

국민에게 신뢰받는 안전 최우선의 KINS

Ⅲ. 방사선 측정 및 분석

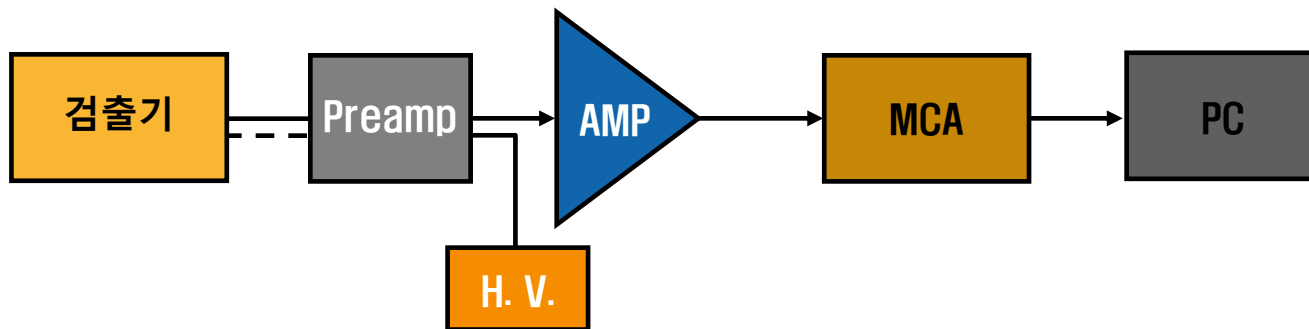
감마분광분석



입사 방사선의 정보를 통해 핵종을 식별

- 미지의 시료로부터 방출되는 **감마선 에너지를 분리 측정함에 따라 함유된 핵종을 식별**하고 방사능을 평가하는 분석법
 - 핵종별로 고유 에너지를 지닌 감마선을 방출하는 원리 이용
- 입사 방사선에 의한 $E_{\text{deposit}} \propto$ **출력 펄스의 크기(Pulse height)**인 특성의 검출기 사용

일반적인 감마선 분광 분석 시스템 회로 구성

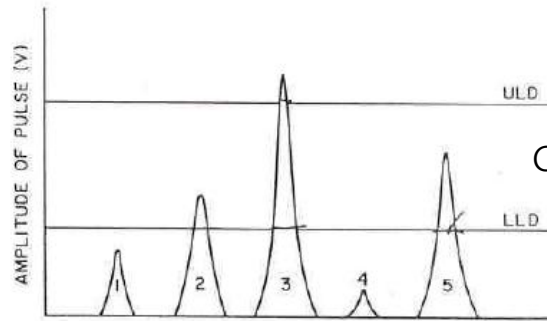


- 전치증폭기(preamp) : 펄스의 1차 성형 및 약간의 증폭
- 주증폭기(amp) : 펄스의 2차 성형 및 증폭
- 다중채널분석기(MCA, Multi channel Analyzer): 펄스의 크기에 따라 해당 채널에 기록·저장



단일채널분석기(SCA; Single channel Analyzer)

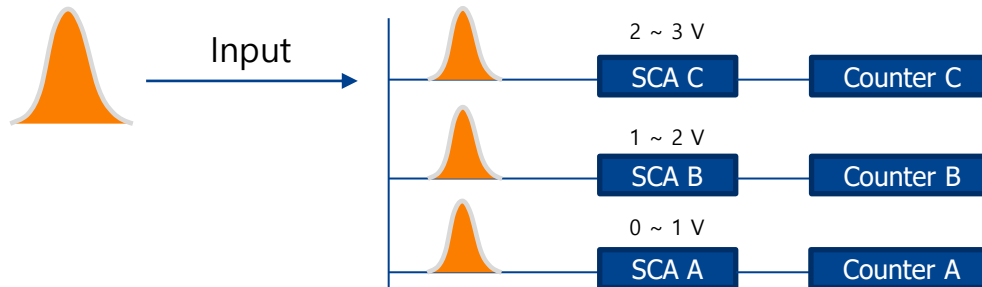
- 특정 크기의 펄스(특정 에너지)만을 계수
 - LLD와 ULD 사이의 펄스
 - 2번, 5번 펄스 계수



- ULD: 상한 선별기
- LLD: 하한 선별기

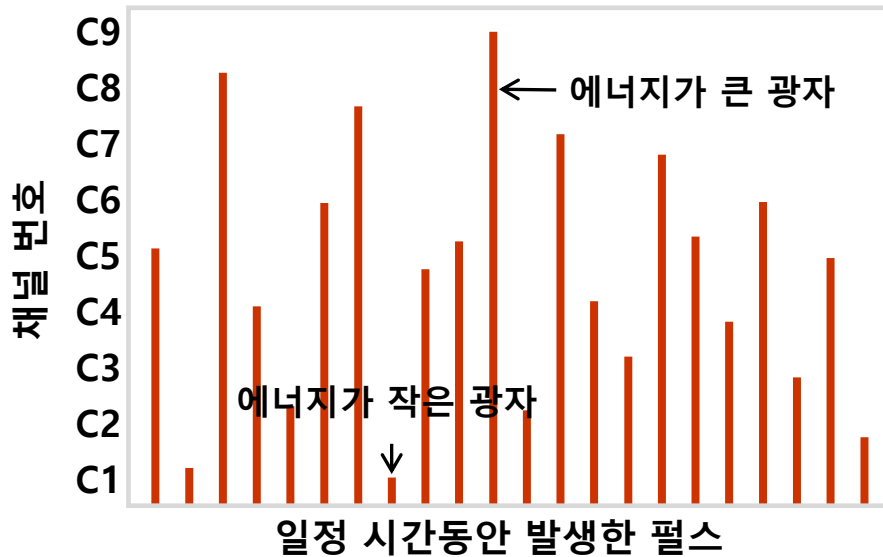
다중채널분석기(MCA)

- 펄스의 크기에 따라 해당되는 채널에 구분하여 계수
 - 다른 관심 채널을 갖는 여러 SCA가 배열된 개념

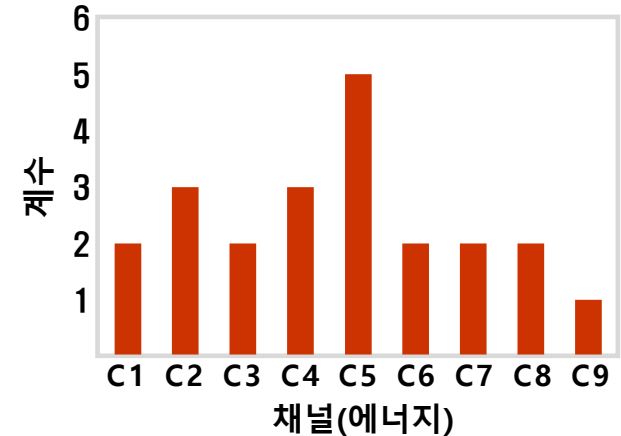


에너지 스펙트럼

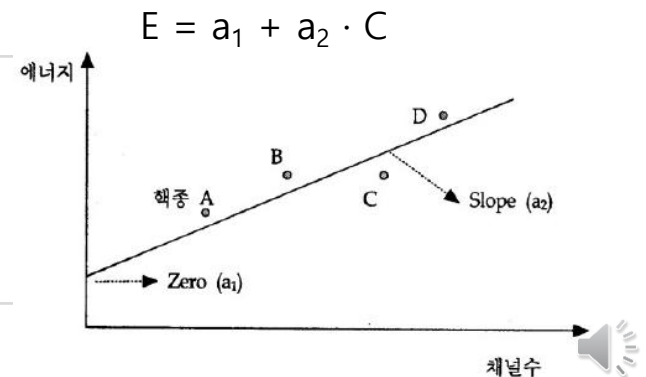
- 각 채널별로 펄스 수를 계수 → 채널별 계수치를 얻음



- 에너지 스펙트럼



※ 에너지교정: 에너지와 채널과의 관계를 확인
 → 채널은 에너지로, 에너지는 채널로 상호 변환 가능
 [가정] 0.5 keV/Ch 의 교정조건
 1,000 번째 채널에서 3,000 계수 ⇒ 500 keV 방사선이 3,000 개 계수됨



MCA의 채널 수 결정

■ MCA 채널 수(N)를 늘리는 경우

- 세밀한 에너지 구분 가능 **But!**
- 채널 당 계수치 감소로 통계 오차 증가
- 데이터 처리량 증가로 계측시스템 불감시간(τ) 증가

$$\tau = \frac{N}{\nu} + B$$

■ 채널 수 결정

$$\text{채널 수} = h \frac{\text{관심있는 에너지 범위(keV)}}{\text{FWHM(keV)}}$$

- FWHM(Full Width Half Maximum)
- 반치폭, 에너지 분해능을 결정

h: 스펙트럼에서 피크 식별을 위해 FWHM 묘사에 할당되는 최소의 채널 수
(최소 4 개 채널을 FWHM에 할당)

- 관심있는 에너지 범위: 통상 0 ~ 2.5 MeV

- NaI(Tl)의 경우 FWHM : 50keV 정도 최소채널수 = $4 \times \left(\frac{2500}{50} \right) = 200 \text{ chs}$
- HPGe의 경우 FWHM : 2keV 정도 최소채널수 = $4 \times \left(\frac{2500}{2} \right) = 5000 \text{ chs}$



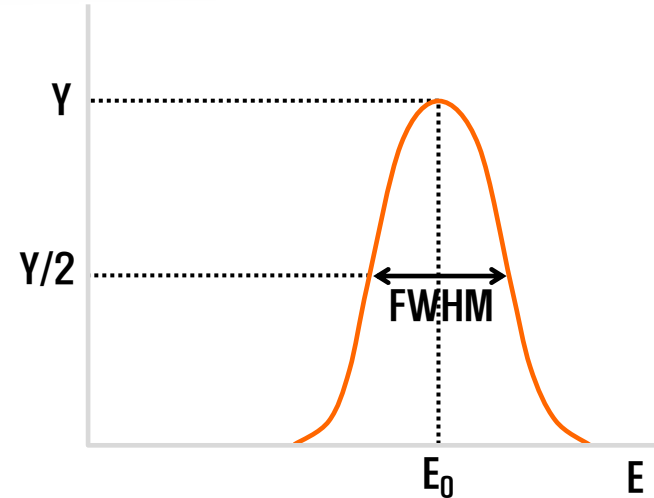
에너지 분해능(Energy Resolution)

■ 반치폭 (FWHM; Full Width Half Maximum)

- 피크 최대값의 1/2 지점에서의 폭

■ FWHM 형성의 주요 원인

- 신호 자체(정보전달자) 발생율의 요동(파노 인자)
- 형성된 전하의 수집율의 요동
- 전자 회로에서의 잡음



■ $FWHM^2 = \sum(FWHM_i)^2$, 가우시안 분포와 유사

$$E_0 = KN$$

$$FWHM = 2.35\sigma$$

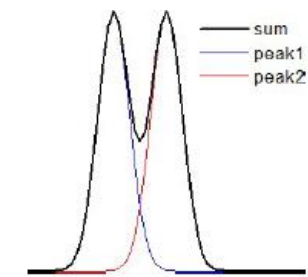
$$\sigma = K\sqrt{N}$$

- E_0 : 입사 방사선의 에너지
- K : 비례상수 (기체검출기의 경우 W값)
- N : 생성된 정보전달자의 수

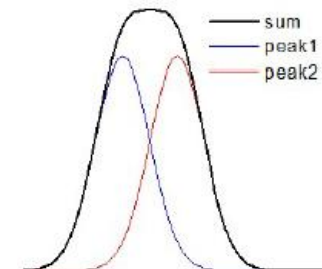
$$\text{에너지분해능}(R) \equiv \frac{FWHM}{E_0} = \frac{2.35K\sqrt{N}}{KN} = \frac{2.35}{\sqrt{N}}$$

$$N = E_0/W$$

$$R \propto \frac{1}{\sqrt{E_0}}$$



good resolution



bad resolution

→ R 이 작을수록 에너지분해능이 우수함

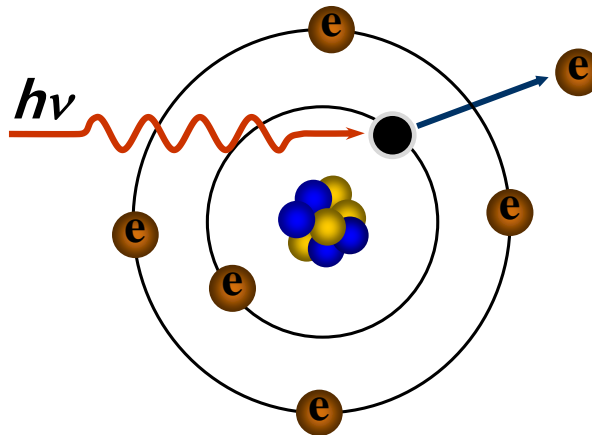
→ 단위 에너지당 생성되는 정보전달자의 수가 많으면 분해능 우수



감마선과 물질과의 상호작용

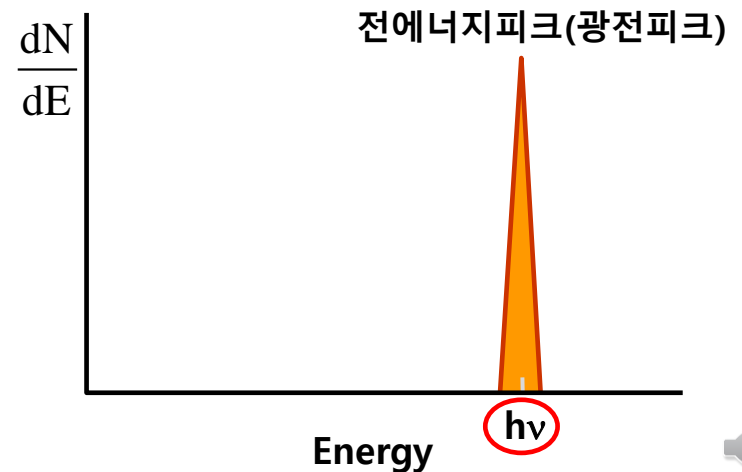
■ 광전효과(Photoelectric absorption)

- 광자가 입사하면서 모든 에너지를 원자 내 전자에 부여하면서 소멸되는 반응



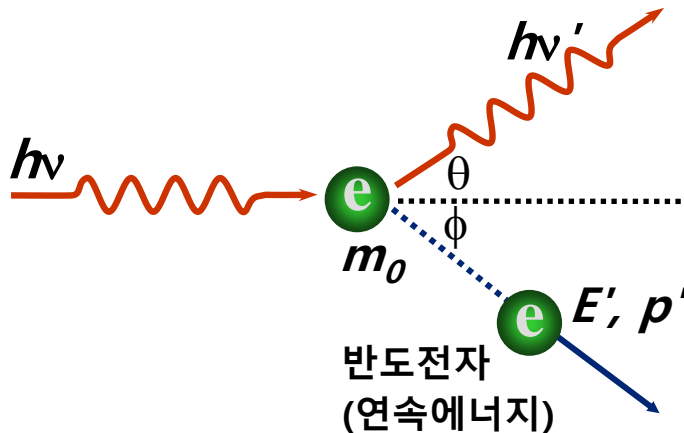
$$\sigma_{PE} \propto \frac{Z^5}{E^{3.5}}$$

- 생성된 전자는 비정기 매우 짧아 검출기 내에서 에너지를 모두 잃음
- 입사하는 감마선 에너지와 동일한 에너지에서 피크가 형성됨
- 피크 에너지를 통해 감마선 에너지 확인 및 핵종 분석 가능



■ 콤프턴 산란(Compton scattering)

- 광자가 자유전자와 반응하여 에너지 일부를 잃고 산란되어 나가는 현상, 전자도 궤도 이탈



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

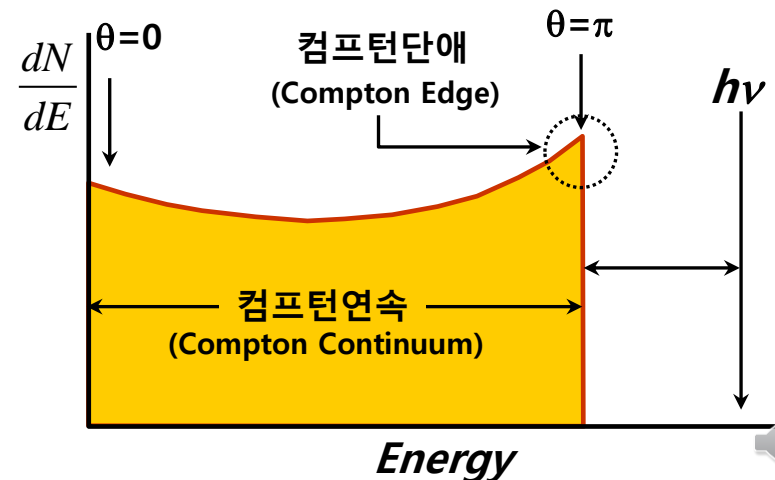
$$E' = h\nu - h\nu'$$

$$m_e c^2 = 511 \text{ keV}$$

- 콤프턴 단애(광자가 180°로 후방산란)

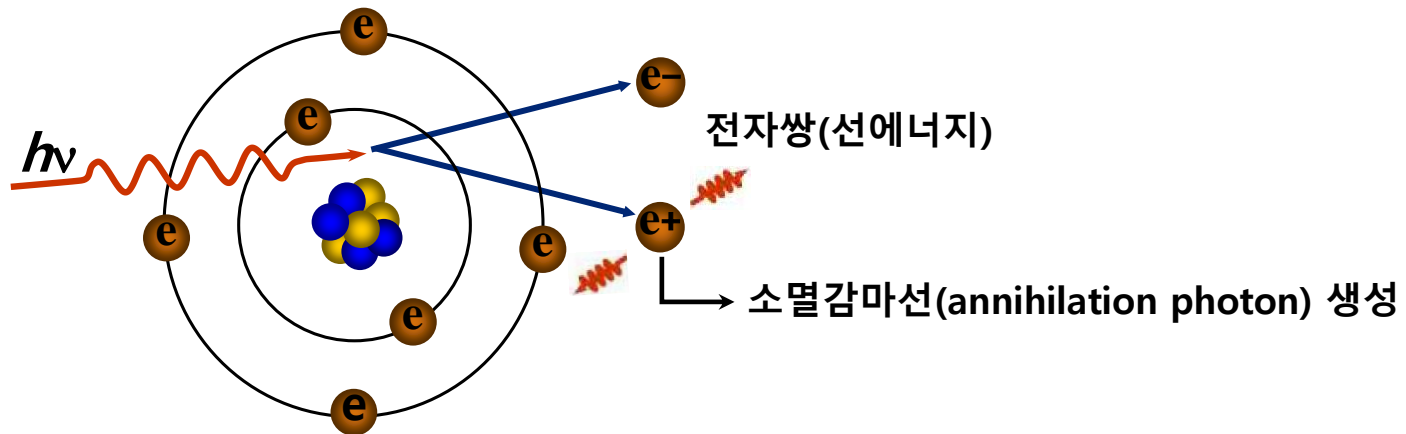
$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + 2 \frac{h\nu}{m_e c^2}}$$

- 산란각에 따라 전자에 전달되는 에너지 상이
- 에너지 스펙트럼 상에서도 연속적으로 나타남
- 전자에 최대에너지를 전달하는 산란각(180°)에서 콤프턴 단애 형성

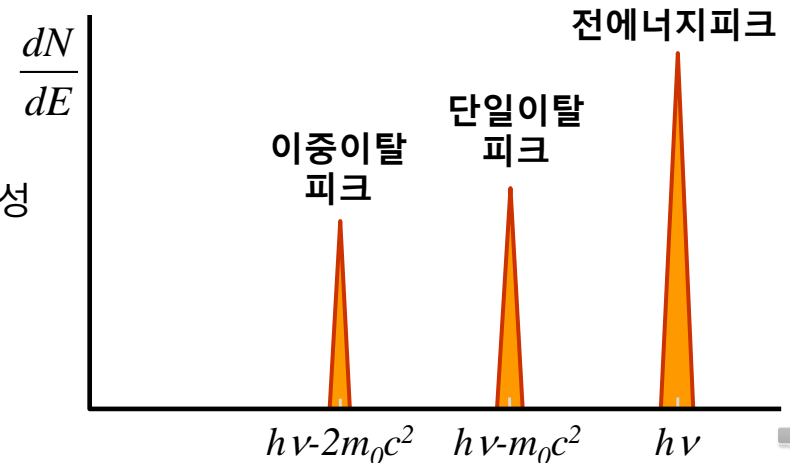


■ 전자쌍생성(Pair production)

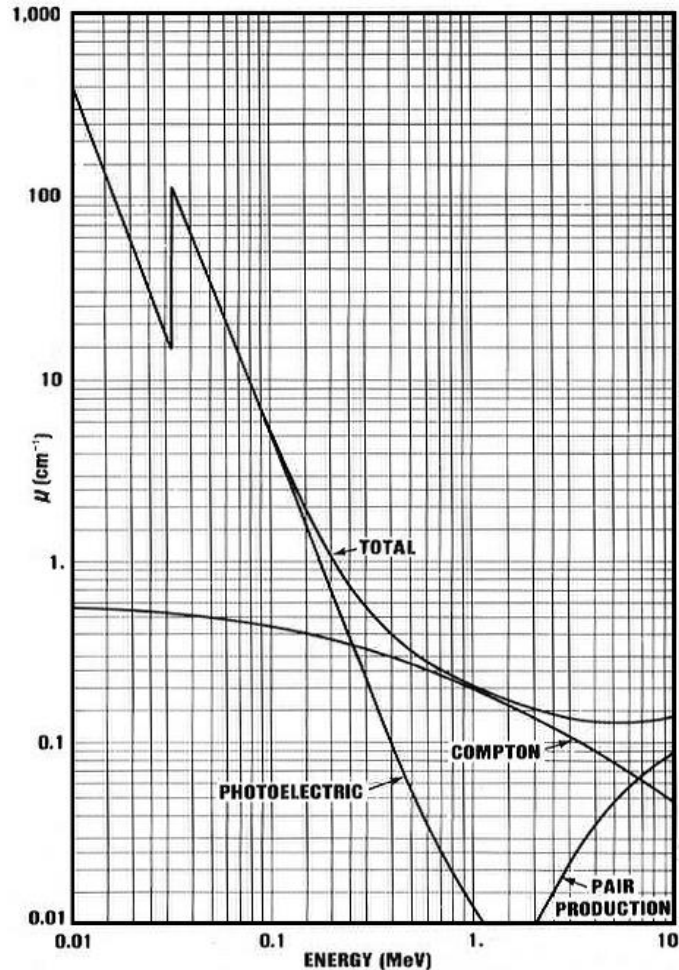
- 광자가 원자핵의 전기장에 의해 흡수되고 양전자와 음전자 쌍을 생성하는 반응
- 양전자와 음전자의 정지질량에너지($0.511 \text{ MeV} \times 2 = 1.022 \text{ MeV}$) 이상의 광자 에너지 필요



- 음전자는 반응 일어난 부근에서 흡수
- 양전자는 음전자와 상호작용하여 소멸감마선 생성
 - 2개의 0.511 MeV 광자



■ NaI(Tl) 검출기의 선형감쇠계수



- 저 에너지 영역에서 광전효과가 지배적으로 발생

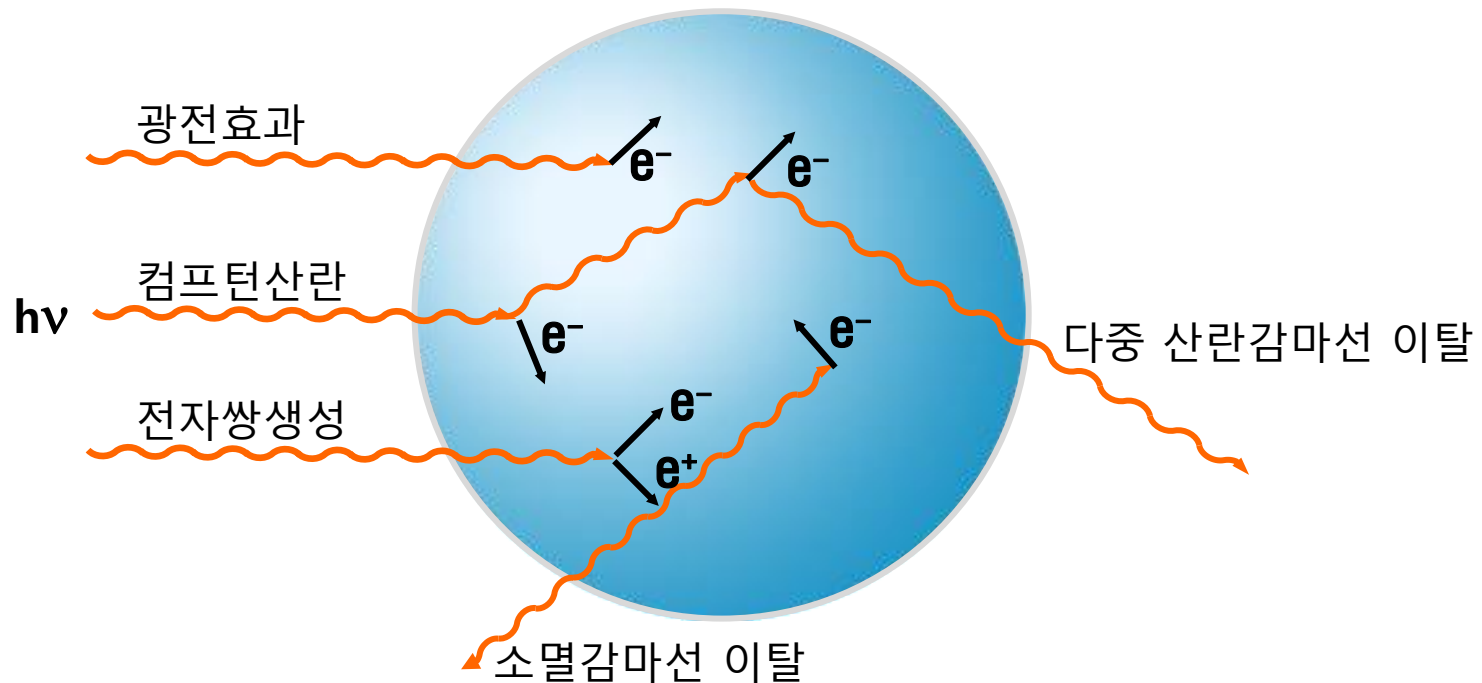
[감마선과 물질과의 상호작용]

- ¹³⁷Cs 선원 : 광전효과, 컴프턴산란
- ⁶⁰Co 선원 : 광전효과, 컴프턴산란, 전자쌍생성



검출기의 크기에 따른 차이

■ 중간 크기의 검출기



■ 극단적 소형 검출기

- 산란 감마선, 소멸감마선 모두 이탈
- 콤프턴 단애 선명, 이중이탈 피크만 형성

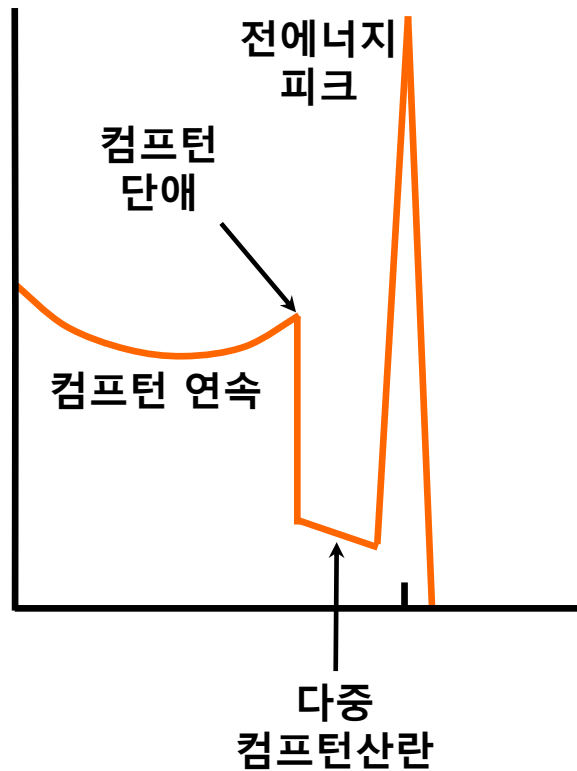
■ 극단적 대형 검출기

- 상호작용에 따른 모든 에너지 수집
- 전 에너지 피크(광전 피크)만 형성

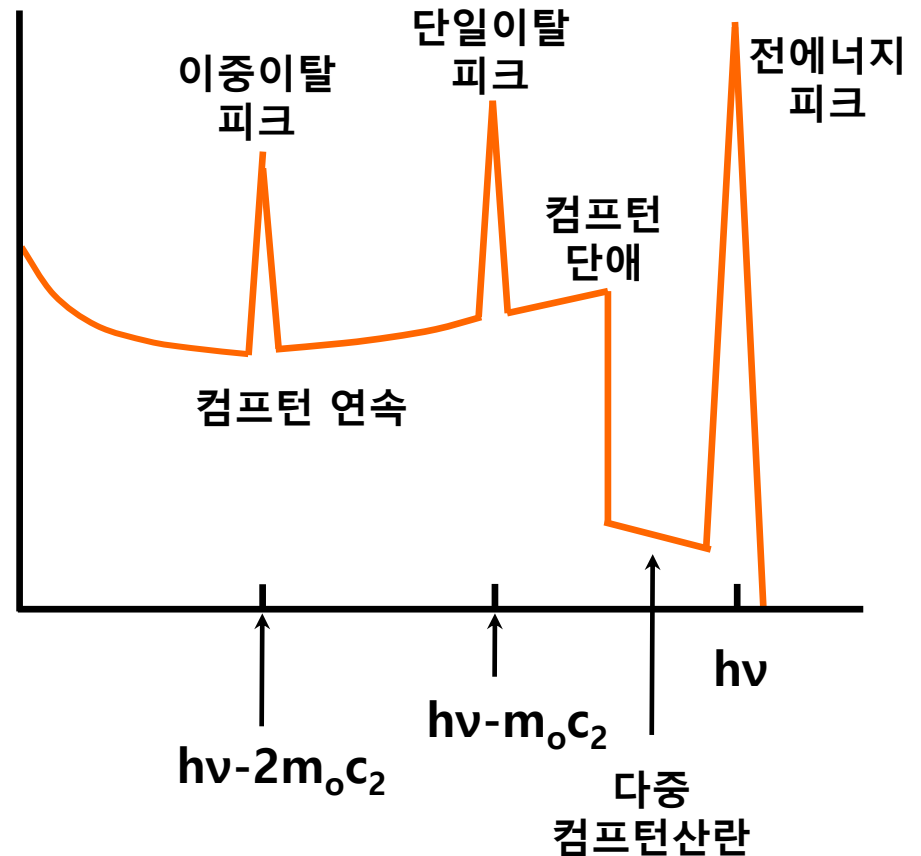


일반적 검출기의 에너지 스펙트럼

■ $h\nu < 1.022 \text{ MeV}$

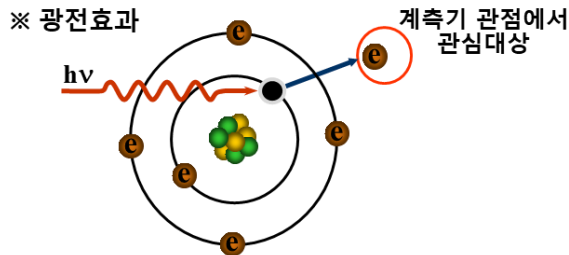
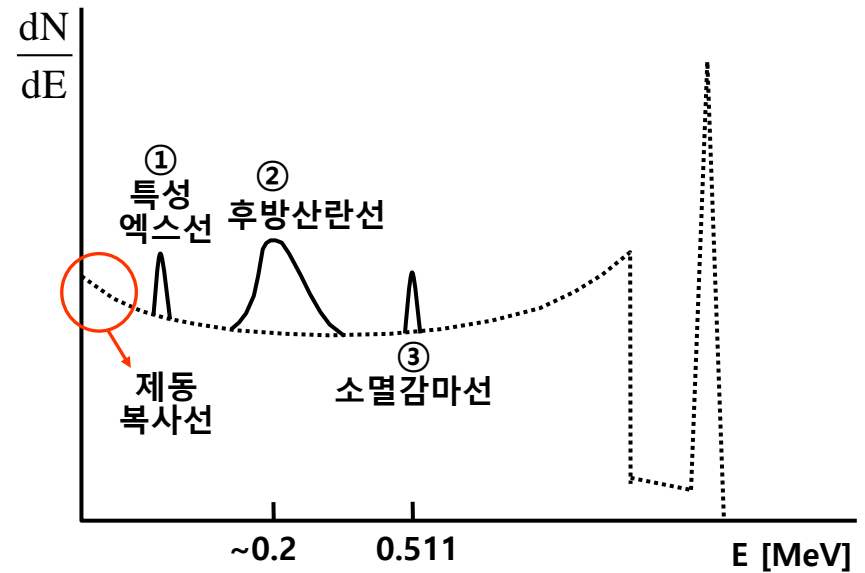
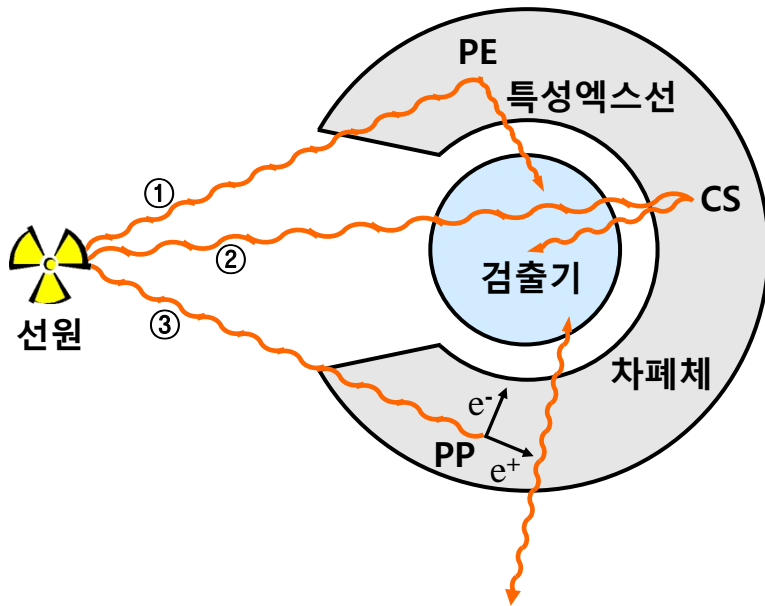


■ $h\nu > 1.022 \text{ MeV}$



주변의 차폐체에 의한 에너지 스펙트럼 변화

- 백그라운드 감소 등을 위해 검출기 주변 차폐한 경우
 - 광자가 검출기 주변의 차폐체와 반응하여 스펙트럼에 기여

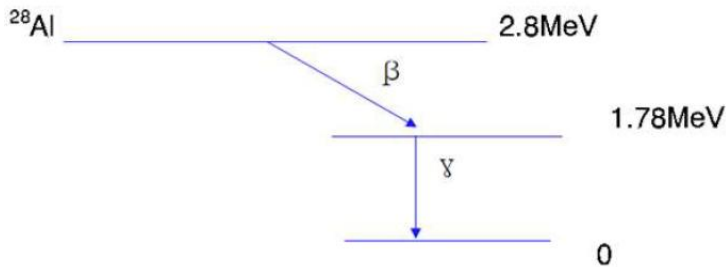
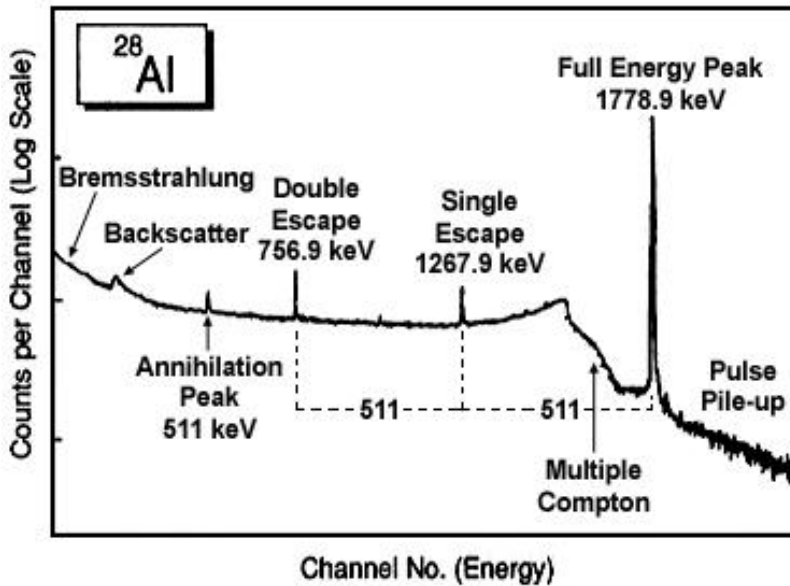


- 여러 핵종이 혼재된 경우 다른 핵종의 광전피크와 중첩될 수 있음

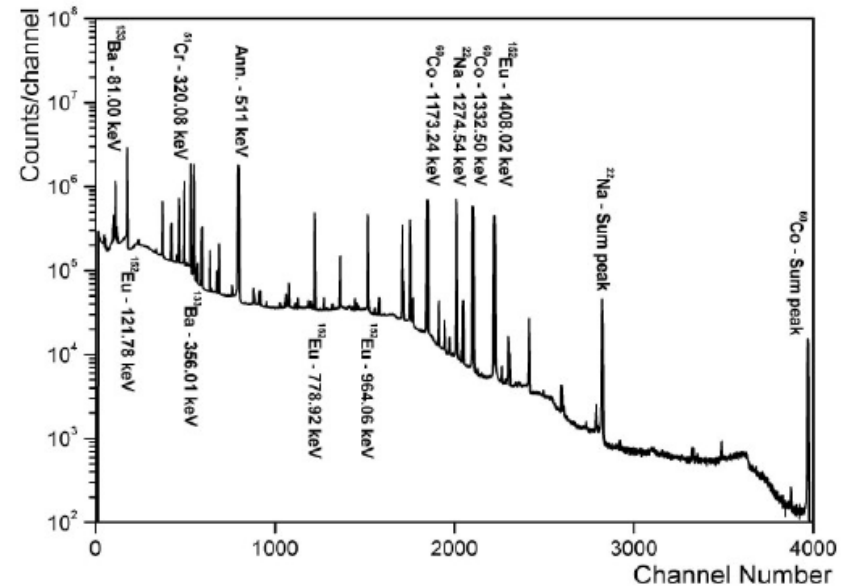


감마선 에너지 스펙트럼 예시

■ ^{28}Al 의 에너지 스펙트럼



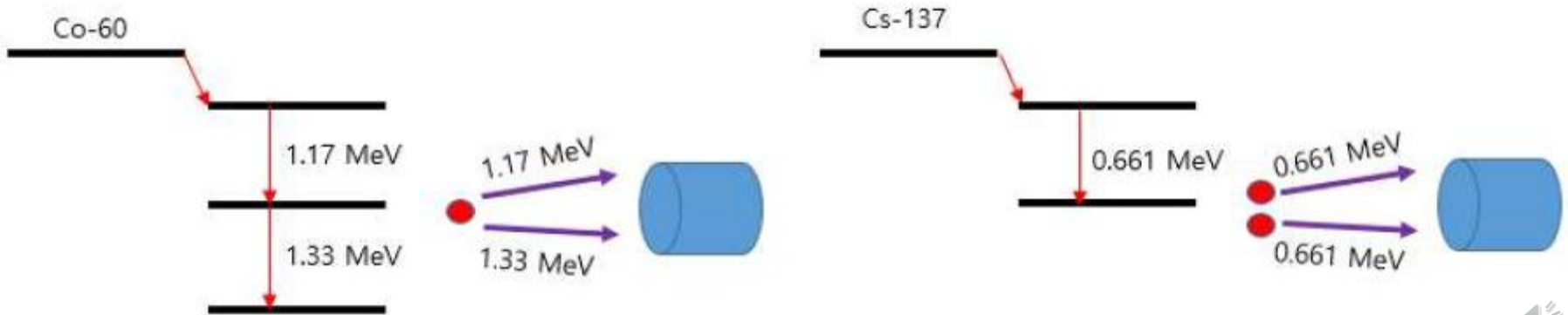
■ 여러 핵종이 포함된 에너지 스펙트럼



동시 검출(Coincidence)에 의한 합성(Summing) 피크

- 다수의 감마선이 검출기 분해시간 내 동시 입사하여 합산된 에너지 피크 생성
- True coincidence summing : 붕괴 한번에 여러 감마선이 방출되어 동시 검출
 - 예) Co-60: 1.17 MeV, 1.33 MeV 동시 발생 → 2.5 MeV 피크 형성
- Random coincidence summing : 다수의 붕괴로부터 감마선 방출이 동시 검출
 - 예) CS-137: 662 keV 2 개 동시 입사 → 1.324 MeV 피크 형성
- 동시 검출 효율 및 보정

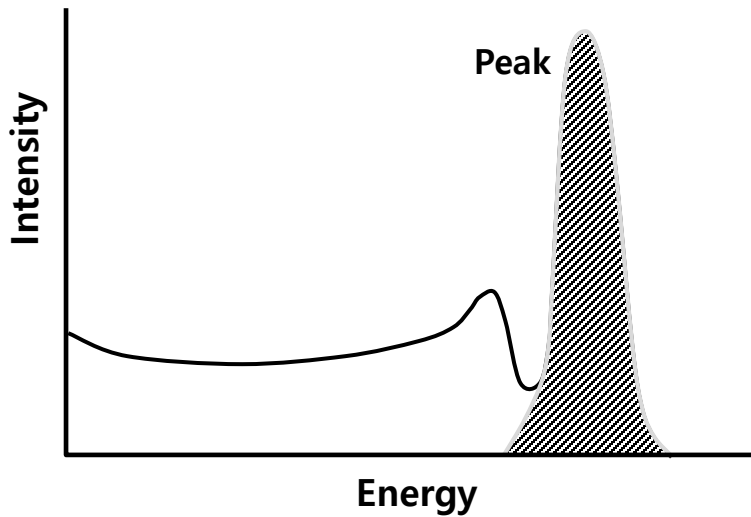
$$C_c = \epsilon_c \cdot A = \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot A, \quad C_1 = \epsilon_1(1 - \epsilon_2)A, \quad C_2 = \epsilon_2(1 - \epsilon_1)A$$



감마 분광 분석 시스템의 성능평가 기준

■ Peak to Total Ratio(PTR)

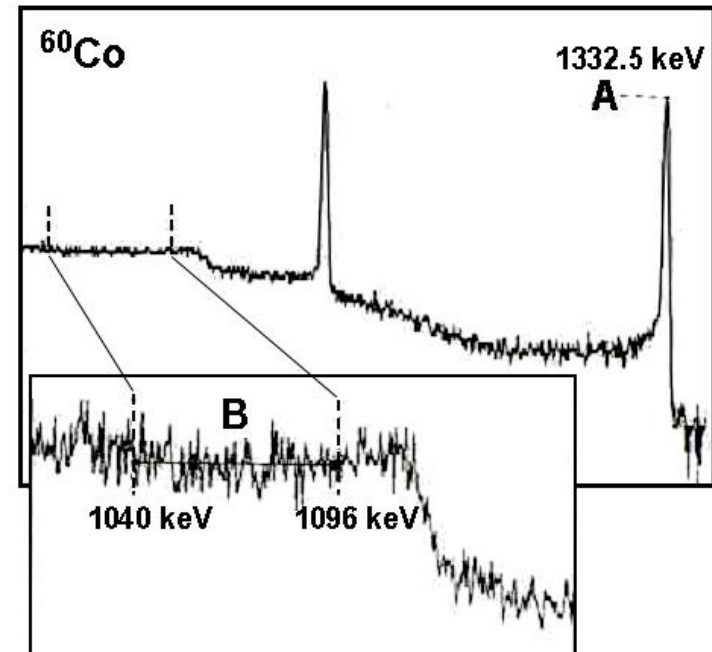
- PTR이 클수록 에너지 분해능이 좋음



$$\text{PTR} = \frac{\text{Area under the Peak}}{\text{Area of total spectrum}}$$

■ Peak to Compton Ratio(PCR)

- PCR이 클수록 에너지 분해능이 좋음



$$\text{PCR} = \frac{\text{Counts at the Peak}}{\text{Average counts btw 1040 and 1096 keV}}$$



국민에게 신뢰받는 안전 최우선의 KINS

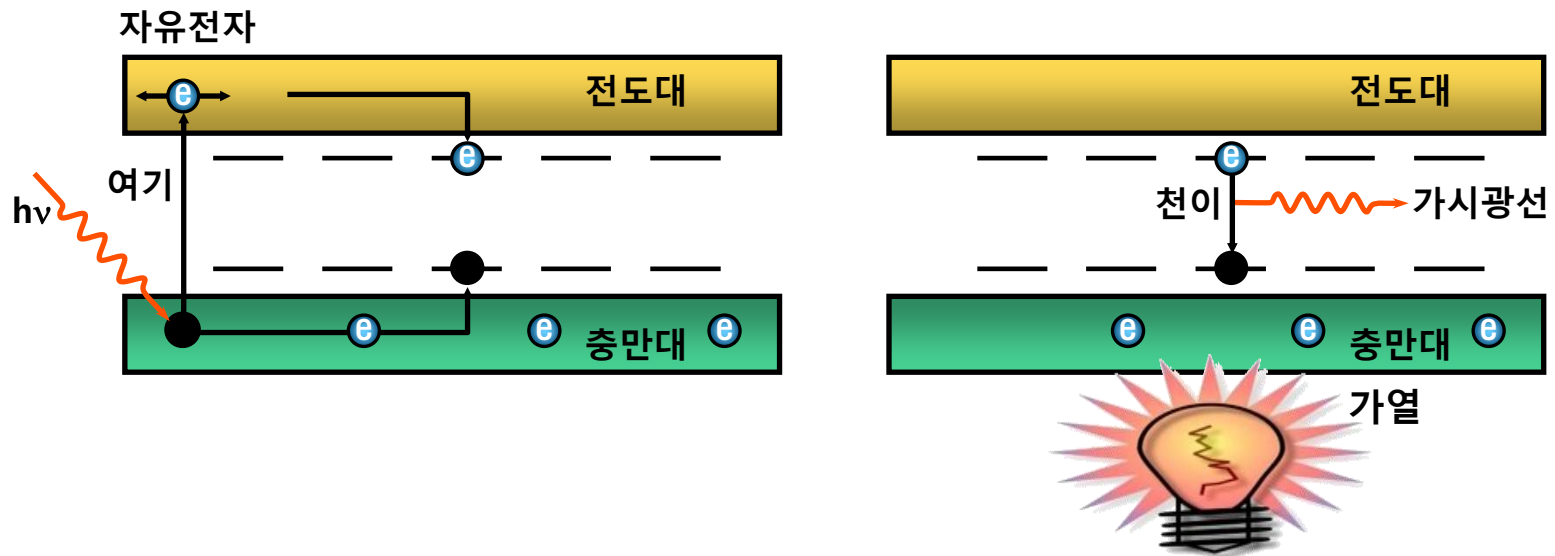
Ⅲ. 방사선 측정 및 분석

선량측정



열형광선량계(TLD; Thermo luminescence detector)

- 방사선에 의해 여기된 전자가 트랩되었다가 가열 시 천이되면서 발광하는 원리 이용
 - 선량 \propto 트랩된 전자 \propto 발생하는 빛
- 긴 기간 누적하여 착용하였다가 판독을 통해 선량을 평가하는 수동형 검출기



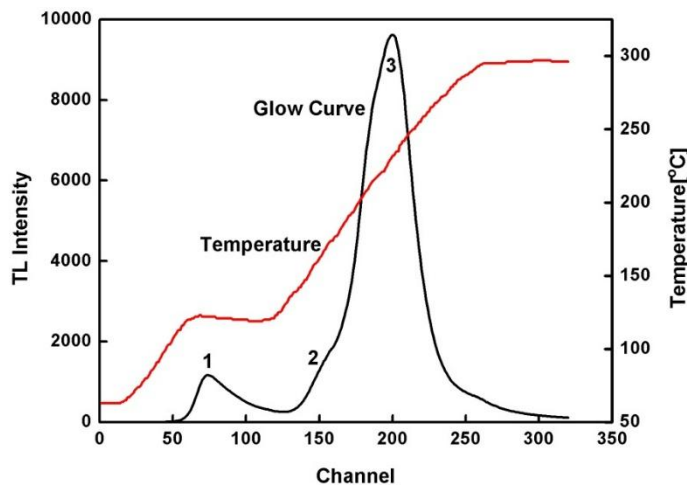
열형광선량계(TLD; Thermo luminescence detector)

■ 주요 특성

- 감도 매우 우수, 저선량($10 \mu\text{Sv}$) 측정 가능
- 열처리(annealing)하면 재사용 가능
- 반응도의 에너지 의존성이 낮음(조직등가)
- 퇴행(fading)이 낮음

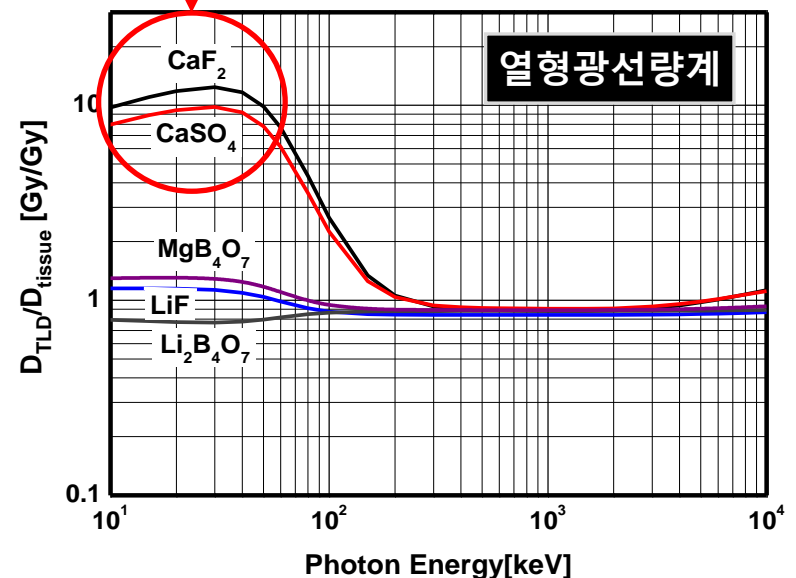
■ 글로우 곡선

- 열을 가했을 때 발생하는 열형광 강도
- 열형광물질 고유의 특성



■ 에너지 의존성

- 조직비등가물질의 경우 저에너지에서 반응 증가



열혈광선량계(TLD; Thermo luminescence detector)

■ 열혈광물질

- 조직의 유효원자번호 = 7.4

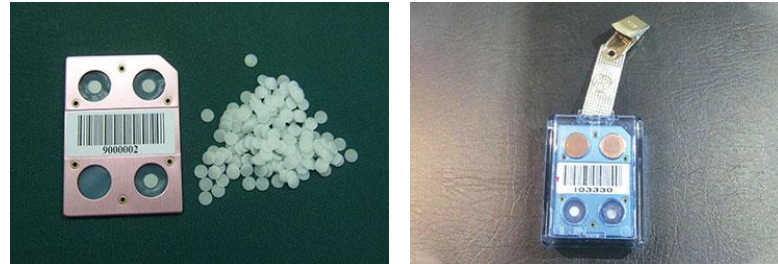
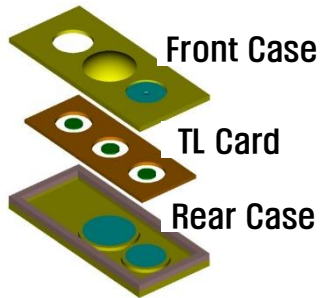
구 분	열형광물질	Z _{eff}	상품명	측정방사선	용 도
조직등가	LiF:Mg,Ti	8.3	TLD-100, TLD-700	감마선, 베타선	개인선량측정
			TLD-600	중성자	
	LiF:Mg,Cu,P	8.3	TLD-100H, TLD-700H GR-207(⁷ LiF:Mg,Cu,P)	감마선, 베타선	
			TLD-600H GR-206(⁶ LiF:Mg,Cu,P)	중성자	
Li ₂ B ₄ O ₇ :Cu	7.3		감마선, 베타선		
조직비등가	CaSO ₄ :Dy	14.4		감마선, 베타선	개인선량측정 환경감시
	CaF ₂ :Dy	16.3		감마선, 베타선	

- Harshaw 사의 TLD 예
 - TLD-700: 자연 Li에서 ⁶Li 함량을 줄임 (⁷Li 99.9 % + ⁶Li 0.1 %)
 - TLD-600: ⁶Li 95.6 % 농축된 Li, ⁶Li (n, α)³H 반응



열형광선량계(TLD; Thermo luminescence detector)

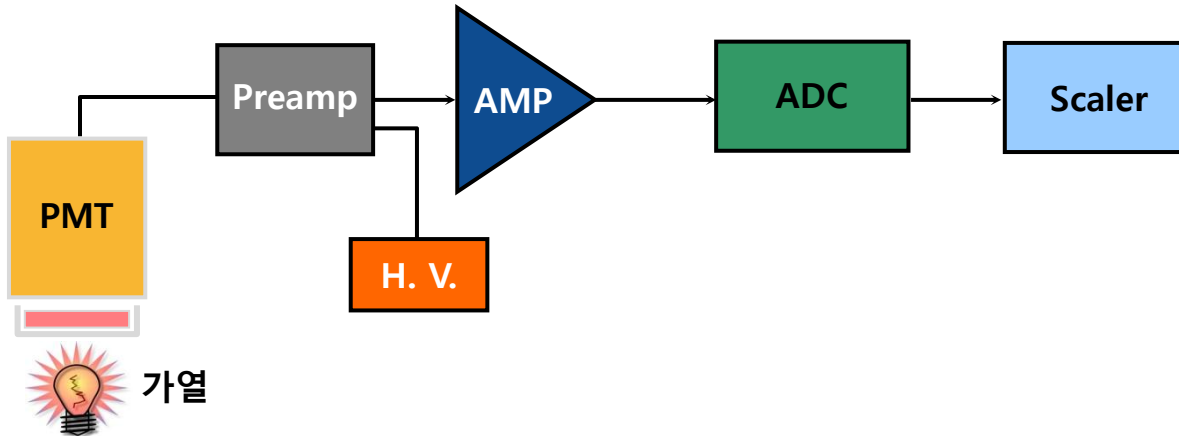
■ 형태



- (주)일진라드 사 TLD 형태

■ 판독시스템

- PMT를 통해 빛을 광전자로 변환시켜 계수



- Harshaw 사 판독시스템

필름배지

■ 방사선 입사에 따른 화학작용에 의한 감광 원리를 이용

- 선량 \propto 필름의 흑화도

■ 감광물질(AgBr)에 방사선 입사 시 반응 \rightarrow

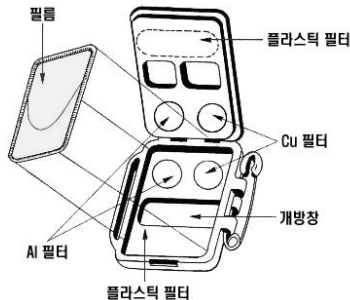
■ Ag가 생성되는 현상: 감광

■ 감광된 필름의 처리

- 현상(환원) \rightarrow 정지 \rightarrow 정착 \rightarrow 수세 \rightarrow 건조
- 잠상 중심에서 환원반응(금속의 Ag 입자화)

■ 감광 정도에 따라 흑화도가 구분되어 나타남

- 방사선 + 필름 $\rightarrow e^-$
- $e^- + Ag^+ \rightarrow Ag$
- $Ag + e^- \rightarrow Ag^-$
- $Ag^- + Ag^+ \rightarrow 2Ag$
- $2Ag + e^- \rightarrow AgAg^-$
- $AgAg^- + Ag^+ \rightarrow 3Ag$
- 4 ~ 6 Ag = 잠상 중심



필름배지

■ 주요 특성

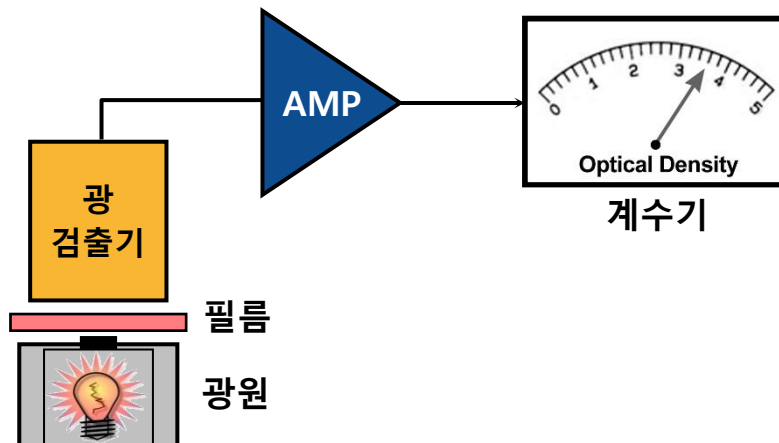
- 측정 가능 선량범위가 좁음
- 온도, 습도 영향이 큼

■ 판독시스템(밀도계)

- 흑화도

$$D = \log_{10} \frac{I_0}{I}$$

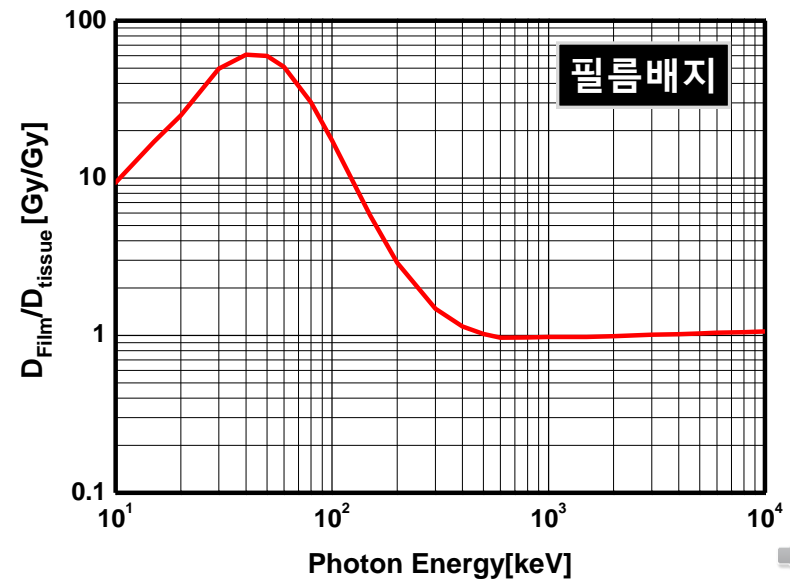
I_0 : 필름에 입사하는 빛의 강도
 I : 필름을 투과한 빛의 강도



- 반응도의 에너지 의존성이 큼
- TLD와 비교하여 퇴행(fading)이 큼

■ 에너지 의존성

- AgBr의 원자번호가 높아 저에너지 반응도 높음



필름뱃지

- 필터를 사용하는 이유
 - 필터 밀도 조절을 통해 심부선량: $H_p(10)$, 수정체선량: $H_p(3)$, 피부선량: $H_p(0.07)$ 얻음
 - 방사선 종류를 구별하기 위해 창을 설정: 베타, 감마 구분
 - 각 영역별 반응도 차이를 통해 에너지 추정(선질 정보)
 - 에너지 의존성을 보정



광자극발광 선량계(OSL; Optically stimulated luminescence)

- TLD와 유사한 원리를 이용, 가열이 아닌 레이저 자극을 통해 천이
 - 선량 \propto 트랩된 전자 \propto 발생하는 빛
- 주요 특성
 - 측정 가능 선량 및 에너지 범위가 넓음
 - 온도, 습도 등 환경요인에 안정적
 - 재판독이 가능함(TLD는 재판독 불가)
 - 상온에서 동작하므로 열 손상 없음

형광 유리선량계(RPLG; Radiophoto luminescence glass)

- Ag를 첨가한 인산염 유리에 방사선 입사 시 발광중심 형성, 자외선으로 자극하여 발광을 유도



법정 개인 선량계

- 종사자의 개인선량계: 측정결과를 즉시 확인할 수 있는 **능동형 선량계는 제외**
 - 감광 또는 흑화작용 등 화학작용을 이용한 선량계
 - 형광 또는 섬광 등 여기작용을 이용한 선량계
 - 분자구조 결함 등 결함유발을 이용한 선량계
- TLD, OSL, 필름벤티지, 유리형광선량계

보조 선량계

- 법정 선량계의 기능을 보완, **실시간 선량률 확인**(능동형 선량계)
- 고선량률 노출 감지 및 경보
- 심리적 안정 도모
- 전자개인선량계, 포켓선량계



복수선량계(2개 또는 2종 이상) 착용하는 이유

- 개인선량계의 감도, 방향의존성, 에너지 의존성이 문제가 되는 경우
- 혼합방사선장에서 방사선장의 종류를 구분하여 측정할 때
- 기준 선량계 위치(가슴)보다 특정 부위의 선량이 높을 것으로 예상될 때
- 선량범위를 한 개의 선량계로 측정 불가능한 경우



이상적인 개인선량계

- 조직등가물질로 구성
- 인체 깊이 10, 3, 0.07mm를 반영할 수 있을 것
- 방향의존성, 에너지 의존성이 적고 충격이나 환경영향, 퇴행 영향이 적을 것
- 판독 시 피폭방사선량에 대한 재현성 우수, 판독오차가 적고 신속



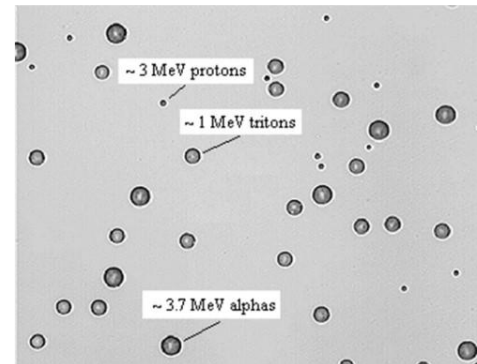
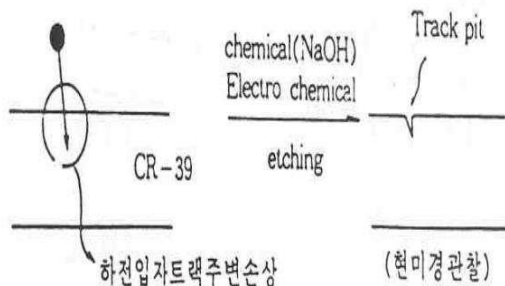
알베도 선량계(Albedo dosimeter)

- 고속중성자 선량 측정용
- 고속중성자가 인체 내 수소원자와 산란하여 감속되어 나오는 것을 ${}^6\text{Li}$ 과 반응시킴
 - ${}^6\text{Li}$ 의 ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ 반응 이용
- 고속중성자 측정용으로 사용하기 위해 선량계 외부에 필터 설치
 - 카드뮴(Cd) 필터 이용
 - 외부에서 입사하는 열중성자는 차폐, 인체에서 산란되어 나오는 열중성자와만 반응
- 단점
 - 1 keV ~ 10 MeV에 이르는 중성자에 대해 약 2,000배 가량 반응도 차이 발생
 - 정확한 선량평가를 위해서는 중성자 선질(에너지 정보)을 사전에 알고 있어야 함.



고체비적검출기

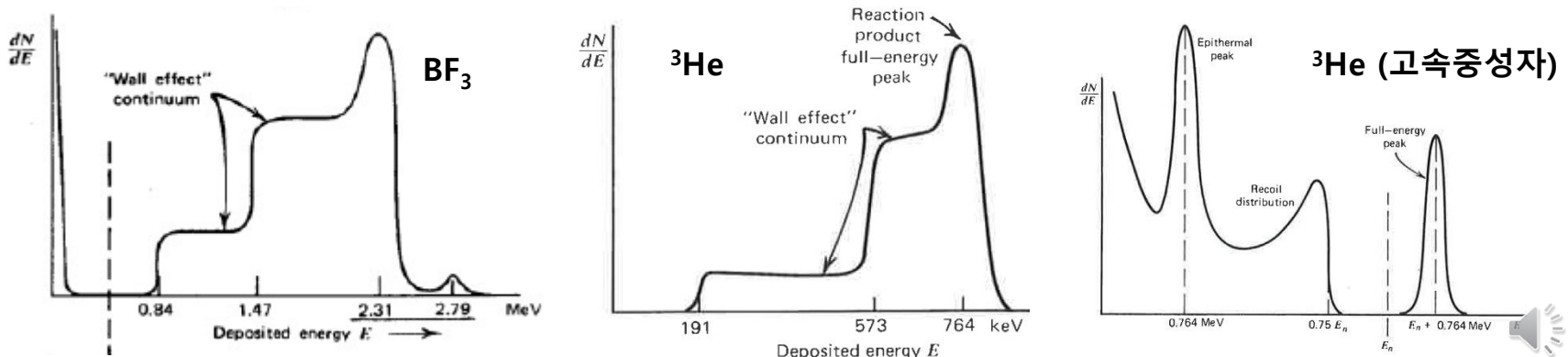
- 방사선 특히 **중하전입자**에 의해 격자구조에 물리적 손상을 주어 비적 형성
 - α 선을 방출하는 공기중 라돈 측정에 이용
 - 중성자의 경우 반응으로 생성된 양성자로 인해 비적 형성되어 중성자 선량계로 이용
- 긴 기간동안 누적된 비적을 **표면처리(에칭(Etching))**하여 비적을 **확대하여 관측**
 - 에너지에 따라 손상정도에 차이가 있어 에너지 구분 가능
- CR-39, LR-115 등



중성자 검출용 (BF_3 , ^3He) 비례계수관

■ 중성자 검출 원리

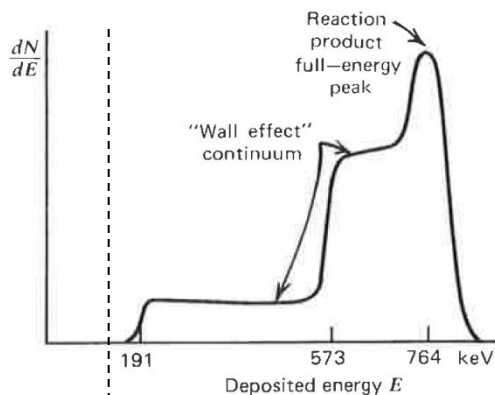
- ^{10}B , ^3He 의 열중성자를 흡수하는 핵 반응 이용
 - $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ ($Q = 2.792 \text{ MeV}$, 4 %), $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}^*$ ($Q = 2.31 \text{ MeV}$, 96 %)
 - $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$ ($Q = 0.764 \text{ MeV}$)
- 이상적으로는 Q값에서 피크가 형성되어야 하나 검출기 외벽 근처에서 반응 후 생성된 2차 입자가 검출기 외벽으로 빠져나가는 **wall effect** 발생
 - 예) ^3He 검출기에서 p, ^3H 은 각각 573 keV, 191 keV의 에너지로 반대로 이동
- 열중성자로 감속시켜 흡수반응으로 생성된 입자를 간접 측정, 입사하는 중성자 에너지 정보를 잃음



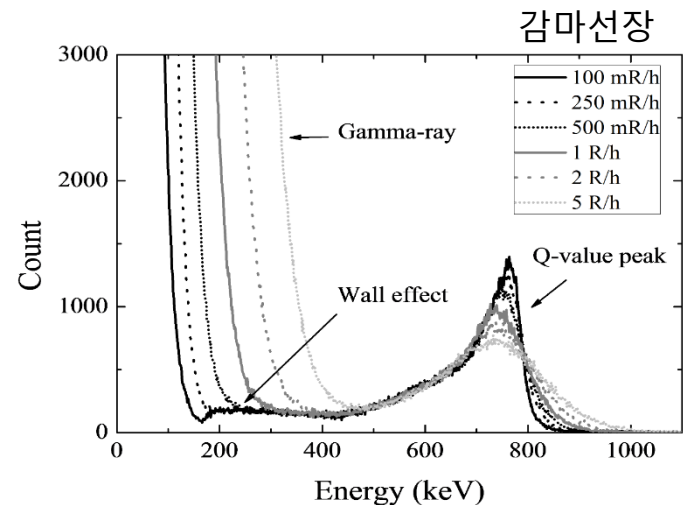
중성자 검출용 (BF_3 , ^3He) 비례계수관

■ 감마선, 중성자 분리

- 감마선과 중성자 측정 원리가 유사하여 감마선 신호가 잡음신호로 발생
- 감마선 신호와 중성자 신호의 분리 필요
- 감마선 신호는 파고 선별기를 통해 쉽게 분리 가능
 - 감마선은 주로 검출기 **외벽과 반응**하여 전자 생성
 - 중성자의 핵반응으로 생성된 하전입자보다 전자의 비정기 길이로 검출기에 **에너지 일부만 전달**
- 고감마선장에서는 **Pile-up**이 발생하여 구분이 어려울 수 있음



파고선별기

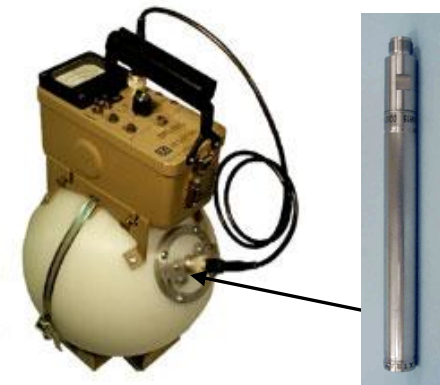
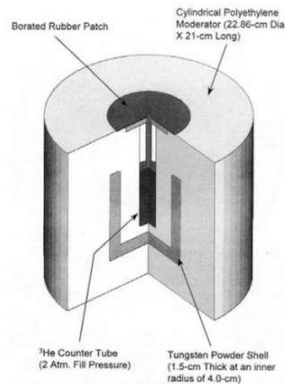
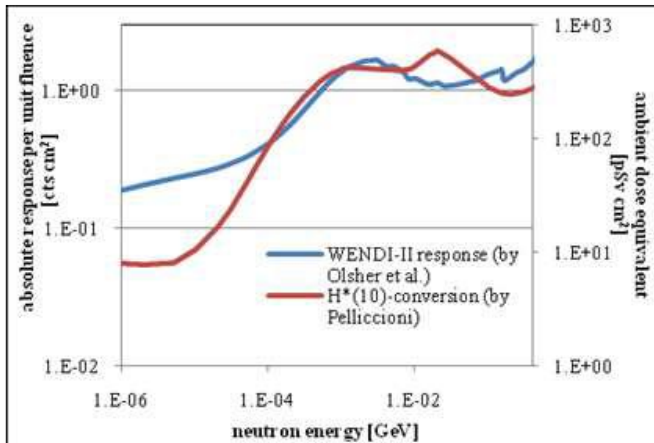


감마선장



능동형 중성자 선량계(Rem 미터)

- ^3He 또는 BF_3 비례계수관을 감속재로 감싸 응답특성을 선량환산인자와 유사하게 설계
 - 열중성자와의 핵반응이 주요 반응이므로 속중성자를 HDPE 등으로 감속시켜 열중성자화
 - HDPE 등에 의해 열중성자 반응도가 매우 증가하므로 카드뮴 등으로 열중성자 반응도 저감
 - 고에너지의 반응도를 높이기 위해 텅스텐 등을 일부 삽입하여 감속
- 넓은 중성자 에너지 영역에서 선량 측정 가능



화학선량계

- 방사선에 의해 물질의 **화학적 물성이 변화하는 것을 측정하는 원리**
- 물질의 화학적 변화량 (**G값**)
 - 방사선 에너지 100 eV 흡수 당 생성되는 원자, 분자의 수
 - **G값이 클수록 방사선에 대한 반응도가 좋음**
- **고선량**(수 ~ 수천 Gy) 측정용, 누적형
- **프리케 선량계**
 - 산화반응 이용
 - $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$
 - $G(\text{Fe}^{3+}): 15.5$
- **세륨 선량계**
 - 환원반응 이용
 - $\text{Ce}^{4+} \rightarrow \text{Ce}^{3+}$
 - $G(\text{Fe}^{3+}): 2.34$



수지선량계(말단 선량계)

- 말단: 손, 팔꿈치 아래, 발, 무릎 아래
- 핵의학과, 개봉선원 취급기관 등: 몸에 비해 **손에 높은 선량 피폭, 별도 감시 필요**
- 손가락, 손목 등에 착용
 - 선원에 의한 오염이 발생하지 않는 위치에 최적화하여 착용
 - 실제 최대선량 발생지점은 손끝이므로 착용부 위치와의 보정 필요



눈(수정체)선량계

- ICRP 60: 백내장 문턱선량 **3 Gy**
 - 수정체 등가선량한도 연간 150 mSv로 유효선량한도 만족 시 자동 달성
- ICRP 118: 백내장 문턱선량 **0.5 Gy**
 - 수정체 등가선량한도 연간 50 mSv를 넘지않고 5년간 100 mSv
 - 개봉된 베타선원에 **안면이 노출되는 작업환경**의 경우 보안경 착용, 수정체 선량 감시 필요



열량계(Calorimeter)

- 흡수선량은 단위 질량당 흡수된 에너지이며 에너지는 열의 형태로 변환
- 일정 양의 물질을 방사선에 노출시킬 때 발생하는 온도 상승을 측정
 - 온도상승분에 물질의 비열을 곱하여 흡수된 열량을 얻음

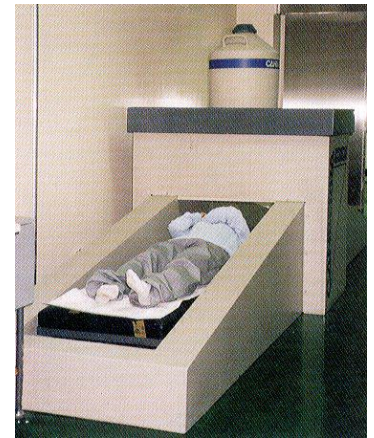
$$D = 4200 \cdot C \cdot \Delta T$$

- D : 흡수선량 (Gy)
- C : 비열 (cal/g^{°K})
- ΔT : 온도변화 (°K)
- 1 Gy = 1 J/Kg = 2.4×10^{-4} cal/g
- 물의 비열이 1 cal/g^{°K} 일때 물의 온도를 1°C 상승시키기 위해서는 4,200 Gy 만큼의 많은 선량 필요
- 고선량 환경에서만 활용 가능



직접생체검정(in-vivo bioassay), 체외계수법

- 종사자 신체를 시료로 간주, 체내의 방사선핵종으로부터 방사선을 직접 측정
 - 방사선 계수치로 체내 존재량을 평가하고 초기 섭취, 흡입량을 추정
- 전신 계수기(Whole body counter), 폐계수기, 갑상선 계수기



간접생체검정(in-vitro bioassay)

- 종사자의 생체 시료(소변, 대변 등)를 분석하여 평가
 - 매우 미량 포함되므로 화학처리하여 농축하거나 분리하는 등 절차가 복잡함.
- 삼중수소의 경우 소변 채취 후 액체섬광계수기(LSC)로 측정하면 섭취량 평가 용이

작업환경 감시법

- 작업장의 공기중 방사능 농도 감시, 시나리오를 통한 흡입률, 시간 등 고려하여 평가
 - 작업 중 호흡률: 1.2 m³/h, 일반적인 호흡률: 0.54, 0.78 m³/h 등



국민에게 신뢰받는 안전 최우선의 KINS

IV. 방사선 취급



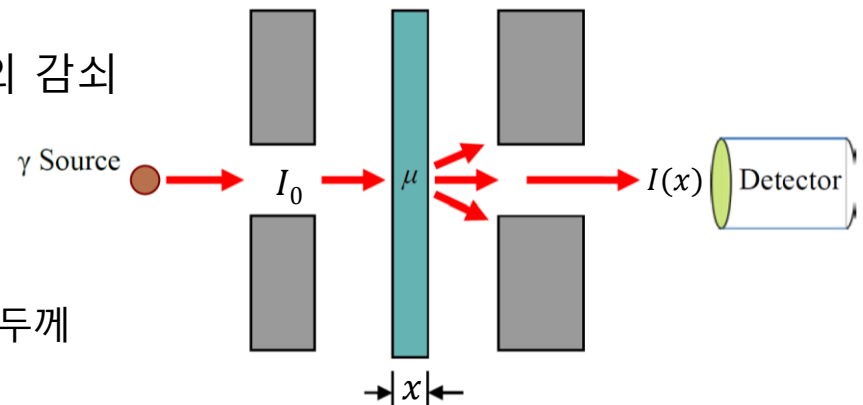
이상적 상황에서의 방사선 감쇠

- 감쇠: 방사선이 물질을 통과할 때 물질과 상호작용하여 세기가 약해지는 현상

- 단일 에너지 광자가 물질을 통과할 때의 감쇠

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

- I_0 : 초기 방사선의 세기
- μ : 선형감쇠계수[1/cm] ▪ x : 물질 두께



- μ 는 모든 상호작용을 고려한 전체 감쇠계수

- 물질의 원자번호가 커질수록 광전효과, 쌍생성 확률이 증가

- μ 가 밀도(ρ)에 의존하므로 질량감쇠계수($\frac{\mu}{\rho}$)[cm²/g]로 물질고유의 감쇠계수를 사용

$$I(x) = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)\rho x}$$



반가층(HVL; Half value layer, 십가층(TVL; Tenth value layer)

- 반가층: 방사선의 세기가 **절반**으로 감소되는데 필요한 차폐 물질 두께

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} \quad \frac{I}{I_0} = \frac{1}{2} = e^{-\mu x_{1/2}} \quad x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0.693}{\mu} \quad \rightarrow \text{HVL}$$

- 십가층: 방사선의 세기가 **1/10**으로 감소되는데 필요한 차폐 물질 두께

- $\text{TVL} = \frac{\ln 10}{\mu}$

인상인자(B; Build-up factor)

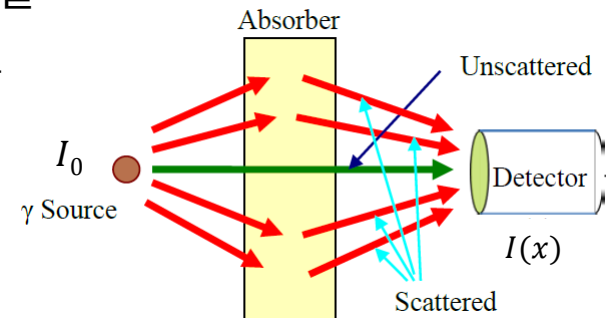
- 실제 환경에서는 산란반응 후에도 관심영역으로 도달

- 산란반응에 의해 과소평가 → 이를 보정한 것이 인상인자

- $B \geq 1$, 입사 에너지, 물질의 감쇠계수, 두께와 연관

$$B = \frac{\text{Scattered \& Unscattered}}{\text{Unscattered}}$$

$$I(x) = I_0 B e^{-\mu x}$$



차폐재료의 선정

■ 베타선

- 알파선보다는 투과력이 강함, 제동복사선이 2차적으로 발생
- **원자번호가 낮은** 물질(플라스틱, 알루미늄)로 비정보다 조금 두껍게 설계

■ 엑스선, 감마선

- 전하가 없고, 투과력이 매우 높음
- **원자번호가 크고 밀도가 높은 물질** (납, 텅스텐, 콘크리트)로 차폐
- 인상인자를 작게하기 위해 원자번호가 낮은 물질을 앞에 설계(산란으로 감쇠)하고 원자번호가 높은 물질을 뒤에 설계하면 광전흡수가 많이 발생

■ 중성자

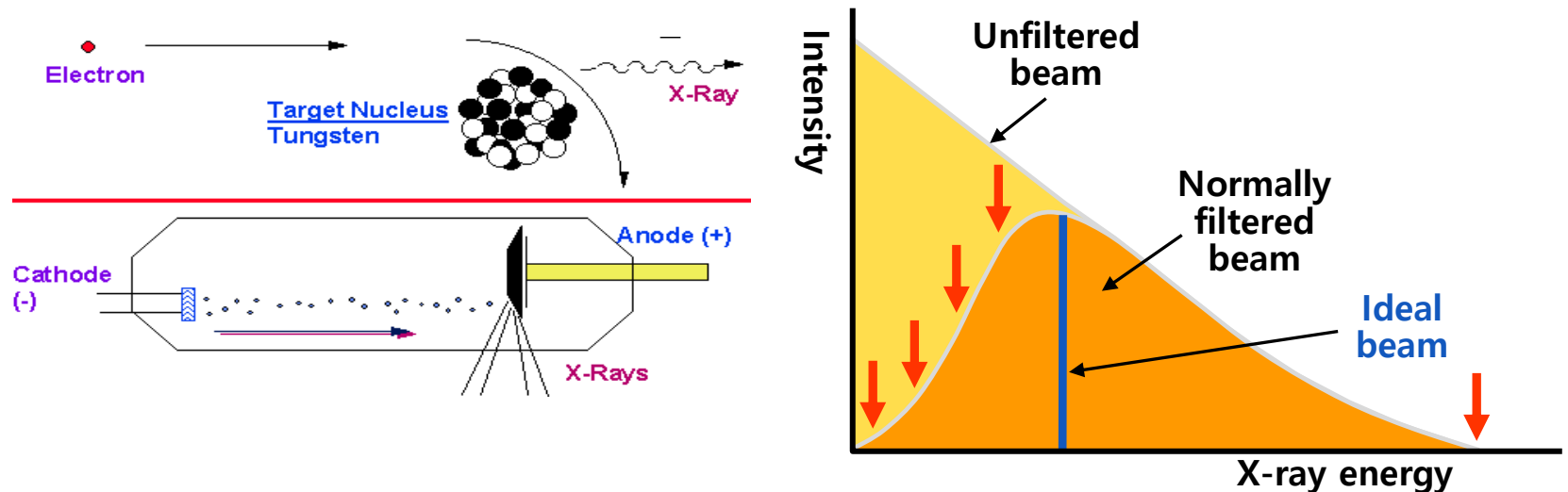
- 산란을 통한 **감속재**: 수소원자가 많은 물질(물, 파라핀(화재 위험), 폴리에틸렌 등)
- 열중성자 반응도가 높은 **흡수재**: ${}^6\text{Li}$, ${}^{10}\text{B}$, Cd 등
- 물질에서 중성자와 반응을 통해 감마선이 생성되므로 감마선 차폐 필요



엑스선발생장치

■ 엑스선 발생

- 가속된 전자빔이 양극 표적에 충돌하면서 제동복사선 생성
- 표적물질은 원자번호가 높고(제동복사 ↑) 녹는점이 높은 물질 사용, 텅스텐, 로듐 등

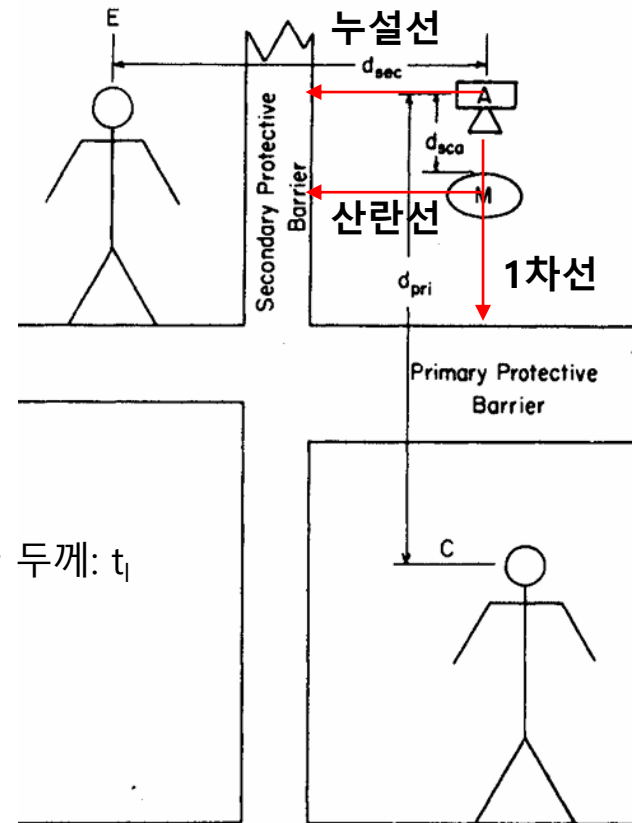


- 엑스선관의 **관전압** 증가 → 전자 에너지 증가 → 제동복사선 에너지 및 수 증가
- 엑스선관의 **관전류** 증가 → 전자 발생 수 증가 → 제동복사선 수 증가



엑스선 차폐 계산

- 단일 에너지를 갖는 감마선과는 차폐 접근이 상이
 - 짧은 두께에서 저에너지 엑스선이 먼저 차폐
- 실험적 데이터를 이용하여 차폐에 필요한 두께 도출
- **1차선**: 목적하는 방향으로 방출되는 엑스선
- **누설선**: 엑스선관에서 목적부 외로 방출되는 엑스선
- **산란선**: 목적물로부터 산란된 엑스선
 - 산란선 차폐에 필요한 두께: t_s
 - 누설선 차폐에 필요한 두께: t_l
 - $|t_s - t_l| > TVL \rightarrow t_s, t_l$ 중 두꺼운 두께로 차폐
 - $|t_s - t_l| < TVL \rightarrow t_s, t_l$ 중 두꺼운 두께 + HVL 추가 차폐



오염제거의 원칙

- **조기 제염**: 시간이 지날 수록 제염이 어려워 지고, 오염이 확산됨
- **오염 확대 방지**: 제염 작업으로 오염면적이 확대되면 안됨
- **폐기물 처리방안 마련**: 제염 작업한 잡고체 등 방사성폐기물 발생
- **습식법 선택**: 공기 중 비산 방지
- **적절한 제염법 선택**: 방사성 핵종의 물리, 화학적 특성 고려
- **제염제 등 구비**: 오염 우려 작업 시 제염제 등 장비 상시 구비 필요
- **제염 후 확인**: 잔여 오염이 없는지 이차 오염이 없는지 확인
- **오염 확인 방법**
 - 직접 측정: 표면오염 측정기(입사각 얇은 GM 등)
 - 간접 측정: 스미어법(스미어 용지로 오염표면을 문질러 체취 후 용지를 측정)

- 알파선 방출핵종 : 0.4 Bq/cm²
- 알파선 이외의 베타감마 방출핵종 : 4 Bq/cm²



오염방지

■ 체내 섭취, 흡입 방지

- 입으로 피펫 등 장치 조작금지, 사용시설 내 금식, 금연
- 가스, 증기가 발생할 가능성이 있는 핵종은 밀폐된 용기에 보관
- 후드, 글로브박스에서 개봉선원 취급, 방진마스크 등 착용

■ 인체 오염방지

- 라텍스 장갑 등 착용, 손톱은 짧게 유지, 오염가능부에 barrier cream을 바름
- 손등 등 피부에 외상이 있는 경우 취급 금지
- 오염된 손(장갑 등)으로 전기 스위치, 타 장비(저울, 컴퓨터, 냉장고) 조작 유의
- 방사선관리구역을 나갈 때 오염검사, 손을 씻기

■ 시설 오염 방지

- 제염이 용이한 재료를 깔고 작업
- 작업실 전용 작업복, 신발 비치 / 관리구역 밖으로 장치, 의류 반출 주의



사고 시 응급조치의 원칙

- 안전유지의 원칙: 인명 및 신체 안전을 1순위, 물질 손상은 2순위
- 통보의 원칙: 인근 체류자, 시설관리자, 방사선안전관리자에게 신속히 알림
- 확대방지의 원칙: 응급조치를 한 자가 과도한 피폭이나 오염되는 것을 최소화
- 과대평가의 원칙: 사고 위험성 평가는 과소평가해서는 안됨

방사성동위원소 종류

- 순수베타선원: ^3H , ^{14}C , ^{32}P , ^{90}Sr , ^{147}Pm , ^{36}Cl
- 알파선원: ^{210}Po , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Am
- 감마선원: ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{60}Co
- 0.511 MeV 광자선원: ^{22}Na , ^{18}F , ^{68}Ge
- 중성자 선원: ^{252}Cf , $^{241}\text{Am}/\text{Be}(\alpha, n)$

