

新刊書籍 発売！ 2012年10月10日 刊行

# 「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は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し、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思います。

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

# 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

# 東京大学教養学部 放射線講義 スライドのご案内

ごらんのファイル以外にも、別学期の講義シリーズのファイルがあります。

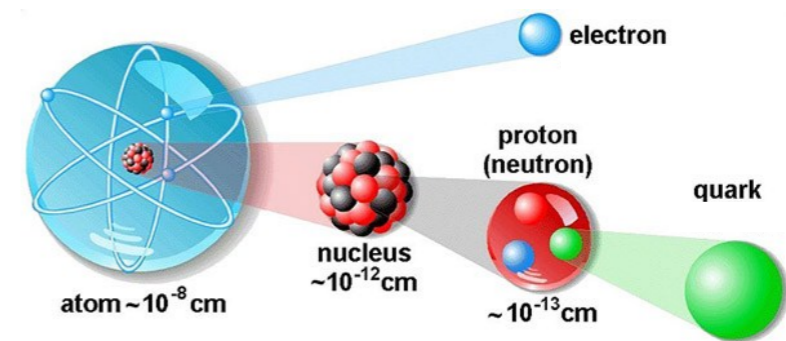
書籍「放射線を科学的に理解する — 基礎からわかる東大教養の講義 —」

とあわせて、どうぞご利用下さい。

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

2011年度夏学期  
自主講義

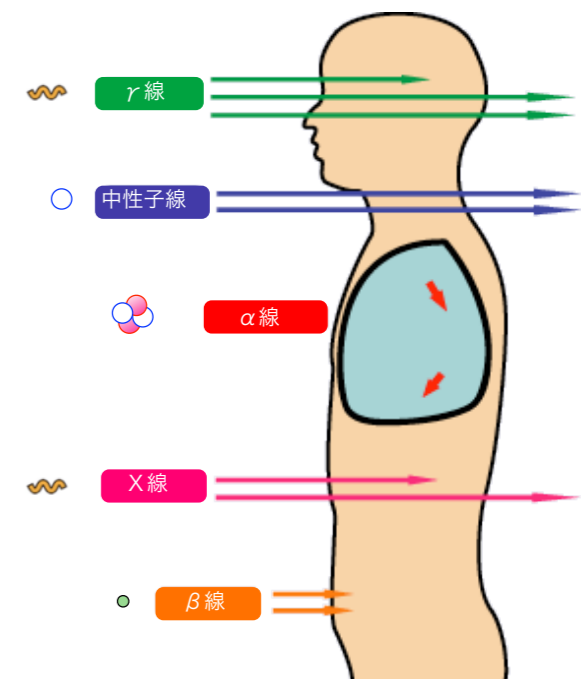
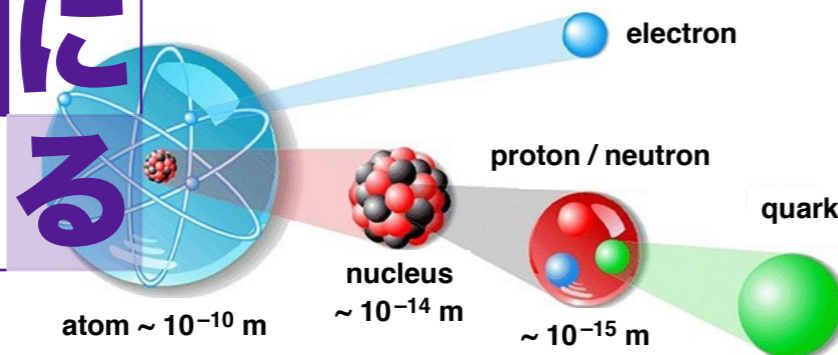
自主講義  
放射線学



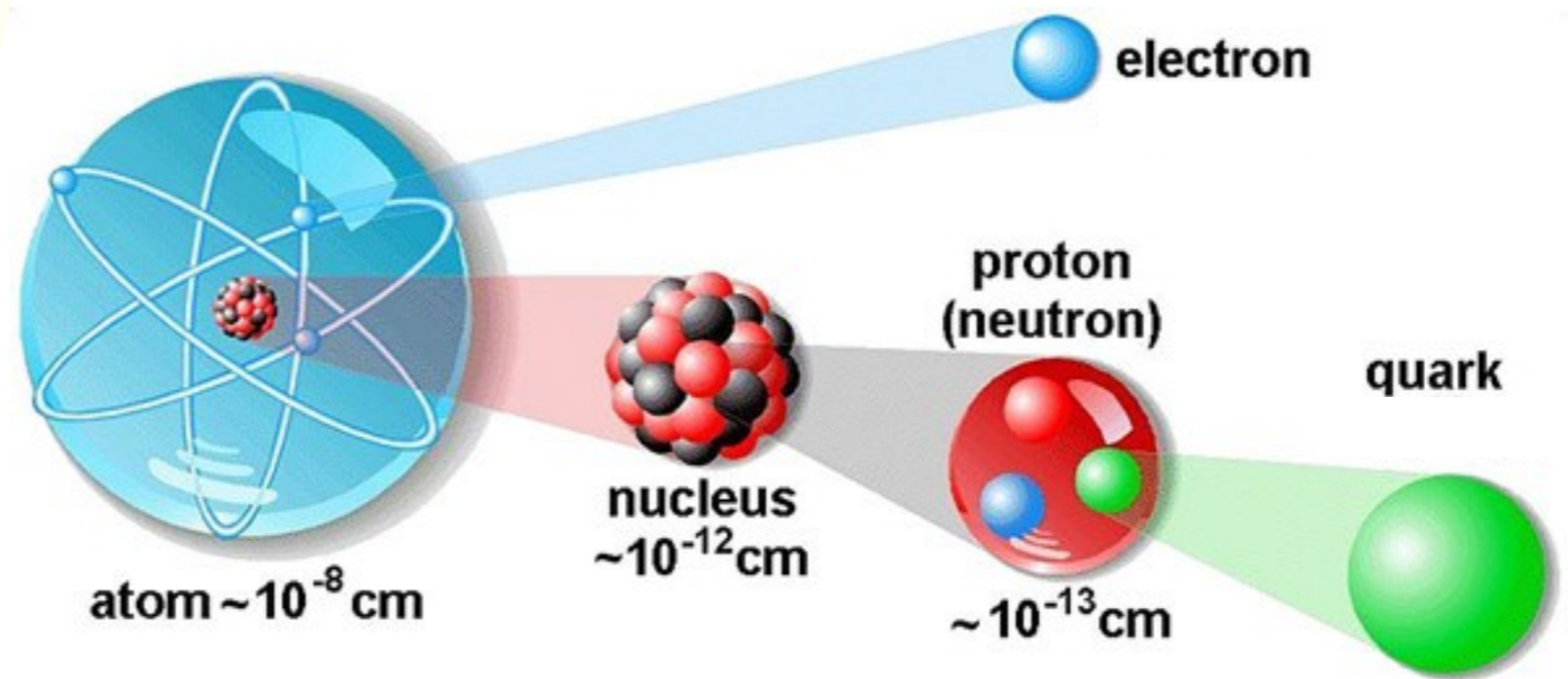
2011年度冬学期  
主題科目テーマ講義

2012年度冬学期  
主題科目テーマ講義

放射線を  
科学的に  
理解する



# 自主講義 「放射線学」



物理部会／広域・相関 助教 鳥居 寛之

(粒子線物理学・素粒子原子物理学)

東京大学 教養学部／大学院総合文化研究科

# 自主講義 「放射線学」

## ● 講義日程

- 第1回 5/10 (火)
- 第2回 5/17 (火)
- 第3回 5/24 (火)
- 第4回 5/31 (火)
- 第5回 6/ 7 (火)
- 第6回 6/14 (火)
- 予備日 6/21 (火)

**物理部会／広域・相関 助教 鳥居 寛之**

**(粒子線物理学・素粒子原子物理学)**

東京大学 教養学部／大学院総合文化研究科

# 自主講義 「放射線学」

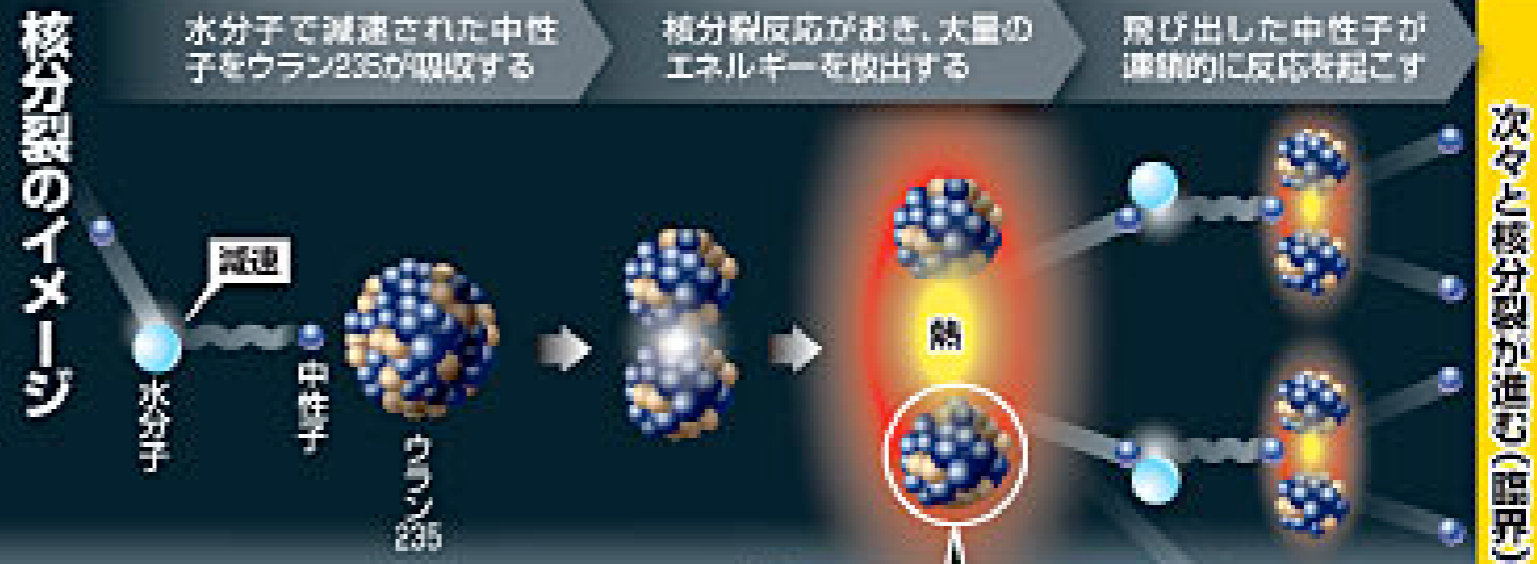
- 第1回：講義概要のイントロ  
(5/10) 放射線とは？
- 第2回：放射線と物質との相互作用《放射線物理学》  
(5/17) (エネルギー損失、各種反応・散乱過程)
- 第3回：放射線の生体への作用と影響《放射線生物学》  
(5/24) 放射線と放射能の単位  
放射線の防護《放射線安全管理学》
- 第4回：原子核の壊変《原子核物理学》  
(5/31) 核分裂反応《原子力工学》
- 第5回：放射線の利用  
(6/7) 放射線診断・治療《放射線医療》
- 第6回：高エネルギー・素粒子物理学《加速器科学》  
(6/14) 放射線の測定《放射線計測学》、discussion

# 自主講義 「放射線学」

- 第1回：講義概要のイントロ  
(5/10) 放射線とは？
- 第2回：放射線と物質との相互作用 《放射線物理学》  
(5/17) (エネルギー損失、各種反応・散乱過程)
- 第3回：放射線の生体への作用と影響 《放射線生物学》  
(5/24) 放射線と放射能の単位  
放射線の防護 《放射線安全管理学》
- 第4回：原子核の壊変 《原子核物理学》  
(5/31) 核分裂反応 《原子力工学》
- 第5回：放射線の利用  
(6/7) 放射線診断・治療 《放射線医療》
- 第6回：高エネルギー・素粒子物理学 《加速器科学》  
(6/14) 放射線の測定 《放射線計測学》、discussion

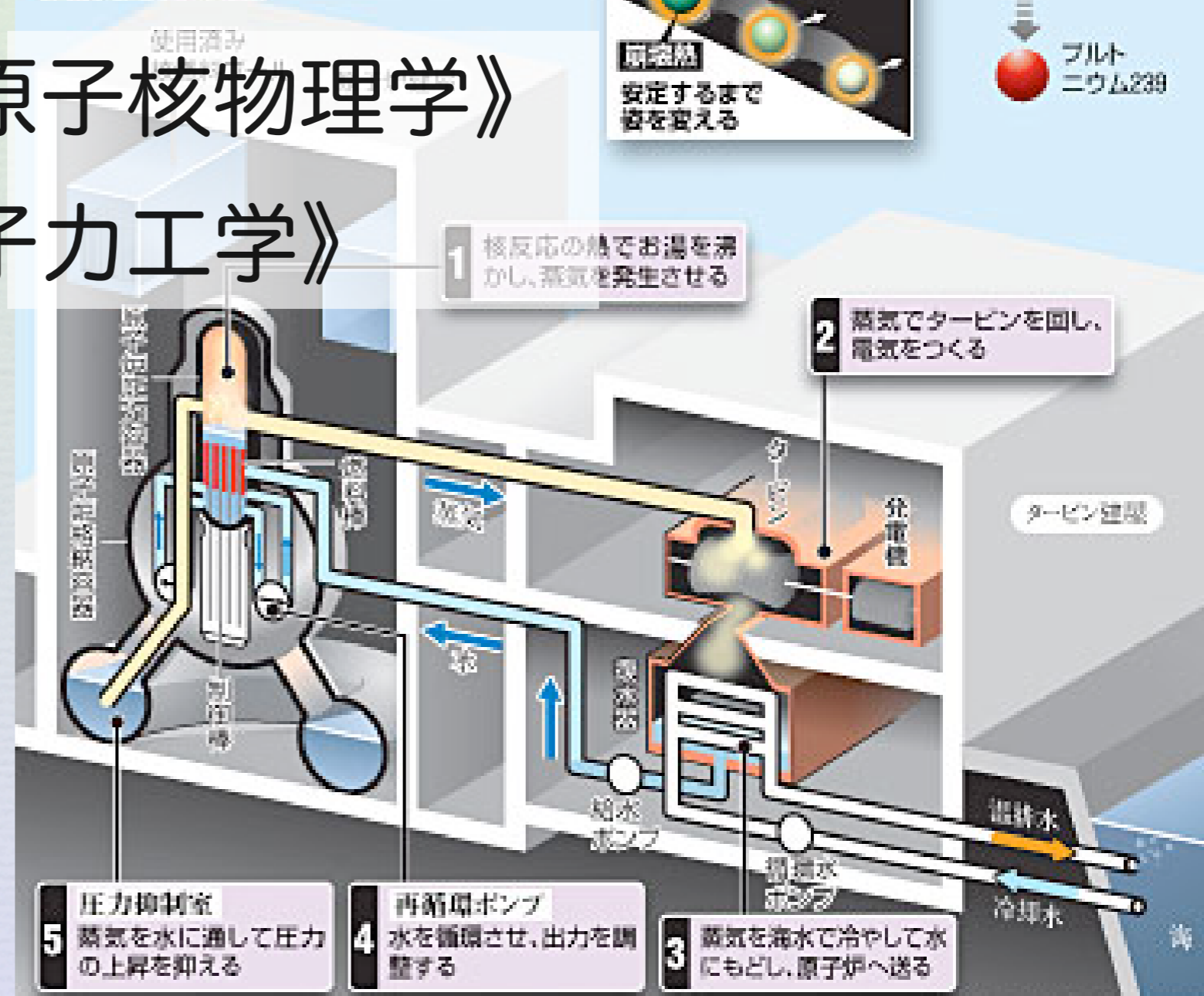
# 第4回 (5/31)

- 原子核の壊変 《原子核物理学》
- 核分裂反応 《原子力工学》



## 原子力発電の仕組み

(沸騰水型炉の場合)





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

Å ( $10^{-10}$  m)

オングストローム

原子物理学

Atomic Physics

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

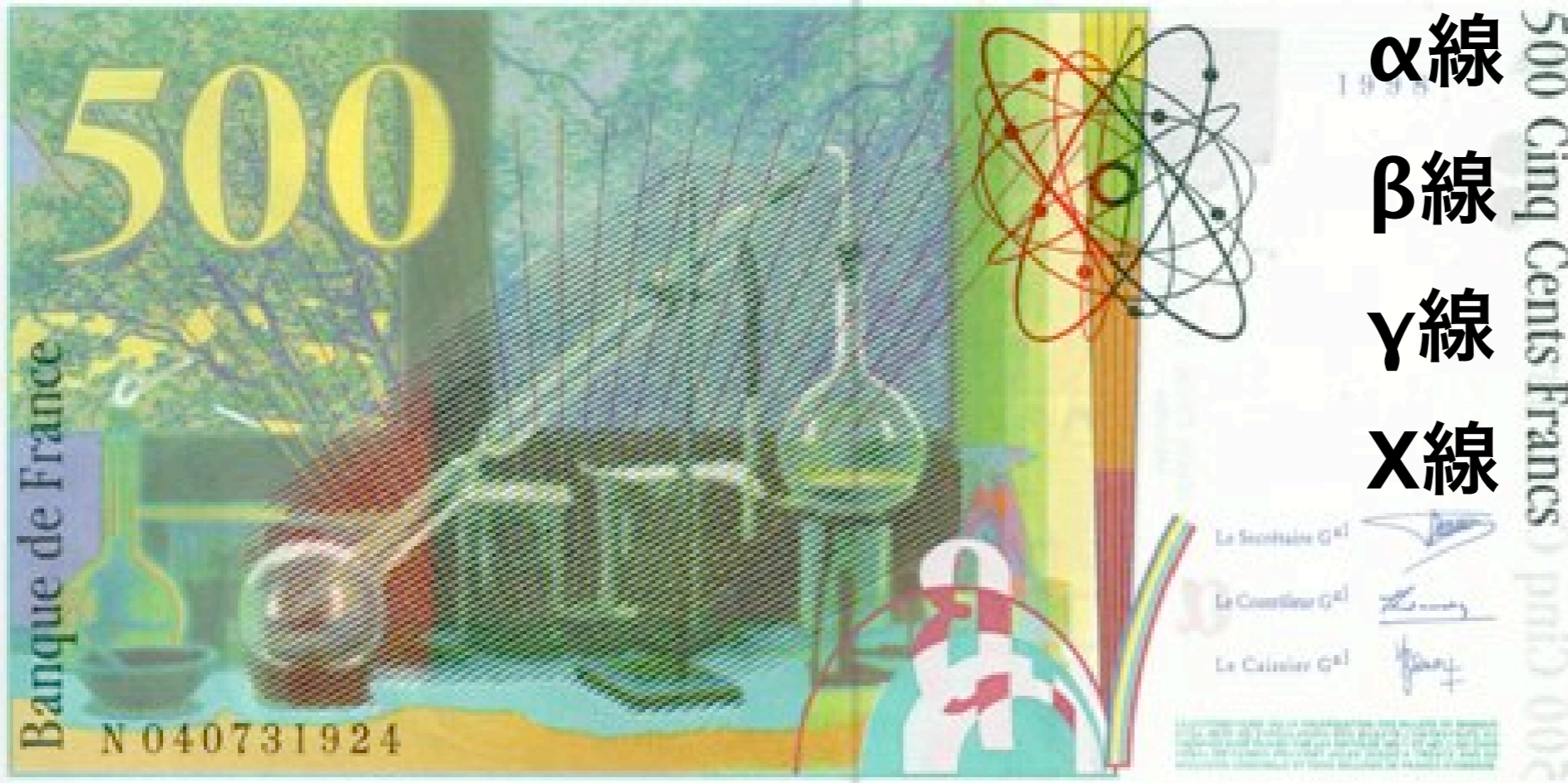


クォーク  
quark



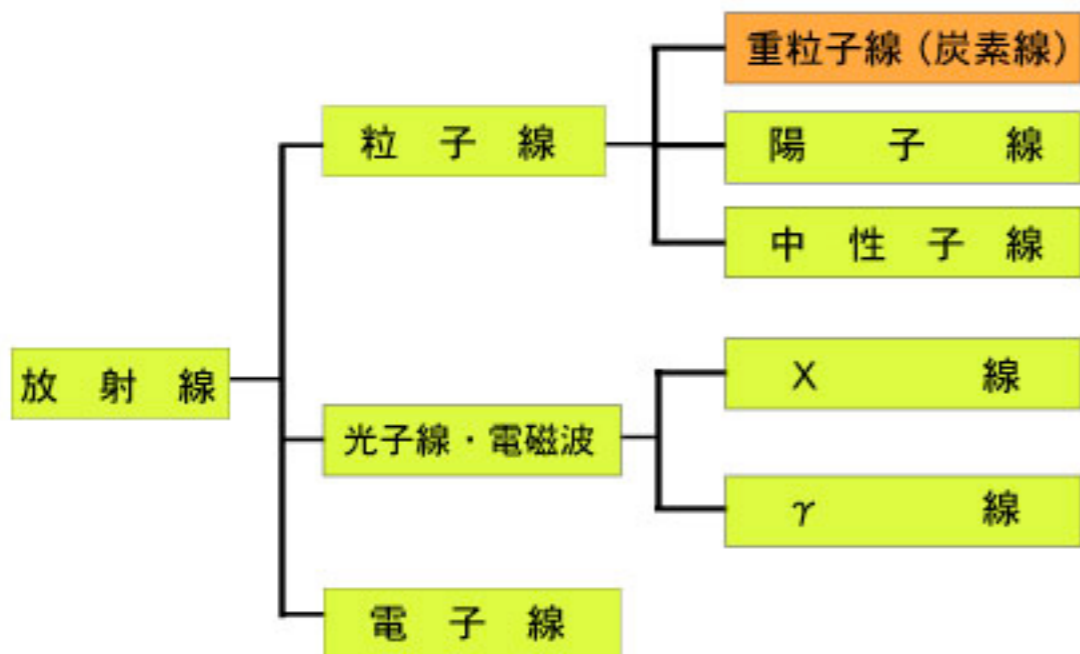


Billet de 500 Francs Français  
en circulation: 1993–1999



- $\alpha$ 線    ヘリウム原子核
- $\beta$ 線    高速の電子
- $\gamma$ 線    光子（電磁波）
- X線    光子（電磁波）

放射線の種類 (放射線治療分野で用いられる分類)



原子核 N

**α 線**

$${}^A_Z N \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} M + {}^4_2 \alpha$$

**β 線**

$${}^A_Z N \rightarrow {}^A_{Z+1} M + {}^0_{-1} \beta + \bar{\nu}_e$$

$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e^0$$

**γ 線**

$${}^A_Z N^* \rightarrow {}^A_Z N + {}^0_0 \gamma$$

100 keV ~ MeV

放射線のもつエネルギーは？

☞ 100 keV ~ MeV for α/β/γ

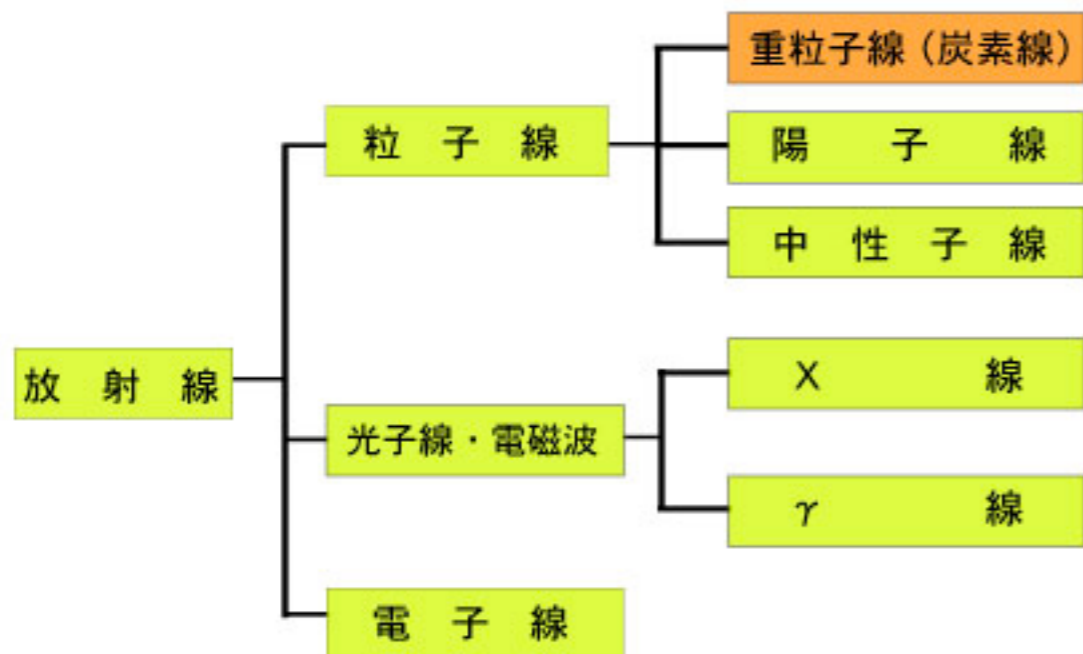
Cf. 原子の束縛エネルギーは？

荷電粒子の質量は？

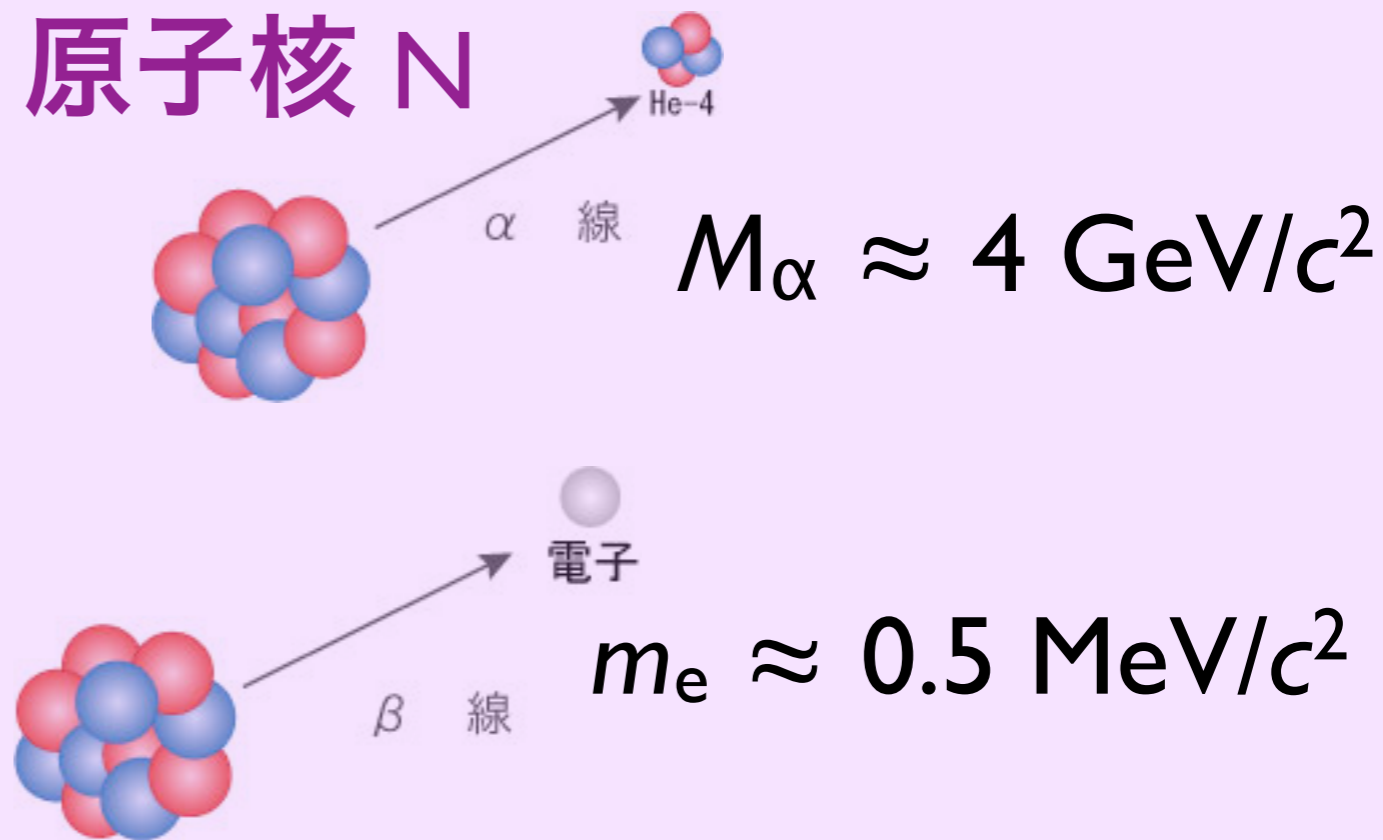
$$A^* \rightarrow A + h\nu(\text{X-ray})$$

原子 A 10 ~ 100 keV

# 放射線の種類 (放射線治療分野で用いられる分類)



## 原子核 N

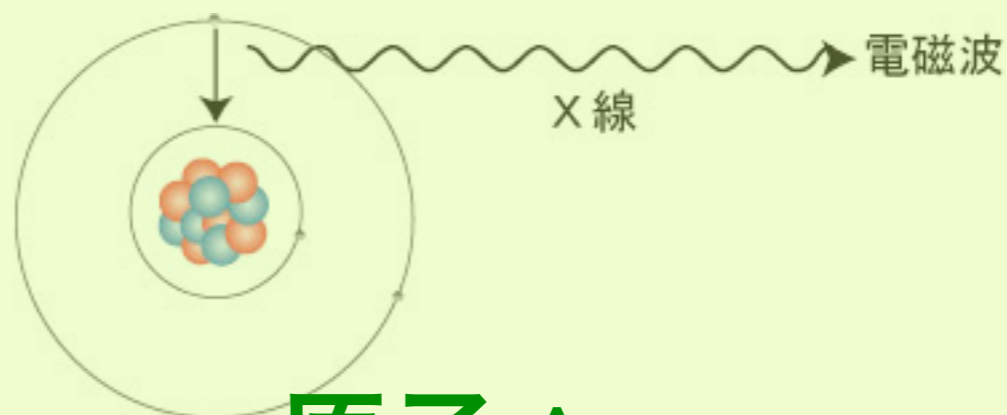
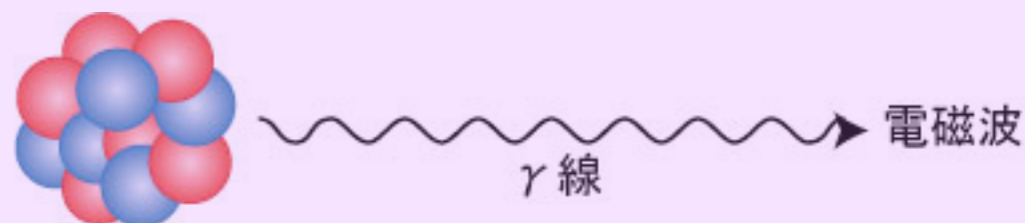


放射線のもつエネルギーは？

👉 **100 keV ~ MeV** for  $\alpha/\beta/\gamma$

原子の束縛エネルギーは？

👉 **最外殻電子で 10 eV 程度**



**原子 A 10 ~ 100 keV**

# 原子核物理学

# 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><b>Atomic</b></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><b>α</b> Alpha decay</p> <p><b>p</b> Proton emission</p> <p><b>n</b> Neutron emission</p> <p><b>SF</b> Spontaneous fission</p> </div> <div style="width: 30%;"> <p><b>β</b> Beta decay</p> <p><b>β+</b> Beta+ decay</p> <p><b>EC</b> Electron capture</p> <p><b>□</b> Stable</p> </div> <div style="width: 15%;"> <p>Selected</p> <p>All</p> </div> </div>																	2 He 2
2	3 Li 3 6.941	4 Be 4 9.012182	5 B 5 10.811	6 C 6 12.0107	7 N 7 14.00643	8 O 8 15.999	9 F 9 18.998403	10 Ne 10 20.1797											10 Ne 10 20.1797
3	11 Na 11 22.989769	12 Mg 12 24.3047																18 Ar 18 39.948	
4	19 K 19 39.0983	20 Ca 20 40.078	21 Sc 21 44.955912	22 Ti 22 47.88	23 V 23 50.9415	24 Cr 24 51.9961	25 Mn 25 54.938044	26 Fe 26 55.845	27 Co 27 58.933195	28 Ni 28 58.6934	29 Cu 29 63.546	30 Zn 30 65.38	31 Ga 31 69.723	32 Ge 32 72.630	33 As 33 74.9216	34 Se 34 78.96	35 Br 35 79.904	36 Kr 36 83.80	
5	37 Rb 37 85.4678	38 Sr 38 87.62	39 Y 39 88.905848	40 Zr 40 91.224	41 Nb 41 92.90638	42 Mo 42 95.94	43 Tc 43 (98)	44 Ru 44 101.07	45 Rh 45 101.07	46 Pd 46 106.36	47 Ag 47 107.8682	48 Cd 48 112.411	49 In 49 114.818	50 Sn 50 118.710	51 Sb 51 121.757	52 Te 52 127.6	53 I 53 126.905	54 Xe 54 131.29	
6	55 Cs 55 132.90545	56 Ba 56 137.327	57-71 Lanthanides	72 Hf 72 178.49	73 Ta 73 180.9479	74 W 74 183.84	75 Re 75 186.207	76 Os 76 190.23	77 Ir 77 192.222	78 Pt 78 195.084	79 Au 79 196.96657	80 Hg 80 200.59	81 Tl 81 204.38	82 Pb 82 207.2	83 Bi 83 208.9804	84 Po 84 (209)	85 At 85 (210)	86 Rn 86 (222)	
7	87 Fr 87 (223)	88 Ra 88 (226)	89-103 Actinides	104 Rf 104 (261)	105 Db 105 (262)	106 Sg 106 (263)	107 Bh 107 (264)	108 Hs 108 (265)	109 Mt 109 (266)	110 Ds 110 (271)	111 Rg 111 (272)	112 Cn 112 (285)	113 Uut 113 (284)	114 Uuq 114 (289)	115 Uup 115 (288)	116 Uuh 116 (289)	117 Uus 117 (289)	118 Uuo 118 (294)	

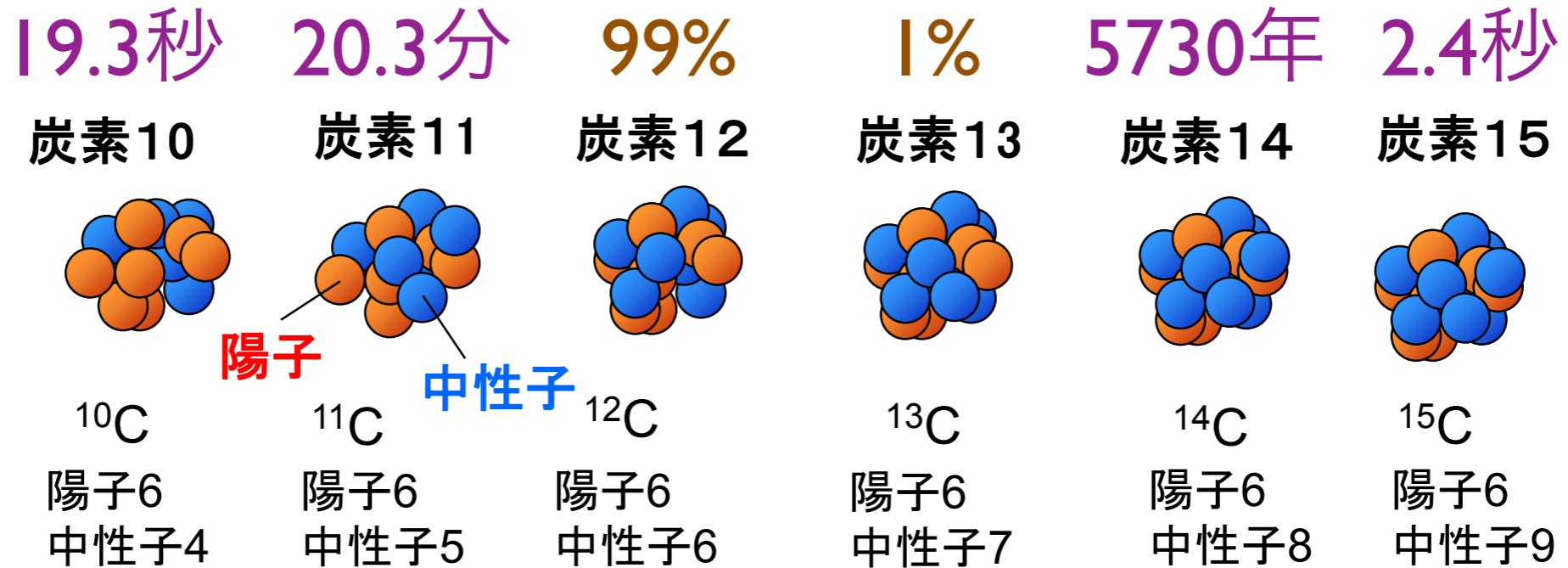
For elements with no stable isotopes, the mass number of the isotope with the longest half-life is in parentheses.

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

# 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



陽子過剰になると？

(寿命がある： $\beta^+$ 壊変、電子捕獲(EC))

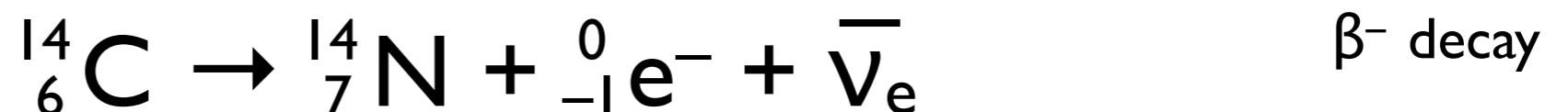
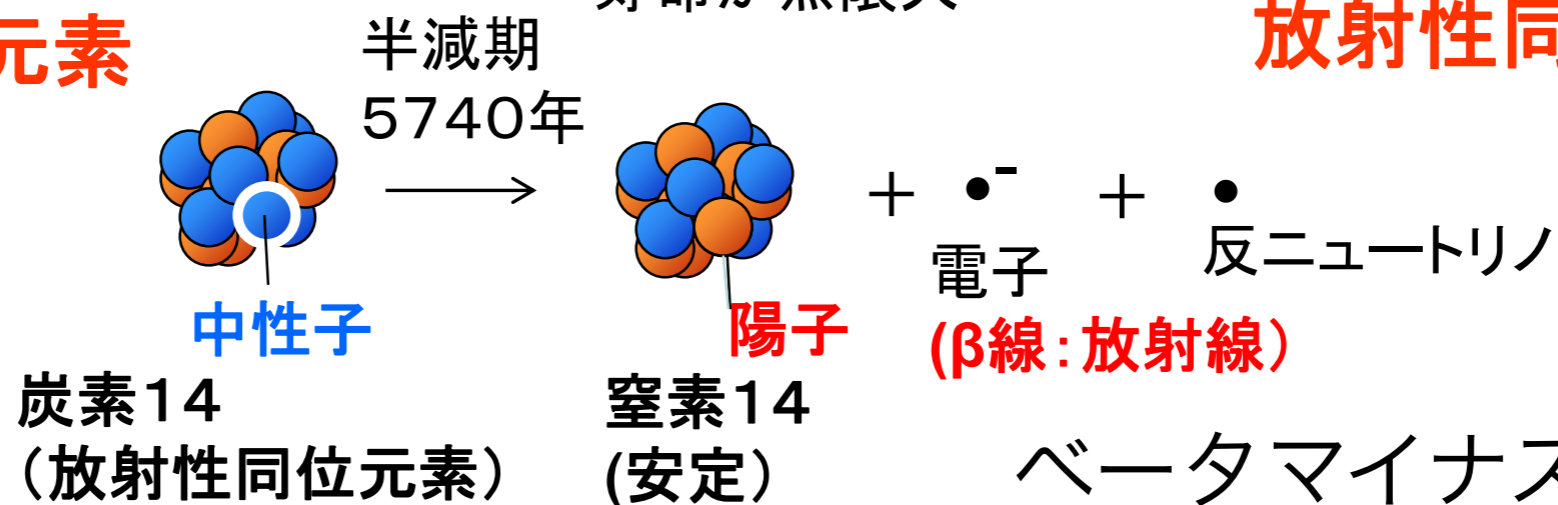
天然に存在=**安定同位体**  
寿命が無限大

中性子過剰になると？

(寿命がある： $\beta^-$ 壊変)

## 放射性同位元素

## 放射性同位元素



# 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 nuclei stay in the nucleus?" "What combinations of protons and neutrons are possible?" "What happens when nuclei are compressed or rapidly rotated?" "What is the origin of the nuclei found on Earth?"

**Legend**

- electron ( $e^-$ )
- positron ( $e^+$ )
- neutrino ( $\nu$ )
- antineutrino ( $\bar{\nu}$ )
- quark
- gluon field
- gluon
- photon ( $\gamma$ )
- Nucleon:  $A = Z + N$

## 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  $10^{12}$  K, this soup condensed into protons, neutrons, and electrons. As time progressed, most 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 and impermeable from the most massive elements and dispersed 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 far 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 nuclides. Nuclear theory predicts that there are at least 4000 more to be discovered with  $Z$  > 112.



## Radioactivity

**Alpha Decay:**  ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$  (alpha particle)

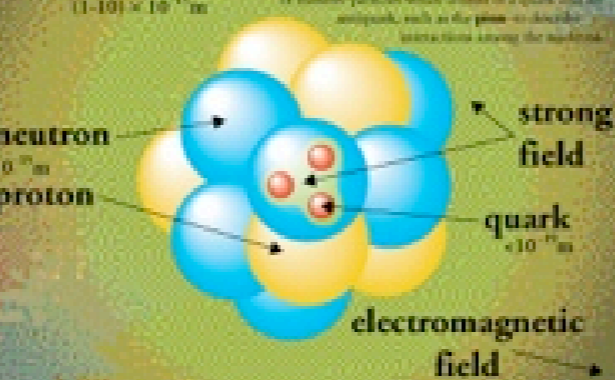
**Beta Minus Decay:**  ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}$  (beta particle)

**Beta Plus Decay:**  ${}^{11}_6\text{C} \rightarrow {}^{11}_5\text{B} + e^+ + \nu$  (beta particle)

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

Radioactive decay transforms a nucleus by emitting different particles. In alpha decay, the nucleus releases a  ${}^4_2\text{He}$  nucleus—an alpha particle. In beta decay, the nucleus either emits an electron and antineutrino (for a proton and neutron) or captures an orbital electron and emits a positron. A positron is the same for the antiparticle of the electron. Antineutrino is composed of anti-particle. 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, energy is carried away from the nucleus at different speeds, up to  $10^8$  m/s, from the nucleus emission. If the emission is slow, the energy is  $< 10$  MeV, the other way around, it is  $> 10$  MeV.

## Nuclear Energy

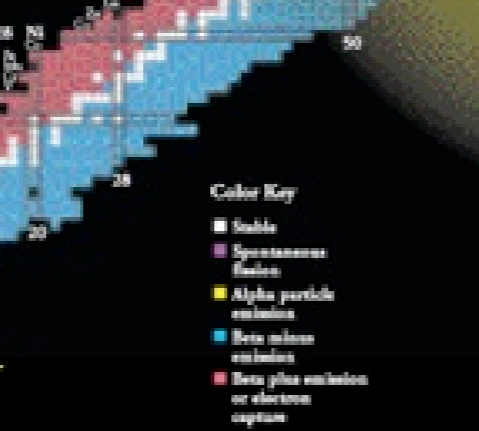
**Fission:**  ${}^{235}_{92}\text{U} + n \rightarrow {}^{141}_{54}\text{Xe} + {}^{92}_{38}\text{Sr} + 3n$

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

In the early stages of nuclear reactions, 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 stellar evolution, more massive nuclei up to and beyond uranium are synthesized by fusion. By measuring the number of reactions that come from the Sun, scientists recently have demonstrated that neutrinos must have a mass greater than zero.

## 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 or  $Z = 2, 8, 28, 50, 82$  and  $126$ ) are indicated by a rectangle on the chart. They correspond to major closed shells and show regions of greater nuclear binding energy.



## Applications

**Radioactive Dating:** Usually, accurate radioactive isotopes such as  ${}^{14}\text{C}$  are used to date objects that were once living, such as wood. For example, from a study of pollen found at the site, scientists determined that Pompeii was built nearly 4,000 years ago.

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

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

**Space Exploration:** Excess heat and alpha particles in naturally occurring thorium isotopes present in thorium oxide. On Earth, nuclear reactions are used to supply heat from geothermal sources or as an alternative.

**Nuclear Reactors:** Nuclear reactions on the fission of  ${}^{235}\text{U}$  or  ${}^{239}\text{Pu}$  nuclei to produce electric power. Reactors will have other nuclear applications, generate radioactive waste, depend of the mass as a subject of current research.

**Magnetic Resonance Imaging:** Magnetic Resonance Imaging (MRI) utilizes an array of nuclei reactions involving the magnetic field of a nucleus to study the local chemical environment. The 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 shapes 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 rotated?" "What is the origin of the nuclei found on Earth?"

**Legend**

- electron ( $e^-$ )
- positron ( $e^+$ )
- neutrino ( $\nu$ )
- antineutrino ( $\bar{\nu}$ )
- quark
- gluon field
- photon
- photon ( $\gamma$ )
- Nucleon:  $A - Z$

## 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,  $T_{univ}$ , cooled to about  $10^{12}$  K, this soup condensed into protons, neutrons, and electrons. As time progressed, most 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 star temperatures from the most massive elements and disperse them into space. Our earth was formed from supernova debris.

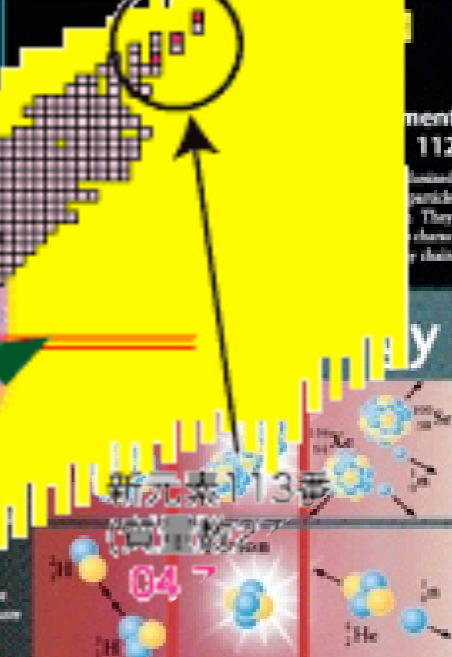


## Phases of Nuclear Matter

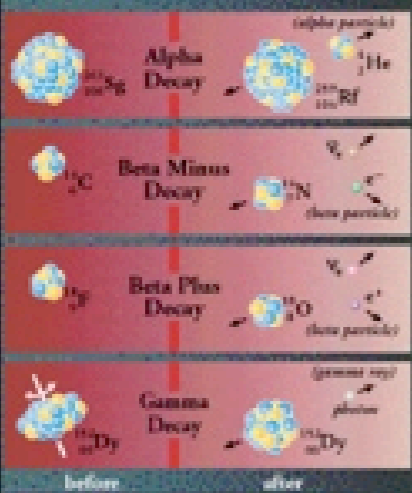


## Unstable Nuclei

Stable nuclei form a narrow white band on the Chart of the Nucleides. Scientists produce unstable nuclei far 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 112 more.

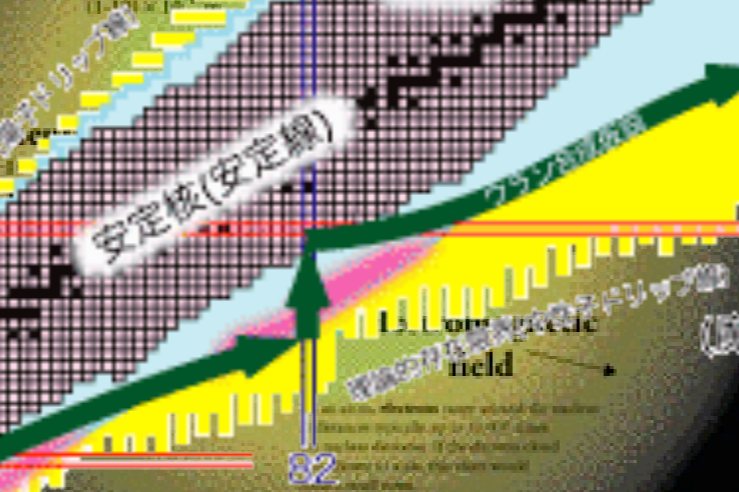


## Radioactivity



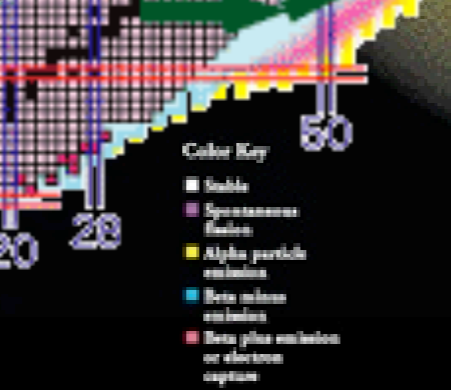
Radioactive decay transforms a nucleus by emitting different particles. In alpha decay, the nucleus releases a  $^4_2\text{He}$  nucleus, an alpha particle. In beta decay, the nucleus either emits an electron and antineutrino for a positron and neutrino or captures an orbital electron and emits a neutrino. A gamma ray is the same for the antiparticle of the electron. Antineutrino is composed of anti-particle. Both alpha and beta decays change the original nucleus into a nucleus of a different chemical element. In gamma decay, the nucleus liberates internal energy by emitting a photon—a gamma ray. This decay does not modify the chemical properties of the atom.

## The Nucleus



## Chart of the Nucleides

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



## Applications

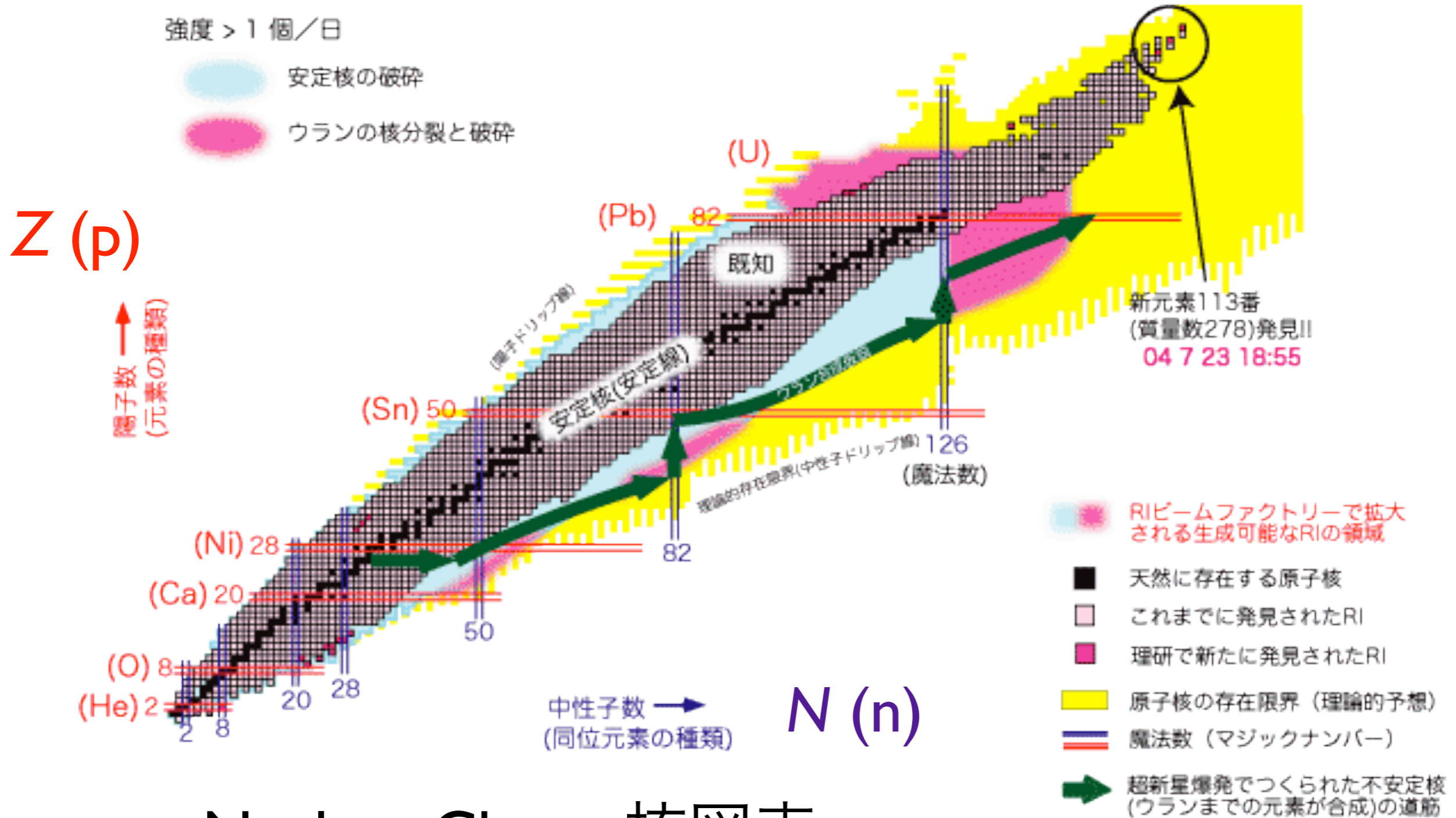
- Radioactive Dating:** Recently discovered radioactive isotopes such as  $^{14}\text{C}$  are used to date objects that were once living, such as wood. The example here is a study of pollen found at the site, indicating that the tombing was built nearly 4,000 years ago.
- Smoke Detectors:** Many smoke detectors use a small amount of the alpha emitter  $^{241}\text{Am}$  to ionize the air. Smoke entering the detector reduces the current and sets off the alarm.
- Nuclear Medicine:** Radioactive isotopes such as  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{131}\text{I}$ , and  $^{18}\text{F}$  are commonly used in the diagnosis and treatment of disease. Nuclear medicine such as  $^{131}\text{I}$  is used in thyroid hormone therapy (HT) to prevent spread of breast cancer.
- Space Exploration:** Exposure and alpha particles in specially designed detectors placed in Martian soils. On Earth, nuclear reactions are used to supply energy from geothermal sources or as an alternative.
- Nuclear Reactors:** Nuclear reactions on the fission of  $^{235}\text{U}$  or  $^{239}\text{Pu}$  nuclei to produce electric power. Reactors will have other nuclear applications generate radioactive waste, depend of the way to a subject of current research.
- Magnetic Resonance Imaging:** Magnetic Resonance Imaging (MRI) utilizes an external magnetic field to excite protons in the body. The technique accurately maps the density of hydrogen to produce three-dimensional images of the human body.

www.CPEPweb.org





RIKEN

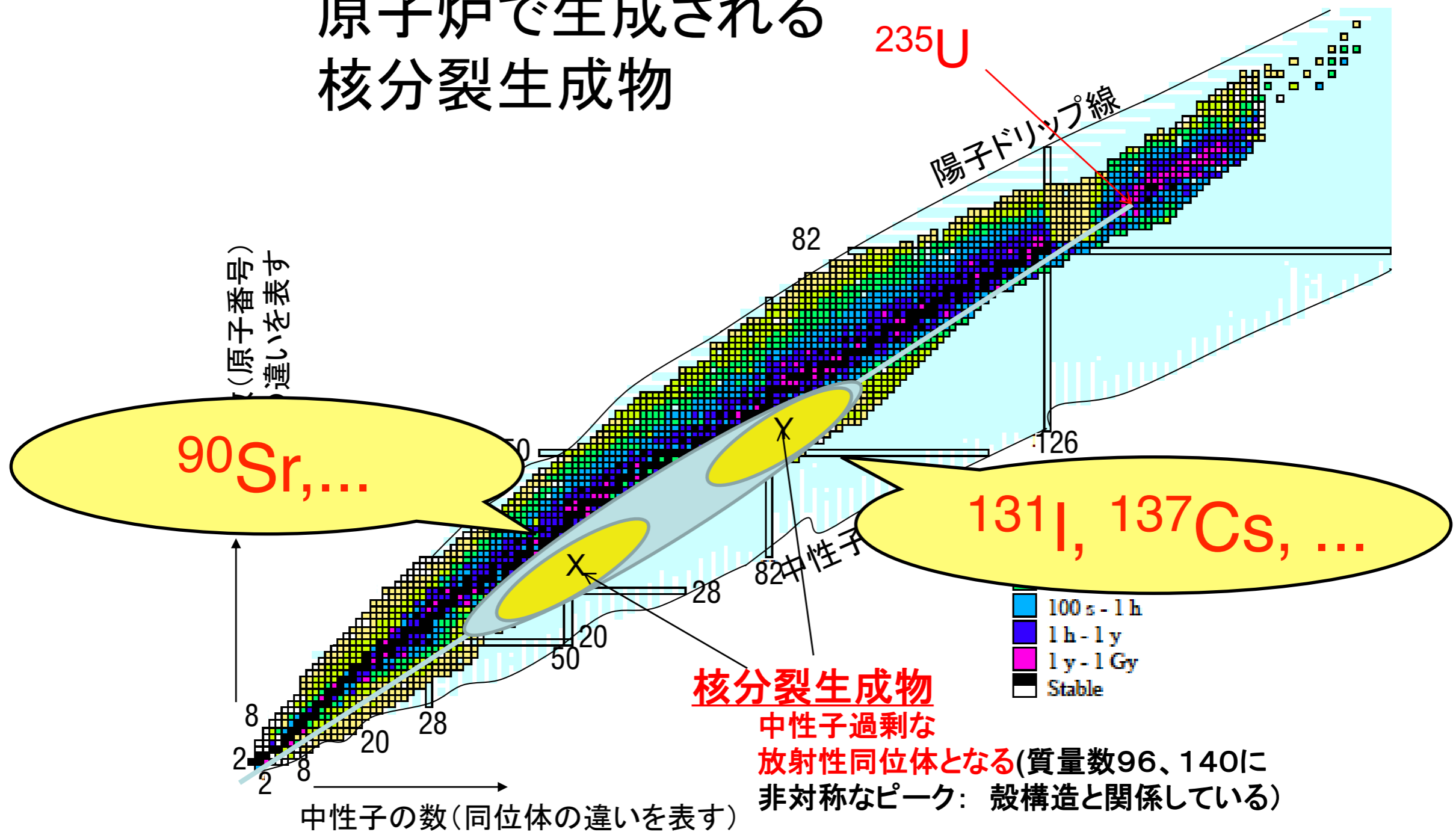


Nuclear Chart 核図表

# 原子核物理学

## Nuclear Physics

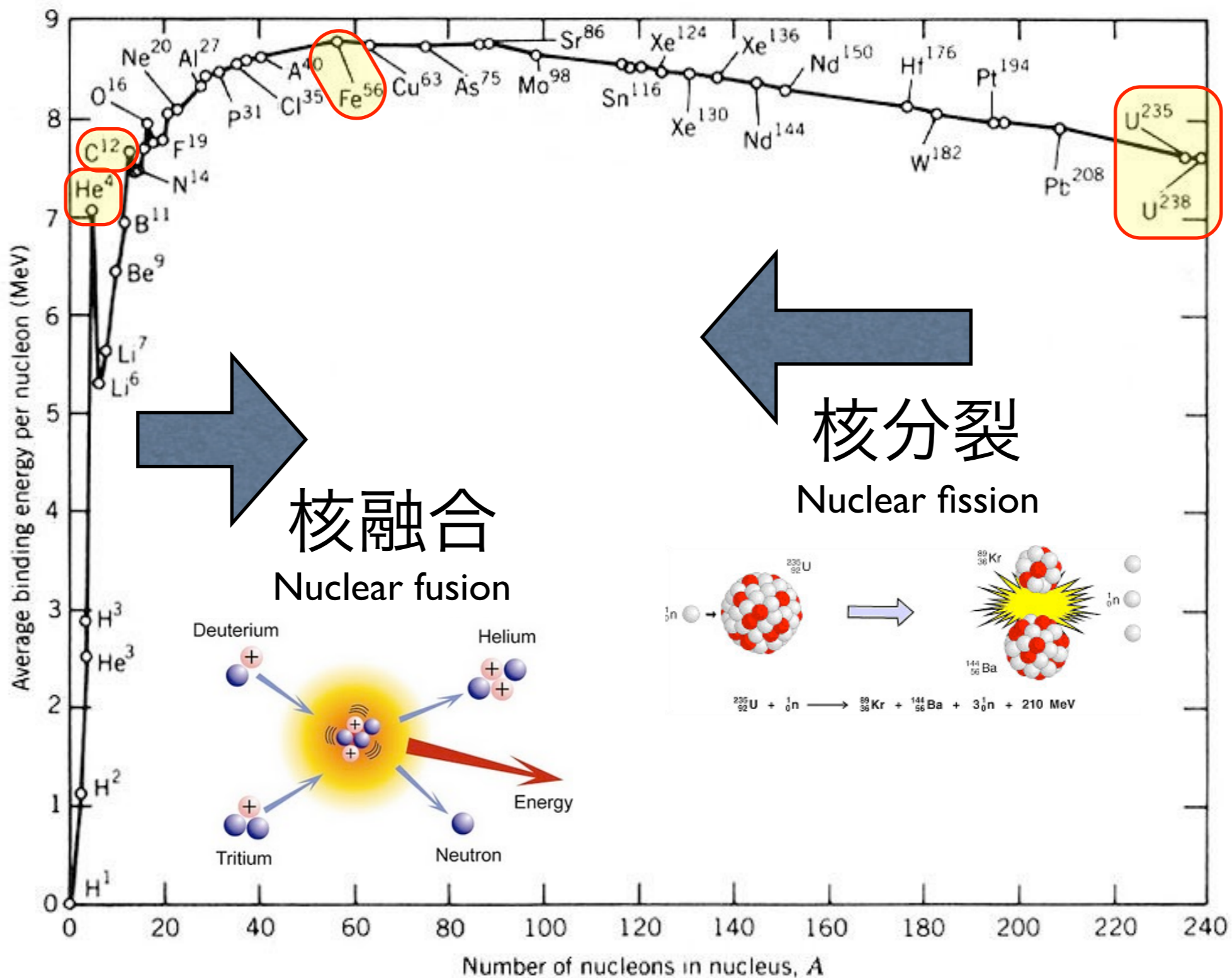
原子炉で生成される  
核分裂生成物



Nuclear Chart 核図表

# 最も安定な原子核は？

核子あたりの結合エネルギー (MeV)



# Weizsäcker-Bethe の (半経験的) 質量公式

$$M(Z, N) = Z M_p + N M_n - E_B / c^2$$

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

## 液滴モデル

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

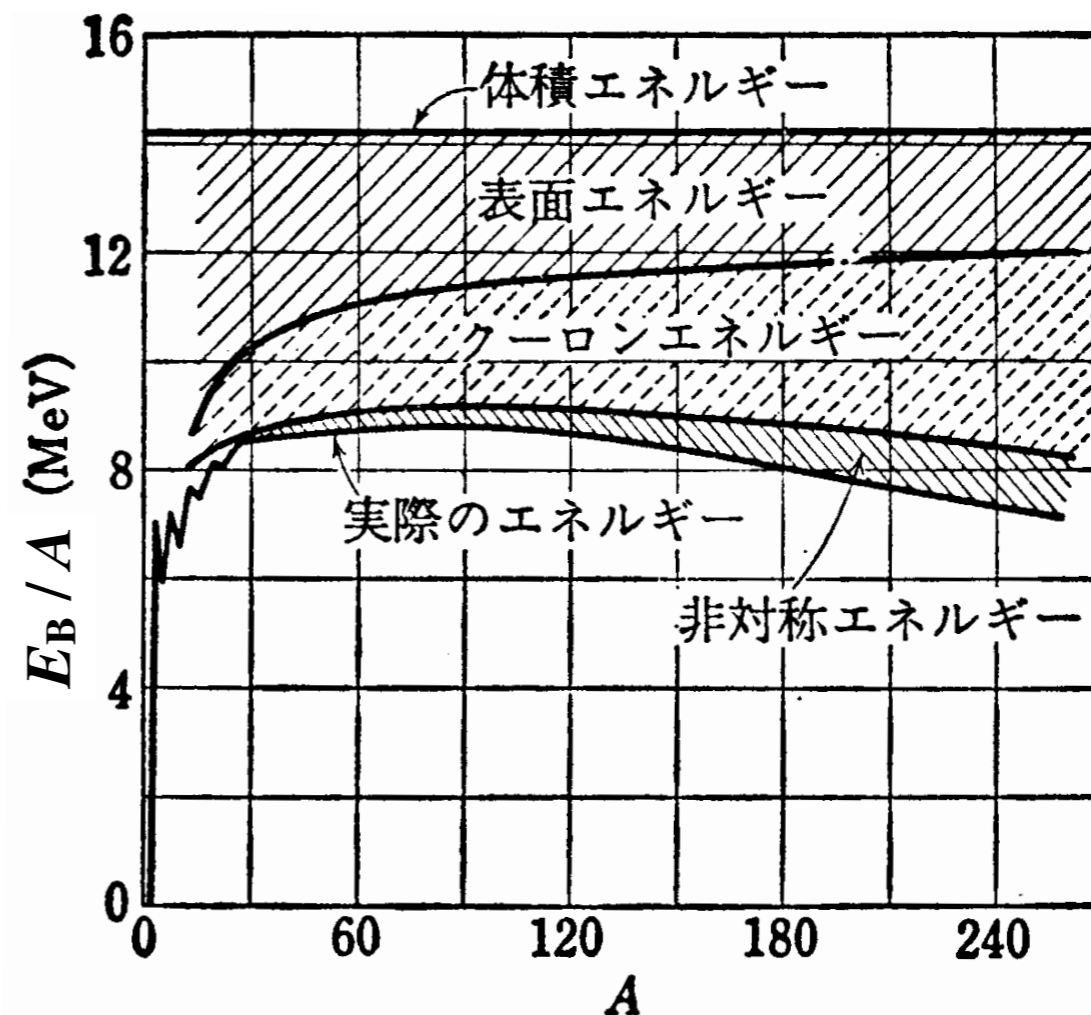
体積エネルギー

クーロンエネルギー

対称エネルギー

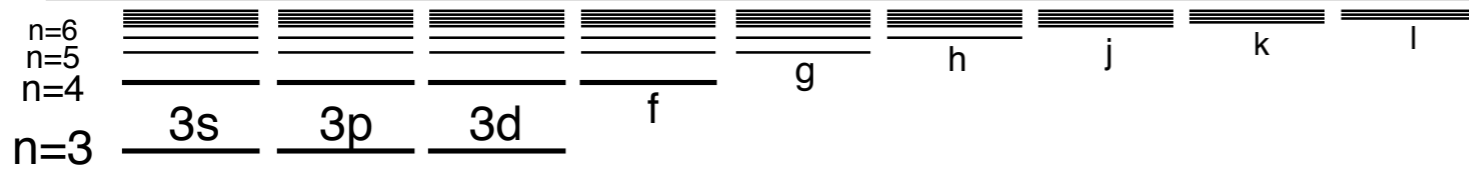
対エネルギー

表面エネルギー



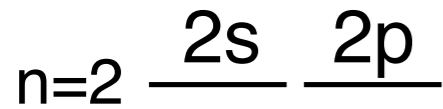
# 原子のエネルギー準位

連続状態 continuum



束縛状態 bound states

離散的エネルギー準位 discrete energy levels



$$-E_B = -hc R_\infty \frac{Z^2}{n^2}$$

$R_\infty$  : リュードベリ定数

$$\hbar \equiv \frac{h}{2\pi}, \quad \alpha \equiv \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} \approx \frac{1}{137}$$

$h$  : プランク定数

$\alpha$  : 微細構造定数

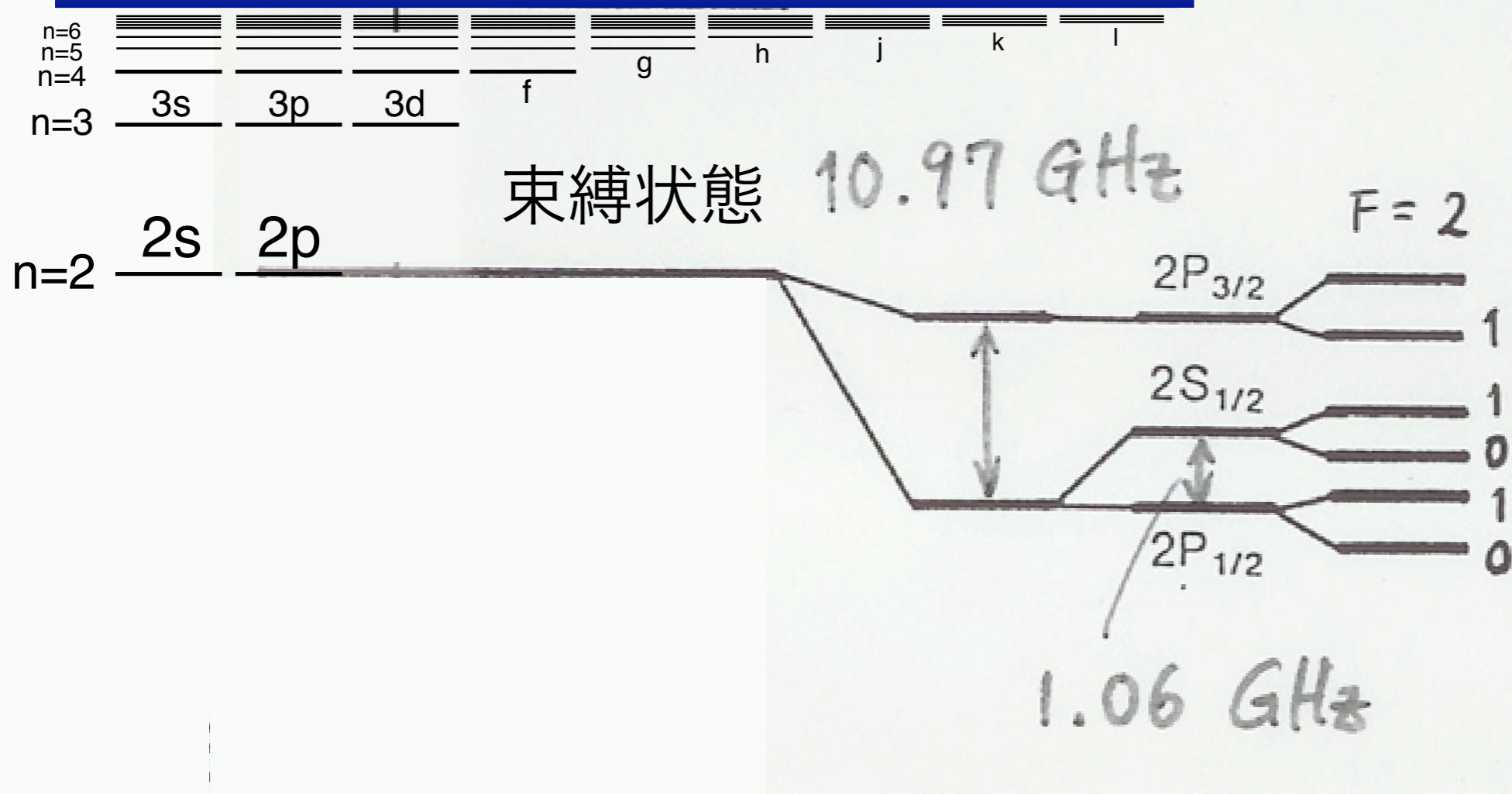
(無次元量)

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

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

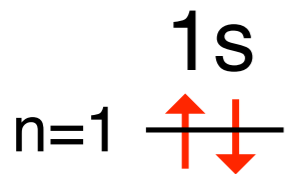
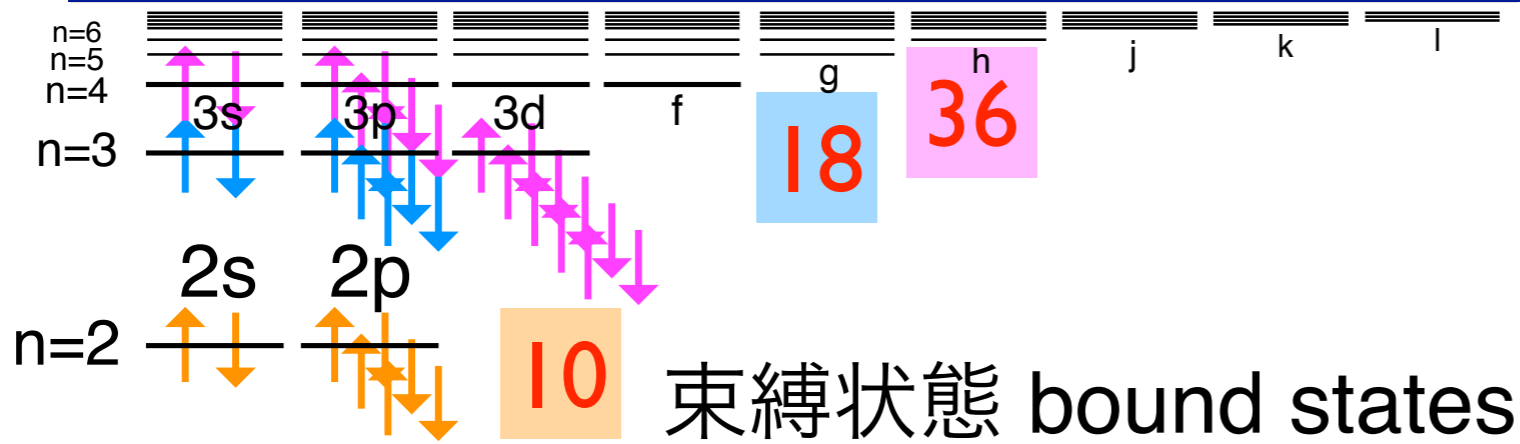
$$-E_B = -\frac{1}{2} m_e c^2 \alpha^2 \frac{Z^2}{n^2}$$

# 連続状態 continuum



# 原子のエネルギー準位

連続状態 continuum



2

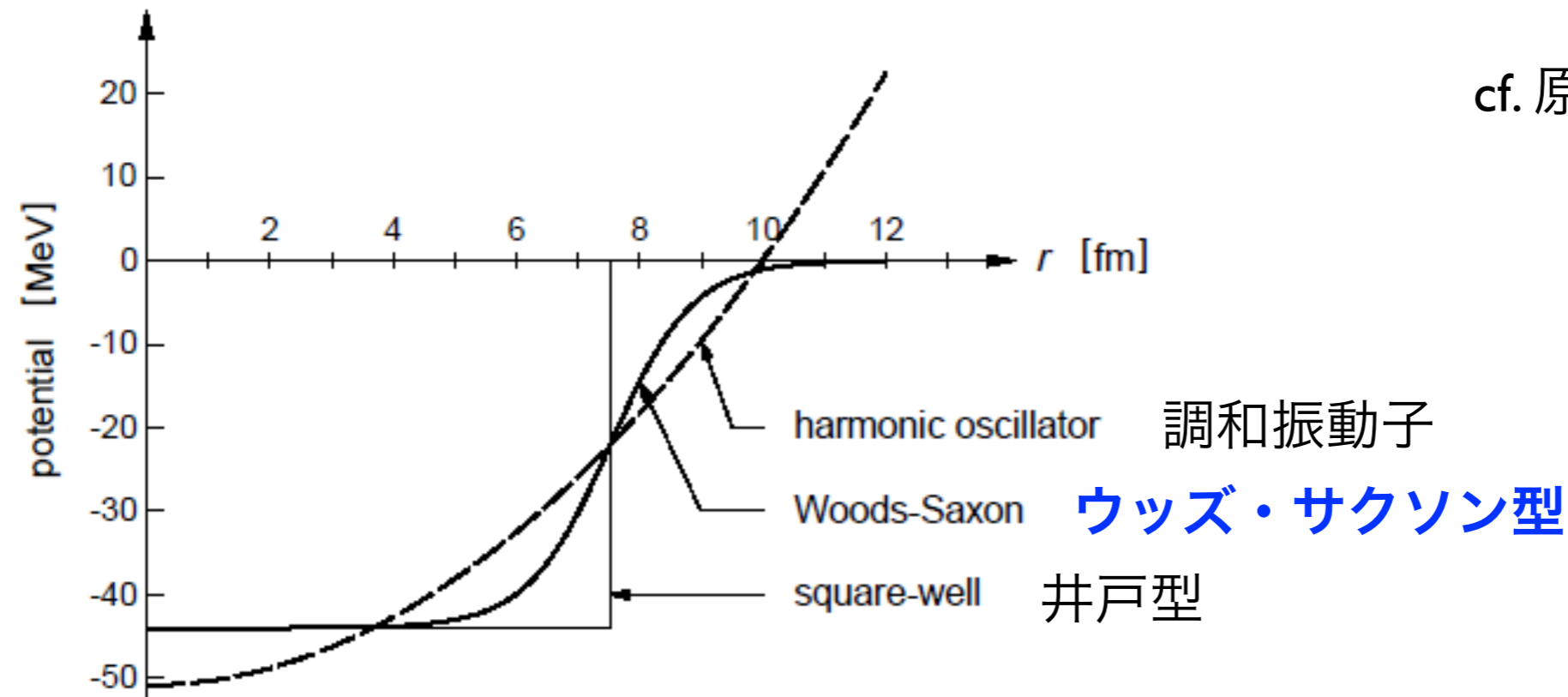
魔法数  
magic number

閉殻  
closed shell

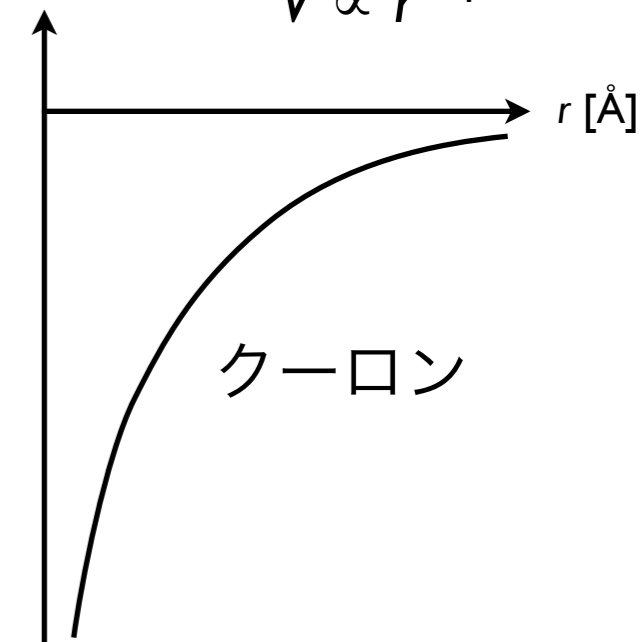
魔法数	電子配置	元素
2	$1s^2$	He
10	$1s^2 2s^2 2p^6$	Ne
18	$[Ne] 3s^2 3p^6$	Ar
36	$[Ar] 4s^2 3d^{10} 4p^6$	Kr
54	$[Kr] 5s^2 4d^{10} 5p^6$	Xe
86	$[Xe] 6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^6$	Rn

稀ガス

# 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)

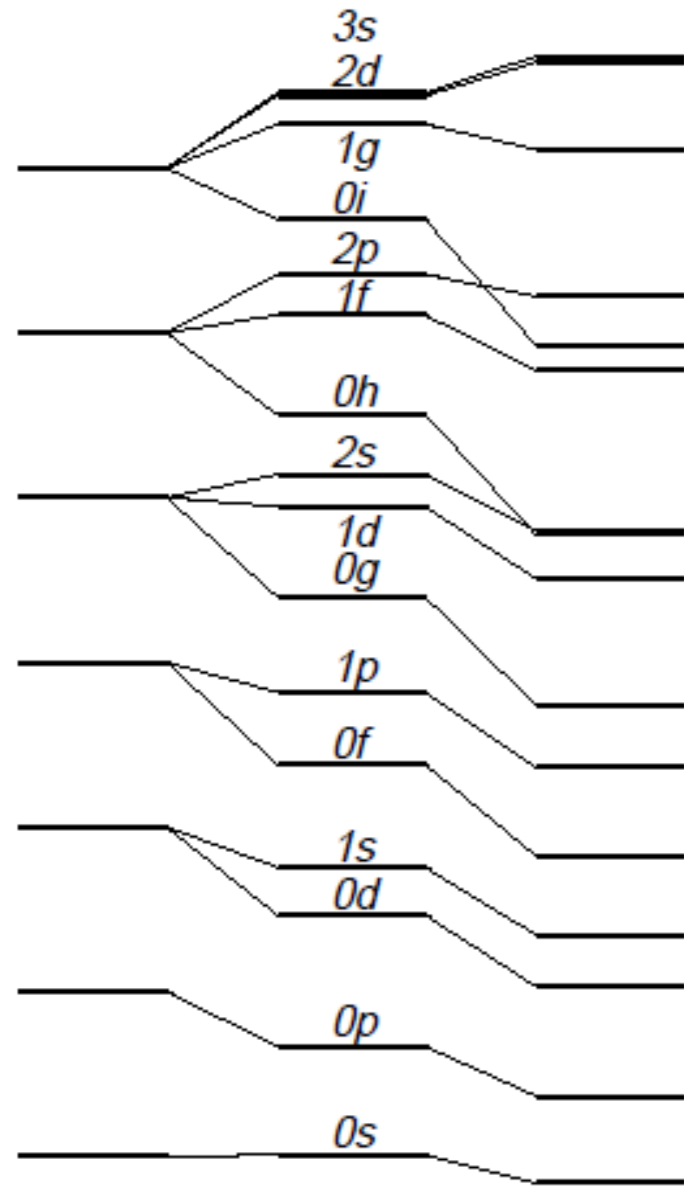
核力 = 「強い相互作用」 “**Strong Interaction**”

力の到達距離は核子のサイズ

$\beta$ 壊変 : 「弱い相互作用」 “**Weak Interaction**”



# 原子核構造の殻模型 Shell model

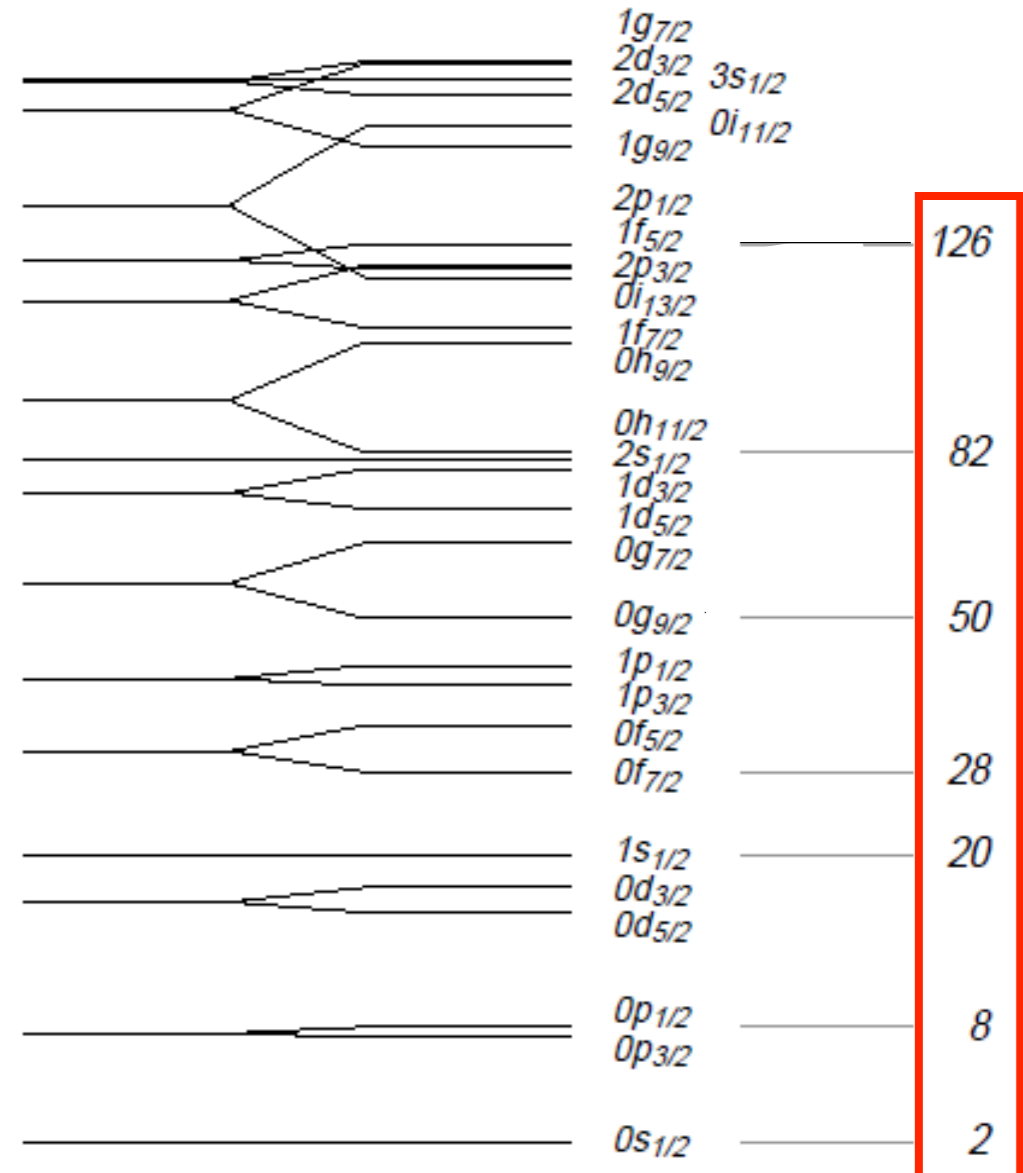


harmonic oscillator    Woods-Saxon    square-well  
 調和振動子    ウッズ・サクソン型    井戸型

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

Woods-Saxon potential

ウッズ・サクソン型ポテンシャル

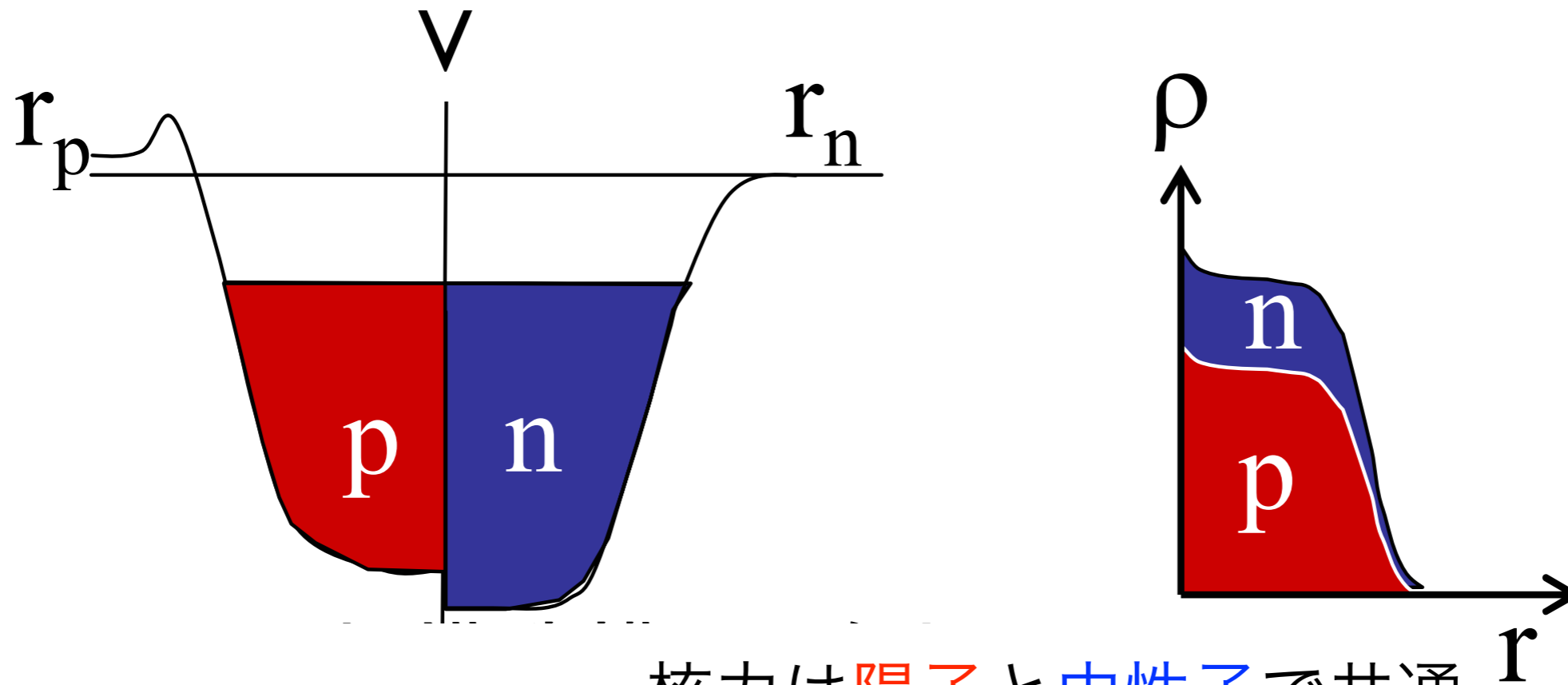


+ LS 相互作用

**魔法数**  
**magic number**

# 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

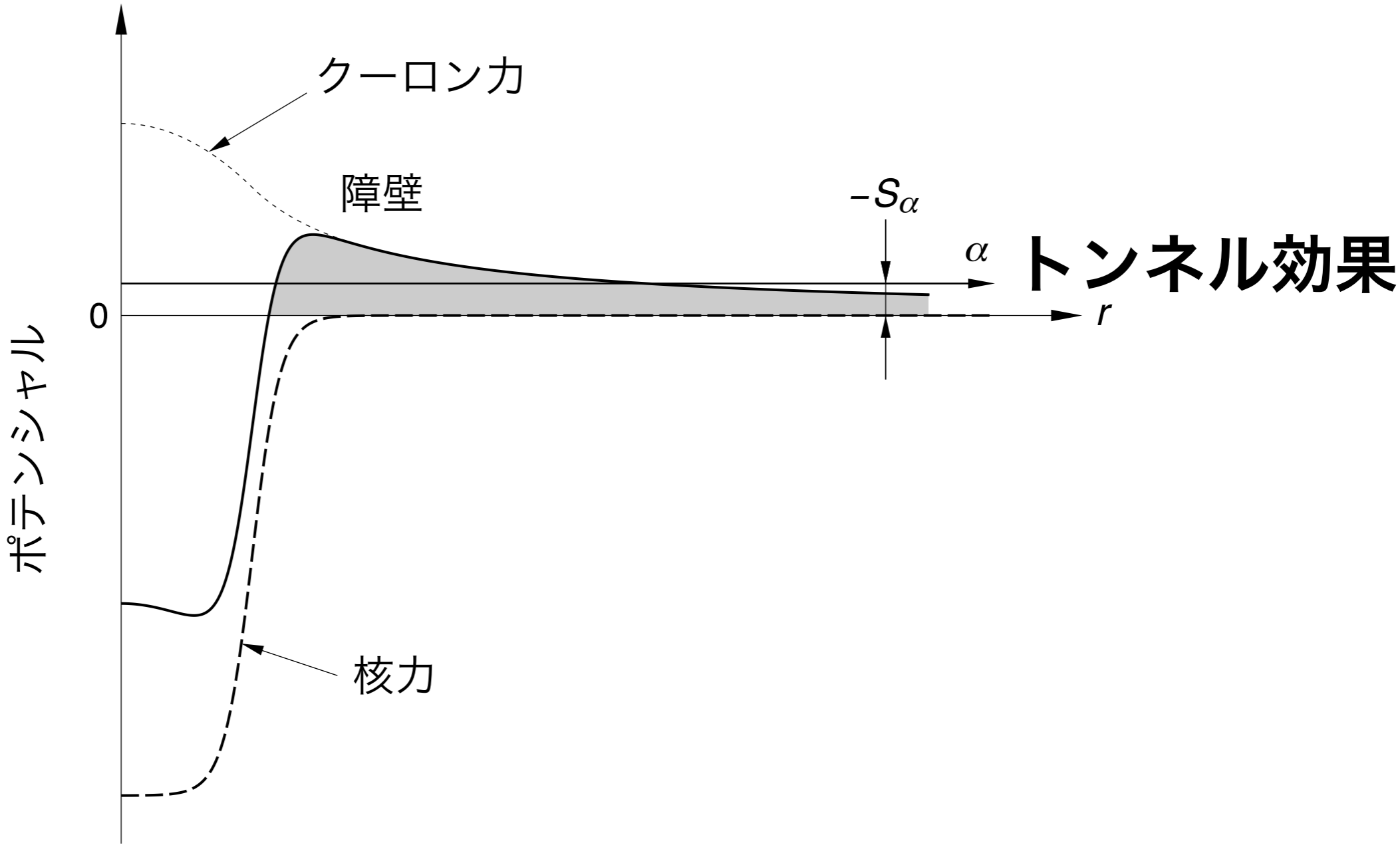
クーロン反発により上昇。  $\propto Z^2 / A^{1/3}$

(特に重い原子核で) 中性子の方が数多く入る。

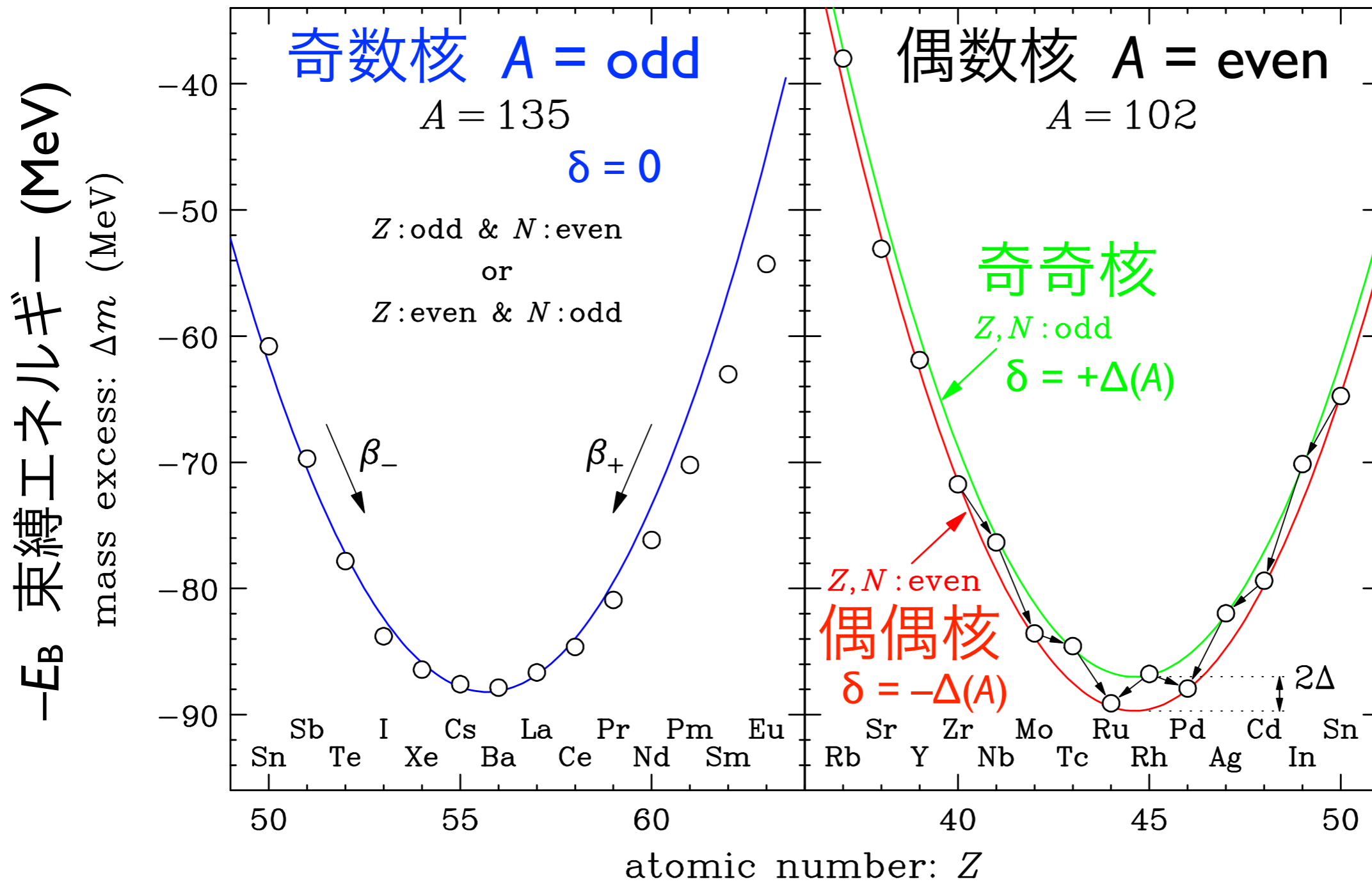
陽子数も中性子数も魔法数となる (二重閉殻、double magic)

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

# $\alpha$ 壊変 (崩壊)



# 原子核束縛エネルギーの偶奇依存性

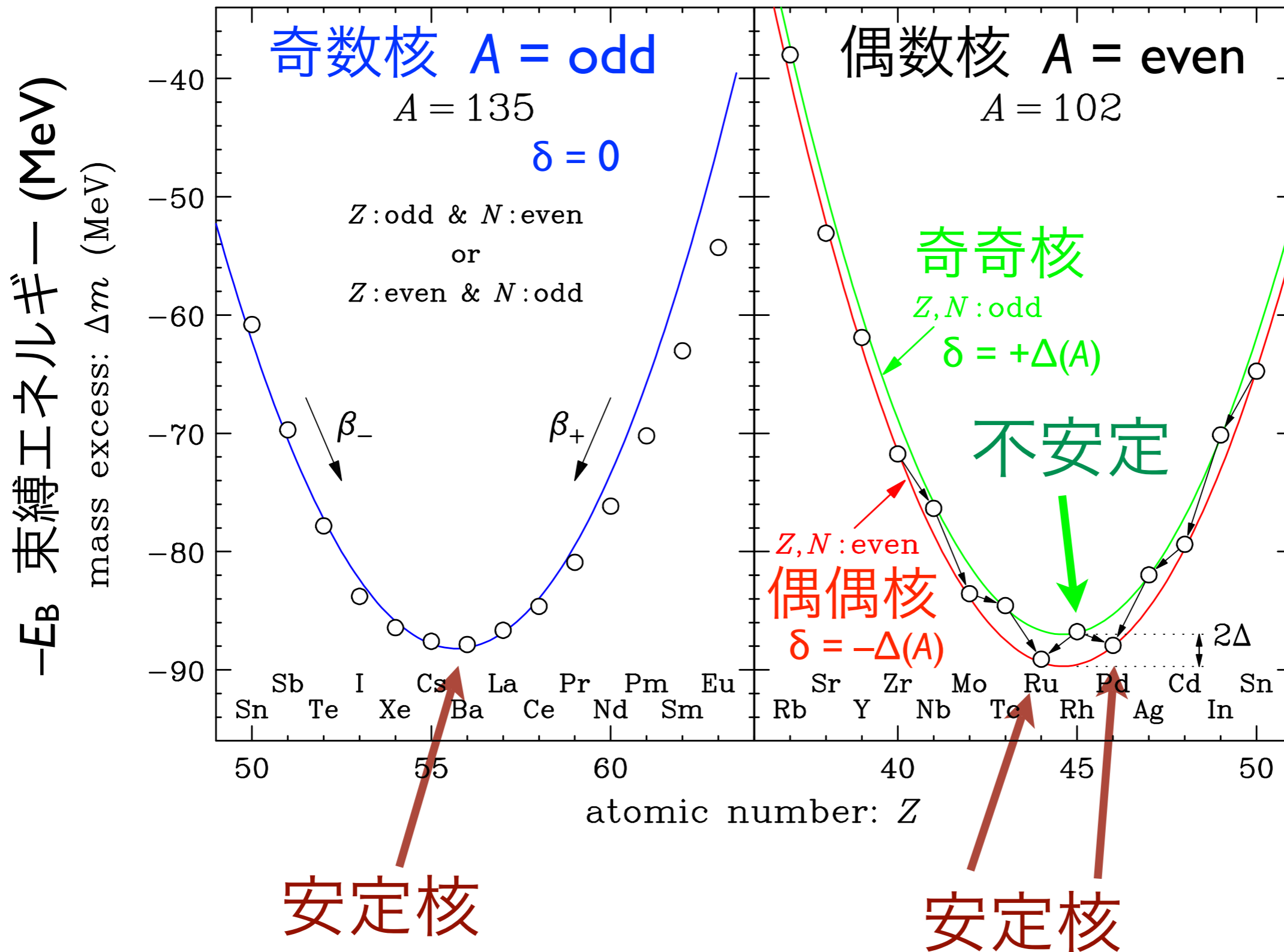


$$-E_B = \dots + a_a (N - Z)^2 / A + \delta$$

対称エネルギー

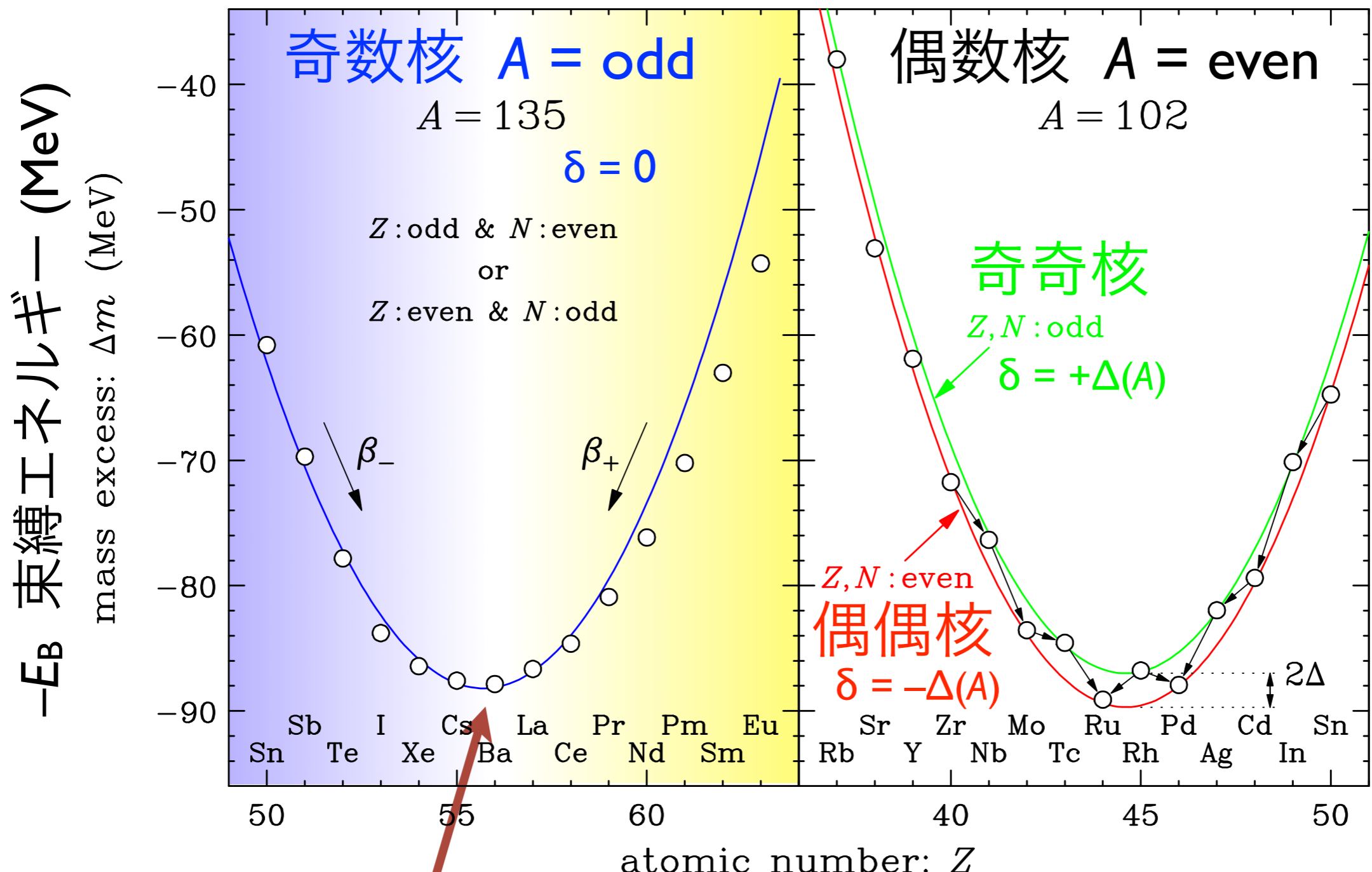
対エネルギー

# 原子核束縛エネルギーの偶奇依存性

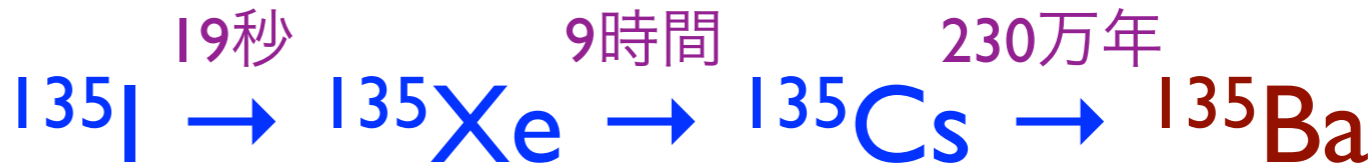


安定核の 60% は偶偶核。安定な奇奇核は 4 つのみ。  ${}^2_1\text{D}_1$   ${}^6_3\text{Li}_3$   ${}^{10}_5\text{Be}_5$   ${}^{14}_7\text{N}_7$

# 原子核束縛エネルギーの偶奇依存性



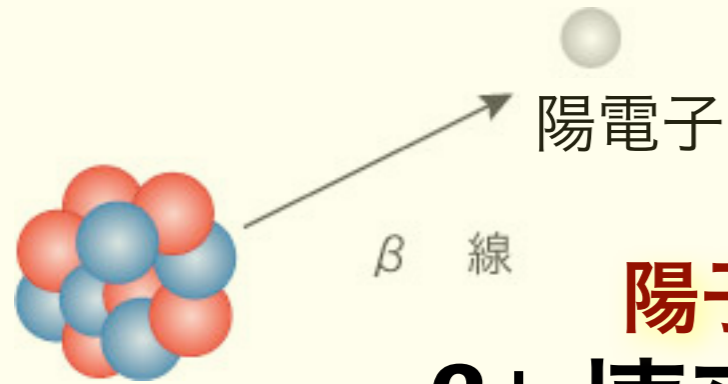
安定核



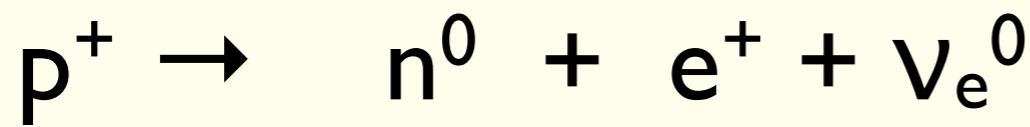
原子炉内では  $^{135}\text{Xe} + n \rightarrow ^{136}\text{Xe}$  (中性子捕獲反応)

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

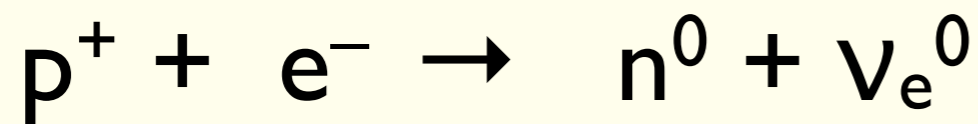
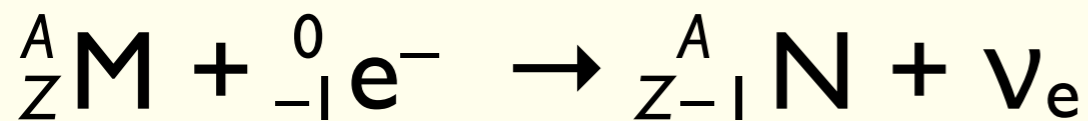
100 keV ~ MeV



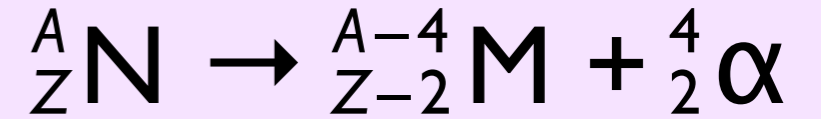
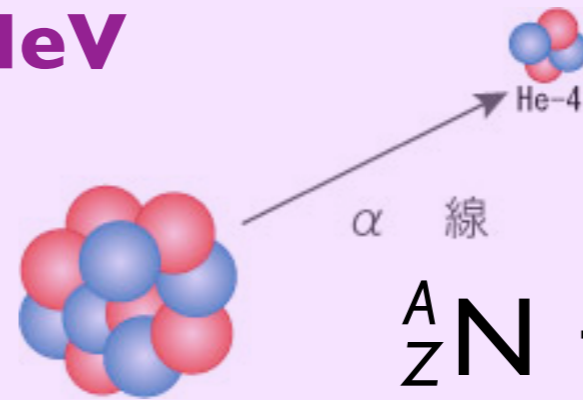
陽子過剩核  
 **$\beta^+$  壞變 (崩壞)**



**軌道電子捕獲 (EC)**

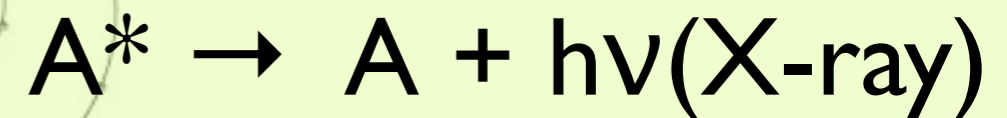
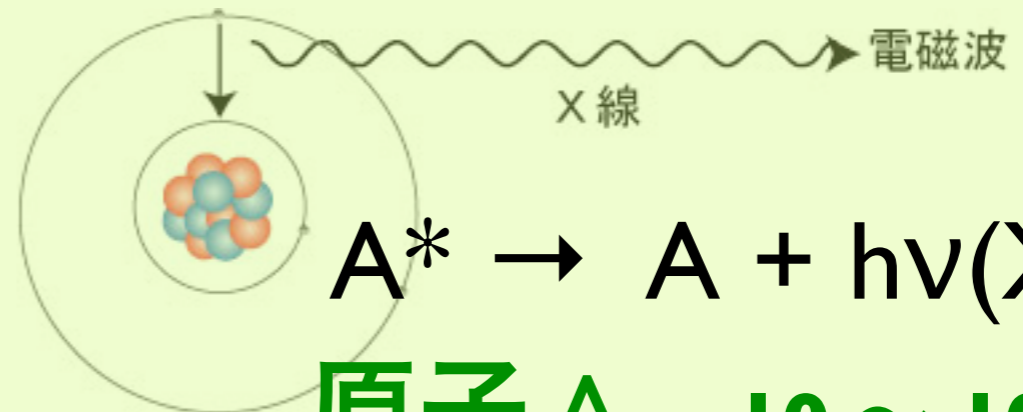
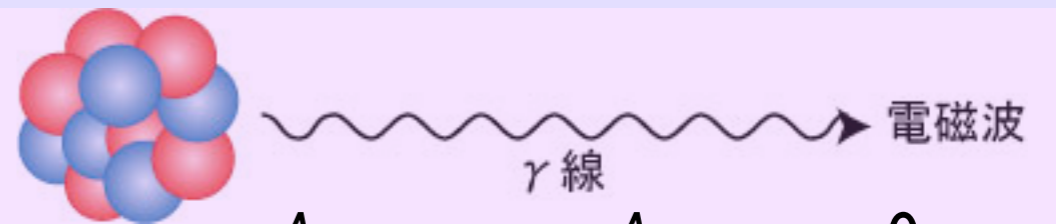
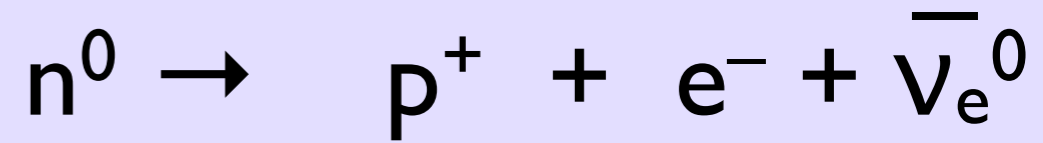
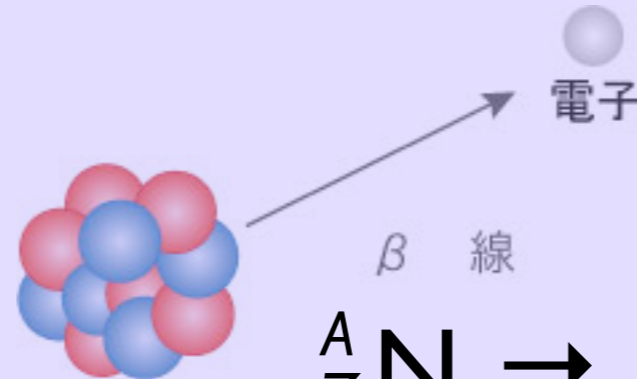


原子核 N



中性子過剩核

**$\beta^-$  壞變 (崩壞)**



原子 A 10 ~ 100 keV

# 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	$Z, N$	${}^A_Z N_N$	${}^{Am_1}_Z N_N^{(*)}$	${}^{Am_2}_Z N_N^{(*)}$

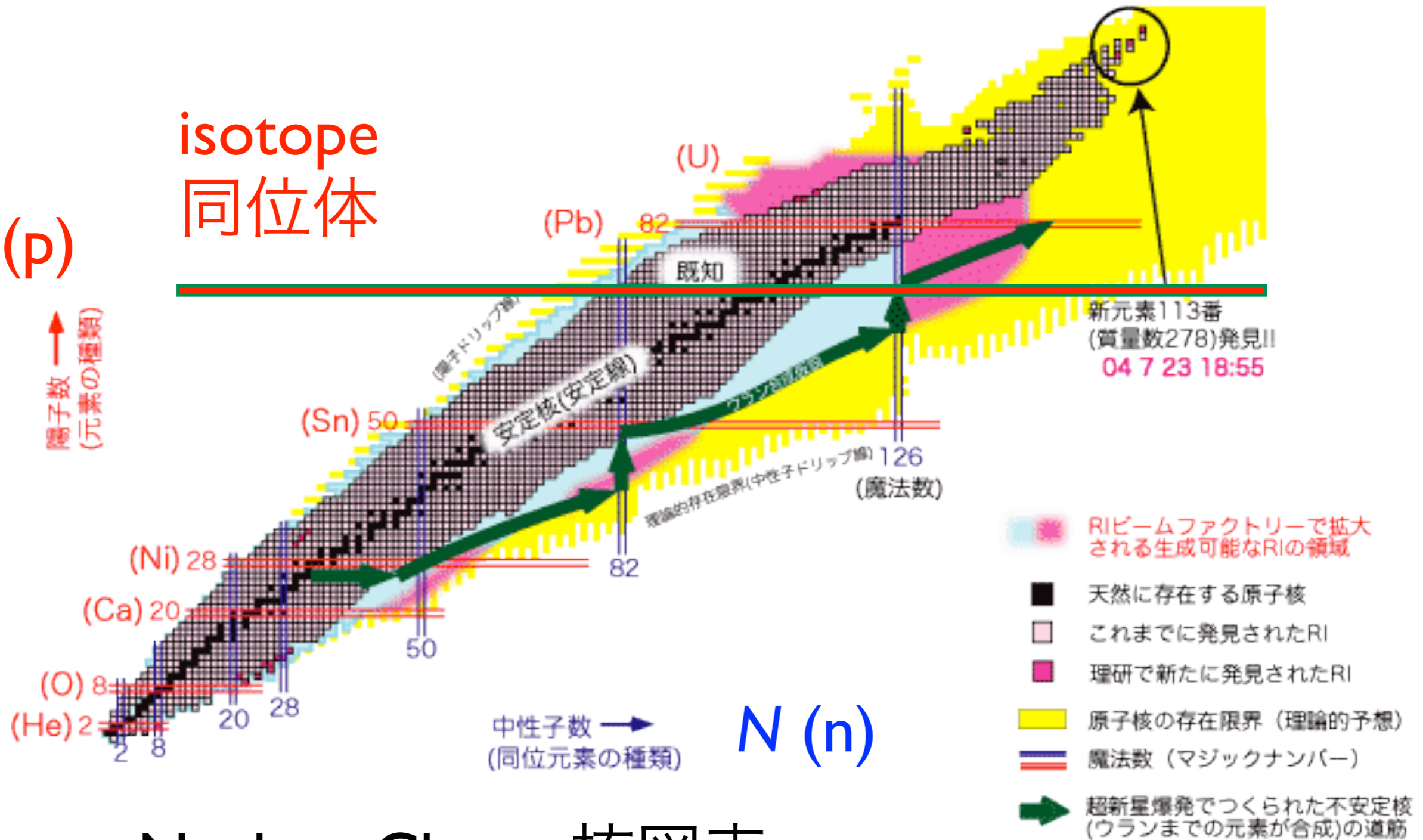


# 原子核物理学

## Nuclear Physics

Z (p)

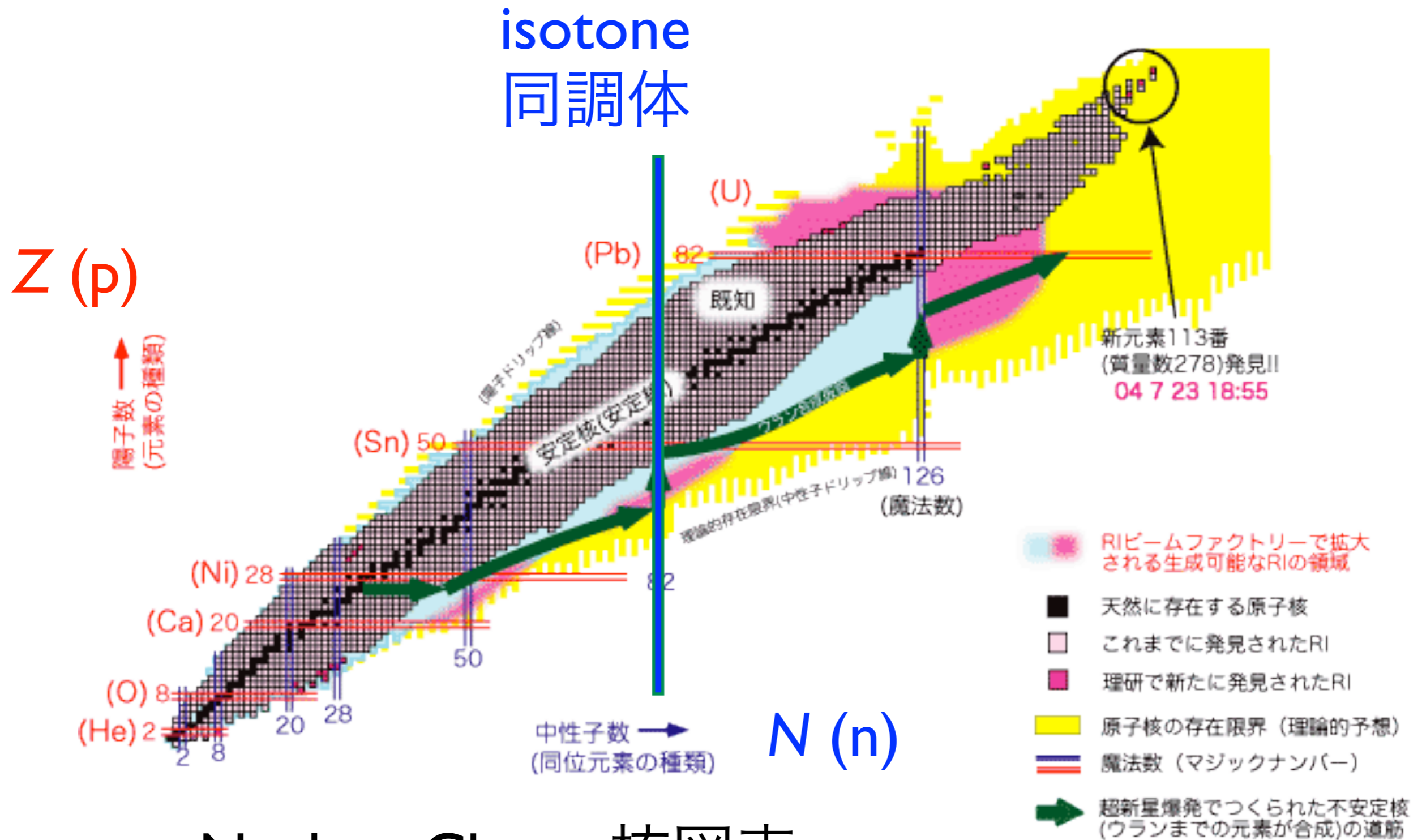
isotope  
同位体



Nuclear Chart 核図表

# 原子核物理学

## Nuclear Physics



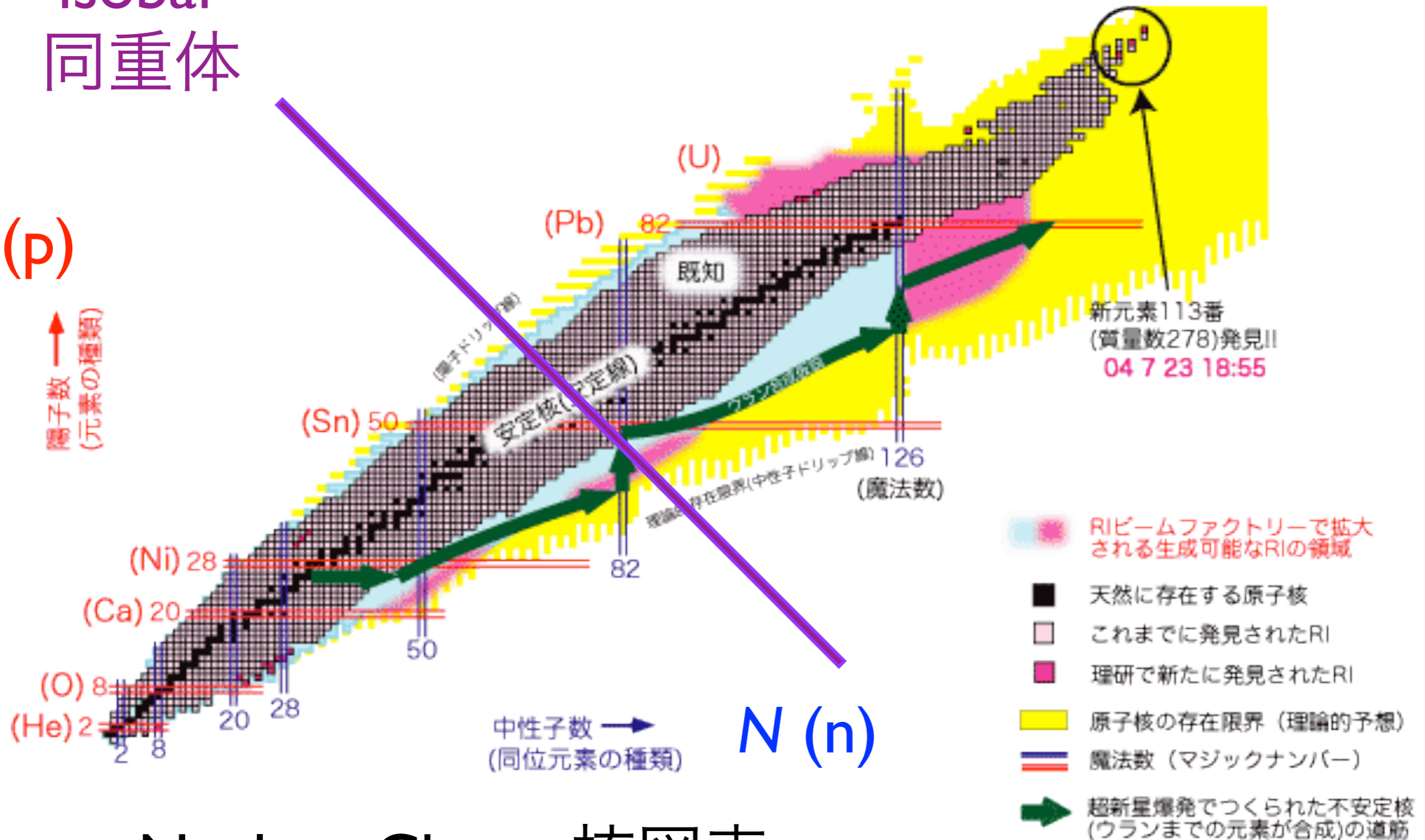
Nuclear Chart 核図表

# 原子核物理学

## Nuclear Physics

isobar  
同重体

Z (p)



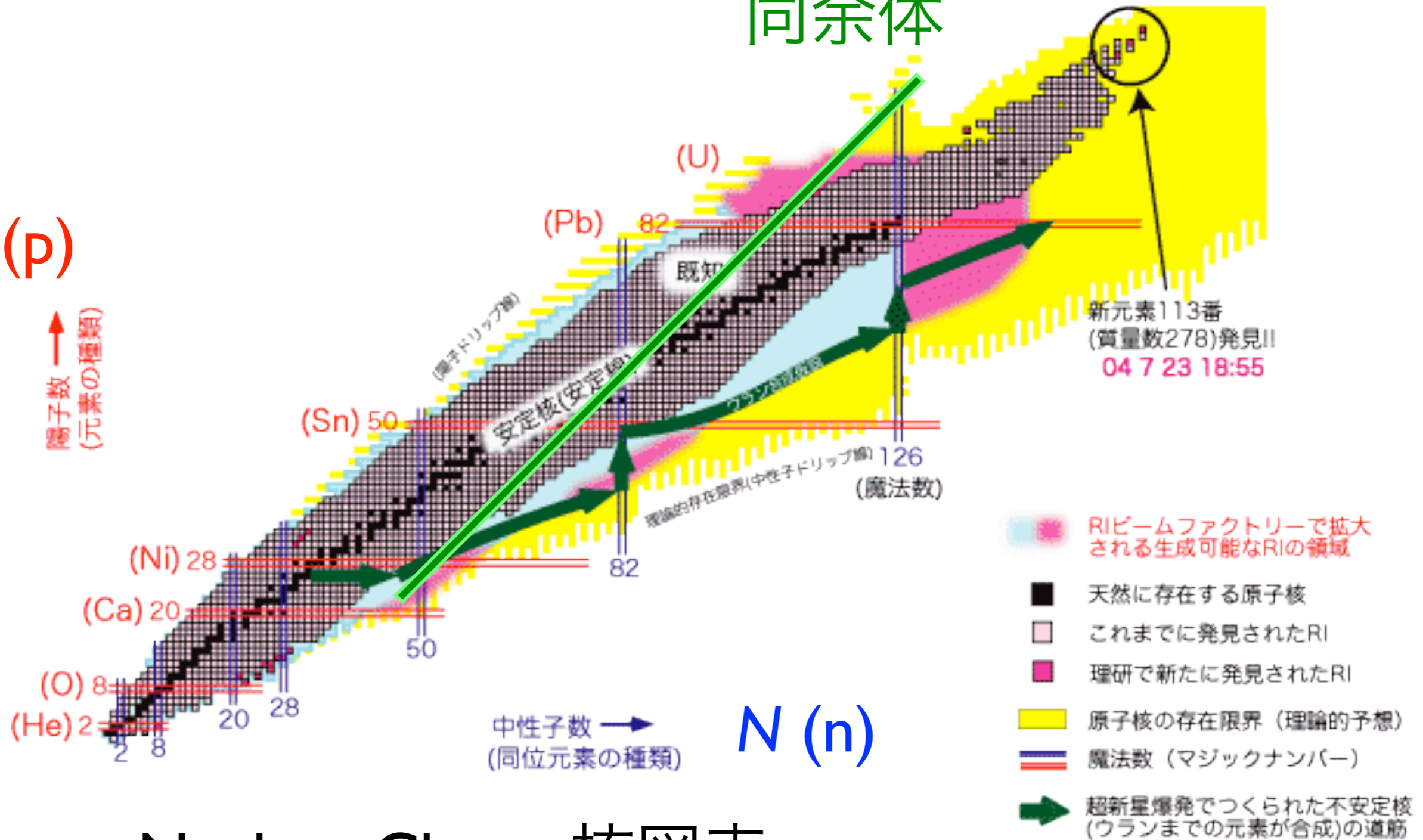
Nuclear Chart 核図表

# 原子核物理学

## Nuclear Physics

isodiapher  
同余体

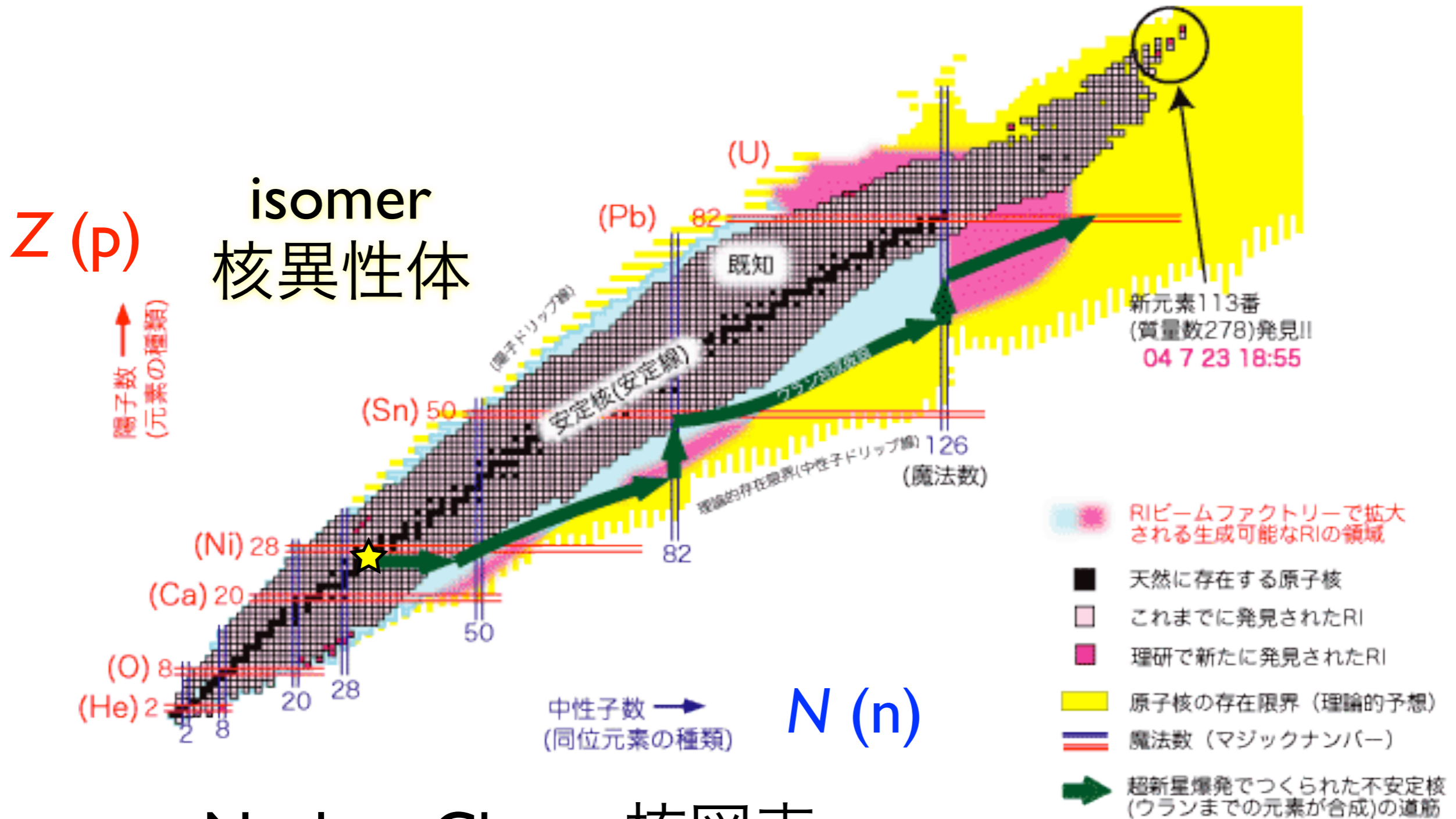
Z (p)



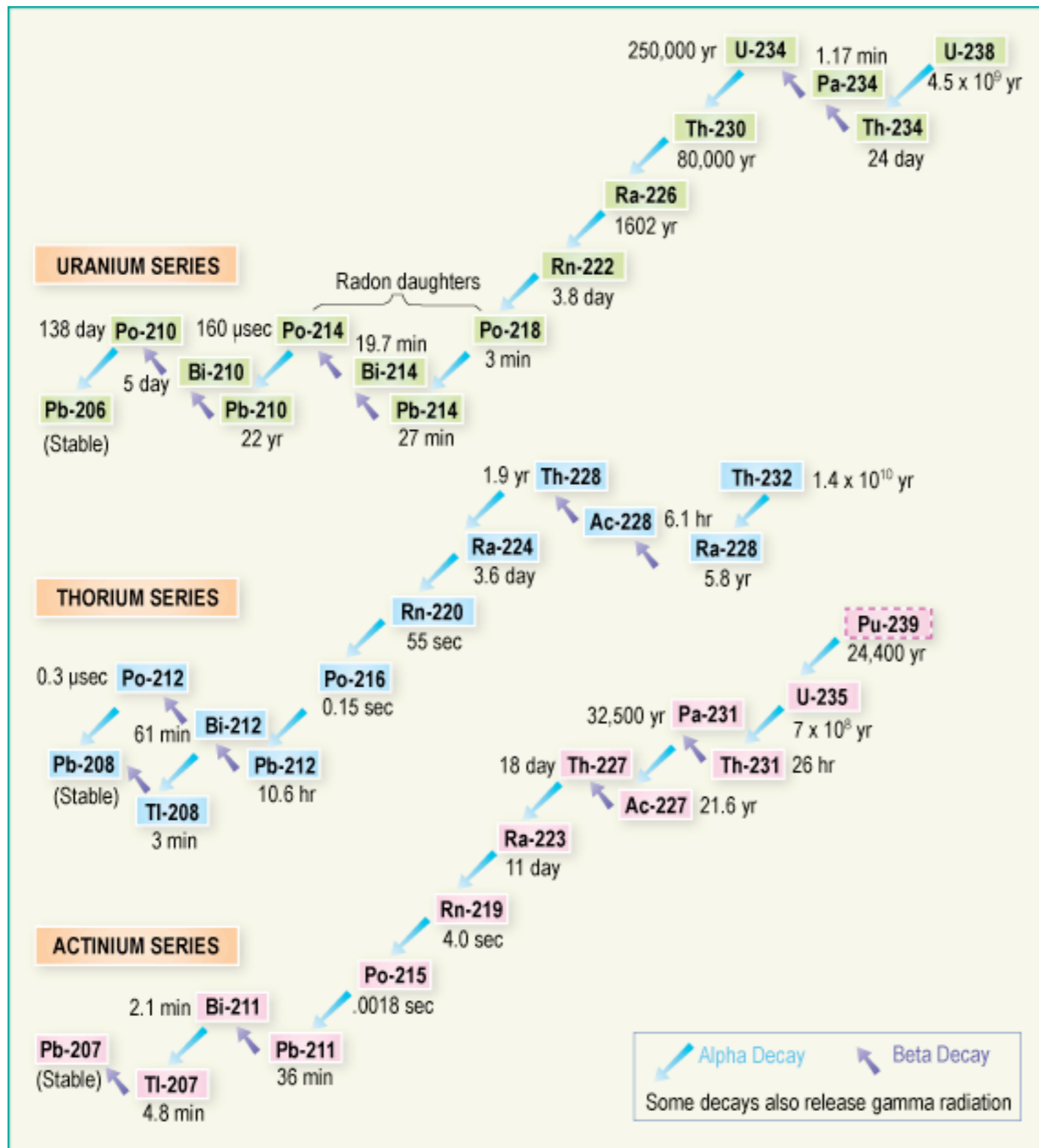
Nuclear Chart 核図表

# 原子核物理学

## Nuclear Physics



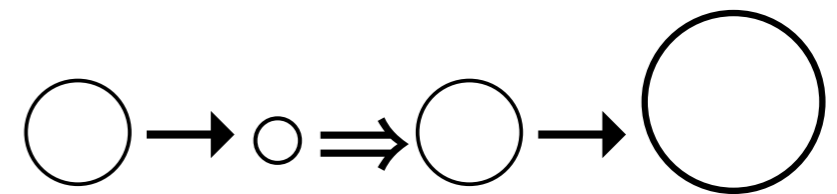
Nuclear Chart 核図表



# 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



# 原子力工学

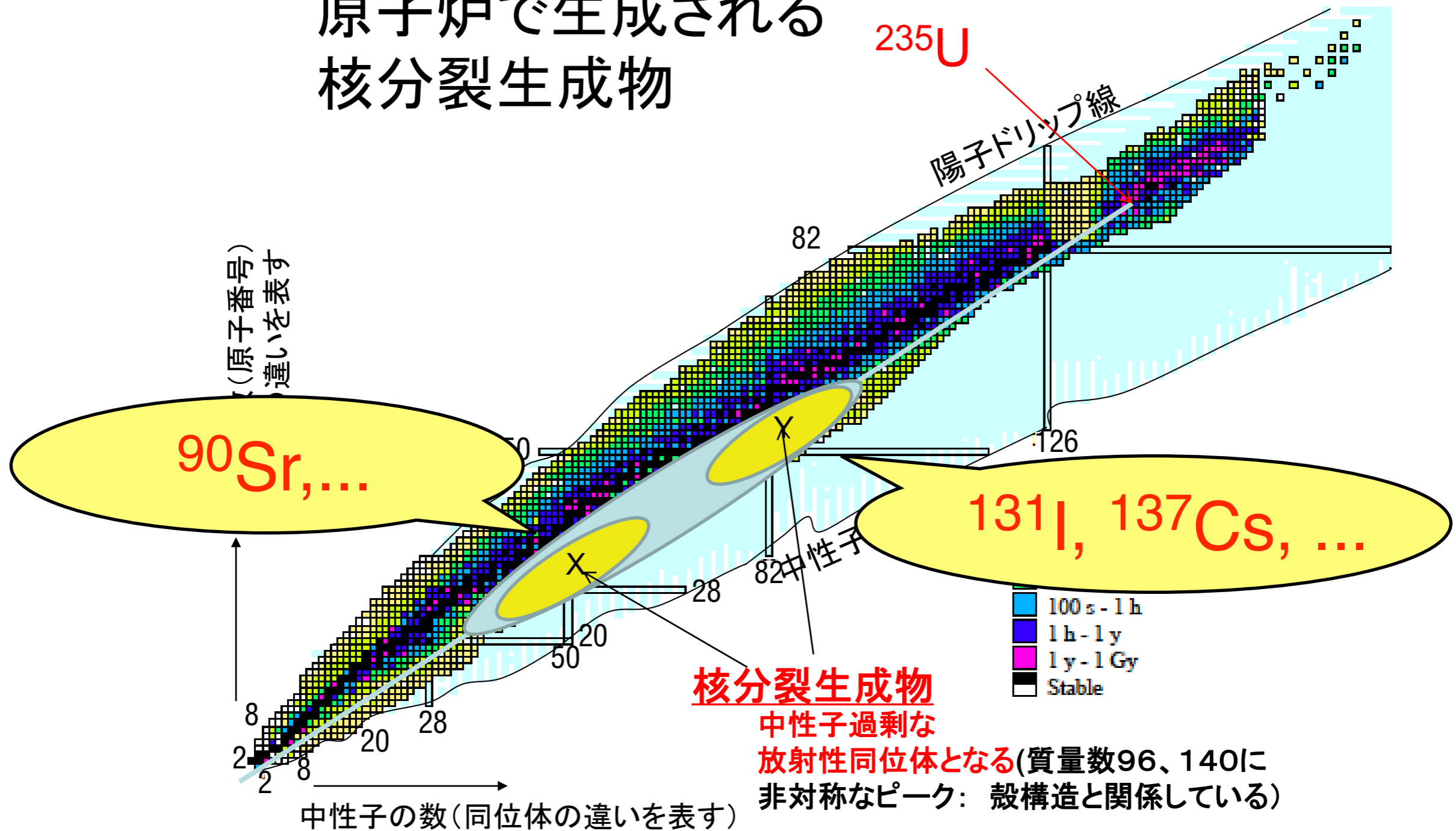
# 核分裂

Nuclear fission

# 原子核物理学

Nuclear Physics

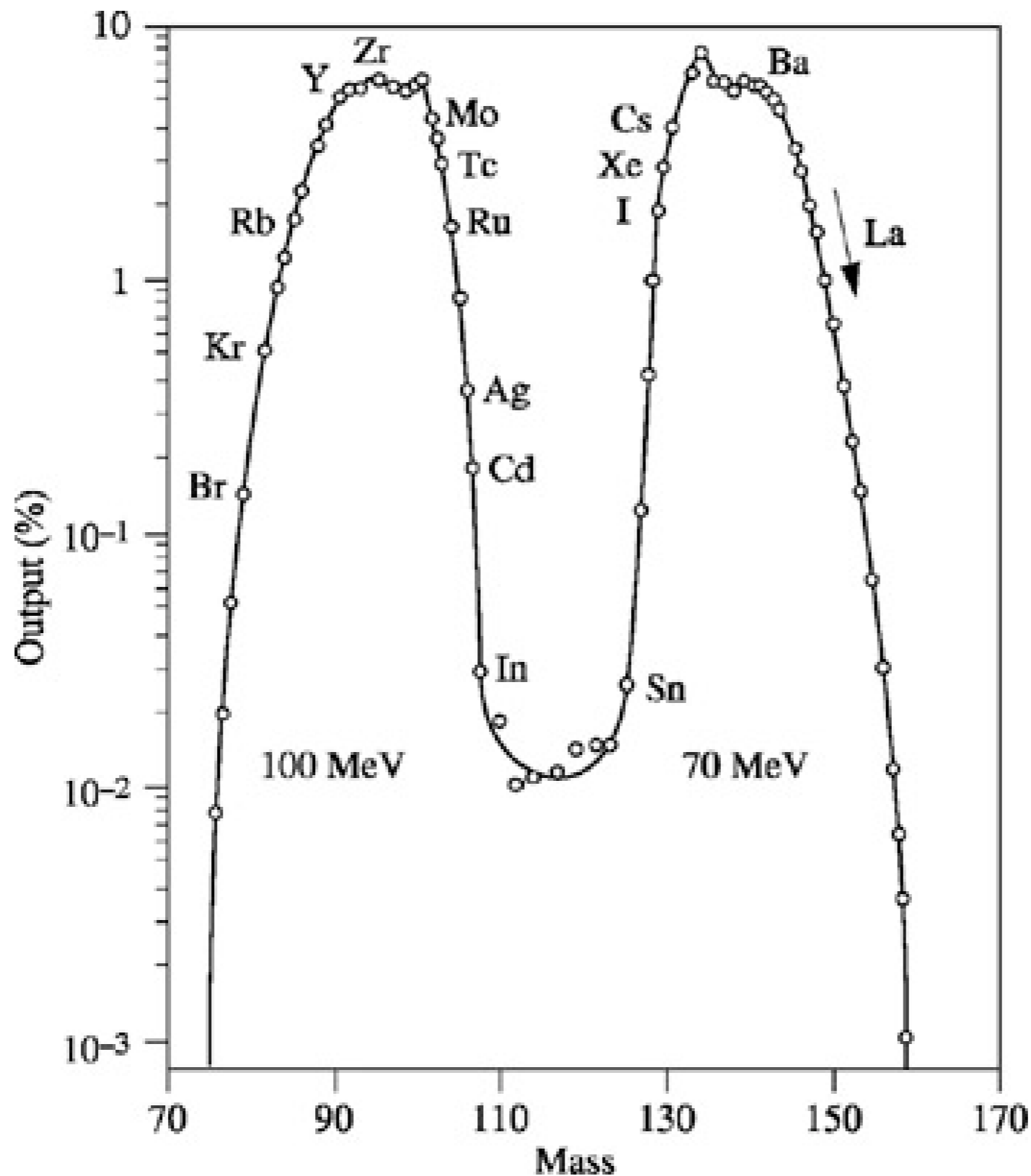
原子炉で生成される  
核分裂生成物



Nuclear Chart 核図表



生成率 [%] (対数目盛り)



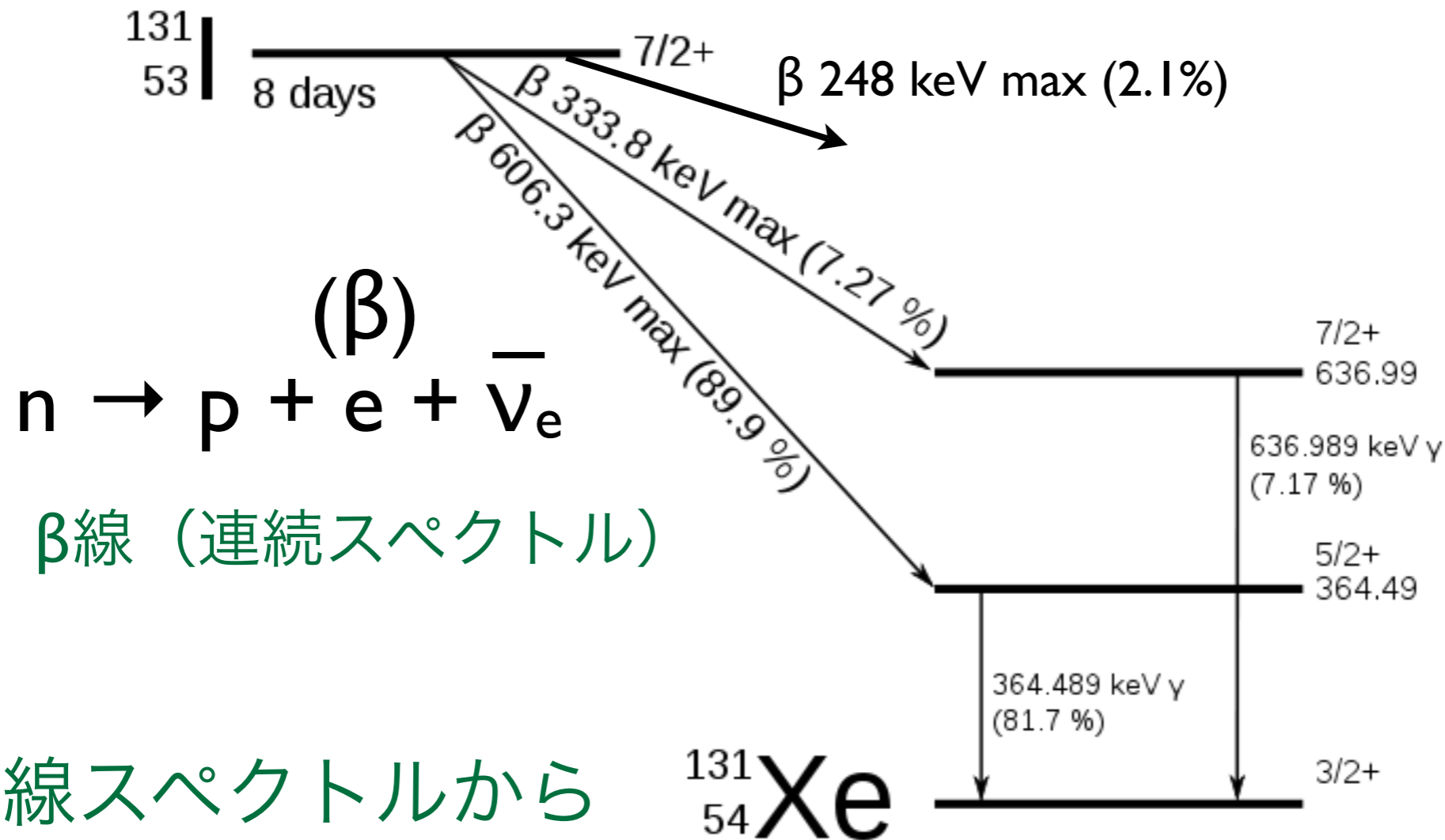
非対称分裂

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くていい(雲散霧消)。

$^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{99}\text{Mo}$ ....

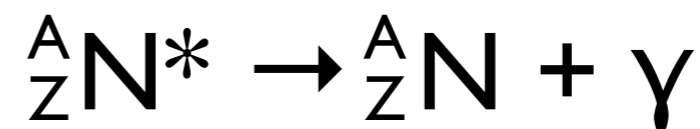
# 中性子過剰核は $\beta$ 壊変 (崩壊) を繰り返しながら

安定核まで  
たどり着く。



$\beta$ 線スペクトルから  
核種の同定をするのは  
容易ではない。  
例： $^{90}\text{Sr}$  ( $\gamma$ 線を出さない)

$\gamma$ 線：原子核の脱励起



$\gamma$ 線 (定まったエネルギー)

$\gamma$ 線のスペクトル分析により核種の同定に役立つ。

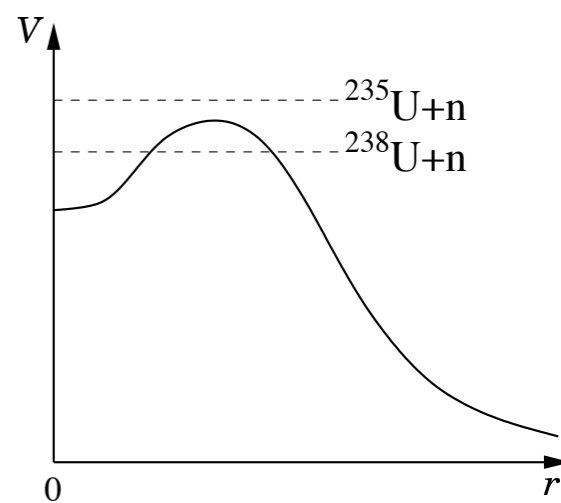
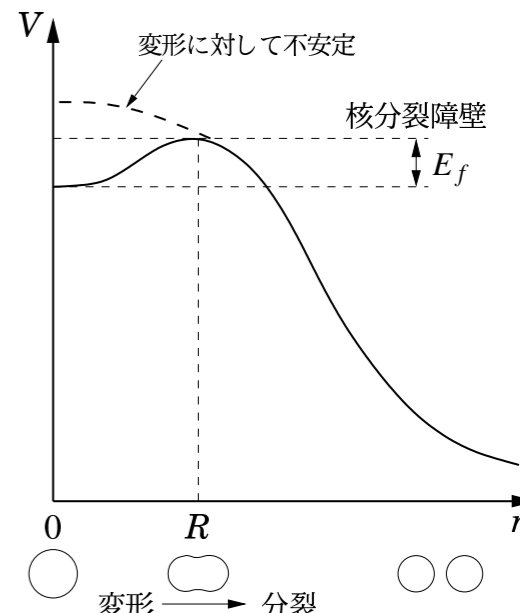
# ウランの核分裂

(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 <sup>neutron capture</sup> 中性子捕獲 によって供給。

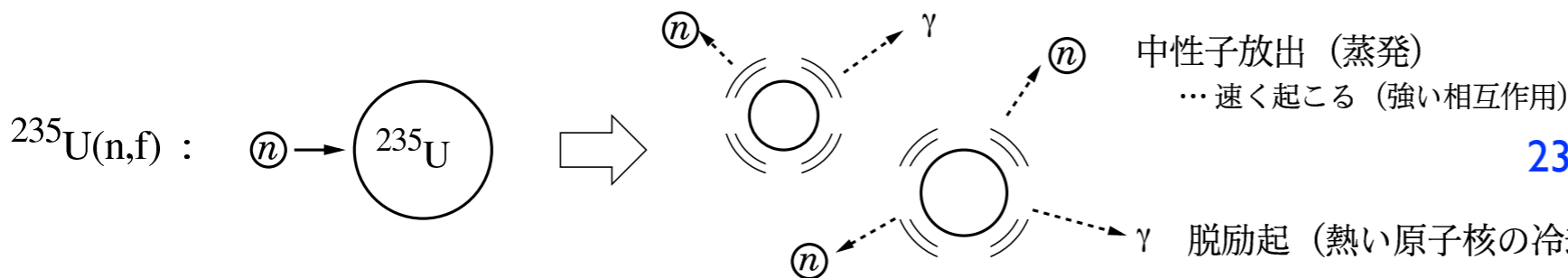
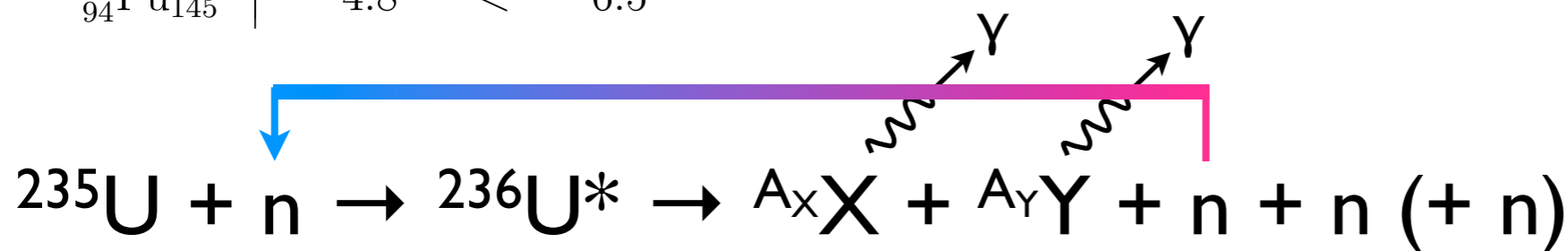
例:  $Q_n = (m[{}^{238}\text{U}] + m[n] - m[{}^{239}\text{U}])c^2 = 4.8 \text{ [MeV]} > 0 \dots$  発熱反応

高次項まで含めて  $E_f$  を計算 ... Bohr & Wheeler

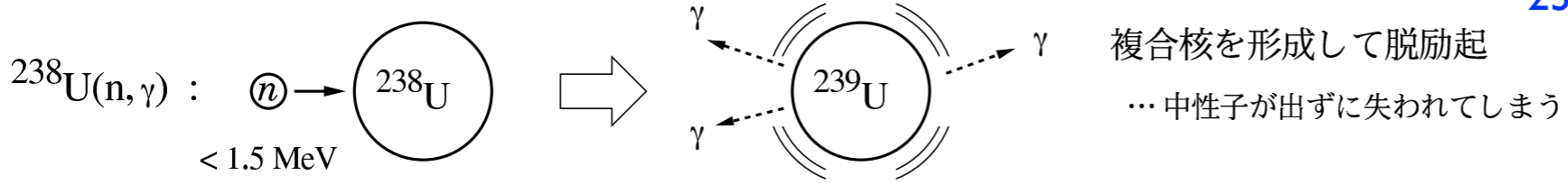


	$E_f$ [MeV]	$Q_n$ [MeV]	
${}^{238}_{92}\text{U}_{146}$ (99.275%)	6.3	> 4.8	... 1.5 MeV 以上の中性子が必要
${}^{235}_{92}\text{U}_{143}$ (0.72%)	5.8	< 6.5	... 0 エネルギー中性子でも分裂
${}^{239}_{94}\text{Pu}_{145}$	4.8	< 6.5	

対エネルギーの違い

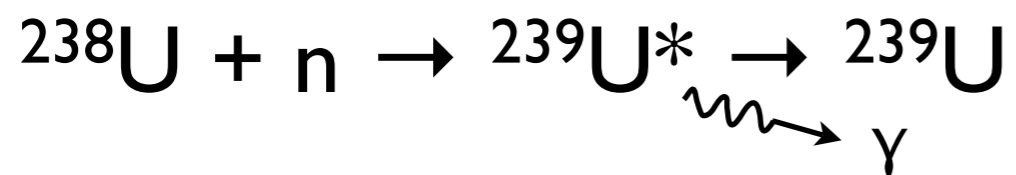


${}^{235}\text{U}$ : 0.72%, 半減期 7.03億年

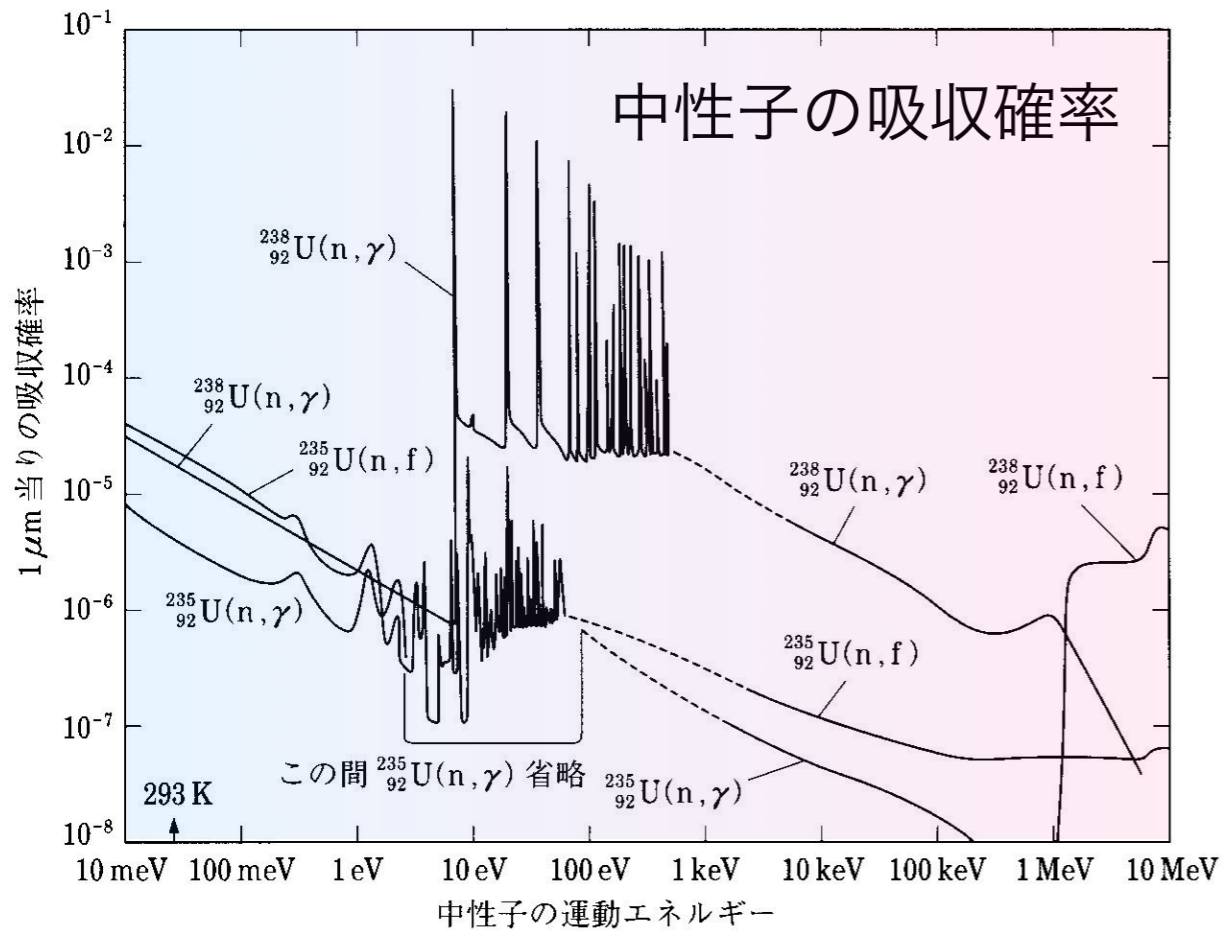


${}^{238}\text{U}$ : 99.3%, 半減期 44.6億年

**👉  ${}^{235}\text{U}$  濃縮燃料を使う**

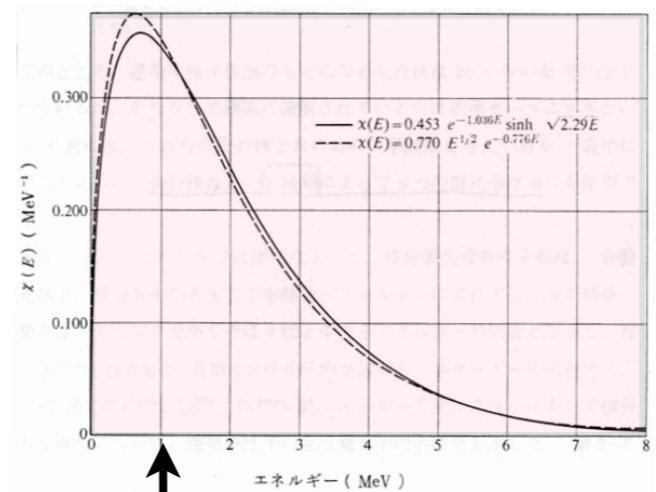


(大阪大学 故岡村弘之先生の講義資料より借用・改変)



$E_n < 1 \text{ eV}$  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

### 即発中性子の エネルギースペクトル

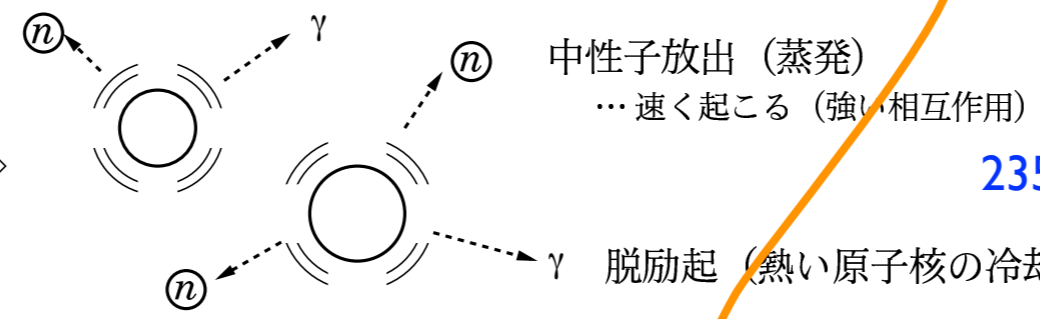
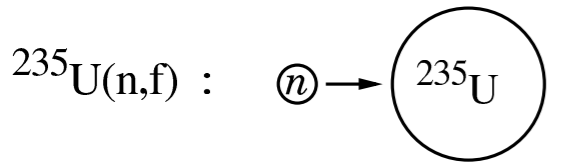


減速

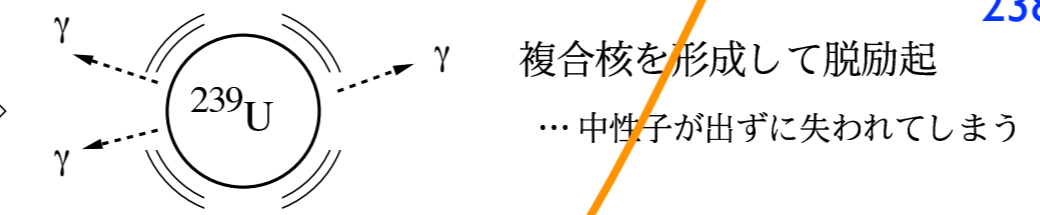
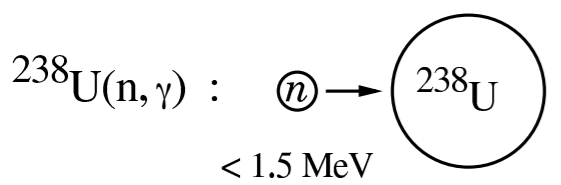
loss



熱中性子

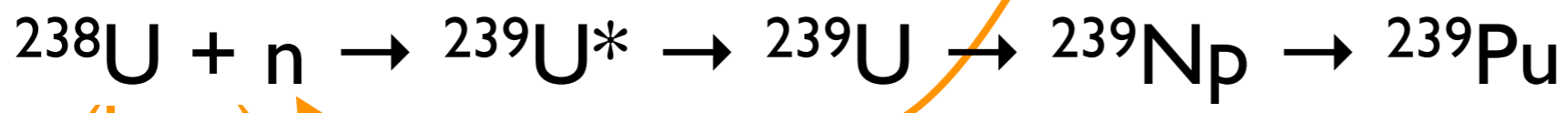


$^{235}\text{U}$  : 0.72%, 半減期 7.03億年



$^{238}\text{U}$  : 99.3%, 半減期 44.6億年

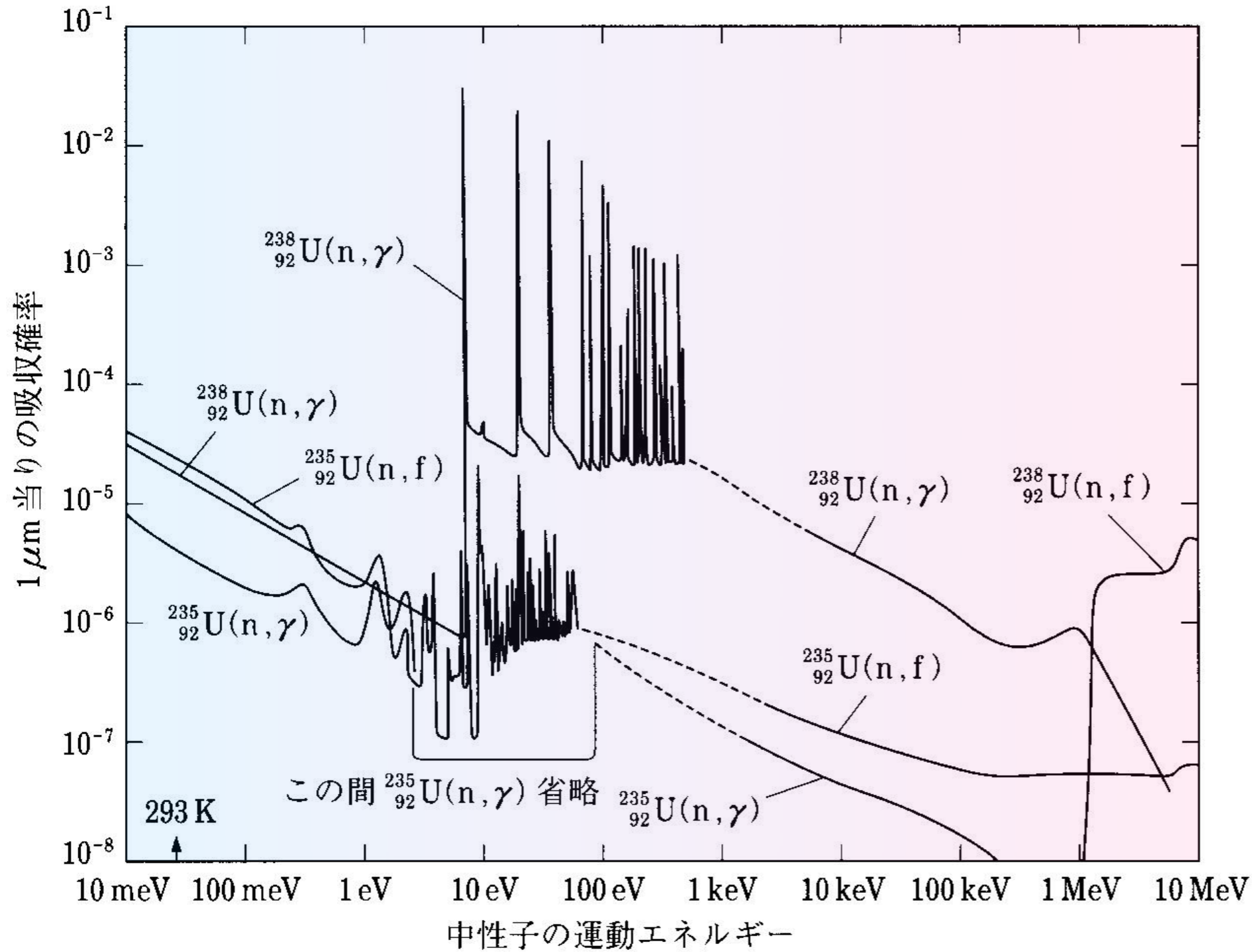
👉  $^{235}\text{U}$  濃縮燃料を使う



(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  ${}^{238}\text{U}$  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のだそう。

# 遅い中性子による $^{235}\text{U}$ の核分裂エネルギーの平均的な配分

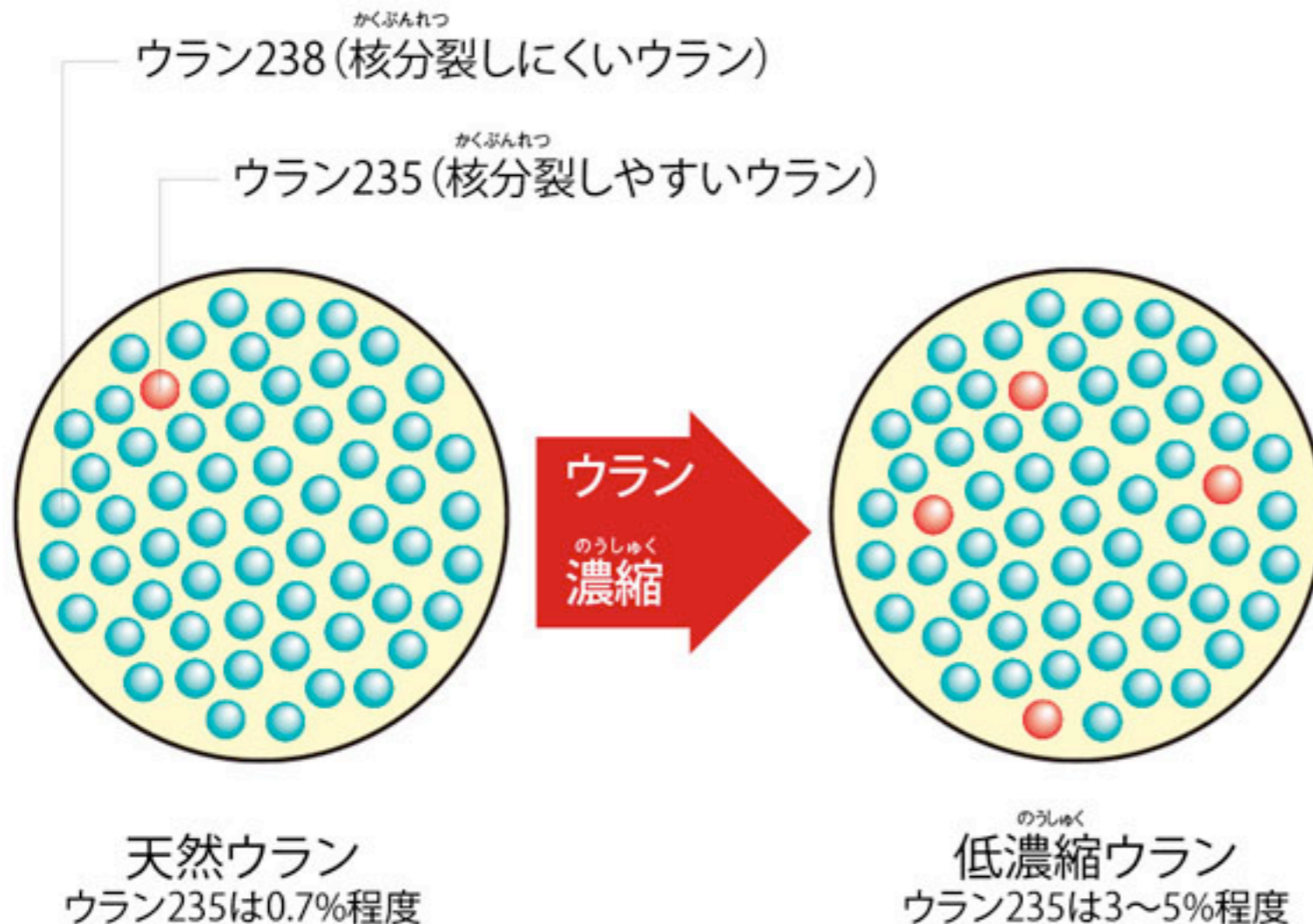
核分裂破片の運動エネルギー	~165 MeV
核分裂中性子の運動エネルギー(2-3個)	~5 MeV
即発の $\gamma$ 線エネルギー(~5本)	~6MeV
分裂生成物からの $\beta$ 線のエネルギー(~7本)	~8MeV
分裂生成物からの $\gamma$ 線のエネルギー(~7本)	~6MeV
ニュートリノの持ち出すエネルギー	~12MeV
核分裂の全エネルギー	~ 202MeV

福島第一原発では地震発生時(3月11日時点)に原子炉は完全停止(すなわち**核分裂は停止**)している  
原子炉からのエネルギー(ニュートリノを除く)190MeVのうち、14MeV(7%)が問題になっている。大多数は短い半減期のため崩壊済、2週間後には1%未満(それでも発熱量は大きい)

# 《 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 を高めます。これを「ウランの濃縮 のうしゆく」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

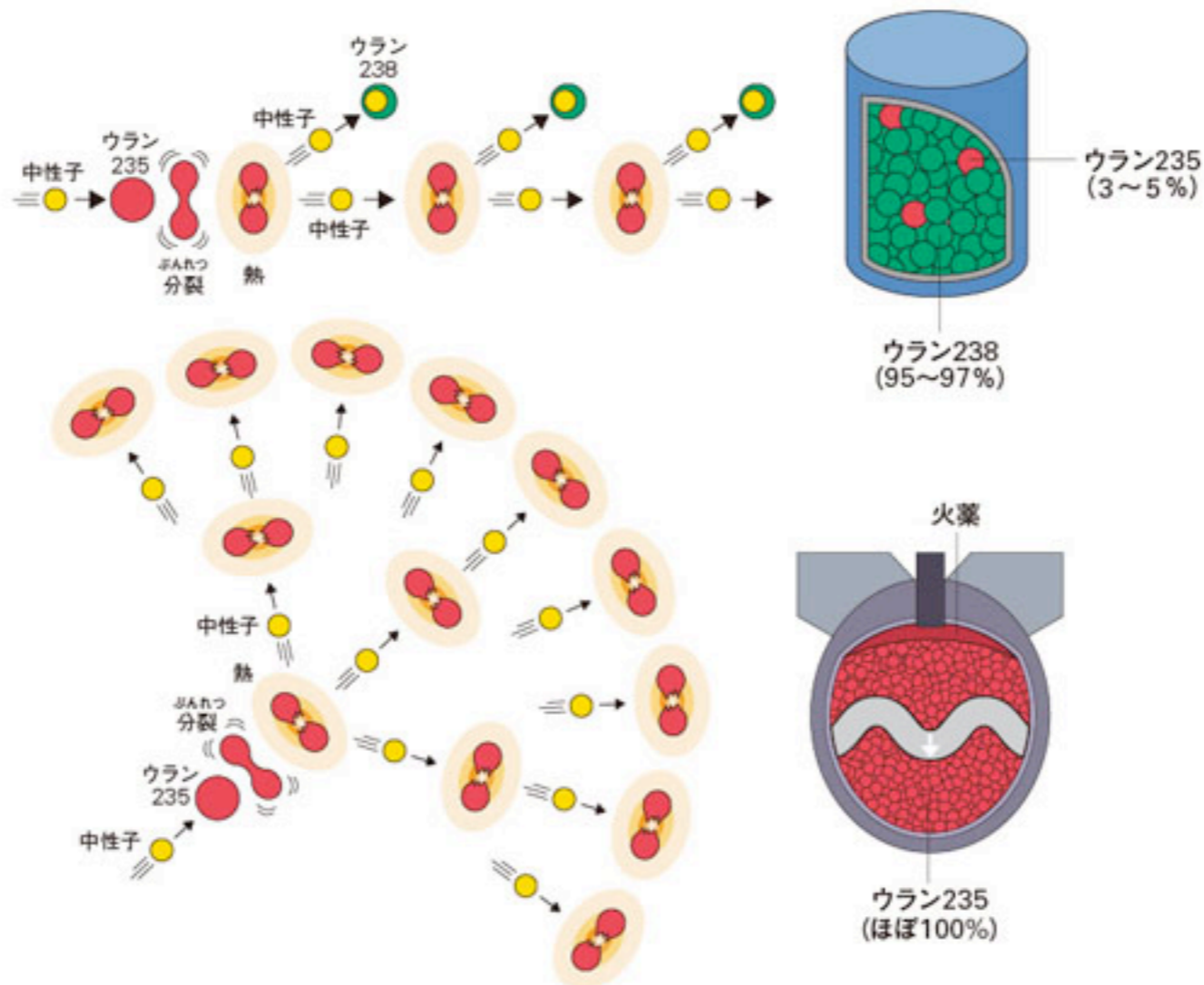
- ☀ ガス拡散法
  - ☀ 遠心分離
  - ☀ レーザー法
  - ☀ ノズル法、
  - ☀ 化学法 (イオン交換法)
- UF<sub>6</sub> (気体)

(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 》

原子力発電の場合



連鎖反応  
臨界

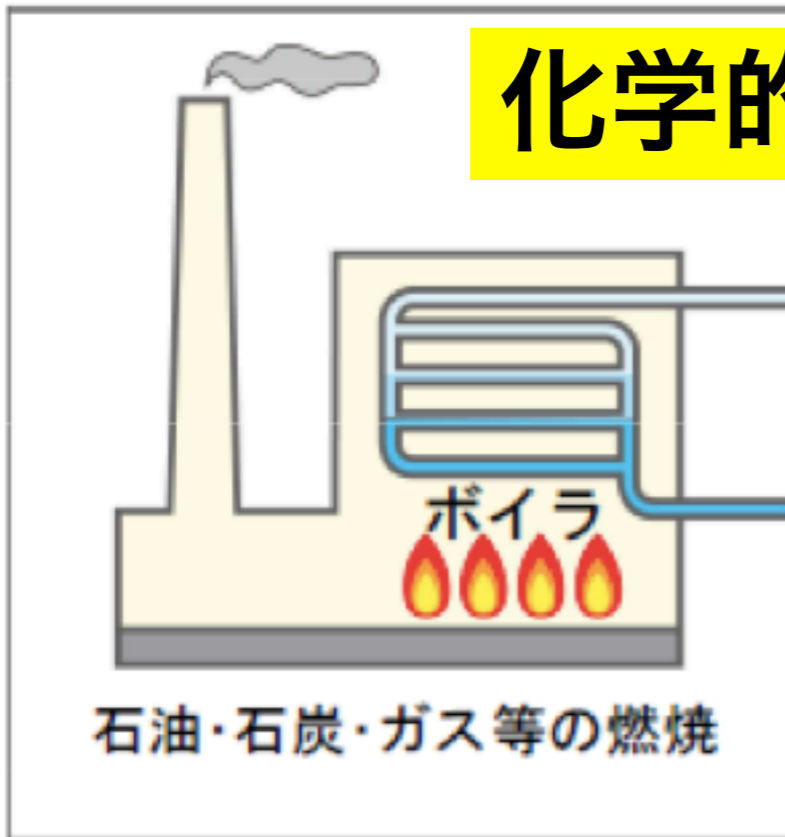
ばくだん  
原子爆弾の場合

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。



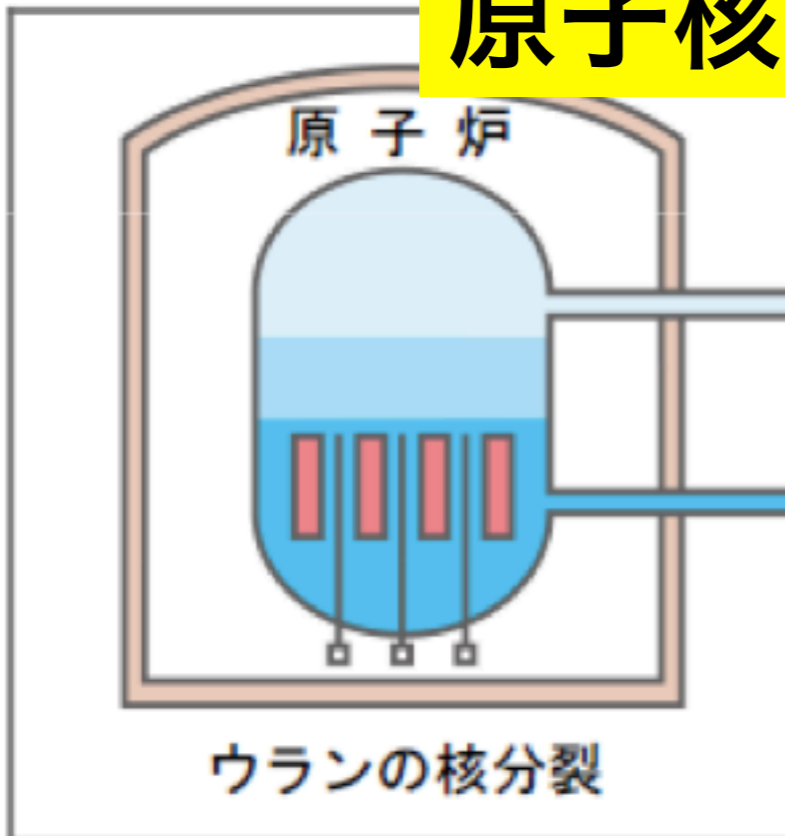
# 火力発電と原子力発電の違い

火力

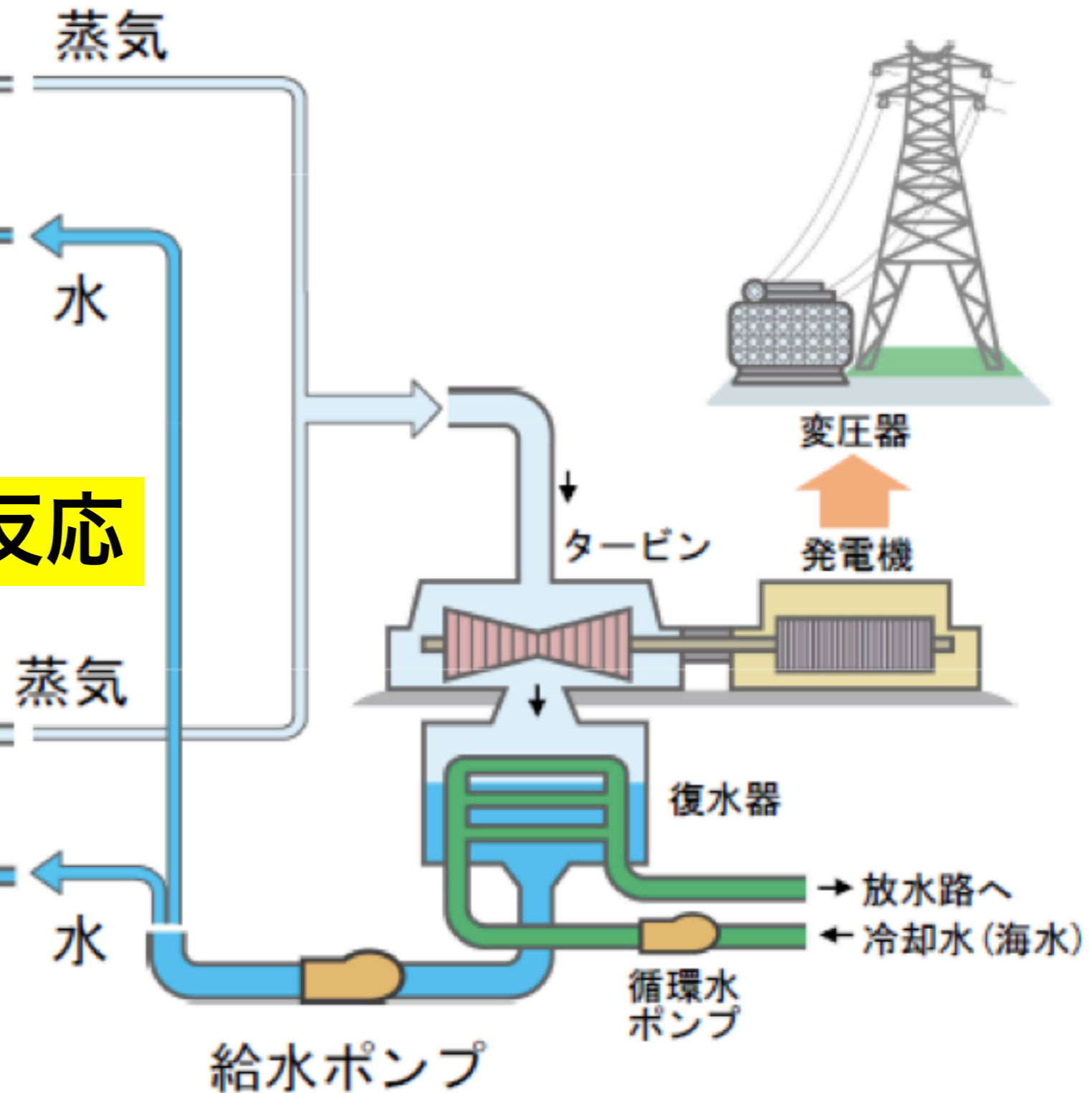


化学的燃焼

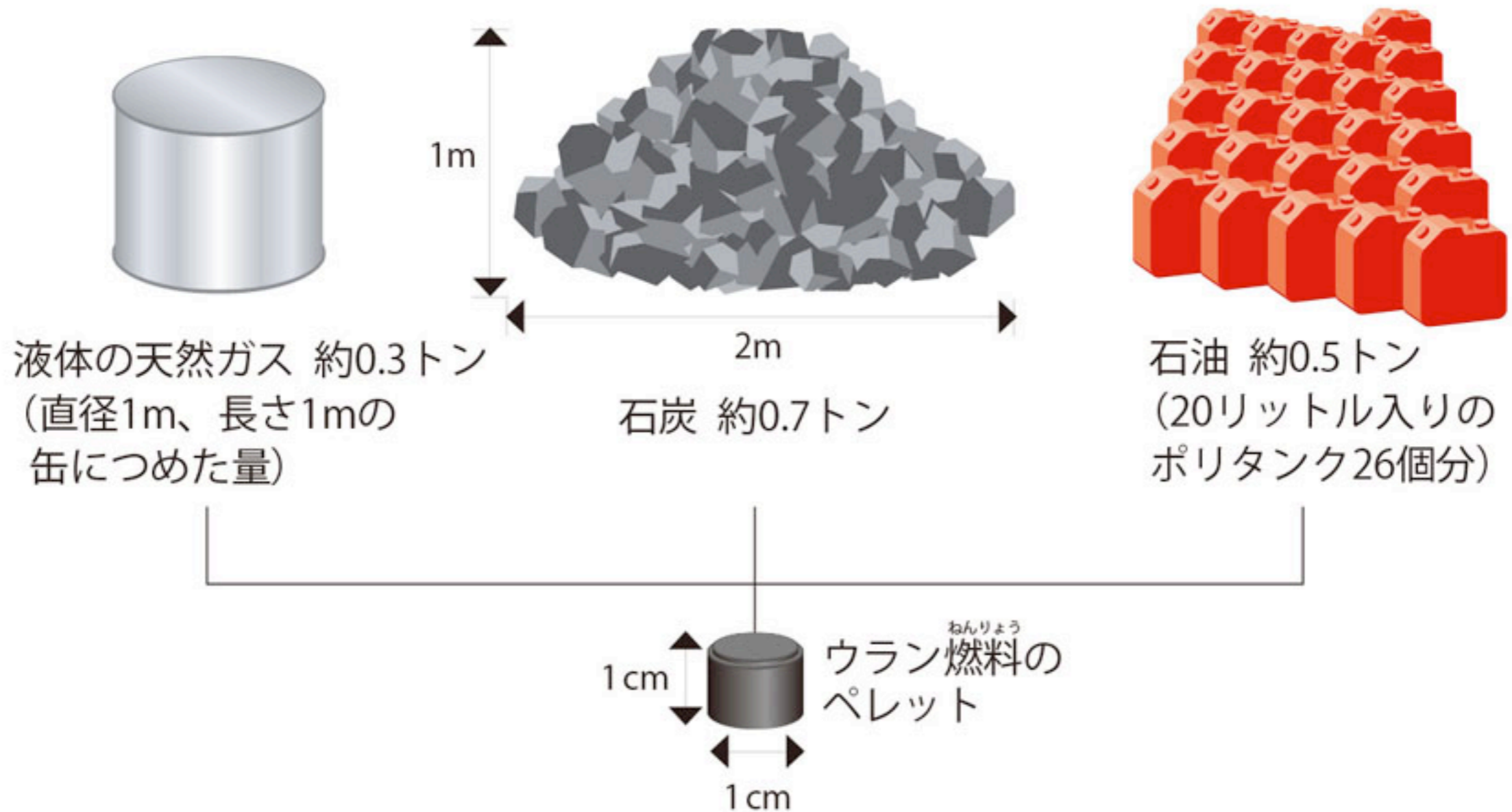
原子力



原子核反応



# 《 エネルギー源の比較(原子力発電と火力発電) 》



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 <sub>2</sub> O)	軽水 (H <sub>2</sub> O)
重水炉	天然ウラン 微濃縮ウラン プルトニウム	重水 (D <sub>2</sub> O)	軽水 (H <sub>2</sub> O) 重水 (D <sub>2</sub> O)
黒鉛炉	濃縮ウラン	黒鉛 (グラファイト)	軽水 (H <sub>2</sub> 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

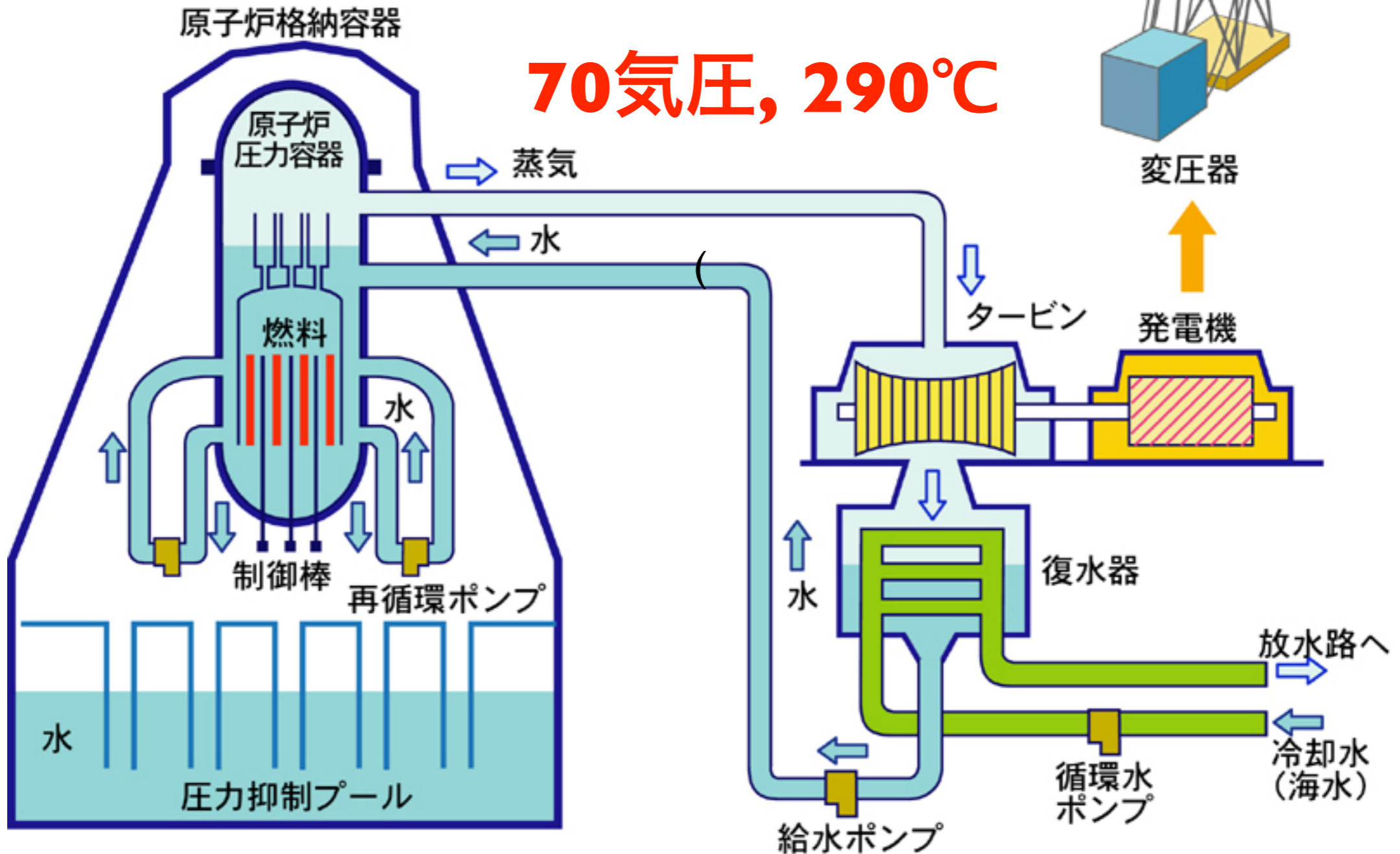
運転の制御：熱中性子を吸収する元素

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)

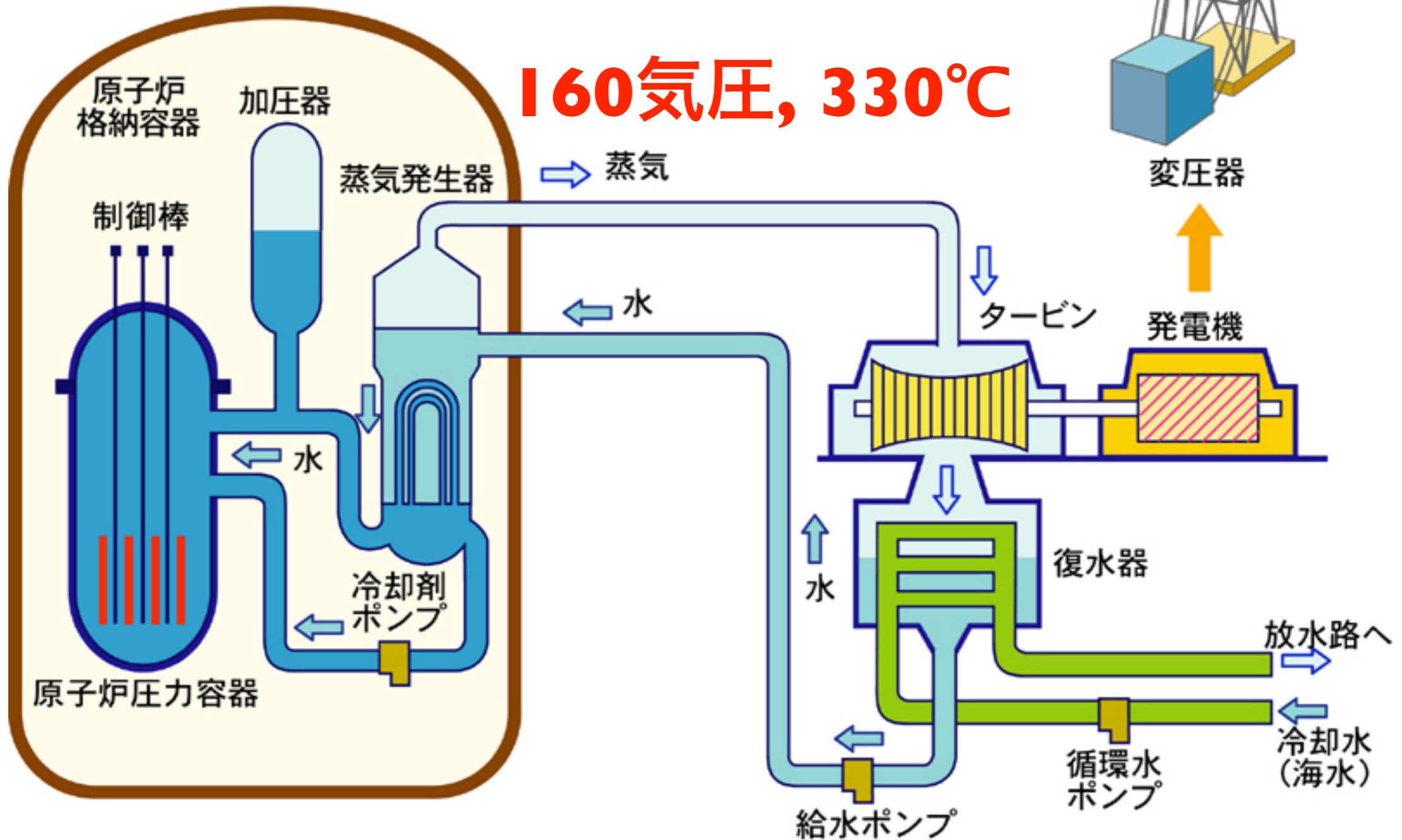


# 加圧水型原子炉

**PWR** (Pressurized Water Reactor)



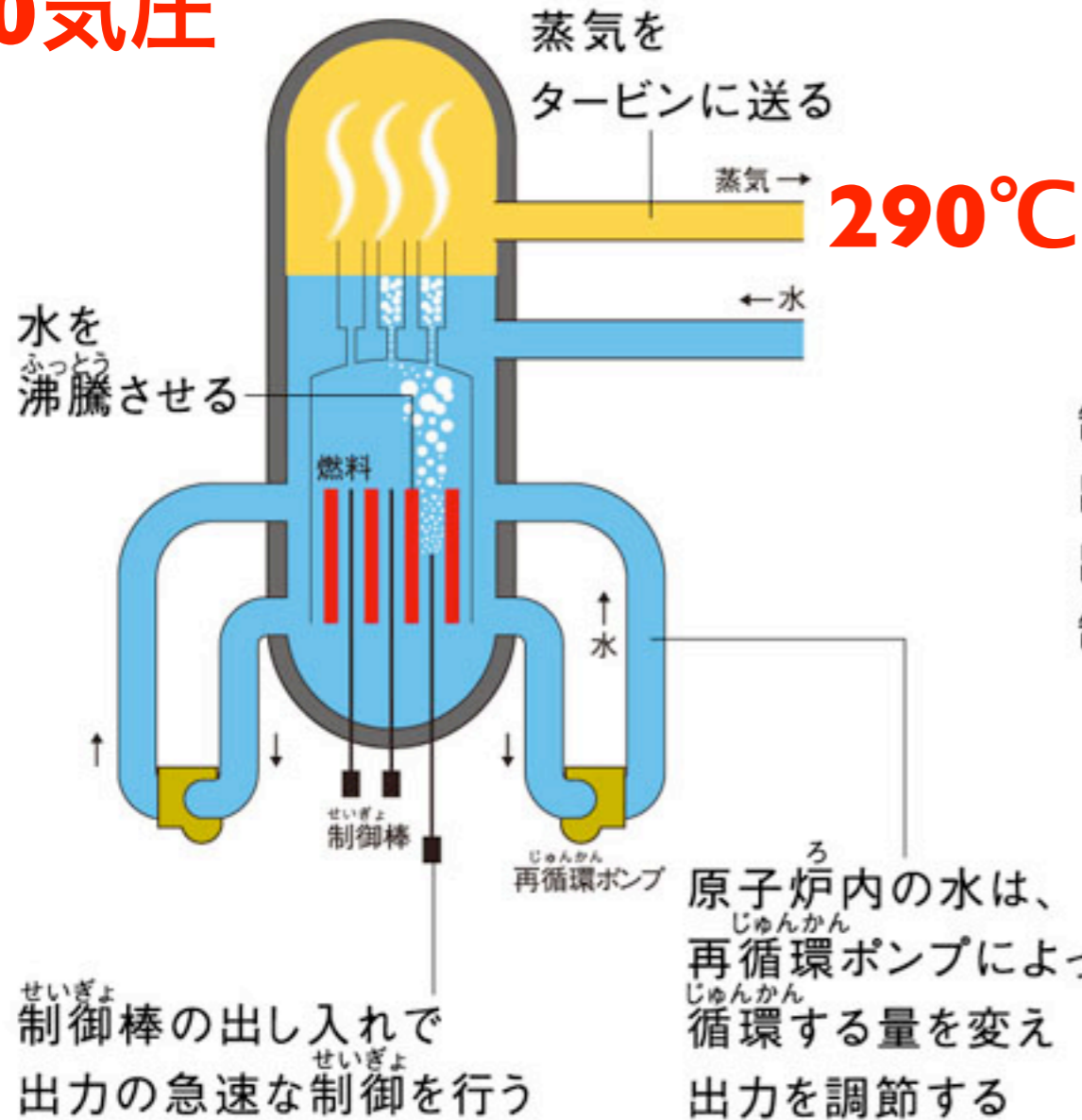
**160気圧, 330°C**



# 《 原子炉のしくみ 》

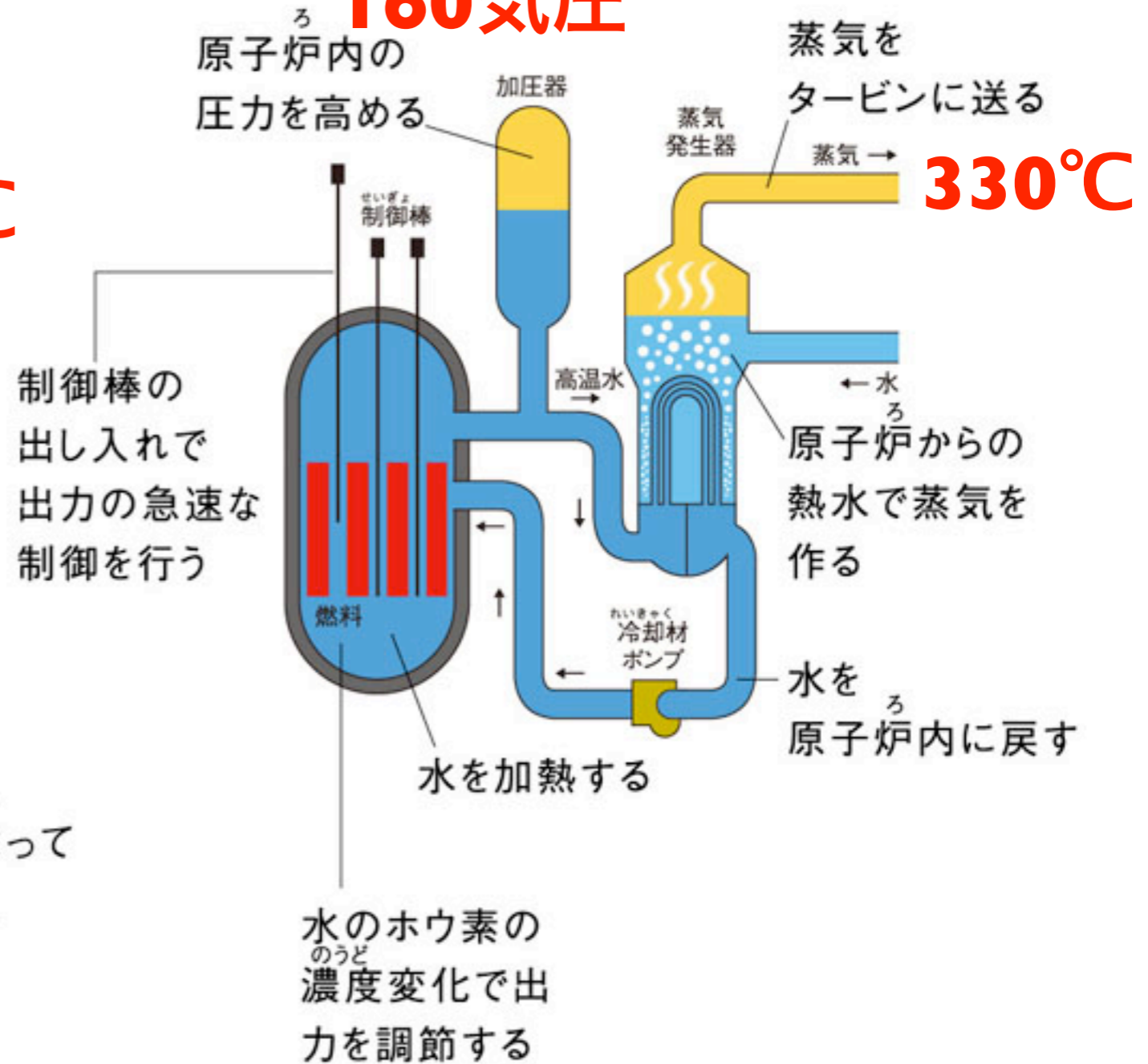
沸騰水型原子炉 (BWR)

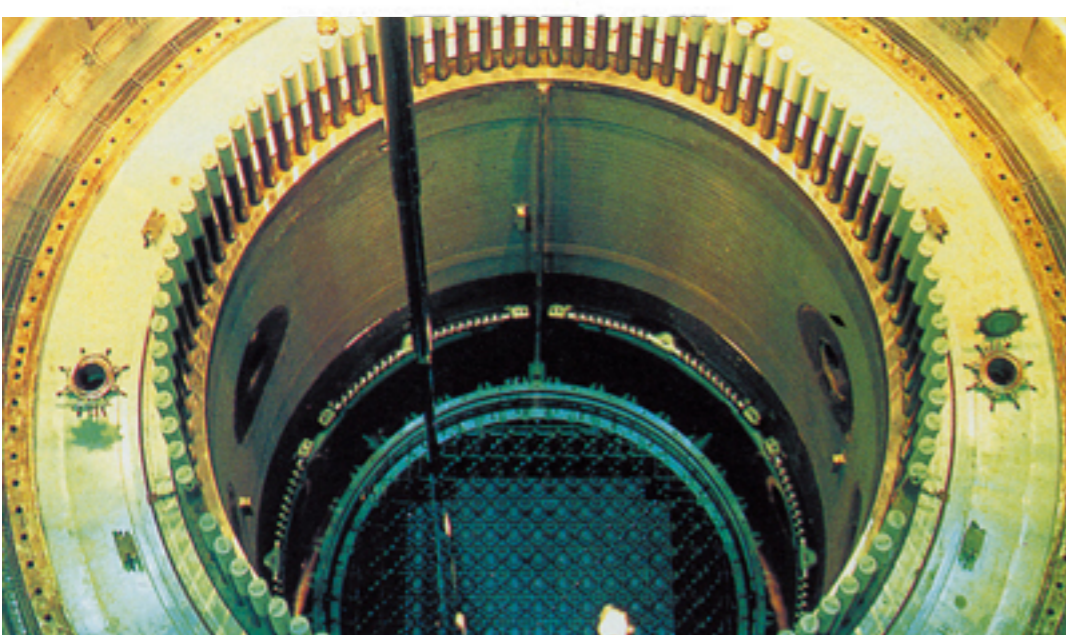
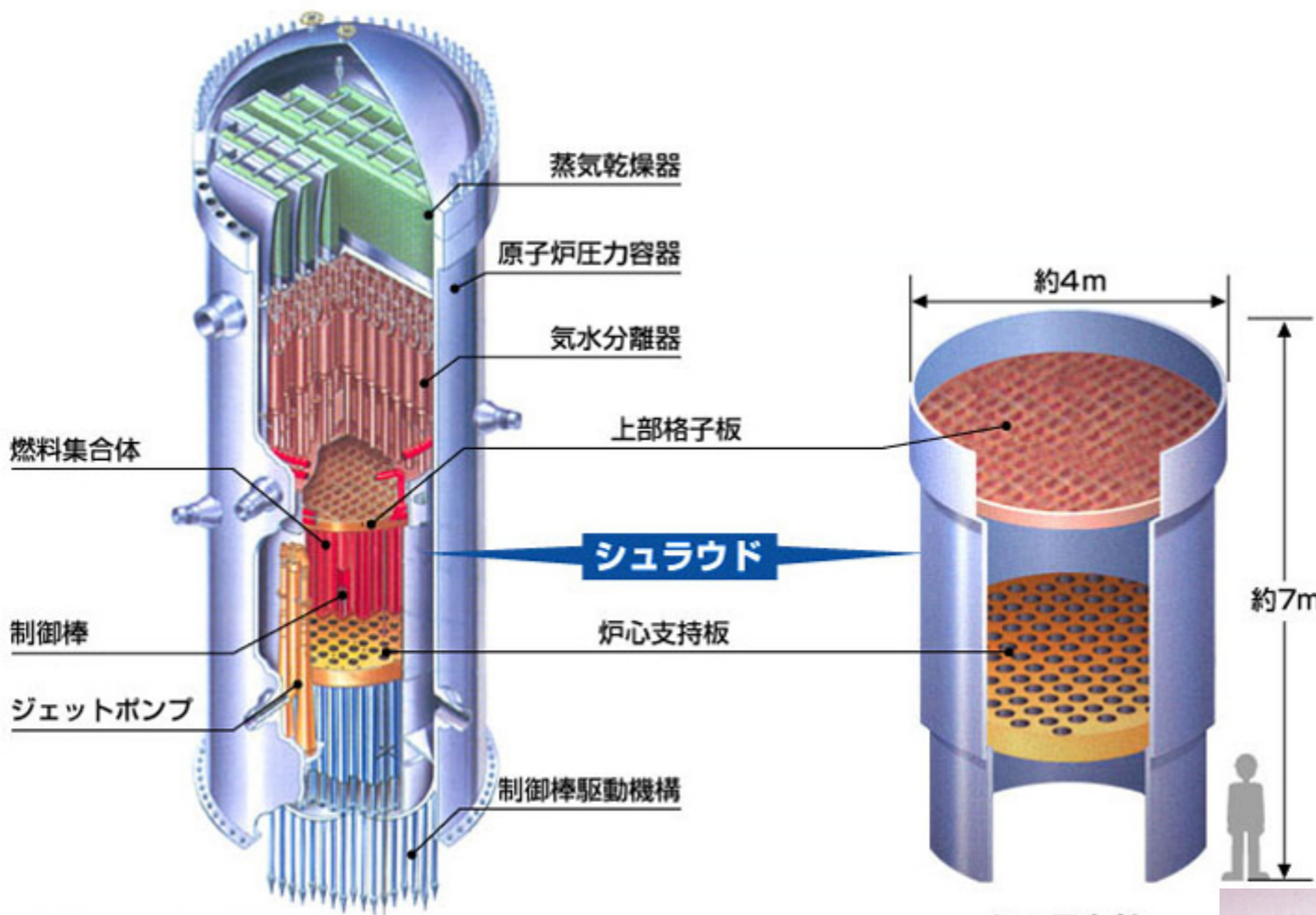
70気圧



加圧水型原子炉 (PWR)

160気圧

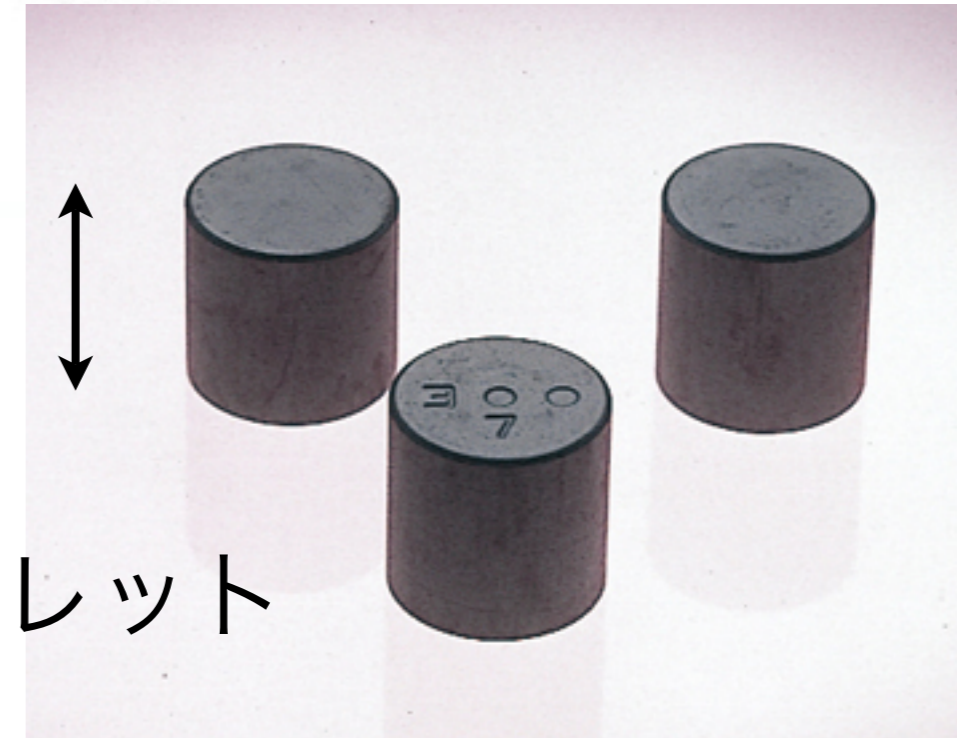




シュラウド

1 cm

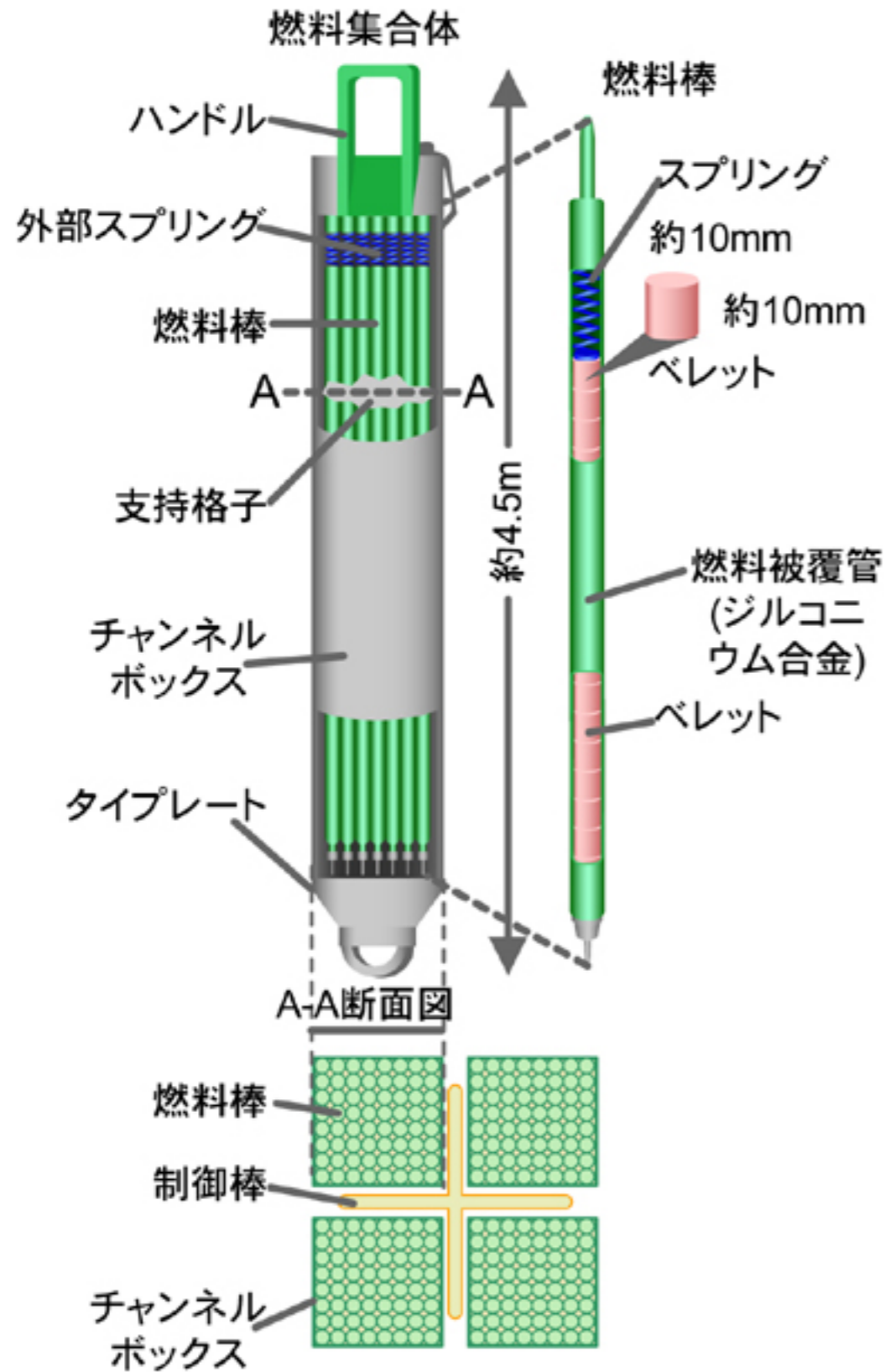
UO<sub>2</sub> ペレット



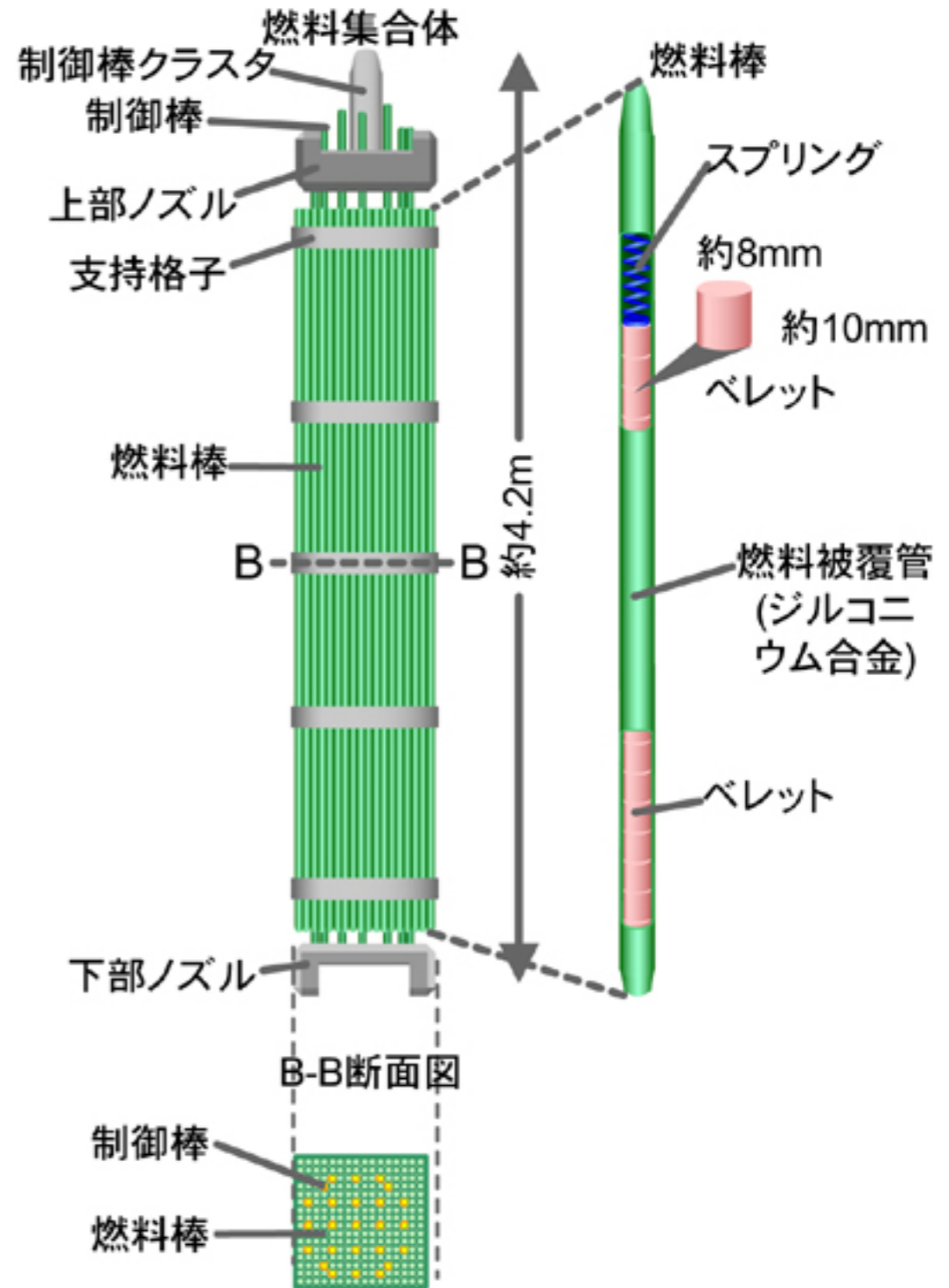
写真提供：東京電力株



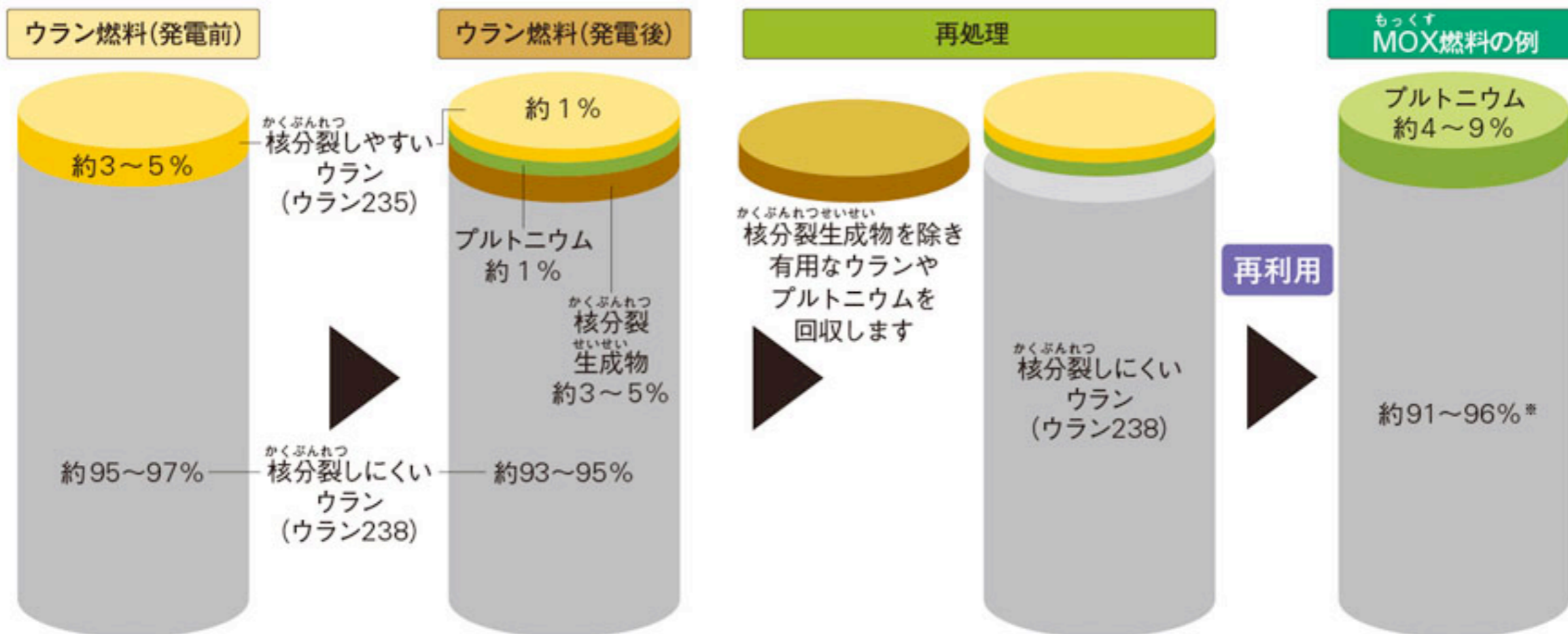
# BWR



# PWR



# 《 ウラン燃料とMOX燃料 》

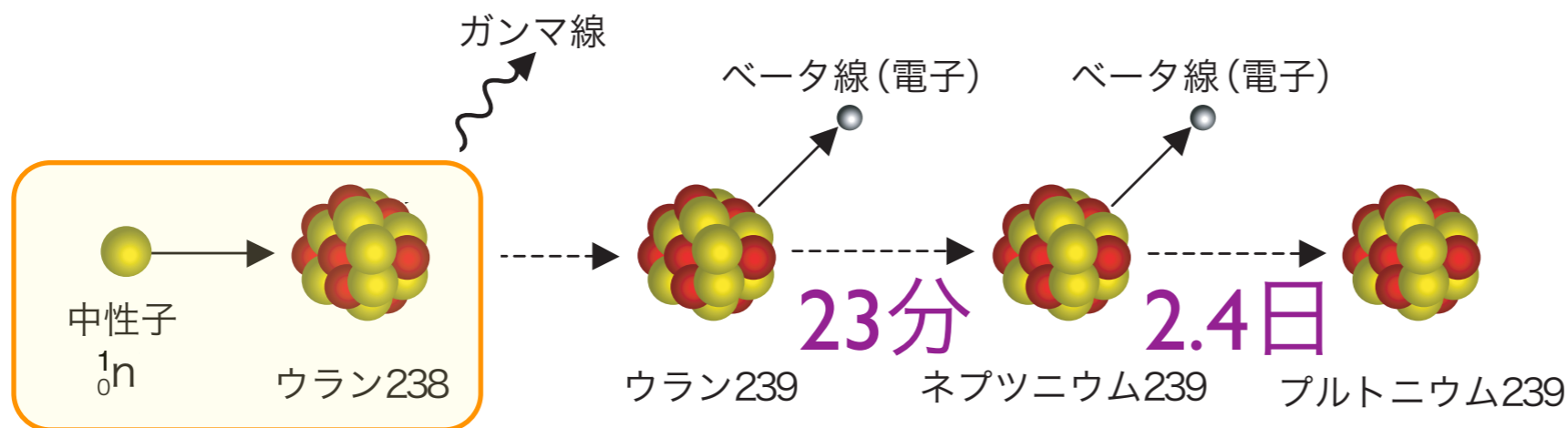


かくぶんれつ  
核分裂生成物

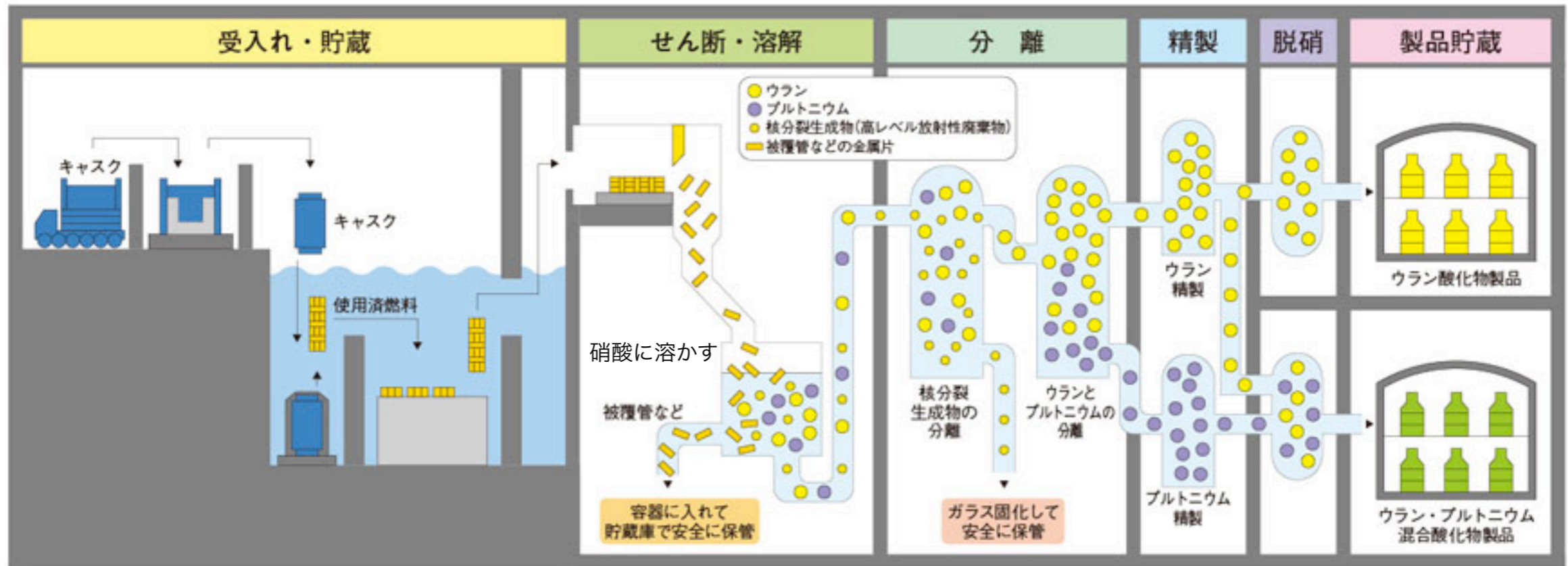
非常に高いレベルの放射線を発生する元素がふくまれています。

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)。

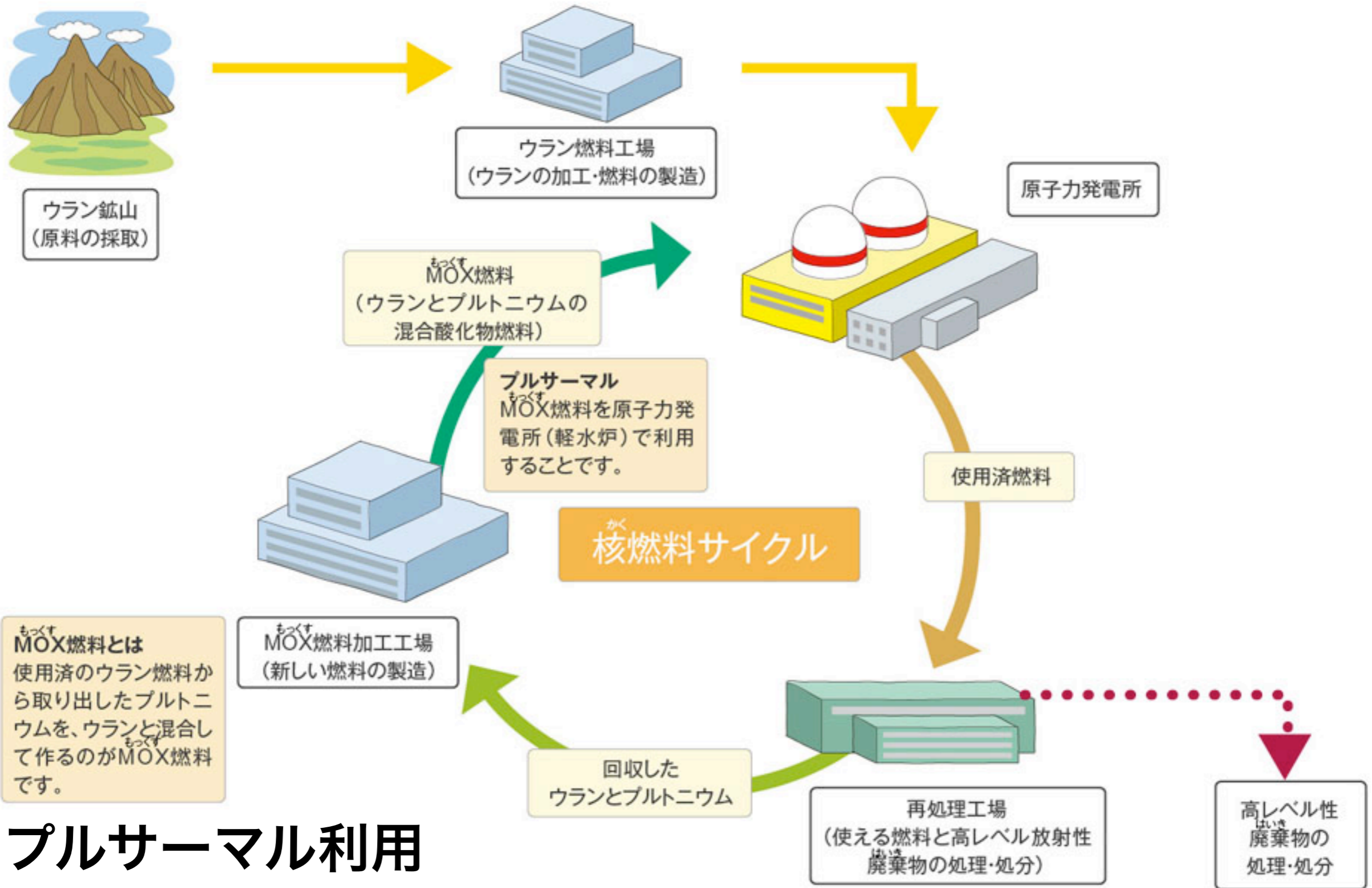


# 《 再処理の主な工程 》



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 ( $^{135}\text{Xe}$  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** ( $\text{UO}_2 + \text{PuO}_2$ )

# 軽水炉によるプルサーマル利用

長期運転すると  $^{239}\text{Pu}$  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

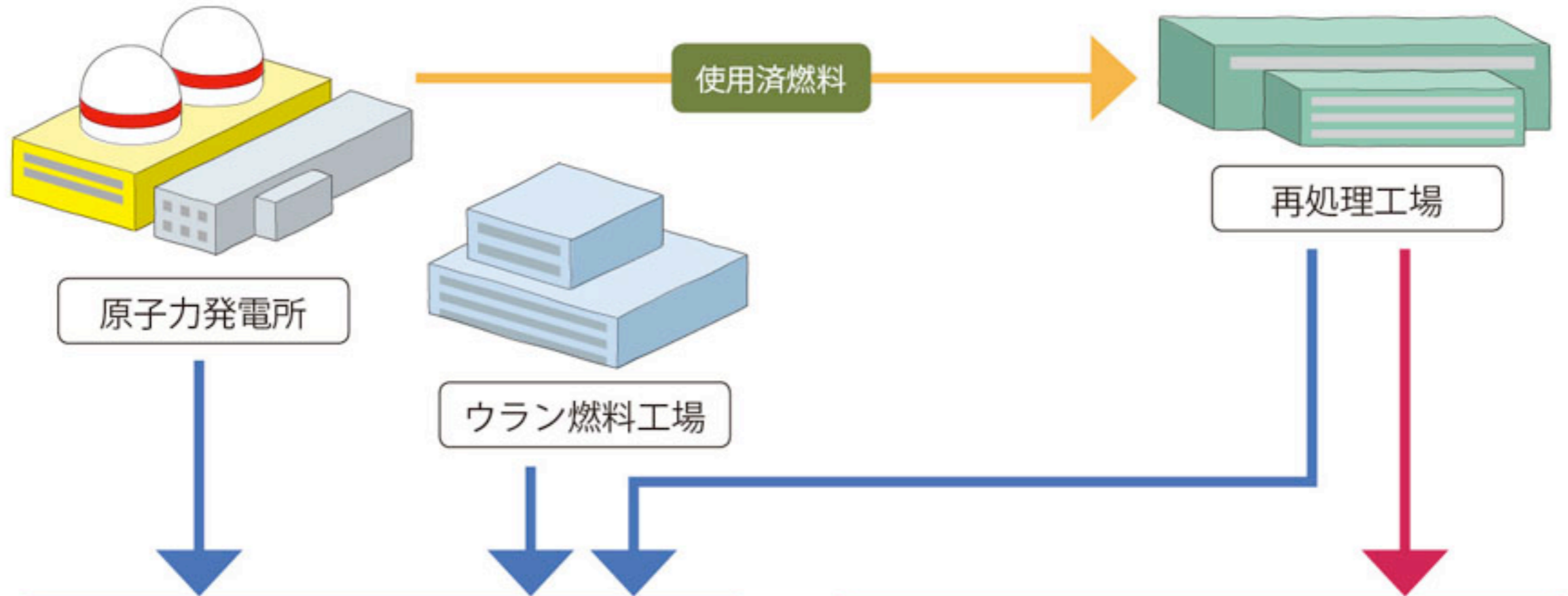
**高速**中性子により  $^{238}\text{U}$  から  $^{239}\text{Pu}$  を多数生成する計画。

放射性核種の**増殖**（使った以上の燃料の生成）。

$^{239}\text{Pu}$  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

# 《 放射性廃棄物 <sup>はいき</sup> 》



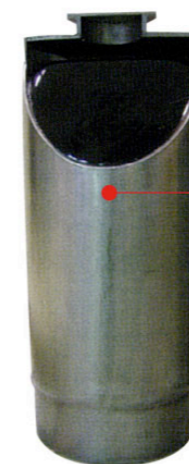
## 《 低レベル放射性廃棄物 <sup>はいき</sup> 》

低レベル放射性廃棄物は、原子力施設の運転、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（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 <sup>はいき</sup> 》

高レベル放射性廃棄物は、再処理工場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

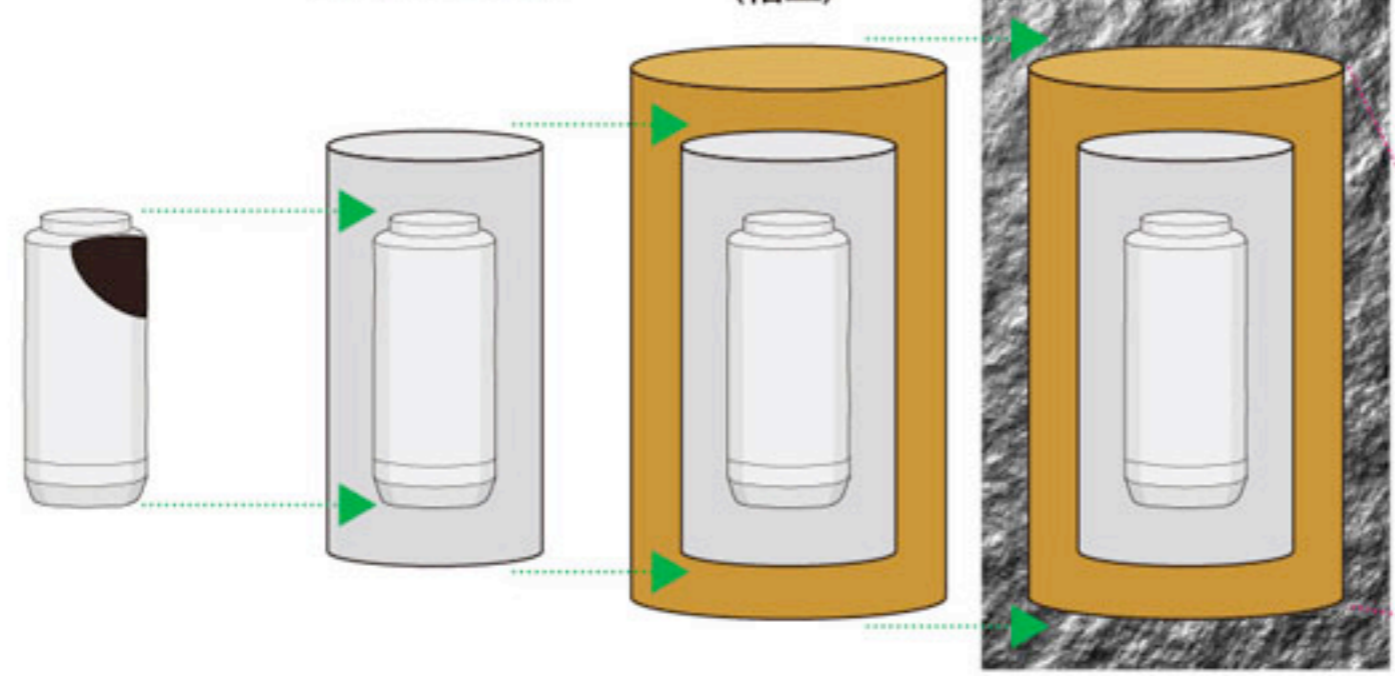
高レベル放射性廃液をガラス原料とともに溶かし合わせて、ステンレス容器に入れて固めたもの。

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  | 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<br>(金属製の容器) | 緩衝材<br>(粘土) | 岩盤    |



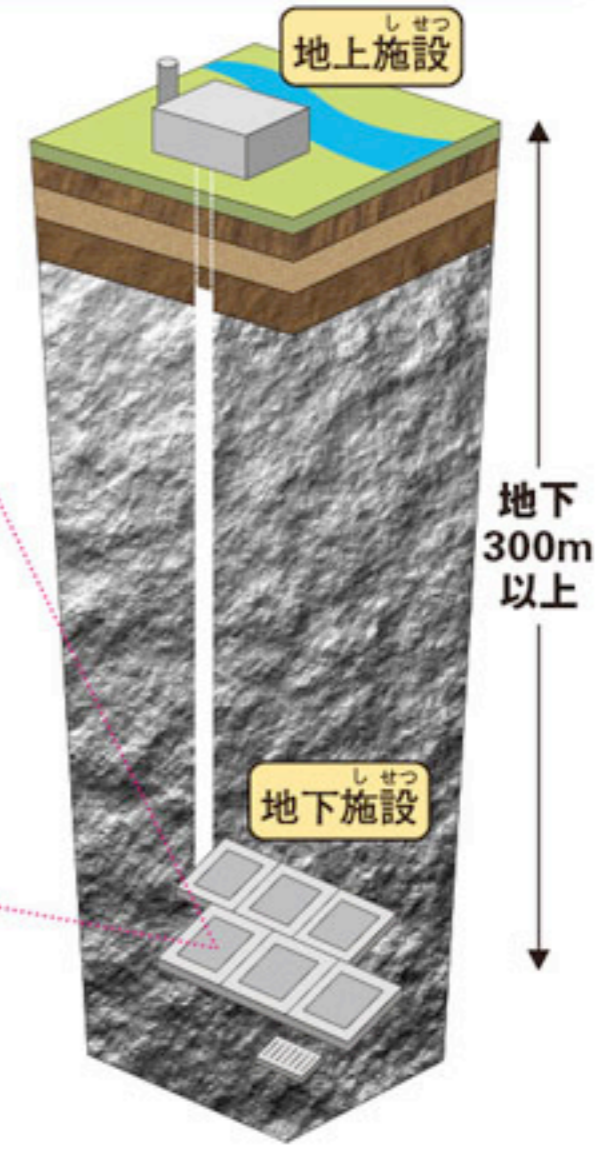
ガラスは放射性物質が地下水に溶け出しにくくします。

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



# 《 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 P 運転中  
■ 建設中 P 建設中  
■ 着工準備中 P 着工準備中

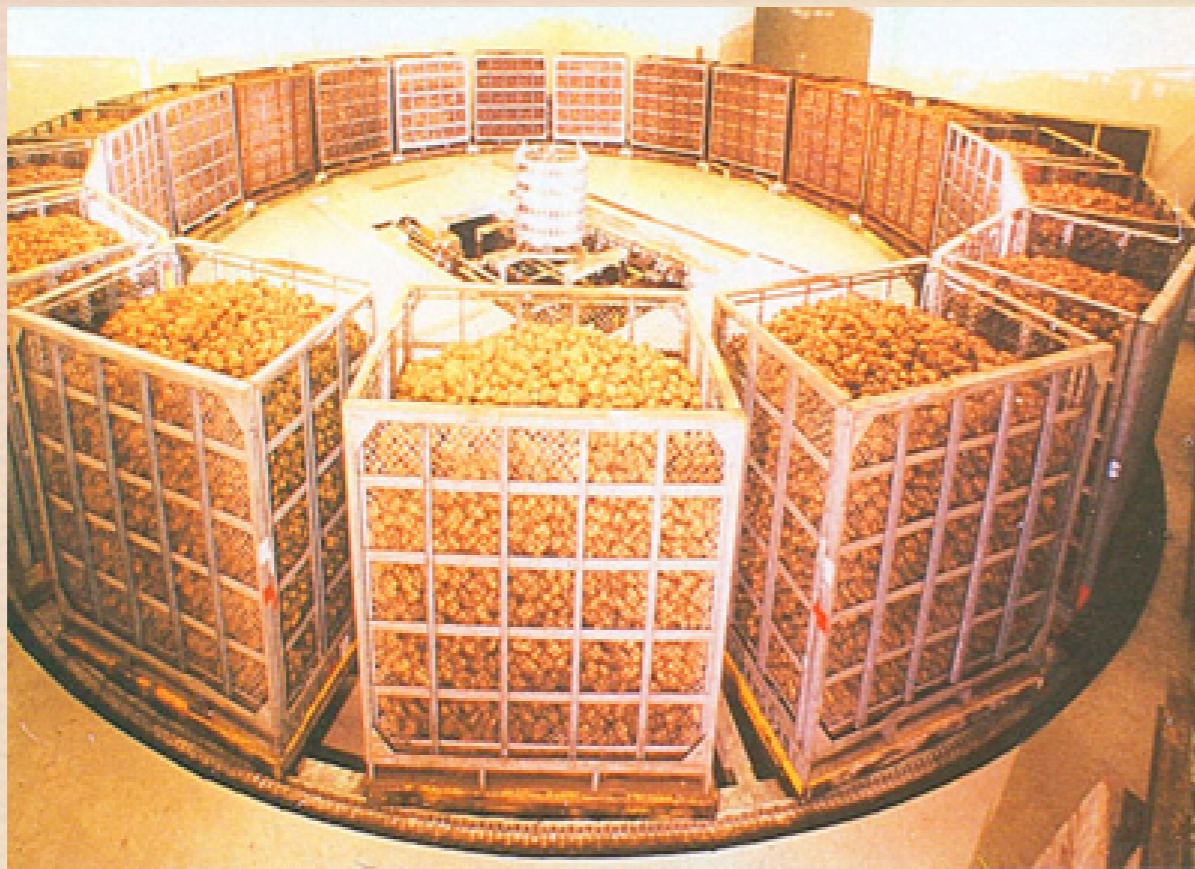
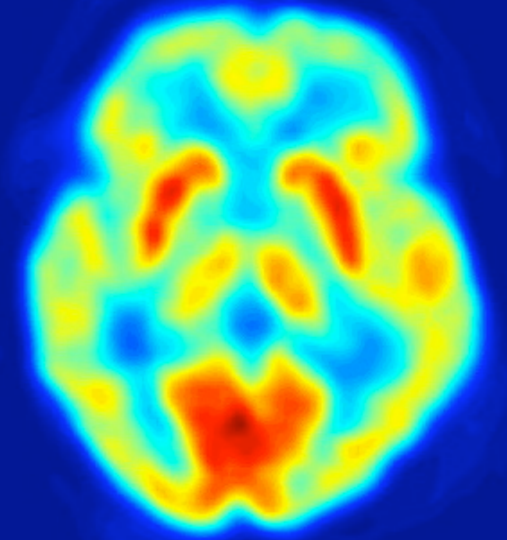




# 次回予告

## 第5回 (6/7)

- 放射線の利用
- 放射線診断・治療《放射線医療》



# 自主講義 「放射線学」

- 第1回：講義概要のイントロ  
(5/10) 放射線とは？
- 第2回：放射線と物質との相互作用 《放射線物理学》  
(5/17) (エネルギー損失、各種反応・散乱過程)
- 第3回：放射線の生体への作用と影響 《放射線生物学》  
(5/24) 放射線と放射能の単位  
放射線の防護 《放射線安全管理学》
- 第4回：原子核の壊変 《原子核物理学》  
(5/31) 核分裂反応 《原子力工学》
- 第5回：放射線の利用  
(6/7) 放射線診断・治療 《放射線医療》
- 第6回：高エネルギー・素粒子物理学 《加速器科学》  
(6/14) 放射線の測定 《放射線計測学》、discussion

## 講義スライド、講義予定

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

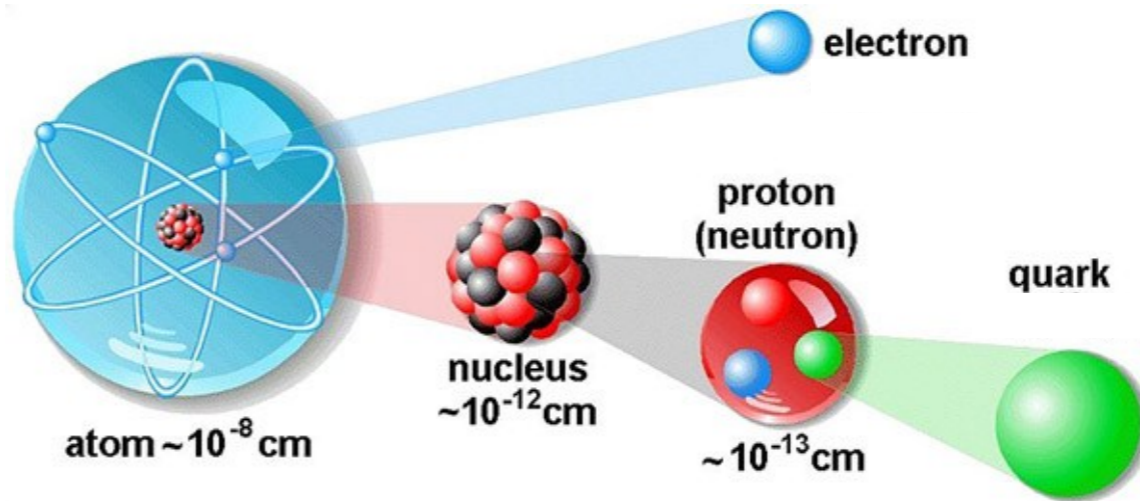
## 連絡先

[torii-radio@radphys4.c.u-tokyo.ac.jp](mailto:torii-radio@radphys4.c.u-tokyo.ac.jp)

担当教員:鳥居 寛之

**授業アンケート**

# 自主講義 放射線学



## 放射線を学ぶ

原子力発電所の事故が連日トップニュースで報じられ、世界中が放射能汚染に対しヒステリックなまでに反応している現在、我々には放射線に対する正しい科学的リテラシーが求められています。

一方で、放射線に関する学問は多分野にわたり、大学などで系統立って教えられる機会は非常に限られています。放射線に対する知識不足が、必要以上の不安と混乱を引き起こしている現状があります。

そこで今回、教養学部物理部会に所属して粒子線物理学を専門とする鳥居助教が講師となって、自主講義を企画することにしました。急遽の講義開催決定により正規の授業として組み込むことができなかったため、受講しても単位は出ませんが、意欲ある皆さんの参加を期待します。

## 講義内容

放射線とは？

放射線と放射能の単位(シーベルト、ベクレルなど)

放射線と物質との相互作用《放射線物理学》

放射線の測定《放射線計測学》

放射線の生体への作用と影響《放射線生物学》

原子核の壊変《原子核物理学》と核分裂反応《原子力工学》

放射線の利用(放射線診断・治療、分析、年代測定)

高エネルギー・素粒子物理学《加速器科学》

講師 鳥居 寛之 教養学部物理部会 助教

## 講義日程

第1回 5/10(火)

第2回 5/17(火)

第3回 5/24(火)

第4回 5/31(火)

第5回 6/7(火)

第6回 6/14(火)

火曜5限  
開講中！

## 場所・時間

11号館1101教室

火曜5限16:20~17:50

## 対象

主に1, 2年の理系が対象ですが、意欲のある文科生や3年生以降も歓迎します。

**Fine.** Per oggi è tutto.

Fini pour aujourd'hui

That's all for today.

Всё за сегодня.

오늘은 여기까지 하겠습니다.

Ci vediamo la prossima settimana.

On se voit la semaine prochaine.

See you next week.

Увидимся на следующей неделе.

다음 주에 또 만납시다.