



放射線

鳥居 寛之
小豆川勝見
渡辺雄一郎
著
中川 恵一
執筆協力

科学的に
理解する

基礎からわかる東大教養の講義

丸善出版

「放射線を科学的に理解する

— 基礎からわかる東大教養の講義 —

鳥居寛之・小豆川勝見・渡辺雄一郎 著

中川恵一 執筆協力

丸善出版

本体 2500円＋税

- 1章 放射線とは？《放射線入門》
 - 2章 放射線の性質《放射線物理学 I》
 - 3章 原子力発電で生み出される放射性物質
《原子核物理学・原子力工学》
 - 4章 放射線量の評価《放射線物理学 II》
 - 5章 放射線の測り方《放射線計測学》
 - 6章 環境中での放射性物質《環境放射化学》
 - 7章 放射線の細胞への影響《放射線生物学》
 - 8章 放射線の人体への影響《放射線医学》
 - 9章 放射性物質と農業《植物栄養学・土壤肥料学》
 - 10章 放射線の防護と安全《放射線防護学》
 - 11章 役に立つ放射線《放射線の利用・加速器科学》
- Q&A

放射線を理解するには、物理学・化学・生物学・医学・工学など多くの分野の知識が必要です。しかしこれらすべてを網羅することは難しく、系統立てて学べる機会是非常に少ないのが実情です。

本書は東京大学教養学部で行われた講義をもとに、放射線について多角的に学べるよう配慮しています。日常生活や原発事故にかかわる具体的な例を引きながらやさしくていねいに解説しましたので高校生や一般の方にも広く読んでいただきたいと願っています。

<http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lecture/radiolect-kn.html>

2015年度 Aセメスター 主題科目学術フロンティア講義

放射線

を

科学的に

理解する

金曜 5 限

@ 21 KOMCEE
(West)

K303教室



γ 線



中性子線



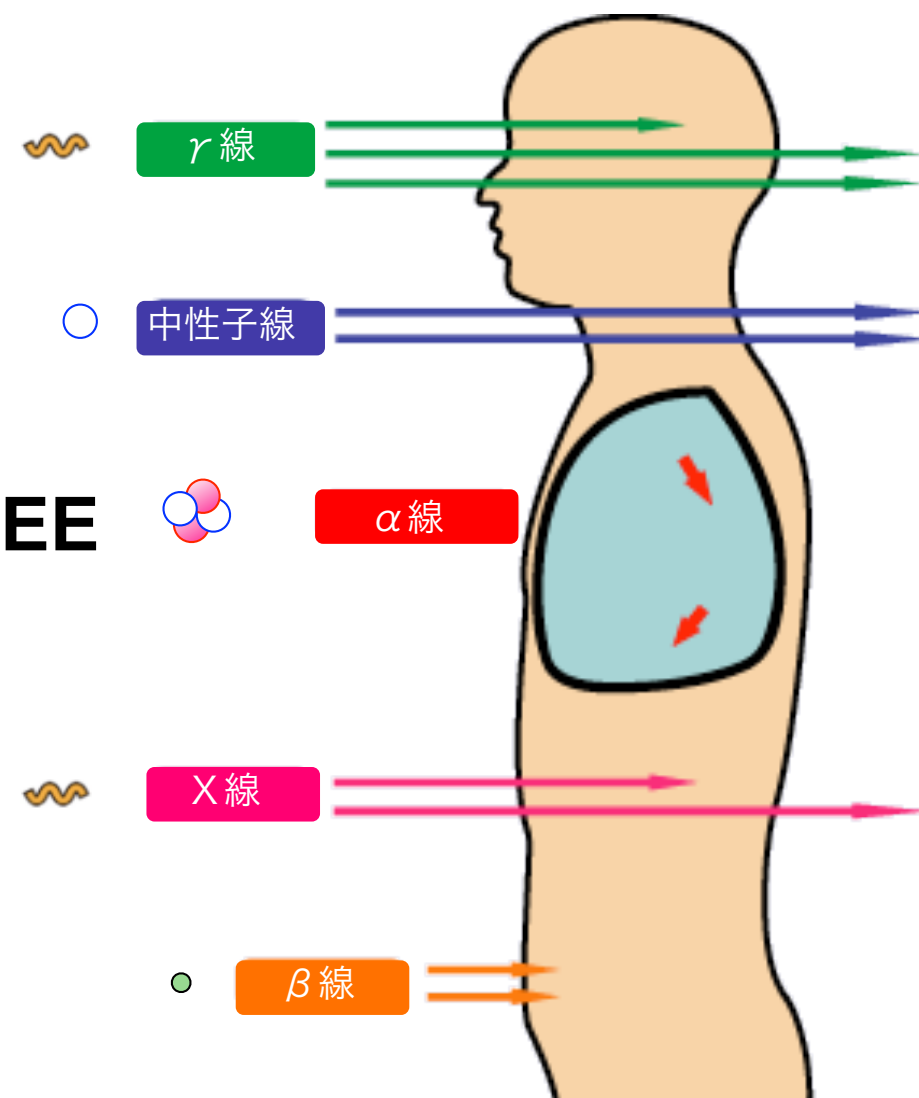
α 線



X線



β 線



担当教員 鳥居 寛之 (粒子線物理学)

小豆川 勝見 (環境分析化学)

渡邊 雄一郎 (生命環境応答学)

東京大学 教養学部 / 大学院総合文化研究科

放射線

を

科学的に

理解する

金曜 5 限

@ 21 KOMCEE
(West)

K303教室

2015 / 10 / 30 (金)



γ 線



中性子線



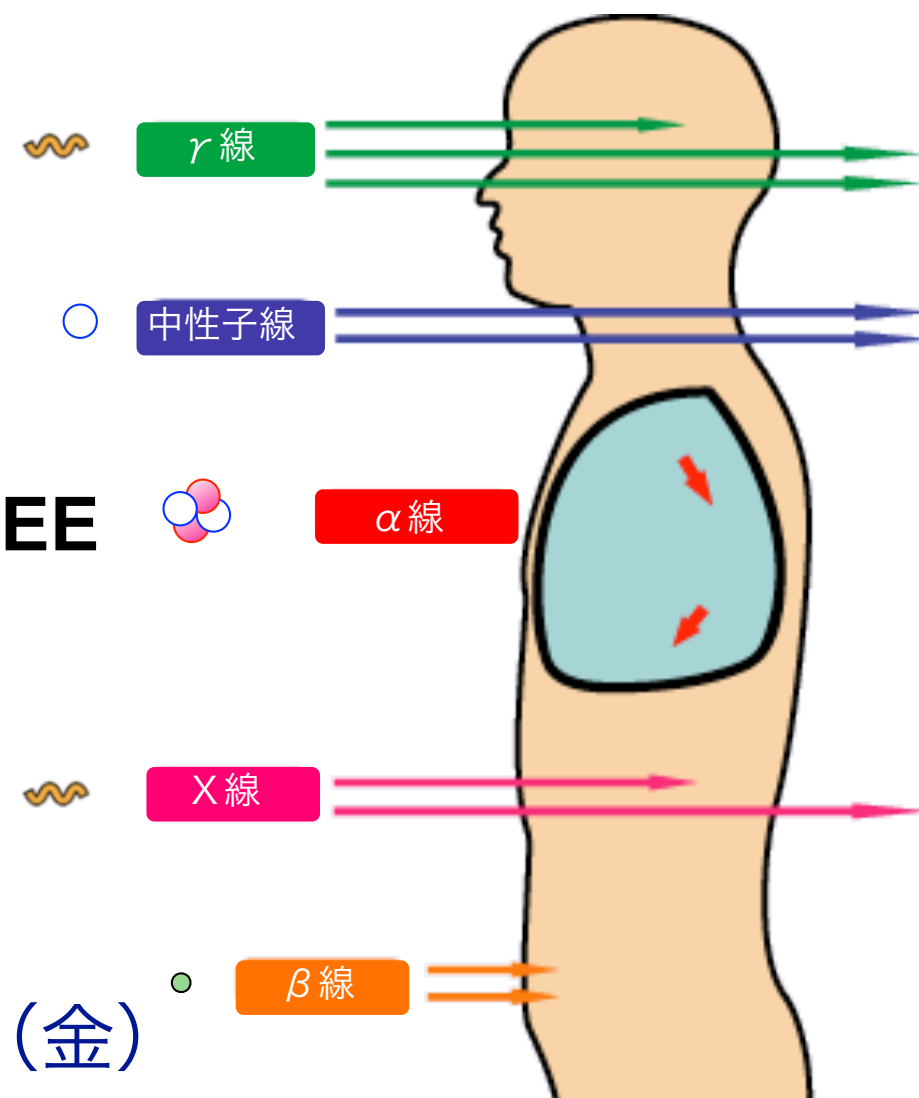
α 線



X線



β 線



第7回

原子核物理学・原子力工学

原子核模型と核構造、核崩壊と核分裂、原子力発電の原理

鳥居 寛之

東京大学 教養学部 / 大学院総合文化研究科

放射線を科学的に理解する

- 9/18 放射線入門 【鳥居】
- 9/25 放射線物理学 【鳥居】
- 10/ 2 放射線計測学 【小豆川】
- 10/ 9 放射線物理・化学 【鳥居】
- 10/16 放射線生物学 【渡邊】
- 10/23 被曝調査・医療支援 【坪倉】
- 10/30 原子核物理学・原子力工学 【鳥居】
- 11/ 6 環境放射化学 【小豆川】
- 11/13 環境放射化学 【小豆川】
- 11/24 放射線医療 【芳賀】
- 11/27 放射性物質汚染と農業 【藤原】
- 12/ 4 放射線の利用 【渡邊】
- 12/11 加速器科学・放射線防護学 【鳥居】

鳥居 寛之

小豆川 勝見

渡邊 雄一郎

《教養学部》

坪倉 正治 《医科学研究所》

芳賀 昭弘 《医学部附属病院放射線科》

藤原 徹 《農学部応用生命化学》

ゲスト講師

- 1章 放射線とは？ 《放射線入門》
- 2章 放射線の性質 《放射線物理学Ⅰ》
- 3章 原子力発電で生み出される放射性物質
《原子核物理学・原子力工学》
- 4章 放射線量の評価 《放射線物理学Ⅱ》
- 5章 放射線の測り方 《放射線計測学》
- 6章 環境中での放射性物質 《環境放射化学》
- 7章 放射線の細胞への影響 《放射線生物学》
- 8章 放射線の人体への影響 《放射線医学》
- 9章 放射性物質と農業
《植物栄養学・土壌肥料学》
- 10章 放射線の防護と安全 《放射線防護学》
- 11章 役に立つ放射線
《放射線の利用・加速器科学》

Q&A

準教科書



**科学的に
理解する**

基礎からわかる東大教養の講義

丸善出版

「放射線を科学的に理解する

— 基礎からわかる東大教養の講義 —」

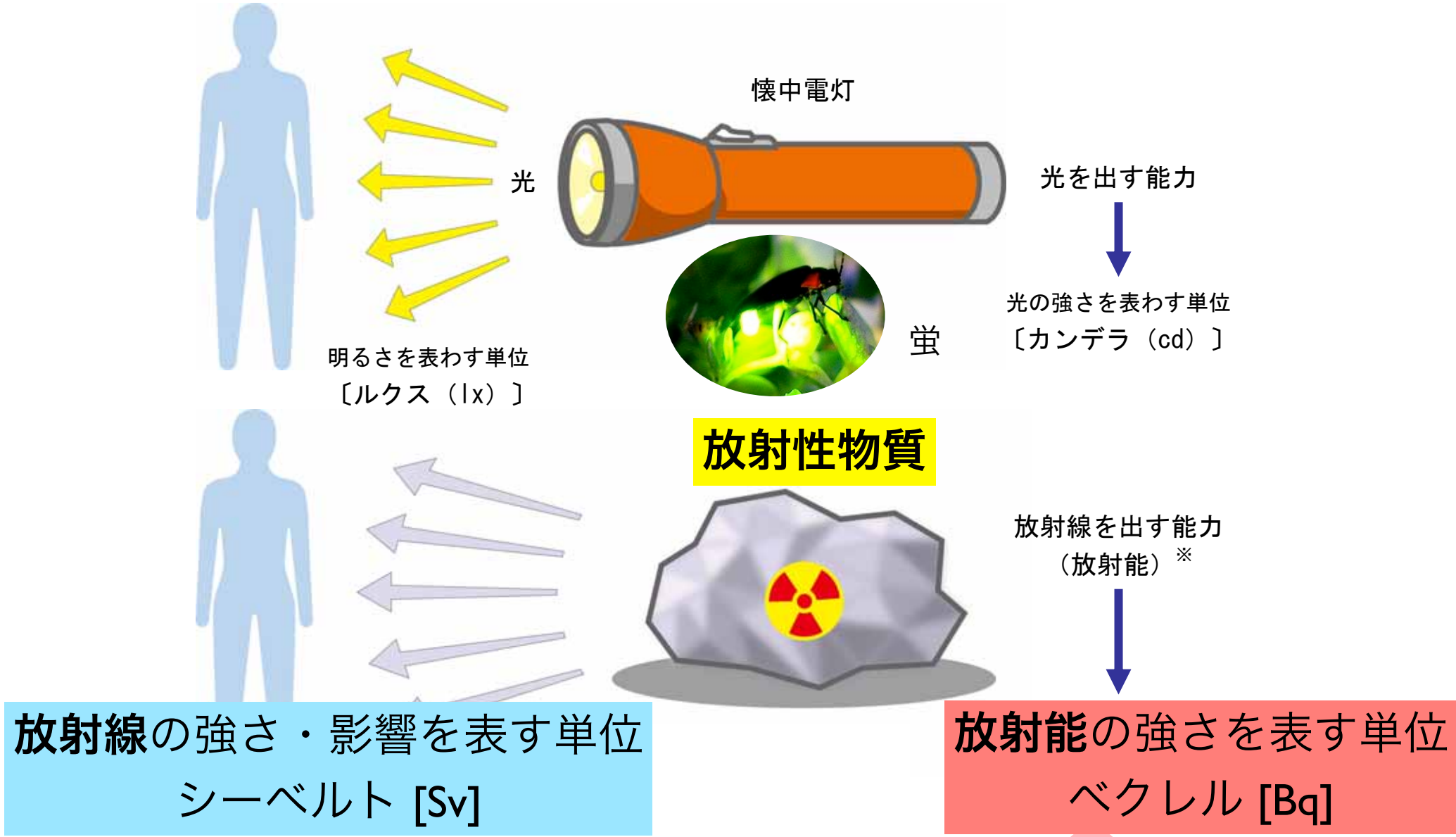
鳥居寛之・小豆川勝見・渡辺雄一郎 著

中川恵一 執筆協力

丸善出版

本体 2500円＋税

放射能と放射線



放射能 (radioactivity) の単位

[Bq] | Bq = 1 dps, [Ci] | Ci = 37 GBq

Becquerel

decay/disintegration
per second

Curie

1 キュリー = 370億ベクレル





分子
molecule

nm (10^{-9} m)

ナノメートル

化学

eV

電子ボルト

Chemistry



原子
atom

原子物理学

Atomic Physics

Å (10^{-10} m)

オングストローム

eV – keV

数電子ボルト～

キロ電子ボルト

錬金術はなぜ失敗したか



原子核
nucleus

原子核物理学

Nuclear Physics

fm (10^{-15} m)

フェムトメートル

MeV

メガ電子ボルト



陽子
proton

素粒子物理学

Particle Physics

am (10^{-18} m)

アトメートル

GeV

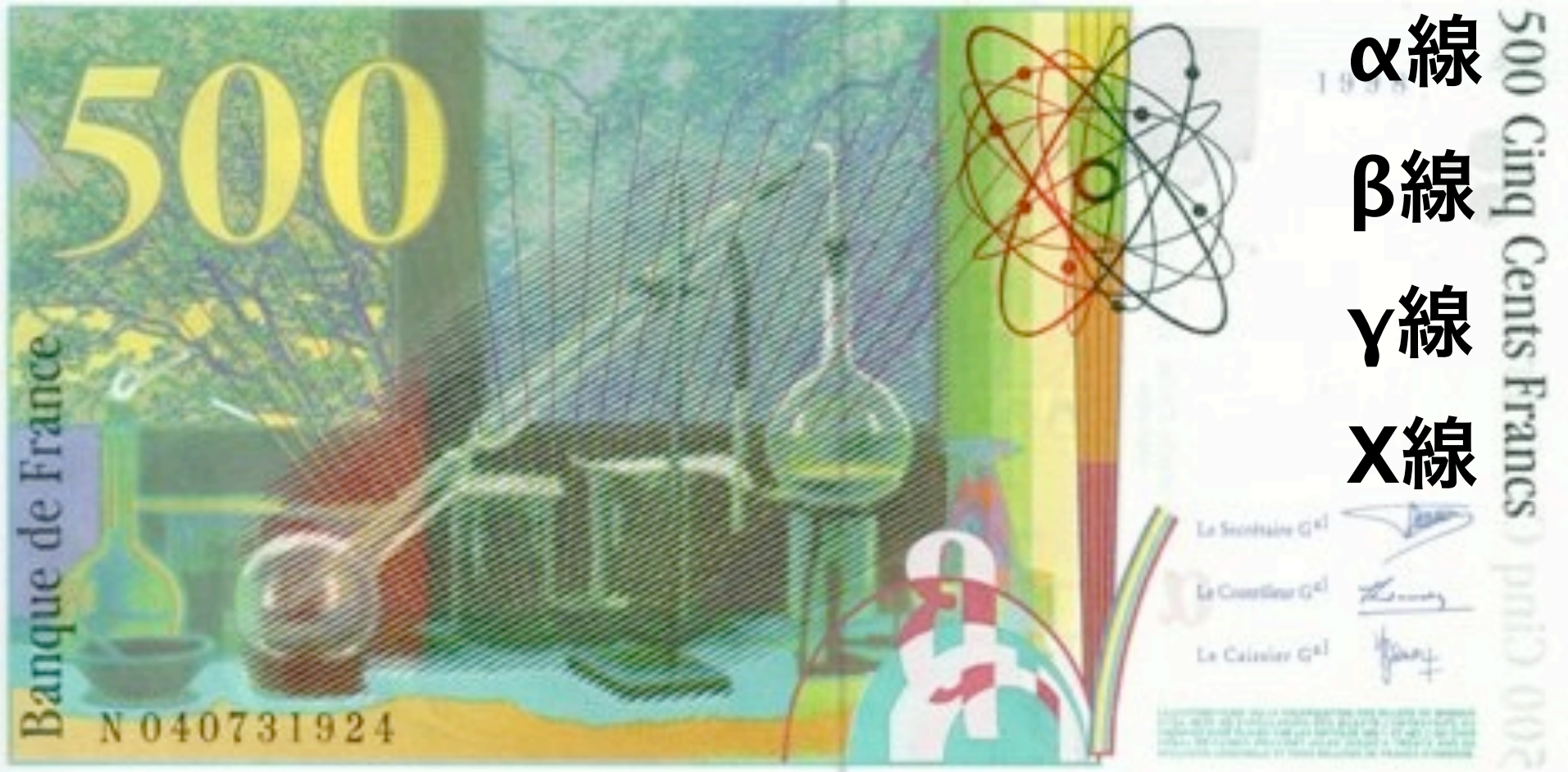
ギガ電子ボルト



クォーク
quark

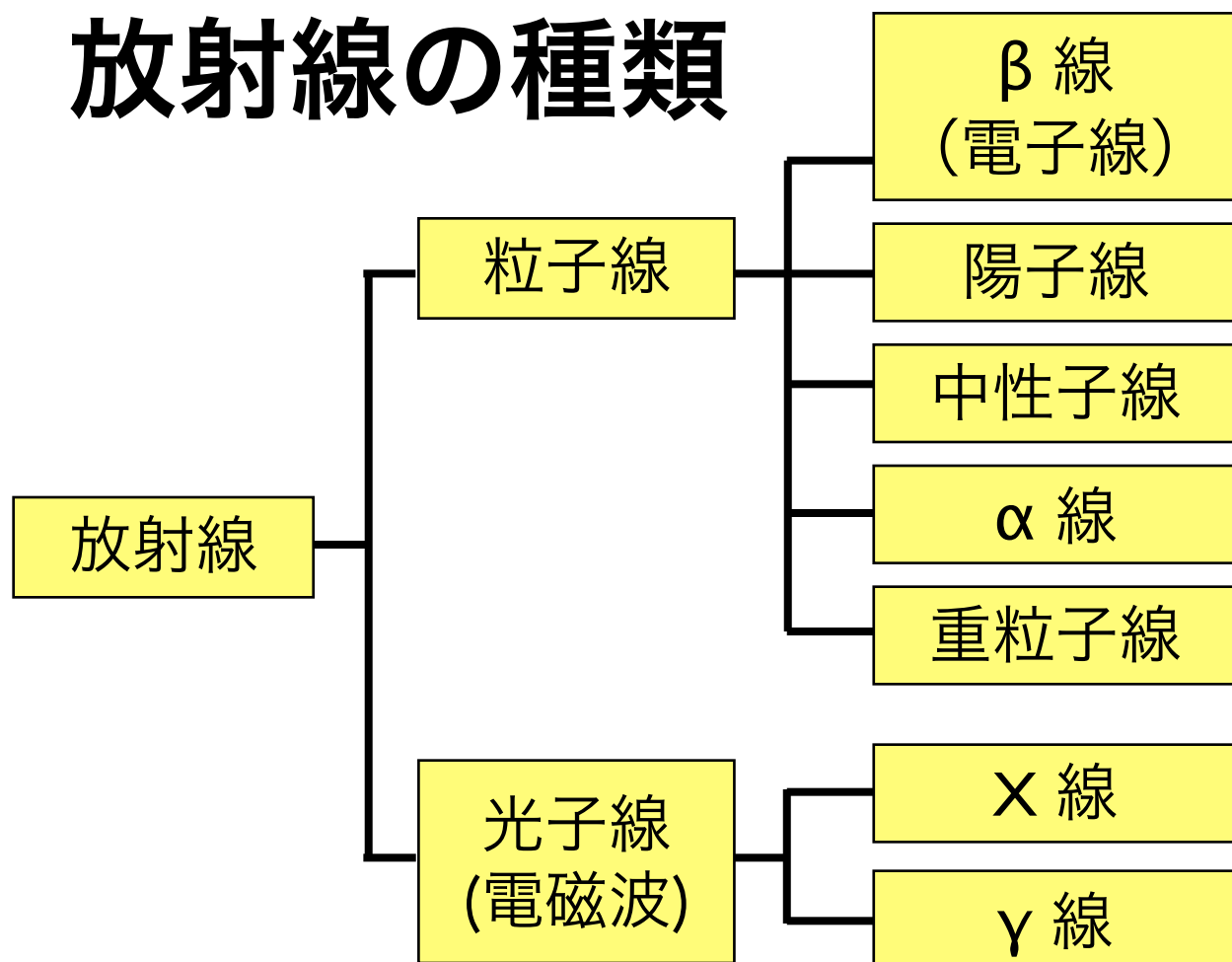


Billet de 500 Francs Français en circulation: 1993–1999

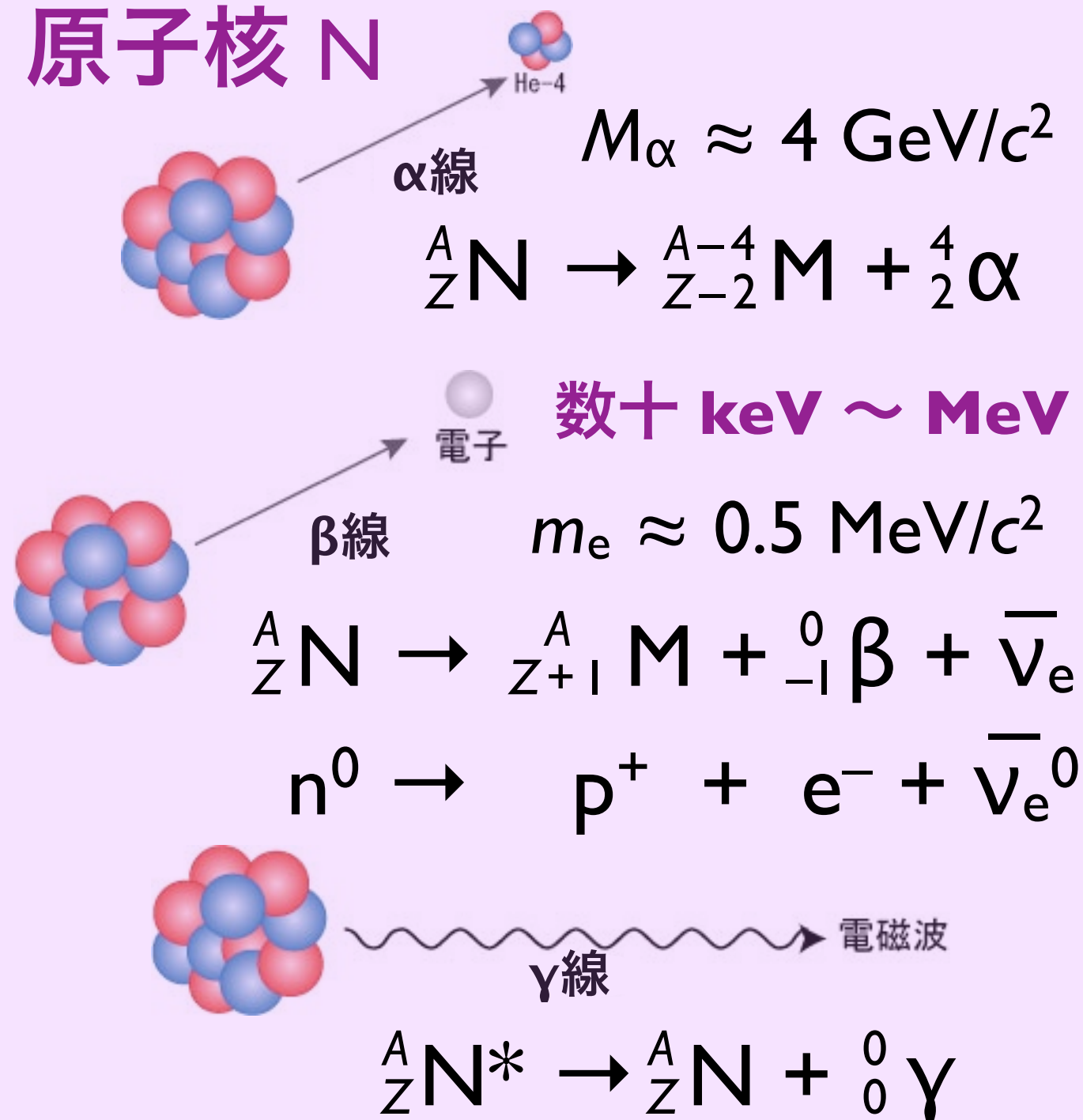


- α線 ヘリウム原子核
- β線 高速の電子
- γ線 光子（電磁波）
- X線 光子（電磁波）

放射線の種類



原子核 N



放射線のもつエネルギーは？

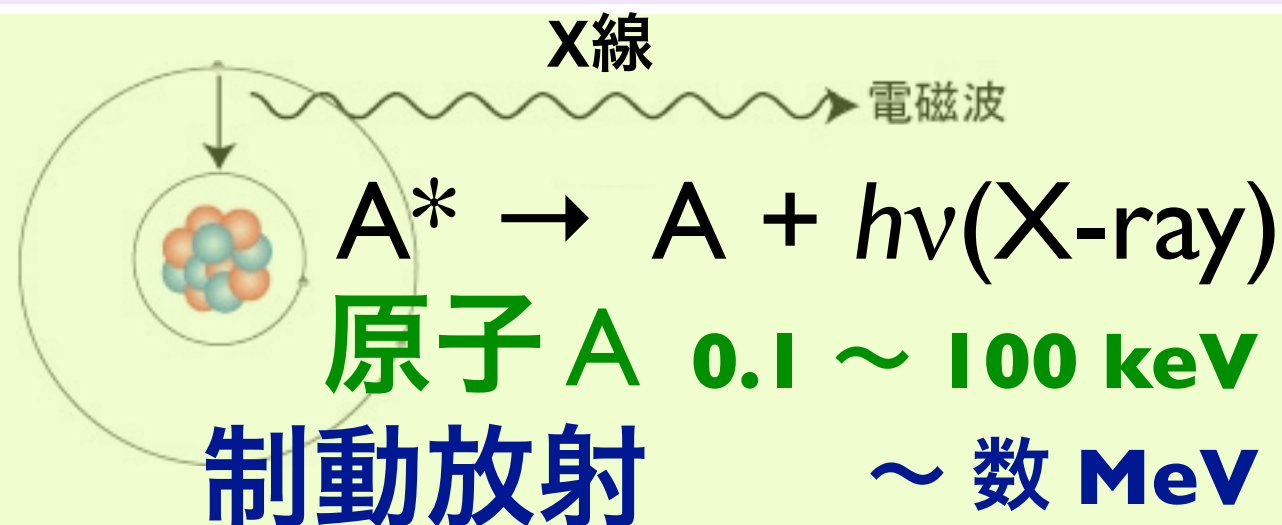
☞ 数十 keV ~ 数 MeV (α, β, γ)

Cf. 原子の束縛エネルギーは？

☞ 最外殻電子で **10 eV 程度**
(1 eV = 96 kJ/mol)

放射線の速度は？

☞ 光速の数% ~ **100%**



原子核物理学

原子 = **atom**

molecule < mole + -cule
(小さな塊)

ラテン語

atom < atomus < ατομος < a- + témnein + -os
(切ることができない)

古典ギリシャ語

an**atomy** < ana- + témnein

tomography < tomo- + -graphy

tom-, -tome, -tomy = to cut

-graphy = writing, drawing

周期表

	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	<table border="1"> <tr> <td>C 固体</td> <td colspan="5">金属</td> <td colspan="2">非金属元素</td> </tr> <tr> <td>Hg 液体</td> <td>アルカリ金属</td> <td>アルカリ土類金属</td> <td>ランタノイド</td> <td>遷移元素</td> <td>卑金属</td> <td>非金属元素</td> <td>希ガス</td> </tr> <tr> <td>H 気体</td> <td></td> <td></td> <td>アクチノイド</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rf Unknown</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>										C 固体	金属					非金属元素		Hg 液体	アルカリ金属	アルカリ土類金属	ランタノイド	遷移元素	卑金属	非金属元素	希ガス	H 気体			アクチノイド					Rf Unknown								5 B 10.811	6 C 12.010	7 N 14.006	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.179
C 固体	金属					非金属元素																																												
Hg 液体	アルカリ金属	アルカリ土類金属	ランタノイド	遷移元素	卑金属	非金属元素	希ガス																																											
H 気体			アクチノイド																																															
Rf Unknown																																																		
3	11 Na 22.989	12 Mg 24.305											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 83.798																																
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 (97.907)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.90	46 Pd 106.42	47 Ag 107.86	48 Cd 112.41	49 In 114.81	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.60	53 I 126.90	54 Xe 131.29																																
6	55 Cs 132.90	56 Ba 137.32	57-71	72 Hf 178.49	73 Ta 180.94	74 W 183.84	75 Re 186.20	76 Os 190.23	77 Ir 192.21	78 Pt 195.08	79 Au 196.96	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98	84 Po (208.98)	85 At (209.98)	86 Rn (222.01)																																
7	87 Fr (223)	88 Ra (226)	89-103	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 Uut (284)	114 Ff (289)	115 Uup (288)	116 Lv (292)	117 Uus	118 Uuo (294)																																

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

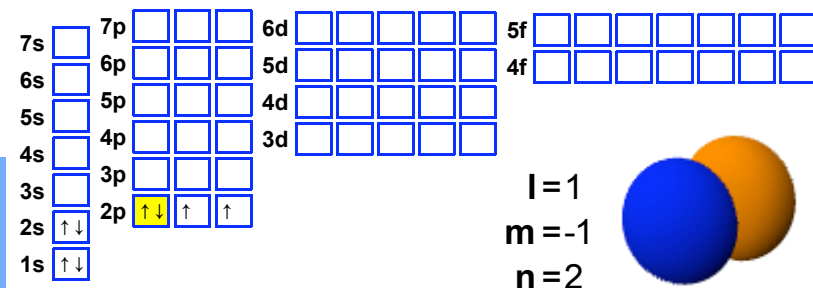
周期表 Design and Interface Copyright © 1997 Michael Dayah. <http://www.ptable.com/> Last updated: May 30, 2008

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	68 Er 167.25	69 Tm 168.93	70 Yb 173.05	71 Lu 174.96
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)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (262)

周期表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H 1	2 He 0																
2	3 Li 1	4 Be 2																
3	11 Na 1	12 Mg 2																
4	19 K 1	20 Ca 2	21 Sc 3	22 Ti 4	23 V 5	24 Cr 6	25 Mn 4	26 Fe 3	27 Co 4	28 Ni 4	29 Cu 2	30 Zn 2	31 Ga 3	32 Ge 4	33 As 5	34 Se 6	35 Br 7	36 Kr 4
5	37 Rb 1	38 Sr 2	39 Y 3	40 Zr 4	41 Nb 5	42 Mo 6	43 Tc 7	44 Ru 6	45 Rh 6	46 Pd 4	47 Ag 4	48 Cd 2	49 In 3	50 Sn 4	51 Sb 5	52 Te 6	53 I 7	54 Xe 6
6	55 Cs 3	56 Ba 2	57-71 Lanthanides	72 Hf 4	73 Ta 5	74 W 6	75 Re 7	76 Os 7	77 Ir 6	78 Pt 6	79 Au 7	80 Hg 2	81 Tl 3	82 Pb 4	83 Bi 5	84 Po 6	85 At 7	86 Rn 6
7	87 Fr 3	88 Ra 2	89-103 Actinides	104 Rf 4	105 Db 5	106 Sg 6	107 Bh 7	108 Hs 7	109 Mt 6	110 Ds 6	111 Rg 7	112 Cn 2	113 Uut 3	114 Fl 4	115 Uup 5	116 Lv 6	117 Uus 7	118 Uuo 6

8
O
酸素
15.9994
[He]2s² 2p⁴



s
p
d
f

1s² 2s² 2p⁴

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

周期表 Design and Interface Copyright © 1997 Michael Dayah. <http://www.ptable.com/> Last updated: May 30, 2008

57 La 3	58 Ce 4	59 Pr 4	60 Nd 3	61 Pm 3	62 Sm 3	63 Eu 3	64 Gd 3	65 Tb 4	66 Dy 3	67 Ho 3	68 Er 3	69 Tm 3	70 Yb 3	71 Lu 3
89 Ac 3	90 Th 4	91 Pa 5	92 U 6	93 Np 6	94 Pu 6	95 Am 4	96 Cm 4	97 Bk 4	98 Cf 4	99 Es 4	100 Fm 3	101 Md 3	102 No 3	103 Lr 3

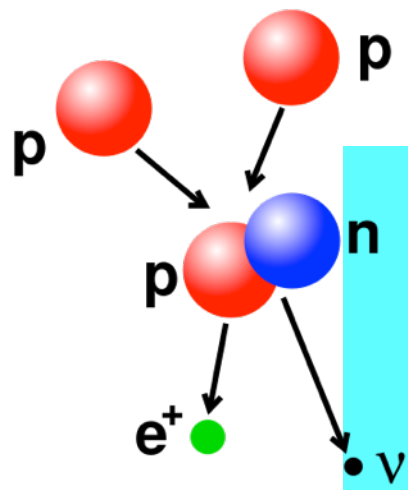
Periodic Table of Elements

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	1 H 1 1.00794	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 20%;"> <p>Atomic</p> <p>Name Hydrogen-3</p> <p>Mass 3.01604927767</p> <p>Binding Energy 2.827266</p> <p>Abundance 0%</p> <p>Half-Life 12.32 y</p> <p>Decay Width 1.174e-30</p> </div> <div style="width: 30%;"> <p>α Alpha decay</p> <p>p Proton emission</p> <p>n Neutron emission</p> <p>SF Spontaneous fission</p> </div> <div style="width: 30%;"> <p>β Beta decay</p> <p>β+ Beta+ decay</p> <p>EC Electron capture</p> <p>□ Stable</p> </div> <div style="width: 20%;"> <p>Selected All</p> </div> </div>																	2 He 2
2	3 Li 2	4 Be 2	5 B 2	6 C 3	7 N 3	8 O 3	9 F 2	10 Ne 3											
3	11 Na 2	12 Mg 3											13 Al 2	14 Si 4	15 P 3	16 S 5	17 Cl 3	18 Ar 7	
4	19 K 3	20 Ca 9	21 Sc 5	22 Ti 6	23 V 4	24 Cr 5	25 Mn 4	26 Fe 7	27 Co 5	28 Ni 8	29 Cu 2	30 Zn 7	31 Ga 2	32 Ge 7	33 As 3	34 Se 9	35 Br 2	36 Kr 9	
5	37 Rb 5	38 Sr 9	39 Y 5	40 Zr 8	41 Nb 5	42 Mo 9	43 Tc 5	44 Ru 10	45 Rh 5	46 Pd 9	47 Ag 6	48 Cd 11	49 In 2	50 Sn 11	51 Sb 3	52 Te 11	53 I 3	54 Xe 13	
6	55 Cs 4	56 Ba 8	57-71	72 Hf 8	73 Ta 7	74 W 7	75 Re 2	76 Os 11	77 Ir 7	78 Pt 9	79 Au 5	80 Hg 11	81 Tl 3	82 Pb 6	83 Bi 3	84 Po 3	85 At 1	86 Rn 2	
7	87 Fr 3	88 Ra 4	89-103	104 Rf 1	105 Db 1	106 Sg 1	107 Bh 2	108 Hs 2	109 Mt 1	110 Ds 1	111 Rg 1	112 Cn 1	113 Uut 1	114 Fl 1	115 Uup 1	116 Lv 1	117 Uus 1	118 Uuo 1	

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

Periodic Table Design and Interface Copyright © 1997 Michael Dayah. <http://www.ptable.com/> Last updated: May 30, 2008

57 La 3	58 Ce 8	59 Pr 3	60 Nd 7	61 Pm 3	62 Sm 8	63 Eu 4	64 Gd 7	65 Tb 3	66 Dy 8	67 Ho 5	68 Er 11	69 Tm 5	70 Yb 11	71 Lu 4
89 Ac 3	90 Th 6	91 Pa 6	92 U 6	93 Np 3	94 Pu 6	95 Am 3	96 Cm 8	97 Bk 5	98 Cf 7	99 Es 4	100 Fm 4	101 Md 3	102 No 3	103 Lr 1



Periodic Table of Elements

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

陽子 p
 重陽子 pn
 三重陽子 pnn
原子核
 アルファ粒子
 $\alpha = ppnn$
 ${}^3\text{He}^{++} = ppn$

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-4	ヘリウム3	原子

放射性物質とは

放射性核種

= 放射性同位体

= 不安定原子核

を含む原子からできている物質

放射性物質とは

放射性核種
= 放射性同位体
= 不安定原子核

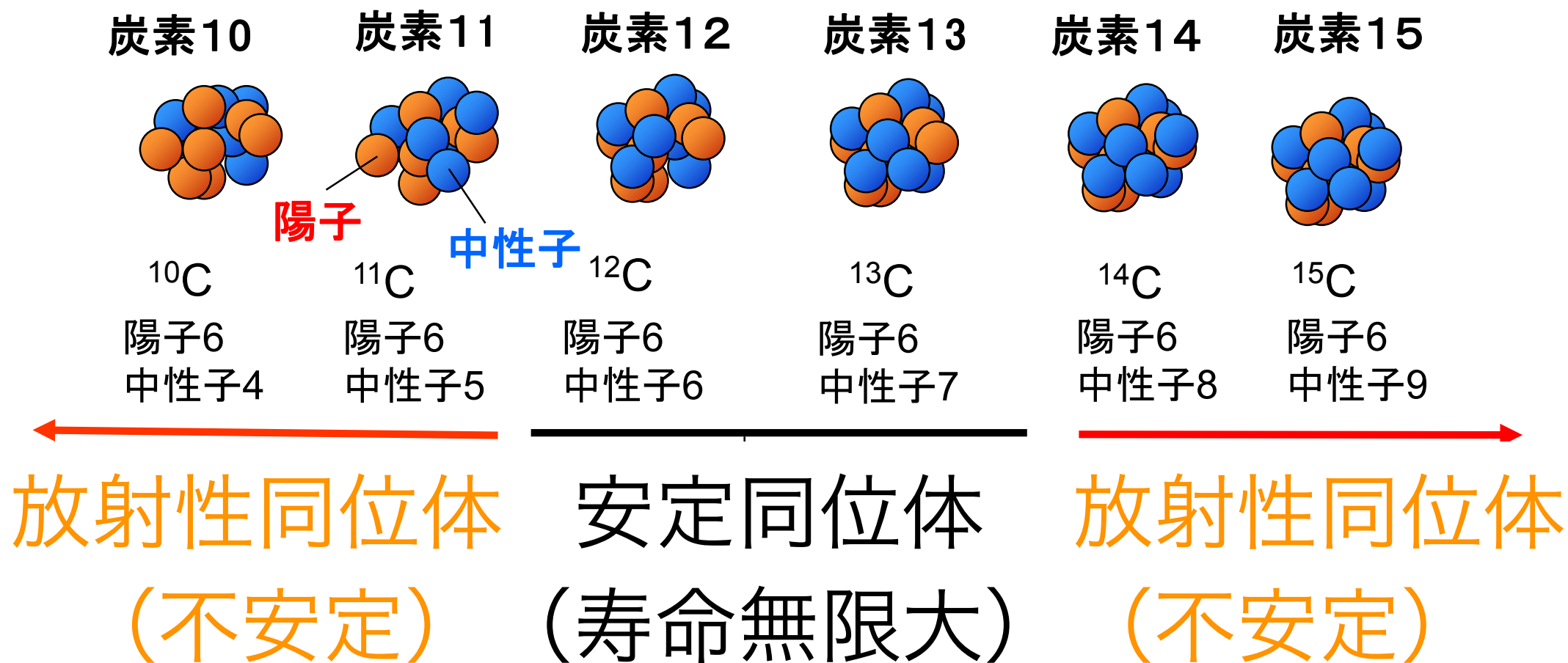
を含む原子からできている物質

$$\text{質量数 } A = Z + N$$



陽子数 Z が同じなら化学的には同じ元素
中性子数 N が違う原子核が多種存在する

炭素原子核の例



同位体 (原子番号(=陽子数)は同じで中性子数が異なる**原子核**)

同位体間では化学的性質は同じ

半減期

19.3秒

20.3分

99%

1%

存在比

5730年

2.4秒

炭素10

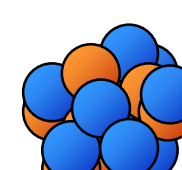
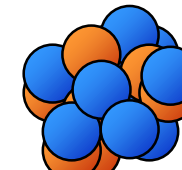
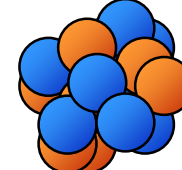
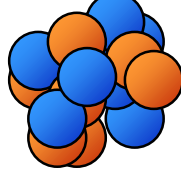
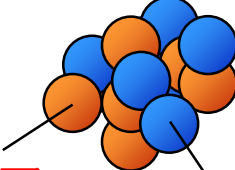
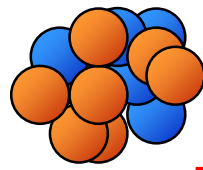
炭素11

炭素12

炭素13

炭素14

炭素15



^{10}C

^{11}C

^{12}C

^{13}C

^{14}C

^{15}C

陽子6

陽子6

陽子6

陽子6

陽子6

陽子6

中性子4

中性子5

中性子6

中性子7

中性子8

中性子9

陽子過剰になると?

(寿命がある: β^+ 壊変、電子捕獲(EC))

天然に存在=**安定同位体**
寿命が無限大

中性子過剰になると?

(寿命がある: β^- 壊変)

放射性同位体

半減期

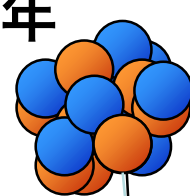
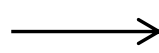
5730 ± 40年



中性子

炭素14

(放射性同位体)



陽子

窒素14

(安定)

+ e^-

電子

(β 線: 放射線)

+ $\bar{\nu}_e$

反ニュートリノ

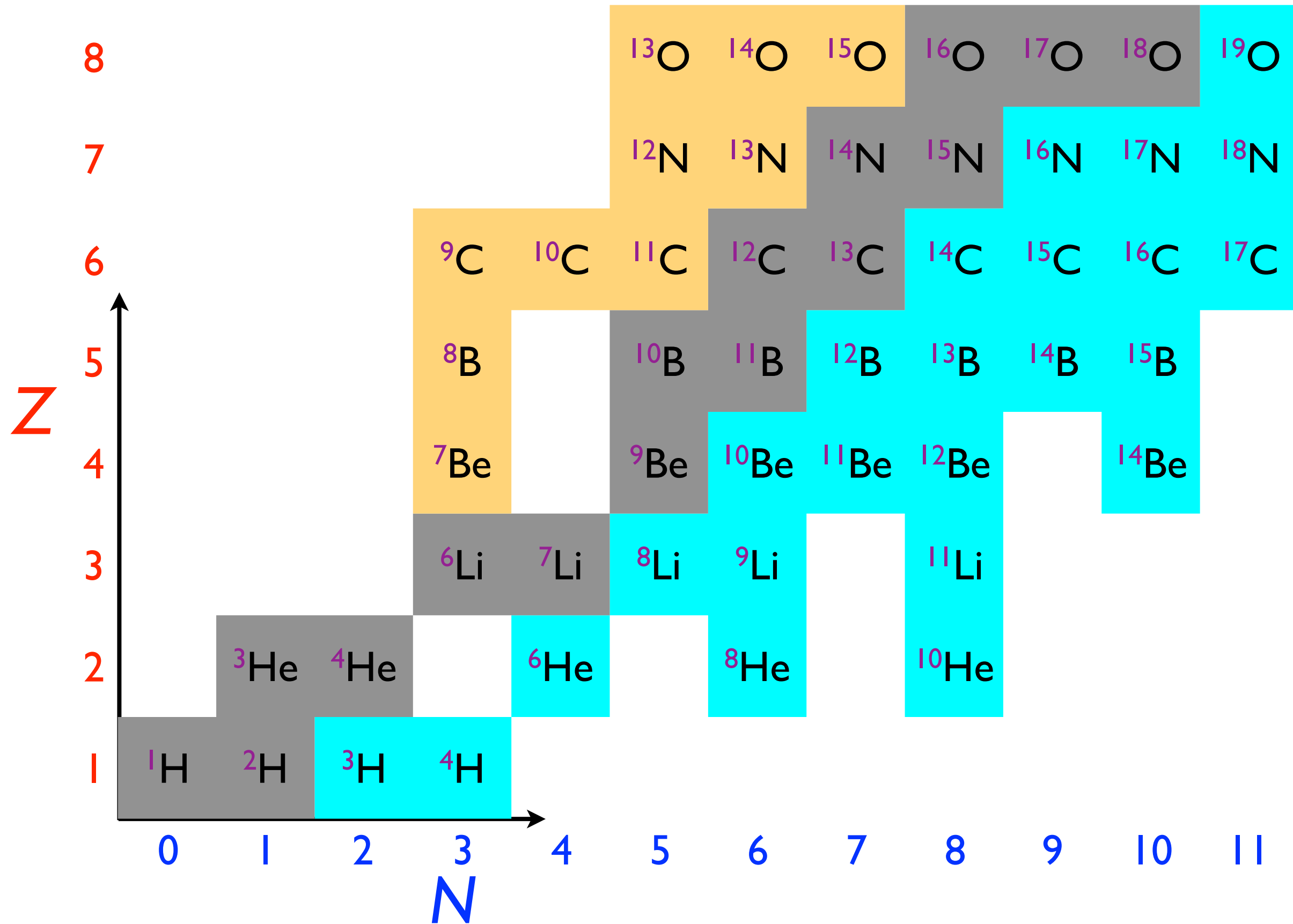
放射性同位体

ベータマイナス壊変 (崩壊)



β^- decay

核图表



Nuclear Science

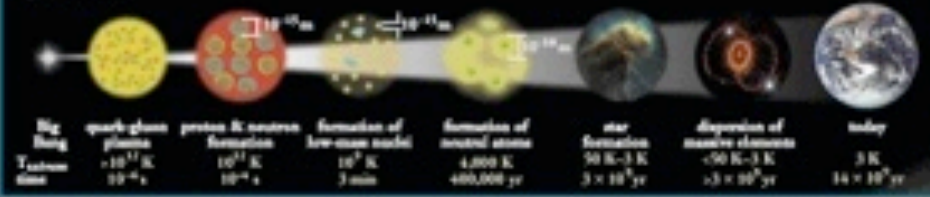
Nuclear Science is the study of the structure, properties, and interactions of the atomic nuclei. Nuclear scientists calculate and measure the masses, shapes, sizes, and decays of nuclei at rest and in collisions. They ask questions, such as "Why do nucleons stay in the nucleus? What combinations of protons and neutrons are possible? What happens when nuclei are compressed or rapidly cooled? What is the origin of the nuclei found on Earth?"

Legend

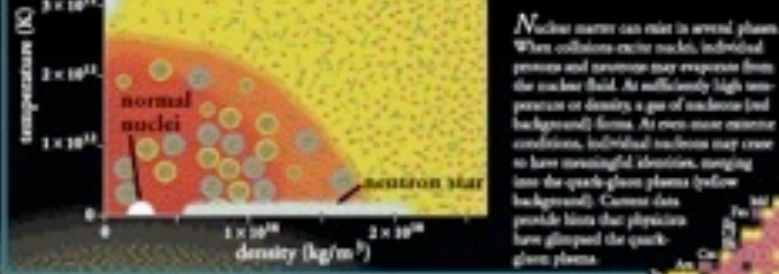
- electron (e^-)
- quark
- photon (γ)
- gluon field
- gluon
- photon (γ)
- neutrino (ν)
- antineutrino ($\bar{\nu}$)
- photon (γ)
- Neutron = $A - Z$
- Proton = Z
- Atomic Number = Z
- Mass Number = A

Expansion of the Universe

After the Big Bang, the universe expanded and cooled. At about 10^{-35} second, the universe consisted of a soup of quarks, gluons, electrons, and neutrinos. When the temperature of the Universe, T_{univ} , cooled to about 10^9 K, this soup condensed into protons, neutrons, and electrons. As time progressed, some of the protons and neutrons formed deuterium, helium, and lithium nuclei. Still later, electrons combined with protons and these low-mass nuclei to form neutral atoms. Due to gravity, clouds of atoms condensed into stars, where hydrogen and helium fused into more massive chemical elements. Expanding stars (supernovae) from the most massive elements and disperse them into space. Our earth was formed from supernova debris.

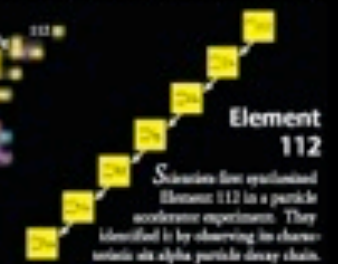


Phases of Nuclear Matter



Unstable Nuclei

Stable nuclei form a narrow white band on the Chart of the Nuclides. Scientists produce unstable nuclei for from this band and study their decays, thereby learning about the extremes of nuclear conditions. In its present form, this chart contains about 2500 different nuclei. Nuclear theory predicts that there are at least 4000 more to be discovered with $Z \leq 112$.



Radioactivity

Alpha Decay
 $^{238}_{92}\text{U} \rightarrow ^{234}_{90}\text{Th} + ^4_2\text{He}$

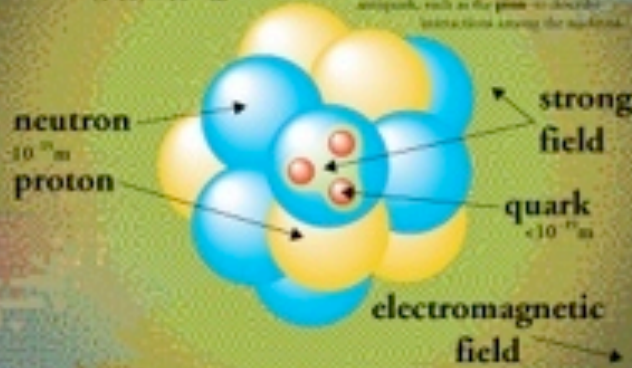
Beta Minus Decay
 $^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}_e$

Beta Plus Decay
 $^{11}_6\text{C} \rightarrow ^{11}_5\text{B} + e^+ + \nu_e$

Gamma Decay
 $^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow ^{60}_{27}\text{Co} + \gamma$

Radioactive decay transforms a nucleus by emitting different particles. In alpha decay, the nucleus releases a ^4_2He nucleus—an alpha particle. In beta decay, the nucleus either emits an electron and antineutrino for a proton and neutrino or captures an atomic electron and emits a neutrino. A positron is the antiparticle of the electron. Antineutrino is composed of anti-particles. Both alpha and beta decays change the original nucleus into a nucleus of a different chemical element. In gamma decay, the nucleus lowers its internal energy by emitting a photon—a gamma ray. This decay does not modify the chemical properties of the atom.

The Nucleus



In an alpha emission event, the nucleus at distance r emits an alpha particle. The nucleus recoils in the opposite direction with momentum p . The alpha particle has a mass m_α and a charge q_α .

Nuclear Energy

Fission
 $^{235}_{92}\text{U} + n \rightarrow ^{141}_{54}\text{Xe} + ^{90}_{38}\text{Sr} + 2n$

Fusion
 $^2_1\text{H} + ^3_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + n$

In the early stages of nuclear evolution, of our sun and other stars, hydrogen fuses to form helium, releasing energy in the form of photons (light) and neutrinos. During the later stages of nuclear evolution, more massive nuclei up to and beyond uranium are synthesized by fusion. By measuring the number of reactions that occur from the Sun, scientists recently have demonstrated that reactions must have a mass greater than iron.

Chart of the Nuclides

The Chart of the Nuclides presents in graphic form all known nuclei with atomic number, Z , and neutron number, N . Each nuclide is represented by a box colored according to its predominant decay mode. Magic numbers ($2, 8, 20, 28, 50, 82$ and 126) are indicated by a rectangle on the chart. They correspond to major shell gaps and show regions of greater nuclear binding energy.



- Color Key**
- Stable
 - Spontaneous fission
 - Alpha particle emission
 - Beta minus emission
 - Beta plus emission or electron capture

Applications

Radioactive Dating
Naturally occurring radioactive isotopes such as ^{14}C are used to date objects that were once living, such as wood. For example, from a study of artifacts found at the site, scientists determined that the landscape was built nearly 4,000 years ago.

Smoke Detectors
Many smoke detectors use a small amount of the alpha emitter ^{241}Am to ionize the air. Smoke entering the detector reduces the current and sets off the alarm.

Nuclear Medicine
Radioactive isotopes, such as ^{201}Tl , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, and ^{131}I , are commonly used in the diagnosis and treatment of illness. Positron emission tomography (PET) uses ^{18}F and is used in Positron Emission Tomography (PET) to generate images of brain activity.

Space Exploration
Radium and alpha particles in naturally occurring elements present in Martian rocks. On Earth, nuclear reactors are used to study some form, mineral compositions or an environment.

Nuclear Reactors
Nuclear reactors are the basis of ^{235}U or ^{239}Pu nuclei to produce electric power. Reactors and other nuclear applications generate radioactive waste. Disposal of this waste is a subject of current research.

Magnetic Resonance Imaging
Magnetic Resonance Imaging (MRI) makes use of atomic transitions involving the magnetic field of a nucleus to study the local chemical environment. This technique accurately maps the density of hydrogen to produce three-dimensional images of the human body.

www.CPEPweb.org

Nuclear Science

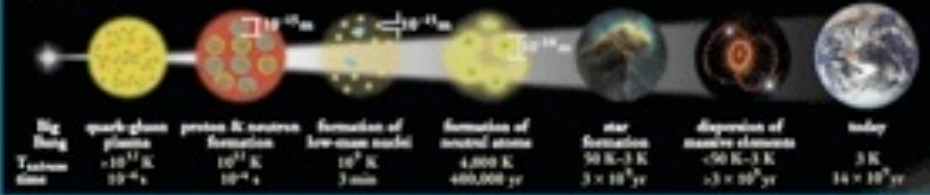
Nuclear Science is the study of the structure, properties, and interactions of the atomic nuclei. Nuclear scientists calculate and measure the masses, shapes, sizes, and decays of nuclei at rest and in collisions. They ask questions, such as "Why do nucleons stay in the nucleus? What combinations of protons and neutrons are possible? What happens when nuclei are compressed or rapidly cooled? What is the origin of the nuclei found on Earth?"

Legend

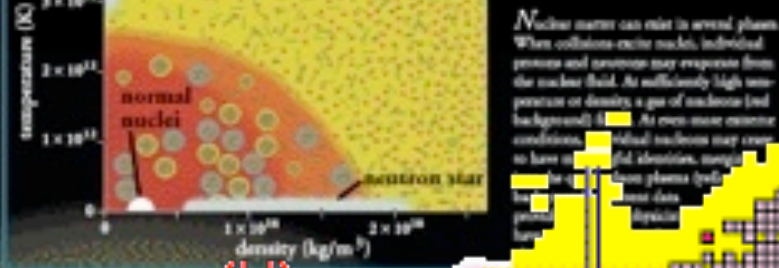
- electron (e^-)
- quark
- gluon field
- photon
- photon (γ)
- neutrino (ν)
- gluon
- photon (γ)
- neutrino (ν)
- photon (γ)
- Neutron = $A - Z$

Expansion of the Universe

After the Big Bang, the universe expanded and cooled. At about 10^{-35} second, the universe consisted of a soup of quarks, gluons, electrons, and neutrinos. When the temperature of the Universe, $T_{universe}$, cooled to about 10^9 K, this soup condensed into protons, neutrons, and electrons. As time progressed, some of the protons and neutrons formed deuterium, helium, and lithium nuclei. Still later, electrons combined with protons and these low-mass nuclei to form neutral atoms. Due to gravity, clouds of atoms condensed into stars, where hydrogen and helium fused into more massive chemical elements. Expanding stars (supernovae) from the most massive elements and disperse them into space. Our earth was formed from supernova debris.

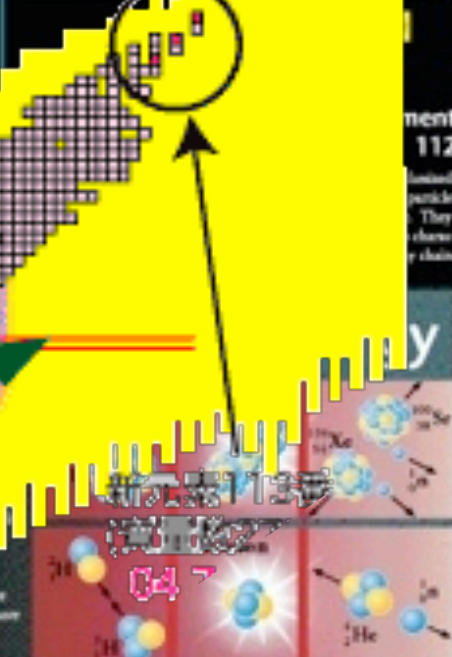


Phases of Nuclear Matter



Unstable Nuclei

Stable nuclei form a narrow white band on the Chart of the Nuclides. Scientists produce unstable nuclei for from this band and study their decays, thereby learning about the extremes of nuclear conditions. In its present form, this chart contains about 2500 different nuclei. Nuclear theory predicts that there are about 5000 more.



Radioactivity

Alpha Decay
 $^{238}_{92}\text{U} \rightarrow ^{234}_{90}\text{Th} + ^4_2\text{He}$

Beta Minus Decay
 $^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}_e$

Beta Plus Decay
 $^{11}_6\text{C} \rightarrow ^{11}_5\text{B} + e^+ + \nu_e$

Gamma Decay
 $^{60}_{27}\text{Co}^* \rightarrow ^{60}_{27}\text{Co} + \gamma$

Radioactive decay transforms a nucleus by emitting different particles. In alpha decay, the nucleus releases a ^4_2He nucleus—an alpha particle. In beta decay, the nucleus either emits an electron and an antineutrino for a proton and neutron) or captures an atomic electron and emits a neutrino. A positron is the name for the antiparticle of the electron. Antineutrino is composed of anti-particles. Both alpha and beta decays change the original nucleus into a nucleus of a different chemical element. In gamma decay, the nucleus loses its internal energy by emitting a photon—a gamma ray. This decay does not modify the chemical properties of the atom.

The Nuclides

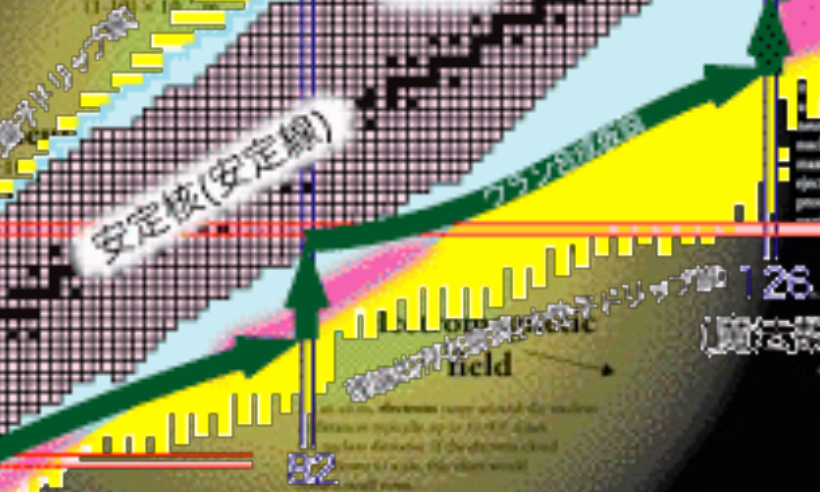


Chart of the Nuclides

The Chart of the Nuclides presents in graphic form all known nuclei with atomic number, Z, and neutron number, N. Each nuclide is represented by a square according to its predominant decay mode. Magic numbers (2 or Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82 and 126) are indicated by a triangle on the chart. They correspond to major shell gaps and show regions of greater nuclear binding energy.

Color Key

- Stable
- Spontaneous fission
- Alpha particle emission
- Beta minus emission
- Beta plus emission or electron capture

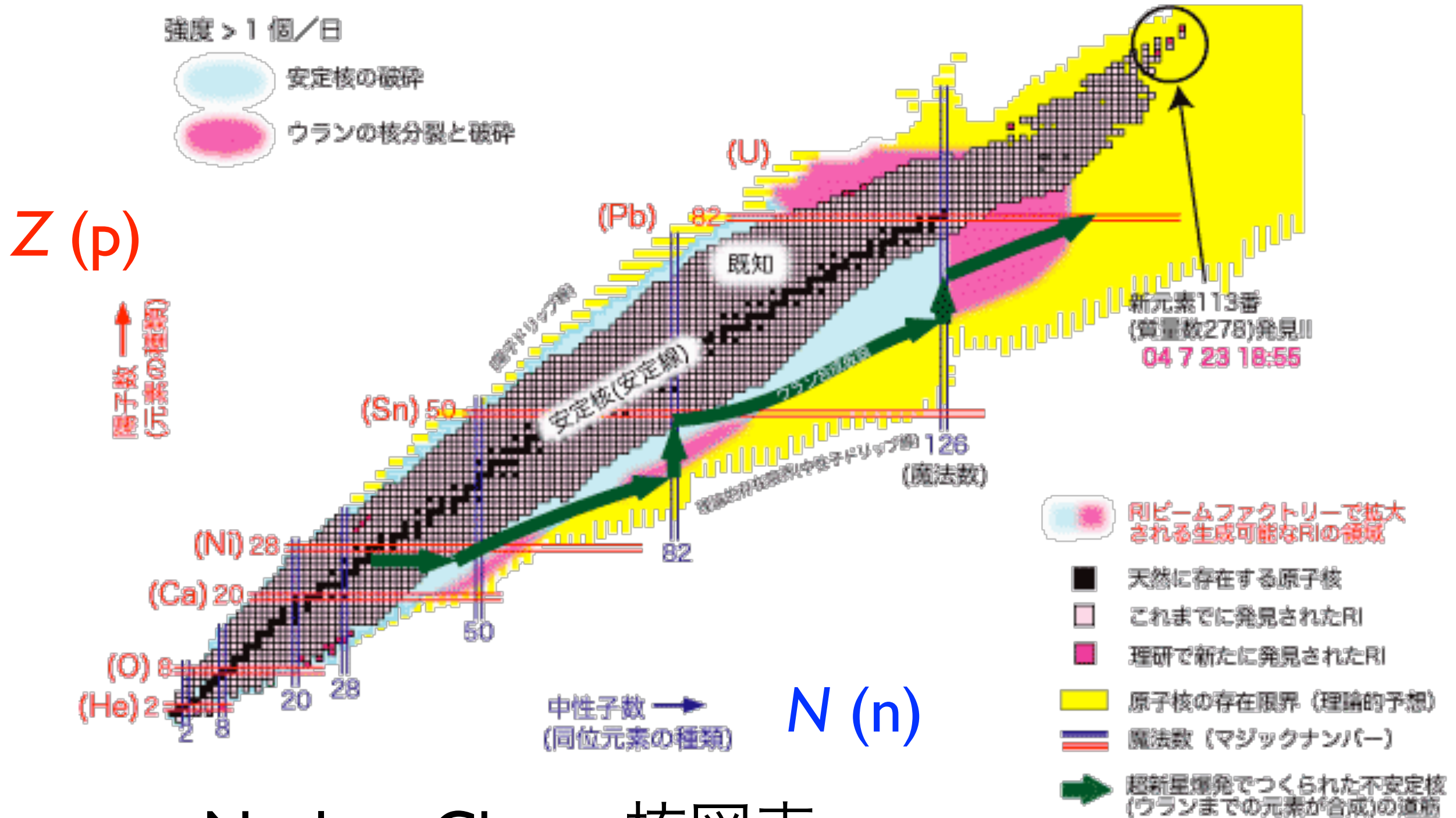
Applications

- Radioactive Dating:** Recently discovered radioactive isotopes such as ^{14}C are used to date objects that were once living, such as wood. For example, from a study of carbon found at the site, scientists determined that Pompeii was built nearly 2,000 years ago.
- Smoke Detectors:** Many smoke detectors use a small amount of the alpha emitter ^{241}Am to ionize the air. Smoke entering the detector reduces the current and sets off the alarm.
- Nuclear Medicine:** Radioactive isotopes, such as ^{201}Tl , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, and ^{131}I , are commonly used in the diagnosis and treatment of disease. Positive electron emitters such as ^{18}F are used in Positron Emission Tomography (PET) to generate images of brain activity.
- Space Exploration:** Uranium and alpha particles to identify chemical elements present in Martian rocks. On Earth, nuclear reactors are used to supply some form of electrical power to an astronaut.
- Nuclear Reactors:** Nuclear reactions are the basis of ^{235}U or ^{239}Pu nuclei to produce electric power. Reactors and other nuclear applications generate radioactive waste, disposal of the waste is a subject of current research.
- Magnetic Resonance Imaging:** Magnetic Resonance Imaging (MRI) makes use of atomic transitions involving the magnetic field of a nucleus to study the local chemical environment. This technique accurately maps the density of hydrogen to produce three-dimensional images of the human body.

www.CPEPweb.org



RIKEN



Nuclear Chart 核図表

核種の数

安定核種 約300種

実験的に確認 3000種

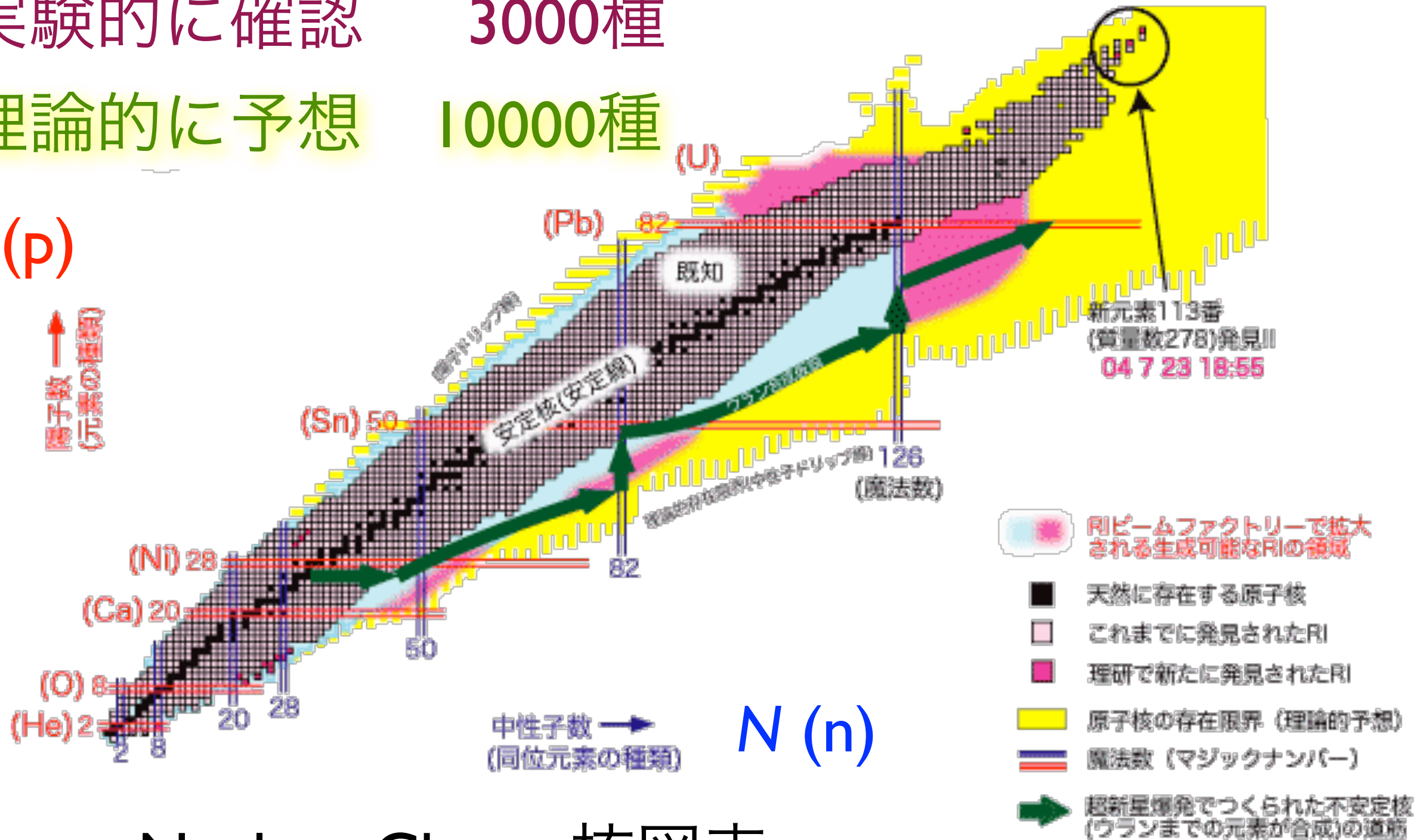
理論的に予想 10000種

原子核物理学

Nuclear Physics

Z (p)

↑ 陽子数
(元素の種類)



Nuclear Chart 核図表

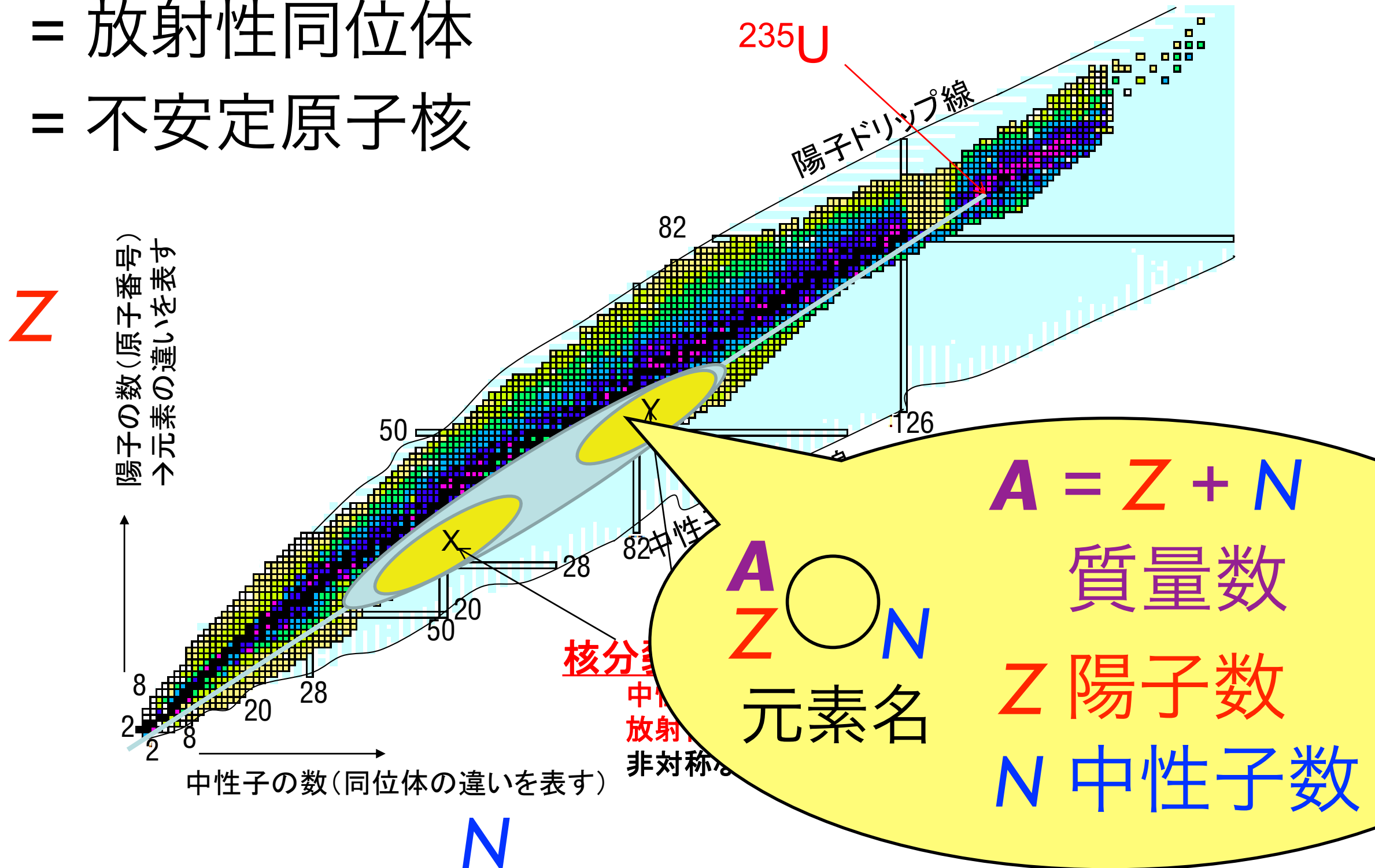
放射性物質とは

放射性核種

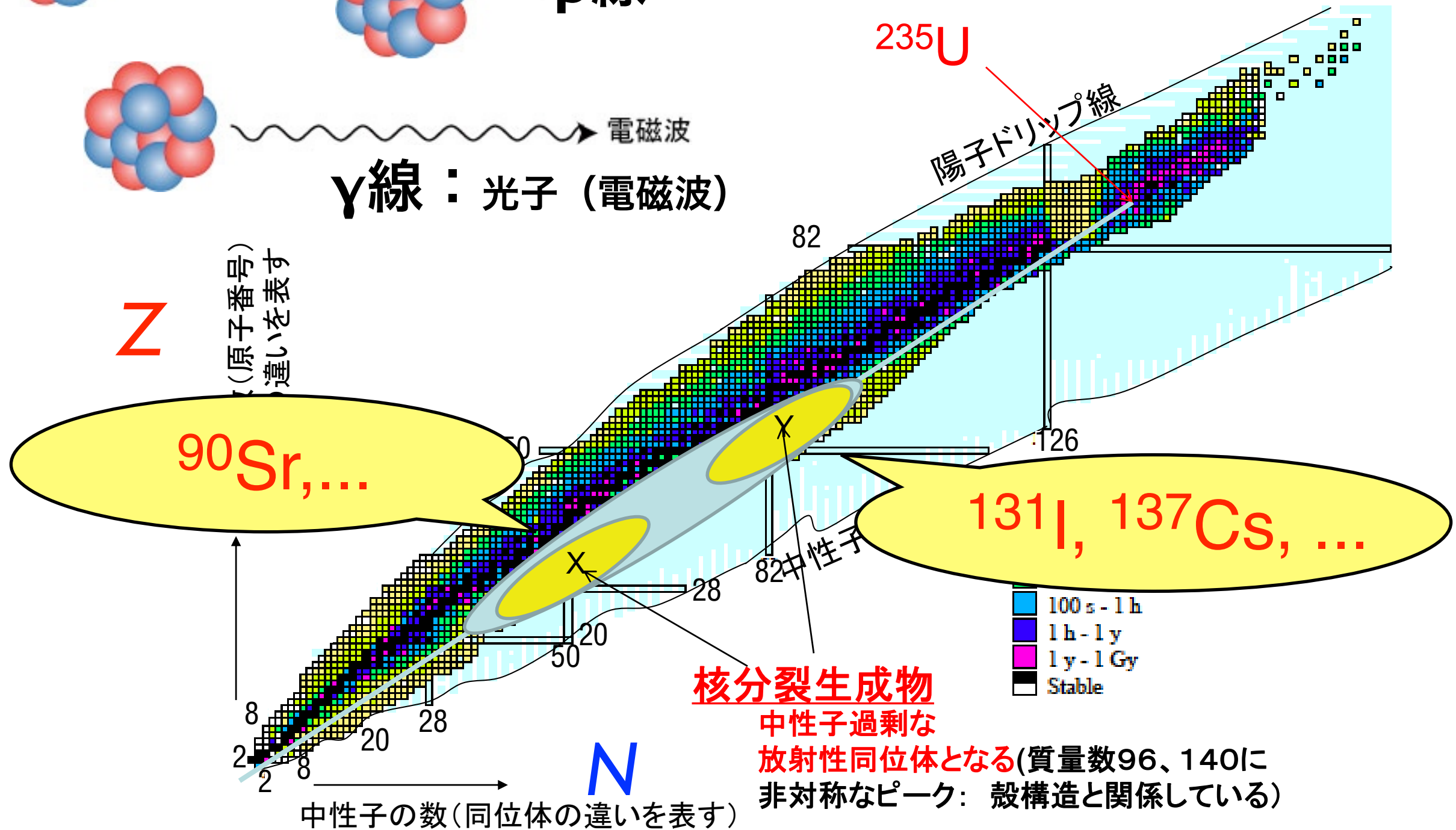
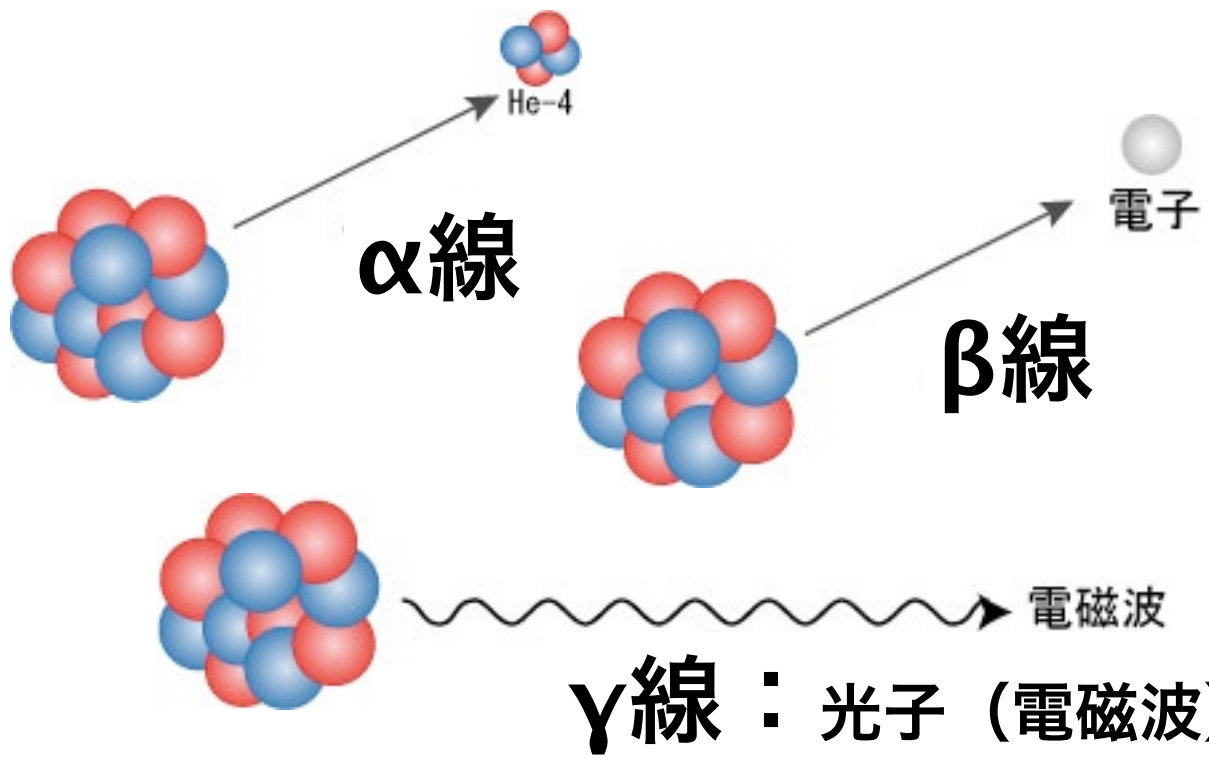
= 放射性同位体

= 不安定原子核

核図表



放射能とは 放射性物質が放射線を出す能力のこと。



Nuclear Chart 核図表

関連する核種の分類

isotope

同位体

Z



isobar

同重体

A



isomer

核異性体

Z, N



関連する核種の分類

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

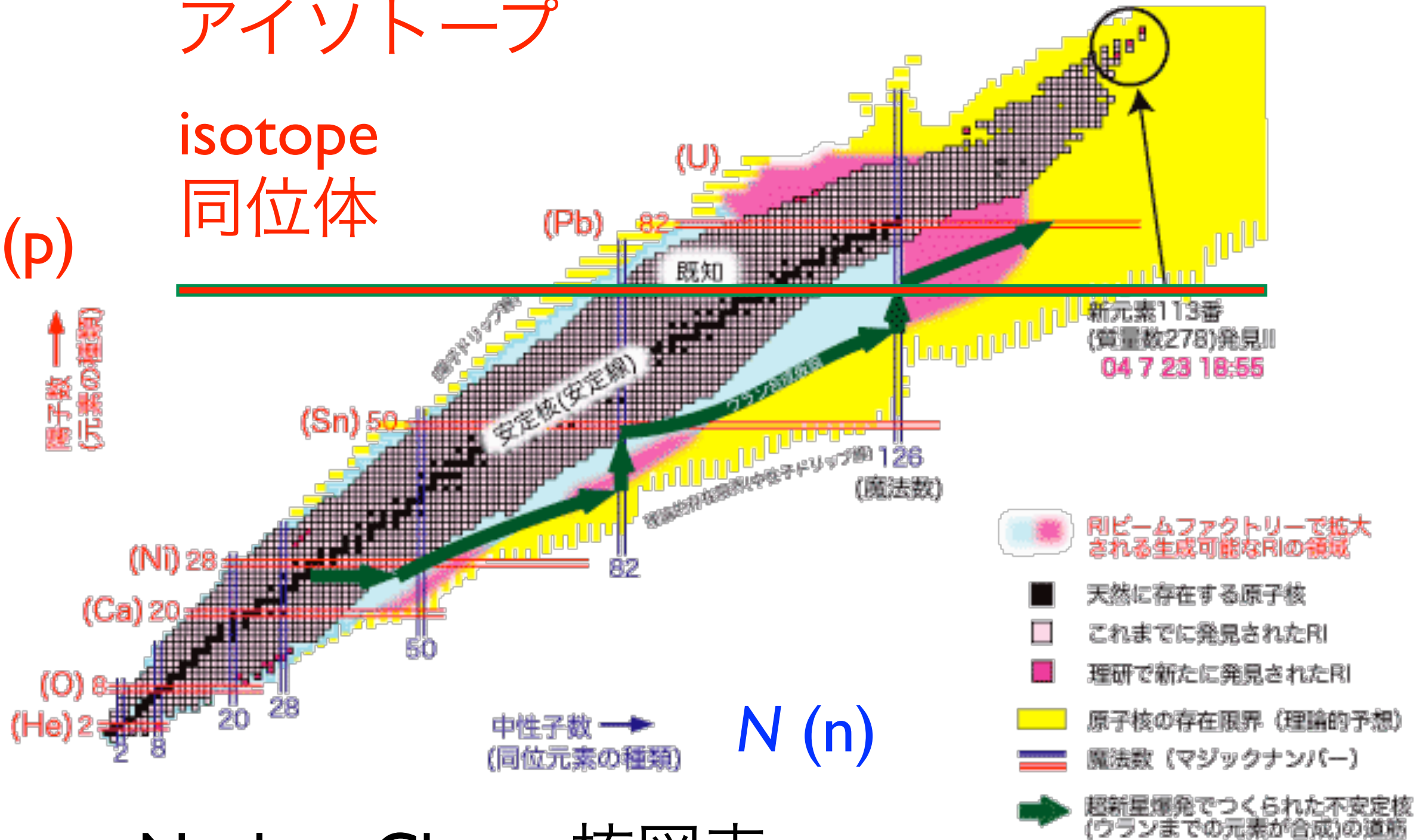
Nuclear Physics

アイソトープ

isotope
同位体

Z (p)

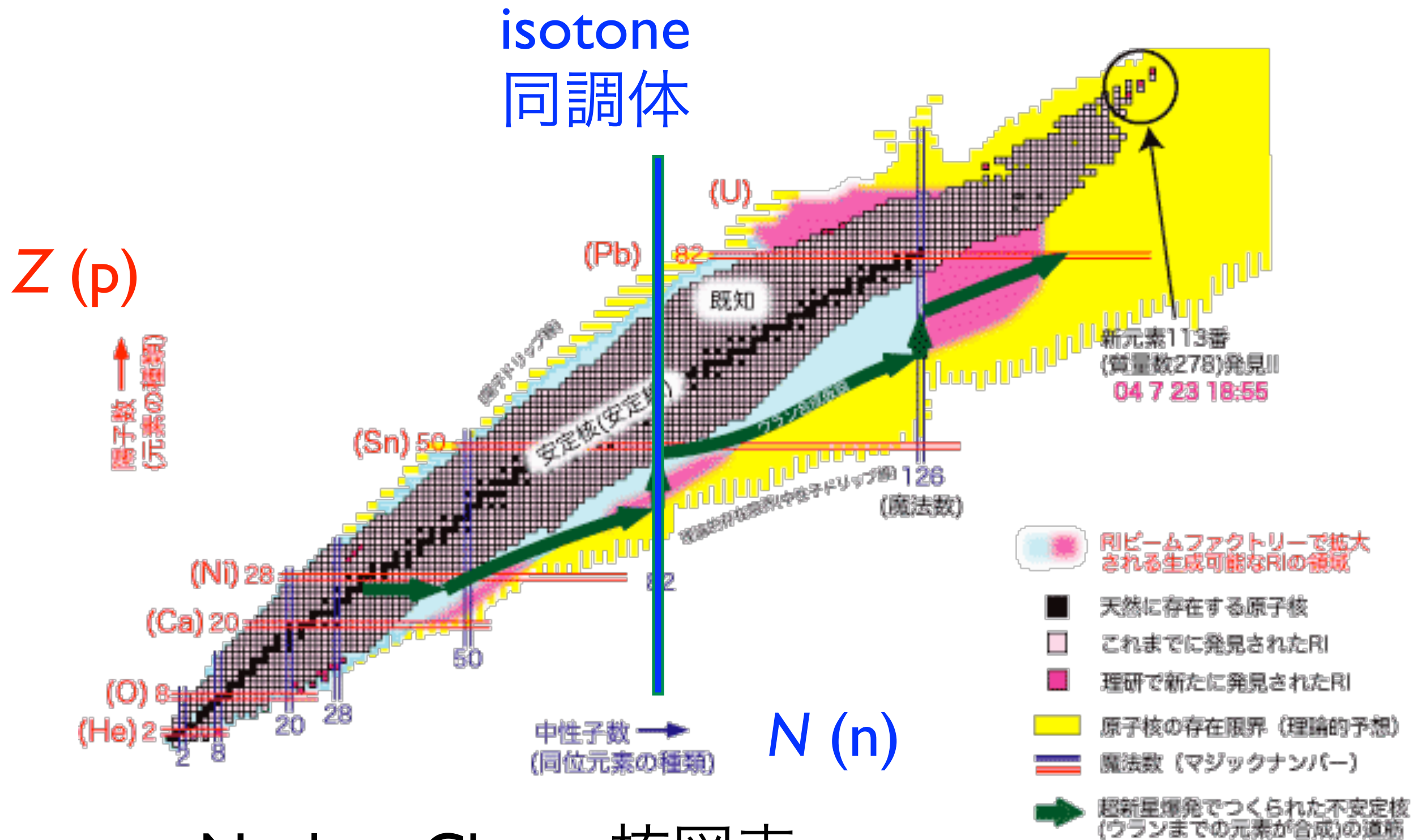
↑
陽子数
(元素の種類)



Nuclear Chart 核図表

原子核物理学

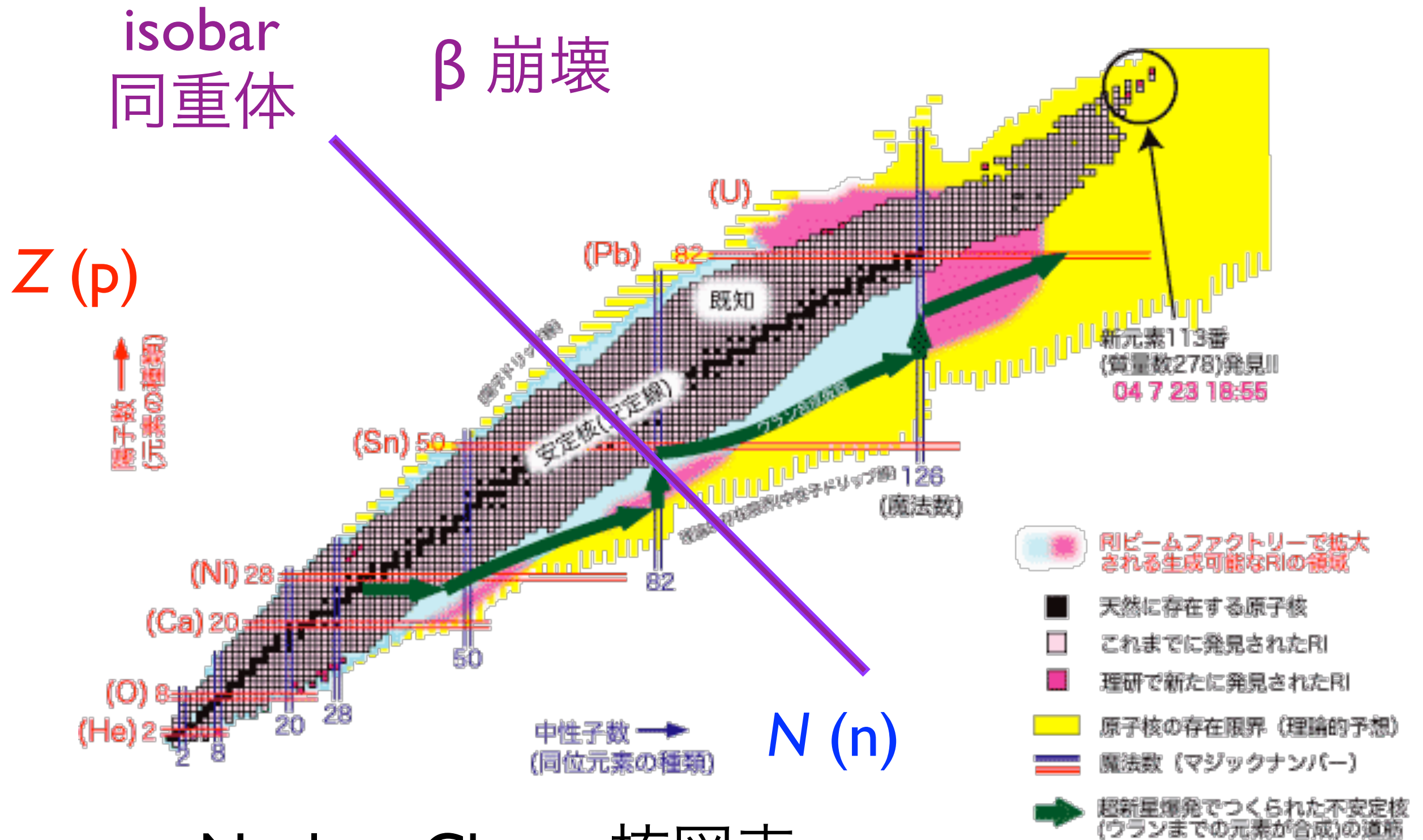
Nuclear Physics



Nuclear Chart 核図表

原子核物理学

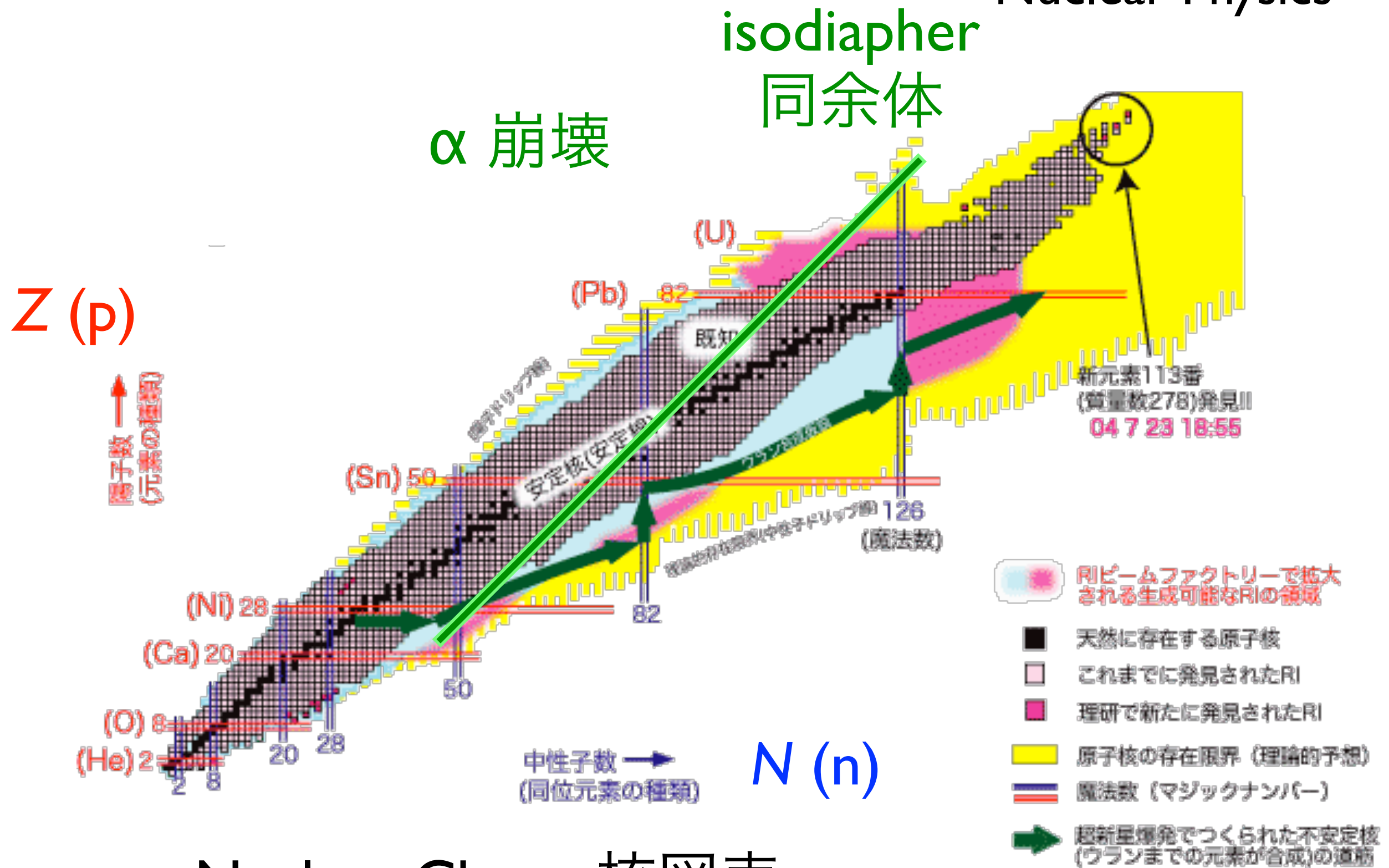
Nuclear Physics



Nuclear Chart 核図表

原子核物理学

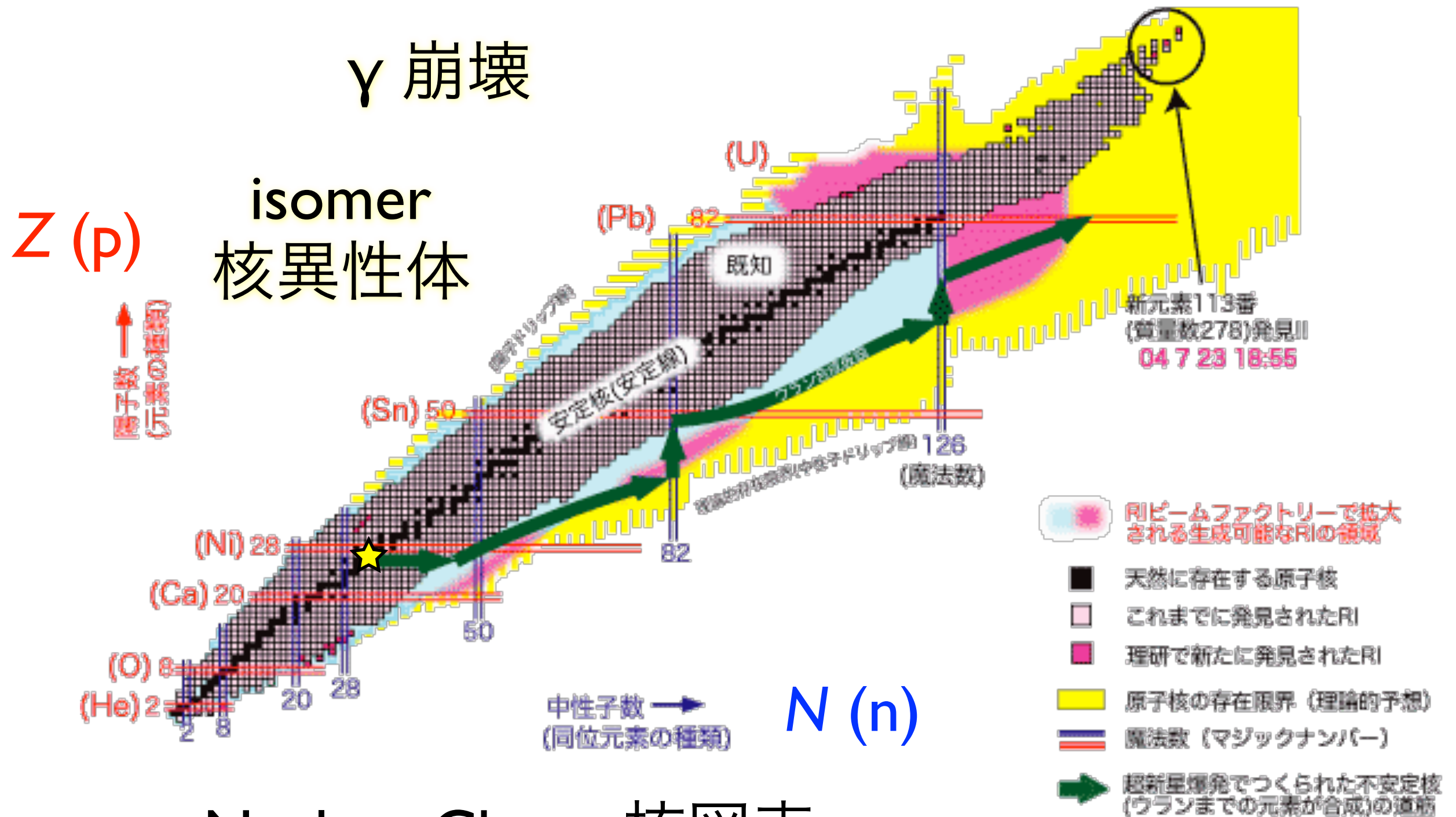
Nuclear Physics



Nuclear Chart 核図表

原子核物理学

Nuclear Physics



Nuclear Chart 核図表

原子核物理学

Nuclear Physics

β 崩壊
isobar
同重体

isotone
同調体

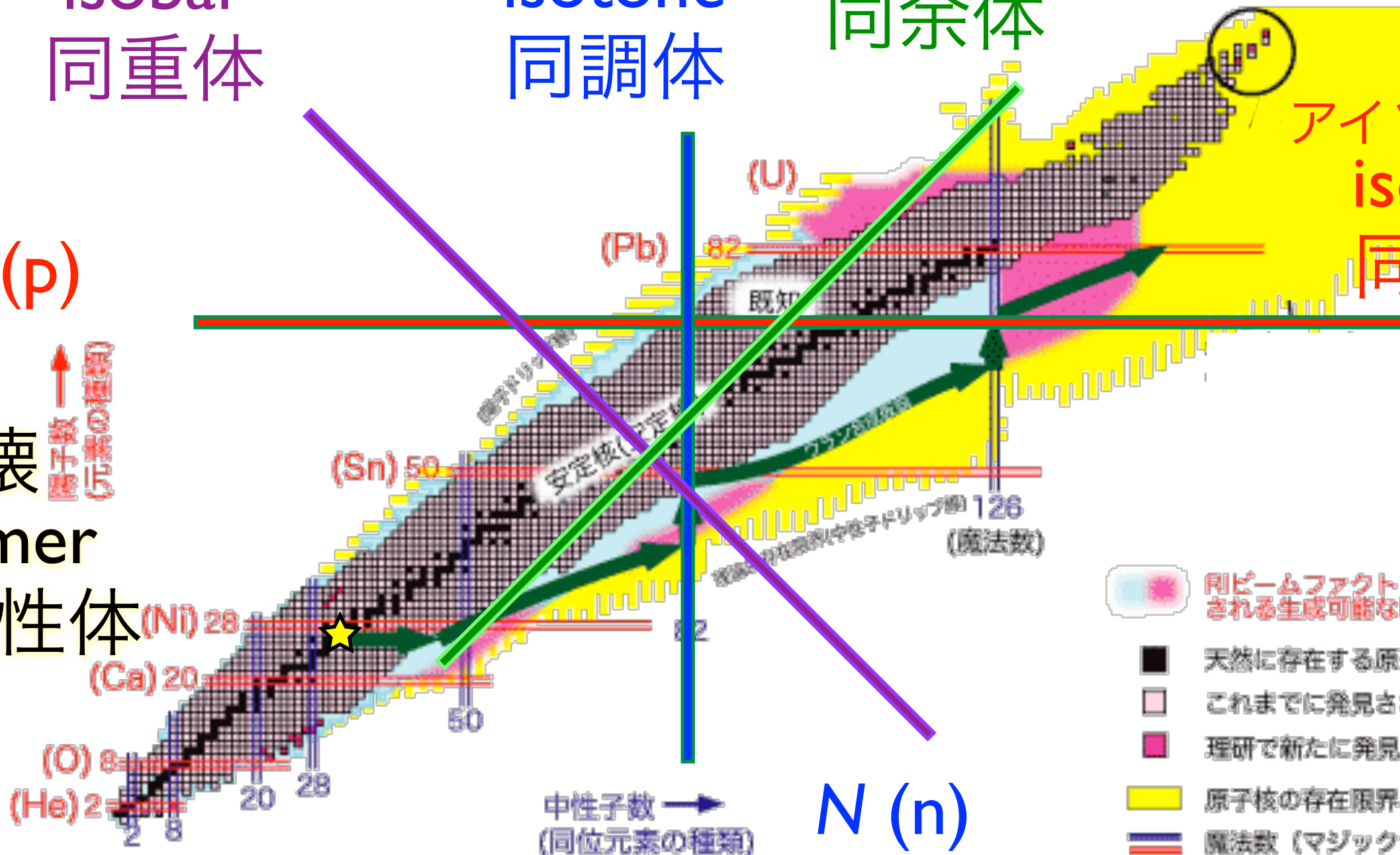
α 崩壊
isodiapher
同余体

アイソトープ
isotope
同位体

Z (p)

γ 崩壊
isomer
核異性体

↑ 中性子の種類
↑ 陽子の種類

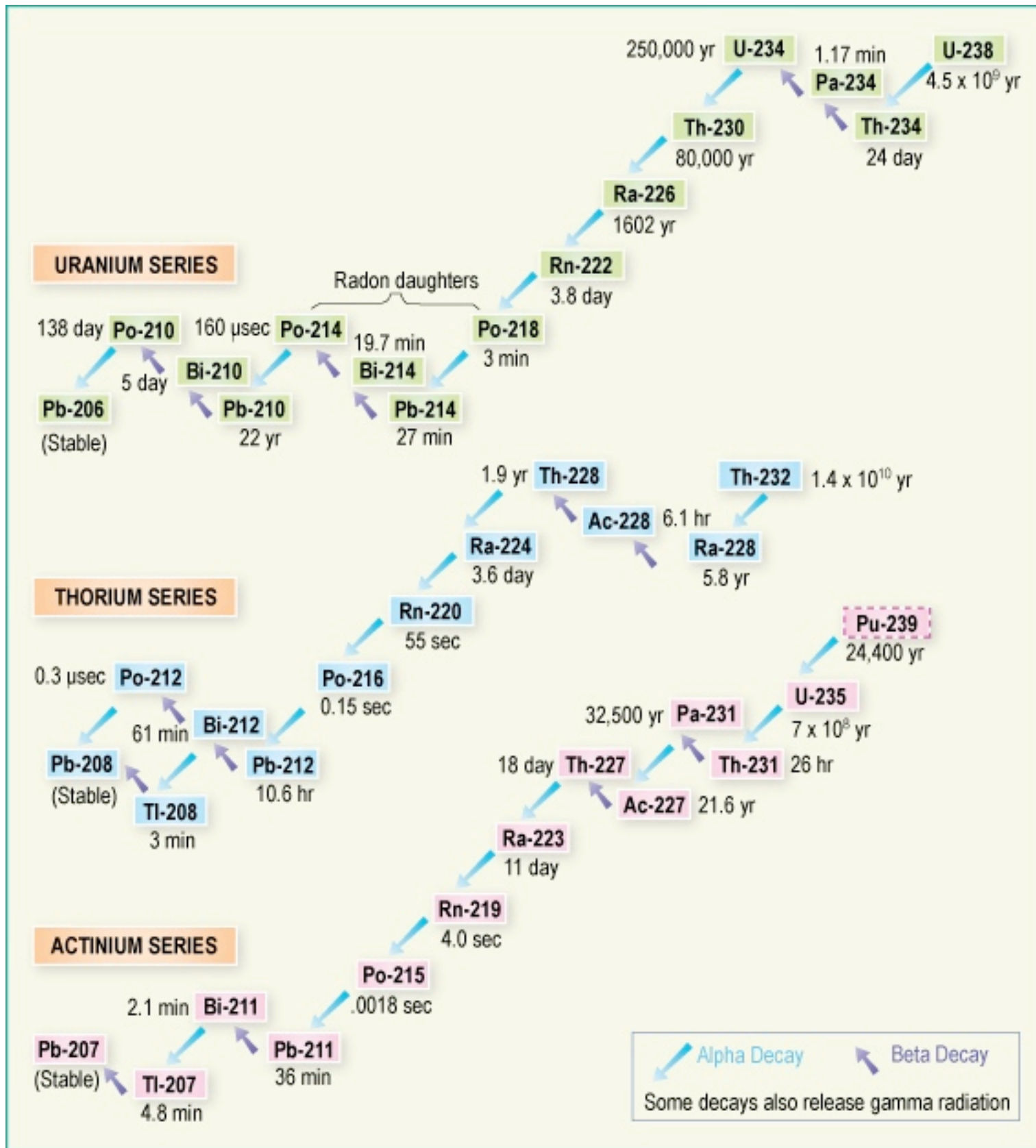


中性子数 →
(同位元素の種類)

N (n)

- 円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)
- 超新星爆発で作られた不安定核 (ウランまでの元素が合成)の道筋

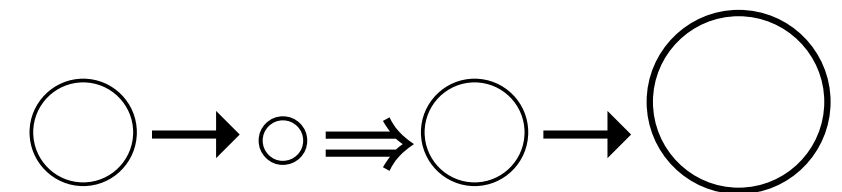
Nuclear Chart 核図表



壊変 (崩壊) 系列

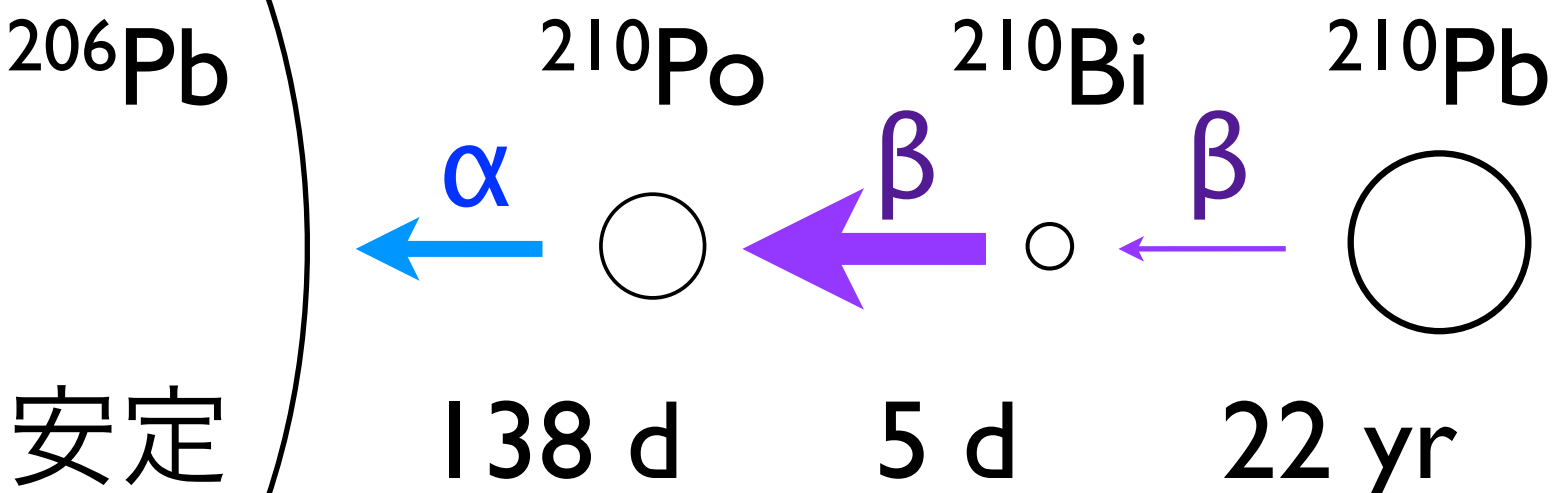
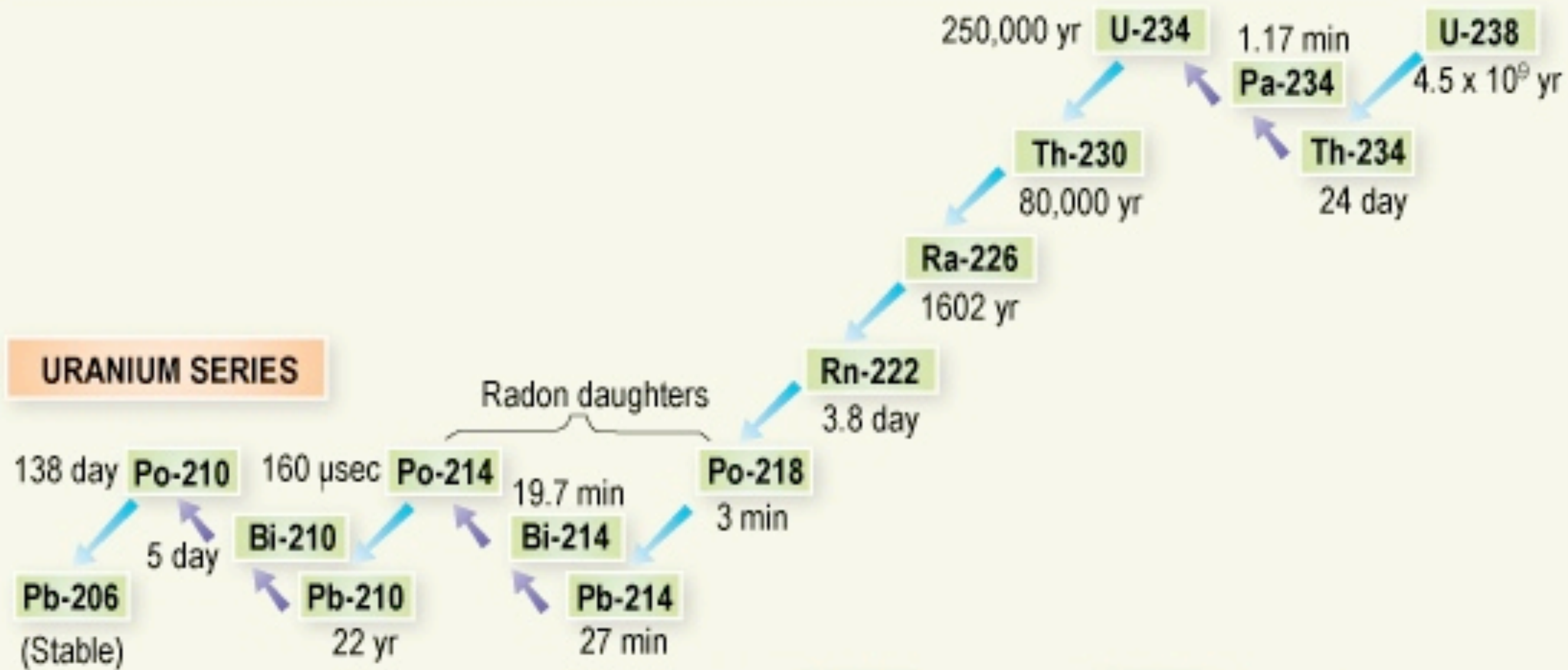
- (4n) トリウム系列
- (4n+1) ネプツニウム系列
- (4n+2) ウラン系列
- (4n+3) アクチニウム系列

放射平衡



壊変 (崩壊) 系列

(4n+2) ウラン系列



放射平衡

壊変 (崩壊) 系列

(4n+2) ウラン系列

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

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

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

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

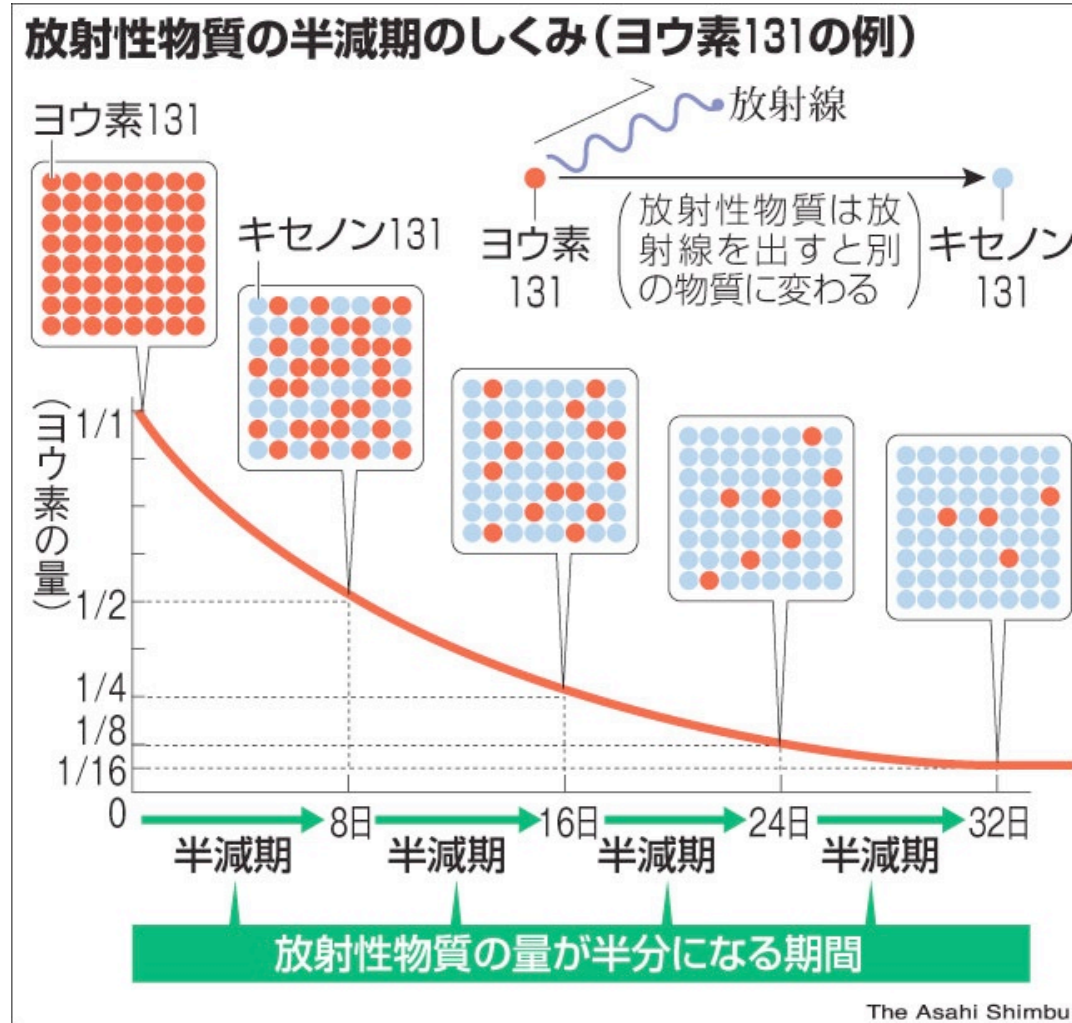
$\lambda = 1/\tau$ λ : 崩壊レート、 τ : 寿命

半減期の1.44倍

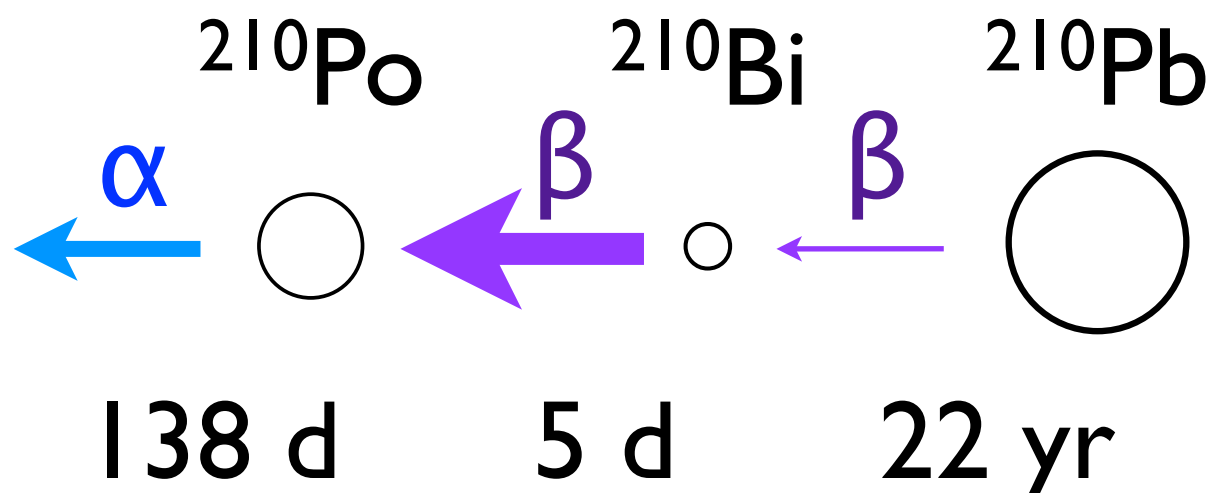
$$N_1 = N_{10} e^{-\lambda_1 t}$$

崩壊レートは定数

個々の崩壊は
確率的に起こる



^{206}Pb
安定



放射平衡

壊変 (崩壊) 系列

(4n+2) ウラン系列

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

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

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

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

$\lambda = 1/\tau$ λ : 崩壊レート、 τ : 寿命
 半減期の1.44倍

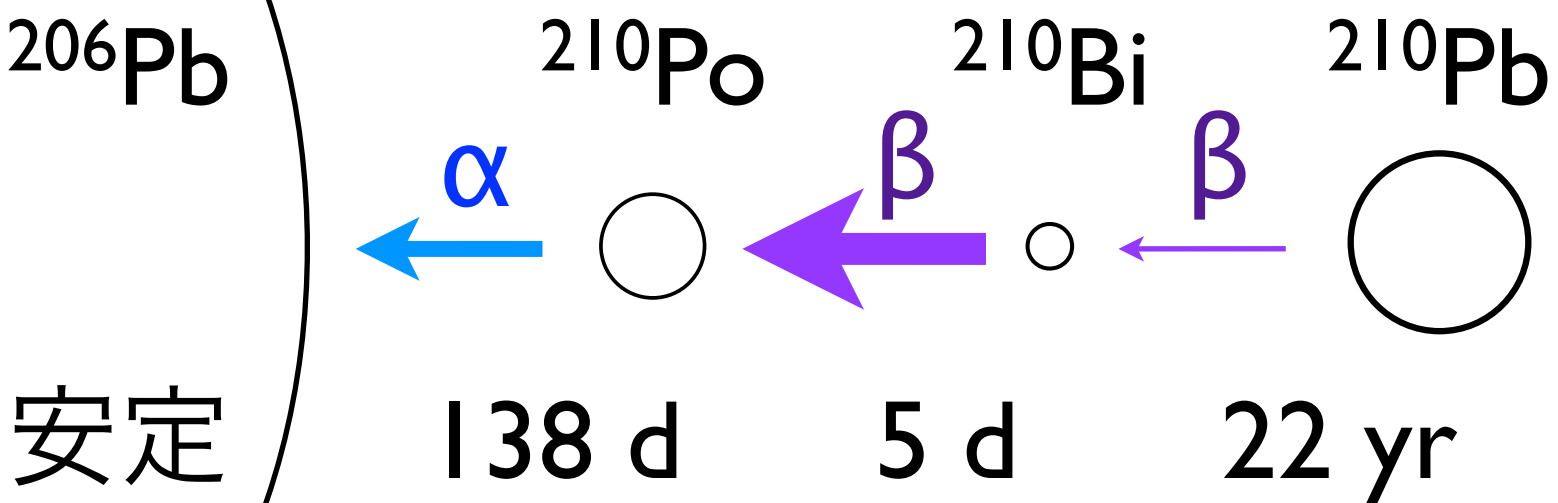
$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} \{e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\} + N_{20} e^{-\lambda_2 t}$$

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

過渡平衡
 ($\lambda_1 < \lambda_2$, t が十分長い)

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

永続平衡
 ($\lambda_1 \ll \lambda_2$, τ_1 がとても長い)



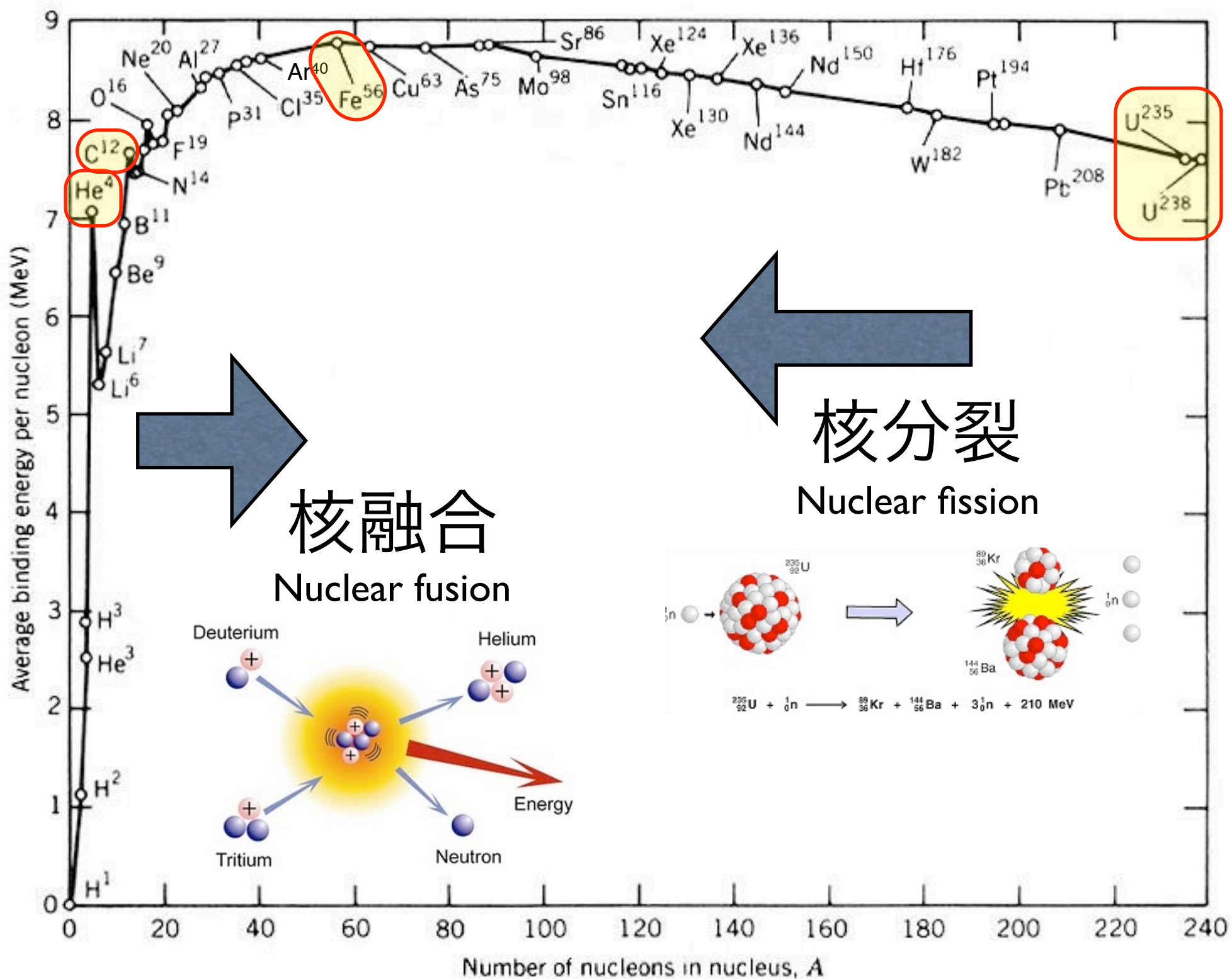
放射平衡

原子核物理学

原子核模型と核構造

最も安定な原子核は？

核子あたりの結合エネルギー (MeV)



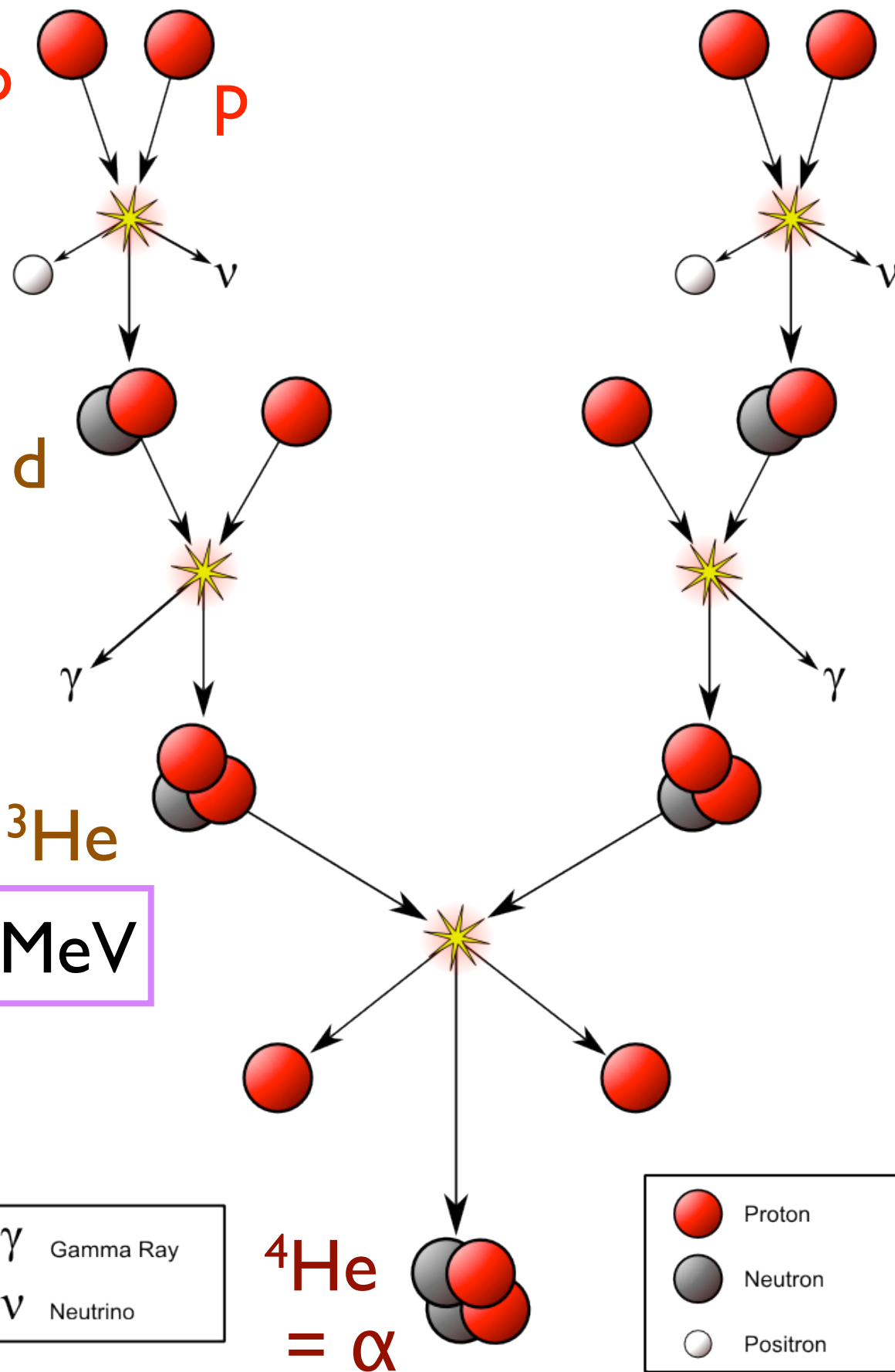
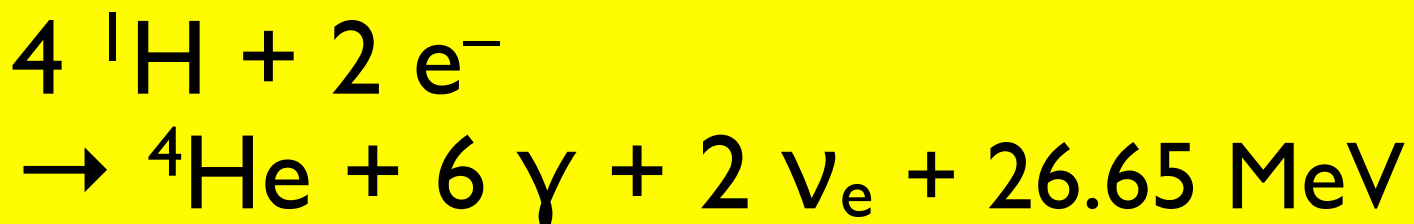
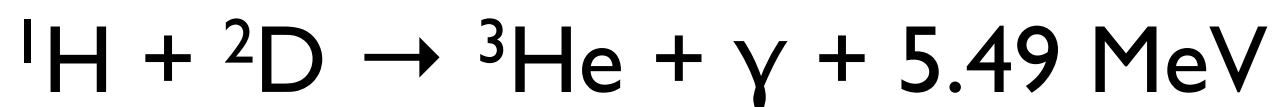
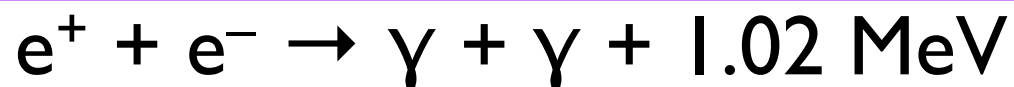
核融合

Nuclear fusion

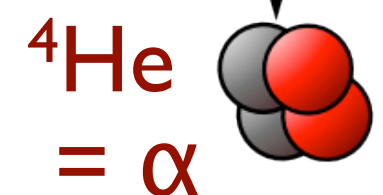
太陽では水素 (${}^1\text{H}$) からヘリウム (${}^4\text{He}$) を合成

原子核 p

原子核 α



γ Gamma Ray
 ν Neutrino



Proton
Neutron
Positron

Weizsäcker-Bethe の (半経験的) 質量公式

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

$$M_{\text{atom}}(Z, N) = Z M_H + N M_n - E_B / c^2 \quad (\text{電子の束縛エネルギーは無視})$$

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

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

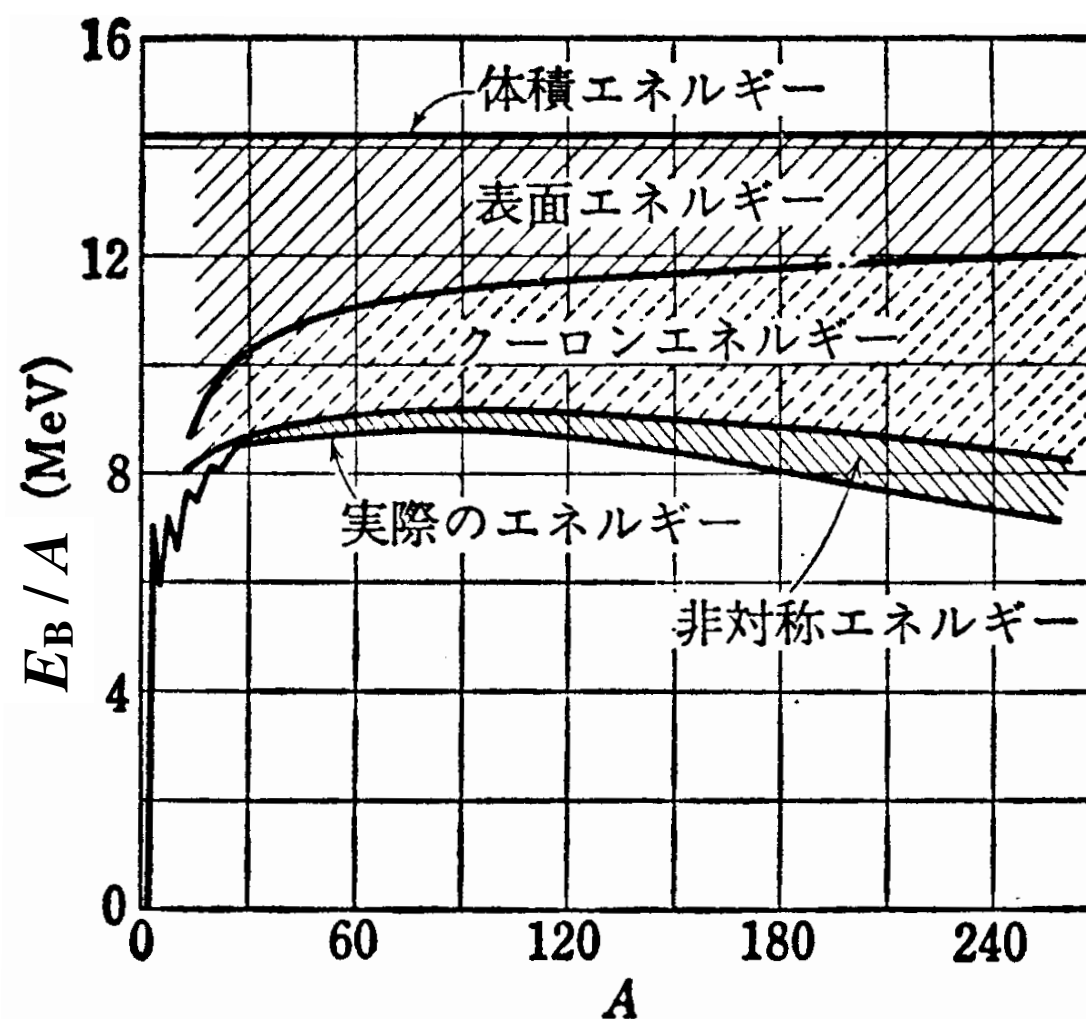
体積エネルギー

クーロンエネルギー

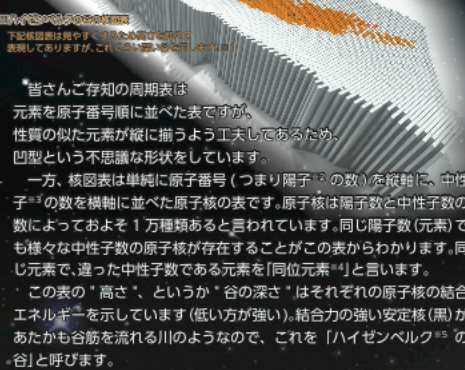
対称エネルギー

対エネルギー

表面エネルギー



「全原子核の地図」核図表とは



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が、性質の似た元素が縦に揃うよう工夫してあるため、山型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)を縦軸に、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の数によっておよそ1万種類あると言われています。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(低い方が強い)。結合力の強い安定核(黒)が、あた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。

核図表の見かた

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、周期表の順番と一緒です。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。

黒い所は安定核^{※6}、といい、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^{※7}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

例えばヘリウム4では

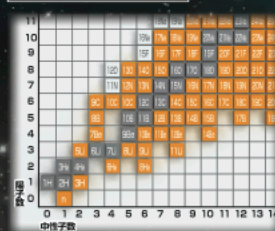


例えば炭素13では



と表す。(※右の核図表では陽子数は省略)

真上からみた立体核図表



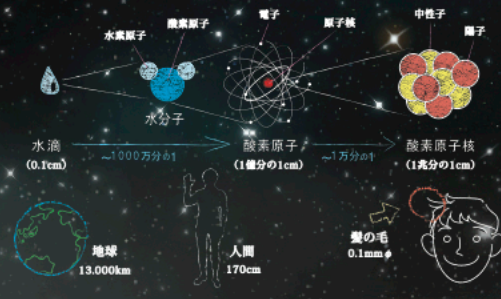
核図表

Chart of Nuclides

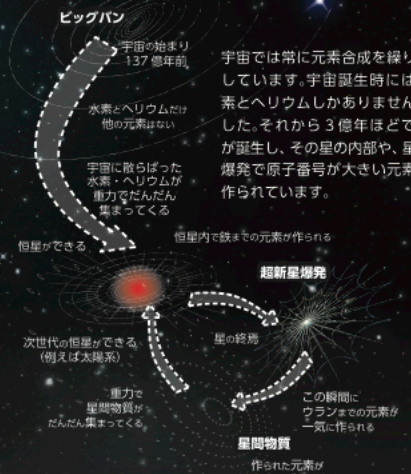
今から137億年前、ビッグバンによって私たちの宇宙は生まれました。でもその時に存在した元素は水素とヘリウムだけ。それから3億年ほど経て星が生まれると、その中で重い元素が創られ始め、星の終焉に起きる超新星爆発では、より重い元素が一気に創られたと考えられています。私たちの体を含め、宇宙を構成する物質は全てこれらの元素から出来ています。一方、元素の本体は陽子と中性子からなる原子核です。陽子と中性子の微妙なバランスからなる原子核の成り立ちを調べることは、物質の起源を調べることにほかなりません。ここに示す核図表は全ての原子核を示した地図であり、元素合成と宇宙の歴史も刻まれています。原子核は果たしてどのように生まれたのか、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1mm。最新鋭の顕微鏡でぎりぎ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(+)の電気をもちつと中性子(電気を持たない)という2種類の粒子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

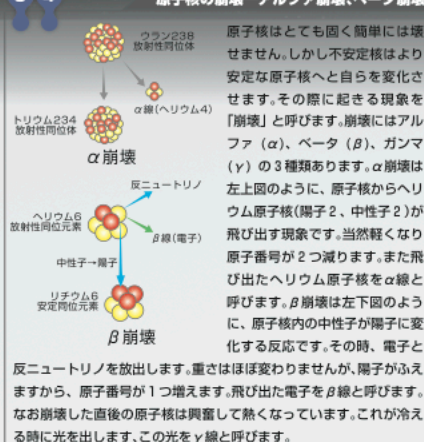


1 2 原子核=陽子+中性子



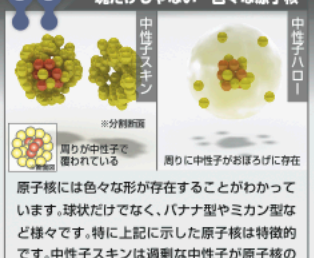
原子核は陽子と中性子の集合体でできています。例えばヘリウム4は2つの陽子と2つの中性子からなり、ウラン235は92個の陽子と143個の中性子からなっています。陽子と中性子の数はそれぞれの原子核ごとに安定する値があり、そのバランスが崩れると原子核が壊れて別の原子核へと変化していきます。

3 4 原子核の崩壊—アルファ崩壊、ベータ崩壊



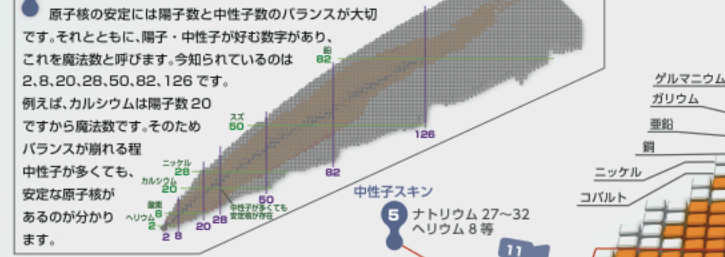
原子核はとても固く簡単には壊れません。しかし不安定核はより安定な原子核へと自らを変化させます。その際に起きる現象を「崩壊」と呼びます。崩壊にはアルファ(α)、ベータ(β)、ガンマ(γ)の3種類あります。α崩壊は左上図のように、原子核からヘリウム原子核(陽子2、中性子2)が飛び出す現象です。当然軽くなり原子番号が2つ減ります。また飛び出したヘリウム原子核をα線と呼びます。β崩壊は右下図のように、原子核内の中性子が陽子に変化する反応です。その時、電子と反ニュートリノを放出します。重さはほぼ変わりませんが、陽子がふえますから、原子番号が1つ増えます。飛び出した電子をβ線と呼びます。なお崩壊した直後の原子核は興奮して熱くなっています。これが冷える時に光を出します。この光をγ線と呼びます。

5 6 塊だけじゃない—色々な原子核

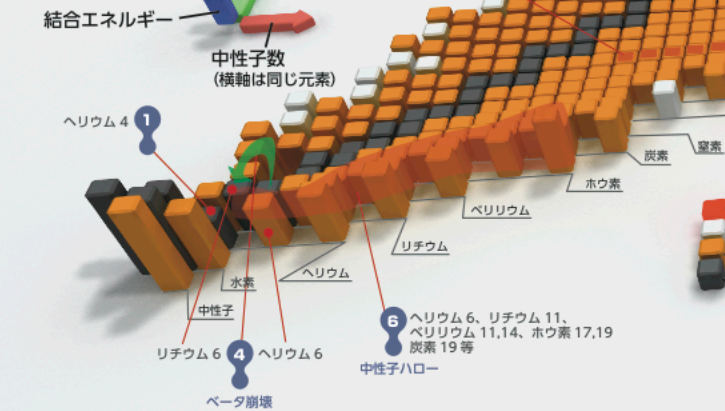


原子核には色々な形状が存在することがわかっています。球状だけでなく、バナナ型やミカン型など様々です。特に上記に示した原子核は特徴的です。中性子スピンは過剰な中性子が原子核の外にしみ出して中性子だけの皮を作っています。中性子ハローはしみ出した中性子が大きく広がってしまい、おぼろげに存在します。

7 魔法数(マジックナンバー)

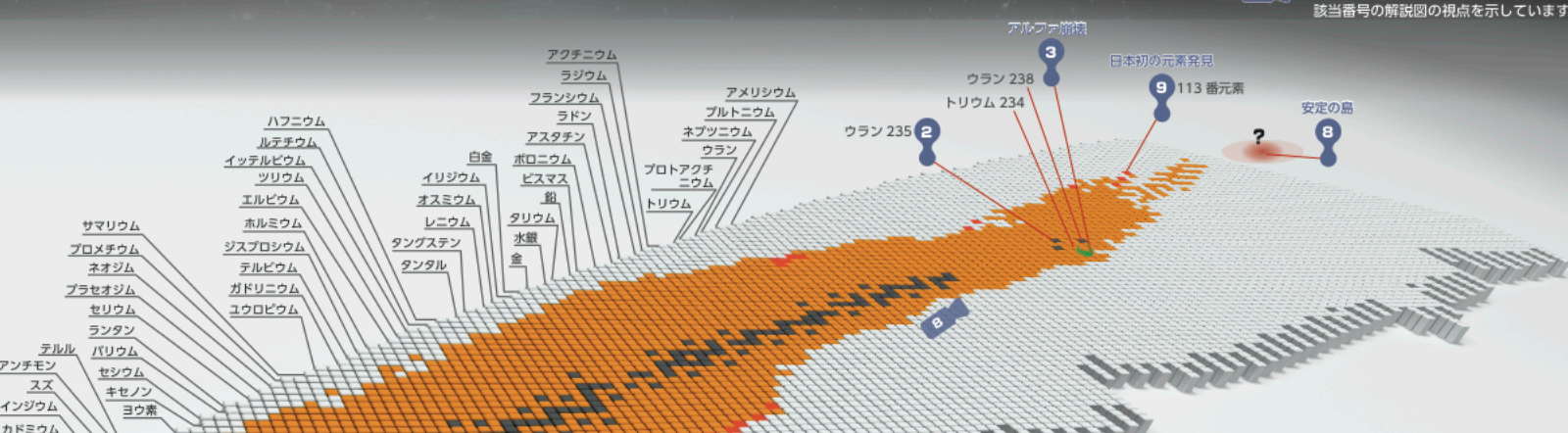


原子核の安定には陽子数と中性子数のバランスが大切です。それとともに、陽子・中性子が好む数字があり、これを魔法数と呼びます。今知られているのは2, 8, 20, 28, 50, 82, 126です。例えば、カルシウムは陽子数20ですから魔法数です。そのためバランスが崩れる程中性子が多くなると、不安定な原子核があるのが分かります。



リ研で発見した原子核
未発見の原子核
不安定核
安定核

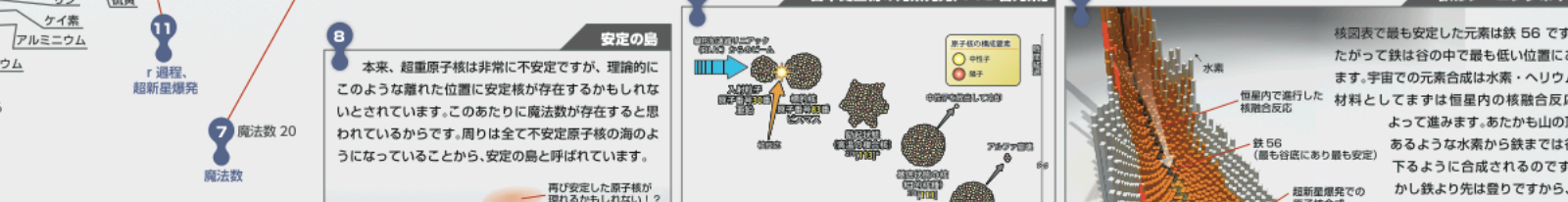
不安定核を介して鉄より重い元素が出来る



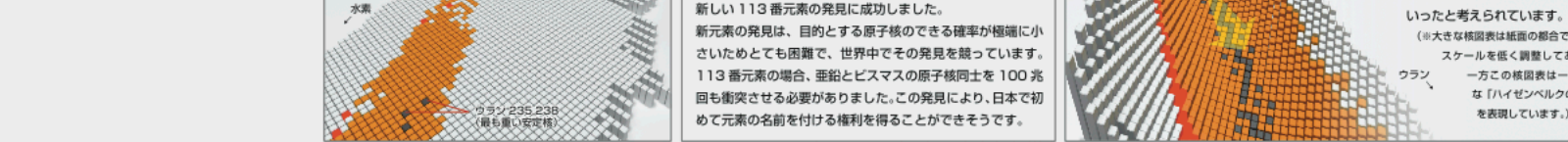
鉄までの原子核は恒星内で生まれました。鉄より重い元素はどのようにしてできたのでしょうか。これまでの研究でその半分は超新星爆発によってできたと考えられています。この時の爆発的な元素合成の道筋が左図の青色のラインで、r過程と呼ばれます。超新星爆発の際に発生する大量の中性子を通常の原子核が沢山取り込み、一気に重たい中性子過剰核へと変換。途中から中性子の取り込みと中性子が陽子になる反応(ベータ崩壊)のバランスで複雑なラインを描くことになると考えられています。爆発が落ち着き中性子の供給が止まると、ベータ崩壊によってまさに谷を下るように安定核へと変化する道筋を緑色のラインで示しました。RIBF[®]ではこ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



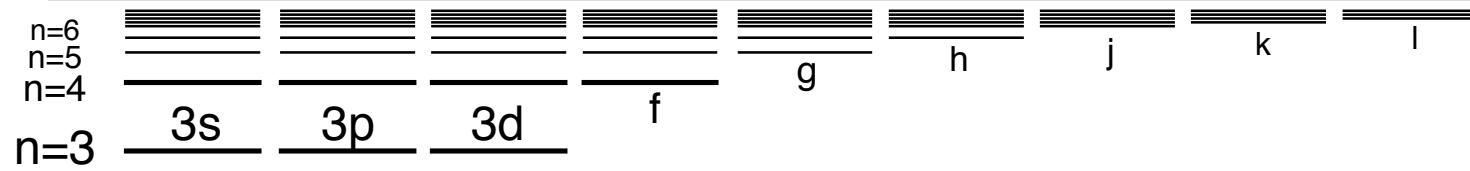
9 日本史上初の元素発見「113番元素」



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たのだ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「ハイゼンベルグの谷」を表しています。)



連続状態 continuum



原子のエネルギー準位

電子質量 $m_e = 511 \text{ keV}/c^2$

束縛状態 bound states

離散的エネルギー準位 discrete energy levels

覚えにくい

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

$$-E_B = -hc R_\infty \frac{Z^2}{n^2} \quad R_\infty : \text{リュードベリ定数}$$

$$\hbar \equiv \frac{h}{2\pi}, \quad \alpha \equiv \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} \approx \frac{1}{137} \quad h : \text{プランク定数}$$

α : 微細構造定数

(無次元量)

$$n=1 \quad \frac{1s}{-13.6 \text{ eV}} \quad \text{(水素原子)}$$

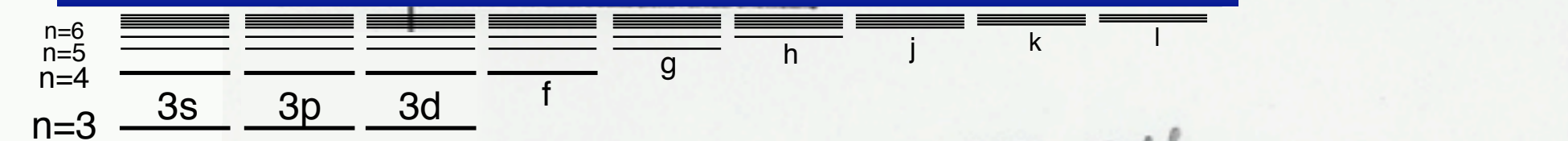
$$E_B(\text{H}) = \frac{M}{M+m} E_B$$

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

Z 大 $\rightarrow E_B = h\nu$ 大 : X線

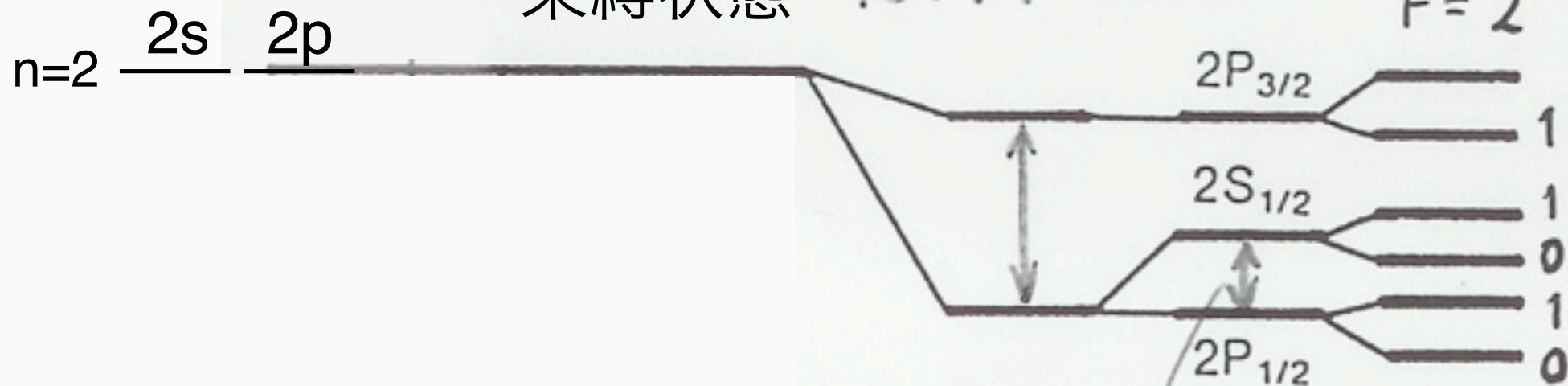
$$v_e = c \alpha \frac{Z}{n}$$

連続状態 continuum



束縛状態

10.97 GHz



↕ 24 MHz

↕ 178 MHz

↕ 59 MHz

1.06 GHz

$n=1$ 1s -13.6 eV

Bohr

Dirac

Lamb

HFS

$1S_{1/2}$

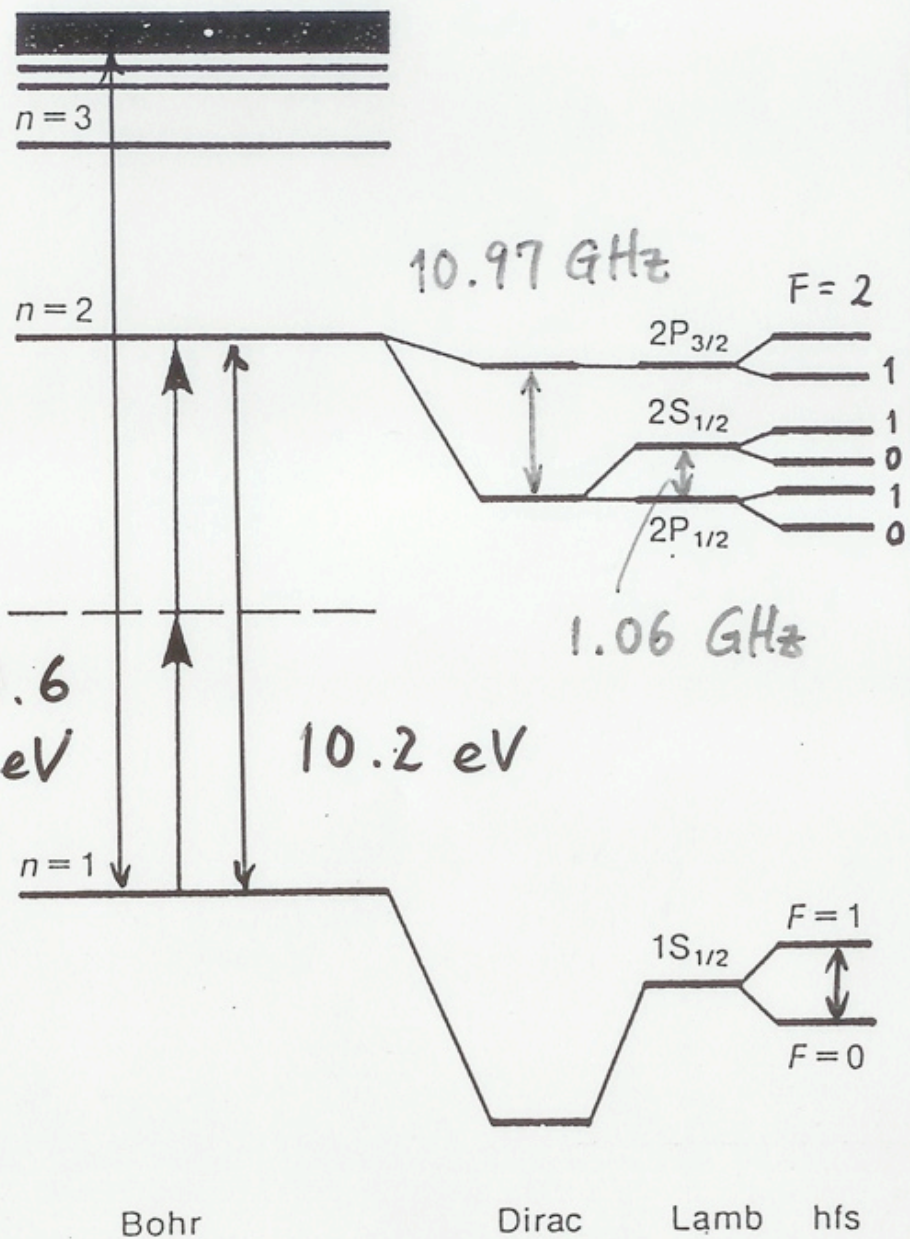
$F=1$

$F=0$

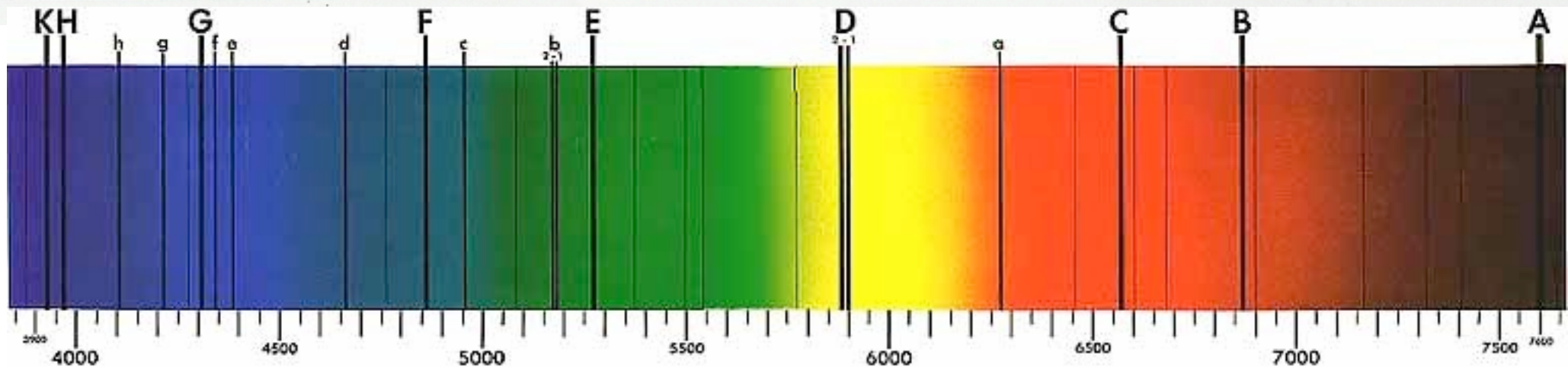
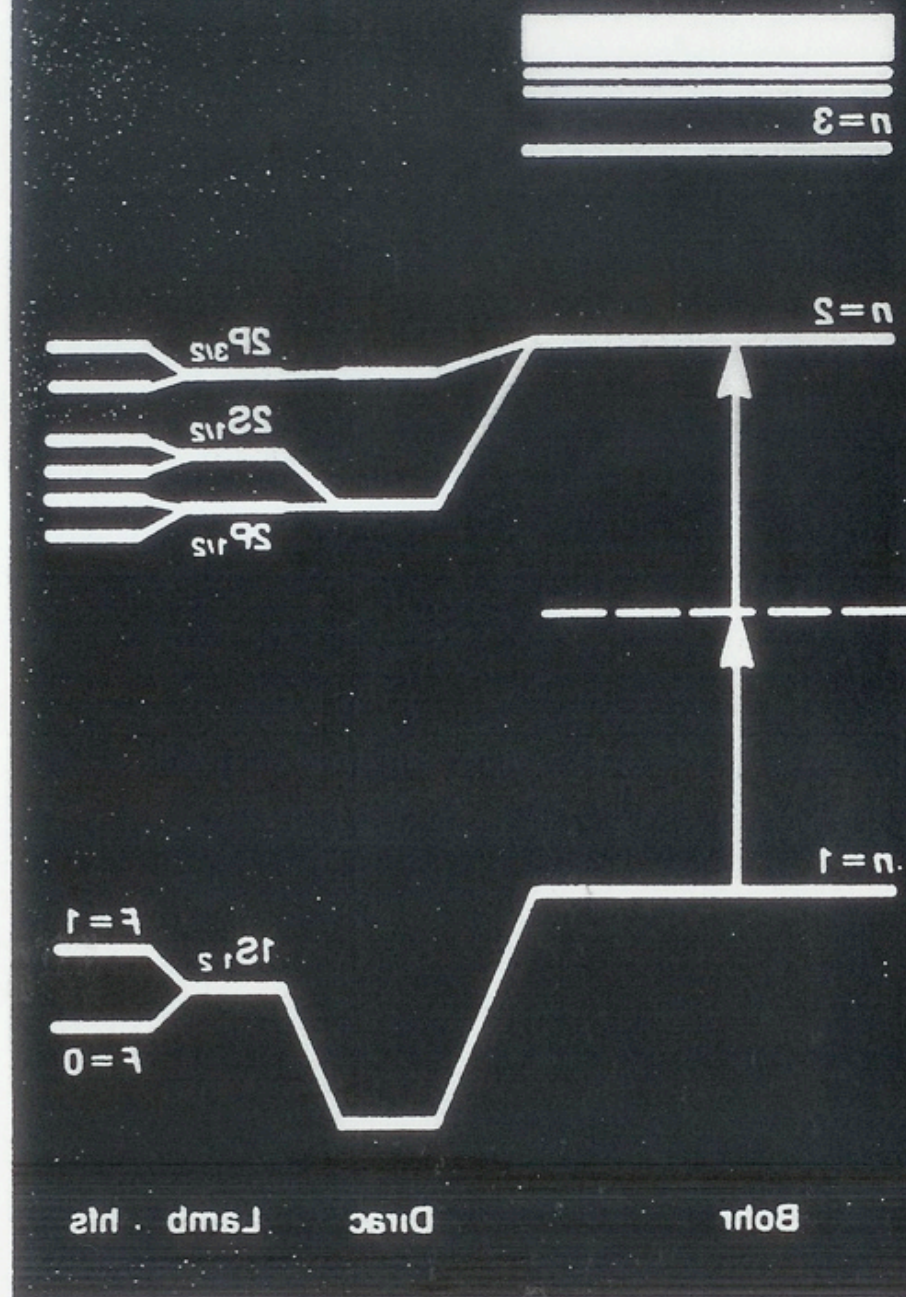
1.42 GHz

水素原子
氢原子

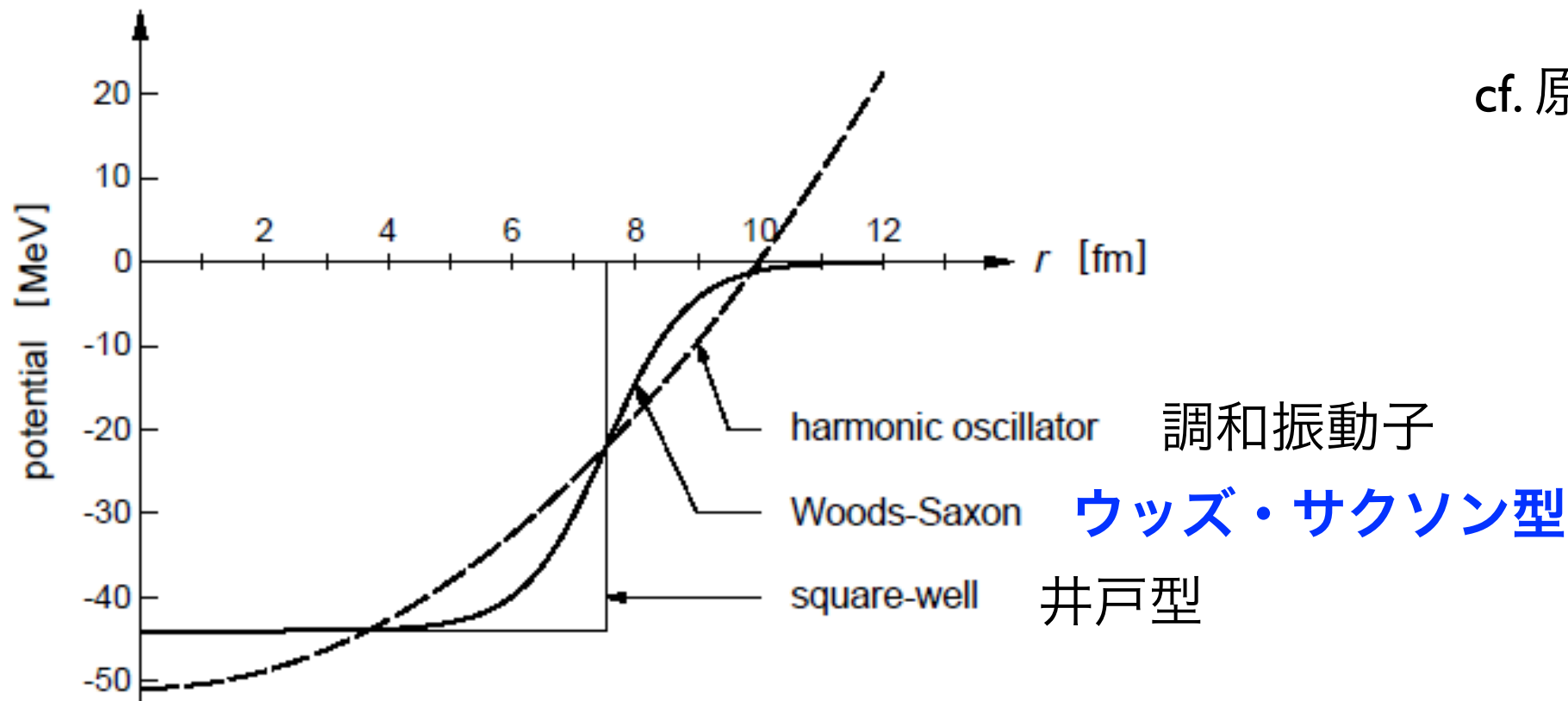
HYDROGEN



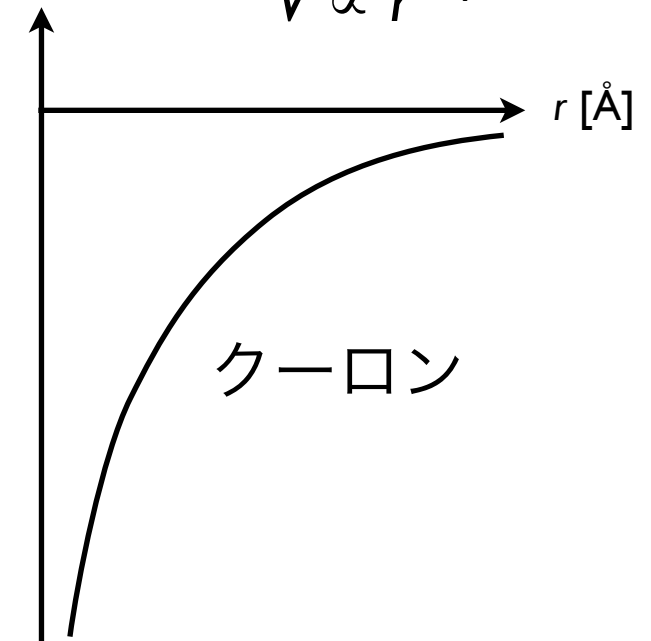
АНТИДРОГЕН



原子核のポテンシャル



cf. 原子のポテンシャルは
 $V \propto r^{-1}$



原子核の大きさは $r = 1.2 A^{1/3} \text{ fm}$ ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$)

原子核は密度一定 (密度の飽和性)

核力 = 「強い相互作用」 “Strong Interaction”

力の到達距離は核子のサイズ

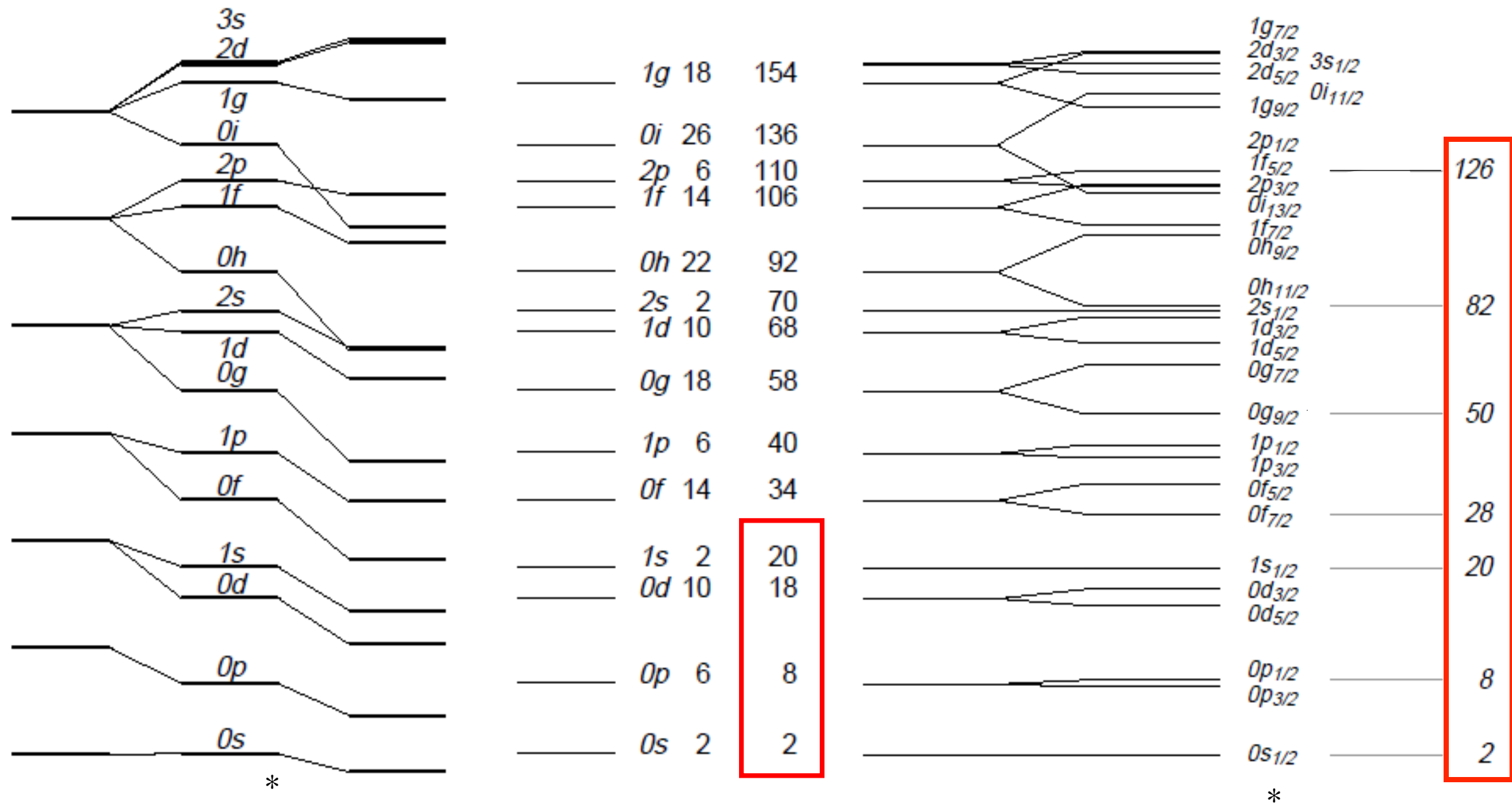
湯川ポテンシャル $1/\kappa = \hbar / m_{\pi}c$

湯川の間接子論

$$V(r) \propto -\frac{e^{-\kappa r}}{r}$$

β 崩壊(壊変) : 「弱い相互作用」 “Weak Interaction”

原子核構造の殻模型 Shell model



魔法数

magic number

+ スピン軌道結合

(実際の原子核では準位の順番が少し異なる)

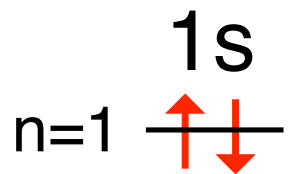
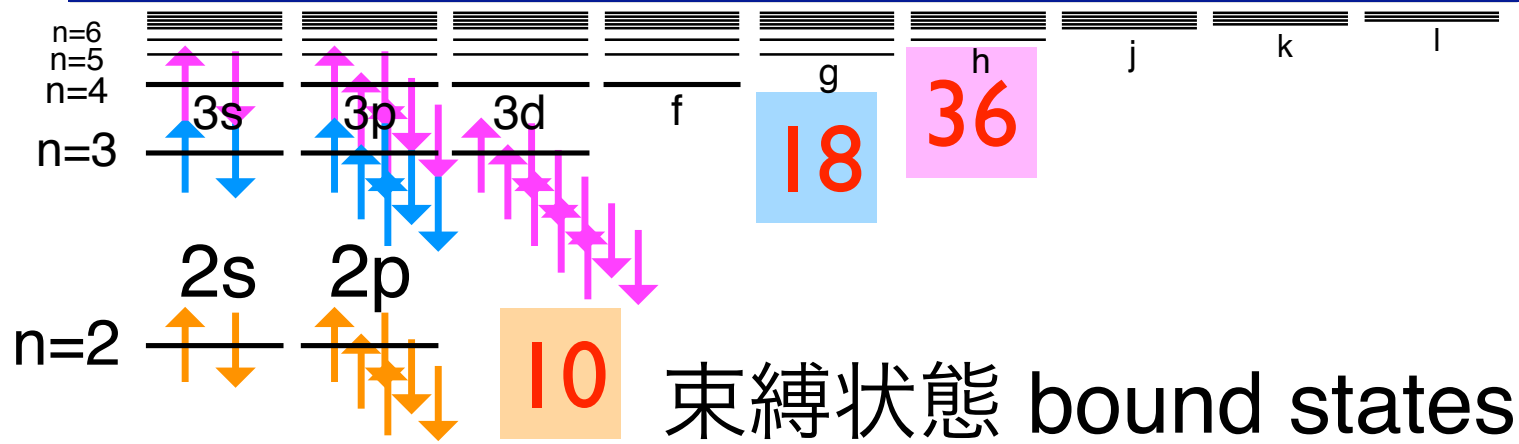
調和振動子 ウッズ・サクソン型
ウッズ・サクソン型

ウッズ・サクソン型ポテンシャル

(*) 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

原子のエネルギー準位

連続状態 continuum



2

魔法数
magic number

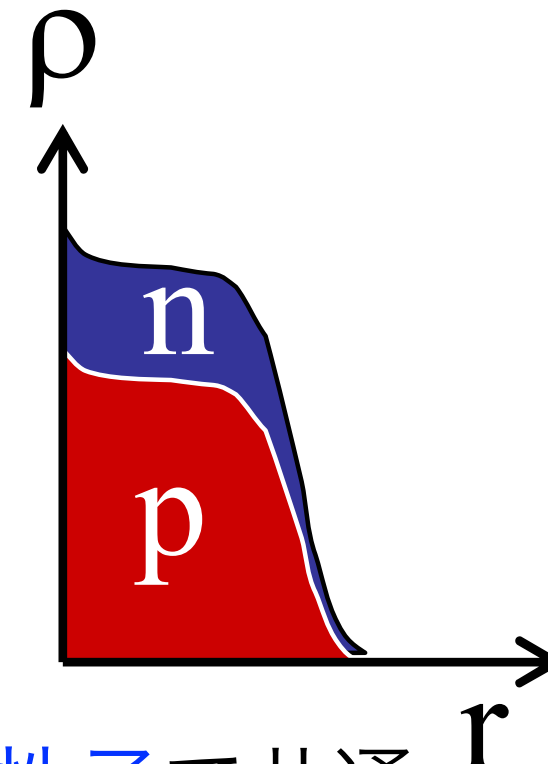
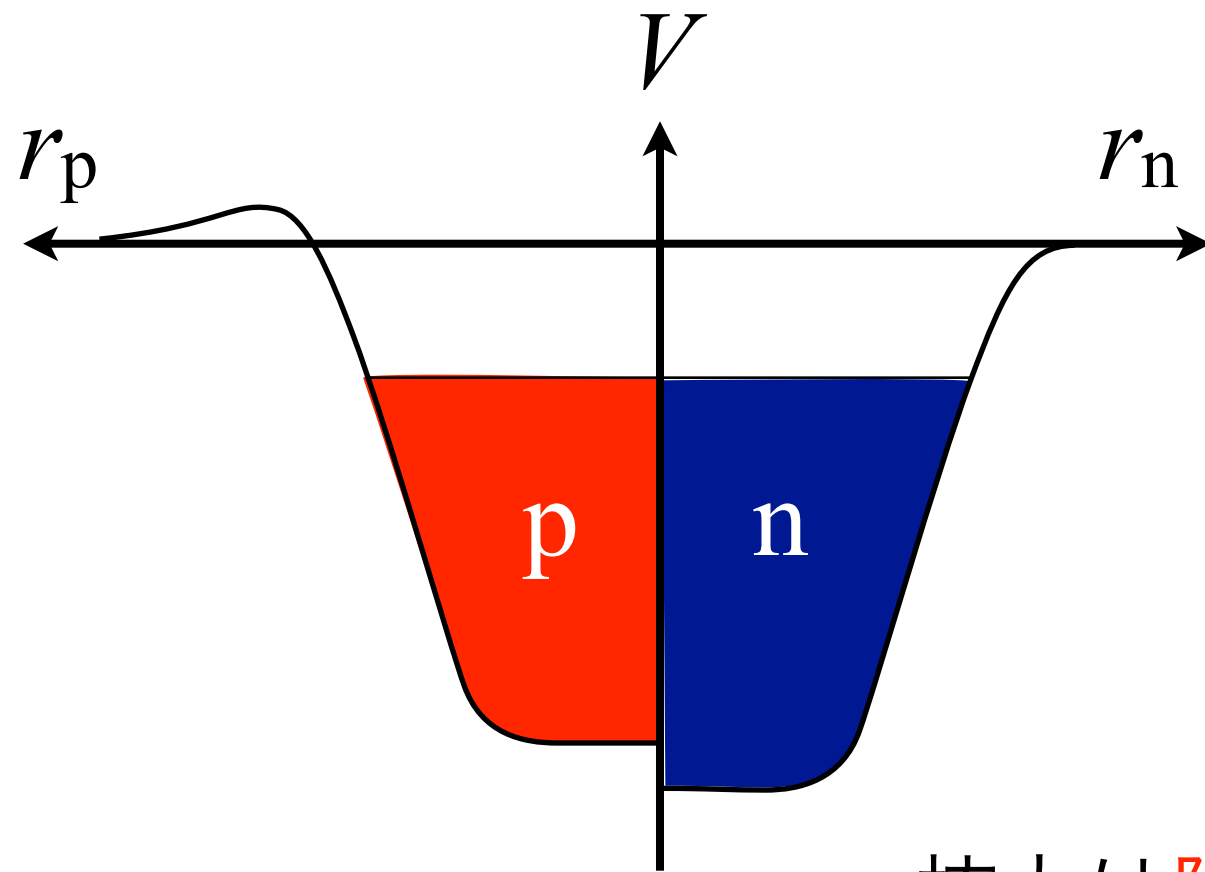
閉殻
closed shell

魔法数	電子配置	元素
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

貴ガス

原子核のポテンシャル

密度分布



核力は陽子と中性子で共通

陽子のポテンシャルは

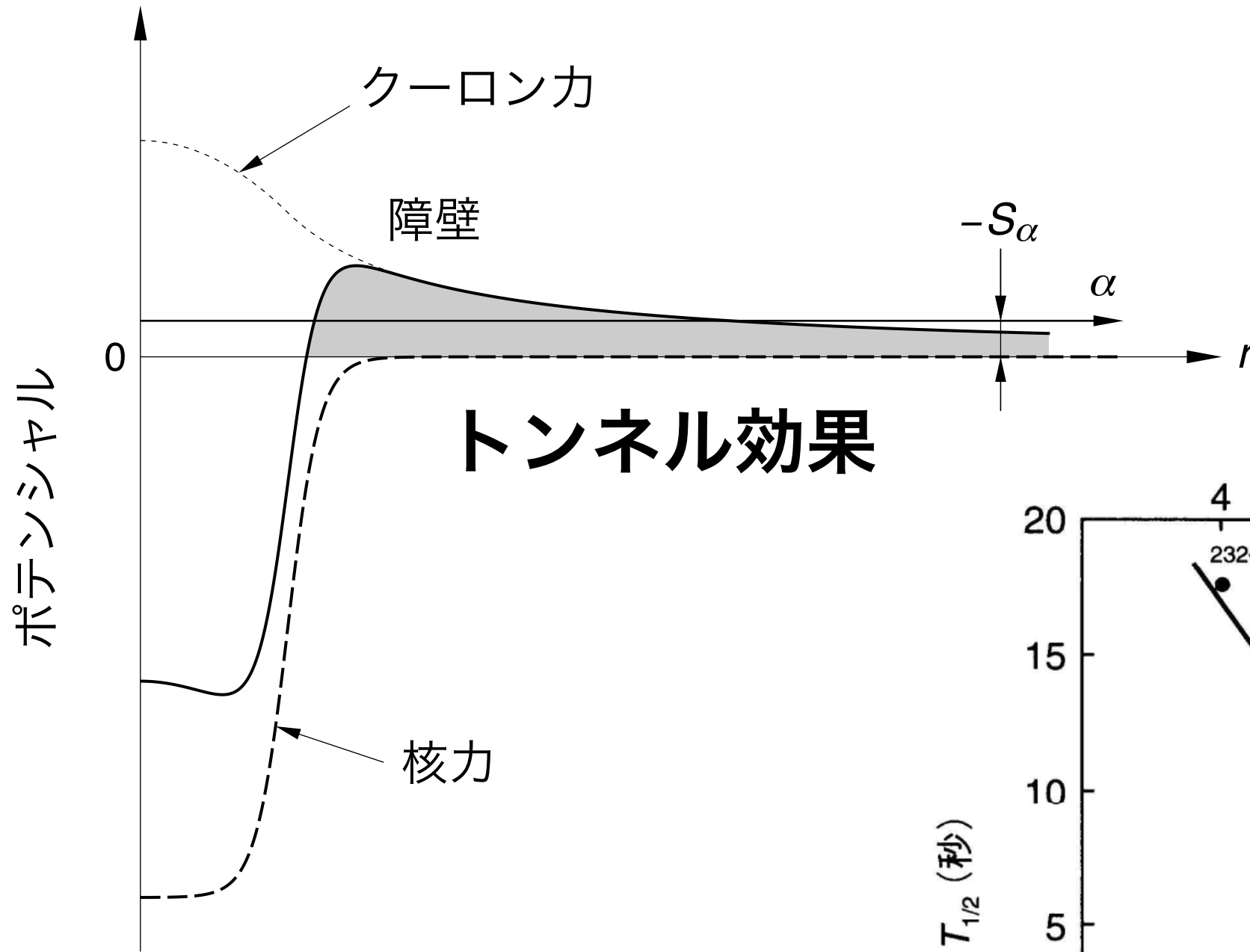
クーロン反発により上昇。 $\propto Z^2 / A^{1/3}$

(特に重い原子核で) 中性子の方が数多く入る。

陽子数も中性子数も魔法数となる (二重閉殻、double magic)

原子核は特に安定。 e.g. ${}^4_2\text{He}_2$ ${}^{16}_8\text{O}_8$ ${}^{40}_{20}\text{Ca}_{20}$ ${}^{48}_{20}\text{Ca}_{28}$ ${}^{208}_{82}\text{Pb}_{126}$

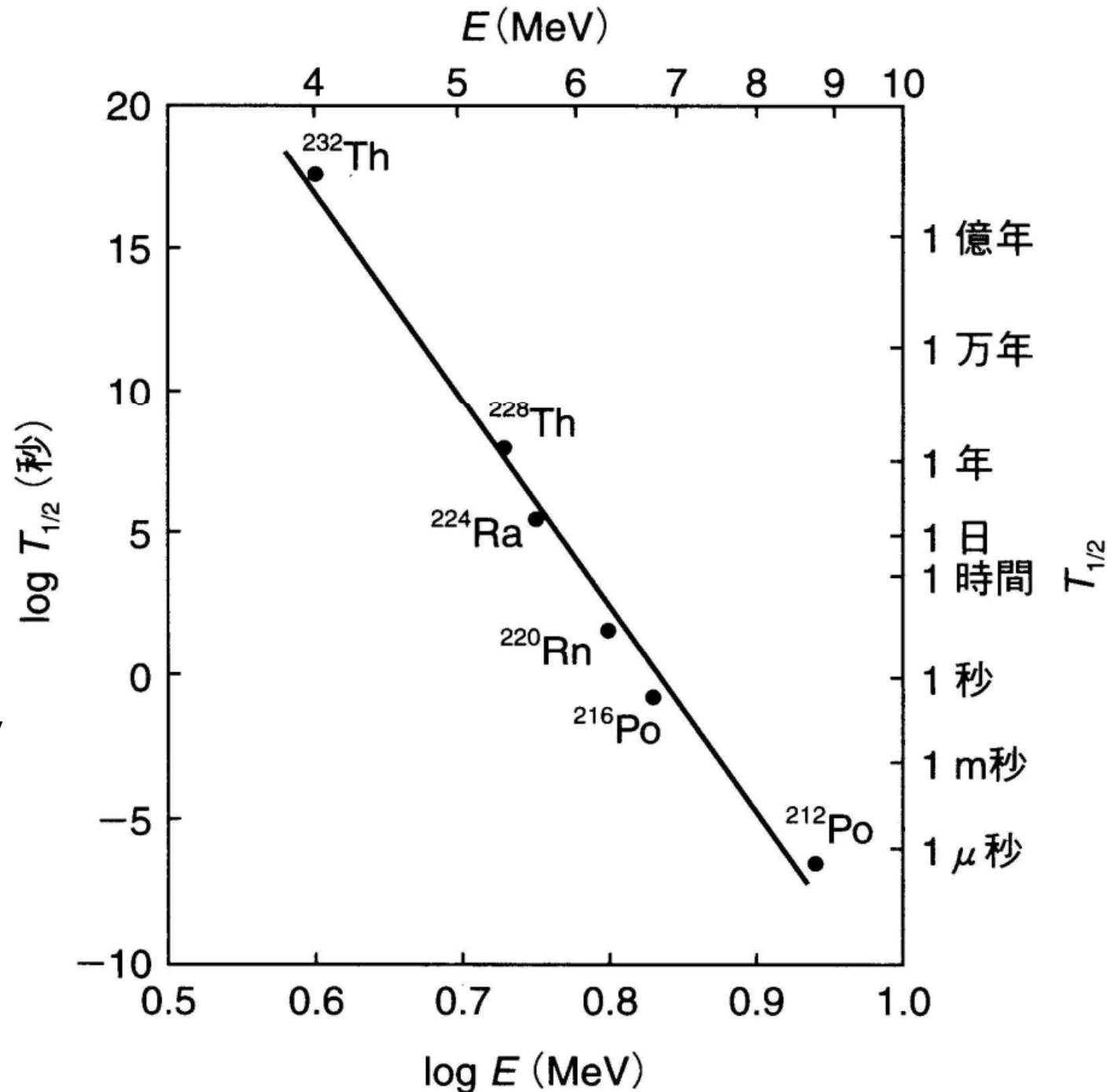
α 壊変 (崩壊)



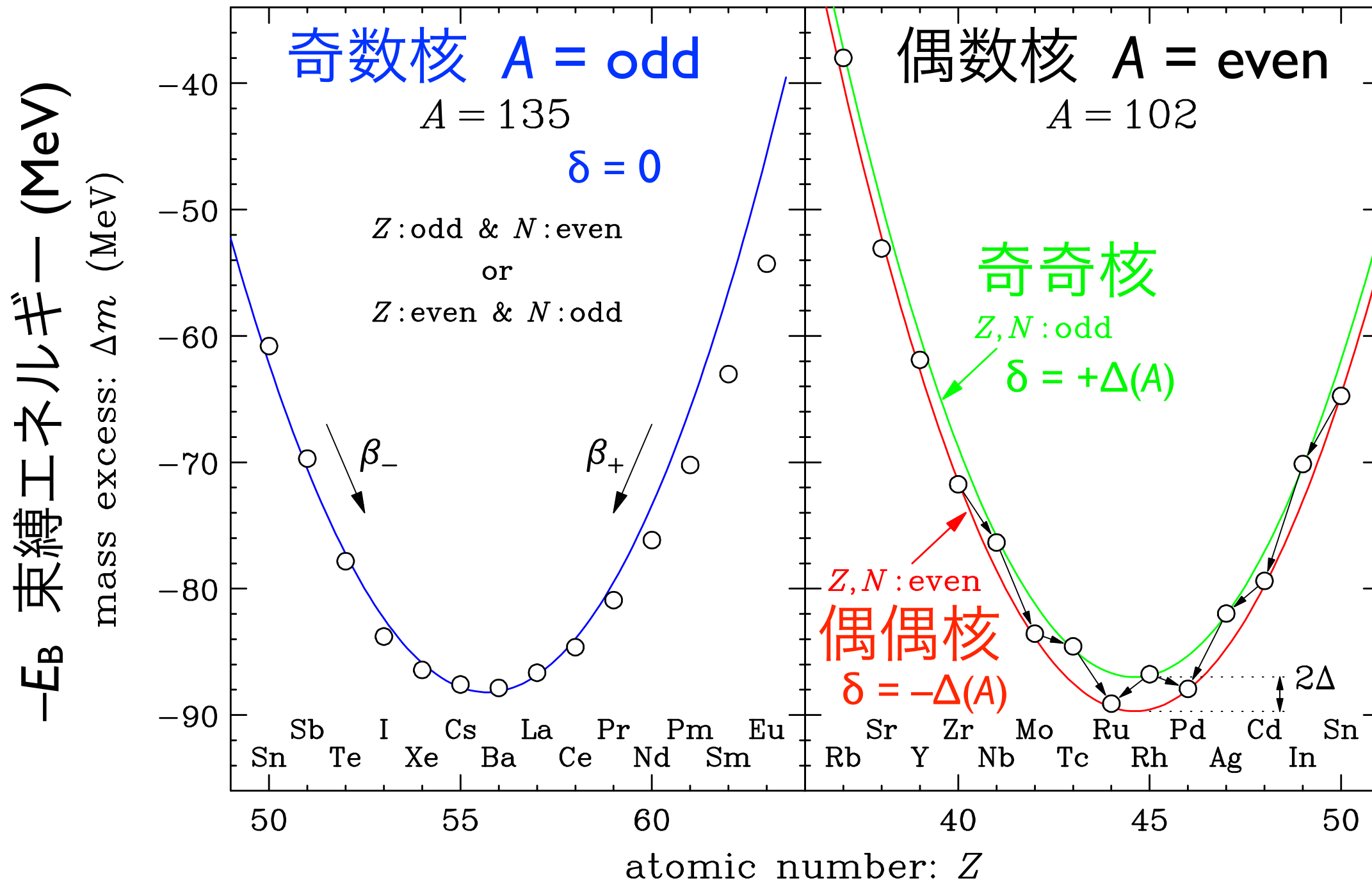
トンネル効果

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



原子核束縛エネルギーの偶奇依存性



$$-E_B = \dots + \frac{a_a}{4} (N - Z)^2 / A + \delta$$

対称エネルギー

対エネルギー

「全原子核の地図」核図表とは

「全原子核の地図」核図表とは

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が、性質の似た元素が縦に揃うよう工夫してあるため、山型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）を縦軸に、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おり、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（低い方が強い）。結合力の強い安定核（黒）が、あたかも谷筋を流れる川のようなので、これを「ハイツベルク」と呼びます。

核図表の見かた

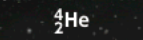
縦軸は陽子数であり、元素の種類でもあります。下から上に向かって陽子数が増えていくため、周期表の順番と一緒です。横軸は中性子数で左から右に向かって中性子の数が増えていきます。つまり横一線では同じ陽子数で、違う中性子数で構成される同位元素になります。

黒い所は安定核⁶、といい、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⁷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

陽子数 + 中性子数 / 陽子数 元素記号

例えばヘリウム 4 では

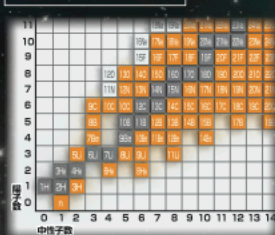


例えば炭素 13 では



と表す。（※右の核図表では陽子数は省略）

真上からみた立体核図表



核図表

Chart of Nuclides

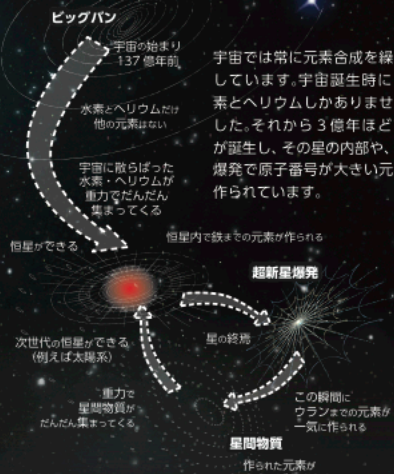
今から 137 億年前、ビッグバンによって私たちの宇宙は生まれました。でもその時に存在した元素は水素とヘリウムだけ。それから3億年ほど経て星が生まれると、その中で重い元素が創られ始め、星の終焉に起きる超新星爆発では、より重い元素が一気に創られたと考えられています。私たちの体を含め、宇宙を構成する物質は全てこれらの元素から出来ています。一方、元素の本体は陽子と中性子からなる原子核です。陽子と中性子の微妙なバランスからなる原子核の成り立ちを調べることは、物質の起源を調べることにほかなりません。ここに示す核図表は全ての原子核を示した地図であり、元素合成と宇宙の歴史も刻まれています。原子核は果たしてど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。最新鋭の顕微鏡で見え始める大きさです。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 種類の粒子の塊であることを知っています。



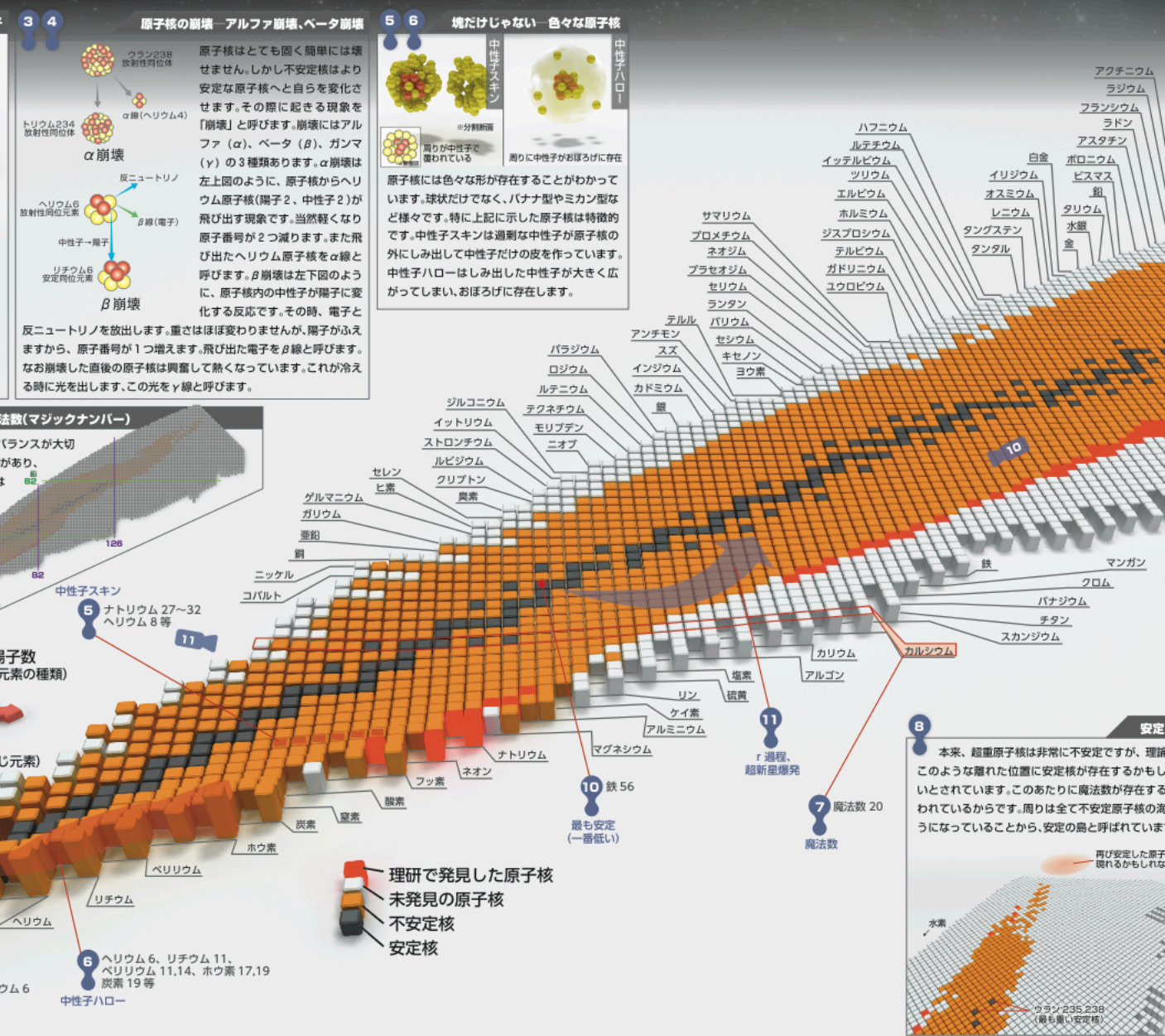
私たちの体は星くずでできている



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 魔法数 (マジックナンバー)

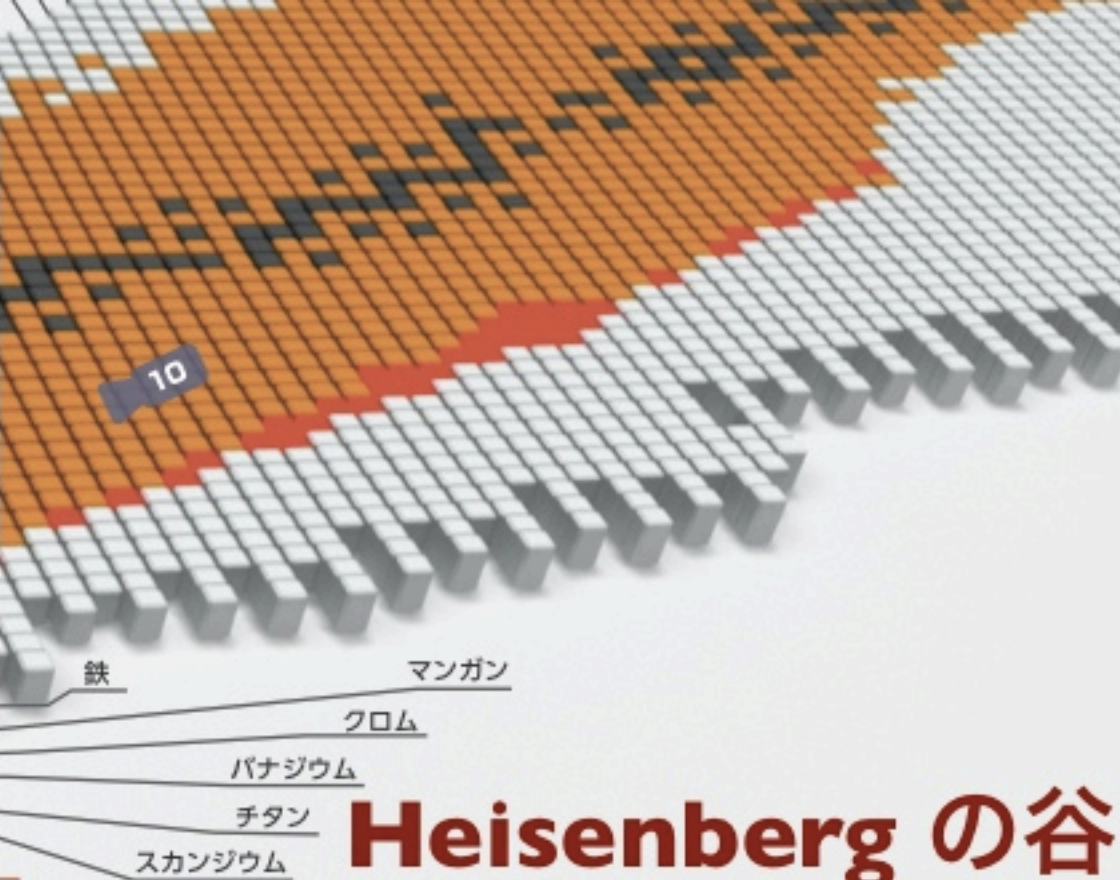
8 安定の島

9 日本史上初の元素発見「113番元素」

10 鉄はターニングポイント

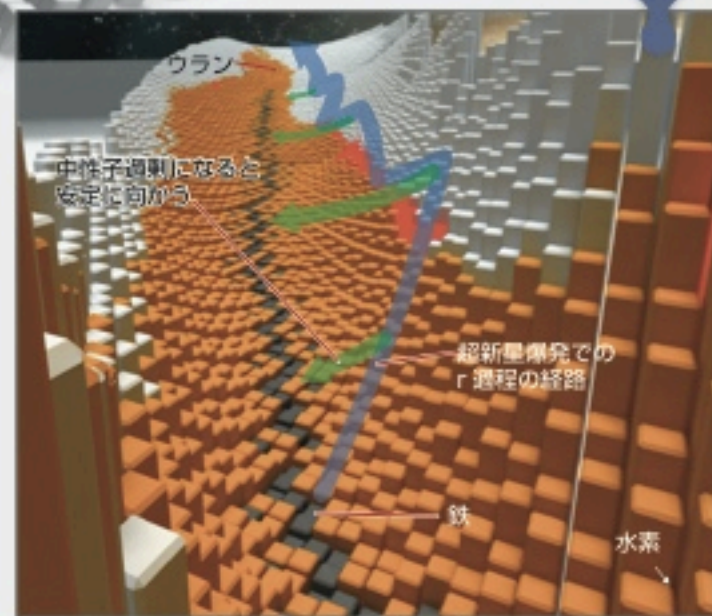
11 不安定核を介して鉄より重い元素が出来る

※1 「縦軸」：縦軸の核図表は陽子数で高さの差がわかりにくいのですが、一般に「ハイツベルク」の図表は縦軸に陽子数を示し、横軸に中性子数を示します。なお、深い谷になると内側が見えなくなってしまう... というのが都合です。
 ※2 「陽子」「中性子」：原子核はほぼ同じ質量の2種類の粒子で出来ています。プラス電荷を持つのが陽子、電荷を持たないのが中性子です。通常陽子と中性子の数がほぼ同じで、その電子はマイナス電荷を持ち電子陽子数の約 2000 分の1という軽さです。
 ※3 「魔法数」：偶数個の陽子数、偶数個の中性子数、偶数個の陽子数と偶数個の中性子数を持つ原子核は、安定核が多い傾向があります。
 ※4 「魔法数」：偶数個の陽子数、偶数個の中性子数、偶数個の陽子数と偶数個の中性子数を持つ原子核は、安定核が多い傾向があります。
 ※5 「ハイツベルク」：ドイツの理論物理学者、ヴェルナー・カール・ハイツベルク。行列力学と不確定性原理によって量子力学を完成させた一人です。
 ※6 「安定核」：崩壊しない原子核のことを安定核と言います。ただし、ウランのように半減期が地球の年齢より長くて安定な核もいくつかあります。この表では安定核として扱っています。
 ※7 「結合エネルギー」：陽子と中性子がバラバラではなく、結合して原子核にな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。低い値にある原子核ほど失ったエネルギーが大きくなり、つまり不安定になります。
 ※8 「RIBF」：RI ビームファクトリー。理研・東大共同研究センターの日本を代表する原子核研究施設です。



Heisenberg の谷

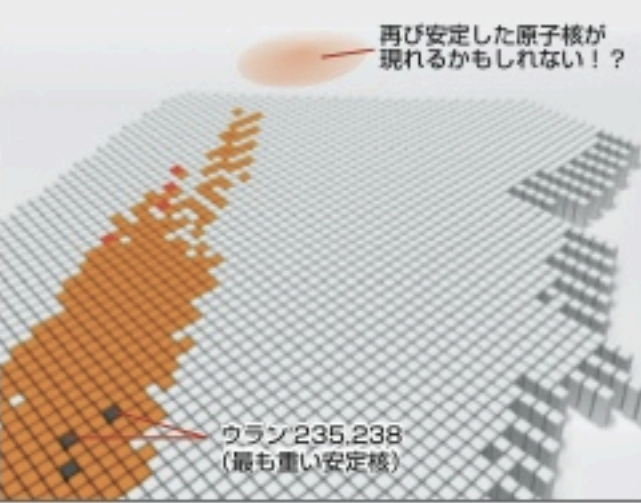
不安定核を介して鉄より重い元素が出来る



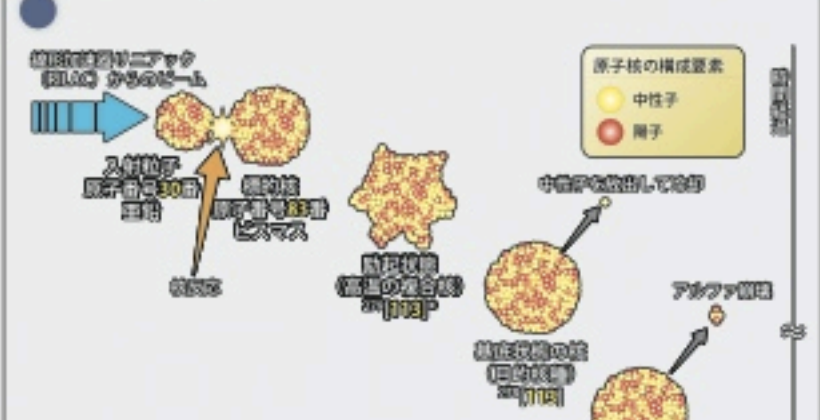
鉄までの原子核は恒星内で生まれました。鉄より重い元素はどのようにしてできたのでしょうか。これまでの研究でその半分位は超新星爆発によってできたと考えられています。この時の爆発的な元素合成の道筋が左図の青色のラインで、r過程と呼ばれます。超新星爆発の際に発生する大量の中性子を通常の原子核が沢山取り込み、一気に重たい中性子過剰核へと変換。途中から中性子の取り込みと中性子が陽子に変わる反応（ベータ崩壊）のバランスで複雑なラインを描くことになると考えられています。爆発が落ち着き中性子の供給が止まると、ベータ崩壊によってまさに谷を下るように安定核へと変化する道筋を緑色のラインで示しました。RIBF^{※8}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

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。

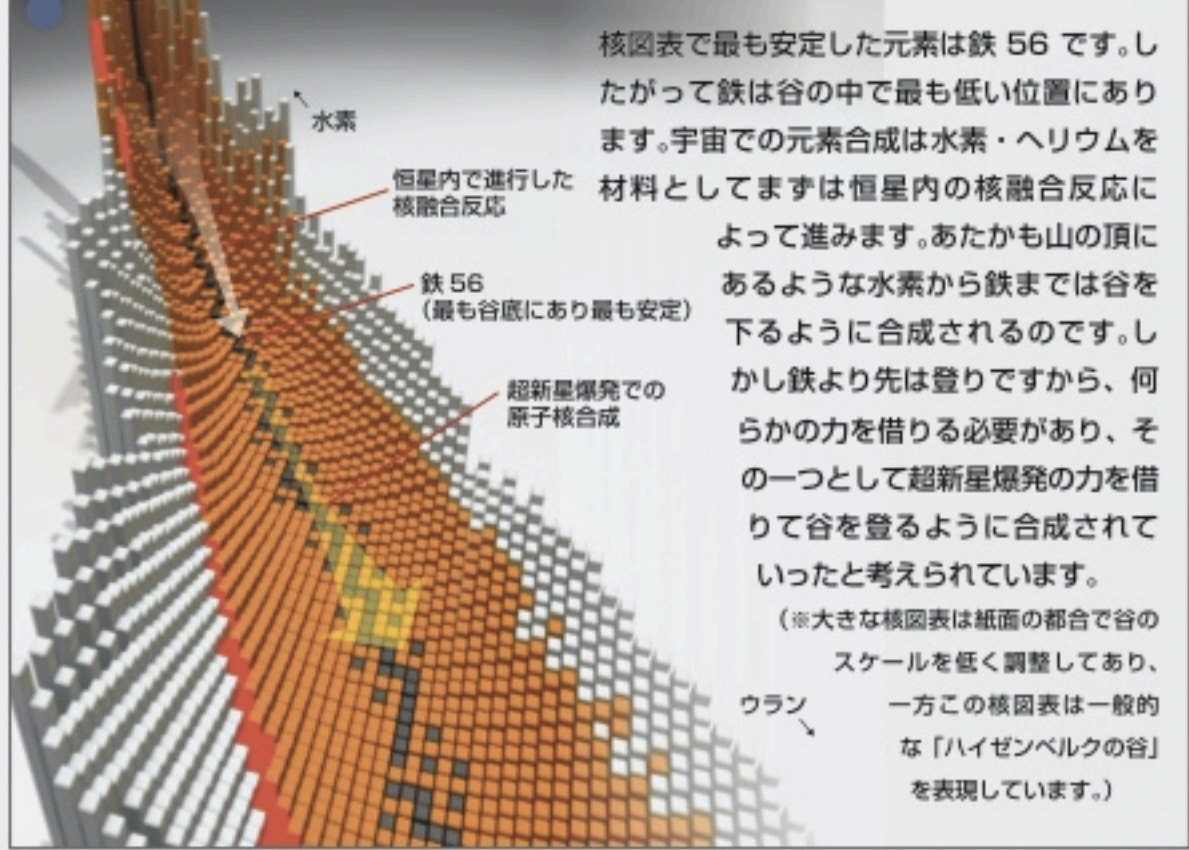


9 日本史上初の元素発見「113番元素」



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

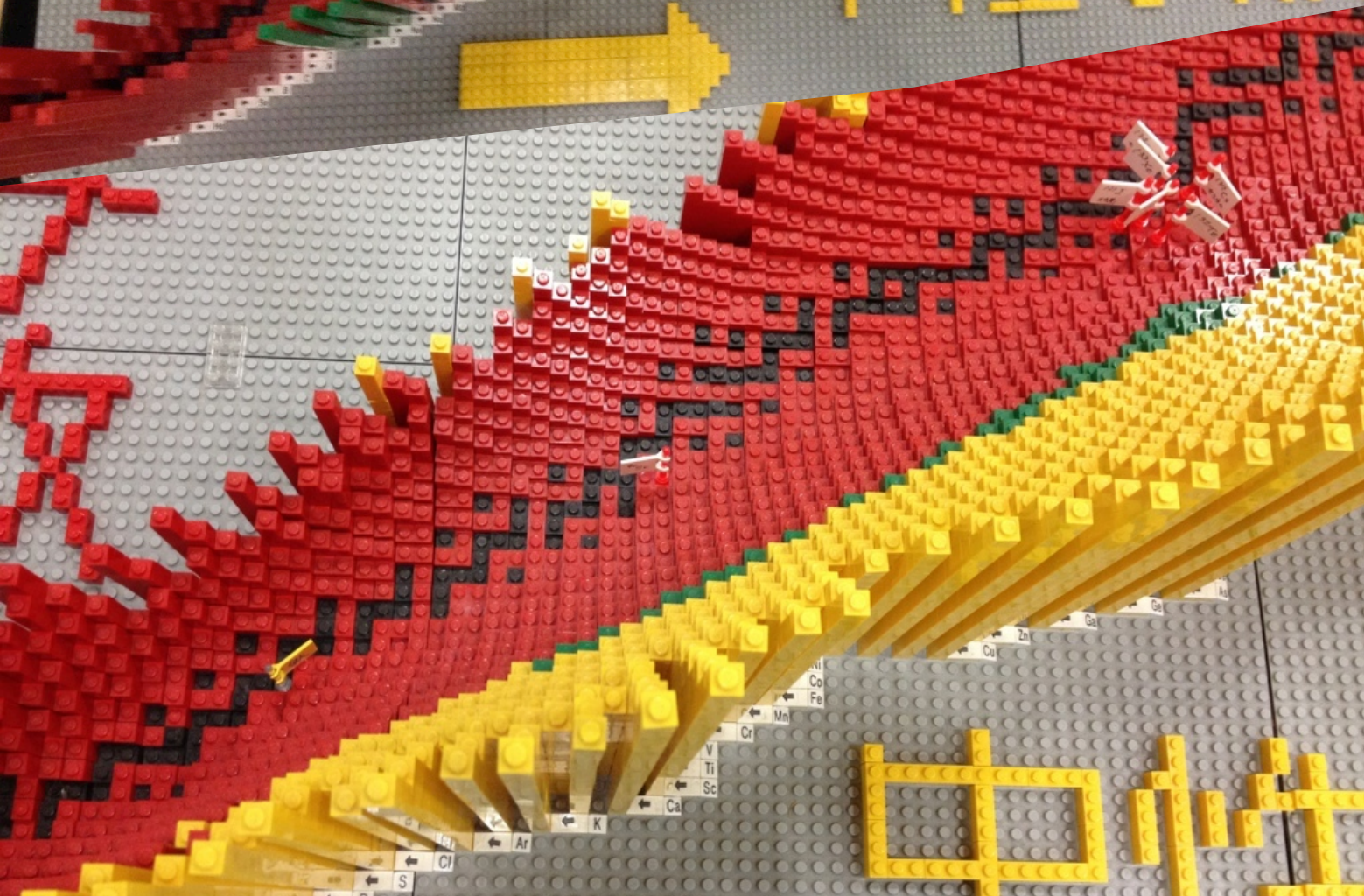
ルギーと言います。低い所にある原子核ほど失ったエネルギーが大きく壊れにくい、つまり安定になります。
 ※8 [RIBF]: RI ビームファクトリー。理研仁科加速器研究センターの日本を代表する原子核研究施設の総称。

RIKEN ~~NISHINA~~
CENTER

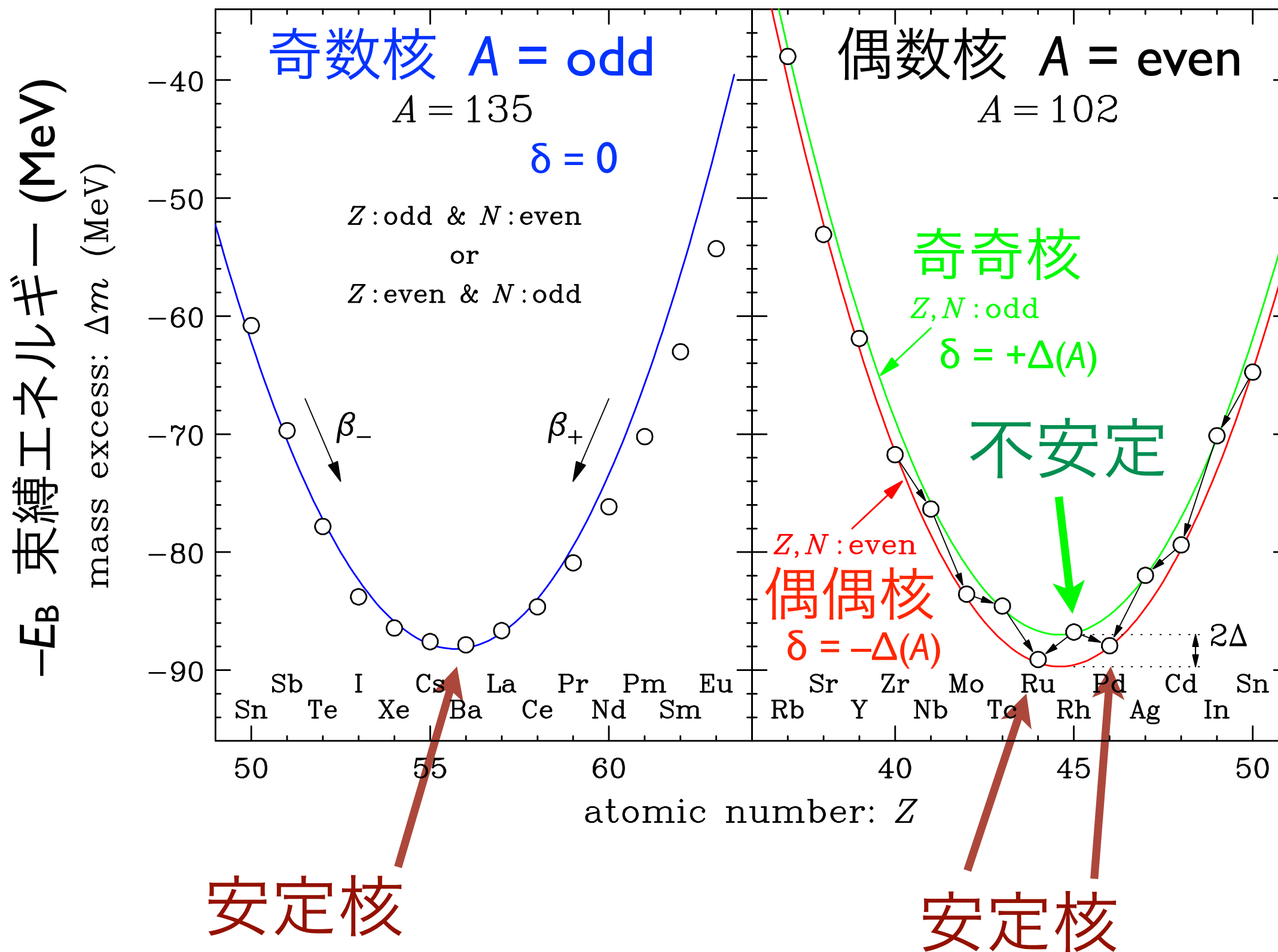


陽子数

中性子数

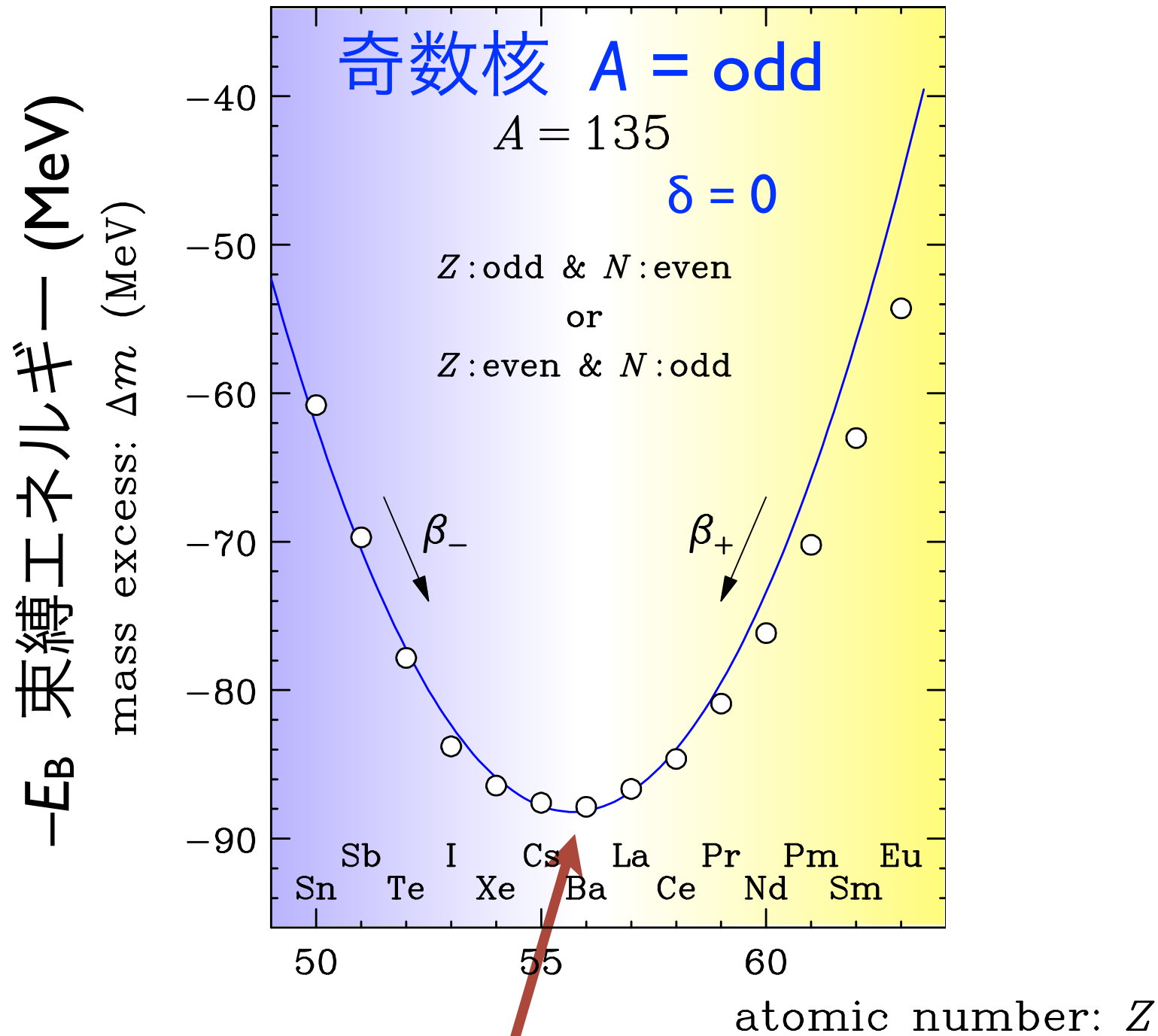


原子核束縛エネルギーの偶奇依存性



安定核の 60% は偶偶核。安定な奇奇核は 4 つのみ。 ${}^2_1\text{H}_1$ ${}^6_3\text{Li}_3$ ${}^{10}_5\text{Be}_5$ ${}^{14}_7\text{N}_7$

原子核束縛エネルギーの偶奇依存性

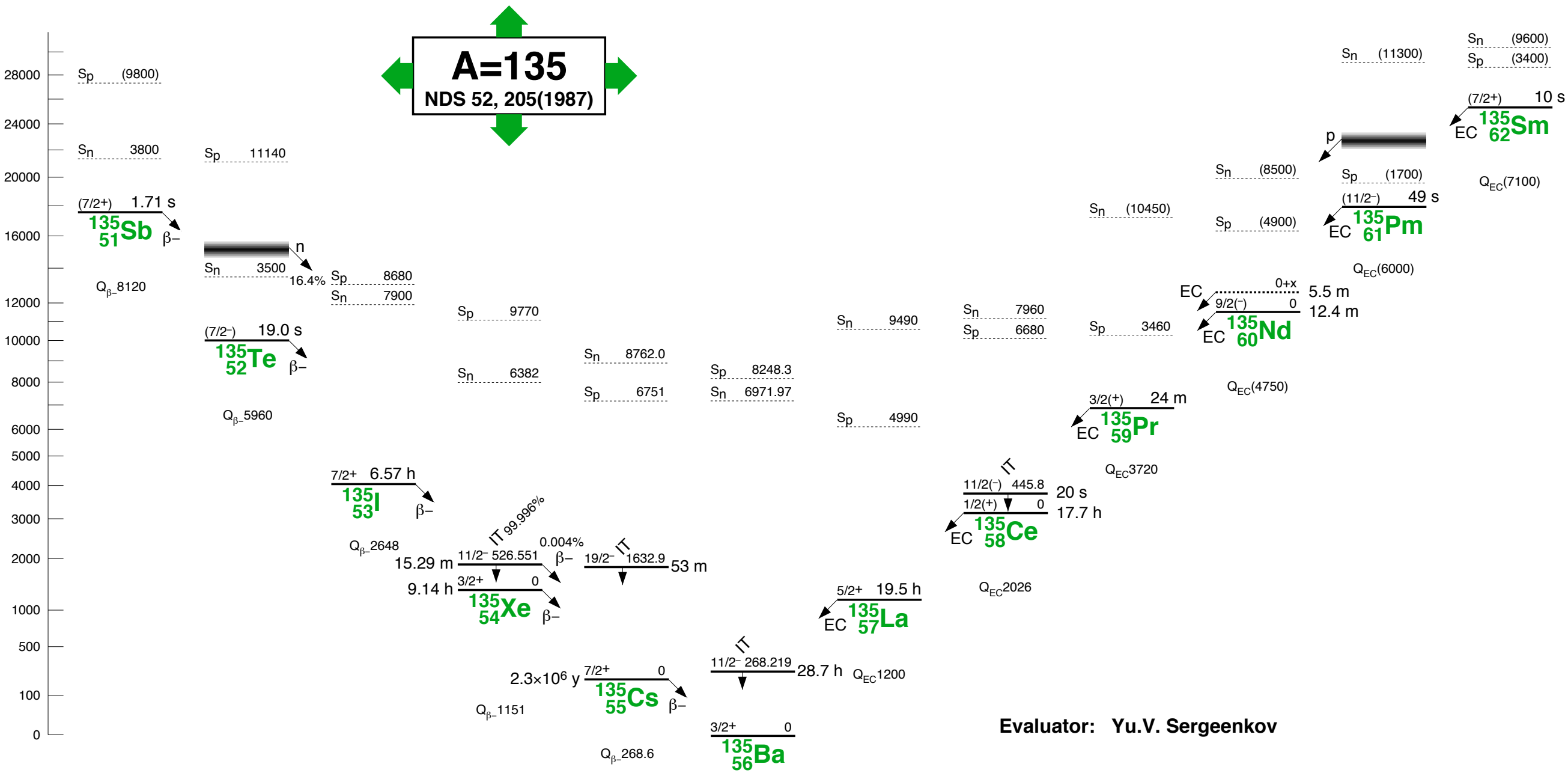


安定核



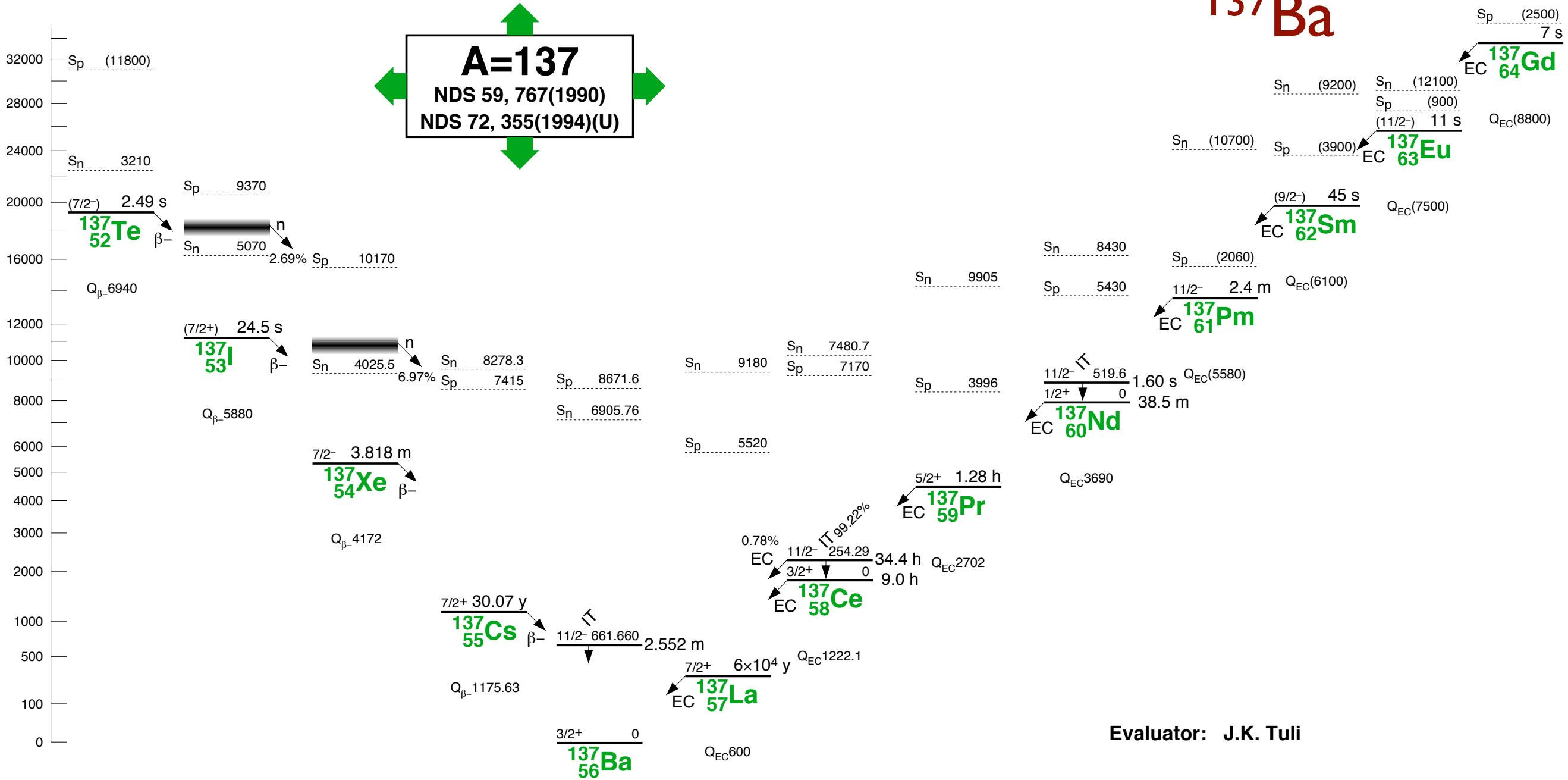
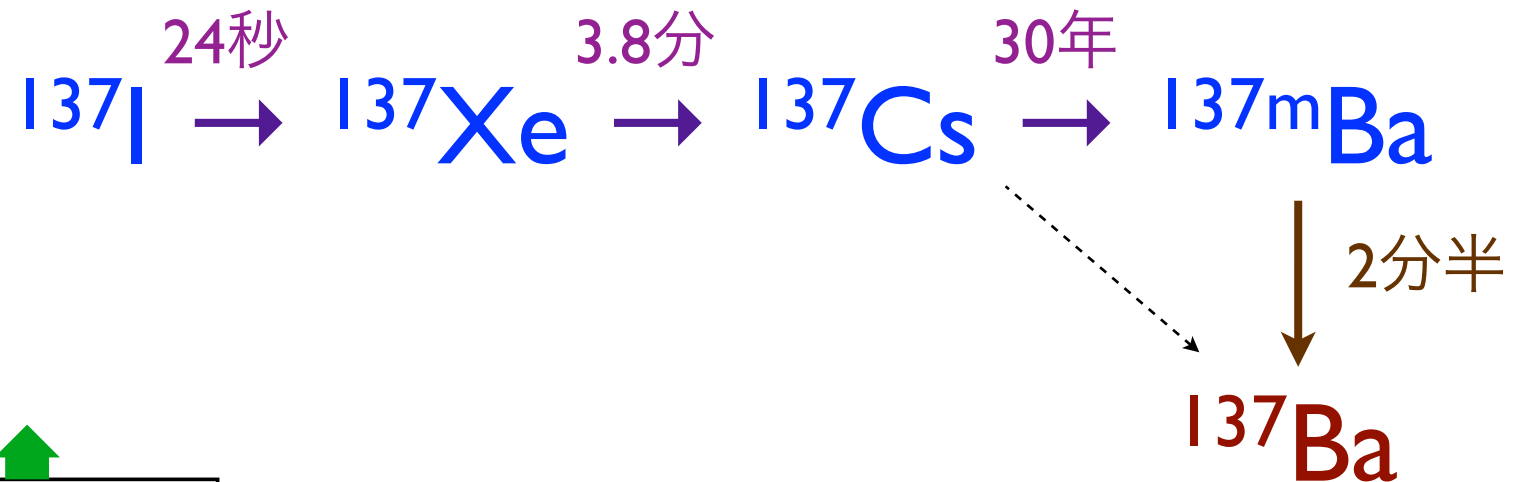
原子炉内では $^{135}\text{Xe} + n \rightarrow ^{136}\text{Xe}$ (中性子捕獲反応)

中性子過剰核は β^- 壊変 (崩壊) を繰り返しながら 安定核までたどり着く。

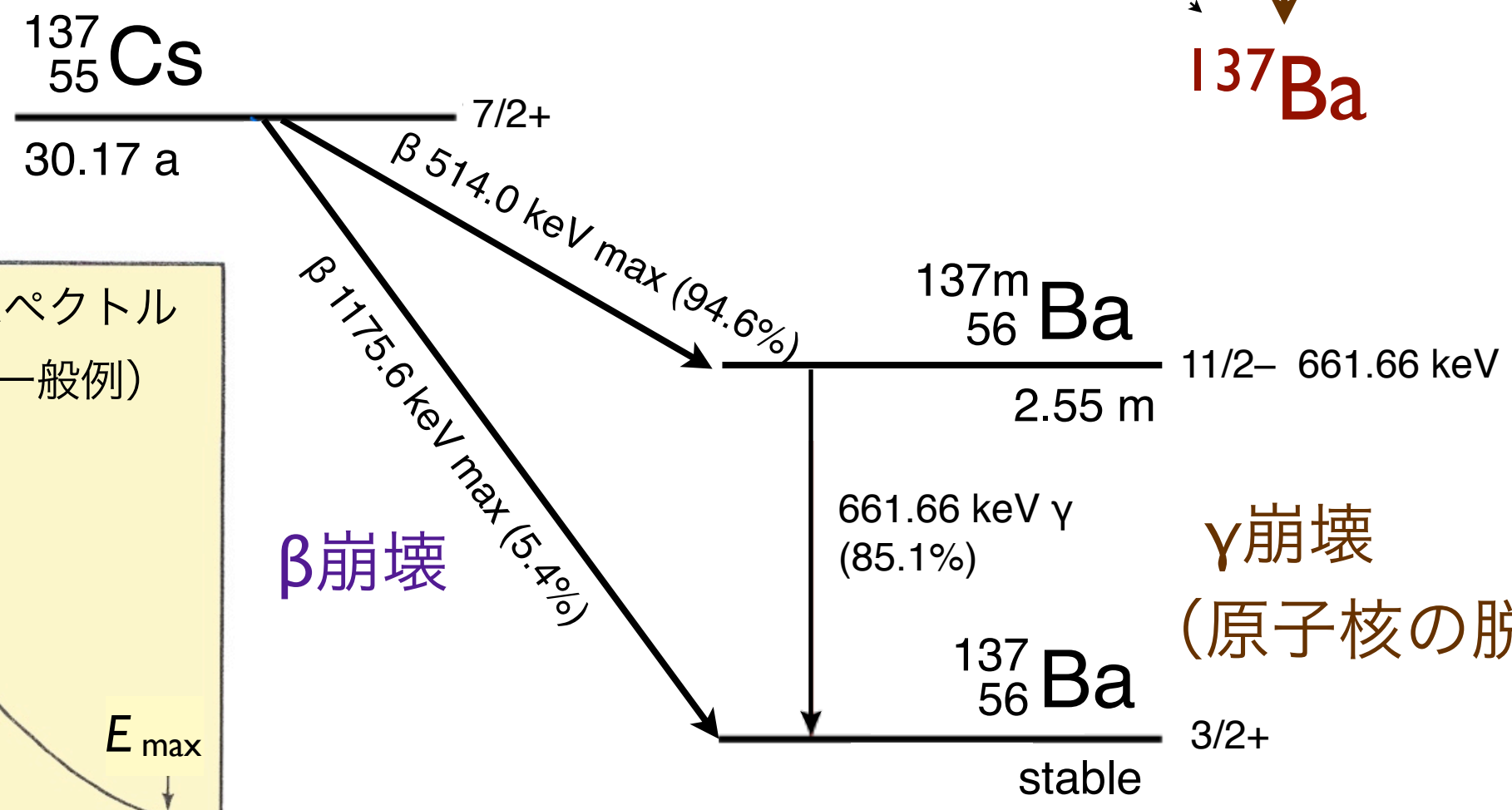


原子炉内では $^{135}\text{Xe} + n \rightarrow ^{136}\text{Xe}$ (中性子捕獲反応)

中性子過剰核は β^- 壊変 (崩壊) を繰り返しながら 安定核までたどり着く。

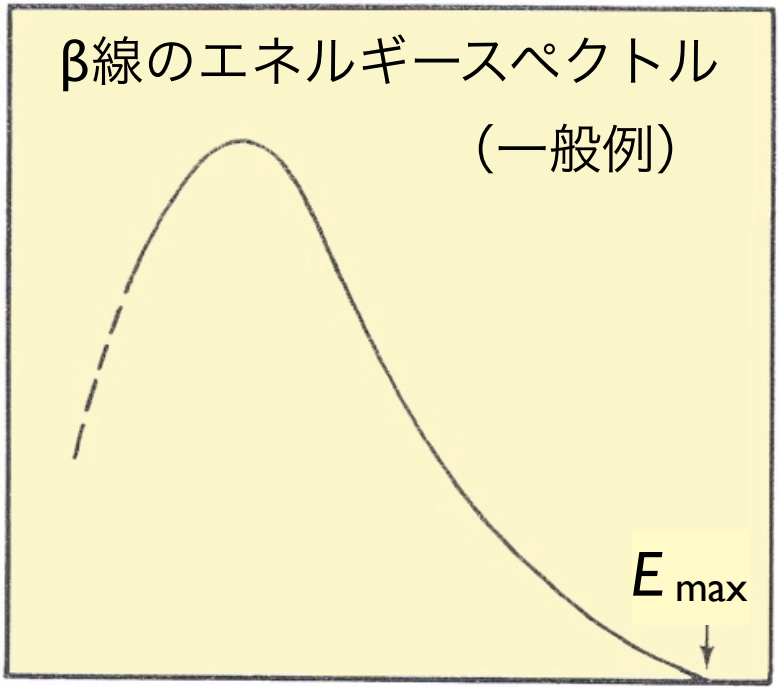


中性子過剰核は β^- 壊変 (崩壊) を繰り返しながら 安定核までたどり着く。



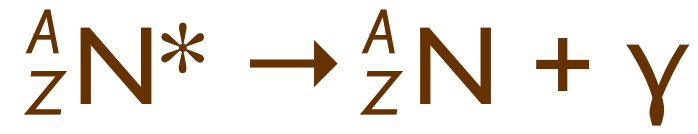
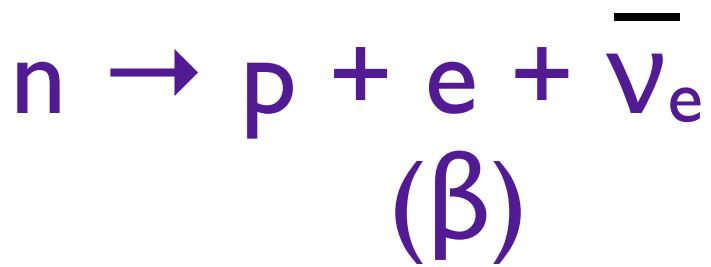
γ 崩壊
 (原子核の脱励起)

粒子数の分布

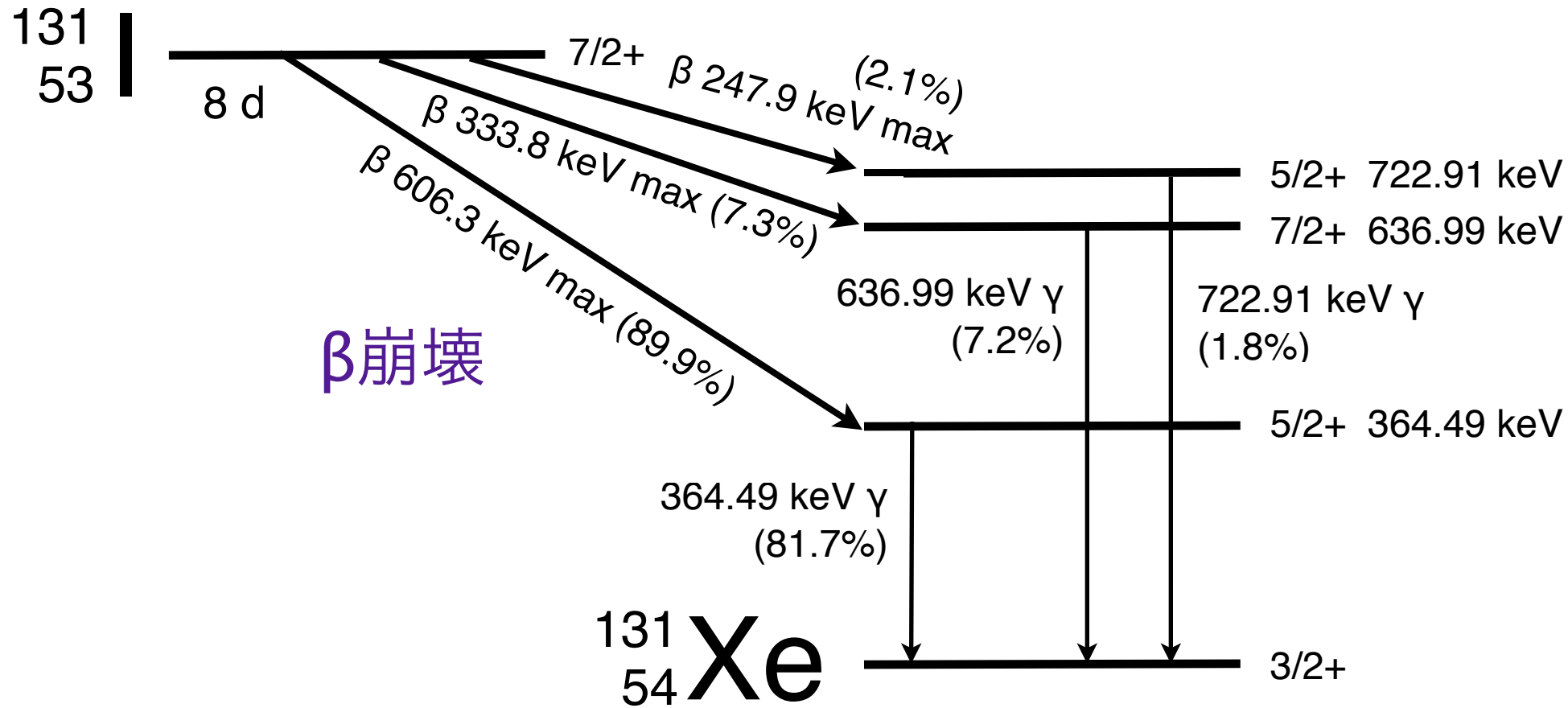
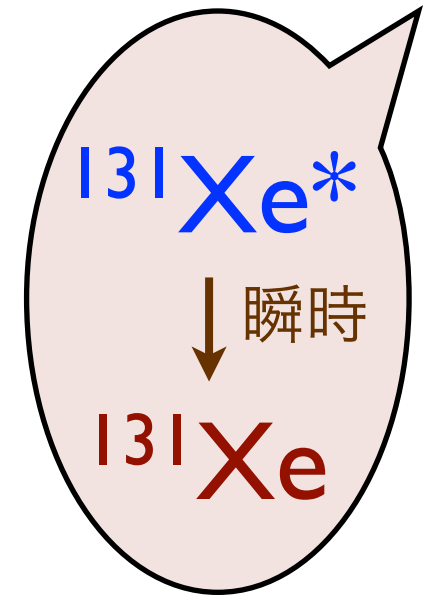
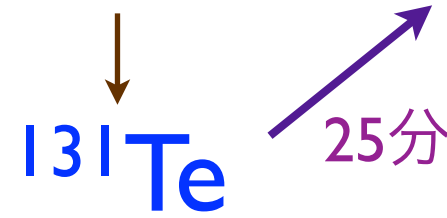


エネルギー E_β

β 線 (連続スペクトル)

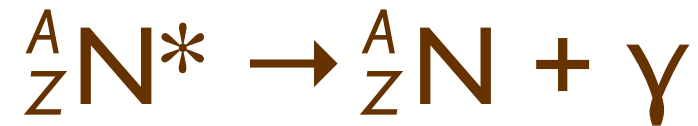


γ 線 (定まったエネルギー)



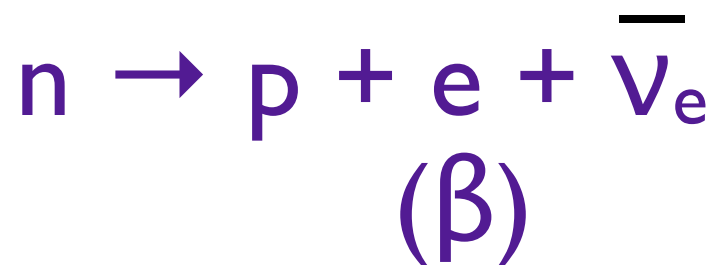
β崩壊

γ線：原子核の脱励起

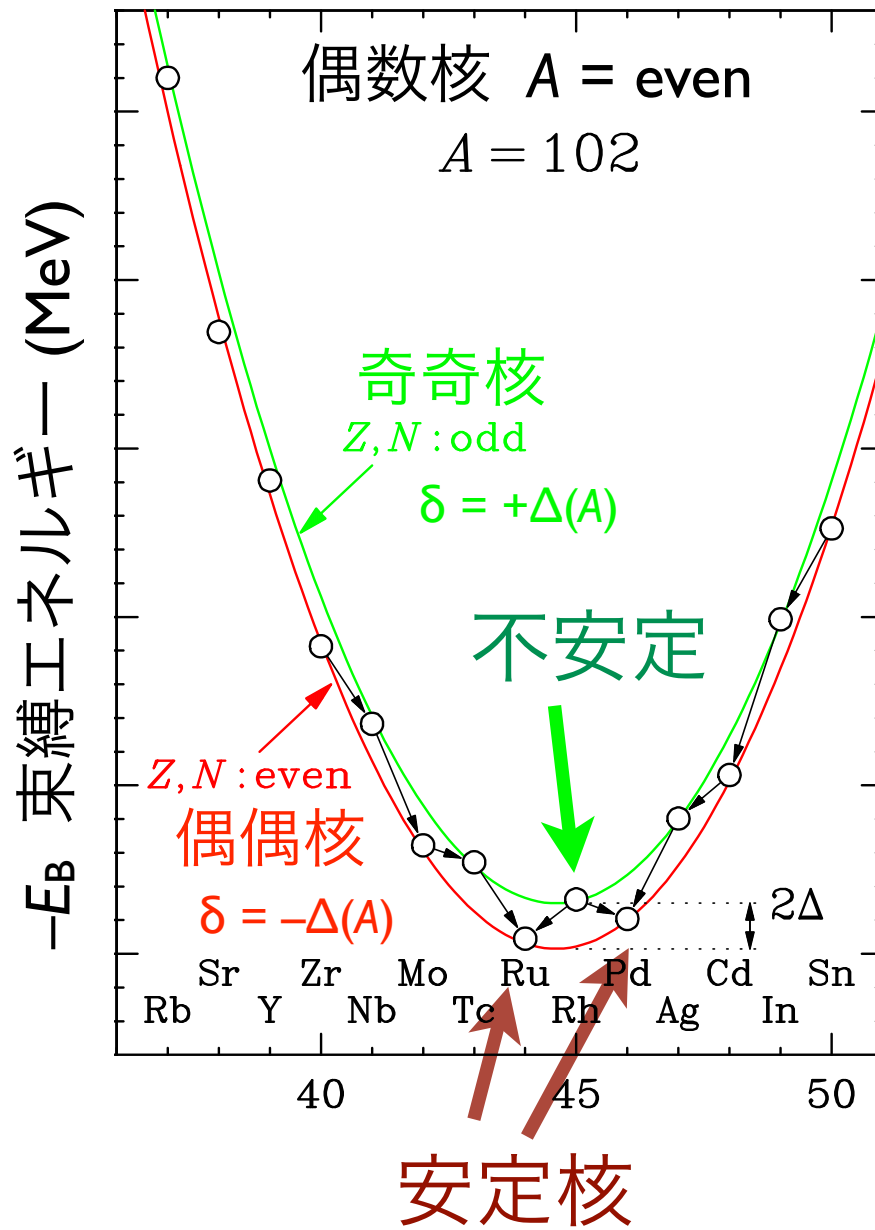
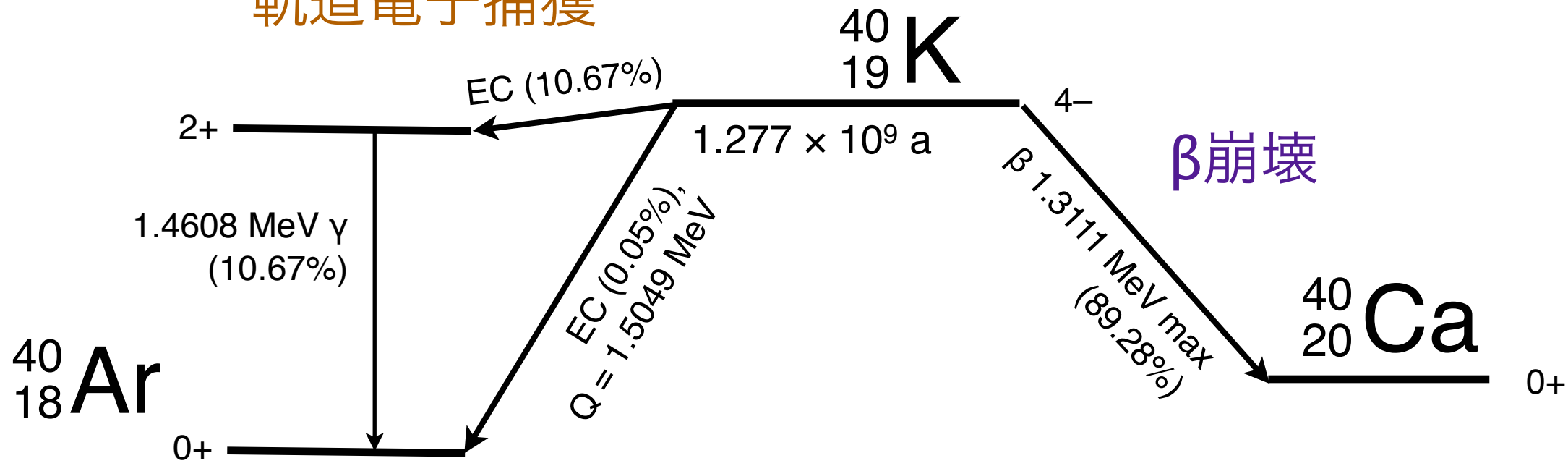


γ線（定まったエネルギー）

β線（連続スペクトル）

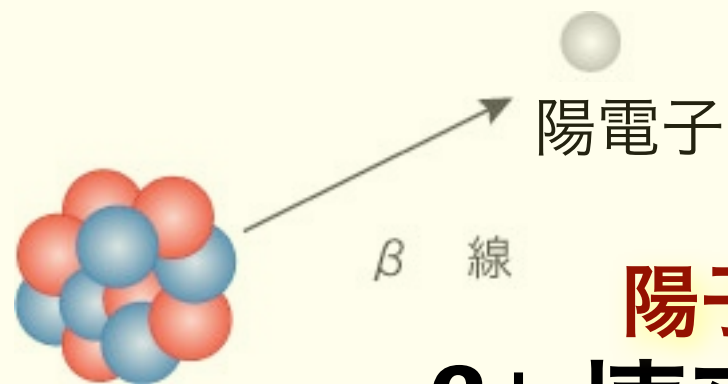


軌道電子捕獲

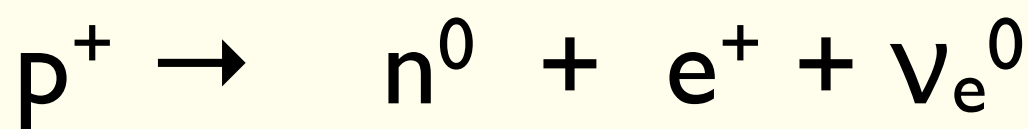


数十 keV ~ MeV

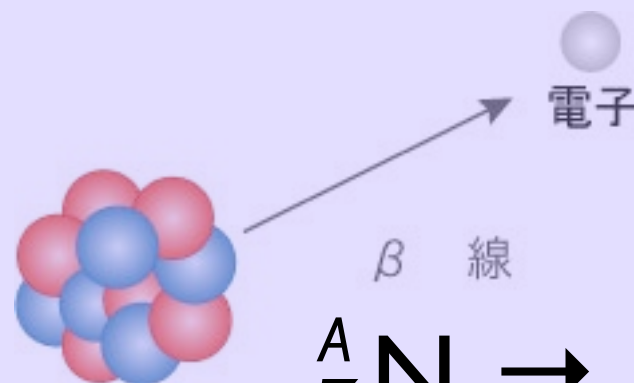
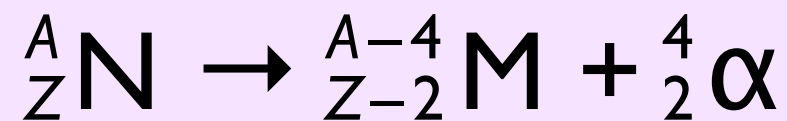
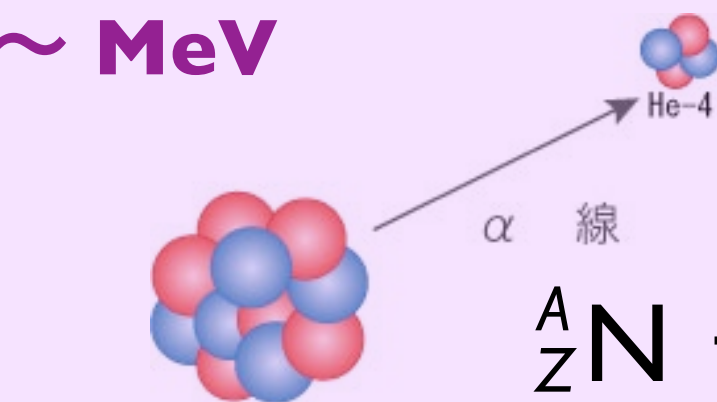
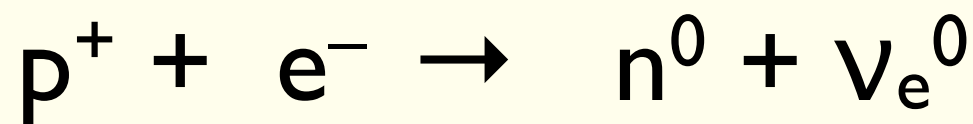
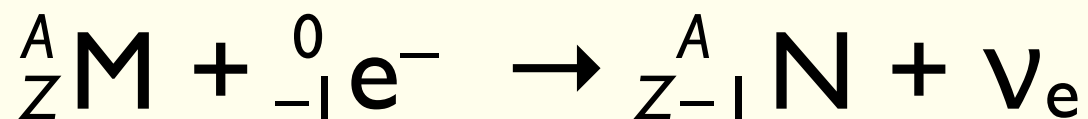
原子核 N



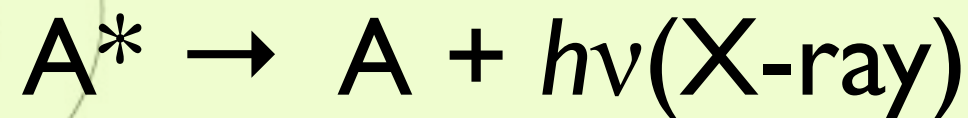
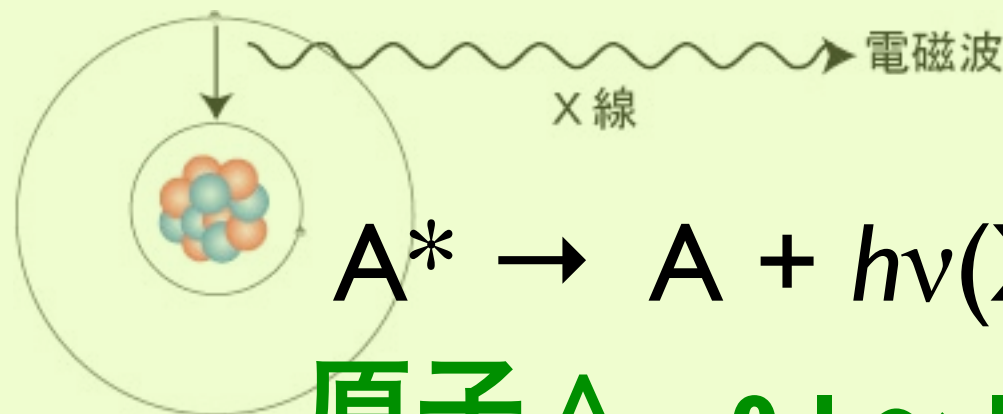
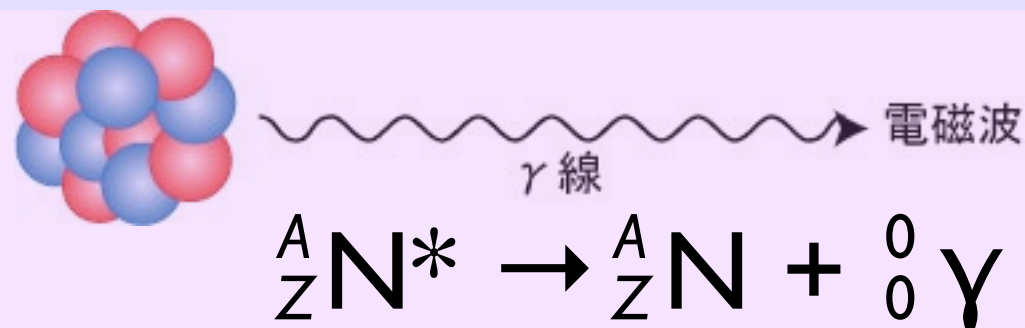
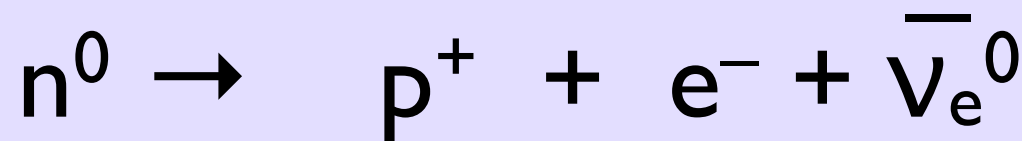
陽子過剩核
 β^+ 壊変 (崩壊)



軌道電子捕獲 (EC)



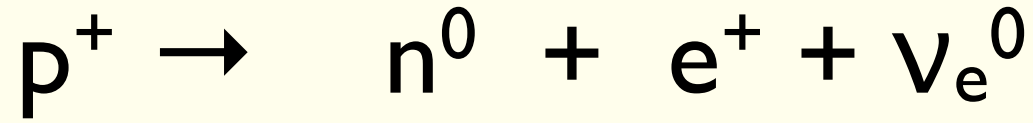
中性子過剩核
 β^- 壊変 (崩壊)



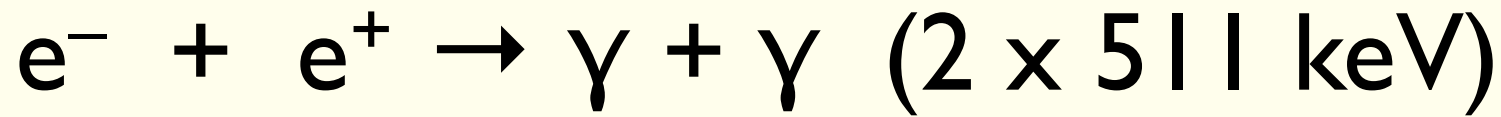
原子 A 0.1 ~ 100 keV

連続スペクトル
(エネルギー分布)

β^+ 壊変 (崩壊)

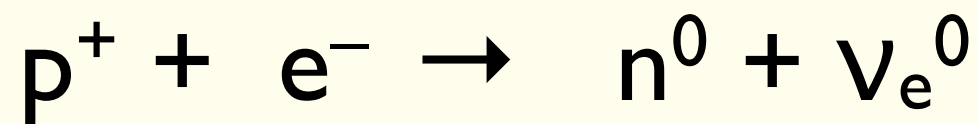
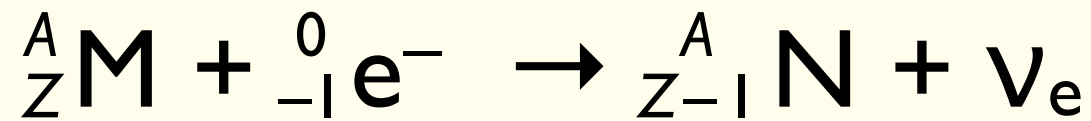


陽電子消滅

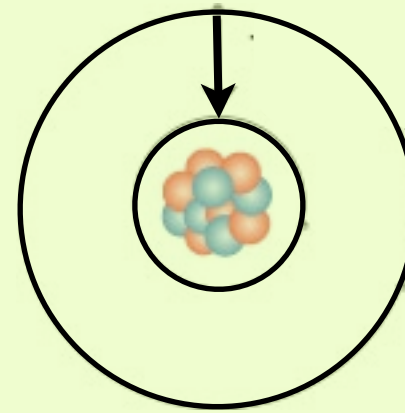
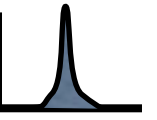
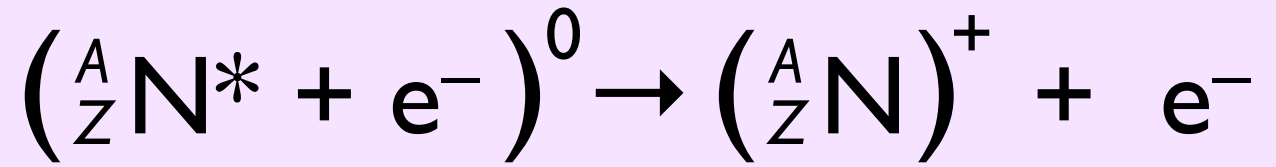
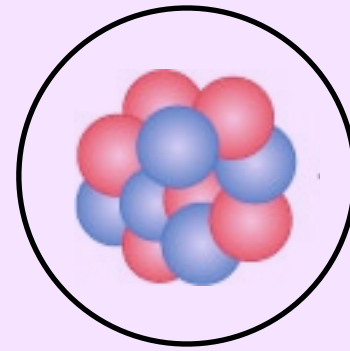


線スペクトル
(定まったエネルギー)

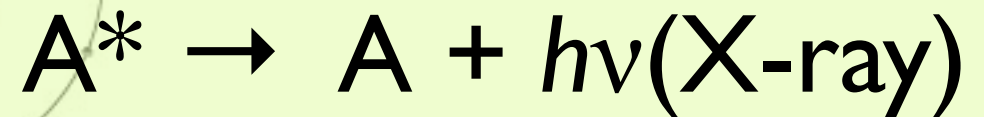
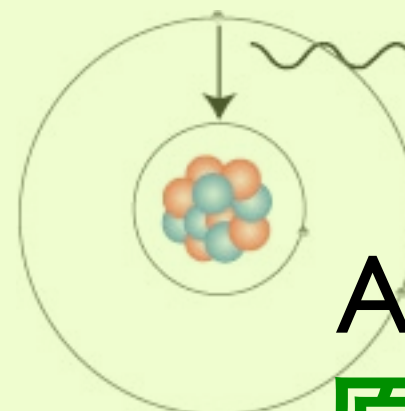
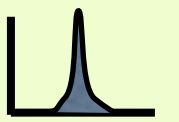
軌道電子捕獲 (EC)



内部転換 (IC)



Auger 電子

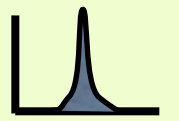


原子 A 0.1 ~ 100 keV

X線

電磁波

特性X線



PET (Positron Emission Tomography)

陽電子断層撮影法

組織の”はたらき”を知る

^{18}F -FDG (fluorodeoxy glucose), $^{15}\text{O}_2$, H_2^{15}O



放射線医療：診断

e^+



陽電子 positron

電子 electron



e^-

^{11}C , ^{13}N ,
 ^{15}O , ^{18}F

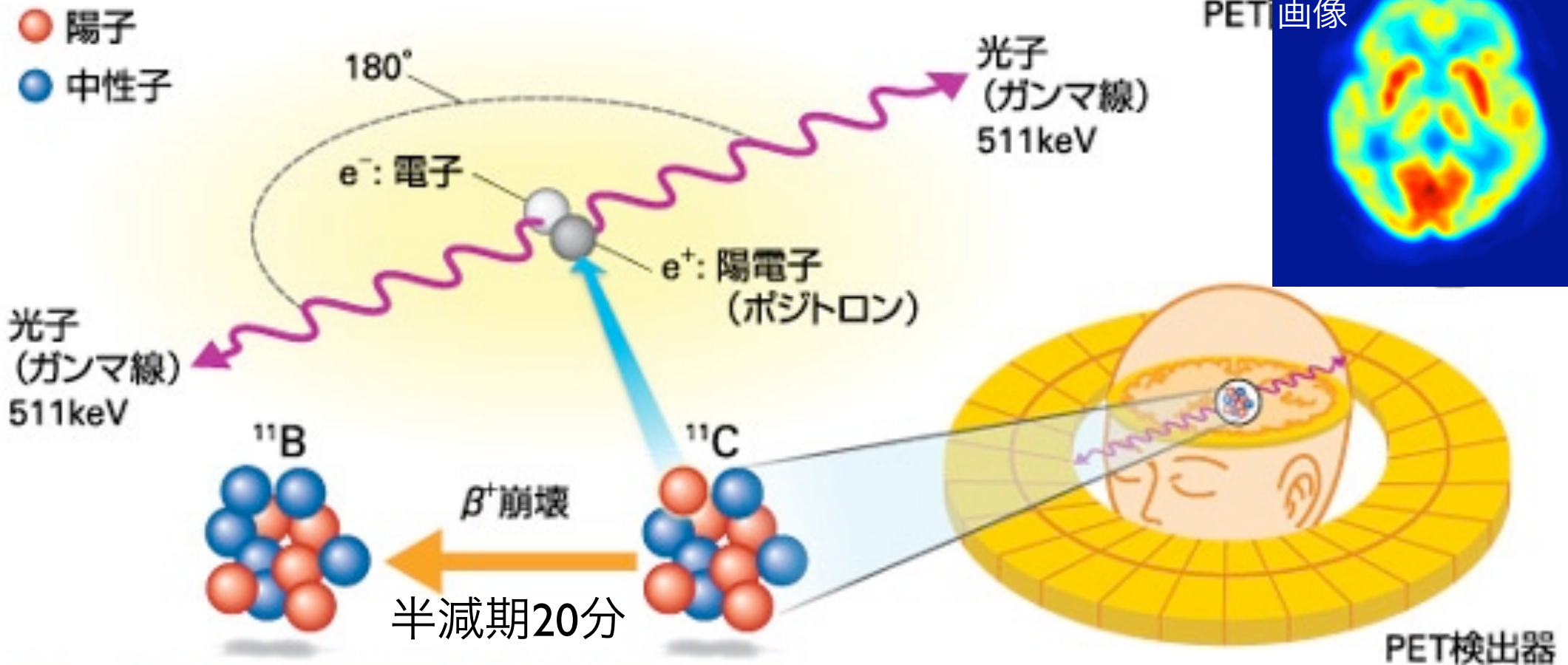
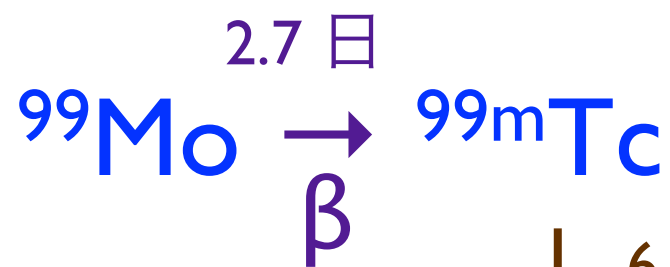


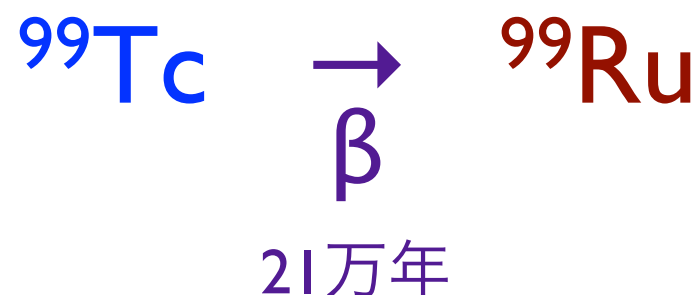
図1 PET (陽電子放射断層画像撮影法) の仕組み

調べたい分子に陽電子を放出する放射性核種を付け、静脈注射によって投与する。例えば、炭素 11 (^{11}C) はホウ素 11 (^{11}B) に崩壊するとき、陽電子を 1 個放出する。その陽電子が近くにある電子と衝突し、両方向にガンマ線が放出される。検出器がガンマ線をとらえることで断層画像が得られ、分子がどこに、どれだけ存在しているのかを知ることができる。

海外の研究用原子炉
で生成・空輸



核医学検査
(投与)



安定同位体が存在しない元素

幻のニッポニウム (小川正孝)
テクネチウム ${}_{43}\text{Tc}$
プロメチウム ${}_{61}\text{Pm}$

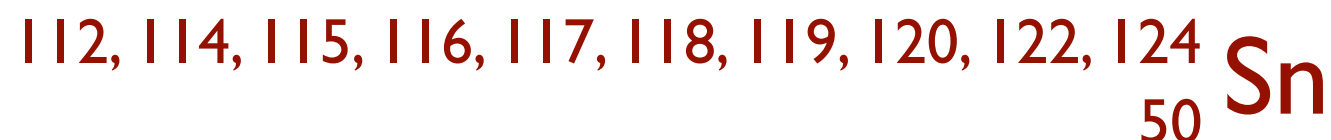
ビスマス ${}_{83}\text{Bi}$ 以上の原子番号の元素

安定同位体が 1 つだけの元素



${}^{133}_{55}\text{Cs}$ ${}^{197}_{79}\text{Au}$ など 26 元素

安定同位体が多数



原子核物理学

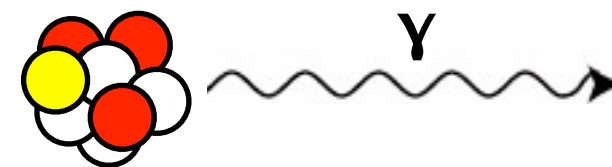
原子力発電の原理

中性子の反応と放射化、核分裂反応

中性子の吸収と核反応

質量数が1つ大きい原子核を形成したあと、 γ 線などを放出。

放射化の原因となる。



放射化

放射性物質でないものが放射線照射によって放射性を帯びること。

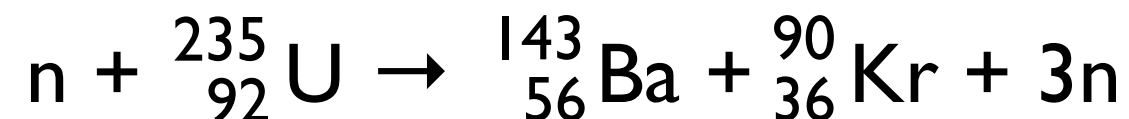
中性子や、**10 MeV 以上の γ 線**による核反応で放射性核種が生じることがある。

通常の放射性核種による β 線や γ 線、原子からの X 線などでは起こらない。

加速器施設や原子炉などの第一種管理区域では放射化に注意が必要。

核分裂反応の発見

$n + {}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{239}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{239}_{93}\text{X} + \beta^-$ により超ウラン元素の生成が研究されていた。

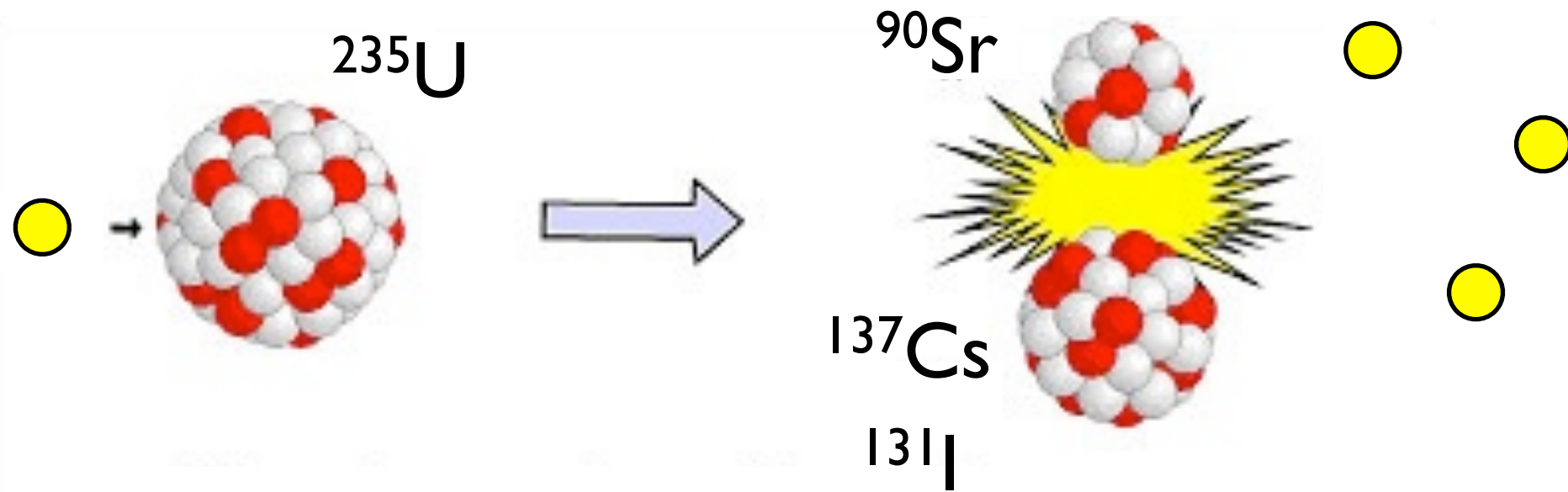


Otto Hahn & Fritz Straßmann (1938)

実験

Lise Meitner 理論的解釈

原子核分裂反応

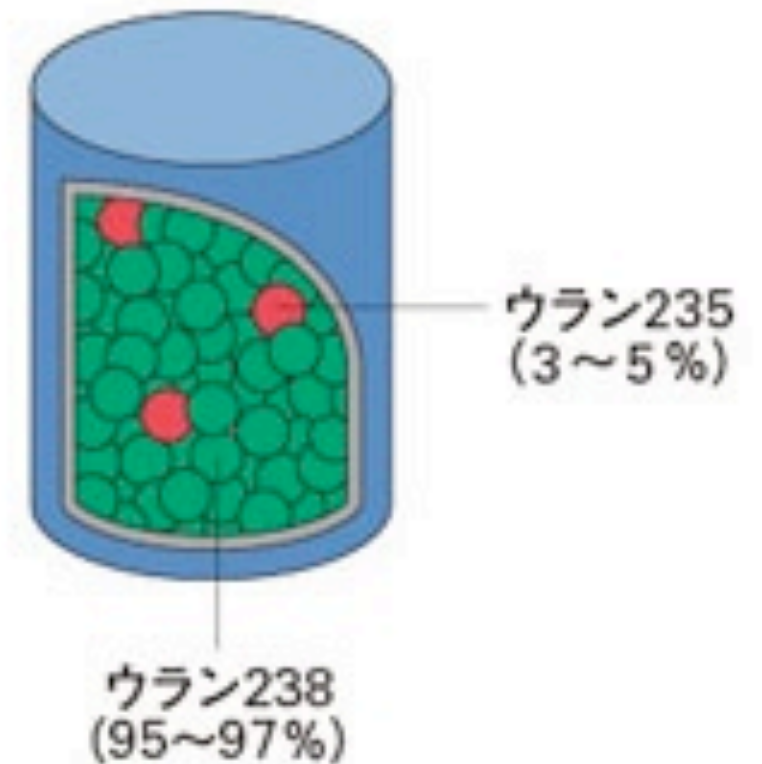
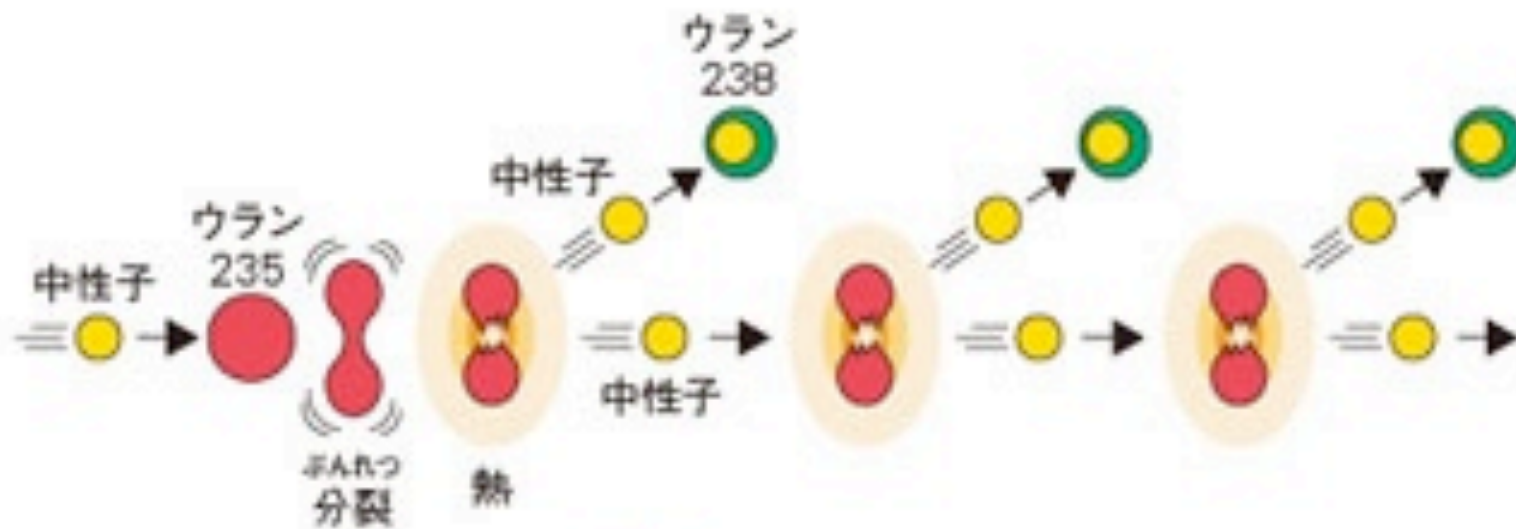


粒子の運動エネルギーとして放出

熱中性子

減速

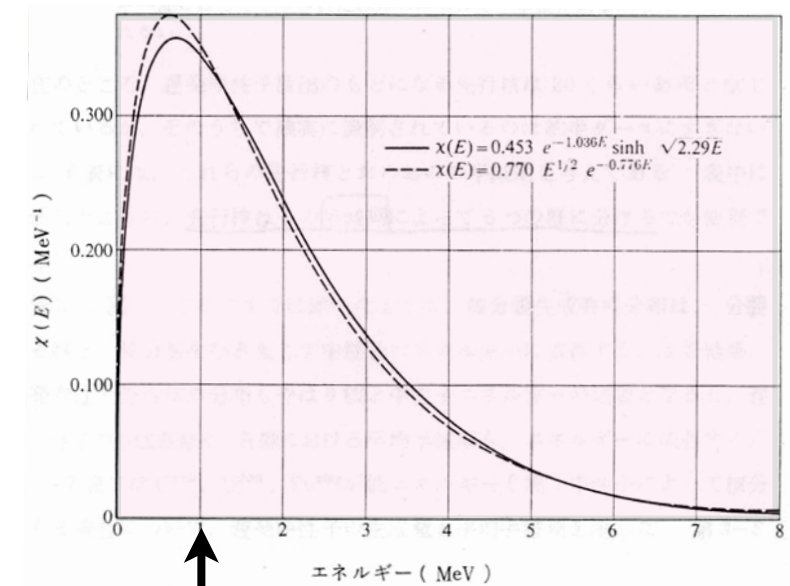
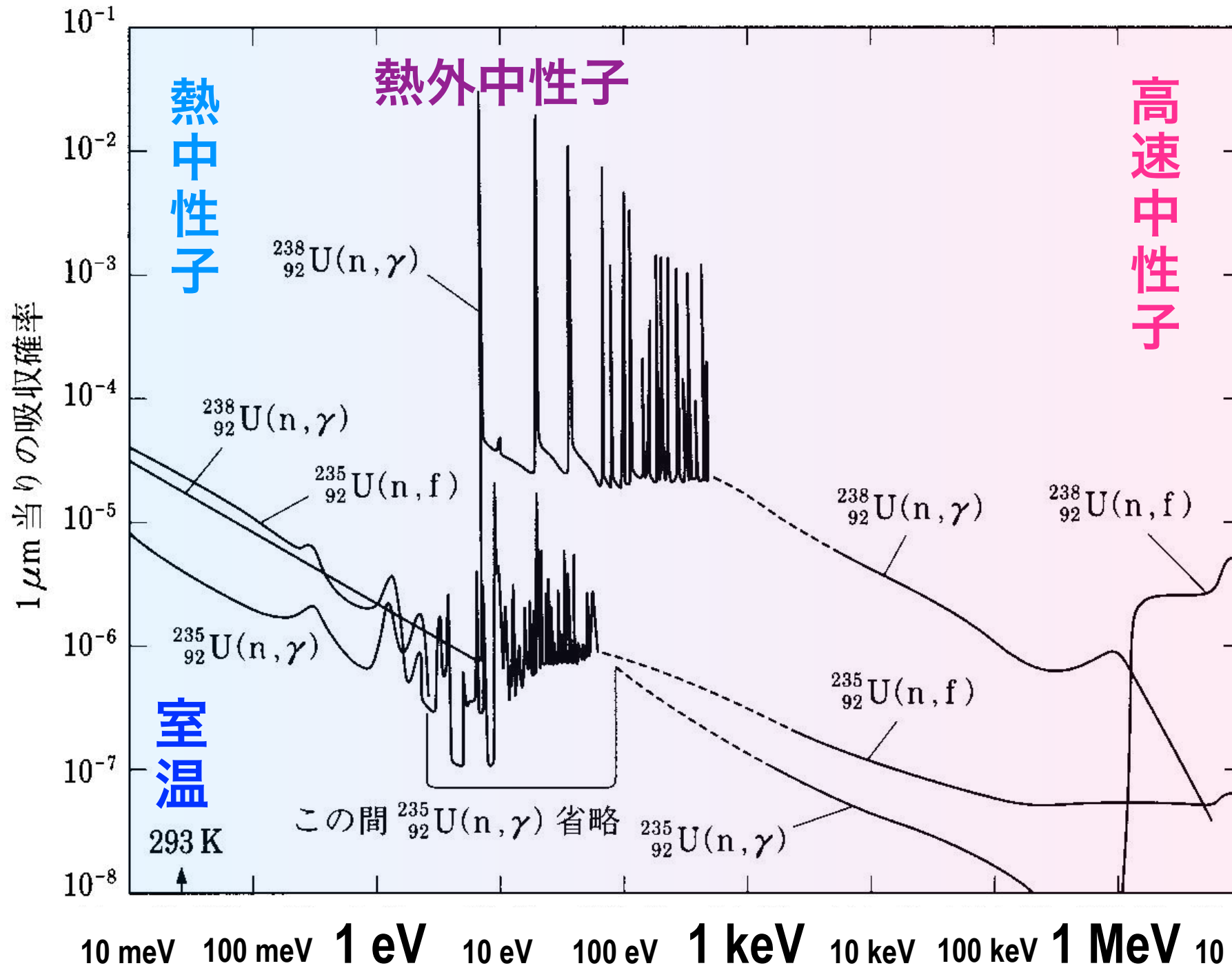
高速中性子



中性子 + ウラン **235** / **238**

中性子の吸収断面積 (吸収確率)

即発中性子のエネルギースペクトル



1 MeV

$E_n < 1 \text{ eV}$ では

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

... 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



粒子の運動エネルギーとして放出

熱中性子

減速

高速中性子

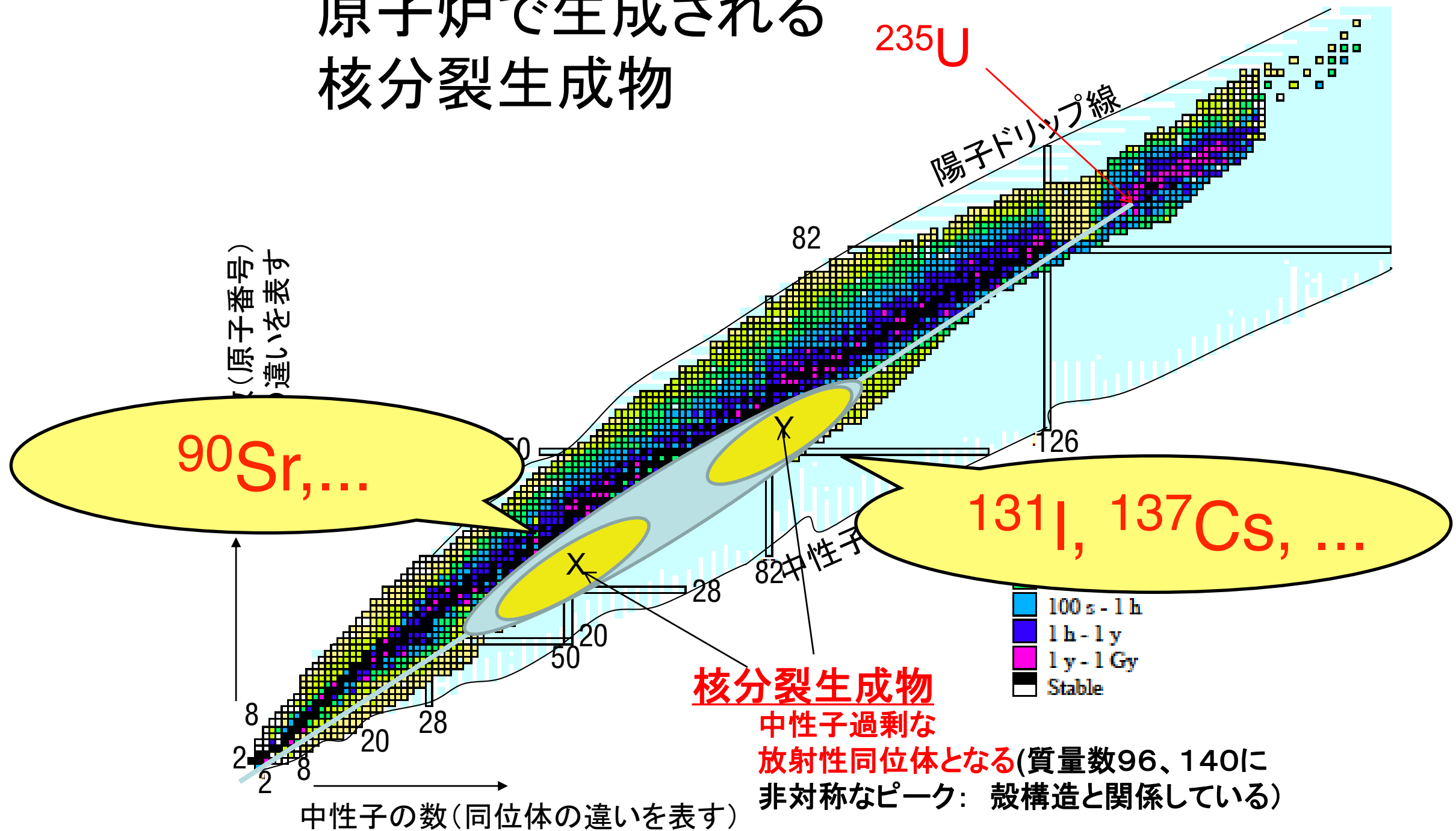
核分裂

Nuclear fission

原子核物理学

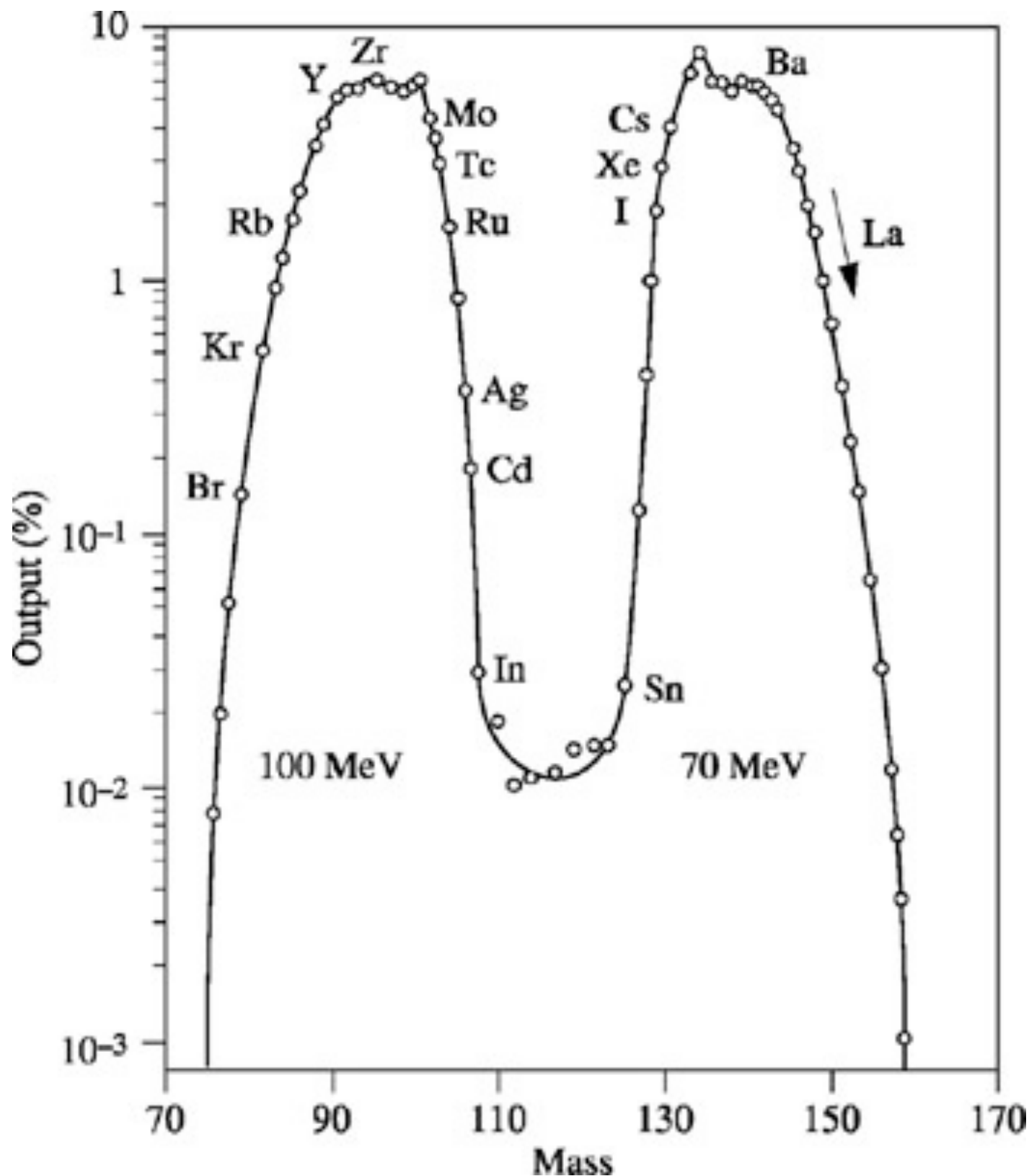
Nuclear Physics

原子炉で生成される
核分裂生成物



Nuclear Chart 核図表

生成率 [%] (対数目盛り)



核分裂生成物

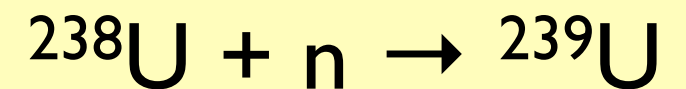
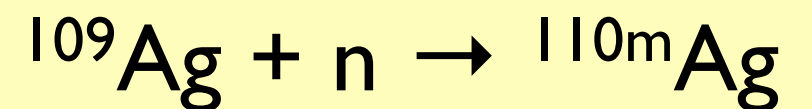
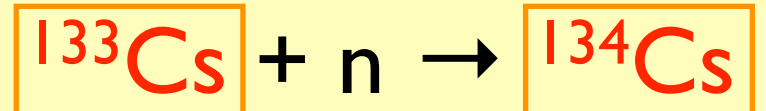
fission products

非対称分裂

放射化生成物

activation products

中性子捕獲反応



半減期が数日～数十年のものが特に問題。**揮発性・水溶性**のものほどより遠くまで運ばれる。稀ガスはあまり気にしないでいい(雲散霧消)。

核分裂生成物 **^{131}I , ^{137}Cs , ^{90}Sr** , ^{85}Kr , ^{135}Xe , ^{140}Ba , ^{95}Zr , ^{106}Ru , ^{99}Mo

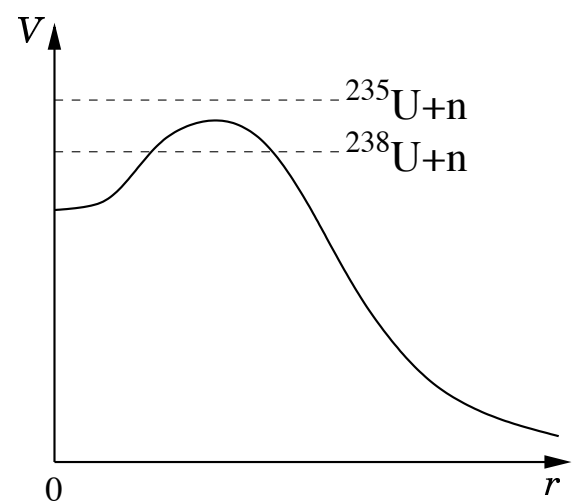
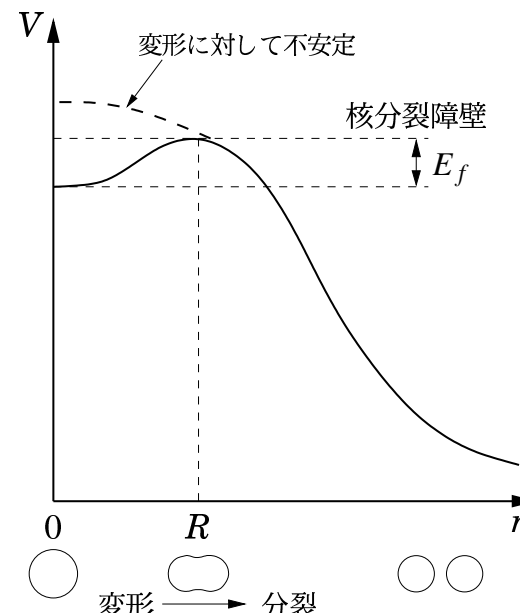
ウランの核分裂

(中性子による) 誘起分裂

核分裂障壁 E_f を越えるエネルギーを ^{neutron capture} 中性子捕獲 によって供給。

例: $Q_n = (m[{}^{238}\text{U}] + m[n] - m[{}^{239}\text{U}])c^2 = 4.8 \text{ [MeV]} > 0 \dots$ 発熱反応

高次項まで含めて E_f を計算 ... Bohr & Wheeler

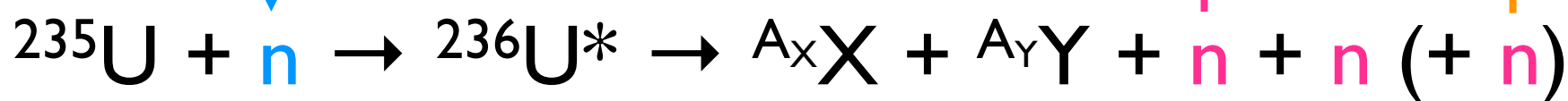


	E_f [MeV]	Q_n [MeV]	
${}^{238}_{92}\text{U}_{146}$ (99.275%)	6.3	> 4.8	... 1.5 MeV 以上の中性子が必要
${}^{235}_{92}\text{U}_{143}$ (0.72%)	5.8	< 6.5	... 0 エネルギー中性子でも分裂
${}^{239}_{94}\text{Pu}_{145}$	4.8	< 6.5	

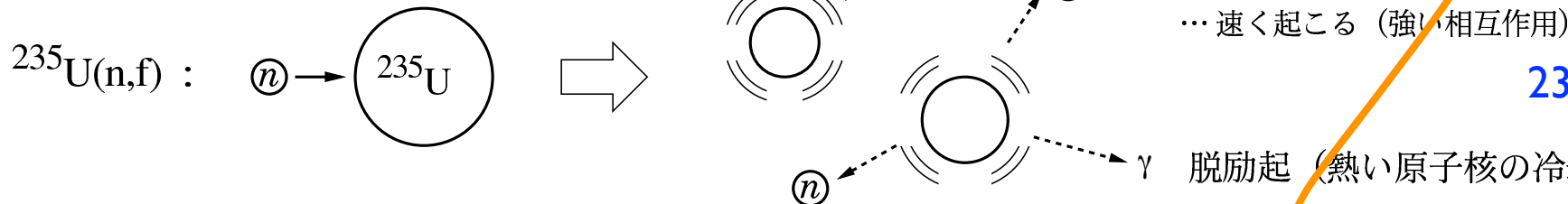
対エネルギーの違い

減速

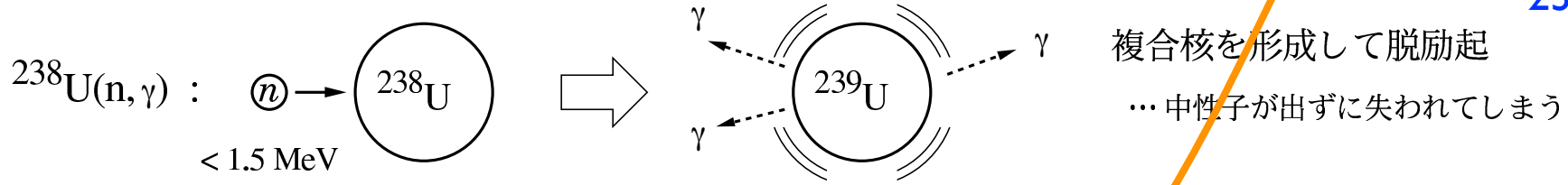
loss



熱中性子

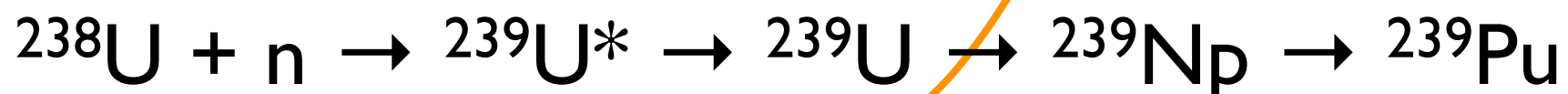


${}^{235}\text{U}$: 0.72%, 半減期 7.03億年



${}^{238}\text{U}$: 99.3%, 半減期 44.6億年

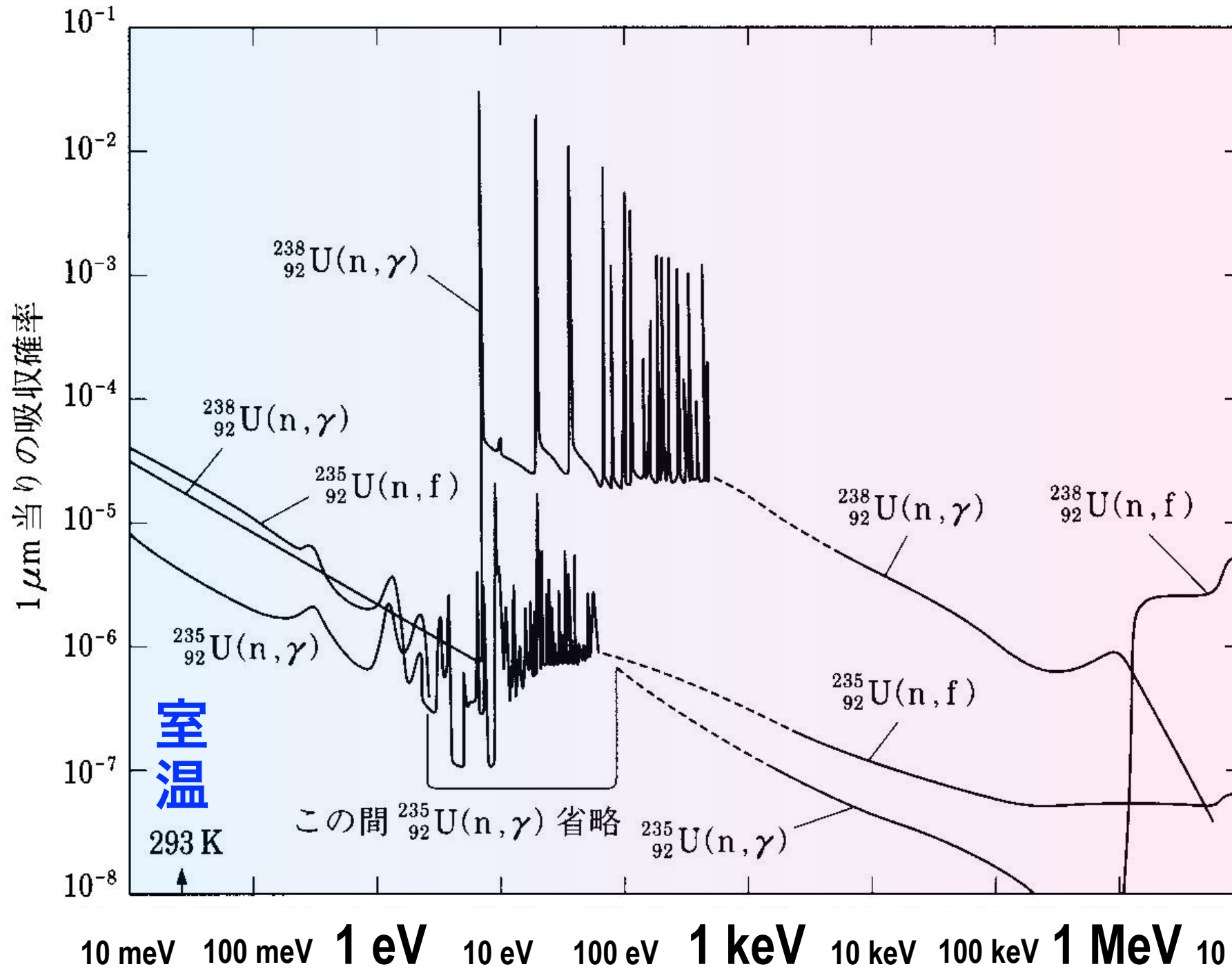
${}^{235}\text{U}$ 濃縮燃料を使う



(loss)

(大阪大学 故岡村弘之先生の講義資料より借用・改変)

中性子の吸収断面積 (吸収確率)



$E_n < 1 \text{ eV}$ では

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

... 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

1 eV ~ 1 keV での ²³⁸U による吸収ピークを避けるため、燃料棒は格子状に入れ、間の減速材で一気に熱中性子まで冷えるように設計されている。

^{235}U の核分裂によるエネルギーの内訳

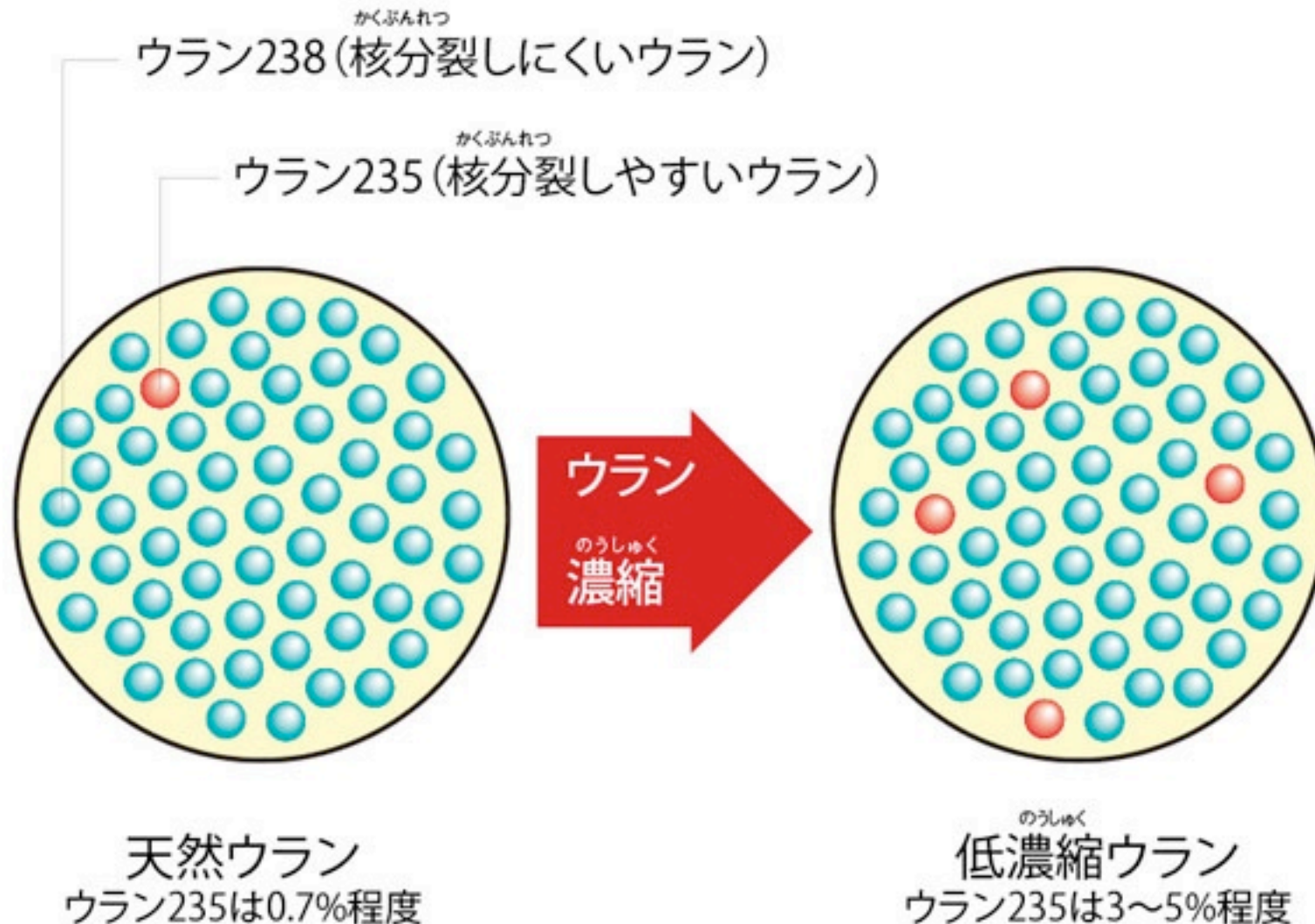
	放出 エネルギー	回収可能 エネルギー
核分裂片の運動エネルギー	168 MeV	168 MeV
核分裂中性子の運動エネルギー (2~3個)	5 MeV	5 MeV
即発 γ 線 (約5本)	7 MeV	7 MeV
核分裂生成物の崩壊		
β 線 (約7本) のエネルギー	8 MeV	8 MeV
γ 線 (約7本) のエネルギー	7 MeV	7 MeV
ニュートリノが持ち出すエネルギー	12 MeV	—
捕獲 γ 線 (^{235}U 以外の中性子吸収)	—	3~12 MeV
合計	207 MeV	198~207 MeV

原子力工学

《 ウランの濃縮 のうしゆく 》

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のうどを高めまのうしゆくす。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 のうしゆく



同位体分離技術

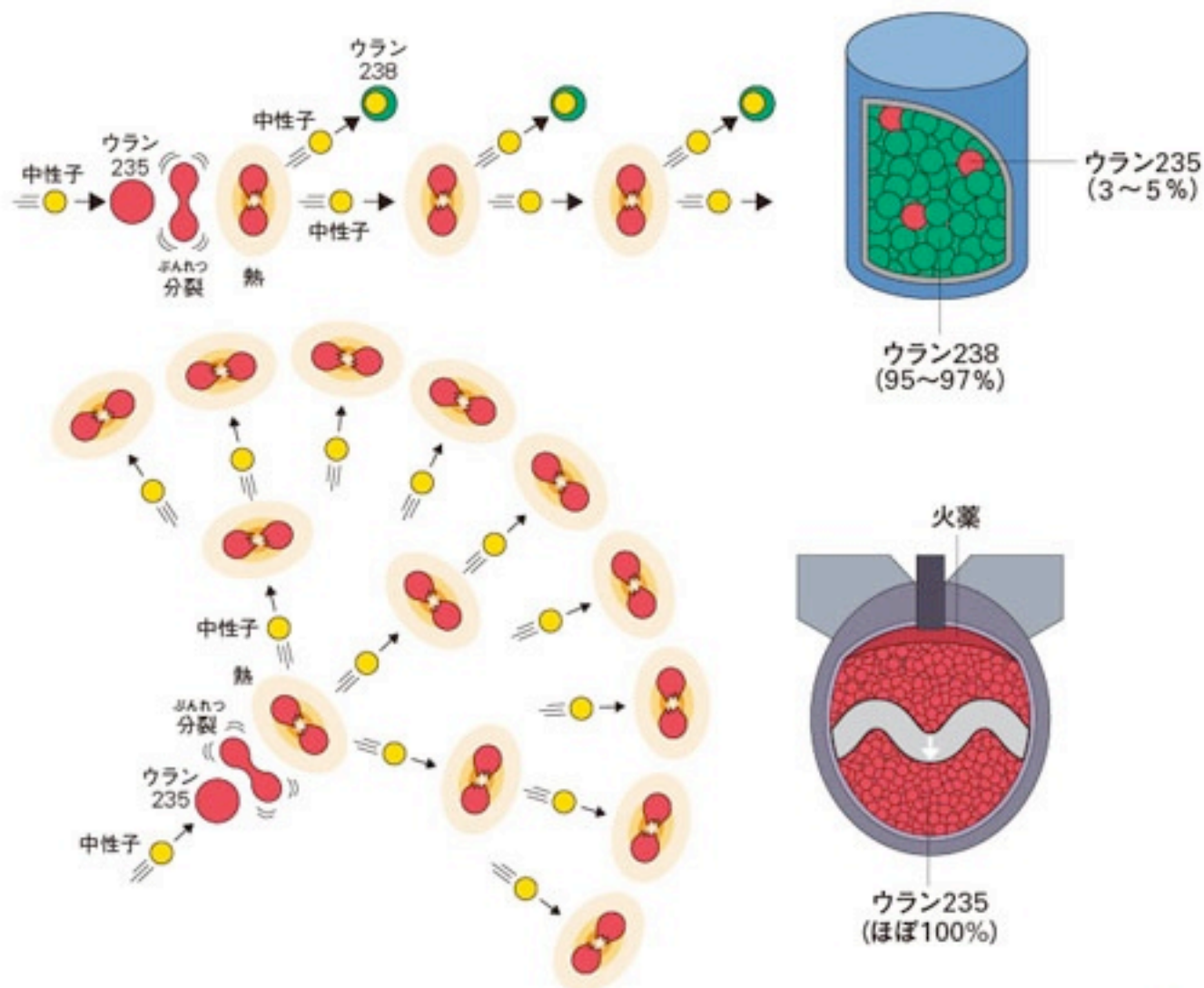
- ☀ ガス拡散法
 - ☀ 遠心分離
 - ☀ レーザー法
 - ☀ ノズル法、
 - ☀ 化学法 (イオン交換法)
- UF₆ (気体)

(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。)

《 原子力発電と原子爆弾の違い 》 ばくだん

原子力発電の場合

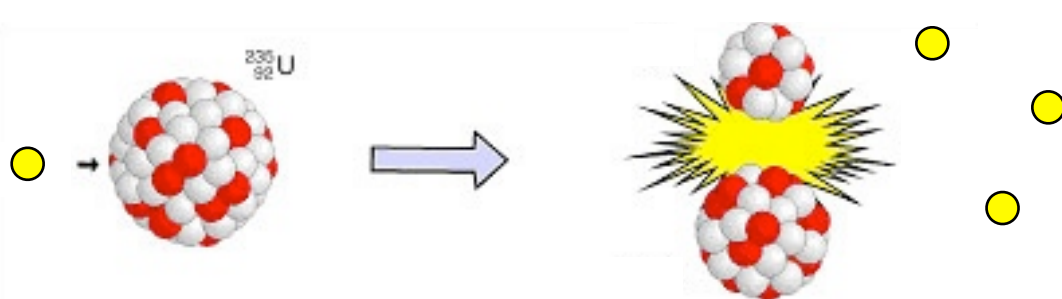


ばくだん
原子爆弾の場合

連鎖反応
臨界

ちがう点	原子力発電	原子爆弾
ウラン235の割合	3~5%	ほぼ100%
かくふんれつ核分裂のしかた	ウランを少しずつ核分裂させます。	いっしゆん 一瞬のうちにほとんどのウランを核分裂させます。
調節のしかた	せいぎよ 制御機能を持ち、安定した核分裂連鎖反応となるように調節します。	かくふんれつへいさ 核分裂連鎖反応を制御する装置がありません。

臨界の制御



粒子の運動エネルギーとして放出

熱中性子

減速

高速中性子

制御棒：熱中性子の吸収断面積が大きい元素 (B, Cd)

遅発中性子

1% 未満だが、遅れて出る中性子がある。原子炉の制御に重要な役割。

55秒の遅れ：制御に現実的な時間的余裕を与える。



反応度係数が負

(沸騰水型原子炉)

温度上昇 ⇒ 蒸気の泡 (ボイド) が増える ⇒ 中性子減速が弱まる ⇒ 核分裂が減る ⇒ 温度が下がる。

燃料集合体の温度上昇 ⇒ ドップラー効果によりウラン238の中性子吸収確率が増加 ⇒ 核分裂が減る。

中性子毒：原子炉内で ${}^{135}\text{Xe} + n \rightarrow {}^{136}\text{Xe}$ (中性子捕獲反応)



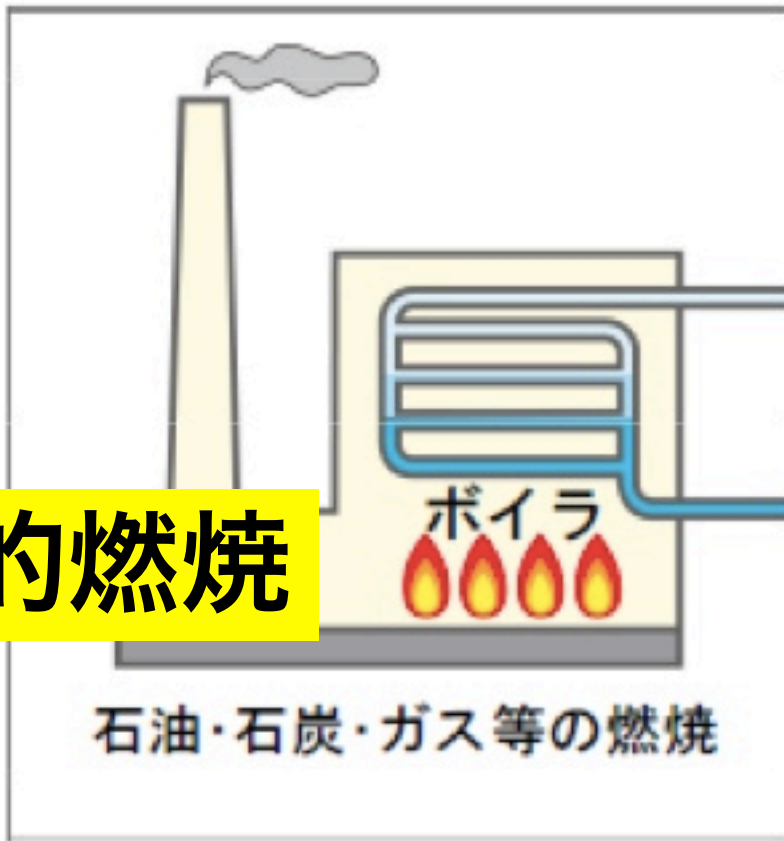
反応断面積 (反応確率) が桁違いに大きい

中性子過剰核は β^- 壊変 (崩壊) を繰り返しながら安定核までたどり着く。

火力発電と原子力発電の違い

火力

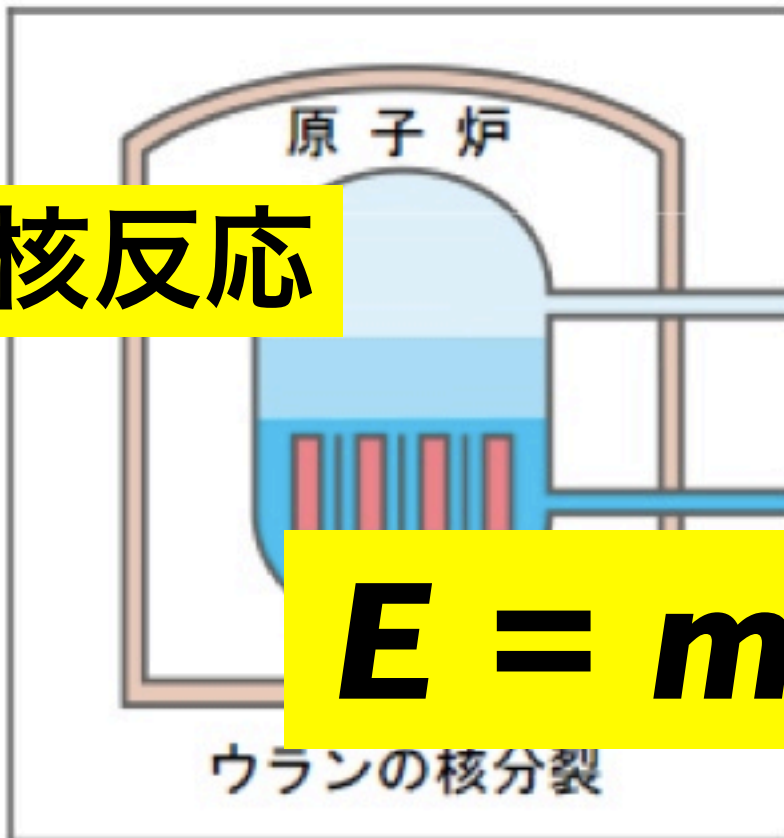
化学的燃焼



原子核反応

原子力

$$E = mc^2$$



蒸気

水

蒸気

給水ポンプ

タービン

復水器

循環水ポンプ

変圧器

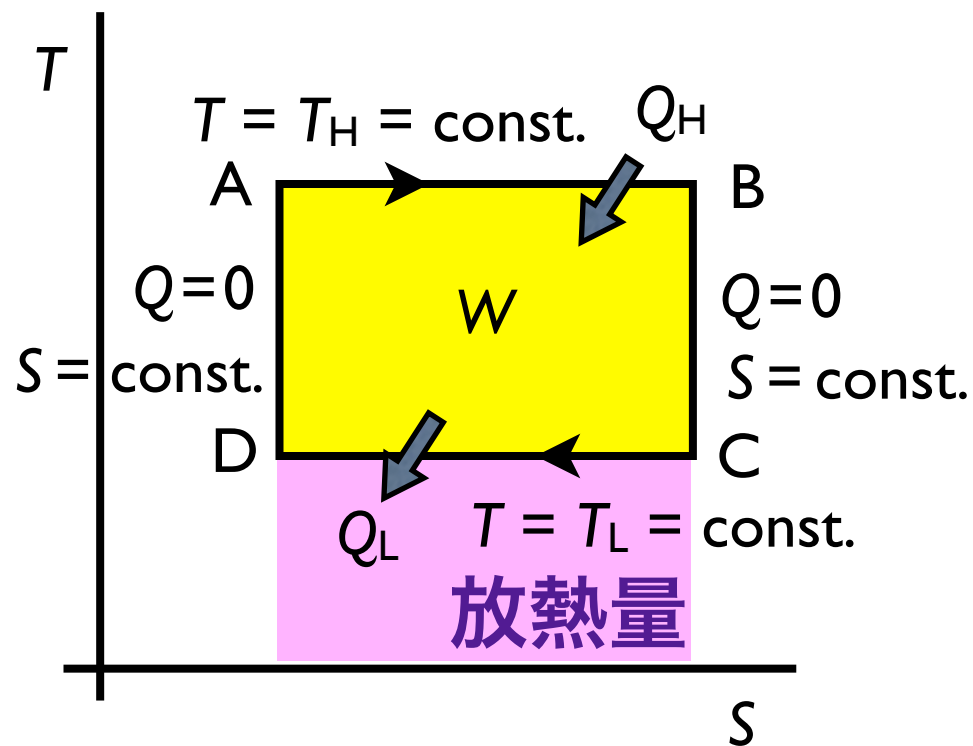
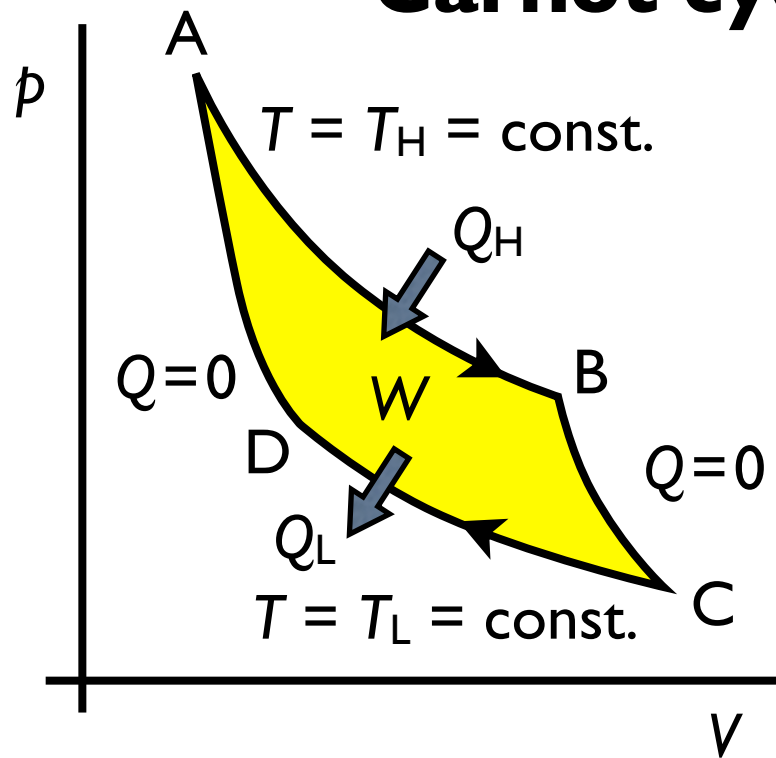
発電機

→ 放水路へ

← 冷却水(海水)



Carnot cycle



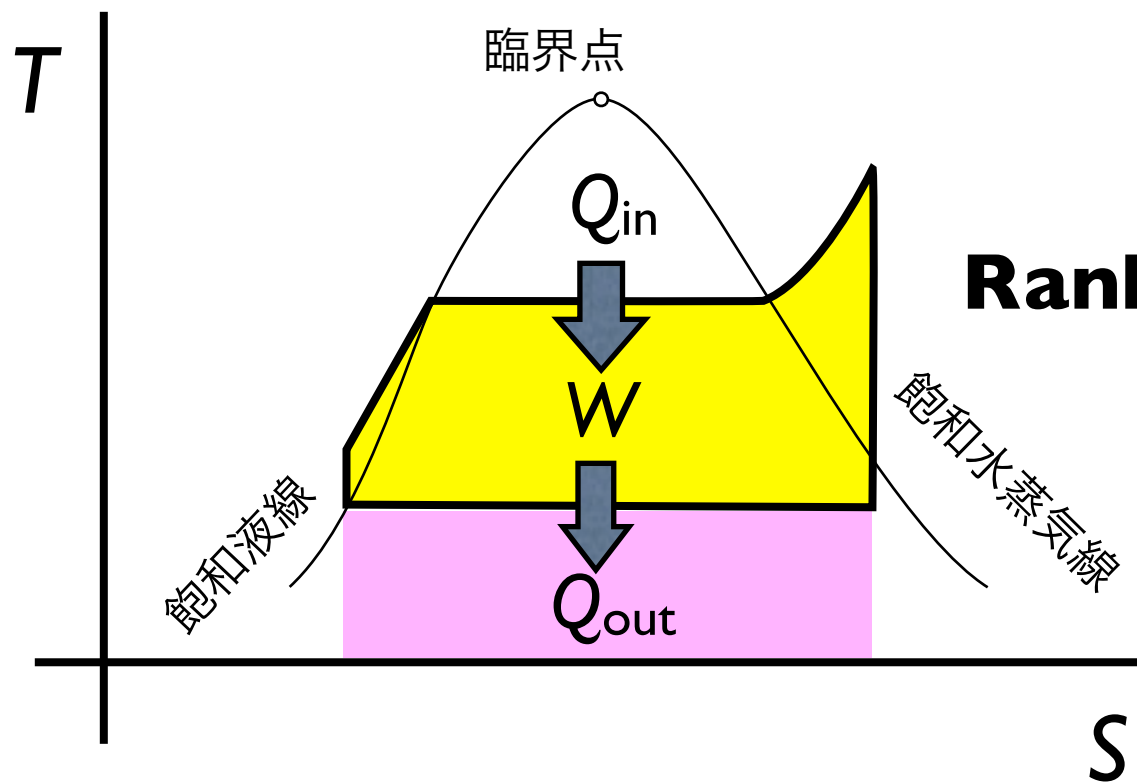
$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T}$$

Entropy
エントロピー

カルノーサイクル

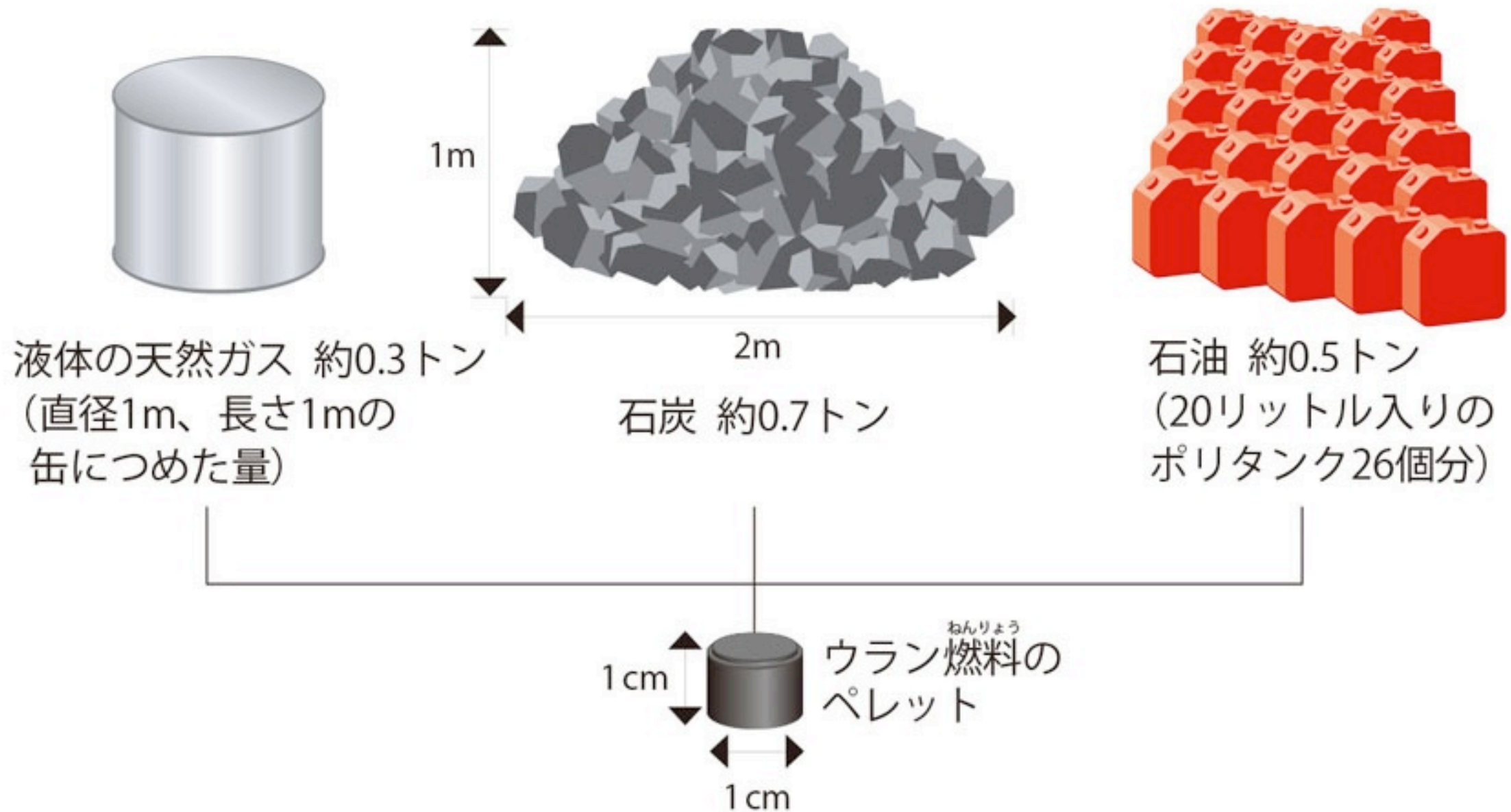
$$dQ = T dS$$

蒸気機関 ランキンサイクルの T-S 線図



Rankine cycle

《 エネルギー源の比較(原子力発電と火力発電) 》



液体の天然ガス 約0.3トン
(直径1m、長さ1mの
缶につめた量)

1m

2m

石炭 約0.7トン

石油 約0.5トン
(20リットル入りの
ポリタンク26個分)

1cm

ウラン^{ねんりょう}燃料の
ペレット

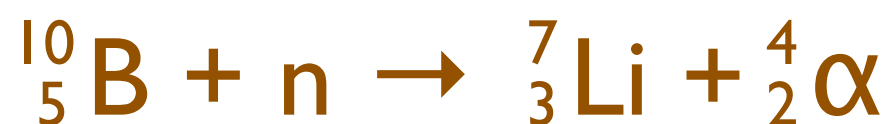
1cm

原子力発電のエネルギー源であるウラン燃料は、直径1cm、高さ1cmのペレットに焼き固めて使います。このペレット1個で一般の家庭で使う8~9か月分の電力(2,600kWh)を発電できます。これは天然ガスで約0.3トン、石炭で約0.7トン、石油で約0.5トン^{いっぽん}を燃やして発電できる電力量に相当します。

原子炉	燃料	減速材*	冷却材*
軽水炉	濃縮ウラン	軽水 (H ₂ O)	軽水 (H ₂ O)
重水炉	天然ウラン 微濃縮ウラン プルトニウム	重水 (D ₂ O)	軽水 (H ₂ O) 重水 (D ₂ O)
黒鉛炉	濃縮ウラン	黒鉛 (グラファイト)	軽水 (H ₂ O)
ガス炉	天然ウラン 濃縮ウラン トリウム	黒鉛 (グラファイト)	二酸化炭素 ヘリウム

運転の制御：熱中性子を吸収する元素

制御棒* (炭化ホウ素、カドミウム合金)、ホウ酸水

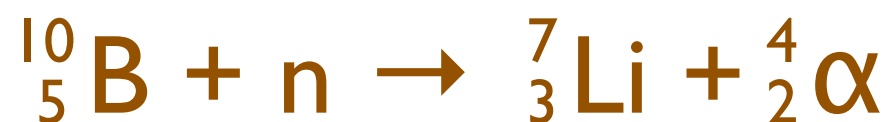


(*) 放射化しにくい物質

原子炉	原子炉施設
軽水炉	日本の原子力発電所（沸騰水型／加圧水型）
重水炉	新型転換炉の原型炉「ふげん」 カナダの原子力発電所 CANDU
黒鉛炉	チェルノブイリ原発（РБМК (RBMK) 型）
ガス炉	日本初の実用原子炉「東海発電所」 発電のほかにも化学工業など

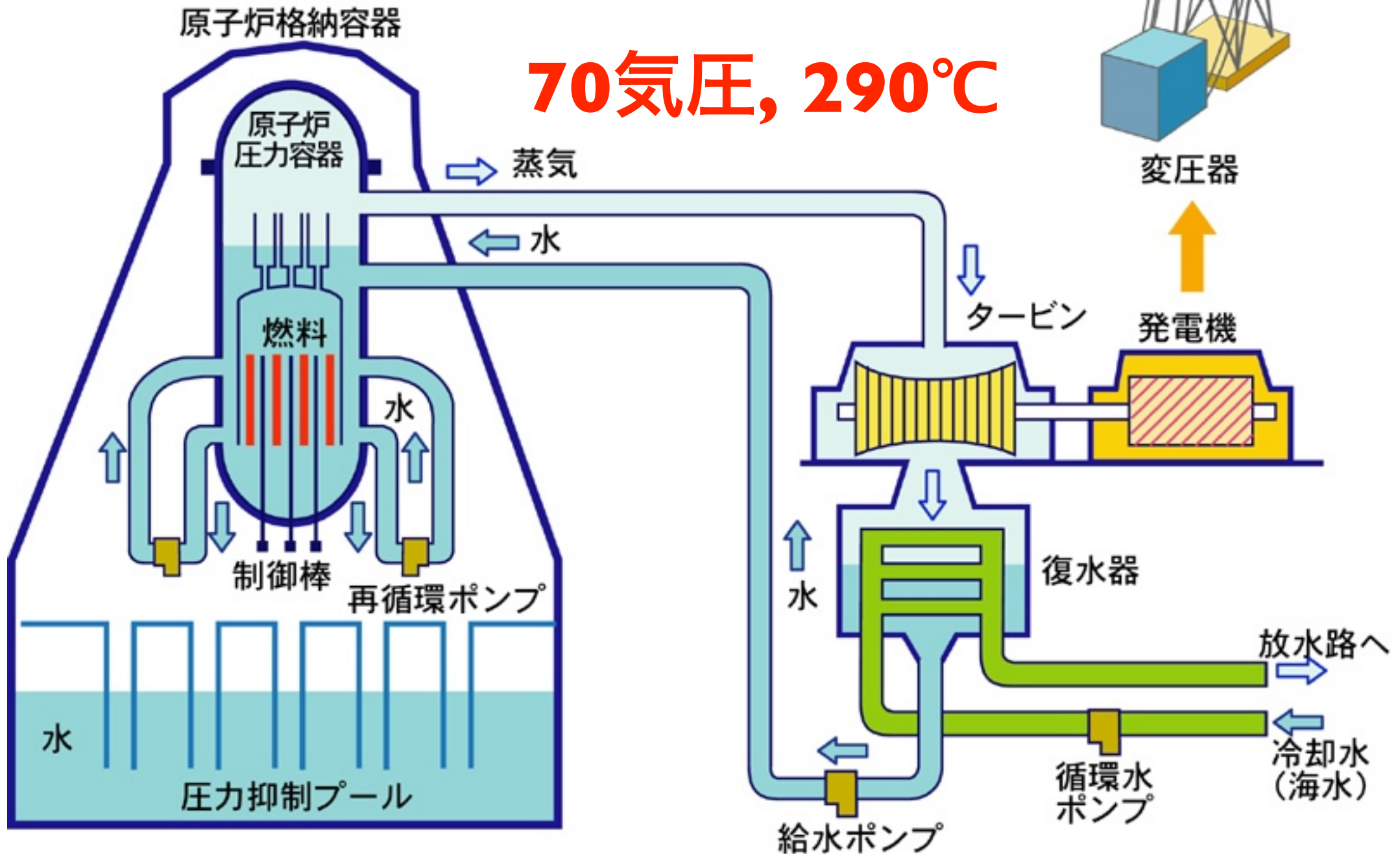
運転の制御：熱中性子を吸収する元素

制御棒（炭化ホウ素、カドミウム合金）、ホウ酸水



沸騰水型原子炉

BWR (Boiling Water Reactor)

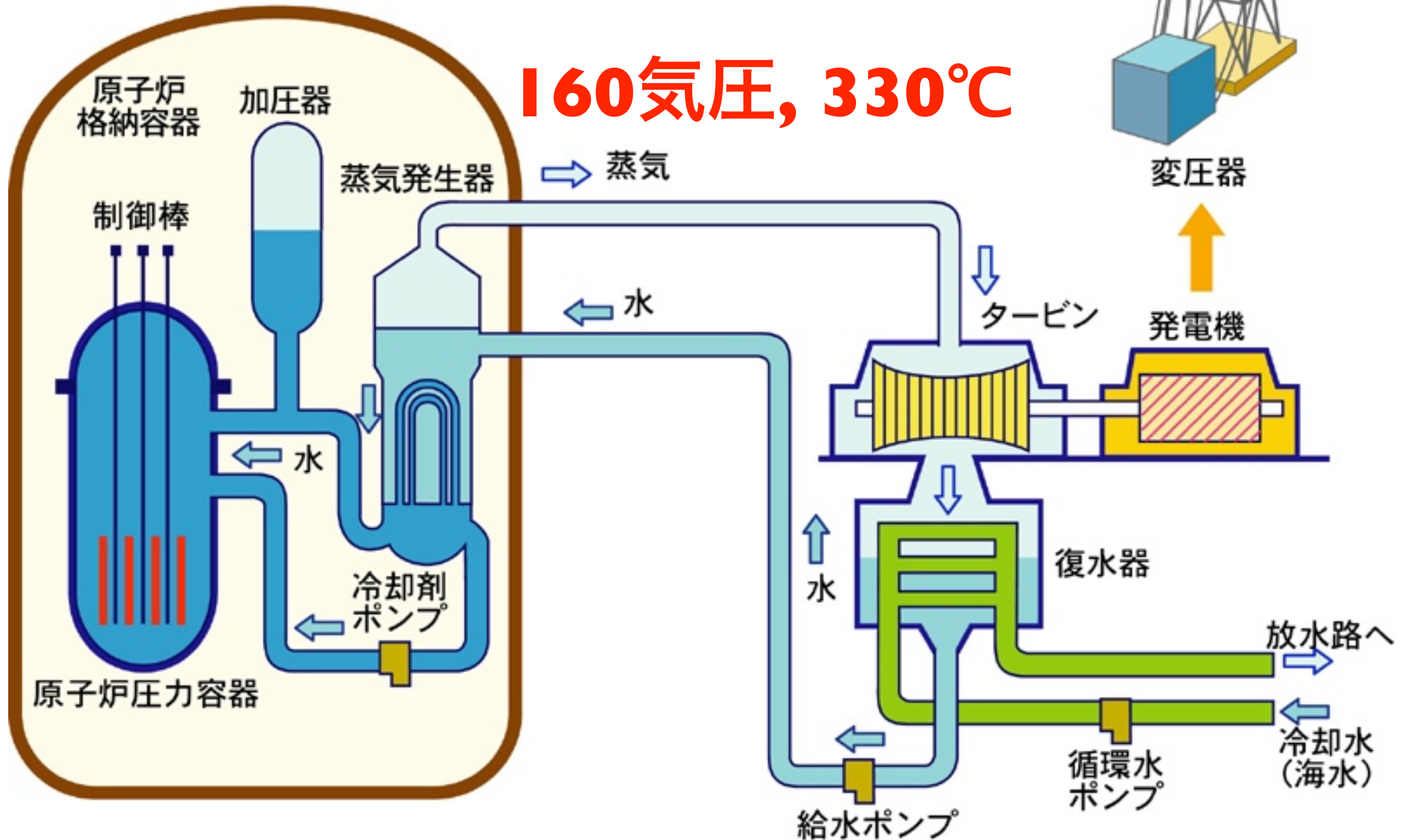


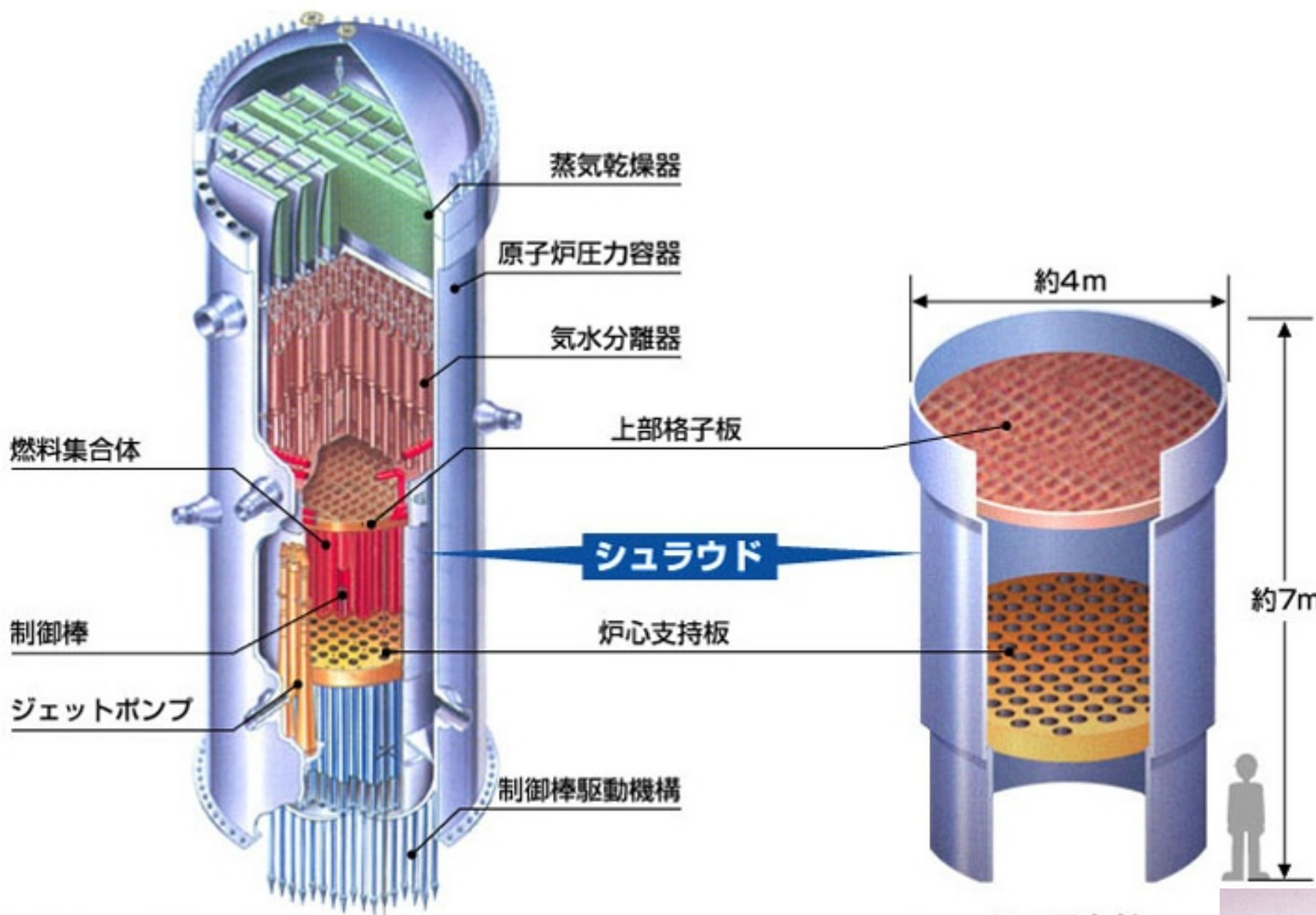
加圧水型原子炉

PWR (Pressurized Water Reactor)



160気圧, 330°C



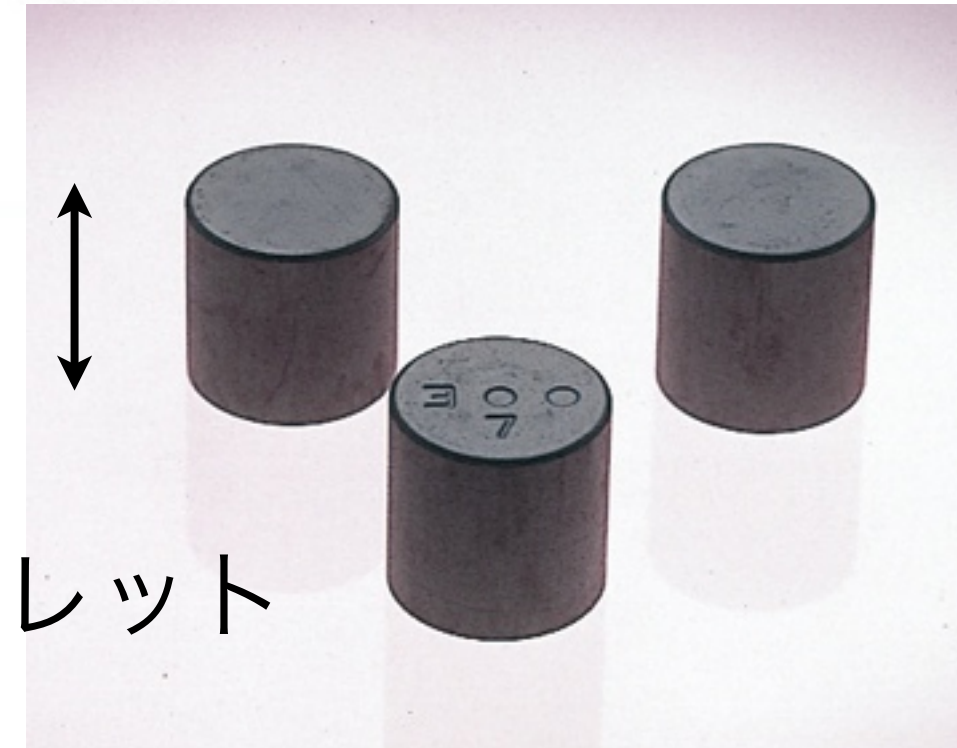


写真提供：東京電力株

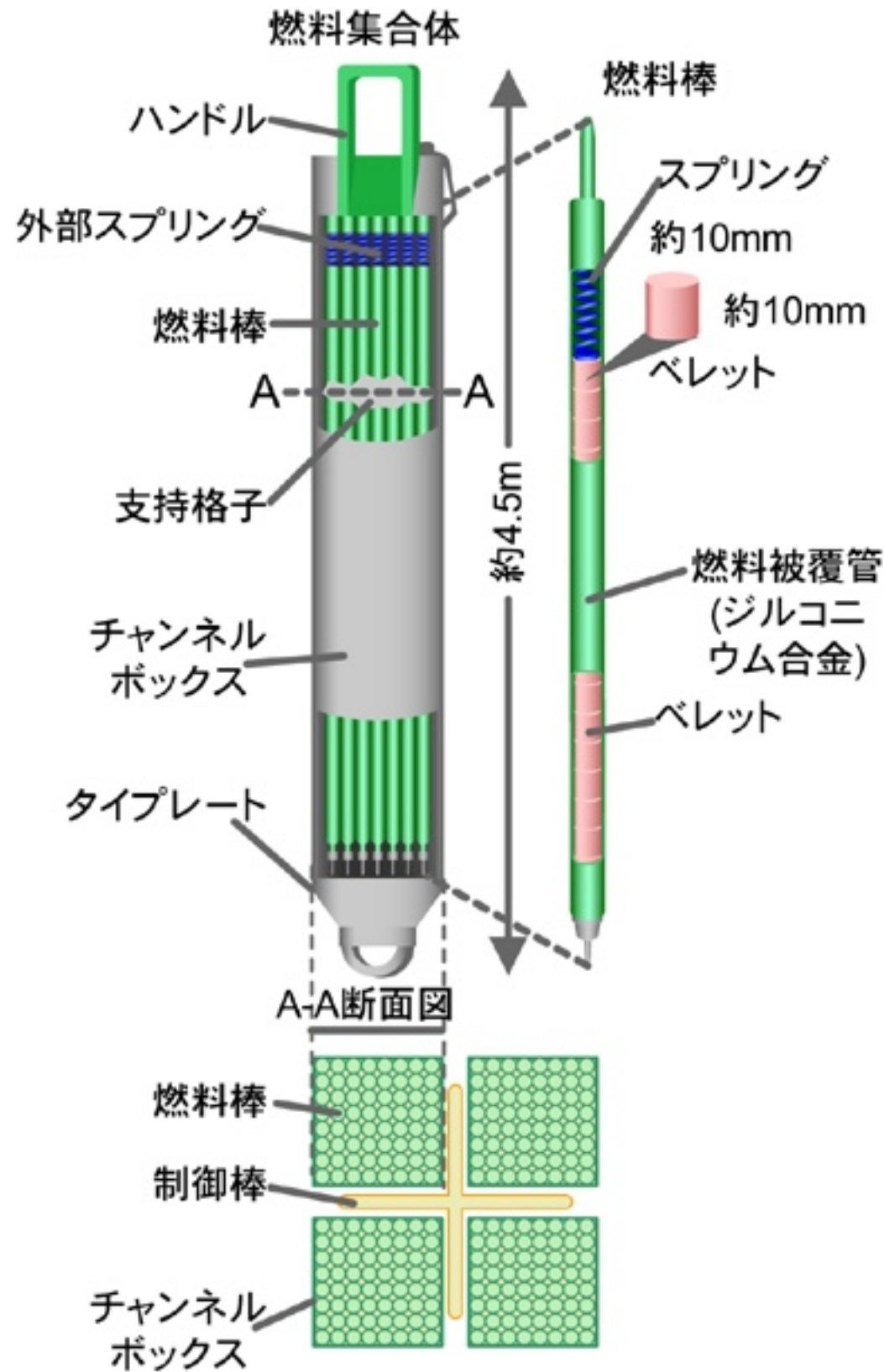
シュラウド

1 cm

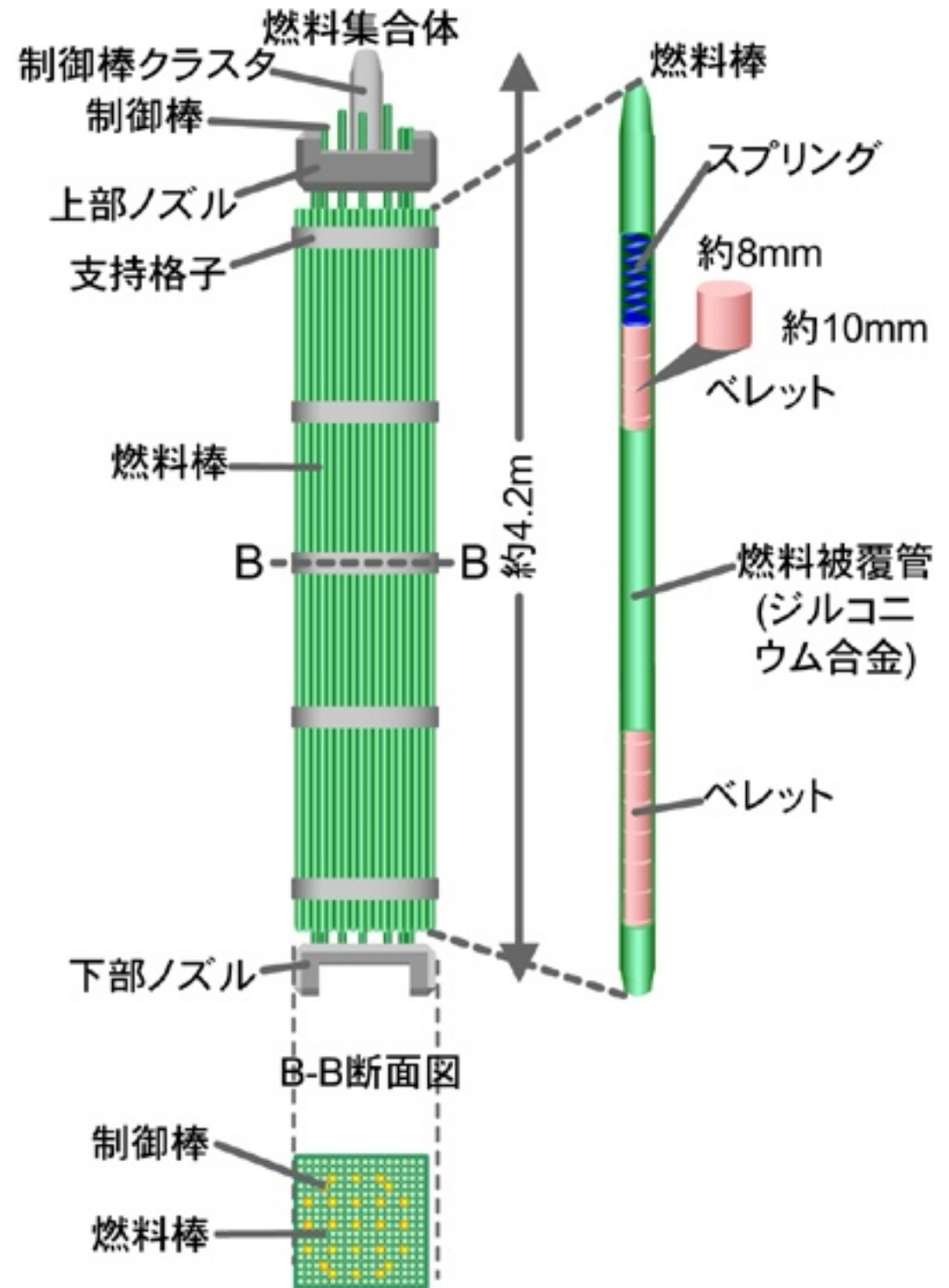
UO₂ ペレット



BWR



PWR



原子力事故

原子力事故

国際原子力事象評価尺度
(INES)

スリーマイル島原子力発電所事故 (1979)	レベル5
チェルノブイリ原発事故 (1986)	レベル7
東海村 JCO 臨界事故 (1999)	レベル4
福島第一原発事故 (2011)	レベル7

国際原子力事象評価尺度

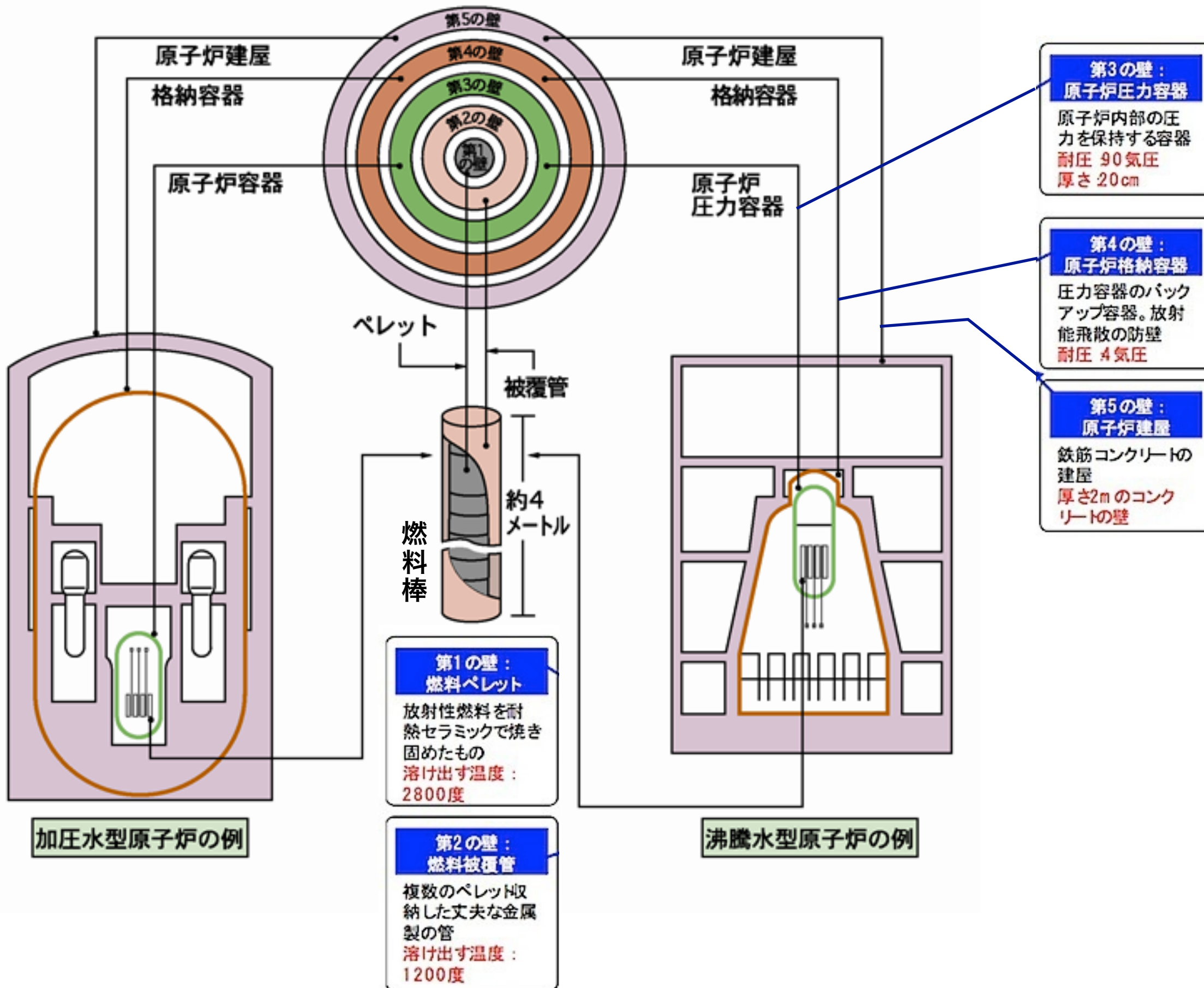
レベル7	深刻な事故	チェルノブイリ原発事故
6	大事故	
5	事業所外へリスクを伴う事故	スリーマイル島原発事故
4	事業所外への大きなリスクを伴わない事故	東海村臨界事故
3	重大な異常事象	
2	異常事象	
1	逸脱	

放射性物質の外部放出 (ヨウ素131等価)

- 7 : 数万テラベクレル相当以上
- 6 : 数千~数万テラベクレル相当
- 5 : 数百~数千テラベクレル相当

“五重の壁”

原子炉の放射性物質を閉じ込める多重防護



深層防護の考え方による安全確保

欧州の規制

日本の
規制

1. 異常の発生防止：異常を起こさない
2. 異常の拡大防止：異常が起きた場合でも、異常を拡大しない
3. 異常の影響緩和：異常が拡大した場合でも、影響を緩和する
4. 事故への対応：影響が緩和できなくても、事故に対応できるようにする
炉心損傷が起こっても放射性物質を環境へ放出しない
5. 人を守る：事故に対応できなくても、人を守る
放射性物質が放出したとしても、公衆被ばくを抑制するように備える

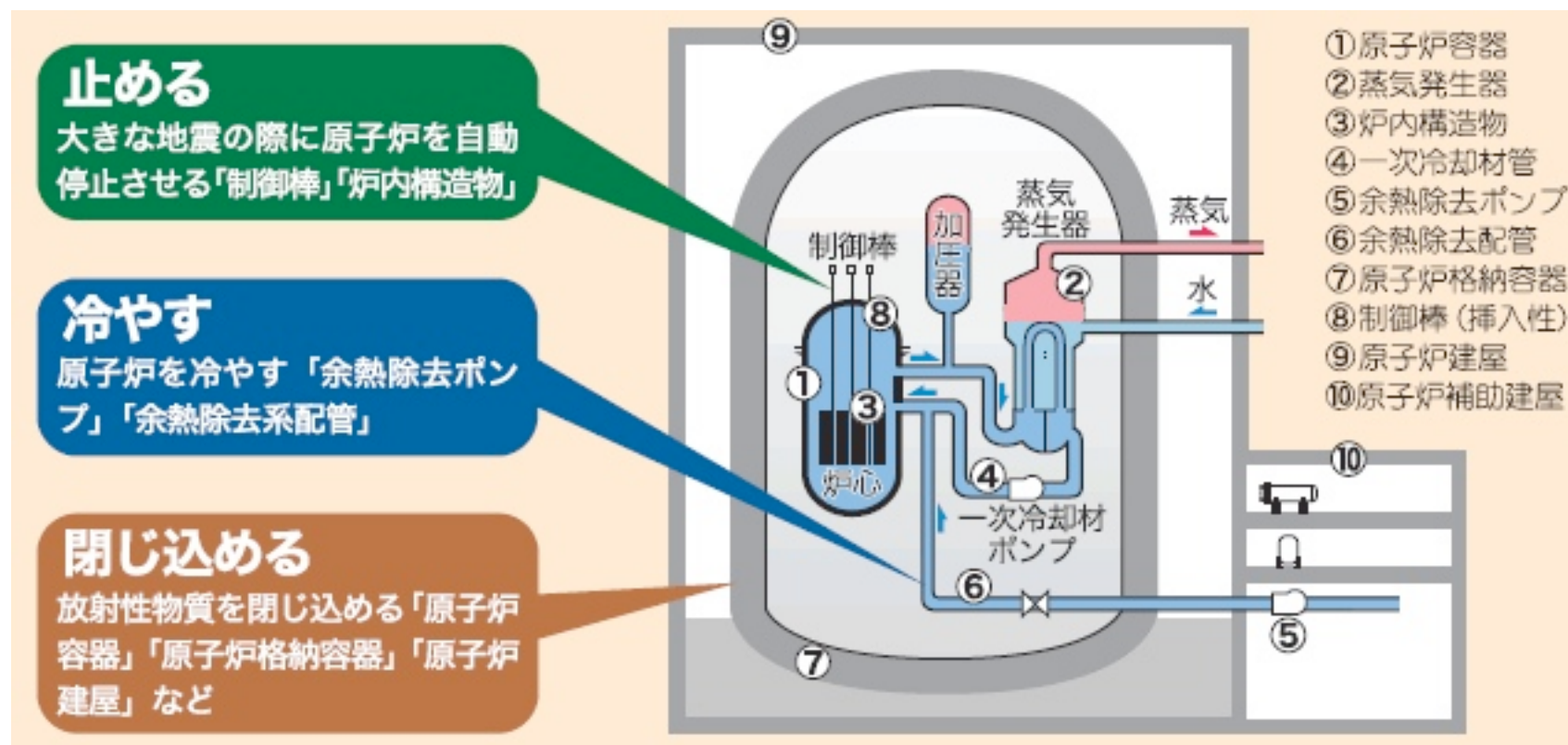
安全神話？

過酷事故 (severe accident) の発生防止を最終目標として、
「想定を超える事象」への対策が考えられていなかった。
過酷事故に対する Accident Management の不備。

100% の安全は存在しない

ゼロリスクを求めると安全神話に陥ることになる。
リスクコミュニケーション

止める、冷やす、閉じ込める



*ただし福島第一原発は古いので、1～4号機の発電出力は1 GWeより小さいが、ここでは典型的に1 GWeとして説明。

福島原発事故の場合

止める：制御棒により運転停止。成功。

冷やす：全交流電源喪失により炉心冷却できず失敗。

閉じ込める：水素爆発により放射性物質が広範囲に飛散。

なぜ冷やし続ける必要があるのか。

1 GWe \Leftarrow 3 GW

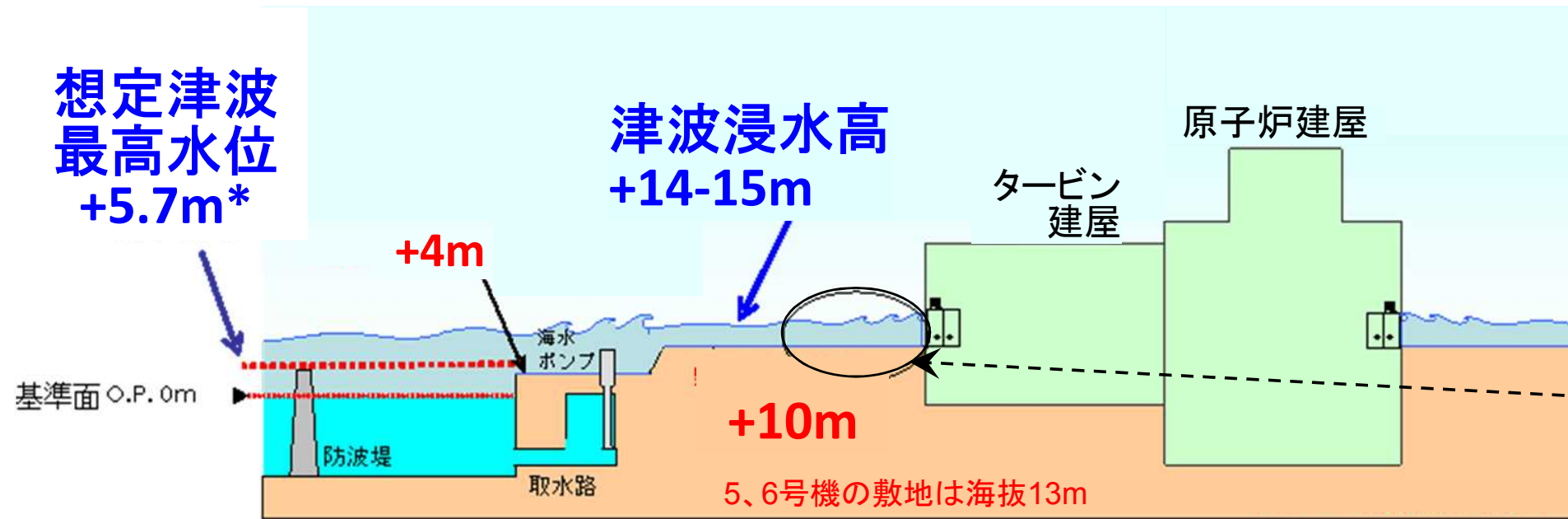
発電効率 30% 残りは熱

運転停止後も**崩壊熱**が7%ある！

放射性核種の崩壊に伴う熱

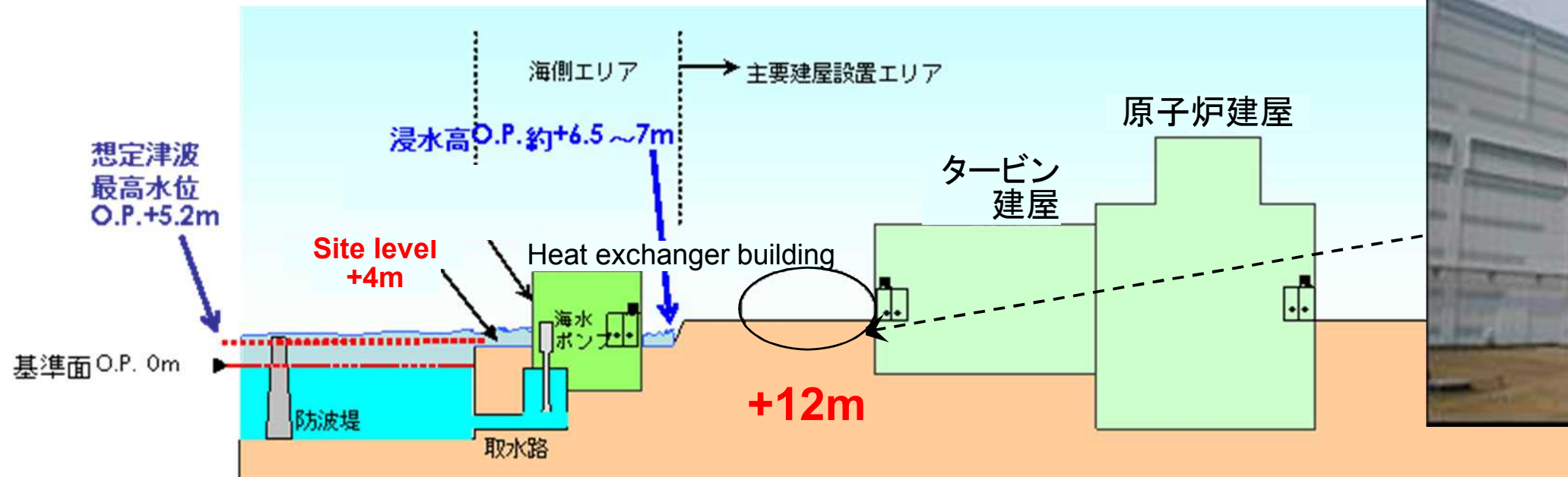
津波

福島第一原子力発電所

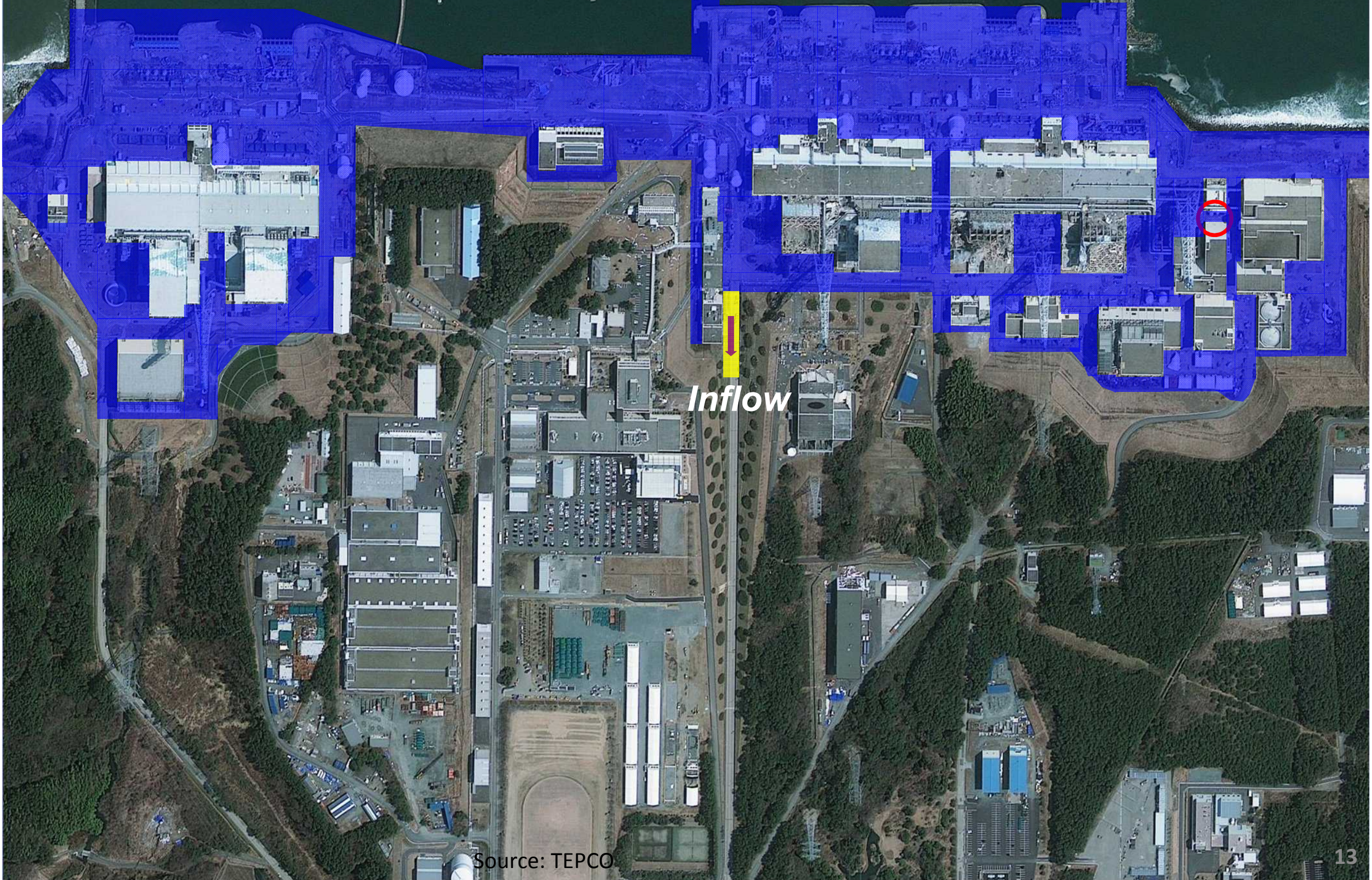


* 2002年日本土木学会原子力土木委員会発行ガイドラインに基づく

福島第二原子力発電所



福島第一原子力発電所の津波影響範囲





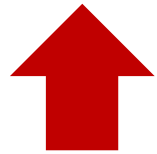
2013年10月21日（共同通信）



地震で倒壊した夜ノ森鉄塔

事故の原因: 1~4号機における全交流電源喪失

全交流電源喪失

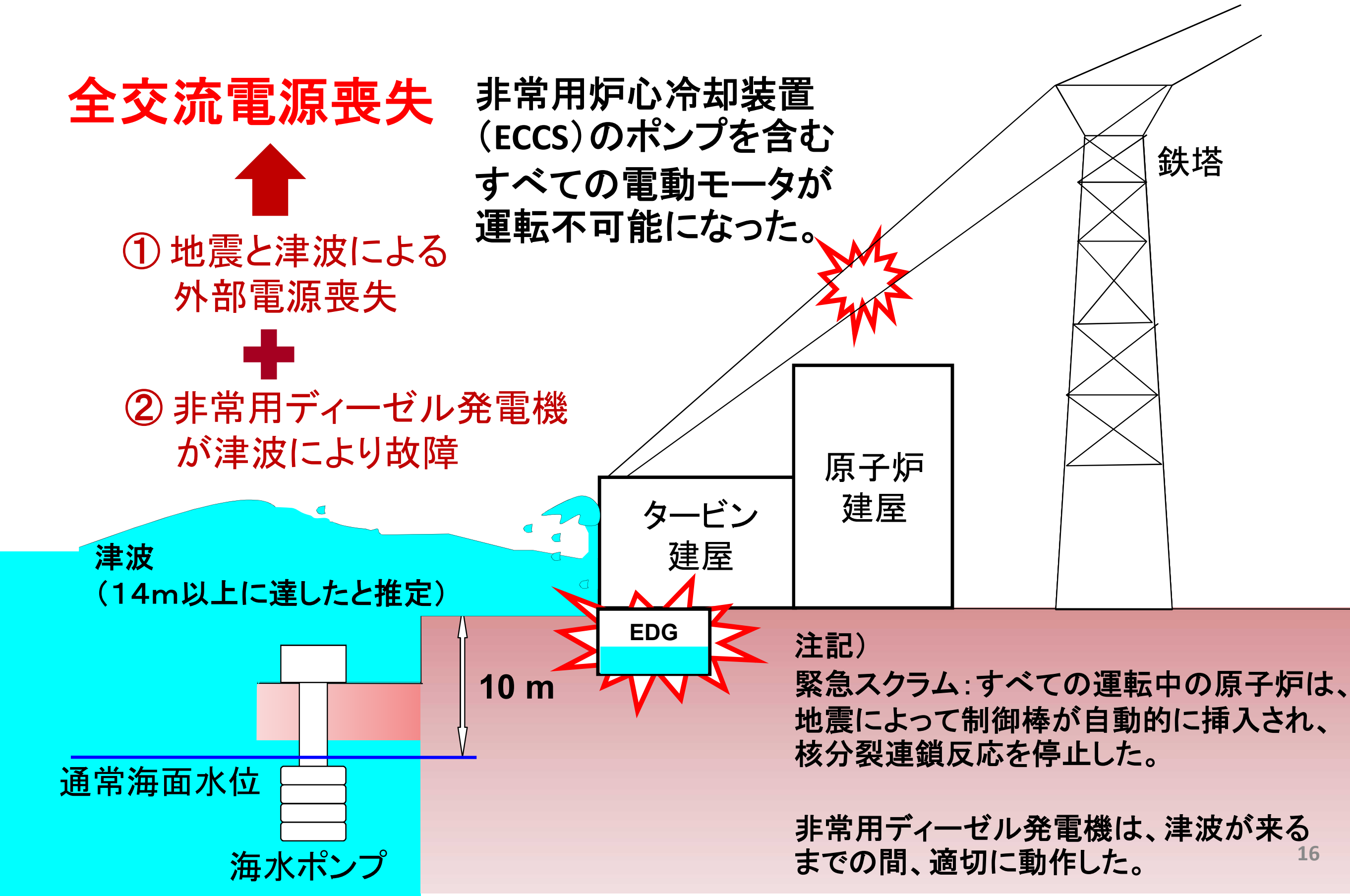


① 地震と津波による外部電源喪失



② 非常用ディーゼル発電機が津波により故障

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。



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。

福島第一原発事故の不幸中の幸い

環境中に漏洩した放射性物質は原子炉内の1割程度。

うち大半は海に流れた。

👉 **陸地に降ったのは全体の数%程度。**

免震重要棟が8ヶ月前に完成していた。本館は地震で損傷。

👉 対応の前線基地として使えた。でなければ撤退？

4号機の**使用済み燃料プール**に流れ込む水が存在した。

👉 4日前に抜かれるはずが作業の不手際で残っていた。

現場の必死の**努力**。

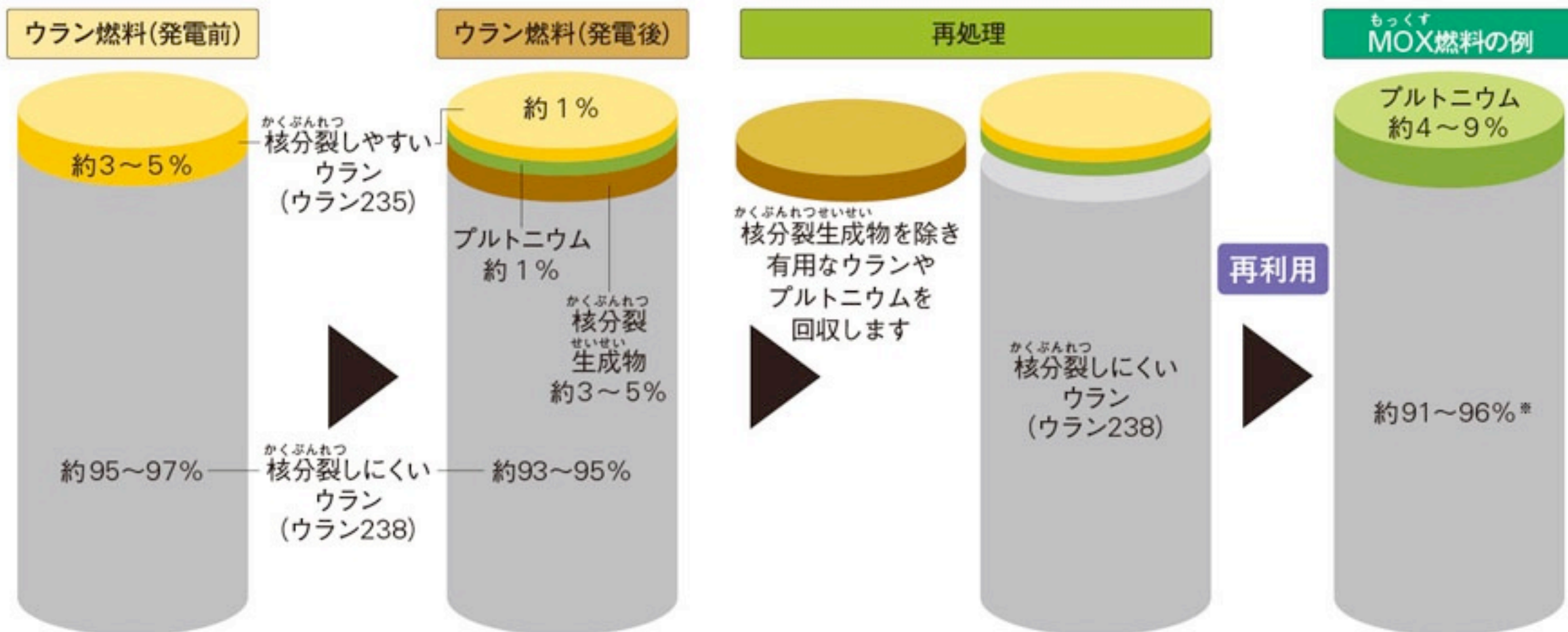
“次”が起きたら、30 km 圏の**避難**で済むのか？

原子力工学

核燃料サイクル

高レベル放射性廃棄物処理問題

《 ウラン燃料とMOX燃料 》

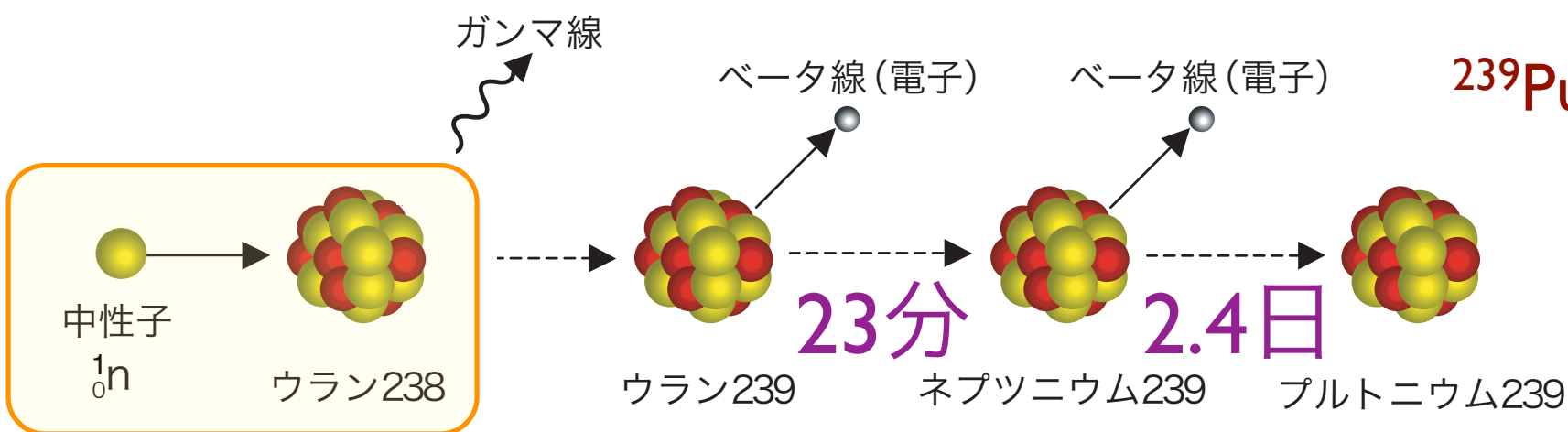


かくぶんれつ 核分裂生成物

非常に高いレベルの放射線を発生する元素がふくまれています。

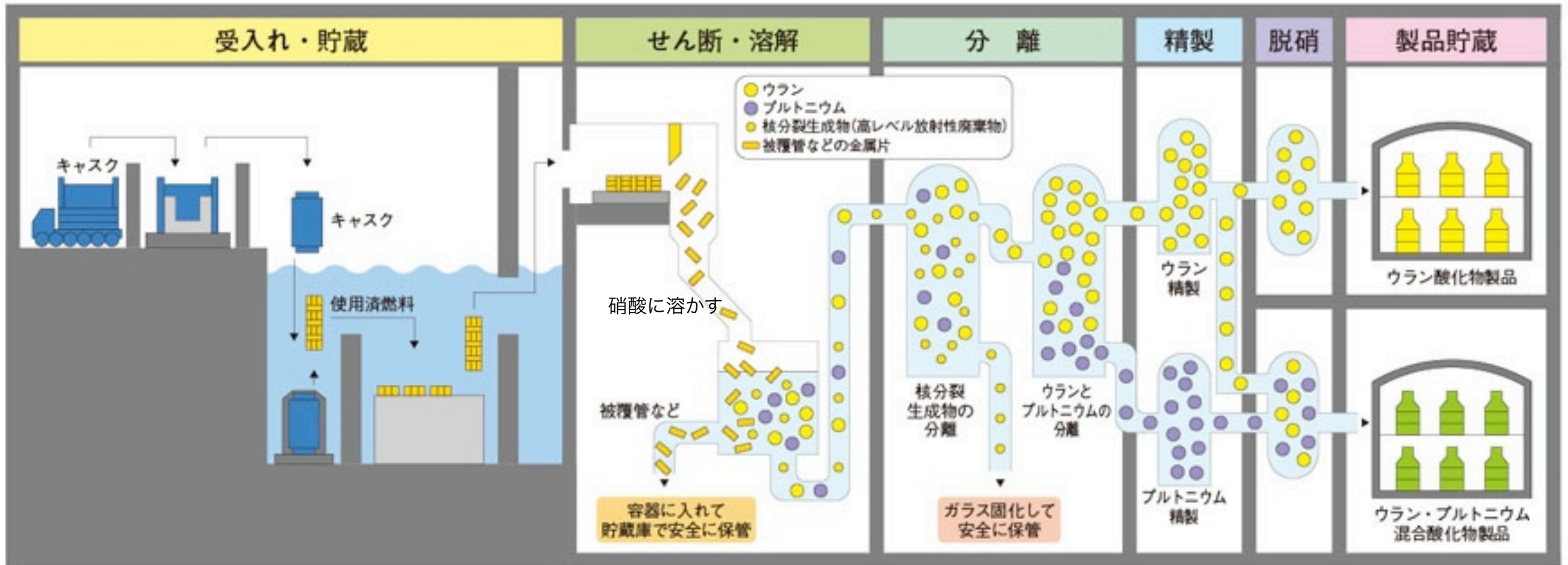
もっくす MOX燃料

プルトニウムとウランの酸化物を混ぜて作った混合酸化物燃料です(※わずかにウラン235をふくみます)。



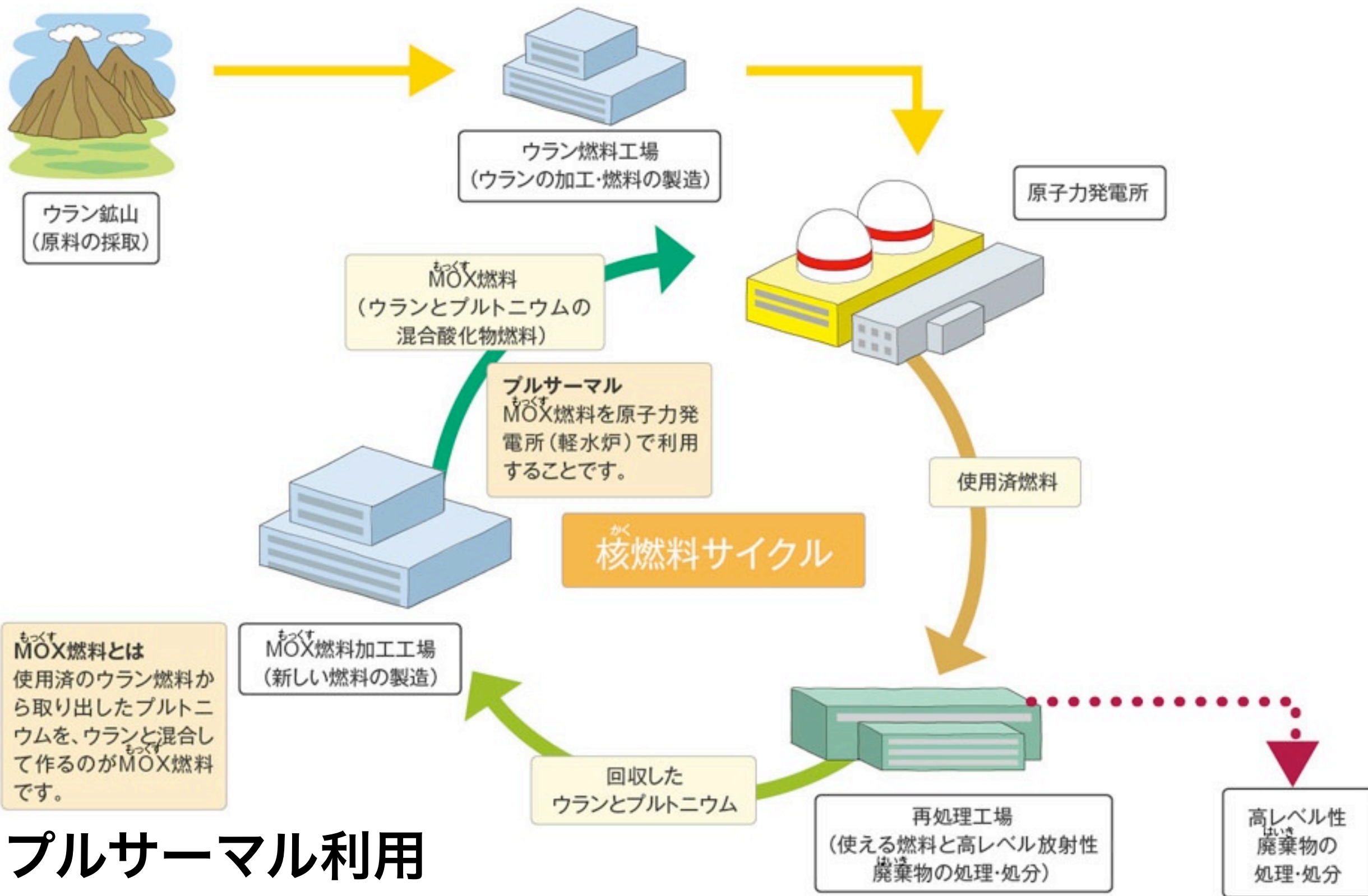
^{239}Pu , ^{241}Pu も n を吸収して核分裂する。

《 再処理の主な工程 》



原子炉の運転により燃料中に蓄積する核分裂生成物の中には、中性子の吸収断面積が莫大なものがあって (^{135}Xe など) 原子炉運転の妨害となる。その他の生成物もウラン燃料の性質を悪化させることになる。このため原子炉の燃料体は適当な時期に一部ずつ交換し、取り出した燃料棒に化学的処理を行って、核分裂生成物を分離するとともに、残っているウラン燃料および燃料内で生成したプルトニウムを回収する。これを核燃料再処理という。

《 核燃料サイクルの流れ 》



プルサーマル利用
MOX 燃料 ($UO_2 + PuO_2$)

軽水炉によるプルサーマル利用

長期運転すると ^{239}Pu 以外に Am など放射性の超ウラン元素が多種できてしまう。

高速増殖炉

高速中性子により ^{238}U から ^{239}Pu を多数生成する計画。

放射性核種の**増殖**（使った以上の燃料の生成）。

^{239}Pu も中性子を吸収して核分裂を起こすので、大量の燃料を生み出せることを意味する。

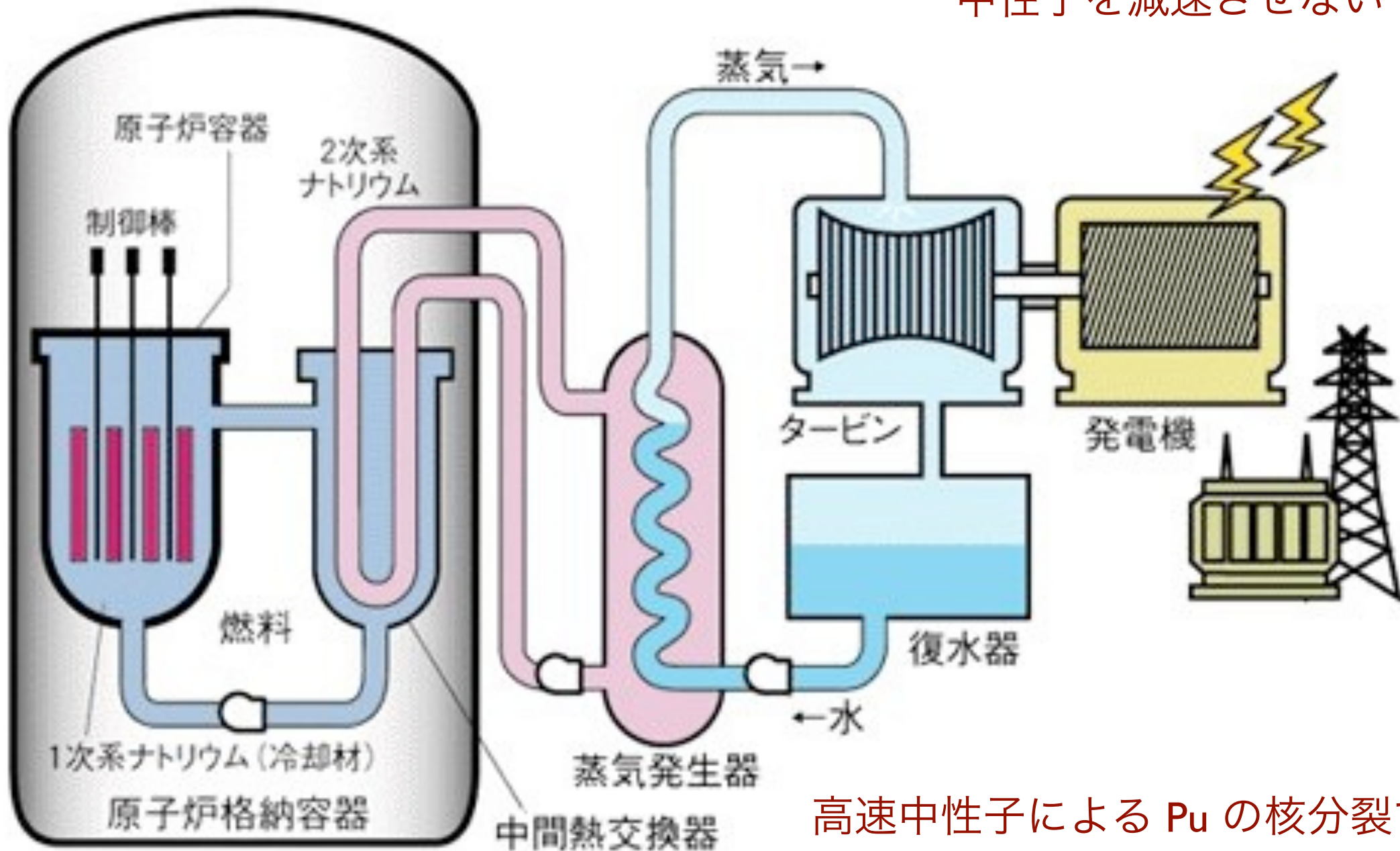
「もんじゅ」の二次冷却系**液体ナトリウム**漏れ事故

高速増殖炉

高速中性子：
中性子を減速させない

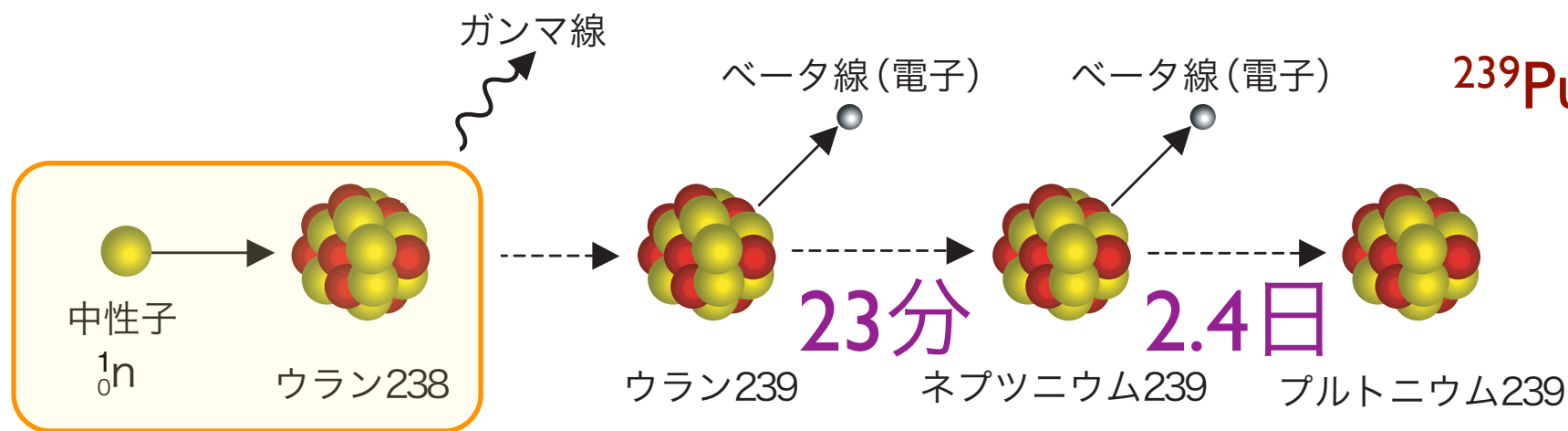
MOX 燃料
($UO_2 + PuO_2$)

冷却材：
液体金属
ナトリウム

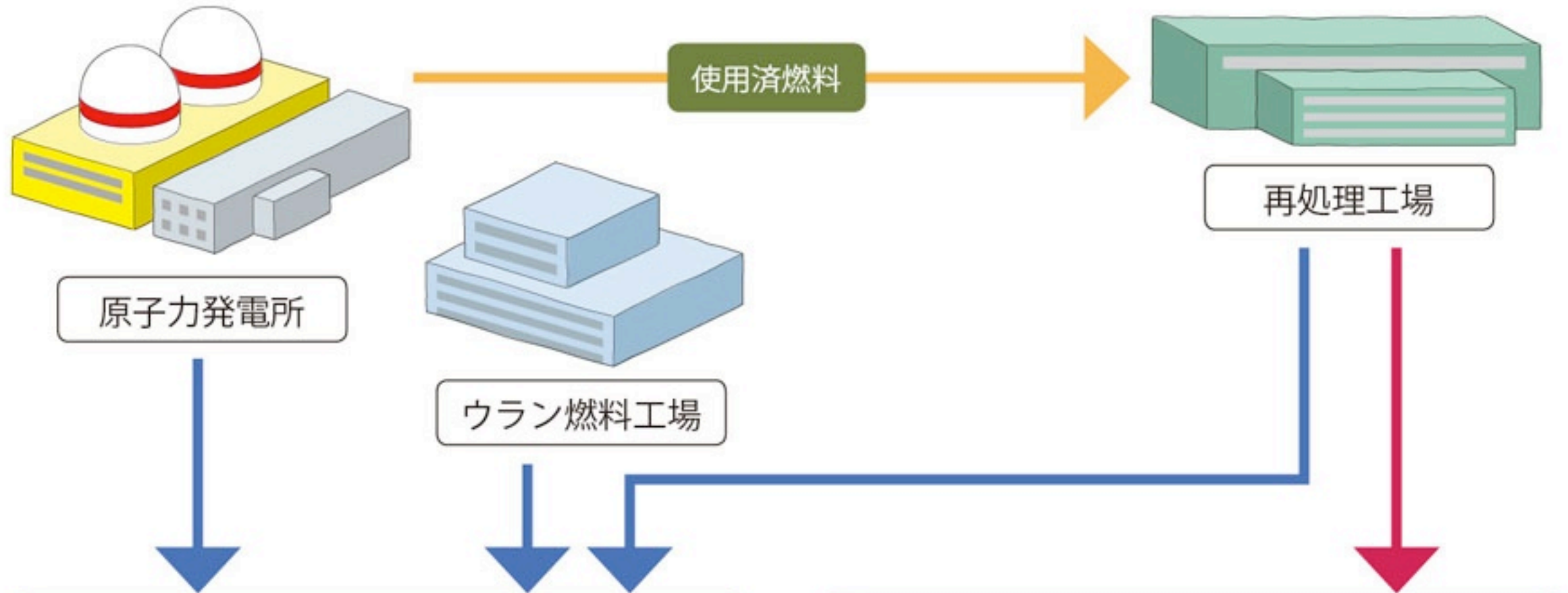


高速中性子による Pu の核分裂で
出てくる中性子の平均個数が多い。

^{239}Pu , ^{241}Pu も n を吸収して
核分裂する。



《 放射性廃棄物 ^{はいき} 》



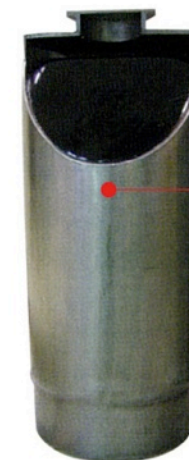
《 低レベル放射性廃棄物 ^{はいき} 》

低レベル放射性廃棄物^{はいき}は、原子力施設^{しせつ}の運転、点検、解体などにもなって発生するものです。コンクリート、金属、使用済みの消耗品^{しょうしょうひん}（ペーパータオル、作業用手袋、作業服）などです。これらは放射能レベルに応じて適切に処分されます。



《 高レベル放射性廃棄物 ^{はいき} 》

高レベル放射性廃棄物^{はいき}は、再処理工場^{さいしりこうじょう}で使用済燃料からまだ使えるウランやプルトニウムを回収した後に残る、放射能レベルの高い廃液^{はいえき}のことです。これをガラスと溶かし合わせて固化したものを「ガラス固化体」といい、30～50年間、地上で冷却した後、処分します。



ガラス固化体

高レベル放射性廃液をガラス原料とともに溶かし合わせて、ステンレス容器に入れて固めたもの。

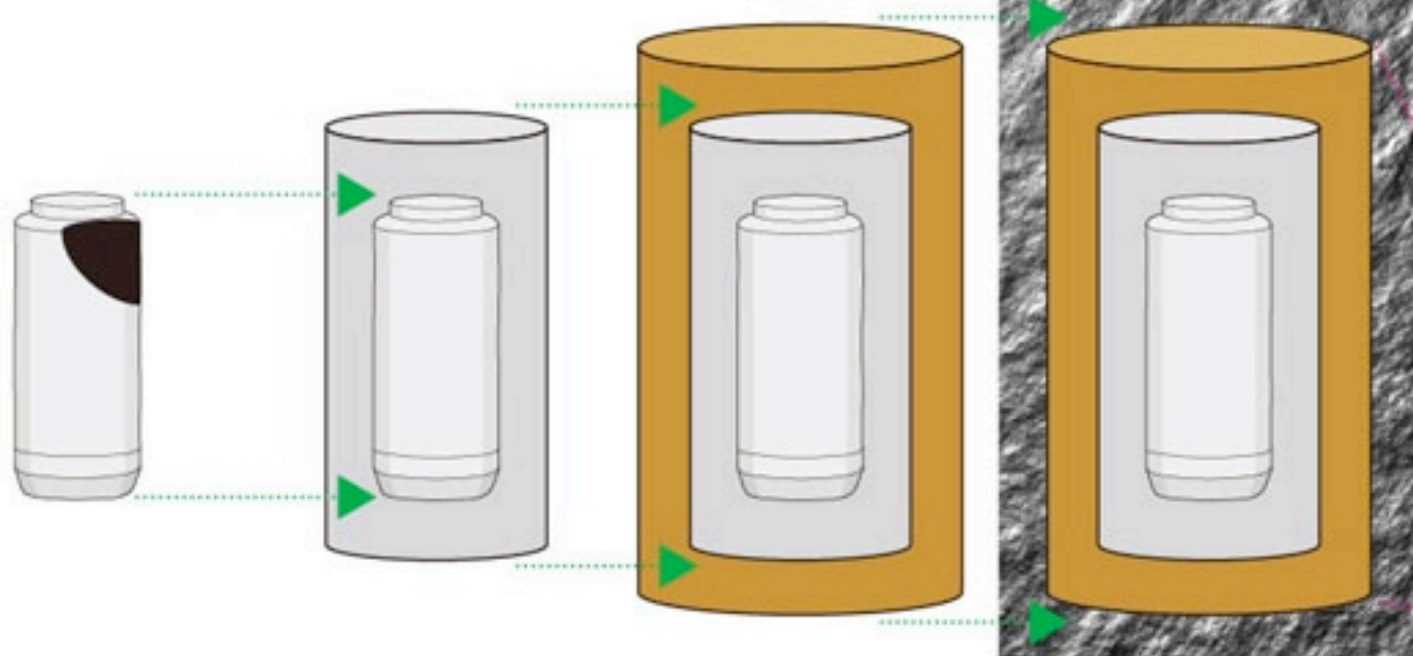
直径：約40cm
高さ：約130cm
総重量：約500kg

《 高レベル放射性廃棄物の処分方法 》

多重バリアシステム

人工バリア + 天然バリア

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



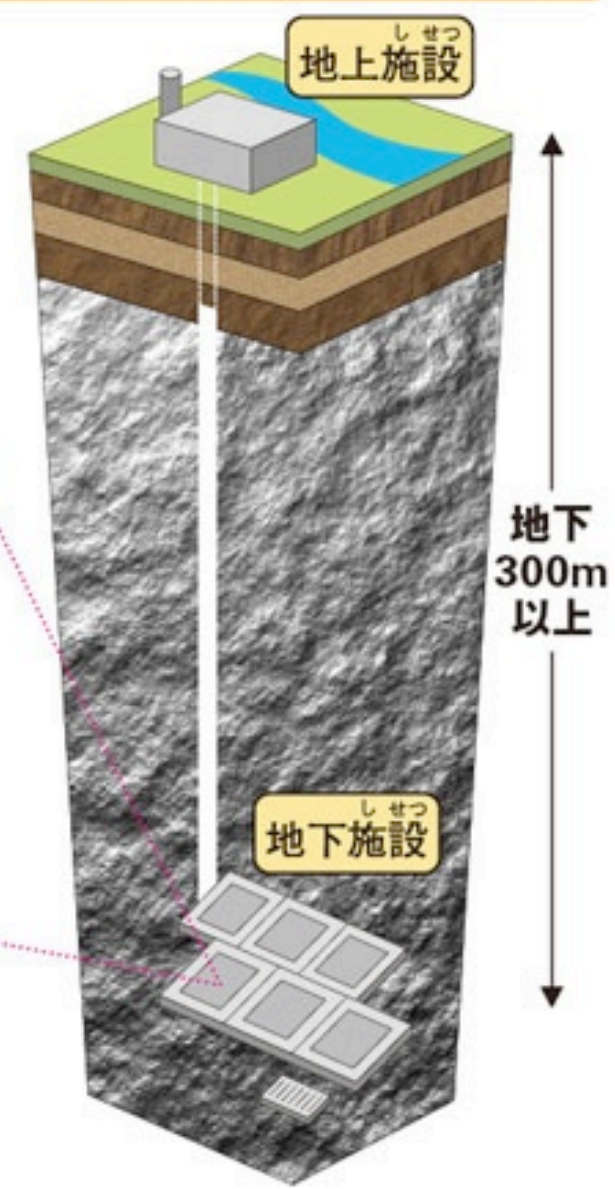
ガラスは放射性物質が地下水に溶け出しにくくします。

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う厚さ約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



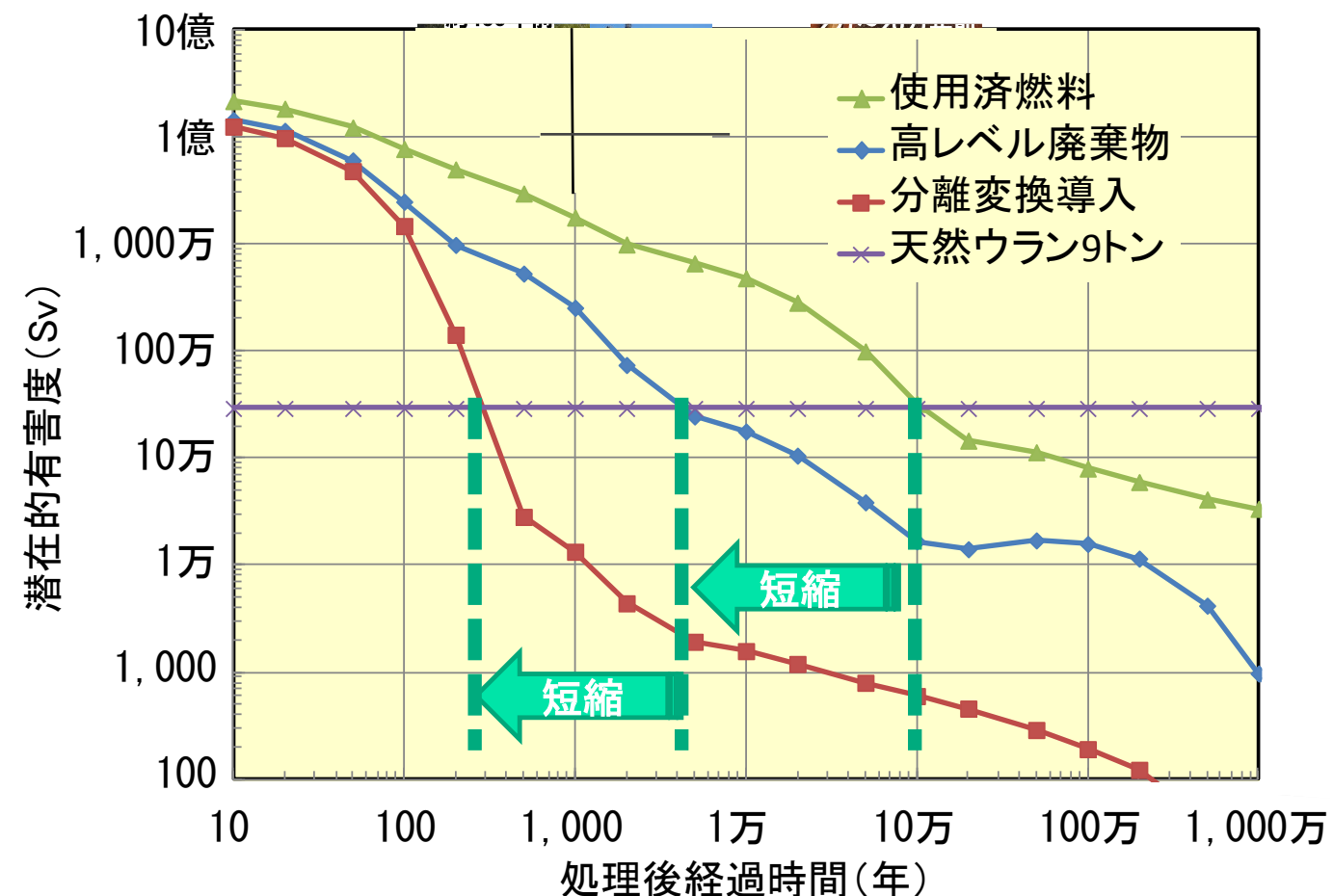
最終処分場 候補地 ゼロ

Cf. フィンランド 「オンカロ」

使用済み核燃料の核変換処理（研究段階）

- 放射性核種を群分離し、原子炉や加速器で中性子や陽子などを照射して核分裂や核破砕反応を起こし、安定核種や短寿命核種に変えることを研究中（分離変換技術）。
- 中性子による (n, γ) や $(n, 2n)$ 反応を利用。
- 高レベル放射性廃棄物のマイナーアクチノイド（プルトニウム以外の超ウランウラン元素）について、高速増殖炉の核燃料サイクルの中で処理する方法や、加速器駆動 (ADS) 未臨界炉や専焼高速炉による階層処理が考えられている。

- ※ 環境中の放射性物質を原子炉や加速器施設に運んで原子核反応を起こさせるのはまず不可能（原理的にもコスト的にも）。
 - 圧倒的多数の非放射性核種を放射化させてしまう。
 - 多種多様な核種に対し、うまく非放射性核種に変えるように選択的に反応を起こさせるのはまず無理。



《 日本の原子力発電所 》

日本の原子力発電所(2010年3月末現在)

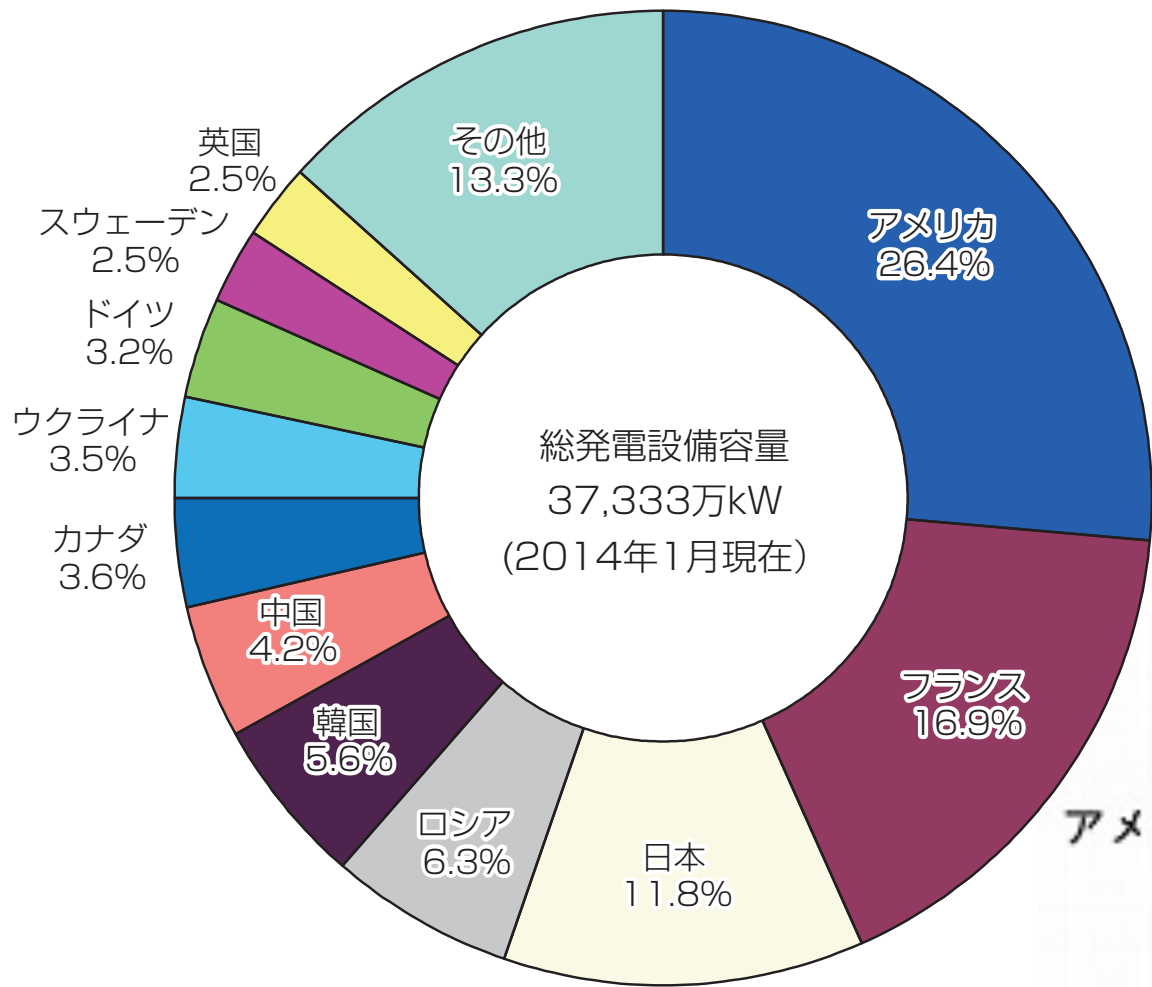
	基数	合計出力(万kW)
運転中	54基	4,884.7万kW
建設中	2基	275.6万kW
着工準備中	12基	1,655.2万kW
合計	68基	6,815.5万kW

沸騰水型原子炉 (BWR) 加圧水型原子炉 (PWR)

■ 運転中 ■ 運転中
■ 建設中 ■ 建設中
■ 着工準備中 ■ 着工準備中

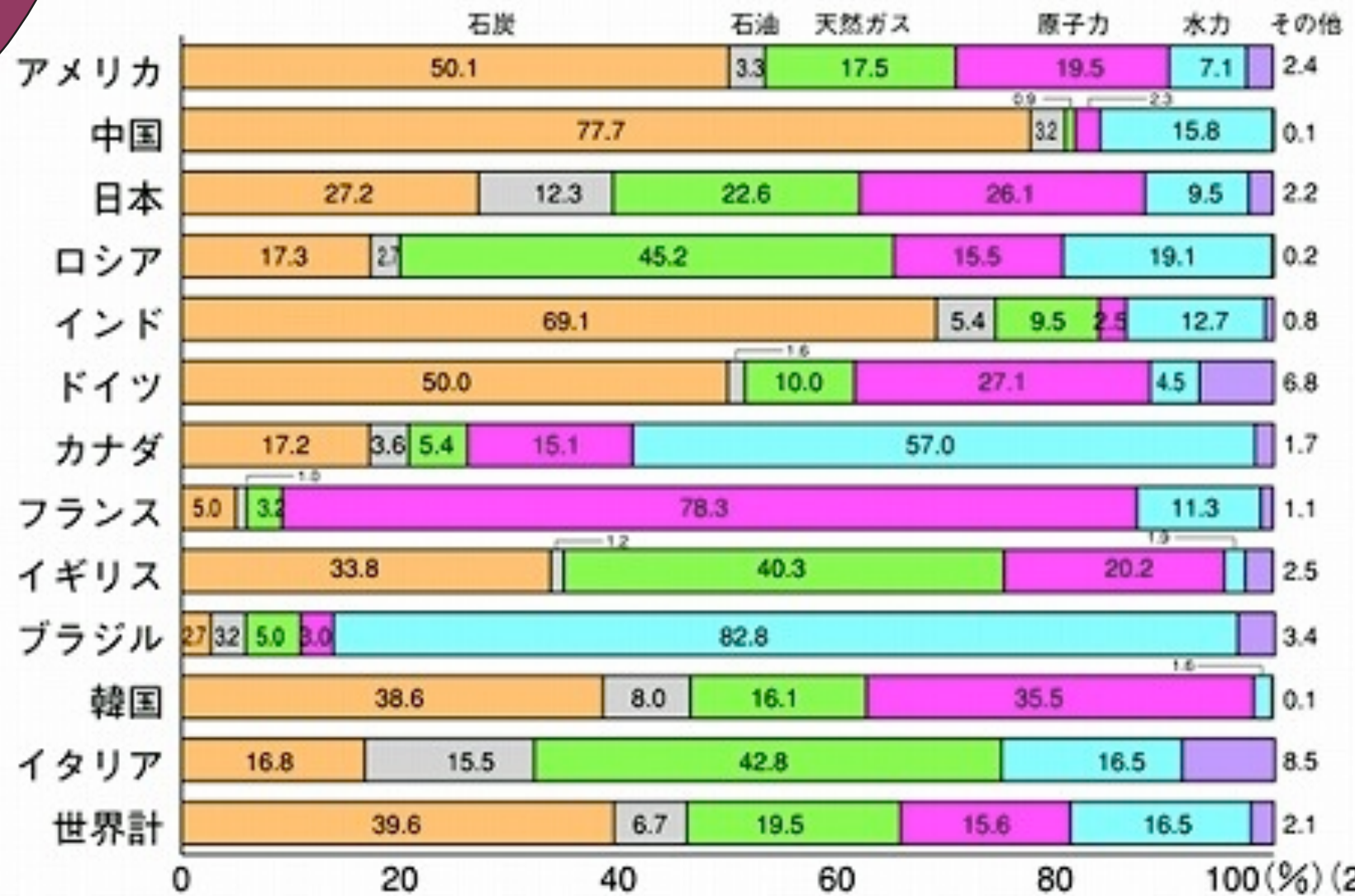


【第213-2-1】世界の原子力発電設備容量



(2004年)

主要国の電源別発電電力量の構成比



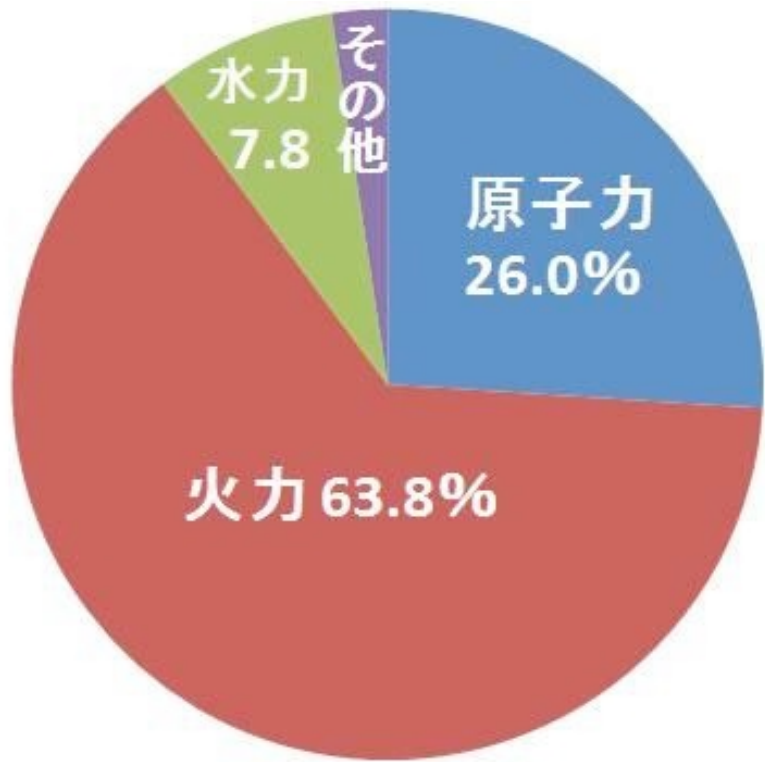
出典： IAEA-PRIS 資料を基に作成



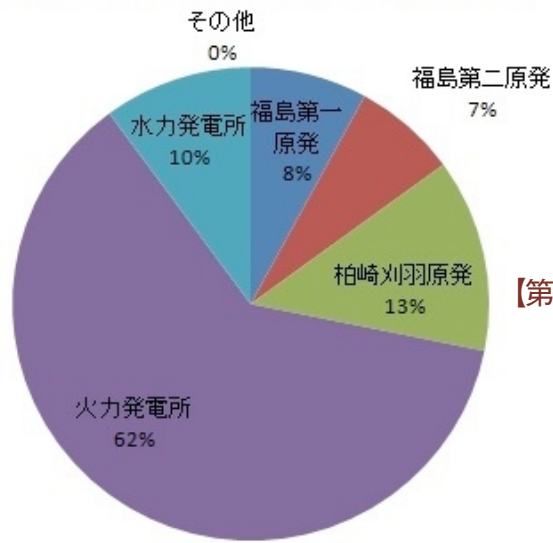
(注) 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある。

出典： IEA Electricity Information 2006 Edition

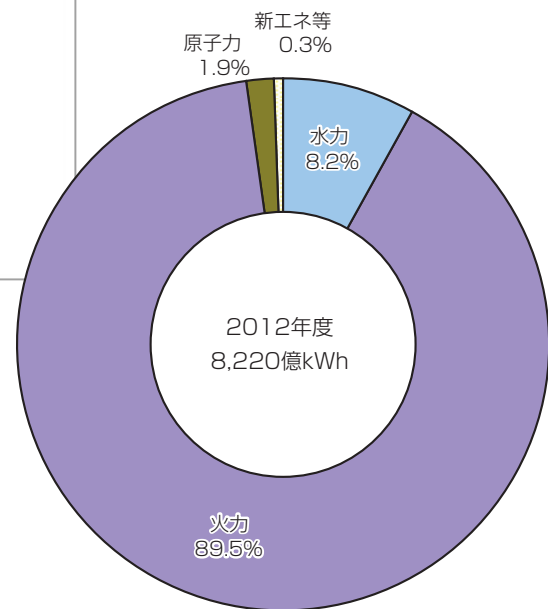
日本の発電量の比率 2008



東京電力の電力総出力の割合



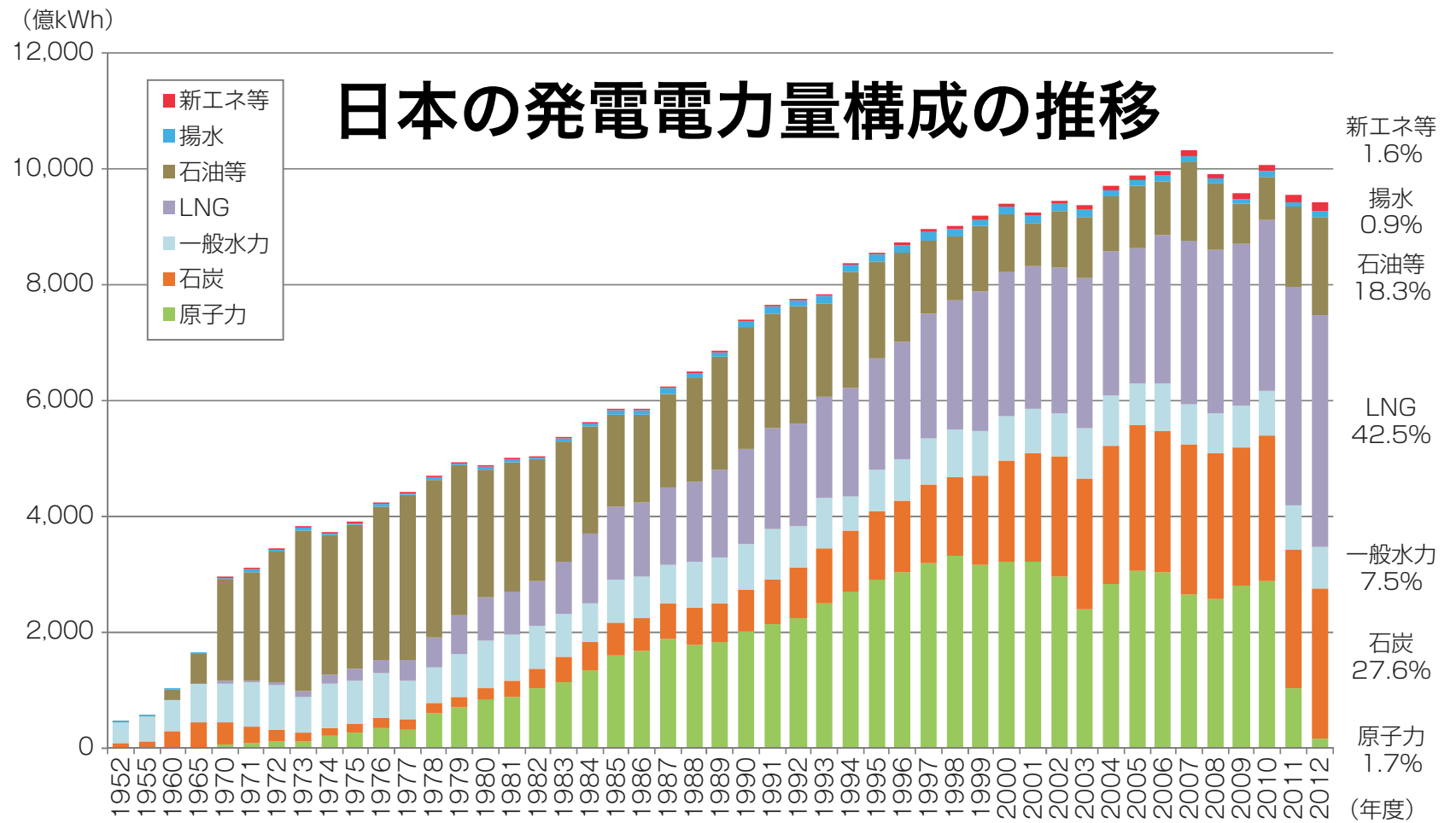
【第 213-2-2】 全国発電端電力量の構成 (2012 年度)



日本の発電量の比率 2012

出典： 資源エネルギー庁「電力調査統計平成 24 年度発電実績」を基に作成

日本の発電電力量構成の推移

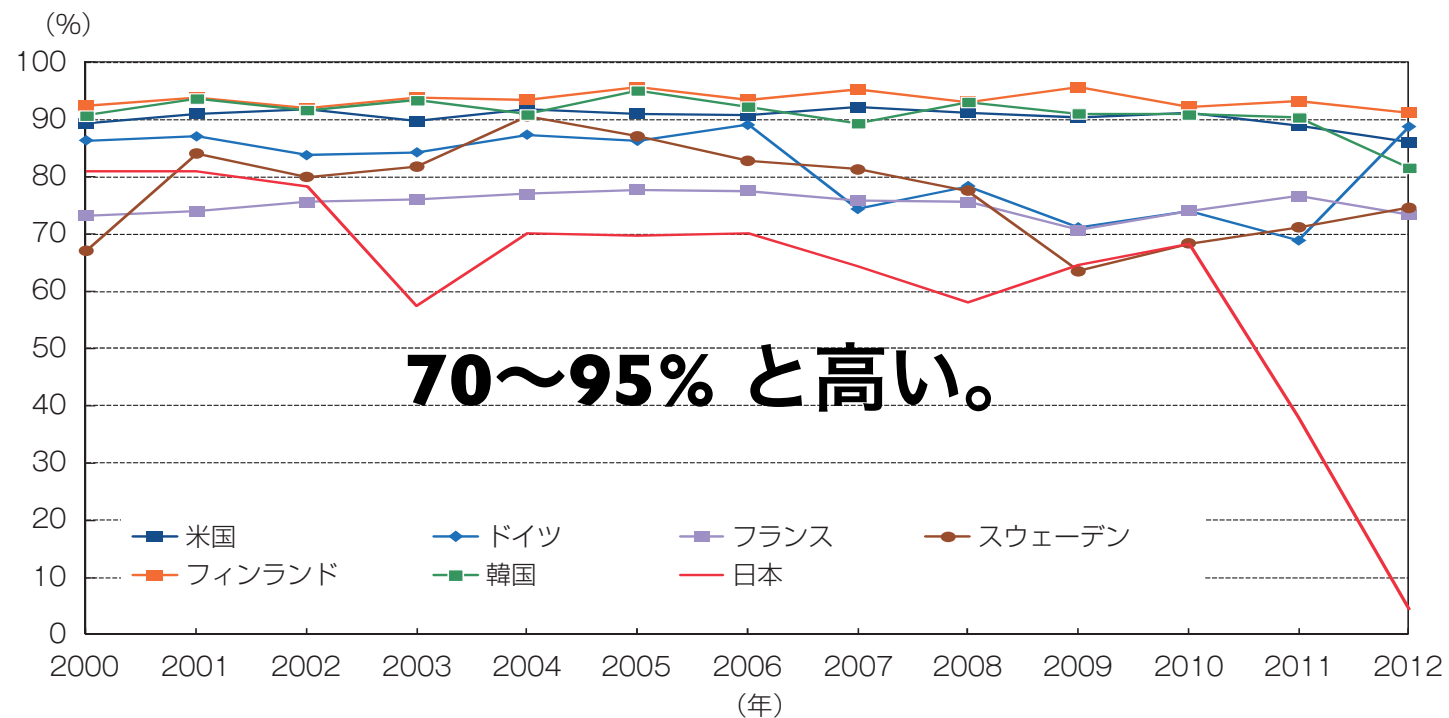


(注) 1971 年度までは 9 電力会社計。

出典： 資源エネルギー庁「電源開発の概要」、「電力供給計画の概要」を基に作成

世界の原子力発電の設備利用率の推移

【第 213-2-3】 世界の原子力発電の設備利用率の推移



出典： 原子力安全基盤機構「原子力施設運転管理年報 平成 25 年版」を基に作成

成績評価

合否判定（点数なし） 2単位

- 出席
- レポート

各分野ごとに1本選択、合計3本
（それより多く提出してもよい）

物理分野：鳥居

環境化学分野：小豆川

生命科学分野：渡邊・坪倉・芳賀・藤原

レポート締め切り

各分野ごとに1本選択、合計3本
(それより多く提出してもよい)

- **物理分野**

物理：鳥居

締切：11月13日(金)

- **環境化学分野**

環境化学：小豆川

締切：11月27日(金)

- **生命科学分野**

生命科学：渡邊・坪倉・
芳賀・藤原

締切：12月11日(金)

● 物理 課題 #5

原子炉内で核分裂または放射化により生成する放射性核種にはどんなものがどんな割合で存在するか。それら核種の崩壊についても説明せよ。そうした多種多様な核種のうち ^{131}I や ^{137}Cs , ^{90}Sr などが特に問題となるのはなぜか。

● 物理 課題 #6

なにかひとつ、工学・医療などに利用されている放射性核種を選び、その寿命や崩壊の種類、放出される放射線のエネルギーなどを調べてみよ。その核種が利用される特徴はどこにあるか。余力があれば、その元素の他の同位体についても調べてみよ。

この課題(#4, #5)は誰でも選択可。

● 物理 課題 #7

以下の計算課題 (A), (B) の両方に回答せよ。

(A) ^{40}K の内部被曝

体重 60 kg の人の体内にはカリウム元素が通常 130 g 程度含まれている。このうち 0.0117% は放射性同位体の ^{40}K (半減期 12.8億年)である。

- (i) この ^{40}K による放射能は何ベクレルか。
- (ii) 1 Bq の ^{40}K が体全体に与える実効線量率は何 $\mu\text{Sv/h}$ と見積もられるか。
- (iii) 体内にある ^{40}K による被曝は年間何 mSv/年 に相当するか。

(B) ^{131}I の崩壊熱

福島第一原発から放出された ^{131}I は 15万 TBq ($T=10^{12}$) と言われている。原子炉の中には、当初その10倍前後の ^{131}I が、1号機から3号機までの各々の炉内に存在していた。

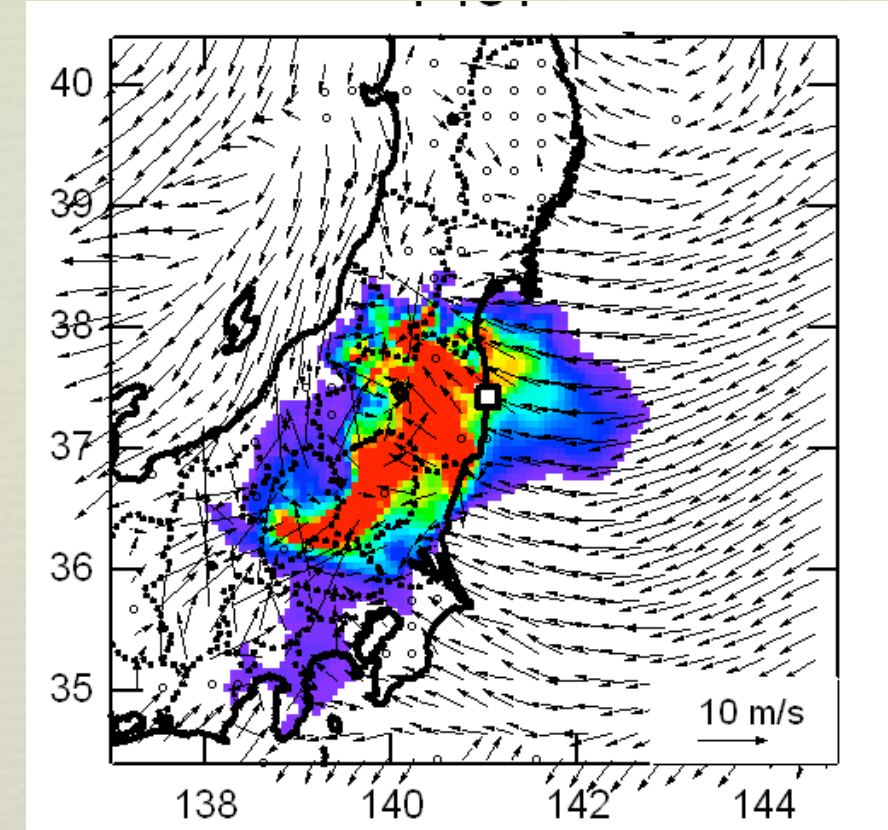
- (i) 放出された ^{131}I は全部で何グラムに相当するか。
- (ii) 各炉内において、 ^{131}I による崩壊熱は当初何ワットであったと推定されるか。放出される β 線と γ 線のどちらも炉内の水で全てのエネルギーを失うとして計算するとよい。(※ 実際の炉内では他のあらゆる核種による崩壊熱が積算される。)
- (iii) 原子炉容器内の適当な水量を仮定して、 ^{131}I の寄与による温度上昇率を見積もってみよ。なお、水の冷却循環装置は電源喪失のため止まっていた。

この課題(#6)は誰でも選択可。

次回予告

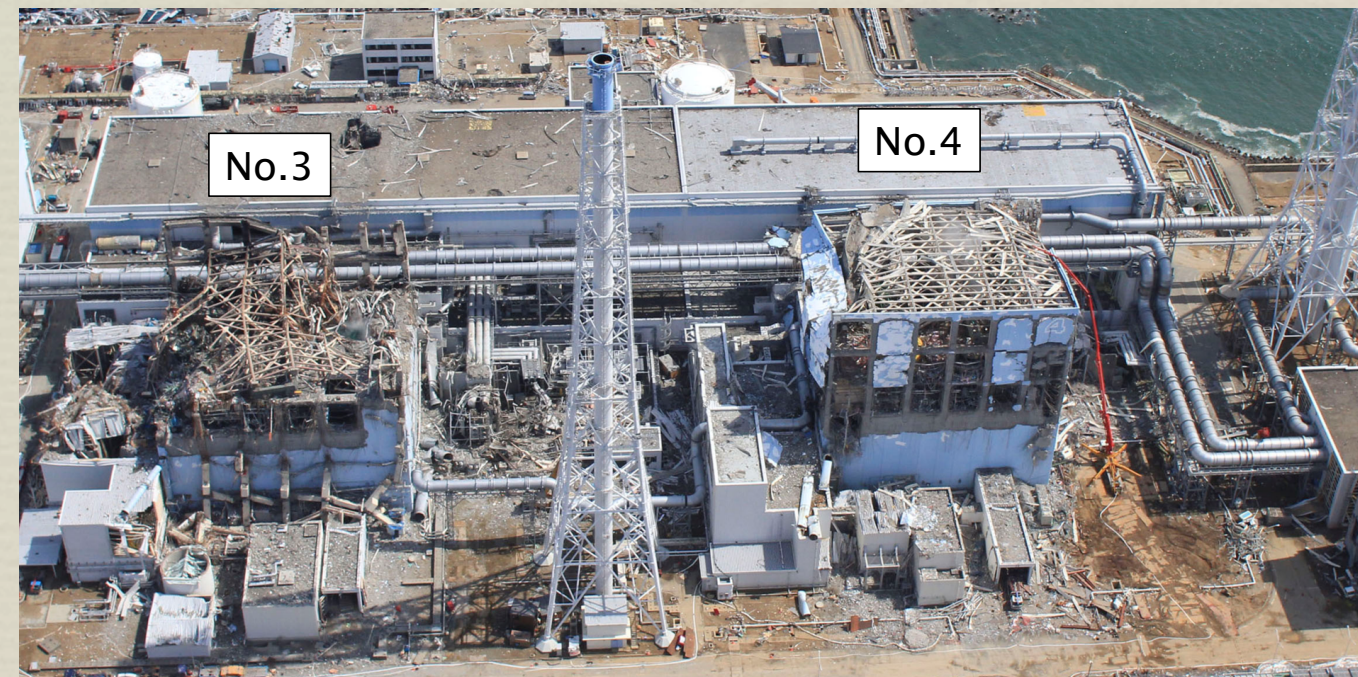
第8回 (11/6)

第9回 (11/13)



● 環境放射化学

- 放射線量の時間変化、放射性物質の濃縮と拡散
- シミュレーションと将来の放射線量



講義スライド、講義予定

<http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lecture/>

東大教養 放射線 講義



検索

連絡先

torii-radio@radphys4.c.u-tokyo.ac.jp

担当教員：鳥居 寛之

Fine. Per oggi è tutto.

Fini pour aujourd'hui

That's all for today.

Всё за сегодня.

오늘은 이만 마치겠습니다.

Ci vediamo la prossima settimana.

On se voit la semaine prochaine.

See you next week.

Увидимся на следующей неделе.

다음 주에 또 만납시다.