

# 감마선 분광분석

## - Gamma-ray Spectrometry -



이 해 영

# **I. 감마선분광학의 기초지식**

# 1. 서론

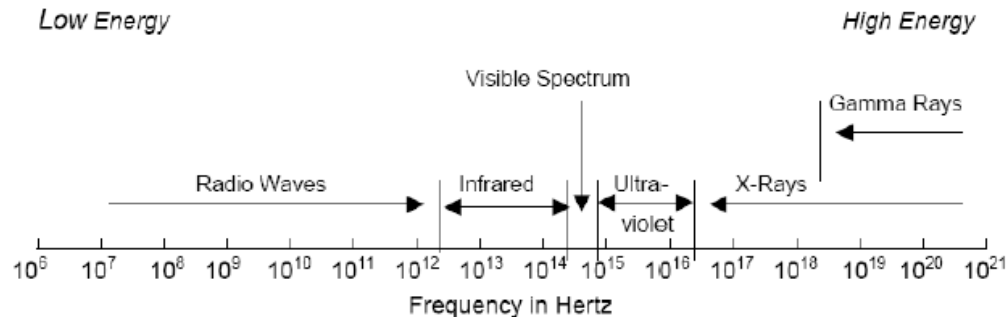
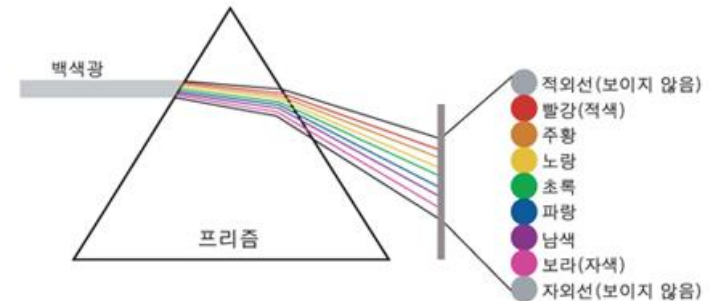
## ◆ 분광학(Spectroscopy)

- 파장(주파수, 에너지)에 따른 빛과 물질 간의 상호작용 연구
- 프리즘 → 가시광선 관찰
- 오늘날 파장(에너지)에 따른 어떤 양을 측정하는 것을 의미



## ◆ 스펙트럼(Spectrum)

- 파장(주파수, 에너지)의 함수로 주어지는 반응 값을 도표로 나타낸 것



# 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



DEN/DETC/SDTC/LSTD  
2011, December

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

Charly MAHE  
charly.mahe@cea.fr

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)

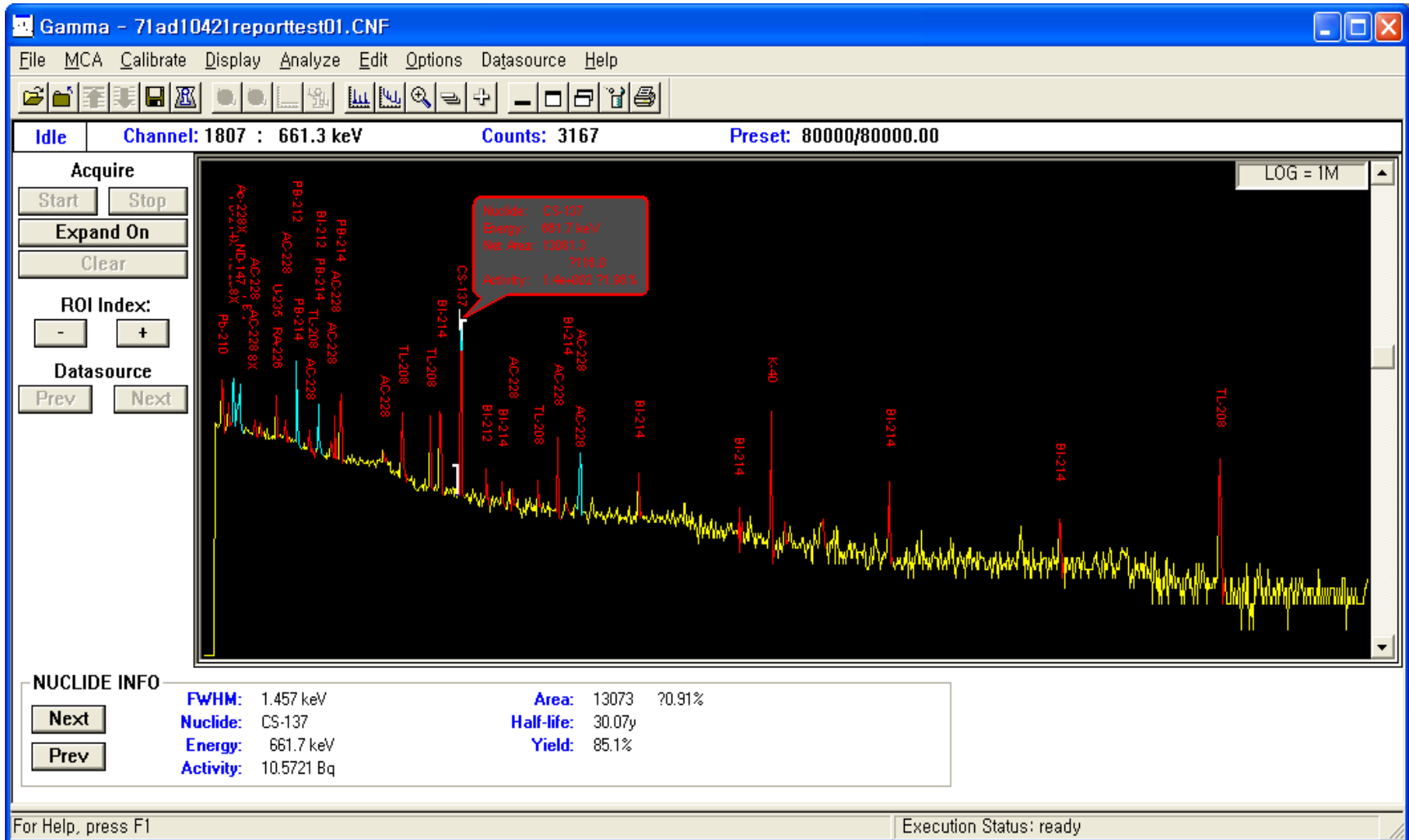
- 다양한 매질(matrices)내에 있는 감마방출 동위원소의 식별(identification) 및 정량(quantification)
- 선원(source)로부터 방출된 감마선의 수(number)와 에너지(energy)
- 응용 : 감마선의 수  $\Rightarrow$  방사능의 결정(determination),  
감마선의 에너지  $\Rightarrow$  방사성 핵종의 식별(identification)

## ◆ 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

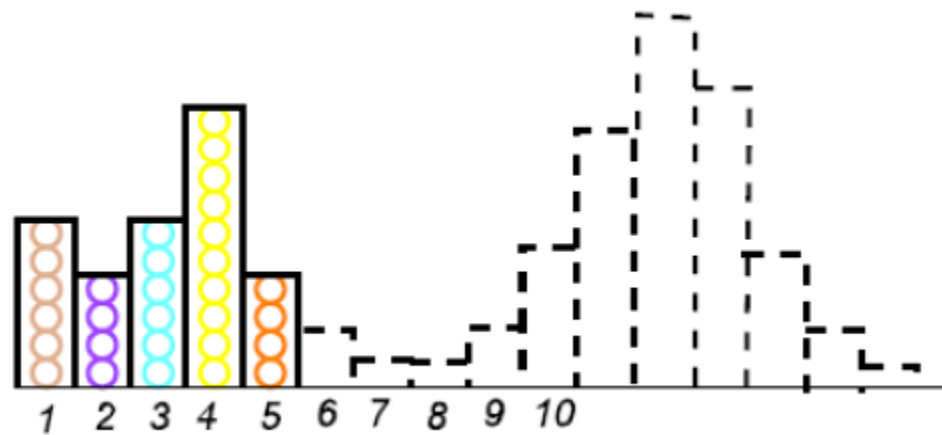
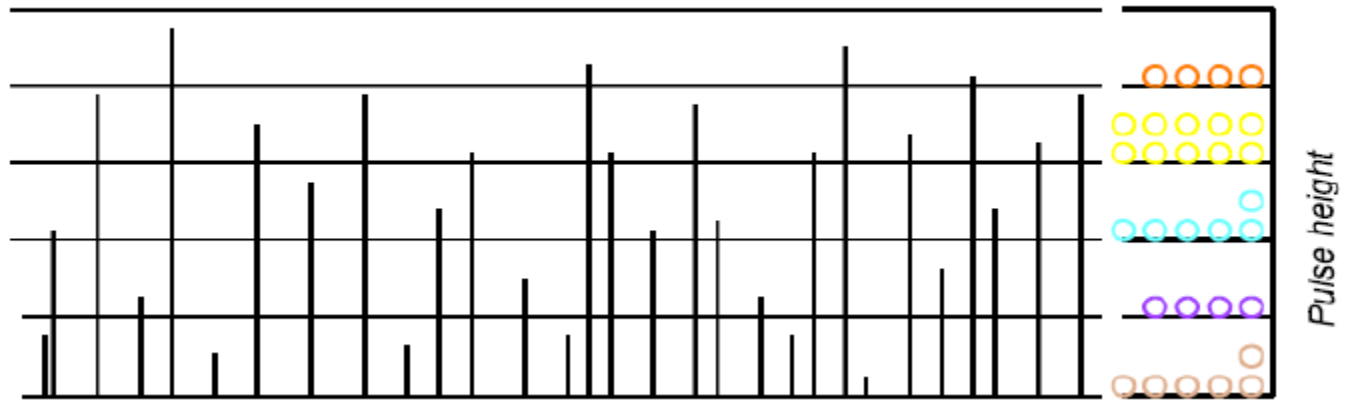
# 1. 서론

## ◆ 감마선 스펙트럼의 예



# 1. 서론

## ◆ 파고높이 스펙트럼(Pulse height spectrum)



# 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

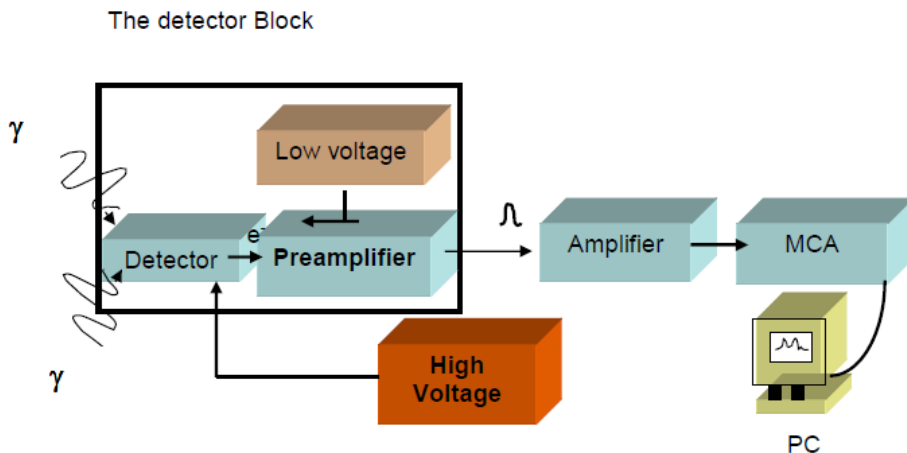
- Monitoring in nuclear facilities
- Health physics
- Nuclear medicine
- Research in materials
- Bioscience
- Environmental science, and
- Industrial uses of radioisotopes



## 2. 시스템의 구성

### ◆ gamma Spectroscopy System(typical)

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



## 2. 시스템의 구성

### ◆ NIM bin (Low voltage power supply)

- Nuclear Instrumentation module (Methods)
- 표준화 ; 신호에 대한 정의, 인가전압, 핵계측 모듈의 물리적 크기
- 모듈들의 교체를 용이
- 계측시스템의 재구성 혹은 확장성을 용이(활용분야에 따라)

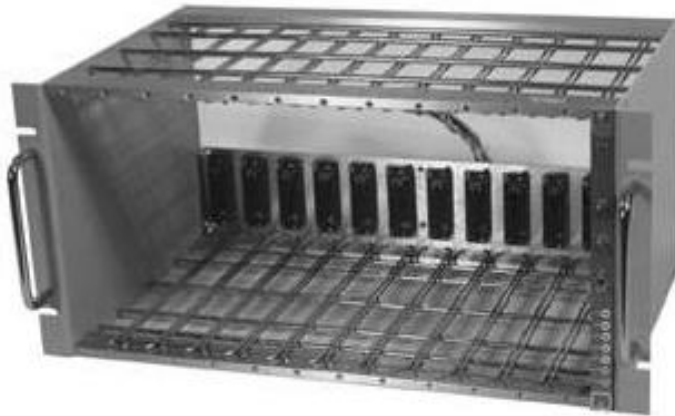


그림. 대표적인 NIM bin



그림. A typical HV Power supply and Amplifier

## 2. 시스템의 구성

### ◆ CAMAC (modular data handling system)

- Compute Automated Measurement And Control
- Defined by European Standards On Nuclear Electronics(ESONE) Committee of JRC
- 주 목적 : data acquisition (or remotely programmable trigger and logic applications)
- 전세계적으로 거의 모든 핵물리학연구 또는 산업분야에서 이용
- 미국의 NIM 사양과 유럽 ESONE위원회의 사양을 결합(joint)
- 표준화 ; 모듈에 대한 전기적 및 물리적 사양, 기기의 housing 및 crates, crate backplane (LeCroy model 8025 with 25 positions and model 8007 with 7 positions)
- Interface directly with the GPIB or IEEE Std. 488-1978 bus



## 2. 시스템의 구성

### ◆ 전치증폭기 (Pre-Ampifier)

- 검출기내에 생성된 전하의 수집
- 임피던스 정합(match) ; 검출기의 고 임피던스와 동축케이블(증폭기까지)의 저 임피던스
- 전하유감형 전치증폭기(charge sensitive preamplifier)가 가장 널리 이용
- 검출기와 가깝게 배치(to maximize performance)

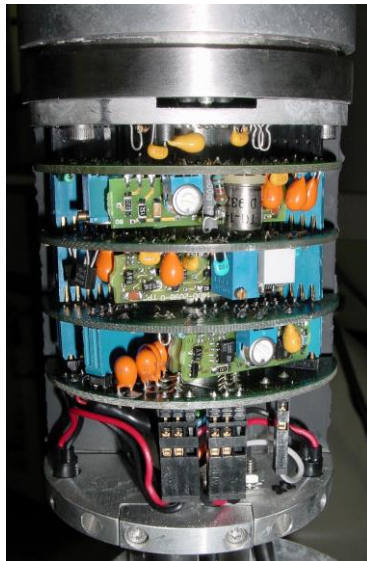
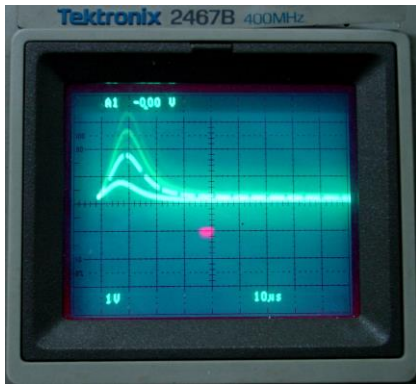


그림. HPGe 검출기의 전치증폭기 실제 사진

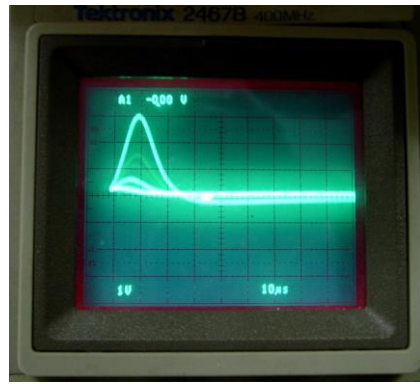
## 2. 시스템의 구성

### ◆ 선형증폭기 (Linear Amplifier) ; 기능

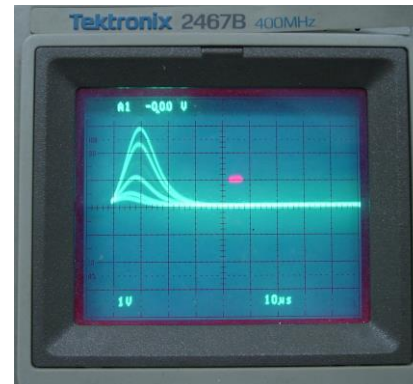
- Gain adjust ; stability
- Input signal polarity change
- Shaping time adjust ; output pulse shape
- Pole-Zero Cancellation
- Baseline Restoration
- Pulse Pile-up
- 주요특성 ; 선형성, 출력신호모양, gain의 안정성, S/N 비 등



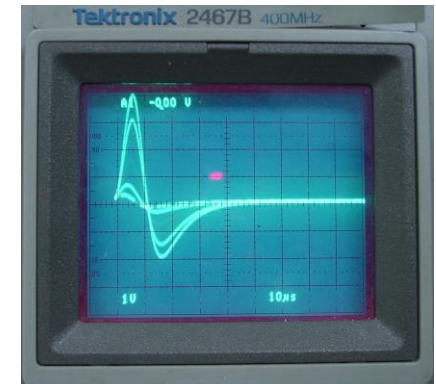
(a) Overshoot



(b) Undershoot



(c) Unipolar pulse



(d) Bipolar pulse

그림. 주 증폭기의 출력신호 사진

## 2. 시스템의 구성

---

### ◆ 다중파고분석기 (Multichannel Analyzer, MCA)

#### ❖ Configurations

- ADC (Analogue to Digital Converter)
- Spectrum Memory ; collecting the data
- Display (and Printer) ; providing a visual and producing output

#### ❖ PC-based MCA System

- ADC Board clips into the PC
- Clip-in board with an external ADC
- Multichannel buffer (MCB) connected to the PC

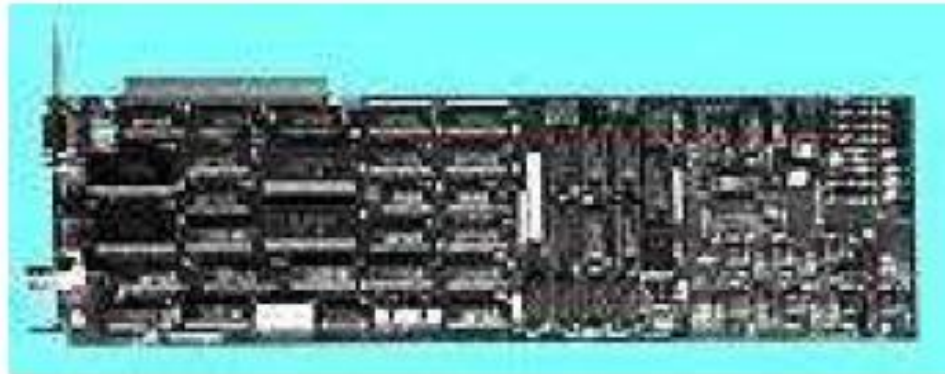


그림. Typical MCA card

# 2. 시스템의 구성

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

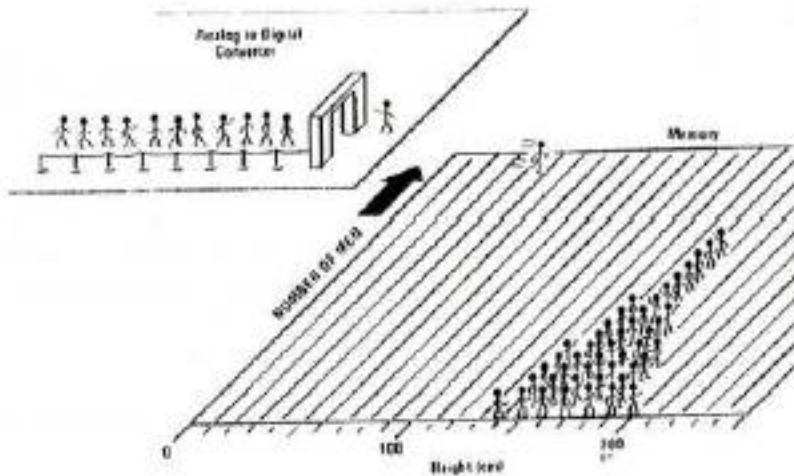
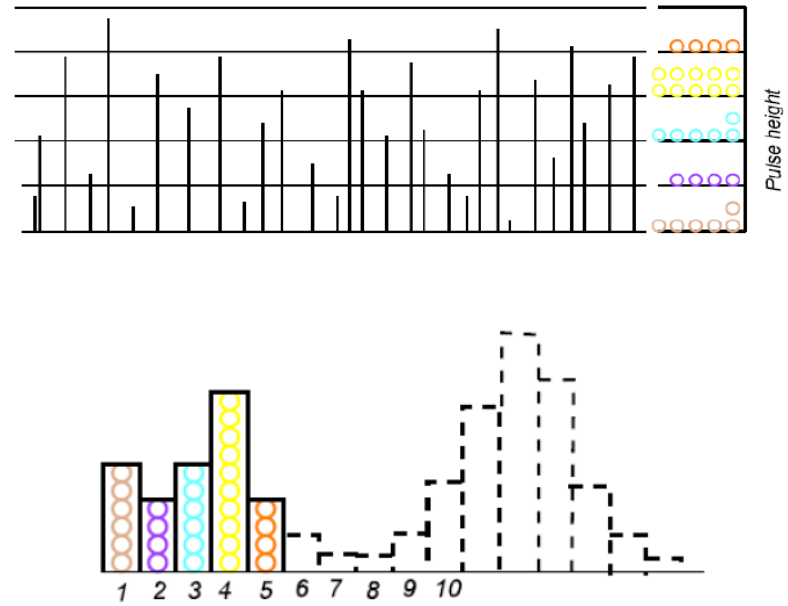
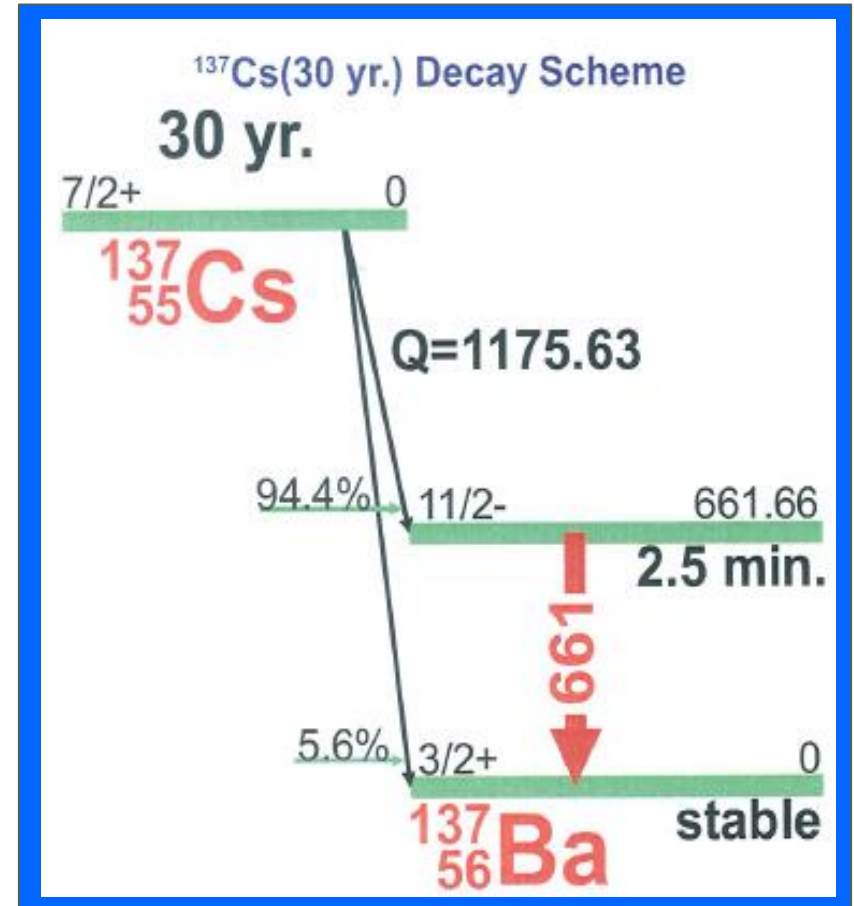
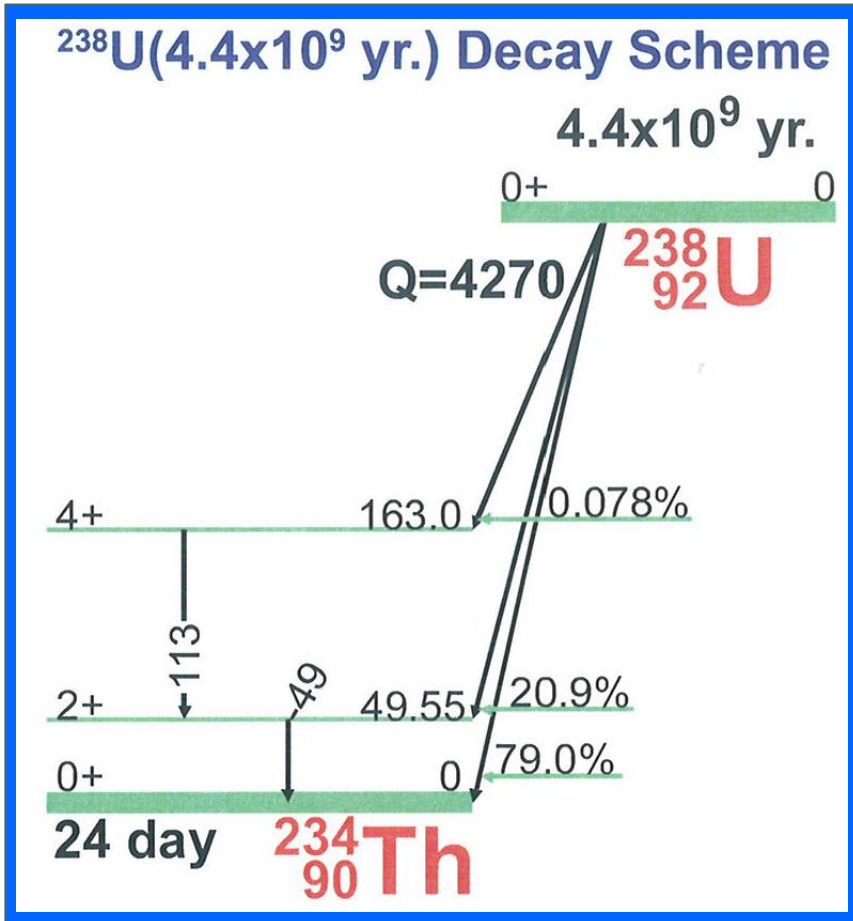


그림. ADC 도식도



# 3. 기초지식

## (1) 붕괴 도식(decay scheme)





# 3. 기초지식

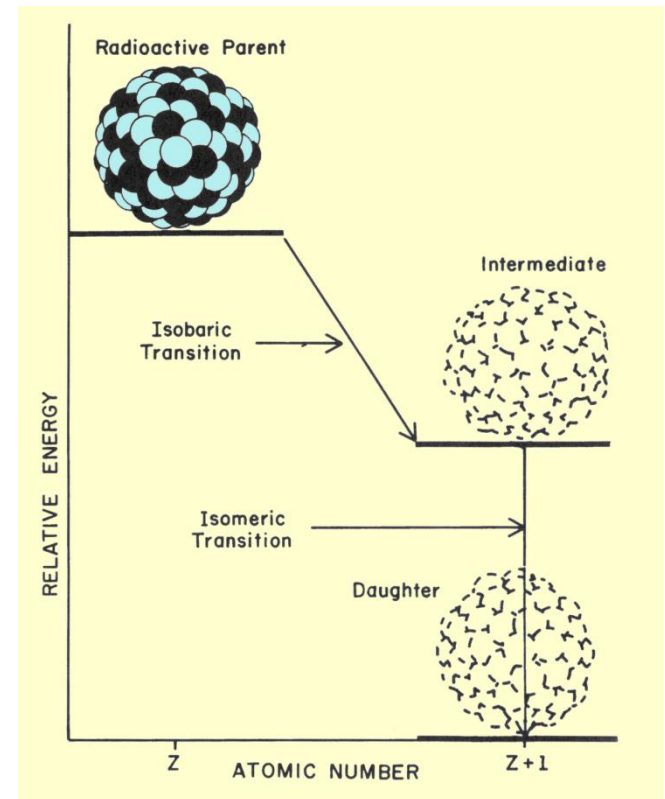
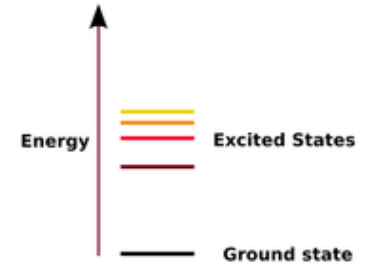
## (2) 핵이성체(nuclear isomer)

■ 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)
- $^{137m}\text{Ba}$ (2.5분),  $^{99m}\text{Tc}$ (6.0시간),  $^{103m}\text{Rh}$ (57.5분),  $^{133m}\text{Xe}$ (2.1일),  $^{191m}\text{Ir}$ (4.9초)

■ 핵이성체 전이(isomeric transition, IT)

- 핵이성체가 감마선을 방출(준안정상태에서 감마붕괴)



# 3. 기초지식

## (3) 감마선 방출률(emission probability per decay)

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

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

➤  $^{137}\text{Cs}$ 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( $\alpha$ ) =  $N_e/N_\gamma$ ,

여기서,  $N_e$ 는 전이(transition)시 내부전환전자의 방출확률,  $N_\gamma$ 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 방출비(emission rate)

■ 어떤 선원으로부터 방출된 에너지 E인 감마선의 단위시간당의 수(#) ;  $\gamma/\text{sec}$

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

$$R(E) = P_{\gamma}(E) \cdot A = P_{\gamma}(E) \cdot \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$$

■  $^{137}\text{Cs}$  1000Bq

➤ 감마선방출 ; 850개 /초

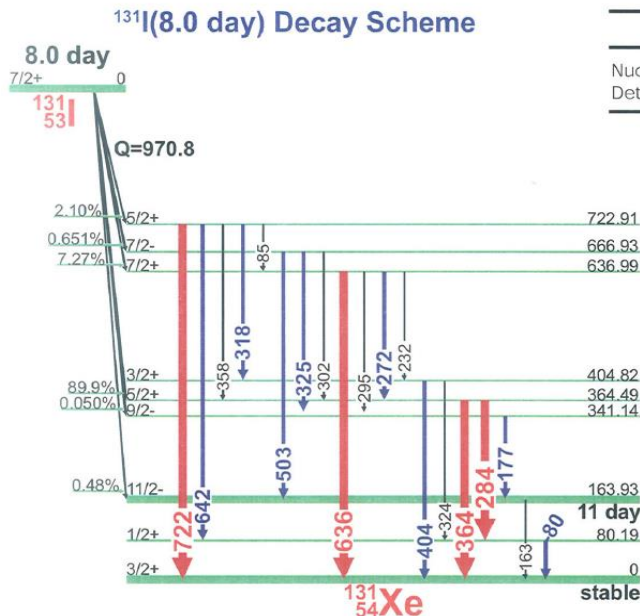
➤ 방사선 검출기 피크효율 교정에서 매우 중요

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

# 3. 기초지식

## (5) 감마선 분기비(branching ratio)

- 특정에너지 감마선방출률과 그 에너지준위에서 총 전이율의 비
  - $^{131}\text{I}$  364.49keV → 2가지 경로로 분기(0keV, 284.31keV)
  - $P_\gamma(0\text{keV}): 81.7\%$ ,  $P_\gamma(284.31\text{keV}): 6.14\%$
  - 각각의 분기비 ;  $81.7/87.84=0.93$ ,  $6.14/87.84=0.07$
- 동시합산효과 보정시 매우 중요한 개념



GAMMA-RAY ENERGIES AND INTENSITIES

Nuclide:  $^{131}\text{I}$  Half Life: 8.02070(11) day  
 Detector: 55 cm<sup>3</sup> coaxial Ge (Li) Method of Production: U(n,f) chem

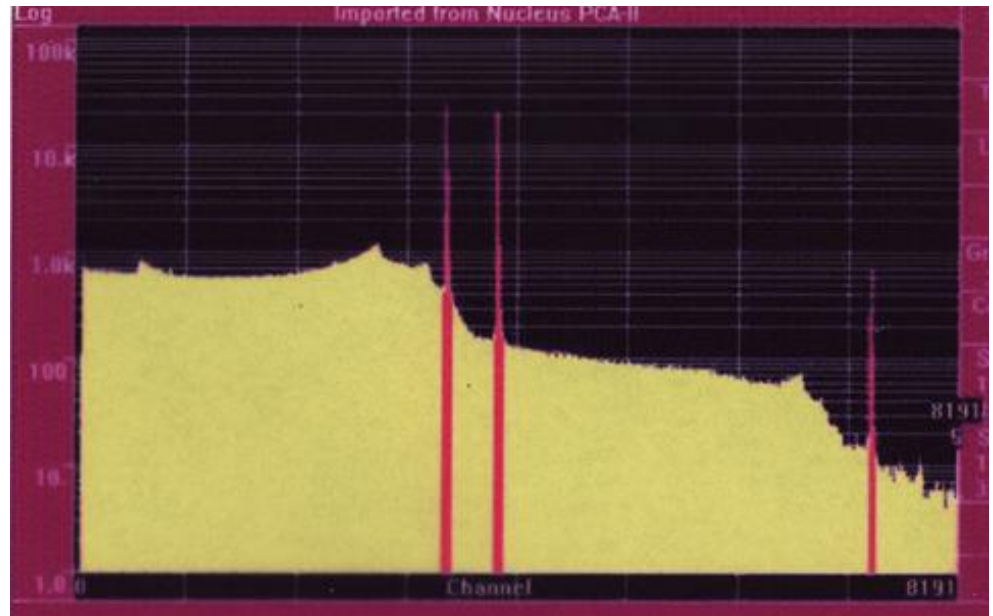
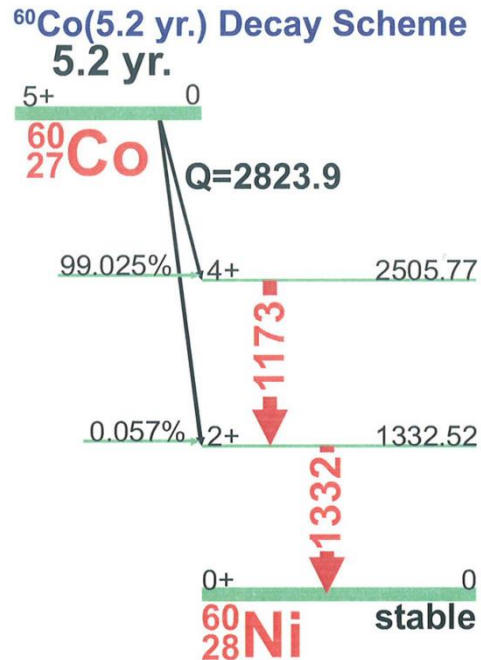
$E_\gamma$ (keV)	$\sigma E_\gamma$	$I_\gamma$ (rel)	$I_\gamma$ (%)	$\sigma I_\gamma$	S
80.185	0.002	2.8	2.62	0.04	2
85.90	0.20		0.0001		4
163.930	0.008				4
177.214	0.002	0.36	0.270	0.004	4
232.18	0.15		0.0032	0.0004	4
272.498	0.017	1.1	0.0578	0.0011	4
284.305	0.005	7.6	6.14	0.06	1
295.80	0.20		0.0018	0.0008	4
302.40	0.20		0.0047	0.0006	4
318.088	0.016	0.10	0.0776	0.0017	4
324.651	0.025	0.34	0.0212	0.0025	4
325.789	0.004		0.274	0.021	
358.40	0.20		0.016	0.006	4
364.489	0.005	100.	81.7	0.8	1
404.814	0.004	0.07	0.0547	0.0017	4
449.60	0.20		0.0074	0.0025	4
503.004	0.004	0.46	0.360	0.004	2
636.989	0.004	9.1	7.17	0.10	1
642.719	0.005	0.28	0.217	0.004	2
722.911	0.005	2.3	1.7729	0.0268	1

$E_\gamma$ ,  $\sigma E_\gamma$ ,  $I_\gamma$ ,  $\sigma I_\gamma$  - 1998 ENSDF Data

# 3. 기초지식

## (6) 동시합산(coincidence summing)

- 2개 이상의 감마선을 cascade 형태로 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 ;  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{88}\text{Y}$



# 3. 기초지식

---

## (7) 우연합산(random summing)

- 독립된 방사성붕괴로부터 각각의 감마선들이 우연히 합산(검출기분해시간 이내에서)
  - 계수율이 증가함에 따라 증가

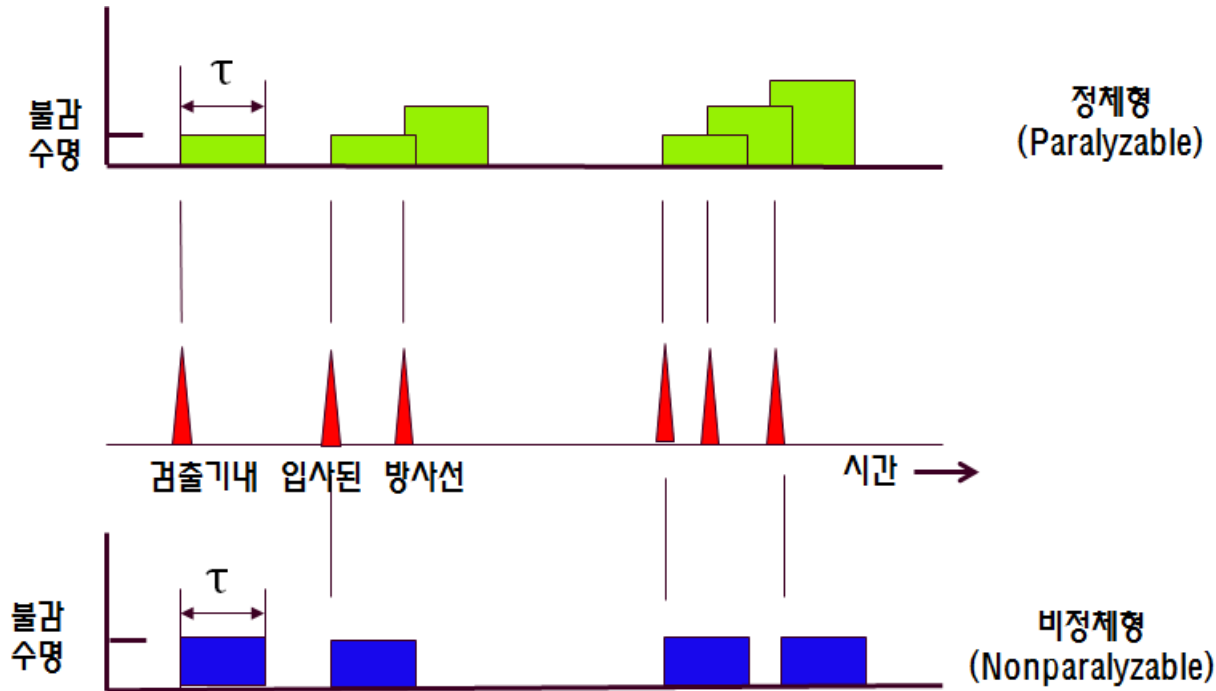
## (8) 펄스 중첩(pulse pileup)

- Discriminator의 판별시간(500nsec) 이상의 시간차이를 가지는 2개의 연이은 감마선
  - 선행펄스와 후행펄스의 중첩
  - 중첩된 출력펄스 ; 그 폭과 높이에서 찌그러짐
  - Pileup Rejector 사용

# 3. 기초지식

## (9) 불감시간(dead time)

- 2개의 입사방사선에 대해서 2개의 분리된 펄스로 출력 ; 최소한의 분리시간을 불감시간
  - 계수율이 큰 경우 계수손실에 대한 보정이 필요
  - 정체형(paralyzable)과 비정체형(nonparalyzable) 모델



# 3. 기초지식

---

## (10) 유효 계수시간(live time)

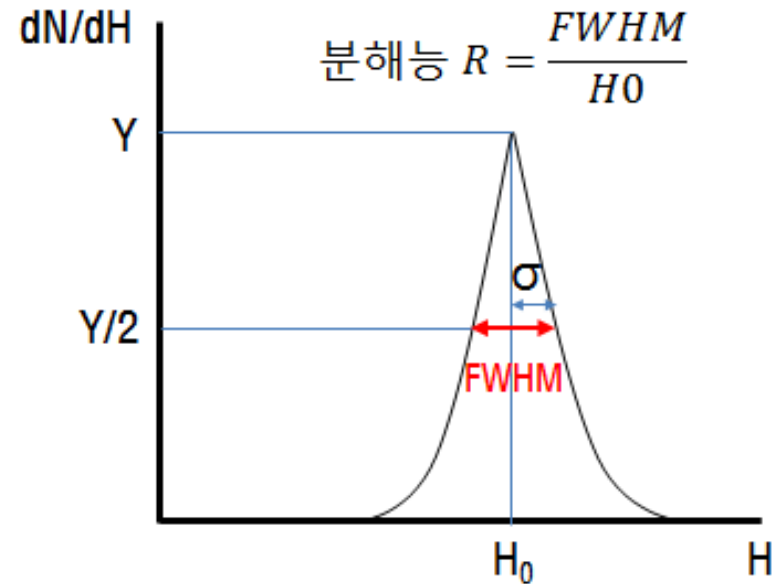
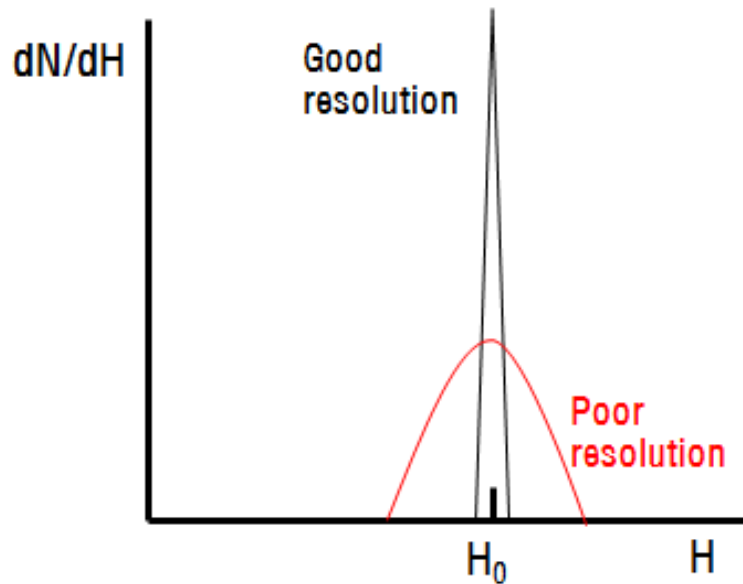
- MCA의 불감시간 = ADC의 처리시간 + 기억장치의 기억시간
  - MCA의 입력게이트 ; 직전펄스의 “Busy” 시간 동안에는 ADC는 close 상태
  - 대부분의 MCA는 internal clock을 가지고 있음
  - 이 클럭의 출력펄스를 원래의 신호펄스와 함께 입력게이트를 통해 입력 → “0” 채널에 기록
  - 따라서 입력차단으로 손실된 비율은 클럭펄스와 신호펄스 모두 같은 비율이 됨
  - 결과적으로 채널 “0” 에 누적된 클럭펄스의 수는 MCA의 유효 계수시간
  - Real time(elapsed time) = live time + dead time



# 3. 기초지식

## (11) 에너지 분해능(energy resolution)

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



# 3. 기초지식

## (12) 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.) ;  $\epsilon_{re} = \frac{\text{HPGe 반도체검출기의 절대효율 (1332.5keV, 25cm 거리)}}{3" \times 3" \text{ NaI 검출기의 절대효율 (1332.5keV, 25cm 거리)}}$

➤  $^{60}\text{Co}$  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

# 3. 기초지식

## (12) 검출 효율(detection efficiency)

- 기록된 events의 특성에 따른 분류 -

■ 총 효율(total eff.) ;  $\epsilon_{total} = \frac{\text{스펙트럼상에 기록된 모든 펄스의 수}}{\text{선원에서 방출된 방사선(광자)의 수}}$

➤ 스펙트럼 아래의 총면적 ; 펄스높이(에너지)와 관계없이 기록된 모든 펄스의 수

■ 피크 효율(peak eff.) ;  $\epsilon_{peak} = \frac{\text{에너지 } E \text{에 대응되는 피크에서의 계수율}}{\text{에너지가 } E \text{인 방사선(광자)의 선원으로부터 방출률}}$

➤ 일명 전에너지흡수(full energy absorption)효율

➤ Peak to total ratio( P/T) ; 동시합산 보정에 이용

