

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願っています。

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



# 放射線を科学的に理解する

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

# 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

金曜 5 限

@ 21 KOMCEE

K402教室

2012 / 11 / 20 (火)



$\gamma$ 線



中性子線



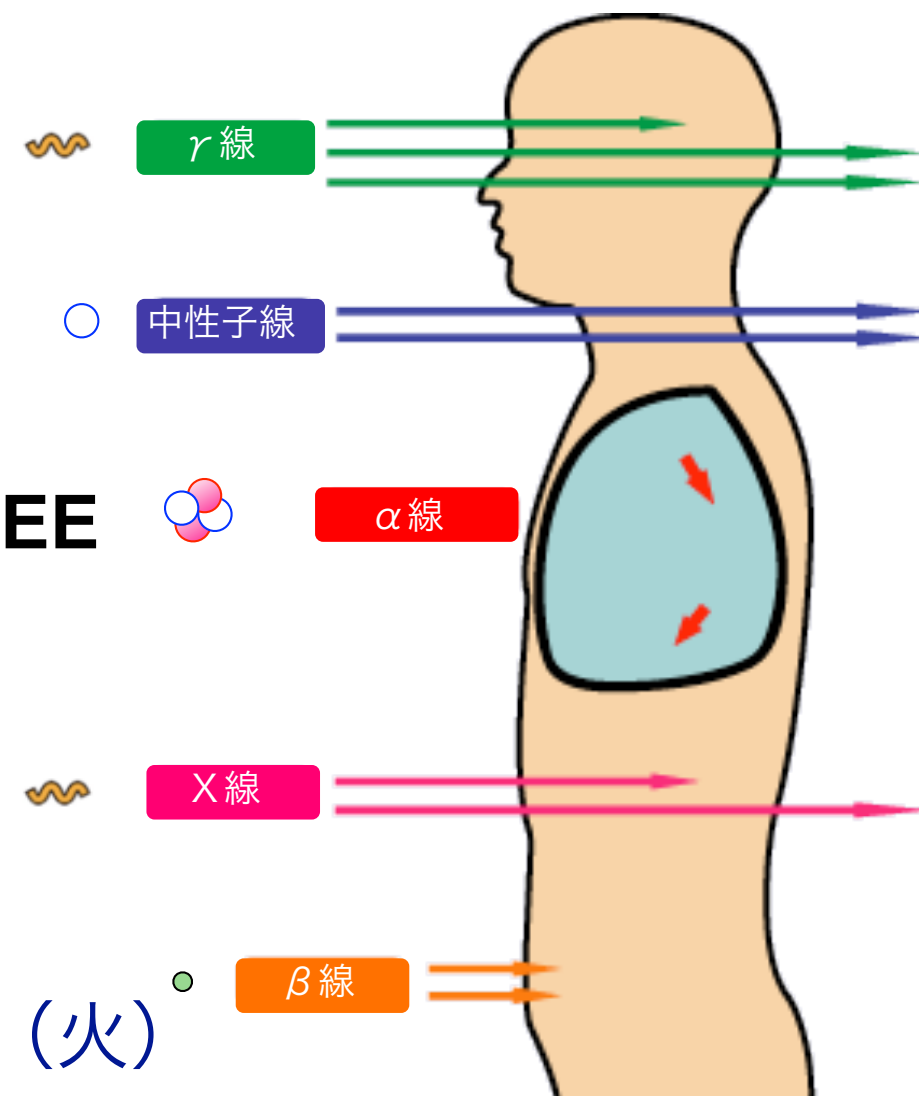
$\alpha$ 線



X線



$\beta$ 線



第7回

## 原子核物理学・原子力工学

原子核と放射能、核崩壊・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

- 10/12 放射線入門 【鳥居】
- 10/19 放射線物理学 【鳥居】
- 10/26 放射線計測学 【小豆川】
- 11/ 2 環境放射化学 【小豆川】
- 11/ 9 放射線生物学 【渡邊】
- 11/16 放射線医療 【作美】
- 11/20 原子核物理学 【鳥居】
- 11/30 環境システム工学 【森口】
- 12/ 7 科学技術社会論 【藤垣】
- 12/14 環境放射化学 【小豆川】
- 12/21 植物栄養・肥料学 【藤原】
- 1/11 放射線の利用 【渡邊】
- 1/25 放射線防護学・加速器科学 【鳥居】

担当教員

ゲスト講師

鳥居 寛之

小豆川 勝見

渡邊 雄一郎

《教養学部》

作美 明

森口 祐一

藤原 徹

藤垣 裕子

《医学部附属病院放射線科》

《工学系都市工学》

《農学部応用生命化学》

《教養学部広域システム》



# 第7回 (11/20)

## 物理分野

● 《原子核物理学》

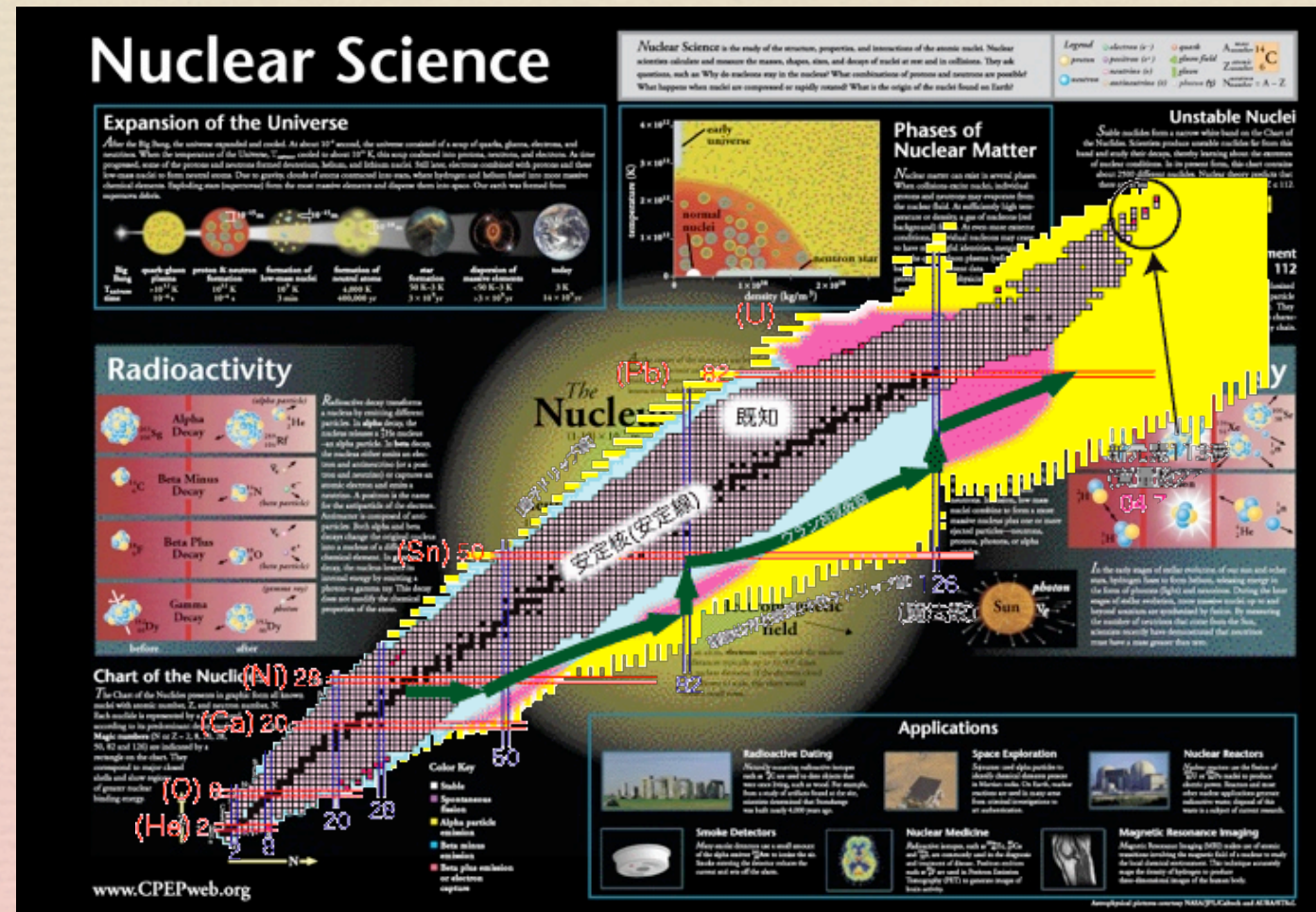
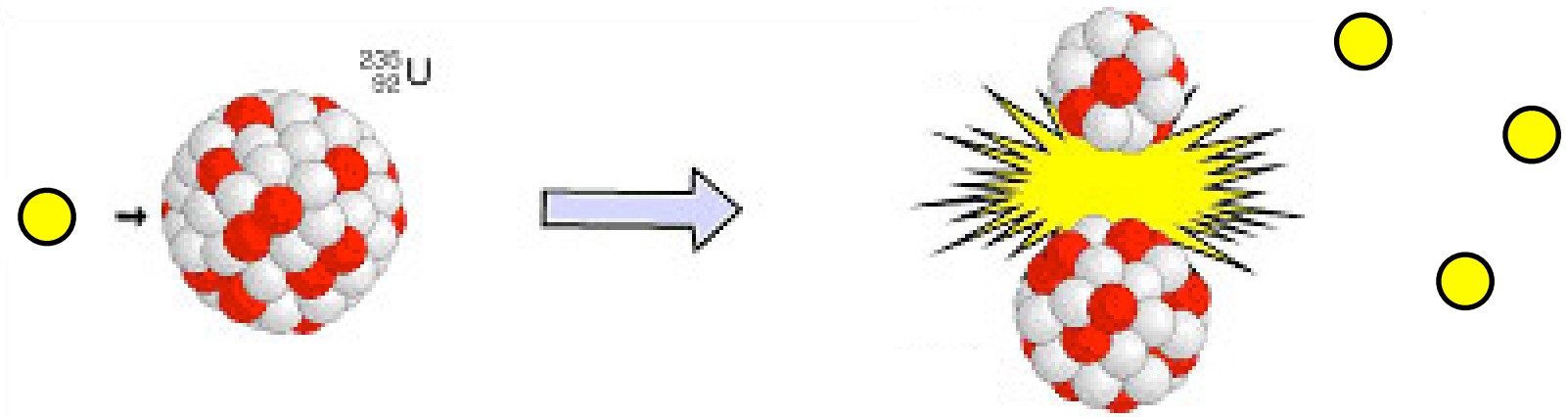
● 原子核と放射能、核崩壊・核分裂

● 《原子力工学》

● 原子力発電の原理

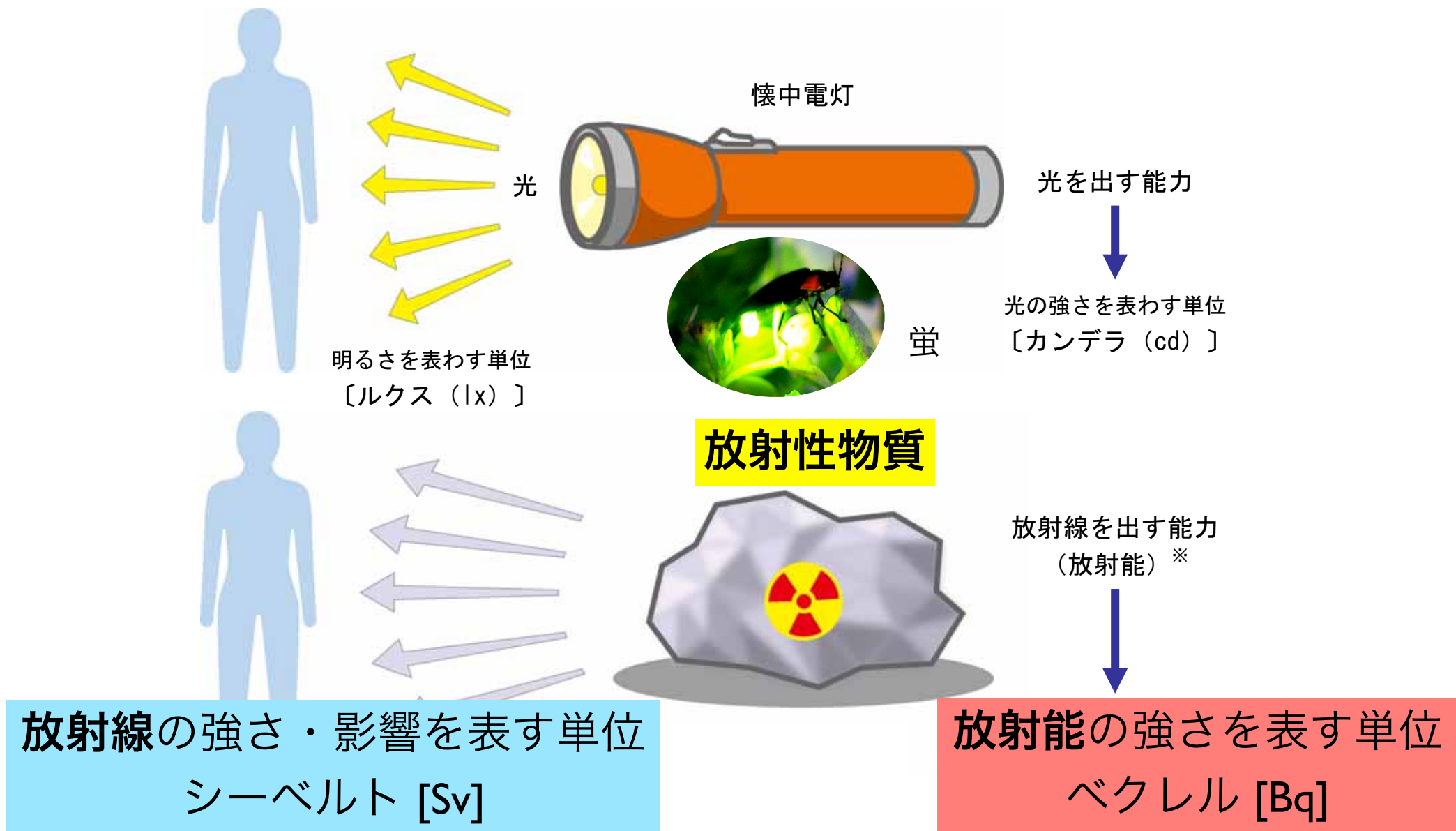
教養学部物理

鳥居 寛之



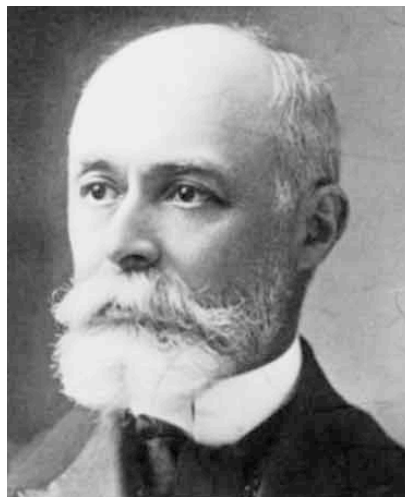


# 放射能と放射線



6-1

出典：資源エネルギー庁「原子力2010」



## 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)

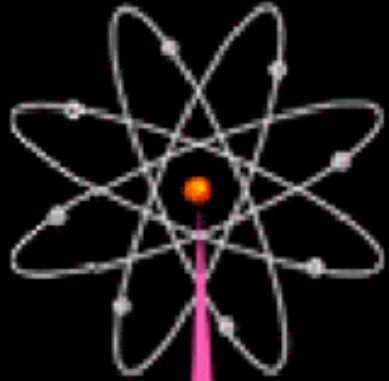
ナノメートル

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

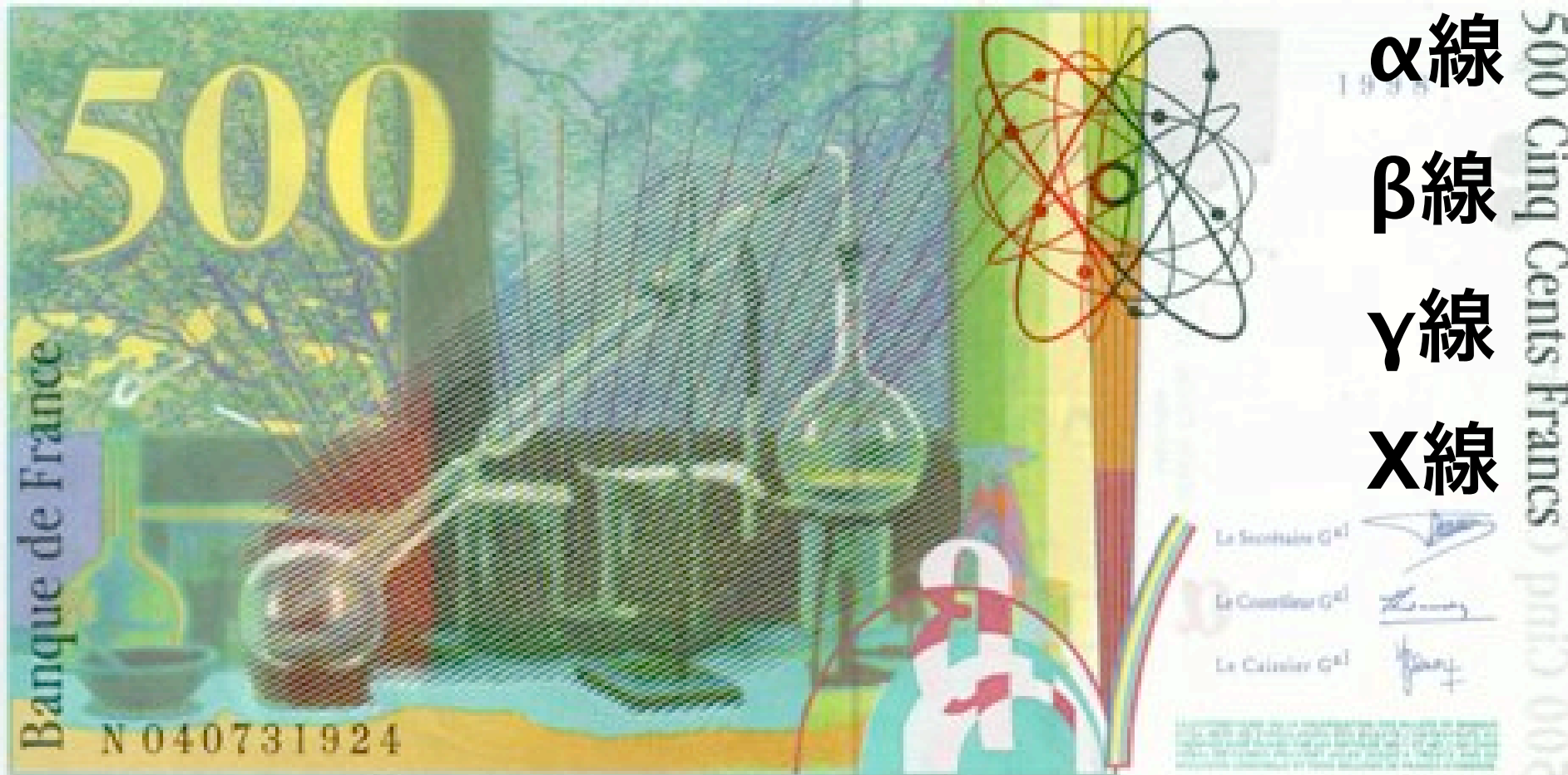


クォーク  
quark



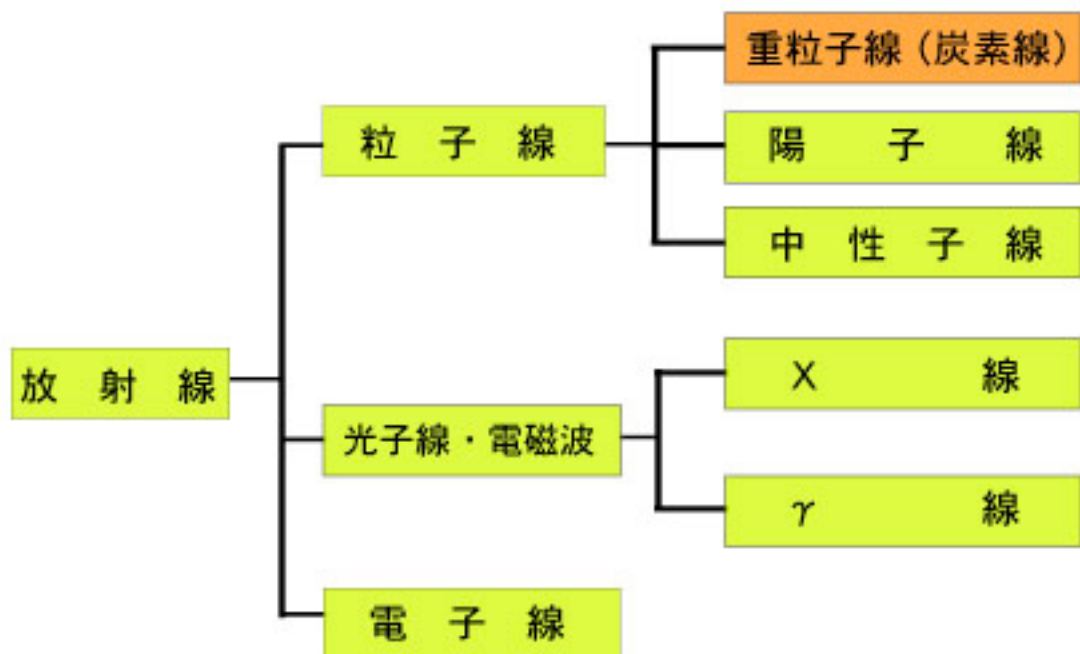


Billet de 500 Francs Français  
en circulation: 1993–1999

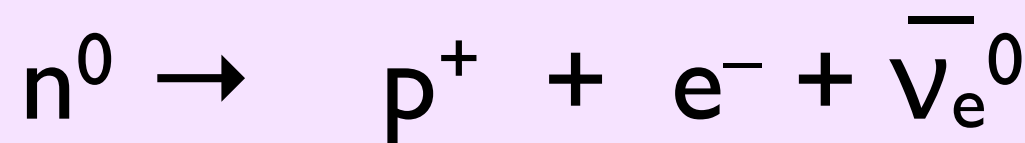
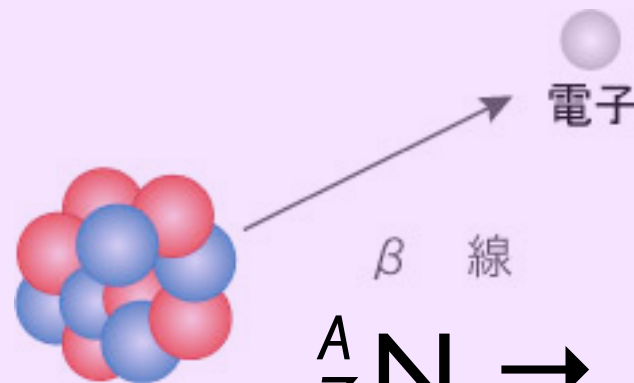
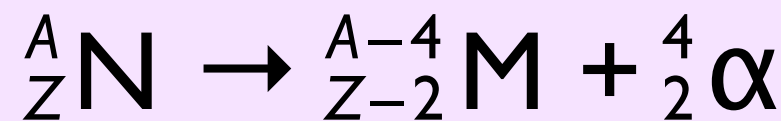
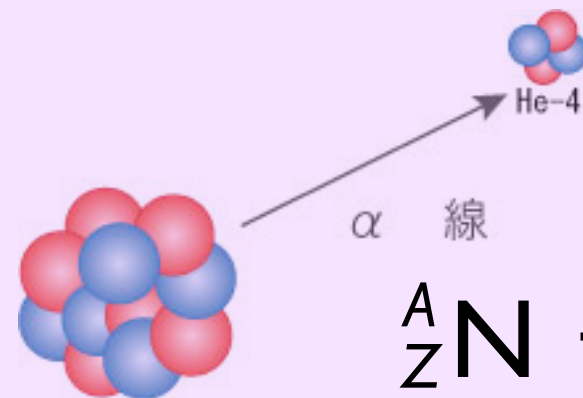


- α線   ヘリウム原子核
- β線   高速の電子
- γ線   光子（電磁波）
- X線   光子（電磁波）

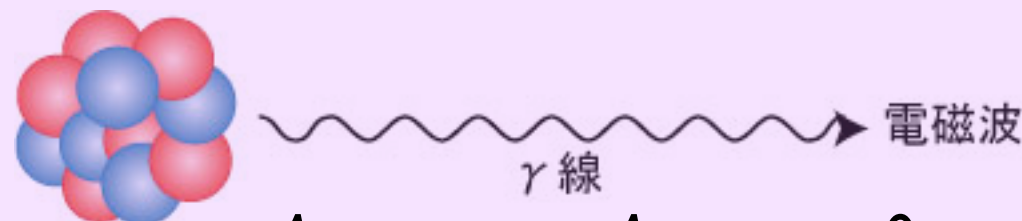
放射線の種類 (放射線治療分野で用いられる分類)



原子核 N



100 keV ~ MeV

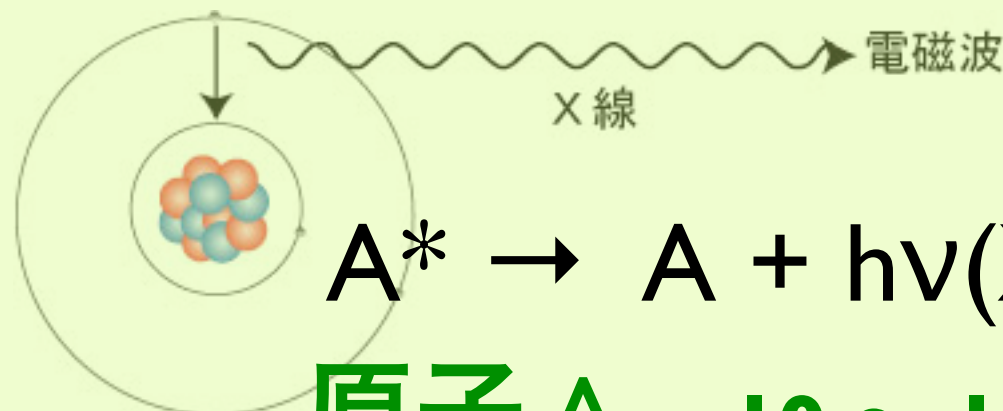


放射線のもつエネルギーは？

☞ 100 keV ~ MeV for  $\alpha/\beta/\gamma$

Cf. 原子の束縛エネルギーは？

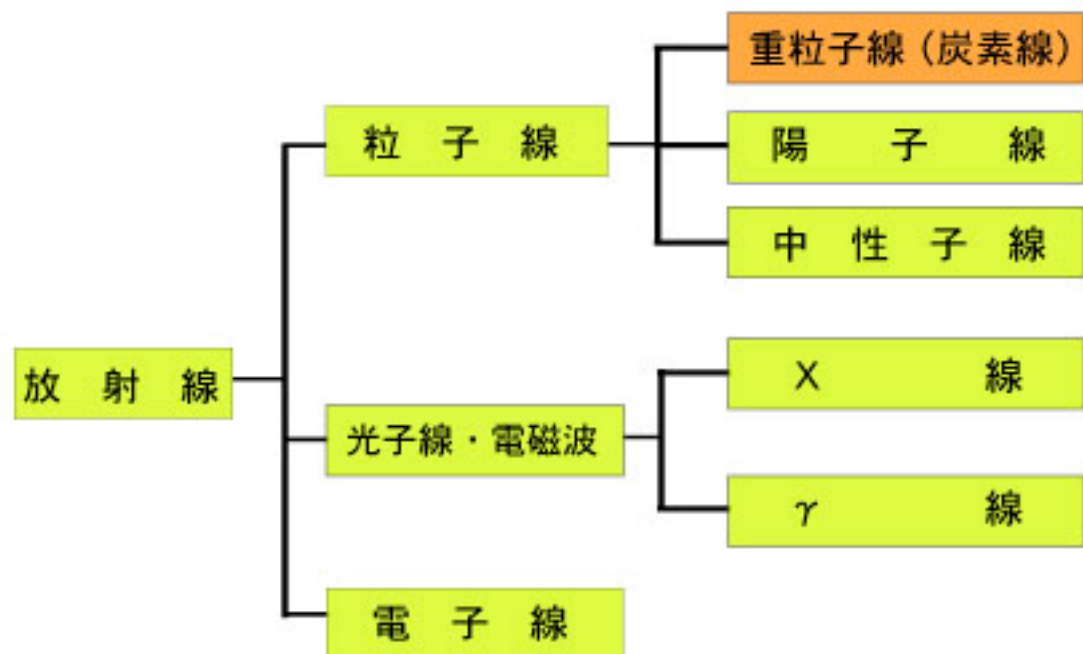
荷電粒子の質量は？



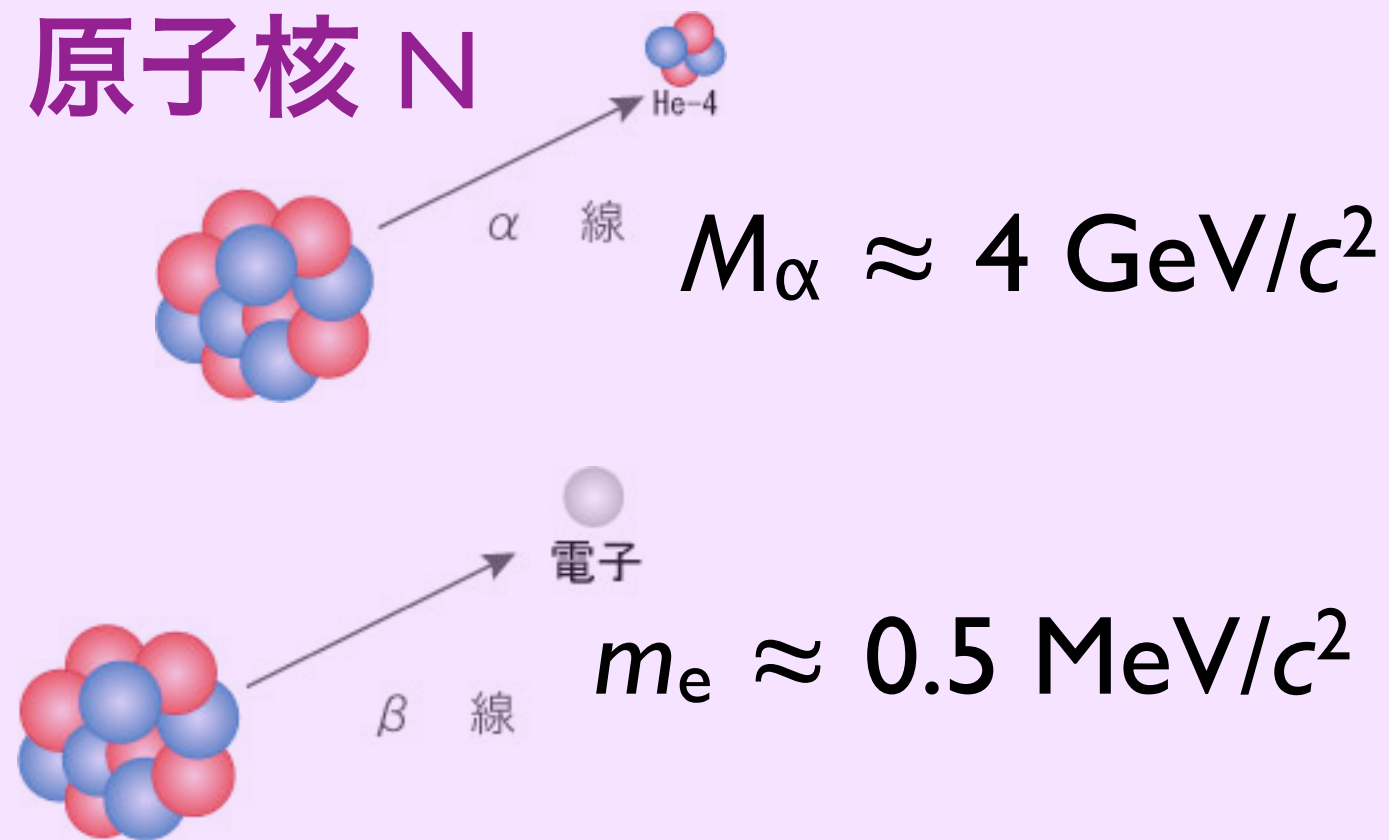
原子 A 10 ~ 100 keV



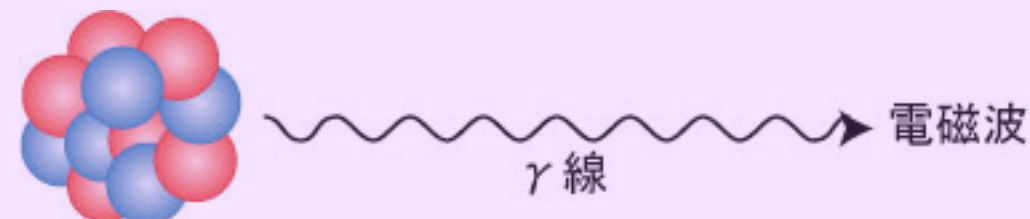
# 放射線の種類 (放射線治療分野で用いられる分類)



## 原子核 N



**100 keV ~ MeV**

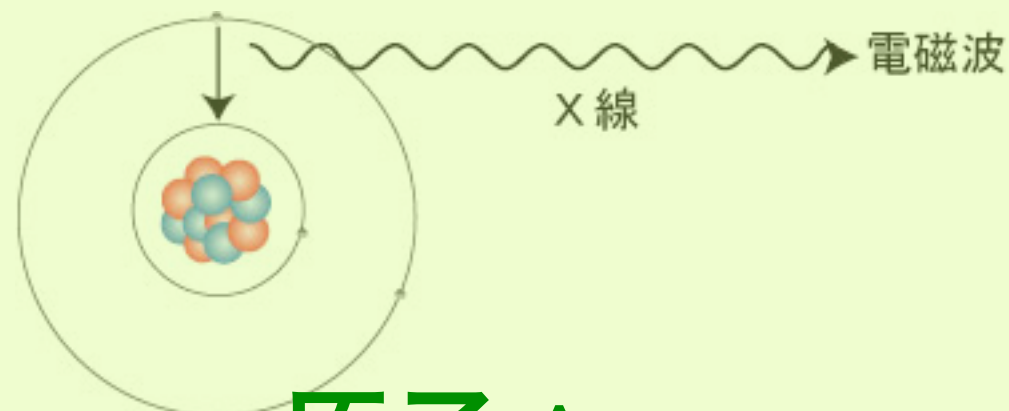


放射線のもつエネルギーは？

👉 **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



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

**tom**ography < 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 <b>H</b> 1.0079	Atomic Sym Mass																2 <b>He</b> 4.0026																																
2	3 <b>Li</b> 6.941	4 <b>Be</b> 9.0121	<table border="1"> <tr> <td><b>C</b> 固体</td> <td colspan="5">金属</td> <td colspan="2">非金属元素</td> </tr> <tr> <td><b>Hg</b> 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><b>H</b> 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><b>Rf</b> Unknown</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>										<b>C</b> 固体	金属					非金属元素		<b>Hg</b> 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	<b>H</b> 気体			アクチノイド					<b>Rf</b> Unknown								5 <b>B</b> 10.811	6 <b>C</b> 12.010	7 <b>N</b> 14.006	8 <b>O</b> 15.999	9 <b>F</b> 18.998	10 <b>Ne</b> 20.179
<b>C</b> 固体	金属					非金属元素																																												
<b>Hg</b> 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																																											
<b>H</b> 気体			アクチノイド																																															
<b>Rf</b> Unknown																																																		
3	11 <b>Na</b> 22.989	12 <b>Mg</b> 24.305											13 <b>Al</b> 26.981	14 <b>Si</b> 28.085	15 <b>P</b> 30.973	16 <b>S</b> 32.065	17 <b>Cl</b> 35.453	18 <b>Ar</b> 39.948																																
4	19 <b>K</b> 39.098	20 <b>Ca</b> 40.078	21 <b>Sc</b> 44.955	22 <b>Ti</b> 47.867	23 <b>V</b> 50.941	24 <b>Cr</b> 51.996	25 <b>Mn</b> 54.938	26 <b>Fe</b> 55.845	27 <b>Co</b> 58.933	28 <b>Ni</b> 58.693	29 <b>Cu</b> 63.546	30 <b>Zn</b> 65.38	31 <b>Ga</b> 69.723	32 <b>Ge</b> 72.64	33 <b>As</b> 74.921	34 <b>Se</b> 78.96	35 <b>Br</b> 79.904	36 <b>Kr</b> 83.798																																
5	37 <b>Rb</b> 85.467	38 <b>Sr</b> 87.62	39 <b>Y</b> 88.905	40 <b>Zr</b> 91.224	41 <b>Nb</b> 92.906	42 <b>Mo</b> 95.96	43 <b>Tc</b> (97.907)	44 <b>Ru</b> 101.07	45 <b>Rh</b> 102.90	46 <b>Pd</b> 106.42	47 <b>Ag</b> 107.86	48 <b>Cd</b> 112.41	49 <b>In</b> 114.81	50 <b>Sn</b> 118.71	51 <b>Sb</b> 121.76	52 <b>Te</b> 127.60	53 <b>I</b> 126.90	54 <b>Xe</b> 131.29																																
6	55 <b>Cs</b> 132.90	56 <b>Ba</b> 137.32	57-71	72 <b>Hf</b> 178.49	73 <b>Ta</b> 180.94	74 <b>W</b> 183.84	75 <b>Re</b> 186.20	76 <b>Os</b> 190.23	77 <b>Ir</b> 192.21	78 <b>Pt</b> 195.08	79 <b>Au</b> 196.96	80 <b>Hg</b> 200.59	81 <b>Tl</b> 204.38	82 <b>Pb</b> 207.2	83 <b>Bi</b> 208.98	84 <b>Po</b> (208.98)	85 <b>At</b> (209.98)	86 <b>Rn</b> (222.01)																																
7	87 <b>Fr</b> (223)	88 <b>Ra</b> (226)	89-103	104 <b>Rf</b> (261)	105 <b>Db</b> (262)	106 <b>Sg</b> (266)	107 <b>Bh</b> (264)	108 <b>Hs</b> (277)	109 <b>Mt</b> (268)	110 <b>Ds</b> (271)	111 <b>Rg</b> (272)	112 <b>Cn</b> (285)	113 <b>Uut</b> (284)	114 <b>Ff</b> (289)	115 <b>Uup</b> (288)	116 <b>Lv</b> (292)	117 <b>Uus</b>	118 <b>Uuo</b> (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

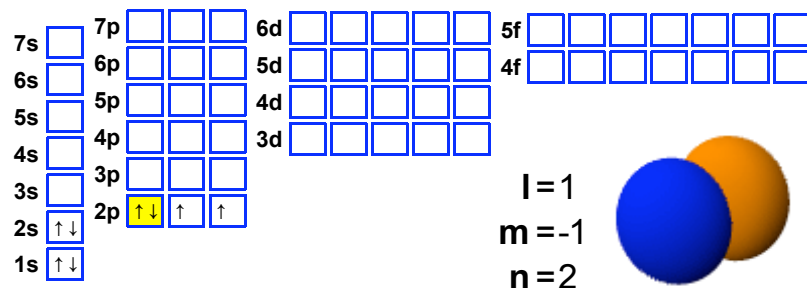
57 <b>La</b> 138.90	58 <b>Ce</b> 140.11	59 <b>Pr</b> 140.90	60 <b>Nd</b> 144.24	61 <b>Pm</b> (145)	62 <b>Sm</b> 150.36	63 <b>Eu</b> 151.96	64 <b>Gd</b> 157.25	65 <b>Tb</b> 158.92	66 <b>Dy</b> 162.50	67 <b>Ho</b> 164.93	68 <b>Er</b> 167.25	69 <b>Tm</b> 168.93	70 <b>Yb</b> 173.05	71 <b>Lu</b> 174.96
89 <b>Ac</b> (227)	90 <b>Th</b> 232.03	91 <b>Pa</b> 231.03	92 <b>U</b> 238.02	93 <b>Np</b> (237)	94 <b>Pu</b> (244)	95 <b>Am</b> (243)	96 <b>Cm</b> (247)	97 <b>Bk</b> (247)	98 <b>Cf</b> (251)	99 <b>Es</b> (252)	100 <b>Fm</b> (257)	101 <b>Md</b> (258)	102 <b>No</b> (259)	103 <b>Lr</b> (262)



# 周期表

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

8  
**O**  
酸素  
15.9994  
[He]2s<sup>2</sup> 2p<sup>4</sup>



s  
p  
d  
f

1s<sup>2</sup> 2s<sup>2</sup> 2p<sup>4</sup>

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

# 元素周期表

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

铱

镅

这些原理没有一致稳定的同位素,大量的同位素最长的半衰期

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

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

# Periodic Table of Elements

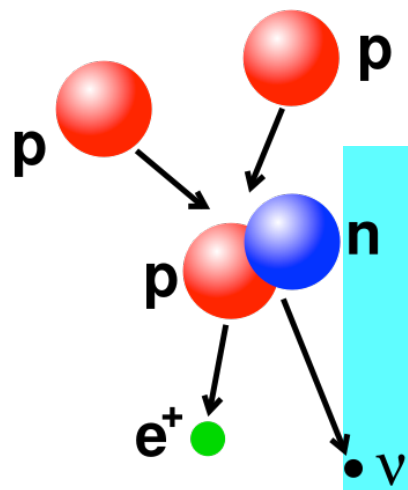
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18																																					
1	1 H 1 1.00794	<table border="0"> <tr> <td>Atomic Name</td> <td>Hydrogen-3</td> <td><b>α</b> Alpha decay</td> <td><b>β</b> Beta decay</td> <td>Selected</td> <td>All</td> </tr> <tr> <td>Mass</td> <td>3.01604927767</td> <td><b>p</b> Proton emission</td> <td><b>β+</b> Beta+ decay</td> <td>5</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>Binding Energy</td> <td>2.827266</td> <td><b>n</b> Neutron emission</td> <td><b>EC</b> Electron capture</td> <td>7</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>Abundance</td> <td>0%</td> <td><b>SF</b> Spontaneous fission</td> <td>Stable</td> <td>9</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Half-Life</td> <td>12.32 y</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Decay Width</td> <td>1.174e-30</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>																	Atomic Name	Hydrogen-3	<b>α</b> Alpha decay	<b>β</b> Beta decay	Selected	All	Mass	3.01604927767	<b>p</b> Proton emission	<b>β+</b> Beta+ decay	5	6	Binding Energy	2.827266	<b>n</b> Neutron emission	<b>EC</b> Electron capture	7	8	Abundance	0%	<b>SF</b> Spontaneous fission	Stable	9	10	Half-Life	12.32 y					Decay Width	1.174e-30					2 He 2
Atomic Name	Hydrogen-3	<b>α</b> Alpha decay	<b>β</b> Beta decay	Selected	All																																																		
Mass	3.01604927767	<b>p</b> Proton emission	<b>β+</b> Beta+ decay	5	6																																																		
Binding Energy	2.827266	<b>n</b> Neutron emission	<b>EC</b> Electron capture	7	8																																																		
Abundance	0%	<b>SF</b> Spontaneous fission	Stable	9	10																																																		
Half-Life	12.32 y																																																						
Decay Width	1.174e-30																																																						
2	3 Li 2 6.941	4 Be 2 9.012182	5 B 2 10.811	6 C 3 12.0107	7 N 3 14.0064	8 O 3 15.999	9 F 2 18.998	10 Ne 3 20.1797																																															
3	11 Na 2 22.989769	12 Mg 3 24.304											13 Al 2 26.981538	14 Si 4 28.0855	15 P 3 30.973762	16 S 5 32.06	17 Cl 3 35.453	18 Ar 7 39.948																																					
4	19 K 3 39.0983	20 Ca 9 40.078	21 Sc 5 (44.9559)	22 Ti 6 47.867	23 V 4 50.9415	24 Cr 5 51.9961	25 Mn 4 54.938	26 Fe 7 55.845	27 Co 5 58.9332	28 Ni 8 58.6934	29 Cu 2 63.546	30 Zn 7 65.38	31 Ga 2 69.723	32 Ge 7 72.630	33 As 3 74.9216	34 Se 9 78.96	35 Br 2 79.904	36 Kr 9 83.80																																					
5	37 Rb 5 85.4678	38 Sr 9 87.62	39 Y 5 (88.9058)	40 Zr 8 91.224	41 Nb 5 92.906	42 Mo 9 95.94	43 Tc 5 (98.9062)	44 Ru 10 101.07	45 Rh 5 101.07	46 Pd 9 106.36	47 Ag 6 107.868	48 Cd 11 112.411	49 In 2 114.818	50 Sn 11 118.710	51 Sb 3 121.757	52 Te 11 127.6	53 I 3 126.905	54 Xe 13 131.29																																					
6	55 Cs 4 132.905	56 Ba 8 137.327	57-71 Lanthanides	72 Hf 8 178.49	73 Ta 7 180.948	74 W 7 183.84	75 Re 2 186.207	76 Os 11 190.23	77 Ir 7 192.222	78 Pt 9 195.084	79 Au 5 196.967	80 Hg 11 200.59	81 Tl 3 204.38	82 Pb 6 207.2	83 Bi 3 208.98	84 Po 3 (209)	85 At 1 (210)	86 Rn 2 (222)																																					
7	87 Fr 3 (223)	88 Ra 4 (226)	89-103 Actinides	104 Rf 1 (261)	105 Db 1 (262)	106 Sg 1 (263)	107 Bh 2 (264)	108 Hs 2 (265)	109 Mt 1 (266)	110 Ds 1 (271)	111 Rg 1 (272)	112 Cn 1 (285)	113 Uut 1 (288)	114 Fl 1 (289)	115 Uup 1 (290)	116 Lv 1 (293)	117 Uus 1 (294)	118 Uuo 1 (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





# Periodic Table of Elements

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

Name: Hydrogen-3  
 Mass: 3.01604927767  
 Alpha decay:  $\alpha$   
 Beta decay:  $\beta$   
 Selected: All  
 He: 2

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	<b>原子</b>

# 放射性物質とは

放射性核種

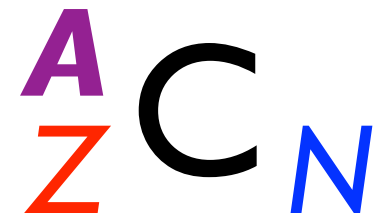
= 放射性同位体

= 不安定原子核

を含む原子からできている物質

表記法  $^{12}\text{C}$  (または C-12, 炭素12)

質量数  $A = Z + N$

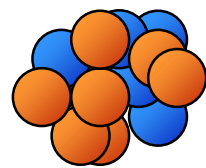


元素名

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

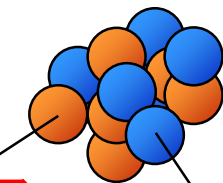
炭素10



$^{10}\text{C}$

陽子6  
中性子4

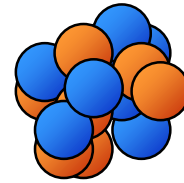
炭素11



$^{11}\text{C}$

陽子6  
中性子5

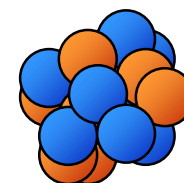
炭素12



$^{12}\text{C}$

陽子6  
中性子6

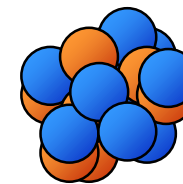
炭素13



$^{13}\text{C}$

陽子6  
中性子7

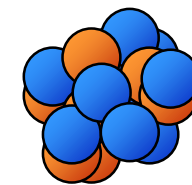
炭素14



$^{14}\text{C}$

陽子6  
中性子8

炭素15



$^{15}\text{C}$

陽子6  
中性子9

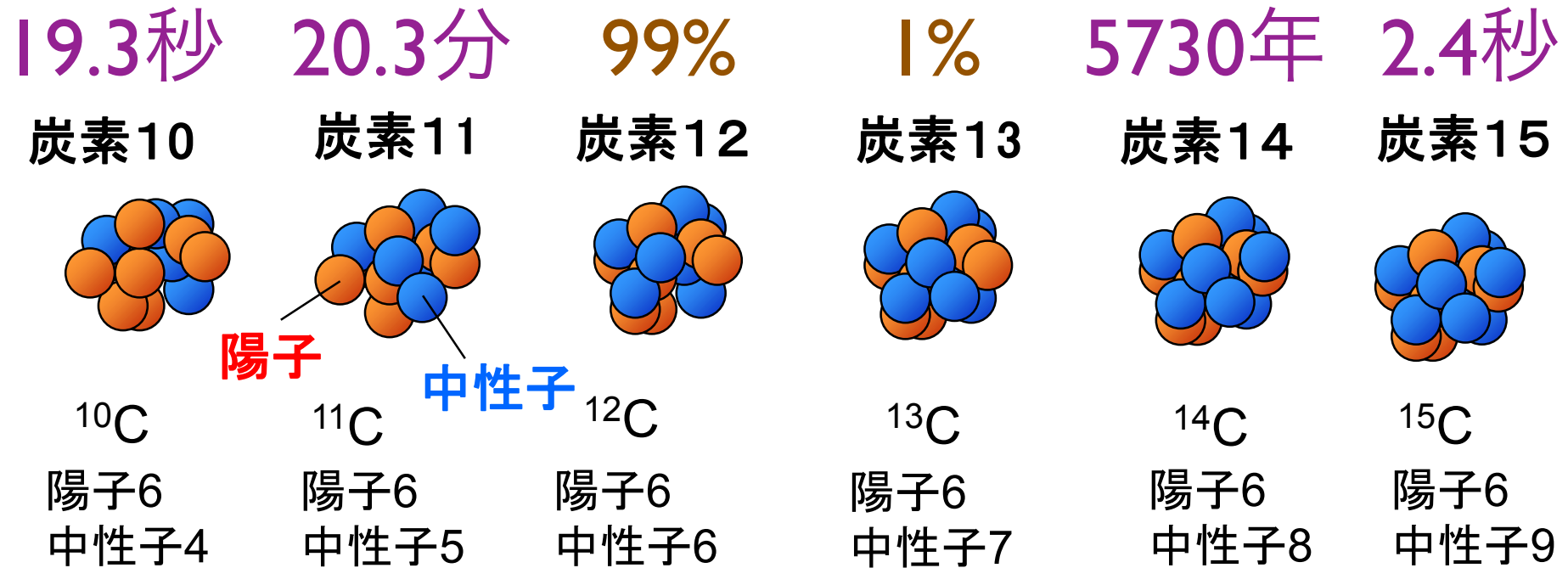
放射性同位体  
(不安定)

安定同位体  
(寿命無限大)

放射性同位体  
(不安定)

# 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))

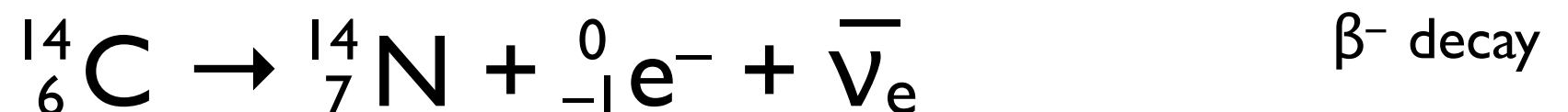
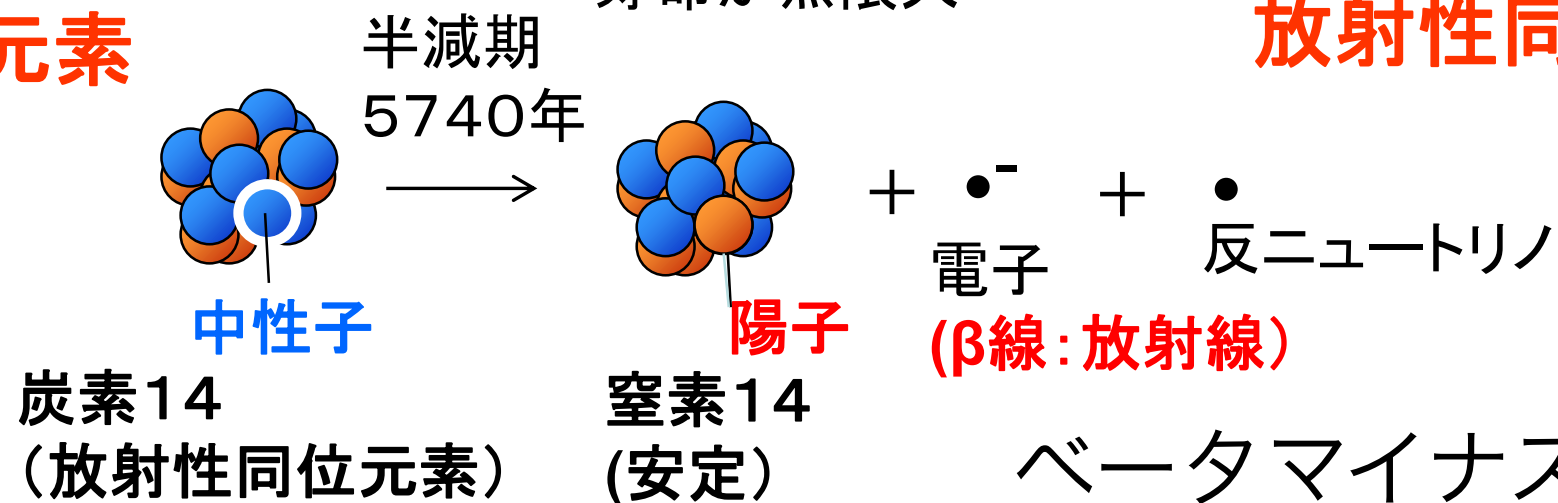
天然に存在=**安定同位体**  
寿命が無限大

中性子過剰になると？

(寿命がある:  $\beta^-$ 壊変)

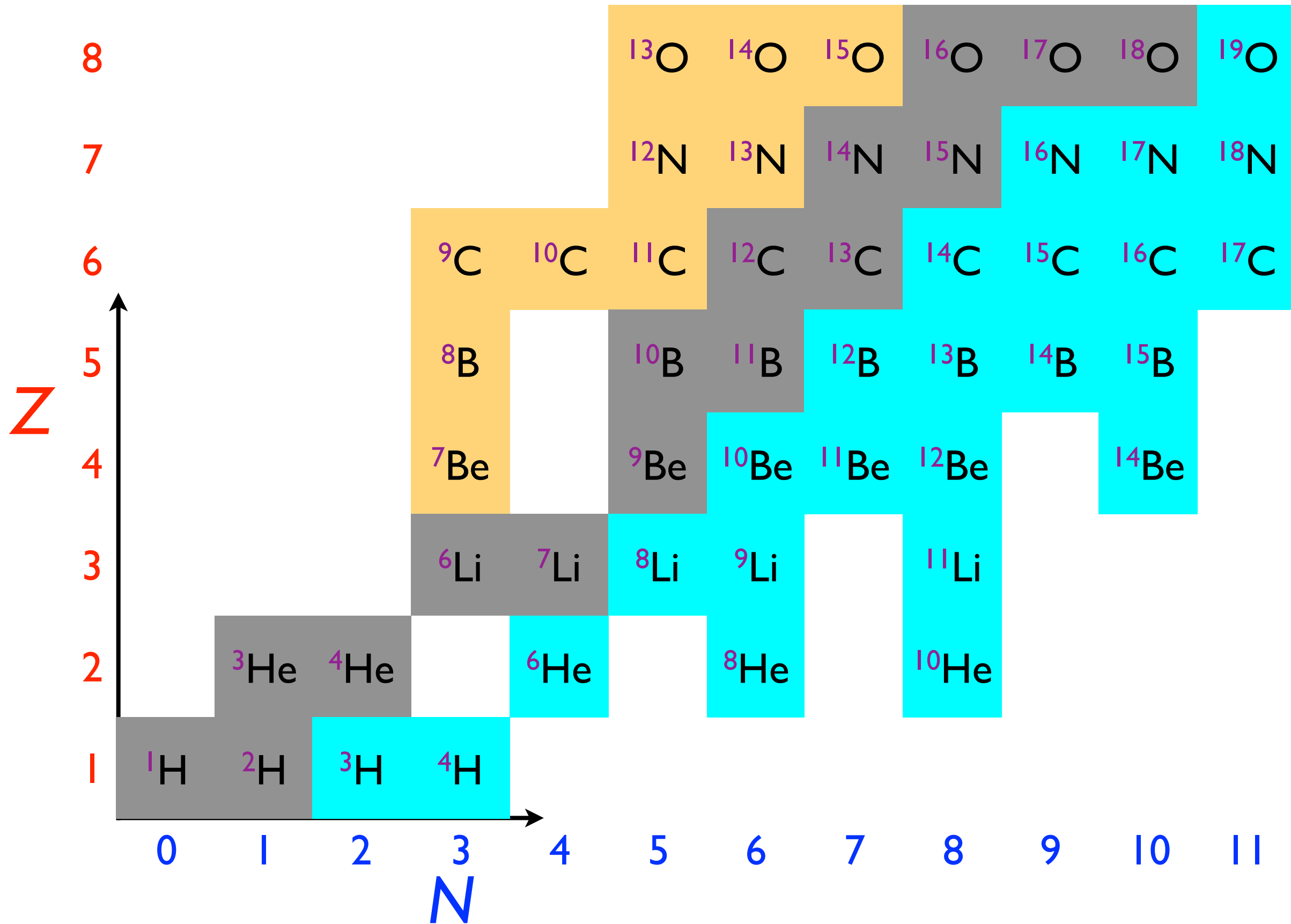
## 放射性同位元素

## 放射性同位元素





# 核图表



# Nuclear Science

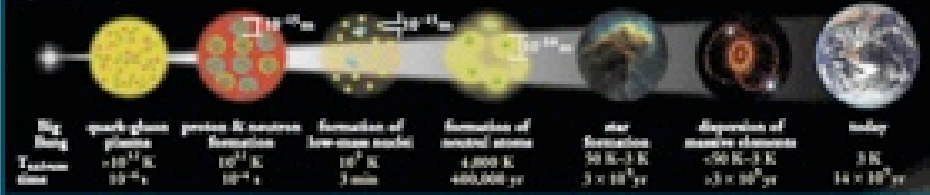
**Nuclear Science** is the study of the structure, properties, and interactions of the atomic nuclei. Nuclear scientists calculate and measure the masses, shapes, sizes, and decays of nuclei at rest and in collisions. They ask questions, such as "Why do nuclei stay in the nucleus?" "What combinations 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.

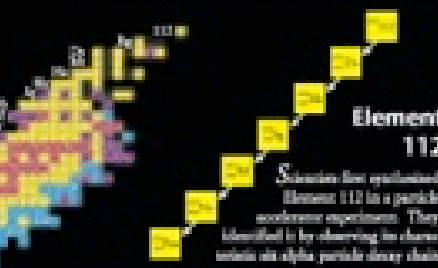


## Phases of Nuclear Matter



## 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  $Z \leq 112$ .



## Radioactivity

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

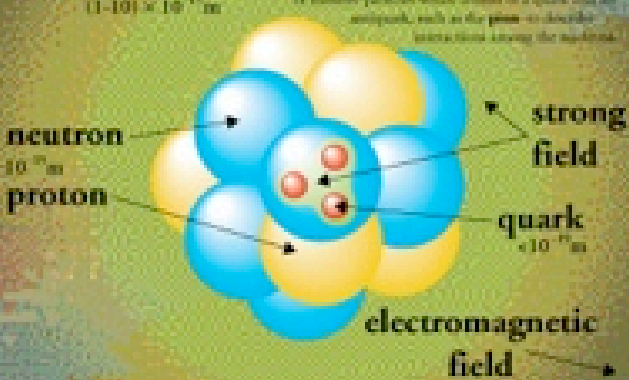
**Beta Minus Decay:**  ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}$  (beta particle)

**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 atomic electron and emits a positron and neutrino. 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  $10^7$  m/s, from the nucleus decaying. If the electron cloud were absent, it is like the electron would have a small orbit.

## Nuclear Energy

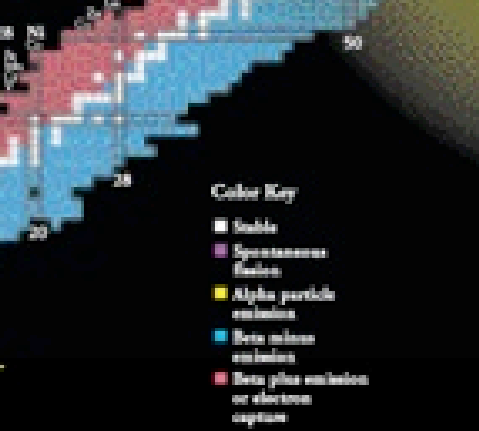
**Fission:**  ${}^{235}_{92}\text{U} + n \rightarrow {}^{141}_{54}\text{Xe} + {}^{92}_{38}\text{Sr} + 2n$

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

In the early stages of nuclear reactions 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 stellar evolution, more massive nuclei up to and beyond iron 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  $Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82$  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:** Recently, scientists have used radiocarbon dating with  ${}^{14}\text{C}$  to date objects that were once living, such as wood. For example, from a study of pollen found at the site, scientists determined that the bridge 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:** Radiative 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 with  ${}^{18}\text{F}$  is used in Positron Emission Tomography (PET) to produce images of brain activity.

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

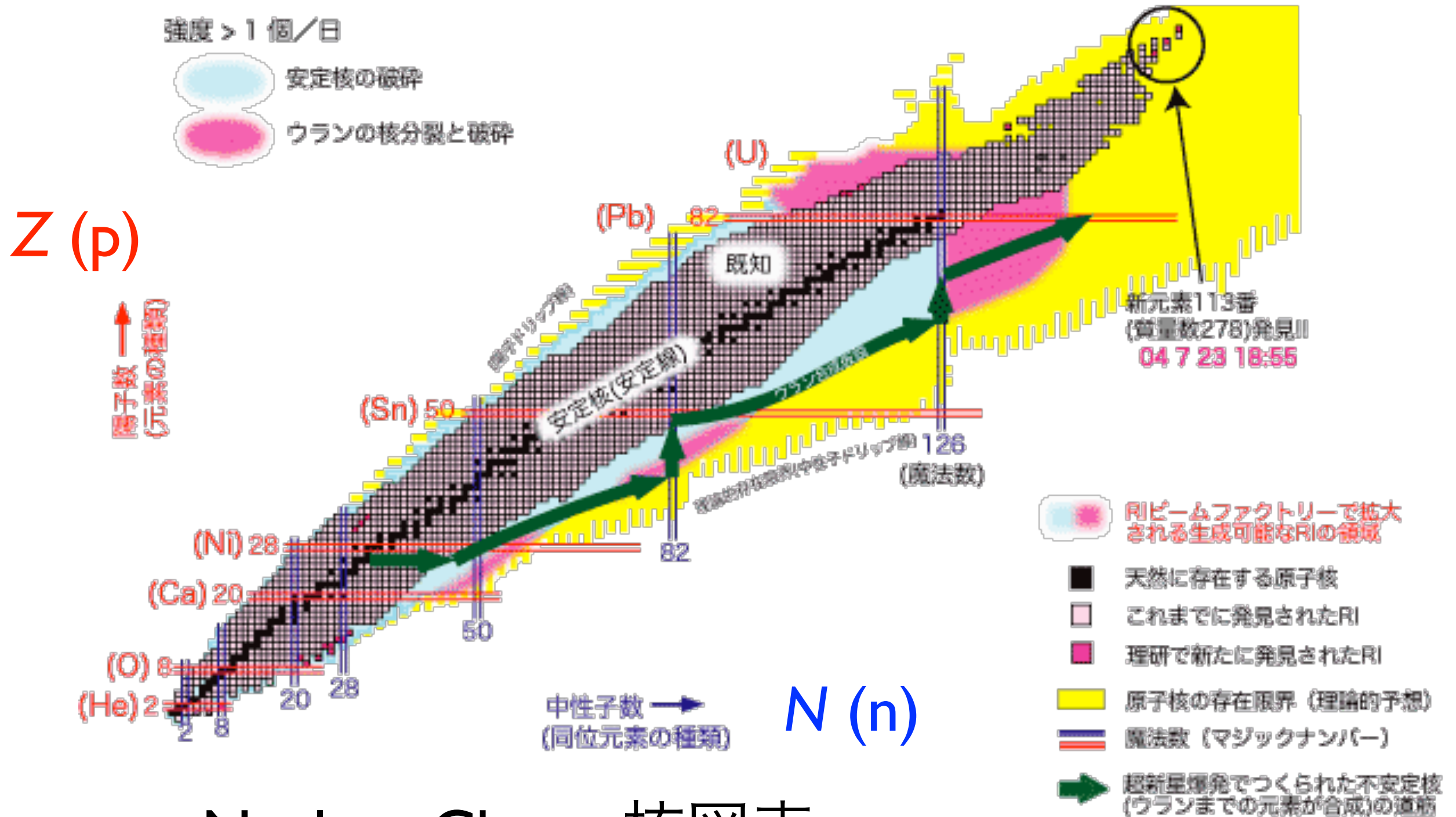
**Nuclear Reactors:** Nuclear reactors on the basis of  ${}^{235}\text{U}$  or  ${}^{239}\text{Pu}$  nuclei to produce electric power. Reactors will have other nuclear applications generate radioactive waste, depend of the way to a subject of current research.

**Magnetic Resonance Imaging:** Magnetic Resonance Imaging (MRI) utilizes an 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



# 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

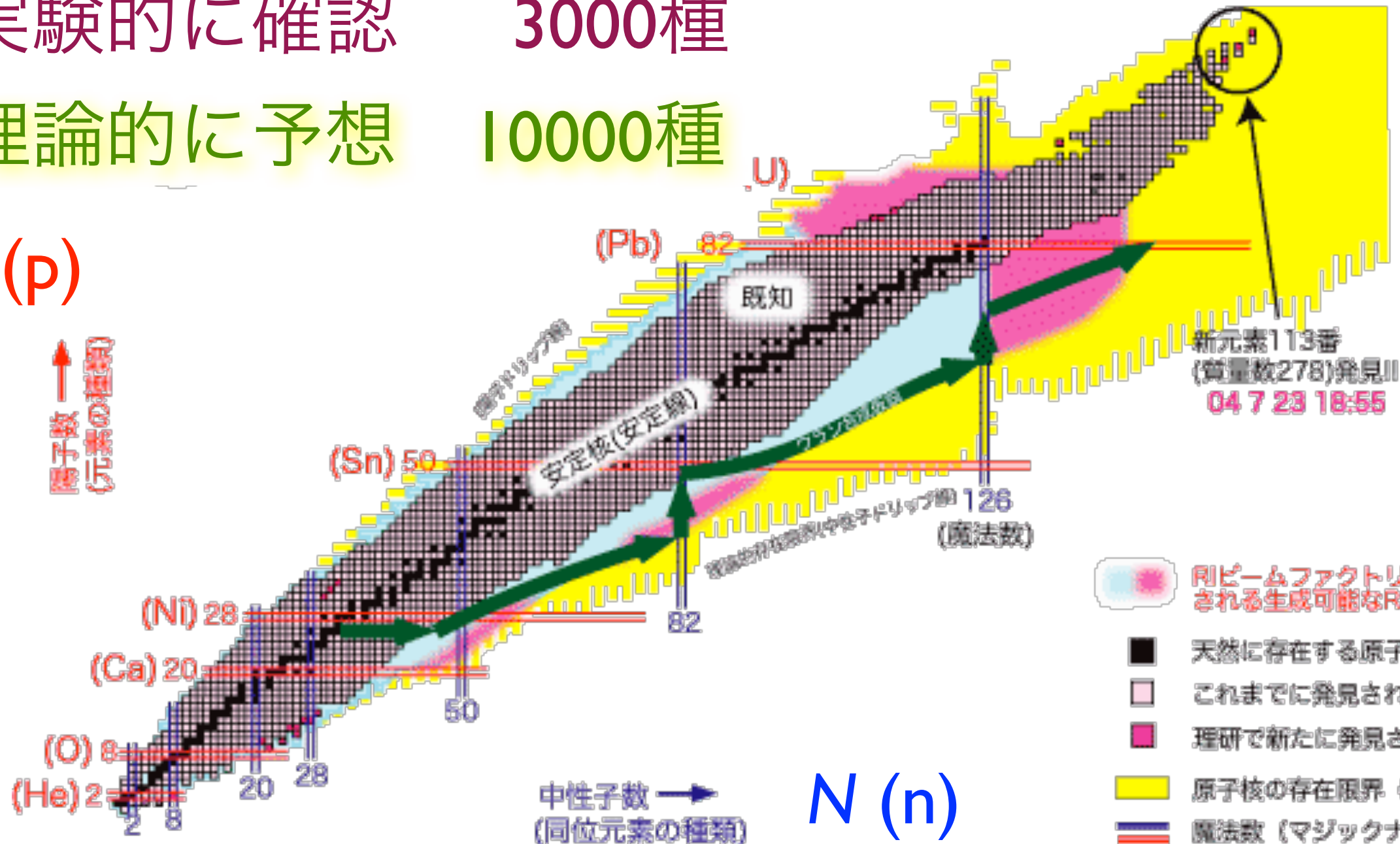
理論的に予想 10000種

# 原子核物理学

## Nuclear Physics

Z (p)

↑ 原子数  
陽子数 (元素の種類)



Nuclear Chart 核図表

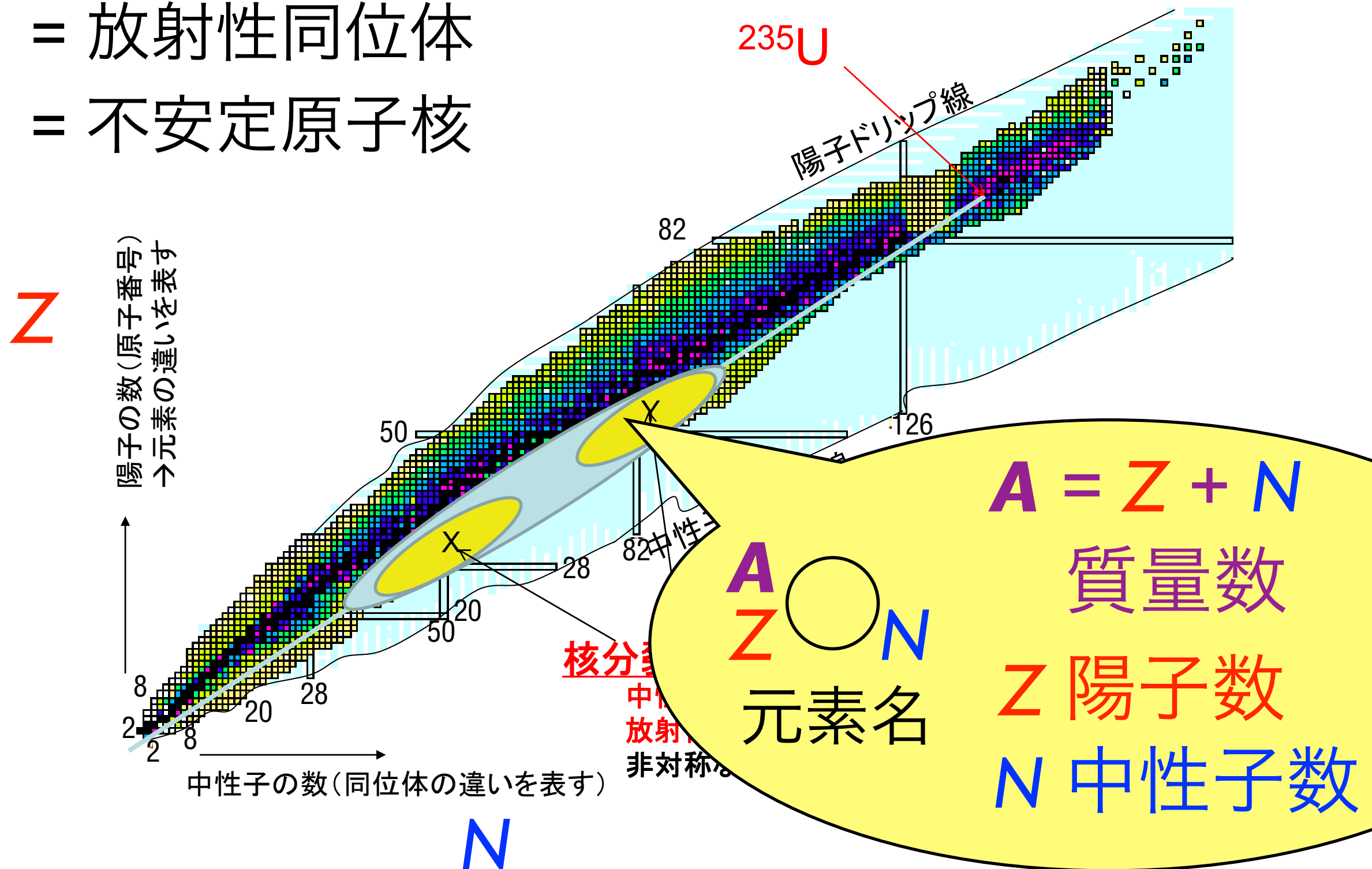
# 放射性物質とは

放射性核種

= 放射性同位体

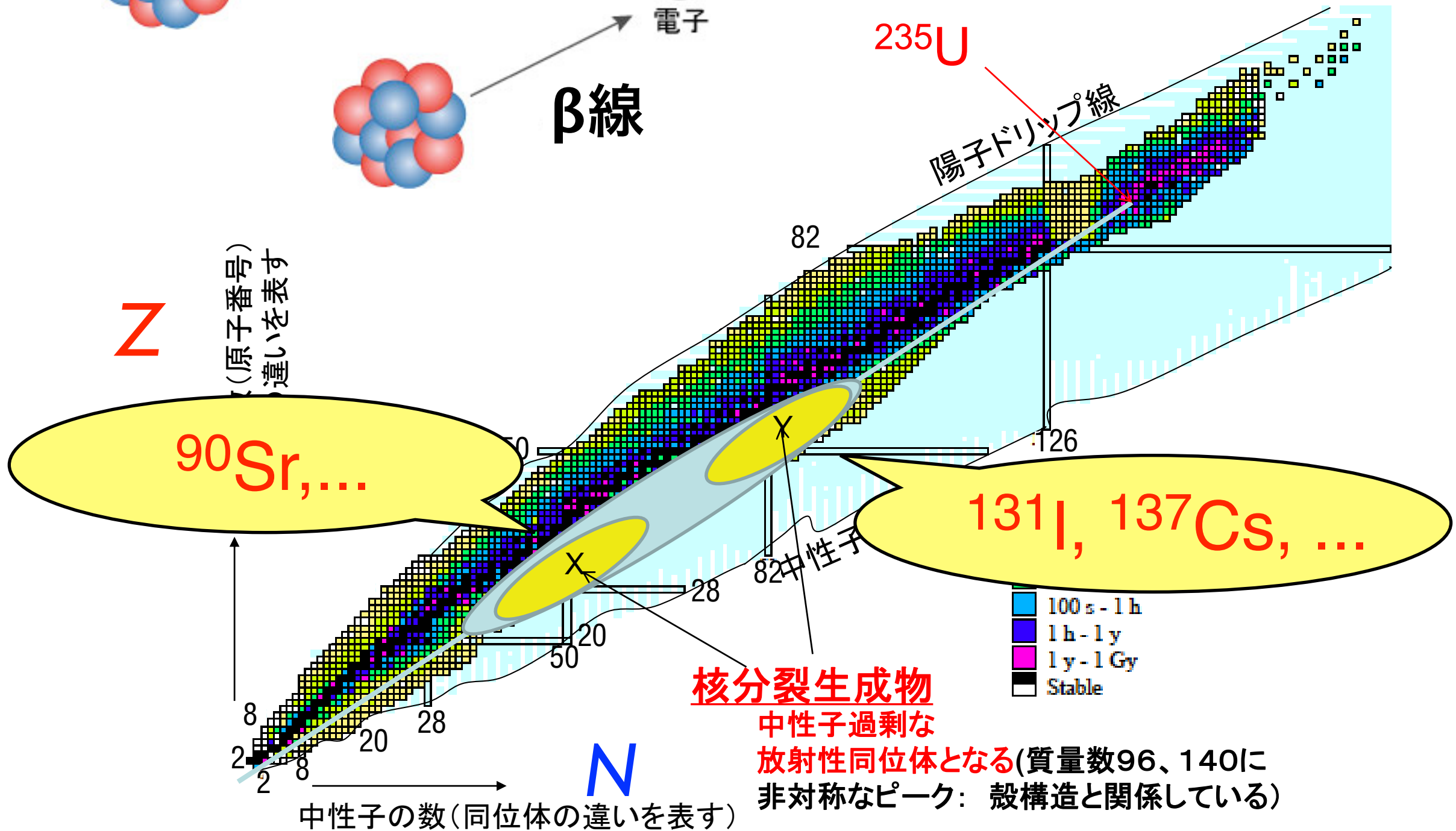
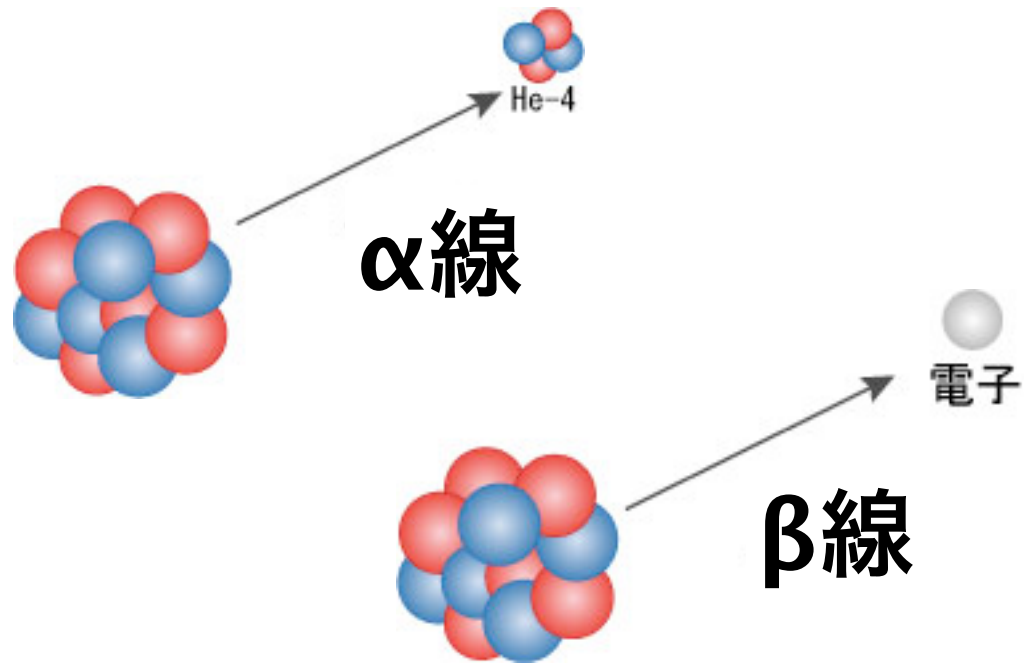
= 不安定原子核

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	$Z$	${}^A_Z N_N$	${}^{A'}_Z N_{N'}$	${}^{A''}_Z N_{N''}$
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	$Z, N$	${}^A_Z N_N$	${}^{Am_1}_Z N_N^{(*)}$	${}^{Am_2}_Z N_N^{(*)}$

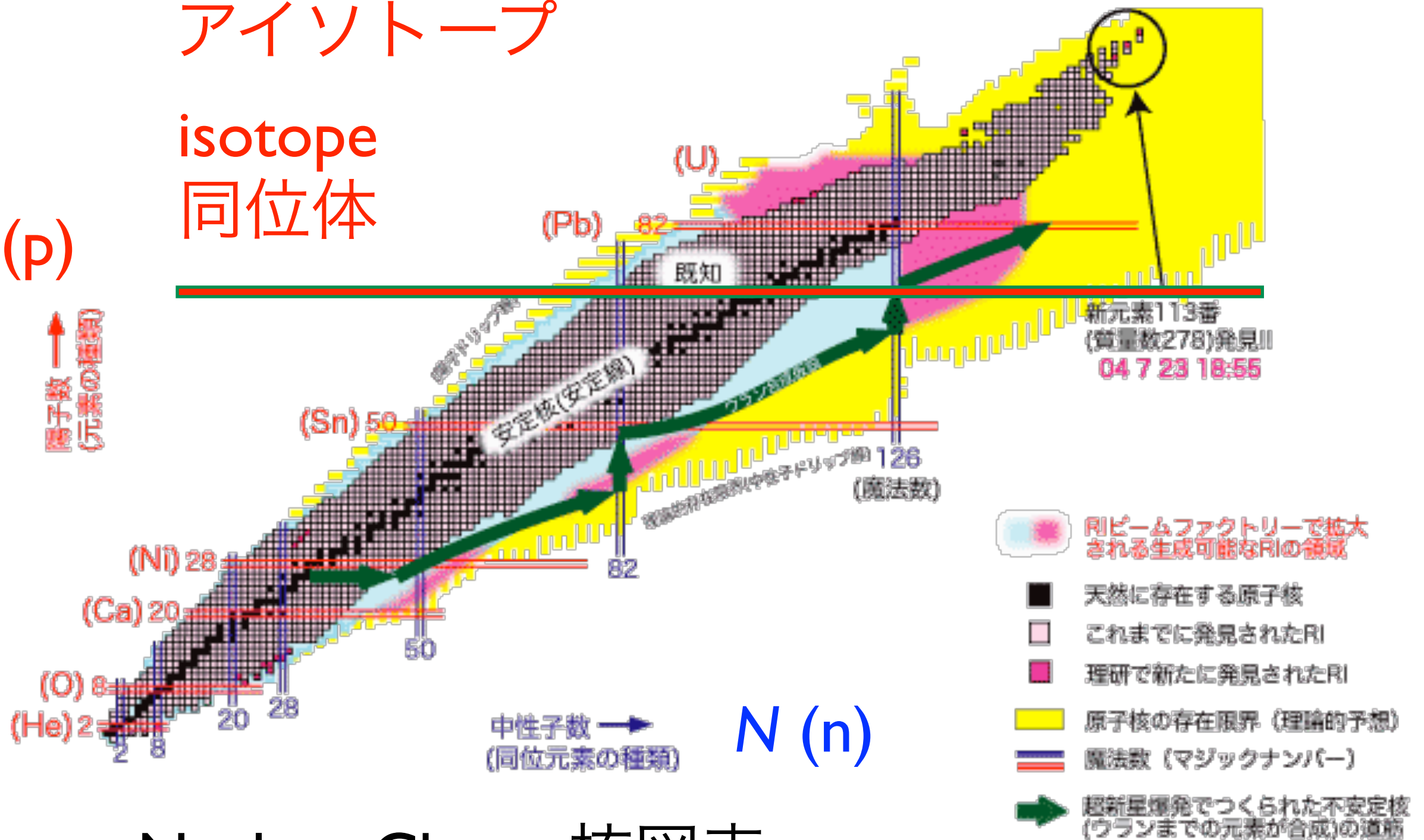
# 原子核物理学

## Nuclear Physics

アイソトープ

isotope  
同位体

Z (p)

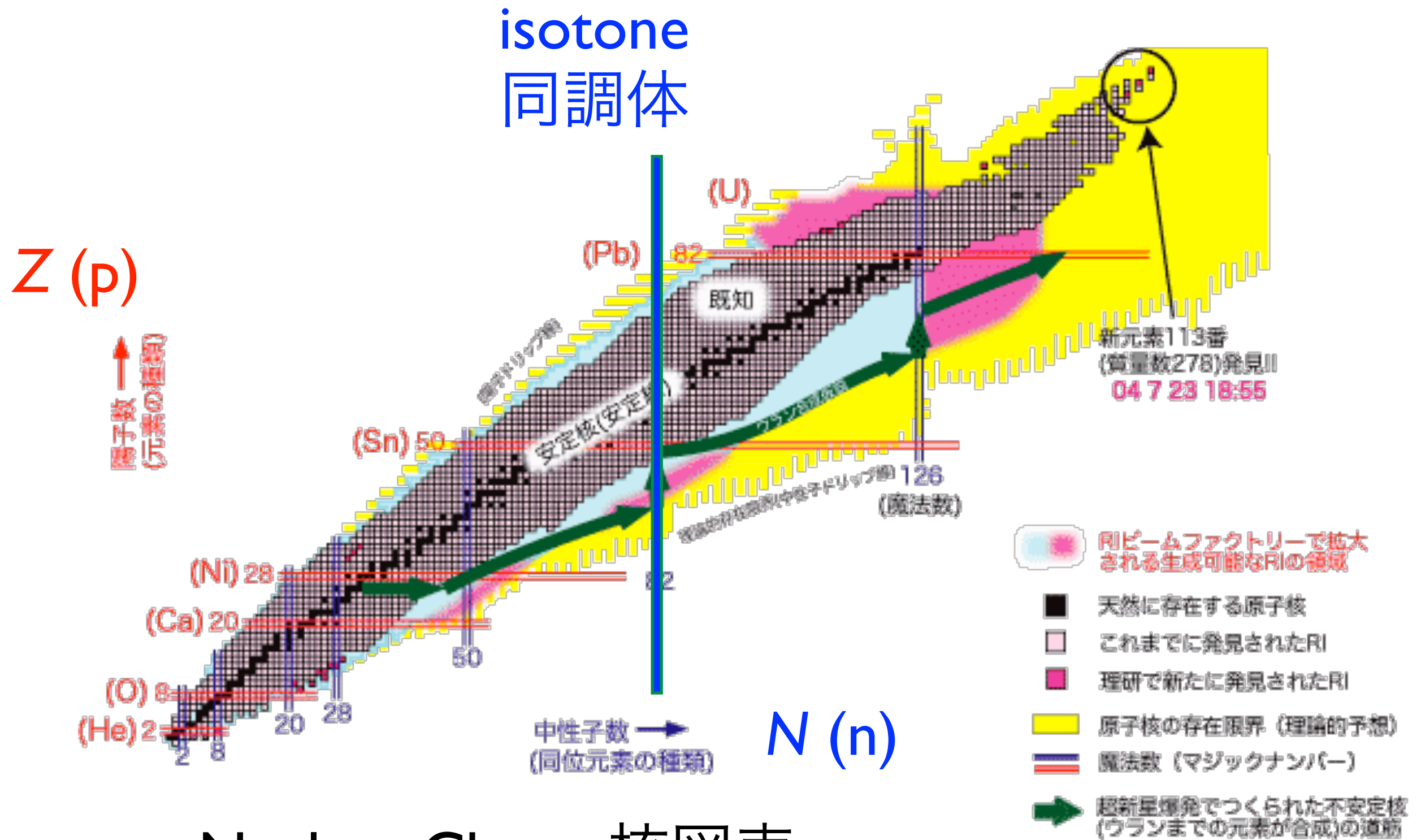


Nuclear Chart 核図表



# 原子核物理学

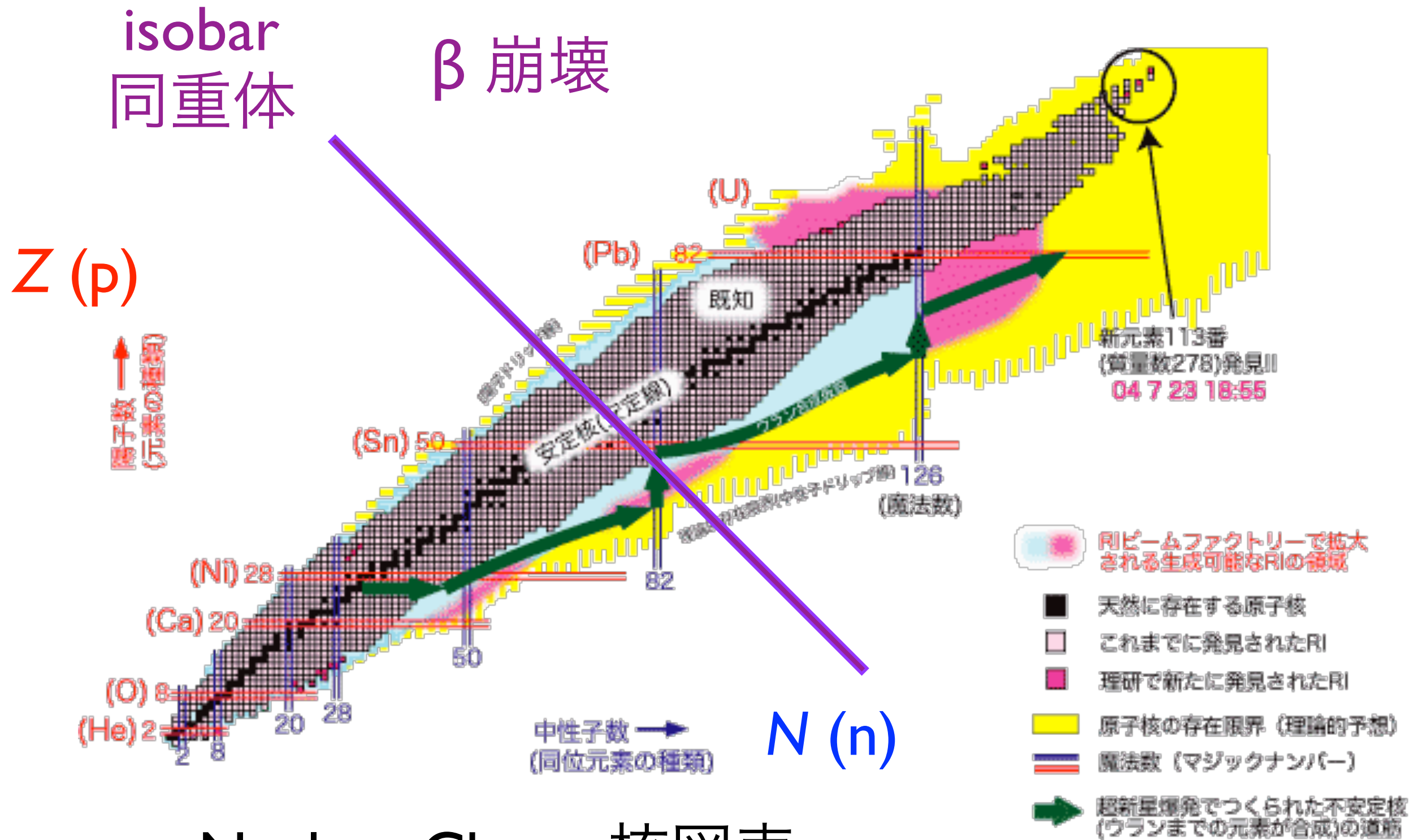
## Nuclear Physics



Nuclear Chart 核図表

# 原子核物理学

## Nuclear Physics

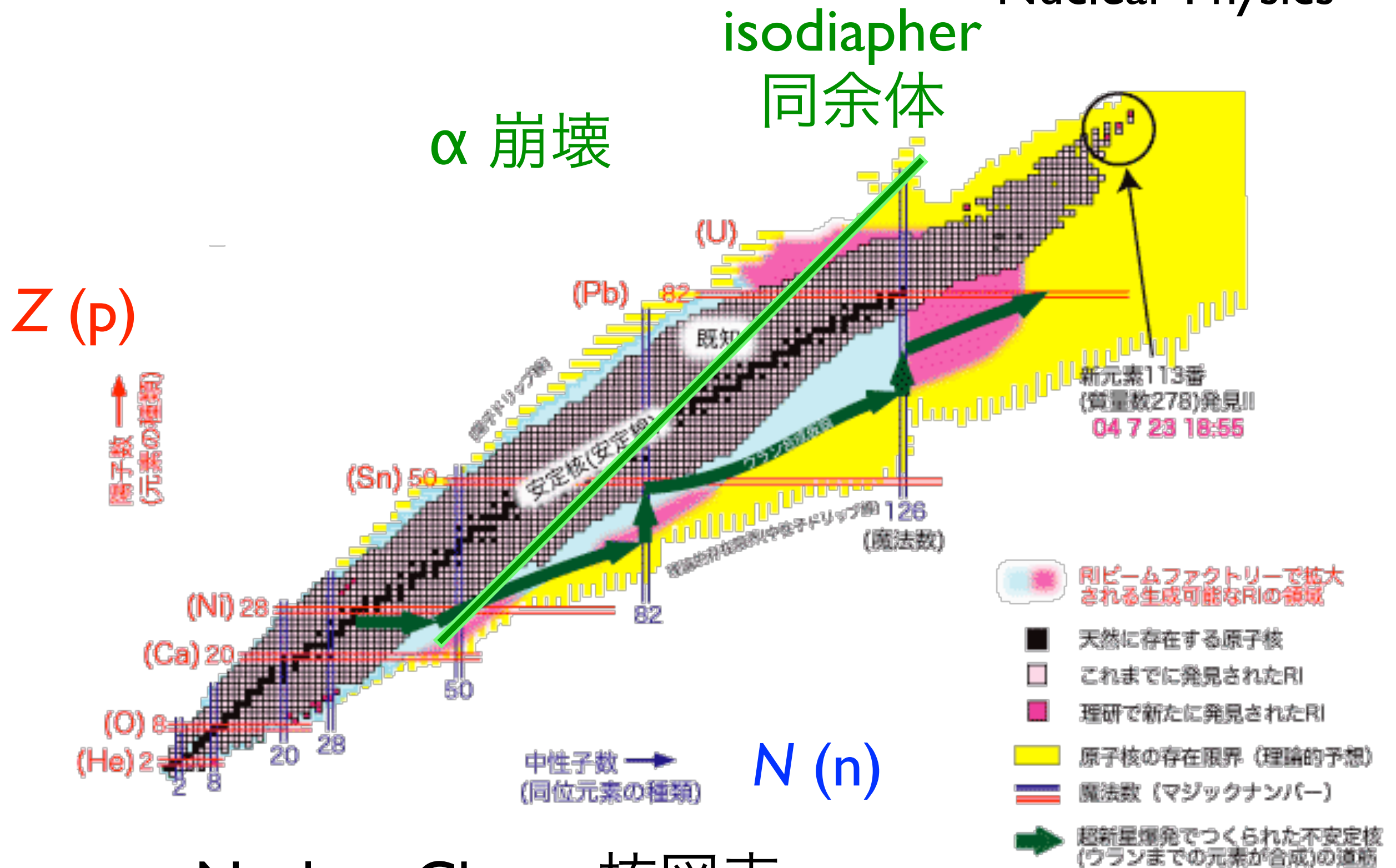


Nuclear Chart 核図表



# 原子核物理学

## Nuclear Physics

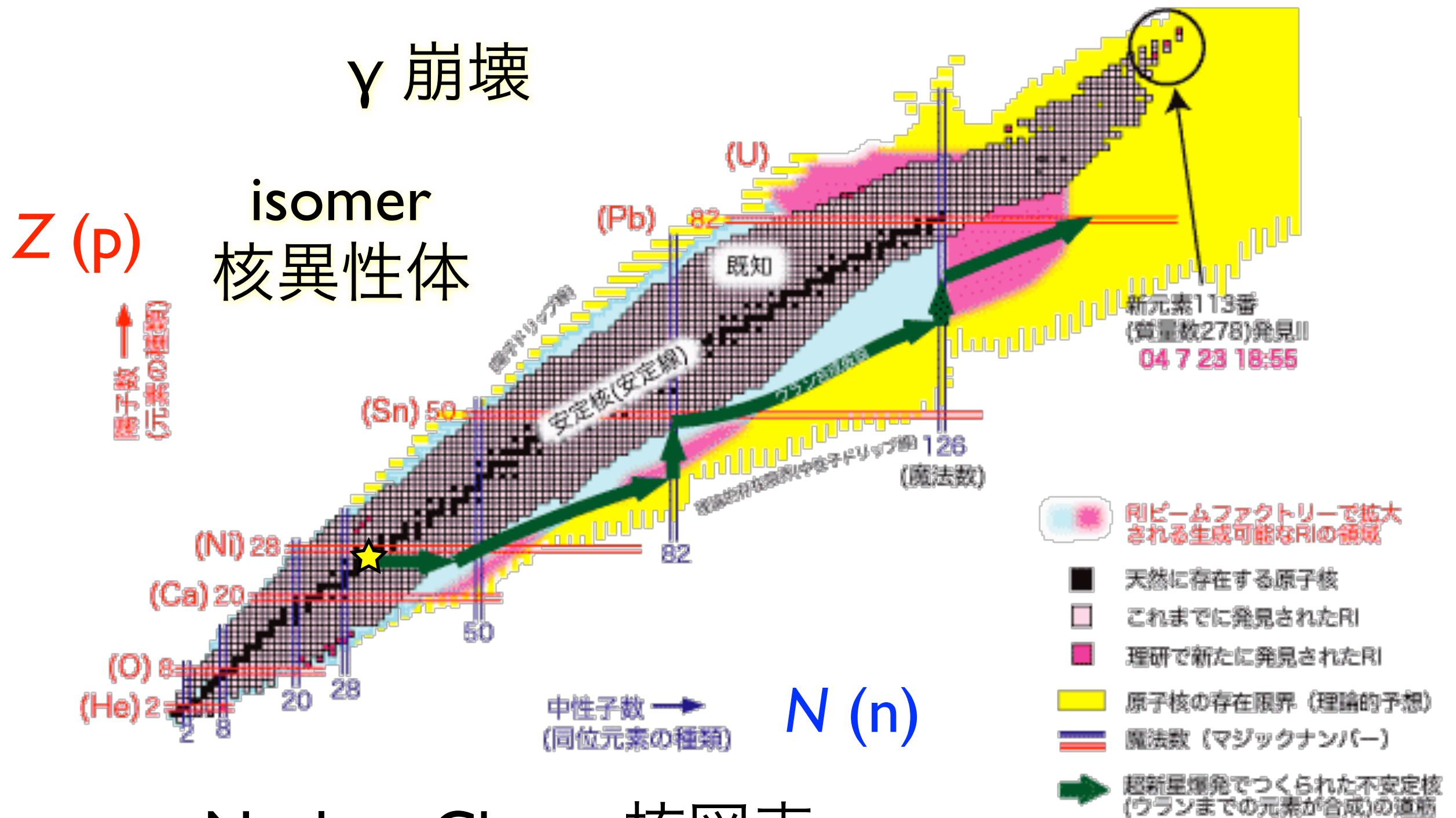


Nuclear Chart 核図表

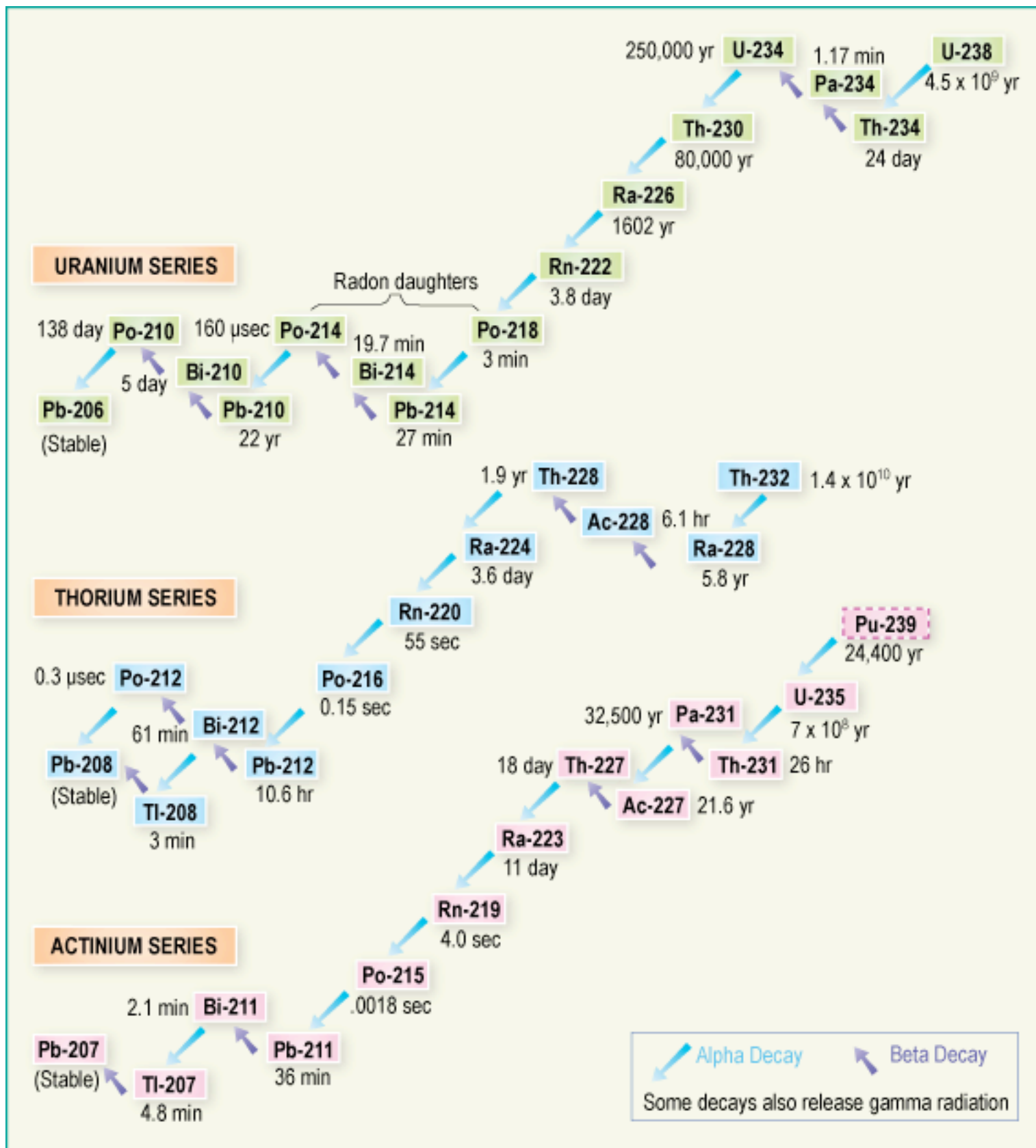


# 原子核物理学

## Nuclear Physics



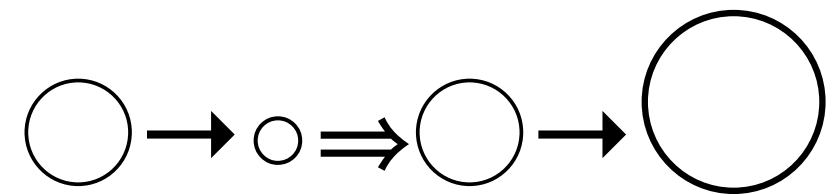
Nuclear Chart 核図表



# 壊変 (崩壊) 系列

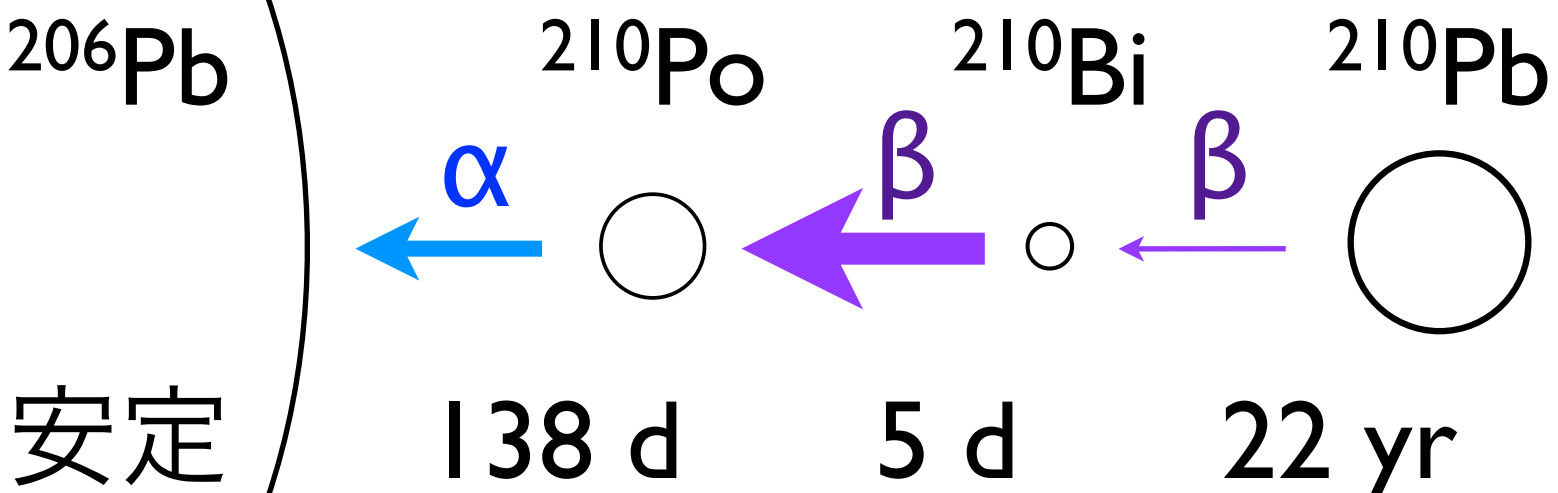
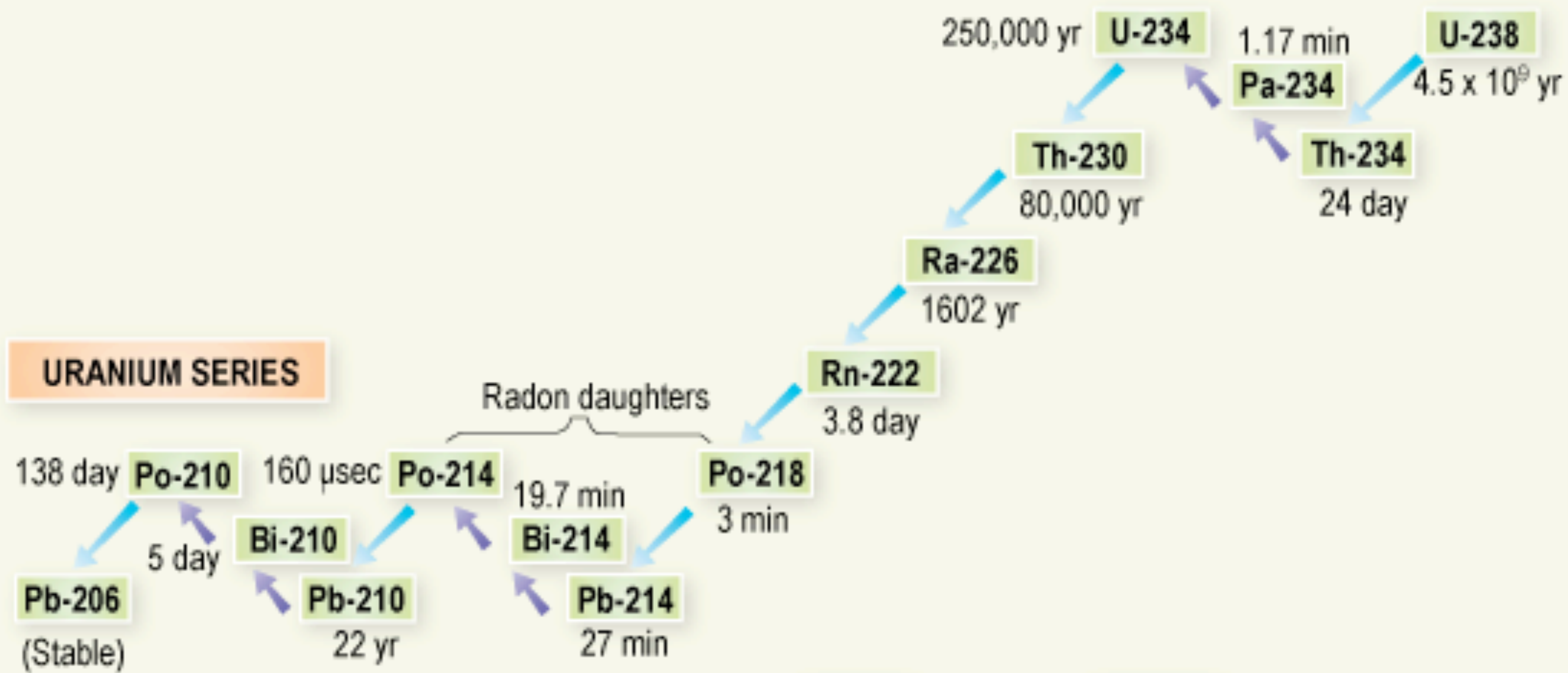
- (4n) トリウム系列
- (4n+1) ネプツニウム系列
- (4n+2) ウラン系列
- (4n+3) アクチニウム系列

# 放射平衡



# 壊変 (崩壊) 系列

## (4n+2) ウラン系列



放射平衡

安定



# 壊変 (崩壊) 系列

## (4n+2) ウラン系列

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

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

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

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

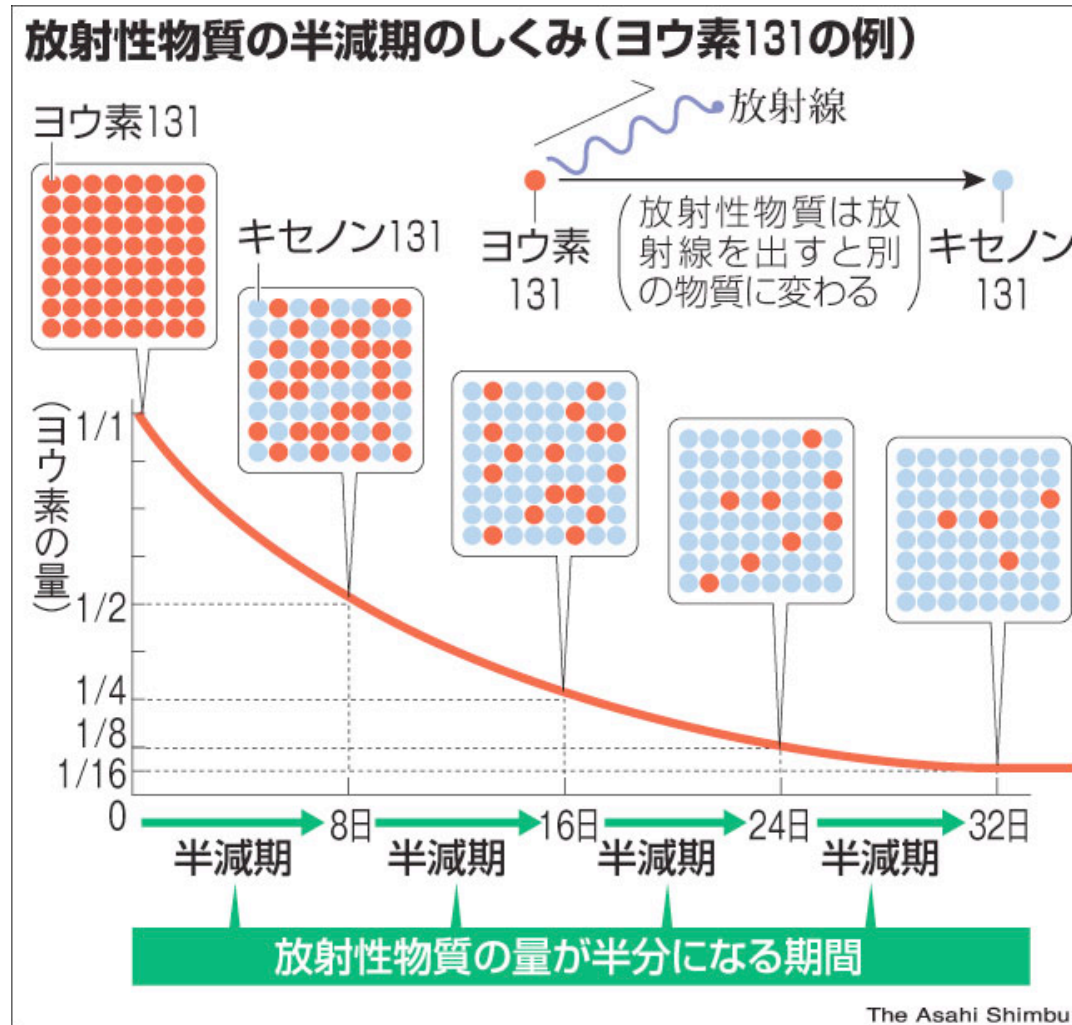
$\lambda = 1/\tau$        $\lambda$ : 崩壊レート、 $\tau$ : 寿命

半減期の1.44倍

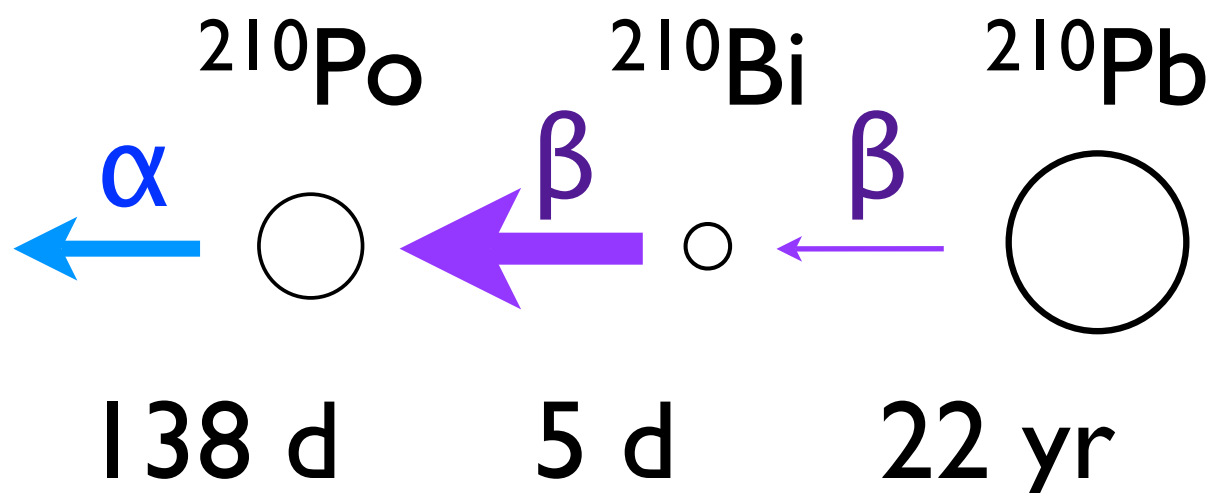
$$N_1 = N_{10} e^{-\lambda_1 t}$$

崩壊レートは定数

個々の崩壊は  
**確率的**に起こる



$^{206}\text{Pb}$   
安定



放射平衡

# 壊変 (崩壊) 系列

# (4n+2) ウラン系列

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

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

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

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

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

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

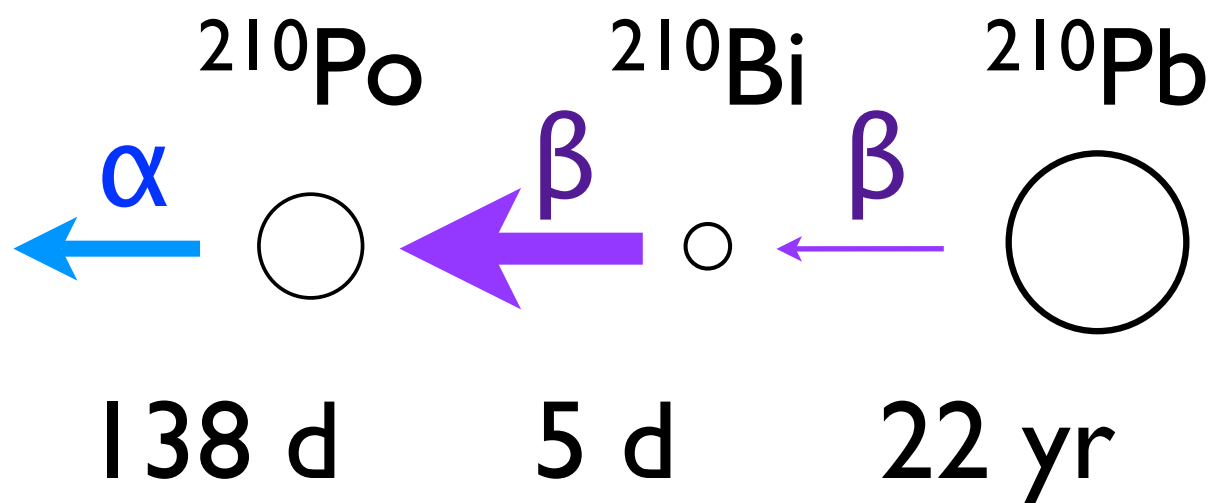
$$N_2 \approx \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} e^{-\lambda_1 t}$$

**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**  
 ( $\lambda_1 \ll \lambda_2$ ,  $\tau_1$  がとても長い)

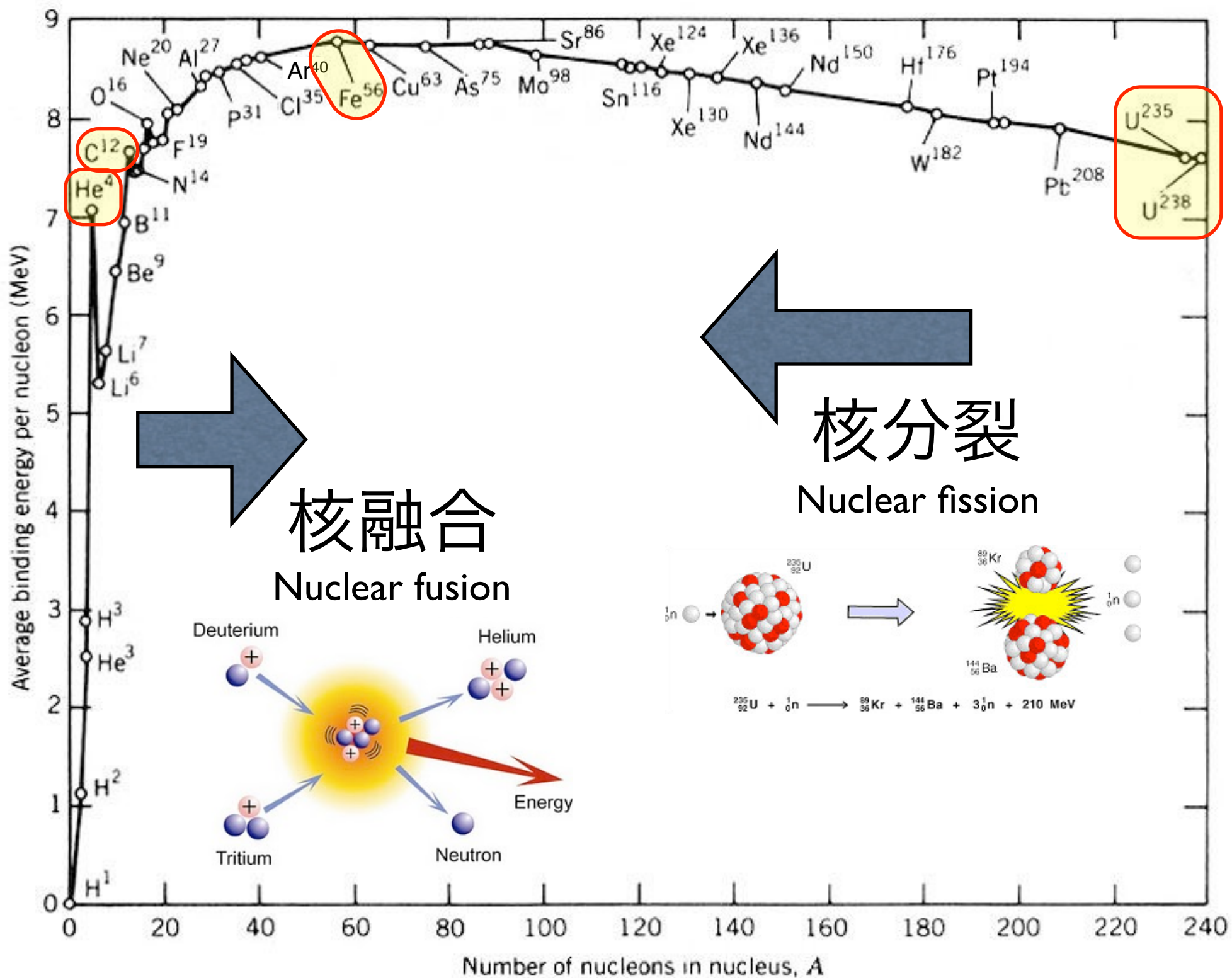
$^{206}\text{Pb}$   
 安定



**放射平衡**

# 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

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

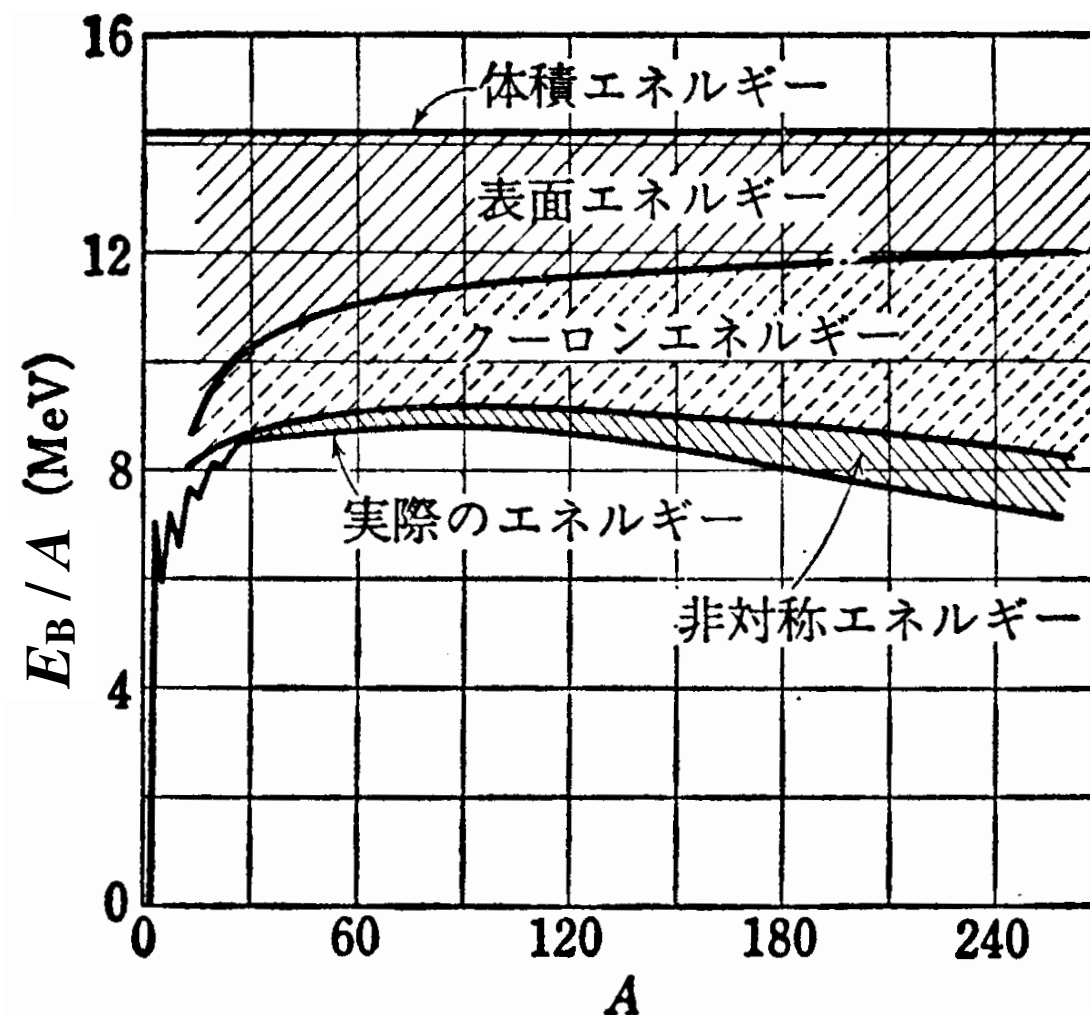
体積エネルギー

クーロンエネルギー

対称エネルギー

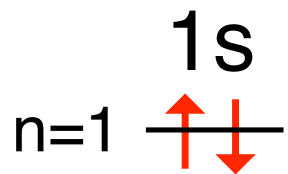
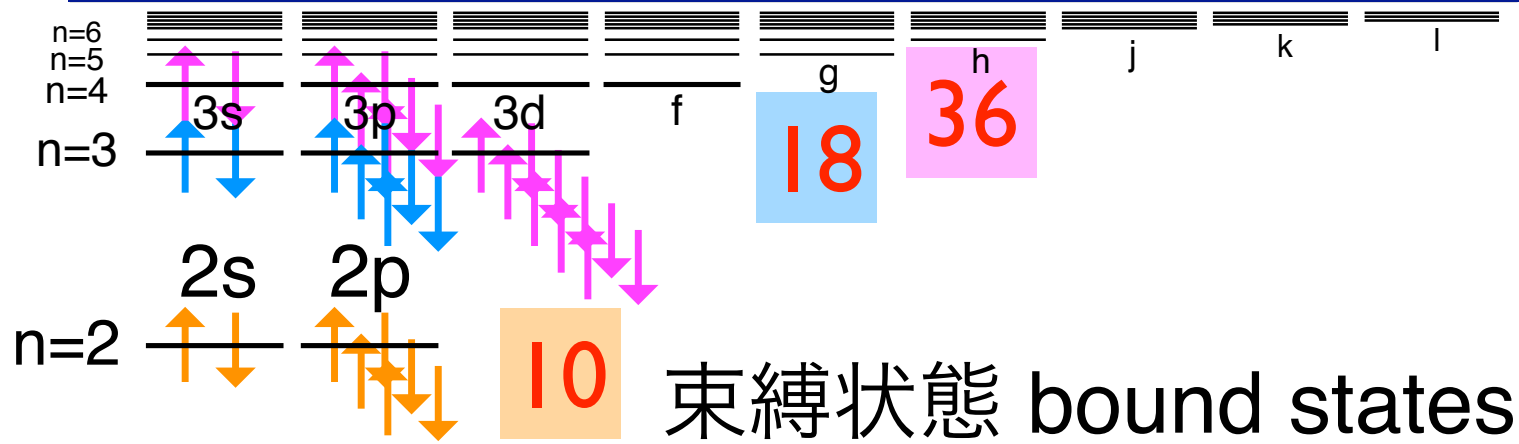
対エネルギー

表面エネルギー



# 原子のエネルギー準位

連続状態 continuum



2

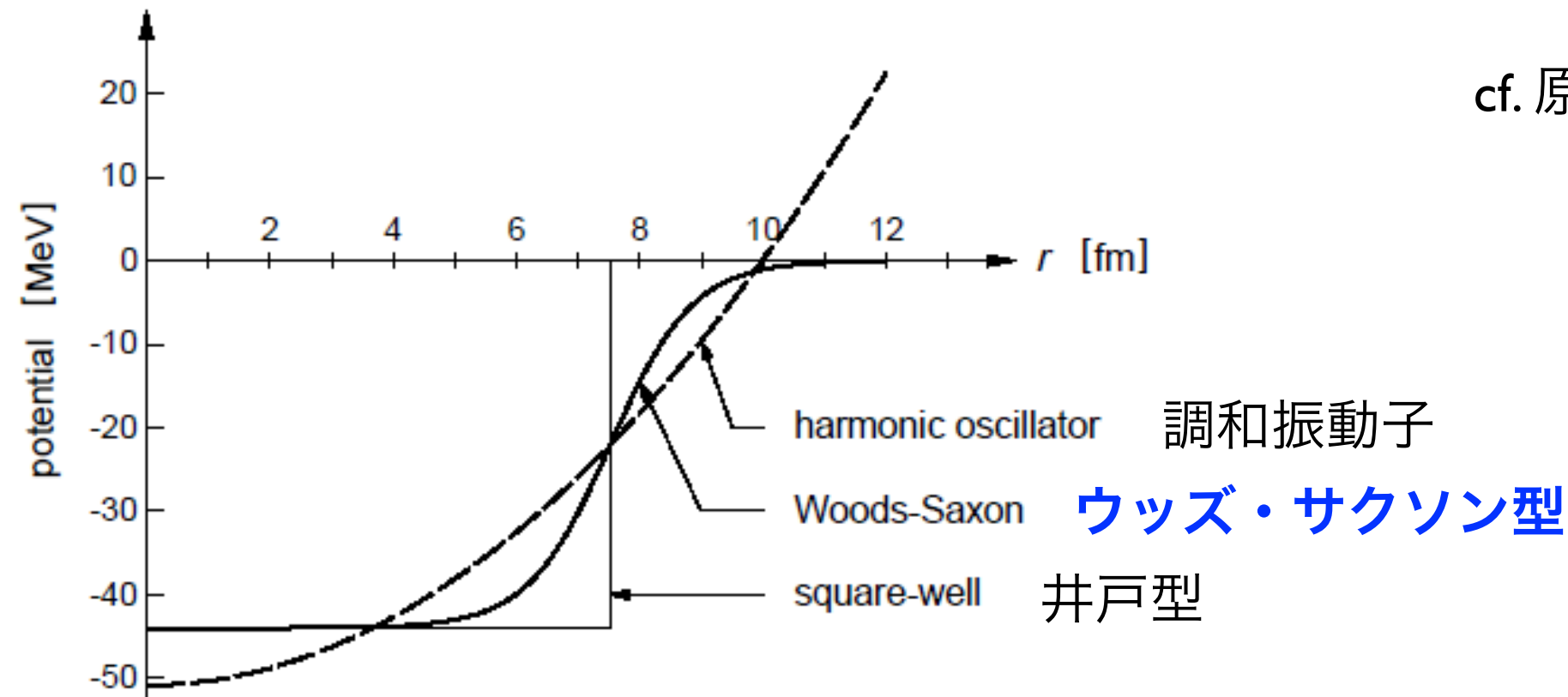
魔法数  
magic number

閉殻  
closed shell

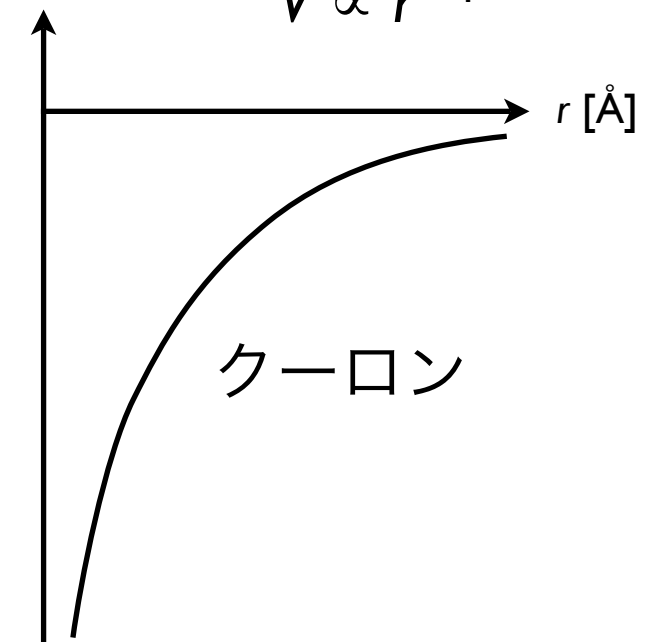
魔法数	電子配置	元素
2	$1s^2$	He
10	$1s^2 2s^2 2p^6$	Ne
18	$[Ne] 3s^2 3p^6$	Ar
36	$[Ar] 4s^2 3d^{10} 4p^6$	Kr
54	$[Kr] 5s^2 4d^{10} 5p^6$	Xe
86	$[Xe] 6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^6$	Rn

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

原子核は密度一定 (密度の飽和性)

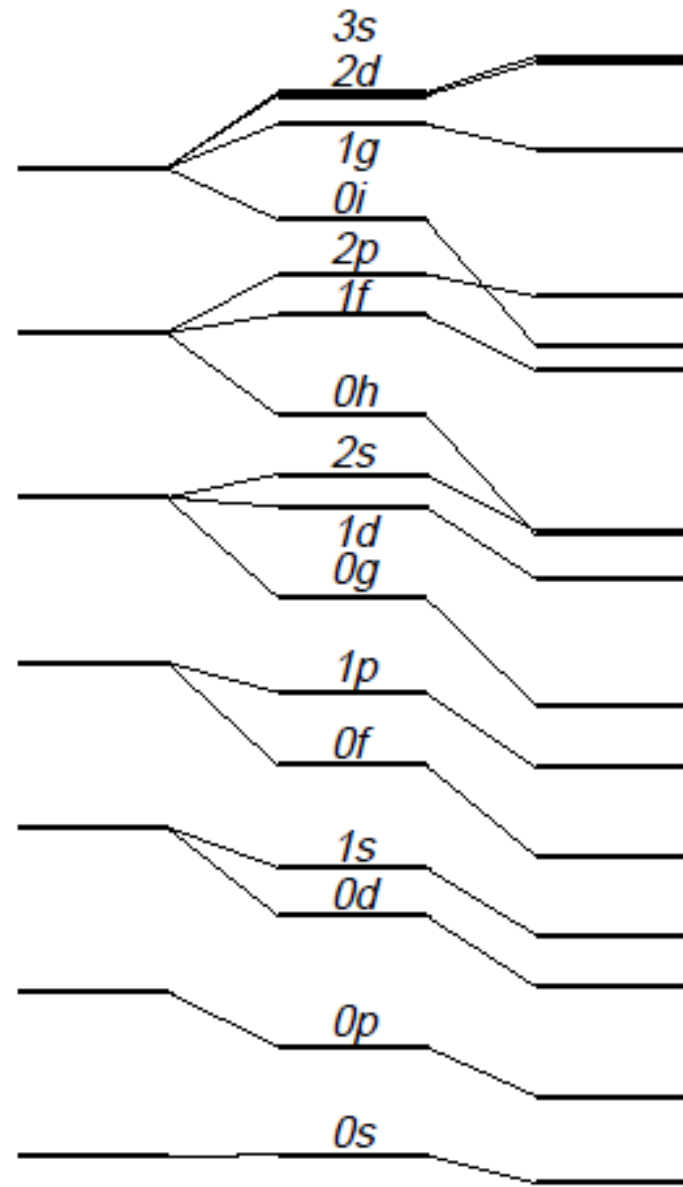
核力 = 「強い相互作用」 “**Strong Interaction**”

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



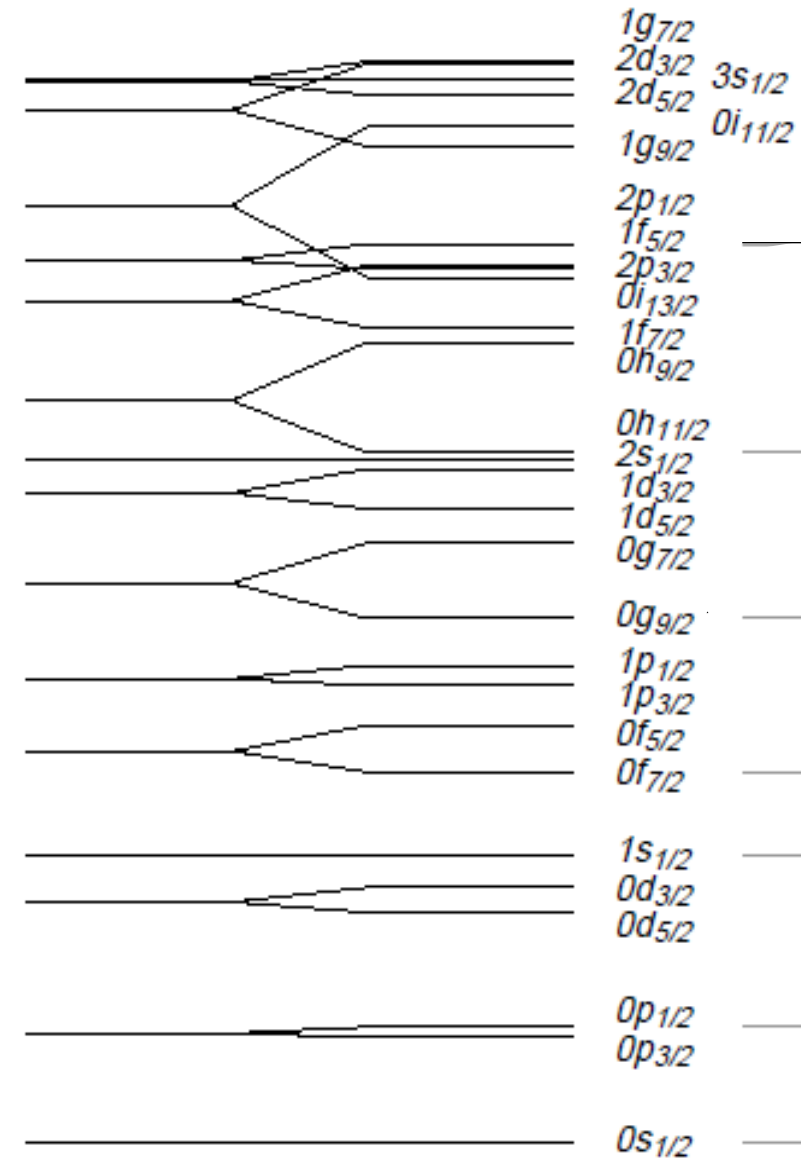
harmonic oscillator    Woods-Saxon    square-well

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

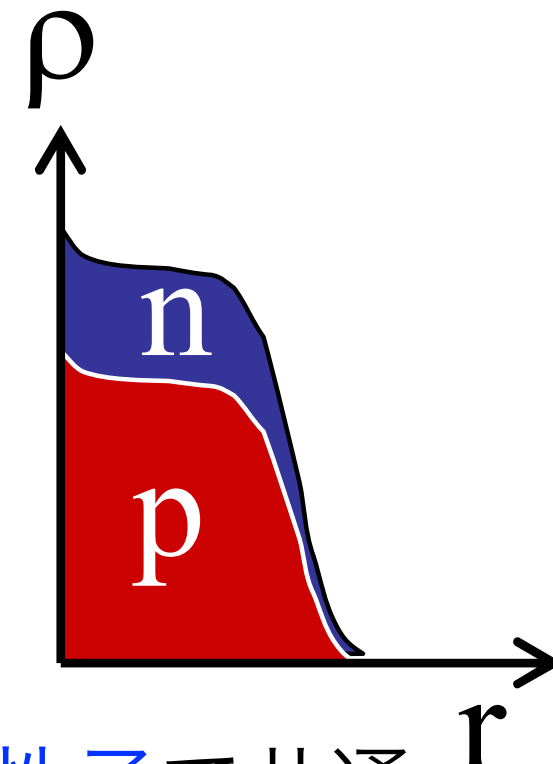
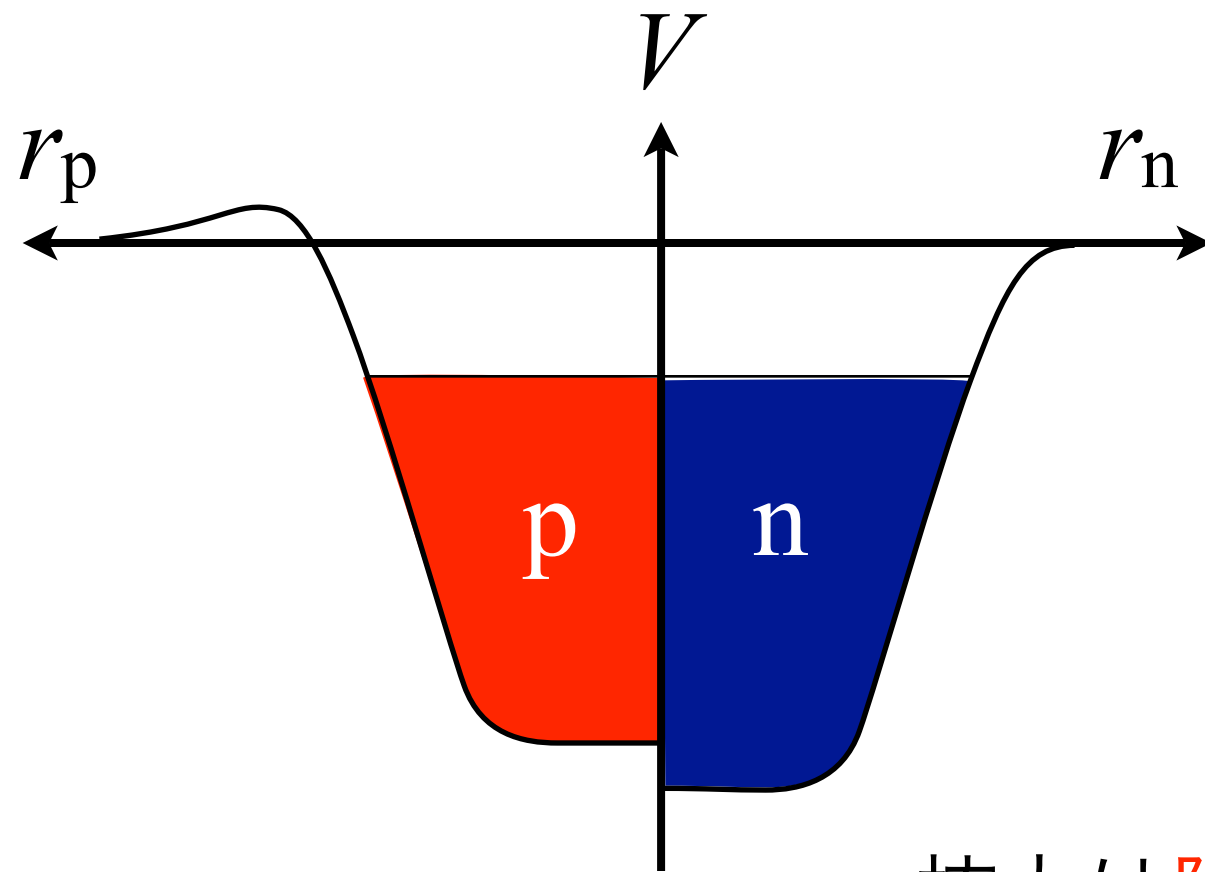


+ LS 相互作用

**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

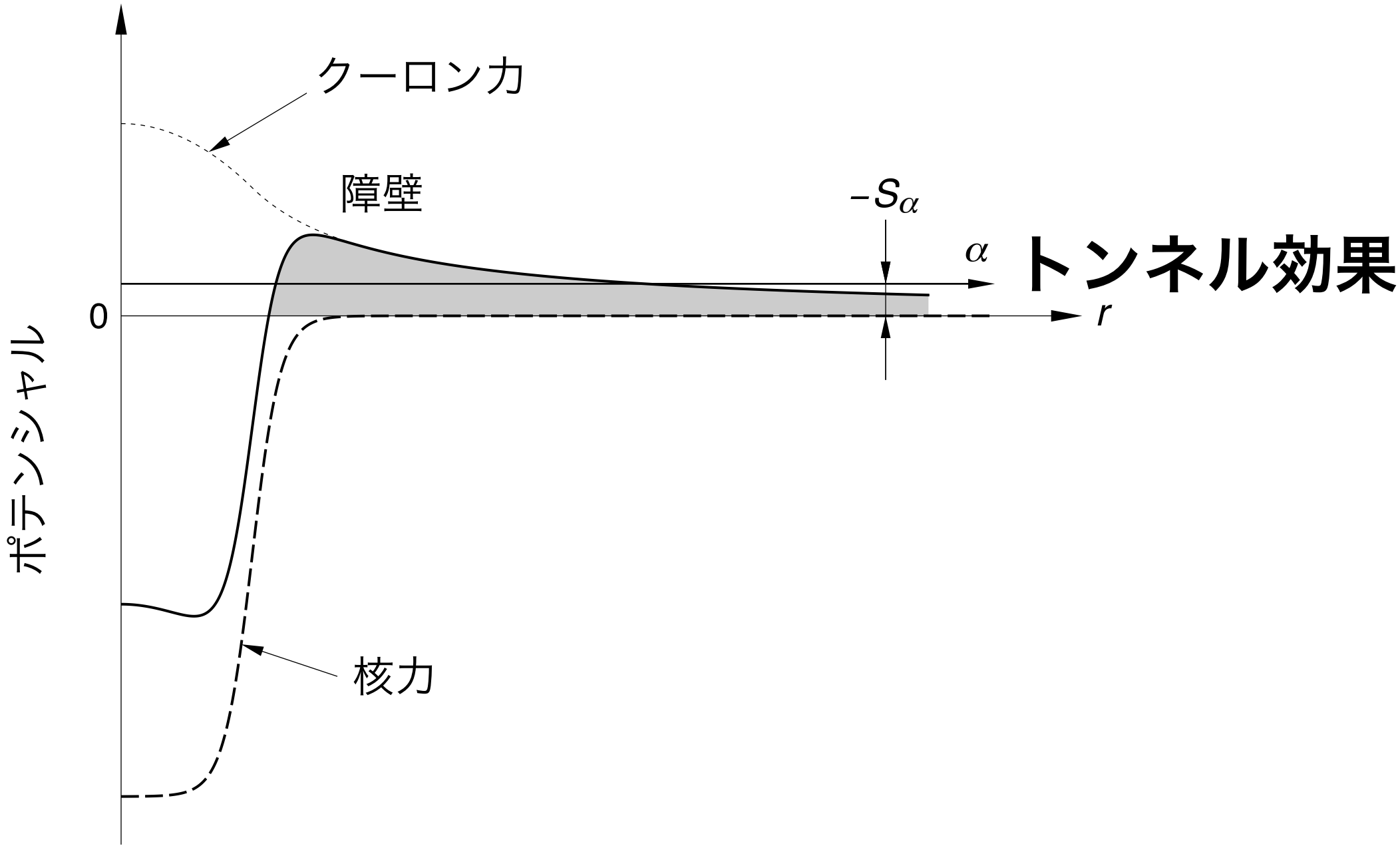
クーロン反発により上昇。  $\propto Z^2 / A^{1/3}$

(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)

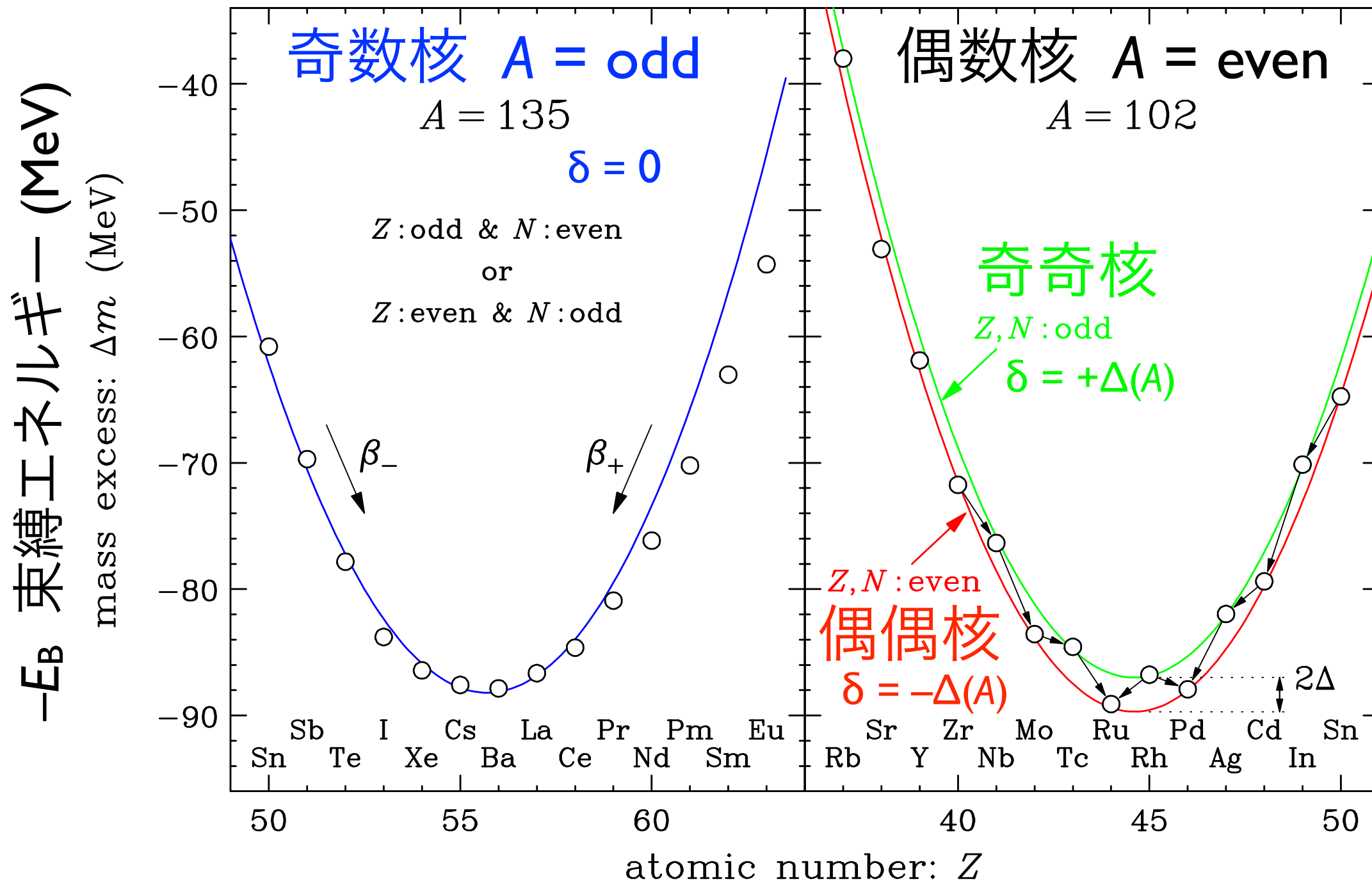
原子核は特に安定。 e.g.  ${}^4_2\text{He}_2$   ${}^{16}_8\text{O}_8$   ${}^{40}_{20}\text{Ca}_{20}$   ${}^{48}_{20}\text{Ca}_{28}$   ${}^{208}_{82}\text{Pb}_{126}$

# $\alpha$ 壊変 (崩壊)





# 原子核束縛エネルギーの偶奇依存性

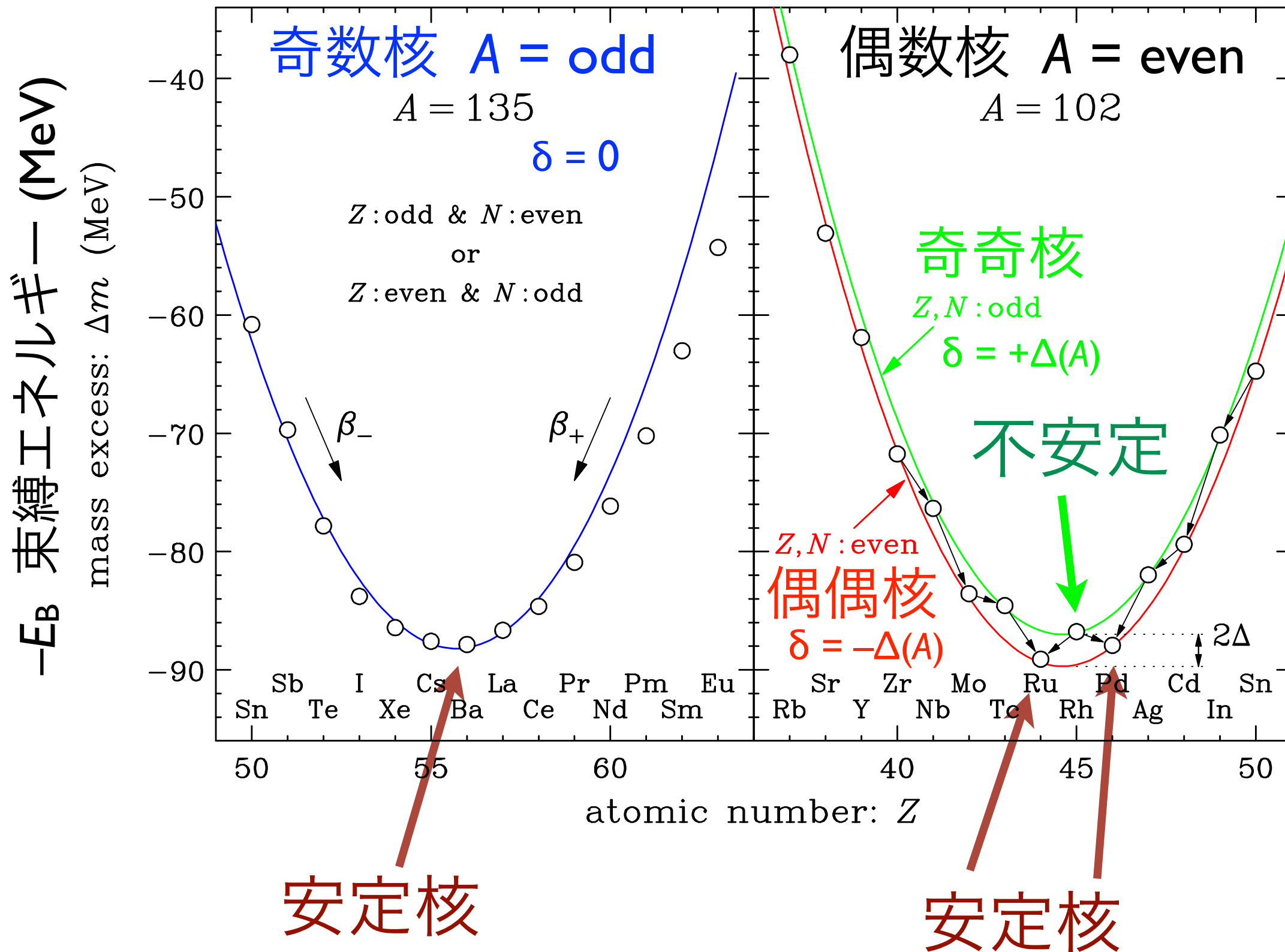


$$-E_B = \dots + a_a (N - Z)^2 / A + \delta$$

対称エネルギー

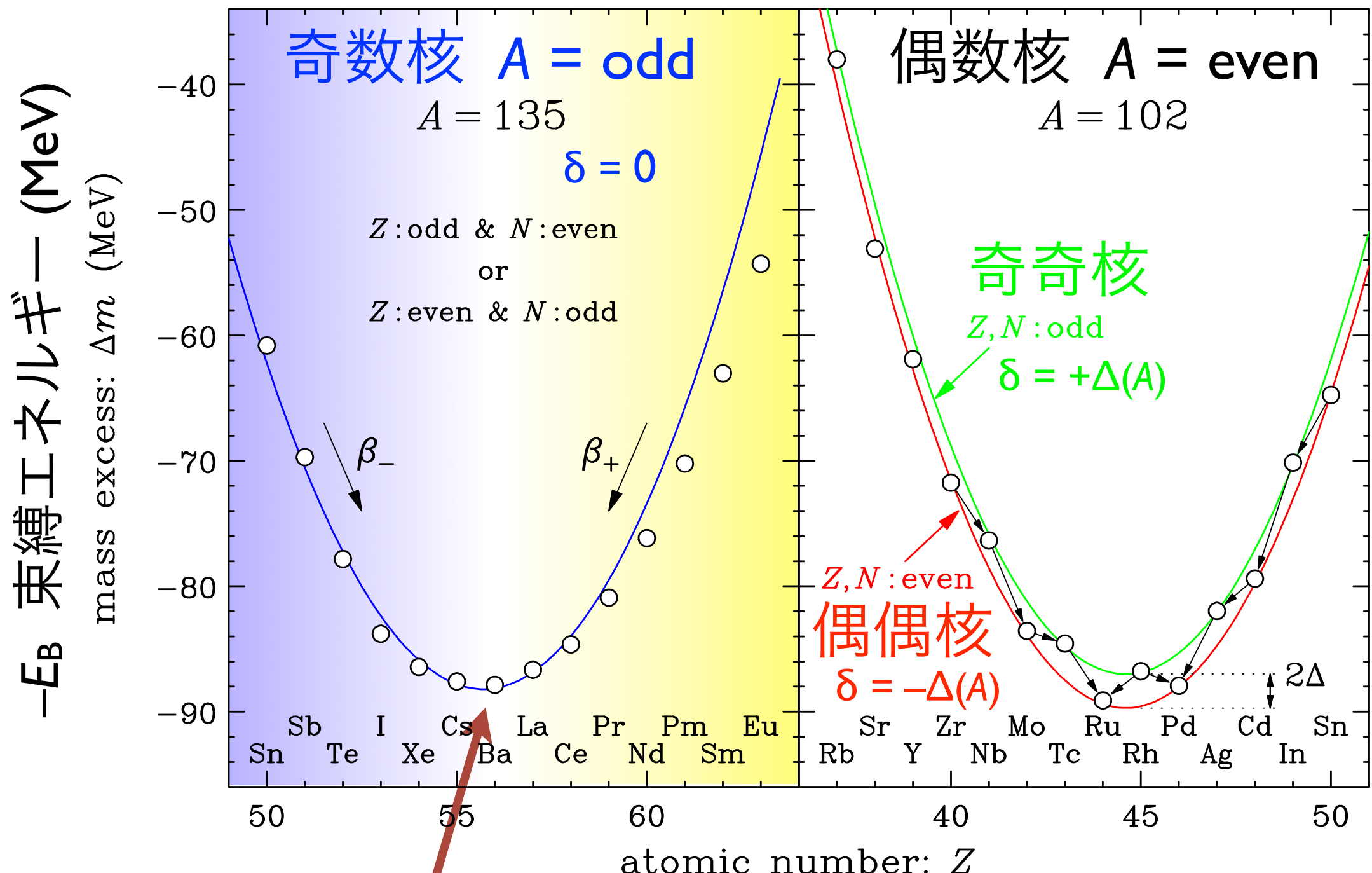
対エネルギー

# 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。  ${}^2_1\text{H}_1$   ${}^6_3\text{Li}_3$   ${}^{10}_5\text{Be}_5$   ${}^{14}_7\text{N}_7$

# 原子核束縛エネルギーの偶奇依存性



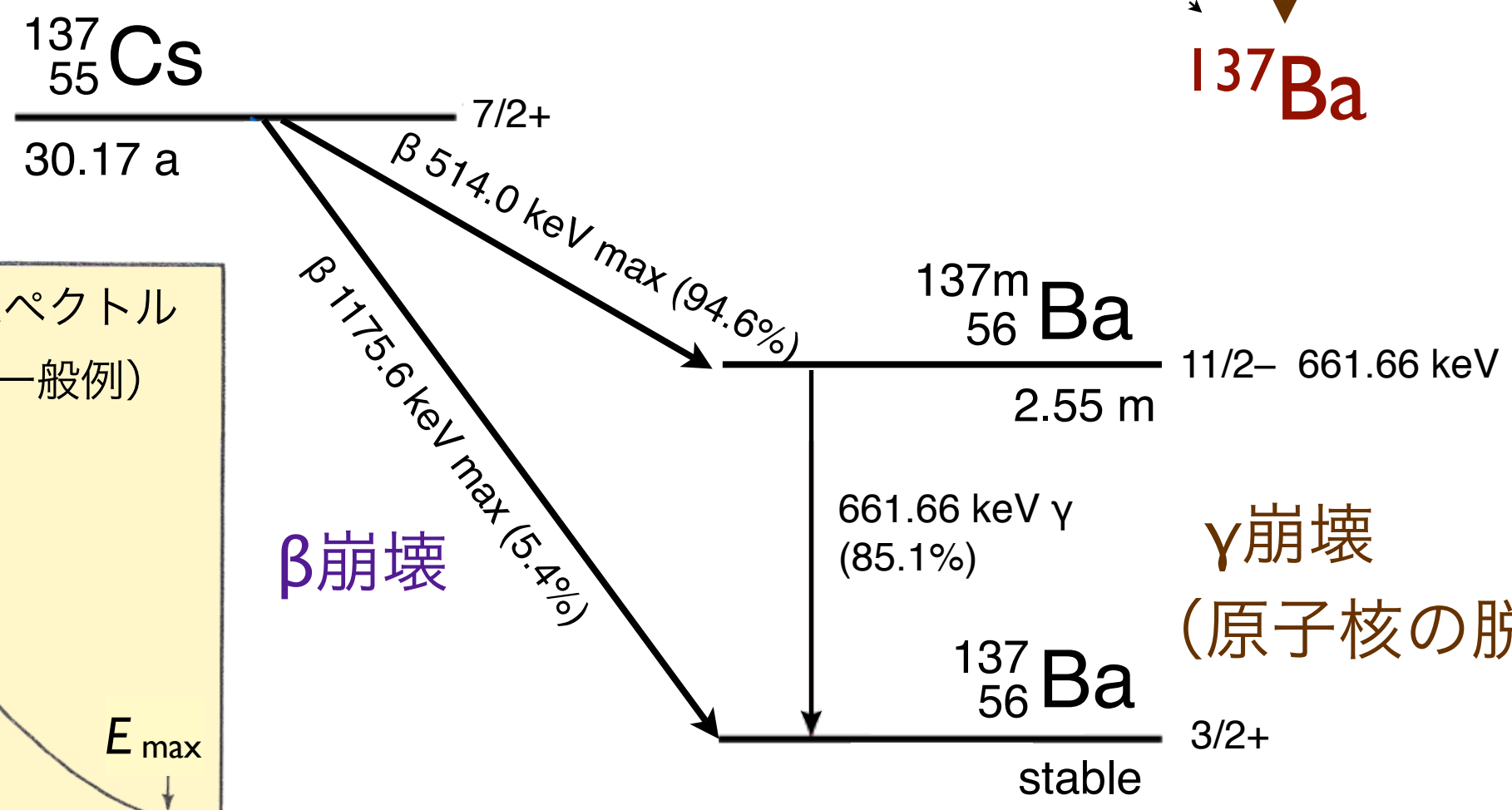
安定核



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

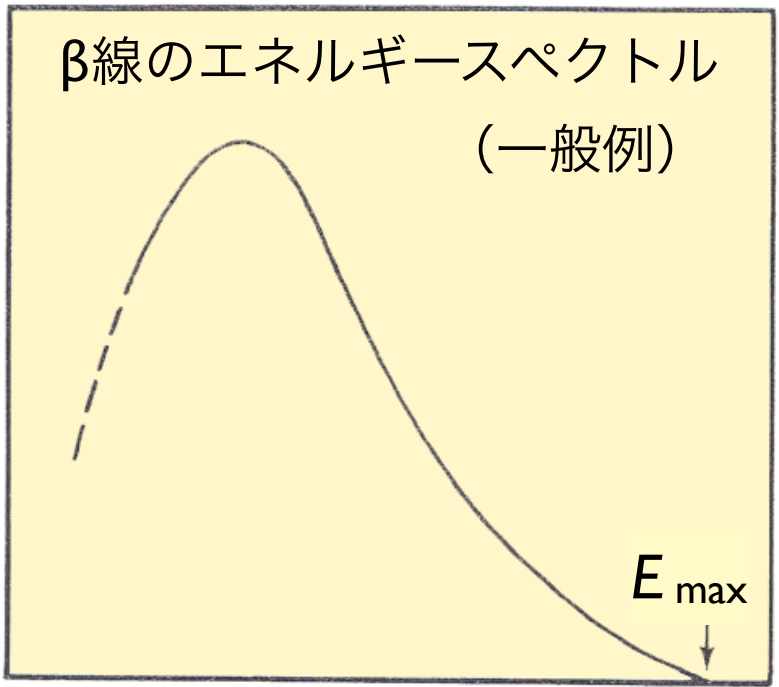
中性子過剰核は  $\beta^-$  壊変 (崩壊) を繰り返しながら 安定核までたどり着く。





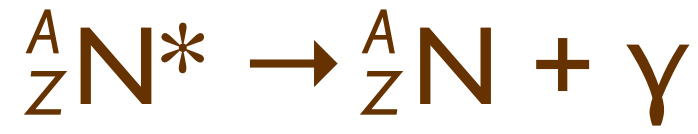
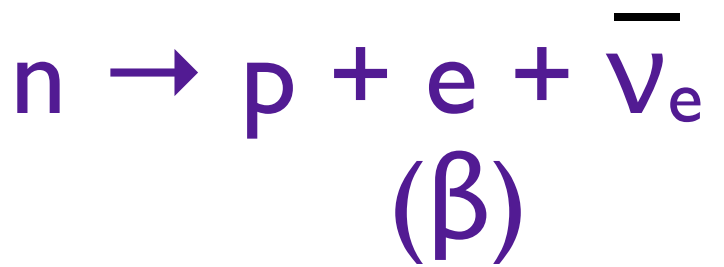
$\gamma$ 崩壊  
 (原子核の脱励起)

粒子数の分布

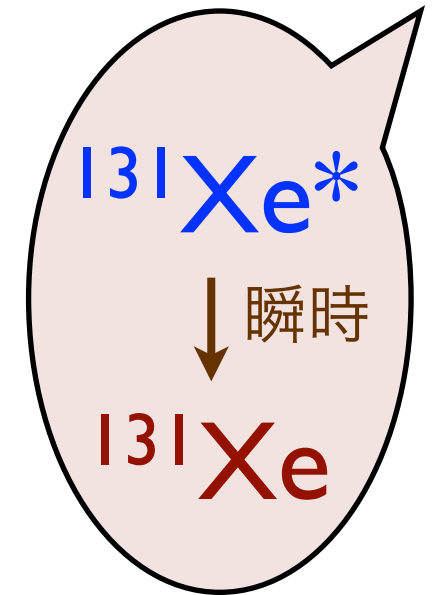
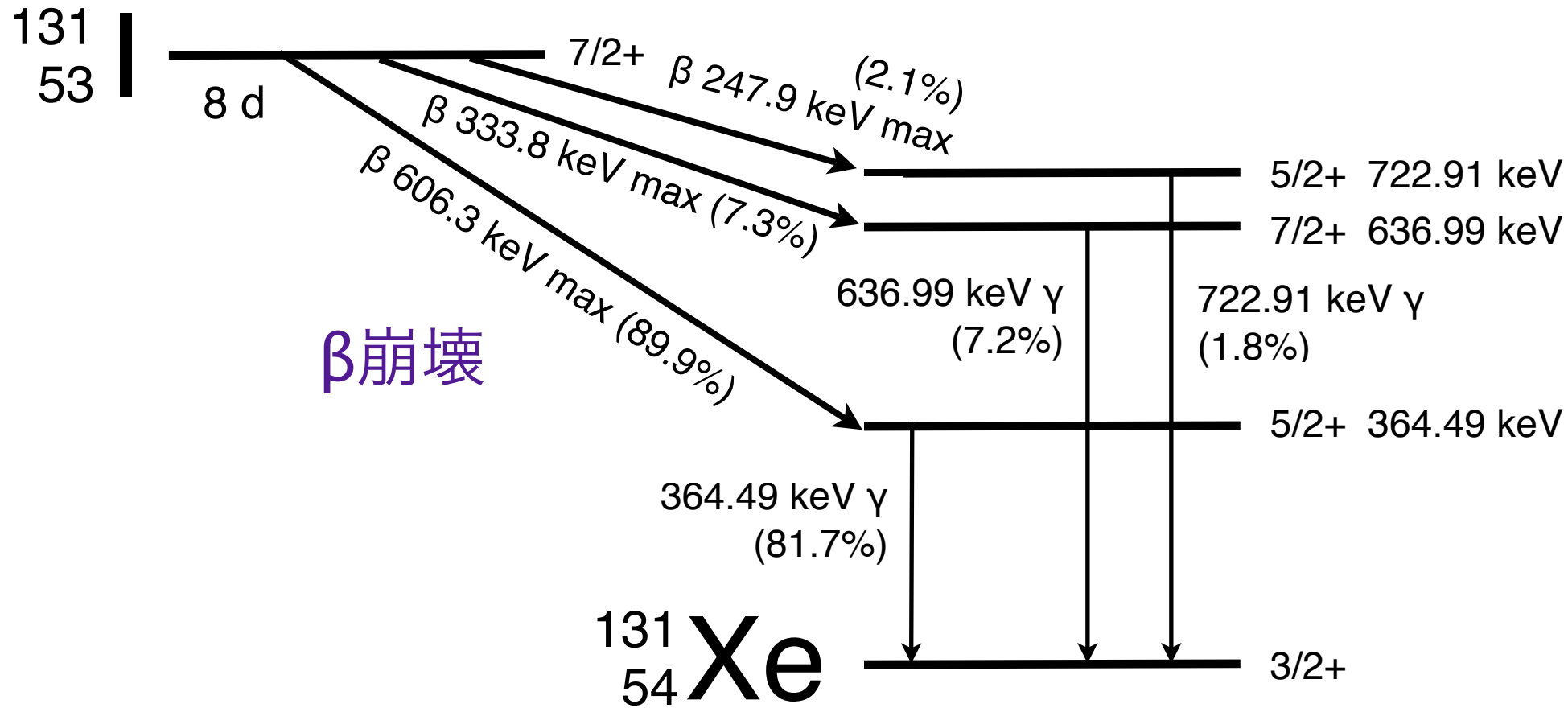
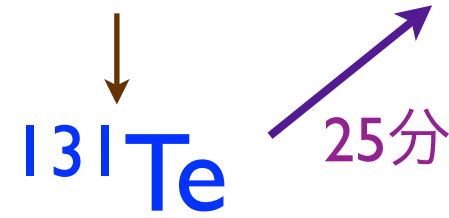


エネルギー  $E_\beta$

$\beta$ 線 (連続スペクトル)

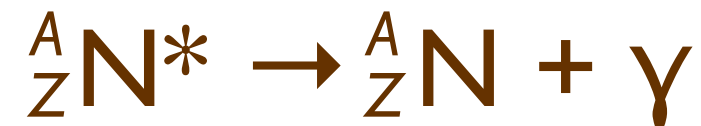


$\gamma$ 線 (定まったエネルギー)



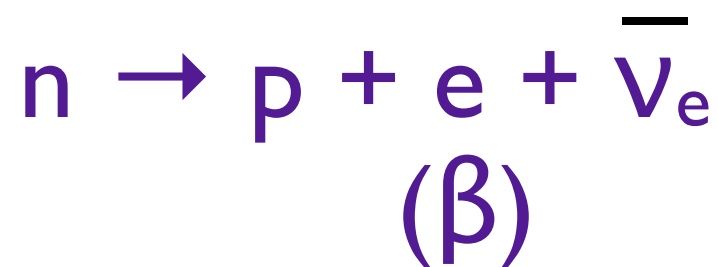
β崩壊

γ線：原子核の脱励起

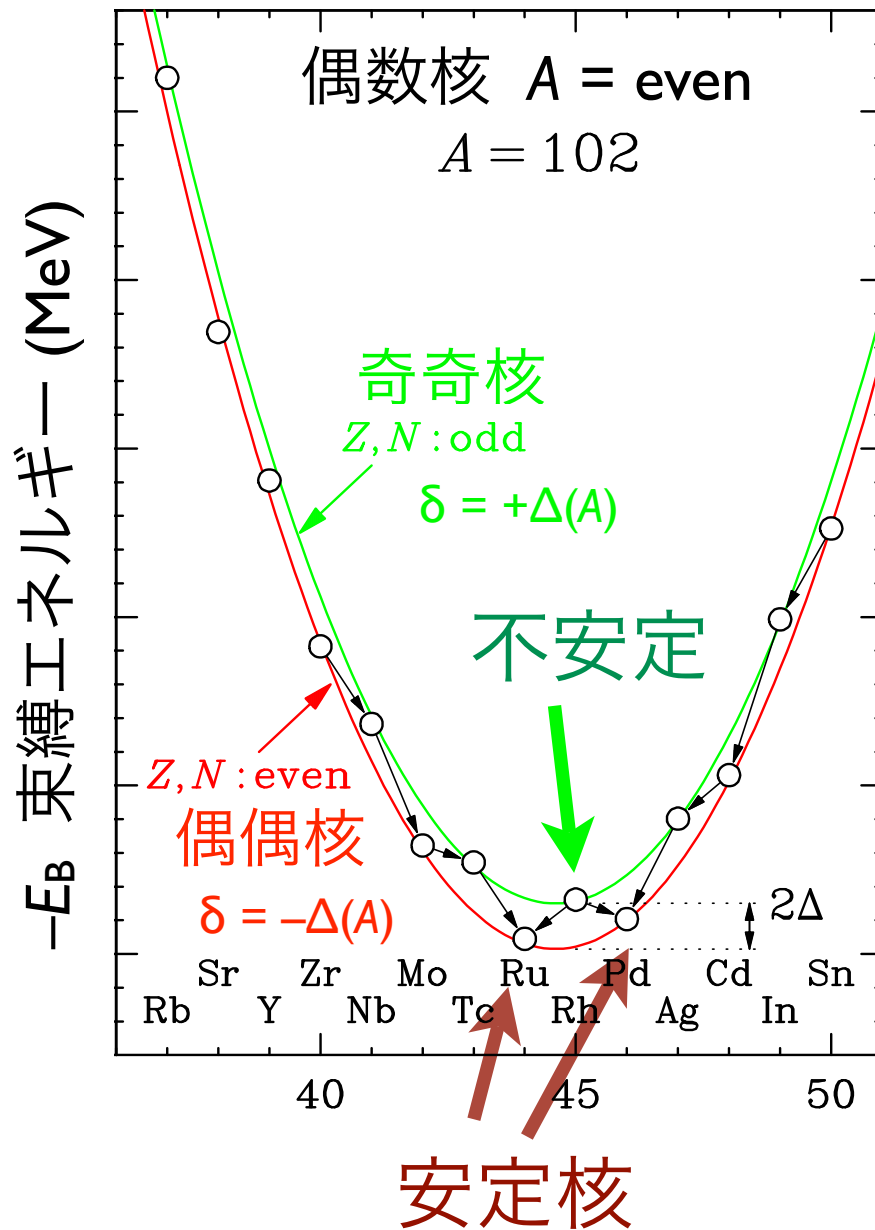
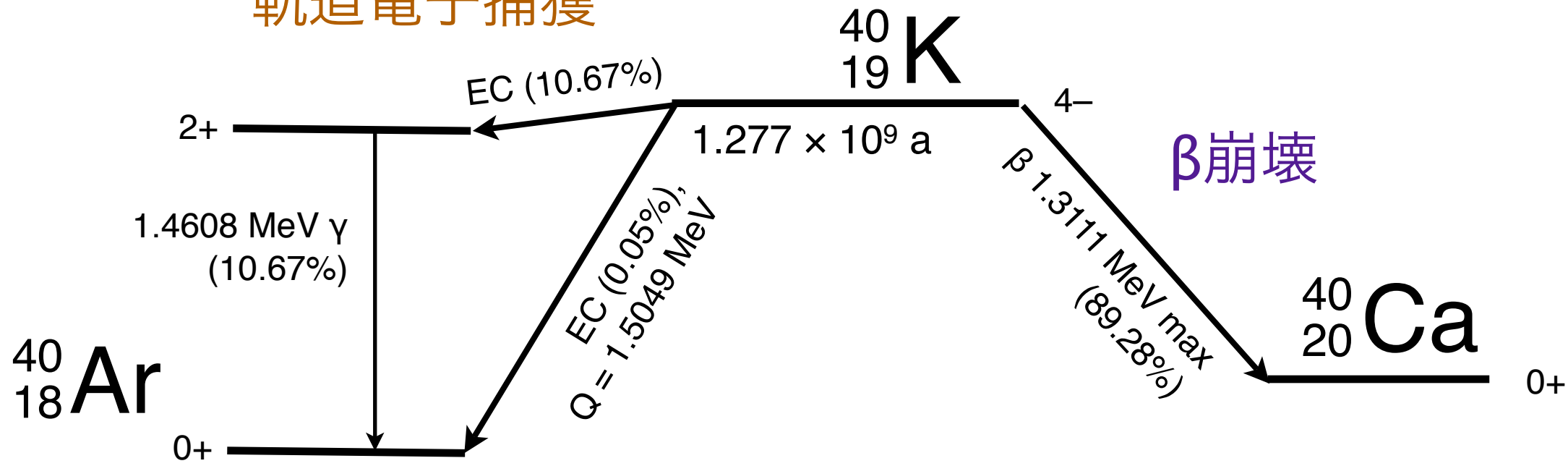


γ線（定まったエネルギー）

β線（連続スペクトル）

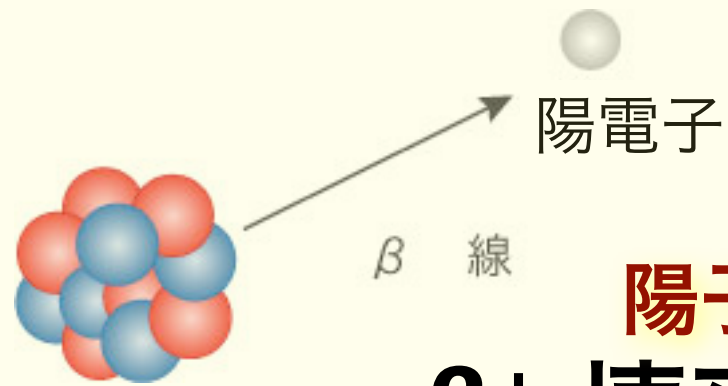


# 軌道電子捕獲

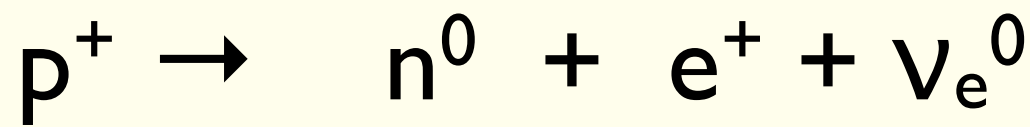




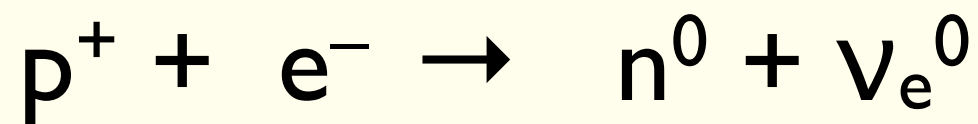
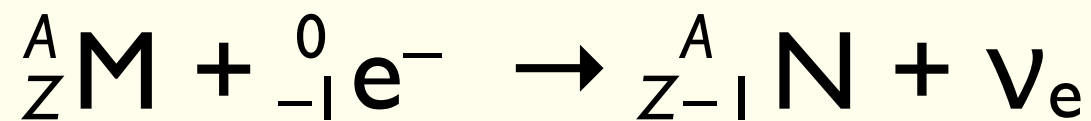
100 keV ~ MeV



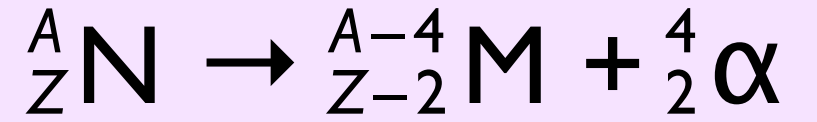
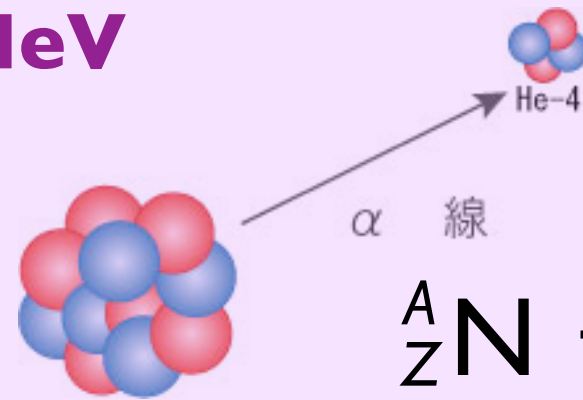
陽子過剩核  
 **$\beta^+$  壞變 (崩壞)**



**軌道電子捕獲 (EC)**

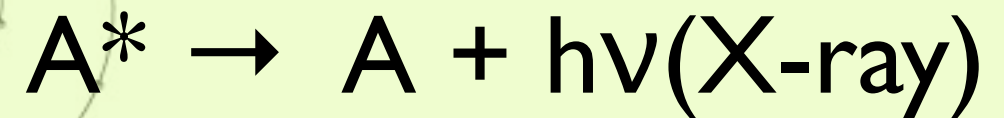
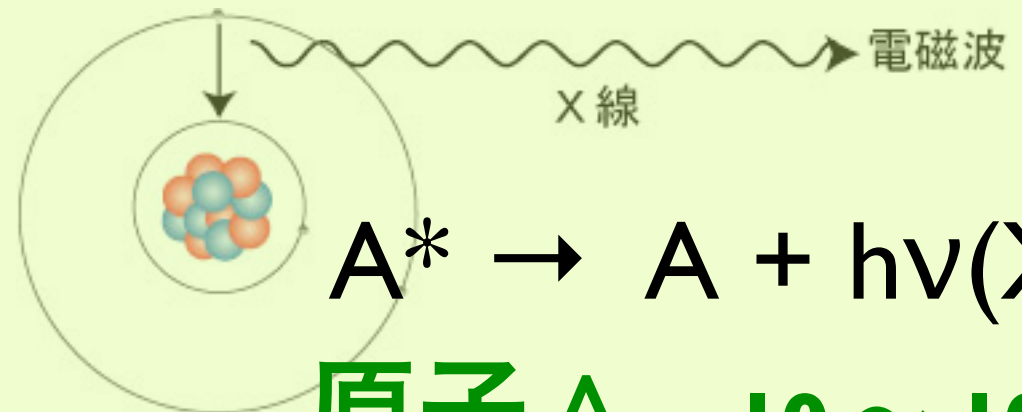
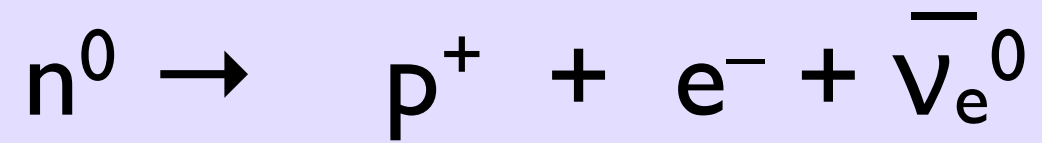
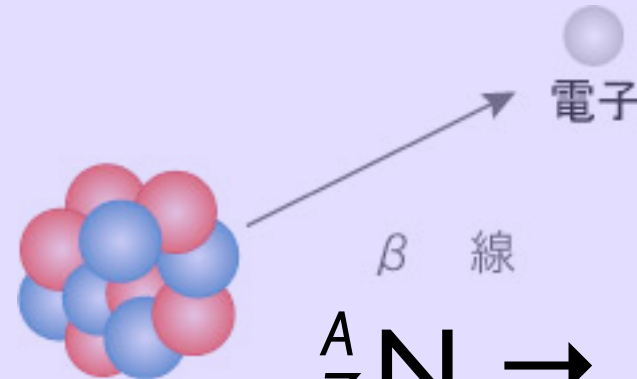


原子核 N



中性子過剩核

**$\beta^-$  壞變 (崩壞)**



原子 A 10 ~ 100 keV

# PET (Positron Emission Tomography) 陽電子断層撮影法


組織の”はたらき”を知る

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




放射線医療：診断

$e^+$



陽電子 positron

電子 electron



$e^-$

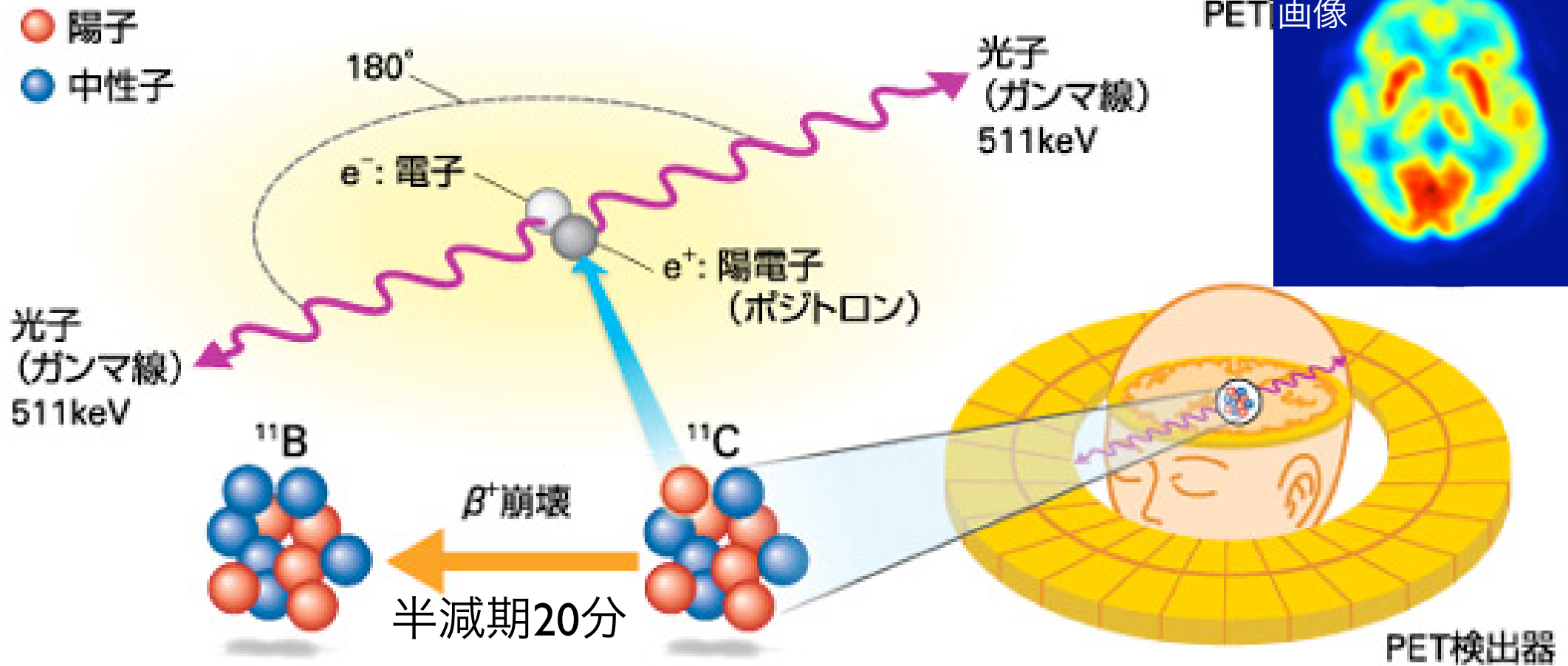
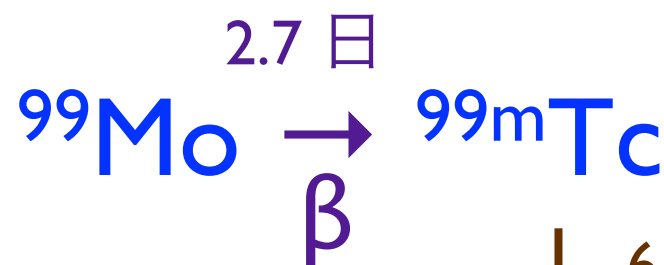


図1 PET (陽電子放射断層画像撮影法) の仕組み

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 ( $^{11}\text{C}$ ) はホウ素 11 ( $^{11}\text{B}$ ) 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。

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

海外の研究用原子炉  
で生成・空輸



核医学検査  
(投与)



幻のニッポニウム (小川正孝)

安定同位体が存在しない元素

テクネチウム  ${}_{43}\text{Tc}$

プロメチウム  ${}_{61}\text{Tc}$

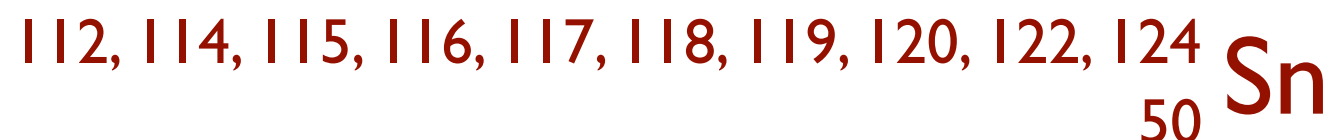
ビスマス  ${}_{83}\text{Bi}$  以上の原子番号の元素

安定同位体が 1 つだけの元素



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

安定同位体が多数

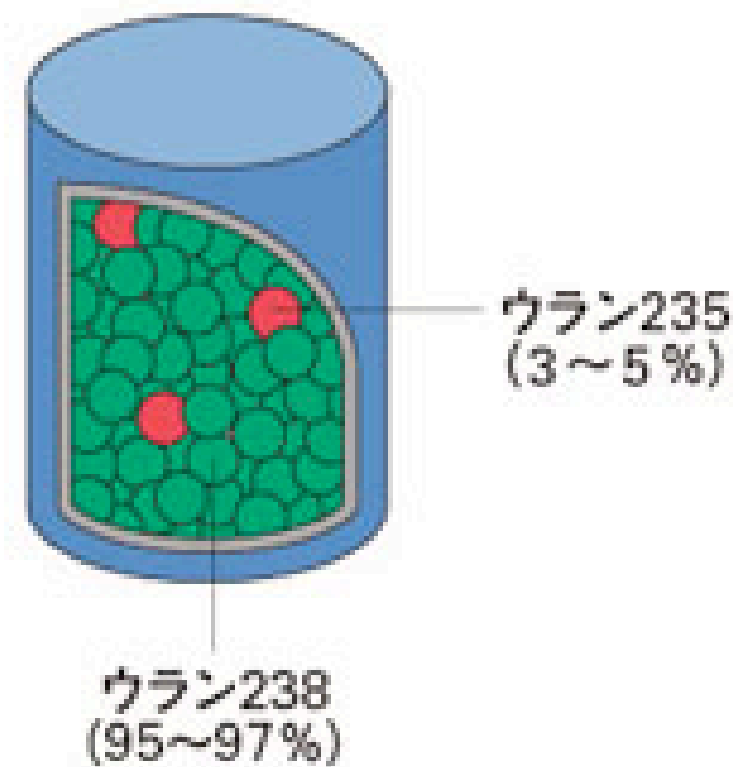
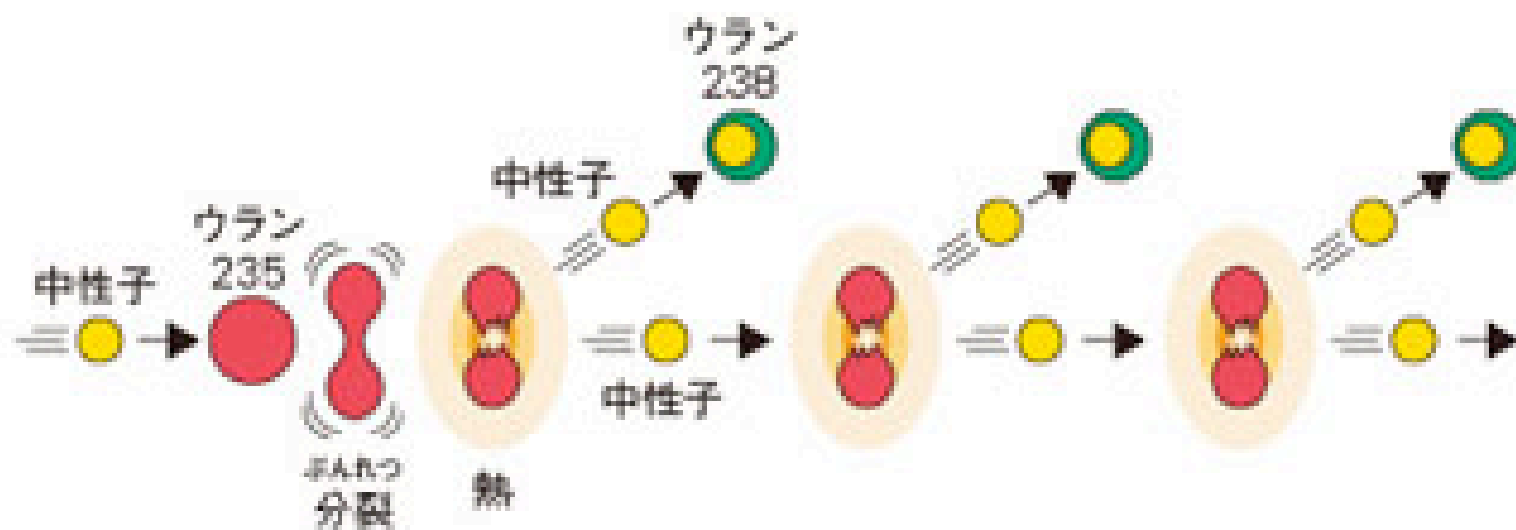
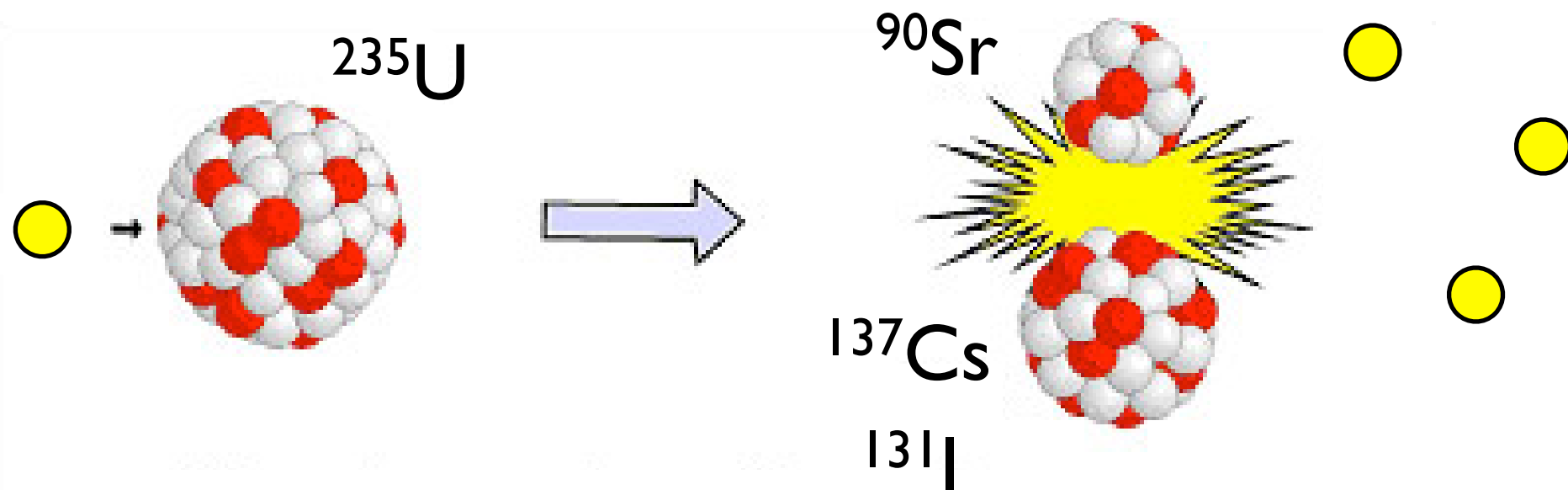




# 原子力工学



# 原子核分裂反応



中性子 + ウラン 235 / 238

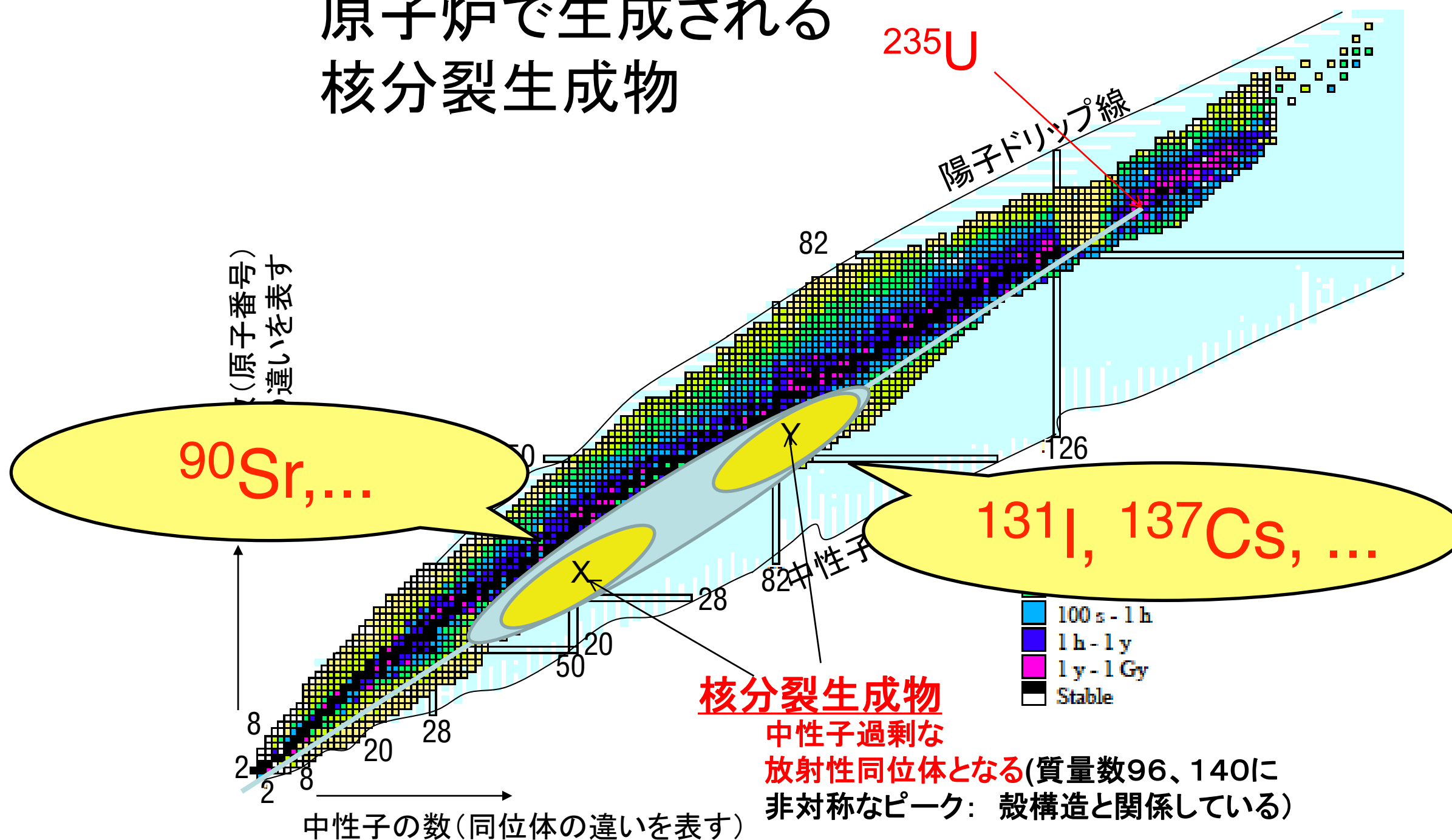
# 核分裂

Nuclear fission

# 原子核物理学

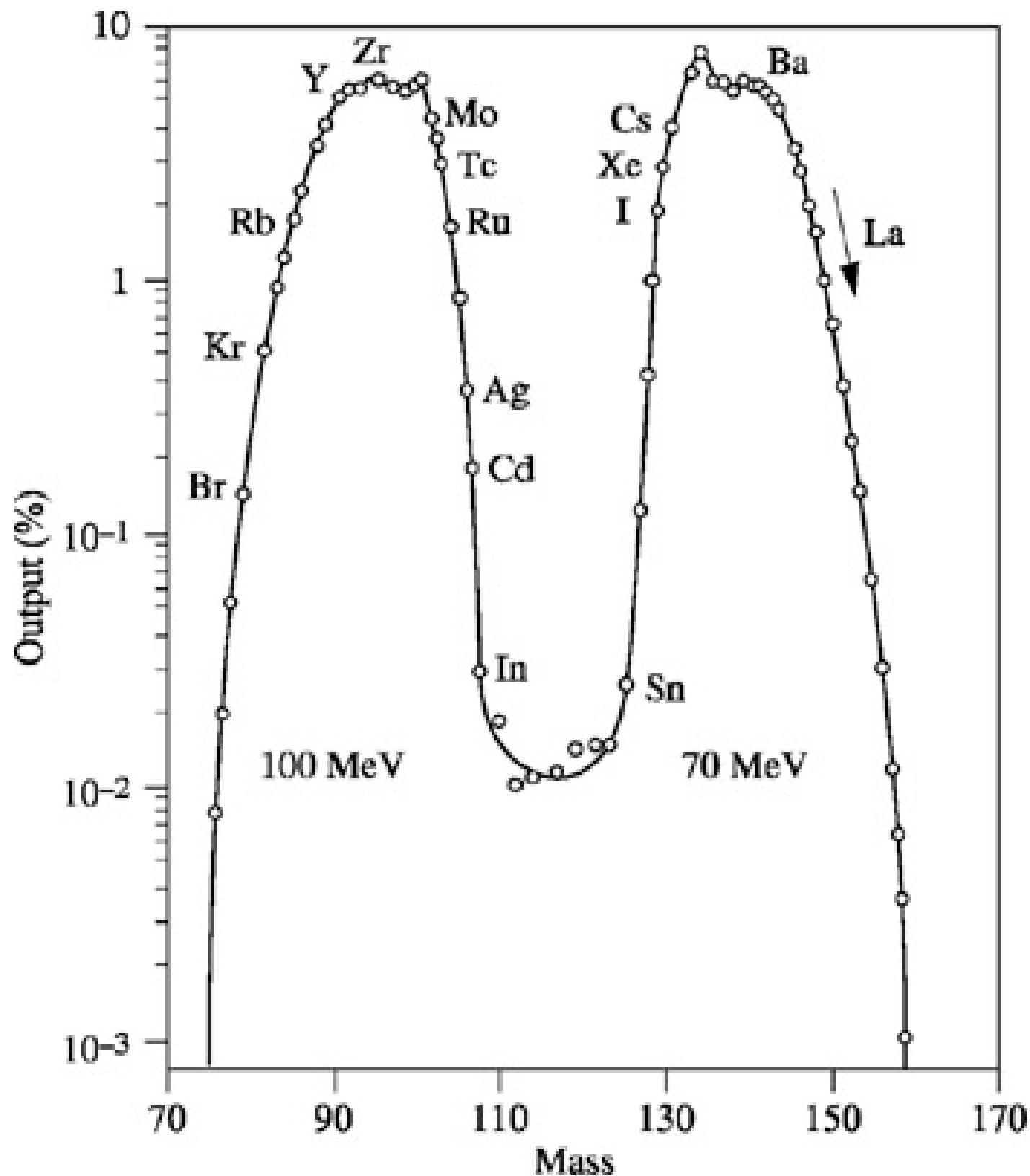
Nuclear Physics

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)



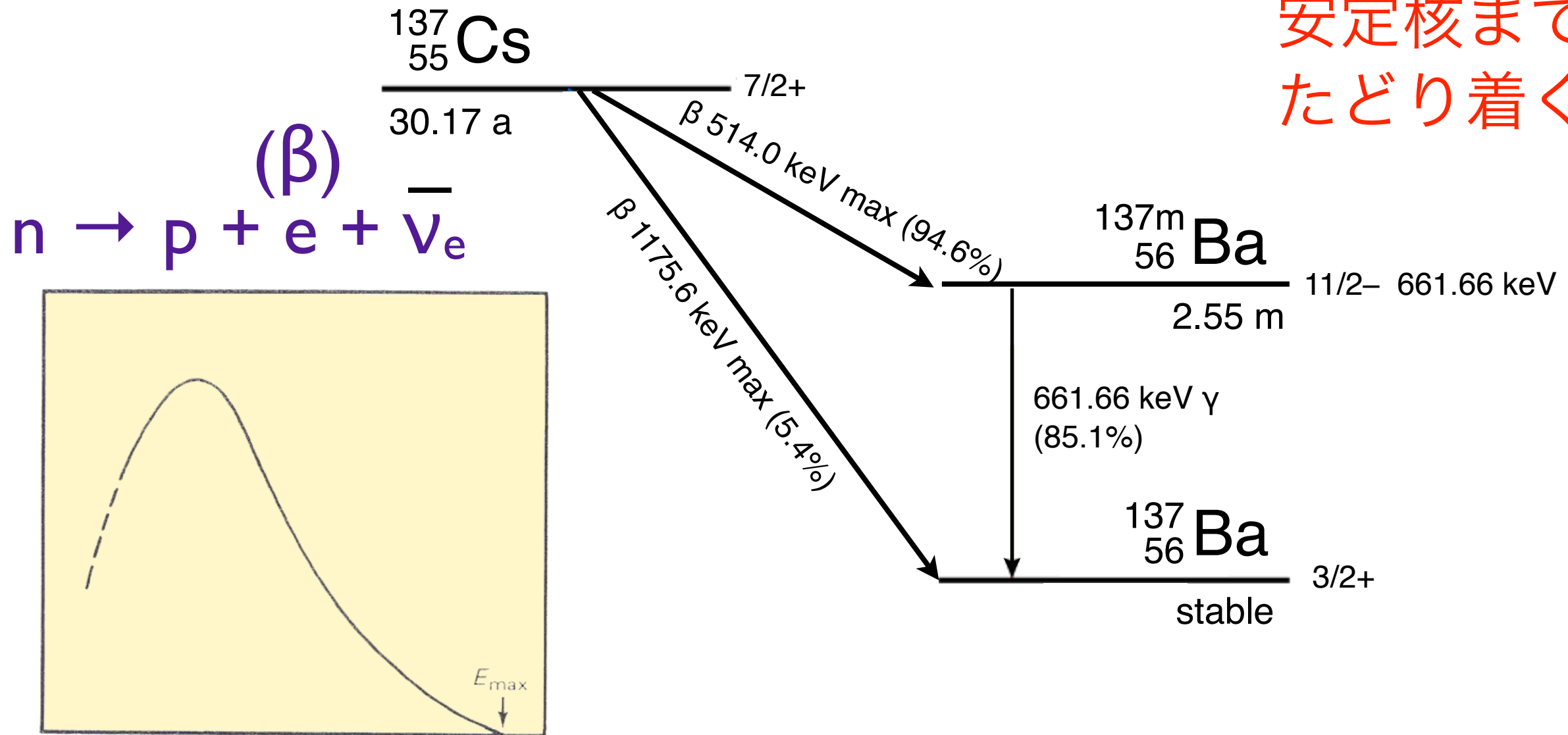
非対称分裂

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

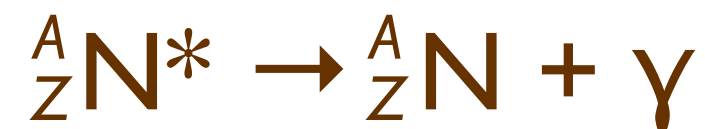
安定核まで  
たどり着く。



$\beta$ 線の連続スペクトルから  
核種の同定をするのは無理。

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。



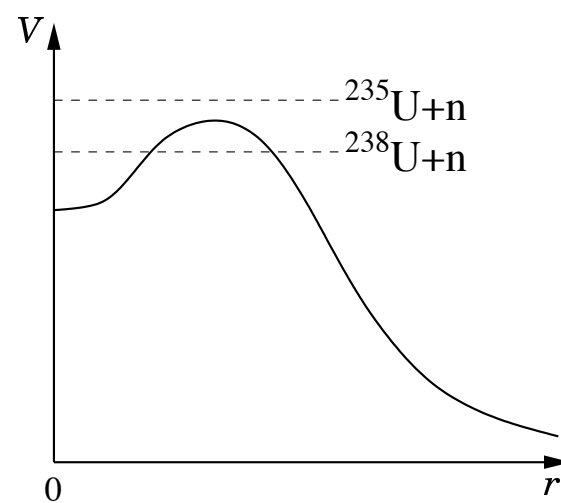
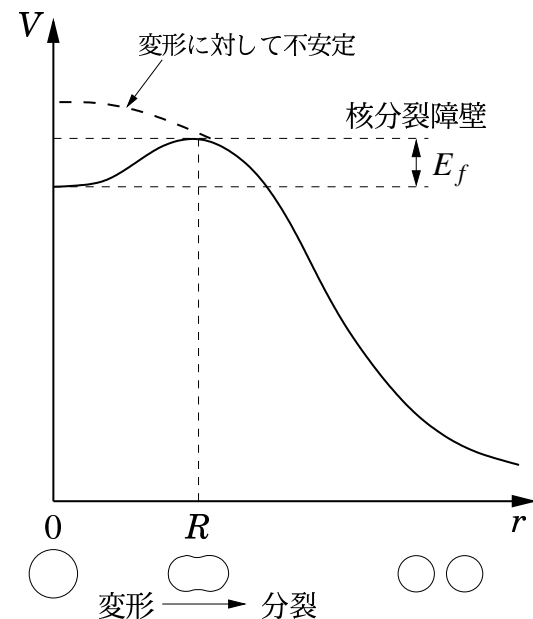
# ウランの核分裂

(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。

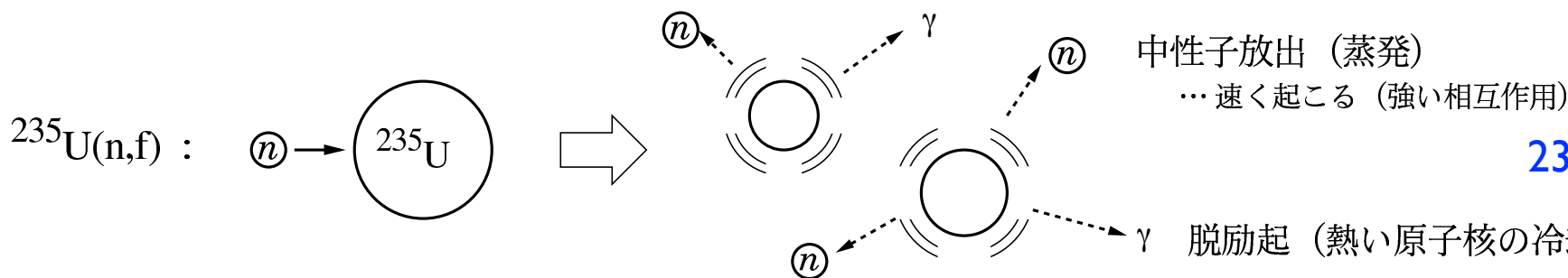
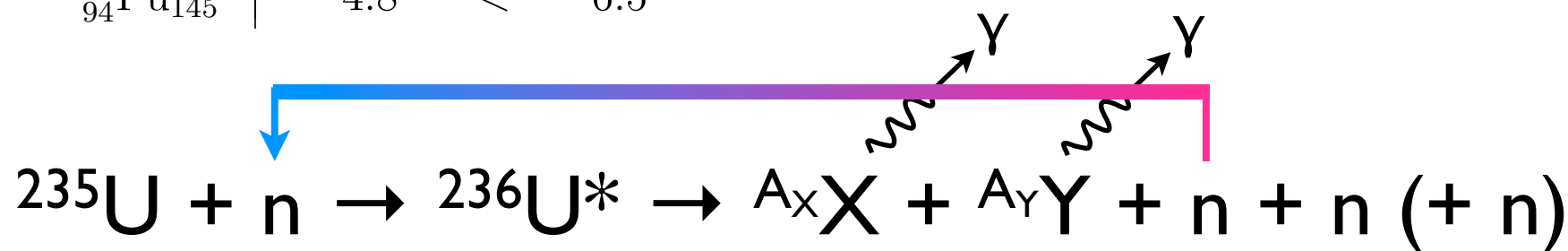
例:  $Q_n = (m[{}^{238}\text{U}] + m[n] - m[{}^{239}\text{U}])c^2 = 4.8 \text{ [MeV]} > 0 \dots$  発熱反応

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

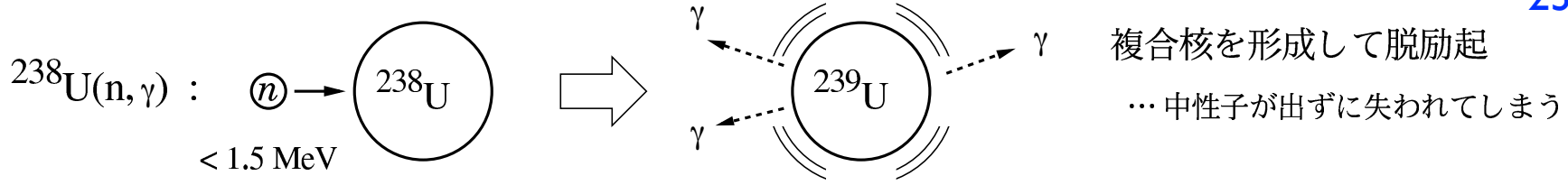


	$E_f$ [MeV]	$Q_n$ [MeV]	
${}^{238}_{92}\text{U}_{146}$ (99.275%)	6.3	> 4.8	... 1.5 MeV 以上の中性子が必要
${}^{235}_{92}\text{U}_{143}$ (0.72%)	5.8	< 6.5	... 0 エネルギー中性子でも分裂
${}^{239}_{94}\text{Pu}_{145}$	4.8	< 6.5	

} 対エネルギーの違い

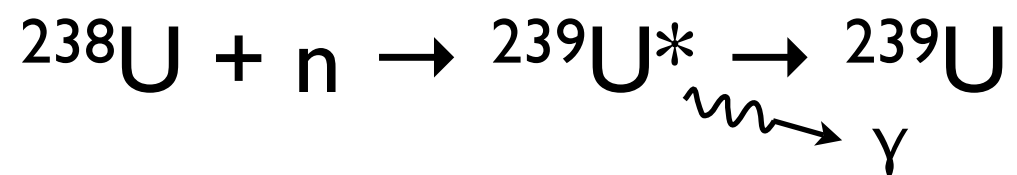


${}^{235}\text{U}$ : 0.72%, 半減期 7.03億年

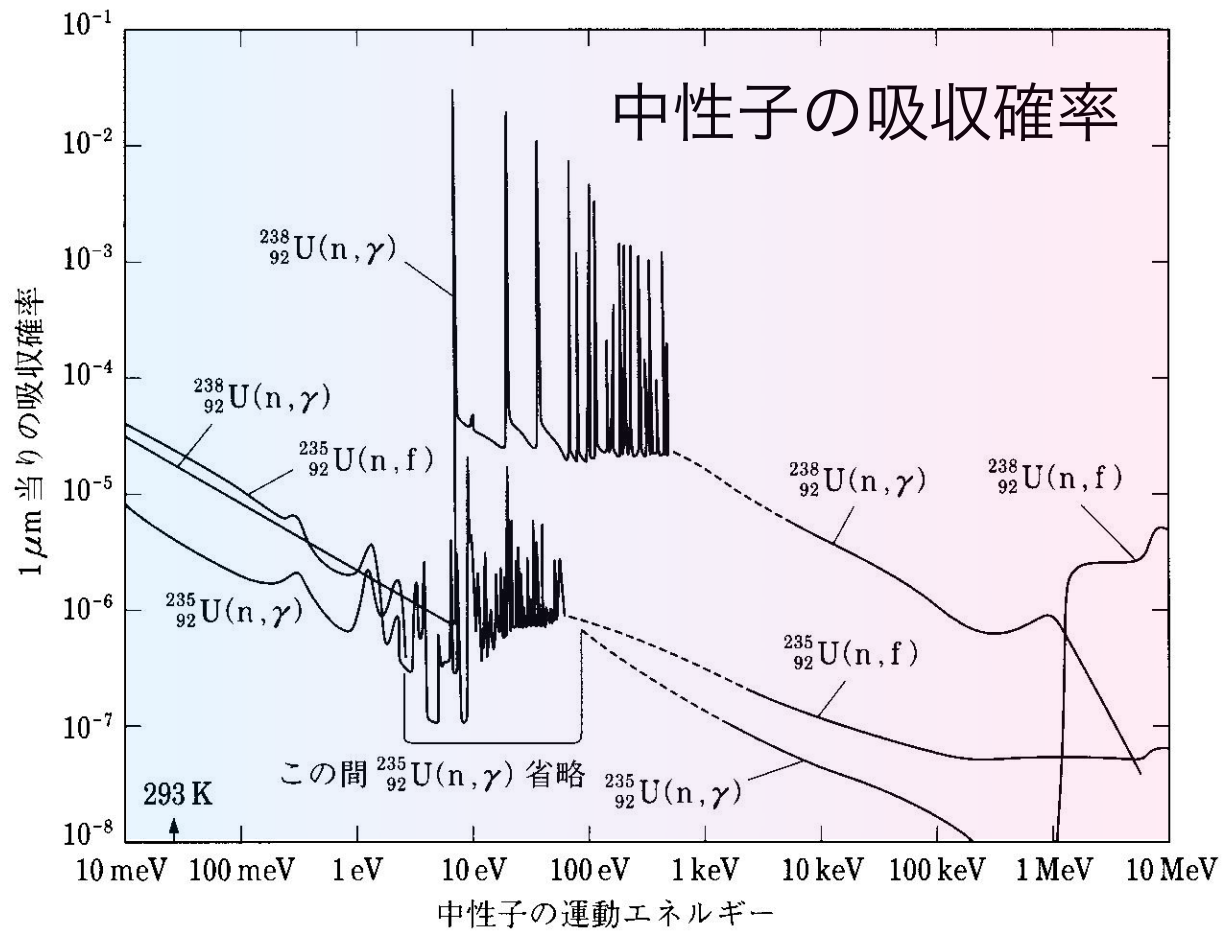


${}^{238}\text{U}$ : 99.3%, 半減期 44.6億年

**👉  ${}^{235}\text{U}$  濃縮燃料を使う**

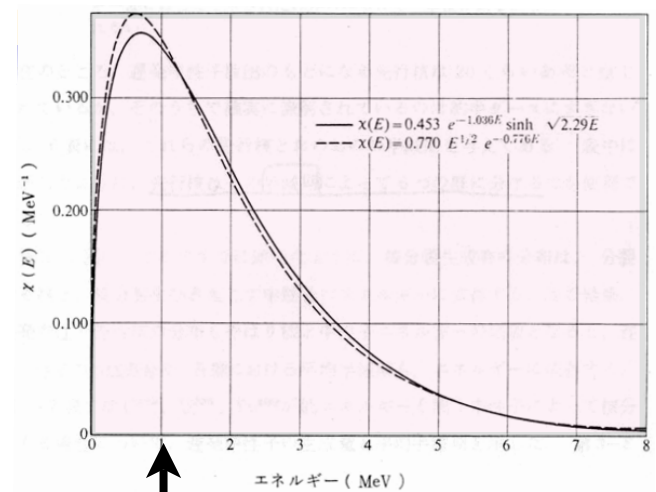


(大阪大学 故岡村弘之先生の講義資料より借用・改変)



$E_n < 1 \text{ eV}$  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

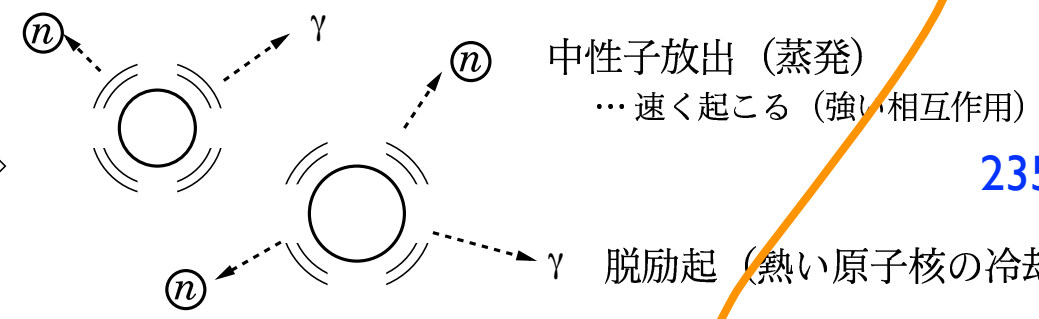
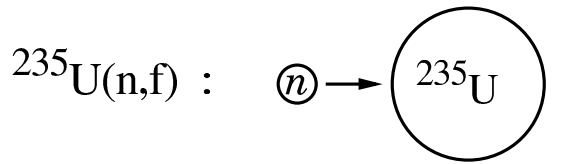


減速

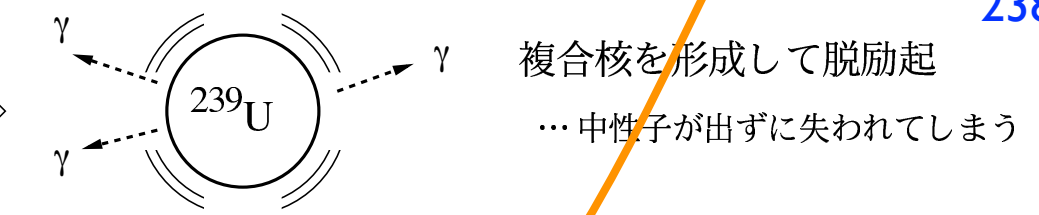
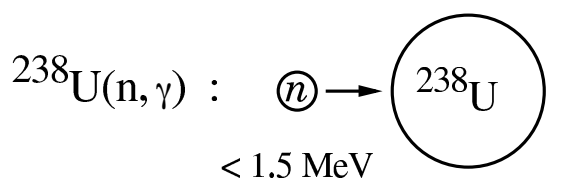
loss



熱中性子

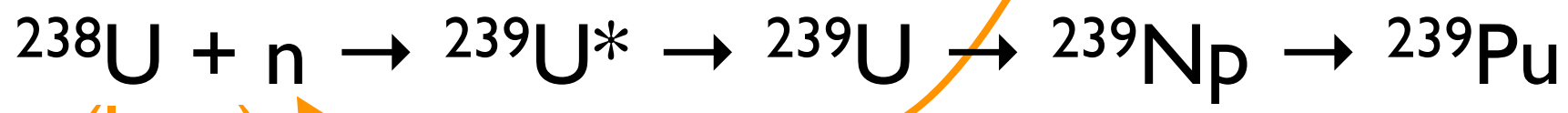


$^{235}\text{U}$ : 0.72%, 半減期 7.03億年



$^{238}\text{U}$ : 99.3%, 半減期 44.6億年

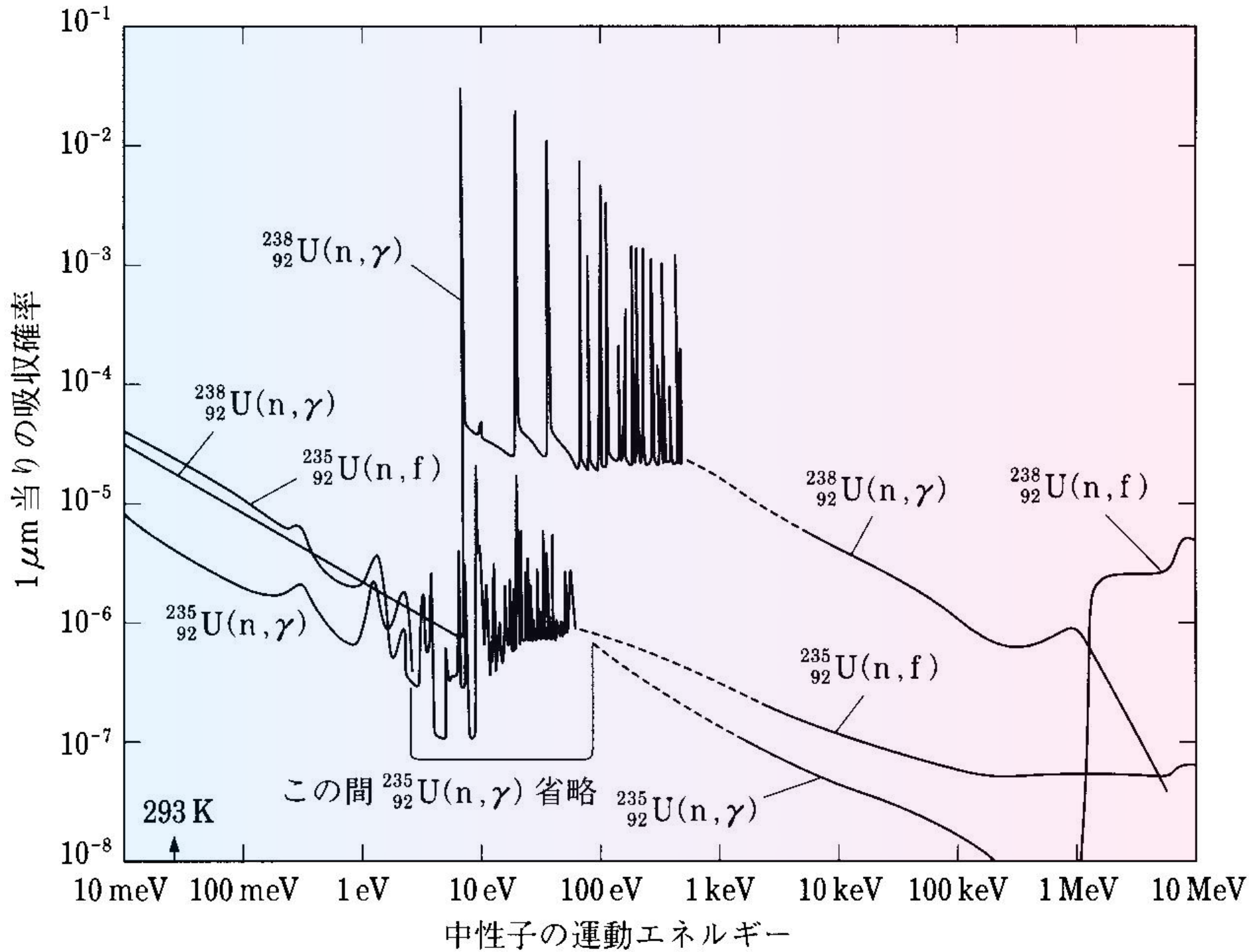
$^{235}\text{U}$  濃縮燃料を使う



(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

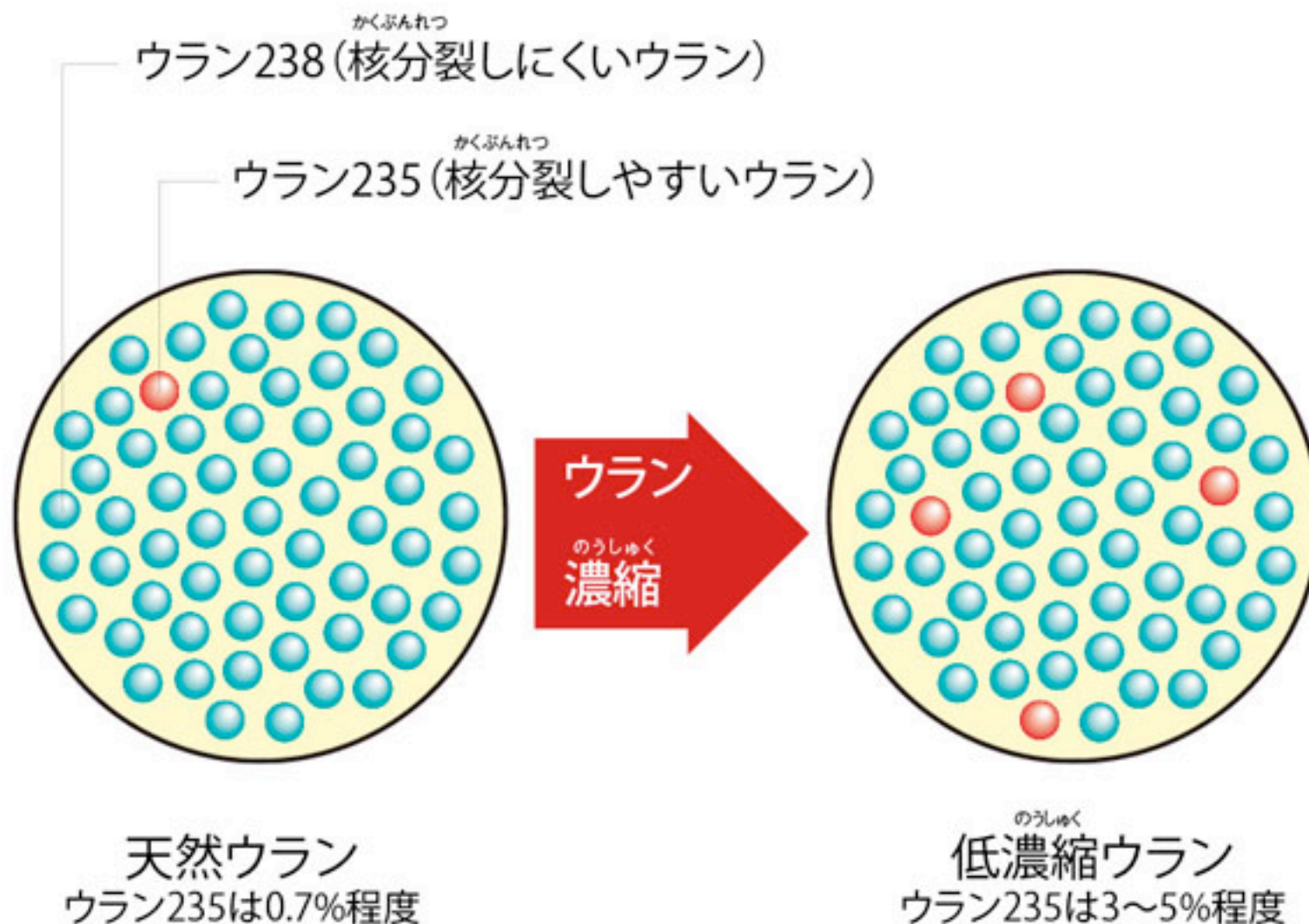
1 eV ~ 1 keV での  $^{238}\text{U}$  による吸収ピークを避けるため、燃料棒は格子状に入れ、間の減速材で一気に熱中性子まで冷えるように設計されているのだそう。



# 《 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)
- UF<sub>6</sub> (気体)

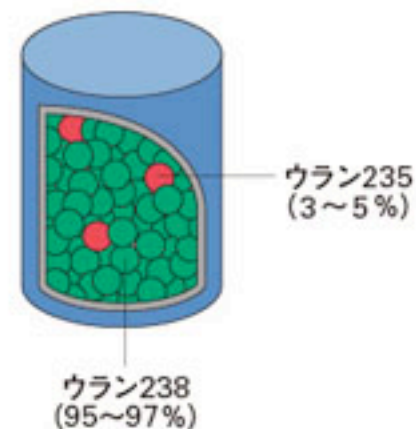
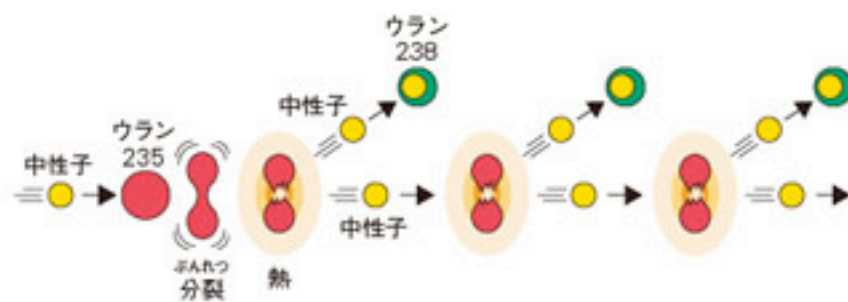
(原子力教育支援情報提供サイト「あとみん」より図表を借用。)

出所: チャレンジ! 原子力ワールド (以下のページも。)

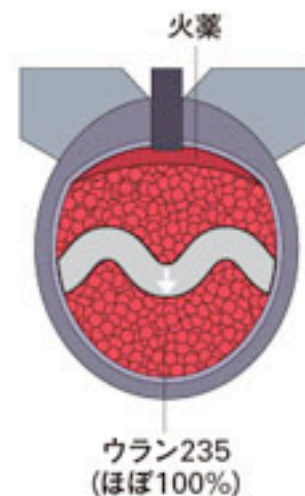
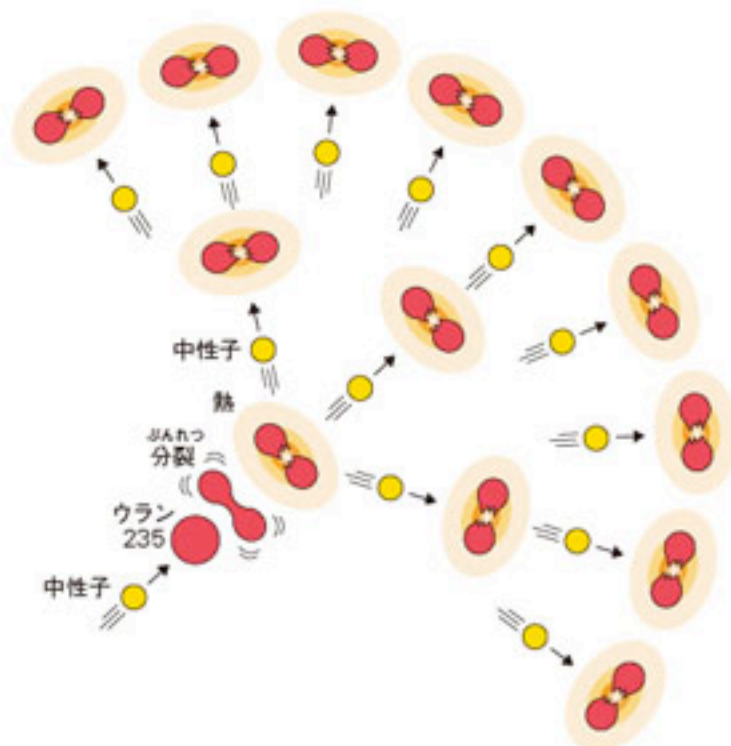


# 《 原子力発電と原子爆弾の違い 》

原子力発電の場合



ばくだん  
原子爆弾の場合



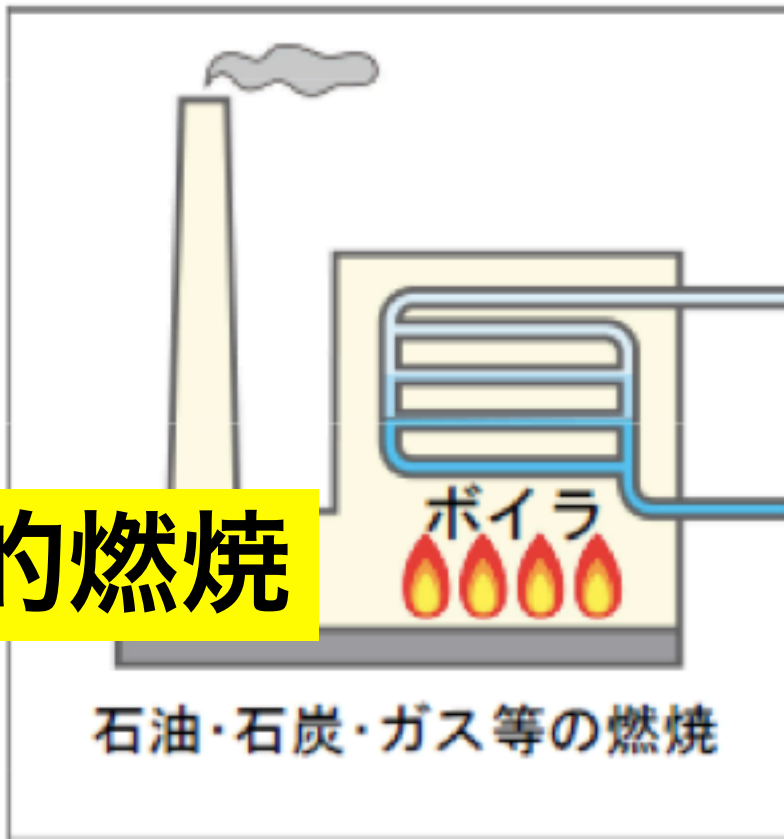
連鎖反応  
臨界

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	かくふんれつ 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

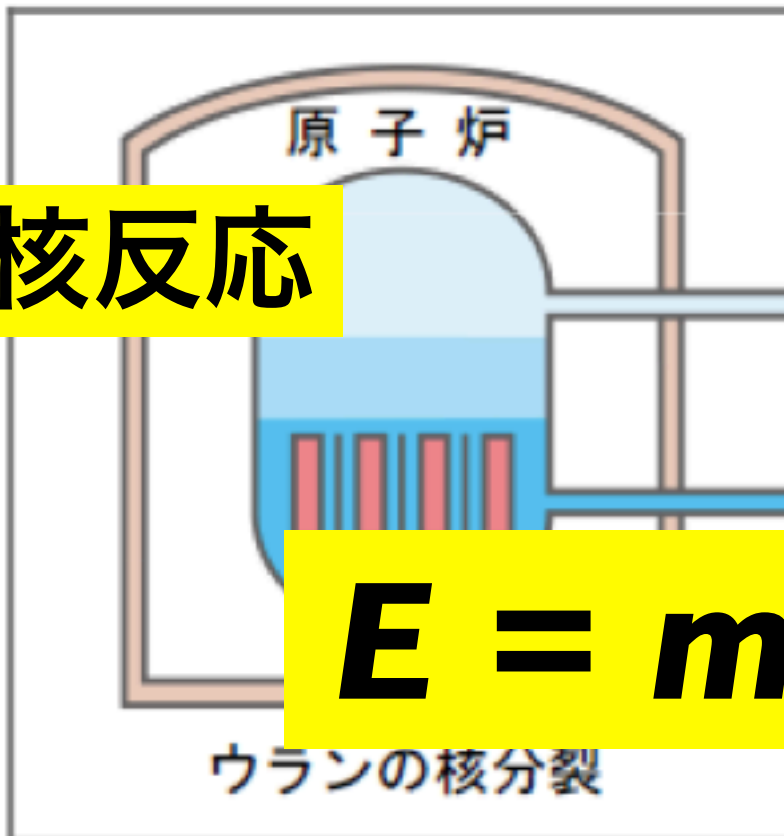


石油・石炭・ガス等の燃焼

原子核反応

原子力

$$E = mc^2$$



ウランの核分裂

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

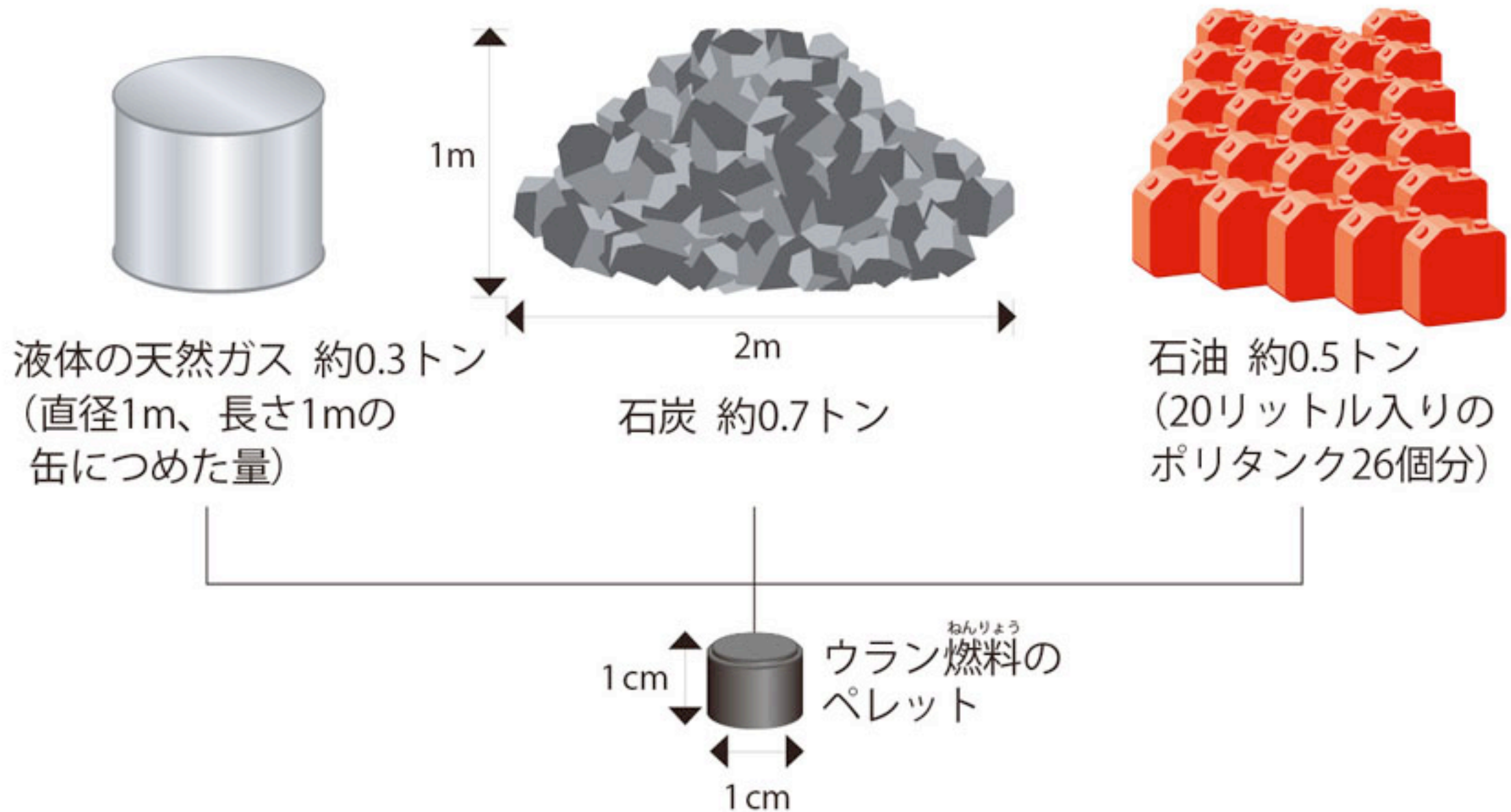
発電機

→ 放水路へ

← 冷却水(海水)



# 《 エネルギー源の比較(原子力発電と火力発電) 》



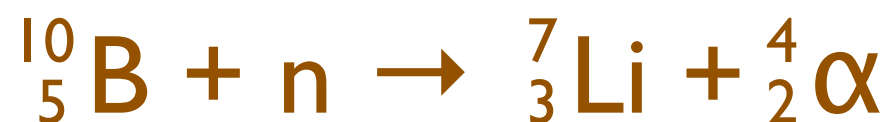
原子力発電のエネルギー源であるウラン燃料は、直径1cm、高さ1cmのペレットに焼き固めて使います。このペレット1個で一般の家庭で使う8~9か月分の電力(2,600kWh)を発電できます。これは天然ガスで約0.3トン、石炭で約0.7トン、石油で約0.5トンを燃やして発電できる電力量に相当します。



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

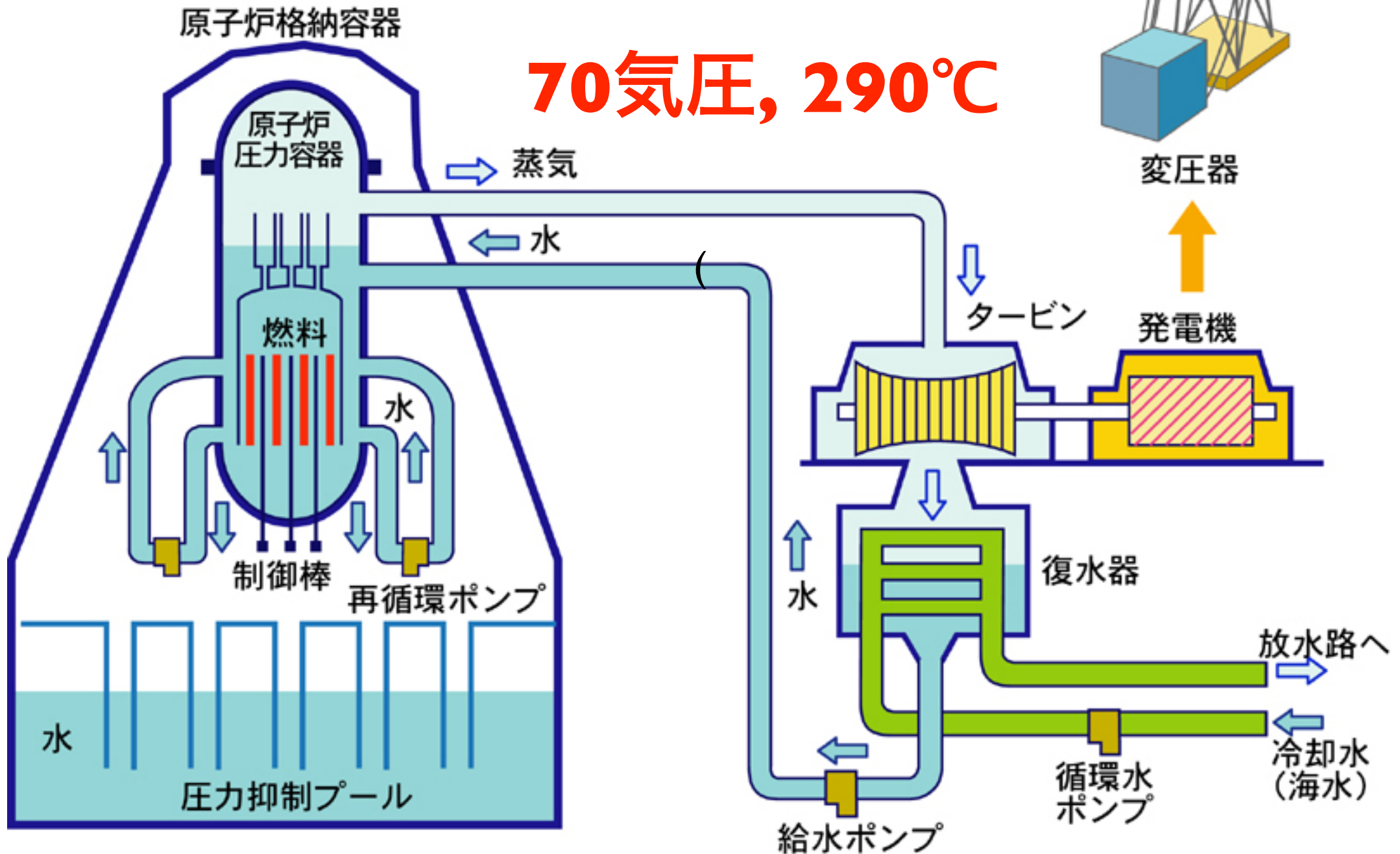
運転の制御：熱中性子を吸収する元素

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)

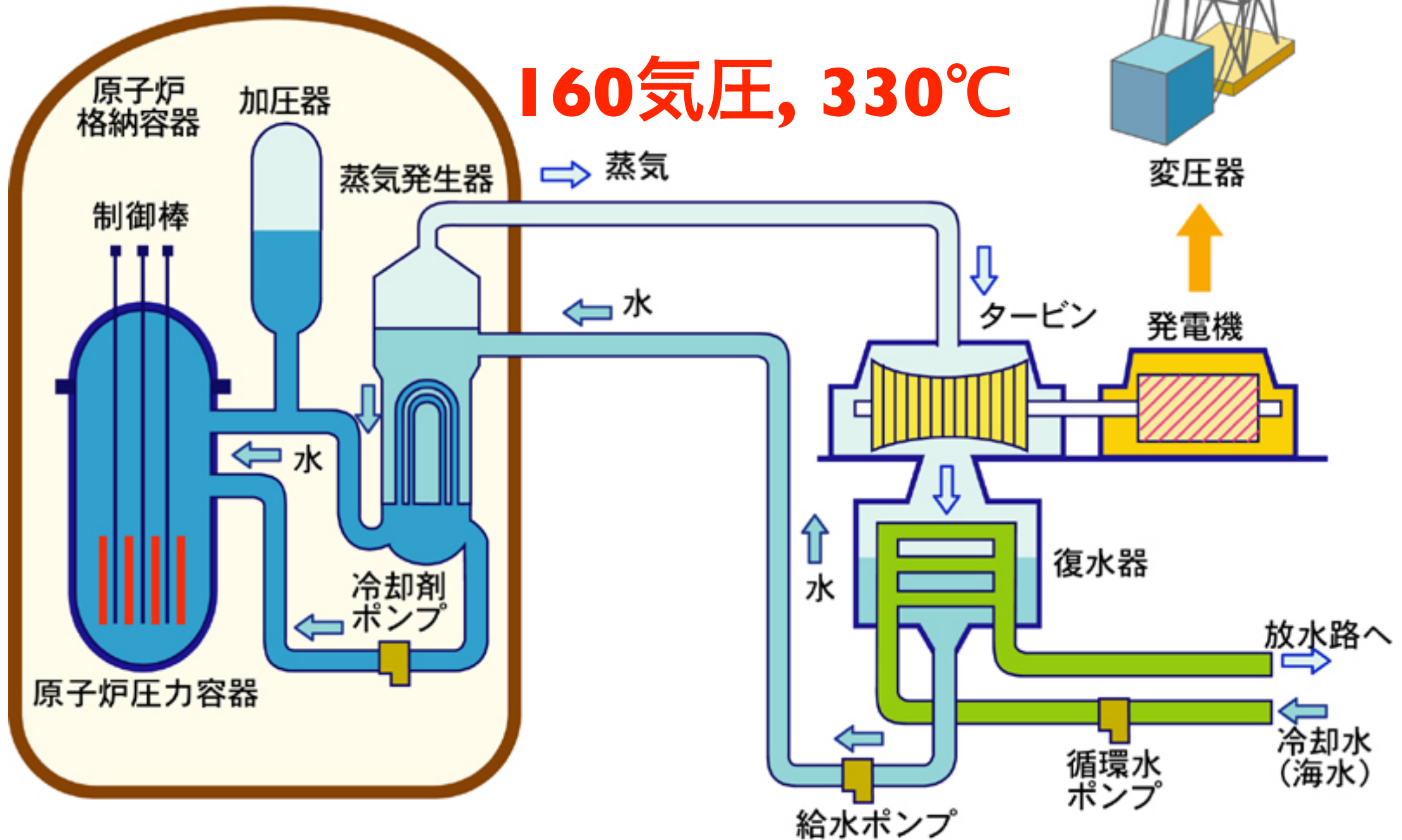


# 加圧水型原子炉

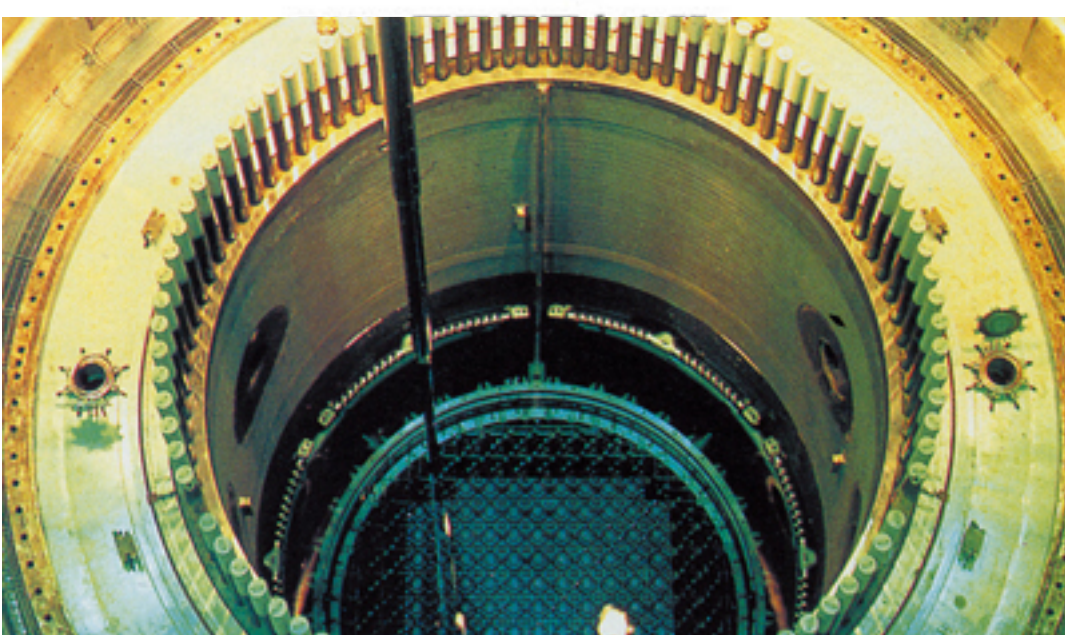
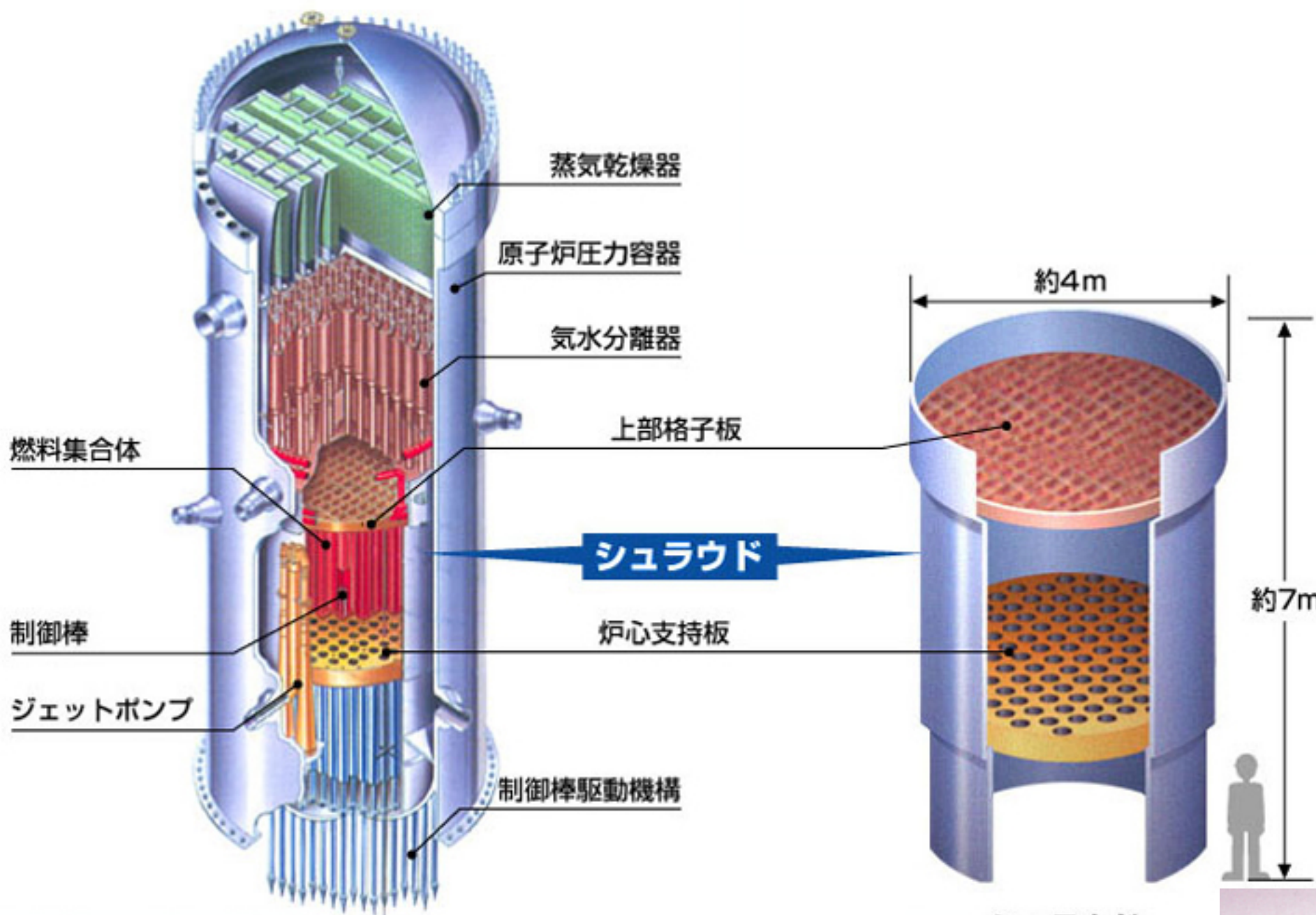
**PWR** (Pressurized Water Reactor)



**160気圧, 330°C**





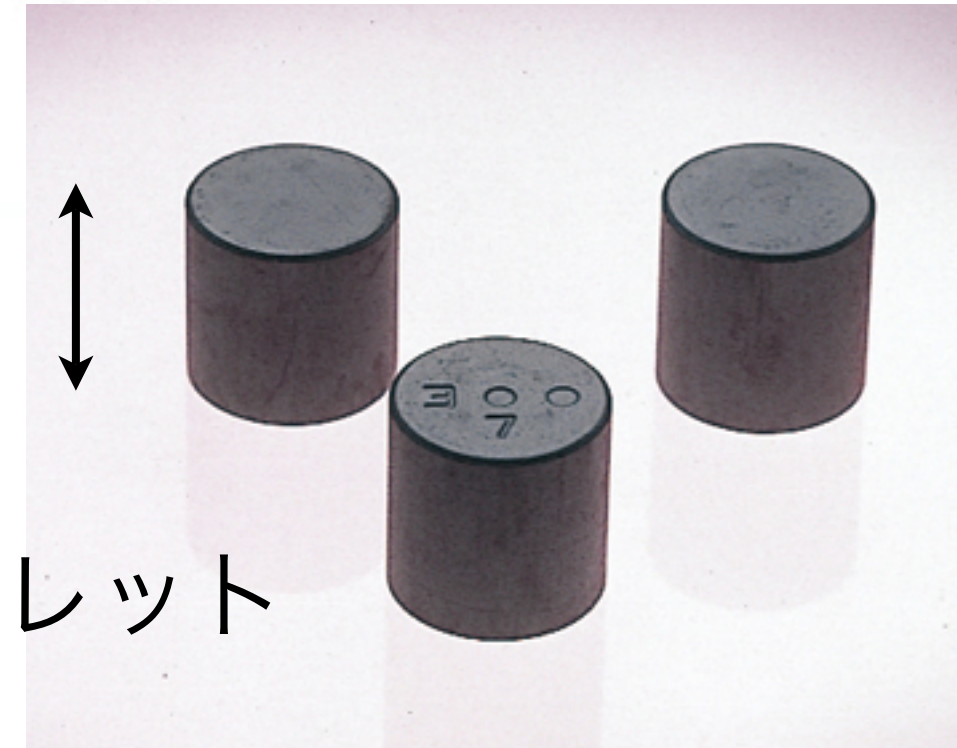


写真提供：東京電力株

シュラウド

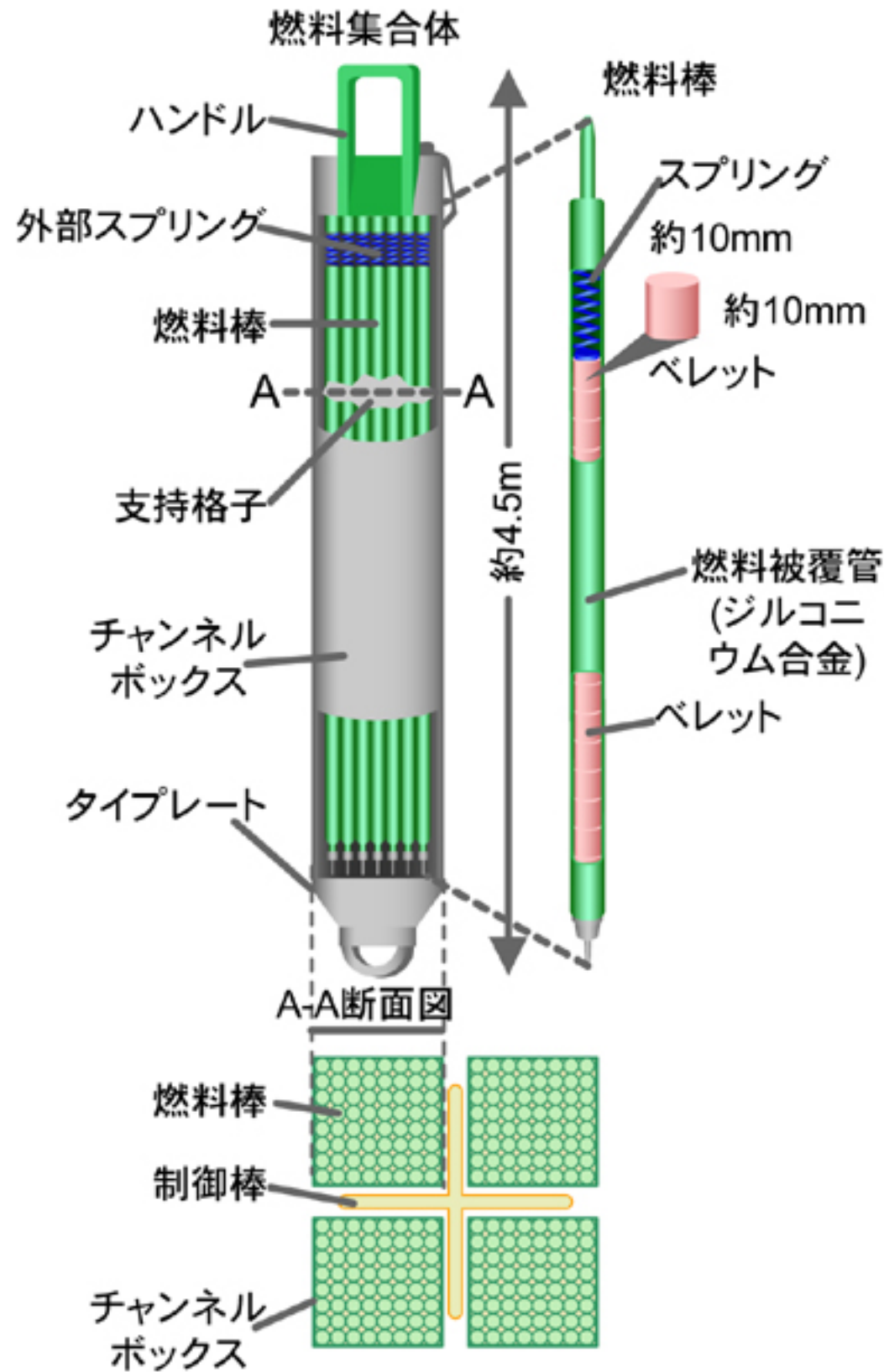
1 cm

UO<sub>2</sub> ペレット

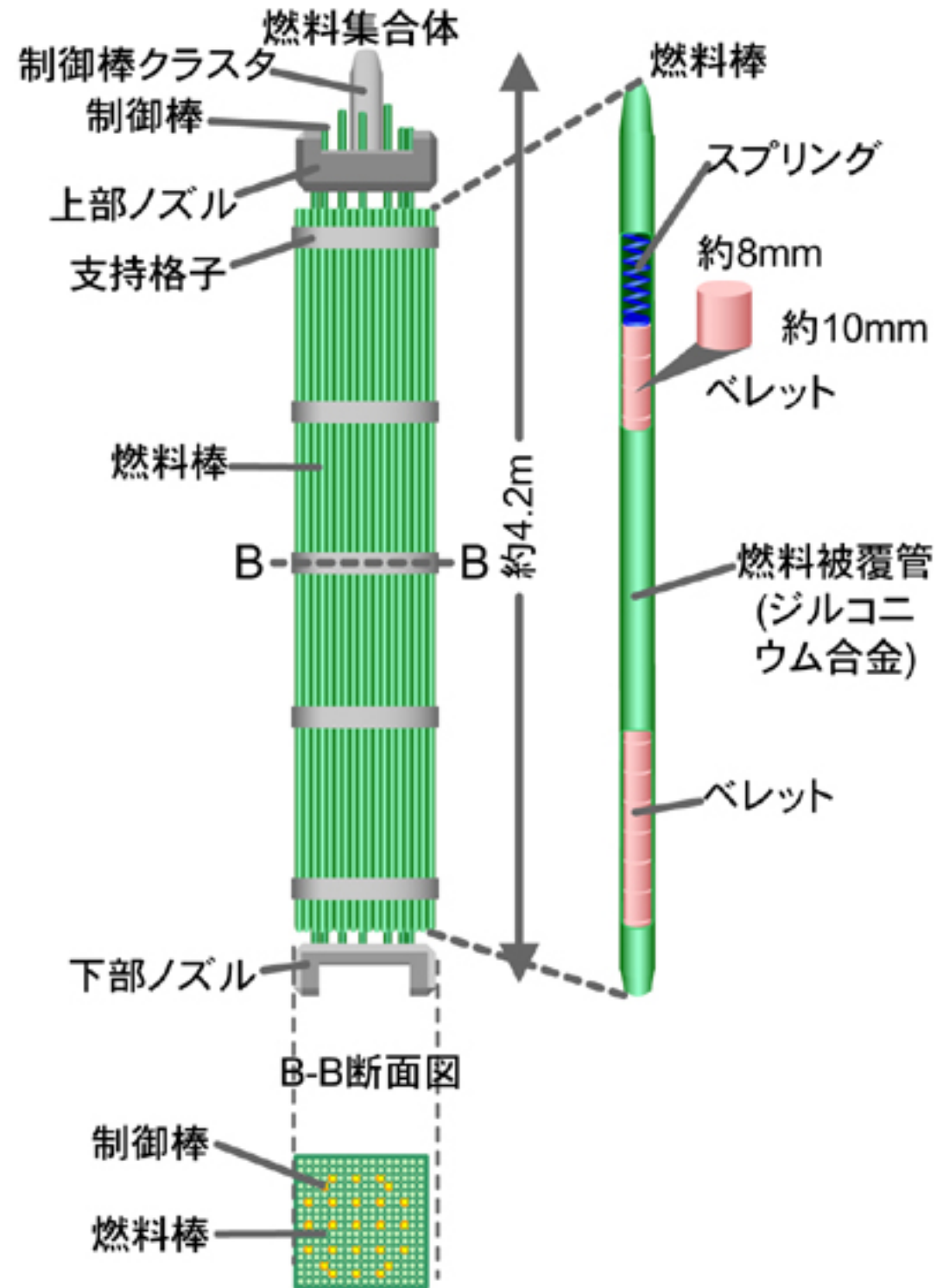




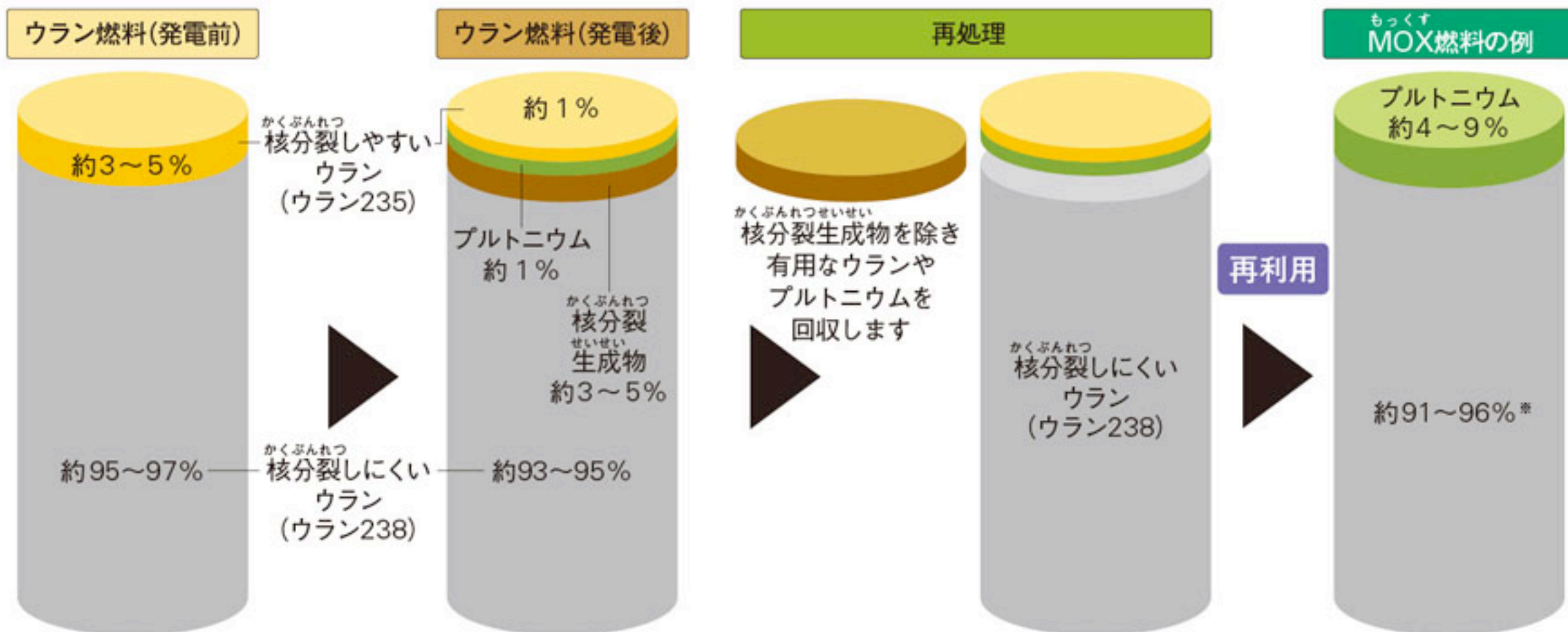
# BWR



# PWR



# 《 ウラン燃料とMOX燃料 》

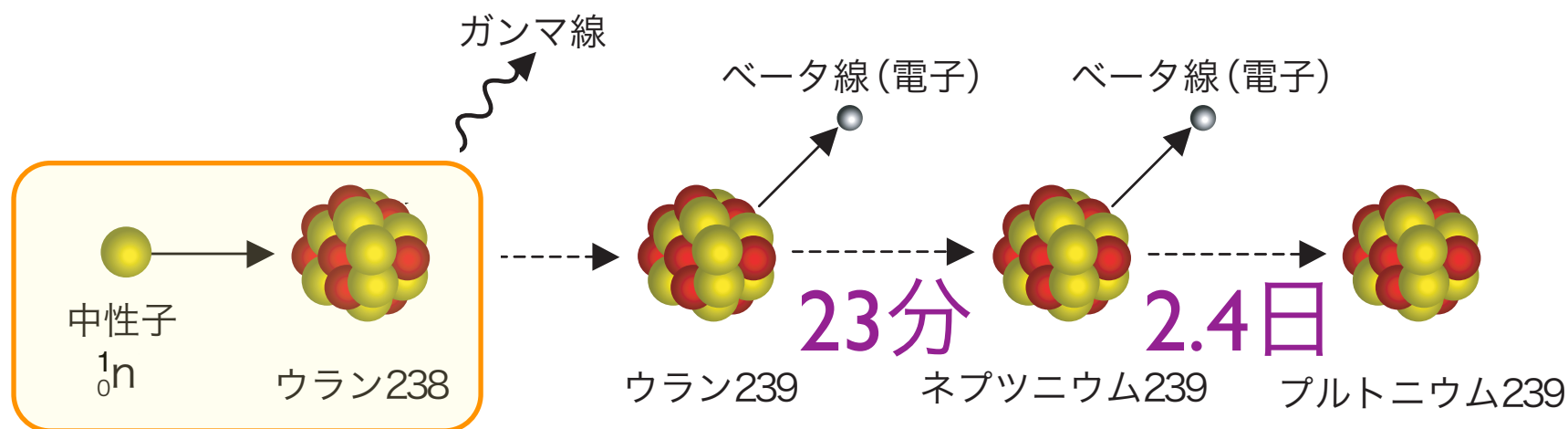


かくぶんれつ 核分裂生成物

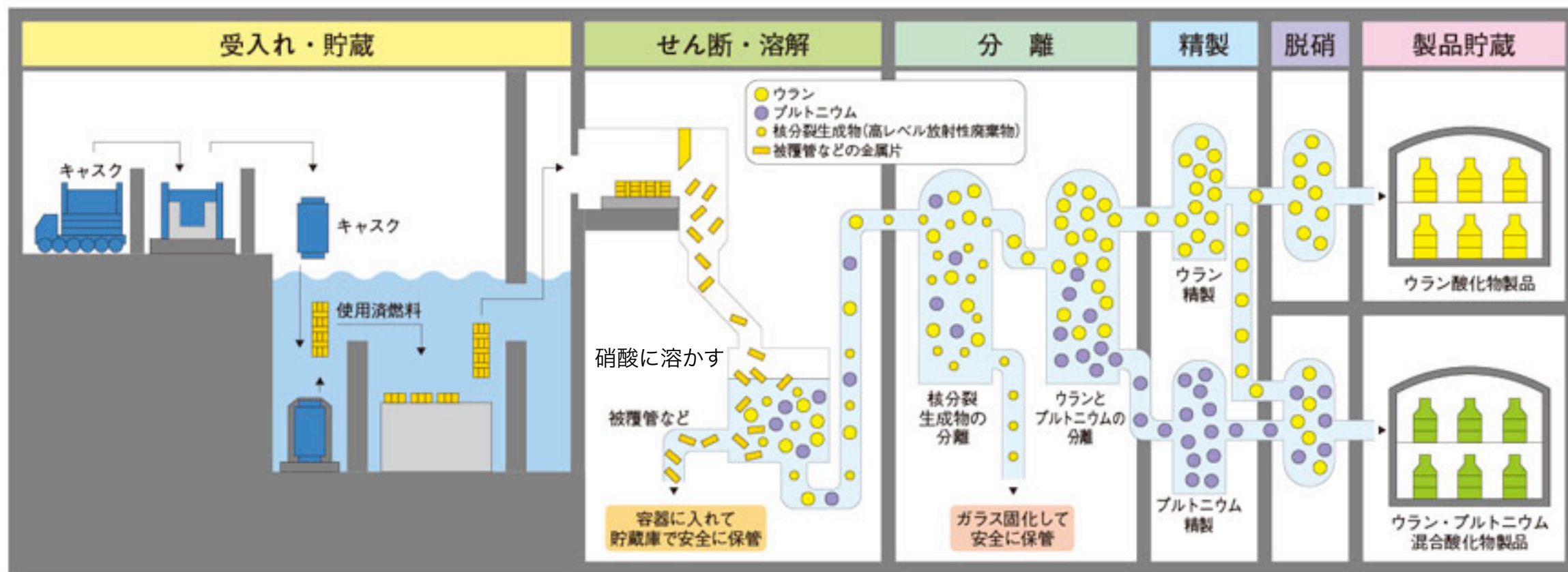
非常に高いレベルの放射線を発生する元素がふくまれています。

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)。



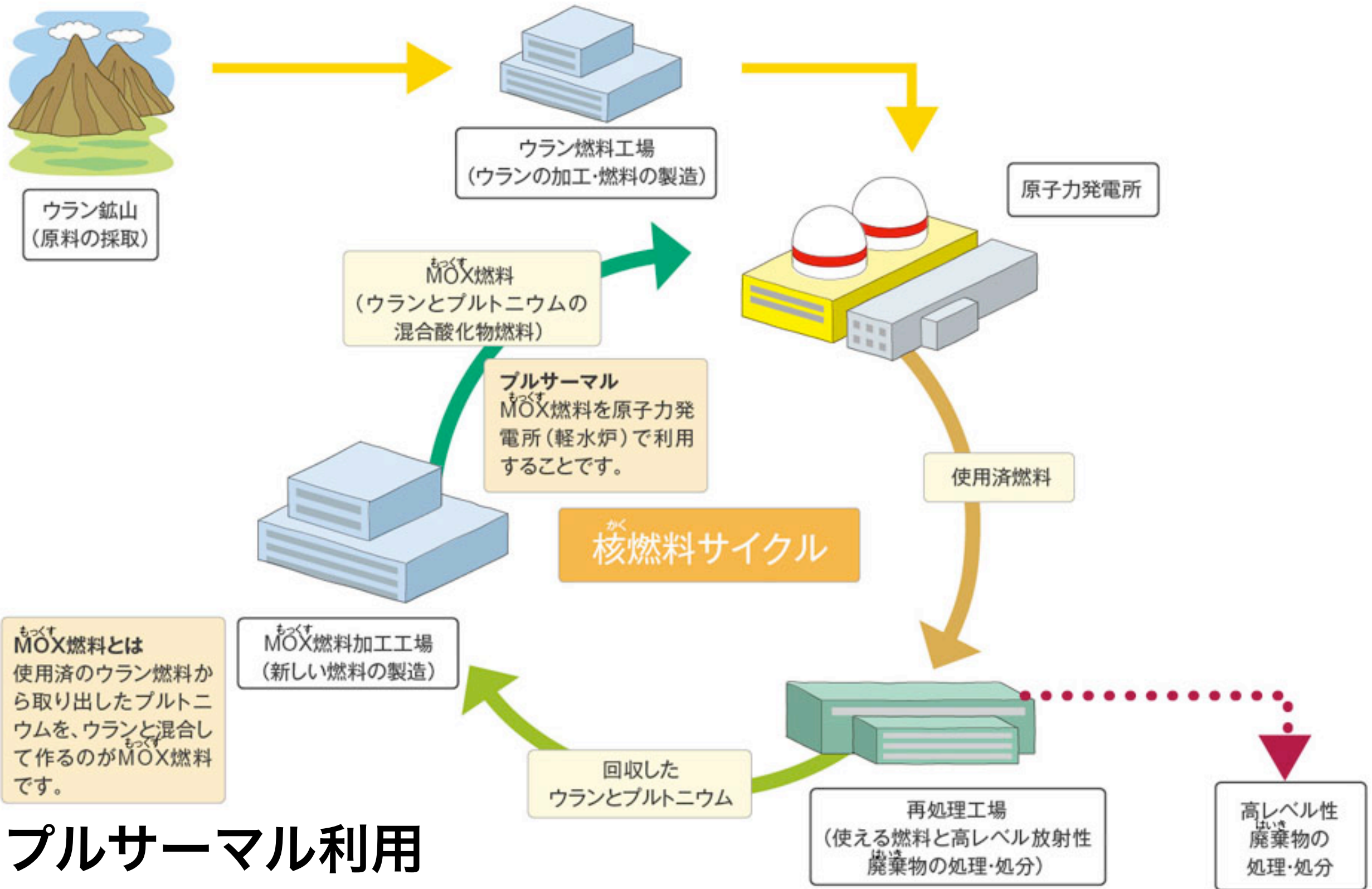
# 《 再処理の主な工程 》



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** ( $UO_2 + PuO_2$ )



# 軽水炉によるプルサーマル利用

長期運転すると  $^{239}\text{Pu}$  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

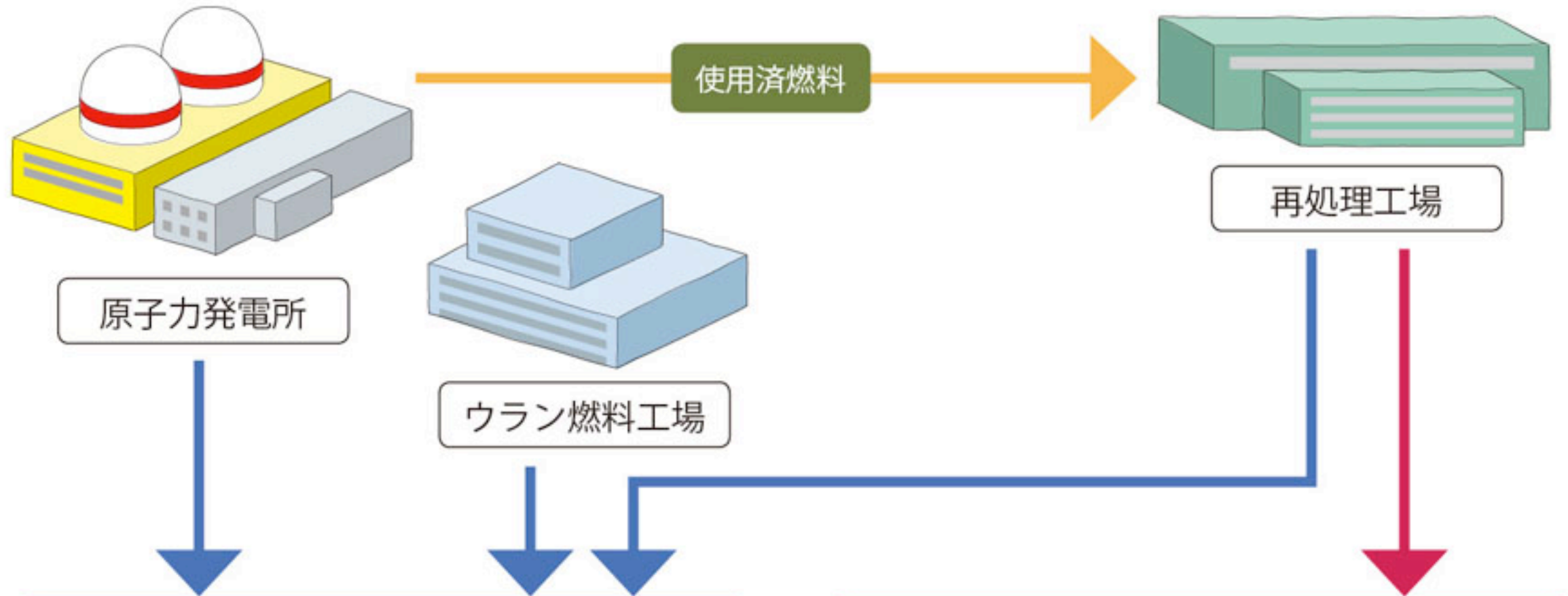
**高速**中性子により  $^{238}\text{U}$  から  $^{239}\text{Pu}$  を多数生成する計画。

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> 》



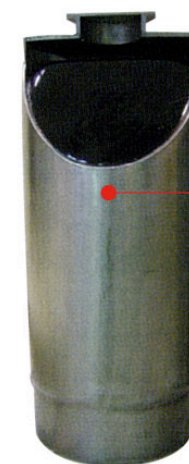
## 《 低レベル放射性廃棄物 <sup>はいき</sup> 》

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。

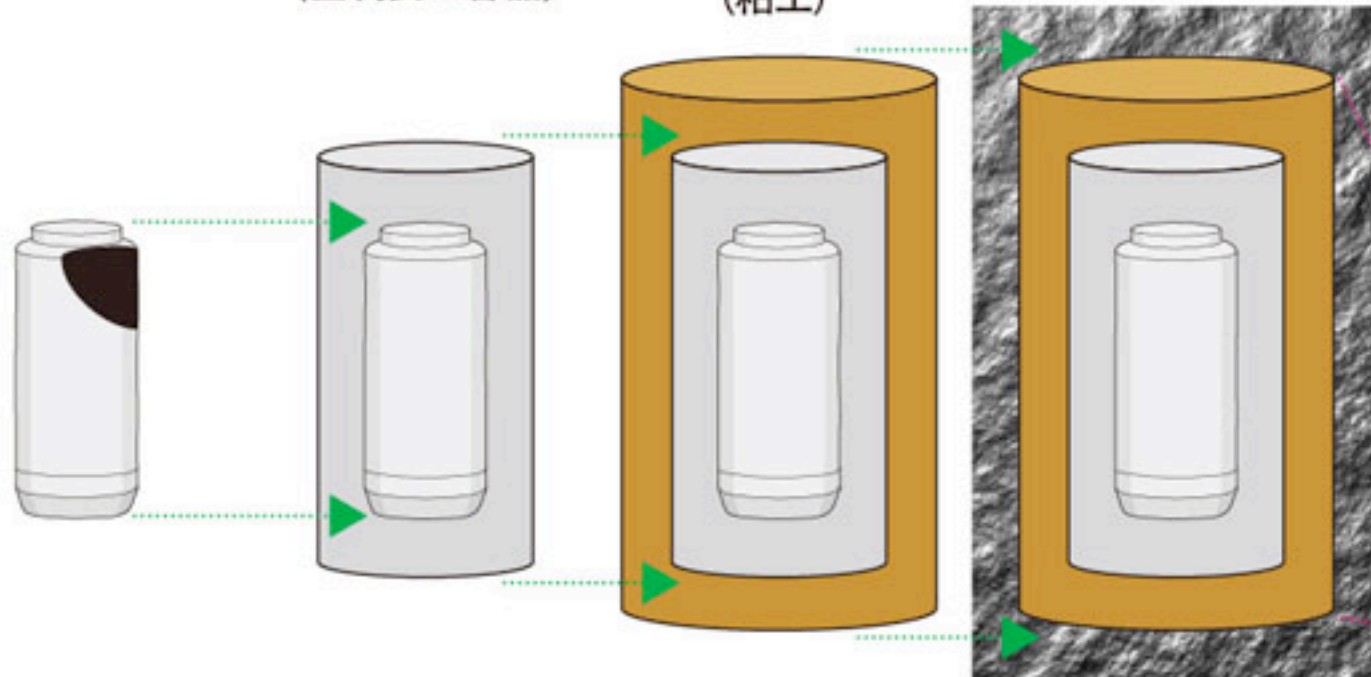
直径：約40cm  
高さ：約130cm  
総重量：約500kg

# 《 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    |



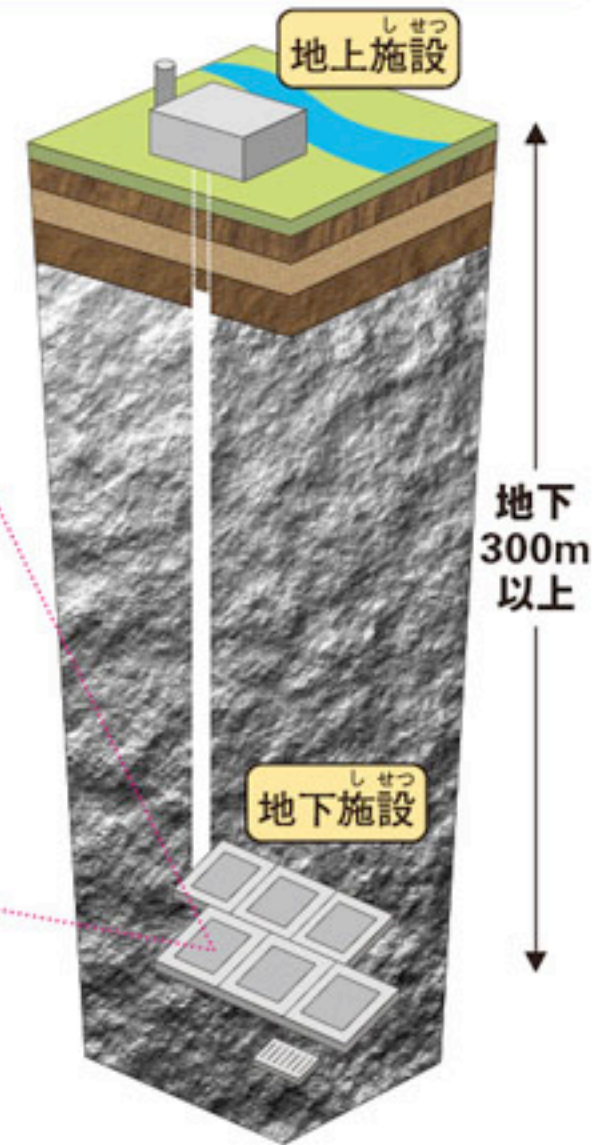
ガラスは放射性物質が地下水に溶け出しにくくします。

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

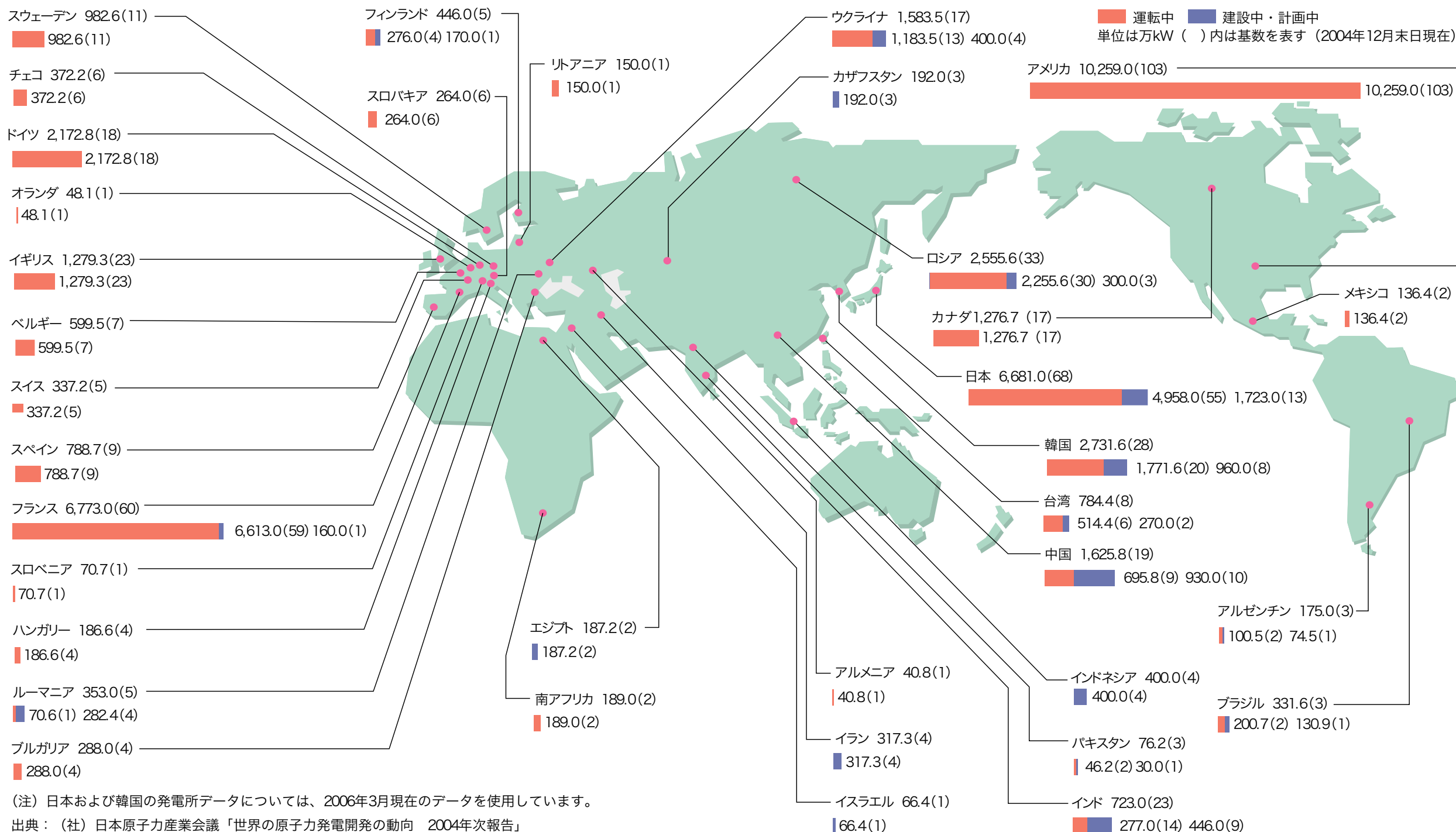




石油に代わるエネルギーとして、世界各国の原子力発電への期待は大きく、世界中で、2004年12月末現在、運転中の原子炉は434基3億7,920万キロワットにおよび、設備容量は、アメリカ、フランス、日本、ロシア、ドイツ、韓国

の順となっています。また、建設中・計画中のものは70基で、日本、中国、韓国、インド、ウクライナ、ルーマニア、インドネシア、イランなどとなっています。

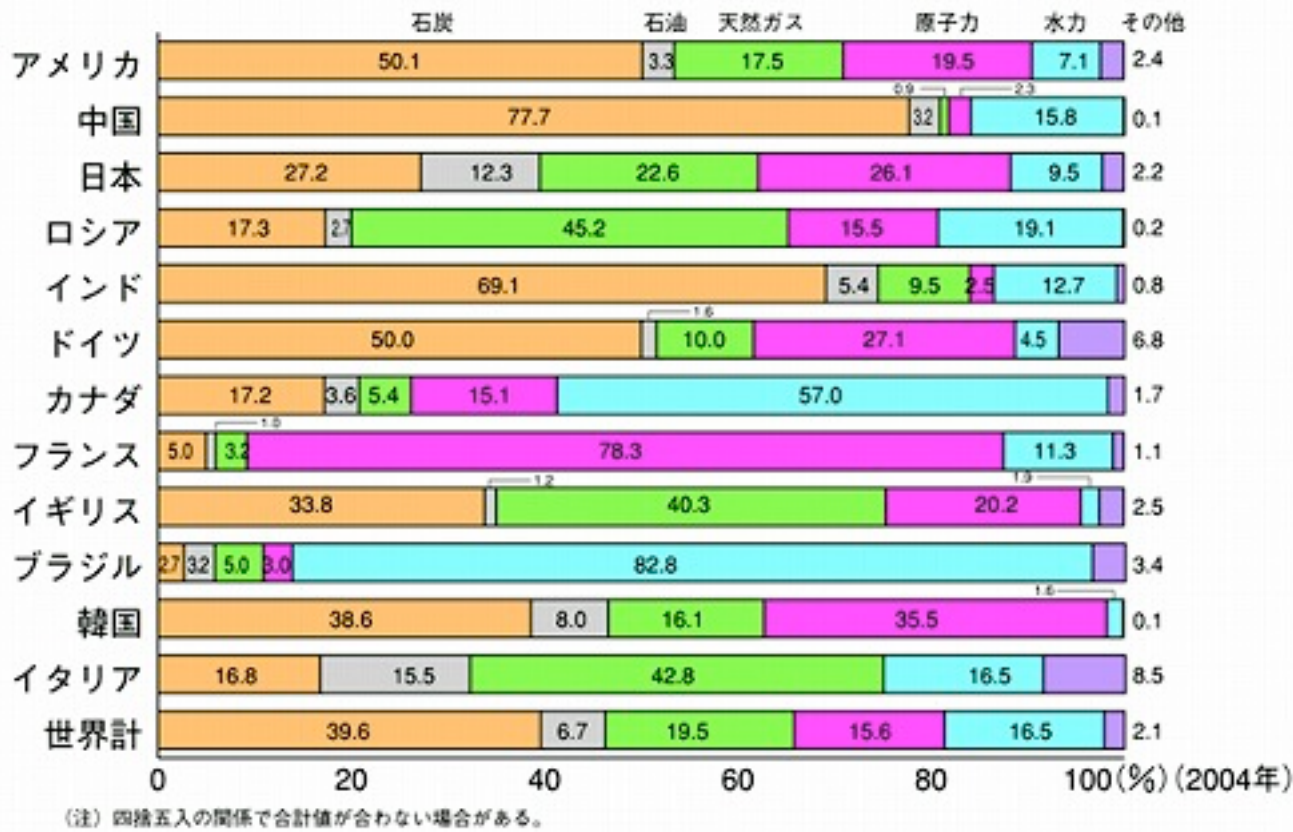
●世界の原子力発電の開発状況



(注) 日本および韓国の発電所データについては、2006年3月現在のデータを使用しています。

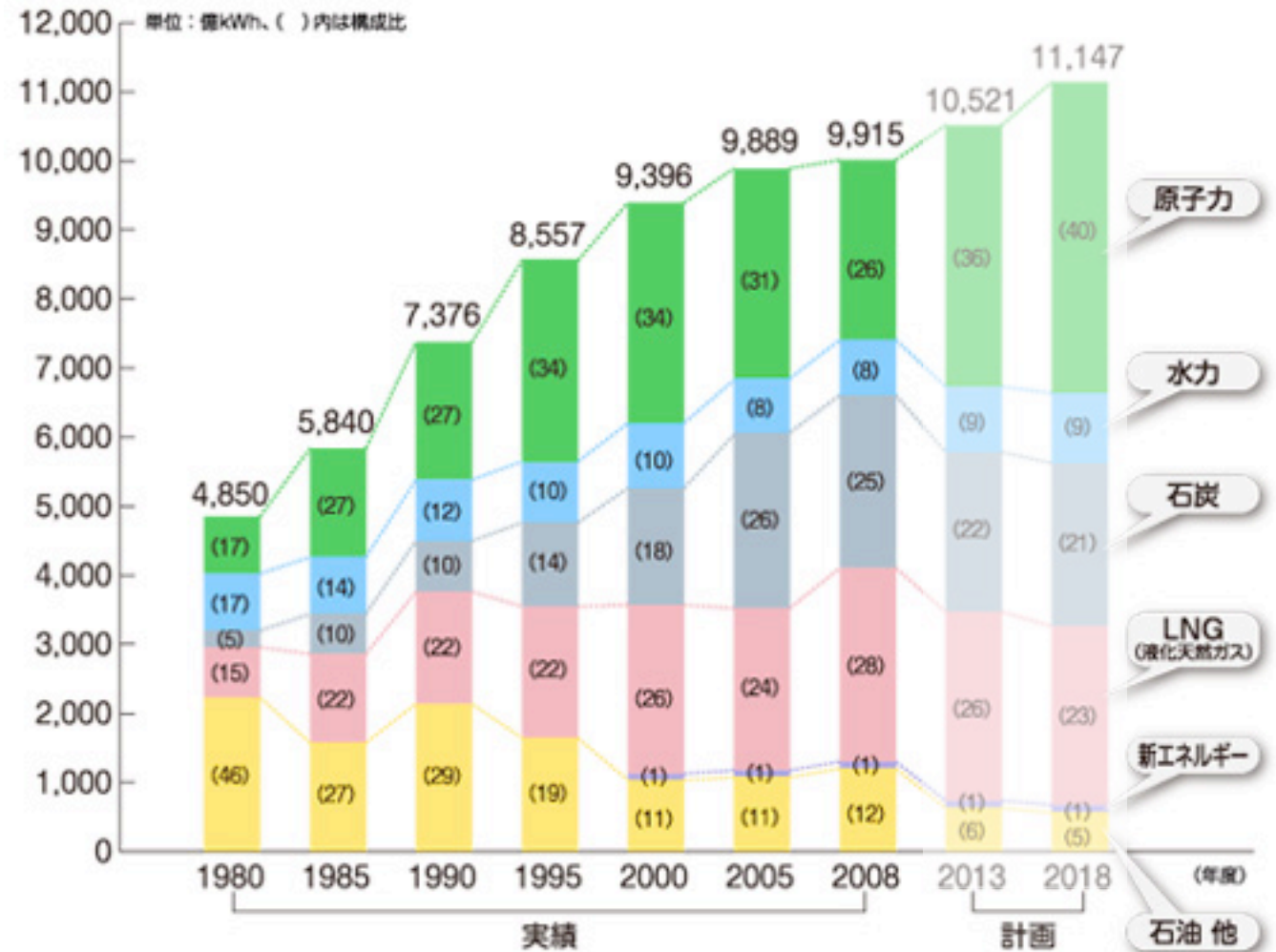
出典：(社)日本原子力産業会議「世界の原子力発電開発の動向 2004年次報告」

# 主要国の電源別発電電力量の構成比

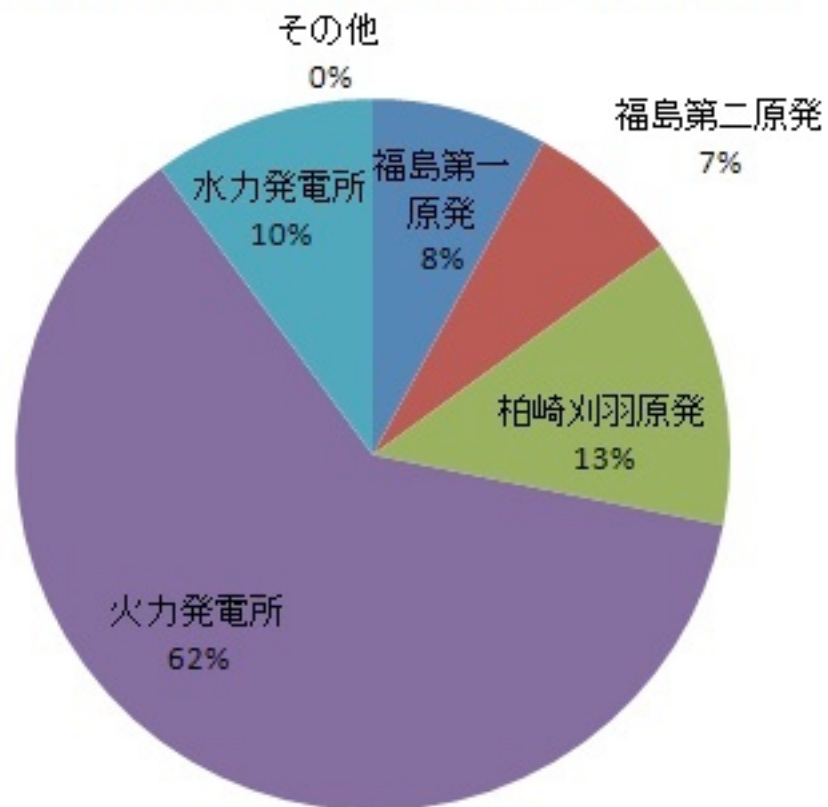


出典：IEA Electricity Information 2006 Edition

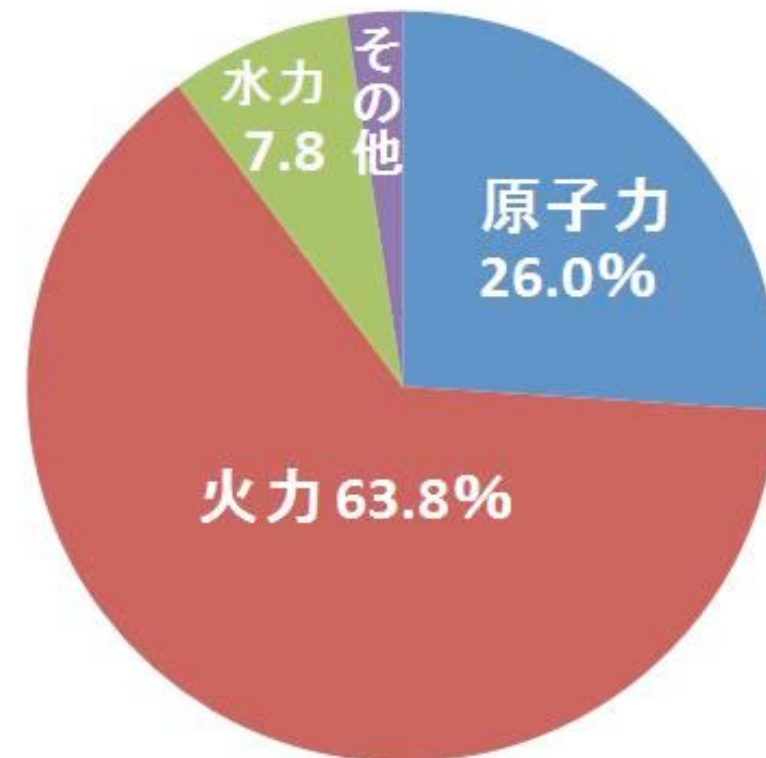
# 発電電力量構成比の推移 (10電力計、受電を含む)



# 東京電力の電力総出力の割合



日本の発電量の比率 2008





# レポート

## • 物理分野 #2 以下の2題からいずれかを選択

(A) 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ついて、 $\alpha$ 崩壊の系列、 $\beta$ 崩壊の系列ごとに整理して述べよ。また、多種多様な核分裂生成物のうち  $^{131}\text{I}$  や  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  などが特に問題となるのはなぜか。

(B) 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。



# 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・社会**：鳥居, 藤垣

締切：12月21日(金)

- **化学分野**

**化学・環境**：小豆川, 森口

締切：1月11日(金)

- **生命科学分野**

**生命科学**：渡邊, 作美, 藤原

締切：1月中旬



第8回：11/30

次回予告

環境システム工学

【工学部都市工学 森口 祐一 先生】

(放射性物質の除染、がれき処理)



# 放射線を科学的に理解する

- 10/12 放射線入門 【鳥居】
- 10/19 放射線物理学 【鳥居】
- 10/26 放射線計測学 【小豆川】
- 11/ 2 環境放射化学 【小豆川】
- 11/ 9 放射線生物学 【渡邊】
- 11/16 放射線医療 【作美】
- 11/20 原子核物理学 【鳥居】
- 11/30 環境システム工学 【森口】
- 12/ 7 科学技術社会論 【藤垣】
- 12/14 環境放射化学 【小豆川】
- 12/21 植物栄養・肥料学 【藤原】
- 1/11 放射線の利用 【渡邊】
- 1/25 放射線防護学・加速器科学 【鳥居】

担当教員

ゲスト講師

鳥居 寛之

小豆川 勝見

渡邊 雄一郎

《教養学部》

作美 明

森口 祐一

藤原 徹

藤垣 裕子

《医学部附属病院放射線科》

《工学系都市工学》

《農学部応用生命化学》

《教養学部広域システム》

# 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 テーマ講義



検索

## 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



**Fine.** Per oggi è tutto.

Fini pour aujourd'hui

That's all for today.

Всё за сегодня.

오늘은 여기까지 하겠습니다.

Ci vediamo la prossima volta.

On se voit la prochaine fois.

See you next time.

Увидимся в следующий раз.

또 만납시다.