

《해 설》

放射線量 및 單位(ICRU. Report-33)

(Radiation Quantities and Units)

陸 鍾 激

漢陽大學校 工科大學 原子力工學科 教授

(1981. 3. 2)

序 言

ICRU(International Commission on Radiation Units and Measurements)는 1925년에 發足하여 各種放射線의 線量과 單位 및 放射能에 대하여 研究開發하고 線量測定과 放射線防禦技術을 向上시켜 國際적으로 방사선 安全管理에 크게 貢獻하고 있음은 勿論이고 이와 雙璧을 이루고 있는 ICRP(International Commission on Radiological Protection, 1950年發足)와도 緊密한 聯關을 가지고 있으며 現在까지 各國共通으로 利用하고 있는 實情이다. 特히 各國實情에 맞는 방사선 장해방어령의 施行을 보게 된 基本委員會이기도 하다. 위의 ICRU-Reports와 ICRP-Publications뿐만 아니라 US NCRP(National Council on Radiation Protection and Measurements)-Reports들은 모두 保健物理學에서나 實際로 방사선 取扱을 하는 방사선 종사자는 勿論 방사선 측정기기 제작자들에게도 標準 指針書로 되어 있음은 既知의 事實이다. 그러나 위의 여러가지 報告書나 發行書 中 방사선 방어기술의 A.B.C.라고 할 수 있는 Report는 亦是 ICRU Report-33인 「放射線量 및 單位」라고 할 수 있을 것이다. 이는 最新으로 出版된 것이고 1980年 4月 15日 美國에서 發刊되었다.

따라서 이 最近版을 可能な 限 原本을 正確하게 옮겨 보기로 하였으니 放射線從事者는 이 分野에서 先進 또는 後進을 莫論하고 한번쯤 精讀해 줄 것을 권고한다.

第一章 一般的 考察

I-가. 基本概念

本 項에서는 ICRU 委員會에서 가장 基本이 되는 방사선량과 單位에 대한 개념을 確立시켜 놓았고 物理的 現象을 特定지워주는 物理的 量인 길이, 시간, 부피 및 방사선량 등을 數量的으로 決定해 놓았으며 이량의 表示로는 各各 其單位가 選定되어야 함은 當然하다. 특히 最近 ICRU는 SI 單位(國際標準單位系)의 使用을 권고하고 있다. 이 SI 單位는 基本單位, 유도單位 및 보조單位的 세가지로 구분했고 SI 單位가 아닌 在來式 單位를 특수單位(Special Units)라고 부르며 예컨대 Curie(Ci) Röntgen(R) Rad 및 Rem 등은 各各 특수單位이고 Rad는 특수單位로는 Kerma의 單位가 되어왔으며 固有 에너지부여(Specific energy imparted), 흡수선량지수 및 등가선량지수등을 Rem으로 表示해 왔다.

그러나 ICRU 권고로는 이들 單位로 表示함은 1985年까지 使用하기로 하고 其間은 徐徐히 SI單位로 代替하여 使用함은 最近 各種 關係論文들에서 잘 보여주고 있다.

SI 單位의 使用 권고는 1977年 5月 佛蘭西 Paris에서 開催되었던 第4次 國際放射線 防禦學會(IRPA) 및 總會에서 부터 크게 高調되었음은 筆者도 이 IRPA 총회에 唯一한 韓國代表로 參席하였으므로 그 狀況을 잘 알고 있다.

SI 단위의 한 예로 波長의 單位는 Hertz(sec⁻¹), 방사능 單位는 Becquerel(Bq, sec⁻¹) 吸收線量 單位로 Gray (Gy, J·kg⁻¹), 등가선량 單位로 Sievert(Sv, J·kg⁻¹) 등이 現在 世界 共通으로 널리 使用되고 있으며 특히 “Health Physics Journal”(U.S.A.)에서는 示範 學術誌로 過去 使用해오던 Rad, Rem 및 Röntgen(r) 등은 括號內에 넣어서 參考로만 하게하고 있다. 또한 第4次 IRPA 총회에서 從來의 전리방사선과 非電離 放射線(Non ionizing radiation: NIR) 두가지로 區分하였고 NIR에는 Sonic, ultrasonic, infrasonic, infrared, U.V. microwave 및 radiofrequency 등이 여기에 속함을 指摘했으며 各其 人體에 대한 피폭선량 限界值를 設定해 놓고 있으나 現在 우리나라에서는 microwave, U.V. 등을 많이 使用하고 있음에도 不拘하고 이 NIR 分野에 대한 研究와 방사선 방어에 대한 對策이 全無한 느낌이 들며 우리 모두가 앞으로 해야 할 課題라고 보며 비파괴검사(NDT)때 수반되는 용접(Welding) 時에나 microoven에서도 이 NIR가 發生 放出되는 勿論 Laser beam에도 NIR가 있음은 알아야 하겠고 모두 방사선 장해가 있음은 이미 周知의 事實이다.

I-나. 確率的 및 非確率的量(Stochastic and non-stochastic nature of quantities)

방사선의 生物學的作用 및 効果에서 晩發性效果는 이 確率的量으로 其 最大許容線量이 決定되며 身體障害效果, 암으로 死亡할 수 있는 線量決定 및 身體障害 危險(Somatic risk) 限度決定에서 繼續的인 低線量被曝時에 “as low as reasonably achievable(ALARA-Principle)” 限度設定에도 이 통계적량이고 過去式表現으로는 nonthreshold value 가된다. 앞으로 記述될 第2章의 Specific energy(imparted), Z(J·kg⁻¹)의 量도 통계값이다. 2章에서 나올 吸收線量, D(J·kg⁻¹ =Gy)는 非통계값이고 threshold value 가 되며 한 예로 年間 및 適當線量 制限值가 全身에 대해서는 각각 5rem/Y, 0.3rem/W라고 ICRP에서 規定함도 이 非確率값이며 눈의 水晶體를 除外한 組織體에 대한 年間등가선량 限度=0.3Sv(50rem/Y)로 함도 모두 非確率임을 다시한번 想起할 必要가 있다고 보겠다. 또 하나의 예로 全身 및 器官에 대한 集團線量=∫_{D_c}[∞] D·N(D)_{dD}로 表示하며 D, N은 各 個體에 대한 非確率선량 및 個體人員數이고 D_c는 Cutoff 선량이라 하여 0.1 mrad로 신체효과를 주는 最少線量이 된다. 이선량은 방사선 시술에 종사하는 全集團線評價에 大端히 重要하다.

I-다. 數式化(Mathematical formalism)

이는 방사선량 및 單位의 定義에서 유도된 방사선량의 規定과 energy spectra分布函數 및 確率의 分布函數를 表現함에 必要한 數式이고 大體로 微分商의 形式이라고 볼 수 있다. 한 예로 2章에서 記述될 粒子 후루언쓰(Particle fluence, Φ) $\frac{dN}{da}$ 와 같고 球의 단면적 da에 入射되는 粒子의 數 dN가 된다. 따라서 Φ의 에너지가 O에서 E인 粒子일때 그 分布函數는 Φ(E)고 微分의 分布를 Φ_E라고 하면 $\Phi_E = \frac{d\Phi(E)}{dE}$ 가 된다.

이 微分의 分布函數를 積分하면 即 후루언쓰(fluence)가 된다. 즉,

$$\Phi = \Phi_{(\infty)} = \int_0^{\infty} \Phi_E dE$$

이 후루언쓰 Φ_∞에 LET(Linear Energy Transfer)와 CSDA(Continuous-Slowing-Down Approximation) 概念을 導入하면

$$\Phi_{\infty(L)} = \Phi_{(E)} \left(\frac{dL}{dE} \right)^{-1}$$

여기서 $L = \frac{dE_L}{dl}$, dl은 방사선 통로에 있는 흡수체의 미소길이 이고 dE_L은 이흡수체에 局部的으로 주어진 平均에너지고 L_∞는 L의 最大값이며 阻止能(Stopping Power)과 같다. 또한 방사선과 물질과의 상호 작용에서 質量阻止能 $\frac{S}{\rho}$ (2章 B.5.)와 質量減衰係數 $\frac{\mu}{\rho}$ (2章 B.2.)는 粒子에너지의 函數고 방사선場이 複合된 에너지 스펙트럼으로 구성되어 있을 때는 $\frac{\mu}{\rho}$ 와 $\frac{S}{\rho}$ 와 같이 平均값으로 하나 다음과 같이 스펙트럼 分布函數 Φ_E와 $\frac{\mu}{\rho}$ 에 후루언쓰 Φ로 重率하여 表現한다. 즉,

$$\frac{\mu}{\rho} = \int_0^{\infty} \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \Phi_E dE / \int_0^{\infty} \Phi_E dE = \frac{1}{\Phi} \int_0^{\infty} \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \Phi_E dE$$

第2章 定義(Definitions)

이 장에서는 일반적으로 各量에 대하여 짧은 정의의를 내리고 정의에 따르는 精確한 설명속에 있는 몇몇 詞에 대하여 精確한 의미를 기술하였으며 방사선량과 그들 單位 中 필수적으로 필요한 것만 포함시켰다.

各 單位에 대한 정의 뒤에는 그 單位의 SI 單位를 나타내었으며 SI 單位에 대한 특별한 명칭이 필요할 때는 연관된 정의와 기호도 함께 나타내었다. 一 章에서 言及한 바와 같이 過去式 單位 表記는 ICRU 에서 1985년 까지 使用하고 可能한 限 빠른 時日 內에 SI 單位에 익숙해 져야함은 물론이다. 이 장에서는 單位들 4개의 항목으로 나누어 놓았다. 첫 항은 “Radio-

metry"라 칭하여 방사선과 관련된 양들을 다루었다. 둘째 항은 "Interaction Coefficients"(相互作用係數)라 칭하며 방사선과 물질과의 相互作用에 관한 양들을 다루었다.

셋째 항은 "Dosimetry"라 칭하며 첫째 및 둘째 항의 양에서 一般的으로 얻어지는 양들을 다루고 있다.

네째 항은 "Radioactivity"이다.

2-A. Radiometry

방사선을 측정하고 방사선 효과를 조사하는데에는 우리가 관심갖고자 하는 요점에 따라 방사선장을 여러 등급으로 세분화하는 것이 필요하다. 따라서 여기에서는 우선 방사선장과 관련된 기본적인 양들의 대부분을 정의하고 이들로 부터 발전된 방사선장을 보다 자세하게 세분화하는 양들을 정의 하였다.

이러한 양 들은 粒子數와 에너지를 다루는데 그것에 따라 粒子束(Particle flux)과 에너지束(Energy flux) 등으로 불리우고 있다. 「粒子」라는 단어는 보다 특정한 항, 즉 중성자속(Neutron flux) 전자후루언쓰(Electron fluence) 등으로 대치될 수 있으며 같은 방법으로 중성자 에너지 속(Neutron energy flux), 전자 에너지 후루언쓰(Electron energy fluence) 등의 양 들도 정의될 수 있다. 만약 방사선장이 다양한 에너지를 가진 粒子들로 구성되어 있다면 이장에서 정의된 양들 중의 하나인 粒子에너지에 해당되는 스펙트럼 분포가 필요하게 될 것이다. 그것들은 방사선의 양들을 에너지에 대하여 미분함으로써 얻어진다. 즉,

$$R_E = \frac{dR(E)}{dE} \text{ 및 } P_E = \frac{dP(E)}{dE}$$

R_E 는 粒子에너지에 대한 방사에너지(Radiant energy, E)의 스펙트럼 분포이고, P_E 는 粒子에너지 E 에 대한 粒子放射(Particle radiance, P)의 스펙트럼 분포이다.

2-A. 1a : 입자수(Particle number, N)

방출 전달 흡수되는 입자수, 단위 : I

2-A. 1b : 방사 에너지(Radiant energy, R)

방출 전달 흡수되는 입자의 에너지 단위 : J

2-A. 2a : 粒子束(Particle flux, N)

$N = \frac{dN}{dt}$ dN 은 시간 dt 사이의 입자수의 변화량 단위 : S^{-1}

2-A. 2b : 에너지束(Energy flux, R)

$R = \frac{dR}{dt}$ dR 은 시간변화 dt 사이의 방사에너지의 변화량 단위 : W

2-A. 3a : 粒子 후루언쓰(Particle fluence, Φ)

$\Phi = \frac{dN}{da}$ dN 은 단면적이 da 인 球로 들어오는 粒

子數고 da 는 각 방사선 방향에 수직이어야 한다.

단위 : m^{-2}

2-A. 3b : 에너지 후루언쓰(Energy fluence, ψ)

$\psi = \frac{dR}{da}$ dR 은 단면적이 da 인 球로 들어오는 방사에너지의 변화량 단위 : $J \cdot m^{-2}$

2-A. 4a : 粒子 후루언쓰 율(Particle fluence rate, ϕ)

$\phi = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d^2N}{da \cdot dt}$ $d\Phi$ 는 시간 dt 동안에 입자 후루언쓰의 변화량 단위 : $m^{-2} \cdot S^{-1}$

Notes : 粒子束密度(Particle flux density)가 이 양(ϕ) 대신 사용되기도하나, 밀도라는 단어에 많은 뜻이 내포되었기 때문에 이 양이 더 좋다.

2-A. 5a : 粒子 라디안쓰(Particle radiance, P)

$P = \frac{d\phi}{d\Omega} = \frac{d^3N}{da \cdot dt \cdot d\Omega}$ $d\phi$ 는 입체각 $d\Omega$ 라는 특정 방향으로 파급되는 입자 후루언쓰의 변화량 단위 : $m^{-2} \cdot S^{-1} \cdot Sr^{-1}$

2-A. 5b : 에너지 라디안쓰(Energy radiance, γ)

$\gamma = \frac{d\psi}{d\Omega} = \frac{d^3R}{da \cdot dt \cdot d\Omega}$ $d\psi$ 는 특정방향인 입체각 $d\Omega$ 내에 전파되는 입자들의 에너지 후루언쓰의 변화량 단위 : $W m^{-2} \cdot Sr^{-1}$

이 부문에서 정의된 모든 양들은 스펙트럼 분포(Particle radiance ρ)인 ρ_E 를 입자에 너지 E , 입체각 Ω , 그리고 시간 t 에 관하여 계속해서 적분함으로써 구해질 수 있다. 즉,

$$\text{입자 라디안쓰는 } P = \int P_E dE$$

$$\text{입자 후루언쓰 율은 } \phi = \int_E \int_\Omega P_E d\Omega \cdot dE$$

$$\text{입자 후루언쓰는 } \Phi = \int_E \int_\Omega \int_t P_E dt d\Omega dE$$

$$\text{에너지 라디안쓰는 } \gamma = \int_E E \cdot P_E dE$$

$$\text{에너지 후루언쓰 율 } \psi = \int_E \int_\Omega \int_t E \cdot P_E dt d\Omega dE$$

2-B. 相互作用 係數(Interaction coefficients)

상호작용 계수는 비확률의(Non-stochastic) 양이다. 이 상수들은 방사선과 물질과의 상호작용을 특정짓기 때문에 주로 특정한 방사선이나 특정한 물질 특정한 형태의 상호작용에 적용된다.

2-B. 1 : 단면적(Cross section, σ)

표적과 입사하는 하전입자 및 비하전입 자와의 상호작용에 관계되는 양인데 $\sigma = \frac{P}{\phi}$ 로 주어진다. 여기서 P 는 한개의 표적체에 ϕ 라는 입자 후루언쓰가 들어 왔을

때 상호작용을 일으킨 확률이다. 단위 : m^2
 지금까지 사용해왔던 단위는 barn 으로서 $1b=10^{-23}m^2$
 가 된다 .

Notes : (a) 「상호작용」은 입사 입자의 에너지나 방향
 이 변화함에 따라 그 작용의 과정이 변하게 된다.
 핵반응의 경우 상호작용의 형태는 입사하는 입자와
 방출되는 입자에 따라서 특정 지어지며 예를들면
 $\sigma_{r,n}$ 나 $\sigma_{n,n'}$ (비탄성산란 단면적) 등이 있다. 유사한
 방법으로 원자의 상호작용에도 적용할 수 있는데 $\sigma_{r,e}$
 (광전단면적) $\sigma_{r,r}$ (Rayleigh 산란단면적) 등이 있다
 (b) 만약 주어진 표적체에서 몇가지 독립적인 상호작
 용이 가능하다면 총단면적 σ 는 각각의 단면적 σ_j 의
 합으로 나타낼 수 있다. 즉,

$$\sigma = \sum_j \sigma_j = \frac{1}{\phi} \sum P_j$$

여기서 P_j 는 J 형태의 작용이 일어날 확률이다.

(c) 분자와 같은 복합 표적체의 단면적은 독립된 원자
 들의 혼합물로 보고 다룬다. 이러한 방법은 대부분
 의 경우에는 합당한 방법이지만 낮은 에너지의 광자
 의 경우에는 적용되지 않는다.

2-B. 2 : 非荷電粒子에 대한 물질의 질량 흡수계수는

$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho N} \cdot \frac{dN}{dl}$ 로 나타낸다 여기서 $\frac{dN}{N}$ 은 粒子
 中 밀도가 ρ 인 물질內의 dl 거리만큼 가는 동안 반
 응을 일으키는 비율이다. 단위 : $m^2 \cdot kg^{-1}$

Notes : (a) μ 는 總線減衰係數이다.

(b) 주어진 한 원자핵종의 표적에 포함된 표적체 간의
 상호 작용이 무시된다면 질량흡수계수는 총단면적을
 σ 로 나타낼 수 있다. 즉,

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{N_A}{M} \cdot \sigma$$

여기서 N_A 는 아보가도르상수이고 M 은 표적요소
 의 분자량이다.

(c) 광자의 경우에는 다음과 같이 쓸 수 있다. 즉,

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{N_A}{M} (\sigma_{r,e} + \sigma_{r,r} + \sigma_{r,e^+} + \sigma_{r,e^+})$$

여기서 $\sigma_{r,e}$ 는 광전효과에 의한 단면적이고 σ_{r,e^+} 는
 Compton 효과에 의한 단면적, $\sigma_{r,r}$ 는 Coherent
 scattering에 의한 단면적, σ_{r,e^+} 는 쌍전자생성에 의
 한 단면적이다. 단 입자의 에너지가 수 MeV 이상을
 초과할 때에는 핵반응 항이 더 들어가야 한다. 예를
 들면 $\sigma_{n,n}$ $\sigma_{r,p}$ 등과 같다.

(d) X선과 γ 선의 경우에는 $\frac{\mu}{\rho}$ 는 단면적항으로 나타
 내지 않고 다음과 같이 나타내진다.

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\sigma}{\rho} + \frac{\sigma_c}{\rho l} + \frac{\sigma_{coh}}{\rho} + \frac{k}{\rho}$$

여기서 첫 항은 광전효과에 의한 것이고 둘째 항은
 Compton 효과, 셋째 항은 Coherent scattering, 네
 째 항은 쌍전자생성에 의한 것이고 입자 에너지가
 수 MeV를 초과할 때에는 핵반응 항이 첨가 되어야
 한다.

(e) 중성자 물리에서는 μ 가 거시적단면적 “ Σ ”로 나타
 내어진다.

(f) 분자와 같은 복합된 표적체의 질량흡수계수는 독
 립된 원자들의 혼합물로 보고 다룬다. 이 방법은 대
 부분의 경우에는 합당한 방법이지만 낮은 에너지의
 광자인 경우에는 적용되지 않는다.

2-B. 3 : 질량에너지 전달계수 (Mass energy transfer
 coefficient, $\frac{\mu_{tr}}{\rho}$)

비하전입자에 대한 물질의 질량에너지 전달계수는
 $\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{1}{\rho EN} \cdot \frac{dE_{tr}}{dl}$ 로 나타내어진다. 여기서 E
 는 입사하는 입자의 에너지이고 $\frac{dE_{tr}}{dl}$ 은 밀도가 ρ 인
 물질내서 입자가 dl 거리를 가는 동안 작용에 의하여
 하전입자에 전달된 입사 입자의 에너지의 변화율이
 다. 단위 : $m^2 \cdot kg^{-1}$

결과적으로 B.3과 B.2는 同一한 單位로 표시된다.

Notes : (a) 편의상 E 는 입자의 정지에너지를 포함하
 고 있지 않다. dE_{tr} 은 비하전입자들에서 유리되어 나
 온 모든 하전입자들의 최초의 운동에너지의 합이다.

(b) 주어진 한 원자핵종의 표적에서 표적체 간의 상호
 작용이 무시된다면 질량에너지 전달계수는 단면적의
 항으로 표현될 수 있다. 즉,

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{N_A}{M} \sum_j f_j \cdot \sigma_j = \frac{\mu}{\rho} f$$

여기서 f 는 f_j 의 重率平均(weighted average)이고,
 f_j 는 입사된 입자의 에너지 E 중에서 J 형태의 작용
 에 의해 하전입자의 운동에너지로 전달된 에너지
 의 비율을 평균한 값이다.

(c) 광자의 경우

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{N_A}{M} (\sigma_{r,e} f_{r,e} + \sigma_{r,r} f_{r,r} + \sigma_{r,e^+} f_{r,e^+})$$

로 쓸 수 있다. 여기서 $f_{r,e} = 1 - \frac{\delta}{h\nu}$ 고 δ 는 흡수된
 광자당 발산되어 나오는 형광방사선의 평균에너지이
 고 $h\nu$ 는 입사된 광자의 에너지다. 또 $f_{r,r} = 1 -$
 $\frac{h\nu' + \delta}{h\nu}$ 여기서 $h\nu'$ 는 Compton 산란에 의해서 산
 란된 광자의 평균에너지이며 $f_{r,e^+} = 1 - \frac{2mC^2}{h\nu}$ 이
 되고 mC^2 은 전자의 정지질량에너지다.

(d) X선과 γ 선의 경우에는 단면적의 항으로 나타내어
 지지 않고 아래와 같이 나타내어진다. 즉

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{\tau_a}{\rho} + \frac{\sigma_{ca}}{\rho} + \frac{k_a}{\rho}$$

여기서 $\frac{\tau_a}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} \left(1 - \frac{\delta}{h\nu}\right)$ 이며 $\frac{\tau}{\rho}$ 는 광전 질량흡수계수이고 $\frac{\sigma_{ca}}{\rho} = \frac{\sigma_c}{\rho} \cdot \frac{\bar{E}_e}{h\nu}$, 여기서 $\frac{\sigma_c}{\rho}$ 는 Compton 질량흡수계수, \bar{E}_e 는 Compton recoil electron (反跳電子), $\frac{k_a}{\rho} = \frac{k}{\rho} \left(1 - \frac{2mC^2}{h\nu}\right)$ 여기서 $\frac{k}{\rho}$ 는 쌍전자 생성의 질량흡수계수이다.

(e) 中性子の 경우에는 다음과 같이 쓴다.

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{1}{E} \sum_L N_L \sum_J \epsilon_{L,J}(E) \cdot \sigma_{L,J}(E)$$

여기서 L 은 표적핵을 가르키고 J 는 핵반응 형태(탄성산란, 비탄성산란(n, α) 반응등)를 가르킨다. N_L 은 어떤 부피 요소 내의 물질의 질량에 대한 이 부피 요소내의 L 표적 핵종의 핵자의 수를 나타내며 $\epsilon_{L,J}(E)$ 는 단면적이 $\sigma_{L,J}(E)$ 인 물질과의 작용에 의해 하전입자의 운동에너지로 전달된 평균에너지이다. 탄성산란의 경우에는 평균 산란에너지 ϵ_{el} 은

$$\epsilon_{el} = \frac{2m_i \cdot m_n E (1-f_1)}{(m_i + m_n)}$$

여기서 m_i 는 표적핵의 질량이고 m_n 은 중성자의 질량, f_1 은 질량중심제에서 굴절각의 평균 Cosine 값이다.

(f) 분자와 같은 복합된 표적체의 질량에너지 전달계수는 독립된 원자들의 혼합물로 보고 다룬다 이 방법은 대부분의 경우에는 합당한 방법이지만 낮은 에너지의 광자의 경우에는 적용되지 않는다.

2-B. 4 : 질량에너지 흡수계수(Mass energy absorption coefficient)

비하전입자에 대한 물질의 질량에너지 흡수계수

$\frac{\mu_{en}}{\rho}$ 는 질량에너지 수송계수(Mass energy transfer coefficient) $\frac{\mu_{tr}}{\rho}$ 와 $(1-g)$ 의 곱이다. 여기서 g 는 물질내에서 제동복사로 잃은 2차 하전입자 에너지의 분율이다. 즉,

$$\frac{\mu_{en}}{\rho} = \frac{\mu_{tr}}{\rho} (1-g)$$

단위 : $m^2 \cdot kg^{-1}$

Notes : (a) 만일 주어진 원자핵종의 표적내에 포함된 표적물질사이의 상호작용이 무시될 수 있다면 질량에너지 흡수계수는 단면적으로 표시될 수 있다. 즉,

$$\frac{\mu_{en}}{\rho} = \frac{N_A}{M} \sum_j f_i (1-g_j) \sigma_j$$

여기서 N_A 는 아보가드로상수, M 은 표적원소의 분자량, f_j 는 入射하는 입자 에너지 E (정지 에너지는 제외한다)의 평균인테 이것은 상호작용 단면적 σ_j 를

갖고 j 형태의 상호작용에서 하전입자의 운동에너지로 변환된다. g_j 는 제동복사로 잃은 상호 작용에서 j 형태로 생성된 2차 하전 입자 에너지의 분율이다.

(b) $\frac{\mu_{en}}{\rho}$ 와 $\frac{\mu_{tr}}{\rho}$ 는 2차 하전입자의 운동에너지가 정지 질량에너지와 비교할 만하거나 클 때, 특히 높은 원자번호 물질 내에서의 상호작용에서는 서로 다를 수 있다.

2-B. 5 : 總 質量 阻止能(Total mass stopping power, $\frac{S}{\rho}$)

하전입자의 물질에 대한 총 질량저지능 $\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dl}$ 여기서 dE 는 밀도 ρ 인 물질內에서 거리 dl 만큼 움직일 동안 하전입자에 의해서 잃은 에너지이다.

단위 : $J \cdot m^2 \cdot kg^{-1}$

E 는 eV로 표시할 수 있으며 $\frac{S}{\rho}$ 는 $eV \cdot m^2 \cdot kg^{-1}$ 으로도 나타낼 수 있다.

Notes : (a) S 는 總 線阻止能이다.

(b) 핵반응이 무시될 수 있는 에너지에서 총 질량저지

능은 $\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl}\right)_{col} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl}\right)_{rad}$ 이다.

여기서 $\left(\frac{dE}{dl}\right)_{col} = S_{col}$ 은 線形 충돌저지능이고,

$\left(\frac{dE}{dl}\right)_{rad} = S_{rad}$ 은 선형 방사저지능이다.

(c) 총 질량저지능은 $\frac{\mu_{tr}}{\rho}$ 에 대해서와 비슷한 방법으로 단면적에 의해서 표시할 수 있다.

2-B. 6 : 선형 에너지 전달(Linear energy transfer or restricted linear collision stopping power, L_d)

하전입자의 물질에 대한 선형 에너지 전달 L_d 은 $L_d = \left(\frac{dE}{dl}\right)_d$ 고 dE 는 에너지 손실이 제한된 값(energy cutoff) Δ 보다 작은 범위내에서 전자와의 충돌에 의해서 거리 dl 만큼 움직인 동안 하전입자에 의해서 잃은 에너지이다. 단위 : $J \cdot m^{-1}$

E 는 eV로도 표시될 수 있으므로 L_d 는 $eV \cdot m^{-1}$ 로 표시할 수 있고 편리하도록 $Kev \cdot \mu m^{-1}$ 로 표시할 수 있다.

Notes : (a) 비록 정의가 에너지 Cut-off를 명시하고 비정(range)의 Cut-off를 나타내지 않지만 에너지 손실을 때때로 국부 에너지 전달(energy locally transferred)로써 나타내 진다.

(b) 표시를 간단히 하기 위해서 Δ 를 eV로 표시해도 좋다. 그때 L_{100} 은 100eV의 에너지 Cut-off에 대한 선형 에너지 전달(LET)을 나타낸다.

(c) $L_{\infty} = S_{\infty}$ 이다.

(d) LET도 역시 $\frac{dE_{tr}}{\rho dx}$ 에 대해서 말한 바와 비슷한 방법으로 Cross section에 관해서 표시 될 수 있다.

2-B7 : 방사 화학적 收率(Radiation chemical yield, $G_{(x)}$)

방사 화학적 수율 $G_{(x)} = \frac{n_{(x)}}{\epsilon}$ 로 표시하며 $n_{(x)}$ 는 특정한 물질 x 가 생성되거나 파괴되거나 변화되는 평균적인 물질의 양이고 ϵ 는 관여된 평균 에너지이다. 단위 : mol·J⁻¹

Notes : 위의 G -값은 전달된 에너지에 대한 생성물질의 평균수라고도 정의 되어 (100eV)⁻¹로써 표시되어 왔다. 예를 들면 15.5(100eV)⁻¹의 Fe³⁺에 대한 G -값이 Co-60 γ 선에 대해서는 1.61 μ mol·J⁻¹로 된다.

2-B. 8 : 가스內서 이온쌍 形成에 소비되는 평균에너지 (Mean energy expended in a gas per ion pair formed, W)

가스내서 하나의 이온쌍을 형성하는데 소비되는 평균에너지 $W = \frac{E}{N}$ 고 N 은 하전입자의 최초의 운동 에너지 E 가 가스내에서 완전히 소비될때 형성되는 이온쌍의 평균수이다. 단위 : J
 W 를 eV로 표시해도 좋다.

Notes : (a) 정의 에서 제동복사로 부터 생성된 이온들이나 하전입자에 의해 방출된 다른 2차 방사선들은 N 에 포함된다.

(b) 때로는 입자의 경로에 따라서 생성되는 이온쌍당 소비되는 평균에너지의 변화에 관심의 초점을 둘 필요가 있을 경우도 있다. 그때는 ICRU-Report 31[7]에서 정의된 미분 개념이 나타내 진다.

2-C. : 線量測定(Dosimetry)

물체에 대한 방사선의 영향은 앞서 2-A에서 정의된 선량에 의해 명기 되었듯이 방사선장의 크기와 2-B에서 정의된 선량에 의해 명시된 바와 같이 방사선과 물질 사이의 상호작용의 정도에 따르게 된다. 선량측정의 양은 본질적으로 2-A에서 정의된 양과 2-B에서 정의된 양의 곱이 된다. 비록 선량측정의 양들이 그와 같은 곱으로 계산될지라도 보통 측정 선량제로 직접 측정 된다.

2-C. 1 : 에너지 관여(Energy imparted, ϵ)

어떤 부피의 물질內에서 이온화 방사선에 의한 에너지 관여 ϵ 은

$$\epsilon = R_{in} - R_{out} + \sum Q$$

여기서 R_{in} 은 체적내로 입사하는 방사에너지, 즉 체적

내로 들어가는 모든 하전, 비하전 이온화 방사선의 에너지의 합(정지에너지는 제외), R_{out} 은 체적으로 부터 방출되는 방사에너지 즉 체적을 떠나는 모든 하전, 비하전 이온화 입자의 에너지의 합(정지에너지는 제외).

$\sum Q$ 는 그 체적내에서 일어나는 어떤핵변환에서 핵자와 入射입자의 정지 길량에너지의 총합 단위 : J

Notes : (a) ϵ 는 통계적 양이다.

(b) ϵ 의 기대값인 평균 에너지, 관여 양 ϵ 는 비통계적 양이다.

2-C. 2 : 선에너지(Linear energy, y)

$$\text{선형 에너지 } y \text{는 } y = \frac{\epsilon}{l}$$

여기서 ϵ 은 에너지 손실에 의해 대상 체적내에서 물체로 전달된 에너지 이고 l 는 그 체적안에서의 평균 비적의 길이이다. 단위 : J·m⁻¹

ϵ 은 eV로 표시되어도 좋으며 y 를 eVm⁻¹로 나타내도 된다. 편리하도록 KeV· μ m⁻¹와 같이 표시할 수도 있다.

Notes : (a) y 는 통계적인 양이다.

(b) 선형에너지의 분포는 흡수선량이나 흡수선량율과 무관하다.

(c) 체적내에서 평균비적의 길이는 그 체적내에서 발생된 비적의 길이의 평균이다. 대체로 불룩한 구형체에 대해서는 $l = \frac{4V}{a}$ 와 같고 V 는 체적이고 a 는 표면적이다.

(d) y 의 확률분포를 고찰해 보는것이 바람직 하다. 분포함수의 값 $F_{(y)}$ 는 선형에너지가 y 와 같거나 작은 확률이다. 확률밀도 $f_{(y)}$ 는 $f_{(y)} = \frac{dF_{(y)}}{dy}$

(e) 선에너지는 선에너지 전달(LET)과 비슷하다. 왜냐하면 두양은 모두에너지를 길이로 나눈 양으로써 정의 되기 때문이다. 그러나 선 에너지 전달이 에너지 Cut-off에 종속되는 비통계적 양인데 비하여 선 에너지는 기하학적 Cut-off에 종속되는 통계적인 양이다. 또 하나의 차이점은 선 에너지전달이 미분 비적 요소(differential track element)에 적용되고 직접적으로 이온화 입자의 비적에 비해 짧은 거리에서 결정되어야만 하지만 선 에너지는 비적의 구조에 관계없이 정의되므로 비적이 1보다 짧은 경우에도 적용할 수 있다는 점이다.

2-C. 3 : 비 에너지 전달(Specific energy imparted, Z)

$Z = \frac{\epsilon}{m}$ 고 이온화 방사선에 의해서 질량 m 인 물체에 전달된 에너지 ϵ 이다. 단위 : J·kg⁻¹

비에너지의 단위에 대한 SI(특수 단위)로 Gray

(G_y)가 있다. 즉 1G_y=1J·kg⁻¹ 비에너지의 특수단위의 하나는 rad를 一時的으로 使用해도 좋다 단 1rad=10⁻²J·kg⁻¹

Notes : (a) Z는 통계적인 양이고 Z의 확률분포를 고찰하는 것이 중요하고,

(b) 비에너지(Specific energy)는 하나 또는 다수의 에너지 축적 현상 때문에 일어날 것이다. 하나의 현상에서 손실되는 비에너지의 분포함수 F₁(Z)는 Z보다 작거나 같은 에너지가 한 현상이 일어났을 때 손실되는 조건적인 확률이다. 확률밀도 f₁(z)는 F₁(z)를 Z에 관해서 F₁(z)를 미분한것 즉, f₁(z)= $\frac{dF_1(z)}{dz}$

(c) 분포함수의 값 F(z)는 에너지가 Z와 같거나 작을 확률이고 f(z)= $\frac{dF(z)}{dz}$, f(z)는 에너지 축적이 일어날 확률이 없는 Z=0에서 Dirac delta함수의 성분을 갖는다.

(d) 둥근 체적에 대해서는 y와 單一 에너지 축적현상 (Single energy deposition event)으로 인한 비에너지 Z의 증가는 Y= $\frac{\rho a}{4} \cdot Z$ 고 여기서 a는 체적의 표면적, ρ는 그 체적에서 물질의 밀도이다.

2-C. 4 : 흡수선량(Absorbed dose, D)

$D = \frac{d\epsilon}{dm}$ 여기서 dε는 이온화방사선에 의해서 질량 dm인 물체에 준 평균 에너지 전달이다.

단위 : J·kg⁻¹

흡수선량의 SI 단위는 Gray(G_y)고

$$1G_y = 1J \cdot kg^{-1}$$

과거 사용해 온 rad는 1rad=10⁻²J·kg⁻¹

Note : 평균 비에너지 (Mean specific energy, Z̄)

$\bar{Z} = \int_0^{\infty} Z \cdot f(z) dz$ 로 表示할 수 있고 이 식은 D(C.4)에 대한 또 하나의 정의에서 사용될 수 있는 비통계적 양이다. 즉 $D = \lim_{m \rightarrow 0} \bar{Z}$ 이런 관계는 D와 Z̄ 사이의 연관성을 나타내 주며 흡수선량 D는 질량 m이 "0"으로 접근할때 Z의 극한값과 같고 체적에서의 평균 흡수선량은 그 체적에서의 평균 비에너지 Z̄와 같다.

2-C. 5 : 흡수선량률(Absorbed dose rate, Ḋ)

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt}, \quad \text{단위 : } J \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$$

SI 특수 단위로는 Gray(G_y)=J·kg⁻¹를 사용하면

$$1G_y \cdot S^{-1} = 1J \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$$

rad를 一時的으로 使用해도 좋고 이때, 1rad·s⁻¹=10⁻²J·kg⁻¹·s⁻¹와 같이 된다.

2-C. 6 : 커마(Kerma, K)

$K = \frac{dE_{tr}}{dm}$ 고 dE_{tr}은 질량 dm인 물질 내에서 非荷

電 이온화 입자에 의해서 생성된 모든 하전 이온화 입자의 최초의 운동에너지의 총 합이다.

단위 : J·kg⁻¹

kerma 단위에 대한 SI 단위는 Gray(G_y)가 있고,

$$1G_y = 1J \cdot kg^{-1}$$

rad로 表示하면 1rad=10⁻²J·kg⁻¹로 一時的으로 當分간(1985년까지) 使用한다.

Notes : (a) 에너지 E(정지에너지는 제외)에 의한 非荷電 이온화 방사선에 대해서 에너지 후루언쓰 ϕ와 커마 K와의 관계는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$K = \phi \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) = \phi \left[E \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) \right]$$

여기서 $\frac{\mu_{tr}}{\rho}$ 은 질량에너지 전달계수이고 $\left[E \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) \right]$ kerma factor라고 부른다.

(b) dE_{tr}은 非하전 이온화 입자에 의해 생성된 하전 이온화 입자의 최초의 운동에너지의 총 합이기 때문에 이들 非하전 입자들이 제동복사로 방사되는 에너지를 포함한다. 어떤 하전입자의 에너지도 그것들이 체적요소 내에서 일어나는 2차 과정에서 이온화될 때에도 포함된다. 이와같이 Auger전자의 에너지도 그것이 dm안에서 이온화 될 때는 dE_{tr}의 한 부분이 된다.

(c) 자유공간의 한점에서나 서로 다른 물질 내부에서 특정한 물질에 대한 kerma나 kerma율의 값을 생각하는 것이 종종 편리할 때가 있다. 그와같은 경우에 그 값은 특정한 물질의 알려진 작은양의 입자 후루언쓰 또는 에너지 후루언쓰 값으로 부터 kerma를 계산하는 것은 (a)에 주어진 관계식을 사용하며 Water phantom안에 있는 한점에서의 kerma는 [air kerma라고 말할 수 있다.

(d) kerma를 측정하기 위하여 질량요소가 충분히 작아서 공기가 삽입되어도 非하전 이온화 입자의 장을 조금도 방해하지 않아야 한다.

이것은 만일 측정될 물질의 kerma가 주위의 매질과 서로 다르다면 문제는 달라진다. 즉 매질로 인한 방해가 어느정도 인정 된다면 적절한 수정이 필요하게 된다.

(e) 선량측정을 하기 위해서 먼저 간접적으로 이온화한 입자의 장(field)을 적당한 물질에 대한 kerma rate로 표시하는 것이 편리할 것이다.

그 물질은 공기가 될 수 있고 의학생물학에 적용되는 간접 전리 방사선에 대해서는 적당한 연조직체의 조합이나 방사선효과의 연구에 대해서는 이와 등가한 phantom(類似人體)을 사용할 수 있다.

(f) 흡수선량과 kerma의 동질성은 하전입자의 평형이

얻어지고 제동방사선의 생성을 무시할 수 있을 때 이들은 서로 접근된다.

2-C. 7 : 커마율(Kerma rate, K)

$$K = \frac{dK}{dt} \quad \text{단위 : } J \cdot kg^{-1} \cdot S^{-1}$$

Gray (G_y)를 사용하면

$$1G_y, S^{-1} = 1J \cdot kg^{-1} \cdot S^{-1}$$

일시적으로 사용하고 있는 rad 단위로는 $1rad \cdot s^{-1} = 10^{-2} \cdot J \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$ 가 된다.

2-C. 8 : 照射線量(Exposure dose, X)

$X = \frac{dQ}{dm}$, dm 의 질량을 가진 공기의 미소부분에서 X 선 또는 γ 선으로 인해 방출된 2차 전자가 공기 중에서 생성된 이온쌍중 어느한쪽 부호(e^- , e^+)의 이온 전제전하의 총 합을 dQ 라 할때 이다.

$$\text{단위 : } C \cdot kg^{-1}$$

조사선량의 특수단위는 röntgen(R)이고 당분간 사용하며 $1R = 2.58 \times 10^{-4} C \cdot kg^{-1}$ 로 표시한다.

Notes : (a) 전자 제동흡수로 부터 생기는 전리는 dQ 에 포함시키지 않는다. 단 入射 방사선의 에너지가 높을때만은 例外고 위의 조사선량의 단위는 공기커마(Air kerma)와 同一하게 된다.

(b) 現在까지의 기술로는 光子에너지가 5~6MeV 内外 일때의 조사선량 측정에는 難點이 있다.

(c) C.6에서 말한 kerma의 경우와 같이 공기와 相異한 자유공간이나 물질 내부의 한점에 대한 조사선량 또는 조사선량을 표현은 편리하고 물—phantom內的 한점에 대한 조사선량 표현과도 같다.

(d) 이 측정에서 주위할 점은 측정점의 질량요소가 극히 적어야만 光子의 조사장을 크게 동요시키지 않는다. 이 문제는 특히 주위 매질이 공기가 아닐때 중요시 된다. 만일 위의 동요가 많을때는 적절한 교정이 요구된다.

(e) X 의 정의로서 또 다른 표현식은 $X = \phi \frac{\mu_{en}}{\rho} \cdot \frac{e}{W}$ 여기서 ϕ 는 에너지 후루언쓰고 $\frac{\mu_{en}}{\rho}$ 은 공기중에서 질량흡수계수며 e 는 電荷, W 는 공기중에서 한쌍의 이온을 형성 하는데 소요되는 평균에너지 이다.

(f) 하전입자의 과도적 변화로 평형이 이루어질 때 röntgen(R)으로 표시한 값은 공기, 물 또는 연조직체에 대한 흡수선량 단위인 rad 값과 대략 一致한다. 그러나 이 대략적인 값은 SI 단위를 使用할 때는 달라진다.

光子에 관한 경우 공기 kerma를 G_y (Gray, $J \cdot kg^{-1}$) 단위로 표현함이 便利하며 이는 過渡的 荷電粒子의 平衡(Transient charged-particle equilibrium) 일

때는 공기, 물, 연조직에 대한 흡수선량은 G_y 로 표시함이 좋다.

2-C. 9 : 照射線量率(Exposure dose rate, \dot{X})

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} \quad \text{단위 : } C \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$$

여기서도 특수단위인 röntgen(R)은 당분간 사용하게 되며 이는 $1R \cdot s^{-1} = 2.58 \times 10^{-4} C \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$ 로 표시한다.

2-D. 放射能(Radioactivity)

방사선장에 依해서 방사능 물질이 생성되며 방사능에 관한 정의는 다음과 같다.

2-D. 1 : 붕괴상수(Decay constant, λ)

$\lambda = \frac{dP}{dt}$ 로 표시되며 한 주어진 핵종이 dt 시간 동안 어떤 에너지 상태로 부터 自發的인 핵전환을 일으키는 확률 dP 이다. 단위 : s^{-1}

Note : $\frac{\ln 2}{\lambda}$ 를 보통 $T_{1/2}$ 즉 반감기라고 한다.

2-D. 2 : 방사능(Activity, A)

$A = \frac{dN}{dt}$ 이고 핵질물이 가진 특정 에너지 상태에서 시간 dt 동안 자발적 핵전환으로 생기는 기대되는 붕괴수 dN 이다. 단위 : s^{-1}

SI 단위인 특수명칭은 Becquerel(Bq.)이고 $1Bq = 1S^{-1}$ 이며 在來의 특수단위 Curie(Ci)는 당분간만 사용하고 $1Ci = 3.7 \times 10^{10} s^{-1} = 3.7 \times 10^{10} Bq.$ 가 된다.

Note : 위의 「특정에너지상태」란 핵종의 기저상태(Ground State)를 말하며 한 특정에너지 상태의 방사능은 $\lambda \cdot N$ 이다.

2-D. 3 : 공기 커마율 상수(Air kerma-rate constant, Γ_0)

$\Gamma_0 = \frac{l^2 K_0 \delta}{A}$ 로 표시되고 δ (keV) 보다 큰 光子에너지에 依한 공기커마율(K_0)로서 방사능 A 의 點線源에서의 거리가 l 일 때다. 단위 : $m^2 \cdot J \cdot kg^{-1}$

SI 단위로서 G_y 와 B_q 을 使用하면 $m^2 \cdot J \cdot kg^{-1} = m^2.$

Table 1. SI Units and Their Symbols

Name	Symbol
coulomb	C
joule	J
kilogram	kg
metre	m
mole	mol
second	s
steradian	sr
watt	W

$G_y \cdot B_q^{-1} \cdot S^{-1}$ 가 된다.

Γ_s 에서 在來的 表現인 Curie(Ci) 및 rad를 使用한 단위는 다음과 같이 表記된다.

$$1 \text{ rad} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Ci}^{-1} \cdot \text{S}^{-1} = \left(\frac{10^{-12}}{3.7} \right) \text{m}^2 \cdot \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Notes: (a) 상기 光子란 γ 선과 특성 X선 및 내부전자 계동복사도 포함한다.

(b) 상기 點線源이란 이상적 점원 이라는 말이고 一定한 크기의 점선원으로서 감쇄와 산란이 생기고 光子

消滅 및 外部電子 制動輻射도 생긴다. 따라서 이들 過程에는 相當한 校正이 必要할 때도 있다.

(c) 선원과 측정점 사이에 어떤 매질이 관여될 때에는 흡수 및 산란을 증가 시킴으로 교정이 요구된다.

(d) δ -값의 선정은 실제사항에 따라 다르나 단위의 간편화를 위해서 δ 는 keV로 표시함을 권고한다. 지금까지의 물리적 양 및 그들 단위는 다음 표 1, 2 및 3으로 일관 하여 표시하였다.

Table 2. Quantities and Units for General Use

Definition No.	Quantity		Unit Symbols		
	Name	Symbol	SI	SI Restricted Name ^a	Special ^b
A.1.a	Particle number	N	1		
A.1.b	Radiantenergy	R	J		
A.2.a	(Particle) flux ^c	N	s^{-1}		
A.2.b	Energy flux	R	W		
A.3.a	(Particle) fluence	Φ	m^{-2}		
A.3.b	Energy fluence	Ψ	Jm^{-2}		
A.4.a	(Particle) fluence rate ^c	ϕ	$\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$		
A.4.b	Energy fluence rate	ϕ	Wm^{-2}		
A.5.a	Particle radiance ^c	\dot{p}	$\text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$		
A.5.b	Energy radiance	r	$\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1}$		
B.1	Cross section	σ	m^2		b
B.2	Mass attenuation coefficient	μ/ρ	$\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$		
B.3		μ_{tr}/ρ	$\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$		
B.4	Mass energy transfer coefficient	μ_{en}/ρ	$\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$		
B.5	Total mass stopping power	S/ρ	$\text{Jm}^2 \text{kg}^{-1}$		$\text{eV m}^2 \text{kg}^{-1}$
B.6	Linear energy transfer	L_d	Jm^{-1}		eV m^{-1d}
B.7	Radiation chemical yield	$G(x)$	mol J^{-1}		
B.8	Mean energyexpended perion pair	W	J		eV
C.1	Energy imparted	ϵ	J		
C.2	Lineal energy	y	Jm^{-1}		eV m^{-1d}
C.3	Specificenergy(imparted)	z	J kg^{-1}	Gy	rad
C.4	Absorbed dose	D	J kg^{-1}	Gy	rad
C.5	Absorbed dose rate ^c	\dot{D}	$\text{J kg}^{-1} \text{s}^{-1}$	Gy s^{-1}	rad s^{-1}
C.6	Kerma	K	J kg^{-1}	Gy	rad
C.7	Kerma rate ^c	\dot{K}	$\text{J kg}^{-1} \text{s}^{-1}$	Gy s^{-1}	rad s^{-1}
C.8	Exposure	X	C kg^{-1}		R
C.9	Exposure rate ^c	\dot{X}	$\text{C kg}^{-1} \text{s}^{-1}$		Rs^{-1}
D.1	Cecary constant ^c	λ	s^{-1}		
D.2	Activity ^c	A	s^{-1}	Bq	Ci
D.3	Air kerma-rate constant ^c	Γ_s	$\text{m}^2 \text{J kg}^{-1}$	$\text{m}^2 \text{Gy Bq}^{-1} \text{s}^{-1}$	$\text{m}^2 \text{rad Ci}^{-1} \text{s}^{-1}$

^aThe symbol for the special name of the SI unit restricted to specified quantities.

^bOne should not infer that the size of a unit given in this column is equal to the size of a unit on the same line in the other columns.

^cDay (d), hour (h), and minute (min) may be used instead of second (s).

^dFor practical purposes, $\text{keV} \mu\text{m}^{-1}$ may be used as a convenient multiple.

Table 3. SI Prefixes

Factor	Prefix	Symbol	Factor	Prefix	Symbol
10 ¹⁸	exa	E	10 ⁻¹	deci	d
10 ¹⁵	peta	P	10 ⁻²	centi	c
10 ¹²	tera	T	10 ⁻³	milli	m
10 ⁹	giga	G	10 ⁻⁶	micro	μ
10 ⁶	mega	M	10 ⁻⁹	nano	n
10 ³	kilo	k	10 ⁻¹²	pico	p
10 ²	hecto	h	10 ⁻¹⁵	femto	f
10 ¹	deka	da	10 ⁻¹⁸	atto	a

第三章 放射線防禦用 物理的量 및 單位
(Quantities and Units for Use in
Radiation Protection)

ICRU-Report 33 마지막章이며 第一, 第二章을 利用한 방사선방어용 술어 中 가장 기본이 되는 것이다. 이 장은 主로 ICRU-Report 25(Conceptual Basis for the Determination of Dose Equivalent, 1976)를 기초로 하고 또한 ICRP-Publication 26에서 규정된 것과 UNSCEAR(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation)에서 정의한 용어들 中 방사선방어용 필요한 것을 발췌한 것이며 集團線量(Collective dose), 集團線量當量(Collective dose equivalent), 預託線量(Committed dose), 預託線量當量(Committed dose equivalent), 線量預託(Dose Commitment), 線量當量預託(Dose equivalent Commitment) 및 有效線量當量(Effective dose equivalent) 등은 취급하지 않았다.

3-1. 線量當量(Dose equivalent)

近來 방사선방어 기술 수행에 있어서 주어진 人體器官에 대한 방사선 효과를 表現할때 그 特定 器官에 대해 얻어진 선량에서 흡수선량에 重率(Weighting) 한 一定한 계수를 곱하여 실제의 선량을 推定한다. 이 계수가 在來의 線質係數(Quality factor, QF)라고 하며 이는 荷電粒子가 흡수선량을 나타낼때 생물학적 효과를 고려하여 흡수선량에 重率해 주는 것이며 이것이 RBE(Relative biological effectiveness) 값이 된다. 但 이 계수는 하전입자의 증돌저지능과 어느한계 까지 만 대략 비례하므로 방사선방어 목적으로는 RBE와 다른 QF(Q)은 이용함이 좋다.

그러나 이 Q-값은 一般의인 상용방사선방어 예단 이 용하고 높은 방사선량의 피폭사고때 그 효과를 결정 지우는데 사용해서는 안된다.

또한 수정계수(Modifying factor, N)도 흡수선량에 중첩하여 사용하고 β-γ=1을 적용하며 (N=1) 평가할 조직체의 한점에서 D=흡수선량, Q=선질계수, N=수정계수(때로는 分布係數라고도 함) 일때 등가선량 H는 H=D·Q·N가 되고 SI 단위로는 D 및 H=J·kg⁻¹, H는 Sievert(S_v)로 표기하며 다음과 같다.

$$1 S_v = 1 J \cdot kg^{-1}$$

등가선량 표시로 在來의 단위는 rem 또는 Rem으로 표시했으나 이는 당분간 사용하고 1rem=10⁻² J·kg⁻¹으로 표시됨으로 결국 100rem=1S_v가 된다.

Notes: (a) 본량 H(S_v)는 선량당량한계(Dose equivalent limit) 값과 比較하여 사용되고 피폭사고 같은 높은 선량에 의한 효과를 평가하는데는 사용하지 못한다.

(b) Q(QF)는 直接 L_∞(LET_∞)와 관계되고 ICRP에서 그 관계의 더욱 상세한 논의는 "Jour. of Health Physics", Vol.9, p.357(1963)이나 ICRU-Report 16(Linear energy transfer, 1970)에 기록되어 있다.

(c) 일반적인 경우 D는 하전입자가 L_∞-값 범위에 있고 N가 1인 경우 H=DQ̄고 여기서 Q̄는

$$\bar{Q} = \frac{1}{D} \int_0^{\infty} Q \cdot D_L \cdot dL, \quad D_{L\infty} = \frac{dD(L\infty)}{dL_{\infty}}$$

로 표현하며 선량 당량율 H는 H= $\frac{dH}{dt}$ 이다.

$$\text{단위} : J \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$$

SI 단위로 S_v로 表示하면 다음과 같다. 즉,

$$1 S_v \cdot s^{-1} = 1 J \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$$

따라서 在來의 rem을 사용할 때는 1rem·s⁻¹=10⁻² J·kg⁻¹·s⁻¹와 같이 표기한다.

3-2. 주변 방사선한계(Ambient radiation levels)

방사선방어를 목적으로 한 그 제한치는 등가선량 H로 표시되나 이는 흡수선량 D와 一次의인 중요성이 있다. 그러나 조직내의 선량당량의 값은 직접 구하기 어렵고 간접적인 양과 알고저하는 점以外的 장소에서 측정된 값으로부터 구한다.

방사선량의 고저를 결정할때 어떤 특정장소에 대한 最大吸收線量값을 대략 표시할 때가 있다. 특히 우리들 신체내부 두께에 따라 그 값이 다르며 또한 각 기관에 따라 높은 방사선강도를 나타낼 때 이 最大値는 중요한 의미를 나타낸다. 이 最大吸收線量을 얻기 위해 공기중에서 照射되는 X-γ선과 비전리粒子的 kerma 값을 決定지워야 한다. 等方向入射방사선에 대해서는 신체내 최대흡수선량의 크기를 적절한 조사선량치를 결정 해야하며 예전대 조사선량으로 R 단위가 최대흡

수선량치로서 rad와 近似하다고 합과 같고 SI 단위로서는 C/kg(조사선량 단위)을 $G_{ray}(G_r)$ 단위로 흡수선량을 표시함과 같다. 그러나 실제로 방사선은 等方向入射가 아니기 때문에 신체 최대흡수선량을 결정할 때는 등방향이라고 가정할 때가 실제보다 높은 값을 나타낸다.

특히 光子에너지가 ~100keV때 신체내 최대흡수선량은 kerma로 표시한 값이나 또는 공기내 자유조사에 의한 측정에서 얻은 값보다 크며 그 이유는 신체내에서 방사선의 산란효과가 있기 때문이고 조사선량과 kerma 단위규정에서 이미 하전입자 방사선에 대한 값이 아님을 밝혀둔 것이다(2章 C 6 및 C.8 참조) 일반적으로 주어진 방사선장에 대한 최대흡수선량은 유사인체(phantom)의 크기와 재료에 따라서 다르다. 따라서 우리들은 실제 인체와 그 크기 및 조직성분이 비등한 조직등가 유사인체(Tissue equivalent phantom)를 사용함이 적절하다. 대체로 편리하게 구형 유사인체(Spherical phantom)를 쓰며 이 phantom 내의 최대 흡수선량이나 등가선량은 적절한 근사치를 나타낸다.

또한 방사선방어용으로 어떤 장소에서의 주위 방사선강도를 결정지우기 위해서 吸收線量指數(Absorbed dose index, D_1)와 等價線量指數(Dose equivalent index, H_1)를 다음과 같이 정의한다. 이 概念으로서 인체의 연조직내의 최대흡수선량은 球形組織等價物質內의 最大吸收線量으로 近似化시킨다. 이 방법은 공기중에서 인체의 외부피폭일때 신체표면에서 최대흡수선량을 결정하기가 곤란할때 대단히 유리하다.

3-2-1 : 吸收線量指數(Absorbed dose index, D_1)

한점에서 D_1 이란 密度가 1gcm^{-3} , 직경이 30cm인 인체연조직과 등가한 물질로된 구형 유사인체내의 어느 한점에서 최대흡수선량을 나타내는 값을 말한다.

$$\text{단위 : J}\cdot\text{kg}^{-1}$$

SI 단위로 흡수선량 지수는 $G_{ray}(G_r)$ 이고 $1G_r=1\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 이며 在來式 단위인 rad로서는 $1\text{rad}=10^{-2}\cdot\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ (2章 C.4)이다.

Notes : (a) 人體피부층 표면에서 두께가 약 $70\mu\text{m}$ 이던 이는 죽은 세포로 되어있는 고로 구형 유사인체 표면에서 $70\mu\text{m}$ 의 흡수선량 지수를 결정함은 意味가 없다.

(b) 구형 유사인체 구성 성분으로 現在까지 사용하고 있는 성분비는 다음과 같다.

O : 76.2%, C : 11.1%, H : 10.1%, N : 2.6% 이들 성분외의 미량성분은 선량측정 목적을 위해서는 중

요하지 않아서 무시하여 왔다.

(c) 위의 정의와 설명은 모든 전리방사선에 적용하며 각종 혼합방사선장일때에는 γ 선 $D_1(\text{gamma ray } D_1)$, 中性子 $D_1(\text{neutron } D_1)$, 陽子 $D_1(\text{proton } D_1)$ 등으로 표시하면 된다.

(d) 上記 (c)에서 방사선의 종류(n, p 및 γ)에 따라 그 최대흡수선량이 나타나는 장소가 달라지고 뿐만 아니라 일반적으로 방사선장에 대한 D_1 값은 多少적게 나타난다.

(e) 특히 높은 에너지의 가속기나 우주비행등에서 현제까지 불확실한 환경 방사선장에 대한 흡수선량 지수 D_1 은 직경 30cm, 밀도 1g/cm^3 인 구형 유사인체내서 外挿法으로 결정한다.

3-2-2 : 吸收線量指數率(Absorbed dose index rate, \dot{D}_1)

$$\dot{D}_1 = \frac{dD_1}{dt} \quad \text{단위 : J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$$

SI 단위로는 $1G_r\cdot\text{s}^{-1}=1\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 가되고 당분간만 사용하는 rad로 표시하면 $1\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}=10^{-2}\cdot\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 이 된다.

3-3-3 : 線量當量指數(Dose equivalent index, H_1)

3-3-1에서와 같이 한점에서 H_1 이란 밀도가 1g/cm^3 , 직경이 30cm인 구형 유사인체내의 한점에서 최대선량당량을 나타내는 값이다. 단위 : $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$

SI 단위로는 Sievert(S_v)이고

$$1S_v=1\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$$

rem을 사용하면 $1\text{rem}=10^{-2}\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 이 된다.

Notes : (a) 3-2-1 (D_1)에서와 같이 유사인체 표면의 두께 $70\mu\text{m}$ 에 대한 선량당량지수는 무시한다.

(b) 연조직의 구성 성분은 3-2-1(b)와 같이 하고 미량 성분은 무시한다.

(c) 3-2-1(c)와 같이 혼합된 방사선장일때에는 γ 선 H_1 , 中性子 H_1 , 陽子 H_1 등으로 표기한다.

(d) 3-2-1 (d)와 같이 γ, n, p 에 따라 최대 선량당량이 나타나는 장소가 달라지고 H_1 값은 대체로 낮게 된다.

(e) 3-2-1(e)와 같이 H_1 값을 外挿法으로 구한다.

(f) 유사인체내의 선량당량은 보통 구의 깊이에 따라 감소하고 인체표면에 있는 장기에서 높은 등가선량치를 나타낸다. 따라서 이 구를 外殼部分과 內殼部分 두部分으로 나눈이 좋다. 단 外殼部는 $70\mu\text{m}$ 에서 깊이 1cm로 하고 이 部位에서의 최대등가선량은 얇은 등가선량지수(Shallow dose equivalent rate, $H_{1,s}$)라고 하며 이구의 中心部의 최대 선량 당량 지수를 $H_{1,d}$ 라고 표기한다. 換言하면 위의 두指數 $H_{1,s}$ 와 $H_{1,d}$ 는 등가선량 지수들의 표기법을 밝혀둔다.

Table 4. Quantities and Units for Use in Radiation Protection

Quantity		Unit Symbols		
Name	Symbol	SI	Restricted Name ^a	Special ^b
Dose equivalent	H	J kg^{-1}	Sv	rem
Dose equivalent rate ^c	\dot{H}	$\text{J kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$	Sv s^{-1}	rem s^{-1}
Absorbed dose index	D_1	J kg^{-1}	Gy	rad
Absorbed dose index rate ^c	\dot{D}_1	$\text{J kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$	Gys^{-1}	rads^{-1}
Dose equivalent index	H_1	J kg^{-1}	Sv	rem
Dose equivalent index rate ^c	\dot{H}_1	$\text{J kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$	Sv s^{-1}	rem s^{-1}
Shallow dose equivalent index	$H_{1,s}$	J kg^{-1}	ϵv	rem
Deep dose equivalent index	$H_{1,d}$	J kg^{-1}	Sv	rem

^aThe symbol for the special name of the SI unit restricted to specified quantities.

^bOne should not infer that the size of a unit given in this column is equal to the size of a unit on the same line in the other columns.

^cDay (d), hour (h), and minute (min) may be used instead of second (s).

一般的으로 선질계수의 최대치(Q_{max}) 및 흡수선량 지수(D_1)의 값은 구내의 각각 다른 위치에서 나타나고 따라서 Q_{max} 에 의한 H_{max} 의 위치는 D_{max} 가 생기는 위치와는 다르나 $D_1 \cdot Q_{max}$ 값으로도 H_1 값이 過少평가 되지는 않는다.

混合방사선장에서는 각 방사선에 대한 D_1 에 그에 적절한 Q_{max} 를 곱한 $D_1 \cdot Q_{max}$ 의 합으로서 혼합 H_1 값을 결정한다.

3-2-4 : 線量當量指數率(Dose equivalent index rate, \dot{H}_1)

$$\dot{H}_1 = \frac{dH_1}{dt} \quad \text{단위 : } \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

이 값의 SI 단위는 $1\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1} = 1\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 이고 在來表示해 오던 rem 으로는 $1\text{rem} \cdot \text{s}^{-1} = 10^{-2} \cdot \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 표시해야 한다.

위의 第3章에 대한 각종량과 그 단위를 일괄하여 보면 표 4와 같다.

結 言

머릿말에서와 같이 ICRU Report-33은 保健物理學과 방사선 방어기술의 기본이 되는 각종 방사선량 및 단위들에 대하여만 說明한 것이고 이 Report-33을 기초로 하여 방사선시설 각분야에 걸쳐 유도된 이론과 규제들이 국제적으로 널리 利用되고 있으며 우리나라의 原子力法 및 其施行細則, 방사선동위원소등의 관리 및 그에의한 방사선장해 방어령등도 그 기본 개념과 관리규제의 기초도 여기에 근거를 두고 있다. 또한 ICRU

는 NCRP(1953年發足) 및 ICRP(1955年發足)와 三角관계로 三位一體와 같으며 美國의 NBS (National Bureau of Standards, 1959年) Handbooks도 이틀로부터 연유되었고 특히 NBS Handbook-52에서 (MPC)_{air}, (MPC)_{water} 및 인체내 최대 허용양(신체부하량등) 등을 규정해 놓았다. 최근 ANSI (American National Standard Institute)도 여기서 근거를 두고 있으며 한예로 각종방사선 에너지에 따른 방사선장에 대한 선량을 환산인자값들을 내놓았으며 N666(ANS-6.1)에는 中性자와 γ 선의 flux-to-dose-rate factors 값을 내놓았다. 원자력발전소에서는 방사선 안전관리를 위해 NRC(Nuclear Regulatory Commission)가 있고 또한 10CFR에서도 상세하게 다루고 있으며 이의 Part 50, Appendix 을 보면 원자력발전소의 기, 액, 고체에 대한 radwaste-system과 cost-benefit analysis(원익비용분석)를 소개하여 각국실정에 맞게 적용할수 있다.

위의 모든 發刊物은 주로 美國의 것이나 구라파쪽에서는 이들을 기초로하고 1969年 3月(20日~21日) Copenhagen 會議에서 最初로 방사선방어의 지침서를 내도록 했으며 "Radiation Protection Recommendation in Nordic Countries"라는 名稱의 冊子가 紹介되었다. 以上 각종의원회 및 관련지침서의 간단한 소개를 하였으며 이들 방대한 보고서들중 우선 가장 기본적인 ICRU Report-33을 먼저 소개한 것을 이해하여 주기 바라며 이같이 우리나라의 방사선안전관리 기술에 다소라도 보탬이 되었으면 하는 마음 간절하며 독자의 지도편달을 바랍니다.