

原子力 關係資格試驗의

傾向과 対策 (I)

(核物理)

1. amu

原子質量單位 atomic mass unit 記호amu. 分子, 原子, 原子核, 陽子, 中性子등의 相對的質量을 나타내는데 사용하는 單位的 하나. 炭素의 同位元素 ^{12}C 의 中性原子 質量的 12分の 1을 1amu로 한다. 즉, $1\text{amu} = 1.660149 \times 10^{-24}\text{g}$

2. 同位元素

同位核(KS1131) isotope 原子番号가 같고 質量數가 서로 다른 核種을 서로 同位元素 또는 同位核이라고 한다

3. 核種

nuclide 原子 또는 原子核의 種類를 나타내는데 사용하는 用語, 보통 特定的 原子番号Z, 質量數A, 에너지狀態를 가진 것에 限한다. ^N_ZX (단, $N = A - Z$)은 中性子數) 略해서 ^AX 로 表示한다.

4. 核子

nucleon 原子核을 구성하는 陽子, 中性子과 이들의 反粒子(反陽子, 反中性子)의 總칭

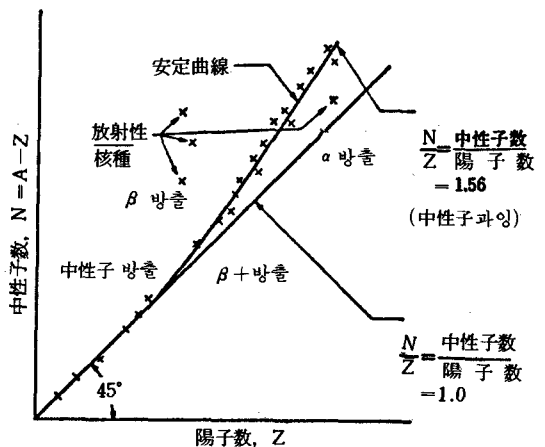
5. 原子核(核)

(atomic)nuclears 原子의 中核을 만드는 것으로核子 즉, 陽子와 中性子로 되는 複合粒子. 陽電荷를 가지고 있으며 原子의 質量은 대부분이 原子核으로 이루어진다. 그 크기는 $10^{-12} \sim 10^{-13}\text{cm}$ 정도

6. 여러가지 核種에 對한 安定曲線을 그리고 그 곡선의 右側에 있는 粒子和 左側에 있는 粒子가 어떤 方法으로 安定하게 되는가를 說明하라

原子核이 安定하게 存在하기 위해서는 그 원자핵을 구성하는 陽子와 中性子の 個數의 比率이 어느 一定範圍에 들어있어야 한다. 그림에서 安定曲線에서 벗어나는 것은 모두 不安定한 原子核이다. 그림에서 安定곡선 의 右側의 것은 α 粒子 또는 β^+ 粒子를 放出하며, 左側의 것은 β^- 線을 放

出하여 各各 安定曲線上的 安定原子核으로 複歸하려 한다. (放射性同位元素들이다) 경우에 따라서는 中性子를 放出할 때도 있다.



同位元素에 對한 中性子數와 陽子數의 關係

7. 核內에서는 어떤 힘이 核子에 作用하고 있는가. 이와같은 힘에 미치는 크기(첫수)의 影響은 어떤것인가

核力(nuclear force)이다. 즉, 核子사이에 作用하여 原子核을 形成하고 있는 힘. (1) 原子核의 直徑정도의 近距離에만 作用한다. (近距離核力) (2) 荷電에 關係하지 않는다. (3) 交換力(exchange force)이 支配的이다.

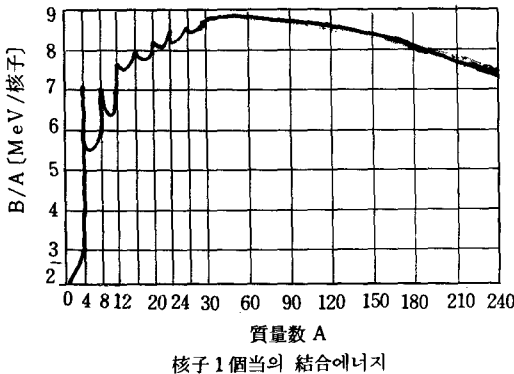
8. 質量欠損, 結合에너지 및 이들의 相互關係를 說明하라.

質量欠損(mass defect) : 原子番号Z, 質量數A인 原자핵의 質量 $M_{(A,Z)}$ 이 이를 구성하는 核子の 質量 合計, 즉 Z개의 陽子와 (A-Z)개의 中性子の 質量 合計보다 작다. 이 差, $\Delta M = Z M_p + (A - Z) M_n - M_{(A,Z)}$ 을 質量欠損이라고 한다. 여기서, M_p 는 陽子の 質量, M_n 은 中性子

의 質量.

結合에너지(binding energy) : 原子核을 구성하는 核子가 結合할 때 放出하는 에너지, 核分裂이나 核融合에 의해서 생기는 원자핵 에너지의 根源이라고 말할수 있다. 원자핵 전체의 結合에너지를 核結合에너지라 하며, 그 値를 그 원자핵의 質量數로 나눈 것을 核子 1개당의 結合에너지(binding energy per nucleon)이라 한다. 그림은 質量數A의 函數로 나타낸 核子 1個當의 結合에너지이다. 무거운 核이나 가벼운 核은 비교적 不安定하며 中間의 核은 安定함을 나타내고 있다.

原子核内에서는 質量欠損과 거의 等量的의 質量이 核子間的 結合에너지로 轉換되어 있기 때 문이라고 생각되며, 質量과 에너지의 同等原理가 成立하고 있다.



9. 核子 1개당의 結合에너지를 核種의 質量數에 의해서 나타내는 그림을 간단히 그리고, 結合энер지를 사용해서 核分裂 및 核융합에서 放出되는 에너지를 설명하라

(문 8의 그림 참조)

Einstein의 質量·에너지式, $E=mc^2$ (c는 眞空中의 光速度, m는 静止質量, E는 에너지)

結合에너지(B, E) = 質量欠損(ΔM) $\times c^2$

[計算例] ${}^4_2\text{He}$ 의 正確한 質量이 4.00387amu 인 경우, 이 原子에 대한 質量欠損은, 2.01518 (陽子の 質量, 2×1.00759) + 2.01796 (中性子の 質量, 2×1.00898) + 0.00110 (電子의 質量, 2×0.00055) = 4.03424

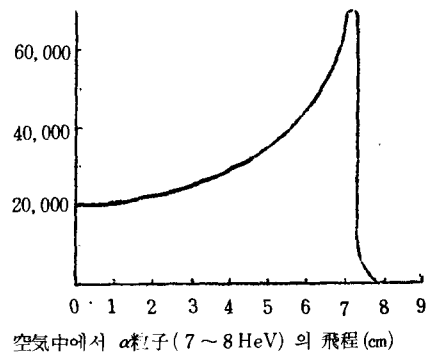
原子力産業 ① ②

$$4.03424 - 4.00387 = 0.03037 \text{ (amu, 質量欠損)}$$

$$0.03037 \text{ amu} \times 931 \text{ MeV/amu} = 28.25 \text{ MeV}$$

10. α 粒子란 무엇인가. α 粒子는 物質内에서 어떤 飛程을 가지는가. 또 α 粒子는 單一에너지인가

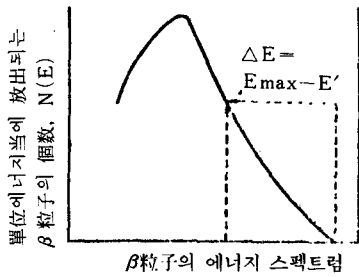
α 粒子, alpha particle : α 붕괴시 放出되는 헬륨의 原子核 ${}^4_2\text{He}$ 으로서 2개의 中性子和 2개의 陽子が 結合한 것이다. α 粒子의 흐름이 α 線이다. α 粒子의 飛程(range) (荷電粒子가 物質中을 통과할 때 어느 거리를 가면 그 電離作用이 급격히 감소한다. 이 거리, 즉 飛跡(track)의 길이를 飛程이라 함)은 그림과 같이 空氣中에서는 7cm에 不過하며 통과한 자취에 높은 比電離(= 比電離能 specific ionization power, α 粒子 등의 電離放射線이 空氣 등의 物質을 통과할 때 單位길이에 대해 生成되는 이온雙(ion pair)의 數를 일으킨다. α 粒子는 不連續的인 에너지를 가지고 放出되므로 單一에너지이다. 따라서 스펙트럼은 線스펙트럼이 된다.



11. β 粒子란 무엇인가. 이것은 物質内에서 어떤 飛程을 가지는가

β 붕괴등에서 放出되는 고속도의 電子 또는 陽電子. 負의 β 粒子는 電子로써 負의 β 붕괴시 放出되며, 正의 β 粒子는 陽電子로서 正의 β 붕괴시 放出된다.

β 붕괴도 不連續的인 에너지 E_{max} 를 가진 β 粒子의 放出이라고 想像되나, β 입자의 energy spectrum은 α 粒子의 경우와는 달리 그림에서와 같



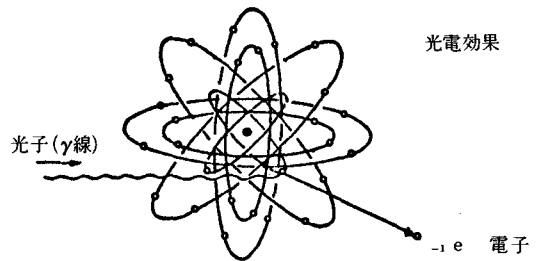
이 連續的이다. β 粒子는 α 粒子 무게의 1/7350에 불과하고 比電離能도 1/200~400밖에 되지 않으나 物質內部를 상당히 깊게 透過할 수 있다. β 粒子의 최고 에너지는 4MeV 정도이고 이것의 飛程은 200mg/cm²이다. β 粒子의 에너지는, 원자핵이나 전자와의 사이에서 彈性散活(elastic scattering) 및 非彈性散活(inelastic scattering)에 의해 잃는다. 또 電離에 의한 에너지 상실외에도 원자핵이나 전자에 의해 잡아당겨지거나 반발되어 電子의 飛程이 굴곡될 때 減速(moderation)되어 에너지를 잃을 때도 있다. 일반적으로 高速에서 運動하는 荷電粒子(charged particle)가 다른 荷電粒子와 相互作用에 의해 영향을 받아 그 결과 X線 등의 電磁波를 放射하는 현상 또는 그 放射線을 制動放射(阻止X線)(bremsstrahlung)이라 하는데 여기서 방출되는 電磁放射는 連續스펙트럼을 가지는 X線이다. 物質中の 電子의 飛程R(g/cm²)은 近似的으로 $R = 0.542E - 0.133$ 으로 표시된다.(문제14참조)

12. γ 線이란 무엇인가. 또 X線은 무엇인가. 이들은 어떻게 다른가. 이들은 物質內에서 어떤 飛程을 가지는가

γ 線은 放射性核種에서 방출되는 電磁波이다. 보통, X線管 등으로 人工的으로 發生시킨 波長 $10^{-6} \sim 10^{-10}$ cm 정도의 電磁波를 X線이라고 하는데 대해 原子核에서 방출되는 $10^{-10} \sim 10^{-12}$ cm ($1 \sim 100$ MeV에너지)의 電磁波를 γ 선(gamma ray)이라고 한다. γ 선의 투과력은 X선보다 強하나 이온化作用, 写真作用, 螢光作用은 약하다. X線은 보통 紫外線과 γ 線과의 중간, 즉 약 $100 \text{ \AA} \sim 0.01 \text{ \AA}$ 범위의 波長을 가지는 것을 말하나

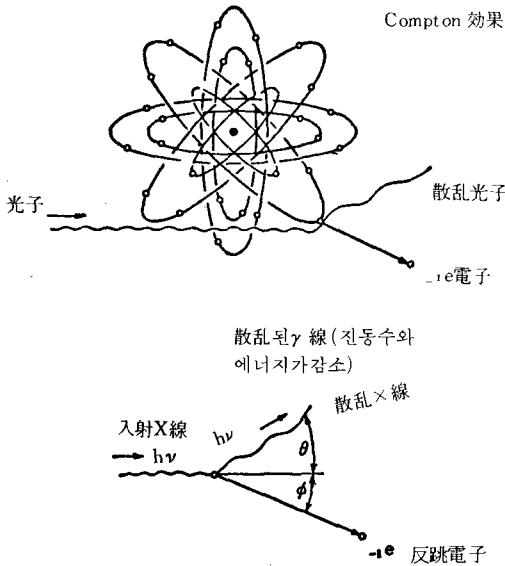
人工的으로 얻어지는 γ 線領域의 電磁波도 여기에 포함시킬 때가 있다. 便宜上 X線과 γ 線을 区分하지 않을때도 있다. γ 선은 α 입자나 β 입자와 같은 荷電粒子에 비해 比電離能이 弱하나 透過力은 매우 강하며 物質內에서 吸收되거나 에너지를 잃는 과정은 매우 복잡하다. γ 선의 物質과 相互作用은 크게 다음 세가지로 나눈다.

光電效果(photoelectric effect) : 어떤系(예컨대 原子, 物體)에 光子(X線 내지 低에너지 γ 線)가 入射되었을 때 그 系에 結合되어 있는 電子가 光子의 大部分의 에너지를 흡수하여 系外로 튀어나오는 현상. 이 電子를 光電子라 함. 光電效果에 의한 線減弱係數 μ_{pe} 는 光子의 에너지가 작을 때는 거의 $(h\nu)^{-3.5}$ (高에너지에서는 $(h\nu)^{-1}$ 에 비례)이고 또 原子番号 Z의 5乘(Z^5)에 비례한다. 光電效果는 光子(γ 線)의 에너지가 적을 때(A λ 에서는 50keV, pb에서는 500keV以下) 일어나며, 光子의 에너지가 커짐에 따라 다음의 Compton 散亂이 重要해진다.



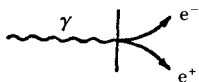
콤프톤效果(Compton effect) [콤프톤散亂, Compton scattering] : X선 또는 γ 선과 自由電子 또는 弱하게 束縛되어 있는 電子사이에서 일어나는 것으로서 原子自体와의 反應은 아니다. 物質에 의해 散亂된 X선 속에 그 波長이 入射X線の 것보다 긴 쪽으로 變化한 것이 포함되어 있는 현상. 이 경우, 동시에 原子에서 튕겨나온 電子(反跳電子, recoil electron)가 射出된다. 波長의 變化는 $2\lambda_0 \sin^2 \theta$ 2로서 주어진다. 여기서 $\lambda_0 = h/mc = 0.024 \text{ \AA}$ (h 는 Planck의 定數, m 은 電子의 質量, c 는 眞空中의 光速)로서 Compton 波長이라고 불려진다. θ 는 入射方向과 散亂方向이 만드는 角. 線減弱係數中の Compton 散

란에 의한 부분 μc 는 물질 1cm^3 당의 원자수를 N 로 하면, $\mu c = N\sigma_c = NZ\sigma_e$ 가 되고 原子番号 Z 에 비례한다.



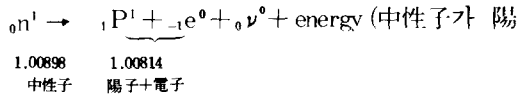
이온 쌍생성(電子對創生)(electron-pair formation) : 高에너지 (1.02MeV 以上)의 γ 線이 原子核 또는 電子의 電界속에서 消滅되고 電子와 陽電子가 生成되는 現象, 内部變換電子雙生成과 區別하여 外部電子雙生成이라고 할때도 있다. 5MeV 以下の γ 線에 대해 電子雙生成이 일어나는 確率은, 電子1개當의 斷面積으로 표시하면 原子核의 原子番号 Z 및 $(E\gamma - 1.02)$ (MeV)에 비례한다. 즉, 物質 1原子當에서는 原子번호 Z^2 에 비례한다. 1.02MeV (靜止電子質量은 0.51MeV 와 等價)는 Einstein의 質量과 에너지 變換公式 ($E=mc^2$)에 의하면 電子와 陽電子의 質量의 合에 相當한다. 線減弱係數中の 電子雙生成에 의한 부분 μ_p 는 原子번호 Z^2 에 대체로 비례하며 光子의 에너지가 커지면 급속히 增加한다. γ 線의 스펙트럼은 線 스펙트럼이다.

電子雙生成

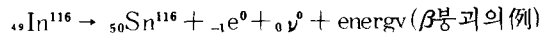


13. 中性微子란 무엇인가. 이것은 中性子 붕괴시 어떻게 해서 생기는가

neutrino(中性微子) = lepton(核子보다 가벼운 素粒子의 總稱, neutrino, 電子, 電子-neutrino, μ neutrino 등 4종류의 존재가 알려져 있다.)의 일종. 記号 ν , 質量0, 電氣的으로 中性이고 安定한 素粒子이다. 物質과의 相互作用은 거의 없고 그 自身은 붕괴하지 않는다. 弱한 상호작용에서 각각 電子 또는 μ 中間자와 雙이 되어 나타난다. 電子와 雙이 되는것을 電子뉴트리노(electron neutrino) ν_e , μ 中間자와 雙이 되는것을 μ 뉴트리노(μ -neutrino) ν_μ 라고 함. 生成例로는,



子로 變換하는 例)



14. 單一放射性同位元素의 放射性崩壞에 대한 式을 유도하여라

시간 t 에서 N 개의 방사성核이 있을 때, 방사성核의 수 N 의 단위시간內的 減少比率 $-(dN/dt)$ 는 그 시간에서의 핵의 수 N 에 比例한다. 즉, $-(\frac{dN}{dt}) \propto N$ 이 比例定數를 λ 라 하면, $-(\frac{dN}{dt}) = \lambda N$ 이 된다. 이 비례定數 λ 는, 崩壞定數(decay constant)라고 하며 단위시간當에 붕괴하는 방사성 핵종의 비율이다. 지금 N_0 는 최초로 있었던 방사성원자의 수, N 은 시간 t 에서의 방사성 원자의 數라고 하면, 위式을 積分하면,

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = \int_0^t -\lambda dt \quad \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

$N = N_0 e^{-\lambda t}$ 이것을 위式에 代入하여 $-\frac{dN}{dt} = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$ 를 얻는다. 즉, 단위시간當의 崩壞數는 指數函數로서 表示할 수 있다.

15. 放射能(radioactivity)

原子核이 不安定하면 放射性崩壞(radiosintegration)를 하며 이에 수반해서 α 선, β 선 또는

γ 선을 방출하는 성질 또는 물질. 방사능의 단위는 베크렐[Bq]이나 慣用單位로서 퀴리[Ci]도 사용된다.

16. 半減期(half life)

記号T. 방사성물질이 가지는 放射能이 원래의 半이 될때까지의 시간. 崩壞定數 λ 인 원자핵의 반감기는 $T = (\text{Log}2)/\lambda = 0.693/\lambda$ 로 表示된다. 生物學的半減期(biological half-life)에 대해 物理的半減期(physical half-life)라고 할 때도 있다. 방사능은, 반감기의 2배의 시간에는 원래의 值의 $(1/2)^2 = 1/4$ 로 감소되며, 5배의 시간에서는 원래의 值의 $(1/2)^5 = 1/32$, 10배의 시간동안에는 $(1/2)^{10} = 1/1024 \approx 0.1\%$ 로 감소된다.

17. 崩壞定數(decay constant)

記号 λ . 방사성붕괴, 또는 素粒子의 붕괴에서 단위시간에 붕괴하는 수는 최초로 존재하는 방사성원소의 원자수 또는 素粒子의 數 N_0 에 비례한다. 이 比例定數 λ 를 붕괴정수라 하며, 원자 또는 素粒子에 固有의 것이다. 여러가지의 붕괴양식이 있을 때는 i번째의 양식으로 붕괴하는 것의 붕괴정수 λ_i 를 部分崩壞定數(partial d.c.)라고 하며 $\lambda = \sum \lambda_i$ 의 관계가 있다.

18. 平均壽命은 어떤 值와 같은가

平均壽命(mean life)이란, 방사성물질에서 어떤 순간에 존재하는 원자의 방사능이 $1/e$ (e 는 自然對數의 밑수)로 감소할때까지의 시간. 붕괴정수 λ 의 逆數와 같다. 記号 τ

$$I = \frac{\int_0^{N_0} t dN}{N_0} = \frac{\lambda N_0 \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt}{N_0} = \frac{1}{\lambda}$$

$$\therefore \tau = \frac{1}{\lambda} = 1.44 T$$

19. 過渡平衡과 永年平衡에 對해 記述하라

過渡平衡(transient equilibrium): 放射性同位元素의 崩壞系列(decay series)에서 어미核種의 감소와 같은 비율로서 딸核種도 감소되어 가는 경우.

즉, 어미核種의 壽命이 비교적 긴 경우 $\lambda_1 < \lambda_2$ 일때 $N_1 \xrightarrow{\lambda_1} N_2 \xrightarrow{\lambda_2} N_3 \xrightarrow{\lambda_3} N_4$ 에서 $N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1$

즉, $\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$ 이다.

永年平衡(secular (radioactive)equilibrium) : 방사성동위원소의 붕괴계열에서 어미核種의 평균수명이 모든 딸核種의 평균수명보다 길때 실현되는 放射平衡. 이때 각 핵종의 원자수(N_A, N_B, \dots)와 붕괴정수($\lambda_A, \lambda_B, \dots$)와의 사이에는 $\lambda_A N_A = \lambda_B N_B = \lambda_C N_C = \dots$ 의 관계가 成立한다. 즉, 어미核種의 수명이 현저하게 긴 경우 $\lambda_1 \gg \lambda_2$ 일때, $N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1$ 즉, $\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ 및 $\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3$ 가 된다.

20. 核에너지 準位(nuclear energy level)

量子論에 의하면 物質은 일반적으로 띄엄띄엄의 值의 에너지밖에 가질수가 없다. 따라서, 원자핵에서도 그가 取할 수 있는 에너지는 일반적으로 수많은 特定值中 어느것에만 限定된다. 원자핵이 그 特定의 值의 하나를 가졌을 때 그 원자핵은 그 에너지準位에 있다고 한다. 하나의 準位에서 다른 準位로 옮겨갈 때 일반적으로 그 差만큼의 에너지를 放出 또는 吸收한다.

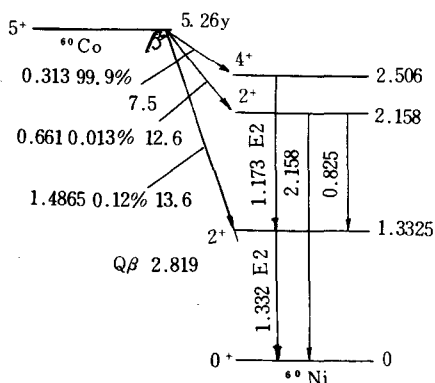
21. 勵起(excitation)

원자나 분자 또는 원자핵, 素粒子가 외부로부터 어떤 자극, 예컨대 粒子의 충돌 또는 熱, 빛, 방사선등의 흡수에 의해 높은 에너지準位가 되는 것. 系를 基底狀態에서 勵起상태로 옮기는데 필요한 에너지를 勵起에너지(excitation energy)라 한다.

22. 崩壞圖(decay scheme)

放射性同位元素가 붕괴할 때 방출되는 방사선의 종류, 그 順序, 에너지, 半減期, 強度比 등을 정리해서 圖示한 것. 安定核種의 基底狀態를 표준(0)으로 잡는다. 어미核種은, 붕괴의 Q값의 크기를 세로軸에 잡고 陽子數가 많을

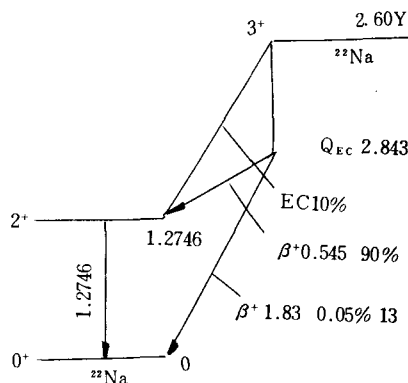
때 右側, 적을 때 左側에 水平으로 線을 긋는다. 아래그림 ^{60}Co 의 붕괴도에서 ^{60}Ni 의 붕괴 基底상태를 기준으로 잡고 ^{60}Co 의 붕괴 에너지(Q값)에 상당하는 2.819MeV의 높이에 ^{60}Co 의 準位를 적는다. 勵起準位間的 遷移는 화살표로 표시된다. ^{60}Co 에서 ^{60}Ni 의 勵起準位에 이르는 비스듬한 화살표는 β^- 에 의한 遷移로서, ^{60}Ni 의 勵起準位間的 수직의 화살표가 γ 선에 의한 遷移이다. 그리고 Z수가 커지고 遷移에너지가 작아지면 γ 선 대신 내부 변환 電子에 의한 遷移가 중요하게 되지만, γ 선과 내부 변환 電子는 다 같이 수직 하향의 화살표로 표시되어 兩者 사이는 구별되어 있지 않다. 그림에서 ^{60}Co 는 대부분이 4^+ 의 2.506MeV에 0.313keV의 β^- 선으로 遷移하고, 그런 다음 1.173과 1.332MeV의 γ 선을 내어 ^{60}Ni 의 基底 상태에 떨어진다는 것을 알 수 있다. β^- 선의 에너지 값과 강도의 다음에 적혀있는 숫자는 $\log ft$ 값이므로서 β^- 선의 遷移가 어느 정도로 금지되어 있는가를 나타내고 있다. 許容遷移에서 $\log ft$ 가 3-6, 제1금지 遷移에서 7-10 정도의 값을 취한다. γ 선의 遷移를 나타내는 화살표 위에 적혀 있는 숫자는 γ 선의 에너지로서 강도는 적혀 있지 않으나 β^-



^{60}Co 의 붕괴도

선의 강도로부터 1.173과 1.332의 γ 선은 99.9%의 강도(내부 변환 電子 강도는 2×10^{-4} 이하)를 가짐을 알 수 있다. γ 선의 에너지값 다음에 있는 「E2」라는 기호는 γ 선의 多重도를 나타내는 것으로서 電氣 4重極 遷移임을 나타내고 있다.

다음에 陽電子 붕괴의 예로서 ^{22}Na 를 아래쪽 그림에 보였다. 陽電子가 방출되기 위해서는 陰電子가 차지하고 있는 準位보다 $2m_e c^2$ 만큼 떨어진 마이너스의 상태에 있는 陽電子의 바다에



서 電子를 1개 들어올리지 않으면 안되기 때문에 $2m_e c^2 = 1.022\text{MeV}$ 가 陽電子 방출을 위한 문턱값(threshold value)이 되고 Q값이 이보다 크지 않으면 방출되지 않는다. 또 방출되는 陽電子의 최대 에너지는 Q값에서 1.022MeV를 뺀 값으로 된다. 이것을 圖示하는데 그림에서 β^+ 붕괴를 나타내는 선과 같이 어미核의 準位에서 1.022MeV의 垂線을 내리고 거기서 비스듬히 선을 긋는다. 電子捕獲(EC)은 그와 같은 문턱값은 없으므로 처음부터 비스듬히 선을 그으면 된다. 그리고 崩壞圖式에는 직접 나타나 있지 않으나 반드시 X선이나 오제 電子의 방출을 수반하고 있다.