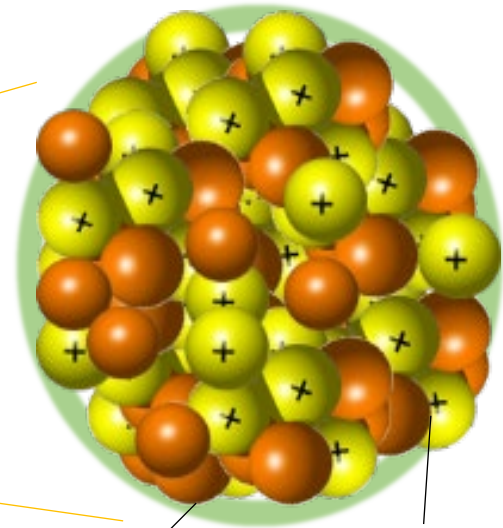
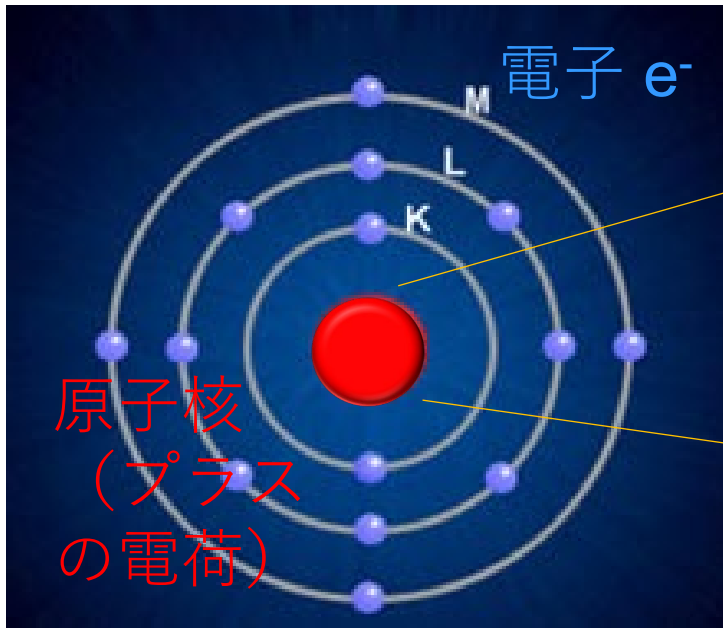


超重元素と重イオン核融合反応

日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター
研究フェロー 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
6,000 個の異なる原子核が存在しうる。
どのくらい陽子と中性子を詰められる？

元素の周期表

①: 原子番号
 H: 記号
 水素: 名前
 1.008: 原子量

※不安定な同位体を持つ元素の場合は、最も半減期が長い同位体の質量数を () 内に示した。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
1	1 H 水素 1.008	■ 卑金属元素														希ガス	2 He ヘリウム 4.0026			
2	3 Li リチウム 6.94	4 Be ベリリウム 9.0122	■ アルカリ土類金属								■ 半金属		5 B ホウ酸 10.81	6 C 炭素 12.011	7 N 窒素 14.007	8 O 酸素 15.999	9 F フッ素 18.998	10 Ne ネオン 20.180		
3	11 Na ナトリウム 22.990	12 Mg マグネシウム 24.305	■ 遷移元素										■ 卑金属		13 Al アルミニウム 26.982	14 Si ケイ素 28.085	15 P リン 30.974	16 S 硫黄 32.06	17 Cl 塩素 35.45	18 Ar アルゴン 39.948
4	19 K カリウム 39.098	20 Ca カルシウム 40.078	21 Sc スカンジウム 44.956	22 Ti チタン 47.867	23 V バナジウム 50.942	24 Cr クロム 51.996	25 Mn マンガン 54.938	26 Fe 鉄 55.845	27 Co コバルト 58.933	28 Ni ニッケル 58.693	29 Cu 銅 63.546	30 Zn 亜鉛 65.38	31 Ga ガリウム 69.723	32 Ge ゲルマニウム 72.630	33 As ヒ素 74.922	34 Se セレン 78.971	35 Br 臭素 79.904	36 Kr クリプトン 83.798		
5	37 Rb ルビジウム 85.468	38 Sr ストロンチウム 87.62	39 Y イットリウム 88.906	40 Zr ジルコニウム 91.224	41 Nb ニオブ 92.906	42 Mo モリブデン 95.94	43 Tc テクネチウム (98)	44 Ru ルテチウム 101.07	45 Rh ロジウム 102.91	46 Pd パラジウム 106.42	47 Ag 銀 107.87	48 Cd カドミウム 112.41	49 In インジウム 114.82	50 Sn スズ 118.71	51 Sb アンチモン 121.76	52 Te テルル 127.60	53 I ヨウ素 126.90	54 Xe キセノン 131.29		
6	55 Cs セシウム 132.91	56 Ba バリウム 137.33	※	72 Hf ハフニウム 178.49	73 Ta タンタル 180.95	74 W タングステン 183.84	75 Re レニウム 186.21	76 Os オスミウム 190.23	77 Ir イリジウム 192.22	78 Pt 白金 195.08	79 Au 金 196.967	80 Hg 水銀 200.59	81 Tl タリウム 204.38	82 Pb 鉛 207.2	83 Bi ビスマス 208.98	84 Po ポロニウム (209)	85 At アスタチン (209)	86 Rn ラドン (222)		
7	87 Fr フランシウム (223)	88 Ra ラジウム (226)	※	104 Rf リフテニウム (261)	105 Db ドブニウム (268)	106 Sg シーボーギウム (269)	107 Bh ボーリウム (270)	108 Hs ハッシウム (277)	109 Mt マイトネリウム (276)	110 Ds ダムスタヂウム (281)	111 Rg レントゲニウム (282)	112 Cn コペルニシウム (285)	113 Nh ニホニウム (284)	114 Fl フレロビウム (289)	115 Mc モスコウィウム (290)	116 Lv リウモリウム (293)	117 Ts テネシウム (294)	118 Og オガネッソン (294)		

8

119	120
-----	-----

超重元素

■ ランタノイド

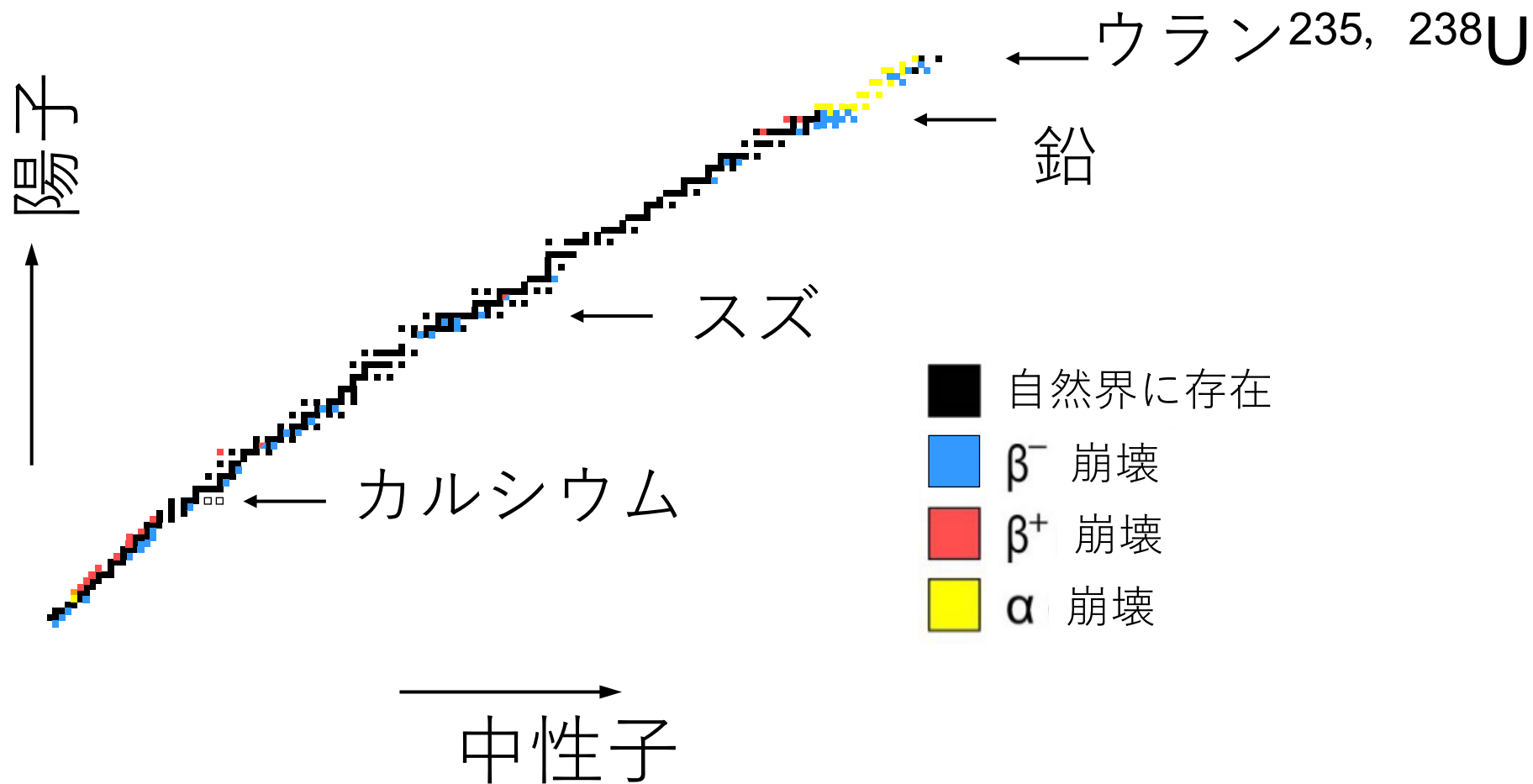
57 La ランタン	58 Ce セリウム	59 Pr プラセオジム	60 Nd ネオジム	61 Pm プロメチウム	62 Sm サマリウム	63 Eu ユウロピウム	64 Gd ガドリニウム	65 Tb テルビウム	66 Dy ジスプロシウム	67 Ho ホルミウム	68 Er エルビウム	69 Tm ツリウム	70 Yb イットルビウム	71 Lu ルテチウム
------------------	------------------	--------------------	------------------	--------------------	-------------------	--------------------	--------------------	-------------------	---------------------	-------------------	-------------------	------------------	---------------------	-------------------

■ アクチノイド

89 Ac アクチニウム	90 Th トリウム	91 Pa プロトアクチニウム	92 U ウラン	93 Np ネプツニウム	94 Pu プルトニウム	95 Am アメリシウム	96 Cm キュリウム	97 Bk バークリウム	98 Cf カリホルニウム	99 Es アインシュタイン	100 Fm フェルミウム	101 Md メンデルビウム	102 No ノーベリウム	103 Lr ローレンシウム
--------------------	------------------	-----------------------	----------------	--------------------	--------------------	--------------------	-------------------	--------------------	---------------------	----------------------	---------------------	----------------------	---------------------	----------------------

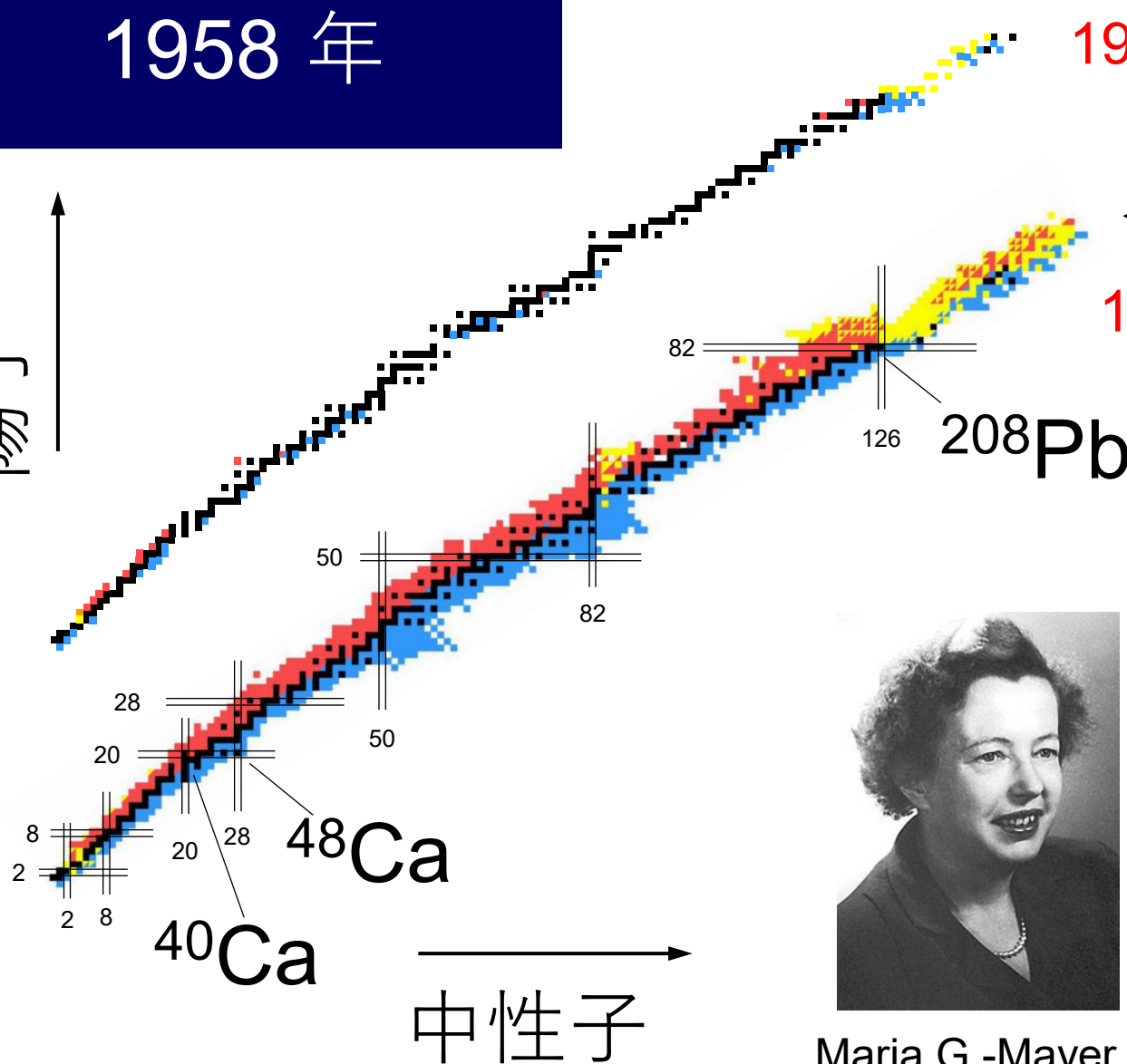
アクチノイド

1935年の核図表



1958年

陽子



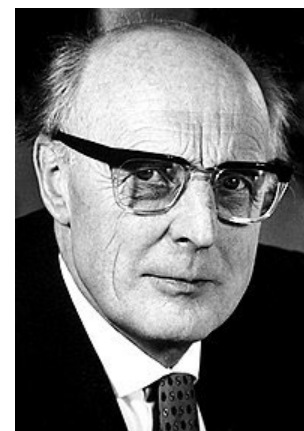
1935

ノーベリウム：No
←(原子番号102)

1958



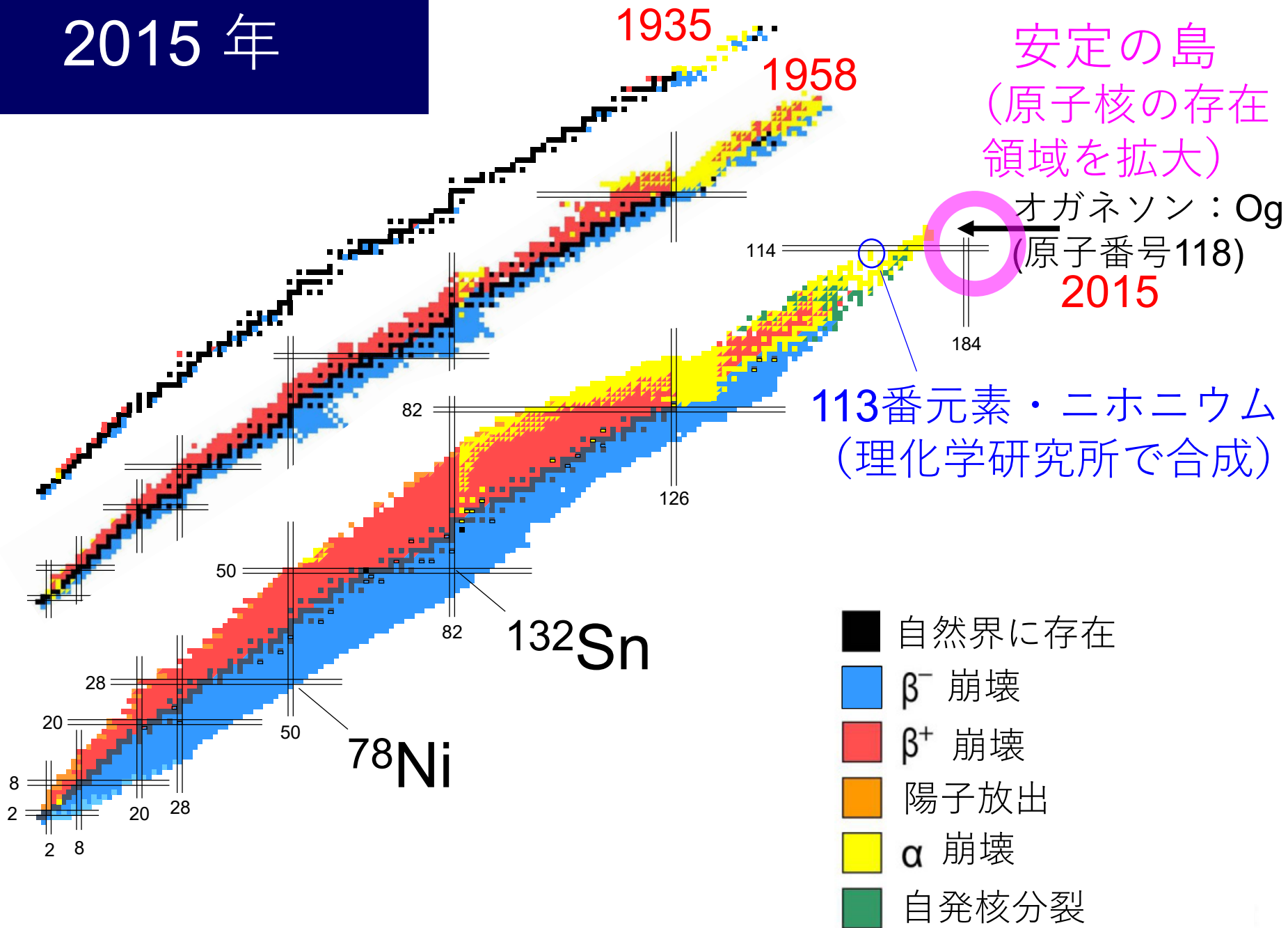
Maria G.-Mayer



Johannes H.D. Jensen

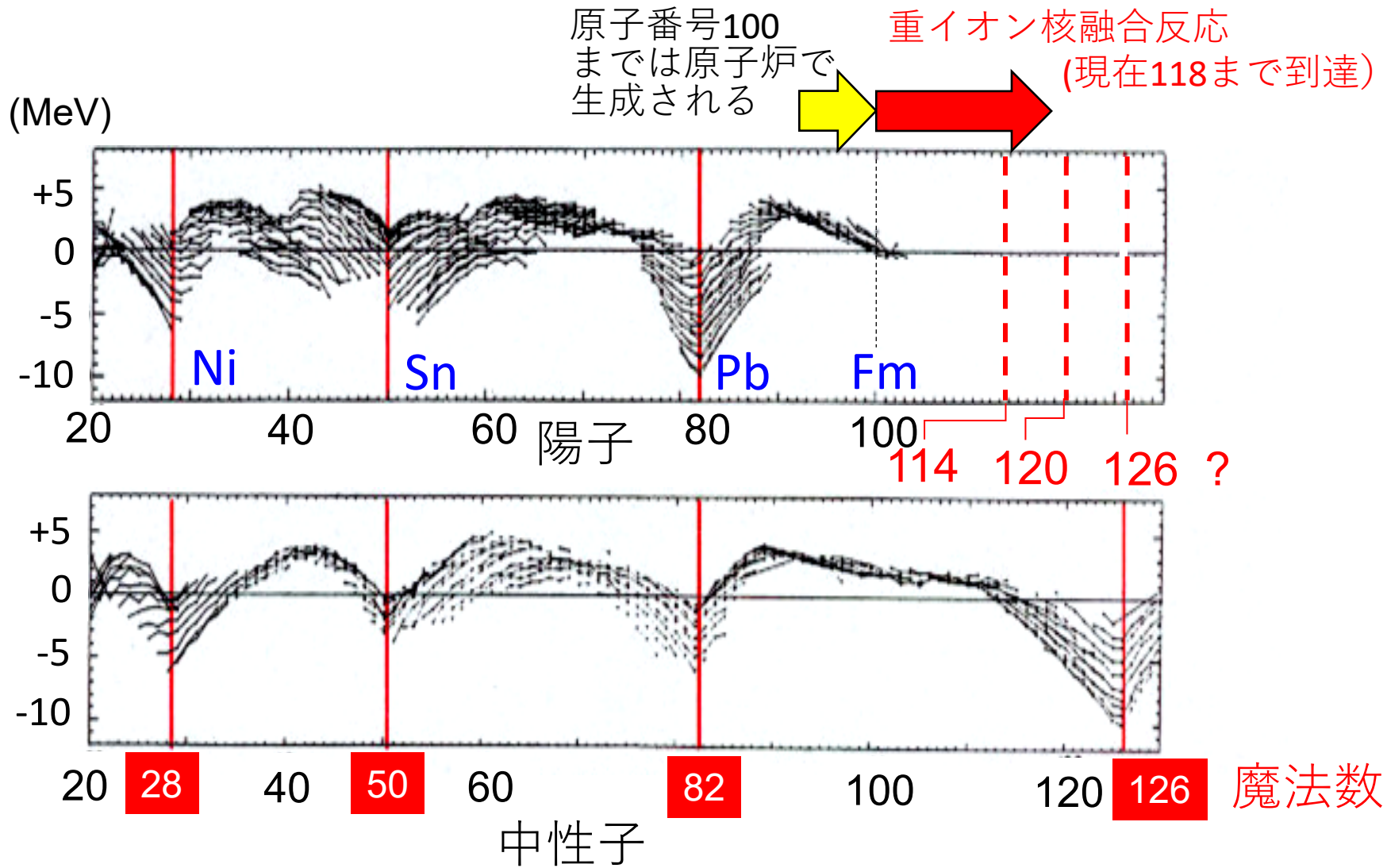
1963 ノーベル賞

2015年



原子核の質量に見る殻構造

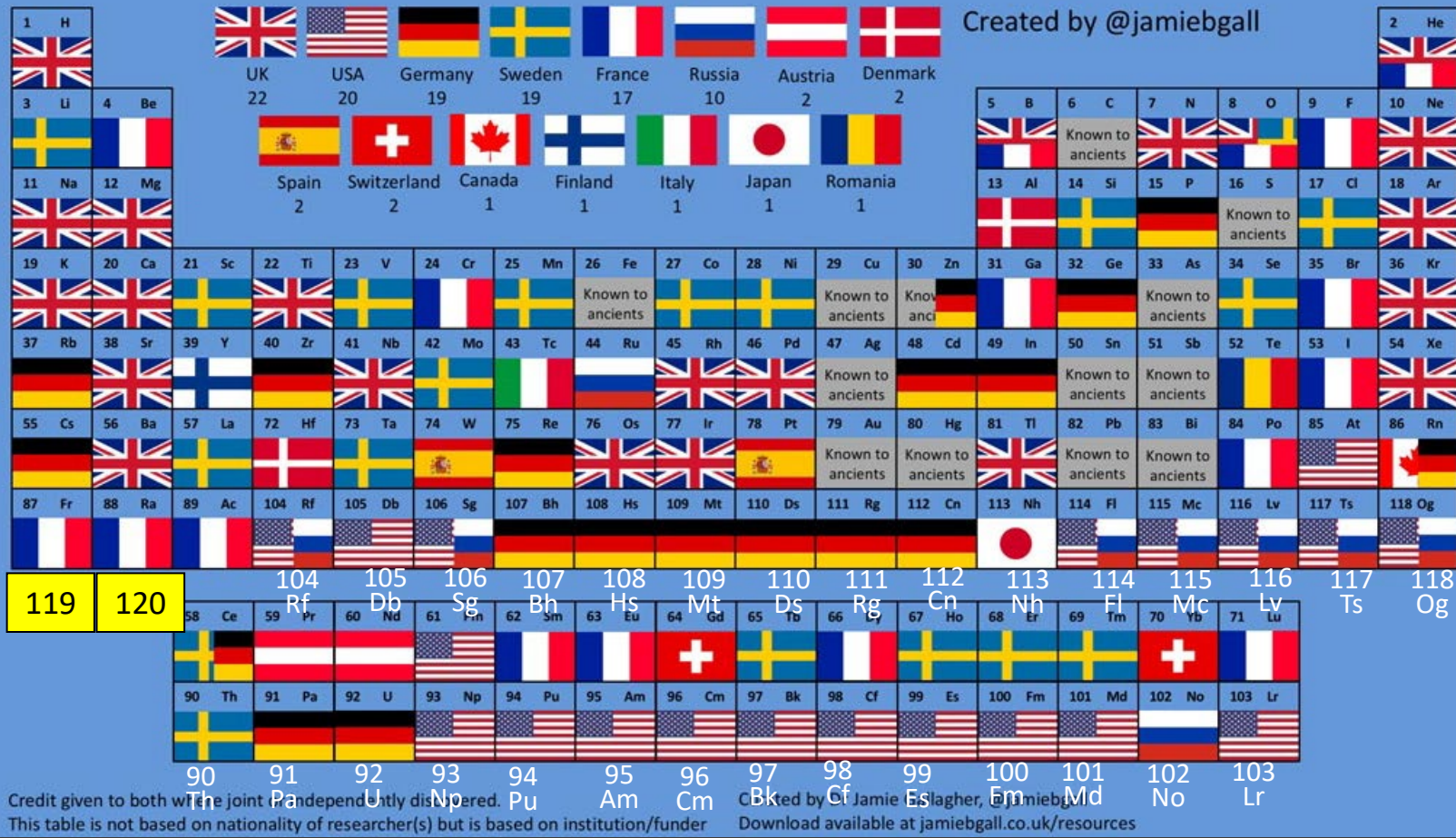
(実験値) - (液滴モデル質量公式)
= ミクロなエネルギー補正量



W.D.Myers and W.J. Swiatecki (1966).

元素の周期表

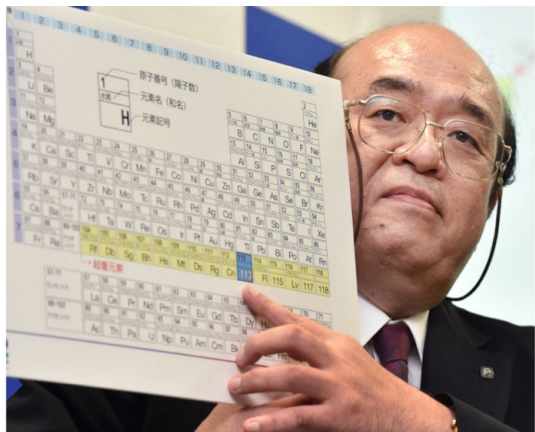
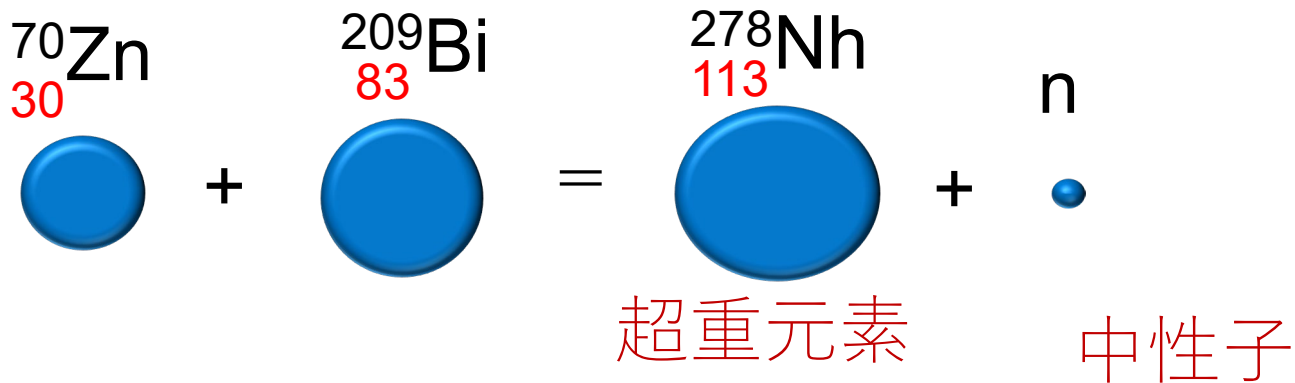
Elements & Country of Discovery



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

超重元素の開拓者

FLNR (Russia)



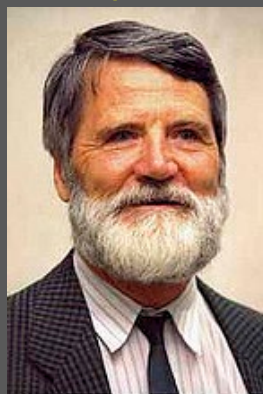
G.N. Flerov



Yu.Ts. Oganessian

Fl (114)
Mc (115)
Lv (116)
Ts (117)
Og (118)
119,120
合成計画

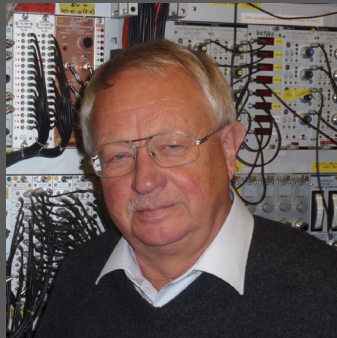
GSI (Germany)



P. Armbruster



G. Münzenberg



S. Hofmann

Bh (107)
Hs (108)
Mt (109)
Ds (110)
Rg (111)
Cn (112)

RIKEN (Japan)



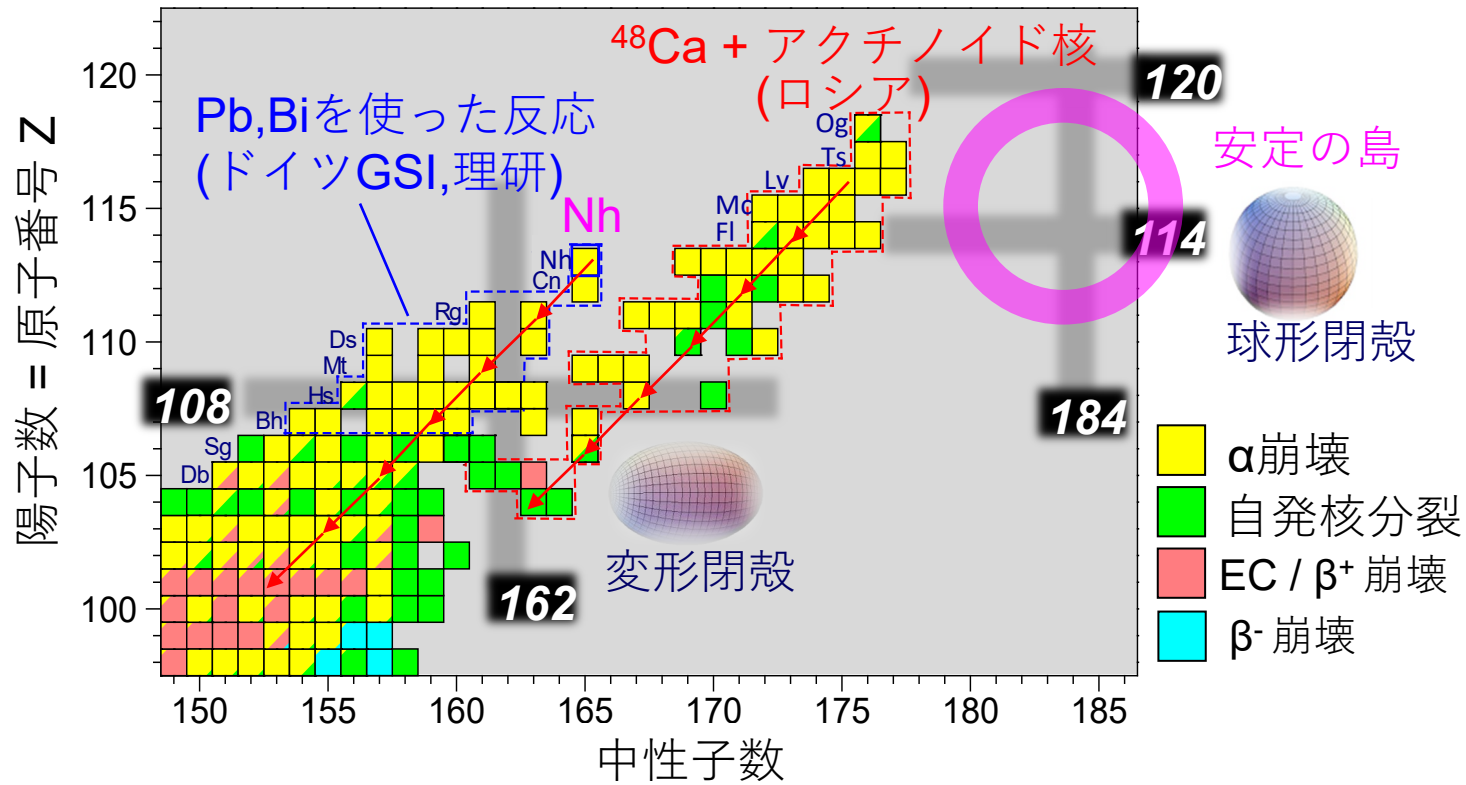
K. Morita

Nh (113)
119合成中

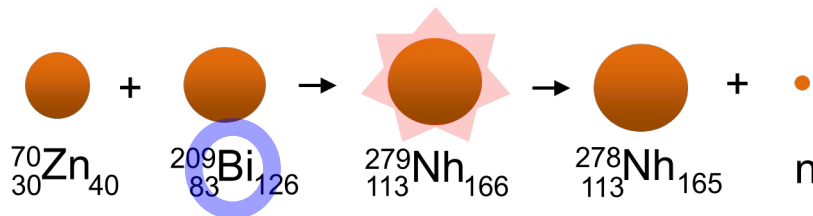
^{48}Ca をビームに使う

^{208}Pb , ^{209}Bi を標的に使う

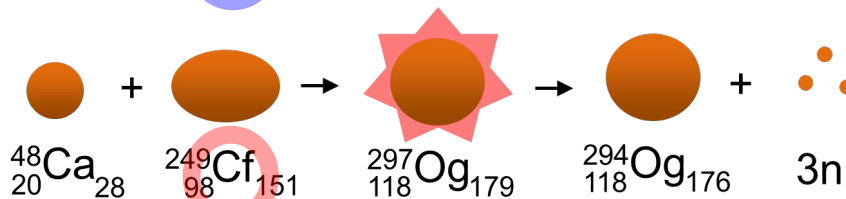
これまでに合成されている超重元素領域の原子核



冷たい核融合

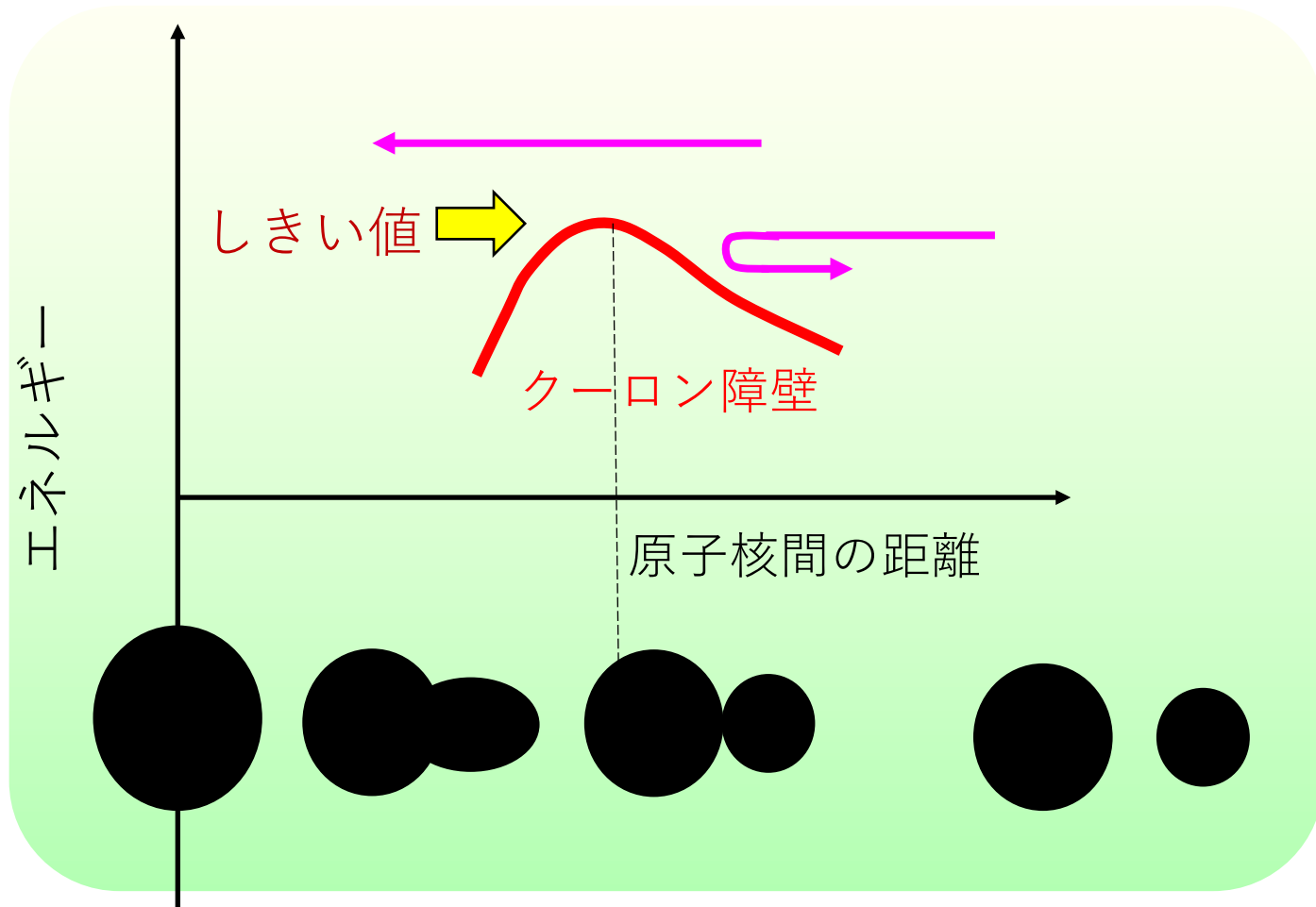


熱い核融合



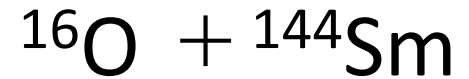
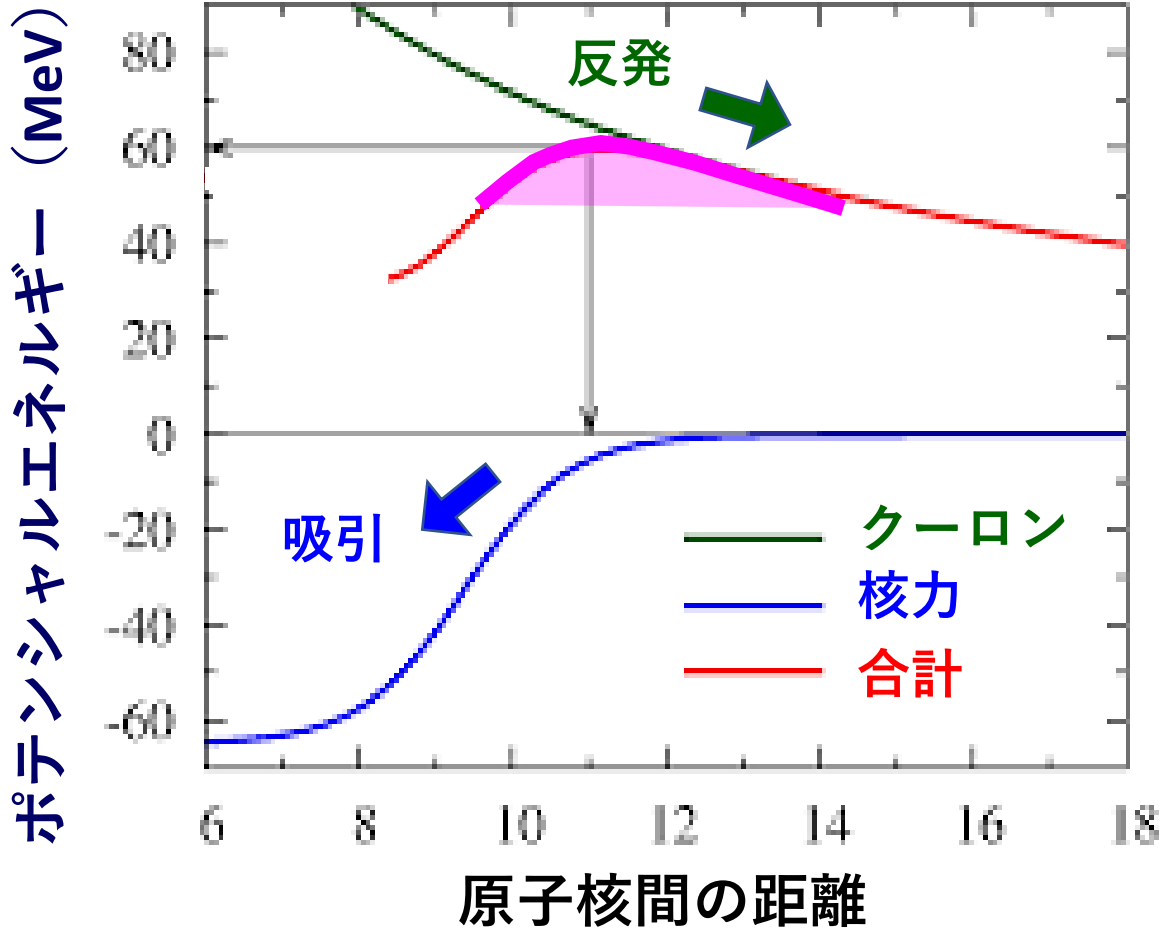
重イオン核融合反応

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**で合成されてきた。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。

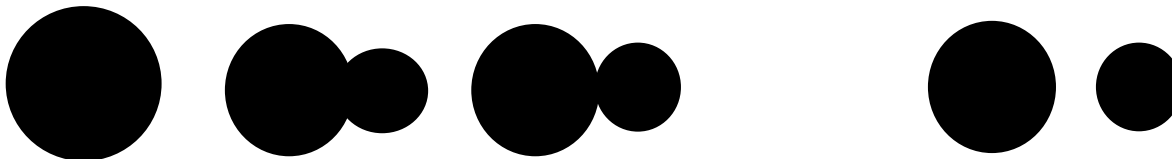


クーロン障壁の記述

- クーロン反発力と核力による吸引力 -



クーロン障壁を
超えれば、自動的に
核融合が起こる
(ただし軽い反応系
の場合)

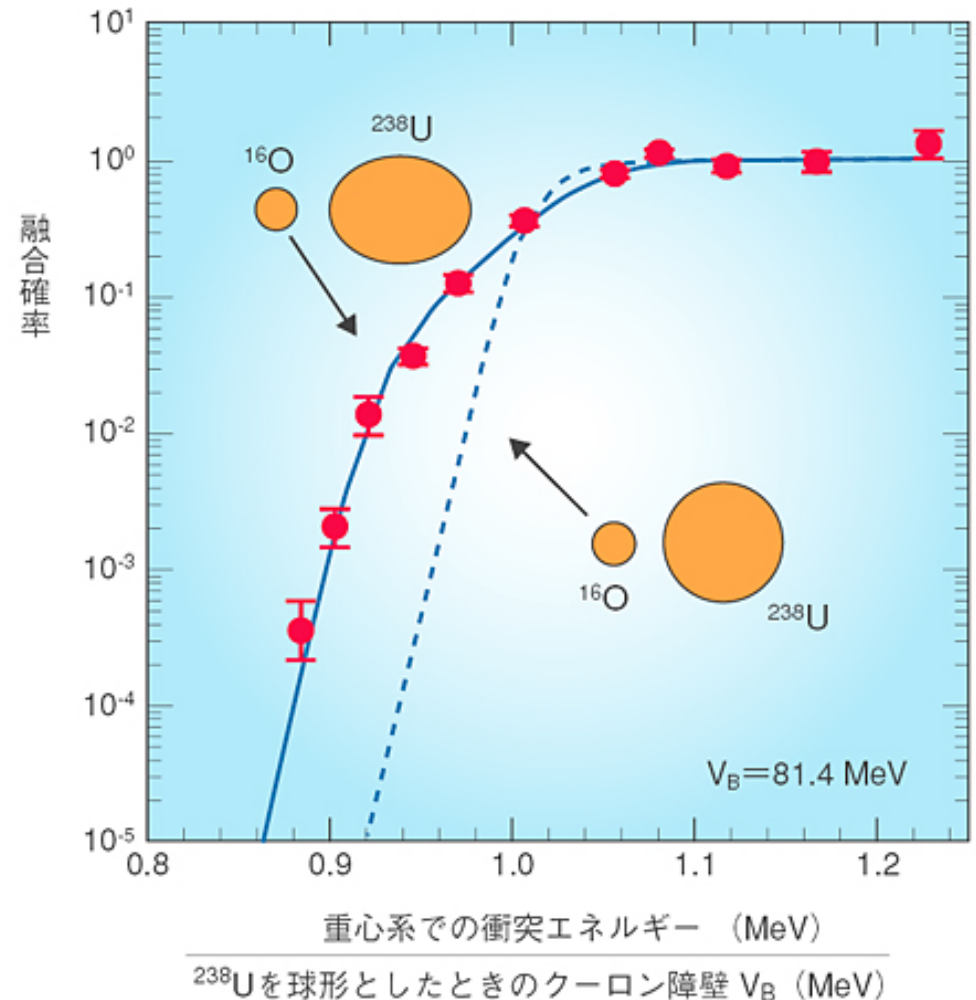


融合確率

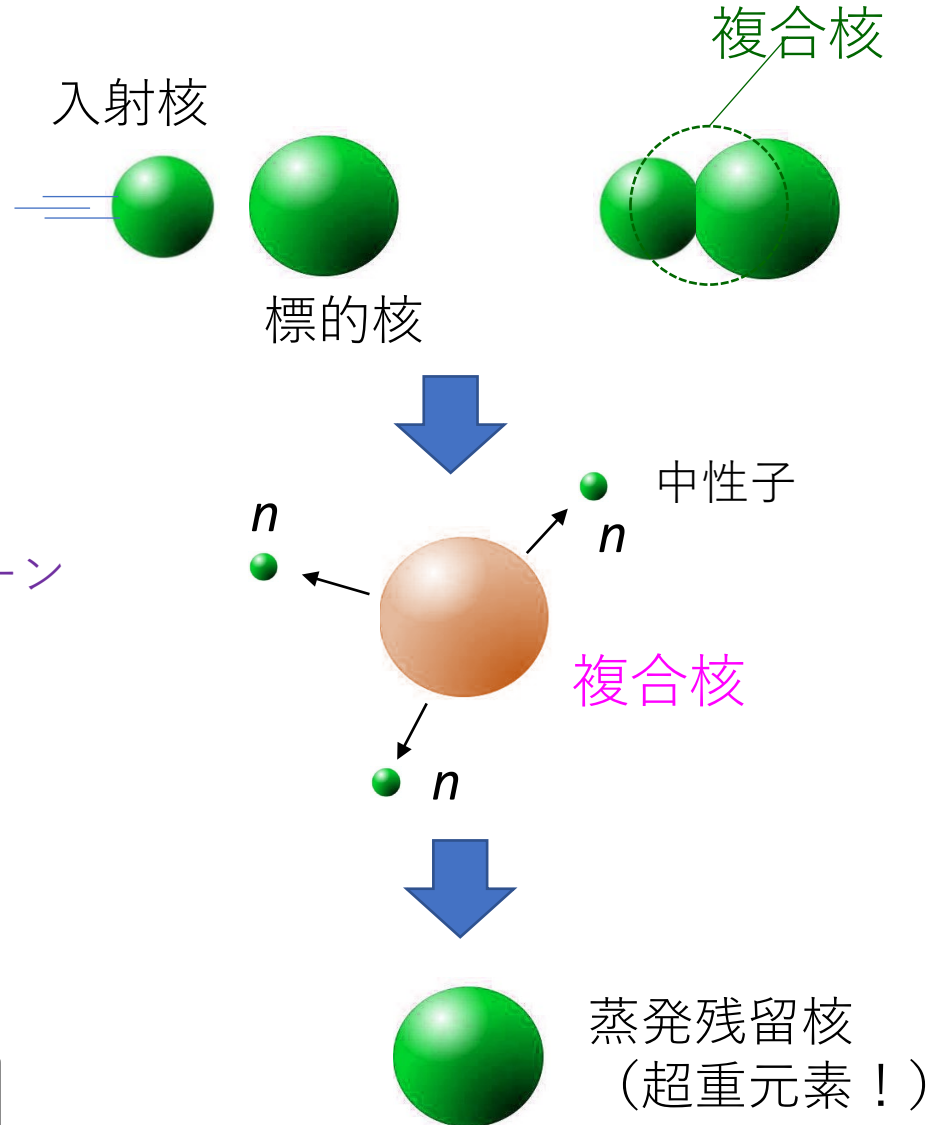
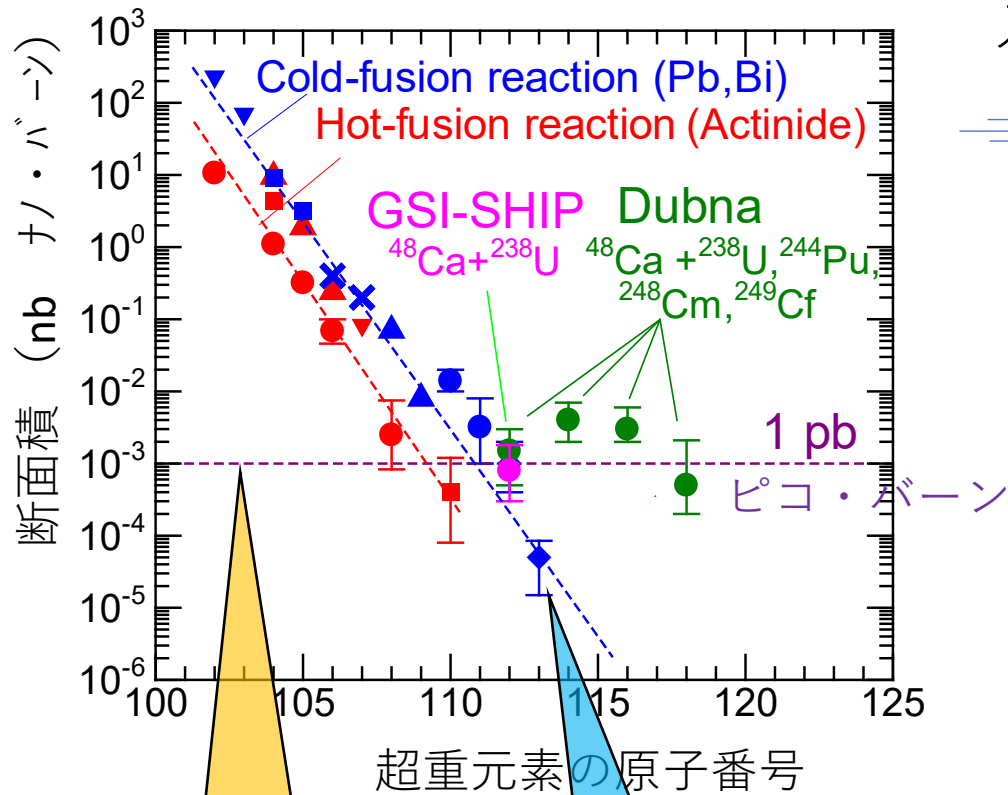
—球形核と変形核の違い—

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。



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

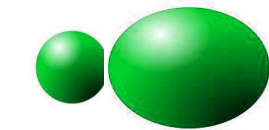
超重元素を作るのが難しい理由

—重い反応系で起こる現象—

超重元素合成の3ステップ



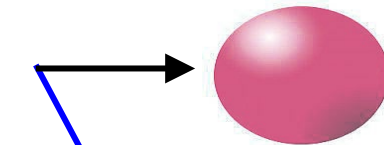
(1) クーロン障壁を
超えてコンタクト



6.6×10^{12}

準核分裂

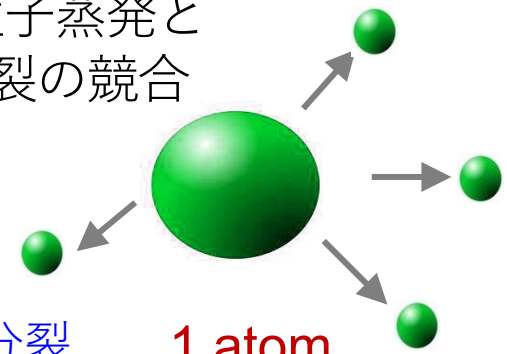
(2) 融合過程
複合核 CN



3.0×10^{11}

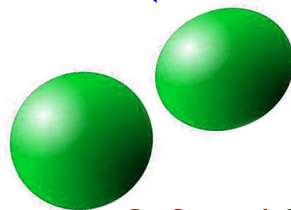
融合してから核分裂

(3) 中性子蒸発と
核分裂の競合



1 atom

(3週間かけて)



6.3×10^{12}



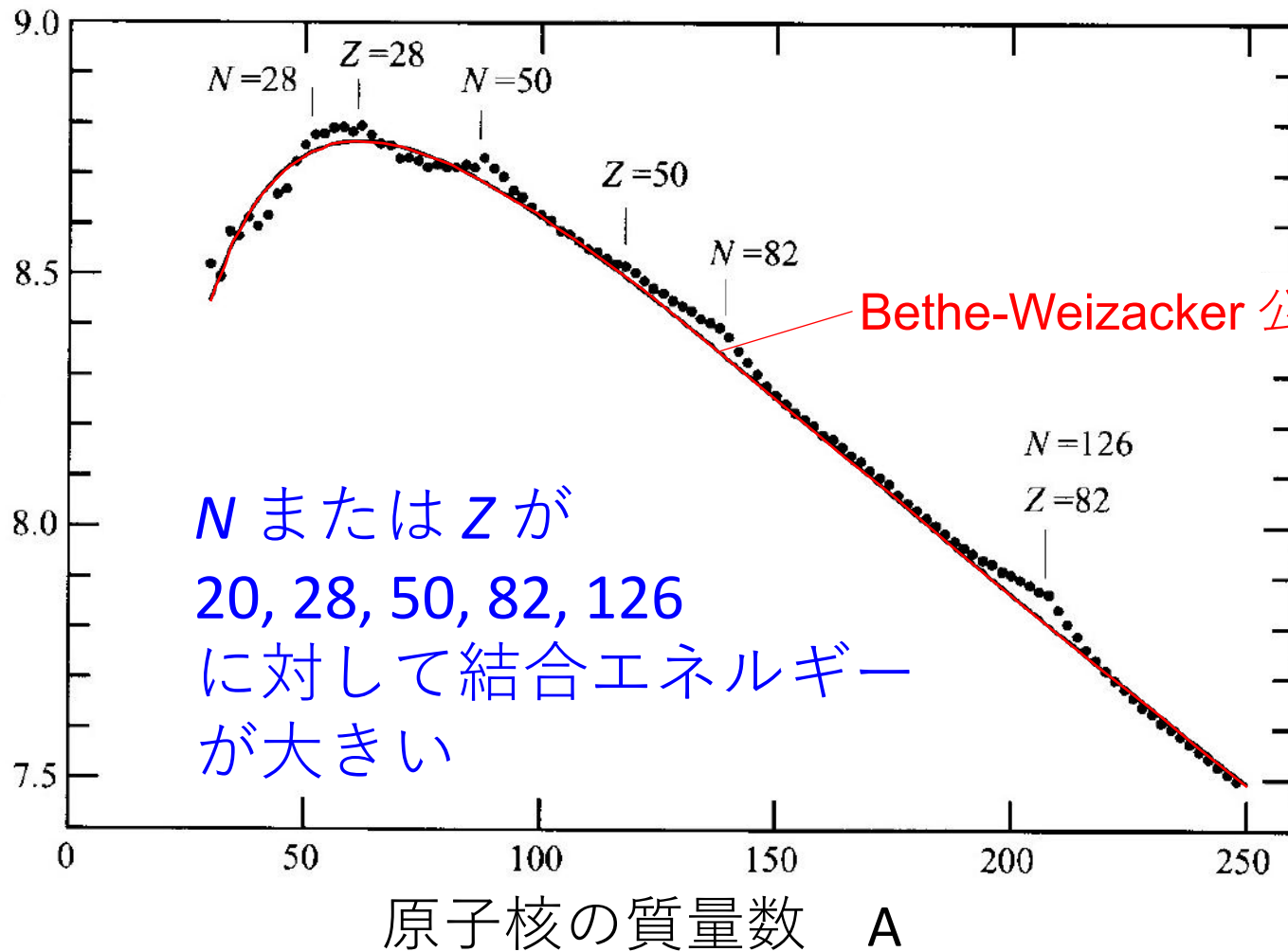
$\sim 3 \times 10^{11}$

(1) 重い原子核どうしの反応では核融合しづらくなる

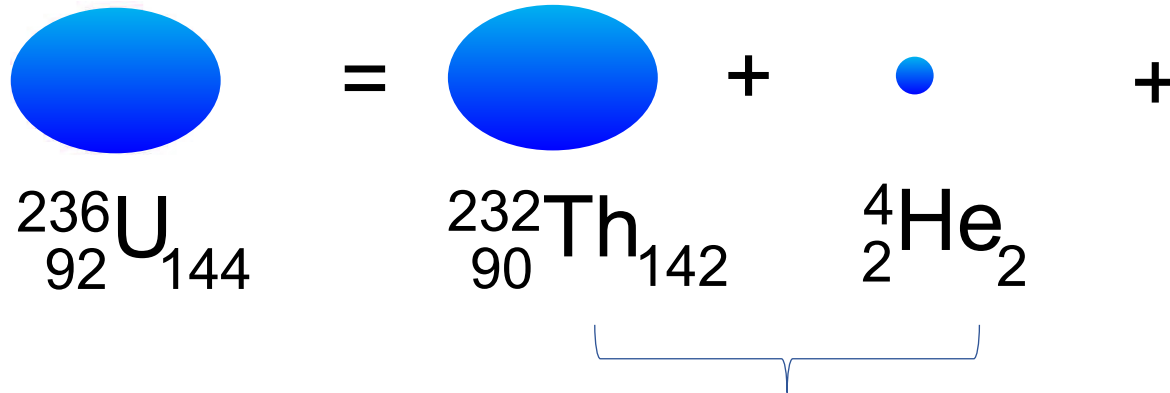
(2) 超重元素では、複合核のほとんどは核分裂してしまう

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

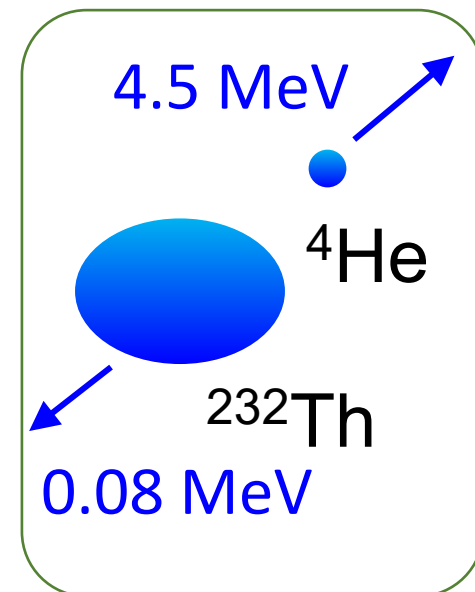
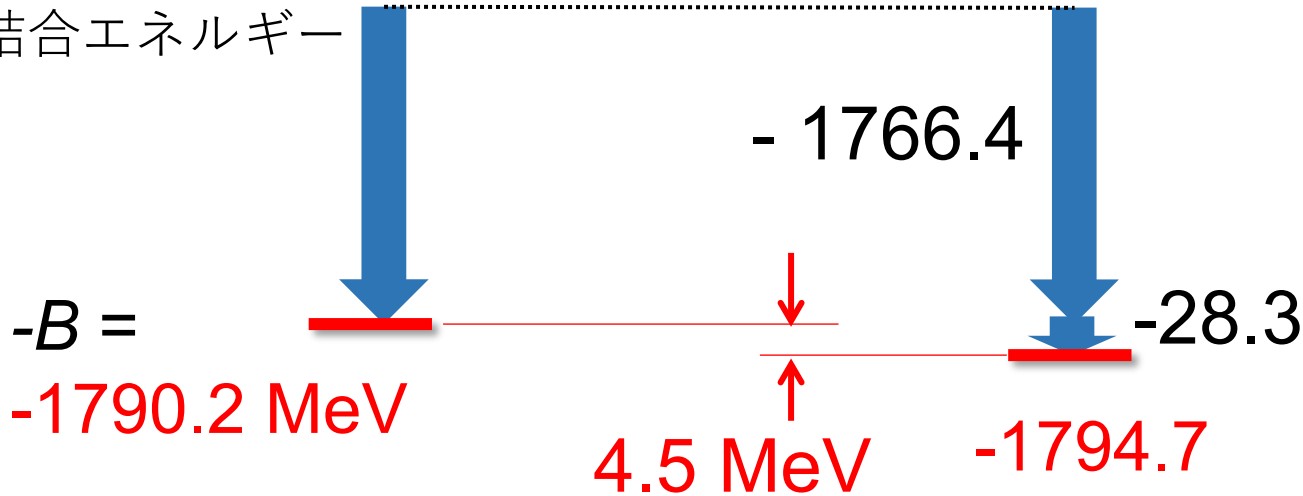


α 崩壊のQ値

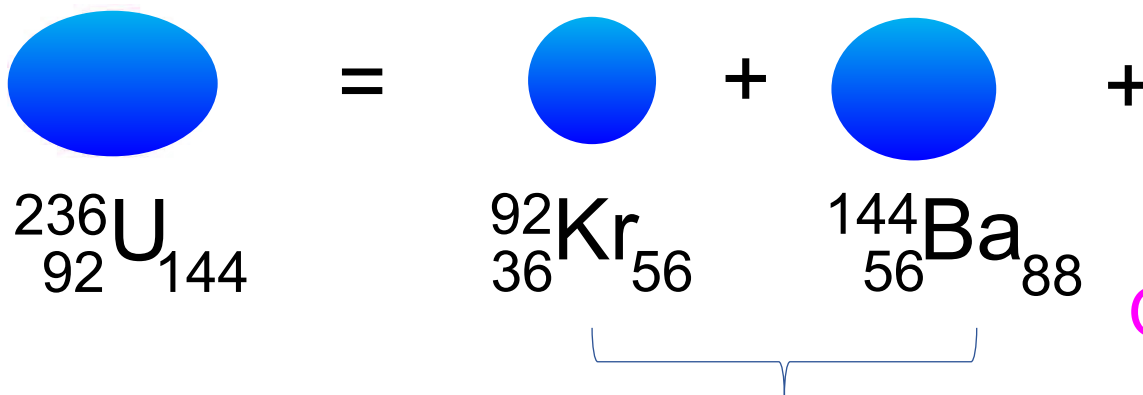


エネルギー
 $Q = +4.5 \text{ MeV}$

結合エネルギー



核分裂のQ値



エネルギー
 $Q = +181.9 \text{ MeV}$
(どこへ行く?)

結合エネルギー

$-B =$

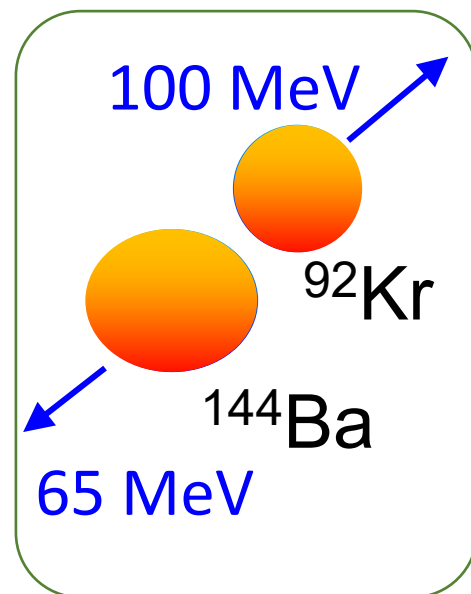
-1790.2 MeV

-782.1

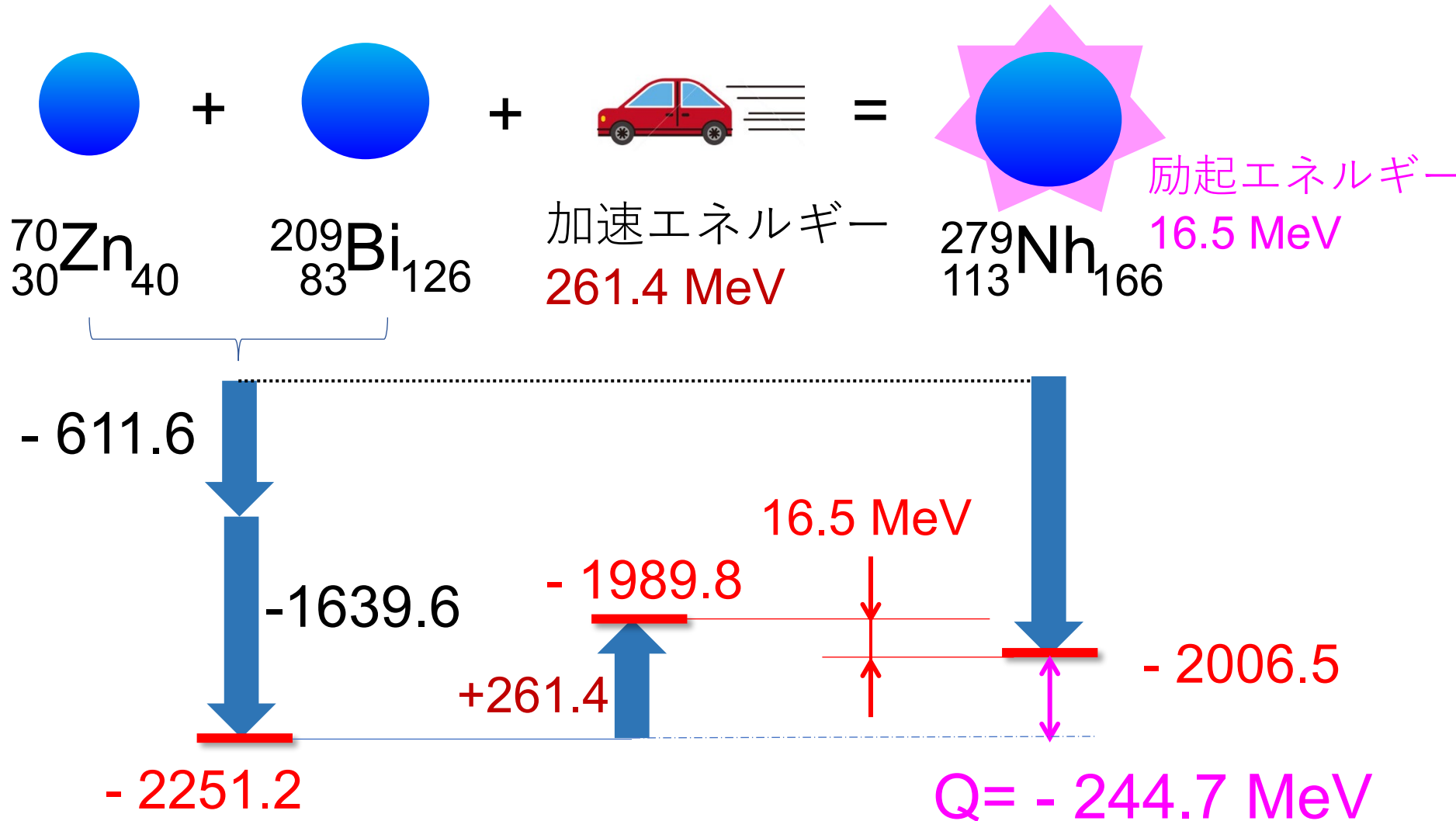
-1190.0

181.9 MeV

-1972.1



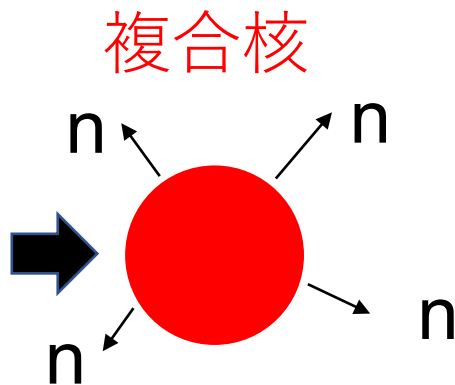
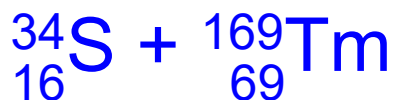
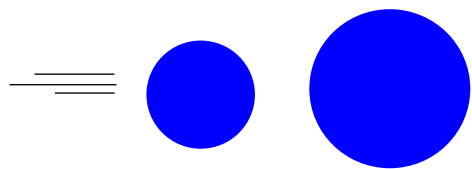
核融合反応



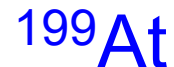
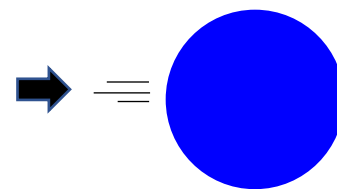
実習実験

実習で学ぶ反応

タンデムで加速



蒸発残留核



At 195 143 ms α 7.075 7.221 α → g γ 149, e ⁻ IT	At 196 290 ms α 6.953 α → m	At 197 387 ms α 7.049	At 198 2.0 s 388 ms α 6.707 α → m	At 199 1.0 s 4.2 s α 6.960 α → g α 6.856 α → m IT 103, e ⁻ γ 141, e ⁻ α 6.480 α → m	At 200 273 ms 6.92 s 7.9 s 47 s 43.2 s α 6.755 α → g γ 181 248)	At 201 1.5 m α 6.344 α → m γ 392 α → m ₁ α 6.277 572 443...	At 202 0.46 s 182 s 184 s α 6.135 α → m ₁ γ 577 639, 642, 738	At 203 7.4 m α 6.088 639, 642, 738
Po 194 0.392 s α 6.846 γ (658), e ⁻	Po 195 1.92 s 4.64 s α 6.699... γ (670) α → m α 6.606... γ (597...) α → g	Po 196 5.60 s α 6.522...	Po 197 26 s 56 s α 6.385 α 6.281	Po 198 1.76 m α 6.185... E, g γ (931), e ⁻	Po 199 4.17 m 5.47 m E, γ 1034 1002... g α 6.059 840... m α → m IT 238... e ⁻	Po 200 11.5 m E, α 5.863 γ 671, 618, 434 797... m	Po 201 8.96 m 15.6 m IT 418, e ⁻ E α 5.683 γ (6), e ⁻ α 5.786 γ 890 γ 967, 964... 240... m, α → g	Po 202 44.7 m E α 5.587 γ 689, 316, 166 791, 717... e ⁻
Bi 193 3.2 s 67 s E α 5.899... α → m γ	Bi 194 115 s 95 s α 5.599... γ 968, 575 260... α → m α 5.645... γ 968... α → g	Bi 195 87 s 183 s E α 6.106... α → m α → g	Bi 196 4.00 m 0.6 s 5.13 m E, β*, γ γ 808, 776 1049... IT (102) IT (158...) 1049... α 5.112 e ⁻ α 5.153 1809...	Bi 197 4.9 m 9.3 m E α 5.780 α → g E γ 855, 85 867, 828... m, g	Bi 198 7.7 s 11.6 m 10.3 m IT 249 196 562... 1063...	Bi 199 24.70 m 27 m E α 5.484 837... α → g m, g	Bi 200 31 m 36.4 m E β* γ 842, 946 1027 1027 462, 420 245... g	Bi 201 57.5 m 103 m IT 848 γ 629, 936 1014 786... m, g

複合核

実験のポイント

【核融合反応の実験】

- (1) **超重元素を合成するのと同じ実験装置や検出器を使う。実験の考え方も同じである。**
 - どんな装置が必要か。
- (2) **実験は、“超高真空”に保たれた装置内で行われる。**
 - 入射ビーム、核融合反応を起こす装置、生成した原子核を分離する装置、生成した原子核を検出する場所、すべて。
- (3) **データ取得は、最先端のデジタルエレクトロニクスを使う。**
 - 従来のアナログ方式とどう違うか。
- (4) **データ解析の手法も超重元素の合成実験と同じ。**
 - 生成された原子核の核種をどう識別するか。
- (5) **超重元素を作るには時間がかかるので軽い元素同位体を作る。**
 - 原子番号85のアスタチン同位体 (At) を作る (自然にはない) 。