

라돈 및 토론

黑澤龍平

Ryuhei Kurosawa

早稻田대학 이공학 종합연구센터 교수

라돈은 우리들 환경에 널리 분포되는 천연의 방사성 기체이지만 일반적으로는 라돈은 천의 이름으로 널리 알려져 있다. 그러나 라돈과 그 자핵종은 α 선을 방출하며, 그 흡입에 의한 피폭선량은 항시 사람이 자연의 방사선원에서 받고 있는 피폭선량의 거의 1/2을 점유한다. 이것에 의한 실제적 재해는 볼 수 없지만, 피폭 실태를 파악할 필요에 따른 여러 측정기와 측정방법이 개발되어 있다. 그리고 실제로 이런 측정기나 측정방법을 사용할 경우에는 이러한 여러 관계를 알아둘 필요가 있기 때문에 그 점에 대해 설명하기로 한다.

1. 머리말

라돈은 86번째 원소로, 천연에 존재하며 α 선을 방출하는 유일한 불활성 기체이다. 천연에는 질량수 222, 220, 219의 세 종류 동위원소가 있어 각각 우라늄-238, 토륨-232, 우라늄-235를 최초의 핵종으로 하는 천연의 붕괴

계열인 우라늄계열, 토륨계열, 악티늄계열에 속해 있다. 천연에는 존재하지 않는 넵투늄계열에 속하는 라돈은 없다. 현재의 원소명은 라돈이지만 옛부터의 통칭은 각각 라돈(Rn), 토론¹⁾(Tn), 악티늄(Ac)이라 불리워지고 있다. 이하 혼란을 피하기 위해 특별한 단서가 붙지 않는 한 통칭으로 표시하기로 한다. 이러한 핵종의 반감기와 방출하고 있는 α 선의 에너지는 각각 3.82351 ± 0.00034 일, 5.486MeV : 55.61 ± 0.04 초, 6.282MeV : 3.96 ± 0.01 초, 6.824MeV 라 되어 있다. 수명이 긴 라돈이 광범위하고 높은 평균농도로 관측된다. 그리고 토론은 발생원에 가까운 좁은 범위에서는 높은 농도이지만, 주변으로 옮겨감에 따라 확산과 감쇠에 의해 낮은 농도로 된다. 악티늄에 이르러서는 관측하기조차 힘들어진다. 라돈의 밀도는 9.96 g/l , 비등점(沸騰點)은 -62°C , 용점(融點)은 -71°C 이고 또한 -62°C 에서의 밀도는 4.4 g/ml 라 전해지고 있다. 그러나 액체 라돈을 본 사람은 거의 없는 것으로 생각된다. 그리고 희(希)가스는 α 선에 의해 발광되기 때문에, 액체 라돈도 발광하지 않는가 라고 생각하는 사람도 있지만, 진위(眞僞) 여부는 알

1) Thron(Tn)토론 : 토론에마니온을 말하며 토륨계열에 속하는 radon 동위원소, 원자량 220, 반감기 54.5초, 원자기호(Tn)

수 없다. 에탄올·드라이아이스 한제(寒劑)는 -72°C 가 되어, 라돈의 액화온도는 간단히 실현되므로 이를테면 활성탄을 이 온도까지 냉각시켜 다량의 라돈을 흡착시키는 것이 가능하다.

라돈은 토양 안에 포함된 ^{226}Ra (라듐)에서 공급된다. 토양을 구성하고 있는 우라늄계 광물에 포함된 라듐에서 세란(細亂)을 경유하거나 또한 α 붕괴시의 급도(及跳)에 의해 라돈이 토양 안의 빈 틈을 통하여 지표(地表)에 이르러 공기중에 분산된다. 그 이동의 모습이 확산현상과 비슷하기 때문에 겔보기의 확산계수 $D\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ 에 의해 표시된다. D는 토양상태에 의해 현저히 변화하여 UN 과학위원회 보고(UNSCEAR)에서는 D의 값이 $10^{-7} \sim 3 \times 10^{-2}\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ 의 범위에 있고 대표적인 값은 $5 \times 10^{-3}\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ 이라 하고 있다. 필자가 측정한 예로는 $2 \sim 6 \times 10^{-3}\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ 였다. 지표에서 문체로 삼고 있는 빈 틈까지의 거리를 $X\text{cm}$ 라 한다면, 토양의 빈 틈안의 라돈 농도 $C_s\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-3}$ 은 근사적(近似的)으로

$$C_s = \frac{a}{\lambda} \left[1 - \exp\left(-\sqrt{\frac{\lambda}{D}} x\right) \right]$$

$$= C_{so} \left[1 - \exp\left(1 - \sqrt{\frac{\lambda}{D}} x\right) \right]$$

가 된다. 여기서 a는 빈 틈 안의 단위시간마다 유입하는 라돈의 양($\text{Bqcm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$)이며, 또한 λ 는 붕괴상수(崩壞常數)이고 $2.0982 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ 이다. a는 단위체적의 토양 안에 포함되는 라듐이 단위시간에 붕괴하는 양의 10~20% (UNSCEAR에서는 20%가 대표치)이다. 이것으로 지표에서 2.2m 정도의 깊이에서는 C_s 가 대략 포화(= C_{so})되어 있는 것을 알 수 있다. 토론의 경우에도 같은 관계로 있을 것이라 생각되지만 λ 가 $1.2464 \times 10^{-2}\text{s}^{-1}$ 이 되므로,

지표에서 3cm 미만에서 대략 포화농도에 달하고 있는 것으로 생각된다. 지표에서 단위시간에 공기중으로 산일(散逸)하는 라돈의 양 $F\text{Bqcm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 은 근사적으로 토양의 지표 부근에서의 라돈 농도구배와 겔보기의 확산계수의 곱이 된다. 즉

$$F = a \sqrt{\frac{D}{\lambda}} = C_{so} \sqrt{D\lambda}$$

가 된다. UNSCEAR에 의하면 평균적인 F의 값은 $1.6 \times 10^{-6}\text{Bqcm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 하고 있다. 이 경우 토양 안의 라듐농도는 0.03Bqg^{-1} 정도가 된다. 또한 C_{so} 가 같으면 토론에 대한 F의 값은 라돈의 77배에 달한다. 지표 부근의 라돈 농도 C_{ao} 는

$$C_{ao} = C_{so} \sqrt{\frac{D}{D_a}} = \frac{a}{\lambda} \sqrt{\frac{D}{D_a}}$$

으로 근사(近似)되어진다. 여기서 D_a 는 대기 중 라돈의 겔보기 확산계수이며, 대기가 온유(渦流)상태이므로 매우 크고, 또한 지표에서의 높이가 증가함에 따라 커진다. C_{ao} 가 같으면 라돈이나 토론도 같은 농도이지만 a가 같다고 가정하면 토론 농도는 라돈보다 낮아진다.

2. 라돈과 토론의 자핵종

자핵종은 Daughter Radionuclide의 역(譯)이지만 최근의 풍조로는 Daughter를 사용하지 않고 Progeny라 말하고 있다. 이것의 확정된 역(譯)은 없다. 라돈이나 토론도 여러개의 자핵종을 연속적으로 생성한다. 라돈의 경우는 라돈에서 순번으로 ^{218}Po (RaA), 3.040분(반감기): ^{214}Pb (RaB), 24.89 ± 0.003 분: ^{214}Bi (RaC), 19.71 ± 0.02 분: ^{214}Po (RaC), $163.7 \pm 0.2\mu\text{s}$ 초까지를 좁은 의미의 라돈 자핵종이라 말하고 있다. 이 다음의 ^{210}Pb (RaD), 반감기가 $22.26 \pm$

0.22년으로의 길기 때문에 앞에 말한 자핵종과는 상당히 다른 역할을 하는 것으로 생각되기 때문이다. 한편 토론의 경우는 ^{210}Po (ThA), $0.145 \pm 0.02\text{초}$: ^{212}Pb (ThB), $10.643 \pm 0.012\text{시간}$: ^{212}Bi (ThC')⁽²⁾, $0.296 \pm 0.002\mu\text{초}$: ^{208}Tl (ThC''), $3.0527 \pm 0.0033\text{분}$ 에서 최후의 안전핵종인 ^{208}Pb 가 된다. 이 경우 토론과 ThA는 거의 같은 행동을 하고 있지만, ThB는 그 반감기가 길기 때문에 토론과는 다른 행동을 취하는 것으로 생각되고 있다. 또한 ThB와 ThC와는 반드시 같은 행동을 취하고 있다고는 생각되고 있지 않지만, 低레벨에서의 ThC의 측정이 어렵기 때문에 평형상태에 있는 것으로 가정하는 수가 많다. 그러나 이것은 옳지는 않으므로 어떤 다른 방법으로 구해야 할 것이다.

라돈이나 토론은 불활성 기체이기 때문에 호흡기도에 흡입되어도 거의 흡수되지 않고 대부분 배출되어 버린다. 그러나 자핵종은 입자성이기 때문에 호흡기도에 흡입되면, 그 일부는 기도의 내벽에 침착한다. 그 다른 일부는 섬모운동에 의해 배출되기는 하지만, 배출되기 전에 호흡기도에 α 선을 조사(照射)하거나 또는 체액(體液)안에 빨려들어 다른 장기(臟器)에 잔류하기도 하여 방사선 피폭의 원인이 된다. 라돈이나 토론에서 생성한 직후의 자핵종은 親핵종이 기체였기 때문에 대기중에 분산된 원자 상태가 되어 있어 물의 분자와 결합되지만, 매우 작아 그 확산속도에서 직경 10Å 전후라 추정되고 있다. 또한 대기중의 에어로졸에 부착하기 쉽고, 부착속도는 에어로졸 농도가 높고 단면적(斷面積)이 (또는 직경)이 클수록 대략 그것에 비례하여 크게 된다. 호흡기도 안에서의 입자상(粒子狀) 물질의 침착비율은 그러한 물리적 성질 특히 입자크기에 의존하기 때문에 자핵종의 입자 크기 분포는 피폭량의 평가에 있어 농도와 더불어 중요한 파라미터(Parameter)의 하나

로 되어 있다.

3. 라돈 등의 측정

3.1 라돈 등의 단위

핵종마다 농도의 기본적 단위는 당연한 일이지만 Bq m^{-3} 이다. 그러나 흡입에 따른 방사선 피폭의 원인은 그러한 자핵종 자체에 있기는 하지만, 종류가 많기 때문에 자핵종을 통틀어 피폭량을 고려하는 농도 표시법이 습관적으로 사용되어 왔다. 장해를 수반하는 피폭이 α 선에 의해 야기되어, 그 양은 다분히 α 선의 에너지와 비례적 관계에 있고 호흡기도에 침착하면 당분간 배출되지 아니할 것이라는 생각에서 문제로 삼고 있는 공기중에서의 그 계열의 모든 자핵종이 비교적 짧은 시간내(라돈의 자핵종에 있어서는 RaD가 될 때까지, 토론의 자핵종에 있어서는 ^{208}Pb 가 될 때까지의 시간)에 방출할지도 모르는 α 선의 에너지의 합을 농도의 단위로 하였다. 그것을 Potential Alpha Energy Concentration(잠재적 알파 에너지 농도, PAEC라 약함)이라 한다. 이를테면 공기 1ℓ 중의 PAEC가 $1.3 \times 10^6 \text{MeV}$ 일 때 (라돈과 자핵종이 평형상태에 있다고 가정할 때 라돈 농도 $1\text{pCi}/\ell$ 의 PAEC가 대략 이 수치가 된다) 1WL(Working Level의 약자)로 하고, 또한 그러한 공기중에서 170시간(1개월의 작업시간)행동하고 있을 때의 누적피폭량을 1WLM(Working Level Month의 약자)으로 한 단위계가 이제까지 사용되고 있다. 에너지의 단위, 길이의 단위 등을 SI단위로 표시하여 Jm^{-3} (Joule/ m^3) 및 Jhm^{-3} (Joule hour m^{-3})이 국제적인 표준단위로 사용하게 되었다. 또한 이 개념을 Bq단위로 표시할 필요도 있어, 이로 인해 Equilibrium Equivalent(Radon or Thoron) Concentration(평형등가(라돈 또는 토론) 농도, 또는 단순

히 평형농도, EEC로 약함)이 변용되고 있다. 이것은 라돈 또는 토론의 PAEC를 방사 평형상태의 라돈이나 토론의 PAEC를 척도로써 표시한 단위로 그 때의 PAEC와 같은 값의 PAEC를 가지며, 방사 평형상태에 있는 라돈 내지 토론 농도와와의 비를 Equilibrium Factor (평형계수, F치)라 부른다. 즉 그때의 라돈 농도에 F치를 곱하면 PAEC가 구해지는 것이 된다.(예: 거주가옥의 경우 F치는 0.4로 사용되고 있다.)

WL와 Jm^{-3} 의 변환계수는 정수(定數)가 되지만, 자핵종의 반감기나 방출 α 선의 에너지 등은 측정자에 따라 달라질 수도 있어, EEC와 PAEC의 변환계수는 반드시 같은 수치라고 할 수는 없다. 수치의 한 예를 들자면,

$$\begin{aligned} 1WL &= 2.083 \times 10^{-5} Jm^{-3} \\ 1\mu Jm^{-3} &= 4.802 \times 10mWL \\ 1WLM &= 3.541 \times 10^{-3} Jhm^{-3} \\ 1Jhm^{-3} &= 282.4WLM \\ EEC_{RN}(\text{라돈}) \\ 1Bqm^{-3} &= 0.267mWL = 5.57 \times 10^{-3} \mu Jm^{-3} \\ EEC_{TN}(\text{토론}) \\ 1Bqm^{-3} &= 3.63mWL = 7.56 \times 10^{-2} \mu Jm^{-3} \end{aligned}$$

이 된다.

PAEC(WL)는 자핵종 각각의 원자수농도 (Bq/l 를 붕괴상수 $\lambda(S^{-1})$ 로 나눔)에 장치 방출할지도 모르는 α 선의 에너지 즉 RaA에는 13.68MeV, RaB와 RaC에는 7.68MeV, ThB와 ThC에는 7.80MeV를 곱하여 합산하며, $1.3 \times 10^6 MeV$ 로 나누면 얻어진다. 또한 RaA, RaB, RaC, ThB, ThC의 각각 $1Bqm^{-3}$ 당 EEC는 0.1060, 0.5130, 0.3810, 0.9134, 0.0866 Bqm^{-3} 이다.

이러한 이유로 자핵종 농도를 측정할 때는 개별농도를 구하는 경우와 직접 PAEC를 구하는 경우가 있다. 전자의 계산으로 후자를 구하는 것은 용이하지만 후자에서 전자를 구하는 것은 근사계산 이외는 불가능하다.

3.2 측정법의 종류

라돈이나 토론은 일반환경의 넓은 범위에 걸쳐 항상 존재하여, 긴 시간에 걸쳐 인간과 관계가 있다. 따라서 이러한 핵종의 장시간에 걸친 평균적인 농도가 피폭상의 평가에 있어 중요하게 된다. 그러므로 될 수 있는대로 에너지를 사용하지 않고 자연의 힘만으로 장시간의 농도측정을 하는 것이 요망된다. 이러한 목적에는 기체인 라돈이나 토론을 대상으로 하여 측정하는 편이 입자성(粒子性) 자핵종을 대상으로 하는 것보다 훨씬 용이하다. 이와같이 시료채취(試料採取)에 에너지를 소비하지 않도록 하는 방법은 Passive법이라 한다. 이에 대해 시료채취에 있어 펌프와 같이 동력을 필요로 하는 장치를 사용하는 방법을 Active법이라 부른다. 양자의 구별은 그다지 엄밀하지 않고 채취방법이 Passive법이면 측정시에 다소의 에너지를 소비하는 경우에도 Passive법이라 부르는 수도 있다. 그러나 Passive법에 의해 라돈이나 토론의 농도를 측정하는 것은 가능하지만, 자핵종 농도측정은 지금으로는 실현되지 않고 있다.

이러한 구분과는 별도로 Grab Sampling법(적절한 번역이 없어 그랩 샘플링법이라 함)과 Continuous Sampling법(연속법)에 의해 분류하는 수가 있다. 전자는 짧은 시간내에 시료를 채취하여 그 시점에서의 농도측정을 되풀이 하는 방식이며, 후자는 문자 그대로 연속적으로 시료를 채취하면서, 그것을 적당한 시정수(10분~1시간 정도)로 측정하면서 농도의 시간적 변화를 구하는 방식이다.

라돈이나 토론의 농도는 기상조건 등에 의해 좌우되기 때문에 시간과 더불어 변동하고 있다. 뿐만 아니라 자핵종 농도는 다른 요인이 첨가되어 매우 변화한다. 따라서 그 실태를 알기 위해서는 연속적으로 시료를 채취하며 측정을 계속하는 것이 바람직하다. 그러므

로 Active법은 물론 Passive법에서도 연속방식이 사용되는 수도 있다.

3.3 Passive법에 의한 라돈과 토론 농도의 측정

앞에 기술한 바와 같이 Passive법에 의해 자핵종 농도를 측정하는 방법은 확립되어 있지 않기 때문에, 이 방법에 의한 라돈 및 토론의 측정법에 대해서만 논하기로 한다.

Passive법으로는 측정용기내의 라돈 등의 농도를 다소의 시간을 늦추어 외부 공기중의 농도와 평형(平衡)시켜, 그 농도를 어떠한 방법에 의해 측정한다. 넓은 의미의 Passive법으로는 용기내의 라돈 농도를 측정할 때, 반도체 검출기(SSD라 약함)과 같은 소량의 전력을 소비하는 방법을 취하는 경우도 있지만, 대개의 경우에는 고체비적(固體飛跡) 검출기(SSTD라 약함) 등 에너지 소비가 없는 방법이 사용되고 있다. SSTD로서는 초산(硝酸) 셀룰로스, CR-39, 폴리카보네이트 등이 널리 사용되고 있다.

라돈이나 토론은 측정용기내에 적당한 필터를 통해 유출입(流出入)하지만, 그 속도는 용기 안팎의 농도차나 용기의 용적과 필터의 통기저항 및 면적 등에 의존한다. 그 속도는 환기율로써 표시되며, 그것이 클수록 외부 공기농도 변동에 대한 추종(追從)은 좋아지지만 반면에 반감기(半減期)가 짧은 토론에 이르기까지 유출입(流出入)하게 된다. 환기율이 낮게 되면 토론이 필터 부위를 통과하는 동안의 시간적 감도(減度)에 의해 용기 안에 들어가기 이전에 감소하기 때문에 그 양이 무시할 수 있을 정도로 낮게 되지만 추종성(追從性)은 나쁘게 된다. 그러나 SSTD는 라돈과 토론의 구별이 불가능하므로 이와 같은 방법으로 양자를 구별할 필요가 있다. 추종성(追從性)이 나쁘게 되어도 라돈 농도의 장시

간에 걸친 평균치는 환기율과 거의 관계가 없게 되므로 그다지 문제가 되지 않는다. 용기내에 들어간 라돈이나 토론에서 자핵종이 생성하여 그 대부분이 확산에 의해 측정용기의 내벽(內壁)에 부착한다. 따라서 용기내의 적당한 장소에 SSTD를 설치하면 용기내의 라돈이나 토론 및 벽면에 침수(沈着)한 자핵종이 방출하는 α 선을 검출한 다음 그것을 기록하여 라돈 농도를 구할 수가 있다.

α 선이 SSTD에 입사되면 그 에너지에 의해 잠재적인 격자간(格子間)의 결합이 발생되며, 이것을 알칼리 용액 등으로 에칭하면 결합을 일으킨 부분의 용액속도가 그렇지 않은 부분의 용액속도에 비해 빠르기 때문에 세공(細孔)(에치핏)이 발생한다. 이러한 현상은 α 선의 단위비정(單位飛程)마다의 에너지 손실(dE/dx)이 큰 저(低)에너지 영역에서 일어나기가 쉽다. 그 영역이 시작하는 한계치는 SSTD의 종류나 에칭 방법에 따라 거의 일정하며, 이를테면 CR-39는 7~8MeV, 초산(硝酸) 셀룰로스는 3.5~4.0MeV, 폴리카보네이트는 0.9~1MeV로 되어 있다. 또한 판상(板狀)의 SSTD에 수직으로 α 선이 입사하면 판(板)의 내부에 들어감에 따라 입사할 때의 에너지가 크며, dE/dx 가 한계치 이하일지라도 판(板)의 내부에서는 에너지가 감소하며, dE/dx 가 한계치에 도달하게 된다. 그러므로 SSTD를 장시간에 에칭하여 그 표면을 두루 용해시켜 한계치에 달하면 에치핏이 발생하게 된다. 또한 α 선이 SSTD에 비스듬히 입사된 경우에는 α 선의 비적(飛跡)에 따른 용해속도는 빠를지라도 표면에서 본 속도는 빠르지 않으며, SSTD 표면의 용해속도와 차가 없어져서 에치핏은 나타나지 않는다. 이 한계를 임계각(臨界角)이라 한다. 에치핏은 현미경과 같은 광학적 확대장치로 관찰하여 수치를 계산하지만, 세공(細孔)이 발생한 다음, 전기화학적 방법에 의해 육안으로 볼 수 있도

록 크게 한 다음 자동계수를 하거나 방전현상(放電現象)을 이용하여 광학적이 아닌 방전회수(放電回數)로 계수(計數)할 수도 있다.

Passive법의 모니터는 구조가 간단하여 장기간의 적산계수(積算係數)가 구해진다. 그러나 용기의 벽에 확산침착한 자핵종 등의 α 선을 계수하는 것 뿐이어서, 농축이라는 조작이 포함하지 않기 때문에 감도는 낮다. 이에 비해 라돈이나 토론에서 생성되는 직후의 RaA나 ThA 등의 자핵종의 87~88%는 양의 전하(電荷)를 지니고 있기 때문에 이것을 용기내의 음의 전극(電極)에다 모으면 농축한 것과 같은 것이 된다. 전극의 부분에 검출기를 설치하여(절緣物(絶緣物)인 SSTD의 경우에는 그 표면 또는 근처에 금속박(金屬箔)과 같은 전극을 설치한다). 그것에 포집(捕集)된 자핵종이 방출되는 α 선을 검출기록하는 방법을 정전포집법(靜電捕集法)이라 부른다. 이 방법은 농축조작이 첨가되기 때문에 높은 감도가 얻어진다. 그러나 용기내의 공기에 물의 분자가 포함하게 되면 이런 것들이 음의 전하(電荷)를 갖게 되어 양의 전하(電荷)를 가진 자핵종과 재결합하여 전하(電荷)를 상실하여 용기내의 제온(除溫)이 중요하며, 또한 이동속도를 빨리하여 재결합의 기회를 적게 하기 위해 전극간의 전계(電界)를 강하게 할 필요가 있다. 그러므로 고전압의 전지를 필요로 하지만 전력소비는 전지내의 누출에 의한 자연방전 뿐이다. 검출기에 SSD를 사용하면 라돈과 토론 양자의 자핵종을 용이하게 판별할 수 있지만 검출부와 판별부에 다소의 전력소비가 발생된다. 또한 정전포집법(靜電捕集法)은 높은 감도가 얻어지기 때문에 통상의 방법으로는 감도가 낮아지기 때문에 할 수 없는 방법, 이를테면 필터의 종류나 면적을 변화시키거나 세공(細孔)을 이용하기도 하여 용기의 환기율을 조정하여, 나아가서 SSTD상에 입사 에너지 조정용의 감속재(減

速材)를 부착시켜 검출할 수 있는 에너지 범위를 선택하여, 라돈과 토론의 양자를 식별하여 검출할 수 있는 방법이 가능하게 된다.

활성탄(活性炭)이 각종 기체를 흡착(吸着)한다는 것은 잘 알려져 있다. 라돈은 불활성(不活性) 기체이지만 활성탄(活性炭)에 의해 흡착된다. 상온(常溫)에서의 라돈에 관한 활성탄과 공기간의 분배계수는 8000~5000위(位)이다. 이것은 1g의 활성탄에 의해 8~5ℓ의 공기중 라돈을 모두 흡착할 수 있음을 의미한다. 또한 라돈을 흡착시킨 활성탄에 톨루엔이나 키시렌 등의 용액을 접촉시키면 흡착한 라돈의 대부분은 이러한 용액 쪽으로 옮겨간다. 이것들을 이용한 Passive형의 라돈 농도 모니터가 시판되고 있다. 그 한 예로 약 1.3g의 활성탄과 대략 같은 양의 실리카겔을 혼합한 흡착제를 세공이 있는 작은 용기에 봉입(封入)하여 이것을 액체 신틸레이션 검출기로 사용되고 있는 것과 같은 20ml의 플라스틱제 바이알 병에 넣는 간단한 장치가 있어 이 병의 뚜껑을 열어 공기중에 방치하면 공기중의 라돈 농도가 일정하면 그 1cm³당의 농도와 활성탄 1g에 흡착한 라돈의 양의 비가 앞에 말한 분배계수에 달할 때까지 흡착이 계속된다. 한편 흡착속도는 흡착량이 증가함에 따라 감소한다. 카탈로그에 의하면 시판된 측정기의 경우, 주변 라돈 농도가 일정하면 10~11시간에서 포화흡착량의 50%에 이르며, 24시간에 약 75%가 되도록 조정(아마도 활성탄 용기의 세공에 의해 조정되고 있을 것이다)되고 있다. 이 모니터는 밀폐된 실내와 같은 라돈 농도의 변동이 적은 곳의 측정에 적합하며, 만약 주변의 라돈 농도가 변화하면 흡착속도가 변동하여, 이를테면 24시간 방치하여 뚜껑을 닫아 흡착을 중지한 경우 주변의 라돈 농도가 높을 때는 흡착량은 기대치보다 많게 되지만 반대로 방치기간의 후반에 라돈 농도가 급격히 저하되면, 그

때까지 흡착한 라돈이 활성탄에서 이탈하는 경우도 있을 수 있다. 따라서 주변의 농도가 변동할 때는 충분한 주의가 필요하다(일반적으로 방치 기간의 후반에 높게 되는 편이 좋다). 또한 앞에 말한 바와 같이 상당한 범위의 공간에 있는 라돈을 흡착하기 위해서는 측정기를 통풍이 잘 되는 장소나 어느 정도 넓은 공간에 설치하지 않으면 안된다. 라돈을 흡착한 활성탄에 액체 신틸레이션을 첨가하여 라돈을 신틸레이션에 옮기지만, 이 경우 소량의 자핵종도 옮겨가는 것 같다. 이 신틸레이터를 액체 신틸레이션 검출기로 측정하면 라돈 농도가 얻어진다. α 선에 대한 액체 신틸레이터의 발광효율은 동일 에너지의 β 선의 약 1/10이지만, α 선의 에너지가 높기 때문에 발광량은 α , β 간에 큰 차이가 없고, 평형상태에서는 라돈 1 붕괴에 대해 대략 5本の 방사선을 계수하는 것이 되어, 활성탄의 중량에 비해 높은 감도가 얻어진다. 24시간 폭로된 간단한 액체 신틸레이션 검출기로 20~30분간 측정하여도 7Bqm^{-3} 位까지의 정량은 가능하다.

또한 활성탄의 양을 많게 하여 흡착후 Ge 검출기나 NaI 신틸레이션 검출기로 흡착한 라돈이나 토론의 자핵종이 방출하는 γ 선을 분별하여 측정하고, 각각의 농도를 구하는 방법 또는 활성탄속에 TLD 소자를 넣어 γ 선의 적산치를 구하여 평균 라돈 농도를 구하는 시도도 이루어지고 있다.

3.4 Active법에 의한 라돈과 토론 농도의 측정

① Grab Sampling법

어떤 짧은 시간내에 라돈이나 토론의 농도(따라서 瞬時值)를 측정하면서 동시에 그것을 반복하는 방법이지만, 1회에 측정을 그만둘 경우에도 Grab Sampling법이라 한다(즉

나중의 연속법과 대비시키기 위해 이렇게 분류한다). 이 목적을 위해 기체전리상(氣體電離箱)이 표준적 방법으로 사용되고 있다. 통상 스테인레스제로 1.0~1.51의 용적을 가지며 기밀성(氣密性)과 기체봉입용(氣體封入用)의 노즐을 가진 단통형(丹筒形)의 전리상(電離箱)이 표준적 방법으로써 사용되고 있다. 전리상 안에 봉입된 후의 자핵종의 생성조건을 일정하게 하기 위해 필터를 통하여 자핵종이나 에어로졸을 제거한 시료공기를 봉입한다. 봉입 후 2.5~3.5시간이 경과하여 라돈과 그 자핵종이 방사평형에 접근한 상태에서 전리전류의 측정을 실시한다. 자핵종을 필터로 제거하지 않아도 2.5~3.5시간 후의 측정은 가능하지만, 제진(除塵)하면 그 다음에 생성한 자핵종의 입자크기는 작아져서 확산속도가 크게 되기 때문에 전리상 안의 자핵종은 급속히 벽면에 부착한다. 또한 그 분포를 두루 똑같이 함과 동시에 전리상 내벽에 ^{210}Po 등의 장수명 자핵종의 부착을 적게 할 목적으로 필터가 사용된다. 전리상 안의 라돈은 용기 안에 고르게 분포되어 자핵종은 부전극(負電極)이나 바깥 전극에 침착하고 있는 것으로 생각되기 때문에 대충 잡은 근사치로는 라돈이 방출하는 α 선의 수집%와 자핵종의 α 선 50%는 용기 안에 들어가 그 속의 공기를 전리하는 것으로 생각된다. 생성한 양·음 이온(전자는 산소분자에 부착하여 음이온이 된다. 또한 α 선이기 때문에 비정(飛程)에 따른 전리밀도는 매우 높다)의 재결합 발생을 피하고, 또한 전극에 급속히 수집할 수 있을 정도의 강한 전계(電界)를 제공하는 것이 가능하다면 전리상 용적이 클수록 감도는 높게 된다. 일반적으로 전리상 안의 단위시간내에 생성하는 α 선의 수는 적지만, α 선 1분당에 생성하는 이온 대(對)의 수는 크다($2.0\sim 3.0 \times 10^{-14}$ 크로닌이 된다). 따라서 α 선이 생성할 때마다 펄스상(狀)에 전류가 흘러 전리전류

가 큰 폭으로 변동하기 때문에 저농도로 평균 전리전류를 직접 관독하기가 어렵다. 그러므로 발생한 전하(電荷)(q)를 적은 용량(cpF)의 콘덴서에 T초 저장하여 콘덴서의 입자전압(端子電壓)(V)를 전위계(電位計)로 측정하는 방법이 채택되고 있다(전리전류 iA 는 $i = \frac{VC}{T} \times 10^{-12}$ 가 된다). 이 방법을 전하 축적법(電荷蓄積法) 또는 충전법이라 한다. 이 경우의 용량은 전위계(電位計)에 짜 넣은 콘덴서의 용량 뿐만 아니라 입력측의 모든 미용량(迷容量)도 포함하며 또한 전위계로서의 오차도 관계가 있기 때문에 전리전류를 정확하게 구할 필요가 있을 때에는 값을 정한 표준의 전류발생기(^{90}Sr 을 내장한 전리상)등으로 교정하여 등가적(等價的) 입력용량을 미리 구해놓을 필요가 있다. 전리상(電離箱)으로는 라돈 1붕괴당 2분약(本弱)의 α 선이 방출되는 것과 전리상 안에 생성한 이온對의 거의 모두를 전리전류로써 측정할 수 있기 때문에 안전성과 재현성(再現性)이 모두 좋아 라돈 농도의 표준적 방법으로는 널리 사용되고 있다.

토론은 단양감기(短羊減期)이므로 전리상에 급속히 시료(試料)를 봉입하고 즉시 전리전류의 측정을 개시하여 그 시간적 감쇠곡선(減衰曲線)을 구하면 농도의 추정이 가능하지만, 이와 같은 측정법은 토론 농도가 높고 충전법을 적용하지 않아도 직접 전리전류의 측정이 가능한 상태가 아니면 사용할 수 없다.

한편 측정용기 안에 생성한 α 선을 전리전류로서가 아니라 용기의 옆 벽면에 칠한 ZnS(Ag)신틸레이터의 발광에 의하여 검출하는 방식이 간편하게 라돈 및 토론 농도측정기로 널리 이용되고 있다. 이 측정법을 신틸레이션·셀法 내지 고안자의 이름에서 루카스·셀法이라 부르고 있다. 이 용기의 대부분은 금속

제로 컵형이며, 그 개방된 면을 투명한 유리 또는 플라스틱판(板)(투명한 도전성(導電性)의 도포제(塗布劑), 이를테면 $SnCl_2$ 를 바르는 것이 좋다고 한다)으로 봉하여 그 부분에 광전자 증배관(增倍管)의 광전면(光電面)이 접하도록 배치하여 용기내에서의 ZnS(Ag)의 발광을 펄스로써 검출되도록 되어 있다. 용기의 닫혀 있는 다른 쪽의 면에는 스톱콕 등을 부착한 봉입관이 1本 내지 2本 접속되어 외부에서 시료공기를 용기내에 에워싸도록 되어 있다. 통상 용기내를 진공 가까이까지 감압(減壓)하여 콕을 닫아 시료의 채취지점에서 마개를 열어 자핵종이나 분진을 제거하기 위한 필터를 끼워 라돈이나 토론을 포함한 시료공기를 용기내에 가둔다. 용기의 마개를 닫아 전리상의 경우와 같이 토론의 경우는 즉시, 라돈의 경우는 2.5~3.5시간 후에 α 선에 의한 발광의 수를 계수한다. 또한 2本の 봉입관을 이용하여 용기 안을 진공으로 하는 대신 필터를 통한 시료공기를 용기 안으로 흐르게 하여 순환 방식으로(용기 용적의 10배 정도 유입한다) 봉입하거나, 또한 시료공기를 연속적으로 흐르게 하여 α 선에 의한 발광의 계수율을 구하여 라돈 농도의 시간적 변화를 측정할 수도 있다. 토론농도는 진공방식으로 봉입하여(몇 초로 끝난다) 10~20초 정도 경과한 다음 2~3분 동안 계수하고, 다시 10분 정도 경과한 후(이 무렵에는 거의 모든 토론은 감쇠되어 있다), 또 한번 계수하여 두 계수치에서 토론 농도를 계산한다. 또한 시간적 여유가 있으면 통상의 방법으로 라돈 농도를 측정하여 첫번째 계수 때의 라돈에 의거 계수를 추정할 필요가 있다. 이를 위해 라돈만을 봉입하여, 봉입 직후에서 2.5~3.5시간 후까지의 α 계수율 시간적 변화를 미리 실측(實測)해둘 필요가 있다. 이를 위해서도 채취시에 필터에 의해 자핵종과 에어로졸을 제거하여 경과시간동안 자핵종이 용기 내벽에 부착

한 속도 등을 일정화(一定化)하지 않으면 안 된다. 용기의 내벽으로 확산함에 따라 부착된 자핵중에서 방출된 α 선 중에 벽측에서 나온 분량은 발광에 기여하지만, 용기 안쪽에서 나온 분량은 용기의 직경이 작지 않는 한 반드시 반대측의 ZnS면에 이른다고 할 수는 없다. 또한 용기 안에 고르게 확산되어 있는 것으로 보여지는 라돈 내지 토론(ThA 포함)에서 방출된 α 선의 일부도 벽면에 도달하지 않는 수도 있다. 또한 광전면(光電面)에서 떨어진 장소에서 발생한 발광은 광전면(光電面)에 달할 때까지 감쇠되기 때문에 신틸레이션 셀은 대형이 될수록 효율이 떨어져 감도는 높아지지 않는다. 그러므로 대개 300ml정도가 한계인 것 같고 고감도의 셀은 없다. 그러나 구조가 간단하여 파손되는 일이 적고 값이 싸기 때문에 널리 이용되고 있다.

α 선을 계수하는 장치에 있어 공통적인 일이지만 α 선을 다른 방사선과 구별하는 능력이 높은 검출법이 채용되고 있을 경우, 그 방식의 효율은 다소 떨어져도 높은 감도를 구할 수 있다. ZnS 신틸레이터는 α 선에 대해 특이한 발광을 나타내므로 이 셀의 백그라운드는

α 방사체의 오염이 주가 되고 통상 0.5cpm 정도로 적다. 따라서 계수시간을 60분으로 한다면 위의 농도정량은 가능하다. 이에 비해 1.51의 기체 전리상에 있어서는 10Bqm⁻³의 라돈을 포함한 공기를 봉입했을 때, 대략 5×10^{-16} A의 전리전류가 얻어진다. 그러나 측정기를 설치한 장소의 조사선량이 7~8 μ Rh⁻¹일 때의 전리전류는 1×10^{-15} A가 되기 때문에 주변의 γ 선 레벨이 높을 경우는 BG 전류가 크게 되어 저농도의 라돈 측정이 어렵게 된다. 그러나 전리상 안에 2MeV 이상의 에너지 소비가 있으면(발생한 전하(電荷)를 10pF의 콘덴서에 축적하면 0.9mV 이상이 된다) α 선이 방출된 것을 전리전류의 급속한 증가로써 검출할 수 있기 때문에 일정시간내의 α 선 방출수에서 라돈 농도를 추정하는 것도 가능하다. 이렇게 하면 β 선이나 γ 선의 영향은 거의 없기 때문에 낮은 농도 레벨까지 측정할 수 있다. 이를테면 2Bqm⁻³정도의 농도로 30분간의 계측시간 동안에 9펄스 정도가 얻어진다. 다만 이 방법으로는 발생 전하량(電荷量)의 다소에 따라 계수대상인 펄스를 안정된 방법으로 선별할 장치를 마련할 필요가 있다.

회원 여러분께 알립니다.

우리협회는 회원 여러분께 보다 나은 서비스를 제공하고자 노력하고 있습니다.

귀 회원의 주소나 전화번호 등 제반사항에 변동이 있을 경우, 전화나 우편, FAX를 이용하여 협회로 신속하게 연락하여 주시기 바랍니다.

▶ 연락처 : 조성과 최 윤 석

(TEL : 02-566-1092, FAX : 02-566-1094)

구 분	주요 연락요망 사항
단체 회원	기관명, 대표자, 방사선안전관리책임자, 주소, 전화번호 등
개인 회원	(우편물수취) 주소, 전화번호, 소속직장 등