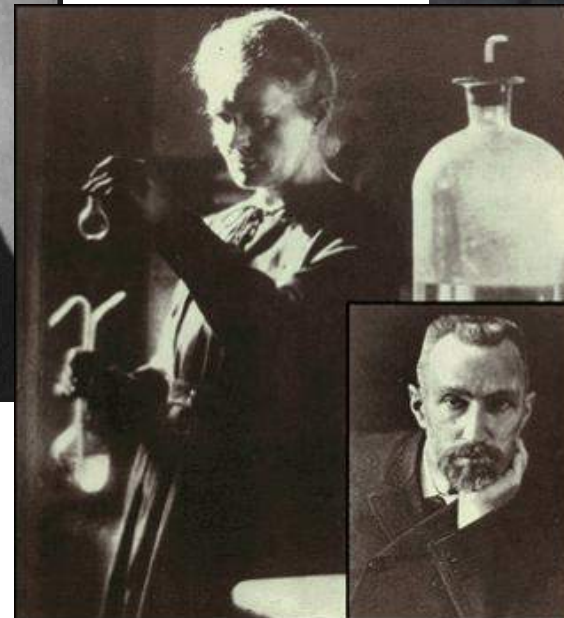
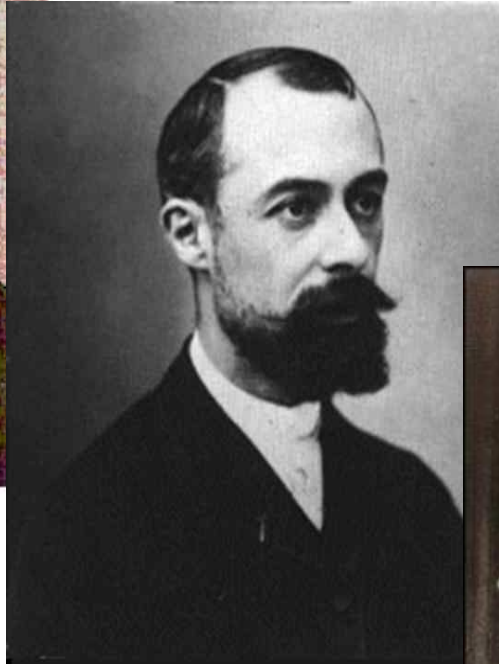
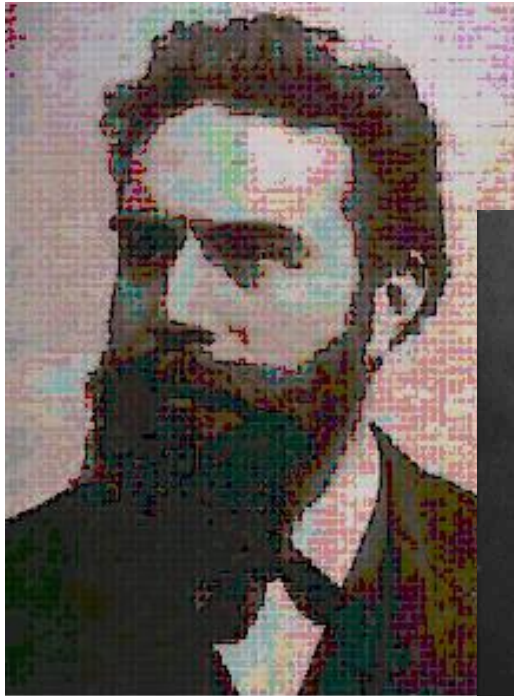
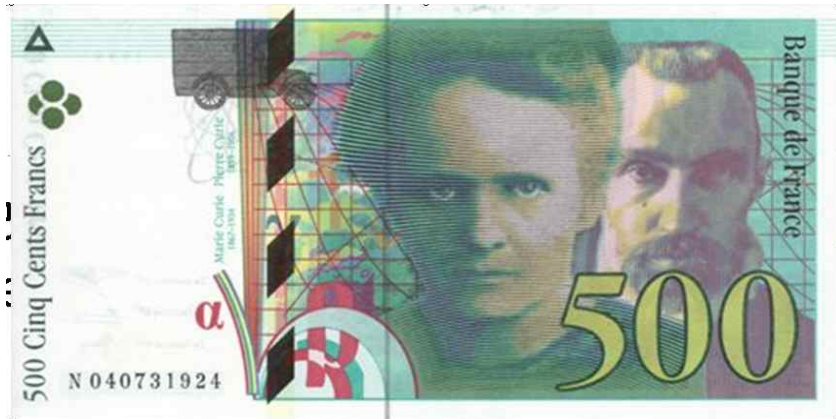


원 자 력 이 론





Marie Curie in 20,000
Polish Zloty in 1989



Marie & Pierre Curie in
500 French France in 1998

* 일러두기: 강의록중 붉은 색 표현 글씨는 일반면허에서 건너뛰어도 됨

제 1 장 물리학

제 1 절 물리의 기초

1. 용어, 단위 및 기본 물리 방정식

가. 용어 및 단위

- 1960년 제11차 국제도량형 총회에서 MKSA(Meter- Kilogram-Second-Ampere) 단위 4개와 온도의 켈빈(K), 광도의 칸델라(Cd)가 공식명칭(“국제단위계”)과 약칭인 “SI”*를 갖게 됨.
- 1971년에 몰(mole)이 추가되어 현재의 SI단위의 기초가 됨.
- 부기본 단위는 각도(angle)를 다루는 평면각(plane angle)과 입체각(solid angle)의 단위.

* The International System of Units (abbreviated SI from the French Le Système International d'Unités)

- 평면각 단위: 라디안(radian; rad)

정의: 라디안(radian)은 어떤 원의 “반지름”과 호의 “길이의 비”

원의 둘레는 $2\pi r$ 이므로 360도는 2π (rad) 또 직각은 90도이므로 $\pi/2$ (rad)

- 입체각: 스테라디안(steradian, sr)

정의: 스테라디안(steradian)은 어떠한 구의 “반지름의 제곱”과 “표면의 면적의 비”

구의 전체 표면적은 $4\pi r^2$ 이므로 , 전체 공의 입체각은 $4\pi r^2/r^2 = 4\pi$ (sr).

확인

1 rem (SI 단위 아님) \rightarrow 0.01 Sv = 10 mSv (SI 단위)

1 Ci (SI 단위 아님) \rightarrow 3.7×10^{10} Bq = 37 GBq (SI 단위)

잠깐 SI 단위는 상식

- 원자력 및 방사선분야에서 광도(cd)는 잘 사용되지 않음
- 관습적인(conventional) 각도 [0도 ~ 360도]는 $[0 \sim 2\pi \text{ rad}]$ 에 해당 (컴프턴 산란에 이용)
- 평면각 라디안(rad)과 방사선장해방어의 흡수선량 단위인 라드(rad)는 혼동하지 말 것

SI 기본단위 및 부기본단위

양		명 칭	기 호
길	이	미터 (meter)	m
질	량	킬로그램 (Kilogram)	kg
시	간	초 (second)	s
전	류	암페어(ampere)	A
열역학적	온도	켈빈(kelvin)	K
물질의	양	몰(mole)	mol
광	도	칸델라(candela)	cd
부기본 단위			
평면각		라디안(radian)	rad
입체각		스테라디안(steradian)	sr

중요

특히 몰(Mole)에 대해서는 정확히 알아야 함.

• 1몰(mol) :

- 어떤 물질이 자신의 원자량 만큼의 질량(g)을 가질 때가 1몰.
- 모든 물질은 1몰일 때 원자의 개수가 아브가드로 숫자와 같다.

[아브가드로 수 (Avogadro Number; Avo. No. Avo. #) : 6.02×10^{23}]

- 모든 기체는 1몰일 때 부피가 22.4 Liter

확인

^{60}Co 의 경우 1 mol의 질량은 60g, 60g의 코발트 원자수는 6.02×10^{23} 개

^{12}C 의 경우 1 mol의 질량은 12g, 12g의 탄소 원자수는 6.02×10^{23} 개,

^{12}C 가 기체인 경우 1 mol 부피는 22.4 Liter, 이 때 탄소 기체원자수는 6.02×10^{23} 개,

1 mol : 12 g 이 되므로 이를 이용하여 탄소원자 한 개의 질량을 직접 구할 수도 있다.

1 mol(6.02×10^{23} 개)일 때 12g이니까, $6.02 \times 10^{23} : 12 = 1 : x \text{ g}$ $x = 1.99 \times 10^{-23} \text{ g}$

[중요 : 몰과 관련된 모든 문제는 이 비례식으로 풀 수 있다]

명 칭	기 호	10의 급수	10진법의 호칭
페 타 (peta)	P	10^{15}	1000조
테 라 (tera)	T	10^{12}	1조
기 가 (giga)	G	10^9	10억
메 가 (mega)	M	10^6	100만
킬 로 (kilo)	k	10^3	1천
헥 토 (hecto)	h	10^2	100
데 카 (deka)	da	10	10
데 시 (deci)	d	10^{-1}	10분의 1
센 티 (centi)	c	10^{-2}	100분의 1
밀리 (milli)	m	10^{-3}	1천분의 1
마이크로 (micro)	μ	10^{-6}	100만분의 1
나 노 (nano)	n	10^{-9}	10억분의 1
피 코 (pico)	p	10^{-12}	1조분의 1
펨 토 (femto)	f	10^{-15}	1천조분의 1

- 1000배를 나타내는 킬로의 k는 반드시 소문자로
- 밀리(m),마이크로(μ), 나노(n), 피코(p) 및 킬로 (k) 메가(M), 기가(G), 테라(T): 방사능의 세기
- 옹스트롬(angstrom Å): 10^{-10} m 또는 10^{-8} cm이며 원자의 반지름에 해당하는 길이
- 펨토(f)는 원자핵의 반지름을 나타낼 때 이용됨

나. 기본 물리 방정식

- 속도(v) : 시간당 이동한 거리

단위 : m/s

- 가속도(a) : 시간당 속도의 변화량

단위 : $\frac{\text{m}}{\text{s}} / \text{s} = \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

- 힘(F) : 정지하고 있는 물체를 움직이고, 움직이는 물체의 속도나 운동방향을 바꾸는 물리량

힘 = 질량 (m) × 가속도 (a)

단위 : 뉴턴(N) = $\text{kg} \times \frac{\text{m}}{\text{s}} / \text{s} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$ [디멘전 $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^{-2}$]

$= 10^5 \text{ g} \cdot \text{cm} / \text{sec}^2 = 10^5 \text{ dyn}$

확인

정지하고 있는 질량 1 kg의 물체에 힘을 가했더니 10초 후 속도가 20 m/s가 되었다. 주어진 힘은 얼마인가?

(해) 질량 1 kg, 가속도는 시간당 속도의 변화량이므로 $(20 \text{ m/s} - 0) / 10 \text{ sec} = 2 \text{ m/s}^2$, 따라서 주어진 힘 $F = ma$ 는 2 뉴턴(N)

- 일(W)과 에너지(E)

일은 물체에 작용한 힘(F)과, 그 힘의 방향으로 움직인 물체의 변위(이동거리, S)의 곱

$$W = FS = mas \text{ [즉 질량} \times \text{가속도} \times \text{변위]}$$

단 작용하는 힘과 이동하는 방향이 같지 않을 때는 힘과 변위 사이의 각을 Θ 라 할 때

$$W = FS \cos \Theta$$

에너지 : 물체가 물리적인 일을 할 수 있는 능력. 일의 반대 개념이므로 일과 에너지는 같은 물리량이며 단위는 같다.

- 일(W)과 에너지(E)의 단위 :

줄 (J) : 기본단위로서 1joule은 1kg의 물체를 1m/s^2 의 가속도로 1m 움직이는 데 필요한 에너지 (또는 그 때까지 진행된 일의 양),

$$J = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \times \text{m} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2} \text{ [디멘전 } \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sec}^{-2}] = 10^7 \text{ g} \cdot \text{cm}^2 / \text{sec}^2 = 10^7 \text{ erg}$$

에르그 (erg) : 1g의 물체를 1 cm/s^2 의 가속도로 1 cm 이동하는 데 필요한 에너지

$$1\text{erg} = 10^{-7}\text{J}, \quad 1\text{J} = 10,000,000 \text{ erg.}$$

칼로리 (cal) : 열량을 나타내는 에너지의 단위로 자주 사용

1 cal는 물 1 g의 온도를 1°C 올리는 데 필요한 에너지로 $1 \text{ cal} = 4.2 \text{ J}$ 임

거꾸로 $1 \text{ J} = 0.24 \text{ cal}$

[주의 : 칼로리의 C를 대문자로 쓰면, 즉 1 Cal는 1 kcal와 같은 의미로 $1 \text{ Cal} = 4200 \text{ J}$]

잠깐

또 하나의 에너지: 전자볼트 (electronvolt ; eV).

- 전자 1개가 [전자 한 개의 전하량(전기량)은 1.602×10^{-19} 쿨롱(C)] 가 [진공중에서](#) 1 V의 전위차로 가속될 때 얻는 운동에너지
- 전자기적으로 볼 때 전하량 (C) \times 전위차 (전압 V) 또한 에너지 (J)이다.
- 따라서 $1\text{eV} = 1.60218 \times 10^{-19}(\text{C}) \times 1(\text{V}) = 1.60218 \times 10^{-19} \text{J}$

$$= 1.60218 \times 10^{-12} \text{erg}$$

The electronvolt (symbol eV) is a unit of energy. It is the amount of energy equivalent to that gained by a single unbound electron when it is accelerated through an electrostatic potential difference of one volt, [in a vacuum](#). In other words, it is equal to one volt (1 volt = 1 joule / 1 coulomb) multiplied by the (unsigned) charge of a single electron ($1 \text{ e} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$).

원자력이론

- 일률
 - 단위시간당 일의 량 : $W \text{ (watt)} = \text{J/sec}$
 - 따라서 전기요금등에 자주 이용되는 Wh(와트시) 등은 거꾸로 일(즉 에너지)의 단위이다
 $1\text{Wh} = 1\text{watt} \times 1 \text{ hr} = 1\text{J/s} \times 1\text{hr} = 1\text{J/s} \times 3600 \text{ s} = 3600 \text{ J}$
- 일과 일률 : $1 \text{ J} = 1 \text{ W} \cdot \text{sec}$, $1 \text{ W} = 1 \text{ J/sec}$

물리량	기 본 식	MKS단위		CGS 단위	
		기 호	차원(dimension)	기 호	차원(dimension)
힘	힘 = 질량 \times 가속도	N	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	dyn	$\text{g} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$
에너지(일)	에너지 = 힘 \times 거리	J	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$	erg	$\text{g} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
일률	일률 = 일/시간	W	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$	erg/s	$\text{g cm}^2 \text{ s}^{-3}$

* 입자플루언스 ($\#/\text{cm}^2$) 또는 rad, steradian의 차원은?

잠깐

차원에 대해서는 잘 알아 둡시다.

2. 입자, 파동의 이중성과 양자역학

가. 입자관련 물리량

질량이 있는 물질인 입자는 다음의 운동량을 가진다.

- 운동에너지 (Kinetic Energy) = $\frac{1}{2}mv^2$,
- 운동량 $P = mv$

문] 초속 20m/s로 날아가는 질량 300g인 야구공을 운동에너지는?

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \text{에서 } \frac{1}{2}(0.3\text{kg})(20\text{m/s})^2 = 3 \text{ J}$$

문] 운동에너지가 20 keV 일 때 전자의 속도는 얼마인가?

[풀이]

20 keV 일 때

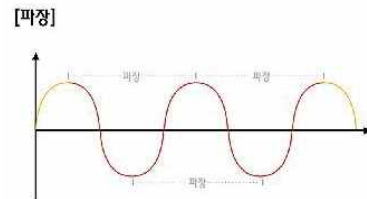
$$K = \frac{1}{2}m_e v^2, \quad v = \sqrt{\frac{2K}{m_e}}, \quad v = \sqrt{\frac{2K}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \times 20\text{keV} \times 1.6 \times 10^{-16}\text{J/keV}}{9.1 \times 10^{-31}\text{kg}}} = 8.39 \times 10^7 \text{m/s}$$

가. 파동(wave) 관련 물리량

질량이 없는 파동은 다음의 물리량을 가진다.

- 파장, 진동수, 속도

- 파장 (wave length), λ (단위 cm, 또는 m) : 파의 마루에서 마루 (또는 골에서 골까지의 거리)



- 진동수 (또는 주파수, frequency), ν (또는 f , 단위 sec^{-1}) - 단위시간당 진행한 파장의 숫자.
- 파의 진행속도 (v) : 파장(λ) \times 진동수(ν)

$$v = \lambda \nu ; \text{광속일 때는 } c = \lambda \nu$$

확인 파의 길이(파장 λ) 가 5 cm 인 전자기파가 1초간 50회 진행한다면 1초당 전자파의 진행 속도는 $[5 \text{ cm} \times 50] / \text{sec} = 2.5 \text{ m/sec}$ 임은 자명.

- 질량이 없는 파동의 에너지 및 운동량 (너무 중요한 공식)

- 에너지 $E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$ ($\because c = \lambda\nu =$ 파동이 광속일 때)

- 운동량 $P = \frac{h}{\lambda} = h \frac{\nu}{c}$ ($\because c = \lambda\nu =$ 파동이 광속일 때)

여기서 h 는 플랑크 상수 $= (6.626196 \ 0.0000076) \ 10^{-27} \text{erg} \cdot \text{s} = 6.6260755 \ 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$
 즉 플랑크 상수는 광자가 갖는 에너지와 진동수의 비(比)

The Planck constant is the conversion factor for the energy of a photon from its frequency,
 $E = hf$, where E is energy, h is Planck's constant, and f is frequency. (USA)

The reduced Planck constant, also known as Dirac's constant, and denoted, \hbar pronounced "h-bar".
 This constant is used in the same formula when the frequency is in radians instead of cycles,
 $E = \hbar\omega$, where the frequency in radians per second is given by $\omega = 2\pi f$. (angular frequency)

$$P = \hbar k, \text{ where } k \text{ is angular wavenumber } 2\pi\left(\frac{1}{\lambda}\right)$$

문] 1eV의 에너지를 가지는 전자파의 파장은?

[풀이] $E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$

$$\therefore \lambda = h\frac{c}{E} = 6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s} \times \frac{3 \times 10^8 \text{m/s}}{1 \text{eV} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{J/eV}} = 1.24 \times 10^{-6} \text{m}$$

문] 파장 1 Å (10^{-10} m)인 X-선의 에너지를 구하고 keV로 나타내시오.

[풀이]

$E = h\nu = hc/\lambda$ 에서

$$= 6.62 \times 10^{-34} \times 2.997 \times 10^8 \div 10^{-10} \approx 1.98 \times 10^{-15} \text{ (J)} \approx 12.4 \text{ (keV)}$$

$$(\because 1 \text{ keV} = 1.602 \times 10^{-16} \text{J})$$

다. 파동-입자의 이중성 (Wave Particle Duality)

- 드브로이 파장 (De Broglie Wavelength 입자의 파장 ; matter wave 물질파) :
 - 드브로이는 자연이 Symmetry를 이루고 있다고 생각
 - 따라서 질량이 없는 파동이 $p = \frac{h}{\lambda}$ 을 가진다는 것에 착안하여
 - 질량이 있는 입자도 파동을 가질 것이라고 가정함.
 - 이에 따라 드브로이는 λ 와 p 를 바꾸고 p 에는 다시 mv 를 과감하게 대입함.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

- 후일 핵물리 실험에서 드브로이 파장이 관찰되어 입자와 파동의 이중성이 판명됨

$$[\text{Lorentz factor } (\gamma) \text{ 가 고려되면 } \lambda = \frac{h}{\gamma m_0 v} = \frac{h}{m_0 v} \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}]$$

상식

물질파 개념은, 빛이 파동성(波動性)과 입자성(粒子性)의 이중성을 가지는 것에 착안해, 전자(電子) 등의 입자도 파동성이 수반된다고 생각하여 1924년 L.드브로이가 도입했다. 물질파는 그 파장이 p 에 반비례하며 $\lambda = h/p$ 값을 가진다고 가정하여 N. Bohr의 양자조건을 물질파로 설명하였다. 1927년 C.J.데이비슨과 L.H.거머에 의해 전자선이 나타내는 파동에 특징적 간섭현상이 확인되어 실험적으로 입증되었다. 1929년 노벨 물리학상 수상

라. 상대론 (relativity)

- 정지질량에너지(질량-에너지 등가)

정지시의 질량이 m_0 인 입자가 모두 에너지로 바뀌면

$$E_0 = m_0 c^2$$

- 상대론적 질량

물질(입자)의 속도가 작은 경우(일상적인 경우)에는 무시할 수 있지만 입자의 속도가 빨라지면, 더구나 속도가 광속도에 접근하면 입자의 질량은 증가하며 광속으로 다가갈수록 무한대에 접근한다.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

- 상대론적 총에너지

상대론적으로 총에너지는 $E = mc^2$ 이다. 물론 여기서 m 은 상대론적 질량이다.

- 총에너지 $E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$

- 상대론적 운동에너지

상대론적 운동에너지는 총에너지를 먼저 구하고 여기서 정지질량에너지를 뺀 값이 된다.

(사실 이렇게 설명하면 너무나 단순화 시켜 말도 안되지만)

상대론적 운동에너지(K.E.) = 총에너지 - 정지질량 에너지

$$= mc^2 - m_0c^2 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - m_0c^2 = \left(\frac{1}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}} - 1 \right) m_0c^2$$

- 상대론적 운동량

위와 같은 빠른 속도의 입자의 운동량은 기존의 $p = mv$ 로 만족되지 않음

$$p = mv = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}} v$$

입자 및 파동 방정식 정리

구분	정지질량	에너지	운동량 및 물질파	상대론적 효과
입자	있음	$K.E. = \frac{1}{2}mv^2$ <p>따라서 $v = \sqrt{\frac{2 \cdot K.E.}{m}}$</p> $P = mv = \sqrt{2m(K.E.)}$	$p = mv$ $\lambda = \frac{h}{mv}$	$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ $K.E. = mc^2 - m_0c^2$ $= \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - m_0c^2$ $p = mv = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} v$
파동	없음	$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$	$p = \frac{h}{\lambda}$	-

원자력이론

문] 전자의 정지질량에너지를 구하시오.

[풀이] 전자의 정지질량에너지는

$$\begin{aligned} E &= m_0 c^2 \\ &= 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg} \times (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2 \\ &= 8.19 \times 10^{-14} \text{ J} \times \frac{1 \text{ eV}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}} \times \frac{1 \text{ MeV}}{10^6 \text{ eV}} \\ &= 0.511 \text{ MeV} \end{aligned}$$

문] 운동에너지가 20 keV, 1 MeV일 때 전자의 속도는 얼마인가?

[풀이]

(1) 20 keV일 때: 위의 문제와 동일

$$v = \sqrt{\frac{2K}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \times 20 \text{ keV} \times 1.6 \times 10^{-16} \text{ J/keV}}{9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}}} = 8.39 \times 10^7 \text{ m/s}$$

잠깐

질량이 극히 작은 전자는 고에너지에서 상대론적 효과가 있음.

따라서 전자의 에너지가 작을 때는 고전적인 방식으로 풀어도 오차가 거의 없으나 전자의 에너지가 정지에너지의 1/10 이상일 경우(약 50 keV 이상)에는 상대론적 효과를 고려하여야 함.

(2) 1 MeV일 때

$$K = mc^2 - m_0c^2$$

$$= \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - m_0c^2 = m_0c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - 1 \right)$$

$$1 = 0.511 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) \text{에서 } v = 0.941 c \text{가 된다.}$$

즉, 광속의 94.1 %의 속력을 가지므로 1 MeV를 가진 전자의 속력은 $2.823 \times 10^8 \text{ m/s}$ 이다.

잠깐

이 문제는 v/c 를 예를 들어 t 라는 다른 변수로 치환하고 풀어야 쉽게 풀 수 있음.

문] 정지한 전자의 속력을 $0.9c$ 로 증가시키기 위해 필요한 에너지를 계산하시오.

[풀이] 속력이 $0.9c$ 일 때의 전자의 에너지는

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{0.511 \text{ MeV}}{\sqrt{1 - \frac{(0.9c)^2}{c^2}}} = \frac{0.511 \text{ MeV}}{\sqrt{0.19}}$$

$$= 1.172 \text{ MeV}$$

따라서 가해주어야 할 에너지는

$$K = mc^2 - m_0 c^2 = 1.172 \text{ MeV} - 0.511 \text{ MeV} = 0.661 \text{ MeV}$$

잠깐

전자의 질량은 암기하지 않더라도 정지질량에 해당하는 에너지가 0.511 MeV 라는 사실은 기억하여야 함.

예를 들어 양전자와 음전자가 서로 만나 쌍소멸 할 때 발생하는 전자파의 에너지는 두 전자의 정지질량 에너지의 합인 1.022 MeV 임

제 2 절 원자 및 원자핵

1. 원자의 구조

가. 원자론

- 데모크리토스의 원자론 :

- 고대인들은 물질을 분해하면 더 이상 나눌수 없는 궁극적인 입자에 대해 탐구함.
- 오늘날 우리가 “모든 물질은 원자로 이루어져 있다”라는 명제에서 사용되는 원자(atom)란 말은 고대 그리스 자연철학자인 데모크리토스(Demokritos)가 처음 사용함. 이는 그리스어로 “더 이상 나눌 수 없는 것”이라는 의미를 지닌다.
- 데모크리토스의 우주를 ‘충만’과 ‘진공’으로 구분하여 충만은 원자로 이루어져있다고 생각 하였으며, 따라서 사색에 의한 이론이지 과학적 근거에 의한 원자론은 아님.
- 이후 과학이 발전함에 따라 원자의 구조가 밝혀지고 원자는 더 이상 나눌 수 없는 것이 아니라 더욱 작은 기본 입자의 집합체임이 밝혀짐.

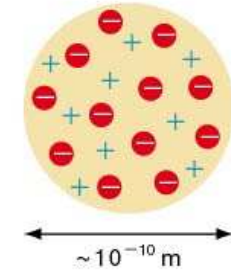
- 돌턴의 원자론 :

- 물질을 분해해 가면 더 이상 분해가 불가능한 딱딱한 돌멩이 같이 궁극적인 미립자에 도달 한다고 하여, 그 입자를 원자라고 함

원자력이론

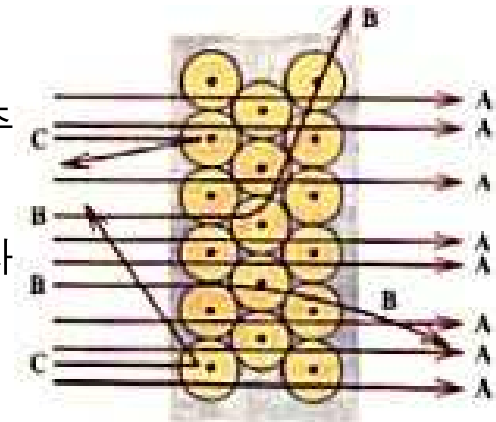
- 돌턴은 기체반응의 법칙, 배수비례의 법칙등에 근거하여 원자론을 도출함으로써 근대 원자론의 아버지라 불림.

Thomson's atomic model



- 톰슨의 원자론 : 건포도빵 모양(rasin bread model; plum puding medel)
 - 전자를 발견 (Cathode ray); 전자의 전하량과 질량을 규명, 돌턴이론 파기
 - 원자는 구형이고 중성이다
 - 음전기를 띤 전자는 고정되어 박혀있고(건포도) 빵 전체에 동일한 양전기가 퍼져있다.

- 러더퍼드(Rutherford) : 행성모양 이론
 - α 선 산란실험으로 원자핵을 발견
 - 원자의 중심에 질량의 대부분이 집중된 양전기를 띤 핵이 있고 주변에 전자가 돌고 있다.
 - 문제점 - 핵주변을 돌고 있는 전자는 정전기적 인력에 의해 전자기파를 내놓으며 핵과 충돌하고 만다.



- 채드윅(Chadwick) : 중성자 발견

- 보어(Bohr) :
 - 현대적 원자모형 수립
 - 전자는 아무 궤도나 돌지 않고 일정하게 정해진 궤도를 돈다는 이론
 - 양자(量子) 물리량이 연속적인 값을 가지지 못하고 띄엄띄엄한 특정한 값만 가지는 현상
 - a. 독립된 궤도 : 원자내의 전자는 불연속적인 에너지 E_1, E_2, E_3, \dots 을 가진다. 핵에서 멀어질수록 전자의 에너지는 커진다.
 - b. 궤도내의 전자는 전자파를 발생하지 않음 - 전자가 주어진 궤도를 회전하고 있는 한 전자는 전자파를 방출하지 않음 (맥스웰의 전자기론과는 상반됨)
 - 1. 양자조건 : 전자의 각운동량 (mvr)은 $\frac{h}{2\pi}$ 의 자연수배 ($n, n=1, 2, 3 \dots$)이다. (또는 정상
- 운동 조건 $mvr = \frac{h}{2\pi}n$
2. 진동수 조건 : 전자가 높은 에너지 준위에서 낮은 에너지 준위로 전자가 이동할 때 그 에너지 차만큼의 전자파를 방출 (반대의 경우는 흡수) 한다. 이 때 전자파의 에너지는 $h\nu = E' - E$

참고 마지막 양자조건의 의미?

- 양자조건은 일정 지점에서 전자가 궤도를 출발하면 다시 그 지점으로 돌아왔을 때 궤도의 변이가 같다는 의미
- 전자는 마루 꼭대기(또는 골 밑바닥)에서 출발했으면 한 바퀴 회전 후 마루 꼭대기(또는 골 밑바닥)로 돌아와야 한다.
- 전자가 그리는 원이 파장의 자연수 배라는 의미이다.
- 전자까지의 반지름을 r 이라 하면 원의 둘레는 $2\pi r$, 따라서
 - 전자의 궤도는 파장의 n (n = 자연수) 배이다. $2\pi r = n\lambda$
 - 각 운동량 (mvr)에서 mv 는 전자의 물질파이므로 $mv = p = h/\lambda$
 - 또 r 은 $2\pi r = n\lambda$ 라는 위의 식에서 $r = \frac{n\lambda}{2\pi}$ 로 바꿀 수 있다.

$$\text{따라서 } mvr = (mv) \times r = (h/\lambda) \times \left(\frac{n\lambda}{2\pi}\right) = \frac{h}{2\pi}n$$

- 현대의 원자론 : 전자의 궤도는 확률적이라는 개념하에서, 전자운(雲) 모델을 채택



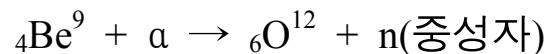
참고

세계사적 주요 인공핵변환

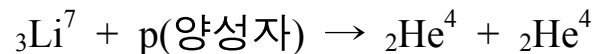
- 양성자의 발견 : 1919년 러더퍼드는 고속의 α 입자를 질소의 원자핵에 충돌시켜 최초로 질소를 산소로 인공핵변환을 일으키는데 성공.



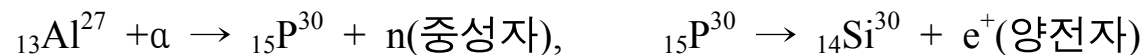
- 중성자의 발견 : 1932년 채드윅은 베릴륨에 α 입자를 충돌시킬 때, 중성자가 나오는 것을 발견



- 양성자에 의한 인공 핵변환 : 1932년 코크프로트와 월턴은 입자 가속 장치로 양성자를 가속, 충돌시켜 원자핵을 인공 변환시키는데 성공.



- 인공 방사능의 발견 : 1934년 퀴리 부부는 최초로 인공 방사성 원소를 발견하였다. 최근에는 원자로를 이용하여 많은 종류의 인공 방사성 원소들이 만들어지고 있다.



나. 전자의 궤도

- 원자핵을 중심으로 회전하고 있는 전자의 궤도는 안쪽에서부터 K, L, M, N, ...으로 이름 붙인다.

- $n=1$ (K-궤도), $n=2$ (L-궤도), $n=3$ (M-궤도), $n=4$ (N-궤도), ...

- 각 궤도에 수용될 수 있는 전자의 최대 수는 $2n^2$ (n 은 주양자수, 궤도 안쪽부터 1, 2, 3...의 자연수), 즉

$$n=1 \text{인 K 궤도에는 } 2 \times 1^2 = 2 \text{개}$$

$$n=2 \text{인 L 궤도에는 } 2 \times 2^2 = 8 \text{개}$$

$$n=3 \text{인 M 궤도에는 } 2 \times 3^2 = 18 \text{개}$$

$$n=4 \text{인 N 궤도에는 } 2 \times 4^2 = 32 \text{개}$$

문] M각까지 최대한 들어갈 수 있는 전자는 몇 개인가?

[풀이] 궤도전자 수는 $2n^2$

$$\text{K 각}(n=1)\text{에는 } 2 \times 1^2 = 2 \text{개}$$

$$\text{L 각}(n=2)\text{에는 } 2 \times 2^2 = 8 \text{개}$$

$$\text{M 각}(n=3)\text{에는 } 2 \times 3^2 = 18 \text{개}$$

[답] $2 + 8 + 18 = 28$ 개

잠깐

M각에 최대한 수용되는 전자는 몇 개인가? 라는 질문에 대해서는

[풀이] M 각(n=3)에는 $2 \times 3^2 = 18$ 개]

문] 전자궤도 L각에 6개의 전자가 존재하면서 전기적으로 중성인 원자는?

- ① 헬륨 ② 탄소 ③ 질소 ④ 산소

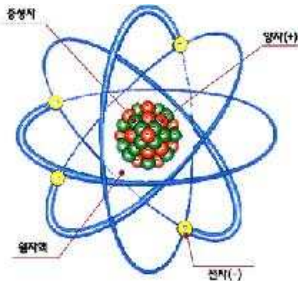
[풀이] 전자궤도 K각에는 2개의 전자가 위치하면 포화되므로 전체 전자의 수는 8개이고 전기적으로 중성이므로 양성자의 수(원자번호)도 8이므로 산소(O)에 해당.

즉 1~20번까지의 원자 및 주요한 원자의 원자번호는 암기하고 있으면 편리. 아래 표외에 더욱 중요한 것들이 Co, Cs, Ir, I 등임.

원자 번호	원소명	원자 번호	원소명	원자 번호	원소명	원자 번호	원소명
1	수소 (H)	6	탄소 (C)	11	나트륨 (Na)	16	황 (S)
2	헬륨 (He)	7	질소 (N)	12	마그네슘 (Mg)	17	염소 (Cl)
3	리튬 (Li)	8	산소 (O)	13	알루미늄 (Al)	18	아르곤 (Ar)
4	베릴륨 (Be)	9	불소 (F)	14	규소 (Si)	19	칼륨 (K)
5	붕소 (B)	10	네온 (Ne)	15	인 (P)	20	칼슘 (Ca)

다. 원자의 구성요소

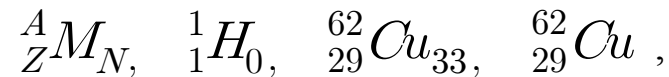
- 구성 : 원자(atom)는 원자핵(nucleus)과 전자(electron)로 구성
- 원자핵 : 양성자(또는 양자, proton) + 중성자(neutron)로 구성되어 전체질량의 99.95%를 차지
- 핵자 (nucleon) : 양성자와 중성자를 통칭
- 구성요소 중 양성자와 중성자의 질량은 거의 같으며 (중성자가 조금 더 질량이 크다) 전자는 양성자 또는 중성자 질량의 1840분의 1 정도에 해당한다.



종 류	기 호	전 하*	정 지 질 량		
			무게(kg)	원자질량 (amu, u)	등가에너지 (MeV)
양성자	p	+1	1.673×10^{-27}	1.007276	937.774
중성자	n	0	1.675×10^{-27}	1.008665	939.067
전 자	e	-1	9.109×10^{-31}	0.000548	0.511

라. 원자의 표기 및 분류

- 원자의 표기 : 일반적으로 다음과 같이 표기한다.



- M : 원소기호 (Atomic Symbol), 수소(Hydrogen)일 때는 H, 구리(Copper)는 Cu로 표시
- Z : 원자번호 (Atomic number), 원자속의 양성자수. 수소는 Z =1, 구리는 Z=29
- A : 원자량 또는 질량수 (mass number), 양성자와 중성자를 합한 수(핵자의 수)
 $A = Z+N$. 수소는 양성자만 하나이므로 $Z = A$, 구리는 핵 속에 중성자가 33개 더 있기 때문에 $A = 62$ 이다.
- N : 중성자수 (neutron number) = $A - Z$, 일반적으로 잘 표시하지 않음

원자력이론

- 동위원소(동위체), 동중원소(동중체, 동중핵), 동중성자원소(동중성자체), 핵이성체
 - 동위원소(isotope) : 양성자 갯수(Z)가 같은 원소
 - 동중원소(isobar) : 질량수(A; 양성자 + 중성자 수)가 같은 원소
 - 동중성자원소(isotone) : 중성자수 (N, i.e., A-Z)가 같은 원소
 - 핵이성체(isomer) : Z와 A는 같고 어느 한쪽이 준안정(metastable)한 핵종
 - 경상핵(mirror nucleus) : **Z와 N이 바뀐 핵종** ${}^{15}_7\text{N}_8, {}^{15}_8\text{O}_7$,

구 분	Z	N	A (Z+N)	비 고
동위체	=	≠	≠	${}^1_1\text{H}_0, {}^2_1\text{H}_1$
동중체	≠	≠	=	${}^{90}_{38}\text{Sr}_{52}, {}^{90}_{39}\text{Y}_{51}$
동중성자체	≠	=	≠	${}^{60}_{27}\text{Co}, {}^{62}_{29}\text{Cu}$
핵이성체	=	=	=	${}^{99}_{43}\text{Tc}, {}^{99m}_{43}\text{Tc}$

문] ${}_{19}\text{K}^{39}$ 와 동중성자체(Isotone)인 것은?

- ① ${}_{37}\text{Rb}^{87}$ ② ${}_{43}\text{Tc}^{99m}$ ③ ${}_{38}\text{Sr}^{87}$ ④ ${}_{20}\text{Ca}^{40}$

문] 동위체, 동중성자체 등의 예가 틀리게 조합된 것은?

- ① 동위체 ${}^1\text{H}, {}^2\text{H}$ ② 동중성자체 ${}^3\text{H}, {}^4\text{He}$
 ③ 동중체 ${}^3\text{H}, {}^3\text{He}$ ④ 핵이성체 ${}^{99m}\text{Tc}, {}^{99}\text{Tc}$

여기와 전리

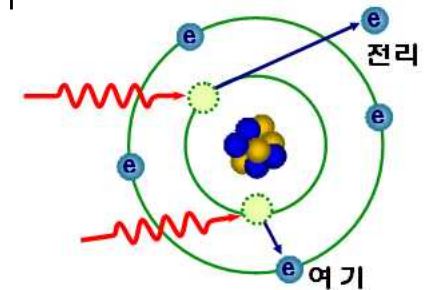
전자의 에너지준위와 구속과 관계되는 용어

여기(excitation)

- 여기상태 = 흥분상태 = 들뜬 상태 = excited state
- 기저상태 = 바닥상태 = ground state
- 궤도전자가 에너지를 흡수하여 안정된 기저상태(ground state)에서 에너지가 높은 여기 상태 상태로 옮겨가는 것
- 핵의 구속력을 벗어나지는 않은 상태
- 여기상태는 그 수명이 10^{-8} sec 정도로 짧아서 곧 전자파를 방출하면서 기저상태로 환원

전리(ionization)

- 에너지를 흡수하여 궤도전자가 원자핵의 구속력으로부터 완전히 벗어나는 것
- 원자는 전자를 잃어 이온화된 상태.
- 이 때 전자를 자유 전자(free electron) 이라 함.
- W값 : 1개의 이온쌍을 만드는데 필요한 평균에너지
(반도체 Si : 3.6eV, 공기 : 34eV)



원자핵과 원자의 비교

	원 자	원자핵
반 경	$0.53 \times 10^{-10} n^2 \text{ (m)}^*$	$1.2 \times 10^{-15} A^{1/3} \text{ (m)}$
	$0.53 \times n^2 \text{ (Å)}^{**}$	$1.2 \times A^{1/3} \text{ (fm)}^{**}$
질 량 비	100	99.975
구 조	원자핵+전자	중성자, 양성자
중 심	있음 (원자핵)	없 음
작 용 력	쿨 롱 력	핵 력

원자의 특성은 핵의 주변, 즉 궤도전자에 의해 좌우되며 원자핵의 밀도는 질량수나 핵반경에 관계없이 일정하다.

* 수소 (H) 원자에 대해서만 적용되는 식이다. n 은 주양자수

** 전술하였듯이 $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$, $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$, A= 질량수

- 원자의 반경

- 원자의 반경은 전자의 궤도 반경, 즉 원자의 중심에서 전자까지의 거리를 말함
- $n = 1$ 일 때, 즉 전자가 K 궤도에 있을 때 원자의 반지름 r_1 은

$$r_1 = 0.53 \text{ \AA} \quad (1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}) = r_B = \text{Bohr radius (보어 반경)}$$

- 그 위의 궤도에서는 $r_n = r_1 n^2 = 0.53 n^2 (\text{\AA})$

여기서 $n = 2$ (L각), 3 (M각)...

- 원자핵의 반경

- 원자핵의 부피(V)는 원자핵의 질량수(A)에 비례한다.
- 닦은 비가 $A : B$ 일 때, 부피의 비는 $A^3 : B^3$ 임을 상기하면, 핵의 반경 r 은 $V^{1/3}$ 즉 $A^{1/3}$ 에 비례한다 ;

$$R \propto A^{1/3}$$

$$R = 1.2 \times 10^{-15} A^{1/3}$$

$$= r_0 A^{1/3} \quad r_0 \approx 1.2 \text{ fm} \quad , \quad A \text{는 원자핵의 질량수}$$

참고 (원자반경 공식의 유도)

전자가 원자핵 주위를 등속원운동을 하기 위해서는, 전자가 바깥쪽으로 도망가려는 원심력과 원자핵이 전자를 잡아다는 쿨롱(Coulomb)력이 같아야 한다. 즉 수소 원자의 경우

$$\text{원심력 } F = m \frac{v^2}{r}$$

$$\text{쿨롱력 } F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} \quad (\because \text{Coulomb's law})$$

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$$

$$\text{양자 조건에서 전자의 각운동량 } (mvr) = \frac{h}{2\pi} n$$

$$v = \frac{n}{mr} \frac{h}{2\pi} \text{ 를 대입하고 } r \text{에 대해 정리하면}$$

$$\therefore r = \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2} n^2 = 0.53 \times 10^{-10} n^2 \text{ (m)} = 0.53 \times n^2 \text{ (\AA)}$$

여기서 ϵ_0 는 유전율(誘電率) 상수(permittivity constant)로 $8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$ 으로 주어지는 값이다.

원자력이론

문] U^{235} 원자핵의 반지름을 구하시오.

[풀이] 위식에서 $R = 1.2 \times 10^{-15} A^{1/3} (\text{m}) \approx 1.2 \times 10^{-15} \times (235)^{1/3} (\text{m})$
 $\approx 7.39 \times 10^{-15} (\text{m})$

문] U^{235} 원자핵의 부피는 얼마인가라고 물으면?

[풀이] 반지름이 R 일 때 부피는 $\frac{4}{3} \pi R^3$ 이므로 위에서 구한 R을 대입

문] U^{235} 원자핵의 밀도를 구하시오 라고 묻는다면?

- 밀도 = 질량/부피 이므로
- 부피는 $\frac{4}{3} \pi R^3$
- 질량은 $235 \times$ 양성자 질량 (또는 중성자 질량)

문]. 원자핵의 반경이 $^A X$ 원소의 약 2배일 것으로 생각되는 원소는?

가. $^{(1.4A)} Y$ 나. $^{2A} Y$ 다. $^{4A} Y$ 라. $^{8A} Y$

참고 원자핵의 밀도

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{A \cdot M_p}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{3 \cdot M_p}{4\pi r_0^3} = \frac{1.673 \times 10^{-27}}{\frac{4}{3} \times 3.14 \times (1.2 \times 10^{-15})^3} \approx 2.3 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

여기서 $r_0 = 1.2 \text{ fm}$

[결론] 최종식의 M_p , r_0 는 모두 변하지 않는 상수이므로, 원자핵의 밀도 ρ 는 A 와 원자핵의 반경 R 에 무관하며, 어떤 원소이든지 원자핵의 밀도는 일정하다.

원자의 에너지 준위

- 원자에서 전자가 지니는 에너지 준위를 의미

$$E_n = -13.6 \frac{Z^2}{n^2} (eV) \quad [n=1,2,3 \dots\dots]$$

- 수소 원자의 에너지준위:

$$E_n = -13.6 \frac{1}{n^2} (eV) \quad [n=1,2,3 \dots\dots]$$

- 즉 안쪽궤도부터 -13.6 eV (K), -3.40 eV (L), -1.51 eV (M), ……등의 양자화된 에너지준위만 허용되며, 바깥궤도로 갈수록 핵에 묶여 있는 정도가 약해짐

전자가 천이시 방출되는 빛에너지

- 전자가 궤도 사이를 천이($E_m \rightarrow E_n$)할 때 준위차이에 해당하는 빛의 에너지가 방출됨

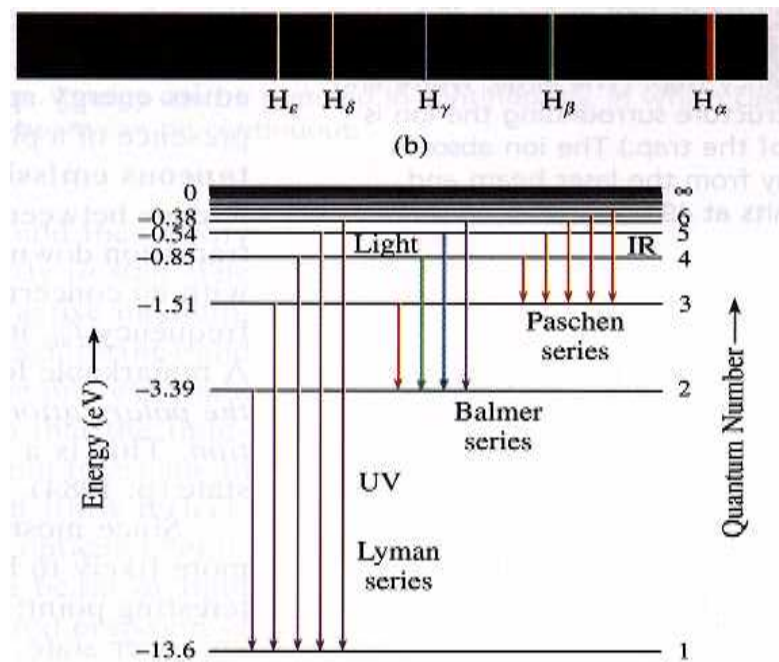
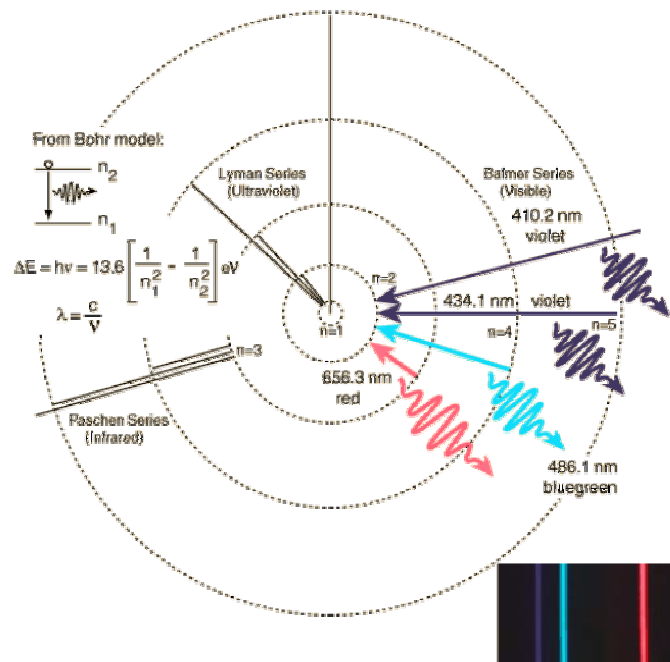
$$\begin{aligned} h\nu &= E_n - E_m \\ \frac{hc}{\lambda} &= -13.6 \frac{1}{n^2} + 13.6 \frac{1}{m^2} \quad \because c = \lambda\nu \end{aligned}$$

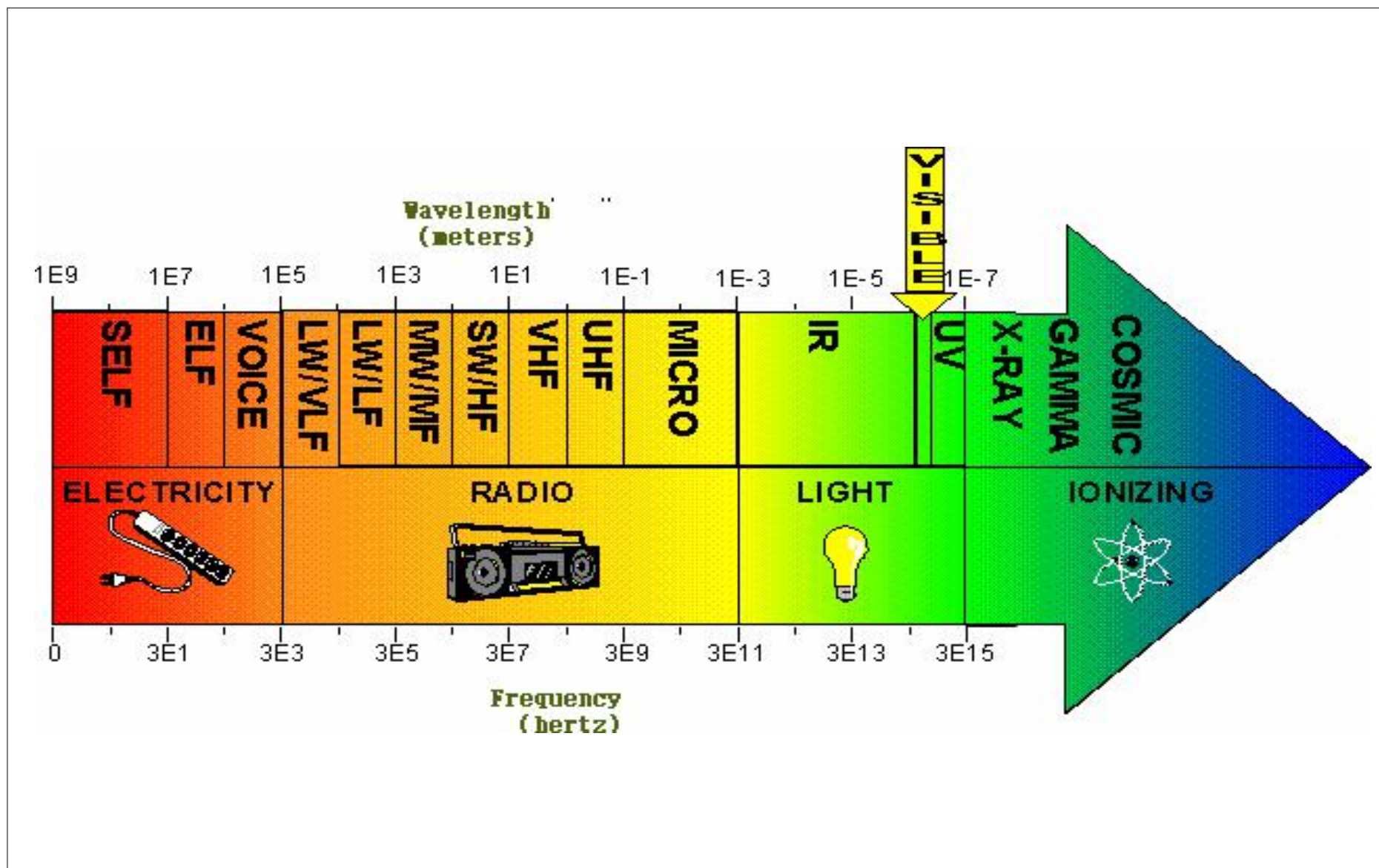
$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = m + 1, m + 2, \dots$$

$R_H = 1.09678 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$; Rydberg constant for Hydrogen

- 예를 들어 $n=3 \rightarrow n=2$ 로 천이시 에너지준위 차이 1.89 eV에 해당하는 656 nm 파장을 갖는 붉은 빛의 광자 방출
- Lyman series : $n=1$ 로 천이시 방출하는 파장이 370 nm 보다 작은 빛 (자외선)
- Balmer series : $n=2$ 인 궤도로 천이시 방출하는 파장이 370 nm ~780 nm 사이의 빛 (가시광선)
- Paschan series : $n=3$ 으로 천이할 때 방출하는 파장이 780 nm 보다 큰 빛 (적외선)

[참고] 수소원자의 선스펙트럼





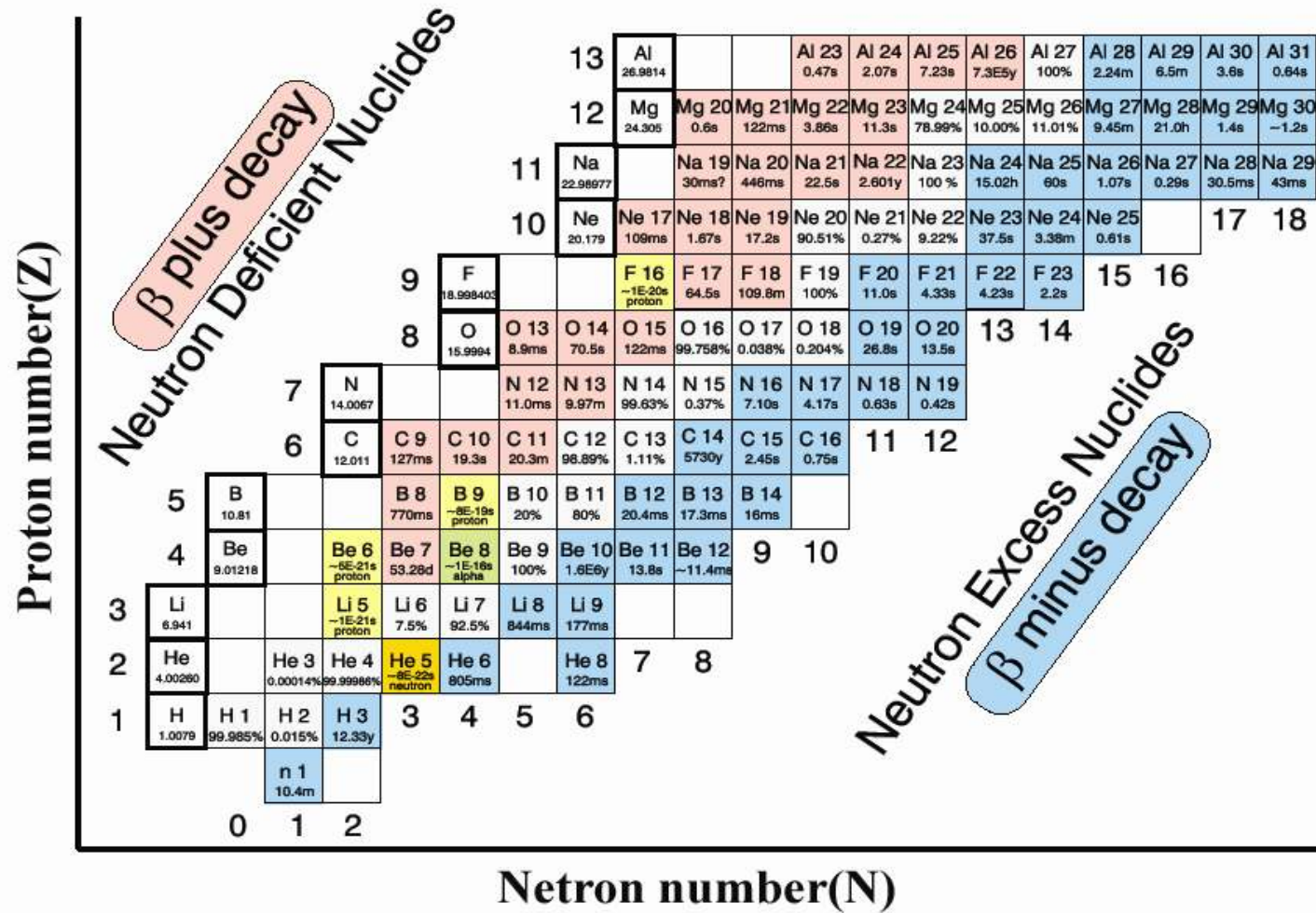
핵모형 및 원자핵의 안정

- 각모형 (Shell model)
 - 핵의 에너지 준위를 규명하는 이론이다.
 - 핵은 특별한 양성자수 또는 중성자수(마법수)를 가질 때 안정하다는 이론.
 - 마법수 : 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 등 이다.
 - 이들 수는 독립적으로도 해당되고 이들의 합에도 적용된다.

[예] ${}^4\text{He}(Z=2, N=2)$, ${}^{16}\text{O}(Z=8, N=8)$, ${}^{40}\text{Ca}(Z=20, N=20)$, ${}^{88}\text{Sr}(Z=38, N=50)$, ${}^{120}\text{Sn}(Z=50, N=70)$,
 ${}^{140}\text{Ce}(Z=58, N=82)$, ${}^{208}\text{Pb}(Z=82, N=126)$

- 이러한 핵종들이 안정한 이유는 핵자들이 핵 속의 중성자각이나 양성자각을 완전히 채우고 있는 것으로 사료되기 때문
- 이는 마치 궤도전자수가 각 궤도마다 $2n^2$ 개일 때 안정한 것과 유사하고, 원자에서 궤도전자 천이시 특성 X선을 방출하는 것과 유사하게 원자핵에너지의 여기상태, γ 선을 방출하는 것, 알파붕괴 현상 등을 어느 정도 설명할 수 있다.

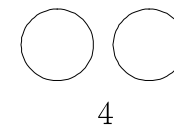
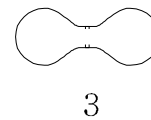
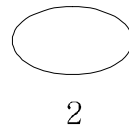
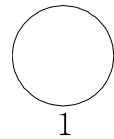
- 원자핵의 안정
 - 자연계에 존재하는 안정된 핵종의 중성자/양성자 비 = 1~1.5이다.
 - 원자번호 20번 이하는 양성자와 중성자의 비가 거의 1이다.
 - 원자번호가 커질수록 양성자와 중성자의 비가 1.5까지 확대된다. 즉 무거운 원자핵일 경우 안정한 원자핵은 중성자 수가 많다.
 - 원자핵이 무거워 질수록 중성자의 비율이 높아지는 것은 이는 양성자가 많아져 양성자끼리의 반발력이 심화됨을 막기 위한 것이다
 - 이 비율보다 중성자가 많은 중성자 과잉핵종은, 중성자가 전자를 방출하며 양성자로 바뀌는 β^- 붕괴, 반대로 중성자가 적은 중성자결손핵종은, 양성자가 양전자를 방출하며 중성자로 바뀌는 β^+ 붕괴를 한다.



- 물방울 모형 (Liquid drop model)

- 핵분열을 설명할 수 있는 모형
- 물방울의 표면장력이 물분자를 단단히 붙들고 있는 것처럼 핵력이 정전기력에 의해 반발하는 양성자를 붙잡아서, 물방울같이 핵을 둥근 공모양으로 유지하고 있다는 모형

1. 물 방 울	→	1. 반응물
2. 진동/신장	→	2. 복합핵/신장
3. 아령모양	→	3. 아령모양
4. 분 열	→	4. 분 열



- 아령 모양이 되면서 쿨롱 척력이 핵력보다 커져서 원자핵이 2개 이상의 조각으로 분열됨
- 또한 이렇게 원자핵이 물방울 모양이 되면 “실제로 측정하기 어려운 다양한 핵종의 원자핵의 질량의 계산”을 가능케 한다.

$$M = 0.99389A - 0.00081Z + 0.014 A^{2/3} + 0.083 \frac{(\frac{A}{2} - Z)^2}{A} + 0.000627 \frac{Z^2}{A^{1/3}} + \Delta$$

여기서 $\Delta = 0$ for odd A

$$\Delta = -0.036/A^{3/4} \text{ for even A \& even Z}$$

$$\Delta = 0.036/A^{3/4} \text{ for even A \& odd Z}$$

제 3 절 원자핵반응

1. 핵력과 결합에너지

가. 핵력

핵력(nuclear force)이라 함은 핵자를 응집시켜 핵이라는 입자를 형성시키는 힘을 말한다. 핵력은 다음과 같은 특징을 가진다.

- (1) 강한 인력(Strong attractive force): 쿨롱력보다 100배 정도 강한 인력.
- (2) 단거리력(Short range force): 핵자간의 거리 (a few fm)에서만 작용한다. (외부에서는 0)
- (3) 전하독립적(Charge independent): 전하와 무관. 즉 p-p, p-n, n-n 사이의 핵력은 같다.
- (4) 포화력(Saturated force): 원자핵내의 어느 지점에서나 핵밀도와 비결합에너지 일정
- (5) 교환력(Exchangeable force): π 중간자를 매개로 힘을 주고받는다.

잠깐

핵력의 다섯 가지 특징은 반드시 이해할 것.

- 원자질량단위 (atomic mass unit; amu 또는 u)
 - 원자 하나의 질량은 무거운 원자인 ^{238}U 의 경우에도 $4.3 \times 10^{-25} \text{ kg}$ 으로 일반적으로 쓰는 질량 단위보다 매우 작음.
 - 따라서 중성(즉 양성자와 같은 수의 전자를 포함한)의 ^{12}C 의 원자질량을 12 [단위는 u]로 두어 나머지 핵종에 대해 상대적인 질량의 단위를 사용하게 됨. 따라서

$$1 \text{ u} = ^{12}\text{C} \text{ 원자 하나의 무게} / 12$$

여기서 ^{12}C 탄소원자 1몰은 질량이 12g 이때 원자의 개수는 아브가도르 숫자(Avo. No.; N_A)인 원자갯수는 6.02×10^{23} 개임을 상기하면

$$\text{탄소원자 하나의 질량} = \frac{12\text{g}}{\text{Avo.No.}} = \frac{12\text{g}}{6.02 \times 10^{23}}$$

$$\text{따라서 } 1\text{u} = \frac{12\text{g}}{\text{Avo.No.}} \div 12 = \frac{1}{\text{Avo.No.}} \text{ gram}$$

$$= 1.660531495 \times 10^{-24} \text{ g} = 1.660531495 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

- 즉 1 u는 Avo. No. 의 역수이다.

문] ^{235}U 의 원자량은 약 235.044u이다. 1u의 정의로부터 1u의 질량을 구하여 우라늄 원자 1개의 질량을 구하라. 단 아브가도르 숫자(N_A)는 6.023×10^{23} 으로 한다.

[풀이] 1u 는 중성상태의 ^{12}C 원자 1개의 질량의 1/12로 정의된다. 탄소 원자 1mole의 질량은 12g이고 이때 원자수는 아브가도르 숫자(N_A)만큼 존재하므로

$$\begin{aligned} 1\text{u} &= \frac{^{12}\text{C 원자 1개의 질량}}{12} = \frac{12\text{g}/N_A}{12} = \frac{10^{-3}\text{kg}}{6.023 \times 10^{23}} \\ &= 1.6603 \times 10^{-27}\text{kg} \end{aligned}$$

따라서 ^{235}U 원자 1개의 질량은

$$235.044\text{u} \times 1.6603 \times 10^{-27} \text{ kg/u} = 3.9024 \times 10^{-25} \text{ kg}$$

- 1 u의 에너지
 - 상대성이론에 따라 질량과 에너지는 서로 변환되며, 모든 물질은 에너지덩어리로 존재한다고 본다. 즉, 1 u의 질량을 에너지로 환산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E &= m_0 c^2 = 1.6605 \times 10^{-27} \text{ kg} \times (2.9979 \times 10^8 \text{ m/sec})^2 \\ &= 1.429242 \times 10^{-10} \text{ J} = 931.5 \text{ MeV} \end{aligned}$$

- 핵의 결합에너지(Binding Energy; E_b)
 - 원자핵의 질량은 그것을 구성하고 있는 핵자(양성자, 중성자)를 각각으로 떼어 놓았을 때의 합보다 작다.
 - 그 차이를 질량결손 (ΔM)이라 하며 이 질량결손은 양성자와 중성자를 따로 따로 독립하고 있는 상태에서 핵력이 미치는 상태까지 접근시키는 데 소요되는 Potential 에너지의 감소에 해당한다.
 - 따라서 원자핵을 양성자와 중성자로 다시 떼어내기 위해서는 이만큼의 에너지를 가해주어야 하는데 이를 결합에너지라 한다.

결합에너지 = 양성자, 중성자 각각의 질량의 합 - 결합되었을 때의 핵의 질량

- 질량이 M인 어떤 원자핵이 양성자 Z개 중성자 N (A-Z) 개로 이루어져 있을 때 결합에너지 E_b 다음과 같다.

$$\text{질량결손 } \Delta M = (Z M_p + N M_n) - M$$

$$\text{결합에너지 } E_b = \Delta M c^2 = (Z M_p + N M_n - M) c^2$$

$$\text{핵자 1개당 결합에너지 } f_B = \frac{E_b}{A}$$

문] ${}^4_2\text{He}$ 원자핵의 질량이 4.00150 u 일때 결합에너지는 얼마인가?

(단 $M_p = 1.00727u$, $M_n = 1.00866u$, $M_H = 1.007825u$, $M_e = 0.0005486u$)

[풀이] 질량결손 $\Delta M = (Z M_p + N M_n) - M_{\text{He}}$ (여기서 M_{He} 는 헬륨의 핵질량)

$$= (2 \times 1.007275u + 2 \times 1.008665u - 4.00150u)$$

따라서 결합에너지는 $E_b = [ZM_p + NM_n - M(\text{He})]c^2$ 또는

$$= (2 \times 1.00727u + 2 \times 1.00866u - 4.00150u) \times \frac{931.5\text{MeV}}{1u}$$

$$= 28.3\text{MeV}$$

잠깐

위의 문제는 실제적인 문제는 아니다. 왜냐하면 물리학의 테이블(표)은 원자핵의 질량이 주어지는 것이 아니라 원자(핵 + 전자)의 질량이 주어지기 때문이다. 따라서 이때는 원자의 질량에서 전자의 질량을 빼서 핵의 질량을 구해 핵의 질량과 비교하여야 한다. 질량이 M인 어떤 원자가 양성자 Z개 중성자 N(A-Z) 개로 이루어져 있을 때 결합에너지 E_b 다음과 같다.

$$\Delta M = (Z M_p + N M_n) - (M - Z M_e)$$

(\because 여기서 M은 원자질량 따라서 $(M - Z M_e)$ 는 핵의 질량)

$$= [Z (M_p + M_e) + N M_n] - M$$

$$\doteq (Z(M_H) + N M_n) - M \quad (\because M_p + M_e \doteq M_H)$$

$$E_b = \Delta M c^2$$

문] ${}^4_2\text{He}$ 원자의 질량이 4.0026u 일때 결합에너지는 얼마인가? 또한 핵자 1개당 결합에너지는 얼마인가? (단 $M_n = 1.008665\text{u}$, $M_H = 1.007825\text{u}$)

[풀이] 결합에너지 $E_b = ([ZM_p + NM_n] - [M_{\text{He}} - ZM_e])c^2$

(여기서 M_{He} 는 헬륨의 원자질량, M_e 는 전자질량 따라서 $[M_{\text{He}} - ZM_e]$ 는 원자핵의 질량)

$$= [ZM_H + NM_n - M]c^2$$

$$= (2 \times 1.007825\text{u} + 2 \times 1.008665\text{u} - 4.0026\text{u}) \times \frac{931.5 \text{ MeV}}{1\text{u}}$$

$$= 28.3 \text{ MeV}$$

그러므로 핵자당 결합에너지는 $f_B = \frac{E_b}{A} = \frac{28.3}{4} = 7.075 \text{ MeV/핵자 (nucleon)}$ 이다.

잠깐

헬륨 원자질량이 주어졌을 때 전자 질량을 빼지 않고 계산한 잘못된 답은

$E_b = 27.3\text{MeV}$, $f_B = \frac{27.3}{4} = 6.825 \text{ MeV/핵자}$ 이 나온다. 이럴 경우 객관식문제에서는 i) 약 6.8 MeV, ii) 약 7.1 MeV 가 대부분 보기로 나온다.

- 핵자당 결합에너지

- ① 핵자 1개당 결합에너지를 말하며 E_b/A 이다.
- ② 핵자당 결합에너지는 $A \approx 60$ 부근에서 가장 크다. (^{56}Fe 이 최대)

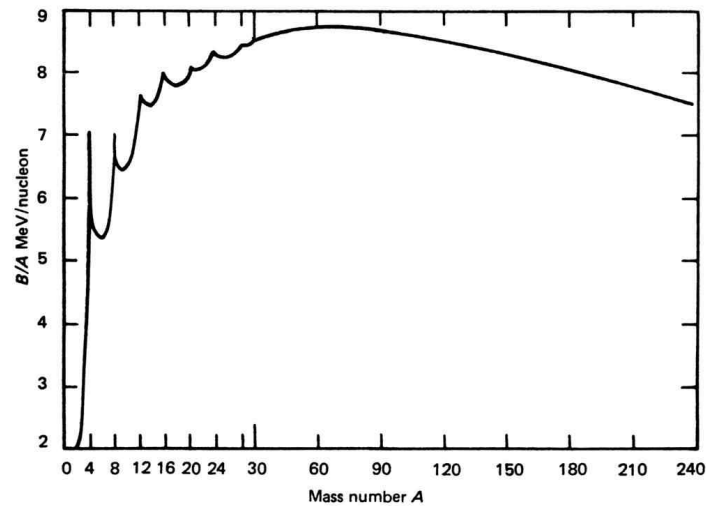


FIG. 3.3 The change of the average binding energy per nucleon with mass number A . Notice the change in scale after $A = 30$. (From *The Atomic Nucleus* by Evans.)

문] 질량수 150이상의 원자핵의 핵자당 결합에너지는?

- ① 1 ~ 3 MeV ② 3 ~ 15 MeV ③ 5 ~ 7 MeV ④ 7 ~ 8 MeV

문] 다음 원자번호가 낮은 물질중에서 상대적으로 결합에너지가 높아 핵자당 결합에너지의 그래프에서 불연속적으로 위로 솟구치는 핵종이 아닌 것은?

- ① He-4 ② Li-6 ③ C-12 ④ O-16

답] He-4, C-12 그리고 O-16(또는 Ne-20)의 공통점은 모두 원자번호는 2의 배수, 질량수는 4의 배수이다. 즉 알파입자의 배수가 된다. 이런 경우 원자핵은 더욱 안정하고 따라서 결합에너지도 높다. 즉 핵속에서 양성자와 중성자가 even-even pair 이고 또한 알파입자의 배수이면 상대적 결합에너지가 높다.

문] ${}^7\text{Li}$ 의 원자질량이 7.01601u일때 Li 원자핵의 핵자당 결합에너지(Binding Energy/nucleon)를 계산하라.

(단 $M_H = 1.0078\text{u}$, $M_n = 1.0087\text{u}$ 로 한다)

[풀이] ${}^7\text{Li}$ 의 원자는 3개의 양성자, 4개의 중성자 및 3개의 전자로 구성되어 있으므로

$$\text{결합에너지 B.E.} = \Delta mc^2 = [(3M_p + 4M_n) - (M({}^7\text{Li}) - 3M_e)] \times 931.5 \text{ MeV/u}$$

여기서 전자와 양성자의 질량은 주어지지 않았으므로

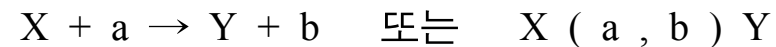
$M_p + M_e \approx M_H$ 를 이용하면

$$\begin{aligned} \text{B.E.} &= [(3M_{\text{H}} + 4M_{\text{n}}) - m(^7\text{Li})] \times 931.5 \text{ MeV/u} \\ &= [(3 \times 1.0078\text{u} + 4 \times 1.0087\text{u}) - 7.01601\text{u}] \times 931.5 \text{ MeV/u} \\ &= 39.3 \text{ MeV} \end{aligned}$$

따라서 핵자당 결합에너지 B.E./nucleon = $39.3/7 = 5.61 \text{ MeV/nucleon}$

2. 핵반응

- 핵반응은 2개의 원자핵이 서로 충돌하여 원자핵이 결합하거나 분해하여 새로운 원자핵을 낳게 하는 반응.
- 인공적으로는 러더퍼드에 의해 처음으로 성공
- 주로 무거운 원자핵 (우라늄 등, 이를 표적핵 target nucleus이라 함)에
- 상대적으로 가벼운 입자 (중성자 등, 이를 입사핵 incident nucleus, 또는 incident particle이라 함)가 입사하여 반응을 일으킴



• 핵반응의 원칙

- 전체핵자수가 보존된다. (핵자수 보존법칙)
- 전하가 보존된다. (전하량 보존법칙)
- 질량-에너지의 합이 보존된다. (질량-에너지 보존법칙)
- 반응전후의 운동량의 합이 보존된다. (선형운동량과 각운동량보존법칙)

- 반응의 Q 값 (Q -value)

- 원자핵반응 전후의 질량결손을 에너지로 변환시킨 값 $Q = \Delta M c^2$
- 표적핵 X에 a가 입사하여 Y와 b로 붕괴된 경우 : ($X + a \rightarrow Y + b$)

$$\begin{aligned} Q &= \{ (\text{앞의 핵질량의 합}) - (\text{뒤의 핵질량의 합}) \} \times (\text{광속})^2 \\ &= \{ (M_X + M_a) - (M_Y + M_b) \} c^2 \text{ (J)} \\ &= \{ (M_X + M_a) - (M_Y + M_b) \} \times 931.5/u \text{ (MeV)} \end{aligned}$$

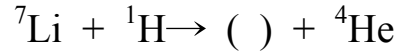
- $Q > 0$ 일때 발열(exothermic) 반응,
- $Q < 0$ 일 때 흡열(endothermic) 반응

- 문턱에너지 (문턱값, threshold energy)

- 흡열반응일 때는 문턱에너지(threshold energy)가 존재.
- 문턱값이란 처음으로 반응을 일으키기 위해 가해주어야 할 에너지로 Q-value 보다 크다. 다시 말하면 흡열반응으로서 Q -value가 -4 MeV인 반응식에 4 MeV의 에너지를 주어도 반응은 일어나지 않고 초기의 반응은 더 큰 값을 주어야 한다.

- 문턱에너지 $E_{th} = \frac{M_X + M_a}{M_X} Q$ 이다.

문] 다음의 핵반응에서 ()속에 들어갈 핵종은?



- ① ${}^6\text{B}$ ② ${}^4\text{He}$ ③ ${}^3\text{He}$ ④ ${}^3\text{H}$

[풀이] 양변을 비교하면 ()안의 핵종의 질량수는 4, 원자번호는 2이므로 ② ${}^4\text{He}$

문] 핵반응 $a + X \rightarrow b + Y$ 가 일어날 때 다음 중 틀린 것은?

- ① 반응전후의 핵자의 총 수는 같다.
 ② 반응전후의 전하량은 보존된다.
 ③ 반응전후에 질량보존의 법칙이 성립한다.
 ④ 반응전후에 질량과 에너지의 합이 보존된다.

[풀이] ③, 핵반응은 반응전후의 질량결손이 발생하므로 질량보존의 법칙은 작용하지 않는다.

문] Q -value 가 4MeV 인 흡열반응에서 표적 핵의 질량이 4amu 이고 입사 핵의 질량이 2amu 라고 할 때 threshold energy는 얼마인가?)

[풀이]
$$E_{\text{th}} = | -Q | \times \frac{M_X + M_a}{M_X} = 4\text{MeV} \times \frac{4\text{amu} + 2\text{amu}}{4\text{amu}} = 6\text{MeV}$$

문] ${}^{14}_7\text{N}(\alpha, p){}^{17}_8\text{O}$ 핵반응에서 Q값과 핵반응이 일어날 수 있는 문턱(발단)에너지 E_{th} 를 구하시오.

${}^{14}_7\text{N}$ 의 원자량은 14.0030740u, ${}^{17}_8\text{O}$ 의 원자량은 16.9991315u이다.

$$\begin{aligned} Q &= [(M_{\text{N}} - 7M_{\text{e}} + M_{\alpha}) - (M_0 - 8M_{\text{e}} + M_{\text{p}})] c^2 \\ &= (M_{\text{N}} + M_{\alpha} - M_0 - M_{\text{p}} + M_{\text{e}}) c^2 \end{aligned}$$

적절히 조작하면

$$\begin{aligned} &= [M_{\text{N}} + (M_{\alpha} + 2M_{\text{e}}) - M_0 - (M_{\text{p}} + M_{\text{e}})] c^2 \\ &= (M_{\text{N}} + M_{\text{He}} - M_0 - M_{\text{H}}) c^2 \end{aligned}$$

따라서

$$Q = (14.0030740 + 4.0026032 - 16.9991315 - 1.0078250)u \times \frac{931.5\text{MeV}}{u} = -1.19\text{MeV}$$

$Q < 0$ 이므로 흡열반응이고 문턱에너지 E_{th} 는

$$\begin{aligned} E_{\text{th}} &= |Q| \left(\frac{M_{\text{X}} + M_{\alpha}}{M_{\text{X}}} \right) \\ &= 1.19\text{MeV} \times \left(\frac{14 + 4}{14} \right) = 1.53\text{MeV} \end{aligned}$$

주의

무조건 전자는 다 떼어내고 계산하는 것이 편함.

- 발열반응시 운동에너지의 배분

→ $X + a \rightarrow Y + b$ 가 발열반응일 때

반응후의 입자 Y와 b의 운동에너지는

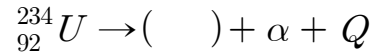
무거운 입자가 작은 양의 에너지를,

가벼운 입자가 많은 양의 에너지를 가지는 데 그 공식은 다음과 같다.

$$b \text{의 운동에너지, K.E. (b)} = \frac{M_Y}{M_Y + M_b} Q$$

$$Y \text{의 운동에너지, K.E. (Y)} = \frac{M_b}{M_Y + M_b} Q$$

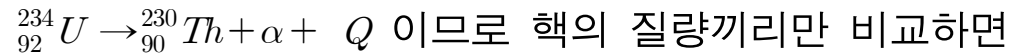
문] 다음 () 안에 알맞은 것은 ?



[풀이] 위 식은 ${}_{92}^{234}\text{U}$ 가 스스로 붕괴하여 α 선을 방출하고 Q값 만큼의 반응에너지를 방출한 것이다. 따라서 ()안의 원자번호는 90이고 질량수는 230이므로 ${}_{90}^{230}\text{Th}$

(2) 위의 반응에서 알파입자와 Th 원자핵의 운동에너지를 계산하시오.

(단 $M_{\text{U}} = 234.0409\text{u}$, $M_{\text{Th}} = 230.0331\text{u}$, $M_{\text{He}} = 4.00260\text{u}$) $\times 931.5 \text{ MeV/u}$



$$Q\text{값} = [(M_{\text{U}} - 92M_{\text{e}}) - \{(M_{\text{Th}} - 90M_{\text{e}}) + M_{\alpha}\}] \times 931.5 \text{ MeV/u}$$

$$= [M_{\text{U}} - M_{\text{Th}} - (M_{\alpha} + 2M_{\text{e}})] \times 931.5 \text{ MeV/u}$$

(여기서 $M_{\alpha} + 2M_{\text{e}} = M_{\text{He}}$ 이므로)

$$Q\text{값} = (234.0409\text{u} - 230.0331\text{u} - 4.00260\text{u}) \times 931.5 \text{ MeV/u}$$

$$= 4.84 \text{ MeV}$$

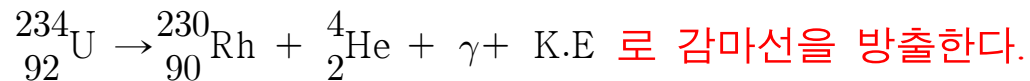
따라서 α 의 운동에너지

$$K.E.(\alpha) = \frac{M_{Th}}{M_{Th} + M_{\alpha}} Q = \frac{230}{230 + 4} \times 4.84 = 4.76 \text{ MeV}$$

Th의 운동에너지

$$K.E.(Th) = \frac{M_{\alpha}}{M_{Th} + M_{\alpha}} Q = \frac{4}{230 + 4} \times 4.84 = 0.08 \text{ MeV}$$

참고 실제 우라늄 $^{234}_{92}\text{U}$ 의 붕괴는



이 때 방출되는 감마선의 에너지가 0.053 MeV 이므로 Q값은 감마에너지와 두 입자의 운동 에너지이므로

$$Q_{\text{값}} = \gamma + K.E = (M_u - M_{th} - M_{\alpha}) \times 931.5 = 4.84 \text{ MeV}$$

$$K.E.(\alpha + Th) = Q - \gamma = 4.84 - 0.053 = 4.79 \text{ MeV}$$

$$K.E.(\alpha) = \frac{230}{230 + 4} \times 4.79 = 4.71 \text{ MeV}$$

$$K.E.(Th) = \frac{4}{230 + 4} \times 4.79 = 0.08 \text{ MeV}$$

제 4 절 방사성 붕괴

1. 방사선의 정의

- 파 (wave)나 입자 (particle)가 공간을 진행하는 상태에 있는 것을 방사선이라 한다.
- 이 방사선중에서는 공기를 이온화(전리)시키는 전리방사선과 공기를 이온화시키기에는 에너지가 부족한 비전리방사선이 있다.
- 일반적으로 방사선을 말할 때는 “전리방사선”을 의미한다.
 - 직접전리방사선 (하전 입자) : α, β, p, d, t , 중이온 등
 - 간접전리방사선 (전자파나 비하전 입자) : X, γ, n 등
- [참고] 원자력법에서 정의하는 방사선
 - α 선 · 중양자선 · 양성자선 · β 선 기타 중하전입자선
 - 중성자선, • γ 선 및 X선 , • 5만 eV이상의 에너지를 가진 전자선

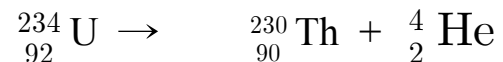
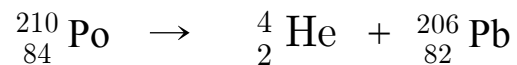
문] α 선, β 선, γ 선의 물질과의 상호작용에서 공통적인 사항은?

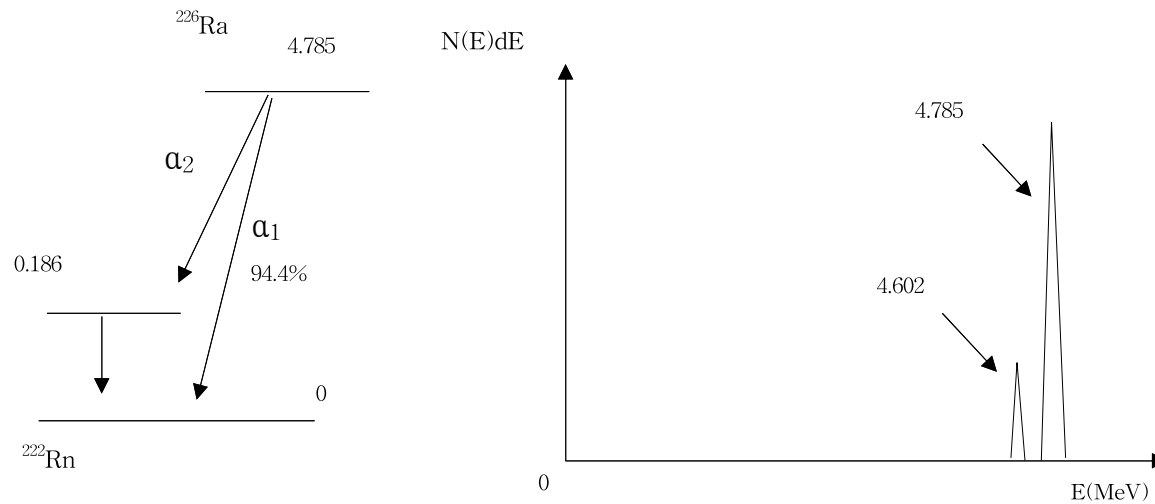
- ① 전리작용 ② 광전효과 ③ 콤프턴산란 ④ 전자쌍생성

2. 방사선의 발생기전

가. 알파(α) 붕괴

- 라듐이나 우라늄과 같이 무거운 원자핵(heavy nuclides)에서 주로 발생.
- 안정된 핵과 비교할 때, 양성자수 대비 중성자 수의 비가 매우 작을때(중성자 수 대비 양성자의 비가 클 때) α 입자가 나옴
- α 입자는 양성자(p) 2개와 중성자(n) 2개로 구성된 입자, 즉 헬륨의 원자핵이 고속으로 방출되는 것. 따라서 원자번호와 질량수는 보존되어야 하므로 딸핵종은 모핵종에 비하여 2의 원자번호 및 4의 질량수가 감소한다.
- 예를 들어 $^{210}_{84}\text{Po}$ 과 $^{234}_{92}\text{U}$ 인 경우, α 입자 붕괴반응은 다음과 같다.
- [중요] α 붕괴시 α 입자는 특정한 값의 에너지를 가진다. (선스펙트럼)





반응의 Q값 $Q_\alpha = [(M_{\text{Po}} - 84M_e) - (M_{\text{Pb}} - 82M_e + M_\alpha)]c^2$
 $= [(M_{\text{Po}} - M_{\text{Pb}}) - 2M_e - M_\alpha]c^2$
 $= [M_{\text{Po}} - M_{\text{Pb}} - M_{\text{He}}]c^2$

- 반감기가 길면 에너지가 작은 특징이 있음 (Geiger-Nuttall law)

$$\ln \lambda = -a_1 \frac{Z}{\sqrt{E}} + a_2$$

* 참고

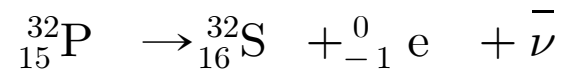
In nuclear physics, the Geiger-Nuttall law or Geiger-Nuttall rule relates the decay constant of a radioactive isotope with the energy of the alpha particles emitted. Roughly speaking, it states that short lived isotopes emit more energetic alpha particles than long lived ones. Formulated in 1911 by Hans Geiger and John Mitchell Nuttall, in its modern form the Geiger-Nuttall law is

$$\ln \lambda = -a_1 \frac{Z}{\sqrt{E}} + a_2$$

where λ is the decay constant, Z the atomic number, E the total kinetic energy (of the alpha particle and the daughter nucleus), and a_1 and a_2 are constants.

나. 베타(β) 붕괴

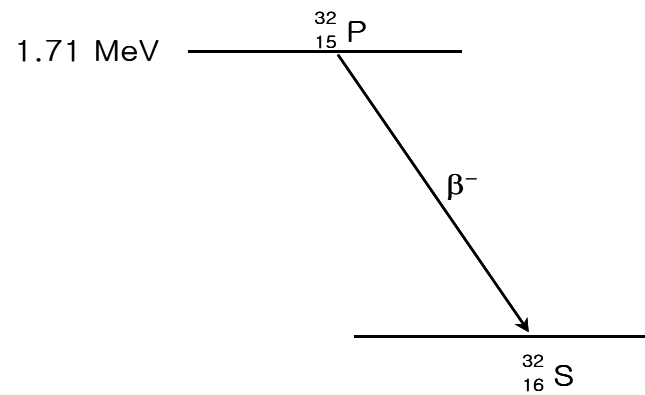
- 원자핵에서 중성자가 양성자로 변환하며, 고속의 음전자가 방출되는 붕괴형식
- 방출되는 음전자를 β 선이라 함. 반물질인 질량이 **거의 없는** 안티뉴트리노(Anti-neutrino; 반 중성미자)($\bar{\nu}$)가 함께 방출.
- β 선이 방출되면 본래의 원자핵보다 양성자가 1개 더 많고 중성자가 1개 적은 원자핵이 남게 되므로 원자질량은 변하지 않고 다만 원자번호만 1 증가



- [중요] β 입자는 안티뉴트리노($\bar{\nu}$)와 에너지를 나누어 가진다. 안티 뉴트리노가 0~방출시 획득할 수 있는 최대에너지 범위내에서 임의의 값을 가질 수 있기 때문에 β 입자 또한 0 ~ 최대에너지 사이의 임의의 값을 가짐. (연속 스펙트럼)
- 따라서 β 의 경우는 평균 β 에너지라는 개념을 사용하는데 방출되는 β 의 평균에너지는 최대에너지의 1/3이다.

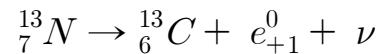
$$\beta \text{의 평균에너지} = \frac{\beta_{\max}}{3}$$

$$\begin{aligned} Q_{\beta^-} &= [(M_P - 15M_e) - (M_S - 16M_e + M_e)]c^2 \\ &= [M_P - M_S]c^2 \end{aligned}$$



다. 양전자(β^+) 붕괴

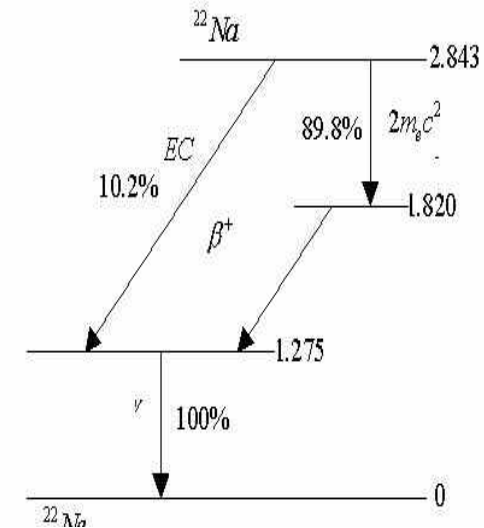
- 원자핵에서 양성자가 양전자를 방출하여 중성자로 변환하는 붕괴형식
- 양전자는 음전자와 질량은 같지만 부호가 반대
- 원자질량은 변하지 않지만 원자번호가 1개 **감소한다**.
- 이때 미립자인 뉴트리노(neutrino; 중성미자) (ν)가 같이 방출된다.



$$Q_{\beta^+} = [(M_N - 7M_e) - (M_C - 6M_e + M_e)]c^2$$

$$= [(M_N - M_C) - 2M_e]c^2$$

- 반응에너지를 양전자와 뉴트리노가 나누어 가지는 것은 음전자 붕괴와 마찬가지로
- 반응에너지에 주의 : 모핵종의 질량이 자핵종보다 $2M_e c^2$ 보다 큰 경우에만 자발적으로 붕괴



${}^{22}_{11}\text{Na}$ 의 β^+ 붕괴도

문] 우라늄계열의 $^{222}_{86}\text{Rn}$ 이 여러 번의 α 와 β 붕괴를 거쳐 최종적으로 $^{206}_{82}\text{Pb}$ 이 되었다. α 와 β 붕괴는 각각 몇 번 발생하였는가?

[풀이] α 붕괴시마다 질량수가 4 감소하고 원자번호가 2 감소하므로

우선 질량수에서 α 붕괴 회수를 구하면

$$\alpha \text{ 붕괴 회수} = (222 - 206) / 4 = 4 \text{ (회)}$$

β 붕괴시에는 질량수는 변하지 아니하고 원자번호는 1 증가하므로

$$\text{원자번호 변화} = -2 \times \alpha \text{ 붕괴 회수} + \beta \text{ 붕괴 회수}$$

$$(82-86) = -4 = -2 \times 4 + \beta \text{ 붕괴 회수}$$

$$\beta \text{ 붕괴 회수} = 4 \text{ (회)}$$

$$\therefore \alpha \text{ 붕괴 회수 } 4\text{회}, \beta \text{ 붕괴 회수 } 4\text{회}$$

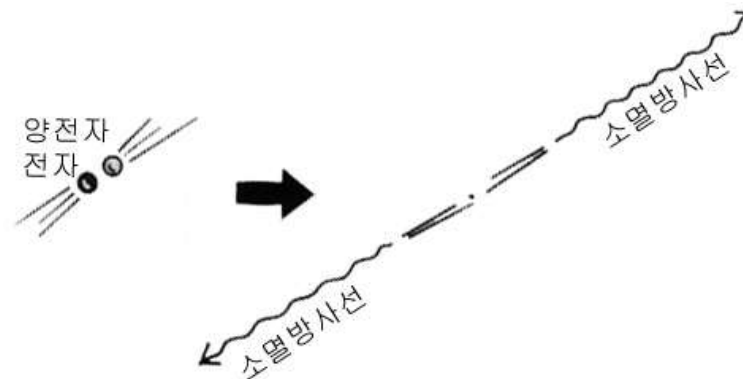
문] $^{238}_{92}\text{U}$ 은 붕괴를 계속하여 $^{206}_{82}\text{Pb}$ 의 동위원소로 되는데, 이때 납의 질량수와 α, β 붕괴의 횟수를 순서대로 나열한 것으로 맞는 것은?

- ① 206, 6회, 8회 ② 208, 8회, 6회 ③ 208, 6회, 8회 ④ 206, 8회, 6회

잠깐

쌍소멸과 쌍생성

- 양전자는 반물질로서 부근의 음전자와 재결합하려는 소멸하려는 특성,
- 재결합이 일어나면 아래 그림과 같이 양전자와 음전자가 모두 소멸[또는 쌍소멸 annihilation]하는 동시에 180방향으로 0.511 MeV (전자 한개의 정지질량에너지의 해당) 에너지를 갖는 2개의 전자파가 방출(소멸방사선)
- 반대로 1.02 MeV 이상의 에너지를 가진 전자파가 사라지면서 양전자 하나와 음전자 하나의 전자쌍을 생성하는 것을 쌍생성(pair production)한다. 전자파가 질량으로 변하고 남은 에너지(전자파의 원래 에너지 - 1.022 MeV)는 생성된 전자들의 운동에너지로 바뀐다.



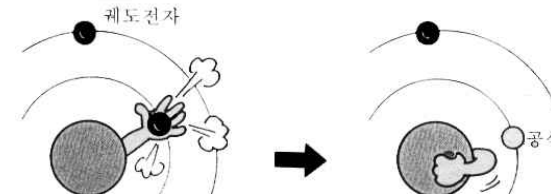
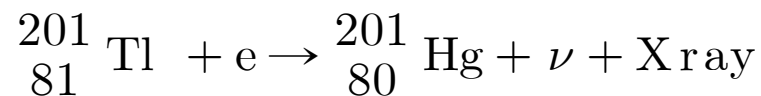
① 1 MeV ② 2.02 MeV
③ 1.51 MeV ④ 0.5 MeV

[답] ①, 쌍생성되는 전자와 양전자는 에너지를 똑같이 나누어 갖는 것은 아니다.

- 인공 핵종으로서 원자로나 가속기를 이용하여 제조해야 하므로 실용적으로 자발 핵분열 선원으로 사용되는 핵종은 ^{252}Cf 임
- ^{252}Cf 은 원자로의 사용후핵연료 중에 생성된 악티나이드(특히, ^{244}Cm)를 추출하여 시료로 만든 다음 다시 고선속 실험로(예: High Flux Test Facility; HFTF)에 장전하여 수년 동안 조사시켜 계속 중성자를 포획하도록 하는 과정을 통해 생산되므로 ^{252}Cf 은 매우 고가임
- ^{252}Cf 은 반감기 **2.65년**으로 주로 알파 붕괴하며 **3%만** 자발핵분열을 일으킴

라. 원자핵의 궤도전자 포획 (EC, electron capture)

- 원자핵에 있는 양성자가 궤도전자를 포획하여 중성자로 변환하는 붕괴형식
- 양전자 붕괴와 같이 본래의 질량수는 그대로이나 원자번호가 1개 감소한다.
- 핵과 가장 가까이 있는 K-궤도전자가 주로 포획되므로 K-capture라고도 부른다.
- 외각 전자가 다시 K-궤도를 채우면서 특성 X선을 방출
- [중요] 이때 방출되는 X선이 다른 전자에 때리면서 에너지를 전달하는 경우, X선을 받은 전자가 방출되는 경우가 있는데 이를 Auger 전자라 함.
- [중요] 이때 뉴트리노를 방출하는데 이 뉴트리노는 선스펙트럼의 에너지



마. γ 방출

- α 또는 β 붕괴 후에도 원자핵이 여기 상태에 있는 경우, 대부분 짧은 시간 내에 여분의 에너지를 전자파인 γ 선을 방출하고 안정상태가 되려고 한다.
- γ 선은 방출되어도 핵변환이 일어나지 않기 때문에 γ 붕괴라는 말대신 단순히 γ 선 방출이라고 한다.
- 원자핵에서 방출되는 γ 선 또한 α 과 마찬가지로 특정한 에너지를 가진다. (선스펙트럼)

바. 내부 전환 (IC; internal conversion)

- 한편 들뜬상태에 있는 원자핵이 γ 선을 방출하는 대신에, 여분의 에너지를 궤도전자 (이 경우에도 주로 K-각 전자)에 주므로 궤도전자가 원자 외부로 탈출하는 경우가 있다.
- 이와 같은 현상을 내부전환(internal conversion)이라고 하며, 이때 방출된 전자를 내부전환 전자라고 한다.
- 이때도 외각 전자가 K-궤도를 채우면서 특성 X-선을 방출하는데, 이 특성 X선이 다시 Auger 전자를 방출할 수 있다.

잠깐

따라서,

1. 내부전환 시에는 내부전환 전자 뿐 아니라 Auger 전자는 발생가능하다.
2. Auger 전자는 전자포획뿐 아니라 내부전환 시에도 발생가능하다.
 - 특성 X선은 오제전자 방출과 경쟁적으로 일어나며 가벼운 원소에서는 특성 X선보다 오제전자 방출이 빈번하며 이때 광자를 방출하는 분율을 형광수율(fluorescent yield)라 함.

사. 핵이성체 전이 (IT, isomeric transition)

- 원자핵이 붕괴된 다음에도 들뜬 상태를 비교적 긴 시간동안 유지하는 경우 이런 원자핵을 핵이성체(nuclear isomer)라고 한다.
- 예를 들면 ^{99m}Tc .
- 핵이성체도 고유의 반감기를 갖고 있으며, γ 선을 방출하여 안정상태에 도달된다.

문] 어떤 원자 X가 아래 표에서 초기에 2의 상태에 있다가 전자포획을 한 경우와 β^- 붕괴를 한 경우에 각각 어디로 옮겨갈 것이며 그 이유는?

	A	A-1	A-2	A-3	A-4
Z+1	1	5	9	13	17
Z	2	6	10	14	18
Z-1	3	7	11	15	19
Z-2	4	8	12	16	20

[풀이] 전자포획의 경우 질량수(A)은 변화가 없으나 양성자가 전자를 포획하여 중성자로 변하므로 원자번호(Z)가 1감소하여 초기 2 상태에서 3의 상태로 옮겨가고, β^- 붕괴시에도 질량수의 변화는 없으나, 중성자가 양성자로 변환되면서 음전자를 방출하므로 원자번호가 1증가하여 초기 2의 상태에서 1의 상태로 옮겨간다.

발생기전

α 선	${}^4\text{He}$ 핵의 흐름, α 붕괴
β 선	핵내에서 방출되는 전자와 동일한 성질을 가진 입자의 흐름 (β^+ , β^- 의 2가지 종류가 있다.) β 붕괴
γ 선	불안정한 원자핵이 방출하는 전자파
전자선	에너지를 얻어 전리된 전자의 흐름
X선	핵외의 원자에서 상호작용에 의해 발생하는 전자파
중성자, 양성자, 중양자, 삼중양자	핵분열, 핵반응시 방출되는 입자선의 흐름

방사선의 종류

종 류		기 호	전 하	질 량 수
전자기 방사선	X-ray	X	0	-
	γ - ray	γ	0	-
입 자 방사선	α	α	+2	4
	β	β^-	-1	-
	전자선	e^-	-1	-
	양전자선	β^+	+1	-
	양성자선	p	+1	1
	중양성자선	d	+1	2
	중이온선	-	+1이상	50이상
	중간자선	π, μ	$\pm 1, 0$	e^- 와 p의 중간
	핵분열조각	-	+32 ~ +66	72 -161
	중성자선	n	0	1

방사선 붕괴형식

구분	붕괴형식 Z, A의 변화	붕괴핵종에서 방출되는 방사선	붕괴원자에서 방출되는 방사선	붕괴원자외부에서 방출되는 방사선
α 붕괴	$(Z, A) \rightarrow (Z-2, A-4)$	α 입자, γ 선 (저에너지)	내부전환에 의한 특성 X선	
β^- 붕괴	$(Z, A) \rightarrow (Z+1, A)$	β^- 입자, 중성미자 때로 γ 선	저에너지 γ 선이 방출되는 경우, 약간의 내부전환 전자와 X선	제동복사
β^+ 붕괴	$(Z, A) \rightarrow (Z-1, A)$	β^+ 입자, 중성미자 때로 γ 선	특성 X선	소멸방사 제동복사
전자포획	$(Z, A) \rightarrow (Z-1, A)$	때로 γ 선	내부전환전자 특성 X선 오제전자	
핵이성체 전이(IT)	$(Z, A)^* \rightarrow (Z, A)$	γ 선	내부전환전자 특성 X선	
자발핵분열	$(Z, A) \rightarrow$ 두 개 핵분 열조각	핵분열조각 중성자, γ 선	내부전환전자 X선	β 선 γ 선

문] 다음중 원자핵내에 양성자의 개수가 중성자 개수보다 과잉일 경우 주로 발생하는 반응을 2가지 고르시오.

- ① 전자포획 ② 양전자방출 ③ 핵이성체전이 ④ 음전자방출

[답] ①과 ②

[풀이] (해설) 양성자가 과잉인 핵종은 양성자 개수를 줄이기 위해, 양성자가 전자를 포획하여 중성자가 되거나, 양전자를 방출하면서 양성자가 중성자로 변환한다.

문] α 붕괴, β 붕괴와는 달리 γ 선의 경우는 γ 선 방출로 표현하는 이유가 올바른 것은?

- ① α 선과 β 선은 입자선이나 γ 선은 전자기파이기 때문이다.
② 방사선방호의 관점에서 외부피폭시 관심의 대상이 되는 것은 투과력이 강한 γ 선이므로 γ 선의 방사선적인 성질을 강조하기 위해서이다.
③ 원자핵이 γ 선을 방출할 때는 핵종이 변화하지 않고 단지 에너지가 낮은 상태로 옮겨가기 때문이다.
④ 최초로 발견한 미지의 방사선을 미지수 X를 이용하여 X선이라 명하듯이 관습적 (conventional) 표현이다.

[답] ③

4. 핵심 정리사항

가. β^+ 방출과 전자포획 (EC)

(1) 공통점

- 핵자변환이 같다.
- 양성자과잉핵종에서는 주로 발생한다.
- 중성미자가 발생한다.

(2) 차이점

- β^+ 방출 : 에너지 분포가 연속적인 β^+ 선을 방출한다.
- EC : 특성X선 또는 오제전자를 방출한다.
- 붕괴에너지가 1.02 MeV 이상의 경우에는 β^+ 붕괴와 경합과정을 거치게 된다. 즉 붕괴 에너지가 1.02 MeV 이하에서는 전자포획만 일어나고 역으로 β^+ 붕괴에서는 반드시 전자포획이 공존한다.

[Remind: 양전자 붕괴의 반응에너지를 상기]

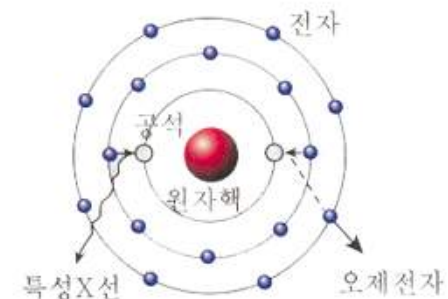
나. 특성X선과 연속X선

X선의 발생 : 충돌손실(여기, 전리)에 의한 특성X선과 제동복사에 의한 연속X선이 있다

특성X선

가속되어진 하전입자가 궤도전자와 상호작용하여 여기, 전리를 일으키고 이에 수반되어 그 에너지 차만큼 전자파를 방출하는 데 이때 방출되는 전자파를 특성 X선이라 하고 target 물질에 따라 고유하다. 방출되는 전자파의 진동수의 제곱근은 원자번호에 비례하는 데 이것을 Moseley's law라고 한다.

$$\sqrt{\nu} \propto Z$$



연속 X선 : 제동복사선(Bremsstrahlung)

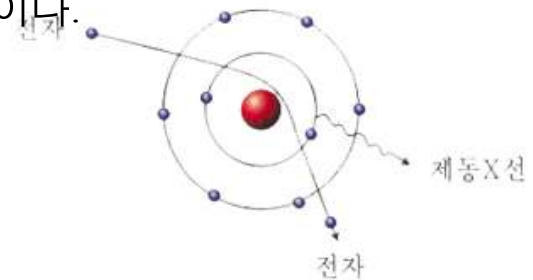
- 가속되어진 하전입자가 원자핵부근에서 쿨롱력에 의해 감속되면서 그 감속된 차만큼 전자파를 방출하는 데 이 현상을 제동복사라 함.
- 제동 복사는 하전입자의 에너지가 클 경우와 하전입자의 질량이 작을 경우(전자, β 선) 발생할 확률이 높다.

β 선 에너지의 제동복사선으로의 변환률(f)

$$f = 3.5 \times 10^{-4} Z E_{\max}$$

Where Z : 물질의 원자번호, E_{\max} : 전자의 최대에너지(MeV)

방사손실과 충돌손실이 거의 같아지는 것은 $EZ \approx 800$ 일 때 이다.



참고

Cs-137과 Sr-90은 순 β 방출체인데 방사선 방어상 전자파 방출체로 간주한다. ^{137}Cs 은 방사평형상태에 있는 낭핵 $^{137\text{m}}\text{Ba}$ 이 전자파를 방출하며, ^{90}Sr 은 방사평형상태에 있는 ^{90}Y 에서 방출되는 β 선 2.27 MeV가 주변물질과의 상호작용으로 제동방사선을 방출하기 때문이다.

다. 오제전자와 내부전환전자

- 오제전자 : 특성 X선이 방사를 수반하지 않고 궤도전자를 전리시키는 현상을 말하며 이때 방출되는 전자를 오제전자라고 한다.
- 내부전환전자 : γ 선이 방사를 수반하지 않고 궤도전자를 전리시키는 현상을 말하며 이때 방출되는 전자를 내부전환전자라 한다. 내부전환은 무거운 원자핵일수록 잘 일어난다.

문] 다음 중 Auger 전자와 관련 있는 것끼리 바르게 짝지은 것은?

- ① 양성자과잉 - β^- 붕괴 ② γ 선방출 - 내부 전환
- ③ 전자포획 - 특성 X선 ④ 원자핵불안정 - 핵이성체전이

[답] ③

문] Auger 효과와 반드시 결합하여 일어나는 현상은?

- ① 특성X선 방출 ② 내부전환전자 방출
- ③ γ 선방출 ④ β 선붕괴

[답] ①

문] 다음 현상중, 서로의 개념이 정반대인 것은?

- ① 특성X선 - γ 선 ② Auger 전자 - 내부전환전자
- ③ 방사성붕괴 - 광자의 전리 ④ 광자소멸 - 양전자생성

[답] ④, 광자소멸 - 양전자생성

라. 베타선과 전자선

구 분	베타선	전자선
차 이 점	발생원 : 핵에서 방출된다.	발생원 : 핵 밖(원자궤도)에서 방출된다.
	연속스펙트럼	선스펙트럼
비 교 점	① 전하 = 1.6×10^{-19} C로 동일하다. ② 정지질량 (m_0) = 9.1×10^{-31} kg = 0.511 MeV로 동일하다. ③ 하전을 띤 입자방사선이다. ④ 물질과 상호작용하는 방법이 동일하다.	

제 4 절 원자핵의 변환

방사성핵종이 방사선을 방출하면서 다른 원자핵으로 변환되는 것
인공적으로 안정된 핵종의 원자핵에 입자를 가속시켜 인위적인 핵변환을 일으킬 수 있다.
(원자로, 가속기 등)

1. 자연변환

자연계에는 안정한 핵종과 불안정한 핵종이 있으며 이중 불안정한 핵종이 안정화되어 가는 과정에 방사선을 방출하는 것을 방사성붕괴라 한다.

가. 계열붕괴 하는 자연방사성핵종

- 악티늄계열 ($4n+3$) : $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$ [α - 7회, β^- - 4회]
- 우라늄계열 ($4n+2$) : $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$ [α - 8회, β^- - 6회]
- 토륨계열 ($4n$) : $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$ [α - 6회, β^- - 4회]

[넵튬계열 ($4n+1$) : $^{241}\text{Pu} \rightarrow ^{209}\text{Bi}$; ^{241}Pu 의 반감기가 짧아 존재하지 않음] [α - 7회, β^- - 4회]

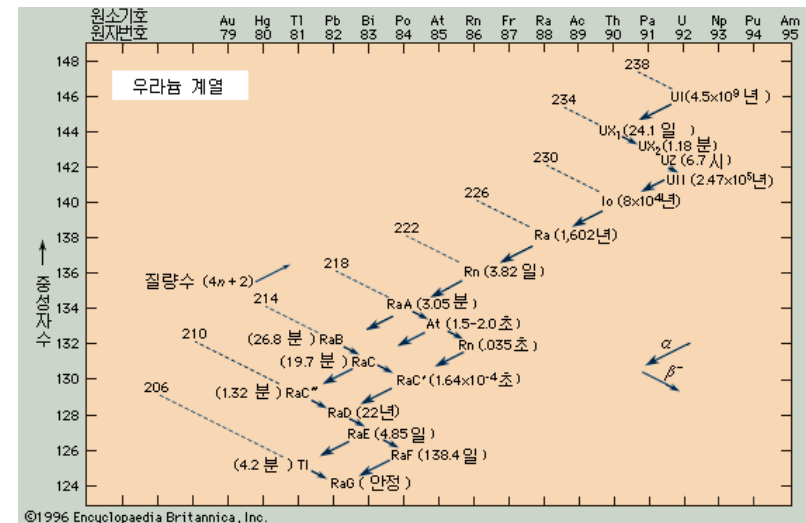
잠깐 3가지 계열의 공통점

- 자연계에 존재하며 비교적 긴 반감기 (10^8 년 이상)를 가지고 있다.
- 계열붕괴도중 Rn 기체가 있다.
- 최종핵종이 $_{82}\text{Pb}$ 이다.
- 계열의 분지를 일으킨다. [Q: 여기서 분지란 무엇인가?]

문] 자연붕괴계열들의 공통점에 속하는 것은?

- ① U이 최초의 어미핵종이다.
- ② 최종핵종은 Bi이다.
- ③ gas상태를 거친다.
- ④ 최초의 어미핵종의 반감기가 짧다.

[답] ③



[우라늄 계열 붕괴도표]

나. 계열붕괴하지 않는 자연방사성핵종

- 지구연령에 해당하는 10^9 년 이상의 반감기를 가져 아직도 존재하는 핵종이다.
- 예: K-40 (반감기 1.28×10^9 y), 내부피폭의 주된 원인이 된다.

Rb-97 (반감기 4.7×10^{10} y)

In-115, La-138, Nd-114, Sm-147, Lu-176, Re-187, Pt-190

다. 유도 천연방사성 핵종

1) 우주선에 의한 유도 방사능

- H^3 , N^{14} (n,t) C^{12}
- C^{14} $N^{14}(n, p) C^{14}$
- Be^7 우주선이 대기중 O_2 , N_2 에 작용
- Cl^{36} $Cl^{35}(n, \gamma) Cl^{36}$ 등

2) 천연 핵분열 생성물 ^{235}U , ^{232}Th , ^{238}U 의 핵분열

방사성 붕괴

- 방사성붕괴의 공리

- 공리(Axiom) 1: 핵종 A의 자발핵변환율은 A의 원자핵 개수에 비례한다.

The rate of spontaneous nuclear transformation of nuclide A is proportional to the number of nuclei A.

- 공리(Axiom) 2: 각 핵종의 변환률은 물리적(온도, 압력 등) 및 화학적 상태 및 수명 등에 독립적이다.

The transformation constant is unique to each nuclide and is independent of physical (temperature, pressure, etc.) and chemical states, ages, etc.

공리 1로부터 자발핵변환율(시간당 변환되는 원자핵의 수)는

$$\frac{dN(t)}{dt} \propto N(t) \rightarrow \text{비례상수를 } \lambda \text{ 로 두면}$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t) \rightarrow \text{양변을 적절히 적분하면}$$

$$\ln N(t) = C_1 e^{-\lambda t}$$

$$N(t) = C_2 e^{-\lambda t} \quad (C_1, C_2 \text{는 적분 상수})$$

여기서 초기조건(Initial condition) $t=0$, $N(t)=N_0$ 를 적용하면 $C_2 = N_0$

따라서 $\therefore N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$

여기서 λ 를 붕괴상수 (decay constant, 또는 변환상수 transformation constant)

원자력이론

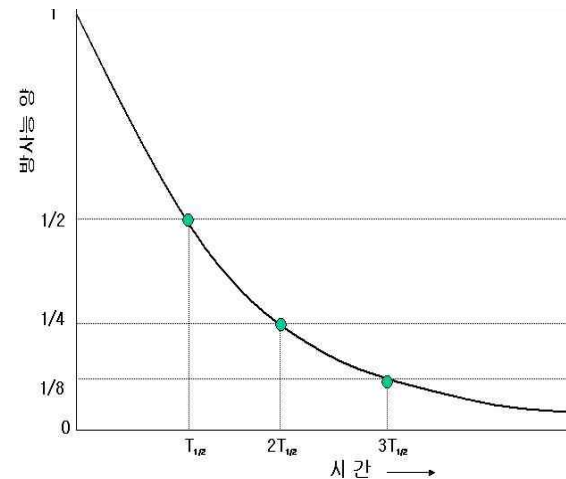
- 방사능 (Activity)
 - 원자핵이 방사선을 방출하여 다른 원자핵종으로 변하는 능력을 말한다.
 - 단위 시간(주로 1초)당 붕괴 수를 일컫기도 한다. 따라서 위식에서

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

방사성원자핵의 숫자가 $N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$ 로 감소함에 따라

$$A = \lambda N = \lambda N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (\lambda N_0 \text{를 } A_0 \text{라 하면})$$

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$



• 반감기 ($T_{1/2}$)

- 최초의 방사능 (물질의 양)이 1/2로 줄어드는 데 걸리는 시간을 말한다. 정의에 따라,

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{2} \rightarrow t = T_{1/2}$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$\rightarrow \ln \frac{1}{2} = \ln e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$\rightarrow T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}$$

- 문제에서 붕괴상수가 주어지는 경우는 드물다. 따라서 붕괴상수를 대입해야 하는 부분에

$$T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}, \text{ 즉 } \lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} \text{ 를 대입해야 문제를 해결할 수 있다.}$$

문] 1g의 ^{226}Ra 은 800년 후에 몇 g이 될까? 단 ^{226}Ra 의 반감기는 1600년이다.

[답] $N = N_0 \exp(-\lambda t) = N_0 \exp\left(-\left(\frac{0.693}{T_{1/2}}\right)t\right)$ 에서 $t=800 \text{ yr}$, $T_{1/2}=1600\text{yr}$ 이므로 계산기 한판 두드리

$$\text{면 } N = 1g \exp\left(-\left(\frac{0.693}{1600}\right)800\right) \approx 0.7g$$

확인

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

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-\frac{0.693}{T_{1/2}} t}$$

$$A = \frac{dN}{dt} = \lambda N \quad A(t) = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\frac{0.693}{T_{1/2}} t}$$

$$\rightarrow T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}$$

- 방사능의 단위

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ dps}$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ dps} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq} \text{ (} ^{226}\text{Ra } 1 \text{ g 의 방사능)}$$

※ Bq = dps (disintegration/sec) = tps (transformation/sec)

참고

$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$ 에서 $e^{-\lambda t}$ 를 음미해보자.

1. $e^{-\lambda t}$ 는 $t = 0$ 일 때 1 이고 $t = \infty$ 일 때 0 이다. 시간 $t = 0$ 일 때 N 은 하나도 붕괴하지 않음으로 초기값 N_0 이고 시간이 무한대로 흐르면 ($t = \infty$) 모두 붕괴해 $N = 0$ 이며, 그 사이에 N 은 지수함수적으로 감소한다.
2. $e^{-\lambda t}$ 의 값은 $0 \leq e^{-\lambda t} \leq 1$ 이며 이와 같은 값은 확률이다.

문] 어떤 방사성 핵종이 t 시간 후에 붕괴하지 않고 생존할 확률은 얼마인가? 또 시간 t 동안 붕괴할 확률은 얼마인가?

[답] 초기에 N_0 개의 방사성 핵종은 시간 t 이후에 $N_0 \cdot e^{-\lambda t}$ 개만 남는다. 따라서 시간 t 이후에 생존할 확률은 $e^{-\lambda t}$, 따라서 확률법칙에 따라 시간 t 동안 붕괴할 확률은 $[1 - e^{-\lambda t}]$ 이다

문] 동일한 방사능을 가진 ^{192}Ir , ^{60}Co , ^{137}Cs 중 원자수가 많은 순서대로 나열한 것은?

- | | |
|--|--|
| ① $^{137}\text{Cs} > ^{60}\text{Co} > ^{192}\text{Ir}$ | ② $^{192}\text{Ir} > ^{60}\text{Co} > ^{137}\text{Cs}$ |
| ③ $^{137}\text{Cs} > ^{192}\text{Ir} > ^{60}\text{Co}$ | ④ $^{192}\text{Ir} > ^{137}\text{Cs} > ^{60}\text{Co}$ |

[답] ② 초기에 N_0 개의 방사성 핵종, $A_{\text{Ir}} = A_{\text{Co}} = A_{\text{Cs}}$ $\lambda_{\text{Ir}} N_{\text{Ir}} = \lambda_{\text{Co}} N_{\text{Co}} = \lambda_{\text{Cs}} N_{\text{Cs}} = k$

$$N_{\text{Ir}} = \frac{k}{\lambda_{\text{Ir}}} \propto \frac{1}{74.3\text{d}}, N_{\text{Co}} = \frac{k}{\lambda_{\text{Co}}} \propto \frac{1}{5.3\text{y} \times 365\text{d/y}}, N_{\text{Cs}} = \frac{k}{\lambda_{\text{Cs}}} \propto \frac{1}{30\text{y} \times 365\text{d/y}}$$

※ 방사능이 크다는 뜻은?

- (1) 단위시간당 붕괴하는 방사성 원자나 분자수가 많다는 의미이다.
- (2) 방사성물질의 양이 많다는 의미이다. (* $A=\lambda N$ 을 생각하면 된다.)
- (3) 같은 질량의 물질중 반감기가 짧은 것이 방사능의 세기가 크다.

문] ^{226}Ra 의 반감기는 3.8일이다. 10일이 경과한 후에 몇 %의 ^{226}Ra 이 붕괴하는가?

- ① 16 % ② 79 % ③ 84 % ④ 89 %

[풀이] $N = N_0 \exp (-\lambda t)$ 에서 10일후의 방사성원소의 개수 $N(t = 10\text{일})$ 은

$$\begin{aligned} N(t = 10\text{일}) &= N_0 \exp (-\lambda t) \\ &= N_0 \exp ([-0.693/3.8\text{일}] \times 10\text{일}) \\ &= 0.16 N_0 \end{aligned}$$

따라서 10일후에는 16 %의 ^{226}Ra 만이 생존하므로 붕괴한 양은 84 %이다.
(주의) 계산을 정확히 하고도 16%로 오기하는 수험생들이 의외로 존재한다.

문] 360 GBq의 ^{192}Ir 조사선원이 있다. 방사능이 1/3로 감쇠하였을 때 선원을 교체한다면, 교체일에 가장 가까운 일수는? 단, ^{192}Ir 의 반감기는 74일이다.

- ① 90 ② 100 ③ 110 ④ 120

[답] ④

문] 유물에서 발견된 나무조각의 탄소를 분석하여 탄소 1 g당 10 dpm 10 Bq의 방사능이 있음을 알았다. 현재의 나무조각에는 ^{14}C 의 방사능이 1 g당 15 dpm이라면 이 나무는 얼마나 오래 된 것인가? (단, ^{14}C 의 반감기는 5,730년)

[풀이] 나무조각의 방사능 : 10 dpm/g

현재방사능 : 15 dpm/g

$$10 = 15 \times e^{-\frac{0.693}{5730} \times t} \quad \text{따라서} \quad t = 3353 \text{년}$$

[고급문제] 10 Ci의 ^{60}Co 이 ($T_{1/2} = 5.26\text{년}$)이 2반감기 동안 방출하는 β 입자의 총 수는? (단 ^{60}Co 은 붕괴시 하나의 β 입자를 방출한다고 가정한다.)

[풀이] 이 문제에 대해서는 대부분의 타교재에서는 다음 적분식을 이용해 풀지만 붕괴식의 뜻을 정확히 안다면 굳이 적분을 이용해 풀이할 필요가 없다.

$A = \frac{dN}{dt}$ 에서 시간 $t=0$ 에서 $2T_{1/2}$ 까지 붕괴한 입자의 수 = 방출된 베타입자의 수

$$\text{따라서 전체베타 입자의 수 } N = \int_0^{2T_{1/2}} A dt = A_0 \int_0^{2T_{1/2}} e(-\lambda t) dt = \frac{A_0}{\lambda} [1 - e(-\lambda \cdot 2T_{1/2})]$$

[답] 초기방사능 $A_0 = 10 \text{ Ci}$ 따라서 초기 방사성 입자의 수 N_0 는

$A = \lambda N$ 에서

$$\begin{aligned} N_0 &= \frac{A_0}{\lambda} = \frac{A_0 T}{0.693} = \frac{(10\text{Ci} \times 3.7 \times 10^{10} \text{dps/Ci}) \times (5.26\text{y} \times 365 \text{d/y} \times 24 \text{h/d} \times 3600 \text{sec/h})}{0.693} \\ &= 8.86 \times 10^{19} \text{ atoms} \end{aligned}$$

2반감기 후에 남아있는 방사성원소의 개수 $N(2T_{1/2})$ 는

$$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t) \quad \text{에서}$$

$$\begin{aligned} N(2T_{1/2}) &= N_0 \exp\left(-\frac{0.693}{T_{1/2}} \cdot 2T_{1/2}\right) \\ &= N_0 \exp(-0.693 \cdot 2) = 0.25 N_0 \end{aligned}$$

방출된 β 입자의 총 수는 붕괴된 ^{60}Co 원자의 개수와 같으므로
방출된 β 입자의 총 수

$$\begin{aligned} &= N_0 - 0.25 N_0 = 0.75 N_0 = 0.75 \times 8.86 \times 10^{19} \\ &= 6.64 \times 10^{19} \end{aligned}$$

참고

다시 말해 2반감기가 지날 때까지 75 %가 붕괴하므로, 이 붕괴된 양과 초기 원자의 개

수 $N_0 = \frac{A_0}{\lambda} = \frac{A_0 T}{0.693}$ 만 알면 답을 구할 수 있다.

한걸음 더

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t} = A_0 e^{-\ln 2 \frac{t}{T_{1/2}}} = A_0 \left(e^{\ln \frac{1}{2}}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} = A_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

문] 1g의 ^{226}Ra 은 800년 후에 몇 g이 될까? 단 ^{226}Ra 의 반감기는 1600년이다.

[답] $N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$ 에서 $\frac{t}{T_{1/2}} = \frac{800}{1600} = \frac{1}{2}$ 이므로 $N = 1g \times \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \doteq 0.707g$

문] 핵종 A(반감기 1시간)와 핵종 B(반감기 3시간)가 있다. 처음에는 핵종 A의 방사능이 핵종 B의 4배였다면 몇시간 후에 서로의 방사능이 같아지겠는가?

[답] 핵종 A의 초기방사능을 A_0 , 핵종 B의 초기방사능을 B_0 라 하면 $A_0 = 4B_0$
 t 시간 후에는 A의 방사능은 $A_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_A}} = 4B_0 \left(\frac{1}{2}\right)^t$

t 시간 후에는 B의 방사능은 $B_0\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_B}} = B_0\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{3}}$

따라서 $4B_0\left(\frac{1}{2}\right)^t = B_0\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{3}}$, 양변을 $4B_0$ 로 나누어 정리하면

$$\left(\frac{1}{2}\right)^t = \left(\frac{1}{2}\right)^2 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{3}} = \left(\frac{1}{2}\right)^{(2 + \frac{t}{3})}$$

지수끼리만 비교하면 $t = 2 + t/3$ 그러므로 $t = 6/2$ 시간 = 3시간

두걸을 더

※ 유효반감기(T_e)

- 방사성물질이 인체내부로 들어가면, 물리적 반감기에 의해서 감소되지만, 시스템을 우리 인체로 국한시키면 우리 몸의 신진대사에 의해서도 몸 밖으로 배출된다.
- 따라서 인체내부의 방사성물질은 또 하나의 반감기를 고려하여야 하는데, 신진대사에 의해 방사성물질이 생물학적으로 절반으로 줄어드는데 걸리는 시간을 생물학적 반감기(biological

half-life)

- 생물학적 반감기와 물리적 반감기(physical half-life)를 모두 고려해준 값을 유효반감기

$$\lambda_e = \lambda_p + \lambda_b$$

$$\frac{1}{T_e} = \frac{1}{T_p} + \frac{1}{T_b} \rightarrow T_e = \frac{T_p \cdot T_b}{T_p + T_b}$$

인체내부 피폭은 T_e 를 먼저 구해서 $N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$ 의 공식에 대입하여 $N = N_0 \cdot e^{-0.693 \frac{t}{T_e}}$ 계산

문] Cs^{137} 의 물리적반감기는 30.2년이고, 생물학적 반감기는 70일이다. 유효반감기는 얼마인가?
[2005년 RI 협회회보 원자력이론 12번 문제 발췌]

- ① 75.17일 ② 69.56일 ③ 45.39일 ④ 21.31일 ⑤ 0.74일

[답] $\frac{1}{T_{\text{eff}}} = \frac{1}{T_p} + \frac{1}{T_b}, \frac{1}{T_{\text{eff}}} = \frac{1}{30.2 \times 365} + \frac{1}{70}, \therefore T_{\text{eff}} = 69.56\text{일}$

[상기 풀이의 문제점] 위 문제는 실지로 유사하게 출제된 적이 있으며 위와 같이 풀어도 된다. 그러나 이 문제의 출제 의도는 유효반감기의 의미를 아는 경우 계산을 하지 않고 바로 집어내어, 계산상의 실수를 방지하고 풀이시간을 단축하는 것이다.

생물학적으로 70일마다 반씩 줄어드는데 30.2년의 물리적 반감기는 의미를 가지지 못한다. 생물학적 반감기 30일을 아주 조금 더 단축시킬 뿐이다. 따라서 정답은 2번 이외에는 없다. 같은 방식으로 다음 문제를 풀 수 있다.

확인

1000 Bq의 ^{137}Cs 이 몸속으로 흡수된 후 140일 지난 후의 체내 잔존 방사능은 얼마인가?
단 ^{137}Cs 의 물리적반감기는 30.2년이고, 생물학적반감기는 70일이다.

- ① 약 320 Bq ② 약 300 Bq ③ 약 250 Bq ④ 약 200 Bq

물리적반감기	생물학적 반감기	유효반감기
5	10	3.3
100	200	66
100	1000	90
100	10000	99

[답] ③ [암산으로 가능]

문] 다음 중 유효반감기를 붕괴상수로 바르게 표시한 것은?

① $T_e = \frac{0.693}{\lambda_p + \lambda_b}$ ② $T_e = \frac{\lambda_p \lambda_b}{\lambda_p + \lambda_b}$ ③ $T_e = \frac{\lambda_p + \lambda_b}{\lambda_p \times \lambda_b}$ ④ $T_e = \lambda_p + \lambda_b$

여기서 λ_p 는 물리적 붕괴상수, λ_b 는 생물학적 제거상수이다.

[답] ① $T_e = \frac{T_p \times T_b}{T_p + T_b} = \frac{\frac{0.693}{\lambda_p} \times \frac{0.693}{\lambda_b}}{\frac{0.693}{\lambda_p} + \frac{0.693}{\lambda_b}}$

$$= \frac{\frac{(0.693)^2}{\lambda_p \lambda_b}}{\frac{0.693 \lambda_p + 0.693 \lambda_b}{\lambda_p \lambda_b}}$$

$$= \frac{(0.693)^2}{0.693 \lambda_p + 0.693 \lambda_b}$$

$$= \frac{0.693}{\lambda_p + \lambda_b}$$

잠깐

시중에 나와있는 한글 교재에 위의 문제가 수록된 경우 모든 풀이는 위와 같다. 그러나 이것이 잘된 풀이일까? 위와 같이 풀어도 답은 나오지만 이것을 보고 “힘으로 푼다”라고 한다. 반감기는 자연의 물리적인 양으로부터 인간이 만든 인위적인 양이다. 우리의 손이 3개였다면 3감기를 만들었을 것이다. 원래 유효반감기를 구하는 공식 자체도 붕괴상수와 제거상수의 결합효과는 “합”으로 나타난다는 물리적 의미에서 출발한다. 따라서 출제의도는 이것을 아느냐는 것을 묻는 것이고 자칫하면 위의 풀이는 0점 처리될 수 있다.

[정해] $\lambda_e = \lambda_p + \lambda_b$ (모든 것은 물리적 의미의 λ 에서 출발했다. λ_e 만 바꾸면)

$$\frac{0.693}{T_e} = \lambda_p + \lambda_b$$

$$T_e = \frac{0.693}{\lambda_p + \lambda_b}$$

• 평균수명 (τ)

- 방사성핵종은 이론상 무한대 시간 생존 [지수함수의 특징]
- 따라서 방사성핵종의 수명에 대해 통계적 개념으로 평균수명의 개념을 정립.
- 확률적으로 평균수명이란 (전체 개체의 각각의 수명의 합) / (전체 개수)
- 미소시간 $t + dt$ 사이에 붕괴하는 방사성핵종의 갯수는 $\frac{dN}{dt} = \lambda N$,
- 이때까지의 수명이 t 이므로
- 따라서 통계학적인 평균수명은,
 $t + dt$ 사이의 사멸한 개체의 수와 그때까지의 수명 t 를 곱한 값 $t \cdot \lambda N$ 을
 X 축 (여기서는 시간의 축인 t 축)에 대해서 모두 더하여(수학적으로는 0에서 무한대까지 적분)
 전체개체수를 나누면 된다.

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \lambda N dt \quad (\text{그런데 } N = N_0 e^{-\lambda t} \text{ 이므로}) = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \lambda N_0 e^{-\lambda t} dt$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = 1.44 T_{1/2} \quad [\text{이 사이의 과정은 부분적분(partial integration)로 구한다}]$$

- 평균수명이 지난 후 방사능의 세기 (또는 방사성핵종의 개수) - 아래 예제

평균수명을 구하고 평균수명이 지난 후 방사능의 세기는?

1. 평균수명은 위의 식으로 구한다. (따라서 일반면허에서는 출제가 불가능)

2. 평균수명 $\tau = \frac{1}{\lambda}$ 이므로 $A = A_0 e^{-\lambda t}$ 에서 $A = A_0 e^{-\lambda \cdot 1/\lambda} = A_0 \frac{1}{e}$, 따라서 평균수명이 지난 후에는 원래 방사능 A_0 의 $1/e$ 만큼 남는다.

※ 평균수명을 구하라는 주관식 문제에서 적분하지 않고 $1/e$ 를 대입하여 평균수명을 구하는 것은, 답을 대입하여 문제를 푸는 것과 같으므로 점수를 얻지 못한다.

참고

부분적분 $(fg)' = f'g + fg'$ 에서 유래, 따라서 $\int fg' = \int (fg)' - \int f'g$

$$\begin{aligned} \text{따라서 위의 적분 } \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \lambda N_0 e^{-\lambda t} dt &= \frac{N_0 \lambda}{N_0} \left(\int_0^{\infty} \frac{-1}{\lambda} (te^{-\lambda t})' dt - \int_0^{\infty} -\frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t} dt \right) \\ &= \lambda \left(\left[\frac{-1}{\lambda} te^{-\lambda t} \right]_0^{\infty} - \frac{1}{\lambda^2} [e^{-\lambda t}]_0^{\infty} \right) \end{aligned}$$

(앞의 항 $\left[\frac{-1}{\lambda} te^{-\lambda t} \right]_0^{\infty}$ 은 0과 무한대에 대해 모두 zero, 뒤의 항 $[e^{-\lambda t}]_0^{\infty}$ 은 -1로 귀결되므로)

$$= \lambda \left(\frac{1}{\lambda^2} \right) = \frac{1}{\lambda}$$

- 비방사능 (specific activity: S. A.)

- 어떤 원자 1 g의 방사능

- 방사능의 정의 , 1 mol의 원자량 및 원자의 개수(아보가드로 숫자)를 알면 바로 비례식으로의 개념을 알면 바로 유도할 수 있다.

$$A = \lambda N \text{ 이므로}$$

$$S.A. = \lambda N_{1g}$$

($N_{1g} = 1g$ 일 때 원자의 개수, 이것은 1 mol 원자의 개수 (아보가드로 수) 를 1 mol의 질량 (원자량)으로 나눈 값)

$$= \lambda \frac{N_A}{M} = \frac{0.693}{T_{1/2}} \cdot \frac{N_A}{M}$$

문] ^{226}Ra 1 g의 방사능을 계산하라. (단, ^{226}Ra 의 반감기는 1620년이다.)

[풀이]

$$A = \lambda N, S.A. = \lambda N_{1g} \text{ 에서}$$

반감기가 1,620년이므로 $\lambda = 0.693/1620\text{년}$

Ra 1 mol은 원자량은 226 g, 원자수는 6.02×10^{23} 개
따라서 $226 : 6.02 \times 10^{23} = 1 : X$.

$$\begin{aligned} \text{굳이 식으로 쓴다면 } S.A. &= \lambda N = \frac{0.693}{T} \times \frac{N_A}{M} \\ &= \frac{0.693}{1620 \text{ y} \times 365 \text{ d/y} \times 24 \text{ h/d} \times 3600 \text{ s/h}} \times \frac{6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}}{226 \text{ g/mol}} \times \\ &\doteq 3.7 \times 10^{10} \text{ dps /g} \end{aligned}$$

문] 원자량이 M인 어떤 물질 W g의 방사능은? (단 T는 반감기이다)

- ① $\frac{TW N_A}{0.693M}$ ② $\frac{0.693T}{M N_A W}$ ③ $\frac{TM}{0.693W N_A}$ ④ $\frac{0.693W N_A}{TM}$

[답] ④

1g의 비방사능은

$$S. A. = \lambda N_{1g} = \lambda \frac{N_A}{M} = \frac{0.693}{T_{1/2}} \cdot \frac{N_A}{M}$$

$$\text{따라서 } W \text{ g의 방사능은 } W \times (S.A) = \frac{0.693}{T_{1/2}} \cdot \frac{W \cdot N_A}{M}$$

확인

표준상태에서 1cc의 ^{85}Kr (반감기 : 10.7년)의 방사능은?

- ① 1.24 Ci ② 1.49 Ci ③ 1.71 Ci ④ 1.96 Ci

[답] ②

제 6 절 방사선과 물질과의 상호작용

- 방사선이 물질 내에서 여러 작용을 통해 영향을 미치는 동시에 방사선 자신도 영향을 받아 진로, 에너지의 변화 등으로 소멸
- 방사선과 물질간의 상호작용은 방사선측정, 방사선차폐등에 관한 기본

1. 하전입자의 물질내 에너지 손실과정

- 일반적으로 방사선과 원자와의 충돌과정은 고속으로 입사하는 방사선에 대해 거의 정지하고 있는 표적원자로 가정한다.

가) 탄성산란 :

원자핵과의 상호작용으로 입사하는 입자가 방향만 바꾸는 과정, 에너지 보존칙이 성립되며, 전 운동에너지도 보존된다.

나) 비탄성산란 (충돌손실) :

하전입자의 물질 내에서의 에너지손실과정은 비탄성충돌이 대부분을 차지한다. 충돌전후에 있어서 입사입자와 표적입자의 본질은 변하지 않지만 내부에너지가 변함. 이때 전리를 일으키는 확률은 여기를 일으키는 확률보다 작다.

다) 제동복사 (방사손실) :

원자핵의 coulomb력에 의해 입사하전입자가 제동되면서 그 속도의 감소량만큼을 전자파로 방출하는 현상을 말하는 데 이때 방출되는 전자파를 제동복사선이라 하며 연속스펙트럼분포를 나타낸다.

제동복사시 에너지 손실률은 흡수물질의 원자번호의 제곱 (Z^2)과 에너지 (E)에 비례하고 입사입자의 질량의 제곱 (m^2)에 반비례 한다

전자의 경우 제동복사가 가장 문제가 된다.

라) Cerenkov effect :

매질 내에서 광속도보다 빠른 속도로 하전입자가 진행할 때 전자파를 방출하는 현상을 말하는 데 이때 방출되는 복사선을 체렌코프방사선이라 한다.

마) 쌍소멸 :

음전자와 양전자 한 쌍이 소멸되면서 감마선으로 바뀌는 현상이다. 소멸방사선은 핵내에서 발생하는 것이 아니기 때문에 광자(photon)라는 표현이 적함

[참고] 저지능, 비전리, LET

- 저지능 (stopping power) $-\frac{dE}{dX}$: (하전입자의 입장에서 에너지 손실을 관찰)

단위거리 당 방사선입자가 에너지를 잃는 비율

관심의 방사선이 전자선인 경우 저지능은 충돌 저지능과 복사저지능으로 구분할 수 있음

$$\text{저지능} : \left(-\frac{dE}{dX}\right)_t = \left(-\frac{dE}{dX}\right)_c + \left(-\frac{dE}{dX}\right)_r$$

- LET (선형에너지 전달) $-\frac{dE}{dX}$: (에너지를 전달받는 매질의 입장에서 관찰)

저지능과 같은 개념이나 저지능 값에서 델타선(δ)으로 인한 에너지와 제동복사를 제외한 값

델타선 δ -ray : 관심영역을 빠져나가는 2차 방사선 δ -ray라 부름

- 비전리(specific ionization) : 비정을 따라 단위 길이당 만드는 이온쌍의 수

[예] LET와 저지능을 수식으로 다시 표현하면

$$\text{저지능} : \left(-\frac{dE}{dX}\right)_t = \left(-\frac{dE}{dX}\right)_c + \left(-\frac{dE}{dX}\right)_r$$

입사하는 방사선의 입장에서 단위거리당 에너지 손실

$$\text{LET} : \left(-\frac{dE}{dX}\right)_{c, \Delta}$$

방사선이 입사된 위치주변에서 하전입자에게 전달된 에너지에 초점을 둔 양으로
저지능에서 관심영역을 벗어나는 radioactive loss와 δ -ray를 제외한 값.

2. 알파선과 물질과의 상호작용

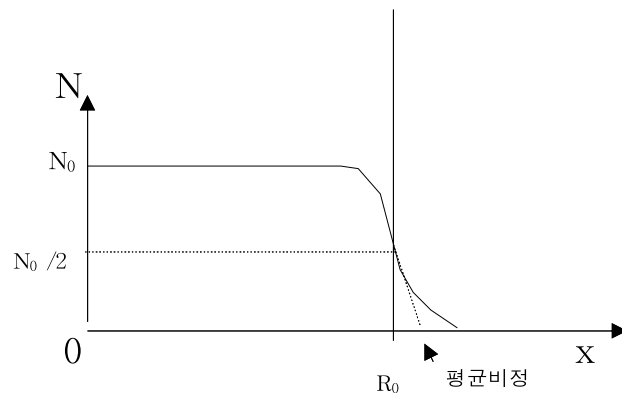
가. 특징

- 속도가 빠른 α 입자의 흐름이다.
- 전자에 비해 질량이 크므로 충돌에 의한 진로변화가 거의 없다.
- 충돌회수가 많아 밀도가 높은 물질에는 투과력이 적다.

나. 알파선의 비정(range)

일정한 에너지를 갖는 α 선의 경우 일정한 비정을 가진다.

비정은 알파선의 세기와 비행거리간의 관계로 정의된다.



2.5 MeV 이하일 때는 약 0.5cm/MeV,

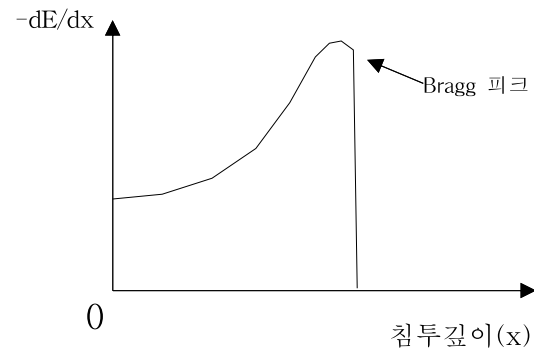
2.5 MeV 이상일때는 약 0.75 cm/MeV

$$\text{또는 } R_{\text{air}} = 0.318 E^{3/2} \quad (4 \sim 8 \text{ MeV})$$

평균비정 [Rm] : 알파입자의 수가 1/2로 감소,

외삽비정 [Re] : 수학적으로 바깥늘림 비정

비정의 요동(교란) [Range Straggling], 알파입자에 의한 여기 및 전리의 횟수가 개개의 입자에 따라 다르기 때문에 일어나는 통계적인 변동



Bragg 피크

알파 입자와 같은 중하전입자가 물질에 입사하여 진행하면서 에너지를 잃어가면 저지능 (stopping power) 값이 근사적으로 $1/E$ 에 따라 증가하다가 입자가 정지상태에 이른다. 이처럼 최대도달거리 (비정)직전 저지능이 최대로 된 피크를 Bragg 피크라고 부른다.

- 저지능 (Stopping power)과 비정 (Range)의 관계

$$S_m/S_{air} = R_{air}/R_m$$

여기서, S = 물질의 저지능, R = 물질 내에서의 비정

문] 2 MeV 알파선의 공기중에서의 비정은?

- ① 0.2 cm ② 1.0 cm ③ 6.5 cm ④ 9.5 cm

[답] ②

문] 5 MeV의 알파입자가 공기보다 상대저지능이 800배인 어떤 물질 m에 입사하였을 때 평균 비정을 구하여라.

[답] 공기중에서의 비정 $R_{air} = 0.318 E^{3/2} = 0.318 \times 5^{3/2} = 3.555 \text{ cm}$

저지능과 비정은 반비례하므로 $S_m/S_{air} = R_{air}/R_m$

따라서 어떤 물질 m에서의 비정 $R_m = 3.555 \text{ cm} / 800 = 0.00444 \text{ cm}$

문] 공기중 비정이 3 m인 알파선의 물에서의 비정은?

[답] $300 \text{ (cm)} \times 0.001293 \text{ (g/cm}^3\text{)} = X \text{ (cm)} \times 1 \text{ (g/cm}^3\text{)}$

$X = 0.3879 \text{ cm}$

중요

밀도 두께 (density thickness)

- 비정의 단위는 길이이므로 cm, μm 등이 사용
- 따라서 같은 에너지의 방사선에 대해서도, 물질에 따라 각기 비정이 다름
- 그렇지만 밀도 ρ 와 거리 ℓ 의 곱은 같다는 사실에 착안하여 밀도 두께를 만듦. (g/cm^2)
- 즉 3 MeV의 알파선에 대해, 물질마다 비정은 다르지만 밀도 두께는 같음. 다시 말해 밀도 두께에 대하여 다시 그 물질의 밀도를 나누면 해당물질의 비정이 됨

중요 :

- 저지능, 선형감쇠계수도, 같은 에너지의 방사선에 대해서 그 값이 서로 다르기 때문에 밀도 두께를 이용.
- 단 저지능과 선형감쇠계수 자체가 $1/\ell$ 의 차원을 가지기 때문에 수학적으로는 나누어진 모양이 됨. 즉 $\frac{1}{\ell \times \rho}$ [단위는 cm^2/g]
- 밀도 두께로 나눈 경우 “질량”이란 말을 앞에 붙여 질량저지능, 질량감쇠계수라 부름

문] 다음 중 차폐체의 선형감쇠계수(linear attenuation coefficient; μ)에 대한 설명으로 틀린 것은?

- ① μ 는 방사선 에너지의 함수로 주어지는 차폐체의 고유 상수이다.
- ② 실제 계산에는 선형감쇠계수에 밀도를 곱한 값인 질량감쇠계수(mass attenuation coefficient; μ_m)가 자주 이용된다.
- ③ μ 의 차원은 m^{-1} 이다
- ④ 방사선이 두께 X cm인 차폐물질에서 반응하지 않고 투과할 확률은 $\exp(-\mu X)$ 이다.

[답] ②

* 중하전입자와 물질간의 상호작용

가. 특징

- 중하전입자는 그 질량이 전자보다 훨씬 큰 입자
- 양성자, 알파입자, 핵분열생성물
- 주로 궤도전자와 전리 및 여기반응
- 중하전입자의 진로는 직선적
- 비정 : 하전입자가 물질을 침투할 수 있는 깊이

비정 비례법칙(Scaling Law of Range)

- 단일 중하전입자에 대한 서로 다른 물질에서의 비정

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \sqrt{\frac{M_1}{M_2}} \quad (R : \text{물질}, \rho : \text{밀도}, M: \text{원자량})$$

- 하나의 물질에서 같은 속도를 갖는 서로 다른 중하전입자의 비정

$$\frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2 \frac{M_1}{M_2} \quad (R : \text{물질}, z : \text{전하수}, M: \text{원자량})$$

문] 10MeV 양성자의 물속 비정도가 0.118 cm 라면 40 MeV α 의 물속 비정도는?

$$[\text{답}] \quad E_p = \frac{1}{2}m_p v_p^2 = 10 \text{ MeV} \quad E_\alpha = \frac{1}{2}m_\alpha v_\alpha^2 = \frac{1}{2}(4m_p)v_\alpha^2 = 40 \text{ MeV} \quad \therefore v_p = v_\alpha$$

양성자의 속도와 α 의 속도가 같으므로 아래의 식을 적용

따라서 α 선의 물속 비정도 0.118 cm임.

$$\frac{R_p}{R_\alpha} = \left(\frac{z_\alpha}{z_p}\right)^2 \frac{M_p}{M_\alpha} = \left[\frac{1}{4}\right]\left[\frac{2}{1}\right]^2 = 1$$

3. 베타선과 물질과의 상호작용

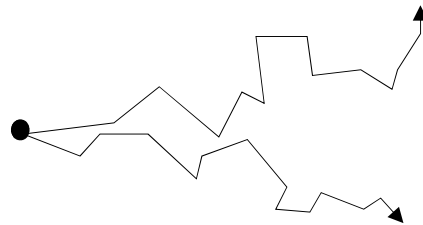
가. 특징

- 전자는 작용하는 대상도 전자로서 대등한 입자들이 작용하므로 거동은 중하전입자와 다르다.
- 전자가 물질의 원자 궤도전자 또는 핵의 방사선장과 반응하게 되면 입사된 전자 자신의 방향도 심하게 영향을 받는다.
- 높은 에너지에서는 전방향 산란이 우세하나 에너지가 낮아지면 후방산란[backscattering]도 자주 일어나고
- 따라서 물질에 입사된 전자의 궤적은 직선을 형성하는 것이 아니라 무질서한 브라운운동과 같은 형태를 취한다. 그러므로 전자에게는 비정도 중하전입자처럼 분명하지 않다.

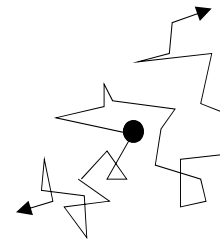
나. 전자의 저지능

전자가 물질 중에서 에너지를 잃는 과정에는 중하전입자처럼 충돌에 의한 전리 및 여기 외에 복사선을 방출하는 방법이 있다. 이는 전자의 경우 질량이 작아 MeV 단위의 에너지에서 전자의 속도가 상대론적 작용의 영향을 받는 특성에서 기인한다. 따라서 전자의 저지능은 다음과 같이 충돌분과 복사분의 합으로 쓸 수 있다.

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right) = \left(-\frac{dE}{dx}\right)_c + \left(-\frac{dE}{dx}\right)_r$$



(a) 고에너지 전자



(b) 저에너지 전자

충돌저지능과 복사저지능 사이에는 대략 다음의 비율이 성립한다.

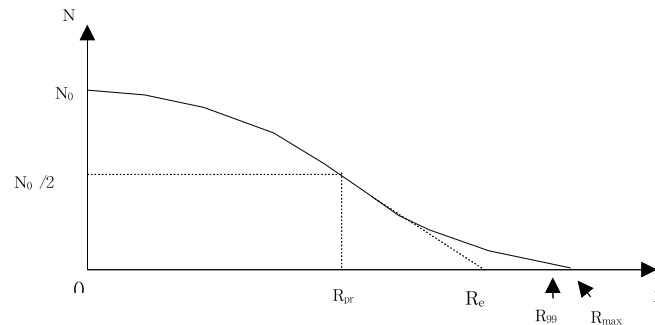
$$\frac{\left(-\frac{dE}{dx}\right)_r}{\left(-\frac{dE}{dx}\right)_c} \cong \frac{EZ}{800}$$

※ Heitler의 제동복사에 의한 평균에너지 손실

$$\begin{aligned} \left(-\frac{dE}{dx}\right)_r &= N r_0^2 \frac{Z^2}{137} (E + mc^2) \left(4 \log \frac{2(E + mc^2)}{mc^2} - \frac{4}{3}\right) \\ &= 3.44 \times 10^{-4} (E + mc^2) \frac{Z^2}{A} \rho \left(4 \log \frac{2(E + mc^2)}{mc^2} - \frac{4}{3}\right) \end{aligned}$$

- 전자의 비정

전자의 비정도 알파선과 같은 방법으로 선원과 계측기 사이 물질의 두께를 달리하는 방법으로 측정이 가능하다. 그러나 전자의 경우에는 흡수체가 얇은 경우에도 후방산란으로 인해 검출기에 도달하지 못하는 전자들이 생긴다. 처음부터 전자수는 감소 경향을 보이며 꼬리가 길어진다. 흔히 사용되는 비정은 외삽비정 R_e 인데 이에 대해서는 다음의 실험 곡선으로 근사하게 구할 수 있다.



잠깐

초기에 동일한 에너지를 갖는 동종의 많은 입자가 같은 물질에 입사되었더라도 입자들이 진행하는 과정에서 일으키는 상호작용의 세부 내용은 달라지기 때문에 어떤 깊이에도달했을 때 각개 입자들이 잃은 (또는 현재 가지고 있는) 에너지의 양은 서로 달라져 평균치를 중심으로 정규분포를 하게 된다. 초기에 단색 (단일)에너지였던 것이 물질 내에서 진행한 거리가 증가할수록 개별 입자의 에너지 분산은 커진다. 이 현상을 에너지 요동(교란) (energy straggling)

※ 중성자와 물질의 상호작용

- ① 탄성산란
- ② 비탄성산란
- ③ 포획

[문제] 알파입자는 왜 제동복사선을 내지 않는가?

제동복사선은 하전입자가 전기장의 힘을 받아 에너지를 상실(속도가 감속)할 때 발생 되는 전자파임.. 전자선은 질량이 매우 작기 때문에 전기장을 만나면 쉽게 방향과 속도를 바꾸게 되며 에너지를 잃는 비율이 상당함.

따라서 그 에너지가 제동복사 X선으로 방출됩니다. 그러나 **알파 입자**는 전자에 비해 **질량이 7000 배 정도 크기** 때문에 에너지에 비해 운동량이 커 전기장의 영향을 쉽게 받지 않습니다(그래서 알파는 물질 속에서 거의 직선 운동을 하게 됨).

따라서 에너지 손실은 주로 물질의 궤도전자와 **쿨롱 상호작용**을 통해 일어나며 제동복사선을 내지 않음. 원론적으로는 알파나 양성자도 강한 전기장을 만나면 제동복사선을 낼 수 있지만 물질의 원자핵 주변에 형성되는 약한 전기장으로는 어려움.

4. 감마선과 물질과의 상호작용

전자기 방사선은 전하를 갖지 않음에 따라 하전입자의 물질과의 상호작용과 달리 쿨롱력의 지배를 받지 않는다.

가. 요약

Photoelectric effect (광전효과)

Compton scattering (컴프턴 산란)

Pair production (전자쌍생성)

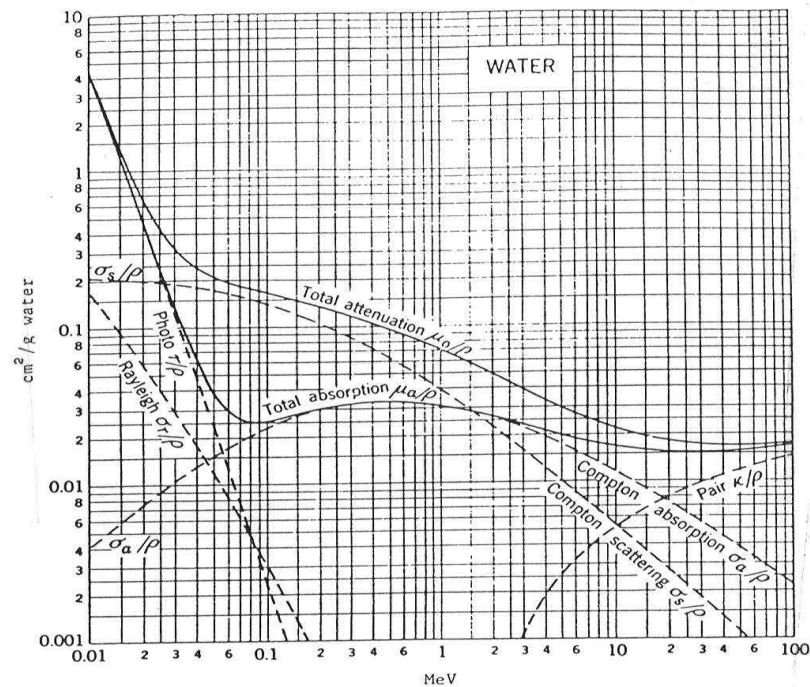
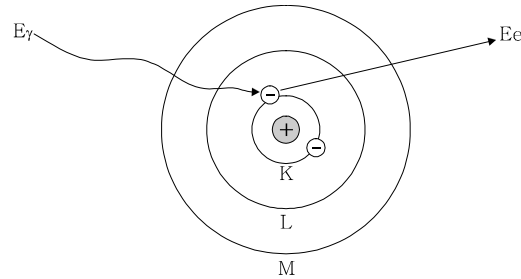


FIGURE 1. Mass attenuation coefficients for gamma-rays in water. (From *The Atomic Nucleus*, by R. D. Evans, Copyright 1955, by permission of McGraw-Hill Book Co., Inc., as reproduced from *Radiological Health Handbook*.)

나. 광전효과
일종의 전리 현상이다.



$$E_e = h\nu - W$$

$$E_e = \frac{1}{2}mv^2 \text{ (광전자의 에너지)}$$

$$E_\gamma = h\nu \text{ (입사광자의 에너지)}$$

W = 일함수 (Work function) 전자의 원자핵과의 결합에너지, E_b (속박전자의 결합에너지)라고 표시하기도 함

- 광자가 궤도전자에 충돌하여 전에너지를 원자와 결합된 전자에 전달한다.
- 방출된 전자는 전에너지에서 결합에너지를 뺀 나머지 양 만큼의 운동에너지를 가진다.
- 광자는 전자의 W보다 큰 에너지를 가져야 한다.
- 입사광자의 에너지가 궤도전자의 에너지 보다 크고 반드시 발생하는 것은 아니다.
- 발생확률은 $\sigma_{ph} \propto \frac{Z^5}{(h\nu)^{\frac{7}{2}}}$ 이다.
- 광전효과는 원자핵 가까이에서 잘 일어난다 (모든 광전효과의 80 % 이상이 최내각 (K각) 전자와 작용 - 광자와 궤도전자의 공명현상).
: 이때 반도핵도 운동에너지를 가지나 광전자의 운동에너지보다 극히 작으므로 무시한다.
- 광자의 에너지가 고에너지에서 광전효과의 발생확률은 낮지만 납과 같은 원자번호가 큰 원소에서는 무시할 수 없다.

[문] 10keV의 감마선을 고려하여 철과 알루미늄의 차폐효과를 비교하여라 단 감마선과 물질간에는 광전효과만 고려한다.

$$\frac{\sigma_{Al}}{\sigma_{Fe}} \approx \frac{\sigma_{ph, Al}}{\sigma_{ph, Fe}} = \frac{\left(\frac{Z^5}{E^{3.5}}\right)_{Al}}{\left(\frac{Z^5}{E^{3.5}}\right)_{Fe}} = \left(\frac{13}{26}\right)^5 = \left(\frac{1}{2}\right)^5$$

∴ 철이 알루미늄의 2⁵배 차폐효과가 좋다.

문] 파장이 2000\AA 인 광자가 나트륨의 최외각전자와 충돌하였다. 최외각 전자에 대한 원자의 전리포텐셜이 5.41 eV 일 때 방출된 최외각 전자의 운동에너지는 ?

[풀이] 광자의 에너지 ($h\nu$)는

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = \frac{hf(\text{J})}{1.6 \times 10^{-19}(\text{J/eV})} = \frac{hc}{1.6 \times 10^{-19}\lambda} = \frac{6.626 \times 10^{-34}(\text{J} \cdot \text{s}) \times 3 \times 10^8(\text{m/s})}{1.6 \times 10^{-19}(\text{J/eV}) \times 2000 \times 10^{-10}(\text{m})}$$

$$= 6.20\text{ eV}$$

따라서 광전자의 운동에너지 $E_{\text{pe}} = 6.20 - 5.41 = 0.79\text{ eV}$

문] Na에서 광전자를 튀어나오게 하는데 필요한 에너지는 2.0 MeV 이다. 파장 2000\AA 의 빛을 쬔었을 때, 방출되는 광전자의 최대에너지와 최대속도를 구하라.

[풀이] (1) 광전자의 최대에너지

$$h\nu = h \frac{c}{\lambda} = K_{\text{max}} + W$$

$$\therefore K_{\text{max}} = h \frac{c}{\lambda} - W$$

$$= 6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s} \times \frac{3 \times 10^8 \text{m/s}}{2,000 \text{\AA} \times 10^{-10} \text{m/\AA}} - 2\text{eV} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{J/eV}$$

$$= 6.74 \times 10^{-19} \text{J} = 4.21\text{eV}$$

(2) 광전자의 최대속도

$$K_{\max} = \frac{1}{2}m_e v^2, \quad v = \sqrt{\frac{2K_{\max}}{m_e}}$$

$$\therefore v = \sqrt{\frac{2K_{\max}}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \times 6.74 \times 10^{-19} \text{ J}}{9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}}} = 1.22 \times 10^6 \text{ m/s}$$

문] 파장 3,000 Å의 빛이 금속에 부딪쳐서 최대에너지 2.0 eV의 광전자를 방출하였다면, 그 일함수는 얼마인가?

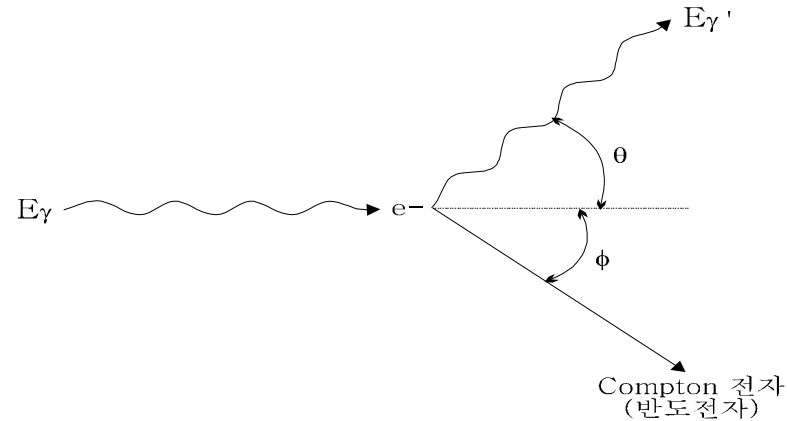
[풀이] $h\nu = h\frac{c}{\lambda} = K_{\max} + W$

$$\therefore W = h\frac{c}{\lambda} - K_{\max}$$

$$= 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{3,000 \text{ Å} \times 10^{-10} \text{ m/Å}} - (2 \text{ eV} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV})$$

$$= 3.43 \times 10^{-19} \text{ J} = 2.14 \text{ eV}$$

다. 컴프턴 산란



광자가 원자의 최외각전자 또는 자유전자와 상호작용하여 에너지의 일부를 주고 자기 자신은 산란되어 나가는 현상을 말한다 (연속스펙트럼).

$$E_{\gamma'} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma(1 - \cos\theta)}{m_e c^2}} : \theta \text{ 방향으로 산란된 광자의 에너지}$$

$$E_e = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{m_e c^2}{E_\gamma (1 - \cos \theta)}} : \text{전자의 운동에너지}$$

참고 이 식을 증명하는 문제는 출제된 경우는 거의 없다. 단 이 식을 이용해서 풀이하는 문제는 종종 출제된다. 전자의 운동에너지는 따라 암기할 필요없이 광자의 에너지를 암기하면 전자의 운동에너지는 $E_r - E_{\gamma'} = E_r - \frac{E_\gamma}{1 + \frac{m_e c^2}{E_\gamma (1 - \cos \theta)}}$ 가 된다.

$$E_{e(\max)} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{m_e c^2}{2E_\gamma}} \quad (\cos \theta = -1 \text{ 일때, 즉 } \theta = 180^\circ \text{ 일때})$$

문] 1 MeV 정도의 광자가 물질내의 전자에 의하여 산란되어 에너지와 방향을 바꾸는 현상은?

- ① 전자포획 ② 광전효과 ③ 콤프턴효과 ④ 전자쌍생성

[답] ③

※ 시험에는 항상 이런 기본을 묻는 문제가 반드시 출제된다고 보아야 한다.

문] 1 MeV의 광자가 어떤 물질에 입사하여 반대방향으로 되튀어 나왔을 때 반도체자의 에너지를 계산하라.

[풀이] 되튀어 나왔으므로 산란각은 180° , 따라서 산란된 광자의 에너지는

$$E_{r'} = \frac{E_r}{1 + \frac{E_r(1 - \cos\theta)}{m_e C^2}} \quad \text{식에서}$$

$$E_{r'} = \frac{E_r}{1 + \frac{E_r(1 - \cos 180^\circ)}{m_e C^2}} = \frac{1}{1 + \frac{1(1 - (-1))}{0.511}} = 0.204 \text{ MeV}$$

$$\text{반도체자의 에너지 } E_e = E_r - E_{r'} = 1 \text{ MeV} - 0.204 = 0.796 \text{ MeV}$$

문] 감마선과 물질과의 상호작용중에서 잘못된 설명은 ?

- ① 감마선의 에너지가 높을수록 광전효과의 발생확률이 감소한다.
- ② 콤프톤 산란시 광자의 산란각이 90° 일 때 콤프턴전자의 에너지가 최대이다.
- ③ 고에너지 감마선에서 양전자와 음전자가 동시 생성될 확률이 높다.
- ④ 쌍생성시 생성된 전자쌍의 운동에너지의 합은 감마선에너지에 1.02 MeV를 제한 값이다.

[답] ②

$$E_{r'} = \frac{E_r}{1 + \frac{E_r(1 - \cos\theta)}{m_e C^2}} \text{ 에서 } \cos 180^\circ \text{인 경우가 } E_{r'} \text{가 최소이며 따라서 } E_e \text{가 최대}$$

문] 3 MeV의 광자가 90°의 산란각으로 Compton 산란할 때 산란광자와 전자의 에너지와 반도전자의 에너지를 구하시오.

[풀이] (1) 산란광자의 에너지

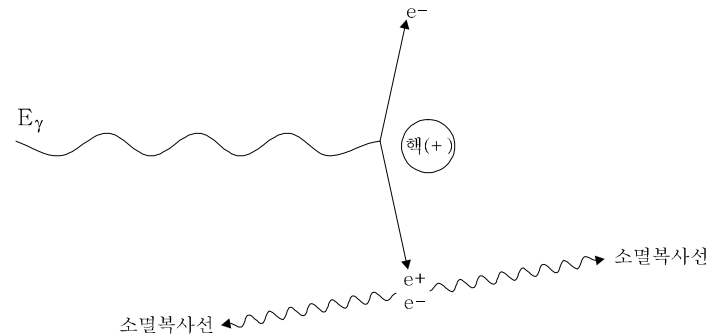
$$E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}(1 - \cos\phi)}{m_e c^2}}$$

$$= \frac{3}{1 + \frac{3(1 - \cos 90^\circ)}{0.511}} = 0.44 \text{ MeV}$$

(2) 반도전자의 에너지

$$E_c = E_{\gamma} - E_{\gamma'} = 3 - 0.44 = 2.56 \text{ MeV}$$

라. 전자쌍생성



일정한 에너지 이상을 가진 광자가 핵의 쿨롱장 부근에서 소멸하여 음양의 한쌍의 전자를 생성하는 현상으로 1.02 MeV 이하에서는 발생하지 않는다. 쌍생성에 의해 생성된 음전자와 양전자는 광자의 진행방향과 유사한 방향으로 진행하면서 매질을 여기, 전리 및 제동복사를 일으켜 에너지를 상실하게 된다. 이때 양전자는 가진 에너지를 모두 소모하게 되면 주변전자와 결합하여 0.51 MeV의 운동에너지를 가진 2개의 소멸복사선을 발생시킨다. 결과적으로 1개의 높은 에너지를 가진 광자로 인하여 작은 에너지를 가진 2개의 광자가 발생된다.

마. 요약정리

• 감마선의 에너지 활용

과 정	에너지 활용 및 변화
광전효과	전에너지를 전자에 전달
Compton 산란	에너지의 일부를 전자에게 전달하고 자신은 일부의 에너지를 가지고 산란
전자쌍생성	입사에너지는 소멸되고 음 및 양의 2개전자를 생성하고 여분의 에너지를 2개의 전자에 분배

• 상호작용과 연계하여 추가적으로 발생할 수 있는 현상

- 광전효과 이후 : 광전자가 주변물질과 제동복사를 일으켜 전자파를 발생하며, 원자의 공동에서 특성 X선이 발생한다. 이와 연계되어 오제전자도 발생할 수 있다.
- 컴프턴 산란 이후 : 에너지의 일부를 잃어버린 산란선이 광전효과를 일으키고 그 이후 ①과 같은 현상이 발생한다.
- 전자쌍생성 이후 : 생성된 음전자에 의한 제동복사와 양전자에 의한 소멸복사가 발생한다.

• 입사감마선 에너지와 대상물질에 대한 원자번호 크기의 발생확률

과정	E 의존성	에너지 (E)와의 관계	Z 의존성
광전 효과	$E^{-3.5}$	입사광자의 에너지가 증가할 때 감소하며 0.5 MeV 영역에서 주로 발생	Z^5
Compton산란	E^{-1}	입사광자의 에너지가 0.1 ~ 5 MeV 영역에서 발생하며 약 1 MeV에서 최대로 발생	Z
전자쌍생성	$E - 1.02$	입사광자의 에너지 1.02 MeV 이하에서는 결코 발생하지 않음	Z^2

문] 10 keV의 감마선을 고려하여 철과 알루미늄의 차폐효과를 비교하여라. 단 감마선과 물질 간에는 광전효과만 고려한다.

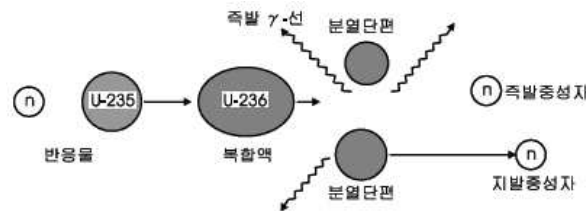
$$\frac{\sigma_{Al}}{\sigma_{Fe}} \approx \frac{\sigma_{ph,Al}}{\sigma_{ph,Fe}} = \frac{\left(\frac{Z^5}{E^{3.5}}\right)_{Al}}{\left(\frac{Z^5}{E^{3.5}}\right)_{Fe}} = \left(\frac{13}{26}\right)^5 = \left(\frac{1}{2}\right)^5 \quad \therefore \text{철이 알루미늄의 32배 만큼 차폐효과가 좋다.}$$

- γ 선과 물질과의 상호 작용시 발생하는 전자의 스펙트럼분포

- 전자쌍 생성시 방출되는 두 전자의 운동에너지는 반드시 등분배되지 않으므로 $0 \sim [E_r (\text{MeV}) - 1.02]$ 까지의 연속 스펙트럼분포를 가진다.
- 콤프턴 산란시 방출되는 반도전자의 에너지는 산란광자의 산란각도에 따라 변하기 때문에 입사 γ 선의 에너지를 $E_r (\text{MeV})$ 라 할때 반도전자의 에너지는 $0 \sim (E_r - \frac{E_r}{1 + \frac{2E_r}{0.511}})$ 의 연속 스펙트럼분포를 가진다.

5. 핵분열

- Chadwick의 중성자 발견(1932) 이후 Fermi가 중성자를 우라늄 원자에 입사시켜 네가지의 다른 베타입자 방출체 검출
- Niels Bohr와 John Wheeler가 핵분열 과정 설명을 위한 물방울 모형 제안
- 원자로에서의 핵분열
 - : 자발적 핵분열(Spontaneous Fission) + 중성자 유도 핵분열(대부분)
- 중성자 유도 핵분열
 - ; 핵분열을 일으키기에 필요한 최소한의 에너지: 문턱에너지(임계 에너지)
- 핵분열 과정: 중성자(particle)이 반응물(target)에 입사하게 되면 복합핵(compound nucleus)을 형성하고 진동/신장을 거쳐 두 단편(핵분열 파편; Fission Fragments)으로 갈라짐. 갈라진 두 단편들은 대부분 중성자 과잉이므로 다시 직후(10^{-14} 초내) 곧바로 붕괴하며 중성자 방출(즉발 중성자; Prompt Neutron), 얼마 후 나타나는 중성자(지발중성자; delayed Neutron)



가. 핵분열가능 핵종(Fissionable Nuclide) : 원자력법의 핵연료물질 + 핵원료 물질을 통칭

- 중성자를 흡수했을 때 핵분열 가능성을 가지고 있는 핵종

Th-232, U-233, U-235, U-238, Pu-239

- 핵분열가능 핵종 핵분열성 핵종(Fissile Nuclides) + 핵분열 원료핵종(Fertile Nuclides)

핵분열성 핵종: 열중성자를 흡수하여 핵분열을 일으키는 핵종 (U-233, U-235, Pu-239)

핵분열성 원료 핵종: 열중성자를 흡수하여 핵분열성 핵종으로 변환 되는 핵종 (U-238, Th-232)

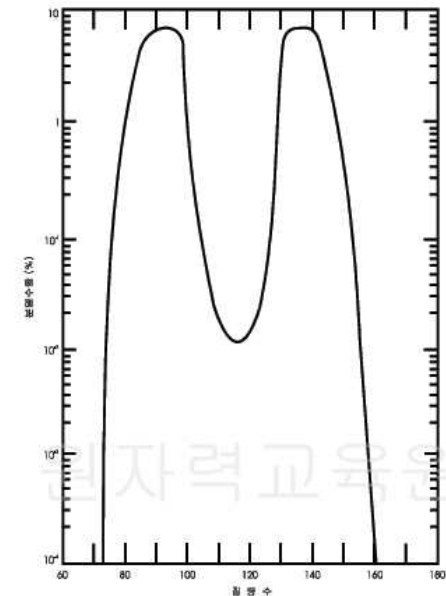
나. . 핵분열 생성물

- 핵분열 파편, 중성자, 방사선 등 방출
- 질량수가 135와 100인 핵분열파편이 약 7%로 가장 많이 생성
- 생성물 곡선의 면적의 합: 200%
- 평균적으로 2~3개의 즉발중성자 발생

예) U-235가 핵분열 하면서 $^{135}_{54}\text{Xe}$ 이 생성되었을 때

가능한 나머지 하나의 핵분열 단편과 중성자수는?

- ① $^{97}_{38}\text{Sr}$, n=2개, ② $^{97}_{38}\text{Sr}$, n=3개, ③ $^{97}_{39}\text{Y}$, n=2개, ④ $^{98}_{39}\text{Y}$, n=2개



다. 핵반응단면적(Cross Section C.X.)

- 입사하는 입자플루언스(주로 중성자)에 대해 표적원자핵 하나가 반응할 확률의 비를, 핵 반응단면적이라 하고 소문자 시그마 σ 로 나타낸다. 즉 $\sigma = \frac{P}{\Phi}$
- 이 σ 는 무척 작아 그 기하학적 크기가 수 10^{-24} cm^2 이므로, 10^{-24} cm^2 를 일일이 적는 불편을 해소하기 위해 편의상 1 b [barn] = 10^{-24} cm^2 이라 하였다.
- 핵반응 미시적 단면적의 종류
 - ; 산란단면적(탄성산란+비탄성산란)
 - ; 흡수단면적(포획+분열)

예제) 중성자 1개가 U-235 원자 1개와 충돌할 때 핵분열을 일으킬 확률은?

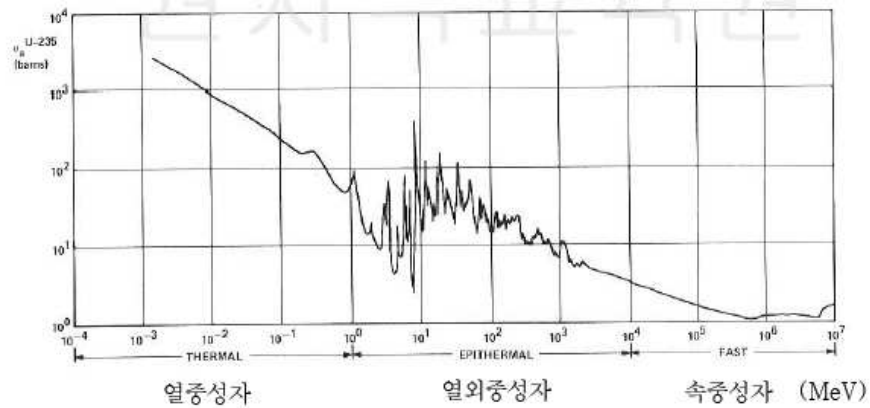
(U-235의 총반응단면적 680b, 산란단면적 10b, 포획단면적 98b)

Sol) 총반응단면적이 680b 이므로 분열단면적은 $680 - 10 - 98 = 580 \text{ b}$

따라서 충돌할 때 핵분열 반응이 일어날 확률은 $580/688 \times 100(\%) = 84.3\%$

- 여기곡선 : 핵반응단면적은 입사입자의 에너지에 따라 달라지는 데 이 관계를 나타낸 곡선

U-235의 중성자 에너지에 따른 흡수단면적의 변화 (산란단면적은 거의 변화없음)



: 열중성자 영역 : $1/v$ 에 비례하여 변화 열외중성자 영역: 공명
속중성자 영역 : 작은 값을 가지며 거의 변화 없음

- 거시적 단면적 $\Sigma[\text{cm}^{-1}]$: 미시적 단면적 $\sigma(\text{cm}^2)$ X 원자밀도 $N(\#/\text{cm}^3)$

예제) U-235의 거시적 핵분열 단면적 ($\sigma_f=580\text{b}$, U밀도 $\rho=18.9\text{g}/\text{cm}^3$)

sol) U-235의 원자밀도 $N = \frac{\rho \times N_A}{M} = 4.84 \times 10^{22} \text{ 개}/\text{cm}^3$

거시적 단면적 $\Sigma = \sigma N = 28.1 \text{ cm}^{-1}$

* 실제 원자로에는 순수 U-235가 아닌 3% 농축 UO_2 를 사용하며, UO_2 외에도 물, 제어봉, 구조물 등이 비균질적으로 구성되어 전체적으로 거시적단면적을 고려한다

- 평균 자유행정(mean free path, λ) : 하나의 반응이 일어날 때까지 중성자 하나가 이정한 거리

$\lambda = \frac{1}{\Sigma}$ (거시적 단면적의 역수)

- 핵분열 반응률(R) = 거시적 핵분열단면적(Σ) x 중성자속(ϕ)

예) 중성자속(ϕ)이 $6.02 \times 10^{12} [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$ 원자로에서 U-235의 거시적 분열단면적이 0.52 cm^{-1} 일 때 핵분열 반응률은?

sol)

$$R = \Sigma \phi = 3.12 \times 10^{12} [\text{핵분열반응}/\text{cm}^2\text{s}]$$

- 중성자 생성률 = 거시적 핵분열단면적(Σ) x 중성자속(ϕ) x 핵분열당 중성자생성률(ν)

라. 중성자의 증배

- 원자핵이 분열하면 한 개 이상의 중성자가 방출되며 방출된 중성자의 q일부는 다시 핵분열을 일으켜 더 많은 핵분열을 일으킨다 이 과정을 연쇄반응(Chain Reaction)이라고 한다.
- 원자력발전소에서는 이 연쇄반응을 제어함으로써 일정한 출력수준을 유지한다. 하나의 핵분열이 다른 하나의 핵분열만 일으키도록 조절하는 것이다. 이는 생성되는 중성자의 수와 흡수되거나 누설되는 중성자의 수가 같아 중성자의 수가 동일하게 유지된다는 뜻이다.
- 이 상태는 간략하게 생성률 = 흡수율 + 누설률로 표현될 수 있다.

마. 증배계수

- 중성자의 누설이 없는 무한 원자로를 가정할 때 이 때의 증배계수를 무한증배계수(Infinite Multiplication Factor, k_{∞})라고 하며 4인자(재생계수, 속핵분열 계수, 공명이탈 확률, 열중성자 이용률)의 곱으로 정의되기 때문에 4인자공식이라고도 한다.

$$k_{\infty} = \eta \epsilon p f$$

인자	정의
η : 재생계수(Reproduction factor)	$\frac{\text{열핵분열 결과 생성되는 속중성자 수}}{\text{연료에 흡수되는 열중성자 수}}$
ϵ : 속핵분열 계수(Fast Fission factor)	$\frac{\text{모든 핵분열 결과 생성된 속중성자 수}}{\text{열핵분열로 생성된 속중성자 수}}$
p : 공명이탈 확률(Resonance Escape Probability)	$\frac{\text{공명포획을 피하여 나오는 열외중성자 수}}{\text{공명영역에 들어가는 열외중성자 수}}$
f : 열중성자 이용률(Thermal Utilization factor)	$\frac{\text{연료에 흡수된 열중성자 수}}{\text{원자로내에 흡수된 열중성자 수}}$

- 실제 원자로에서는 감속과정에서 중성자 누설이 일어나므로 열중성자 및 속중성자가 누설되지 않을 확률을 곱하여 6인자 공식으로 사용되며 이를 유효증배계수(Effective Multiplication Factor, k_{eff})라 한다.

$$k_{eff} = k_{\infty} (= \eta \epsilon p f) P_f P_{th}$$

인자	정의
P_f : 속중성자 비누설확률 (Fast Neutron Non-leakage Probability)	$\frac{\text{감속과정에서 누설되지 않은 속중성자의 수}}{\text{속중성자의 수}}$
P_{th} : 열중성자 비누설확률 (Fast Neutron Non-leakage Probability)	$\frac{\text{감속과정에서 누설되지 않은 열중성자의 수}}{\text{열중성자의 수}}$

예제) 다음과 같은 가상 원자로가 있을 때 η , ϵ , p , f , P_f , P_{th} , k_{eff} 를 각각 구하시오

- 1,000개의 열중성자가 연료에 흡수
- 열핵분열로 2,000개의 속중성자가 생성
- 50개의 속중성자가 속핵분열의 결과로 생성
- 100개의 속중성자가 누설
- 500개의 열외중성자가 U-238에 포획
- 100개의 열중성자가 누설
- 300개의 열중성자가 독물질, 구조물질 및 감속재에 흡수

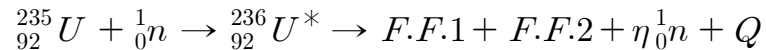
Sol)

- $\eta = (2000/1000) = 2$
- $\epsilon = (2000+50) / (2000) = 1.025$ $P_f = (2050-100) / (2050) = 0.951$
- $p = (1950-500) / (1950) = 0.744$ $P_{th} = (1450-100) / (1450) = 0.931$
- $f = (1350-300) / (1350) = 0.778$
- $k_{eff} = (1050) / (1000) = 1.05$

다른 식의 요약 설명

가. 핵분열

- $^{235}_{92}\text{U}$ 과 같은 핵분열물질의 원자핵이 중성자를 받으면 그것이 대개 2개(때로는 드물게 3개)의 핵분열파편(또는 핵분열 생성물이라 부름. Fission Fragment; FF or Fission Product; FP)으로 쪼개지면서 많은 에너지와 함께 2~3개의 중성자를 방출한다. 이것을 식으로 표시하면



이때 질량결손에 의해 최종적으로 방출되는 에너지를 알아보면

성 분	방출에너지(MeV)
핵분열파편의 운동에너지	167
중성자의 운동에너지	6
즉발 감마선	6
방사능 붕괴에 따른	
베타선	5
지발 감마선	5
뉴트리노	11
에 너 지	200 MeV/분열

[문] U235 원자핵 1개가 열중성자에 의해 핵분열 할 때, 약 200MeV의 에너지가 발생한다. 그러면 U235 1g이 전부 핵분열 할 때 발생하는 에너지는 몇 칼로리 인가? (단, $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-12}\text{erg}$, $1\text{ cal} = 4.2 \times 10^7\text{erg}$, Avogadro = 6×10^{23} 이다.)

- ① $1.05 \times 10^{10}\text{cal}$ ② $1.95 \times 10^{10}\text{cal}$ ③ $3.95 \times 10^{10}\text{cal}$ ④ $2.95 \times 10^{10}\text{cal}$

[답] ②

i) ^{235}U 1g내의 우라늄 원자의 개수는

$$\frac{1}{235} \times 6 \times 10^{23} = 2.55 \times 10^{21} \text{ 개}$$

ii) 이때 발생하는 에너지를 cal로 나타내면 (단위 변환 과정임)

$$2.55 \times 10^{21} \text{ 개} \times 200 \frac{\text{MeV}}{\text{개}} \times 1.6 \times 10^{-13} \frac{\text{Joule}}{\text{MeV}} \times \frac{1\text{cal}}{4.2\text{Joule}} = \text{약 } 1.95 \times 10^{10} \text{ cal}$$

나. 중성자 증배(multiplication)

- 상기 핵분열식에서 핵분열당 발생하는 중성자의 개수는 평균 $\eta = 2.5$ 개이다. 이 중성자가 모두 다시 핵분열에 사용된다면, 다음 핵분열 횟수는 2.5회

- 그 다음은 $(2.5)^2$ 번째는 $(2.5)^n$ 으로 기하급수적으로 증가하여 우리는 핵분열과정을 통제

할 수가 없고 핵물질은 폭발할 것이다.

- 그러나 실제로는 그러하지 않고 발생한 중성자가 주변물질에 흡수되기도 하고 바깥으로 달아나기도 하며, 단순한 충돌로 에너지를 잃기도 한다.

- 따라서 실제 중성자가 증가되는 과정을 증배(multiplication)라고 한다.

중성자 증배계수(K)는 다음과 같이 정의한다.

$$K = \frac{N(f+1)}{N(f)}$$

즉 f 번째 핵분열 때 생성된 중성자 개수와 f+1번째 핵분열 때 생성된 중성자 개수의 비율이다.

I) $K = 1$ 이면,

- 중성자 1만개의 핵분열을 일으켜 2만 5천개(N_f)의 중성자가 발생, 이 중성자 중에서 1만 5천개의 중성자는 여러 다른 반응으로 사라져버려 핵분열에 사용되지 못하고 최종 1만개만 핵분열을 일으켜 다시 2만 5천개(N_{f+1})의 중성자가 발생.

원자로나 반응장치가 일정한 출력으로 안전하게 운전되는 상황이 경우를 임계(Critical)라고 함.

II) $K < 1$ 이면,

- 처음에 중성자를 많이 투입해도 점점 시간이 갈수록 감소하므로, 최종적으로 핵분열이 중지됨. 원자로를 정지시킬 때, 중성자 흡수물질을 다량 투입하는 경우에 해당함.
- 이 경우를 미임계(Subcritical) 라고 함.

III) $K < 1$ 이면,

- 중성자가 점점 증가하여 최종적으로는 제어가 불가.
- 원자로를 처음 기동시킬 때 사용하는 Mode로, 원자로가 원하는 출력에 도달하면 중성자 흡수물질을 조절하여 임계상태로 환원함.
- 이 상태를 초임계(Supercritical)이라고 함.

다. 증배 인자 (Multiplication Factor)

- 증배계수에 영향을 끼치는 인자들을 알아보자
- f 번째 생긴 중성자의 개수를 $N(f)$ 라고 하자. 이때 생성된 중성자는 에너지가 약 2 MeV인 고속중성자(Fast Neutron)이다. 이 고속중성자는 U^{235} 와 반응하지 않고 원자로를 빠져나갈 수 있

다.

- P_f 를 “고속중성자가 (원자로밖으로) 누설되지 않을 확률”이라 한다면 이때 중성자의 개수는 $P_f N(f)$ 개이다.

- 고속중성자는 U^{235} 과 충돌해도 핵분열을 조금만 일으키나 ϵ 을 “고속중성자에 의한 핵분열률”이라 한다면 중성자의 개수는 $\epsilon P_f N(f)$ 이다.

- 고속중성자(2 MeV)는 주변에 감속재(주로 H_2O 또는 D_2O)와 충돌하여 핵분열을 잘 일으키는 열중성자(Thermal Neutron, 0.025 MeV)로 감속되는데 이 과정의 중성자를 열외중성자(Epithermal) 중성자라고 한다.

- Epithermal 영역에서는 중성자가 핵분열 반응없이 흡수되는 확률이 존재하는데 이를 공명흡수(resonance absorption)라 한다. p 를 “중성자가 공명흡수 되지 않을 확률”이라 하면 고속중성자가 감속된 후 열중성자의 개수는 $p \epsilon P_f N(f)$ 이다.

- 이 열중성자도 핵분열성 우라늄과 반응하지 않고 원자로를 빠져나갈수 있다. 따라서 최종적으로 남는 열중성자의 개수는 $p \epsilon P_f P_t N(f)$ 이다. 여기서 P_t 는 “열중성자가 (원자로밖으로) 누설되지 않을 확률”이다.

- 열중성자가 핵분열을 잘 일으키기는 하나 매 반응때마다 100% 일으키는 것은 아니다. 따라서 f 를 “열중성자의 핵분열 이용률”이라하고 핵분열당 생기는 고속중성자의 개수를 η (약

2.5개) 라 하면

$$- N(f+1) = \eta f p \varepsilon P_f P_t N(f)$$

따라서 중성자의 (유효)증배계수 $K_{\text{eff}} = \frac{N(f+1)}{N(f)} = \eta f p \varepsilon P_f P_t$

- 유효증배계수는 6개의 인자로 구성되어 있어 6인자 공식(Six-factor formula)라 함

- 무한히 큰 가상의 원자로를 가정하면, 고속중성자나 열중성자가 이 원자로에서 누설될 확률은 0이다. 이 말은 $P_f = P_t = 1$

- 따라서 무한히 큰 원자로에서의 중성자 무한증배계수

$$k^\infty = \eta f p \varepsilon \text{ 이며 4인자 공식(four-factor formula)이라 한다.}$$

제2장 방사화학

제 1 절 기본개념 및 방사평형

1. 중요사항

- 방사평형에 도달하는 과정, 영속평형, 일시평형, 밀킹

잠깐 : 특히 방사평형과 밀킹에 대해서는 완전한 이해 필요

- 무담체 RI의 성질, 특히 극미량의 극저농도 물질의 화학과 그 분리법
- RI와 표지화합물의 제법과 기본 개념
- 방사화 분석, 트레이서 이용법 및 기타 여러 이용법

2. 방사선화학(radiation chemistry)과 방사화학

- 방사선화학 (radiation chemistry)

전리방사선이 물질에 조사될 때 발생하는 화학작용을 연구하는 학문으로 동위원소 등을 화학 반응을 일으키기 위한 선원으로만 사용한다.

- 방사화학 (radiochemistry)

열중성자에 의한 핵반응, 핵의 붕괴 등 핵 자체의 반응과 이들 동위원소를 추적자로 사용하는 화학반응을 다룬다.

3. 순도 및 화학적 수율

- 방사능순도

$$\text{방사능순도} = \frac{\text{해당 핵종 방사능}}{\text{총방사능}} \times 100 (\%)$$

- 방사화학적순도

$$\text{방사화학적순도} = \frac{\text{특정 방사성화합물 방사능}}{\text{전체 방사성화합물 방사능}} \times 100 (\%)$$

- 화학적순도

$$\text{화학적순도} = \frac{\text{특정 방사성화합물 화학량}}{\text{전체 방사성화합물 화학량}} \times 100 (\%)$$

- 방사선 화학적 수율 (radiation chemical yield)
 - ① 단위 조사량당 반응량을 표시하는 방법이다.
 - ② 흡수에너지 100 eV당 생성된 분자변화 또는 생성분자의 수는 G 값으로 나타낸다.

$$G = \frac{\text{No. of Molecular Change}}{100\text{eV}}$$

4. 방사평형 (일시평형과 영구평형)



방사평형이란 방사성핵종이 연속적으로 붕괴하고 있을때 친핵종의 반감기가 딸핵종의 반감기보다 길 때에는 어떤 일정시간 경과 후 방사능과 원자수의 비가 일정해진다. 이것을 방사평형이라 한다.

$$N_A = N_A^0 e^{-\lambda_A t}, \quad N_B = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_A^0 (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t})$$

참고 연쇄붕괴의 미분방정식은 다음식으로 풀 수 있다. 단 풀이에 시간이 많이 소모되므로 출제되는 경우는 드물다

$$\left(e^{\lambda_b t} \cdot \frac{dN_b}{dt} + \lambda_b e^{\lambda_b t} \cdot N_b \right) = \lambda_a N_{a_0} \cdot e^{(\lambda_b - \lambda_a)t}$$

$$\left(e^{\lambda_b t} \cdot N_b \right)' = \lambda_a N_{a_0} \cdot e^{(\lambda_b - \lambda_a)t}$$

$$N_b e^{\lambda_b t} = \frac{1}{\lambda_b - \lambda_a} \lambda_a \cdot N_{a_0} \cdot e^{(\lambda_b - \lambda_a)t} + C$$

$$N_b(t) = \frac{1}{\lambda_b - \lambda_a} \lambda_a \cdot N_{a_0} \cdot e^{(\lambda_b - \lambda_a)t} e^{-\lambda_b t} + C \cdot e^{-\lambda_b t}$$

$$t = 0 \text{에 서 } N_b(0) = 0$$

$$N_b(0) = \frac{1}{\lambda_b - \lambda_a} \lambda_a N_{a_0} \cdot 1 \cdot 1 + C \cdot 1 = 0$$

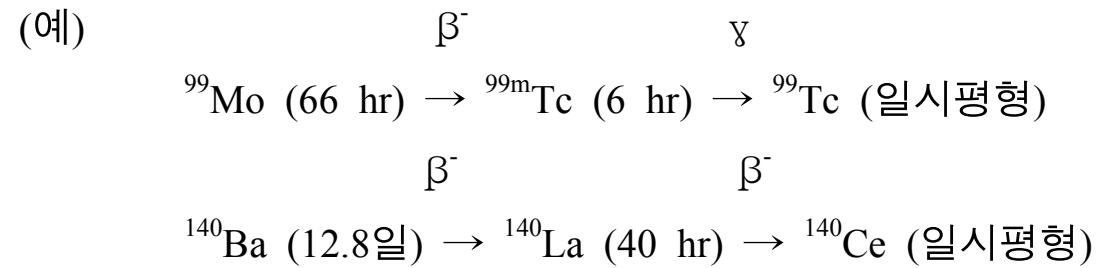
$$C = \frac{-1}{\lambda_b - \lambda_a} \lambda_a N_{a_0}$$

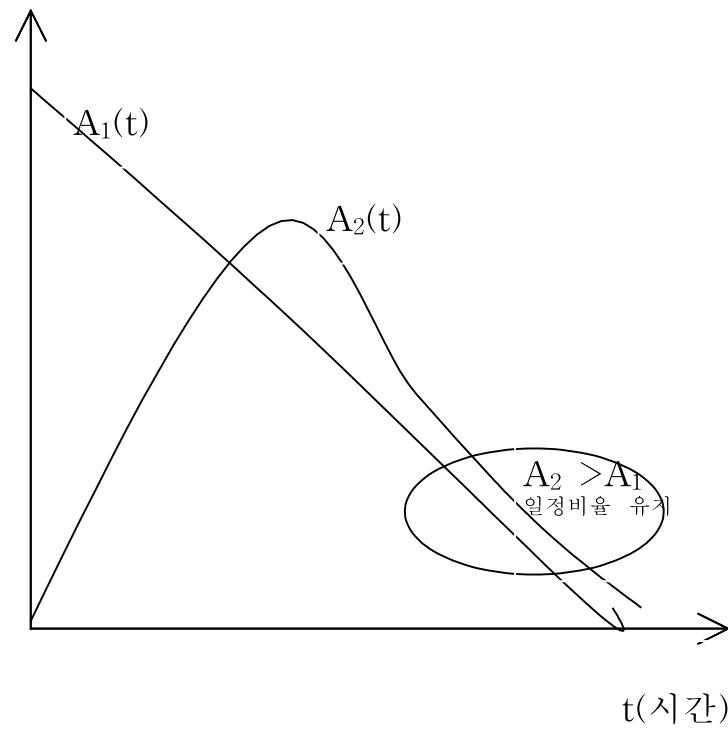
$$N_b(t) = \frac{1}{\lambda_b - \lambda_a} \lambda_a N_{a_0} e^{-\lambda_a t} + \frac{-1}{\lambda_b - \lambda_a} \lambda_a N_{a_0} e^{-\lambda_b t}$$

$$\therefore N_b(t) = \frac{\lambda_a}{\lambda_b - \lambda_a} N_{a_0} (e^{-\lambda_a t} - e^{-\lambda_b t})$$

과도 (일시)평형 (Transient Equilibrium; $T_A > T_B$, $\lambda_A < \lambda_B$)

$$N_B = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_A$$





문] 방사성 물질 A, B가 과도평형을 이룰 때 방사성 물질의 $\frac{N_B}{N_A}$ 와 방사능의 비를 구하시오.

[풀이] 기본식 $N_B = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_A$ 에서

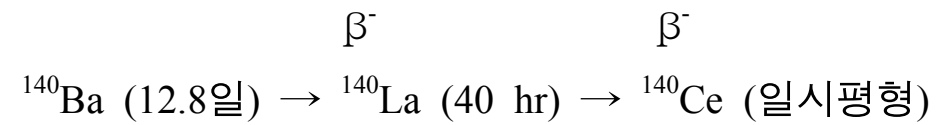
$$1) \frac{N_B}{N_A} = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A}, \quad 2) \frac{N_B}{N_A} = \frac{T_B}{T_A - T_B}$$

$$\text{방사능의 비} \quad \frac{A_B}{A_A} = \frac{\lambda_B N_B}{\lambda_A N_A} = \frac{\lambda_B \lambda_A}{\lambda_A (\lambda_B - \lambda_A)} = \frac{\lambda_B}{(\lambda_B - \lambda_A)}$$

$$3) \frac{A_B}{A_A} = \frac{\lambda_B}{(\lambda_B - \lambda_A)} \quad 4) \frac{A_B}{A_A} = \frac{T_A}{T_A - T_B}$$

$$5) \frac{A_B}{A_A} = \frac{1}{1 - \frac{(\lambda_A)^2}{\lambda_A \lambda_B}}$$

문] 아래의 일시 평형에서 A_2/A_1 의 비는 ?

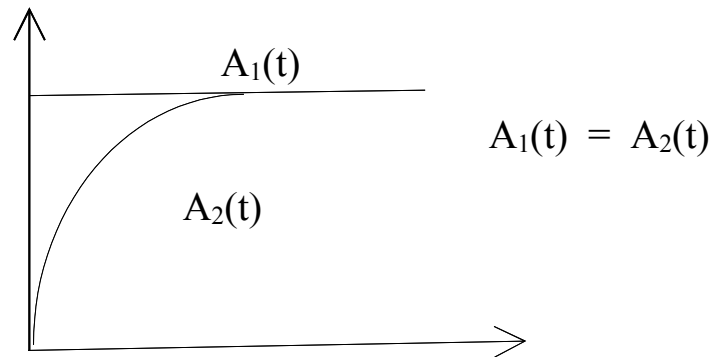
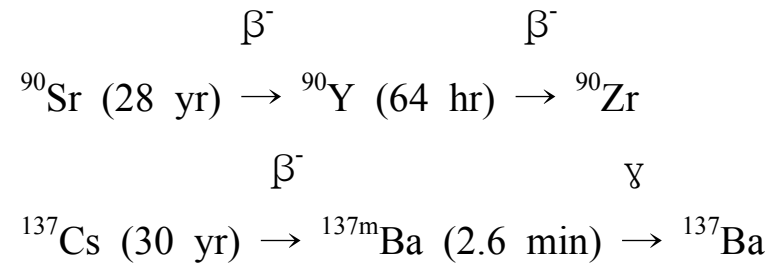


[답] 위에서 구한 $\frac{A_2}{A_1} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = \frac{12.8\text{day} \times 24\text{h/day}}{12.8\text{d} \times 24\text{h/d} - 40\text{h}} = 1.15$

- 영년 (영속)평형 (Secular Equilibrium $T_A \gg T_B$, $\lambda_A \ll \lambda_B$)

$$N_B = \frac{\lambda_A}{\lambda_B} N_A$$

(예)



영속평형; 모핵종의 반감기가 자핵종에 비해 너무 길기 때문에 자핵종이 평형에 도달할 때까지 시간영역에서 모핵종의 방사능은 변하지 않는 것 처럼 보인다.

A

문] 방사성 물질 A, B가 영구 평형을 이룰 때 방사성 물질의 $\frac{N_B}{N_A}$ 와 방사능의 비를 구하시오.

[풀이] 방사성물질의 비 $\frac{N_B}{N_A} = \frac{\lambda_A}{\lambda_B}$

그렇다면 방사능의 비 $\frac{A_B}{A_A} = ?$

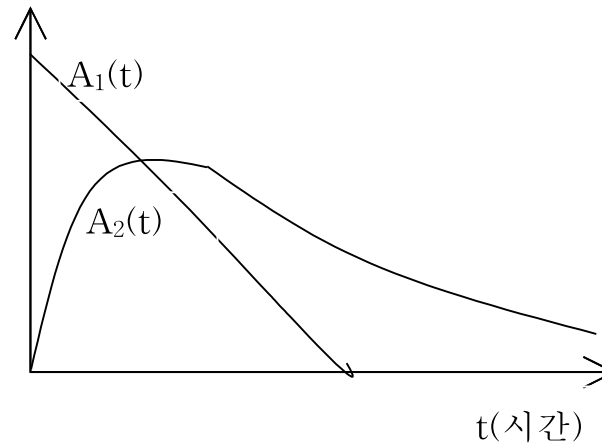
문] 두 방사성 동위원소 A (λ_A, N_A)와 B (λ_B, N_B)가 영속평형을 나타낸 식은?

- ① $\lambda_A N_B = \lambda_B N_A$ ② $T_A N_A = T_B N_B$
 ③ $\lambda_A N_A = T_B N_B$ ④ $T_A N_B = T_B N_A$

[답] ④, 영속평형일 때는 $\lambda_A N_A = \lambda_B N_B$ 이고 따라서 $T_A N_B = T_B N_A$

- 방사평형을 이루지 않을 때

모핵종의 반감기가 자핵종의 반감기보다 짧을 경우, 즉 $\lambda_A \gg \lambda_B$ 일 경우에는 방사평형이 존재하지 않는다. 이 경우에는 모핵종이 붕괴해버리고 생성된 자핵종만이 자신의 반감기에 따라 감소한다.



5. 밀킹

방사평형에 있는 딸핵종을 분리하는 간단한 조작으로써 딸핵종을 어미핵종에서 분리 후 일정한 시간이 경과되면 다시 방사평형에 도달하므로, 딸핵종을 다시 분리하는 것을 밀킹조작 방법이라 하며 그 장치를 Cow System 또는 RI Generator 라고 한다.

밀킹의 특징은 다음과 같다.

- 무담체 RI를 원자로나 가속기로부터 멀리 있는 곳에서 쓸 수 있다. 즉 딸핵종의 반감기를 어미핵종의 반감기로 늘려서 쓸 수 있는 효과를 준다.
- 친핵종의 반감기가 길기 때문에 일정시간이 경과하고 난 후 재차 딸핵종을 채취하여 사용할 수 있다.
- 희망하는 시간에 RI를 얻을 수 있다.
- 만족스러운 화학적, 방사화학적 순도를 얻을 수 있다.

밀킹은 딸핵종의 방사능이 최대가 되었을 때 분리하여 사용하는데 딸핵종의 방사능이 최대가 되는 시간은 다음과 같다.

$$\text{딸핵종의 방사능이 최대가 되는 시간} = \frac{\ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

대표적인 Generator로는 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ Generator가 있는데 무담체이거나 높은 비방사능의 $^{99}\text{MoO}_4^-$ 를 알루미나에 흡착시켜 두면 그 딸핵종인 $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$ 가 생겨 일시방사평형상태가 되는 데 이때 0.9 % NaCl용액을 흘려 내리면 $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$ 만 흘러나오며 $^{99}\text{MoO}_4^-$ 는 그대로 흡착되어 있게 된다. 적당한 시간간격을 두고 여러 번 밀킹하여 사용할 수 있기 때문에 편리하다.

문] ^{99}Mo ($T_{1/2}$: 66시간)에서 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ($T_{1/2}$: 6시간)밀킹한 다음 다시 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 이 최대치에 달하는 시간은 ?

[답: 22.83시간 -풀이 생략]

제 2 절 인공방사성핵종

1. 방사선헌종 생산

하전입자 가속 : 양성자, 알파입자,

비하전입자 : 중성자, 감마선

하전입자는 원하는 에너지로 가속이 용이하나, 비하전입자는 핵분열시 방출되는 높은 에너지의 중성자를 열중성자까지 감속시켜 사용하거나, 고속전자의 제동방사를 이용하여 핵반응을 일으키기도 함

2. 핵반응단면적(Cross Section C.X.)

- 입사하는 입자플루언스(주로 중성자)에 대해 표적원자핵 하나가 반응할 확률의 비를, 핵반응단면적이라 하고 소문자 시그마 σ 로 나타낸다. 즉 $\sigma = \frac{P}{\Phi}$
- 이 σ 는 무척 작아 그 기하학적 크기가 수 10^{-24} cm^2 이므로, 10^{-24} cm^2 를 일일이 적는 불편을 해소하기 위해 편의상 $1 \text{ b [barn]} = 10^{-24} \text{ cm}^2$ 이라 정의하였다.

3. 여기곡선

- 핵반응단면적은 입사입자의 에너지에 따라 달라지는 데 이 관계를 나타낸 곡선을 말한다.

4. 중성자 (열중성자) 조사시 시간에 따른 생성방사능

- 중성자조사시 시간에 따른 생성방사능

미소시간 dt 동안에 일어나는 반응수 dN 은

$$\frac{dN}{dt} = N_0 \phi \sigma - \lambda N$$

N_0 : 표적원자수, N : 생성원자수

ϕ ($n/cm^2 \cdot s$) : 열중성자속밀도

σ : 반응단면적(cm^{-2}), $1b = 10^{-24}cm^2$

λ (s^{-1}) : 생성핵종 붕괴상수

t (s) : 조사시간

- 생성핵종이 안정핵종인 경우

반응수와 생성핵수가 같으므로 t 시간 반응할 경우에

$$N = N_t \phi \sigma t$$

생성핵종이 방사성일 경우 핵반응이 일어날 동안에도 붕괴하므로

$$N = \int_0^t N_t \phi \sigma e^{-\lambda t} dt = N_t \phi \sigma \frac{(1 - e^{-\lambda t})}{\lambda}$$

붕괴상수를 반감기로 나타내고, 표적핵의 존재비 θ 를 고려하면

$$A = \lambda N = N_t \phi \theta \sigma (1 - e^{-\lambda t})$$

$$= N_t \phi \theta \sigma (1 - e^{-0.693t/T})$$

$$A = N \phi \sigma (1 - e^{-\lambda t})$$

포화계수(saturation factor) $(1 - e^{-\lambda t})$

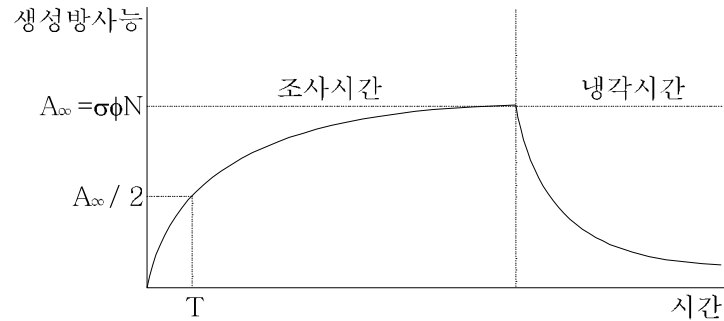
$$t \rightarrow \infty \text{ 일 때, } 1 - e^{\frac{-0.693t}{T}} = 1$$

$$t \rightarrow T \text{ 일 때, } 1 - e^{\frac{-0.693T}{T}} = 1/2$$

$$t \rightarrow 2T \text{ 일 때, } 1 - e^{\frac{-0.693 \times 2T}{T}} = 3/4$$

이상과 같이 표를 만들면

조사시간	T	2T	3T	4T
생성방사능	최대생성치의 1/2	최대생성치의 3/4	최대생성치의 7/8	최대생성치의 15/16



생성핵종의 반감기만큼 표적핵종에 중성자를 조사했을 경우 생성방사능은 최대치의 1/2 [포화계수 $1 - e^{-\lambda t}$ 에 의해]이 되며 조사시간이 길어질수록 거의 포화에 도달하게 된다. 이처럼 중성자를 계속 조사하더라도 방사능의 증가가 없는 상태에 도달하게 되는데 이것을 포화방사능 ($A = \sigma\phi N$) 이라 한다.

$$\text{포화방사능} : A_s = N\phi\sigma \quad (t \rightarrow \infty)$$

중성자조사가 끝나면 생성핵종은 그 반감기를 가지고 붕괴하기 시작하는데 이것을 냉각시간(d) 이라 한다.

$$A = N\phi\sigma (1 - e^{-\lambda t})e^{-\lambda d}$$

잡간 RI 생성에 적용되는 기본식에서 포화계수는 $t \rightarrow 0$ 일 때 λt 가 되며, $t \rightarrow \infty$ 일 때 1이 된다.

$t \rightarrow \infty$ 포화계수 = 1 (당연).

$t \rightarrow 0$ 일 때, 포화계수 = λt

$$\approx 1 - (1 - \frac{0.696t}{T}) = \frac{0.693t}{T_{\frac{1}{2}}} = \lambda t, \quad [\because \lim_{x \rightarrow 0} e^{-x} = 1 - x + \frac{x^2}{2!} - \frac{x^3}{3!} + ??? \approx 1 - x]$$

문] 10 mg의 Cu를 $2 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 의 중성자속으로 4시간 조사했을 때 $^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$ 의 핵반응으로 얻어지는 ^{64}Cu 의 비방사능(Bq/mg)을 구하라. 단, $\sigma=3.9 \text{ b}$, $T=12.8$ 시간이다.

[풀이] $A = N\phi\sigma(1 - e^{-\lambda t})$

$$= \frac{10 \times 10^{-3} \times 6.023 \times 10^{23}}{63} \times 2 \times 10^{11} \times 3.9 \times 10^{-24} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{0.693 \times 4}{12.8}\right) \right\}$$

$$= 7.45 \times 10^7 (1 - e^{-0.22}) = 7.45 \times 10^7 \times 0.22$$

$$= 16.4 \times 10^6 \text{ dps} = 443 \mu\text{Ci}$$

따라서 비방사능

$$443 \mu\text{Ci} \div 10 \text{ mg} = 44 \mu\text{Ci/mg}$$

$$= 1.63 \times 10^6 \text{ Bq/mg}$$

4. RI생산

가. 원자로

- 수개 표적 동시조사가 가능하다.
- 생산경비가 싸다.
- 일상생산이 용이한 편이다.
- 핵자는 중성자과잉핵종이다.
- 붕괴방식은 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ 이다.
- 원자로 내에서 중성자를 안정핵종에 조사하여 RI를 생산한다.
(예, $\text{Co-59} \rightarrow \text{Co-60}$)

나. 가속기 (cyclotron)

- 수개표적동시조사가 불가능하다.
- 생산경비가 비싸다.
- 일상 생산이 용이치 않은 편이다.
- 핵자는 양성자과잉핵종이다.
- 붕괴방식은 $p \rightarrow n + e^+ + \nu$ 이다.
- 하전입자를 가속시켜 안정핵종을 표적으로 충격하여 RI를 생산한다.

5. 생산하는 RI의 방사능을 크게 하기 위한 조건

- (1) 핵반응단면적이 큰 물질을 표적물질로 사용한다.
- (2) 중성자속밀도를 크게 한다.
- (3) 표적원자수를 많이 한다.
- (4) 조사시간을 길게 한다.(무한정 길게 할 수 없으므로 일반적으로 생성핵종의 반감기의 5배정도 조사하면 포화방사능에 도달하게 되므로 적당 시간 조사하여 최대의 방사능을 얻을 수 있도록 한다.)

제 3 절 방사화학적 분리

1. 무담체

- 무담체 : 한 방사성핵종이 단독으로 존재할 때-같은 원소의 비방사성동위원소가 섞여 있지 않은 경우
- 비방사능이 큼
- 담체의 기능적 분류
 - (1) 스캐벤저(scavenger): 대상 RI에 따라다니는 핵종을 제거하고 대상 RI를 용액에 남기기 위해 가하는 담체 (수산화알루미늄, 수산화철, 이산화 망간)
 - (2) 홀드백캐리어 (hold back carrier) : 스캐벤저 또는 분리조작시 대상 RI가 ane어나가는 것을 방지하기 위하여 가하는 담체
 - (3) 포집체 (collector): 대상 RI를 농축 분리할 목적으로 가하는 담체

- 무담체의 무게

I^{131} ($T = 8d$) 1mCi 의 무게

$$A = 1\text{mCi} = 3.7 \times 10^7 \text{dps} = \lambda N = \frac{0.693}{T} \times \frac{W}{M} \times N_A$$

$$\begin{aligned} \therefore W &= 3.7 \times 10^7 \text{dps} \times \frac{T}{0.693} \times M \times \frac{1}{N_A} \\ &= 3.7 \times 10^7 \text{dps} \times \frac{8d \times 24 \times 3,600\text{s/d}}{0.693} \times 131\text{g} \times \frac{1}{6.023 \times 10^{23} \text{n/mol}} \\ &= 8.03 \times 10^{-9} \text{g} \end{aligned}$$

문] ^{131}I 에 ^{127}I 을 첨가했을 때 변화되는 것은?

- | | |
|------------|----------|
| ① 방사성핵종 순도 | ② 비방사능 |
| ③ 전체 방사능 | ④ 화학적 순도 |

[답] ②

^{131}I 에 대해 ^{127}I 은 담체이다. 담체를 첨가하면 ^{131}I 의 비방사능이 감소한다.

문] 어느 대상으로 하는 RI와 함께 따라다니면서 공존할 가능성이 있는 핵종을 제거하고 대상으로 하는 RI를 용액 속에 남게 할 목적으로 수산화알루미늄 등을 가하는데, 이와 같은 물질을 무엇이라고 하는가?

- ① 홀드백캐리어 (hold back carrier) ② 스캐벤저 (scavenger)
- ③ 콜렉터 (collector) ④ 동위원소담체 (isotope carrier)

[풀이] ②

분리 조작할 목적 RI를 용액속에 있게 하고 따라 다니는 핵종을 제거하는 목적으로 가하는 것은 스캐벤저이다. 수산화알루미늄, 수산화철, 이산화망간, 불화란탄 등을 사용한다.

2. 방사성핵종의 방사화학적 분리법

(1) 침전법

분리할 방사성핵종의 용액에 적당한 담체를 가하여 침전반응을 이용하여 분리하는 방법

- 공침법

침전법의 한 가지이며 목적하는 방사성핵종을 침전쪽에 가도록 하는 방법

- 1단계 : 목적 방사성핵종과는 비동위원소담체에 해당하는 “공침제” 를 가하여 목적 방사성핵종을 공침시켜 분리한다.
- 2단계 : 담체(공침제)를 목적 핵종에서부터 분리·제거한다.

(2) 용액잔류법

침전법과는 반대로 목적하는 방사성핵종을 용액에 남도록 하고 다른 방사성핵종은 침전으로 제거하는 방법이다. 원리적으로는 용출법과 유사하며 경우에 따라 이 방법을 용출법에 포함시키기도 한다. 그러나 조작상 침전법의 특수한 경우이다.

(3) 용출법

어떤 용액 또는 용매에 대하여 표적물질 또는 모체원소의 염류가 불용성이고 목적으로 하는 방사성원소가 가용성일 경우 이 용액 또는 용매에 의하여 목적으로 하는 방사성동위원소만을 씻겨 내리는 방법

- 장점 : 단수명 방사성핵종의 제조에 편리하게 이용된다.
- 단점 : 다른 불순물 핵종도 일부 녹아 들어갈 수 있다.

(4) 용매추출법(solventextraction method)

각종의 원소가 포함되지 않은 혼합시료에 대해 두 섞이지 않는 분배계수 차이를 이용하여 용매로 추출·분리하는 방법 (예) Mo^{99} 에서 Tc^{99m} 을 추출할 때 유기용매로 메틸에틸케톤을 이용한다.

(5) 이온교환수지법

이온교환수지에 의한 원소의 분리·농축하는 방법으로 방사성핵종의 다과에 무관하고 무담체 RI는 더욱 예민하게 분리할 수 있어서 가장 자주 이용되는 방법중의 한가지이다. 이온교환수지에는 양이온 및 음이온교환수지가 있다.

- 장점 : 조작이 단순하다.
- 단점 : 시간이 걸리며, 방사선이 강할 경우에는 이온교환수지가 분해된다.

(6) 질러드 챌머법

핵반응의 되튕효과를 이용하여 동위원소를 분리하는 방법으로 $X + a \rightarrow Y + b$ 의 반응에서 Y와 b는 함께 방출되고 운동량이 보존되어야 하므로 생성핵종 Y는 되튀어 나오게 된다.

3. 방사성핵종의 전기화학적 분리법

- 치환법 :

목적으로 하는 동위원소를 갖는 용액에 이온화경향이 큰 금속을 투입하여 그것보다 이온화 경향이 작은 미량의 방사성동위원소를 금속으로 그 표면에 석출시켜 분리하는 방법

- 내부전해법 :

치환법과 원리는 같으나 전극과 금속을 따로따로 설치하여 행한다.

- 외부전원에 의한 전해법 :

일반의 전기분해법과 마찬가지로 직접 전류를 가하여 전해, 석출하는 방법

제 4 절 방사성표지화합물의 제조

방사성표지화합물이란 어느 화합물중의 특정원자나 원자단을 방사성 원자로 바꾸어 넣은 화합물을 말한다.

예) $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow {}^{14}\text{CH}_3\text{COOH}$ or $\text{CH}_3{}^{14}\text{COOH}$

1. 방사성표지화합물의 필요요건

- 표지 후에도 원래의 화학적 성질이 보존되어야 한다.
- 표지위치를 알 수 있어야 하며 추적자로 이용하는 동안 안정되어야 한다.
- 도입한 RI의 반감기와 에너지가 적당하여야 한다.
- 불완전표지화합물을 생체에 사용하는 경우 독성을 나타내거나 전혀 다른 생물학적 거동을 해서는 안 된다.

2. RI 선택상 고려해야 할 사항

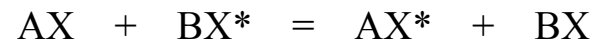
- 방사선의 종류와 에너지를 고려
- 반감기 및 사용시간을 고려해야 한다. 선택상 여유가 있을 경우 반감기가 긴 핵종이 좋으나 일반적으로 장수명 핵종은 단수명 핵종보다 방사선에너지가 낮으며 또한 폐기물처리도 따른다.

- 방사화학적 순도 (RCP) [방사성핵종순도 (RNP)]는 다음과 같이 정의된다.

$$= \frac{\text{특정방사성화합물 [핵종] 방사능}}{\text{전체방사성화합물 [핵종] 방사능}} \times 100 (\%)$$

- 비방사능은 단위질량당 방사능 (Ci/g)을 말하는 데 실험대상에 따라 적합한 비방사능을 가진 RI를 선택하여야 한다. 실험도중 비방사능의 급격한 변화가 일어나지 않도록 해야 하며 너무 많은 담체 (캐리어)를 가하여 비방사능이 떨어지지 않게 하여야 한다.
- 화학형과 화학적 특성을 고려해야 한다.
- 라디오콜로이드를 고려한다. 이것을 방지하기 위해서는 액성을 크게 변화시킨다던가, 용존착이온을 만드는 착화제를 가한다. 또 필요에 따라서 캐리어를 가하여 산화-환원 사이클을 반복시킨다.
- 방사선효과를 고려한다. 트레이서 양만으로는 문제되지 않으나 RI를 많이 쓰는 경우 실험계에 주는 방사선에 의한 변화, 실험자의 피폭, 생물체에 일어나는 변화를 무시할 수 없게 된다. 또한 표지화합물에도 변화가 생기므로 RI양에 유의해야 한다.

- 동위원소효과를 고려한다. 트레이서에 쓰이는 RI와 그 안정동위원소는 질량수는 다르나 화학적 행동은 완전히 같다는 전제하에 있다. 그러나 질량수가 다름에 따라서 물리적, 화학적 성질에 차이가 있는 경우가 있다. 이것을 동위원소효과라 하며 방사능의 유무에 관계없이 일어나고 원자번호가 작은 원자로서 질량수의 차가 클수록 현저하다.
- 동위원소교환반응을 고려한다. 동일원소X를 함유하는 화학종 AX, BX*의 사이에는 X가 교환된다.



3. 뜨거운 원자화학 (Hot Atom)

- $X + a \rightarrow Y + b$ 의 반응에서 Y와 b는 함께 방출되고 운동량이 보존되어야 하므로 생성핵종 Y는 되튀어(반조, recoil) 나간다. (n, γ)반응에서 반조에너지 E' 는 다음과 같다. (Er : MeV 단위의 γ선에너지, M : u 단위의 표적핵종의 질량)

$$E' = \frac{537 Er^2}{M} (\text{eV})$$

- (n , γ) 반응으로 캐리어프리인 RI를 만드는 데 이용되는 질라드-첼머 반응이 그 좋은 예이다. 요오드화에틸렌 (C₂H₅I)에 열중성자를 조사하면 ¹²⁷I (n , γ) ¹²⁸I 반응을 일으키는데 이때 생긴 ¹²⁸I 은 반조되어 그 화학결합을 끊고 유리상태로 된다. 이 ¹²⁸I을 물로 추출하면 무담체 (carrier free)인 ¹²⁸I을 제조할 수 있다.

잠깐

Szilard - Chalmer법 적용을 위한 조건

- 1) 핵반응후 동위원소의 화학결합이 깨져야 한다. (recoil-반조 에너지가 커야한다).
- 2) 재결합이나 교환반응이 없어야 한다.
- 3) 적당한 분리방법이 있어야 한다.

생성되는 RI가 표적원자에 의해 희석되어 비교적 비방사능이 낮은 RI 를 생성하는 핵반응 : (n , γ) 반응은 표적핵과 생성핵의 원자번호가 같기 때문에 화학적으로 상호분리가 어려우므로 비방사능이 높은 핵종을 만들기가 힘들다.

4. 방사성표지화합물의 불안정성의 요인

- 1차 내부효과 : 방사성붕괴에 따라 화학결합상태가 달라져 분해하는 현상이며 외적조건에 무관하다.
- 1차 외부효과 : 표지에 사용된 RI가 방출하는 방사선에 의해 표지화합물자신이 분해되는 현상이다.
- 2차 방사선효과 : 1차내·외부효과에 의해 생성된 활성종에 의해 일어나는 2차적 분해현상이다.
- 화학적 분해효과 : 일반화학반응에 의해 분해가 일어나는 현상이다.

5. 방사성표지화합물의 일반적인 보관방법

- carrier를 가하여 비방사능을 낮추어 보관한다.
- 영하 40 °C 이하의 저온으로 보관한다.
- 활성종의 포착제를 가하여 회석, 보관한다.
- 진공으로 하거나 불활성기체를 충전하여 보관한다.
- 수분, 산소를 제거하여 보관한다.

6. 방사선화학의 4가지 기본반응

- 이온화 $[M \rightarrow M^+ + e^-]$
- 여기 $[M \rightarrow M^*]$
- 중화 $[M^+ + e^- \rightarrow M^*]$
- 전자포획 $[A + e^- \rightarrow A^-]$

7. 추적자의 요건

- 라디오콜로이드가 생성되지 않아야 한다.
- 추적자의 화학형태가 일정해야 하고 이용 중 동위원소교환이 일어나지 않아야 한다.
- 동위원소효과가 없어야 한다.
- 방사선흡과가 없어야 한다.

8. 엑티버블(Activable) 트레이서

산업현장에서 원료나 중간체의 추적, 도시환경중의 이동경로조사 등에서 제품이나 공정, 자연 환경 등을 방사성물질에 오염시키지 않게 하기 위해서 법적규제가 적용된다. 따라서 추적자로 비방사성물질을 사용하고 난 후 그 실험종료 직후 시료를 방사화하는 방법을 사용하게 되는데 이를 엑티버블 트레이서 (Activable tracer)라 하며, 후방사화 트레이서라고도 한다.

잠깐

엑티버블 트레이서 (Activable tracer)의 요건

- ① 열중성자 방사화단면적이 커야 한다.
- ② 반감기가 짧은 γ 선 방출 핵종이 좋다.
- ③ 원소자체는 비싸지 않고 무독성이어야 한다.
- ④ 자연에 존재하지 않아야 하며 실험중 외부로부터 오염되지 않아야 한다. 이를 위하여 Sm, Eu, Gd, Dy의 희토류원소를 사용한다.

9. 방사성 표지화합물의 일반적인 제법

가. 화학적 합성법

화학반응을 수단계에 걸쳐 일으키게 하여 RI를 도입하는 방법

- 장점 : 표지위치가 확실하다.
- 단점 : 다단계의 미량합성이어서 복잡하다.

나. 생 합성법

화학적합성법이 여의치 않는 화합물이 생체에서 합성될 경우에 그 생체를 이용하는 방법

- 장점 : 생체에서 직접 합성할 수있다.
- 단점 : 부반응이 많아 비방사능이 낮은 화합물이 얻어진다.

다. 동위원소 교환법

표지하려는 유기물중의 어느 특정원소의 안정동위원소 원자를 방사성원자와 교환시켜 표지하는 방법

- 장점

부반응이 없다.

반응물질과 생성물질이 같아서 분리정제가 용이하다.

고비방사능의 생성물을 얻을 수 있다.

- 단점

모든 화합물에 대해 적용할 수 없다.

C-I C-Br 등 일부 극성결합 화합물에서만 가능하다.

라. 반도 표지법

원자로에서 중성자 조사를 함으로써 핵반응을 일으키게 하고 생성되는 RI의 반도에너지로 표지반응을 시키는 방법

- 장점 : 원자로를 이용하여 직접 표지화합물을 얻을 수 있다.

- 단점 : 중성자조사로 인한 피표지물질의 분해나 부반응으로 인하여 낮은 비방사능의 표지화합물을 얻게 된다.

잠깐

무담체 (carrier Free)의 단점 (무담체보다 담체를 사용하는 이유)

- 화학적으로 불안정하다.
- 방사성붕괴에 의한 원소변화가 있을 수 있다.
- 화학결합 절단에 의한 화합물을 파괴할 수 있다.
- 방사콜로이드 상태는 흡착을 잘하므로 유동의 어려움이 있다.
→ 용기 벽면에 잔류한다.
- 산성에서보다 알칼리성에서 용해도가 감소되어 콜로이드를 더 잘 형성한다.

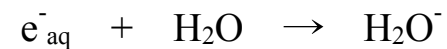
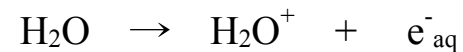
제3장 방사선생물학

제 1 절 방사선의 작용

1. 물의 이온화

- 물은 인체를 구성하고 있는 물질의 70 %를 차지하고 있다. 따라서 방사선이 인체에 조사되면 물의 이온화가 일어나고 방사분해가 일어나게 된다.

① 물분자가 이온화되면 하나의 전자가 방출되며 방출된 전자는 다른 물분자에 의해 흡수되어 양이온 물분자 (H_2O^+) 와 음이온 물분자 (H_2O^-) 가 생성된다.



② 양이온 물분자 (H_2O^+) 와 음이온 물분자 (H_2O^-) 가 다른 물분자의 존재 하에서 분해되어 이온과 유리기를 생성한다.



- ③ H^+ 나 OH^- 가 가지고 있는 에너지는 크지 않으나 물분자의 방사분해로 생성된 1차 유리기인 e^-_{aq} , H^\bullet , OH^\bullet 는 반응력이 강하기 때문에 생성된 부위에서 대부분 2차 반응을 일으킨다. 2차적으로 생성되는 유리기로는 HO_2^\bullet , O_2^\bullet 가 있으며 먼 곳까지 이동하여 생체구성 물질과 상호작용을 일으킬 수 있다.

- ④ 순수한 물에서는 유리기들이 서로 작용하여 H_2 , H_2O , H_2O_2 를 형성한다.



2. 방사선의 작용단계

세포성분의 대부분을 차지하는 물은 이온화되면서 과산화물 등의 해로운 화학물질을 만들어 낸다. 이러한 유해 작용은 세포의 구조와 기능을 변화시켜 임상증상이 나타나게 된다.

- 물리적 단계 ($10^{-18} \sim 10^{-15}$ sec)

세포의 원자나 분자에 부여된 에너지에 의해서 물분자에 이온화가 생성되는 단계

- 물리화학적 단계 ($10^{-13} \sim 10^{-12}$ sec)

물분자에 이온화 된 것이 다른 물 분자 또는 생체물질과 반응하여 새로운 물질 (활성이온, 유리기, 여기분자 등)을 형성

- 화학적 단계 ($10^{-10} \sim 10^{-3}$ sec)

물리화학적 단계에서 생성된 물질이 세포의 중요한 유기분자와 작용함. 유리기와 산화제가 염색체를 이루고 있는 복잡한 분자를 파괴

- 생물학적 단계 (수 초 ~ 수 시간)

각각의 증상에 따라 세포에 영향을 주는 형태로 변환

세포가 조기 사멸

세포분열이 중단되거나 지연

영구적인 변화가 일어나 자손세포에 전달

3. 직접작용과 간접작용

- 직접작용

방사선의 에너지가 물을 제외한 유기분자에 직접 흡수/전달되어 장해를 일으키는 작용이다.

- 간접작용

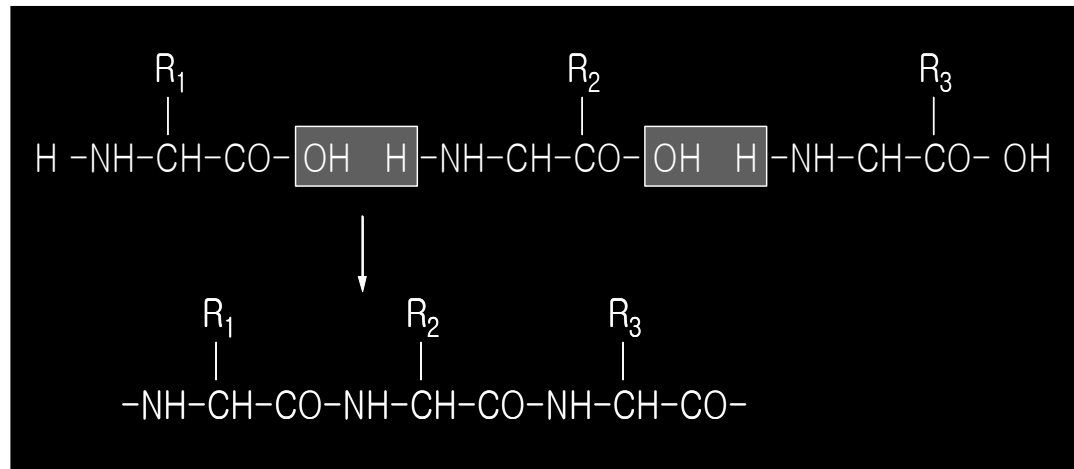
어떤 분자가 직접에너지를 흡수하는 것이 아니고 에너지를 흡수한 다른 분자와 반응하여 장애가 발생하는 것을 말하며, 주로 물분자의 이온화나 여기를 통해 유발된다.

제 2 절 세포 및 기관에 대한 방사선의 영향

1. 세포구성 성분과 방사선

가. 단백질

세포를 구성하는 가장 기본 물질로 신진대사를 조절함. 효소, 효몬, 항체 및 세포소기관이 단백질로 구성됨. 단백질의 기본단위는 아미노산이며, 단백질의 종류에 따라 고유 배열을 유지함으로써 그 특성과 기능을 유지한다. 단백질의 아미노산 분자중 방사선에 의해 구조적 변화를 일으킬 수 있는 부위는 곁사슬부위로 탈수소 등의 구조변화를 가져올 수 있으며, 이중 히스티딘, 트립토판, 티로신과 -SH기를 가지고 있는 시스테인이 감수성이 높다. 단백질 특유의 기능 상실은 폴리펩티드 결합이 끊어지는 것 같은 근본적인 구조변화에 있다기보다 측쇄의 구조변화로 인하여 공간배열이 변하기 때문에 일어난다.



나. 지방

지방은 생물체 또는 그 분비물중 유기용매에 용해되는 물질을 총칭하는 것으로, 중성지방은 지방산이 결합한 것을 의미하고, 조직내에 저장지방으로 존재한다. 중성지방 (지방산이 3가 알콜인 글리세롤과 에스테르 결합을 이룬 것)에서 방사선에 민감한 부분은 불포화지방산이며 포화지방산보다 산화가 쉽게 일어나 민감하다. 이러한 유리기 및 과산화물은 체내에서 단백질 및 기타 유기물과 반응하여 유기물을 변성시키거나 대사 장애를 유발시킨다.

다. 염색체에 미치는 방사선영향

염기의 구조변화 및 염기 탈락은 대부분이 OH 유리기에 의해 일어난다. 염기중에 피리미틴 유도체가 퓨린보다 방사선에 민감하며, 이러한 염기서열의 구조변화 및 탈락은 유전장해 및 돌연변이의 원인이 된다. 이중 한 가닥이 끊어진 경우 재결합이 가능하나, 만일 산소가 존재하여 절단부위에 과산화형이 형성되면 회복이 힘들다. 또한 두 가닥이 절단된 경우 절단부위가 5개 이내의 뉴클레오티드 거리일 경우 회복이 불가능하다.

잠깐

아래 염색체에 미치는 영향은 출제빈도가 높은 문제이다.

- 결실(defection) : 염색체의 일부분이 절단되어 소실된다.
- 역위(inversion) : 결실된 염색체 조각(들)이 절단되었던 염색체에 위치가 뒤바뀌어 재결합된다.
- 중복(duplication) : 절단된 염색체 부분이 상동염색체의 온전한 짝과 결합되어 동일한 유전자를 이중으로 갖게 된다.
- 전좌(translocation) : 절단된 염색체 부분이 상동염색체의 짝이 아닌 다른 염색체에 결합되는 것이다.
- 염색체 교환(sister chromatid exchange) : 체세포 분열에 있어 복제된 염색본체와 원래의 염색본체가 한곳 이상에서 모여 분열시 염색본체의 일부가 뒤바뀌는 현상이다.

DNA 분자의 구조변화 참고 → 방사선생물학

□ 방사선조사에 의하여 일어나는 DNA 분자의 구조변화

- 1) 염기의 구조변화 (deamination)
- 2) 염기의 탈락 또는 삽입
- 3) 사슬사이의 수소결합 풀림
- 4) 한 가닥의 절단 (SSB, Single Strand Breakage)
- 5) 두 가닥의 동시절단 (DSB, Double Strand Breakage)
- 6) 나선내의 가교 형성 (cross-linkage)
- 7) 다른 DNA 분자 사이의 가교형성
- 8) 단백질 사이의 가교형성

위의 1)과 2)를 유전자 돌연변이라 한다.

2. 방사선감수성

가. 세포의 방사선감수성

- 유사분열¹⁾율이 높은 세포
- 분열과정이 긴 세포
- 형태적, 기능적 분화의 정도가 낮은 세포
- 어리고 약한 세포
- 핵 부피가 큰 세포
- 염색체의 수가 적은 세포
- 미토콘드리아의 수가 적은 세포
- 배수성이 낮은 세포 (고등식물의 경우)
- 대사율이 높은 세포

1) 세포분열 과정에서 염색체가 나타나고 방추사가 생기는 분열의 한 형식

나. 포유류 기관 계에 미치는 방사선감수성 (높은 순서대로)

- 성숙한 백혈구, 적혈구 아세포, 정원세포
- 중간정도 성숙한 여포세포²⁾, 골수구 세포
- 위선세포, 소혈관 내피세포
- 조골세포, 파골세포³⁾, 연골 아세포
- 정자
- 선관유세포, 섬유아세포, 적혈구
- 신경세포, 근세포

다. 향골성 핵종 (bone seekers)

bone seeker란 내부피폭시 뼈에 모이기 쉬운 향골성 핵종을 말하는 데 다음의 것들이 그 예다.

Sr, Ra, Pu, Am, P, Th, Ca, U , Y

2) 동물의 내분비샘 조직에서 많은 세포로 이루어지는 공동모양의 구조, 2. 난소 속에서 성장과정에 있는 세포성의 주머니 (난포)

3) 뼈의 개조나 재생과정에서 뼈를 분해, 흡수하는 큰 다핵세포

특징 : ① 유효반감기가 길다.

② 뼈의 성장에 관여하는 골단부에 침착된다.

③ 골수를 조사하여 조혈기 장애를 일으킨다.

문] 다음중 내부피폭시 뼈에 침착되는 향골성 핵종(bone seeker)이 아닌 것은?

- ① Pu ② Ca ③ U ④ I

[답] ④, 방사성핵종의 결정장기를 묻는 문제는 자주 출제되는 중요문제로 향골성핵종은 P, U, Ca, Pu, Ra, Sr, Zn 등이며. I은 갑상선에 집중되는 대표적인 핵종

라. 조직 및 장기의 방사선감수성 순서

순위	조직 및 장기
1	림프조직 (Lymphatic tissue), 흉선 (thymus), 골수 (Bone marrow)
2	난소 (ovary), 고환 (testicle)
3	점막 (mucosa)
4	타액선 (salivary gland)
5	모낭 (hair follicle)
6	피지선 (sebaceous gland), 한소 (sweat gland)
7	피부 (skin)
8	장막 (serous membrane), 폐 (lung)
9	신장 (kidney)
10	부신 (suprarenal), 간 (liver), 췌장 (pancreas)
11	갑상선 (thyroid gland)
12	근조직 (muscular tissue)
13	결합조직 (connective tissue), 혈관 (blood vessel)
14	연골 (cartilage)
15	골 (bone)
16	신경세포 (nervous cell)
17	신경섬유 (nervous fiber)

문] 다음은 인체의 조직, 장기를 γ 선에 대한 감수성이 높은 순서대로 나열하였다. 옳은 것을 골라라.

- ① 뼈 > 소장 > 피부 > 조혈조직
- ② 조혈조직 > 소장 > 피부 > 뼈
- ③ 조혈조직 > 소장 > 뼈 > 피부
- ④ 소장 > 조혈조직 > 피부 > 뼈

[답] ②

제 3 절 방사선의 생물학적 효과의 영향 요인

1. 생물학적 요인

- 방사선감수성

신체의 방사선감수성은 세포나 장기/조직의 종류에 따라 다르다. 또한 세포분열 중에 방사선 피폭을 받았을 경우 감수성이 높으므로 세포분열빈도가 높을수록 방사선감수성은 커진다.

① Bergonie-Tribondeau의 법칙 : 아래 예제 참조

② 세포분열주기에 있어서 방사선이 조사된 시기에 따라 방사선감수성이 다르다.

- 연령

어린 개체일수록 방사선에 약하다

- 유전적 인자

문] 방사선의 세포 감수성에 대한 베르고니-트리본도 이론(Bergonie-Tribondeau Theory)을 간략히 논하시오.

베르고니-트리본도 이론(Bergonie-Tribondeau Theory):

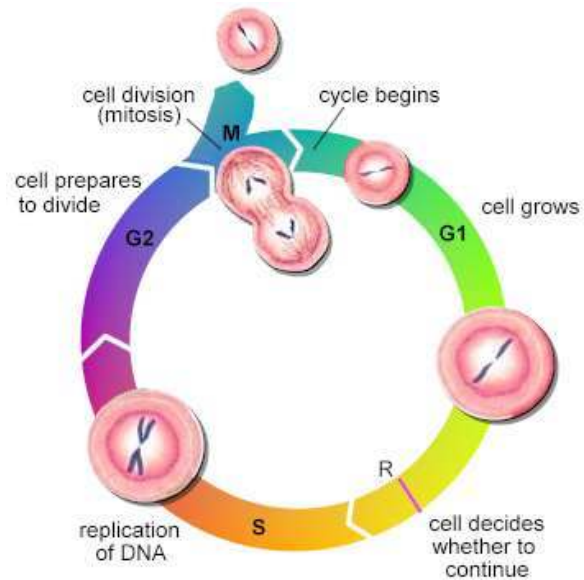
동일한 생물체라 하여도 세포의 종류에 따라 방사선 감수성이 다르다. 즉

- i) 유사분열율이 높아서 정상조건하에서 유사분열을 많이 거듭하는 세포,
- ii) 분열과정이 긴 세포,
- iii) 형태적, 기능적 분화정도가 낮은 세포, 그리고
- iv) 어리고 연약한 세포일수록 방사선 감수성이 높다.

문] 방사선감수성에 대한 설명 중 옳지 않은 것은? [답 3]

- ① 세포는 일반적으로 분열빈도가 높을수록 방사선감수성은 크다.
- ② Bergonie-Tribondeau의 법칙이란 증식활동이 많을수록 미분화된 세포일수록 세포의 방사선에 대한 감수성이 높다는 이론이다.
- ③ 세포분열주기에 있어서 방사선이 조사된 시기에 따라 방사선감수성은 관계없다.
- ④ M기(세포분열기)가 가장 방사선감수성이 높고 S기(DNA합성기)가 가장 방사선감수성이 낮다.

[추가] 세포분열 주기와 방사선 감수성



- 정상적인 세포는 임의로 분열하는 것이 아니라 초기에는 정지기(G_0 기)에 대기
- 분열이 필요하다는 1차 증식인자가 전달되면 G_0 기에서 G_1 기로 변화함
- G_1 에서 S를 거쳐 G_2 까지의 시기를 간기(interphase)라 부름
 - ① 간기
 - G_1 기 : DNA복제 준비기, 세포성장(단백질 합성)
 - S기 : DNA복제기, 염색체가 1가닥씩 더 만들어짐

- G₂기 : 세포생장 완료, 분열, 준비기

② 분열기(M기) : 각각의 세포로 분열하는 시기, 방사성감수성이 가장 민감

- **M기는 세분하면** 핵막이 사라지기 전까지의 전기(prophase), 방추사의 분리작용이 이루어지는 중기(metaphase), 염색체들이 분리되는 후기(anaphase), 분리된 핵막과 세포막이 형성되는 말기(telophase)로 구분

- M기에서 분열이 완료되면 다시 다음 분열을 준비하는 G₁기로 넘어감

- 대선량에 조사된 세포중 팽윤하여 핵농축(pyknosis)등을 일으키며, **조사후 한번도 분열하지 않고 죽는 세포사를 간기사(interphase death)**라고 함

2. 물리적 요인

- 흡수선량 : 방사선장해의 지배인자로 인체의 흡수선량에 직접적으로 비례한다.
- 흡수선량율 : 세포는 회복 또는 재생능력이 있어서 단시간에 받아서 치명적일 수 있는 선량 준위도 장기간 나누어 피폭되면 중대한 장해를 받지 않을 수 있다.
- 선량분포 : 동일선량이 특정장기에 균등하게 피폭되었을 때보다는 그 장기의 일부에 집중하여 피폭되면 방사선장해발생 가능성이 더 커진다.
- 피폭범위 : 피폭되는 부위가 전신인지 또는 일부 장기/조직인지에 따라 장해의 영향은 다르다.
- 선질 : 방사선의 종류와 에너지에 따라 흡수선량에 다른 등가선량이 달라지므로 장해발생의 위험도 다르다.

3. 물리적요인, 산소효과 및 치사선량의 관계

- 선량율이 높아지면 LD₅₀₍₃₀₎이 낮아진다.
- 동일 선량일 경우 국부조사에 비해 전신조사는 LD₅₀₍₃₀₎이 낮아진다.
- 온도가 높은 조건하에서 조사하면 LD₅₀₍₃₀₎이 낮아진다.
- 산소효과 : 산소농도 (또는 혈중 산소 분압)가 높은 조건하에서 조사하면 LD₅₀₍₃₀₎이 낮아진다.

* LD₅₀₍₃₀₎ [half lethal dose;반치사선량, 30일 이내에 50 %가 사망할 선량, 보통 감마선으로 전신일시 피폭시 4 Gy 가량)

* LD₁₀₀₍₃₀₎ [whole lethal dose:전치사선량, 30일 이내에 100 %가 사망할 선량, 보통 감마선으로 전신일시 피폭에 7 Gy 가량]

*OER (oxygen enhancement ratio)

$$OER = \frac{\text{산소가 존재하는 조건하에서의 방사선 영향}}{\text{산소가 없는 조건하에서의 방사선 영향}}$$

$$OER = \frac{\text{산소가 없는 조건하에서 특정한 효과를 일으키는데 필요한 선량}}{\text{산소가 존재할 때 특정한 효과를 일으키는데 필요한 선량}}$$

4. 방사선방호제(또는 방호물질; radioprotective agents)

- 피폭받는 대상의 방사선장해를 감소시킬 수 있는 물질을 말한다..
- 방사선방호제는 DRF (dose reduction factor)가 > 1 이어야 한다.

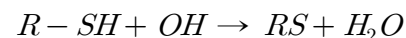
$$DRF(\text{선량감소계수}) = \frac{\text{방호물질 존재하에서 어떤 효과를 나타내는데 필요한 선량}}{\text{방호물질 없이 같은 효과를 나타내는데 필요한 선량}}$$

$$DRF(\text{선량감소계수}) = \frac{\text{방호물질 존재없이 특정한 선량이 일으키는 생물학적 영향}}{\text{방호물질 존재하에 특정한 선량이 일으키는 생물학적 영향}}$$

- 예를 들어 시스테인, 시스테인아민 등과 같이 -SH 기와 NH₂기를 함유하고 있는 화합물은 방사선 방호체로서 생체물질 대신 방사선에 피폭되어 생체로의 영향을 감소시킨다.
- 방사선방호제의 작용 메커니즘은 다음 종류가 있다.

㉠ 유리기의 제거

방사선에 의하여 생성된 세포내의 유리기(OH)가 시스테인아민과 반응하여 시스테인아민은 산화되며 유리기는 반응력이 없는 안정된 유리기로 전환되어 간접작용 장애를 감소시킨다.



㉡ 수소공여에 의한 손상회복

단일분자(RH)가 방사선에 의하여(간접 또는 직접작용) 유리기(R)로 전환되면 $RH \rightarrow R + H^{\bullet}$ 이 유리기(R)는 서로 반응하여 $R + R \rightarrow R-R$ $R + O_2 \rightarrow RO_2$ 등의 과산화물이 된다. 이 때 방호물질(R)은 수소를 공여함으로써 다시 원상태로 회복된다.

㉔ 세포성분과의 상호작용

방호물질 세포내에 존재하는 단백질의 $-SH$ 기와 결합하여 mixed disulfide를 형성하여 유리기의 공격으로부터 특정 단백질을 보호하는 역할을 한다.

㉕ 조직내 저산소 상태 유발

thino기는 쉽게 산화된다. 생체내에 투여된 thino기는 조직내 산소와 결합하여 산화되면서 저산소 상태를 유발함으로써 방사선으로부터 세포물질을 보호하는 효과를 나타내게 된다.

- 방사선 방호제는 생체내에 투입되었을 때 근본적으로 방사선에 의해 생성된 유리기를 제거 또는 불활성화시킴으로써 방호효과를 나타낸다. 그 메카니즘은 위에 예를 든 여러 가지가 있을 수 있으나 각 과정간의 엄격히 구분하는 것은 무의미하며 실제 방사선 방호효과는 여러 메카니즘의 복합적 작용에 의해 나타난다고 볼 수 있다.

문] $LD_{50(30)}$ 이 5.0Gy인 동물에 A 물질을 1mg/kg 농도로 주입한 다음 방사선을 조사하였을 때 $LD_{50(30)}$ 이 6.0 Gy로 나타났다. A 물질의 DRF는 ?

[답] 1.2 (풀이 생략)

문] 어떤 생물체에 동일한 선량이 조사되었을 때의 생물학적 영향에 대한 설명 중 틀린 것은?

- ① 짧은 시간에 고선량을 피폭이 저선량의 장시간 피폭보다 영향이 크다.
- ② 고온에서의 피폭이 저온에서의 피폭보다 영향이 크다.
- ③ 산소가 적은 조건에서의 피폭이 고산소 조건에서의 피폭보다 영향이 크다.
- ④ 전신피폭이 국부피폭보다 일반적으로 영향이 크다.

[답] ③, 방사선 피폭의 경우 고산소 조건에서 피폭의 영향이 크다. 더불어 암세포의 증식 또한 고산소 조건에서 빨라지는데 이를 “산소효과(Oxygen Effect)”라고 한다.

제 4 절 방사선의 인체 영향

1. 신체적 영향과 유전적 영향

- 신체적 영향

피폭한 개체에 영향이 나타난다.

- 유전적 영향

피폭한 개체의 후손에게서 영향이 나타난다.

2. 급성효과

- 방사선피폭후 수일, 또는 수 주안에 영향이 나타남

- 분자사 (1,000 Gy 이상 피폭 시) : 즉사

- 중추신경 증후군(50 Gy정도 전신피폭) : 수 분~ 수 시간 이내 사망

- 위장증후군 (10 Gy) : 수 일 ~ 일주일내 사망

- 조혈증후군 (2 Gy) : 수 주 이내 사망

원자력이론

**** 생식선의 발단선량 : 불임과 홀몬 분비 이상**

방사선에 대한 감수성은 세포의 성숙단계에 따라 다르다.

남성은 후기정원세포, 여성은 2차 난모 세포가 방사선감수성이 높다.

**** 불임발단선량**

(단위 : Gy)

남 성	일시불임	0.15
	영구불임	3 - 5
여 성	일시불임	0.65 - 1.5
	영구불임	7 - 8 (20~30세)
		3 (40세)

**** 눈의 수정체 : 수정체혼탁, 백내장**

장해의 종류	급성피폭	만성피폭
수정체 혼탁	2 Gy	5 Gy
백 내 장	5 Gy	8 Gy

** 피부

피부의 표피의 기저세포는 항상 세포분열을 반복하고 있고 방사선감수성이 높다. 기저세포는 피부표면으로부터 평균 70 μm 깊이에 존재한다. 다음은 1회 조사시 방사선량에 따른 피부의 급성장애를 나타내었다.

	선 량 (Gy)	급 성 영 향
1 도	3	탈모 및 지문소실
2 도	5.5	홍반 및 색고침착
3 도	8.5	수포형성
4 도	10	궤양형성

2. 지발효과

- 방사선의 영향이 장기간의 잠복기를 거쳐서 나타나는 현상
- 방사선에 의한 노화
- 수명 단축
- 방사선 백내장
- 방사선 발암

3. 방사선발암단계

- 초기유발단계

정상세포가 발암원인 방사선에 피폭되는 단계이다.

- 촉진단계 I

생물학적 과정을 통해 피폭손상의 대부분은 복구되나 이 과정에서 손상이 복구되지 않고 고정되는 단계이다.

- 촉진단계 II

손상이 고정된 세포가 촉진물질과 접촉되면 종양이 발생한다.

- 진행단계

양성 또는 악성의 종양세포가 암세포로 전환되는 단계이다.

- 질병발생

각종 암이 발생하는 단계이며 Natural Killer 세포에 의한 암세포의 사멸이 부분적으로 일어난다.

문] $LD_{50(30)}$ 의미를 가장 바르게 설명한 것은 ?

- ① 방사선피폭을 받은지 30일 이내에 결정적 영향이 일어날 확률이 50 % 이상인 선량을 의미한다.
- ② 방사선피폭을 받은지 30일 이내에 사망할 확률이 50 % 이상인 선량을 의미한다.
- ③ 30 Gy의 선량은 50 % 이상이 피폭자를 즉시 사망하는 치사선량(Lethal Dose)라는 것을 의미한다. .
- ④ 30 Gy의 선량은 잠재적으로 50 %이상의 피폭자를 암으로 사망시킬 수 있는 잠재선량(Latent Dose)라는 의미이다.

[답] ②, $LD_{50(30)}$ 에서 LD는 Lethal Dose로 치사선량(사망에 이르는 선량)의 약자이고 50은 피폭자의 50 %, 30은 30일 이내를 의미한다. 이를 반치사량이라 부르고 이와 달리 $LD_{100(30)}$ 은 전치사량에 해당한다.

실전문제

1. ^{235}U 의 원자량은 약 235.044u이다. 1u의 정의로부터 1u의 질량을 구하여 우라늄 원자 1개의 질량을 구하라. 단 아보가도르 숫자는 6.023×10^{23} 으로 한다.

풀이 : 1u 는 중성상태의 ^{12}C 원자 1개의 질량의 1/12로 정의된다. 탄소 원자 1mole의 질량은 12g 이고 이때 원자수는 아보가도르 숫자(N_A)만큼 존재하므로

$$1\text{u} = \frac{^{12}\text{C 원자 1개의 질량}}{12} = \frac{12\text{g}/N_A}{12} = \frac{10^{-3}\text{kg}}{6.023 \times 10^{23}}$$

$$= 1.6603 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

따라서 ^{235}U 원자 1개의 질량은

$$235.044\text{u} \times 1.6603 \times 10^{-27} \text{ kg/u} = 3.9024 \times 10^{-25} \text{ kg}$$

2. ${}^7\text{Li}$ 의 원자질량이 7.01601u일때 Li 원자핵의 핵자당 결합에너지(Binding Energy/nucleon)를 계산하라.
(단 $M_H = 1.0078\text{u}$, $M_n = 1.0087\text{u}$ 로 한다)

풀이 : ${}^7\text{Li}$ 의 원자는 3개의 양성자, 4개의 중성자 및 3개의 전자로 구성되어 있으므로
결합에너지 $B.E. = \Delta mc^2 = [(3M_p + 4M_n + 3M_e) - m({}^7\text{Li})] \times 931.5 \text{ MeV/u}$
여기서 전자와 양성자의 질량은 주어지지 않았으므로

$M_p + M_e \approx M_H$ 를 이용하면

$$\begin{aligned} B.E. &= [(3M_H + 4M_n) - m({}^7\text{Li})] \times 931.5 \text{ MeV/u} \\ &= [(3 \times 1.0078\text{u} + 4 \times 1.0087\text{u}) - 7.01601\text{u}] \times 931.5 \text{ MeV/u} \\ &= 39.3 \text{ MeV} \end{aligned}$$

따라서 핵자당 결합에너지 $B.E./\text{nucleon} = 39.3/7 = 5.61 \text{ MeV/nucleon}$

(주의) ${}^7\text{Li}$ 의 원자질량이 아니라 원자핵의 질량이 주어졌다면 이것은 전자를 포함하지 않은 질량이므로 결합에너지 $B.E. = \Delta mc^2 = [(3M_p + 4M_n) - m({}^7\text{Li})] \times 931.5 \text{ MeV/u}$ (단 여기서 $m({}^7\text{Li})$ 은 원자핵의 질량)이 된다. 그러나 대부분의 경우 원자질량이 도표화되어 있으므로 원자핵의 질량을 주는 문제는 보편적이 아니며, 따라서 $M_p + M_e \approx M_H$ 관계를 이용하여야 한다.

3. 핵반응 $a + X \rightarrow b + Y$ 가 일어날 때 다음 중 틀린것은?

- ① 반응 전후의 핵자의 총 수는 같다. ② 반응 전후의 전하량은 보존된다.
③ 반응 전후에 질량보존의 법칙이 성립한다. ④ 반응 전후에 질량과 운동에너지의 합이 보존된다.

[답] ③

(해설) 핵반응은 반응 전후의 질량결손에 따른 에너지가 발생하므로 질량보존의 법칙은 작용하지 않는다.

4. 다음 중 원자핵 내에 양성자의 개수가 중성자 개수보다 과잉일 경우 주로 발생하는 반응을 2 가지 고르시오.

- ① 전자포획 ② 양전자방출 ③ 핵이성체전이 ④ 음전자방출

[답] ①과 ②

풀이 : 양성자가 과잉인 핵종은 양성자 개수를 줄이기 위해, 양성자가 전자를 포획하여 중성자가 되거나, 양전자를 방출하면서 양성자가 중성자로 변환한다.

5. 다음중 Auger 전자와 관련있는 것끼리 바르게 짝지은 것은?

- ① 양성자과잉 - β^- 붕괴
- ② γ 선방출 - 내부 전환
- ③ 전자포획 - 특성 X선
- ④ 원자핵불안정 - 핵이성체전이

[답] ③

6. 어떤 물질의 반감기가 T, 원자량이 M일때 이 물질의 비방사능을 바르게 나타낸 것은 (0.693은 표기 안함 - 왜 귀찮아서, 상수라서)

- ① $\frac{TN_A}{M}$
- ② $\frac{T}{MN_A}$
- ③ $\frac{TM}{N_A}$
- ④ $\frac{N_A}{TM}$

[답] ④

(해설) 비방사능(Specific Activity): 단위질량당 방사능

$$S. A. = \lambda N_{1g} \quad (N_{1g} = 1g \text{ 일 때 원자의 개수}) = \lambda \frac{N_A}{M} = \frac{N_A}{TM}$$

7. 1 MeV의 광자가 어떤 물질에 입사하여 반대방향으로 되튀어나왔을 때 광자의 에너지는?

풀이: 되튀어 나왔으므로 산란각은 180° , 따라서 산란된 광자의 에너지는

$$E_{r'} = \frac{E_r}{1 + \frac{E_r(1 - \cos\theta)}{m_e C^2}} \quad \text{식에서}$$

$$E_{r'} = \frac{E_r}{1 + \frac{E_r(1 - \cos 180^\circ)}{m_e C^2}} = \frac{1}{1 + \frac{1(1 - (-1))}{0.511}} = 0.204 \text{ MeV}$$

8. 감마선과 물질과의 상호작용 중에서 잘못된 설명은 ?

- ① 감마선의 에너지가 높을수록 광전효과의 발생확률이 감소한다.
- ② 콤프톤 산란시 광자의 산란각이 90도 일때 콤프턴전자의 에너지가 최대이다.
- ③ 고에너지 감마선에서 양전자와 음전자가 동시 생성될 확률이 높다.
- ④ 쌍생성시 생성된 전자쌍의 운동에너지의 합은 감마선에너지에 1.02 MeV를 제한 값이다.

[답] ② $E_{r'} = \frac{E_r}{1 + \frac{E_r(1 - \cos\theta)}{m_e C^2}}$ 에서 $\cos 180^\circ$ 인 경우가 $E_{r'}$ 가 최소이며 따라서 E_e 가 최대

9. 1 Ci 의 Rn^{222} 의 질량(g) 과 표준상태에서 차지하는 부피(cc)는 각각 얼마인가? 단, Rn^{222} ($T = 3.825\text{d}$), Avogadro 수는 $6.023 \times 10^{23}\text{n/mol}$ 이다.

풀이 :

- (1) 1Ci의 Rn^{222} 의 질량

$$A = \lambda N = \frac{0.693}{T} \times \frac{W}{M} \times N_A$$

$$\therefore W = \frac{A \times T \times M}{0.693 \times N_A}$$

10. 반감기가 10일이고 10Ci 인 A핵종과 반감기가 20일이고 5Ci 인 B 핵종의 방사능이 같아질 때 걸리는 시간은?

풀이:

$$(1) A = A_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{t/T_A} = 10 \times \left(\frac{1}{2} \right)^{t/10}$$

$$B = B_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T_B} = 5 \times \left(\frac{1}{2}\right)^{t/20}$$

$$(2) A = B, 10 \times \left(\frac{1}{2}\right)^{t/10} = 5 \times \left(\frac{1}{2}\right)^{t/20}$$

$$\therefore t = 20d$$

11. Na_2CO_3 의 분자량은 106이고 Na^{24} 의 반감기는 15 시간이다. $^{24}\text{Na}(n, \gamma)$ 반응단면적이 0.52b, 표적 Na_2CO_3 이 5 g, 원자로의 중성자속이 $10^{12}\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 일 때 60시간 조사시 생성 방사능은 얼마인가?

[풀이]

생성방사능 $A = n\sigma\phi(1 - e^{-\lambda t})$

$$= \frac{W}{M} \times N_A \times \sigma \times \phi (1 - e^{-\lambda t})$$

$$= \frac{5 \times 2}{106} \times 6.023 \times 10^{23} \times 0.52\text{b} \times 10^{-24}\text{cm}^2/\text{b} \times 10^{12}\text{n/cm}^2 \cdot \text{s} \times (1 - e^{-0.693 \times 60/15})$$

$$= 2.78 \times 10^{10}\text{dps}$$

12. 담체, 비방사능, 무담체 RI 등과 관련한 아래 서술 중 맞는 것은?

- ① 비방사능의 단위는 Ci/ml이다.
- ② 단순 (n, γ)반응으로 만든 RI는 무담체 RI이다.
- ③ 무담체 RI의 비방사능 (Ci/g atom)은 시간경과와 무관, 일정하다.
- ④ 무담체 RI에 그 동위원소담체를 가하면 비방사능이 높아진다.

[답] ③, 무담체 RI가 방사성붕괴할 경우 그 원자수도 감소하므로 방사능 (Ci/g atom)은 시간경과와 무관, 일정하다

13. 방사선피폭이 인체영향 중 지발효과를 3가지 적으시오.

[풀이]

- ① 방사선백내장
- ② 수명단축
- ③ 방사선발암
- ④ 방사선에 의한 노화 (radiological aging)

원자력이론

14. 감마선과 물질과의 상호작용에 관한 다음 표를 완성하시오.

상호작용	원자번호 의존성	에너지 의존성	스펙트럼 종류
(1)	(4)	(6)	(8)
(2)	(5)	E^{-1}	(9)
(3)	Z^2	(7)	(10)

[풀이]

상호작용	원자번호 의존성	에너지 의존성	스펙트럼 종류
광전 효과	Z^5	$E^{-3.5}$	선스펙트럼
Compton 효과	Z	E	연속스펙트럼
전자쌍생성	Z^2	$E-1.02(\text{MeV})$	연속스펙트럼

15. 방사선이 인체 내에서 간접효과를 일으키는데 이때 인체의 어느 물질로 인해 간접효과가 최초에 유발되는가?

- ① 염색체 ② 과산화수소(H_2O_2) ③ 물 ④ 산소(O_2)

[답] ③

16. 가속기를 분류하시오

[풀이]

- ① 고주파를 이용한 것 : 사이클로트론, 싱크로사이클로트론, 싱크로트론, 직선형가속기
- ② 정전압을 이용한 것 : 밴더그래프, 탄덤밴더그래프
- ③ 직류자장을 이용한 것 : 사이클로트론
- ④ 자장강도를 변화시킨 것 : 베타트론, 싱크로트론, 싱크로사이클로트론
- ⑤ 유도전장을 이용한 것 : 베타트론
- ⑥ 중이온을 가속시키는 것 : 콕크로프트·월턴형가속기, 밴더그래프, 사이클로트론, 싱크로트론, 직선형가속기
- ⑦ 전자만을 가속시키는 것 : 베타트론

17. 아래의 방사성핵종 중 우주선에 의해 유도된 것이 아닌 것은?

- ① ^3H ② ^{14}C ③ ^{32}P ④ ^{137}Cs

[답] ④ ^{137}Cs 는 주로 인공적으로 실시하는 핵분열에서 생성된다. 참고로 체내에 섭취되었을 때 전신, 근육에 침착 된다.

18. 방사선에 의한 인체의 만발장해의 특징이 아닌 것은?

- ① 피폭에서 증상 발생까지의 시간이 길다. ② 방사선 특이성이 없다.
③ 저선량 장기간 피폭시 발생되기 쉽다. ④ 고선량 단기간 피폭시 발생된다.

[답] ④

19. 반도효과(recoil effect)를 이용한 분리법은?

- ① 방사콜로이드법 ② 질라드 - 첼머법
③ 스캐벤저 ④ 용액잔류법

[답] ②

20. 중성자조사에 의한 방사성동위원소의 생산에 적용되는 기본식에서 포화계수는 $(1 - e^{-\lambda t})$ 이다. 중성자 조사시간이 $t \approx 0$ 와 $t = \infty$ 일 때 포화계수는?

- ① $\lambda t, 1$ ② $1 - e^{-\lambda t}, \lambda t$ ③ $e^{-\lambda t}$ ④ $\lambda t, e^{-\lambda t}$

[답] ①

21. 핵자당 결합에너지에 대한 다음 설명 중 옳지 않은 것은?

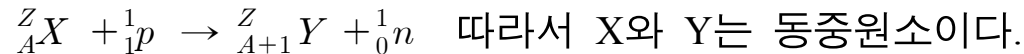
- ① 핵반응은 핵자당 결합에너지를 증가시키는 방향으로 일어난다.
- ② 핵자당 결합에너지가 큰 원소들이 안정영역을 구성한다.
- ③ 양성자와 중성자의 비(n/p)가 클수록 핵자당 결합에너지가 증가한다.
- ④ 핵자당 결합에너지는 핵자의 종류에 상관없이 거의 일정하다.

[답] ③ 핵자당 결합에너지는 Fe 부근의 원자가 가장 크며, 이후 원자번호가 커지면 오히려 감소한다.

22 양성자를 가속하여 원자핵 X에 충돌시켜, 중성자와 새로운 원자핵 Y를 얻었다. X와 Y에 대한 다음 설명 중 옳은 것은?

- ① X와 Y의 화학적 성질은 같다. ② X와 Y는 동중원소이다.
- ④ X와 Y는 핵이성체이다. ③ X의 원자번호는 Y보다 크다.

[답] ② 이 반응에서 다른 입자가 발생하지 않는다면



23 U^{235} 원자핵 1개가 열중성자에 의해 핵분열 할 때, 약 200MeV의 에너지가 발생한다. 그러면 U^{235} 1g이 전부 핵분열 할 때 발생하는 에너지는 몇 칼로리 인가? (단, $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-12}\text{erg}$, $1\text{cal} = 4.2 \times 10^7\text{erg}$, Avogadro = 6×10^{23} 이다.)

- ① $1.05 \times 10^{10}\text{cal}$ ② $1.95 \times 10^{10}\text{cal}$ ③ $3.95 \times 10^{10}\text{cal}$ ④ $2.95 \times 10^{10}\text{cal}$

[답] ②

24 반감기 $T = 1.5 \times 10^5$ 년인 Tc^{99} 원자 10^5 개가 방출하는 베타 입자는 10년간에 몇 개일까?

- ① 3.6 ② 4.0 ③ 4.6 ④ 5.4

25 방사성 표지화합물 보관방법으로서 적절치 않은 것은?

- ① G값이 낮은 화합물로 변환시켜 냉암소에 보관
 ② 방사능 농도나 비방사능을 가능한 낮춤
 ③ 방사선 흡수제나 방사선 에너지 분산재를 가해 함께 보관
 ④ 물에 녹여 보관

26 P^{32} 는 베타 붕괴하여 S^{32} 가 된다. 이때 베타의 최대에너지는 얼마인가? (여기서 P^{32} 의 원자질량은 31.98403 u, S^{32} 의 원자질량은 31.98224 u, $u = 931.48$ MeV 이다.)

27 방사선의 생물학적 영향을 설명하기 위해 사용되는 용어이다. 설명이 옳지 않은 것은?

- ① 산소증강비 (OER) - 동일한 생물학적 효과를 보기 위하여 산소가 없는 조건하에서의 방사선량과 산소가 있는 조건 하에서 사용한 방사선량의 비율
 ② 반치사선량 [$LD_{50(30)}$] - 방사선에 피폭된 개체군의 50%가 30시간 이내에 사망하는 선량
 ③ 상대생물효과비 (RBE) - 동일한 생물학적 효과를 얻기 위하여 사용한 기준방사선 (X선)의 선량과 시험방사선 선량의 비율
 ④ 선에너지전달(LET) - 방사선이 생물체 등 매질을 통과할 때 단위 비정당 전달하는 에너지

28 인체 내에 흡입된 어떤 방사성핵종의 물리적인 반감기는 50일이라 한다. 만약 이 핵종에 대한 인체의 생물학적 배설상수가 $2.0 \times 10^{-2}/\text{일}$ 이라면, 신체에서 이 핵종에 대한 유효반감기는 몇 일 인가?

- ① 10.54 일 ② 15.76 일 ③ 20.47 일 ④ 50 일

29 자연 상태에서 가장 무거운 원소인 우라늄 원자의 직경은 가장 가벼운 수소원자 직경의 몇 배쯤 될까?

- ① 3배 ② 35배 ③ 92배 ④ 238배

30. A핵종(반감기 : 4시간)과 B핵종(반감기 : 1시간)의 방사성혼합물이 있다. 각각의 딸핵종은 비 방사성이다. 이 방사성혼합물의 전방사능을 $t=0$ 에서 1,000 Bq, $t=4$ 시간에서 150 Bq일때, $t=0$ 에서 핵종 B의 방사능은 얼마인가?

- ① 200 Bq ② 400 Bq ③ 600 Bq ④ 800 Bq

[답] ④

방사성핵종 A, B의 초기방사능을 각각 A_0 , B_0 라고 한다면

a) 주어진 조건에서 $A_0 + B_0 = 1,000 \text{ Bq}$

b) 4시간 경과후 전방사능은 $A_0 \exp\left(\frac{-\ln 2}{4h} \cdot 4h\right) + \exp\left(\frac{-\ln 2}{1h} \cdot 4h\right) = 150 \text{ Bq}$

정리하면 $\frac{A_o}{2} + \frac{B_o}{16} = 150 \text{ Bq}$

a), b)식을 연립하여 풀면 일단의 과정을 거쳐 $B_o=800 \text{ Bq}$ 를 얻는다.