
감마선 분광분석

- Gamma-ray Spectrometry -

이 해 영

I. 감마선분광학의 기초지식

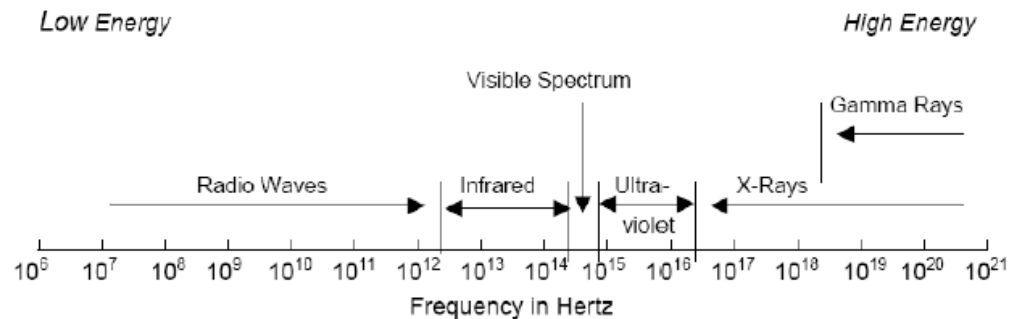
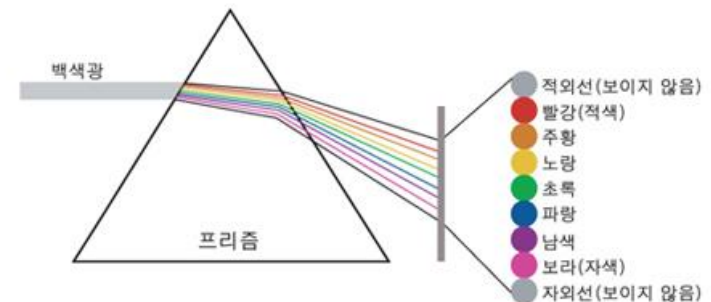
1. 서론

◆ 분광학(Spectroscopy)

- 파장(주파수, 에너지)에 따른 빛과 물질 간의 상호작용 연구
- 프리즘 → 가시광선 관찰
- 오늘날 파장(에너지)에 따른 어떤 양을 측정하는 것을 의미
- $E = h\nu = hc/\lambda$

◆ 스펙트럼(Spectrum)

- 파장(주파수, 에너지)의 함수로 주어지는 반응 값을 도표로 나타낸 것
- 에너지가 클수록 파장이 짧다



1. 서론

◆ 분광분석법(Spectrometry)

- 파장(주파수, 에너지)에 따른 빛(방사선)의 세기 측정 및 기록
- Spectroscopy와 구분 없이 사용

Gamma Ray Spectroscopy

Experiment GRS

University of Florida — Department of Physics
PHY4803L — Advanced Physics Laboratory



Gamma Spectrometry

Nuclear Energy Division – Marcoule center

Fuel Cycle Technology Department

Fuel Technology Development Unit

Characterization and Visualization
Technologies in DD&R

Gamma Spectrometry



Charly MAHE
charly.mahe@cea.fr

DEN/DTEC/SDTC/LSTD
2011, December

IAEA Practical training workshop – Characterization and Visualization Technologies in DD&R

1



Gamma-ray Spectroscopy



An introduction:
gamma rays, detectors, spectrometers

Exotic Beams Summer School 2011, MSU

Dirk Weisshaar (NSCL)

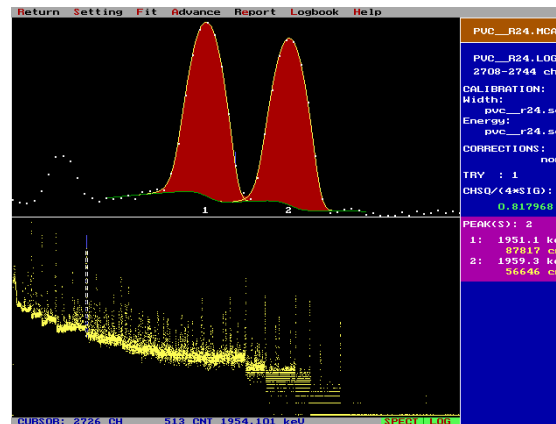
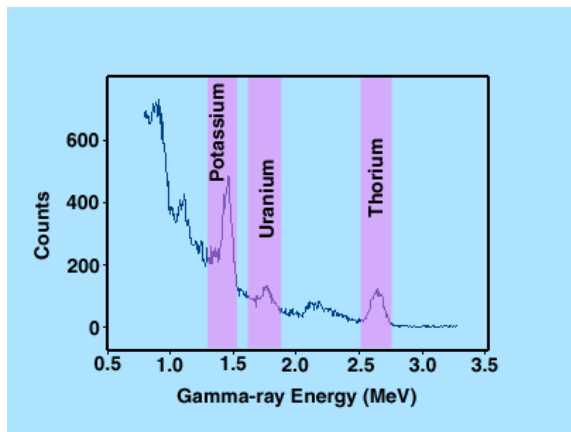
1. 서론

◆ 감마선 분광분석법(Gamma ray spectrometry)

- 다양한 매질(matrices)내에 있는 감마방출 동위원소의 식별(identification) 및 정량(quantification)
- 선원(source)로부터 방출된 감마선의 수(number)와 에너지(energy)
- 응용 : 감마선의 수 $\Rightarrow$ 방사능의 결정(determination),
감마선의 에너지 $\Rightarrow$ 방사성 핵종의 식별(identification)

◆ 스펙트럼 분석(spectrum Analysis)

- 전 에너지 흡수에 해당하는 스펙트럼 피크의 분석
- 피크 위치(location) $\Rightarrow$ 감마선에너지 측정 $\Rightarrow$ 방사성핵종 식별
- 피크 면적(area) $\Rightarrow$ 감마선 방출률 측정 $\Rightarrow$ 방사능의 결정



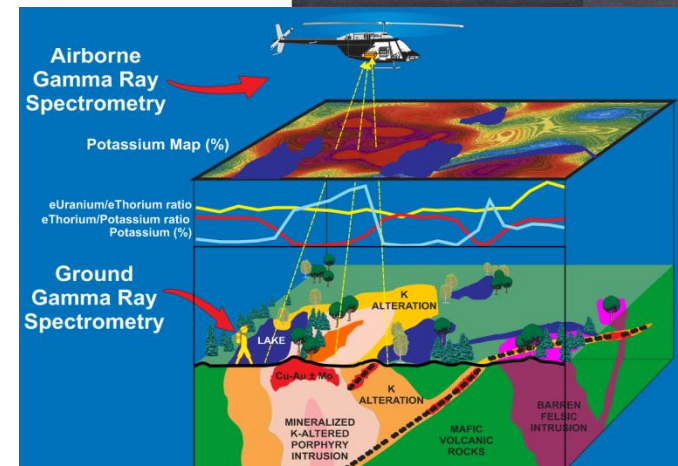
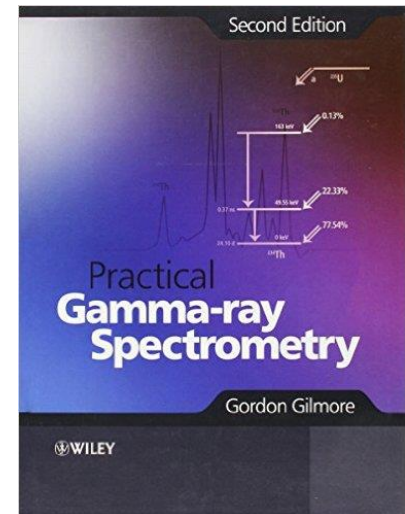
1. 서론

◆ 감마선 분광분석법의 활용(Applications)

- 장점 ⇒ 1회 측정으로 많은 수의 감마방출 핵종을 검출, 전처리 비교적 간단
- Ge 반도체검출기의 출현 ⇒ 다양한 분야에서 응용
- 컴퓨터의 보급 ⇒ 많은 양의 데이터 해석, 신속한 처리

◆ 활용 분야

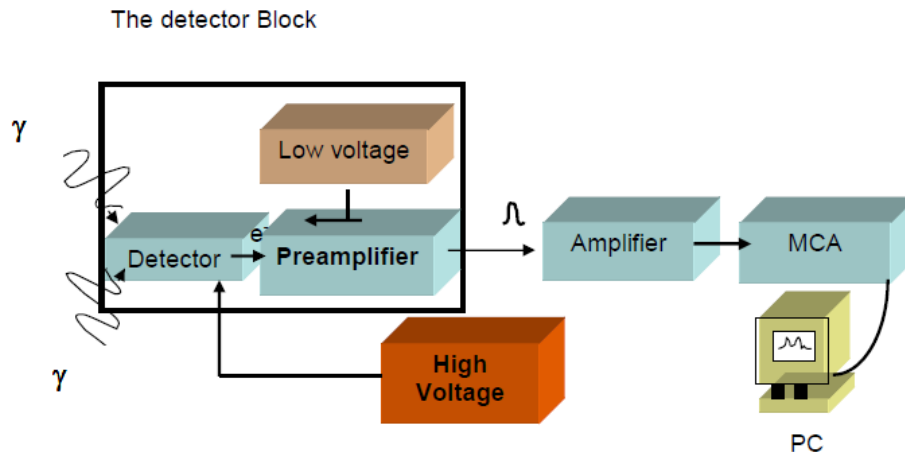
- 원자력시설의 모니터링
- 보건물리(방사선방호)
- 핵의학
- 재료/물성 연구
- 생명과학
- 지구환경과학
- RI를 이용하는 산업체 (비파괴검사 등)



1. 서론

◆ gamma Spectroscopy System(typical)

- HPGe detector (or NaI Detector)
- High voltage power supply
- Preamplifier
- Amplifier
- Analogue to Digital Converter(ADC)
- Multi-Channel Analyzer(MCA)



1. 서론

◆ 고순도 게르마늄 검출기(HPGe)

- 입사한 감마선과 Ge 원자와의 상호작용 결과로 생긴 고속전자에 의하여 그 에너지에 비례하는 전자(electron-hole pair)를 생성하는 일종의 방사선센서
- 대부분 동축 원통형 구조
- 접합구조 및 인가전압의 극성에 따라 P형(+전압 인가)과 N형(-전압 인가)
- P형 : 방사선 입사장이 약간 두꺼워 50 keV 이상의 감마선이나 X-선이 측정대상
- N형 : 입사장을 매우 얇게 제작할 수 있어서($\sim 0.3 \mu\text{m}$) 저에너지 영역(약 10 keV)에서 수 MeV 영역까지 측정이 가능

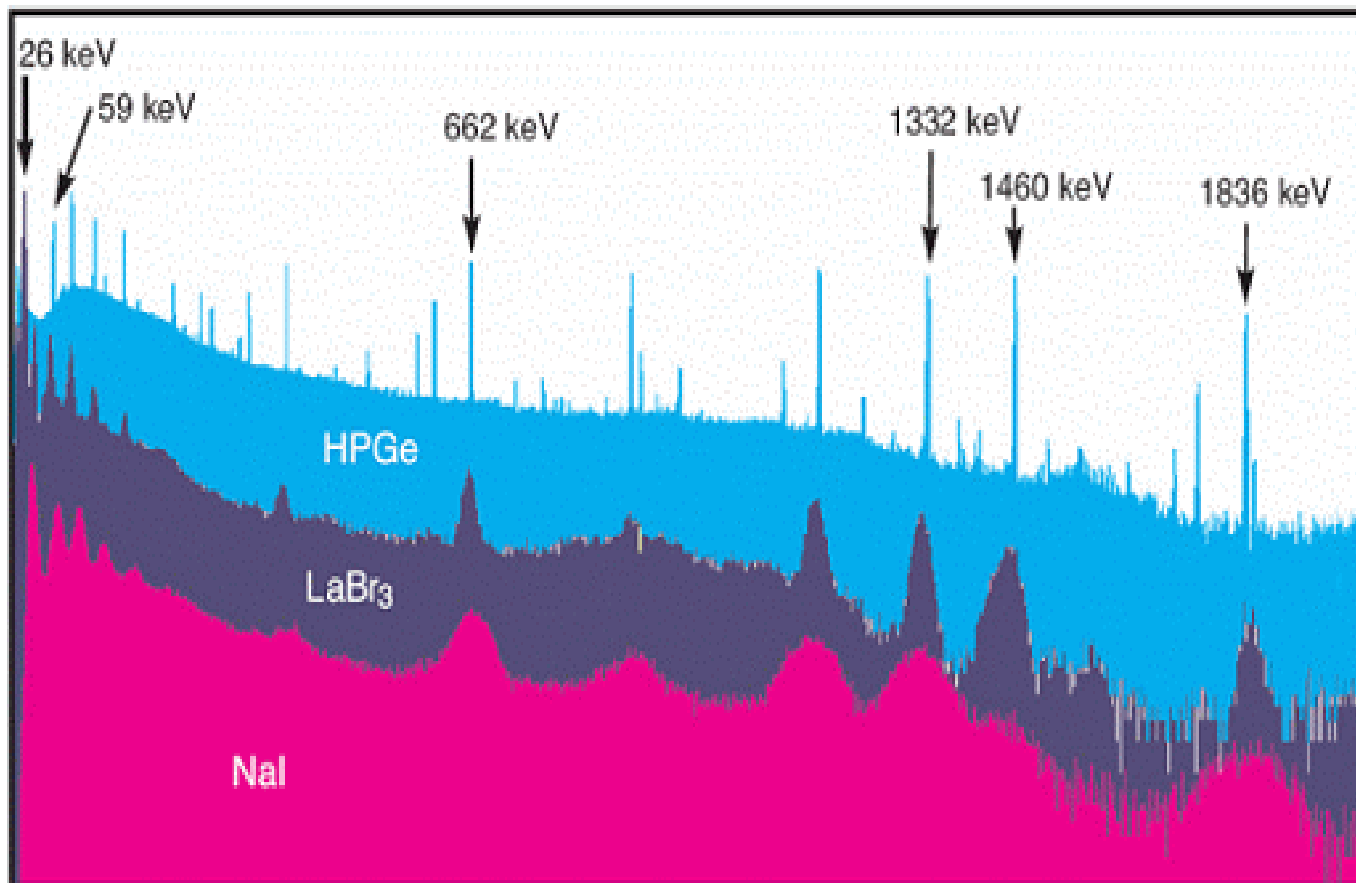


1. 서론

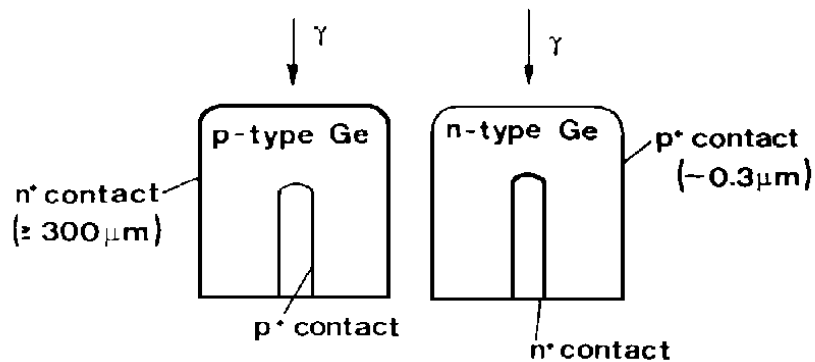
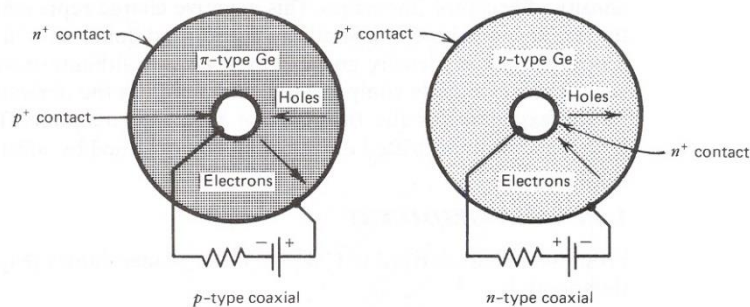
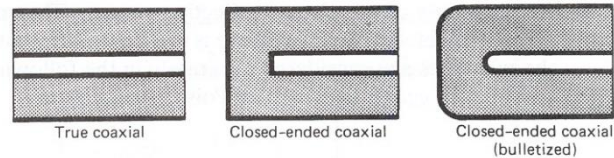
◆ NaI 검출기와 HPGe 검출기의 비교

NaI(Tl)	HPGe
저렴하다 ($\times 10$) 검출효율이 높다 ($\times 10$) 대용량 검출기 제작에 용이하다 일반 환경에서 동작한다 온도에 민감하다 양극의 전압에 민감하다 ($V^{0.7N}$) 에너지분해능이 저조하다 [6%, 80 keV for 3"×3" at 1332 keV]	액체질소로 냉각하여 사용한다 (77K) 온도의 영향을 덜 받는다 인가전압의 영향을 덜 받는다 에너지분해능이 우수하다 [0.15%, 2 keV typical at 1332 keV]

1. 서론

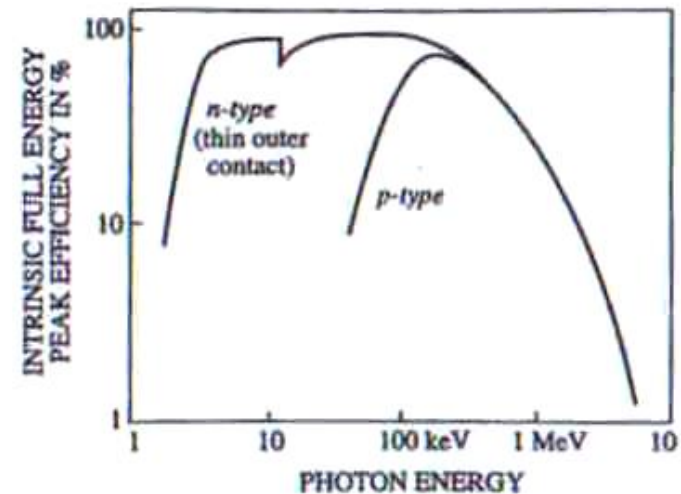


1. 서론



P- type :
cheaper, most common,
poor low energy performance

n-type :
expensive,
good low energy performance



1. 서론

◆ 고전압 공급장치

- 검출기내에 생성된 전하를 수집하기 위하여 역 전압을 통한 전기장을 인가하는 기능
- 전형적인 HPGe 검출기는 약 3000 V 정도가 요구되며, 최고 5000 V까지 인가할 수 있는 것들이 시판되고 있음

◆ 전치증폭기

- 검출기내에 생성된 전하 량에 비례하는 전압신호(mV)로 바꾸어 주는 기능
- 선형증폭기에 신호의 손실 없이 전달함과 동시에 접속한 신호케이블에 의한 잡음이 생기지 않도록 출력 임피던스를 낮게 유지

◆ 선형증폭기

- 빠른 상승시간(rising time)과 느린 하강시간(decay time)을 지닌 전치증폭기의 출력신호를 정형(shaping) 하는 기능과
- 신호대 잡음의 비(S/N비)를 개선시켜 신호를 선형적으로 증폭(~ 10 V)시키는 기능

1. 서론

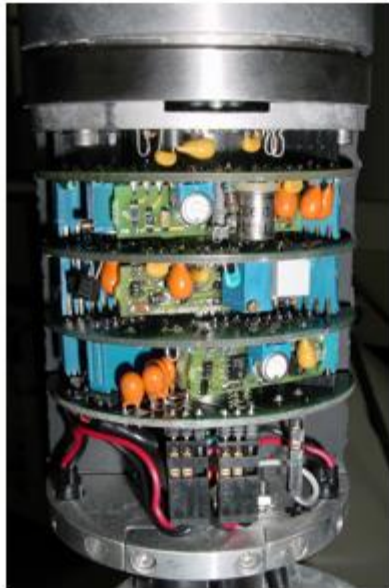
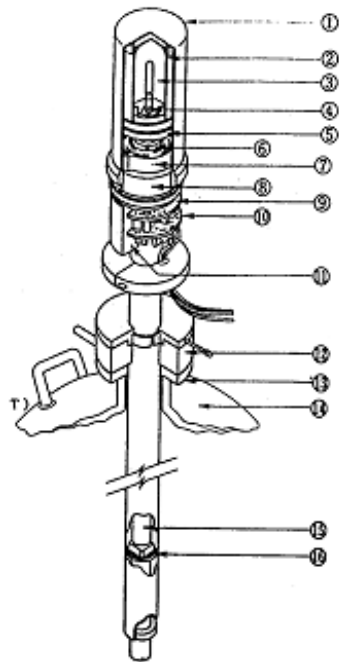
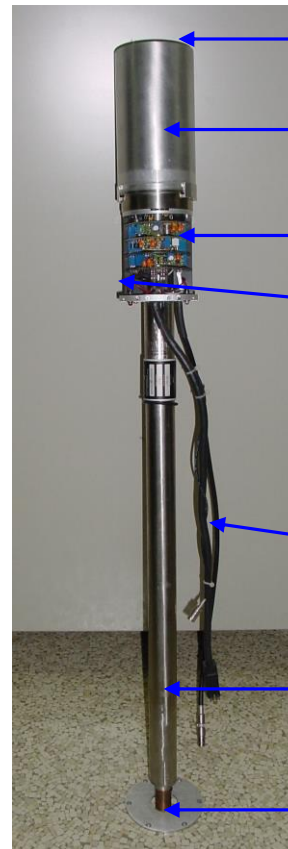


그림. HPGe 검출기의 전치증폭기 실제 사진

1. 서론



- ①End cap
- ②Cap
- ③Ge반도체 결정
- ④고정 나사
- ⑤고정부
- ⑥Cooling rod 쇠고리
- ⑦열전연체 (플라스틱 FET)
- ⑧차폐
- ⑨Cryostat flange
- ⑩전치증폭기
- ⑪고압필터
- ⑫수지 Ring
- ⑬Dewar flange
- ⑭Dewar vessel
- ⑮Cold finger
- ⑯Molecular sieve



End Cap

Ge 반도체결정

전치증폭기

고압필터

**Signal /H.V. Cable
(PreAMP power, E, T, Inhibit)**

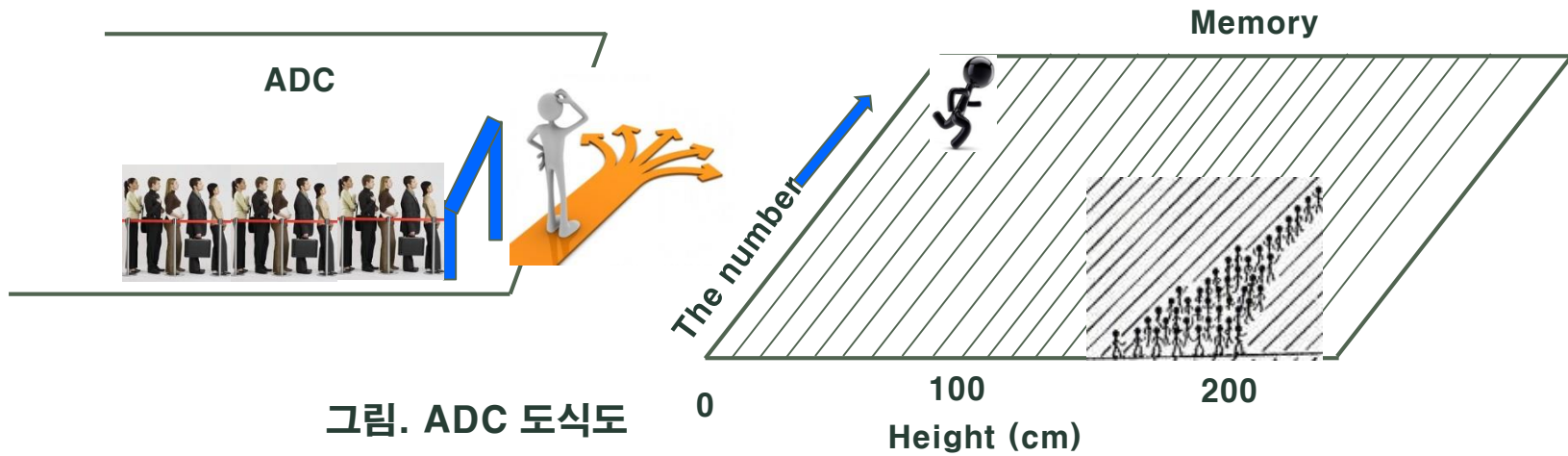
Cold Finger

Molecular Sieve

1. 서론

◆ 아날로그-디지털변환기 (Analogue to Digital Conversion, ADC)

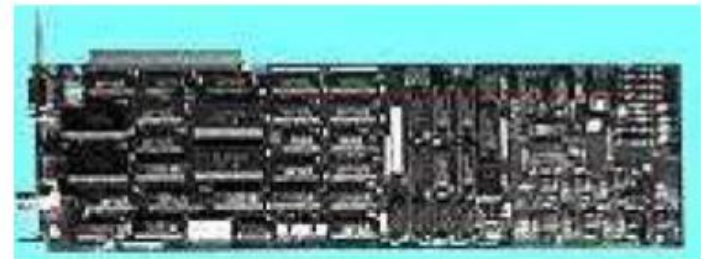
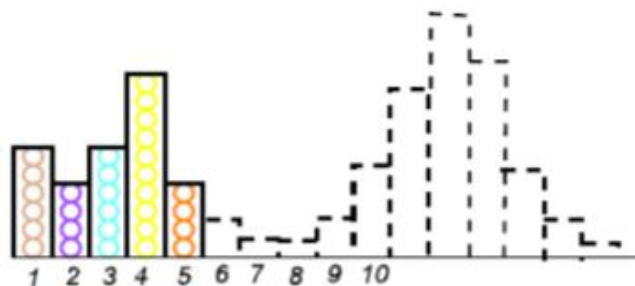
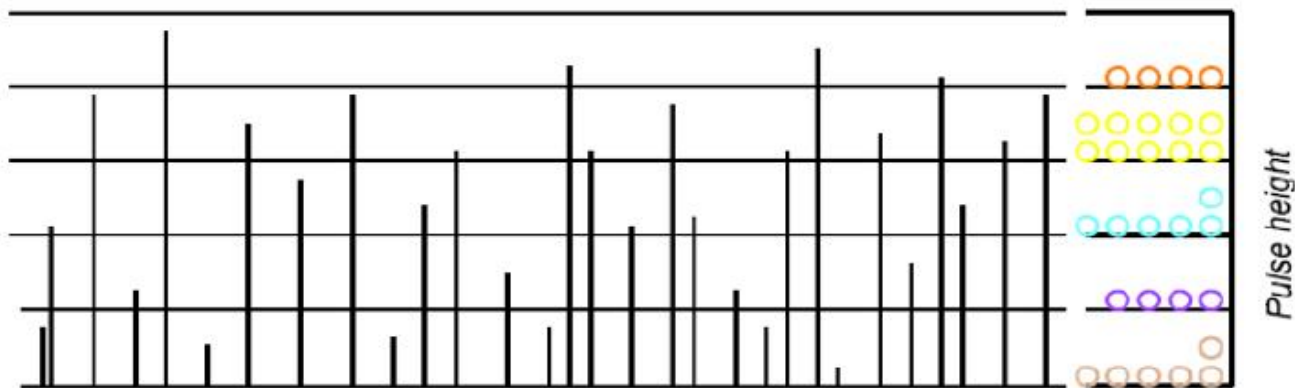
- 감마분광분석시스템의 심장 역할



1. 서론

◆ MCA

- 검출기에 흡수된 에너지에 비례하는 펄스 크기 별로 분류하여 해당채널에 기록 및 저장(기록), 출력하는 기능과 수집과정에서의 스펙트럼을 CRT상에 표시할 수 있는 기능
- 파고분석기는 ADC, 스펙트럼 메모리, 디스플레이 장치로 구성
- 오늘날에는 대부분 PC에 ADC, 스펙트럼 메모리를 조합시킨 PC-MCA가 많이 이용



1. 서론

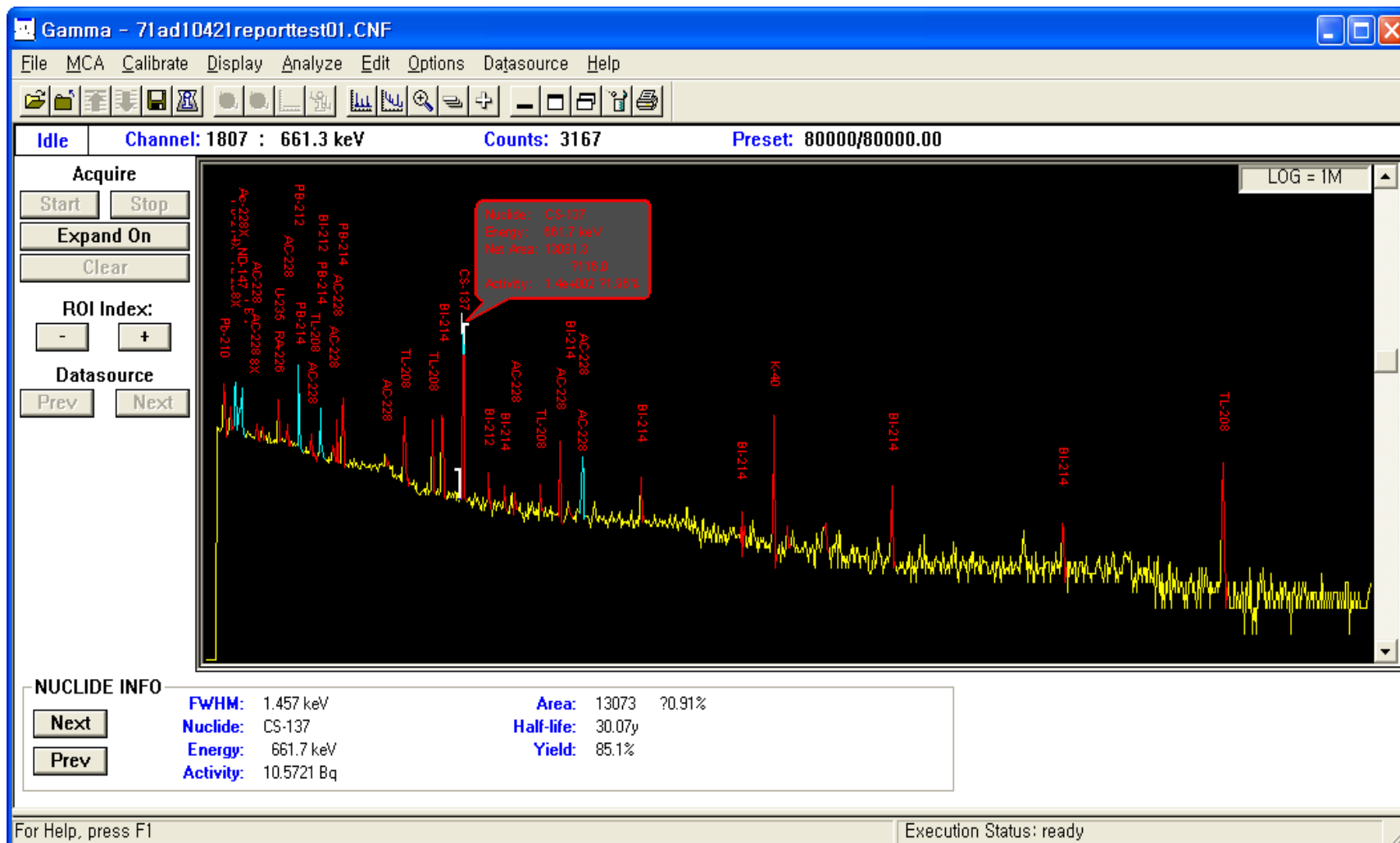
◆ 디지털 신호처리 장치(DSP)

- 펄스신호의 아날로그 파형 정형(shaping) 기능을 디지털 domain에서 처리
- 과거 NIM 규격의 아날로그 전자회로부(예를 들면 선형증폭기, ADC 등)를 대신하는 기능
- CANBERRA사 : DSA-1000, Lynx 등
- ORTEC사 : DSPEC series



1. 서론

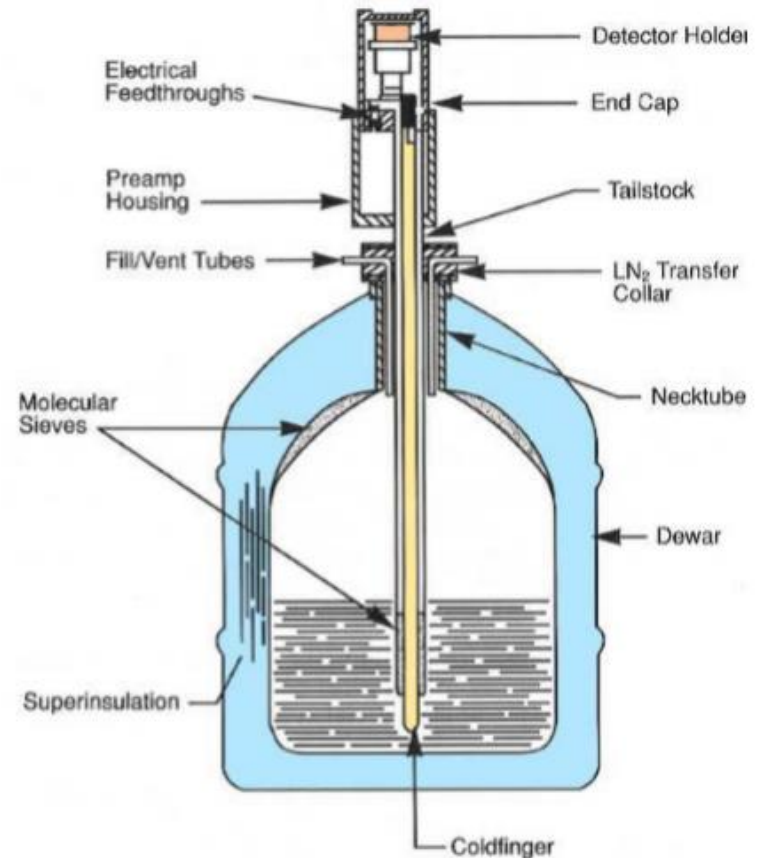
◆ 감마선 스펙트럼의 예



1. 서론

◆ 검출기의 냉각

- 검출기가 냉각되지 않은 상태에서 고전압을 인가하면 검출기 Ge 결정에 큰 누설전류가 흘러서 전치증폭기를 손상시키므로 충분히 냉각 [24시간 정도]
- 충분히 냉각되지 않은 상태에서의 고전압 인가에 의한 검출기 충격을 방지하기 위해서는 DSP의 고전압차단(HVINH) 케이블을 연결해주는 것이 좋음
- HPGe 검출기는 고전압이 걸려 있지 않으면 냉각이 중단된다고 하더라도 성능이 나빠지지는 않는다.
- 재 냉각은 완전하게 실온으로 돌아온 뒤 다시 냉각시키는 것이 바람직하며, 이때에도 충분히 냉각[24시간 정도]시켜서 고전압을 인가한다.



1. 서론

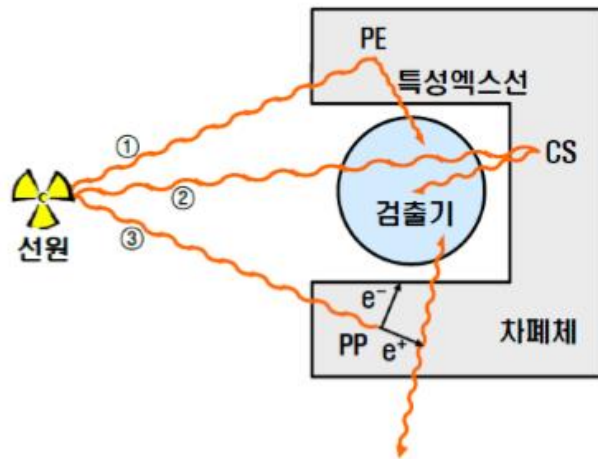
◆ 배경방사선(백그라운드) 선원

- 1) 검출기 재질(반도체 재질)에 함유된 천연방사성핵종으로부터 방출되는 방사선
- 2) 검출기 주변장치(지지대, 차폐체 등)에 함유된 천연방사성핵종으로부터 방출되는 방사선
- 3) 검출기를 둘러싼 공기중의 라돈과 그 딸핵종에 기인한 방사선
- 4) 지표의 지각방사선, 또는 분석실의 벽체 및 구조물로부터 방출되는 방사선
- 5) 우주선 등

1. 서론

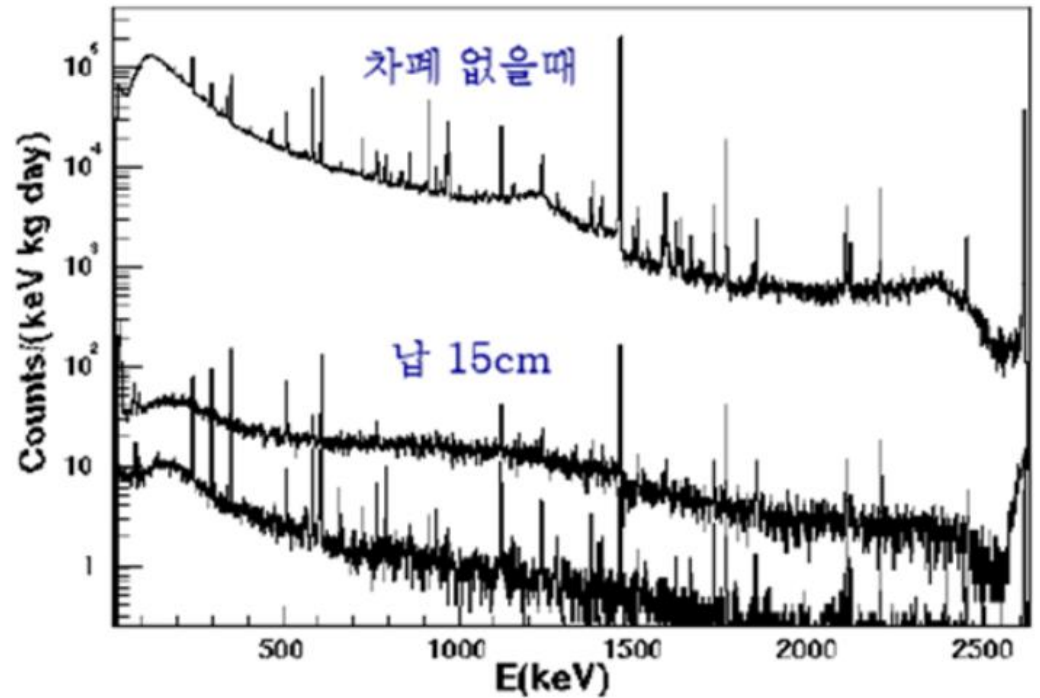
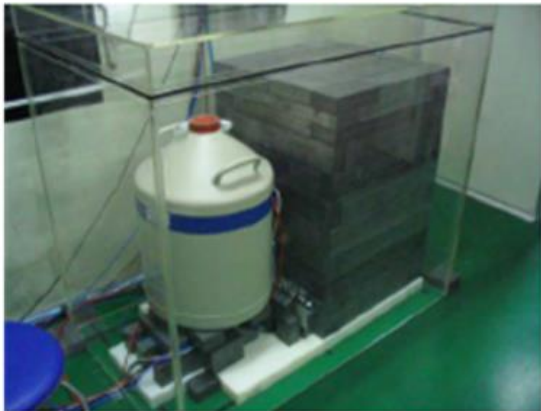
◆ 배경방사선(백그라운드)를 줄이는 방법

- 1) 차폐체(납 등) 이용
- 2) 가드검출기 이용한 반동시 회로
- 3) 동시회로



1. 서론

◆ 차폐체 이용

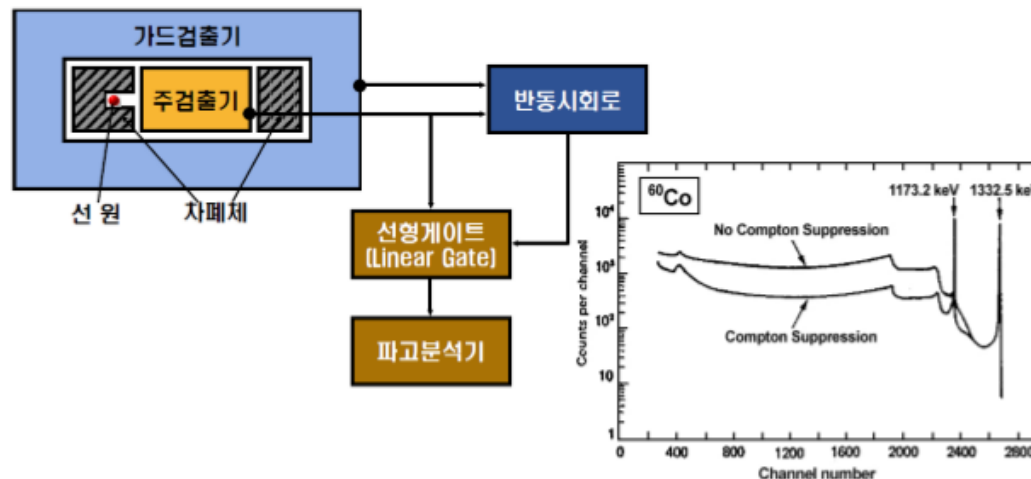


납 15cm+ 구리 10cm+ 질소가스 (지하 700미터)

1. 서론

◆ 가드검출기를 이용한 반동시 회로

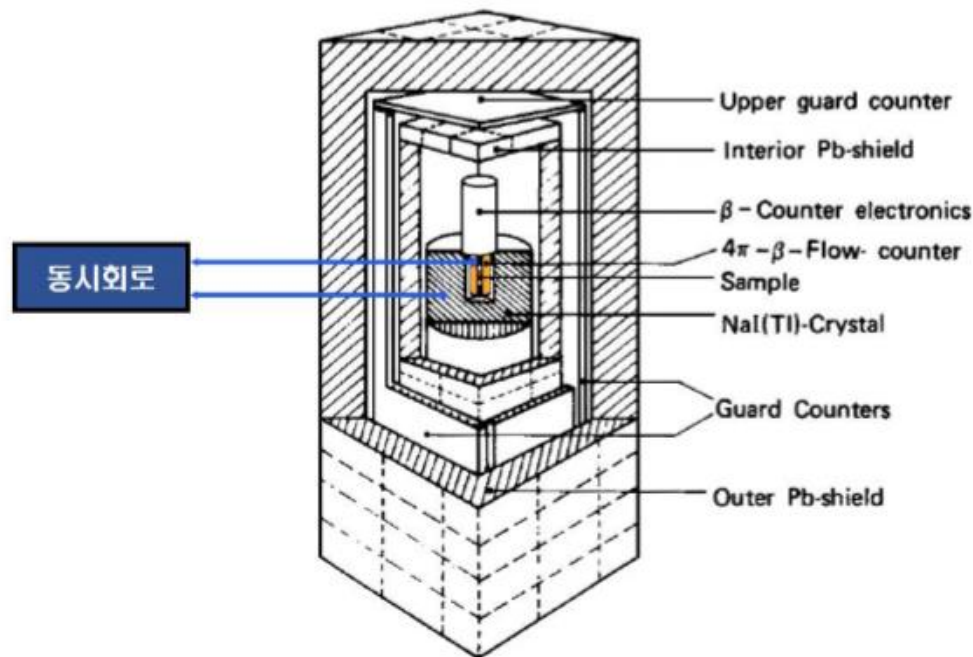
- 가드검출기 : 플라스틱검출기(대용량), 액체섬광검출기, 고리형태의 GM 검출기 등
- 우주선에 의한 백그라운드 기여 분을 크게 저감
- 선원에서 방출되는 방사선은 주 검출기에서만 신호생성
 - 반동시 회로에서 출력펄스 형성
- 우주선은 가드 검출기와 주 검출기 모두에서 신호생성
 - 반동시회로에서 출력펄스 제거
- 컴프턴 연속부 저감
 - 선원에서 방출된 감마선이 주 검출기에서 컴프턴 산란을 한 후 가드 검출기로 입사하여 다른 반응을 하면 반동시회로에서 출력펄스 제거



1. 서론

◆ 동시회로

- 베타선과 감마선을 동시 측정 : 베타붕괴에 수반되어 동시에 감마선을 방출하는 핵종
- 주로 감마선은 NaI 검출기가 측정하고 베타선은 비례수관(기체유입형 4π)이 측정
 - NaI 검출기와 비례계수관이 동상에 신호생성 → 동시회로에서 출력펄스 형성
 - 어느 한 검출기에서만 신호생성(백그라운드 방사선) → 동시회로에서 출력펄스 제거
- 백그라운드 저감효과가 높으므로 극저준위 방사능측정에 이용(최소검출하한치 개선)



2. 기초 핵물리학

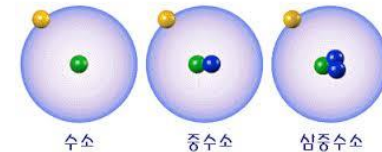
◆ 원자와 원자핵

- 원자핵 속에 있는 양성자의 수 ; 원자번호(atomic number) Z
- 중성자의 수 : $N=A-Z$
- 질량수 (mass number) : $A = Z+N$



◆ 동위원소(isotopes)

- 양성자의 수(Z)가 같고 중성자의 수(N)가 다른 원소
- ^{32}S , ^{33}S , ^{34}S , ^{35}S , ^{36}S , ^1H (hydrogen, H), ^2H (deuterium, D), ^3H (tritium, T)
- 방사성동위원소(Radioisotopes, RI) ; ^3H , ^{35}S



◆ 핵종(nuclides)

- 질량수 A 와 원자번호 Z 를 함수로 결정되는 원자핵의 종류를 구분해서 말할 때
- 핵종의 종류

구분	Z	N	A	예
동위 원소(체)	=	≠	≠	$^1_1\text{H}_0$, $^2_1\text{H}_1$, $^3_1\text{H}_2$
동중 원소(체)	≠	≠	=	$^{90}_{38}\text{Sr}_{52}$, $^{90}_{39}\text{Y}_{51}$
동중성자 원소(체)	≠	=	≠	$^{59}_{27}\text{Co}_{32}$, $^{60}_{28}\text{Ni}_{32}$
핵이성체	=	=	=	$^{137m}_{56}\text{Ba}_{81}$, $^{137}_{56}\text{Ba}_{81}$

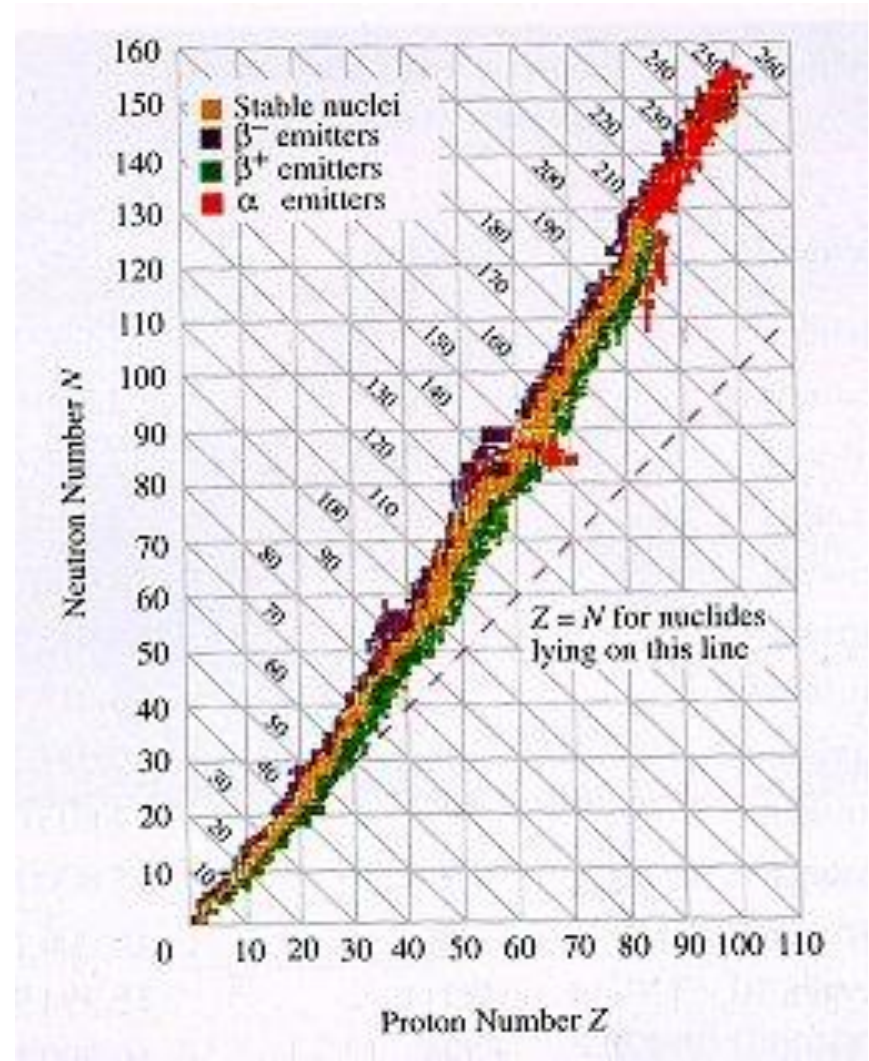
2. 기초 핵물리학

◆ 원자핵의 안정성(stability)

- 원자핵 속의 양성자수와 중성자수의 비로서 안정성이 결정
- 무거운 원자핵($Z > 20$)은 양성자보다 상대적으로 더 많은 중성자를 필요로 함
 - 원자번호가 커지면 양성자 사이의 반발력(쿨롱력)이 커져 원자핵 자체가 불안정해지므로 그 반발력을 약화시키기 위해서

◆ 원자핵의 붕괴(decay)

- 불안정한 핵종은 자연적으로 변환하여 안정한 핵종으로 됨
- 이러한 붕괴과정에서 반드시 α 선이나 β 선이 방출
- 불안정한 원자핵을 방사성핵종



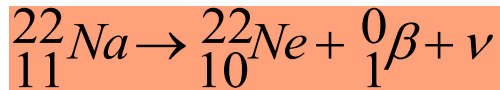
2. 기초 핵물리학

◆ 베타 붕괴

- β^- **decay** (과잉 중성자, neutron-rich decay) ; 과잉 중성자가 양성자로 변환하여 전자를 원자핵 밖으로 방출



- β^+ **decay** (과잉 양성자, neutron-poor decay) ; 양성자를 원자핵 밖으로 방출

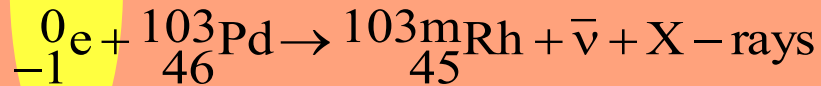


Note: β^- and β^+ particles are emitted in a spectrum of possible energies as the decay energy is shared with a neutrino and an anti-neutrino, respectively.

2. 기초 핵물리학

◆ 전자포획 (Electron Capture)

- 과잉 양성자 (neutron-poor decay)를 가진 핵이 원자핵 외부의 궤도전자를 포획하여 중성자로 변환

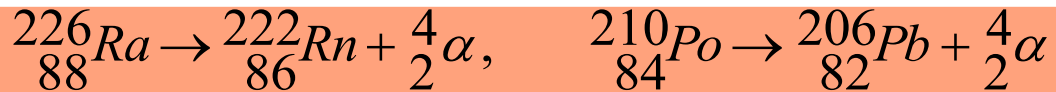


These are ORBITAL electrons!!

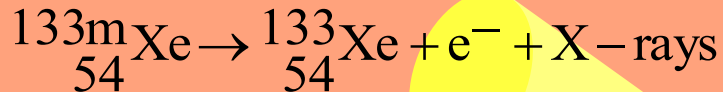
2. 기초 핵물리학

◆ 알파 붕괴

- 무거운 핵은 종종 알파입자(^4He)를 방출하면서 붕괴



- 여기 에너지는 Auger 전자와 X-선을 방출을 가져오는 내부전환(Internal Conversion, IC)과정을 통해서 에너지를 잃고 바닥상태가 됨



*α -particles are
mono-energetic!!*

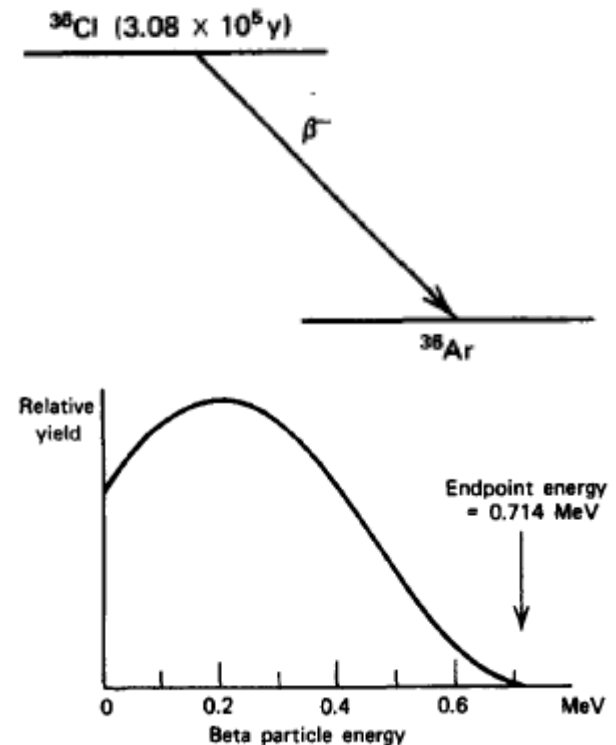
*This is an
ORBITAL
electron!!*

2. 기초 핵물리학

◆ 순 베타방출 선원(Pure beta sources)

- Decay directly to the ground state of the product(no via the excited state)

Nuclide	Half-Life	Endpoint Energy (MeV)
^3H	12.26 y	0.0186
^{14}C	5730 y	0.156
^{32}P	14.28 d	1.710
^{33}P	24.4 d	0.248
^{35}S	87.9 d	0.167
^{36}Cl	3.08×10^5 y	0.714
^{45}Ca	165 d	0.252
^{63}Ni	92 y	0.067
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	27.7 y/64 h	0.546/2.27
^{99}Tc	2.12×10^5 y	0.292
^{147}Pm	2.62 y	0.224
^{204}Tl	3.81 y	0.766

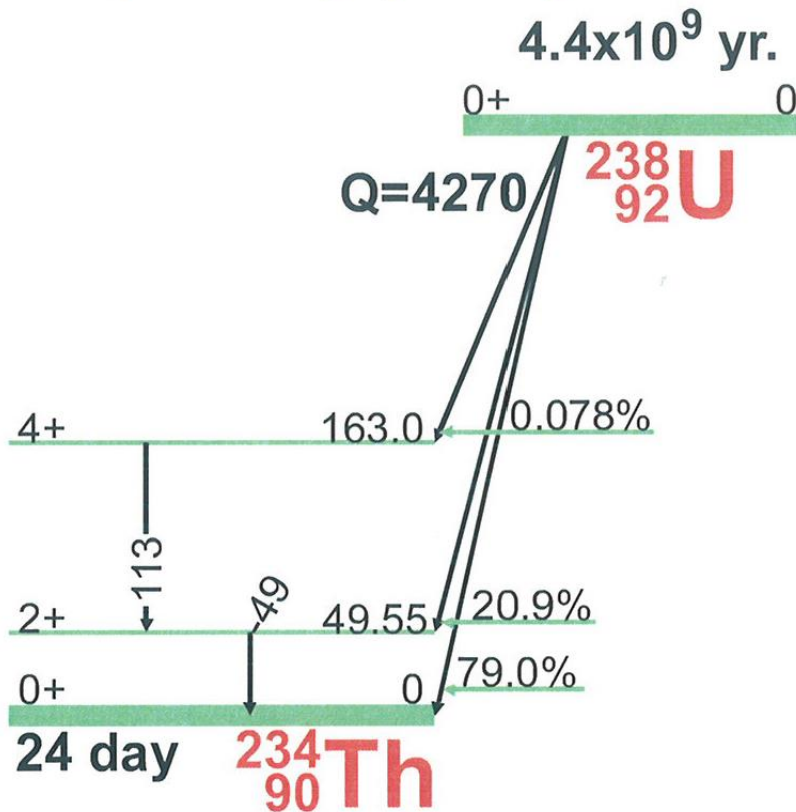


Data from Lederer and Shirley

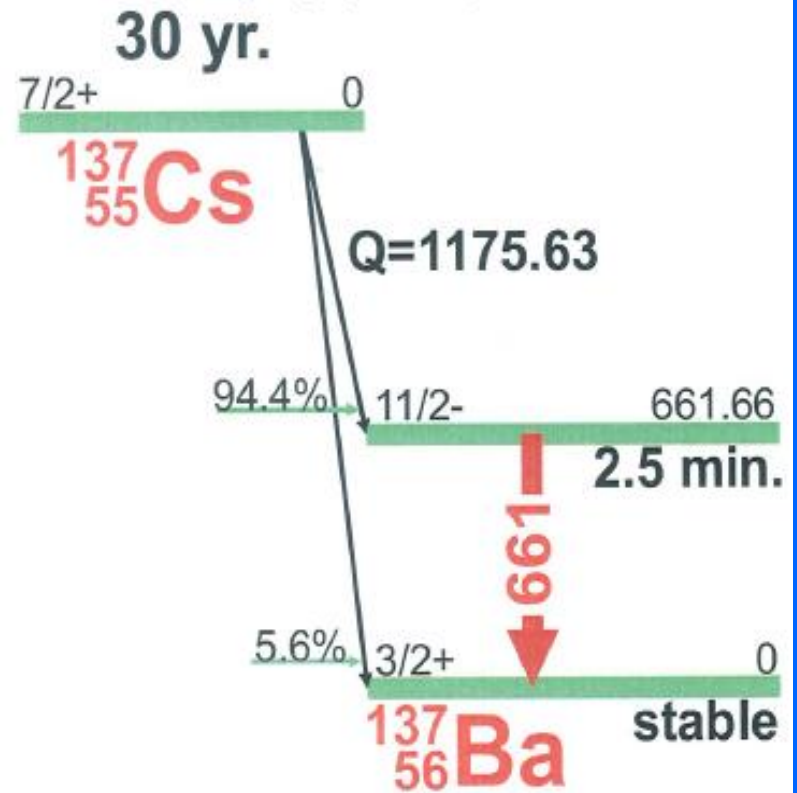
3. 기초지식

(1) 붕괴 도식(decay scheme)

^{238}U (4.4×10^9 yr.) Decay Scheme



^{137}Cs (30 yr.) Decay Scheme



3. 기초지식

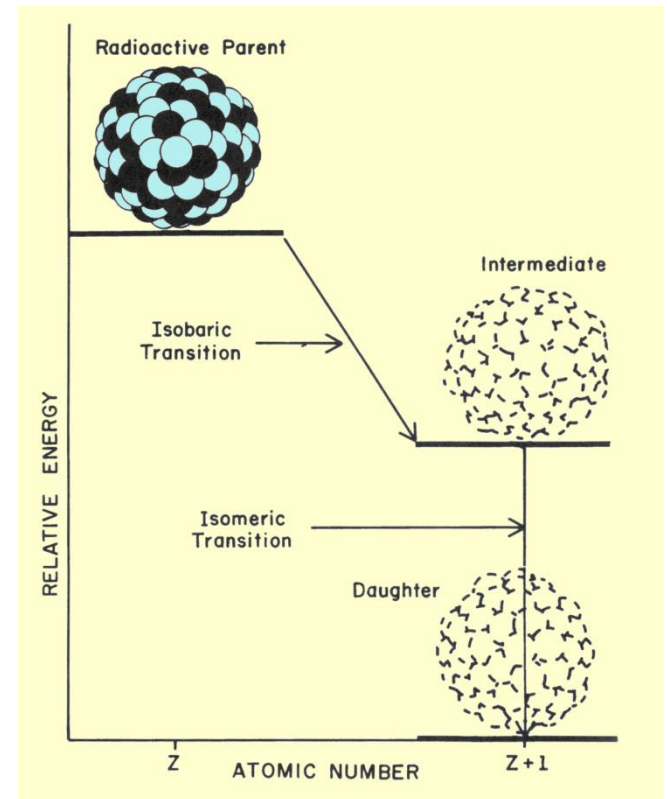
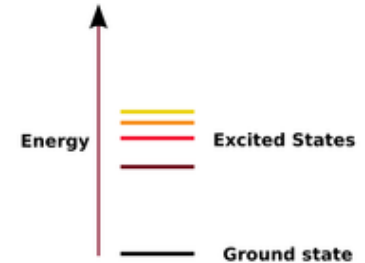
(2) 핵이성체(nuclear isomer)

■ 준안정상태(metastable)의 원자핵 ; 하나 이상 핵자의 들뜸상태(excitation)로 인한 것

- 원자번호(Z), 질량수(A)는 동일하지만 다른 에너지상태를 가지는 2종 이상의 핵종
- 일반적인 핵의 들뜸상태는 10^{-12} 초(수 psec) 정도
- 이성핵은 상대적으로 장시간 들뜸상태 ; 준안정상태 (“m” 를 붙여 구분)
- ^{137m}Ba (2.5분), ^{99m}Tc (6.0시간), ^{103m}Rh (57.5분), ^{133m}Xe (2.1일), ^{191m}Ir (4.9초)

■ 핵이성체 전이(isomeric transition, IT)

- 핵이성체가 감마선을 방출(준안정상태에서 감마붕괴)



3. 기초지식

(3) 감마선 방출확률(emission probability per decay)

■ 방사성붕괴시 특정에너지(E)의 감마선이 방출될 확률[$P_\gamma(E)$] ; Intensity/100 decay (%)

➤ 유사용어 ; yield, abundance, gamma intensity[$I_\gamma(\%)$]

➤ ^{137}Cs 의 베타붕괴 → 661.66keV 감마선 방출확률 ; 85%

※ 모든 들뜸 상태의 원자핵이 바닥상태로 되면서 감마선을 방출하는 것은 아니다

■ 내부전환(Internal Conversion, IC)

➤ 핵의 들뜸상태 에너지를 원자핵의 궤도(atomic electron)에 에너지를 전달하는 과정

➤ 내부전환계수(α) = N_e/N_γ ,

여기서, N_e 는 전이(transition)시 내부전환전자의 방출확률, N_γ 는 감마선 방출확률

➤ $N_e + N_\gamma = 1$, $N_\gamma = 1/(1 + \alpha) = 1/(1 + 0.111) = 0.898$

➤ 661.66keV 감마선방출확률 ; $94.4\% \times 0.898 = 85\%$

3. 기초지식

(4) 감마선 방출률(emission rate)

■ 어떤 선원으로부터 방출된 에너지 E인 감마선의 단위시간당의 수(#) ; γ/sec

➤ 참고 ; 방사능 단위(Bq) → radioactive decay per second의 개념

$$R(E) = P_{\gamma}(E) \cdot A$$

■ ^{137}Cs 1000Bq

➤ 감마선방출 ; 850개 /초

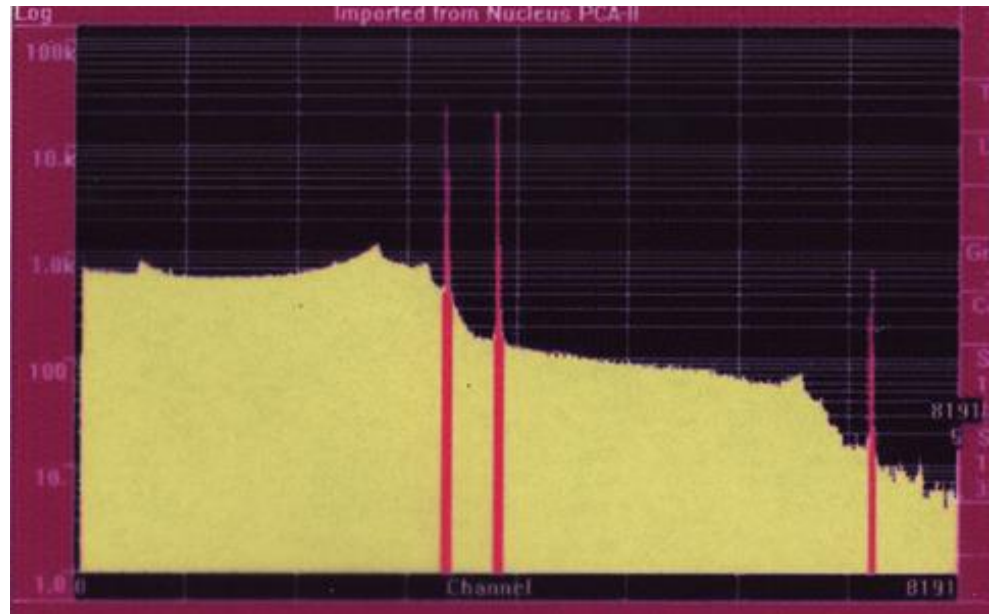
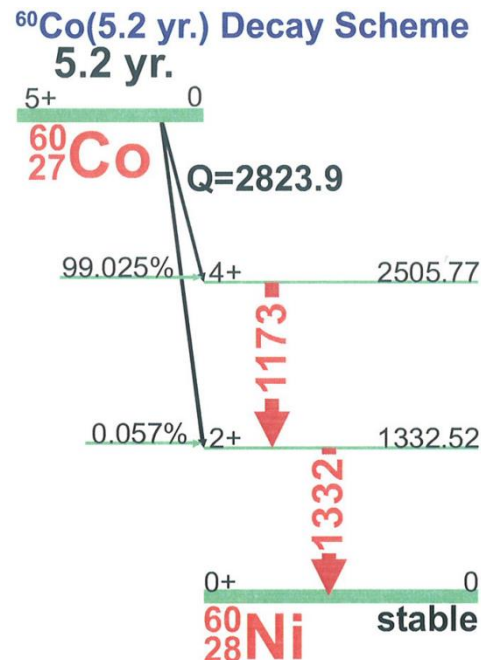
➤ 방사선 검출기 피크효율 교정에서 매우 중요

➤ $Eff. = \frac{cps}{\gamma ps}$, ~~cps/dps~~

3. 기초지식

(5) 동시합산(coincidence summing)

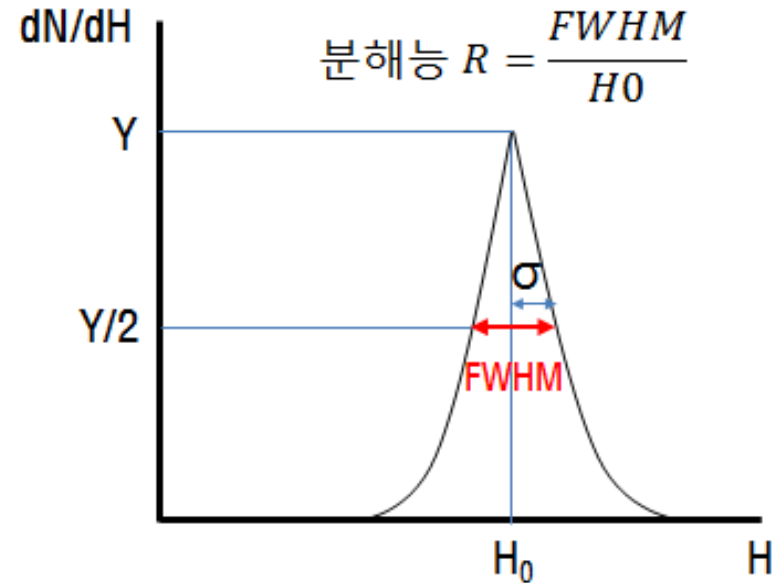
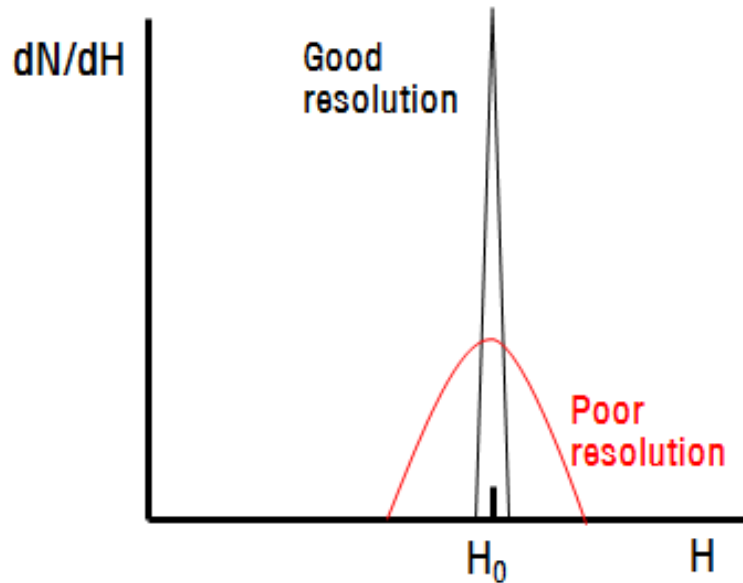
- 2개 이상의 감마선을 cascade형태로 방출시 동시에 검출되어 하나의 펄스신호로 합산
 - 일명 cascade 합산이라고도 함, 우연합산과는 다른 형태로서 낮은 계수율에서도 나타남
 - 상용의 분석프로그램에 자체적인 보정 알고리즘을 개발해서 탑재
- 측정대상의 선원/시료의 방사능을 과대 또는 과소 평가를 하게 하는 원인 ; ^{60}Co , ^{88}Y



3. 기초지식

(6) 에너지 분해능(energy resolution)

- 피크의 반치폭(FWHM)을 중앙값(H_0)으로 나눈 값
 - FWHM ; 피크의 최고값에 대한 절반(1/2)이 높이에서의 분포의 폭
 - 에너지 분해능의 값이 작으면 작을수록 피크 구별능력이 우수하다는 의미



3. 기초지식

(7) 검출 효율(detection efficiency)

■ 절대 효율(absolute eff.) ; $\epsilon_{ab} = \frac{\text{검출기(계수기)에 기록된 펄스의 수}}{\text{선원에서 방출된 방사선(광자)의 수}}$

➤ 검출기의 특성 및 S-D geometry에 관계됨

■ 상대 효율(relative eff.) ; $\epsilon_{re} = \frac{\text{HPGe 반도체검출기의 절대효율 (1332.5keV, 25cm 거리)}}{3" \times 3" \text{ NaI 검출기의 절대효율 (1332.5keV, 25cm 거리)}}$

➤ ^{60}Co 선원 ; 1332.5keV

■ 고유 효율(intrinsic eff.) ; $\epsilon_{intr} = \frac{\text{검출기(계수기)에 기록된 펄스의 수}}{\text{검출기에 입사된 방사선(광자)의 수}}$

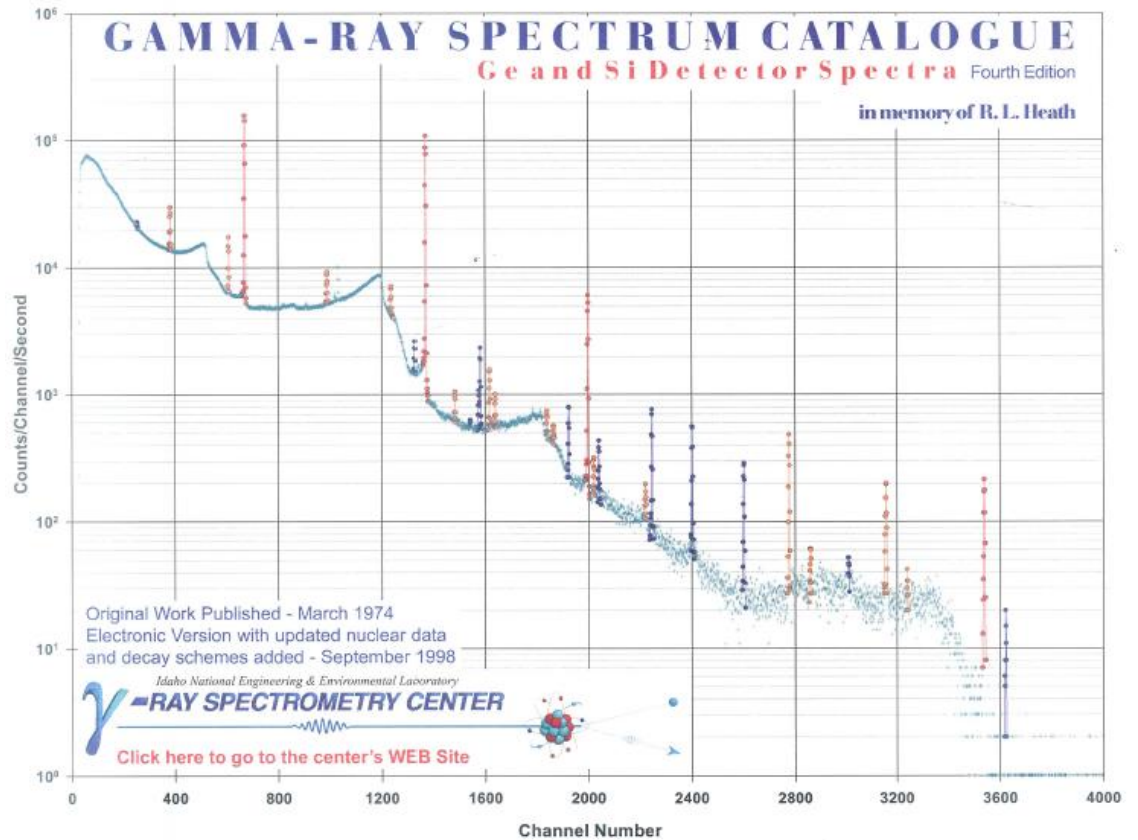
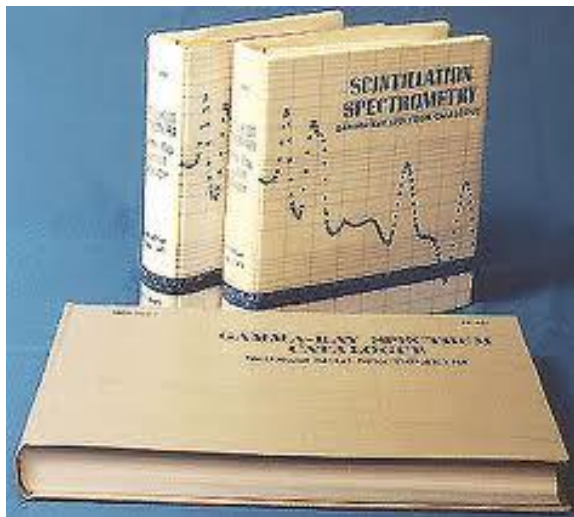
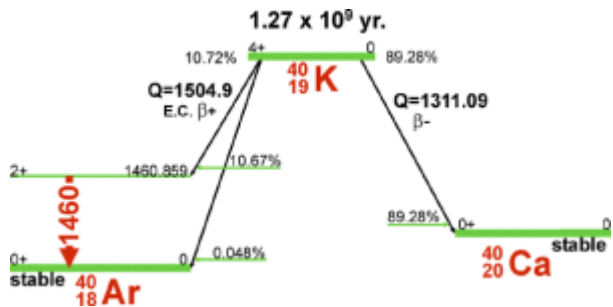
➤ 절대효율과 고유효율의 관계 ; isotropic source의 경우

$$\epsilon_{intr} = \epsilon_{ab} \cdot \left(\frac{4\pi}{\Omega}\right), \quad \Omega \text{ 는 선원의 위치에서 검출기를 바라 본 입체각(solid angle)}$$

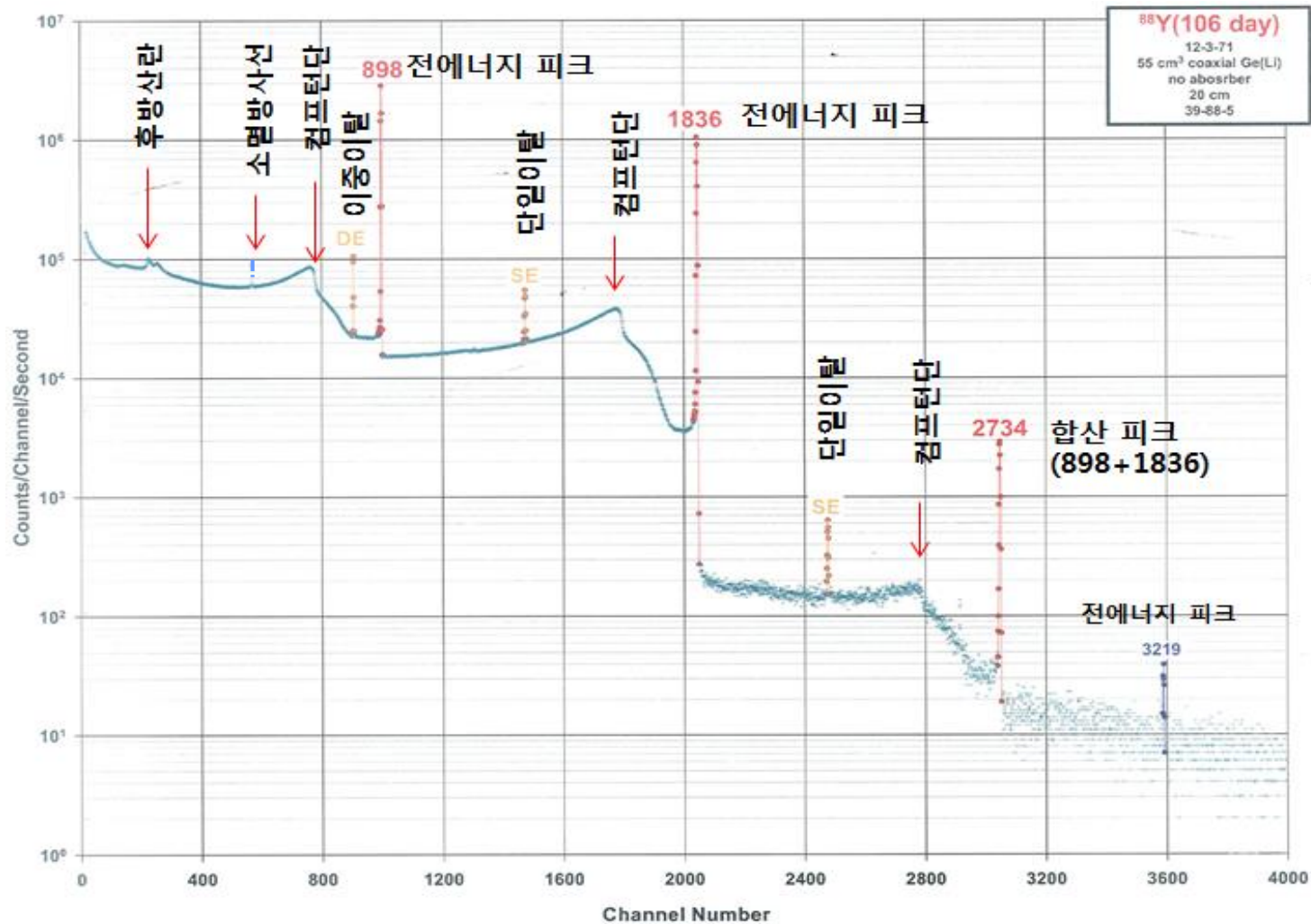
➤ 검출기의 재질, 방사선에너지, 입사방향에서의 검출기의 물리적 두께 등에 관계됨

II. 감마선 스펙트럼의 구성요소

1. 스펙트럼 카탈로그



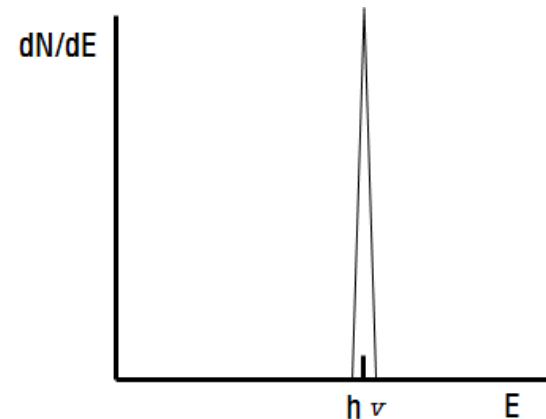
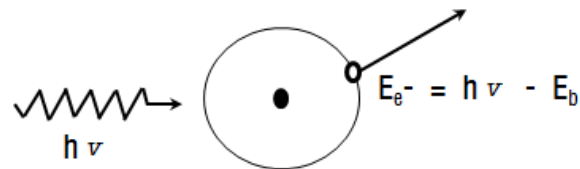
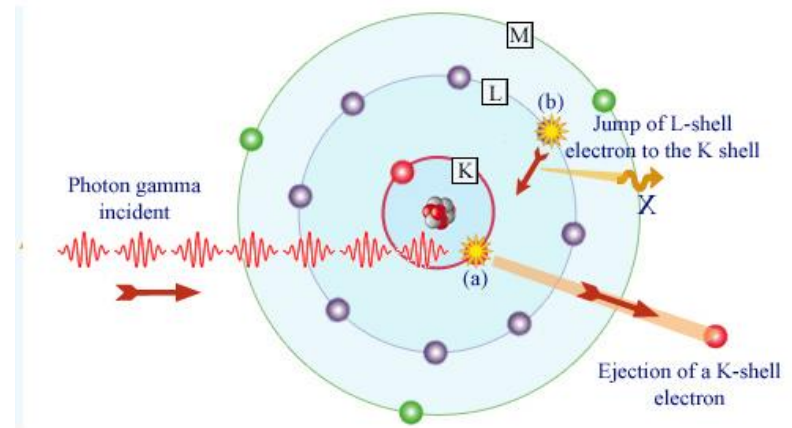
1. 스펙트럼 구성요소



2. 감마선과 검출기와의 상호작용 및 응답함수

(1) 광전흡수(photoelectric absorption)

- Ge원자(Ge검출기 경우)의 궤도전자와 상호작용 ; 광전자
 - 입사감마선의 모든 에너지를 궤도전자에 전달 → 입사 감마선은 사라짐
 - 특성 X선 또는 auger 전자가 방출
 - 입사감마선 에너지($h\nu$)와 똑 같은 에너지의 피크가 스펙트럼상에 생성(단일 피크)
 - full energy peak, photopeak
 - 감마선(X선) 에너지스펙트럼 측정에 실질적으로 이용되는 효과



2. 감마선과 검출기와의 상호작용 및 응답함수

(2) 콤프턴 산란(Compton scattering)

- 자유전자나 결합력이 매우 약한 궤도전자와 충돌 상호작용 ; 콤프턴 전자, 산란감마선

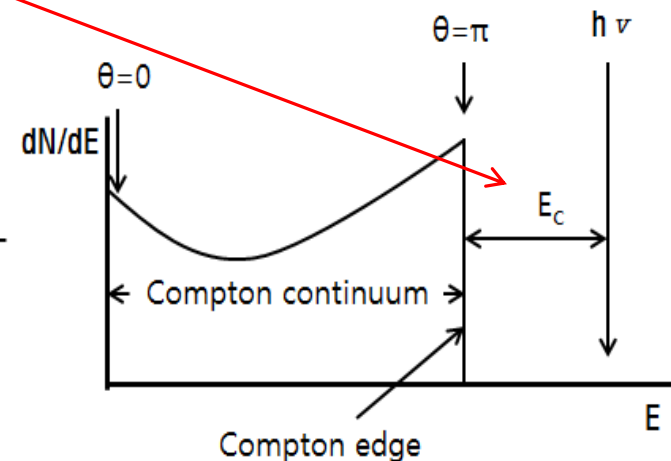
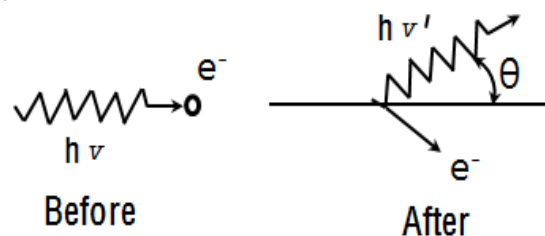
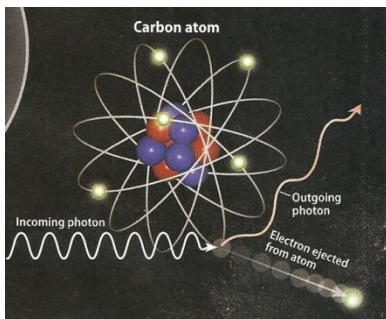
$$(h\nu)' = \frac{(h\nu)}{1 + \frac{(h\nu)}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)} \quad E_e = (h\nu) - (h\nu)' = \frac{(h\nu)}{1 + \frac{m_0 c^2}{h\nu(1 - \cos \theta)}}$$

- 정면충돌($\theta = \pi$)의 경우 ; 콤프턴 전자는 감마선 입사방향, 전자에 최대에너지가 전달

$$E_e^{\max}_{\theta=\pi} \equiv \frac{(h\nu)}{1 + \frac{m_0 c^2}{2h\nu}} \quad E_c = h\nu - E_e^{\max}_{\theta=\pi} \equiv \frac{(h\nu)}{1 + \frac{2h\nu}{m_0 c^2}}$$

입사감마선의 에너지가 큰 경우,
즉 $h\nu \gg m_0 c^2/2$ 에서는 이 에너지가 차이가 아래와 같이 일정한 값으로 수렴

$$E_c = \frac{m_0 c^2}{2} (= 0.256 \text{ MeV})$$



2. 감마선과 검출기와의 상호작용 및 응답함수

(3) 쌍생성(pair production)

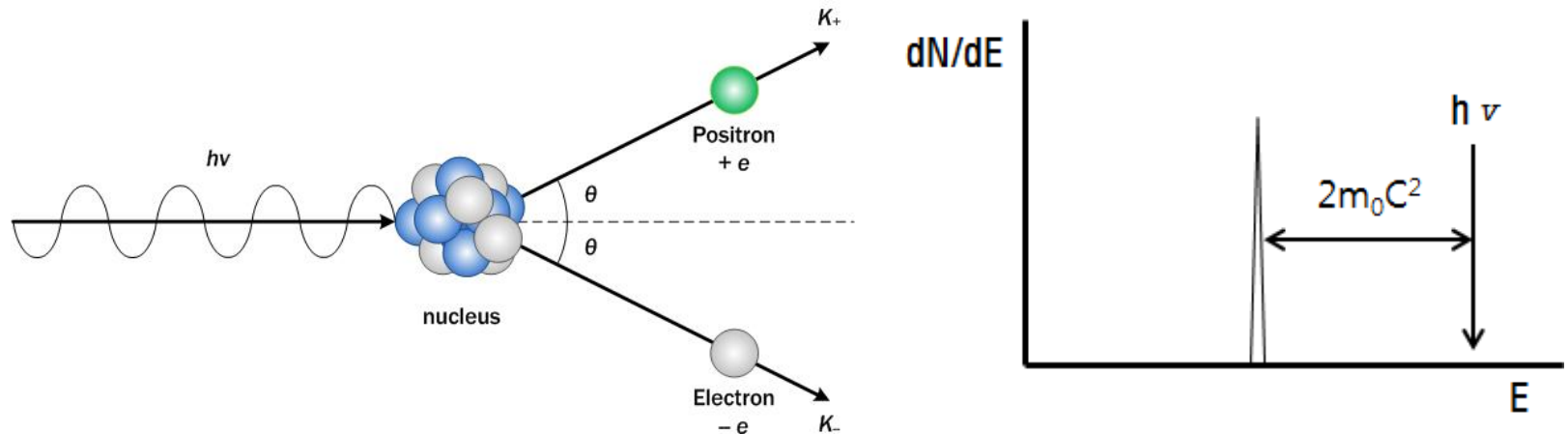
■ 검출기매질 원자핵(Ge원자핵)의 쿨롱장내에서 소멸 ; 전자, 양전자 쌍의 생성

- 총 운동에너지(전자KE+양전자KE) ; 입사감마선에너지 보다 $2m_0c^2$ 만큼 아래에 위치

$$E_p^- + E_p^+ = h\nu - 2m_0c^2$$

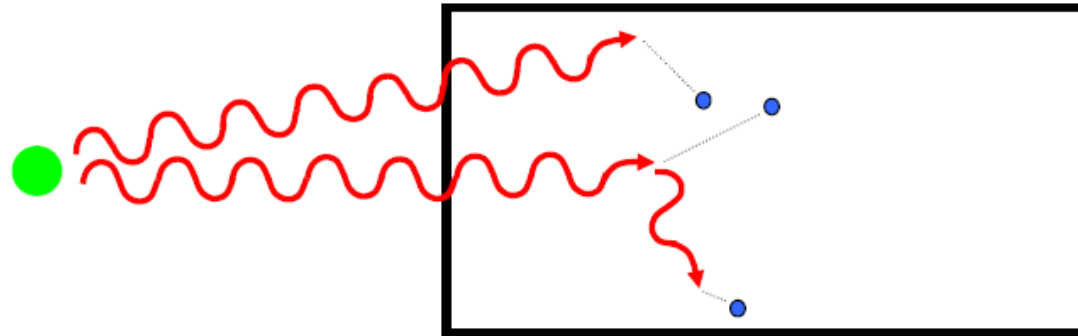
■ 양전자소멸 방사선 ; 0.511MeV 감마선 2개가 발생

- double escape peak, single escape peak

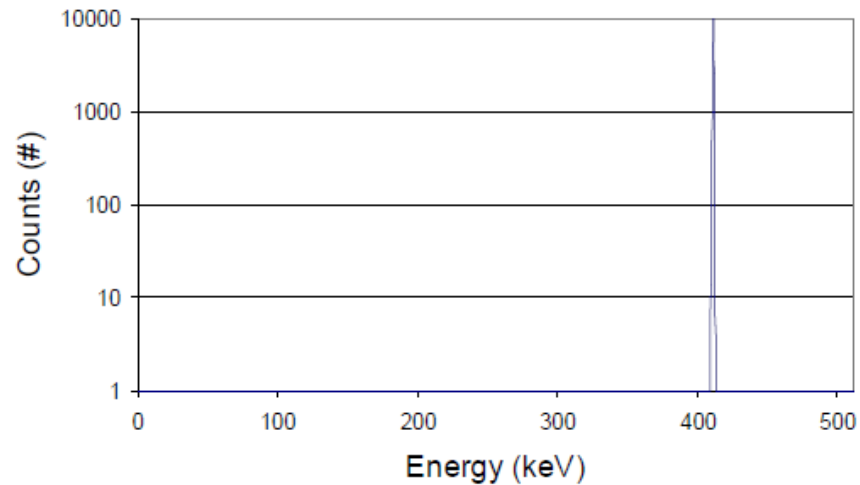


3. 스펙트럼 구성요소

(1) 전에너지 피크(full energy peak)

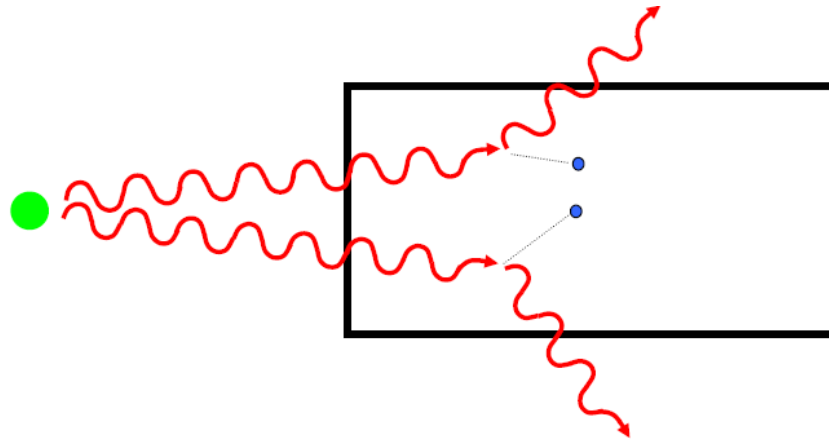


full energy events

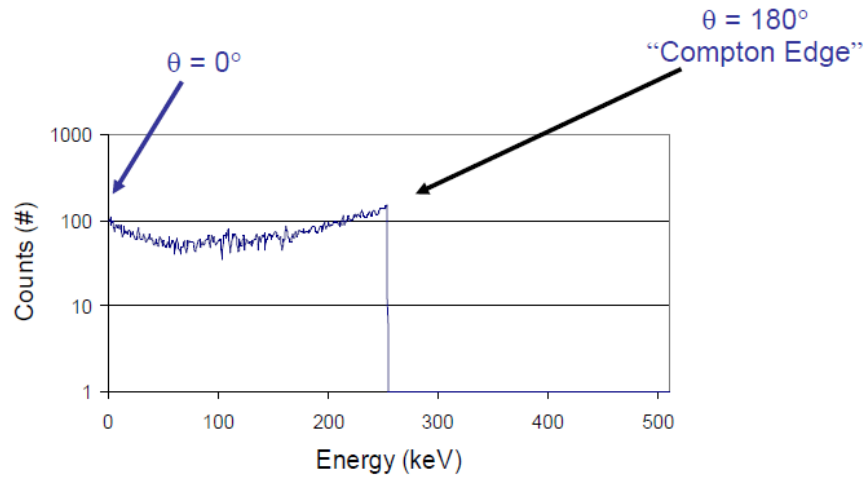


3. 스펙트럼 구성요소

(2) 콤프턴 연속부와 단(Compton Continuum and Edge)



The scattered gamma-rays escape from the detector

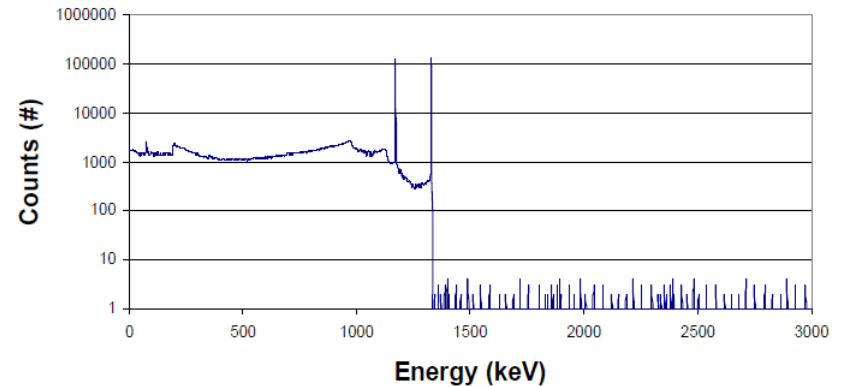


3. 스펙트럼 구성요소

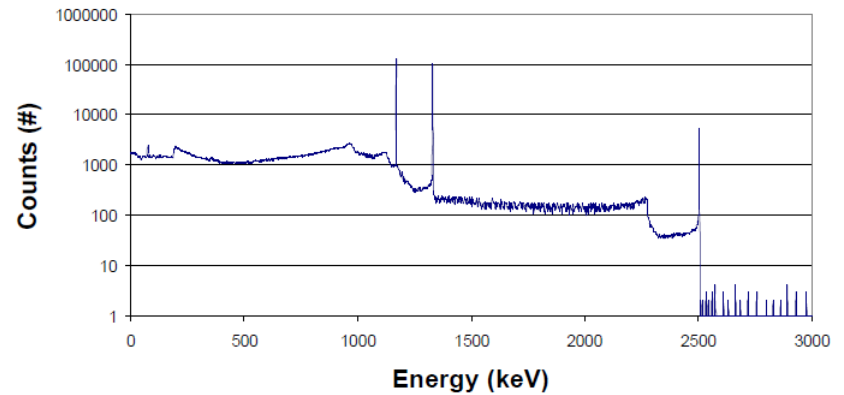
(3) 합성 피크(sum peak)



^{60}Co Decay Scheme



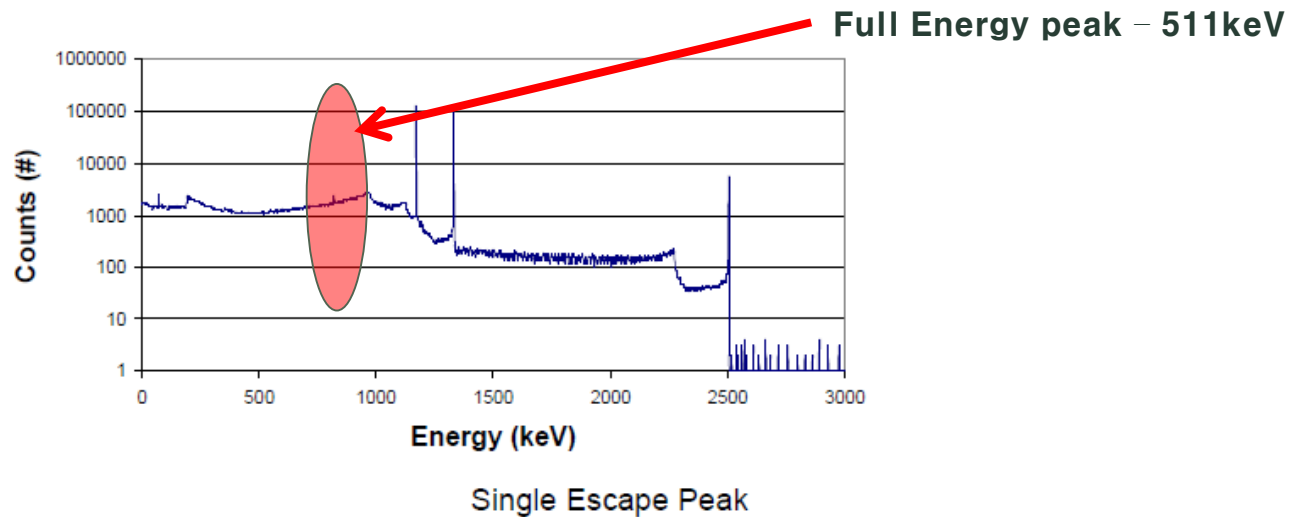
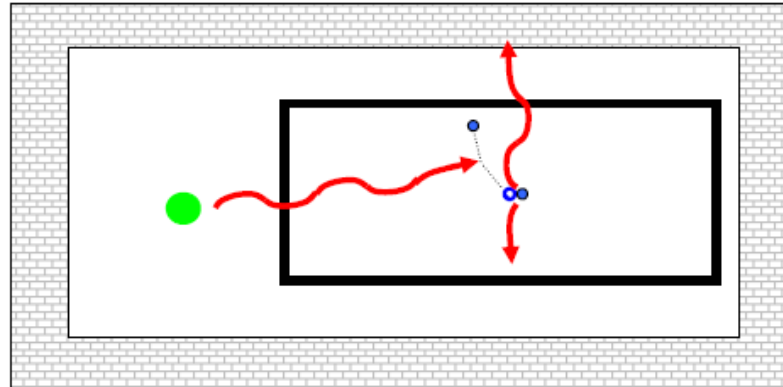
Expected Spectra Based on Decay



Actual Spectra

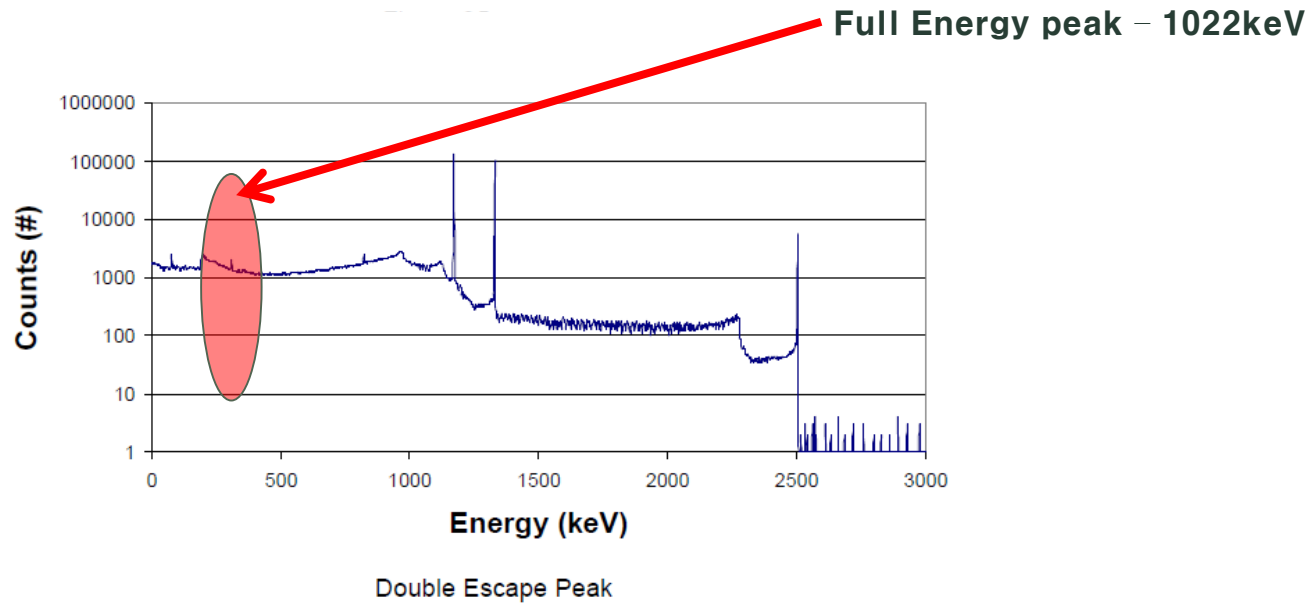
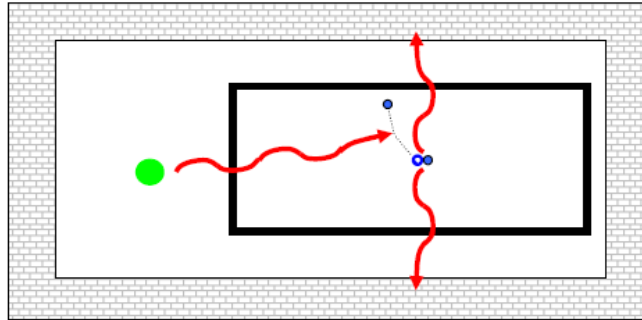
3. 스펙트럼 구성요소

(4) 단일 이탈 피크(single escape peak)



3. 스펙트럼 구성요소

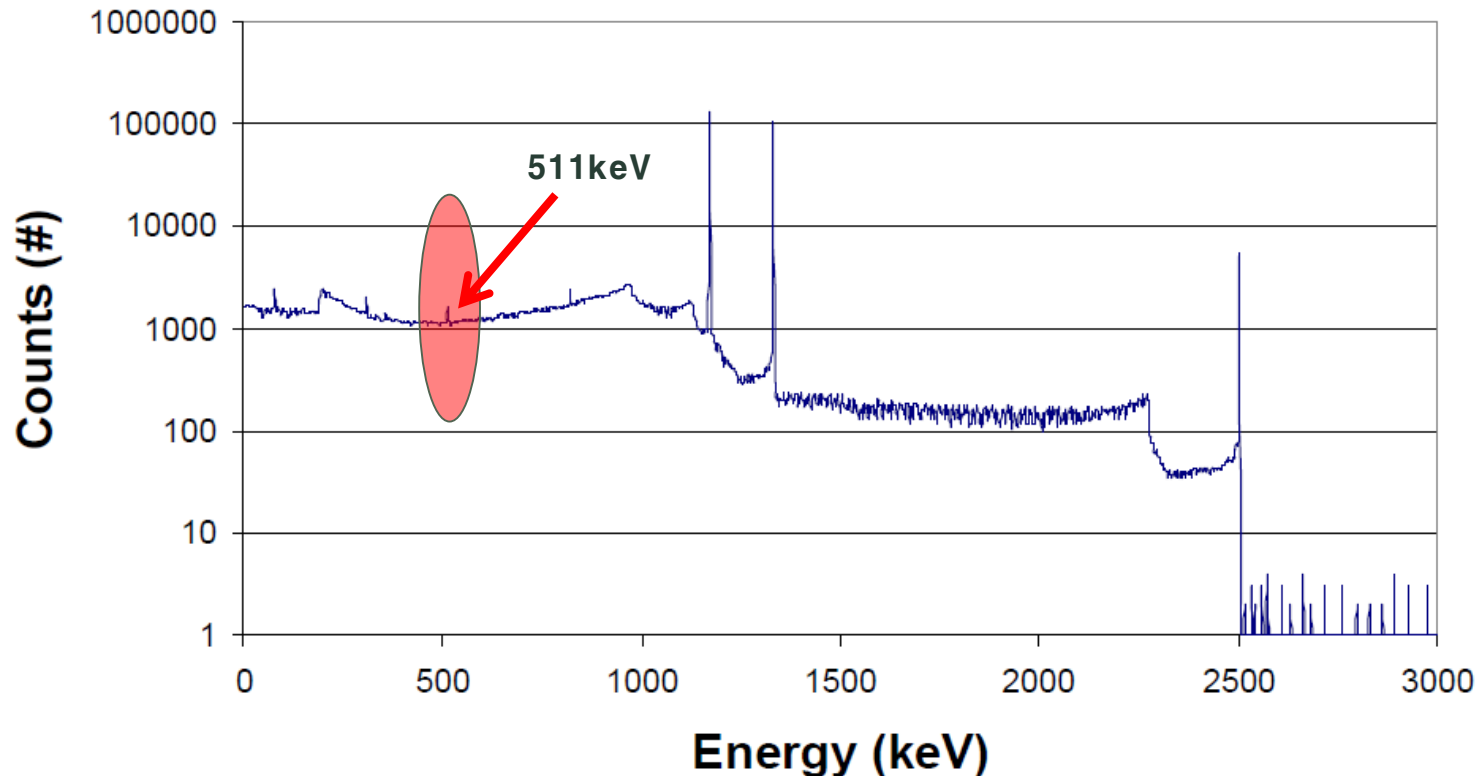
(5) 이중 이탈 피크(double escape peak)



3. 스펙트럼 구성요소

(6) 소멸 방사선 피크(Annihilation Peak)

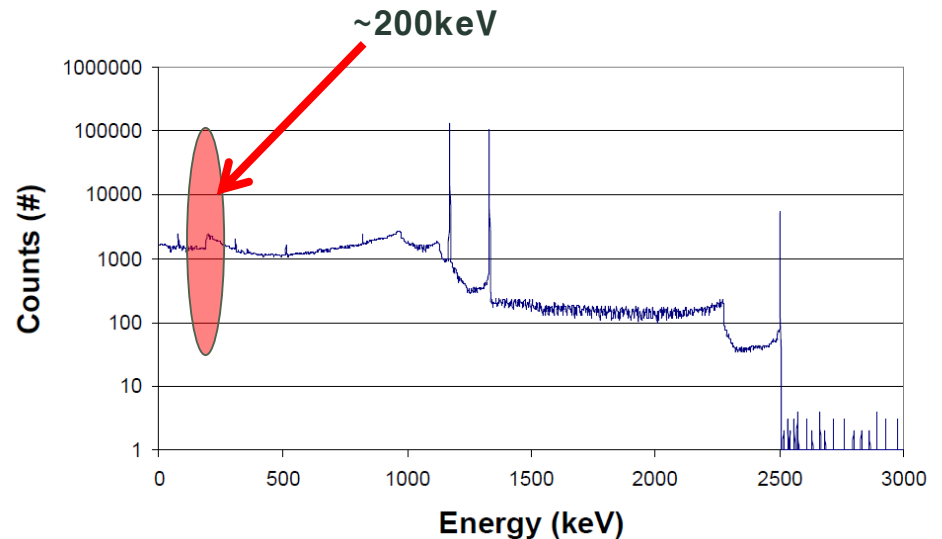
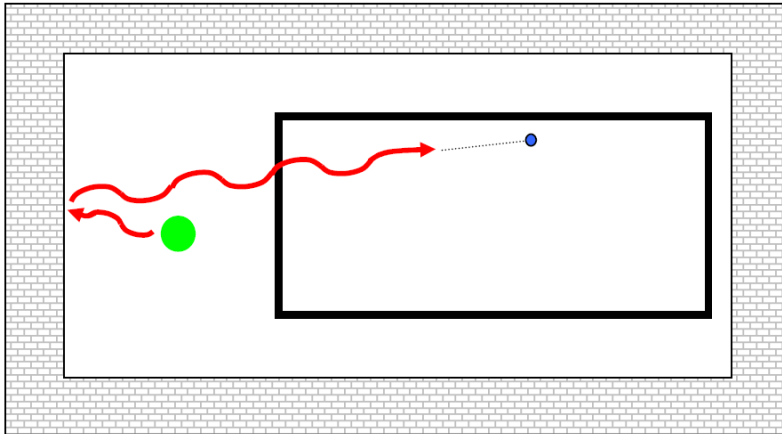
- ◆ 전자-양전자 쌍생성(pair production)이 검출기주변 차폐체에서 일어나는 경우
 - 2개의 소멸방사선 가운데 하나가 검출기내로 입사
 - 이때 소멸방사선 피이크가 511keV에 생김



3. 스펙트럼 구성요소

(7) 후방산란 피크(Backscattering Peak)

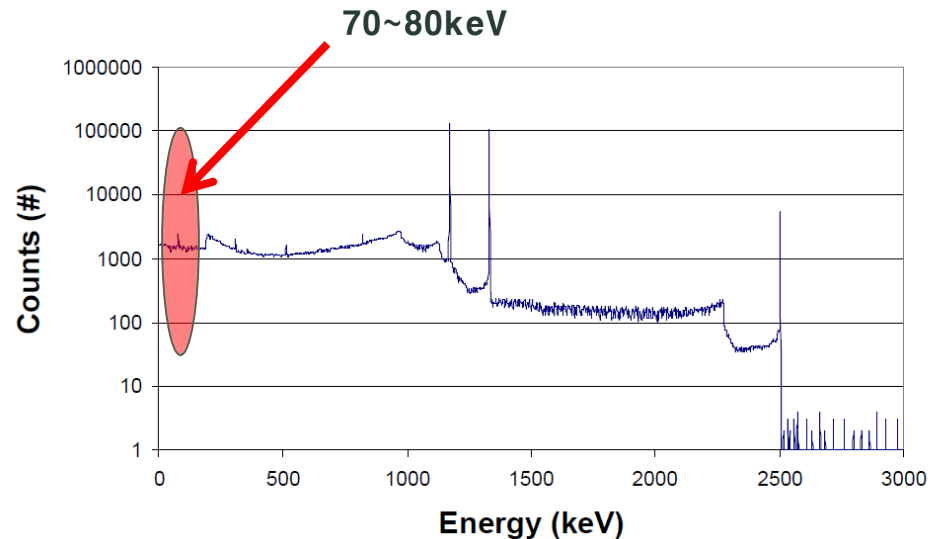
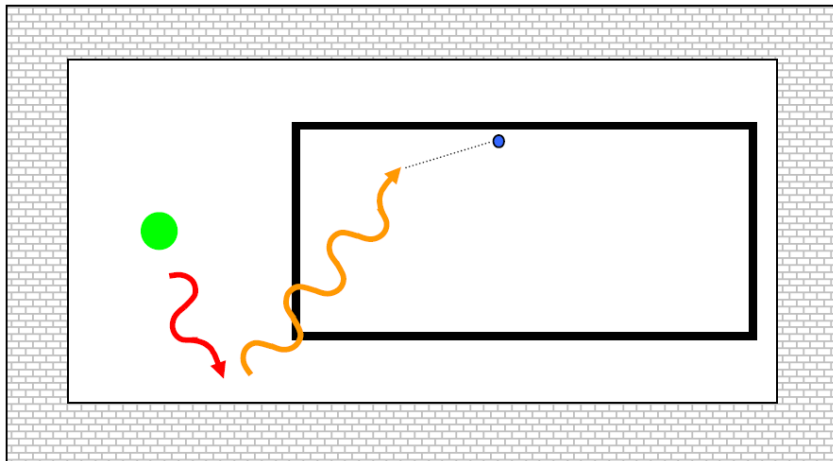
- ◆ 검출기주변 차폐체(납)에서 산란된 감마선이 검출기내로 입사
 - 약 180도 후방으로 산란
 - 수백 keV(few hundred keV) 부근에서 나타남



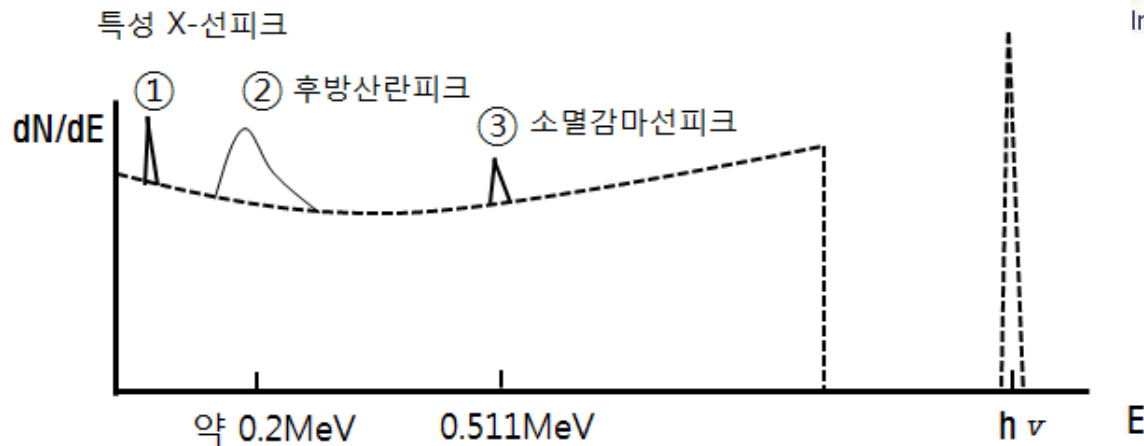
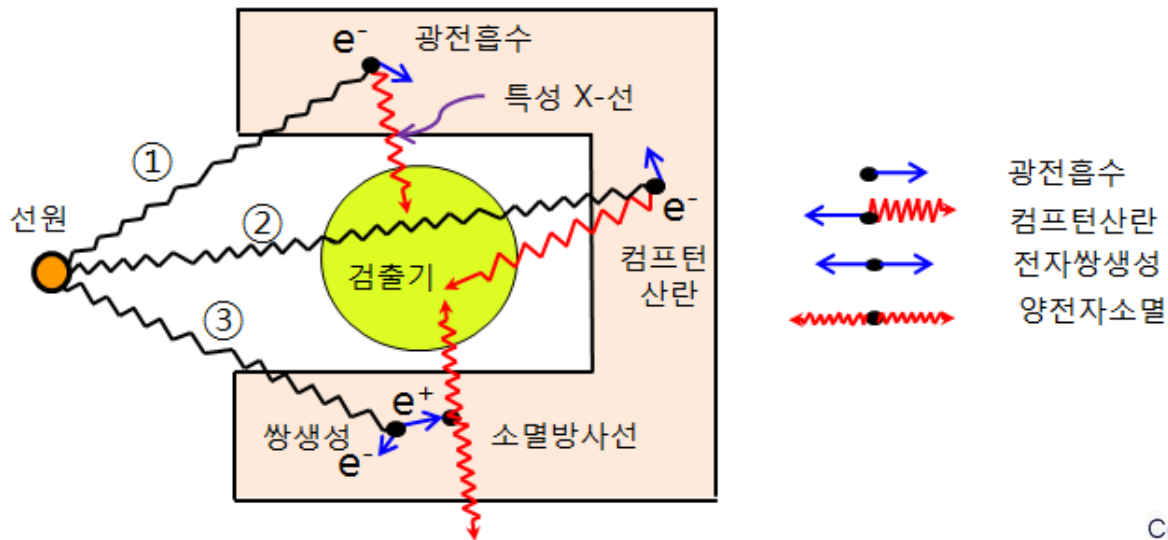
3. 스펙트럼 구성요소

(8) 특성 X-선(Characteristic X-rays Peak)

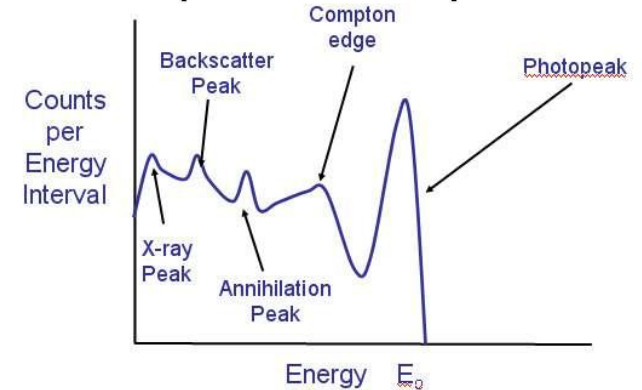
- ◆ 검출기주변 차폐체(납)의 방사선에 의한 이온화 과정에서 발생한 광자가 검출기내로 입사
 - 특성 X-선은 궤도전자의 전이(transition)로 인해서 생김
 - Fill the lower empty shell



3. 스펙트럼 구성요소



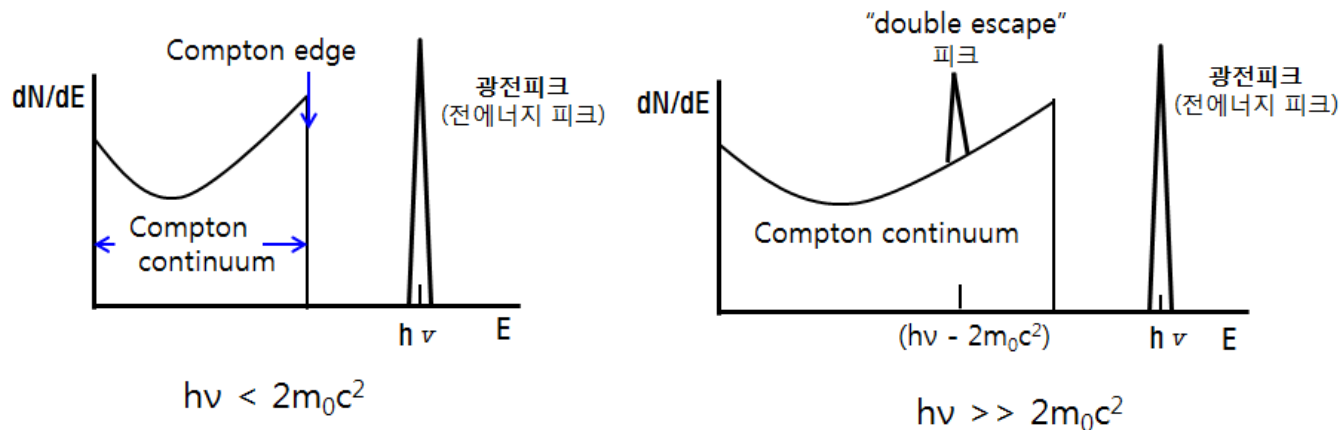
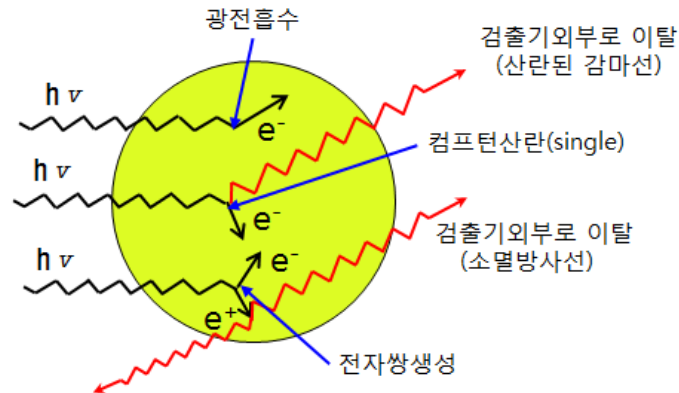
Components of Spectrum



4. 검출기 크기에 따른 감마선스펙트럼 특성

(1) 소형 검출기(small detectors)

- 2차 감마선의 평균자유행로 보다 작은 크기(<2cm) ; 하전입자는 모두 검출기내에서 흡수를 가짐



4. 검출기 크기에 따른 감마선스펙트럼 특성

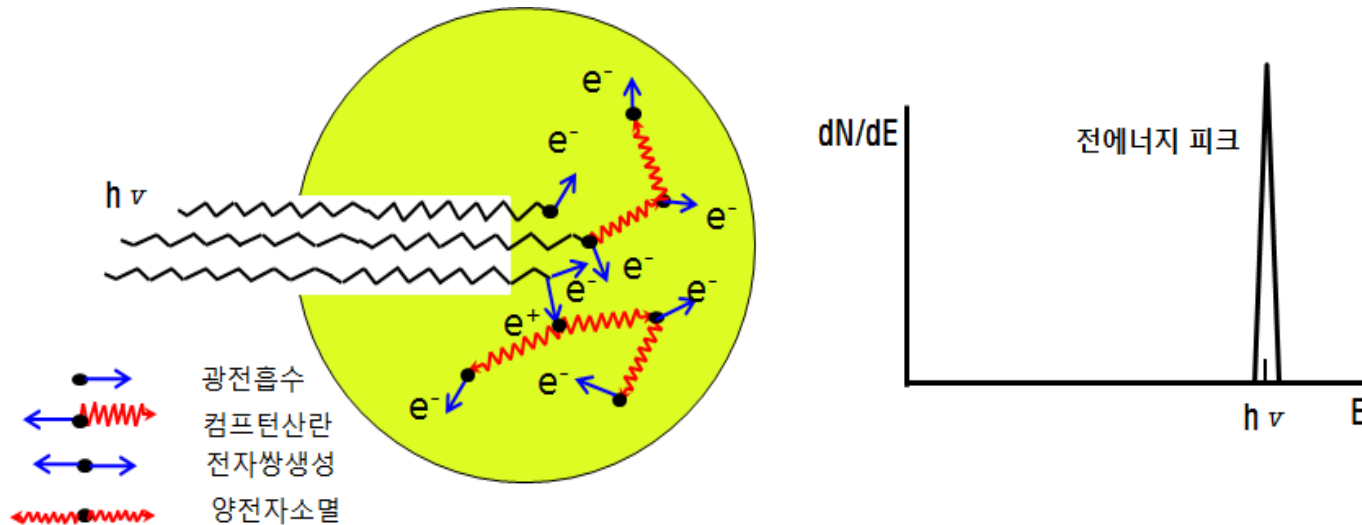
(2) 초대형 검출기(very large detectors)

■ 2차 감마선 모두가 검출기 유감체적내에서 상호작용 ; 수십 cm 이상의 검출기 크기

- 검출기의 응답은 마치 원래의 입사감마선이 단일 단계에서 단순한 광전 흡수를 한 것과 동일한 결과
- 용어적으로

소형검출기의 경우 광전 피크(photoelectric peak)

대형검출기의 경우 전에너지 피크(full energy peak) 또는 전흡수 피크(full absorption peak) 적절한 표현

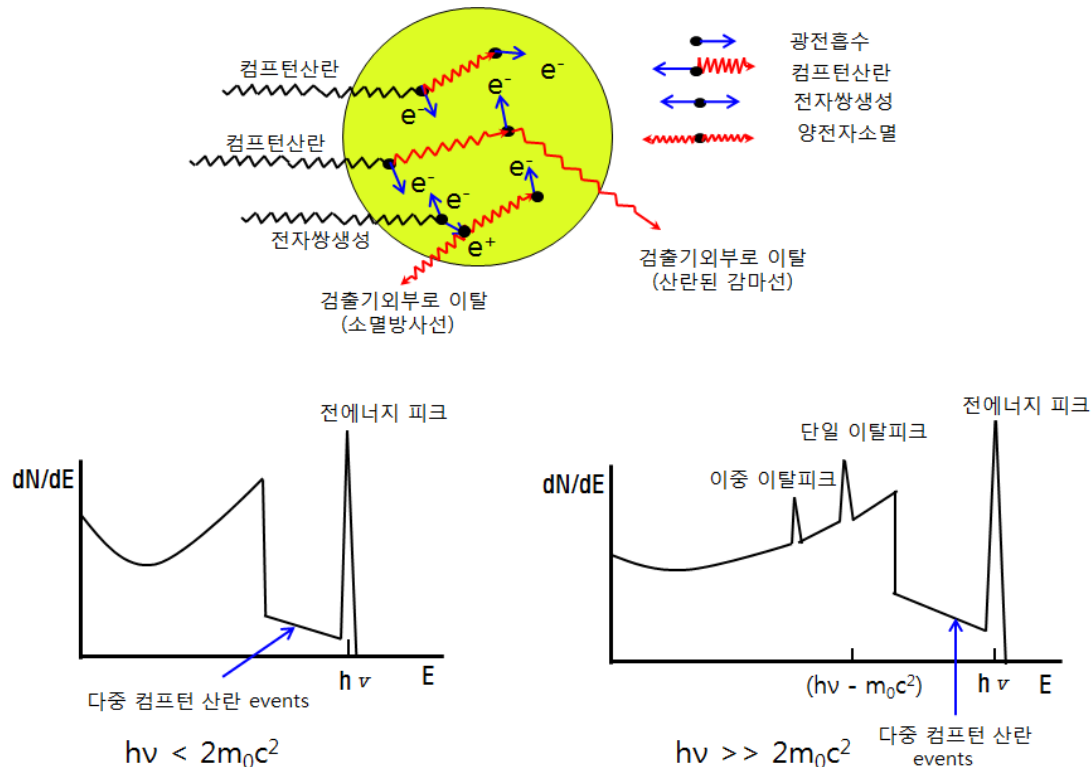


4. 검출기 크기에 따른 감마선스펙트럼 특성

(3) 중간크기 검출기(intermediate size detectors)

■ 실제 감마선분광학에 이용되는 대부분의 검출기 크기

- 2차 감마선의 일부가 이탈 → 에너지스펙트럼 매우 복잡
- 다중산란 → 컴프턴 단과 광전 피크 사이에 약간 낮은 스펙트럼 분포



3. 에너지 및 분해능 교정

에너지 교정

- 에너지 교정

: 스펙트럼의 피이크 위치(채널)에 대한 감마선에너지 상관관계 도출

- 잘 알려진 감마선에너지 방출선원을 이용하여 측정 및 채널에 대하여 최소자승 회귀법을 이용하여 교정식 산출

$$E = P_1 + P_2 \times C + P_3 \times C^2 \quad (E: \text{감마선에너지}, P_i: \text{피팅 파라메타}, C: \text{채널})$$

- 에너지 판정 오차

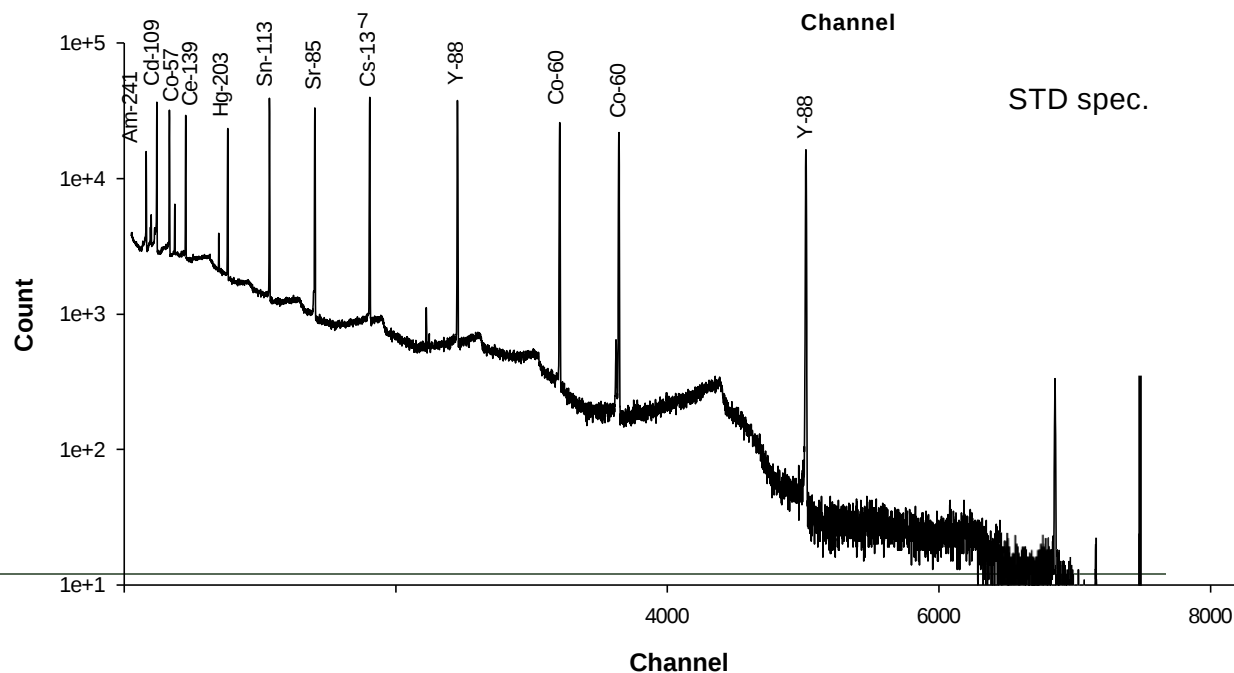
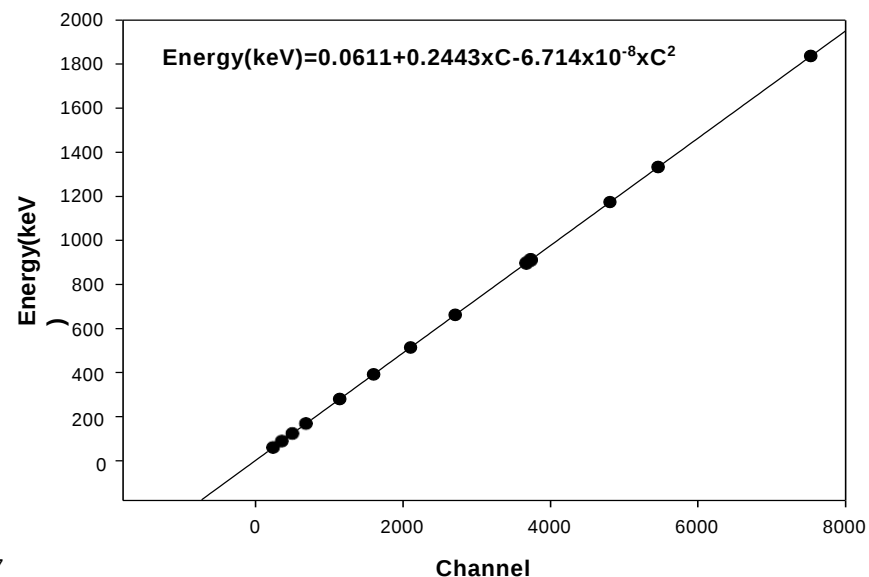
- 감마선원의 위치 즉, 감마선의 입사각에 따라 검출기 내부의 전기장 영향 차이로 인해 전하 수집이 일정하지 않을 수 있음.

→ 1.5 MeV에 대하여 약 0.1 keV로서 전체 에너지 교정의 비선형성에 비해 매우 작으므로 무시할 수 있는 수준

에너지 교정

● 혼합 표준 감마선원 이용

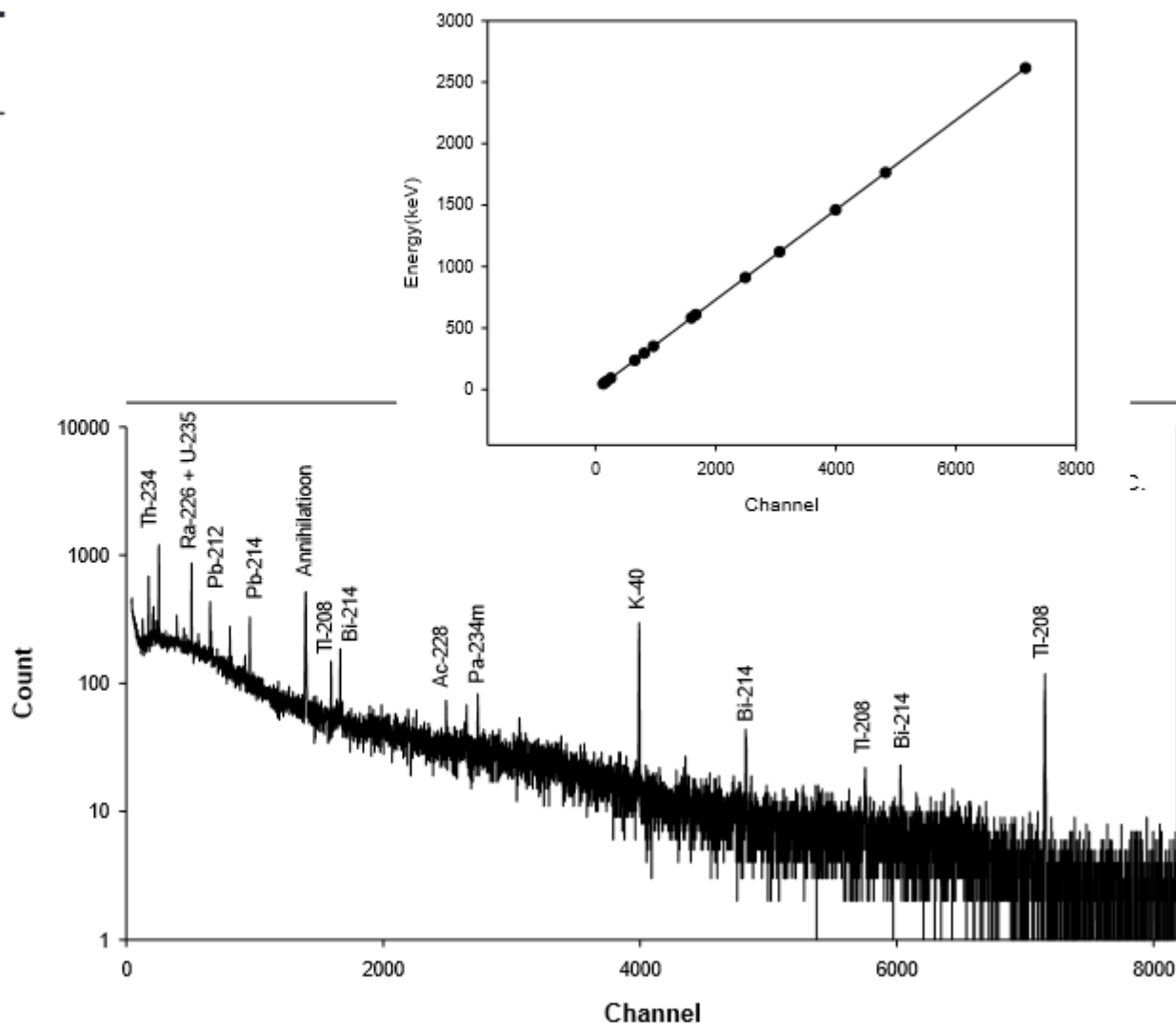
핵종	에너지(keV)
Am-241	59.5
Cd-109	88.04
Co-57	122.06
Ce-139	165.86
Hg-203	279.2
Sn-113	391.7
Sr-85	514.01
Cs-137	661.66
Y-88	898.04
Co-60	1173.24
Co-60	1332.5
Y-88	1836.06



에너지 교정

●스펙트럼의 백그라운드/자연핵종의 에너지피이크 이용

Nuclide	Energy (keV)	Nuclide	Energy (keV)
Pb-210	46.5	Tl-208	511.0
Th-234	63.3	Ann	511.2
Pb-212	75.0	Tl-208	583.0
Pb-214	74.6	Bi-214	609.3
Th-234D	92.6	Bi-212	727.0
Ra-226	186.2	Ac-228	794.7
U-235	185.7	Tl-208	860.4
Ac-228	209.3	Ac-228	911.2
Pb-214	238.4	Bi-214	1120.3
Tl-208	278.0	Bi-214	1238.1
Pb-214	295.2	Bi-214	1377.7
Ac-228	270.2	K-40	1460.8
Tl-208	278.0	Tl-208	1592.5
Pb-214	295.2	Bi-212	1620.6
Ac-228	338.3	Bi-214	1729.6
Pb-214	351.9	Bi-214	1764.5
Ac-228	463.0	Tl-208	2614.4



분해능 교정

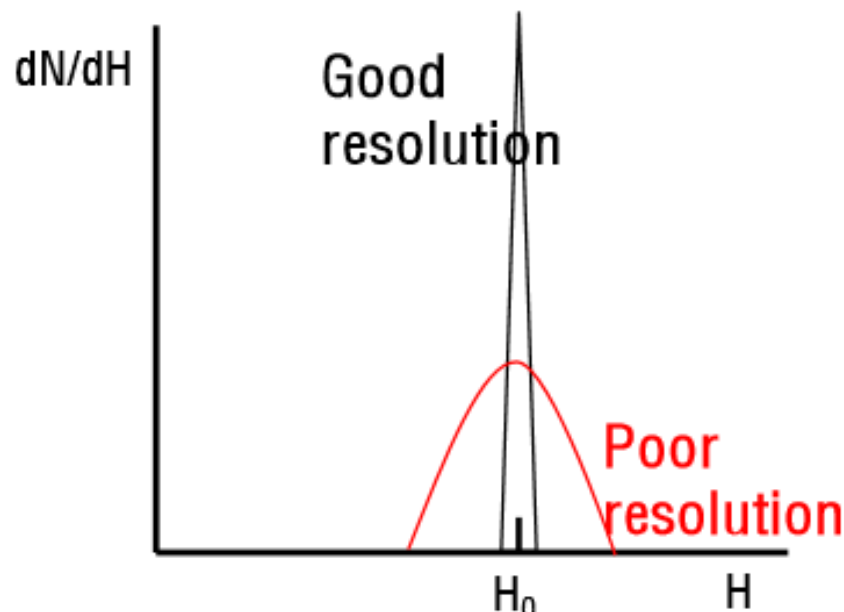
에너지 분해능의 물리적 의미

$$\text{에너지분해능}(R) \equiv \frac{FWHM}{E_0}$$

- 서로 가까이 있는 2개의 피크 구분 능력
- 에너지 분해능을 상대적인 값(%) 또는 절대값(keV)으로 표현
 - NaI 검출기의 분해능 : 약 50 keV for Cs-137 661keV
 - HPGe 검출기의 분해능 : 약 1.5 keV for Cs-137 661 keV

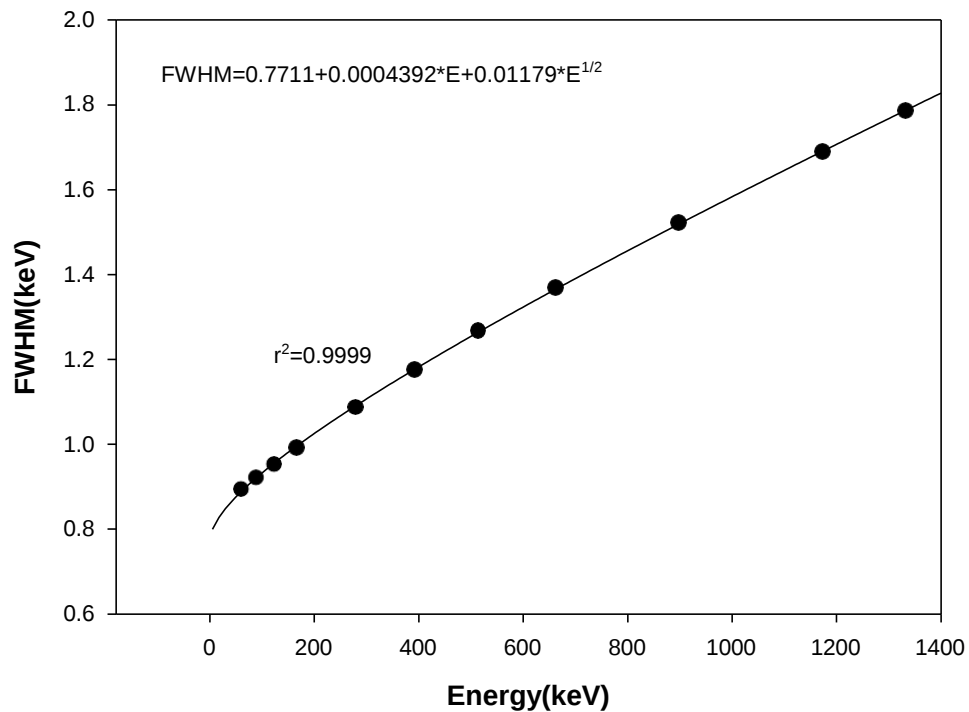
⇒ R 이 작을수록 에너지분해능이 우수함

⇒ 에너지분해능 $\propto$ 단위 에너지당 생성되는 정보전달자의 수



분해능 교정

FWHM 교정곡선



FWHM 적용

■ 검출기 품질관리, Poor peak 가우시안 피팅,

4. 검출기 효율교정

- ❖ 검출효율 특성
 - ❖ 검출기 효율교정
-

검출효율 특성

- 검출효율

- 절대효율(Absolute full-energy peak efficiency)

$$\varepsilon_{abs.} = N_C / N_\gamma$$

- 고유효율(Intrinsic full-energy peak efficiency)

$$\varepsilon_{intr.} = \frac{N_C}{N_{incident\ \gamma}}$$

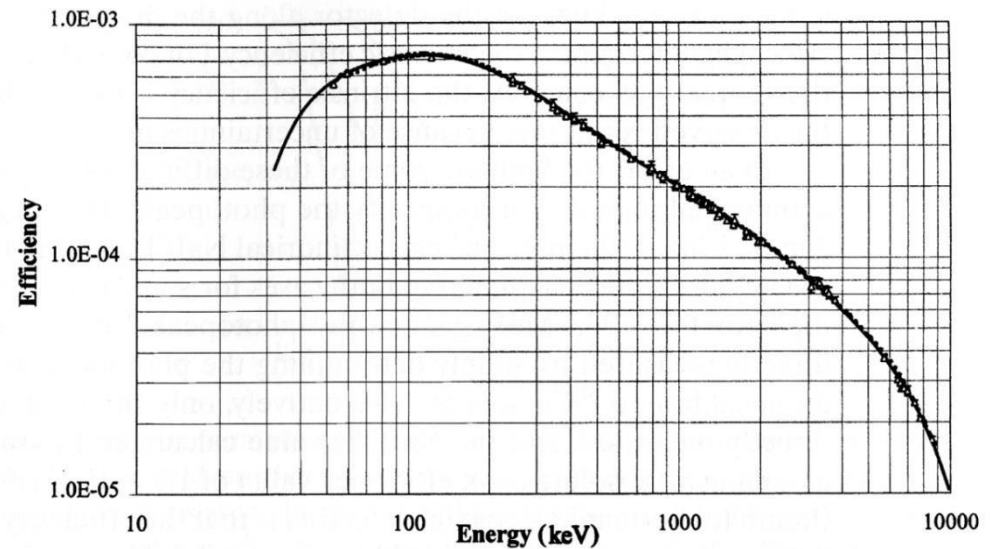
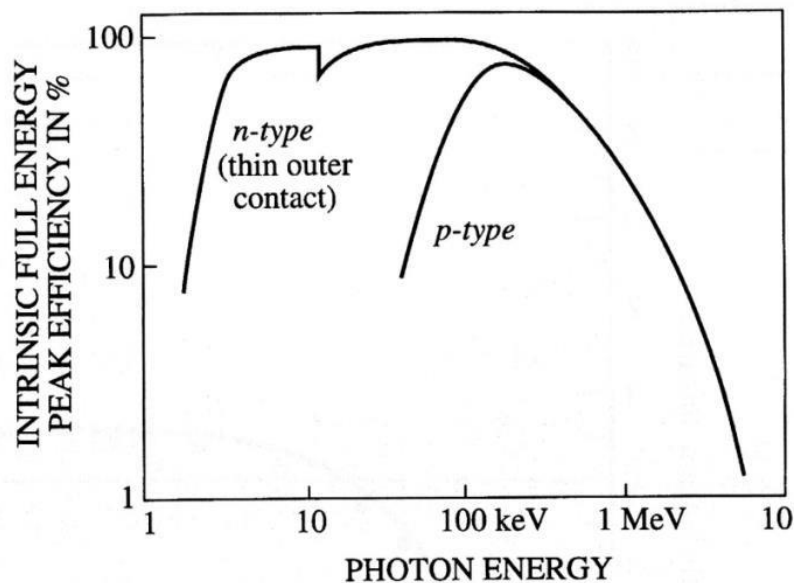
- 상대효율(Relative efficiency)

$$\varepsilon_{rel.} = \frac{\text{Absolute full-energy peak efficiency}}{\text{Absolute full-energy peak efficiency of } 3" \times 3" \text{ NaI(Tl)}}$$

where detector-to-source distance : 25 cm, gamma-ray energy : 1332 keV (Co-60)

검출효율 특성

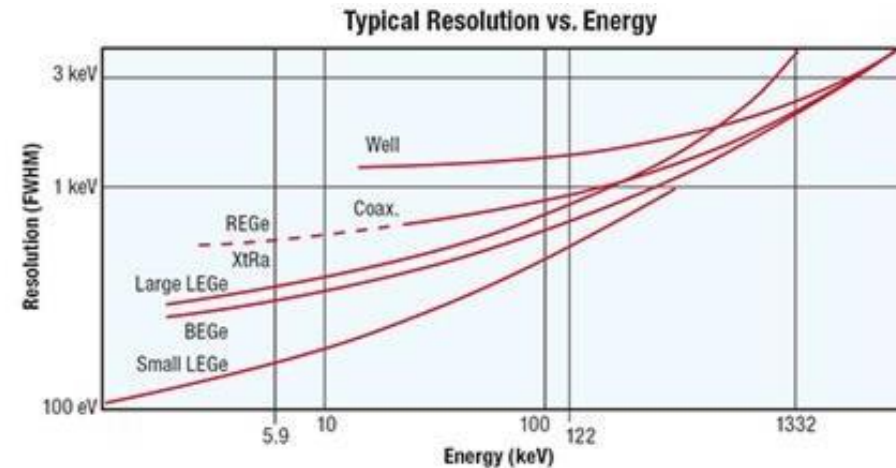
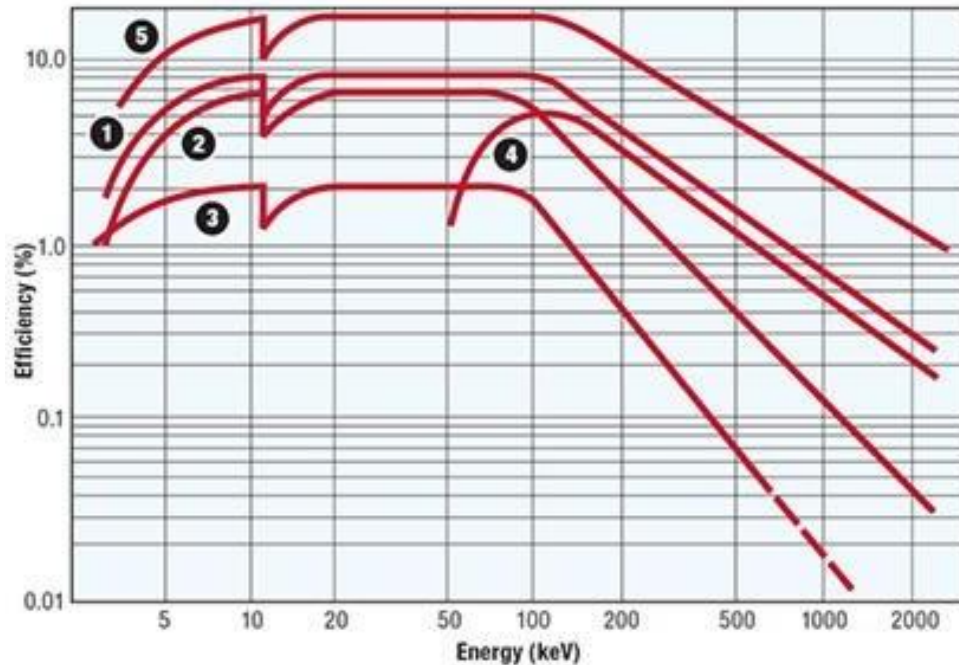
● HPGe 검출기의 효율특성



입사감마선에 대한 Ge 검출기에 대한 일반적인 고유효율곡선

검출효율 특성

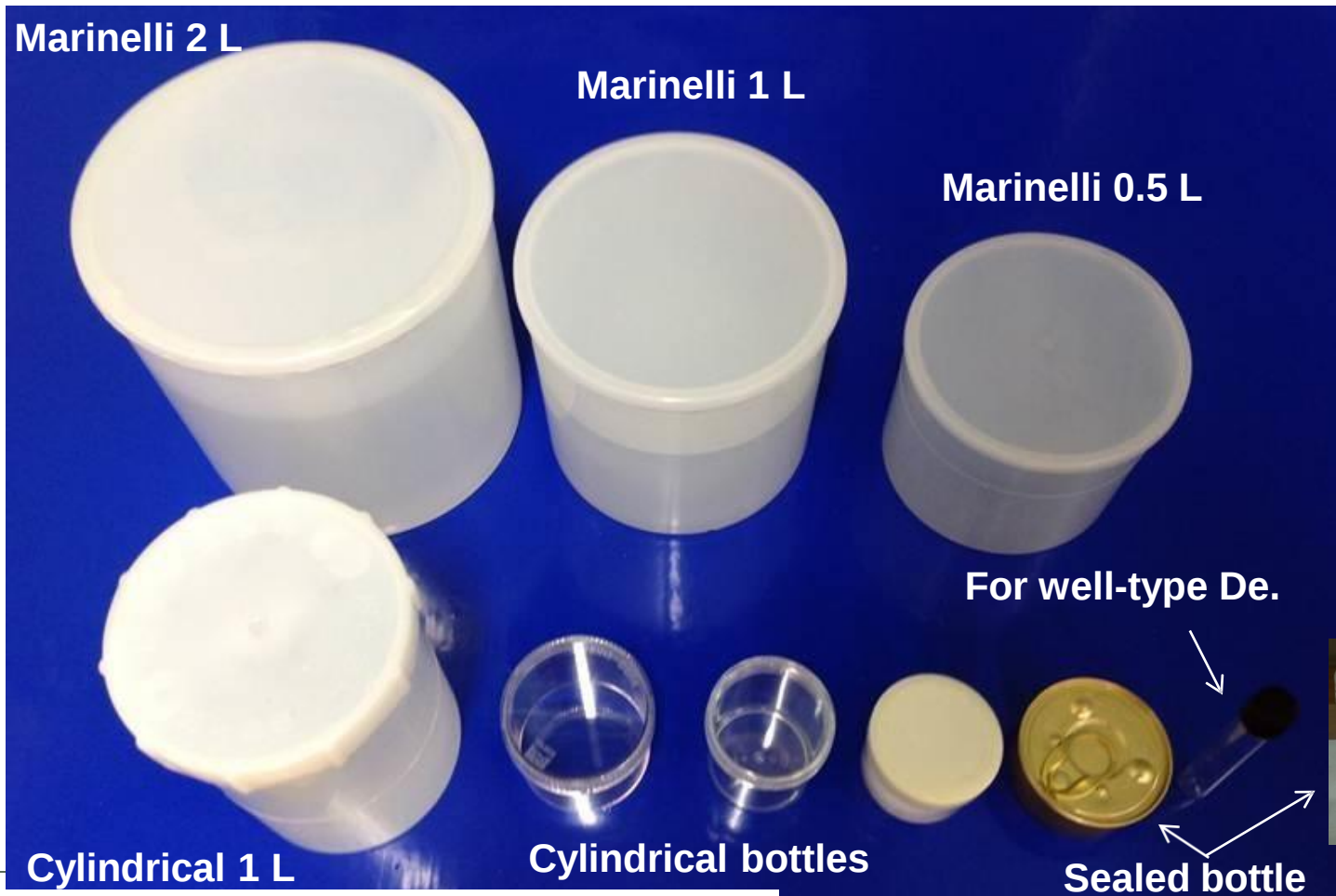
● HPGe 검출기 종류에 따른 효율특성



From Canberra website

검출효율 특성

- 측정용기의 종류



검출기효율교정

● 감마선 에너지 대 효율교정

$$\varepsilon = \frac{N}{AI_{\gamma} t_s K_r K_m K_{rc} K_{cc}}$$

N : 순계수

ε : 검출효율

t_s : 측정시간(Live time)

I_{γ} : 감마선 방출율

A : 방사능(Bq)

K_r : 표준선원의 방사능 참고 기준일에 대한 붕괴보정인자

K_m : 측정시간 동안의 붕괴보정인자

K_{rc} : 우연동시합산효과 보정인자

K_{cc} : 축차우연동시합산 효과 보정인자

검출기효율 교정

- 검출효율은 시료의 기하학적 형태(크기, 밀도, 시료와 검출가간의 거리 등)에 의존하기 때문에 실제 측정하고자 하는 환경과 동일한 조건에서 교정을 수행
 - 감마선 분광분석을 하고자 하는 전 에너지 영역에 걸쳐서 방출에너지를 알고 있는 감마선원(표준선원)을 사전에 측정한 후 각 에너지에 대한 효율곡선식을 유도
 - 효율교정용 선원은 감마선의 에너지뿐만 아니라 방출률과 방사능을 사전에 알고 있어야 한다
 - 감마선에너지 및 방출률 : 핵붕괴 데이터
 - 방사능 : 선원제조사에서 제공
 - 일반적으로 약 100 keV 부근에서 검출효율이 최대(광전효과 최대, 검출기 크기 에따라 차이)
 - 그 이상의 에너지에서는 광전효과 감소 및 검출기에서의 이탈(투과) 등으로 효율이 감소
 - 또한 저에너지에서(100 keV 이하)에서는 dead layer에 의한 에너지 감소로 효율이 감소
-

검출기효율 교정

◆ 검출효율을 결정하는 인자(factors)

- 시료자체에서의 흡수(self absorption)
 - Attenuation of photons inside the source due to absorption in the sample material
 - 물질의 밀도가 1g/cm^3 이하이고 시료의 두께가 2cm 이하인 경우 무시가능
 - 검출기 입사창의 재질
 - Attenuation of photons in the canning material over the entrance face of the detector
 - 입사창의 재질 및 두께, 감마선에너지 등과 관계
 - 100keV 이상의 감마선에너지의 경우 알루미늄 재질에서는 이러한 효과를 무시가능
 - 검출기와 선원간의 기하학적 구조
 - The fraction of the photons emitted by the source that hits the effective volume of the detector
 - 검출기와 선원간의 유효거리 등
 - 검출기의 물리적 크기
 - The fraction of the photons hitting the detector that contributes to the full energy peak
 - 검출기의 유효체적과 감마선에너지에 따라 결정
-

검출기효율교정

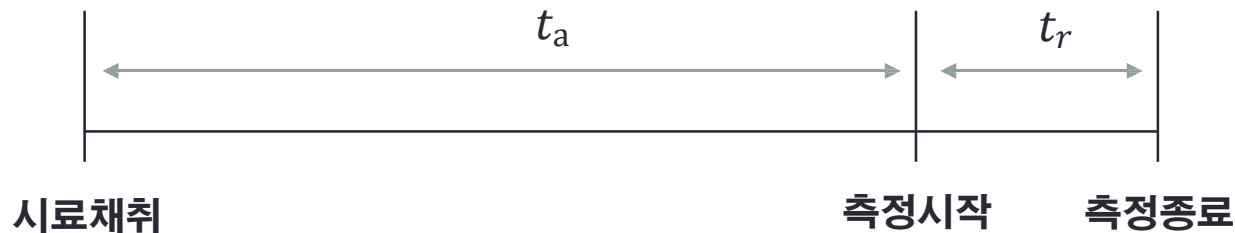
- 방사능 붕괴 보정(K_r, K_m)

$$K_r = \exp(-\lambda t_a)$$

, t_a : 측정일로 부터 표준선원의 방사능 기준일에 대한 붕괴시간

$$K_m = \frac{1 - \exp(-\lambda t_r)}{\lambda t_r}$$

, t_r : 불감시간을 고려한 측정시간 (Real time)



검출기효율교정

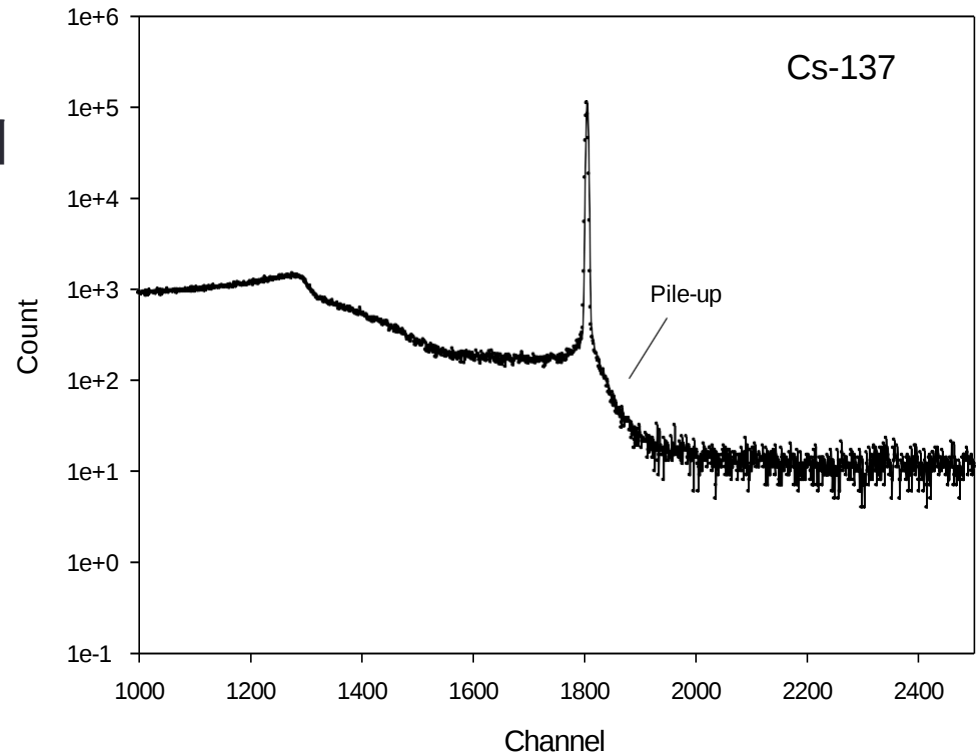
● 우연동시합산(Random summing, Pile up) 보정(K_{rc})

- 높은 계수율의 스펙트럼에서 발생
- 우연동시 합산이므로 전 피이크에 대한 보정인자 같음

$$K_{rc} = \exp(-2 R \tau)$$

, R : 총 계수율

, τ : 신호처리 시스템의 분해시간



검출기효율교정

● 축차우연동시합산 보정(K_{cc})

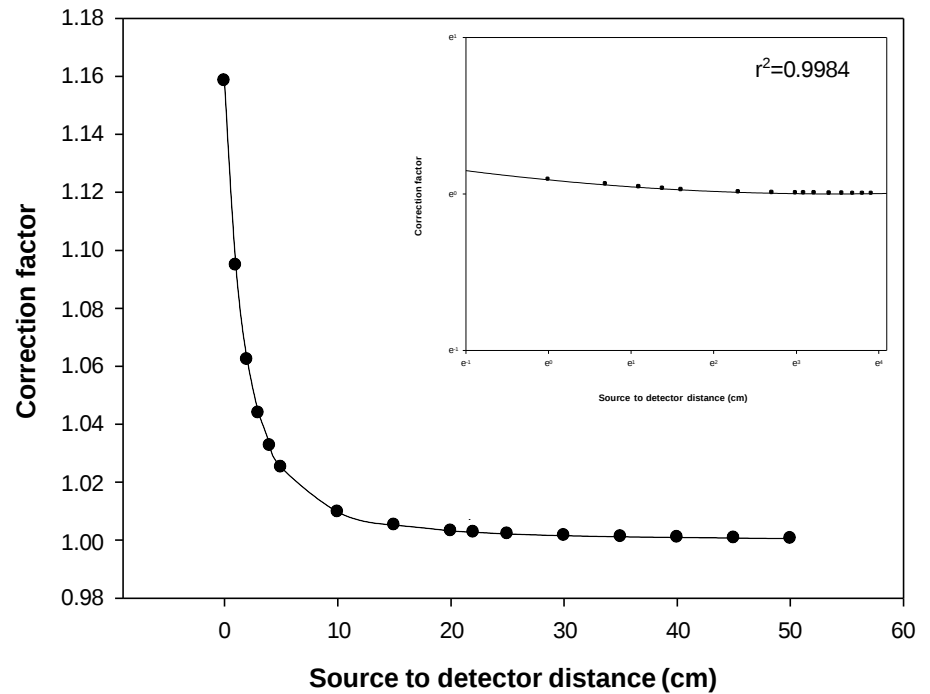
- 축차우연동시합산 (True Coincidence Summing, or Cascade Summing) 효과
 - 스펙트로미터의 분해시간 이내에 두개 이상의 광자(photon)을 방출하는 핵종에 대하여 동시합산효과가 발생할 수 있다.
 - ⇒ 핵에너지준위의 붕괴시간 << 검출기의 전하수집 시간
 - 동시 신호가 발생하면, 합산된 에너지 크기로 기록된다.
 - 전에너지 흡수피이크가 동시합산 될 경우, 이 에너지에 대한 계수 손실이 발생한다.
 - 계수율(선원의 세기)에 의존하지 않으며, 효율이 증가함에 따라 증가함.
 - 동일한 선원을 이용하여 직접 비교 분석할 경우 이 효과는 무시될 수 있다.
-

검출기효율교정

Calculation of total efficiency; Monte Carlo simulation

⁶⁰Co Point-like source

Distance (cm)	Total efficiency	Correction Factor
0	0.13660	1.15822
1	0.08650	1.09470
2	0.05852	1.06216
3	0.04191	1.04375
4	0.03149	1.03251
5	0.02444	1.02505
10	0.00958	1.00967
15	0.00515	1.00517
20	0.00313	1.00314
22	0.00268	1.00269
25	0.00211	1.00212
30	0.00152	1.00152
35	0.00115	1.00115
40	0.00091	1.00091
45	0.00071	1.00071
50	0.00053	1.00053



Correction factors for cascade coincidence summing effect as the variation of detector to source distance for 1173 keV of ⁶⁰Co

$$C_{1173} = 1/(1 - \varepsilon_{t-1332})$$

검출기효율교정

상용 프로그램을 이용한 True coincidence summing 보정; GESPECOR

The screenshot displays the GESPECOR software interface. The main window has a menu bar with options: TUTORIAL, DETECTOR, GEOMETRY, SHIELD, MATERIAL, ATTENUATION, COINCIDENCE, TRANSFER FACT, EFFICIENCY, OPTIONS, INFO, and EXIT. The central area is titled "COINCIDENCE-SUMMING CORRECTIONS AND EFFICIENCY" and contains several input fields and buttons. A "Decay Data Files" dialog box is open, showing a list of available files: CO60_1332.ded, CS32.ded, and CS326.ded. A "Text File Display" window is also open, showing the contents of a file named "07mmSOIL.sco". The main window has a "DETECTOR" section with "Selected: DT00.DET" and "Available: DT00.DET, DT07.det". A "GEOMETRY" section has "Selected: GM00.GEO" and "Available: GM00.GEO, u8-50mm.geo". A "SOURCE MATRIX" section has "Available: AIR.MAT, AL.MAT, BE.MAT". A "SHIELD" section has "Available: SH00.SHI, SHIELD#7.shi". A "Text File Display" window is open, showing the contents of a file named "07mmSOIL.sco". The window displays the following text:

Source volume (cm³):
9.04779E+01

SAMPLE COMPOSITION DATA IN THE FILE: SOIL(d=1.mat DENSITY: 1.04900E+00 g/cm³

SHIELD DATA IN THE FILE: SHIELD#7.shi

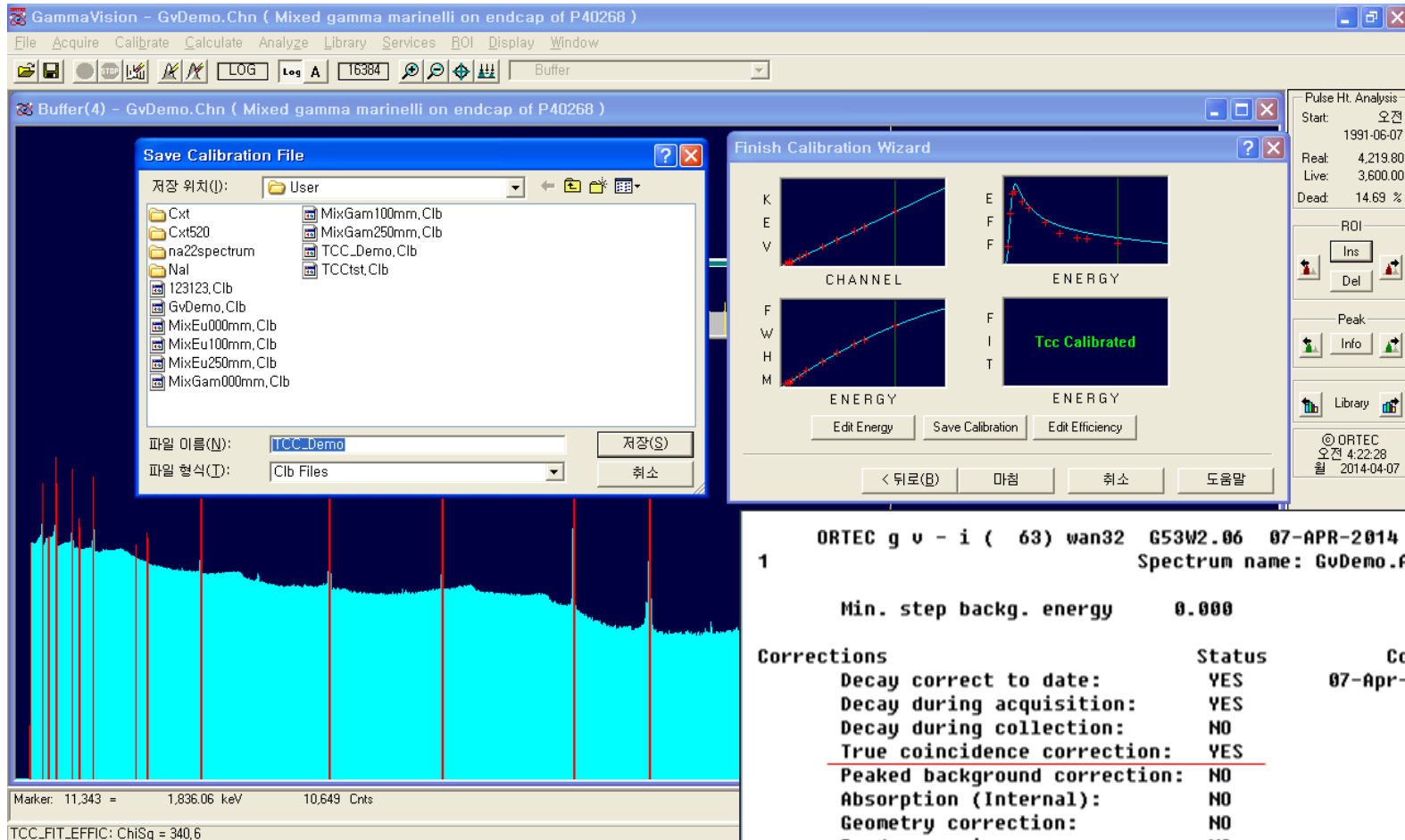
Nuclide	Decay	Energy	Yield	Fc	Nsec	Nsum	IdealEff.	Err.(%)
CS-134	BETA-	604.69	0.9763E+00	0.89040E+00	8	0	0.19436E-01	0.22E+00
CS-134	BETA-	604.69	0.9763E+00	0.89040E+00	8	0	0.19436E-01	0.22E+00

SAMPLE COMPOSITION DATA IN THE FILE: SOIL(d=2.mat DENSITY: 2.01670E+00 g/cm³

CS-134	BETA-	604.69	0.9763E+00	0.88141E+00	8	0	0.16870E-01	0.30E+00
--------	-------	--------	------------	-------------	---	---	-------------	----------

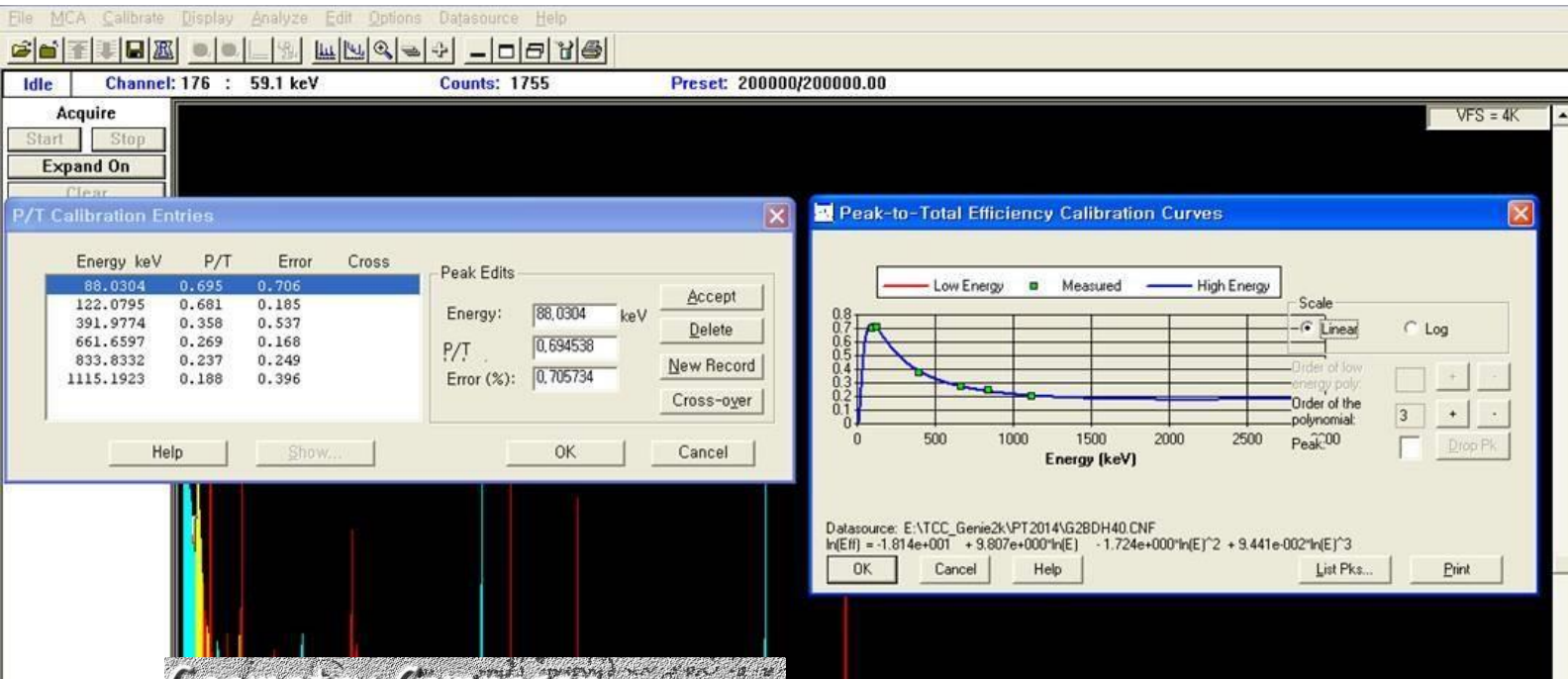
검출기효율 교정

상용 프로그램을 이용한 True coincidence summing 보정; GammaVision

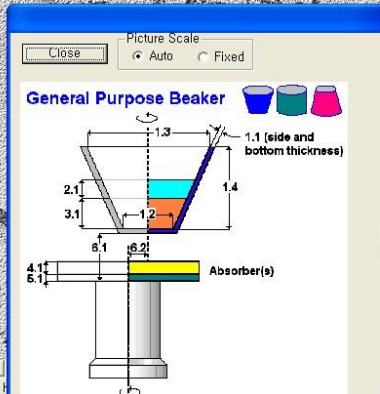


검출기효율교정

상용 프로그램을 이용한 True coincidence summing 보정; Genie2K



Geometry Composer



Nuclide Name	Id Confidence	Energy (keV)	Yield (%)	Activity (Bq /kg)	Activity Uncertainty	Coinc Corr
CO-60	0.997	1173.24*	99.97	3.70813E+002	3.68011E+000	0.981
		1332.50*	99.99	3.73405E+002	3.87473E+000	0.980
Zn-65	0.940	511.00*	2.90	2.11773E+002	7.83505E+000	free
		1115.55*	50.60	1.92147E+000	4.71133E-001	free
SR-85	0.978	514.01*	96.00	7.03990E+002	6.60276E+000	free
CE-139	0.995	165.86*	80.00	1.15053E+002	1.30985E+000	free
HG-203	0.960	279.20*	81.00	5.42943E+002	5.96788E+000	free

검출기효율교정

환경시료에 대한 True coincidence summing보정

Nuclide	Energy (keV)	Correction factor
Cs-134	605	0.88
Bi-214	609.3	0.91
Tl-208	583	0.89
Ac-228	911	0.98

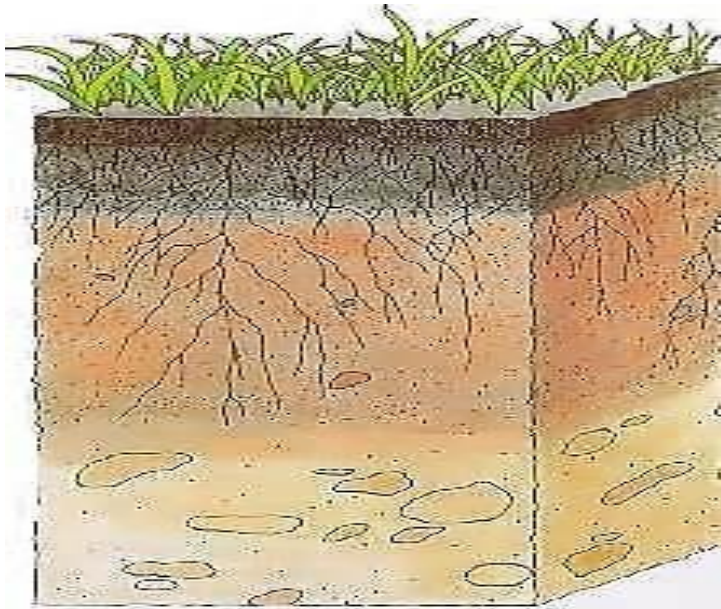
- 113 ml Cylindrical sample (30 mm diameter, 40 mm height) on top of the p-type detector window
- p-type HPGe detector with 30% of relative efficiency
- Sample material: Soil with 1.6 g/cm³

5. 방사능 분석

방사능분석 개요

방사능 단위

For what purpose?



Total activity

Bq

Mass unit

Bq/kg

Area unit

Bq/m²

Volume unit

Bq/m³

방사능분석

$$A = \frac{N}{\varepsilon m I_{\gamma} t_s K_s K_m K_a K_c K_{cc} K_{sc}}$$

N : 순계수

ε : 검출효율

t_s : 측정시간(Live time)

I_{γ} : 감마선방출율

m : 질량

K_s : 방사능농도 산출 기준일에 대한 붕괴보정인자

K_m : 측정시간 동안의 붕괴보정인자

K_a : 선원의 밀도 및 구성원소의 종류에 따른 자체 감쇠보정인자

K_r : 우연동시합산효과 보정인자

K_{cc} : 축차우연동시합산 효과 보정인자

K_{sc} : 자체감쇠 효과 보정인자

방사능분석-자체감쇠효과 보정

자체감쇠효과

- 교정선원과 분석대상시료의 화학적 구성요소 및 밀도 차이에 의해 발생할 수 있는 선원내에서의 감마선감쇠를 차이 보정

Marinelli
beaker



Cylindrical
bottle



Calibration source



Environmental samples
with different matrix

방사능분석 - 자체감쇠효과 보정

GESPECOR ; Self-attenuation correction

GESPECOR

TUTORIAL DETECTOR GEOMETRY SHIELD MATERIAL ATTENUATION COINCIDENCE TRANSFER FACT. EFFICIENCY OPTIONS INFO EXIT

SELF-ATTENUATION COMPUTATIONS

Tutorial Typical Calc. Expt. Att. Coeff. Special Transm. Exp. Close

Detector File= DT07.det
Geometry File= u8-50mm.geo
Material File for the Matrix of the Sample= SOIL(d=1.mat
Density (g/cm³)= 1.049

Matrix of calibration source
Selected: Available:
WATERSOL.MAT SOIL(d=1.mat
SOIL.MAT
WATERSOL.MAT
Density: 1

Output files
Selected: Available:
Next Calc: 07mmSOIL.aco

Energy List File
Selected: Available:
EN00.ENE EN00.ENE
New View

CALCULATION:
Single set Multiple sets

DETECTOR
Available:
Selected: DT00.DET
DT07.det

GEOMETRY
Available:
Selected: GM00.GEO
u8-50mm.geo

SOURCE MATRIX
Available:
Selected: SOIL(d=1.mat
Density: 1.049
AIR.MAT
AL.MAT
BE.MAT

SHIELD
Available:
Selected: SH00.SHI
SHIELD#7.shi

View File from Directory:
C:\
gamma
GESPECOR
bin
File:
ENLOG.GES
GELNATEN.GES
GELNFOTO.GES
GELNPER.GES

Text File Display

T.W.FONT PRINT

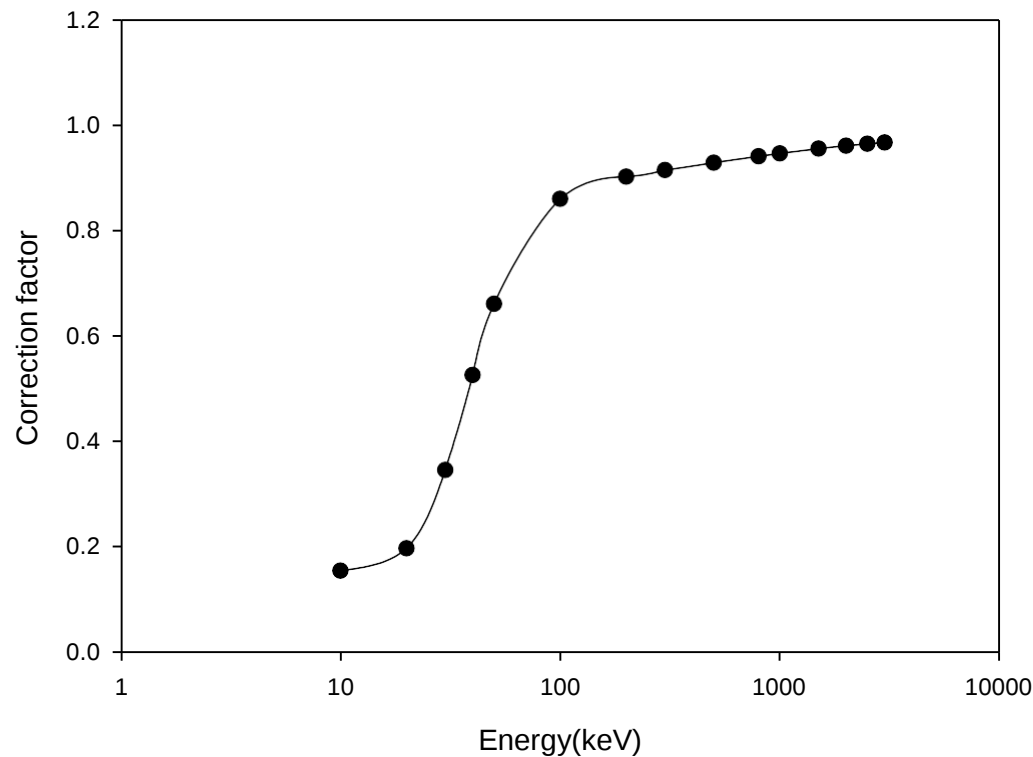
C:\gamma\GESPECOR\results\07mmSOIL1.aco 72 lines beginning with line 1

0
File name for material and Density (g/cm³):
POLYPROP.ln 9.00000E-01
Distance from the end cap to the bottom of the container:
0.200
Source volume (cm³):
9.04779E+01
Standard source composition file: WATERSOL.MAT Density: 1.00000E+00 g/cm³
Current sample composition file: SOIL(d=1.mat Density: 1.04900E+00 g/cm³

Energy	Mu(std)	Mu(sample)	Fa0	Fa1	Fca	Obs.
50.00	0.20771	0.33150	0.67815	0.55865	0.82379	
100.00	0.16538	0.17131	0.72903	0.72154	0.98972	
200.00	0.13563	0.13018	0.76859	0.77620	1.00991	
500.00	0.09664	0.09184	0.82582	0.83332	1.00909	
1000.00	0.07066	0.06712	0.86777	0.87374	1.00688	
2000.00	0.04940	0.04716	0.90460	0.90862	1.00445	

방사능분석 – 자체감쇠효과보정

토양 시료에 대한 자체감쇠 보정인자



- 113 ml Cylindrical sample (30 mm diameter, 40 mm height) on top of the p-type detector window
- p-type HPGe detector with 30% of relative efficiency
- Sample material: Soil with 1.6 g/cm^3