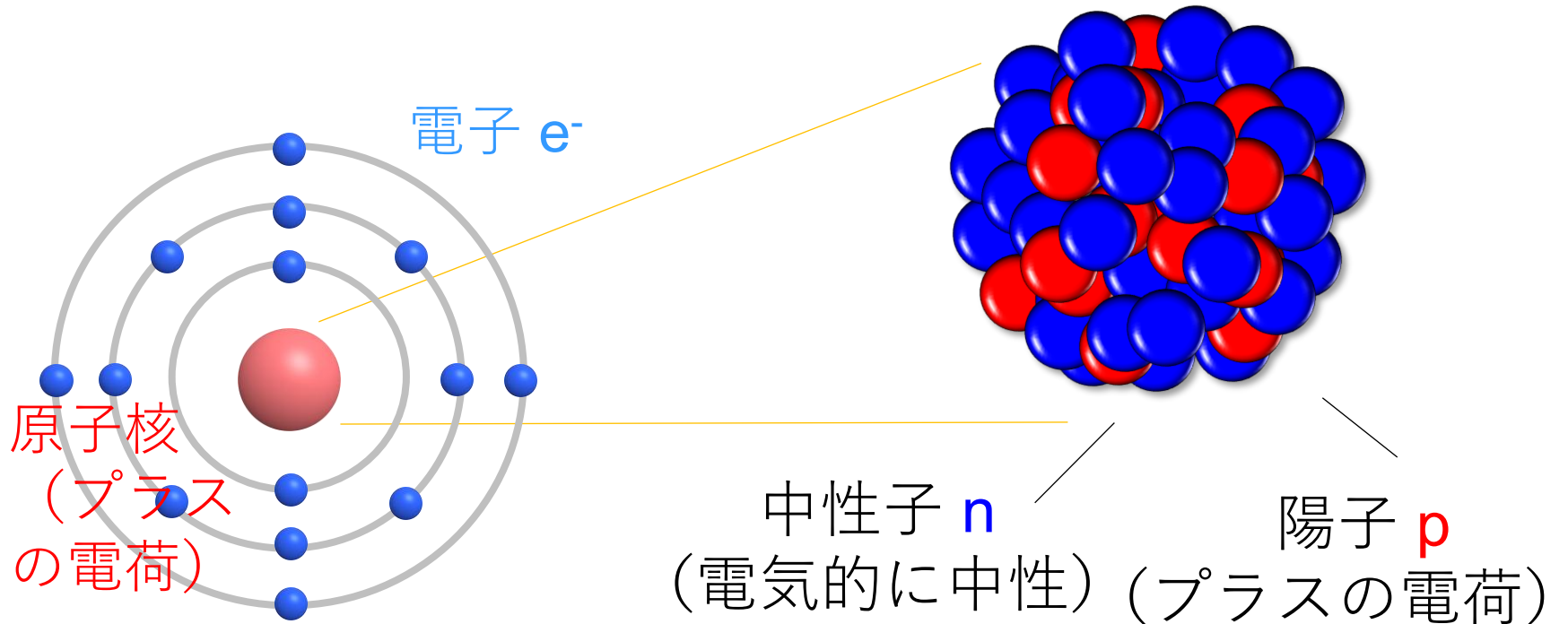


超重元素と重イオン核融合反応

日本原子力研究開発機構
先端基礎研究センター
西尾 勝久

原子核



ウラン235



質量数 $A =$ 陽子数 Z + 中性子数 N

人工的に合成できる原子核を含めて
7,000 種類の原子核が存在しうる。
どのくらい重い原子核ができる？
元素の周期表はどこまで伸びる？

陽子の数 = 原子番号

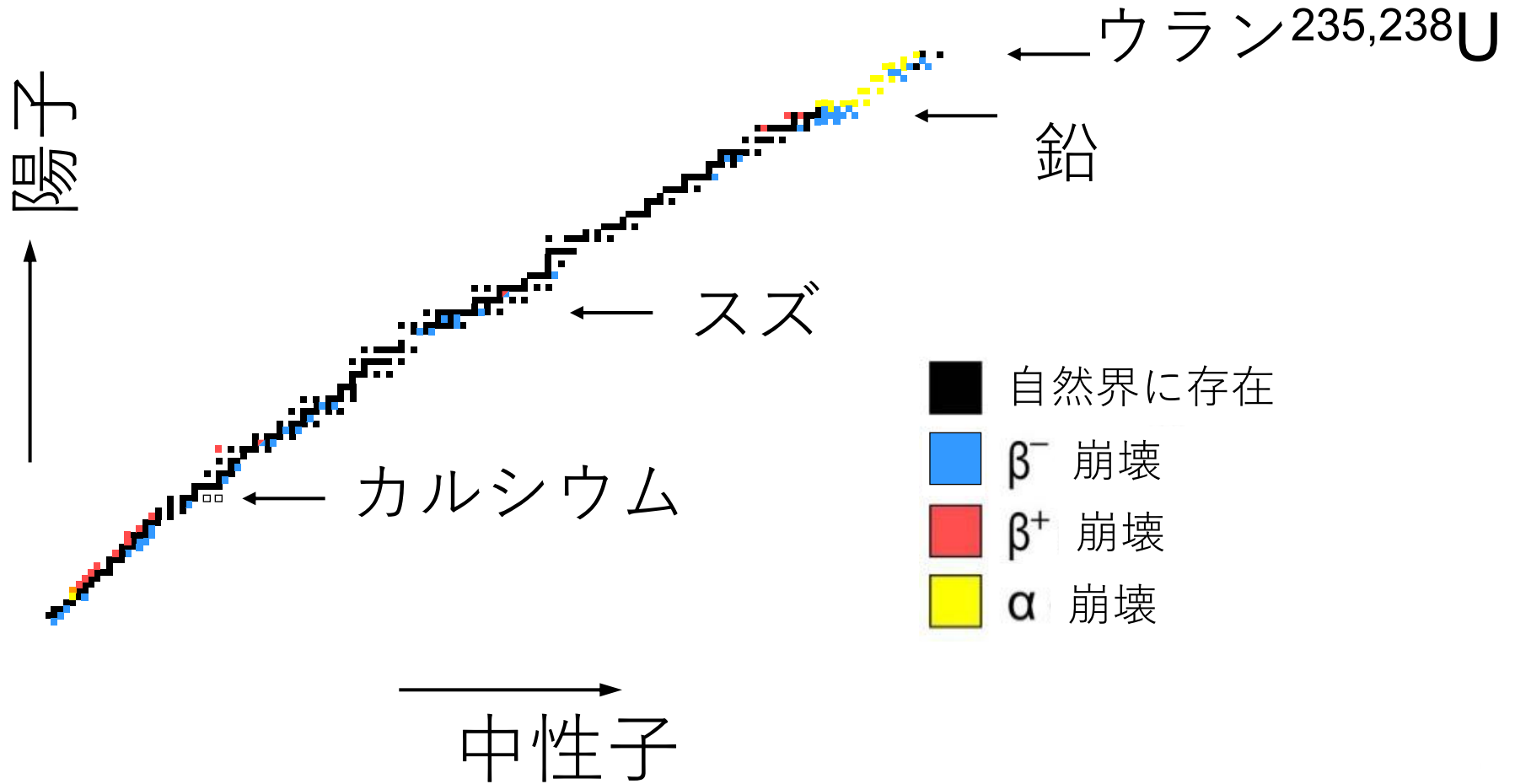
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H Hydrogen 1.008																	2 He Helium 4.003
2	3 Li Lithium 6.94	4 Be Beryllium 9.012											5 B Boron 10.81	6 C Carbon 12.01	7 N Nitrogen 14.01	8 O Oxygen 16.00	9 F Fluorine 19.00	10 Ne Neon 20.18
3	11 Na Sodium 22.99	12 Mg Magnesium 24.31											13 Al Aluminium 26.98	14 Si Silicon 28.09	15 P Phosphorus 30.97	16 S Sulfur 32.06	17 Cl Chlorine 35.45	18 Ar Argon 39.95
4	19 K Potassium 39.10	20 Ca Calcium 40.08	21 Sc Scandium 44.96	22 Ti Titanium 47.88	23 V Vanadium 50.94	24 Cr Chromium 52.00	25 Mn Manganese 54.94	26 Fe Iron 55.85	27 Co Cobalt 58.93	28 Ni Nickel 58.69	29 Cu Copper 63.55	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Gallium 69.72	32 Ge Germanium 72.64	33 As Arsenic 74.92	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.90	36 Kr Krypton 83.79
5	37 Rb Rubidium 85.47	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.91	40 Zr Zirconium 91.22	41 Nb Niobium 92.91	42 Mo Molybdenum 95.96	43 Tc Technetium 98	44 Ru Ruthenium 101.1	45 Rh Rhodium 102.9	46 Pd Palladium 106.4	47 Ag Silver 107.9	48 Cd Cadmium 112.4	49 In Indium 114.8	50 Sn Tin 118.7	51 Sb Antimony 121.8	52 Te Tellurium 127.6	53 I Iodine 126.9	54 Xe Xenon 131.1
6	55 Cs Caesium 132.9	56 Ba Barium 137.3	57 - 71 Lanthanides	72 Hf Hafnium 178.5	73 Ta Tantalum 180.9	74 W Tungsten 183.8	75 Re Rhenium 186.2	76 Os Osmium 190.2	77 Ir Iridium 192.2	78 Pt Platinum 195.1	79 Au Gold 197.0	80 Hg Mercury 200.5	81 Tl Thallium 204.38	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 209	84 Po Polonium 209	85 At Astatine 210	86 Rn Radon 222
7	87 Fr Francium 223	88 Ra Radium 226	89 - 103 Actinides	104 Rf Rutherfordium 261	105 Db Dubnium 268	106 Sg Seaborgium 272	107 Bh Bohrium 270	108 Hs Hassium 277	109 Mt Meitnerium 276	110 Ds Darmstadtium 281	111 Rg Roentgenium 280	112 Cn Copernicium 285	113 Nh Nihonium 284	114 Fl Flerovium 289	115 Mc Moscovium 288	116 Lv Livermorium 293	117 Ts Tennessee 294	118 Og Oganesson 294
8	119	120																

57 La Lanthanum	58 Ce Cerium	59 Pr Praseodymium	60 Nd Neodymium	61 Pm Promethium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutetium
89 Ac Actinium	90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkelium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelevium	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium

超重元素

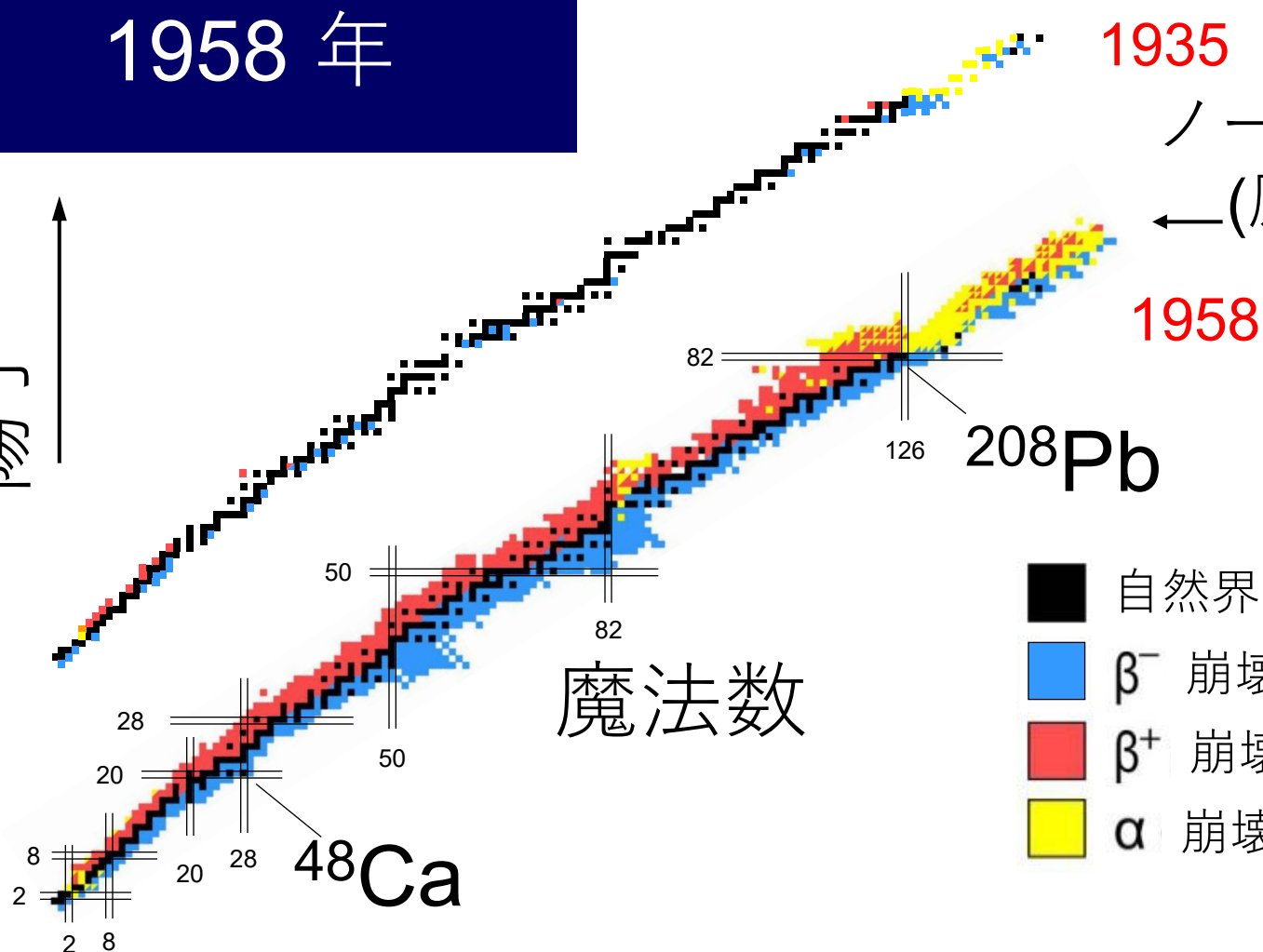
アクチノイド

1935年の核図表



1958 年

陽子



1935

ノーベリウム：No
←(原子番号102)

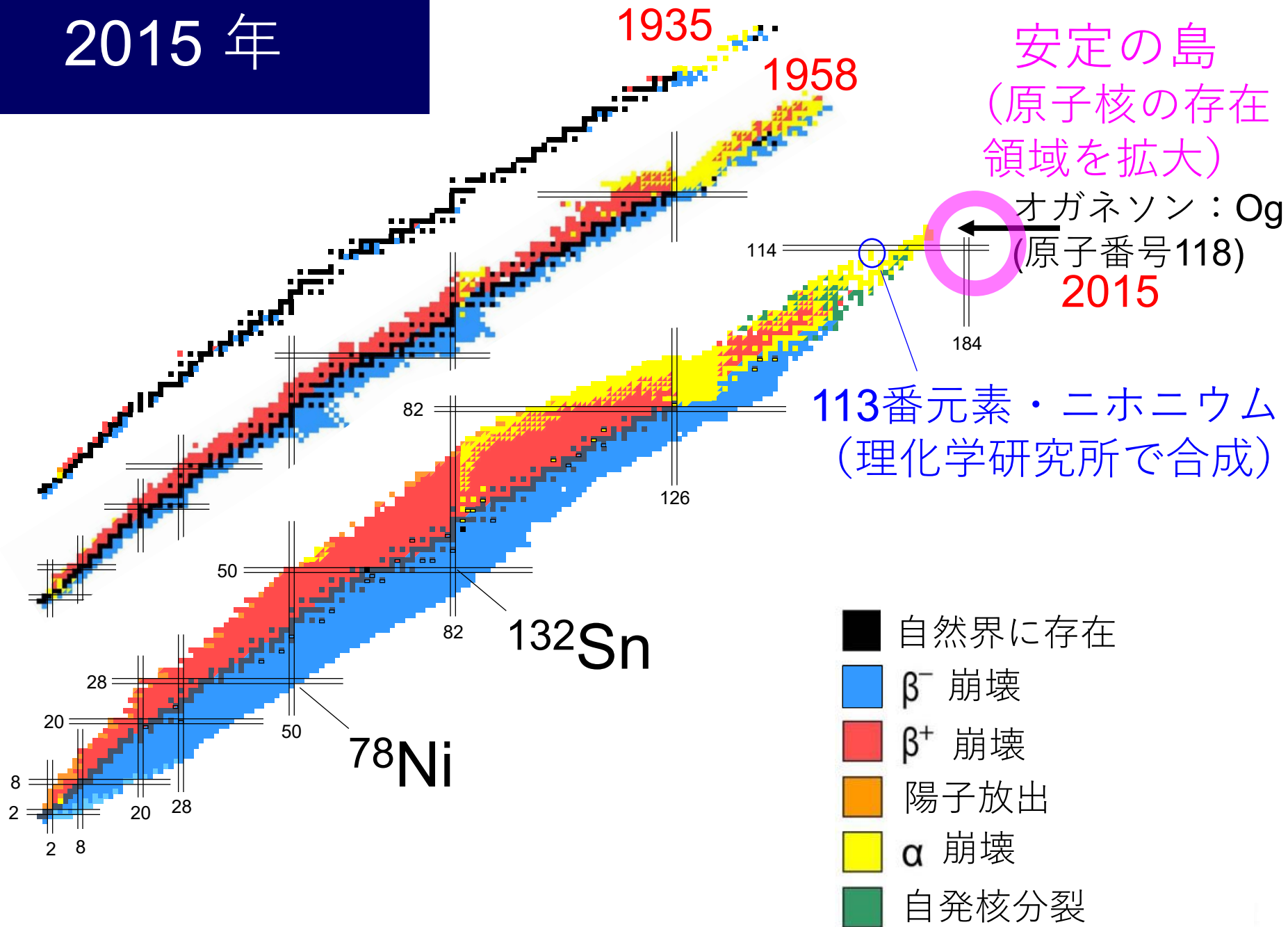
1958

魔法数

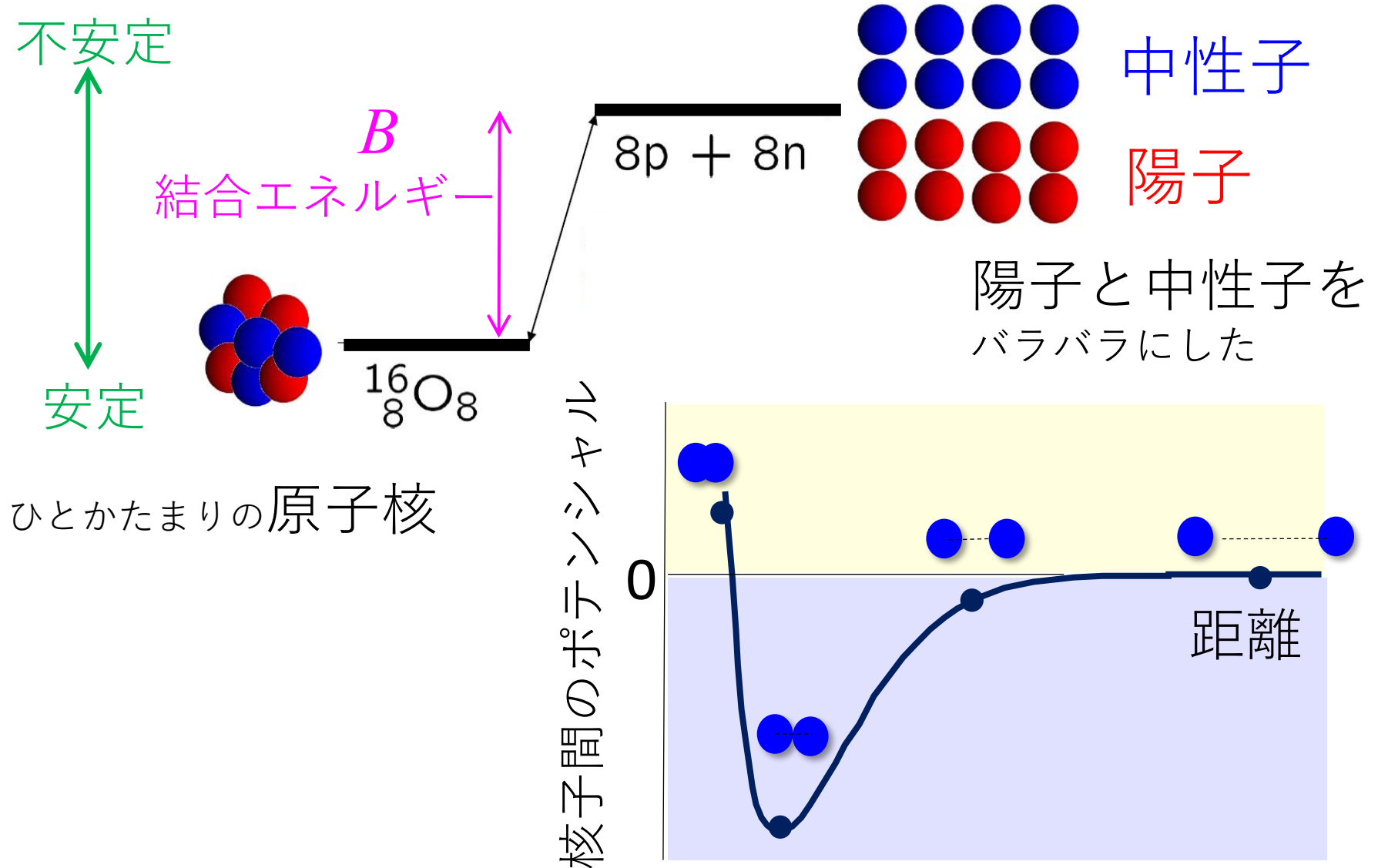
- 自然界に存在
- β^- 崩壊
- β^+ 崩壊
- α 崩壊

中性子

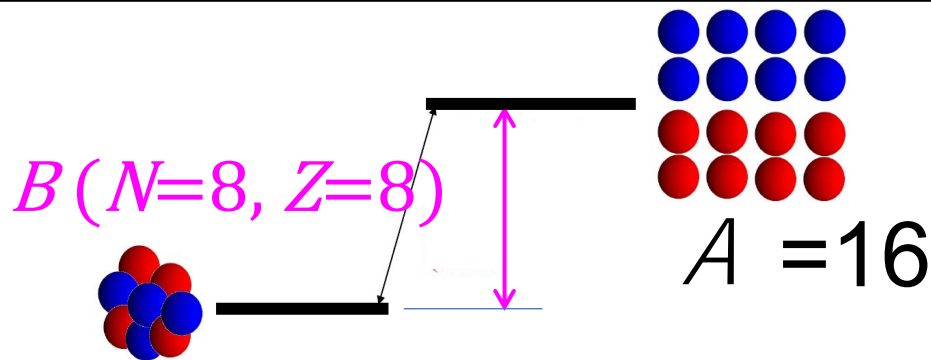
2015 年



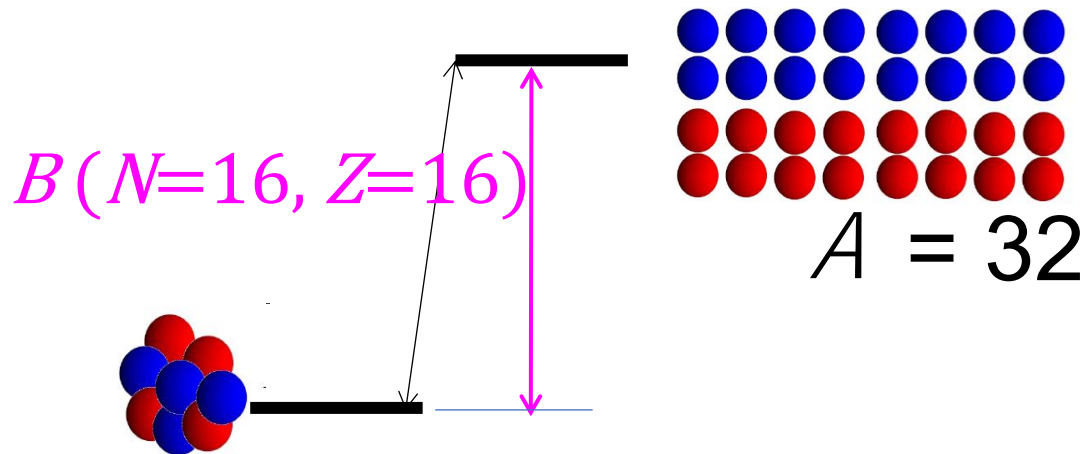
原子核の結合エネルギー



結合エネルギー B の表現



$^{16}_8\text{O}_8$ 酸素16



$^{32}_{16}\text{S}_{16}$ 硫黄32

原子核の質量

陽子の質量

中性子の質量

結合エネルギー

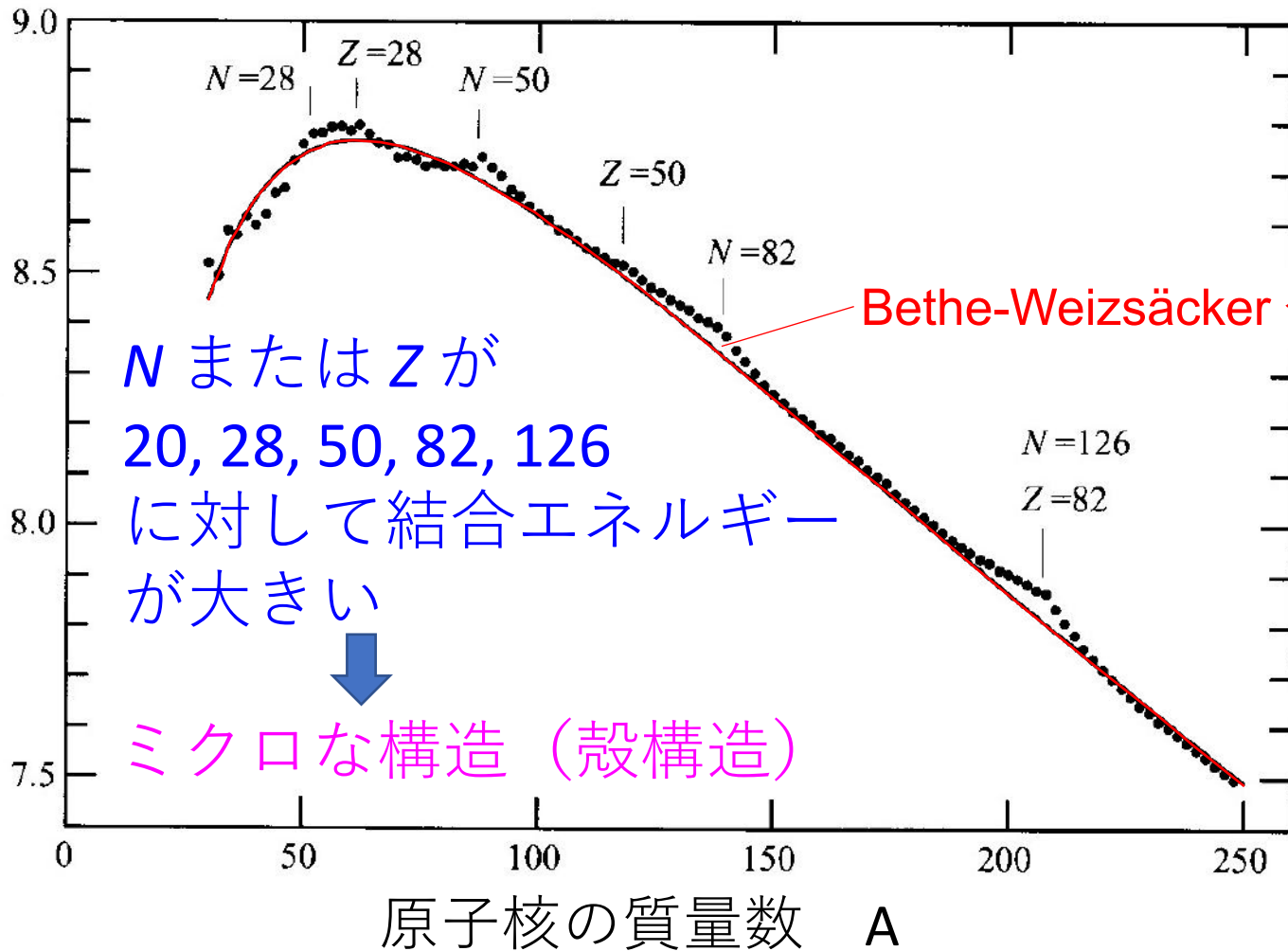
$$m(N, Z)c^2 = Zm_p c^2 + Nm_n c^2 - B(N, Z)$$

$1.6726 \times 10^{-27}(\text{kg})$

$1.6749 \times 10^{-27}(\text{kg})$

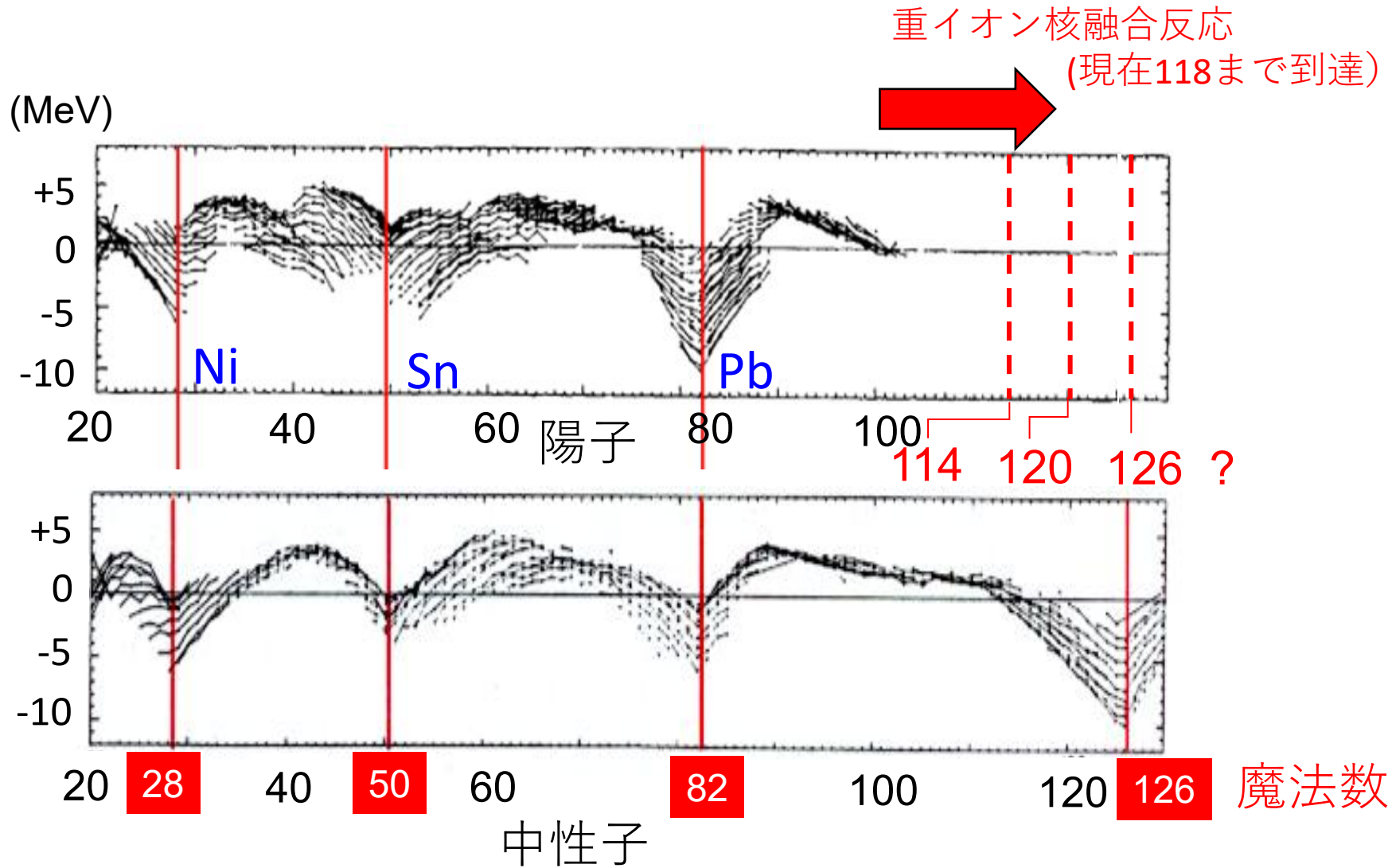
核子あたりの結合エネルギー －質量モデルと実際の原子核－

原子核の結合エネルギー B
(MeV/u)
原子核の質量数 A

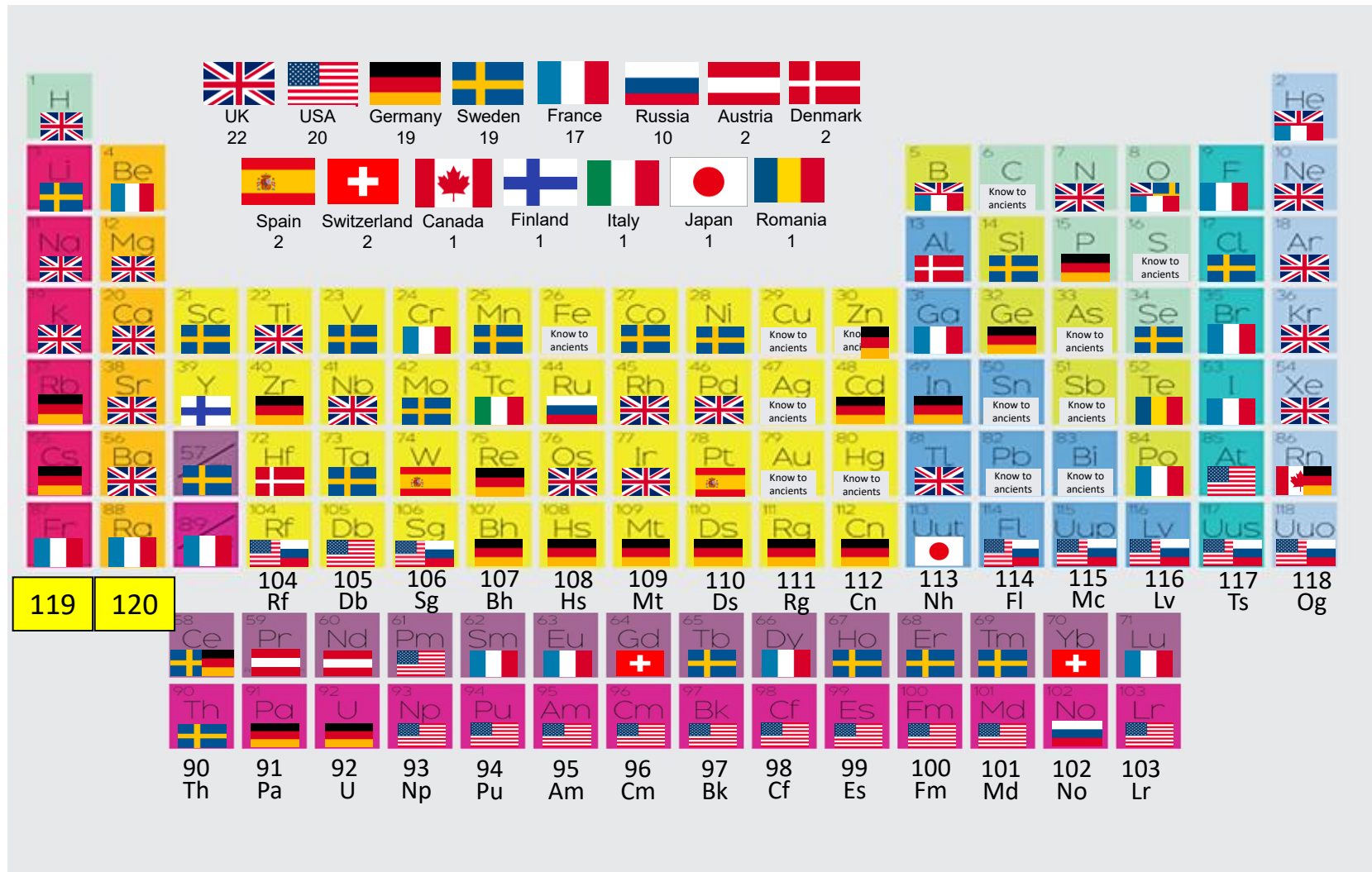


原子核の質量に見る殻構造

(実験値) - (液滴モデル質量公式)
= ミクロなエネルギー補正量



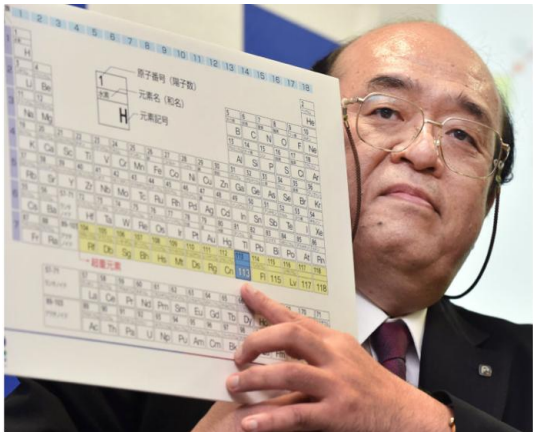
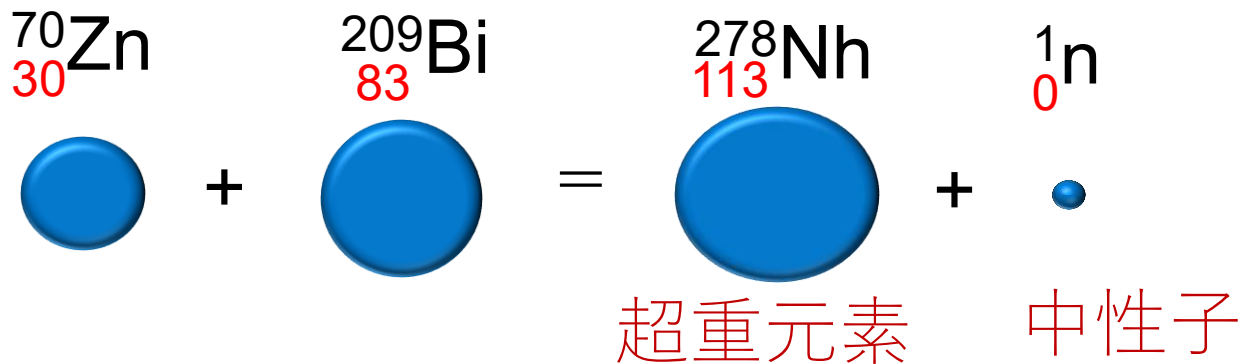
元素の周期表



第 7 周期
第 8 周期

日本における113番元素の合成

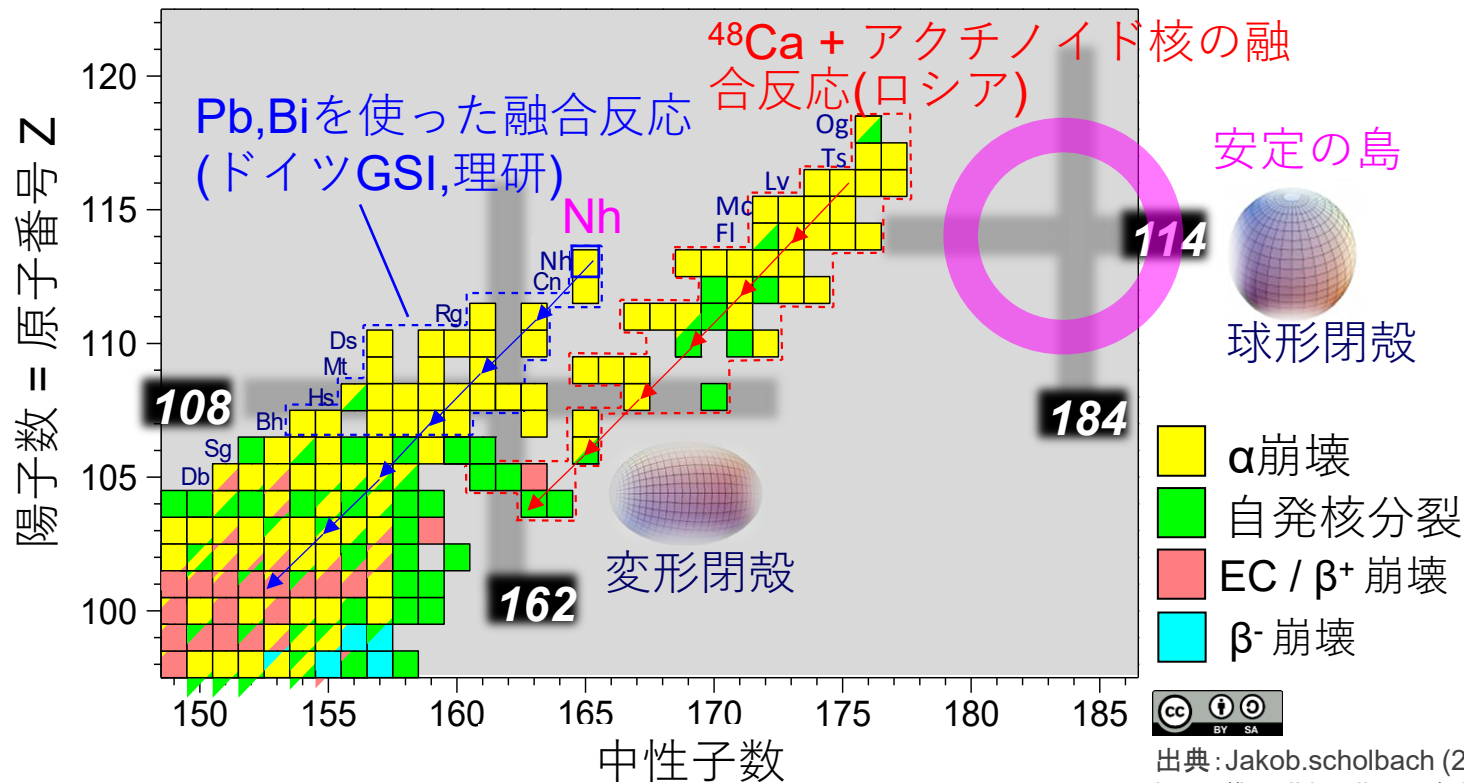
8年かけて実験し3つのニホニウム原子核を合成



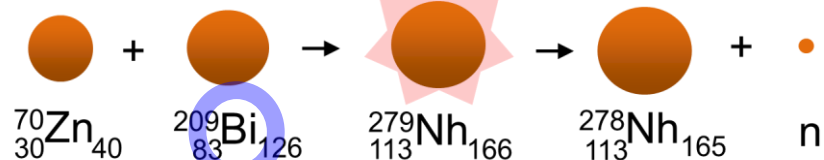
九州大学/理研 森田氏

✚出典:新元素 原子番号113番 理研が命名権獲得 (2015/12/31), 毎日新聞,
写真: 竹内幹 撮影, <https://mainichi.jp/articles/20151231/k00/00e/040/161000c>

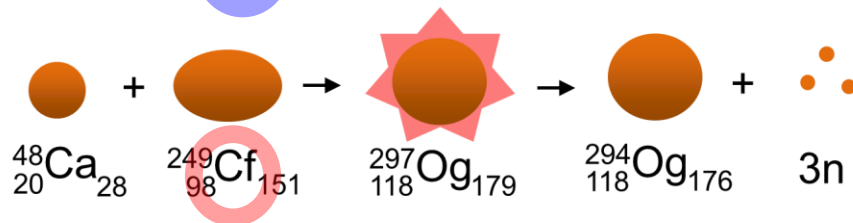
これまでに合成されている超重元素領域の原子核



冷たい核融合



熱い核融合

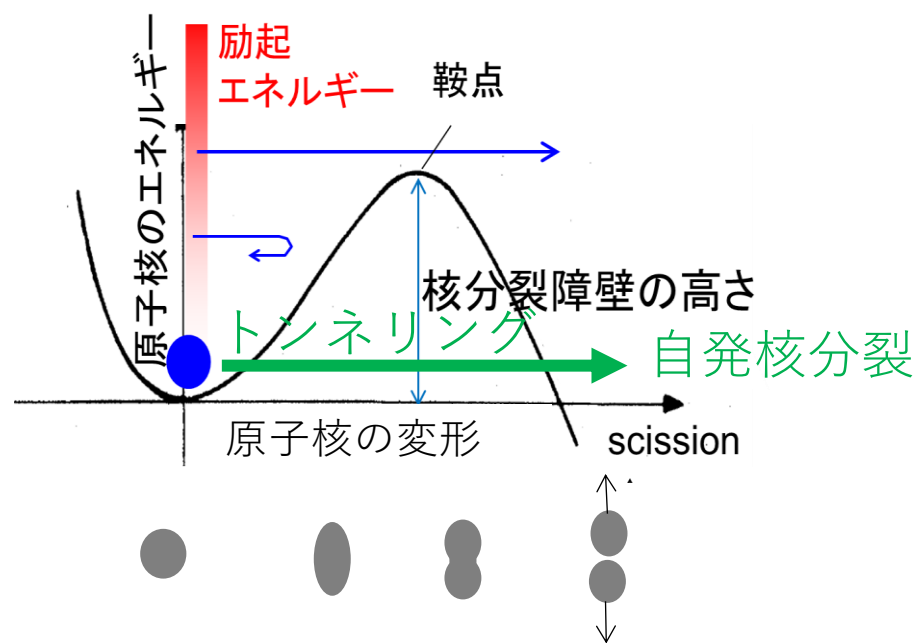
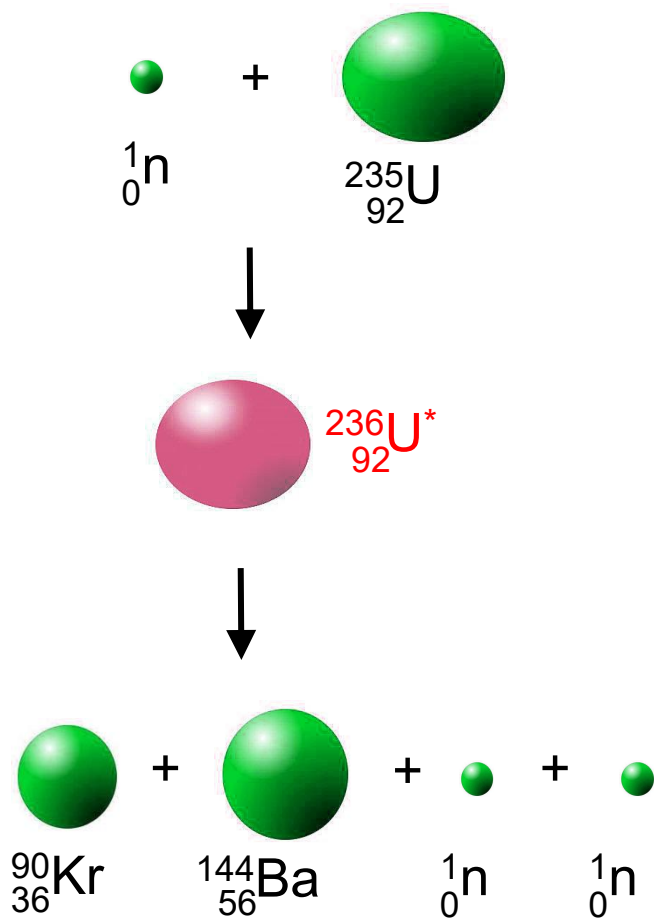


核分裂 - Fission -

ウラン（元素92）に中性子を照射し、中性子の捕獲反応と β^- 崩壊を利用して重い元素を作る研究をしていた。→ 核分裂の発見（1938年）



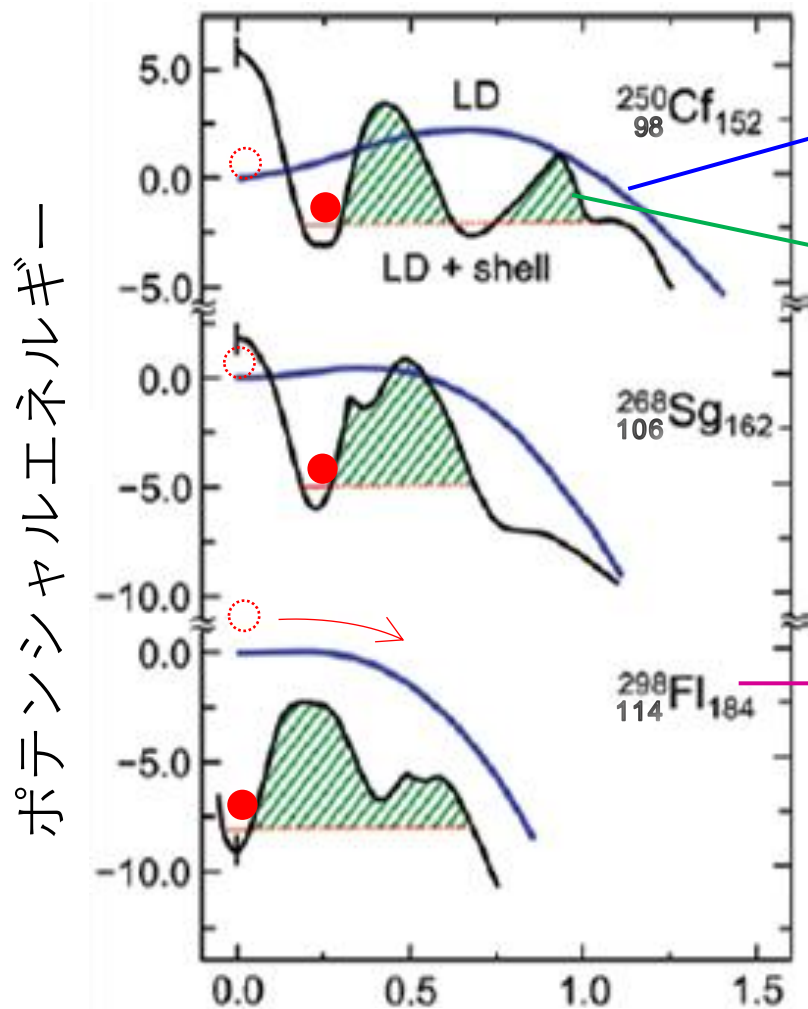
Otto Hahn and Lise Meitner



Bohr-Wheeler (1939)

超重元素が存在できる理由

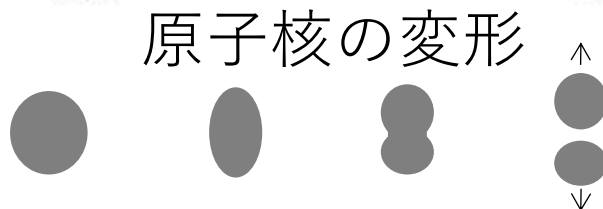
- マクロなモデルからミクロなモデルへ -



液滴モデル (古典的)

ミクロな効果を取り入れた
(現在のモデル)

安定の島の中心
(2重魔法数核)

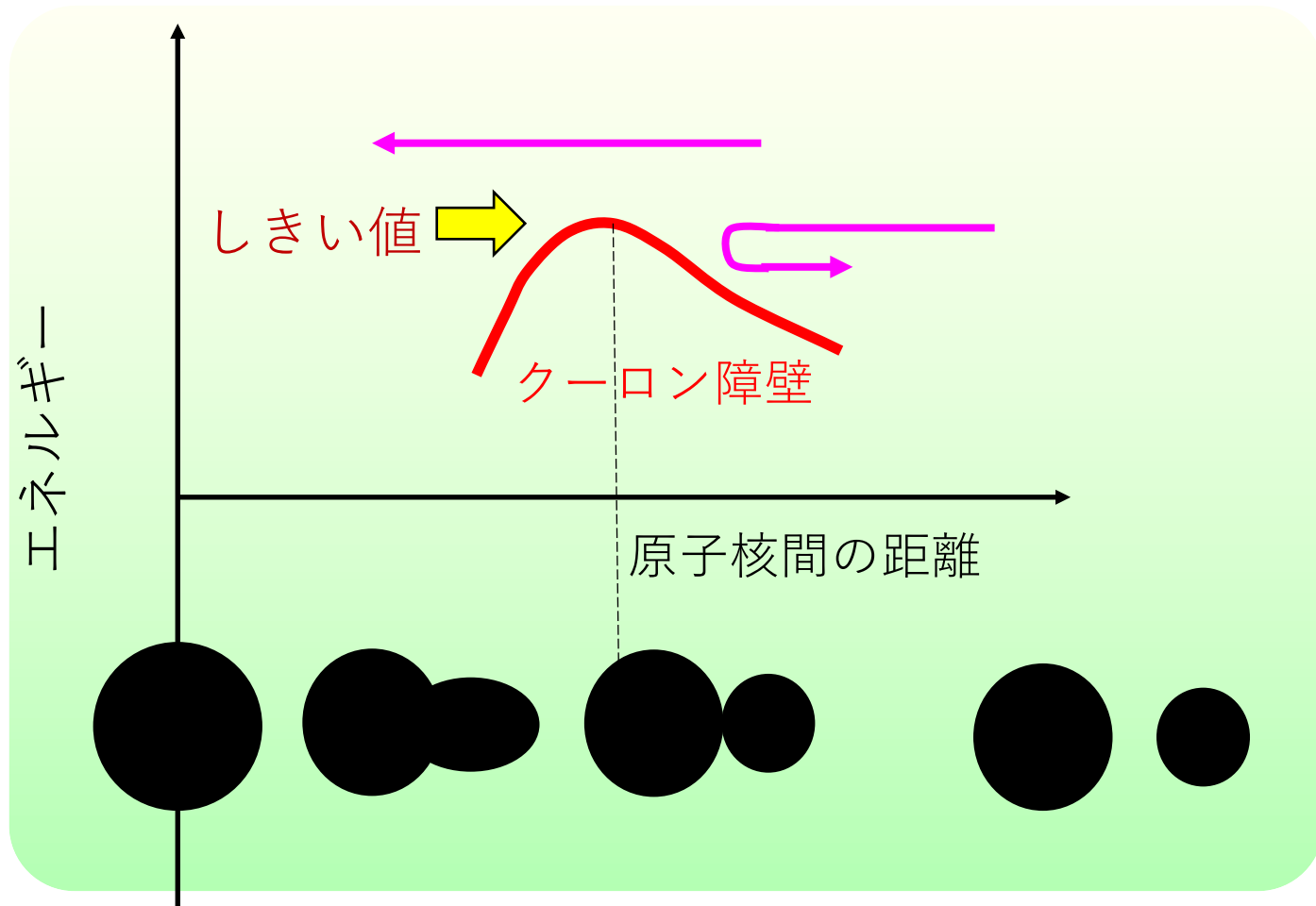


†出典: Sigurd Hofmann (2019), Synthesis and properties of isotopes of the transactinides, p. 891, Fig. 7, De Gruyter Brill, <https://doi.org/10.1515/ract-2019-3104>

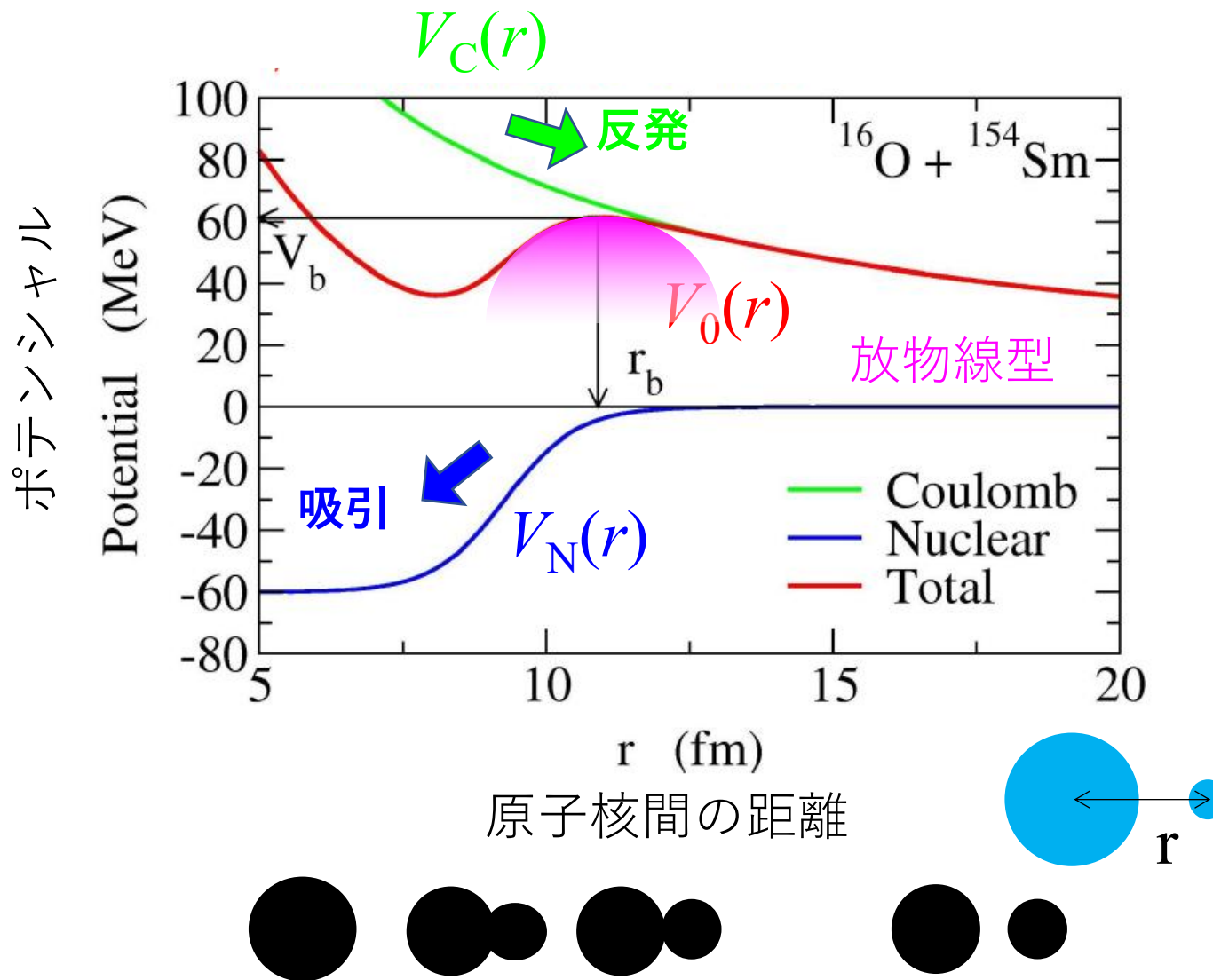
原典: Cwiok, S., Sobiczewski, A.: Potential energy and fission barriers of superheavy nuclei calculated in multidimensional deformation space. Z. Phys. A 342, 203 (1992) and Sobiczewski, A.: private communication (2017).

重イオン核融合反応

100番元素より重い原子核は、重イオンビームを用いた**核融合反応**で合成できる。反応させるには、原子核どうしのクーロン反発力よりも高い運動エネルギーで衝突させる必要がある。

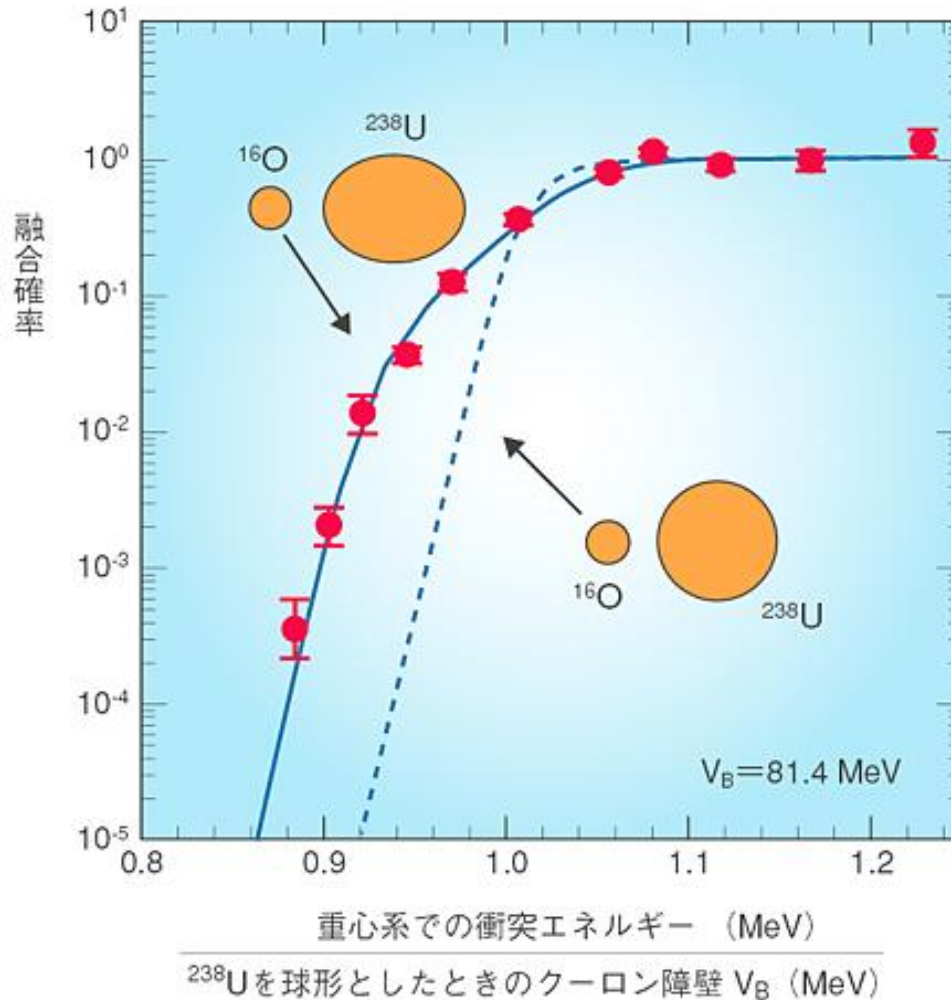


原子核どうしの間に働くクーロン障壁



融合確率

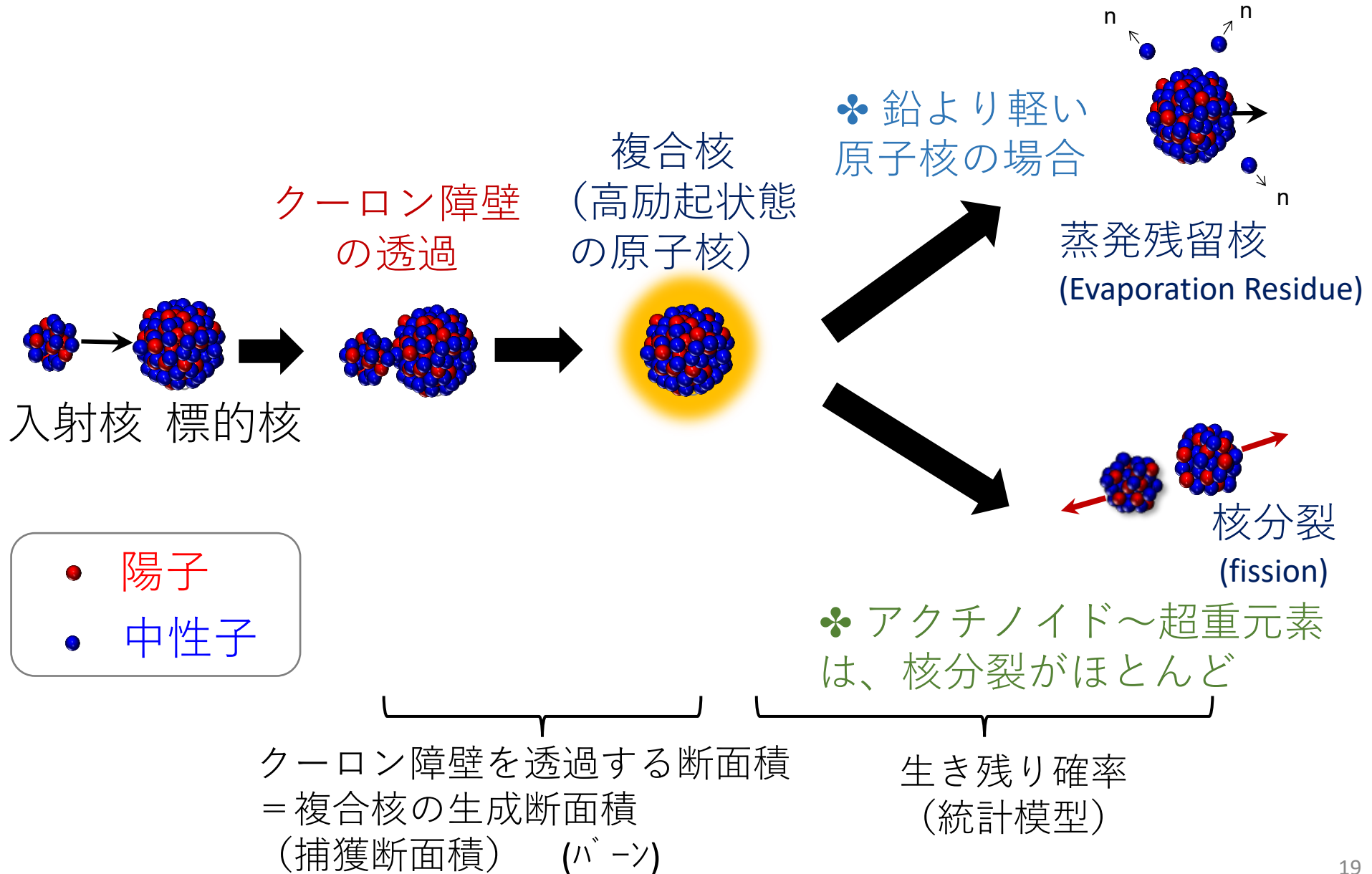
—球形核と変形核の違い—



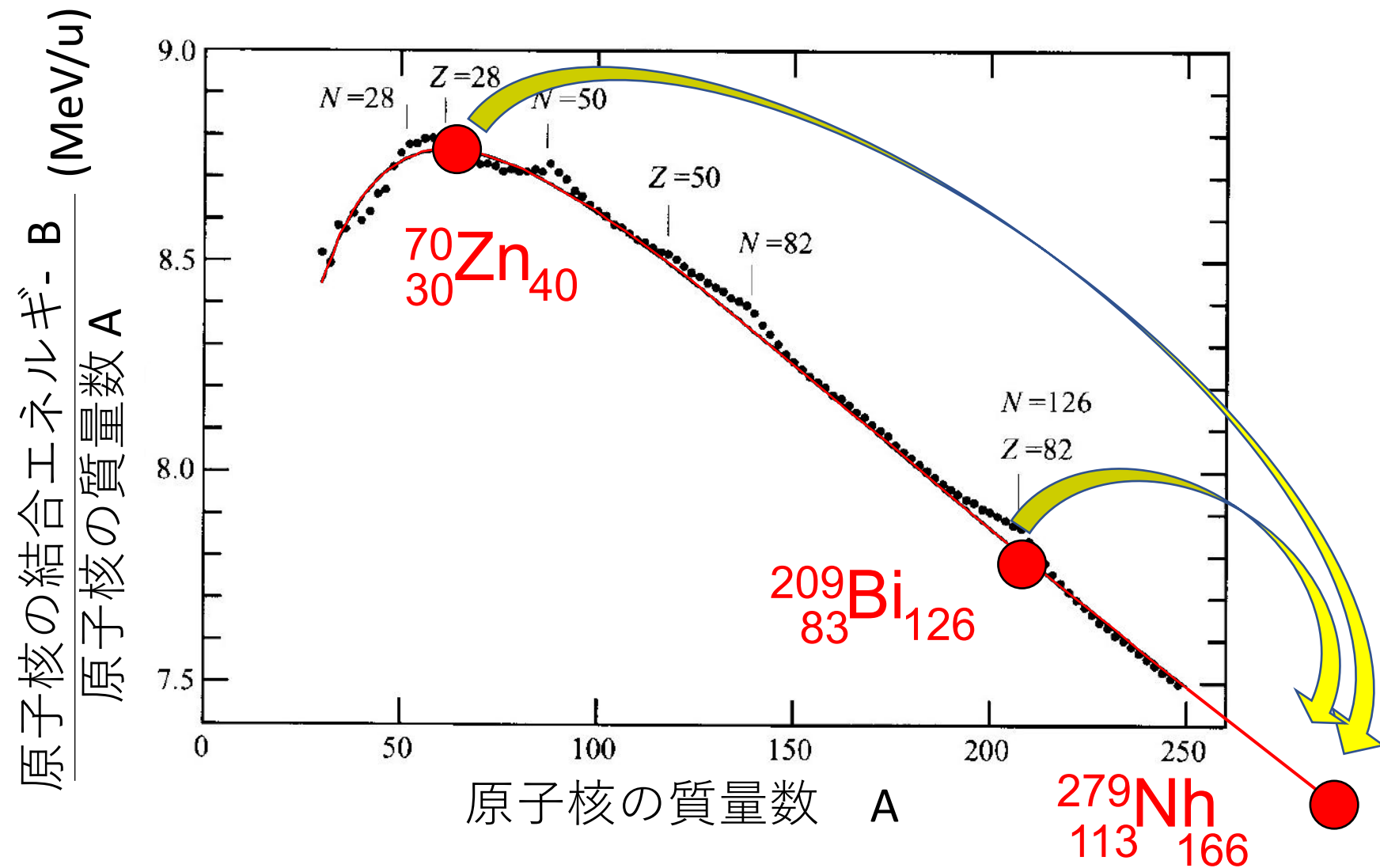
原子核が変形していると、低いエネルギーでも核融合反応が起こる。

→ ^{238}U 原子核が変形していることの証拠でもある。

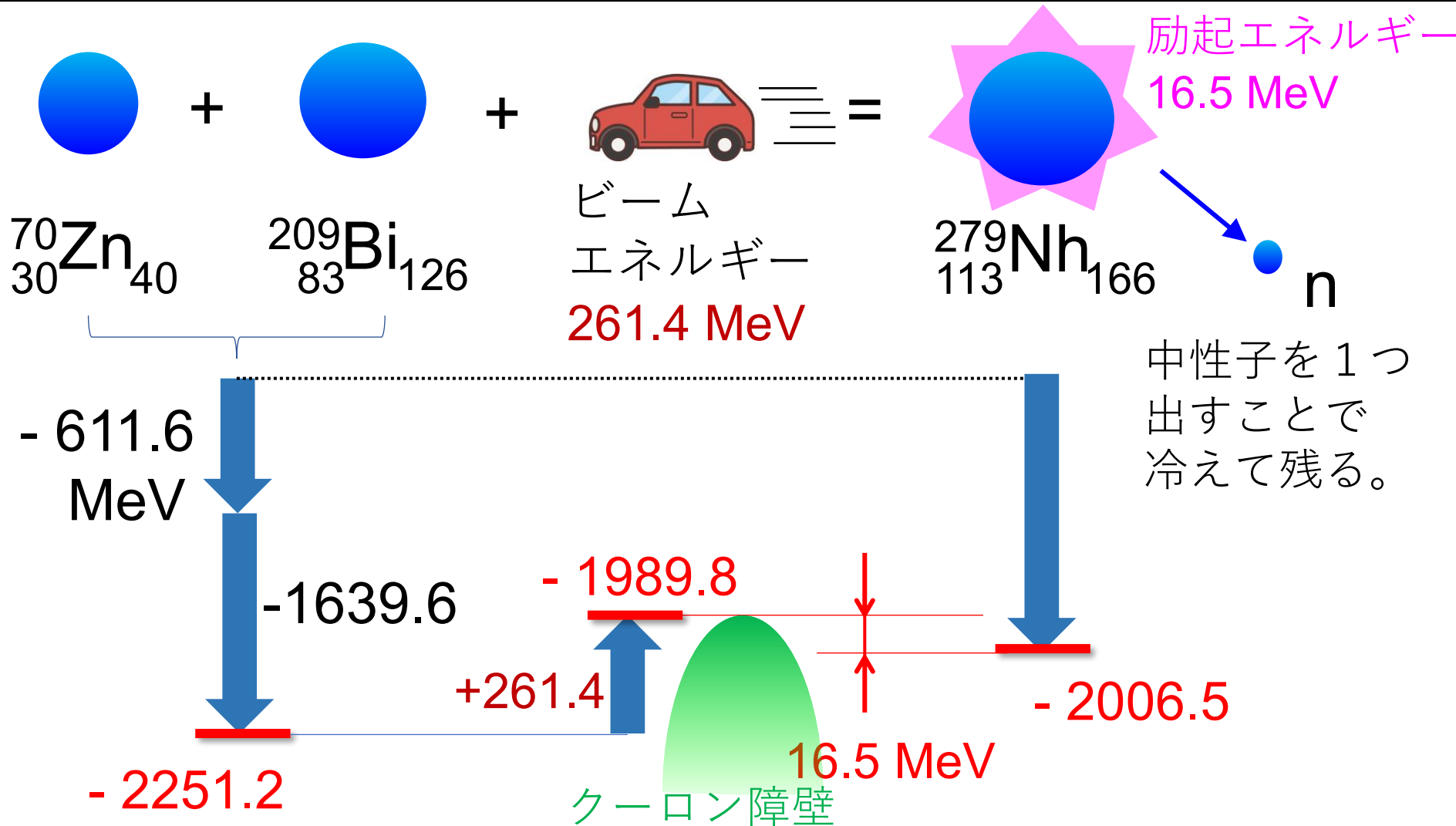
元素合成の2過程



超重元素の合成 (113番元素)

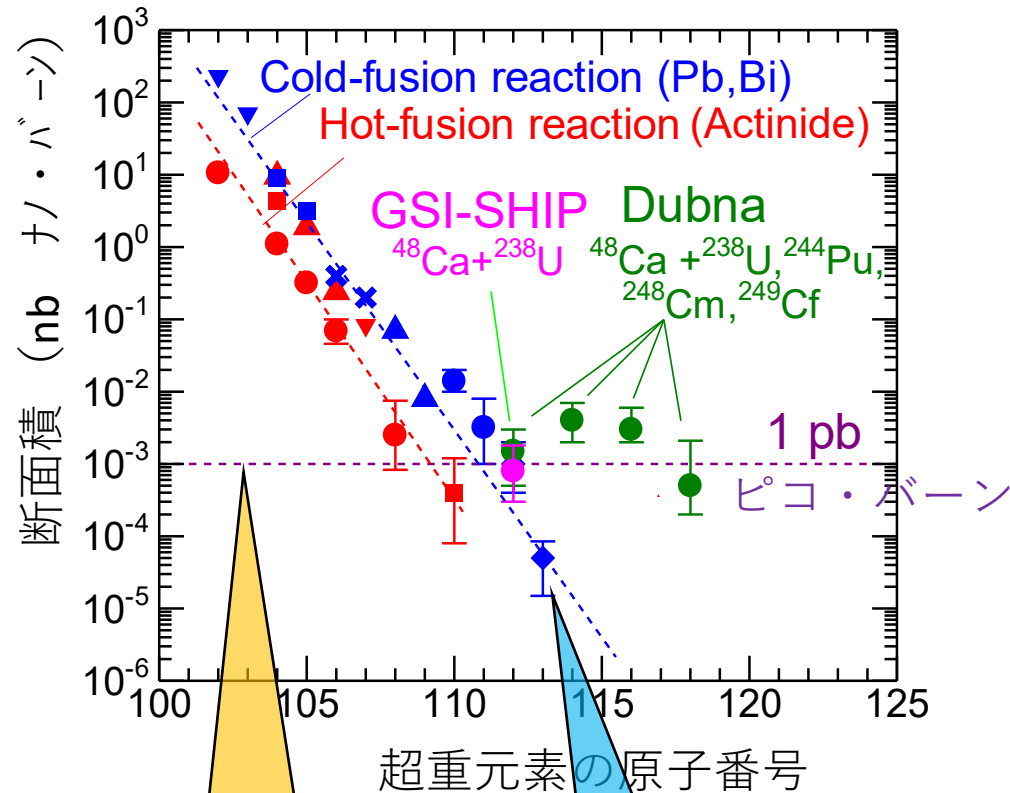


113番元素合成のエネルギー



融合反応のQ値 $Q_{\text{fusion}} = -2251.2 - (-2006.5) = -244.7 \text{ MeV}$

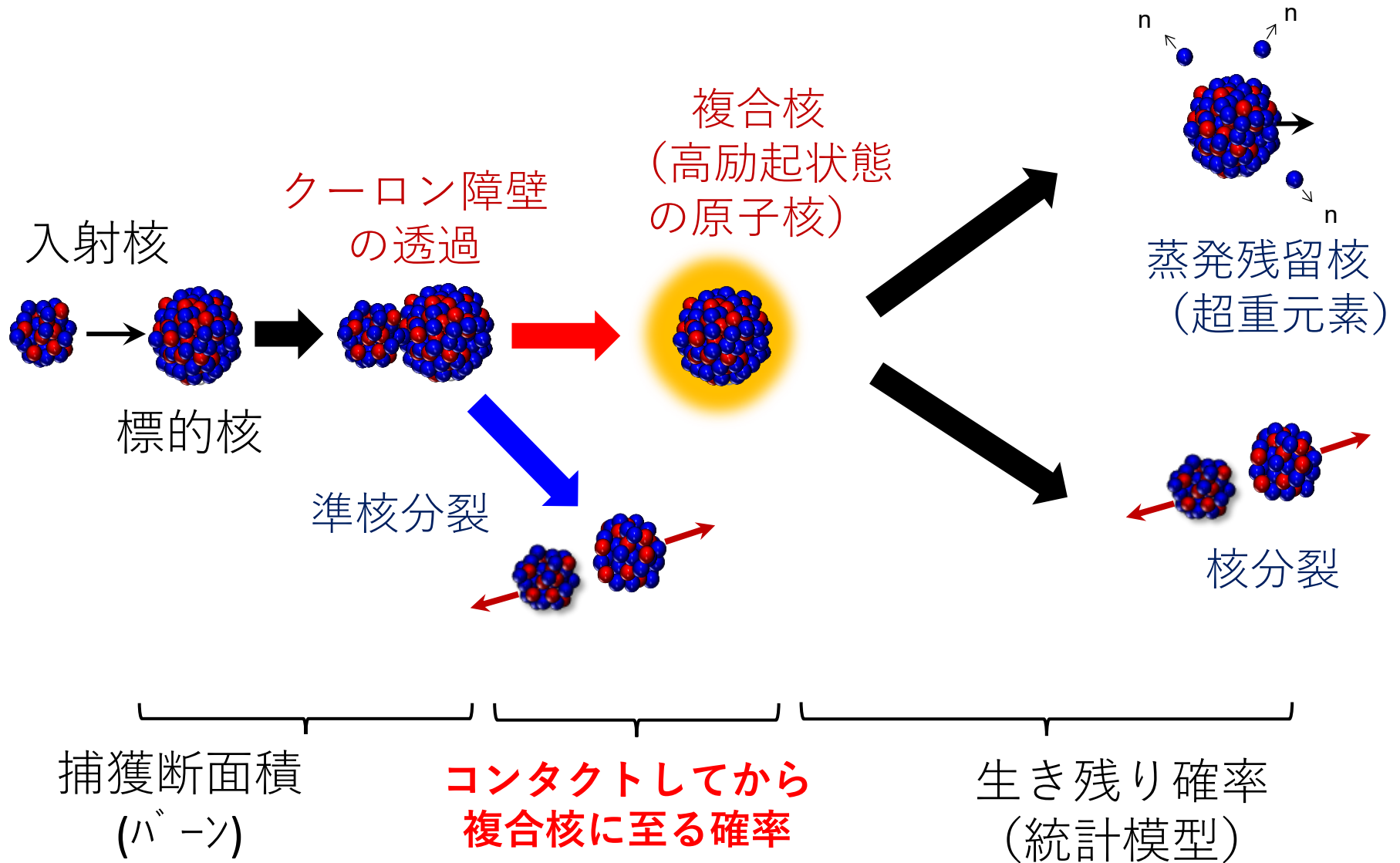
超重元素を合成する断面積



1 ~ 2 週間の
実験で
1 個生成できる

理研・113番元素

超重元素合成の3つの過程（重い反応系）

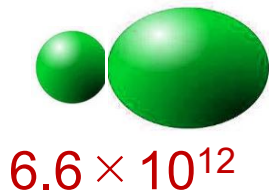


超重元素合成の例

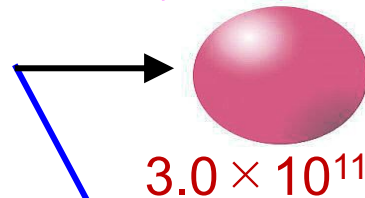
超重元素合成の 3 ステップ



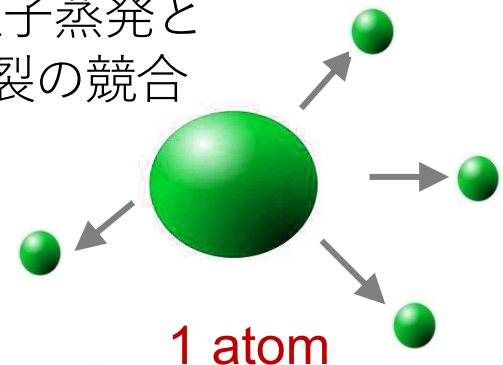
(1) クーロン障壁を
超えてコンタクト



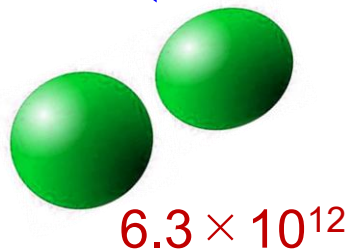
(2) 融合過程
複合核 CN



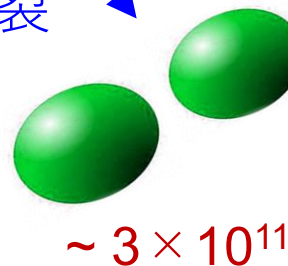
(3) 中性子蒸発と
核分裂の競合



準核分裂



核分裂

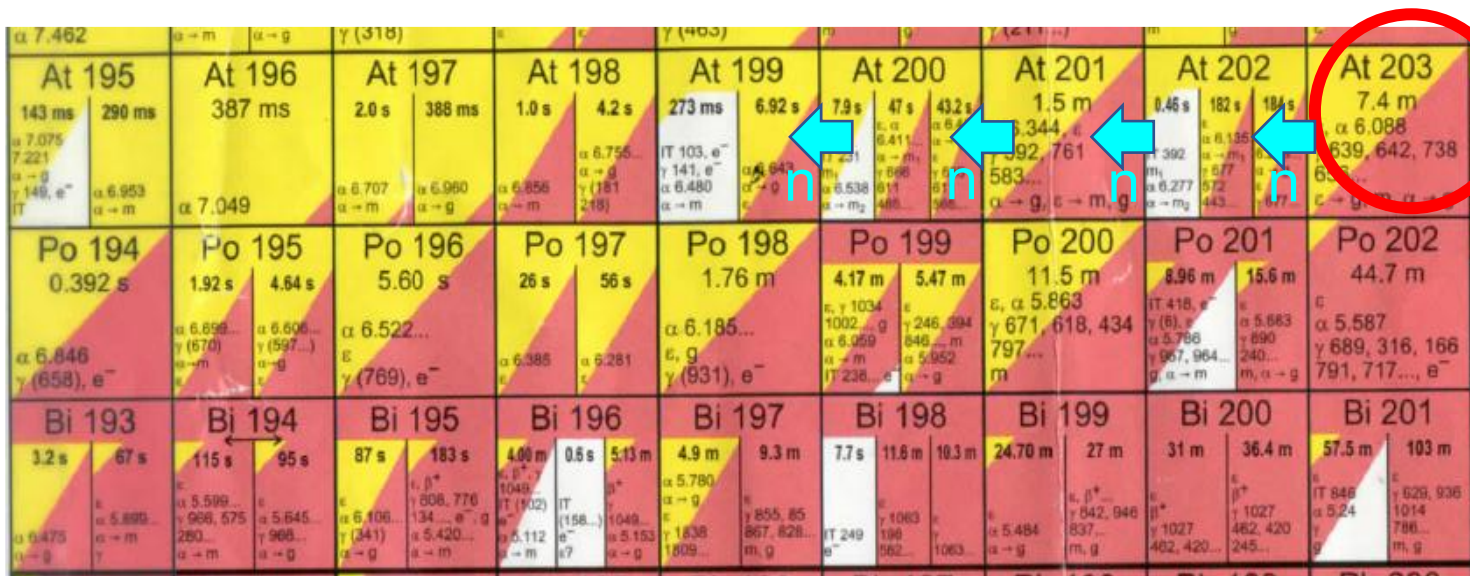
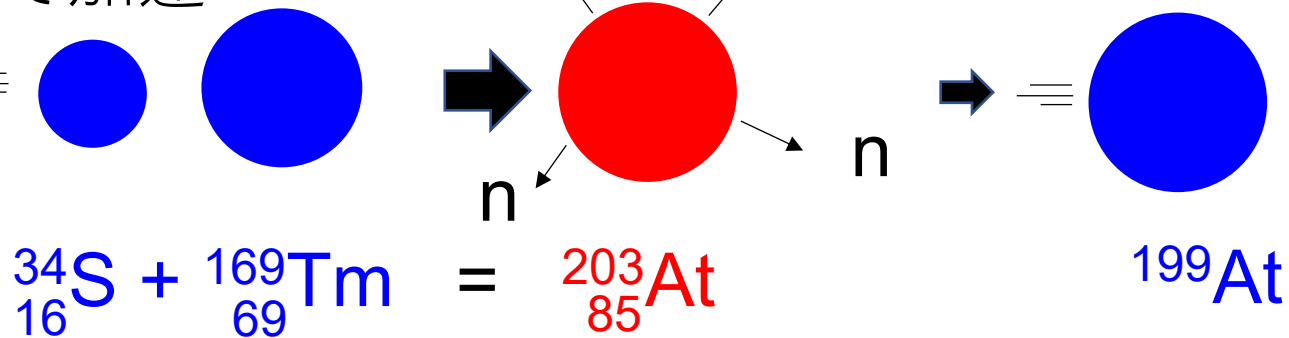


実習で学ぶ反応


原子力機構 タンデムで加速

複合核

蒸発残留核



複合核

 α 崩壊

EC/ β^+ 崩壊

まとめ

- ❖ 原子核の内部構造を取り入れない古典的なモデルでは、**104番元素**までしか存在できない。しかし、内部構造によって核分裂障壁が出現するため、**超重元素**が存在できる。
- ❖ 超重元素は、核融合反応で合成される。原子核どうしを融合させるには、クーロン反発力に打ち勝つ運動エネルギーで衝突させる必要がある。
- ❖ 原子核どうしが融合すると、高励起状態の複合核ができる。中性子をいくつか出すことで冷えて固まり、蒸発残留核として残ったものが超重元素になる。
- ❖ 超重元素になると、（１）原子核どうしが融合しにくくなる。また、（２）複合核が核分裂で容易に壊れてしまうため、作るのがむずかしくなる。