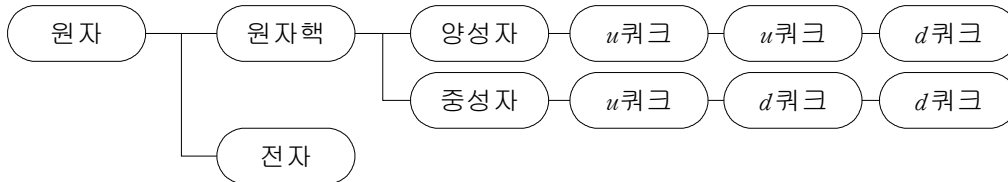


General Chemistry II

단원	Ch 19. Nuclear Chemistry
학습 주제	Radiation, Fission and Fusion

1 Radioactivity

1. 원자를 이루는 요소들의 발견



2. DNA에 대한 방사선의 전리작용

구분	알파선(α)	베타선(β)	감마선(γ)
실체	헬륨 원자력	전자선	X선보다 파장이 짧은 전자파
질량(비)	7200	1	없음
대기 중 투과력	1cm 이하	수십 cm~수 m	수백 m~수 km
인체 내 투과력	수 μm	1cm 정도	일부는 인체를 투과

3. 아인슈타인의 질량-에너지 등가 원리(Einstein's Mass Energy Relationship)

$$E=mc^2 \Leftrightarrow \text{변화식} : \Delta E = \Delta mc^2$$

4. Binding Energy of Nuclei

- ① 정의(binding energy) : 특정한 원자핵이 구성 핵자로 분리되는데 필요한 에너지로 정의한다.
- ② 이때 에너지 변화 : $\Delta E = (\Delta m)c^2$ 이다.

5. Inspection and Detection of radiation

- ① 사진 유제(photographic emulsion) : 누적 방사선 피폭량을 측정
- ② Geiger counter(가이거 계수기)
 - (1) 고에너지 전자(β particle)이 Geiger counter 내부로 들어오면 cation과 electron이 발생
 - (2) electron은 acceleration되어 positive charge를 띤 전선으로 이동
 - (3) 이동 과정에서 원자들의 ionization이 급격하게 진행
 - (4) electron의 avalanche : 큰 전류가 중앙에 위치한 전선으로 흐름
 - (5) 측정 가능한 전압차 발생, 알코올 분자에 의해 다시 소멸

반복 ...

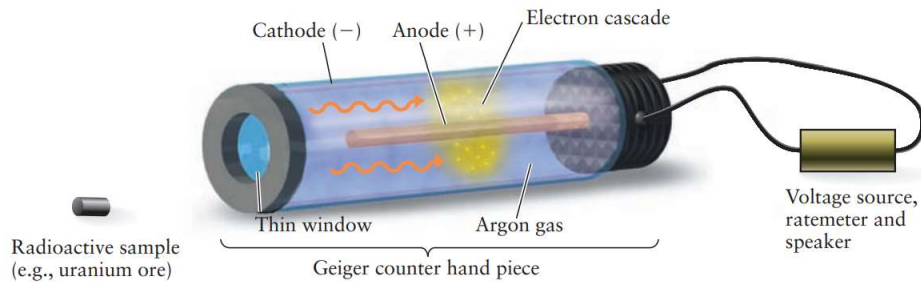


FIGURE 19.4 In a Geiger-Müller tube, radiation ionizes gas in the tube, freeing electrons that are accelerated to the anode wire in a cascade. Their arrival creates an electrical pulse, which is detected by a ratemeter. The ratemeter displays the accumulated pulses as the number of ionization events per minute.

② Nuclear Structure and Nuclear Decay Processes

1. 핵반응에서 에너지 변화

- ① 원자의 구조는 어떻게 표현하는가? 양성자 수 : Z , 질량수 : A , 중성자 수 : N 으로 표현한다.
- ② 용어 정리
 - isotope(동위원소) : 양성자 수(Z)는 같고 중성자 수(N)이 다른 원소
 - isotone(동중성자원소) : 중성자 수(N)는 같고 양성자 수(Z)가 다른 원소
 - isobars(동중량원소) : 질량수(A)는 같고 양성자 수와 중성자 수가 다른 원소
 - atomic mass unit(=amu, u : 원자 질량 단위) : 단일 원자 ^{12}C 의 질량의 $1/12$ 을 1amu로 정의한다.

2. 강력과 약력

- ① Joule 단위는 Nuclear scale의 dynamics를 서술하기에 부적합함. \triangleright eV 또는 MeV의 형태로 기술.
- ② 강력 : 원자핵이 안정하게 유지되도록 핵자 간의 결합에 관여하는 힘
 - 강력은 핵자의 전하와 무관하며, 중성자-중성자, 중성자-양성자, 양성자-중성자 사이에 모두 작용
 - 퍼텐셜 에너지 곡선은 매우 깊고(MeV), 날카로운 경계를 가진 좁은 폭을 가지고 있다.

3. 핵붕괴 과정(nuclear decay process)

① 핵반응에서 성립하는 법칙들

※ 핵반응에서 성립하는 법칙들

1. (넓은 의미의) 질량 보존 법칙 : Einstein의 Mass-Energy Relationship에 의해 핵반응 전후 질량은 달라지지만 에너지의 관점에서는 보존된다고 볼 수 있다.
2. 질량수 보존의 법칙 : 양성자 수와 중성자 수의 합인 질량수가 보존된다.
3. 전하 보존의 법칙 : 반응 전후에 전하는 변화하지 않는다. \triangleright 여기서 전하는 이온가를 의미하는 것이 아닌, $_{\star}^{\text{X}}$ 에서 \star 에 해당하는(사실상 원자 번호(Z)의 확장) 값의 합이 보존됨을 말한다.



- ① 질량수의 합 : $2+3=4+1$
- ② 전하량의 합 : $1+1=2+0$

3. 원자의 N/Z 에 따른 핵붕괴 과정

N/Z 의 상대적 크기	일어나는 과정
크다	양성자 방출(proton emission)
매우 작다	중성자 방출(neutron emission)
불안정(무관)	자발적인 핵분열(fission) 일어남

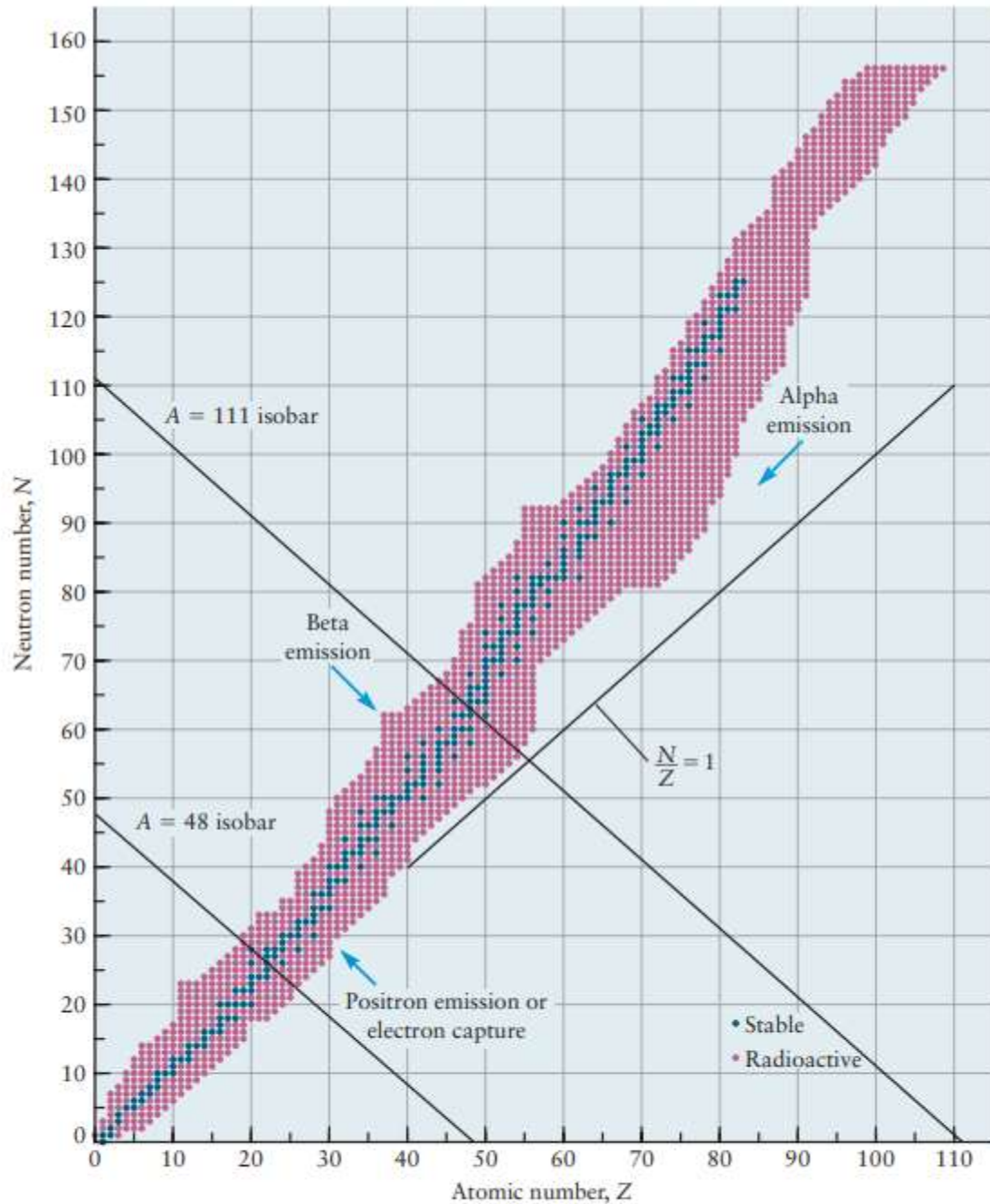


FIGURE 19.4 A plot of N versus Z for a number of nuclides, with the stable nuclides represented by blue dots and the unstable nuclides represented by red dots. The stable nuclides lie along a "line of stability," with slope $N/Z = 1$ (shown) for the lighter elements, increasing to 1.5 for the heavier elements. Regions in which particular decay processes dominate are labeled. The $A = 48$ and $A = 111$ isobars shown are two families of nuclides with mass numbers 48 and 111, respectively.

4. 핵붕괴의 실제(nuclear decay)

※ 요약							
붕괴 종류	방출 입자	ΔZ	ΔN	ΔA	방출 입자의 에너지 범위	예시	발생 조건
α	${}^4\text{He}^{2+}$	-2	-2	-4	$4 \leq E_\alpha \leq 10 \text{ MeV}$	${}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{234}\text{Th} + \alpha$	$Z > 83$
β^-	고에너지 e^- , $\bar{\nu}_e$	+1	-1	0	$0 \leq E_{\beta^-} \leq 2 \text{ MeV}$	${}^{14}\text{C} \rightarrow {}^{14}\text{N} + \beta^- + \bar{\nu}_e$	$(N/Z) > (N/Z)_{\text{stable}}$
β^+	고에너지 e^+ , ν_e	-1	+1	0	$0 \leq E_{\beta^+} \leq 2 \text{ MeV}$	${}^{22}\text{Na} \rightarrow {}^{22}\text{Ne} + \beta^+ + \nu_e$	$(N/Z) < (N/Z)_{\text{stable}}$ (가벼운 핵종)
EC	ν_e	-1	+1	0	$0 \leq E_\gamma \leq 2 \text{ MeV}$	$e^- + {}^{207}\text{Bi} \rightarrow {}^{207}\text{Pb} + \nu_e$	$(N/Z) < (N/Z)_{\text{stable}}$ (무거운 핵종)
γ	광자	0	0	0	$0.1 \leq E_\gamma \leq 2 \text{ MeV}$	${}^{60}\text{Ni}^* \rightarrow {}^{60}\text{Ni} + \gamma$	모든 여기된 핵종
IC	전자	0	0	0	$0.1 \leq E_e \leq 2 \text{ MeV}$	${}^{125}\text{Sb}^m \rightarrow {}^{125}\text{Sb} + e^-$	감마선 방출이 억제되는 경우

(1) 알파 붕괴 : 양성자가 풍부한 입자는 알파 입자(α particle, ${}^4_2\text{He}^{2+}$)를 방출하며 더 안정한 핵종으로 전이

(2) 베타 붕괴

① 양성자가 부족한 화학종 : 중성자가 양성자로 변환되고 베타 입자(β^-)와 반중성미자($\bar{\nu}$) 방출 ▷ β^- 붕괴

② 양성자가 풍부한 화학종 : 양성자가 중성자로 변환되고 양전자(e^+)와 중성미자(ν) 방출 ▷ β^+ 붕괴

(3) 전자 포획(Electron capture : EC)

① 조건 : 양성자가 많다, 양전자의 방출이 에너지적으로 불가하다

② 과정 : 원자핵이 자신의 궤도함수의 전자를 포획 → 양성자가 중성자로 변환

③ 결과 : 질량수는 변하지 않음(양성자 → 중성자이므로), 중성미자 ν 만 방출

(4) 감마 붕괴 : 원자핵이 에너지 준위가 높은 들뜬 상태에서 낮은 바닥 상태로 전이되면서 발생

(5) 내부 전환(Internal conversion : IC) : 들뜬 상태의 원자핵이 에너지가 낮은 바닥 상태로 전이되면서 원자핵 주위에 에너지를 주어 궤도함수 전자를 방출하는 현상

③ Mass-Energy Relationship

1. Einstein's equation : $E=mc^2$ ▷ form of change $\Rightarrow \Delta E = (\Delta m)c^2$

2. 베타 붕괴 과정에서의 에너지 전이는 연속적이다 ▷ 나오는 전자의 KE는 $0 \sim E_{\text{max}}$ 까지 연속적으로 가능

[Example 19.1] 다음의 붕괴 과정에서 전자의 최대 운동 에너지를 계산하시오.



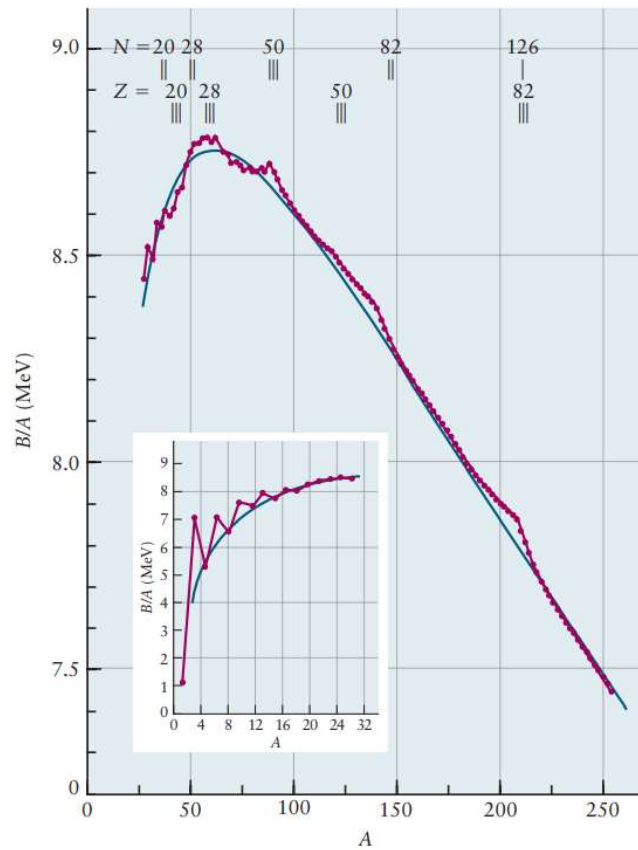
[Example 19.2] 다음의 붕괴 과정에서 전자의 최대 운동 에너지를 계산하시오.



3. 원자핵 결합 에너지(binding energy)

- ① 정의 : 특정한 원자핵이 구성 핵자로 분리되는데 필요한 에너지
- ② 질량수에 따른 핵자 당 평균 결합 에너지

FIGURE 19.10 Average binding energy per nucleon as a function of mass number A . Magic numbers of neutrons and protons are located by the vertical lines at the top of the figure.



▷ 껍질이 가득 차는 magic number일 때 특히 안정한 경향성이 관찰됨

T A B L E 19.1

Masses of Selected Elementary Particles and Atoms

Elementary Particle	Symbol	Mass (u)	Mass (kg)
Electron, beta particle	${}^0_{-1}e^{-}$	0.000548579911	$9.1093819 \times 10^{-31}$
Positron	${}^0_{+1}e^{+}$	0.000548579911	$9.1093819 \times 10^{-31}$
Proton	${}^1_1p^{+}$	1.0072764669	$1.6726216 \times 10^{-27}$
Neutron	1_0n	1.0086649158	$1.6749272 \times 10^{-27}$

Atom	Mass (u)	Atom	Mass (u)
1_1H	1.007825032	${}^{23}_{11}Na$	22.9897697
2_1H	2.014101778	${}^{24}_{12}Mg$	23.9850419
3_1H	3.016049268	${}^{30}_{14}Si$	29.97377022
3_2He	3.016029310	${}^{30}_{15}P$	29.9783138
4_2He	4.002603250	${}^{32}_{16}S$	31.9720707
7_3Li	7.0160040	${}^{35}_{17}Cl$	34.96885271
8_4Be	8.00530509	${}^{40}_{20}Ca$	39.9625912
9_4Be	9.0121821	${}^{49}_{22}Ti$	48.947871
${}^{10}_4Be$	10.0135337	${}^{81}_{35}Br$	80.916291
8_5B	8.024607	${}^{87}_{37}Rb$	86.909183
${}^{10}_5B$	10.0129370	${}^{87}_{38}Sr$	86.908879
${}^{11}_5B$	11.0093055	${}^{127}_{53}I$	126.904468
${}^{11}_6C$	11.011433	${}^{226}_{88}Ra$	226.025403
${}^{12}_6C$	12 exactly	${}^{228}_{88}Ra$	228.031064
${}^{13}_6C$	13.003354838	${}^{228}_{89}Ac$	228.031015
${}^{14}_6C$	14.003241988	${}^{232}_{90}Th$	232.038050
${}^{14}_7N$	14.003074005	${}^{234}_{90}Th$	234.043595
${}^{16}_8O$	15.994914622	${}^{231}_{91}Pa$	231.035879
${}^{17}_8O$	16.9991315	${}^{231}_{92}U$	231.036289
${}^{18}_8O$	17.999160	${}^{234}_{92}U$	234.040945
${}^{19}_9F$	18.9984032	${}^{235}_{92}U$	235.043923
${}^{21}_{11}Na$	20.99764	${}^{238}_{92}U$	238.050783

[Example 19.3] Table 19.1의 자료를 이용하여 4_2He 의 결합 에너지를 계산하여 Joule과 백만 전자 볼트 (MeV)로 나타내어라.

4 Chemical Kinetics of Radioactive Decay

First-order reaction

① 적분 속도식 유도하기

화학 반응의 속도 = $\frac{dc}{dt} = -kc$, 변수분리법을 이용하면 $\frac{1}{c}dc = -kdt$

t 가 0에서 t 로 변할 때 농도는 $c(0)$ 에서 $c(t)$ 로 변화한다.

$$\text{이를 이용하면 } \int_{c(0)}^{c(t)} \frac{1}{c} dc = -k \int_0^t dt$$

$$\ln \frac{c(t)}{c(0)} = -kt \quad \therefore c(t) = c(0)e^{-kt}$$

② 반감기의 계산

위 식에 대입하면 $\frac{1}{2}c(0) = c(0)e^{-kt_{1/2}}$ 양변에 $c(0)$ 는 약분되고, $-\ln 2 = -kt_{1/2} \quad \therefore t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} = \frac{0.6931}{k}$


③ 1차 반응의 특성 : 반감기가 반응물의 초기 농도에 영향을 받지 않는다.

TABLE 19.3

Decay Characteristics of Some Radioactive Nuclei

Nuclide	$t_{1/2}$	Decay Mode [†]	Daughter
${}^3_1\text{H}$ (tritium)	12.26 years	e^-	${}^3_2\text{He}$
${}^8_4\text{Be}$	$\sim 1 \times 10^{-16}$ s	α	${}^4_2\text{He}$
${}^{14}_6\text{C}$	5730 years	e^-	${}^{14}_7\text{N}$
${}^{22}_{11}\text{Na}$	2.601 years	e^+	${}^{22}_{10}\text{Ne}$
${}^{24}_{11}\text{Na}$	15.02 hours	e^-	${}^{24}_{12}\text{Mg}$
${}^{32}_{15}\text{P}$	14.28 days	e^-	${}^{32}_{16}\text{S}$
${}^{35}_{16}\text{S}$	87.2 days	e^-	${}^{35}_{17}\text{Cl}$
${}^{36}_{17}\text{Cl}$	3.01×10^5 years	e^-	${}^{36}_{18}\text{Ar}$
${}^{40}_{19}\text{K}$	1.28×10^9 years	$\begin{cases} e^- (89.3\%) \\ \text{E.C. (10.7\%)} \end{cases}$	$\begin{matrix} {}^{40}_{20}\text{Ca} \\ {}^{40}_{18}\text{Ar} \end{matrix}$
${}^{59}_{26}\text{Fe}$	44.6 days	e^-	${}^{59}_{27}\text{Co}$
${}^{60}_{27}\text{Co}$	5.27 years	e^-	${}^{60}_{28}\text{Ni}$
${}^{90}_{38}\text{Sr}$	29 years	e^-	${}^{90}_{39}\text{Y}$
${}^{109}_{48}\text{Cd}$	453 days	E.C.	${}^{109}_{47}\text{Ag}$
${}^{125}_{53}\text{I}$	59.7 days	E.C.	${}^{125}_{52}\text{Te}$
${}^{131}_{53}\text{I}$	8.041 days	e^-	${}^{131}_{54}\text{Xe}$
${}^{127}_{54}\text{Xe}$	36.41 days	E.C.	${}^{127}_{53}\text{I}$
${}^{137}_{57}\text{La}$	$\sim 6 \times 10^4$ years	E.C.	${}^{137}_{56}\text{Ba}$
${}^{222}_{86}\text{Rn}$	3.824 days	α	${}^{218}_{84}\text{Po}$
${}^{226}_{88}\text{Ra}$	1600 years	α	${}^{222}_{86}\text{Rn}$
${}^{232}_{90}\text{Th}$	1.40×10^{10} years	α	${}^{228}_{88}\text{Ra}$
${}^{235}_{92}\text{U}$	7.04×10^8 years	α	${}^{231}_{90}\text{Th}$
${}^{238}_{92}\text{U}$	4.468×10^9 years	α	${}^{234}_{90}\text{Th}$
${}^{239}_{93}\text{Np}$	2.350 days	e^-	${}^{239}_{94}\text{Pu}$
${}^{239}_{94}\text{Pu}$	2.411×10^4 years	α	${}^{235}_{92}\text{U}$


[†]E.C. stands for electron capture; e^+ for positron emission; e^- for beta emission; α , for alpha emission.

 **방사능(Activity, A)** : 원자핵의 붕괴 속도 $-dN/dt = kN$


→ 방사능은 원자핵의 수 N 에 비례하므로 이 또한 시간의 지수함수 형태로 감소한다.

$$A = A_0 e^{-kt}$$

[Example 19.4] 12.26년의 반감기를 가진 삼중수소(^3H)는 베타 방출에 의해 붕괴하여 ^3He 로 변한다. 삼중수소를 포함한 화합물 시료의 초기 방사능은 0.833Bq이다. 처음 시료에 있던 삼중수소 원자핵의 수 N_0 , 붕괴상수 k 및 2.50년 후의 방사능을 구하시오.

 **연대 측정**

- ① 초기 방사능 값과 현재의 방사능 값을 알고 있는 경우 : $A(t) = A(0)e^{-kt}$ 임을 이용하여 해결
- ② 동일한 원리로 숫자를 구해서 해결해도 된다.

 **비방사능(specific activity)** : 단위 질량 당 방사능(Bq g^{-1})

[Example 19.5] 어떤 목재 도구에 있는 ^{14}C 의 specific activity는 0.195 Bq/g이다. 이 목재 도구의 연대를 계산하시오.

⑤ Nuclear Fission

1. 핵분열(nuclear fission)

- ① 의미 : 한 원자핵에 중성자와 같은 입자가 충돌할 때 2개 이상의 새로운 원자핵으로 쪼개지면서 에너지를 방출하는 현상
- ② 연쇄 반응(chain reaction) : 우라늄은 하나의 중성자를 흡수하여 핵분열을 일으키면서 2~3개의 중성자를 방출하며, 다른 우라늄이 중성자를 흡수하여 또 다시 핵분열을 일으킨다 → 이와 같이 우라늄이 계속 분열하는 현상을 연쇄 반응이라 한다. ▷ branching chain reaction 일어남(18장 참고)
- ③ 감속재(moderator) : fission이 일어나도록 하는 중성자는 저속 중성자이다 → fission되어 방출된 고속 중성자의 속도를 줄여줘야 된다. 이때 속도를 줄여주는 친구(물질)를 저속재(moderator)라 한다.
→ 사용하는 감속재에 의해 각각의 원자로의 이름이 다르다 : 물의 경우 경수로/중수로, 흑연을 사용하면 흑연로라고 한다.
- ④ 제어봉(control rod) : 핵분열 속도를 줄이기 위해서는 중성자를 흡수하여 그 수를 줄여야 한다. 이때 중성자를 흡수하는 장치를 제어봉이라고 하며, 카드뮴(Cd)이나 붕소(B)가 사용된다.

2. 원자로(nuclear reactor)

- ① moderator로 물을 사용하는 경우 - 경수로 vs 중수로

원자로	경수로	중수로
핵연료	저농축 우라늄	천연 우라늄
감속재	물(경수)	물(중수)
장점	감속재 확보 편리	주수 사용으로 반응 조절 편리
단점	농축 우라늄 확보 어려움	감속재 확보 어려움
설치 원전	고리, 영광, 울진, 미국	월성, 캐나다

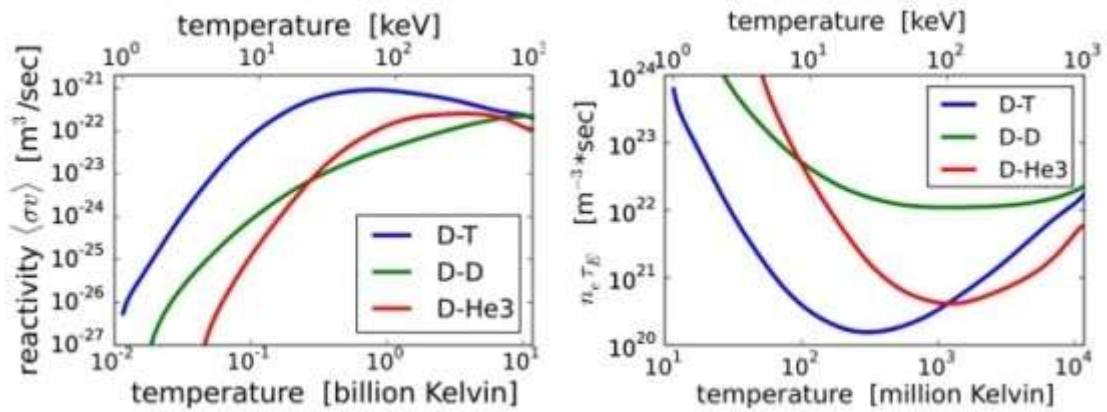
- ② 고속 증식로
 - 원리 : 고속 중성자를 우라늄에 충돌시키면 플루토늄이 만들어지며, 플루토늄이 핵분열(fission)할 때 발생하는 에너지를 이용한다.
 - 고속의 중성자를 우라늄에 충돌시켜 플루토늄을 얻으면 분열시 생성되는 고속 중성자를 다시 감속시키지 않고 계속 반응에 이용한다.
 - 핵연료의 증식 : 고속 증식로에서는 우라늄이 플루토늄으로 전환되면서 분열이 잘 되는 핵연료의 양이 증가하는데 이 현상을 핵연료 증식이라고 한다.

⑥ Nuclear Fusion

[질문1] 핵융합 과정에서 에너지가 필요한 이유를 설명해 보자.

[질문2] 로슨의 조건(Lawson's Criterion)을 알아보자.

- (1) 로슨의 조건은 무엇인가?
- (2) 아래 제시된 그래프에서 주어진 핵융합 반응 D-D, D-T 등의 반응식을 쓰시오.
- (3) 가장 쉽게 일어나는 반응은 무엇일까?



[질문3] 우주의 역사에서 이루어진 핵융합 과정에 대해서 설명해 보자.

7 The Shell Model of the Nucleus

[정리]