2016年度 仁科記念講演会

「祝 ニホニウム発見」

いかにして元素は合成されたか
―天然元素から人工元素まで―

講演1 「いかにして天然元素は合成されたか」
茂山 俊和（東京大学理学系研究科ビッグバン宇宙国際研究センター准教授）

講演2 「いかにして人工元素は合成されたか」
羽場 宏光（理化学研究所仁科加速器研究センター RI 応用チームリーダー）

挨拶：小林 誠（仁科記念財団理事長）、福田 裕穂（東京大学理学系研究科長）、
下浦 享（東京大学原子核科学研究センター長）、延與 秀人（理化学研究所仁科加速器研究センター長）

日 時　2016年12月5日(月)
16:00～18:00（開場15:30）

場 所　東京大学本郷キャンパス大講堂（安田講堂）

主 催　仁科記念財団、東京大学原子核科学研究センター、理化学研究所仁科加速器研究センター

後 援　日本アイソトープ協会

2016 年度（第 62 回）仁科記念講演会

祝 ニホニウム Nh 発見

いかにして元素は合成されたか —天然元素から人工元素まで—

2016 年 12 月 5 日 16:00～18:00 東京大学安田講堂

プログラム

司会：東京大学原子核科学研究センター長　下浦 享

開会の辞

挨拶：仁科記念財団理事長　小林 誠

挨拶：東京大学理学研究科長　福田裕穂

挨拶：理化学研究所仁科加速器研究センター長　延與秀人

講演

講演 1：東京大学理学系研究科ビッグバン宇宙国際研究センター准教授　茂山俊和

「いかにして天然元素は合成されたか」

講演 2：理化学研究所仁科加速器研究センターRI 応用チームリーダー　羽場宏光

「いかにして人工元素は合成されたか」

閉会の辞

挨拶：元東京大学原子核研究所長、東京大学名誉教授　山崎敏光

「いかなる理由で国際純正応用化学連合は森田浩介グループに 113 番元素命名権を与えたか」

主催者からのご挨拶

皆様、本日は仁科記念講演会にご参集いただき有難うございます。

さて、日本発の新元素、原子番号 113 番「ニホニウム」Nh がいよいよ「周期表」に登場します。ロシア・アメリカの研究者が発見した 114 番から 118 番までの新元素が加わり「周期表」の第 7 周期までが完結するという元素発見史上画期的な成果となりました。

仁科記念財団、東京大学原子核科学研究センター、理化学研究所仁科加速器研究センターはこの快挙を記念して、2016 年度（第 62 回）仁科記念講演会「祝ニホニウム発見」を、本日、東京大学安田講堂にて開催することにいたしました。

これまでに発見された 118 種類の元素のうち、原子番号 1 の水素から 92 番のウランまでの天然に存在する元素は星の中の核融合反応や超新星爆発、中性子星の合体など星の最期の天体現象で合成されたと考えられています。一方、原子番号 93 番のネプツニウムから 118 番のオガネソンまでの元素と、43 番テクネチウム、61 番プロメチウム、85 番アスタチンはほぼ全てがイオンの加速器を用いて人工合成されました。

日本発ニホニウムの合成実験は、埼玉県和光市にあります理研重イオン加速器施設で行われましたが、この加速器は東京大学原子核科学研究センターと理化学研究所仁科加速器研究センターが共同事業として建設したものです。

本講演会では、宇宙における元素合成の謎に挑む新進気鋭の物理学者**茂山俊和博士**と、森田浩介九州大学教授の右腕としてニホニウム合成実験を主導した化学者**羽場宏光博士**が「いかにして元素は合成されたか—天然元素から人工元素まで—」を語ります。

そして閉会の辞では、今回の命名権授与審査委員を務められた**山崎敏光東京大学名誉教授**から授与理由を語っていただきます。

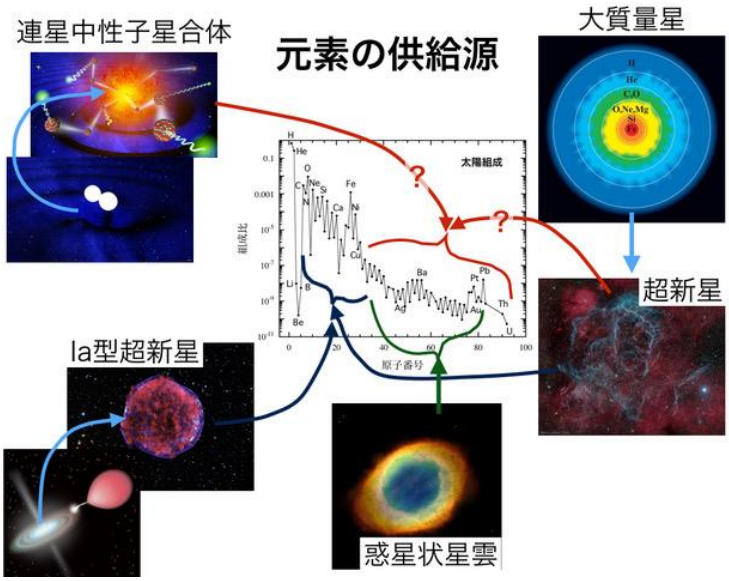
おわりに、本日の講演会を通じまして、皆様が基礎科学の分野に一層ご関心を持っていただき、また、基礎科学分野での我が国の実力の一端をご理解いただければ幸いです。

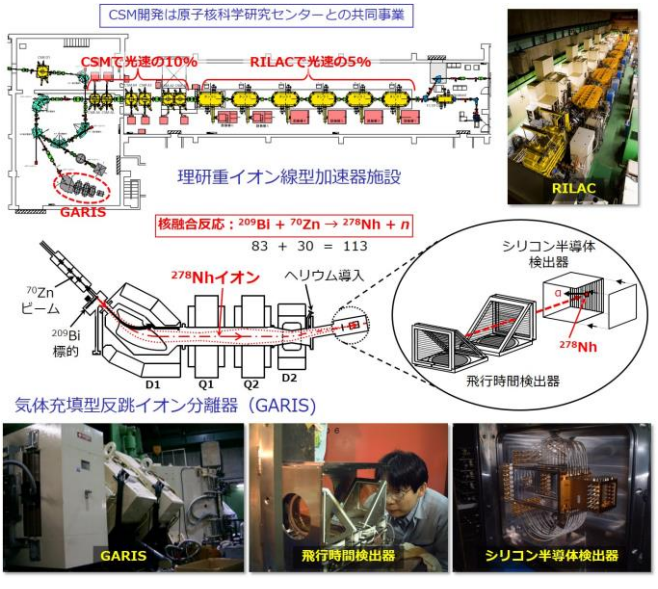
元素周期表（2016年）

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

原子番号 元素記号　天然元素　　原子番号 元素記号　人工元素

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





お知らせ

113番元素名の「ニホニウム」正式決定にあたって（総長談話） [その他] (広報室)

2016年12月01日掲載

　このたび、森田浩介博士をはじめとする理化学研究所のグループが発見した113番元素の名称が、国際純正応用化学連合（IUPAC）によって「ニホニウム」と正式決定されました。東京大学を代表して、心からお祝いを申し上げます。

　これは、長岡半太郎博士、仁科芳雄博士以来の長年にわたる我が国の原子核物理学研究の賜物であり、我が国の基礎科学と先端技術の先進性の現れでもあります。この素晴らしい成果に、東京大学も量子ビーム加速を通じて貢献させていただきましたが、引き続きこのような学術基盤を担う研究の発展を進めてまいりたいと考えています。

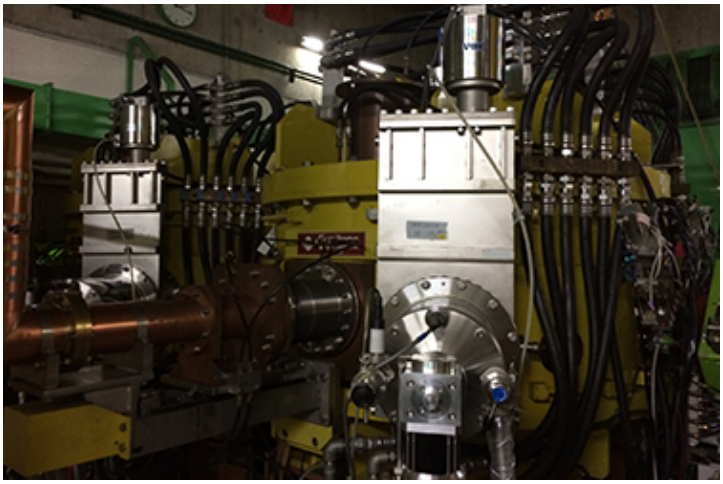
　我が国における元素の発見の歴史は古く、戦前には、本学教養学部の前身である第一高等学校で教鞭をとったこともある小川正孝博士が惜しいところで逃した75番元素の研究がありました。加速器による原子核の研究では、本学の電気工学科を卒業したのち、長岡半太郎博士の下で物理学に転じた仁科芳雄博士らによる60インチサイクロトロンの建設が第2次大戦中も続けられました。その後、戦後に原子核研究が中断した時期を経て東京大学附属原子核研究所（核研）、理化学研究所（理研）などで加速器による原子核実験が行われるようになり、超重元素の探索の機運も研究者たちの間で高まっていきました。
　超重元素を作り出すには、重い原子核を別の原子核にぶつける必要があり、重イオン加速器が必要です。1984年、理研から核研に教授として移った野村亨博士を中心に、GARISという超重元素分離器を製作してのプロジェクトが始まりました。ただ、GARISによる超重元素探索はうまく進みませんでした。
　しかし、ここで歴史の偶然が訪れます。次世代加速器（RIBF）建設のためにGARISの場所を変える必要が生じ、加速されるイオンビームのエネルギーと強度の大幅な向上のため、加速器に6台の装置（IH型キャビティ）が付加されました。その副産物として、超重元素探索に適したビームがGARISに入射されるようになったのです。
　もう一つの偶然も加わりました。それは東大に関わるものです。1997年に、核研を改組する形で、理学系研究科附属の施設として原子核科学研究センター（CNS）が設立され、2000年度に上記の6台の装置のうち4台を東大の予算で設置したのです。この装置導入の当初の目的はRIBFの全体性能の向上でしたが、超重元素探索にもプラスに働くことも予期されていたようです。もちろん東大の寄与だけで実験ができたわけではないものの、この理研と東大の連携がなければデータは取れなかったとは言えるかもしれません。

　日本の物理学の水準は極めて高く、113番元素の発見はその結実の一つです。その源は、常に広い視野と長い時間スケールで研究を進めてきた、厚みのある核物理学の研究コミュニティにあります。性急に成果を求めるのではなく、常に学問の基盤を高め続けることの重要性の証明を、ニホニウムの発見が示しているのです。
　今回の理研の栄誉を心からお祝いするとともに、今後も本学が、我が国さらには世界の学術に大きな貢献を果たすため、いっそうの努力を重ねていく決意を新たにしております。

東京大学総長 五神 真

関連URL：特別解説 「113番元素の発見」
理学系研究科教授／理学系研究科附属原子核科学研究センター 前センター長　大塚 孝治

対象者： 社会人・一般 / 在学生 / 受験生 / 留学生 / 卒業生 / 企業

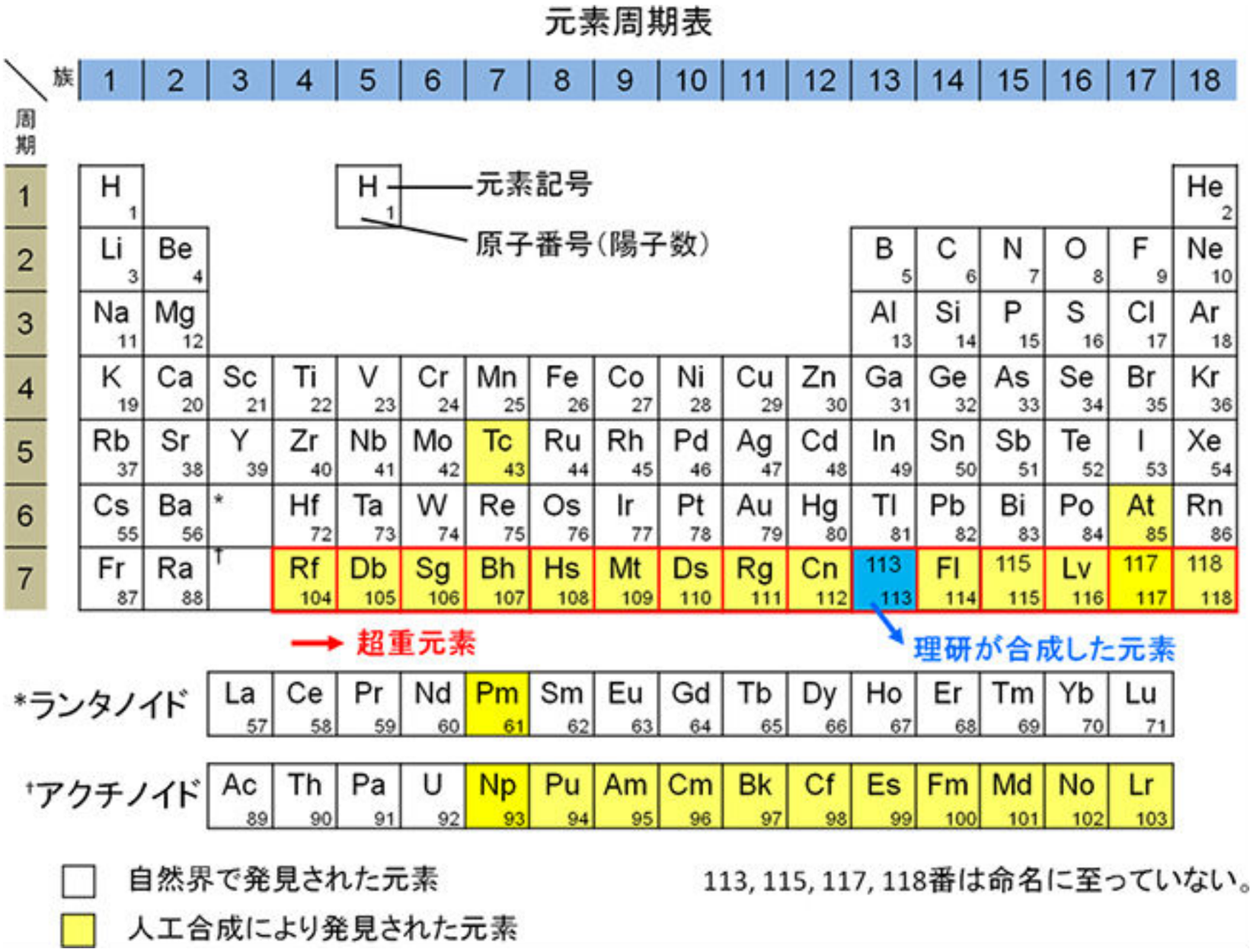


東大の予算で設置された重イオンエネルギー増幅装置。理研と東大の連携がなければ貴重なデータは取れなかった、と言えるかもしれません。

RESCEU
東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター
Research Center for the Early Universe

いかにして天然元素は合成されたか

茂山 俊和

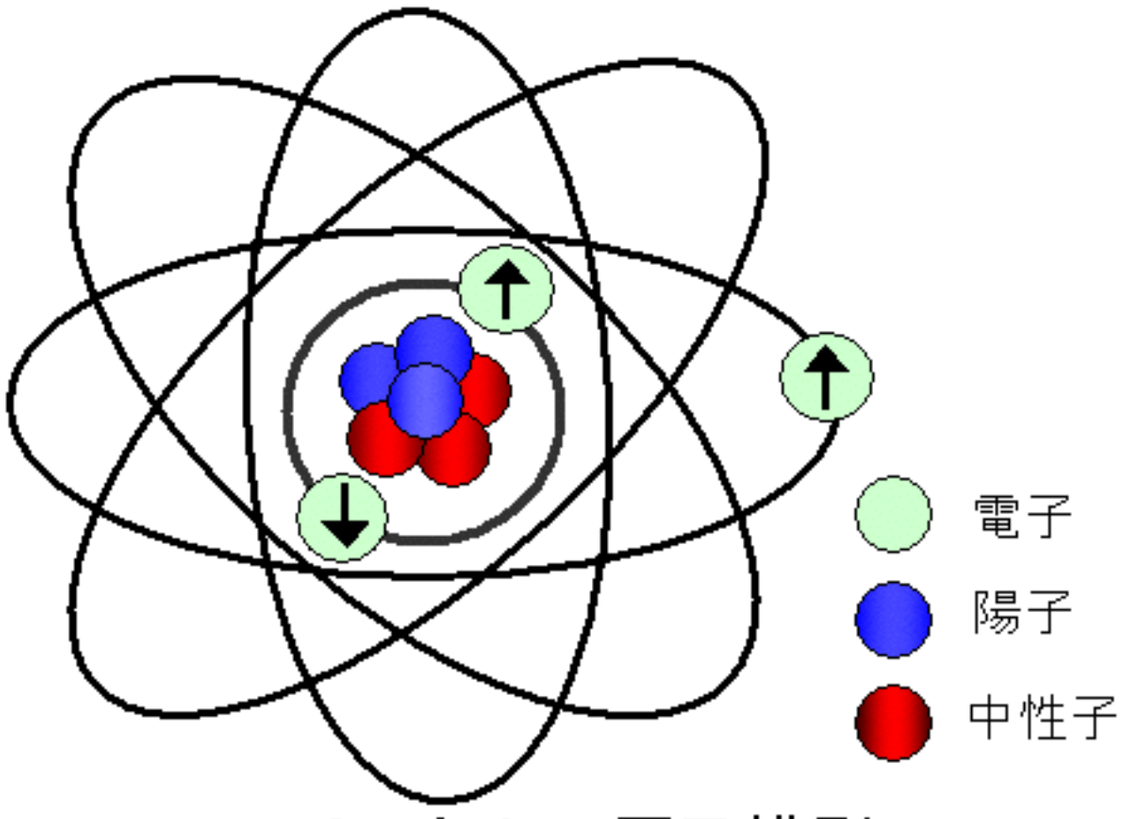


天然元素と人工元素

iTmediaより

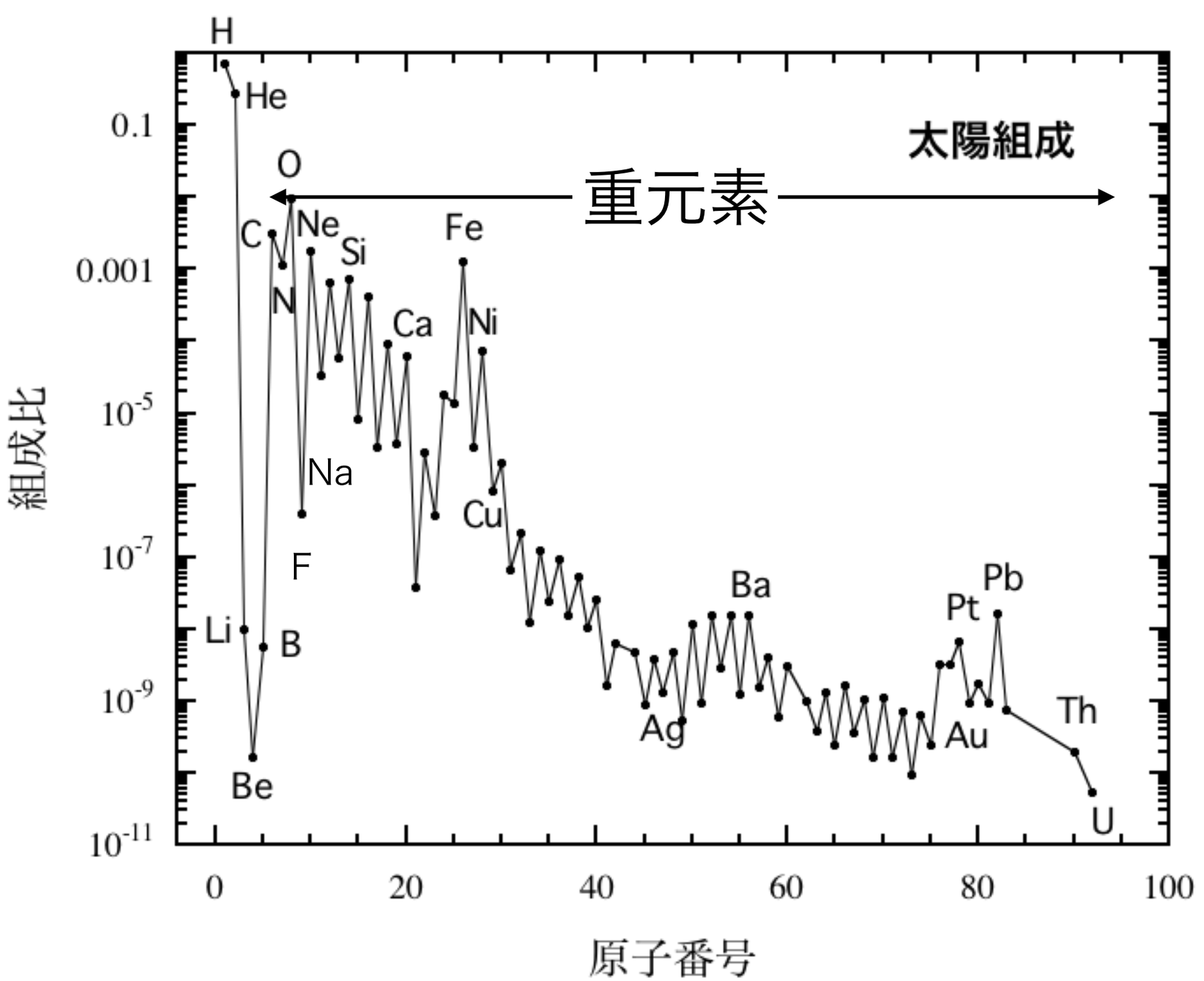
元素とは

- 原子=物質の基礎単位
  - 原子核+電子
  - 原子核=陽子+中性子
    - 陽子数(原子番号)と質量数
- 元素=「性質を包括する抽象的概念」
  - 原子番号のみで区別=元素記号
  - 同位体は区別しない
- 元素合成=原子核の変化(核融合、核分裂)



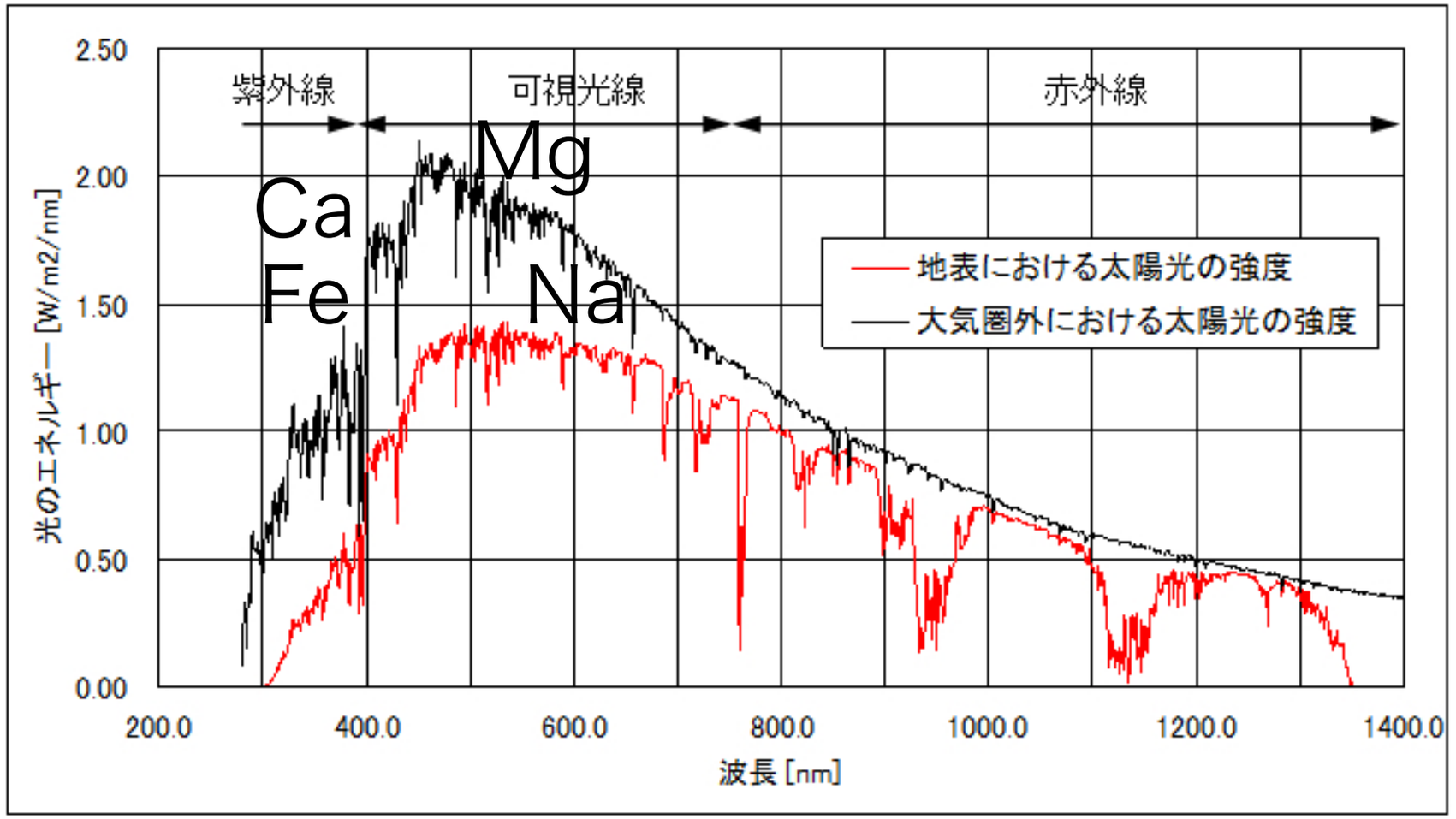
リチウムの原子模型

http://gc.sfc.keio.ac.jp/



太陽系にある元素の組成

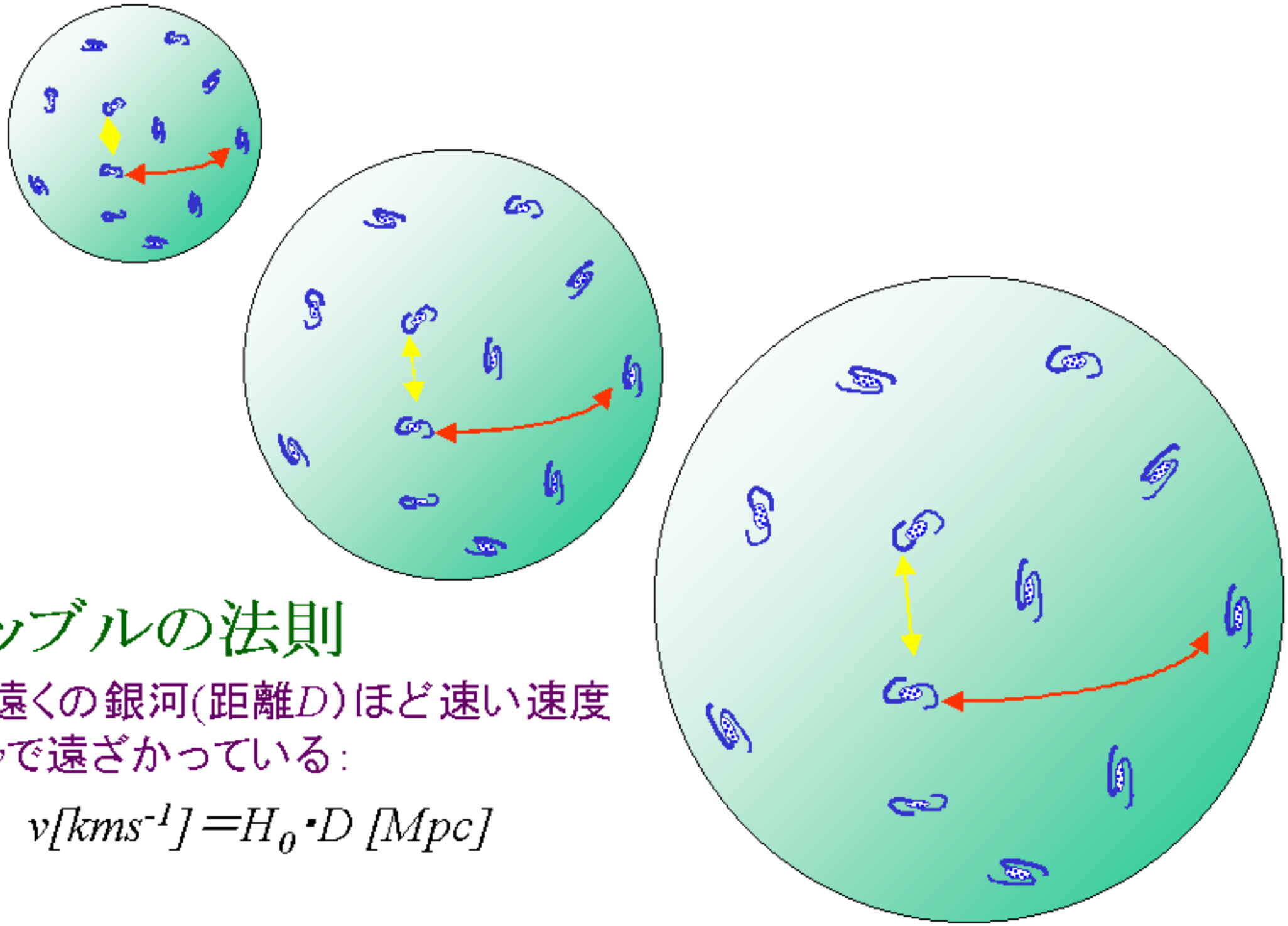
いつでもどこでも同じ組成なのか?



太陽のスペクトル

吸収線の強さから組成を求める

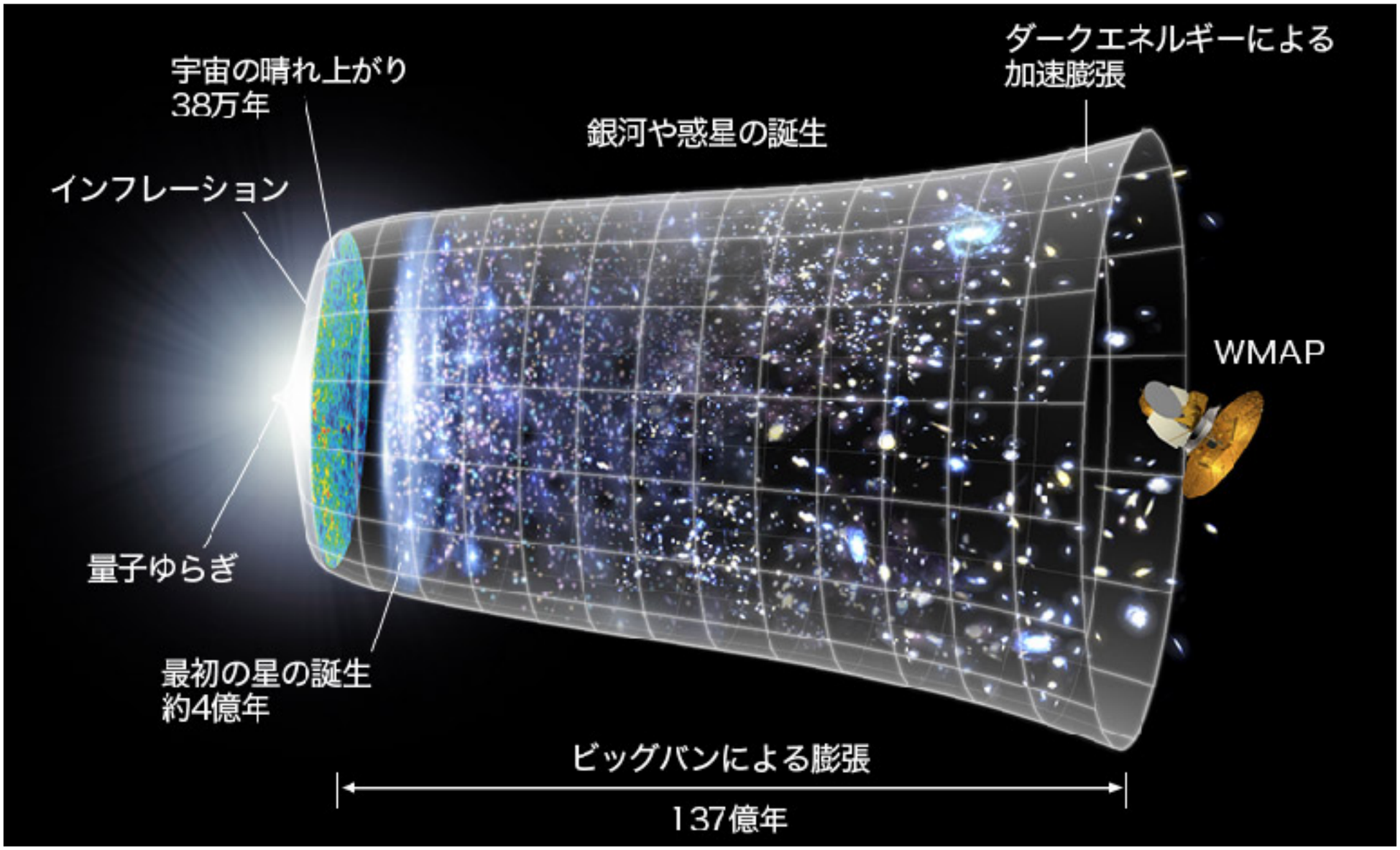
宇宙は膨張している



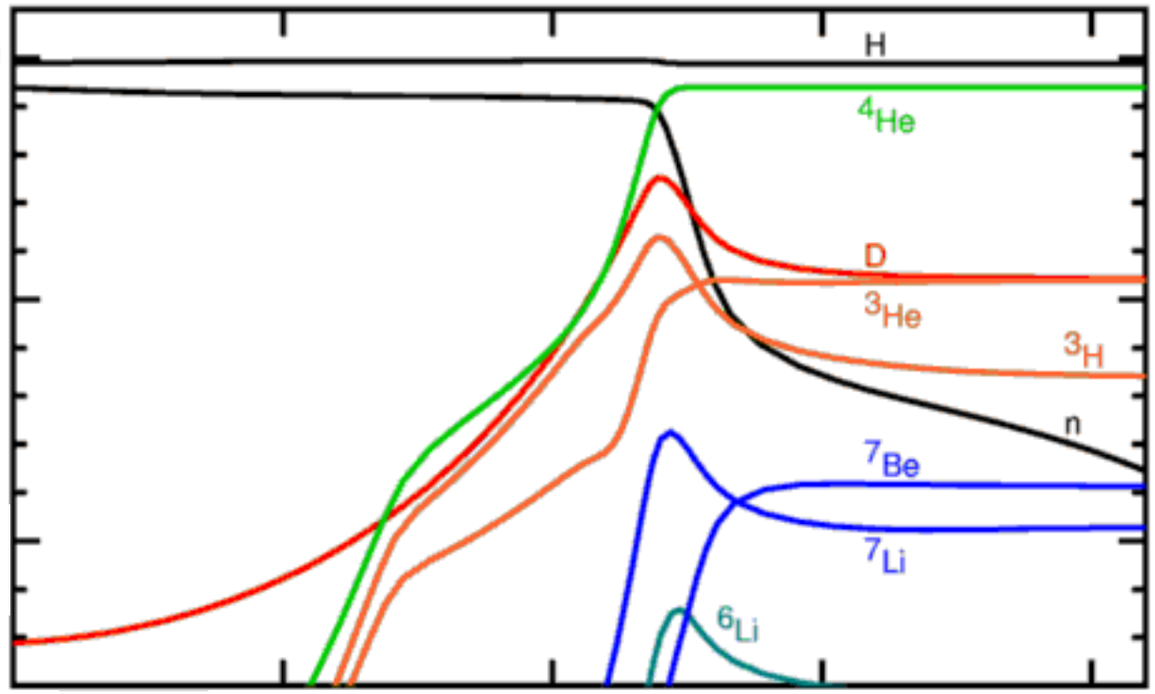
- ハッブルの法則
  - 遠くの銀河(距離D)ほど速い速度vで遠ざかっている:

$$v[kms^{-1}] = H_0 \cdot D\ [Mpc]$$

- 過去の宇宙は小さい
  - そして熱い
    - 宇宙が現在の大きさの1/1,000の時、温度~3,000 K
      - 宇宙背景放射
    - 宇宙が３０億分の1の大きさの時、温度~100億 K
      - 鉄の原子核もバラバラになる温度
    - 陽子、中性子、電子、陽電子、ニュートリノ、光子



宇宙膨張の帰結としての元素の起源



1
0.00001
質量比
0.0000000001

1 10 100 1000 10,000
時間(秒)

宇宙最初の元素合成

水素(H)、ヘリウム(He)が主成分

少量の重水素(D)、リチウム(Li)

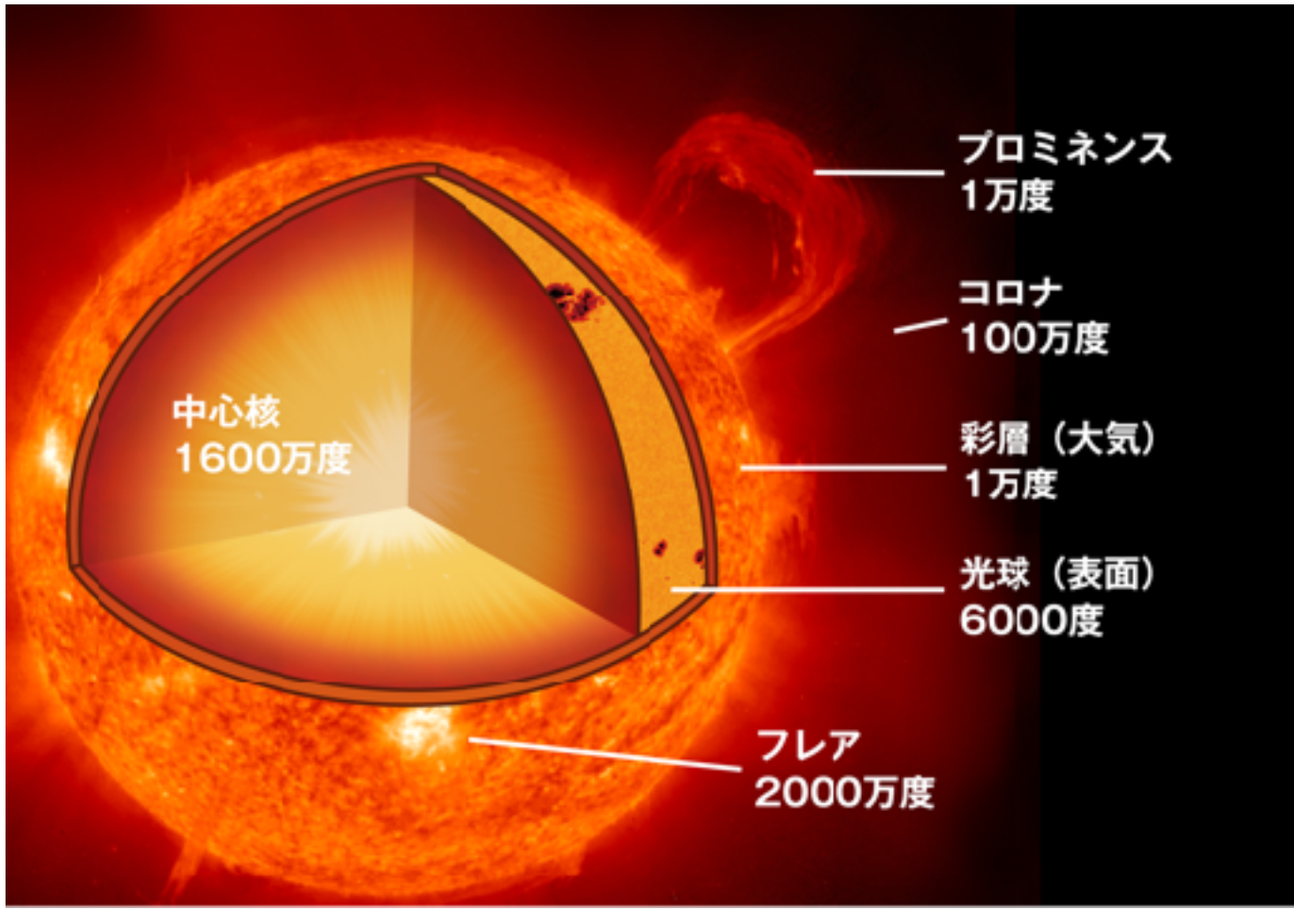
元素合成の現場

八ヶ岳(7月7日)

出典： lovecomet2010.blog48.fc2.com

恒星の中身

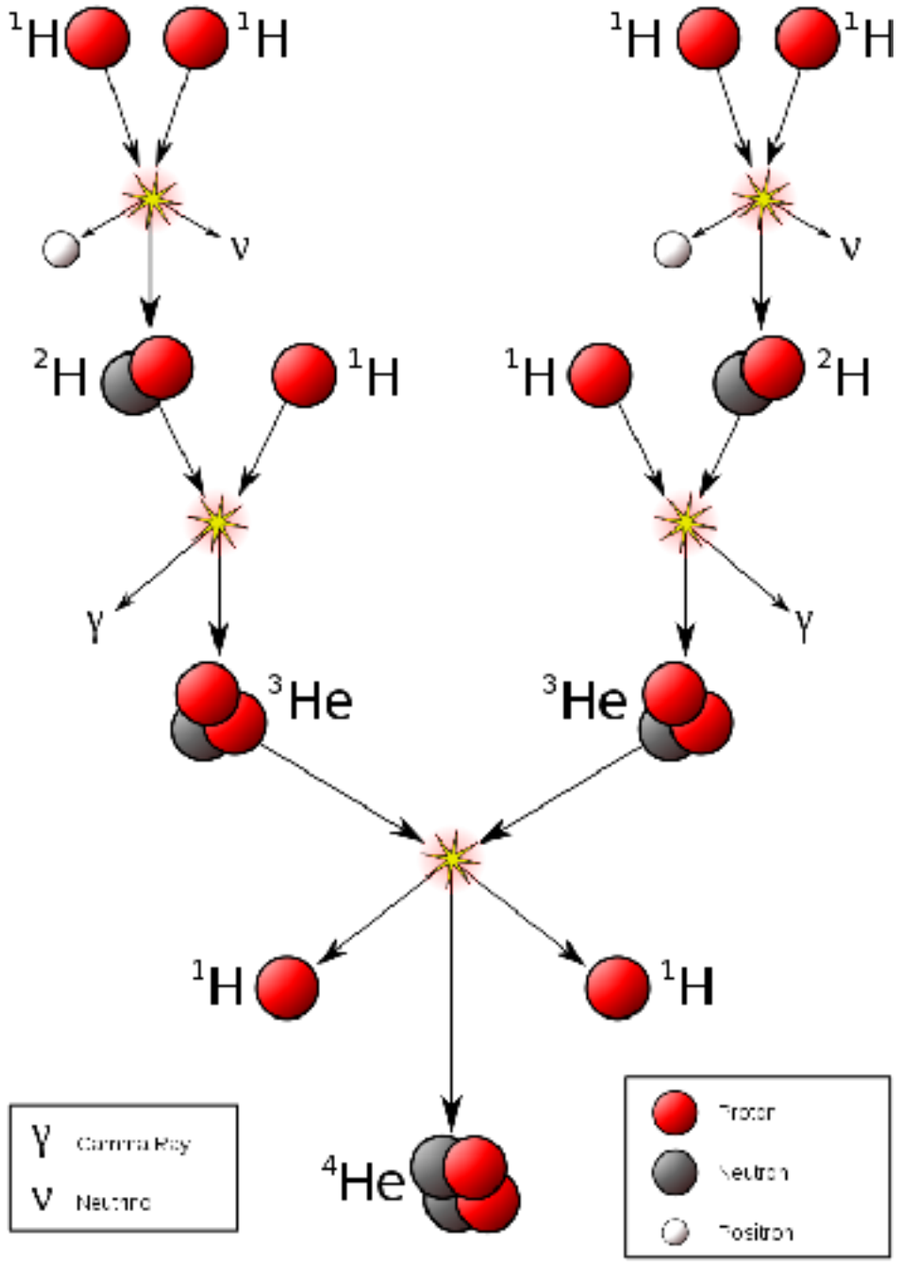
- 恒星の中
  - 自己重力(万有引力)⇄圧力差
  - 中心は高温高密度
- 恒星の中心
  - 1千万 K以上の高温
- 質量が大きいほど中心温度は高い



国立天文台

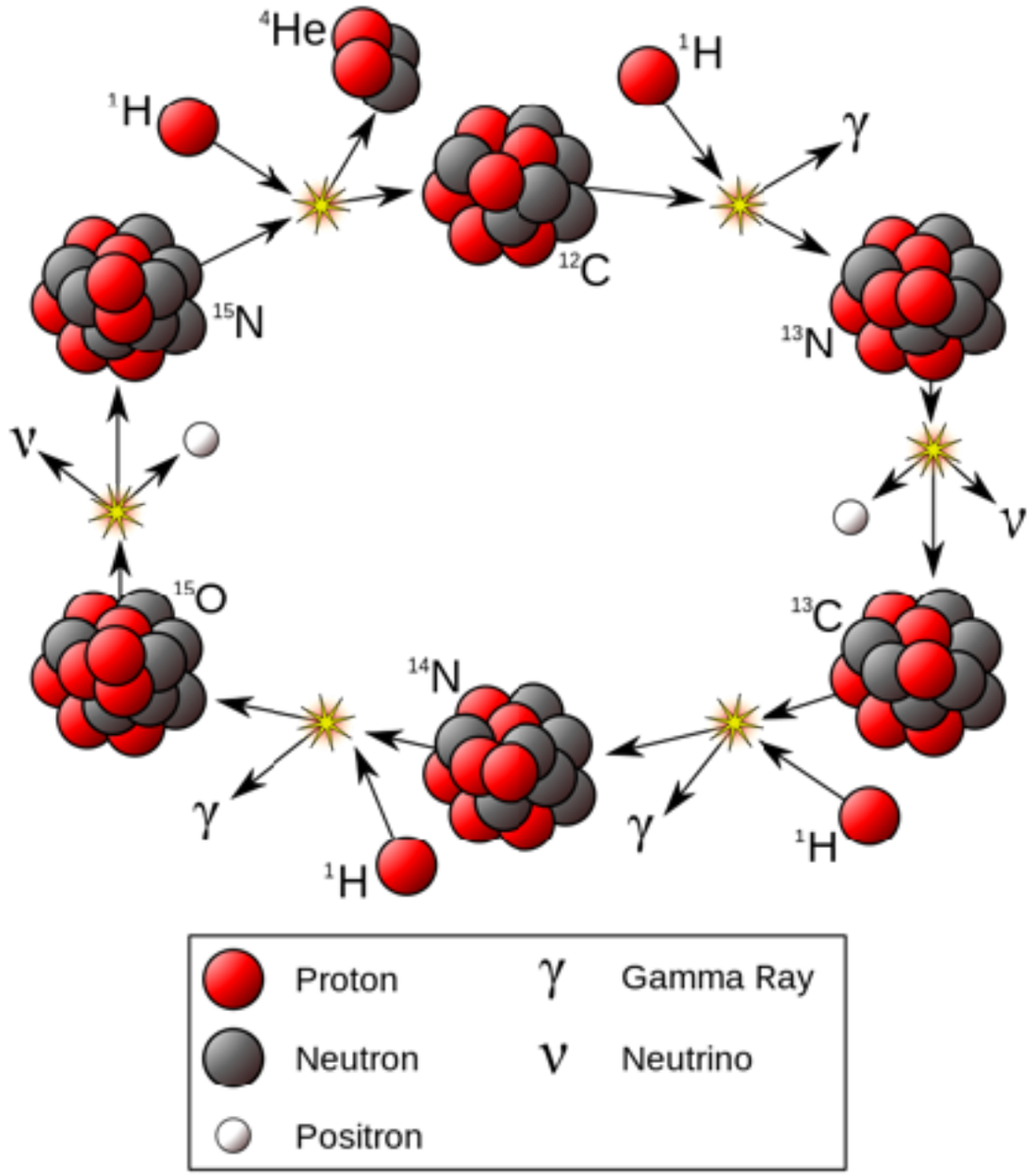
元素合成の現場

- 電気の反発力に打ち勝って核融合
  - 4つの水素(H)から1つのヘリウム(He)
    - 発熱反応
    - 太陽のエネルギー源
      - 100億年継続



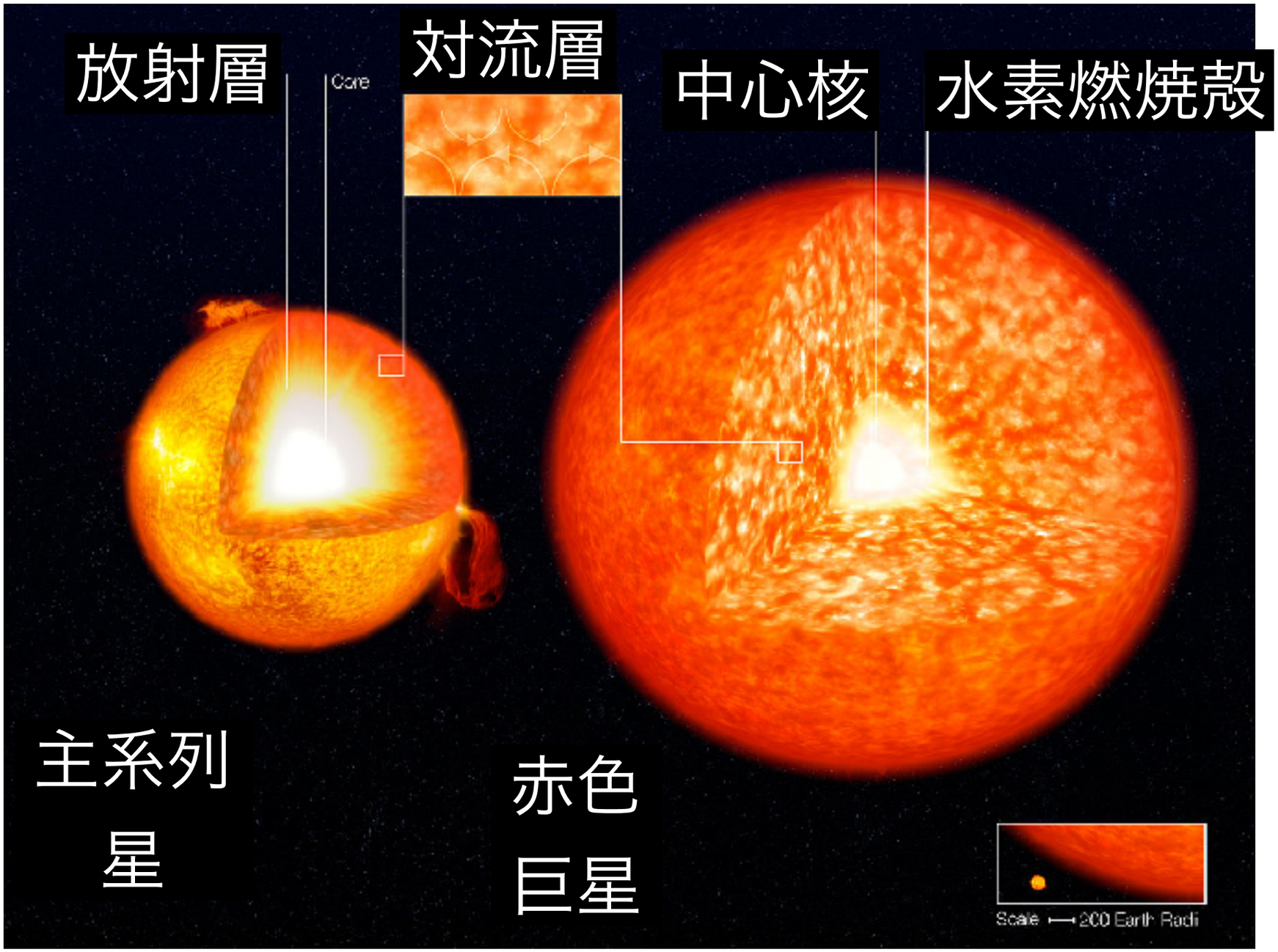
もう一つの水素核融合反応

- CNOサイクル
- 炭素(C)、窒素(N)、酸素(O)を触媒とする反応
- 太陽より重い星の中心で起こる。
- C,Oは^{14}Nになる。



星の進化

- 4つの水素の質量より一つのヘリウムの質量が小さい
  - 質量欠損=>エネルギー($E=mc^2$)
- ヘリウム中心核の形成
- 水素燃焼は中心から球殻上領域へ



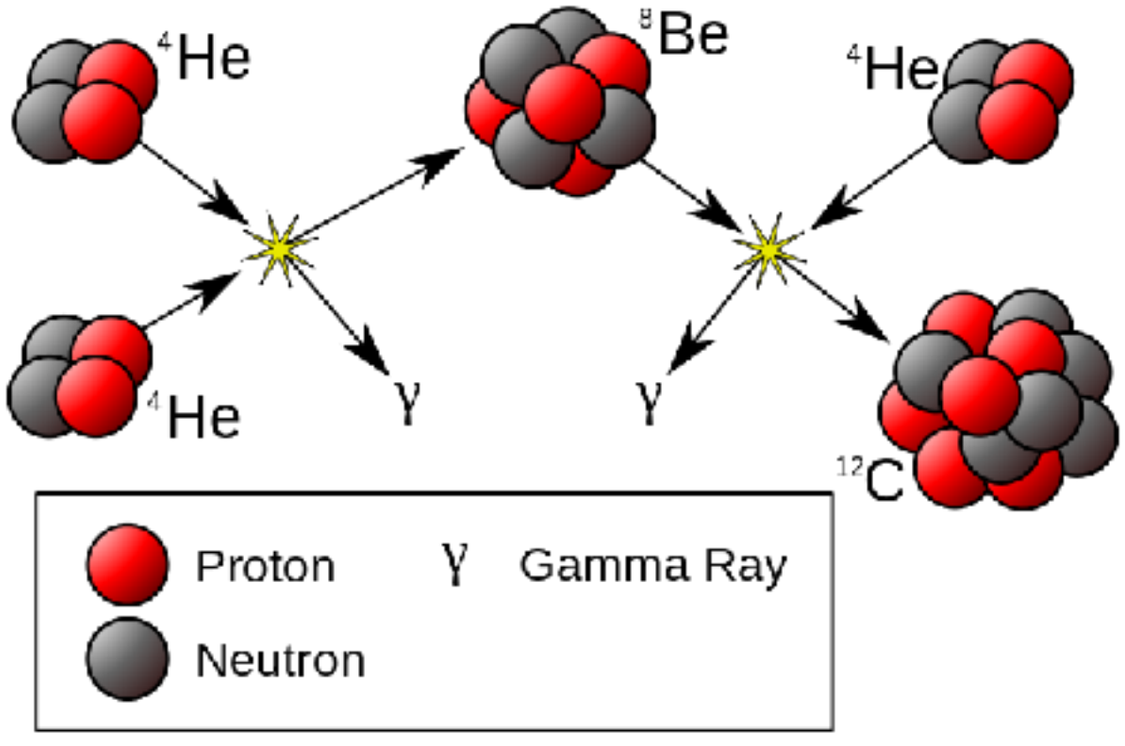
http://www.eso.org/public/images/eso0729a/

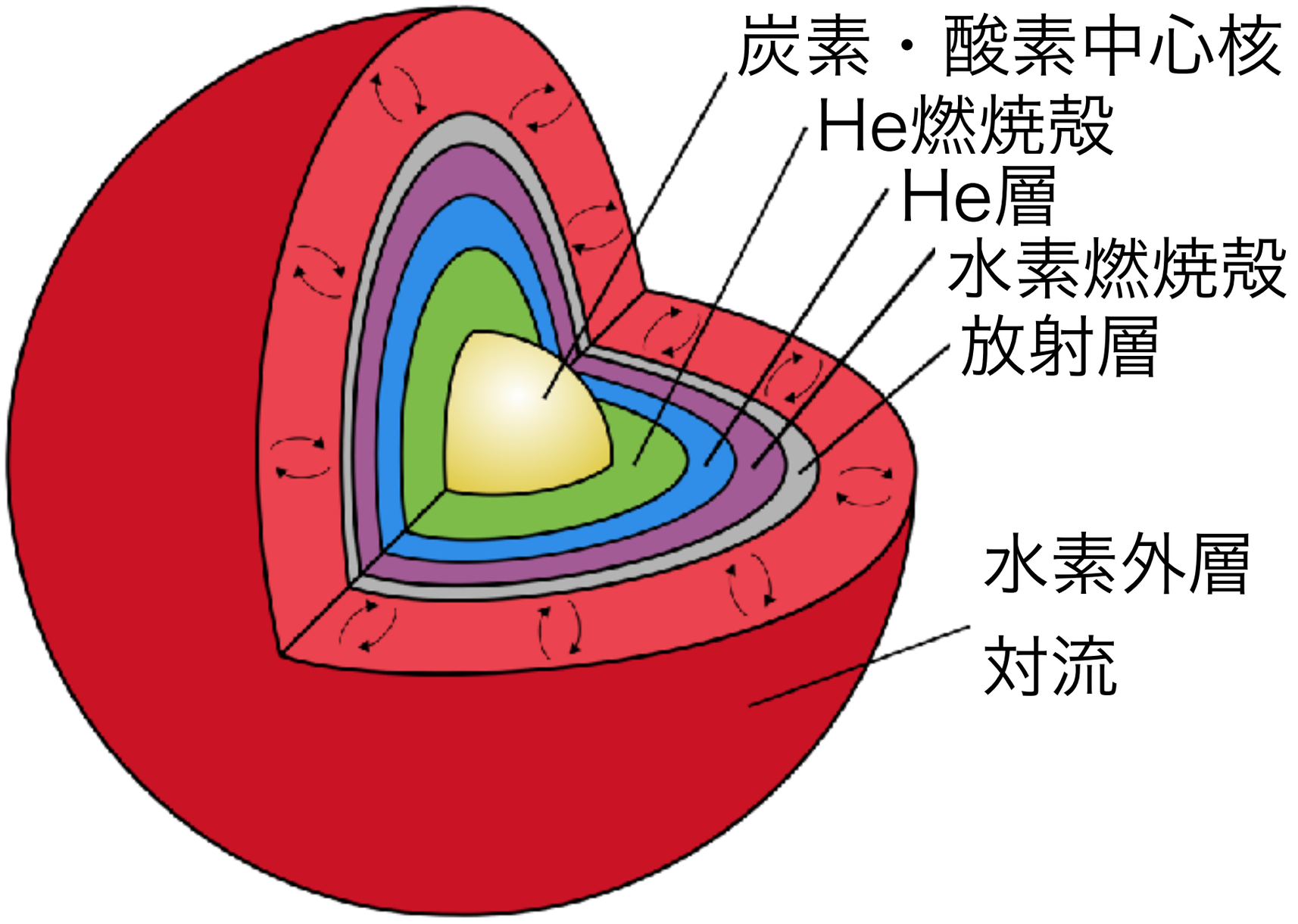
構造の変化

主系列星から赤色巨星

炭素・酸素の作り方

- ヘリウム(He)中心核の成長
  - 収縮による密度・温度上昇
  - 3つのHe=>炭素(^{12}C)
    - ^{8}Be=>2^{4}He(8.2x10^{-17} 秒)
    - 発熱反応
    - ^{12}C+He=>^{16}O
- 水平分枝星に収縮
- 炭素・酸素中心核の成長





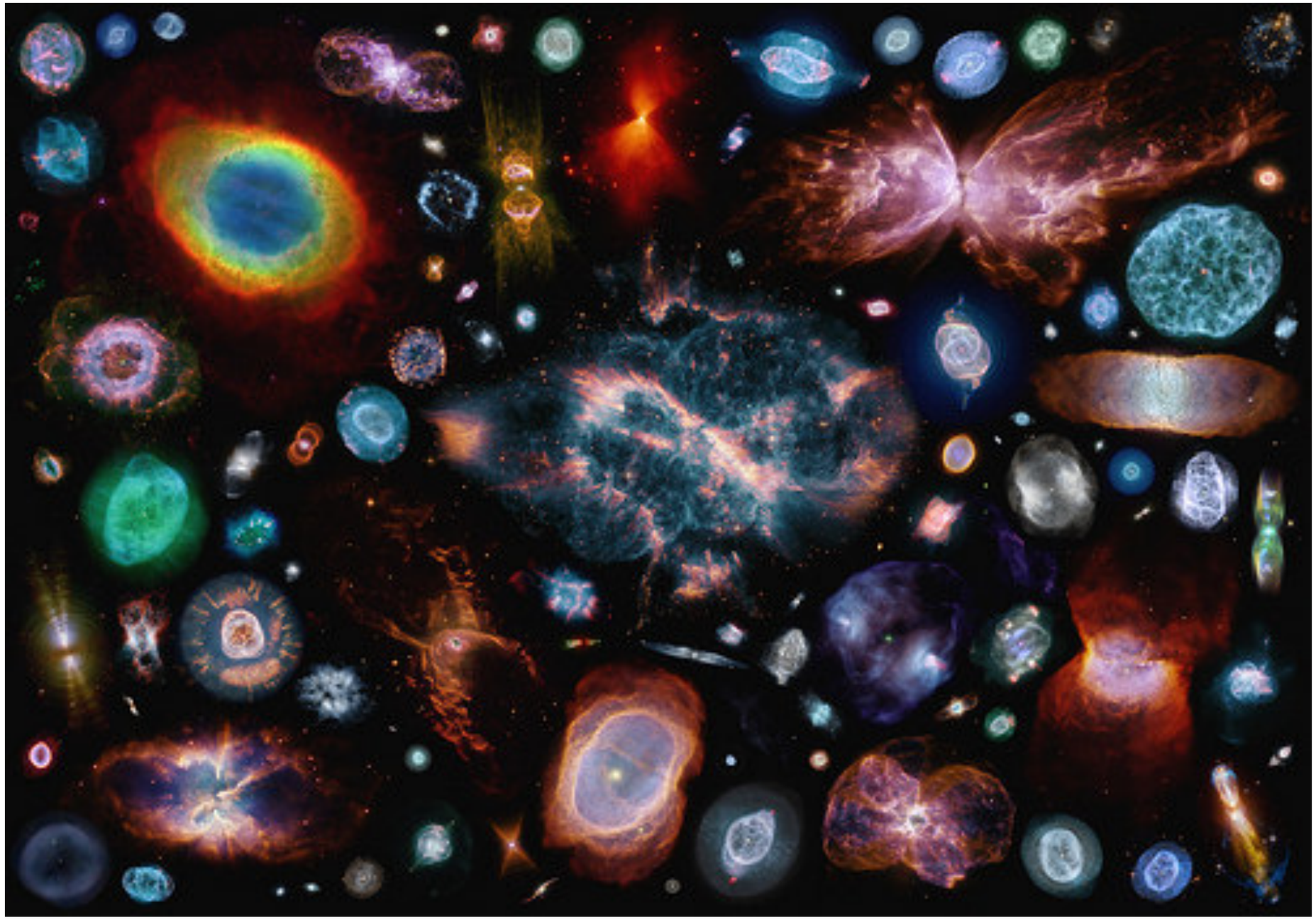
漸近巨星分枝星の内部

宇宙空間への放出

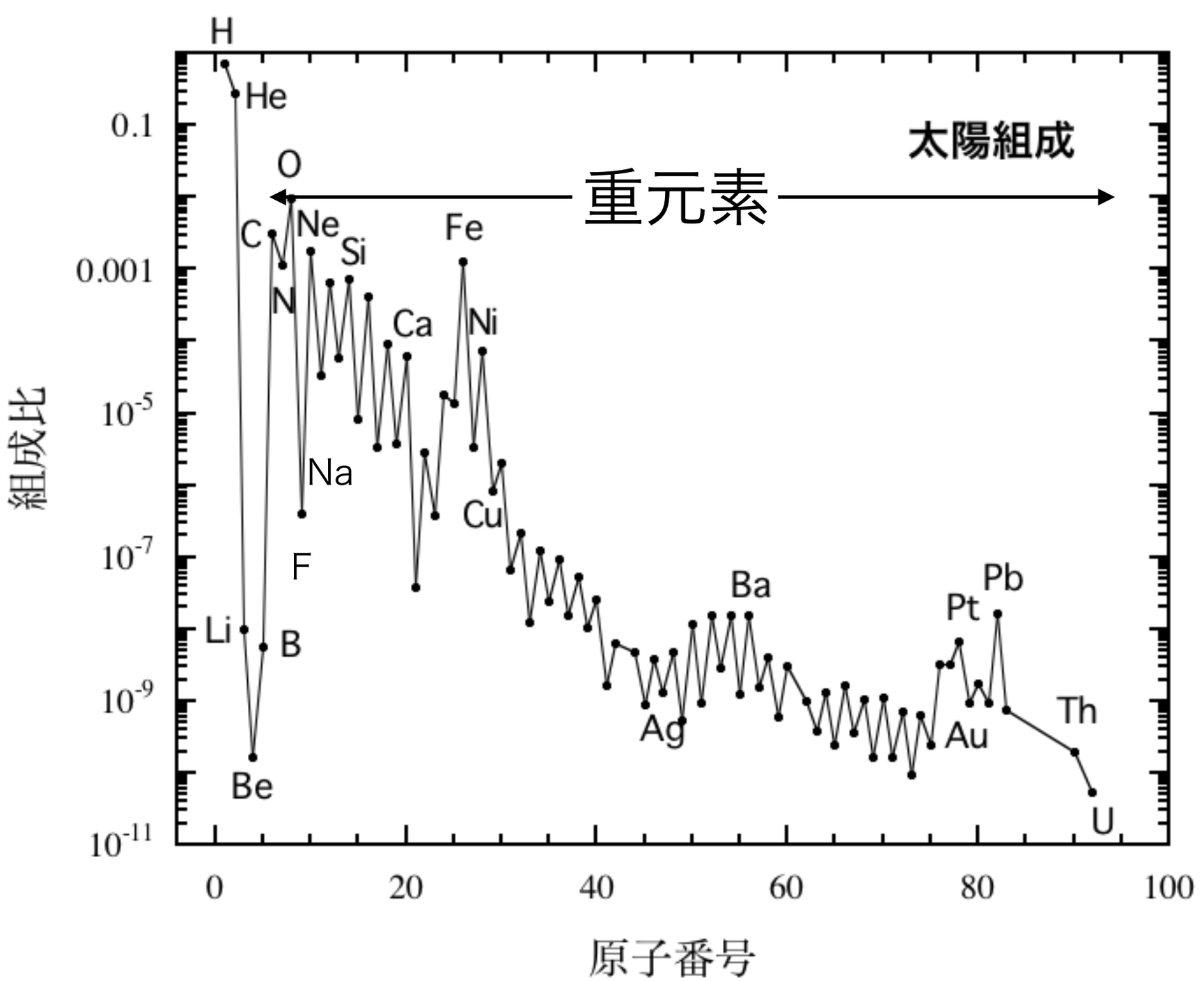
- 惑星状星雲
  - 太陽のような質量の星の最期
  - 水素燃焼の結果
    - ヘリウム、窒素
  - 炭素、酸素
  - 中心天体=白色矮星

白色矮星

- 質量
  - 太陽の半分くらい
  - 半径~数千 km
  - 質量が大きいと半径は小さい
    - 限界質量~1.4太陽質量



様々な惑星状星雲



太陽系にある元素の組成

いつでもどこでも同じ組成なのか?

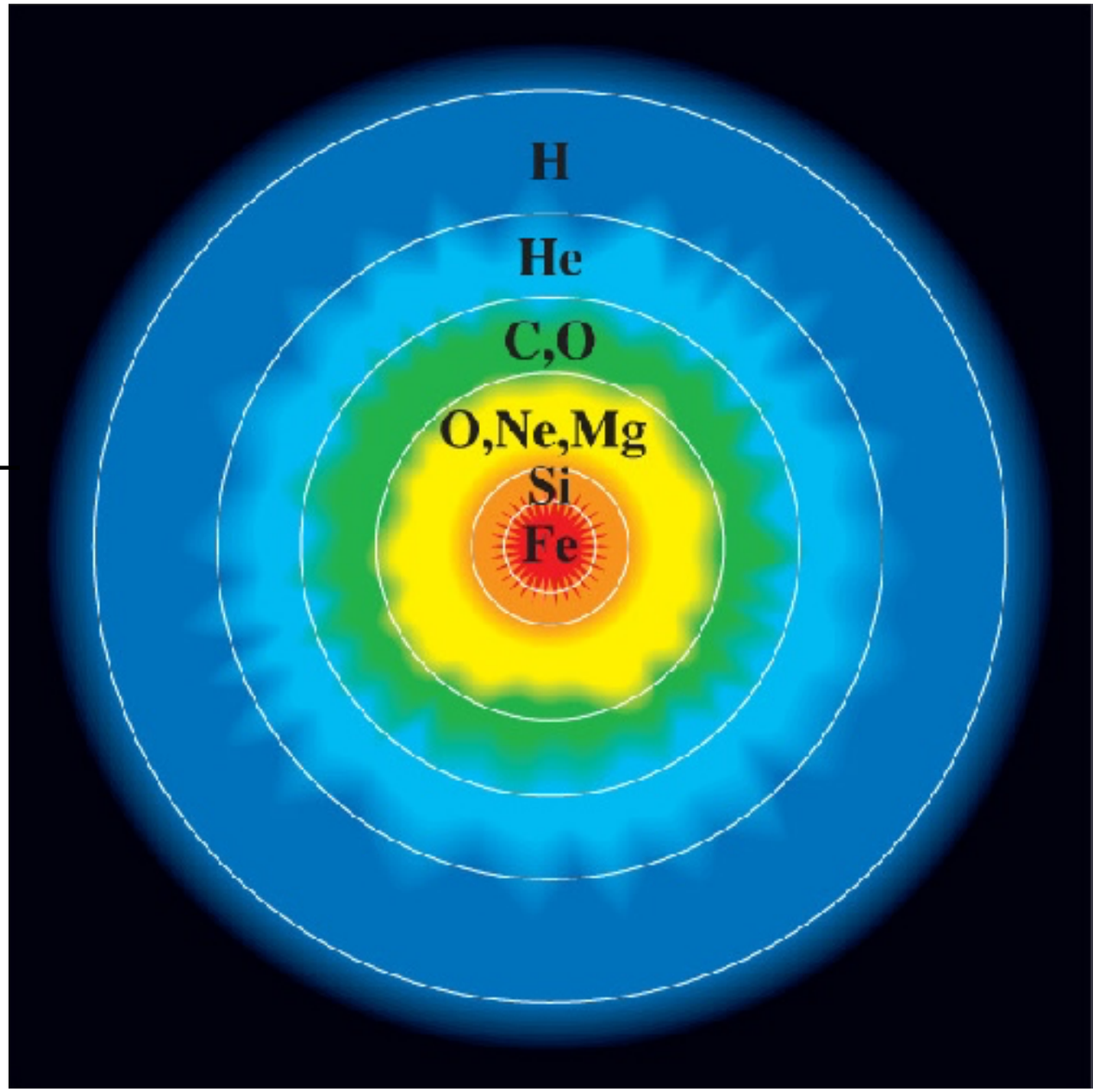
重い星は重い元素を作る

- 太陽より10倍以上重い星
  - 炭素・酸素中心核で
    - $^{12}C+^{12}C$=>マグネシウム(^{24}Mg)、ネオン(^{20}Ne)+He
  - 酸素・ネオン・マグネシウム中心核の形成
    - ネオンの光分解$^{20}Ne+\gamma$=>5^{4}He
    - $^{4}He+^{24}Mg$=>ケイ素(^{28}Si)+^{4}He=>硫黄(^{32}S)
- ケイ素・硫黄中心核の形成

- ケイ素の光分解　$^{28}Si+\gamma => 7\,^{4}He$
- $^{32}S+^{4}He => ^{36}Ar+^{4}He => ^{40}Ca+^{4}He => \cdots => $鉄
- 鉄の中心核の形成・成長
- 鉄を他の元素に変える反応=吸熱反応

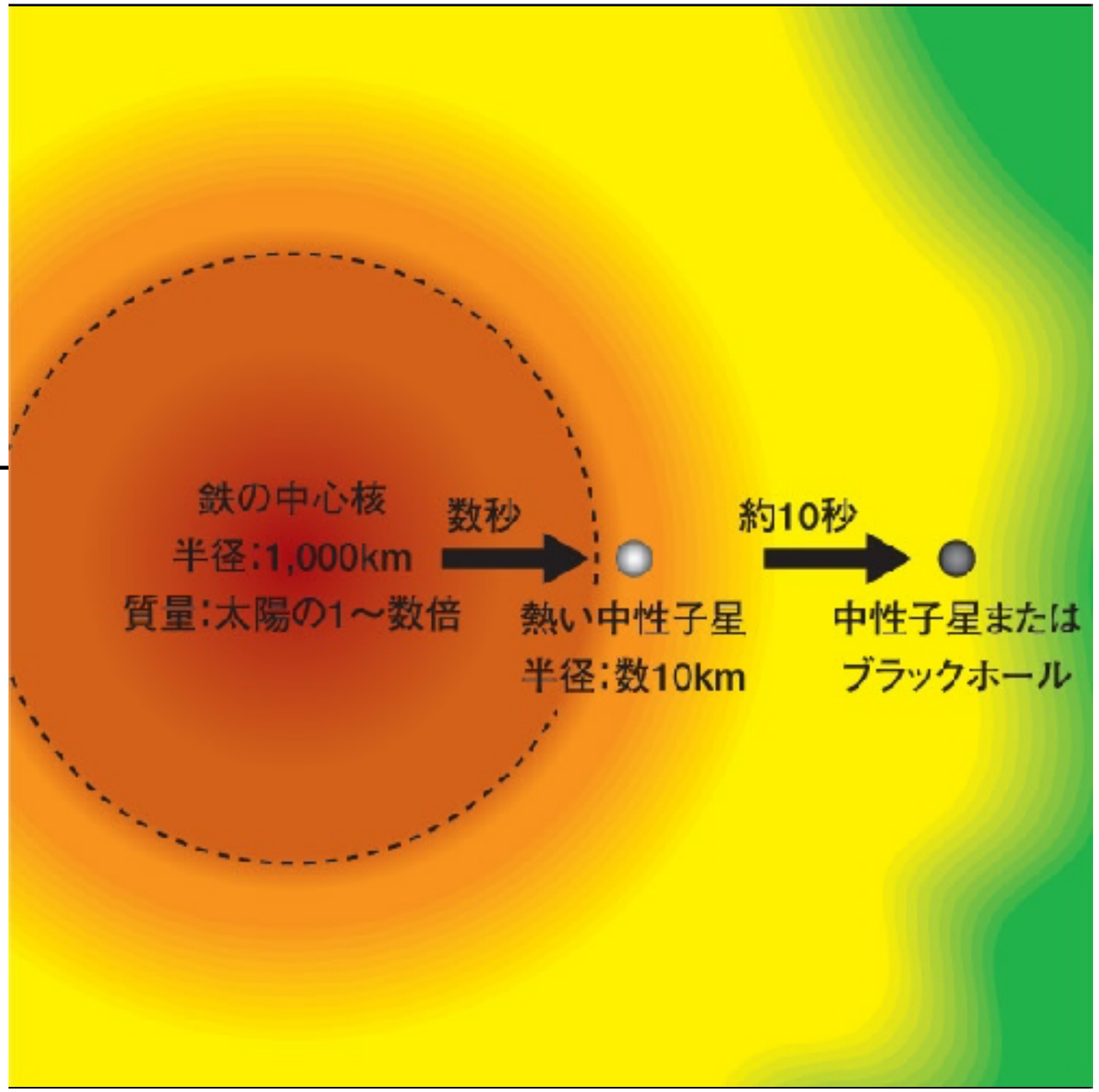
超新星爆発

- 鉄の中心核が重力収縮
  - 鉄の光分解
  - 電子捕獲
  - 中性子星またはブラックホールになるまで
- 外層は中性子星に衝突・反発して爆発
- 鉄の合成現場
  - 温度5-6x10^9 K



超新星爆発

- 鉄の中心核が重力収縮
  - 鉄の光分解
  - 電子捕獲
  - 中性子星またはブラックホールになるまで
- 外層は中性子星に衝突・反発して爆発
- 鉄の合成現場
  - 温度5-6x10^9 K



この超新星で供給される元素

- 炭素、酸素、ネオン、マグネシウム、ケイ素、硫黄、アルゴン、カルシウム、チタン、クロム、鉄、ニッケル

- 原子番号が偶数の元素が主
  - 原子番号奇数の元素
    - これらの元素が含まれたガスから誕生した星
      - 陽子捕獲反応
      - ニュートリノ放射による反応

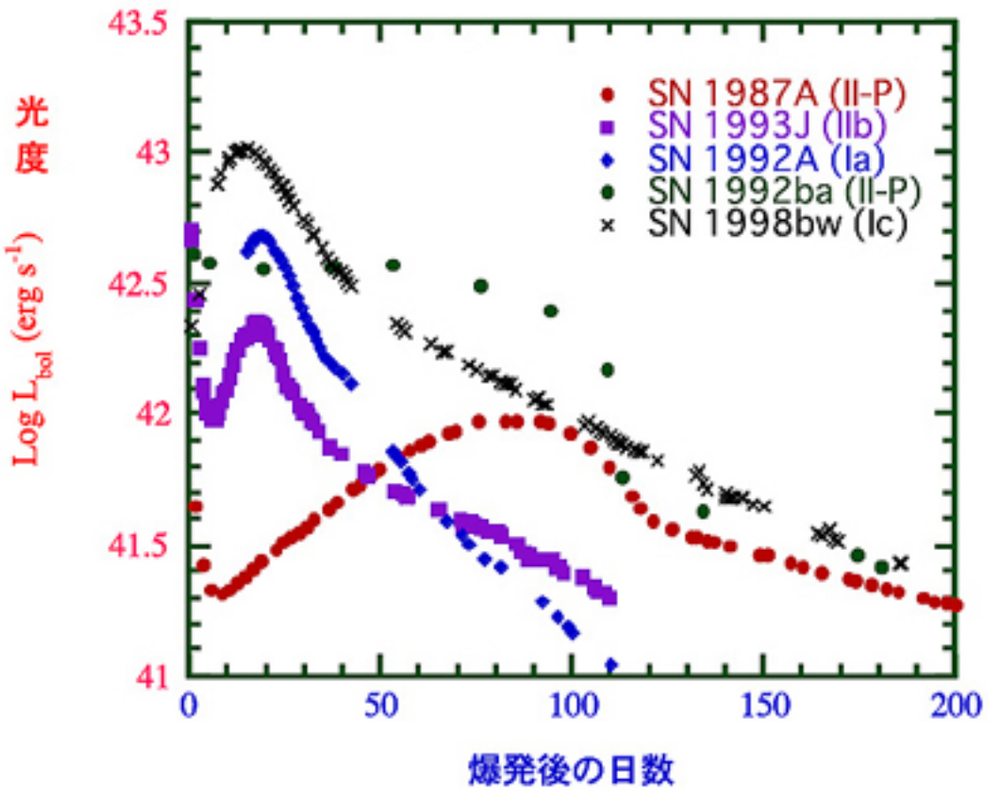
超新星

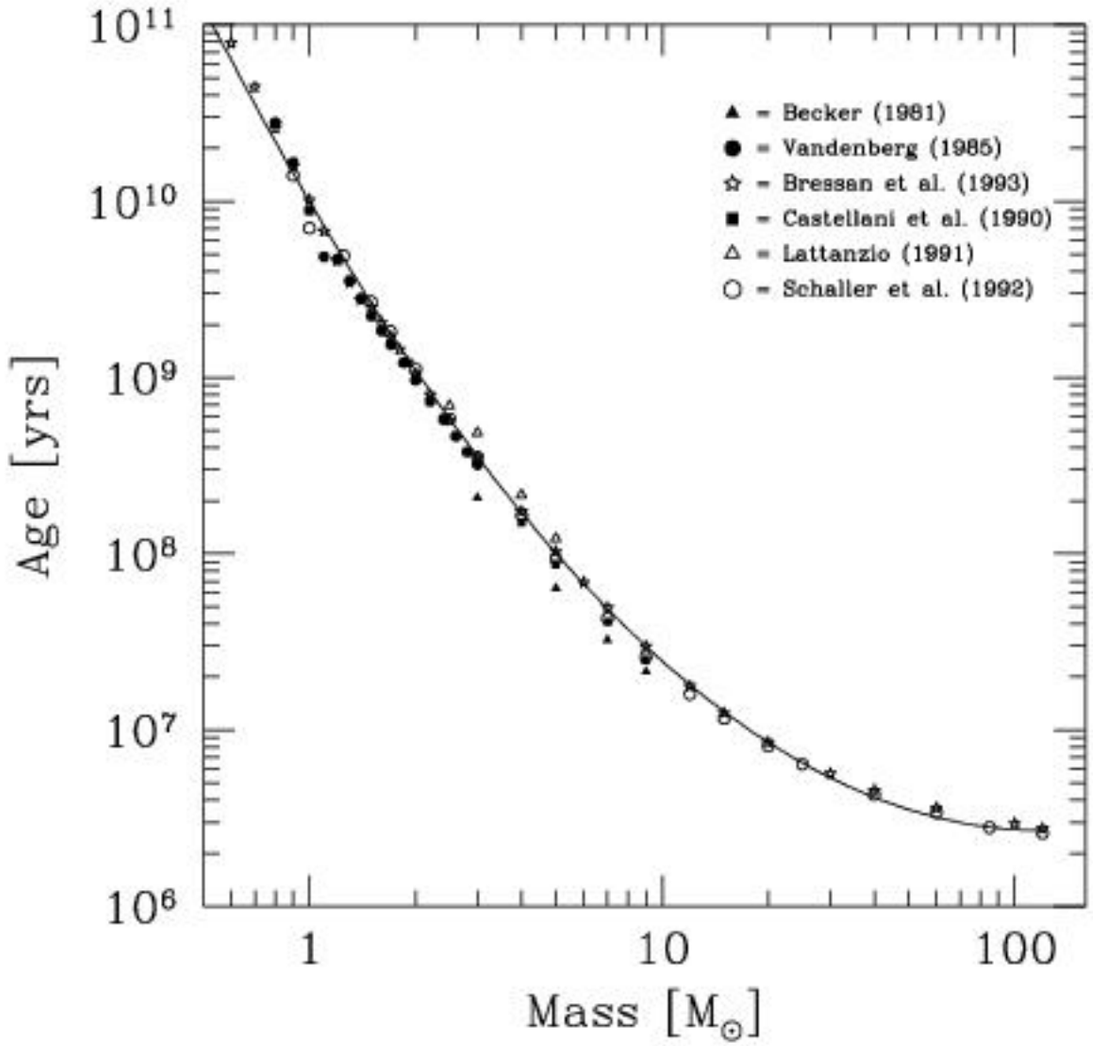
- 超新星を光らせる放射性元素

  - $^{56}Ni => ^{56}Co => ^{56}Fe$

    - ^{56}Ni半減期=6.1日

    - ^{56}Co半減期=77.2日

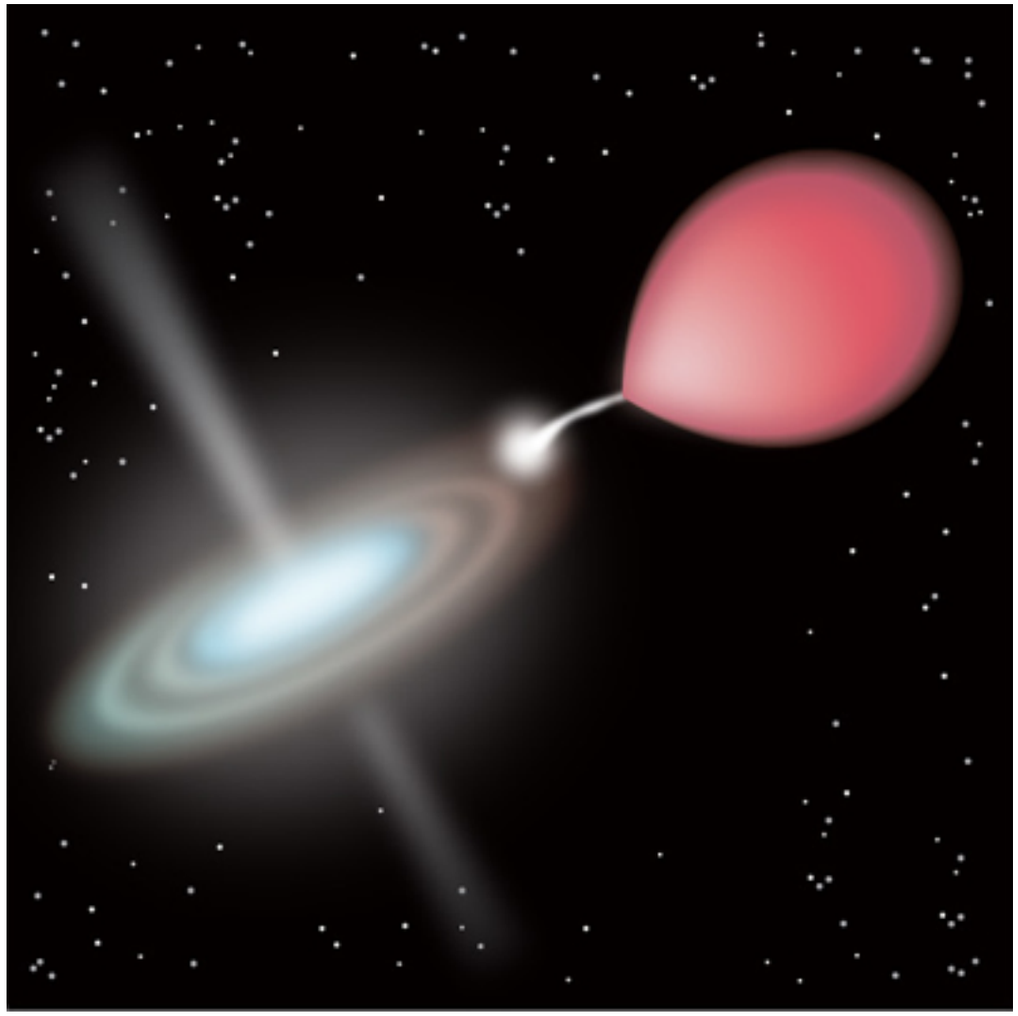



▲ = Becker (1981)
● = Vandenberg (1985)
☆ = Bressan et al. (1993)
■ = Castellani et al. (1990)
△ = Lattanzio (1991)
○ = Schaller et al. (1992)
Age [yrs]
10^11
10^10
10^9
10^8
10^7
10^6
1
10
100
Mass [M⊙]

星の寿命

連星系中の白色矮星の超新星爆発

- 白色矮星には限界質量~太陽質量の1.4倍
  - 伴星が赤色巨星になると
  - 外層が白色矮星に降り積もって質量増加
  - 限界質量で
    - 炭素+炭素=>マグネシウムなどの反応に点火
    - 星全体が爆発



連星系中の白色矮星の超新星爆発

- 白色矮星には限界質量~太陽質量の1.4倍
  - 伴星が赤色巨星になると
  - 外層が白色矮星に降り積もって質量増加
  - 限界質量で
    - 炭素+炭素=>マグネシウムなどの反応に点火
    - 星全体が爆発

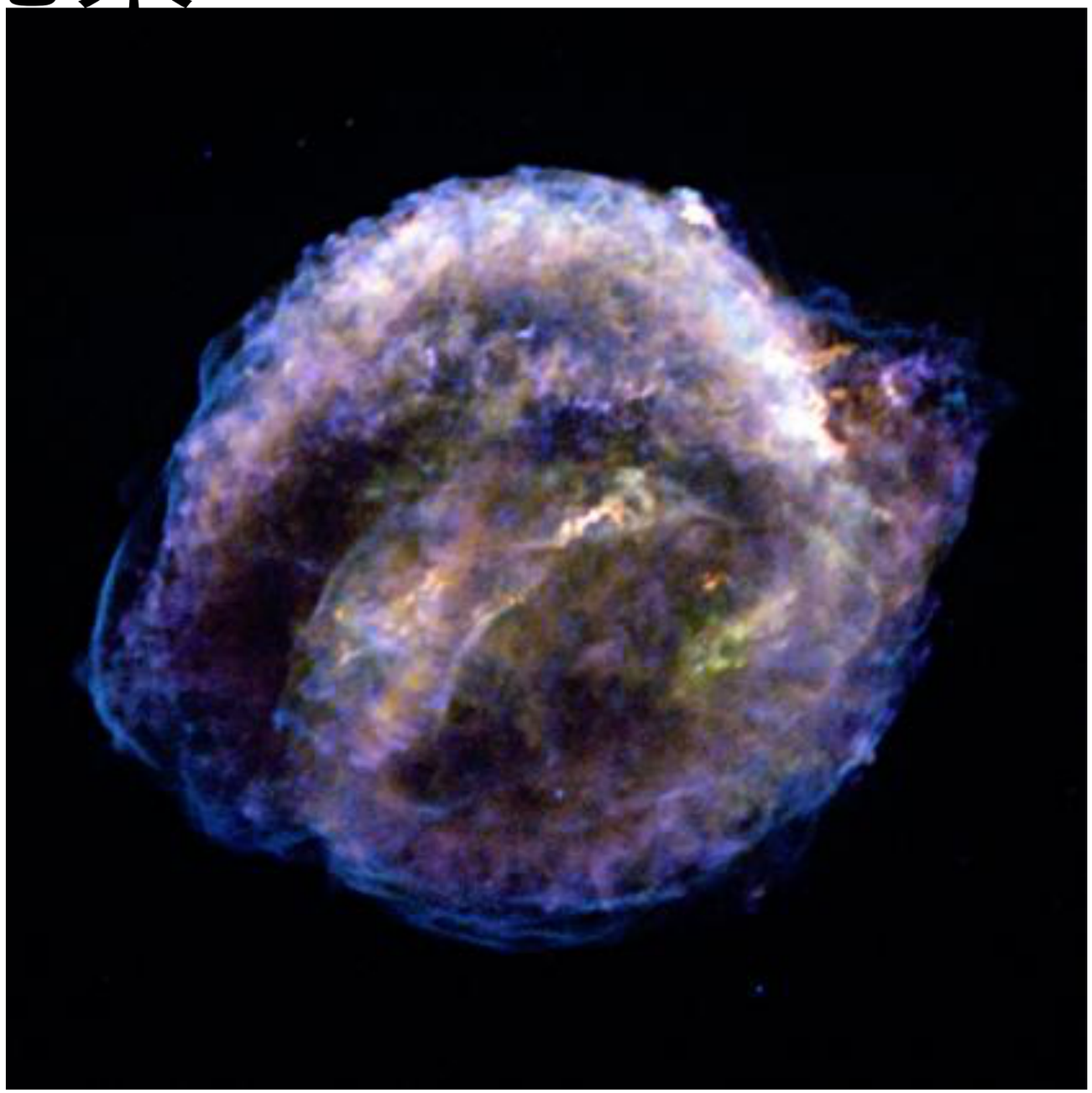
連星白色矮星の合体

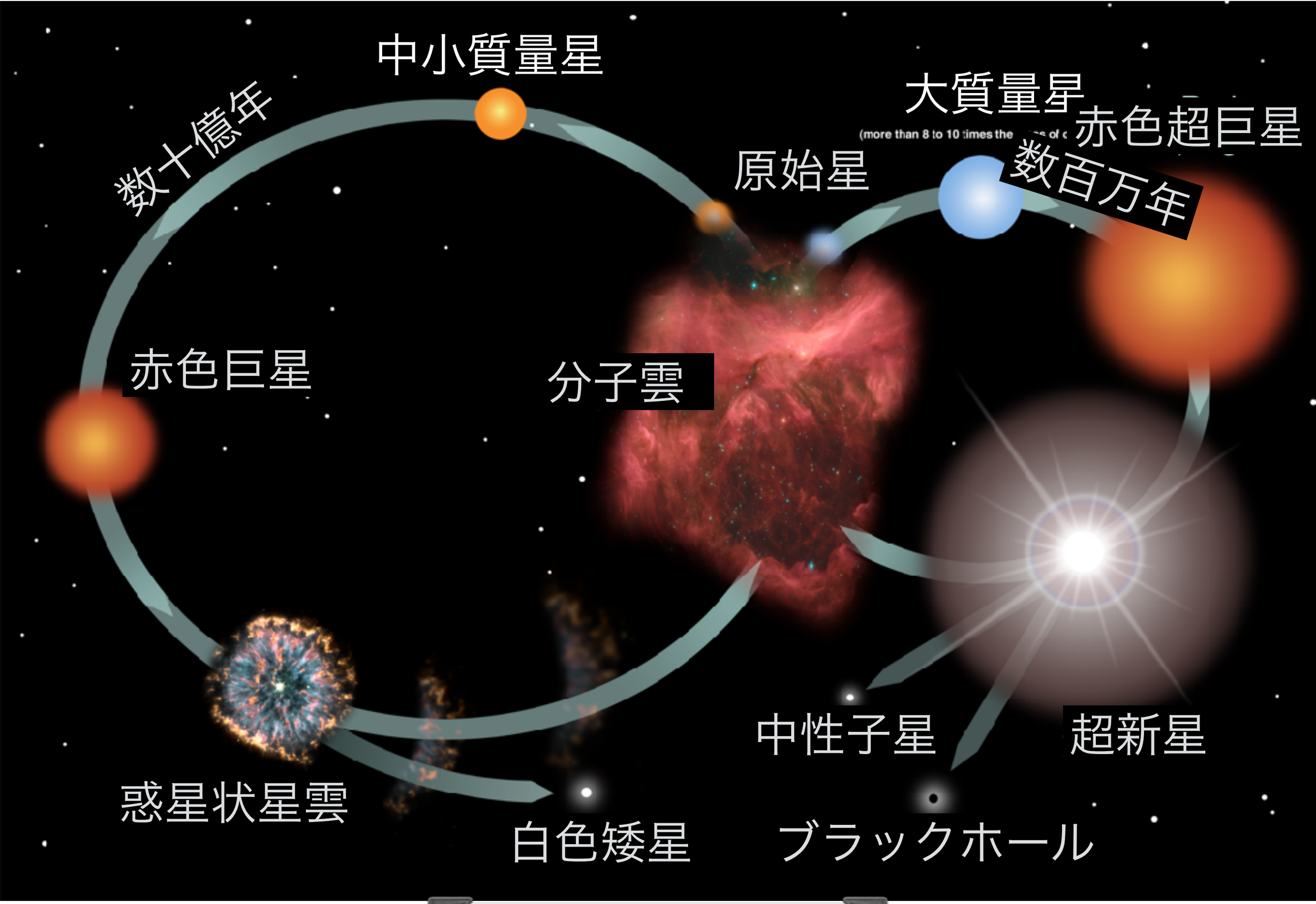
- 白色矮星+白色矮星の連星
  - 重力波を放出=>軌道が収縮=>合体
  - 合体後に核融合反応が暴走=>爆発
- Ia型超新星

Ia型超新星から供給される元素

- 炭素、酸素、ケイ素、硫黄、クロム、鉄、ニッケル

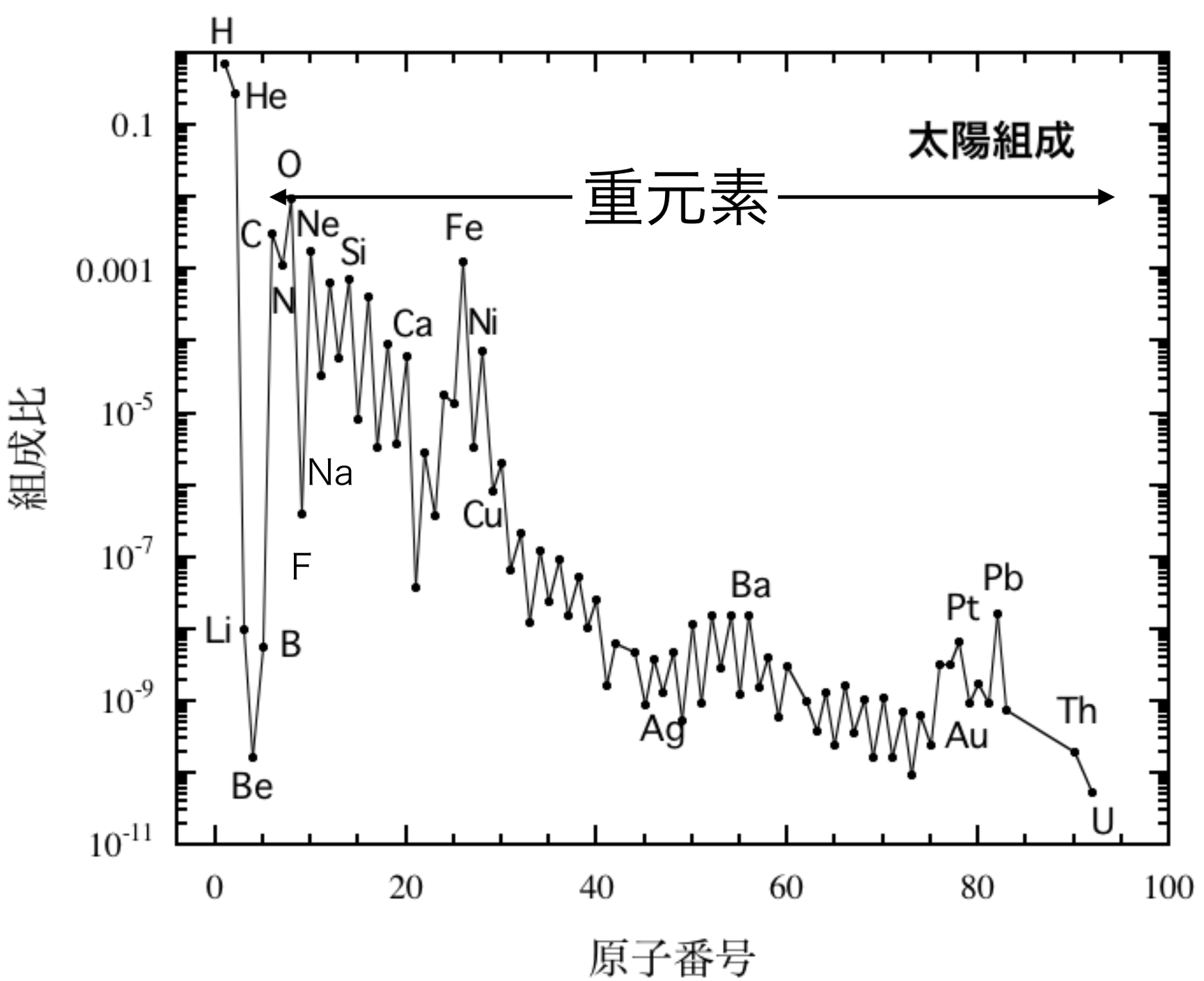
- 超新星残骸のX線観測





星のライフサイクル

NASA

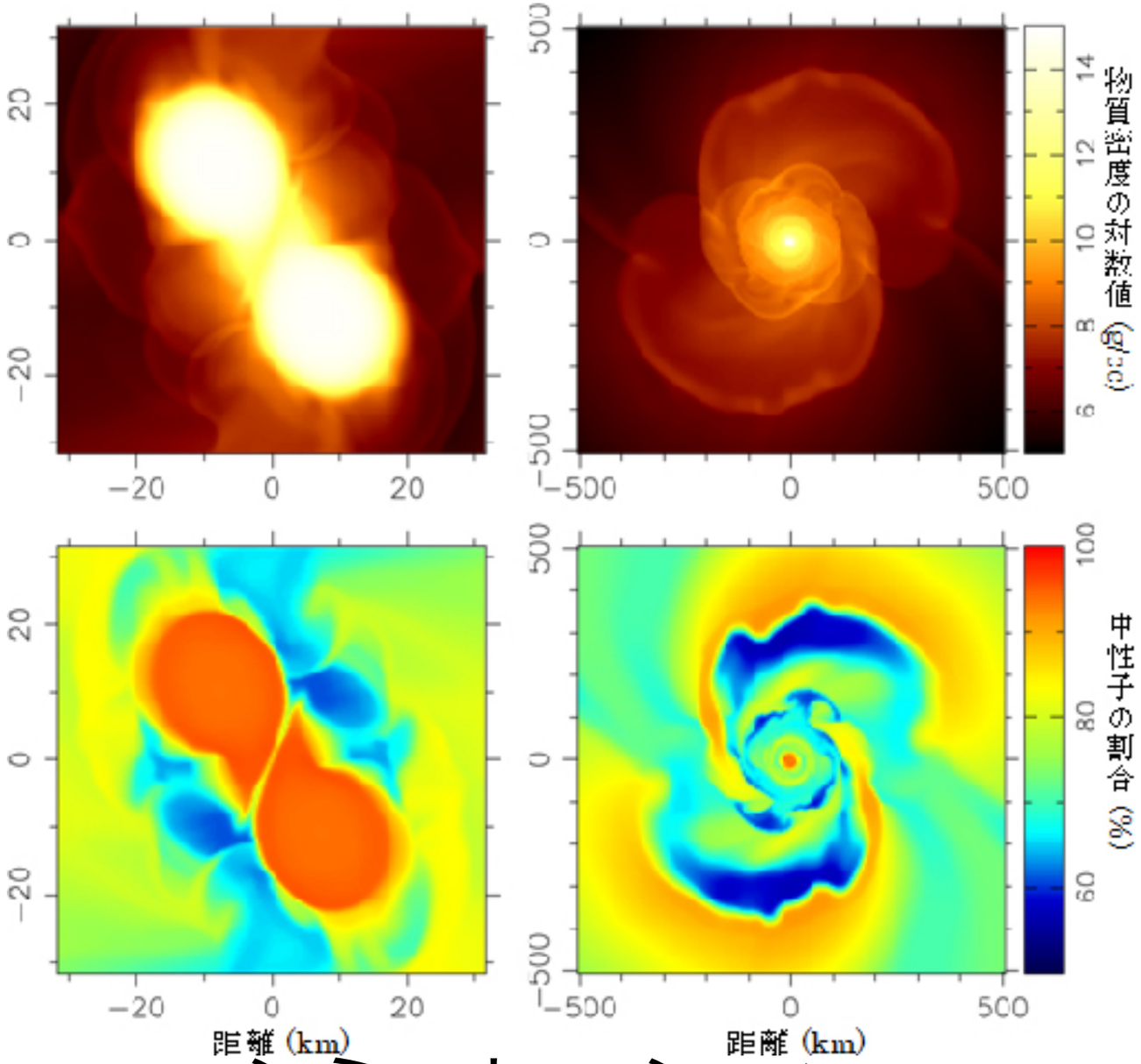


太陽系にある元素の組成

いつでもどこでも同じ組成なのか?

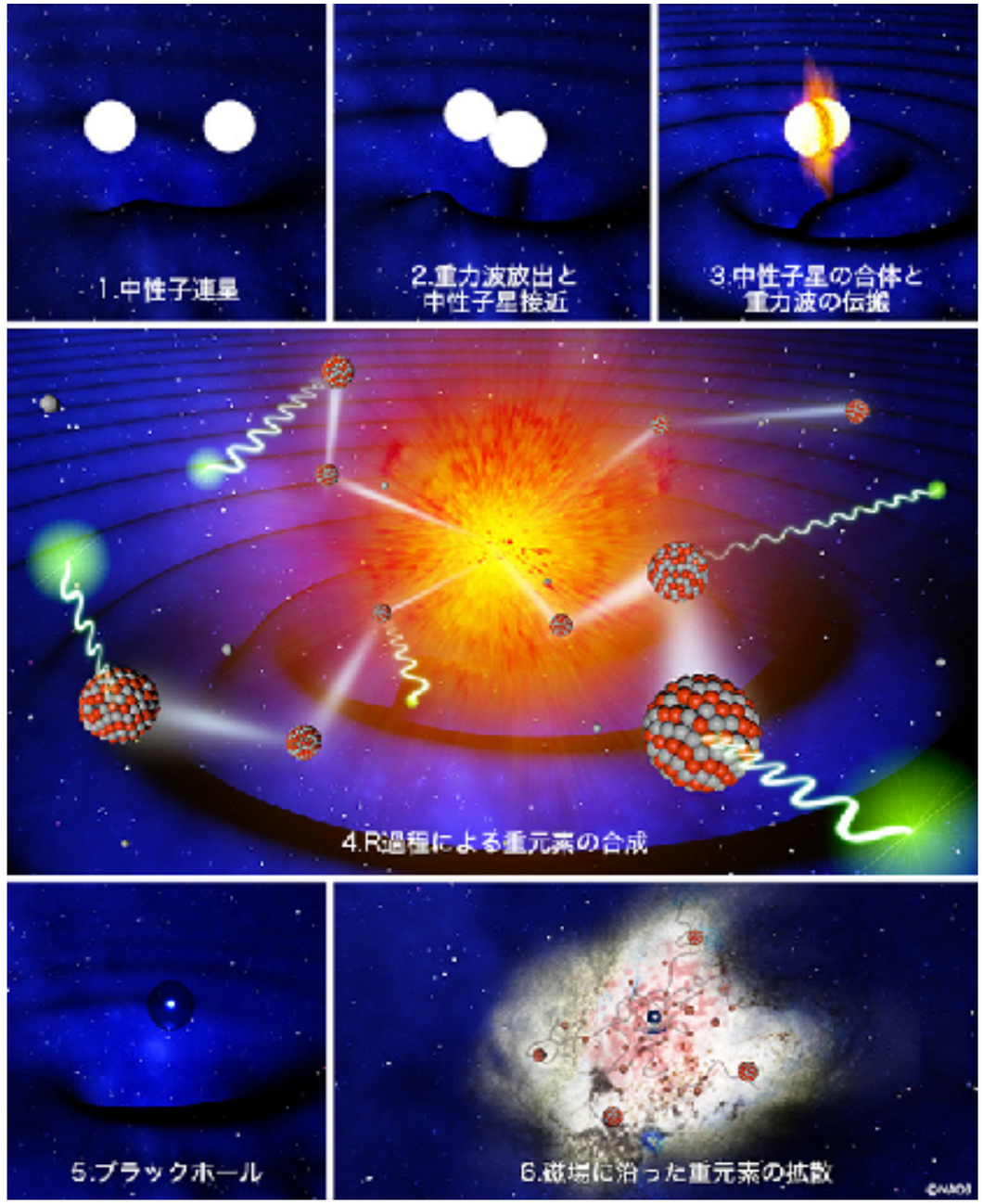
中性子捕獲反応

- 鉄より重い元素を作る反応
- 遅い中性子捕獲反応(β崩壊より遅い)
  - 中小質量星のヘリウム燃焼段階
    - $^{13}C + {}^{4}He \Rightarrow {}^{16}O$+中性子(n)など
    - Fe+n+n+n…=>バリウム(Ba)+n+n…=>ビスマス
- 速い中性子捕獲反応(β崩壊より速い)
  - 超新星爆発時の中性子星表面付近
  - 連星中性子星合体時
  - ブラックホール・中性子星合体時



シミュレーション

Wanajo+ 2014

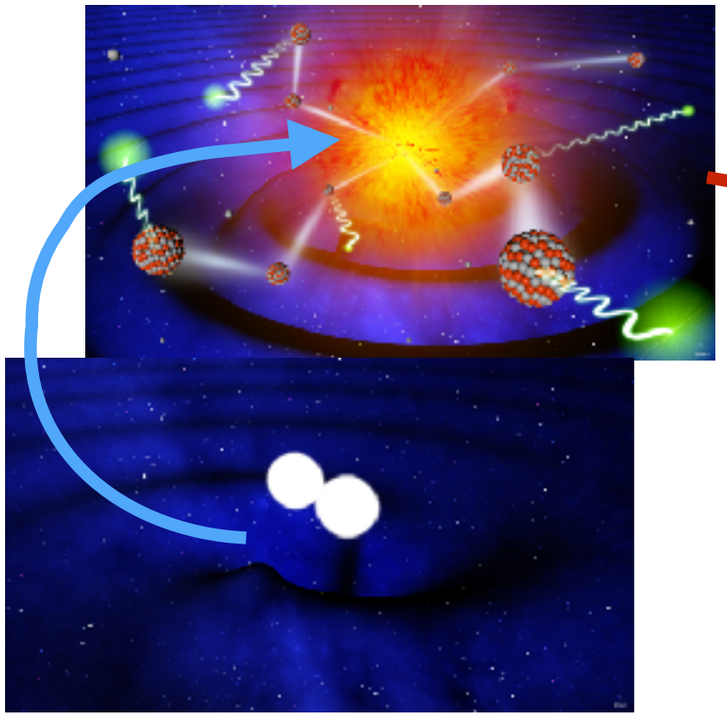


中性子星合体

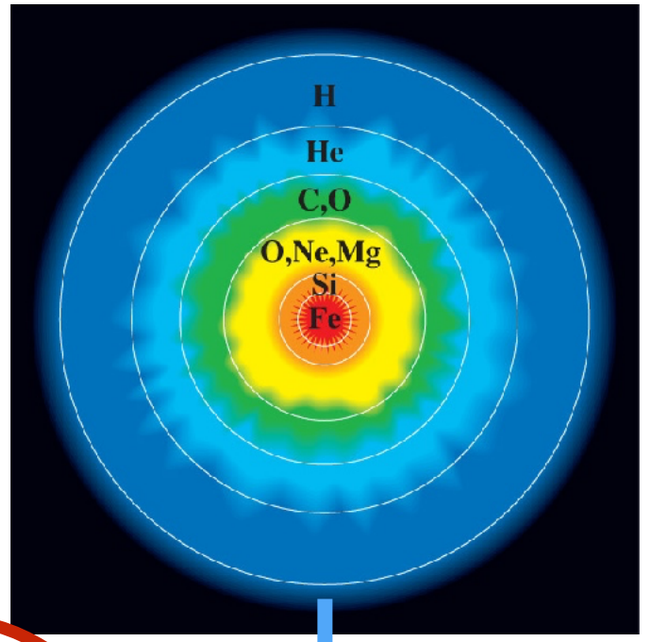
地球数個分の金が放出?

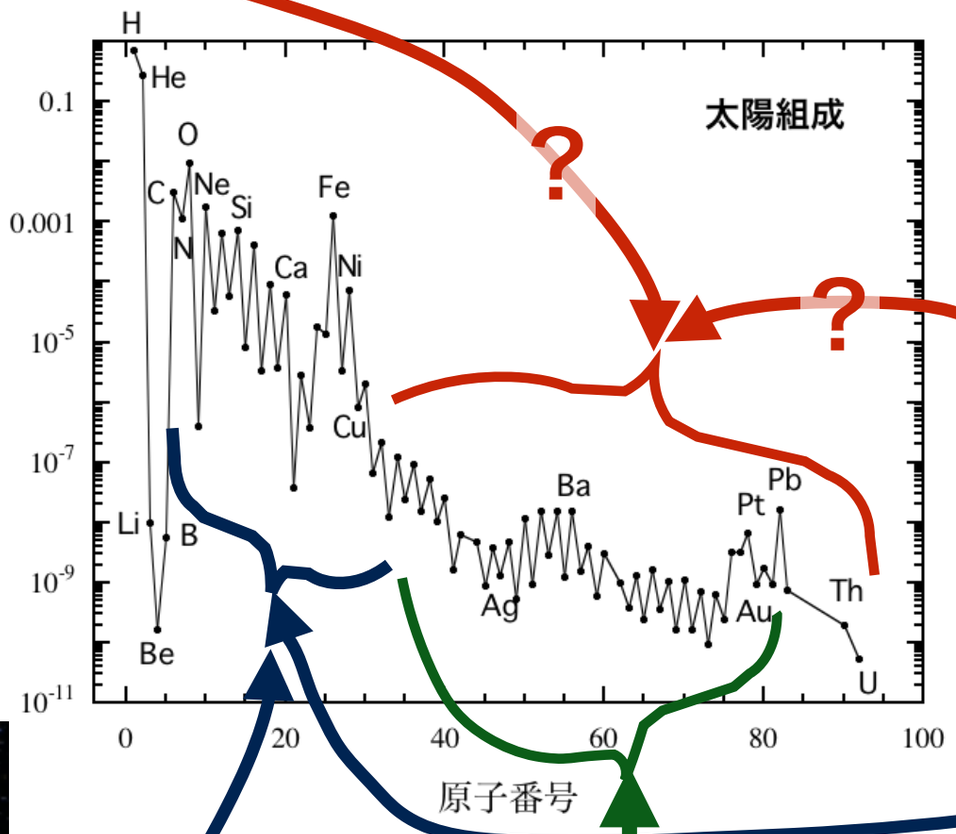
元素の供給源

連星中性子星合体



大質量星

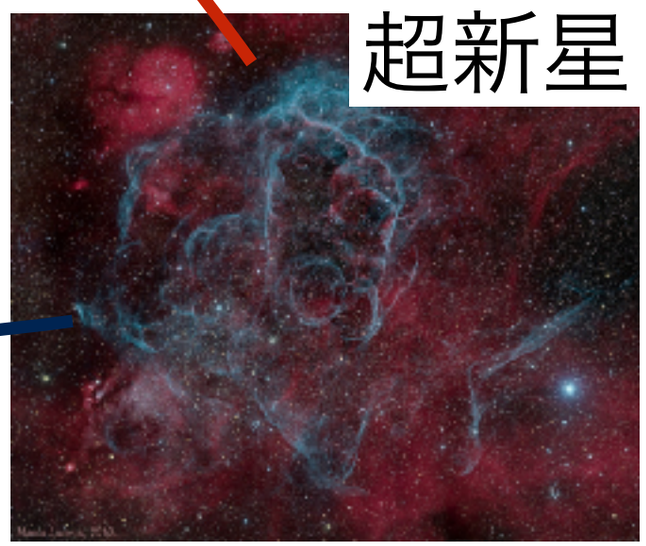




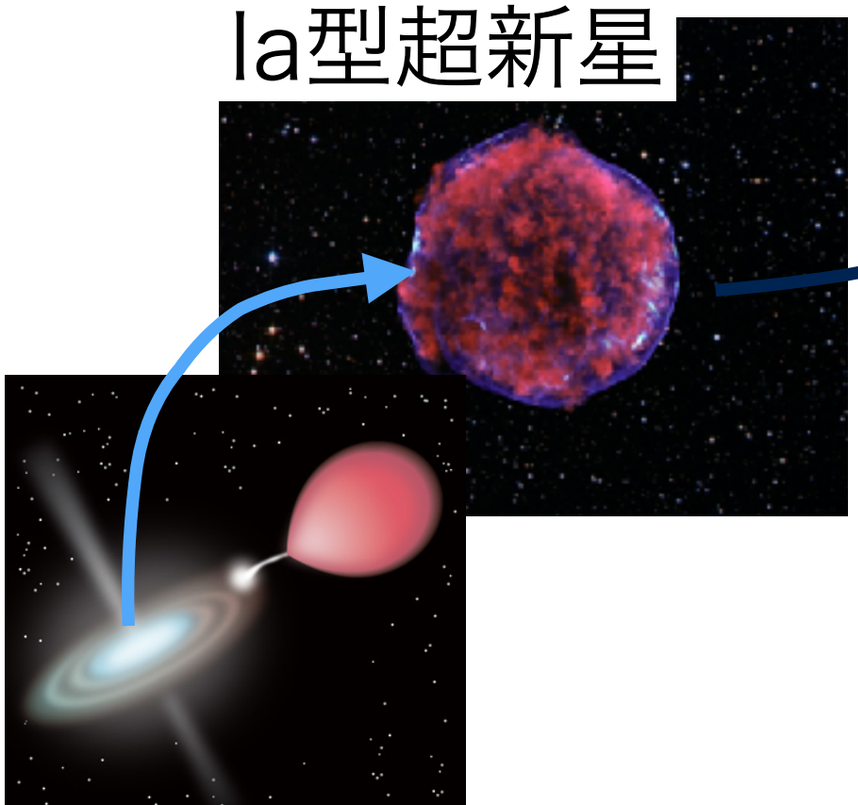
?

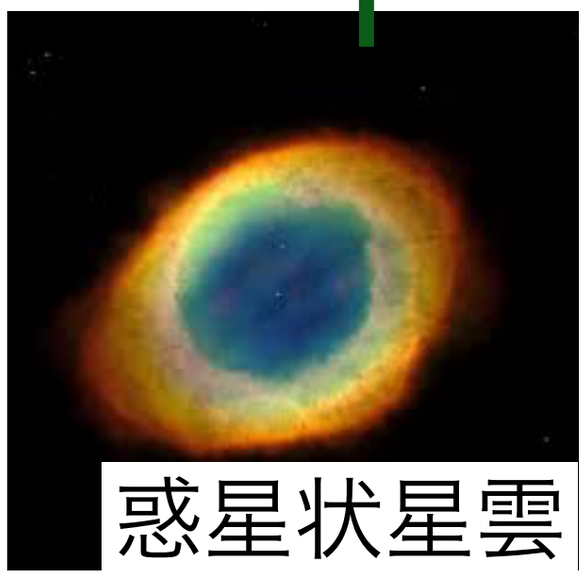
?

超新星



Ia型超新星





惑星状星雲

いかにして人工元素は合成されたか

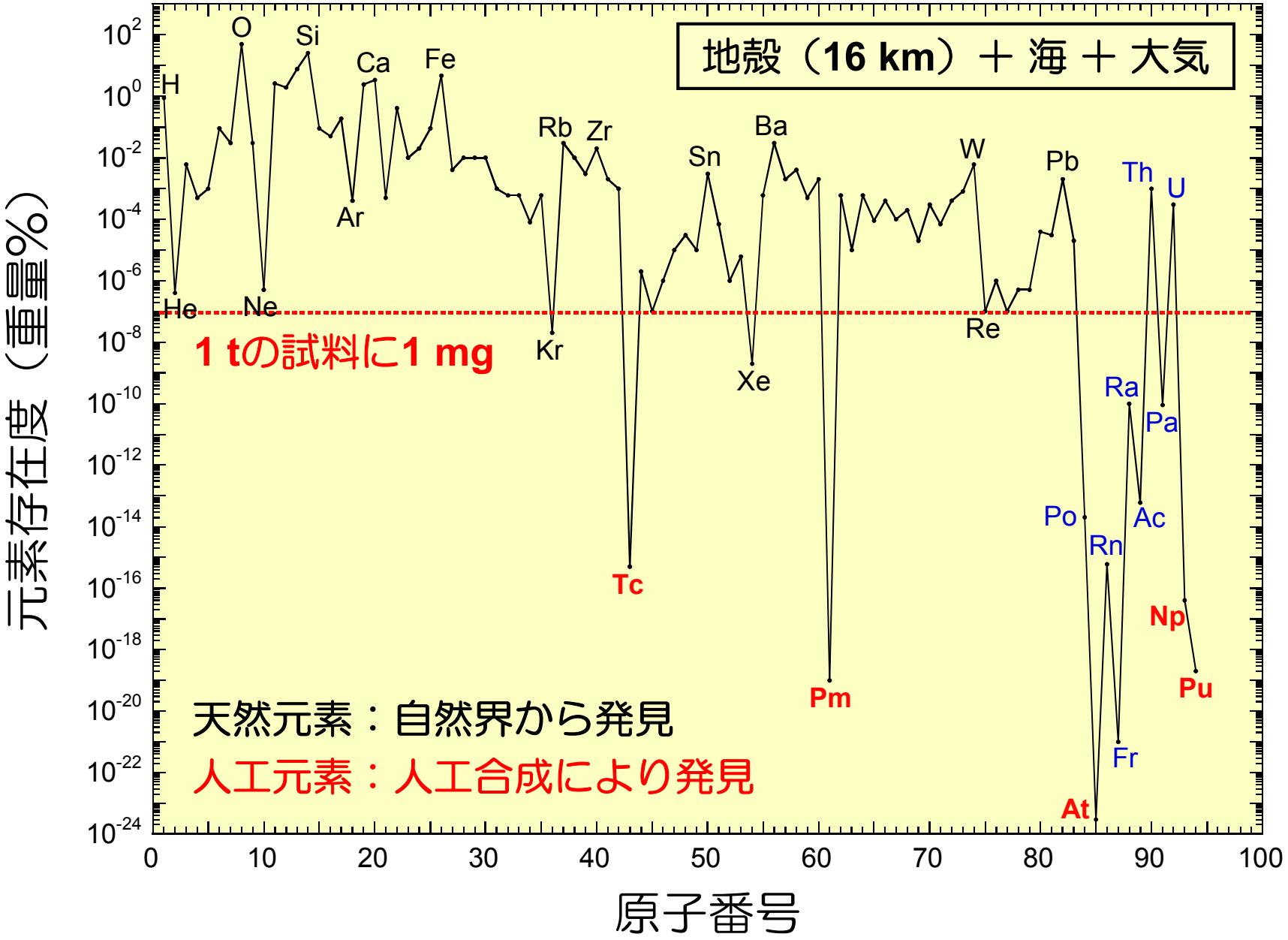
理化学研究所
仁科加速器研究センター
RI応用チーム
羽場宏光

発表内容

1. はじめに－周期表と核図表－
2. 人工元素の合成－原子核反応－
3. いかにしてニホニウムは合成されたか
4. おわりに

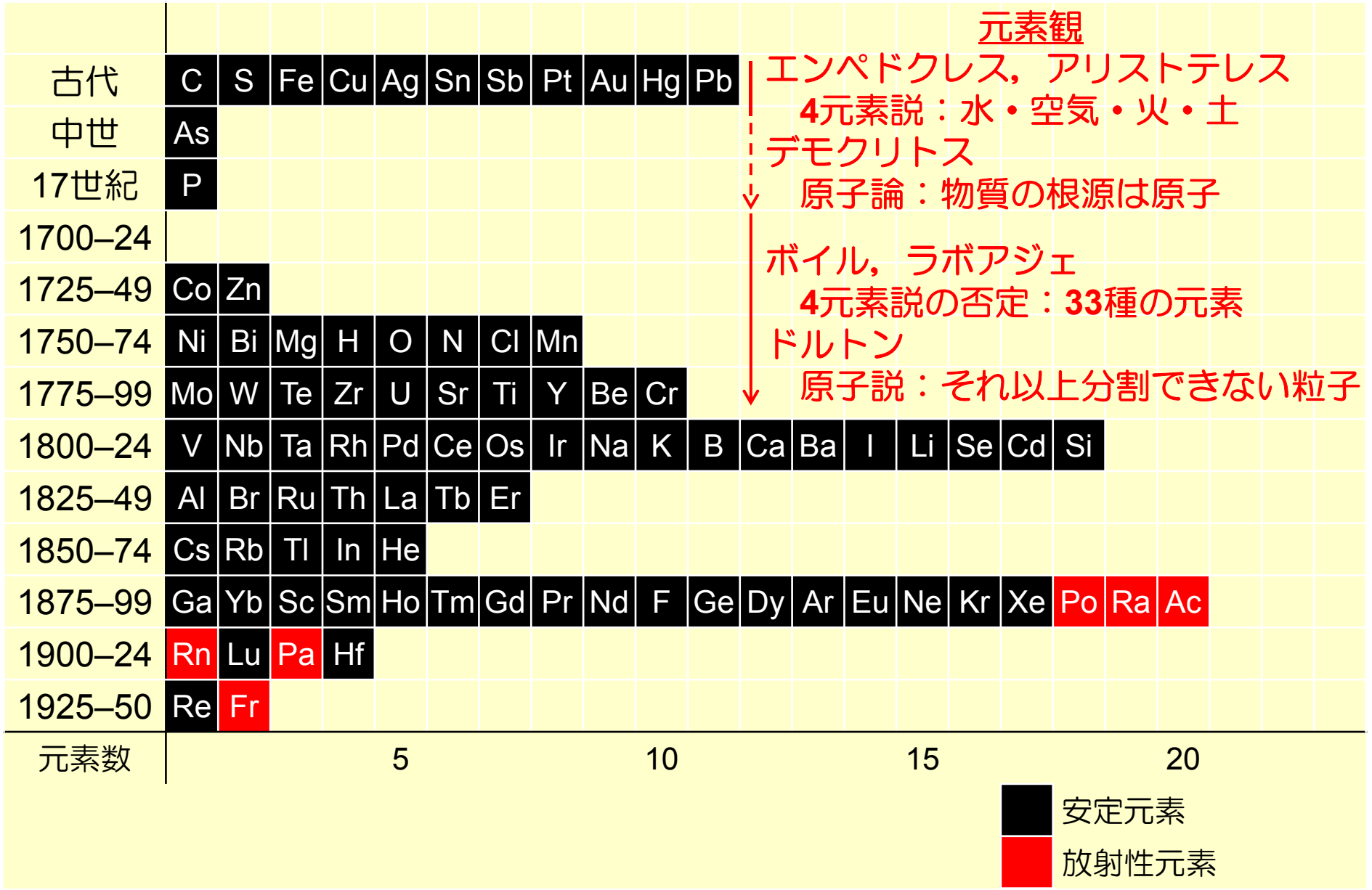
1. はじめに
―周期表と核図表―

現在の地球の元素存在度

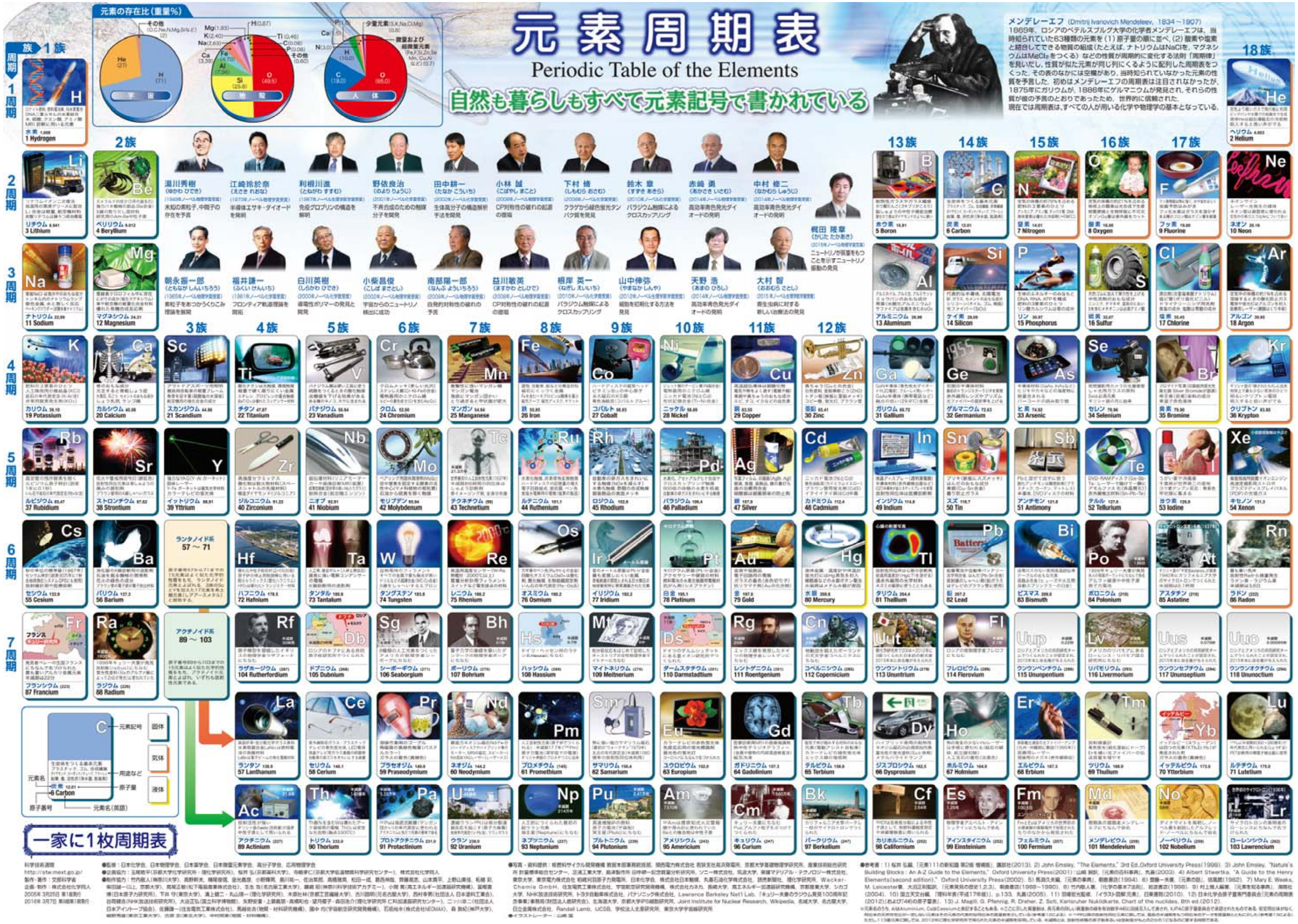


“Periodic Table of the Elements” 4th ed., Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2007.

天然元素発見数の歴史的経過



イラスト図解 元素, 日東書院, 2010.

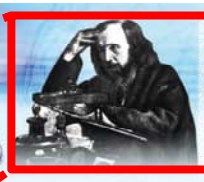


元素周期表
Periodic Table of the Elements
自然も暮らしもすべて元素記号で書かれている
元素の存在比（重量%）
宇宙
地殻
人体
メンデレーエフ（Dmitrij Ivanovich Mendeleev, 1834～1907）
1族
2族
3族
4族
5族
6族
7族
8族
9族
10族
11族
12族
13族
14族
15族
16族
17族
18族
1周期
2周期
3周期
4周期
5周期
6周期
7周期
1 Hydrogen
2 Helium
3 Lithium
4 Beryllium
5 Boron
6 Carbon
7 Nitrogen
8 Oxygen
9 Fluorine
10 Neon
11 Sodium
12 Magnesium
13 Aluminum
14 Silicon
15 Phosphorus
16 Sulfur
17 Chlorine
18 Argon
19 Potassium
20 Calcium
21 Scandium
22 Titanium
23 Vanadium
24 Chromium
25 Manganese
26 Iron
27 Cobalt
28 Nickel
29 Copper
30 Zinc
31 Gallium
32 Germanium
33 Arsenic
34 Selenium
35 Bromine
36 Krypton
37 Rubidium
38 Strontium
39 Yttrium
40 Zirconium
41 Niobium
42 Molybdenum
43 Technetium
44 Ruthenium
45 Rhodium
46 Palladium
47 Silver
48 Cadmium
49 Indium
50 Tin
51 Antimony
52 Tellurium
53 Iodine
54 Xenon
55 Cesium
56 Barium
ランタノイド系 57～71
72 Hafnium
73 Tantalum
74 Tungsten
75 Rhenium
76 Osmium
77 Iridium
78 Platinum
79 Gold
80 Mercury
81 Thallium
82 Lead
83 Bismuth
84 Polonium
85 Astatine
86 Radon
87 Francium
88 Radium
アクチノイド系 89～103
104 Rutherfordium
105 Dubnium
106 Seaborgium
107 Bohrium
108 Hassium
109 Meitnerium
110 Darmstadtium
111 Roentgenium
112 Copernicium
113 Ununtrium
114 Flerovium
115 Ununpentium
116 Livermorium
117 Ununseptium
118 Ununoctium
57 Lanthanum
58 Cerium
59 Praseodymium
60 Neodymium
61 Promethium
62 Samarium
63 Europium
64 Gadolinium
65 Terbium
66 Dysprosium
67 Holmium
68 Erbium
69 Thulium
70 Ytterbium
71 Lutetium
89 Actinium
90 Thorium
91 Protactinium
92 Uranium
93 Neptunium
94 Plutonium
95 Americium
96 Curium
97 Berkelium
98 Californium
99 Einsteinium
100 Fermium
101 Mendelevium
102 Nobelium
103 Lawrencium
湯川秀樹
朝永振一郎
江崎玲於奈
福井謙一
利根川進
白川英樹
野依良治
小柴昌俊
田中耕一
南部陽一郎
小林誠
益川敏英
下村脩
根岸英一
鈴木章
山中伸弥
赤崎勇
天野浩
中村修二
大村智
梶田隆章
元素記号
元素名
原子番号
原子量
用途など
元素名（英語）
固体
気体
液体
一家に1枚周期表

元素周期表

Periodic Table of the Elements

自然も暮らしもすべて元素記号で書かれている



メンデレーエフ（Dmitrij Ivanovich Mendeleev，1834～1907）
1869年，ロシアのペテルスブルグ大学の化学者メンデレーエフは，当時知られていた63種類の元素を（1）原子量の順に並べ，（2）酸素や塩素と結合してできる物質の組成（たとえば，ナトリウムはNaClを，マグネシウムは$MgCl_2$をつくる）などの性質が周期的に変化する法則「周期律」を見いだし，性質が似た元素が同じ列にくるように配列した周期表をつくった．その表のなかには空欄があり，当時知られていなかった元素の性質を予言した．初めはメンデレーエフの周期表は注目されなかったが，1875年にガリウムが，1886年にゲルマニウムが発見され，それらの性質が彼の予言のとおりであったため，世界的に信頼された．
現在では周期表は，すべての人が用いる化学や物理学の基本となっている．

メンデレーエフ（Dmitrij Ivanovich Mendeleev，1834～1907）
1869年，ロシアのペテルスブルグ大学の化学者メンデレーエフは，当時知られていた63種類の元素を（1）原子量の順に並べ，（2）酸素や塩素と結合してできる物質の組成（たとえば，ナトリウムはNaClを，マグネシウムは$MgCl_2$をつくる）などの性質が周期的に変化する法則「周期律」を見いだし，性質が似た元素が同じ列にくるように配列した周期表をつくった．その表のなかには空欄があり，当時知られていなかった元素の性質を予言した．初めはメンデレーエフの周期表は注目されなかったが，1875年にガリウムが，1886年にゲルマニウムが発見され，それらの性質が彼の予言のとおりであったため，世界的に信頼された．
現在では周期表は，すべての人が用いる化学や物理学の基本となっている．

メンデレビウム

周期表の誕生

1869年 ドミトリ・メンデレーエフ

63元素の原子量と酸化数

⇒ 周期表を作成

未知元素を予測

			Ti = 50	Zr = 90	? = 180.	
			V = 51	Nb = 94	Ta = 182.	
			Cr = 52	Mo = 96	W = 186.	
			Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,4	
			Fe = 56	Ru = 104,4	Ir = 198.	
		Ni =	Co = 59	Pl = 106,6	Os = 199.	
H = 1			Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200.	
	Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112		
	B = 11	Al = 27,4	? = 68	Ur = 116	Au = 197?	
	C = 12	Si = 28	? = 70	Sn = 118		
	N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122	Bi = 210?	
	O = 16	S = 32	Se = 79,4	Te = 128?		
	F = 19	Cl = 35,5	Br = 80	J = 127		
Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85,4	Cs = 133	Tl = 204.	
		Ca = 40	Sr = 87,6	Ba = 137	Pb = 207.	
		? = 45	Ce = 92			
		? Er = 56	La = 94			
		? Yt = 60	Di = 95			
		? In = 75,6	Th = 118?			

D. I. Mendelejew, Zhurnal Russkogo, Khimicheskogo Obshchestva, **1**(2–3), 60 (1869).

周期表の誕生

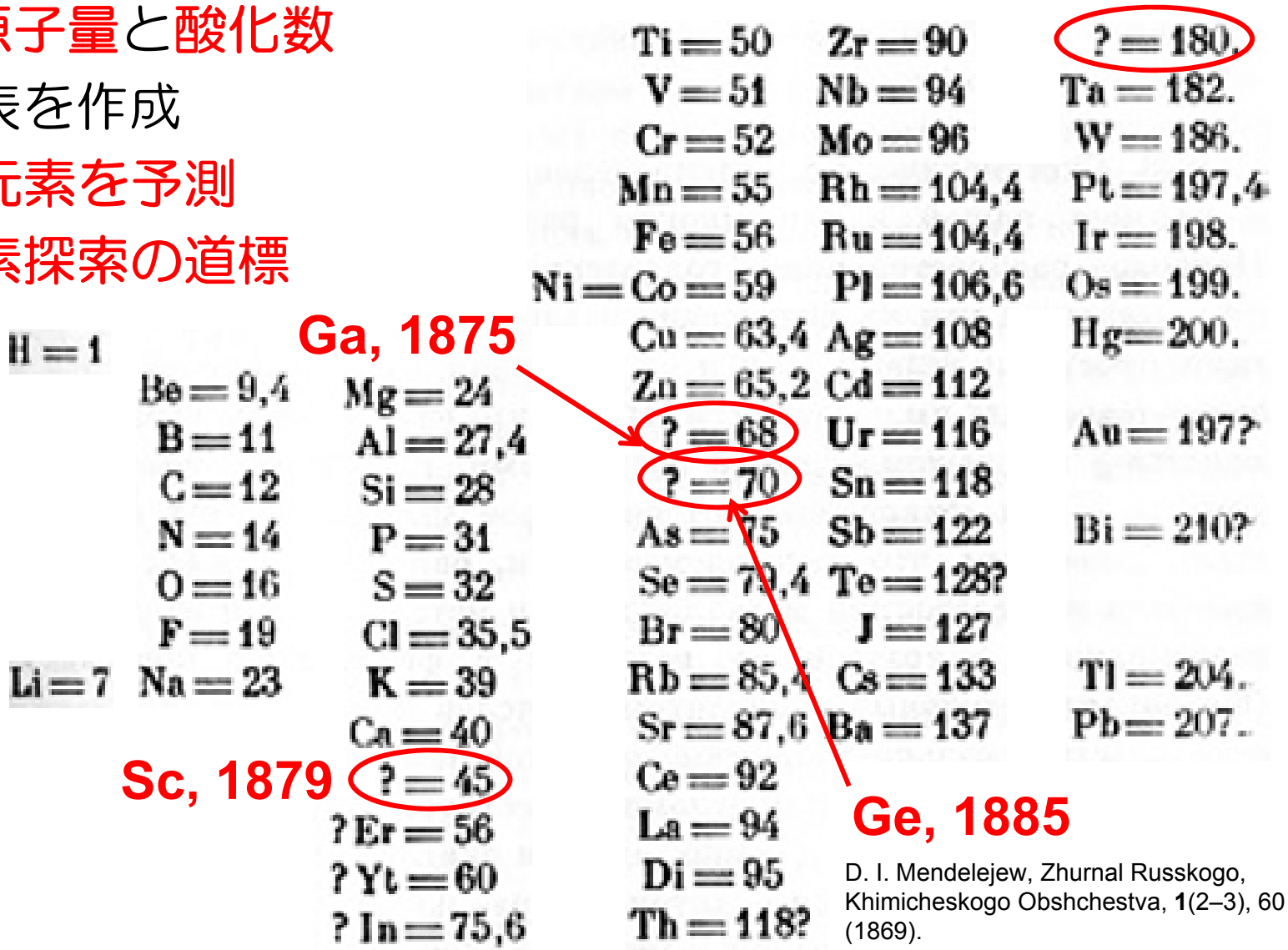
1869年 ドミトリ・メンデレーエフ

63元素の原子量と酸化数

⇒ 周期表を作成

未知元素を予測

⇒ 新元素探索の道標



D. I. Mendelejew, Zhurnal Russkogo, Khimicheskogo Obshchestva, **1**(2–3), 60 (1869).

原子の構造

1897 トムソンによる電子の発見

1904 長岡・ラザフォード・ボーアの原子模型

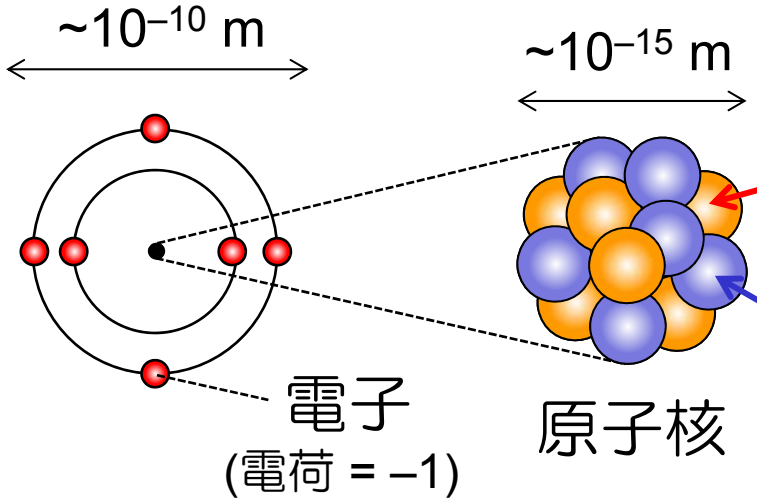
1911 ラザフォードによる原子核の発見

1914 モーズリーの元素同定法

原子番号を特性X線の波長で同定

元素は周期表上に原子番号の順にならぶ

1919 ラザフォードによる陽子の発見



陽子，電荷 = +1

陽子数 ＝ 原子番号

陽子の数が元素を決める

(1: 水素，…，26: 鉄，…)

中性子，電荷 = 0

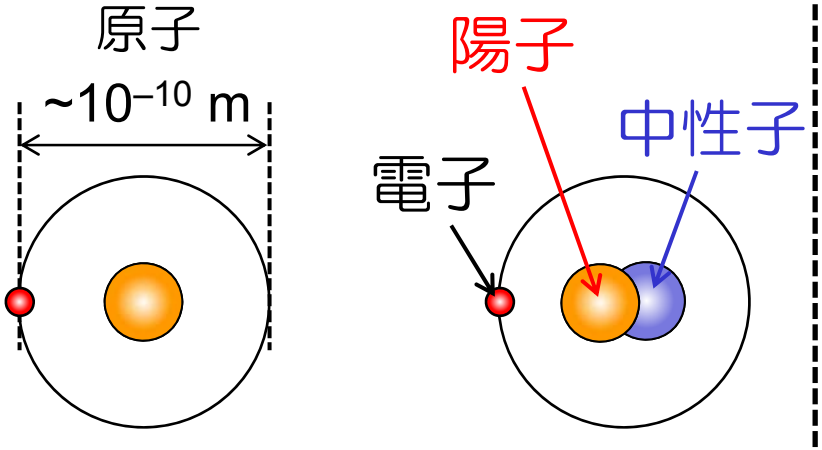
質量数 = 陽子数 + 中性子数

同位体

陽子数が同じで中性子数（質量数）が異なる核種

1913年 ソディーが「Isotope」の提案

安定な同位体

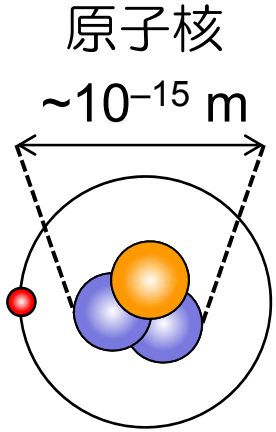


^{1}H　　^{2}H

元素記号

質量数 ＝ 陽子数 ＋ 中性子数

不安定な同位体



^{3}H

半減期12.3年

β⁻壊変

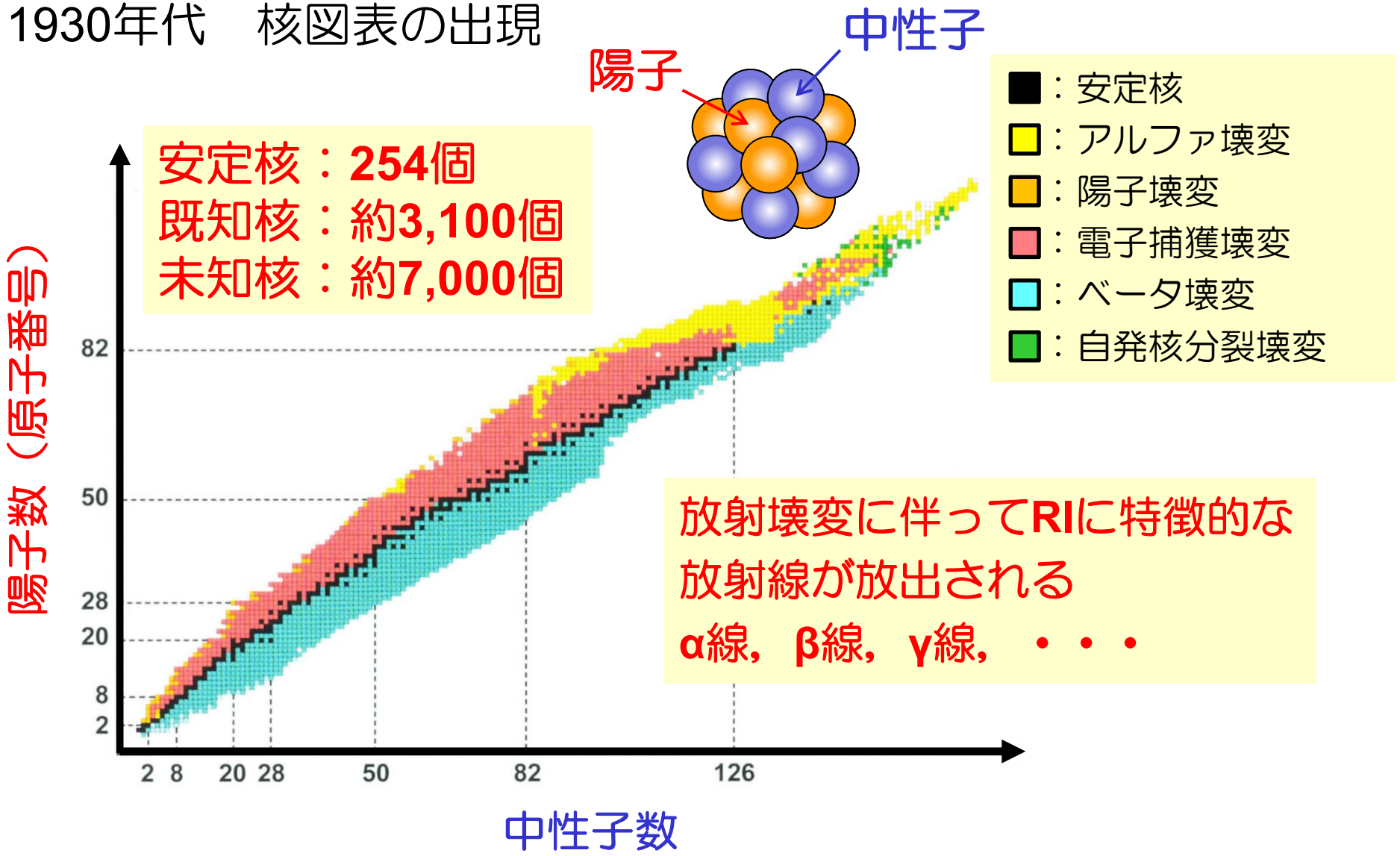
放射性同位体
(Radioactive Isotope, Radioisotope, RI)

周期表は同位体を分類できない.

核図表

縦軸に陽子数，横軸に中性子数をとり同位体を分類

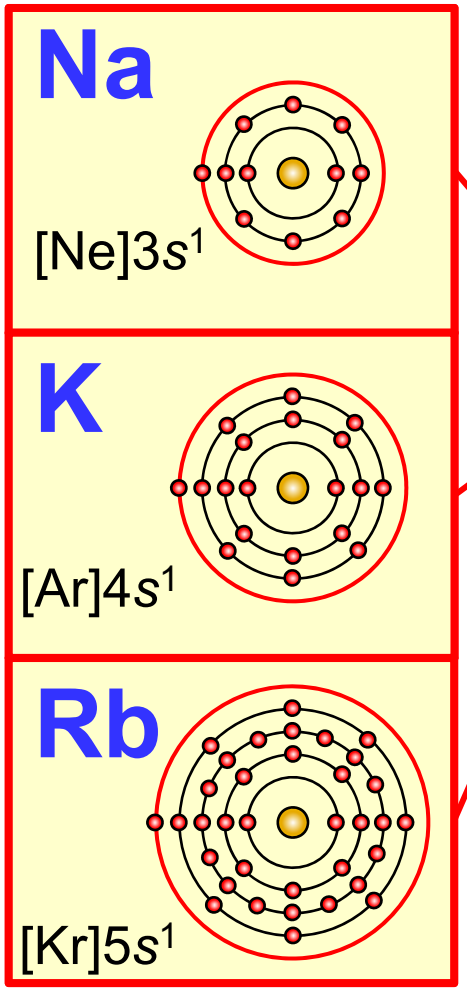
1930年代　核図表の出現



J. Magill et al., Karlsruher Nuklidkarte 8th ed., Nucleonica, 2012.

現代の周期表

- 元素を原子番号の順で左から右にならべる
- 化学的性質（最外殻電子配置）の似た元素が縦に並ぶように折り返す ⇒ 周期性



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

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

元素周期表（2016年）

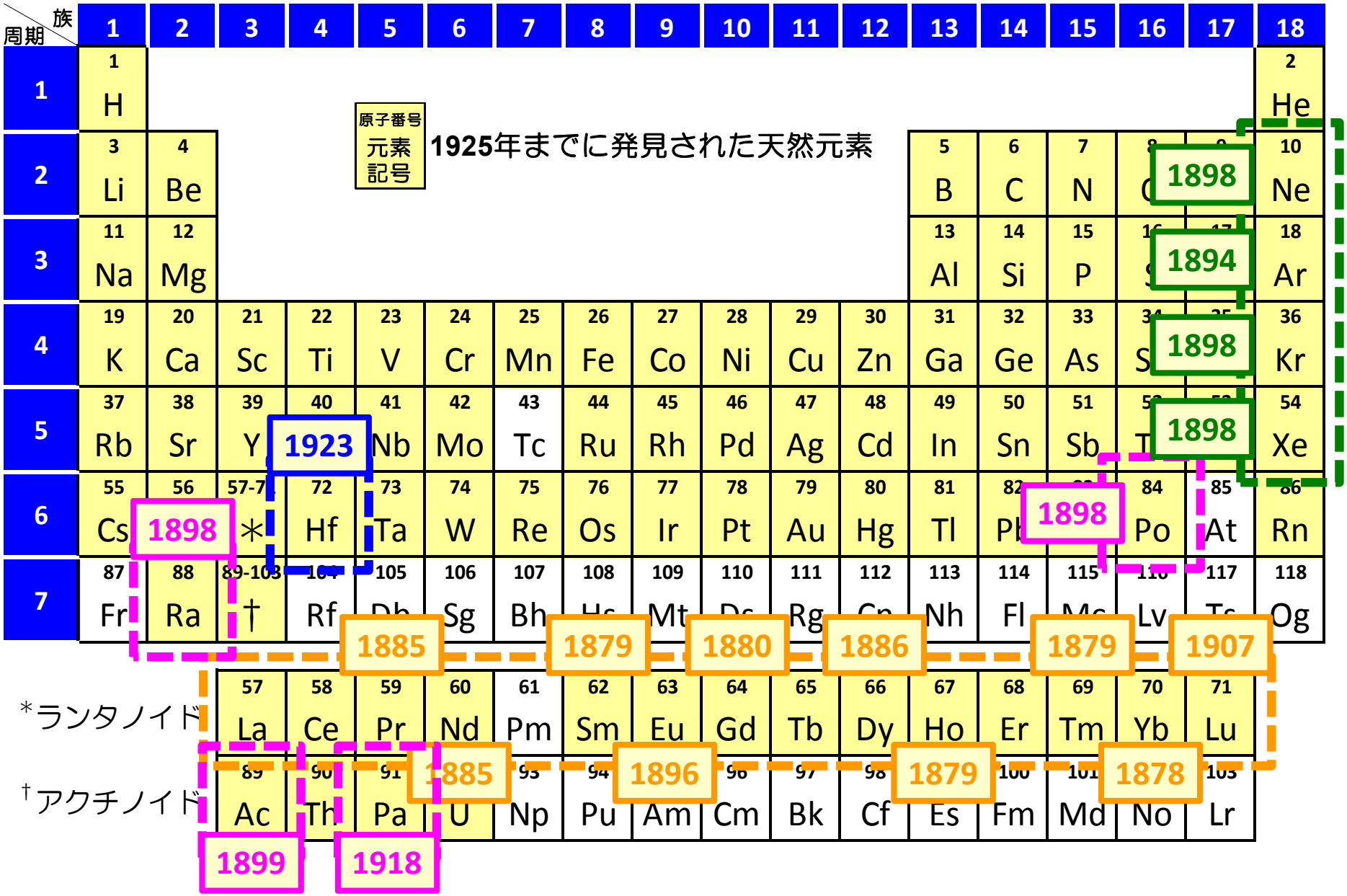
周期＼族	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38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

原子番号
元素記号

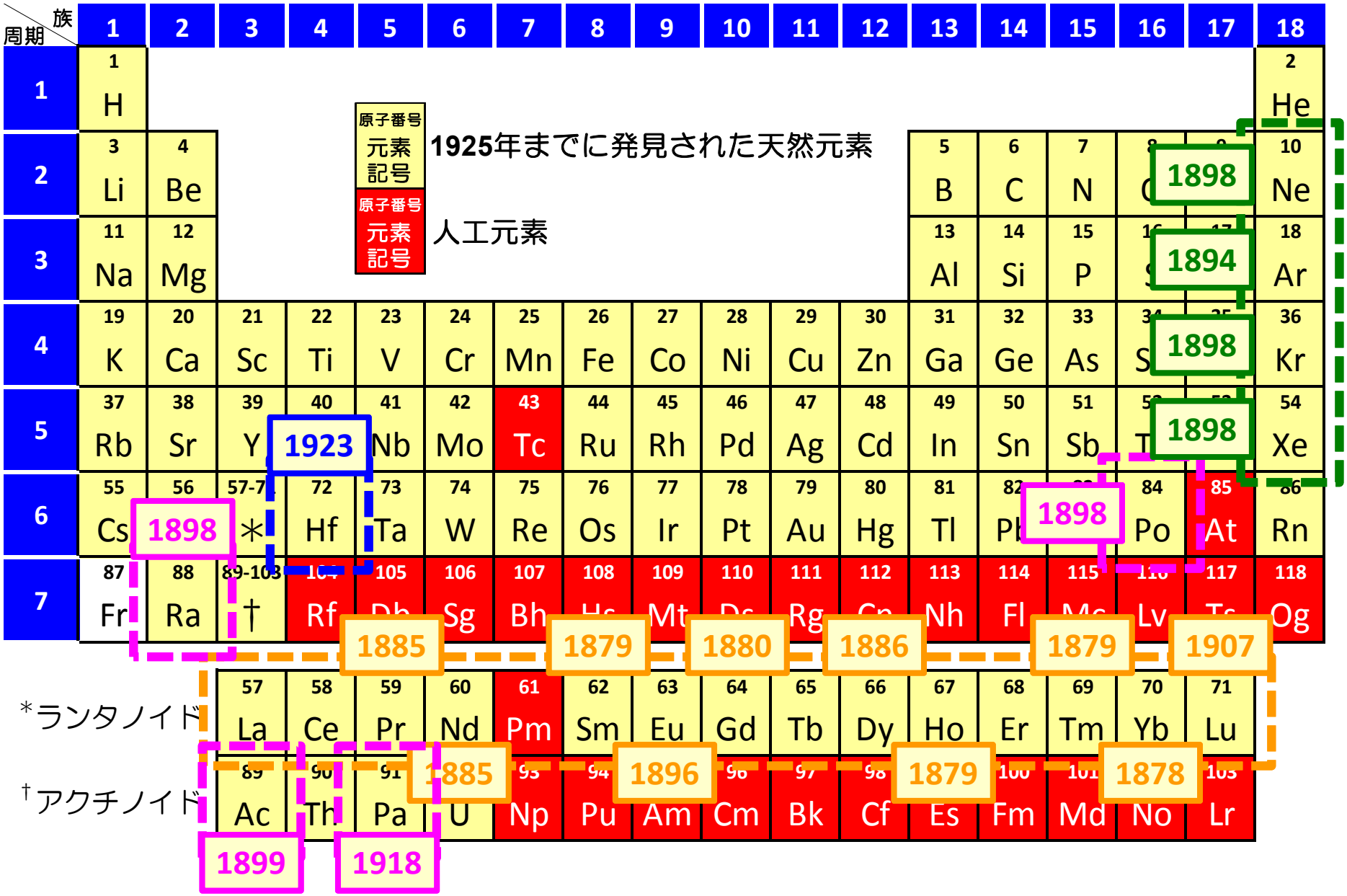
メンデレーエフ時代の元素

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

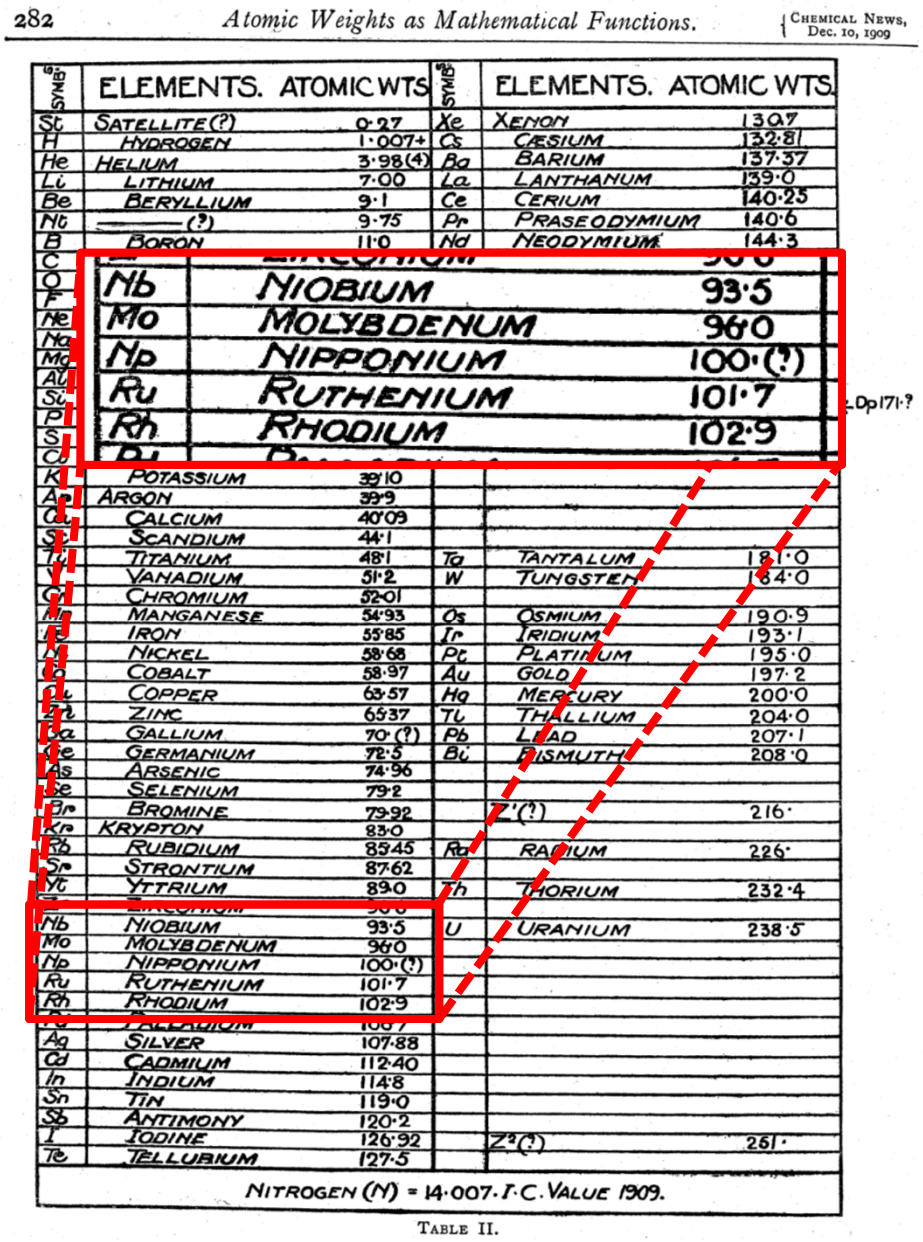
元素周期表（2016年）


族
周期
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
原子番号
元素記号
1925年までに発見された天然元素
1 H
2 He
3 Li
4 Be
5 B
6 C
7 N
10 Ne
11 Na
12 Mg
13 Al
14 Si
15 P
18 Ar
19 K
20 Ca
21 Sc
22 Ti
23 V
24 Cr
25 Mn
26 Fe
27 Co
28 Ni
29 Cu
30 Zn
31 Ga
32 Ge
33 As
36 Kr
37 Rb
38 Sr
39 Y
40 Nb
41 Mo
42 Tc
43 Ru
44 Rh
45 Pd
46 Ag
47 Cd
48 In
49 Sn
50 Sb
54 Xe
55 Cs
56 Ba
57-71 *
72 Hf
73 Ta
74 W
75 Re
76 Os
77 Ir
78 Pt
79 Au
80 Hg
81 Tl
82 Pb
84 Po
85 At
86 Rn
87 Fr
88 Ra
89-103 †
104 Rf
105 Db
106 Sg
107 Bh
108 Hs
109 Mt
110 Ds
111 Rg
112 Cn
113 Nh
114 Fl
115 Mc
116 Lv
117 Ts
118 Og
57 La
58 Ce
59 Pr
60 Nd
61 Pm
62 Sm
63 Eu
64 Gd
65 Tb
66 Dy
67 Ho
68 Er
69 Tm
70 Yb
71 Lu
89 Ac
90 Th
91 Pa
92 U
93 Np
94 Pu
95 Am
96 Cm
97 Bk
98 Cf
99 Es
100 Fm
101 Md
102 No
103 Lr
1898
1923
1898
1894
1898
1898
1898
1885
1879
1880
1886
1879
1907
1885
1896
1879
1878
1899
1918
*ランタノイド
†アクチノイド

元素周期表（2016年）


族
周期
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
原子番号
元素記号
1925年までに発見された天然元素
原子番号
元素記号
人工元素
1898
1894
1898
1898
1898
1923
1885
1879
1880
1886
1879
1907
1885
1896
1879
1878
1899
1918
*ランタノイド
†アクチノイド

43番元素ニッポニウム

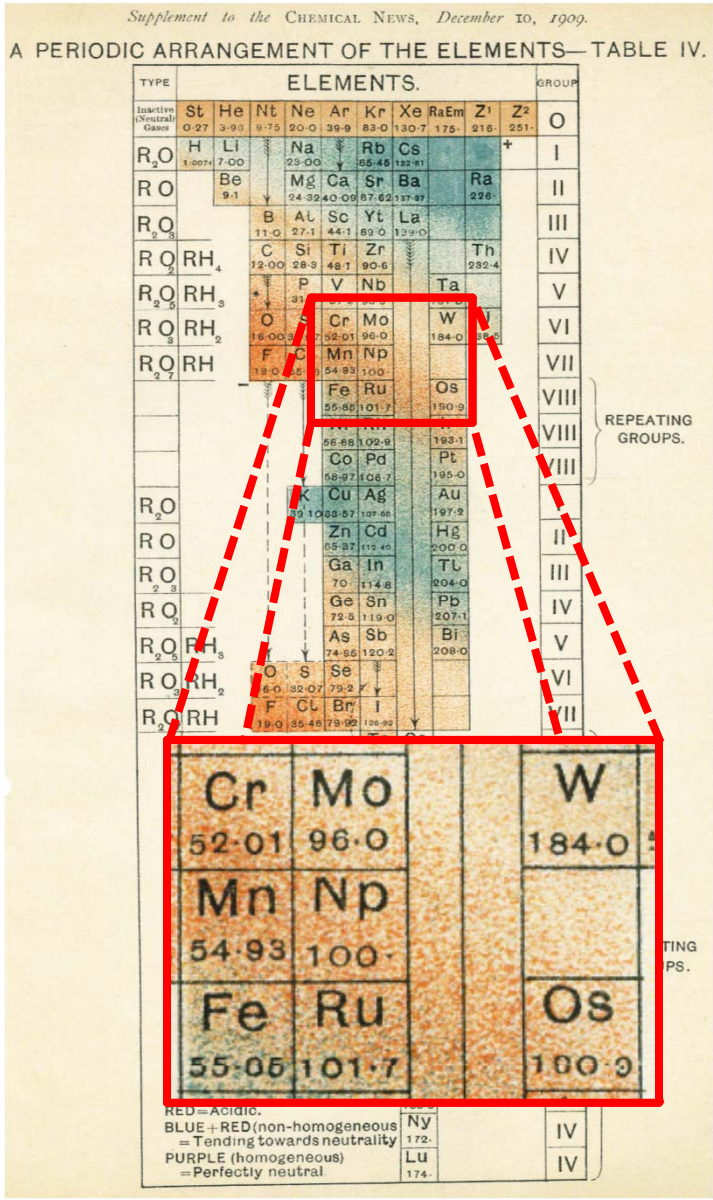


282 *Atomic Weights as Mathematical Functions.* CHEMICAL NEWS, Dec. 10, 1909

SYMBOL	ELEMENTS.	ATOMIC WTS.	SYMBOL	ELEMENTS.	ATOMIC WTS.
St	SATELLITE (?)	0·27	Xe	XENON	130·7
H	HYDROGEN	1·007+	Cs	CÆSIUM	132·81
He	HELIUM	3·98(4)	Ba	BARIUM	137·37
Li	LITHIUM	7·00	La	LANTHANUM	139·0
Be	BERYLLIUM	9·1	Ce	CERIUM	140·25
Nt	——— (?)	9·75	Pr	PRASEODYMIUM	140·6
B	BORON	11·0	Nd	NEODYMIUM	144·3
Nb	NIOBIUM	93·5			
Mo	MOLYBDENUM	96·0			
Np	NIPPONIUM	100·(?)			
Ru	RUTHENIUM	101·7			
Rh	RHODIUM	102·9			
K	POTASSIUM	39·10			
A	ARGON	39·9			
Ca	CALCIUM	40·03			
Sc	SCANDIUM	44·1			
Ti	TITANIUM	48·1	Ta	TANTALUM	181·0
V	VANADIUM	51·2	W	TUNGSTEN	184·0
Cr	CHROMIUM	52·01			
Mn	MANGANESE	54·93	Os	OSMIUM	190·9
Fe	IRON	55·85	Ir	IRIDIUM	193·1
Ni	NICKEL	58·68	Pt	PLATINUM	195·0
Co	COBALT	58·97	Au	GOLD	197·2
Cu	COPPER	63·57	Hg	MERCURY	200·0
Zn	ZINC	65·37	Tl	THALLIUM	204·0
Ga	GALLIUM	70·(?)	Pb	LEAD	207·1
Ge	GERMANIUM	72·5	Bi	BISMUTH	208·0
As	ARSENIC	74·96			
Se	SELENIUM	79·2			
Br	BROMINE	79·92	Z'(?)		216·
Kr	KRYPTON	83·0			
Rb	RUBIDIUM	85·45	Ra	RADIUM	226·
Sr	STRONTIUM	87·62			
Yt	YTTRIUM	89·0	Th	THORIUM	232·4
Zr	ZIRCONIUM	90·6			
Nb	NIOBIUM	93·5	U	URANIUM	238·5
Mo	MOLYBDENUM	96·0			
Np	NIPPONIUM	100·(?)			
Ru	RUTHENIUM	101·7			
Rh	RHODIUM	102·9			
Pd	PALLADIUM	106·7			
Ag	SILVER	107·88			
Cd	CADMIUM	112·40			
In	INDIUM	114·8			
Sn	TIN	119·0			
Sb	ANTIMONY	120·2			
I	IODINE	126·92	Z²(?)		261·
Te	TELLURIUM	127·5			

NITROGEN (N) = 14·007·I·C. VALUE 1909.

TABLE II.



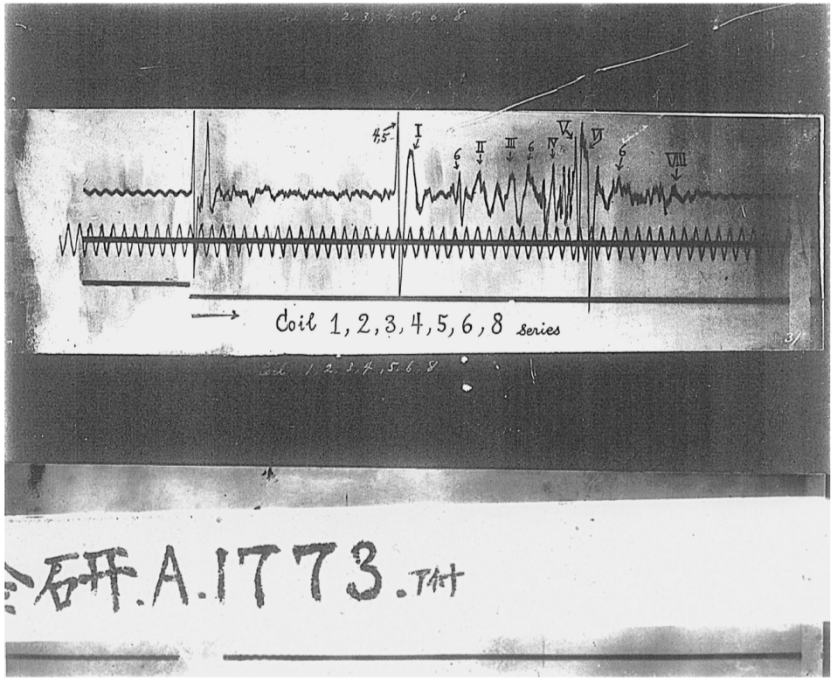
F. H. Loring, Chem. News, Dec. 10, 281 (1909).

ニッポニウムの発見

1899　第一高等学校教授
1904　英国に留学（～1906），ラムジーと研究
1908　トリアニトから43番元素ニッポニウムを発見
1911　東北帝国大学理科大学教授，1918 同大学総長
1925　ノダックがコルンブ石から特性X線により
　　75番元素レニウム（Re）を発見
1930　木村健二郎，青山新一が小川のニッポニウム
　　を特性X線によりReと確認
1937　セグレが43番元素を人工合成

小川正孝
（1865–1930）

	ニッポニウム		レニウム
	小川	吉原	
光学スペクトル	4882±10 Å		4889.17 Å
原子量	100	185.2	186.2
化学形	MCl_2	$MOCl_4$	$ReOCl_4$

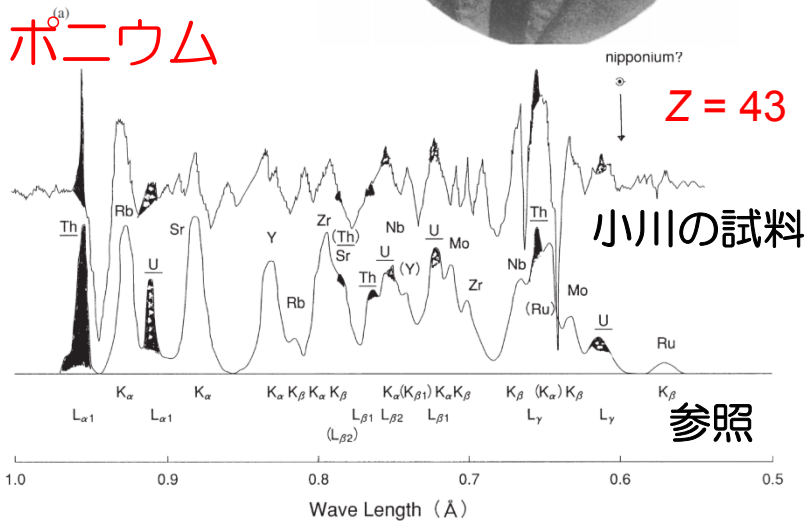


H. K. Yoshihara, Proc. Jpn. Acad. Ser. B **84**, 232 (2008).

ニッポニウムの発見

1899　第一高等学校教授
1904　英国に留学（～1906），ラムジーと研究
1908　トリアニトから43番元素ニッポニウムを発見
1911　東北帝国大学理科大学教授，1918 同大学総長
1925　ノダックがコルンブ石から特性X線により
　　75番元素レニウム（Re）を発見
1930　木村健二郎，青山新一が小川のニッポニウム
　　を特性X線によりReと確認
1937　セグレが43番元素を人工合成

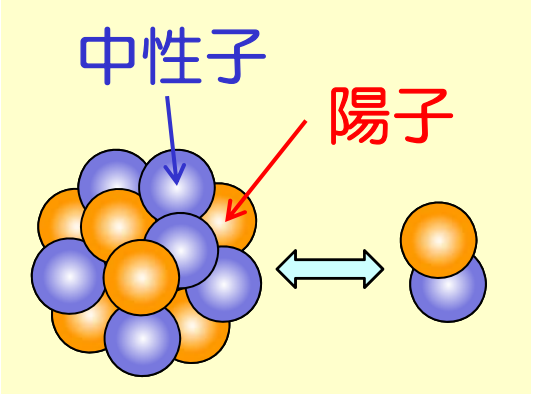
	ニッポニウム		レニウム
	小川	吉原	
光学スペクトル	4882±10 Å		4889.17 Å
原子量	100	185.2	186.2
化学形	MCl_2	$MOCl_4$	$ReOCl_4$



H. K. Yoshihara, Proc. Jpn. Acad. Ser. B **84**, 232 (2008).

2. 人工元素の合成
―原子核反応―

天然に見つからない元素を人工合成



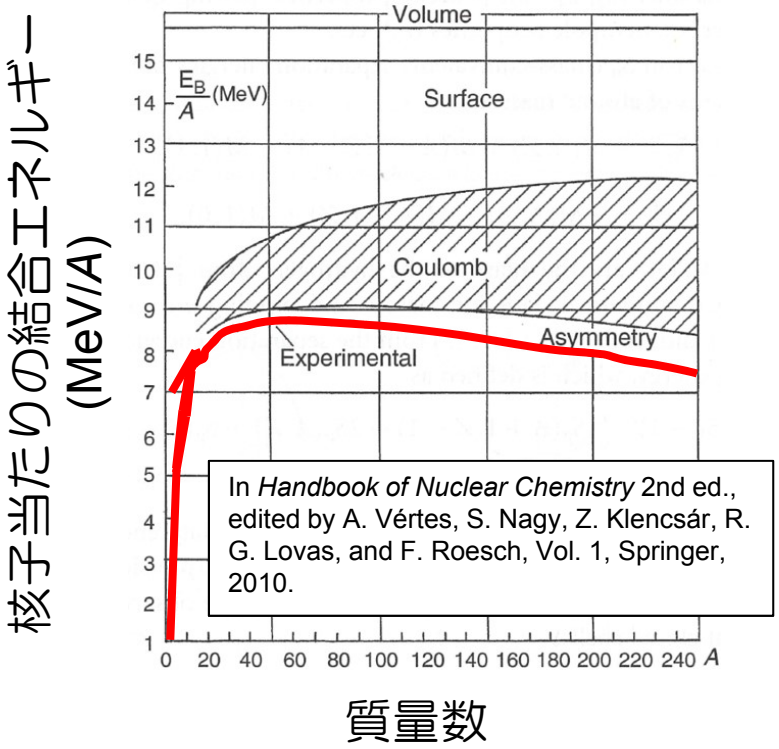
核子の組み換えによって，これまで確認されていない陽子数をもつ原子核を人工的につくる．

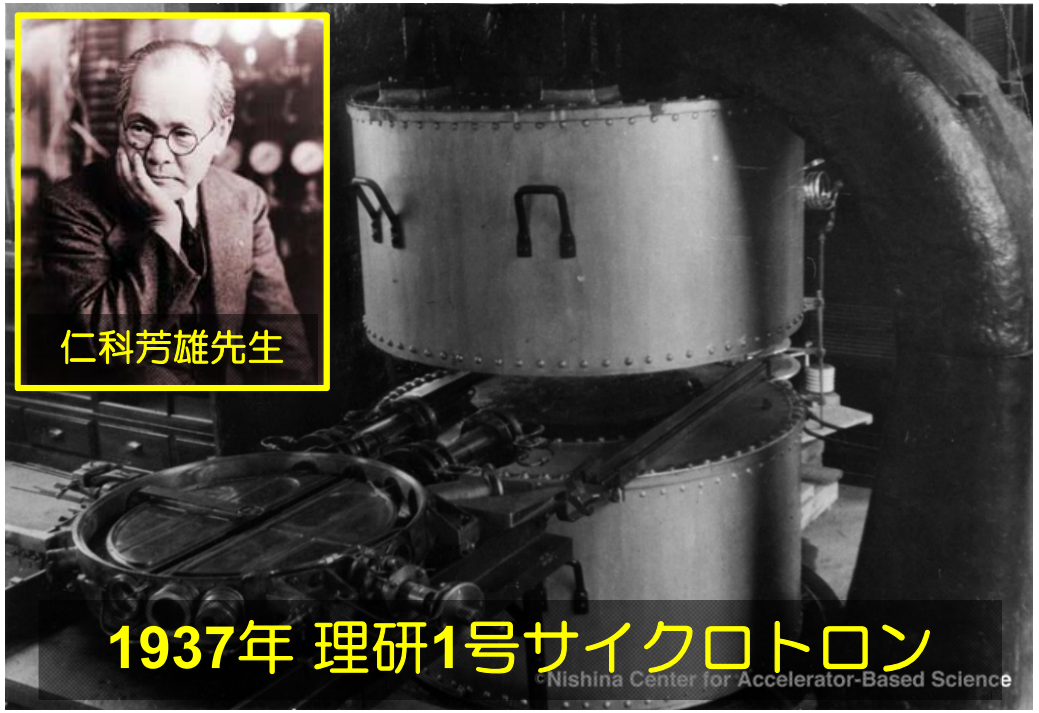
1929年 ローレンスがサイクロトロンを発明

→ **100万電子ボルト（MeV）の高エネルギーイオンビームを発生**

1939年 ハーンとシュトラスマンが核分裂を発見

1942年 フェルミら最初の原子炉始動 → 中性子を大量に発生

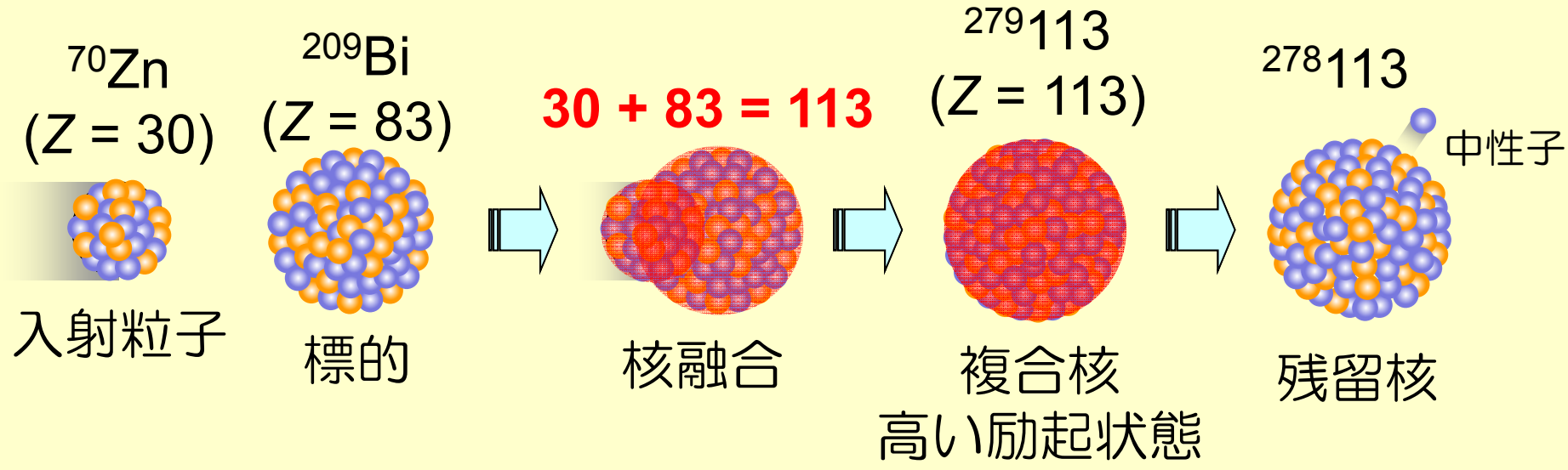




原子核 融合反応

113番元素の例

- 陽子の数が113の原子核をつくればよい.
- 亜鉛（原子番号Z = 30）とビスマス（Z = 83）を核融合させる.



^{209}Bi + ^{70}Zn → ^{278}113 + n または ^{209}Bi(^{70}Zn,n)^{278}113 と表記

原子核は正の電荷をもつ．2つの原子核が核融合するためには，
静電反発力に打ち勝って，原子核同士が接触する必要がある.

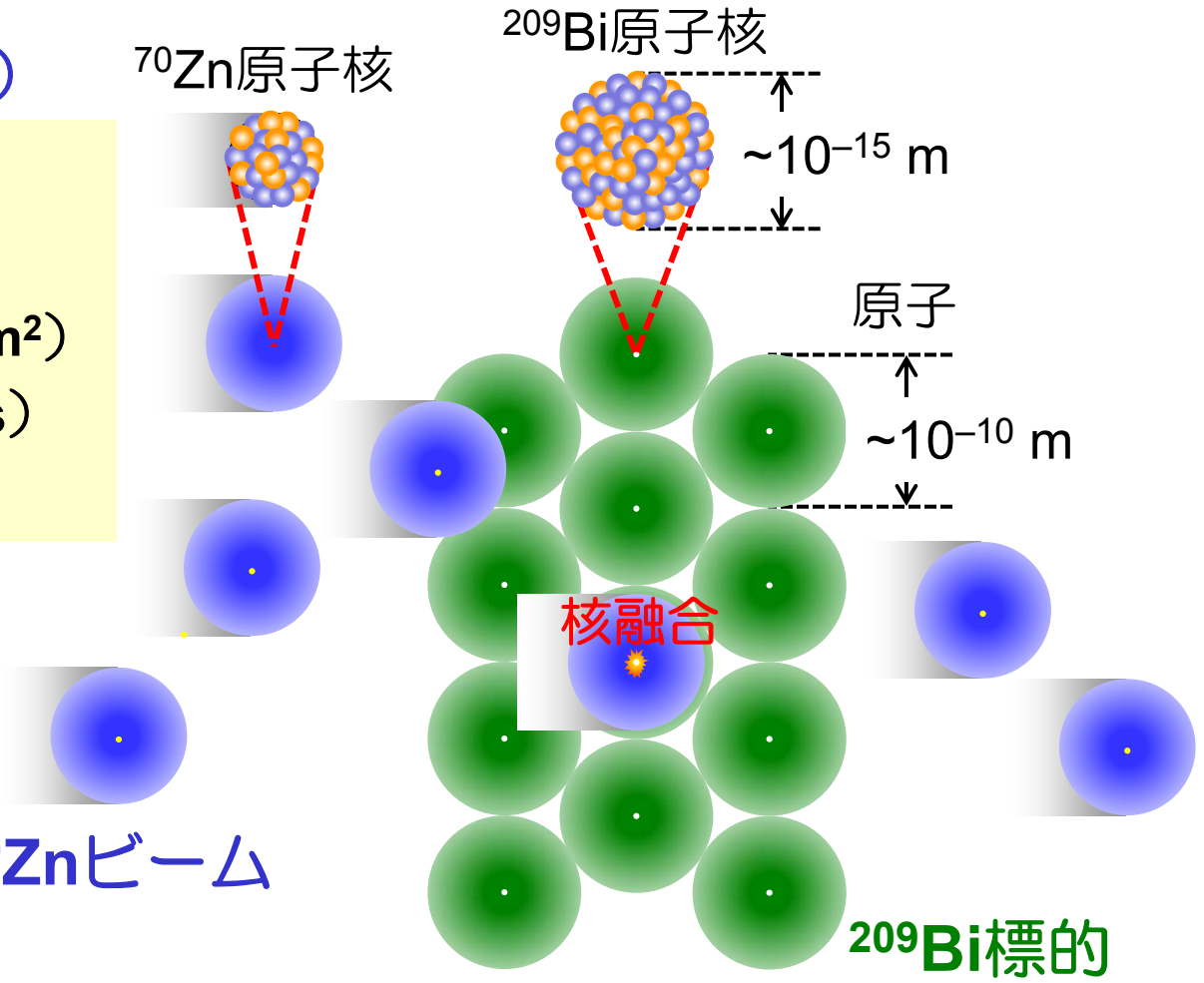
⇒ 重イオン加速器を用いて，**^{70}Znイオンを光速の10%に加速**

核融合の起こりやすさ（反応断面積）

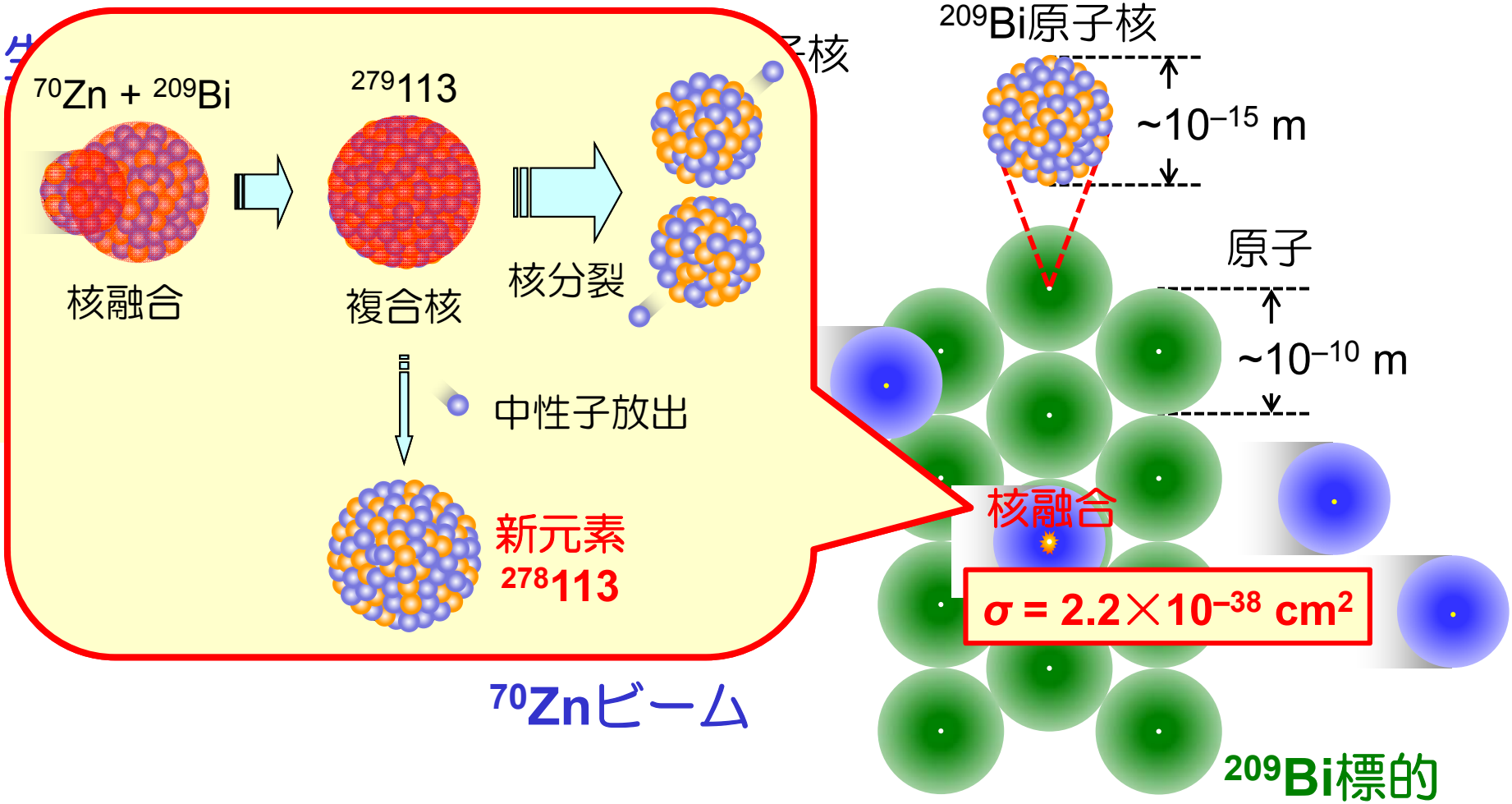
生成原子数：*N*（原子）

$$N = \sigma \times w \times I \times t$$

- σ: 反応断面積（cm^2）
- w: 標的原子数（原子/cm^2）
- I: ビーム強度（イオン/s）
- t: 照射時間（s）



核融合の起こりやすさ（反応断面積）

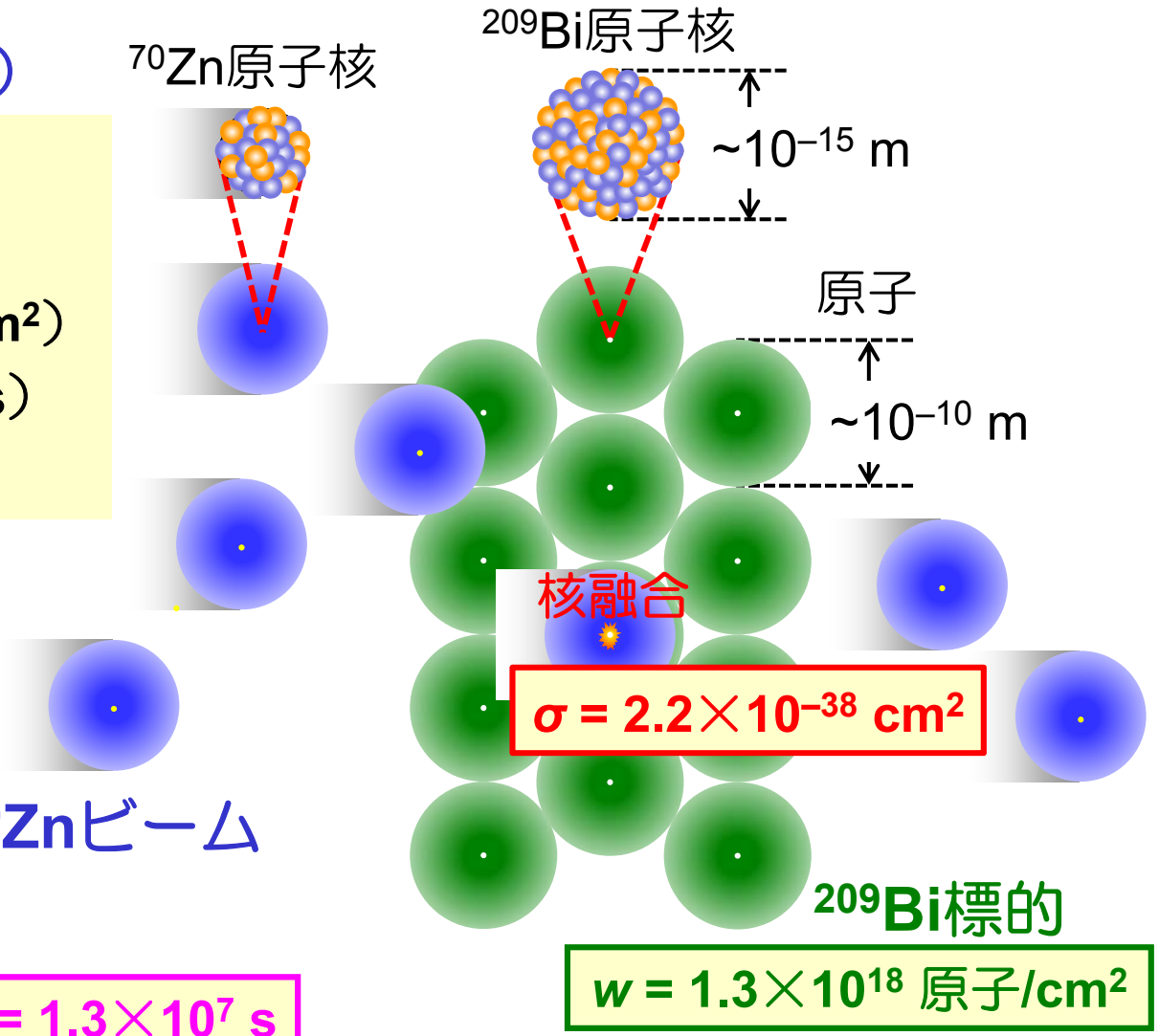


核融合の起こりやすさ（反応断面積）

生成原子数：N（原子）

$$N = \sigma \times w \times I \times t$$

- σ: 反応断面積（cm^2）
- w: 標的原子数（原子/cm^2）
- I: ビーム強度（イオン/s）
- t: 照射時間（s）



大強度加速器が必要

$I = 2.8\times10^{12}$ イオン/s

150日間の長期実験 $t = 1.3\times10^{7}$ s

$$N(^{278}113) = 2.2\times10^{-38}\times 1.3\times10^{18} \times 2.8\times10^{12} \times 1.3\times10^{7}$$
$$= 1\text{原子！}$$

人工元素発見の歴史

原子番号	元素名	元素記号	発見年	発見国	合成核反応	半減期
43	テクネチウム	Tc	1937		$^{nat}Mo(d,xn)^{nat+2-x}Tc$	-
85	アスタチン	At	1940		$^{209}Bi(\alpha,2n)^{211}At$	7.5 h
93	ネプツニウム	Np	1940		$^{238}U(n,\gamma)^{239}U \rightarrow {}^{239}Np$	2.3 d
94	プルトニウム	Pu	1940		$^{238}U(d,2n)^{238}Np \rightarrow {}^{238}Pu$	-
95	アメリシウム	Am	1944		$^{239}Pu(2n,\gamma)^{241}Pu \rightarrow {}^{241}Am$	~500 y
96	キュリウム	Cm	1944		$^{239}Pu(\alpha,n)^{242}Cm$	~150 d
61	プロメチウム	Pm	1947		$^{235}U(n,F)^{147}Pm$	3.7 y
97	バークリウム	Bk	1950		$^{241}Am(\alpha,2n)^{243}Bk$	4.6 h
98	カリホルニウム	Cf	1950		$^{242}Cm(\alpha,n)^{245}Cf$	45 min
99	アインスタイニウム	Es	1955		$^{238}U(15n,\gamma)^{253}U \rightarrow {}^{253}Es$	~20 d
100	フェルミウム	Fm	1955		$^{238}U(17n,\gamma)^{255}U \rightarrow {}^{255}Fm$	~16 h
101	メンデレビウム	Md	1955		$^{253}Es(\alpha,n)^{256}Md$	~0.5 h
102	ノーベリウム	No	1958		$^{244}Cm(^{12}C,4n)^{252}No$	3 s
103	ローレンシウム	Lr	1961		$^{249\text{-}252}Cf(^{11,12}B,xn)^{258}Lr$	8 s

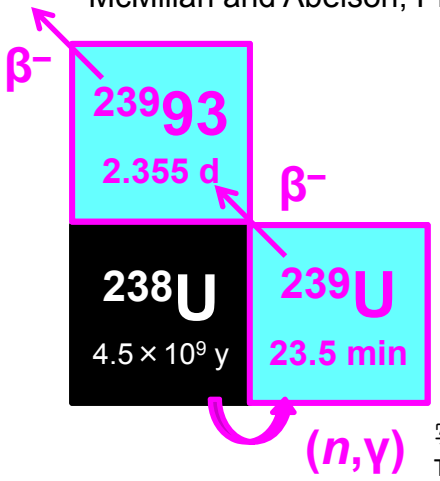
人工元素発見の歴史

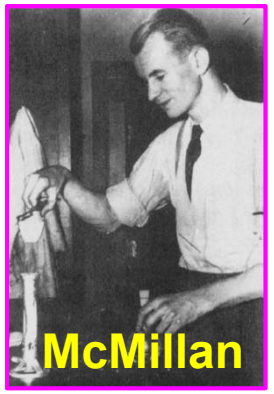
原子番号	元素名	元素記号	発見年	発見国	合成核反応	半減期
43	テクネチウム	Tc	1937		$^{nat}Mo(d,xn)^{nat+2-x}Tc$	-
85	アスタチン	At	1940		$^{209}Bi(\alpha,2n)^{211}At$	7.5 h
93	ネプツニウム	Np	1940		$^{238}U(n,\gamma)^{239}U \rightarrow {}^{239}Np$	2.3 d
94	プルトニウム	Pu	1940		$^{238}U(d,2n)^{238}Np \rightarrow {}^{238}Pu$	-
95	アメリシウム	Am	1944		$^{239}Pu(2n,\gamma)^{241}Pu \rightarrow {}^{241}Am$	~500 y
96	キュリウム	Cm	1944		$^{239}Pu(\alpha,n)^{242}Cm$	~150 d
61	プロメチウム	Pm	1947		$^{235}U(n,F)^{147}Pm$	3.7 y
97	バークリウム	Bk	1950		$^{241}Am(\alpha,2n)^{243}Bk$	4.6 h
98	カリホルニウム	Cf	1950		$^{242}Cm(\alpha,n)^{245}Cf$	45 min
99	アインスタイニウム	Es	1955		$^{238}U(15n,\gamma)^{253}U \rightarrow {}^{253}Es$	~20 d
100	フェルミウム	Fm	1955		$^{238}U(17n,\gamma)^{255}U \rightarrow {}^{255}Fm$	~16 h
101	メンデレビウム	Md	1955		$^{253}Es(\alpha,n)^{256}Md$	~0.5 h
102	ノーベリウム	No	1958		$^{244}Cm(^{12}C,4n)^{252}No$	3 s
103	ローレンシウム	Lr	1961		$^{249\text{-}252}Cf(^{11,12}B,xn)^{258}Lr$	8 s

93番元素ネプツニウム（Np）の発見

カリフォルニア大・マクミランら

McMillan and Abelson, Phys. Rev. **57**, 1185 (1940).





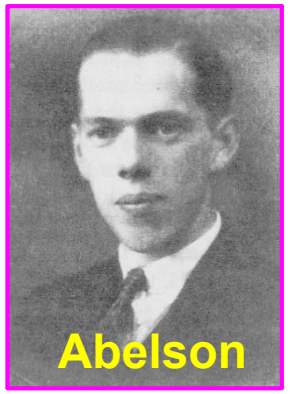


写真: D. C. Hoffman et al., The Transuranium People The Inside Story, Imperial College Press, 2000.

(1) ローレンス放射線研究所のサイクロトロン
中性子ビームを$^{238}UO_3$標的に照射
$^{238}U(n,\gamma)^{239}U$

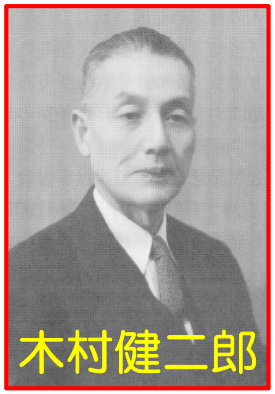
(2) ^{238}U担体を用いて^{239}Uを化学精製

(3) β線計測
^{239}U（β⁻壊変）→
新元素**$^{239}93$**（β⁻壊変）
^{239}Uの減衰と$^{239}93$成長を確認

93番元素ネプツニウム（Np）の発見

理研・仁科芳雄ら

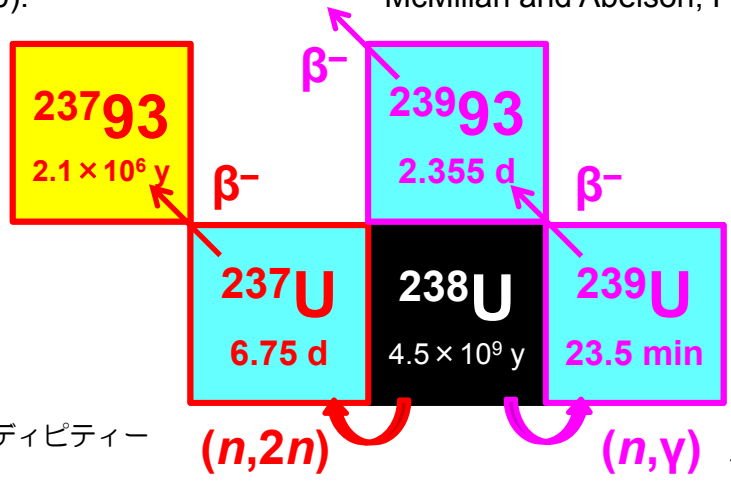
Nishina et al., Phys. Rev. **57**, 1182 (1940).

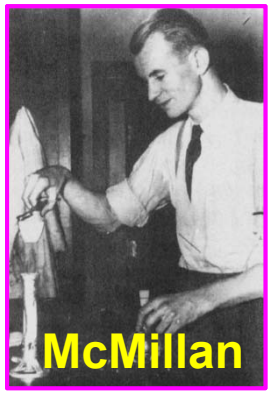


木村先生の写真: 吉原賢二, 化学者たちのセレンディピティー ノーベル賞への道のり, 東北大学出版会, 2006.

カリフォルニア大・マクミランら

McMillan and Abelson, Phys. Rev. **57**, 1185 (1940).





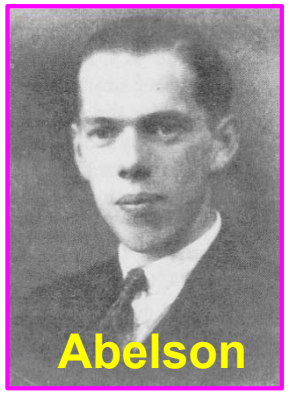


写真: D. C. Hoffman et al., The Transuranium People The Inside Story, Imperial College Press, 2000.

(1) 理研のサイクロトロン
　重陽子を加速しリチウムに照射
　　中性子ビームを発生
(2) *n*ビームを$^{238}U_3O_8$標的に照射
　^{238}U(*n*,2*n*)^{237}U
　^{237}U（β⁻壊変）→ **新元素^{237}93**
(3) Re担体を加えてNpを化学分離
(4) α/β線計測
　長寿命**^{237}93**を検出できず

(1) ローレンス放射線研究所のサイクロトロン
　中性子ビームを$^{238}UO_3$標的に照射
　^{238}U(*n*,γ)^{239}U
(2) ^{238}U担体を用いて^{239}Uを化学精製
(3) β線計測
　^{239}U（β⁻壊変 ）→
　　新元素**^{239}93** （β⁻壊変 ）
　^{239}Uの減衰と**^{239}93**成長を確認

人工元素発見の歴史

原子番号	元素名	元素記号	発見年	発見国	合成核反応	半減期
43	テクネチウム	Tc	1937		$^{nat}Mo(d,xn)^{nat+2-x}Tc$	-
85	アスタチン	At	1940		$^{209}Bi(\alpha,2n)^{211}At$	7.5 h
93	ネプツニウム	Np	1940		$^{238}U(n,\gamma)^{239}U \rightarrow {}^{239}Np$	2.3 d
94	プルトニウム	Pu	1940		$^{238}U(d,2n)^{238}Np \rightarrow {}^{238}Pu$	-
95	アメリシウム	Am	1944		$^{239}Pu(2n,\gamma)^{241}Pu \rightarrow {}^{241}Am$	~500 y
96	キュリウム	Cm	1944		$^{239}Pu(\alpha,n)^{242}Cm$	~150 d
61	プロメチウム	Pm	1947		$^{235}U(n,F)^{147}Pm$	3.7 y
97	バークリウム	Bk	1950		$^{241}Am(\alpha,2n)^{243}Bk$	4.6 h
98	カリホルニウム	Cf	1950		$^{242}Cm(\alpha,n)^{245}Cf$	45 min
99	アインスタイニウム	Es	1955		$^{238}U(15n,\gamma)^{253}U \rightarrow {}^{253}Es$	~20 d
100	フェルミウム	Fm	1955		$^{238}U(17n,\gamma)^{255}U \rightarrow {}^{255}Fm$	~16 h
101	メンデレビウム	Md	1955		$^{253}Es(\alpha,n)^{256}Md$	~0.5 h
102	ノーベリウム	No	1958		$^{244}Cm(^{12}C,4n)^{252}No$	3 s
103	ローレンシウム	Lr	1961		$^{249\text{-}252}Cf(^{11,12}B,xn)^{258}Lr$	8 s

超重元素発見の歴史

原子番号	元素名	元素記号	発見年	発見国	合成核反応	半減期
104	ラザホージウム	Rf	1964		$^{242}Pu(^{22}Ne,4n)^{260}Rf$	0.3 s
			1969		$^{249}Cf(^{12}C,4n)^{257}Rf$	4.5 s
105	ドブニウム	Db	1970		$^{249}Cf(^{15}N,4n)^{260}Db$	1.6 s
			1971		$^{243}Am(^{22}Ne,4n)^{261}Db$	1.8 s
106	シーボーギウム	Sg	1974		$^{249}Cf(^{18}O,4n)^{263}Sg$	0.9 s
107	ボーリウム	Bh	1981		$^{209}Bi(^{54}Cr,n)^{262}Bh$	4.7 ms
108	ハッシウム	Hs	1984		$^{208}Pb(^{58}Fe,n)^{265}Hs$	1.8 ms
109	マイトネリウム	Mt	1982		$^{209}Bi(^{58}Fe,n)^{266}Mt$	3.5 ms
110	ダームスタチウム	Ds	1995		$^{208}Pb(^{62}Ni,n)^{269}Ds$	270 μs
111	レントゲニウム	Rg	1995		$^{209}Bi(^{64}Ni,n)^{272}Rg$	1.5 ms
112	コペルニシウム	Cn	1996		$^{208}Pb(^{70}Zn,n)^{277}Cn$	240 μs
113	ニホニウム	Nh	2004		$^{209}Bi(^{70}Zn,n)^{278}113$	238 μs
114	フレロビウム	Fl	2004		$^{242}Pu(^{48}Ca,3n)^{287}Fl$	0.51 s
115	モスコビウム	Mc	2012		$^{243}Am(^{48}Ca,2n)^{289}115$	177 ms
116	リバモリウム	Lv	2004		$^{245}Cm(^{48}Ca,2n)^{291}Lv$	6.3 ms
117	テネシン	Ts	2010		$^{249}Bk(^{48}Ca,4n)^{293}117$	14 ms
118	オガネソン	Og	2006		$^{249}Cf(^{48}Ca,3n)^{294}118$	0.89 ms

3. いかにしてニホニウムは合成されたか

人工元素発見の歴史（2001年）

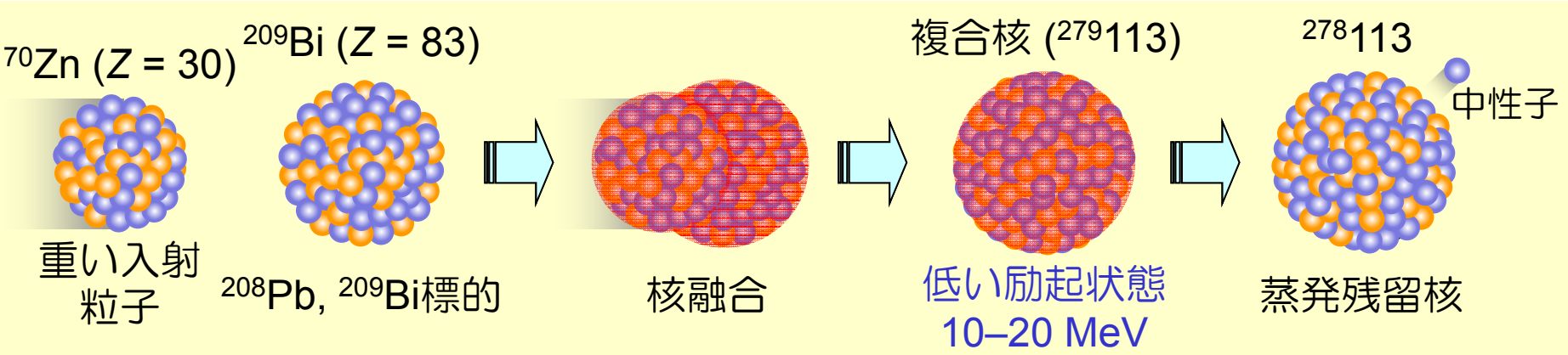
原子番号	元素名	元素記号	発見年	発見国	合成核反応	半減期
104	ラザホージウム	Rf	1964		$^{242}Pu(^{22}Ne,4n)^{260}Rf$	0.3 s
			1969		$^{249}Cf(^{12}C,4n)^{257}Rf$	4.5 s
105	ドブニウム	Db	1970		$^{249}Cf(^{15}N,4n)^{260}Db$	1.6 s
			1971		$^{243}Am(^{22}Ne,4n)^{261}Db$	1.8 s
106	シーボーギウム	Sg	1974		$^{249}Cf(^{18}O,4n)^{263}Sg$	0.9 s
107	ボーリウム	Bh	1981		$^{209}Bi(^{54}Cr,n)^{262}Bh$	4.7 ms
108	ハッシウム	Hs	1984		$^{208}Pb(^{58}Fe,n)^{265}Hs$	1.8 ms
109	マイトネリウム	Mt	1982		$^{209}Bi(^{58}Fe,n)^{266}Mt$	3.5 ms
110			1995		$^{208}Pb(^{62}Ni,n)^{269}Ds$	270 μs
111			1995		$^{209}Bi(^{64}Ni,n)^{272}Rg$	1.5 ms
112			1996		$^{208}Pb(^{70}Zn,n)^{277}Cn$	240 μs
113				未発見		
114			1999		$^{242}Pu(^{48}Ca,3n)^{287}114$	5.45 s
115				未発見		
116			2000		$^{248}Cm(^{48}Ca,4n)^{292}116$	32.5 ms
117				未発見		
118				未発見		

理研の戦略

新元素をつくる二つの方法

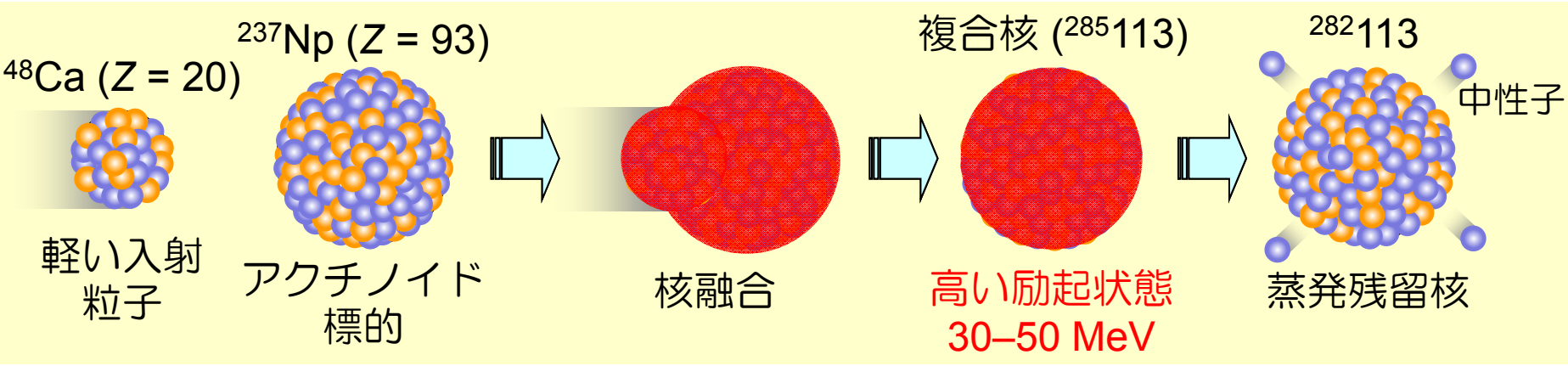
①冷たい核融合反応：107～112番元素で成功

魔法数近傍の^{208}Pb, ^{209}Bi標的核＋Fe近傍の入射核

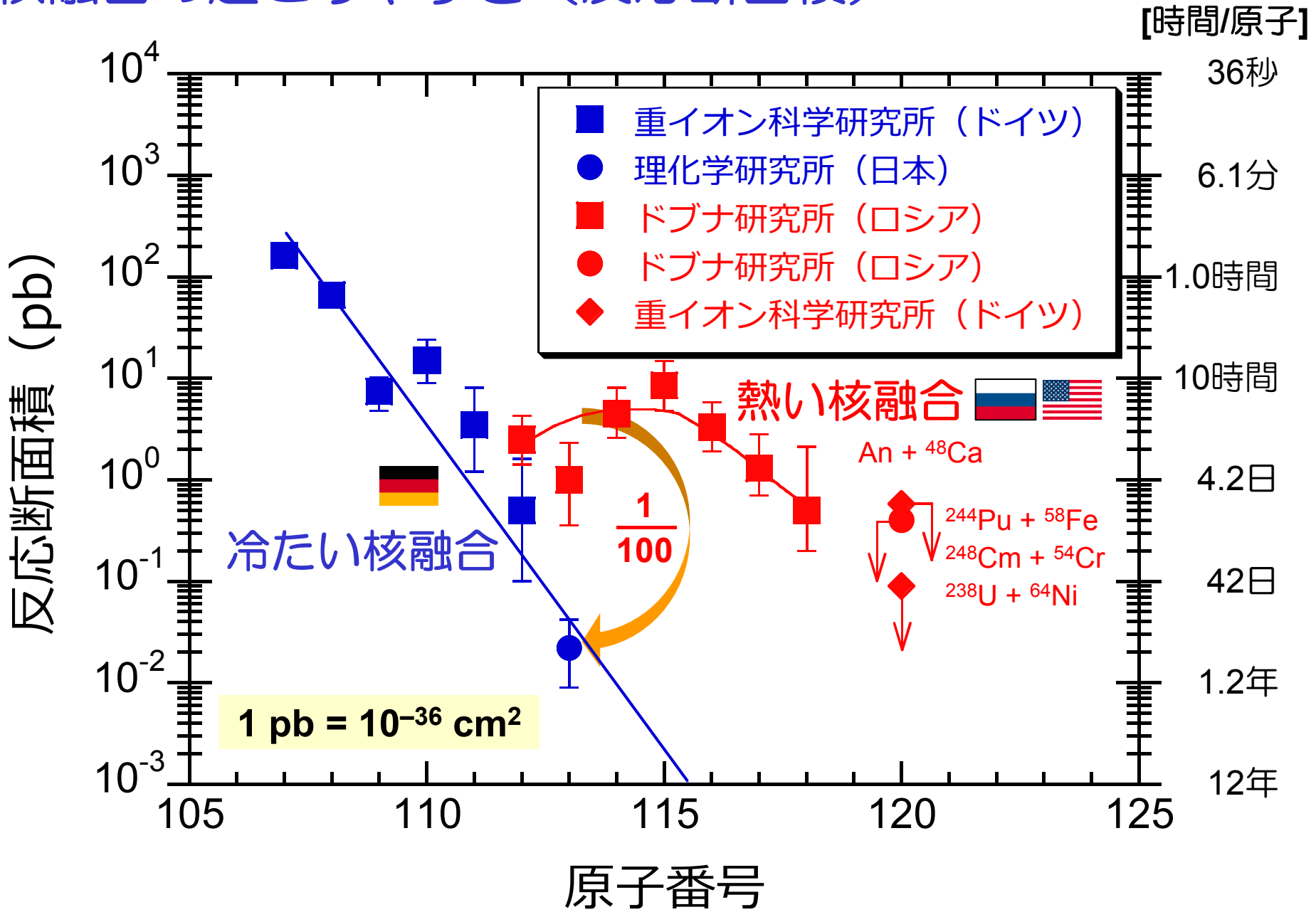


②熱い核融合反応：114, 116番元素で成功

アクチノイド元素の標的核＋二重魔法数の^{48}Ca入射核



核融合の起こりやすさ（反応断面積）



新元素の同定（原子番号の同定）

冷たい核融合

α壊変鎖が既知核へ

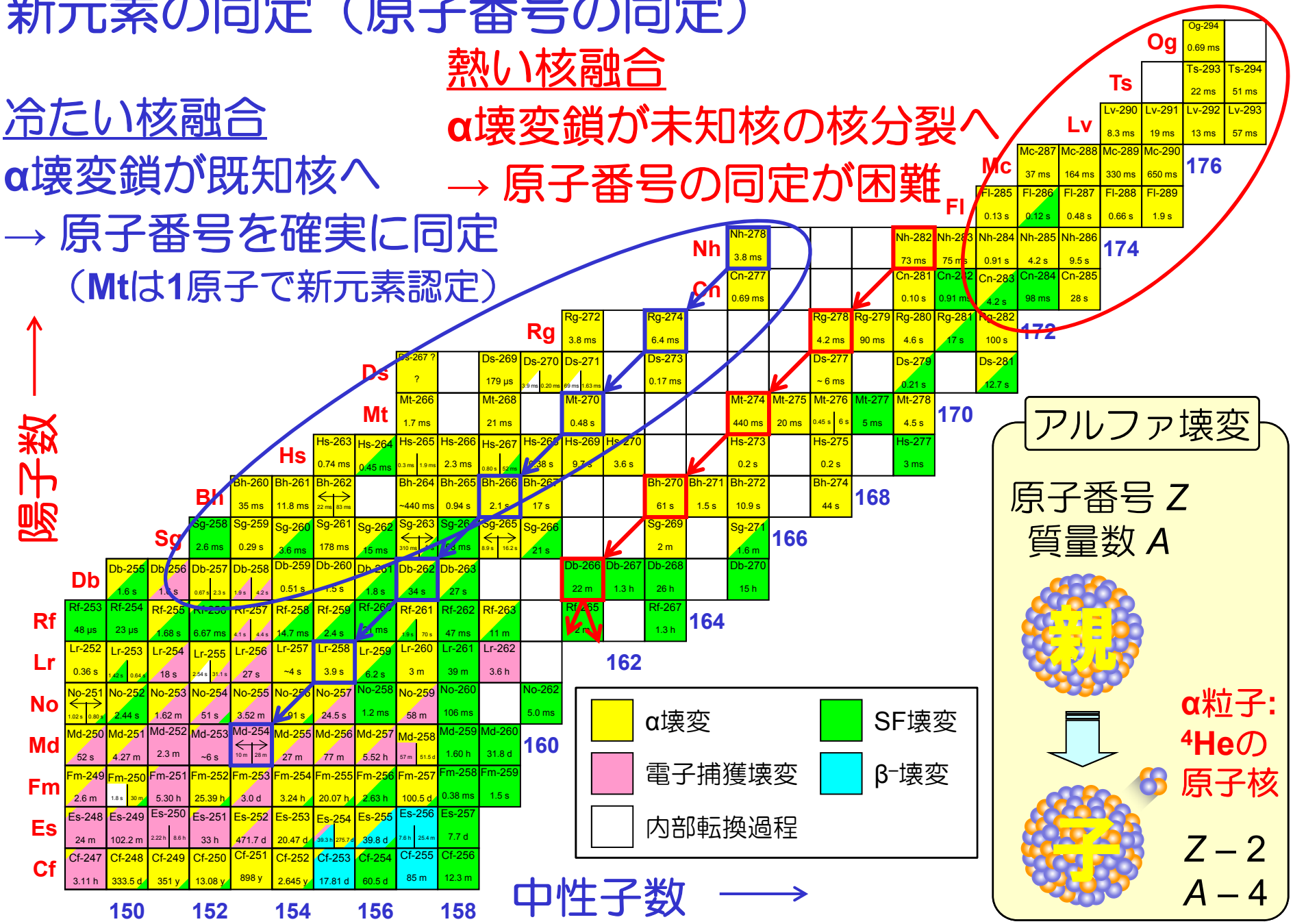
→ 原子番号を確実に同定

（Mtは1原子で新元素認定）

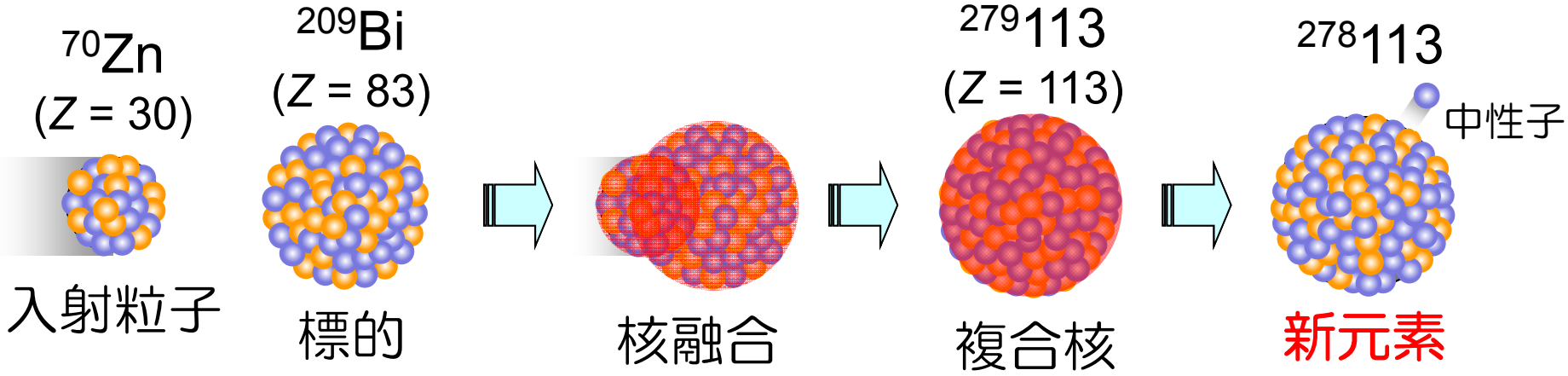
熱い核融合

α壊変鎖が未知核の核分裂へ

→ 原子番号の同定が困難



理研の戦略：冷たい核融合による113番元素の探索



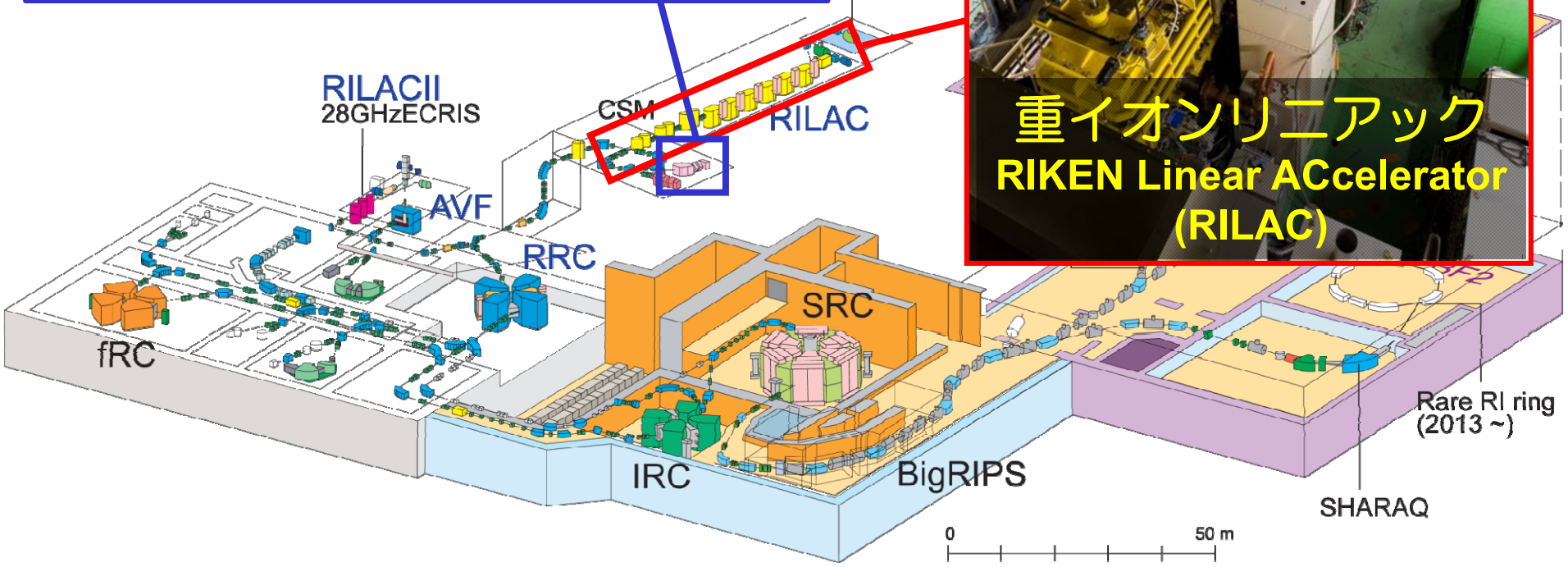
実験期間	2003/9/5 ～ 2012/8/18（**9年間**）
照射時間	13274時間（**553日**）
実験者	**43人**
ビームエネルギー	348 MeV (標的中央値)
ビーム強度	0.47 pμA (2.8×10^{12} s^{-1})
粒子数	1.35×10^{20} (15 mg)
標的厚	0.45 mg cm^{-2} (1.3×10^{18} cm^{-2})
GARIS効率	80%
Si検出器効率	94%

理研和光研究所（埼玉県和光市）

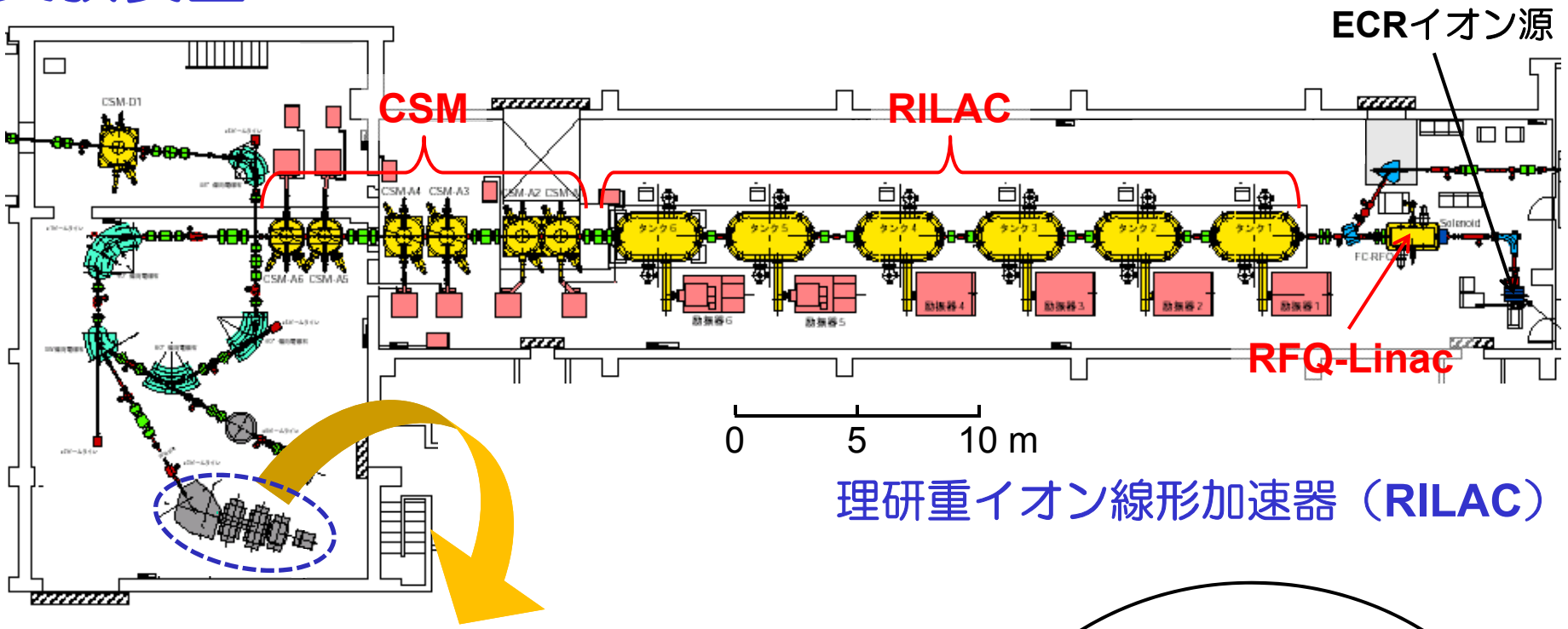
理研RIビームファクトリー

気体充填型反跳核分離装置
GAs filled Recoil Ion Separator (GARIS)

重イオンリニアック
RIKEN Linear ACcelerator
(RILAC)

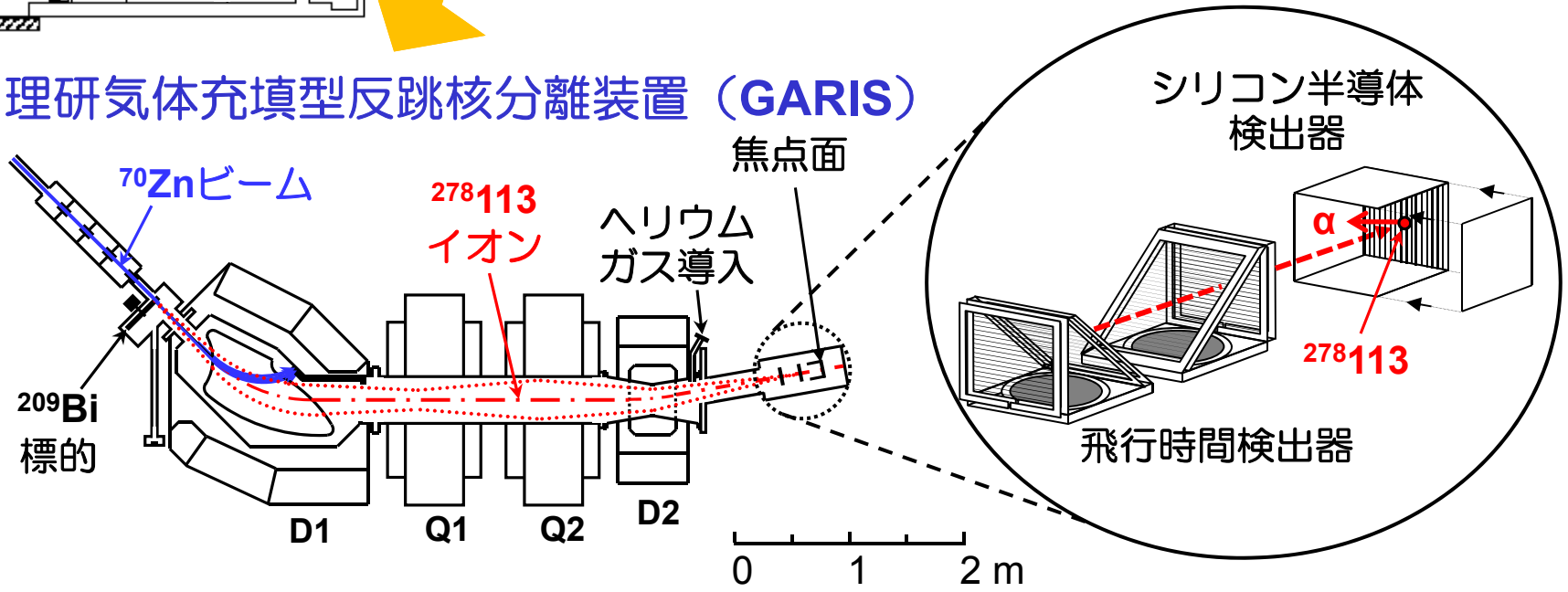


実験装置

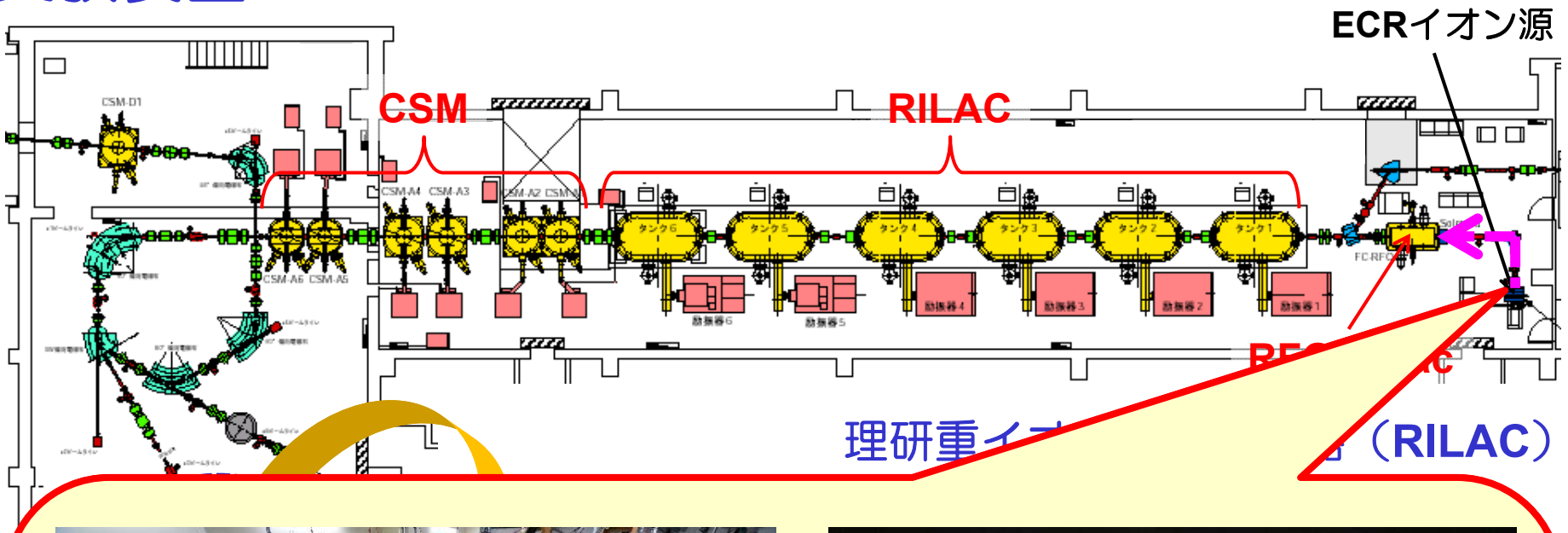


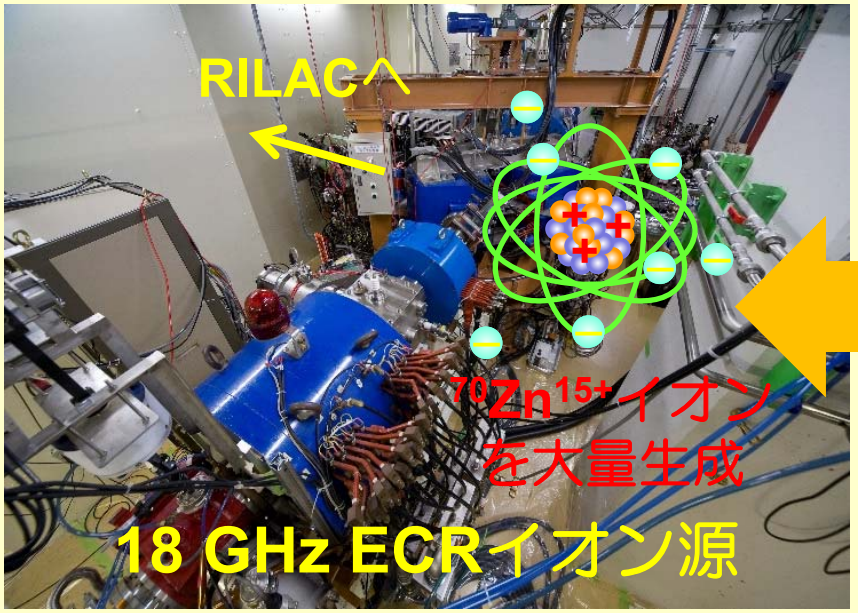
理研重イオン線形加速器（RILAC）

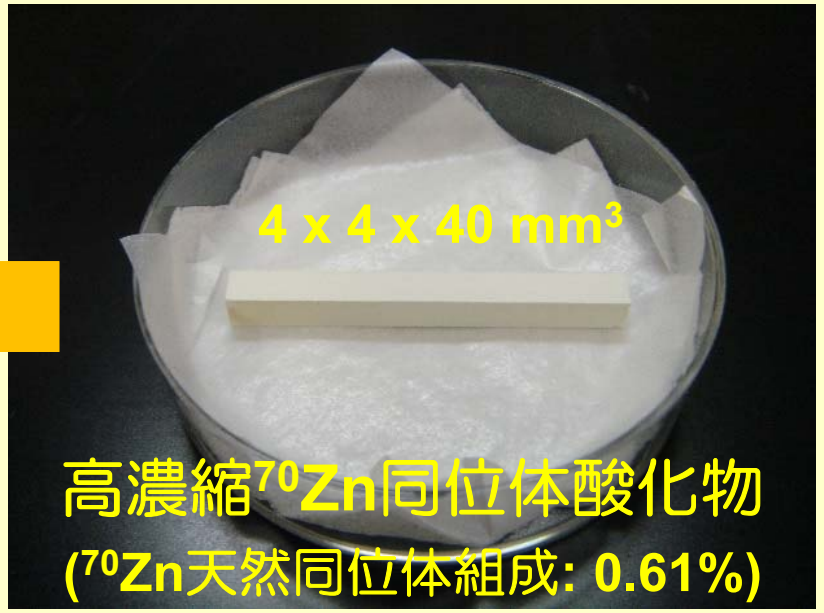
理研気体充填型反跳核分離装置（GARIS）



実験装置

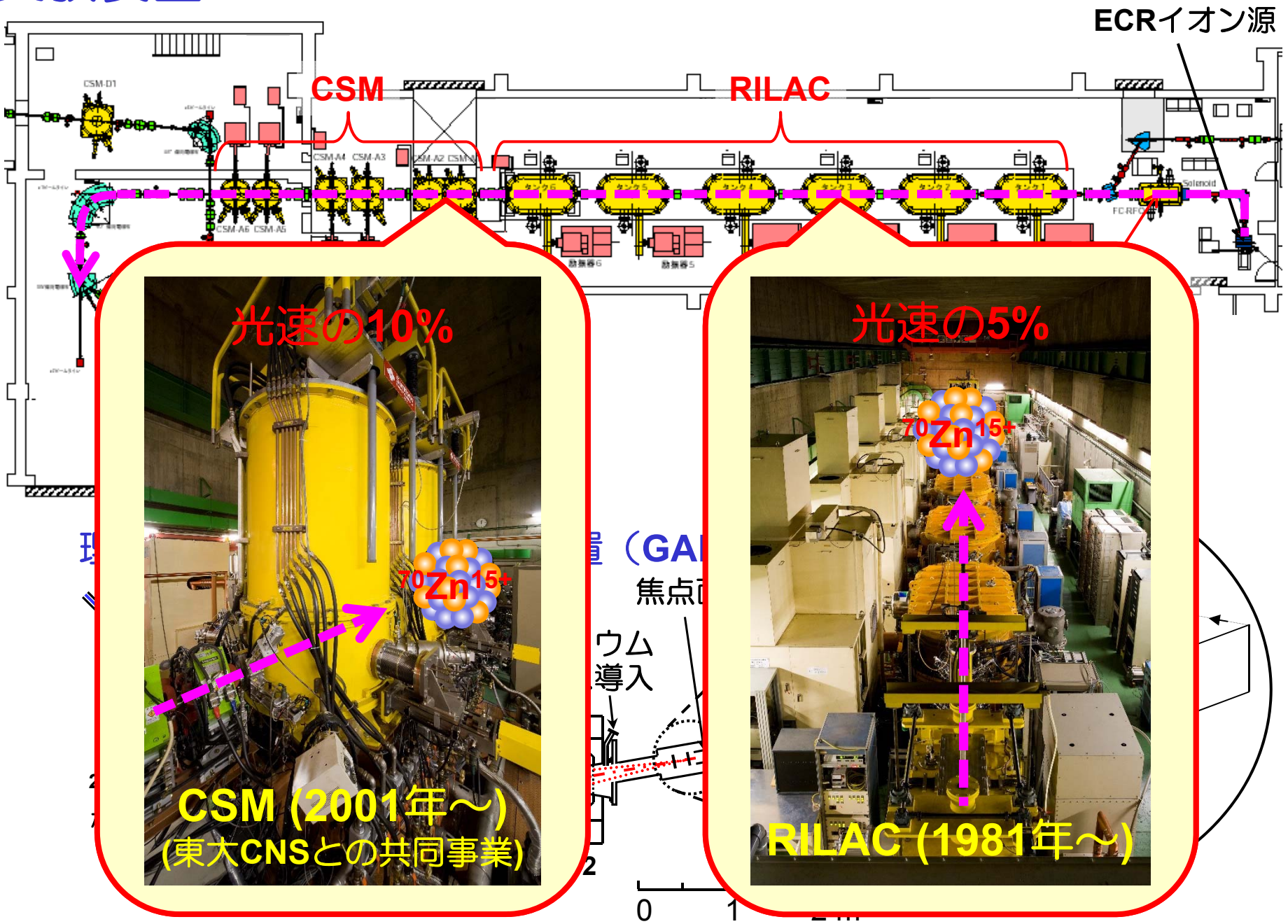

ECRイオン源
CSM
RILAC
理研重イオン線形加速器（RILAC）


RILACへ
$^{70}Zn^{15+}$イオン
を大量生成
18 GHz ECRイオン源

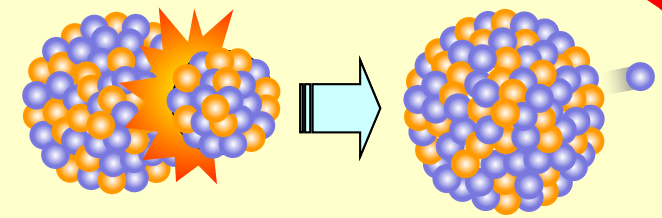

4 x 4 x 40 mm^3
高濃縮^{70}Zn同位体酸化物
(^{70}Zn天然同位体組成: 0.61%)

0 1 2 m

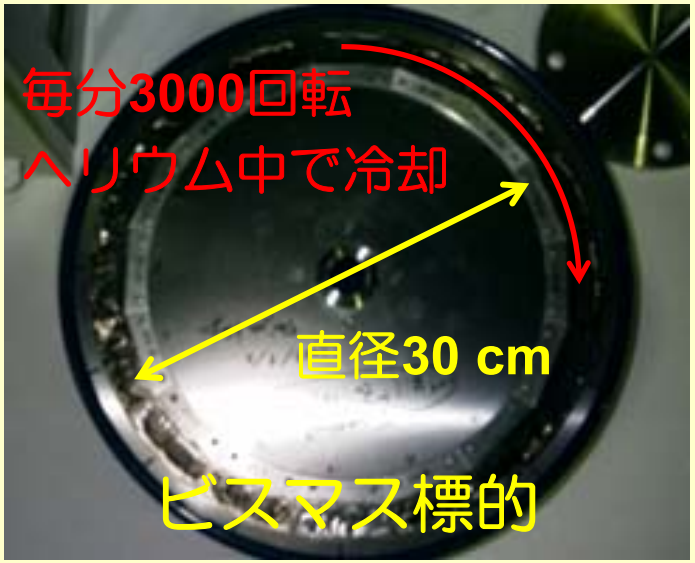
実験装置

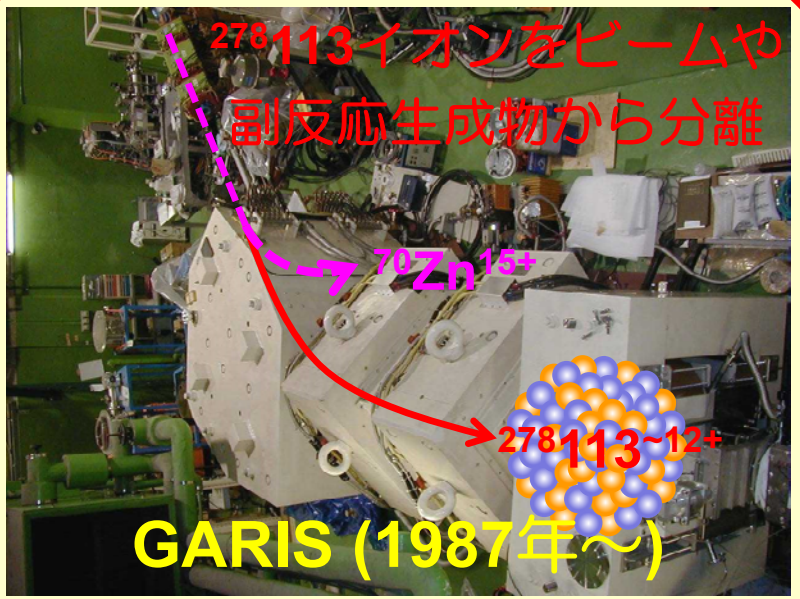

ECRイオン源
CSM
RILAC
光速の10%
$^{70}Zn^{15+}$
CSM (2001年～)
(東大CNSとの共同事業)
光速の5%
$^{70}Zn^{15+}$
RILAC (1981年～)

実験

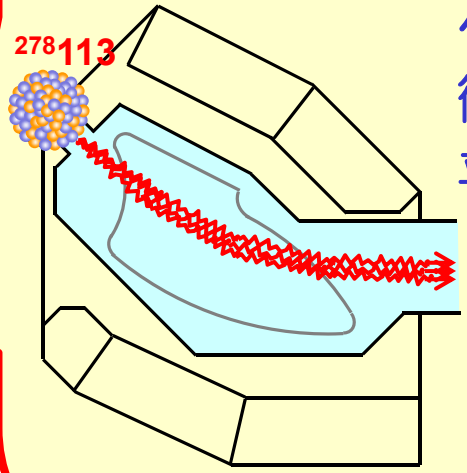


$^{209}Bi + {}^{70}Zn \rightarrow {}^{278}113 + n$





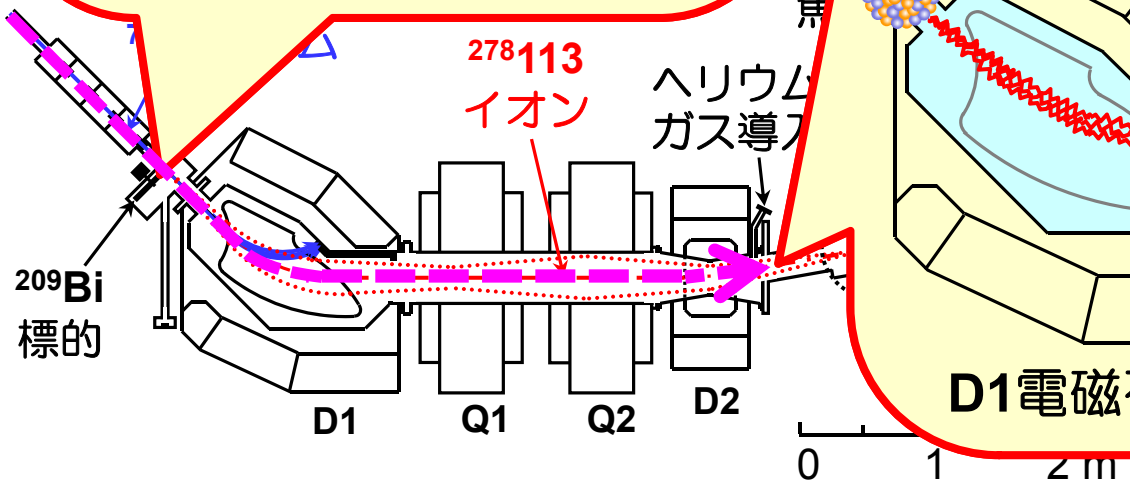
ヘリウム中



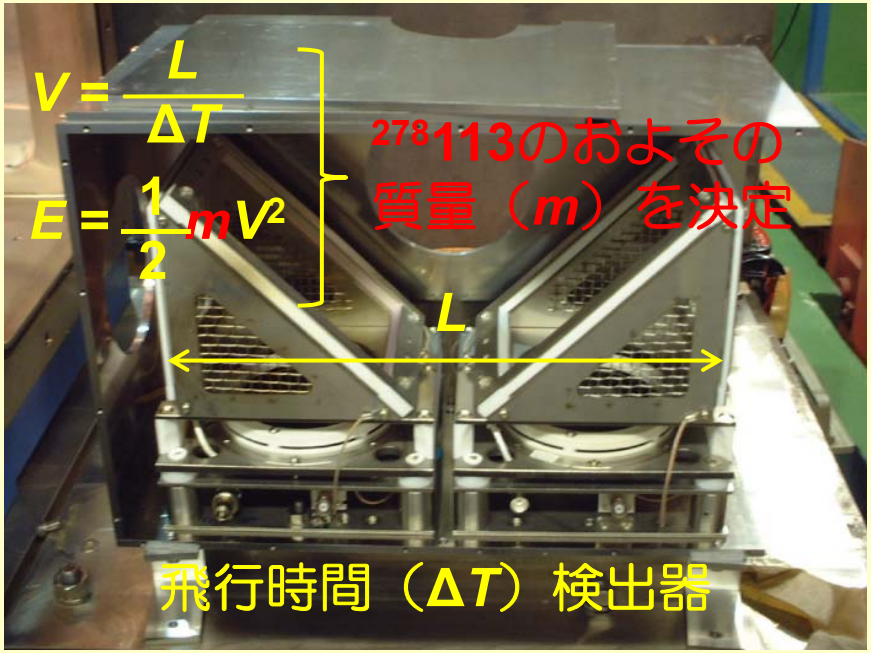
$^{278}113$イオンは,
ヘリウム原子と
衝突を繰り返し
平衡電荷$\bar{q}$をもつ.

$\bar{q}$

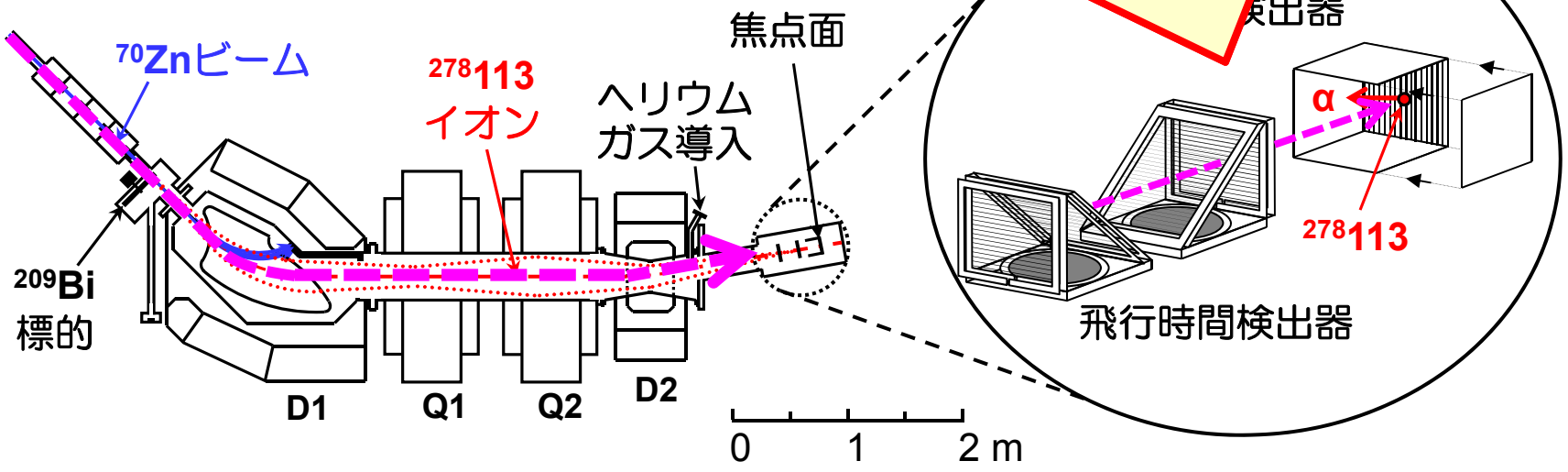
輸送効率が高い.
約80%！



D1電磁石



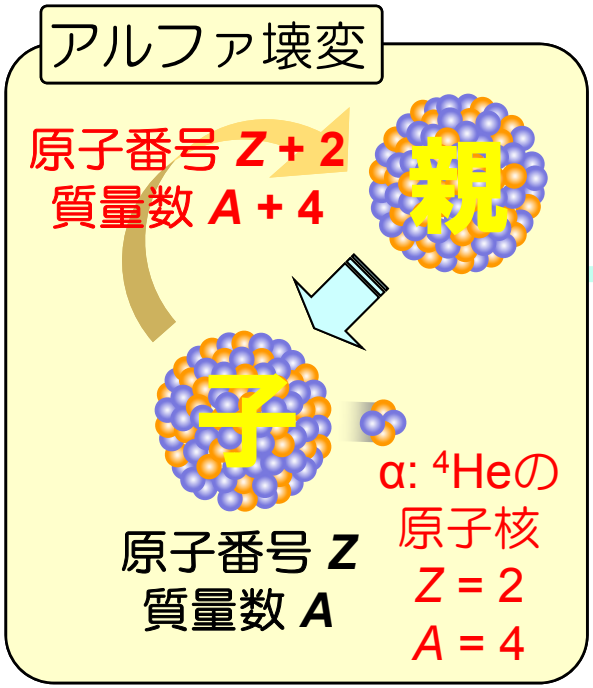
理研気体充填型反跳分離装置（GARIS）

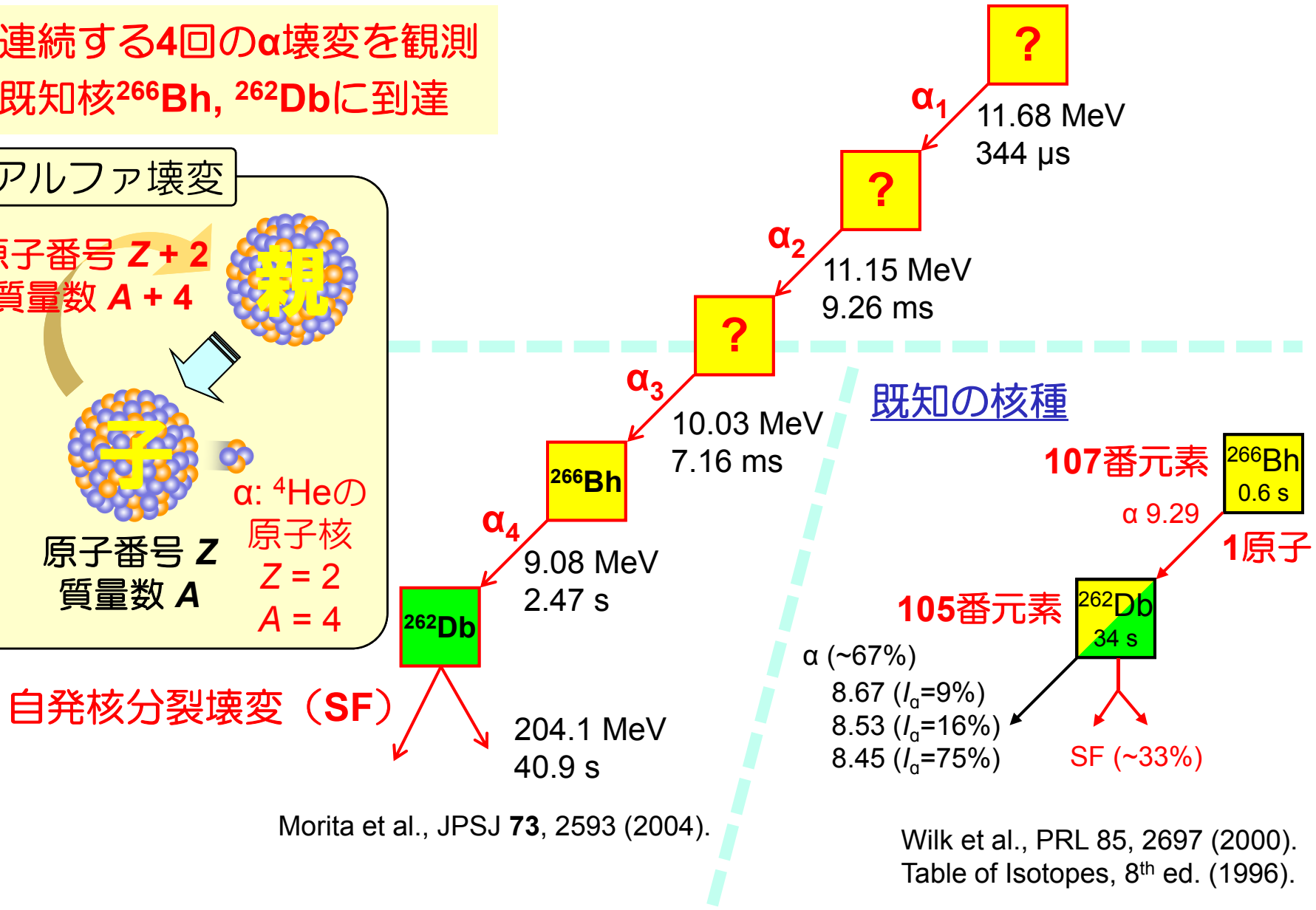


113番元素の初観測

2004年7月23日

- 連続する4回のα壊変を観測
- 既知核^{266}Bh, ^{262}Dbに到達





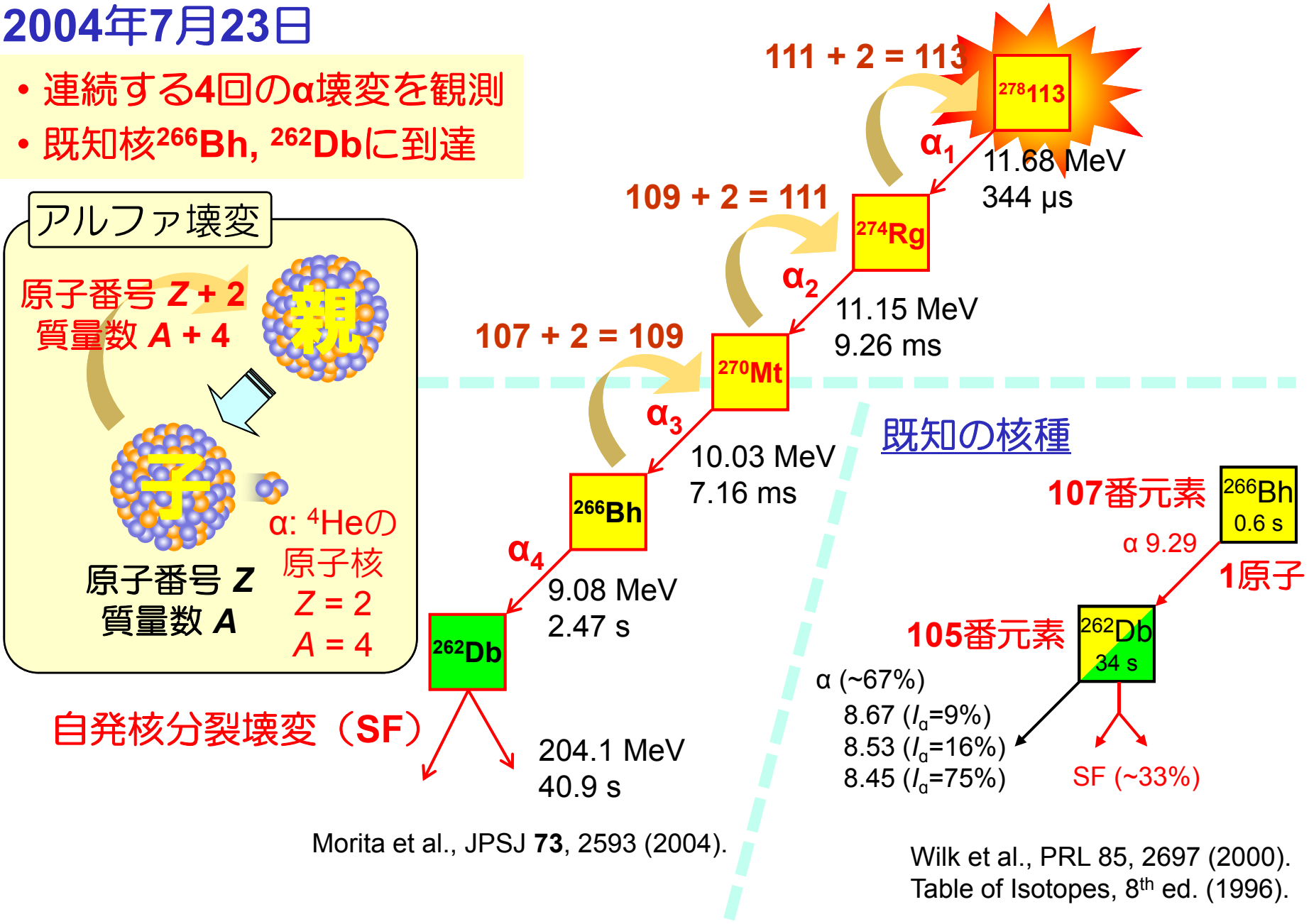
Morita et al., JPSJ **73**, 2593 (2004).

Wilk et al., PRL 85, 2697 (2000).
Table of Isotopes, 8th ed. (1996).

113番元素の初観測

2004年7月23日

- 連続する4回のα壊変を観測
- 既知核^{266}Bh, ^{262}Dbに到達



Morita et al., JPSJ **73**, 2593 (2004).

Wilk et al., PRL 85, 2697 (2000).
Table of Isotopes, 8th ed. (1996).

113番元素発見の論文

日本物理学会の雑誌

Journal of the Physical Society of Japanで発表

Journal of the Physical Society of Japan
Vol. 73, No. 10, October, 2004, pp. 2593–2596
©2004 The Physical Society of Japan

LETTERS

Experiment on the Synthesis of Element 113 in the Reaction ^{209}Bi(^{70}Zn,n)^{278}113

Kosuke MORITA[1*], Kouji MORIMOTO[1], Daiya KAJI[1], Takahiro AKIYAMA[1,2], Sin-ichi GOTO[3], Hiromitsu HABA[1], Eiji IDEGUCHI[4], Rituparna KANUNGO[1], Kenji KATORI[1], Hiroyuki KOURA[5], Hisaaki KUDO[6], Tetsuya OHNISHI[1], Akira OZAWA[7], Toshimi SUDA[1], Keisuke SUEKI[7], HuShan XU[8], Takayuki YAMAGUCHI[2], Akira YONEDA[1], Atsushi YOSHIDA[1] and YuLiang ZHAO[9]

[1]*RIKEN (The Institute of Physical and Chemical Research), Wako, Saitama 351-0198*
[2]*Department of Physics, Saitama University, Sakura-ku, Saitama 338-8570*
[3]*Center for Instrumental Analysis, Niigata University, Ikarashi, Niigata 950-2181*
[4]*Center for Nuclear Study, University of Tokyo Wako Branch, Wako, Saitama 351-0198*
[5]*Advanced Science Research Center, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai, Ibaraki 319-1195*
[6]*Department of Chemistry, Niigata University, Ikarashi, Niigata 950-2181*
[7]*University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305-8571*
[8]*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China*
[9]*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China*

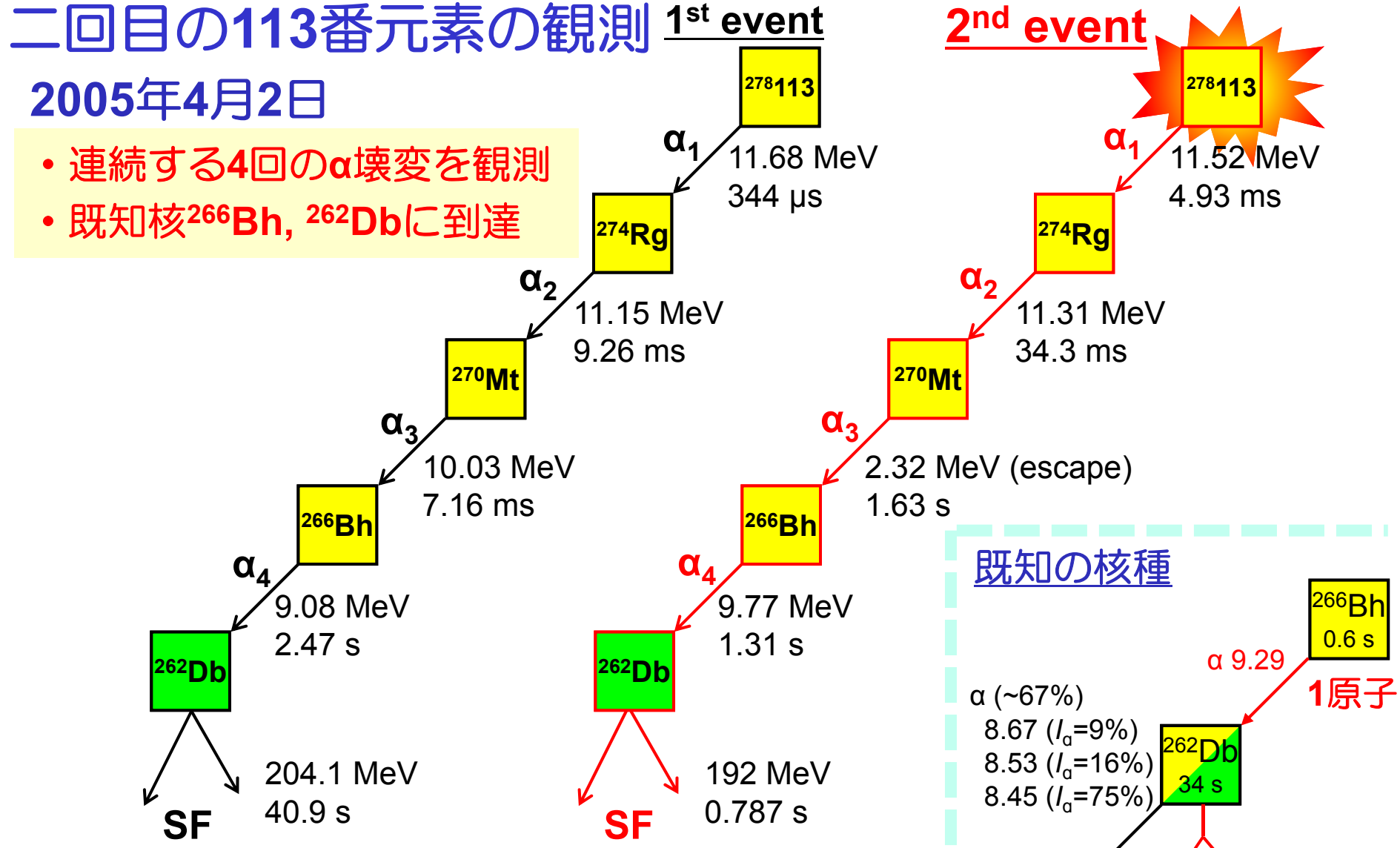
(Received July 30, 2004) **2004年7月30日 論文投稿**

The convincing candidate event of the isotope of the 113th element, ^{278}113, and its daughter nuclei, ^{274}111 and ^{270}Mt, were observed, for the first time, in the ^{209}Bi + ^{70}Zn reaction at a beam energy of 349.0 MeV with a total dose of 1.7×10^{19}. Alpha decay energies and decay times of the candidates, ^{278}113, ^{274}111, and ^{270}Mt, were (11.68 ± 0.04 MeV, 0.344 ms), (11.15 ± 0.07 MeV, 9.26 ms), and (10.03 ± 0.07 MeV, 7.16 ms), respectively. The production cross section of the isotope was deduced to be 55^{+150}_{-45} fb (10^{-39} cm^2).

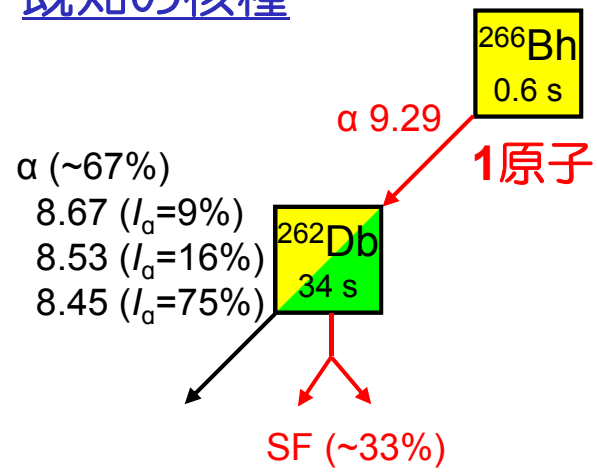
二回目の113番元素の観測

2005年4月2日

- 連続する4回のα壊変を観測
- 既知核^{266}Bh, ^{262}Dbに到達



Morita et al., JPSJ **73**, 2593 (2004). Morita et al., JPSJ **76**, 045001 (2007).



Wilk et al., PRL 85, 2697 (2000).
Table of Isotopes, 8th ed. (1996).

2006年，113番元素の発見をIUPACとIUPAPの合同調査委員会（JWP）に主張

113番以降の新元素発見に関わる調査報告書

国際純正・応用化学連合（IUPAC）機関誌 Pure and Applied Chemistry

Pure Appl. Chem., Vol. 83, No. 7, pp. 1485–1498, 2011.
doi:10.1351/PAC-REP-10-05-01
© 2011 IUPAC, Publication date (Web): 1 June 2011 **2011年6月1日**

Discovery of the elements with atomic numbers greater than or equal to 113 (IUPAC Technical Report)*

Robert C. Barber[1], Paul J. Karol[2,‡,§], Hiromichi Nakahara[3], Emanuele Vardaci[4], and Erich W. Vogt[5]

[1]Department of Physics and Astronomy, University of Manitoba, Manitoba, R3T 2N2, Canada; [2]Department of Chemistry, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA 15213, USA; [3]Chemistry Department, Tokyo Metropolitan University, Tokyo 192-03, Japan; [4]University of Naples "Federico II" and Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Napoli, Italy; [5]TRIUMF, Vancouver, BC, V6T 1W5, Canada

Abstract: The IUPAC/IUPAP Joint Working Party (JWP) on the priority of claims to the discovery of new elements 113–116 and 118 has reviewed the relevant literature pertaining to several claims. In accordance with the criteria for the discovery of elements previously established by the 1992 IUPAC/IUPAP Transfermium Working Group (TWG), and reinforced in subsequent IUPAC/IUPAP JWP discussions, it was determined that the Dubna-Livermore collaborations share in the fulfillment of those criteria both for elements $Z = 114$ and 116. A synopsis of experiments and related efforts is presented.

Keywords: atomic number 114; atomic number 116; discovery; new elements; IUPAC Inorganic Chemistry Division; IUPAP; periodic table; trans-copernicium; transfermium.

Z = 113

113; *01 The collaboration of Oganessian et al. [8,9]*

In 2004, this collaboration studied the hot fusion reaction of ^{48}Ca with ^{243}Am and reported one four-member α-decay chain commencing at ^{287}115, passing through ^{283}113 and then ^{279}Rg and ^{275}Mt leading to ^{271}Bh whose α-decay was inferred to lead to ^{267}Db which decayed by spontaneous fission (with a 100 min lifetime). At a different bombardment energy, three chains beginning with ^{288}115, continuing sequentially to ^{284}113, ^{280}Rg, ^{276}Mt, ^{272}Bh, and terminating with spontaneous fission of ^{268}Db with mean lifetime of 23 h were observed with good internal agreement. None of the nuclides had been previously characterized.

113; *02 The collaboration of Morita et al. [10,11]*

Production of two chains of α-emitting nuclides was reported by Morita et al. from the cold fusion reaction of a bismuth target with a ^{70}Zn beam at the RIKEN heavy-ion facility in Japan, the first in 2004 [10] and the second in 2007 [11]. The former study reports the α-chain commencing with ^{278}113 pro-

森田グループの発見は，とても有望であるが，観測事象数が少なく，既知核への確固たる連結はなく，観測された**2**事象に不一致があり，発見の基準を満たしていない．

of 9.29 MeV, within the uncertainties of the RIKEN results, with a lifetime of 1–10 s. It was followed by a 28 s α-decay, not by spontaneous fission. The latter observation is in contrast to the RIKEN result.

JWP ASSESSMENT: The work of the collaboration of Morita et al. is very promising but has not met the criteria for discovery owing to the paucity of events, the absence of firm connection(s) to known nuclides, and the inconsistencies noted above.

113; *03 The collaboration of Oganessian et al. [13]*

In 2007, this collaboration investigated the hot fusion of ^{48}Ca with ^{237}Np and reported two four-member α-decay chains commencing at ^{282}113, passing through ^{278}Rg, ^{274}Mt, and ^{270}Bh, and leading, in just one chain, to ^{266}Db decay by spontaneous fission with a 32 min lifetime. The first two events in each chain showed excellent mutual agreement for both decay energies and lifetimes. The third member gave lifetimes of 470 and 810 ms. None of the nuclides had been previously characterized.

JWP ASSESSMENT: The collaborations of Oganessian et al. at Dubna were essentially contemporaneous with those of Morita et al. at RIKEN. The results are encouraging but do not meet the criteria for discovery because of the paucity of events, the lack of connections to known nuclides, and the absence of cross-bombardments.

オガネシアン グループの発見

$^{243}Am(^{48}Ca,3;4n)^{288,287}115 \xrightarrow{\alpha} {}^{284,283}113$ (1,3原子)

新元素発見の基準を満たしていない.

113; *02 The collaboration of Morita et al. [10,11]*

Production of two chains of α-emitting nuclides was reported by Morita et al. from the cold fusion reaction of a bismuth target with a ^{70}Zn beam at the RIKEN heavy-ion facility in Japan, the first in 2004 [10] and the second in 2007 [11]. The former study reports the α-chain commencing with ^{278}113 pro-

森田グループの発見は，とても有望であるが，観測事象数が少なく，既知核への確固たる連結はなく，観測された2事象に不一致があり，発見の基準を満たしていない.

of 9.29 MeV, within the uncertainties of the RIKEN results, with a lifetime of 1–10 s. It was followed by a 28 s α-decay, not by spontaneous fission. The latter observation is in contrast to the RIKEN result.

JWP ASSESSMENT: The work of the collaboration of Morita et al. is very promising but has not met the criteria for discovery owing to the paucity of events, the absence of firm connection(s) to known nuclides, and the inconsistencies noted above.

113; *03 The collaboration of Oganessian et al. [13]*

In 2007, this collaboration investigated the hot fusion of ^{48}Ca with ^{237}Np and reported two four-mem- and leading, in t two events in The third mem- terized. ntially contem- meet the crite- nclides, and the absence of cross-bombardments.

オガネシアン グループの発見

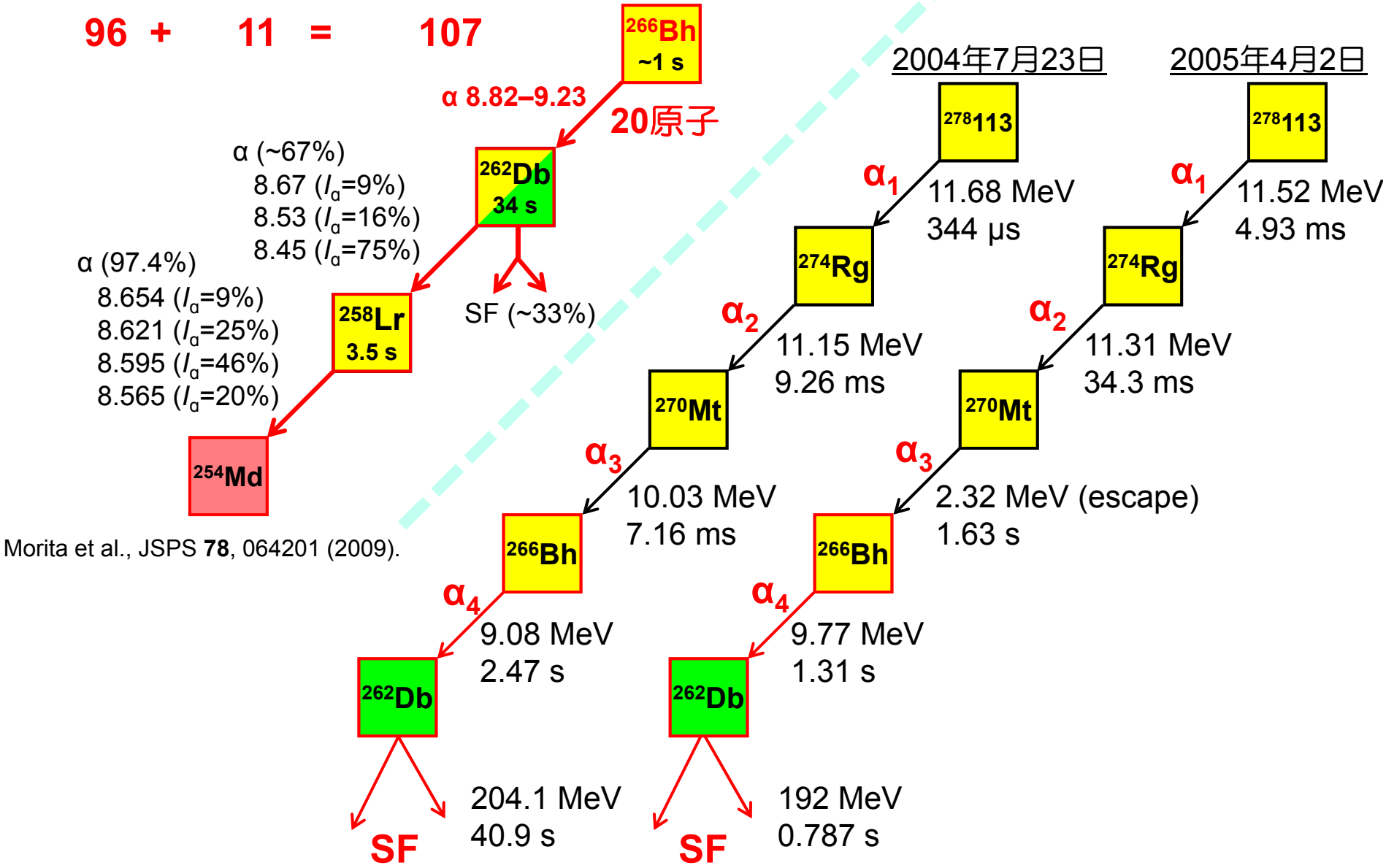
$^{237}Np(^{48}Ca,3n)^{282}113$ (2原子)

新元素発見の基準を満たしていない.

113番元素の曾孫，^{266}Bhの直接合成

^{248}Cm + ^{23}Na → ^{266}Bh + 5*n*

96 + 11 = 107



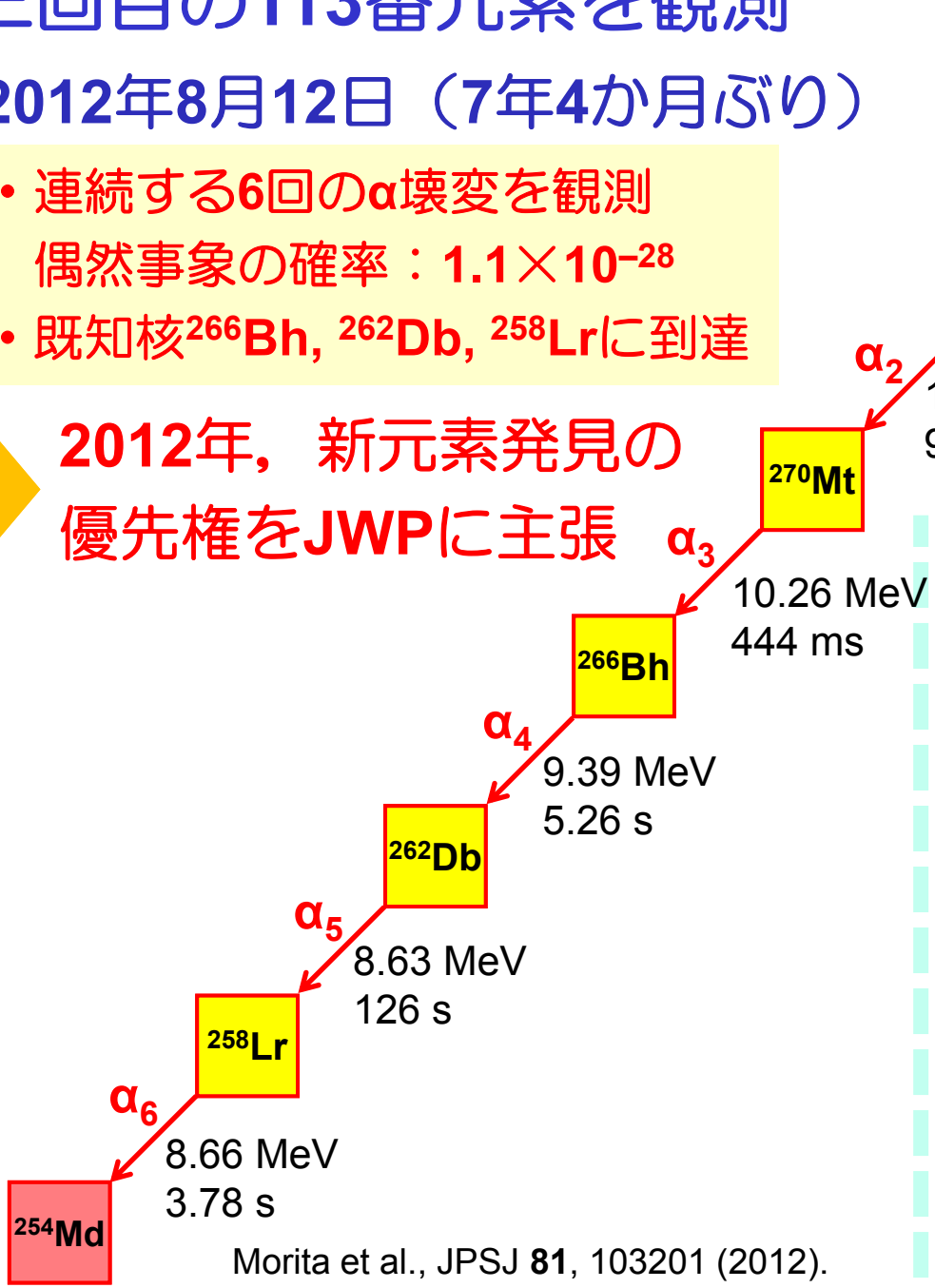
Morita et al., JSPS **78**, 064201 (2009).

三回目の113番元素を観測

2012年8月12日（7年4か月ぶり）

- 連続する6回のα壊変を観測
  偶然事象の確率：1.1×10^{-28}
- 既知核^{266}Bh, ^{262}Db, ^{258}Lrに到達

2012年，新元素発見の優先権をJWPに主張



Morita et al., JPSJ **81**, 103201 (2012).

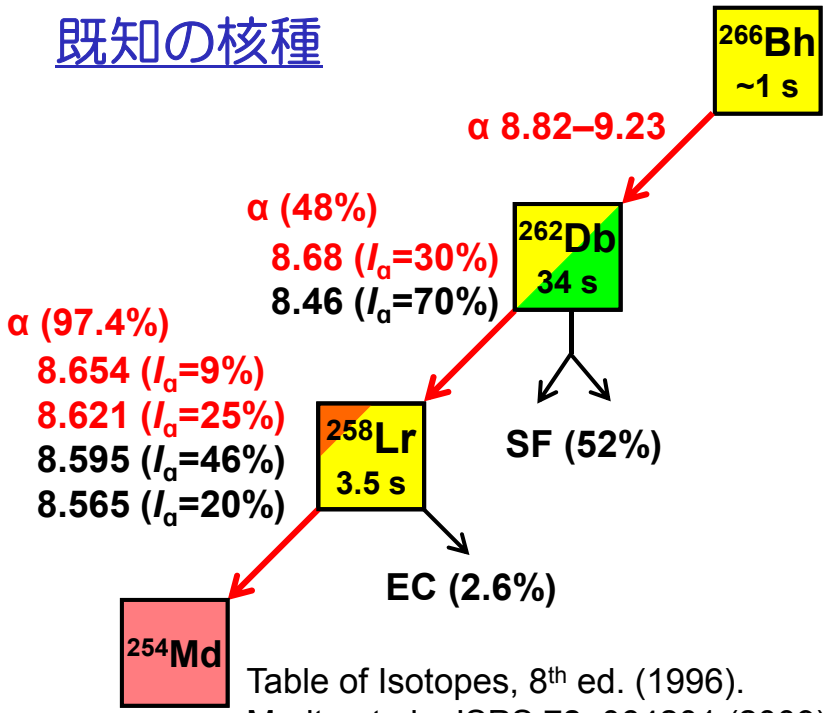


Table of Isotopes, 8th ed. (1996).
Morita et al., JSPS **78**, 064201 (2009).
Haba et al., PRC **89**, 024618 (2014).

露米共同研究チームによる113, 115, 117, 118番元素の合成

113, 115, 117, 118番元素の優先権を主張

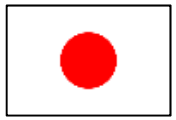
118番元素: ^{249}Cf + ^{48}Ca (2006–2012, 4原子)

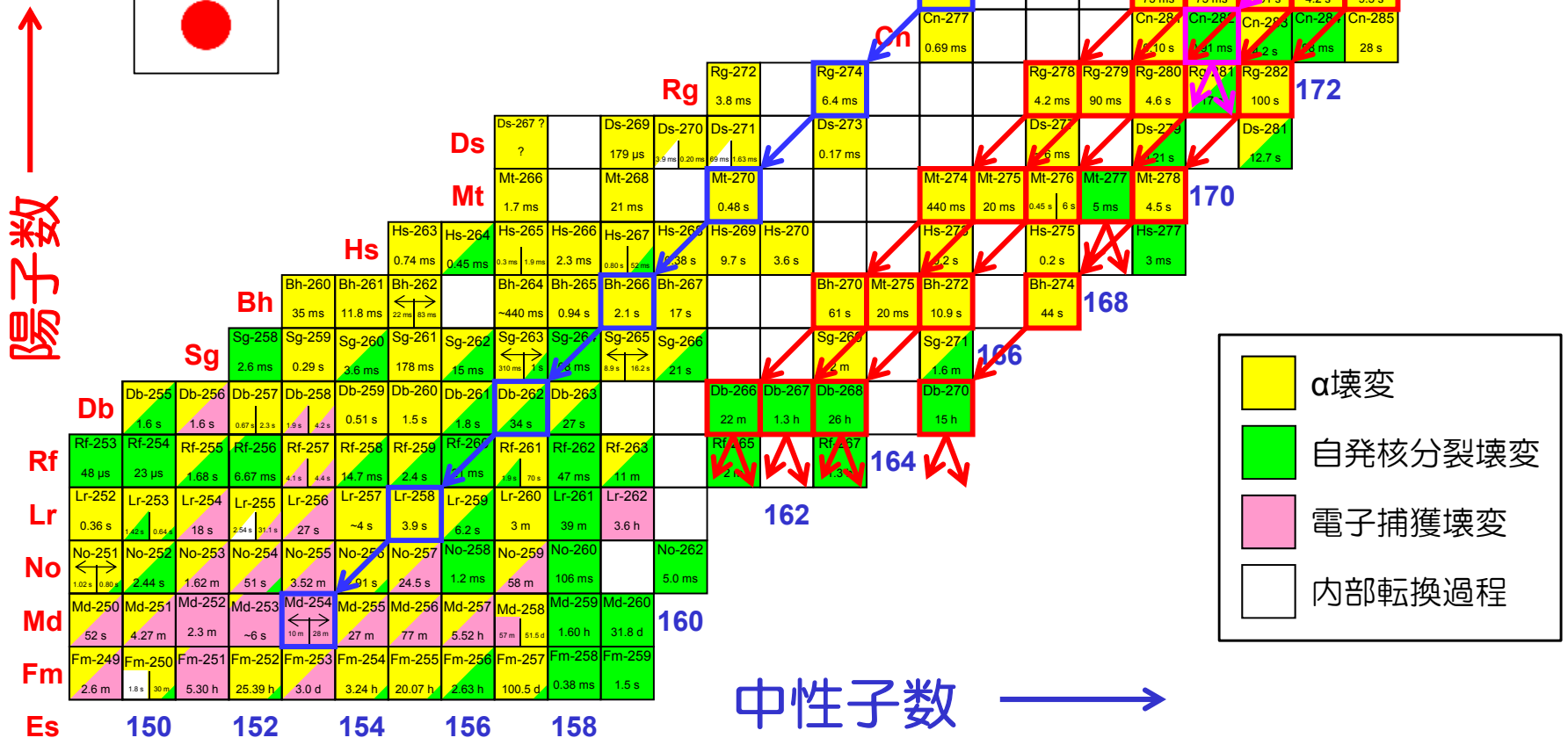
117番元素: ^{249}Bk + ^{48}Ca (2010–2013, 10/3原子)

115番元素: ^{243}Am + ^{48}Ca (2004–2012, **2/31/4**原子)

113番元素: ^{237}Np + ^{48}Ca (2007, 2原子)

RIKEN: ^{209}Bi + ^{70}Zn (2004–2012, **3**原子)





113, 115, 117番元素発見に関わるJWPの調査報告書

DE GRUYTER

Pure Appl. Chem. 2016; 88(1-2): 139–153

IUPAC Technical Report

Paul J. Karol[a,*], Robert C. Barber, Bradley M. Sherrill, Emanuele Vardaci and Toshimitsu Yamazaki

Discovery of the elements with atomic numbers $Z = 113$, 115 and 117 (IUPAC Technical Report)

DOI 10.1515/pac-2015-0502

Received December 14, 2015; accepted December 22, 2015

2015年12月22日 論文受理

Abstract: The fourth IUPAC/IUPAP Joint Working Party (JWP) on the priority of claims to the discovery of new elements 113, 115, 117 and 118 has reviewed the relevant literature pertaining to several claims. In accordance with the Criteria for the discovery of elements previously established by the 1991 IUPAC/IUPAP Transfermium Working Group (TWG), and reinforced in subsequent IUPAC/IUPAP JWP discussions, it was determined that the RIKEN collaboration has fulfilled those Criteria for element $Z = 113$. The Dubna–Livermore–Oak Ridge collaborations claims for 115 and 117 are also in compliance. The discussion of element $Z = 118$ will appear in

理研の共同研究チームが，113番元素発見の必要条件を満たす．

http://www.iupac.org/

Login Contact Forum

About Projects Publications Conferences

International Union of Pure and Applied Chemistry

Highlights

- The IUPAC Network
- Periodic Table of the Elements
- Color Books

2015年大晦日

2015年12月30日 報道発表

< ICSU publications on climate change

30 Dec 2015 23:50 Age: 2 days
Category: Press Releases

Discovery and Assignment of Elements with Atomic Numbers 113, 115, 117 and 118

IUPAC announces the verification of the discoveries of four new chemical elements: The 7th period of the periodic table of elements is complete.

The fourth IUPAC/IUPAP Joint Working Party (JWP) on the priority of claims to the discovery of new elements has reviewed the relevant literature for elements 113, 115, 117, and 118 and has determined that the claims for discovery of these elements have been fulfilled, in accordance with the criteria for the discovery of elements of the IUPAP/IUPAC Transfermium Working Group (TWG) 1991 discovery criteria. These elements complete the 7th row of the periodic table of the elements, and the discoverers from Japan, Russia and the USA will now be invited to suggest permanent names and symbols. The new elements and assigned priorities of discovery are as follows:

Element 113 (temporary working name and symbol: ununtrium, Uut)

The RIKEN collaboration team in Japan have fulfilled the criteria for element *Z*=113 and will be invited to propose a permanent name and symbol.

理研の共同研究チームが，113番元素発見の必要条件を満たし，元素名と元素記号を提案する.

1　14新版　2016年（平成28年）1月1日（金）

新元素 理研に命名権

「113番」アジアで初

理化学研究所は31日、森田浩介グループディレクター（58）らのチームが2004年に合成した新元素（原子番号113）について、国際学会で理研の発見と認められ、アジアで初めて命名権を獲得したと発表した。これにより、元素周期表に初めて日本人が名付け親の元素が掲載されることになる。森田さんは「元素名はこれから考える」と述べた。

（5面に関連記事）

原子番号92のウランより重い元素は全て人工的に合成され、118番まで発見の報告がある。113番については、理研と米露の共同チームがそれぞれ「発見した」と報告し、国際純正・応用化学連合と国際純粋・応用物理学連合の合同作業部会が審査していた。

両学会は「データの確実性が高い」ことを理由に、理研の発見を認定し、31日に森田さんに通知した。未確定だった115番と113番（陽子30個）を加速器で光速の10％まで加速し、重金属のビスマス原子核（同83個）に衝突させて核融合させる実験を繰り返し、04年9月に1個の113番元素ができたと報告。12年8月までに計3個の合成に成功した。

米露チームは04年2月、アメリシウム（同95個）にカルシウム（同20個）を衝突させて115番元素を作り、崩壊の過程で113番元素を確認したと発表していた。【斎藤広子、下桐実雅子】

元素周期表

元素は宇宙のあらゆる物質を構成する基本要素。原子番号は原子核内の陽子の数を表す。原子番号1の水素が最も軽く、92のウランまでは自然界に存在するそれより重い元素は人工的に作られる。原子番号によって元素の性質は周期的に変わり、似た性質の元素が縦や横の列に並ぶように配置したものが元素周期表。

MAINICHI

毎日新聞

1月1日（金）
2016年（平成28年）

発行所：東京都千代田区一ツ橋1-1-1
〒100-8051 電話（03）3212-0321
毎日新聞東京本社

THE YOMIURI SHIMBUN

讀賣新聞

2016年（平成28年）
1月1日 金曜日
元日

日本初 元素に命名権

113番 理研作製を認定

理化学研究所は31日、2004年から3回、合成に成功した原子番号113の元素㊟について、化学者の国際組織「国際純正・応用化学連合（IUPAC）」が正式に理研チームを発見者と認定、命名権が与えられたと発表した。〈関連記事2・39面〉

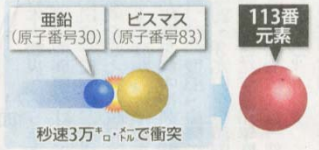
日本のチームが元素の発見者になるのは初めて。中学や高校の教科書などにも掲載されている元素の一覧「周期表」に、日本発の元素名とアルファベットの「元素記号」が載ることになる。

元素の種類は、原子の中心の原子核を構成する陽子の数で決まり、陽子数が原子番号となる。理研仁科加速器研究センター（埼玉県和光市）の森田浩介グループディレクター（九州大教授）（58）らのチームは04年7月、原子番号30の亜鉛を加速器で秒速3万キロ・メートルに加速、原子番号83のビスマスに衝突させて合成し、113番元素の作製に成功。05年と12年にも同じ方法で113番元素を合成した。

森田さんは記者会見で、113番元素の名称について「チームでこれから議論して考えたい」と述べた。今後、同連合の正式な文書が届き、その後6か月以内に名称と元素記号を提案することになっているという。

㊟元素 宇宙のあらゆる物質のもとになる成分で、原子の種類を示す。最も軽い原子番号1番の水素（H）から順にヘリウム（He）、リチウム（Li）と続く。92番のウラン（U）までは、一部の例外を除いて自然界に存在するが、93番以降は人工的に作られた。

理研チームが加速器で行った113番元素の作製実験



©朝日新聞社 2016年

46562号（日刊）

朝日新聞

2016年（平成28年）
1月1日
金曜日
元日

天気	6	9	12	15	18	21(時)		
水戸	☀	☀	☀	☀	☀	☀	0	10
宇都宮	☀	☀	☀	☀	☀	☀	10	−1
前橋	☀	☀	☀	☀	☀	☀	10	0
さいたま	☀	☀	☀	☀	☀	☀	10	1
千葉	☀	☀	☀	☀	☀	☀	10	1
東京	☀	☀	☀	☀	☀	☀	10	3
横浜	☀	☀	☀	☀	☀	☀	0	5
甲府	☀	☀	☀	☀	☀	☀	0	4
静岡	☀	☀	☀	☀	☀	☀	0	5

朝日新聞東京本社　本日の編集長＝佐古浩敏
〒104-8011東京都中央区築地5-3-2 電話03-3545-0131 www.asahi.com

新元素発見、日本初の認定　理研に命名権

理化学研究所は31日、グループディレクターで九州大教授の森田浩介氏のチームが人工合成した新元素が、国際純正・応用化学連合（IUPAC）に原子番号113番の元素として認定され、命名権を与えられたと発表した。半年程度かけて新元素の名前と元素記号を決める。日本の研究チームが発見した元素が、周期表に載るのは初めて。アジアでも初。別の方法で合成したと発表した米ロのチームと命名権を争っていた。

原子番号113番

▼38面＝「周期表の座席」獲得

森田グループによる新元素命名会議

「ニホニウム」を提案することに決定

IUPACによる新元素名の公表と5か月間の一般審査

INTERNATIONAL UNION OF
PURE AND APPLIED CHEMISTRY

Advancing Chemistry Worldwide

President
Prof. Natalia P. Tarasova (Russia)

Vice President
Prof. Qi-Feng Zhou (China)

Secretary General
Prof. Richard Hartshorn (New Zealand)

Past President
Dr. Mark C. Cesa (USA)

Treasurer
Mr. Colin J. Humphris (UK)

Executive Director
Dr. Lynn M. Soby (USA)

For Release 8 June 2016 **2016年6月8日 発表**

IUPAC is naming the four new elements nihonium, moscovium, tennessine, and oganesson

Following earlier reports that the claims for discovery of these elements have been fulfilled [1, 2], the discoverers have been invited to propose names and the following are now disclosed for public review:

- Nihonium and symbol Nh, for the element 113,
- Moscovium and symbol Mc, for the element 115,
- Tennessine and symbol Ts, for the element 117, and
- Oganesson and symbol Og, for the element 118.

一般審査へ（11/8終了）

The IUPAC Inorganic Chemistry Division has reviewed and considered these proposals and recommends these for acceptance. A five-month public review is now set, expiring 8 November 2016, prior to the formal approval by the IUPAC Council.

http://www.iupac.org/

113, 115, 117, 118番元素名が正式決定

INTERNATIONAL UNION OF
PURE AND APPLIED CHEMISTRY

Advancing Chemistry Worldwide

President Prof. Natalia P. Tarasova (Russia)	*Vice President* Prof. Qi-Feng Zhou (China)	*Secretary General* Prof. Richard Hartshorn (New Zealand)
Past President Dr. Mark C. Cesa (USA)	*Treasurer* Mr. Colin J. Humphris (UK)	*Executive Director* Dr. Lynn M. Soby (USA)

For Immediate Release 30 November 2016 **2016年11月30日**

IUPAC Announces the Names of the Elements 113, 115, 117, and 118

Elements 113, 115, 117, and 118 are now formally named nihonium (Nh), moscovium (Mc), tennessine (Ts), and oganesson (Og)

Research Triangle Park, NC (USA): On 28 November 2016, the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) approved the names and symbols for four elements: nihonium (Nh), moscovium (Mc), tennessine (Ts), and oganesson (Og), respectively for element 113, 115, 117, and 118.

原子番号	元素名		元素記号
	英語	日本語	
113	**nihonium**	**ニホニウム**	**Nh**
115	**moscovium**	**モスコビウム**	**Mc**
117	**tennessine**	**テネシン**	**Ts**
118	**oganesson**	**オガネソン**	**Og**

進化する元素周期表（2016年11月30日）

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

原子番号
元素記号

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

元素周期表（1～172番元素）

周期＼族	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	1 H																	2 He	1s
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	2s2p
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	3s3p
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	4s3d4p
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	5s4d5p
6	55 Cs	56 Ba	57-71	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	6s5d6p
7	87 Fr	88 Ra	89-103	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og	7s6d7p
8	119	120	121-	156	157	158	159	160	161	162	163	164	139	140	169	170	171	172	8s7d8p
9	165	166											167	168					9s9p

6	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	4f
7	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	5f
8	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	6f

8	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	5g

Pyykkö, Phys. Chem. Chem. Phys. **13**, 161 (2011).

119番以降の新元素探索

ロシア ドブナ研究所

$^{244}Pu(^{58}Fe,xn)^{302-x}120$ (< 0.4 pb)

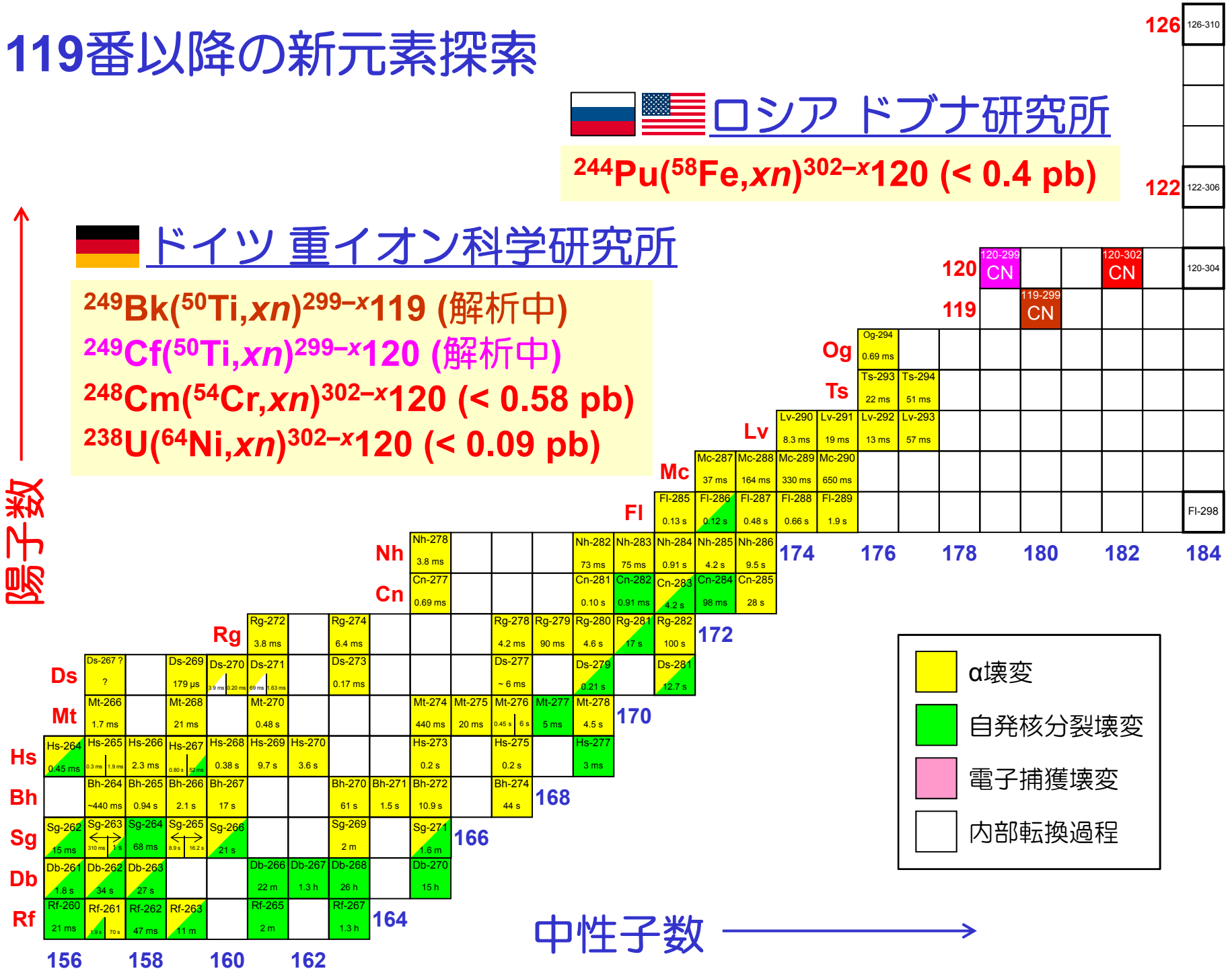
ドイツ 重イオン科学研究所

$^{249}Bk(^{50}Ti,xn)^{299-x}119$ (解析中)

$^{249}Cf(^{50}Ti,xn)^{299-x}120$ (解析中)

$^{248}Cm(^{54}Cr,xn)^{302-x}120$ (< 0.58 pb)

$^{238}U(^{64}Ni,xn)^{302-x}120$ (< 0.09 pb)

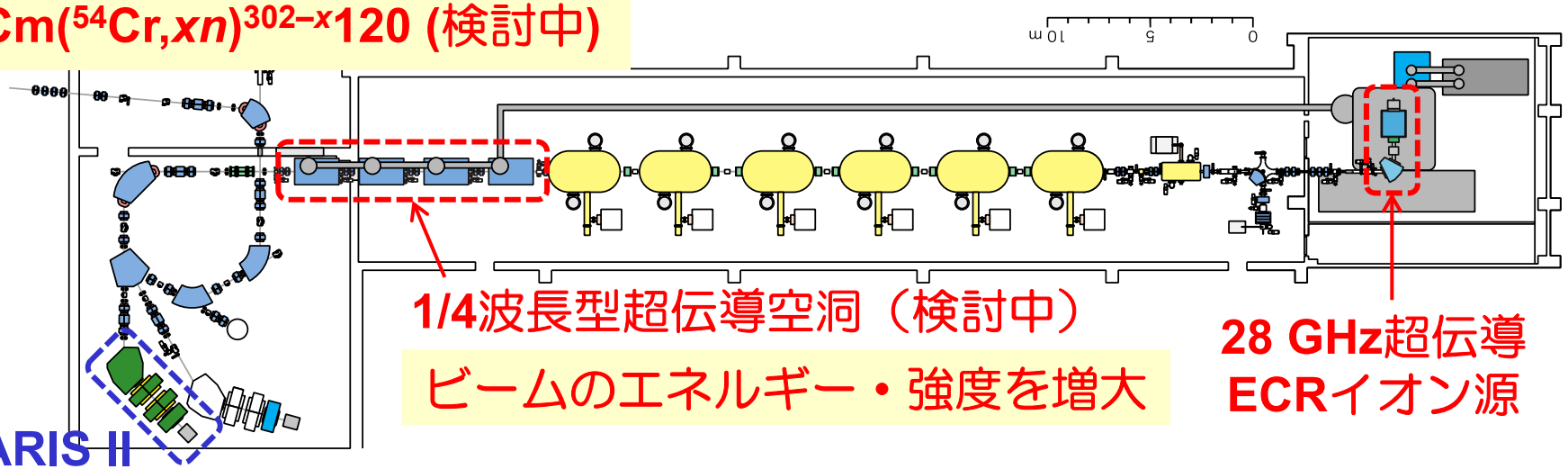


日本 理化学研究所

$^{248}Cm(^{51}V,xn)^{299-x}119$ (検討中)

$^{248}Cm(^{54}Cr,xn)^{302-x}120$ (検討中)

RILACのアップグレード（2017～）

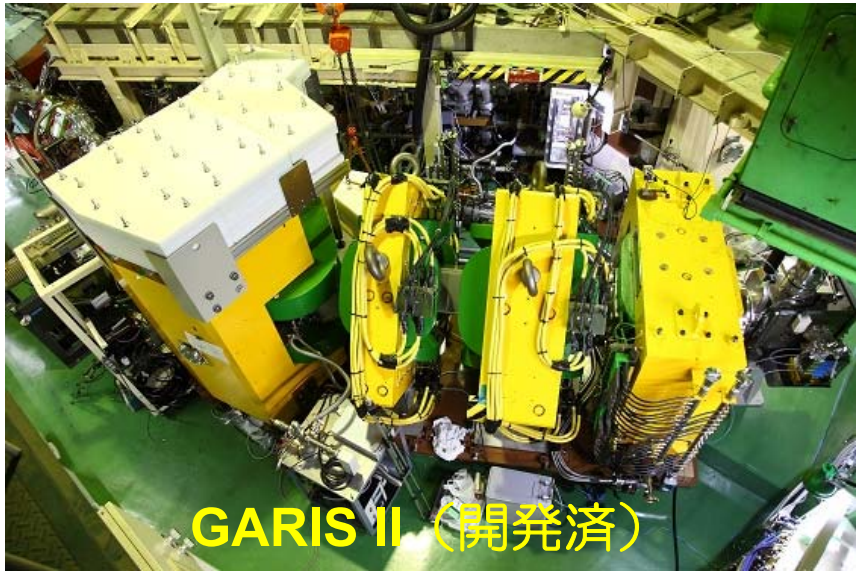


GARIS II

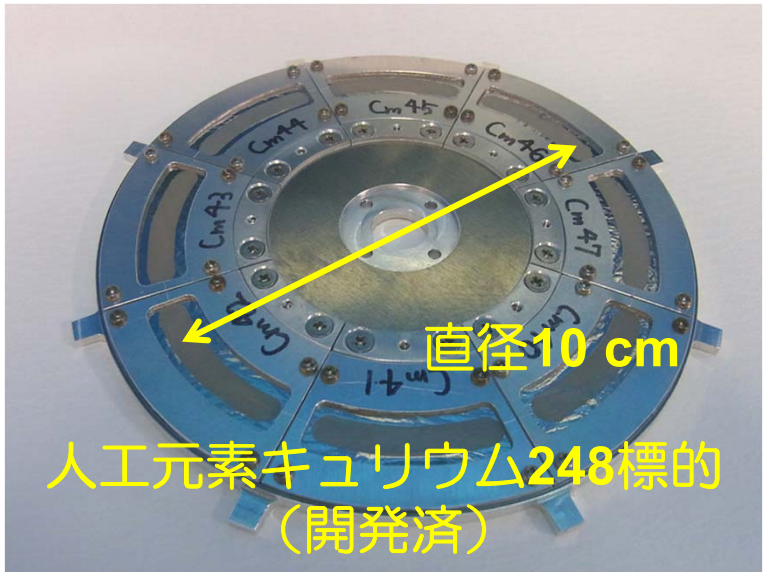
1/4波長型超伝導空洞（検討中）

ビームのエネルギー・強度を増大

28 GHz超伝導
ECRイオン源



超重元素の収集効率を増大



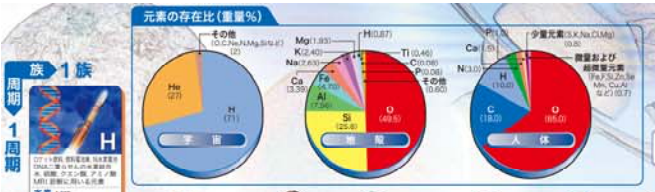
119, 120番元素の原料

4. おわりに

元素周期表

Periodic Table of the Elements

自然も暮らしもすべて元素記号で書かれている



メンデレーエフ (Dmitrij Ivanovich Mendeleev, 1834～1907)
1869年、ロシアのペテルスブルグ大学の化学者メンデレーエフは、当時知られていた63種類の元素を (1) 原子量の順に並べ (2) 酸素や塩素と結合してできる物質の組成（たとえば、ナトリウムはNaCl中で、マグネシウムはMgCl$_2$をつくる）などの性質が周期的に変化する法則「周期律」を見いだし、性質が似た元素が同じ列にくるように配列した周期表をつくった。その表のなかには空欄があり、当時知られていなかった元素の性質を予言した。初めはメンデレーエフの周期表は注目されなかったが、1875年にガリウムが、1886年にゲルマニウムが発見され、それらの性質が彼の予言のとおりであったため、世界的に信頼された。
現在では周期表は、すべての人が用いる化学や物理学の基本となっている。

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

周期 1周期 2周期 3周期 4周期 5周期 6周期 7周期

ランタノイド系
57 ～ 71

アクチノイド系
89 ～ 103

一家に1枚周期表

梶田 隆章 (かじた たかあき)
2015年ノーベル物理学賞受賞
ニュートリノが質量をもつことをつきとめニュートリノ振動の発見

湯川秀樹 (ゆかわ ひでき)
(1949年ノーベル物理学賞受賞)
未知の素粒子、中間子の存在を予言

江崎玲於奈 (えさき れおな)
(1973年 ノーベル物理学賞受賞)
半導体エサキ・ダイオードを発明

利根川進 (とねがわ すすむ)
(1987年ノーベル生理学医学賞受賞)
免疫グロブリンの構造を解明

野依良治 (のより りょうじ)
(2001年ノーベル化学賞受賞)
不斉合成のための触媒分子を開発

田中耕一 (たなか こういち)
(2002年ノーベル化学賞受賞)
生体高分子の構造解析手法を開発

小林 誠 (こばやし まこと)
(2008年ノーベル物理学賞受賞)
CP対称性の破れの起源の提唱

下村 脩 (しもむら おさむ)
(2008年ノーベル化学賞受賞)
クラゲから緑色蛍光タンパク質を発見

鈴木 章 (すずき あきら)
(2010年ノーベル化学賞受賞)
パラジウム触媒によるクロスカップリング

赤崎 勇 (あかさき いさむ)
(2014年ノーベル物理学賞受賞)
高効率青色発光ダイオードの発明

中村 修二 (なかむら しゅうじ)
(2014年ノーベル物理学賞受賞)
高効率青色発光ダイオードの発明

朝永振一郎 (ともながしんいちろう)
(1965年ノーベル物理学賞受賞)
素粒子をあつかうくりこみ理論を開発

福井謙一 (ふくいけんいち)
(1981年ノーベル化学賞受賞)
フロンティア軌道理論を開拓

白川英樹 (しらかわ ひでき)
(2000年ノーベル化学賞受賞)
導電性ポリマーの発見と開発

小柴昌俊 (こしば まさとし)
宇宙からのニュートリノ検出に成功

南部陽一郎 (なんぶ よういちろう)
(2008年ノーベル物理学賞受賞)
自発的対称性の破れの予言

益川敏英 (ますかわ としひで)
(2008年ノーベル物理学賞受賞)
CP対称性の破れの起源の提唱

根岸 英一 (ねぎし えいいち)
(2010年ノーベル化学賞受賞)
パラジウム触媒によるクロスカップリング

山中伸弥 (やまなかしんや)
(2012年ノーベル生理学医学賞受賞)
細胞を初期化する方法を発見

天野 浩 (あまの ひろし)
(2014年ノーベル物理学賞受賞)
高効率青色発光ダイオードの発明

大村 智 (おおむら さとし)
(2015年ノーベル生理学医学賞受賞)
寄生虫病に対する新しい治療法の発見

科学技術週間
http://stw.mext.go.jp/
製作・著作：文部科学省
企画・制作：株式会社化学同人
2005年 3月25日 第1版発行
2016年 3月7日 第8版第1刷発行

●監修：日本化学会、日本物理学会、日本薬学会、日本農芸化学会、高分子学会、応用物理学会
●企画協力：玉尾皓平（理化学研究所・理化学研究所）、稲荷 弘（京都薬科大学）、寺嶋孝仁（京都大学化学研究所）、佐藤 健（東京大学）、高橋雅英（青山学院大学）、松田一彦（東京大学）、高橋正彰（東京理科大学）、藤嶋 昭（神奈川科学技術アカデミー）、小間 篤（慶應義塾大学理工学部）、岩崎 悠（東京理科大学）、上野山雄仁、石橋 彩、柴田雄一（以上、京都大学）、尾崎正伸（和下福島原発事故対応）、玉生 浩（名古屋工業大学）、藤原 祐（神奈川科学技術アカデミー）、小間 篤（慶應義塾大学理工学部）、宮坂博（日本原子力研究所）、下井 守（東京大学）、滝上 隆一（理化学研究所）、木原壮林（京都工芸繊維大学）、吉川研明（元名古屋大学）、西村幸恵（社団法人 日本鉄鋼連盟）、谷岡健吉（NPO放送技術研究所）、大迫正弘（国立科学博物館）、笠原俊宏・上原昌彦・高橋和也・望月建子・森田浩介（理化学研究所 仁科加速器研究センター）、二ツ川章二（社団法人 日本アイソトープ協会）、佐藤康一（住友電気工業株式会社）、馬越佑吉（物質・材料研究機構）、藤中 功（宇宙航空研究開発機構）、石橋純夫（株式会社ISOMAX）、森 勇斗（神戸大学）、細野秀雄（東京工業大学）、吉原 豊（東北大学）、中村照美（物質・材料機構）

●写真・資料提供：核燃料サイクル開発機構 敦賀本部廃棄前処理部、関西電力株式会社 美浜支社高浜発電所、京都大学原子炉実験所、産業技術総合研究所 計量標準総合センター、正直工業大学、島津製作所 田中第一記念館資料室研究所、シニー株式会社、気象大学、東京電力ホールディングス株式会社 柏崎刈羽原子力発電所、日本化学会、株式会社日本触媒、丸善石油化学株式会社、読売新聞社、理化学研究所、Wacker-Chemie GmbH、住友電気工業株式会社、宇宙航空研究開発機構、株式会社カネカ、長崎大学、高エネルギー加速器研究機構、京都産業大学、シカゴ大学、NHK放送技術研究所、トヨタ自動車株式会社、パナソニック株式会社、Lawrence Berkeley Nat'l Lab.、（キュリー夫妻のラジウム発見100周年記念事業）事務局（財団法人 放射線影響研究所）、Joint Institute for Nuclear Research、Wikipedia、名城大学、名古屋大学、日立金属株式会社、Randall Lamb、UCSB、学校法人北里研究所、東京大学宇宙線研究所

●イラストレーター：山崎 昇

●参考書：1) 桜井 弘編、「元素111の新知識 第2版 増補版」、講談社 (2013)、2) John Emsley, "The Elements," 3rd Ed.,Oxford University Press(1998)、3) John Emsley, "Nature's Building Blocks : An A-Z Guide to the Elements," Oxford University Press(2001)、「出雲 創吉、「元素の百科事典」、丸善(2002)、4) Albert Stwertka, "A Guide to the Henry Elements(second edition)," Oxford University Press(2002)、5) 馬淵久夫編、「元素の事典」、朝倉書店(1994)、6) 豊崎一夫編、「元素の話」、培風館(1982)、7) Mary E. Weeks, M. Leicester 著、大沼正則監訳、「化学発見の歴史 I,II,III」、朝倉書店(1988～1990)、8) 竹内敬人著、「化学の基本7法則」、岩波書店(1998)、9) 村上雅人編著、「元素を知る事典」、海鳴社(2004)、10) 国立天文台編、「理科年表(平成17年版)」、p.133、丸善(2005)、11) 羽曽部 紀雄、「イラスト図解 元素」、日東書院(2010)、12) 日本化学会原子量専門委員会 「元素の周期表(2012)」および47名の原子量表)、13) J. Magill, G. Pfennig, R. Dreher, Z. Sóti, Karlsruher Nuklidkarte, Chart of the nuclides, 8th ed.(2012)

※元素名のうち、AlはAluminium、CuはCuprumなどと表記することもある。※ここに示した有量数は、各元素名の由来となった物質の名称を括弧内に記載した。なお、IUPACの原子量委員会で承認されたものである。安定同位体が1核種しかない元素の有量数は、その同位体の質量数を括弧内に示した。※ここに示した原子量は、各元素の安定同位体の存在比の地球上での平均値を用いて計算した。ただし、同位体比が変動している元素については、その変動幅を考慮して決定した。※ここに示した原子量は、2011年6月現在の原子量の標準値を採用している。※遷移元素、ランタノイド元素、アクチノイド元素の電子配置は省略した。

人類初の人工元素

1937年 セグレら

- カリフォルニア大学放射線研究所のサイクロトロンで加速した重陽子をモリブデンに照射
- 第7族元素のレニウムとマンガンを担体に化学分離
- レニウムに似た放射性元素を発見
- 「人工的な」を意味するギリシャ語「τεχνητός」から命名

^{99m}Tc (半減期：6.0時間)

単一光子放射断層撮影診断（SPECT）に利用

- 脳血流，甲状腺機能，心臓機能，肝臓機能，癌骨転移
- 国内診断件数: 90万件/年

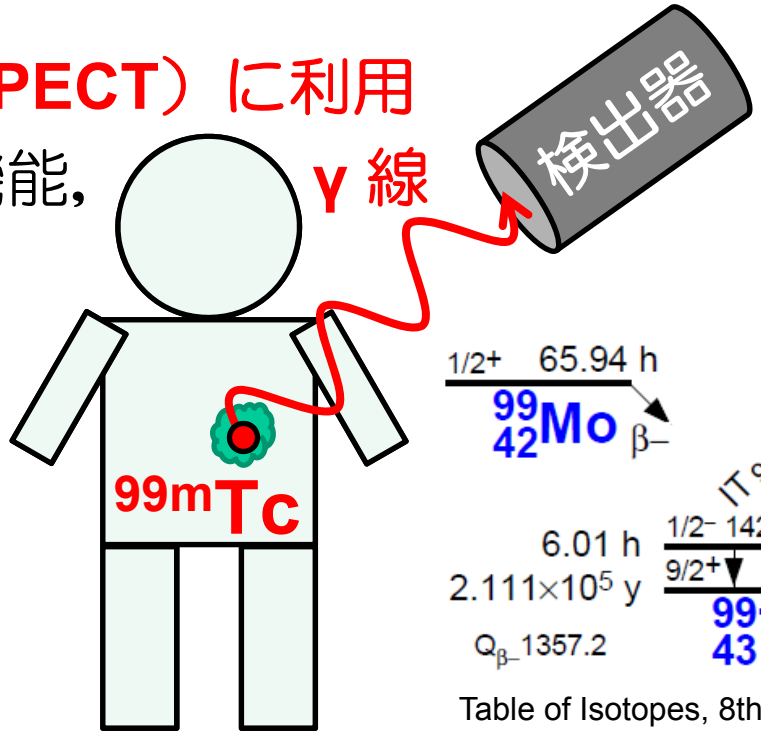
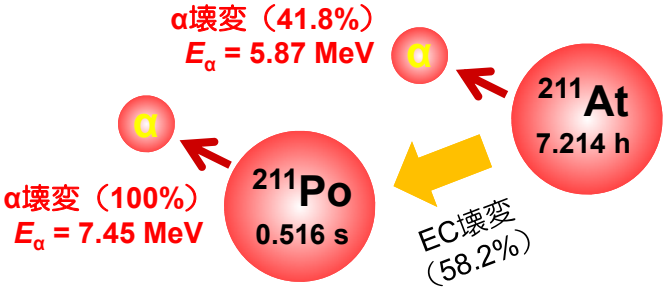


Table of Isotopes, 8th ed. (1998).

人類二つ目の人工元素

1940年 コーソン，マッケンジー，セグレ

- カリフォルニア大学放射線研究所のサイクロトロンで加速したアルファ粒子をビスマスに照射：$^{209}Bi(\alpha,2n)^{211}At$
- 「不安定な」を意味するギリシャ語「ἄστατος」から命名



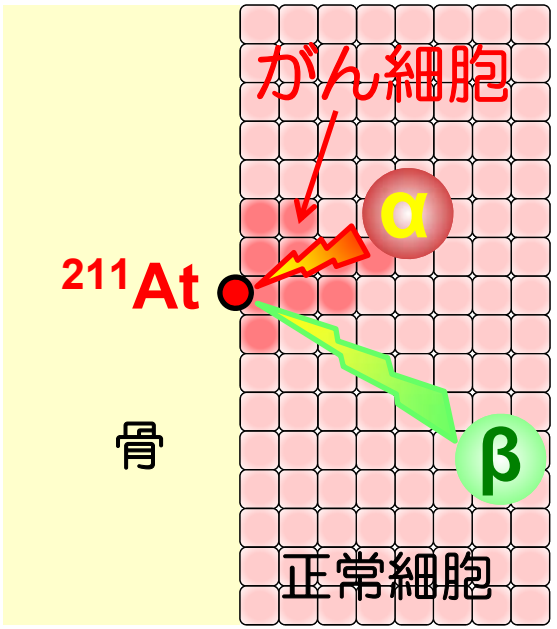
^{211}At (半減期：7.2時間)

RI内用療法に期待

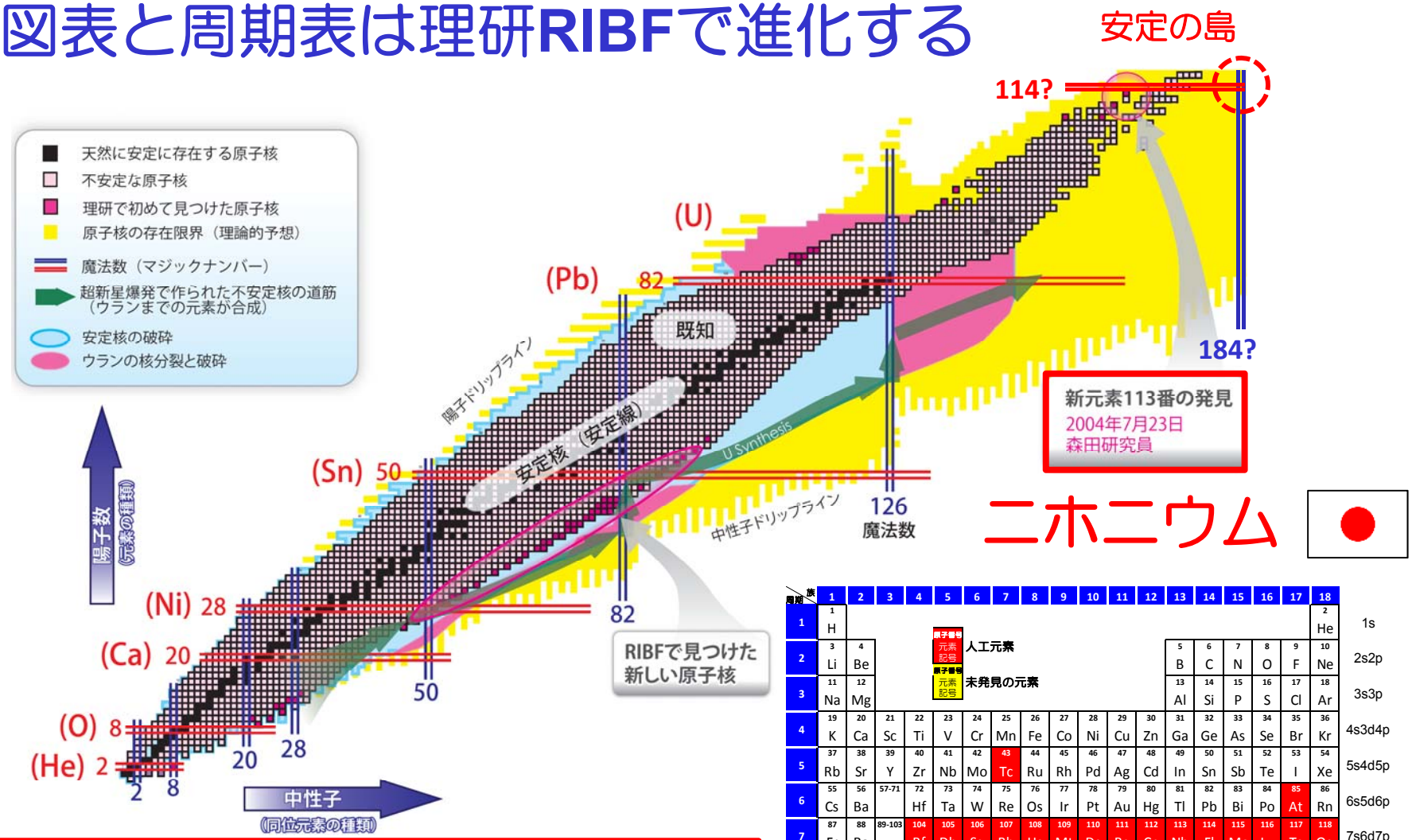
- α線は生体組織内での飛程がβ線に比較して短く，高い線エネルギー付与

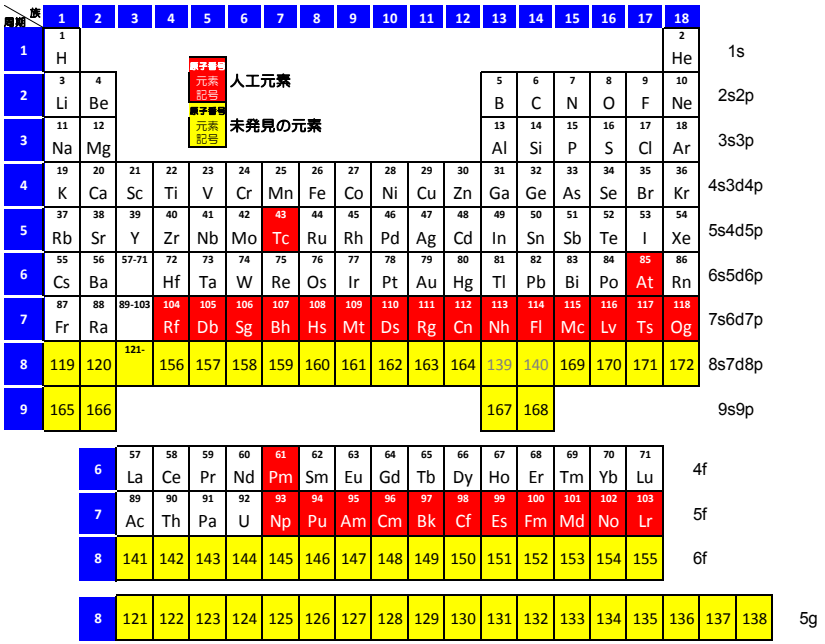
粒子	エネルギー (MeV)	組織内飛程 (μm)	線エネルギー付与 (keV/μm)
α線	5 – 9	40 – 100	60 – 80, 240
β線	0.05 – 2.3	50 – 1200	0.2

- 高い細胞毒性，正常細胞への影響が低い
- 播種性のがん，血液由来のがん，微小転移がん，手術後の部位に残存する微小がんの治療に期待



核図表と周期表は理研RIBFで進化する





- 核図表，周期表の拡大
- 元素の起源の解明
- 究極の原子核理論，量子化学理論
- 新しい応用，産業利用を開拓

森田グループ

理化学研究所	森田浩介，森本幸司，加治大哉，羽場宏光， **Rituparna KANUNGO**，鹿取謙二，大西哲哉，須田利美， 米田晃，吉田敦，菊永英寿，大関和貴，工藤祐生， 市川隆敏，小森有希子，大江一弘，若林泰生，住田貴之， 山木さやか，酒井隆太郎，長谷部裕雄，**Minghui HUANG**， 笠松良崇
埼玉大学	秋山 隆宏，山口貴之
新潟大学	後藤真一，工藤久昭，刈屋佳樹，村上昌史，村山裕史
近代物理研究所	**Hushan XU**，**Tianheng HUANG**
東京大学	井手口栄治
東北大学	佐藤望
原子力機構	小浦寛之，塚田和明，光岡 真一
山形大学	門叶冬樹，藤森康幸，増子尭博，眞山圭太，森谷透， 生井沙織，武山美麗
筑波大学	小沢顕，末木啓介
東京理科大学	田中謙伍
高能物理研究所	**Yuliang ZHAO**

ご清聴ありがとうございます.