

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

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。

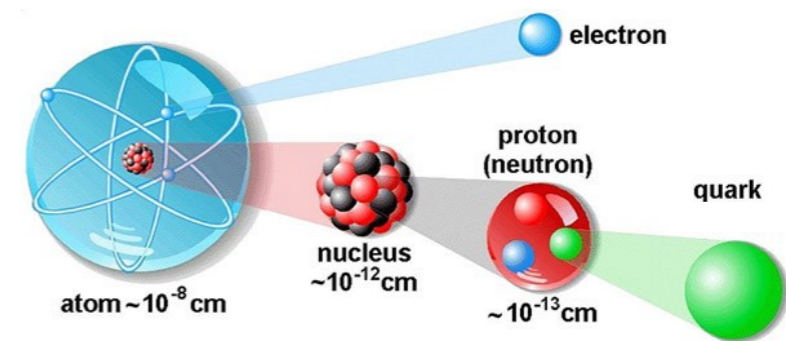
書籍「放射線を科学的に理解する — 基礎からわかる東大教養の講義 —」

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

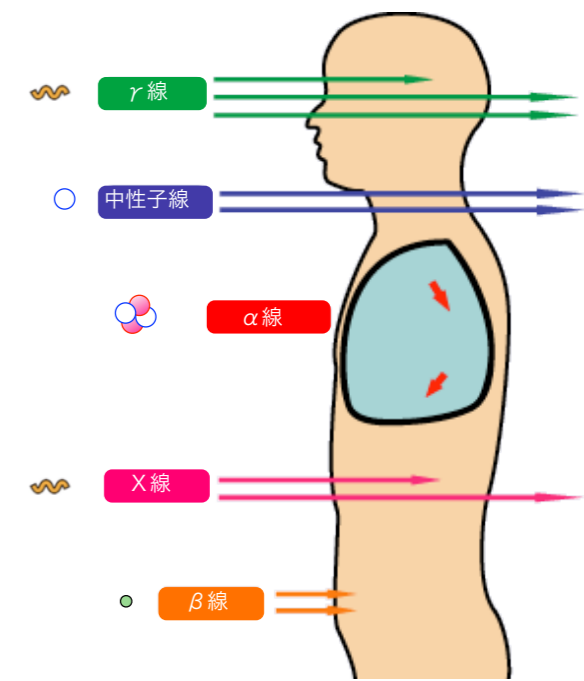
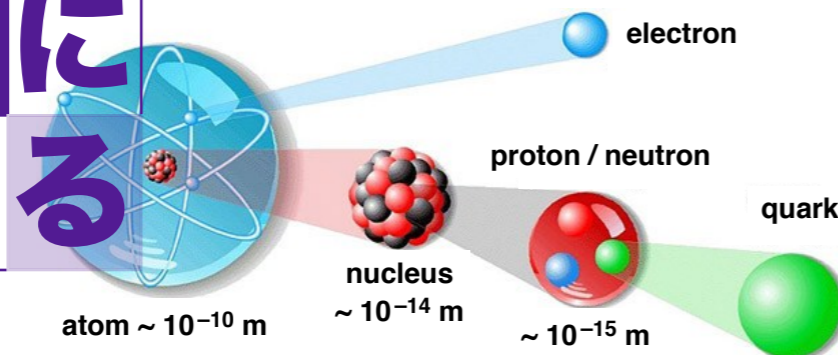
自主講義
放射線学



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

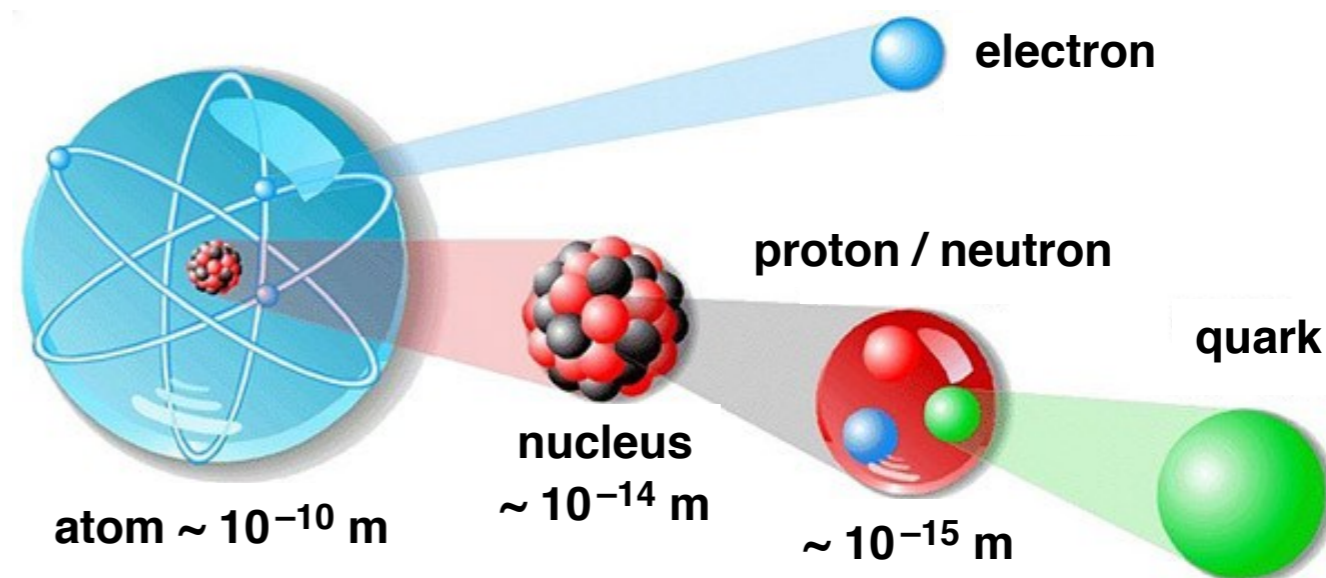
放射線を
科学的に
理解する



2011年度冬学期 主題科目テーマ講義

第7回：2011 / 11 / 18 (金)

放射線を
科学的に
理解する



金曜5限 @ 11号館 1101教室

原子核物理学

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/ 7 放射線入門 【鳥居】
- 10/14 放射線物理学 【鳥居】
- 10/21 放射線計測学 【小豆川】
- 10/28 環境放射化学 【小豆川】
- 11/ 4 放射線生物学 【渡邊】
- 11/11 放射線医学 【中川】
- 11/18 原子核物理学 【鳥居】
- 12/ 2 原子力工学 【石渡】
- 12/ 9 放射線物理学 【鳥居】
- 12/16 環境放射化学 【小豆川】
- 1/10 植物栄養・土壌肥料学 【藤原】
- 1/20 放射線の利用 【渡邊】
- 1/27 加速器科学・まとめ 【鳥居】

鳥居 寛之

小豆川 勝見

渡邊 雄一郎

《教養学部》

中川 恵一 《医学部附属病院放射線科》

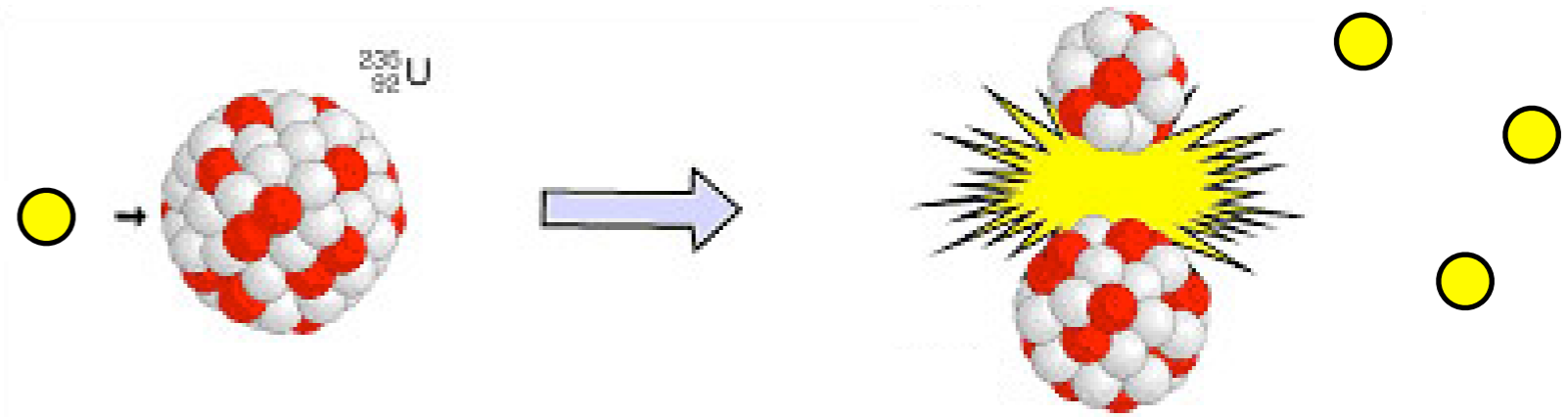
石渡 祐樹 《工学系原子力国際専攻》

藤原 徹 《農学部応用生命科学》

ゲスト講師

第7回 (11/18)

物理分野

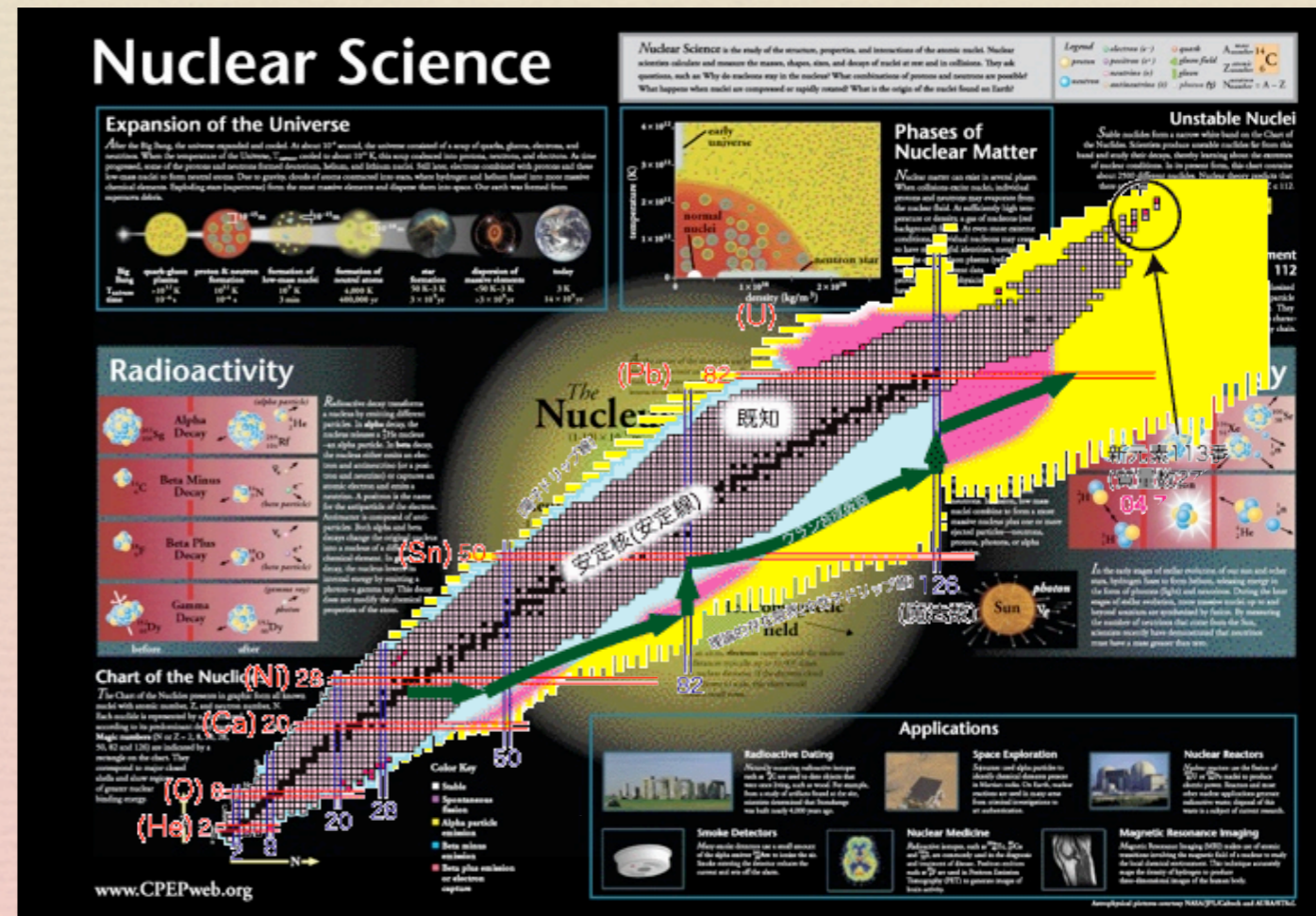


《原子核物理学》

放射能とは、原子核構造・核壊変・核分裂

教養学部物理

鳥居 寛之





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

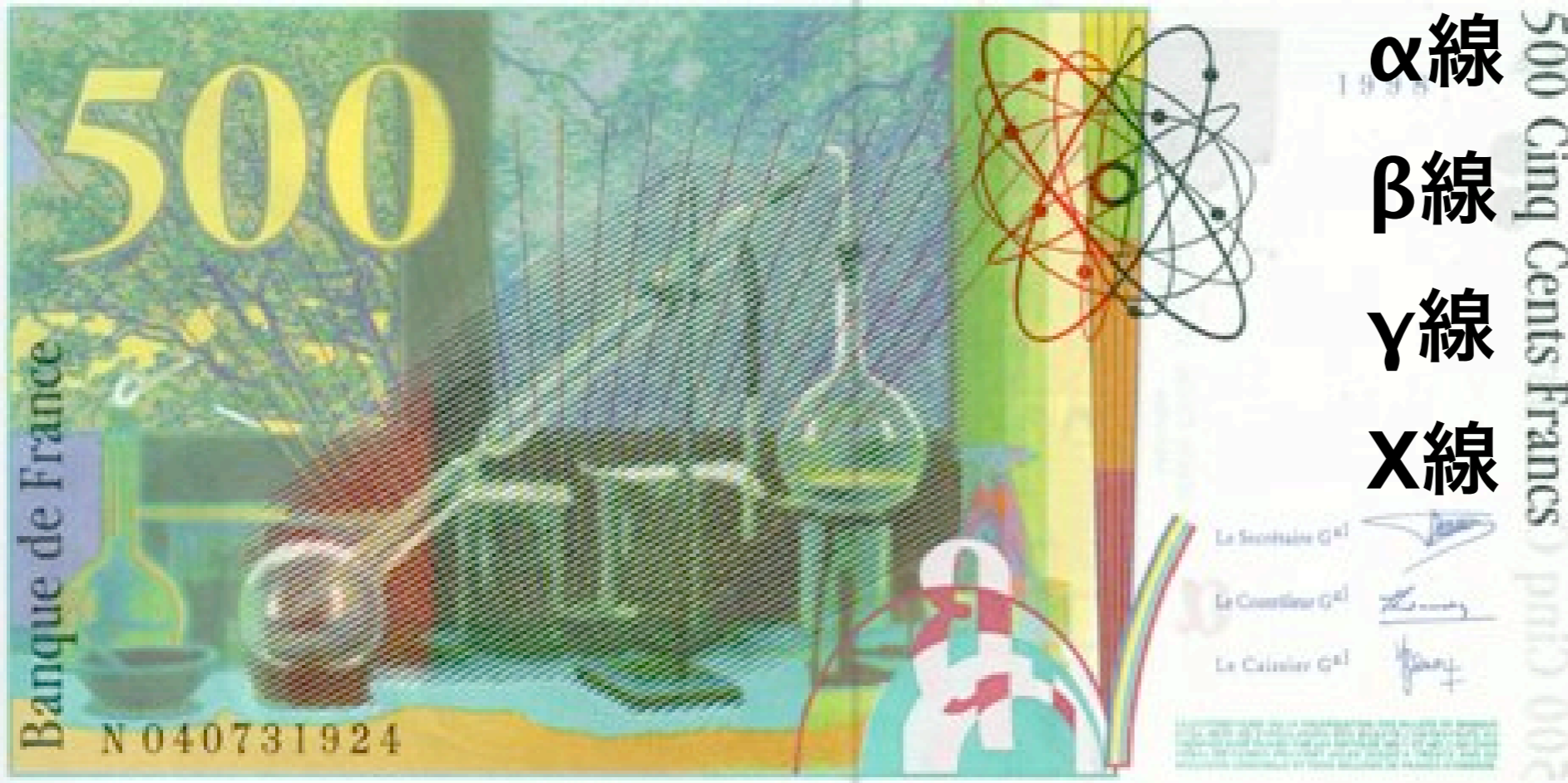
ギガ電子ボルト



クォーク
quark

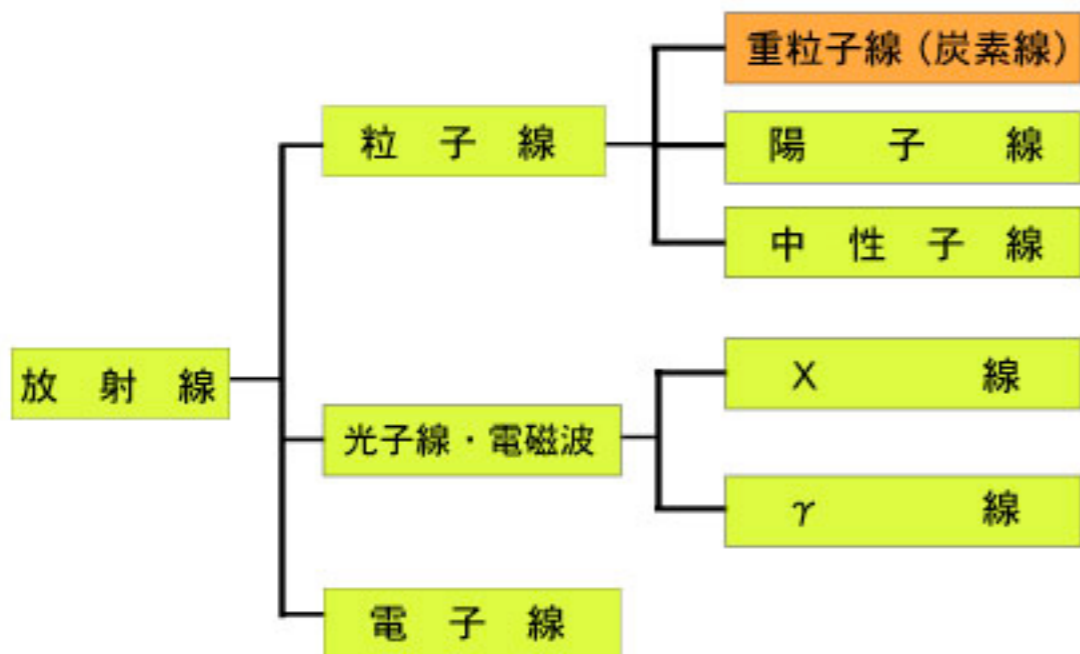


Billet de 500 Francs Français
en circulation: 1993–1999

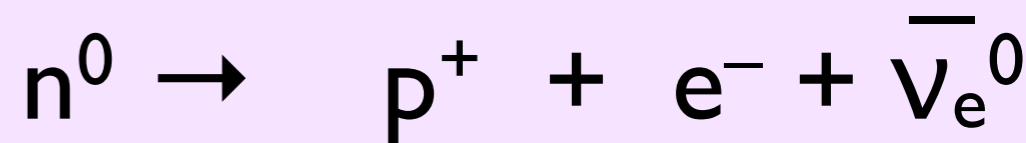
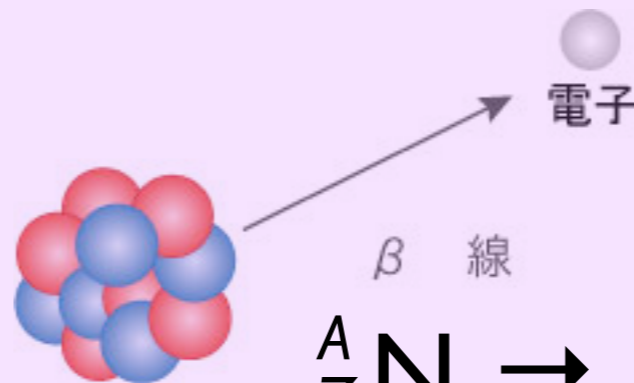
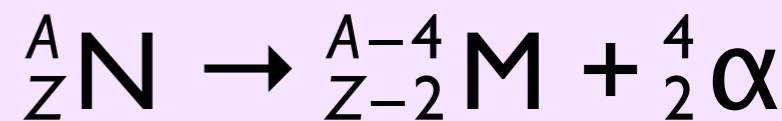
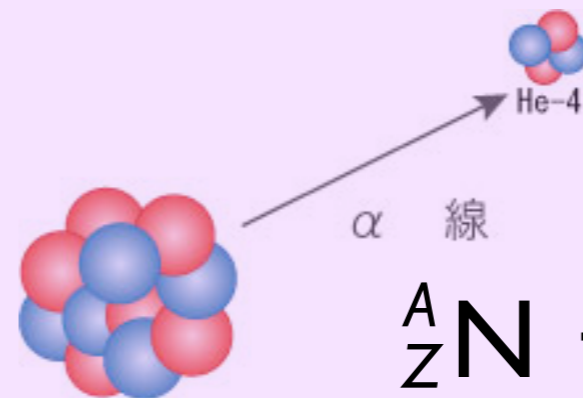


- α 線 ヘリウム原子核
- β 線 高速の電子
- γ 線 光子（電磁波）
- X線 光子（電磁波）

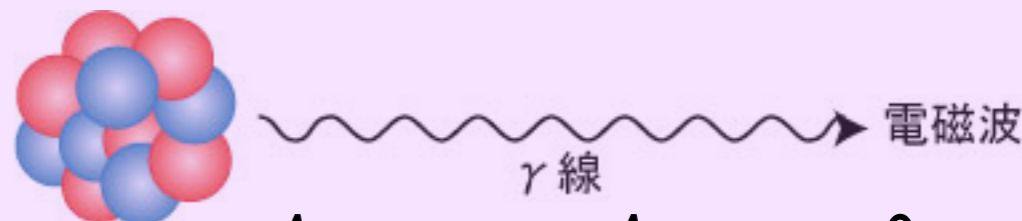
放射線の種類 (放射線治療分野で用いられる分類)



原子核 N



100 keV ~ MeV

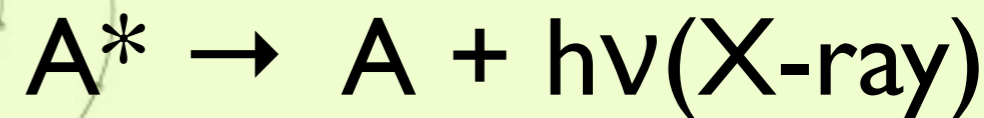
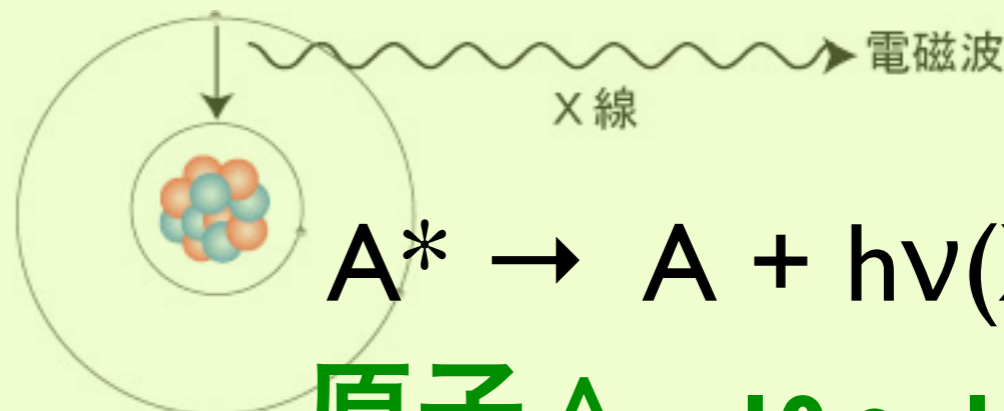


放射線のもつエネルギーは？

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

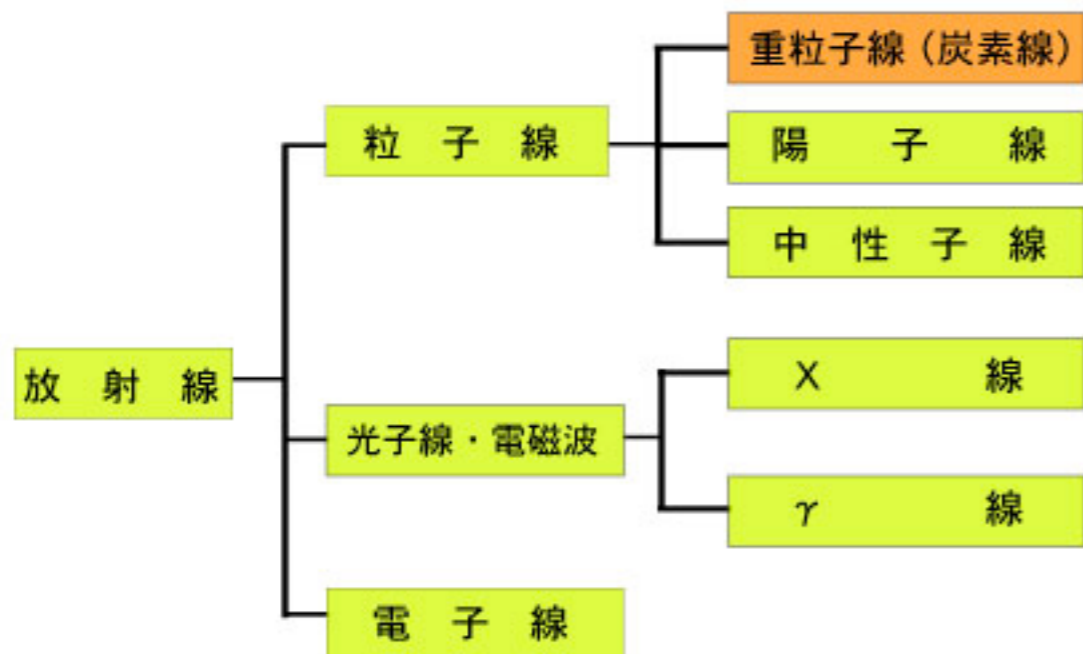
Cf. 原子の束縛エネルギーは？

荷電粒子の質量は？

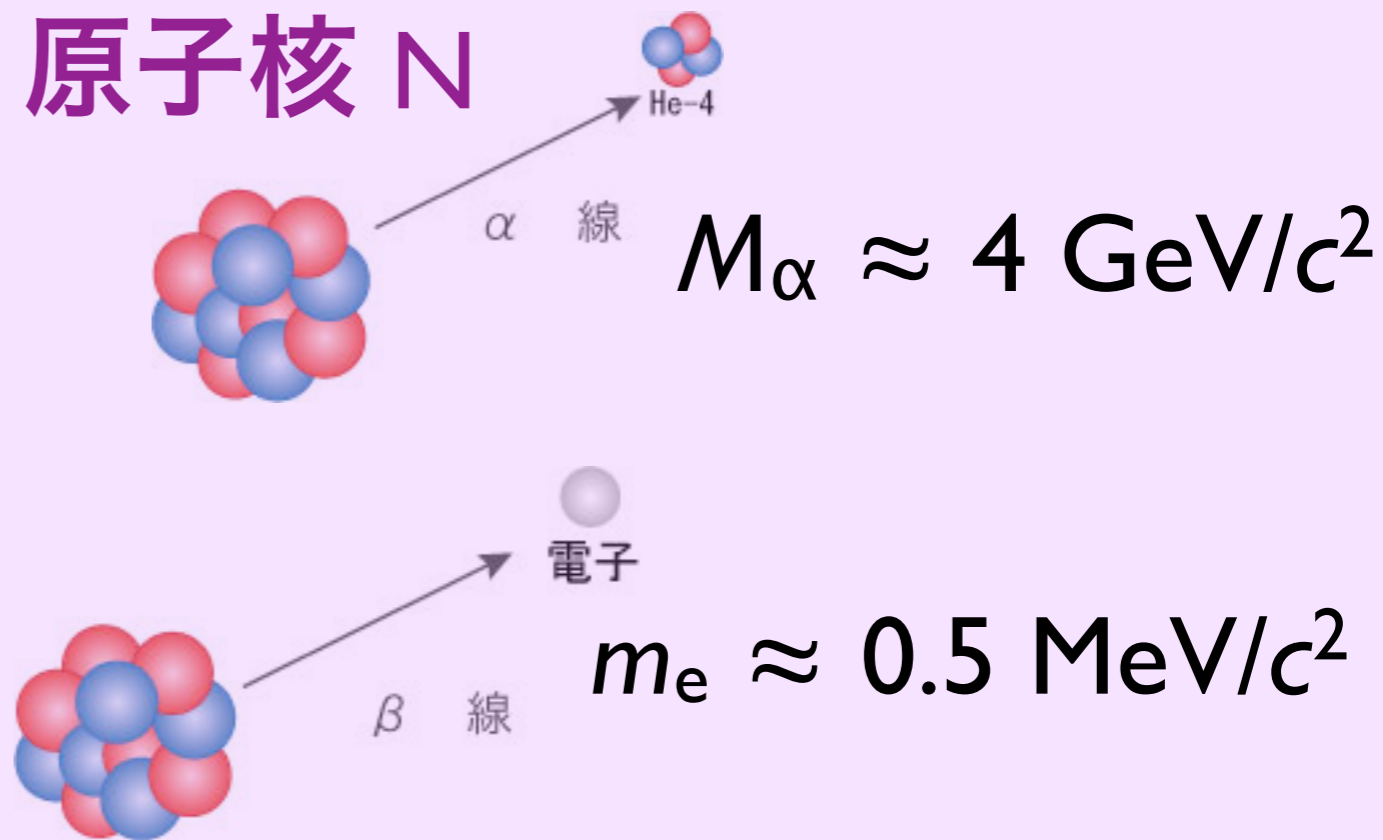


原子 A 10 ~ 100 keV

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

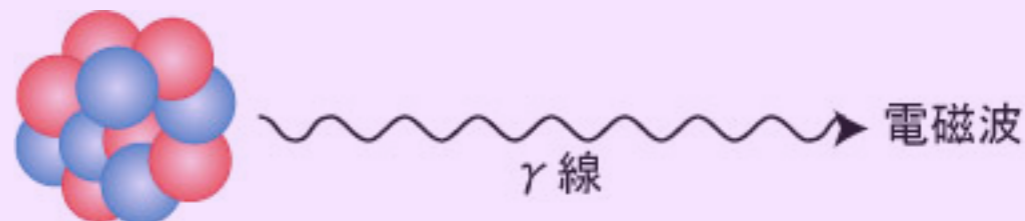


放射線のもつエネルギーは？

👉 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

ラテン語

(小さな塊)

atom < atomus < ατομος < a- + témnein + -os

(切ることができない)

古典ギリシャ語

anatomy < ana- + témnein

tomography < tomo- + -graphy

tom-, -tome, -tomy = to cut

-graphy = writing, drawing

周期表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18																																
1	1 H 1.0079	Atomic Sym Mass																2 He 4.0026																																
2	3 Li 6.941	4 Be 9.0121	<table border="1"> <tr> <td>C 固体</td> <td colspan="5">金属</td> <td colspan="2">非金属元素</td> </tr> <tr> <td>Hg 液体</td> <td>アルカリ金属</td> <td>アルカリ土類金属</td> <td>ランタノイド</td> <td>遷移元素</td> <td>卑金属</td> <td>非金属元素</td> <td>希ガス</td> </tr> <tr> <td>H 気体</td> <td></td> <td></td> <td>アクチノイド</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rf Unknown</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>										C 固体	金属					非金属元素		Hg 液体	アルカリ金属	アルカリ土類金属	ランタノイド	遷移元素	卑金属	非金属元素	希ガス	H 気体			アクチノイド					Rf Unknown								5 B 10.811	6 C 12.010	7 N 14.006	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.179
C 固体	金属					非金属元素																																												
Hg 液体	アルカリ金属	アルカリ土類金属	ランタノイド	遷移元素	卑金属	非金属元素	希ガス																																											
H 気体			アクチノイド																																															
Rf Unknown																																																		
3	11 Na 22.989	12 Mg 24.305											13 Al 26.981	14 Si 28.085	15 P 30.973	16 S 32.065	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948																																
4	19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.955	22 Ti 47.867	23 V 50.941	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.38	31 Ga 69.723	32 Ge 72.64	33 As 74.921	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.798																																
5	37 Rb 85.467	38 Sr 87.62	39 Y 88.905	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.96	43 Tc (97.907)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.90	46 Pd 106.42	47 Ag 107.86	48 Cd 112.41	49 In 114.81	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.60	53 I 126.90	54 Xe 131.29																																
6	55 Cs 132.90	56 Ba 137.32	57-71	72 Hf 178.49	73 Ta 180.94	74 W 183.84	75 Re 186.20	76 Os 190.23	77 Ir 192.21	78 Pt 195.08	79 Au 196.96	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98	84 Po (208.98)	85 At (209.98)	86 Rn (222.01)																																
7	87 Fr (223)	88 Ra (226)	89-103	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (264)	108 Hs (277)	109 Mt (268)	110 Ds (271)	111 Rg (272)	112 Cn (285)	113 Uut (284)	114 Uuq (289)	115 Uup (288)	116 Uuh (292)	117 Uus	118 Uuo (294)																																

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

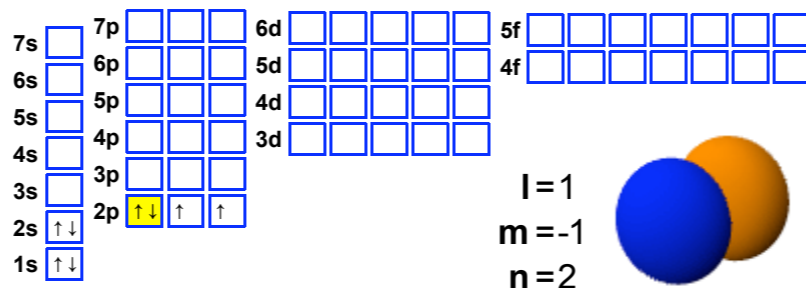
周期表 Design and Interface Copyright © 1997 Michael Dayah. <http://www.ptable.com/> Last updated: May 30, 2008

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

周期表

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

8
O
酸素
15.9994
[He]2s² 2p⁴



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

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

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

元素周期表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 氢	Atomic Sym																2 氦
2	3 锂	4 铍	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;"> 1 氢 Hydrogen 1.00794 1s¹ </div> <div> α A衰变 p Proton emission n Neutron emission SF Spontaneous fission </div> <div> β β衰变 β+ Beta+ decay EC Electron capture □ Stable </div> </div>															10 氖
3	11 钠	12 镁	Selected All															18 氩
4	19 钾	20 钙	21 钪	22 钛	23 钒	24 铬	25 锰	26 铁	27 钴	28 镍	29 铜	30 锌	31 镓	32 锗	33 砷	34 硒	35 溴	36 氪
5	37 铷	38 锶	39 钇	40 锆	41 铌	42 钼	43 锝	44 钨	45 铼	46 钨	47 铟	48 锡	49 铊	50 铅	51 铟	52 碲	53 碘	54 氙
6	55 铯	56 钡	57-71 镧系	72 铪	73 钽	74 钨	75 铼	76 钨	77 铱	78 铂	79 金	80 汞	81 铊	82 铅	83 铋	84 钋	85 砹	86 氡
7	87 钫	88 镭	89-103 锕系	104 镱	105 铪	106 铪	107 铪	108 铪	109 铪	110 铪	111 铪	112 铪	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	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 镧	64 铈	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

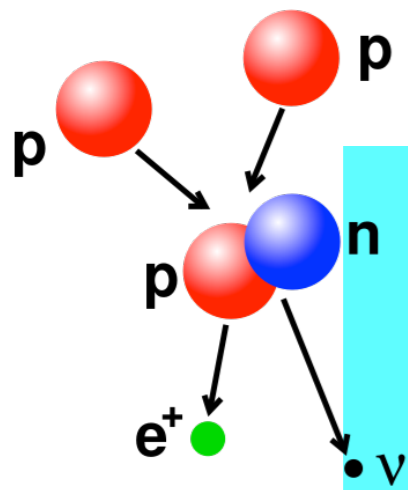
Periodic Table of Elements

	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>α Alpha decay</td> <td>β Beta decay</td> <td>Selected</td> <td>All</td> </tr> <tr> <td>Mass</td> <td>3.01604927767</td> <td>p Proton emission</td> <td>β+ Beta+ decay</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Binding Energy</td> <td>2.827266</td> <td>n Neutron emission</td> <td>EC Electron capture</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Abundance</td> <td>0%</td> <td>SF Spontaneous fission</td> <td><input type="checkbox"/> Stable</td> <td></td> <td></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	α Alpha decay	β Beta decay	Selected	All	Mass	3.01604927767	p Proton emission	β+ Beta+ decay			Binding Energy	2.827266	n Neutron emission	EC Electron capture			Abundance	0%	SF Spontaneous fission	<input type="checkbox"/> Stable			Half-Life	12.32 y					Decay Width	1.174e-30					2 He 2
Atomic Name	Hydrogen-3	α Alpha decay	β Beta decay	Selected	All																																																		
Mass	3.01604927767	p Proton emission	β+ Beta+ decay																																																				
Binding Energy	2.827266	n Neutron emission	EC Electron capture																																																				
Abundance	0%	SF Spontaneous fission	<input type="checkbox"/> Stable																																																				
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 14.00643	8 O 3 15.999	9 F 2 18.998403	10 Ne 3 20.1797																																															
3	11 Na 2 22.989769	12 Mg 3 24.304											13 Al 2 26.981538	14 Si 4 28.08558	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 (44.955912)	22 Ti 6 47.88	23 V 4 50.9415	24 Cr 5 51.9961	25 Mn 4 54.938045	26 Fe 7 55.845	27 Co 5 58.933195	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 (88.905848)	40 Zr 8 91.224	41 Nb 5 92.90638	42 Mo 9 95.94	43 Tc 5 (98.90625)	44 Ru 10 101.07	45 Rh 5 101.07	46 Pd 9 106.36	47 Ag 6 107.8682	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 4 132.90545	56 Ba 8 137.327	57-71 Lanthanides	72 Hf 8 178.49	73 Ta 7 180.94788	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 5 196.96657	80 Hg 11 200.59	81 Tl 3 204.3833	82 Pb 6 207.2	83 Bi 3 208.9804	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 (284)	114 Uuq 1 (289)	115 Uup 1 (288)	116 Uuh 1 (289)	117 Uus 1 (289)	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

1	1	Atomic
1	H	1.00794
2	Li	6.941
3	3	Binding Energy
2	2	Abundance
11	11	Half-Life
12	12	Decay Width

Name Hydrogen-3
Mass 3.01604927767

α Alpha decay

β Beta decay

Selected All

2
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	原子

放射性物質とは

放射性核種

= 放射性同位体

= 不安定原子核

を含む原子からできている物質

放射性物質とは

放射性核種

= 放射性同位体

= 不安定原子核

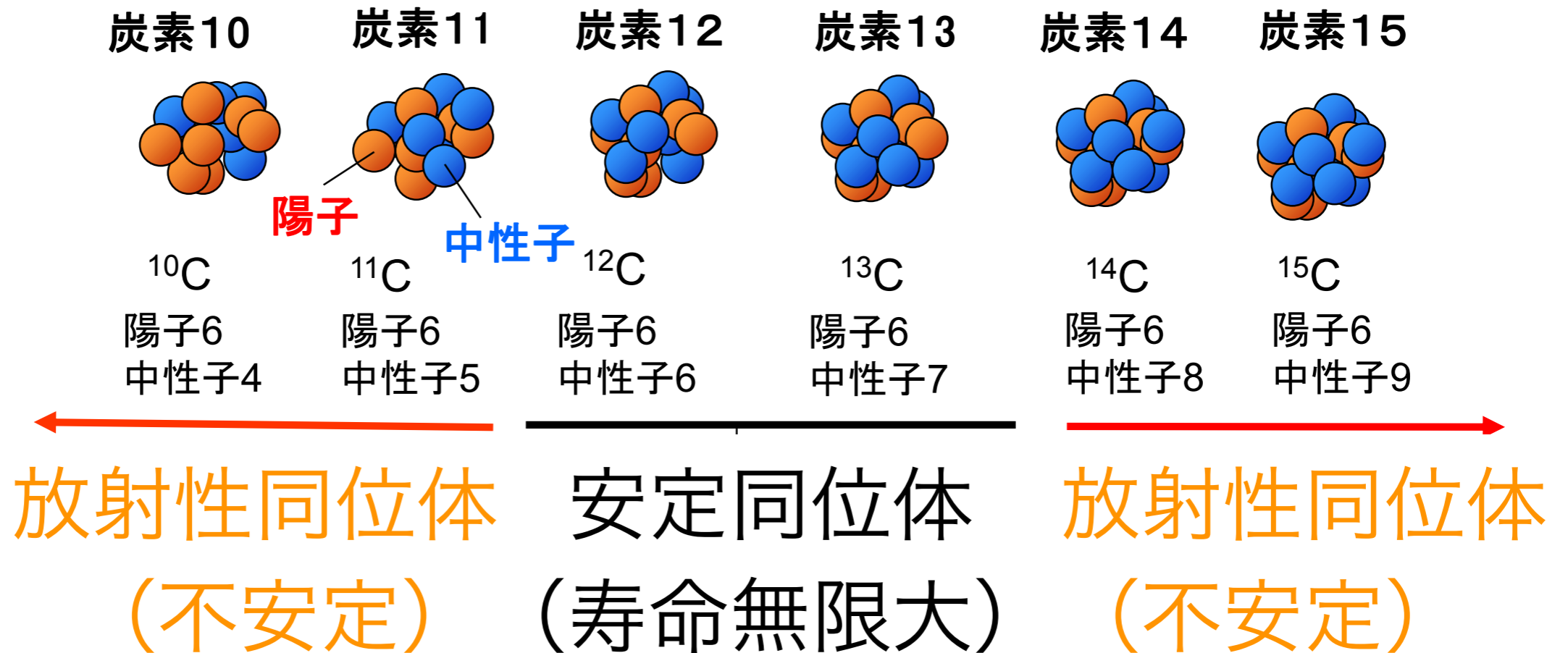
を含む原子からできている物質

$$\text{質量数 } A = Z + N$$



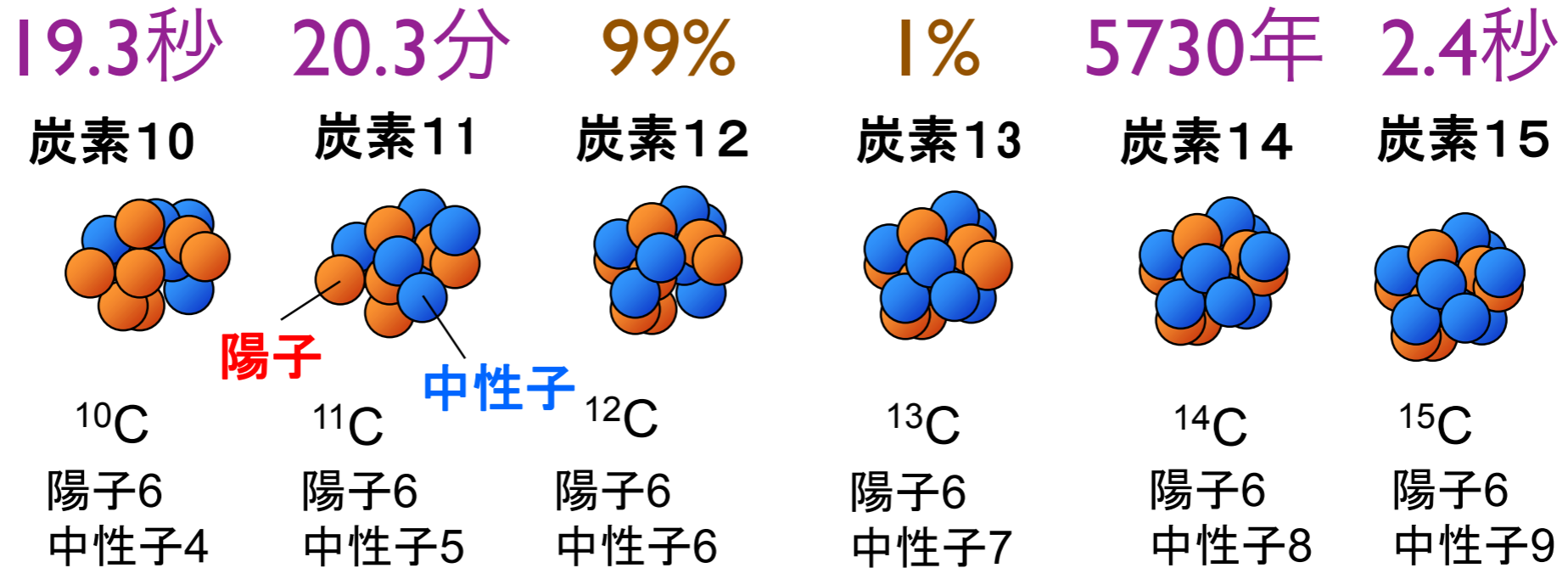
陽子数 Z が同じなら化学的には同じ元素
中性子数 N が違う原子核が多種存在する

炭素原子核の例



同位体(原子番号(=陽子数)は同じで中性子数が異なる**原子核**)

同位体間では化学的性質は同じ



陽子過剰になると？

(寿命がある： β^+ 壊変、電子捕獲(EC))

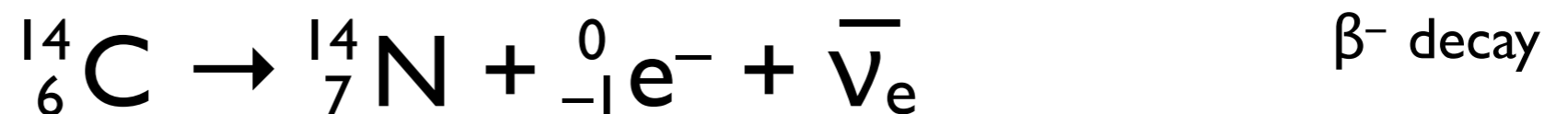
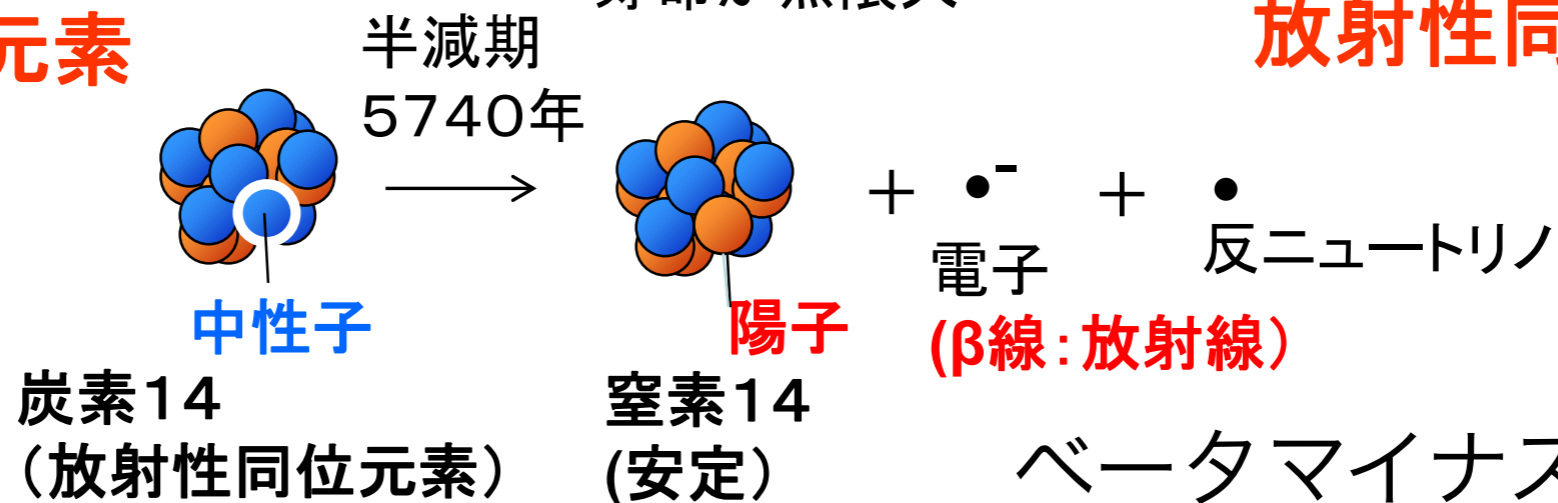
天然に存在=**安定同位体**
寿命が無限大

中性子過剰になると？

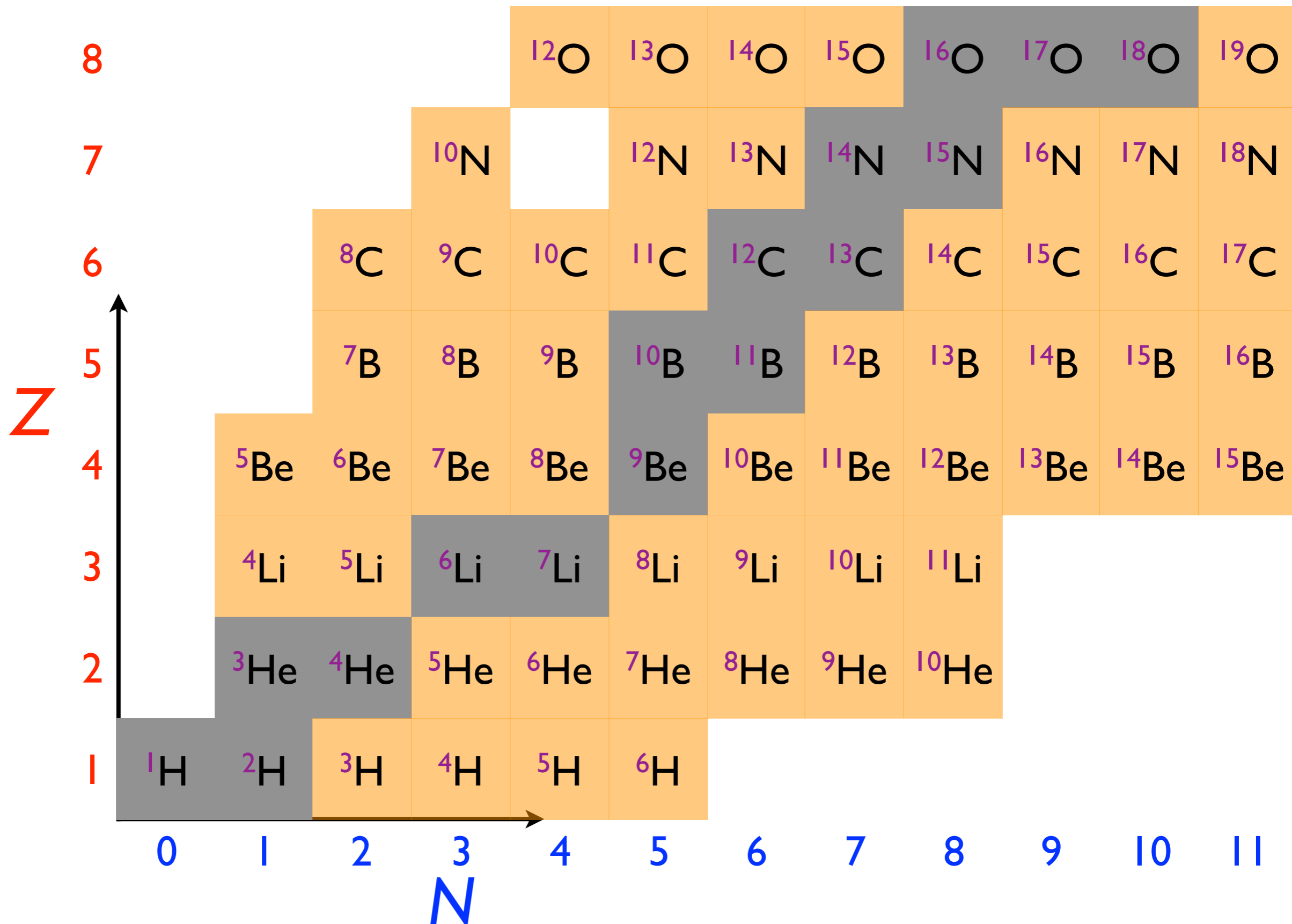
(寿命がある： β^- 壊変)

放射性同位元素

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 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 (ν)
- antineutrino ($\bar{\nu}$)
- quark
- gluon field
- gluon
- photon (γ)
- 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)

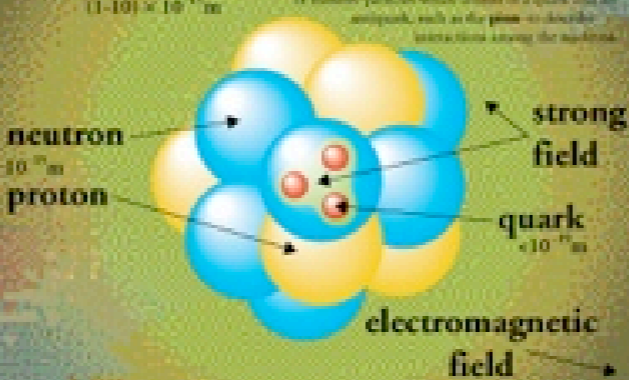
Beta Minus Decay: ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}_e$ (beta particle)

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



Nuclear Energy

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

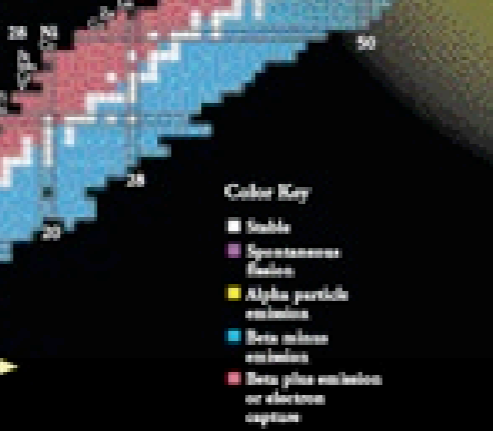
Fusion: ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + n$



In the early stages of nuclear reactions, 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 $Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82$ 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 ${}^{14}\text{C}$ 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 landscape 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 tracers such as ${}^{99m}\text{Tc}$, ${}^{18}\text{F}$, and ${}^{131}\text{I}$ are commonly used in the diagnosis and treatment of illness. Nuclear medicine such as ${}^{125}\text{I}$ is used in Brachytherapy. Brachytherapy (BRT) is precision therapy of local tumors.

Space Exploration: Exposure and alpha particles in specially designed detectors permit in-situ neutron counts. On Earth, neutron detectors are used to study areas from mineral composition to an environment.

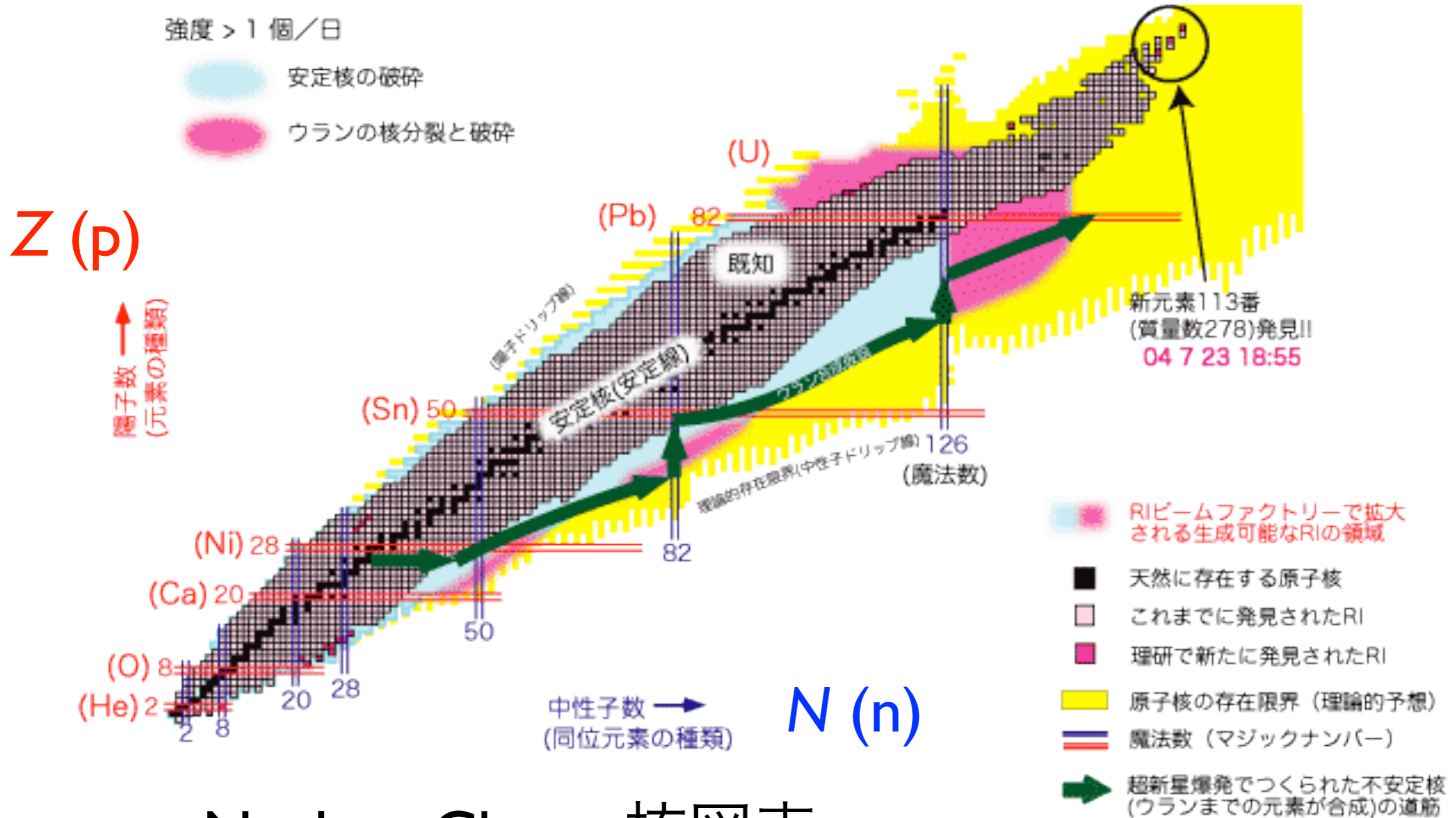
Nuclear Reactors: Nuclear reactors are the basis of ${}^{137}\text{Cs}$ or ${}^{60}\text{Co}$ used to produce medical isotopes. Reactors will also allow nuclear applications greater radioactive waste disposal of the more a subject of current research.

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

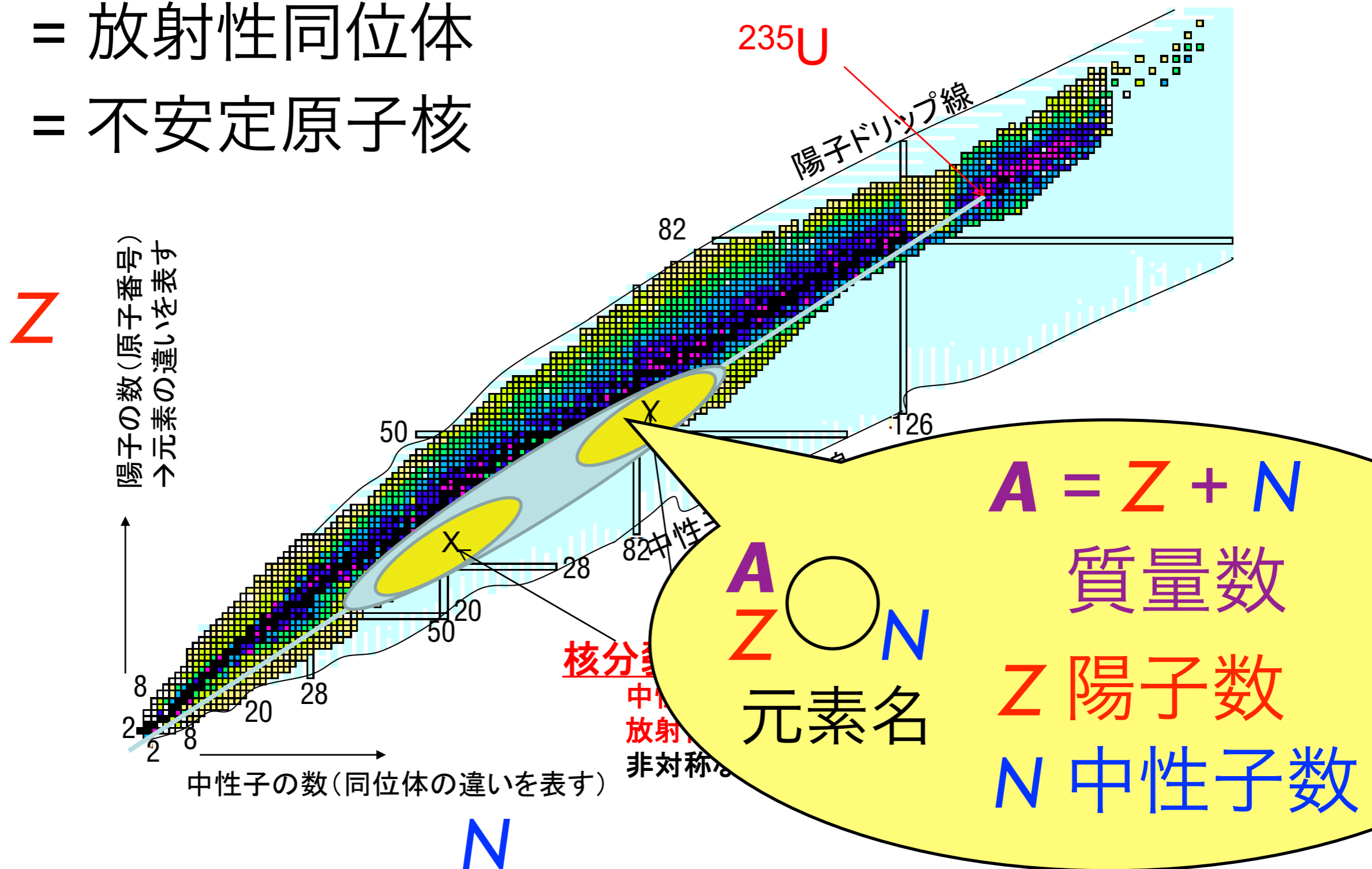
放射性物質とは

放射性核種

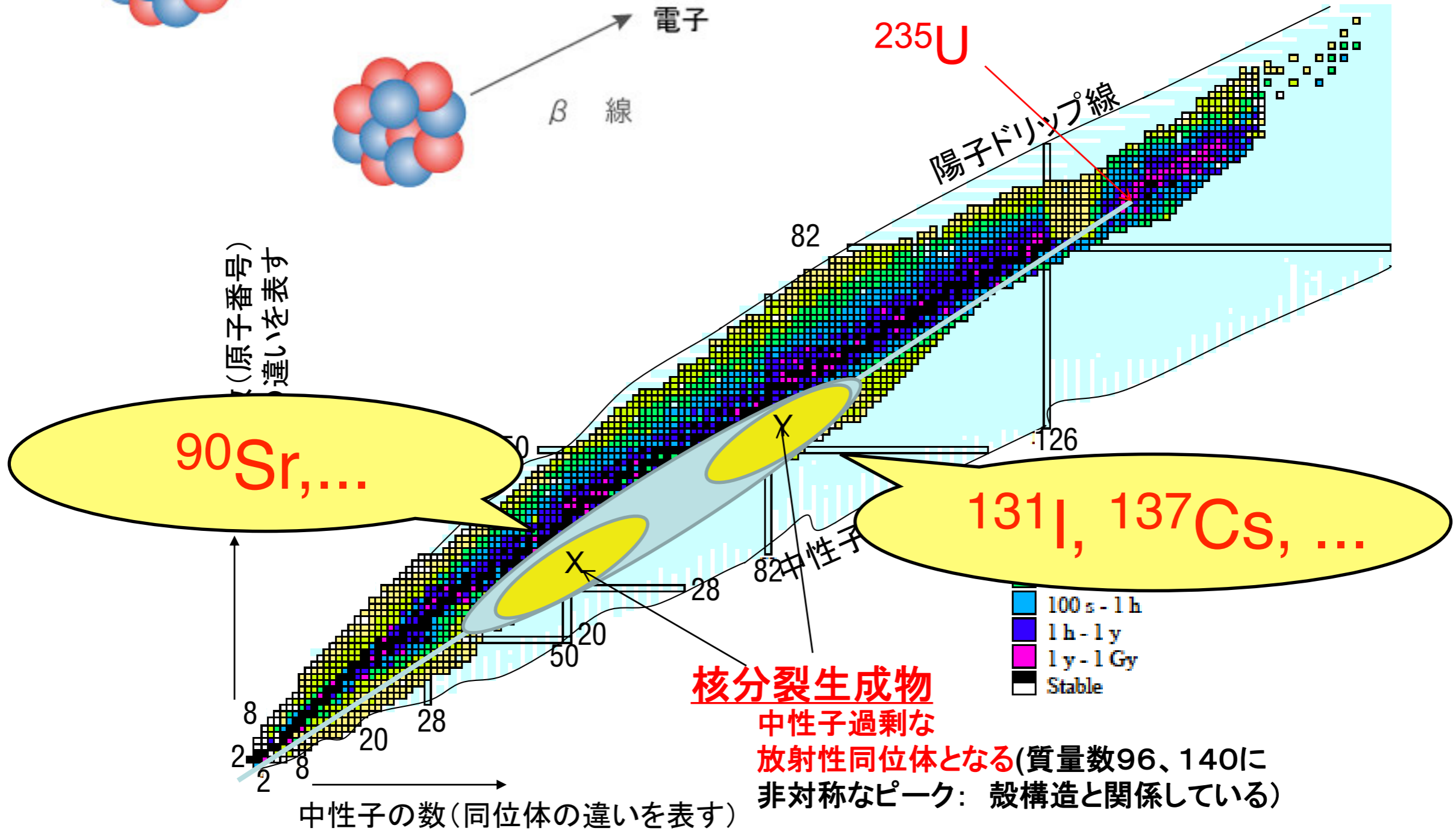
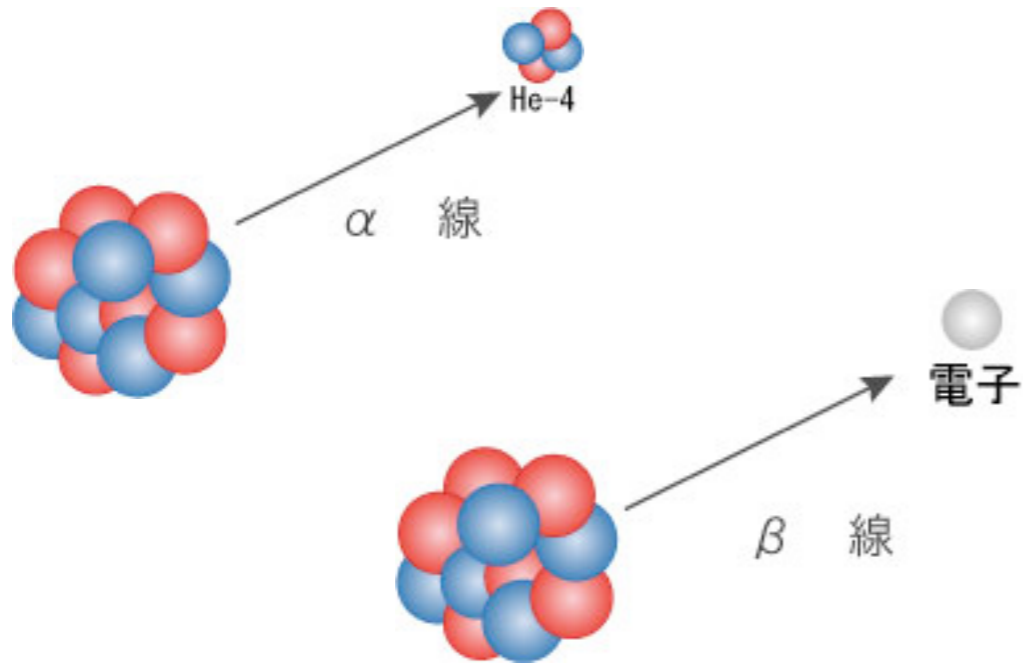
= 放射性同位体

= 不安定原子核

核図表

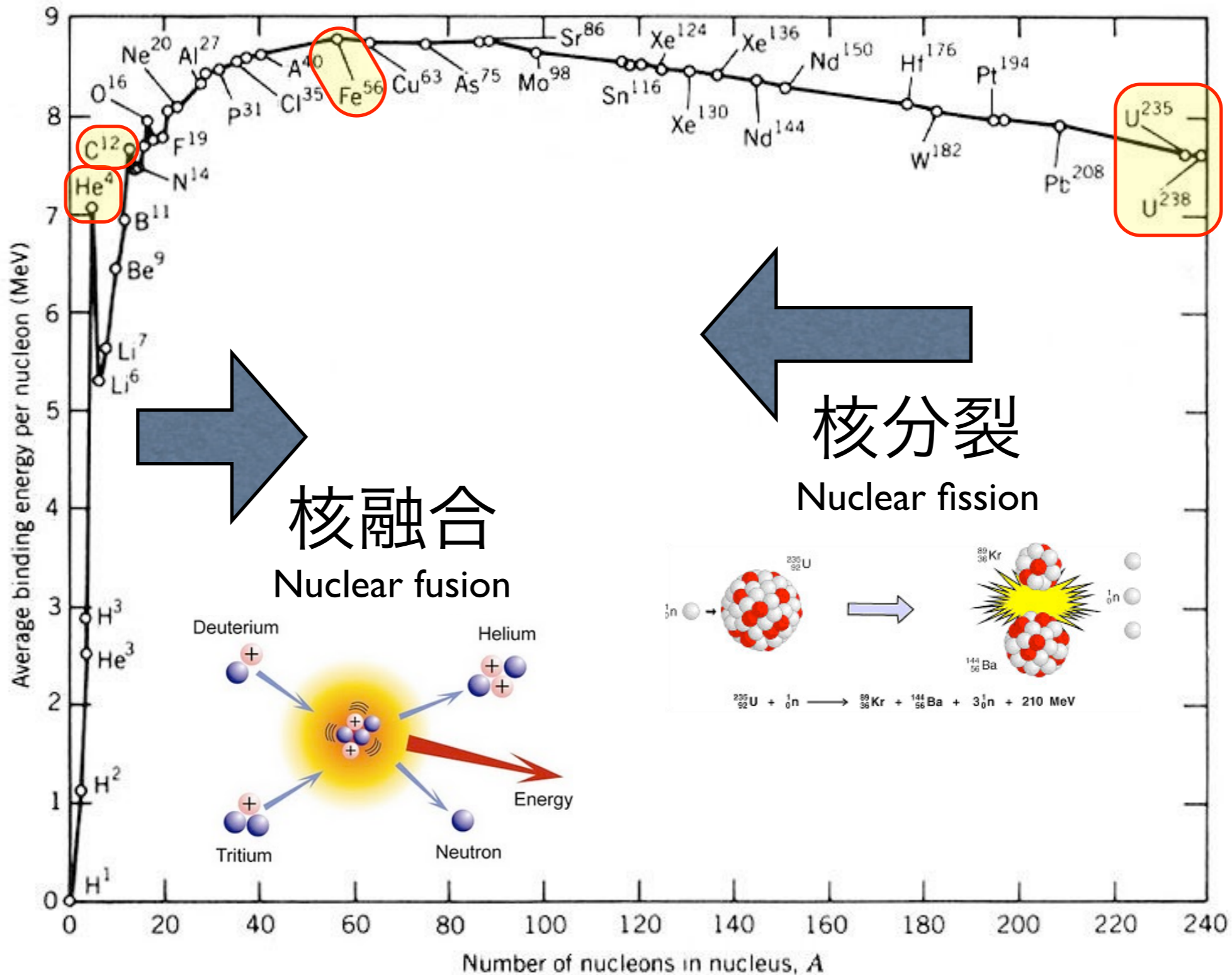


放射能とは 放射性物質が放射線を出す能力のこと。



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

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

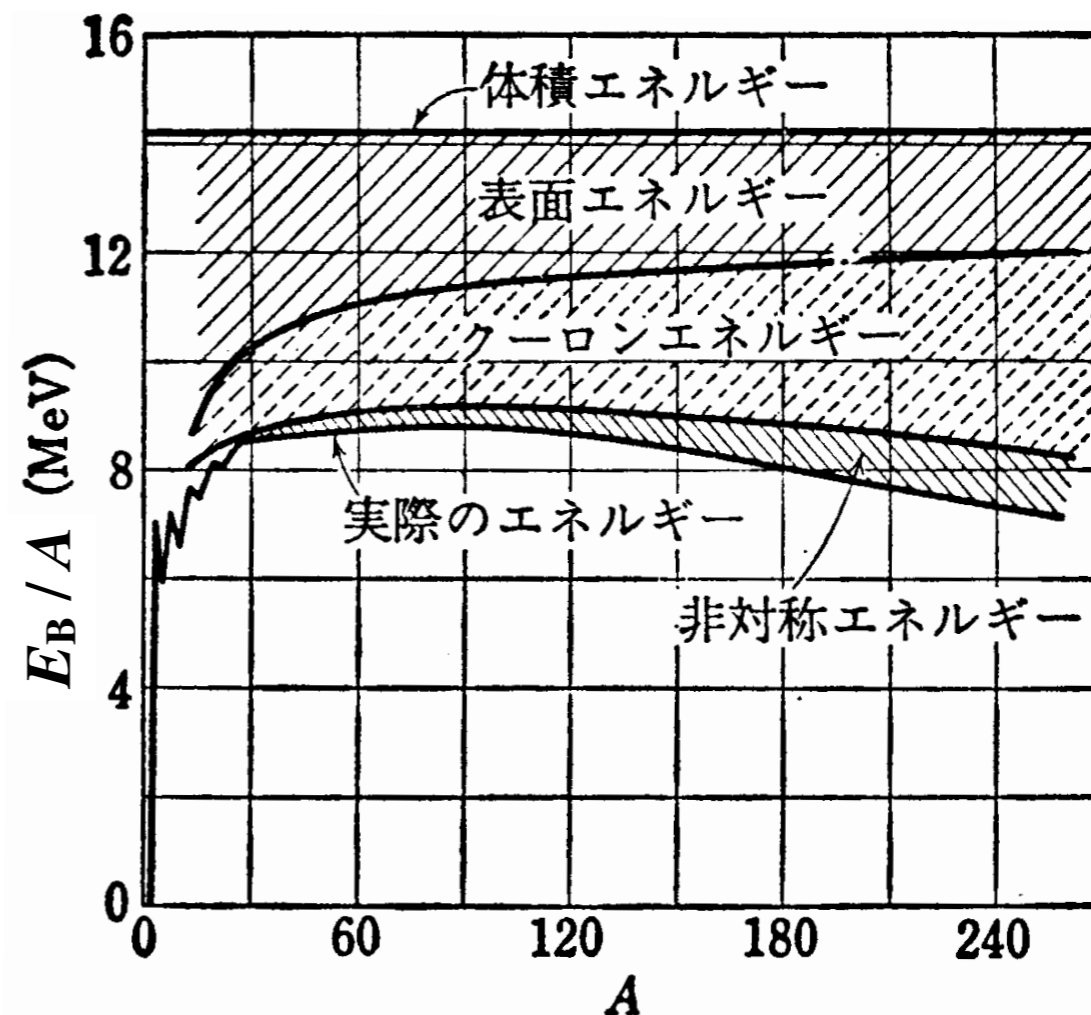
体積エネルギー

クーロンエネルギー

対称エネルギー

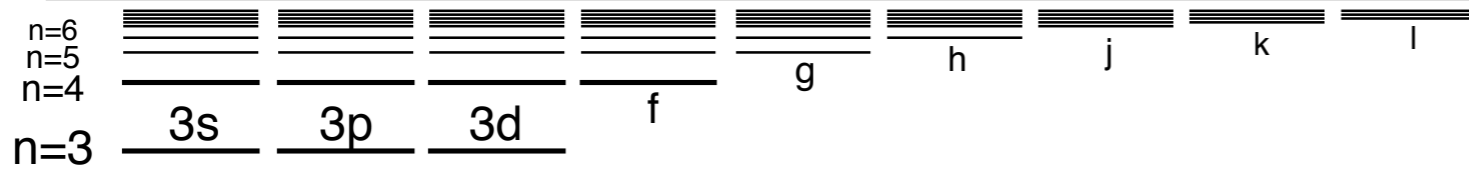
対エネルギー

表面エネルギー



原子のエネルギー準位

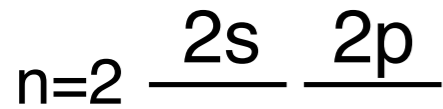
連続状態 continuum



束縛状態 bound states

離散的エネルギー準位 discrete energy levels

覚えにくい



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

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

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

α : 微細構造定数
(無次元量)

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

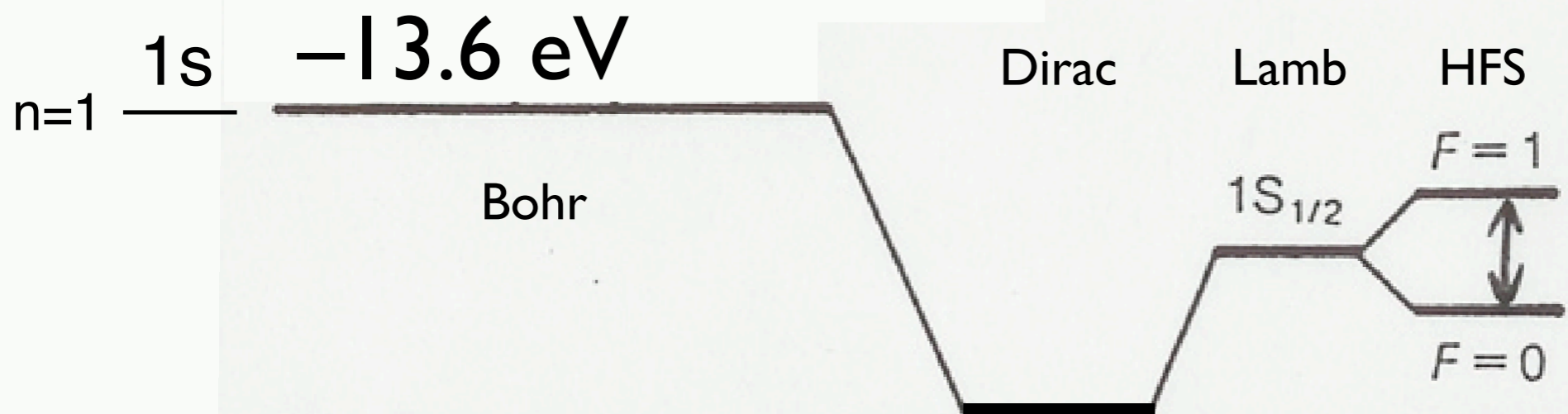
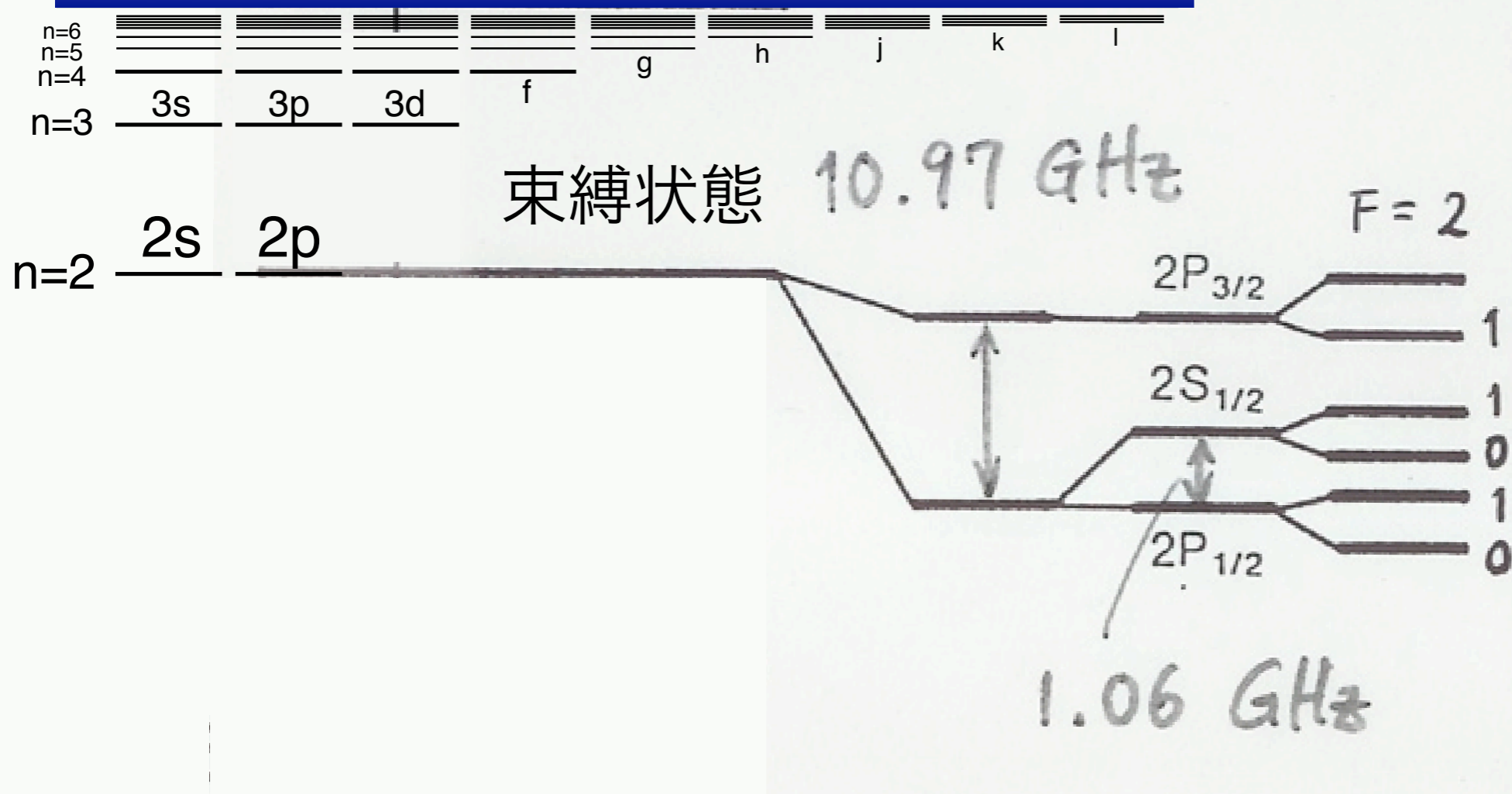
$$E_B(\text{H}) = \frac{M}{M+m} E_B$$

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

Z 大 $\rightarrow E_B = h\nu$ 大 : X線

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

連続状態 continuum

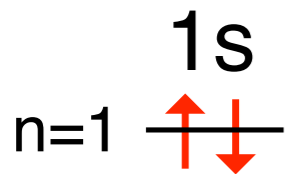
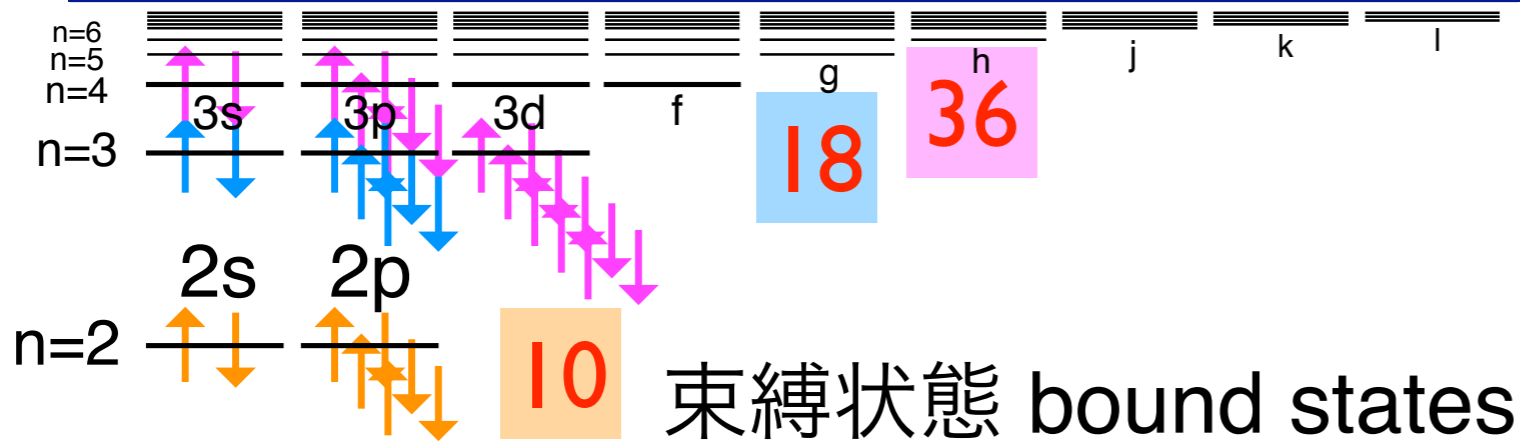


\updownarrow 24 MHz
 \updownarrow 178 MHz
 \updownarrow 59 MHz

1.42 GHz

原子のエネルギー準位

連続状態 continuum



2

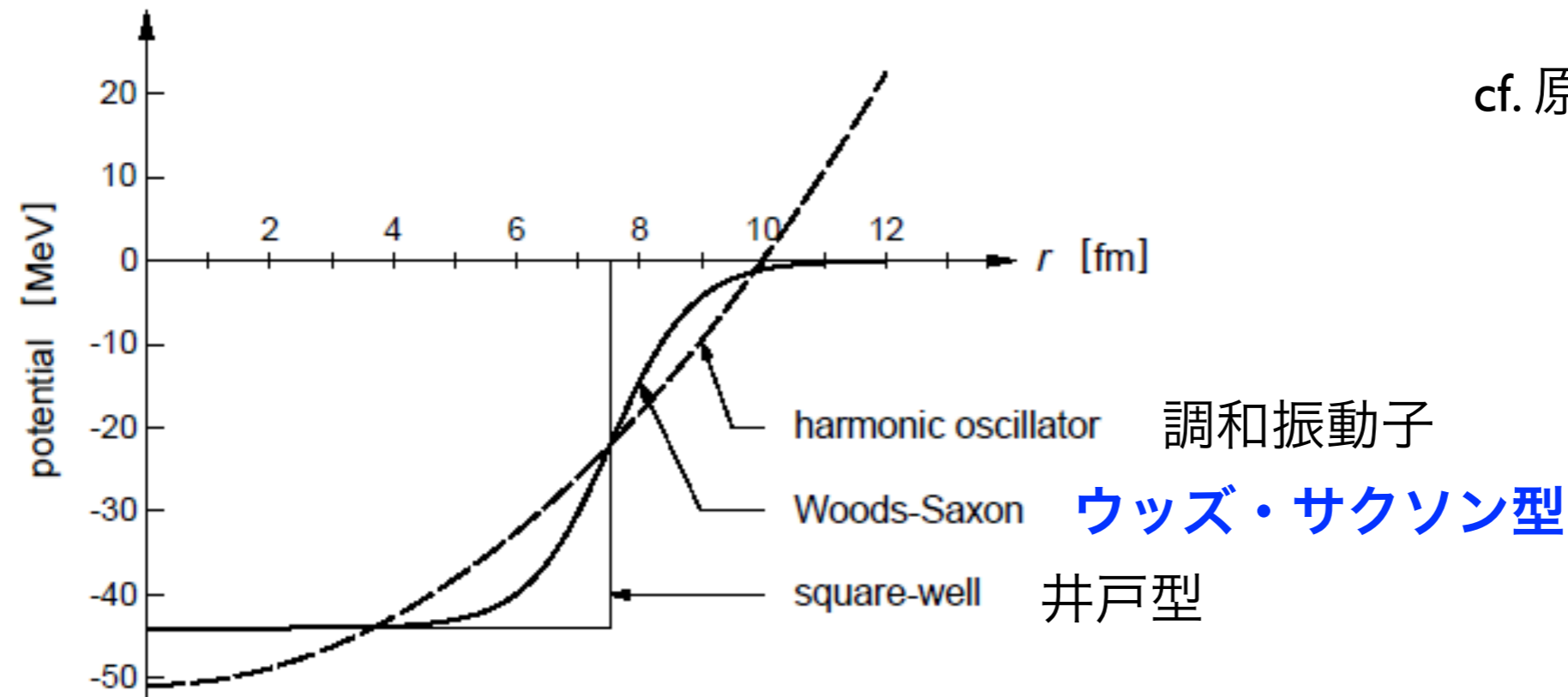
魔法数
magic number

閉殻
closed shell

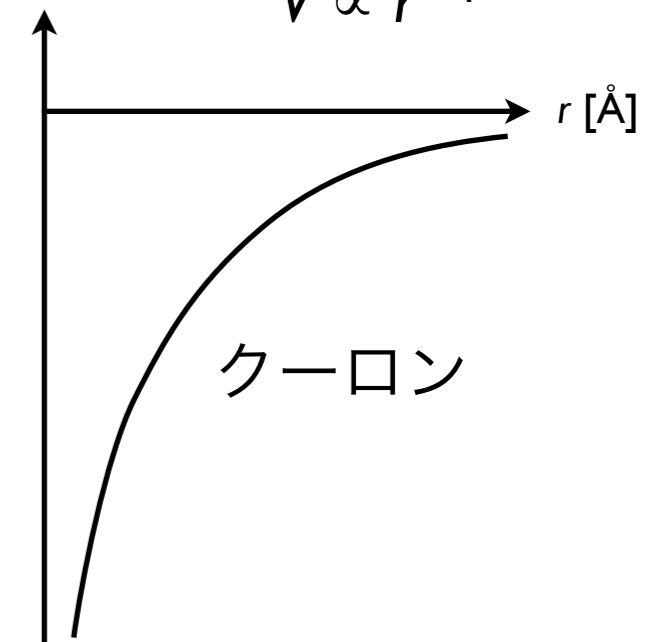
魔法数	電子配置	元素
2	$1s^2$	He
10	$1s^2 2s^2 2p^6$	Ne
18	$[Ne] 3s^2 3p^6$	Ar
36	$[Ar] 4s^2 3d^{10} 4p^6$	Kr
54	$[Kr] 5s^2 4d^{10} 5p^6$	Xe
86	$[Xe] 6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^6$	Rn

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

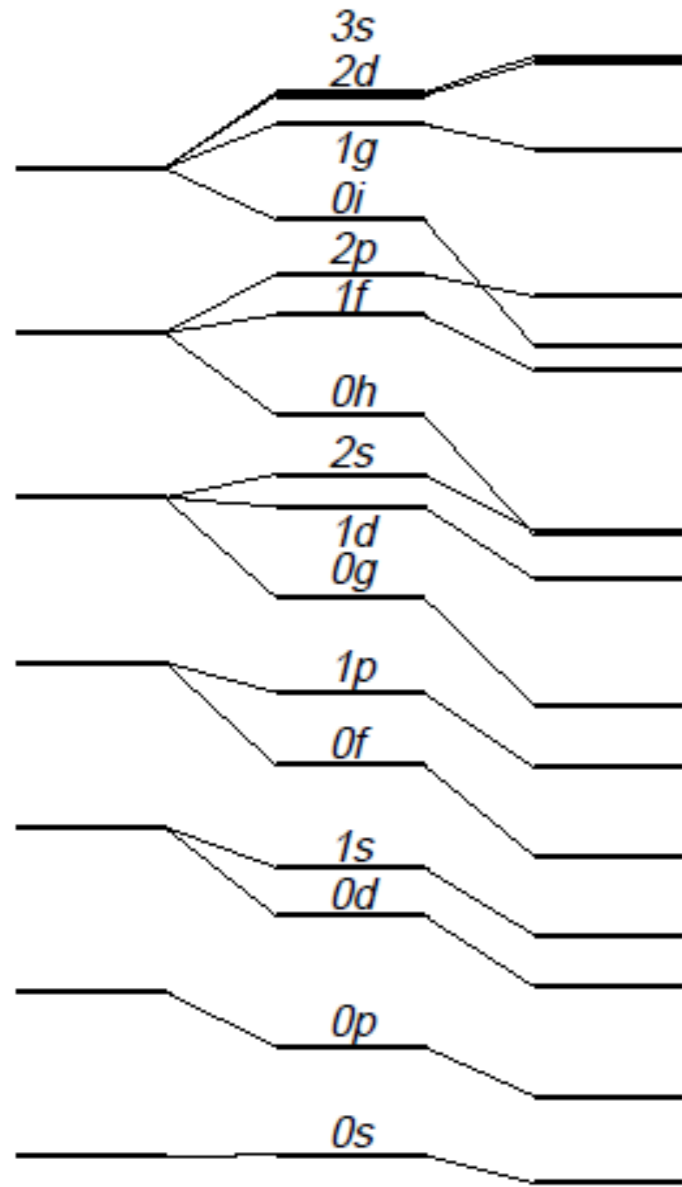
原子核は密度一定 (密度の飽和性)

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

力の到達距離は核子のサイズ

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

原子核構造の殻模型 Shell model

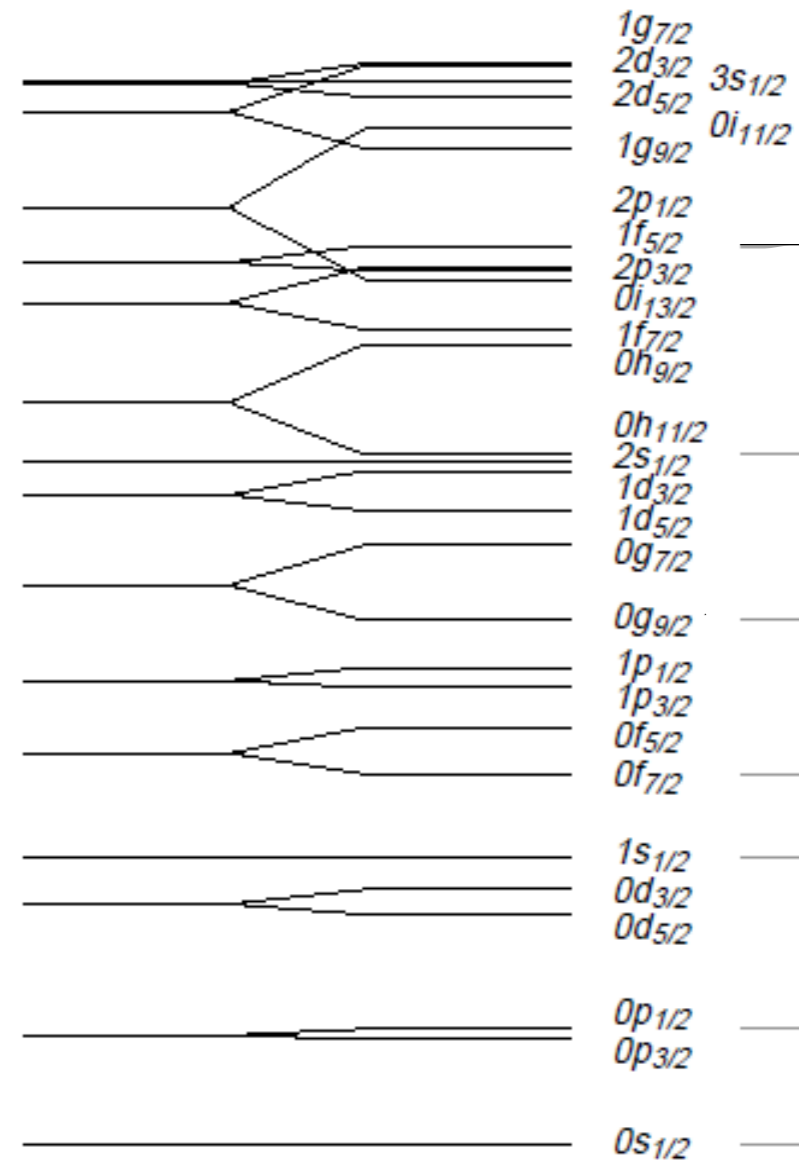


harmonic oscillator Woods-Saxon square-well
 調和振動子 ウッズ・サクソン型 井戸型

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

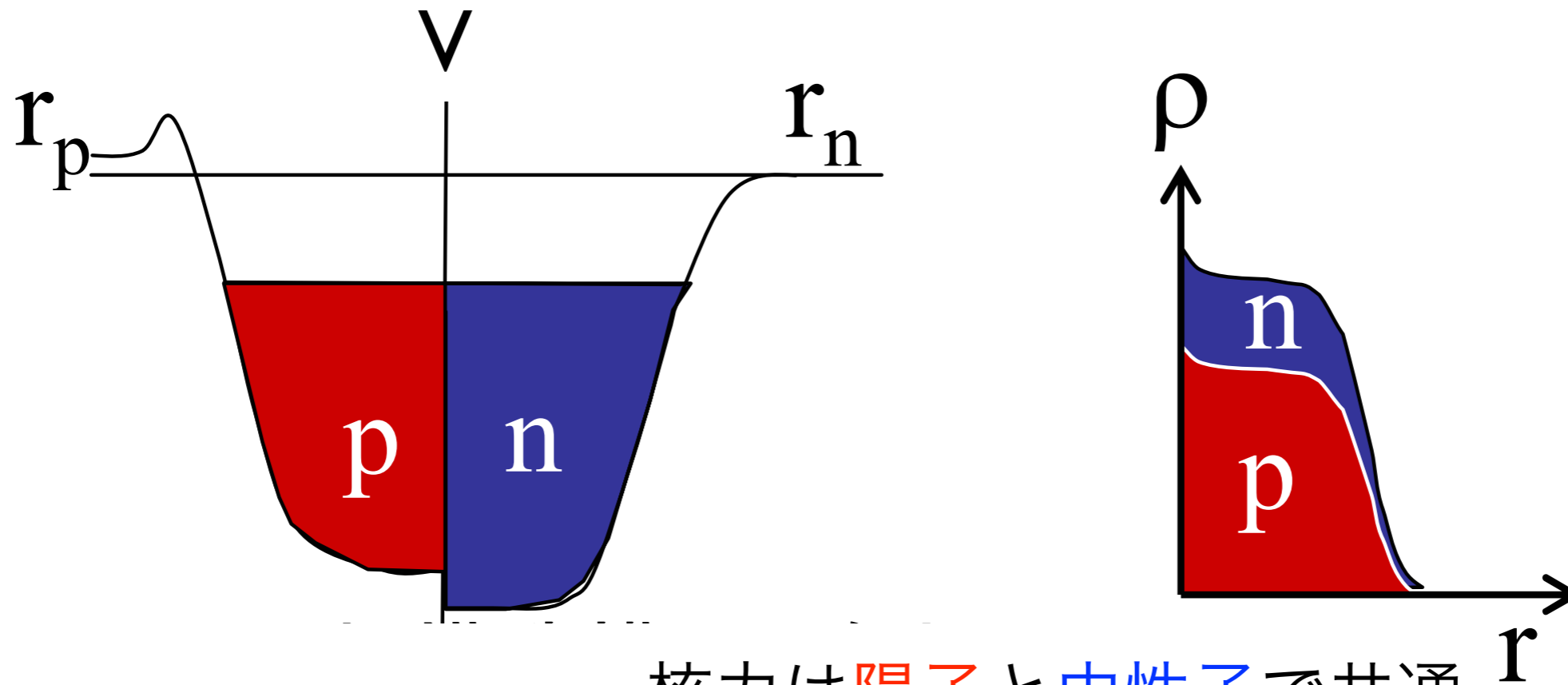


+ LS 相互作用

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

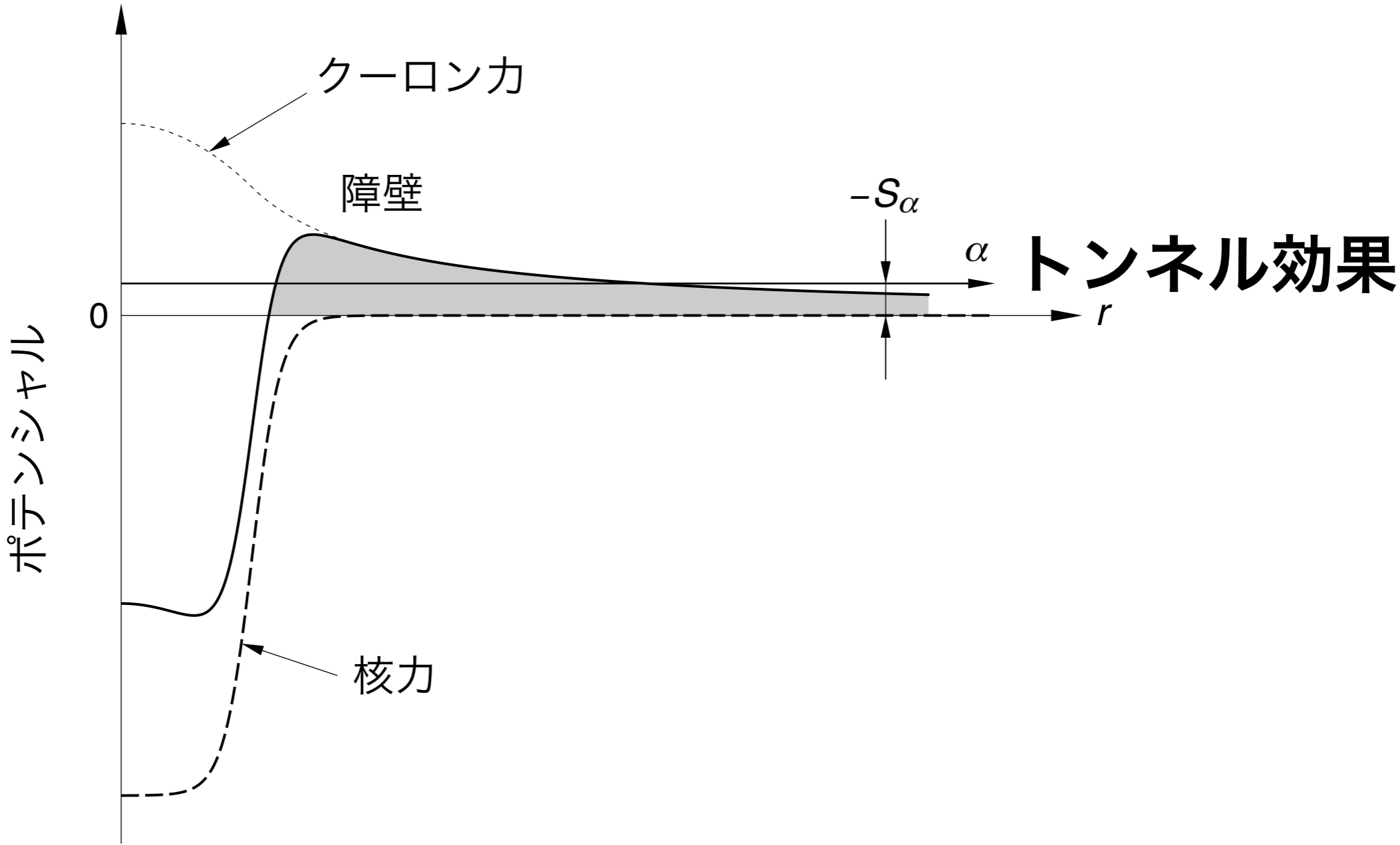
クーロン反発により上昇。 $\propto Z^2 / A^{1/3}$

(特に重い原子核で) 中性子の方が数多く入る。

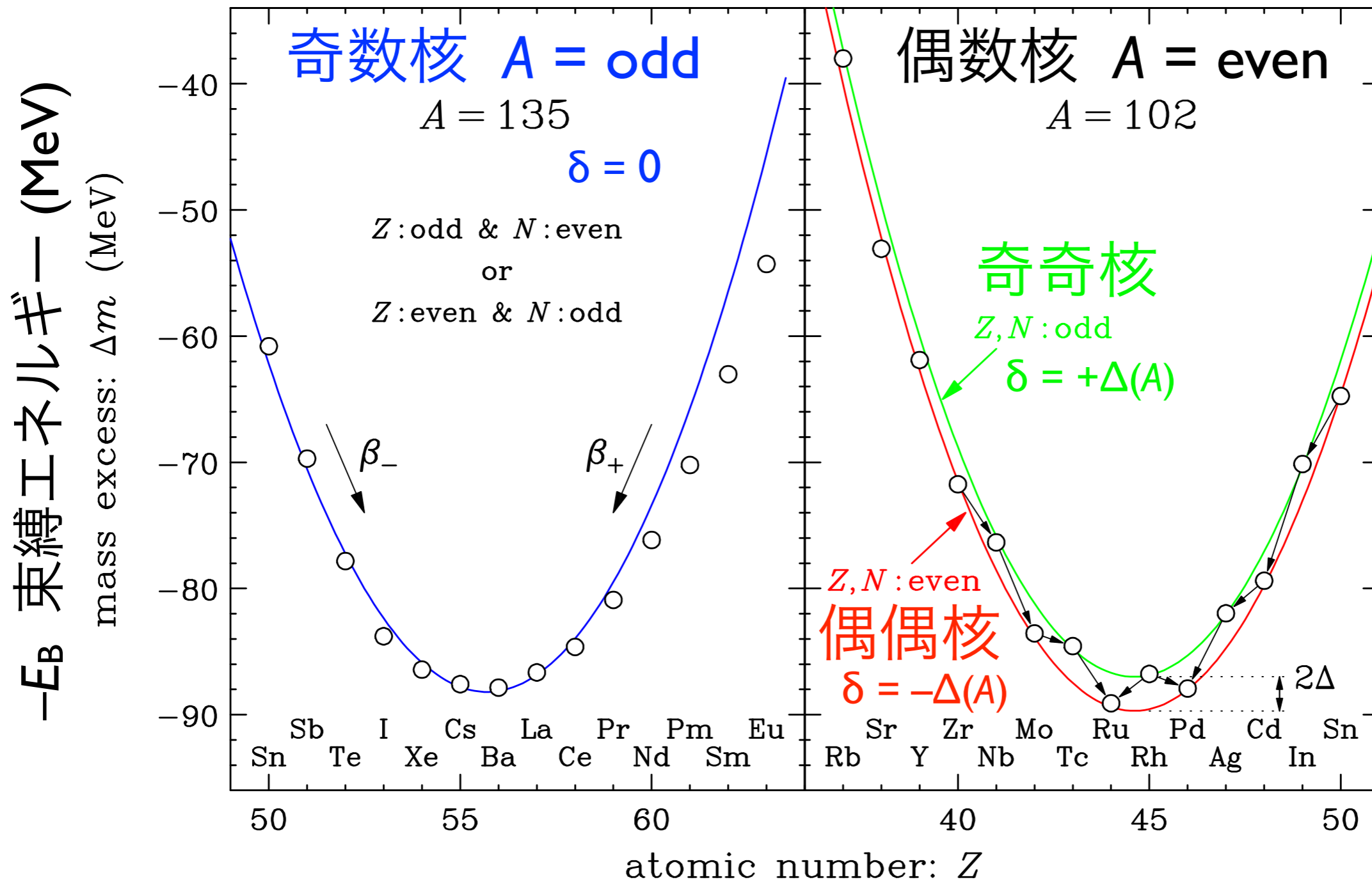
陽子数も中性子数も魔法数となる (二重閉殻、double magic)

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

α 壊変 (崩壊)



原子核束縛エネルギーの偶奇依存性

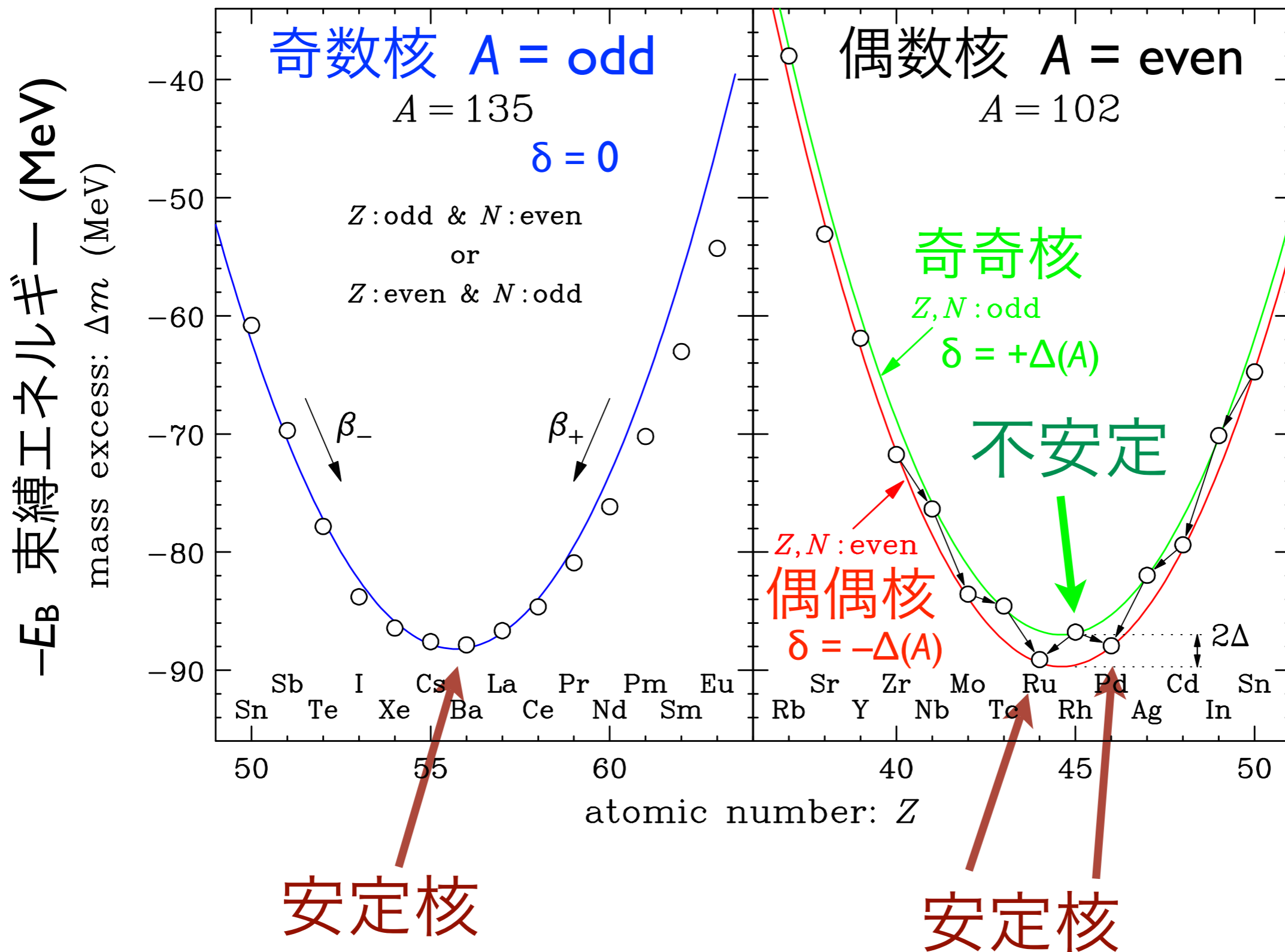


$$-E_B = \dots + a_a (N - Z)^2 / A + \delta$$

対称エネルギー

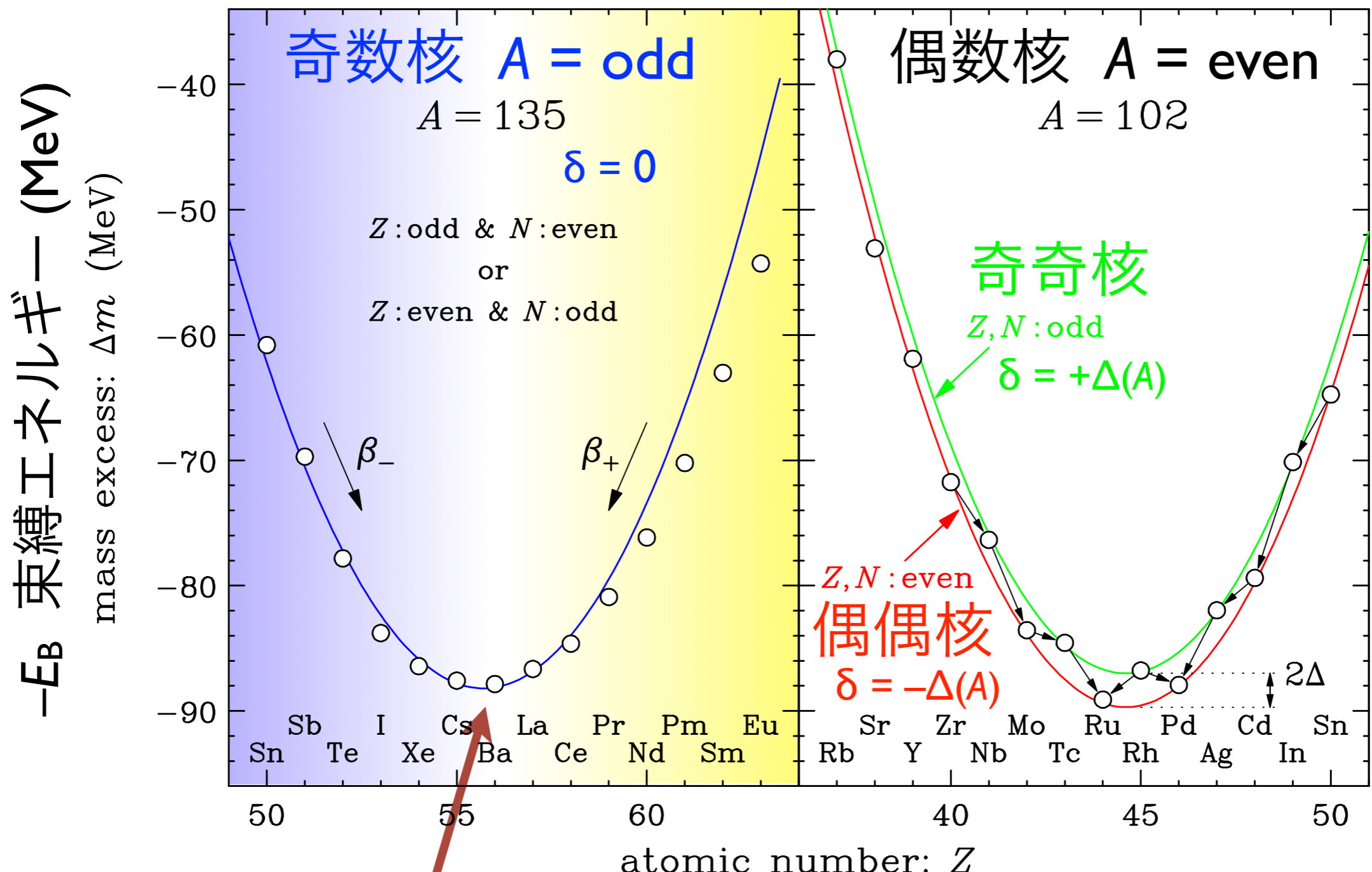
対エネルギー

原子核束縛エネルギーの偶奇依存性

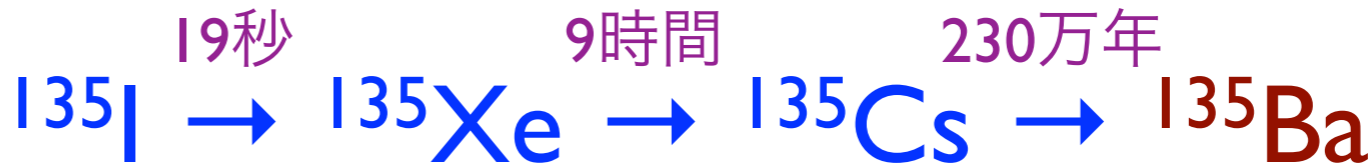


安定核の 60% は偶偶核。安定な奇奇核は 4 つのみ。 ${}^2_1\text{D}_1$ ${}^6_3\text{Li}_3$ ${}^{10}_5\text{Be}_5$ ${}^{14}_7\text{N}_7$

原子核束縛エネルギーの偶奇依存性

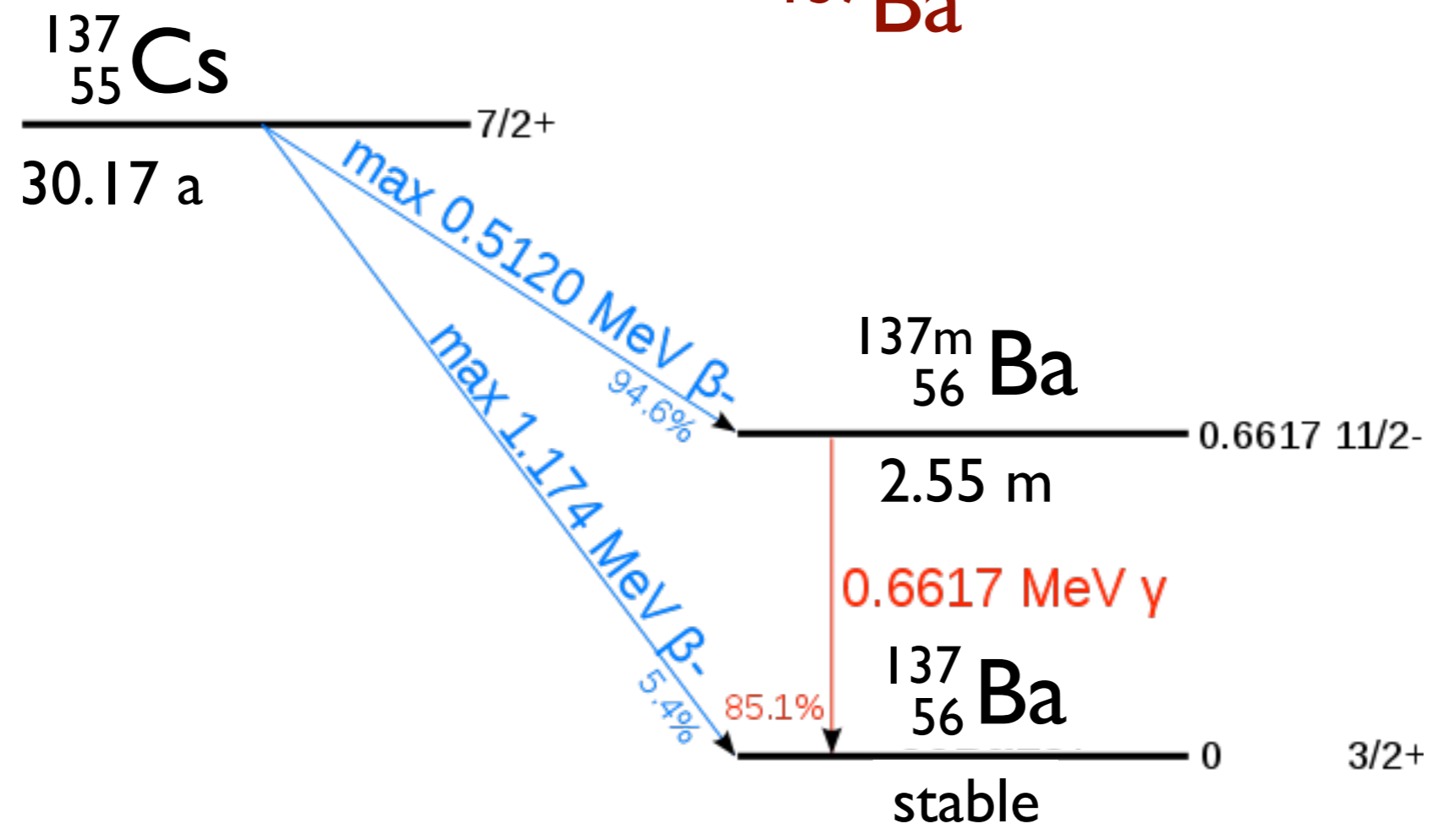
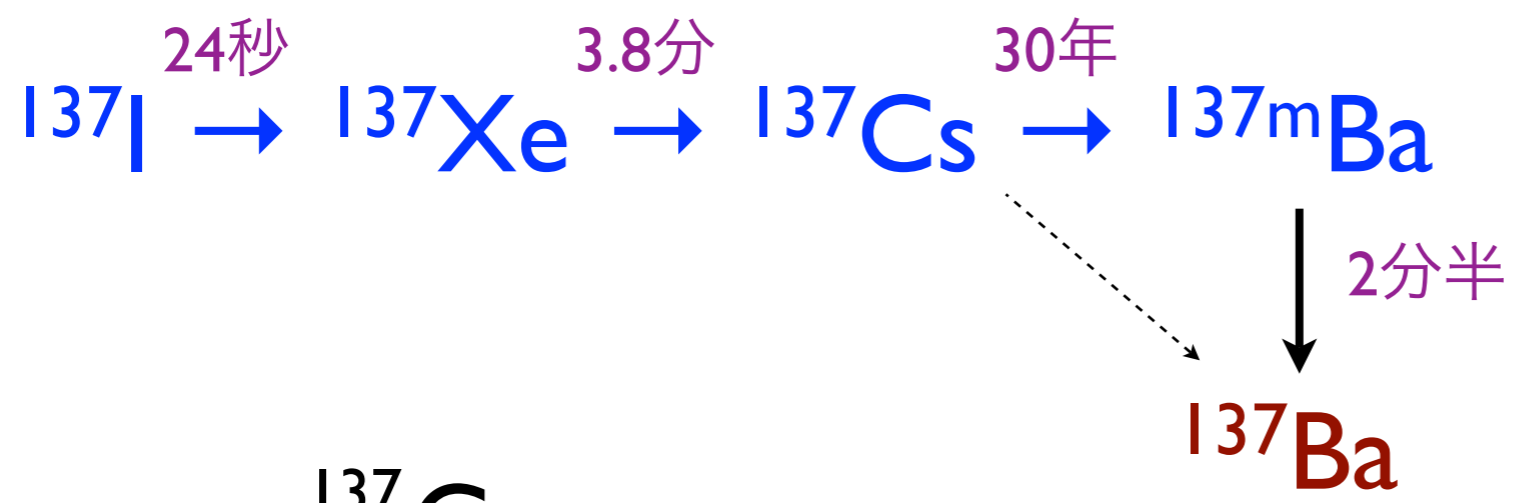


安定核



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 β^- 壊変 (崩壊) を繰り返しながら 安定核までたどり着く。



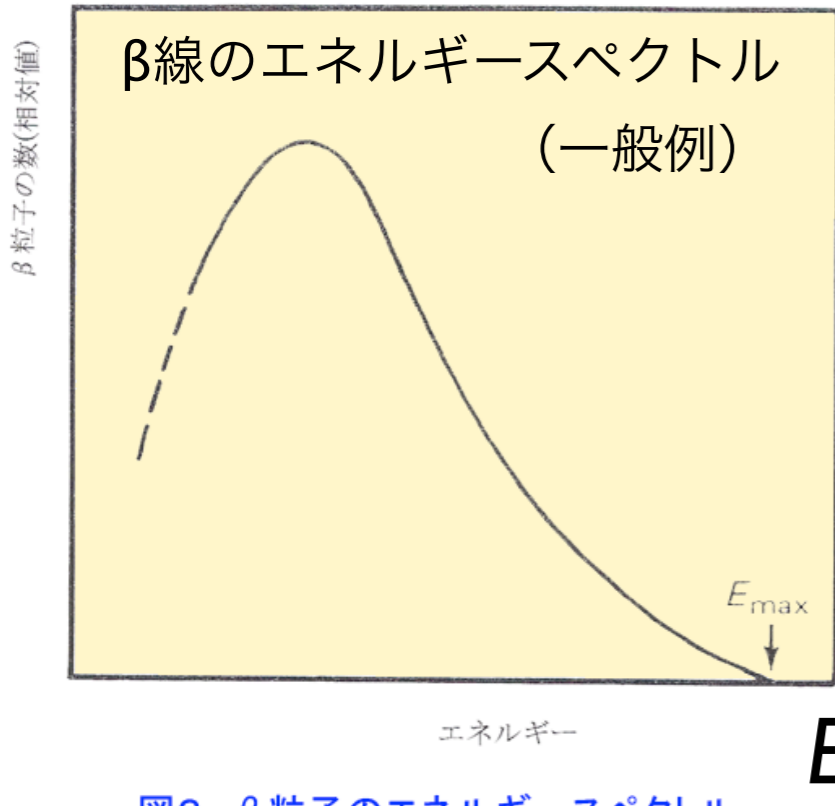
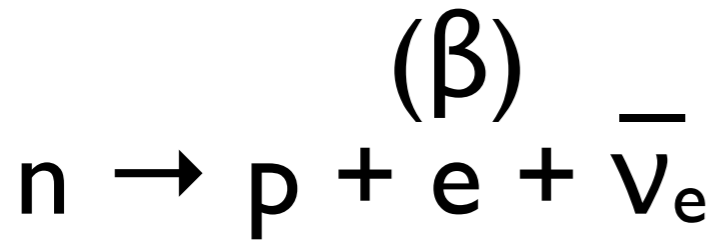
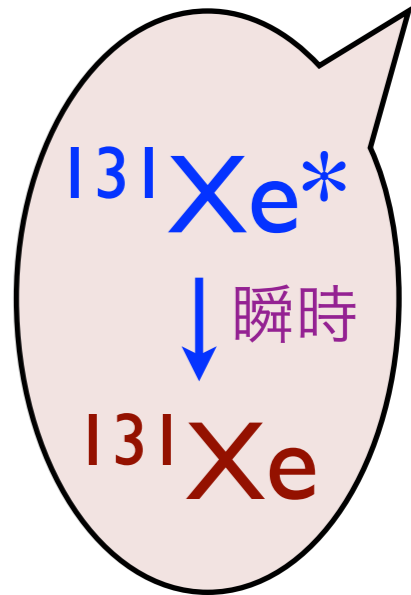
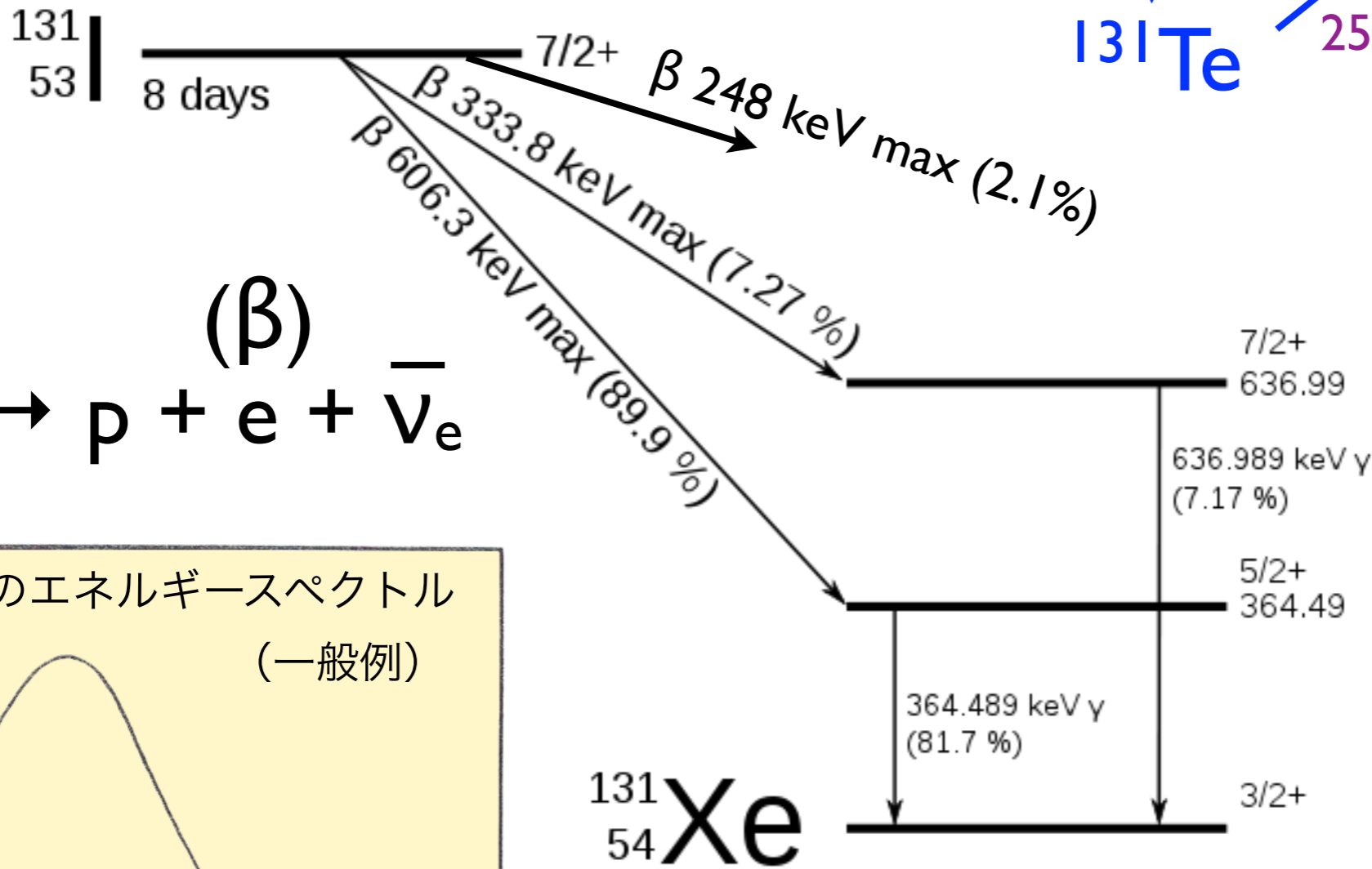
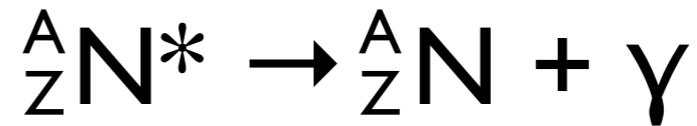


図2 β粒子のエネルギースペクトル
 [出典]石川友清(編):初級放射線、通商産業研究社、p.37

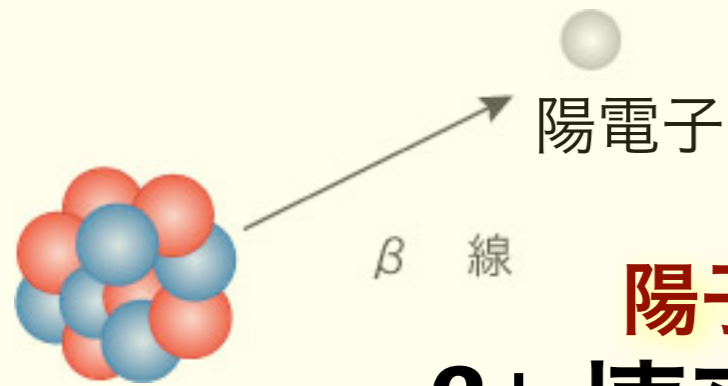
γ線：原子核の脱励起



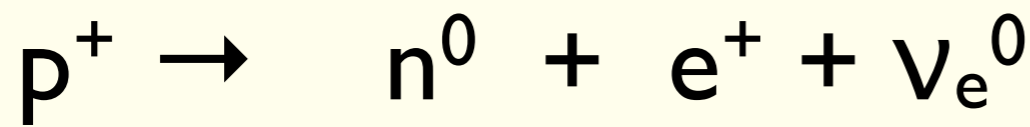
γ線 (定まったエネルギー)

β線 (連続スペクトル)

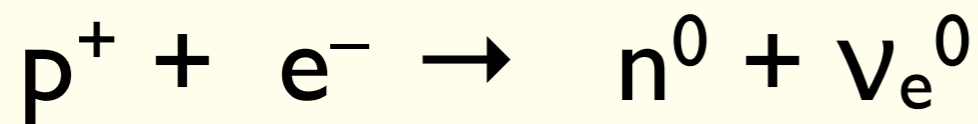
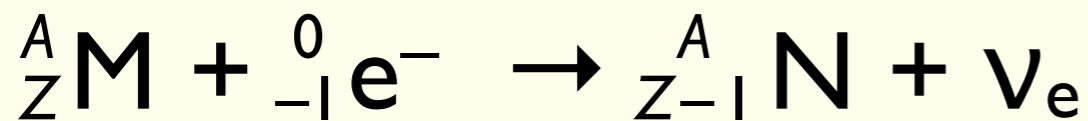
100 keV ~ MeV



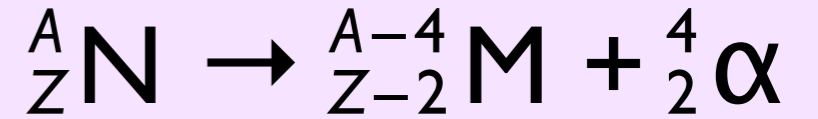
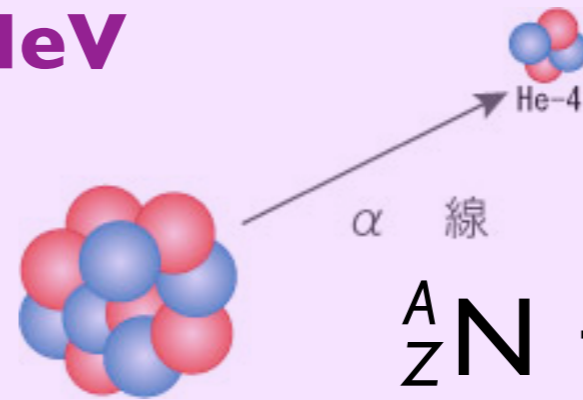
陽子過剩核
 β^+ 壞變 (崩壞)



軌道電子捕獲 (EC)

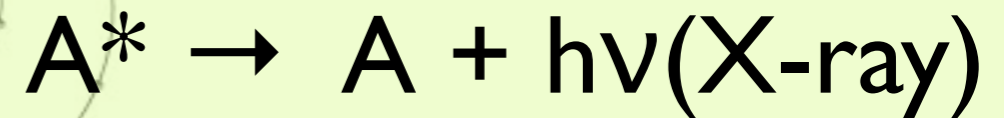
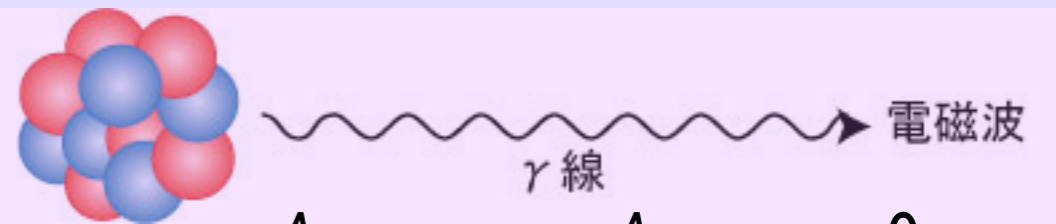
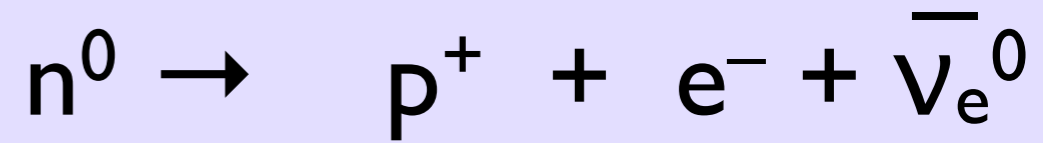
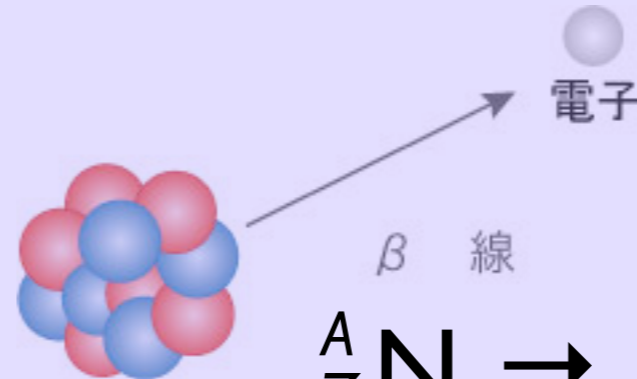


原子核 N



中性子過剩核

β^- 壞變 (崩壞)



原子 A 10 ~ 100 keV

関連する核種の分類

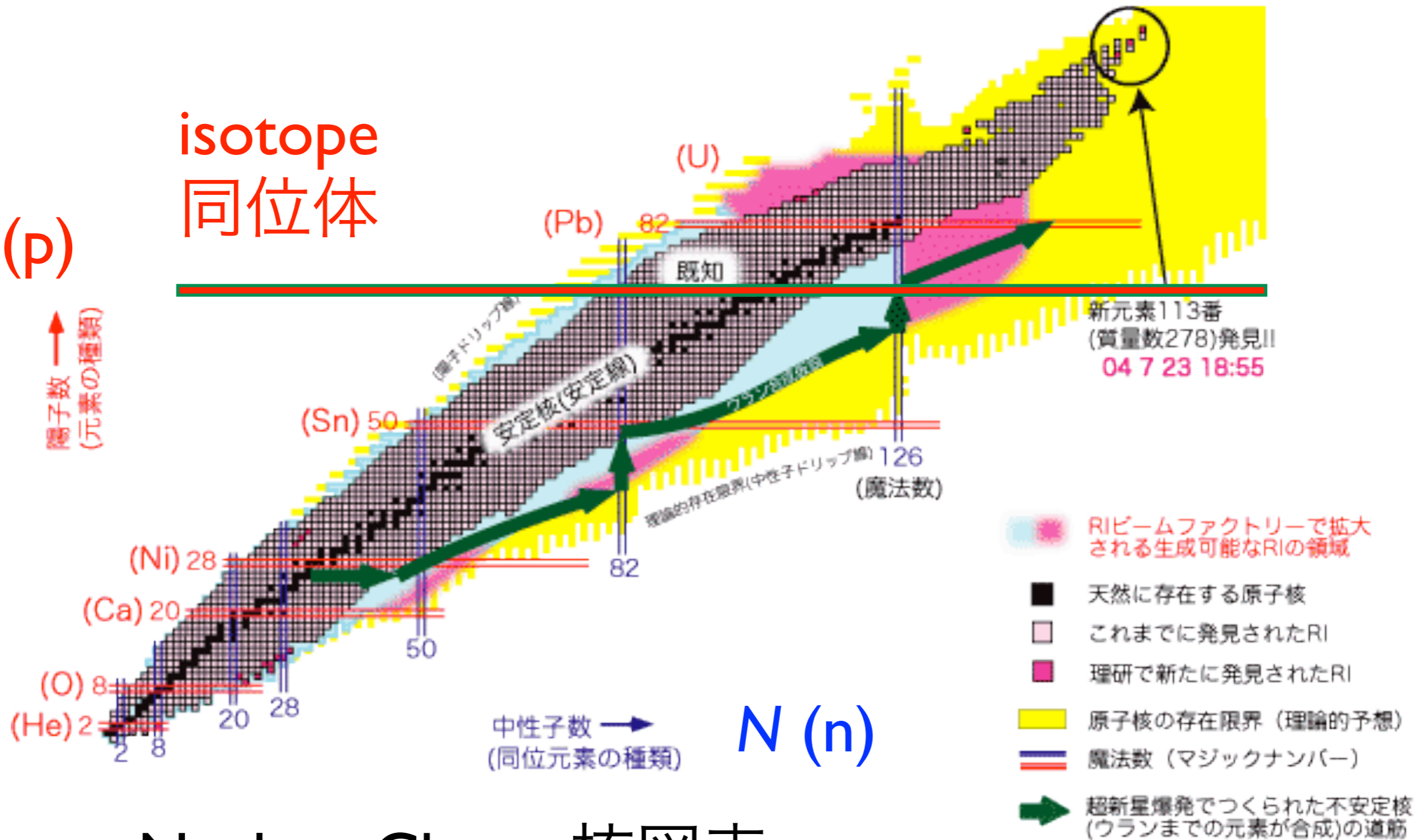
isotope	同位体	Z	${}^A_Z N_N$	${}^{A'}_Z N_{N'}$	${}^{A''}_Z N_{N''}$
isotone	同調体 (同中性子体)	N	${}^A_Z N_N$	${}^{A'}_{Z'} N_N$	${}^{A''}_{Z''} N_N$
isobar	同重体	A	${}^A_Z N_N$	${}^A_{Z'} N_{N'}$	${}^A_{Z''} N_{N''}$
mirror nuclei	鏡映核, 鏡像核	$A, Z \leftrightarrow N$	${}^A_Z N_N$	${}^A_{Z'} N_{N'}$	$Z' = N$ $N' = Z$
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

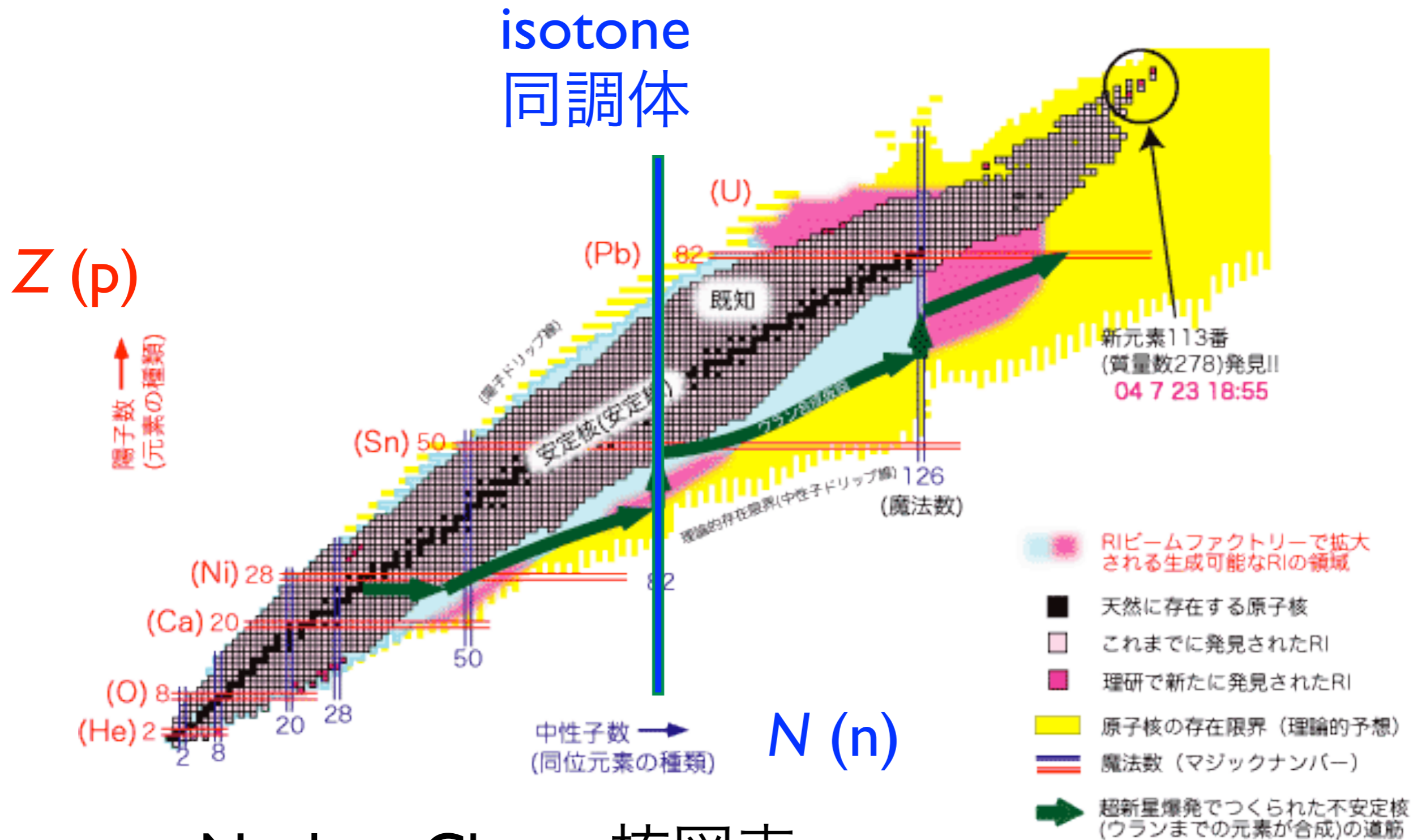


新元素113番
(質量数278)発見!!
04 7 23 18:55

Nuclear Chart 核図表

原子核物理学

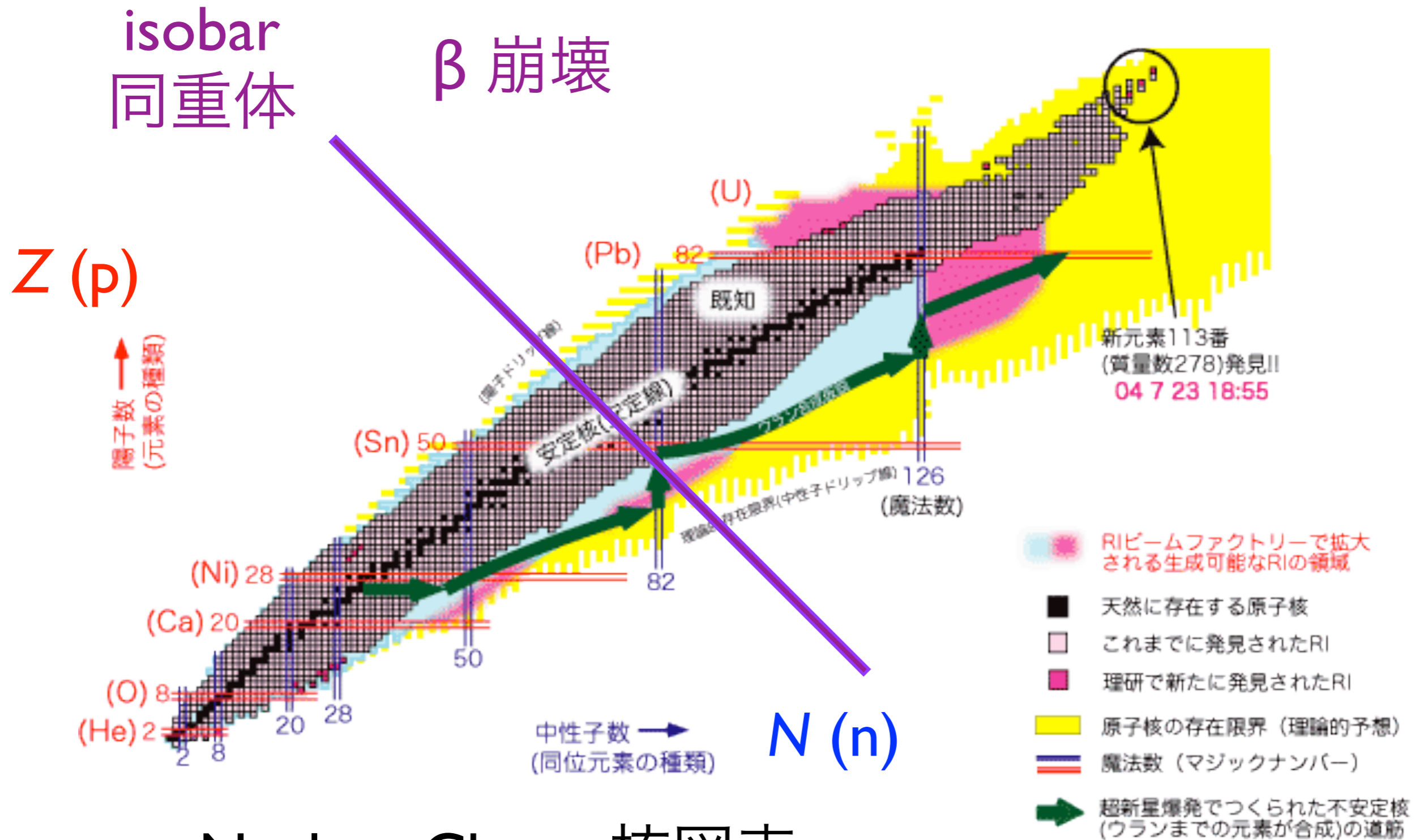
Nuclear Physics



Nuclear Chart 核図表

原子核物理学

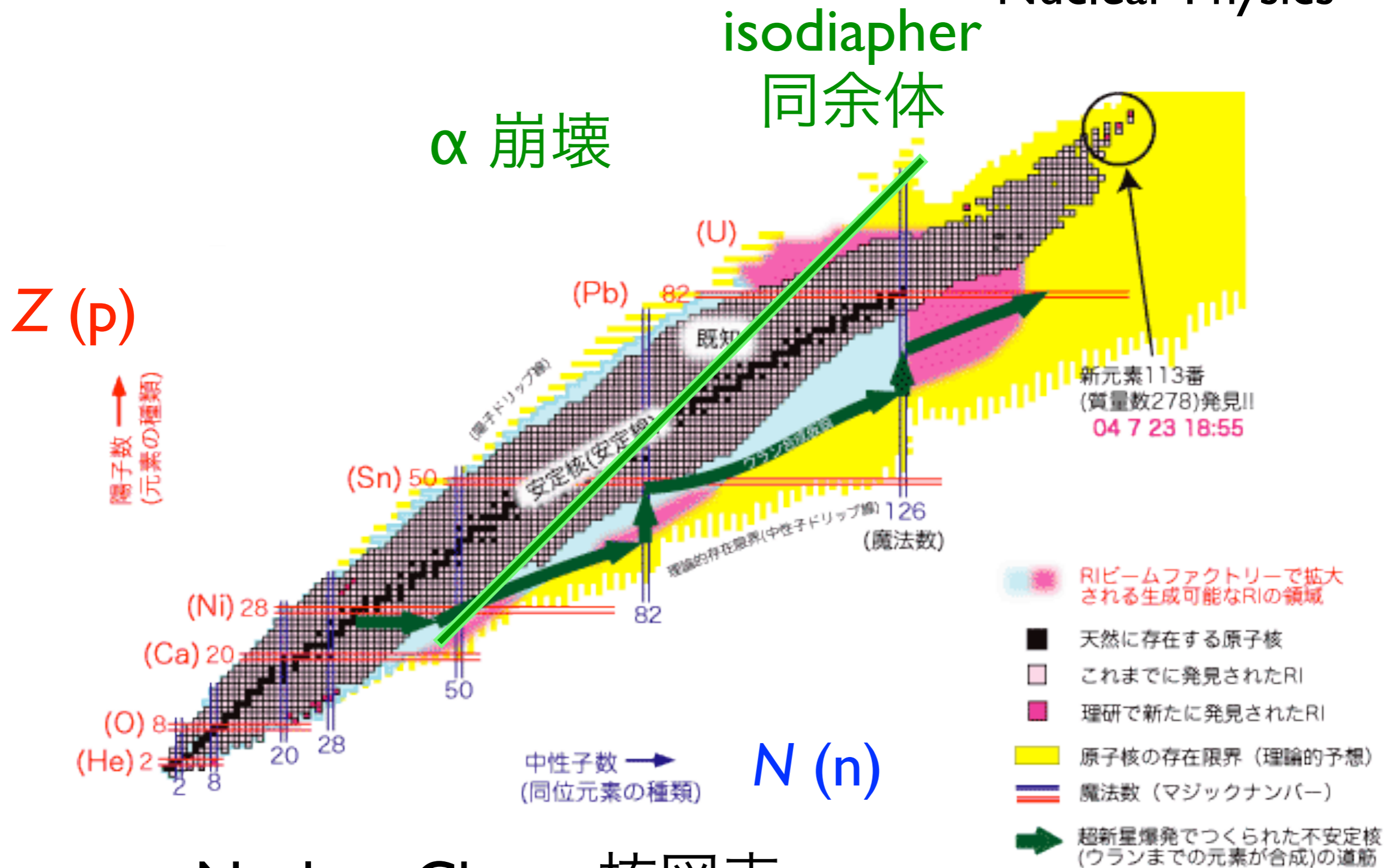
Nuclear Physics



Nuclear Chart 核図表

原子核物理学

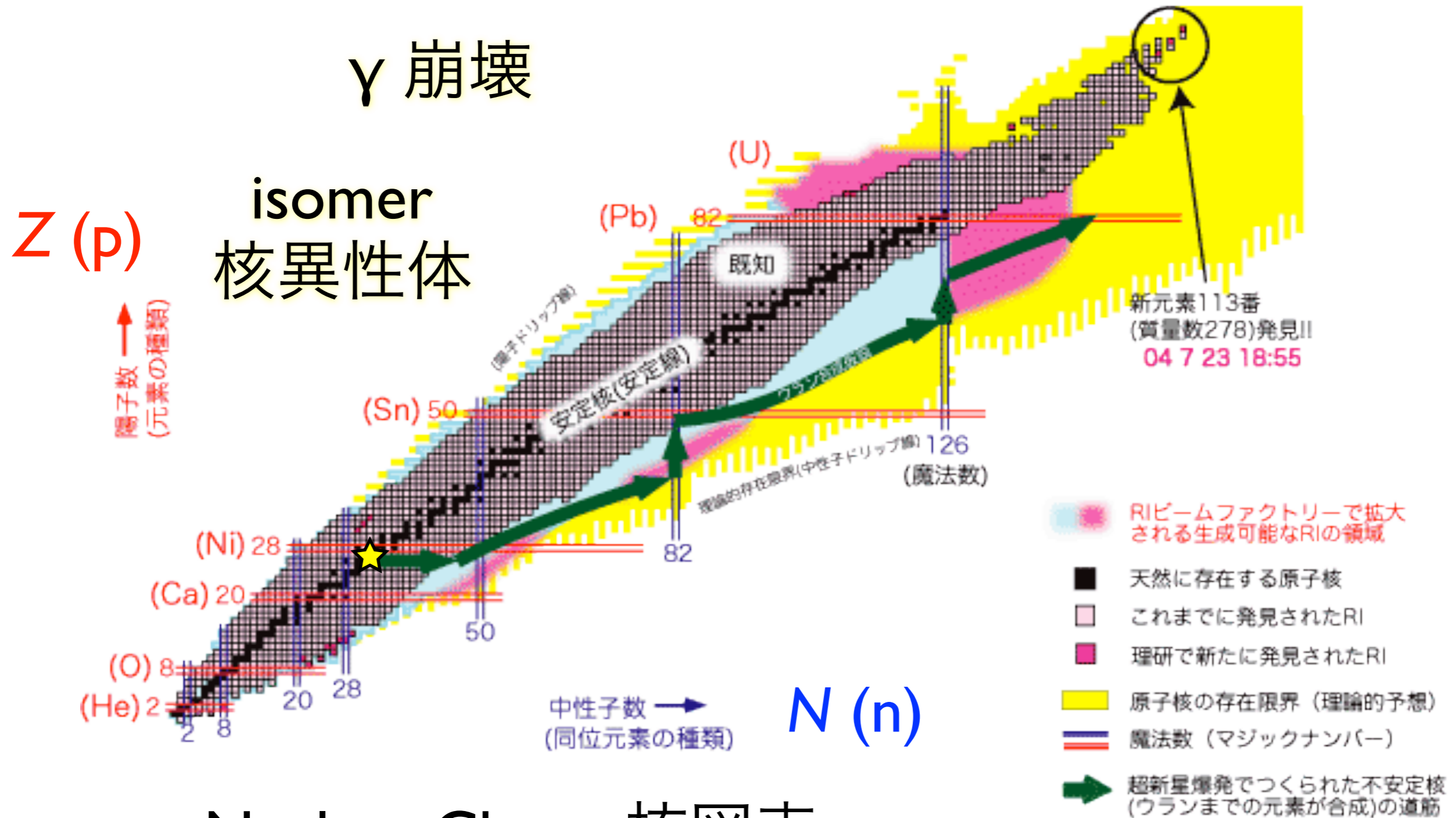
Nuclear Physics



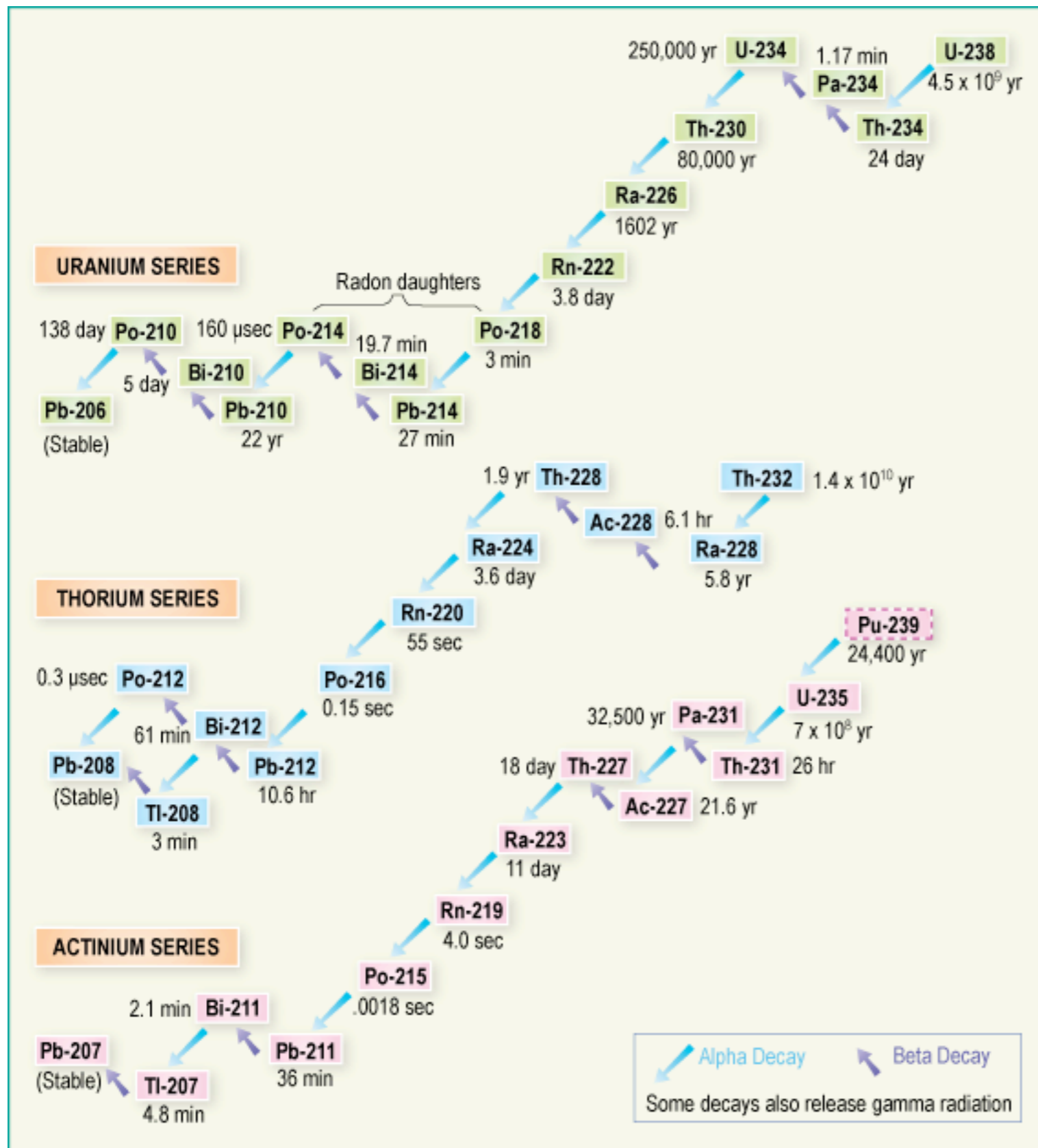
Nuclear Chart 核図表

原子核物理学

Nuclear Physics



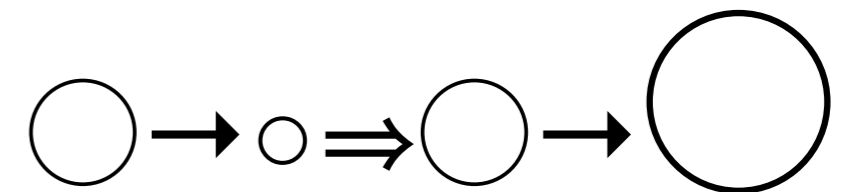
Nuclear Chart 核図表



壊変 (崩壊) 系列

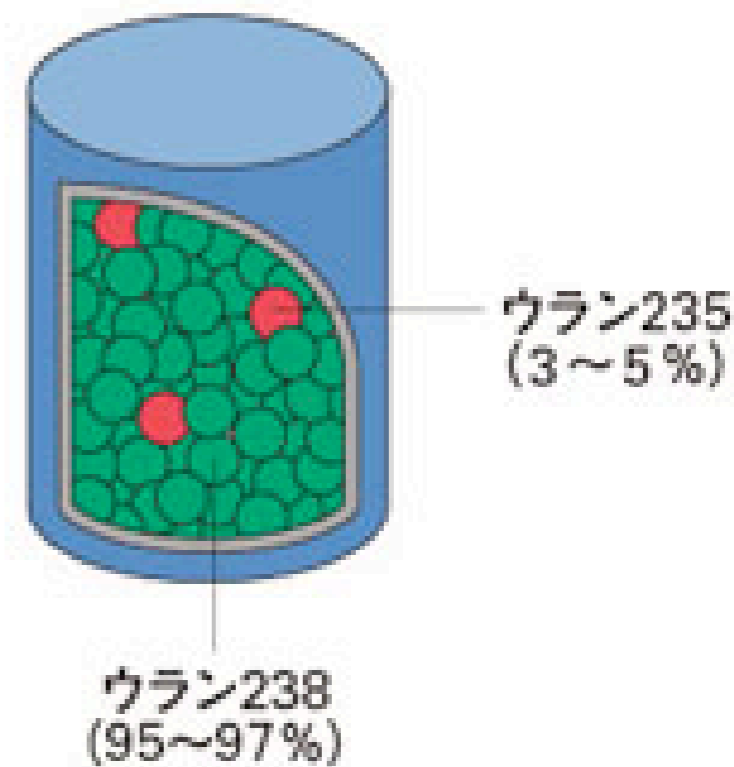
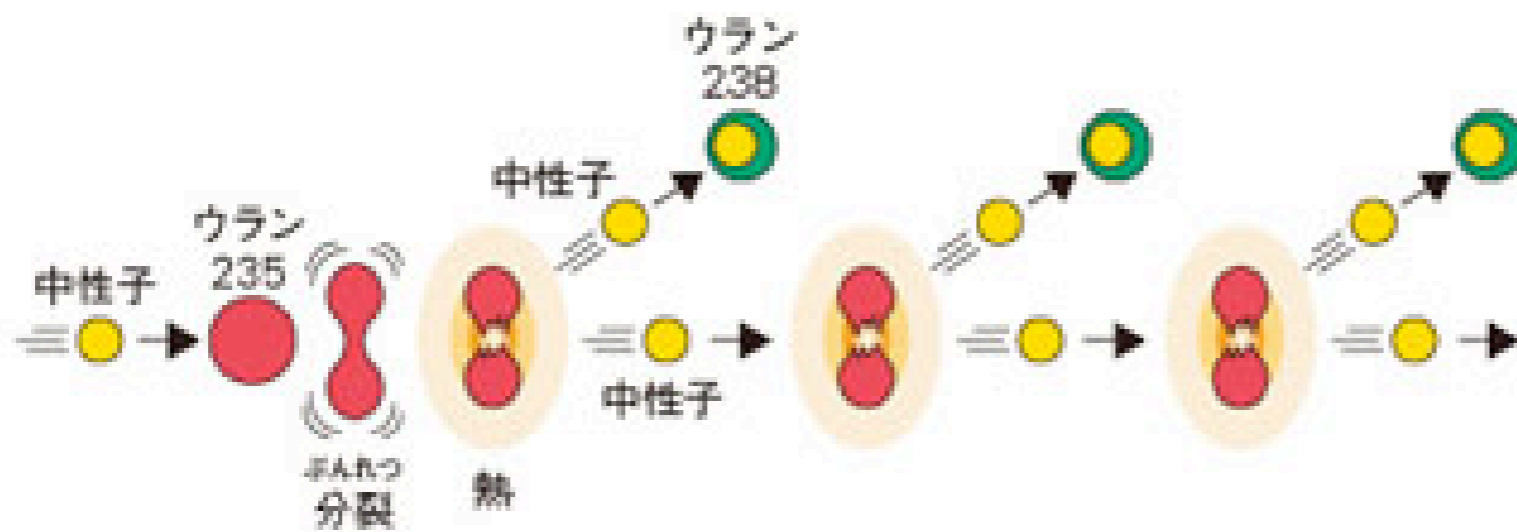
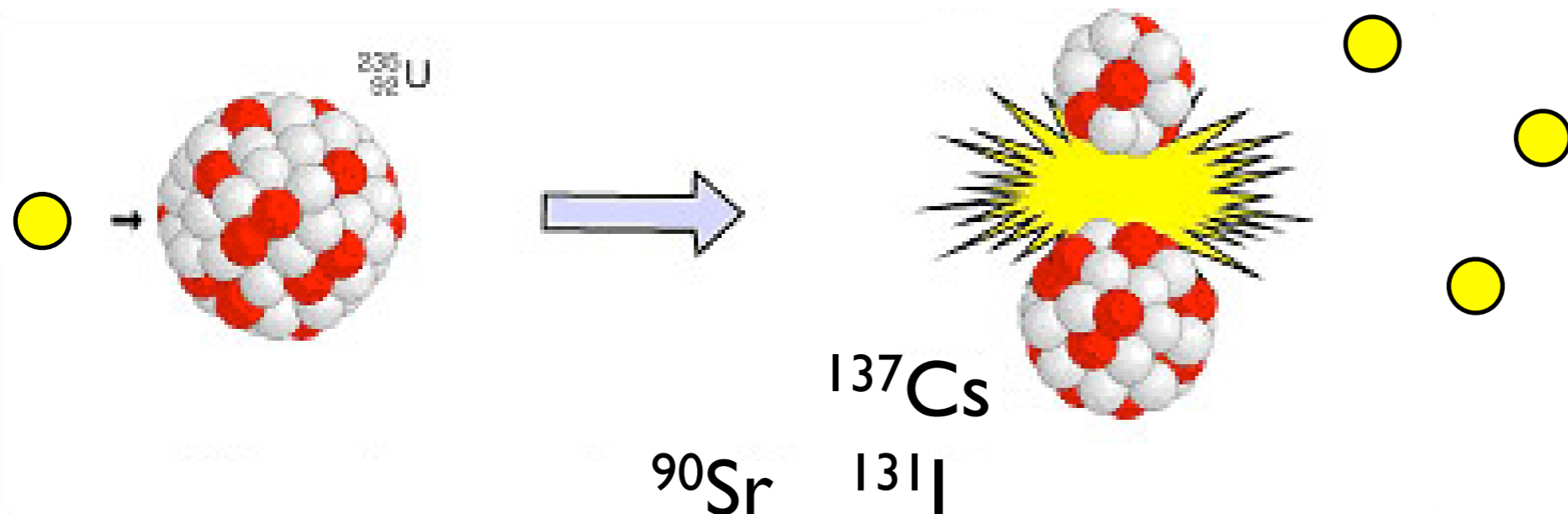
- (4n) トリウム系列
- (4n+1) ネプツニウム系列
- (4n+2) ウラン系列
- (4n+3) アクチニウム系列

放射平衡



原子力工学

原子核分裂反応



中性子 + ウラン 235 / 238

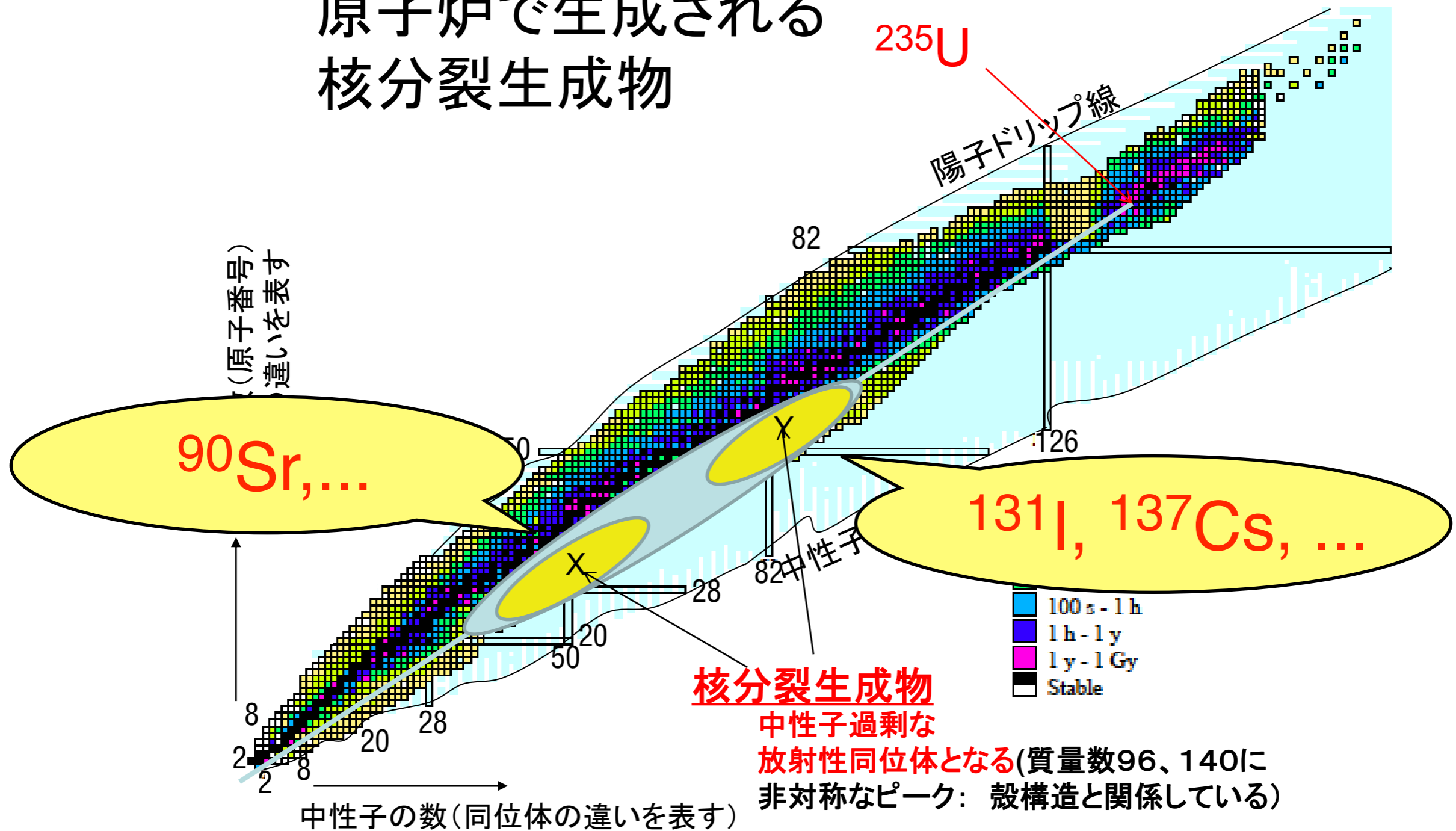
核分裂

Nuclear fission

原子核物理学

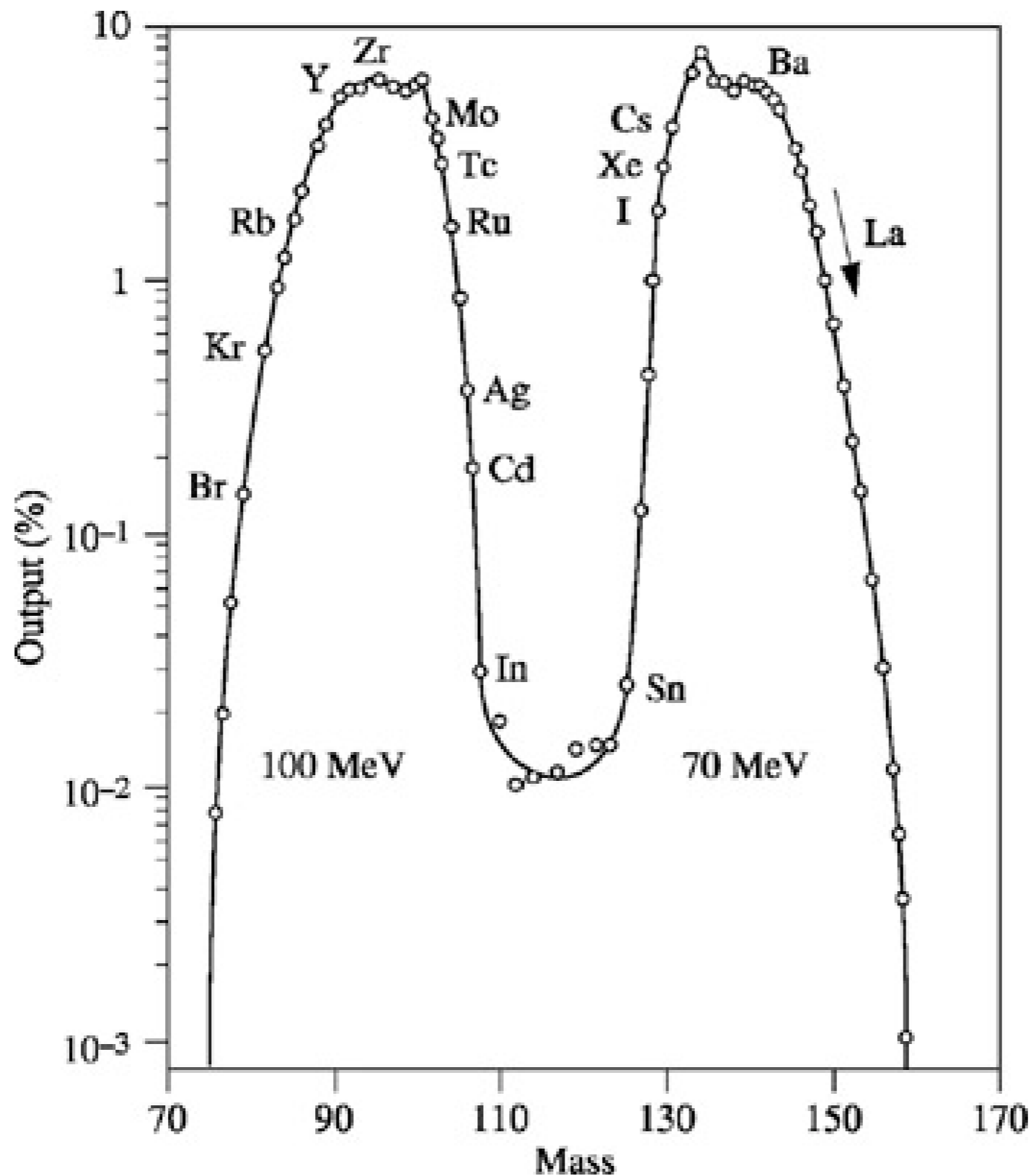
Nuclear Physics

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)



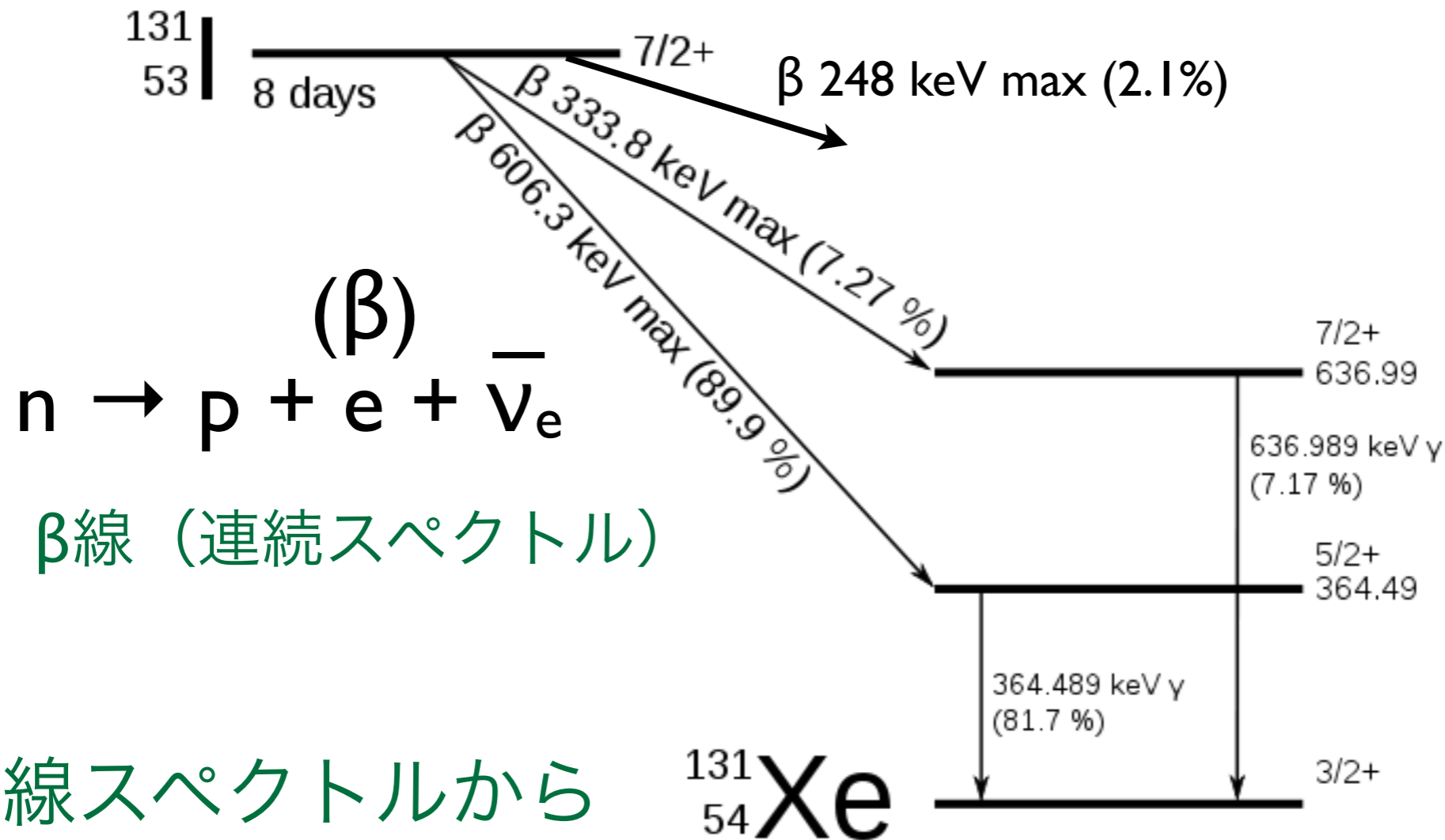
非対称分裂

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)。

¹³¹I, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ⁸⁵Kr, ¹³⁵Xe, ¹⁴⁰Ba, ⁹⁵Zr, ¹⁰⁶Ru, ⁹⁹Mo....

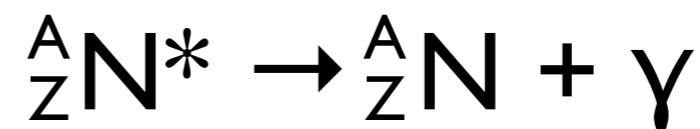
中性子過剰核は β 壊変 (崩壊) を繰り返しながら

安定核まで
たどり着く。



β 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}Sr (γ 線を出さない)

γ 線：原子核の脱励起



γ 線 (定まったエネルギー)

γ 線のスペクトル分析により核種の同定に役立つ。

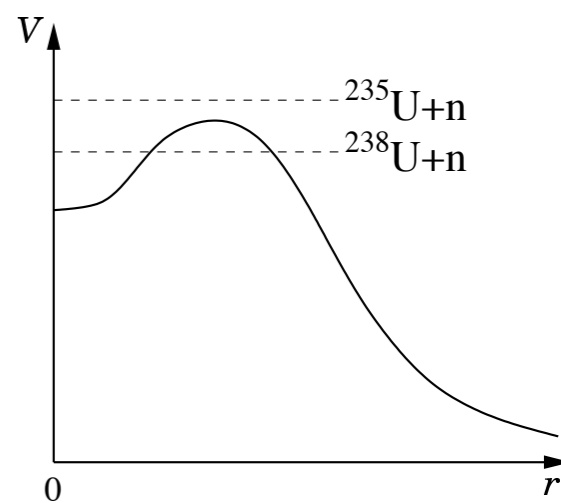
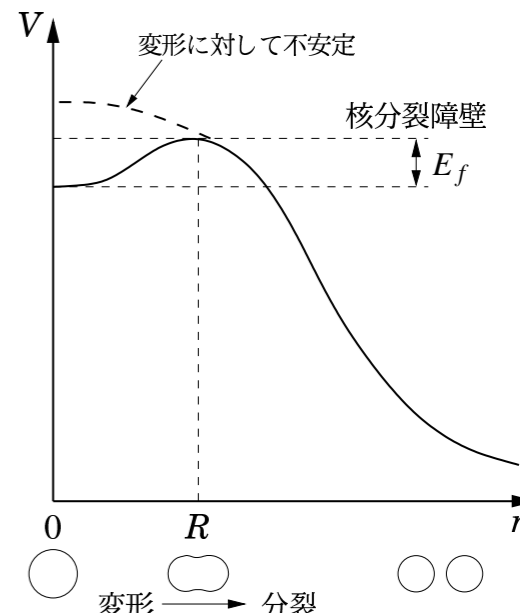
ウランの核分裂

(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 ^{neutron capture} 中性子捕獲 によって供給。

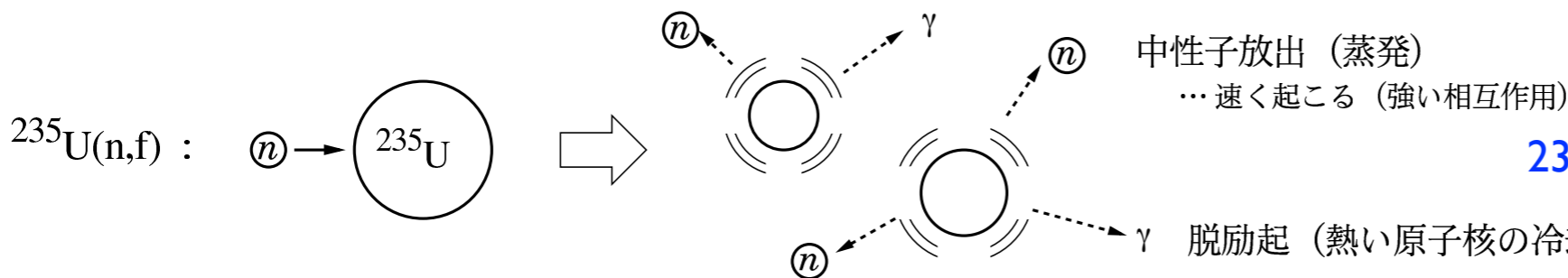
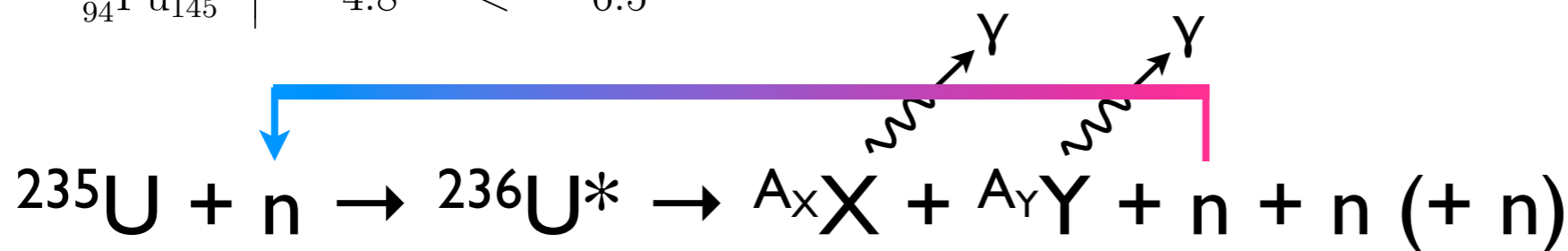
例: $Q_n = (m[{}^{238}\text{U}] + m[n] - m[{}^{239}\text{U}])c^2 = 4.8 \text{ [MeV]} > 0 \dots$ 発熱反応

高次項まで含めて E_f を計算 ... Bohr & Wheeler

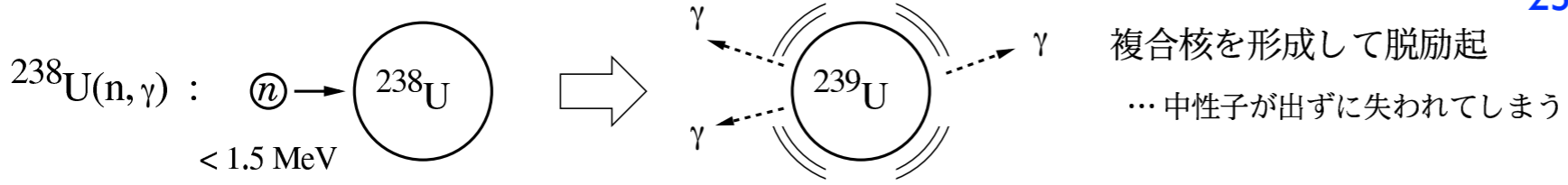


	E_f [MeV]	Q_n [MeV]	
${}^{238}_{92}\text{U}_{146}$ (99.275%)	6.3	> 4.8	... 1.5 MeV 以上の中性子が必要
${}^{235}_{92}\text{U}_{143}$ (0.72%)	5.8	< 6.5	... 0 エネルギー中性子でも分裂
${}^{239}_{94}\text{Pu}_{145}$	4.8	< 6.5	

} 対エネルギーの違い

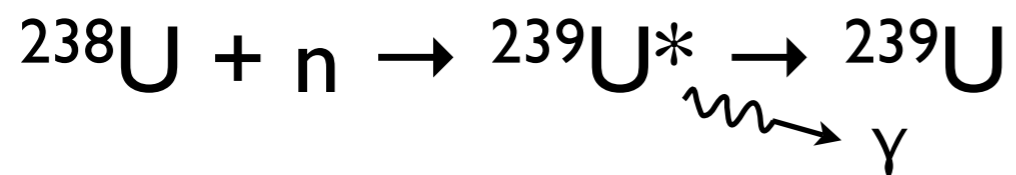


${}^{235}\text{U}$: 0.72%, 半減期 7.03億年

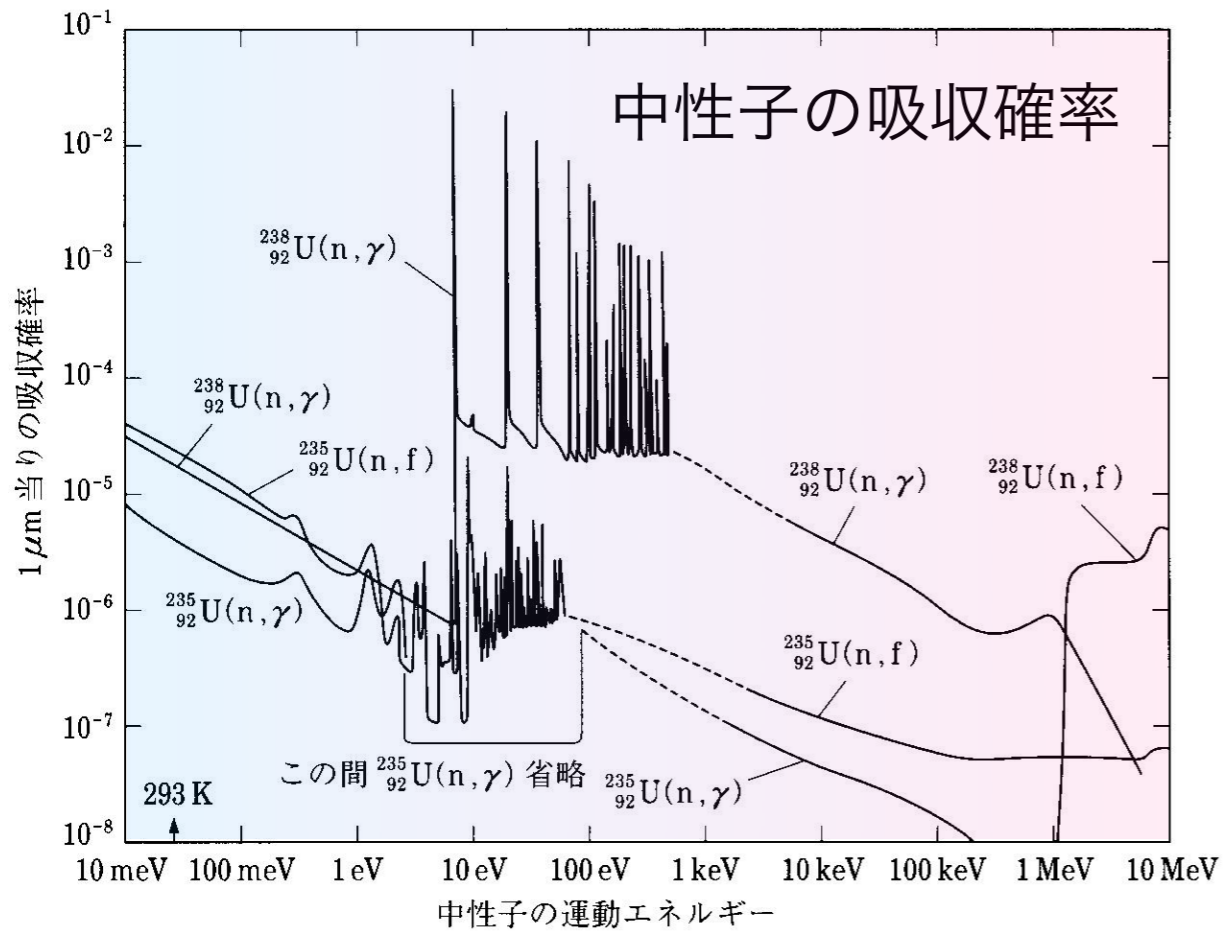


${}^{238}\text{U}$: 99.3%, 半減期 44.6億年

👉 ${}^{235}\text{U}$ 濃縮燃料を使う

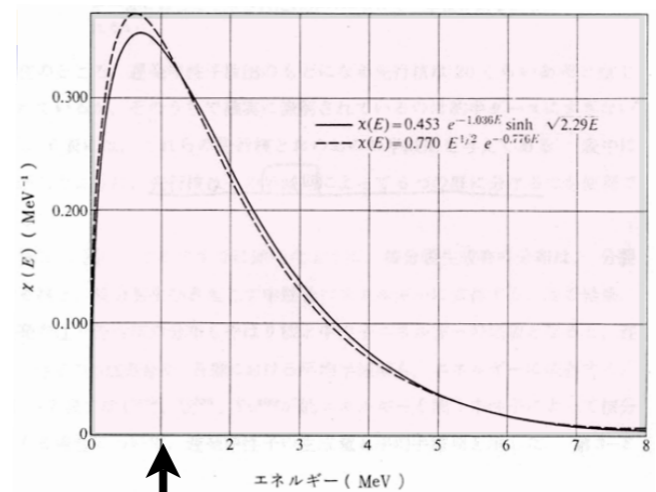


(大阪大学 故岡村弘之先生の講義資料より借用・改変)



$E_n < 1 \text{ eV}$ 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

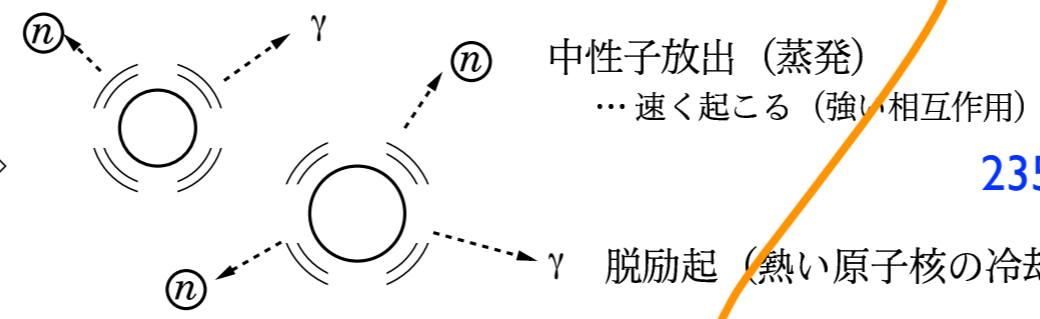
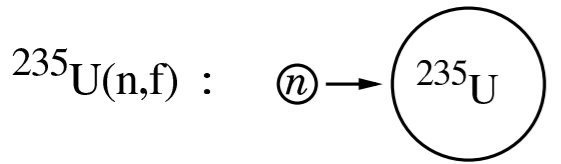


減速

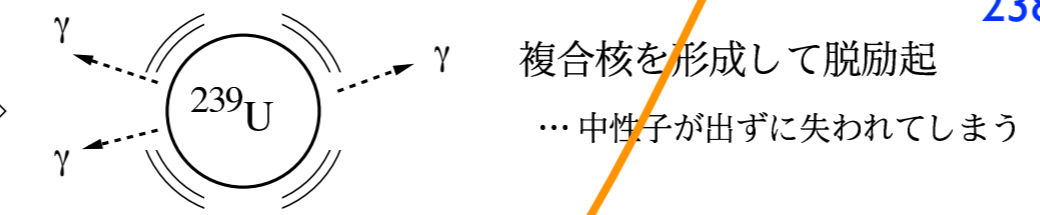
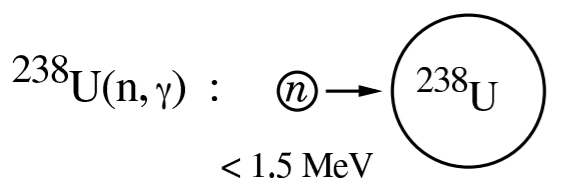
loss



熱中性子

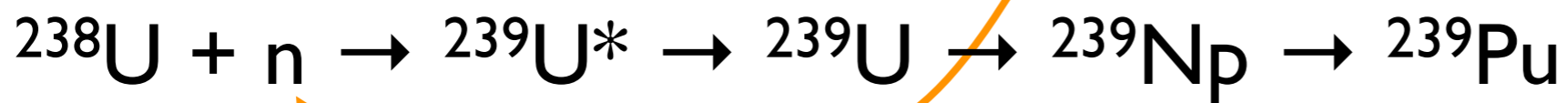


^{235}U : 0.72%, 半減期 7.03億年



^{238}U : 99.3%, 半減期 44.6億年

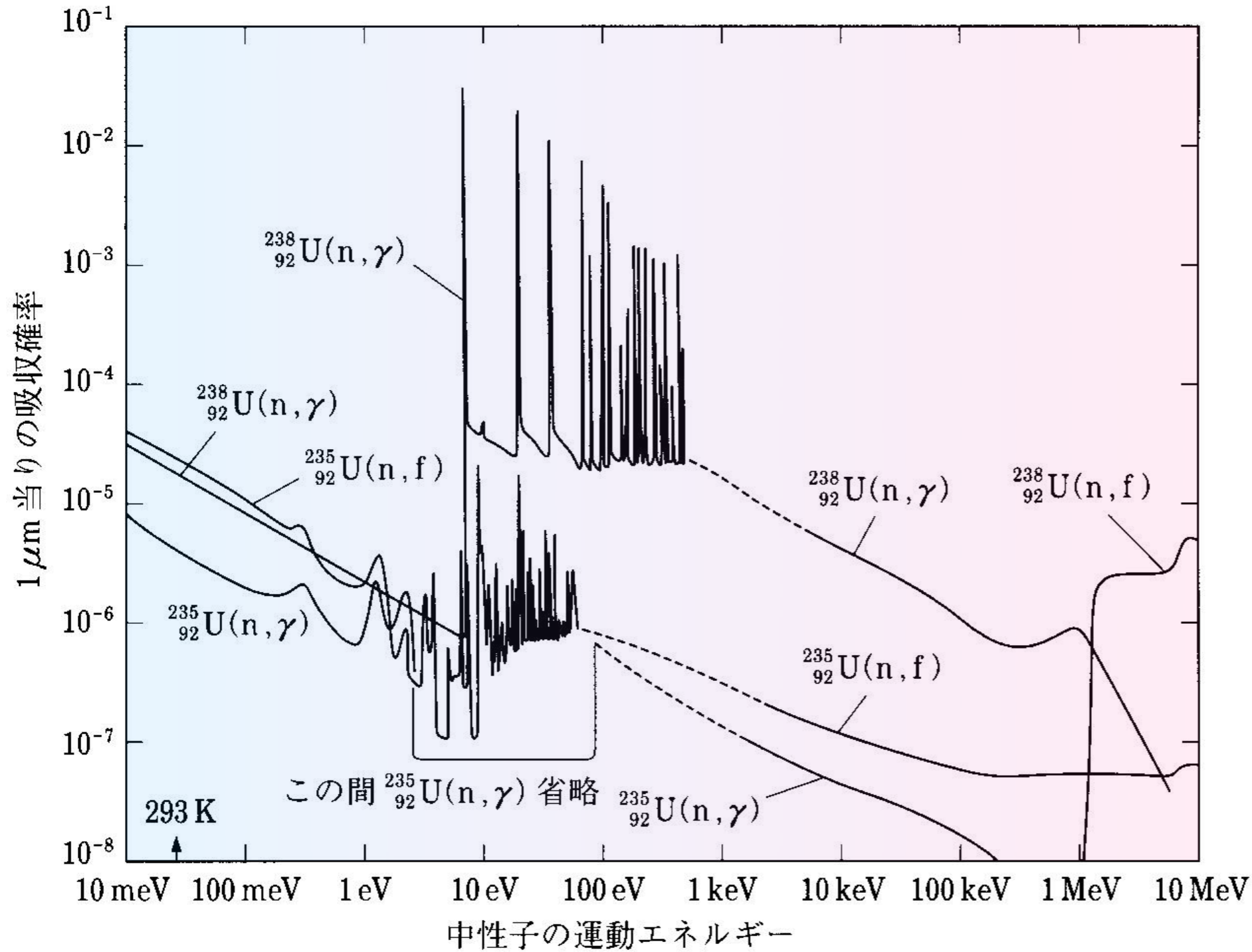
👉 ^{235}U 濃縮燃料を使う



(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}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}U の核分裂エネルギーの平均的な配分

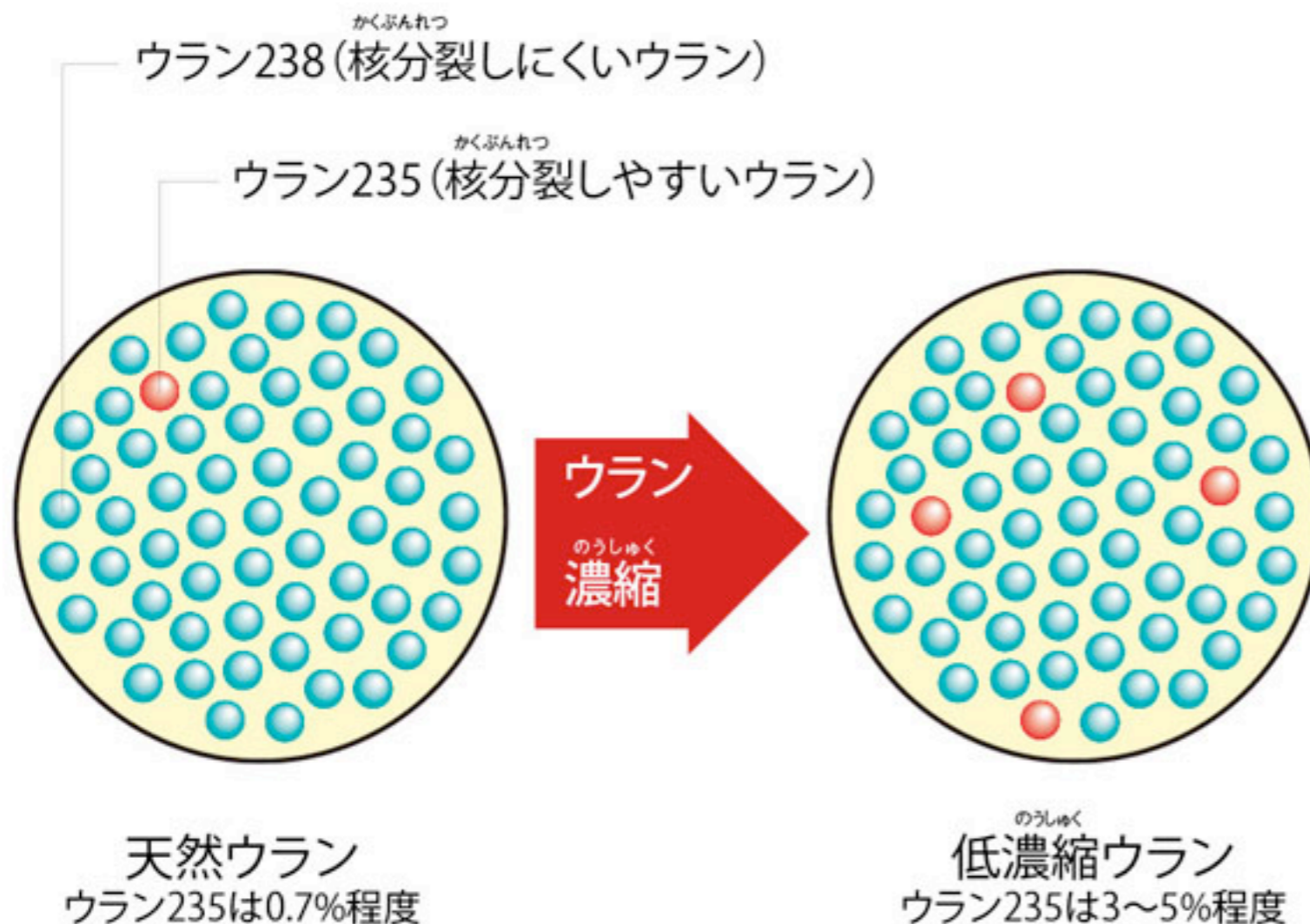
核分裂破片の運動エネルギー	~165 MeV
核分裂中性子の運動エネルギー(2-3個)	~5 MeV
即発の γ 線エネルギー(~5本)	~6MeV
分裂生成物からの β 線のエネルギー(~7本)	~8MeV
分裂生成物からの γ 線のエネルギー(~7本)	~6MeV
ニュートリノの持ち出すエネルギー	~12MeV
核分裂の全エネルギー	~ 202MeV

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

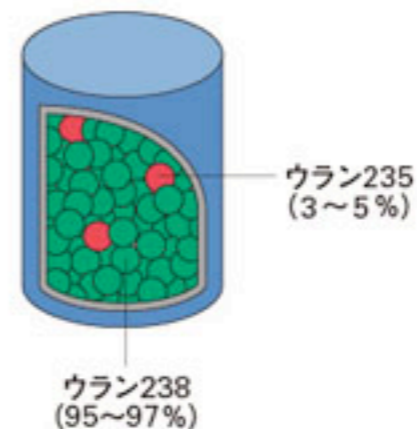
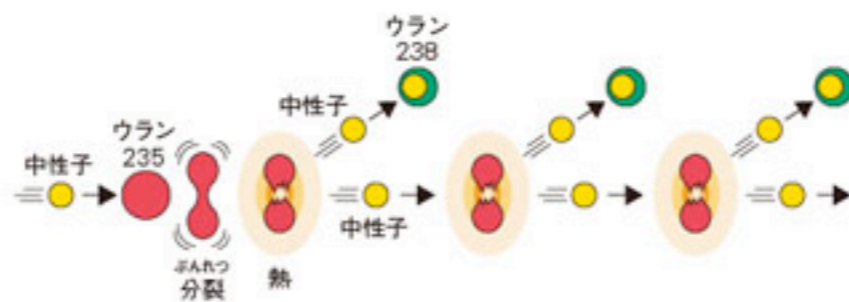
- ☀ ガス拡散法
 - ☀ 遠心分離
 - ☀ レーザー法
 - ☀ ノズル法、
 - ☀ 化学法 (イオン交換法)
- UF₆ (気体)

(原子力教育支援情報提供サイト「あとみん」より図表を借用。)

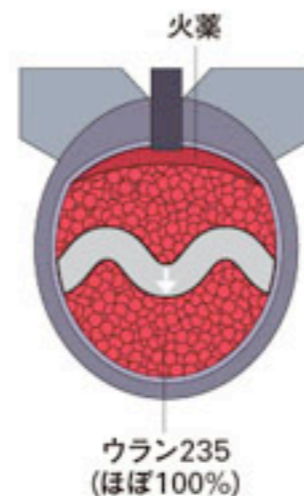
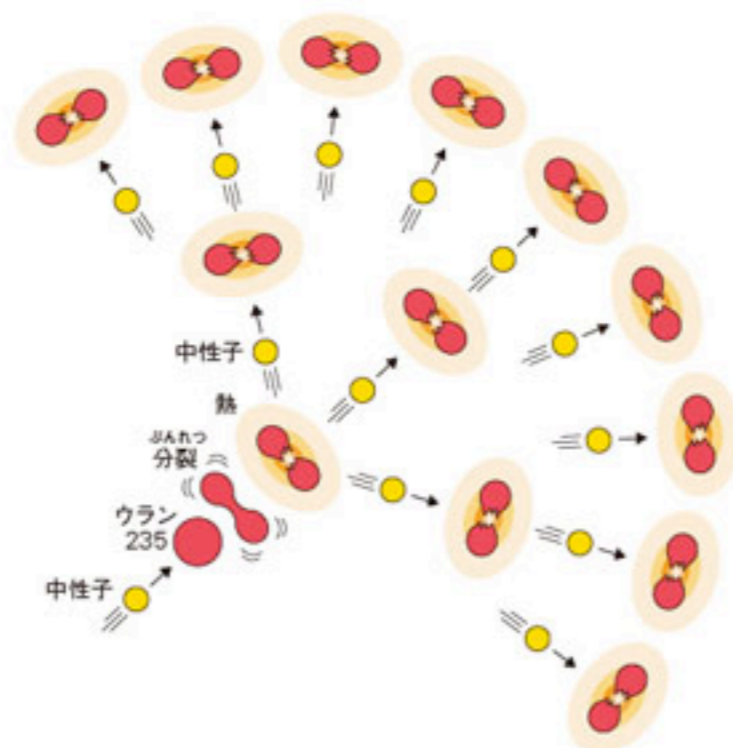
出所: チャレンジ! 原子力ワールド (以下のページも。)

《 原子力発電と原子爆弾の違い 》

原子力発電の場合



ばくだん
原子爆弾の場合



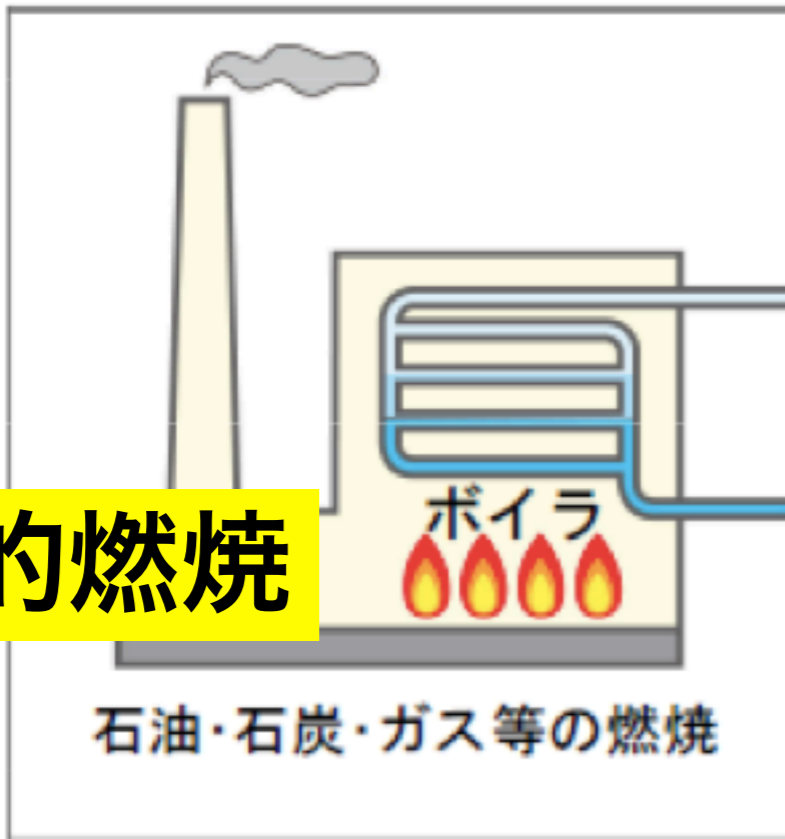
連鎖反応
臨界

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

火力発電と原子力発電の違い

火力

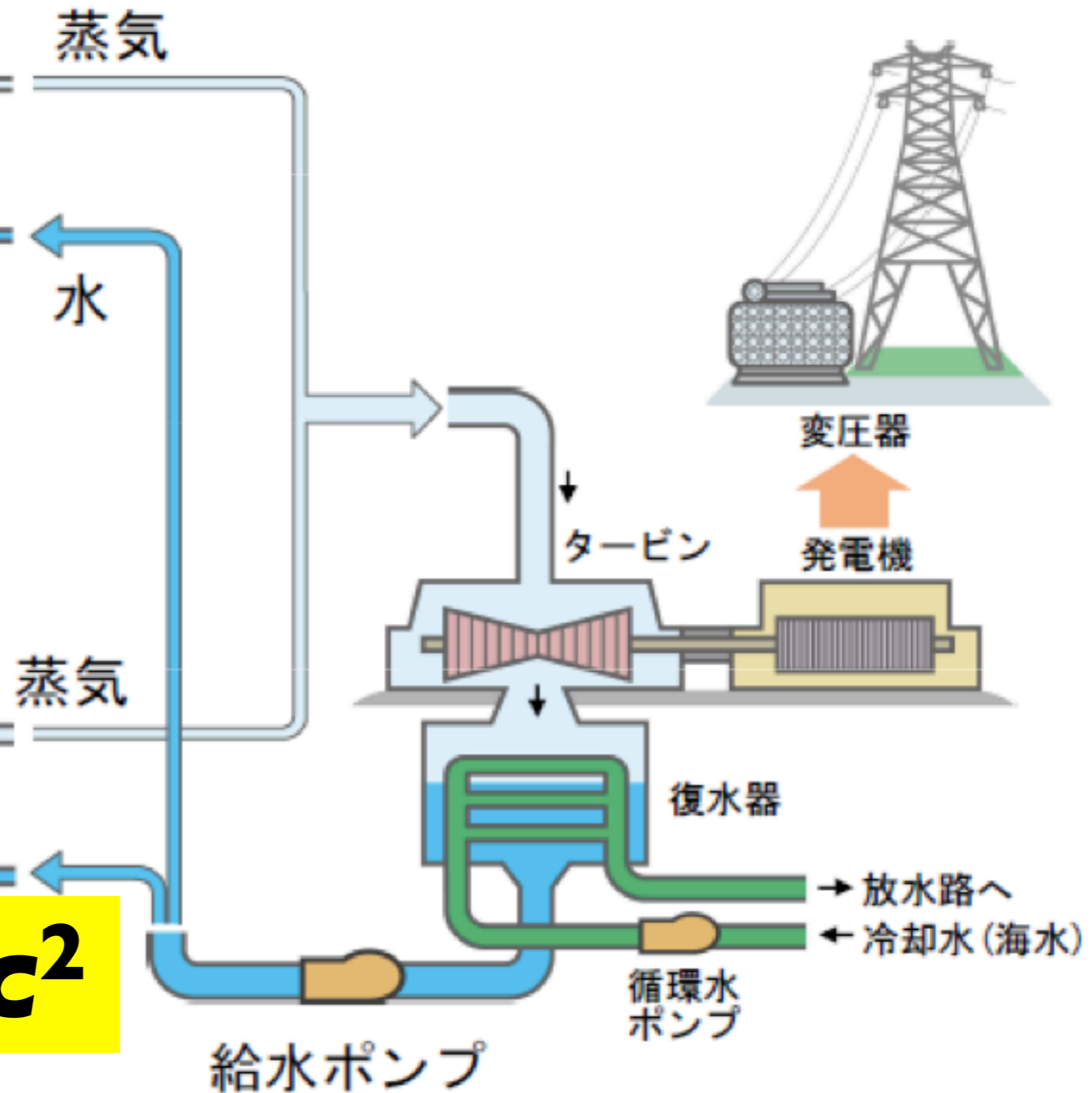
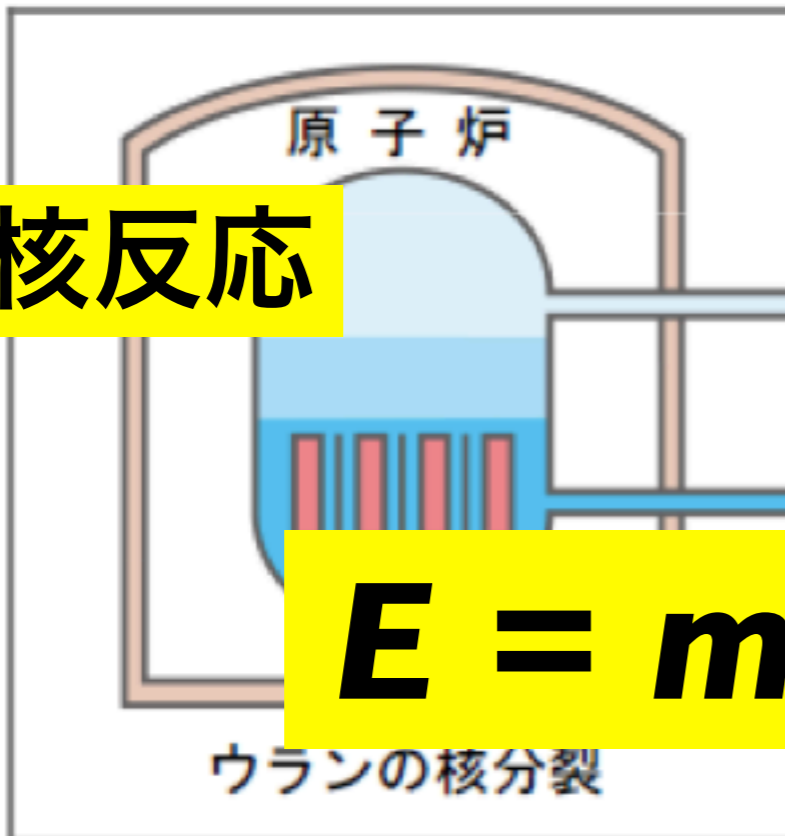
化学的燃焼



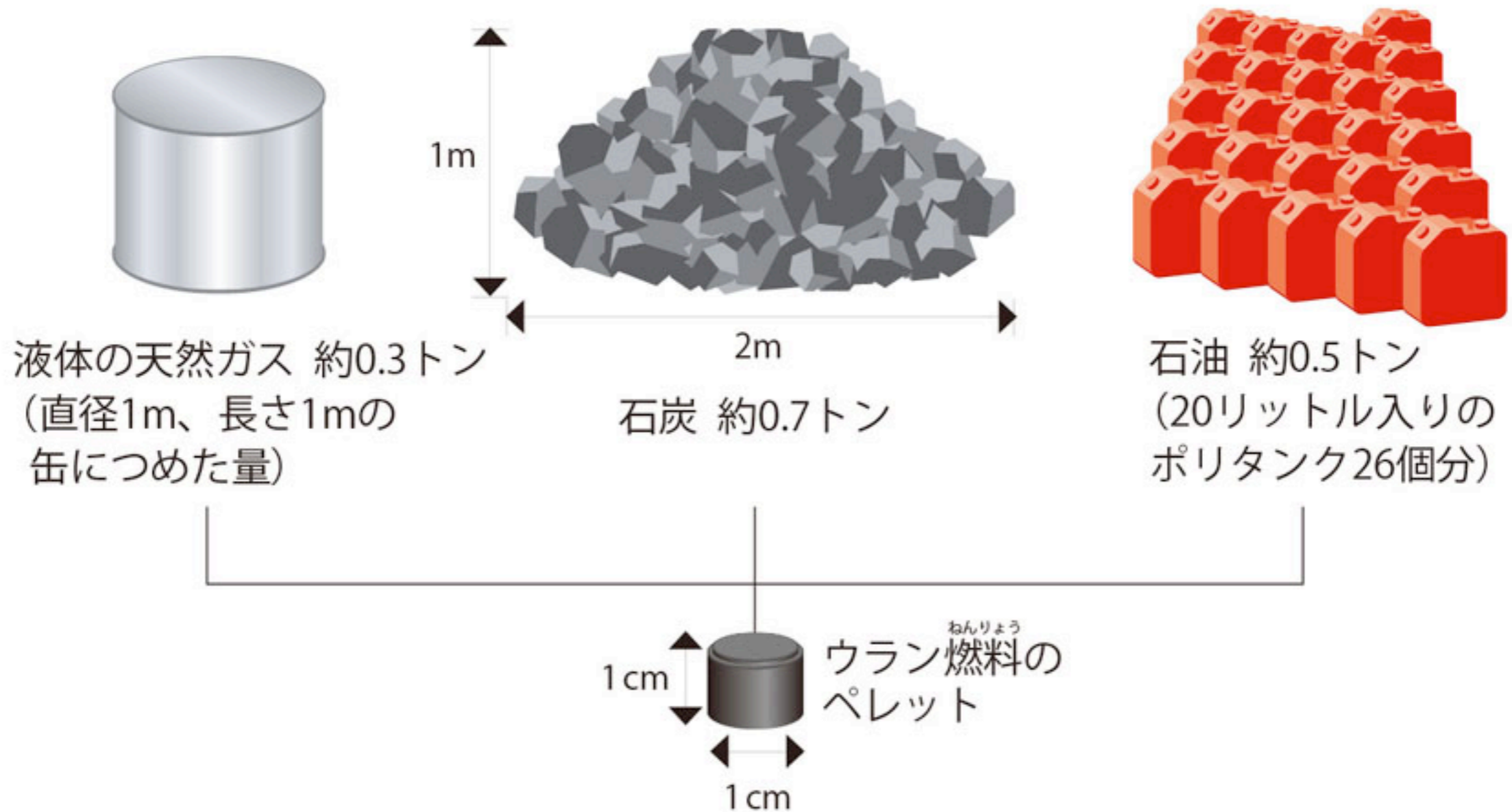
原子核反応

原子力

$$E = mc^2$$



《 エネルギー源の比較(原子力発電と火力発電) 》



液体の天然ガス 約0.3トン
(直径1m、長さ1mの
缶につめた量)

1m

2m

石炭 約0.7トン

石油 約0.5トン
(20リットル入りの
ポリタンク26個分)

1cm

ウラン^{ねんりょう}燃料の
ペレット

1cm

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

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

運転の制御：熱中性子を吸収する元素

制御棒* (炭化ホウ素、カドミウム合金)、ホウ酸水



(*) 放射化しにくい物質

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

運転の制御：熱中性子を吸収する元素

制御棒（炭化ホウ素、カドミウム合金）、ホウ酸水



レポート

各分野ごとに1本選択、合計3本

(それより多く提出してもよい)

• 物理分野 #2

物理：鳥居・石渡

化学：小豆川

締切：12月22日(木)

生命：渡邊、中川、藤原

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、 α 崩壊の系列、 β 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}I や ^{137}Cs , ^{90}Sr などが特に問題となるのはなぜか。

レポート締め切り

各分野ごとに1本選択、合計3本
(それより多く提出してもよい)

- **物理分野**

物理：鳥居・石渡

締切：12月22日(木)

- **化学分野**

化学：小豆川

締切：12月22日(木)

- **生命科学分野**

生命：渡邊、中川、藤原

締切：1月20日(金)

次回予告

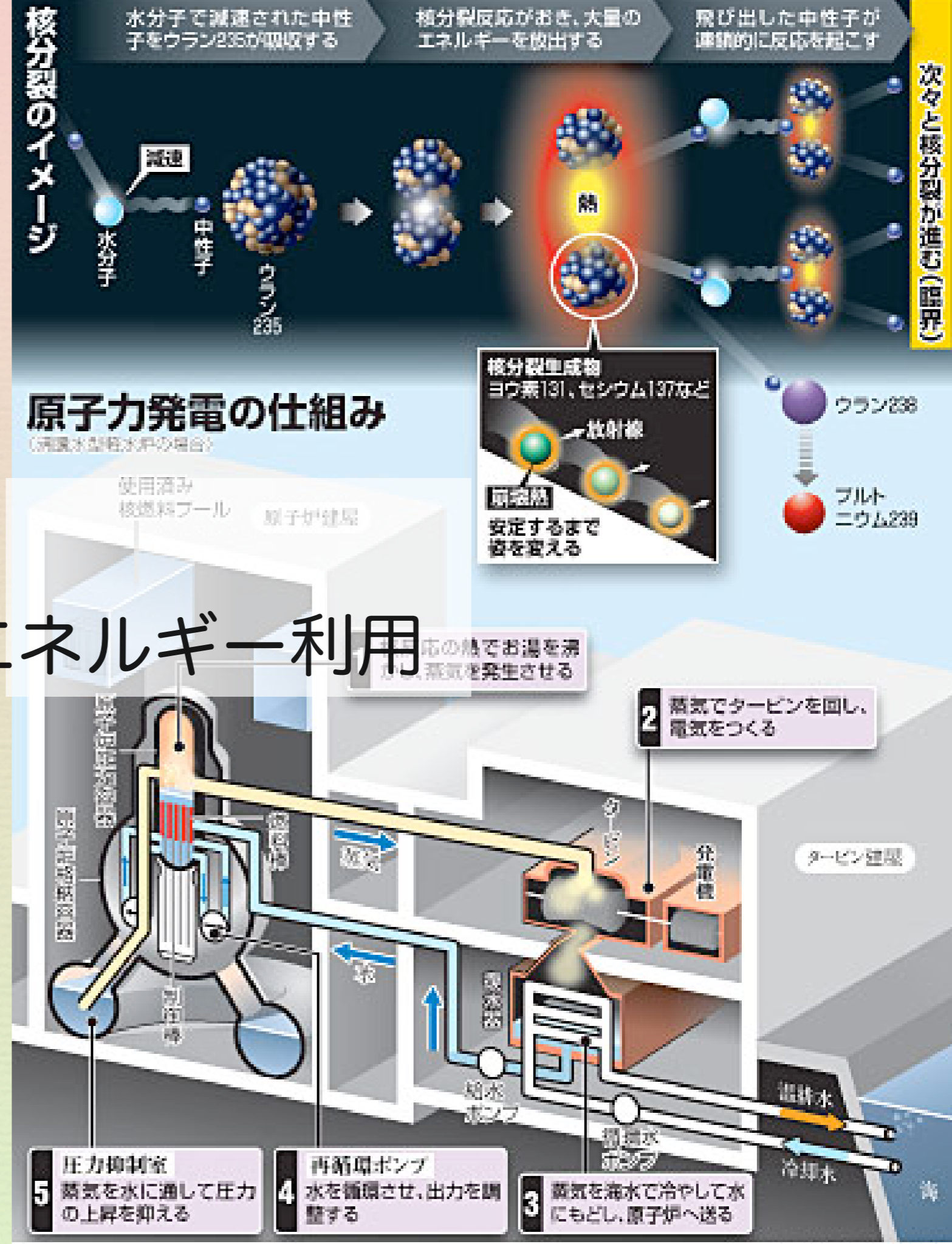
第8回 (12/2)

● 《原子力工学》

● 原子力発電、エネルギー利用

工学系原子力国際専攻

石渡 祐樹 先生



放射線を科学的に理解する

- 10/ 7 放射線入門 【鳥居】
- 10/14 放射線物理学 【鳥居】
- 10/21 放射線計測学 【小豆川】
- 10/28 環境放射化学 【小豆川】
- 11/ 4 放射線生物学 【渡邊】
- 11/11 放射線医学 【中川】
- 11/18 原子核物理学 【鳥居】
- 12/ 2 原子力工学 【石渡】
- 12/ 9 放射線物理学 【鳥居】
- 12/16 環境放射化学 【小豆川】
- 1/10 植物栄養・土壌肥料学 【藤原】
- 1/20 放射線の利用 【渡邊】
- 1/27 加速器科学・まとめ 【鳥居】

鳥居 寛之

小豆川 勝見

渡邊 雄一郎

《教養学部》

中川 恵一 《医学部附属病院放射線科》

石渡 祐樹 《工学系原子力国際専攻》

藤原 徹 《農学部応用生命科学》

ゲスト講師

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

担当教員：鳥居 寛之

Fine. Per oggi è tutto.

Finis 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.