

# 放射線量標準測定

—X, γ線을 中心으로—

田 載 植\*

韓國標準研究所

표 1. 電離放射線의 分類

## 1. 전리방사선

매질의 유무에 관계없이 에너지의 공간적 전달을 행하는 물질적 실체의 흐름을 방사선이라고 부른다. 여기에는 통상적인 전파나 광선, 입자선 등도 포함된다. 그중에서도 원자, 분자를 직접 또는 간접적으로 전리시키는 작용을 하는 방사선을 전리방사선이라고 하는데 이를 간단히 방사선이라고 부르고 있는 것이다. 이것을 분류해 보면 표 1과 같다.

한개의 방사선이 갖는 에너지는 매우 적은 것이므로

	直接電離放射線	間接電離放射線
粒子放射線	電子, 陽性子, 重陽子, α粒子 荷電中間子等	中性子, 中性中間子等
電磁放射線	—	光子(X線, γ線)

보통 eV 단위로 나타내는데 이것을 다른 에너지 단위로 환산하면  $1\text{eV}=1.602\times 10^{-12}\text{erg}=1.6\times 10^{-19}\text{W}\cdot\text{s}$ 이다.

광자(光子)의 경우에는 그 파장을  $\lambda(\text{\AA})$ 라 하고 에

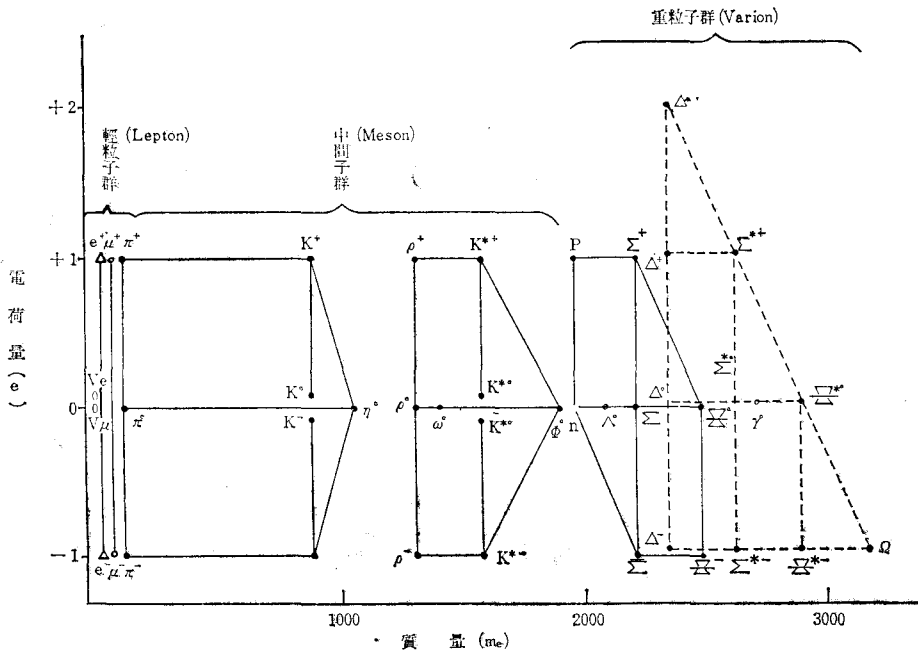


그림 1. 粒子放射線의 主要實體인 各種素粒子

\* 現職: 忠南大學校 物理學科 教授

표 2. 放射線과 그 利用

(電離)放射線	自放射線	天然放射線·地中, 大氣, 物體內에 含有된 微量의 放射性物質에서 나오는 $\alpha, \beta, \gamma$ 線等 宇宙線·宇宙空間에서 오는 高에너지 粒子線, hyperon, $\pi, \mu$ 中間子, $\gamma$ 線等 銀河 X 線·銀河系의 星雲에서 오는 軟 X 線
	人工放射線	RI 放射線·人工의 操作(原子爐, 核爆發等)으로 核反應을 일으켜 만든 放射性物質에서 나오는 $\beta, \gamma$ 線等 人工放射線·X線發生裝置에서의 X線 ·荷電粒子加速裝置에서의 粒子線 및 X線, n線等 Cyclotron, Synchrotron, Van de Graaff, Betatron, LINAC 裝置附隨放射線·電子顯微鏡, TV送·受像器에서 나오는 軟 X 線等
放射線의 利用	醫學	診斷, 治療, 分析
	工學	原子力發電, 造船(機)等材料檢査, 土木等
	物理學	原子核, 宇宙線, 放射線物理
	化學	分析, 重合等
	生物學	遺傳, 殺菌
	其他	農學, 地質學, 考古學, 法醫學, 美術等

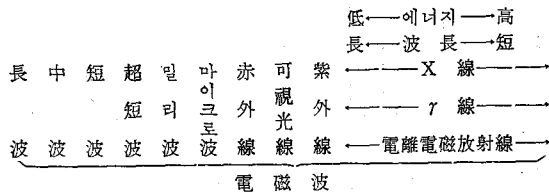
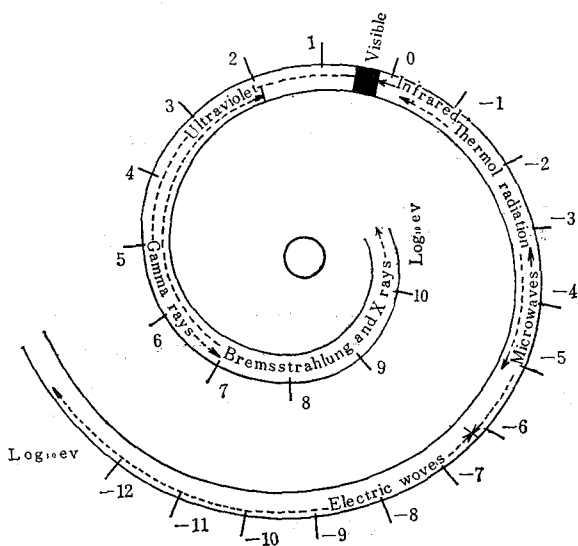


그림 2. 各種電磁波放射線

너지를  $E(\text{keV})$ 라고 할 때  $E(\text{keV}) = \frac{12.40}{\lambda(\text{Å})}$ 의 관계가 있다.

그림 1은 입자방사선의 주요질체인 각종 소립자(素粒子)를 전하(電荷)와 질량의 합수로 나타낸 것이며 그림 2는 전자파(電磁波) 방사선의 종류를 그림으로 나타낸 것이다.

방사선은 우리의 주변에 항상 존재하고 있으며 다방

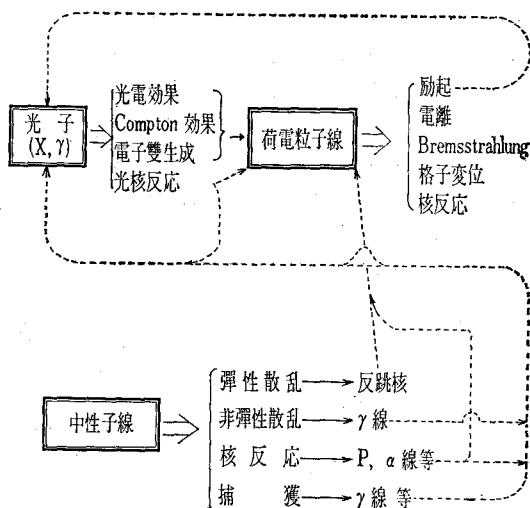


그림 3. 各種放射線의 物質과의 相互作用

면으로 이용되고 있는데 그 내용을 살펴보면 표 2와 같다. 한편 방사선의 물질과의 상호 작용 과정은 그림 3과 같다.

2. 방사선의 양과 단위

물체가 방사선에 조사(照射)된 결과로 나타나는 최종 효과에는 자양각색의 것이 있을 수 있으나 생물학적 효과를 위시하여 이와 같은 효과를 유효하게 이용하기 위하여서는 이 효과를 정확하고도 적절하게 정량적으로 평가하고, 예측하고 또한 control할 수 있는 수단이 필요하다. 그림 4)에 표시한 바와 같이 본질적으로는 방사선의 속성을 나타내는 양  $A_1$ 과 영향을 받게되는 물체에 관한 정보  $M_1$  및 이 양자(兩者)를 잇는 상호작용 과정에 관한 올바른 이론  $T$ 가 알려지면

표 3. 基本的인 放射線關係量과 單位

量	摘用放射線種	定義物質	定義概念	價用單位	SI單位	問題點
照射線量	X線, $\gamma$ 線	空氣	一定質量空氣와의 相互作用으로 생긴 ion雙의 數	R(Roentgen)	$C \cdot kg^{-1}$	極低에너지 및 高에너지 영역에서의 電子平衡不足
吸收線量	모든 電離放射線	모든物質	入射한 電離放射線에 의하여 物體에 吸收된 에너지의 單位質量當의 比	rad	Gy(gray) ( $J \cdot kg^{-1}$ )	靜止質量變化除外? 摘用空間(특히 微視的인 경우)?
Kerma	間接電離放射線	모든物質	一定物質內에 발생한 荷電粒子的 初期운동 에너지의 總合	rad	Gy(gray) ( $J \cdot kg^{-1}$ )	測定方法不完全
線量當量	모든 電離放射線	人體	放射線防護目的으로 人體에 미치는 효과를 等量化하기 위하여 定한 便宜의約束	rem	Sv(sivert)	線質因子(Q) 및 其他修正因子 측정 곤란 효과의 個體差
放射能	모든 放射性核種	放射性物質	放射性物質의 當核崩壞數	Ci (Curie)	Bq(beck- ereI) ( $s^{-1}$ )	核種마다 測定定量方法이 다름
粒子放出率	모든 電離放射線粒子	없음	單位時間當放出되는 粒子數	$s^{-1}$	$s^{-1}$	
線束密度	모든 電離放射線	없음	單位時間當 任意空間의 單位面積을 지 나는 粒子數	$cm^{-2}, s^{-1}$	$m^{-2}s^{-1}$	

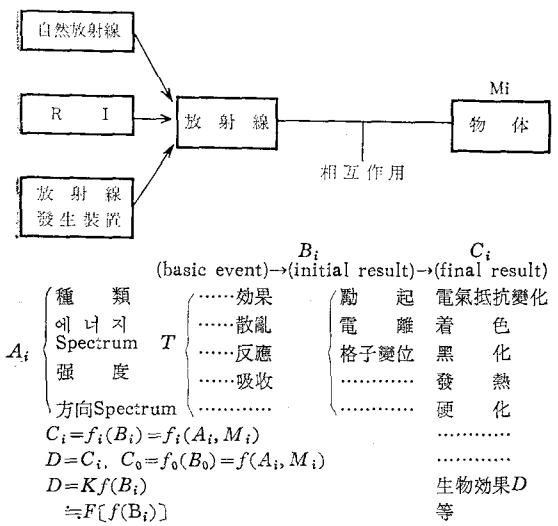


그림 4. 放射線量測定關聯圖

원리적으로는 그 효과를 알아낼 수가 있다.

그러나 상호작용중에서 initial event  $B_i$ 와 final event  $C_i$  사이의 이론적 관계는 매우 복잡한 뿐 아니라 알려져 있지 않은 것이 많으며 특히 생물효과  $D$ 에 관한

여서는 그것을 알아낸다는 것이 거의 불가능한 상태에 있다. 설사 어느 정도 그 관계가 알려졌다 하더라도 그 평가를 위한 측정은 매우 번잡하며 노력에 비하여 오차가 너무 크다. 그래서 상호작용  $B_i$ 와  $C_i$  ( $D$ 포함) 사이에 어떤 함수관계를 상정(想定)하여 이것이 복측하는 범위안에서 비례관계가 성립한다면 거의 그 목적을 달성한다고 보는 것이다. 이것이 방사선량 측정의 기본 개념인데 그 중에는 특히 측정이 용이한 효과  $C_0$ 를 대표로 취하여 그것을 실용적인 측정법의 하나로 쓰는 경우도 많다.

방사선의 "양"(quantity)이나 "강도"(intensity)의 개념은 방사선이 통과하는 것이 매질 유무에 관계없이 그곳을 흐르는 방사선이 운반하는 에너지의 양, 그 자체에만 초점이 놓여진 가장 기본적이고 추상적 개념이다. 이에 반하여 방사선량(dose)의 개념은 방사선 그 자체에 관한 개념이 아니라 방사선과 그것에 조사된 물질과의 상호작용에 의하여 그 물질에 미치는 어떤 물리적 영향의 정도(程度)에 그 기초가 놓여진 개념이다.

이 물리적 영향으로 구체적으로 무엇을 택할 것인가가 문제인데 그것으로는 방사선의 종류나 에너지에 관계없이 일의적으로 정의(定義)되고, 내부 모순없이 보

편적인 물리적 의미를 가지며, 그러면서도 신속히 정밀하게 측정가능한 물리적 수단이 쓰이는 그런 것이 바람직하다.

역사적으로는 X선,  $\gamma$ 선에 대하여 R 단위로 표시되는 조사선량(exposure)이라든가, 모든 방사선에 적용되는 흡수선량(absorbed dose) 등이 채용되고 있다.

계측표준의 대상이 되는 방사선관계의 기본적인 양과 단위는 표 3에 나타낸 바와 같다.

### 3. 조사선량표준

조사선량은 질량이  $dm$  인공기의 체적소내에서 입사광자에 의하여 유리된 전자(음전자 및 양전자)가 공기내에서 완전히 정지되었을 때 공기내에 생성한 한쪽부호의 총전하의 절댓값이  $dQ$ 라고 하면

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

로 정의하는데 이양을 나타내는 특수단위로 roentgen (R)을 쓴다. 1R은

$$1R = 2.58 \times 10^{-4} \text{Ckg}^{-1}$$

이며 이것을 다른 말로 바꾸면 “X선 또는  $\gamma$ 선이 공기와 상호작용한 결과 공기 0.001293g (1기압, 0°C의 건조공기 1cc의 질량)당 생성된 이차전자(二次電子)가 완전히 정지할 때까지에 발생시킨 ion 쌍의 총전하가 정(正), 부(負) 각각 1 esu일 때”의 X 또는  $\gamma$ 선의 양을 1R이라고 하는 것이다. 이와 같이 정의된 조사선량의 표준측정에는 다음과 같은 관련인자들과 측정기기가 있다.

#### 3-1) 관련인자

##### (1) 상호작용의 종류

광전효과( $\tau$ )                    저(低)에너지 영역에서 현저함  
Compton효과( $\sigma$ )                수백 keV에서 최대가 됨.  
전자쌍 생성( $\kappa$ )                1.02MeV이상에서 생김  
이 세가지 종류의 상호작용이 일어나는 확률을 에너지의 함수로 나타낸 것이 그림5<sup>3)</sup>이다.

##### (2) 전자의 비정(飛程)

1기압의 공기속에서  
10keV ~ 1mm  
100keV ~ 10cm  
1MeV ~ 3m  
10MeV ~ 40m

(cf. 공기 1cm = 1.293mg/cm<sup>3</sup> / 1.293mg/cm<sup>3</sup>)

##### (3) 전자평형(電子平衡)

어떤 공간에서 정지되는 이차전자의 수와 그곳에서 발생되어 다른 공간으로 나가는 이차전자의 수가 같아

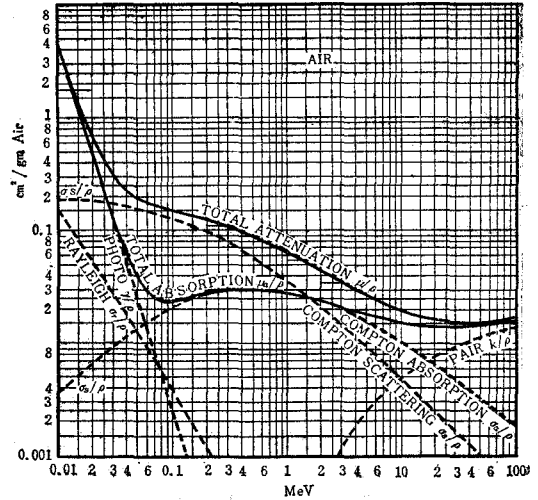


그림 5. Mass attenuation coefficients for photons in "air" taken as 78.04 volume percent nitrogen, 21.02 volume percent oxygen, and 0.94 volume percent argon. At 0°C and 760mmHg pressure, the density of air is  $\rho = 0.001293 \text{ gm/cm}^3$ . From Evans (1968).

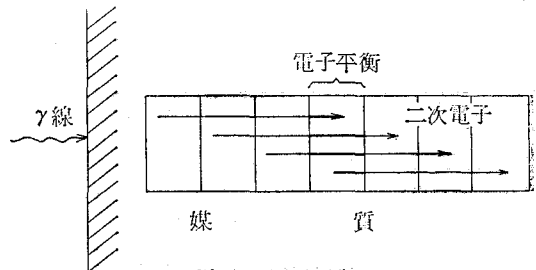


그림 6. 電子平衡

평형에 도달한 상태를 말하며 그림으로 표시하면 그림 6과 같다.

이와 같은 전자평형상태를 이용하면 공기 1cc에서 발생된 이차 전자 그 자체가 공기중에 만든 ion쌍을 모으는 대신 공기 1cc중에 존재하는 ion쌍을 전부 모으면 바로 같은 값이 된다. 그러나 이와 같이 알맞은 상태는 광자의 에너지가 커지면 성립되기 어렵다. 왜냐하면 일차광자의 에너지가 크면 거기서 발생하는 이차전자의 비정이 커지므로 전자평형상태를 얻으려면 전리함의 부피가 그만큼 커져야 한다는 것이 첫째 이유이고, 둘째로는 입사광자의 에너지가 커지면 전자쌍 생성의 확률이 커져 소멸광자의 기여가 많아지기 때문이다.

수 MeV 이상의 광자에 대한 조사선량 측정에는 전자평형의 부족에 의한 오차가 점점 크게 되는데 그것은 3MeV의 경우 2%, 10MeV의 경우는 5%, 30MeV

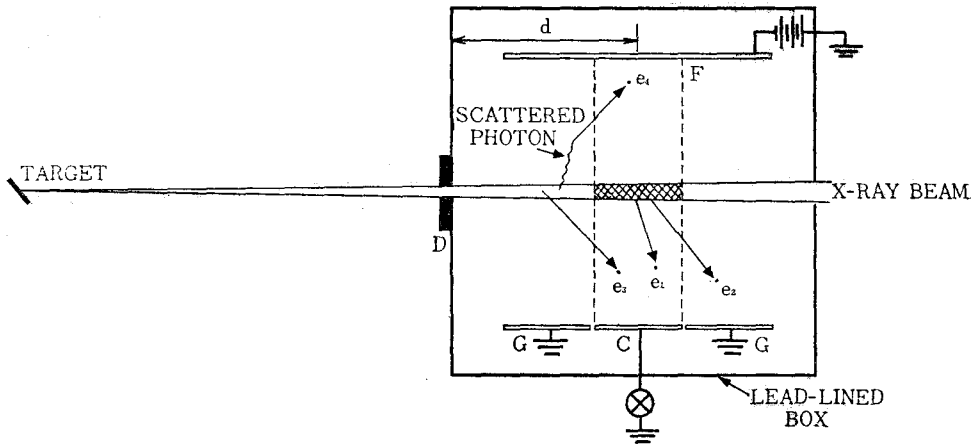


그림 7. 平行平板型自由空氣電離函

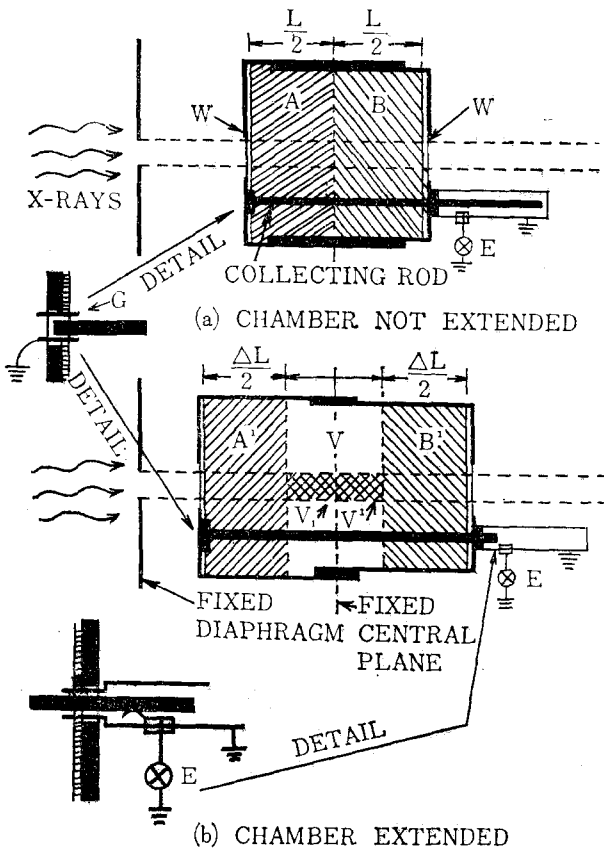


그림 8. The proposed new type of free-air chamber. The defining aperture and the mid-plane of the chamber both remain fixed with respect to the x-ray beam.

광자의 경우에는 10%에 이르고 있으므로 이점을 유의해야 하며 실제로 수 MeV 이상의 광자와 수 keV 이하 광자에 대한 조사선량측정에는 아직까지 기술상의

의 어려움이 상존하고 있다.<sup>2)</sup>

### 3-2) 자유공기전리함(Free Air Ionization Chamber)

자유공기전리함은 roentgen의 정의를 실현할 수 있도록 설계한 전리함으로 X선 또는 저에너지  $\gamma$ 선의 조사선량 측정의 일차표준 기기로 사용되고 있다.

자유공기전리함에는 평행평판형(parallel plate type)과 원통형(cylindrical type)의 두가지가 있는데 이들은 모두 주어진 에너지 영역에서 전자평형 조건을 만족시키도록 설계제작 되어 있다.

#### (1) 평행평판형 자유공기전리함

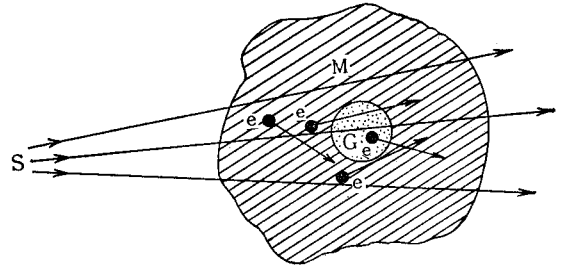
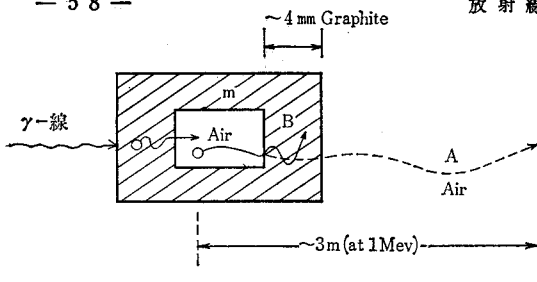
평행평판형 자유공기전리함의 구성도는 그림 7<sup>2)</sup>과 같다. 같은 면에 있는 전극 G, C는 모두 접지(接地)되어 있으며 반대편에 있는 전극 C에는 electrometer가 연결되어 입사방사선에 의하여 발생된 ion의 전하를 측정하도록 되어 있다. Guard plate G와 endguarding 전극 F에 의하여 두 전극판 사이에 균일한 전장(電場)이 만들어지고 이 전장은 곧 측정하고자 하는 ion이 모여지는 영역을 형성하도록 설계되어 있다. X선이 입사하는 aperture size A와 수집전극의 길이 L로 결정되는 체적 V내에는 전자평형이 이루어지도록 설계 제작되었으므로 이 체적내의 전리전하를 측정함으로써 입사방사선의 조사선량을 측정하는 것이다.

이와 같은 전리함에 의한 조사선량을 표준측정할 경우 반드시 고려하여야 할 보정인자들이 있는데 그것은 다음과 같다.

#### a) 유효전리용적

R단위는 1기압 0°C의 전조공기에 대하여 정의된 것이므로 전리용적 V는

$$\left(\frac{273.16}{T}\right) \left(\frac{P-0.238 P_1}{760}\right) V$$



M : 吸收體  
 G : 電離氣體空洞  
 S : 入射放射線  
 e : 二次電子

그림 11. Bragg-Gray의 空洞原理

차광자 즉 산란광자에 의하여 생성된 전자의 기여는 측정되지 말아야 하며 전극판 사이의 불충분한 spacing에 의하여 이차전자가 발생시킨 전리전하가 손실될 수가 있는데 이것들에 관한 보정이 행해져야 한다.

d) Aperture-전극 사이의 감쇄보정

조사선량은 전리함의 aperture 위치의 것을 측정하고자 하나 실제 측정되는 것은 이곳에서  $d$ 만큼 떨어진 전극에서 측정되므로 이 구간에서의 입사광자의 감쇄에 대한 보정을 해주어야 한다. 그 보정인자는  $e^{\mu d}$ 이 될 것인데 여기서  $\mu$ 는 입사광자에 대한 공기의 선형감쇄계수이다.

e) 기타보정인자

그밖에 ion 재결합에 대한 보정인자들이 있으나 몇 개의 경우 이것들은 무시할 수 있는 인자들이다.

이 모든 인자들을 고려해 주면 결국 조사선량을( $R/sec$ )은

$$\dot{X} = \left( \frac{3 \times 10^9}{A \cdot L} \right) \left( \frac{T}{273.16} \right) \left( \frac{760}{P - 0.238 P_1} \right) \cdot \left( \frac{100}{100 + K} \right) \left( \frac{100}{100 + f} \right) C \frac{\Delta v}{t} e^{\mu d} \dots \dots (1)$$

된다. 여기서  $K(\%)$ 는 전리함내에서의 전자손실과 이차광자에 의한 전자생성의 합을 전(全) 이차전자수로 나눈 비율이고,  $f(\%)$ 는 전장의 distortion에 의한 electron gain을 전(全) 이차전자수로 나눈 비율이며,  $C$ 는 collecting region에서의 capacitance (frad),  $\Delta v / \Delta t$ 는 electrometer에서의 balancing potential의 시간변화율이며  $A \cdot L = V$ 이다.

(2) 원통형자유공기전리함

원통형 자유공기전리함의 개요는 그림 8에 나타낸바와 같다. 이 자유공기전리함도 앞에서 언급한 전리함의 경우와 작동원리는 마찬가지로이나 수집전극이 평판이 아니라 봉(棒)으로 되어 있어서 평판형전리함의 경우에 고려해 주어야 하는 전장 distortion에 대한 보정이 불필요하게 될 것이며, 유효전리용적을 전체원통

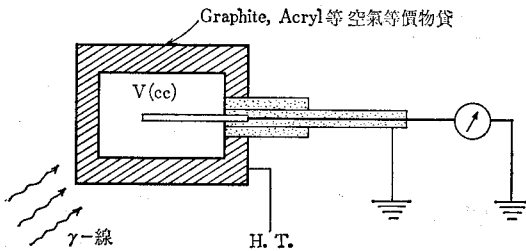
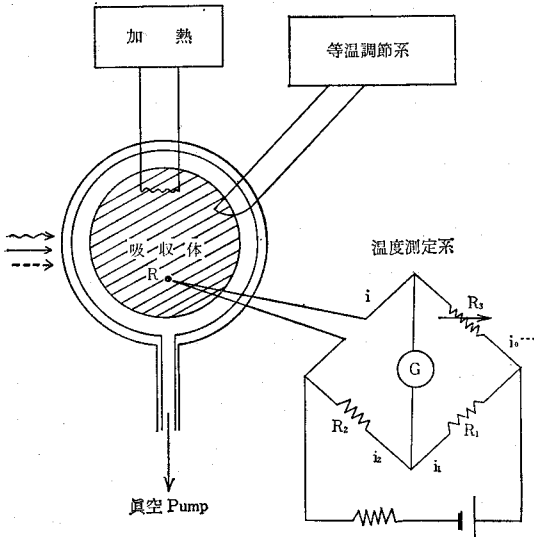


그림 9. 空洞電離函



$G=0$ 면 (at balance)

$$\left. \begin{matrix} i_1 R_1 = i_2 R_3 \\ i_2 R_2 = i_1 R_4 \end{matrix} \right\} i_1 = i_2, \quad i_3 = i_4 \Rightarrow R = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}$$

그림 10. Calorimeter 原理圖

로 보정되어야 한다. 여기서  $T$ 는 공기의 온도(kelvin),  $P$ 는 대기압(mmHg),  $P_1$ 은 대기중 수증기압(mmHg)이다.

b) 전장

이 요인은 전극과 접지된 외부 보호상자 사이 guard wire 또는 strip 사이에서 생기는 distortion 및 수집전극과 guard plate의 misalignment에 의한 distortion 등에 기인하는 것이다.

c) 전자손실 및 산란광자의 기여

조사선량은 입사광자에 대하여 정의된 것이므로 이

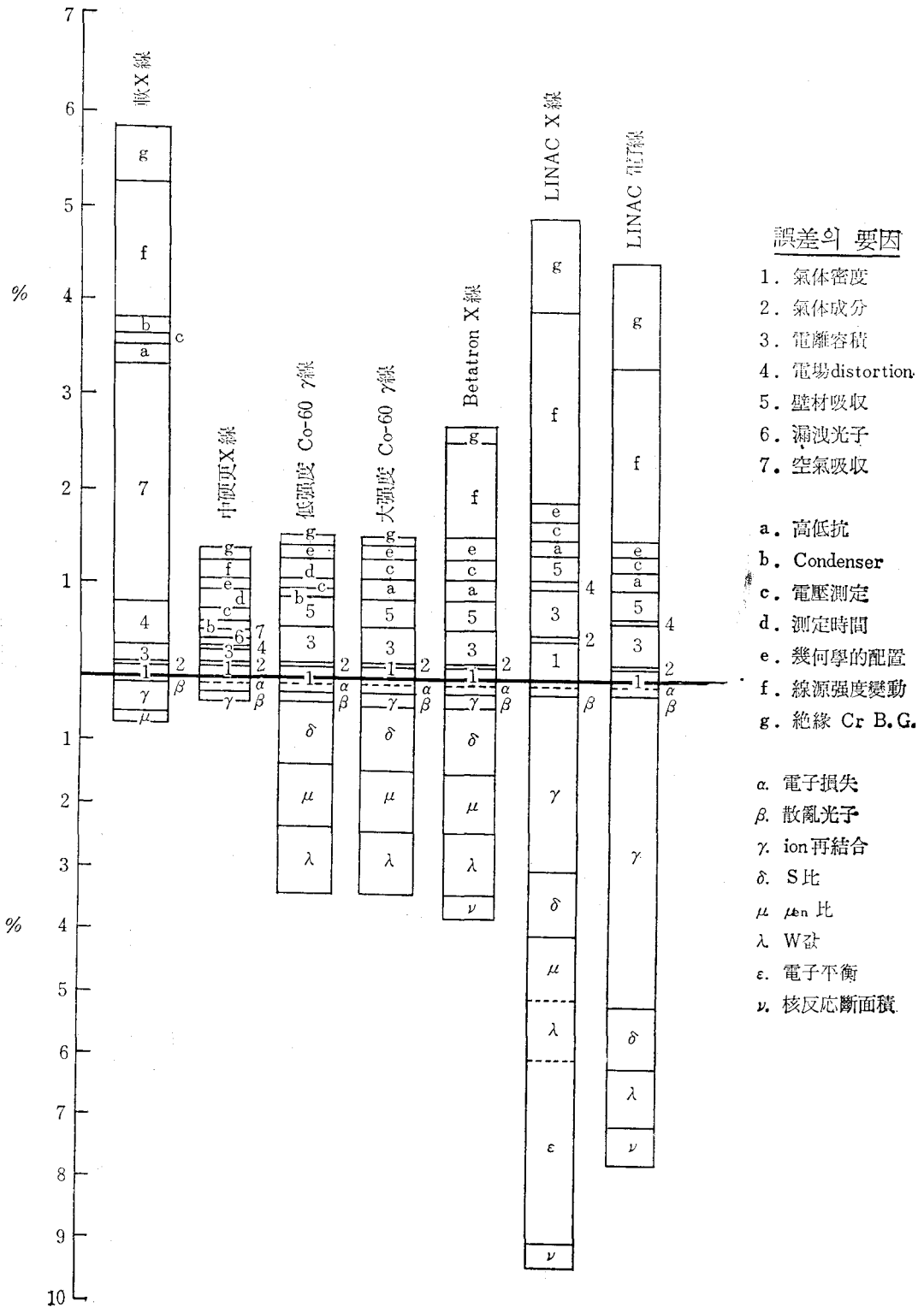


그림 12. 線量絕對測定の 誤差

方法	現象	檢出體	測定可能範圍 DOSE → R (rad H <sub>2</sub> O)	範圍 DOSE RATE → R/S (rad/S H <sub>2</sub> O)	FADING 24hr	1 Mev ~50Kev の 感度変化	備考		
相對的方法	吸光度変化	Glass	Ag-phosphate Co-borosilicate		> ±10% < ±2%	20 ~7	常時較正必要		
		Plastic	Polymethyl metacrylate Polyvinyl Clovide Polystyrene		< ±5% > ±10% > ±10%				
	螢光	Dye	Red perspex Dyed cellophane		< ±5% < ±2%				
		Photoluminescence	High Z phosphate Low Z "		> ±10% > ±10%	20 ~7			
	電流(圧)	Degradation of Luminescence	Anthracene P-Quaterphenyl		< ±2% < ±10%	~1			
			CaSO <sub>4</sub> : Mn LiF		< ±5% < ±5%	~7			
		Semi Conductor	Si, Ge, GaAs, [10 <sup>-9</sup> Amp/1 (R/min)]			6			
	絕對的方法	化學	Solar Cell (Si)	光電圧 [10 <sup>-2</sup> mV/1 (R/min)] 光電流 [10 <sup>-8</sup> Amp/1 (R/min)]					常時較正不要
			Crystal	CdS [5 × 10 <sup>-6</sup> Amp/1 (R/min)]				50	
		發熱	Fricke		平均値	< ±5%			
電離		Calorimeter Ion Chamber		平均値		~1 ~1			

再現性 誤差 < ±2% < ±5% < ±10% > ±10%

図 13. 各種實用的 吸收線量測定方法の範圍



의 용적을 좌우 또는 앞뒤로 변화시킴으로써 구하게 된 점이 다를 뿐이다.

3-3) 공동(空洞)전리함(cavity chamber)

수백 keV 이상의 에너지를 가진 광자선속(光子線束)에 대하여서는 보통의 자유공기전리함을 사용할 수 없다. 왜냐하면 이차전자의 비정이 수 m에까지 이르기 때문이다. 그래서 공기벽(空氣壁) 대신에 적당한 고체벽(공기 등가물질)을 사용한 공동전리함이 사용된다. 그렇지 않은 경우에는 공기를 사용하지 고압공기(10~20 기압)를 사용한 소위 pressurized air ionization chamber를 쓴다. 그림 9는 조사선량 표준측정용 공동전리함의 개요도이다. 이 공동전리함을 사용하여 조사선량을 구할 때에는

$$\dot{X}(R/hr) = \frac{i \times 3 \times 10^9 \times 3600}{V} \cdot \frac{T \times 760}{273.16 \times P} \cdot (1+a) \frac{w}{a} \frac{S_m}{S_m} \cdot \frac{a \mu_{en}}{w \mu_{en}} \dots \dots \dots (2)$$

로 계산한다. 여기서  $(1+a) = e^{a^d}$ 는 전리함벽(壁)에 의한 일차광자의 흡수보정항,  $S_m$ 는 전자에 대한 mass stopping power (단위 g/cm<sup>2</sup>당 에너지 손실율과 같음)이고  $\mu_{en}$ 는 광자에 대한 에너지 흡수계수(입사된 광자에너지중 전리나 여기에 소모되는 에너지로 전환되는 확률을 나타냄)이다.

4. 흡수선량절대측정

4-1) 열량계법(calorimetry)<sup>7)</sup>

전리나 여기에 의하여 물질내에 흡수된 에너지가 최종적으로는 열에너지로 바뀌어 그 물질의 온도상승을 가져오는 결과를 응용한 것으로 결정격자의 변위, 분자의 중합, 결합자의 파괴등에 소비되는 경우의 미량의 에너지 흡수를 제외한다면 이 방법은 가장 원리적인 방법이라고 말할 수 있으나 실제로는 노력이 많이 들고, 많은 시간을 요하며, 높은 정밀 정확도의 결과를 내기 위하여서 대단한 기술적 노력이 요구된다. 일례로 단열형 calorimeter의 개략도를 그림 10에 나타내고 그 원리를 간단히 설명하기로 한다.

열적(熱的)으로 고립되어 있는 물체에 방사선이 조사되면 흡수된 방사선이 물체내에서 열로 변환되어 그 물체의 온도를 변화시킨다. 방사선이 조사되는 흡수체의 질량을  $\Delta m$ , 방사선 흡수로 인하여 발생된 열에너지를  $\Delta E_h$ ,  $\Delta m$ 에 투여된 흡수에너지를  $\Delta E_a$ 라고 하면  $\Delta m$ 내의 흡수선량  $D$ 는

$$D = \frac{\Delta E_D}{\Delta m} = \frac{\Delta E_h}{\Delta m} + \frac{\Delta E_s}{\Delta m}$$

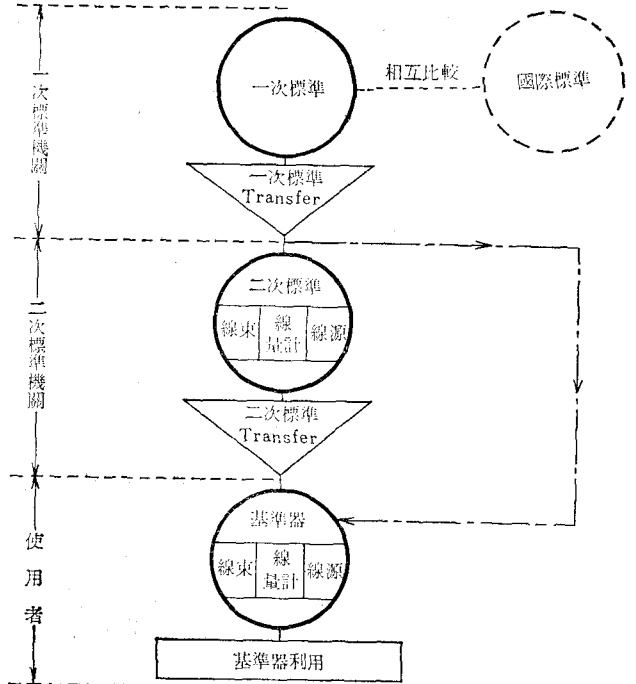


그림 14. 放射線標準體系

$$= C_p \Delta T + \frac{\Delta E_s}{\Delta m} \dots \dots \dots (3)$$

$$\left( \frac{\Delta E_s}{\Delta m} = C_p \Delta T \right)$$

로 주어진다. 여기서  $\Delta E_s$ 는 heat defect를 나타내는데 이것은 흡수체의 성질에 따라 +또는-의 값을 가질 수 있다.  $C_p$ 는 흡수체의 specific heat capacity이며  $\Delta T$ 는 조사된 방사선에 의하여 발생한 흡수체의 온도변화량이다.

실제로 이방법으로 흡수선량을 측정하는데는 흡수체의 물질선정, heat defect, 구조상의 비균질성등, 사전에 연구하여야할 여러가지의 기술적인 인자들이 있다.

4-2) 전리법-공동전리함

이방법은 소위 Bragg-Gray의 공동이론(cavity theory)<sup>8)</sup>을 응용한 것으로 흡수선량을 구하고자 하는 물질로 둘러싸인 기체내에 발생하는 ion쌍을 측정하여, 따로 구해 놓은 기체와 물질 각각의 전자에 대한 저지능(阻止能)의 비(比)를 적용하여 계산함으로써 그 물질내에 흡수된 에너지의 양을 알아내는 방법이다. 이 경우 공동내 기체의  $\bar{W}$ 값을 미리 알고 있어야 한다.

지금 적당한 두께의 벽체물질(壁材物質)(흡수선량을 측정하고자 하는 물질)에 둘러싸인 미소공동내에 있는 전리기체에 외부에서 방사선이 입사하였다고 한다(그림 11 참조). 이때 기체의 단위체적에 대하여 단위시간당

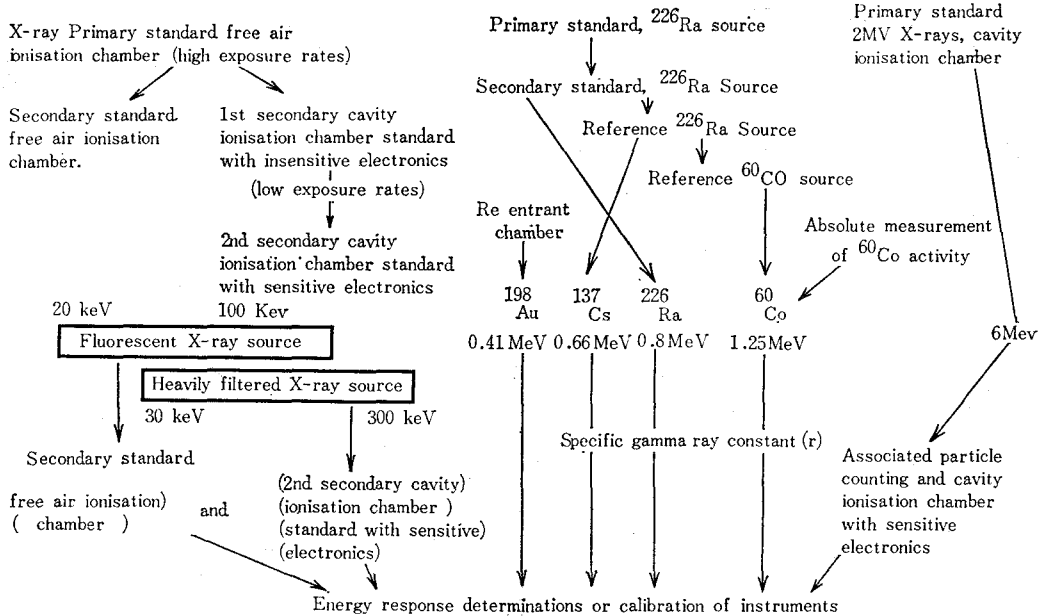


그림 15. Schematic diagram of X- and  $\gamma$ -sources and their standards.

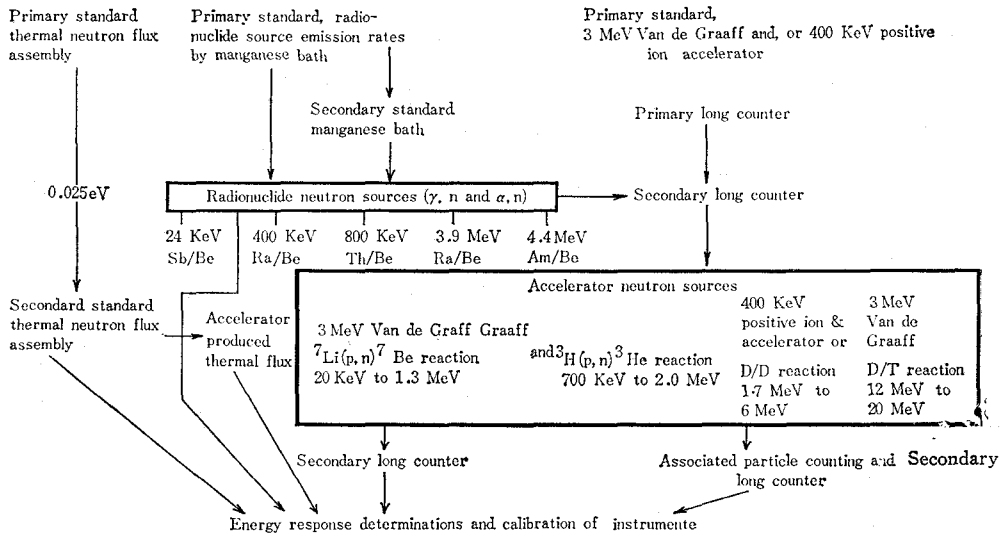


그림 16. Schematic diagram of neutron sources and their standards.

$J$ 개의 ion쌍이 발생되는데 1개의 ion쌍발생에 요하는 평균에너지를  $\bar{W}$  erg라고 하면 벽체물질의 단위체적당 단위시간에 흡수되는 에너지  $E$  erg는

$$E = SJ\bar{W} \dots \dots \dots (4)$$

로 표현된다. 여기서  $S$ 는 이차전자에 대한 벽체물질의 저지능과 전리기체의 저지능의 비이다. 이것을 물질과 기체의 질량저지능으로 표시하면

$$\left( S = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE}{dx} \right)_m / \left( \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE}{dx} \right)_g \dots \dots \dots (5)$$

된다. 이것이 Bragg-Gray의 공동 이론의 골자이다. 단, 이법칙이 성립되기 위하여서는 다음 네가지 조건이 만족되어야 한다. ① 공동의 크기는 기체내에서의 이차전자의 비경보다 작아야 한다. ② 공동을 둘러싼 물질의 두께는 그 속에서의 이차전자의 최대비경과 같거나 그보다는 두꺼워야 한다(하전입자 평형조건). ③ 물질내에 입사하는 방사선이 현저하게 감쇄되어 버려서는 안된다. ④ 양자(兩者)의 저지능비  $S$ 는 이차전자의 속도에는 무관하여야 한다는 것등이다.

표 4. 放射線量 標準計測 機器裝置

標準對象量	單位	標準測定裝置	線 源	
照射線量	R	— 軟X線標準電離函 (Soft X-ray Free Air Chamber)	—5~50keV X線發生裝置	
		中硬X線標準電離函 (Medium X-ray Free Air Chamber)	—30~300keV X線發生裝置	
		γ線標準電離函 (Cavity Ionization Chamber)	—0.4~3MeV 標準 γ線源	
吸收線量	rad(Gy)	— 熱量計型吸收線量測定裝置 (Calorimeter)	$^{138}\text{Au}$ 1Ci $^{137}\text{Cs}$ 1Ci $^{226}\text{Ra}$ 100mg $^{60}\text{Co}$ 1Ci 2~30MeV線型加速器	
		外挿電離函 (Extrapolation Chamber)		— $^{60}\text{Co}$ 1~3KCi 2~30MeV LINAC
		Hurst型 標準比例計數管 (Hurst "Absolute" Proportional Counter)		— 標準中性子線源
中性子放出率	$\text{n}\cdot\text{s}^{-1}$	— 誘導放射能形熱中性子標準測定裝置 (Induced Activity Measurement System) 固體飛跡測定 (Solid State Nuclear Track Detector)	標準中性子線源 $\text{Ra-Be}$ 1Ci $\text{Am-Be}$ 1Ci 標準 Graphite pile $(10^9\sim 10^{10}\text{n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ 熱中性子發生裝置 $(10^6\sim 10^9\text{n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ 速中性子束密度標準 $(0.7\sim 3\text{MeV Van de Graaff})$	
中性子線束密度	$\text{n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$			

표 5. 放射能 標準計測 機器裝置

標準對象量	單位	標準測定裝置	主要附帶裝置
放射能	Ci(Bq)	2π 比例計數式 α 放射能絕對測定裝置 (2π Proportional α Counting System)	Si 表面障壁型半島體 α 線 Spectrometer β 線 Spectrometer
		4π β 放射能絕對測定裝置 (4πβ Counting System)	NaI (Tl) 및 Ge(Li) γ 線 Spectrometer
		4π β-γ 同時計數式 放射能絕對測定裝置 (4π β-γ Coincidence Counting System)	眞空蒸着裝置
		4πβ 液體閃光式放射能絕對測定裝置 (4πβ Liquid Scintillation Counting System)	

실제의 측정에서는

$$\begin{aligned}
E_m(\text{erg/g}) &= \frac{J_m}{M} (\text{esu/g}) \bar{W}_m (\text{ev/ion}) \\
&\times 1.6 \times 10^{-12} (\text{erg/ev}) \\
&\times \frac{1}{4.8 \times 10^{-10}} (\text{ion/esu}) \\
&= 3.34 \times 10^{-5} \frac{J_m}{M} \bar{W}_m (\text{rad}) \\
&= 3.34 \times 10^{-5} \frac{m S_M}{m S_g} \cdot \frac{J_m}{g} \bar{W}_g (\text{rad}) \quad (6)
\end{aligned}$$

로 계산된다. 여기서 suffix *m*은 흡수체를 *g*는 공동내 기체를 나타내며 *M*은 흡수체의 총질량이다.

### 4-3) 화학선량계(chemical dosimeter)<sup>9)</sup>

방사선이 물질내에 입사됨에 따라 전리, 여기과정을 거쳐 화학적으로 활성화된 핵종을 생성하는 경우가 있는데 이때 생성된 화학변화량으로부터 흡수선량을 측정하는 방법이 있다. 특히 수용액의 화학반응이 잘 알려져 있는데, 물은 방사선(하전입자선)에 의한 분해결과 H와 OH의 유리기(遊離基)나 H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>의 분자를 생기게 하고 이것들이 이르는 화학반응에 의한 생성물의 양을 측정하여 흡수선량을 산출한다.

표준적인 화학선량계는 Fricke 선량계인데 이선량계의 적용선량 범위는 4,000—40,000rad이고 적용선량의 범위는 0.1—4,000rad/s 정도이다.

이 선량계는 γ선 조사에 따라 발생하는 고속전자선에 의하여 황산제 1철용액의 산화, 즉 2가의 철 ion (Fe<sup>2+</sup>)이 3가 ion (Fe<sup>3+</sup>)으로 변화되는것을 이용한 것으로 조사후의 제 2철 ion의 농도를 측정하여 흡수선량을 산출한다. 표준용액은 0.001M의 FeSO<sub>4</sub> 또는 Fe(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)를 0.8N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>에 용해시킨 것을 쓰는데 용액속에서의 반응은 다음과 같이 나타난다.

- a) Fe<sup>2+</sup> + OH → Fe<sup>3+</sup> + OH<sup>-</sup>
- b) H + O<sub>2</sub> → HO<sub>2</sub>
- c) Fe<sup>2+</sup> + HO<sub>2</sub> → Fe<sup>3+</sup> + HO<sub>2</sub><sup>-</sup>
- d) HO<sub>2</sub><sup>-</sup> + H<sup>+</sup> → H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>
- e) Fe<sup>2+</sup> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> → Fe<sup>3+</sup> + OH + OH<sup>-</sup>

한편 방사선에 의한 100eV의 흡수에너지당 생성 또는 변환되는 분자수를 *G*값이라고 하는데 Fricke 선량계의 제 2철 ion이 생성되는 *G* 값, *G*(Fe<sup>3+</sup>)는 *G*<sub>e</sub>(Fe<sup>3+</sup>) = *G*<sub>OH</sub> + 3*G*<sub>H</sub> + 2*G*<sub>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></sub>의 형으로 나타난다. <sup>60</sup>Co γ선에 대한 *G*(Fe<sup>3+</sup>)는 15.5인데 이값은 16MeV 정도의 γ선까지는 거의 에너지에 무관하다. 조사용기로는 화학적안정성이 좋은 석영(石英) 유리나 pyrex 유리의 cell을 쓴다. 3가의 철 ion을 정량하는때는 일반적으로 분광광도계를 사용하는데 한쪽 석영 cell에는 참조용

용액(0.8N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)을 넣고 다른 하나에는 Fricke 용액을 넣어 흡광도(吸光度)의 차이를 304nm의 파장에서 측정한다.

Fricke 용액의 흡수선량 *D*는 흡광도의 차 Δ*A*로부터 다음과 같이 계산한다.

$$D = \frac{N \cdot \Delta A}{G \epsilon \rho l} \times 1.602 \times 10^{-15} (\text{rad}) \dots \dots \dots (7)$$

여기서 ε는 제 2철 ion의 분자흡광계수로 2205 [1 + 0.0069(T-25)] M<sup>-1</sup>cm<sup>-1</sup>이고 (T는 용액의 절대온도), *l*은 분광광도계의 흡수 cell내의 광로(光路) 길이(cm), *N*은 Avogadro수, ρ는 용액의 밀도이다. G=15.5 25°C의 경우에는

$$D = 2.72 \times 10^4 \frac{\Delta A}{l} (\text{rad})$$

된다. *G*값의 온도의존성은 1°C당 0—0.09%정도이다.

## 5. 선량측정에서의 오차

일반적인 대상이 되고 있는 X, γ선에 대하여 에너지나 강도에 따라 대략 이를 분류하고, 그 각각에 대하여 적당한 방법으로 절대측정할 경우 개재되는 오차를 실험상 또는 이론상(사용한 물리정수의 부정확성등)의 작오차요인으로 대별하여 그림으로 표시한 것이 그림 12이다.<sup>10)</sup>

한편 선량측정의 여러가지 실용적인 방법과 그 방법들이 cover할 수 있는 선량 및 선량률 범위와 재현성의 오차등을 한눈에 알아볼 수 있게 정리하여 놓은 것은 그림 13이다.<sup>4)</sup> 이 그림을 통하여 각종 선량측정방법의 유용성과 장단점을 측정목적에 따라 쉽게 판단할 수가 있을 것이다.

## 6. 방사선량 표준체계

방사선 계측분야에 있어서 계측표준의 일반적인 체계는 그림 14와 같다. 방사선관계량에 대한 국가일차표준에는 원기(原器)가 없으며 국제도량형국(BIPM)이나 미국의 표준국(NBS), 영국의 국립물리학연구소(NPL) 등 국제표준과의 측정치의 상호비교를 통하여 국제적인 인정을 받음으로써 비로서 국가일차표준의 기능을 발휘하게 된다. 현재 그 정밀정확도 수준은 표준측정대상량이나 선량률, 방사능의 경우는 대상핵종등에 따라 다르나 대체로 조사선량의 경우 0.5—1%, 흡수선량은 1—2%, 방사능은 0.5—2% 범위에 머무르고 있다.

이와 같은 국가일차표준을 유지하고 발전시키는 국가표준기관은 이차표준기관에 대한 바로 상위의 소급기관(溯及機關)이 되며 이 두 기관사이의 소급성(溯及性-traceability)은 표준조사(照射) 또는 표준선원(線源) 등 transfer instruments를 통하여 연결된다. 대부분의 검교정용 기준기의 교정은 이차표준 기관에서 행하게 되며 현장에서 쓰이는 각종 실용측정기기들은 교정용 기준기를 통하여 교정하는 것이 보통이다. 방사선의 표준체계는 이상에 언급한 바와 같거나 방사선의 국가일차표준 기관이 갖추어야 할 주요기기 장치들을 살펴보면 표 4 및 표 5와 같다.

한편 방사선량측정기기의 검출감도는 일반적으로 측정대상 방사선의 에너지에 크게 의존하므로 일차표준계측뿐 아니라 이차표준 내지 기준기를 사용한 측정에 있어서도 가급적 넓은 범위의 에너지 영역을 cover 할 수 있는 선원의 확보가 필수적이다. 이와 같은 목적을 달성하기 위하여 갖추어야 할 X,  $\gamma$ 선원과 중성자선원의 대표적인 에너지별 배열이 그림 15와 그림 16에 각각 도시(圖示) 되어 있다.<sup>11)</sup>

### 참 고 문 헌

1. Y. Moriuchi: Standard Measurement Method of Radiation Quantities, Training Text, National Institute of Radiological Sciences, Chiba, Japan (1969)
2. ICRU Rept. 33 : Radiation Quantities and Units, ICRU, Washington, D.C. (1980)
3. R.D. Evans: X-ray and  $\gamma$ -ray Interactions, in Radiation Dosimetry Vol. I (F.H. Attix and W.C. Roesch ed.), Academic Press, New York (1968)
4. Y. Moriuchi: Bulletin of ETL 38, 259 (1974)
5. H.O. Wyckoff and F.H. Attix: NBS Handbook 64, Design of Free-Air Ionization Chambers, US NBS (1957)
6. F.H. Attix: NRL Rept. 5646, Electronic Equilibrium in Free-Air Chambers and a Proposed New Chamber Design, US NRL (1961)
7. J.S. Laughlin and S. Genna: Calorimetry, in Radiation Dosimetry II (F.H. Attix et al. ed.), Academic Press, New York (1966)
8. T.E. Burlin: Cavity-Chamber Theory, in Radiation Dosimetry I (F.H. Attix et al. ed.), Academic Press, New York (1968)
9. H. Fricke and E.J. Hart: Chemical Dosimetry, in Radiation Dosimetry II (F.H. Attix et al. ed.), Academic Press, New York (1966)
10. Y. Moriuchi: Nucl. Eng. (Jap.) 15(10), 29 (1969)
11. IAEA Tech. Rept. 133: Handbook on calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments, IAEA, Vienna (1971)