連載講座

第 1 回

放射線管理(1)

서 두 환

한국에너지연구소 원자로관리실장

RI취급종사자의 피폭관리, 교육·훈련을 수행하는 방사선관리자는 물론, 실제로 현장에서 작업관리를 하는 담당자의 기술력을 향상시키기 위하여, 방사선 관리에 대한 기본지식을 연재로 소개한다.

Ⅰ 放射線의 基礎

1. 放射性崩壞, 放射能

N개의 방사성핵종이 시간 t에 붕괴하는 수 dN은 다음식으로 주어진다.

$$dN = -\lambda Ndt \quad (1)$$

λ는 붕괴상수라 부르고, 핵종에 특유한 상수이다.

방사성핵종이 단위시간에 붕괴하는 수를 방사능이라 한다. 방사능 A는 (1)식에서

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (2)$$

방사능은 원자수, 즉 질량에 비례한다. 방사능의 SI 단위는 매초당 1붕괴로 정의되며, 이것을 베크렐(Bq)이라 부른다.

$$1\,Bq = 1\,s^{-1} \quad (3)$$

특수단위로서 오래전 부터 사용하고 있는 단위 퀴리(Ci)는 매초 3.7×10^{10}붕괴로 정의 된다.

$$1\,Ci = 3.7\times10^{10}\ dps = 3.7\times10^{10}\,Bq \quad (4)$$

(1)식을 적분하면

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (5)$$

를 얻을 수 있다. N_0는 t=0일 때의 원자수이다.

N=1/2·N_0로 될 때까지의 시간을 반감기(T)라 한다.

$$T = \frac{\ell n2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (6)$$

이 T를 이용하면 (5)식은 다음과 같이 된다.

$$N = \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T} N_0 \quad (7)$$

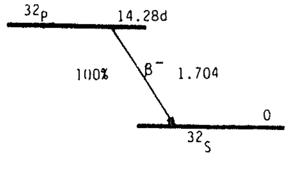
방사능은 원자수에 비례하므로, 방사능 A에 대해서도 (7)식과 같은 식이 성립한다.

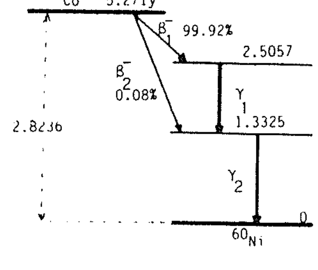
$$A = \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T} A_0 \quad (8)$$

(7), (8)식은 직관적으로 이해할 수 있는 식이며, 현장에서 대체로 이 식으로 처리할 수 있다.

2. 崩壞圖

붕괴도의 몇가지 예를 그림 1에 표시한다.





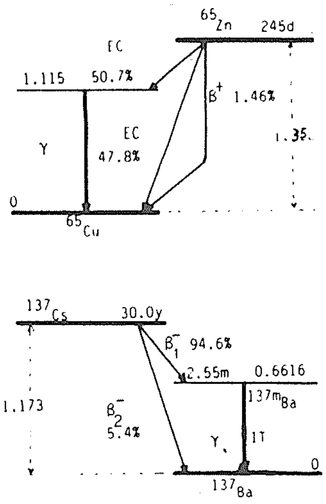


그림 1. 붕괴도의 몇가지 예

3. 核分裂

무거운 원자핵이 2개이상의 원자핵으로 분열하는 현상이다. ^{233}U, ^{235}U, ^{239}Pu 등은 열중성자의 포획으로 핵이 여기되어 핵분열을 일으키기 때문에, 유도핵분열이라 부르고 (n, f)로 나타낸다. (γ, f), (p, f), (α, f) 등의 유도핵분열도 있다. ^{252}Cf 처럼 자연적으로 분열하는 것이 있어서 자발핵분열이라 부른다.

핵분열은 질량비가 2 : 3의 불균등한 2개의 조각으로 나눠지는 확률이 가장크다(그림 2). 3개의 조각으로 분열하는 확률은 2개인 경우의 1/100 이하이며, 그 이상으로 나눠지는 확률은 더욱 더 작다.

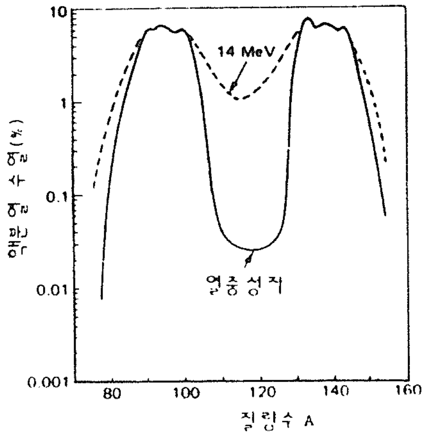


그림 2. 열중성자에 의한 ^{235}U 의 핵분열수율

4. 荷電粒子와 物質과의 相互作用

4.1 用語의 定義

전자선, α선 등의 하전입자는 쿨롱력으로 직접 물질의 원자를 전리하기 때문에, 직접전리입자라고도 부른다.

광자, 중성자 등의 비하전입자는 물질원자와의 상호작용으로, 전리입자를 방출하여, 이 방출된 하전입자가 물질의 원자를 전리하기 때문에, 간접전리입자라 부른다.

전리를 일으키는 하전입자와 비하전입자를 전리방사선이라고 총칭한다. 단순히 방사선이라고 말할 때는 전리방사선을 의미할 때가 많다.

모든 전리방사선에 적용되는 양으로서 흡수선량이 있다. 흡수선량 D는 질량 dm의 물질에 전리방사선으로 주어진 에너지 dE를 dm으로 나눈 것이다.

$$D = \frac{dE}{dm} \tag{9}$$

흡수선량의 SI 단위 그레이(Gy)는 물질 1kg에 흡수된 에너지 1 J로 정의된다.

$$1\,Gy = 1J/kg \tag{10}$$

특수단위로서 오래전 부터 사용하고 있는 단위 라드(rad)는 물질 1 g에 대한 흡수에너지 100 erg로 정의된다.

$$1\,rad = 100erg/g = \frac{1}{100}Gy \tag{11}$$

흡수선량율$\dot{D}$는 시간 dt에서 흡수선량의 증가 dD를 dt로서 나눈 것이다.

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \tag{12}$$

단위로는 Gy s^{-1}, rad s^{-1}, mrad min^{-1} 등이 사용된다.

하전입자에 대한 물질의 선저지능(線阻止能) S는 하전입자가 물질속을 길이 dx 지나갈 때 잃는 평균운동에너지(− dE)를 dx로 나눈 것이다.

$$S = -\frac{dE}{dx} \tag{13}$$

S를 물질밀도 ρ로 나눈 S_m을 질량저지능이라 하고, 단위단면적에서 단위질량당의 물질에서 잃은 운동에너지를 나타낸다.

$$S_m = \frac{S}{\rho} \tag{14}$$

하전입자가 물질속에서 에너지를 잃는 원인은 전리·여기에 의한 충돌손실 및 핵의 쿨롱력에 인한(제동)방사손실이다.

하전입자가 물질속에서 그 운동에너지를 잃어 정지(靜止)할 때까지의 거리를 비정이라 한다.

하전입자가 기체속에서 그 운동에너지를 완전히 잃고 생성한 이온쌍의 평균수를 N라 하면,

$$W = \frac{E}{N} \tag{15}$$

을 하나의 이온상을 만드는데 기체속에서 소모한 평균에너지라 하고, W값이라 부른다.

4.2 電子線, β⁻線 및 β⁺線

전자의 에너지가 낮을 때는 충돌손실이 주이지만, 에너지가 커짐에 따라 방사손실이 커진다. 전자의 에너지를 E(MeV)라 하면,

$$EZ \approx 800 \quad (16)$$

로서 충돌손실과 방사손실이 같아진다.

β^-선, β^+선, 에너지가 낮은 전자선이 물질속에서 에너지를 잃는 것은, 거의 충돌손실에 의한 것이다. 한편, 베타트론, 선형가속기 등에서 발생시킨 고에너지전자선의 경우에는 방사손실이 중요하게 된다.

질량충돌저지능은 물질에 의하여 거의 변하지 않는다. 따라서 β^-선, β^+선, 저에너지전자선의 질량저지능은 근사적으로 물질에 의존하지 않는다.

에너지 E(MeV)인 전자선의 알루미늄속에서의 비정 R(g/cm²)은

$$R = 0.526E - 0.094 \quad (E > 0.6) \quad (17)$$

로 주어진다.

β선은 연속스펙트럼이기 때문에 그 비정은 최대에너지를 갖는 전자로서 결정된다.

전자선의 공기에 대한 W값은 전자의 에너지에 무관하게 33.73 eV이다.

전자는 질량이 작기 때문에, 원자핵의 전장과의 상호작용으로 산란을 잘 일으킨다. 또, 전자는 원자를 전리 여기시켜 그 진행방향을 바꾼다. 진행방향에 대하여 90°를 넘는 산란을 후방산란이라 부른다.

β^+선이 물질속에서 에너지를 잃는 상황은 β^-선과 똑 같다. 운동에너지를 잃은 양전자는 음전자와 합하여 서로 반대방향으로 나가는 2개의 0.51 MeV의 광자로 변한다. 이것을 전자쌍소멸이라 한다.

4.3 α線

α線입자는 질량이 크기 때문에, 물질속에서의 방사손실은 거의 없다. α입자의 질량은 전자의 약 7,300배가 되어, 전리 여기로 진행방향은 변하지 않고 직진한다.

α선의 질량저지능은 물질에 의하여 별로 변하지 않는다.

α선의 에너지를 E(MeV)라 하면, 공기중에서의 비정 R(cm)은,

$$R = 0.318E^{3/2} \quad (4 < E < 7) \quad (18)$$

로 주어진다.

공기에 대한 α선의 W값은 34.7 eV이다.

4.4 核分裂조각

핵분열로 발생한 핵분열조각은, 처음은 큰 에너지와 큰 전하를 갖는 중성자과잉의 원자핵이다. 물질내에서 원자를 전리·여기시켜 그 에너지를 잃은 것과 동시에, 중성자를 방출하거나 β^-붕괴한다. 그리하여 마지막에는 방사성 또는 안정한 원자핵으로 된다. 이와 같이 에너지와 전하를 잃어, 전리능력이 없어진 핵을 핵분열생성물이라 부른다.

핵분열조각은 큰 에너지를 가지고 있지만, 질량이 크기 때문에 속도가 작고, 또한 큰 전하를 가지고 있기 때문에 질량저지능이 두드러지게 커져서, 그 결과 비정은 α선에 비하면 아주 짧다. 공기중에서 최대 2.5cm 정도이다.

5. 非荷電離粒子와 物質과의 相互作用

5.1 光子

1) 광자의 감쇠식

광자가 가는 선속으로 물질에 입사하면, 광자는 거리에 따라 선속내에서 소멸하거나 선속 바깥으로 나간다. 이것을 광자의 감쇠라 한다.

일정한 에너지를 갖는 I개의 입사광자가 선속내에서 dx의 거리를 진행하여 감쇠한 수를 dI라 하면,

$$dI = -\mu I\,dx \quad (19)$$

로 주어진다. μ는 선감쇠계수라 하고, 물질의 단위길이당 광자수의 감쇠율을 뜻한다.

선감쇠계수를 물질의 밀도 ρ로 나눈 μ_m을 질량감쇠계수라 부른다.

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (20)$$

μ_m은 물질의 단위단면적, 단위질량당 광자수의 감쇠율을 뜻하고, 물질의 상태에 무관한 상수이다.

(19)식을 적분하면

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (21)$$

을 얻을 수 있다. I_0는 $x = 0$일 때의 입사광자수이다.

$I = \frac{1}{2}I_0$가 되는 물질의 두께 $x_{1/2}$를 반가층이라 한다.

$$x_{1/2} = \frac{\ell n 2}{\mu} = \frac{0.693}{\mu} \quad (22)$$

(21)식은 반가층을 이용하면

$$I = I_0\left(\frac{1}{2}\right)^{x/x_{1/2}} \quad (23)$$

로 된다.

감쇠계수는 광전효과에 의한 감쇠계수 τ, 컴프턴효과에 의한 감쇠계수 σ 및 전자쌍생성에 의한 감쇠계수 κ의 합으로 나타낸다.

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad (24)$$

2) 광전효과

광자가 원자의 궤도전자와 작용하여, 모든 에너지를 전자에 주는 현상이다. 에너지를 얻어서 원자밖으로 튀어나온 전자를 광전자라 한다.

원자핵과의 결합이 강한 전자일수록 광전효과를 잘 일으킨다. 따라서 K각전자와의 사이에 80% 일어나고, 이어서 L각전자 사이에 일어난다. 입사광자의 에너지를 $h\nu$, 궤도전자와의 결합에너지를 δ라 하면, 광전자의 에너지는 $h\nu - \delta$이다.

광전효과에 의한 선감쇠계수 τ는, 광자에너지 E가

0.5 MeV 보다 작을 때는

$$\tau \propto \frac{N\tau^{5}}{E^{3.5}} \qquad (25)$$

로 주어진다. N은 물질 1㎤에 들어있는 원자수이다.

3) 컴프턴효과

광자가 자유전자에 에너지의 일부를 주고, 광자자신은 나머지 에너지를 갖고 산란되는 현상이다. 광자와 자유전자 사이에는 에너지와 운동량의 보존법칙이 성립한다. 컴프턴효과는 자유전자뿐만 아니라, 핵과의 결합에너지가 작은 외각궤도의 전자에 대해서도 일어나고, 또한 내각궤도 전자와 핵과의 결합에너지가 광자에너지에 비하여 무시할 수 있는 정도라면 모든 전자에 대해서도 일어날 수 있다. 운동에너지를 얻은 전자를 반도전자(recoil electron), 산란된 광자를 컴프턴산란광자라 한다. 산란광자는 입사광자보다

$$\triangle\lambda = \frac{h}{m_0c}(1-\cos\theta) \qquad (26)$$

만큼 파장이 길어진다. θ는 입사광자의 진행방향에 대하여 산란광자가 갖는 각도이다.(그림 3).

컴프턴효과에 의한 선감쇠계수 σ는 광자에너지 E가 0.51 MeV 보다 클 때

$$\sigma \propto \frac{NZ}{E} \qquad (27)$$

로 된다.

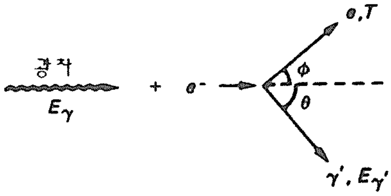


그림3. 컴프턴 효과

4) 전자쌍생성

원자핵의 근방을 지나가는 광자는 핵의 강한 전장의 영향으로 음전자와 양전자의 한쌍을 만들어 소멸한다. 이 현상을 전자쌍생성이라 한다. 2개의 전자질량에 해당하는 에너지, 즉 1.02 MeV 이상이라야 일어난다. 2개의 전자가 얻는 에너지는 $h\nu - 2m_0c^2$이다.

전자쌍생성에 의한 선감쇠계수 κ는

$$\kappa \propto NZ(Z+1) \qquad (28)$$

로 주어진다.

5) 광자에너지와 셋 효과

광전효과, 컴프턴효과 전자쌍생성이 일어날 비율은 그림 4와 같이 광자에너지에 따라 변화한다. 그림 4에서 알 수 있는 것 처럼, 광자에너지가 작을 때는 광전효과가 주이며, 에너지가 커지면 컴프턴효과가, 더욱더 에너지가 커지면 전자쌍생성이 중요하게 된다. 그림 4는 납에 대한 예이지만, 이 경향은 모든 물질에 공통적이다. 그림 5는 각 효과의 상대적 중요성을 나타낸 것이다.

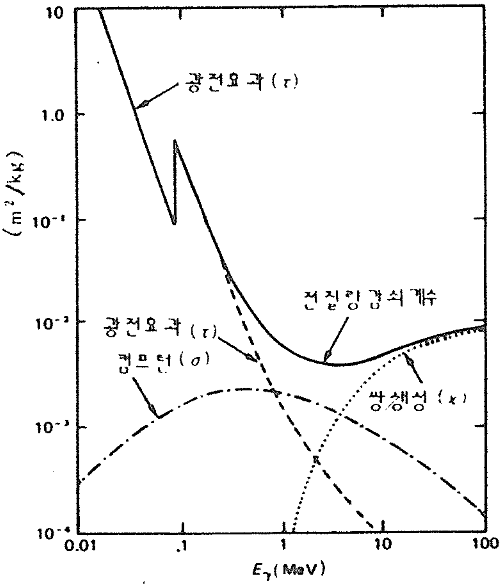


그림 4. 납에 대한 광자의 감쇠와 흡수

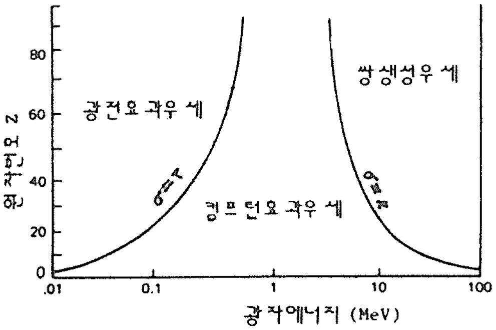


그림5. 광자 상호작용의 상대적 중요성

6) 에너지흡수 계수

광전효과, 컴프턴효과, 전자쌍생성에 의하여 광자에너지중, 처음에 전자에 준 에너지의 율을 단위길이로 나타낸 것을 선에너지전이계수 μ_k라 한다. μ_k는

$$\mu_k = \tau\left(1-\frac{\delta}{h\nu}\right) + \sigma\frac{E_e}{h\nu} + \kappa\left(1-\frac{2m_0c^2}{h\nu}\right) \qquad (29)$$

로 주어진다. 여기서 δ는 광전효과를 일으킨 궤도전자와 핵과의 결합에너지의 평균치, E_e는 컴프턴반도전자의 평균에너지이다.

원자와 광자와의 상호작용에서 처음에 광자로 부터 에너지를 얻은 전자는, 물질속을 움직이는 동안에 원자핵 근방에서 제동방사손실한다. 이 제동방사손실의 율을 g 라 하면,

$$\mu_{en} = \mu_k(1-g) \qquad (30)$$

을 선에너지흡수계수라 한다. 이것은 광자에너지중, 마지막에 전자의 운동에너지로 된 비율을 단위길이로

나타낸 양이다. 납에 대한 μ_{en}이 그림4에 표시되어 있다.

μ_{en}을 물질의 밀도ρ로 나눈 μ_{en}/ρ를 질량에너지흡수계수라 한다. 그림6에 공기에 대한 광자의 감쇠와 흡수를 나타낸다.

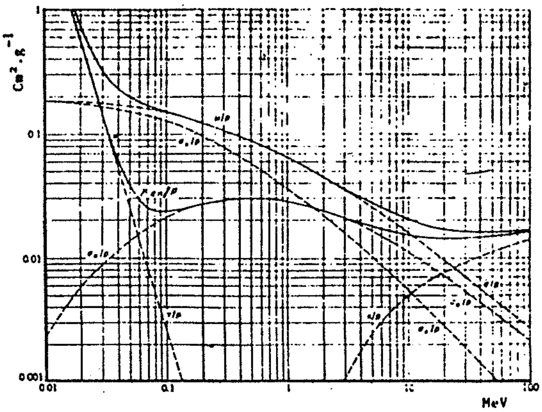


그림 6. 공기에 대한 광자의 감쇠와 흡수

7) 조사선량

광자와 물질과의 상호작용으로 광전효과, 컴프턴효과, 전자쌍생성이 일어나고, 그 결과 방출된 전자가 물질을 전리시킨다. 여기서 질량 dm의 공기와 광자와의 상호작용에서 생긴 이온 한쪽 부호의 전하 합을 dQ라 하면,

$$X = \frac{dQ}{dm} \qquad (31)$$

을 조사선량이라 한다.

조사선량의 SI 단위는 킬로그램당 쿨롱(C/ kg)이다.

오래전 부터 사용하고 온 렌트겐은 dm = 0.001293g, dQ = 1esu로 정의된 것이다. 0.001293 g 의 공기는 표준상태의 공기 1㎤에 해당한다.

조사선량율$\dot{X}$는 조사선량의 증가 dx를 시간 dt로 나눈 것이다.

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} \qquad (32)$$

단위는 Cs^{-1}, kg^{-1}, Rs^{-1}, $Rmin^{-1}$ 등이 사용된다.

5.2 中性子

중성자선에 대해서도 광자의 경우와 같이 (19), (21)식이 성립한다. 선감쇠계수μ 대신에, Σ라는 거시적단면적이 사용된다.

중성자의 에너지 E(eV) 와 그 속도 v (cm /s)와의 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$E = 5.227 \times 10^{-13} v^2 \qquad (33)$$

고속중성자는 물질속에서 원자핵과 탄성충돌 또는 비탄성충돌하여, 그 때마다 중성자는 산란되어 속도는 작아진다. 중성자의 속도를 효과적으로 작게 하는 물질을 감속재라 한다. 중성자를 잘 흡수하는 물질은 감속재로서는 적합하지 않다.

에너지 E의 중성자가 질량수 A의 원자핵에 충돌하였을 때, 그 핵에 주는 운동에너지 E_r은 다음 식으로 주어진다.

$$E_r = \frac{4A}{(1+A)^2} E \cos^2\theta \qquad (34)$$

θ는 중성자로 부터 에너지를 얻은 반도핵의 진행방향이 중성자의 진행방향과 이루는 각도이다.

고속중성자는 물질속에서 산란작용을 반복하여, 그 운동에너지는 물질속에서 원자핵이 열평형상태로 있는 열운동에너지와 같아진다. 열평형상태로 된 중성자를 열중성자라 부른다. 온도 20℃에서 열중성자의 최대확률속도는 2,200 m/s 이며, 이에 대응하는 운동에너지는 0.025 eV 이다.

중성자는 전하를 가지고 있지 않기 때문에, 원자핵 내부로 들어가기 쉽다. 즉, 흡수되어 핵반응을 잘 일으킨다. 대표적인 핵만으로(n, f), (n, γ), (n, p) 및 (n, α)가 있다.

원고모집

本 協會에서는 매 분기 발간하는 會報誌에 게재할 論壇, 정보, 수기 제언, 수필, 시, 꽁트등등을 모집하오니 회원 여러분께서는 적극투고하여 하여 주시기 바랍니다.

○ 접 수 : 수시

○ 보낼곳 : 사단법인 한국방사성동위원소협회 조성부
서울 서초구 서초1동 1451 - 1 (원일빌딩201호)
우편번호 : 137 - 070
전화번호 : 584 - 9209