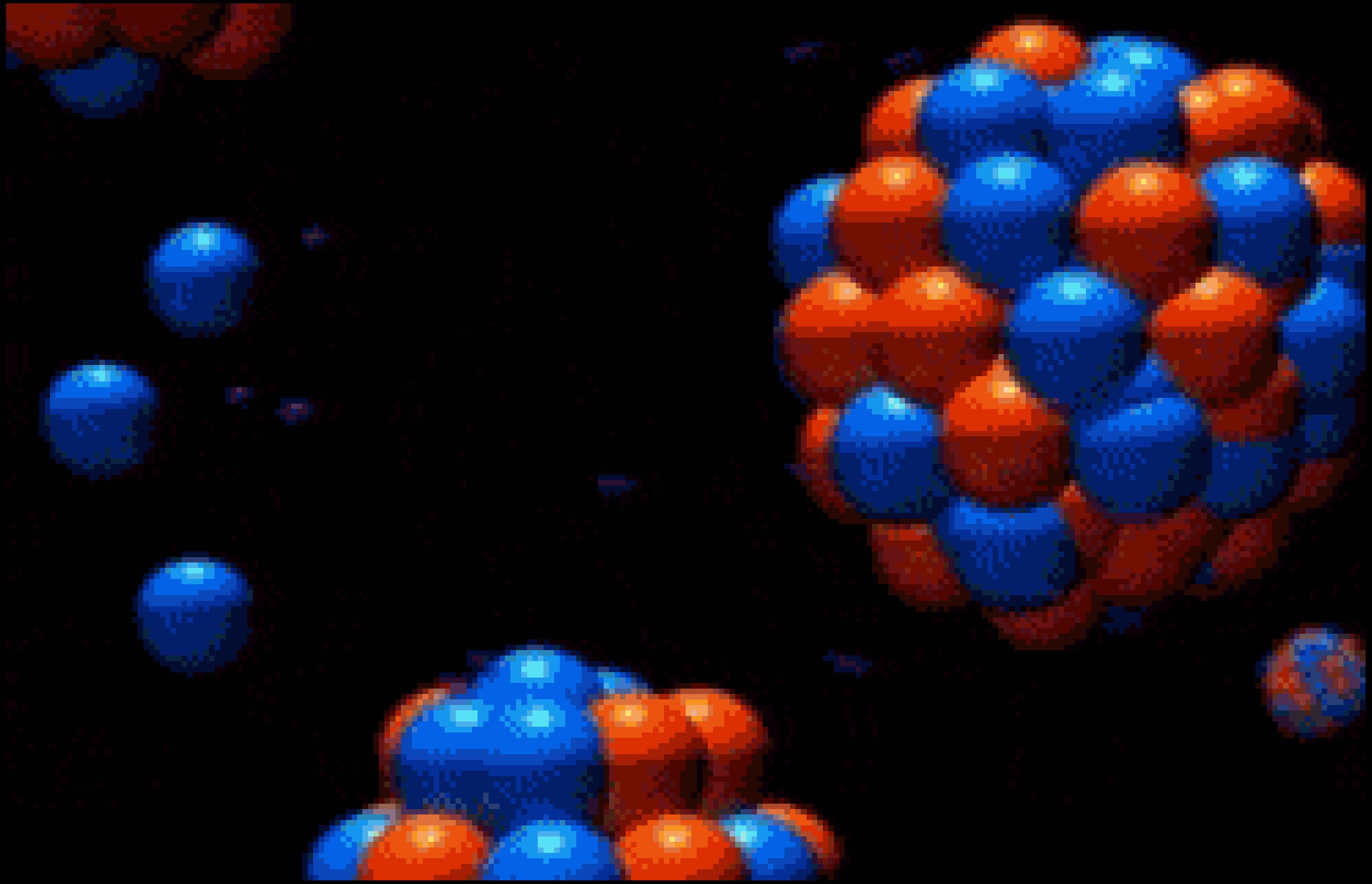
เคมีนิวเคลียร์

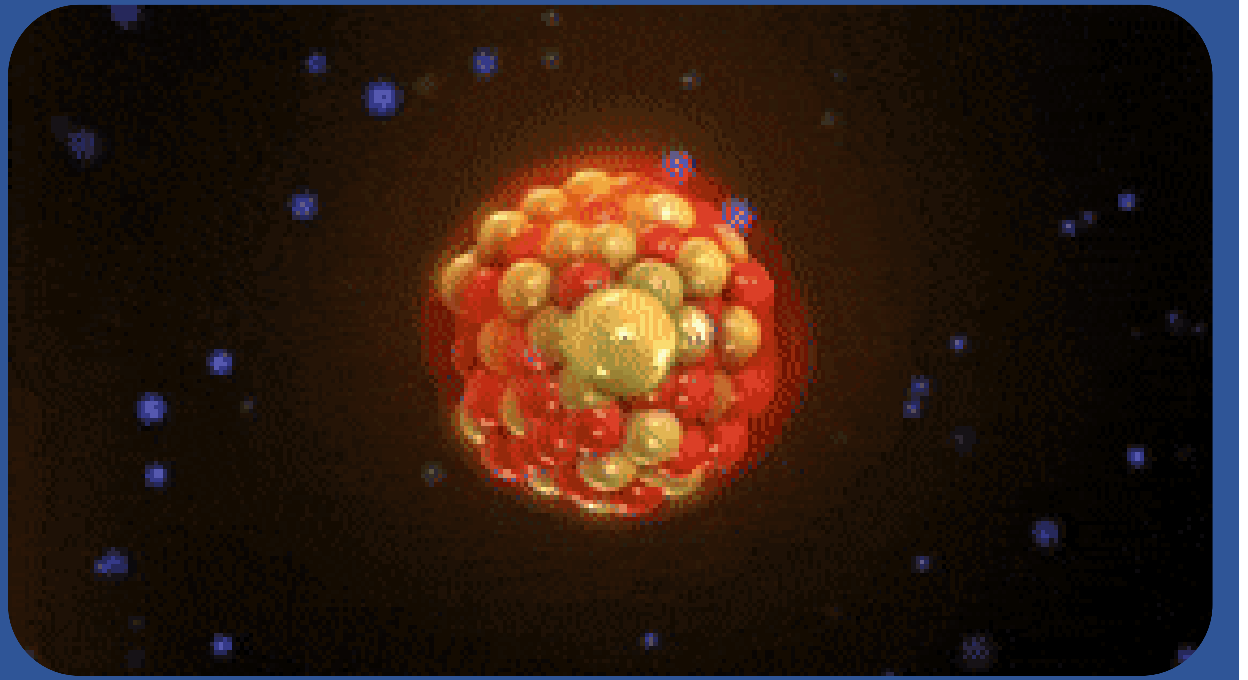
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ

Active Learning
Learning for all
by Woravith Chansuvarn



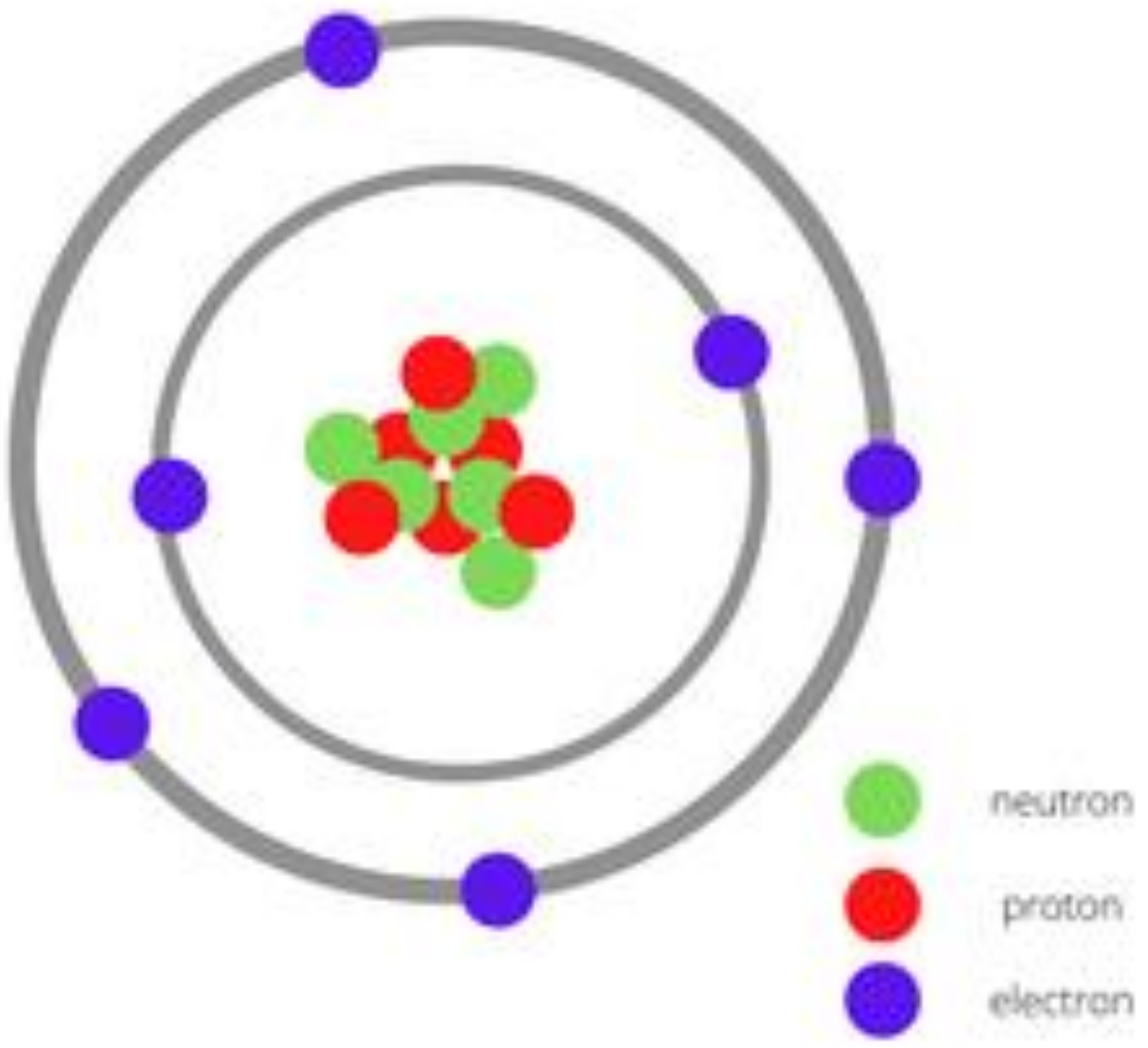
Chemographics
woravith
woravith.c@rmutp.ac.th
http://web.rmutp.ac.th/woravith

เคมีนิวเคลียร์

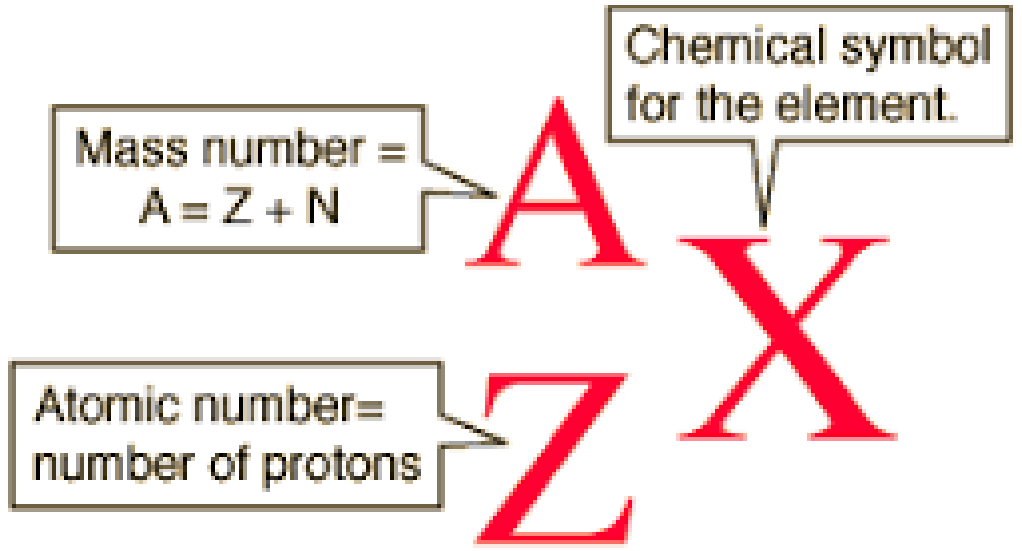


- สมบัติและเสถียรภาพของนิวเคลียส
- ธาตุกัมมันตรังสี
- ปฏิกิริยานิวเคลียร์
- ประโยชน์ของเคมีนิวเคลียร์และกัมมันตภาพรังสี

สมบัติและเสถียรภาพของนิวเคลียส



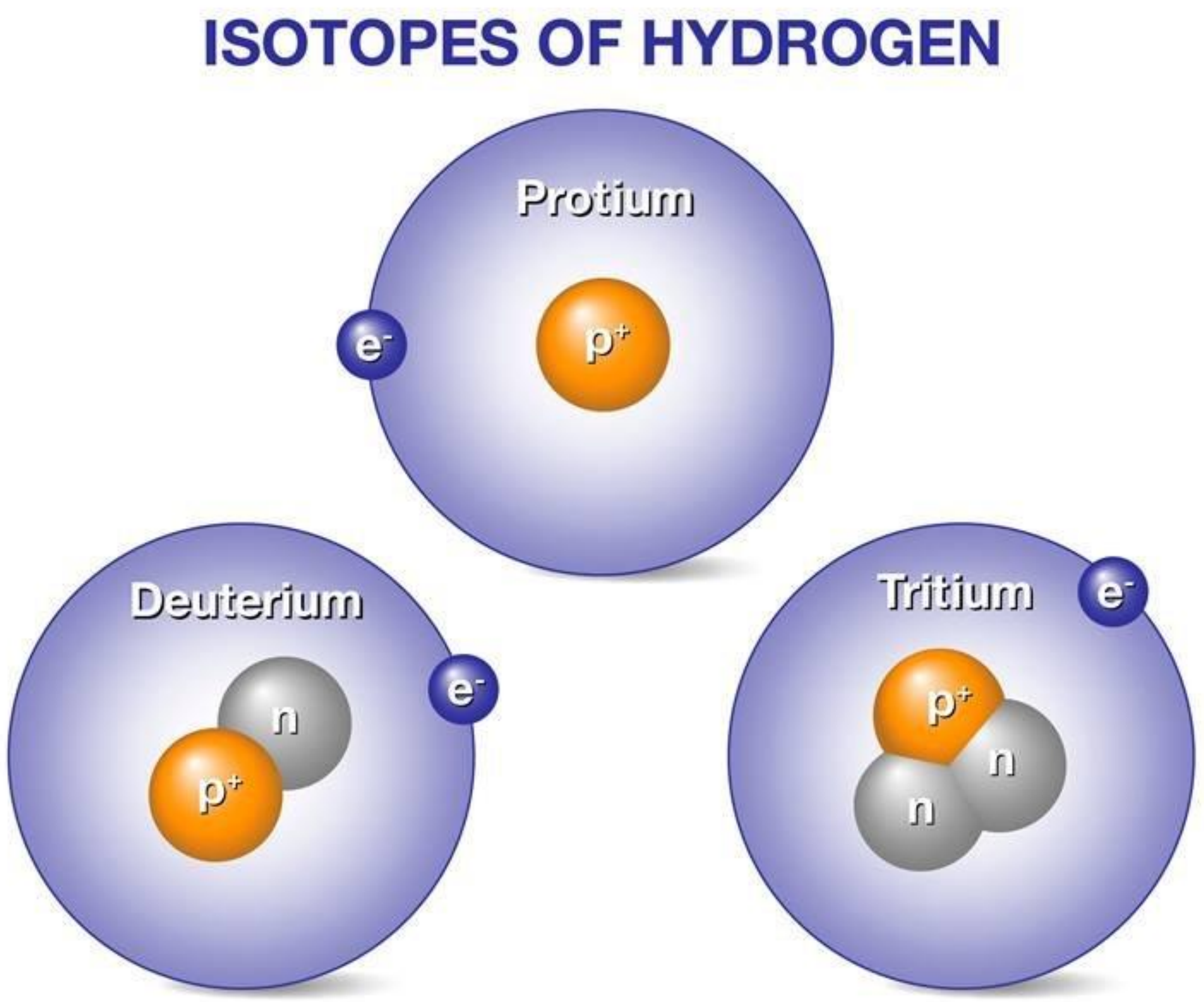
อนุภาค	สัญลักษณ์	มวล		ประจุ	ประจุไฟฟ้า (C)
		หน่วยกรัม	หน่วย amu		
อิเล็กตรอน	e	9.1095×10^{-28}	0.000548	-1	1.6022×10^{-19}
โปรตอน	p	1.6726×10^{-24}	1.007276	+1	1.6022×10^{-19}
นิวตรอน	n	1.6749×10^{-24}	1.008665	0	0

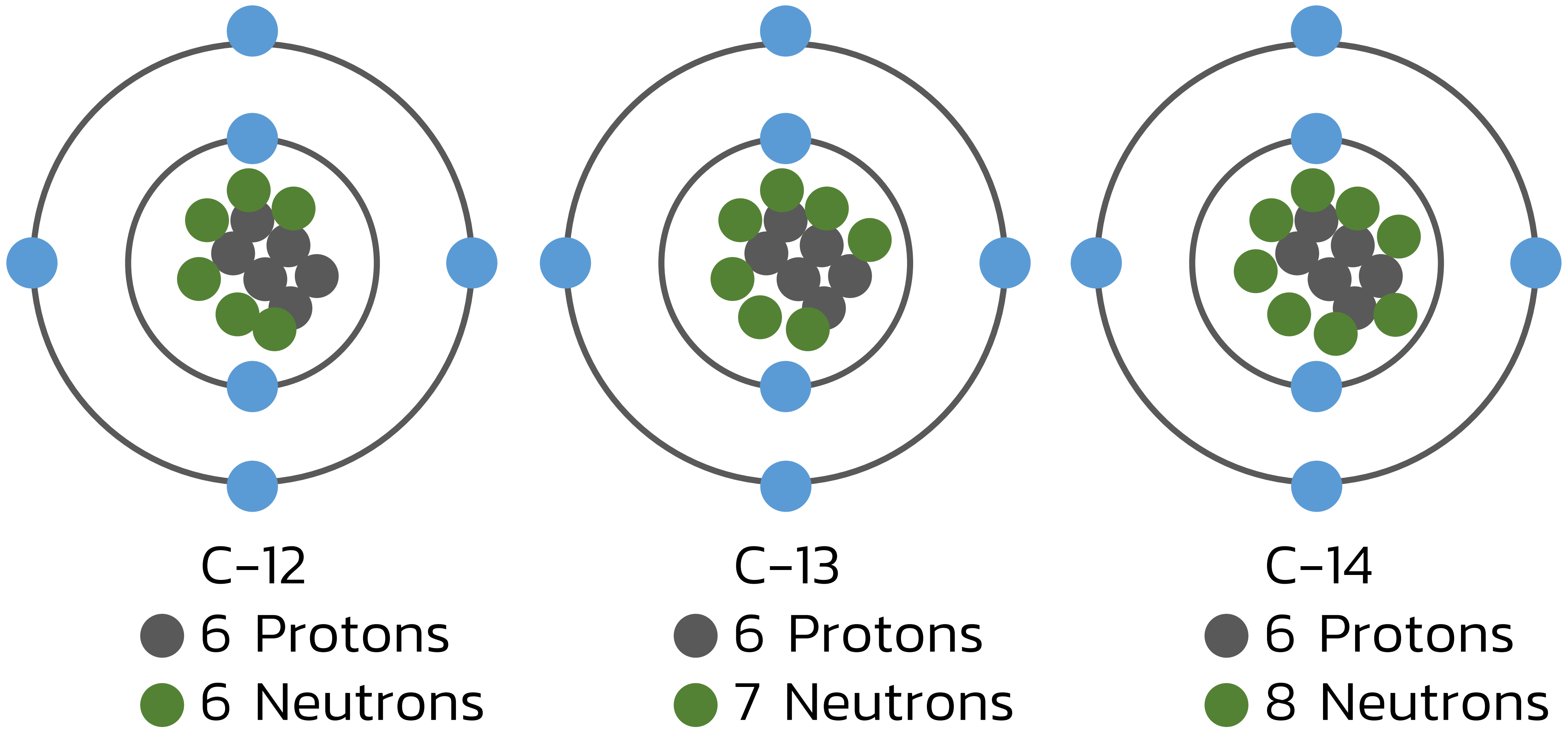


- อะตอมที่ระบุจำนวนโปรตอนและนิวตรอน เรียกว่า นิวไคลด์ (nuclide)
- อนุภาคภายในนิวเคลียส (โปรตอนและนิวตรอน) ว่า นิวคลีออน (nucleon)

#ไอโซโทป

ธาตุชนิดเดียวกัน แต่มีมวลเชิงอะตอมไม่เท่ากัน





ไอโซโทปของธาตุเดียวกันจึงมีสมบัติทางเคมีเหมือนกันเกิดสารประกอบประเภทเดียวกันและมีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีทำนองเดียวกัน ไอโซโทปของธาตุแต่ละชนิดปรากฏในธรรมชาติที่ไม่เท่ากัน

Element	Isotope	mass	Mass difference	Abundance (%)
Hydrogen	^{1}H	1.007825		99.985
	^{2}H	2.014102	+1.006277	0.015
Carbon	^{12}C	12.0		98.890
	^{13}C	13.003355	+1.003355	1.110
Nitrogen	^{14}N	14.003074		99.634
	^{15}N	15.000109	+0.997035	0.366
Oxygen	^{16}O	15.994915		99.762
	^{17}O	16.999132	+1.004217	0.038
	^{18}O	17.999161	+2.004246	0.200
Phosphor	^{31}P	30.973762		100
Sulfur	^{32}S	31.972071		95.020
	^{33}S	32.971459	+0.999388	0.750
	^{34}S	33.967867	+1.995796	4.210
	^{36}S	35.967081	+3.995010	0.020

#เสถียรภาพของนิวเคลียส

- นิวเคลียสที่เสถียร – ไม่แผ่รังสี
- นิวเคลียสที่ไม่เสถียร – แผ่รังสี เรียก ไอโซโทปกัมมันตรังสี (radioactive isotope)

นิวเคลียสจะเสถียรหรือไม่ พิจารณาจาก

1) อัตราส่วนของ n/p

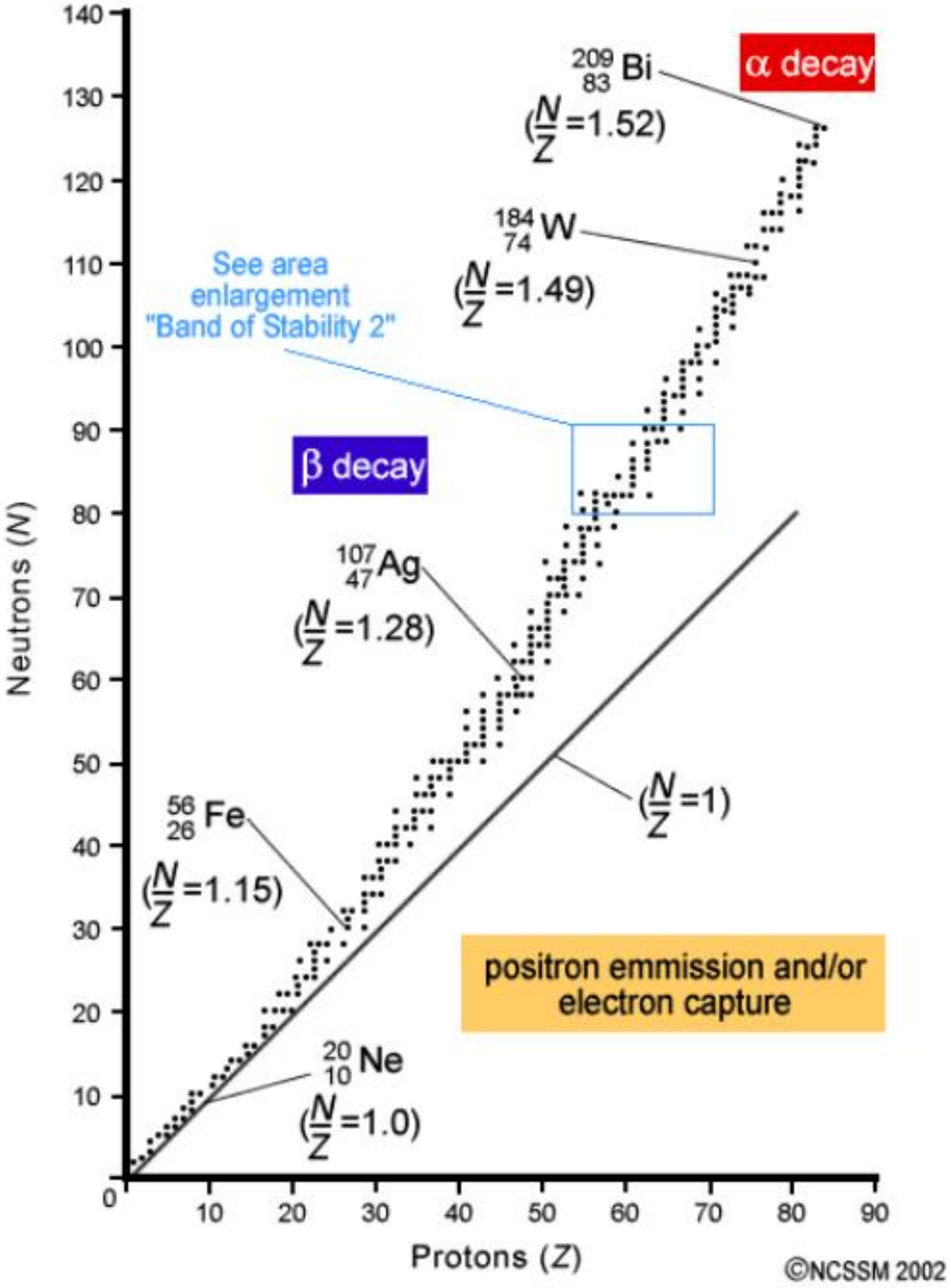
- ธาตุที่มีเลขเชิงอะตอมต่ำ (<20) มีอัตราส่วน $n/p \approx 1$
- ธาตุที่มีเลขเชิงอะตอมตั้งแต่ 20 (Ca) - 83 (Bi) อัตราส่วน $n/p > 1.52 - 1$
- ไอโซโทปของธาตุที่มีเลขเชิงอะตอมมากกว่า 84 (Po) จะไม่เสถียร

2) พิจารณาจากจำนวน n และ p

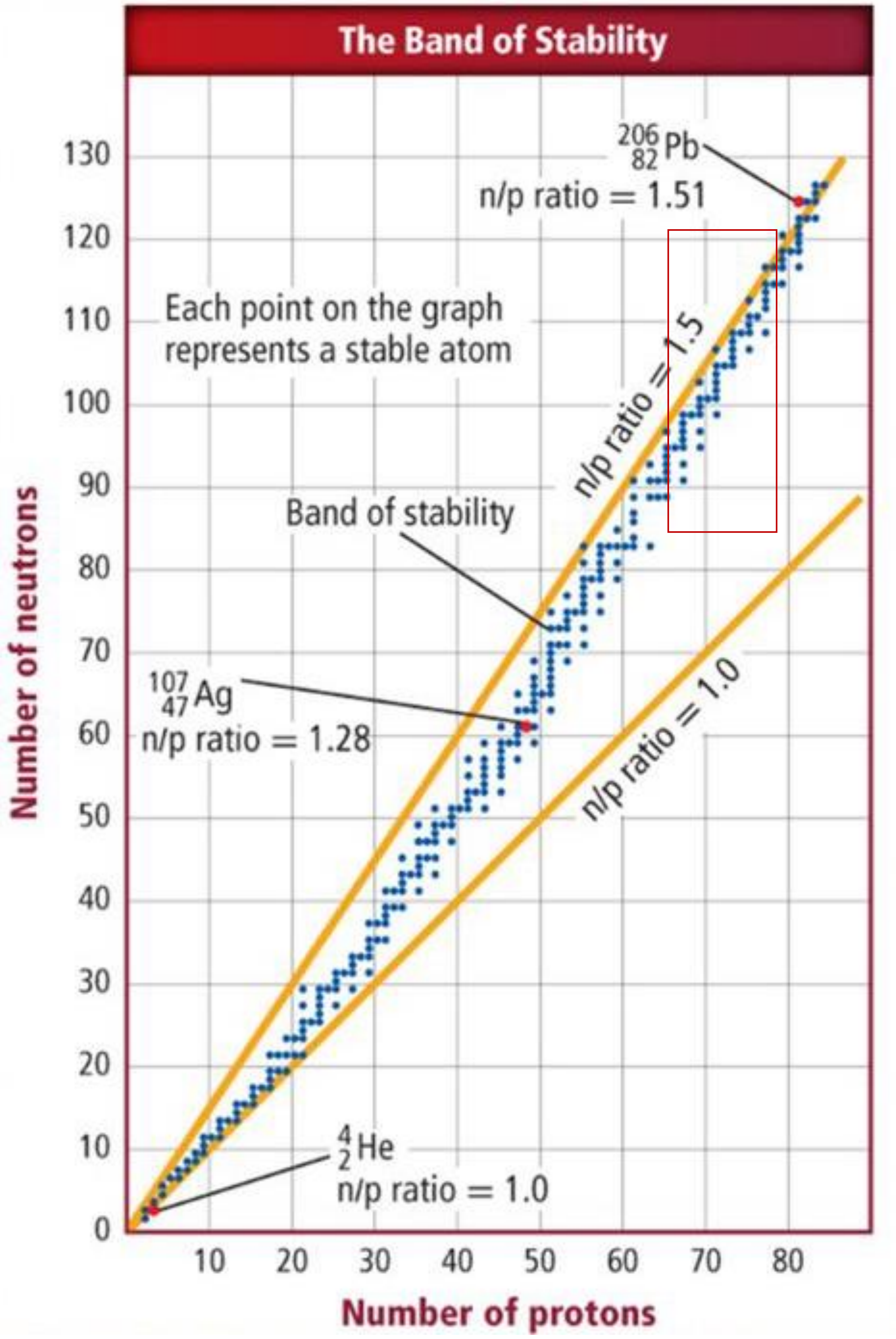
- ธาตุที่มี n หรือ p เท่ากับ 2(He), 8(O), 20(Ca), 50(Sn), 82(Pb), 126(-) จะมีความเสถียรสูงและมีจำนวนไอโซโทปมาก เรียกว่า เลขมหัศจรรย์ (magic number)
- ธาตุที่มีจำนวน p, n เป็นเลขคู่ (even) เสถียรกว่าเลขคี่ (odd)

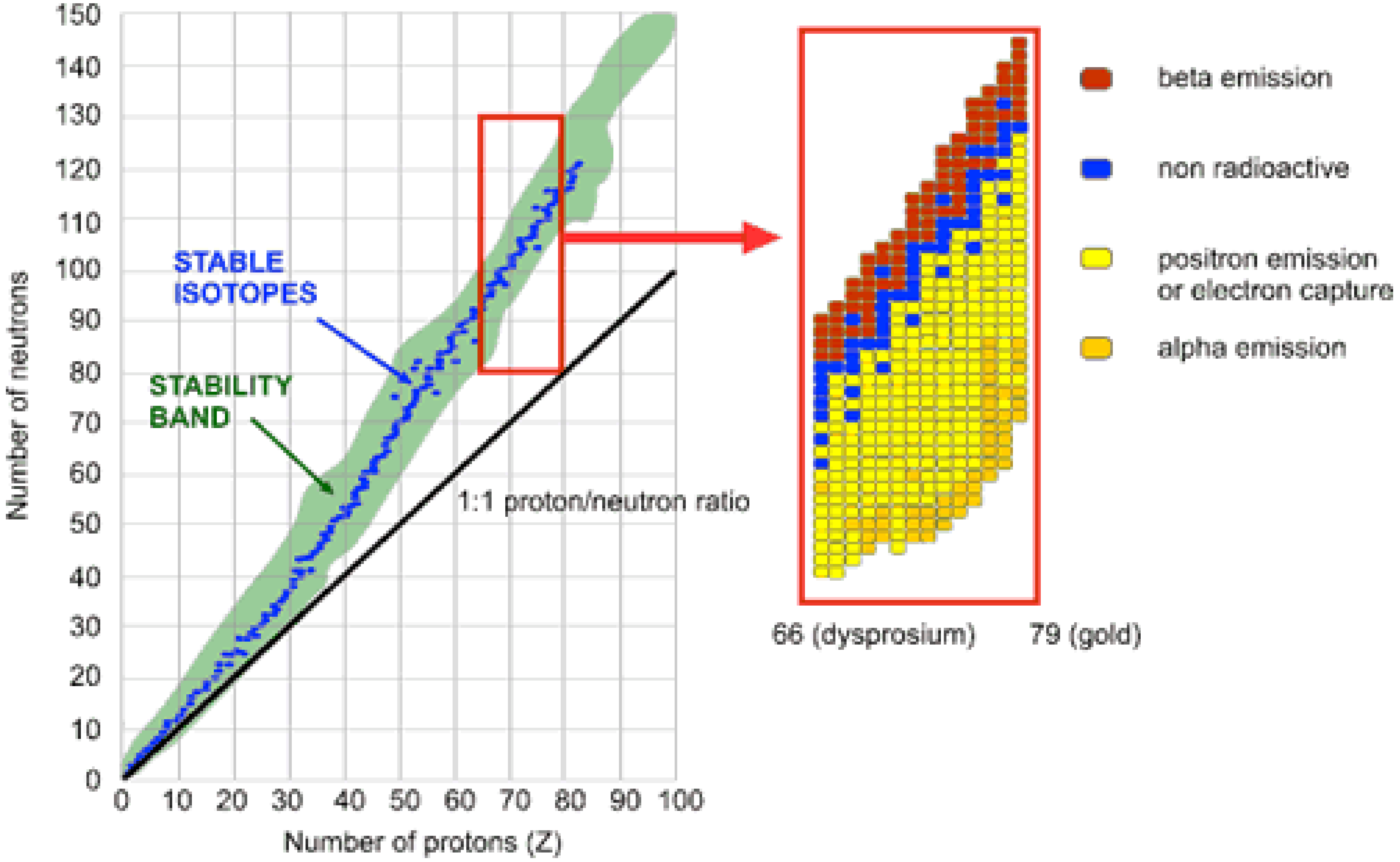
#แถบเสถียรภาพของนิวเคลียส

1) แสดงนิวไคลด์ที่เสถียรในธรรมชาติ
2) นิวไคลด์ที่อยู่เหนือแถบเสถียรภาพจะมี n/p สูงเกินทำให้ไม่เสถียร
3) นิวไคลด์ที่อยู่ต่ำกว่าแถบเสถียรภาพจะมี n/p ต่ำเกินทำให้ไม่เสถียร
4) แถบเสถียรภาพ (band of stability) นิวเคลียสของธาตุที่เสถียรจะมีอัตราส่วนจำนวนนิวตรอนต่อโปรตอน (n/p) ในแนวเส้นเสถียรภาพ (belt of stability)
5) นิวไคลด์ที่ไม่เสถียรจะเกิด การเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์เพื่อให้เสถียรขึ้น



จาก *Introduction to U-series Geochemistry* (p. 14), by B. Bernard et al., 2003. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*





- ไอโซโทปเสถียรจะอยู่บน stability band
- ธาตุที่มีเลขเชิงอะตอมช่วง 66 (Dy) ถึง 79 (Au) มีกระบวนการสลายหลายแบบ
  - นิวไคลด์ที่มีอัตราส่วน n/p ต่ำกว่าจะสลายแบบปล่อยโพซิตรอนหรือจับยึดอิเล็กตรอน (electron capture) หรือปล่อยรังสีแอลฟา
  - ส่วนนิวไคลด์ที่มีอัตราส่วน n/p สูงกว่าสลายแบบปล่อยรังสีบีตา

#พลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียส

- พลังงานที่ใช้ในการยึดนิวคลีออนเข้าได้ด้วยกันในนิวเคลียสของธาตุ หรือ เป็นพลังงานที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้นิวเคลียสแตกตัวเป็นองค์ประกอบย่อย
- หาได้จากผลต่างของมวลอะตอมของธาตุกับมวลนิวคลิออน (โปรตอน + นิวตรอน)
- มวลพร่อง (mass defect, Δm) มวลส่วนหนึ่งที่หายไปเมื่อนิวคลีออนอิสระมารวมกันเป็นนิวเคลียส

$$\Delta m = [Z(m_p) + (A-Z)m_n] - m_{atom}$$

m_p = มวลโปรตอน (1.007826 amu)
m_n = มวลนิวตรอน (1.008665 amu)
m_{atom} = มวลนิวไคลด์ (amu)
Z = เลขเชิงอะตอม (จำนวนโปรตอน)
A = มวลเชิงอะตอม (มวลนิวคลิออน)

- มวลส่วนที่หายไปมีค่าเท่ากับพลังงานที่ปลดปล่อยเมื่ออนุภาคมารวมตัวกันเป็นนิวเคลียส หรือเรียกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียส (nuclear binding energy; nb)

$$E_{nb} = (\Delta m)c^2$$

- พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน (binding energy per nucleons, b/n) จะบอกให้ทราบความเสถียรของนิวเคลียส (ค่ายิ่งมากยิ่งเสถียร)

$$E_{b/n} = \frac{(\Delta m)c^2}{n_p + n_n}$$

จงคำนวณหาพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียส F-19 และพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน
(กำหนดน้ำหนักอะตอม F-19 = 18.9984 amu)

$$\Delta m = [Z(m_p) + (A-Z)m_n] - m_{atom}$$

Δm = [9x(1.007826 amu) + (19-9)x1.008665 amu] – 18.9984 amu
= 0.1587 amu

❖ **พลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียส**

amu → E (J)

1 amu = 1.6605×10^{-27} kg

Δm = (0.1587 amu)(1.6605×10^{-27} kg/amu)
= 2.635×10^{-28} kg

E_{nb} = $(\Delta m)c^2$
= (2.635×10^{-28} kg)x(3.00×10^{8} m/s)^2
= 2.37×10^{16} kg·m^2/s^2
= 2.37×10^{-11} J

❖ **พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน**

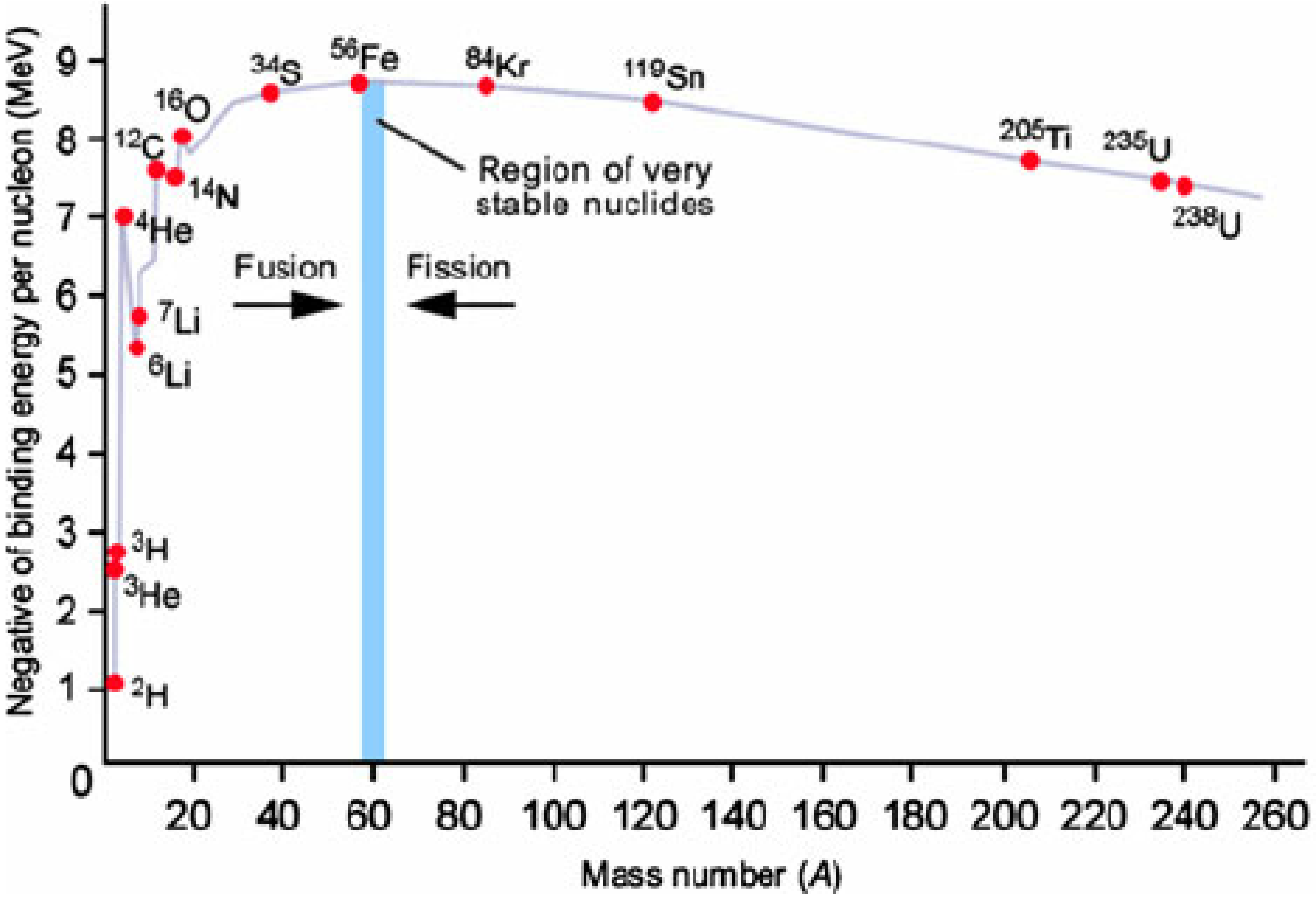
$$E_{b/n} = \frac{2.37\times10^{-11}\ J}{9+10} = 1.25\times10^{-12}\ J$$

E (J) → E (eV)

1 eV = 1.602×10^{-19} J
1 J = 6.242×10^{18} eV

$E_{b/n}$ = (1.25×10^{-12} J)x(6.242×10^{18} eV/J)
= 7.79×10^{6} eV/amu
= 7.79 MeV

พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน (binding energy per nucleons)



$$\Delta m = [26x(1.007826 \text{ amu}) + (56\text{-}26)x1.008665 \text{ amu}] - 55.934932 \text{ amu} = 0.528494 \text{ amu}$$

$$1 \text{ amu} = 1.6605x10^{-27} \text{ kg} = 931.5 \text{ MeV}/c^2$$

$$E_{nb} = 0.528494 \text{ amu} \times 931.5 \text{ MeV} = 4.928x10^2 \text{ MeV}$$

$$E_{b/n} = \frac{4.928x10^2 \text{ MeV/amu}}{56} = 8.801 \text{ MeV/amu}$$

From. Lepine-Szily, et al. (2012). Nuclear astrophysics: Nucleosynthesis in the Universe. International Journal of Astrobiology. 11. 243-250. 10.1017/S1473550412000158.

ธาตุกัมมันตรังสี

กัมมันตรังสี (Radioactive Elements)

ธาตุที่มีองค์ประกอบภายในนิวเคลียสที่ไม่เสถียร ส่งผลให้เกิดการสลายตัว หรือการปล่อยรังสีของธาตุอยู่ตลอดเวลาเพื่อให้จำนวนองค์ประกอบในนิวเคลียสมีความสมดุล และเสถียรมากขึ้น โดยธาตุกัมมันตรังสีนั้นจะเป็นไอโซโทปบางตัวของธาตุบางชนิดเช่น C-14 หรือมักเป็นธาตุที่มีมวลมากหรือมีเลขอะตอมสูงเกินกว่า 82 เช่น Ra-226 หรือ U-238 เป็นต้น

กัมมันตภาพรังสี (Radioactivity)

การเสื่อมสลายโดยตัวเองของนิวเคลียสของอะตอมที่ไม่เสถียร เป็นผลให้ได้อนุภาคแอลฟา อนุภาคบีตา รังสีแกมมาซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีช่วงคลื่นสั้นมากและมีพลังงานสูงทั้งหมดนี้ พุ่งออกมาด้วยความเร็วสูงมาก ในบางกรณีอาจมีพลังงานความร้อนและพลังงานแสงเกิดตามมาด้วย

รังสีแอลฟา (Alpha: α)

เกิดจากการสลายตัวของนิวเคลียสที่มีขนาดใหญ่และมีมวลมาก หรือมีจำนวนโปรตอนภายในนิวเคลียสมาก

- อนุภาคแอลฟาในรูปของนิวเคลียส He
- มีสถานะทางไฟฟ้าเป็นประจุบวก (+2)
- มีมวลค่อนข้างใหญ่
- มีอำนาจทะลุทะลวงต่ำ ไม่สามารถทะลุผ่านสิ่งกีดขวาง เช่น ผิวหนัง แผ่นโลหะบางๆ หรือแผ่นกระดาษไปได้

รังสีบีตา (Beta: β)

เกิดจากการสลายตัวของนิวเคลียสที่มีจำนวนนิวตรอนมาก

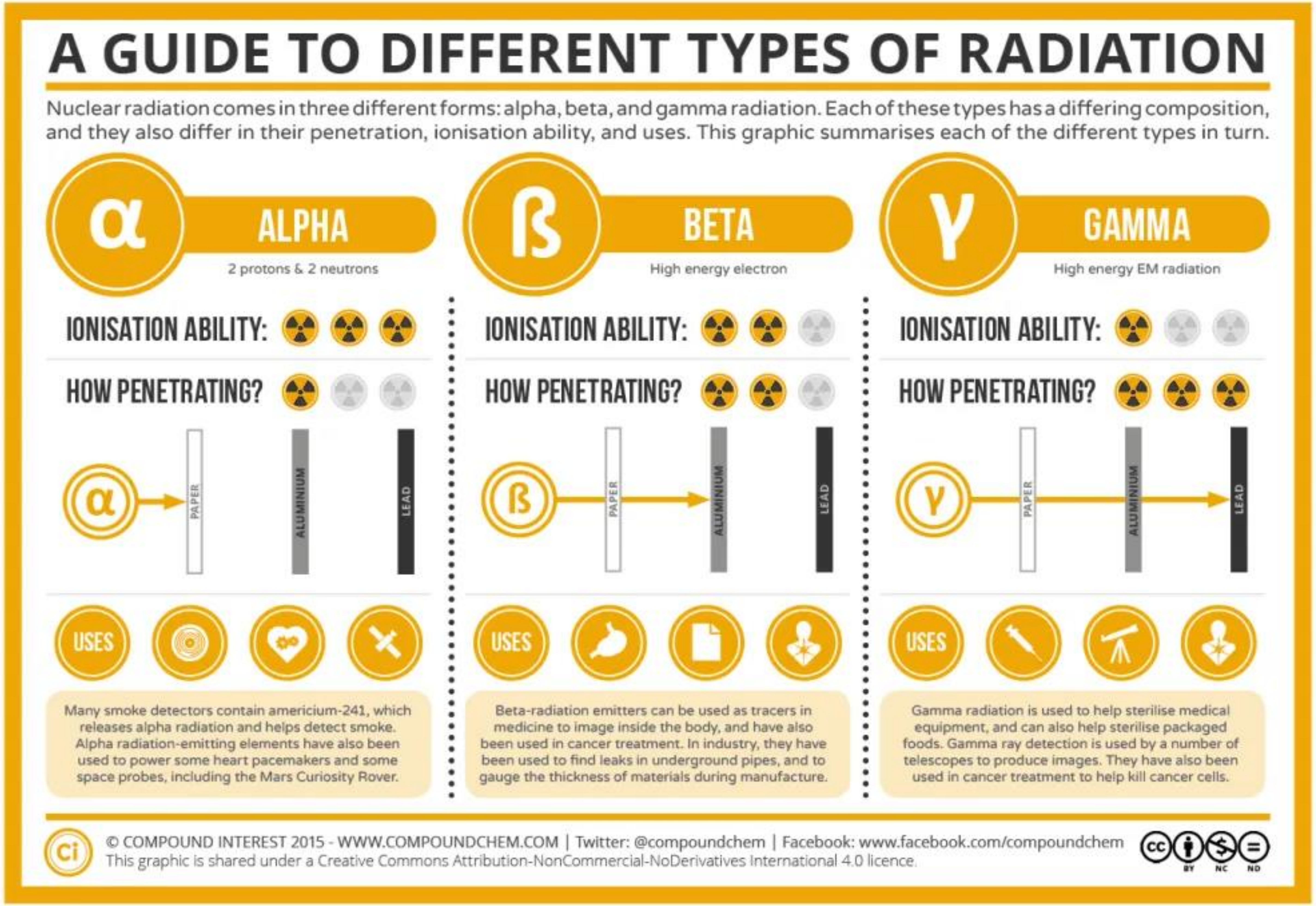
- มีสมบัติคล้ายคลึงกับอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ และมีมวลต่ำ
- มีอำนาจทะลุทะลวงสูง (สูงกว่ารังสีแอลฟาราว 100 เท่า)
- มีความเร็วในการเคลื่อนที่สูงถึงระดับใกล้เคียงกับความเร็วแสง

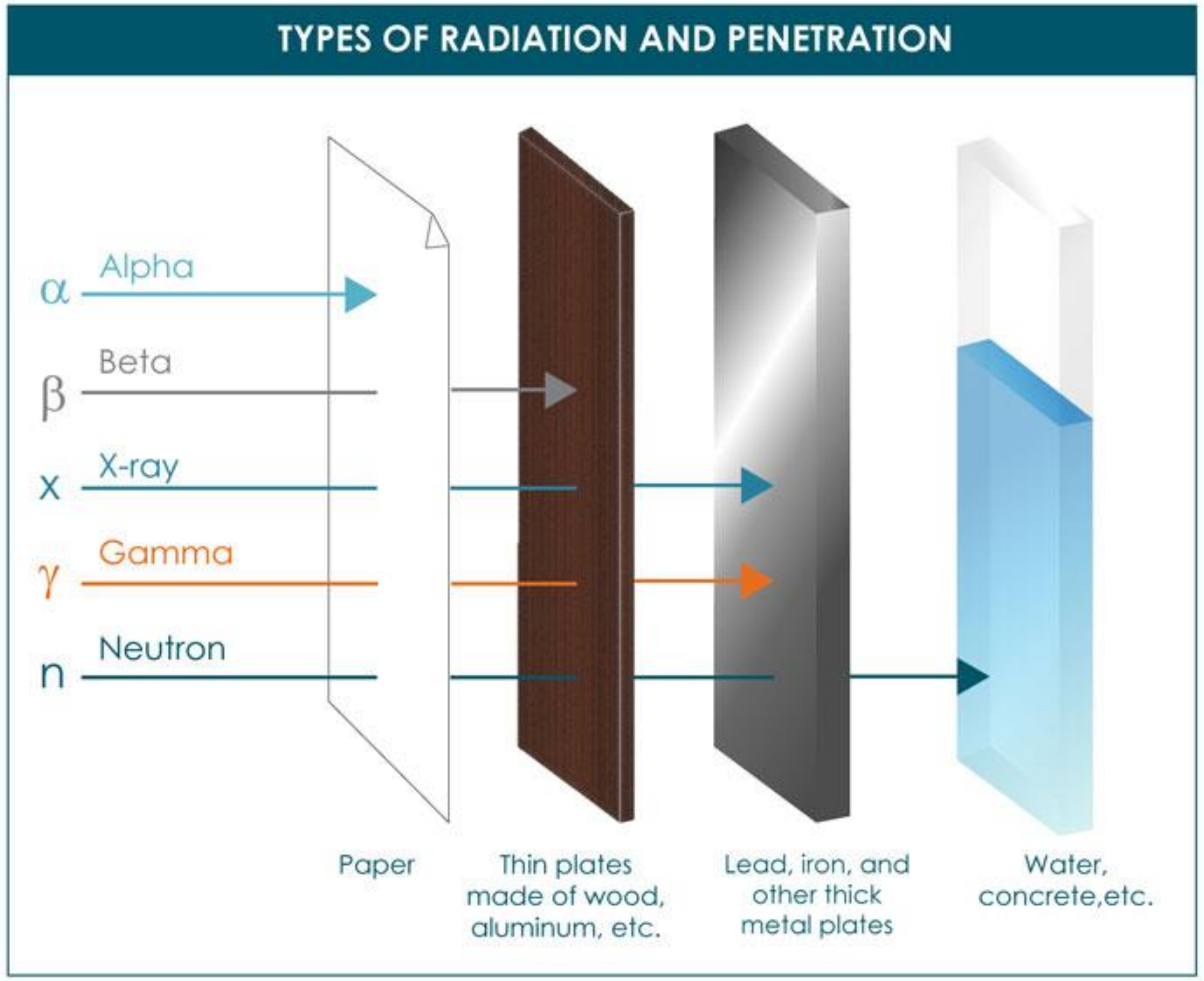
รังสีแกมมา (Gamma: γ)

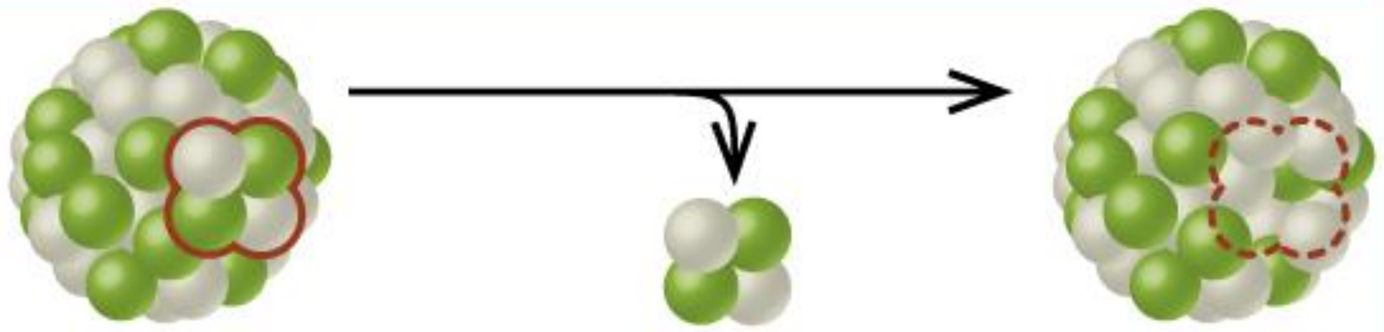
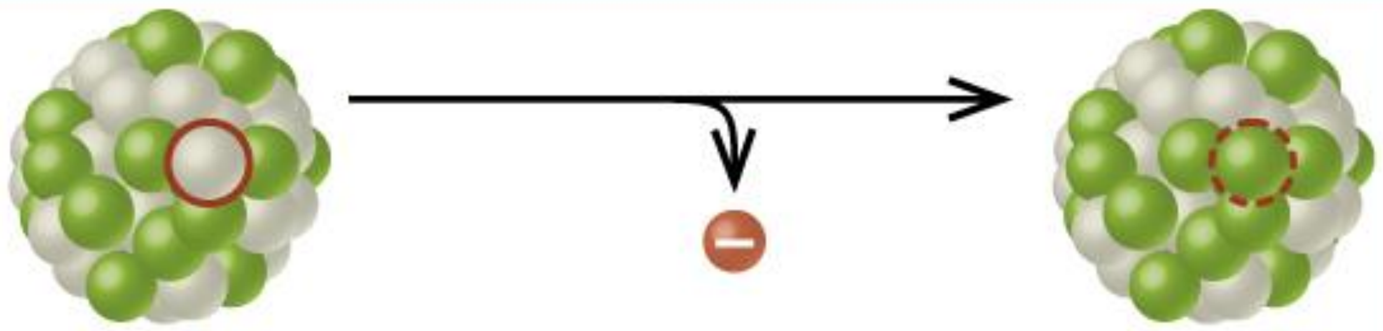
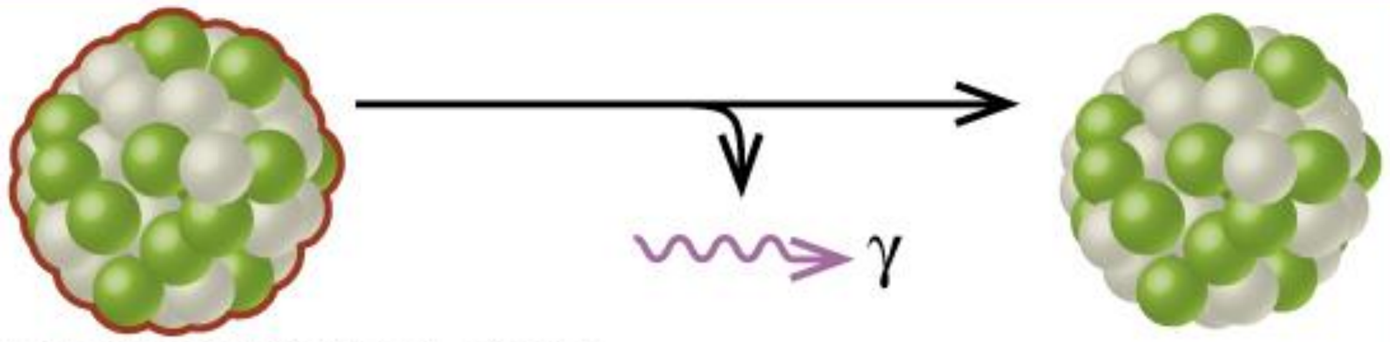
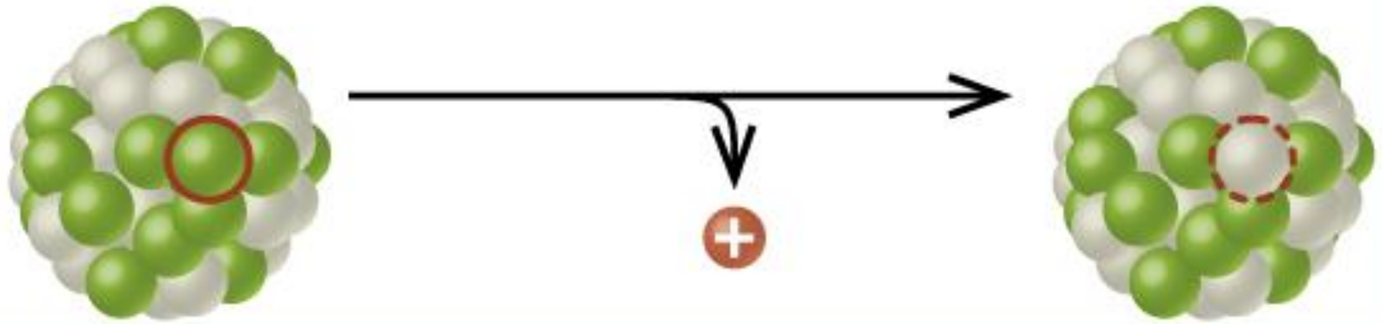
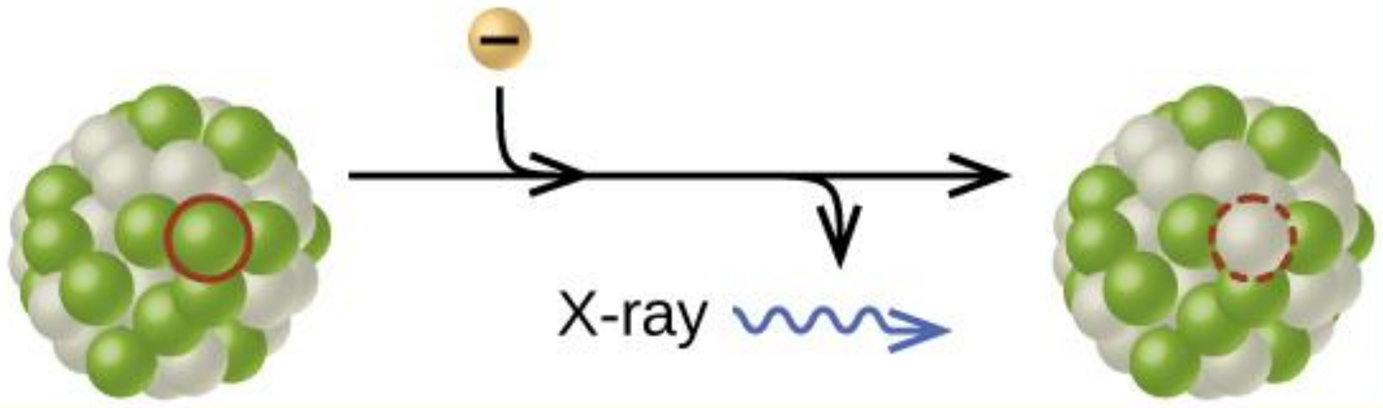
เกิดจากการที่นิวเคลียสภายในอะตอมมีพลังงานสูงหรือถูกกระตุ้น จึงก่อให้เกิดรังสีแกมมาที่มีสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้า มีสมบัติคล้ายรังสีเอกซ์ (X-ray)

- ไม่มีประจุและไม่มีมวล
- มีพลังงานสูง
- เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าแสง
- มีอำนาจทะลุทะลวงสูงที่สุด

ชนิด	สัญลักษณ์	ประจุ	มวล (amu)	ประเภท
แอลฟา ; α	$^{4}_{2}He$	+2	4	อนุภาค
บีตา ; β, $β^-$	$^{0}_{-1}e$	–1	0	อนุภาค
แกมมา ; γ	γ	0	0	รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า
นิวตรอน; n	$^{1}_{0}n$	0	1	อนุภาค
โพสิตรอน; $β^+$	$^{0}_{+1}e$	+1	0	อนุภาค
โปรตอน; p	$^{1}_{1}H$	+1	1	อนุภาค

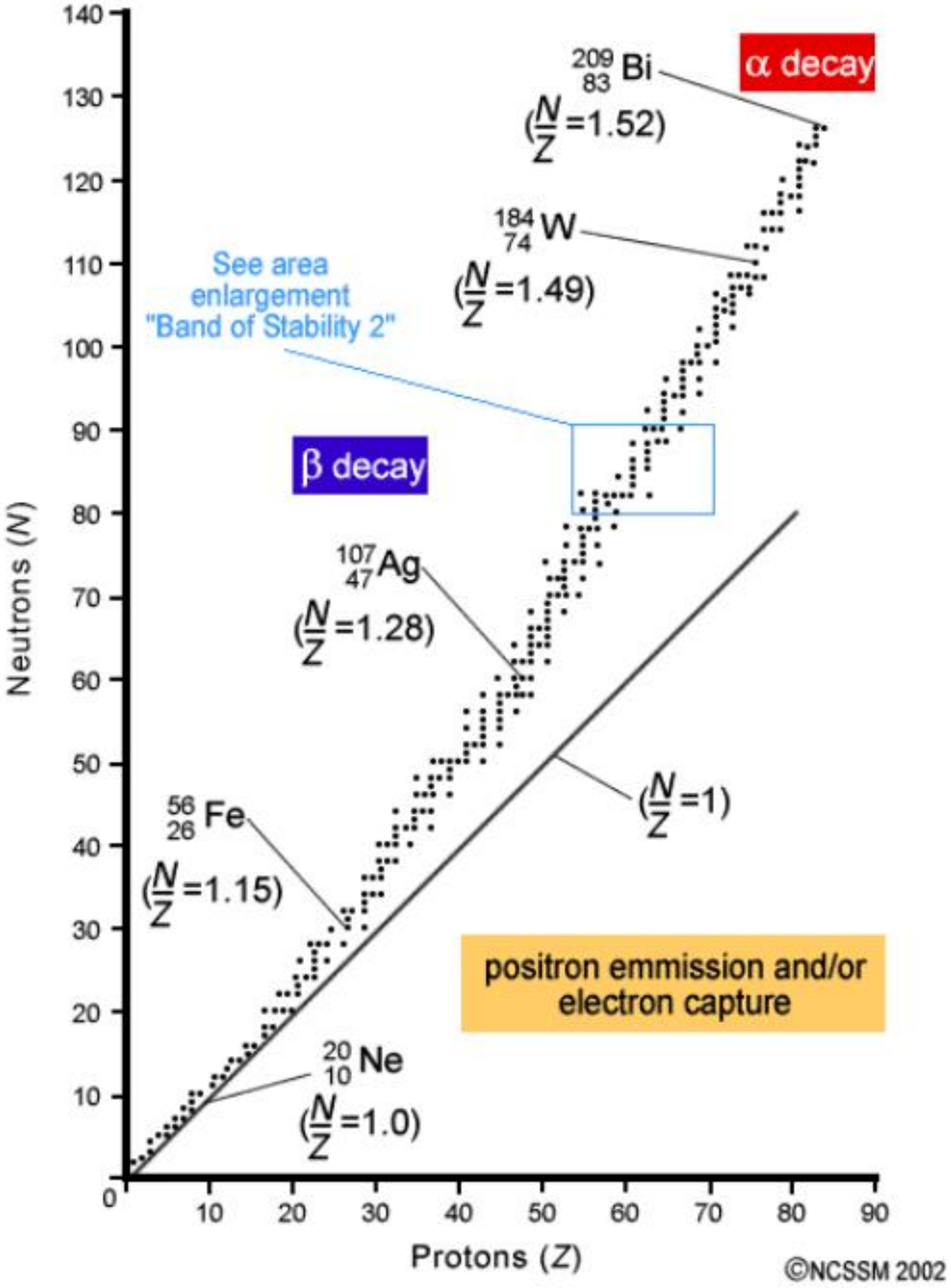

A GUIDE TO DIFFERENT TYPES OF RADIATION
Nuclear radiation comes in three different forms: alpha, beta, and gamma radiation. Each of these types has a differing composition, and they also differ in their penetration, ionisation ability, and uses. This graphic summarises each of the different types in turn.
ALPHA
2 protons & 2 neutrons
BETA
High energy electron
GAMMA
High energy EM radiation
IONISATION ABILITY:
HOW PENETRATING?
PAPER
ALUMINIUM
LEAD
USES
Many smoke detectors contain americium-241, which releases alpha radiation and helps detect smoke. Alpha radiation-emitting elements have also been used to power some heart pacemakers and some space probes, including the Mars Curiosity Rover.
Beta-radiation emitters can be used as tracers in medicine to image inside the body, and have also been used in cancer treatment. In industry, they have been used to find leaks in underground pipes, and to gauge the thickness of materials during manufacture.
Gamma radiation is used to help sterilise medical equipment, and can also help sterilise packaged foods. Gamma ray detection is used by a number of telescopes to produce images. They have also been used in cancer treatment to help kill cancer cells.
© COMPOUND INTEREST 2015 - WWW.COMPOUNDCHEM.COM | Twitter: @compoundchem | Facebook: www.facebook.com/compoundchem
This graphic is shared under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives International 4.0 licence.


TYPES OF RADIATION AND PENETRATION
α Alpha
β Beta
X X-ray
γ Gamma
n Neutron
Paper
Thin plates made of wood, aluminum, etc.
Lead, iron, and other thick metal plates
Water, concrete,etc.

	Type	Nuclear equation	Representation	Change in mass/atomic numbers
^4_2He	Alpha decay	$^A_ZX \longrightarrow {}^4_2He + {}^{A-4}_{Z-2}Y$		A: decrease by 4 Z: decrease by 2
$^0_{-1}e$	Beta decay	$^A_ZX \longrightarrow {}^0_{-1}e + {}_{Z+1}^{A}Y$		A: unchanged Z: increase by 1
	Gamma decay	$^A_ZX \longrightarrow {}^0_0\gamma + {}^A_ZY$	 Excited nuclear state	A: unchanged Z: unchanged
$^0_{+1}e$	Positron emission	$^A_ZX \longrightarrow {}^0_{+1}e + {}_{Y-1}^{A}Y$		A: unchanged Z: decrease by 1
$^0_{-1}e$	Electron capture	$^A_ZX \longrightarrow {}^0_{-1}e + {}_{Y-1}^{A}Y$		A: unchanged Z: decrease by 1

#แถบเสถียรภาพ (belt of stability)

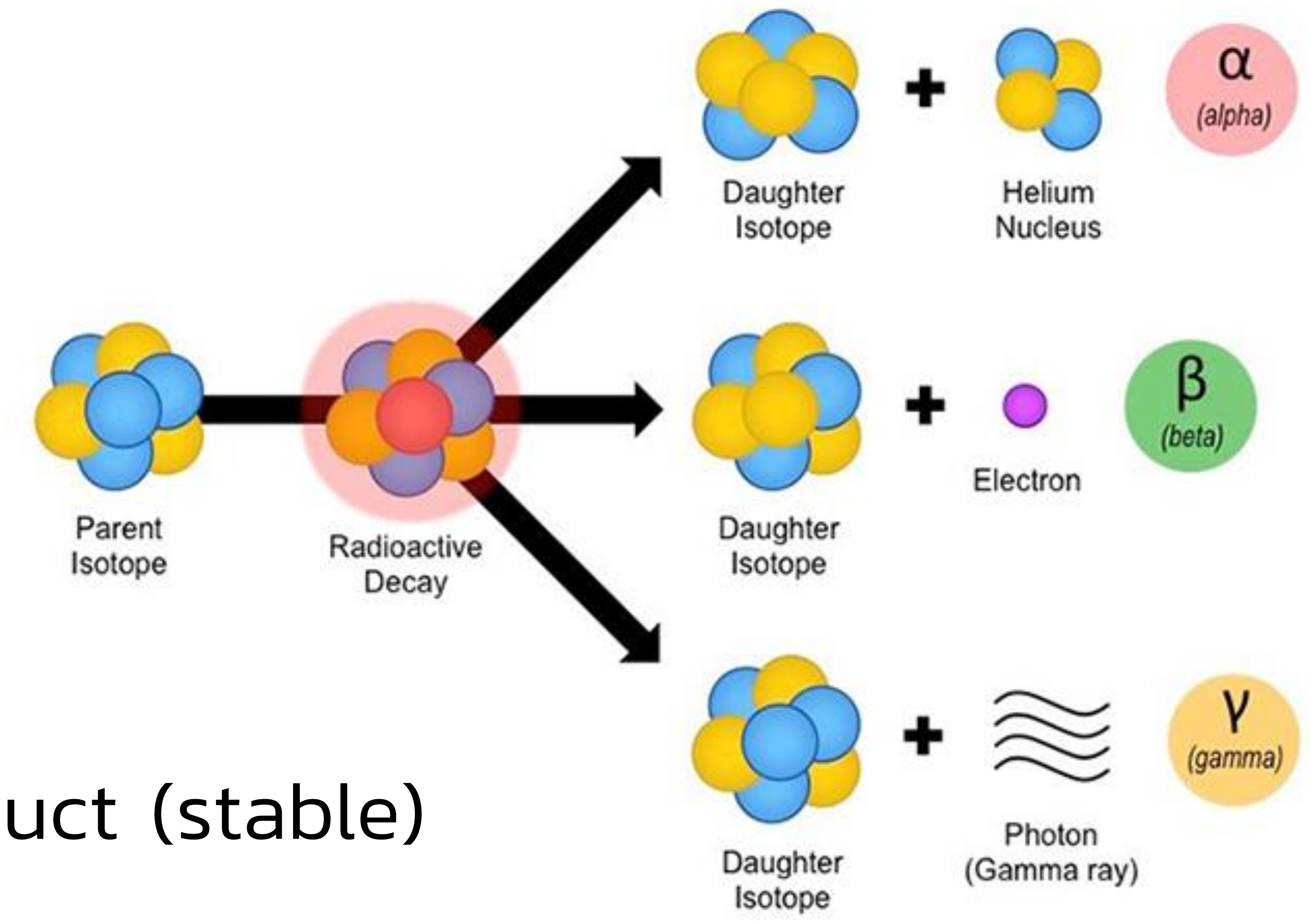
1) นิวไคลด์ที่อยู่นอกแถบเสถียรภาพจะไม่เสถียร จะเกิดการปล่อยกัมมันตภาพรังสีเพื่อให้ได้ไอโซโทปใหม่ที่อัตราส่วน n/p เข้าเส้นแถบเสียรภาพ
2) นิวไคลด์ที่มี n/p สูง จะปล่อยอนุภาคบีตา (β)
   $\rightarrow$ Z ลดลง A คงเดิม
3) นิวไคลด์ที่มี n/p ต่ำ จะปล่อยอนุภาคโพสิตรอน (β^+) หรือ Electron capture
   $\rightarrow$ Z ลดลง A คงเดิม
4) นิวไคลด์ที่ Z > 83 จะปล่อยอนุภาคแอลฟา (α)
   $\rightarrow$ Z ลดลง A ลดลง



จาก *Introduction to U-series Geochemistry* (p. 14), by B. Bernard et al., 2003. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*

#อนุกรมการสลายตัวของกัมมันตรังสี

อนุกรมการสลายตัว (Decay series) คือ ไอโซโทปของธาตุกัมมันตรังสีปลดปล่อยอนุภาคหรือรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าแล้วได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่เสถียร จะมีการสลายตัวอย่างต่อเนื่องจนได้อะตอมที่เสถียรในที่สุด



Parent (unstable) → daughter atom (unstable) → product (stable)

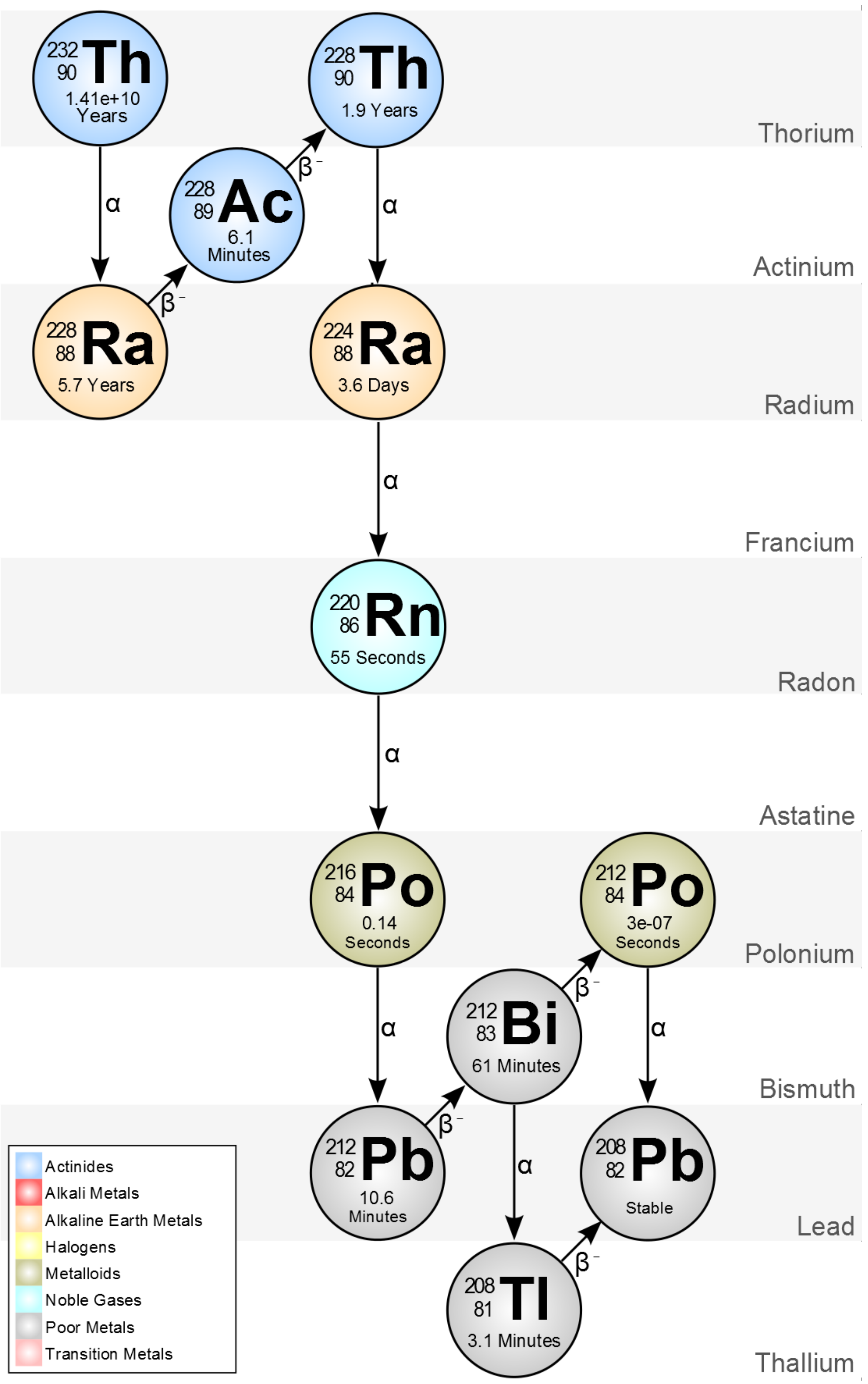
1) อนุกรมทอเรียม (Thorium series, 4n) ; Th-232 → → → Pb-208
2) อนุกรมเนปทูเนียม (Neptunium series, 4n+1) ; Np-237 → → → Tl-205
3) อนุกรมยูเรเนียม (Uranium series, 4n+2) ; U-238 → → → Pb-206
4) อนุกรมแอกทิเนียม (Actinium series, 4n+3) ; U-235 → → → Pb-207

#การสลายตัวของกัมมันตรังสี

อนุกรมทอเรียม (Thorium series)

- นิวไคลด์ทุกตัวมีเลขมวลที่หารด้วย 4 ลงตัว จึงอาจเรียกว่าอนุกรม 4n
- เริ่มจาก Th-232 สลายตัวอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งได้นิวไคลด์เสถียรคือ Pb-208
- มีขั้นสลายตัว 10 ขั้น การสลายตัวตั้งแต่เริ่มจนสิ้นสุดจะให้ β 4 ครั้ง และ α 6 ครั้ง

$$^{232}_{90}\mathrm{Th} \rightarrow {}^{286}_{82}\mathrm{Pb}$$

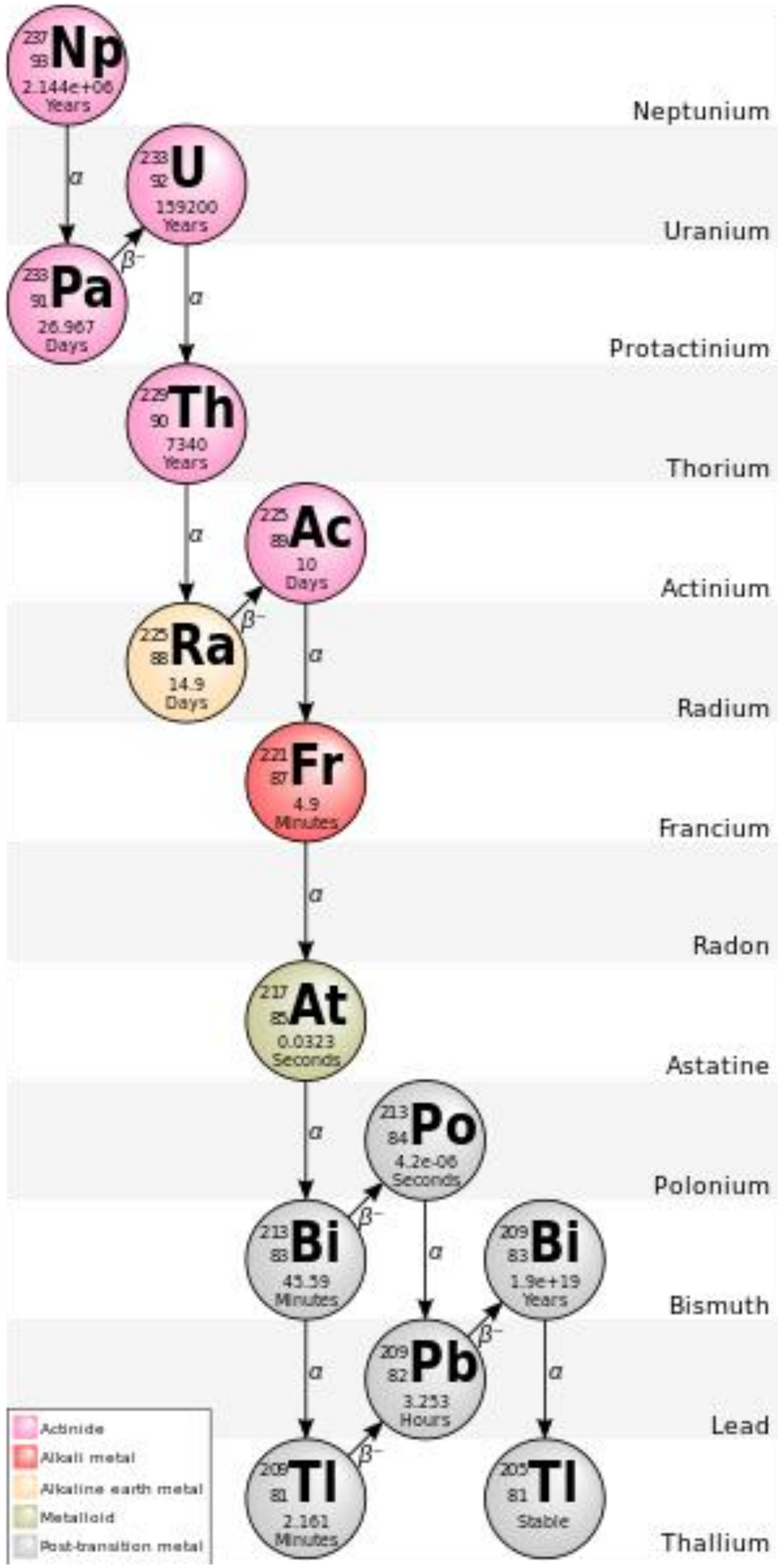


#การสลายตัวของกัมมันตรังสี

อนุกรมเนปทูเนียม (Neptunium series)

- นิวไคลด์ทุกตัวมีเลขมวลที่หารด้วย 4 แล้วเหลือเศษ 1 จึงอาจเรียกว่าอนุกรม 4n+1
- เริ่มจาก Np-237 สลายตัวอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งได้นิวไคลด์เสถียรคือ Tl-205
- การสลายตัวตั้งแต่เริ่มจนสิ้นสุด จะให้ β 4 ครั้ง และ α 8 ครั้ง

$$^{237}_{93}Np \rightarrow ^{205}_{81}Tl$$

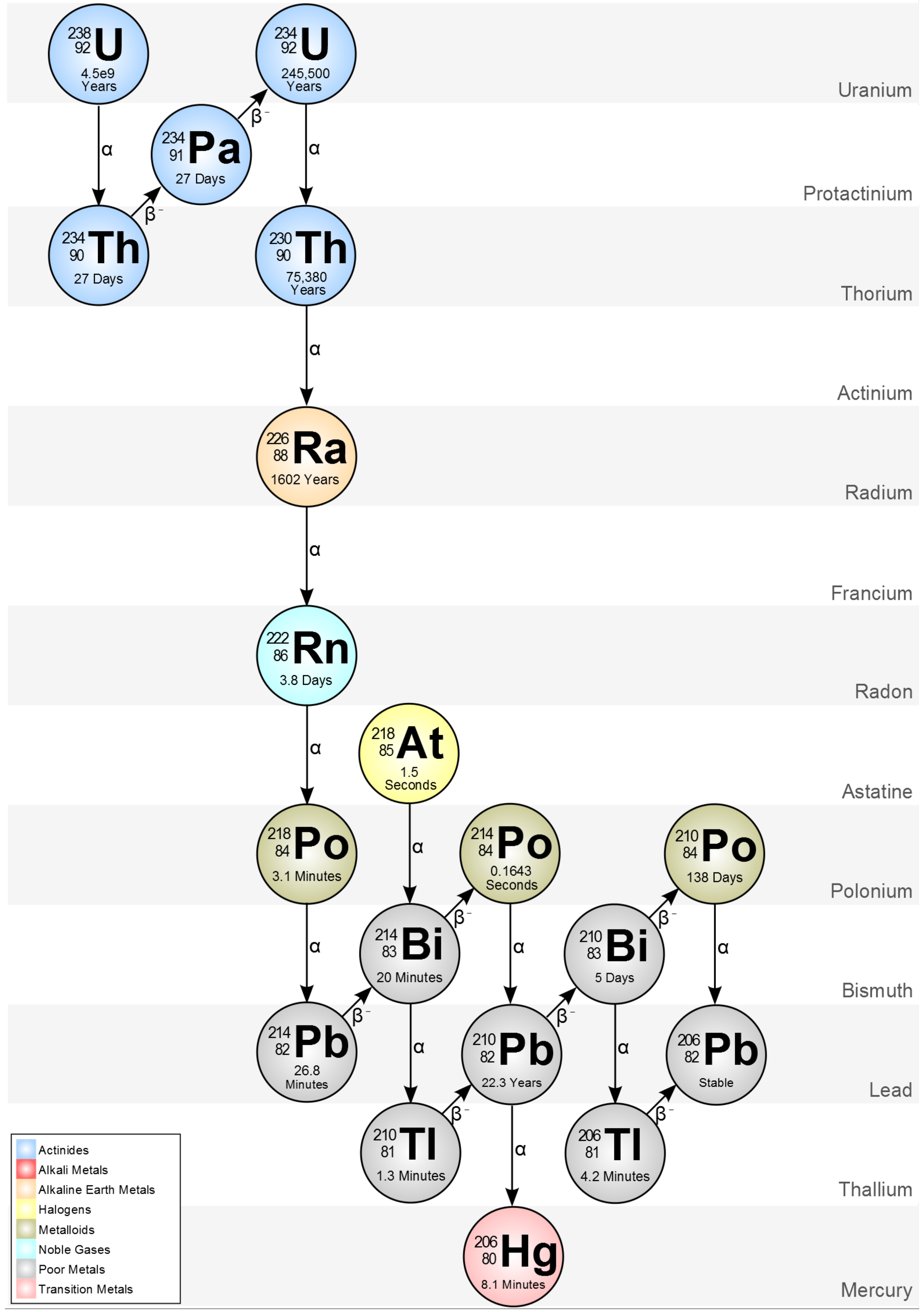


#การสลายตัวของกัมมันตรังสี

อนุกรมยูเรเนียม (Uranium series)

- นิวไคลด์ทุกตัวมีเลขมวลที่หารด้วย 4 แล้วเหลือเศษ 2 จึงอาจเรียกว่า อนุกรม 4n+2
- เริ่มจาก U-238 สลายตัวอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งได้นิวไคลด์เสถียรคือ Pb-206
- การสลายตัวตั้งแต่เริ่มจนสิ้นสุดจะให้ β 6 ครั้ง และ α 8 ครั้ง

$$^{238}_{92}\mathrm{U} \rightarrow\ ^{206}_{82}\mathrm{Pb}$$

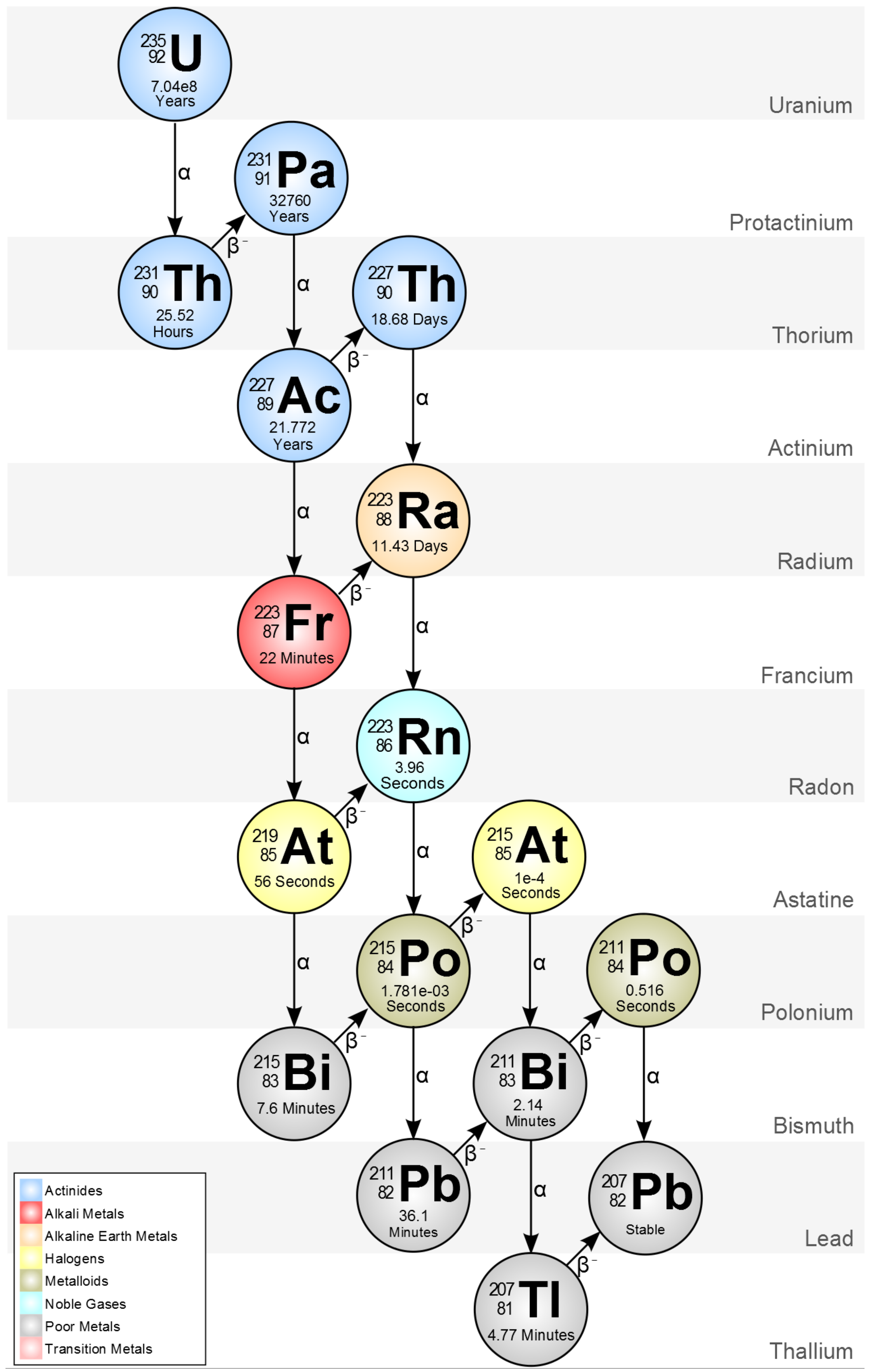


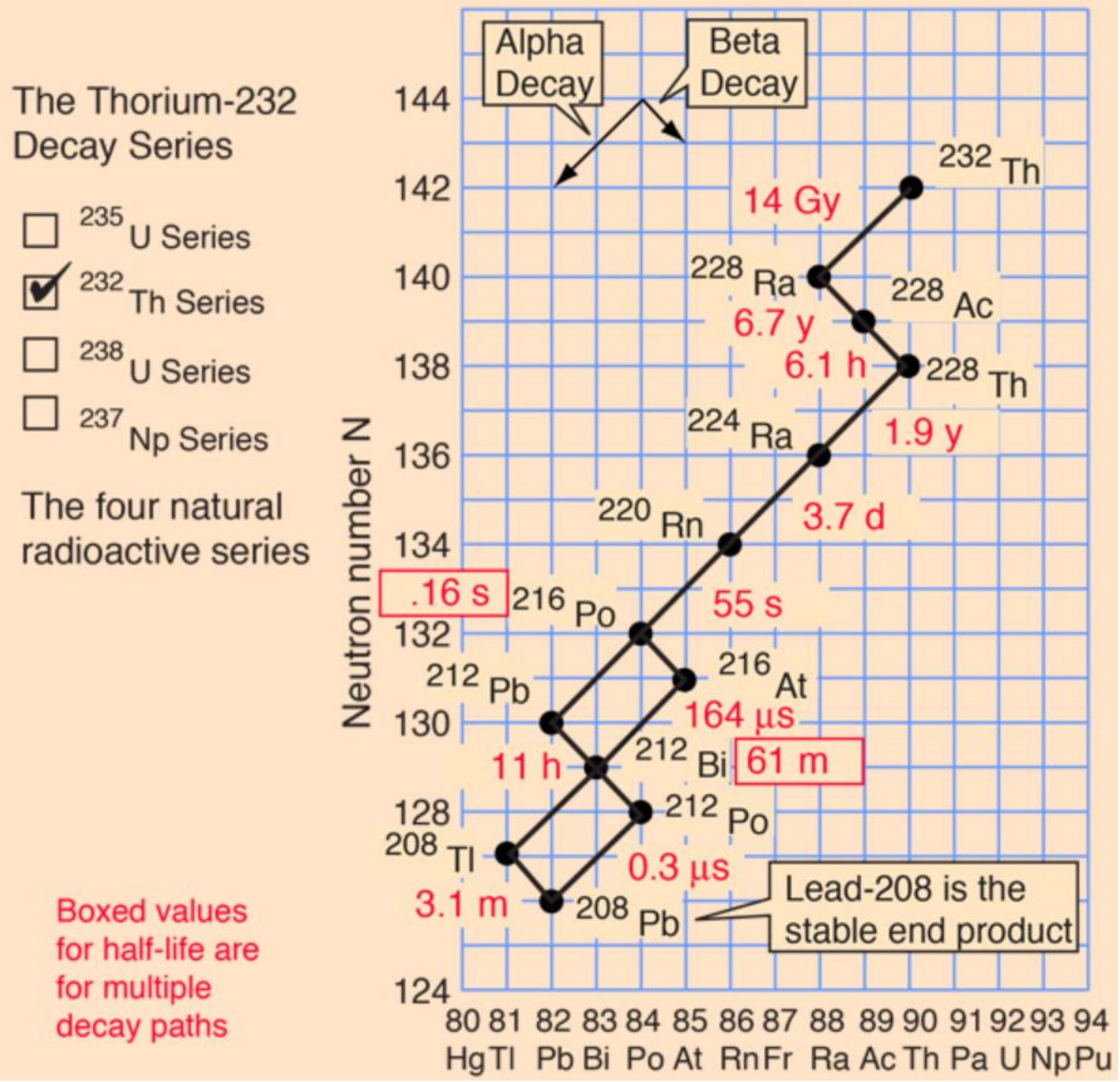
#การสลายตัวของกัมมันตรังสี

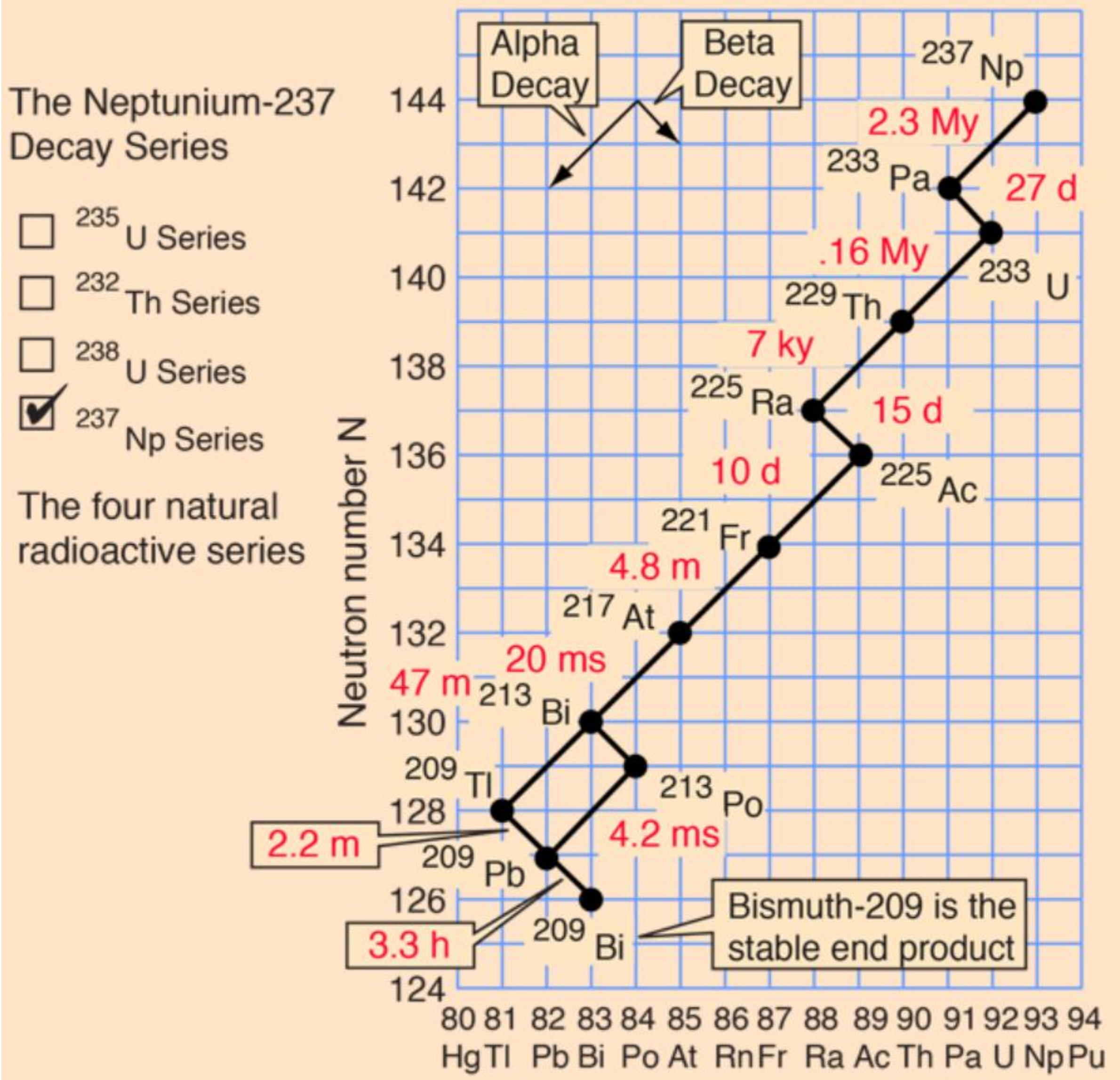
อนุกรมแอกทิเนียม (Actinium series) หรือ
อนุกรมแอกนิโน–ยูเรเนียม

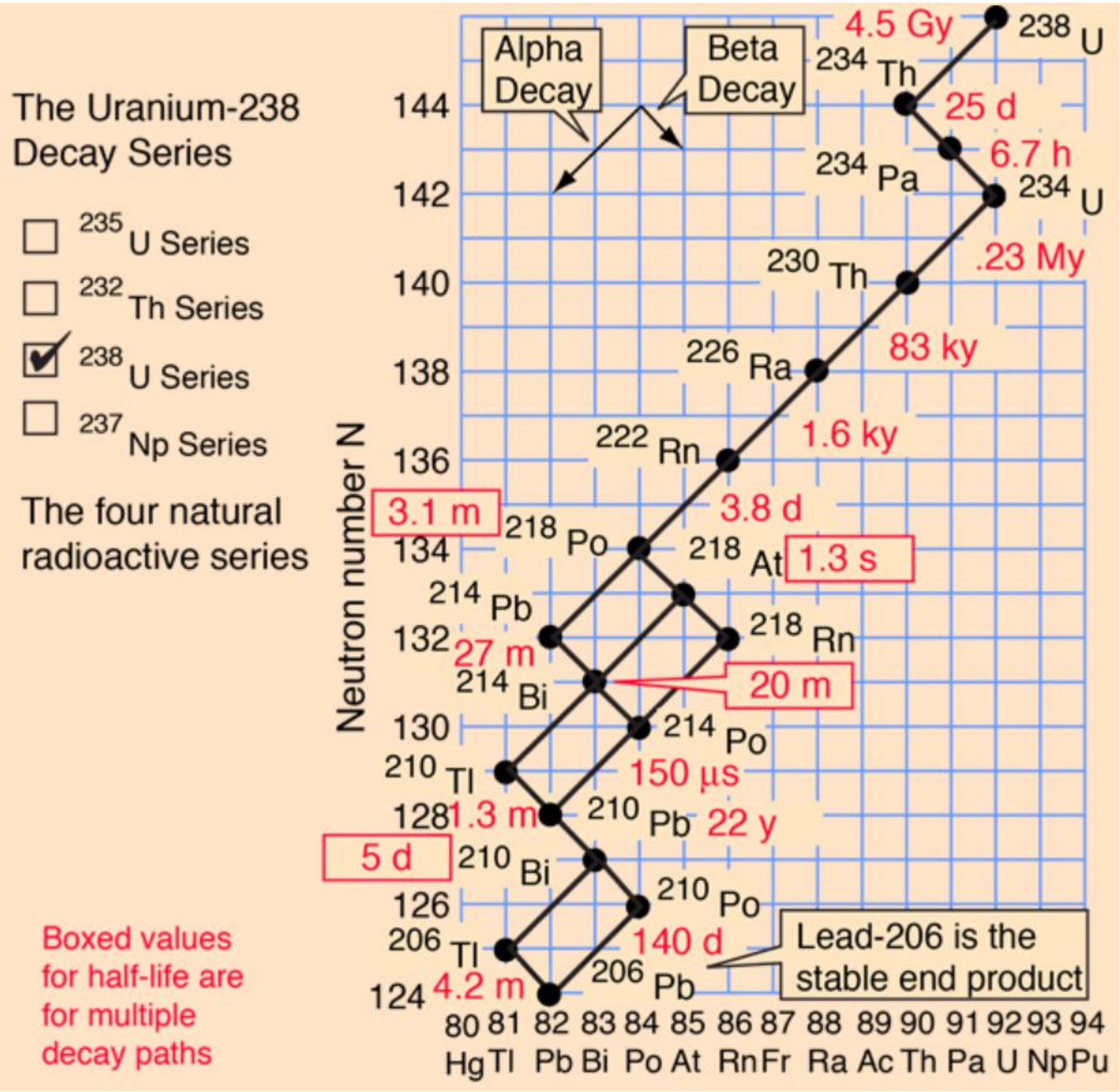
- นิวไคลด์ทุกตัวมีเลขมวลที่หารด้วย 4 แล้วเหลือเศษ 3 จึงอาจเรียกว่าอนุกรม 4n+3
- เริ่มจาก U–235 สลายตัวอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งได้นิวไคลด์เสถียรคือ Pb–207
- การสลายตัวตั้งแต่เริ่มจนสิ้นสุด จะให้ β 4 ครั้ง และ α 7 ครั้ง

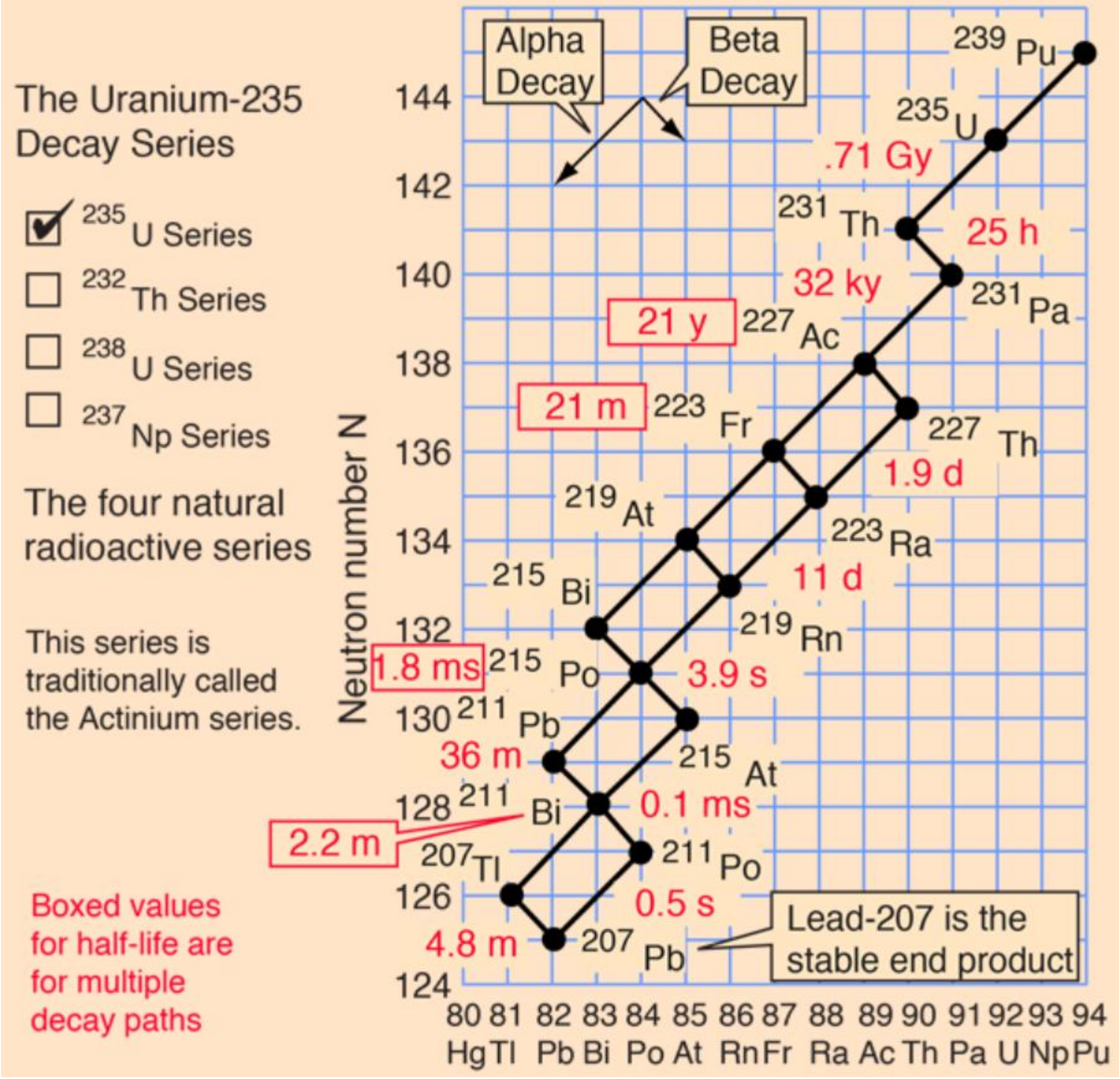
$$^{235}_{92}U \rightarrow \, ^{207}_{82}Pb$$





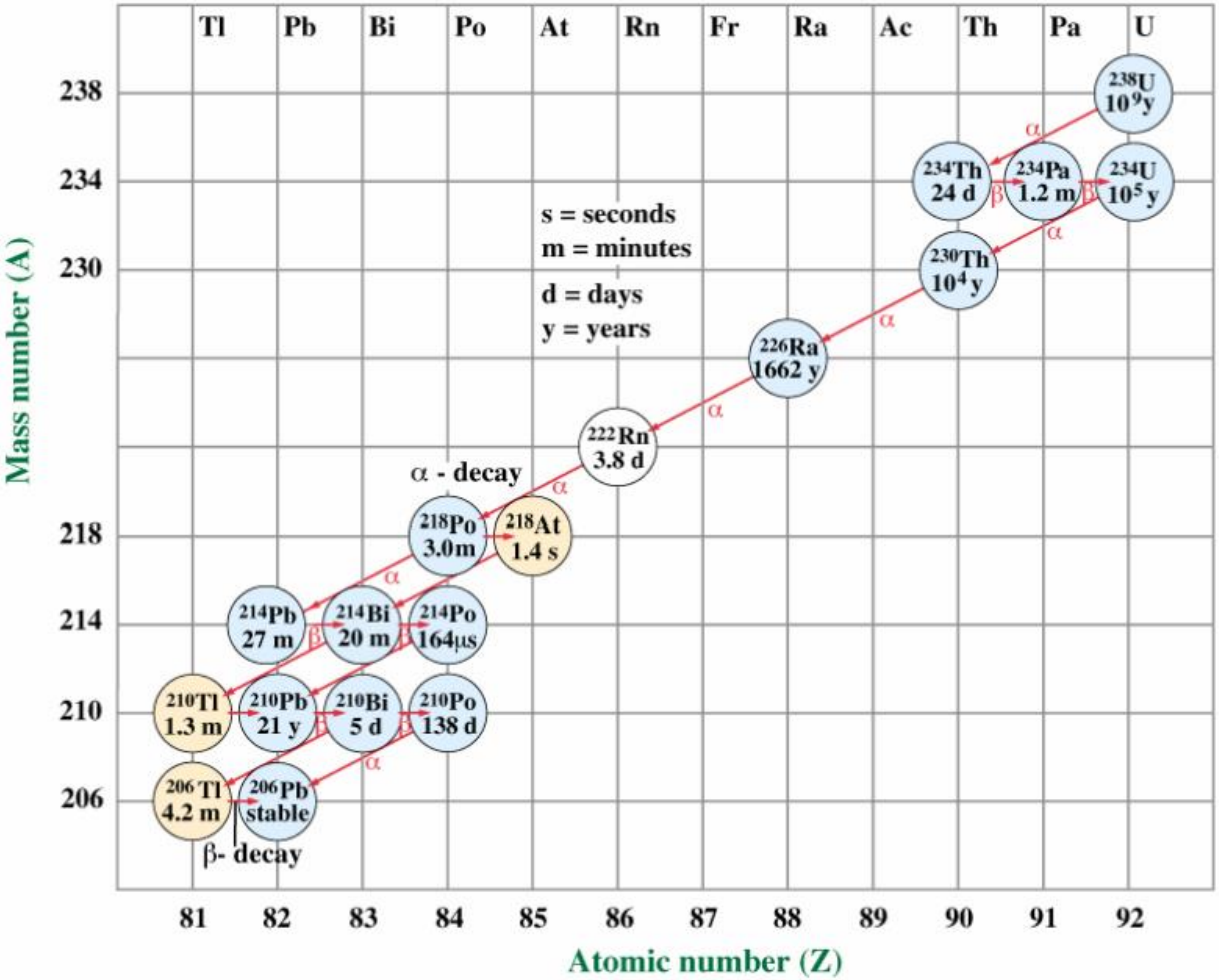






ที่มา: http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Nuclear/radser.html

อนุกรมการสลายตัวของอนุกรมยูเรเนียม และครึ่งชีวิต



ดัดแปลงจาก *General Chemistry* (p. 691), by D.D. Ebbing & S.D. Gammon, 2017, Cengage Learning

#ครึ่งชีวิต

ครึ่งชีวิต (half-life; $t_{1/2}$) คือระยะเวลาที่ธาตุกัมมันตรังสีสลายตัวจนเหลือจำนวนอะตอมครึ่งหนึ่งของตอนเริ่มต้น

ธาตุกัมมันตรังสีชนิดใดมีครึ่งชีวิตยาวนานจะมีการสลายตัวอย่างช้า ๆ แต่หากธาตุกัมมันตรังสีชนิดใดมีครึ่งชีวิตสั้นจะมีการสลายตัวอย่างรวดเร็วค่าครึ่งชีวิตของนิวไคลด์เริ่มต้นของทั้งสามอนุกรม ได้แก่ U-238, U-235 และ Th-232 มีค่าเท่ากับ 4.5×10^{9}, 7.0×10^{8} และ 1.4×10^{10} ปี ตามลำดับ

^{238}U decay chain

Nuclide	*Half-life*	*Ref.*
^{238}U	4.4683 ±0.0048 Byrs	1
^{234}Th	24.1 days	2
^{234}Pa	6.69 hours	2
^{234}U	245,250 ± 490 yrs	3
^{230}Th	75,690 ± 230 yrs	3
^{226}Ra	1599 ± 4 yrs	4
^{222}Rn	3.823 ± 0.004 days	4
^{218}Po	3.04 min.	2
^{218}At	1.6 sec.	2
^{218}Rn	35 msec.	2
^{214}Pb	26.9 min.	2
^{214}Bi	19.7 min.	2
^{214}Po	0.1637 msec.	2
^{210}Tl	1.3 min.	2
^{210}Pb	22.6 ± 0.1 yrs	4
^{210}Bi	5.01 days	2
^{210}Po	138.4 ± 0.1 days	4
^{206}Hg	8.2 min.	2
^{206}Tl	4.2 min.	2
^{206}Pb	stable	

^{235}U decay chain

Nuclide	*Half-life*	*Ref.*
^{235}U	0.70381 ± 0.00096 Byrs	1
^{231}Th	1.063 days	2
^{231}Pa	32,760 ± 220 yrs	5
^{227}Ac	21.77 ± 0.02 yrs	4
^{227}Th	18.72 days	2
^{223}Fr	22 min.	2
^{223}Ra	11.435 days	2
^{219}At	50 sec.	2
^{219}Rn	3.96 sec.	2
^{215}Bi	7.7 min.	2
^{215}Po	1.78 msec.	2
^{215}At	0.1 msec.	2
^{211}Pb	36.1 min.	2
^{211}Bi	2.14 min.	2
^{211}Po	0.516 sec.	2
^{207}Tl	4.77 min.	2
^{207}Pb	stable	

^{232}Th decay chain

Nuclide	*Half-life*	*Ref.*
^{232}Th	14.0100 Byrs	6
^{228}Ra	5.75 ± 0.03 yrs	4
^{228}Ac	6.15 hours	2
^{228}Th	1.912 ± 0.002 yrs	4
^{224}Ra	3.66 days	2
^{220}Rn	55.6 sec.	2
^{216}Po	0.145 sec.	2
^{212}Pb	10.64 hours	2
^{212}Bi	1.009 hours	2
^{212}Po	0.298 μsec.	2
^{208}Tl	3.053 min.	2
^{208}Pb	stable	

จาก *Introduction to U-series Geochemistry* (p. 14), by B. Bernard et al., 2003. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, https://doi.org/10.2113/0520001

#อัตราการลายตัวของกัมมันตรังสี

ธาตุกัมมันตรังสีสลายตัวและแผ่รังสีตลอดเวลา โดยไม่สามารถทำนายได้ว่าอะตอมกัมมันตรังสี (นิวไคลด์) อะตอมใดจะสลายตัวเมื่อใด เนื่องจากการสลายตัวเกิดขึ้นแบบสุ่ม

อัตราการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี หรือเรียกว่า กัมมันตภาพ (activity; A) แปรผันโดยตรงกับจำนวนอะตอมกัมมันตรังสี (N) ที่ปรากฏอยู่ ณ เวลานั้น ๆ

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

$$\int_{N_0}^{N} \frac{dN}{N} = \int_{t_0}^{t} -\lambda dt$$

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\lambda t$$

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

N_0 = กัมมันตภาพรังสี ณ เวลาเริ่มต้น (t=0)
N = กัมมันตภาพรังสี ณ เวลา t ใด ๆ
λ = ค่าคงที่ของการสลายตัว

ครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$)

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}$$

#ตัวอย่าง

ถ้าเริ่มต้นมี Sr-90 1.000 g และผ่านไป 2.00 ปี เหลือ Sr-90 อยู่ 0.953 g จงคำนวณครึ่งชีวิต และคำนวณปริมาณ Sr-90 ที่เหลือเมื่อเวลาผ่านไป 5.00 ปี

ต้องหาค่า k จากการสลายตัวเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

$$\ln[A]_t = \ln[A]_0 - kt$$

$$\ln(0.953) = \ln(1.000) - k(2.0)$$

$$k = \frac{-\ln(0.953) - \ln(1.000)}{2.00 \text{ Yr}}$$

$$= 2.41\text{x}10^{-2} \text{ Yr}^{-1}$$

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{2.41\text{x}10^{-2} \text{ Yr}^{-1}}$$

$$= 28.8 \text{ Yr}^{-1}$$

$$\ln[A]_t = \ln[A]_0 - kt$$

$$\ln[A]_t = \ln(1.000) - (2.41\text{x}10^{-2})(5.00)$$

$$= -0120$$

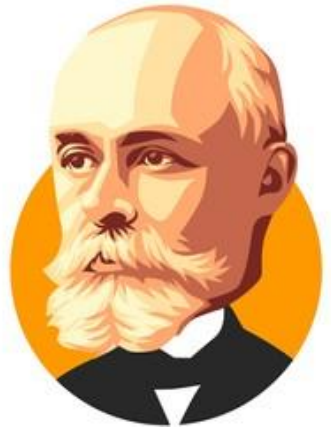
ทำ exp.

$$[A]_t = e^{-0120} = 0.887 \text{ g}$$

#หน่วยวัดทางรังสี

	SI unit	Conventional unit
Radioactivity*[1]	Becquerel (Bq)	Curie (Ci)
	1 Bq = 1 disintegration/sec 1 Ci = 3.7×10^{10} disintegration/sec = 37 GBq	
Absorbed dose*[2]	gray (Gy)	Rad, Rd
	1 Gy = 1 J/kg = 100 rad	
Effective dose*[3]	sievert (Sv)	rem (Roentgen equivalent for man)
	1 Sv = 100 rem 1 Sv = 1 Gy	
Linear energy transfer	Newton (N)	keV/μm
	1 N = 1 J/m 1 keV/μm = 1.6×10^{-13} N	

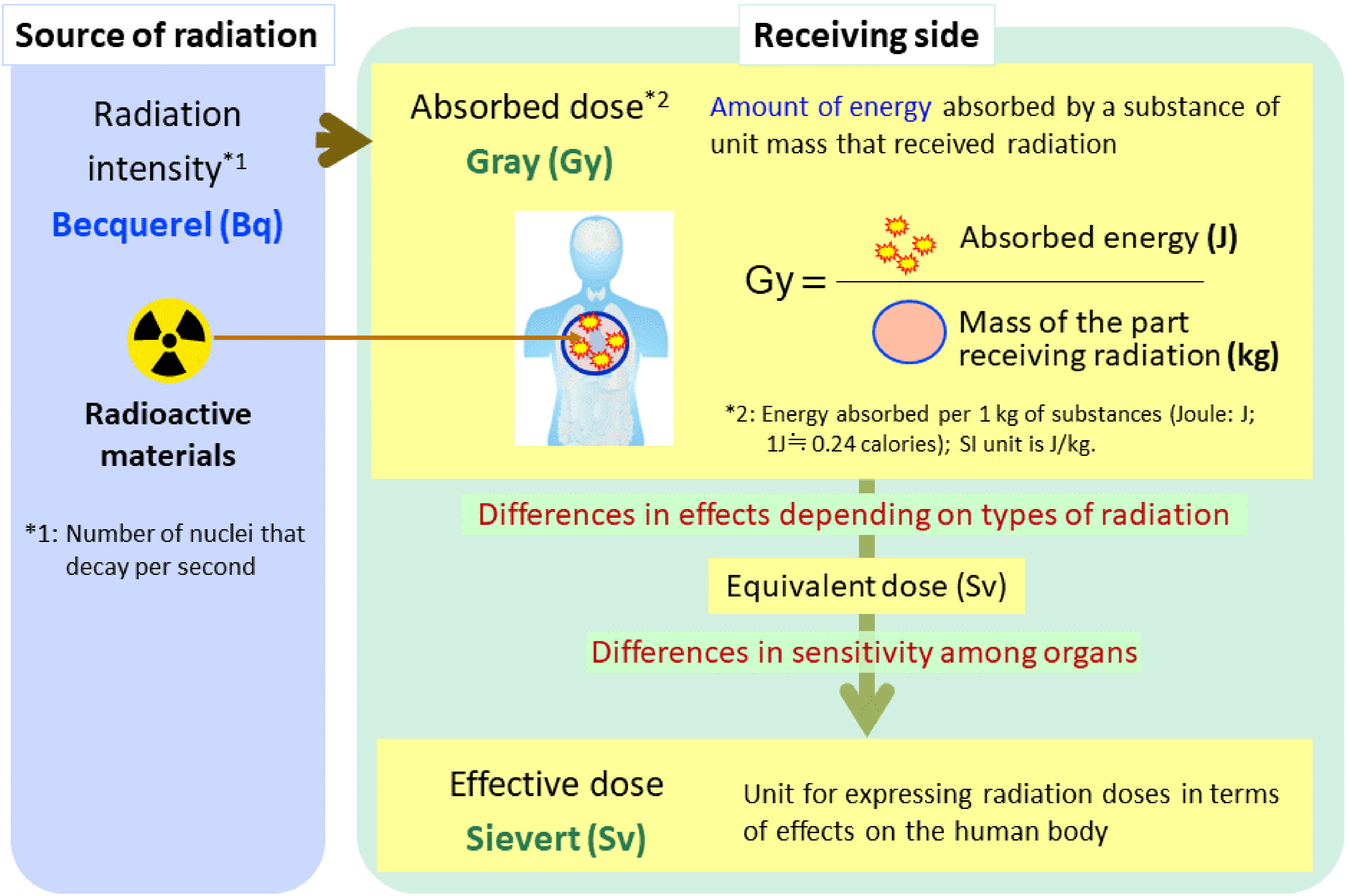
*[1] ปริมาณสารกัมมันตรังสี (radioactivity) เป็นวัดการสลายตัวของนิวเคลียสให้รังสีออกมาเป็นจำนวนครั้งต่อวินาที (disintegration per second)
*[2] ปริมาณรังสีดูดกลืน (absorbed dose) หน่วย Gy หรือ Rad
*[3] ผลกระทบของรังสีที่เกิดกับร่างกายมนุษย์ (effective dose) หน่วย rem หรือ Sv
*[4] ปริมาณรังสีสมมูลที่บุคคลได้รับ (dose equivalent) หน่วย rem หรือ Sv



Becquerel (Bq)
1 Bq = 1 dis./sec

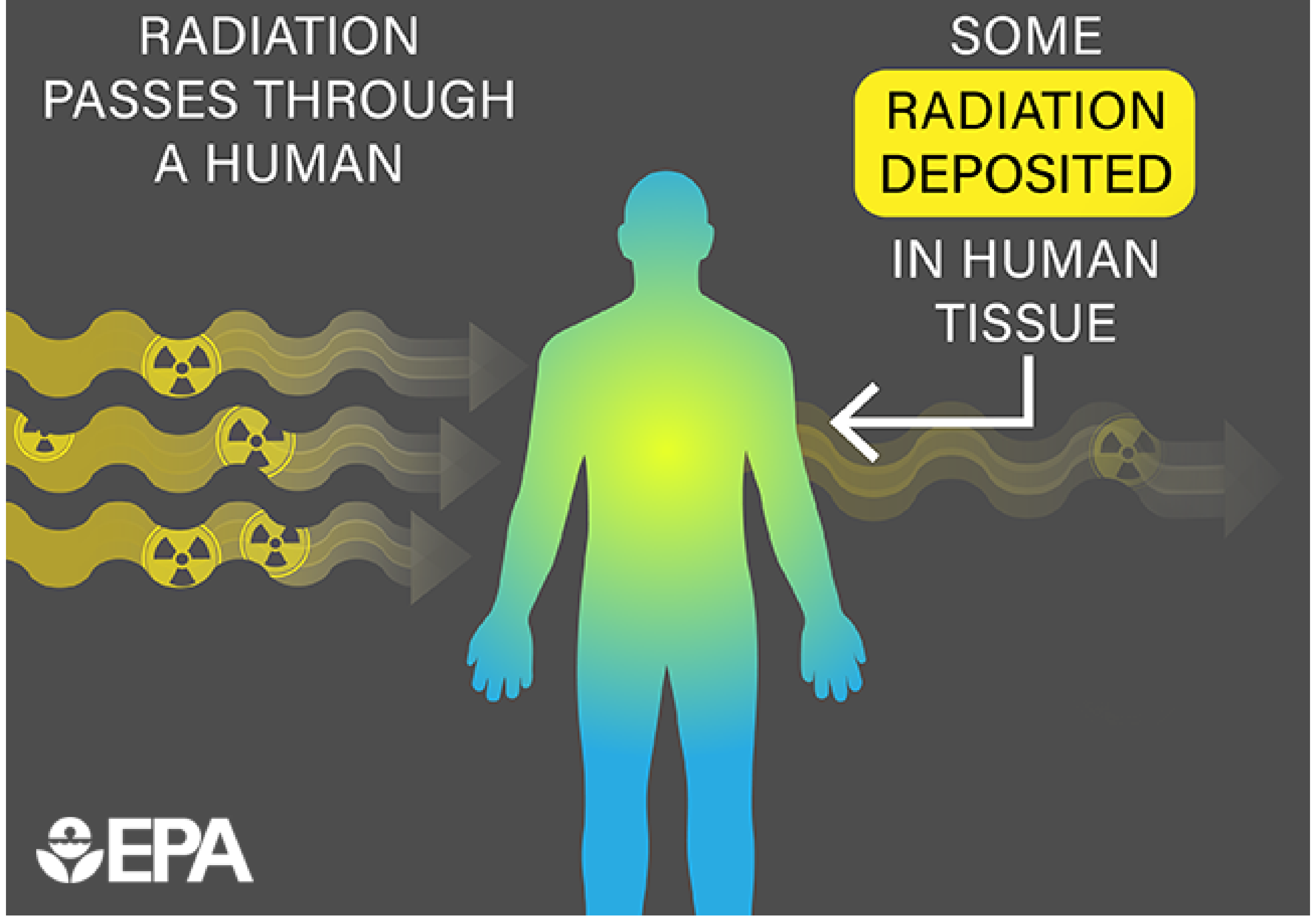
Curie (Ci)
1 Ci = 3.7×10^{10} dis./sec

Rutherford (Rd)
1 Rd = 10^{6} dis./sec



Absorbed Dose

Absorbed dose measures ionizing **radiation absorbed**.



Using Absorbed Dose

Common Use	Measuring dose from medical equipment
Units	Gray (Gy), Rad (rad)

Examples

Dose to the lens of eyes from a brain CT scan
≈60 mGy or 6 rad

Dose to the thyroid from a chest CT scan
≈10 mGy or 1 rad

Effective Dose

Effective dose indicates radiation **health effects** for a population.

ABSORBED DOSE → FACTOR IN

TYPE OF RADIATION	ORGAN SENSITIVITY
α alpha, β beta, γ gamma, etc...	lungs, colon, stomach, etc...

→ EFFECTIVE DOSE

EPA

Using Effective Dose

Common Use	Used to set protective levels for groups of people.
Units	Sievert (Sv), Rem (rem)

Examples

Worker radiation limit
50 mSv or 5 rem over one year

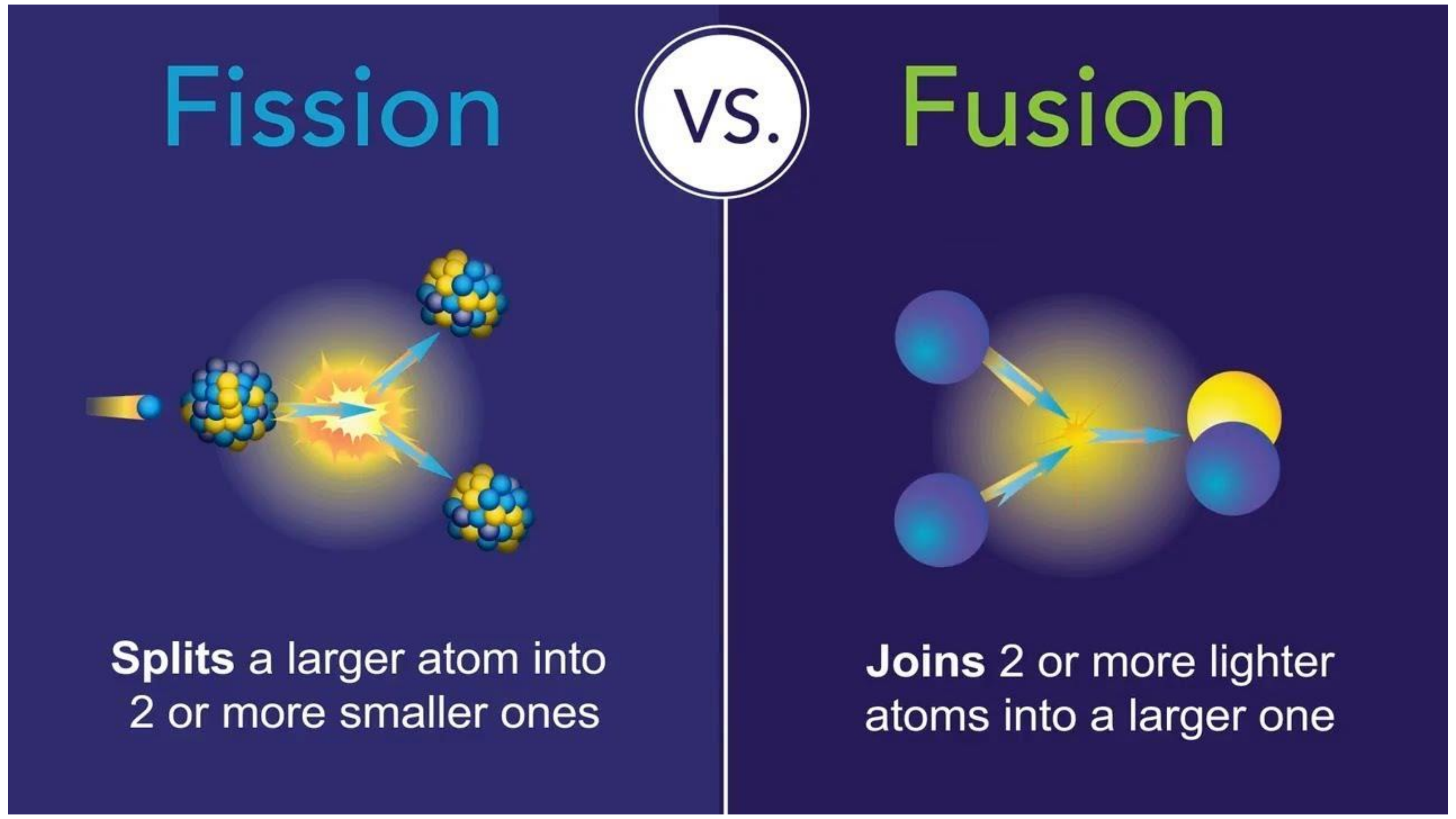
Evacuate/shelter in place guidance for an emergency
more than 10–50 mSv or 1-5 rem over four days

EPA

ปฏิกิริยานิวเคลียร์

ปฏิกิริยาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในองค์ประกอบของนิวเคลียส ซึ่งเกิดจากการสลายตัวตามธรรมชาติของนิวไคลด์กัมมันตรังสีและให้พลังงานออกมา

$$^{235}_{92}U \rightarrow ^{231}_{90}Th + ^{4}_{2}He$$



โดยทั่วไปปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดจากการชนกันระหว่างนิวเคลียสกับอนุภาค เช่น ปฏิกิริยา

$$X + a \rightarrow Y + b$$

เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ย่อ X(a,b)Y เรียกปฏิกิริยานี้ว่า

"ปฏิกิริยา (a, b) ของนิวเคลียส X"

เมื่อ X คือ นิวเคลียสของธาตุที่เป็นเป้า
a คือ อนุภาคที่วิ่งมาชนเป้า
b คือ อนุภาคที่เกิดขึ้นใหม่ (ปล่อยออกมา)
Y คือ นิวเคลียสของธาตุที่เกิดขึ้นใหม่

$$^{24}_{12}Mg + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{27}_{14}Si + ^{1}_{0}n$$

$$^{24}_{12}Mg\ (\alpha,n)\ ^{27}_{14}Si$$

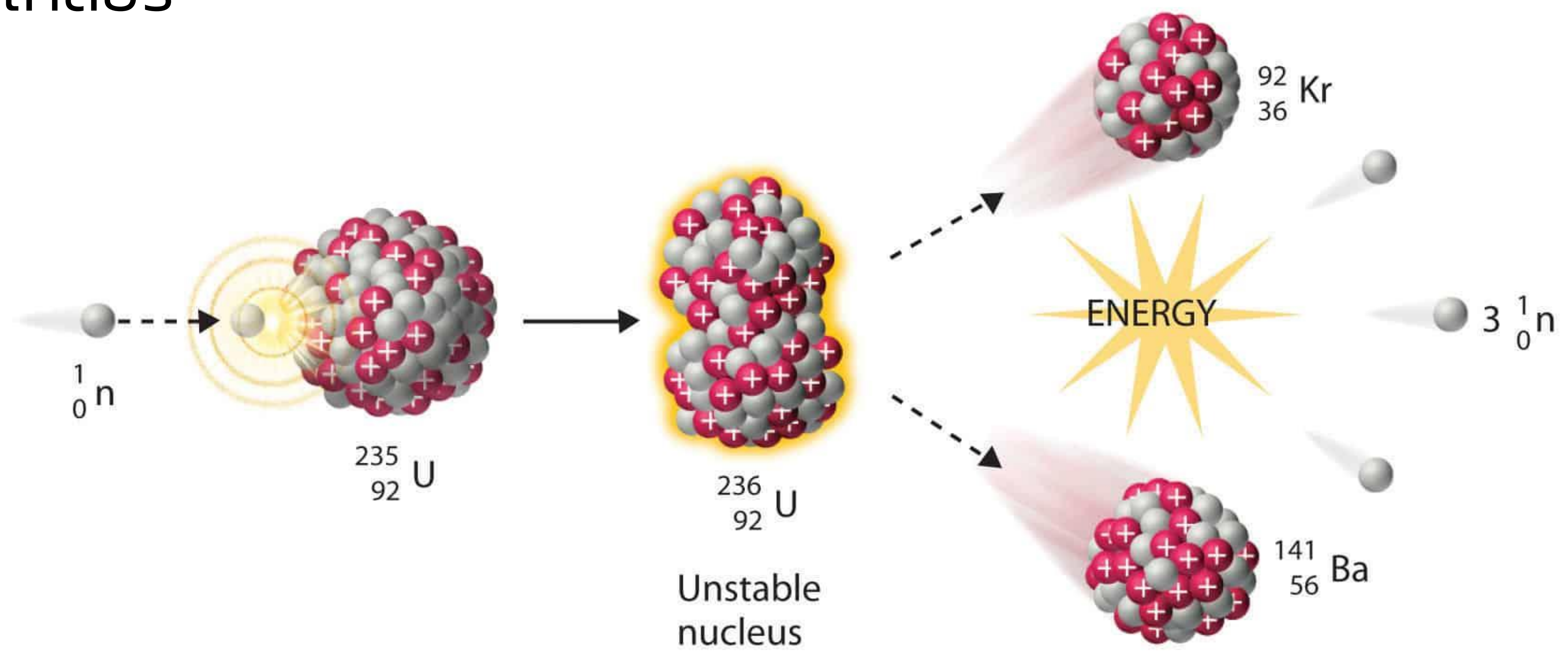
#ปฏิกิริยาฟิชชัน (fission reaction)

การยิงนิวตรอนช้าเข้าชนนิวเคลียสของยูเรเนียม

- ทำให้นิวเคลียสของยูเรเนียมแตกออกเป็นสองส่วนที่เบากว่ายูเรเนียม และเกิดนิวตรอนใหม่ขึ้น
- มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีแกมมาและรังสีชนิดอื่น ๆ
- นิวตรอนใหม่จะเข้าชนนิวเคลียสทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่เป็นกระบวนการนิวเคลียร์ฟิชชันที่ต่อเนื่อง

$$^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{143}_{56}Ba + {}^{90}_{36}Kr + 3{}^{1}_{0}n + 200\ MeV$$

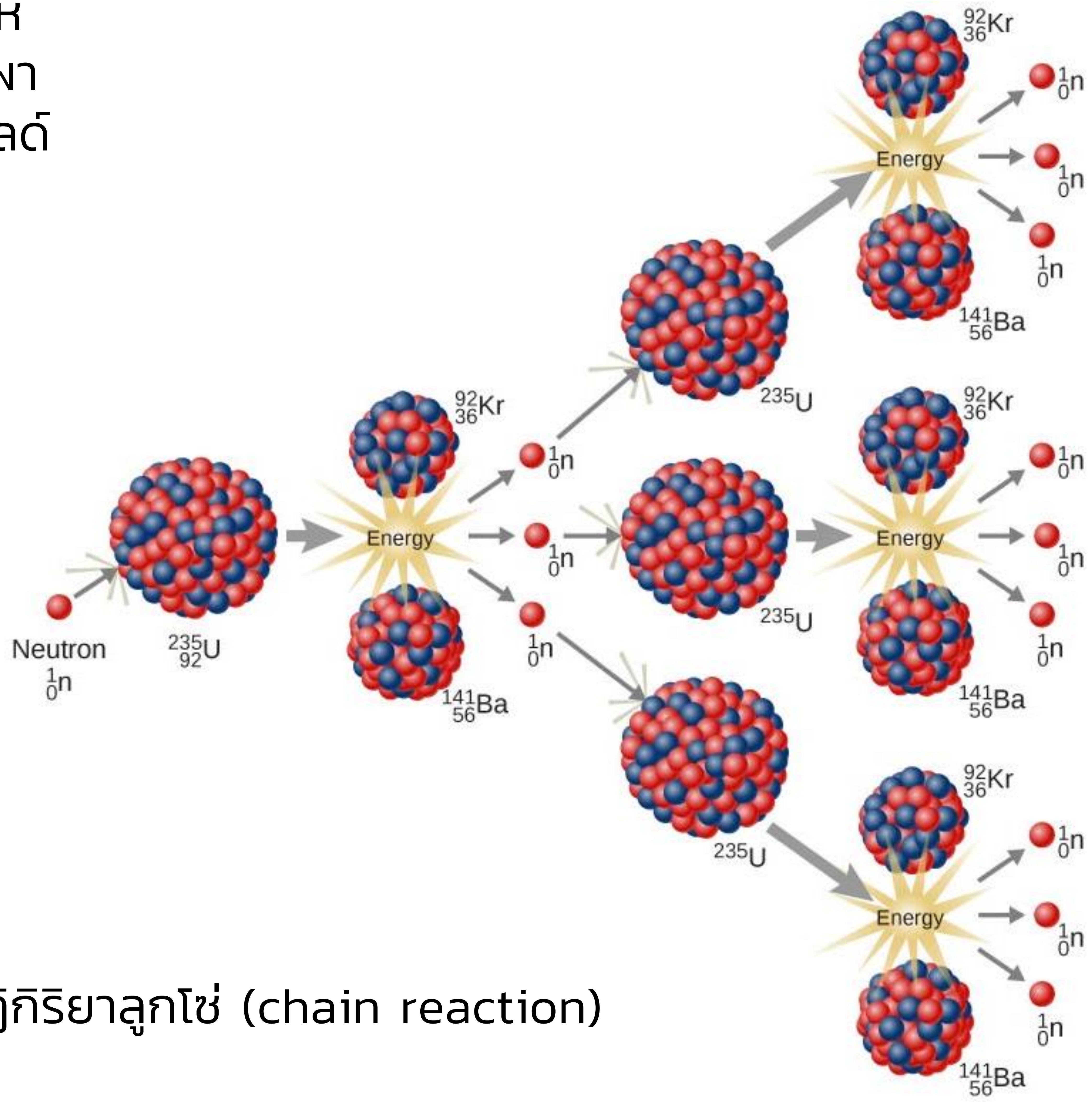
ปฏิกิริยาฟิชชันเกิดขึ้นช้า ๆ และเกิดอย่างต่อเนื่อง เช่น นิวตรอนที่มีพลังงาน 1 eV วิ่งชน U-235



หาก U-235 จำนวน 1 กรัมทำปฏิกิริยาฟิชชันจะให้พลังงานสูงเทียบเท่ากับพลังงานที่เกิดจากการเผาถ่านหินถึง 3 ตัน ถ้าผลผลิตฟิชชันที่ได้เป็นนิวไคลด์ไม่เสถียร (ธาตุกัมมันตรังสี) จะเกิดการแผ่รังสีต่อไปจนได้นิวไคลด์เสถียรที่มีเสถียรภาพ

$$^{90}_{36}Kr \xrightarrow{\beta^-} {}^{90}_{37}Rb \xrightarrow{\beta^-} {}^{90}_{38}Sr \xrightarrow{\beta^-} {}^{90}_{39}Y \xrightarrow{\beta^-} {}^{90}_{40}Zr$$

(ผลผลิตฟิชชัน) (เสถียร)



ปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction)

#ปฏิกิริยาฟิชชัน (fission reaction)

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U \xrightarrow{85\%} ^{141}_{56}Ba + ^{92}_{36}Kr + 3^{1}_{0}n + 202.5\ MeV$$

Uranium (Natural) — Uranium (unstable)

$$^{233}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{234}_{92}U \xrightarrow{94\%} ^{94}_{38}Sr + ^{137}_{54}Xe + 3^{1}_{0}n + 197.9\ MeV$$

Uranium (Synthetic) — Uranium (unstable)

$$^{239}_{94}Pu + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{240}_{94}Pu \xrightarrow{73\%} ^{103}_{40}Zr + ^{134}_{54}Xe + 3^{1}_{0}n + 207.1\ MeV$$

Plutonium (Synthetic) — Plutonium (unstable)

คำนวณพลังงานที่ปล่อยออกมาของปฏิกิริยาฟิชชัน U-235

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{141}_{56}Ba + ^{92}_{36}Kr + 3^{1}_{0}n + E$$

มวลของ ^{235}U = 235.0439 amu
มวลของ ^{141}Ba = 140.9139 amu
มวลของ ^{92}Kr = 91.89730 amu

mass defect หาได้จาก $\Delta m = \Sigma(nm_{initial}) - \Sigma(nm_{products})$

$$\Delta m = [m(^{235}_{92}U)+m(^{1}_{0}n)] - [m(^{143}_{56}Ba)+m(^{90}_{36}Kr)+3m(^{1}_{0}n)$$

$$= [235.0439 + 1.008665] - [140.9193 + 91.89730 + (3x1.008665)]$$

$$= 0.21537 \text{ amu}$$

ดังนั้น $0.21537 \text{ amu} \times 1.6605\times10^{-27} \text{ kg/amu} = 3.5751\times10^{-28} \text{ kg}$

จากสมการ $E = mc^2$

$$= (3.5751\times10^{-28} \text{ kg})(3.00\times10^{8} \text{ m/s})^2$$

$$= 3.22\times10^{-11} \text{ J}$$

$$E = (3.22\times10^{-11} \text{ J})/(1.6021\times10^{-19} \text{ J})$$

$$= 2.01\times10^{8} \text{ eV}$$

1 amu = 931.5 MeV ได้

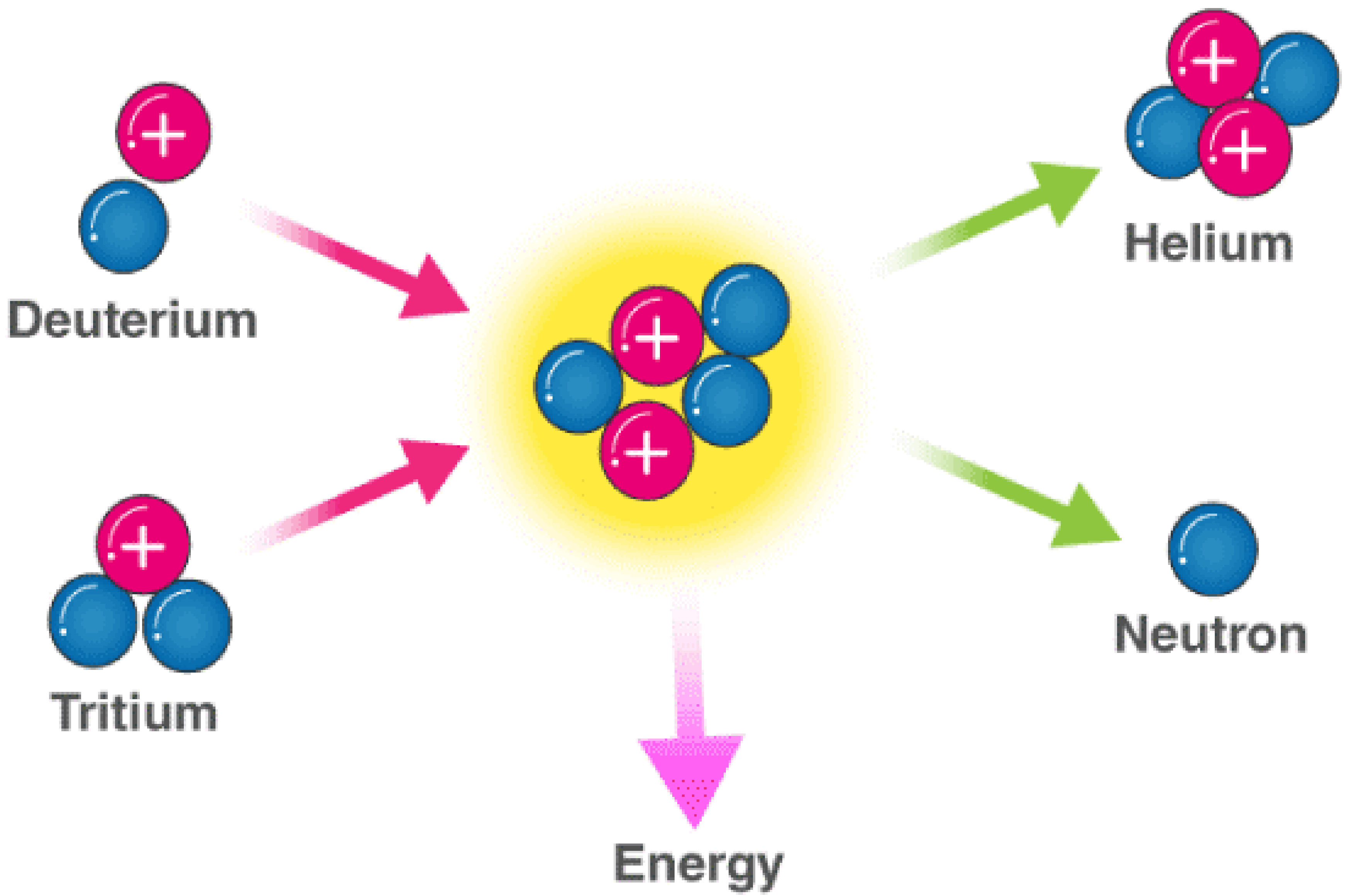
$$E = 0.21537 \text{ amu} \times 931.5 \text{ MeV}$$

$$= 2.01\times10^{2} \text{ MeV}$$

#ปฏิกิริยาฟิวชัน (fusion reaction)

ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่นิวเคลียสของธาตุเบาสองชนิดหลอมรวมกันเป็นนิวเคลียสที่หนักกว่า ทำให้มีพลังงานยึดเหนี่ยวเพิ่มและนิวเคลียสมีเสถียรภาพมากขึ้น พร้อมกับคายพลังงานมหาศาล โดยพลังงานที่คายออกมามีค่ามากกว่าพลังงานที่ได้จากปฏิกิริยาฟิชชันของนิวเคลียสที่มีจำนวนเท่ากัน

$$4\,{}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + 2\,{}^{0}_{+1}e + 24.6\ MeV$$



คำนวณพลังงานที่ปล่อยออกจากปฏิกิริยาฟิวชัน

$$^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{1}H + E$$

มวลของ ^{1}H = 1.0078 amu

มวลของ ^{2}H = 2.0141 amu

มวลของ ^{3}H = 3.0160 amu

มวลของ ^{4}He = 4.0026 amu

1 amu = 1.66×10^{27} kg

1 eV = 1.6021×10^{-19} J

$$\Delta m = [m(^{2}_{1}H)+m(^{3}_{1}H)] - [m(^{4}_{2}He)+m(^{1}_{1}H)$$

$$= [2.0141 + 3.0160] - [4.0026 + 1.0078] = 0.001970 \text{ amu}$$

amu $\rightarrow$ kg

$$= (0.001970 \text{ amu})(1.6605\times10^{-27} \text{ kg/amu})$$

$$= 3.270\times10^{-29} \text{ kg}$$

$$E = \Delta mc^{2}$$

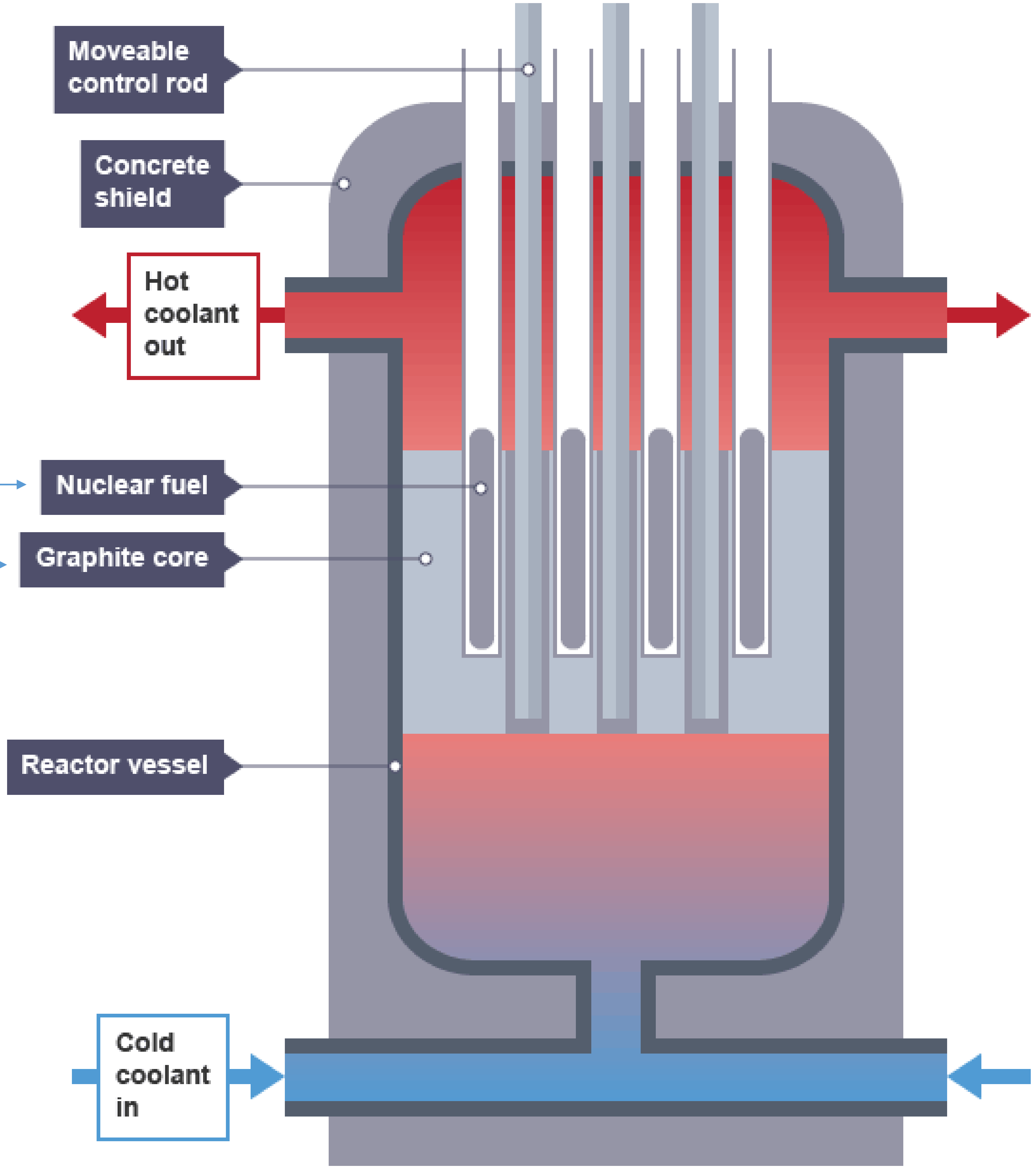
$$E = (3.270\times10^{-29} \text{ kg})(3.00\times10^{8} \text{ m/s})^{2}$$

$= 2.94\times10^{-12}$ J หรือ 18.4 MeV

ประโยชน์ของเคมีนิวเคลียร์และกัมมันตภาพรังสี

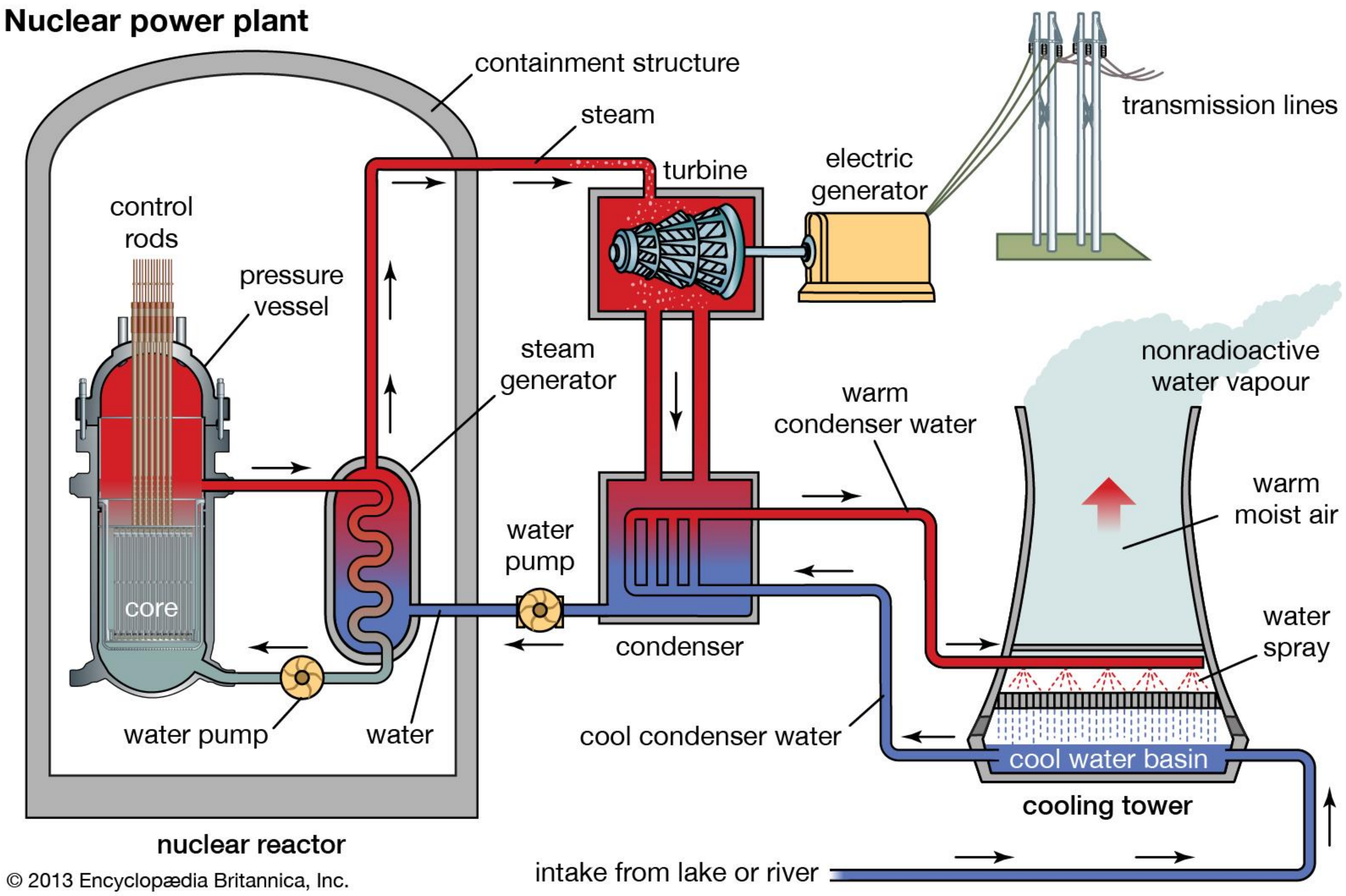
เตาปฏิกรณ์ปรมาณู (nuclear reactor) เป็นเครื่องมือมือสำหรับควบคุมปฏิกิริยาลูกโซ่ของปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน

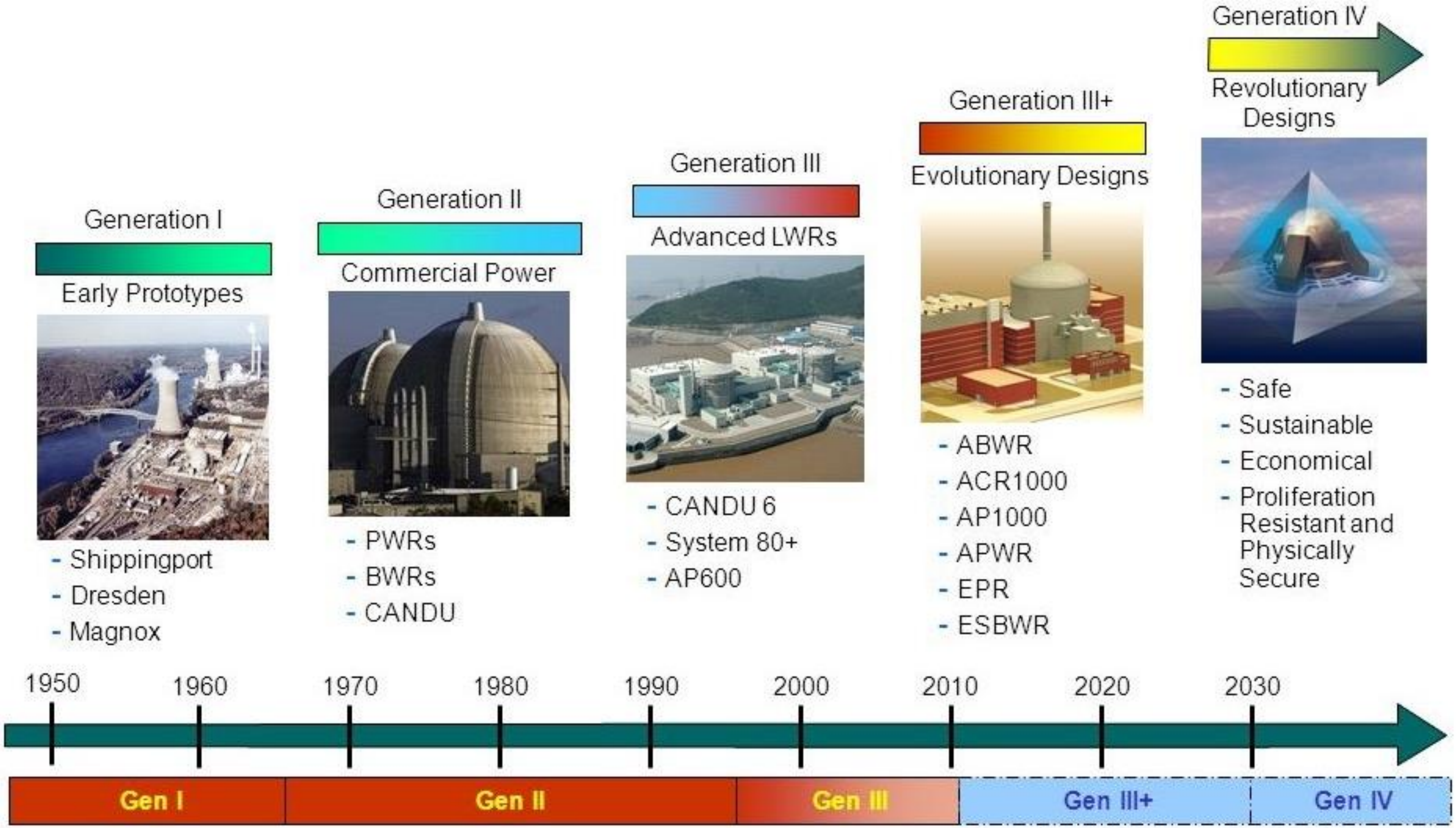
- เชื้อเพลิงปรมาณู (fuel element) นิยมใช้ U-235 หรือ U-238 รวมกับ U-235
- โมเดอเรเตอร์ (moderator) เป็นตัวลดความเร็วของอนุภาคนิวตรอนให้เป็นนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำ
- แท่งควบคุมนิรภัย (control rod) ใช้ควบคุมปฏิกิริยาฟิชชันให้เกิดมากขึ้นหรือน้อยลง ด้วยการควบคุมจำนวนนิวตรอนซึ่งเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยา
- ตัวระบายความร้อน (coolant)
- ส่วนคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ทำหน้าที่เป็นเครื่องกำบังรังสี ป้องกันกัมมันตภาพรังสี (shielding)



โรงไฟฟ้านิวเคลียร์

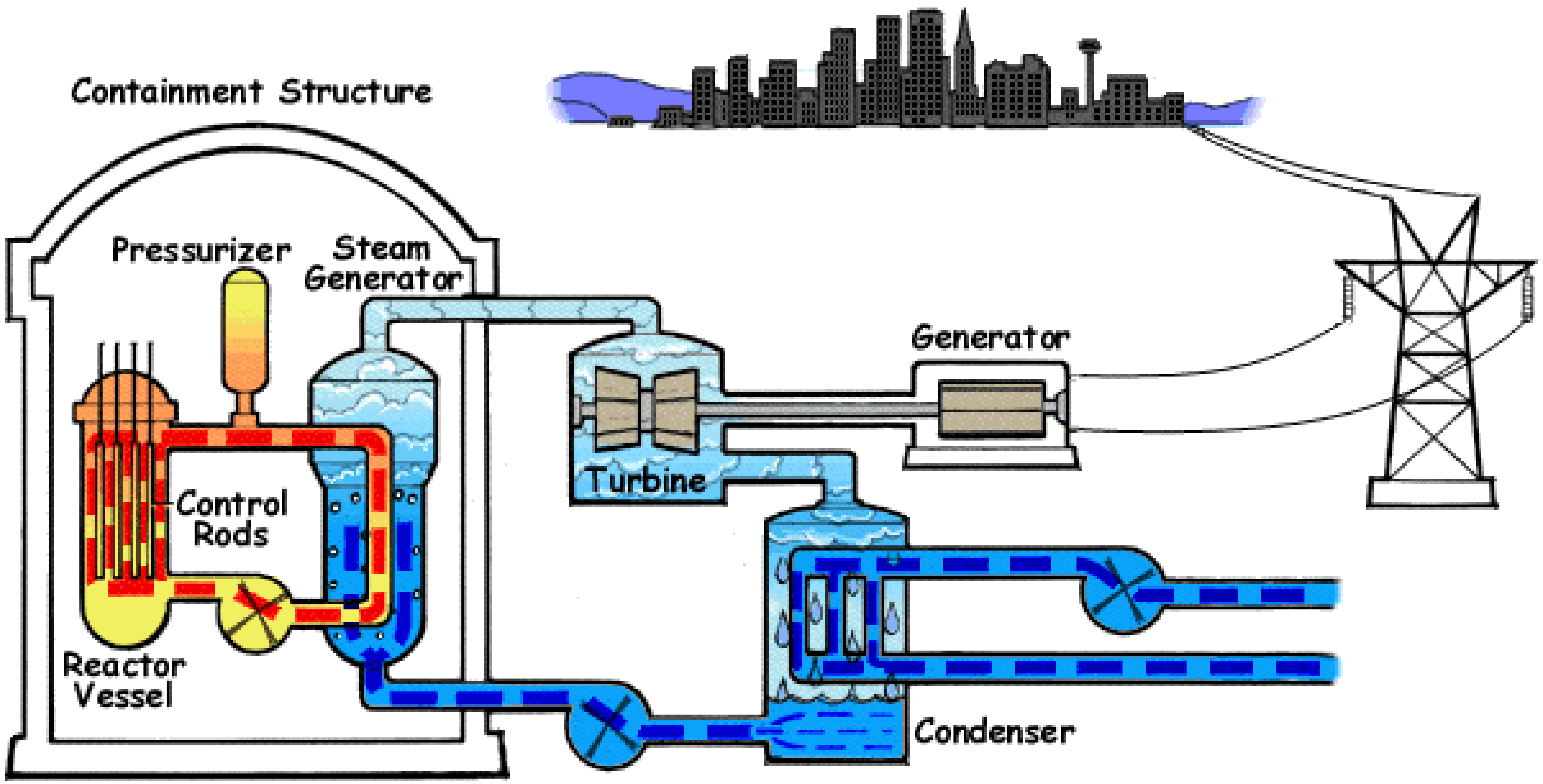
(เตาปฏิกรณ์ + ระบบผลิตไอน้ำ + ระบบผลิตกระแสไฟฟ้า + ระบบหล่อเย็น)




Generation I
Early Prototypes
- Shippingport
- Dresden
- Magnox
Generation II
Commercial Power
- PWRs
- BWRs
- CANDU
Generation III
Advanced LWRs
- CANDU 6
- System 80+
- AP600
Generation III+
Evolutionary Designs
- ABWR
- ACR1000
- AP1000
- APWR
- EPR
- ESBWR
Generation IV
Revolutionary Designs
- Safe
- Sustainable
- Economical
- Proliferation Resistant and Physically Secure
1950
1960
1970
1980
1990
2000
2010
2020
2030
Gen I
Gen II
Gen III
Gen III+
Gen IV

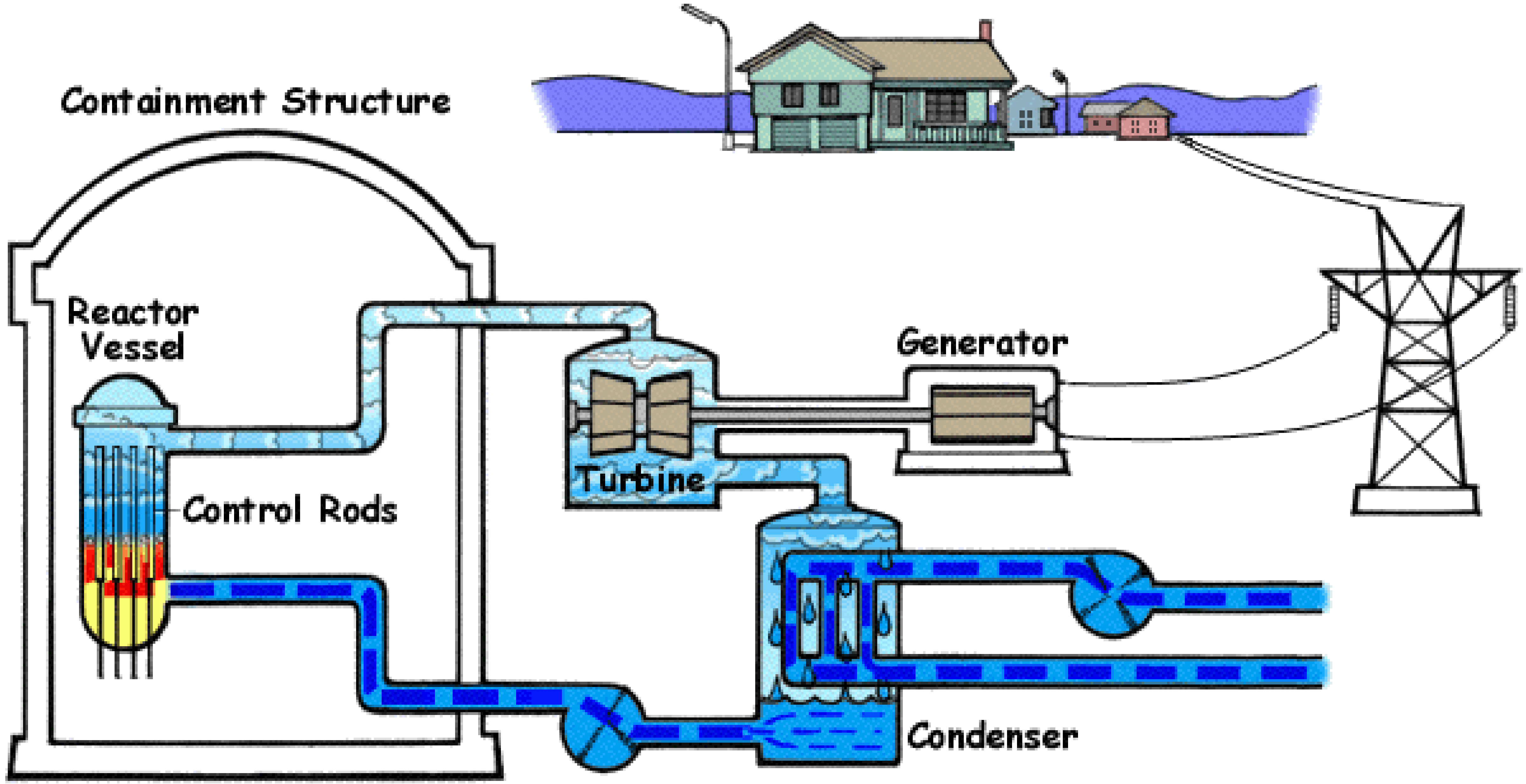
#เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบใช้น้ำความดันสูง (pressurized water reactor; PWR)

- ใช้แท่งเชื้อเพลิงประมาณ 200-300 แท่งต่อหนึ่งมัด เรียงในแนวตั้งอยู่ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์
- มีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำภายใต้ความดันสูง (150 เท่าของความดันบรรยากาศ) น้ำจึงจะไม่เดือด ไหลผ่านแกนเครื่องปฏิกรณ์เป็นวงจรแรก และทำหน้าที่เป็นสารหน่วงด้วย
- มีระบบระบายความร้อนวงจรที่สอง มีความดันต่ำกว่าจึงทำให้น้ำเดือด



#เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำเดือด (boiling water reactor; BWR)

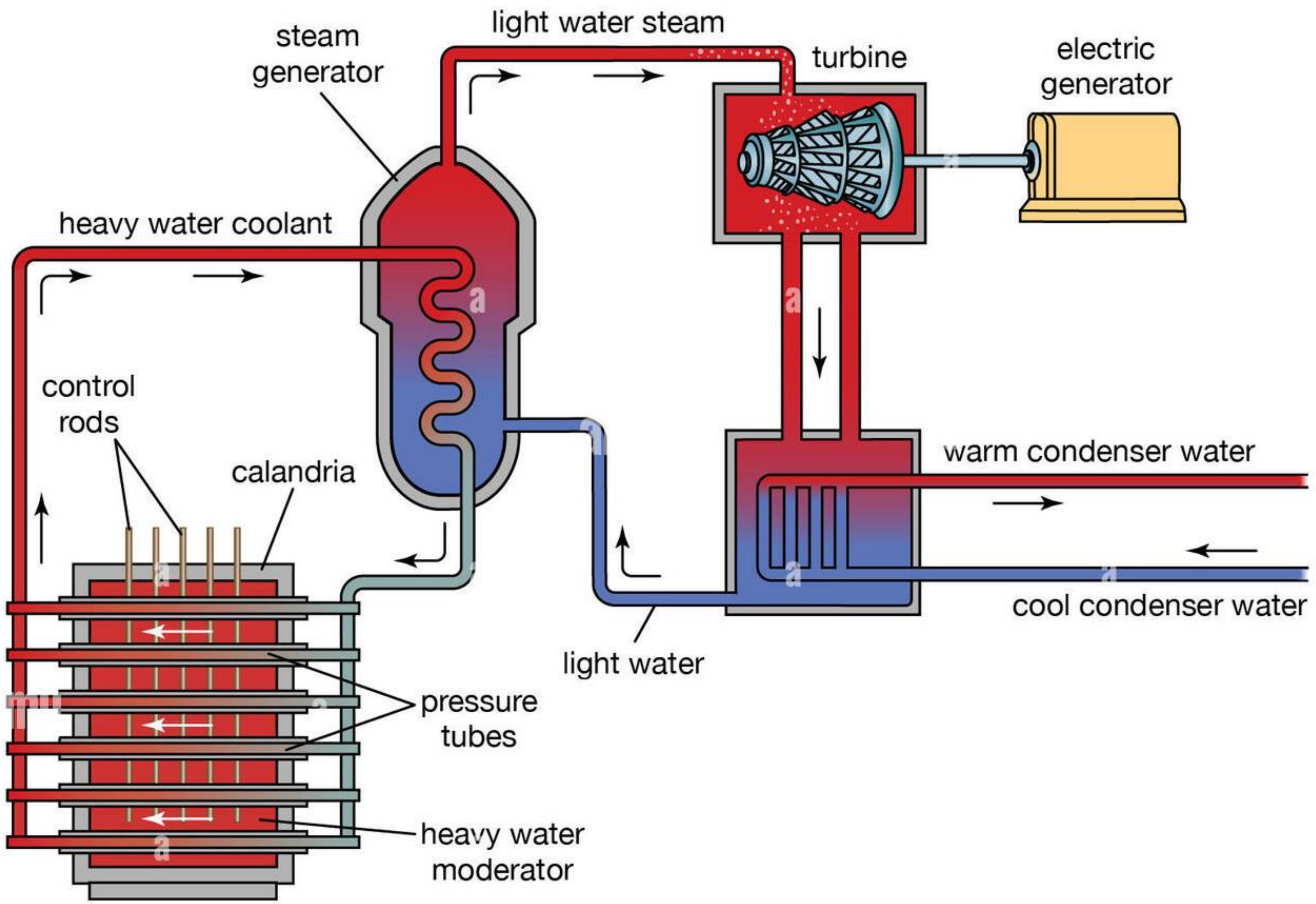
- การออกแบบที่คล้ายกับ PWR ต่างกันที่ระบบหล่อเย็นมีระบบเดียว
- ใช้น้ำที่มีความดันต่ำประมาณ 75 เท่าของความดันบรรยากาศ ทำให้มีสภาพเป็นน้ำเดือด



#เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบใช้น้ำมวลหนัก

(pressurized heavy water reactor; PHWR) หรือ Canadian uranium deuterium (CANDU)

- มีเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เชื้อเพลิงยูเรเนียมธรรมชาติ UO_2
- มีน้ำมวลหนัก (D_2O) ภายใต้ความดันที่สูงกว่าความดันอิ่มตัว
- เครื่องปฏิกรณ์วางในแนวนอน ง่ายต่อการเปลี่ยนเชื้อเพลิงโดยไม่ต้องหยุดเดินเครื่อง



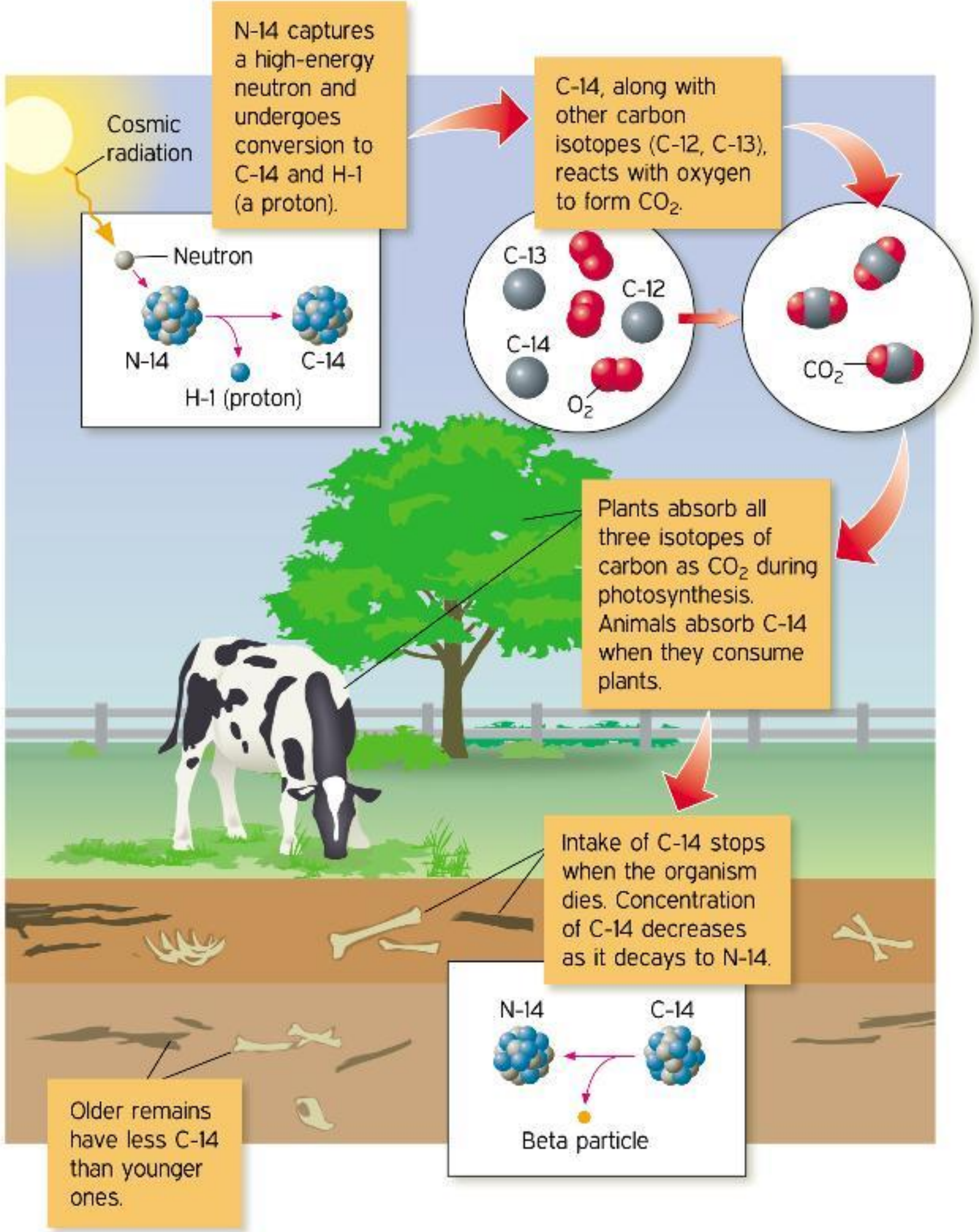
#การหาอายุด้วยวิธีคาร์บอน-14 (radiocarbon dating)

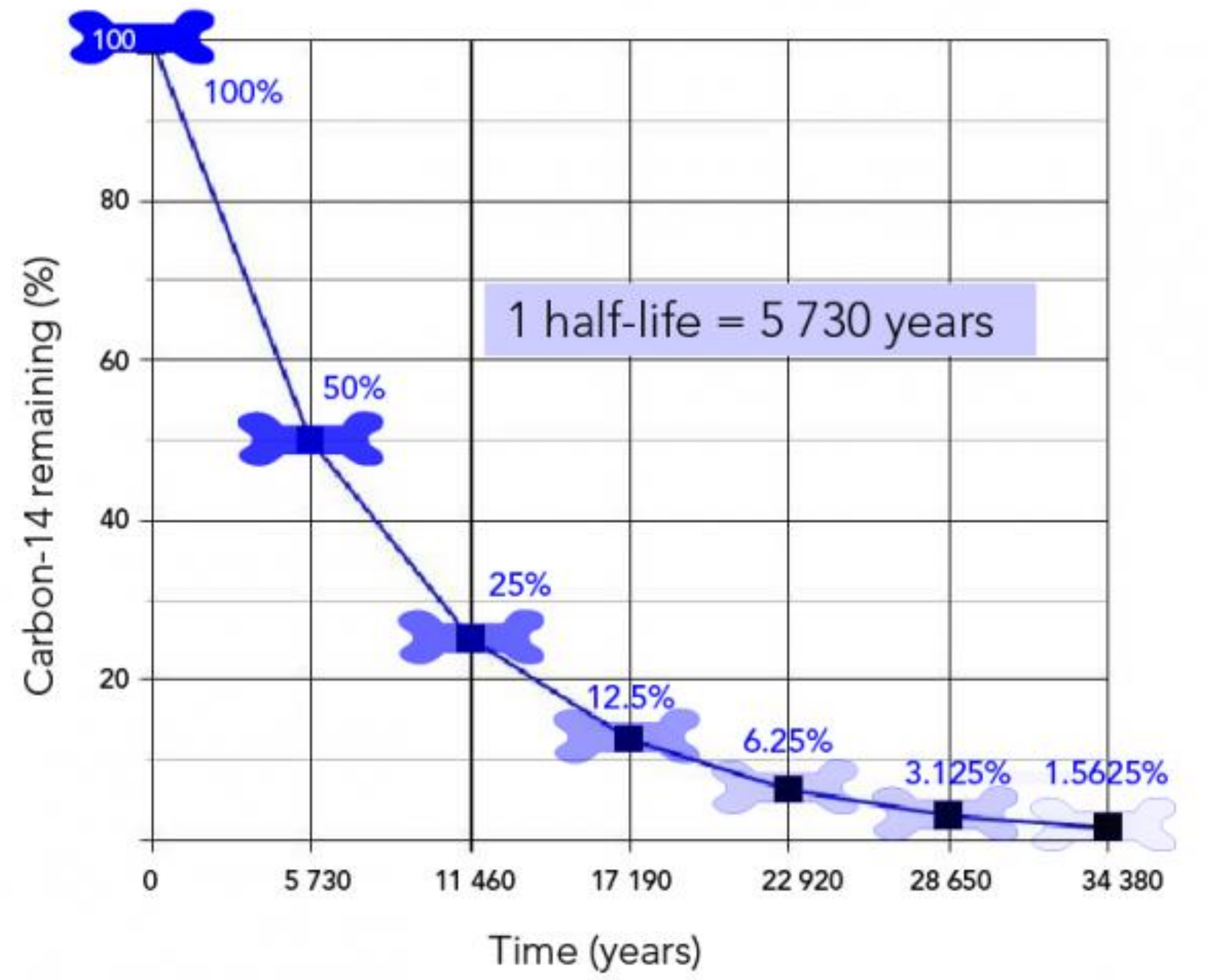
โดยการตรวจวัดปริมาณค่า C-14 ที่เหลืออยู่ (N_t) ส่วนค่าปริมาณเริ่มต้นของ C-14 (N_0) ประเมินจากปริมาณ C-12 และหารด้วย 1 ล้านล้าน (10^{12})

$$N_t = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}} \Rightarrow t = \frac{t_{1/2} \ln\left(\frac{N_t}{N_0}\right)}{-\ln 2}$$

ข้อจำกัด

1) ใช้ได้กับตัวอย่างที่เป็นอินทรียวัตถุเท่านั้น
2) ไม่สามารถใช้ตรวจวัดอายุที่มีอายุแก่กว่า 54,000 ปี ได้อย่างถูกต้อง เนื่องจาก C-14 ที่มีอยู่ในตัวอย่างอาจจะหลงเหลืออยู่น้อยมากหรืออาจสลายตัวไปหมด
3) ไม่สามารถตรวจวัดอายุตัวอย่างที่มีอายุน้อยกว่า หรือตายหลังจากปี ค.ศ.1950 ได้เนื่องจาก เป็นช่วงเริ่มต้นการปฏิวัติอุตสาหกรรมและมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (C-12) ออกสู่บรรยากาศ ส่งผลให้อัตราส่วนระหว่าง C-14 และ C-12 เปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก จึงไม่สามารถเทียบสัดส่วนเพื่อประเมิน C-14 เริ่มต้น (N_0) ได้





กระดูกมนุษย์โบราณพบอัตราส่วนของ C-14/C-12 เป็น 1/4 มนุษย์มีอายุประมาณกี่ปีผ่านมา

จาก อัตราส่วนของ C-14/C-12 เป็น 1/4 หรือ 25/100

$$\frac{C\text{-}14}{C\text{-}12} = \frac{1}{4} = \frac{N_t}{N_0}$$

$$t = \frac{t_{1/2}\ln\left(\frac{N_t}{N_0}\right)}{-\ln 2}$$

$$t = \frac{5730\ \ln\left(\frac{1}{4}\right)}{-\ln 2}$$

= 11,460 Yr

#กิจกรรม work@class

แบ่งกลุ่มทำกิจกรรม 6.1

มอบหมายโจทย์ให้แต่ละกลุ่ม
ระดมสมองแก้ไขโดยวิธีการ
ร่วมแสดงความคิดเห็น

ให้แต่ละกลุ่มนำเสนอ วิธีการแก้ไขโจทย์ปัญหา

1) หลักการสำคัญหรือหลักพื้นฐานที่ถูกต้อง
2) วิธีการคำนวณค่าที่ถูกต้อง
3) วิธีอธิบายเชิงพฤติกรรม (วิธีปฏิบัติ) ที่ถูกต้อง

โดยให้กลุ่มอื่น ๆ รับฟัง และซักถามในข้อที่สงสัย