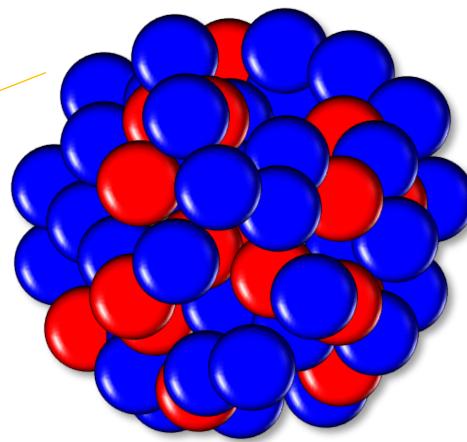
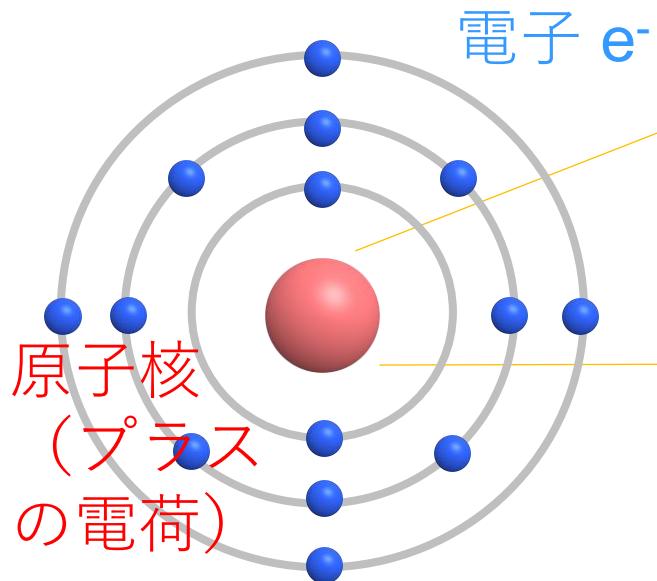


超重元素と重イオン核融合反応

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



中性子 n (電気的に中性) 陽子 p (電気的に中性)

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?

ウラン235

$^{235}_{92}\text{U}^{143}$

質量数 $A = \text{陽子数 } Z + \text{中性子数 } N$

陽子の数 = 原子番号

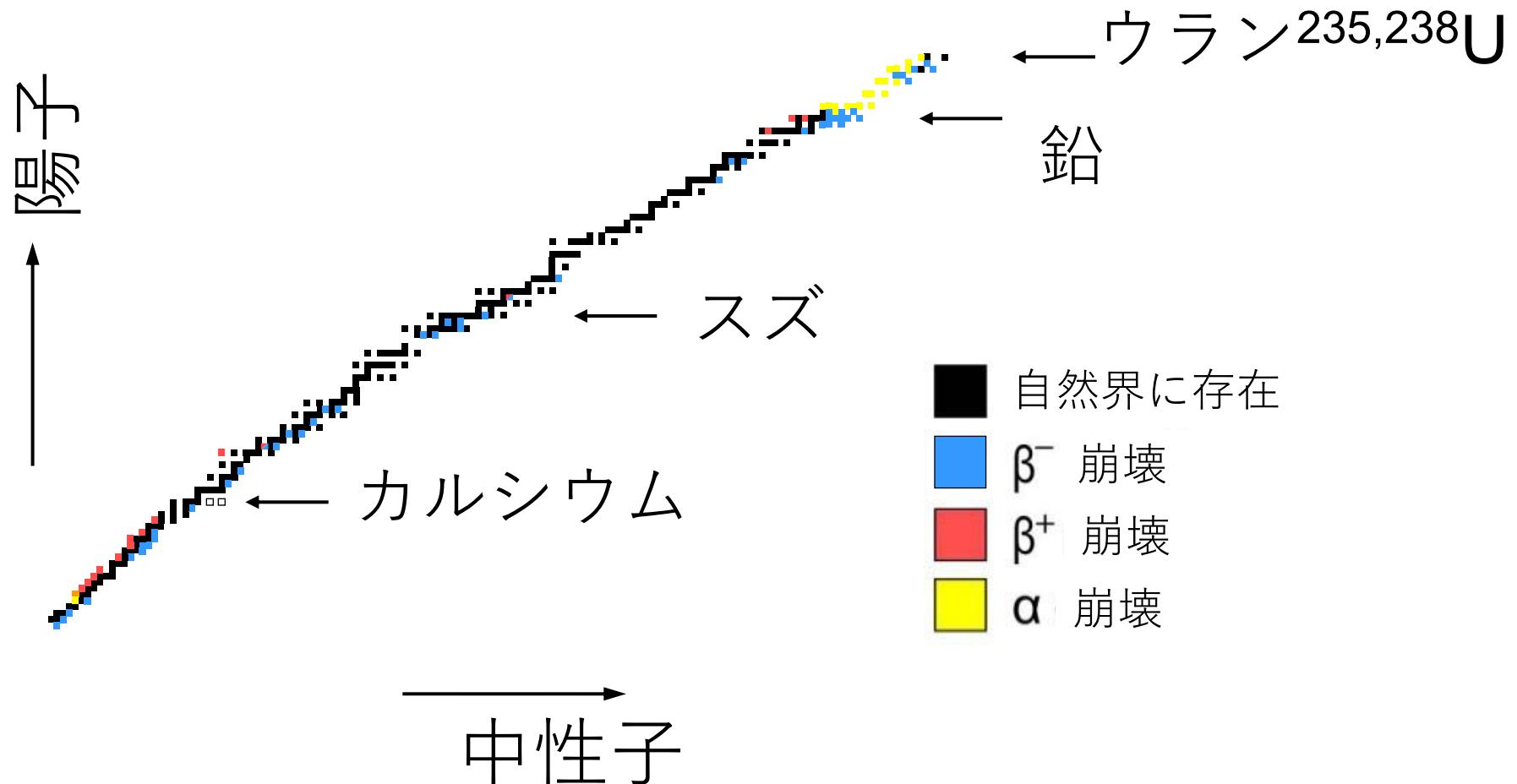
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	H Hydrogen 1.008																He Helium 4.003		
2	Li Lithium 6.94	Be Beryllium 9.012															Ne Neon 20.18		
3	Na Sodium 22.99	Mg Magnesium 24.31																	
4	K Potassium 39.10	Ca Calcium 40.08	Sc Scandium 44.96	Ti Titanium 47.88	V Vanadium 50.94	Cr Chromium 52.00	Mn Manganese 54.94	Fe Iron 55.85	Co Cobalt 58.93	Ni Nickel 58.69	Cu Copper 63.55	Zn Zinc 65.39	Al Aluminum 26.98	Si Silicon 28.09	P Phosphorus 30.97	S Sulfur 32.06	Cl Chlorine 35.45	Ar Argon 39.95	
5	Rb Rubidium 85.47	Sr Strontium 87.62	Y Yttrium 88.91	Zr Zirconium 91.22	Nb Niobium 92.91	Mo Molybdenum 95.96	Tc Technetium 98	Ru Ruthenium 101.1	Rh Rhodium 102.9	Pd Palladium 106.4	Ag Silver 107.9	Cd Cadmium 112.4	Ga Gallium 69.72	Ge Germanium 72.64	As Arsenic 74.92	Se Selenium 78.96	Br Bromine 79.90	Kr Krypton 83.79	
6	Cs Caesium 132.9	Ba Barium 137.3	57 - 71 Lanthanides		Hf Hafnium 178.5	Ta Tantalum 180.9	W Tungsten 183.9	Re Rhenium 186.2	Os Osmium 190.2	Ir Iridium 192.2	Pt Platinum 195.1	Au Gold 197.0	Hg Mercury 200.5	Tl Thallium 204.38	Pb Lead 207.2	Bi Bismuth 209.0	Po Polonium 209	At Astatine 210	Rn Radon 222
7	Fr Francium 223	Ra Radium 226	89 - 103 Actinides		104 Rutherfordium 265	105 Dubnium 268	106 Seaborgium 272	107 Bohrium 270	108 Hassium 277	109 Meitnerium 276	110 Darmstadtium 281	111 Roentgenium 280	112 Copernicium 285	Nh Nihonium 284	Fl Flerovium 289	Mc Moscovium 288	Lv Livermorium 293	Ts Tennessine 294	Og Oganesson 294
8			119 120																

超重元素

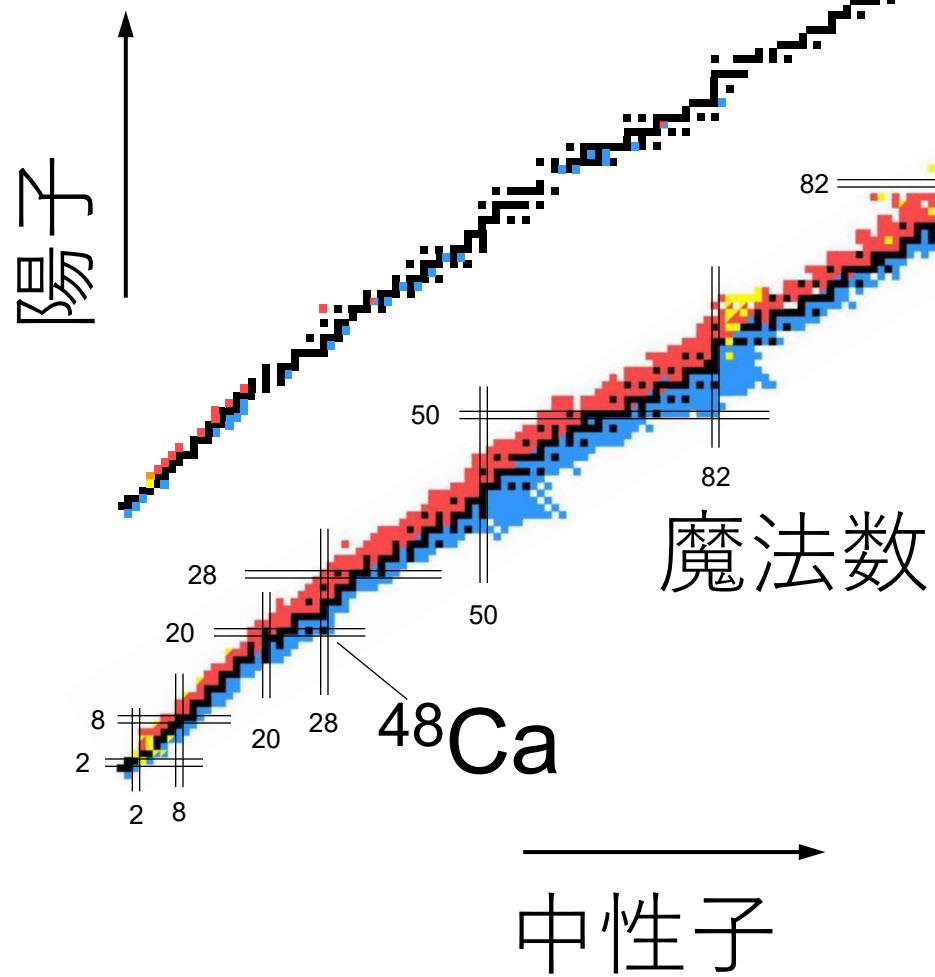
57 La Lanthanum	58 Ce Cerium	59 Pr Praseodymium	60 Nd Neodymium	61 Pm Promethium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutetium
89 Ac Actinium	90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	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

アクチノイド

1935年の核図表



1958 年



1935

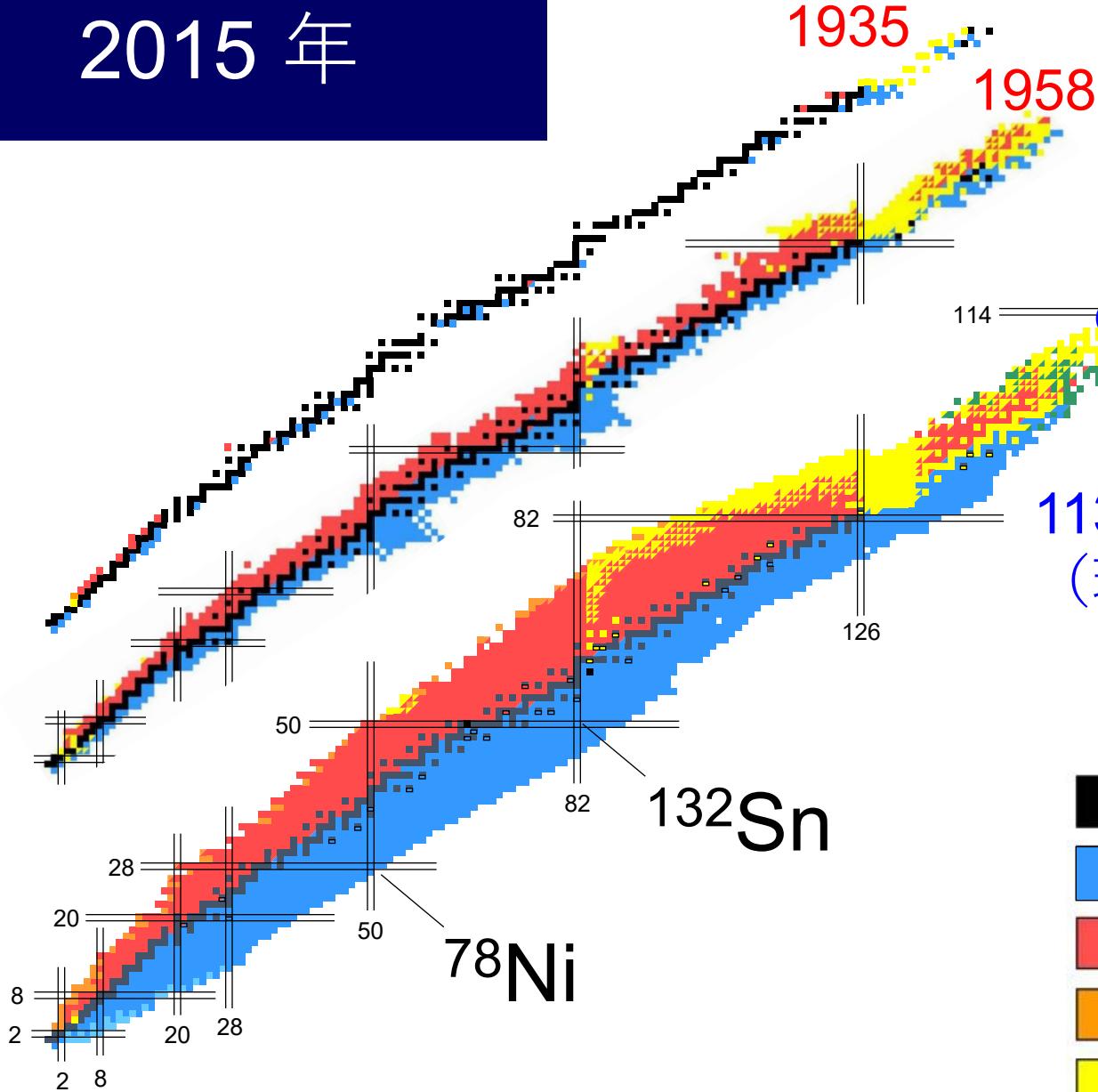
ノーベリウム : No
(原子番号 102)

1958

^{208}Pb

- 黒：自然界に存在
- 青： β^- 崩壊
- 赤： β^+ 崩壊
- 黄： α 崩壊

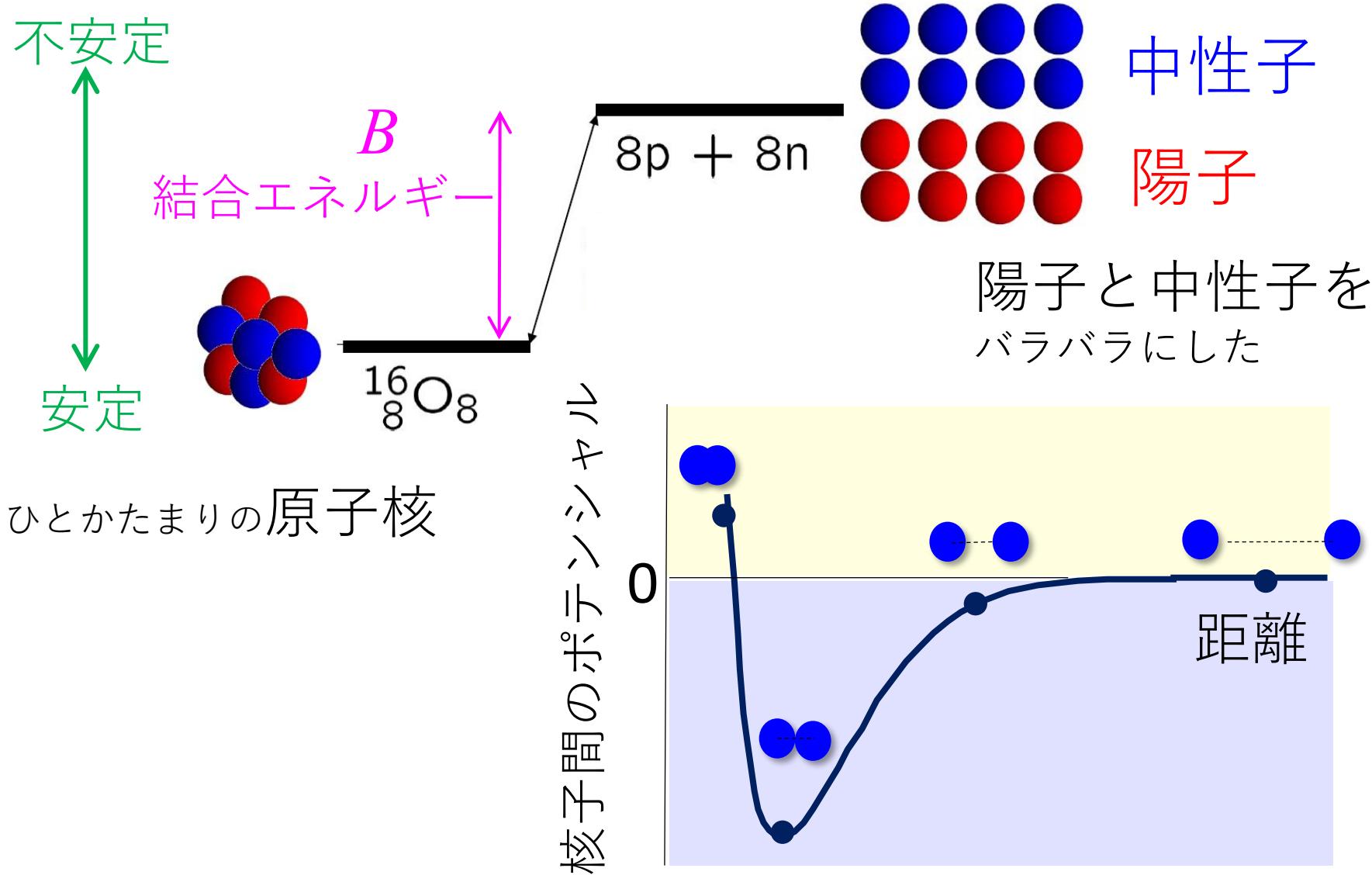
2015 年



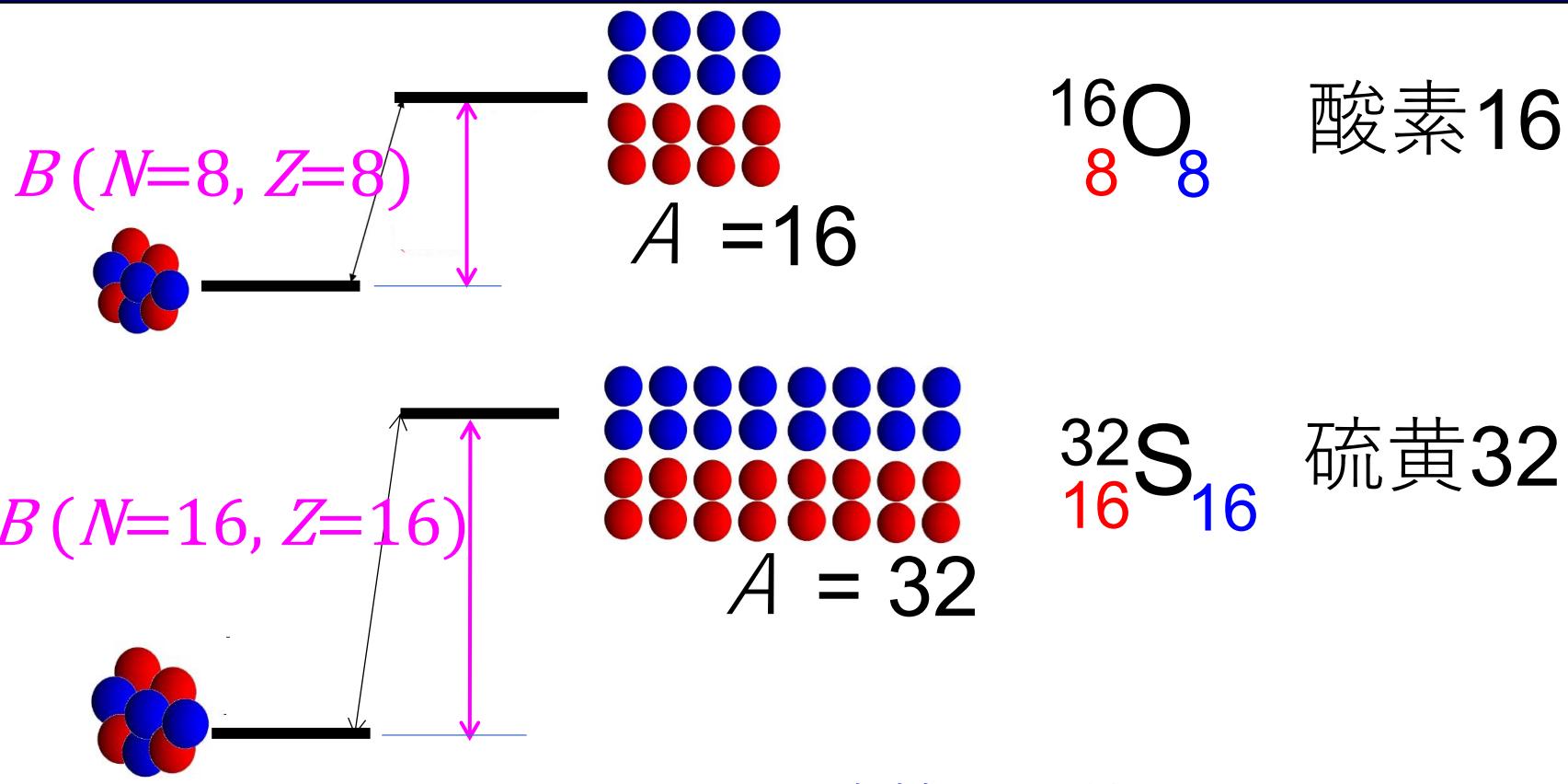
安定の島
(原子核の存在
領域を拡大)
オガネソン : Og
(原子番号118)
2015
113番元素・ニホニウム
(理化学研究所で合成)

- 自然界に存在
- β^- 崩壊
- β^+ 崩壊
- 陽子放出
- α 崩壊
- 自発核分裂

原子核の結合エネルギー



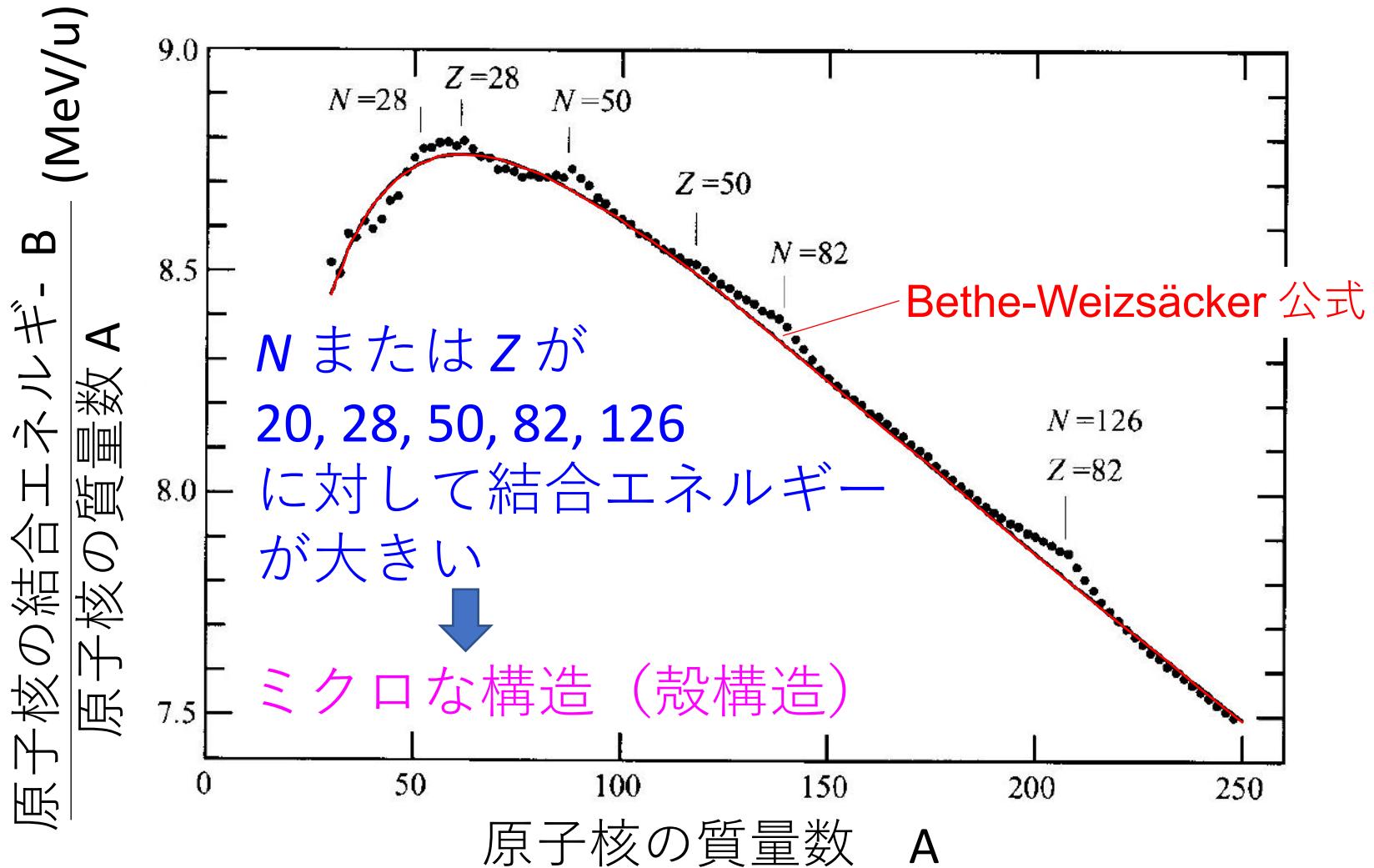
結合エネルギー— B の表現



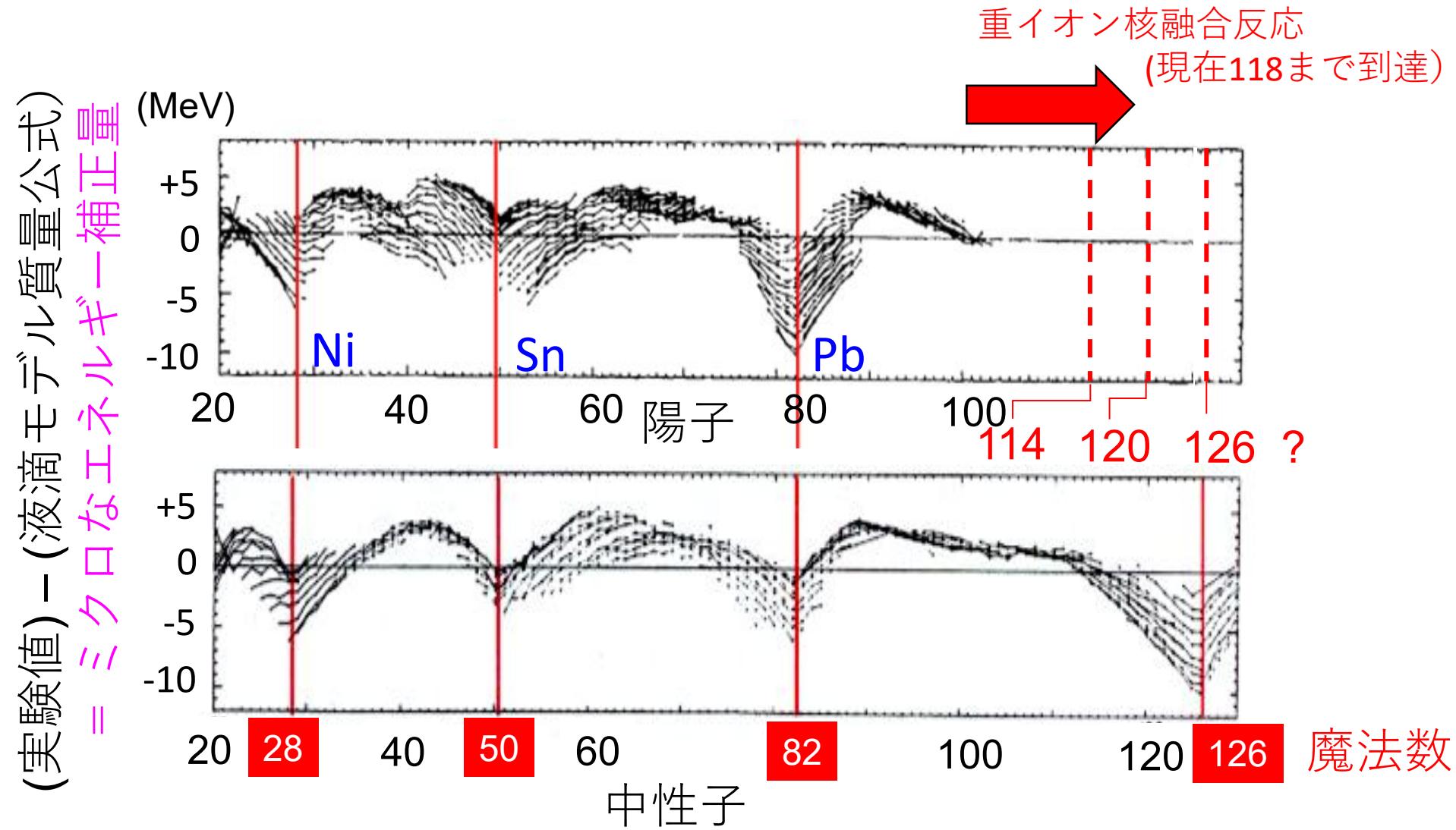
$$m(N, Z)c^2 = Z m_p c^2 + N m_n c^2 - B(N, Z)$$

$1.6726 \times 10^{-27}(\text{kg})$ $1.6749 \times 10^{-27}(\text{kg})$

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 -



原子核の質量に見る殻構造



*出典: Mathieu Ferraton (2011), Collisions profondément inélastiques entre ions lourds auprès du Tandem d'Orsay & Spectroscopie gamma des noyaux exotiques riches en neutrons de la couche fp avec le multi-détecteur germanium ORGAM, p. 14, Fig. 2, HAL open science

元素の周期表

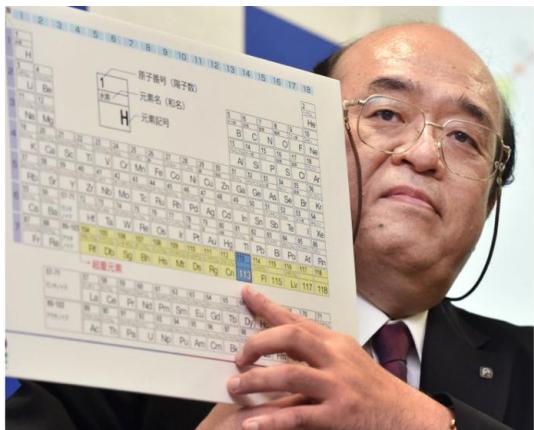
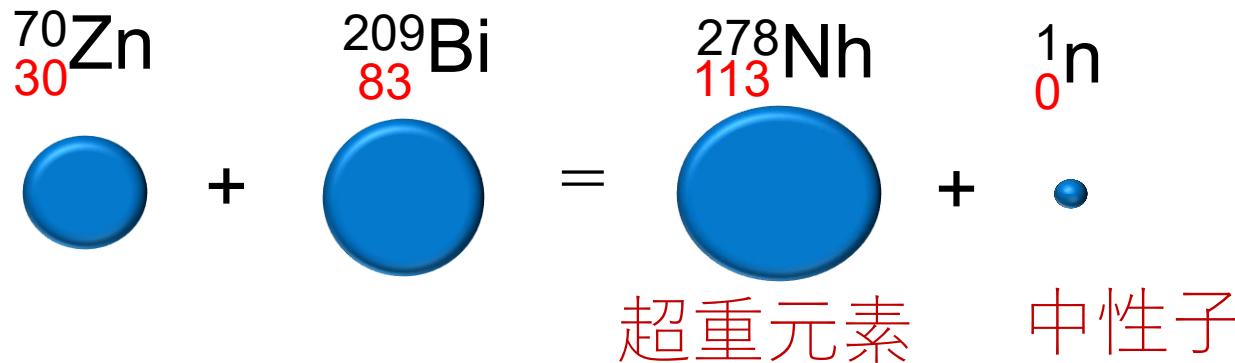
The following table lists the elements and their discoverer countries based on the flags visible in the image:

Element	Atomic Number	Discoverer Country
H	1	UK (Great Britain)
Li	3	Sweden
Be	4	France
Na	11	UK (Great Britain)
Mg	12	UK (Great Britain)
K	19	UK (Great Britain)
Ca	20	UK (Great Britain)
Sc	21	Sweden
Ti	22	UK (Great Britain)
V	23	Sweden
Cr	24	France
Mn	25	Sweden
Fe	26	Know to ancients
Co	27	Sweden
Ni	28	Sweden
Cu	29	Know to ancients
Zn	30	Germany
B	5	UK (Great Britain)
C	6	UK (Great Britain)
N	7	UK (Great Britain)
O	8	France
F	9	France
Ne	10	UK (Great Britain)
Ar	18	UK (Great Britain)
Rb	37	Germany
Sr	38	UK (Great Britain)
Y	39	Finland
Zr	40	Germany
Nb	41	UK (Great Britain)
Mo	42	Sweden
Tc	43	France
Ru	44	Russia
Rh	45	UK (Great Britain)
Pd	46	UK (Great Britain)
Ag	47	Germany
Cd	48	France
In	49	Germany
Ga	31	France
Ge	32	Germany
As	33	Know to ancients
Se	34	Sweden
Br	35	France
Kr	36	UK (Great Britain)
Ar	37	UK (Great Britain)
Rn	38	UK (Great Britain)
Cs	55	Germany
Ba	56	UK (Great Britain)
Hf	72	Sweden
Ta	73	Finland
W	74	France
Re	75	Germany
Os	76	UK (Great Britain)
Ir	77	UK (Great Britain)
Pt	78	Spain
Hg	79	Know to ancients
Au	80	Germany
Cd	48	UK (Great Britain)
In	50	Sweden
Sn	51	Know to ancients
Sb	52	Romania
Te	53	Know to ancients
I	54	France
Pb	82	Germany
Bi	83	France
Po	84	UK (Great Britain)
At	85	France
Rn	86	Canada
Fr	87	France
Ra	88	France
Rf	104	USA (Russia)
Db	105	USA (Russia)
Sg	106	USA (Russia)
Bh	107	Germany
Hs	108	Germany
Mt	109	Germany
Ds	110	Germany
Rg	111	Germany
Cn	112	Japan
Nh	113	Japan
Fl	114	USA (Russia)
Mc	115	USA (Russia)
Lv	116	USA (Russia)
Ts	117	USA (Russia)
Og	118	USA (Russia)
Ce	58	Sweden
Pr	59	Austria
Nd	60	Austria
Pm	61	USA
Sm	62	France
Eu	63	France
Gd	64	Switzerland
Tb	65	Sweden
Dy	66	France
Ho	67	Sweden
Er	68	Sweden
Tm	69	Sweden
Yb	70	Switzerland
Lu	71	France
Th	90	Sweden
Pa	91	Germany
U	92	Germany
Np	93	USA
Pu	94	USA
Am	95	USA
Cm	96	USA
Bk	97	USA
Cf	98	USA
Es	99	USA
Fm	100	USA
Md	101	USA
No	102	Russia
Lr	103	USA
119	119	France
120	120	France

第7周期
第8周期

日本における113番元素の合成

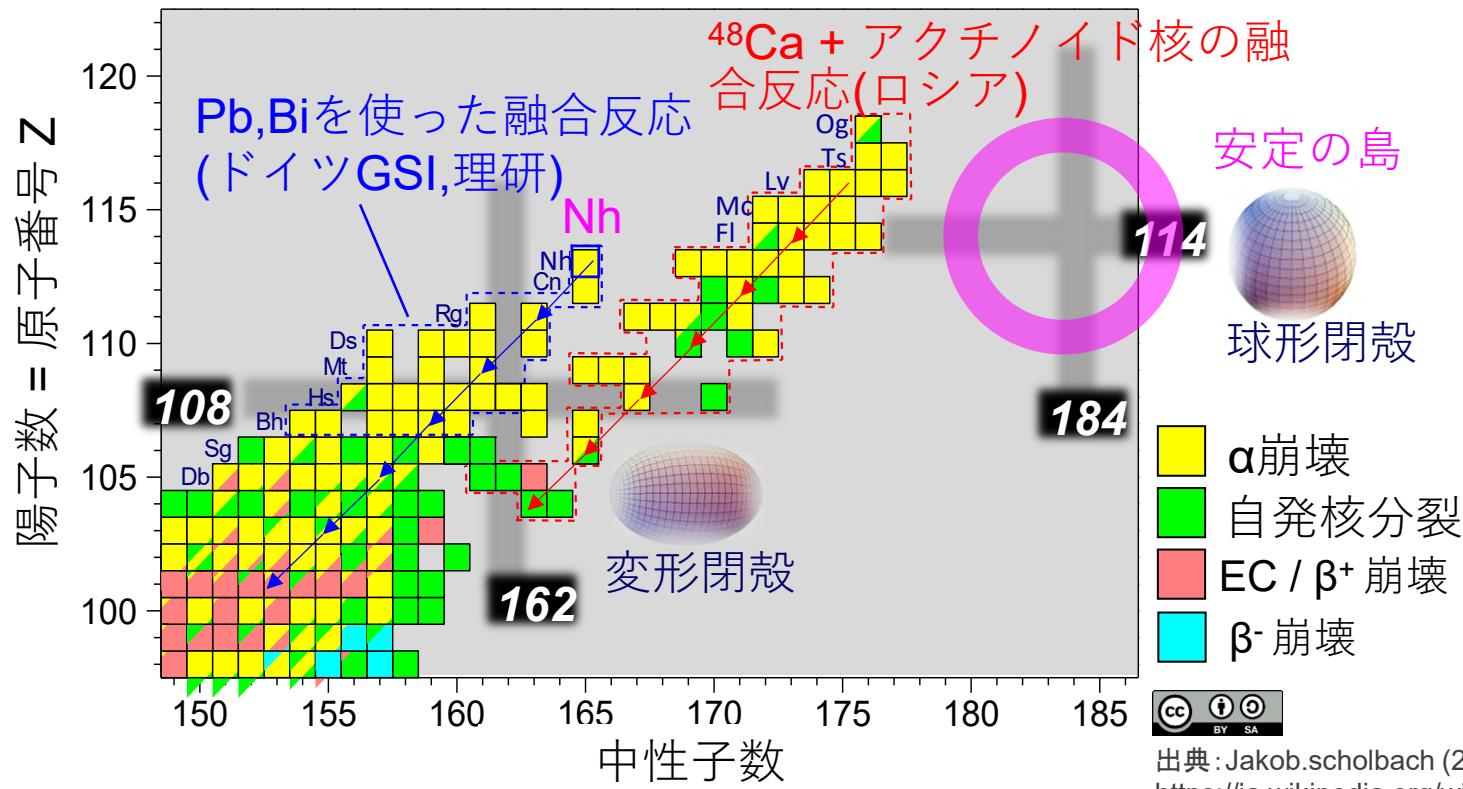
8年かけて実験し3つのニホニウム原子核を合成



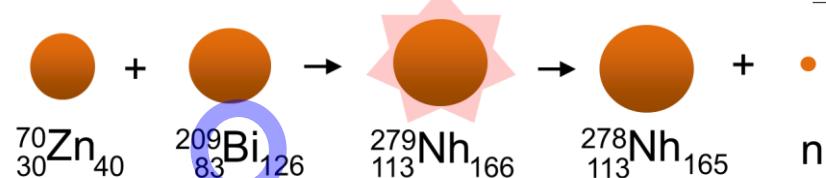
九州大学/理研 森田氏

＊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

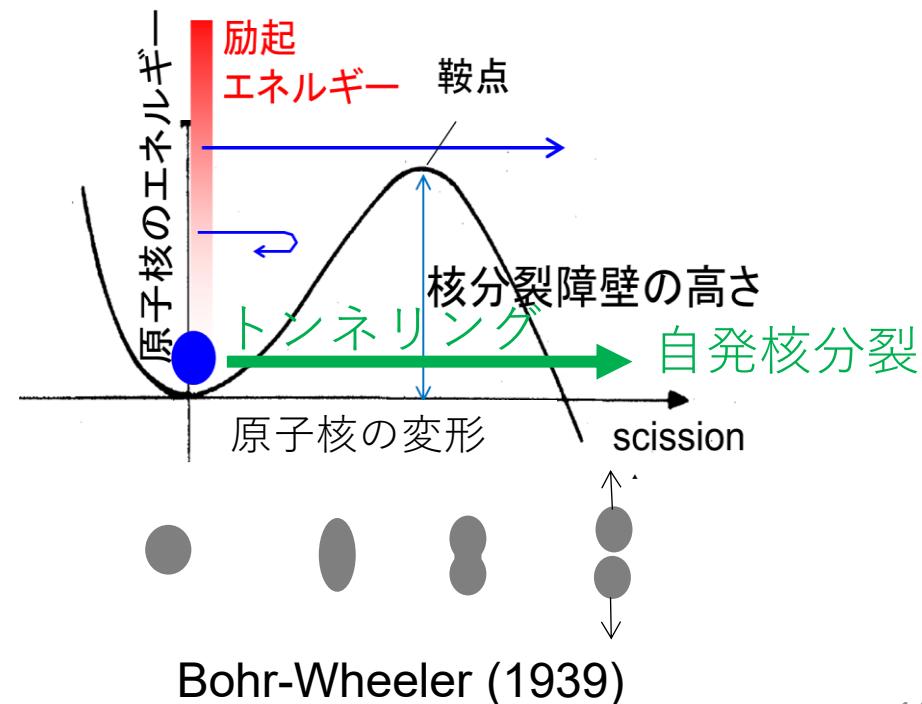
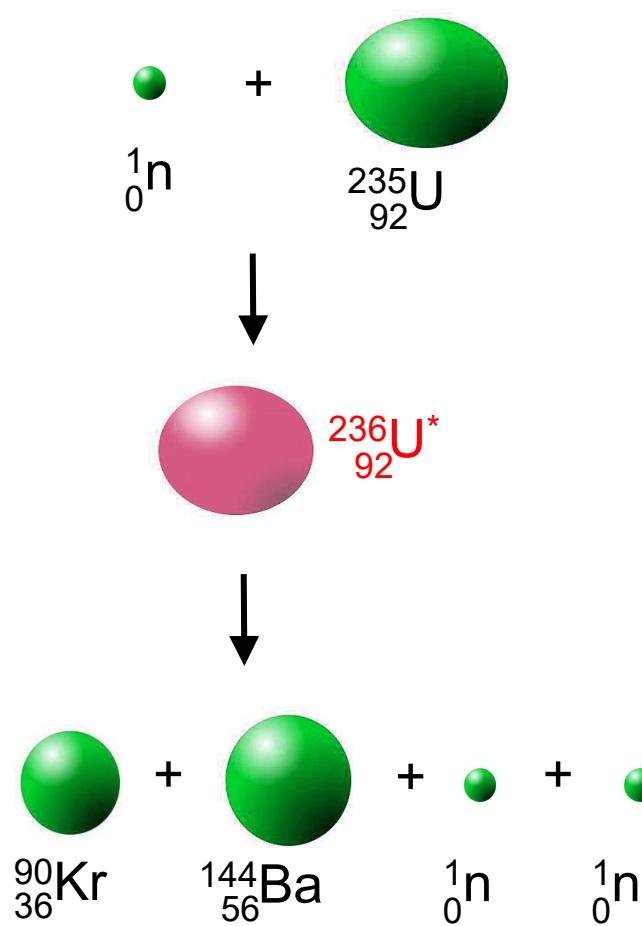


熱い核融合



核分裂 - Fission -

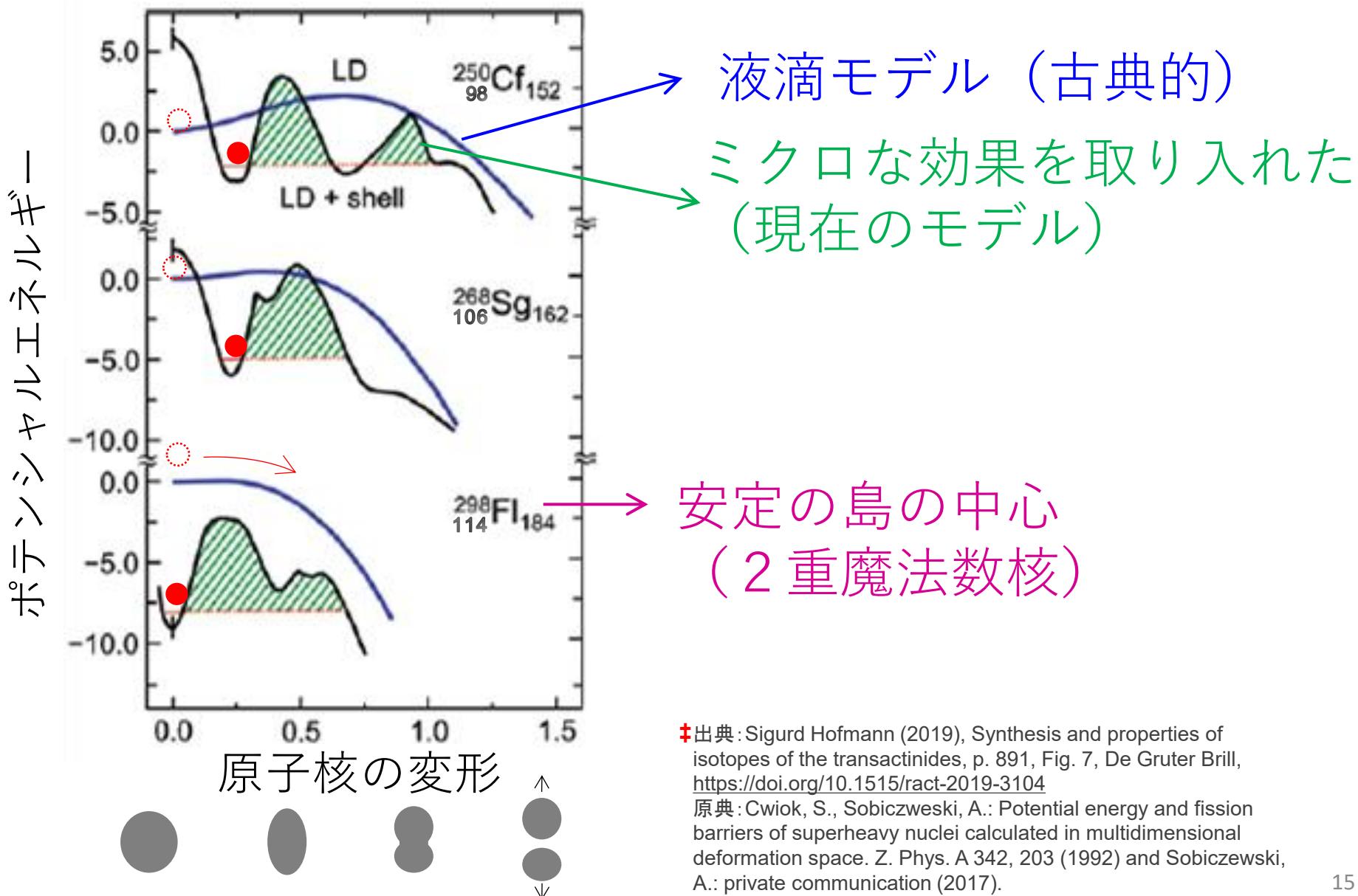
ウラン（元素92）に中性子を照射し、中性子の捕獲反応と β^- 崩壊を利用して重い元素を作る研究をしていた。→ 核分裂の発見（1938年）



Otto Hahn and Lise Meitner

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 -

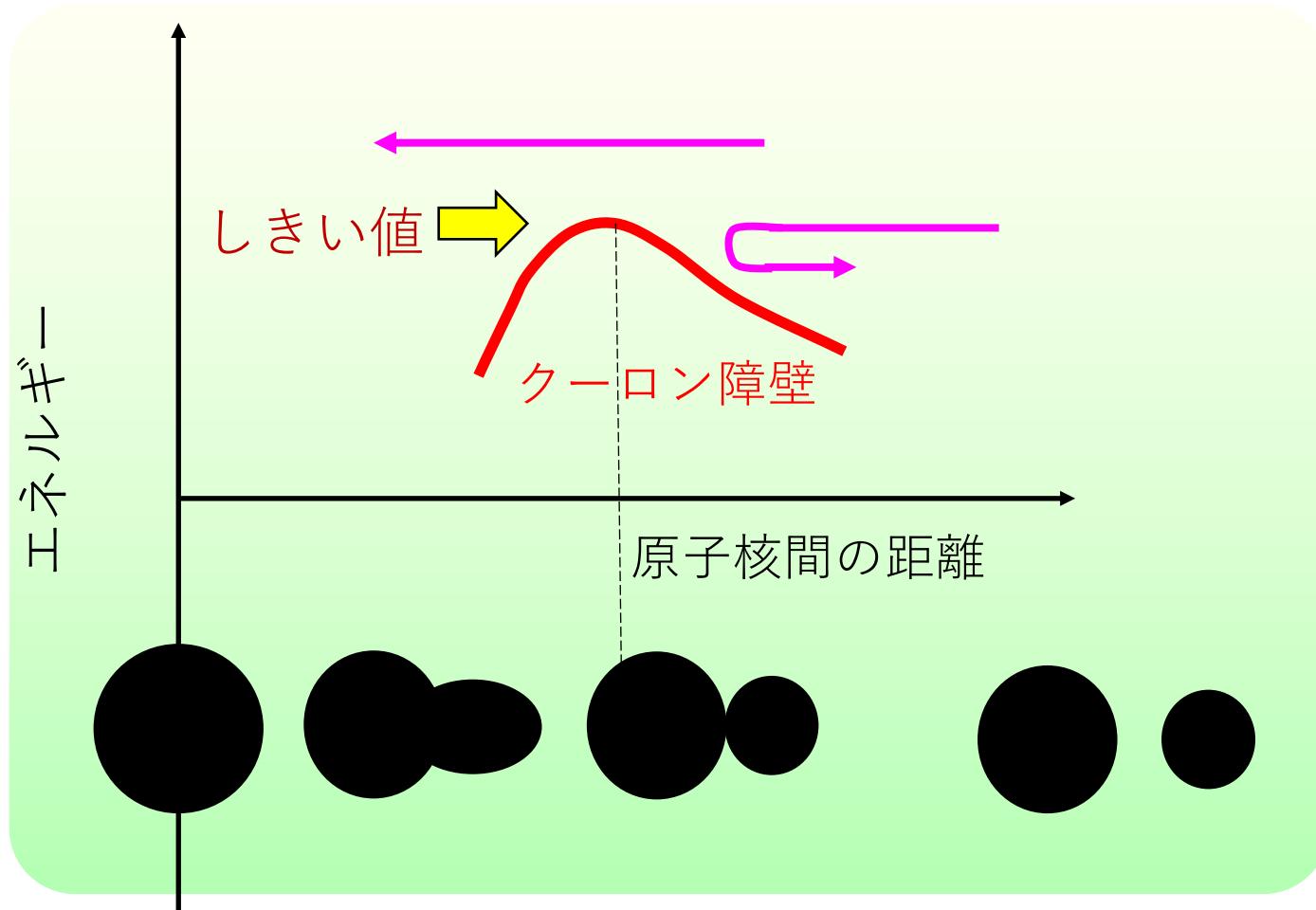


*出典: Sigurd Hofmann (2019), Synthesis and properties of isotopes of the transactinides, p. 891, Fig. 7, De Gruter Brill,
<https://doi.org/10.1515/ract-2019-3104>

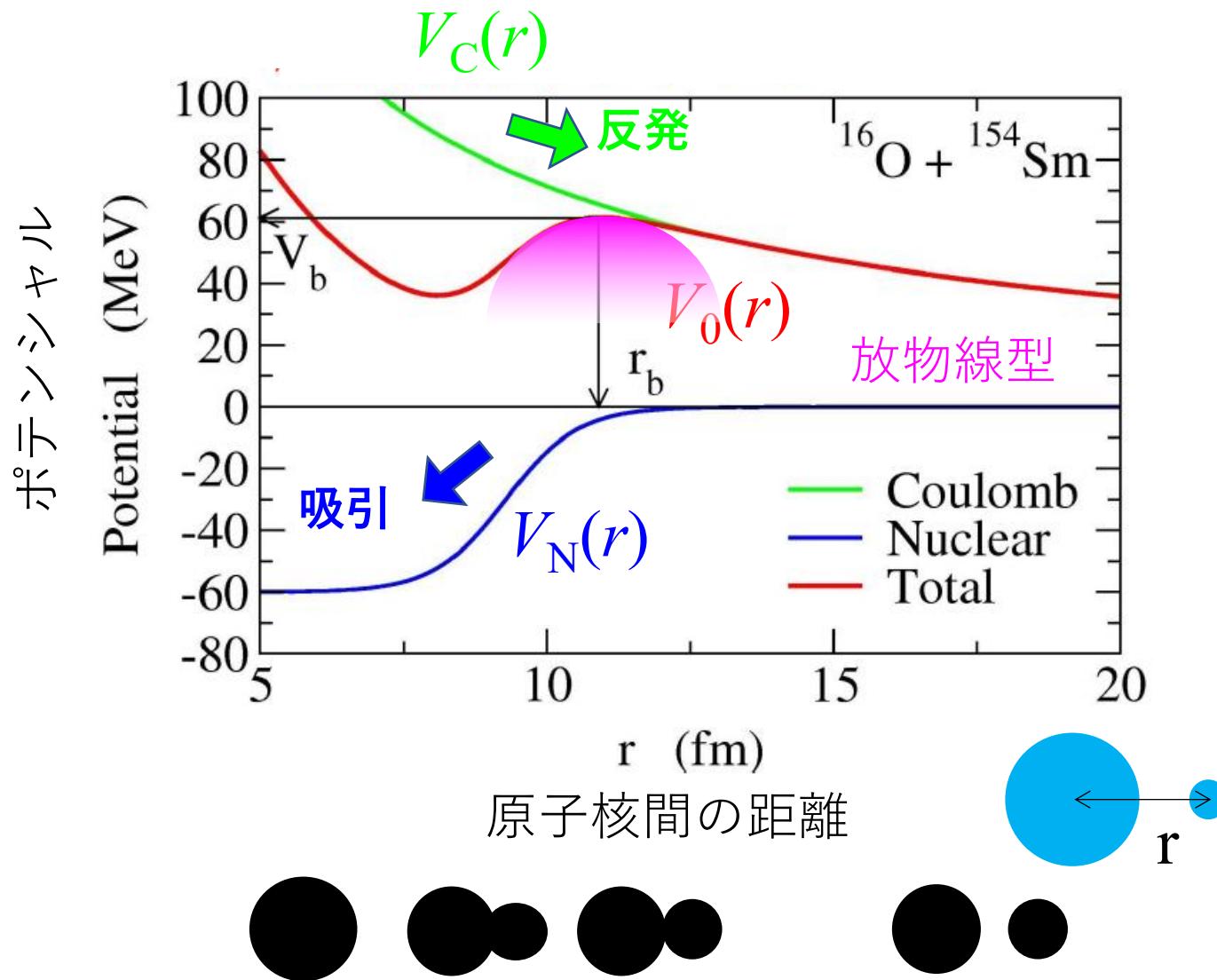
原典: Cwiok, S., Sobiczewski, A.: Potential energy and fission barriers of superheavy nuclei calculated in multidimensional deformation space. Z. Phys. A 342, 203 (1992) and Sobiczewski, A.: private communication (2017).

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。

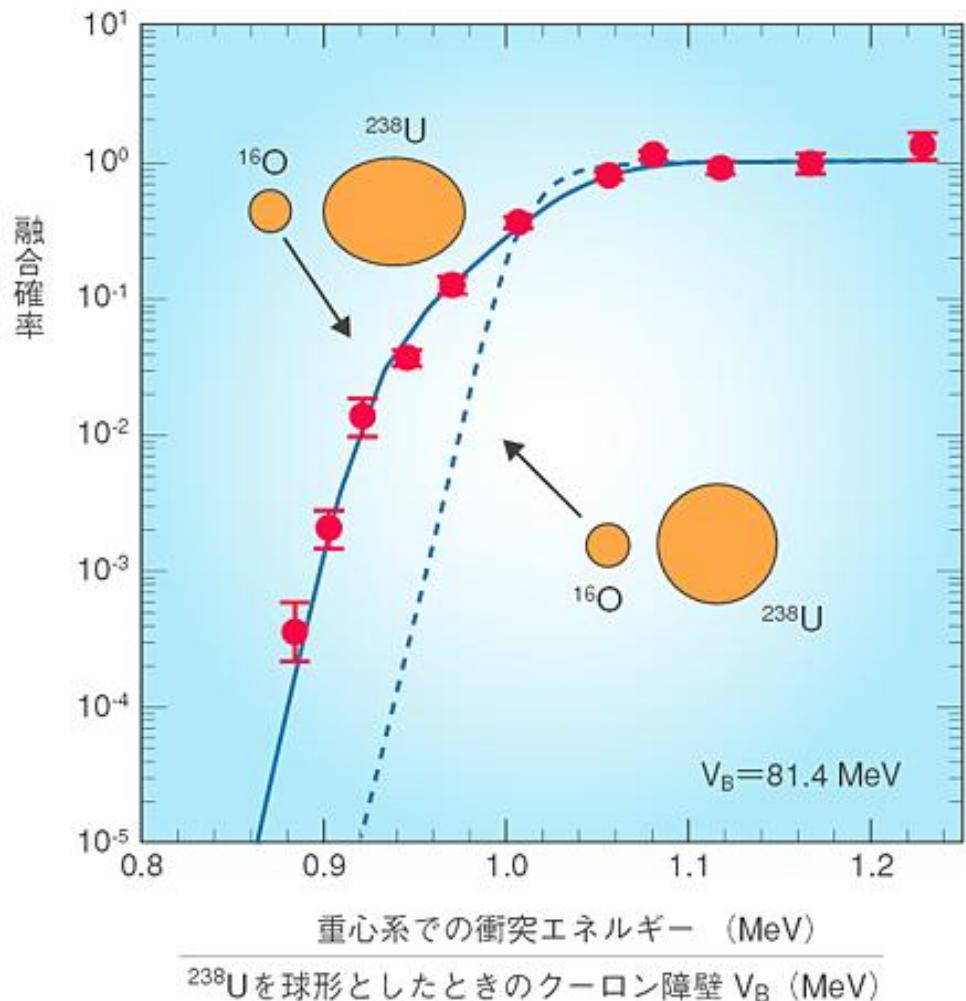


原子核どうしの間に働くクーロン障壁



*出典: Kouichi Hagino, Noboru Takigawa (2012), Subbarrier Fusion Reactions and Many-Particle Quantum Tunneling, p. 1062, Fig. 1, Oxford Academic, <https://doi.org/10.1143/PTP.128.1061>

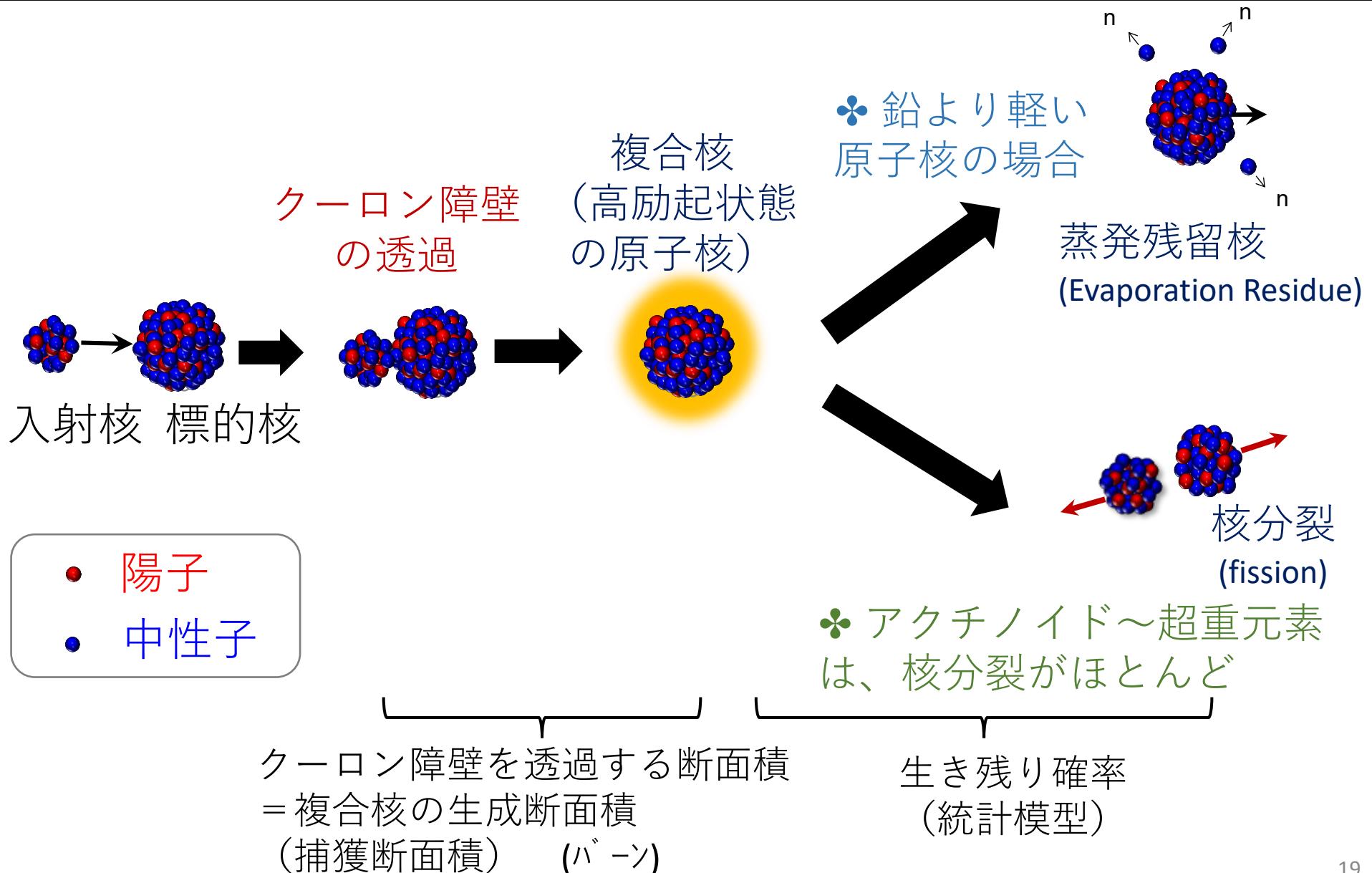
融合確率 —球形核と変形核の違い—



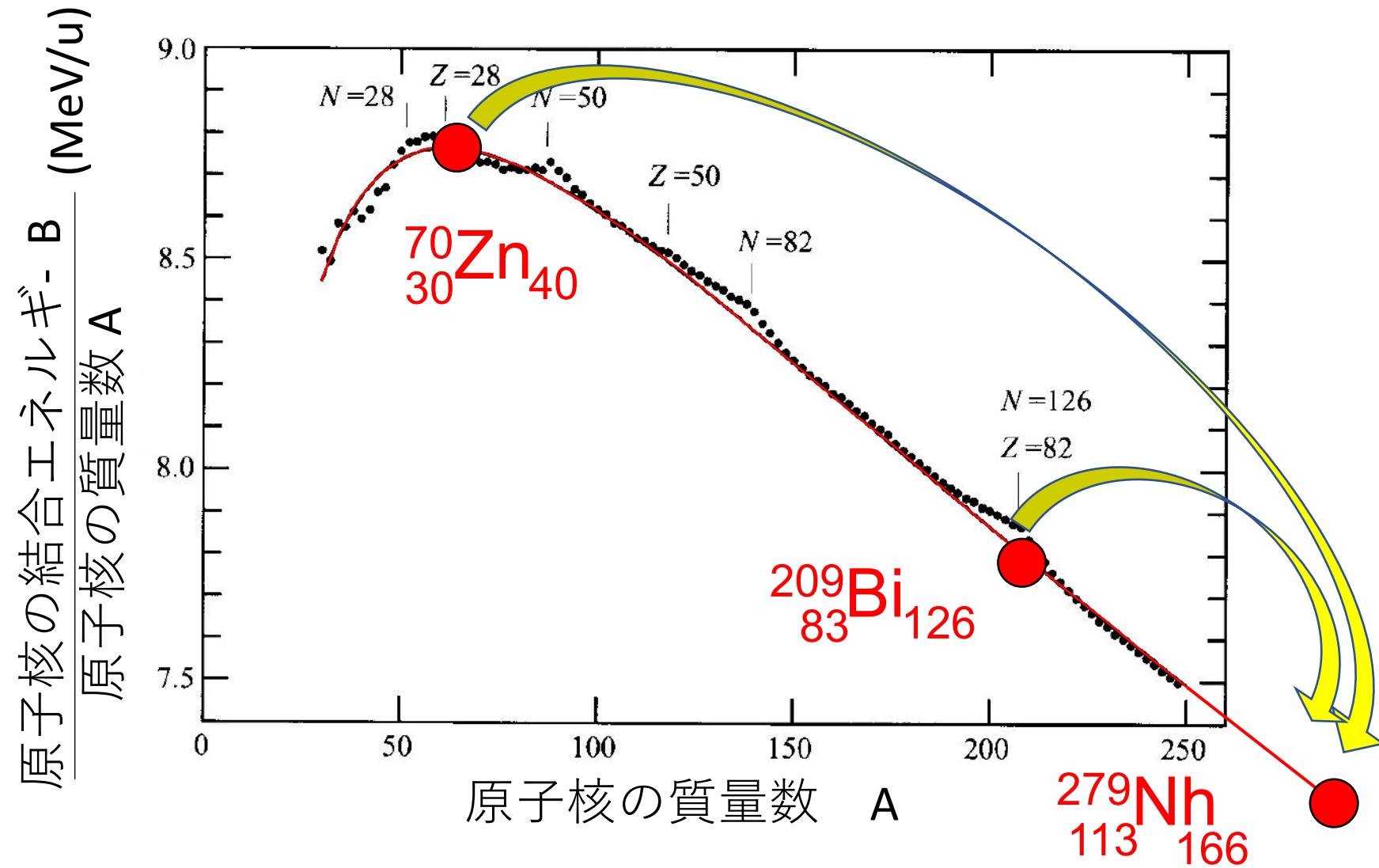
原子核が変形していると、低いエネルギーでも核融合反応が起こる。

→ ^{238}U 原子核が変形していることの証拠でもある。

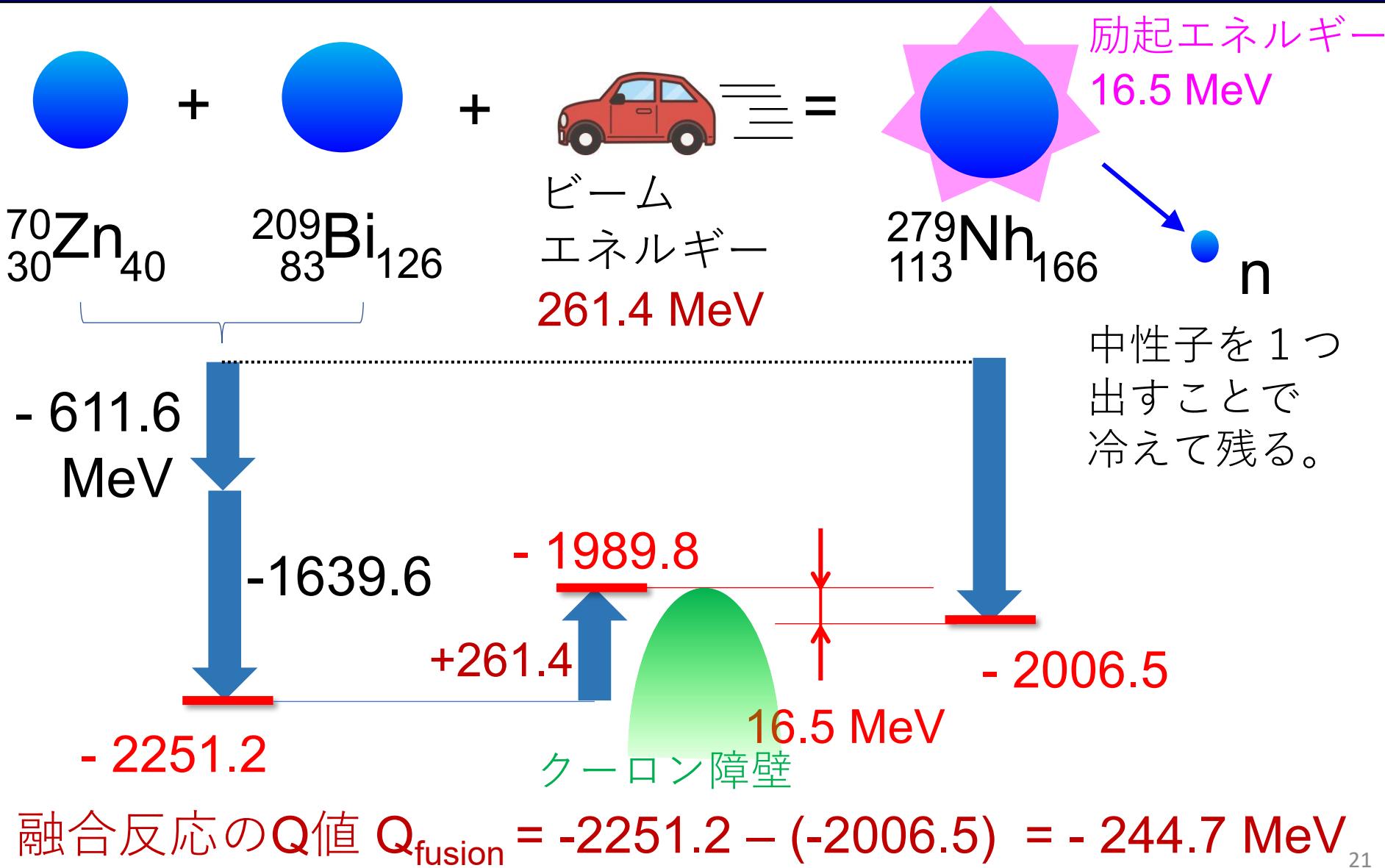
元素合成の2過程



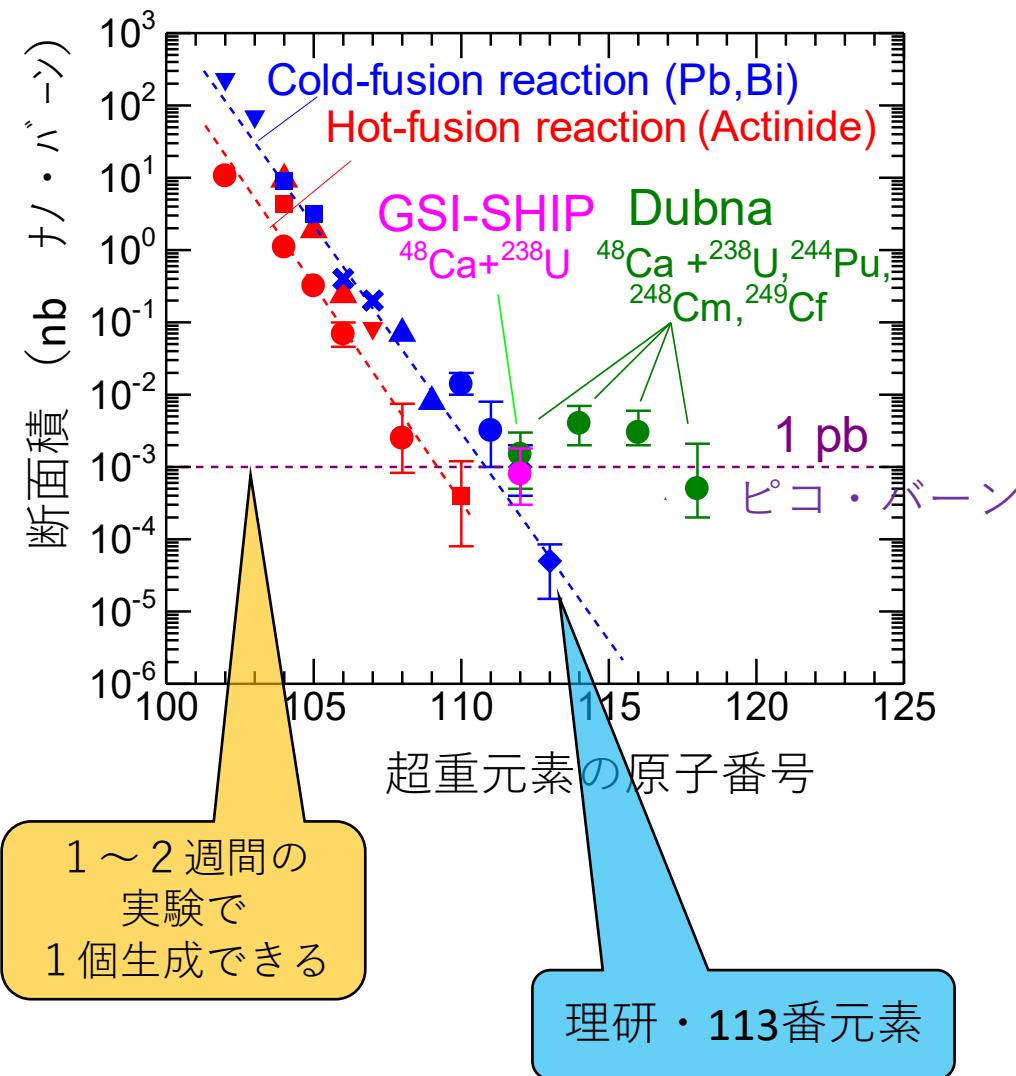
超重元素の合成（113番元素）



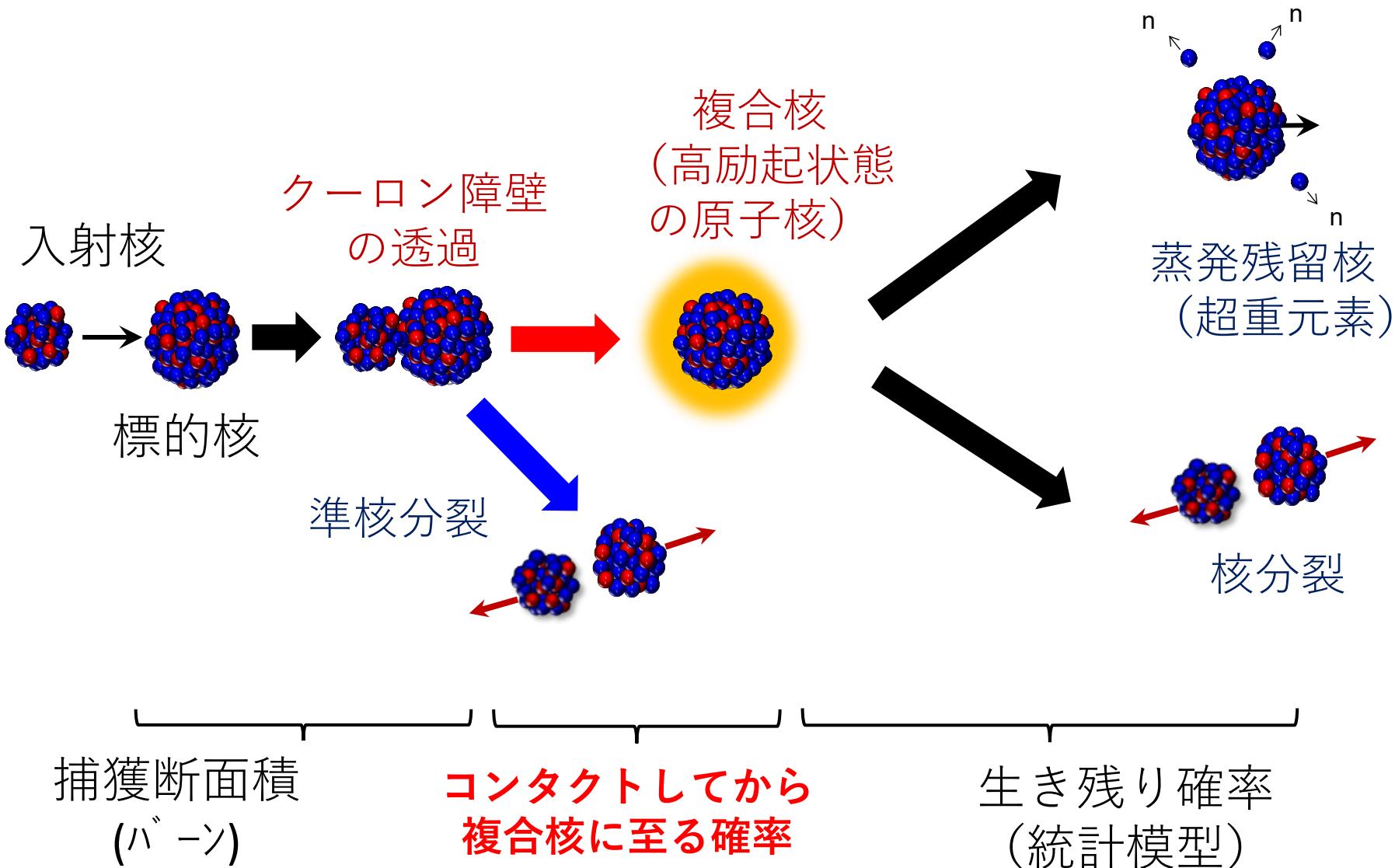
113番元素合成のエネルギー



超重元素を合成する断面積



超重元素合成の3つの過程（重い反応系）

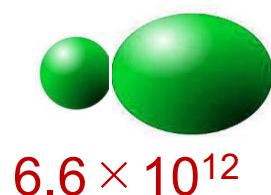


超重元素合成の例

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



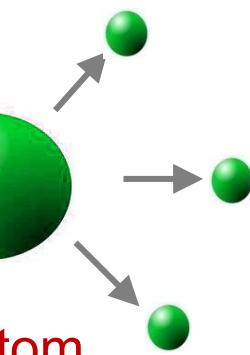
6.6×10^{12}

(2) 融合過程
複合核 CN



3.0×10^{11}

(3) 中性子蒸発と
核分裂の競合



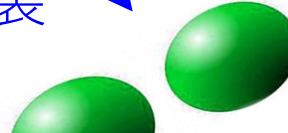
1 atom

準核分裂



6.3×10^{12}

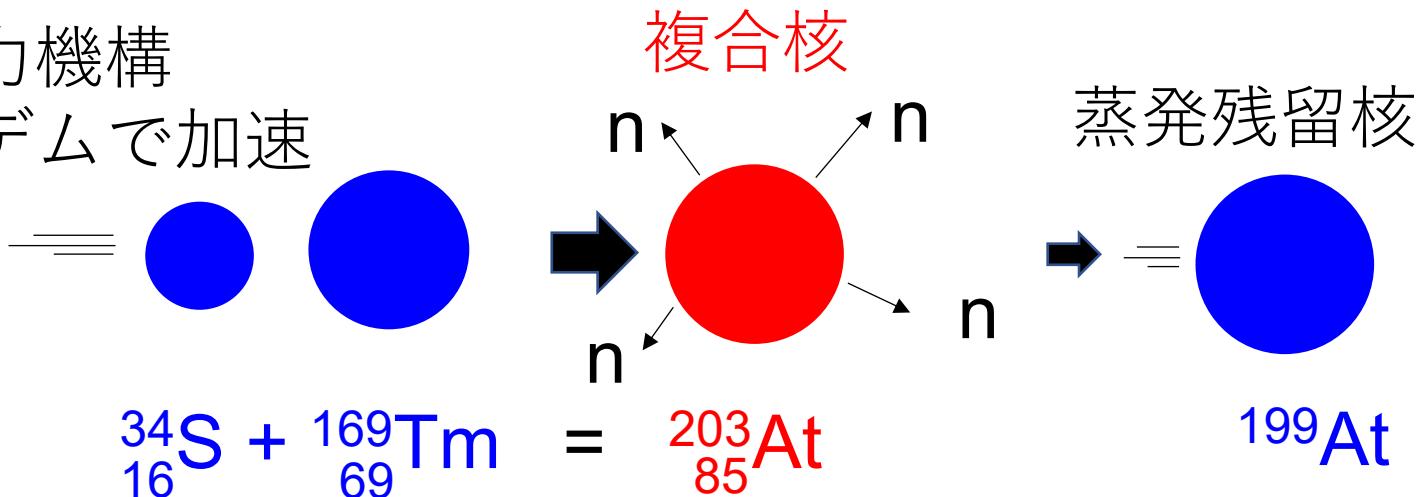
核分裂



$\sim 3 \times 10^{11}$

実習で学ぶ反応

原子力機構 タンデムで加速



複合核

α崩壊

1

The Karlsruhe Nuclide Chart

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。