

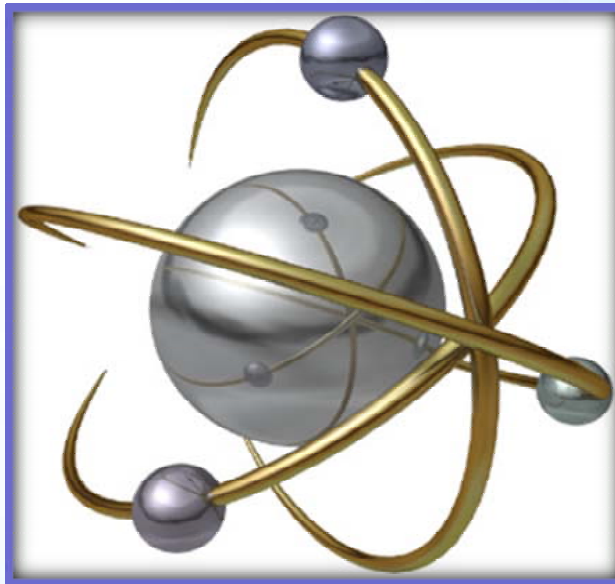
원 자 력 기 초 이 론

한 양 대 학 교
방 사 선 안 전 연 구 실
장 한 기

hkjang@rrl.hanyang.ac.kr



방사선 물리



용어, 단위, 및 기본 물리량

접두어

명 칭	기 호	10의 급수	10진법의 호칭
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 가 (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

■ 1몰(mol)

- 어떤 물질이 자신의 원자량만큼의 질량(g)을 가질 때를 이때의 양이 1몰
- 모든 물질은 1몰일 때 원자의 개수가 아보가드로 숫자와 같음[아보가드로수: 6.02×10^{23}]
- 모든 기체는 1몰일때 부피가 22.4Liter
- 예) Co-60의 경우 1몰의 질량은 60g, 원자수는 6.02×10^{23} 개
C-12기체 1몰의 부피는 22.4Liter, 기체원자수는 6.02×10^{23} 개

용어, 단위, 및 기본 물리량

■ 일(W)과 에너지(E)

- 일은 물체에 작용한 힘과 그 힘의 방향으로 움직인 물체의 변위의 곱[$W=FS$]
- 에너지: 물체가 물리적인 일을 할 수 있는 능력. 일의 반대개념, 같은 물리량이며 단위는 동일
- 줄[J] : 1joule은 1kg의 물체를 1m/s^2 의 가속도로 1m 움직이는 데 필요한 에너지[$1\text{J}=0.24\text{cal}$]
- 에르그(erg) : 1g의 물체를 1cm/s^2 의 가속도로 1cm 이동하는데 필요한 에너지[$1\text{erg}=10^{-7}\text{J}$]
- 일률: 단위시간당 일의 량[$W(\text{watt})=\text{J/s}$]

■ 입자, 파동의 이중성과 양자역학

▶ 파동관련 물리량

- 파장(wave length); 전자파나 음파의 마루에서 마루[λ , cm]
- 진동수(frequency); 단위시간당 진행한 파수, 주기T의 역수 [ν , sec^{-1}]
- 파의 진행속도; $v = \lambda \nu$, 광속일 때는 $c = \lambda \nu$

▶ 입자관련 물리량

- 질량이 있는 물질 : 운동에너지= $\frac{1}{2} mv^2$, 운동량 $P=mv$
- 질량이 없는 파동의 에너지 및 운동량

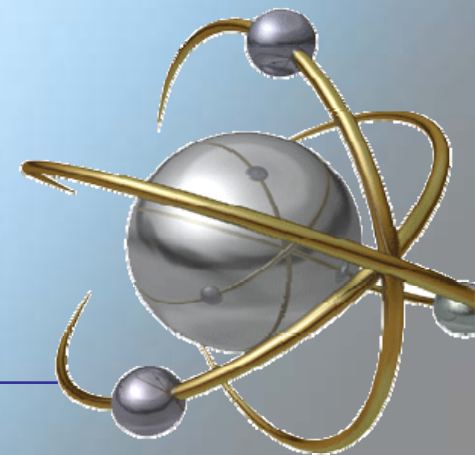
에너지; $E=h\nu = h(c/\lambda)$, 운동량; $P=h/\lambda = h(\nu/\lambda)$ 여기서 h 는 플랑크 상수 : $6.6260755 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

■ 전자볼트(Electron Volt; eV) : 1개의 전자가 1V의 전압으로 가속될 때 얻는 에너지

- $1\text{eV} = 1.60219 \times 10^{-19} \text{ C} \times 1\text{V} = 1.60219 \times 10^{-19} \text{ J}$

원자와 원자핵

- **톰슨의 원자핵 발견(1897년)** : **건포도 빵 모형**, 전자의 전하량, 전자의 질량을 밝혀냄
- **리더포드의 원자핵 발견(1909년)** : **알파입자 산란실험**, 원자핵의 주위로 전자가 궤도운동하는 원자모형을 제안
- **제드릭** : 중성자 발견
- **보어의 원자모형** : **양자 조건**, 수소원자의 스펙트럼은 잘 설명이 되지만 다른 원자의 스펙트럼을 설명하는데 한계
- **현대의 원자모형** : 전자를 특정 위치에 특정한 에너지를 가진 존재 확률로 표시(전자구름모형 혹은 오비탈(orbital))
- **원자의 구조**
 - 원자 : 원자핵과 전자
 - 원자핵 : 핵자(양성자, 중성자)로 구성



원자의 구성 요소

입 자	질 량(Kg)	원자질량단위(u)	에너지(MeV)
전자 [e ⁻]	9.10955×10^{-31}	0.0005486	0.511
양성자[p]	1.67261×10^{-27}	1.007276	938.277
중성자[n]	1.67491×10^{-27}	1.008665	939.571

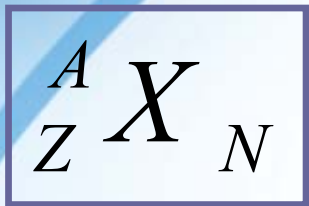
■ $e = 1.60219 \times 10^{-19} \text{C}$ (쿨롱, coulomb) = $4.80298 \times 10^{-10} \text{esu}$

원자와 원자핵

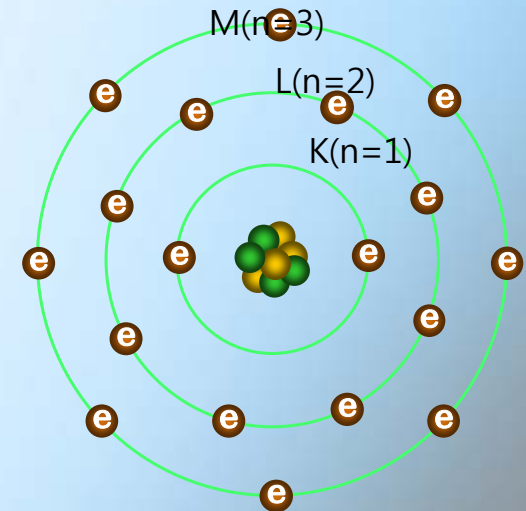
■ 전자의 궤도

- 원자핵을 중심으로 회전하고 있는 전자의 궤도에 안쪽에서부터 K,L,M,N,... 으로 이름을 붙임.
- $n=1$ (K-궤도), $n=2$ (L-궤도), ...
- 각 궤도에 수용될 수 있는 전자의 최대수는 $2n^2$ (n 은 주양자수)

■ 원소의 표기



- X : 원소기호
- A : 질량수 (mass number), $A=Z+N$
- Z : 원자번호 (atomic number), 원자내의 양성자수
- N : 중성자수, 일반적으로 잘 표시하지 않음.



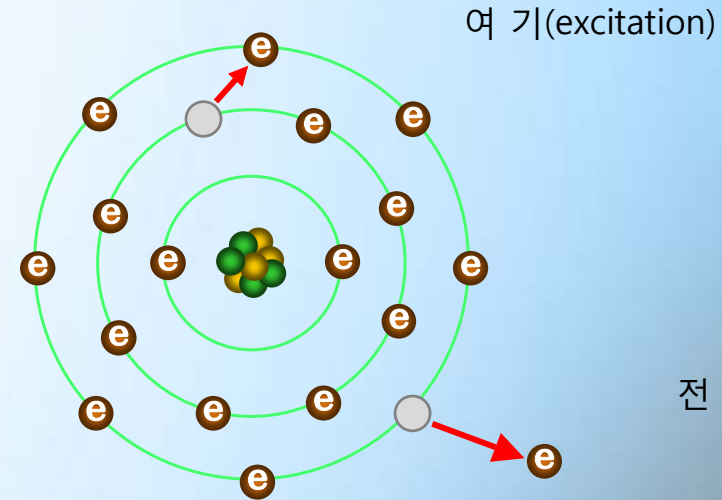
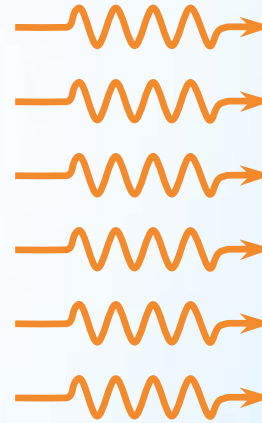
핵[핵종]의 종류

구 분	Z	N	A (Z+N)	예
동위체(isotope)	=	≠	≠	^1H , ^2H , ^3H
동중체(isobar)	≠	≠	=	$^{16}_7\text{N}$, $^{16}_8\text{O}$
동중성자체(isotone)	≠	=	≠	^9_4Be , $^{10}_5\text{Be}$
핵이성체(isomer)	=	=	=	$^{99\text{m}}\text{Tc}$

원자와 원자핵

여기와 전리

- **여기(excitation)** : 원자의 궤도전자가 에너지를 흡수하여 안정된 기저상태(ground state)에서 에너지가 높은 상태로 옮겨가는 것(10^{-8}sec)
- **전리(ionization)** : 에너지를 흡수하여 궤도전자가 원자핵의 구속력으로부터 완전히 벗어나는 것
- **W 값** : 1개의 이온쌍을 만드는데 필요한 평균에너지(반도체; Si : 3.6eV, 공기 : 34eV)



원자의 크기

- 전자의 궤도 반경 : $r = \frac{h^2}{4\pi^2 k Z m e^2} n^2 = 0.53 \times 10^{-10} \frac{n^2}{Z} \text{ (m)}$

- 수소원자의 크기 : $r = 0.53 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$)

- 원자의 에너지 준위 : $E_n = -k \frac{Z e^2}{2 r_n} = -13.6 \frac{Z^2}{n^2} \text{ (eV)}$

원자핵의 반경

- 원자핵의 부피는 원자핵의 질량수에 비례
- $R = 1.2 \times 10^{-15} A^{1/3}$, 여기서 A는 원자핵의 질량수

원자와 원자핵

원소의 주기율표

Periodic Table of the Elements, in Pictures

Group 1 1 H Hydrogen Alkali Metals 3 Li Lithium 11 Na Sodium 19 K Potassium 	Group 2 4 Be Beryllium 12 Mg Magnesium 20 Ca Calcium 	Key Symbol → C Name → Carbon Use or Occurrence → Plants and Animals The atomic number is the number of protons in an atom. Solid, Liquid, Gas at room temperature Radioactive Man-Made	Atoms Atoms have a nucleus of protons and neutrons surrounded by electrons. The number of electrons in an uncharged atom is the same as the number of protons. Molecules Atoms combine to make molecules by sharing or trading their outer electrons. Many atoms prefer to have eight electrons in their outer orbit like the oxygen atom in H ₂ O.	Group 8 2 He Helium 10 Ne Neon 18 Ar Argon 	Group 8 2 He Helium 10 Ne Neon 18 Ar Argon 	
2 B Boron 13 Al Aluminum 	5 C Carbon 14 Si Silicon 	6 N Nitrogen 15 P Phosphorus 	7 O Oxygen 16 S Sulphur 	8 F Fluorine 17 Cl Chlorine 	9 Br Bromine 35 Br Bromine 	16 S Sulphur
3 B Boron 13 Al Aluminum 	5 C Carbon 14 Si Silicon 	6 N Nitrogen 15 P Phosphorus 	7 O Oxygen 16 S Sulphur 	8 F Fluorine 17 Cl Chlorine 	9 Br Bromine 35 Br Bromine 	16 S Sulphur
4 K Potassium 20 Ca Calcium 37 Rb Rubidium 55 Cs Cesium 	21 Sc Scandium 39 Y Yttrium 56 Ba Barium 	22 Ti Titanium 40 Zr Zirconium 72 Hf Hafnium 	23 V Vanadium 41 Nb Niobium 73 Ta Tantalum 	24 Cr Chromium 42 Mo Molybdenum 74 W Tungsten 	25 Mn Manganese 43 Tc Technetium 75 Re Rhenium 	26 Fe Iron 44 Ru Ruthenium 76 Os Osmium
5 Rb Rubidium 37 Sr Strontium 55 Cs Cesium 	38 Yttrium 56 Ba Barium 	40 Zr Zirconium 72 Hf Hafnium 	41 Nb Niobium 73 Ta Tantalum 	42 Mo Molybdenum 74 W Tungsten 	43 Tc Technetium 75 Re Rhenium 	44 Ru Ruthenium 76 Os Osmium
6 Cs Cesium 55 Ba Barium 	56 La Lanthanum 58 Ce Cerium 60 Nd Neodymium 	57 Pr Praseodymium 59 Sm Samarium 61 Eu Europium 	62 Gd Gadolinium 64 Tb Terbium 66 Dy Dysprosium 	67 Ho Holmium 69 Er Erbium 71 Lu Lutetium 	72 Hf Hafnium 74 W Tungsten 	73 Ta Tantalum
7 Fr Francium 87 Rf Rutherfordium 	88 Th Thorium 90 Pa Protactinium 	89 U Uranium 91 Np Neptunium 93 Pu Plutonium 	94 Am Americium 96 Cm Curium 98 Bk Berkelium 	95 Cf Californium 97 Es Einsteinium 99 Fm Fermium 	96 Md Mendelevium 101 No Nobelium 102 Lr Lawrencium 	97 Bk Berkelium

Trans-Actinides: These man-made atoms exist for less than a second.

Element 112 was the highest-numbered element yet created, as of 1996.

Groups
The vertical columns are called groups. Elements in the same group behave similarly because they have the same number of outer electrons.
Group 1 has one outer electron, group 2 has two, etc. Most transition metals have two.

Lanthanides or Rare Earth Metals
Actinides

La 57 Lanthanum Ce 58 Cerium Pr 59 Praseodymium Nd 60 Neodymium 	Pm 61 Promethium Sm 62 Samarium Eu 63 Europium 	Gd 64 Gadolinium Tb 65 Terbium Dy 66 Dysprosium 	Ho 67 Holmium Er 68 Erbium Tm 69 Thulium 	Yb 70 Ytterbium Lu 71 Lutetium 	Hf 72 Hafnium W 74 Tungsten 	Ta 73 Tantalum
Ac 89 Actinium Th 90 Thorium Pa 91 Protactinium 	U 92 Uranium Np 93 Neptunium Pu 94 Plutonium 	Am 95 Americium Cm 96 Curium Bk 97 Berkelium 	Cf 98 Californium Es 99 Einsteinium Fm 100 Fermium 	Md 101 Mendelevium No 102 Nobelium Lr 103 Lawrencium 	Hf 72 Hafnium W 74 Tungsten 	Ta 73 Tantalum

Copyright © 1997 Keith Enevoldsen

원자핵 반응

■ 핵력과 결합에너지

- 핵력의 특징

- 1) 쿨롱력보다 강한 인력이다.
- 2) 단거리력이다. (핵내에서만 작용하는 힘)
- 3) 전하독립성이다. (전하와 관련 없다. p-p, n-p, n-n 사이의 핵력은 같다.)
- 4) 포화성을 가진다. (원자핵의 어느 지점에서든 밀도와 비결합에너지 일정)
- 5) 교환력이다. (π 중간자를 매개로 힘을 주고 받는다.)

■ 원자질량 단위(atomic mass unit; amu 또는 u)

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

- 즉 1u는 아보가드로수의 역수

$$1u = \frac{12g}{Avo.No.} \div 12 = \frac{1}{6.02 \times 10^{23}} g = 1.660531495 \times 10^{-24} g = 1.660531495 \times 10^{-27} kg$$

- 1u의 에너지

$$E = mc^2 = 1.6605 \times 10^{-27} kg \times (2.9979 \times 10^8 m / sec)^2 = 1.429 \times 10^{-10} J = 931.5 MeV$$

원자핵 반응

■ 질량결손과 결합에너지

– 질량결손 (Mass defect, ΔM)

- (원자핵의 질량) < (양성자의 질량) + (중성자의 질량)
- $\Delta M = (ZM_p + NM_n) - M$

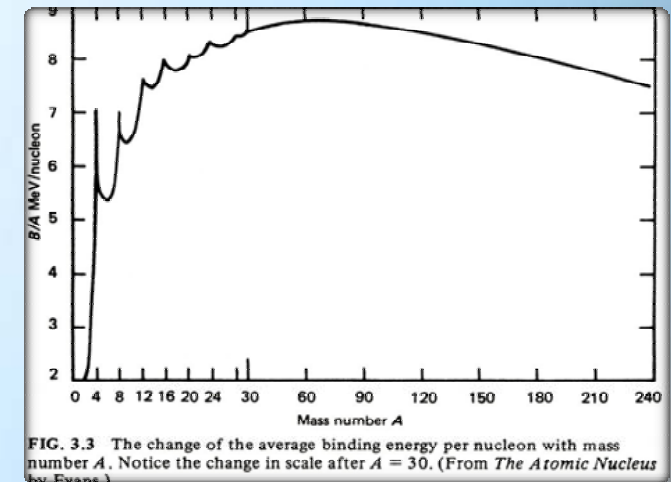
– 결합에너지 (Binding energy, E_b)

- 원자핵을 양성자와 중성자로 분리시키는데 필요한 에너지
- $E_b = \Delta mc^2 = (ZM_p + NM_n - M)c^2$

– 핵자당 결합에너지 (f_B)

- 핵자 한 개당 결합에너지
- 핵자당 결합에너지는 질량수가 60부근에서 가장 크다. (^{56}Fe 이 최대)

$$f_B = \frac{E_b}{A}$$



원자핵 반응

예제) ${}^4_2\text{He}$ 원자핵의 무게가 4.00150u 일 때, 결합에너지와 핵자 당 결합에너지는 얼마인가?
(단, $M_p=1.007275\text{u}$, $M_n=0.008665\text{u}$)

풀이) 질량결손 $\Delta M = (ZM_p + NM_n) - M_{\text{He}}$
 $= (2 \times 1.007275\text{u} + 2 \times 0.008665\text{u} - 4.00150\text{u})$

따라서 결합에너지는

$$E_b = [ZM_p + NM_n - M_{\text{He}}]c^2$$

또는,

$$E_b = (2 \times 1.007275\text{u} + 2 \times 0.008665\text{u} - 4.00150\text{u}) \times 931.5 \text{ MeV/u}$$
$$= 28.3 \text{ MeV}$$

그러므로, 핵자당 결합에너지는

$$f_B = \frac{E_b}{A} = \frac{28.3}{4} = 7.075 \text{ MeV}$$

원자핵 반응

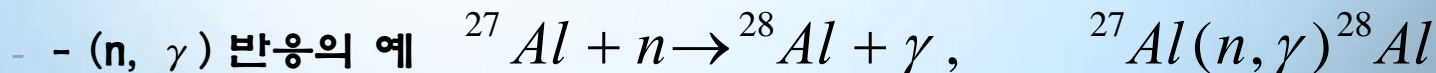
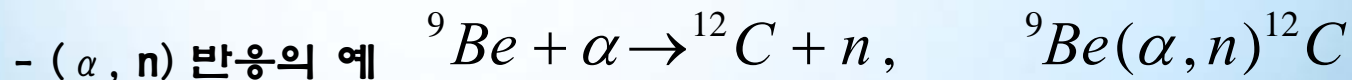
■ 핵반응 (Nuclear Reaction) : 2개의 원자핵이 충돌하여 원자핵이 결합하거나 분해하여 새로운 원자핵을 낳게 하는 반응

- 가속된 입사입자 a를 정지하고있는 표적핵 X에 충돌시켜 다른 생성핵 Y와 방출입자 b를 만드는 반응



- 핵반응 발생의 4법칙

- 핵자의 보존 : 핵반응 전후 핵자의 총 수는 보존된다
- 전하의 보존 : 핵반응 전후 모든 입자가 갖는 총 전하량의 합은 보존된다
- 운동량 보존 : 핵반응 전후 충돌입자의 총 운동량은 보존된다
- 운동에너지 보존 : 핵반응 전후 운동에너지는 보존된다



원자핵 반응

■ 반응의 Q값(Q-value)와 문턱에너지(threshold energy)

- $a + X \rightarrow Y + b$ 반응시

반응의 $Q > 0$ 일때 발열 반응, 반응의 $Q < 0$ 일때 흡열 반응

$$Q = [(M_a + M_X) - (M_Y + M_b)]c^2 \text{ (J)}$$
$$= [(M_a + M_X) - (M_Y + M_b)] \times 931.5 / u \text{ (MeV)}$$

- 흡열반응일 때는 문턱에너지가 존재

- 문턱에너지란 처음으로 반응을 일으키기 위해 가해주어야 할 에너지로 Q-value보다 크다.

$$E_{th} = \frac{M_X + M_a}{M_X} |Q|$$

- 발열반응시 운동에너지의 배분

- $a + X \rightarrow Y + b$ 가 발열반응일때,

b의 운동에너지 : $K.E.(b) = \frac{M_Y}{M_Y + M_b} |Q|$

Y의 운동에너지 : $K.E.(Y) = \frac{M_b}{M_Y + M_b} |Q|$

원자핵 반응

예제) $^{63}_{30}\text{Zn}$ 과 $^{63}_{29}\text{Cu}$ 사이에서 일어날 수 있는 붕괴반응은 무엇인가?

또한, 이때의 반응에너지(Q-value)는 얼마인가?

(단, $M(^{63}_{30}\text{Zn})=62.933\text{u}$, $M(^{63}_{29}\text{Cu})=62.9298\text{u}$, $M_e=0.0005486\text{u}$)

풀이) $^{63}_{30}\text{Zn}$ 과 $^{63}_{29}\text{Cu}$ 는 원자량의 변화 없이 원자번호만 1만큼 줄어드므로 β^+ 붕괴 가능

이때의 Q-value는

$$\begin{aligned} Q_{\beta^+} &= (M_X - M_Y - 2M_e)c^2 \\ &= (62.933\text{u} - 62.9298\text{u} - 2 \times 0.0005486\text{u}) \times 931.5 \text{ MeV/u} \\ &= 1.96 \text{ MeV} \end{aligned}$$

방사성 붕괴와 방사능

■ **방사능 (Radioactivity) : 불안정한 원자나 원자핵이 스스로 붕괴하면서 내부로부터 방사선을 방출하는 현상**

- 정의 : 방사성물질 내부에서 단위시간당 일어나는 핵변환의 수
- 단위

■ SI 단위 : Bq (베크렐) – 방사성 핵종이 1초 동안 한 개의 핵변환 하는 수

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ dps (disintegration per second)}$$

■ 전통적 단위 : Ci (큐리) – ^{226}Ra 1g과 같은 붕괴수를 나타내는 방사능의 양

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

시간에 따른 변화

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

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad N_0 = \frac{W}{M} \times N_A$$

N_0 : 초기($t=0$) 어미 핵종의 원자수

W : 원자핵의 무게 (g)

M : 원자량

N_A : 아보가드로 수 ($6.023 \times 10^{23} \text{ n/mol}$)

□ 비방사능 (Specific Activity)

- 물질의 단위질량 혹은 단위부피당 방사능

방사성 붕괴와 방사능

■ 반감기와 평균 수명

- **반감기(half life, $T_{1/2}$)** : 어느 특정 방사성핵종의 원자수가 방사성붕괴에 의해서 최초 원자수의 반으로 줄어드는데 소요되는 시간
- **평균수명 (mean life, τ)** : 방사성붕괴로 딸핵종의 원자수가 처음의 $1/e$ 가 되는 시간

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}} \rightarrow T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

$$N = N_0 e^{-\frac{0.693 t}{T_{1/2}}} \quad \therefore \quad A = A_0 e^{-\frac{0.693 t}{T_{1/2}}}$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = 1.44 T_{1/2}$$

■ 유효반감기

- 내부피폭시 신체부하량이 붕괴나 대사에 의하여 1/2로 되는데 걸리는 시간

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

T_b : 생물학적 반감기

T_p : 물리학적 반감기

방사성 붕괴와 방사능

예제) 105 Bq의 ^{60}Co ($T=5.26\text{y}$)의 질량은?

풀이) $A = \lambda N = \frac{0.693}{T_{1/2}} \times \frac{W}{M} \times N_A$

$$10^5 \text{ dps} = \frac{0.693}{5.26[\text{y}] \times 365[\text{d/y}] \times 24[\text{h/d}] \times 3600[\text{s/h}]} \times \frac{W}{60} \times 6.023 \times 10^{23}$$

$$\therefore W = 2.38 \times 10^{-9} \text{ g}$$

예제) ^{226}Ra 은 반감기가 1620년으로 α 붕괴를 한다. 1g의 ^{226}Ra 이 1초 동안 붕괴하는 총 수는 얼마인가?

풀이) $A = \lambda N = \frac{0.693}{T_{1/2}} \times \frac{W}{M} \times N_A$

$$= \frac{0.693}{1620[\text{y}] \times 365[\text{d/y}] \times 24[\text{h/d}] \times 3600[\text{s/h}]} \times \frac{1}{226} \times 6.023 \times 10^{23}$$

$$= 3.7 \times 10^{10} \text{ dps}$$

방사성 붕괴와 방사능

■ ^{238}U 1g의 방사능($T_{1/2}=4.51 \times 10^9 \text{ yr}$)?

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{\ln 2}{4.51 \times 10^9 \text{ y} \times 365 \text{ d / y} \times 24 \text{ h / d} \times 3600 \text{ s / h}} = 4.87 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$$

$$N = \frac{1}{238} \times 6.02 \times 10^{23} = 2.53 \times 10^{21}$$

$$A = \lambda N = 4.87 \times 10^{-18} \times 2.53 \times 10^{21} = 12325 \text{ Bq}$$

■ 현재 100 mCi의 방사성물질($T_{1/2}=8\text{d}$)이 32일 지났을 때 방사능은?

$$A = A_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} = 100 \text{ mCi} \times \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{32}{8}} = 6.25 \text{ mCi}$$

■ 현재 235 MBq인 ^{60}Co 가 100 MBq로 되는 시점은($T_{1/2}=5.26\text{yr}$)?

$$t = 6.48 \text{ yr}$$

방사선과 물질의 상호작용

■ 탄성산란(elastic scattering)

- 입사입자가 표적입자와 충돌하였을 때 입사입자의 내부에너지 변동없이 방향의 변화만을 일으키는 과정

■ 비탄성산란(inelastic scattering)

- 상호작용 전후 입사입자의 본질은 변하지 않지만 내부에너지가 변하는 과정
- 전체 계의 에너지는 보존되지만 입사입자의 운동에너지 중 일부는 표적원자의 내부에너지 변화에 기여

■ 핵반응[Nuclear reaction]

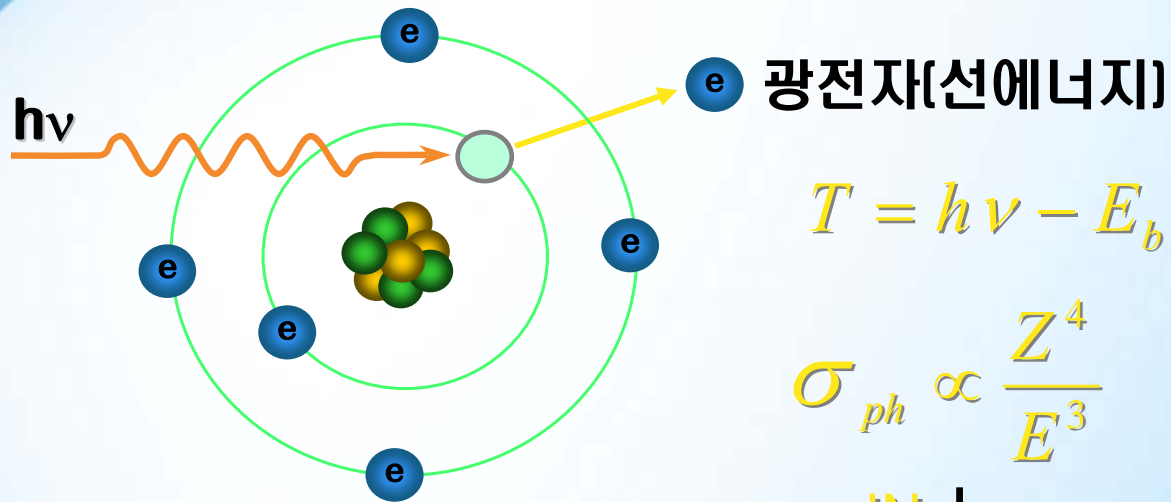
- 상호작용 결과 입사입자와 충돌입자의 본질이 변화됨
- 핵반응시 에너지 보존법칙은 아인슈타인의 질량-에너지 등가공식에 따라 반응 전후의 질량변화를 일으킴



방사선과 물질의 상호작용

광전효과

광자의 에너지가 **궤도전자**에 흡수되어 궤도전자를 이탈시키는 현상



$$T = h\nu - E_b \quad : \text{방출되는 광전자의 운동에너지}$$

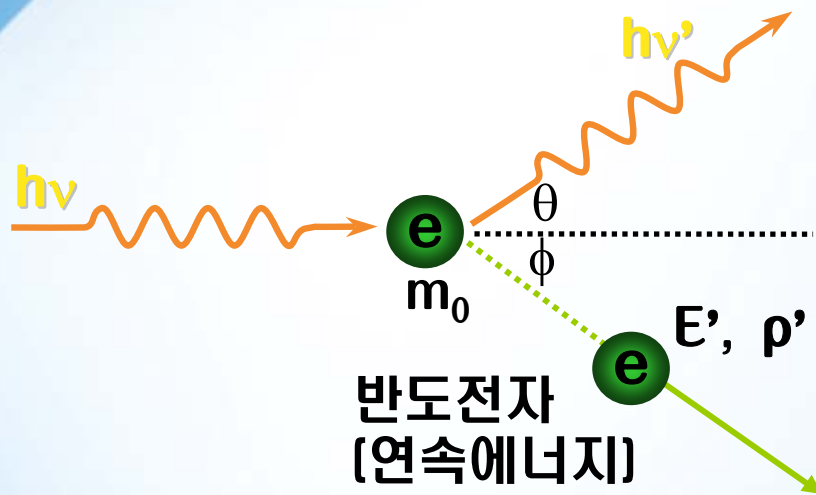
$$\sigma_{ph} \propto \frac{Z^4}{E^3} \quad : \text{광전효과의 반응단면적}$$



방사선과 물질의 상호작용

● 콤프턴산란

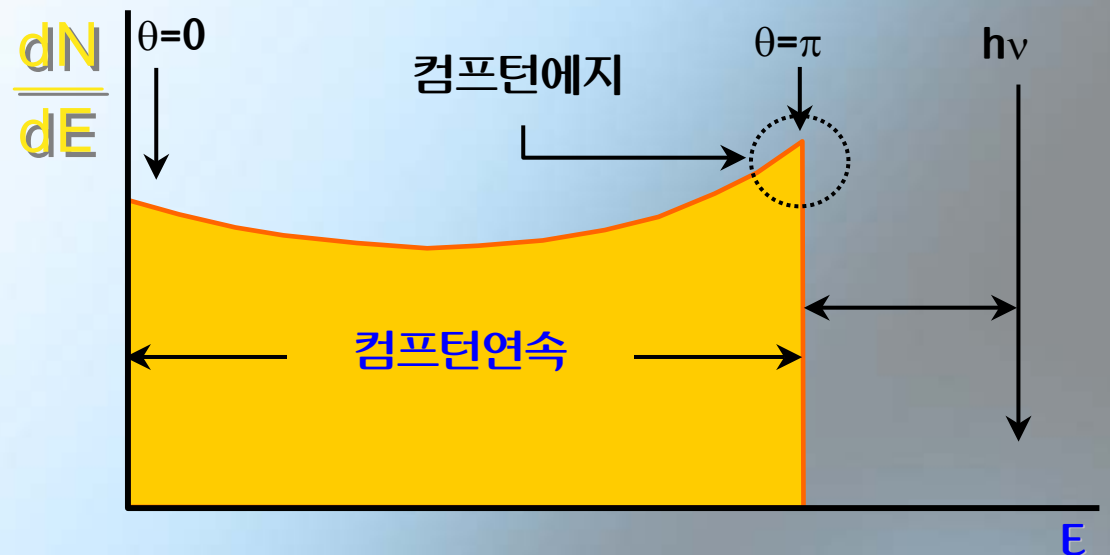
입사광자가 **자유전자**와 반응하여 광자는 방향을 바꾸어 튕겨나가고 에너지를 전달받은 전자가 궤도를 이탈하는 현상



$$\sigma_{cs} \propto \frac{Z}{E}$$

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)}$$

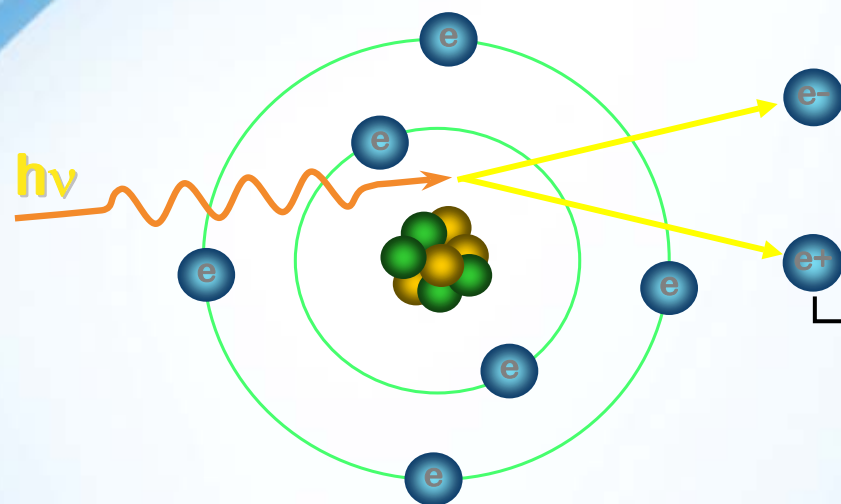
$$T = h\nu - h\nu'$$



방사선과 물질의 상호작용

전자쌍생성

광자가 전기장내를 진행하다가 흡수되고 그 에너지를 양전자와 음전자로 변환하여 방출하는 현상



전자쌍[선에너지]

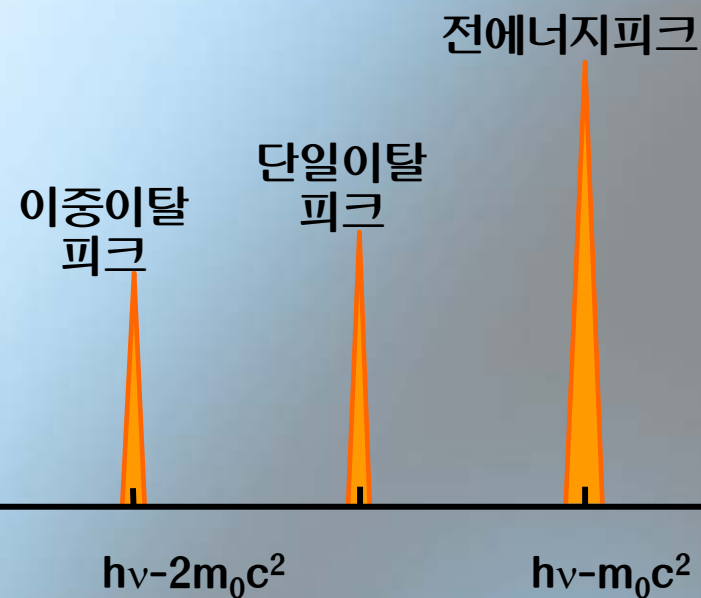
$$h\nu = T^- + T^+ + 2m_0c^2$$

소멸감마선 생성

$$\sigma_{pp} \propto Z^2 E$$

입사광자의 에너지가 1.02MeV 이상일 경우에만 발생

$\frac{dN}{dE}$



방사선과 물질의 상호작용

※ 감쇠계수

- 선형감쇠계수

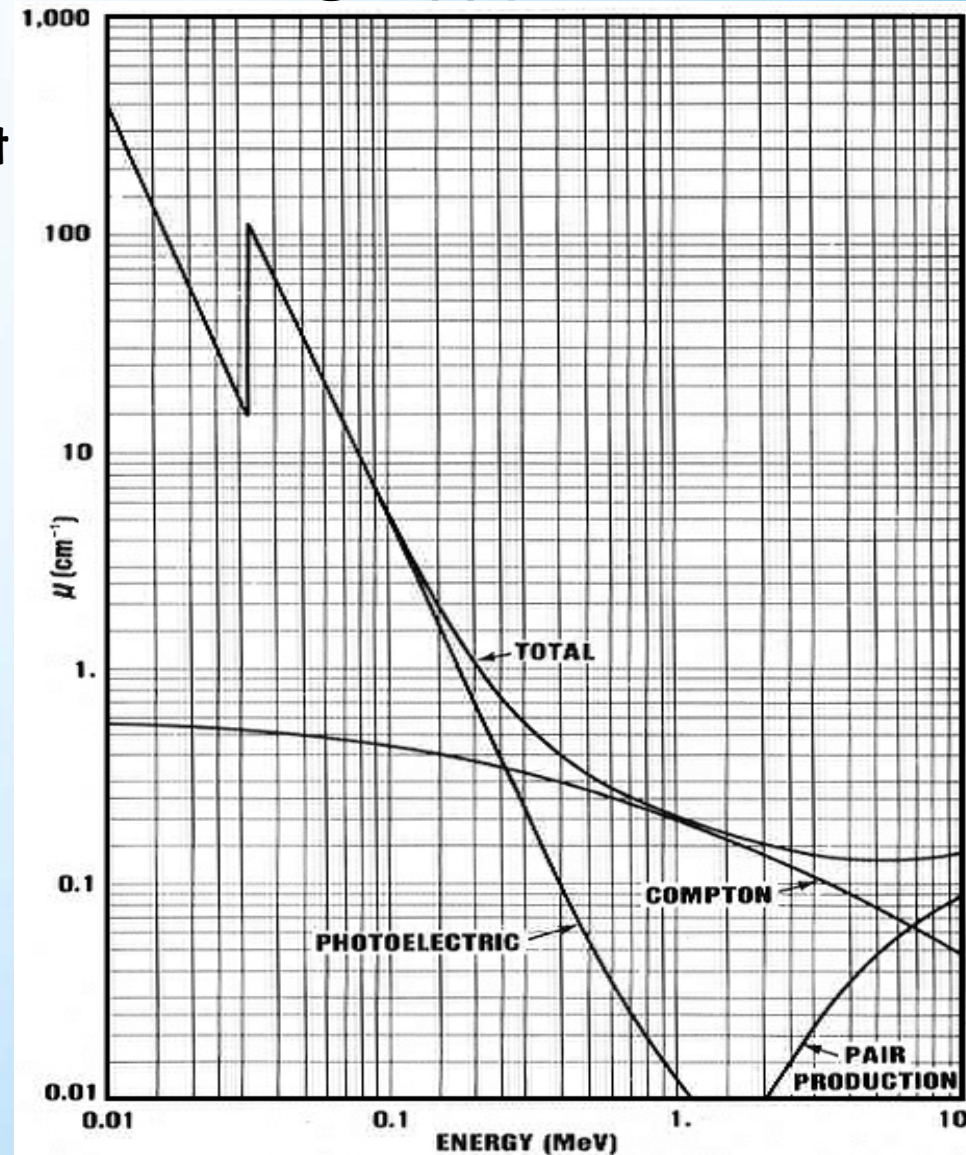
물질 내에서 광자가 단위거리를 이동하는 동안 물질과 상호작용을 일으킬 확률

$$\mu = N \sigma \text{ [cm}^{-1}\text{]}, \quad \mu = N\sigma_{ph} + ZN\sigma_{cs} + N\sigma_{pp}$$

- 질량감쇠계수(mass attenuation coefficient)

$$\frac{\mu}{\rho} \text{ [cm}^2\text{/g]}, \quad \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu_{ph}}{\rho} + \frac{\mu_{cs}}{\rho} + \frac{\mu_{pp}}{\rho}$$

● NaI(Tl) 검출기에서 감마선의 에너지에 따른 선형감쇠계수



방사선과 물질의 상호작용

예제) 3MeV 광자가 물질 내 입사하여 콤프턴산란을 일으키고 90° 로 산란하였을 때, 산란광자의 에너지와 전자의 에너지는?

풀이) 산란광자의 에너지는,

$$E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)} = \frac{3}{1 + \frac{3}{0.511} (1 - \cos 90^\circ)} = 0.44 \text{ MeV}$$

되튐전자(반도전자)의 에너지는,

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

방사선과 물질의 상호작용

□ 광자의 감쇠와 감쇠계수

■ 거리의 역제곱 법칙

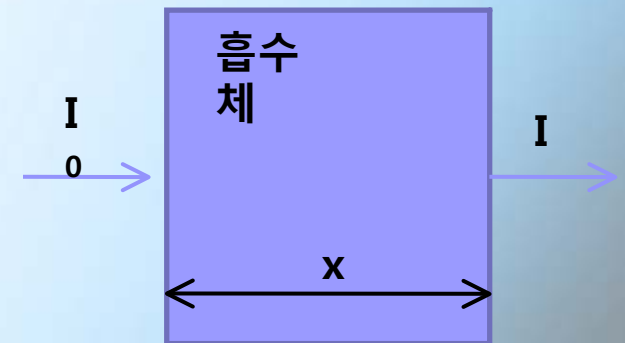
- 점선원에서 멀어질수록 단위면적당 광자수는 거리의 제곱에 반비례

■ 감쇠의 지수법칙

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

I_0 : 입사빔의 세기

μ : 선형감쇠계수 (attenuation coefficient)



■ 반가층 (Half Value Layer : HVL)

- 흡수체를 투과한 후의 강도 I 가 투과전 강도의 $1/2$ 되는 흡수체의 두께

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{2} = e^{-\mu x} \Rightarrow x_{1/2} = \frac{0.693}{\mu}$$

방사선과 물질의 상호작용

■ 선형감쇠계수와 질량감쇠계수

□ 선형감쇠계수 : $\mu_1 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$

□ 질량감쇠계수 : $\mu_m = \frac{\mu_1}{\rho} \text{ (cm}^2 \text{ / g)}$

□ 면밀도 : $t = \rho \times x \text{ (g / cm}^2\text{)}$

예제) 에너지가 1MeV인 광자의 구리($\rho=8.9\text{g/cm}^3$)에 대한 질량감쇠계수는 $0.059\text{cm}^2/\text{g}$ 이다. 이 광자의 콘크리트($\rho=2.4\text{g/cm}^3$)에 대한 반가량은 얼마인가?

풀이) 1MeV의 광자의 경우, 질량감쇠계수(μ_m)은 물질의 종류에 관계없이 거의 일정하므로, 콘크리트에서 방사선의 강도가 $\frac{1}{2}$ 이 되는 면밀도는,

$$t = \frac{0.693}{\mu_m} = \frac{0.693}{0.059} = 11.746 \text{ (g/cm}^2\text{)}$$

따라서, 반가량은 $x = \frac{t}{\rho} = \frac{11.746}{2.4} = 4.9 \text{ (cm)}$

방사선과 물질의 상호작용

■ 하전입자와 물질과의 상호작용

□ α 선과 물질과의 상호작용

■ α 선의 특징

- 속도가 빠른 α 입자의 흐름
- 충돌에 의한 진로변화가 거의 없다
- 투과력이 적다

■ 저지능(stopping power)

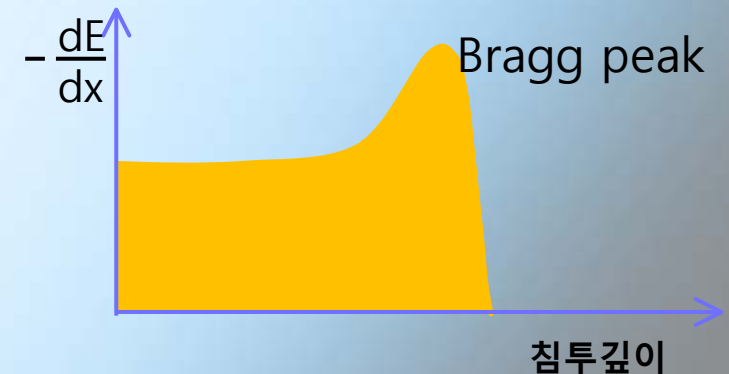
- 단위길이당 평균 에너지 손실 : $S = -\frac{dE}{dx}$

■ 비정 (range, R)

- 방사선이 물질속에서 전에너지를 잃을때까지 진행한 거리

■ 브래그 피크 (Bragg peak)

- 최대비정 직전 저지능이 최대로 된 피크



방사선과 물질의 상호작용

● 비정 비례법칙(Scaling Law of Range)

- 단일 중하전입자에 대한 서로 다른 물질에서의 비정

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \sqrt{\frac{M_1}{M_2}}$$

점자 1, 2 : 물질의 종류

ρ : 물질의 밀도

M : 물질의 원자량

- 하나의 물질에서 같은 속도를 갖는 서로 다른 중하전입자의 비정

$$\frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^2 \frac{M_1}{M_2}$$

점자 1, 2 : 중하전 입자의 종류

z : 중하전입자의 전하수

M : 중하전입자의 정지질량

[예제] 10MeV 양성자의 물속 비정이 0.118g/cm³ 이라면 40MeV α 의 물속 비정은?

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

$$\frac{R_p}{R_\alpha} = \left(\frac{z_\alpha}{z_p} \right)^2 \frac{M_p}{M_\alpha} = \left(\frac{1}{4} \right) \left(\frac{2}{1} \right)^2 = 1, \therefore R_\alpha = R_p = 0.118 \text{ g / cm}^2$$

방사선과 물질의 상호작용

□ β 선과 물질과의 상호작용

■ β 선의 특징

- 속도가 빠른 전자의 흐름
- 물질과 상호작용으로 많은 산란을 하므로, 무질서한 궤적을 가짐
- 제동복사선 방출

■ 전자의 저지능

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

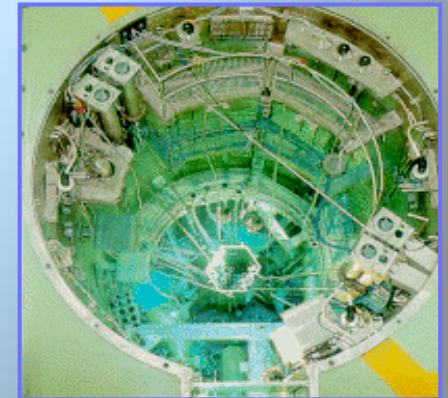
$$\frac{\left(-\frac{dE}{dx}\right)_r}{\left(-\frac{dE}{dx}\right)_c} \cong \frac{EZ}{700}$$

■ β 선의 비정과 최대에너지

$$R = 0.407 E^{1.38} \quad 0.15 < E < 0.8 \text{ MeV}$$

□ 체렌코프복사 (Cerenkov' s radiation)

- 매질 내에서 광속보다 빠른 속도로 하전입자가 진행하면서 방출하는 복사선



방사선과 물질의 상호작용

□ Linear Energy Transfer (LET)

- LET는 물질에 전달된 에너지 중 2차방사선 에너지 형태로 관심있는 영역을 빠져나간 것을 제외한 에너지 전달량으로 정의
- 이때 관심영역을 빠져나가는 2차 방사선을 δ -ray라 부름

□ 제한저지능(restricted stopping power)

$$LET_{\Delta} = \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\Delta} \quad (\Delta : \text{cut-off energy})$$

□ LET와 저지능의 차이

- 저지능 : 단위거리당 에너지 손실 (입사하는 방사선의 입장)
- LET : 방사선이 입사된 위치주변에서 하전입자로부터 전달된 에너지
저지능에서 radioactive loss와 δ -ray를 제외한 값

방사선과 물질의 상호작용

■ 중성자와 물질과의 상호작용

□ 중성자의 특징

- 중성자는 단독으로는 불안정한 상태이므로 β 붕괴를 일으켜 양성자로 변환



- 중성자의 반감기 : 약 12분

□ 핵과의 상호작용

- 핵과의 탄성산란 : (n, n) : 운동에너지와 운동량이 보존
- 핵과의 비탄성산란 : (n, n') : 운동량만 보존
- 중성자 포획 : (n, γ)
- 핵반응 : (n, p) , (n, α) , $(n, 2n)$
- 핵분열 : (n, f)

Proton number (Z)

Neutron Deficient Nuclides

beta plus decay

Neutron Excess Nuclides

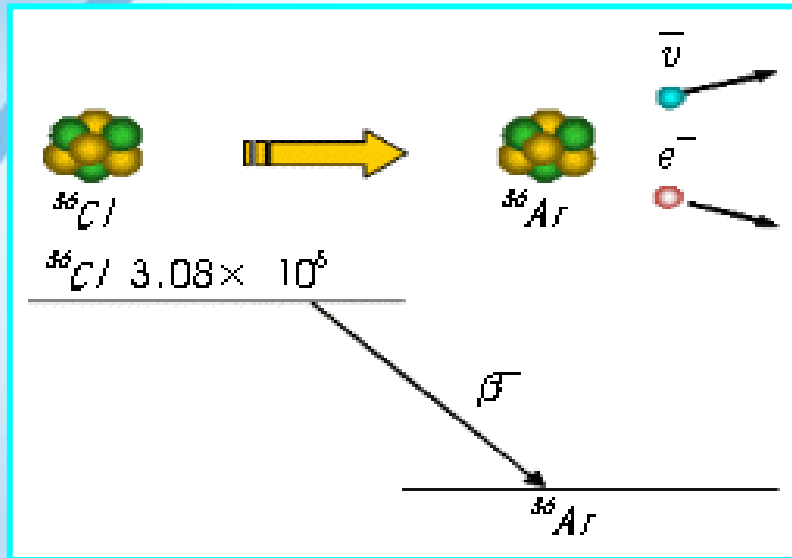
beta minus decay

Neutron number (N)

전자선원

가. 베타 붕괴 : 음전자 붕괴와 양전자 붕괴

- 음전자 붕괴 : 중성자 과잉상태인 핵종
- 양전자 붕괴 : 양성자 과잉인 핵에서 발생



■ 음전자 붕괴와 붕괴 도식의 예

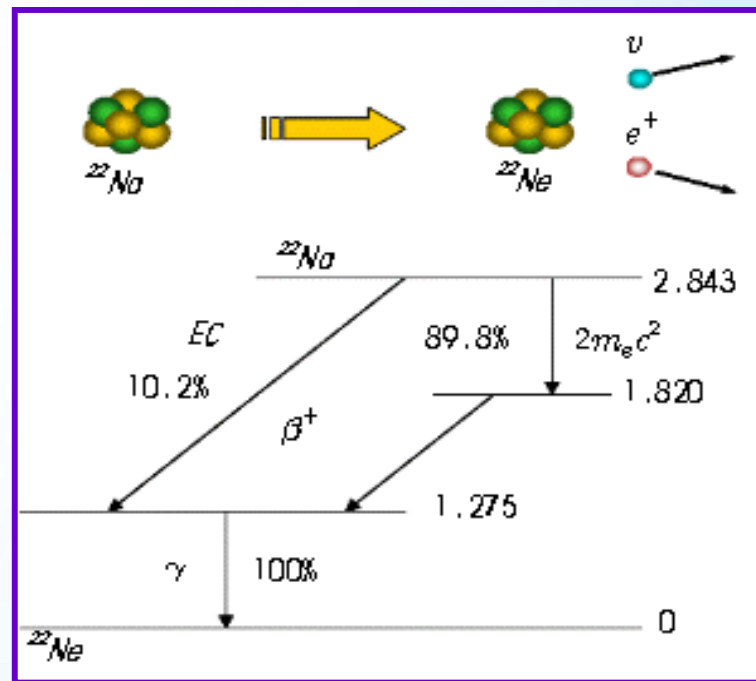
- 어미핵종의 에너지 준위에서 우하단 방향 사선으로 베타 붕괴
- 오른쪽 방향 원자번호 증가
- 하단 방향 : 에너지 감소

$$n \rightarrow p + \beta^- + \bar{\nu}$$

$$p \rightarrow n + \beta^+ + \nu$$

전자포획 (electron capture)

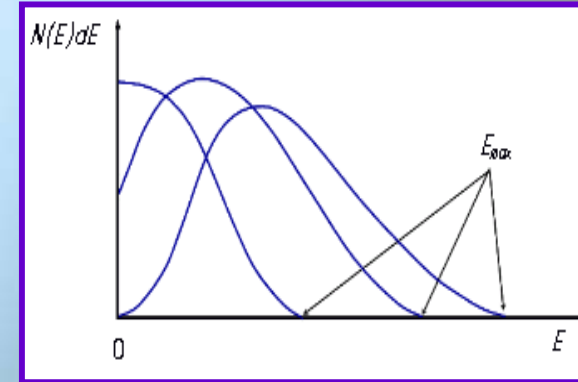
$$p + e \rightarrow n + \nu$$



■ 양전자 붕괴와 붕괴 도식의 예

- 양전자 붕괴와 전자포획이 경쟁적으로 일어남.
- 왼쪽 하단 : 원자번호와 에너지 감소

베타붕괴의 에너지스펙트럼



$$\bar{E}_{\beta^-} = \frac{E_{\max}}{3}$$

전자선원

순수베타핵종

핵 종	반감기	최대에너지(MeV)	핵 종	반감기	최대에너지(MeV)
^3H	12.26년	0.0186	^{45}Ca	165일	0.252
^{14}C	5730년	0.156	^{63}Ni	92년	0.067
^{32}P	14.28일	1.710	^{90}Sr	27.7년	0.546
^{33}P	24.4일	0.248	^{90}Y	64시간	2.27
^{35}S	87.9일	0.167	^{99}Tc	2.12×10^5 년	0.292
^{36}Cl	3.08×10^5 년	0.714	^{204}Tl	3.81년	0.766

전자선원

나. 내부전환(Internal Conversion)

- 여기상태의 원자핵이 감마선을 방출하는 대신 그 에너지를 주변의 **궤도전자(주로 K 각)**에 전달하여 궤도 전자를 이탈시키는 반응
- **감마선 방출반응과 경쟁적으로 일어남**

$$\alpha = \frac{n_{ce}}{n_{\gamma}},$$

$$n_{ce} + n_{\gamma} = 1,$$

$$n_{ce} = \frac{\alpha}{(1 + \alpha)}$$

여기서, α : **내부전환계수**

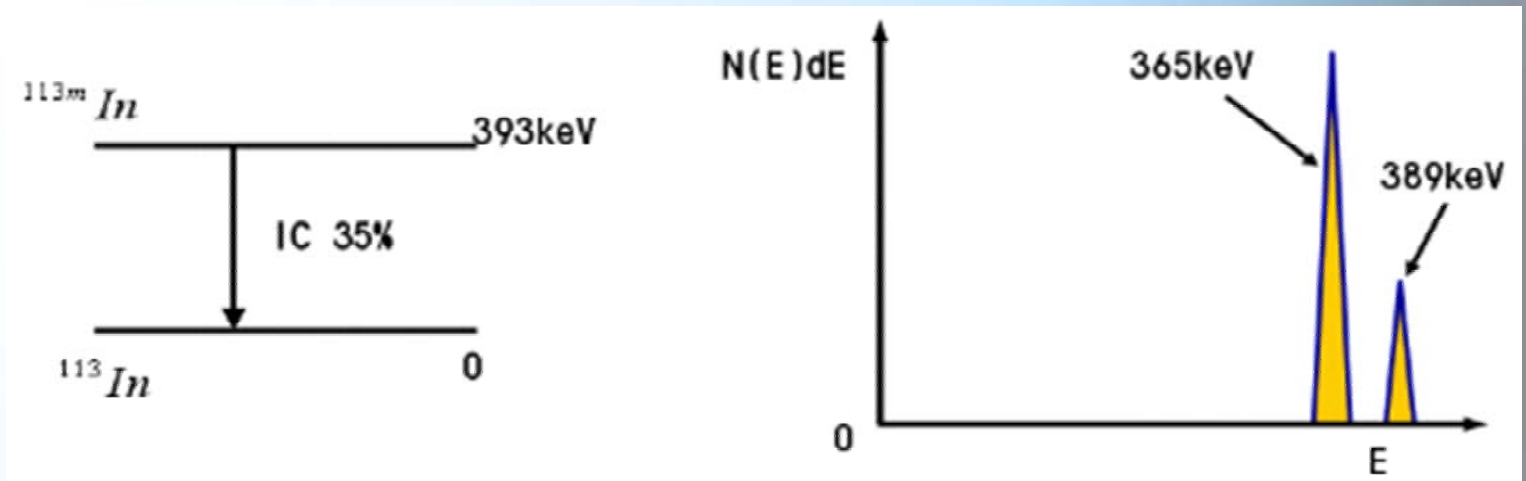
n_{ce} : 매 천이당 방출되는 내부전환전자 수

n_{γ} : 매 천이당 방출되는 감마선의 수

$$E_{ce} = E' - E_b$$

K 각 결합에너지 : 28keV

L 각 결합에너지 : 5keV

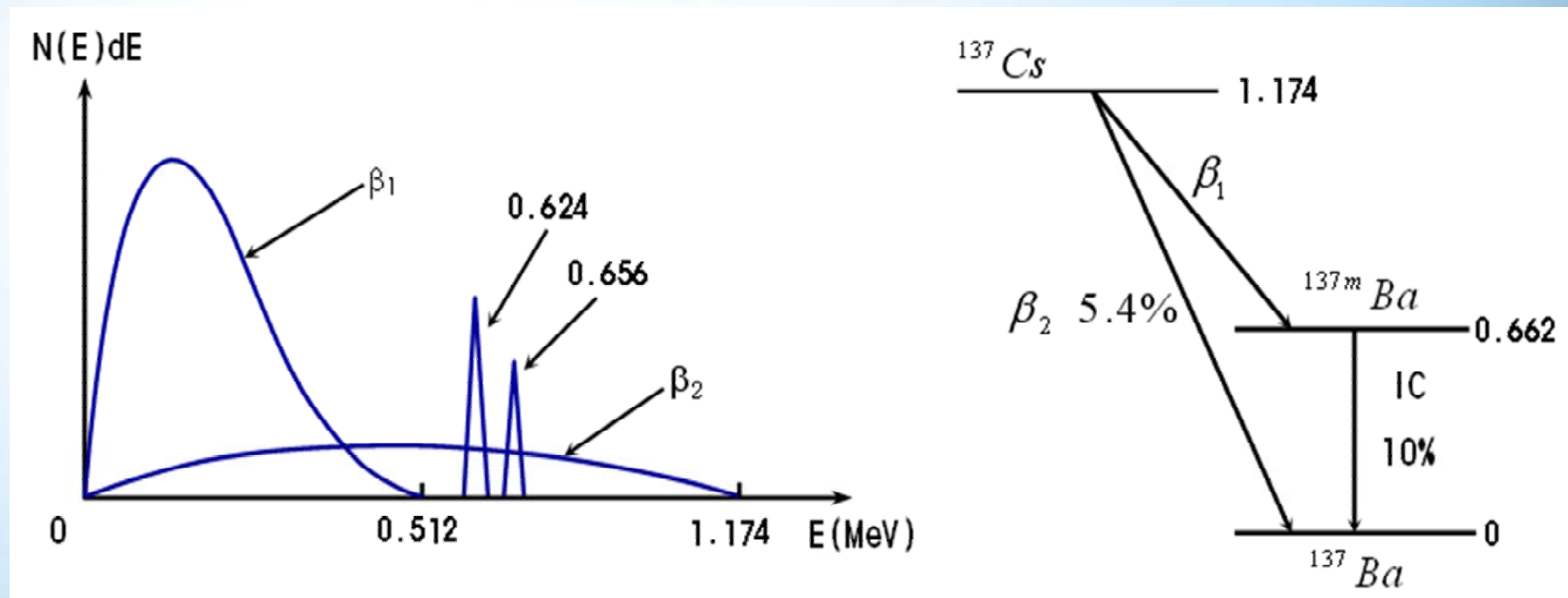


■ 내부전환의 붕괴도식 및 내부전환전자의 스펙트럼

전자선원

다. 오제전자(Auger electron)

- 오제전자의 발생과정은 내부전환전자와 유사
- 내부전환전자 : **핵의 여기 에너지**가 궤도 전장 전달
- 오제전자 : **원자의 여기 에너지**를 외곽 전자에 전달하여 이탈되는 전자
- 스펙트럼 : **단색에너지 (선스펙트럼)**
- 오제전자의 방출은 원자번호가 낮은 원자에서 발생

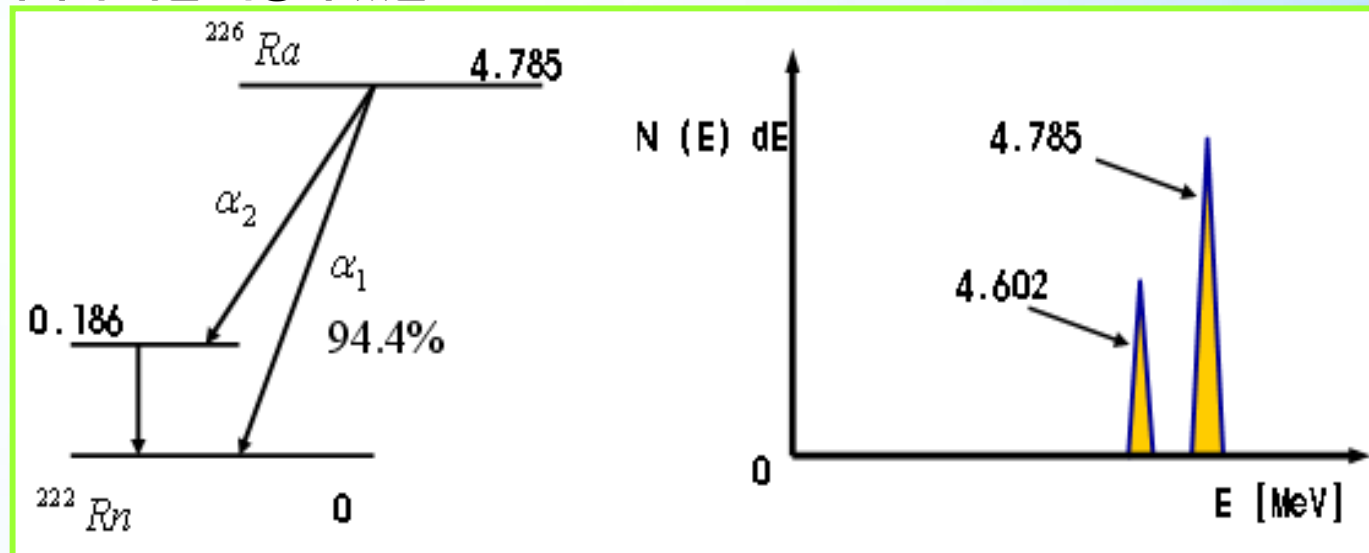


■ Cs-137에서 방출되는 전자의 에너지 스펙트럼과 붕괴도식

중 하 전 입 자

가. 알파붕괴

- 원자번호가 83번 이상인 핵종에서 주로 일어남. [^{148}Gd 3.18 MeV제외]
- 베타 붕괴와는 달리 알파입자가 상당한 무게를 가진 만큼 반도되는 핵도 상당한 에너지를 공유하게 되며 에너지와 운동량 보존
- 만약 딸 핵종의 기저상태 에너지로 가지 않고 에너지 E' 인 여기 상태로 천이하면 아래 그림과 같이 4.602MeV를 가진 알파선을 방출
- 반감기가 길면 에너지가 작은 특징이 있음



■ Ra-226의 붕괴도식과 알파에너지 스펙트럼.

나. 자발 핵분열

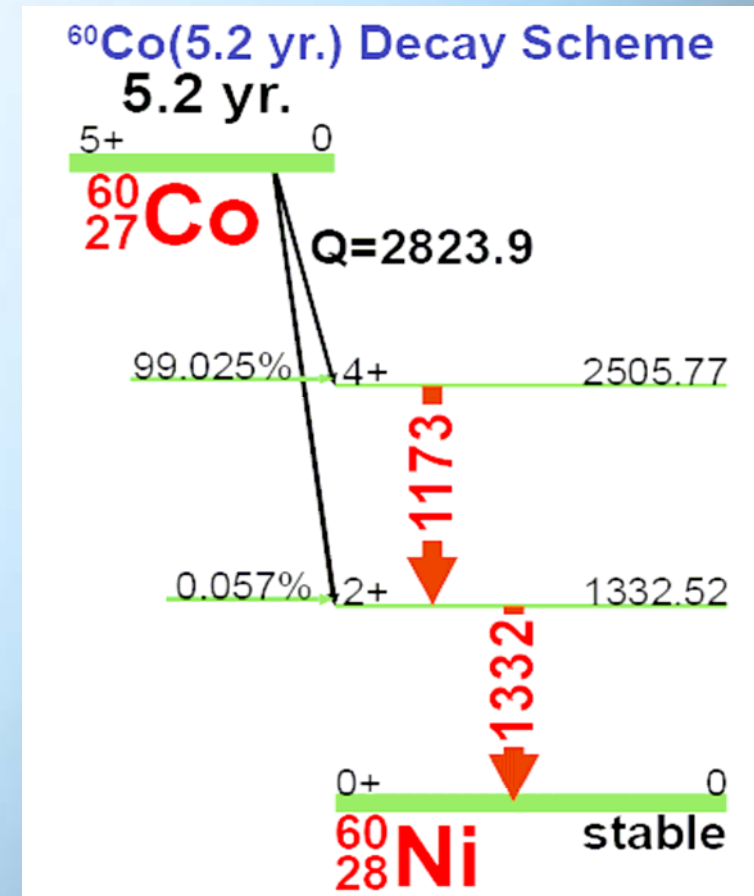
- 자발핵분열 핵종은 중하전 입자 및 중성자 선원으로 이용. (예 : Cf-252 , 반감기 2.65년, 주로 알파붕괴하며 3%만 자발핵분열을 일으킴)
- 우라늄보다 큰 핵종들은 대체로 자발 핵분열성이 있으며, 그 성질은 원자번호가 높아 질수록 커짐.

전자파 방사선원

가. 감마천이

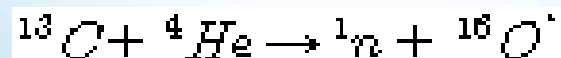
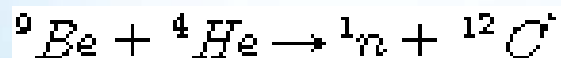
- 소수의 순수 베타 방출 핵종을 제외하고 알파, 베타 붕괴 후에도 여전히 여기 상태.
- 준안정상상태에 있는 핵은 전자파의 일종인 감마선을 방출하여 기저상태에 놓임.
- 고유한 **단색에너지 스펙트럼**.
- 감마선 분광분석을 통해 방사성물질에서 방출되는 감마선의 에너지를 측정함으로써 그 물질을 구성하는 핵종의 종류를 식별하고 방사능을 평가함.
- 일반적으로 방사성핵종에서 방출되는 감마선의 에너지는 3 MeV 이하.
- 예외적으로
N-16 : 6.13 MeV, 반감기 : 7.13초
Co-56 : 3.55 MeV, 반감기 : 77일

■ Co-60의 붕괴도식



나. 핵반응 감마선

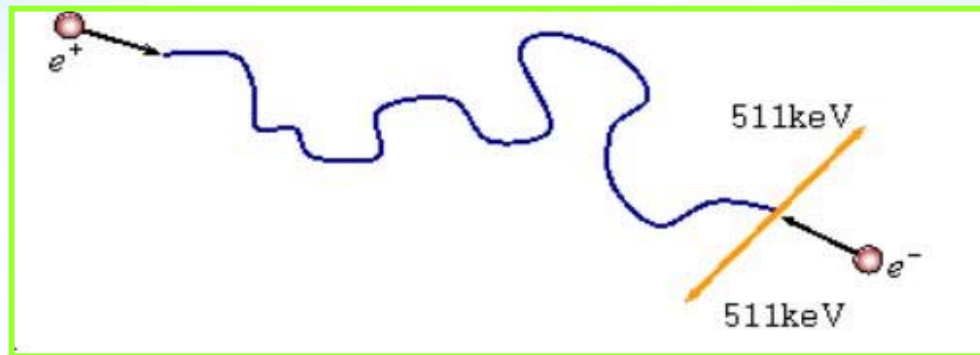
- 핵반응을 이용한 감마선원을 사용하는 경우는 드물다.
- ^9Be : 4.44 MeV, ^{13}C : 6.13 MeV
- 알파입자를 흡수시켜 핵반응을 일으키는 것은 효율이 낮음



전자파 방사선원

다. 소멸 감마선원

- 양전자 붕괴에서 방출된 양전자가 물질 내에서 감속되어 에너지가 거의 0에 도달하면 주위의 자유전자와 결합하여 소멸하면서 **0.511MeV**의 에너지를 갖는 **두 개의 광자** 방출.

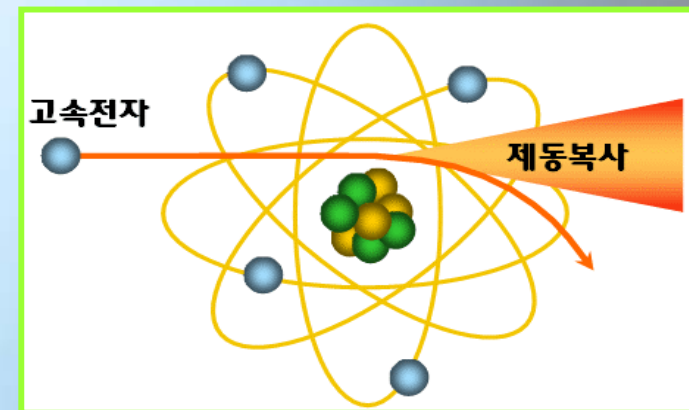


■ 소멸감마선

라. 제동복사

- 고속의 하전입자 특히 전자가 강한 전기장 내를 지날 때 필연적으로 방향이 바뀌며 감속을 받게 되는데 이 감속으로 인해 입자의 에너지 손실이 전자파의 형태로 발산되며 이것이 **제동복사선(bremsstrahlung)**임.
- 제동복사선 에너지 : 하전입자의 에너지, 전기장의 강도에 따라 유동적. **연속스펙트럼**
- 제동복사선은 비교적 높은 에너지의 베타를 방출하는 방사성물질(Sr-90 등)에서도 방출되지만, 전형적으로는 X선 발생장치에서 방출되는 X선의 대부분이 제동복사선임.
- X선 발생장치의 양극에서는 입사한 전자 에너지의 99%가 열로 전환
- 제동복사율 = $ZE/800$ [E : MeV , Z : 원자번호]

■ 제동복사선의 방출원리

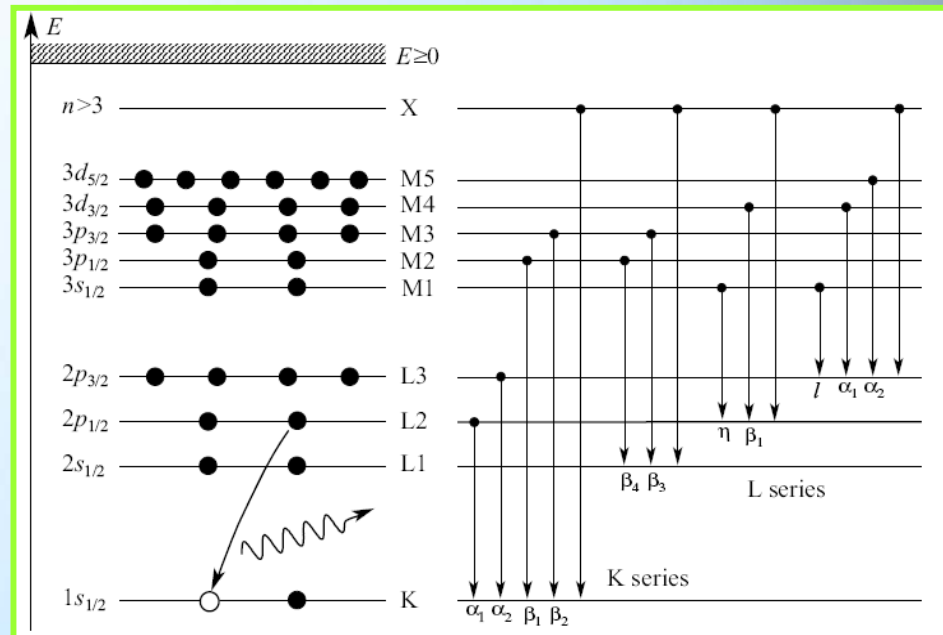
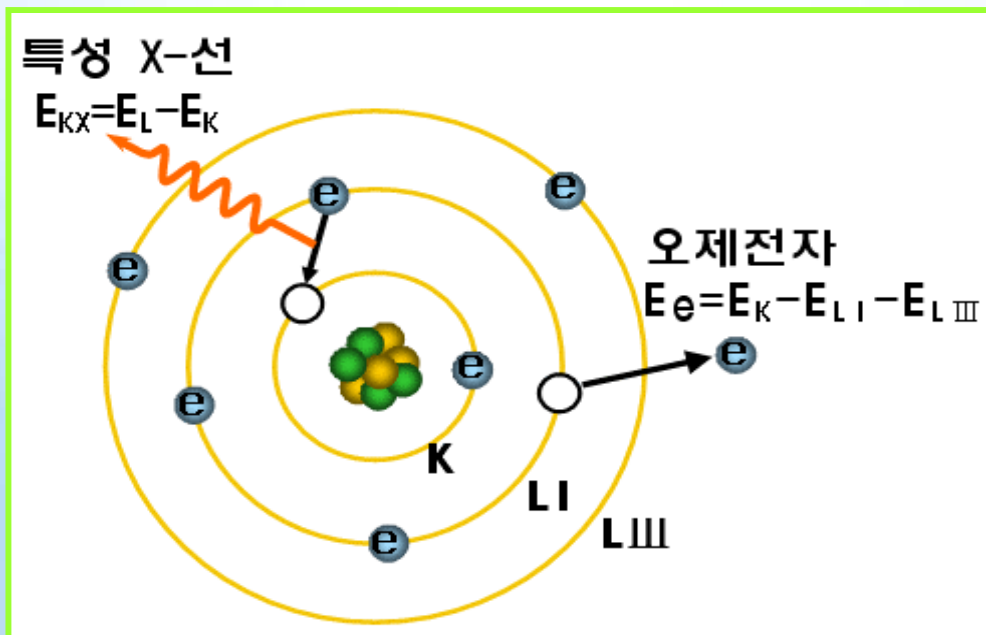


전자파 방사선원

마. 특성 X-선

- 전자포획, 내부전환, 광자와 전자의 충돌, 전자와 전자의 충돌 등 여러 원인에 의해 원자 궤도의 내각 전자에 공백이 생기면 외곽전자가 이를 메우면서 에너지 차이만큼 복사선을 방출하는데 이를 특성 X선이라 함.
- 특성 X선은 오제전자 방출과 경쟁적으로 일어남.
- 원자번호가 낮은 물질 \Rightarrow 오제전자, 원자번호가 높은 물질 \Rightarrow 특성 X-선
[K 각 방출을 기준으로 원자번호 50번 근처에서 교차가 일어남]
- 광자를 방출하는 분율을 형광수율 (fluorescent yield) 이라 함.
- 스펙트럼 : 단일에너지 [X선 회절분석, X선형광 분석 등 물질분석 수단으로 이용]
- 특성 X선의 에너지는 이를 발산하는 원자의 원자번호의 제곱에 근사적으로 비례 [Moseley의 법칙]

$$\sqrt{\nu} = 0.498 \times 10^8 (Z - 1)$$



■ 특성 X-선의 방출원리

방 사 화 학

방사평형

■ 방사평형

- 방사성핵종이 연속적으로 붕괴하고 있을 때 친핵종의 반감기가 딸핵종의 반감기보다 길 때에는 어떤 일정시간 경과 후 방사능과 원자수의 비가 일정해지는데 이를 방사평형이라 한다.



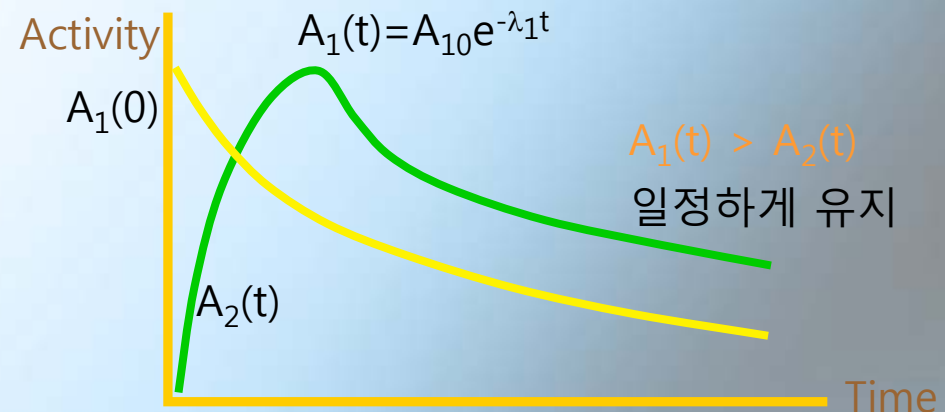
$$N_A = N_{A,0} e^{-\lambda_A t}$$

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

■ 일시평형 (과도평형, transit equilibrium)

$$\lambda_A > \lambda_B, \quad \lambda_A < \lambda_B$$

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



방사평형

■ 일시평형의 예

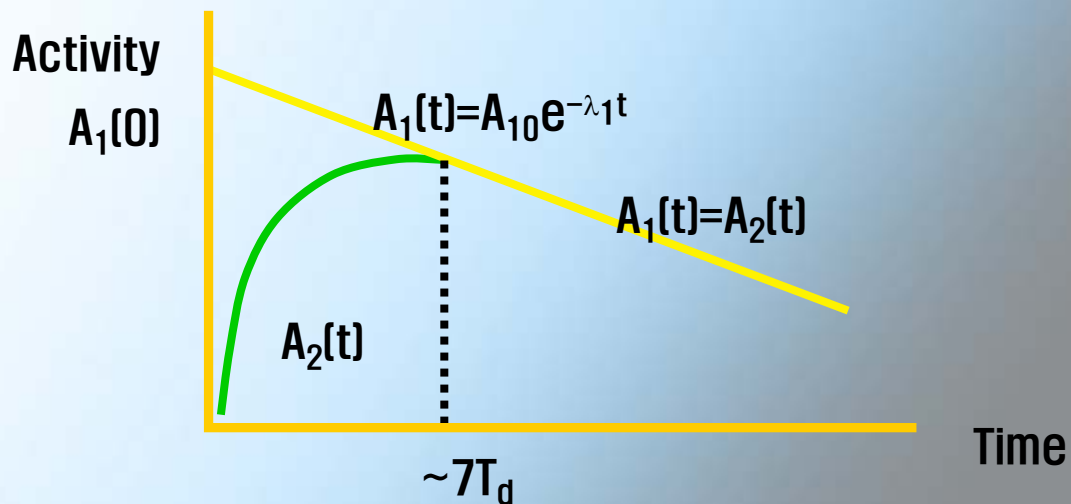


■ 영년평형 (영속평형, Secular equilibrium)

$$T_A \gg T_B, \quad \lambda_A \ll \lambda_B$$

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

◆ 영년평형의 예



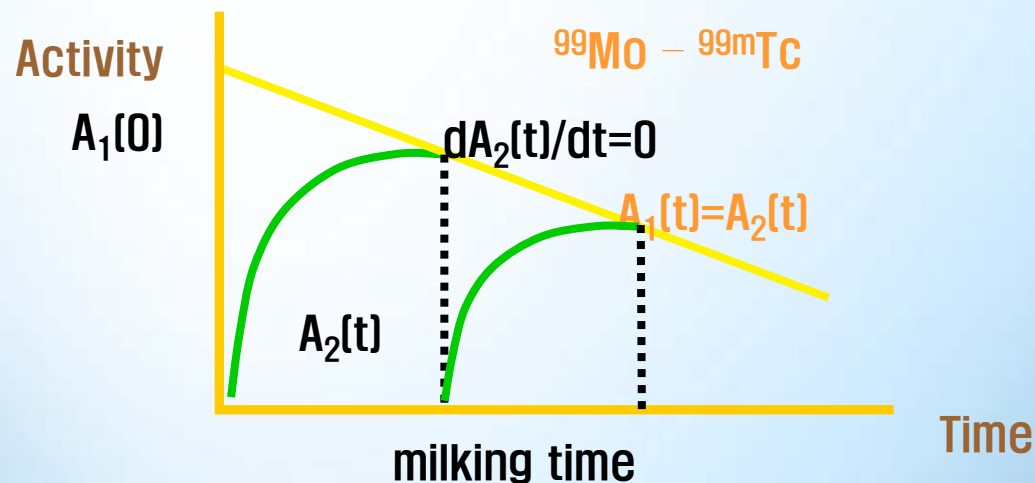
방사평형

– 밀킹 (milking)

- 방사평형에 있는 계에서 딸핵종을 화학분리로 채취하는 조작
- 무담체 RI를 원자로나 가속기로부터 먼 곳에서도 사용 가능
- 일정 시간이 경과하고 난 후 재차 딸핵종을 채취하여 사용 가능
- 희망하는 시간에 RI 획득
- 화학적, 방사화학적 순도 우수

- 딸핵종의 방사능이 최대가 되는 시간 T_{\max}
- $^{99}\text{Mo}-^{99\text{m}}\text{Tc}$ Generator

$$T_{\max} = \frac{\ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}}{\lambda_2 - \lambda_1}$$



방사화학적 핵종분리

■ 방사화학적 분리법

- 취급하는 RI의 양은 극미량이다.
- 단반감기 RI일수록 빨리 분리해야한다.
- 정량적 분리가 반드시 필요하지는 않다.
- 비방사능이 높은 상태로 분리되면 좋다.
- 분리과정 중 방사선차폐에 유념해야한다.

■ 담체 (carrier)

- RI를 쓰는 방사화학적 분리는 대상으로하는 물질량이 극미량이므로 흡착이나 콜로이드생성 현상이 일어나 재래식 분리법이 적용될 수 없는 경우가 발생하는데 이를 극복하기위한 방법으로 첨가하는 물질을 담체라고 함

■ 무담체 (carrier-free)

- 담체가 가해지거나 포함되지 않은 방사성 동위원소

방사화학적 핵종분리

- 동위원소담체 (isotope carrier)

- 화학분리시 목적으로하는 방사성핵종의 안정 동위원소를 담체로써 첨가

- 담체의 종류

- 유지담체 (hold-back carrier)

- 어떤 방사성원소가 다른 원소와함께 공침되거나 다른 원소에 수반되어 가는것을 피하기 위해 방사성원소에 가하는 비방사성동위원소

- 스캐벤저 (scavenger)

- 목적하는 방사성원소를 모액중에 남기고 다른 방해원소들을 공침, 흡착 등으로 제거할 목적으로 가하는 담체

- 포집체 (collector)

- 여러 방사성원소가 혼합된 용액이거나 희박한 한가지 방사성원소 용액에서 목적원소만을 직접적으로 포집하거나 농축할 목적으로 가하는 담체

방사화학적 핵종분리

■ 침전법

- 분리할 방사성핵종의 용액에 적당한 담체를 가하여 침전반응을 이용하여 분리하는 방법

■ 공침법

- 침전법의 한가지이며 목적하는 방사성핵종을 침전쪽에 가도록 하는 방법
 - 1단계 : 목적 방사성핵종과는 비동위원소담체에 해당하는 "공침제"를 가하여 목적 방사성핵종을 공침시켜 분리
 - 2단계 : 담체(공침제)를 목적 핵종에서부터 분리 · 제거

■ 용액잔류법

- 침전법과는 반대로 목적하는 방사성핵종을 용액에 남도록 하고 다른 방사성핵종은 침전으로 제거하는 방법

■ 용매추출법

- 각종의 원소가 포함되지 않은 혼합시료에 대해 두 섞이지 않는 분배계수 차이를 이용하여 용매로 추출 · 분리하는 방법

방사화학적 핵종분리

■ 용출법

- 어떤 용액 또는 용매에 대하여 표적물질 또는 모체원소의 염류가 불용성이고 목적으로 하는 방사성원소가 가용성일 경우 이 용액 또는 용매에 의하여 목적으로 하는 방사성동위원소만이 씻겨 내리는 방법
 - 장점 : 단수명 방사성핵종의 제조에 편리하게 이용
 - 단점 : 다른 불순물 핵종도 일부 녹아 들어갈 수 있음

■ 이온교환 수지법

- 이온교환수지에 의한 원소의 분리 · 농축하는 방법
 - 장점 : 조작이 단순
 - 단점 : 시간이 걸리며, 방사선이 강할 경우에는 이온교환수지가 분해됨

■ 전기화학적 분리

■ 치환법

- 목적으로 하는 동위원소를 갖는 용액에 이온화경향이 큰 금속을 투입하여 그것보다 이온화경향이 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

방사성 표지화합물 제조

■ 방사성 표지화합물

■ 방사성 표지화합물의 정의

- 어떤 화합물의 어느 한 원자나 원다단을 안정동위원소(SI)나 방사성동위원소(RI)로 바꾸어 넣은 화합물

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

■ 방사성 표지화합물의 필요조건

- 표지 후에도 원래의 화학적 성질이 보존되어야한다
- 표지위치를 알 수 있어야 하며 추적자로 이용하는 동안 안정되어야한다
- 도입한 RI의 반감기와 에너지가 적당하여야한다
- 불완전표지화합물을 생체에 사용하는경우 독성을 나타내거나 전혀 다른 생물학적 거동을 해서는 안된다.

방사성 표지화합물 제조

■ RI 선택상 고려해야 할 사항

- 방사선의 종류와 에너지, 비방사능
- 반감기 및 사용시간
- 화학형과 화학적 특성
- 라디오콜로이드
- 방사선 효과, 동위원소 효과, 동위원소 교환반응

■ 불안정성

- 1차 내부효과 : 방사성핵종의 붕괴에 의한 자기분해
- 1차 외부효과 : 붕괴시 방출되는 방사선에너지가 표지화 분자 자신 또는 다른 표지화합물 분해
- 2차 방사선효과 : 1차 방사선에 의한 활성종에 의해 표지화합물 분해
- 화학적 분해효과 : 일반 화학반응에 의한 분해

방사성 표지화합물 제조

■ 방사성 표지화합물의 보관요령

- carrier를 가하여 비방사능을 낮추어 보관
- 영하 40℃ 이하의 저온으로 보관
- 활성종의 포착제를 가하여 희석, 보관
- 진공으로 하거나 불활성기체를 충전하여 보관
- 수분, 산소를 제거하여 보관

■ 무담체(carrier free)의 단점

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

방사성 표지화합물 제조

■ 방사성 표지화합물의 일반적인 제법

■ 화학적 합성법

- 화학반응을 수단계에 걸쳐 일으키게 하여 RI를 도입하는 방법
- 장점 : 표지위치가 확실하다.
- 단점 : 다단계의 미량합성이어서 복잡하다.

■ 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.

방사성 표지화합물 제조

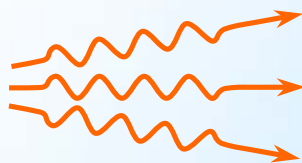
■ 동위원소 교환법

- 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.

■ 반도 표지법

- 원자로에서 중성자 조사를 함으로써 핵반응을 일으키게 하고 생성되는 R의 반도에너지로 표지반응을 시키는 방법
- 장점 : 원자로를 이용하여 직접 표지화합물을 얻을 수 있다.
- 단점 : 중성자조사로 인한 피표지물질의 분해나 부반응으로 인하여 낮은 비방사능의 표지화합물을 얻게된다.

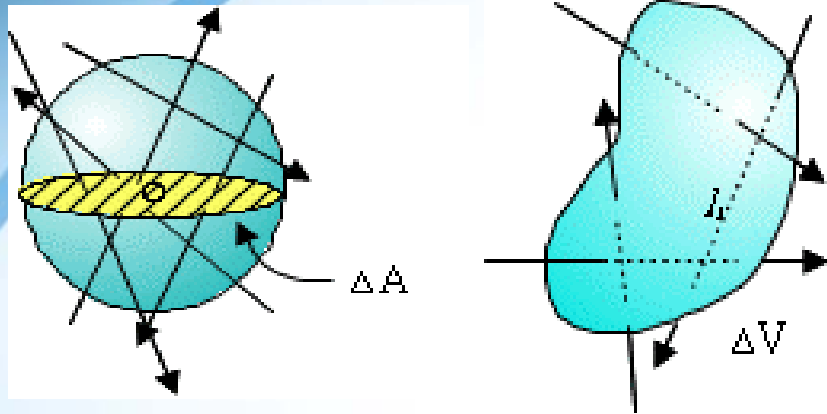
방사선량



Fluence / Energy fluence

■ 플루언스(fluence; ϕ) : 일정한 시간 동안 한 점을 중심으로 한 단면적 ΔA 인 가상의 구면을 지나는 입자의 수 ΔN

■ 플루언스율(fluence rate; Φ) : 플루언스의 시간률



$$\phi \equiv \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta A} = \frac{dN}{dA} [m^{-2}, cm^{-2}]$$

$$\phi \equiv \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum l_i}{\Delta V} [m^{-2}, cm^{-2}]$$

$$\Phi \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = \frac{d\phi}{dt} = \frac{d^2 N}{dt dA} [m^{-2} s^{-1}]$$

■ 에너지 플루언스(energy fluence; ψ) 및 에너지 플루언스율(energy fluence rate; Ψ)

■ 방사에너지(radiant energy; R) : 방출, 전달 또는 흡수된 에너지(정지에너지 포함)의 양

$$\psi \equiv \frac{\Delta R}{\Delta A} [Jm^{-2}, MeVm^{-2}]$$

$$\Psi \equiv \frac{\Delta \psi}{\Delta A} [Js^{-1}m^{-2}, Wm^{-2}]$$

조사선량 [Exposure] X

- 정의 : 에너지 흡수량을 [J]로 표현하지 공기의 양과 단위질량 당 방사선에 의해 생성되는 전하량
 - 방사선 피폭 가능 준위를 나타내는 양으로 사용하며 **3MeV 이하의 광자**(감마선, X선)에 대해서만 사용
 - 단위 : R [rontgen], $1 R = 2.58 \times 10^{-4} C/kg$
 - 조사선량은 처음으로 사용된 선량으로서 **사람이 피폭한 선량을 나타내는 것이 아니라 공간상의 어떤 위치에서 방사선장의 강도를 나타내는 데에 사용되는 양**
 - 조사선량은 **공기 중**에서 방사선에 의해 얼마나 많은 전리전하가 생성 되는가를 평가하는 양
 - 1R : 표준상태의 공기 $1cm^3$ 인 $0.001293g$ 을 전리하여 $1esu$ 의 전하를 생성하는 엑스선 또는 감마선의 양

$$X = \frac{dQ}{dm} [C/kg] \quad \dot{X} = \frac{dX}{dt} [C/kg \cdot sec]$$

■ 공기 중

$$1C/kg = 1 \frac{C}{kg(air)} \times \frac{1(ion)}{1.6 \times 10^{-19} C} \times \frac{34ev}{ion} \times 1.6 \times 10^{-19} \frac{J}{ev} \times 1 \frac{Gy}{J/kg} = 34Gy$$

$$1R = 2.58 \times 10^{-4} \frac{C}{kg} \times 34 \frac{Gy}{C/kg} = 0.00877 Gy$$

■ 흡수선량과 조사선량과의 관계

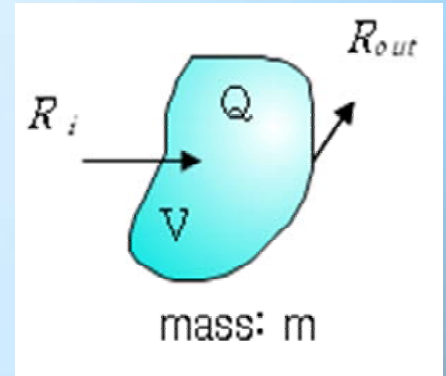
$$D[cGy] = 0.876 \times X[R] \times \frac{(u_{en/\rho})_{tis}}{(u_{en/\rho})_{air}}$$

흡수선량 [Absorbed dose] D

■ 방사선피폭 : 에너지의 흐름인 방사선의 경로에 물체(인체)가 있어 방사선의 에너지가 물체에 흡수

■ 부여 에너지(energy imparted)

$$\varepsilon = (R_{in})_u - (R_{out})_u + (R_{in})_c - (R_{out})_c + \sum Q$$



$(R_{in})_u, (R_{in})_c$: 관심 체적속으로 들어온 모든 하전 입자와 비하전입자들의 에너지의 합

$(R_{out})_u, (R_{out})_c$: 관심 체적을 떠난 모든 하전입자와 비하전입자들의 에너지의 합

$\sum Q$: 체적내 정지질량에너지의 총 변화 (합이 +부호 이면 감소를 나타내고, -부호이면 증가 [J])

■ 흡수선량(D) : 물체 단위질량 당 흡수된 방사선의 평균에너지, 단위 1 Gy(gray) = 1 J/kg

■ 흡수선량을 : 흡수선량을 시간으로 나눈 몫이며, 미소시간 동안에 흡수선량의 변화량임
단위 - Gy/sec = 1 J/kg s

■ 장기선량(organ dose) : 흡수선량의 평가 대상체적을 확장하여 하나의 장기나 조직에 대해 평균한 흡수선량, 여기서 점자 T는 장기조직(tissue)을 나타냄

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm} \quad [J/Kg] \quad \dot{D} = \frac{dD}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{d\varepsilon}{dm} \right) \quad D_T = \frac{\varepsilon_T}{m_T}$$

커마 [kerma] K

- 정의 : 단위 질량당 방출된 **운동에너지(kinetic energy released per unit mass)**의 약어로 만든 물리량
 - 커마의 단위로 J/kg의 특별 명칭은 Gy로 흡수선량과 같음
 - E_{tr} 은 **비하전 방사선에 의해 만들어진 하전입자의 초기 운동에너지의 합으로 제한적으로 정의** 되는 점이 흡수선량과 다름
 - 커마는 전기적으로 중성 방사선인 **광자(감마선, X선)나 중성자 등에 적용**
 - 2차 하전입자의 초기 운동에너지로 규정하므로 에너지의 양도 흡수선량과는 약간 차이가 있음

$$K = \frac{d\varepsilon_{tr}}{dm} \quad [J/Kg]$$

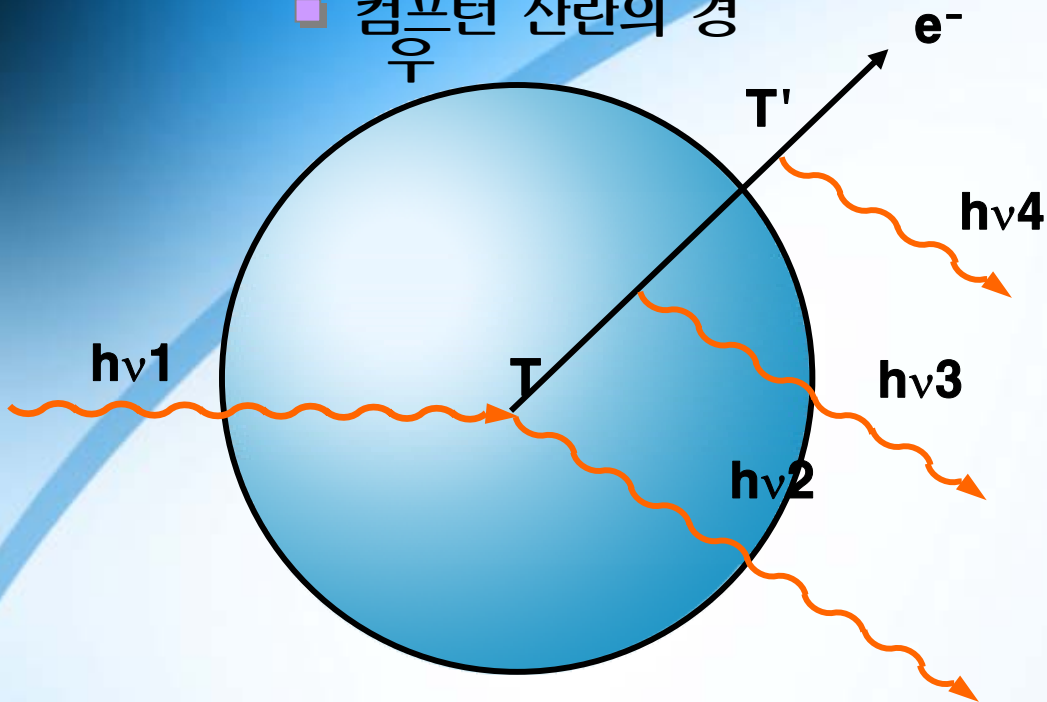
- $K = K_c$ (Collision Kerma) + K_r (Radiative Kerma)

$$K_c = \frac{d\varepsilon_{tr}^{net}}{dm} \quad K_r = \frac{dR_u^r}{dm}$$

- 흡수선량과 커마는 물질의 경계면에서 차이가 커지며 이들 곡선의 구체적 모양은 1차 방사선의 투과력(에너지)에 따라 차이가 있음

부여에너지와 전달에너지의 비교

■ 컴프턴 산란의 경우

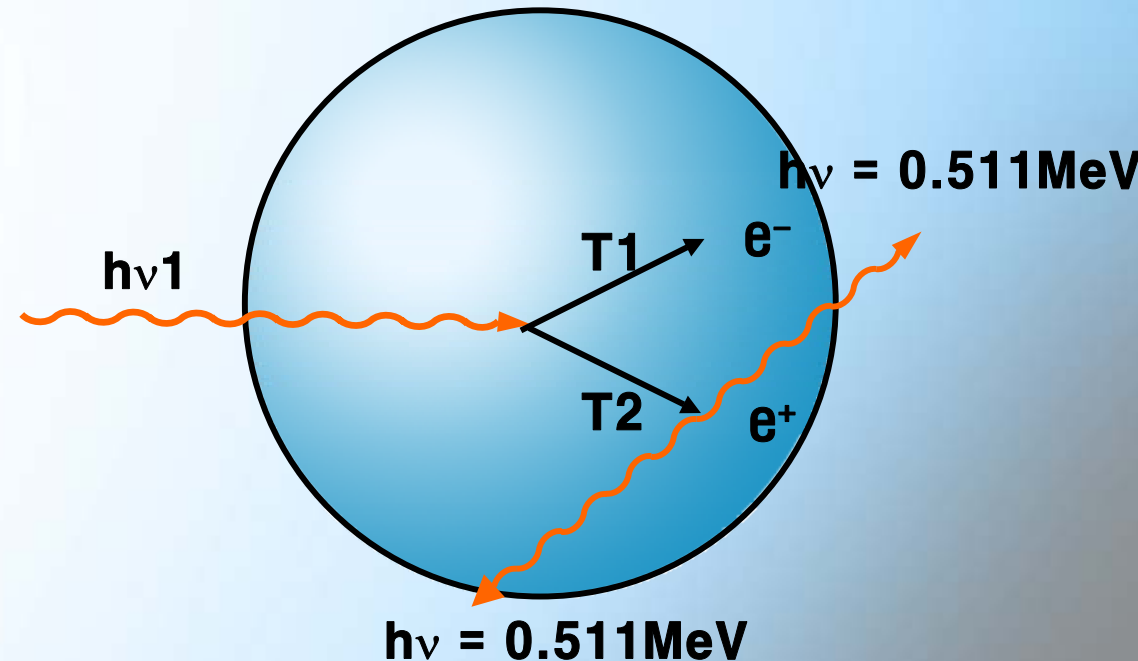


- $E = h\nu_1 - (h\nu_2 + h\nu_3 + T) + 0$

- $E_{tr} = h\nu_1 - h\nu_2 + 0 = T$

- $E_{tr}^n = h\nu_1 - h\nu_2 - (h\nu_3 + h\nu_4) + 0$
 $= T - (h\nu_3 + h\nu_4)$

■ 쌍생성의 경우



- 소멸감마선을 고려하지 않은 경우

- $E = E_{tr} = E_{tr}^n = h\nu_1 - 1.022 \text{ MeV} = T_1 + T_2$

- 소멸감마선을 고려한 경우

- $E = 0 - (1.022 + T_3) + h\nu_1 = T_1 + T_2 - T_3$

- $E_{tr} = 0 - 1.022 + h\nu_1 = T_1 + T_2$

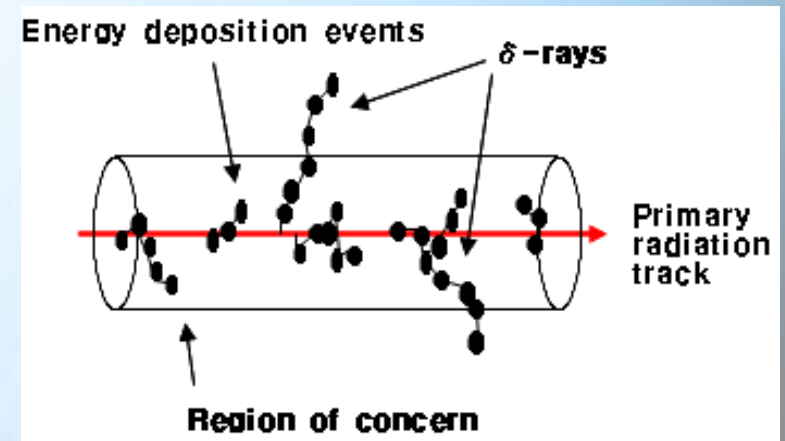
- $E_{tr}^n = 0 - 1.022 - T_3 + h\nu_1 = T_1 + T_2 - T_3$

선에너지전달 (LET)

- 정의 : 물질에 전달되는 에너지 중 2차 방사선 에너지 형태로 관심 있는 영역을 빠져나간 것을 제외한 에너지 전달량으로 정의 이때 관심영역을 빠져나가는 2차 방사선을 δ -ray라 부름
 - 생성된 2차 전자의 에너지가 일정한 값(cut-off energy) 이상이면 δ -ray로 간주하여 관심 체적내 에너지 전달량에서 배제
 - LET는 에너지의 국지 흡수량을 평가하는 선량계측 목적으로 정의
 - Δ 는 cut-off energy

$$LET_{\Delta} = \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\Delta}$$

$$LET_{\infty} = \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\infty} = \left(-\frac{dE}{dx}\right) : \text{stopping power}$$

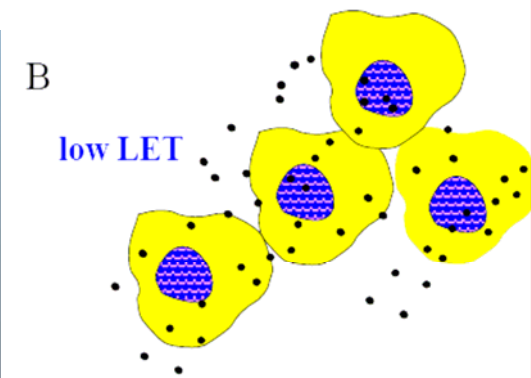
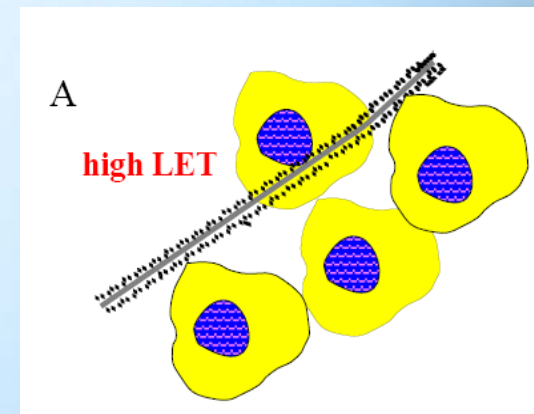


등가선량 [equivalent dose] H

■ 정의 : $H = D_R W_R$

- 여기서 D_R 은 방사선 R에 의한 조직 흡수선량이며 W_R 은 보정하는 상수로서 방사선가중치(radiation weighting factor)라 부름 (방사선의 LET, 다른 표현으로 방사선의 선질에 따라 생물학적 위해도가 다름)
- 등가선량 H의 단위도 흡수선량 D와 같은 J/kg이 기본 단위이나 흡수선량과 구분하기 위해 특별 명칭을 시버트 [Sv]로 함
- 방사선가중인자 (W_R) : 방사선이 인체에 전달하는 에너지의 부여에 따른 방사선장해를 고려하여 결정된 값

방사선의 종류 및 에너지	방사선가중인자(w_R)
광자(전에너지)	1
전자 및 뮤온(전에너지)	1
중성자, 에너지 < 10keV	5
10keV ~ 100keV	10
100keV ~ 2MeV	20
2MeV ~ 20MeV	10
> 20MeV	5
반도양자 이외의 양자	5
알파입자, 핵분열파편	20



유효선량 [Effective dose] E

■ 정의 : $E = \sum W_T H_T$

- 여기서 H_T 는 조직 T의 등가선량이며 W_T 는 그 조직의 조직가중치 임
- 유효선량의 기본 단위 : J/kg이 기본 단위이며, 특별 명칭으로 시버트 [Sv]를 사용
- 유효선량을 평가하기 위해서는 인체내 22개 조직에 대한 선량 분포를 알아야 하기 때문에 직접 측정하여 평가하는 것은 불가능. (물리량과 실용량을 사용하여 평가)
- 즉, 유효선량은 개인의 방사선 피폭에 따른 생물학적 현상들을 잘 설명하고 있고, **확률적 영향에 대한 평가 지표로서 권고된 값임**

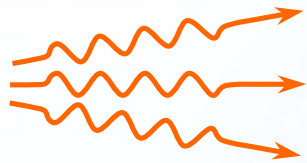
조직	W_T	조직	W_T	조직	W_T	조직	W_T
생식선 ¹⁾ (gonads)	0.2	적색골수 (red bone marrow)	0.12	방광 (bladder)	0.05	뼈표면 (bone surface)	0.01
		결장 (colon)	0.12	유방 ²⁾ (breast)	0.05	피부 (skin)	0.01
		위 (stomach)	0.12	간 (liver)	0.05		
		폐 (lung)	0.12	식도 (esophagus)	0.05	기타조직 ³⁾ (remainder)	0.05
				갑상선 (thyroid)	0.05		

1) 생식선의 높은 가중치는 암위험이 아니라 후손에 심각한 유전결함의 발생위험을 근거로 부여된 것임.

2) 유방의 위험은 남녀 평균치에서 도출된 것임. 남성에서는 유방암 위험이 무시할 수 있으므로 여성은 이 값의 2배에 해당하는 것으로 이해할 수 있음.

3) 이 표에 열거되지 않은 10개의 장기(부신, 뇌, 후두, 소장, 신장, 근육, 비장, 췌장, 흉선, 자궁)에 대해 각각 0.005의 가중치를 할당할 수 있음. 만약 **기타 조직 중 어떤 것이 표에 열거된 어느 조직보다도 높은 등가선량을 보이는 경우에는 이 조직에 0.05의 절반인 0.025를 할당하고 나머지 조직에 대해 0.025를 배분할 수 있음.**

방사선 생물학



생물학적 작용의 과정

가. 물리적 단계 [10^{-16} 초]

- 방사선이 입사되어 물분자 및 생물학적 분자와 반응(전리, 여기)하여 활성 기단을 생성

나. 화학적 단계 [$\sim 10^{-3}$ 초]

- 기단과 생물분자의 화학작용 및 직접변화

다. 생물학적 단계 [\sim 수분에서 시간 이상]

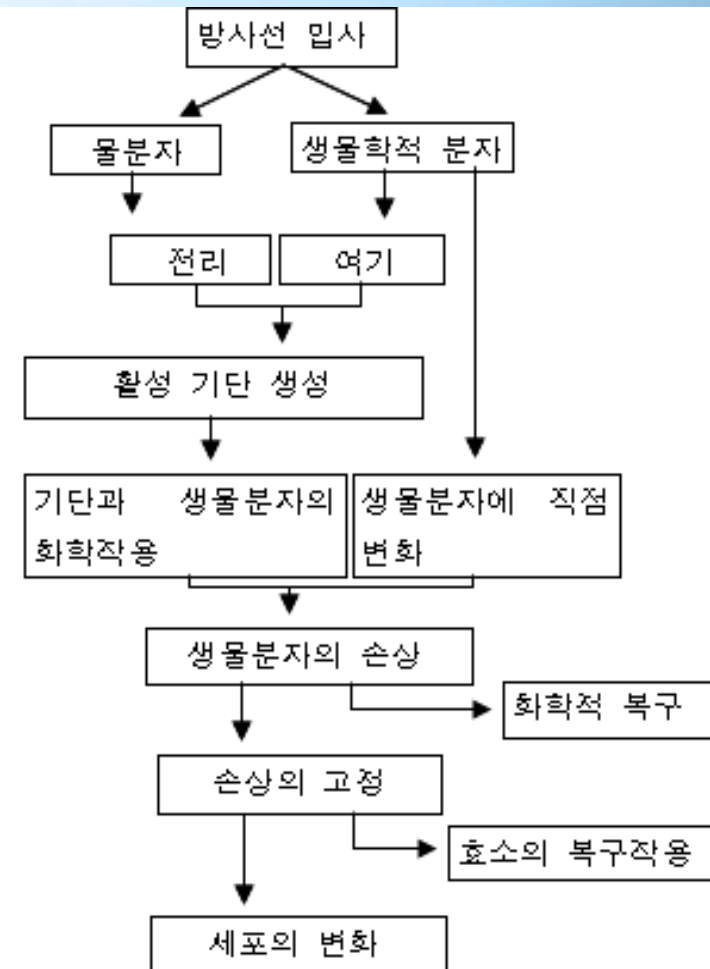
- 생화학 반응이 생체에 영향을 주고 생물계로 결과 증폭
- 각각의 증상에 따라 세포, 장기에 영향을 주는 형태로 변화
- 세포가 조기 사멸
- 세포분열이 중단되거나 지연
- 영구적인 변화가 일어나 자손세포에 전달

물리적 작용
단계
(10^{-16} s)

화학적 작용
단계
($\sim 10^{-3}$ s)

생화학적 작용
단계
(분 단위)

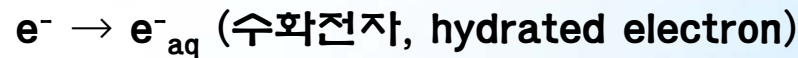
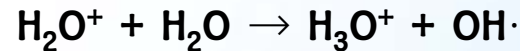
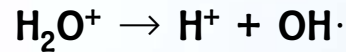
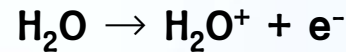
생물학적 작용
단계
(시간 이상)



생물학적 작용단계

■ 라디칼 형성(화학적 단계)

- 인체는 약 70%가 물로 구성되어 있고 물 분자는 방사선에 의해 분해되고 이어서 화학적 변화를 거치는 반응이 일어남.

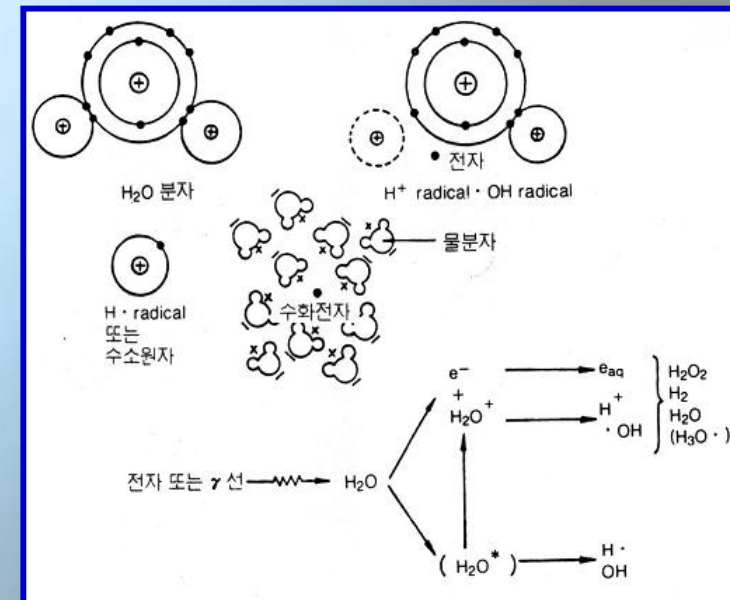


- 수화전자: 물 분자의 전기적 극성으로 인해 정지상태에 가까운 자유전자를 중심으로 물 분자들이 에워싼 형태

■ G Value : 흡수된 방사선 에너지 100eV 당 변화의 수

- 물의 방사선분해에 의한 생성물 및 G 값

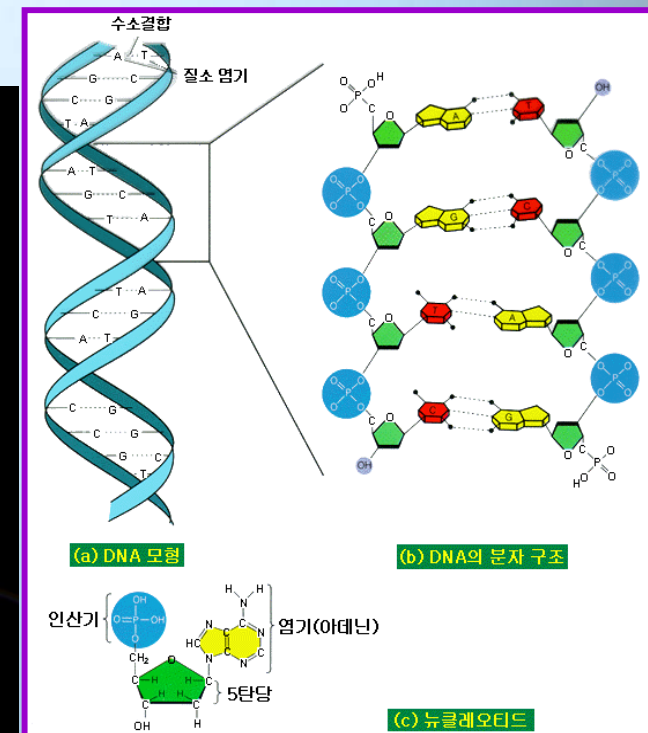
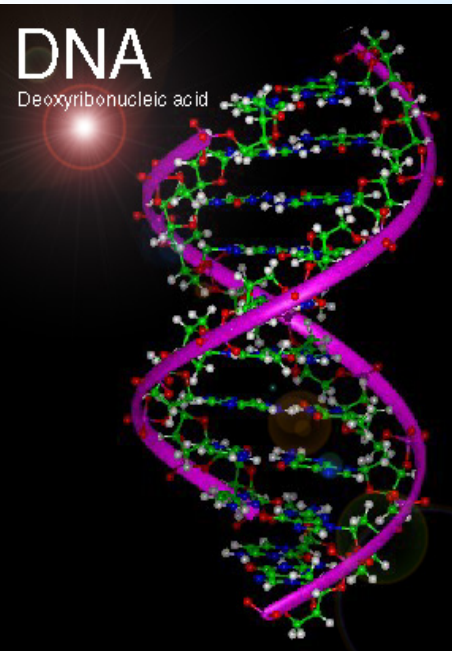
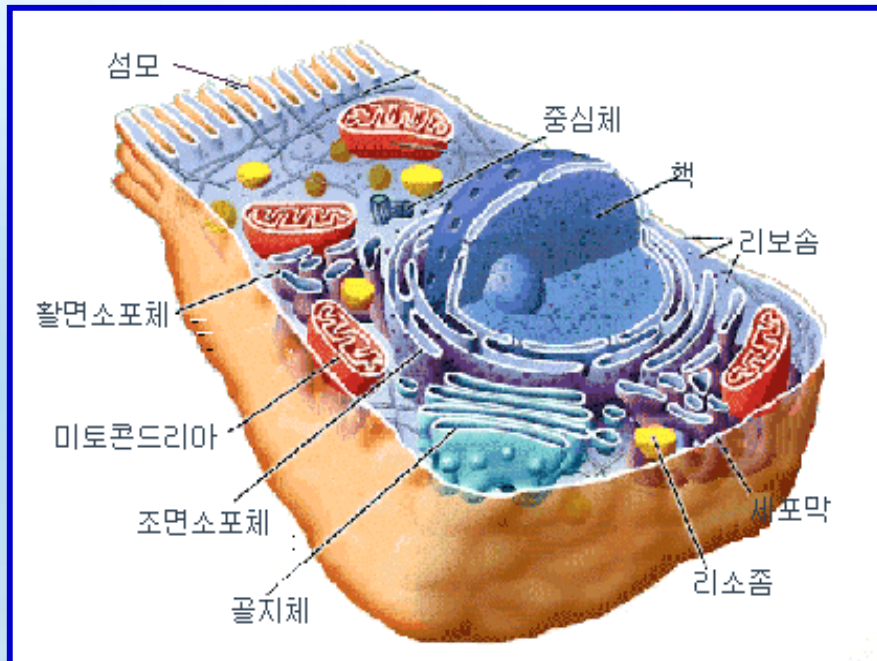
Products	G value	Products	G value
e_{aq}^-	2.7	H_2	0.45
$\text{H}\cdot$	0.55	H_2O_2	0.71
$\text{OH}\cdot$	2.7	H_3O^+	2.7



세포와 구성성분

■ 세포와 DNA

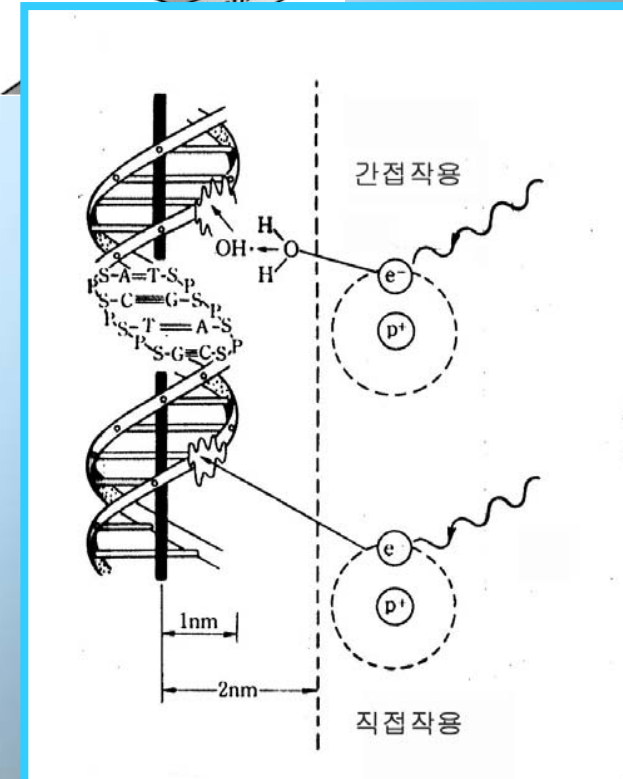
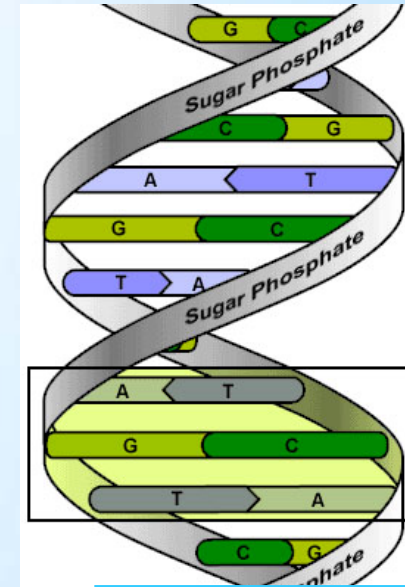
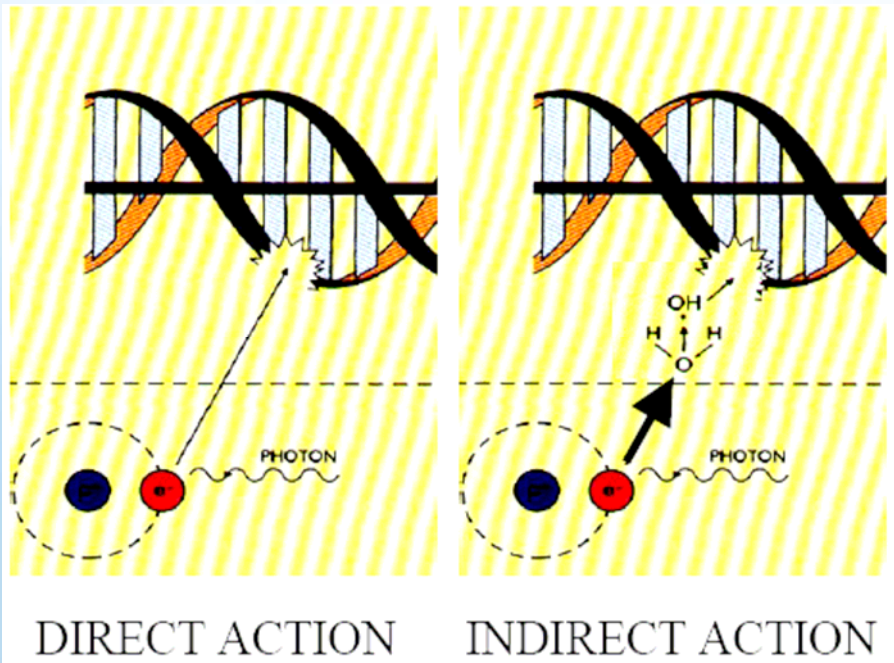
- 인간의 성인은 약 5×10^{13} 개의 세포로 구성
- 작은 조직도 수십억개 이상의 세포로 구성
- DNA를 구성하는 염기 타이민(T), 아데닌(A), 구아닌(G), 사이토신(C)
- RNA에는 우라실(U)이 타이민을 대체
- 퓨린계열 : A, G
- 피리미딘 계열 : T, U, C
- 상보결합 : A-T, C-G



DNA손상과 복구

■ DNA손상 기전 : 직접작용, 간접작용

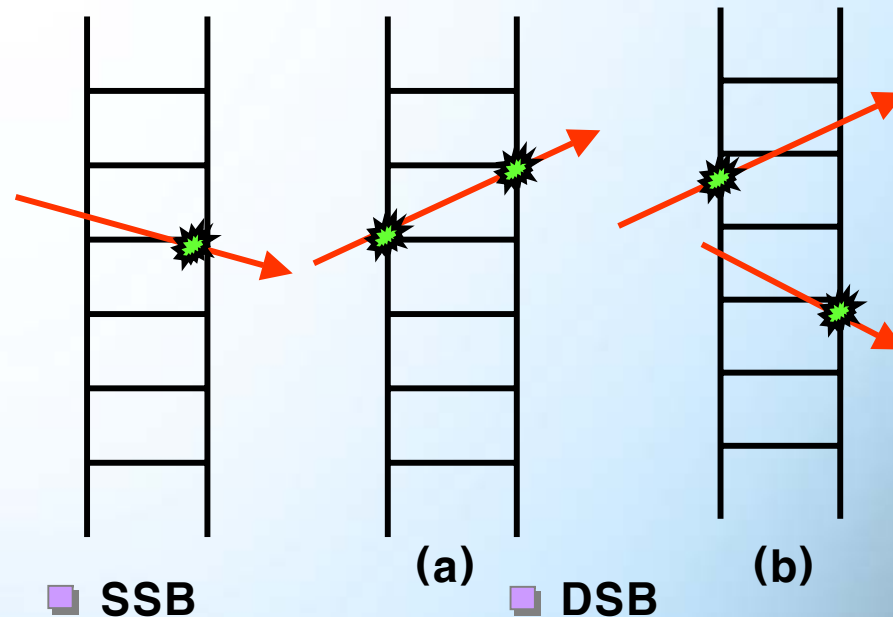
- **간접작용** : 인체의 대부분이 물로 구성되어 방사선에 의해 수화전자, 수소기, 수산화기, 수소가스 등의 기단을 형성하는데 이렇게 생성된 기단들이 이동하여 **DNA**분자와 화학반응을 할 수가 있으며 방사선에 의해 생성된 화학적 부산물이 **DNA**를 공격하여 손상을 입히는 경우
- **직접작용** : 방사선이 원자 물리적 작용에 의해 **DNA**를 직접 공격하고 손상시키는 것을 말함



손상의 유형

■ 한가닥절단(Single strand break)과 양가닥절단(double strand break)

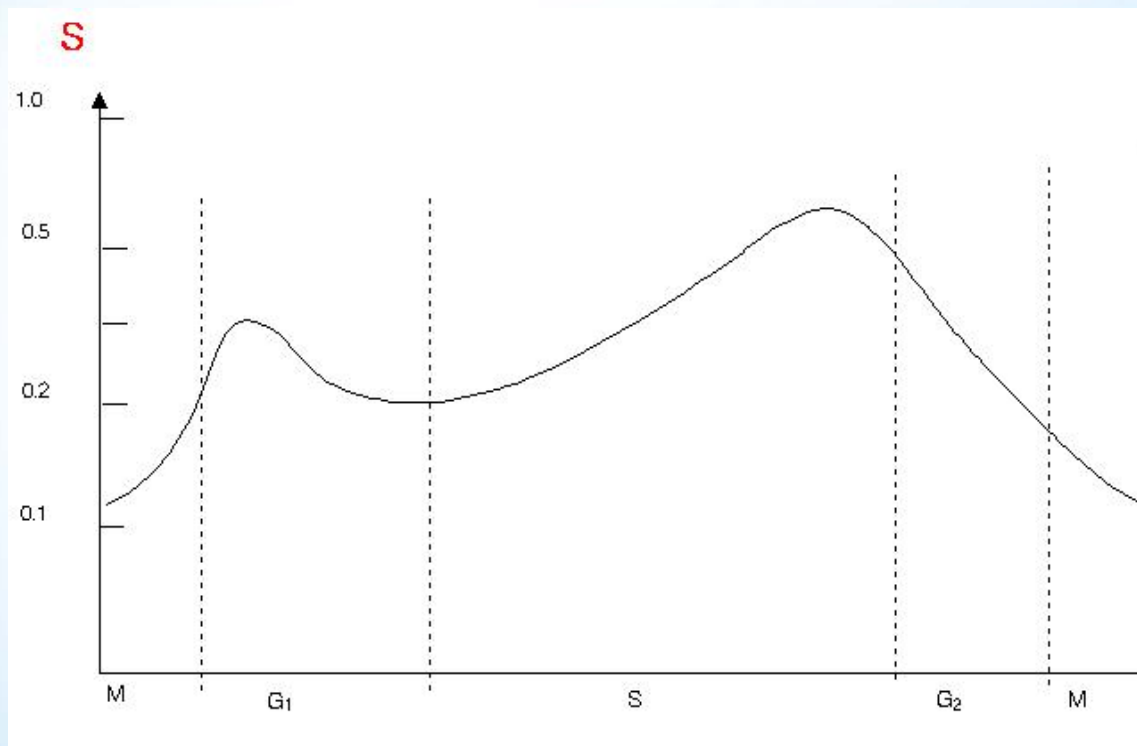
- SSB와 DSB가 일어나는 빈도는 **SSB가 압도적으로 많으며** 방사선이 하나의 SSB를 형성하는데 필요한 에너지는 **60~80eV(G 값으로 1.3~1.7)**이며, 하나의 DSB를 형성하는 데는 약 **1000~1800eV가 필요**
- DSB가 발생하는 방식은 하나의 원인에 의해 양가닥이 동시에 손상하는 경우(a)와 독립된 두 원인이 각각 SSB를 발생시키는데 두 SSB가 시간, 공간적으로 근접하여 DSB로 발전하는 경우(b)가 있음
- 염기들의 손상에 대한 **내성은 T>C>A>G** 순으로 강하게 나타남
- **피리미딘 염기(T,C)가 인접한 부분에** 자외선이 작용하면 이들이 연결고리를 형성하여 정상구조를 손상하며, 복제에서 다른 염기로 오인하도록 만들수 있음.



손상의 유형

■ 세포 분열주기의 방사선감수성

- 방사선 감수성은 분열기인 M기가 가장 민감
- M기는 세분하면 핵막이 사라지기 전까지의 전기(prophase), 방추사의 분리작용이 이루어지는 중기(metaphase), 염색체들이 분리되는 후기(anaphase), 분리된 핵막과 세포막이 형성되는 종기(telophase)로 구분



세포 분열주기에 따른 생존율 곡선 [인간의 섬유모세포에 5 Gy를 조사한 경우]

손상의 유형

■ Bergoni-Tribondeau의 법칙

- 1906년, “세포의 방사선 감수성이 세포의 증식활동에 비례하며 세포의 분화정도에 반비례한다”
- 대사율이 높은 세포가 방사선에 더 민감
- 세포가 성숙할수록 방사선에 강해지며, 일반적으로 성숙한 세포는 대사율이 낮음.
- 어린세포나 조직이 방사선에 더 민감
- 세포분열이 빈번하거나 성장이 빠른 조직은 방사선에 민감
- 줄기세포 또는 간세포는 방사선에 민감함.

■ 피폭의 조건이 미치는 영향

- 선량률 및 선량분할 효과

DDREF(선량선량률효과 인자 ; 선량률효과인자, 고선량효과인자)

IDR(선량을 역비례효과;

높은 LET방사선에 대해서는 선량이 같다면 선량률이 낮은 쪽이 더 큰 영향을 미칠수 있음-항상은 아님)

- 생물학적 효과비 (RBE)

$$RBE = \frac{\text{어떤 지정된 효과를 일으키는데 필요한 기준방사선의 흡수 선량}}{\text{동일한 효과를 일으키는데 필요한 비교방사선의 흡수선량}}$$

손상의 유형

■ 피폭의 환경이 미치는 영향

- 온도효과 : 온도의 증가에 따라 영향이 증가할 것으로 예상 단 인체 또는 생체 내에서는 큰 온도차이가 없음

- 산소효과

산소효과비(OER) : 산소를 포함하는 공기환경(D_{ox})과 산소가 없는 질소환경(D_{ao})에서 일정한 생존율에 이르게는데 필요한 선량의 비

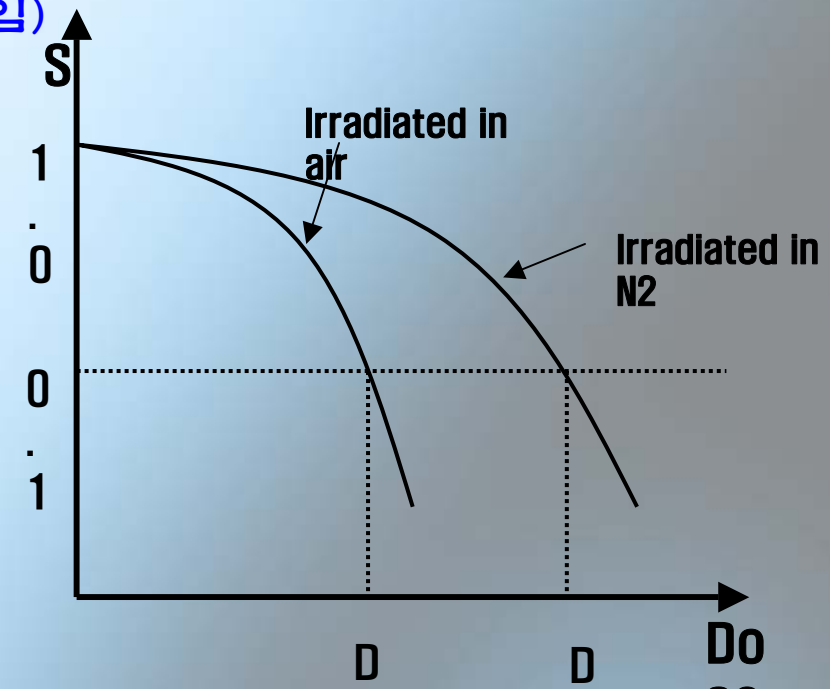
☞ 산소는 방사선 감수성을 증가시키는 역할을 하므로 OER은 1보다 큰 값을 가지며 2-3의 범위에 존재

포유동물 세포에 대한 실험은 200kEV/um에서는 OER이 1로 접근

산소 농도변화에 따른 OER의 변화에는 어떤 문턱농도가 있는 것으로 관찰됨.

- 방사선방호제(방사선영향을 완화) 및 증감제(방사선 영향을 높임)

$$OER = \frac{D_{ao}}{D_{ox}}$$



손상의 유형

■ 낮은 선량의 방사선영향 연구 : 구경꾼 효과, 유전자 불안정

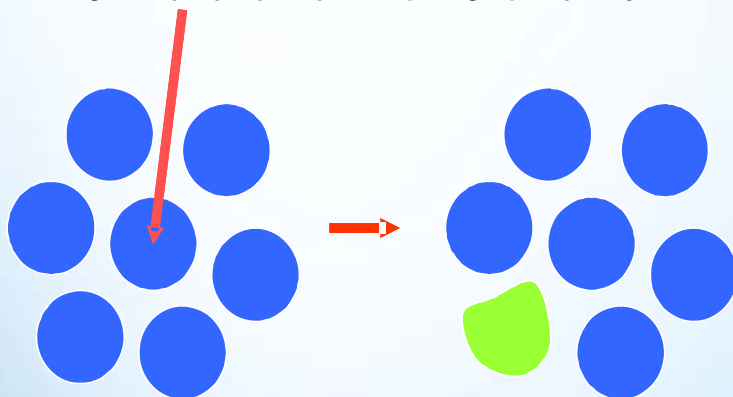
■ 구경꾼 효과(By-stander effect)

- 특정 세포가 방사선에 조사될 때 피폭을 받은 세포가 아니라 인근의 다른 세포에서 그 영향이 나타나는 현상
- 현상이 세포 상호간의 신호전달의 결과인지 피폭한 세포가 방출한 특정 물질에 의한 2차적 효과인지는 불확실

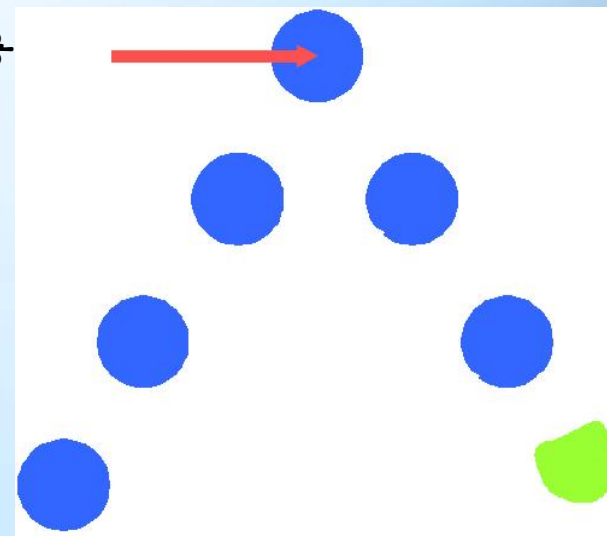
■ 유전자 불안정(genomic instability)

- 피폭한 세포나 바로 그후손 세포도 아닌 몇 대 후손 세포에서 뒤늦게 영향이 발현되는 현상
- 유전적 불안정이 후대에서 우발적으로 발현

☞ 구경꾼 효과는 피폭으로 인한 영향이 공간적으로 파급되는 현상이며, 유전자 불안정성은 영향이 시간적으로 전달되는 현상. 따라서 이들 두 경우가 복합적으로 작용



■ 구경꾼 효과

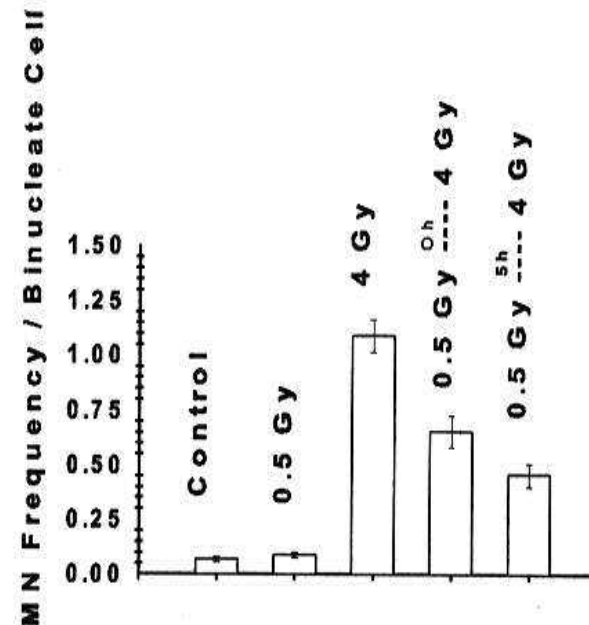
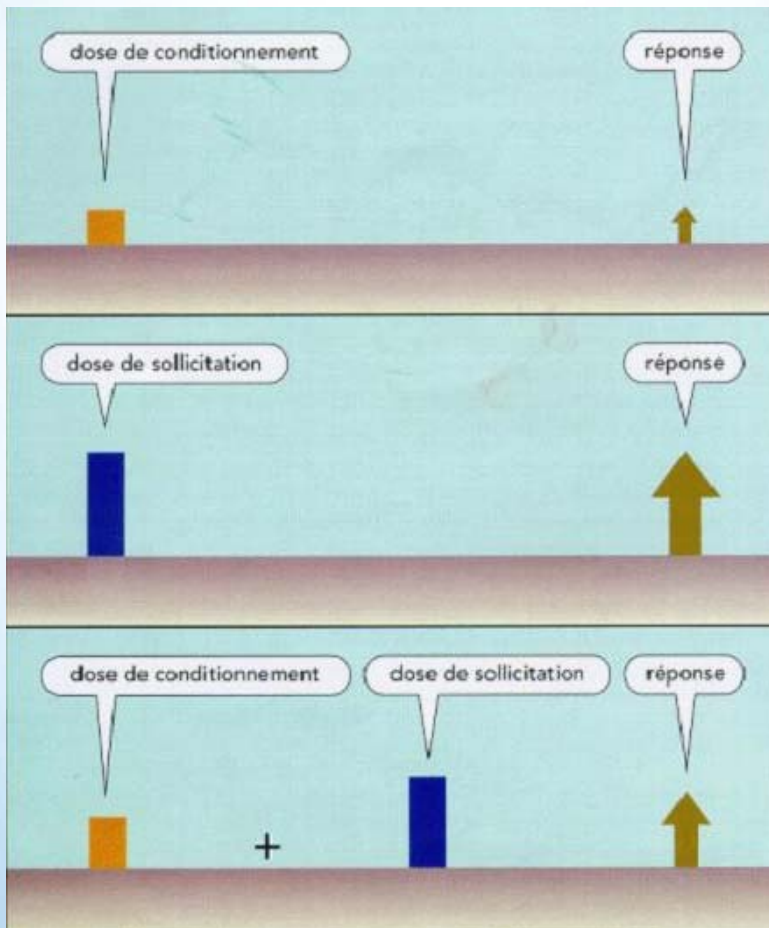


■ 유전자 불안정

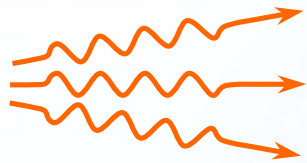
손상의 유형

■ 적응 반응(Adaptive Response)

- 생명체가 어떤 외부자극에 대해 효과적으로 대응하는 체계를 형성함으로써 반복되는 자극에 대해 원활히 반응하는 현상으로 즉, 방사선피폭이라는 하나의 자극에 의해 세포 생물학적 활성화가 유도(유도선량)되고 이에 따라 유해한 작용으로 부터 방어 능력이 향상
- 선량 분할 효과와는 차이가 있음

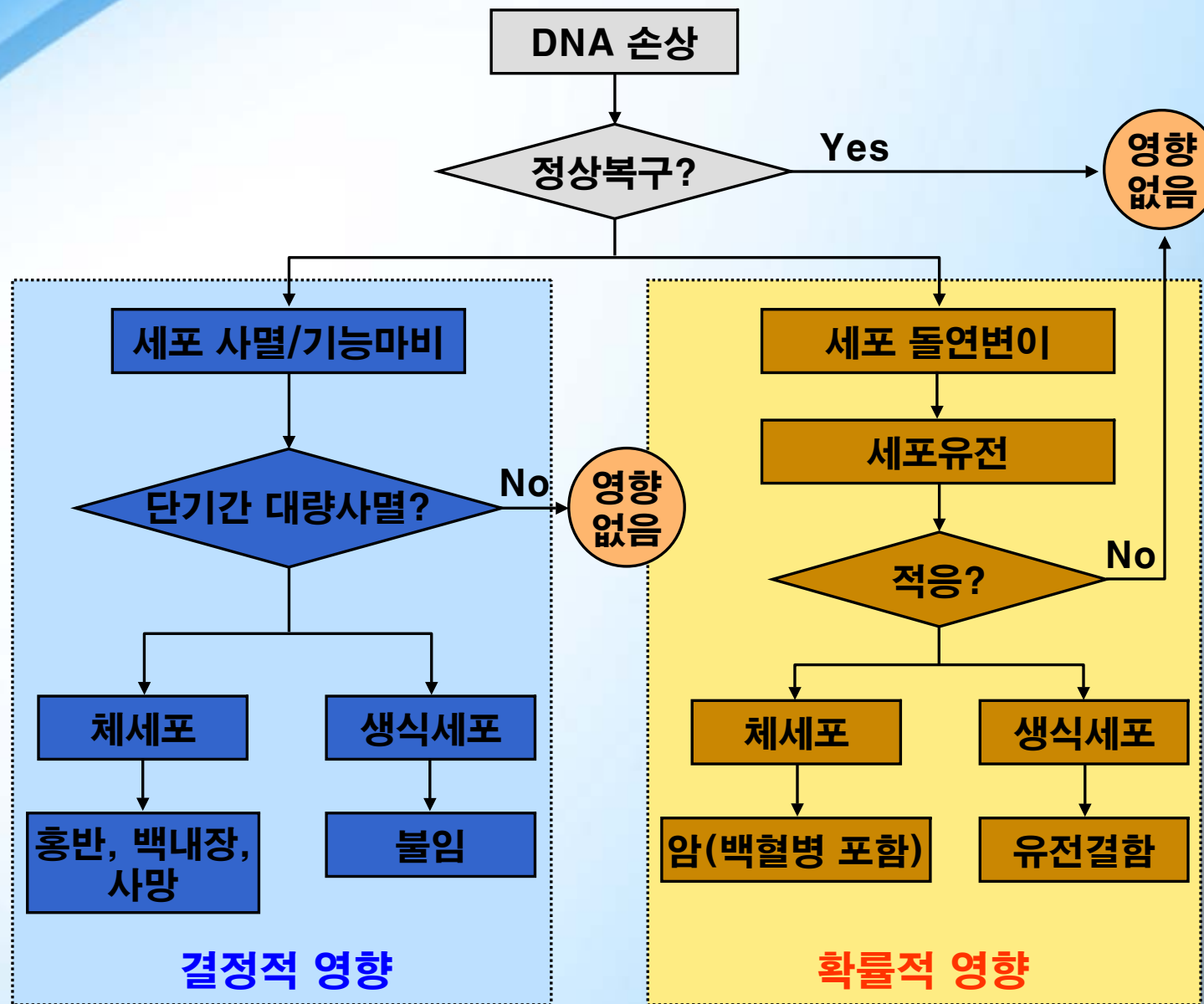


방사선의 인체영향



생물학적 영향의 발현개념

- 분자레벨에서 DNA손상으로 인한 세포의 사멸, 기능마비, 돌연변이로 나타남



■ 신체적 영향과 유전적 영향 방사선의 인체에 대한 영향

- 신체적 영향(피폭한 개체에서 나타남)

급성 : 일반전신 장애(중추신경사망), 조혈조직 손상(골수사망), 소화기 손상(위장관 사망), 불임, 수포, 홍반,

탈모

영향의
발현시기

만성 : 악성종양(백내장, 백혈병, 골육종, 갑상선암, 유방암, 폐암, 피부암), 재생불량성 빈혈, 수명단축,

국소적영향

- 유전적 영향 (피폭한 개체의 후손에게서 나타남) : 유전자 돌연변이, 염색체 이상

전초기
[수 시간]

잠복기
[수 일~수 주]

발병기
[수 주~수 개월]

사망/회복

방사선의 인체에 대한 영향

■ 결정적 영향 Vs. 확률적 영향

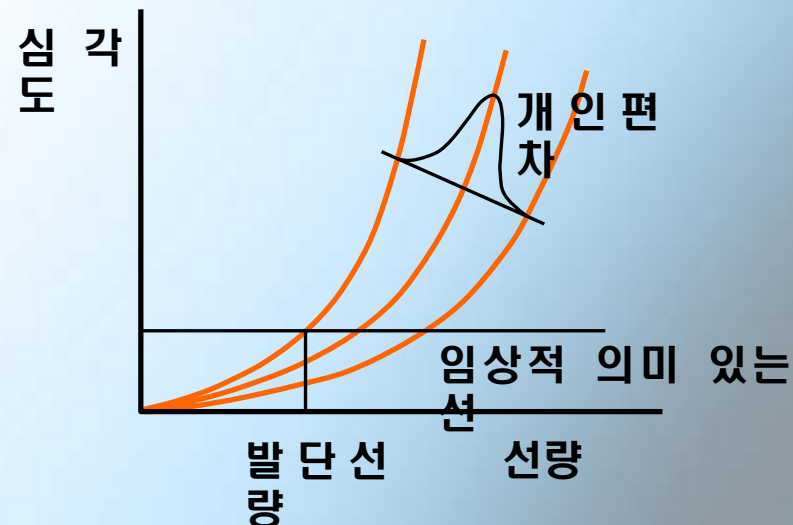
결정적 영향과 확률적 영향의 특성 비교

영향	결정적 영향(Deterministic effect)	확률적 영향(Stochastic effect)
발생기전	급성 고선량 피폭으로 인한 세포사 또는 급성반응에서 기인하는 영향	세포의 돌연변이와 세포유전의 결과로 발생 가능한 영향
인과관계	피폭과 영향 발현의 인과관계가 필연적임	영향의 발현을 우연성이 지배함
선량효과	증상의 심각도가 선량에 비례	영향의 발생확률이 선량에 비례
문턱선량 존재	영향의 정도가 임상학적으로 중요하지 않은 문턱선량 존재	문턱선량이 없이 선량에 비례하는 위험이 있는 것으로 가정
발현시기	대체로 급성(acute)	지발성(chronic)
임상적 특성	증상의 특이성 있음(예를 들어 화상)	타원인 영향과 구분 불가
방호개념	선량을 문턱치 이하로 유지하면 방지 가능	위험을 합리적 범위에서 최소화
관심 영역	사고 피폭이나 치료 분야에서 관심영향	일상 저선량 피폭에서 관심 영향
<u>영향의 예</u>	<u>홍반, 백내장, 혈액상 변화, 치사, 불임</u>	<u>암, 백혈병, 유전결함</u>

방사선의 인체에 대한 영향

■ 결정적 영향 (Deterministic Effect)

- 급성 고선량피폭으로 인한 세포사 또는 급성반응에 기인한 영향
- 피폭과 영향발현의 인과관계가 분명
- 효과의 심각성이 선량에 비례하며 발단치 ($\sim 0.5\text{Gy}$)가 존재
- 대체로 급성적인 특성
- 증상의 특이성 있음 (방사선 피폭에 기인한 것임을 추론할 수 있는 임상적 특성을 지님)
- 사고시 또는 치료방사선 분야에서 관심영향
- 수정체 혼탁, 백내장 (지발성, 6개월 이상의 잠복기), 골수세포 감소, 피부 홍반, 치사, 불임
- 방호개념 : 선량한도를 설정함으로써 방지



결정론적 영향

■ 전신피폭에 따른 증상(조혈 기능)

- 인체의 적색골수는 상당한 양이 골반뼈(60%)에 존재하며 그 나머지는 두개골, 늑골, 상완골, 대퇴골 등에 분포
- 골수선량 3~5Gy를 반치사선량 LD₅₀으로 간주함 ► 면역기능 저하로 인한 2차적 영향의 증가

조혈조직 피폭에 의한 혈액상의 변화

혈액소	증상	문턱선량 (Gy)	명목 정상치
백혈구	불안정하며 대체로 감소 경향	0.5	3500-10000 μL^{-1}
적혈구		1.0	400-500 $\times 10^4 \mu\text{L}^{-1}$
혈소판		1.0	$2 \times 10^5 \mu\text{L}^{-1}$
혈색소		-	12-17 gdL^{-1}

결정론적 영향

■ 생식선 (불임)

생식선 피폭으로 인한 불임의 문턱선량

성별	영향	문턱선량(Gy)	
		1 회의 급성피폭	만성피폭
남성	일시적 불임	0.15	매년 0.4
	영구 불임	3.5 ~ 6	매년 2
여성*	일시적 불임	0.6 ~ 1.5	
	영구 불임	2.5 ~ 6	매년 0.2 이상

• 연령에 따라 상당한 차이 있음

결정론적 영향

■ 피부

선량준위에 따른 피부의 증상

선량* (Gy)	초 기 증 상	만 성 증 상
0.5	염색체 변화	없음
5	일시적 탈모, 홍반	변화 인지되지 않음
10	일시적 피부염, 수종(물집)	위축, 혈관확장, 색소침착
25	궤양, 궤사	만성 궤양

* 선량 범위는 전형적인 것일 뿐이며 신체의 부위와 개인에 따라 상당한 차이가 있을 수 있음.



결정론적 영향

■ 수정체

감마선, X선, 베타 등에 의한 수정체의 문턱선량*

증 상	문턱선량(Gy)	
	1회 급성 피폭	여러번 분할 피폭
수정체의 혼탁	0.5 ~2	5 이상
백내장	5	8 이상

*중성자, 양성자 등의 경우는 위 값의 1/2 내지 1/3로 예상됨(high LET).

■ 갑상선의 방사선영향

증 상	문턱선량(Gy)	비 고
기능 저하	성인: 25~30 아동: 1~10	
급성 갑상선염	200	수 주이내 발생
지발성 갑상선염	10	수 년 후까지 발생 가능

결정론적 영향

■ 전신피폭에 따른 증상

전신 피폭(체내 중요 장기의 동시 피폭)시 선량에 따른 증상

선 량(Gy)	증 상
0.05~0.25	염색체 이상이 발견되는 최소 선량
0.25~0.5	백혈구, 임파구 변화(집단 대조로 판별 가능)
0.5~0.75	혈액 변화를 개별적으로 확인 가능
0.75 ~1.25	피폭자 10% 오심, 구토
1~2	20-70% 구토; 30-60% 무력증; 20-35% 혈구생산 감소, 합병증으로 사망자 발생가능(~5%)
3~5	조혈 기능 장애로 수 개월내 50% 사망(LD _{50/60}) ; LD ₅₀ :반치사선량
6~8	위장계 증후군으로 수 주-수 개월내 100% 사망 (LD _{100/60})
8~10	객혈, 폐수종 등 발현 수주내 사망
15 이상	중추신경계 증후군 장애로 수 일-수 주에 사망

LD_{50/60} : 60일 이내에 피폭자의 50%가 사망하는 치사선량 (Lethal Dose)

결정론적 영향

■ 결정론적 영향의 요약

결정론적 영향 요약(ICRP 99)

영향	조직/장기	발현시기	문턱선량(Gy)
불구증상			
일시적 불임	정소	3 ~ 9 주	~ 0.1 ^{a,b}
영구 불임	정소	3주	<6 ^{a,b}
영구 불임	난소	<1주	3 ^{a,b}
조혈기능 저하	골수	3 ~ 7일	0.5 ^{a,b}
본격적 흉반	피부(넓은 면적)	1 ~ 4주	3 ~ 6 ^b
피부화상	피부(넓은 면적)	2 ~ 3주	5 ~ 10 ^b
일시적 탈모	피부	2 ~ 3주	<4 ^b
백내장(시각장애) ^e	눈	수년	3 ^{a,c}
치명 증상			
골수 증후군			
방치	골수	30 ~ 60일	1 ^b
양호한 가료	골수	30 ~ 60일	2 ~ 3 ^{b,d}
소화계 증후군			
방치	소장	6 ~ 9일	6 ^d
일반적 가료	소장	6 ~ 9일	>6 ^{b,c,d}
폐렴	폐	1 ~ 7개월	6 ^{b,c,d}

a: ICRP 41

b: UNSCEAR 1988

c: NRPB Docs 7(3), 1996

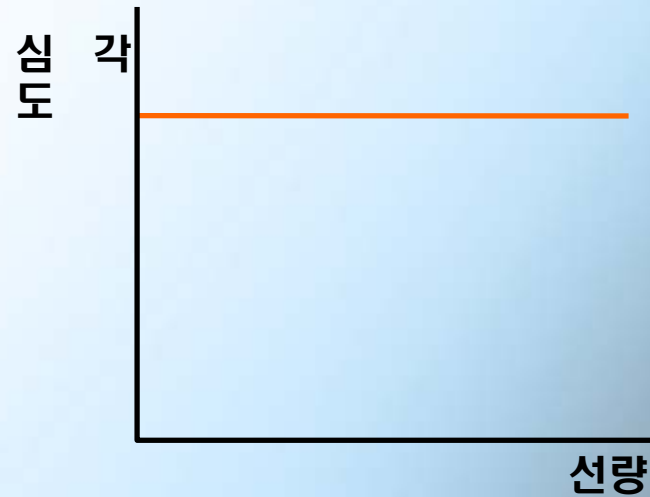
d: NUREG/CR 4214, 1989 and rev.1, 1993.

e: 수정제 혼탁은 더 낮은 선량에서도 발현가능하나 증례가 다름.

확률론적 영향

■ 확률적 영향 (Stochastic Effect)

- 세포의 돌연변이와 세포유전의 결과로 발생가능한 영향
- 영향의 발현을 우연성이 지배
- 영향의 발생확률이 선량에 비례하고 효과의 심각성은 선량에 무관
- 저선량에서도 발단선량 없이 장애 발생확률 존재
- 지발성이라 잠복기가 있다 (백혈병: 최소 2년, 일반 고형암: ~10년)
- 타원인의 영향과 구분 불가
- 만성 저선량 피폭에서 관심 영향
- 암, 백혈병, 유전적 영향 (돌연변이등)
- 방호개념 : 발생확률 (위험)을 합리적 범위에서 최소화 ⇐ ALARA



확률론적 영향

■ 방사선유발암 (일정한 잠복기가 있음)

- 발암원에 노출된 후 암 위험의 시간에 따른 변화
- 백혈병은 노출 후 5년을 전후로 최고치에 달했다가 점차 감소
- 고형암은 최소 잠복기 이후 노년까지 계속 증가

■ 역학적 자료의 해석

- 젊은 연령에서 피폭으로 인해 노령에 암 위험에 대한 미래의 암 증가를 예측(역학연구 대상인 원폭피해 생존자)
- 위험을 투사하는 모델은 기본적으로 절대위험 모델과 상대위험 모델로 분류
- 절대위험모델(더하기 모델) : 방사선 피폭으로 인한 암 위험이 선량 크기에 따라 일정량이 되고 이것이 자연 암 위험에 더해진다고 간주하는 것
- 상대위험도 모델(곱하기 모델) : 방사선으로 인한 암 위험이 자연 암 위험에 비례할 것으로 보는 것

■ 위해도 조정된 확률론적 영향의 위험계수(10^{-2} Sv^{-1}) : 선량평가의 변화

구 분	ICRP 103		ICRP 60	
	작업자	일반인	작업자	일반인
암(지사암, 비지사암) 심각한 유전적 영향	4.1 0.1	5.5 0.2	4.8(4.0, 0.8) 0.8	6(5.0, 1.0) 1.3
합 계	4.2	5.7	5.6	7.3

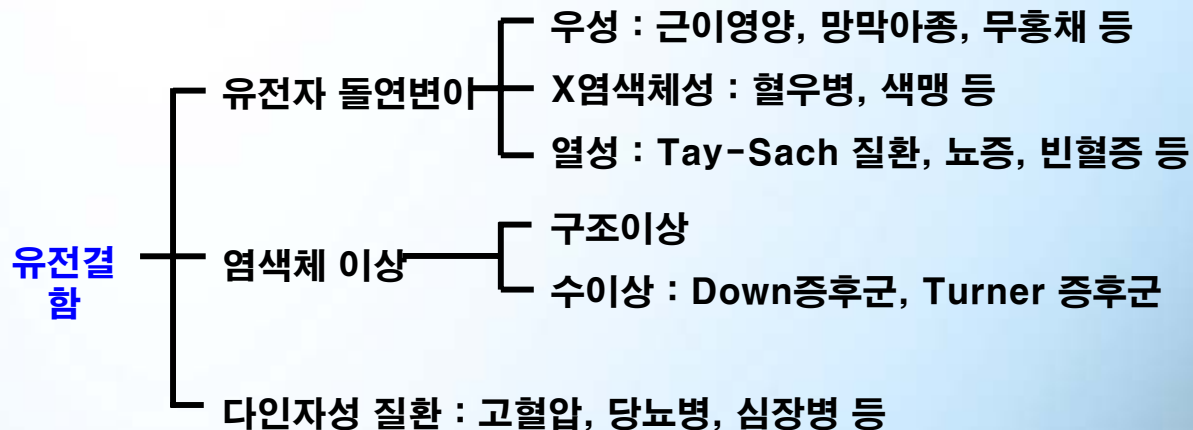
확률론적 영향

■ 조직가중치의 설정

- 동일한 양의 등가선량을 피폭하더라도 조직에 따라 암위험이 다름

■ 확률론적 영향의 위험

- 암위험 : 여러 인구집단의 남녀노소에 대해 평균한 명목상 위험이며, 규모가 큰 집단에 대해 평균적 위험을 평가
- 유전결함 위험 : 유전적 영향이 결함으로 나타남, 생식선의 방사선 피폭에 의한 증가값은 유전결함의 배가선량(자연발생 빈도만큼 증가시키는 선량)을 1Gy로 평가한 것



태아에 미치는 영향

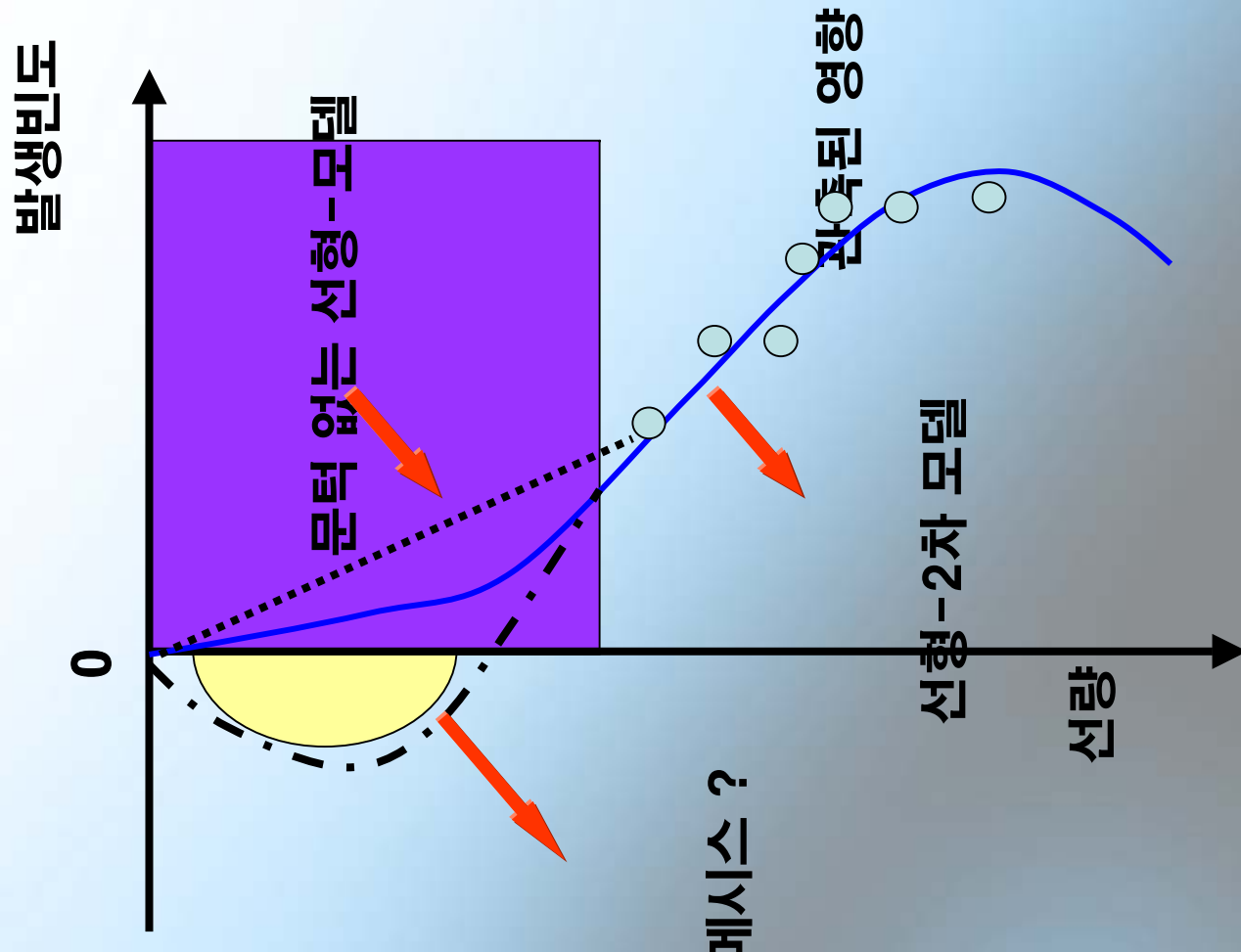
- 태아 : 방사선 감수성이 크며, 기대되는 잔여수명이 길기 때문에 방사선 영향 관점에서 특수한 집단에 속함
- 태생기(수정에서 출생까지의 기간)의 구분과 각각의 시기에 방사선피폭이 된 경우의 주된 영향
- 확률적 영향보다 **배의 사망, 기형 또는 발육 이상 그리고 정신발달 지체로 대변되는 결정적 영향**
- 기관형성기인 수정후 2~8주는 기형 유발에 매우 민감한 시기이며 기형유발의 문턱선량도 약 0.1Gy 정도로 평가
- 뇌를 포함한 중추신경계 형성 시기인 수정후 8~25주의 기간은 정신발달지체 또는 지능저하라는 특유한 결정적 영향의 관점에서 중요 (ICRP 60은 정신지체의 문턱선량은 0.12 ~ 0.2 Gy정도로 평가, 이후 0.3Gy로 높아짐)
- 전반 8주(수정 후 8~15주)는 1Sv 피폭에서 지능저하 발생확률이 40%정도 높은 시기
- 후반 8주(16주~)에서는 그 위험도가 10%정도로 낮아진다고 보고 있음
- 결정적 영향의 특성의 하나인 선량에 따른 지능저하정도는 1Sv당 IQ30점 정도 평가, 이후 25점으로

후생(human embryo and fetus)의 방사선 피폭으로 인한 영향
 축소(ICRP90)

영향의 구분	발생확률/문턱선량	해당 피폭시기
확률론적 영향 아동암 유발 유전적영향 결정론적 영향 배 사망 기형.발육이상	Sv당 ~10% 소아와 같은정도 ~0.1 Gy 0.1 Gy	전 임신 기간 전 임신 기간 착상전 ~ 착상직후 기형: 2 ~ 8주 발육이상: 전기간
지능저하	문턱선량 : 0.1~0.2 Gy 발생빈도 : Sv당0.4~0.1	수정후 8 ~ 25주

영양이 적고 가용성 낮아 이빨이 썩는다

- **호메시스 효과** : 높은 선량은 유해하지만 낮은 선량은 유익한 효과를 내는 현상
- 방사선 방호 목적으로 보수적 입장을 지켜 LN-T가설을 수용
문턱없는 선형관계(Linear No-Threshold; LN-T)



영양이 풍부하고
영양이 풍부하고

조직장기의 방사선감수성

- | | |
|---------------|-----------------|
| 1. 림프조직 | 11. 타액선 |
| 2. 골수 | 12. 피지선 |
| 3. 생식선 | 13. 모든 피부층 |
| 4. 소장 및 대장 상피 | 14. 췌장 |
| 5. 피부상피 | 15. 갑상선 |
| 6. 모세혈관 | 16. 근육 |
| 7. 수정체 | 17. 연골 |
| 8. 모낭 | 18. 골 |
| 9. 신장 간장 | 19. 신경세포 및 신경섬유 |
| 10. 폐 | |

방사선장해에 영향을 미치는 인자

■ 흡수선량

- 인체에 대한 선량과 장애와의 상관관계는 복잡하고 불확실한 점이 남아 있으나 **선량이 결국 장애발생을 지배**

■ 선량률(선량의 시간 분포)

- 인체피폭의 경우 **손상받은 조직의 세포가 대사작용에 의하여 회복능력**이 있으므로 단시간에 받을 경우 치명적인 선량준위도 장기간에 걸쳐 나누어 받게 되면 중대한 장애는 발현 않음

■ 선량의 분포

- 동일한 흡수선량을 **특정 장기가 균등분배한 상태의 피폭**보다 그 장기의 일부가 **집중 피폭** 받는 경우가 장애발생 가능성이 큼

■ 피폭의 범위

- 인체의 전신이 피폭받는 경우가 부분적으로 피폭받는 경우보다 장애발생 확률이 높음

■ 피폭조직의 방사선 감수성

- 신체조직의 방사선 감수성은 세포나 조직의 종류에 따라 다름
- 세포분열 빈도가 높은 조직일수록 감수성이 큼

■ 방사선의 선질

- 방사선의 종류 및 에너지 즉, 방사선의 선질이 다른 경우 장애발생 위험이 다름

방사선장해에 영향을 미치는 인자

■ 방사성핵종의 장기내 침착부위

- 동일한 장기내 침착하는 핵종이라도 구체적인 침착부위가 다름
- 라듐과 플루토늄은 다같이 뼈를 친화성 조직으로 하고 있으나 라듐은 뼈의 무기질 부위, 플루토늄은 내부의 다공성 조직에 침착하므로 골수 피폭은 플루토늄의 영향이 큼

■ 인체내에서의 반감기

- 방사성핵종의 물리적 반감기와 생물학적 반감기의 길고 짧음에 따라 피폭 영향에 차이가 있음

■ 핵종의 물리적, 화학적 성질

- 섭취 또는 호흡하는 방사성핵종의 물리적, 화학적 특성에 따라 그것이 인체내 침착하는 특성 및 부위가 달라질 경우도 있음
- 입자상의 핵종을 호흡할 경우 그 입자의 크기에 따라 호흡기관에 침착하는 부위가 다름