

방사선

- 방사성 동위원소 (放射性 同位元素, radioactive isotope, radioisotope)
 - **방사선**을 방출하여 안정 핵종(安定 核種, stable nuclide) 혹은 안정 동위원소(安定 同位元素, stable isotope)이 되는 불안정한 원자
 - 방사성 핵종 (放射性 核種, radionuclide, radioactive nuclide)으로도 불림

- 방사선 (放射線, radiation)

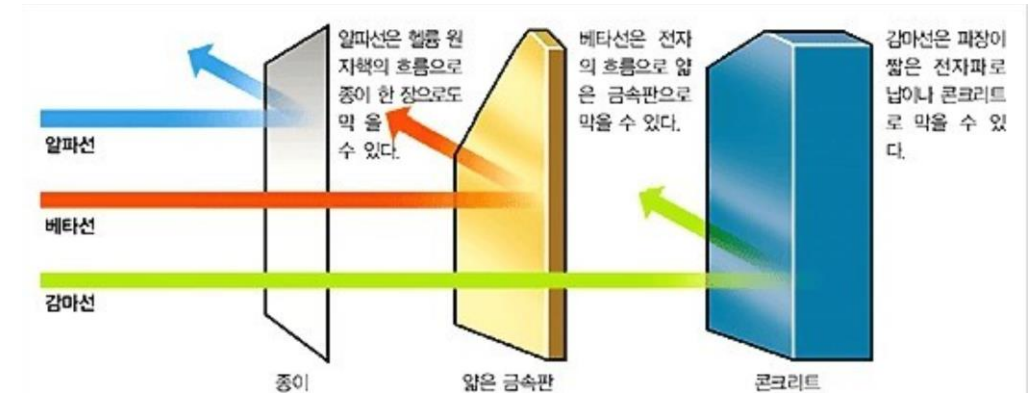
- 전리 방사선 (電離 放射線, ionizing radiation)

- 알파선 (alpha radiation)
 - 베타선 (beta radiation)
 - 중성자선 (中性子線, neutron radiation)
 - 엑스선 (x-ray)
 - 감마선 (γ -ray)

- 비전리 방사선 (非電離 放射線, non-ionizing radiation)

- 자외선, 가시광선, 적외선, 전파, ...

* 전리방사선은 이온화 방사선, 비전리 방사선은 비이온화 방사선이라고 부름



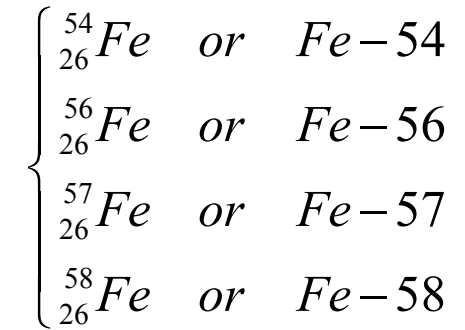
- 동위원소 (同位元素, isotope)
 - 원자번호(Z)는 같고 질량수(A)가 다른 원소
 - 전자와 양성자 수(Z)는 동일
 - 중성자 수(N)가 다름

$$A = Z + N$$

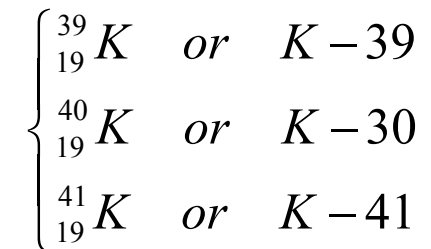
- 원자 기호 표기
 - 원자 기호 X



- 안정 동위원소 (安定 同位元素, stable isotope)

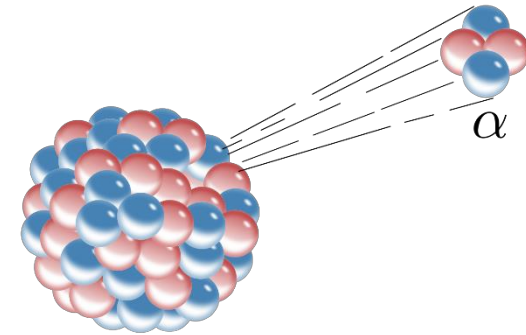


- 방사성 동위원소 (放射性 同位元素, radioactive isotope, radioisotope)



- K-40 : 방사성 동위원소
- K-39, K-41 : 안정 동위원소

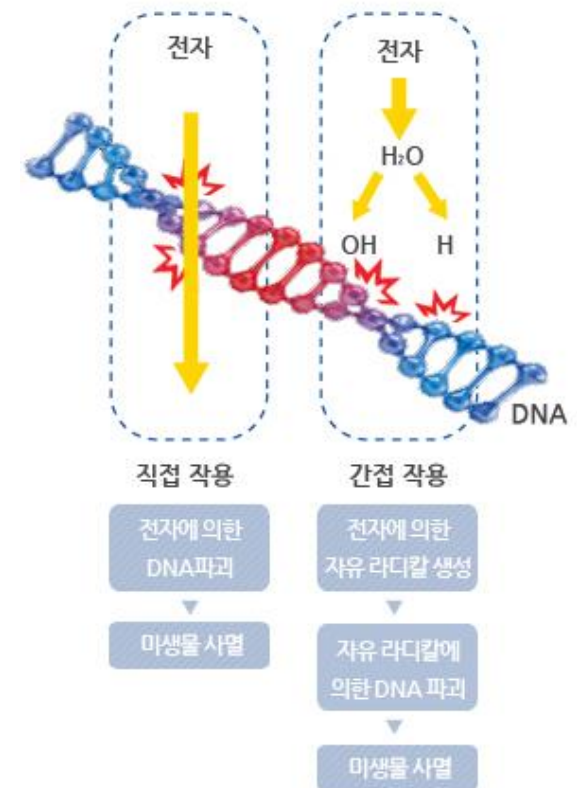
- 알파선 (alpha radiation 혹은 alpha particle 혹은 α)
 - 2개의 중성자(neutron)와 2개의 양성자(proton)으로 구성
→ +2 전하량
 - He-4 핵(nucleus)과 동일



- 피부의 외피를 뚫을 수 없음
 - 해가 없음
- 호흡, 삼킴 혹은 피부 상처를 통하여 알파 방사체가 체내에 침투
 - 세포와 DNA에 매우 심한 손상

- 베타선 (beta radiation 혹은 beta particle 혹은 β^-)
 - 전자 (電子, electron)으로 구성
→ -1 전하량

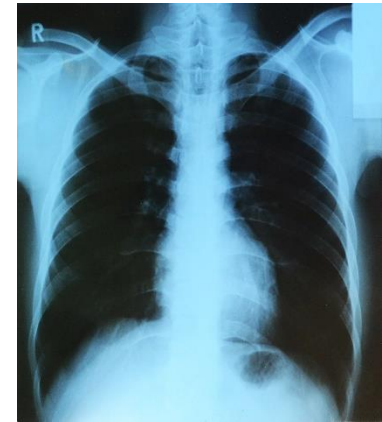
- 옷이나 얇은 알루미늄 판에 의해 투과가 저지
- 인체 외부에서는 세포와 DNA에 알파선보다 약한 손상
- 호흡이나 삼킴에 의해 베타 방사체가 체내에 침투
 - 세포와 DNA에 매우 위험



- 엑스선 (x-ray)

- 전자기파의 일종
- 원자를 구성하는 궤도 전자의 에너지 차에 의해 방출
- 세포와 DNA에 심각한 손상을 줌
- 단층 촬영과 암치료에 사용

그림1



- 감마선 (gamma radiation, gamma ray, γ -ray)

- 전자기파의 일종
- 원자핵을 구성하는 핵자(양성자, 중성자)의 에너지 차에 의해 방출
- 방사성 붕괴(放射性 崩壊, radioactive decay)할 때 알파선, 베타선, 중성자선 등의 방사선과 함께 방출

그림2

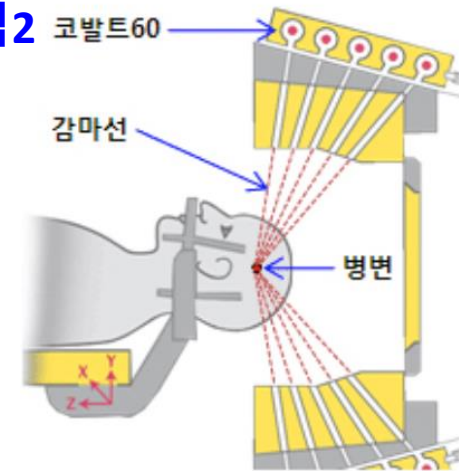
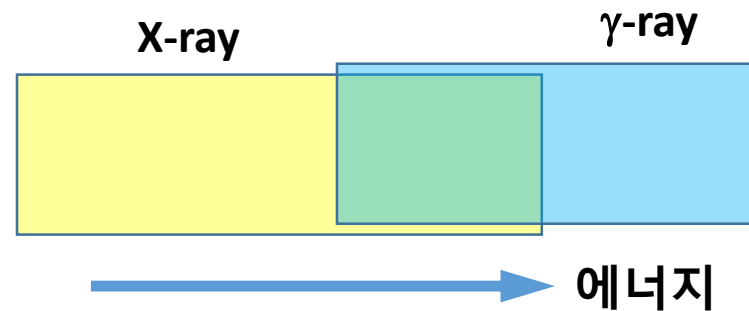


그림3



• 방사성 동위원소 분류

• 천연 방사성 원소

- 원자번호 83~92번까지의 원자들
- 원자번호가 낮은 원자들

• 인공 방사성 원소

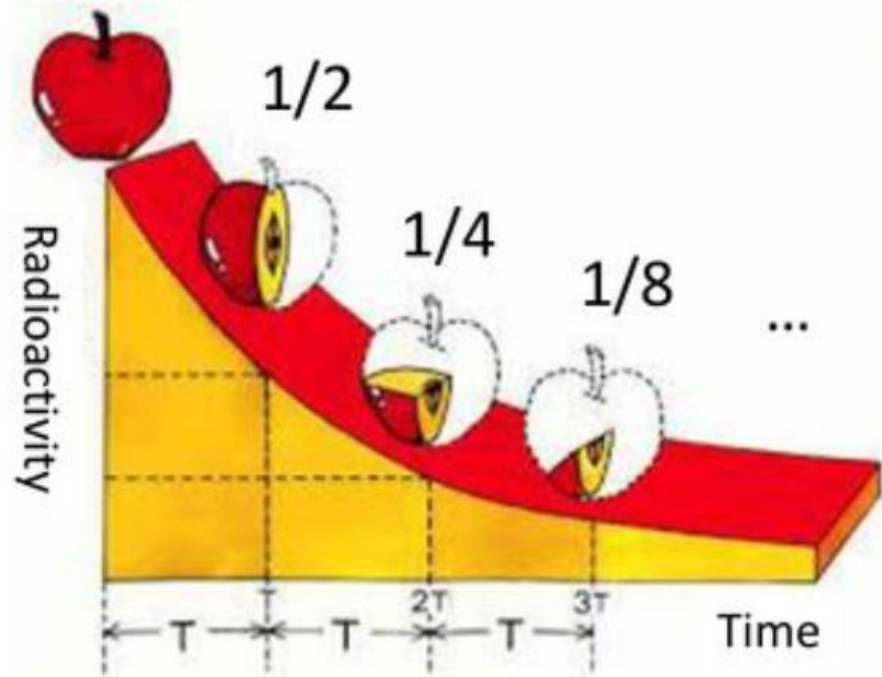
- 원자번호 93번 이상의 원자들

1 H Hydrogen																	2 He Helium
3 Li Lithium	4 Be Beryllium											5 B Boron	6 C Carbon	7 N Nitrogen	8 O Oxygen	9 F Fluorine	10 Ne Neon
11 Na Sodium	12 Mg Magnesium											13 Al Aluminum	14 Si Silicon	15 P Phosphorus	16 S Sulfur	17 Cl Chlorine	18 Ar Argon
19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titanium	23 V Vanadium	24 Cr Chromium	25 Mn Manganese	26 Fe Iron	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Copper	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Selenium	35 Br Bromine	36 Kr Krypton
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdenum	43 Tc Technetium	44 Ru Ruthenium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Silver	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Tin	51 Sb Antimony	52 Te Tellurium	53 I Iodine	54 Xe Xenon
55 Cs Cesium	56 Ba Barium	57 La Lanthanum	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantalum	74 W Tungsten	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platinum	79 Au Gold	80 Hg Mercury	81 Tl Thallium	82 Pb Lead	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astatine	86 Rn Radon
87 Fr Francium	88 Ra Radium	89 Ac Actinium	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Cn Copernicium	113 Uut Ununtrium	114 Fl Flerovium	115 Uup Ununpentium	116 Lv Livermorium	117 Uus Ununseptium	118 Uuo Ununoctium

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

- 반감기(半減期, half-life)

- 방사성 동위원소 원자는 개별적으로 방사선을 방출하여 다른 원자로 변함
- 이런 원자 변환은 원자들 사이에 무작위로(randomly) 일어남
- 반감기 T 정의
 - 방사성 동위원소가 $\frac{1}{2}$ 이 될 때까지 걸리는 시간



Nuclear species	Element symbol		Half-life T
Iodine	$^{131}_{53}I$	I-133	8 days
Cesium	$^{134}_{55}Cs$	Cs-134	2 years
	$^{137}_{55}Cs$	Cs-137	30 years
Strontium	$^{90}_{38}Sr$	Sr-90	29 years
Plutonium	$^{239}_{94}Pu$	Pu-239	24,000 years
Uranium	$^{235}_{92}U$	U-235	700,000,000 years
	$^{238}_{92}U$	U-238	4,500,000,000 years
Tritium	3_1H	H-3	12.3 year

- 우라늄 (U, uranium)의 동위원소

- 알파선 (α)

- 핵에서 양성자 2개와 중성자 2개가 빠져 나가니 원자번호 z 는 2만큼 감소, 질량수 A 는 4만큼 감소

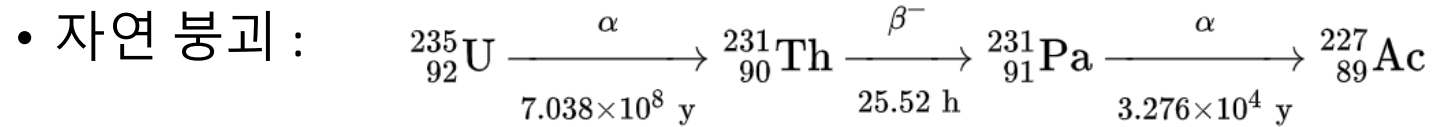
- 베타선 (β^-)

- 핵에서 전자가 빠져 나가니 원자번호 z 는 1만큼 증가

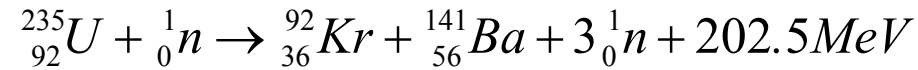
isotope	abundance	Half-life	Decay mode	product
${}^{234}_{92}\text{U}$	0.005%	$2.455 \times 10^5 \text{y}$	α	${}^{230}_{90}\text{Th}$
${}^{235}_{92}\text{U}$	0.720%	$7.04 \times 10^8 \text{y}$	α	${}^{231}_{90}\text{Th}$
${}^{238}_{92}\text{U}$	99.274%	$4.468 \times 10^9 \text{y}$	α	${}^{234}_{90}\text{Th}$
			$\beta^-\beta^-$	${}^{238}_{94}\text{Pu}$

- Abundance는 자연에 존재하는 비율인데 반감기가 길수록 많이 남아 있는 것이 이해가 됨
- U-234의 반감기는 24만년인데 존재 비율이 낮고, U-238은 존재 비율은 높는데 44억년 이상의 반감기가 되니 천연 상태의 우라늄은 그리 위험하지 않다고 볼 수 있음
- 위의 동위원소 이외의 동위원소
 - ${}^{232}_{92}\text{U}$, ${}^{233}_{92}\text{U}$, ${}^{236}_{92}\text{U}$

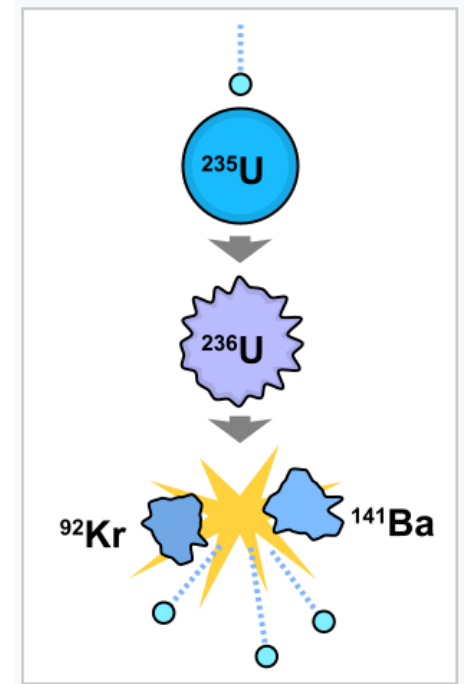
- U-235 ($^{235}_{92}\text{U}$) 핵 반응
 - 자연에 존재 비율 0.72%



- **핵분열** (核分裂, nuclear fission)
 - U-235을 중성자와 반응



- U-235 원자 한 개의 핵분열에 의해 발생하는 에너지 202.5 MeV
 - 우라늄 1g이 핵분열할 때 발생하는 에너지는 석탄 3톤, 석유 9드럼을 태울 때 나오는 에너지에 해당



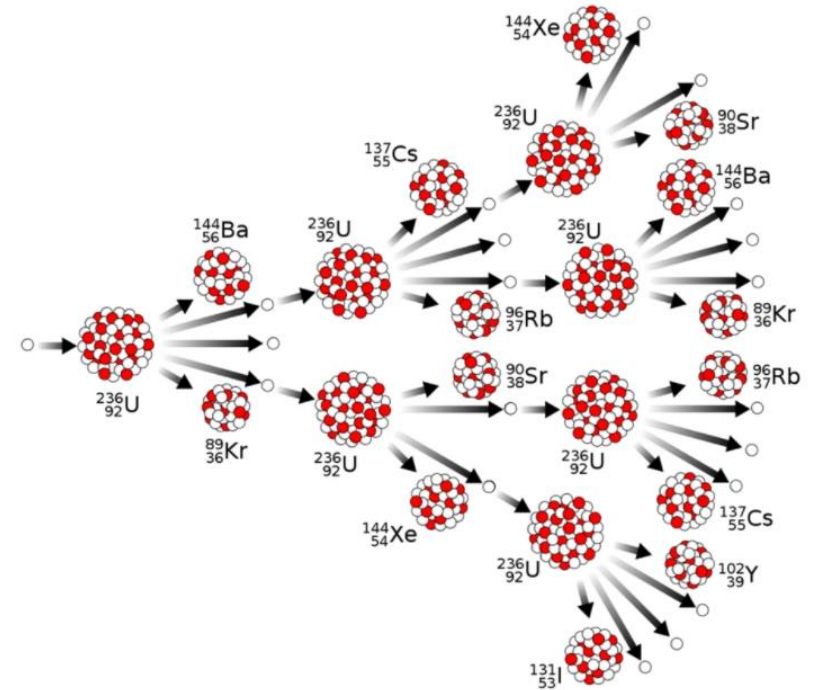
- U-235의 핵분열 (核分裂, nuclear fission)
 - 핵분열에 의해 중성자 수가 3배씩 증가
 - 중성자들은 다른 핵분열의 방아쇠 역할
 - 핵분열이 연쇄적으로 일어나는 현상을 연쇄 반응이라 부름

- 원자로

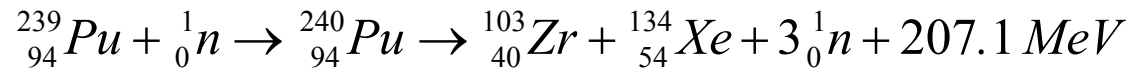
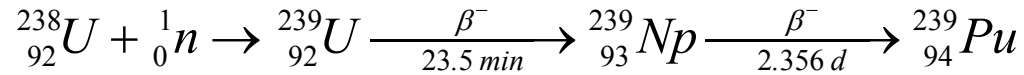
- 중성자 감속재로 연쇄 반응 조절
 - 경수 (light water, 75% 원자로 채택한 중성자 감속재)
 - 보통 우리가 먹는 물(H₂O)
 - 고체 흑연 (20% 원자로가 채택한 중성자 감속재)
 - 중수 (heavy water, 5% 원자로가 채택한 중성자 감속재)
 - 물 (H₂O)에서 H가 중수소
- U-235를 농축(濃縮)한 농축 우라늄(2~4%)을 연료로 사용

- 원자폭탄

- U-235를 최소 60% 이상 농축
- 폭탄으로서 동작하는 임계질량 54 kg



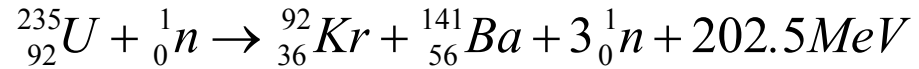
- 플루토늄-239 (Plutonium-239, Pu-239, $^{239}_{94}\text{Pu}$)
 - 자연적으로 플루토늄은 아주 적은 양으로 우라늄 광석에 존재
 - U-238을 많은 수의 중성자에 노출시켜 얻음



- 핵분열 시 U-235보다 많은 중성자를 생성
 - 우라늄에 비하여 임계질량이 낮음 (16 kg)



- U-235의 핵분열 생성물 (fission product)



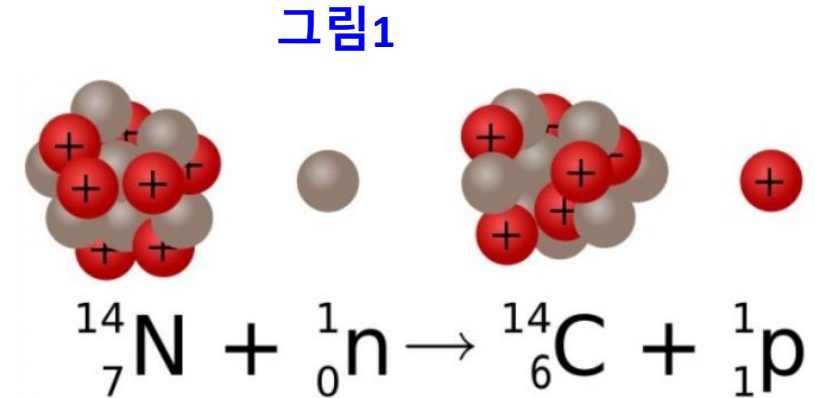
- 위의 반응은 85% 일어남
 - 생산량(yield)은 85%
- 다른 생성물 중 일부는 표와 같음
 - I-131, Cs-137 휘발성
- 생산량(yield)이 크고, 반감기 (half-life)이 긴 것이 문제
 - Cs-137, Sr-90 모두 방사선 에너지가 커서 인체에 치명적
 - Sr-90을 섭취하면 뼈에 칼슘과 비슷하게 작용하여 계속 축적
- 생산량이 크지만 반감기가 짧은 I-131
 - 반감기가 짧아 몇 주 지나면 염려 없음
 - 호흡을 통해 인체에 들어와 갑상선에 영향



Fission products	Yield (%)	Half-life	Decay energy (keV)
Cs-137	6.337	30.23 years	1176
Sr-90	4.505	28.9 years	2826
I-131	2.8336	8.02 days	971
Sm-151	0.5314	0.5314 years	77
Kr-85	0.2180	0.2180 years	687
Eu-155	0.0803	0.0803 years	252
Cd-113m	0.0008	0.0008 years	316
Sn-121m	0.00005	0.00005 years	390

- 탄소-14 (carbon-14, C-14, $^{14}_6\text{C}$)

- 우주선 : 우주에서 지구를 향해 날아오는 방사선
- 지상 9km 상공에서 우주선에 의해 중성자가 생성
- 중성자가 질소-14와 반응
 - 즉각적으로 $^{14}_6\text{C}$ 생성 (그림1)
 - $^{14}_6\text{C}$ 양이 일정하게 유지



- $^{14}_6\text{C}$

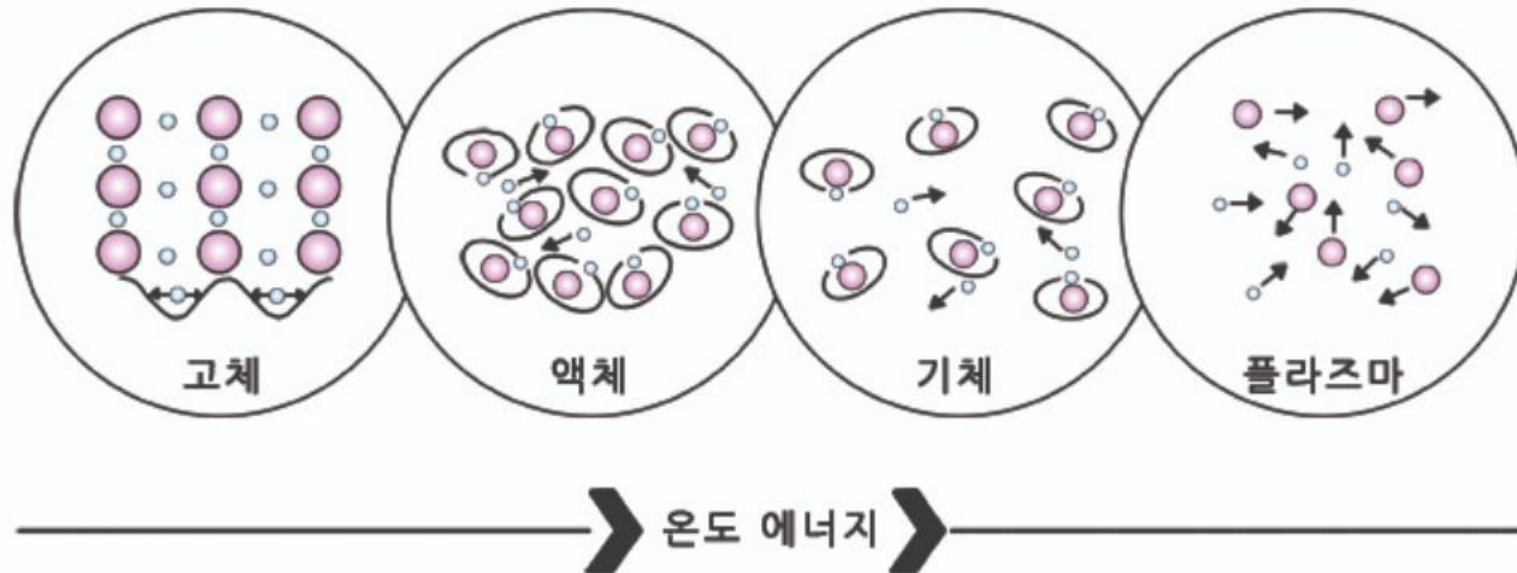
- 베타선을 방출하고 $^{14}_7\text{N}$ 이 되는 반감기 5730년
- 유기물 시료 속에 존재하는 다른 탄소 동위 원소와 비율을 조사하여 방사선 탄소 연대 측정법에 사용 (대략 5만 년까지의 연대 측정)
- $^{14}_6\text{C}$ 이 미량이라서 이 양의 정밀측정이 연대측정의 정확도 결정

isotope	abundance	Half-life	Decay mode	product
$^{12}_6\text{C}$	98.93%	stable	stable	
$^{13}_6\text{C}$	1.07%	stable	stable	
$^{14}_6\text{C}$	$<10^{-12}$	5,730y	β^-	$^{14}_7\text{N}$

- 유튜브 동영상 : <https://www.youtube.com/watch?v=fM059Z4bx2E>

- 플라스마 (plasma)

- 열을 계속 가하면 고체 상태에서 액체 상태 그리고 기체 상태로 변함
- 열을 더 가하면 원자핵(+전하)과 전자(-전하)로 구성된 플라스마가 됨
 - 전자는 열에너지에 의해 매우 빨리 움직임
 - 전자와 원자핵 사이에 인력(引力, attractive force)이 작용하여 원자(原子, atom)로 재결합하는 것을 전자의 빠른 움직임이 방해하여 계속 플라스마 상태가 유지



- 핵융합 (核融合, nuclear fusion)

- 플라즈마 온도를 수 억도로 올림 (고온 플라즈마라 부름)

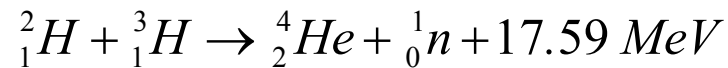
→ 원자핵의 움직임 매우 빨라짐

→ 원자핵의 빠른 움직임은 원자핵 사이의 척력(斥力, repulsive force)을 극복하고 충분히 가까워져 충돌(衝突, collision)

→ 핵융합이 일어남

- 중수소(2_1H)와 삼중수소(3_1H)를 고온 플라즈마에서 핵융합

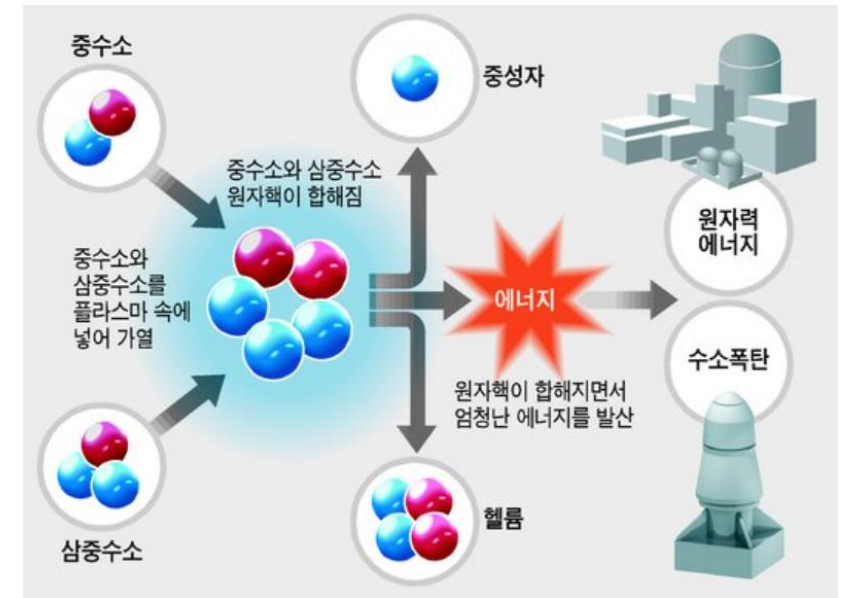
- 헬륨(4_2He)과 중성자(1_0n) 및 17.59 MeV 에너지 방출



- 수소 1g의 핵융합 에너지

- 석탄 21톤
 - 석유 60 드럼

- 태양에서 일어나는 에너지 발생 원리



- 국가핵융합연구소 (NFRI)

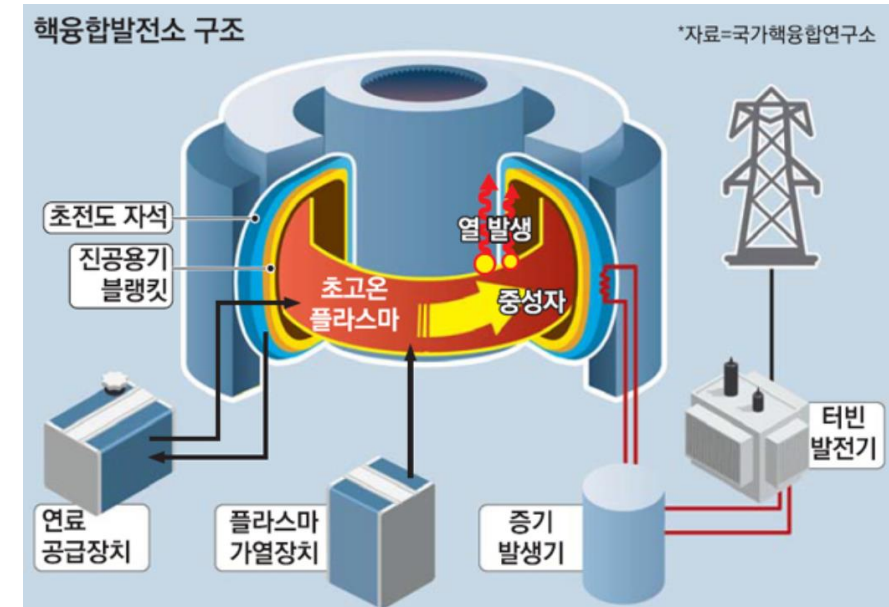
- 2007년 차세대 **초전도 핵융합 연구장치** '케이스타(KSTAR)'를 완공

- 플라스마 온도 3억도
 - 플라스마 지속시간 300초

- 아직은 연구 단계

- 핵융합이 주목 받는 이유

- (1) 매우 높은 연료 효율
 - 핵융합의 약 7배 에너지 얻음
 - (2) 매우 풍부한 연료의 매장량
 - 연료는 바닷물
 - (3) 매우 높은 안정성
 - 대형사고 발생 위험이 전혀 없음
 - (4) 매우 높은 환경 친화성
 - 유해물질을 거의 발생시키지 않음



- KSTAR 유튜브 영상 : <https://youtu.be/jsDHYvsAg-8>