

## 용 어 정 의

### ■ eV

전자가 IV의 전위차를 이동하였을 때 얻은 운동에너지

$$1eV = 1.602 \times 10^{-19} C \cdot V = 1.602 \times 10^{-19} J$$

### ■ amu (Atomic Mass Unit) : 원자질량단위

1amu : 탄소 원자핵 질량과 탄소원자의 6개 전자질량을 합한 질량의 1/12

$$1amu = \frac{1}{12} \times \text{탄소 원자 질량} = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

### ■ e · s · u (electrostatic units) : 정전단위

CGS 단위계에서의 전기량의 기본단위이다. 진공 중에서 거리를 1cm벌러놓은 같은 양의 전하 사이에 작용하는 힘의 크기가 1dyne일 때 그 전기량을 1 e · s · u 라고 정의

$$1Coulomb = 10^9 \text{ esu}$$

### ■ Coulomb

전기량의 MKS 단위이며 1A 전류에 의하여 1초간에 운반되는 전기량

따라서 1C 전기량은  $6.27 \times 10^{18}$  개의 전자의 전기량과 같다

### ■ Bohr의 원자구조

전자가 핵주위를 돌면 전자는 가속도를 갖기 때문에 전자파를 발생하고 전자의 에너지는 감소해야 되지만 실제로는 그렇지 않다.

즉 전자기학에 의하면

원자내에서 전자가 운동할 때 시간이 경과함에 따라 차츰 진동수가 큰(파장이 짧은) 전자파를 내어야 한다.

그러나 현실적으로는 원자는 일정한 파장을 가지고 있다.

이런 현상을 설명하기 위하여 보어는 다음 세 가지 가정을 도입하여 설명함.

#### 가. 양자조건

궤도전자는 고정된 반경에만 회전하고 이 상태에서는 빛을 방사하지 않는다. 이 상태를 정상상태라 한다.

즉 전자는 각운동량이  $h/2\pi$ 의 정수배가 되는 궤도에만 존재한다고 가정.

이 궤도를 회전할 때는 전자는 복사하지 않음

$$mvr = n \frac{h}{2\pi}$$

- m : 정지질량

- v : 선형속도

- r : 회전반경

- n : 양자수

- h : 플랑크상수 ( $6.62 \times 10^{-34} J \cdot s$ )

#### 나. 진동수 조건

원자가 빛을 방출하는 것은 전자가 자신의 궤도( $E_2$ )에서 낮은 준위 에너지( $E_1$ )로 떨어질때 방출한다.

광자(빛)의 에너지는 전자의 궤도 에너지준위의 차

$$h\nu = E_2 - E_1$$

■ X-ray

원자의 여기상태가 변화하여 보다 낮은 에너지 상태로 옮겨갈 때 방출되는 전자파

가. 제동 X선

- ① 고속화된 전자가 표적핵을 통과하게될 때 표적핵에 강한 약핵장(Positive nuclear field)에 의해, 즉 양자와 전자의 상호인력으로 인하여 초기전자의 흐름 방향이 바뀌게 되고 이와 같은 과정에서 일어나는 고속전자의 에너지 손실이 바로 X선이란 전자파로 나타나게 된다.
- ② 최대에너지가 입사전자의 에너지와 같은 연속된 Spectrum을 가지며,
  - 입사전자의 에너지가 클수록(즉 X선관의 관전압이 높을수록)
  - 표적핵의 원자번호가 클수록,
  - X선관에 공급된 전류가 많을수록
 많이 발생한다.
- ③ 하나의 전자가 원자핵의 쿨롱력으로 완전히 저지되어 그 운동에너지가 광자로 변환하였다면 에너지가 가장 큰 광자, 즉 최단파장( $\lambda_{min}$ )의 X선이 얻어지는데 X선관에 걸린 전위차 최대치를  $V_p$ (단위 : KV)라 하면

$$\lambda_{min} = \frac{h \cdot c}{e \cdot V_p} = 1.24 \times 10^{-9} \times \frac{1}{V_p} (m)$$

- ④ 제동복사선은 연속스펙트럼이며, 그 최대치는 충격전자의 에너지에 의해 대개 결정.
- ⑤ 제동복사가 일어날 확률(베타선의 에너지가 제동복사선의 에너지로 변환되는 율)

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

나. 특성X선

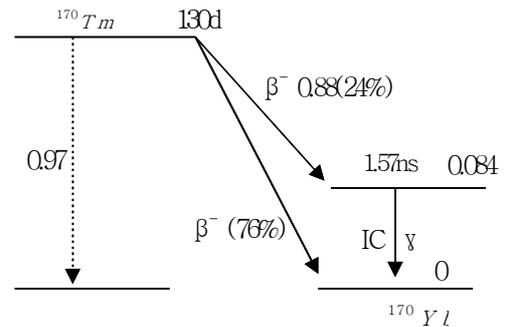
- ① 궤도전자 간의 에너지 차이에 기인하며, 즉 고속화된 전자가 궤도전자를 전리 즉 내뺏음으로서 높은 준위에 있는 전자가 그 빈자리를 채우게 되고 두 에너지 준위 차이 만큼 X선을 방출하는데 이 X선을 특성X선이라 한다.
- ② 특성X선을 방출하지 않고 그 에너지를 궤도전자에 주어 궤도전자를 원자로부터 내뺏는데 소모하는 경우도 있는데 이 현상을 오제(Auger)효과라 하고 이 때 내뺏겨진 전자를 오제전자라 한다.
- ③ 특성X선은 선스펙트럼이다.
- ④ X선관의 걸어준 전압과는 무관
- ⑤ 표적핵의 원자 구조에 의해 결정된다.

■ 내부전환(Internal Conversion : IC)

여기상태에 있는 원자핵이 보다 안정한 상태로 천이할 때  $\gamma$  선을 방출하는 대신 그 천이에너지를 궤도전자에게 주어 전자가 튀어 나오는 현상

이때 튀어나온 전자를 내부전환전자라 한다.

- 선스펙트럼이다.
- IC전자 방출은 원자번호가 클 수록, 천이에너지가 작을 수록 커진다
- 내부전환 전자에너지
  - $E_0 = E_\gamma - I_B$
  - $E_0$  : 내부전환 전자 에너지
  - $E_\gamma$  :  $\gamma$ 선의 에너지
  - $I_B$  : 전자의 결합에너지
- 내부 전환전자 방출의 붕괴도



■ 오제효과

전자포획 또는 내부전환으로 인하여 생긴 방출전자의 빈자리는 높은 준위 궤도전자에 의해 채워지게 되는데 이 때 두 궤도 차에 해당하는 에너지가 특성X선으로 방출되는 도중에 궤도에 있는 전자에 주어 전자를 방출하는 현상 이때 방출된 전자를 오제 전자라 한다.

■ 전자포획(Electron Capture :EC)

과잉의 양성자를 가진 원자핵이 양성자를 방출( $\beta^+$ 붕괴) 하기에 충분한 에너지를 가지지 못할 때 원자의 내부궤도에 있는 한 전자를 핵속으로 흡수하는 현상(선스펙트럼이다)



$$Q = M_p - M_n - B$$

■ 원자핵

- 원자의 크기 :  $10^{-10} m = 1 \text{ \AA}$

- 원자핵의 크기:  $10^{-14} \sim 10^{-15}m$  정도
- 원자핵의 반경

$$R = r_0 A^{1/3} \quad (r_0 = 1.2 \times 10^{-15} \sim 1.4 \times 10^{-15} m)$$

- 원자핵의 부피
  - $R^3 \propto A$  : 핵의 부피는 질량수에 비례한다.
- 원자핵의 밀도( $\rho$ )

$$\rho = \frac{\text{질량}}{\text{부피}} = \frac{A}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{A}{\frac{4}{3}\pi (r_0 A^{1/3})^3} = \frac{3}{4\pi r_0^3}$$

$$= \frac{3}{4\pi (1.2 \times 10^{-15} m)^3} = \text{약 } 1\text{억톤} / \text{Cm}^3$$

**∴ 질량수A와 반경R에 무관하게 핵의 밀도는 거의 일정하다.**

- 원자핵의 크기를 구할수 있는 실험
  - 경상핵,  $\alpha$ 붕괴, 중성자의 산란, 전자의 산란
- 여기된 원자핵은
  - ① 양성자, 중성자, 그 외 다른 입자 방출
  - ②  $\alpha$ 붕괴,  $\beta$ 붕괴
  - ③  $\gamma$ 선, 내부 전환 전자 방출 등의 과정이 일어난다.

## ■ 원자핵의 모형

### 가. 액적 모형 (Liquid drop model)

원자핵은 밀도가 일정(비압축성)한 액체로 되어 있다고 보는 것이다.

핵을 액체라고 생각할 수 있는 것은 핵자간에 작용하는 힘(핵력)이 매우 강하고 도달거리가 짧기 때문에 핵내의 핵자는 자기 자신 주위에 있는 소수개의 입자와만 강하게 결합하여 액체간의 분자간의 힘과 닮았기 때문이다.

- 원자의 결합에너지, 핵분열시 복합핵 형성 과정을 설명할 수 있음

### 나. 페르미 가스모형(Fermi gas model)

원자핵은 우물형 퍼텐셜을 토대로 공 내부에 가둔 Fermi 가스로 가정

핵자들이 서로 독립적으로 자유 운동한다는 모형이다.

평균 퍼텐셜 깊이는 약 40MeV정도

### 다. 각모형(Shell model)

원자핵내에서 전자의 궤도 운동에 대한 각모형과 같이 원자핵 내에서도 평균 퍼텐셜하에 정해진 궤도가 있고, 핵자는 순차적으로 그 궤도를 점유하고 있다고 가정. 이때 원자핵은 **마법수(magic number)**를 가질때 특히 안정하다.

#### ○ 마법수

원자가 폐쇄되어 안정한 것 처럼 핵에서도  $Z$  or  $N$ 의 수가 2, 8, 20, 50, 82, 126일 때 핵이 안전하고 특히  $Z, N$  모두 마법수를 가지면 더욱 안정하다.

### 라. 집단 운동 모형(Collective Model)

- 물방울 모형과 각모형을 절충한 모형
- 변형의 변위는 핵자의 집단운동 결과로서 일어난다고 생각한 모형

■ 핵력(Nuclear Force)

각각의 핵자를 응집시켜 원자핵이라는 하나의 입자를 형성시키고 있는 인력

① 쿨롱력 보다 강한 인력

(핵력 < 쿨롱력 < 약력 < 만유인력)

② 단거리력(short range)

핵자간 거리가 약  $2.5 \times 10^{-15} \text{ m}$  보다 커지면 핵력은 거의 없다.

③ 하전 독립성

핵력은 전하에 무관하여 (p-n), (n-n), (p-p)간에 상호작용하는 크기는 본질적으로 차이가 없다.

④ 포화성

핵의 밀도는 질량수 A와는 무관하게 일정치를 가지며 또한 핵자당 평균결합에 너지는 일정( $\sim 8\text{MeV}$ )하다.

⑤ 교환력을 갖는다

$\pi$ 중간자를 매개로 핵자간에 서로 힘을 교환한다.  
(두 핵자간에 교환력이 존재하며, 이것에는  $\pi$ 중간자가 매개하고 있다)

참고) 핵력을 1로 가정할 때

- 쿨롱력 :  $7.3 \times 10^{-3}$
- 약력( $\beta$ 붕괴 할 때) :  $\sim 5 \times 10^{-14}$
- 만유인력 :  $\sim 2 \times 10^{-39}$

■ 핵종(nuclide)의 분류

구 분	Z (양자)	N (중성자)	A (질량수)	예
동위원소 (isotope)	같음	다름	다름	$^1_1\text{H}$ , $^2_1\text{H}$ , $^3_1\text{H}$
동 중 체 (isobar)	다름	다름	같음	$^3_1\text{H}$ , $^3_2\text{He}$
동중성자체 (isotone)	다름	같음	다름	$^7_3\text{Li}$ , $^8_6\text{O}$
핵 이성 체 (nuclear isomer)	같음	같음	같음	원자핵의 에너지 상태가 다른 $^{60m}\text{Co}$ , $^{60}\text{Co}$
경상핵(鏡像核) (mirror nuclide)	Z와 N이 서로 바뀐 한 쌍의 핵종			$^{13}_6\text{C}$ , $^{13}_7\text{N}$

■ 결합에너지(Binding Energy)

- ① 핵력에 맞서 핵자를 양성자와 중성자로 따로따로 분리시키는데 필요한 에너지
- ② 질량결손 값을 에너지 단위로 환산한 값으로 핵자들이 결합하는데 필요한 에너지
- ③ 질량결손( $\Delta M$ )  
원자핵의 질량은 그것을 구성하는 양성자와 중성자의 질량을 합한 것보다 작다. 이 차이가 질량결손이다.  
그 이유는 양성자와 중성자가 따로따로 독립하고 있는 상태에서 핵력이 미치는 상태까지 접근시키는데 소요되는 퍼텐셜에너지의 감소에 해당된다.  
$$\Delta M = ZM_p + (A - Z)M_n - M$$
- ④ 결합에너지 :  $E_B = \Delta M C^2$
- ⑤ 결합에너지가 크다는 말은 더 안정하다는 것을 의미한다.

■ 핵자당 결합에너지(比結合에너지)

핵 내에서 핵자 한 개를 빼내는데 필요한 일의 평균 값

$$f_B = \frac{\text{결합에너지}}{\text{질량수}} = \frac{E_B}{A}$$

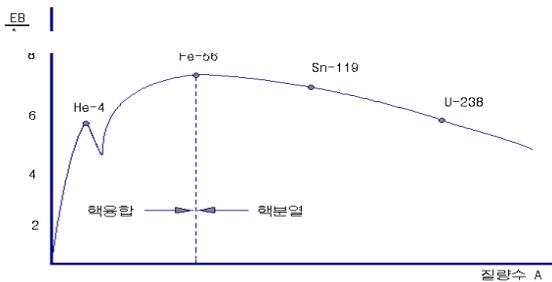
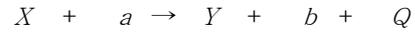


그림 1-2. 원자질량과 핵자당결합에너지와의 관계

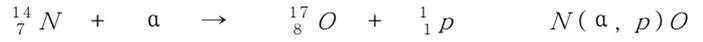
■ 원자핵 반응(Nuclear Reaction)

가속된 입자 a가 정지하고 있는 원자핵 X에 충돌시켜 다른 원자핵 Y와 b를 만드는 것

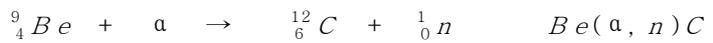
에너지, 전하, 질량수의 보존법칙이 성립한다.



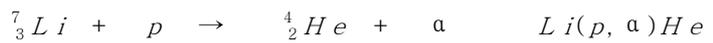
- 최초의 핵반응(Rutherford :1919년)



- 중성자 발견(Chadwick : 1932년)



- 가속기를 사용하여 최초로 인공적으로 얻은 핵반응 (Cockcraft와 Walton:1932년)



- 최초로 방사성 원소  ${}^{30}_{15}P$  를 만든 핵반응(Joliot 부부)



① 핵반응에너지(Q치)

반응전 정지질량의 총합과 반응후 정지질량 총합사이의 차에 해당하는 질량이 에너지로 전환

$$Q = [(M_X + M_a) - (M_Y + M_b)] c^2 = \Delta M c^2$$

- $Q > 0$  (발열반응)  
Q만큼의 에너지가 핵반응시 외부로 방출(에너지로 바뀜)
- $Q < 0$  (흡열반응)  
핵반응이 일어나기 위해서는 입사입자 a에 문턱값(Threshold value)만큼의 에너지를 가져야만 반응이 일어난다.

② 문턱 값(Threshold value)

$$(E_a)_{th} \geq |Q| \left( \frac{M_X + M_a}{M_X} \right)$$

- 문턱 값이 존재하는 이유  
입사입자의 운동에너지의 100%가 핵자의 결합에너지(내부에너지)로 바뀌지 못하고 일부를 반응생성물의 운동에너지로도 바뀔 수 있기 때문이다 즉 생성핵의 운동에너지로도 바뀔 수 있기 때문이다.

.....

■ 반응단면적(Cross Section) :  $\sigma$

$1\text{cm}^2$  내  $N$ 개의 원자핵을 갖는 표적물질에 수직으로  $I$  개의 입자가 입사하여 핵반응을 일으키는 확률을  $P$ 라 하면  $P$ 는 입사 입자수  $I$ 와  $N$ 에 비례하며, 이때  $\sigma$ 를 비례상수라 한다.

$$P = \sigma N I \rightarrow \sigma = \frac{P}{NI} \quad (\text{cm}^2)$$

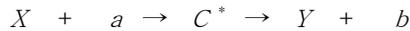
고로, Cross section  $\sigma$ 는 표적핵과 입사 입자가 반응할 확률이다. 반응단면적의 특수 단위  $1\text{barn} = 10^{-28} (\text{cm}^2)$

■ 복합핵(Compound Nucleus)

원자핵은 핵자가 밀접한 공간이므로 입사입자가 핵내로 침입하면 단기간에 많은 핵자·핵자 충돌이 일어나서 입사에너지는 많은 입자에 평균적으로 분배된다.

이 때 1개의 핵자와 얻은 여기에너지는 그 핵자의 속박에너지보다 훨씬 작으므로 어느 핵자도 빨리 핵내로 나올수가 없게 되는데 이렇게 해서 생긴 여기핵은 비교적 긴 수명(약  $10^{-14} \sim 10^{-6}$  초)로서 입사입자가 핵을 가로지르는 시간  $10^{-22}$  초에 비하면 훨씬 길다.

이와 같이 반응의 중간 상태로서 존재하는 여기핵을 복합핵이라 한다.



→



■ 핵분열(Nuclear Fission)

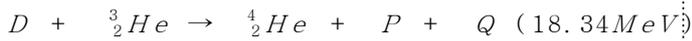
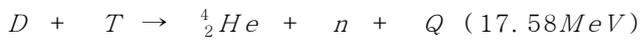
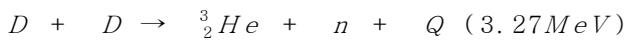
- ① 질량수가 크고 핵자당 결합에너지가 작은핵이 보다 안정한 두 개 이상의 작은 핵으로 분열하는 것  
핵분열시 다음의 세가지 과정이 일어난다.
  - 200MeV에 가까운 에너지 방출
  - 우리몸 원자핵이 질량이 두 개의 원자핵(핵분열생성물)으로 나뉘어 진다.
  - 평균 2.43개 이상의 고속중성자 방출
- ② 우리몸이 핵분열 할 때
  - 총에너지의 80~90%는 핵분열생성물의 운동에너지로
  - 5~6%는 중성자나  $\gamma$ 선으로
  - 5~6%는 분열생성물내에 저장되었다가 나중에 방사선으로 방출된다.
- ③ 자발핵분열
  - 외부에서 에너지를 주지 않더라도 혼자 저절로도 어느 정도의 핵분열을 일으키는 것
  - 원자번호가 클수록 자발핵분열 반감기는 급격히 짧아진다. (붕괴가 잘된다)  
이런 연유로 인해 100이상 원소를 인공적으로 만들기는 어렵다.
  - 자발핵분열시 방출되는 핵분열조각은 연속 스펙트럼이다.
  - 대표적인 핵종은 Cf-252 이다.

■ 핵융합(Nuclear Fusion)

원자핵의 핵자 1개당의 결합에너지의 절대치를 질량수의 함수로서 조사해보면 질량수가 60 정도에서 극대화되고 그것보다 커지면 그 값은 감소한다.

따라서 무거운 핵에서 중간정도의 핵으로 변환하는 반응(핵분열), 또는 가벼운 핵에서 중간정도의 핵으로 변환하는 반응에서는 에너지가 방출된다. 이와 같이 후자의 경우처럼, 가벼운 원자핵이 합쳐서 무거운 원자핵으로 되는 반응을 핵융합이라 한다.

대표적인 예로서



D : 중수소(Deuterium) T : 삼중수소(Tritium)

■ 원자핵 붕괴

가. 붕괴 (decay)

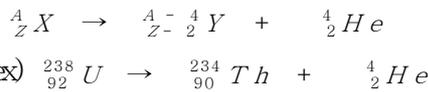
불안정한 핵종 즉 n/p (중성자/양자)가 너무 크거나 너무 작은 핵종은 입자를 방출하고 보다 안전한 원자핵으로 변하는 현상

- ① 한 개의 원자핵이 2개 이상의 원자핵으로 변하는 경우(α 붕괴, 자발핵분열)
- ② A가 일정한 동중핵 중에서 (N, Z)가 변하여 보다 안전한 핵종으로 변하는 경우(β 붕괴)
- ③ 동일 핵종으로 핵이 불안정한 경우, 즉 핵의 여기 상태의 경우(γ 붕괴)

나. α 붕괴

질량수 A가 큰 원자핵에서 α 입자가 터널효과에 따라 핵력과 쿨롱력에 의한 벽을 관통하여 핵외로 방출하는 것을 α 붕괴라 한다.

① α 붕괴 형식



② α 선의 붕괴 에너지

$$Q_\alpha = [M_m - (M_d + M_a)] C^2$$

- $M_m$  : 어미핵의 질량
- $M_d$  : 딸핵종의 질량
- $M_a$  : α의 질량

③ α 입자가 갖는 운동에너지

$$E_\alpha = \left( \frac{M_d}{M_a + M_d} \right) Q_\alpha$$

④ 특징

- α 선은 선스펙트럼이다.
- 생성된 핵종자체가 아직 여기상태이면 α 방출직후에 γ 선을 방출한다.
- 안전핵종에 비해 질량수가 과다한 핵종에서 잘 일어난다.
- α 붕괴하는 핵종은 약간의 예외를 제외하고 고원자번호의 핵종에 한정된다.

다. β 붕괴

원자핵은 A=20까지는 양성자수(Z)와 중성자수(N)가 같으면 안정하다. 그러나 질량수가 큰 무거운 원자핵은 쿨롱력 때문에 Z가 N보다 얼마만큼 적은 쪽(약 Z : N = 1 : 15 정도가 안정)이 안정하다.

이 범위를 벗어난 원자핵은 불안정하여 보다 안전한 원자핵으로 변하려는 성질을 가지고 있기 때문에 과잉의 양성자와 중성자는 각각 중성자 또는 양성자로 변환하는 과정에서 전자를 핵외로 방출하는데 이 변환과정을 β 붕괴라 한다.

- 방출되는 전자의 에너지는 0에서 극대치까지 연속에너지를 갖는다.  
그 이유는 전자 방출과 더불어 중성미자도 방출되는데 에너지가 중성미자에도 분배되기 때문이다.
- β 붕괴는 연속스펙트럼이다.

① β<sup>-</sup> 붕괴

중성자가 양성자보다 과잉인 원자핵에서 일어나기 쉬우며 원자핵속의 N이 P로 변하여 음전자를 방출하고 다른 핵종으로 변하는 것



○ 붕괴에너지 :  $Q_{\beta^-} = (M_X - M_Y) C^2$

② β<sup>+</sup> 붕괴

양성자가 중성자보다 과잉인 원자핵에서 일어나기 쉬우며 원자핵속의 P가 N으로 변하여 양전자를 방출하고 다른 핵종으로 변하는 것



○ 붕괴에너지 :  $Q_{\beta^+} = (M_X - M_Y - 2m_e) C^2$



○ 연속스펙트럼

양성자가 중성자로 붕괴될 때 생성되는 중성미자와 양성자가 그 붕괴에너지를 나누어 가지고 방출되기 때문에 그 에너지 분포는 제로에서 어떤 특정한 값인 최대값까지 연속적인 분포를 가진다.

③ 전자포획(EC)

과잉의 양성자를 가진 원자핵이 양성자를 방출하기에 충분한 에너지를 가지지 못할 때 원자의 내부궤도에 있는 한 전자(보통 K각의 전자)를 핵속으로 흡수하는 현상



- 전자포획은 선스펙트럼이다.
- 전자포획이 일어남과 동시에 K각에 의한 특성 X선이 2차적으로 방출되므로써 확인할 수 있다.

- 붕괴에너지가 1.02MeV이상의 경우에는  $\beta^+$  붕괴와 경합 과정을 이루게 된다.  
역으로 말하면  $\beta^+$  붕괴에 있어서는 반드시 전자포획 붕괴가 공존하게 된다.
- 붕괴에너지 :  $Q_{EC} = (M_X - M_Y)C^2 - B_K$

④ 중성미자(Neutrino)

$\beta$ 선의 연속스펙트럼을 설명하기 위하여 도입된 소립자로서 질량=0, spin=1/2, 전하=0의 입자이다.

⑤  $\beta$ 붕괴의 붕괴에너지

- $Q < 0$  :  $\beta$ 붕괴는 일어나지 않음
- $Q_\beta < Q_{EC}$  :  $\beta^+$  붕괴하지 않는다.  
(  $B_K \ll 2m_e c^2 (= 1.02MeV)$  )이므로  $\beta^+$  붕괴는 하지 않으나 전자포획을 하는 경우가 생긴다)

라.  $\gamma$ 선 방출

$\alpha$ 붕괴 또는  $\beta$ 붕괴를 한 후, 원자핵이 여기상태이면  $\gamma$ 선이 방출되어 기저상태로 떨어지는 현상  
 $\gamma$ 선은 스펙트럼을 가지며, 그 에너지는 수 KeV에서 수 MeV에 이르기 까지 핵종에 따라 가지각색이며, 원자번호등에 관한 규칙성은 전혀 없다.

① 내부전환

② 핵이성체(Isomer) : IT

원자핵이 여기상태에 있으면  $\gamma$ 선을 방출하거나 내부전환에 의하여 낮은 준위로 떨어진다. 이 때 붕괴상수( $\lambda$ )가 작으면 수명( $\tau$ ), 즉 반감기가 길어진다.

이와 같이  $\tau$ 의 측정가능(  $10^{-9}$  초)한 범위에 있는 에너지 준위가 다른 2종이상의 핵종이 존재할 때 이들은 서로 핵 이성체라고 하고 질량수에 m(metastable)를 붙여서 구별한다.

질량수 옆에 m이 붙은 핵은 아직 감마선이 방출하지 않았다는 것을 의미하고

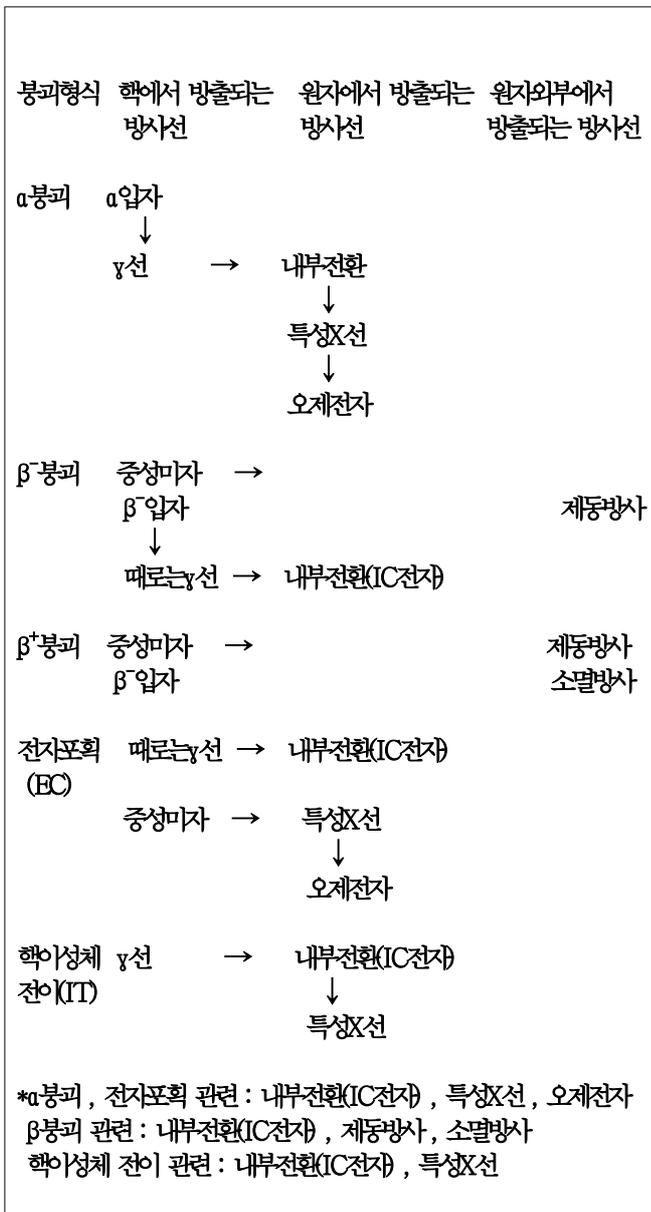
질량수 옆에 m이 없다면 감마선을 방출했다는 것을 의미한다.

- 핵이성체의 반감기는  $\gamma$ 선의 에너지가 적을수록 길고, 핵의 상태사이의 각 운동량의 변화가 클수록 길다.
- 핵이성체의 2차과정 : 내부전환전자, 특성 $\alpha$ 선, 오제전자
- 방사성핵종중 반감기가 긴 핵종은 반감기가 짧은 핵종에 비해서 핵이 더 안정하다는 것을 의미한다.  
따라서 감마선의 방출이 지연된다는 것은 감마선이 즉시 방출하는 핵보다는 더 안정하다는 의미이다.(각 모형으로 설명이 가능)

마. 양자선

양자가 고속으로 흐르는 것으로 **수소이온 빔에 상당한다**.  
 전리능력은 알파선의 1/10정도이지만, 정성적으로 그 성질은 알파선의 경우와 유사하다.  
 방사성동위원소에서 직접 방출되는 경우는 없지만, 각종의 원자핵 실험이나 channeling 실험등 가속기를 사용한 실험에서 취급되는 경우가 많다. 또 중성자에 의한 반발이나 핵반응에 의하여 생긴다.

■ 붕괴에 수반되는 현상



■ 평균 수명 (mean life)  $\tau$

- 처음의 원자수가 1/e가 되는 시간
- **개개 원자의 수명의 총합을 최초에 존재했던 원자의 총수로 나눈 값**으로 정의
- 방사성동위원소가 붕괴될 때까지 걸리는 시간의 평균 값

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} N dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} = 1.44 T_{1/2}$$

■ β선과 물질과의 상호작용

가. β선이 에너지를 잃는 과정

① 여기

원자의 전자와 β입자가 반응하여 전자를 그 위 에너지 궤도로 옮겨주며 산란(β방출)

② 이온화(전리)

원자의 최외각 전자와 β입자와 반응하여 산란 β와 2차 전자 방출

③ 제동복사

입사전자가 흡수물질의 원자핵 근방에서 핵이 만드는 쿨롱장에 의해 가속되어 에너지 복사가 이루어지며 산란 β도 방출된다.

④ 원자핵과 탄성산란

전자-원자핵의 탄성충돌을 통해 입사전자가 산란(이 때 입사전자는 에너지를 잃지 않고 방향만 바뀜) (Rutherford산란이라고도 함)

⑤ 양전자 소멸(Positron annihilation)

β<sup>+</sup>입자가 원자에 접근했을 때 양전자의 운동에너지는 흡수법에 의해 감소됨으로 원자궤도내 음전자와 결합되어 0.51Mev 2개의 photon이 방출

⑥ 체렌코프 방사선(Cerenkov radiation)

β의 에너지가 0.6Mev보다 크면 매질내에서 빛의 속도보다 커지며 이 β가 매질내에서 굴절될 때 전자파 발생

⑦ 위 6가지 중 β선이 에너지를 잃는 중요한 2가지반응은

- 원자의 여기, 전리에 의한 충돌손실과
- 제동복사에 의한 방사손실이 있다

□ 충돌손실

β선이 매질의 원자와 상호작용하여 궤도전자를 여기, 전리시키는 것이 충돌손실이며 후속적으로 특성X선을 방출시킨다. 이때 특성X선이 방사를 수반하지 않고 궤도전자와 상호작용하여 전자를 튀어나오게 할 수도 있는 데 이를 Auger effect라고 한다.

□ 방사손실(또는 복사손실)

β선이 핵의 쿨롱장의 영향을 받아 감속되면서 그 감속된 차이만큼을 전자파형태로 방출하는 데 이를 제동복사

라 하고 이때 방출되는 전자파를 제동복사선 또는 연속X선이라고 한다. β선이 매질과 상호작용하여 제동복사선을 방출하는 비율은 아래와 같이 표시할 수 있다. 이때 E<sub>max</sub>(MeV)는 β선의 최대에너지이고 Z는 매질의 원자번호이다.

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

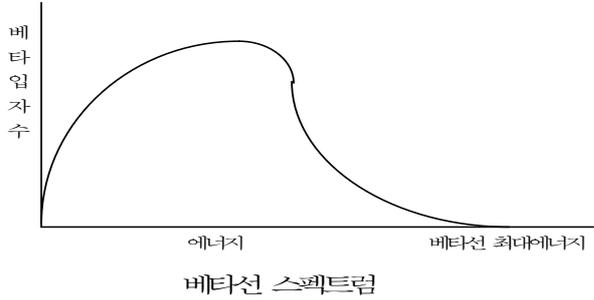
1 MeV의 β선이 납을 통과하면 총에너지의 3%가 제동복사선으로 변환된다. 따라서 β선을 차폐하기 위해서는 제동복사의 비율을 줄이기 위해 원자번호가 낮은 물질로 1차 차폐하고 제동복사를 줄이기 위해 원자번호가 높은 물질로 2차 차폐하여야 한다.

나. β입자의 특징

- 전리작용을 하나, α입자에 비해 적다.
- 전자의 질량이 작기 때문에, 진행방향이 굽혀지기 쉬우나, 낮은물질(저원자번호)일수록 산란은 적다.
- β선의 후방산란  
β선이 물질속에서 산란되어 입사 방향으로 다시 나오는 현상으로 β선의 에너지, 기하학적 조건등에 따라 달라지나 물질의 두께가 충분하여 에너지가 클수록 후방산란율은 커진다.
- β선의 에너지가 크면 최대비정은 커진다.
- 흡수체의 밀도가 크면 최대비정은 낮아진다.

다. β선의 운동

β선은 α선과는 달리 아래 그래프에서 보듯이 연속스펙트럼 분포를 가진다.



다시 말해서 β선은 0 ~ 최대에너지사이의 어떤 에너지라도 가질 수 있다는 것이다.

방사선 피폭선량 평가시 가장 중요시하는 것은 β선스펙트럼의 평균에너지이다. 일반적으로 β선의 평균에너지는 최대에너지의 1/3정도로 보면 실무적으로 무난하다.

β선의 평균에너지가 중요한 이유는

β선이 인체에 흡수될 때 인체가 흡수한 에너지는 평균적으로 β입자 1개로 부터 β선평균에너지에 해당하는 에너지와 같기 때문이다.

일정흡수체내에서 β선의 에너지가 증가함에 따라 최대비정은 증가하게 되고 흡수체의 밀도가 클수록 최대비정이 짧아지게 된다. 엄격히 말하면 β선의 비정에 영향을 미치는 것은 흡수체의 밀도보다는 흡수체의 단위면적당 전자수와 관련이 있다. 다시 말하면 β선의 비정은 흡수체의 단위 면적당 전자밀도는 “흡수체밀도 x 두께”인 밀도두께와 관계가 있다.

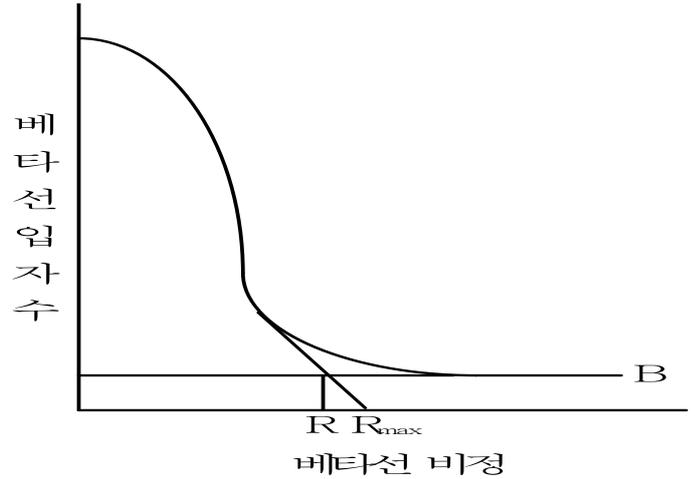
라. β선의 비정

비정(Range)이란 하전입자가 물질 속을 통과할 때 그 운동이 정지할 때까지 간 최대 직선거리. 즉 베타선을 차폐하는데 필요한 두께이다.

$$R(mg/cm^2) = 412 E_{\beta}^{1.265} - 0.0954 \ln E_{\beta} \quad (0.01 \leq E \leq 2.5 MeV)$$

$$R(mg/cm^2) = 530 E_{\beta} - 106 \quad (E > 2.5 MeV)$$

β선과 같이 산란을 받기 쉽고 연속 스펙트럼을 가진 입자에 대해서는 평균비정은 의미가 없어 통상 그에 대신하여 외삽비정이 사용된다. 외삽비정은 흡수곡선에 있어서 최후에 갑자기 떨어지는 영역에서 접선을 그어 구한 것으로 β선의 최대도달 거리에 대개 대응한다. β선의 외삽비정은 β선의 최대에너지 Emax 에 의해서 대개 규정되며, 스펙트럼의 형에 그다지 관계가 없다.



베타선 흡수곡선

상기 그래프는 베타선이 매질중에서 흡수되는 과정을 도시하였다. 이때 B는 제동복사에 의해 기여된 양이다.

마. 저지능(Stopping power)

비에너지 손실 또는 에너지 손실을

하전입자가 물질 속을 통과할 때 단위 길이당 잃는 에너지 (MeV/cm)

$$S = - \frac{dE}{dx} \propto \frac{(Ze)^2}{V^2} Z N$$

Where, e = 전자 전하(  $4.8 \times 10^{-10}$  esu )

Ze : 입사입자의 하전

v : 입사입자의 속도

N : 단위체적당의 원자수 ( 원자 /  $Cm^3$  )

Z : 물질의 원자번호

NZ : 단위체적당 흡수체의 전자수

① 특징

- 입자의 질량에 무관하다.
- 입사전하의 2승에 비례한다.
- 속도의 제곱에 반비례한다.
- 물질의 밀도 원자번호에 비례한다.

② β선의 전 저지능(Total stopping power)

$$\left( \frac{dE}{dx} \right)_{total} = \left( \frac{dE}{dx} \right)_{ion} + \left( \frac{dE}{dx} \right)_{rad}$$

여기서  $\left( \frac{dE}{dx} \right)_{ion}$  : 전리 및 여기에 대한 저지능

$$\propto \frac{\rho}{E}$$

$\left( \frac{dE}{dx} \right)_{rad}$  : 제동복사에 대한 저지능  $\propto EZ^2\rho$

실험결과에 의하면 전리에 의한 에너지손실과 복사에 의한 손실의 비는 다음식으로 주어진다.

$$\frac{\left( \frac{dE}{dx} \right)_{rad}}{\left( \frac{dE}{dx} \right)_{ion}} = \frac{EZ}{800}$$

이 식을 보면  $EZ = 800$ 일 때 서로 같게 됨을 알 수 있다.  $Z = 80$ 을 잡아도  $E = 10MeV$ 가 되어야 비로소  $EZ = 800$ 의 조건을 만족하게 된다. 자연방사성물질로부터 나오는 β선들은 보통  $E = 10MeV$ 이하이어서 이 β선들은 이들이 물질내를 통과할 때는 전리 및 여기작용에 의하여 에너지를 잃게 된다고 생각해도 좋다.

바. W-치(W-value)

이온쌍 하나를 만드는데 필요한 평균에너지

W-치는 입사입자의 종류와 에너지에 그다지 의존하지 않고 또한 흡수물질의 종류에 약간 관계한다.

공기 : 34 eV 고체 : 3~4 eV

사. 비전리(Specific ionization)

하전입자가 기체속을 진행할 때 단위 길이당 생기는 이온쌍 수

비전리는 입자의 속도에 역비례하고, 입사전하의 2승(Z)에 비례한다. 따라서 α선, 양자선의 비전리는 전자의 경우에 비하여 각각 500배, 50배 정도가 된다. α선, 양자선의 경우, 비전리는 에너지에 역비례하고 있는데 반하여 전자의 경우는 일정하다. 이러한 이유는 전자의 속도가 광속에 가까워서 에너지에 그다지 관계하지 않게 되기 때문이다.

$$n_i = - \frac{dE}{dX} \cdot \frac{1}{\epsilon} \quad (\epsilon : W\text{치})$$

■ α선과 물질과의 상호작용

α선은 비전리가 크기 때문에 급속히 에너지를 잃으며 정지한다. 또한 α선은 투과력이 약하여 종이1장 또는 고무장갑으로도 차폐가 가능하며 7 MeV이상의 고에너지가 아니면 인체표피의 보호층조차 투과할 수 없어서 체외방사선피폭대상이나 차폐의 대상에서 제외된다. 그러나 체내에 섭취되었을 때에는 심각한 문제로 대두된다. 다시 말하면 α선은 아주 큰 비전리로 인하여 자신의 전 에너지를 선원이 위치하고 있는 가까운 부분에 전달하고, 또 인체 내부조직에는 조직표면에 보호층이 없어서 이 에너지가 바로 전달되기 때문에 심각한 문제가 된다. 그러므로 체내피폭에서 α선을 방출하는 핵종을 가장 중요시하고 있다.

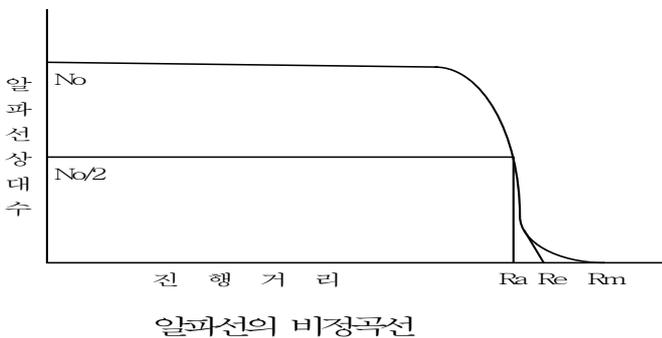
가. α선이 에너지를 잃는 과정

- ① 원자와의 비탄성충돌(주로 속박전자와 충돌하여 에너지상실)
- ② 궤도전자와 여기 및 전리작용
- ③ 원자핵과 산란
- ④ 원자핵과의 탄성산란이나 제동복사에 의한 에너지 손실은 아주 적다.

α선은 그 비적이 거의 직선운동을 하며 80%이상이 비탄성 충돌로 인하여 그 에너지를 잃는다. 이때 에너지를 잃는 매가 나중은 α선의 쿨롱장과 매질원자의 궤도전자에 의한 쿨롱장이 서로 반응하여 매질의 원자를 전리, 여기시킴으로서 에너지를 상실하게 된다.

α선의 비적을 살펴보면 동일한 초기에너지를 가졌더라도 통계적, 확률적으로 반응횟수가 1회반응에서 잃는 에너지의 양이 다르기 때문에 비정이 조금씩 차이가 나는데 이것을 스트래글링(Straggling)이라고 한다.

나. α입자의 비정곡선



상기 곡선에서 보듯이 α선의 수가 1/2로 감소되는 지점까지의 거리를 평균비정(Ra)이라 정의한다. 한편 Rm은 최대비정이며, 외삽비정(Re)은 곡선부분을 X축에 외삽하여 구한 비정을 말한다. 일반적으로 α선의 비정으로는 평균비정을 많이 사용된다.

다. α입자의 비정

① α선이 STP 공기속을 통과할 때

- $R(cm) = 0.56 E_{max} [MeV]$  ( $E < 4MeV$ )
- $R = 1.24E - 2.62 [cm]$  ( $4 < E_a < 8MeV$ )

② α선이 공기이외의 다른 매질속을 통과할 때

$R(mg/cm^2) = 0.56 R_{air} A^{1/3}$  ( $R_{air}$ 의 단위는 cm)

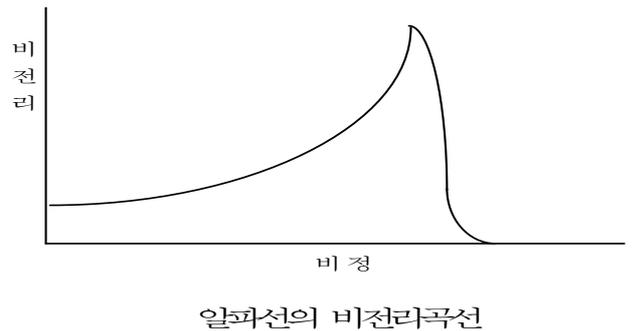
③ 또한 공기와 신체의 연조직의 성분에 의해 결정되는 실험 원자번호가 서로 크게 다르지 않기 때문에 공기중 α선 평균비정 Ra를 이용하면 신체 연조직에서의 비정 R<sub>tissue</sub>를 쉽게 구할 수 있다. 이때 ρ<sub>air</sub>는 공기밀도이고 ρ<sub>tissue</sub>는 신체연조직밀도이다.

$$R_{tissue} = (\rho_{air} / \rho_{tissue}) Ra$$

라. Bragg 곡선(비전리 곡선)

기체속에서 하전입자가 달린 거리를 가로축에, 비전리를 세로축에 취한곡선으로서 하전입자가 정지하기 직전(수백KeV)에서 비전리가 최대가 된다.

α선이 매질을 통과하면서 생기는 이온쌍수를 α선의 비정과 관련시켜서 생각할 수 있는데 이러한 개념에서 정의된 물리량이 비전리이다. 비전리는 α선의 에너지와 관계있으며 아래 그림에서 보듯이 에너지가 감소함에 따라 서서히 증가하다가 정지하기 직전에 최대가 된다. 비전리가 크다는 말은 α선의 에너지손실이 많다는 의미이다.



■  $\gamma$ 선과 물질과의 상호작용

전자파와 물질과의 상호작용하는 방법은 여러 가지가 있으나, 보편 물리분야에 있어서 중요시 되는 과정은 다음의 다섯 가지이다.

- ① 광전효과(Photoelectric effect)
- ② 콤프턴 산란(Compton scattering)
- ③ 전자 쌍생성(Pair production)
- ④ 레일레이 산란(Rayleigh scattering)
- ⑤ 광핵반응(Photonuclear interaction)

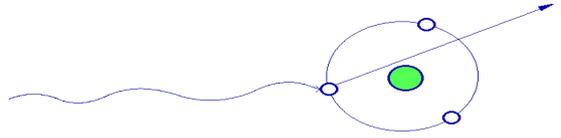
이중 ①, ②, ③의 경우 더욱 더 중요한 역할을 하는 데 에너지 범위가 10 keV - 50 MeV범위에서는 이 3가지 상호작용에 의해 물질에 흡수된다. 이들의 발생빈도는 광자의 에너지와 광자가 통과하는 매질의 원자번호의 함수이다.

이들의 관계를 표로 살펴보면 아래와 같다.

과 정	E 및 Z 의존성	에너지(E)와의 관계
광전효과 ( $\tau$ )	$Z^5 / E_\gamma^{3.5}$	입사광자의 에너지가 증가할 때 감소하며 ~0.5 MeV 영역에서 주로 발생
콤프턴 산란 ( $\sigma$ )	$Z / E_\gamma$	입사광자의 에너지가 0.5~5 MeV 영역에서 다발하며 약 1 MeV에서 최대로 발생
전자쌍생성 ( $\kappa$ )	$Z^2 (E_\gamma - 2m_e c^2)$	입사광자의 에너지 1.02 MeV 이하에서는 결코 발생하지 않는다

가. 광전효과(Photoelectric Effect)

광자가 원자에 충돌하여 전에너지를 원자와 결합된 전자에 주어 전자를 튀어 나오게 하고 자신은 소멸하는 현상이다.



이때 광자는 전자의 결합에너지( $E_b$ )보다 큰 에너지를 가져야 한다.

광전효과는 원자핵 가까이에서 잘 일어나며 실제로 모든 광전효과의 80% 이상이 최내각(K각)전자와 작용한다. 이때 반도핵도 운동에너지를 가지나 광전자의 운동에너지보다 극히 작으므로 무시한다.

① 튀어나온 전자의 운동에너지(광전peak의 에너지)

$$E_p = E_\gamma - E_b$$

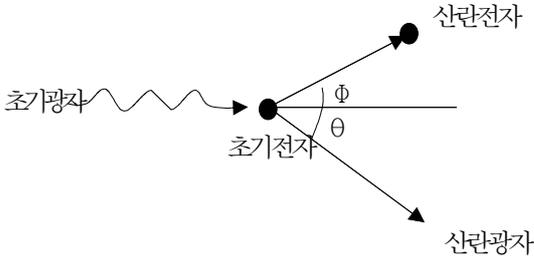
-  $E_p$  : 튀어나온 전자의 운동에너지  
 -  $E_b$  : 입사 $\gamma$ 선의 에너지  
 -  $E_\gamma$  : 전자의 결합에너지

② 광전효과가 일어날 확률( $\tau$ )

- K궤도전자에서 가장 크고(원자핵과의 속박이 크면 큰 만큼 광전효과의 확률은 크게 되며, 역으로 자유전자에서는 이 효과가 일어나지 않는다. 그러므로 속박전자의 K각전자가 관여하는 비율이 크지만 L각전자등에서도 관여하는 비율은 조금 있다)
- 물질의 원자번호 Z가 클수록 크다.
- 저에너지의  $\gamma$ 선 일수록 크다.
- $\gamma$  에너지가 1 MeV 이하일 때 중요

나. 콤프톤 산란(Compton Scattering)

광자가 물질속을 진행할 때 물질내의 전자(주로 최외각 전자 또는 자유전자)와 충돌하여 진행방향을 바꾸어 산란하는 현상 ("광자와 자유전자" 사이에 일어나는 탄성충돌)



이때 광자가 전달하는 에너지의 일부는 속박전자를 떼어내는데 그 에너지를 소모하고 나머지는 전자의 운동에너지로 소모된다. 따라서 콤프턴산란은 비탄성산란이라고 할 수 있다. 그러나 콤프턴산란은 매질원자의 최외각전자의 에너지가 아주 작을 때 일어나므로 이를 무시하고 탄성산란으로 분류하여 처리된다. 다만 입사광자의 에너지가 아주 작을때나 매질의 원자번호가 아주 클때에는 약간의 보정이 요구된다. 따라서 반응전 후의 운동량과 에너지의 합이 보존된다.

구 분	에 너 지	운 동 량
초기광자	$hc/\lambda'$	$h/\lambda$
초기전자	$mc^2$	0
산란광자	$hc/\lambda'$	$h/\lambda'$
반도전자	$mc^2$	$mv$

전자의 반도각  $\psi$ 는  $90^\circ$ 를 넘어서 입사광자의 방향과 역행해서 튀어나갈 수 없다는 사실을 알 수 있다. 다음의 결과에서 알 수 있듯이 광자의 산란각  $\theta = 180^\circ$ 일 때 반도전자의 에너지(E)가 최대가 되며 산란광자의 에너지(E)가 최소가 된다.

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos\theta)$$

$$= 0.0243(1 - \cos\theta) (\text{\AA})$$

- $\theta = 0^\circ (0 \text{\AA})$
- $\theta = 90^\circ (0.0243 \text{\AA})$  - 콤프턴파장
- $\theta = 180^\circ (0.0486 \text{\AA})$  - 반도전자의 에너지가 최대(산란광자의 에너지가 최소)가 된다.

$\Delta\lambda$ 를 Compton 변위라 하며  $\gamma$ 선의 산란각  $\theta$ 에만 의존하고 입사  $\gamma$ 선의 파장이나 에너지와는 무관하다.  $\frac{h}{m_0c}$ 는 상수 값이며, 계산하면  $0.0243$ 이다. 윗 식에서 산란  $\gamma$ 선의 에너지와 반도전자에너지를 구하면 다음과 같다.

① 산란  $\gamma$ 선의 에너지

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E(1 - \cos\theta)}{m_0c^2}}$$

② 반도전자의 에너지

반도전자의 에너지 = 초기  $\gamma$ 선의 에너지 ( $h\nu_0$ ) - 산란  $\gamma$ 선의 에너지 ( $h\nu$ )

$$E'_e = E_\gamma - E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{m_0c^2}{E_\gamma(1 - \cos\theta)}}$$

- 전자의 산란각  $\Phi$ 는  $90^\circ$ 를 넘을 수 없어 산란전자는 입사광자의 진행방향에 역행해서 산란 할 수 없다.
- 반도전자 에너지의 운동에너지는  $\theta = 180^\circ$  (후방산란)일 때 최대가 된다. 이 때는 광자가 똑바로 뒤로 산란될 때를 말하는데 전자는 최대의 에너지를 받게 된다.(콤프턴단에너지) 이 값에서 저에너지 방향으로 연속스펙트럼을 나타내며, 최대치는 스펙트럼 상에서 Compton edge라 부른다.

콤프턴단에너지 :  $E_{max} = \frac{h\nu_0}{1 + \frac{m_0c^2}{2h\nu_0}}$

③ Compton 산란이 일어날 확률( $\sigma$ ) :  $\sigma \propto Z / E_\gamma$

④ Compton 산란의 특징

- 에너지 :  $0.1 \sim 1.0 \text{ MeV}$  사이에서 일어난다.
- 원자번호가 높은 물질일수록 콤프톤 산란이 일어날 확률이 높다.
- $E_c$  스펙트럼 : Compton edge 에너지 이하에서 분포하는 연속스펙트럼이다.

### 다. 전자쌍생성(Pair Production)

일정한 에너지 이상을 가진 광자가 핵의 쿨롱장 부근에서 소멸하여 음양의 한쌍의 전자를 생성하는 현상으로 1.02 MeV 이하에서는 발생하지 않는다.

드물게 원자의 궤도전자에 의해 발생되기도 하는데 이때의 쌍생성은 삼중생성이라 한다.

이는 광자가 소멸되면서 생성되는 양전자 및 음전자 외에 광자가 소멸전에 궤도전자를 이탈시킴으로 발생되는 데 이것이 두 개의 음전자와 한 개의 양전자를 발생하게 하는 것처럼 보인다. 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 적은 에너지를 가진 2개의 광자가 발생된다.

#### ① 전자 쌍생성이 일어날 확률(K)

$$K \propto Z^2 (E_\gamma - 2m_e c^2) (E_\gamma > 1.02 MeV)$$

#### ② 전자쌍생성 에너지(전운동에너지)

$$E_{e^-} + E_{e^+} = E_\gamma - 2m_e c^2$$

#### ③ $E_p$ 스펙트럼

$$E_\gamma, E_\gamma - 0.511 MeV, E_\gamma - 1.022 MeV$$

3개의 피크 및 0.5 MeV(소멸선)의 피크를 갖는 연속스펙트럼이다.

#### ④ 양전자( $\beta^+$ ) 소멸

양전자가 물질 속의 음전자와 결합하여 소멸되고, 전체로서  $2m_e c^2$ 의 에너지에 해당하는 0.511 MeV의  $\gamma$  선을 두 개 방출하는 현상

#### ⑤ 전자 쌍생성의 특징

- 1.02 MeV에서만 발생한다.
- 원자핵과 궤도전자사이의 공간에서 발생한다.
- 콤프턴산란과 광전효과를 수반한다.
- 전자 쌍생성은 복사에너지가 질량에너지로 전환하는 과정이다.

### 라. 광핵 반응(Photonuclear Interaction)

원자핵이 광자를 흡수하여 광자는 소멸되고 원자핵에서 한 개 또는 여러 개의 핵자(대부분 중성자)가 발생하는 현상이다.

광핵작용을 일으키기 위해서는 일정한 에너지 준위 이상의 에너지를 가져야 한다. 어느 경우든지 광핵작용을 일으키기 위해서는 모든 단면적의 5% 이내이다. 따라서 이 반응은 방사선에너지의 흡수측면에서는 중요하지 않으나 작용결과 방사성을 띄는 원자핵이 생성된다는 점에 유의하여야 한다.

광전효과, 콤프턴산란, 전자쌍생성등은 물질 내의 전자와의 상호작용이었다. 전자기파 중에서도 에너지가 큰 편에 속하는 감마선이나 엑스선은 보통 수 MeV 또는 수십 keV의 에너지를 가진다.

이 정도의 에너지로는 핵과의 상호작용으로 에너지를 잃지 않는다. 핵자당 결합에너지는 6~8 MeV 정도이다. 핵자당 결합에너지라는 것은 핵자 하나를 핵으로부터 분리시키는데 들어가는 에너지이다. 따라서 감마선이나 엑스선이 핵자당 결합에너지 이상의 에너지를 가지지 않으면 핵을 변화시킬 수 없다. 우리가 보통 경험하는 엑스선이나 감마선은 핵자당 결합에너지보다 작으므로 광핵반응은 일어나지 않는다. 그러나 요즘은 수십 MeV 정도의 엑스선 발생장치도 사용되고 있으므로 이때에는 광핵반응에 의해 생성되는 중성자 등의 차폐도 고려해야 한다. 광핵반응도 원소에 따라 약간씩의 차이는 있지만 15~20 MeV의 에너지를 가지는 전자기파에서 잘 일어난다고 알려져 있다. 광핵반응의 예로는 다음과 같은 것이 있다.



마. 레일레이 산란(Rayleigh Scattering)

광자가 원자 전체와 상호작용하여 일으키는 산란으로 탄성산란으로 분류된다. 에너지의 변화없이 방향만 변하며, 따라서 커마나 흡수선량에 기여하는 바가 전혀없다.

전자파의 에너지가 적을 때 잘 일어나고 전자기파가 전자와 산란을 하여도 에너지는 잃지 않고 그 진행방향만 바꾸는 현상이다. 즉 전자기파의 에너지가 물질에 전혀 흡수되지 않는 산란이다. 이것은 전자기파가 원자에 입사하여 전자와 상호작용하여 전자를 강제로 진동시키고 이 전자가 진동하면 그 주위에는 같은 진동수의 전자기파가 다시 발생된다. 따라서 물질에 에너지는 전혀 흡수되지 않는다.

바. γ선의 스펙트럼

- ① 전 흡수 peak (광전 peak) :  $E_{\gamma}$
- ② X선 Escape peak :  $E_{\gamma} - E_X$
- ③ Single Escape peak :  $E_{\gamma} - m_o c^2$
- ④ Double Escape peak :  $E_{\gamma} - 2m_o c^2$
- ⑤ Compton edge :

$$E_{\gamma} - \text{후방산란 최소 에너지} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{m_o c^2}{2 E_{\gamma}}}$$

$$\text{⑥ 후방산란 최소에너지} : \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{2 E_{\gamma}}{m_o c^2}}$$

$$\text{⑦ Sum peak} : E_{\gamma} + E'_{\gamma}$$

사. Co-60 을 Ge(Li)감마 핵종 분석기로 측정시 각종 peak(총 13개의 peak)

1) 광전 효과

광전 효과에 의한 peak는 Co-60의 광자에너지가 갖고 있는 2개의 에너지인 ① 1.17MeV와 ②1.33MeV에서 나타난다.

2) 콤프톤 산란

가) 1.17MeV의 광자에너지에 대한 compton산란

(1) compton edge peak

반도(반조)에너지(  $E'_e$  )

$$E'_e = E_\gamma - E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{m_e c^2}{E_\gamma (1 - \cos\theta)}}$$

에서  $\theta = 180^\circ$  일 때  $E'_e$ 가 최대 에너지를 가지며 compton edge에너지라 한다.

$$E'_e = \frac{1.17}{1 + \frac{0.511}{1.17 \times 2}} = \text{③}$$

0.814MeV

(2) 후방산란 peak

$$E_b = E - E'_e = 1.17 - 0.814 = \text{④}$$

0.35MeV

나) 1.33MeV의 광자에너지에 대한 compton산란

(1) compton edge peak

$$E'_e = \frac{1.33}{1 + \frac{0.511}{1.33 \times 2}} = \text{⑤}$$

1.116MeV

(2) 후방산란 peak

$$E_b = E - E'_e = 1.33 - 1.116 = \text{⑥} \quad 0.214MeV$$

3) 전자 쌍생성

전자 쌍생성은 광자에너지가 1.02MeV이상에서만 Co-60의 2개의 광자에너지는 모두 1.02MeV이상이므로 전자 쌍생성이 나타날 수 있다.

가) 쌍생성에 의한 peak

(1) 1.17MeV에 대한 쌍생성 peak

○ Single Escape Peak

$$E_s = E - 0.51 = 1.17 - 0.51 = \text{⑦} \quad 0.66MeV$$

○ Double Escape Peak

$$E_d = 1.17 - 1.02 = \text{⑧} \quad 0.15MeV$$

(2) 1.33MeV에 대한 쌍생성 peak

○ Single Escape Peak

$$E_s = E - 0.51 = 1.33 - 0.51 = \text{⑨} \quad 0.82MeV$$

○ Double Escape Peak

$$E_d = E - 1.02 = 1.33 - 1.02 = \text{⑩} \quad 0.31MeV$$

4) 기타

1) Sum Peak

Co-60과 같은 2개 이상의 감마선을 동시에 방출하는 경우에는 2개의 감마선이 동시에 검출기에 입사하여 함께 에너지를 잃게되어 각각의 감마선 에너지의 합에 해당되는 위치에 sum peak가 나타날 수 있다.

$$E_m = 1.17 + 1.33 = \text{⑪} \quad 2.5MeV$$

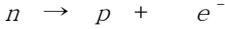
2) X 선 Escape Peak

광전효과가 일어나더라도 두께가 얇은 반도체 계수기를 사용할 경우 특성X선이 밖으로 달아날 확률이 있게되어 K-X선(28KeV)이 밖으로 달아나서 E-28KeV에 해당하는 위치에 peak가 나타날 수 있다.

Co-60의 광자 에너지는 ⑫1.17MeV, ⑬1.33MeV에 각각 X 선 Escape peak가 나타날 수 있다.

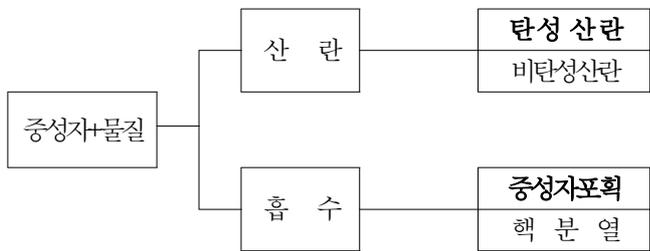
■ 중성자와 물질과의 상호작용

중성자는 원자핵의 구성요소(핵자;nucleon)의 하나이고 이 질량은 거의 양자의 질량과 같지만 단독으로는 안정하지 못하고 반감기 11.7분으로 붕괴하고 β선을 방출하여 양자가 된다.



중성자는 문자 그대로 전하를 갖지 않기 때문에 그것 자체는 직접전리작용은 가지지 않지만 물질 중에서 양자와 충돌한다거나 핵반응 등에 의해서 2차적으로 생긴 하전입자에 의해서 전리가 일어난다. 그러므로 중성자선은 간접전리방사선이다. 물질투과능력은 그 에너지 흡수 물질에 따라 극히 복잡한 양상을 보인다.

가. 에너지를 잃는 과정



① 탄성산란: (n, n)

중성자가 물질의 원자핵과 충돌하여 당구공처럼 중성자의 운동에너지의 일부 또는 전부를 원자핵에 주게 된다. 이때 충돌전후의 운동량과 운동에너지가 보존되는 경우, 즉 원자핵을 여기시키지 않는 경우를 탄성산란이라고 하며 이 과정을 기호로는 (n, n)로 표시한다.

비상대론적인 운동에너지를 갖는 중성자가 물질에 입사할 경우, 충돌에 의하여 산란된 원자핵의 에너지 E는, A를 원자핵의 질량수로 하면

$$E = \frac{4A}{(A+1)^2} (\cos^2 \phi) E_n$$

이다. 여기서 E<sub>n</sub>은 중성자의 에너지, φ는 방출된 핵반조핵의 방출각이다.

위 식에서 반조핵에 주어진 에너지는 산란각 φ에 따라 결정됨을 알 수 있다.

즉 중성자가

- 흡수체의 핵을 스쳐 지나는 경우 반조핵은 입사중성자에 대해 거의 수직으로 방출되기 때문에 (φ ≅ 90°) 반조에너지는 E ≅ 0이고
- 정면으로 충돌한 경우 (φ ≅ 0°) E가 최대가 된다. 즉

$$E_{max} = \frac{4A}{(A+1)^2} E_n \text{ 이다.}$$

표적핵의 질량이 커짐에 따라 반조핵에 전달되는 최대에너지의 비 E<sub>max</sub>/E<sub>n</sub>는 감소한다. 즉 A = 1인 수소핵인 경우 E<sub>max</sub>/E<sub>n</sub> = 1로 최대가 되는데 이것은 중성자가 입사할 때 가졌던 운동에너지가 거의 모두 수소핵으로 옮겨졌음을 뜻한다.

다시 말해서 감마선인 경우 흡수체의 질량이 클수록 흡수가 잘되었지만 중성자인 경우는 반대로 질량이 적을수록 흡수가 잘됨을 알 수 있다.

이외같이 탄성산란에 의하여 운동에너지를 얻은 원자핵은 일반적으로 전리작용을 갖게 되는데, 특히 원자핵이 가벼운 경우 효과적으로 중성자의 에너지를 반조핵에 옮기기 때문에 이것을 중성자의 검출에 이용된다.

② 비탄성산란: (n, n')

중성자가 물질의 원자핵과 충돌하여 산란될 때 충돌전후의 운동량과 운동에너지가 보존되지 않는 경우를 비탄성산란 또는 비탄성충돌이라하며 (n, n')으로 표시한다. 이때 물질의 원자핵은 여기상태로 되며, 여기된 핵은 짧은 시간내에 높은 에너지를 갖는 γ선을 방출하고 기저상태로 돌아간다. 대부분의 (n, n') 반응은 수 MeV이상의 고에너지를 갖는 고중성자가 관여하며 이 반응을 일으키기 위하여는 일정한 값의 최저에너지를 가져야 한다.

즉 이 문턱에너지 이하에서는 (n, n')반응이 일어날 수 없다. 그런데 이 반응은 상대적으로 발생확률이 아주 작아서 중성자검출에 거의 이용하지 않는다.

탄성산란과 거의 같은 양상으로 충돌하여 원자핵의 여기를 동반하는 경우로 여기한 원자핵이 기저상태로 되돌아 갈 때 γ선의 방출을 동반한다. 이 반응은 최저 문턱값을 가지기 때문에 속중성자의 에너지식별에 이용할 수 있다.

- 흡열반응이기 때문에 문턱에너지가 존재한다.
- 대부분 수 MeV이상의 고에너지를 갖는 고속중성자가 관여한다.

③ 중성자포획 ( $n, \gamma$ )

중성자는 쿨롱력이 없기 때문에 대부분의 핵과 상호작용하여 쉽게 흡수되어 질량수가 하나 더 많은 복합핵이 되는데 이러한 상호작용을 중성자포획이라 하고 ( $n, \gamma$ )로 표시된다. 이때 중성자의 결합에너지에 해당하는 약 8MeV의 에너지를 갖는  $\gamma$ 선을 방출하며 이  $\gamma$ 선을 포획감마선이라 한다. 열에너지 근방에서는 포획에 의한 단면적,  $\sigma_c$ 는  $1/v$ , 즉  $E^{-1/2}$ 에 비례하고 열외중성자 영역에서는 복잡한 공명현상을 나타내는데 이 영역을 공명흡수영역이라 한다. 중성자포획으로 형성된 복합핵이 여기상태에서 즉각 또는 시간이 경과된 후에 방사선을 방출하고 안정한 상태로 되는 과정을 방사화(activation)라 한다. 이 복합핵의 붕괴시간은 거의 0부터 수년에 이르기까지 다양하다.

입사중성자의 에너지가 흡수체내의 방출될 입자의 결합에너지보다 큰 경우

중하전입자를 방출할 수 있는 중성자유도에 의한 포획반응을 일으킬 수 있다. 따라서 문턱에너지가 1MeV 이상인 고속중성자의 경우 ( $n, p$ ), ( $n, \alpha$ ), ( $n, 2n$ ) 등의 포획반응이 가능하게 되어 여기된 복합핵은 하전입자를 방출하고 안정된 상태로 돌아간다. 그러나 3가지 중요한 예외가 있는데 이들은 문턱에너지에 관계없이 반응이 일어나며 열중성자( $E_n = 0.025eV$ )에서 다음과 같은 흡수확률을 갖는다.

핵 반응	열중성자 반응단면적 ( $\sigma_{th}$ )	자연상태에서의 존재비 (Abundance)
${}^6_3Li (n, \alpha)$	940b	7.5%
${}^{10}_5B (n, \alpha)$	3836b	20%
${}^{14}_7N (n, p)$	1.81b	99.6%

가)  $\gamma$ 선 방출: ( $n, \gamma$ )

중성자가 핵에 흡수되어 핵의 질량수를 증가시켜 새 핵이 되는데 이 새 핵은 여기상태로 있게되고 따라서 여러 개의  $\gamma$ 선을 내면서 낮은 에너지 준위로 떨어지게 된다.

나) 하전입자 방출: ( $n, p$ ), ( $n, \alpha$ )

중성자가 흡수된 후에  $\gamma$ 선이 아닌 하전입자를 방출하여서 낮은 에너지 준위로 떨어지는 반응

대) 중성자 방출 ( $n, n$ ), ( $n, 2n$ ) ·····

중성자가 아주 큰 에너지를 가지는 경우 핵과 충돌하여

흡수된 뒤  $\gamma$ 선이나 하전입자를 방출하지 않고 중성자를 방출하는 반응

④ 핵분열: ( $n, f$ )

- 중성자를 흡수한 핵이 비슷한 크기의 핵 두 개로 쪼개지는 반응
- 중성자 유도에 의한 포획반응의 한 종류이다.

나. 열중성자

열중성자는 물질과 평형상태에 있는 중성자이다. 그 에너지는 상온(25°C)에서 0.025eV이며 속도는 2200m/s 이다.

$$\frac{1}{2} m v^2 = k T$$

$$k : \text{Bolzman 상수} = 1.38 \times 10^{-23} J / ^\circ K$$

$$\text{참고) } T = (273 + x^\circ C) ^\circ K \quad (T : \text{절대온도})$$

■ 붕괴계열을 이루는 자연방사성 원소

방사성붕괴는 한 번으로 끝나지 않고 계속하여 붕괴를 하는 것을 붕괴계열이라고 한다.

지구의 나이는 약 46억년이고 방사성 붕괴라는 것은 원자핵이 다른 핵으로 변하는 과정이므로 붕괴를 처음 시작하는 원소는 반감기가 아주 길어야 현재까지 남아 있을 수 있다. 이러한 원소가 세가지 있고 이들은 각각

- ${}_{92}^{238}U$  (반감기: 45억년)
- ${}_{92}^{235}U$  (반감기: 9억년)
- ${}_{90}^{232}Th$  (반감기: 130억년이다)

이러한 세 가지의 붕괴계열을 질량수로 표시하기도 한다. 자연적으로 일어나는 방사성붕괴는 알파 붕괴와 감마붕괴의 세 가지이다

알파붕괴는 질량수가 4가 줄어들고 원자번호는 2가 줄어든다.

베타붕괴는  $\beta^-$ ,  $\beta^+$  와 케도전자 포획의 세 가지가 있지만

**붕괴계열을 이루는 방사성원소는  $\beta^-$  붕괴만 한다.**

베타붕괴에서는 원자번호만 변화가 있고 질량수의 변화는 없다. 그리고 감마붕괴에서는 질량수나 원자번호가 변하지 않으므로 어떤 붕괴가 일어나더라도 질량수의 변화는 4가 줄어들거나 변하지 않거나이다.

따라서 제일 처음 붕괴를 시작하는 방사성원소의 질량수가 4의 배수이면 어떤 방사성 붕괴가 일어나더라도 그 계열 내의 방사성원소의 질량수는 4의 배수가 될 것이다. 이렇게 하여 붕괴계열을 이루는 방사성원소들은 질량수를 4의 배수로 표시하는 방법으로 나온다

자연에 존재하는 붕괴계열은 세 가지이므로 한 가지는 반감기가 짧아 자연에 존재하지 않는 계열이라고 추정할 수 있으며 이것은 인공방사성 원소를 생성시킴으로써 그 존재가 확인되었다.

자연에 존재하는 붕괴계열은 모두 최종 안정원소가 남고 이들의 질량수는 각각 다르다. 따라서 우리몸이 포함된 표본에서 납의 양을 알아낸다면 이것이 얼마나 오래 전에 생성된 것인지 알 수 있다. 이러한 방법으로 지질연대를 측정한다.

- **붕괴계열의 공통점**
  - 모핵종의 반감기가 길다.
  - 최종생성물은 Pb의 안정동위원소(Neptunium계열 제외)
  - 붕괴계열 도중에는 반드시 Rn의 동위원소를 생성한다.

계열	붕괴계열	반감기
Actinium <sup>D</sup> 계열 (4n+3)	${}_{92}^{235}U \rightarrow \dots \rightarrow {}_{86}^{219}Rn \rightarrow \dots$	7억년
Uranium계열 (4n+2)	${}_{92}^{238}U \rightarrow \dots \rightarrow {}_{86}^{222}Rn \rightarrow \dots$	45억년
Neptunium계열 (4n+1)	${}_{93}^{237}Np \rightarrow \dots \rightarrow {}_{83}^{209}Bi$	210만년
Thorium계열 (4n)	${}_{90}^{232}Th \rightarrow \dots \rightarrow {}_{86}^{220}Rn \rightarrow \dots$	130억년

1) 붕괴계열이 밝혀질 당시에는 U-235이 발견되지 않았으므로 U-235가 알파붕괴가 2회 베타붕괴가 1회 일어난 후 생성되는  ${}_{89}^{227}Ac$ 에서 시작하는 핵종으로 보았기 때문에 이 계열을 약탈 계열이라고 부름

■ 비 붕괴계열 천연방사성핵종

핵종	동위원소 존재비(%)	반감기(년)	붕괴형식
$K^{40}$	0.0118	$1.26 \times 10^9$	$\beta^-$ (89.5%), EC(10.5%)
$V^{50}$	0.24	$6 \times 10^{15}$	$\beta^-$ (~30%), EC(~70%)
$Rb^{87}$	27.85	$4.8 \times 10^{10}$	
$In^{115}$	95.72	$6 \times 10^{14}$	$\beta^-$
$Te^{123}$	0.87	$1.2 \times 10^{12}$	EC
$La^{138}$	0.089	$1.2 \times 10^{11}$	$\beta^-$ (~30%), EC(~70%)
$Ce^{142}$	11.07	$> 5 \times 10^{15}$	$\alpha$
$Nd^{144}$	23.85	$2.4 \times 10^{15}$	$\alpha$
$Sm^{147}$	14.97	$1.05 \times 10^{11}$	$\alpha$
$Gd^{152}$	0.20	$1.1 \times 10^{14}$	$\alpha$
$Lu^{176}$	2.59	$2.2 \times 10^{10}$	$\beta^-$

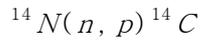
가. K(칼륨)

- ① 칼륨은 지각에 상당히 많은 양을 차지하고 있는 원소로서 음식물 등을 통하여 인체로 들어온다.
- ② K의 동위원소 중에서 K-40은 반감기가 약 13억년 정도로 대단히 길고 칼륨의 동위원소 중 그 존재비율은 0.0118%이다.
- ③ 칼륨은 인체에 미량이지만 필요한 원소이고 그 중 K-40은 보통 사람의 몸 속에 0.1μCi정도 들어 있다. 즉 약  $10^{20}$  개 정도의 K-40이 우리 몸 속에 있고 하루에 약 3억개 정도의 K-40이 붕괴되고 있다.
- ④ K-40은  $\beta^-$  붕괴가 약 89%, 케도전자포획이 약 11%의 두 가지 형식으로 붕괴를 하는데
  - $\beta^-$  붕괴를 할 때에는 감마선은 방출되지 않으면서 칼슘으로 되고 ( ${}_{19}^{40}K \rightarrow {}_{20}^{40}Ca + \beta^-$ )
  - 케도전자포획을 하면 아르곤으로 되면서 약 1.46MeV의 제법 에너지가 큰 감마선도 동시에 방출한다.  
( ${}_{19}^{40}K + e^- \rightarrow {}_{18}^{40}Ar + \gamma$ )
- ⑤ 이 감마선은 K-40이 몸 안에 있더라도 인체 외부에까지

투과하여 나오므로 전신 피폭검사로 그 측정이 가능하다.

나. C-14

C-14는 우주선 중의 중성자와 대기 중의 질소가 반응하여 계속 생성되는 핵종으로서 반감기가 약 5730년이고 지구의 역사에 비해 짧으면서도 자연에 존재하는 방사성 핵종이다.



■ 우주선 기인 방사성핵종(유도방사성핵종)

우주선이 지상 수 km의 고층대기권에 있는  $N$ ,  $O$ ,  $Ar$  등의 원자핵과 충돌하여 핵반응을 일으킨다. 이때 방출되는 양성자, 중성자 등의 입자나 중간자 등이 재차 대기성분의 원자와 2차적으로 핵반응을 일으켜 방사성핵종을 생성한다. 이렇게 생성된 천연방사성핵종을 유도방사성핵종이라 한다.

핵종	반감기	생성 핵반응	존재
$H^3$	12.26y	우주선에 의한 $^{14}N(n, t)^{12}C$ 및 파쇄 반응	빗물, 지표/지하수
$Be^7$	53.6d	우주선에 의한 $O$ , $N$ 의 파쇄반응	빗물
$B^{10}$	$2.5 \times 10^6 y$	"	해저토
$C^{14}$	5,730y	우주선에 의한 $^{14}N(n, p)^{14}C$ 반응	대기, 생체, 해수
$Na^{22}$	2.62y	우주선에 의한 $Ar$ 의 파쇄반응	해수
$P^{32}$	14.28d	"	
$S^{35}$	88d	"	
$Cl^{36}$	$3.08 \times 10^5 y$	우주선에 의한 $^{35}Cl(n, \gamma)^{36}Cl$ 반응	$Cl$ 을 함유하는 암석, 광물
F·P		$U^{235}$ , $U^{238}$ , $Th^{232}$ 의 핵분열	$U$ , $Th$ 등을 함유하는 암석, 광물
$U^{233}$	$1.6 \times 10^5 y$		$Th$ 광
$Np^{237}$	$2.1 \times 10^6 y$		$U$ 광
$Pu^{239}$	24,390y		

■ 천연 방사성핵종의 분포

가. 대기중

- $Rn^{220}$ ,  $Rn^{222}$  및 그 붕괴생성핵종 ( $Pb^{210}$ ,  $Bi^{210m}$ ,  $Po^{210}$ )
- $H^3$ ,  $C^{14}$ ,  $Be^7$ ,  $Na^{22}$ ,  $Si^{32}$ ,  $P^{32}$ ,  $S^{35}$  등

나. 암석중

- $U$ 계열 핵종,  $Th$ 계열 핵종 및  $K^{40}$
- 존재량
  - $U^{238}$  : 0.5~3pCi/g
  - $Th^{232}$  : 1~13pCi/g
  - $Ra^{226}$  : 0.5~37pCi/g
  - $K^{40}$  : 1~30pCi/g

다. 수중

- $U$ 계열 핵종,  $Th$ 계열 핵종 및  $K^{40}$
- 존재량
  - $U^{238}$  : 0.2~9pCi/l
  - $Th^{232}$  : 0.1~11pCi/l
  - $Ra^{226}$  : 0.02~0.3pCi/l
  - $K^{40}$  : 300pCi/l

라. 음식물중

- 천연방사성핵종중 특히 토양이나 물에 녹아 있는 핵종들이 음식물중에 섭취되어 인체내에 들어온다.
- 대기중 핵종은 호흡에 의해 들어온다.
- 음식물중  $K^{40}$  섭취량 : 2000pCi/day

■ 방사평형

가. 단일붕괴

- 어미핵종 A가 붕괴되어 딸핵종 B로 되는데 딸핵종 B는 안정핵종이어서 더 이상 붕괴하지 않는다.
- 어미핵종 A의 붕괴율 = 딸핵종 B의 생성율
- 생성된 딸핵종 B의 원자수 ( $N_B$ )

$$N_B = N_A^0 - N_A = N_A^0 - N_A^0 e^{-\lambda_A t}$$

$$= N_A^0 (1 - e^{-\lambda_A t})$$

나. 연속붕괴

- 어미핵종 A가 붕괴하여 생성된 딸핵종 B도 방사성이어서 다시 붕괴되어 또 다른 딸핵종 C를 생성하는 경우
- A → B → C
- 생성된 딸핵종 B의 원자수 ( $N_B$ )

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

$t = 0$ 일 때 어미핵종 A만 있으므로  $N_B^0 = 0$ 이므로

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

- 생성된 딸핵종 C의 원자수 ( $N_C$ )

$$N_C = N_A^0 - N_A - N_B$$

다. 방사평형 유도과정

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

그런데 처음에는  $N_A$ 만이 나타날 것이며 상수

$$N_B^0 = N_C^0 = 0 \text{ 이므로}$$

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

라. 과도평형(Transient Equilibrium)

어미핵종(A)의 반감기가 딸핵종(B)의 반감기가 길기(약 100 배 정도) 하지만 즉  $\lambda_A < \lambda_B$  로서 친핵종의 반감기가 매우 길지는 않은 경우에 일어난다. 이 경우에 근사적으로  $\lambda_A = 0$ 가 성립하지 않는다. 만약 친핵종이 초기에 순수하다고 가정할 수 있을 만큼 친핵종과 딸핵종이 분리된다면 원자수는 각

각  $N_A = N_A^0 e^{-\lambda_A t}$ 와

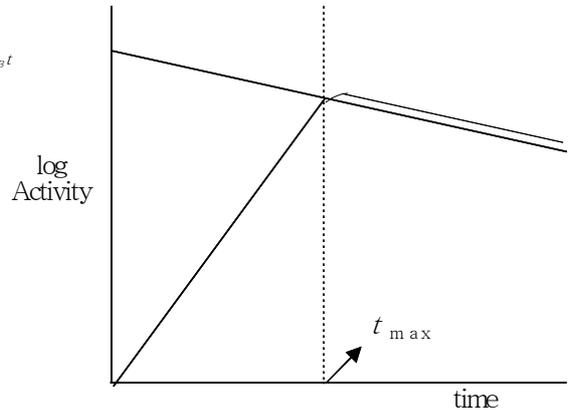
식  $N_B = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_A^0 (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t})$ 으로 주어진다.

어미핵종 A가 붕괴함에 따라 딸핵종 B는 시간  $t_{max}$ 에 도달할 때까지 성장한다.

즉,  $t_{max}$ 에서 어미핵종의 방사능  $A_A$ 와 딸핵종의 방사능  $A_B$ 는 같아지게 되다가  $t_{max}$  이후에는 딸핵종의 방사능  $A_B$ 는 어미핵종의 방사능  $A_A$ 보다 조금 크며, 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_B = A_A \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A}$$

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



- 평형시에 방사능강도의 비

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

이므로 딸핵종의 방사능강도는 친핵종의 방사능 강도보다  $\lambda_B / (\lambda_B - \lambda_A)$ 배 만큼 더 크다.

- 과도평형상태에서  $t_{max}$ 에 도달되는 시간

$$t_{max} = \frac{\ln(\frac{\lambda_B}{\lambda_A})}{\lambda_B - \lambda_A}$$

상기  $t_{max}$  시간에 도달되기 전 딸핵종 B의 성장은 빨리 진행되나  $t_{max}$  이후에는 딸핵종 B의 생성율보다 붕괴율이 더 빨라진다

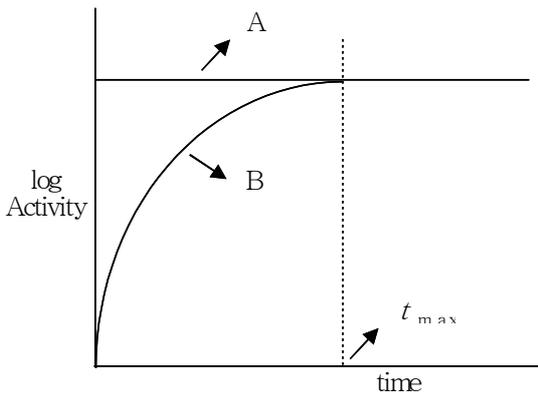
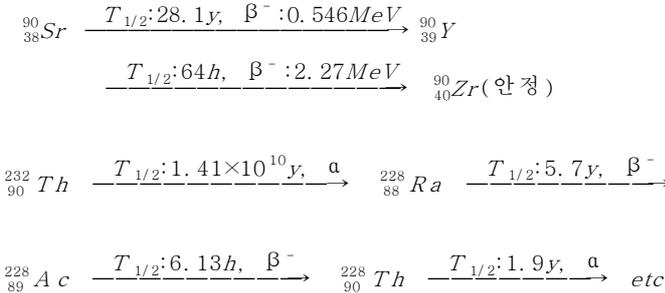
마. 영속평형(Secular Equilibrium)

영속평형은 모핵종의 반감기가 자핵종의 반감기보다 매우 길 경우 발생되며, 모핵종의 원자수 감소는 관측기간 중에는 무시되며, 이때 모핵종의 반감기는 자핵종의 반감기의 1000배 이상 된다.

아래 그림에서와 같이 자핵종의 방사능은 어떤 최대치에 도달되어 변화되지 않은채로 남게된다.

이것은 자핵종 B의 생성율과 붕괴율이 같기 때문이다. 다시 말하면 충분한 시간이 경과되고 나면 모핵종 A의 붕괴수나 자핵종 B의 붕괴수가 같아지게 된다. 이와 같은 상태에 있으면 A 및 B의 원자수는 언제나 A의 반감기에 따라 감소한다. 이와 같은 평형상태를 영속평형이라한다.

○ 영속평형의 예



위 그림에서 보는 바와 같이 평형이 도달된 후 ( $t \geq t_{\max}$ )에는 그 붕괴계열에 속하는 모든 동위원소의 방사능이 같아진다. 즉, 모핵종 A의 방사능  $A_A$ 와 자핵종의 방사능  $A_B$ 가 같아지며, 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\lambda_A N_A = \lambda_B N_B$$

영속평형은  $A \rightarrow B \rightarrow C$ 와 같은 계열뿐만 아니라, A의 반감기가 B이하에 비해서 충분히 길면  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow \dots \rightarrow X \rightarrow Y \rightarrow Z$ 와 같은 긴 붕괴계열에도 이루어진다. 즉 다음과 같은 평형 관계식이 성립한다.

$A_A = A_B = A_C = A_D = A_E$   
 또 시간  $t$ 가  $t_{\max}$  이하, 즉 영속평형에 도달되기 전 자핵종 B의 방사능  $A_B$ 는 다음 식에 의해 계산되어진다.

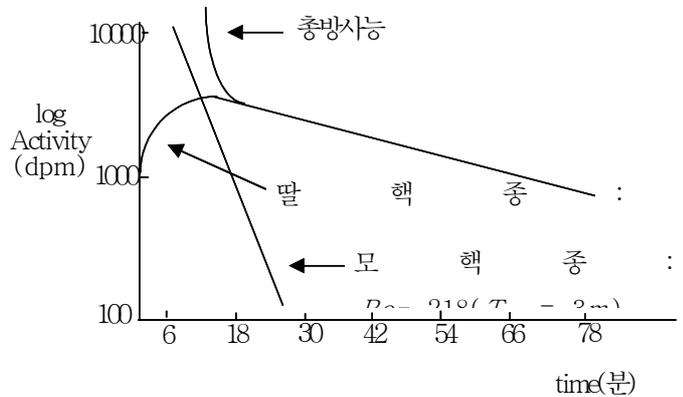
$$A_B = A_A^0 (1 - e^{-\lambda_B t})$$

위 식은 어떤 자핵종의 생성이나 성장을 나타내는 전형적인 식으로, 즉 충분한 시간이 경과하게 되면  $e^{-\lambda_B t}$ 는 0에 수렴하게 되어 결국  $A_B = A_A^0$ 가 되게 된다. 다시 말하면 자핵종 B의 방사능  $A_B$ 와 최초의 모핵종의 방사능  $A_A^0$ 는 같아진다고 말할 수 있다.

바. 평형이 이루어지지 않을 때

모핵종의 반감기가 자핵종의 반감기보다 짧은 경우 즉  $\lambda_A > \lambda_B$ 의 경우에는 방사평형의 현상이 존재하지 않는다.

이 경우는 아래 그림에서 보는 바와 같이 모핵종이 붕괴해 버리고 생성된 자핵종만이 자신의 반감기에 따라 감소한다.



모핵종 A의 반감기가 자핵종 B의 반감기보다 짧은 경우, 모핵종 A의 방사능은 급격히 감소된다. 반면에 자핵종 B의 방사능은 증가하다가 어떤 최대치에 도달된 후 다시 감소된다.

■ RI의 제조

가. 방사성 핵종 생산 기본식 유도

1) RI의 생성핵의 생성속도

미소시간  $dt$  동안에 일어나는 반응수  $dN$ 의 변화율은 처음의 표적핵 수( $N_0$ )와 선속밀도( $\Phi$ )에 비례한다. 이것을 식으로 나타내면

-  $\frac{dN}{dt} \propto N_0 \Phi$  이고, 비례상수를  $\sigma$ (반응단면적)라 하면

면

-  $\frac{dN}{dt} = \sigma N_0 \Phi$  이다.

이것을 적분하면

$N = N_0 e^{-\sigma \Phi t}$

-  $N_0$  : 표적핵의 수

-  $\Phi$  : 선속밀도(단위시간당 단위면적당 입사되는 중성자수:  $cm^{-2} \cdot s^{-1}$ )

-  $\sigma$  : 반응단면적( $cm^2$ )

2) 생성된 RI의 붕괴속도

$A = -\lambda N$

3) RI의 순수한 생성속도

$\frac{dN^*}{dt} = N_0 \Phi \sigma - \lambda N$

-  $N_0 \Phi \sigma$  : 생성핵의 원자수

-  $\lambda N$  : 생성핵의 붕괴하는 수

위 식을 적분하면

$N^* = \frac{n\sigma\Phi}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$

-  $N^*$  :  $N_0$ 의 표적핵에  $\Phi$ 의 세기로  $t$ 시간동안 중성자를 조사시켰을 때 생성된 RI의 수

여기서  $A^* = \lambda N^*$  이고, 표적핵의 존재비( $\theta$ )를 고려하면

**RI 생산 기본식**

$A^* = N_0 \theta \sigma \Phi (1 - e^{-\lambda t})$

$A^*$  : 생성된 RI의 방사능  
 $N_0$  : 표적핵의 원자수  
 $\sigma$  : 표적핵의 반응단면적  
 $\lambda$  : 생성핵의 붕괴상수  
 $\theta$  : 표적핵의 존재비

조사시간  $t$ 가 생성방사성핵종의 반감기 보다 훨씬 같다면 지수함수 항은  $\sim 0$ 이 되므로 괄호안의 값은 1이 된다. 즉  $t \rightarrow \infty$  일 때

$A^* = N_0 \theta \sigma \Phi$

$(1 - e^{-\lambda t})$ 를 포화계수(saturation factor)라고 하는데  $t \rightarrow \infty$  때 포화계수는 1이 되어 가장 많은 포화된 방사능을 얻게 된다.

RI생산에 있어서는 보통  $t=3$ 반감기 정도로 하여 포화방사능의 90% 가까이 얻을 수 있는 조사시간을 유지한다.

나. 냉각시간후의 방사능

조사시간 종료후 시료를 조사공에서 인출한 순간부터는  $t$ 가 정지되며 냉각시간(또는 경과시간)d에 의해 방사능이 감소된다.

냉각시간후의 방사능은

$A_d = N \theta \sigma \Phi (1 - e^{-\lambda t})(e^{-\lambda d})$

다. 최대생성방사능 구하는 식

충분히 긴 시간동안 중성자를 조사한다면 최대생성방사능을 생성할 수 있다.

$t \gg 0 \quad e^{-\lambda t} \approx 0$

$A^* = N_0 \theta \sigma \Phi = Constant$

$N^* = N_{max} (1 - 2^{-a})$

$a$  :  $\frac{\text{조사 시간}}{\text{반감기}}$

$N_{max}$  : 최대생성방사성 원자수

예) 1mg의 금을 열중성자속 밀도  $1 \times 10^{12}(n/cm^2 \cdot sec)$ 인 원자로에서 1시간 조사한 경우 열중성자에 의해 생성한  $^{198}Au$ 의 방사능을 구하라. (단  $^{197}Au$ 의 열중성자에 의한(n $\gamma$ )반응 단면적은 988 barn, 또  $^{198}Au$ 의 반감기는 2.697일이다)

⋮

■ 질라드-첼머 반응 (뜨거운 원자화학)

$X + a \rightarrow Y + b$  의 반응에서 Y와 b는 함께 방출되고 운동량이 보존되어야 하므로 생성핵종 Y는 반조된다.

(n, γ)반응에서 반조에너지 E 는 다음과 같다.

$$E' = \frac{537E_{\gamma}^2}{M} (eV)$$

-  $E_{\gamma}$  : MeV 단위의 γ선에너지

- M : u 단위의 표적핵종의 질량

반조에너지를 받은 원자를 뜨거운 원자(Hot Atom)라고 한다.

(n, γ) 반응으로 캐리어가 없는 RI를 만드는 데 이용되는 질라드-첼머 반응이 그 좋은 예이다.

요오드화에틸 ( $C_2H_5I$ ) 에 열중성자를 조사하면  $^{127}I$  (n, γ)  $^{128}I$  반응을 일으키는 데 이때 생긴  $^{128}I$  은 반조되어 그 화학결합을 끊고 유리상태로 된다.

화학결합은 보통 2~5eV의 에너지로 결합되어 있다. 이렇게 유리상태가 된  $^{128}I$ 을 물로 추출하면 carrier free인  $^{128}I$ 을 제조할 수 있다.

(n, γ) 반응으로는 반응전후의 물질의 원자번호가 같아서 캐리어프리인 핵종을 만들 수가 없는데 질라드첼머법은 (n, γ) 반응임에도 불구하고 캐리어프리인 핵종을 만들 수 있는 예이다.

고비방사능의 RI 제조를 위한 뜨거운 원자 효과의 조건으로서는

- ① 생성핵은 반조되어 화학결합을 끊어야 한다.
- ② 반도에 따른 생성핵은 다른 원자와 재결합을 하지 않아야 한다.
- ③ 생성핵은 비방사성 표적원자와 교환반응이 없어야 한다.
- ④ 반조 생성핵과 표적원자의 분리가 용이하여야 한다.

참고. 질라드 첼머의 반응의 예

$Cr^{50}(n, \gamma)Cr^{51}$ 의 핵반응에서 표적으로  $K_2CrO_4$ 을 사용하면 핵반응 결과 생긴 높은 에너지 상태의  $Cr^{51}$ 핵이  $Cr(VI)O_4^{2-}$ 의 Cr-O결합을 끊고 유리된  $Cr^{51}(III)^{+3}$ 이 온상태로 되어 표적물질로부터 화학적 분리가 가능하여 비방사능이 높은  $Cr^{51}$ 을 얻을수 있음.

또한 (n, γ)반응이외에 (γ, n), (n, 2n), (d, p) 반응 등에 대해서도 적용할 수 있다.

$N^{14}(n, p)C^{14}$ ,  $He^3(n, p)H^3$ ,  $Li^6(n, \alpha)H^3$  등의 반조를 이용해서  $C^{14}$ ,  $H^3$  등의 유기화합물에 대한 표지도 가능하다.

■ 방사화 분석

방사성핵종의 반감기와 방사선 에너지는 핵종에 따라 고유한 것이다.

따라서 시료를 중성자, 양성자, 중양자, α입자 등 높은 에너지와 입자나 혹은 γ선등 전자파로 충격하여 생성된 방사성핵종의 특성을 조사하거나 방사능 세기를 측정함으로써 시료중의 특정원소의 정성, 정량 분석을 할 수 있다. 이 방법을 방사화 분석이라 한다.

즉 방사화(Activation)라고 하는 것은 시료를 중성자, 하전입자 그리고 광자등으로 조사시켜 원자핵반응을 통하여 불안정한 방사성핵종을 만드는 것이다.

방사화 분석법은 원자핵 반응에 바탕을 둔 분석기술이며, 이때 생성된 불안정한 방사성핵종이 안정한 상태로 변할 때 방출하는 고유한 방사선이나 방사능을 측정하므로써 각 원소를 확인하거나 정량할 수 있는 방법이다.

가. 방사화 분석법의 장단점

장 점	단 점
<p>① <b>고감도</b> 검출감도가 좋아 미량분석이 가능하다( <math>10^{-10}g</math> 이하까지 측정 가능)</p>	<p>① <b>정밀도(accuracy)나 재현성이 항상 좋지는 않다.</b></p>
<p>② <b>화학적으로 유사원소의 분석에 유리</b> 희토류원소, 알칼리원소등의 분석에 상호 방해를 받지 않는다.</p>	<p>② <b>부반응이 있으며 입사입자의 흡수등 조건을 일정하게 하기 어렵지 않다.</b></p>
<p>③ <b>방사화 이후의 시료오염은 영향이 없다.</b> 분석에 사용하였던 시료도 방사능 감쇄후에는 재사용이 가능하다. 즉 동일시료를 타분석법에 사용할 수 있다.</p>	<p>③ <b>중성자원이 필요하다.</b> 원자로등 특수설비가 필요하며 분석비용, 시간 및 자리적 조건에 관계가 있다.</p>
<p>④ <b>동시 다원소 분석 가능</b> 적당한 분석 조건에서 30~40종의 원소분석이 가능하다.</p>	
<p>⑤ <b>단순하며 비파괴 분석 가능</b></p>	

나. 방사화 분석법의 특징

- ① H, C, N, O등은 열중성자로는 거의 방사화 되지 않으므로 (방사화단면적이 적으므로)분석이 불가능하다.
- ② 방사화 분석법은 원소의 분석수단 일뿐 그 화학 상태는 알려주지 않는다.  
원자핵반응을 이용한 분석법이기에 때문에 원소분석에는 적합하지만 원자거나 분자형태등은 판별할 수가 없다.
- ③ 중성자 방사화 분석에 의해 60종 이상의 원소가  $10^{-7} \sim 10^{-13}g$ 의 감도로 정량된다.
- ④ 중성자 방사화 분석은 고순도 물질내의 미량불순물, 특히 반도체 재료중의 극미량 불순물 정량에 적합하다.

다. 핵종결정을 위해 일상적으로 적용하는 방법

방출 방사선의 측정(γ선에너지, 반감기, β선에너지) 및 그 방사성동위원소의 화학적 거동으로부터 원소의 종류를 알아낸다.

- ① γ선 스펙트럼을 측정  
고 분해능의 반도체검출기(HPG)를 쓰면 그 에너지 분해능이 좋아서 대략적인 γ선 방출핵종의 확인 또는 2~3의 가능성 있는 핵종중의 하나임을 알 수 있다. 또 반감기를 측정한다.
- ② γ선을 방출하지 않는 단일 핵종이면 흡수체법으로 β선 에너지를 구하고 그 반감기도 측정한다.
- ③ 위 두가지 방법에 의해 몇가지 핵종으로 가능성이 좁혀지므로 이들의 담체를 가해 화학분리함으로써 그 원소명을 확정한다.

라. 방사화 분석의 감도를 결정하는 인자

- ① 방사화단면적(a)과 동위원소 존재비(b)를 곱한값(a×b)이 클 것  
방사화 단면적이 클수록 방사화가 잘되며 감도도 좋다.
- ② 핵종의 수명  
수명(반감기)이 짧을수록 방사화 되기 쉽지만 수명이 너무 짧은 경우에는 측정에 문제가 있기 때문에 수 분에서 수 년정도의 반감기를 갖는 핵종이 적당하다.
- ③ 시료의 주성분 요소
  - 방사화 분석은 다종류의 원소가 비슷한 농도로 혼재되어 있을 때 유리하기 때문에 전체적인 원소의 분포를 미리 파악해 둘 필요가 있다.
  - 주성분의 Na나 P등이 다량으로 존재하는 생물시료의 분석에서는 이들에 의한 높은 방사능 때문에 미량원소의 분석에 방해받을 수 있다.
  - 분석에 적합하지 않는 원소
    - Pb, Be 및 N이하의 원자번호를 갖는 경원소등
    - S, N등도 감도가 나쁘다.

**참고** 비교법을 이용한 미지시료의 질량 계산

분석하려는 원소의 가지량을 시료와 같은 위치에 놓고 같은 시간 조사해서 비교법으로 분석, 정량가능하다. 비교법으로 시료중의 구하는 원소의 질량 W를 구할 수가 있다.

$$\frac{A}{A_{st}} = \frac{W}{W_{st}}$$

$A_{st}$  : 표준시료의 방사능     $W_{st}$  : 표준시료의 무게

$A$  : 미지시료의 방사능     $W$  : 미지시료의 무게

■ 동위원소 희석 분석법(Isotope dilution method)

성질이 유사한 화합물의 상호 분리는 매우 어렵고 시간이 걸리며 결과적으로 정량분석이 어렵게 되는 경우가 흔하다.

그런 경우 대상으로 하는 화합물의 방사성동위원소로 표시한 것(표지화합물)이 있으면 잘 혼합한 다음, 그 일부를 방사화학적으로 순수하게 분리하고 방사능을 측정하여 정량하는 방법을 동위원소 희석 분석법이라 한다.

(측정하려는 대상물질과 같은 방사성 화합물이 있어야 한다)  
즉 화합물 C를  $W_0g$  함유하고 있는 미지시료 중에  $S_1 (mCi/g)$ 의 비방사능을 갖는 표지화합물  $C^*$ 를  $W_1 g$  첨가한 후 화합물 C를 분리한다.

방사표지된  $C^*$ 는 화합물보다 C와 물리적, 화학적으로 구별되지 않으므로 분리한 화합물 C에는 방사능이 있다. 분리해 낸 C의 비방사능을 측정하여  $S_2 (mCi/g)$ 을 얻었다면

$$W_1 S_1 = (W_0 + W_1) S_2$$

즉 동위원소를 넣기 전과 넣은 후(희석된 후)의 총방사능의 양은 같으며  $W_1$ 와  $S_1$ ,  $S_2$ 는 이미 알거나 측정할 수 있는 양이므로  $W_0$ 을 구해낸다.

$$\therefore W_0 = W_1 \left( \frac{S_1}{S_2} - 1 \right)$$

■ 후방사화 추적자법(엑티버블 트레이서법)

방사성동위원소를 쓰면 쉽게 정성·정량이 가능하지만 방사성오염이 잠시 또는 조금만 일어나는 것도 바람직하지 않은 경우에는 방사성동위원소를 쓰기 곤란하다. 이런 경우 비방사성인 추적자를 써서 실험하고 채취한 시료를 방사화분석함으로써 미지 양을 추적하거나 정량할 수 있다. 이 방법을 엑티버블트레이서법 또는 후방사화추적자법이라 한다.

혼합 전		질량	비방사능
	표지화합물	$W_0$	$S_0$
	비방사선화합물	$W_1$	-
혼합 후	측정시료	$W_0+W_1$	$S_2$

혼합전후의 전체 방사능은 같으므로

$$W_0 S_0 = (W_0 + W_1) S_2 = W_0 S_2 + W_1 S_2$$

$$\therefore W_0 = \frac{S_2}{S_0 - S_2} \times W_1$$

참고) 동위원소 효과

동위원소는 질량의 차이를 가지므로 화학결합에서 진동에너지 준위가 달라지며 화학적인 행동에도 영향이 생기는 현상

■ 엑티버블트레이서(후방사화트레이서) 필요조건

- ① 쉽게 방사화될 수 있어야 하고 주변 환경에 존재하지 않을 것 (열중성자 방사화단면적이 크고 반감기는 짧은  $\gamma$ 선 방출 핵종이 좋다.)
- ② 염기로 구득할 수 있어야 하며 화학적으로 무해할 것
- ③ 대표적인 핵종 : Eu

■ 방사화학적 분석법

- 방사화학적분석법이란 시료물질에 화학처리를 하여 시료중의 대상 방사성핵종을 농축 또는 분리하고 방사능을 측정하는데 적합한 모양으로 측정시료를 만들어 그의 방사능을 측정하므로써 시료중의 방사성핵종의 함유량을 정량하는 방법이다.
- 시료에 들어 있는 방사성핵종이 분명치 않을 경우 화학적처리를 하여 분리하고 방사능측정으로 그의 種類를 定性적으로 알아내거나 또는 그 양을 정량으로 구하는 방법도 방사화학적분석법이다.

어느 것이든지 화학적처리와 방사능측정과는 방사화학적분석에 있어서 불가결의 2대요건이 된다.

시료의 방사능준위가 어느 정도 높으면 原시료 또는 증발건고(蒸發乾固)시료(우수(雨水), 육수(陸水)등의 경우)나 탄화(炭化)시료(생물, 식품등의 경우)등을 그대로 측정할 수 있으며 또 Spectrometry의 경우에는 높은 분해능으로 핵종검출이 가능한 점등 많은 이점이 있으며 현재 방사능분석에 널리 쓰여지고 있으나, 감도, 정도(精度)가 그리 높지 않으며 게다가  $\gamma$ 선을 방출하지 못하는 방사성핵종 ( $^3H$ ,  $^{14}C$ ,  $^{32}P$  등)에는 적용되지 않으며 화학적 형태별의 분석이 되지 않는 것등 몇 개의 약점이 있다. 이들의 약점은 방사화학적 분석법을 적용하므로써 극복할 수 있다.

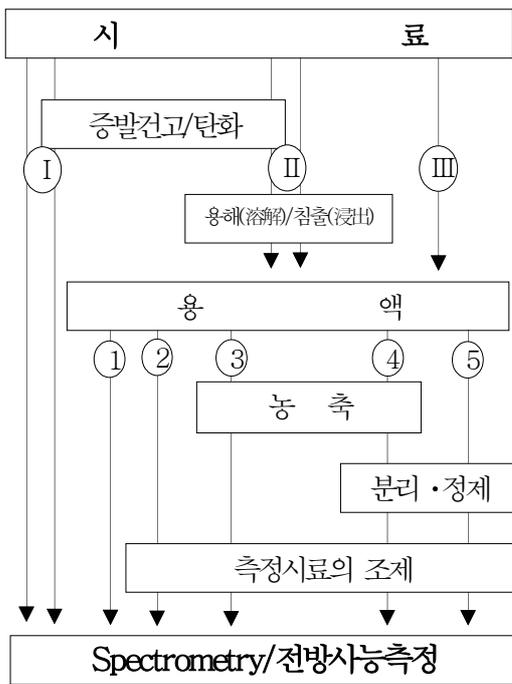
$\gamma$ 선 Spectrometry로 하는 경우에도 방사능의 준위가 낮을 때에는 대상핵종을 미리 농축한다든지 공존(共存)핵종에서 분리, 정제하는 것이 효과적이다. 한편 방사화학적분석법으로 하는 경우에도 방사능측정에는 Spectrometry를 하므로써 분리, 정제조작을 대폭 생략할 경우가 많다. 즉 방사화학적 방법과 Spectrometry와는 서로 보완적인 면을 갖고 있다고 할 수 있다.

이상의 관계를 그림으로 나타내면 아래 그림과 같다.

- I는 보통 기기분석법이라고하며 시료를 직접 또는 증발건고(액체 시료의 경우), 탄화(생물시료의 경우)등의 처리를 한 뒤 그의 純방사능을 측정하든가 Spectrometry를 하는 방법이다.
- II, III은 방사화학적분석의 제I단계로서 시료를 용액으로 만드는 과정이다. 고체시료 또는 탄화시료의 경우 (II)는 산, 알칼리등으로 처리하여 용해 또는 침출한다. 경우에 따라서는 적당한 용제(融劑)와 함께 가열하여 용융, 분석한다. 시료가 액체의 경우 (III)에는 그대로 또는 현탁물(懸濁物)을 여과하여 분석한다.

이와 같이 얻어진 용액에 대하여서는 대상이 되는 핵종이나 공존하는 방사성핵종의 방사능강도, 용존하는 **비방사능 검류(監類)**의 종류나 양, 용액의 부피 등에 따라 ①~⑤중의 어느 한가지 처리를 하여야 한다.

- ①은 앞에 말한 Ⅲ의 액체시료를 그대로 측정하는 경우이고
- ②는 용액에서 적당한 방법으로 측정에 알맞는 모양의 시료를 만들어 그 방사능을 측정하는 방법으로서 용액량이 적고 게다가 공존핵종, 공존물질이 적은 경우에 적용된다.
- ③은 액체의 부피가 많은 경우에는 농축처리를 하여야 한다. ②의 경우나 ③의 경우에도 Spectrometry를 적용하므로써 특히 화학분리를 하지 않아도 대상핵종을 정량할 수 있다.
- ④ ⑤는 공존핵종이나 공존물질이 많은 경우에는 다시 분리, 정제의 과정이 필요하다. ④ ⑤는 가장 일반적인 방사화학분석의 Pattern이며 공존핵종을 완전하게 분리, 제거하는 화학조작을 하므로써 단일의 방사성핵종을 저준위의 방사능 까지도 정량할 수 있다. 일반적으로 방사화학분석법의 감도, 정도는 기기분석법(器機分析法)에 비교하여 높다



■ 방사화학적분리법의 특징

- 방사성핵종의 양은 극미량이다.
- 목적하는 방사성핵종의 반감기가 짧은 경우에는 빠른 분리법이 필요하다.
- 간단 신속하게 원격조작으로 분리할 수 있어야 한다.
- 반드시 정량적으로 분리할 필요는 없다. 단 방사성핵종을 무담체 분리해야 할 경우에는 시료의 화학형, 이용하는 핵반응 및 분리방법 등에 대한 특별한 고려를 해야한다.
- $\gamma$  선 spectrometry가 가능하다.

■ 용어 정의

가. 트레이서(Tracer)

트레이서란 주목하는 원소나 물체의 거동을 조사할 목적으로 참가하는 R나 표지화합물을 말한다.

1) 트레이서 종류

- R 트레이서
- 액티버블트레이서(activable tracer)
- 안정동위원소(SI) 트레이서

2) R 트레이서

- ① 물리적 추적자법  
R를 방사선원으로 써서 물질의 이동, 혼합상태, 미모시형 등 물리적 현상을 추적하는 방법
- ② 화학적 추적자법  
이온이나 화합물의 반응을 추적하는 방법. 단 R가 추적하려는 물질과 완전히 동일한 화학형태이어야 한다.
- ③ 기본요건
  - ⓐ 동위원소교환이 없어야 한다.
  - ⓑ 표지의 위치를 알 수 있어야 한다.
  - ⓒ 동위원소효과가 없어야 한다.
  - ⓓ 방사선효과가 없어야 한다.
- ④ 종류: 저에너지  $\beta^-$  선 방출체
  - $H^3$  ( $E \approx 18keV$ )
  - $C^{14}$  ( $E \approx 156keV$ )
  - $P^{32}$  ( $E \approx 1.7MeV$ )
  - $S^{35}$  ( $E \approx 1675keV$ ) 등
 대부분의 경우 이들의 표지화합물을 사용하며 저에너지  $\beta^-$  선 계측을 위해 액체섬광계측기를 사용한다.

3) 액티버블트레이서(후방사화트레이서)

비방사성물질을 트레이서로 사용해 실험하고 그 실험 종료 직후 시료를 방사화하는 방법을 액티버블트레이서법이라 하고 이때 사용하는 트레이서를 액티버블트레이서라 한다.

- ① 기본요건
  - ⓐ 열중성자 방사화단면적이 커야 한다.
  - ⓑ 반감기가 짧은  $\gamma$  방출 핵종이어야 한다.
  - ⓒ 가격이 저렴하고 무독성이어야 한다.(예: Eu)
  - ⓓ 추적하려는 계에 자연적으로 존재하지 않아야 한다.
  - ⓔ 실험중 외부로부터 오염되지 않아야 한다.
- ② 종류: Sm, Eu, Gd, Dy 등 희토류 원소

4) 안정동위원소 트레이서

적당한 R가 없거나 방사성트레이서를 사용하기 어려운 경우 안정동위원소를 사용한다.

① 종류 : 농축 SI 화합물

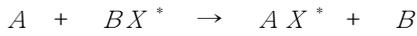
( $H^2$ ,  $C^{13}$ ,  $N^{15}$ ,  $O^{17}$ ,  $O^{18}$ ,  $S^{33}$ ,  $S^{34}$  등)

② 질량분석, RI 분광분석, NMR 분광분석 등으로 확인한다.

참고)

○ 동위원소 교환법

표지하려는 유기물중 특정원소의 안정동위원소 원자를 방사성동위원소 원자로 교환시켜 표지하는 방법이며 교환반응 전후에 화학적 변화는 없다.



$X^*$  : R로 표지한 화합물

장 점	단 점
<ul style="list-style-type: none"> <li>○부반응이 없다.</li> <li>○반응물질과 생성물질이 같으므로 분리정제가 용이</li> <li>○높은 비방사능의 생성물이 얻어진다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○모든 화합물에 적용할 수 없다.</li> <li>○탄소, 요오드, 탄소-브롬 등 일부 극성결합화합물에서만 가능하다.</li> </ul>

○ 동위원소 효과

동위원소는 질량의 차이를 가지므로 화학결합에서 진동에너지 준위가 달라지며 화학적인 행동에도 영향이 생기는 현상 H나 C등 가벼운 원소에 대해서는 화학적 행동을 무시하기 어렵다. 즉 질량수의 차이는 곧 운동에너지의 차이 곧 분자의 진동수의 차이로 나타난다. 운동에너지의 차이는 확산속도, 증기압등 물리화학적 성질에 진동수의 차이는 화학반응 속도에 차이를 나타낸다. 따라서 합성이나 반응생성물의 분해반응 또는 트레이서 실험등에서는 실제의 단계가 많아질수록 동위원소 효과는 크게 나타난다.

○ 방사선 효과

방사선 작용에 의한 화학적 또는 생물학적 효과(예 : 분자간의 가교, 분해)

나. 담체(Carrier)

미량의 방사성물질에 대하여 보통량의 경우와 동일 또는 거의 같은 행동을 하도록 첨가하는 물질

- ① 담체와 대상의 방사성 핵종은 같은 원자기를 가져야 한다.
- ② 트레이서양이 나타내는 이상현상을 없애기 위해서나
- ③ 측정시료를 만들기 위해서나 또는
- ④ 분리할 때에 눈에 띄는 화학상태로 하기 위해서 가한다.

■ 담체의 종류

① 동위원소 담체

목적하는 방사성핵종과 같은 원소(안정동위원소)로 담체 이때 양자는 같은 원소여서 화학적 성질이 완전히 같아서 일단 가한 동위원소 담체를 재차 분리해내기가 곤란하다.

② 비동위원소 담체

목적하는 핵종과 동위원소 관계가 아니면서 유사한 화학적 성질을 가진 원소나 화합물을 가하는 담체

- 목적원소와 담체가 동위원소 관계가 아니기 때문에 이들 간의 미세한 화학적 성질차이를 이용해서 상호분리함으로써 목적원소의 비방사능을 재차 높일 수도 있다.
- 화학처리 후에 비방사능을 높여야 할 경우에는 동위원소담체보다는 비동위원소담체를 사용해야 한다.
- 비동위원소담체 첨가의 예  
 $^{90}\text{Sr}$  분석 때에 천연 Ra는 Sr과 같은 알칼리토 금속에 속하므로 Sr이 Ra에 의해 오염된 가능성이 있어 오염방지를 위해 담체로 Ba염체를 가해 혼합한 다음  $\text{K}_2\text{CrO}_4$ 를 써서  $\text{Ba}(\text{Ra})\text{CrO}_4$ 로 침전시킴으로서 이때 Ra는 공침되어 제거된다.  
 이때 담체로 가한 Ba중 핵분열생성물인  $^{140}\text{Ba}$ 도 같이 제거된다.  
 이때 담체 Ba는  $^{140}\text{Ba}$ 에 대해서는 동위원소담체 노릇을 하는 셈이 된다.  
 그리고 Ra에 대해서 Ba는 비동위원소담체로 사용됨

다. 무담체(Carrier Free)

어떤 방사성핵종이 그 비활성을 수반하지 않는 상태 즉 담체를 포함하지 않는 상태(비방사능이 최대인 상태)

- 특징 : 극미량, 극저농도, 흡착, Colloid형성(Radio Colloid)

라. 유지담체( Hold-back Carrier)

어떤 목적하지 않는 방사성원소가 목적 방사성원소와 공침되거나 수반되는 것을 막고 모액중에 그대로 남아있도록 하기 위해 가하는 담체

예)

- $^{140}\text{Ba}$  -  $^{140}\text{La}$ 의 무담체 용액에서  $^{140}\text{La}$ 를  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 를 써서 공침시킬때에  $^{140}\text{Ba}$ 가 침전에 부착되기 쉬우므로 이를 막기 위해 비방사성  $\text{Ba}^{2+}$ 를 용액 속에 남기기 위해서 유지담체로 가한다.
- 방사평형에 있는  $^{90}\text{Sr}$  -  $^{90}\text{Y}$ 에서  $^{90}\text{Y}$ 를 순수하게 분리할 목적으로 비방사성 Y(동위원소담체)를 가해 용해도적(Solubility product)에 기깝게 해서 쉽게 침전되도록 한다. 이때  $^{90}\text{Y}$ 는 공침되어 침전속에 섞이지 않도록 하기 위해 비방사성 Sr(동위원소 담체)를 가해 섞어준 다음에  $^{90}\text{Y}$ 를 침전시킨다. 이때 가한 Sr은  $^{90}\text{Sr}$ 를 용액속에 남기게 한 것이므로 유지담체이다.

마. 스케빈저(Scavenger)

원 뜻 : 찢은 고기를 먹어치우는 동물 또는 도로 청소부  
 여러 가지 방사성 핵종을 함유한 용액으로부터 목적으로 하는 방사성핵종만을 용액으로 남기고 불필요한 방사성핵종을 분리 제거하기 위하여 첨가하는 원소(담체)

- $\text{Al}^{+3}$ 나  $\text{Fe}^{+3}$ 가 많이 이용되며  $\text{Al}(\text{OH})_3$ 나  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 로 침전시킨다.
- $\text{Cu}^{+3}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{La}^{+3}$ ,  $\text{Ba}^{+2}$ 등을 스케빈저로서 가해 각각 유화물, 수산화물, 불화물, 탄산염등으로 침전시켜 분리함으로써 이 침전에 공침되어 구리족 원소, 주석족원소, 희토류 원소, 알칼리토류원소등이 제거된다.
- 유지담체와 반대되는 개념이다.

**바. 포집제(Collector)**

화학분리하여 얻은 희박한 단일 방사성원소 용액이나 여러 가지 방사성원소 혼합용액에 가해서 목적원소만을 직접 포집 또는 농축할 목적으로 가하는 담체

예)  $^{90}\text{Sr}$ 에서  $^{90}\text{Y}$ 를 무담체 분리할 경우 비방사성  $\text{Y}$ (동위원소담체) 대신 제2철 이온( $\text{Fe}^{3+}$ )을 담체로 가하고(비동위원소담체) 동시에  $^{90}\text{Sr}$ 에 유지담체를 가한 다음 암모니아수를 가해  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 로 침전시킨다.

이때  $^{90}\text{Y}$ 는  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 와 공침하여  $^{90}\text{Sr}$ 과 분리된다.

$^{90}\text{Y}$ 가 공침된 침전( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ )을 산에 녹여 분액갈대기(Separatory funnel)에 옮기고 여기에 에틸에테르를 넣어 흔들면  $\text{Fe}^{3+}$ 만이 에틸층에 추출되므로  $^{90}\text{Y}$ 를 순수히 분리할 수 있다.

이때 가해준  $\text{Fe}^{3+}$ 는 공침제(Co-precipitator) 또는 포집제(collector)이다.

**사. 밀킹(Milking)**

친핵종과 방사평형에 있는 딸핵종을 친핵종으로부터 분리해 얻는 조작을 밀킹이라고 한다. 쉽게 밀킹해 쓸 수 있도록 만든 장치를 cow system 또는 RI generator라 한다.

① 밀킹의 특징

- 무담체 RI를 원자로나 가속기로부터 멀리 있는 곳에서 쓸 수 있게 한다. 딸핵종 반감기( $T_2 < T_1$ )를 모핵종 반감기로 늘려서 쓸 수 있는 효과를 준다.
- 희명하는 시간에 RI를 얻어낼 수 있다.
- 밀킹해 얻은 RI의 화학적순도와 방사화학적순도는 일반적으로 만족스럽다.

② 밀킹 조작

- 이온교환 용매추출, 공침, 크로마토그래피 등이 있다.
- 이온교환수지나 흡착제를 칼럼에 채워 넣고 여기에 cow(모핵종)를 흡착시켜 놓고 딸핵종과의 평형에 도달되면 milk(딸핵종)를 짜는 방식의 밀킹 조작이 가장 편리하게 이용된다.

**아. 방사화학적 수율**

방사화학에서는 반감기와 피폭시간 때문에 회수율은 반드시 100% 가깝게 만들 필요가 없고 몇번 반복하더라도 변동폭이 적고 거의 일정하면 그것으로 족하다. 동위원소캐리어를 사용할 경우에는 회수된 캐리어 양을 정량하여 방사화학적수율을 정한다. 비동위원소캐리어를 쓸 경우에는 대상으로 하는 RI 자체 또는 그 방사성동위원소의 일정량을 가해서 회수된 방사능의 측정치로부터 수율을 구한다. 이와 같이 구한 방사화학적수율에 따라 얻은 측정치를 보정하여 전체 양을 추정한다.

$$\frac{\text{분리 후 나타난 방사성 핵종의 방사능}}{\text{생성된 방사성 핵종의 전체 방사능}} \times 100(\%)$$

$$\circ \frac{\text{조작 후 방사능}}{\text{조작 전 방사능}} \times 100(\%)$$

단 수율이 높으려면 캐리어를 써야 함

**자. 방사화학적 순도**

시료의 전체 방사능 중 특정한 방사성핵종의 방사능이 차지하는 비율 또는 특정화학적 방사능이 차지하는 비율을 말한다. 엄밀히 말하면 전자는 방사성핵종순도(radionuclidic purity)라고 한다.

일반적으로 전자의 의미로 사용되면서도 표지화합물의 순도에 관한 것일 때에는 종종 후자의 의미로 사용된다. 방사성핵종순도를 조사하는 경우에는  $\gamma$ 선스펙트럼을 조사하거나  $\beta$ 선 또는  $\gamma$ 선을 측정해서 그 반감기를 조사한다.

$$\circ \frac{\text{특정 방사성 핵종 방사능}}{\text{전체 방사성 핵종 방사능}} \times 100(\%)$$

$$\frac{\text{특정 방사성 화합물 방사능}}{\text{전체 방사성 화합물 방사능}} \times 100(\%)$$

**차. 방사능오염제거계수**

혼재하는 방사성핵종을 분리할 경우 그 정제가 잘 되면 될 수록 방사화학적순도는 높아진다. 정제의 정도는 처음과 정제후의 방사능세기의 비로부터 결정된다.

I, II핵종을 분리할 때 그 DF(제염계수)는 다음과 같이 정의한다.

$$DF = \frac{(A_1/A_2)_{\text{조작후}}}{(A_1/A_2)_{\text{조작전}}}$$

경우에 따라서는 II핵종단위무계당의 I핵종방사능으로 나타낼 수도 있다.

■ 표지유기화합물(Labelled Organic Compounds)

가. 정의

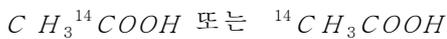
어느 화합물중 특정 원자를 방사성원자로 바꾸어 넣은(표지한) 화합물

나. 종류

1) 완전표지화합물

어느 화합물중의 원자나 원자단을 RI 원자로 바꾸어 넣기 전·후에 구조적으로 하등의 차이를 나타내지 않으며 화학적으로 동일한 화합물

(예) 식초산의 완전표지화합물 :

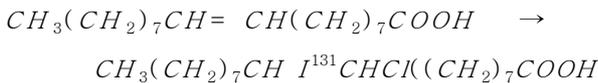


2) 불완전표지화합물

어느 화합물중의 원자나 원자단을 본래의 원자나 원자단이 아닌 제3의 방사성원소나 방사성원자단으로 바꾸어 원래의 화합물과는 구조적으로나 화학적으로 동일하지 않은 화합물

(예) 올레신의 불완전표지화합물

→ 올레신의 이중결합에  $^{131}ICl$ 을 첨가해서 만들 수 있다



다. 방사성 표지 화합물의 필수요건

- ① 방사성원자로 표지한 후에도 가능한 원래의 화학적성질이 그대로 보존되어야 한다.
- ② 화학적으로 표지위치를 알 수 있어야 하며 추적자로 이용 중 동위원소교환반응이 일어나지 않아야 한다.
- ③ 도입된 RI 원자의 반감기와 방사선 에너지가 적당해야 한다.
- ④ 불완전표지화합물을 이용할 경우에는 새로운 방사성 원자나 원자단의 도입으로 인한 구조적 변화나 화학적성질 변화가 본래의 화합물과는 다른 거동을 나타내어서는 안된다.

라. 표지 화합물 사용시 주의사항

1) 표지화합물의 순도

- ① 화학적으로나 방사화학적으로 순수해야 한다.
- ② 순도는 정제과정을 반복해서 비 방사능이 변하지 않을 때까지 계속하면 순도를 높게 할 수 있다.
- ③ 표지화합물은 자기가 내보내는 방사선에 의해서 자신이

분해되기도 하기 때문에 오랜기간 보관해두면 순도가 떨어지게 된다. 그런 것은 사용전 정제해야 한다.

2) 표지 위치 확인

표지화합물은 어떤 특정위치에 방사성원자가 결합되어 있지 않으면 트레이서의 역할을 다 할 수가 없다.

일반적으로 그 합성 반응의 경로로부터 표지 위치는 정해진다. 만약에 전이나 교환반응이 합성중이나 보존중에 일어나면 표지 위치가 불확실해진다. 따라서 분해반응(degradation)에 의해서 그 표지 위치를 확인할 필요가 있다.

3) 표지화합물의 불안정성 요인 및 보존방법

일반적으로 표지 화합물은 분해되기 쉬운 것들이 많다.

그 분해 원인으로서

① 1차 내부효과

방사성표지화합물 중에 있는 방사성원소의 붕괴에 의한 불안정 효과를 말하며, 이 효과는 온도압력 및 습도등 외부조건에 영향을 받지 않는다. 따라서 이 효과를 막기 위한 외부조건 조절은 무의미하며, 다만 가능한 한 분자당 방사성원자 도입의 수를 줄이던가(비방사능의 감축) 또는 방사능 농도를 줄여야 한다.

② 1차 외부효과

표지에 사용한 RI가 방출하는 방사선에 의해 표지화합물이 분해하는 효과

③ 2차 방사선효과(2차 분해)

1차내부효과 및 1차외부효과로 생긴 활성중(자유기, 이온등)들이 표지화합물 분자들을 공격하여 일어나는 분해 효과 이 효과는 1차 효과보다 훨씬 크기 때문에 이를 억제하기 위하여

- 물이 아닌 용매에 녹여 보관
- 방사선 흡수제 첨가
- G값이 낮은 화합물로서 변환하여 보관
- 냉·암소 보관
- 비방사능이나 방사능농도를 가능한 한 낮추어 보관해야 한다.

④ 화학적 분해효과

보통의 화학반응에 의한 분해이며, 이것을 억제하기 위해서는 저온 보존, 용기세정, 불순물제거등을 철저히 해야 한다.

.....

4) 방사성표지화합물의 분해 형태

분해형태	원 인	방 지 방 안
1차 내부 효과	방사성원자의 자연적 붕괴	비 방사능이 정해졌으면 방안 없음.
1차 외부 효과	방사성표지화합물 분자와 α, β, γ 등 방사선의 직접작용	방사성표지화합물을 분산시킬 것
2차 방사선 효과	방사성표지화합물과 1차 효과로 생긴 원자나 라디칼과의 작용	방사성표지화합물의 분산 및 냉각 자유라디칼 포획제 첨가
화학적분해 효과	화합물의 열역학적 불안정성 및 부적합한 환경	냉각, 유해약품의제거

마. 방사성표지화합물의 순도

1) 방사능순도:  $\frac{\text{해당 핵종 방사능}}{\text{총 방사능}} \times 100(\%)$

2) 방사화학적순도

$\frac{\text{특정 방사성 화합물 방사능}}{\text{전체 방사성 화합물 방사능}} \times 100(\%)$

3) 화학적순도

$\frac{\text{특정 방사성 화합물 화학량}}{\text{전체 방사성 화합물 화학량}} \times 100(\%)$

4) 방사성핵종순도

$\frac{\text{특정 방사성 핵종 방사능}}{\text{전체 방사성 핵종 방사능}} \times 100(\%)$

5) 세염계수(Deccontamination Factor)

$\frac{\text{조작 전 방사능}}{\text{조작 후 방사능}}$

6) 방사화학적 수율

$\frac{\text{조작 후 방사능}}{\text{조작 전 방사능}} \times 100$

■ 방사선화학(Radiation Chemistry)

가. 방사화학과 방사선 화학의 비교

① 방사화학(Radiochemistry)

전리방사선이 물질에 조사될 때 발생하는 화학작용을 연구하는 학문으로 동위원소등을 화학반응을 일으키기 위한 선원으로만 사용한다.

② 방사선화학(Radiation Chemistry)

열중성자에 의한 핵반응, 핵의 붕괴등 핵 자체의 반응과 이들 동위원소를 추적자로 사용하는 화학 반응을 다룬다.

나. 방사선이 화학반응에 이용되는 이유

목적하는 생성물을 얻기 위해서는 여러 가지 부반응에 의한 부생성물의 생성도 감수해야하는 어려움이 있음에도 불구하고

- ① 다른 방법으로는 일으키기 어려운 반응도 높은 방사선 에너지를 이용하면 반응이 가능하다.
- ② 촉매를 사용하지 않아도 된다.
- ③ 방사선의 종류 및 에너지에 따라 반응구역을 조절할 수 있다.
- ④ 조사시 온도·압력등의 조절과 특정한 반응을 억제 또는 촉진시키는 특정 첨가제를 가함으로서 원하는 생성물의 수율을 증대시킬 수 있다.

■ 방사선의 화학적수율( $G$  값)

물질이 흡수한 방사선에너지  $100eV$  당 생성(또는 소멸)하는 입자의 수이다.

이것은 피조사체의 방사선에 대한 반응성을 나타낸다.

$$G(\text{molecules}/100eV) = \frac{M}{U/100} = \frac{M}{U} \times 100 = \frac{M}{N} \times \frac{100}{W} (eV)$$

- U : 물질이 흡수한 에너지
- M : 생성한 분자수
- W : W치(이온쌍 1개 생성하는데 필요한 에너지)
- N : 이온쌍의 수

① 방사선 화학반응의  $G$  값은 대부분이 0.1~10 정도이므로 약 1000~10eV 당 1개의 결합이 절단되며 화학결합의 세기는  $2eV$ 로 나머지는 열로 전환된다.

②  $G$  값 : 0.1 이하  
 ○ 방사선에 매우 안정한 물질  
 ○ 벤젠 나프탈렌(공유2중결합) 등으로 특히 polystyrene 가 안정

③  $G$  값 :  $10^2 \sim 10^4$   
 ○ 방사선에 의해 발열반응을 일으킨다.

■ 방사선의 화학작용

가. 방사선에 의한 초기 생성물

방사선이 물질에 조사되면 방사선의 종류나 그 에너지에 따라 여러 가지 물질과의 작용이 일어난다. 작용결과로 생성되는 이온, 여기분자 및 라디칼등 화학적 활성이 큰 초기생성물들의 성질과 이들의 반응에 대하여 알아보자.

① 이온 또는 전리

이온은 전리방사선이 원자 또는 분자의 전자궤도를 그 핵으로부터 완전히 분리시킴으로써 생성된다.

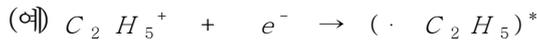
- 궤도전자의 이탈:  $A \rightarrow A^+ + e^-$
- 전자포획:  $A + e^- \rightarrow A^-$

생성된 이온들은 다음과 같은 반응에 의해 소멸된다.

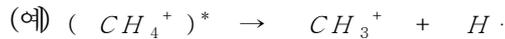
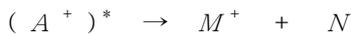
- 이온재결합(ion recombination):



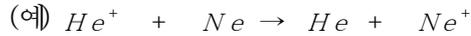
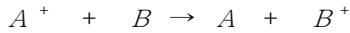
미함)



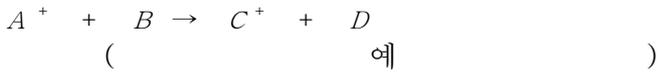
- 해리(dissociation):



- 전하이동(charge transfer):



- 이온-분자간 반응:



② 여기분자(Excited Molecule)

분자나 원자의 궤도전자가 가장 안정한 기저상태에 있지 않고 더 높은 에너지 상태에 있는 것을 여기상태라고 하는데, 이렇게 여기분자나 원자들은 다음과 같이 소멸되기도 하고 화학반응을 일으키기도 한다.

- 여분의 에너지를 빛(광자)으로 방출하고 기저상태로 돌아가는 형광 방출(fluorescence)
- 빛을 방출하지 않고 다른 입자외의 충돌에 의해 같은 중첩도(multiplicity)보다 낮은 상태로 변환되는 내부변환(internal conversion)
- 중첩도가 다른 상태로 변환되는 계간변환(intersystem crossing)
- 자신이 가진 여기에너지를 다른 입자에 전달하고 기저상태로 돌아가는 과정
- 해리나 이성체 생성등 일분자 반응(unimolecular

reaction)

- 다른 분자외의 이분자 반응(bimolecular reaction)

③ 자유라디칼(Free Radical) 또는 유리기

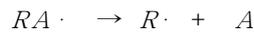
다른 입자와 결합을 이룰 수는 있으나 결합에 사용되지 않은 전자(unpaired electron)를 가진 원자나 분자를 말한다. 자유라디칼은 방사선 뿐만 아니라 열분해, 광분해 및 산화 환원반응등에 의해서도 만들어 질 수 있으며 분자의 공유결합이 끊어지면서 결합전자가 양쪽으로 한 개씩 나뉘어 저 생성된다.



이온이나 여기분자는 물질과 방사선과의 직접작용에 의해 생성되는 반면 자유라디칼은 여기분자의 해리나 이온반응(해리, 이온-분자간반응, 중화반응) 등에 의해 생성되며 전자스핀공명장치(ESR)에 의해 감지할 수 있다.

자유라디칼은 반응성이 커서

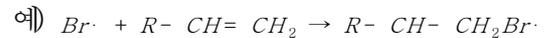
- 해리 반응(radical dissociation):



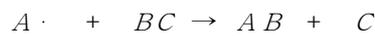
예



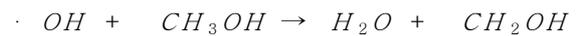
- 부가반응(addition):  $A\cdot + B \rightarrow AB\cdot$



- 추출반응(abstraction):



예

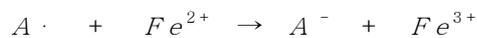


등을 일으키기도 하고

- 라디칼끼리의 결합:  $R\cdot + S\cdot \rightarrow RS$



- 전하이동반응:



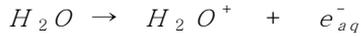
의해 소멸되기도 한다.

■ 방사선 생물학

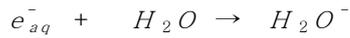
가. 물의 이온화(Ionization of Water Molecules)

생물 또는 세포가 방사선에 피폭되면 일차적으로 물분자에 이온화가 일어나고, 방사분해가 일어나게 되는데 그 과정은 다음과 같다.

① 물이 이온화되면 물분자에서 하나의 전자가 방출되며



② 방출된 전자는 다른 물분자에 의해 흡수된다.



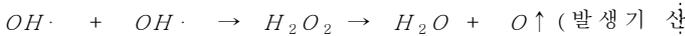
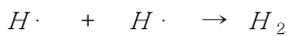
이와 같은 과정으로 양이온 물분자 ( $H_2O^+$ )와 음이온 물분자 ( $H_2O^-$ )가 생성되며 이 이온은 다른 물분자의 존재 하에 분해되어 이온과 유리기(free radical)를 형성한다.



$H^+$  이온과  $OH^-$  이온이 갖고 있는 에너지는 크지는 않으나 물분자와 방사 분해로 인해 생성되는 1차 유리기(primary free radical)인  $e_{aq}^-$ ,  $H\cdot$  및  $OH\cdot$  는 반응력이 강하기 때문에 생성된 부위에서 대부분 2차 반응을 일으킨다.

한편 2차적으로 생성되는 유리기로는  $HO_2\cdot$ ,  $O_2^-$  등이 있으며 1차 유리기에 비해 비교적 반응력이 약하기 때문에 먼 곳까지 이동하여 생체 구성물질과 상호작용을 일으킬 수 있다. 순수한 물에서는 유리기들이 서로 반응하여

$H_2$ ,  $H_2O$  및  $H_2O_2$  등을 형성한다.



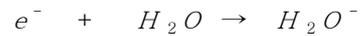
참고) 유리기(Free Radical)

전자각의 최외각에 쌍을 이루지 않는 전자가 있는 원자 또는 분자

■ 방사선 손상이 일어나는 과정(4단계)

가. 물리적 단계

최초의 물리적 단계는  $10^{-16}$ 초 동안에 일어나는 것으로 세포의 원자나 분자에 기여된 에너지에 의해서 물분자에 이온화가 생기는 것이다.



나. 물리화학적 단계

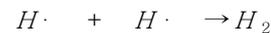
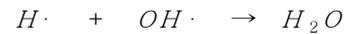
대개  $10^{-6}$ 초 동안 계속되는데 이온이 다른 물분자와 반응하여 새로운 물질을 생성한다. 이렇게 생성되는 물질은 일차 유리기, 이차유리기 및 과산화물 등이다.



다. 화학적 단계

약 2~3초 동안 계속되는 것으로 물리화학적 단계에서 생긴 반응생성물이 세포의 중요한 유기분자와 작용한다. 유리기와 산화제(superoxide 등)가 염색체를 이루고 있는 복잡한 분자를 파괴하게 된다.

예를 들면 이것들과 결합하여 다른 분자가 되거나, 긴 사슬형태의 분자를 절단하게 된다.



라. 생물학적 단계

세포 각각의 증상에 따라 몇 십분에서 수십년의 시간이 걸린다.

- 세포가 조기에 사멸된다.
- 세포분열이 중단되거나 지연된다.
- 영구적인 변화가 일어나서 그것이 자손의 세포에 전달된다.

■ 방사선의 직접작용과 간접작용

가. 직접작용(Direct Effect)

생물체가 방사선에 피폭되면 흡수된 방사선 에너지가 열에너지로 전환되어 이 열이 특정부위에 물리적 구조변화를 유발하는 것(전체 영향의 25%)

나. 간접작용(Indirect Effect)

세포질의 용매인 물이 ion화되고 유리기 및 과산화물을 생성하여 이러한 유리기 및 과산화물이 주변의 세포성분과 반응하여 대사장해를 유발하는 것(전체 영향의 75%)

■ 방사선의 생물학적효과에 영향을 주는 요인

생물의 방사선 감수성에 영향을 주는 요인으로는 방사선 조사시의 물리적 요인과 생물자체의 요인이 있다.

가. 생물학적 요인

① 연령

어린 개체 또는 노화가 심한 개체가 방사선에 약하다.(∵ 세포분열이 많기 때문이다)

② 유전적인자

- AT, XP 등의 유전소인자는 방사선에 민감하다.
  - AT : 운동실조증(Ataxia Telangiectasia)
  - XP : 색소송건과증(Xeroderma Pigmentosum)
- 색소송건과증 증상이 있는 사람은 정상인과는 달리 특히 자외선 의해 심각한 손상을 받을 수 있다.
- 모세관 확장성 운동실조증(AT)증상이 있는 사람은 DNA손상복구에 관여하는 유전자의 결함으로 인해서 방사선에 피폭시 정상인보다 훨씬 심각한 손상을 입게 된다.
- 이형유전자(heterozygote)를 갖고 있는 사람의 경우도 정상인에 비해서 높은 방사선 감수성을 갖는다.

③ 생물의 종류

- 동일한 종에 있어서도 계통이나 품종에 따라 방사선 영향이 다르다.
- 하등한 생물에 비해서 고등생물의 감수성이 높다.
- 특히 방사선에 대한 표적의 크기(Target size : DNA

volume)가 큰 생물일수록 방사선에 강하다.

나. 물리적 요인

④ 국부조사(Partial Body Irradiation)

생물체에 대한 방사선 조사부위에 따라  $LD_{50(30)}$ 에 많은 차이가 있으며, 조사받은 부위와 주변의 조직 및 기관간에는 상호작용이 있으나 장해는 대부분의 경우 조사받은 조직이나 기관에서만 일어난다.

- 조사면적이 커지면  $LD_{50(30)}$ 은 낮아진다.
- 즉 조사되는 부위가 크면 낮은 선량에도  $LD_{50(30)}$ 가 된다.

다.

- 동일선량일 경우 국부조사에 비해 전신조사는  $LD_{50(30)}$ 이 낮아진다.

⑤ 선량률(Dose Rate)

- 준치사선량 이하에서는 방사선 조사가 일정한 시간 간격을 두고 이루어질 경우 생물체에 방사선 손상을 회복하는데 필요한 시간을 제공하는 효과를 나타내게 되어 연속조사에 비해 영향을 덜 받는다.
- 방사선량이 같아도 선량율이 높은 경우가 훨씬 더 영향을 많이 받게된다.
- (급성피폭 일수록  $LD_{50(30)}$ 은 낮아진다. 즉 단시간내에 피폭되면 낮은 선량에도 치사될 수 있다)

⑥ 산소

생물을 저산소 상태에서 방사선을 조사하면 정상적 조건에서의 생물보다 방사선 장해가 감소된다(산소가 많으면  $LD_{50(30)}$ 은 낮아진다)

- 산소에 의한 방사선 영향의 증가율  $OER$ (oxygen enhancement ratio)

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

⑦ 온도

생물체에 방사선 조사시 온도가 높으면  $LD_{50(30)}$ 은 낮아진다.

이와 같은 온도효과는 온도자체의 물리적인 것보다는 오히려 저온으로 인한 조작내 효소량 감소 또는 저온에 의한 조

작내 저산소상태에 기인하는 것으로 해석되고 있다.

.....

■ 방사선의 간접작용에 영향을 미치는 4가지 효과

① 희석효과

일정한 방사선을 조사시켰을때 표적입자의 농도가 작아지면  
치사효과가 작아진다.

② 화학적 보호효과

수용액에 목표로 하는 용질외에 화학물질을 넣으면 조사에  
의한 용질의 변화가 작아진다. 방사선 조사전에 투입하며 방  
어제의 생물에 대한 방사선방어 능력을 나타내는 지표로서 도  
입된 양으로 DRF (선량감소효율)를 사용하며 다음과 같이 표  
시할 수 있다.

$$DRF = \frac{\text{방어제를 가했을 때의 어떤 효과를 얻는 데 필요한 선량}}{\text{방어제를 가하지 않았을 때 같은 효과를 얻는 데 필요한 선량}}$$

③ 동결효과(온도효과)

조사된 수용액에 생긴 유리가 확산되어 장애가 생긴다면 동  
결시키므로서 확산속도를 작게하여 장애를 줄일 수 있다.

④ 산소효과

방사선조사시 계내에 산소분압이 높아지면 방사선감수성이 증  
가한다. 산소에 의한 방사선 감수성의 증대를 양적으로 표현하  
기 위해 산소증감율(OER)을 사용하는 데 다음과 같이 표시  
할 수 있다. (거의 모든 생물의 OER은 2 ~ 3사이에 있다고  
할 수 있다)

$$OER = \frac{\text{산소로 포화했을 때의 방사선효과}}{\text{무산소 상태에서의 방사선효과}}$$

■ RI선택시 고려하여야 할 사항

① 방사선의 종류와 에너지

② 반감기 및 사용시간

선택상 여유가 있을 경우 반감기가 긴 핵종이 좋으나 일반적  
으로 장수명핵종은 단수명핵종보다 방사선에너지가 낮으며 또  
한 폐기물처리도 따른다.

③ 방사화학적 순도 (RCP) [방사성핵종순도 (RNP)]

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

④ 비방사능

단위질량당 방사능 (Ci/g) 을 말하는 데 실험대상에 따라 적합  
한 비방사능을 가진 RI를 선택하여야 한다. 실험도중 비방사  
능의 급격한 변화가 일어나지 않도록 해야하며 너무 많은 캐  
리어를 가하여 비방사능이 떨어지지 않게 하여야 한다.

⑤ 화학형

⑥ 라디오콜로이드

이것을 방지하기 위해서는 액성을 크게 변화시킨다던가, 용존  
착이온을 만드는 착화제를 가한다. 또 필요에 따라서 캐리어  
를 가하여 산화-환원사이클을 반복시킨다.

⑦ 방사선효과

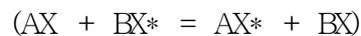
트레이서 양만으로는 문제되지 않으나 RI를 많이 쓰는 경우  
실험계에 주는 방사선에 의한 변화, 실험자의 피폭, 생물체에  
일어나는 변화를 무시할 수 없게 된다. 또한 표지화합물에도  
변화가 생기므로 RI양에 유의해야 한다.

⑧ 동위원소효과

트레이서에 쓰이는 RI와 그 인정동위원소는 질량수는 다르나 화  
학적행동은 완전히 같다는 전제하에 있다. 그러나 질량수가 다름  
에 따라서 물리적, 화학적 성질에 차이가 있는 경우가 있다. 이것  
을 동위원소효과라 하며 방사능의 유무에 관계없이 일어나고 원  
자번호가 작은 원자로서 질량수의 차가 클수록 현저하다.

⑨ 동위원소교환반응

동위원소X를 함유하는 화학종 AX, BX\*의 사이에는 X가 교  
환된다. 이것을 RI로 표지한 X\*를 사용하여 밝혀 내었다



이처럼 교환반응이 생기면 트레이서실험결과를 애매하게 만들  
우려가 있다.

■ 반감기의 측정방법

① 반감기가  $10^9$  sec이하 일 경우

핵반응의 되튐작용을 이용하여 측정한다.

② 반감기가  $10^9$  sec ~ 수 sec 일 경우 : 동시계수법

③ 반감기가 수 sec ~ 10 년 일 경우

방사선측정기를 이용하여 그 감쇠를 측정한다.

④ 반감기가 10 년이상 일 경우

반감기가 10 년이상 일 경우 감쇠를 기다리는 데 긴 시간이 요구되고 1000년이상이면 감쇠를 기다리는 것은 불가능하다. 이 경우 붕괴법칙을 이용하여  $dN/dt = -\lambda N$ 에 따라 원자수  $N$ 와  $\lambda$ 를 구하여 반감기(T)를 구한다.

■ 입자방사선가속기

현재 널리 사용하고 있는 입자기속장치는 가속제도에 따라 다음과 같이 나눌 수 있다.

가속제도	가속기의 종류	가속방식
직선형	콕크로프트 월턴형	전장에 의한 가속방식
	반데그라프형	전장에 의한 가속방식
	선형 가속기	전장에 의한 가속방식
회전형	베타트론	전자장에 의한 가속방식
	사이클로트론	전자장에 의한 가속방식
	싱크로트론	전자장에 의한 가속방식

각각에 대한 주요한 사항을 요약하면 아래와 같다.

가속기의 종류	주요 내용
콕크로프트 월턴형	처음으로 가속입자로 핵변환에 성공했을 때 사용한 가속기로서 핵반응식은 $Li-7p, \alpha He-4$ 이다
반 데 그라프형	벨트기전기라고도 불리는 가속기이다.
선형 가속기	Linac이라고도 불리우며 가속방식이 정상파형 진행파형 2가지이다.
베타트론	전자전용가속장치이다.
사이클로트론	원계도를 가지며 가속할수록 원계도가 커지며 중하 전입자나 이온이외에는 가속시킬 수 없다
싱크로트론	일정한 원계도로 가속한다.