

原子力關係 資格試驗의 傾向과 對策 (IV)

—82年度 RI免許試驗對備要約—

物 理 學

1. 單位와基礎

- 길이 : cm, m이외에 A(angstrom) = 10^{-8} cm
 ○ 質量 : g이외에 1u(原子質量單位) = 1.66×10^{-24} g
 原子質量單位 : ^{12}C 의 中性原子를 12로 한다
 ○ 電荷 : C(coulomb), $Q(\text{C}) = i(\text{A}) \cdot t(\text{s})$
 ○ 힘 : N(newton), $F(\text{N}) = m(\text{kg}) \cdot a(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$
 dyn, $F(\text{dyn}) = m(\text{g}) \times a(\text{cm} \cdot \text{s}^{-2})$
 $1\text{N} = 10^7 \text{dyn}$
 ○ 에너지 : a) J(joule), $W(\text{J}) = F(\text{N}) \cdot l(\text{m})$
 erg, $W(\text{erg}) = F(\text{dyn}) \cdot l(\text{cm})$
 $1\text{J} = 10^7 \text{erg}$
 b) eV(electron volt) : 電位 1V의 점에 있는 電子가 갖는 위치에너지, 또는 電位差 1V로 加速된 전자가 갖는 운동에너지, q 의 電荷를 가진 입자가 전압 V 사이에서 가속되었을 때 얻는 운동에너지는 $E(\text{eV}) = \{q(\text{C}) / 1.6 \times 10^{-19}\} \cdot V(\text{V})$, $1\text{keV} = 10^3 \text{eV}$, $1\text{MeV} = 10^6 \text{eV}$
 c) 速度 v , 질량 m 인 물질이 갖는 운

동에너지 $E_k = mv^2/2$ ($v \ll c$), 靜止質量 m 의 粒子가 갖는 에너지 $E_0 = mc^2$ ($v \ll c$), 電子의 靜止質量 = 511keV , 1u 靜止質量 = 931.5MeV

d) 振動數 ν 인 光子(X 線, r 線)의 에너지 $E(\text{erg}) = h(\text{erg} \cdot \text{s}) \cdot \nu(\text{s}^{-1})$, $h = 6.6 \times 10^{-27} \text{erg} \cdot \text{s}$ (Planck 常數)

重要的 保存法則

- 1) 電荷의 保存 : 密閉系에서 總電荷量은 變化前과 後가 不變(例 $n \rightarrow p + e^- + \nu$).
- 2) 에너지 保存法則 : 밀폐系에서 총에너지(靜止에너지도 필요할 경우에는 고려에 넣음)는 變化前과 後가 不變(例 核反應에서 반응전과 반응 후의 관계, r 선에 의한 電子雙生成 등)
- 3) 運動量 保存法則 : 반응전과 후에서 운동량은 보존된다. (例 α 붕괴에서 α 입자와 反跳核의 질량을 각각 m, M , 속도를 v, V 라고 하면 $mv - MV = 0$ 로 붕괴전의 운동량(0)과 같다. 그리고 光子의 운동량은 $h\nu/c$ 이다)

放射線에 관한 量과 單位

- a) 放射能 : 단위시간에 붕괴하는 核種의 원자수(dN/dt)
 Bq (becquerel) : 每秒의 붕괴원자수(dps)
 Ci (curie) : $3.7 \times 10^{10} Bq$ (^{226}Ra 1g의 방사능과 거의 같다)

b) 粒子 fluence : 단위면적을 통과하는 입자의 總數. 減速材속에서의 열중성자 처럼 모든 방향에서 올때는 단위면적의 大円을 가진 球로 생각한다. (단위 : cm^{-2} 또는 $\text{particles} \cdot \text{cm}^{-2}$)

c) 粒子 fluence 率 : 단위시간에 단위면적을 통과하는 입자의 총수(단위 : $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 또는 $\text{particles} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

d) energy fluence, energy fluence 率 (에너지束密度) : 입자數대신 통과하는 에너지를 말한다. (單位 : $\text{erg} \cdot \text{cm}^{-2}$, $\text{erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

e) 斷面積 : 핵반응이 일어나기 쉬운 정도를 나타내는 量으로 標的의 면적이라고 생각한다. (단위 : b (barn) = $1 \times 10^{-24} \text{cm}^2$)

2. 原子와 原子核

原子 : Ze의 電荷를 가진 원자핵의 주위를 Z개의 전자가 각각 일정한 에너지를 가지고 돌고 있다. 크기는 10^{-8}cm 정도, 질량 $1 \sim 200u$.

原子核 : Z개의 陽子와 거의 같은수의 중성자 (Z이 크면 약 1.5배)가 核力(nuclear force)을 매개로 해서 $10^{-12} \sim 10^{-13} \text{cm}$ 의 크기로 모여있는 系.

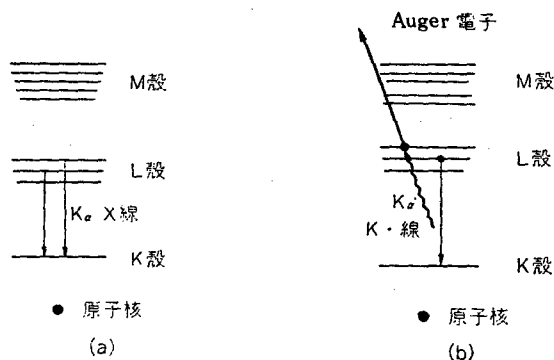


그림 1 原子에서의 電子軌道와 X線, Auger 電子의 放出

原子에서의 電子軌道 : 그림 1과 같이 원자핵에 가장 강하게 결합되어 있는 상태부터 K, L, M, N, O...軌道라고 부르며 그 궤도상태에 있는 전자를 K電子, L電子등 이라고 한다.

원자로부터 방출되는 X선중 KX선은 K殼에

구멍이 뚫려 L殼으로 부터 전자가 이동하여 K殼을 메우며 余分の 에너지를 K_{α} X線으로 방출한다. 즉, $E_K(X線) = B_K - B_L$ 이다. K_{α} X선이 원자밖으로 방출되는 대신에 다른 軌道電子와 相互作用해서 該當전자를 방출시키면 이 전자를 Auger 電子라고 한다. 그림 1 (b)에서는 2개의 L電子가 關与하므로 $E_{KLL}(Auger) = B_K - 2B_L$ 이 된다. 그리고 예들들어 K殼에 N개의 구멍이 뚫려 N_r 개의 光子가 방출되었다고 하면 $N_K = N_r/N$ 를 K fluorescence yield라고 부른다. 그림 2는 K fluorescence yield를 Z의 함수로 표시한 것으로 Z가 작으면 Auger 전자의 방출 확율은 커진다.

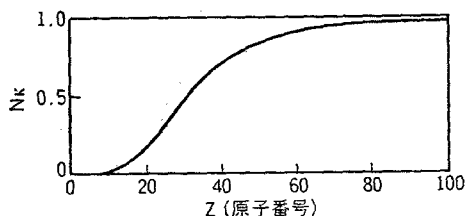


그림 2 fluorescence yield(N_K)

原子核의 性質

(1) 核力 : 원자핵을 구성하고 있는 양자와 중성자를 核子(nucleon)라고 부르며 核力은 核子 사이에 작용하는 힘이다. 10^{-12}cm 라는 대단히 짧은 거리에서 작용하는 힘(近接力)이다. 1개의 핵자는 다른 모든 핵자에 힘을 미치는 것이 아니고 한정된 범위의 핵자밖에 힘을 미치지 못한다(飽和性), 陽子-陽子, 陽子-中性子, 中性子-中性子에 작용하며 電荷와는 無關係이다.

(2) 質量欠損 : Z개의 양자와 N개의 중성자로 되는 원자핵의 질량은 같은 수의 양자와 중성자의 질량보다 작다. 이 작아진 질량에 상당하는 부분은 核子の 結合에너지로 되어 있으며 질량 결손이라고 한다.

(3) 原子核의 勵起와 粒子 및 r선의 放出 : 원자핵의 勵起機構는 복잡하며, 수MeV 이상으로 양자나 중성자의 결합에너지 이상으로 勵起되면 粒子가 보통 우선적으로 방출된다. 방출입자

가 에너지적으로 不可能할 때는 r 선이 방출되어 基低狀態 (ground state)로 된다. 어떤 원자핵 (Z, N)의 기저상태보다 ($Z \pm 1, Z \pm 1$) 원자핵의 기저상태쪽이 에너지가 낮으면 β 붕괴가 일어난다. r 선방출과 競合하는 과정에서 内部轉換電子 (internal conversion electron) 방출이 있다. 이것은 r 선을 방출하는 대신에 軌道電子에 電磁 상호작용으로 에너지가 전해져서 전자가 방출되는 현상이다. 내부전환전자의 에너지 E_e 는 $E_e = E_r - I$ (I 는 전자의 결합에너지)로서 r 선의 放出比에 대한 電子放出比의 비율 $\alpha = I_e / I_r$ 를 内部轉換係數라 한다. 全방사선의 방출비는 $T = I_r(1 + \alpha)$ 로 표시된다. α 는 E_r 가 작을 수록, Z 가 클수록, 準位間의 spin差가 클수록 커진다. 따라서 isomer 轉位の 경우 내부전환전자가 방출되는 비율은 크다.

3. 放射性崩壊

放射能: 不安定한 원자핵이 보다 안정한 원자핵으로 전환해갈 때 방사선을 방출한다. 이와같이 스스로 방사선을 방출하는 성질을 방사능이라고 한다. 또, 이와같은 전환과정을 放射性崩壊 (壞變)라 한다. 방사능의 단위는 Bq 또는 Gi . N 개의 방사성원자핵 (원자)이 있을 때 그 붕괴하는 속도는 그 수에 비례한다. $-dN/dt = \lambda N$
 λ : 崩壊定數, 積分하면 $N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 \exp(-0.693 t / T_{1/2}) = N_0 (1/2)^{t/T_{1/2}}$, $\lambda = \ln 2 / T_{1/2} = 0.692 / T_{1/2}$, $T_{1/2}$: 半減期, $N = N_0 / 2$ 가 되는 시간. 한종류의 원자로 된 $m(g)$ 의 물질이 있을 때 그 원자수는 $N = mN_0 / A$. N_0 : Avogadro 數 ($6.0 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$), A : 質量數 ($A = Z + N$)

α 崩壊: α 粒子 (${}^4_2\text{He}^{++}$)를 방출한다. energy spectrum은 線 spectrum을 나타낸다. ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2\text{He}$. 천연에는 uranium 系列 (${}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{206}\text{Pb}$) ($4n + 2$), actinium 系列 (${}^{235}\text{U}[\text{AcC}] \rightarrow {}^{207}\text{Pb}$) ($4n + 3$), thorium 系列 (${}^{232}\text{Th} \rightarrow {}^{208}\text{Pb}$) ($4n$)이 있고 그 외에 neptunium 系列 (${}^{237}\text{Np} \rightarrow {}^{209}\text{Bi}$) ($4n + 1$)이 있다. 이들 계열중에는 많은 α 붕괴를 하는 핵종이 포함되어 있다. α 붕괴의 Q 值 (그림 3)와 붕괴에 관한 원자의 질량과의 관계는 $M(X)c^2 = M(Y)$

$c^2 + M(\alpha)c^2 + Q$, α 線의 에너지와 反跳核 (Y)의 에너지와의 관계는 각각의 질량, 속도를 m , M , 및 v , V 라 하면 $mv = MV$, $E_\alpha = mv^2/2$, $E_Y = MV^2/2$.

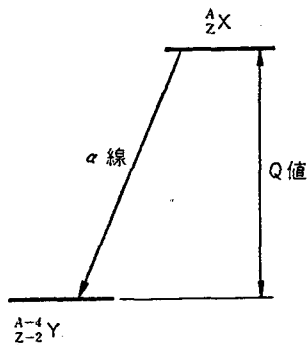
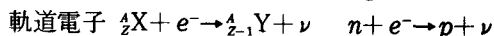
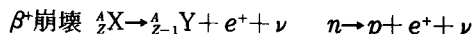
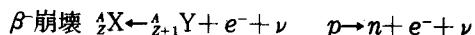


그림 3 α 崩壊와 Q 值

β 崩壊: β 입자 (전자)를 방출한다. 또, 軌道電子捕獲 (orbital electron capture)도 넓은 뜻의 β 붕괴라 불린다.



捕獲 (原子에서 X 線이 放出된다)

β 선의 에너지 spectrum: 連続이다. 습관상 평균치가 아니고 최대에너지에서 β 선의 에너지를 나타낸다. spectrum이 연속인 것은 붕괴시 中性子微子 ($\nu, \bar{\nu}$)와 에너지를 나누기 때문이다. X 를 어미, Y 를 딸이라 부른다. β 붕괴가 가능한지 여부의 판단은 $\Delta > 0$ 에서, β 崩壊 $M({}^A_Z X) + \Delta = M({}^A_{Z+1} Y)$, β^+ 崩壊 $M({}^A_Z X) + \Delta = M({}^A_{Z-1} Y) + 2m_e c^2$, 電子捕獲 $M({}^A_Z X) + \Delta = M({}^A_{Z-1} Y)$, (m_e 는 電子質量)

isomer (準安定準位): 勵起된 원자핵에서 r 선 또는 内部轉換電子를 방출하여 보다 낮은 에너지 상태로 옮겨가는 과정에서 방출과정이 원자핵의 구조로 인해 방해받으면 그 勵起準位の 半減期가 관측할 수 있을 정도로 커지는 경우가 있는데, 그 準位를 isomer라고 부르며 isomer로부터는 통상 r 선과 内部轉換電子가 방출되는데 직접 β 선이나 α 선을 방출할 경우도 많다.

r선의放出 : r선은 원자핵에서 방출되는 波長이 짧은 電磁波로 X선과의 구별은 원자핵에서 방출되는가, 원자에서 방출되는가의 차이이며 波長(에너지)에 따르는 구별은 없다. r선의 energy spectrum은 線 spectrum으로 물질에 대한 투과력이 크다. β붕괴의 많은 경우에 r선 방출을 수반한다.

崩壞圖(壞變圖, 崩壞圖式, decay scheme) : 방사성핵종이 방사선을 내면서 붕괴할 때, 방사선의 종류, 強度 및 에너지관계등을 원자핵의 勵起準位와 함께 圖示한 것.

特殊한 放射性崩壞 : 自發核分裂(spontaneous fission) : 우라늄이나 플루토늄과 같이 무거운 원자핵이 되면 자연히 핵분열을 일으킨다. 반감기가 대단히 긴것이 특징이다.

中性子放出을 하는 β崩壞 : 中性子수가 현저히 많은 원자핵이 붕괴할 때, β붕괴한 후의 勵起상태가 대단히 높아서 중성자의 방출이 가능할때가 있다. 이때 遲發(遲延)중성자 (delayed neutron)가 방출된다. 원자로제어에 중요한 역할을 한다.

4. 原子核反應

원자핵과 入射荷電粒子的 電荷로 만들어진 coulomb障壁보다 큰 에너지로 粒子를 원자핵에 부딪치면 入射粒子는 원자핵의 核力이 미치는 범위속으로 들어가, 勵起된 원자핵은 粒子나 r 선을 방출한다. $\text{X} + \text{a} \rightarrow \text{Y} + \text{b}$: (a,b)反應,

target 入射 生成 放出
粒子 核 粒子

$A_1 + A_2 = A_r + A_s, Z_1 + Z_2 = Z_r + Z_s$ 에너지의 관계는 $M(X)c^2 + M(a)c^2 = M(Y)c^2 + M(b)c^2 + Q$, 여기서 $Q > 0$ 發熱反應, $Q < 0$ 吸熱反應. 흡열반응시는 入射粒子的 에너지를 $\{M_x + M_b / M_a\} \times (-Q)$ 以上으로 하지 않으면 반응은 일어나지 않는다. 이것을 반응의 threshold value라 한다. 그리고 입사입자가 중성자일 경우는 coulomb障壁은 문제되지 않으며 熱중성자에서도 일어난다. 핵반응이 일어나는 비율은 斷面積으로 표시되며 단위는 b(barn)이다.

5. 放射線과物質과의 相互作用

(1) 放射線에 의해서 생기는 여러現象

荷電粒子가 물질중을 통과할 때 주로 電磁相互作用에 의해 물질중 전자의 거동이 변하여 여러가지 변화가 일어난다.

a) 電離作用 : 放射線이 기체중을 통과하면 그 통로에 따라 원자 또는 分子에 束縛되어 있는 전자가 遊離한다. 즉, 전자와 陽이온이 만들어진다. 한개의 ion雙을 만드는데 필요로 하는 평균에너지를 W值라 부르며, 荷電입자의 종류와 에너지에는 별로 의존하지 않는다. α선의 공기에 대한 W值는 약 36eV이다. 물질이 기체가 아니고 고체일때는 電子와 正孔이 만들어진다. 한쌍의 전자·正孔雙을 생성하는데 필요한 평균에너지를 ε值라 부르며, Si에서는 3.6, Ge에서는 2.9eV이다. 전리작용에 의해 만들어진 2次粒子가 또 電離能力을 갖고 있을때(주로 電子) δ線이라고 한다.

b) 勵起作用 : 原子나 分子에 미치는 작용이 電離를 일으킬만큼 충분하지 않을때 원자나 분자는 에너지가 보다 높은 상태가 된다. 즉, 勵起(excitation)된다. 그 결과 γ) 發光작용, L) 寫真乾板의 感光, C) 發色작용, R) 熱luminescence 현상등이 일어난다.

c) Cerenkov效果 : 물질중을 荷電입자가 光速(그 물질속에서)보다 빨리 이동하면 衝擊波에 상당하는 빛이 나온다. 이것을 Cerenkov光이라 한다.

d) 制動放射線 : 運動하고 있는 荷電입자의 속도가 변화했을 때 연속된 에너지의 X선이 放射된다. 이것을 제동방사선이라 한다. 단위시간당 제동방사선에 의해 잃게 되는 에너지는 $z^2 Z^2 / m^2$ 에 비례한다. 따라서 작은 질량을 가진 전자는 제동방사선을 강하게 방출한다.

e) Rutherford散亂 : 荷電粒子는 원자핵이 만드는 電場의 작용을 받아 散亂한다. 이때의 微分斷面積은, $d\sigma/d\theta \propto \frac{1}{E^2} z^2 Z^2 \frac{\sin\theta}{\sin^4(\theta/2)}$ 다만, E는 入射粒子(target에 비례해서 入사입자의

질량이 작을때에 한함)의 운동에너지.

(2) 重荷電粒子和物質과의 相互作用

阻止能(stopping power, 단위길이당에 잃는 에너지)은 $-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_e v^2} NZ \ln\left(\frac{2m_e v^2}{I}\right)$ 入射粒子에 관한量 z, v : 物質에 관한量 Z, I (물질의 平均勵起에너지)

$-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \propto \frac{Z}{A} \approx \text{常数}$: 入射粒子가 정해져 있을 경우 質量阻止能(mass stopping power)은 물질의 종류에 無關係. 즉, ρdx (mg/cm²)로 물질의 두께를 나타내면, 에너지損失은 물질에 無關係(ρ : 물질의 밀도).

比電離: 單位飛程길이당 생기는 ion의 數.

Bragg曲線: 荷電입자의 진행방향에 따라서 比電離를 측정하여 얻어지는 곡선, 荷電입자가 정지하기 전에 비전리가 커진다.

(3) 電子와 物質의 相互作用

特徴: a) 散亂되기 쉽다. 後方散亂係數大 b) 制動放射線을 방출한다 c) 陽電子는 원자핵 가까이에서 消滅하여 511keV의 γ 선을 180° 방향으로 방출(陽電子消滅) d) 飛程(range): $R(\text{g cm}^{-2}) = 0.543E(\text{MeV}) - 0.16$ $E > 0.7\text{MeV}$

(4) γ 線과 物質과의 相互作用

a) 光電效果 γ 선이 원자핵에 가까운 軌道電子를 방출시키고 자신은 소멸한다. (그림4(a)) $E_e = h\nu - I_e, \tau_k \propto Z^5 (h\nu)^{-7/2}$

b) Compton 散亂 γ 선의 自由電子에 의한 散亂. (그림 4 (b)) $h\nu' / h\nu = \{1 + \epsilon(1 - \cos\theta)\}^{-1}, \epsilon = h\nu / m_e c^2, \sigma_c \propto Z$

c) 電子双生成 γ 선이 원자핵가까이에서 소멸하여 陰陽 한쌍의 전자를 만든다. (그림 4 (c)) 生成條件, $E_\gamma > 1.022, 2\text{MeV}$ 이상에서 重要 $k_p \propto Z$ (電子의 coulomb場), $k_p' \propto Z^2$ (원자핵의 coulomb場)

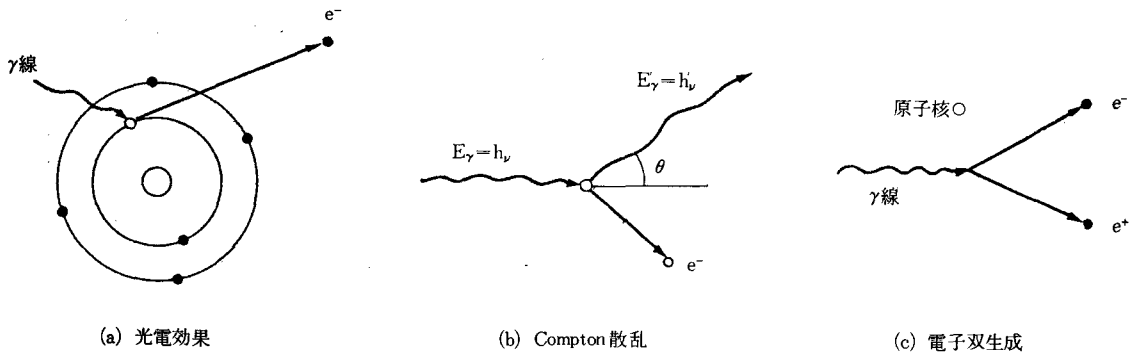


그림 4 γ 線과 物質과의 相互作用에 의한 3 가지의 基本過程

化 学

1. Isotope에 關한 事項

用語: 核種, 中性자부족의 핵종, 中性자過剩의 핵종, 同位元素(安定동위원소와 방사성동위원소), 同重体(isobar), 同中性子体(isotone), 核異性体(nuclear isomer), β 붕괴 鎖列, 천연

방사성핵종(계열을 만드는 방사성핵종과 계열을 만들지 않는 방사성핵종), 천연방사성원소와 인공방사성원소, 超우라늄원소(actinides와 lanthanides), 우라늄·라듐계열(4n+2 계열), 토륨계열(4n 계열), 악티노 우라늄계열(4n+3 계열), 넵투늄계열(4n+1 계열), 라듐線源, Ra DEF線源, 핵분열생성물.

解説: 자주 사용되는 방사성동위원소의 반감기, 붕괴형식, β 또는 γ 선의 에너지를 알아두어

야 한다. 자주 사용되는 핵종은 :

密封線源으로는 ^3H (12.3y, 純 β^- , 18.6keV), ^{14}C (5730y, 純 β^- , 156keV), ^{55}Fe (2.7y, EC, Mn X線), ^{57}Co (271d, EC, r 122keV, 14.4 keV), ^{60}Co (5.3y, β^- , r 1173keV, 1332keV), ^{63}Ni (100y, 純 β^- 67keV), ^{85}Kr (10.7y, β^- , r 514keV), ^{90}Sr (28 y, 純 β^- ; ^{90}Y 64h, 純 β^-), ^{137}Cs (30y, β^- , $^{137\text{m}}\text{Ba}$ 2.5mIT, r 662keV), ^{147}Pm (2.6y, 純 β^-), ^{192}Ir (74d, β^- , EC, r 317keV 기타多數), ^{196}Au (2.7d, β^- , r 412keV), ^{204}Tl (3.8y, β^- , EC, no r), ^{210}Po (138d, α), ^{222}Rn (3.8d, α), ^{226}Ra (1600y, α , 딸核種多數), ^{241}Am (433y, α , r 60keV), ^{252}Cf (2.6y, α , 自發核分裂에 의한 中性子) 등 非密封核種으로는, 上記核種과 重複되지 않은것을 들면: ^{32}P (14d, 純 β^- 1.7MeV), ^{35}S (87d, 純 β^- 167 keV), ^{51}Cr (27.7d, EC, r 320keV, V의 X線), ^{67}Ga (78h, EC, r 185keV 기타), ^{75}Se (120d, EC, 265keV 기타), $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (6h, IT, r 140keV), ^{125}I (60d, EC, 35keV), ^{131}I (8d, β^- , 365keV), ^{133}Xe (5.3d, β^- , r 346keV), ^{169}Yb (32d, EC), ^{197}Hg (64h, EC, r 77keV, Au의 X線), ^{203}Hg (46.6d, β^- , r 279keV) 등이다.

이들 핵種 중 天然에도 存在하는 것은, ^3H , ^{14}C , ^{210}Po , ^{222}Rn , ^{226}Ra 이다. (^{238}U , ^{232}Th , ^{235}U , ^{40}K , ^{87}Rb 등은 天然에 多量으로 存在하는 放射性核種이다). 또 核分裂生成物은 ^{85}Kr , ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{131}I , ^{133}Xe 이다.

2. 放射能과 比放射能

用語 : dps, dpm, cps, cpm, Ci (curie), Bq (becquerel), 無担体, 追跡子 (tracer), 比放射能, 放射能濃度.

解説 : 방사능의 강도는 $A = -dN/dt = \lambda N$ 로 표시된다. (λ 는 붕괴상수, N 는 방사성 핵종의 원자수). 이 식은 다음과 같이 반감기 T , 방사성핵종의 무게 W , 원자량 M 로 표시된다. $A = (0.693/T) \times (W/M) \times 6 \times 10^{23}$. 또, 이 식에서 방사능의 減衰는 $A = A_0 e^{-\lambda t}$ 가 된다. (A_0 는 t

$= 0$ 에서의 방사능강도). $t = nT$ 에서의 A 의 값은 A_0 의 $(1/2)^n$ 이 된다. 따라서, $n = 1/2$ 이면 $(1/\sqrt{2})$ 가 된다.

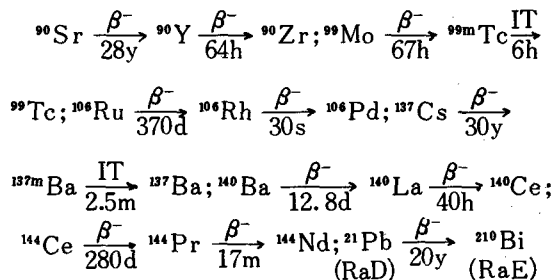
比放射能 (specific activity, Ci/g 또는 mCi/g) 과 방사능농도를 혼동하지 않도록 주의할 것. 비방사능은 無担体 (carrier-free) 상태에서 가장 크며 그 값은 시간과 함께 변화하지 않고 일정하다 (무담체 시료의 비방사능은 $A/W = \lambda \times (W/M) \times 6 \times 10^{23} / W = (\lambda/M) \times 6 \times 10^{23} = \text{一定}$)

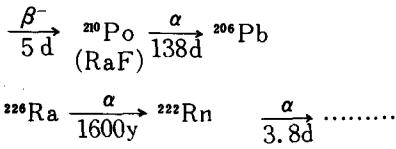
3. 放射平衡

用語 : 어미核種, 딸核種, 崩壞曲線, 過渡平衡, 永年平衡 (secular radioactive equilibrium), milking, generator.

解説 : 어미핵종과 딸핵종의 붕괴상수 및 원자수를 각각 λ_1 , N_1 ; λ_2 , N_2 라고 하면 $dN_1/dt = -\lambda_1 N_1$, $dN_2/dt = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$ 가 된다. 이 들 식의 積分하면 $N_1 = N_1^0 e^{-\lambda_1 t}$; $N_2 = (\lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1)) N_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$, 방사능強도의 식으로 하면 $A_1 = \lambda_1 N_1 = A_1^0 e^{-\lambda_1 t}$; $A_2 = \lambda_2 N_2 = (\lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1)) A_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$ 가 된다. 여기서 $t = 0$ 에서 $N_1 = N_1^0$, $A_1 = A_1^0$ 로 하고 딸核種은 없는것으로 했다. 이 식에서 $\lambda_2 > \lambda_1$ 라고 하면 ($T_2 < T_1$), 시간이 조금 경과하면 $e^{-\lambda_1 t} \gg e^{-\lambda_2 t}$ 로 되므로 $N_2 = (\lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1)) \cdot N_1^0 e^{-\lambda_1 t}$ 또는 $N_2/N_1 = \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) = \text{一定}$ 또는 $A_2/A_1 = \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1) = \text{一定}$ 이 된다. 이것을 放射過渡平衡 (transient equilibrium)이라고 한다. 다음에 $\lambda_2 \gg \lambda_1$ 이면 $N_2/N_1 = \lambda_1 / \lambda_2 = \text{一定}$ 또는 $A_1 = A_2$ 가 된다. 이 상태를 永年平衡이라 한다.

방사평형이 성립하는 어미(親), 딸관계의 예를 들면,





4. RI의 製造法

用語：反應斷面積, 中性子捕獲反應, 反應의 Q值, 勵起曲線, 標的核(target核), 無担體 RI의 製造法, 원자로, cycrotron, 線形加速器, Van de Graaff 가속기, 反跳(recoil), hot atom 효과, Szilard-Chalmer 反應.

解説：RI를 인공적으로 제조하려면, 먼저 핵 반응의 종류, 반응단면적, target 핵종 (安定同位元素)와 그 化學形, 照財粒子的 종류, 에너지 등에 대해 검토한다. 만약 그 RI를 中性子捕獲 反應에서 만들 수 있다면 원자로를 사용하는 것이 가장 손쉽고 값이 싼 방법이다. 그러나 중성자포획반응에서는 target 핵과 생성핵의 원자번호가 같아지므로 무담체 RI나 높은 比방사능의 RI를 만드는 것은 어렵다.

熱中性子照射에 의해서 생성되는 RI의 量(放射化量)은 다음式으로 표시된다. $dN/dt = n\sigma\phi - \lambda N$, 여기서 N 와 λ 는 生成核의 원자수와 붕괴상수, n 는 target 핵종의 원자수, σ 는 열중성자 捕獲斷面積(放射化단면적), ϕ 는 熱中性子束($n/cm^2 \cdot sec$)이다. 이 式에서, t 시간의 照射에서 生成되는 放射能強度(dps)는 $A = \lambda N = n\sigma\phi \cdot (1 - e^{-\lambda t})$ 가 된다. $n\sigma\phi$ 는 飽和放射能值, $(1 - e^{-\lambda t})$ 는 飽和係數이다. target 핵종의 원자수 n 는, target 원소의 무게를 wg , 원자량을 M , target 핵종의 同位元素存在比를 b 로 하면 $n = (w/M) \times b \times 6 \times 10^{23}$ 로 주어진다. 포화계수는 $t = mT$ 라면 (T 는 生成核의 半減期) $(1 - (1/2)^m)$ 가 된다. 그리고 反應斷면적은 入射입자의 에너지에 의해 변화하며, 에너지가 높아지면 여러 가지 반응이 일어날 수 있으므로 목적으로 하는 RI 이외에도 生成되는 것을 주의해야한다. 表 1에 RI제조에 사용되는 대표적인 핵반응을 표시하였다.

熱중성자에 의한 (n, r) 反應에서는 入射입자 에너지가 대단히 적으므로 ($\sim 0.025eV$) target

表 1 RI 製造에 사용되는 代表的인核反應

| 核反應 | 生成 되는 RI의 例 |
|--------------------------------|---|
| (n, r) | $^{59}\text{Co}(n, r)$ ^{60}Co , $^{31}\text{P}(n, r)$ ^{32}P , $^{54}\text{Fe}(n, r)$ ^{55}Fe , $^{197}\text{Au}(n, r)$ ^{198}Au , $^{202}\text{Hg}(n, r)$ ^{203}Hg , $^{44}\text{Ca}(n, r)$ ^{45}Ca |
| $(n, r) \xrightarrow{\beta^-}$ | $^{209}\text{Bi}(n, r)$ $^{210}\text{Bi} \xrightarrow{\beta^-} ^{210}\text{Po}$, $^{130}\text{Te}(n, r)$ $^{131}\text{Te} \xrightarrow{\beta^-} ^{131}\text{I}$ |
| (n, f) | ^{90}Sr , ^{131}I , ^{137}Cs , ^{140}Ba , ^{144}Ce |
| $(d, 2n)$ | $^{51}\text{V}(d, 2n)$ ^{51}Cr |
| (n, p) | $^{14}\text{N}(n, p)$ ^{14}C , $^{32}\text{S}(n, p)$ ^{32}P , $^{35}\text{Cl}(n, p)$ ^{35}S , $^{45}\text{Sc}(n, p)$ ^{45}Ca |
| (n, α) | $^6\text{Li}(n, \alpha)$ ^3H , $^{35}\text{Cl}(n, \alpha)$ ^{32}P |
| (d, α) | $^{24}\text{Mg}(d, \alpha)$ ^{22}Na |

핵은 별로 反跳(recoil)를 받지않는다. 그러나 중성자를 흡수해서 生成되는 핵은 高勵起상태에 있으므로 높은 에너지의 r 선을 방출하여 安定化되어 간다. 에너지 E 의 r 선이 방출될 때 핵은 에너지 E_R 로 反跳한다. $E_R(eV) = 537E^2/M$, 여기서 M 은 反跳核의 질량을 원자질량단위(amu)로 표시한 값이다. 예를 들면, $E = 2\text{MeV}$, $M = 100$ 이라고 하면 $E_R = 20eV$ 가 되므로 反跳에서 化學結合이 절단된다. 反跳하고 있는 원자는 전자상태가 不安定하므로 hot atom이라 한다. Szilard와 Chalmer는 沃化에틸($\text{C}_2\text{H}_5\text{I}$)를 열중성자 照射시켜 $^{127}\text{I}(n, r)$ ^{128}I 을 일으켜 照射후에 target 물질에 물을 넣어 흔드니 ^{128}I 의 대부분이 水相에 옮겨지는 것을 발견하였다. 이와같은 현상을 Szilard-Chalmer 반응이라고 한다. 이 현상을 잘 이용하면 높은 比방사능의 RI를 만들 수 있다(^{51}Cr , ^{32}P 제조법으로 자주 사용).

5. 放射化學的分離

用語：tracer 量, radiocolloid, carrier(担體), 同位元素担體, 非同位元素担體, 保持担體, 捕集劑(collector), 同位元素交換, 放射化學的取

率과 化学収率, 放射化学의 純度와 化学의 純度, 放射能汚染除去係數.

解説: 방사화학적분리는 통상의 화학분리와는 몇가지 점에서 다르다. 相違點은 (i) 방사성물질을 취급하므로 오염을 일으키지 않도록 세심한 주의를 해야 할 필요가 있으며, 특히 가스발생에 주의한다. 또 차폐, 거리, 시간을 항상 생각하면서 조작한다. (ii) 대상물질이 극미량(tracer 량, 10^{-10} mol 이하) 일때가 많으므로 흡착, 共沈, radiocolloid 생성등을 일으키기 쉬워 필요에 따라서는 担體를 加한다. (iii) 방사능의 檢出感度가 대단히 높으므로 반드시 化学収率에 구애받을 필요가 없고 오히려 必要시간을 짧게 하여 방사능減衰나 피폭을 적게 하는 쪽이 좋다. (iv) 同位元素担體를 사용할때는 시료의 RI와 担體가 같은 화학상태를 취하도록 주의한다. (v) 목적으로 하는 RI이외의 방사성동위원소가 共存할때는 화학분리를 잘 행하여 化學적순도를 좋게 하더라도 방사화학적순도는 좋지 않다.

6. 放射化学의 分離法의 보기

解説: (i) 沈殿法, 共沈法: ^{90}Sr - ^{90}Y 의 수용액시료에서 ^{90}Sr 과 ^{90}Y 을 따로 따로 분리하려면 시료에 Sr^{2+} (또는 Ba)와 Fe^{3+} 의 担體를 가하여 암모니아水로 알카리성으로 한다. ^{90}Y 은 수산화제 2철 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 와 共沈하나 ^{90}Sr 은 上澄液에 남으므로 침전을 여과하면 양자를 분리할 수 있다. 이 방법은 ^{140}Ba - ^{140}La 의 相互분리에도 잘 사용된다.

(ii) 溶媒抽出法: (7) 상기의 분리법에서 ^{90}Y 또는 ^{140}La 를 非同位元素担體의 Fe^{3+} 로부터 분리하려면 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 침전을 6~8M HCl에 녹이고 分液할때기에 넣는다. 여기에 에틸에틸이나 이소프로필에틸을 넣어 水相과 有機相을 잘 혼합하면 Fe^{3+} 은 유기상쪽에서 抽出되고, ^{90}Y 또는 ^{140}La 는 무담체상태로 水相에 남는다. (L) 臭素 Br_2 나 沃素 I_2 는 4 塩化炭素 CCl_4 에 잘 抽出된다. 따라서 臭化物(Br^- 의 塩)이나 沃化物(I^- 의 塩)의 수용액이 있을때는(예를 들면 ^{24}Na

^{82}Br 나 ^{128}I 등) 산화제를 가해서 $2\text{Br}^- \rightarrow \text{Br}_2$, $2\text{I}^- \rightarrow \text{I}_2$ 로 하고 CCl_4 를 가해서 Br_2 , I_2 를 추출한다.

(iii) 이온交換法: ion 교환에는 陽ion 교환과 음ion 교환이 있다. 양ion 교환수지에 대한 양ion의 親和度는 陽電價數가 클수록 강하며 (III 價 > II 價 > I 價) 또 ion 半徑이 클수록 강하다. 그러나 溶離되기 쉬운 정도는 逆의 순으로 되므로 예를 들면 $\text{Na}^+ > \text{Ba}^{2+} > \text{La}^{3+}$ 의 순으로 되고 또 $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Rb}^+ > \text{Cs}^+$ 나 $\text{Ca}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > \text{Ba}^{2+}$ 의 순으로 된다. 음이온 교환수지에 대한 금속ion의 親和度는 錯陰이온의 형성하기 쉬운 정도에 관계하고 있다. 예를들면, HCl 용액에서 halogen 錯體를 만드는 경우에는 $\text{Zn}(\text{II}) > \text{Fe}(\text{III}) > \text{Cu}(\text{II}) > \text{Co}(\text{II}) > \text{Mn}(\text{II}) > \text{Ni}(\text{II})$ 의 순으로 樹脂에 붙기 쉽다. 따라서 溶離의 順은 이 逆이 된다.

(iv) 電氣化学的方法: ion化경향의 차이를 이용하는 방법과 외부로부터 電壓을 걸어서 행하는 電解電着法이 있다. ^{64}Zn 의 (n, p) 反應에서 생성되는 ^{64}Cu 를 target의 Zn에서 분리하려면 묽은 황산용액속에 Pb板을 插入한다. ^{64}Cu 는 Pb板上에 析出한다.

(v) 蒸留 또는 揮散法

(vi) paperchromatograph法: Rf 値의 차이에 의해서 분리한다.

(vii) rediocolloid法: 예를 들면, 上記의 ^{90}Sr - ^{90}Y 를 분리하기 위해 용액을 암모니아로 알카리성으로 한 후 filter paper로 여과하면 ^{90}Y 만이 filter paper 上에 흡착된다.

(viii) 反跳法: 前述의 Szilard-Chalmer 反應.

7. 放射能의 分析化学応用

用語: 放射化分析(非破壞放射化分析, 中性子放射化分析, 比較法), 放射分析(同位元素希釈分析, 逆希釈分析).

解説: 放射化分析은 試料中에 포함된 안정 동위원소를 放射化하여 생성된 방사능을 측정하므로써 시료중의 원소를 定量하는 방법이다.

中性子방사화분석이 가장 널리 이용되고 있으나 표준물질과 시료를 동시에 照射하여 방사화시켜 생성되는 방사능을 상대적으로 求해서 定量하는 비교법이 간편하고 精度가 좋다. 목적으로 하는 원소의 시료속의 함량을 Wg , 표준물질 속에서의 함량을 $W_{st}g$ 로 하면 측정되는 각각의 放射能強度 A 및 A_{st} 로부터 $W = W_{st} \cdot A / A_{st}$ 방사화분석은 시료속에 있는 어떤 원소를 정량함에 있어서 그 원소의 방사성동위원소를 가하여 방사능 측정하므로써 定量을 행하는 방법이다. 同位元素希積分析法에 대해서도 조사해 둘 것.

8. 放射線의 化学作用

用語: 放射線化学, 線 energy 付与 (LET), δ 線, G值, radical, 물의放射線分解, 直接作用과 間接作用, 保護作用(radical捕捉劑, energy移動, 電荷移動), 化学線量計(鉄線量計, 세륨線量計, glass線量計, 色素線量計), 放射線重合(graft重合, 架橋反應, 減成反應).

9. 標識化合物

用語 및 要点: 標識의 위치, 合成法(Wilzbach法), 표시화합물의 보존법.

解説: G值, 보호작용, 화학선량계 및 Wilzbach법은 꼭 알아두어야 한다.

ion化경향이 큰 금속의 순서는 K, Ca, Na, Mg, Al, Zn, Fe, Ni, Sn, Pb, (H₂), Cu, Hg, Ag, Pt, Au이다.



1. 放射線檢出器

(1) 氣体の 電離를 이용하는 檢出器

(a) 印加電圧과 수집되는 ion 雙과의 관계: 同軸圓筒狀의 전극구조를 가지는 검출기에서는 中

心線(陽極)의 주위에 강한 電場이 생기므로 印加電圧에 의해서 수집되는 ion 雙의 수가 크게 변하며 다른 동작특성이 얻어진다. 동작특성의 변화에 따라 印加電圧은 再結合領域, 電離函 영역, 比例영역, GM영역 및 放電영역으로 나누어진다.

(b) 電離函: 전리영역에서 동작하는 검출기. 매초 n 개의 ion 雙이 생길때 電離電流 I 는 $I = 1.6 \times 10^{-19} \times n [A]$.

(c) 比例計數管: 비례영역에서 동작시키는 계수관. 전극에 수집되는 이온雙의 총수는 1차이온雙의 數에 비례한다. 比例常數는 가스增倍率과 같다. 전리기체(計數가스)로 PR 가스(아르곤 90%+메탄10%), 메탄가스등이 사용된다.

(d) GM計數管: GM영역에서 동작시키는 계수관. 中心전극둘레에 電子사태(electron avalanche)가 發達하여 1차이온雙의 數와는 관계없이 일정수(飽和值)의 ion 雙이 생긴다. 신호 pulse는 +ion의 群이 -극으로 향해 이동하므로써 형성된다. 이에 관련되어 정의되는 不感時間, 回復時間, 分解時間의 구별을 명확히 하는 외에 印加電圧에 의한 plateau曲線의 변화를 이해해둔다.

(2) 半導體檢出器

荷電입자가 반도체속에서 많은 전자-正孔雙을 생성하는 것을 이용한 검출기. 동작원리는 기체의 전리함과 같다. 특색으로는 ① 電子-正孔雙 當의 에너지가 기체의 W 值의 약 1/10이며, 같은 소비에너지에 대해 기체 경우의 약 10배의 電荷가 생긴다. 이로 인해 신호의 통계적변동이 상대적으로 작아 좋은 에너지分解能이 얻어진다. ② 전자와 正孔이 전극에 수집되는 시간은, 기체계수관에서의 ion 雙 수집시간에 비해 100배이상 빠르다. 검출기의 양극사이에 있는 高低抗의 영역이 感應部分이 되는데 이 고저항영역을 형성시키는 제작기술과 구조등의 차이에 의해 반도체검출기는, $p-n$ 接合形, 表面障壁形, Li drift形 및 高純度半導體形으로 大別한다.

(a) p-n接合形 : p形 Si에 磷을 拡散시켜 p-n접합을 형성시킨 것. 空乏層이라 불리는 고저항의 두께는 bias 전압에도 의존하나 通常, 數 10~500 μm 程度.

(b) 表面障壁形 : n型 Si의 표면에 Au 등의 금속을 얇게 蒸着시키고 그 경계가카이에 고저항영역을 형성시킨 것. 飛程이 짧은 荷電입자의 검출에 적합하다.

(c) Li drift形 : p型 Si 또는 Ge에 Li를 확산시켜서 넓은 영역에 걸쳐 고저항의 感應部分을 형성시킨 것. 그 구조에서 p-i-n形이라고도 불린다. Li원자의 이동을 억제하기 위해 액체 질소온도에 보존하여 사용한다.

(d) 高純度形 : 고순도반도체는 低온도에서 고저항을 가지므로 低溫으로 하는것만으로 검출기로 사용할 수 있다.

(3) scintillation 檢出器

scintillator 와 光電子增倍管(PMT)의 組合으로서 되는 검출기·PMT의 성능은, 光電陰極의 量子효율(入射光子에 의해 光電子가 방출되는 확률로 光子의 波長에 의존), 다이노오드의 증배율등에 의해 결정된다. PMT의 gain은 印加 전압의 변동에 민감하며 인가전압의 안정성이 검출기의 성능에 크게 영향을 준다. scintillator는 無機 scintillator와 有機 scintillator로 大別된다. 전자에는 NaI(Tl), CsI(Tl) 등의 무기結晶을 사용한 것이며, 후자는 유기결정(안트라센등), plastic, 및 액체 scintillator로 大別된다. 액체 scintillator는 토루엔, 디옥산, 키시렌등의

表 1 放射線의 種類와 測定器

| 放射線 | pulse計數 또는 電離電流의測定 | pulse波高 spectrum의測定 |
|---------------|---|---|
| α 線 | 電離函 ZnS(Ag) scintillation 檢出器 液体 scintillation 檢出器 gasflow 比例計數管 | grid가 붙은 電離函 CsI(Tl) scintillation 檢出器 液体 scintillation 檢出器 表面障壁形 半導體檢出器 |
| β 線 | 電離函 端窓形 GM計數管 gasflow比例計管 液体 scintillation 檢出器 | plastic scintillation 檢出器 液体 scintillation 檢出器 |
| X, γ 線 | 電離函 NaI(Tl) scintillation 檢出器 | NaI(Tl) scintillation 檢出器 Ge(Li) 半導體檢出器 Si(Li) 半導體檢出器 |

유기용매에 PPO 등의 螢光물질을 첨가한 것으로 그 속에 방사능측정시료를 녹여서 사용할 수 있다. 시료의 混入에 따라 化学 quenching 및 色 quenching이 일어날때가 있다.

(4) 그 외의 檢出器

(a) Cerenkov 검출기 : 高速荷電粒子가 媒質中에서 방출하는 Cerenkov 光을 PMT로 검출하는 것. 水中에서 Cerenkov 光이 생기는 전자의 최저에너지는 약 263keV.

(b) 固体飛跡 검출기 : 고체중에서의 重荷電粒子의 비적(track)에 따라 생기는 방사선損傷領域을 화학처리에 의해서 확대시켜 etch pit로 계수한다.

(c) 線量計로 사용되는 것 : 열 luminescence 선량계, 螢光유리선량계, 化学선량계등.

2. 放射能測定

核種을 알고 있을때는 pulse의 계수 또는 電離電流의 측정에서 방사능이 결정되나 모르는 핵종 또는 혼합핵종일때는 pulse波高 spectrum 분석이 필요하게 된다.

(1) 방사선의 종류와 측정기 : α , β , γ 선의 각각에 대해 사용되는 대표적검출기의 분류를 表 1에 표시하였다.

(2) 절대측정과 비교측정 : 표준선원과의 비교에 의해 시료의 방사능을 결정하는 경우가 비교측정(相對측정이라고도 함)이고, 그 비교없이 방사능의 절대치를 구하는 경우가 절대측정이다. 절대측정의 대표적 방법을 정리해두는 것이 좋다.

(3) 電離電流에 의한 측정 : 捕集形전리함에 의한 기체의 β 방사능 측정, $4\pi\gamma$ 電離函에 의한 γ 선 방출핵종의 측정이 대표적인 실용例.

(4) pulse計數에 의한 측정 : GM계수관에 의한 β 선측정에 대해 不感時間에 의한 計數누락(counting loss)의 보정, β 선의 後方散亂의 영향, 자기흡수의 보정에 대한 지식을 정리해둔다. 또, gasflow 비례계수관에 의한 α 선과 β 선과의 分別측정의 원리를 알아두어야 한다.

(5) pulse 波高 spectrum 에 의한 測定

(a) spectrum 에 영향을 주는 요인 : 신호 pulse 의 크기는 통계적변동으로 인해 넓어진다. 이 넓어짐은 peak 의 폭으로 관측되며 여기서 에너지分解能(半值幅(half width)/에너지)가 정의된다. 이 외에 MCA 의 非直線性, pile up 효과도 이해해둔다.

(b) spectrum 의 특징 : γ 선에 대한 NaI(Tl) 檢出器의 spectrum 에 대해 光電 peak, escape peak, 後方散乱 peak, Compton edge, sum peak 등을 정확히 이해해둔다.

(c) peak 효율 : γ 선에 대한 NaI(Tl) 檢出器와 Ge(Li) 檢出器의 peak 효율의 에너지依存性을 이해해둔다.

(6) 計數値의 統計變動과 그 處理

(a) Poisson 分布 : 측정 시간중의 RI의 減衰가 충분히 작을 때, 계수치의 통계변동은 Poisson 分布에 따라 그 分散은 평균치와 같다. t 시간의 계수치가 N 일때 단위 시간당의 계수치 γ 의 標準偏差 σ 는 $\sigma = \sqrt{N/t} = (\gamma/t)^{1/2}$.

(b) 誤差의 편차 : 2개의 측정량 x_1 과 x_2 의 합 또는 差의 표준편차는 $(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2}$ 이며, 곱과 나눗의 상대표준편차는 $(1/\sigma_1^2 + 1/\sigma_2^2)^{1/2}$ 이다. 다만, σ_1 과 σ_2 는 x_1, x_2 의 표준편차.

3. 線量測定

측정의 대상은, 주로 照射線량과 조직중의 흡수선량이다. X, γ 線의 경우, [R] 단위의 照射線량 X와 [rad] 단위의 조직흡수선량 D와의 사이에는 $D \approx 0.97X$ 의 관계가 있으며, 양자는 수치적으로 거의 같다. 그래서 실용적선량은 흡수

선량이나 대신에 照射線량이 사용될 때가 많다.

(1) 照射線량의 絶對測定

(a) 平行平板型自由空氣電離函 : 50~300kV 정도의 X선에 의한 照射線량의 절대측정에 사용된다. X선 beam에 따라 2차전자평형을 성립시키고 이 조건하에서 한정된 공기체적으로부터의 電離電流의 절대량을 측정하고 정의에 따라서 照射線량을 결정한다.

(b) 空洞電離函 : 수백 keV 이상 에너지의 γ 선의 절대측정에 사용된다. 空氣等價의 물질로 전리함을 구성하며 空洞內에 2차전자 평형을 성립시킨다. 전리전류의 절대치에서 照射線量率이 구해진다. 空氣等價物質로는 黑鉛, 폴리스티렌, 루사이트등이 사용된다.

(2) 吸收線량의 絶對測定

(a) 空洞電離函 : 전리함의 벽을 가장 적합한 물질로 구성시키고 Bragg-Gray의 空洞原理에 의해, 전리전류의 측정치에서 벽물질에서의 흡수선량을 구한다.

(b) 熱量計 : 가장적당한 물질의 온도상승을 感溫素子로 측정하여 그 물질의 比熱로부터 흡수에너지의 절대치량을 구한다.

(c) Fricke 線量計 (화학선량계) : 황산제 1철의 황산산성용액이 방사선작용에 의해 황산제 2철로 산화되는 현상을 이용한 것. 생성되는 황산제 2철의 농도와 G值에서 흡수선량을 구한다.

(3) 線量計의 校正

올바른 線量率 = 指示値 × 校正係數이다. 22°C, 760 [mmHg]로 교정되어 있는 非 밀폐형의 전리함의 경우 溫度 t (°C), 氣壓 p [mmHg] 에서의 올바른 線量率 X 는, $X = \text{指示値} \times \text{校正係數} \times \{(273+t)/(273+22)\} \times 760/p$ 로 주어진다.

