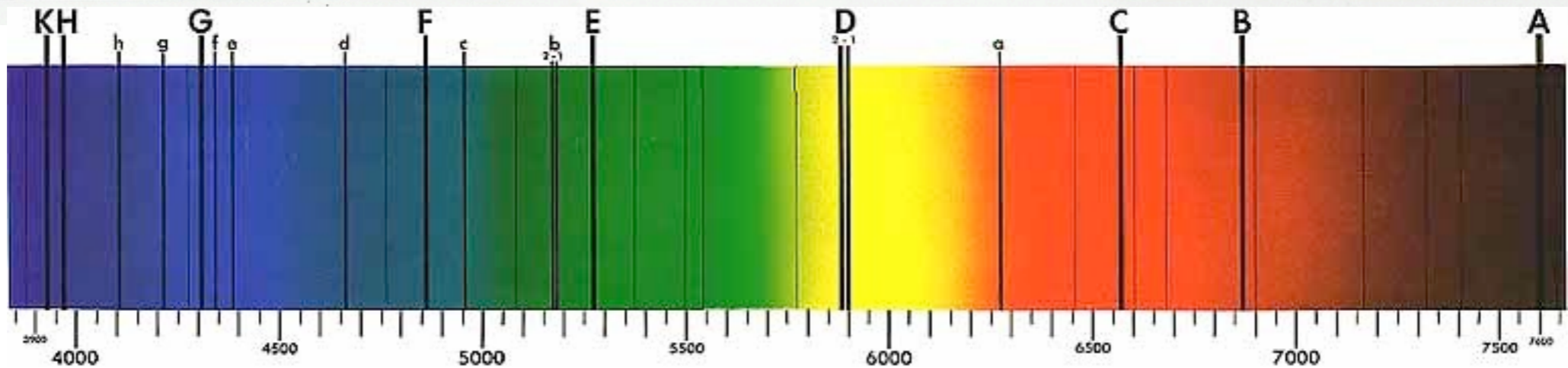
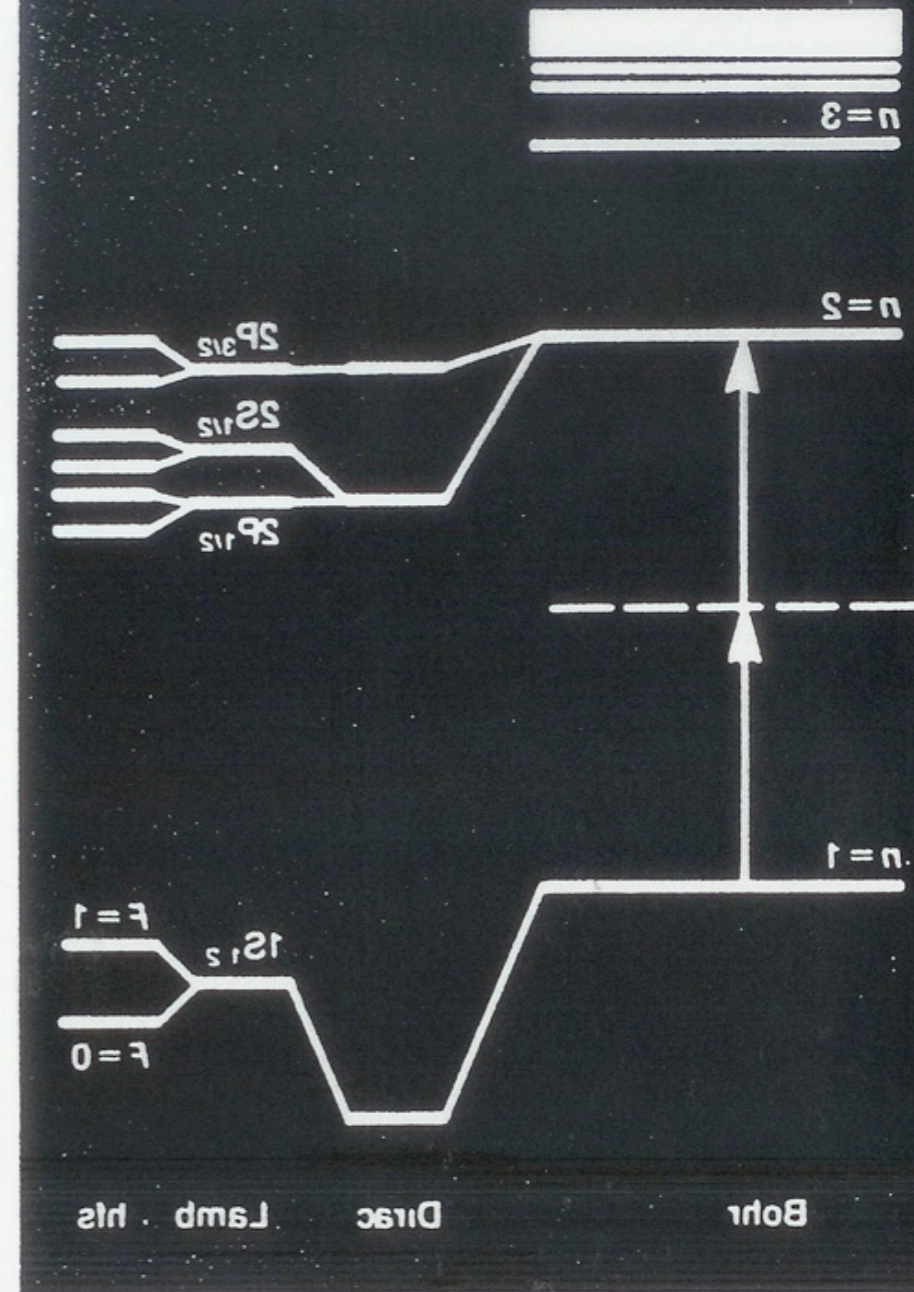
$\updownarrow 24 \text{ MHz}$
 $\updownarrow 178 \text{ MHz}$
 $\updownarrow 59 \text{ MHz}$

1.42 GHz

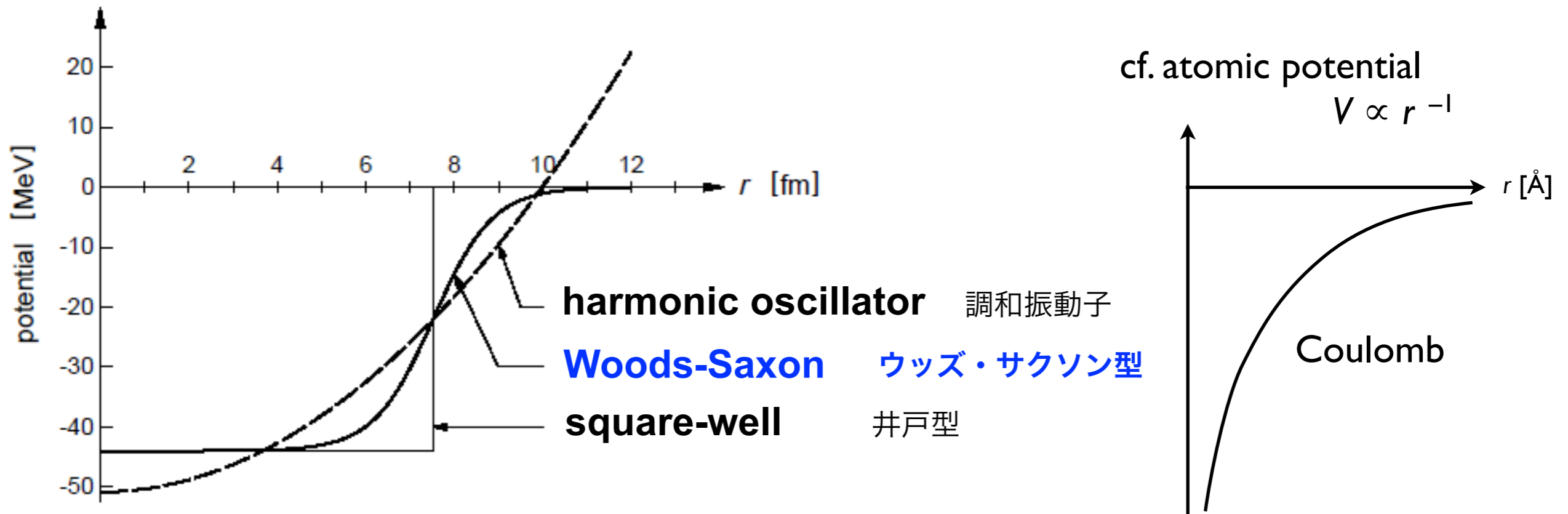
$\frac{97492}{\text{cm}^{-1}}$
 $\frac{82259.279}{\text{cm}^{-1}}$
 $\frac{82258.949}{\text{cm}^{-1}}$
 $\frac{82258.913}{\text{cm}^{-1}}$

$\frac{0.000}{\text{cm}^{-1}}$

ANTIHYDROGEN



Nuclear potential



Nuclear size $r = 1.2 A^{1/3}$ fm (1 fm = 10^{-15} m)

Nuclei have a constant (saturated) density.

Nuclear force = **“Strong Interaction”** 「強い相互作用」

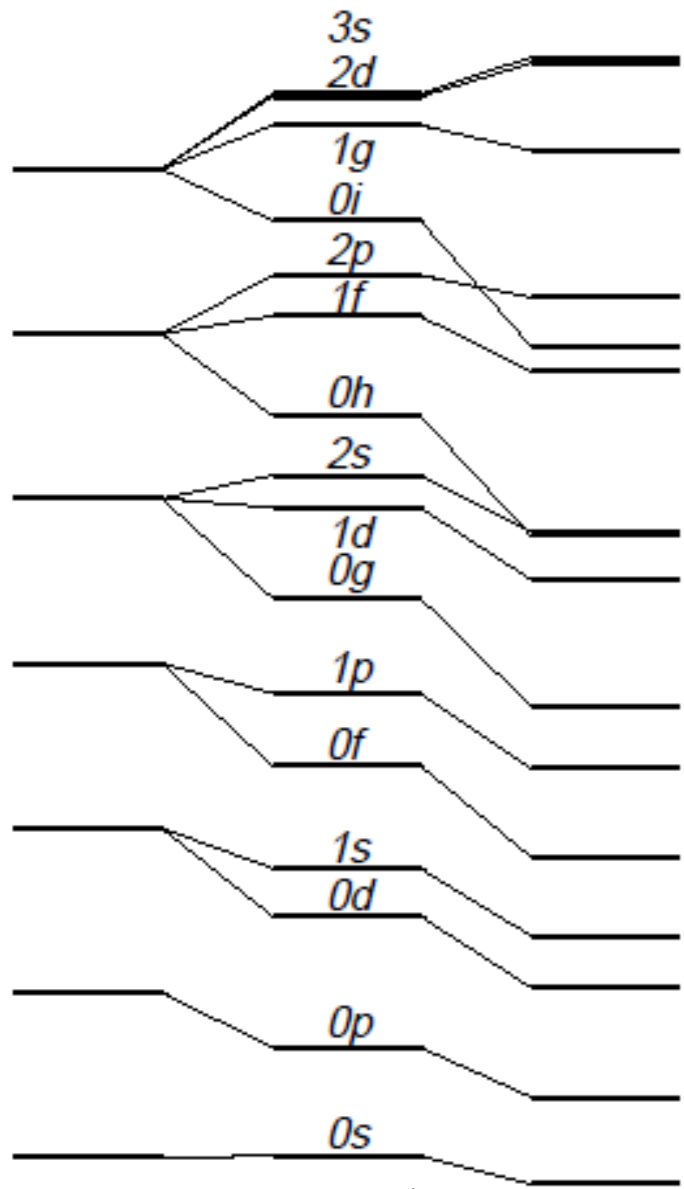
The range of the force \approx nuclear size. **Yukawa potential** $1/\kappa = \hbar / m_{\pi}c$

Yukawa’s meson theory $V(r) \propto -\frac{e^{-\kappa r}}{r}$

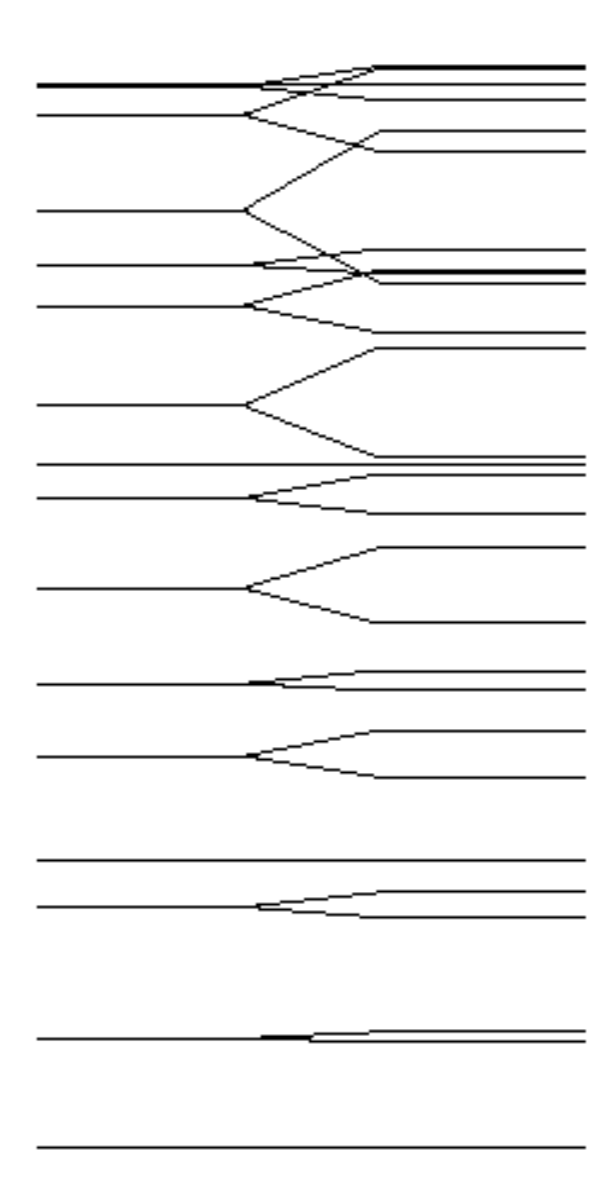
β -decay : **“Weak Interaction”** 「弱い相互作用」

Shell model of nuclear structure

原子核構造の殻模型



1g	18	154
0i	26	136
2p	6	110
1f	14	106
0h	22	92
2s	2	70
1d	10	68
0g	18	58
1p	6	40
0f	14	34
1s	2	20
0d	10	18
0p	6	8
0s	2	2



1g _{7/2}			
2d _{3/2}			
2d _{5/2}			
1g _{9/2}			
2p _{1/2}			
1f _{5/2}			
2p _{3/2}			
0i _{13/2}			
1f _{7/2}			
0h _{9/2}			
0h _{11/2}			
2s _{1/2}			
1d _{3/2}			
1d _{5/2}			
0g _{7/2}			
0g _{9/2}			
1p _{1/2}			
1p _{3/2}			
0f _{5/2}			
0f _{7/2}			
1s _{1/2}			
0d _{3/2}			
0d _{5/2}			
0p _{1/2}			
0p _{3/2}			
0s _{1/2}			
		2	2
		8	8
		20	20
		28	28
		50	50
		82	82
		126	126

harmonic oscillator
調和振動子

Woods-Saxon
ウッズ・サクソン型

square-well
井戸型

Woods-Saxon potential
ウッズ・サクソン型ポテンシャル

+ spin-orbit coupling
+ スピン軌道結合

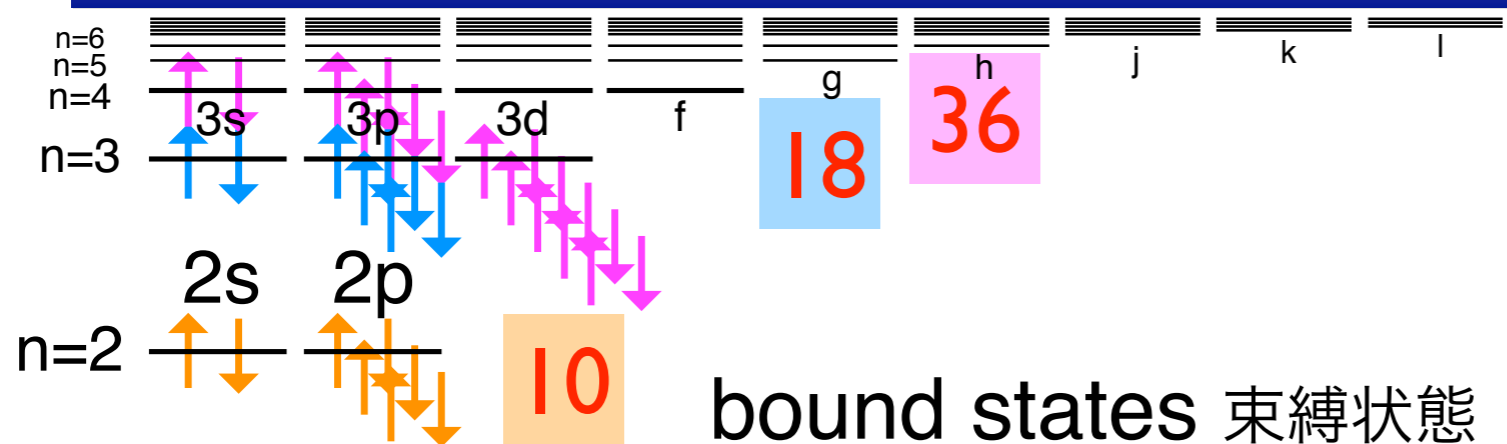
magic number
魔法数

(*) Usual convention takes the principal quantum number larger by unity than that in this diagram. 主量子数はこの図より1つ大きく取る場合の方が一般的

(The order of levels is slightly different for actual nuclei.)

Energy level of atoms

continuum 連続状態



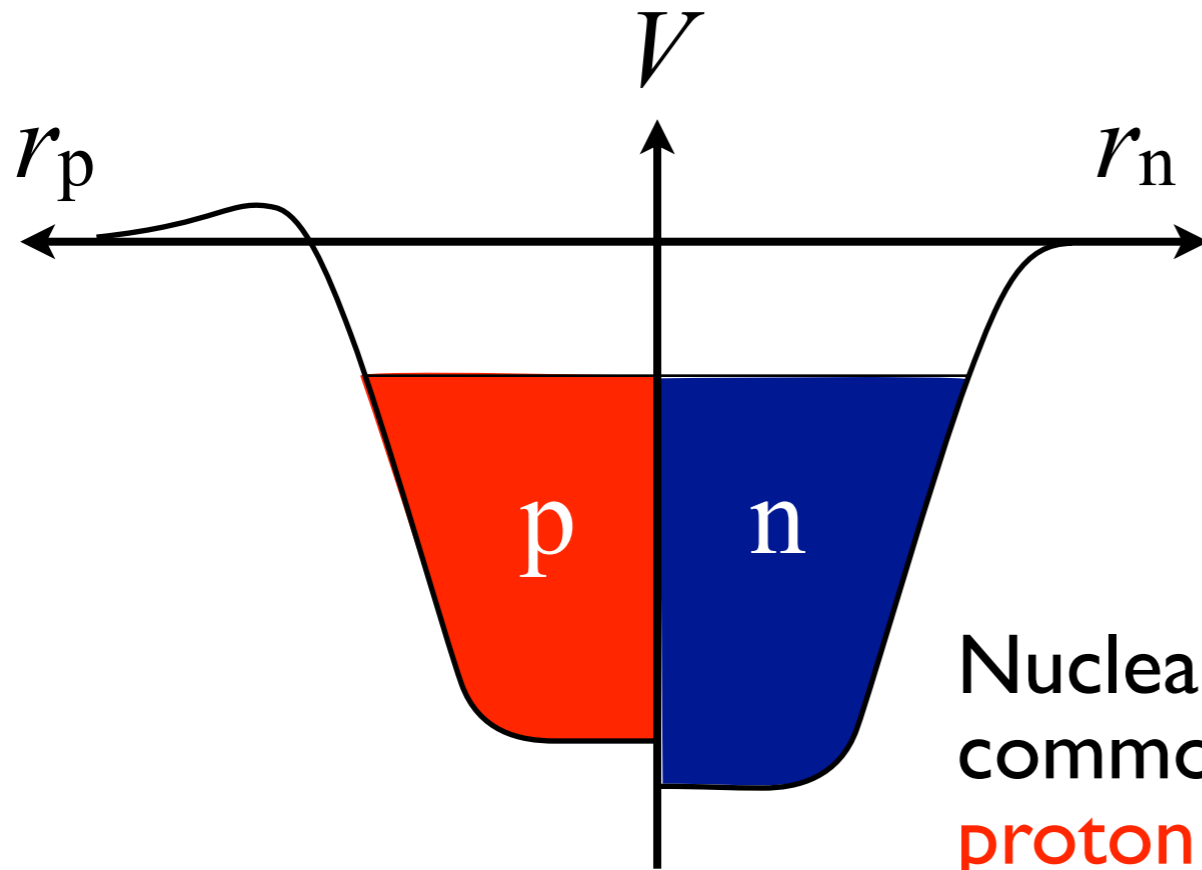
n=1 $1s$ $\uparrow\downarrow$ 2 closed shell
閉殻

magic number	electron configuration	element
2	$1s^2$	He
10	$1s^2 2s^2 2p^6$	Ne
18	$[Ne] 3s^2 3p^6$	Ar
36	$[Ar] 4s^2 3d^{10} 4p^6$	Kr
54	$[Kr] 5s^2 4d^{10} 5p^6$	Xe
86	$[Xe] 6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^6$	Rn

magic number
魔法数

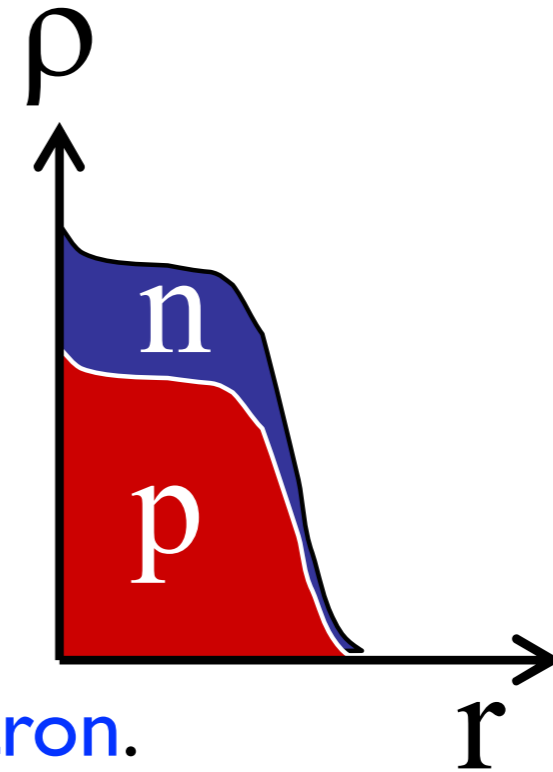
noble gas

Nuclear potential



Nuclear force is common to **proton** and **neutron**.

Density distribution



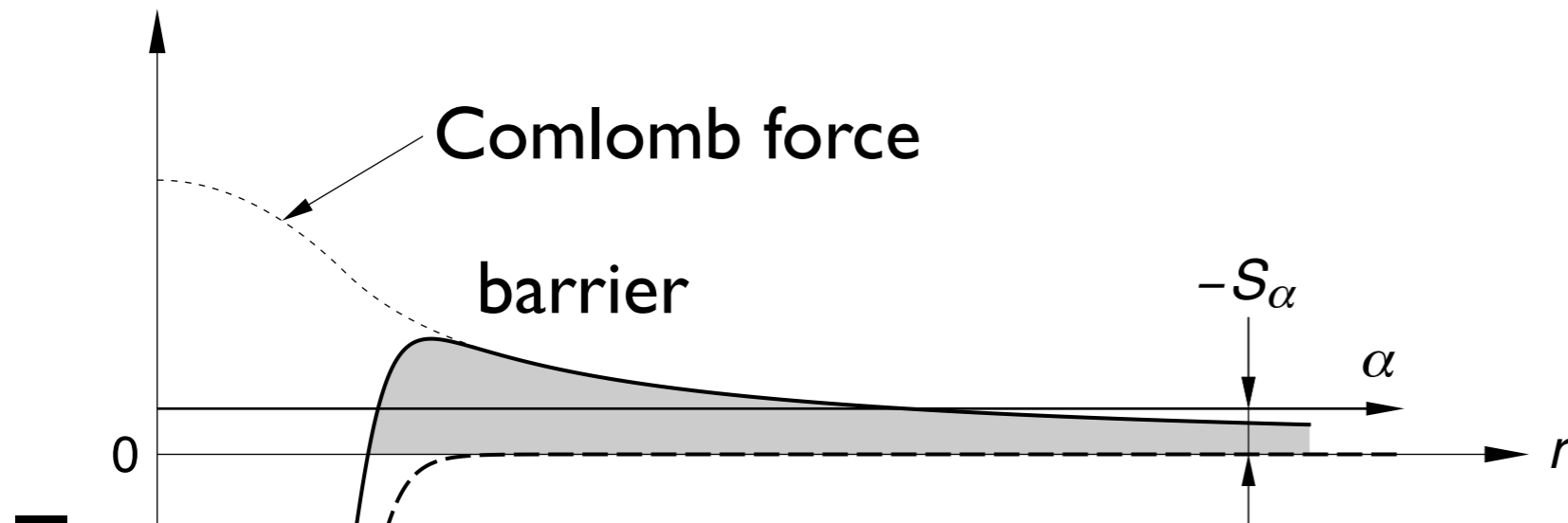
The potential for proton is raised by **Coulomb force**. $\propto Z^2 / A^{1/3}$

A (heavy) nucleus **contains more neutrons** than **protons**.

Double magic (二重閉殻) nuclei are especially stable.



α -decay

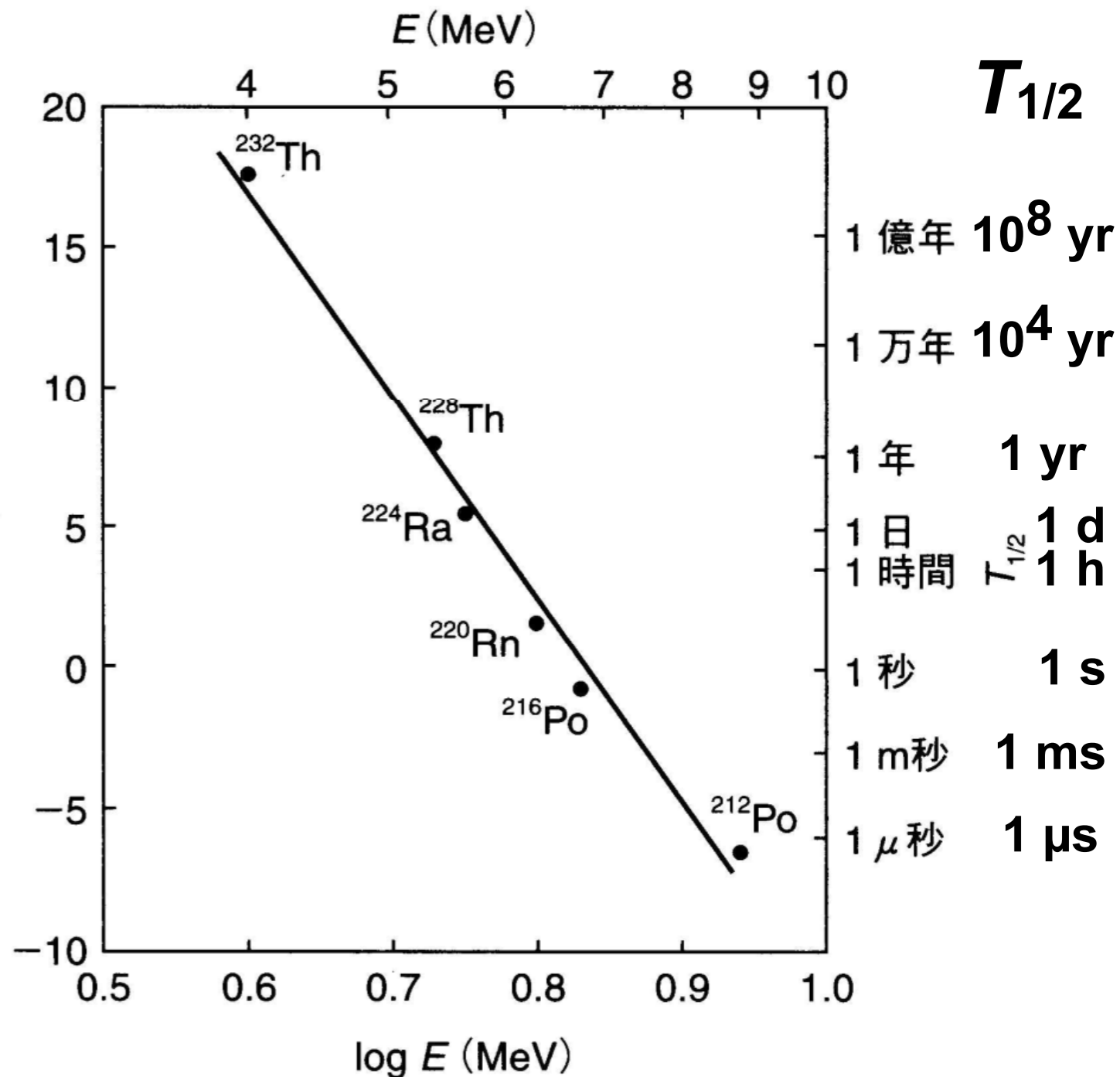


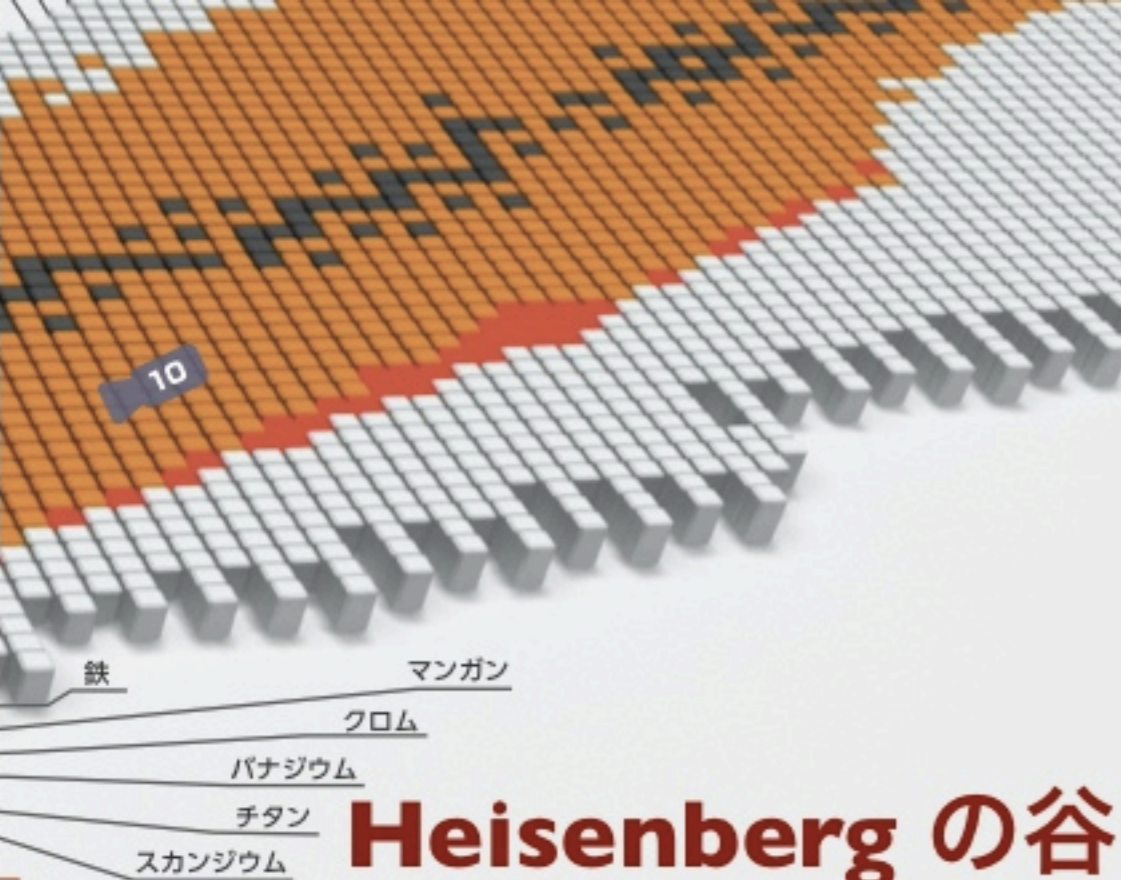
tunnel effect

nuclear force

Geiger-Nuttall law Gamow's theory

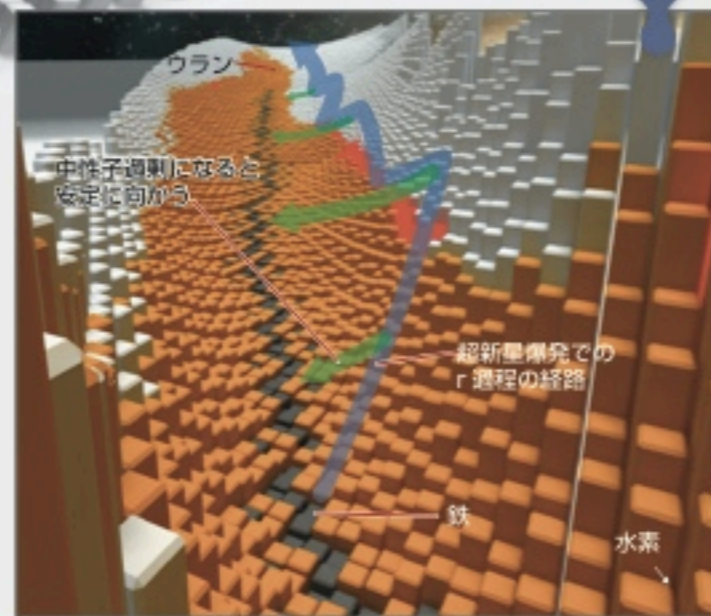
^{232}Th の壊変に伴って生じる α 放出核種の半減期 $T_{1/2}$ と α 線の最大エネルギー E の関係. 縦軸, 横軸とも二つの表示単位で示されている





Heisenberg の谷

不安定核を介して鉄より重い元素が出来る

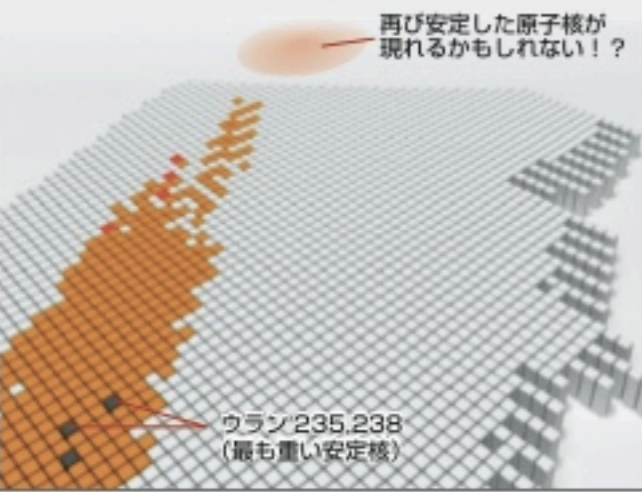


鉄までの原子核は恒星内で生まれました。鉄より重い元素はどのようにしてできたのでしょうか。これまでの研究でその半分位は超新星爆発によってできたと考えられています。この時の爆発的な元素合成の道筋が左図の青色のラインで、r過程と呼ばれます。超新星爆発の際に発生する大量の中性子を通常の原子核が沢山取り込み、一気に重たい中性子過剰核へと変換。途中から中性子の取り込みと中性子が陽子に変わる反応（ベータ崩壊）のバランスで複雑なラインを描くことになると考えられています。爆発が落ち着き中性子の供給が止まると、ベータ崩壊によってまさに谷を下るように安定核へと変化する道筋を緑色のラインで示しました。RIBF^{※8}ではこの中性子過剰核を作り、それを調べる事ができます。

9 日本史上初の元素発見「113番元素」

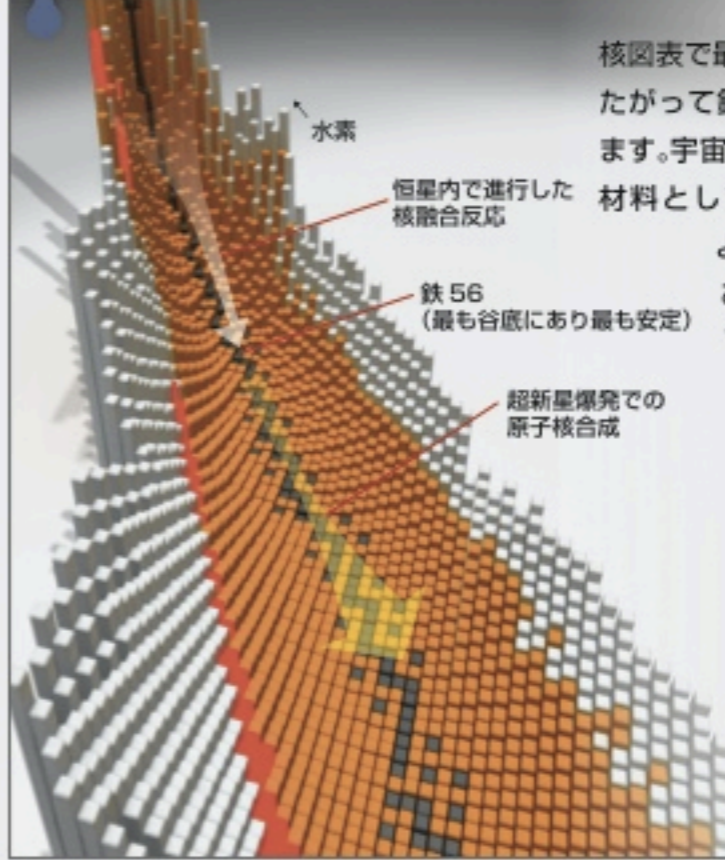
安定の島

来、超重原子核は非常に不安定ですが、理論的にうな離れた位置に安定核が存在するかもしれない。このあたりに魔法数が存在すると思えるからです。周りは全て不安定原子核の海によっていることから、安定の島と呼ばれています。



仁科センターの森田浩介研究员らのグループは世界でこれまで未確認だった新しい113番元素の発見に成功しました。新元素の発見は、目的とする原子核のできる確率が極端に小さいためとても困難で、世界中でその発見を競っています。113番元素の場合、亜鉛とビスマスの原子核同士を100兆回も衝突させる必要がありました。この発見により、日本で初めて元素の名前を付ける権利を得ることができそうです。

10 鉄はターニングポイント

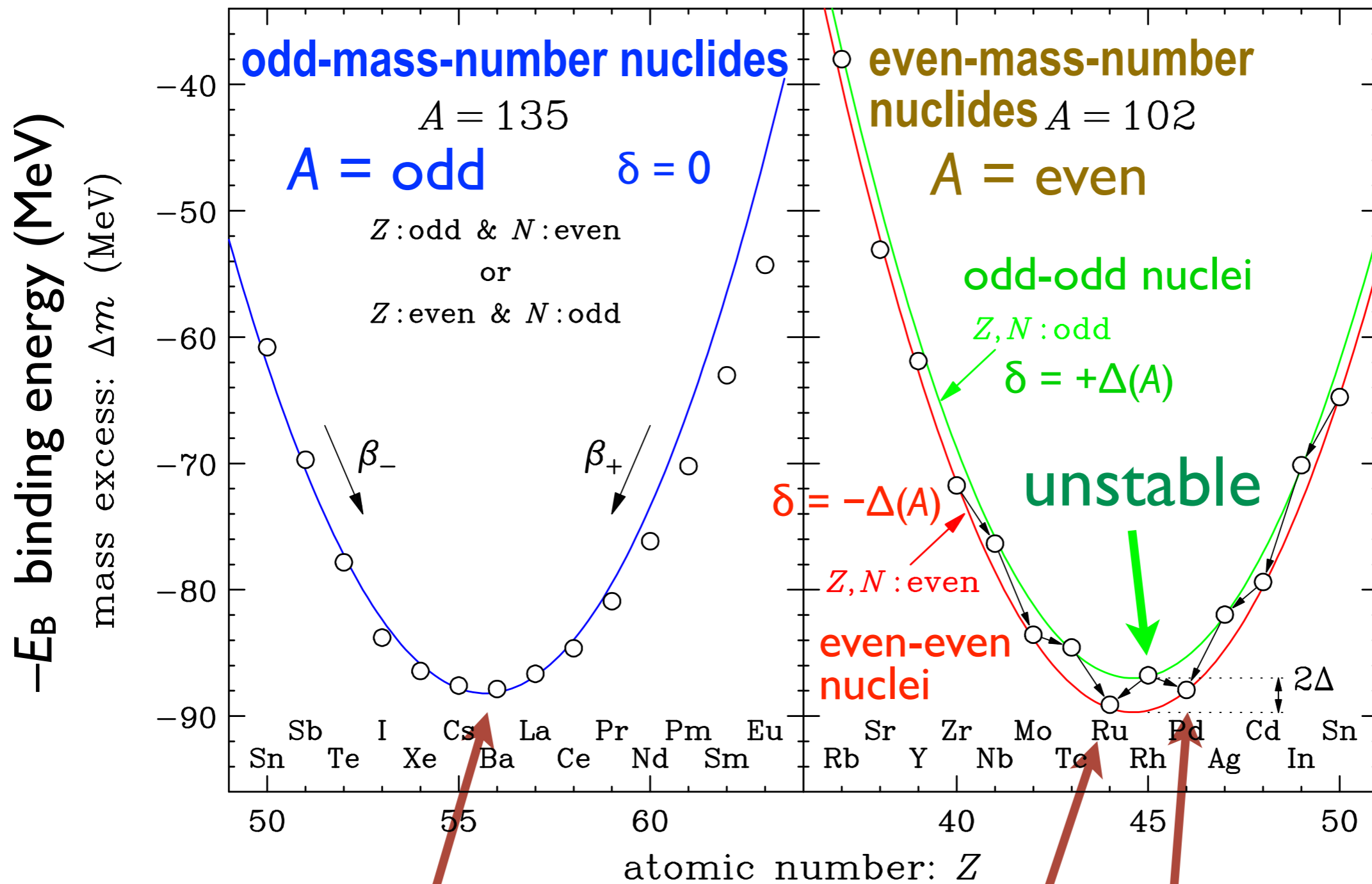


核図表で最も安定した元素は鉄56です。したがって鉄は谷の中で最も低い位置にあります。宇宙での元素合成は水素・ヘリウムを材料としてまずは恒星内の核融合反応によって進みます。あたかも山の頂にあるような水素から鉄までは谷を下るように合成されるのです。しかし鉄より先は登りですから、何らかの力を借りる必要があります。その一つとして超新星爆発の力を借りて谷を登るように合成されていたと考えられています。
(※大きな核図表は紙面の都合で谷のスケールを低く調整しており、一方この核図表は一般的な「ハイゼンベルクの谷」を表現しています。)

などのように半減期が地球の年齢よりも長
 ったときに失われるエネルギーを結合エネ

ルギーと言います。低い所にある原子核ほど失ったエネルギーが大きく壊れにくい、つまり安定になります。
 ※8 [RIBF]: RI ビームファクトリー。理研仁科加速器研究センターの日本を代表する原子核研究施設の総称。

Even-odd dependence of nuclear binding energy

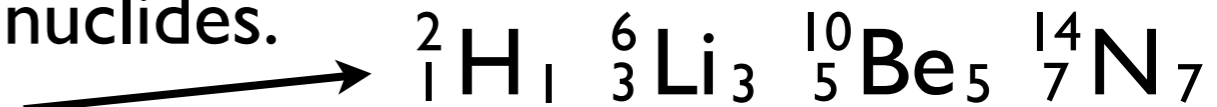


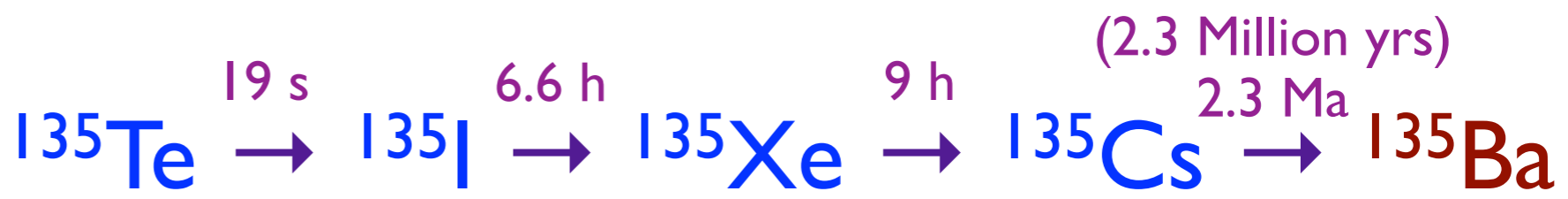
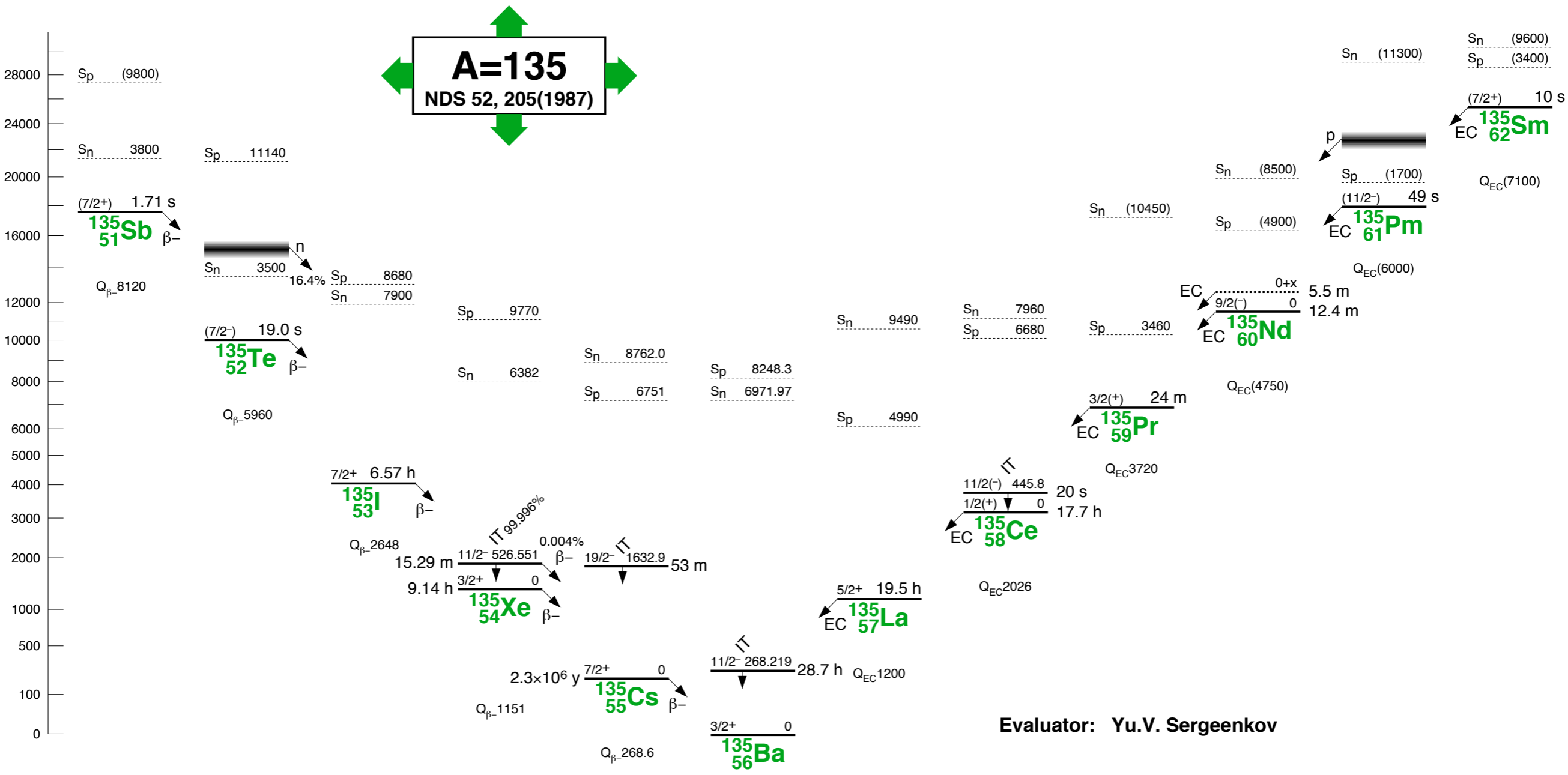
stable nuclide

stable nuclides

60% of stable nuclides are even-even nuclides.

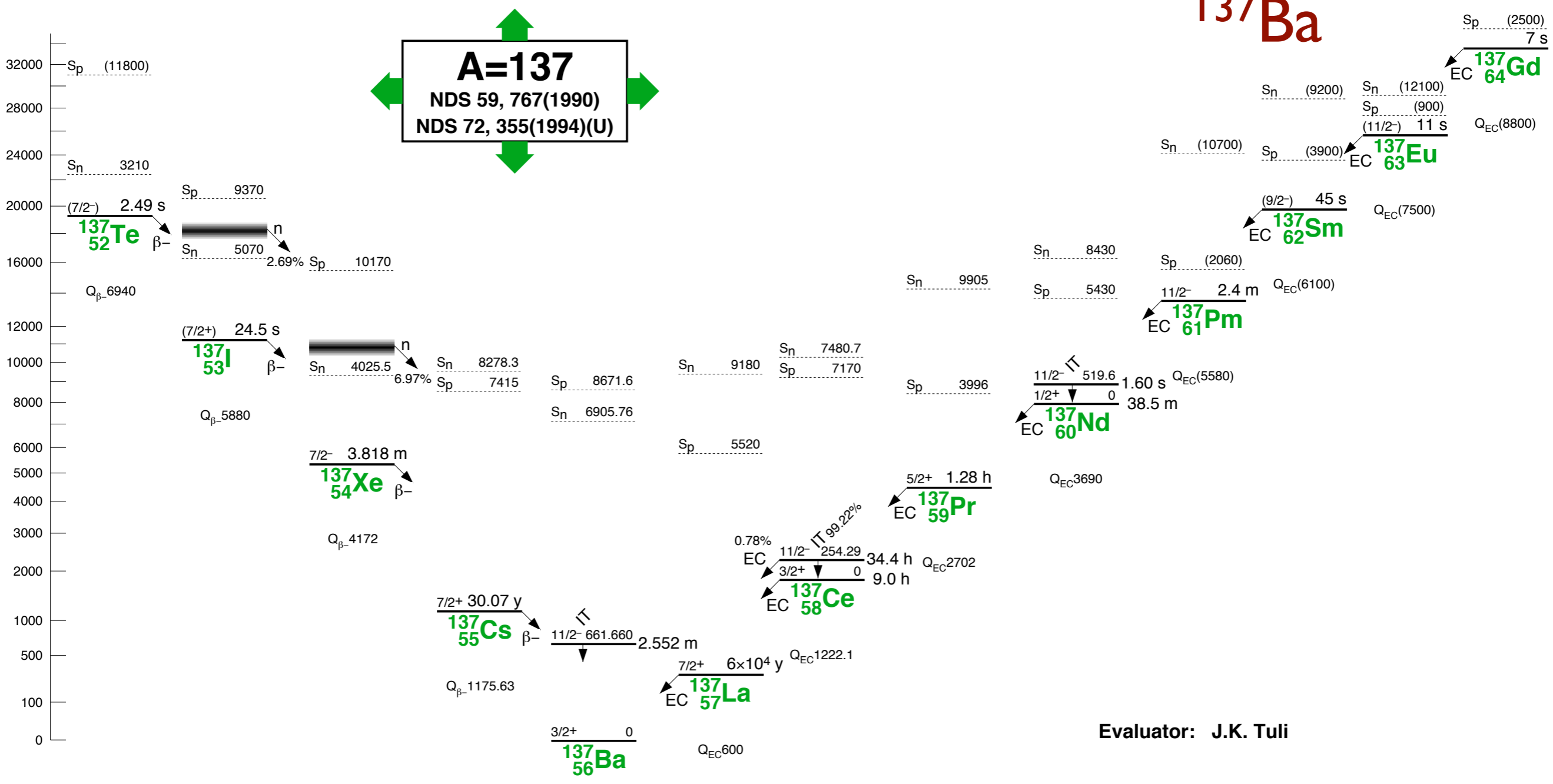
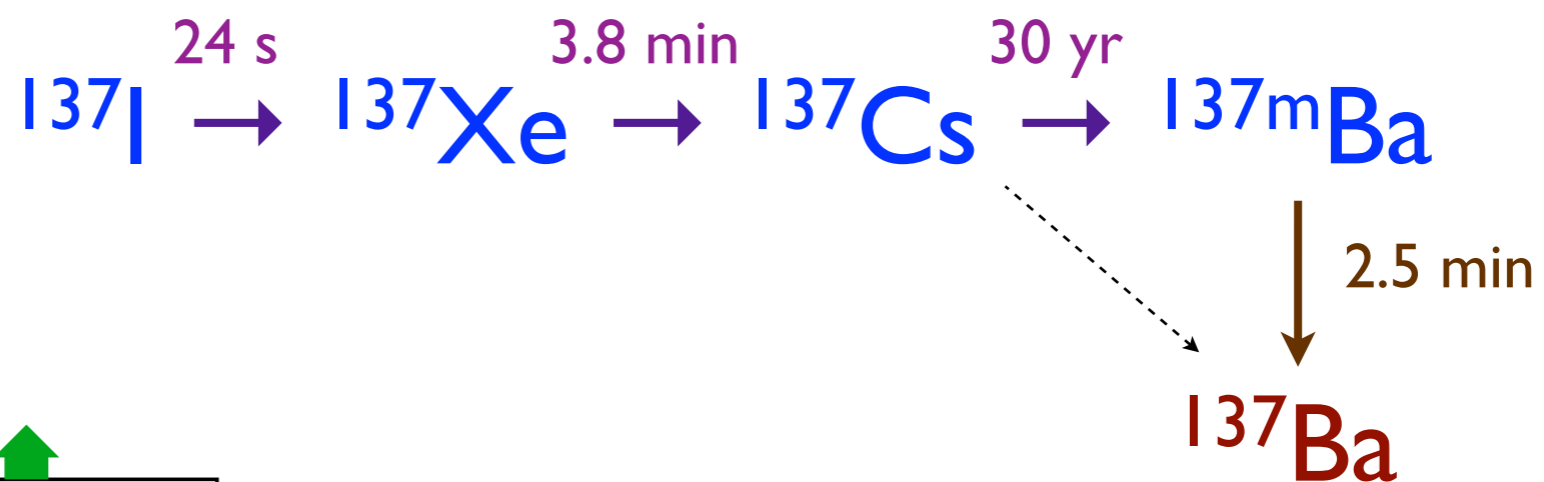
There exist only 4 odd-odd nuclides.



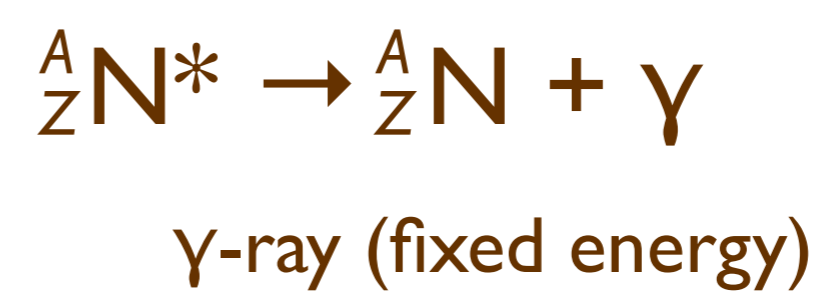
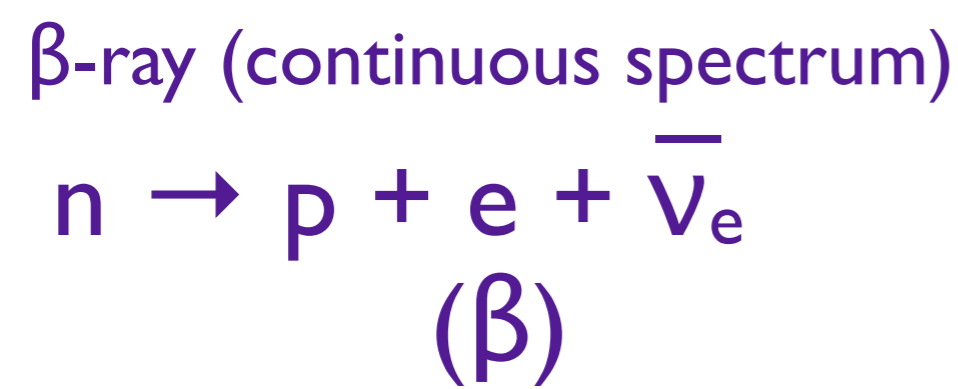
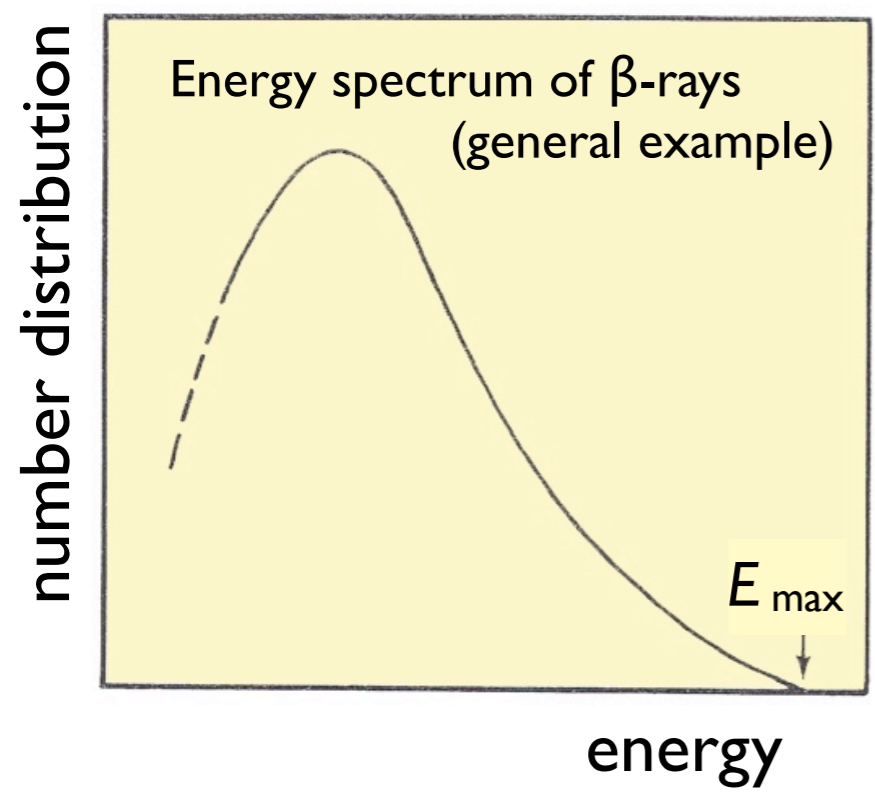
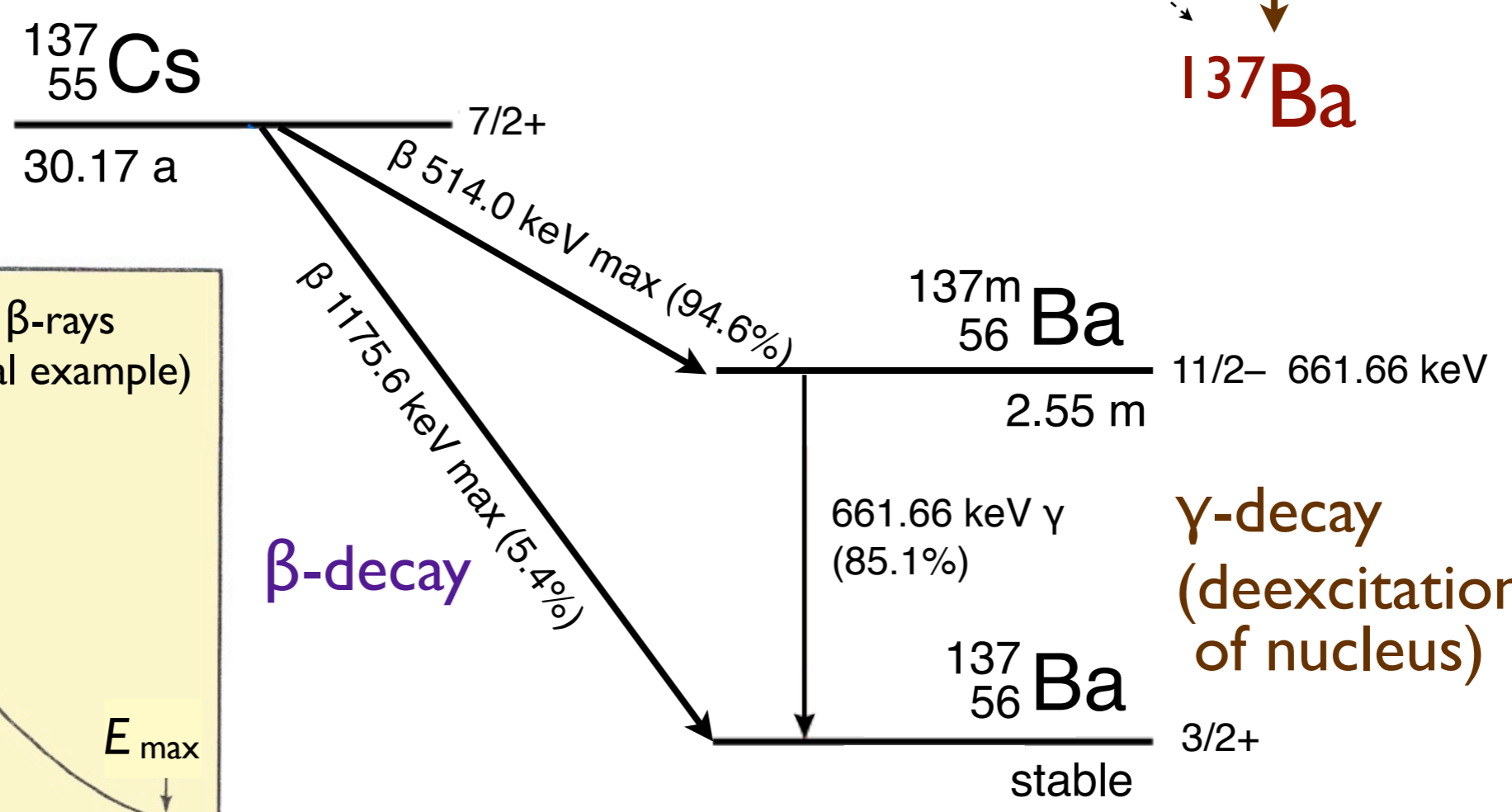
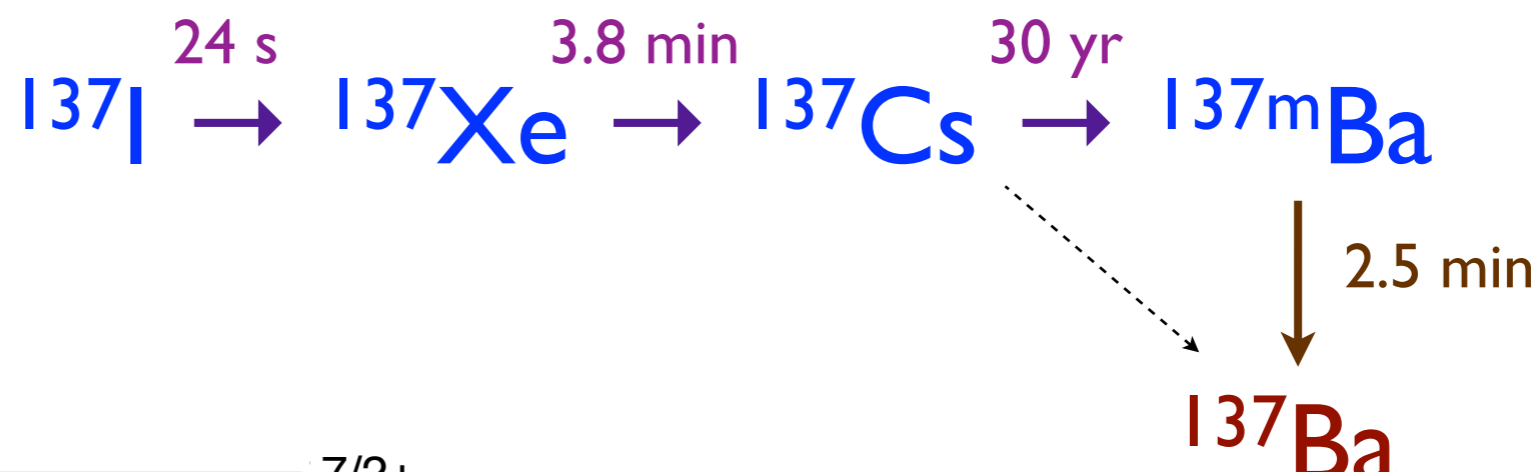


In a nuclear reactor, $^{135}\text{Xe} + n \rightarrow ^{136}\text{Xe}$ (neutron capture).

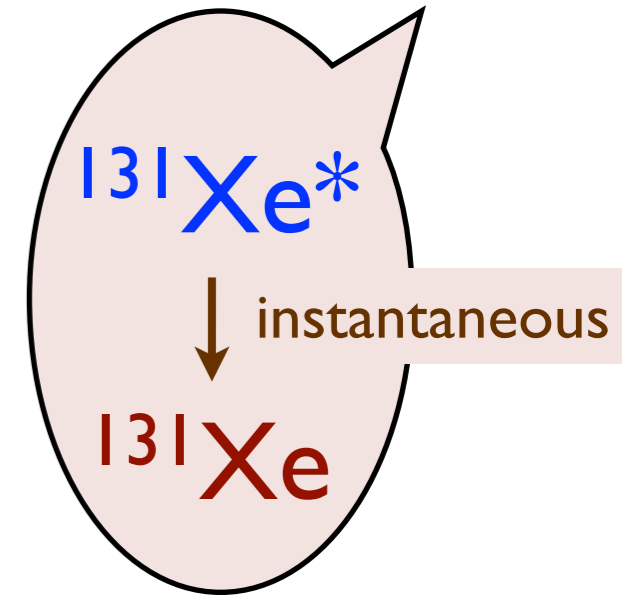
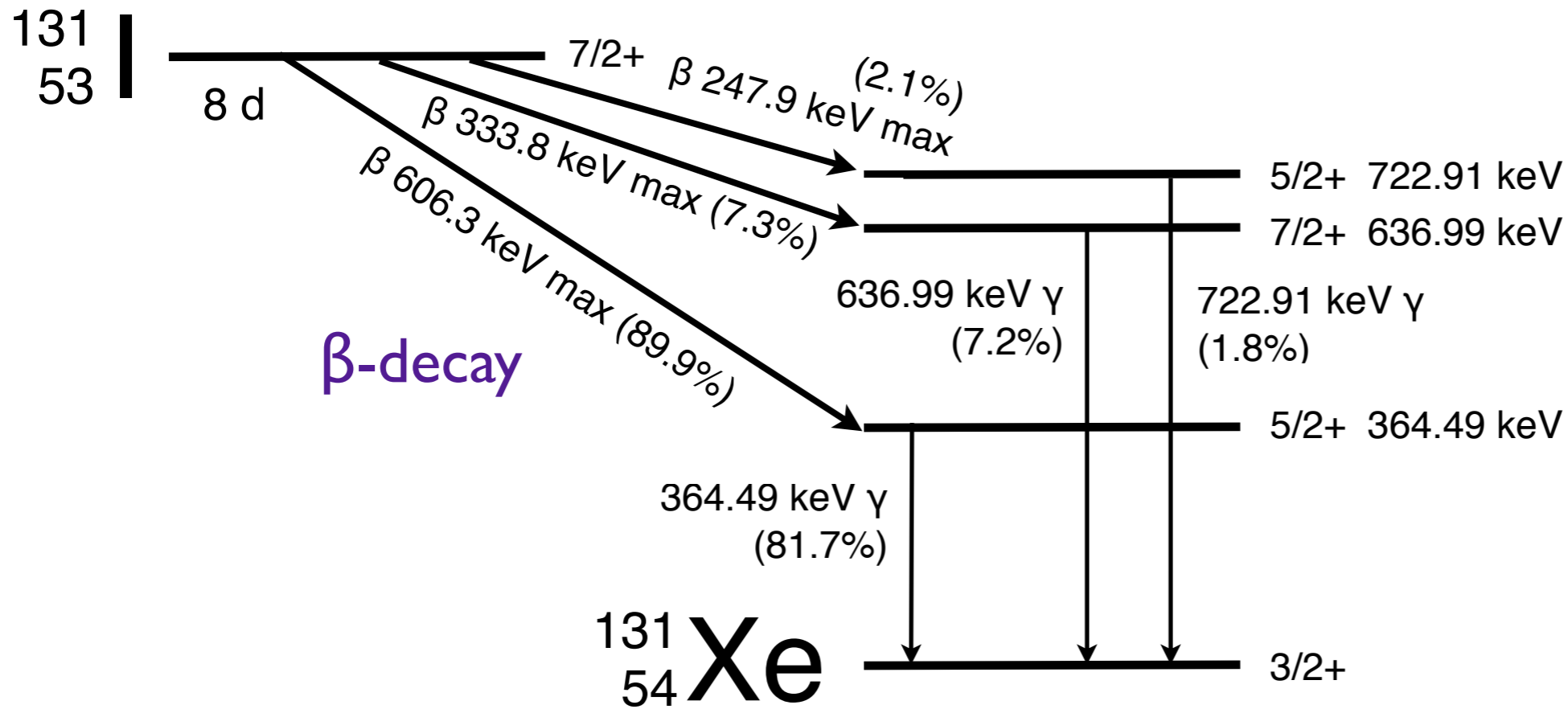
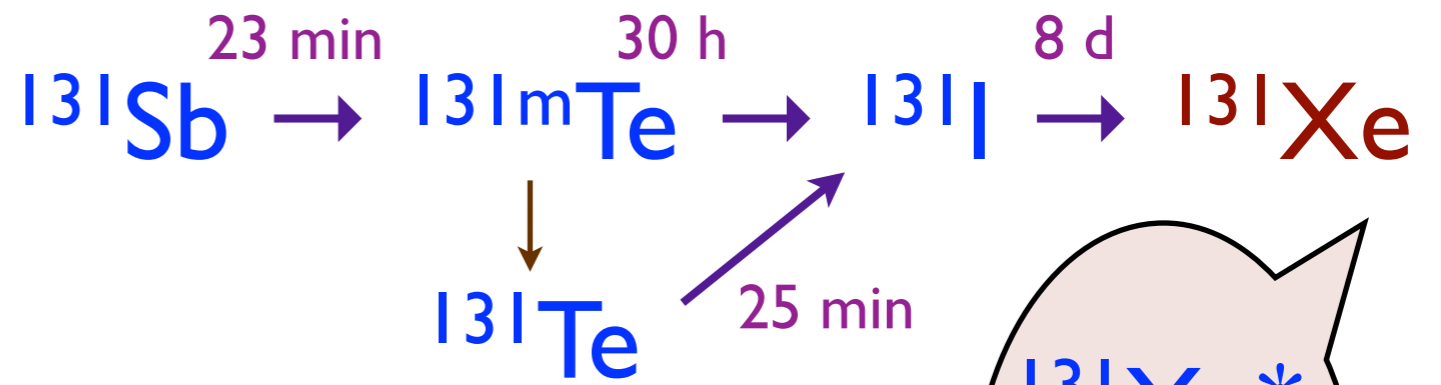
A neutron-rich nucleus cascades down to a stable nuclide via repeated β^- -decay.



A neutron-rich nucleus cascades down to a stable nuclide via repeated β^- -decay.



γ -decay (deexcitation of nucleus)

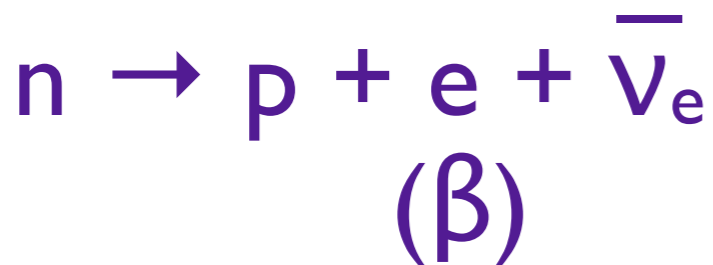


γ -day : deexcitation of nucleus

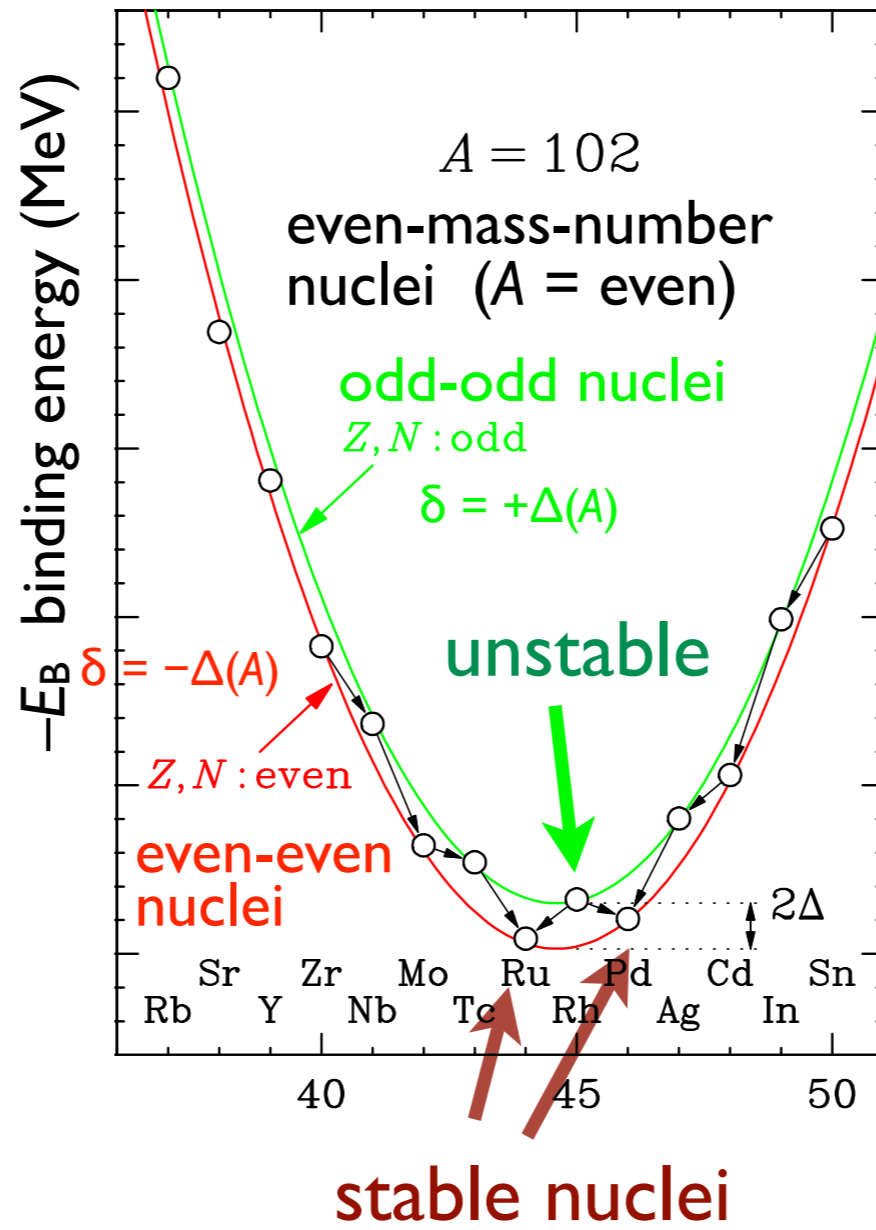
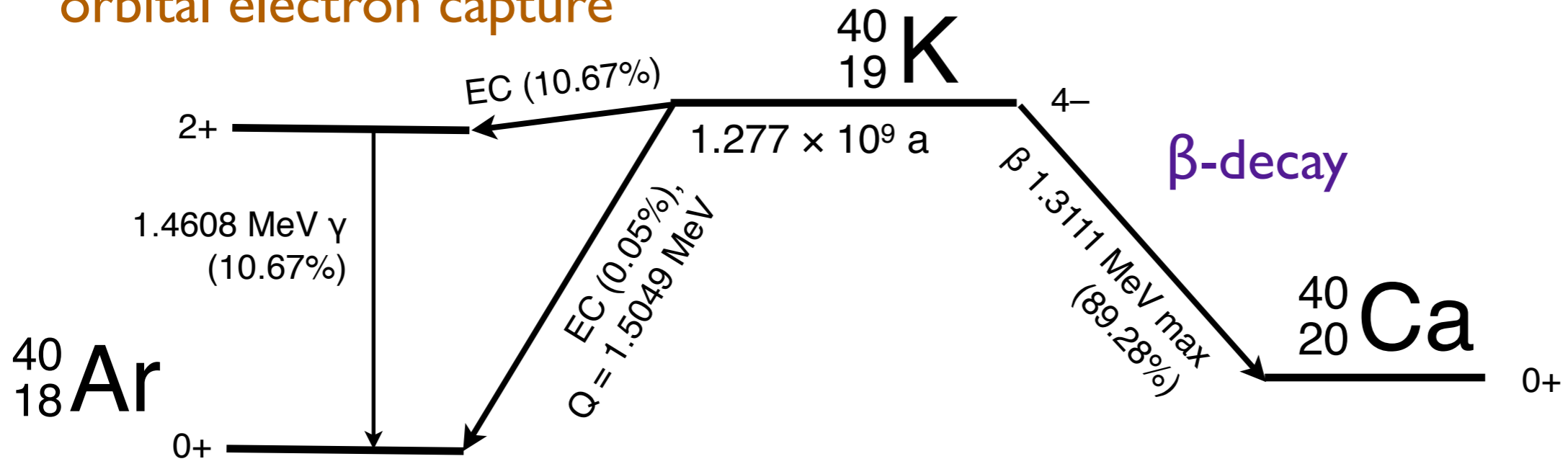


γ -ray (fixed energy)

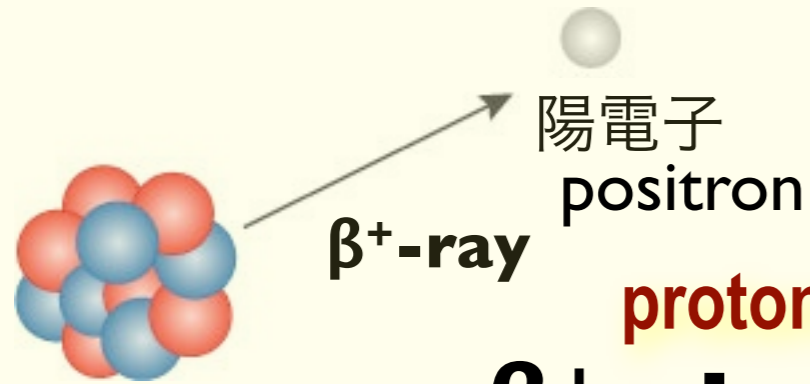
β -ray (continuous spectrum)



orbital electron capture

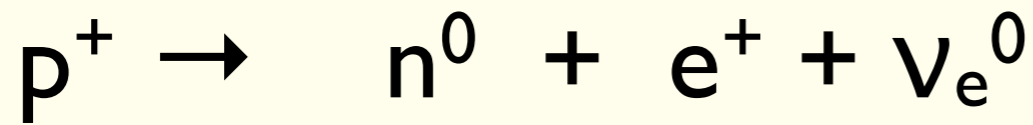


10 keV ~ MeV

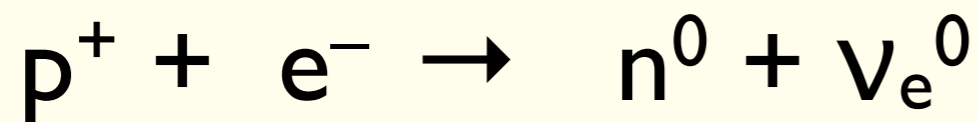
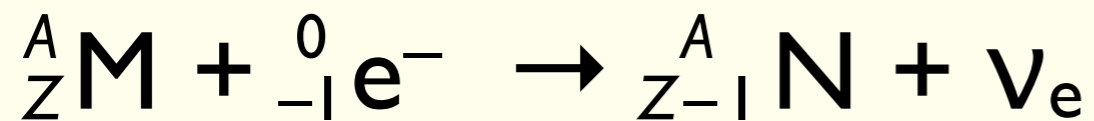


proton-rich nuclei

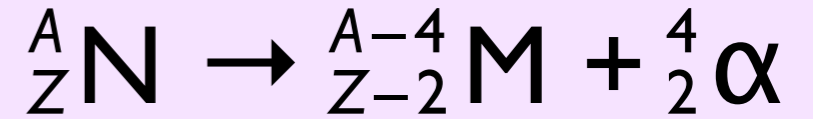
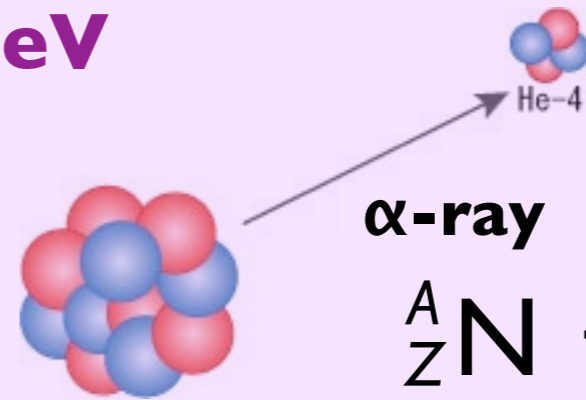
β^+ -decay



Electron Capture

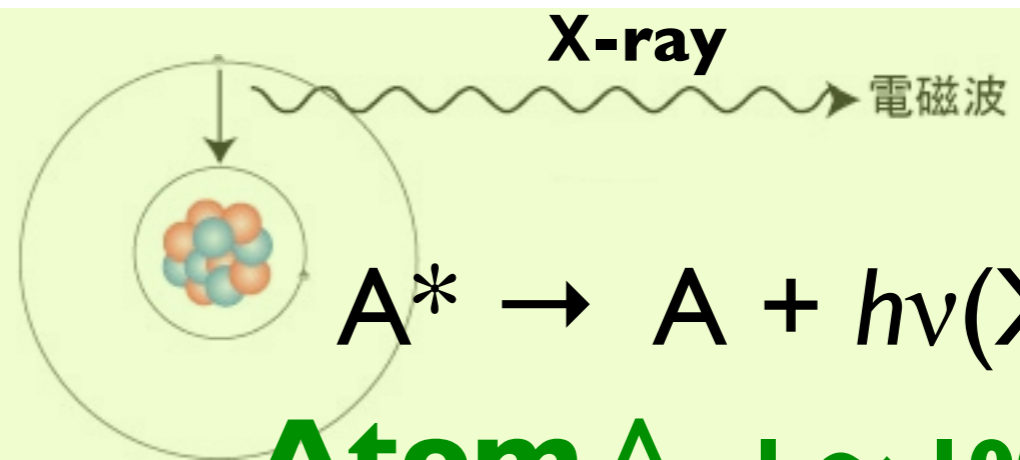
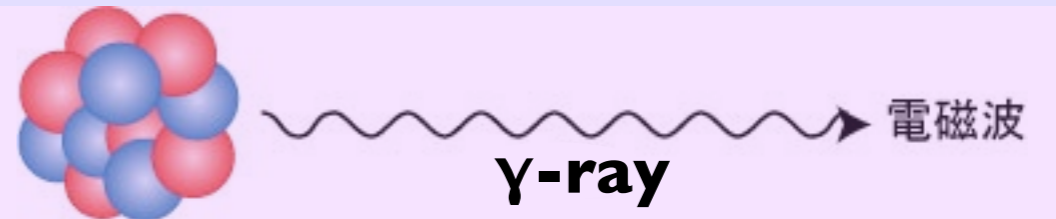
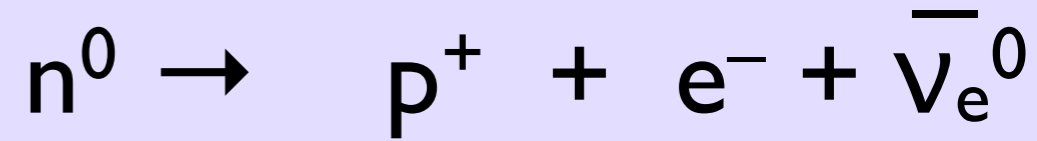
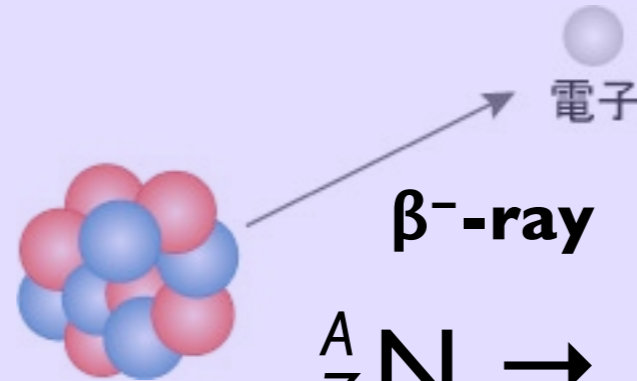


Nucleus N



neutron-rich nuclei

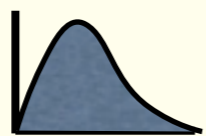
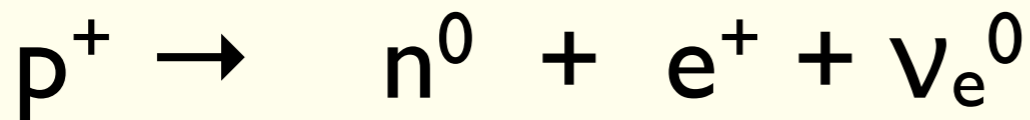
β^- -decay



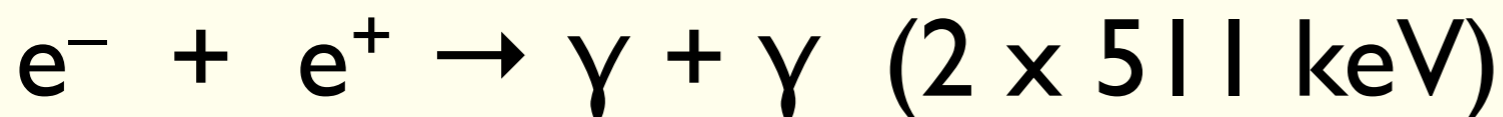
Atom A | ~ 100 keV

Continuous spectrum
(energy distribution)

β^+ -decay

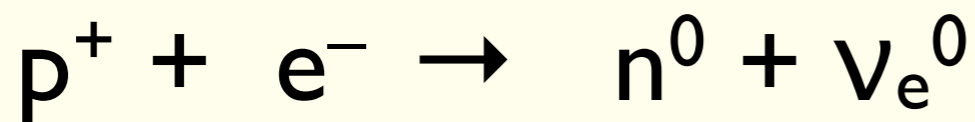
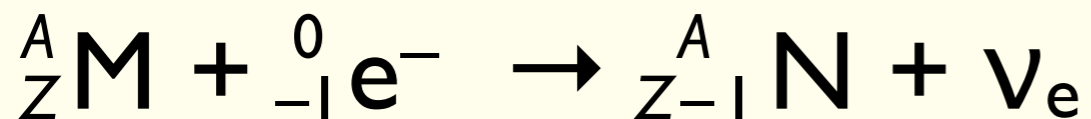


Positron annihilation

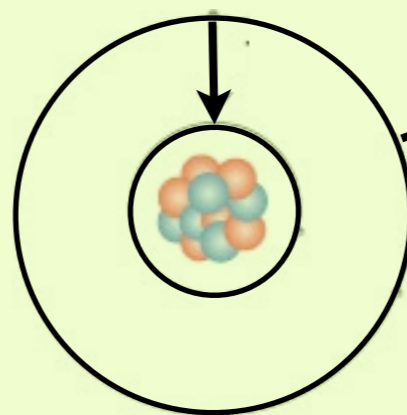
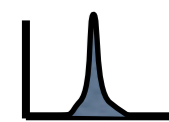
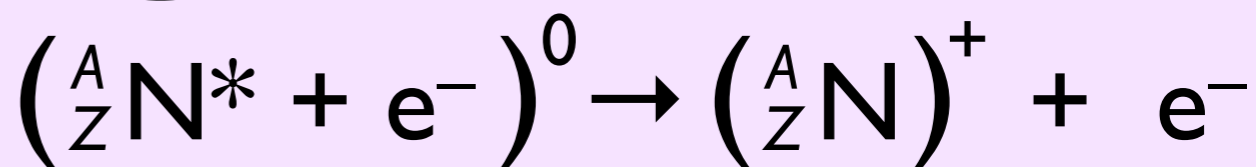
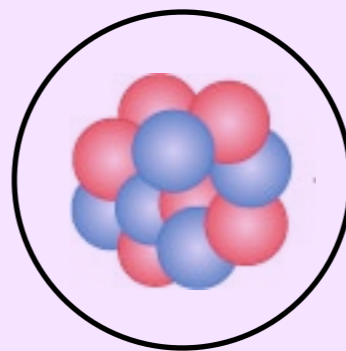


line spectrum
(fixed energy)

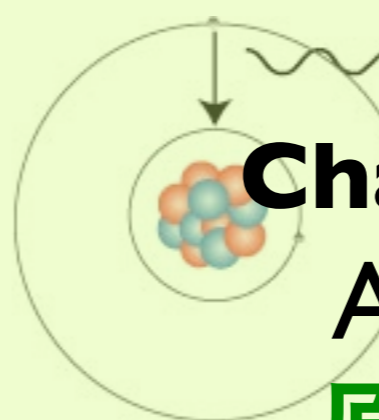
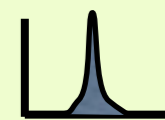
Electron Capture



Internal Conversion

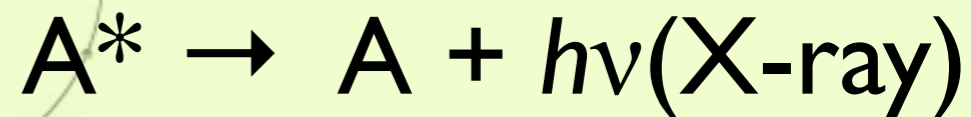


Auger electron



特性X線

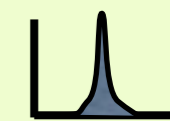
Characteristic X-rays



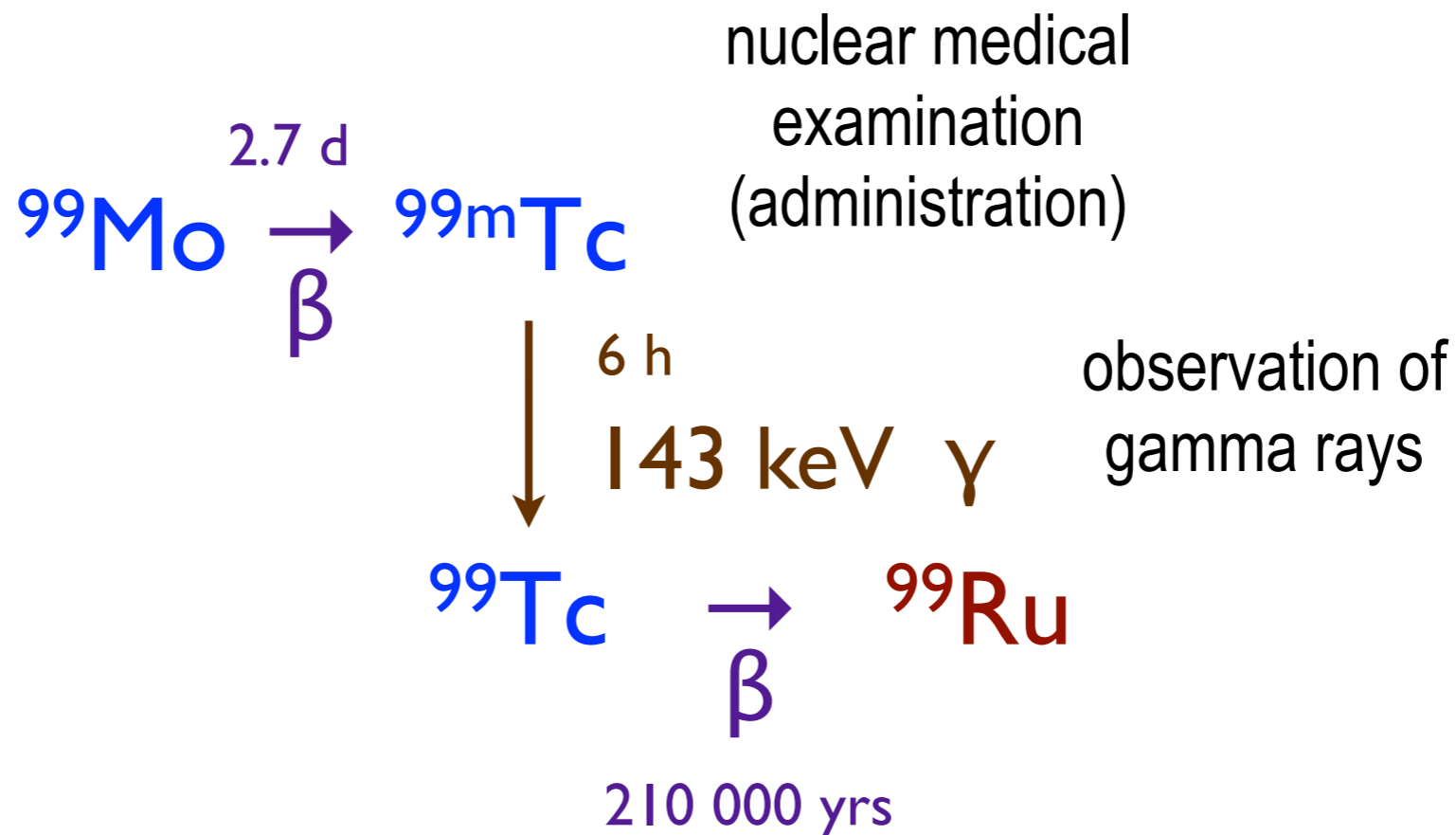
原子 A

$I \sim 100 \text{ keV}$

電磁波



Produced at overseas research reactors and transported by air.



phantom Nipponium by Prof. M. Ogawa (小川正孝)

Elements with no stable isotope

technetium $_{43}\text{Tc}$

promethium $_{61}\text{Pm}$

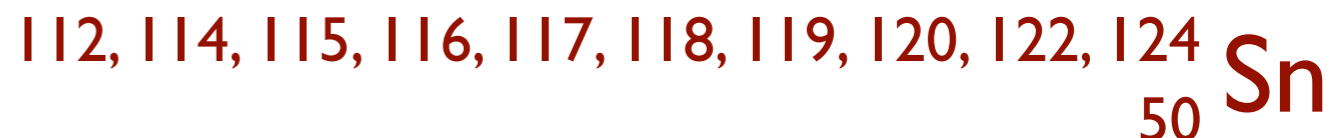
elements with atomic number \geq $_{83}\text{Bi}$

Elements with one stable isotope



$^{133}_{55}\text{Cs}$ $^{197}_{79}\text{Au}$ etc. total 26 elements.

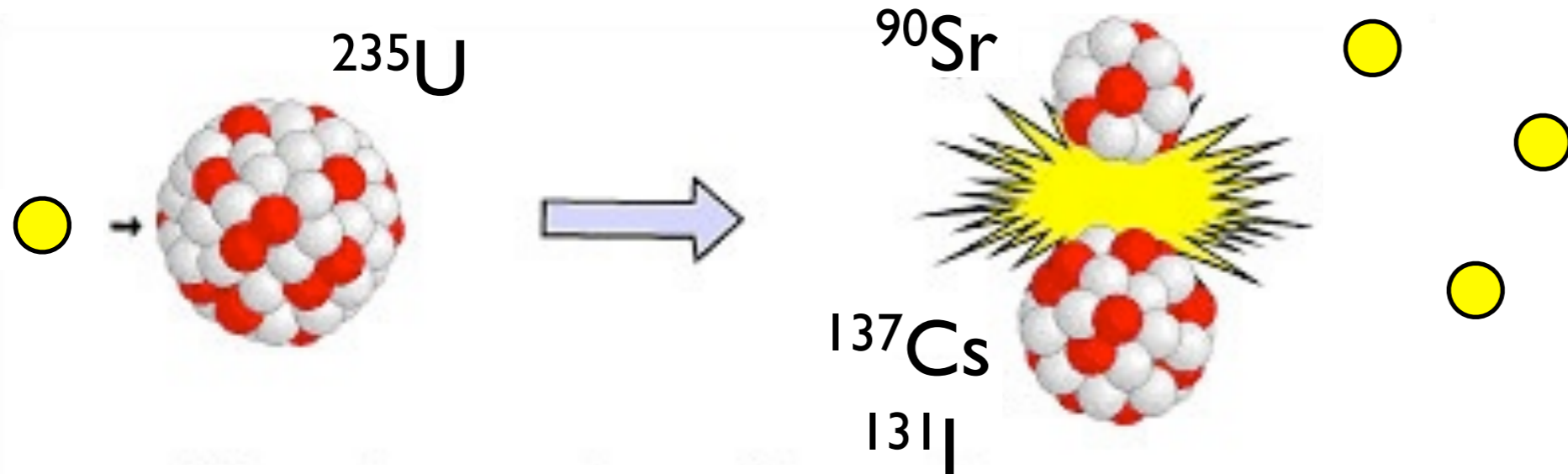
Elements with many isotopes e.g.



Nuclear physics :

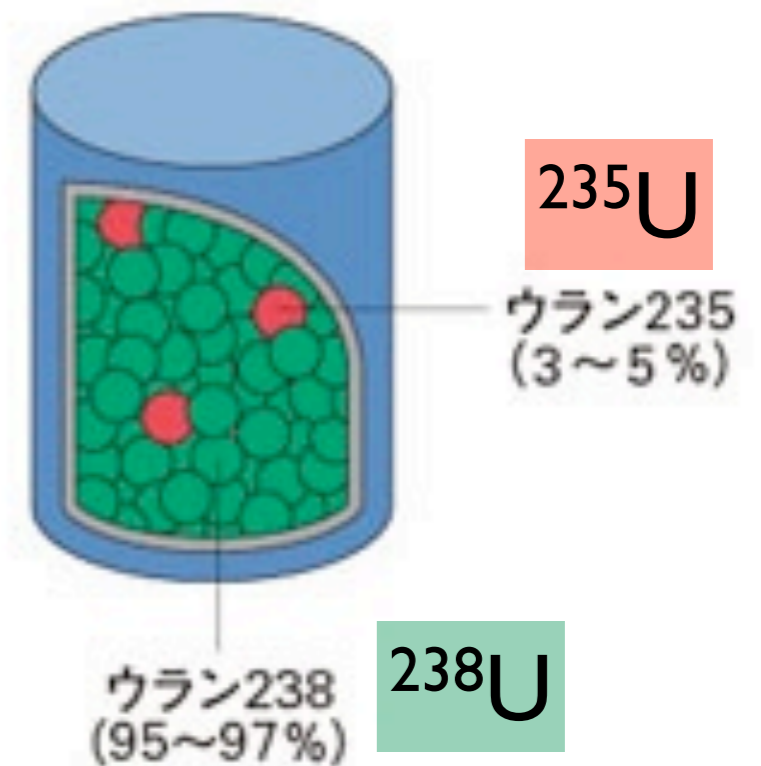
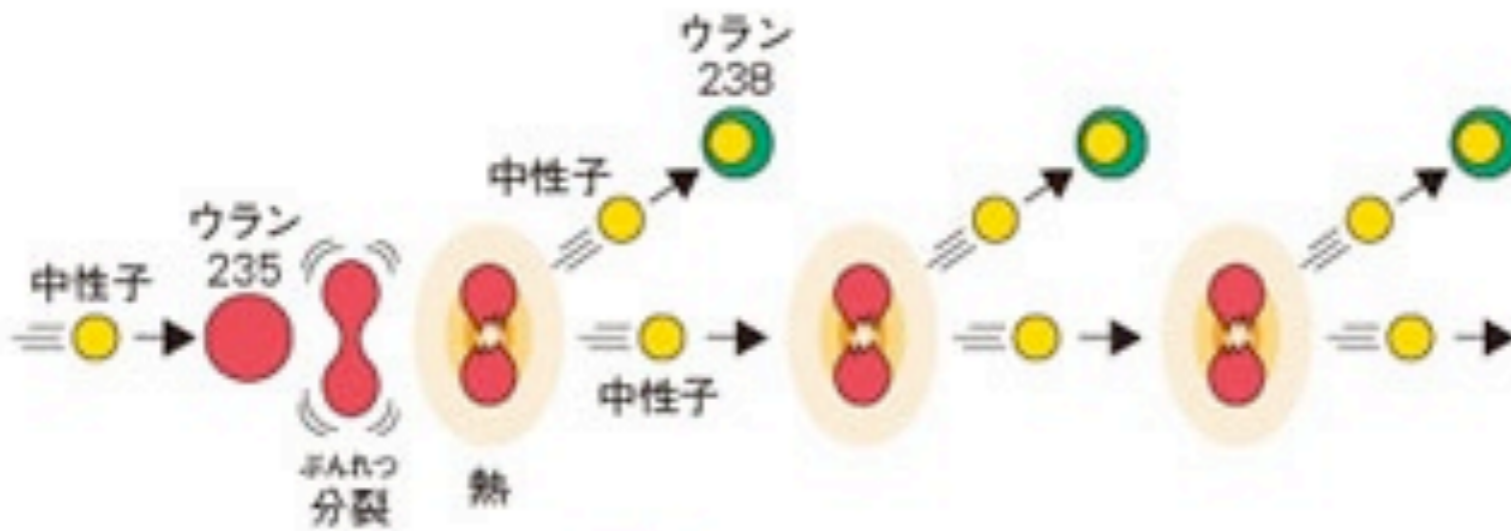
Principle of nuclear power generation

Nuclear fission 原子核分裂反応



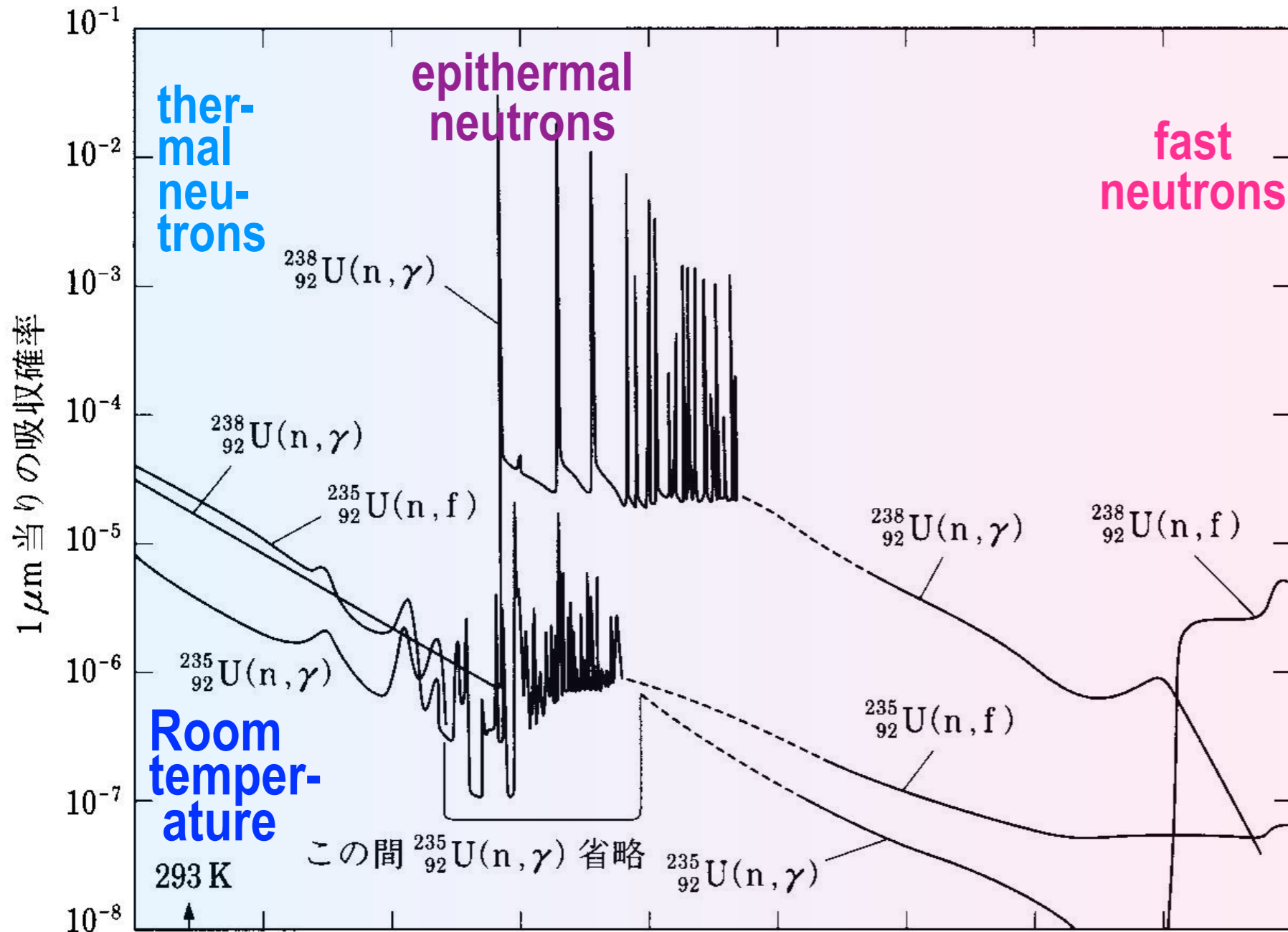
Energy released as kinetic energy of particles

thermal neutron deceleration fast neutron

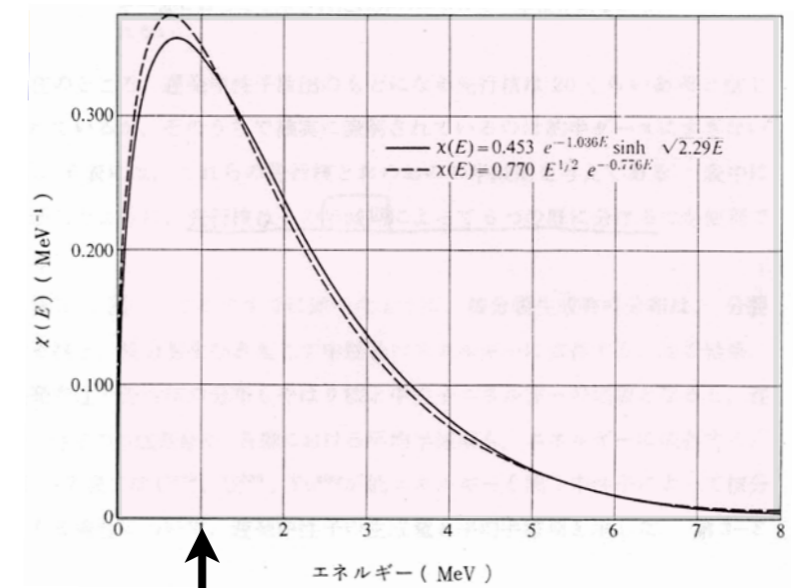


neutron + uranium 235 / 238

Absorption cross section for neutrons



Energy spectrum of prompt neutrons



1 MeV

$E_n < 1 \text{ eV}$ では

$$\sigma [^{235}\text{U}(n, f)] \propto \frac{1}{v_n}$$

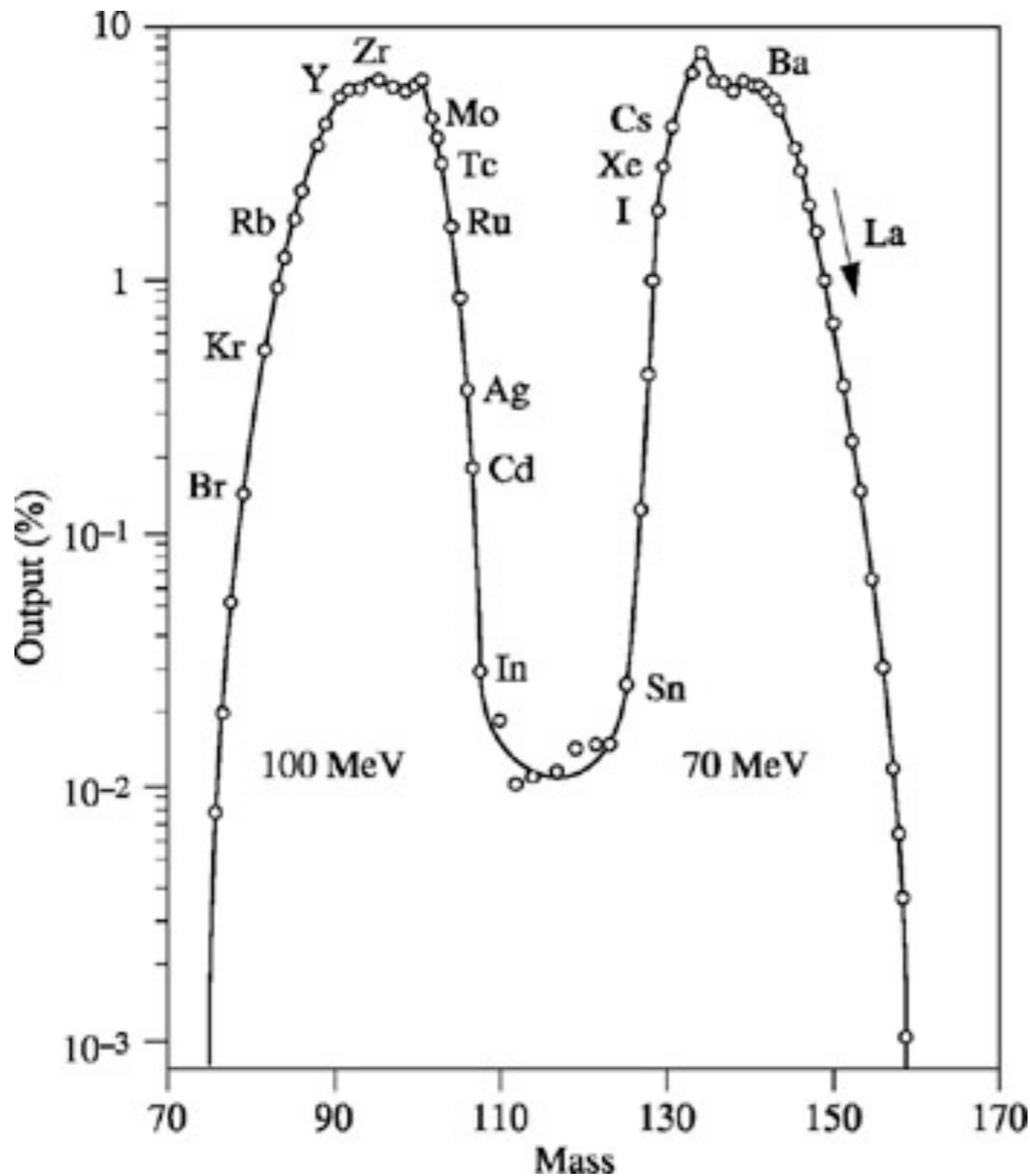
... 中性子が原子核内をゆっくり通り過ぎると反応が起きやすい

10 meV 100 meV 1 eV 10 eV 100 eV 1 keV 10 keV 100 keV 1 MeV 10 MeV Kinetic energy of neutrons



Energy released as kinetic energy of particles

Yield [%] (log. scale)



fission products

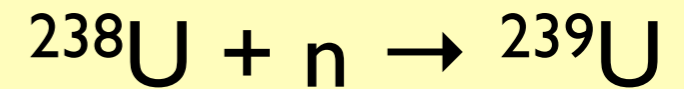
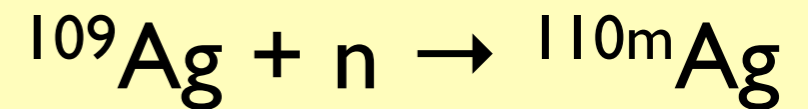
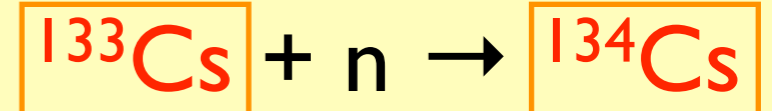
核分裂生成物

asymmetric fission

activation products

放射化生成物

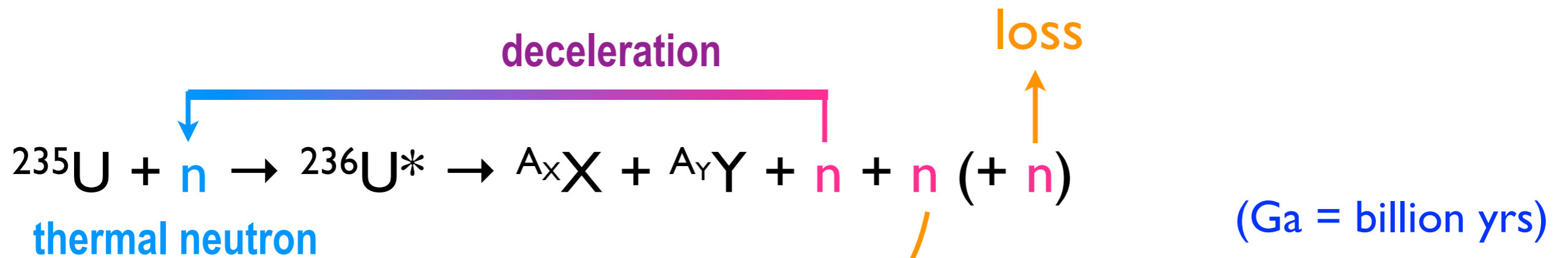
neutron capture



Nuclides with half-lives from days to decades are hazardous. **Volatile or water-soluble** elements are transported further in the air. Noble gases will diffuse away.

fission products **^{131}I , ^{137}Cs , ^{90}Sr** , ^{85}Kr , ^{135}Xe , ^{140}Ba , ^{95}Zr , ^{106}Ru , ^{99}Mo

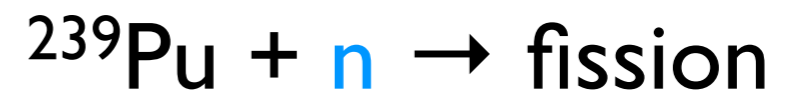
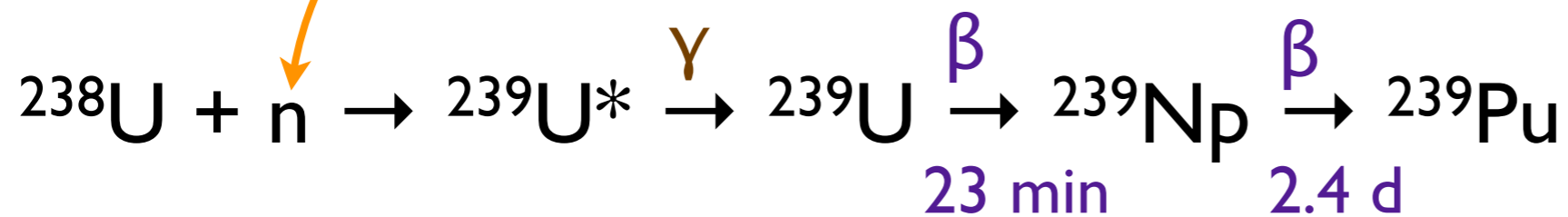
Nuclear fission and activation of uranium



${}^{235}\text{U}$: 0.72%, half-life 7.03 Ga

${}^{238}\text{U}$: 99.3%, half-life 44.6 Ga

Use ${}^{235}\text{U}$ enriched fuel

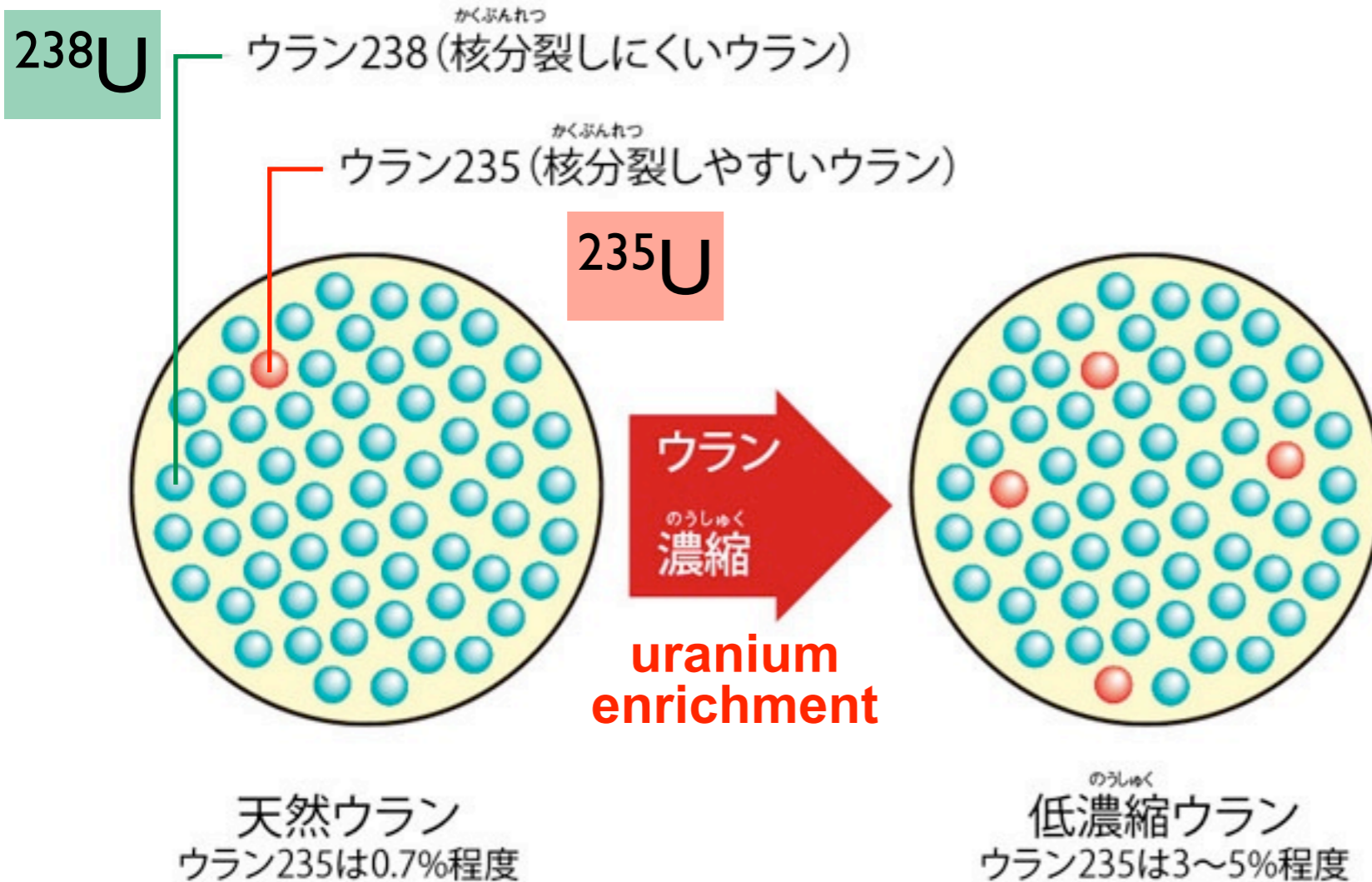


Nuclear engineering

Enrichment of uranium

天然のウラン鉱石にはウラン238が99.3%とウラン235が0.7%の割合でふくまれています。
天然ウランのままでは、原子力発電所で使う燃料としてウラン235の割合が低すぎるので、これを3~5%程度になるよう濃度を高めます。これを「ウランの濃縮」といいます。

天然ウランと低濃縮ウランのちがい



Natural uranium contains
0.7% of U-235

low-enriched uranium (LEU)
contains 3–5% of U-235

Isotope separation techniques

☀ gas diffusion method

☀ centrifugal scheme

UF₆ (gas)

☀ laser method

☀ nozzle method

☀ chemical method

(ion exchange method)

(原子力教育支援情報提供サイト「あとみん」より図表を借用。)

出所: チャレンジ! 原子力ワールド

(以下のページも。)

火力発電と原子力発電の違い

Thermal power vs. nuclear power

thermal
火力

**chemical
combustion**

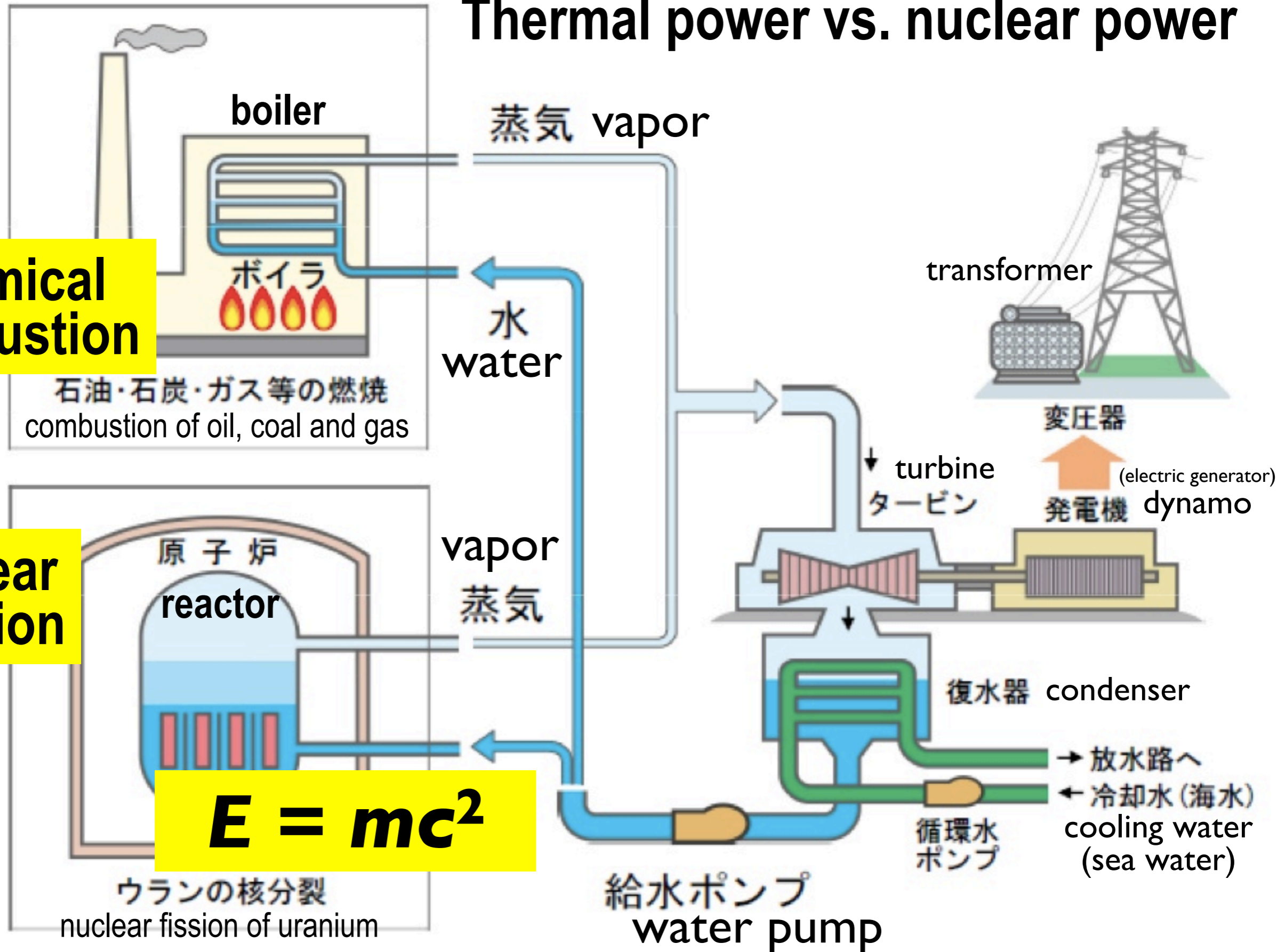
石油・石炭・ガス等の燃焼
combustion of oil, coal and gas

原子力
nuclear

**nuclear
reaction**

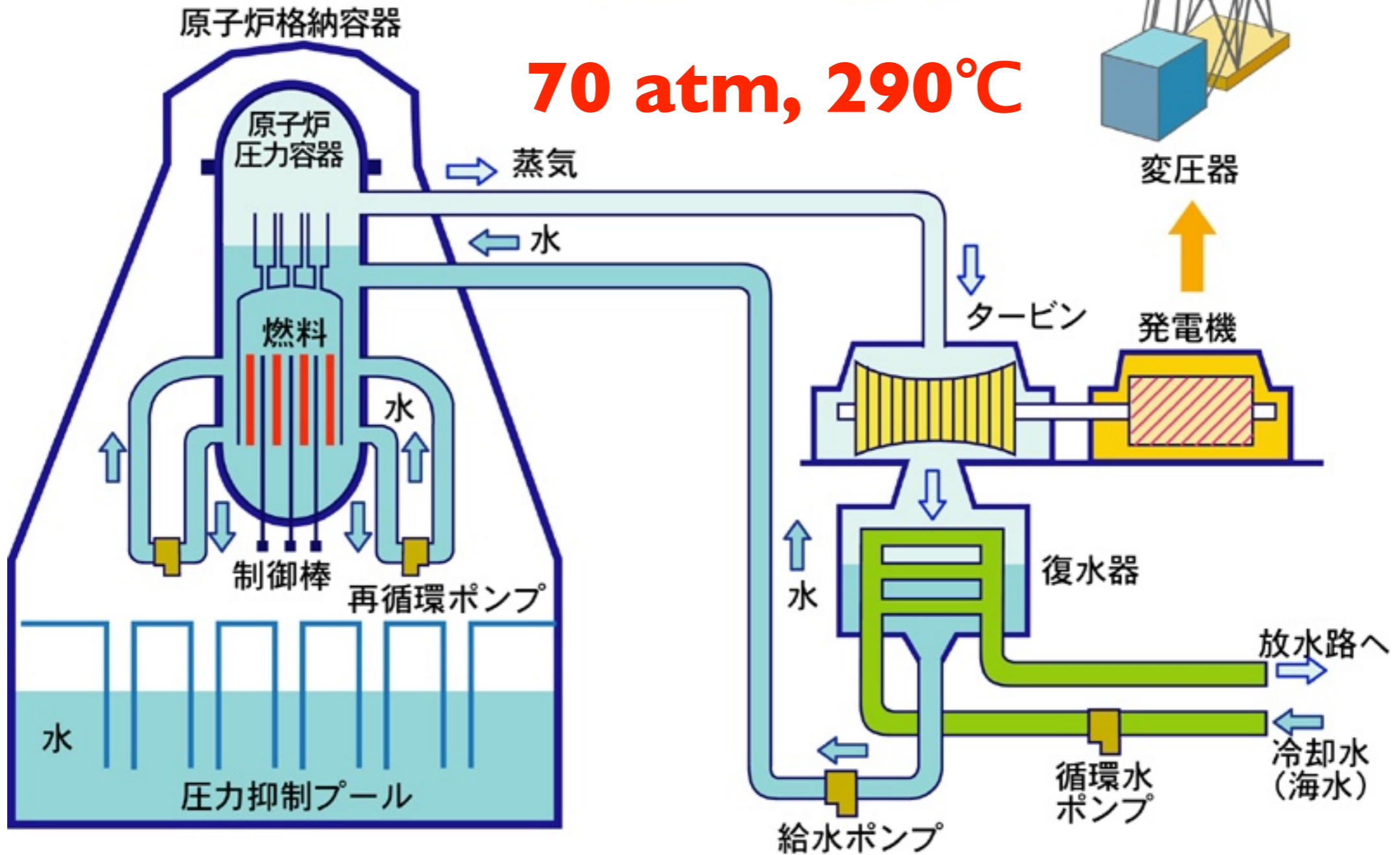
$$E = mc^2$$

ウランの核分裂
nuclear fission of uranium



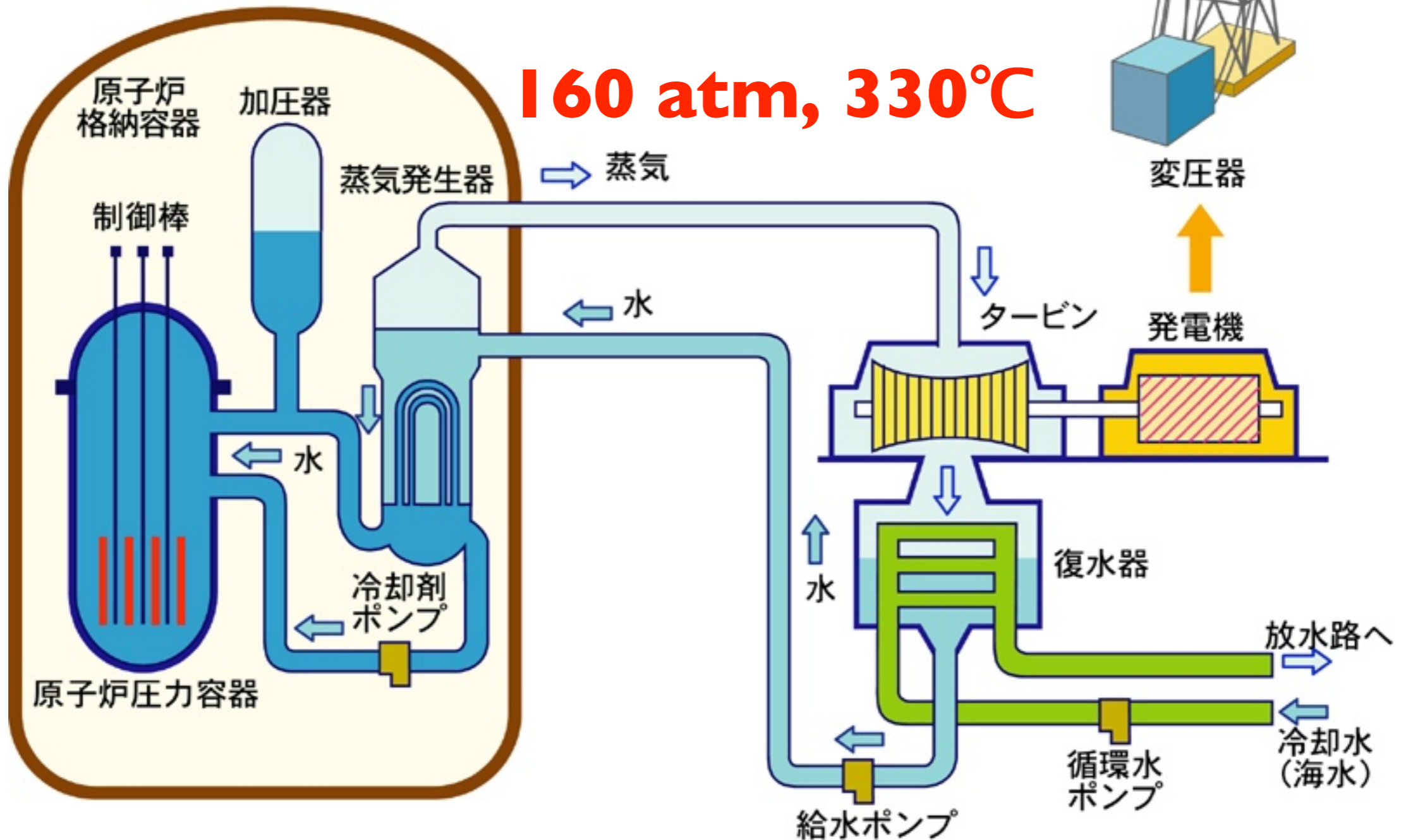
BWR (Boiling Water Reactor)

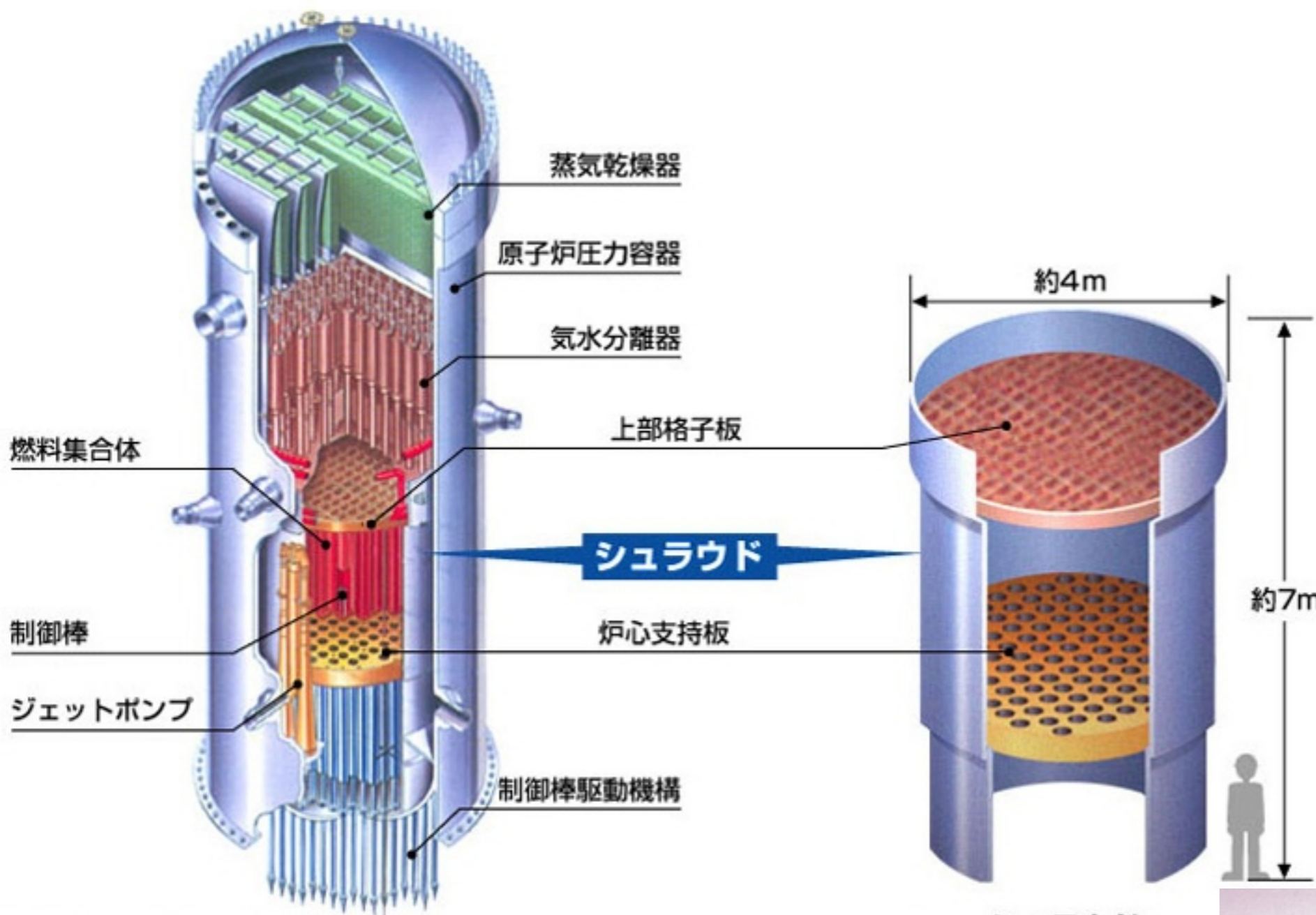
沸騰水型原子炉



PWR (Pressurized Water Reactor)

加圧水型原子炉





シュラウド

1 cm

UO₂ pellets



写真提供：東京電力株

Nuclear accidents / Nuclear wastes

Nuclear accidents

International Nuclear Event Scale
(INES)

Three Mile Island accident (1979)	level 5
Chernobyl nuclear disaster (1986)	level 7
Tokai-mura criticality accident at JCO (1999)	level 4
Fukushima Daiichi nuclear disaster (2011)	level 7

release of radioactive
material to outside
(Radiologically I-131 equivalent)

7 : > couple of 10 000 of TBq

6 : some 1000 to a couple of 10 000 TBq

5 : some 100 to a couple of 1000 TBq

国際原子力事象評価尺度

レベル 7	深刻な事故	チェルノブイリ原発事故
6	大事故	
5	事業所外へリスクを伴う事故	スリーマイル島原発事故
4	事業所外への大きなリスクを伴わない事故	東海村臨界事故
3	重大な異常事象	
2	異常事象	
1	逸脱	

事故の原因: 1~4号機における全交流電源喪失

Cause of the disaster : Complete loss of AC power supply

全交流電源喪失

Complete loss of AC power supply



- ① 地震と津波による外部電源喪失

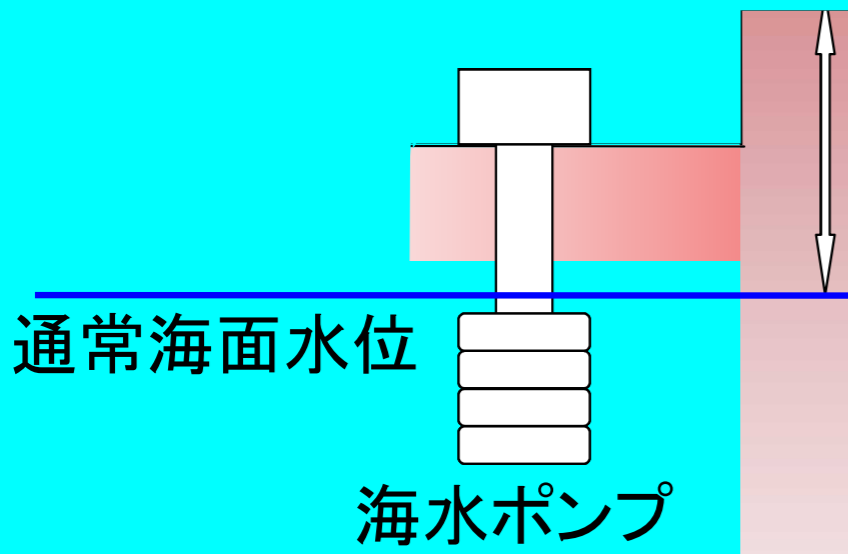
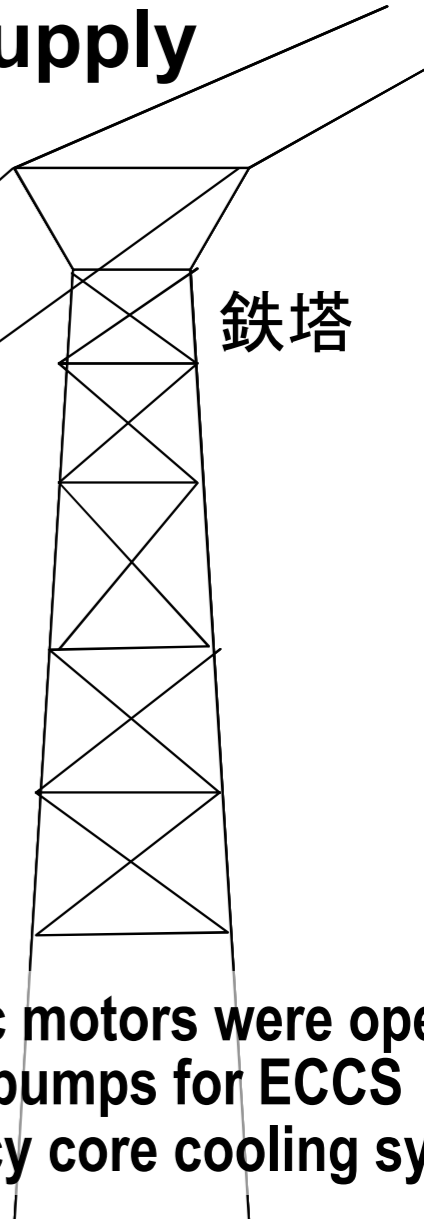
非常用炉心冷却装置 (ECCS) のポンプを含むすべての電動モータが運転不可能になった。

All external power was lost due to earthquake and tsunami.



- ② 非常用ディーゼル発電機が津波により故障

Emergency diesel generator broke down due to tsunami.



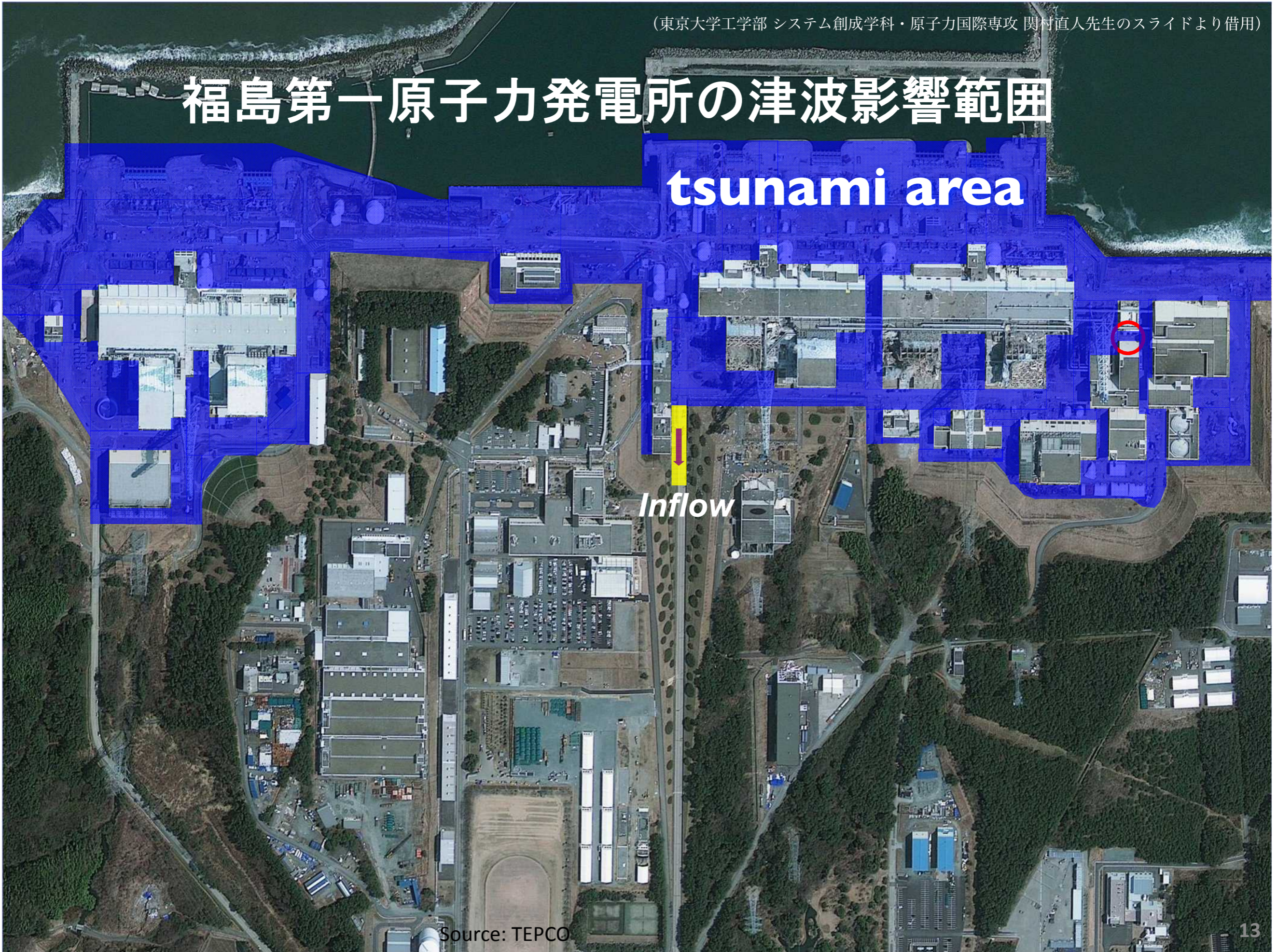
注記) 緊急スクラム: すべての運転中の原子炉は、地震によって制御棒が自動的に挿入され、核分裂連鎖反応を停止した。

非常用ディーゼル発電機は、津波が来るまでの間、適切に動作した。

福島第一原子力発電所の津波影響範囲

tsunami area

Inflow



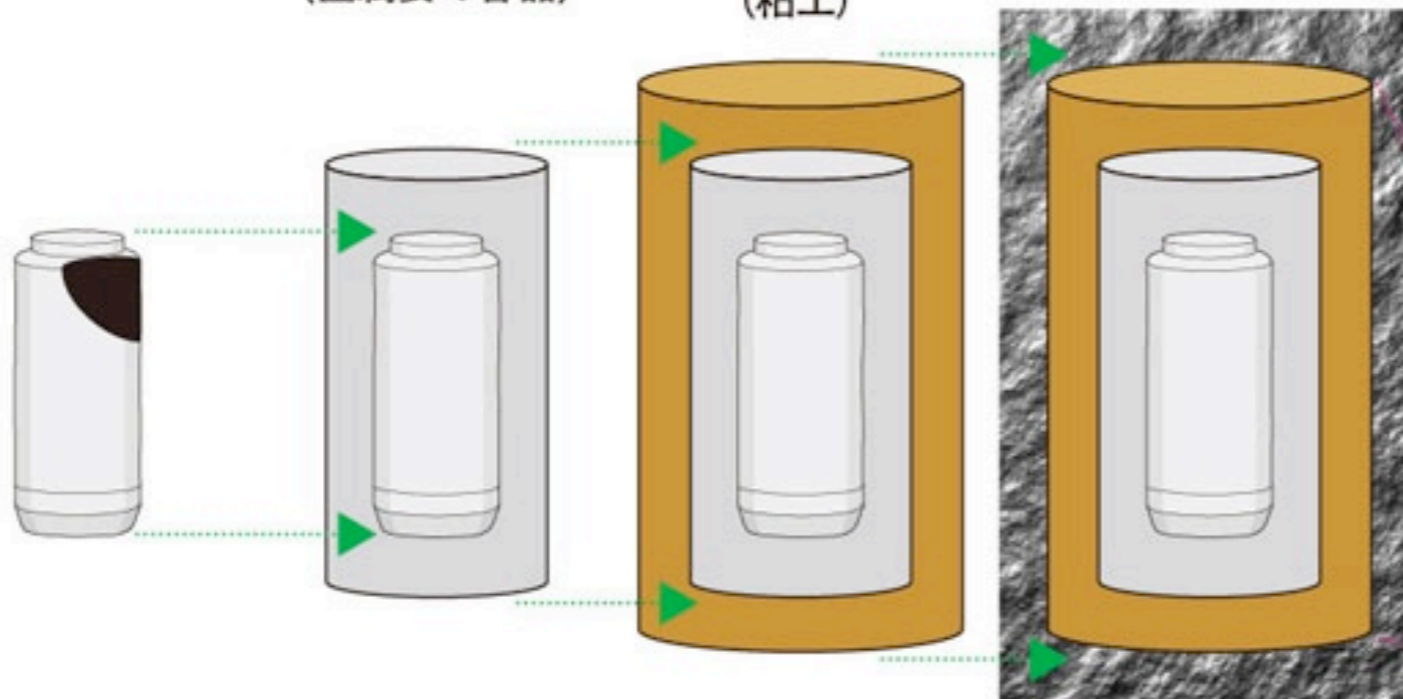
《 高レベル放射性廃棄物の処分方法 》

Disposal of high-level radioactive wastes

多重バリアシステム

人工バリア + 天然バリア

- | バリア 1 | バリア 2 | バリア 3 | バリア 4 |
|--------|---------------------|-------------|-------|
| ガラス固化体 | オーバーパック
(金属製の容器) | 緩衝材
(粘土) | 岩盤 |



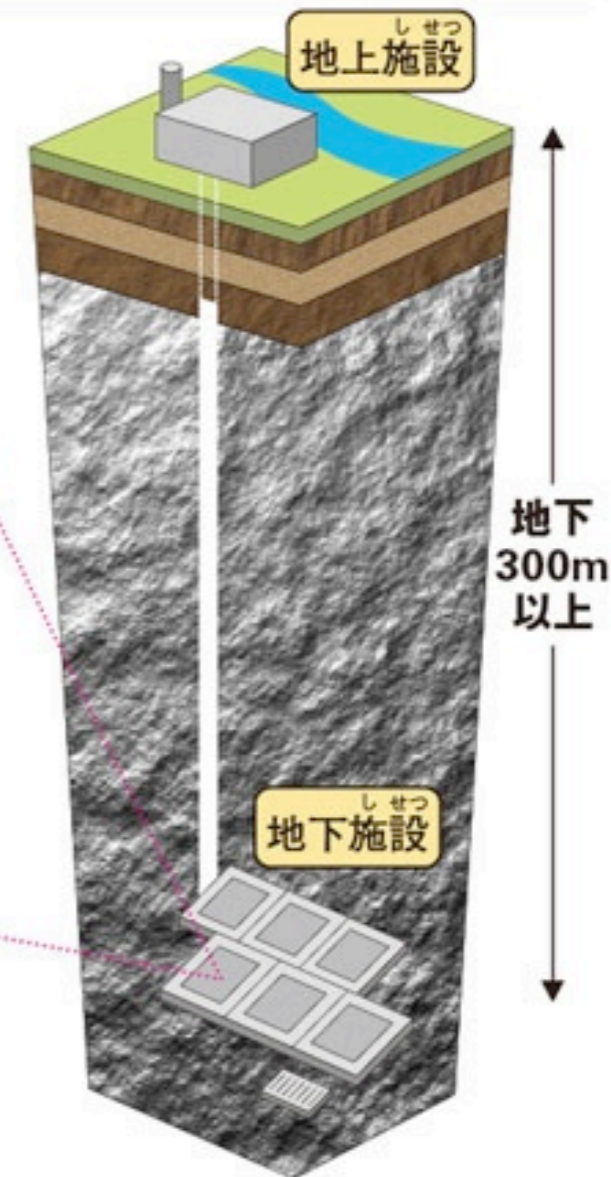
ガラスは放射性物質が地下水に溶け出しにくくします。

厚さ約20cmの金属製の容器。ガラスと地下水が接触するのを防ぎます。

オーバーパックをおお厚さ約70cmの粘土。粘土は水を通しにくく、地下水と放射性物質の移動をおそくします。

地下深くの安定した岩盤は、長期間、放射性物質を閉じ込める力を持っています。また酸素が少なく金属はさびにくくなります。

高レベル放射性廃棄物処分施設



geological disposal

Cf. "Onkalo", Finland

final disposal site : NO candidate site.

Fine.

Grazie per la vostra attenzione.

Gratias ago pro audientia vestra.

Спасибо за внимание.

Merci de votre attention.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

Thank you for your attention.

경청해 주셔서 감사합니다.

谢谢您的关注。

ご清聴ありがとうございました。

鳥居 寛之

Hiroyuki A. TORII