

RI·放射線の利用(2)

3. RI의 理工學的 利用

3.1 吸收, 散亂을 이용한 gauging 利用 放射線두께計 [thickness gauge]

放射線두께計에는 물체에 의한 방사선의 흡수량이 두께와 관계가 있는 것을 이용해서 두께를 측정하는 透過型 放射線두께計와 물체에 의한 後方散亂 放射線을 측정하여 두께를 구하는 散亂型 放射線두께計가 있다(그림 13).

측정하려는 물질의 밀도 차와 두께의 범위에 따라 적당한 방사선의 종류와 에너지를 선택하여야 한다.

두께를 측정할 경우 吸收係數를 μ 라고 하면 μ 와 두께 x 와의 곱이 거의 1이 되어야 측정오차가 최소가 된다. 즉, $\mu x \approx 1$ 이 되도록 측정할 물질과 두께에 따라 적당한 흡수계수 μ 를 가진

RI를 선택하여야 한다.

表 1에 放射線두께計에 사용되고 있는 β 선원과 γ 선원의 성질을, 그림 14에 실제로 사용되고 있는 RI와의 組合에 대해 減弱曲線을 표시하였다.

放射線密度計

방사선밀도계의 원리도 放射線두께計와 같으며 透過型和 散亂型 두종류가 있다. 두께가 일정한 容器에 試料을 넣고 방사선의 흡수를 측정할 경우, 용기에 入射되는 線量 I_0 와 용기를 통과하는 선량(투과선량) I 와의 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

이 식에서 μ 는 減弱係數라고 불려지나 더 정

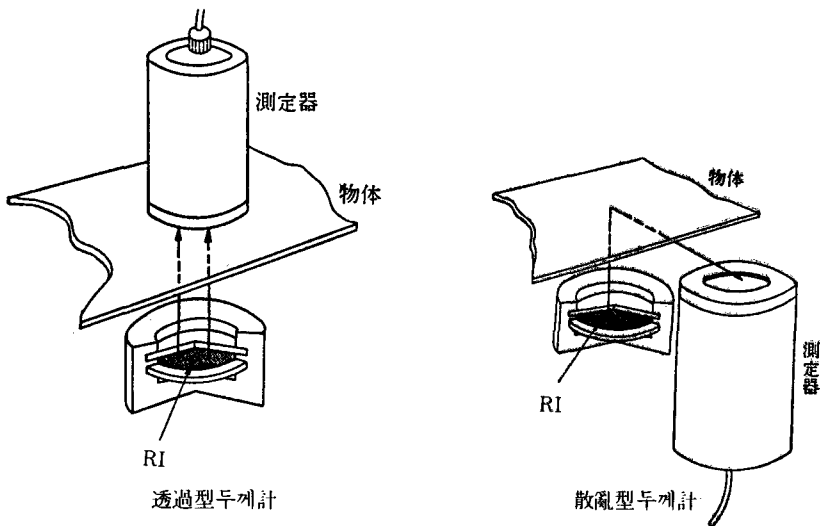


그림 13 放射線두께計

확하게는 線減弱係數이다. 吸收體의 密度를 ρ (g/cm³)라고 하면 $\mu = \mu_m \cdot \rho$ 라는 관계가 성립되며 μ_m 은 質量減弱係數이다.

흡수체의 두께를 단위면적當의 질량, 즉 x' /cm²로 표시했을 때에 $I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$ 식에서 얻어지는 μ 이므로 $I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$ 式은 $I = I_0 \cdot e^{-\mu_m \cdot \rho \cdot x}$ 式으로 바꾸어 쓸 수 있다. 따라서 두께가 一定한 용기에 넣은 試料에 대해서 透過線量 I 를 측정하면 밀도 ρ 를 구할 수 있다.

밀도계의 원리를 응용해서 탱크內 液面의 위치를 정할 수 있으며 또 탱크속에 있는 원료의 경계면(레벨)을 정할 수도 있다. 前者를 液面計, 後者를 레벨計라고 한다. 이들 장치에서는 γ 선

원으로 ⁶⁰Co이나 ¹³⁷Cs을 사용하는 것이 많다.

散亂型 密度計의 원리를 응용한 것에 地下檢層計가 있다. 지하검층계는 γ 線源(¹³⁷Cs을 사용할 때가 많다)과 γ 선측정기를 組合시킨 probe를 boring孔속에 넣고, 地中에서 산란되어서 되돌아오는 後方散亂 γ 선의 양을 측정하여 地中の 密度를 구한다(그림 15). 이 방법에 의해서 암반의 깊이와 斷層의 위치 등을 알 수 있으므로 댐이나 교량의 건설예정지 등에 대한 土木工事時의 지질조사에 이용되고 있다.

密度計에는 速中性子の 散亂을 이용한 水分計도 있다. 중성자는 그 운동에너지(또는 速度)가 작은 것과 큰 것이 있는데 운동에너지가 약

表 1 두께計에 利用되는 主要 RI의 性質과適用範圍

放射性核種	半減期	利用하는 放射線의 種類와 에너지 (MeV)	適用範圍 (mg/cm ²)
¹⁴ C	5760 y	β^- 0.155	1~10
¹⁴⁷ Pm	2.6 y	β^- 0.22	1~15
⁸⁵ Kr	10.6 y	β^- 0.15, 0.67	10~130
²⁰⁴ Tl	3.9 y	β^- 0.77	10~150
⁹⁰ Sr	2.8 y	β^- 0.54 (⁹⁰ Y β^- 2.25)	50~600
¹⁰⁶ Ru	1.0 y	β^- 0.039	100~1200
²⁴¹ Am	458 y	γ 0.027, 0.033, 0.060	400~3500
¹³⁷ Cs	30.0 y	γ 0.662	2000~40000
⁶⁰ Co	5.263 y	γ 1.17, 1.33	2700~55000

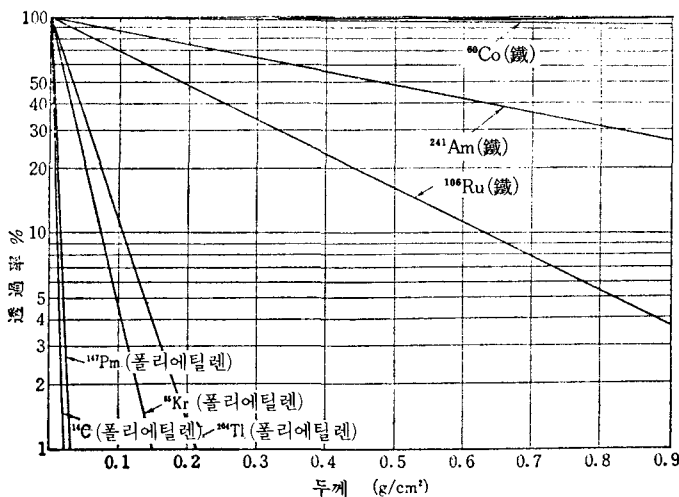


그림 14 두께計에 使用되는 RI의 減弱曲線

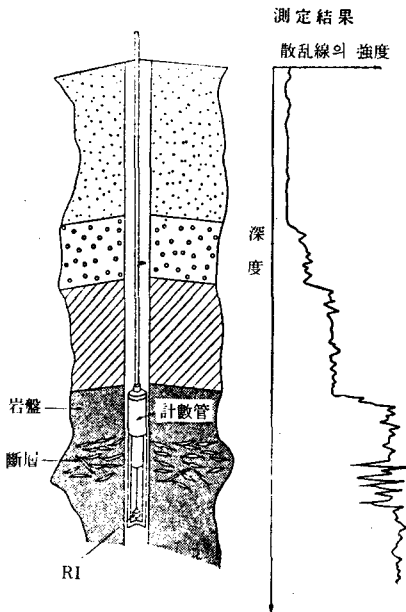


그림15 地下檢層計

0.025eV 정도의 것을 熱中성자라고 부르고 그 이상의 것을 대체적으로 速中성자라고 한다. 速中성자가 물질중에서 散亂되면 그 에너지의 일부를 잃으므로 1개의 速中성자가 여러번 散亂되면 마지막으로 열중성자가 된다. 速中성자의 散亂確率(散亂斷面積)은 상대물질의 원소에 따라 다르나 水素의 산란단면적은 다른 원소에 비해 대단히 크기 때문에 試料에 물(水分)이 포함되어 있으면 열중성자가 생기는 비율이 커진다.

速中성자源과 熱中성자에 대한 感도가 높은 BF₃比例計數管을 組合시킨 probe를 사용하여 試料중에 생기는 열중성자의 양을 측정하여 試料중의 수분의 양을 구하는 것이 中性子水分計(그림 16)이다. 중성자수분계는 鑄物砂, 코크스,

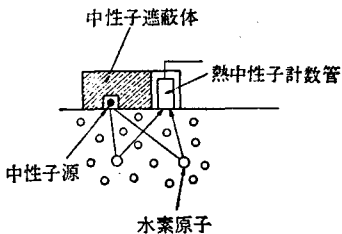


그림16 表面型中性子水分計

세멘트 재료 등의 水分含有量이나 地下水의 測定, 콘크리트 鋪裝의 乾燥度 測定 등에 이용된다.

RI를 사용하는 中性子源에는 α 선을 방출하는 RI와 Be을 組合시켜 (α, n) 반응으로 速中성자를 발생시키는 것, 高에너지의 γ 선을 방출하는 RI와 Be를 조합시켜 (γ, n)반응으로 速중성자를 발생시키는 것 및 ²⁵²Cf와 같이 自發性核分裂에 의해 붕괴할 때 速중성자를 방출시키는 것 등이 있다.

(α, n)반응을 이용하는 것으로는 ²²⁶Ra-Be, ²¹⁰Po-Be, ²³⁸Pu-Be, ²⁴¹Am-Be 등이 있고, (γ, n)반응을 이용하는 것으로는 ²²⁶Ra-Be, ¹²⁴Sb-Be, ²⁴Na-Be 등이 있다.

放射線硫黃計는 비교적 에너지가 낮은 γ 선이나 X선의 흡수를 이용해서 重油나 石油製品에 포함되어 있는 不純物인 유황의 含有率을 측정하는 장치이다. ²⁴¹Am으로부터 방출되는 12~60 keV의 X선 및 γ 선을 試料가 들어있는 용기에 透過시켜서 透過線量率의 변화로 유황의 함유량을 구할 수 있다. RI螢光X線法을 이용하는 유황계도 있다.

眞空計, 煙氣感知器

RI로부터 방출되는 α 선이나 β 선과 같은 荷電粒子는 공기뿐만 아니라 여러가지의 기체, 액체, 고체의 원자들도 電離한다.

電壓을 걸은 2枚의 電極사이의 공간에 있는 공기를 荷電粒子로 전리하면 電離量에 따라 電離電流가 回路에 흐른다. 만약 진공속에 외부의 공기가 들어가면 그 속에 들어간 극소량의 공기에 의해 전리전류가 흐르므로 이 전리전류를 측정하여 眞空度를 측정한다든가 진공의 누설을 검출할 수 있다. 이와같은 장치를 放射線眞空計라고 한다.

한편, 공기중에서 RI에 의해서 電離電流가 흐르고 있는 공간을 煙氣의 分子가 통과하면 ion이 연기의 분자에 붙어서 운반되어 나가므로 電離電流가 감소한다. 이와같은 장치를 煙氣感知器라고 한다. ²⁴¹Am로부터 방출되는 α 선이 이용

되고 있다(그림 17).

이와같이 RI를 사용해서 전리작용을 이용하는 것으로는 이 이외에도 靜電氣除去裝置와 眞空管의 放電을 규칙적으로 행하게 하는 것 등이 있다.

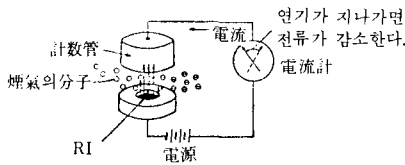


그림17 煙氣 感知器

gas chromatography장치는 殘留農藥등의 分析에 사용되고 있는 장치로서 化合物을 分解시켜 分解生成物이 시간적으로 차이를 두고 나오는 gas量을 연속적으로 측정해서 定量하는 것인데 分解生成物 gas양의 시간적변화를 측정하는 데는 EC型(電子捕獲型) gas chromatography裝置가 사용되고 있다. 이 型의 장치에서는 檢出部인 gas 통로에 소량의 ^{63}Ni 를 고정시키고 전극을 설치하여 ^{63}Ni 에서 나오는 β 선의 흐름을 電流로 측정한다. ^{63}Ni 線源과 전극사이를 gas가 통과하면 電子捕獲現象에 의해 β 입자가 gas分子에 잡혀서 gas와 함께 운반되어 나간다. 즉, gas가 통과한 양에 따라 전류가 감소하므로 전류의 감소량을 가스의 통과량으로 변환하여 지시하도록 되어 있다.

3.2 Radiography

물체에 방사선을 통과시켜서, 透過한 방사선으로 사진필름을 感光시켜 금속재료 내부의 缺陷(흠)을 검출하거나 構造物을 檢査하는 기술을 radiography라고 하며 방사선으로는 X선, γ 선이 이용되고 있다. 특수한 목적으로 중성자를 이용하는 中性子radiography가 사용될 때도 있다. radiography는 非破壞檢査(nondestructive testing)의 한가지 방법으로 이용되고 있으며 radiography이외의 비파괴검사방법에는 超音波探傷法, 電磁探傷法, 浸透探傷法 등이 있다. 비파

괴검사의 主對象은 용접부의 결함이다.

그림 18에서와 같이 部品내부에 작은 결함이 있을 경우 X선이나 γ 선을 투과시키면 결함부분을 투과하는 線量 I_1 과 결함이 없는 부분을 투과하는 線量 I_2 에는 차이가 생기는데 兩者의 比를 취하면 다음式으로 표시된다.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{e^{-\mu(x-\Delta x)}}{e^{-\mu x}} = e^{-\mu \cdot \Delta x}$$

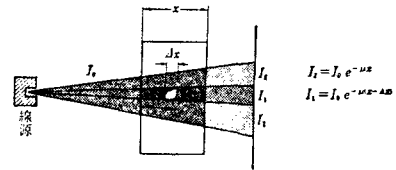


그림18 被寫体contrast

이와같은 透過線量の 比를 被寫体contrast라 하는데 이式으로 표시된 被寫体contrast를 갖는 透過線으로 X선 필름을 黑化시키면 寫眞濃度(黑化度)의 차이로 결함의 圖像이 얻어진다. 이 때, X선필름의 종류에 따라 각각의 필름에 특유한 特性曲線이 있다. 특성곡선은 필름에 대한 방사선의 露出量과 寫眞濃度와의 관계를 나타내는 곡선으로 그림 19에서와 같이 X선 필름의 종류에 따라서 달라진다. 투과선량의 차이가 같더라도 얻어지는 사진농도의 차이는 필름 1이 2보다 크다. 즉, 같은 결함을 같은 선량으로 촬영하여도 필름 1을 사용했을 경우가 큰 黑白의 차이로(寫眞contrast가 크게) 찍혀서 결함의 像이 뚜렷이 나타난다.

X선 필름의 특성곡선의 경사가 급할수록 contrast가 큰 필름이라고 할 수 있는데, 특성곡선의 直線에 가까운 부분을 직선으로 보고 이 직선의 傾斜를 求한다. 그림 19에서의 傾斜(tan a)를 감마(γ)라 한다.

특성곡선의 가로軸의 露出線量 눈금은 對數 눈금으로 되어 있다. 따라서 가로軸의 線量差를 같은 거리로 하여 비교하면 兩者에 대해서 露出線量の 比가 같게 된다(그림 20). 노출선량의 比가 같더라도 특성곡선 左側의 낮은 부분, 즉 선량이 적은 부분 a에서는 contrast가 적어 露出

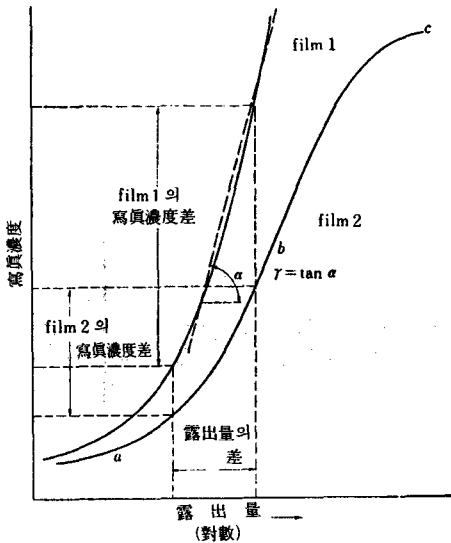


그림19 X線 film의 特性曲線

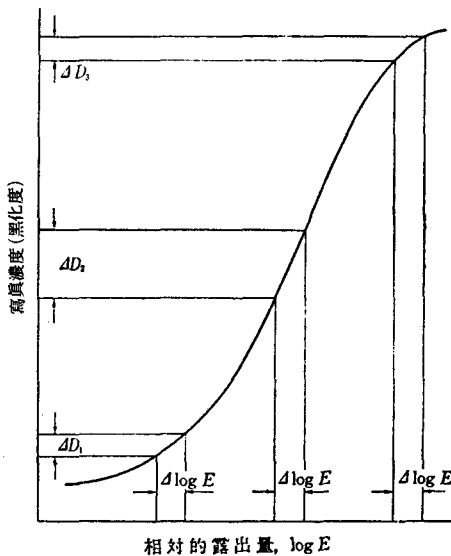


그림20 露出量과 濃度差와의 關係

不足이 되며 또 특성곡선 右側의 부분 c에서도 contrast가 적어 露出過度가 된다.

X선에 의한 radiography는 오래전부터 비파괴검사의 중요한 방법으로 이용되어 왔으며 印加電圧 150kV~400kV의 工業用 X線裝置가 사용되고 있다.

X선장치에서는 印加電圧을 V로 하면 그림 21

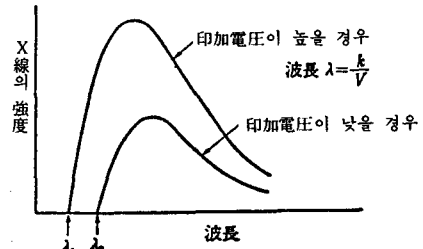


그림21 連續X線의 에너지分布

과 같이 V이하인 여러가지 에너지의 X선을 포함한 連續(白色) X線を 발생한다. 이와같은 X선을 물체에 透過시키면 일정한 에너지(電圧 V에 상당)의 “單色X線”을 투과시켰을 때와 같은 減弱曲線이 된다. 이 에너지 V'를 實効電圧이라고 한다.

工業用 加速器에는 비파괴검사용인 betatron과 linac이 있으며 10~15MeV의 加速電圧으로 에너지가 큰 X선을 발생시킬 수 있다. 이와 같은 高에너지의 X선을 사용하면 두께 40cm 정도의 鐵鋼製品도 透過撮影이 가능하다.

γ線源을 사용하는 radiography는 γ線radiography라고 하는데 γ線源으로는 주로 ⁶⁰Co과 ¹⁹²Ir가 사용되며 일부에서는 ¹³⁷Cs도 이용되고 있다. ⁶⁰Co에서 방출되는 γ선의 에너지는 1.17 MeV와 1.33MeV인데 에너지가 크기 때문에 상당히 두꺼운 鐵鋼의 검사가 가능하다. ¹⁹²Ir로부터는 296keV~612keV 범위의 여러가지 에너지의 γ선이 방출되는데 그 實効에너지는 약 400 keV로 비교적 에너지가 낮기 때문에 얇은 철강 제품, 특히 파이프 검사나 제트 엔진의 검사 등에 이용되고 있다.

γ선 radiography에서 사용되고 있는 照射裝置에는 여러가지 형식의 것이 있으나 그림 22에 나타낸 것처럼 線源容器, 傳送管, 案内管을 갖춘 線源되풀이方式(release方式)의 것이 많이 사용되고 있다.

투과사진에서 미소한 결함을 식별할 수 있는 정도를 缺陷識別度라 하며 촬영한 물체의 두께와 사진에서 식별할 수 있는 최소의 결함의 크기와 의 比로서 나타낸다. 예를 들면, 두께 x인

表 2 radiography用 γ 線源의 性質

放射性核種	^{60}Co	^{137}Cs	^{192}Ir
半減期	5.2年	30年	74日
γ 線 에너지 (MeV)	1.17, 1.33	0.662	0.137~0.651 (実効 0.4)
照射線量率定數 Rhm/Ci	1.3	0.31	0.5

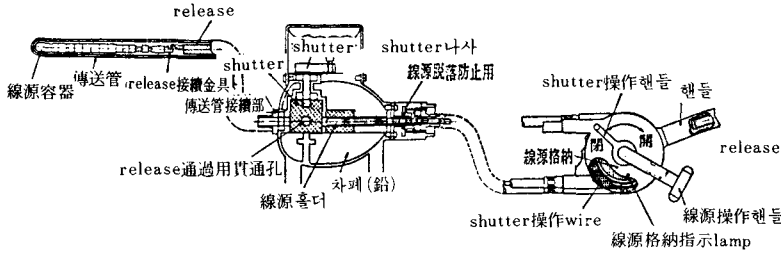


그림22 radiography用照射機 (release式 4 π 方向照射型)의 例

물체(被寫體)를 촬영했을 때 식별할 수 있는 최소의 결함의 두께를 Δx 로 하면 결함식별도 s 는 다음과 같은 百分比로서 나타낼 수 있다.

$$s = (\Delta x / x) \times 100(\%)$$

X선필름의 종류 차이에 의한 contrast와 粒狀性的 差, X선의 焦點과 線源의 크기, 선원과 결함과의 거리 및 결함과 필름과의 거리 비율, X선과 γ 선의 에너지 등이 缺陷識別度를 결정하는 요소이다.

微粒子이고 contrast가 큰 X선 필름을 사용하여 線源과 被寫體의 거리를 크게 하고 低에너지의 X선이나 γ 선으로 촬영하면 결함식별도가 좋아진다.

3.3 分析利用

放射線硫黃計나 水分計도 분석방법이라 할 수 있으나 방사선을 이용한 분석법에는 이들 외에도 放射化分析法, RI螢光X線分析法 등이 있다.

(1) 放射化 分析法

核反應에 의해서 試料中에 생기는 여러가지 원소의 RI를 조사해서 원소를 同定하는 것이 放射化分析(activation analysis)이다. RI를 同定하는 데는 방출되는 γ 선의 에너지가 RI의 종류에 따라 일정한 値를 가지고 있다는 사실을 이용한다. 예를 들면, 1.17 및 1.33MeV의 γ 선이 동시에 방출되고 있을 때 그 RI는 ^{60}Co 이며 시

료중에 코발트가 포함되어 있는 것이다.

同定(identification)이란 분석하려는 원소를 적당한 입자로 照射해서 핵반응을 일으켜서 그 결과 생성되는 방사성핵종이 나타내는 방사능의 특성(방사선의 종류, 에너지, 반감기) 및 그 強度를 측정 분석하므로써 원소의 定性 또는 定量分析을 하는 것이다.

방사화분석은 放射化된 試料로부터 방출되는 γ 선을 에너지別로 측정하여 에너지分布를 측정하는데 이 방법을 γ 선spectrometry, 이 장치를 γ 선spectrometer라 한다. 방사화분석의 특징은 다른 분석방법에 비하여 分析感度가 높다는 것, 화학적인 분리를 하지 않고 비파괴적으로 분석하는 경우가 많다는 것, 迅速分析이 가능한 경우가 많다는 점 등이다.

시료중의 Mn과 Na을 定量할 경우 보통의 原子炉(熱中性子束密度를 $1.8 \times 10^{13} \text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 假定)에서 1시간동안 열중성자를 照射하면 0.00005 μg 의 Mn 및 0.005 μg 의 Na을 검출할 수 있다. Mn에서는 安定同位元素인 ^{55}Mn 에서 (n, γ) 반응으로 반감기 2.576시간인 ^{56}Mn , Na에서는 安定동위원소인 ^{23}Na 에서 같은 (n, γ) 반응으로 반감기 15시간인 ^{24}Na 이 생기는데, ^{56}Mn 으로부터는 0.847MeV, 1.811MeV, 2.110MeV의 γ 선이, ^{24}Na 으로부터는 1.37MeV, 2.75MeV의 γ 선이

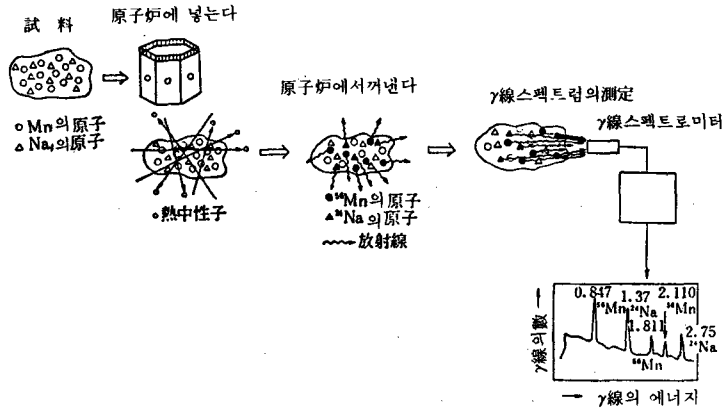


그림23 放射化分析의 順序

방출되므로 방사화된 γ 선 spectrum을 측정하여 이들 γ 선의 에너지에서 Mn과 Na를 同定할 수 있다.

γ 선 spectrum을 측정하기 위한 γ 선 검출기로는 NaI의 結晶을 사용하는 scintillation 검출기와 Ge의 半導体檢出器가 사용된다. Ge半導体檢出器는 에너지分解能이 높고, 에너지幅이 좁은 γ 선 peak가 얻어지므로 에너지가 다른 γ 선 peak를 判別하기 쉽다는 利點이 있다. 그림 24는 그 한가지 例로서 방사화된 重油의 γ 선 spectrum을 나타내었다. 이 γ 선 spectrum을 보면 여러가지의 微量元素를 비파괴적으로 定量할 수 있음을 알 수 있다. 表 3은 몇몇 원소에 대해 방

사화분석에 의한 檢定限界(感度)를 표시하였다.

시료중에 포함되어 있는 다른 원소에 비해 극히 미량인 원소는 방출되는 γ 선의 양이 적기 때문에 γ 선 spectrum에 明瞭한 peak를 나타내지 않을 때가 있다. 또 방사화에 의해서 생긴 RI중에는 γ 선을 방출하지 않고 β 선만을 방출하는 것도 있으므로 이와같은 RI에서는 γ 선 spectrum으로부터 그 존재를 알 수가 없다. 이와같은 때에는 방사화된 시료를 화학적으로 분리한후 분리된 각 부분에 대해서 방사능측정을 한다.

γ 선 spectrum에 나타난 각각의 peak위치로부터 γ 선의 에너지를 알 수 있어 존재하는 여러가지의 RI를 同定할 수 있으며 하나하나의 원

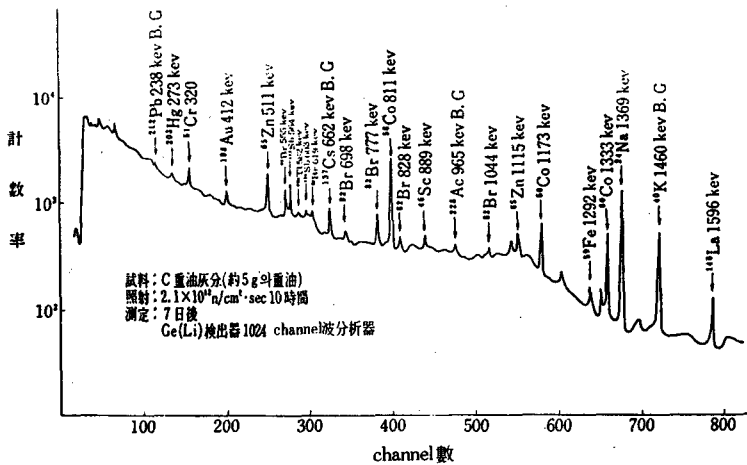


그림24 原子炉에서 放射化된 重油의 γ 線 스펙트럼

分析感度 (μg)	元 素
$1\sim 3\times 10^{-6}$	Dy
$4\sim 9\times 10^{-6}$	Mn
$1\sim 3\times 10^{-5}$	Kr, Rh, In, Eu, Ho, Lu
$4\sim 9\times 10^{-5}$	V, Ag, Cs, Sm, Hf, Ir, Au
$1\sim 3\times 10^{-4}$	Sc, Br, Y, Ba, W, Re, Os, U
$4\sim 9\times 10^{-4}$	Na, Al, Cu, Ga, As, Sr, Pd, I, La, Er
$1\sim 3\times 10^{-3}$	Co, Ge, Nb, Ru, Cd, Sb, Te, Xe, Nd, Yb, Pt, Hg
$4\sim 9\times 10^{-3}$	Ar, Mo, Pr, Gd
$1\sim 3\times 10^{-2}$	Mg, Cl, Ti, Zn, Se, Sn, Ce, Tm, Ta, Th
$4\sim 9\times 10^{-2}$	K, Ni, Rb
$1\sim 3\times 10^{-1}$	F, Ne, Ca, Cr, Zr, Tb
10~30	Si, S, Fe

熱中性子束密度 $1\times 10^{13} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 照射時間 1h일 경우의 檢出限界를 표시

表 3 熱中性子放射化分析

소존재량은 각각의 γ 선 peak 높이로부터 결정할 수 있다. 시료를 방사화할 때 여러가지 원소의 미량을 별도로 준비하여 각각의 원소무게를 측정하고 이들을 표준시료로 해서 試料와 동시에 방사화한다. 시료의 γ 선 spectrum에 나타나는 어느 원소에 상당하는 γ 선 peak의 높이와 같은 원소의 표준시료의 γ 선 spectrum에 나타난 peak의 높이를 비교하면 시료속에 포함된 이 원소의 양을 계산에 의해서 구할 수 있다.

放射化分析에 이용되는 핵반응으로는 (n, γ) 반응이 있는데 이것은 원자로를 熱中性子源으로 이용하면 熱中性子束密度가 크기 때문에 分析感度が 커진다는 것이 그 主要 이유이다. 粒子加速器의 cyclotron에서 加速한 重陽子에 의한 (d, n) 반응이나 陽子에 의한 (p, n) 반응 등은 速中性子를 발생시키므로 이들 속중성자를 減速材 (moderator)에 의해 熱中性子로 바꾸어 (n, γ) 반응에 의한 방사화분석에 이용할 수도 있다. 粒子加速器 linear accelerator (linac)도 이와같은 방법으로 열중성자에 의한 방사화분석에 이용할 수 있다. Cockcroft-Walton型 加速器에서는 重陽子를 가속시켜서 tritium target에 부딪쳐 (d, n) 반응에 의해 대량의 14MeV 速中性子를 발생시킬 수 있으므로 일반적으로 中性子發生裝置라고 불려지고 있다.

速中性子를 발생시키는 장치에서는 減速材를

사용하여서 熱中性子에 의한 방사화분석을 하는 외에 速中性子에 의한 (n, p) 반응이나 ($n, 2n$) 반응 등을 이용한 방사화분석도 가능하다. 열중성자 방사화분석으로 定量하기가 곤란한 O, F, Cl, S 등의 원소는 速中性子에 의한 방사화분석이 사용된다.

cyclotron이나 linear accelerator에서 重陽子 (d)나 陽子 (p)를 加速시켜서 (d, n) 反應, (d, p) 反應, (p, n) 反應, (p, γ) 反應 등으로 방사화분석을 하는 방법도 사용된다. 또, betatron에서 高에너지의 X선을 발생시켜 X선에 의해서 일어나는 핵반응, (γ, n) 반응으로 방사화 분석을 할 수도 있다.

방사화분석의 특징인 分析感度, 迅速性, 비 파괴성을 이용한 여러가지 응용면이 있으나 (1) 超高純度材料중의 불순물 분석, (2) 환경오염물질의 분석, (3) 犯罪科學에로의 응용 등이 주요 대상이다.

超高純度材料중의 미량불순물 분석의 예는 半導體材料 silicon중의 불순물이나 高純度알루미늄地金중의 미량불순물 분석, 방사화분석을 이용한 이들 高純度材料의 精製過程 檢討 등이다. 환경오염물질의 분석에는 모발에 포함된 水銀이나 물, 植物, 토양 등에 포함되는 수은의 방사화분석이 세계적인 규모로 행해져서 수은에 의한 환경오염이나 그 生態學的인 문제가 명백해

졌다.

그 외에 먼지속의 철, 망간, 크롬, 셀렌, 기타 산업폐기물에 의한 오염물질의 분석, 상수도, 하수도, 河川水에 포함된 카드뮴 등 有害금속의 분석, 농작물과 해산물 등에 포함된 유해금속의 분석 등이 널리 응용되고 있다. 犯罪科學의 분야에서는 방사화분석에 의해서 나폴레옹의 遺髮에 포함된 砒素를 定量했으며, 권총의 彈痕주위에 부착된 硝煙을 분석한다든가, 유조선이 흘린 廢油를 분석하여 胥유의 同定을 행하는 등 여러가지의 경우에 응용되고 있다.

(2) RI螢光X線分析

X線管을 사용한 螢光X線分析法은 機器分析의 중요한 方法의 하나로 널리 보급되어 있는데 X線管 대신에 RI를 사용하여 螢光X線分析을 할 수도 있다. 그림 25에 나타낸 것처럼 밀봉된 γ 線源(RI에서 X선이 방출되는 경우에도 이용할 수 있다)에서 나오는 γ 선을 분석시료에 照射시켜 분석시료에 포함되어 있는 여러가지의 원자를 勵起狀態로 만들면 勵起된 원자는 스스로 特性X線을 방출하여 基底狀態로 되돌아간다. 시료에서 방출되는 특성X선은 각각의 원소에 대해 정해진 波長 즉, 특정한 에너지를 가지고 있으므로 특성X선의 에너지를 측정하면 어떤 원소인지 알 수 있다.

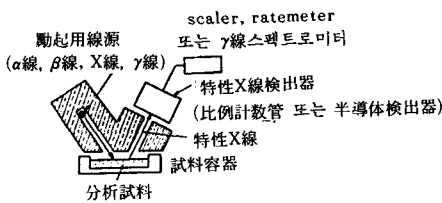


그림25 RI螢光X線分析의 原理

특성X선의 에너지 스펙트럼을 측정할 때도, 放射化分析과 마찬가지로 γ 선스펙트로미터가 사용된다. 試料의 원자를 勵起시키는 데는 각각의 원소의 특성X선 에너지보다 약간 높은 에너지의 γ 선을 入射시켜야 효율이 좋아지므로 보통은 원소에 따라 수십keV에서 백수십keV정도의 γ 선(또는 X선)을 방출하는 RI가 이용되고 있다.

RI형광분석에서는 試料를 勵起시키는데 사용되는 γ 선이나 X선의 量이 X線관을 사용하는 경우의 양에 비해 극히 적기 때문에 分析의 感度는 크지 않다. 즉, 극히 미량의 분석에는 적당하지 않으나 장치가 비교적 간단하기 때문에 野外에서의 측정이나 장기간 계속해서 연속적으로 측정하는 데는 적당하다고 할 수 있다. 그래서 鑛物資源의 탐사나 광산에서 광석의 自動選別, 野外의 測定點에서 장기간 환경오염물질을 계속해서 측정하려 할 때에 적당하다. 또 이 원리를 이용한 두께計도 사용되고 있는데, 예를 들면 鍍金의 두께를 측정할 때 鍍金屬에서 발생하는 特性X선의 量을 이용하는 것도 가능하다.

3.4 RI熱源, 原子電池

RI에서 방출되는 방사선이 물질중에서 흡수되어 消滅되면 방사선 에너지는 熱에너지로 변하므로 發熱이 일어난다. 예를 들면, 1만Ci정도의 ^{60}Co 密封線源에서는 상당량의 발열을 볼 수 있으며 線源 자신도 상당한 高熱이 된다. 이것은 ^{60}Co 에서 방출되는 β 선의 대부분과 γ 선의 일부분이 線源自体내에서 흡수되기 때문이다. 방사선을 물에 入射시켜 水温의 上昇을 측정하여 온도변화로부터 방사선의 量을 산출할 수도 있다.

RI에서 발생하는 이와같은 열을 이용해서 保温用의 heater나 작은 蒸氣엔진을 움직인다는가 또는 소량의 發電을 하는 것이 가능하고 실제로 이와같은 방법은 여러가지 분야에서 이용되고 있다. RI를 사용해서 電池를 만드는 방법은 量은 적다 하더라도 “原子力發電”이라 할 수 있을 것이다.

RI電池는 처음에 미국의 우주계획에서 原子電池라는 이름으로 탄생하였다. 미국 항공우주국의 NASA계획에서 우주개발에 사용되는 RI전지를 爲始하여 浮遊標識燈臺와 海中油田의 탐사에 사용되는 RI전지가 계속 試作되었고 그 후 영국, 프랑스, 일본에서도 試作이 행해졌다.

宇宙用과 地上用으로 사용되는 RI전지의 구조는 그림 26과 같은 것으로 RI밀봉선원을 保温材料로 둘러싸서 中心部를 高温으로 유지하여 熱電素子에 의해 외부와의 온도차로 起電力을

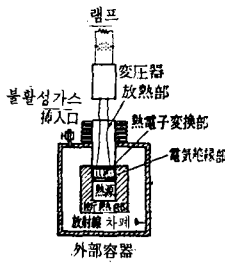


그림26
大型 RI電池의 構造

일으키는 방식을 사용하고 있다. 이와같은 방식을 熱電方式이라 한다. “연료” 또는 RI熱源으로는 α 선을 방출하는 ^{238}Pu , β 선만을 방출하는 ^{90}Sr 등이 이용되며 α 선이나 β 선의 에너지를 熱에너지로 변환하고 있다. ^{90}Sr 의 경우 1만Ci로 약 3와트의 電氣出力을 얻고 있다. ^{238}Pu 이나 ^{147}Pm 을 “연료”로 해서 전기출력 0.1~1밀리와트 정도의 소형 RI전지를 만들 수 있다.

醫學分野에서는 일찍부터 人工臟器의 연구가 추진되어 왔는데 그중에서 心臟pacemaker는 많은 심장병환자에 이용되고 있었다. 心臟pacemaker는 일종의 pulse電壓발생장치로 심장병환자의 体内에 埋沒시켜 심장 근육에 일정한 周波數의 펄스전압을 주어 그 자극에 의해 정상적인 鼓動을 하게 한다. 종래에 사용되어 왔던 심장 페이스메이커는 電源으로 水銀電池를 사용해 왔는데 수은전지는 수명이 2~3년밖에 되지 않는 것이 큰 결점이었다.

RI전지는 반감기가 긴 RI를 연료로 하면 상당히 수명이 긴 전지를 만들 수 있다. 현재 RI 심장페이스메이커에는 ^{238}Pu 또는 ^{147}Pm 이 사용되고 있는데 전지의 수명은 10년정도가 보증되고 있다. 미국에서는 ^{238}Pu 을 RI熱源으로 한 소형의 蒸氣엔진을 사용한 人工심장이 實用化에 가까와지고 있으며 또 ^{238}Pu 을 사용한 heater가 月面에서 地震計의 保温에 사용되고 있다.

3.5 年代測定

방사능이 시간을 재는 “시계”의 역할을 할 수 있다는 것은 널리 알려져 있다. 이집트의 고분속에서 나온 蓮의 씨앗이 언제 것인지 알기 위해 연의 열매속에 있는 炭素의 방사능이 측정

되었다. 또, 미국에서는 바위속의 우라늄 방사능을 측정하여 지구가 40억년전에 생겼다고 발표하였고, 최근에는 아폴로 인공위성이 가지고 온 달 岩石의 방사능으로 달의 年代까지 알 수 있게 되었다.

얼마전에 “Time Capsule”이 만들어 졌을 때 이속에 방사성물질도 넣었다. 즉, 후세의 인류가 우리들의 시대를 알도록 하기 위해 “시계”로서 넣은 것이다.

방사능이 왜 “시계”가 되는 것일까? 그것은 방사능이 시간과 함께 확실하게 崩壞해 간다는 사실을 “시계”로 이용하는 것이다.

우리 인류를 위시해서 모든 동물, 식물, 미생물에 이르기까지 살아있는 것들은 공기가 존재함으로써 생명이 유지되고 있다. 또 지구상의 모든 생물은 태양의 빛과 열을 받아 살고 있으나 태양으로부터는 빛, 열과 함께 宇宙線이라는 방사선도 나오고 있는데 이 우주선으로 인해 大氣中에는 끊임없이 放射性同位元素가 생기고 있다. 대기중에서는 공기를 구성하고 있는 원소의 하나인 질소의 원자가 우주선에 포함되어 있는 中性子線(速中性子線)에 의해 $^{14}\text{N} + n \rightarrow ^{14}\text{C} + p$ 라는 核反應을 일으켜 방사성탄소 ^{14}C 의 원자가 만들어지고 있다. 즉, 安定同位元素 ^{14}N 의 (n, p) 반응으로 ^{14}C 가 생성된다. 공기중에 생긴 ^{14}C 는 탄산가스나 炭酸鹽의 형태로 존재하며 이것이 살아있는 동식물체의 体内에 들어가 동식물의 新陳代謝결과 동식물체의 체내에는 일정한 비율로 ^{14}C 의 방사능이 존재하게 된다. 즉, 동식물의 체내에는 탄소 1그램당 16dpm의 ^{14}C 가 포함되어 平衡狀態로 되어 있다.

이들 동식물이 죽으면 공기중의 탄소를 받아 들이지 못하므로 体内에 있는 ^{14}C 는 계속 붕괴하여 감소가 계속된다. 동식물의 “시체”속에 포함되어 있는 炭素 1그램당 ^{14}C 의 함유율 또는 그 방사능 C_t 를 측정하면 동식물이 “죽은후”의 경과시간 t 를 다음 式에서 구할 수 있다.

$$C_t/C_0 = e^{-0.693t/T}$$

이 式에서 C_t 는 測定時, 즉 현재의 탄소의 比放射能을 나타내며, C_0 는 동식물이 죽을 때까지

의 平衡狀態에서의 탄소의 比放射能을 나타내고 있다. T는 ^{14}C 의 반감기로 5730년이다.

방사성탄소를 이용한 年代測定法은 化石이나 考古學的인 遺品(뼈, 목재 등) 등에 이용되며 수 백년에서 2~3만년까지의 年代를 측정할 수 있다.

암석이나 地質의 年代를 측정하고, 天體의 年代를 측정하는 데는 岩石이나 地層의 生成時에 생긴 우라늄이나 토륨의 방사능 崩壞를 이용한다. 이 우라늄이나 토륨의 붕괴를 系列崩壞(또는 系列變遷)라고 하는데 방사성핵종이 붕괴해서 생기는 생성물도 방사성 핵종이다. 따라서, 긴 壽命의 방사성핵종의 量의 비율이 年數와 함께 조금씩 변화해가므로 계열붕괴에서 생기는 방사성핵종의 同位元素比를 측정하면 生成時부터의 經過年數를 알 수 있다. 우라늄 및 토륨의 붕괴생성물인 헬륨을 이용하는 헬륨法과 鉛을 이용하는 鉛法 등이 있다. 이 年代測定法은 수 십억년의 年代를 측정할 수 있다.

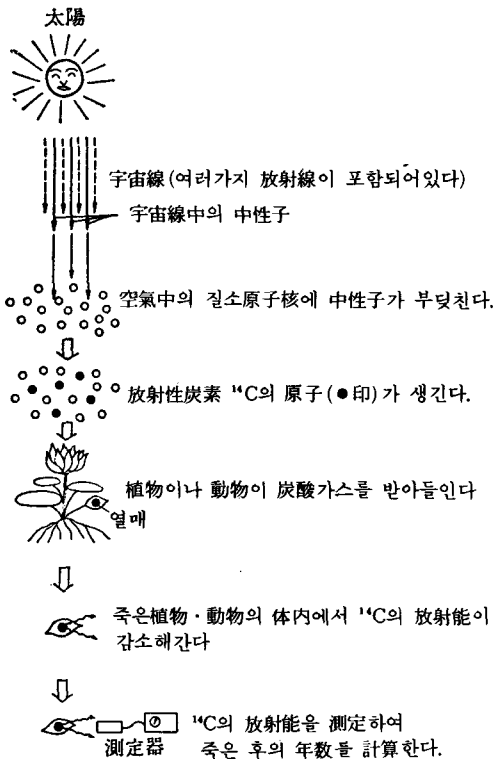


그림27 ^{14}C 에 의한 年代測定의 原理

3.6 트레이서法의 利用

RI는 여러분야에서 tracer(追跡子)로 이용되고 있다. 물속에 잉크를 몇방울 떨어뜨리면 잉크가 퍼져 나가는 모양과 물의 흐름을 잉크의 색으로 뚜렷이 알 수 있다. 이것은 잉크가 물의 tracer역할을 하고 있기 때문이다.

잉크를 이용해서 색으로 관찰하는 대신 방사능을 가진 물질을 tracer로 사용해서 방사능을 측정하므로써 물의 움직임을 알 수 있다. 이와 같이 방사능을 tracer로 사용하는 방법을 放射性트레이서(radioactive tracer)法이라고 한다.

항구를 건설할 때에는 海底의 모래 움직임을 잘 조사하여 堤防의 길이나 방향 등을 정할 필요가 있다. 海流에 의해서 운반되는 해저의 모래를 漂砂라고 하는데 방사성tracer를 사용해서 이 漂砂의 이동을 조사하는 것은 오래전부터 행해지고 있었다. ^{60}Co 이나 ^{45}Sc 등의 RI를 포함한 화합물을 유리원료의 일부로서 첨가하여 방사성 유리를 만들고 이 유리를 분쇄하여 "유리모래"를 만들어 tracer로서 사용하였다.

생산공장, 특히 화학공업공장에서는 反應塔속에서의 원료 움직임이나 원료가 반응탑속에 머무르는 시간(滯留時間) 등을 조사해서 제조공정을 검토해야 할 경우가 많다. 이와같은 검토를 일반적으로 工程管理라고 하는데 RI를 tracer로 사용하여 工程管理를 하는 방법이 여러분야의 공업에 행해져 工정의 合理化와 省力化 등이 추진되어 왔다.

製紙工場의 蒸解塔은 종이의 원료가 되는 목재의 톱을 가성소다液에 넣어 처리하는 장치인데 원료가 증해탑에 들어가서 나올 때까지의 시간이 변화하면 제품인 종이의 성질이 달라지므로 원료가 처리되는 시간을 정확히 알 필요가 있다. 목재의 톱과 함께 움직이는 방사성tracer를 사용해서 원료의 이동을 조사하여 그 결과로부터 증해탑의 操業조건을 最適의 것으로 변경하는 것은 공정관리를 위한 tracer이용의 一例이며 이와같은 것은 세멘트 공장의 공정관리에도 행해져왔다.

최근, 産業公害에 대한 規制가 엄격해져서 생

산공장에서는 有害物質이 방출되지 않도록 하기 위하여 생산공정에서의 유해물질 움직임이나 量 등을 측정하는 경우가 많아졌다. 塩素의 제조공장은 소금을 원료로 해서 電解를 하는데 이 電解裝置에서는 용기의 바닥에 액체의 水銀을 흐르게 하여 陰極의 역할을 하게 하고 있다.

그러므로 이 수은이 장치밖으로 흘러 나가거나, 제품에 포함되어 감소되는 것을 정확히 측정해서 관리해야 하기 때문에 1년에 數回 방사성수은(¹⁹⁷Hg 또는 ²⁰³Hg)을 tracer로 사용해서 電解槽에 넣어 수은이 묻게 되어 완전히 均一하게 되었을 때 수은의 比放射能을 측정하고 있다. 즉, 방사성수은이 묻어지는 樣相에서 음극으로 사용되고 있는 수은의 양을 계산할 수 있는 것이다.

tracer로 넣는 방사성수은의 比放射能이 1g 당 a였었다고 하고, 電解槽에 넣어 수은 1g 당 a'로 묻어졌다고 할 때 tracer가 m그램 있었다고 하면 음극에 사용되고 있는 수은全量 M은 다음의 式에서 구할 수 있다.

$$M = m \times \left(\frac{a'}{a - a'} \right)$$

既知量의 방사성tracer를 이용해서 시료중에 있는 未知量의 같은 원소를 定量하는 방법을 同位元素稀釋分析法(isotope dilution method) 이라고 하는데 전해조의 수은량을 측정하는 앞에서의 방법은 동위원소희석분석법의 원리와 같은 것이다.

자동차의 엔진에 사용되고 있는 피스톤 링의 마모시험에도 방사성tracer가 자주 이용된다. RI를 合金으로, 하여 만든 피스톤 링이나 放射化시킨 피스톤링을 사용하여 엔진의 운전시에 마모된 가루가 윤활유속에서 나오는 것을 윤활유의 방사능변화로 측정하여 피스톤링의 개량이나 피스톤링의 摩耗機構를 해명하기 위한 연구 등이 행해지고 있다.

공장의 제조공정이나 野外실험에서 방사성tracer를 사용하는 경우에는 실험하는 동안 방사선관리를 해야만 하므로 이를 위한 측정기와 시설이 필요하며 또 방사능을 환경으로 방출하는

데 관한 법률적인 제한도 있다.

그래서 “放射能을 갖고있지 않는” tracer를 사용해서 현장실험을 하고 이 실험중에 sampling한 시료를 放射化分析하는 방법이 있다. 예를 들면, 논에 살충제를 살포할 때 살충제에 미리 “放射化되기 쉬운 원소”를 넣고 살포가 끝난 후 벼를 베어서 放射化시켜 “방사화되기 쉬운 원소”의 방사화분석을 하여 벼에 부착된 미량의 살충제를 정량한다. 이 실험에서는 “방사화되기 쉬운 원소”로 europium(Eu)이라는 원소가 사용되는데 이와같은 방법에 사용되는 방사능을 갖고있지 않는 tracer를 「activable tracer」라 하며 이와같은 트레이서法을 activable tracer法이라고 부른다.

3.7 autoradiography의 利用

방사능을 가진 試料의 표면에 사진필름을 밀착시켜두면 시료에서 나오는 방사선(주로 α선이나 β선)에 의해 사진필름이 感光된다. 이와같이 시료속의 방사성물질의 분포를 사진으로 찍는 방법을 autoradiography라고 한다.

의학이나 생물학에서는 쥐에 RI를 주사한 후 쥐의 切片을 만들어 사진필름에 밀착시켜 여러 가지 器官이나 세포에서의 RI분포를 사진으로 찍는 방법이 잘 사용된다. 우라늄광석의 autoradiography를 찍어 우라늄의 분포와 함유량을 조사할 수 있고 금속이나 합금의 재료를 방사화시켜 autoradiography를 하면 방사화된 원소의 분포를 알 수 있어 금속재료를 연구하는 有效한 방법이 되고 있다.

3.8 RI利用의 効果

의학분야에서 RI와 방사선이 이용되고 있는 것은 인간의 생명과 직접 관계가 되므로 그 효과는 대단히 이해하기 쉽다.

한편, 工學분야에서는 이용에 따르는 효과가 반드시 우리들의 일상생활과 결부되어 있지 않은 것같이 생각되기 쉬우나 煙氣感知器처럼 우리들의 생활환경속에서 중요한 역할을 하고 있는 것도 적지 않다. 또 항공기나 선박에서의 radiography와 같이 RI를 이용함으로써 사고를 미연에 방지하고 우리들의 생명을 구해주고 있

는 것도 있다. 理工學的 利用에서는 제조공정의 관리와 제품의 품질관리를 위해 RI가 사용되고 있는 예가 많으며 공업계에서는 막대한 경제효과를 가져와서 공업발전을 통해서 국민생활에 기여하고 있다.

그러나 RI를 이용할 때 방사능의 무서움을 경시할 수는 없다. 퀴리夫人이 방사능을 발견한 직후에 방사선이 치료에 사용될 수 있음을 알고 방사선치료가 단기간에 보급되었으나 그 후 방

사선장해가 續出했다는 귀중한 교훈도 있다. RI의 이용이 급속하게 확대됨에 따라 다른 산업공해와 마찬가지로 방사능에 대한 안전을 어떻게 확보할 것인가하는 문제에 직면하고 있다.

오랜 역사속에서 인류는 위험한 것을 制御하고 그것을 有効하게 활용하는 방법을 배워왔다. RI의 이용에서도 방사능의 위험성만을 논의하지 않고 이를 극복하여 가능한 한 有効하게 이용하려는 사고방식이 필요하다.

慶熙教育 및 研究用原子炉 (KRR) 稼動

國內 大學에서는 최초로 작년 12월 3일 경희대학교 수원캠퍼스에 설치 완료되어 稼動式을 갖은 경희교육 및 연구용원자로 (Aero-jet General Nucleonics, Model 201)는 國內 研究用原子炉로서는 한국에너지연구소의 TRIGA Mark-II, III에 이어 세번째이며, 현재 상업운전 중인 古里 原子力發電所까지 합하면 전국적으로 네번째 정상 가동되는 原子炉이다.

이 原子炉는 20% 농축산화우라늄과 폴리에틸렌 중성자 감속재를 균질 혼합한 核燃料体를 사용하는 熱中性子 原子炉로서 고도의 安全性과 여러가지 안전조치를 마련하고 있으며 또한 그 활용성이 대단히 커서 기초 원자로실험은 물론 원자로물리실험과 일부 핵물리실험까지도 가능하여 원자력과 학생 및 물리학과와 화학과 등 관련학과 교수들의 연구에도 크게 기여하게 될 것이다.

(諸 元)

원자로 탱크 : 9.5ft×6.5ft

방사선차폐구조 : 흑연 20cm

납 10cm

물 55cm (1,000gal.)

노심용기 : 알루미늄 탱크 [76cm×32.2cm]

노심구성 및 U-235함량 :

핵연료원판 (직경 25.6cm, 두께 4cm) 4개
(총 408gr.)

“ (직경 25.6cm, 두께 2cm) 3개
(총 174gr.)

핵연료원판 (직경 25.6cm, 두께 1cm) 2개
(총 58gr.)

제어봉 (Safety) 2개 (총 29gr.)

“ (Coarse) 1개 (14.5gr.)

“ (Fine) 1개 (2.69gr.)

퓨즈 1개 (4gr.)

주요설비 : 실험시설 Thermal Column 1개

Access Ports 4개

Glory Hole 1개

원자로 제어반

