

技術現況分析報告書

방사선 계측기술 및 중성자 계측기 기술 개발 현황

Status of Radiation Detector and Neutron Monitor Technology

KAERI

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 “방사선 계측기술 및 중성자 계측기 기술 개발 현황” 보고서로 제출합니다.

2002년 5월 일

연구기관명 : 한국원자력연구소

주 저 자 : 김 용 균

공동저자 : 송 무 형
박 세 환
하 장 호
문 병 수
정 종 은
홍 석 봉
황 인 구
이 우 교
한 상 효

요 약

이 보고서는 방사선 검출기술과 응용 계측기 및 중성자 검출기의 개발 현황을 이용 현황 및 신기술 내용과 함께 기술하고 있다. 방사선 검출기는 입사 방사선과 검출물질과의 상호작용으로 발생하는 관측 가능한 2차 효과를 측정하는 원리를 이용하는데, 그 2차 효과로는 전리, 여기, 형광, 화학작용 등이 있다. 이들 효과를 이용한 검출기와 주요용도에 따라 방사선 검출기는 크게 가스형 검출기, 섬광체 검출기, 반도체 검출기로 분류한다. 이 보고서는 이들 검출기의 동작 원리와 기술 현황을 포함하고 있다. 또한, 방사선 응용 계측기는 산업용 응용계측기, 노심 핵계측, 의료용 방사선 진단장비, 비파괴 검사 장비, 환경 방사선 및 우주선 측정, Security System, 기초 과학 실험, 방사선 측정 표준화 등으로 나눌 수 있으며 이들 계측기의 기술 개발 현황에 대한 내용을 포함하고 있다.

ABSTRACT

In this report, we describe the current states of the radiation detection technology, detectors for industrial application, and neutron monitors. We also survey the new technologies being applied to this field. The method to detect radiation is the measurement of the observable secondary effect from the interaction between incident radiation and detector material, such as ionization, excitation, fluorescence, and chemical reaction. The radiation detectors can be categorized into gas detectors, scintillation detectors, and semiconductor detectors according to major effects and main applications. This report contains the current status and operational principles of these detectors. The application fields of radiation detectors are industrial measurement system, in-core neutron monitor, medical radiation diagnostic device, nondestructive inspection device, environmental radiation monitoring, cosmic-ray measurement, security system, fundamental science experiment, and radiation measurement standardization. The status of the technology development of these fields are also described.

목 차

요 약	i
Abstract	ii
목 차	iii
그림 목차	vi
표 목 차	viii
I. 서 론	1
II. 방사선 검출기술의 개발 현황 및 전망	2
1. 가스형 검출기	2
(1) 전리함(Ionization Chamber)	3
(2) 비례계수기(Proportional Counter)	4
(3) GM 검출기(Geiger-Mueller Detector)	5
(4) MSGC(Microstrip Gas Chamber)	7
(5) 기체전자 증폭기(GEM, Gas Electron Multiplier) 검출기	8
2. 섬광체 검출기	12
(1) 무기 섬광검출기(Inorganic Scintillation Detector)	12
(2) 유기 섬광검출기(Organic Scintillation Detector)	14
(3) 광증배관(Photomultiplication Tube: PMT)	15
3. 반도체 검출기	16
III. 방사선 응용 계측기 개발 현황 및 전망	21
1. 산업용 응용계측기	21
(1) 액면 계측기	21
(2) 두께 측정기	22
(3) 밀도 측정기	23
(4) 단위 중량(Basis Weight) 측정	24
(5) 습분 측정(Moisture Measurement)	24
(6) 분진 측정(Ash Measurement)	25
2. 노심 핵계측	26
(1) ^3He Counter	26
(2) SPND(Self Powered Neutron Detector)	26
3. 의료용 방사선 진단장비	28
(1) 감마 카메라	28
(2) 단일광자방출전산화 단층촬영장치 (Single Photon Emission Computed Tomography; SPECT)	29

(3) 양전자방출 단층촬영(Positron Emission Tomography; PET)	30
4. 비파괴 검사 장비	32
(1) Computed radiography(CR)	32
(2) Scintillator-Charged coupled device(CCD) 결합형 Digital Radiography(DR)	32
(3) Image intensifier 영상 증배관	33
5. 환경 방사선 및 우주선 측정	34
(1) RMS(Radiation Monitoring System)	34
(2) ERMS (Environmental Radiation Monitoring System) 환경방사선 감시시스템	34
(3) 라돈 검출기	34
(4) 우주선 탑재 검출기	34
6. Security System	36
(1) 핵물질, 화학물질 탐지 장치	36
(2) 폭약 탐지 장치	37
7. 기초과학 실험	39
(1) MWPC	39
(2) RPC(Resistive Plate Chamber)	39
(3) Gammasphere	40
(4) GRETA(Gamma-Ray Energy Tracking Array)	40
(5) Clover 검출기와 Double-Sided Silicon Strip Detector (DSSSD)	41
8. 방사선 측정 표준화	43
(1) 이온 전류함	43
(2) 포켓 도시메타(Pocket Dosimeter)	43
(3) 필름배지(Film Badges)	44
(4) TLD 열 형광 선량계(Thermoluminescent Dosimeter)	44
IV. 중성자 검출기 종류 및 개발 현황	45
1. 가스형 중성자 검출기	46
(1) 붕소 비례계수기(Boron Proportional counter)	46
(2) Fission Chamber	47
(3) 이외의 검출기	48
(4) 최근 연구 분야	49
2. 섬광체형 중성자 검출기	50
(1) 무기 섬광체 중성자 검출기	50
(2) 유기 섬광체 중성자 검출기	51
(3) 최근 연구 분야	53
3. 반도체형 중성자 검출기	54
4. 감속 검출기(Moderating Detector)	55

5. 수소 되튐(Recoil)을 이용한 검출기	56
6. 물방울 검출기(Bubble Detector)	57
7. Activation 검출기	58
8. 영상판(Image Plate)	59
9. 궤적 검출기(Track Detector)	60
참 고 문 헌	61

그 립 목 차

그림 2-1	가스형 검출기의 기본적인 모습	2
그림 2-2	가스형 검출기 조작용의 여러 영역	3
그림 2-3	전리함의 등가회로와 펄스 파형 $V(t)$ 를 도출하기 위한 그림	4
그림 2-4	전자 사태 현상	5
그림 2-5	GM 검출기의 원리와 등가회로	6
그림 2-6	MSGC에서 전하를 수집하는 그림	7
그림 2-7	GEM의 일반적인 모습	9
그림 2-8	GEM 검출기의 예	10
그림 2-9	GEM의 전기장 형성과 전하 증폭	11
그림 2-10	섬광검출기의 검출시스템	15
그림 2-11	광증배관의 구조	15
그림 2-12	반도체의 구조와 검출원리	16
그림 2-13	n-p 접합형 검출기의 구조	17
그림 2-14	NaI(Tl) 섬광 검출기와 HPGe 검출기의 펄스 높이 스펙트럼 비교	18
그림 2-15	반도체 검출기의 검출시스템	20
그림 3-1	외장형 액면 측정기	21
그림 3-2	내장형 액면 측정기	21
그림 3-3	Source 일체형 두께 측정기의 원리	22
그림 3-4	Source 분리형 두께 측정기	23
그림 3-5	밀도측정기의 원리	23
그림 3-6	단위 중량 측정을 위한 기본적인 베타선 계측 구조	24
그림 3-7	SPND의 구조	27
그림 3-8	Small Gamma Camera의 구조	29
그림 3-9	SPECT의 개요도	30
그림 3-10	PET의 일반적인 원리	31
그림 3-11	CR의 구성도	32
그림 3-12	X-선 증배관의 구조	33
그림 3-13	HEPT의 기계 구조부	35
그림 3-14	핵물질 탐지의 원리	36
그림 3-15	광핵공명 산란반응 원리를 이용한 지뢰/폭발물 탐지 장치	38
그림 3-16	A. MWPC의 기본적인 구조와 B. MWPC의 전기장선과 포텐셜	39
그림 3-17	RPC의 기본 원리	40
그림 3-18	반구가 결합된 감마스피어의 내부	40
그림 3-19	HPGe 검출기의 모습과 4π 로 배열한 GRETA의 모습	41
그림 3-20	Clover 검출기	42

그림 3-21 입자 검출을 위한 DSSSD	42
그림 3-22 이온 전류함의 작동원리	43
그림 4-1 중성자 측정용 Fission Chamber	48
그림 4-2 MS plate를 이용한 이차원 중성자 검출기	50
그림 4-3 유기 섬광체를 이용한 중성자 영상화 장치	52
그림 4-4 BGO와 BC454 섬광체를 이용한 중성자 검출기	53
그림 4-5 반도체 검출기를 이용한 중성자 선량계.....	55
그림 4-6 열중성자 측정을 위한 감속 검출기.....	56
그림 4-7 플라스틱 섬광체 섬유를 이용한 중성자 검출기	57
그림 4-8 중성자 물방울 검출기 사진	58
그림 4-9 영상판과 열중성자로 얻은 사진	59
그림 4-10 ^{10}B 중성자 포획 반응에 의해 만들어진 etch	60

표 목 차

표 2-1 무기섬광체의 종류와 특성	13
---------------------------	----

I. 서론

1897년에 퀴리부인이 방사선을 발견한 이후로 개발되어 온 방사선 검출기는 자연 및 인공 방사선을 측정하기 위한 센서로서 이용되어져 왔으며 최근 들어 Δ 기초과학에서는 방사선의 강도 및 에너지 등을 측정하여 핵 및 소립자의 성질을 규명하는데 사용되고, Δ 의료용으로는 감마카메라, CT, PET 등의 장비에서 X-선 및 감마선을 측정하여 진단하는데 사용된다. 또한 Δ 산업용으로는 디지털 방사선 비파괴 검사, 액면측정, 두께 및 밀도 측정, 성분측정에도 사용되는 등 응용범위가 매우 넓은 원자력 기술이다. 방사선이 사용되는 곳에서는 언제나 계측기가 필수적으로 사용되므로 원자력 분야에서 핵 발전을 제외하면 가장 활용도가 높은 기술이다.

방사선이 물질 속으로 입사되면 원자들과의 상호작용을 일으키고 결과적으로 전자들을 만들어 낸다. 이 전자들을 수집하여 형성된 전기적 펄스를 전자회로를 통하여 분석하는 것이 방사선 검출기술이다. 검출기의 선택은 측정하려는 방사선의 종류와 측정을 통하여 우리가 얻고자하는 정보가 무엇이나에 따라 결정된다. 동위원소에서 발생하는 α -입자나 핵반응에서 발생하는 수 MeV급의 낮은 에너지 하전입자를 측정할 경우에는 두께 100 μm 이하의 아주 얇은 검출기가 적절하다. β -붕괴에서 발생하는 전자를 측정할 경우에는 0.1 - 1mm의 검출기가 필요하다. 그러나 물질 내에서의 도달 거리가 큰 감마선의 경우에는 5cm 두께의 검출기로도 충분치 않은 경우가 있다. 방사선의 존재 유무만을 판별할 경우에는 Geiger-Mueller counter 만으로도 충분하다. 방사선 검출기술은 핵물리 및 입자물리학의 실험 기술 발달과 더불어 개발되어 왔으며, 방사선 입자의 종류를 완벽하게 판별하고, 감마선 에너지 측정의 정밀도를 수 % 이내로 줄일 수 있게 되었다. 또한 위치감응형 검출기술을 사용하여 의료용/산업용 디지털 방사선 영상장비가 개발되어 상용화되고 있는 상황이다. 본 보고서에서는 이러한 방사선 검출기술의 개발 현황을 분석하고자 한다.

II. 방사선 검출기술의 개발 현황 및 전망

1. 가스형 검출기

가스형 검출기는 이미 가장 오래 사용되었고, 또 지금도 가장 광범위하게 사용되고 있는 방사선 검출기 유형중의 하나로서 하전입자가 가스를 통과할 때 발생하는 효과에 기초를 둔 것이다. 그림 2-1과 같이 실린더 형태로 중앙전극이 양극으로 실린더 벽이 음극으로 구성된다. 방사선이 검출기에 입사되면 가스를 전리시켜 전자와 양이온, 즉 이온쌍을 생성한다. 이때 검출기의 양극과 음극사이에는 높은 전위차(HV)가 걸려 있으므로 전자는 양극으로 양이온은 음극으로 이동하게 된다. 전자와 양이온이 전극에 포집됨에 따라 전류가 흐르고 후위에 위치한 정밀한 전류측정장치를 통해 신호를 표시한다. 검출기에 입사되는 방사선 준위가 높을수록 검출기에는 더 많은 전류가 흐른다.

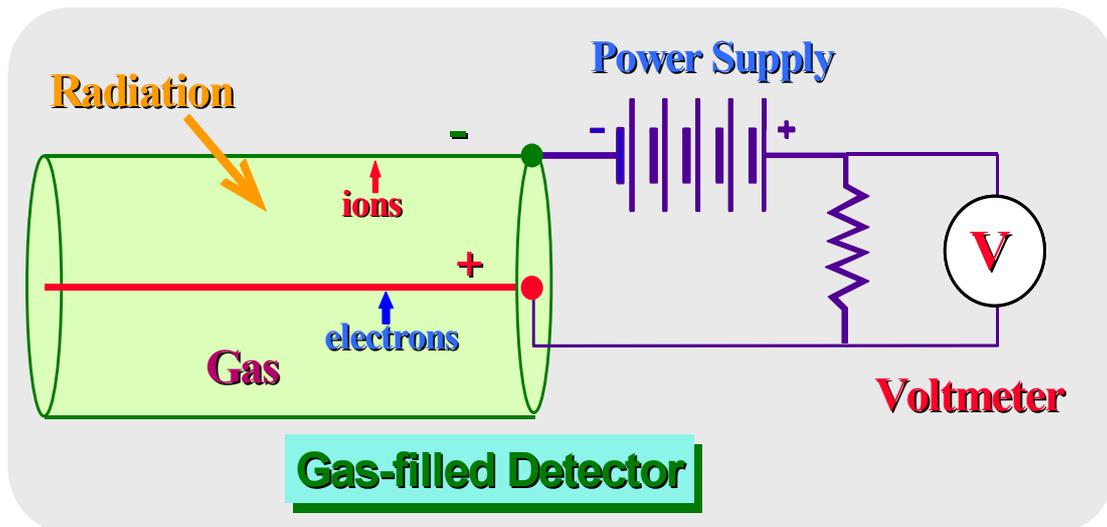


그림 2-1 가스형 검출기의 기본적인 모습

한편 전자와 양이온의 질량 차로 인해 양이온이 음극에 도달하는 시간은 전자가 양극에 도달하는 시간보다 약 1000배 이상 오랜 시간이 걸린다. 그림 2-2는 펄스모드로 작동하는 여러 가지 유형의 가스형 검출기의 차이를 나타낸다. 검출기로부터 관측된 펄스의 진폭을 인가전압이나 또는 검출기의 내부에서 전기장에 대해서 표시하였다.

아주 낮은 전압에 대해서 전기장은 최초의 이온쌍의 재결합을 방지하기에는 불충분하므로 수집 전하는 최초의 이온쌍의 전하보다 적게 된다. 전압을 올리면 재결합이 억제되고 이온포화영역(region of ion saturation)에 도달한다. 다시 전압을 증가시키면 가스 증배가 시작되는 문턱 전기장에 도달한다. 이 때 수집전하는 입사방사선에 의해서 생성된 최초의 이온쌍에 비례한다. 이것이 비례영역(proportionality region)이고, 비례계수기

의 작동모드의 영역이다. 인가 전압이나 전기장을 더욱더 증가시키면 비선형 효과가 일어나기 시작한다. 그리고 인가전압을 아주 높게 하면 양이온에 의해서 생긴 공간전하가 완전하게 지배적이 되어 그 후의 펄스의 거동을 결정한다. 이런 조건하에서는 양이온의 수가 증가하고 가스증배가 발생케 되는 값 이하로 전기장이 강화될 때까지 전자사태가 진행된다. 이것이 GM 영역(Geiger Mueller region)이다.

(1) 전리함(Ionization Chamber)

원리적으로 전리함은 가스형 검출기 중에서 가장 간단한 것이다. 전리함에 흐르는 전류는 기체의 증폭없이 순수하게 초기 이온쌍의 수에 기인하며 출력신호는 방사선장의 강도에 비례한다.[1] 그림 2-3은 전리함의 등가회로와 펄스 파형을 도출하기 위한 그림이다.[2]

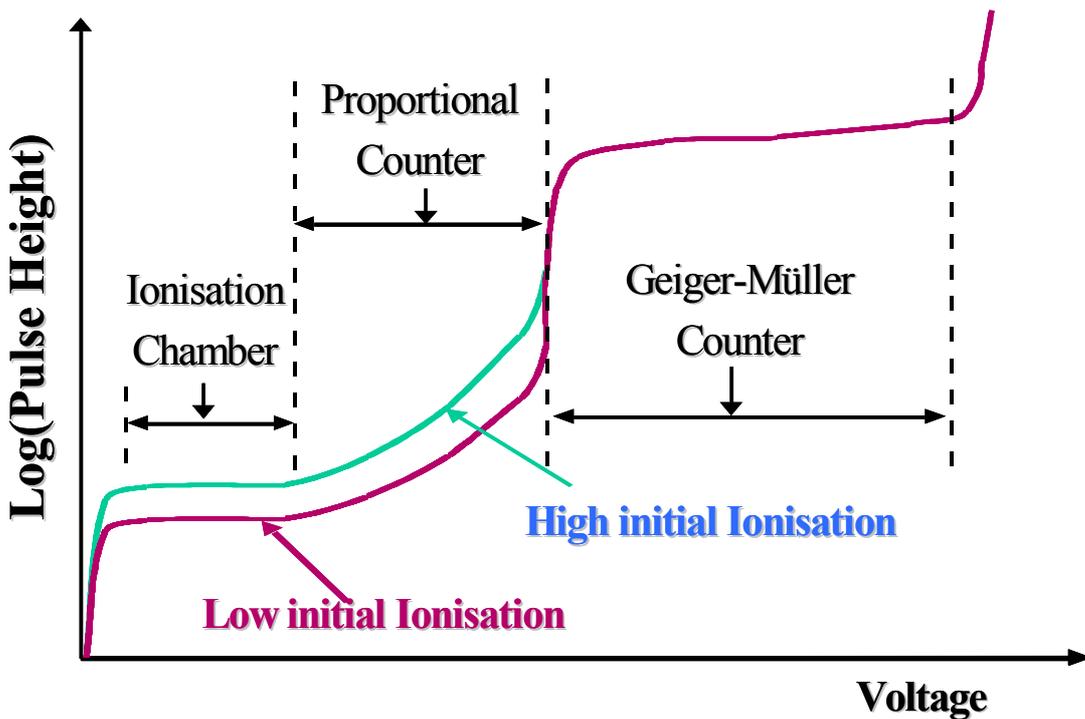


그림 2-2 가스형 검출기 조작의 여러 영역

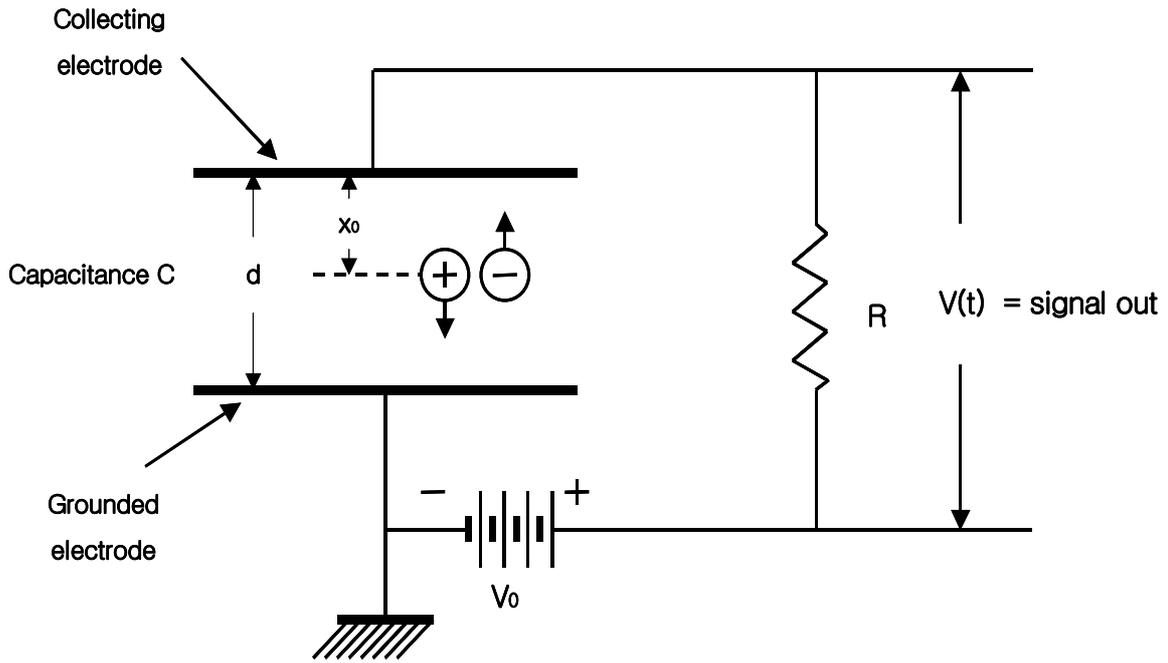


그림 2-3 전리함의 등가회로와 펄스 파형 $V(t)$ 를 도출하기 위한 그림

초기 이온쌍의 수는 검출기에 흡수된 입사방사선의 에너지에 비례하므로 선량률 측정이 가능하고 공기로 채워진 전리함을 이용할 경우 조사선량을 측정할 수 있다. 그러나 방사선과 검출가스와의 상호작용으로 생성된 초기 이온쌍만이 포집되어 출력전류를 형성함으로 전리함에는 아주 작은 양의 전류가 흐른다. 따라서 정밀한 전류측정장치가 필요하다. Fission chamber도 전리함의 한 종류이다.

(2) 비례계수기(Proportional Counter)

비례계수기는 가스형 검출기의 한 유형이고 1940년대 후반에 도입되었다. 전리함이 사용되는 전압영역보다 더 높은 전위차를 검출기에 인가하면 입사방사선이 검출기 가스를 전리하여 생성된 초기전자는 양극으로 포집되는 과정에서 가속되어 2차 전리를 일으킬 수 있는 충분한 에너지를 얻게되고 다시 2차 전자는 또 다른 전리를 야기한다. 이러한 현상을 "전자사태"라고 부르고 비례계수관의 출력은 검출기에서 생성된 총 이온쌍의 수에 비례한다.[2]

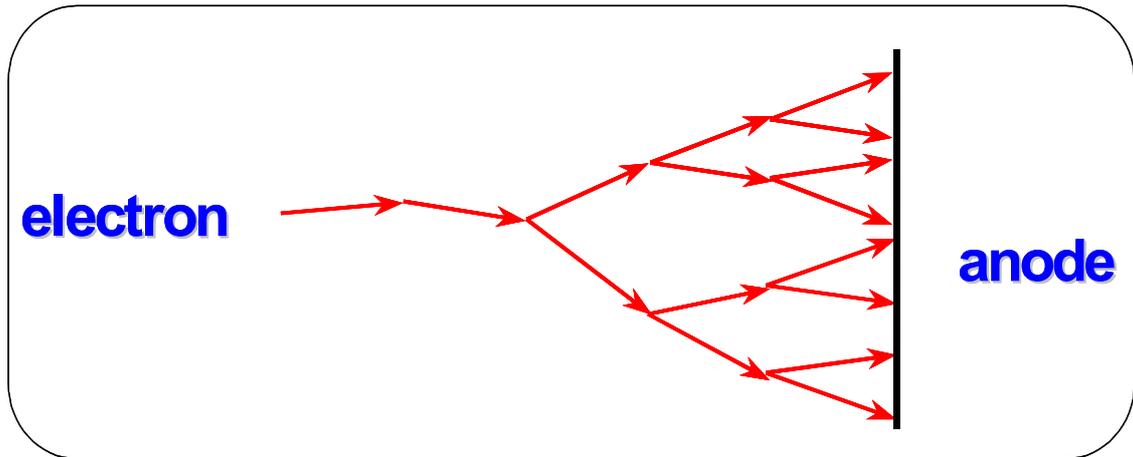


그림 2-4 전자 사태 현상

비례계수기는 방사능측정뿐만 아니라 출력펄스가 입사방사선의 에너지에 비례하므로 방사선의 에너지 측정이 가능하며 방사선의 종류에 따른 전리밀도의 차를 이용하여 알파선과 베타선을 동시에 측정할 수 있다.

방사선이 검출기에 입사되어 전자사태가 발생하고 전자와 양이온이 전극으로 포집되어 출력펄스를 형성하는 동안에 또 다른 방사선이 입사되면 검출기는 잇따른 방사선을 이전 방사선과 구분할 수 없다. 이와 같이 방사선에 의한 출력펄스를 구분하는데 걸리는 시간을 불감시간 또는 회복시간(dead time or recovery time)이라고 부른다. 비례계수기의 불감시간은 수 nsec정도이며 계수률이 낮을 경우에는 문제되지 않지만 계수률이 높은 선원인 경우에는 이에 대한 보정이 이루어져야 한다.

비례계수기에 주로 사용되는 기체는 90 %의 아르곤과 10 %의 메탄으로 구성된 "P-10 가스"이며 10%의 메탄은 방사선과 검출가스와의 반응과정 동안에 여기되었던 원자에서 방출되는 자외선에 의한 부가적인 전리를 방지하기 위해 첨가되는 "소멸기체(quench gas)"이다. 만약 비례계수기에서 자외선에 의한 전리현상을 허용한다면 검출기의 출력펄스의 에너지 비례성이 상실된다.

비례계수기의 기체는 밀봉형으로 봉입할 수도 있으나 기체유입형으로 계측중에 연속적으로 주입할 수도 있다. 기체유입형 검출기는 기체의 성능저하가 없는 장점과 시료와 검출기 사이의 창(window)을 없앨 수 있어 계수효율을 2 계수기의 경우에는 50%, 4 계수기의 경우에는 100%까지 높일 수 있는 이점이 있다. 또한 BF₃ 기체를 사용한 BF₃ 계수관은 중성자 측정용도로 널리 이용되고 있다. ³He counter도 비례계수기의 한 종류로서 원자력 분야에 많이 이용되고 있다.

(3) GM 검출기(Geiger-Mueller Detector)

GM 검출기는 가장 오랜 형태의 방사선 검출기의 하나로서 1928년에 Geiger와

Mueller에 의해서 도입되었다. 이 검출기는 간단해서 가격이 저렴하고 조작도 쉽기 때문에 현재에도 사용되고 있다. GM관에는 일반적으로 비례계수기가 사용되는 전압영역보다 높은 전압이 인가되고 비례계수기에서는 허용하지 않았던 자외선에 의한 추가적인 전리현상을 용인하므로 방사선이 입사되면 양극을 중심으로 GM관의 모든 영역에서 전자사태가 발생한다. 따라서 GM관의 기체증배인자는 $\sim 10^8$ 에 이르므로 펄스를 증폭시키기 위한 추가적인 전자장치가 필요 없을 만큼 충분한 크기의 출력펄스를 형성한다. 그림 2-5는 GM 검출기의 원리와 등가회로를 간단하게 나타낸 그림이다.

그러나 GM관에서 생성되는 총 이온쌍의 수는 초기이온쌍의 수와 관계없이 동일하기 때문에 출력펄스의 크기는 입사되는 방사선의 종류와 에너지에 무관하게 동일하다. 따라서 GM 검출기는 입사방사선의 종류와 에너지를 구분할 수 없고 단지 계수되는 방사선의 갯수, 즉 방사능만 측정 가능하다.[3]

이와 같이 GM검출기는 입사방사선의 성질에 대한 정보를 상실하고 단지 그 수만을 나타내므로 원칙적으로 방사선의 에너지에 종속적인 방사선량을 측정할 수 없다. 이러한 GM검출기의 최대 약점을 보완하기 위해 검출기의 외벽을 적절한 물질(Cu, Sn, Pb 등)로 차폐하여 저 에너지 영역의 광자에 대한 감응도를 낮춤으로써 100 keV에서 수 MeV까지의 영역에서 감응도를 일정하게 조정한다. 이렇게 하면 에너지와 선량과의 관계가 균일해지므로 에너지에 관계없이 입사방사선의 수만을 계수하여 근사적인 방사선량을 얻을 수 있다. 이와 같은 GM관을 "보상형 GM"이라 부르고 주로 선량률을 측정하는 서베이미터(survey meter)로 사용된다.

GM검출기에 주로 사용되는 기체는 He과 Ar이며 전리를 통해 생성된 양이온이 벽물질과 충돌하여 2차 전자를 방출하는 것을 방지하기 위한 소멸기체로 할로젠기체(Cl_2 , Br_2 등)나 유기기체(에틸알콜, 에틸포메이드)가 5~10% 첨가된다. 일반적으로 GM검출기의 불감시간은 100~400 msec이다

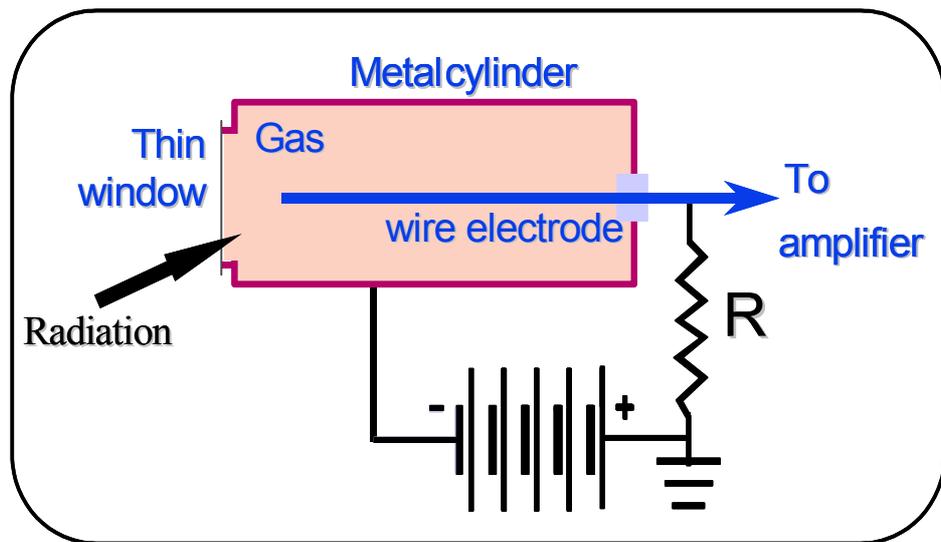


그림 2-5 GM 검출기의 원리와 등가회로

(4) MSGC(Microstrip Gas Chamber)

1988년 A. Oed가 최초로 반도체 공정을 이용하여 기체형 방사선위치센서인 MSGC를 개발하였다. MSGC는 빠르고, 좋은 에너지 분해능과 좋은 시간 분해능(15 nsec)을 가진 다중 전극 비례계수기이며, 그것은 단일 센서 평판의 Drift Chamber와 유사하다. MSGC에 와이어(Wires)는 그림 2-6에서 나타낸 바와 같이 적당한 전도성을 가지고 있는 지지층에 평행의 스트립(Strip)이 위치하게 된다. 이 전극들의 스트립은 일정하게 양극과 음극들로 구성된다. 평평한 MSGC의 센서 평판은 세밀하게 증착된 회로기판과 비슷하며 photo-lithographic 방법을 사용하여 만든다.

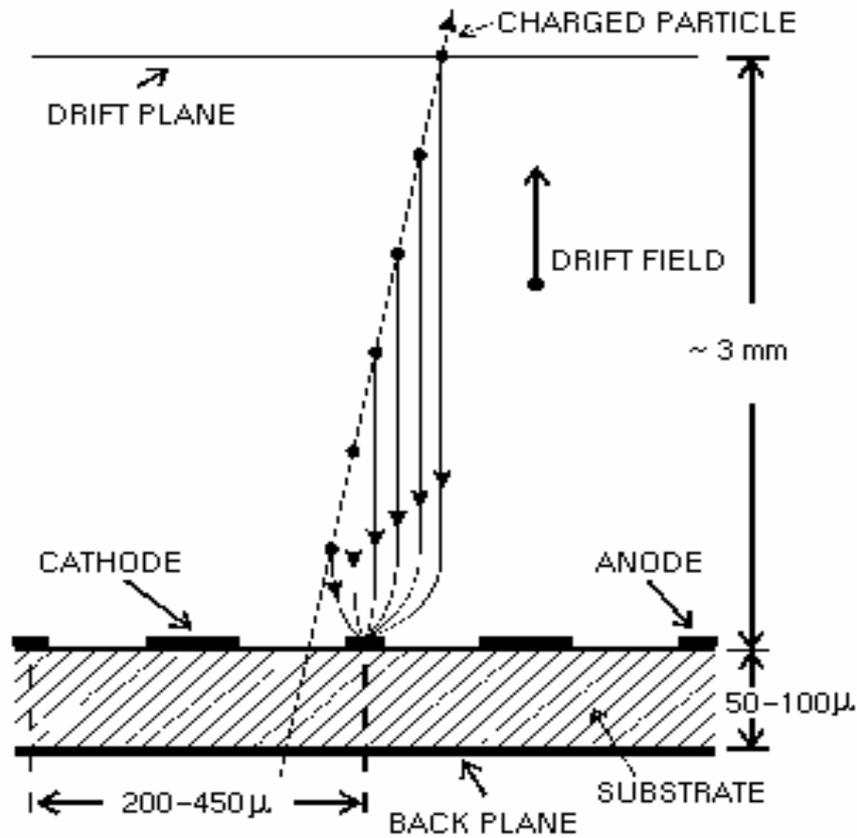


그림 2-6 MSGC에서 전하를 수집하는 그림

(5) 기체전자 증폭기(GEM, Gas Electron Multiplier) 검출기

기체전자 증폭기(GEM)는 고에너지 분야의 입자검출기로 가장 최근(1996년)에 개발되어 선진국에서도 아직 GEM을 적용한 방사선영상 장비가 상용화 개발되지 않은 상태이다. GEM형 기체검출기를 이용한 방사선 영상장치는 우수한 해상도를 구현할 수 있으면서도 내방사성이 좋고 감마선 뿐 아니라 중성자를 이용한 Radiography에도 적용할 수 있는 장점이 있다. 또한 GEM방식의 기체검출기는 MSGC나 MDOT에 비하여 고전압에 강한 특성을 가지므로 차세대 Digital Radiography System의 영상센서로서 활용 가능성이 매우 높다.[4]

기체전자 증폭기는 기존의 다른 기체검출기들에 비해 공간 및 시간 분해능, 검출효율 등 여러 면에서 훨씬 우수한 동작특성을 지니고 있는 것으로 알려져 있다. 또한 기체전자 증폭기의 기체이득(gas gain)이 충분히 높을 경우, readout 회로 위에 직접 결합되어 제작되던 방사선 센서부분이 더 이상 필요하지 않으므로, readout 회로로부터 제거될 수 있다. 이럴 경우 기체전자 증폭기 자신은 readout 회로와는 분리된 방사선 검출기로서 동작하며, readout 회로의 구조도 간단해진다. 또한 그 구조도 단순하여 제작의 용이함도 지니고 있다. 하지만, 이러한 장점에도 불구하고 기체전자 증폭기는 고안된 지 얼마 되지 않아 아직도 이해하고 개선해야 할 동작특성들이 몇몇 남아 있다. 예를 들면, 입사 방사선이 검출기체와 상호 작용하여 생성된 일차전자들 중 일부가 기체전자 증폭기의 미소구멍을 관통하지 못하고 기체전자 증폭기 상위전극에 포획되거나, 또는 증폭기의 미소구멍을 관통하면서 증폭되는 전자들 중 일부가 readout 전극에 도달하지 못하고 기체전자 증폭기의 하위전극에 포획됨으로써 발생하는 기체이득의 손실이다. 또한 기체전자 증폭기 자신이 직접 기체검출기로서 역할을 하고 그리고 readout 회로가 방사선 센서로부터 분리될 수 있기 위해서는 기체전자 증폭기의 기체이득을 충분히 높여야 한다. 정성적으로 말해서, 기체전자 증폭기의 기체이득은 주로 기체전자 증폭기의 기하학적 요소(예를 들면, 미소구멍의 두께, 크기, 모양, 간격) 및 동작요소(예를 들면, 증폭기 주변에서의 전장의 방향 및 상대적 크기, 검출기체의 종류 및 압력 등)에 의해서 좌우된다.

기체형 위치검출기는 반도체 검출기에 비교해서 구조가 간단하여 제작이 용이하고, 대형 검출기 제작이 가능하며, 방사선에 의한 손상이 거의 없다는 장점을 가지고 있다. 최근에는 GEM형 기체검출기와 바늘형상의 CsI(Tl)를 결합시키고, 기체 검출기의 표류 전극면으로 CsI, K-Cs-Sb 등의 광전자방출체를 이용함으로써 50 μ m내외의 고위치분해능을 얻을 수 있게되어, 비파괴검사, 결정구조분석, 유방암진단, DNA의 방사선손상연구, 천문학, 고에너지 입자검출 등 다양한 분야에서 디지털 방사선영상을 구현하는데 크게 이바지 할 것으로 기대되고 있다.

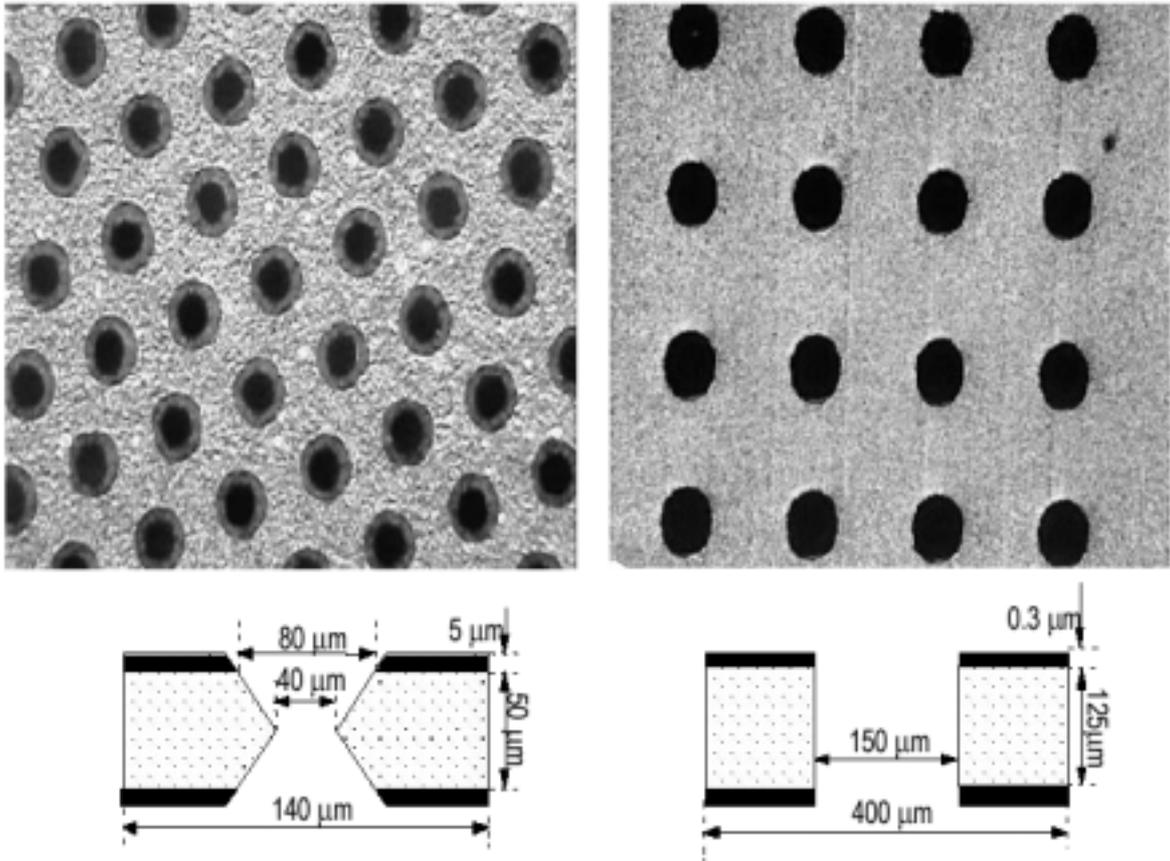


그림 2-7 GEM의 일반적인 모습

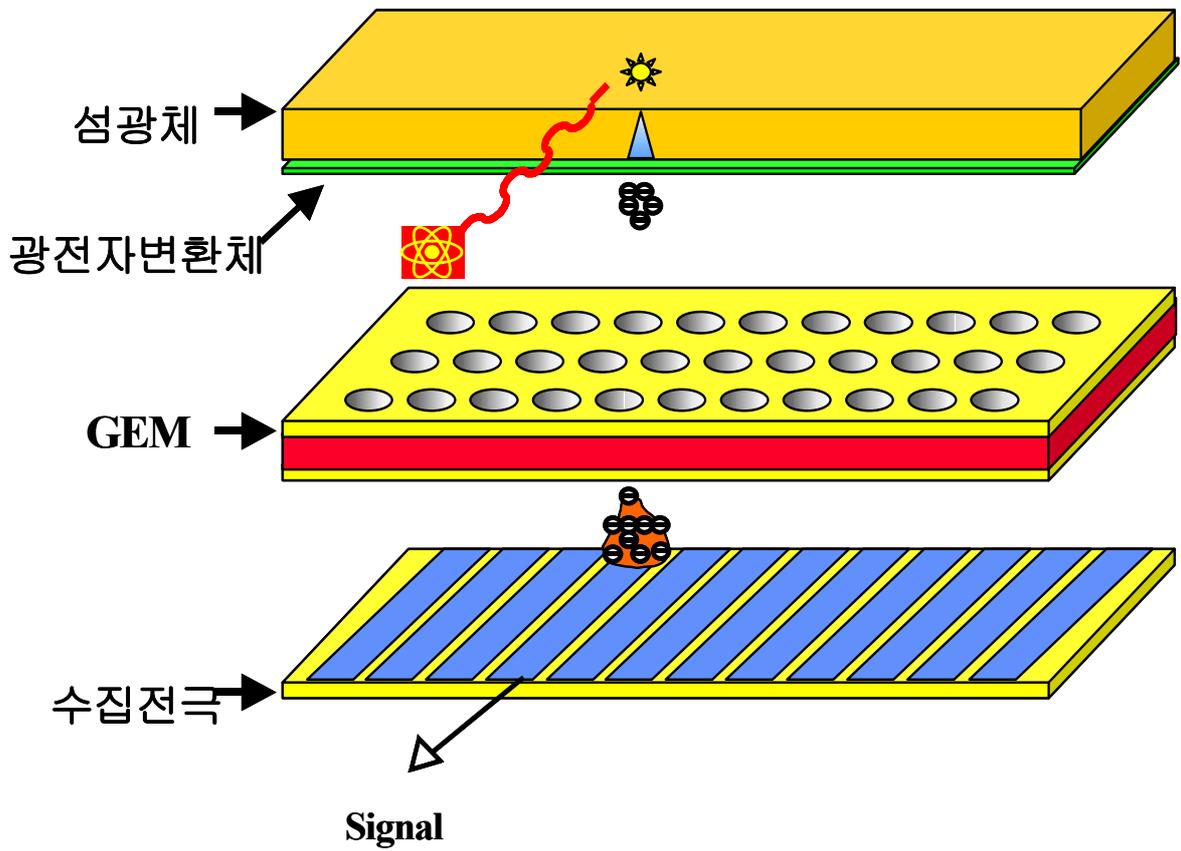


그림 2-8 GEM 검출기의 예

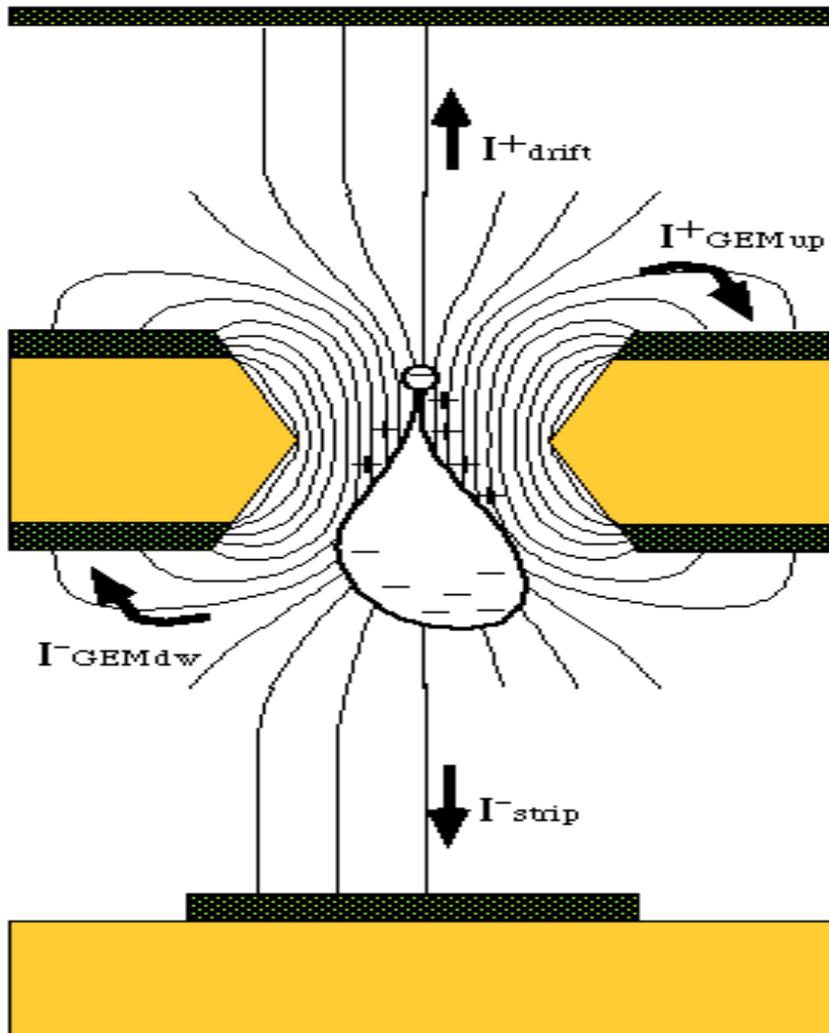


그림 2-9 GEM의 전기장 형성과 전하 증폭

2. 섬광체 검출기

어떤 종류의 물질 중에서 발생하는 섬광(scintillation light)에 의해서 이온화 방사선을 검출하는 일은 예전부터 행하여 온 방사선 측정법의 하나이다. 방사선의 에너지를 흡수하였을 때 원자가전자대에 있던 전자가 전도대로 여기 되었다가 다시 천이($\sim 10^{-8}$ 초 내)에 하면서 가시광선을 방출하는 물질을 섬광물질이라 한다. 입사되는 방사선장의 세기와 가시광선 방출량의 비례성을 이용하는 섬광검출기는 사용하는 섬광물질에 따라 고체, 액체, 기체 또는 유기질, 무기질의 형태가 있다. 표 2-1은 자주 이용되는 무기섬광체의 특성을 나타낸다.[5]

최근에 개발된 섬광체인 CdWO_4 는 밀도가 BGO보다도 크고, 유효원자번호도 크므로 검출효율이 매우 우수하다. 그러나 섬광의 decay constant가 $20\mu\text{s}$ 로 매우 길어 pulse mode의 계수장치에는 사용하기 어려우나, current mode에서는 적합한 섬광체로 사용할 수 있다. GSO는 감마선의 측정시 resolution이 매우 우수한 장점을 지니므로 감마선 분광학에 사용하기 적합하다.

BGO는 PET장치의 섬광체로 사용하는 등 소형의 array detector에 사용하기 적합하지만 resolution은 NaI(Tl) 에 비하여 떨어지는 단점이 있다. 그러나 대용량의 결정을 성장하기가 용이하고 고에너지의 감마선 검출 효율이 높은 특징이 있다. Radiation length는 CdWO_4 가 가장 짧고, Energy resolution은 CsI(Tl) 이 가장 우수하다.

최근에는 원자번호와 밀도가 높아서 감마선에 대한 검출 효율이 높고 에너지 및 시간 분해능이 좋은 섬광체를 신재료로서 개발하고 있으며, Column 구조를 가진 섬광체를 이용하여 고분해능 방사선 영상장비의 센서로 접목하는 연구가 진행되고 있다.

(1) 무기 섬광검출기(Inorganic Scintillation Detector)

무기결정은 주로 할로젠원소(I)인 무기염과 발광중심 역할을 하는 소량의 불순물(activator)로 구성되며 가장 대표적인 무기결정 섬광검출기는 Tl을 불순물로 첨가한 NaI(Tl) 검출기이다.[1, 2]

가. NaI(Tl) 검출기

NaI(Tl) 검출기는 밀도가 3.67g/cm^3 으로 상당히 높고 원자번호가 높은 I(53)를 함유하고 있으므로 감마선에 대한 검출효율이 높다. 그러나 기계적·열적 충격에 약하고 조해성이 있으므로 알루미늄 등으로 밀폐하여 공기와의 접촉을 차단한다. 밀폐로 인해 투과력이 약한 알파, 베타 또는 연질 X-선 측정에는 적절하지 않으며 통상 감마선이나 중·경질의 X-선 측정에 이용된다.

표 2-1. 무기 섬광체의 종류와 특성

섬광체	NaI(Tl)	CsI(Tl)	BGO (Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂)	CdWO ₄	BaF ₂	GSO (Gd ₂ SiO ₅)
밀도(g/cm ³)	3.67	4.51	7.13	7.90	4.89	6.71
Max. Emission 파장(nm)	415	550	480	470	310, 220	450
Decay Constant (nsec)	230	900	300	20000	630, 0.9	60
녹는점(°C)	651	621	1050	1325	1280	-
Photons/MeV	40000	52000	8500	13000	12000	10000
Radiation Length (cm)	2.59	1.86	1.13	1.00	2.06	1.39
Refractive Index at peak emission	1.80	1.78	2.15	2.25	1.5	1.91
Stability	Very Hygro- scopic	Slightly Hygro- scopic	Stable	Stable	Stable	Stable

나. CsI(Tl) 검출기 및 CsI(Na) 검출기

CsI는 섬광물질로써 유용한 또 하나의 할로젠화 알카리이고, 섬광체 중에서 단위 길이당 감마선의 흡수가 최대가 된다. 이 특성은 크기나 중량등이 문제가 되는 우주에서의 계측장치와 같은 응용에 대해서 매우 중요하다.

CsI(Tl) 밀도가 4.51g/cm³으로 상당히 높고 원자번호가 높은 I(53)를 함유하고 있으므로 감마선에 대한 검출효율이 높다. 방출 스펙트럼은 NaI(Tl)의 방출 스펙트럼보다 훨씬 더 파장이 길게 정점화되는데, 이는 빛의 출력이 CsI(Tl)에서 실제적으로 더 낮을 때 임이 인용된다.

CsI(Na)의 밀도는 CsI(Tl)와 같고, 단위 에너지당 광출력이 상당히 높게 NaI(Tl)의 값에 근접한다. CsI(Na)도 흡습성이 있기 때문에 공기와의 접촉을 차단한다.

다. LiI(Eu) 검출기

LiI(Eu)는 ⁶Li를 농축한 것을 사용함으로써 느린 중성자 측정에 이용된다.

라. BGO($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) 검출기

1970년대의 후반에 섬광물질, $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ 는 상업적으로 이용할 수 있게 되었고, 이 물질의 결정은 급속도로 증가되어 왔다. BGO의 중요한 장점은 고밀도(7.13 g/cm^3)와 비스무스(Bi) 성분의 큰 원자번호(83)이다. 이들 성질은 감마선의 광전흡수에 관한 어느 일반적인 이용이 가능한 섬광물질의 단위 체적당 최대의 확률로 나타난다. 그러나 BGO는 광수율(light yield)은 비교적 낮은데, NaI(Tl)의 것보다 10 - 20 %로 보고되고 있다.

마. BaF_2 검출기

다른 순수 무기물질, BaF_2 는 최근에 고속 타이밍 측정에서 그 자체의 퍼텐셜 적용 때문에 주목을 끌고 있다. 현재 BaF_2 는 1 nsec보다 더 짧은 감쇠시간을 갖는다. 이런 특성의 결합은 단위 체적당 높은 검출효율과 고속반응이 요구되는 섬광검출기에 사용되어 진다.

바. ZnS(Ag) 검출기

ZnS(Ag)는 큰 단결정을 얻을 수 없으므로 검출용기 내에 무기분말을 얇게 발라 사용한다. 따라서 ZnS(Ag) 검출기는 알파선 측정용으로 주로 사용되고 베타 또는 감마선에는 반응하지 않는다. 밀도는 4.1 g/cm^3 이다.

그 밖의 무기결정 섬광검출기로 Gd_2SiO_5 (GSO), YAlO_3 (YAP), $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (YAG), CdWO_4 등이 있다.

(2) 유기 섬광검출기(Organic Scintillation Detector)

순수 유기결정으로 섬광특성이 양호한 재료는 안트라센(anthracene)과 스틸벤(stilbene)을 들 수 있다. 안트라센은 가장 오래 전부터 섬광체의 목적으로 이용되어 온 유기물질이고, 다른 어떤 유기 섬광체보다 높은 섬광효율을 가지고 있다. 스틸벤은 섬광효율은 낮지만 하전입자와 전자에 의해서 생성된 섬광을 구별하는데 자주 이용되고 있다. 이들은 큰 결정을 얻기 어렵고 또 기계적 강도가 매우 약하여 결정형태로 사용되기보다 이들 섬광물질을 유기용매에 녹인 액체섬광물질 또는 중합한 플라스틱형태로 사용된다.

액체섬광물질의 특성은 임의의 크기와 임의의 형태로 검출기를 제작할 수 있다는 점과 측정 시료를 직접 섬광체와 혼합하여 사용할 수 있으므로 액체섬광검출기는 투과력이 약한 알파, 저에너지 베타선을 내는 핵종(^3H 와 ^{14}C) 계측에 매우 효과적이다. 유기섬광물질은 원자번호가 낮은 탄화수소로 구성되고 밀도가 낮으므로 감마선 측정용으로는 사용되지 않는다.

그림 2-10은 섬광검출기의 검출시스템의 계통도를 나타내고 있다.[6]

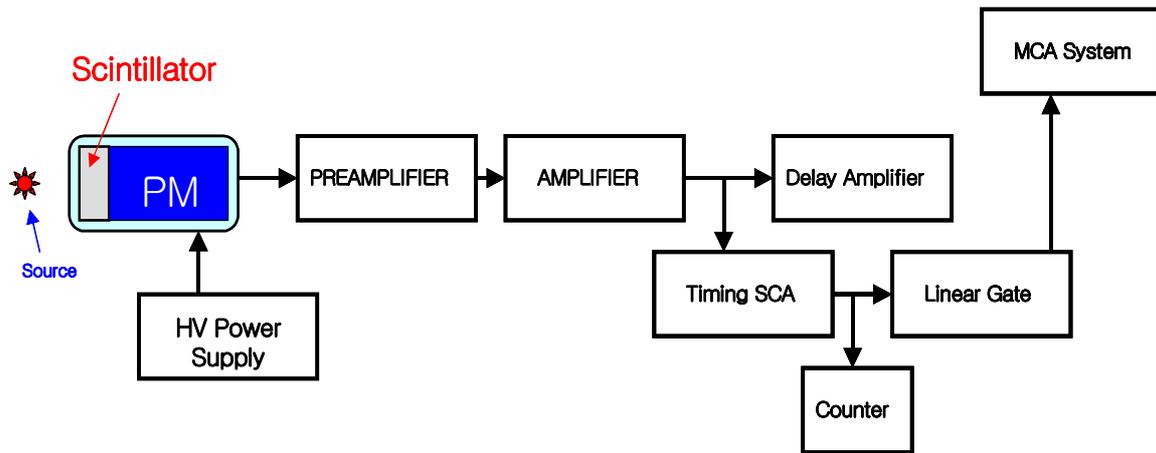


그림 2-10 섬광검출기의 검출시스템

(3) 광증배관(Photomultiplication Tube: PMT)

섬광물질에 방사선의 에너지가 흡수됨에 따라 방출되는 가시광선의 양은 극히 미약하므로 그림과 같은 광증배관을 이용하여 출력신호를 증폭시킬 필요가 있다.

가시광선이 광음극과 반응하여 생성되는 광전자는 순차적으로 높은 전압이 인가된 다단계의 다이노드(dynode)를 거치는 과정에서 증배되어 최종적으로 양극에 포집되는 전자의 수는 초기 전자수보다 약 10^6 배로 증가하고 이에 해당하는 출력펄스가 형성된다. 그림 2-11은 광증배관의 구조를 나타낸다.

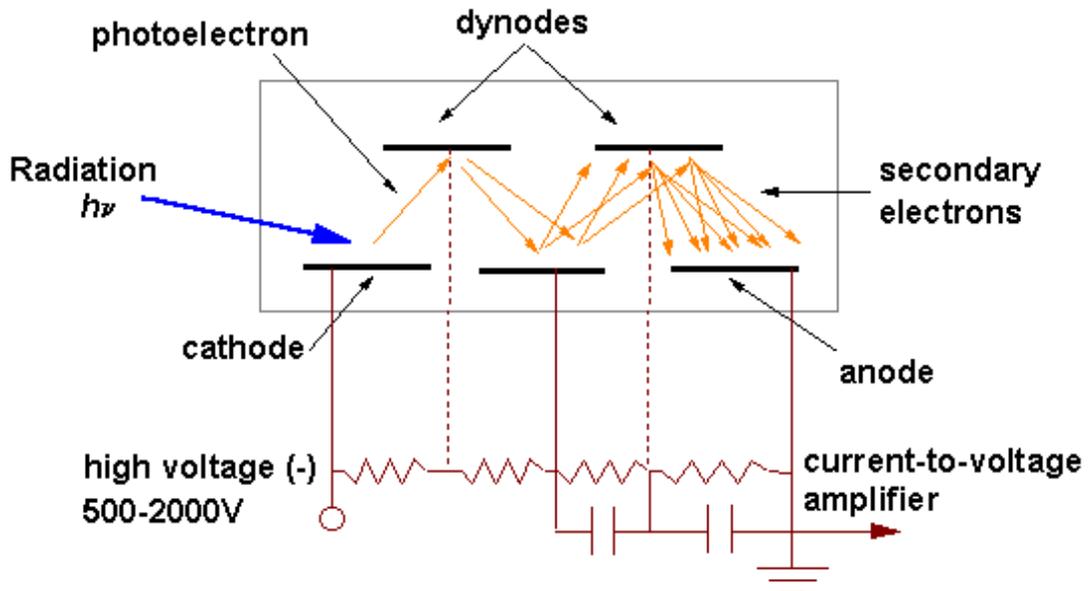


그림 2-11 광증배관의 구조

3. 반도체 검출기

방사선을 검출 및 측정할 경우 고체의 검출매질을 이용하는 것이 유리한 경우가 많다. 고체의 밀도가 기체의 밀도에 비해 약 1000 배 가량 크므로 고에너지 전자와 감마선을 측정하는 경우로 볼 때 고체검출기의 크기는 이것과 같은 가스형 검출기에 비해 작게 할 수 있다. 섬광체 검출기는 고체검출 매질을 마련하는 가능성을 제시해 주고 각종 방사선 계측의 응용에 대해서는 앞에서 설명되었다. 섬광체 검출기의 중요한 문제점의 하나는 에너지의 분해능이 나쁘다는 것이다. 에너지 분해능의 통계적 한계를 개선하는 유일한 방법은 펄스당 정보운반자의 수를 증가시키는 것이다. 방사선 검출기로서 반도체 물질을 사용함으로써 해서 다른 종류의 검출기보다 훨씬 많은 수의 운반자를 얻을 수 있다.[1, 2, 7]

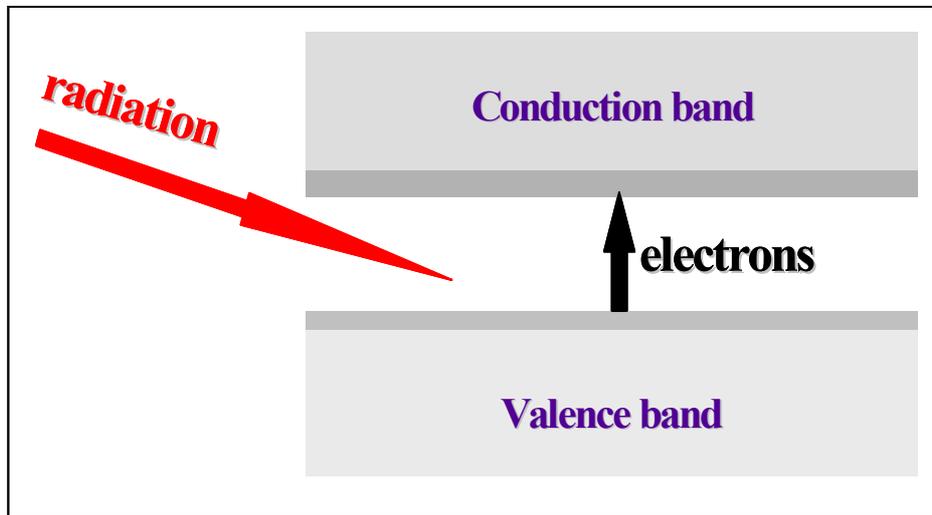


그림 2-12 반도체의 구조와 검출원리

결정체 물질에서는 격자에 주기성이 있기 때문에 그 고체내의 전자에 허용되는 에너지는 띠(band) 모양이 된다. 그림 2-12와 같이 원자가전자대(Valence band)와 전도대(Conduction band) 사이의 에너지 갭(gap)이 작아서 상온에서도 열적인 여기에 의해 원자가전자대에 있던 전자가 전도대로 이동할 수 있는 물질을 반도체라고 부른다. 이와 같이 방사선의 에너지 흡수에 의해서 뿐만 아니라 상온에서도 열적 여기에 의해 반도체 검출기에는 항상 미량의 전류가 흐르기 때문에 사용시에는 반드시 액체질소로 냉각시켜 주어야 한다.

원자가전자대에 있던 전자가 전도대로 이동하면 원자가전자대에는 정공(hole)이라 부르는 전자의 빈자리(vacancy)가 만들어지고 이는 양전자 효과를 낸다. 반도체에서 전자·정공쌍을 만드는데 필요한 에너지는 Ge이 2.9 eV이고 Si이 3.6 eV로 기체(30 eV)에서 보다 상당히 작으므로 동일한 에너지의 입사방사선에 대하여 생성되는 정보전달자의 수가 많아서 출력펄스가 커진다. 따라서 입사방사선의 에너지를 구분하는 에너지 분해

능이 우수하다. 또한 검출기가 기체보다 밀도가 1,000 배정도 큰 고체이므로 방사선의 검출효율이 우수하다.

반도체를 방사선검출기로 사용하는 기본적인 방법은 n형과 p형 반도체를 접합하는 것인데 이를 "n-p 접합형 검출기(또는 n-p 접합 다이오드)"라고 한다. n-p 접합 다이오드의 n측에 (+)로, p측에 (-)로 역바이어스 전압을 인가하면 n측의 전자와 p측의 정공이 각각 전극으로 이동하여 방사선의 검출영역인 공핢층(전자와 정공의 수가 같은 영역)이 확장된다.

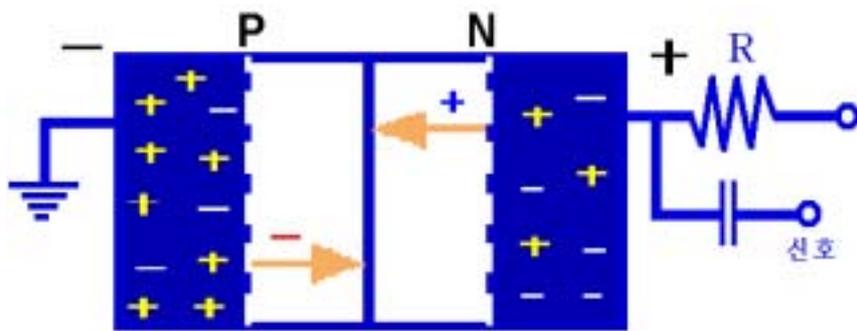


그림 2-13 n-p 접합형 검출기의 구조

흔히 사용되는 반도체는 Si 또는 Ge에 인위적으로 불순물을 첨가함으로써 반도체의 특성을 조절하는데 4족인 Si 또는 Ge에 3족 원소를 첨가한 것을 p형 반도체, 5족 원소를 첨가한 것을 n형 반도체라 부른다.

Si 다이오드 검출기는 특히 얇은 투과형 전결핢층 검출기로서 베타 입자 및 고속 전자의 측정에 이용되는 경우가 많다. 경합하는 대부분의 기술에 비해 반도체 검출기의 사용은 여러 면에서 유리한 경우가 많다. 즉 에너지 분해능 및 안전성이 좋고 시간적으로 변동하지 않으며 타이밍 특성이 뛰어나고 또 입사창이 극히 얇아서 사용하기에 간단한 것 등이다. 비교적 작은 경우에는 유리한 점이지만 표면적이 큰 것이 요구되는 실험에서는 단점이 된다. 표면적이 20 cm^2 까지 Si 다이오드 검출기가 시판되고 있지만 이것은 큰 전기용량을 갖고 있으므로 작은 모양의 검출기에서 얻어진 분해능 보다 에너지 분해능이 덜 좋게 나타난다. 보통 크기는 $1 - 5 \text{ cm}^2$ 이다.

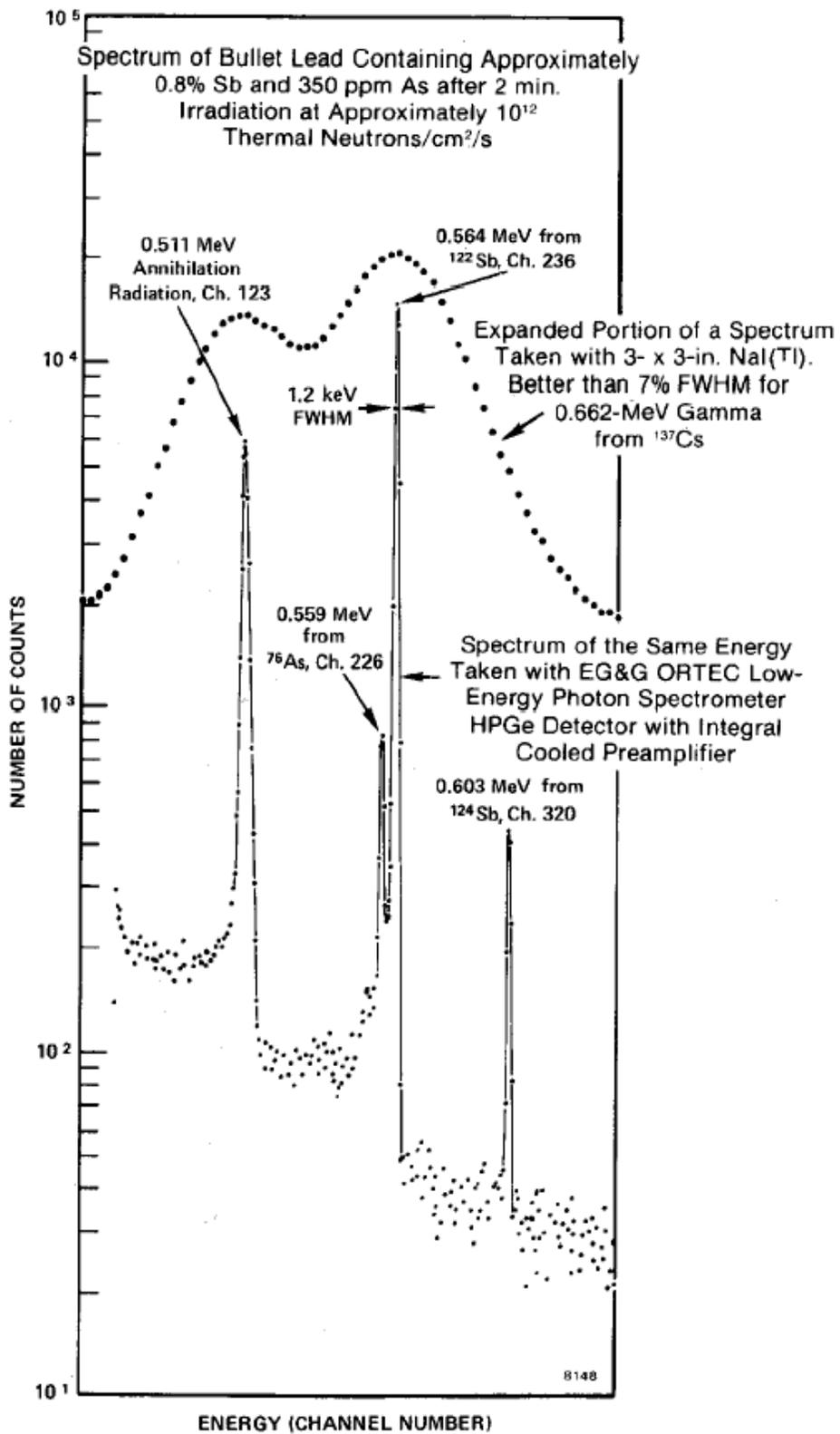


그림 2-14 NaI(Tl) 섬광 검출기와 HPGe 검출기의 펄스 높이 스펙트럼 비교

실제 반도체검출기를 제조할 때에는 공핍층의 더욱 확대하기 위해 p형 Si 또는 Ge 반도체에 Li를 확산시키는 방법을 사용한다. 이러한 검출기를 "Li drifted 반도체검출기"라 하며 Ge(Li), Si(Li)으로 표기한다. Si(Li)는 상온에서 수주동안 보관이 가능하나 Ge(Li)는 사용 시 뿐 아니라 보관할 경우에도 항상 냉각을 시켜주어야 한다. Si(Li)는 X-선 측정용으로 Ge(Li)는 감마선 측정용으로 주로 사용된다.

근래에는 Ge의 불순물 정제기술이 발달하여 Ge(Li) 대신에 "고순도 Ge검출기(High Purity Ge detector, HPGe)"가 널리 사용된다. Ge(Li)는 상온에서 Li이 이동하기 때문에 항상 액체질소로 냉각해야 하는 부담이 있는 반면 HPGe는 열전자에 의한 잡음을 줄이기 위해 사용 중에만 냉각하면 된다. 일반적으로 검출효율과 에너지 분해능과 같은 가장 중요한 성능 특성은 같은 크기의 Ge(Li)과 HPGe에 대해서는 거의 일치한다. 그림 2-14는 같은 입사 감마선 스펙트럼에 대한 NaI(Tl) 섬광 검출기와 HPGe 검출기의 펄스 높이가 스펙트럼을 비교한 그림이다.[6] 이 그림에서와 같이 HPGe 검출기의 에너지 분해능은 매우 우수하기 때문에 NaI(Tl) 섬광 검출기로서는 분해할 수 없는 에너지에 접근하고 있는 다수의 감마선을 분리할 수 있다. 따라서, 복잡한 에너지 스펙트럼을 갖는 감마선분광학에서는 현재 모두가 HPGe 검출기가 사용되게 되었다.

CdTe 검출기는 실온 동작을 가동하게 하는 충분한 띠허격 에너지(1.52 eV)와 비교적 원자번호가 큰 값을 가지고 있다. CdTe은 단위 길이당 광전흡수의 확률은 자주 사용되는 감마선 에너지에 대해서 Ge보다 4 - 5 배, Si의 경우 전형적인 감마선 에너지에 대한 것보다 100 배가 크다. 따라서, 이 물질은 단위 체적당 감마선 효율이 중요한 경우에 많이 이용된다.

HgI₂는 X-선과 감마선에 대해 퍼텐셜검출기로서 상당한 주위를 끌었던 또 다른 물질이다. HgI₂ 검출기는 띠허격 폭이 2.13 eV인 반도체 물질로 이루어져 있다. 수은의 단면적 때문에 저에너지 상호작용 확률은 Ge 검출기의 50배 정도로 크다. 이 점에서 HgI₂ 검출기는 CdTe 검출기보다 훨씬 더 효율적으로 광자를 검출할 수 있는 장점이 있다. 하지만 광범위하게 응용하는데 몇 가지 제한이 있어 검출기 개발은 연구단계에서 크게 벗어나지 못하고 있다.

CdZnTe(CZT)는 띠허격 폭이 1.53 eV와 1.64 eV로 상온에서 감마선을 감지할 수 있을 정도로 열 여기된 전자정공쌍이 적다. 그러나, 가격 경쟁력을 갖추기 위해서는 비저항이 작은 CdZnTe를 이용하여 에너지 분해능과 공간 분해능이 높은 감마선 검출기를 만들어야 하며, 이를 위해서는 높은 바이어스에서 낮은 누설전류를 갖도록 해야 한다.

그 밖의 반도체검출기로 GaAs, InP, CdSe PbI, GaSe 등의 검출기가 있는데 이들은 에너지 갭의 간격이 커서 냉각하지 않고 상온에서 사용할 수 있는 장점이 있으나 에너지 분해능이 좋지 않으며 결정을 키우는데 한계가 있다는 약점이 있다.

그림 2-15는 반도체 검출기의 검출시스템의 계통도를 나타낸다.[6]

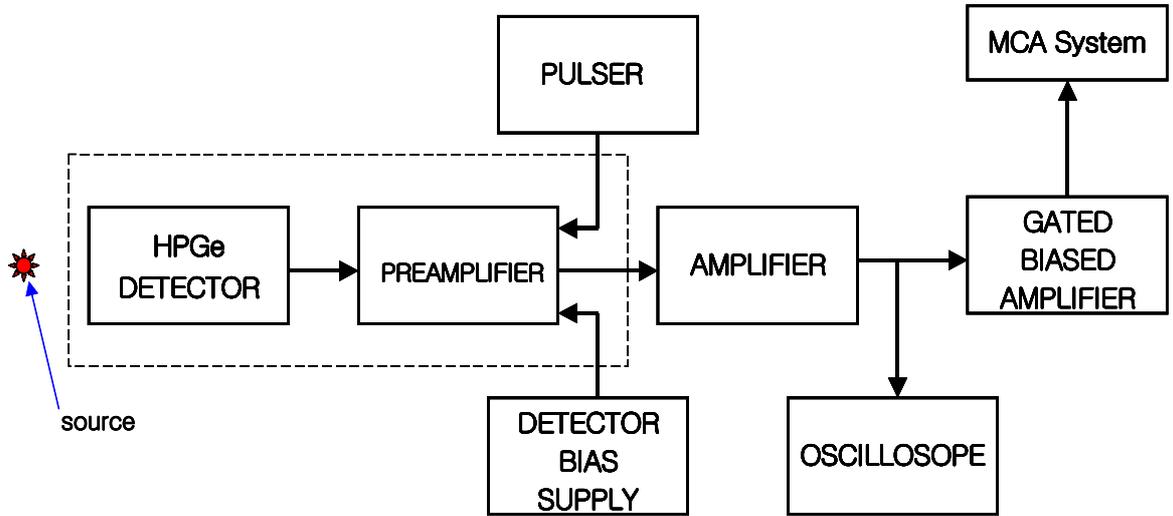


그림 2-15 반도체 검출기의 검출시스템

Ⅲ. 방사선 응용 계측기 개발 현황 및 전망

1. 산업용 응용계측기

(1) 액면 계측기

액면 계측기의 원리는 감마선이 물질을 통과하면서 감쇠하는 물리적 현상과 방사선 측정의 원리를 따르고 있다. 감마방사선이 감쇠하는 전도는 방사선원의 종류, 흡수 경로의 길이 및 매질의 밀도에 의존한다. 방사선원의 조류와 흡수 경로를 고정시키면, 통과 매질의 유무가 측정값에 영향을 준다.[4]

방사선을 이용하는 액면측정기는 측정기를 측정 대상 물질 안에 삽입하거나 접촉시키지 않고 측정이 가능하고, 정확하고 신뢰성 있는 측정값을 제공한다. 저준위 방사선원을 사용하며 금속 용융물의 액면 측정이 가능하고, 측정값은 온도, 먼지, 연기 또는 측정 물질의 표면 등에 영향을 받지 않는 특징을 가지고 있다.

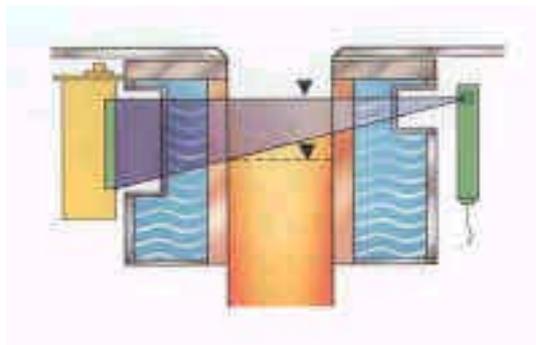


그림 3-1 외장형 액면 측정기

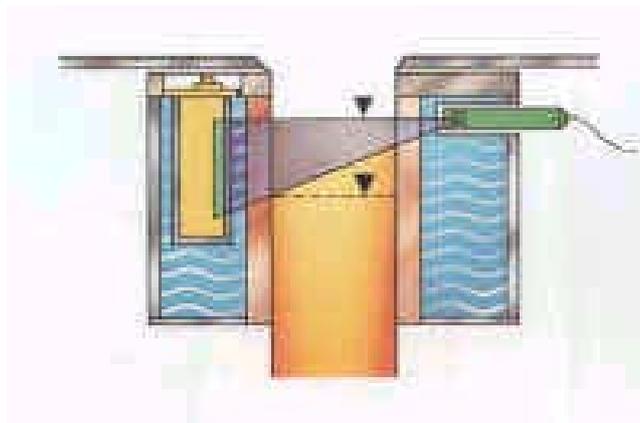


그림 3-2 내장형 액면 측정기

액면 측정기에는 여러 가지 종류가 있다. 공업용 계측기 중에서 가장 많은 종류를 가진 것이 액면 측정기라 할 수 있는데, 온도계, 유량계와는 달리 표준화가 되어 있지 않다. 액면 측정기의 종류로는 액체용, 분체용, 접촉식, 비접촉식, FLOAT식, 압력식 등이 있다.

(2) 두께 측정기

두께 측정기는 미국의 NDC 사와 일본의 Toshiba 사 등에서 여러 가지 종류의 제품을 생산하고 있다. 그림 3-3은 방사선의 후방산란을 이용한 source 일체형 두께 측정기 type의 원리를 나타낸 것이고, 그림 3-4는 방사선의 투과를 이용한 source 분리형 두께 측정기를 나타낸 것이다. 두께 측정기는 측정대상 물체의 종류에 따라 검출기의 종류도 아주 다양하며, 방사선의 종류(gamma선, X-선, β -선 등)에 따라 두께 측정기를 밀도, 면질량 등의 측정에 응용할 수 있는 제품으로 생산 판매하고 있다. 실제 산업체에서는 생산 공정의 요소요소에 두께 측정기를 설치하여 전 과정을 자동화 시스템으로 제품을 생산하고 있다. 두께 측정기의 핵심 부품인 CsI(Tl) 단결정 섬광체는 지금까지 알려져 있는 섬광체 중에서 단위체적당 γ 선 검출효율과 단위에너지당 광수율이 가장 큰 것 중의 하나이다.[4]

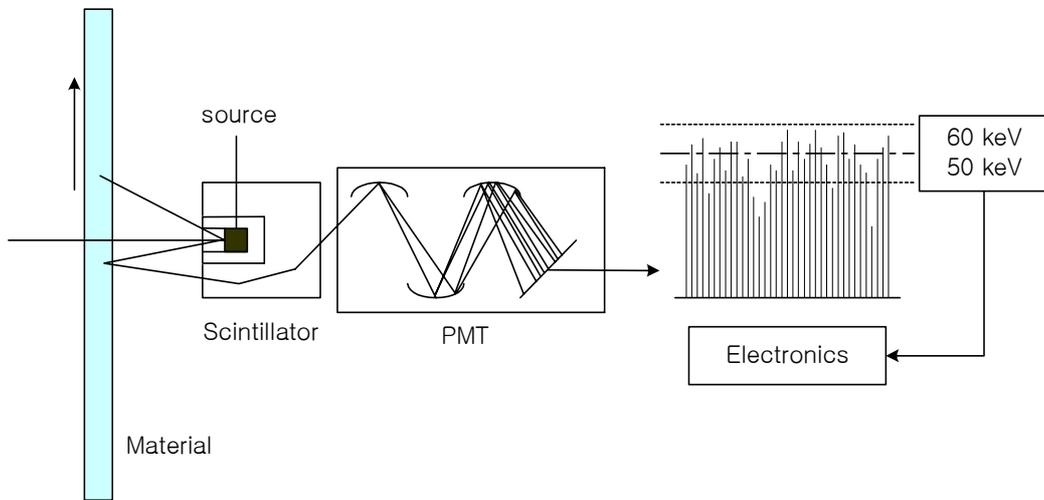


그림 3-3 Source 일체형 두께 측정기의 원리.

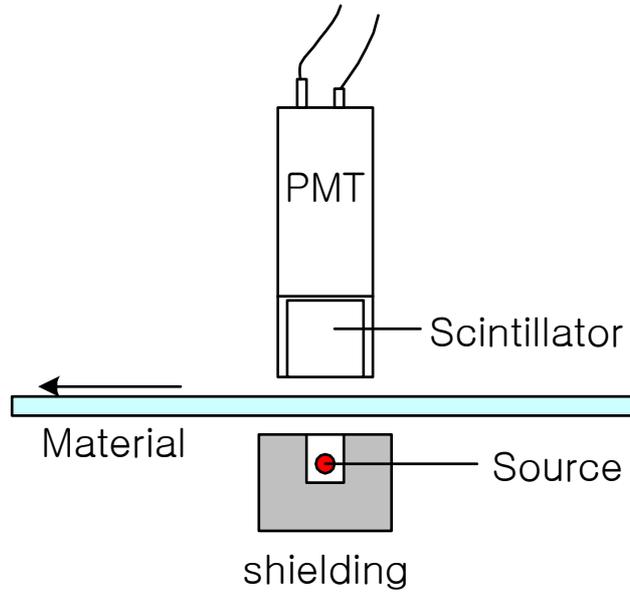


그림 3-4 Source 분리형 두께 측정기.

(3) 밀도 측정기

밀도 측정기의 원리는 감마선의 흡수원리에 기초를 두고 있다. 그림 3-5는 밀도 측정기의 원리를 간략하게 그린 것이다. 방사선을 이용한 밀도 측정기는 측정기를 대상 물질에 삽입하거나 접촉시키지 않고 측정이 가능하고, 배관이나 용기 속의 액체 및 고체 등 내용물 측정이 가능하며 산, 알칼리, 용액, 부유물 등의 측정이 가능한 특징을 가지고 있다. 방사선원은 Cs-137을 주로 사용하고, Co-60과 Am-241 선원은 특수 물질의 밀도를 측정할 때 사용한다. 밀도 측정기용 방사선 검출기는 NaI(Tl) 섬광검출기를 주로 사용한다.[8]

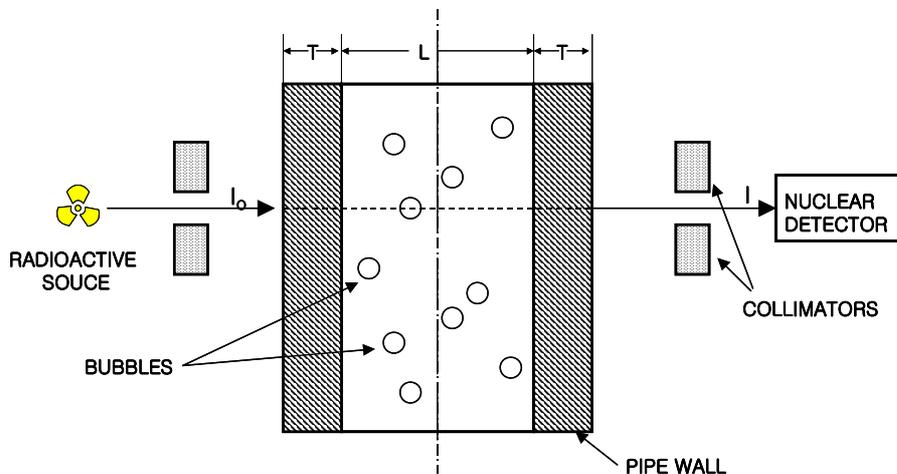


그림 3-5 밀도 측정기의 원리

(4) 단위 중량(Basis Weight) 측정

단위 중량 측정에 사용되는 일차적인 방법은 베타선 투과(beta-gauge transmission) 기법이며 기본 기술은 그림 3-6과 같다. 베타 입자는 종이에 의해 감소하며 투과된 방사선은 ion chamber에 의해 감지된다.[9]

베타선 측정기술은 베타선 감소가 장치에 거의 무관하게 발생하기 때문에 온라인 측정방법이 등장한 초기부터 이용되었으며, 방사선 동위원소가 매우 안정적이고 단순하며 견고하기 때문에 많이 이용되어 왔다.

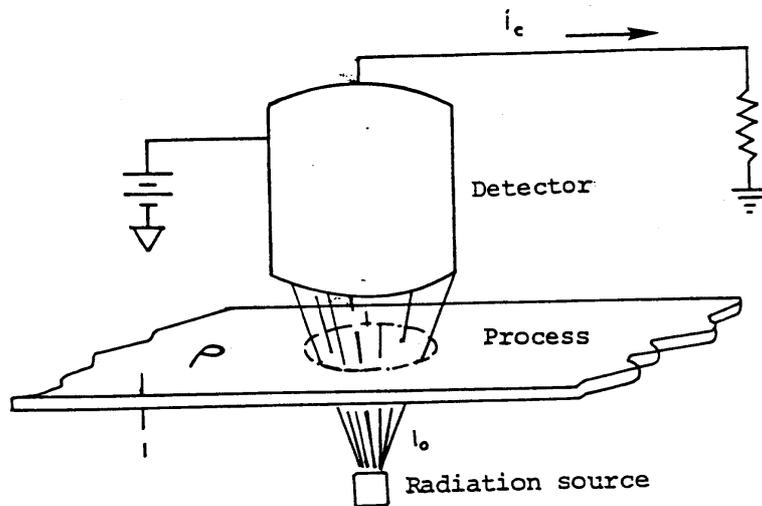


그림 3-6 단위 중량 측정을 위한 기본적인 베타선 계측 구조

(5) 습분 측정(Moisture Measurement)

온라인 습분 측정에 성공적으로 사용된 기술이 몇가지 있다. 다수의 전자파(electromagnetic-radiation) 기술을 포함하는 초기 연구는 1960년대 초기에 고주파(radio-frequency) 기술을 개발하기에 이르렀다. 좀더 복잡한 적외선 습분 측정이 1970년대에 개발이 진행되었으며 1970년대 후반 마이크로파(microwave) 기술의 응용이 실용화되었다. 고주파 에너지를 이용한 전형적인 습분 측정기 구조는 접촉식이며 기본적으로는 구동장치를 가진 탐침(probe), 감지기 및 접지된 전극 등이다.

현재는, 적외선(infrared), 고주파(radio-frequency), 마이크로파(microwave) 기술을 사용한 종이의 습분 측정은 성숙되고 개선되어 특정 응용 분야에 최적의 정확도를 가지고 활용되고 있다.

(6) 분진 측정(Ash Measurement)

종이의 분진 측정에는 저에너지 X-선 측정기법이 유일하다. 이는 분진에 의한 저에너지 X-선의 감소 메커니즘 때문이다. 베타선 감소(산란)에 비해 X-선 감소 메커니즘은 흡수이며 X-선은 원자를 이온화시킴으로써 반응한다. X-선은 원자의 전자(atomic electron)에 그 에너지를 전달하고 없어진다. 다른 궤도껍질(orbital shell)의 전자는 서로 다른 정량적인 에너지에 의해 원자에 묶여 있기 때문에 감소 계수(attenuation coefficient)는 상이한 궤도껍질(orbital shell)의 전자를 이온화시키는데 필요한 특정 에너지 준위에서 불연속성을 나타낸다.

X-선관의 스펙트럼은 종 모양이며 양극 전압에 의해 고에너지쪽이 제한되고, 저에너지 쪽은 X-선관 창(tube window)의 흡수에 의해 제한된다. 양극 고전압의 조정으로 스펙트럼의 이동이 가능하다. 이러한 스펙트럼의 이동으로 두 성분의 최대 분자수 요소(티타늄/점토 혼합의 경우 티타늄, 백악(chalk)/점토 혼합의 경우 칼슘)에 대한 K-edge에 스펙트럼이 걸쳐 있게 하면 분진의 조성에 관계없이 동일한 감소지수를 얻을 수 있다. 이러한 조성과의 무관성은 X-선 분진 측정의 기반이 된다.

2. 노심 핵계측

(1) ^3He Counter

중성자는 양성자, 알파입자 등과 같은 에너지를 가진 하전입자를 발생하는 핵반응을 통해 계측된다. 사실상 모든 형태의 중성자 계측기는 이 변환을 수행하도록 설계된 표적물질과 일반적인 방사선계측기와 결합하여 구성되어 있다. 대부분의 재료에서 중성자 반응에 대한 단면적(Cross section)은 중성자에너지의 함수이므로, 다른 에너지에 대해서는 다소 다른 기술이 발달해 왔다. 약 0.5 eV 카드뮴 컷오프 아래는 통상적으로 열중성자(Slow neutrons)영역이라고 불린다. 이 영역에서는 주로 전량 계측을 위한 것이 많고, 에너지 분석은 일반적으로 복잡한 연구목적용 장비가 필요하게 된다.

중성자의 에너지가 증가할수록 중성자의 반응확률은 낮아진다. BF_3 관은 빠른 중성자(Fast neutrons)에 대해서 매우 낮은 계측 효율을 가지고 따라서 거의 사용되지 않는다. ^3He Proportional counter는 열중성자와 고속중성자 모두에 유용하다. 고속중성자 측정장치는 적절한 계측 효율을 가지는 장치가 되기 위해서 변형되거나 완전히 다른 계측방법을 사용해야한다.

(2) SPND(Self Powered Neutron Detector)

원자로에서 중성자를 측정함으로써 위치에 따른 출력분포와 핵연료의 연소도를 측정하는 데에는 주로 SPND(Self Powered Neutron Detector)를 사용한다. 노내 핵계측 기술은 안전한 원자로 운전 및 제어에 필요한 정보와 신호를 얻기 위한 필수 기술로서 중요성을 가진다. SPND는 다음과 같은 특성을 갖고 있다.[10]

- 전원 공급이 필요 없다.
- 간단하고 견고한 구조
- 온도와 압력 하에서 양호한 안전성
- 낮은 burn-up
- 저 민감도에 따른 제한된 동작범위
- delay response가 길다.

SPND는 전기신호용 동축케이블의 중심 도선에 중성자가 흡수되면 방사화 되고, 방사된 방사선 동위원소의 베타 붕괴에 의해 방출되는 베타선이 실드 선에 도달함으로써 중심 도선에는 전자가 부족하게 되어 중심 도선은 + 전위를 보이고, 실드 선에는 전자 공급에 의해 - 전위가 된다는 원리를 알고 1964년 처음으로 개발되었다.

전형적인 SPND의 구조는 그림 3-7과 같이 방사선과 반응하는 에미터(emitter), 에미터와 콜렉터 사이에 전기적인 절연물인 Al_2O_3 혹은 MgO 의 절연체(insulator)가 채워지고, 인코넬 재질의 콜렉터(collector)가 동축 형상을 하고 있다.

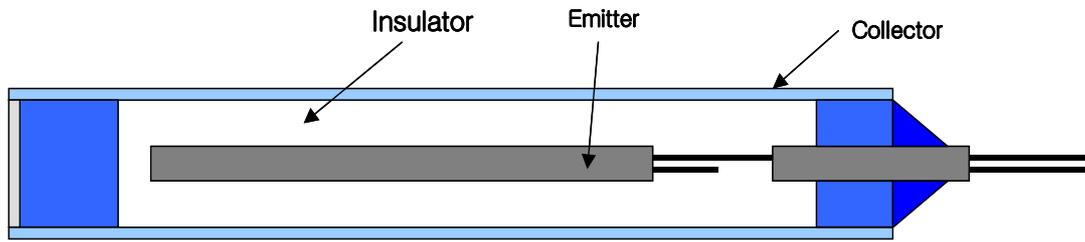


그림 3-7 SPND의 구조

SPND의 에미터는 사용되는 재료의 종류에 따라서 반응특성이 달라지는데 응답 특성에 따라 Delayed respond SPND와 Prompt respond SPND로 나눌 수 있다.

3. 의료용 방사선 진단장비

방사성동위원소를 이용한 진단 및 치료 분야를 핵의학 분야라 한다.[11] 핵의학 분야는 혈액을 채취한 후 동위원소를 이용하여 각종 혈액 성분을 검사하는 체외 검사 (in vitro), 진단목적에 따른 의약품을 동위원소와 표지하여 인체에 주사한 후 즉시 또는 일정한 시간을 기다렸다가 몸 속에 분포한 방사성의약품으로부터 방출되는 감마선 또는 X-선을 계수하거나 영상을 얻어서 진단하는 체내 검사, 동위원소에서 발생하는 에너지가 암 등의 세포 내에서만 에너지를 방출하고 투과력이 매우 적어 암 치료 등에 이용하는 치료분야, 동위원소를 계수하고 영상을 만들어내며 동위원소가 인체에 미치는 영향 등에 관련된 물리 및 기기 분야, 그리고 진단과 치료목적에 맞는 방사성의약품을 개발하는 화학분야로 나누어 볼 수 있다.

핵의학 물리분야 중 영상과 관련된 분야는 평면 영상을 얻느냐 또는 단층촬영 영상을 얻느냐에 따라 감마 카메라 또는 방출단층촬영장치로 나눈다. 또한 영상을 얻기 위하여 단일광자를 내는 동위원소를 이용하느냐 또는 양전자를 내는 동위원소를 이용하느냐에 따라 영상 시스템이 달라지며 단일광자를 영상화하는 경우 단일광자방출전산화 단층촬영장치(single photon emission computed tomography, SPECT), 양전자를 이용하는 경우를 양전자방출단층촬영장치(positron emission tomography, PET)라 부른다.

(1) 감마 카메라

동위원소의 의학적 이용을 위하여 동위원소의 세기를 알아내거나 동위원소의 분포도를 영상화할 필요가 있다. 검출기 scan형 영상에 대하여 검출기를 움직이게 하지 않고 영상화 할 수 있는 장치로서 X-선 영상관을 이용한 각종 카메라가 연구개발 되었다.[12] 1950년 전까지는 주로 동위원소의 세기를 계수하는 계수기나 프로브 등을 이용하였다. 동위원소 분포도의 영상화는 1951년 Benedict 등이 개발한 갑상선의 요오드 분포를 검사하는 섬광 검출기를 자동화하면서부터였다. 그 후 1958년 Hal O. Anger에 의해 섬광카메라가 탄생되었고, 그 기본 개념은 오늘날까지 가장 널리 사용되고 있다.

감마카메라는 생체내 생물학적 현상을 나타내는 방사성 의약품 분포를 영상으로 표현할 수 있어 생체현상 규명이나 질병진단 목적으로 널리 사용되고 있다. 감마카메라 영상은 방사성 동위원소에서 방출되는 감마선과 섬광결정(일반적으로 NaI(Tl)섬광결정)과의 상호작용, 즉 광전효과와 콤프턴 산란 등에 의해 발생된 신호를 적절한 전자회로를 사용하여 처리한 후 컴퓨터를 통해 감마선 검출 위치를 영상으로 표현하여 얻어진다.

현재 사용되고 있는 일반 감마카메라는 검출기 크기(폭:약 50~70cm)가 전신 영상획득에 적합하도록 설계되어 있다. 하지만 커다란 검출기를 구성하는 섬광결정과 여러 개의 광전자 증배관, 복잡한 전자회로는 제작하는데 많은 비용이 필요하여 생산가를 높이는 원인이 된다. Small Gamma Camera는 이러한 물리적 효과와 경제성을 고려한 높은 공간 분해능을 가지는 유방암 진단 전문 카메라 시스템이 NaI(Tl)섬광 결정과 위치 민

감형 광전자 증배관, 적절하게 구성된 여러 가지 전자회로, Analog to Digital 변환기, 그리고 개인용 컴퓨터를 이용하여 개발되었다. 그림 3-8은 Small Gamma Camera 구조를 나타낸다.

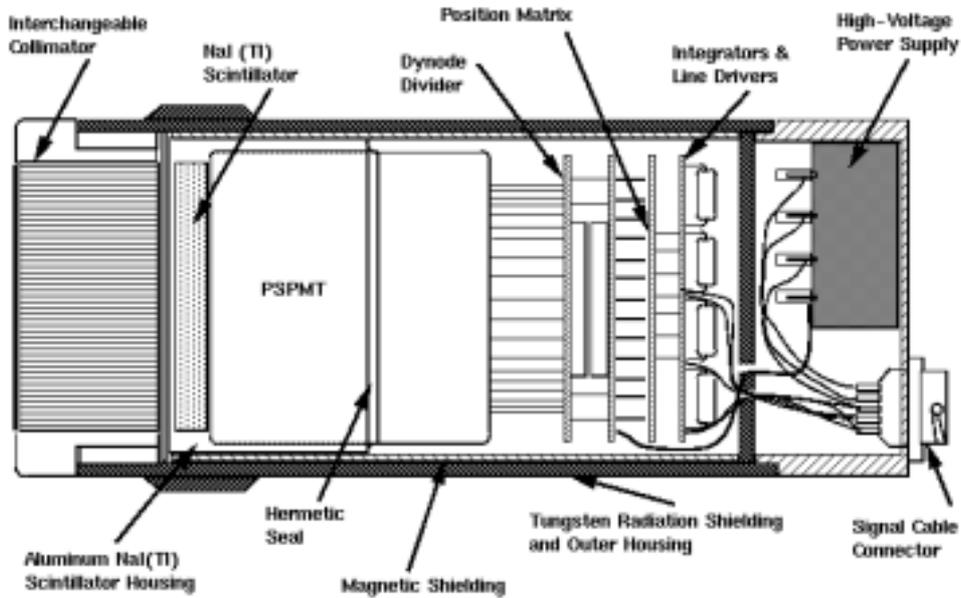


그림 3-8 Small Gamma Camera의 구조

(2) 단일광자방출전산화 단층촬영장치 (Single Photon Emission Computed Tomography; SPECT)

SPECT는 인체 내 기관의 기능을 검사할 수 있는 의약품에 영상을 얻을 수 있는 동위원소를 표지한 방사성의약품을 이용한다. 이를 인체 내에 주사한 후 검사 목적에 따라 주사 후 즉시 또는 일정시간을 기다린 후 영상을 획득한다. 기존의 단층촬영장치 (Computed Tomography, CT) 또는 자기공명영상장치(Magnetic Resonance Imaging, MRI)와 가장 큰 차이는 이들이 해부학적인 정보를 제공하는 반면에 SPECT는 기능적 정보를 제공한다는 것이다.[11, 12]

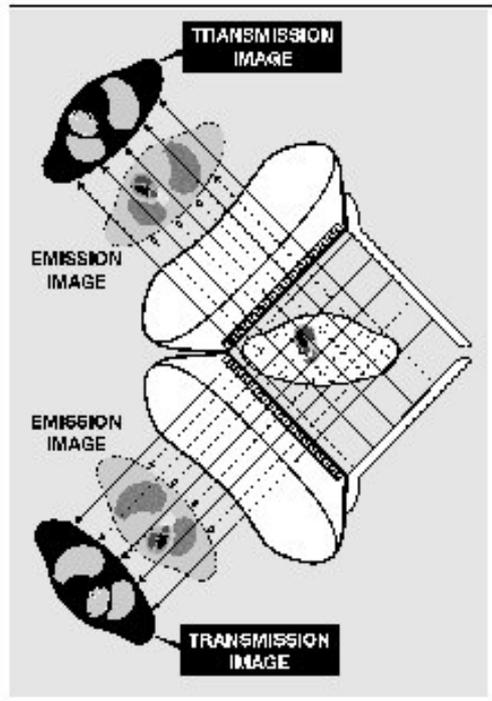


그림 3-9 SPECT의 개요도

핵의학 검사에 이용하는 동위원소가 분포된 곳에서는 4π 방향으로 감마선 또는 X-선이 방출된다. SPECT는 여러 각도에서 검출기를 이용하여 투사영상을 획득하여 2차원적 또는 3차원적인 동위원소의 분포도를 영상화하는 것이다. 주어진 각도에서 투사영상을 얻을 때 감마선 또는 X-선 한 개에 대해 어느 방향에서 얼마만한 에너지가 방출되고 있는가를 검출하여야 한다. 가장 일반적인 방법으로 위치 정보 곧 감마선 또는 X-선이 어느 방향에서 방출되는가를 알아내기 위해 NaI(Tl) 섬광검출기를 이용한다.

(3) 양전자방출 단층촬영(Positron Emission Tomography; PET)

양전자방출 방사성동위원소에서는 직접 감마선이 방출되지 않고 일단 양전하(positive charge)를 띤 전자(electron) 즉, 양전자가 방출되어 이 양전자가 매우 짧은 거리를 조직내에서 비행하는 동안 운동 에너지를 상실하여 정지하고 음전하(negative charge)를 띤 보통의 전자와 결합한다. 이 소멸반응 과정에서 두 전하를 띤 입자가 질량을 손실하면서 0.511 MeV의 에너지를 갖는 두 개의 감마선을 180도 방향으로 방출하는데 이를 검출하여 영상을 구성하는 장치가 양전자방출 단층촬영 장치이다.[11, 12]

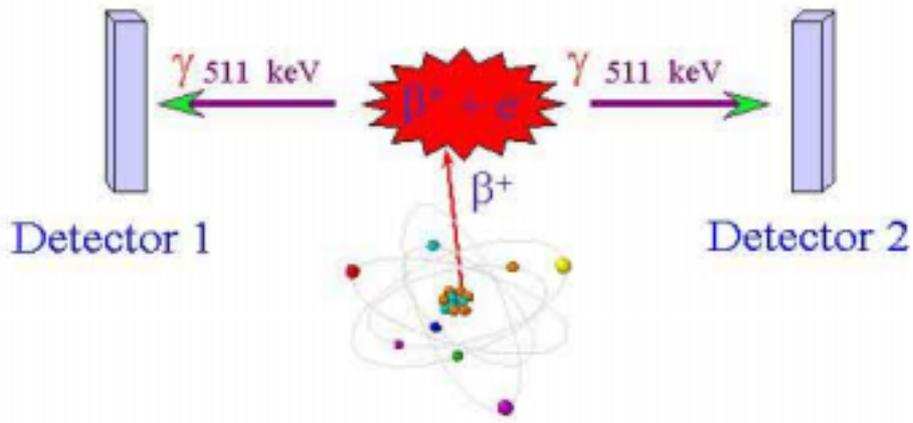


그림 3-10 PET의 일반적인 원리

동시에 이 감마선들을 검출하기 위해서는 서로 대칭되는 짝수의 섬광카메라를 쌍으로 이용하거나 짝수개의 원형 배열 검출기를 써야 한다. 이 원형 배열 검출기 세트의 수는 단층상의 수를 결정하며, 작고 민감도가 높은 소자의 개발에 따라 점차 많은 단층상을 구성할 수 있는 장치가 실현된다.

양전자 방출체에서 발생하는 감마선을 검출하는 PET 스캐너 검출 시스템은 수 만개의 섬광결정(scintillator), 광증배관(photomultiplier tubes) 그리고 동시계수 회로 등으로 이루어져 있다. 섬광결정으로는 NaI(Tl), BGO (bismuth germanate oxide)가 상용화된 PET 스캐너에 사용되고 있으나, 밀도와 유효원자번호가 크고 511 keV 감마선에 대한 저지능(stopping power)이 우수한 BGO가 많이 사용되고 있다.

PET는 SPECT에 비하여 주변 보조 장치가 많아야 한다. 즉 ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F , ^{68}Ga , ^{75}Br 등 PET 검상에 가장 많이 사용되는 양전자 방출 방사성 동위원소는 반감기가 짧기 때문에 PET기기 부근에서 곧바로 이 동위 원소들을 생성할 수 있는 사이클로트론이 있어야 한다.

검출된 감마선량을 이용하여 영상을 재구성하는 방법은 SPECT의 경우와 거의 동일하다.

4. 비파괴 검사 장비

(1) Computed radiography(CR)

CR은 기존의 screen/film system 대신에 휘진성 형광체인 영상판(imaging plate, IP)을 사용하여 촬영하며, IP에 축적된 X-선 정보에 laser beam을 주사하여 analog 신호를 digital 신호로 변환하고, 그것을 영상처리 하여 다시 laser beam으로 필름에 주사하여 기록하는 영상화 시스템이다.[12, 13] 그림 3-11은 CR의 구성을 간략하게 나타내고 있다.

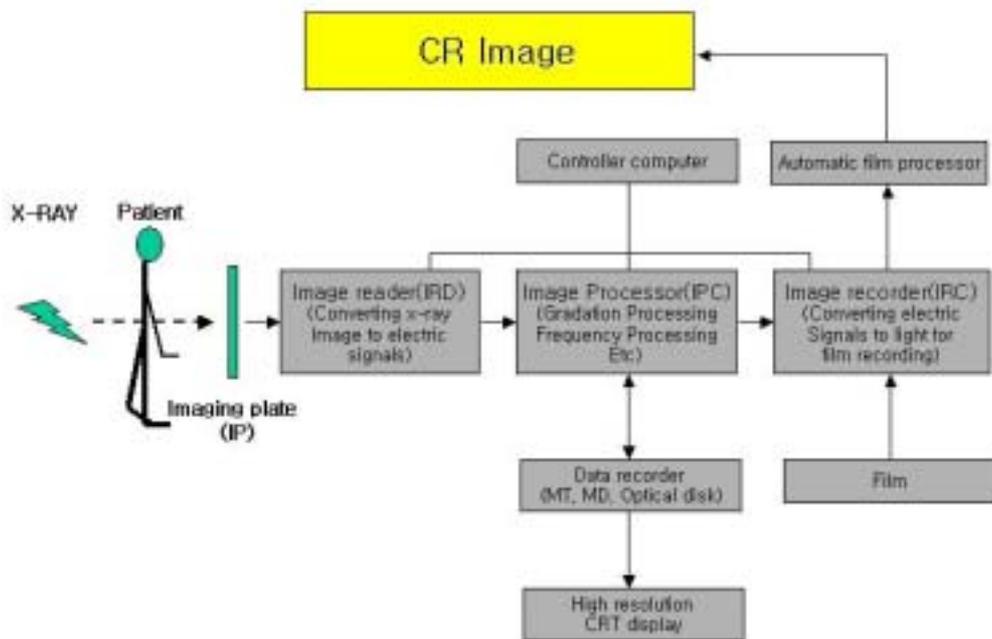


그림 3-11 CR의 구성도

CR은 다각적인 진단이 가능하고, 동일한 영상의 질을 획득할 수 있다. 그리고 업무의 효율성을 높일 수 있고, Radiation dosage가 작으며 Data base 보관으로 필름 분실에서 환자의 진료기록이 유지된다. PACS(영상수록 및 전달체계)에 손쉽게 적용 가능하다는 장점이 있다. 그러나 CR은 임상적용기간이 필요하며 실제 사이즈보다 작은 영상 이미지와 잘못된 설정으로 심한 오차발생 가능성 등의 단점도 가지고 있다.

(2) Scintillator-Charge coupled device(CCD) 결합형 Digital Radiography(DR)

DR은 조사된 X-선량에 비례하는 전기신호를 발생하여 이를 디지털화하여 컴퓨터에 전송하여 이를 저장관리하며 고해상도 모니터에 표시할 수 있게 하는 것을 기본 구

조로 삼고 있다. 기존의 X-ray시스템은 일반적으로 필름을 사용한다. 현상이라는 단계를 꼭 거쳐야 하고, 디지털화하려면 스캐너등을 이용하여 현상후의 데이터를 디지털화하여야만 한다.[12, 13]

하지만 DR시스템중의 한 종류가 되는 Digital X-Ray Imaging System을 이용하면 이런 단계를 모두 생략하고 빠른 시간 안에 원하는 이미지를 볼 수 있다. Digital X-ray Imaging System을 구성하기 위해서는 Scintillator와 CCD 카메라만으로 가능하고, 원하는 X-선에 반응하는 Scintillator를 찾고, 해당 Scintillator의 속성으로써 그 광량을 분석하는 것만으로 비교적 쉽게 이 시스템을 만들어 볼 수 있다. 시스템의 구성은 X-ray선원, Scintillator, CCD카메라(긴 노출시간을 고려하여 실험실의 액체 냉각형 시스템을 사용), 분석용 소프트웨어와 컴퓨터로 되어있다.

DR은 조사된 X-선이 감응물질을 거쳐 전기신호로 변환되는 과정에서 어떤 물질을 사용하느냐에 따라 직접방식과 간접방식으로 나뉜다.

(3) Image intensifier 영상 증배관

재래투시방법은 투시영상의 질이 낮고, 밝기가 적당하지 않는 문제점이 있다. 예전부터 투시자들은 역시 이러한 점을 파악하고 있었지만 적당한 대책을 세우지 못하였으나 X-선 발견이래 무려 50년이 지난 1952년 Wedtinghouse와 Philips 사에서 X-선 영상증배관(X-ray image intensifier)를 개발하여 기술적인 돌파구를 열게 되었다.[13]

영상증배관은 자신의 진공도를 유지하기 위한 자동장치가 부착되어 있는 진공관으로 그림 3-12와 같이 구성되어 있다.

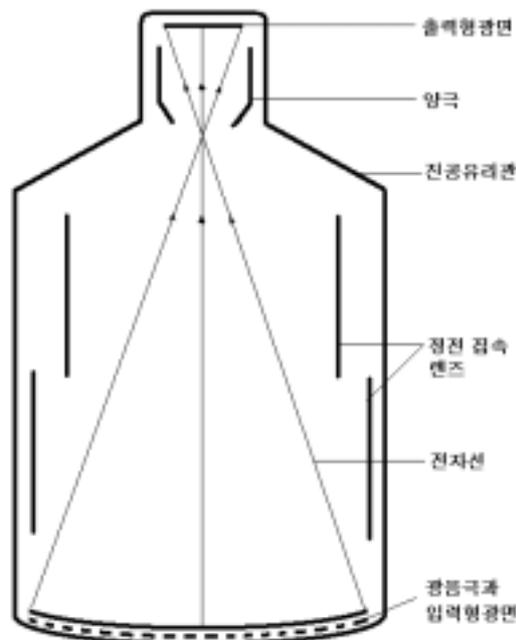


그림 3-12 X-선 증배관의 구조

5. 환경 방사선 및 우주선 측정

(1) RMS(Radiation Monitoring System)

원자력발전소 방사선구역에서 작업을 할 때는 작업장소의 방사선준위와 작업자가 과거에 받은 방사선량을 확인한 후 작업을 허가한다. 방사선구역에서 작업을 할 때는 열형광선량계와 필름배지 등의 측정기로 항상 피폭선량을 측정함은 물론 내부피폭에 대해서도 전신방사능계측기로 측정하고 있다.

(2) ERMS (Environmental Radiation Monitoring System) 환경방사선 감시시스템

환경방사선 감시시스템은 핵시설의 주변 환경에서 방사선량을 측정하고 감시하는 시스템이다. 원자력발전소는 우라늄을 연료로 하여 전기를 생산하는 곳이므로 운전과정에서 방사성물질이 발생한다. 이러한 방사성물질이 주변 환경으로 나가는 것을 방지하기 위하여 원자로건물을 여러 겹으로 밀폐하는 한편 감쇄, 여과, 증발, 고체화 등 여러 과학적인 방법으로 철저하게 처리, 관리하고 있다. 전력회사는 발전소 주변마을에 환경방사선 감시기를 10여 군데 설치하여 24시간 연속 감시하며, 열형광 선량계를 40여 곳에 설치하여 그 지역의 방사선량을 주기적으로 점검하고 있다. 또 원자력발전소 주변의 해저토, 토양, 농작물, 수산물, 축산물 등 여러 가지 시료를 채집하여 방사능을 분석 평가함으로써 환경이 안전하게 보존되고 있음을 확인해나가고 있다.

(3) 라돈 검출기

라돈은 1990년 초기에 발견된 원자번호 86, 반감기 3.82일인 방사성 기체 원소이며, 지각에 널리 분포하고 있는 우라늄-238의 6번째 자핵종에 해당한다. 지각을 구성하고 있는 토양, 암석 및 이들을 사용한 건축자재에는 라돈의 모핵종에 해당하는 Ra-226이 포함되어 있으며, 토양 1g에서의 라돈 방출속도는 대략 20nCi/sec 정도로 알려져 있다.

1950년대 이후 라돈이 인체에 위해할 수도 있다는 판단하에, 미국 등 선진 외국을 중심으로 호흡에 의한 라돈 방사선의 인체에 대한 영향을 파악하기 위한 연구가 본격적으로 착수 되었으며, 1980년대 이후 석유 위기 이후 에너지 절약형 건축물이 등장하면서 라돈에 대한 우려와 관심이 일반인에게 집중되기 시작했다.

(4) 우주선 탑재 검출기

우리별 3호 인공위성에는 과학 탑재체로 SENSE(Space Environment Scientific Experiment)가 탑재되어 궤도상에서 여러 실험을 수행하고 있다. 이 SENSE module에

는 고에너지 입자 검출기(High Energy Particle Telescope ; HEPT)가 탑재되어 있다. HEPT의 검출원리는 $\Delta E - E$ Telescope 방식으로, 태양풍에 의한 고에너지 양성자 및 전자, α -입자를 측정하도록 설계되었다. 즉, 정량적으로 지구 자기권의 고에너지 입자의 생성, 소멸, 변화 등에 대한 정보를 얻을 수 있다. 그림 3-13은 HEPT의 Particle telescope 구조를 나타낸다.[14]

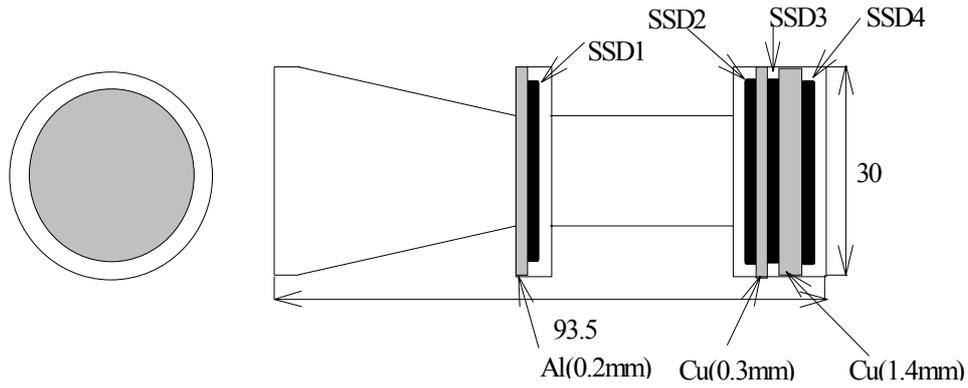


그림 3-13 HEPT의 기계 구조부

6. Security System

(1) 핵물질, 화학물질 탐지 장치

핵무기에 쓰이는 U, Pu 등의 방사성 동위원소 핵종을 탐지하고 분석할 때는 그 핵종이 자발적으로 붕괴하면서 방출하는 특성 감마선을 계측하는 방법을 사용한다(CANBERRA, U-Pu Inspector.). 그러나 화학무기와 같이 안정원소로 이루어진 물질의 성분을 비파괴적으로 신속히 분석할 때는 외부에서 중성자 등의 방사선을 시료에 입사하여 방출되는 2차 방사선을 계측하여 분석하여야 한다(CANBERRA, U-Pu Inspector.). 또한 토양이나 지하수 등의 환경 시료의 오염을 측정하는 경우에도 방사선 계측 방법을 사용하여 분석한다. 이러한 장치들은 시료 채취 과정이 없이 비파괴적 방법으로 결과를 얻을 수 있으며, 각각 적용분야가 다르지만 방사선(감마선) 계측을 통하여 성분 및 농도를 분석하는 공통점이 있다. 따라서 계측된 방사선 스펙트럼으로부터 핵종 분석 결과를 도출하는 기술이 가장 중요한 요소가 된다. 즉, 상용화된 방사선 계측장비를 이용하는 이러한 감마선 핵분광학 장치의 핵심기술은 계측된 감마선 스펙트럼으로부터 원소의 성분 및 농도를 결정하는 Algorithm 및 S/W 기술로서 응용분야가 매우 광범위하다.

감마선 핵 분광학 기술을 이용한 원소 분석 기술은 국외에서는 CANBERRA의 U-Pu Inspector, EG&G ORTEC의 PINS Chemical Assay System 등으로 상용화되어 있는 단계이다. 핵물질의 사찰 및 미육군의 화학무기 검색에 사용되고 있으며, 환경 분야 등 인접 분야에서 사용할 수 있는 장치를 점차 개발하고 있다.

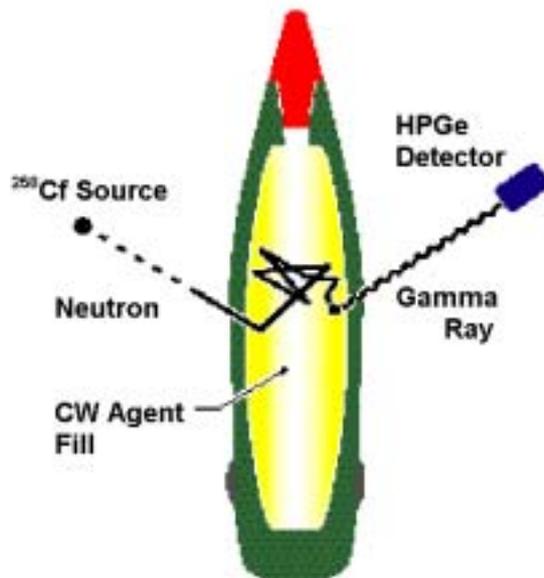


그림 3-14 핵물질 탐지의 원리

(2) 폭약 탐지 장치

Nuclear Technology를 이용한 폭약 탐지기술은 정확도면에서 다른 탐지기술에 비해 큰 장점을 가지고 있다. 이 방식은 폭약 내의 성분인 질소 또는 염소와의 핵반응을 이용하는 것으로 세부기술 종류는 다음과 같다.

- Nuclear Quadrapole Resonance (NQR)
- Thermal Neutron Analysis (TNA)
- Gamma Ray Analysis

이러한 고난도, 고부가가치 기술을 이용한 탐지장치의 개발은 이미 다른 분야에서 상용화된 기술을 폭약탐지장치에 접목시킨 것으로 주로 지뢰 탐지 장치로 활용하기 위하여 주로 대학교, 국립연구소 및 벤처기업에서 연구가 진행되고 있다.

Nuclear Quadrapole Resonance (NQR) 기술을 이용한 탐지장치는 1996년 미국 육·해군에 의해 지원되는 Defence Advanced Research Projects Agency (DAPRA) 계획 가운데 하나인 전자 개코 탐지장치 연구과제로 시작된 것으로, InVision Technologies와 Quantum Magnetic사에 의해 공동 개발중이다. 이 기술은 의료계에서 사용되고 있는 Magnetic Resonance Imaging (MRI) 기술과 매우 비슷하며 특별히 조정된 고주파 펄스를 이용하여 폭약을 탐지한다. 고주파 펄스와 폭약에 포함된 원소와의 반응을 이용하기 때문에 탐지 정확도가 높으나, 폭약에 포함된 주성분-RDX, TNT 등-에 따라 공명 메카니즘이 다양해지는 관계로 각각의 폭약에 대한 탐지 정확도에 차이가 있다. 탐지장치 가격이 낮고 RDX를 포함한 지뢰와 대전차지뢰에 대한 탐지 정확도가 높은 것이 장점이다. 그러나 TNT가 함유된 대인지뢰의 경우 고주파와 TNT의 복잡한 공명과정 때문에, 금속 대인 지뢰의 경우 금속에 의한 고주파 차폐효과 때문에 수신 감도가 낮고 잡음의 증가로 말미암아 탐지 정확도가 RDX를 포함한 대인지뢰에 비해 상대적으로 낮은 것이 단점이다. 현재 탐지 정확도가 높음에도 불구하고, 복잡한 공명과정에 대하여 근본적인 원리규명이 안된 상태이기 때문에 시제품 제작에 있어 문제점이 있다. 따라서 원리규명에 대한 연구가 심도 있게 진행되고 있으나 1999년이래 장치의 탐지능력 향상에 비해 원리규명은 별다른 진전이 이루어지지 않아 시제품 제작에 있어 답보상태에 놓여 있다. 원리규명과 별개로 최근 모든 종류의 폭약, 특히 소량의 TNT 및 금속 대인지뢰에 대한 탐지 정확도를 향상시키기 위해 형상 판별 능력이 뛰어난 X-ray images와의 복합 탐지 장치를 구성하는 방안과 더불어 수신장치와 분석장비의 효율을 극대화하는 연구가 진행되고 있다.

Thermal Neutron Analysis를 이용한 폭약 탐지장치는 neutron과 폭약 내의 화약성분인 질소와의 핵반응을 이용하여 폭약을 탐지하는 것이다. 따라서 탐지 정확도는 높다. 그러나, 중성자의 경우 근본적으로 질소(^{14}N) 등 폭약 구성원소의 중성자흡수 단면적이 매우 낮아 용량이 큰 대전차지뢰 탐지 정확도는 높으나, 상대적으로 대인 지뢰 탐지 능력이 낮아 다른 탐지기술과 복합적으로 사용되고 있다. 또한 강력한 중성자원이 요구되며 이에 따른 방사선차폐가 필요하다.

이 외에 광핵공명 흡수반응(Photo-nuclear Resonance Absorption Reaction)을 이용한 폭발물 탐지장치가 미국 Advanced Energy Systems사에 의해 상용화되어 현재 공

향, 항만에서 사용 계획 중에 있다. 또, 한국원자력연구소에서는 그림 3-15와 같은 광핵 공명 산란반응 원리를 이용한 지뢰/폭발물 탐지 장치를 개발하고 있다.

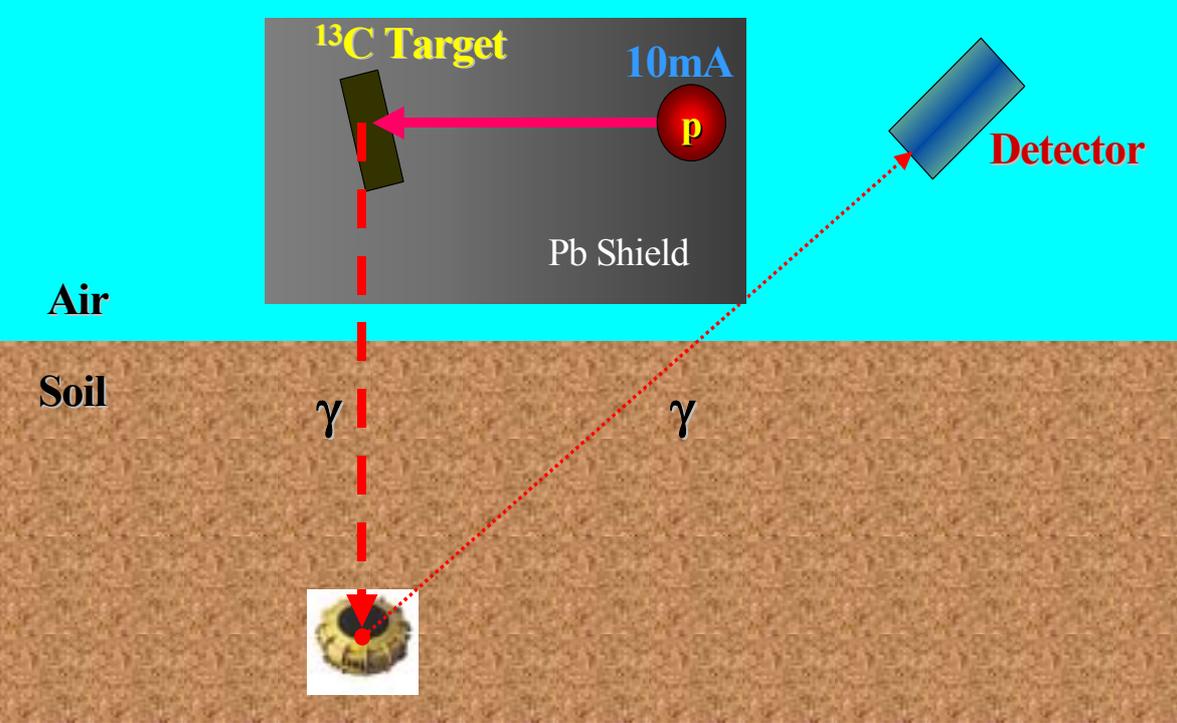


그림 3-15 광핵공명 산란반응 원리를 이용한 지뢰/폭발물 탐지 장치

7. 기초과학 실험

가속기가 발달하면서 핵/입자 물리 실험용 검출기 기술은 최근 수십 년 간 현저한 발전을 보이고 있다. 여기서 그 검출기들에 대한 몇 가지 소개를 한다.

(1) MWPC

기본적인 MWPC는 두개의 cathode 평면과 그 중심에 위치한 일정한 간격으로 놓인 anode wire가 만드는 평면으로 구성된다. wire의 간격은 2mm이고, anode와 cathode의 간격은 7 내지 8mm이다. 그림 3-16 A.에 이 구조가 개략적으로 도식되어 있다. 만약 cathode에 음전압이 걸린다면, 전기장은 그림 3-16 B.에서 보이는 것과 같이 발생한다.

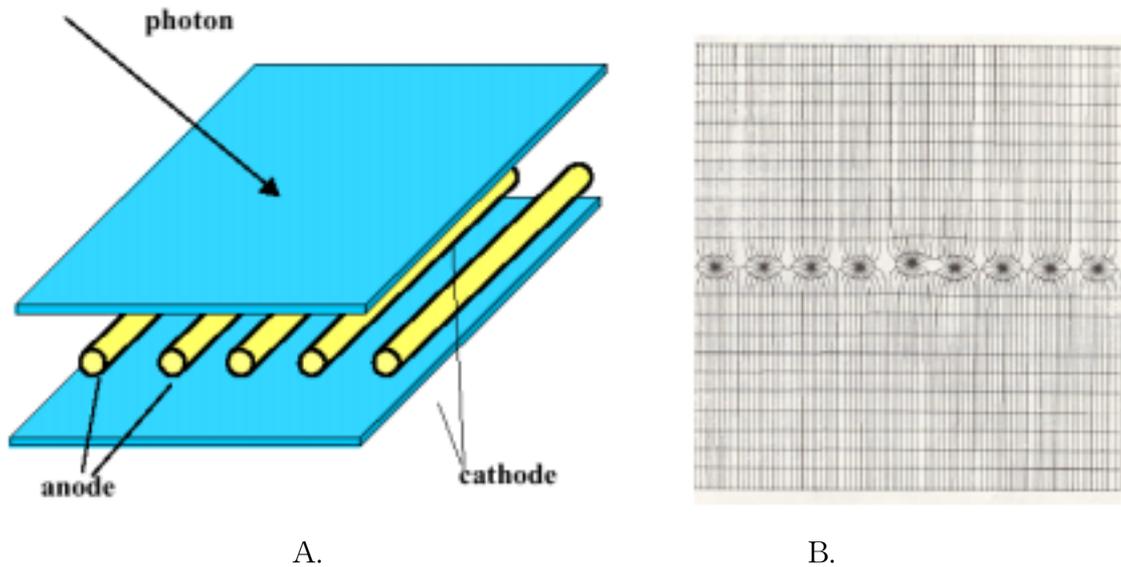


그림 3-16 A. MWPC의 기본적인 구조와 B. MWPC의 전기장선과 포텐셜

MWPC 내에 채워지는 기체는 간단한 비례 counter에 들어가는 기체와 같다. 그 기체는 Ar(75%), isobutane(24.5%)과 freon-13B1(0.5%)의 혼합물로 Magic Gas라 불리운다. 이 기체는 MWPC의 개발 초기에 발견되었으며, 10^7 에 가까운 이득을 제공한다.

(2) RPC(Resistive Plate Chamber)

RPC는 좋은 시간 분해능과 에너지 분해능과 위치 분해능을 가지고 있고, 검출효율이 좋다. 그림 3-17은 RPC의 기본 원리를 나타낸다.

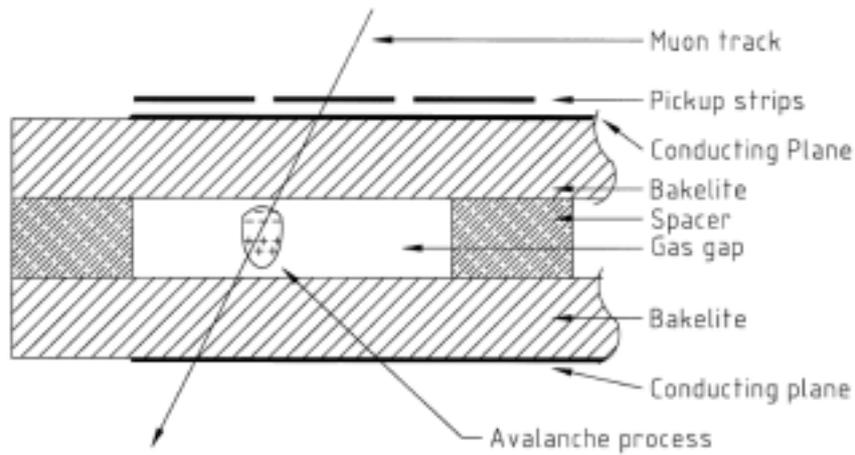


그림 3-17 RPC의 기본 원리

(3) Gammisphere

Gammisphere는 1991년 미국 LBNL(Lawrence Berkeley National Laboratory)에서 제작하여 1997년에 완성한 검출기이다. 총 110대의 BGO 컴프턴 억제형 HPGe 검출기로 구성이 되어 있다.[15] 고 스핀영역에서의 핵구조 연구와 우주선(Cosmic ray) 원인 규명 연구와 전기약력에 대한 연구 등을 수행하고 있다.



그림 3-18 반구가 결합된
감마스피어의 내부

(4) GRETA(Gamma-Ray Energy Tracking Array)

GRETA는 LBNL(Lawrence Berkeley National Laboratory)에서 개발 중에 있는 초고효율(~70 %)의 감마선 검출기 Array이다. 36개의 Segment로 구성된 HPGe 검출기

122대를 4π 로 배열한 것이다. 우수한 위치 분해능을 가지고, 고에너지 감마선(~15 MeV)에 대한 높은 효율과 에너지 분해능이 좋다.

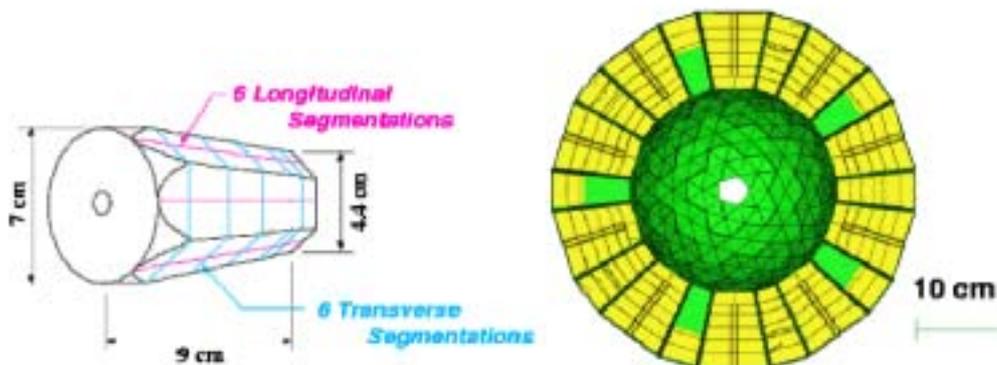


그림 3-19 HPGe 검출기의 모습과 4π 로 배열한 GRETA의 모습

(5) Clover 검출기와 Double-Sided Silicon Strip Detector (DSSSD)

ORNL(Oak Ridge National Laboratory)에서 개발된 첨단 검출기로는 CLOver Array for Radioactive ION beams (CLARION)의 Clover 검출기와 Double-Sided Silicon Strip Detector (DSSSD)가 있다.[16, 17, 18] 그림 3-20은 Clover 검출기로서 4개의 HPGe Crystal로 이루어져 있으며 각 검출기에서 발생된 신호를 모두 합하는 방식을 사용함으로써 Photo peak의 efficiency를 Co-60 감마선 기준으로 100%에서 150%이상까지 향상시킨다. 그림 3-20은 Clover 검출기 및 일반적인 Compton Suppressed Spectrometer로 이루어진 Ge Array 검출시스템의 모습을 보여준다.

Double-Sided Silicon Strip Detector (DSSSD)는 Drip line에 위치한 핵에서 방출되는 하전입자를 검출하기 위한 장치로서 4 cm 정사각형의 형태를 가지며 양쪽면에 각각 16, 40개의 Strip을 가지고 있다. 발생된 입자의 위치 및 에너지를 판독하며 최대 256개의 신호를 동시에 처리하기 위한 Compact 전자회로를 개발하고 있다. 그림 3-21에 보인 검출기는 DSSSD중의 하나로서 상업적으로 구매가 가능한 것이다.



그림 3-20 Clover 검출기

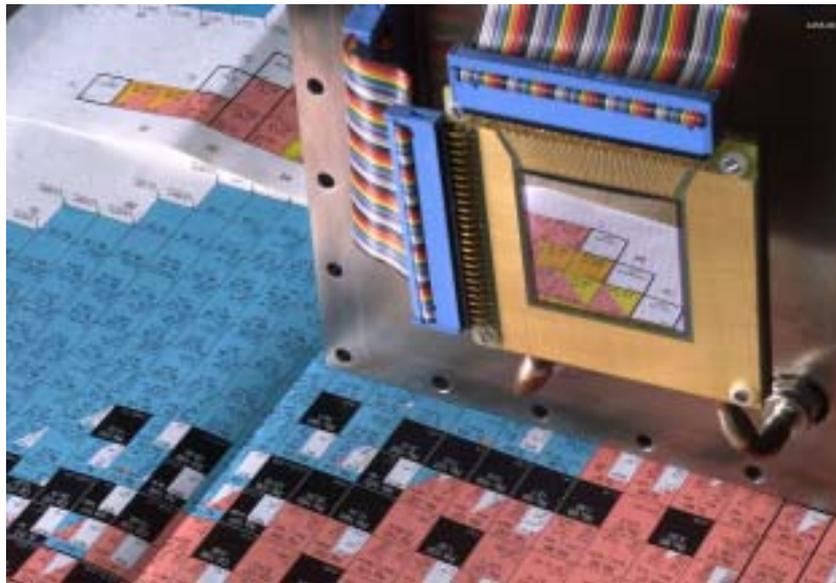


그림 3-21 입자 검출을 위한 DSSSD

8. 방사선 측정 표준화

(1) 이온 전류함

방사선량(Radiation dose)을 측정하기 위해서, 계측기의 반응은 흡수된 에너지에 비례하여야 한다. 이것을 수행하는 기초적인 계측기에는 이온함(Ion chamber)이 있다. 이온함은 조사단위(Exposure unit) 또는 뢰트겐 등의 작동정의에 기초하여 만들어 질 수 있으므로 조사선량(Exposure)을 계측하는데 쓰일 수 있다.[14]

이온 전류함은 기본적으로 두개의 전극으로 구성되어있고, 그 사이는 기체 증배(Gas multiplication)를 방지하기에 충분히 낮은 전위가 있다. 방사선에 의해 함의 내부에서 생성된 이온은 수집되어 외부 회로로 흐른다. 이온함은 이런 방식으로 무한대의 내부 저항을 가진 전류원처럼 작동한다. 원리적으로 Ammeter가 이온전류를 읽기 위해서 외부회로에 설치될 수 있지만, 이것은 대개 전류가 매우 작으므로 행해지지 않는다. 대신에, 10^{10} 오더의 높은 부하저항 R이 회로에 설치되고, 민감한 Electrometer로 그 저항의 전압강하를 측정한다.

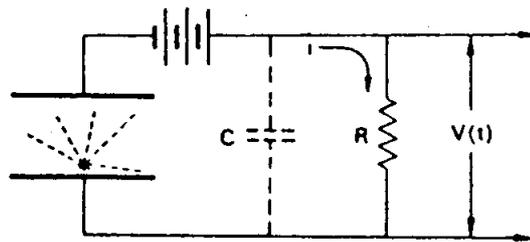


그림 3-22 이온 전류함의 작동원리

(2) 포켓 도시메타(Pocket Dosimeter)

포켓 도시메타라고 불리는 형태의 이온 체임버는 개인 피폭선량을 모니터 하는데 널리 쓰이고 있다. 두 가지 형태의 포켓도시메타가 대체로 사용되고 있다. 이 중의 하나는 콘덴서 타입으로서 간접판독방식(Indirect reading type)으로, 계측된 선량을 판독하기 위해서는 보조장치가 필요하다. 두 번째 형태의 포켓도시메타는 직접판독방식으로 Gold-leaf electroscope의 원리를 이용하여 작동한다.

포켓도시메타는 그 이름이 의미하는 대로, 주로 개인 피폭 모니터링용으로 사용되고, X-선 혹은 감마선에 피폭될 가능성이 있는 사람의 실제 조사량을 측정하기 위해 사용된다. 그러나 이것은 또한 조사 선량이 측정되어야하는 곳에 둬으로써 지역 모니터링에도 사용될 수 있다. 이를 위해서 하나 혹은 이상의 선량계를 일주일 이상동안 원하는 장소에 두어야 한다. 지역 모니터링의 경우, 더 크고 감도가 좋은 것을 사용할 수도 있다. 그런 체임버는 콘덴서 타입의 포켓도시메타와 같은 방법으로 전하 판독기와 함

께 사용되도록 설계된다.

(3) 필름배지(Film Badges)

개인피폭 모니터링에 널리 쓰이는 또 하나의 계측기는 필름배지이다. 이것은 Light-tight paper로 싸고, 적당한 플라스틱이나 금속 용기에 넣은 두개(X 혹은 감마 측정을 위함) 혹은 세 개(X, 감마, 그리고 중성자의 측정을 위함)의 치아 크기의 필름 조각을 하나의 묶음에 넣은 것이다. X-선과 감마선의 측정을 위한 두 개의 필름은 민감한 유제(Emulsion)와 상대적으로 덜 민감한 유제(Emulsion)를 포함한다. 이러한 필름 묶음은 라듐감마선 약 10 mR에서 1800 R의 조사범위에서 유용하다. 그 필름은 베타선에도 또한 민감하고, 베타선 선량을 측정하는데도 사용될 수 있다. 최대 에너지가 400 keV이상이 되는 베타에 대해서 약 50 mrad에서 약 1000 rad까지 된다. 적당한 필름과 기술을 사용해서 5 mrad에서 500 mrad까지의 열중성자 선량과 4 mrad에서 10 rad까지의 속중성자를 측정할 수도 있다.

(4) TLD 열 형광 선량계(Thermoluminescent Dosimeter)

Mn을 불순물로 가지는 CaF₂를 포함한 많은 크리스털(Crystal)과 LiF는 방사선에 조사되고 난 후 열을 가하면 빛을 발한다. 이것을 열 형광 크리스털이라고 한다. 방사선으로부터 에너지를 흡수하면 크리스털의 원자가 여기된다. 이때 열 형광 크리스털에 자유전자와 홀이 생긴다. 이것들은 결정 격자내의 불순물이나 결함에 트랩 된다. 크리스털에 열을 가하면 여기 에너지가 빛으로 방출된다.

열 형광 선량계는 약 10 mrad에서 100,000 rad까지의 범위를 가진 X-선, 감마선, 베타선, 전자, 양성자에 정량적으로 반응한다. LiF 형광체의 유효원자번호는 8.1이고 소프트 티슈의 유효 원자번호는 약 7.4이기 때문에, LiF 열 형광 선량계는 대체로 사람피부와 동등하다는 장점이 있다(Tissue equivalent).

IV. 중성자 검출기 개발현황

일반적으로 중성자는 중성자와 검출기내의 물질이 반응하여 하전 입자를 발생시키는 핵반응이나 탄성 산란 반응을 이용하여 검출한다. 이때 이 반응의 반응단면적은 가능한 커야하며, 반응에 참여하는 핵종은 자연계에서 쉽게 구할 수 있는 물질이어서 제작이 용이하여야 한다. 또한 중성자가 발생하는 환경에서 많은 양의 감마선이 동시에 발생하는 경우가 많으므로 감마선과 중성자를 구분할 수 있는 반응이 바람직하다.

중성자의 핵반응 단면적은 중성자 속도에 크게 의존하므로 중성자 에너지에 따라서 다른 검출기법이 적용된다. 중성자 에너지가 카드뮴 cutoff 에너지인 0.5 eV보다 적은 경우를 열중성자 검출 영역이라고 하며, 이 영역의 중성자 검출은 현재 핵융합로에서 나오는 중성자 검출과 연관되어 그 중요성이 특히 강조되고 있다. 이 때 핵반응에 의하여 발생하는 하전입자는 입사 중성자 에너지에 비하여 큰 운동에너지를 가지게 되므로 입사하는 중성자 에너지는 일반적으로 구할 수 없다.

중성자 에너지가 높은 경우 중성자와 핵반응이나 탄성 산란을 이용한다. 수소와 중성자 탄성산란의 경우, 산란에 의하여 많은 에너지가 중성자에서 수소로 전달할 수 있고 탄성 산란 단면적이 잘 알려져 있으며 크기 때문에 특히 많이 이용된다. 높은 에너지의 중성자를 측정할 경우 중성자 선속(flux)과 더불어 중성자 에너지를 측정할 수 있는 경우가 많다.

열중성자 검출에 많이 쓰이는 핵반응으로 $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ 반응이 있다. 이때 94 %의 핵반응으로 ^7Li 의 첫 번째 들뜬 상태가 만들어 지며, 나머지는 ^7Li 의 바닥상태가 만들어진다. 이 때 각각의 Q-value는 2.310 MeV와 2.792 MeV이다. 이 반응은 높은 에너지 중성자에 대한 낮은 핵반응단면적으로 인하여 주로 열중성자 검출에 많이 쓰인다. $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$ 반응과 $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$ 반응 역시 중성자 검출에 많이 이용되는 핵반응이다.

열중성자 검출에 많이 쓰이는 반응으로 ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu 와 중성자의 핵융합 반응 또한 많이 이용된다. 이 때 융합반응의 상당히 높은 Q-value로 인하여 감마선등 다른 배경계수와 중성자를 쉽게 구분할 수 있는 것이 이 반응의 큰 장점이다.

이러한 기존의 중성자 검출방법 이외에도 최근에는 궤적(track) 검출기, 영상판(image plate) 방법, 물방울(bubble) 검출기 등 다양한 방법들이 시도되고 있다.

중성자 검출기 연구와 개발이 주로 사용되는 영역은 다음과 같다.[19] 우선, 중성자 검출기는 핵융합 반응 연구에 중요한 역할을 담당하고 있다. 즉, 중성자 선속과 그 분포를 측정하여 플라즈마 반응률과 그 공간적 분포에 대한 정보를 얻을 수 있다. 14.1 MeV 중성자에 대한 스펙트럼 모양은 플라즈마내의 온도 분포에 대한 정보를 준다. 핵융합로 연구가 계속될수록 보다 발전된 형태의 중성자 검출기에 대한 요구는 더욱 커질 것이다.

핵발전소의 반응로 설계와 운용 연구를 위한 중성자 검출기 개발은 필수적이다. 특히, 노심 중성자를 검출할 수 있는 장비를 필요로 하고 있다. 방사성 폐기물 처리 및 방사선 안전 관리 분야 또한 중성자 검출기가 많이 쓰이는 영역이다. 우라늄과 플루토늄 동위원소를 민감하게 측정할 수 있는 검출기의 개발이 이 분야에서는 요구된다.

기초과학에서 중성자 검출기가 쓰이는 영역으로는 중성자를 이용한 핵반응 단면적 측정, 암흑물질(dark matter) 검출, 들뜬 핵 상태 연구, 중성자 빔을 이용한 연구, 우주 물리 등이 있다.

중성자 선량계(dosimetry) 역시 꾸준히 연구되는 분야중의 하나이다. 이 연구분야에서는 특정한 에너지 영역의 중성자 분포를 정확히 측정하고자 하는 연구가 계속되고 있다.

중성자 산란이나 회절을 이용한 연구, 방사선 투과 사진법, 단층 촬영 등에도 중성자 검출 개발이 요구되고 있으며, 중성자를 통한 고 분해능 영상을 얻을 수 있는 연구가 많이 수행되고 있다.

1. 가스형 중성자 검출기.

가스 검출기의 예로는 ^3He 튜브, fission chamber, MWPC(MultiWire Proportional Counter), MSGC(MicroStrip Gas Counter) 등이 있으며, 포획 반응(capture reaction), 핵분열 반응, 탄성 산란 등 다양한 반응을 이용한다. 또한 가스 검출기는 감마선과 구분이 용이하고, 수명이 길며, 방사선손상이 다른 검출기에 비하여 적으므로 핵발전소의 센서로 널리 쓰이고 있다. 검출하고자 하는 중성자 선속이 낮은 경우는 펄스모드 검출기가 사용되며, 선속이 높은 경우 current 모드 검출기가 사용된다.

(1) 붕소 비례계수기(Boron Proportional counter)

붕소 비례계수기는 열중성자의 측정에 쓰이며 BF_3 가스가 주로 많이 사용되고 있다.[1] 이때 튜브내의 압력은 주로 0.5 ~ 1.0 atm이다. 중성자와 붕소 핵반응의 Q-value가 열중성자 에너지에 비하여 크기 때문에 검출기로부터 나오는 스펙트럼은 입사 중성자의 에너지에 대한 정보는 주지 못한다. 따라서 검출기의 에너지 분해능은 중요한 사항이 아니다. 스펙트럼 모양은 검출기의 기하학적 구조에 의하여 결정되며, 검출기 제작에 가장 중요한 요소는 중성자 검출효율의 안전성을 찾는 문제이다. 검출기는 주로 원통형으로 만들어지며 주로 알루미늄이나 stainless steel로 만들어지는데, stainless steel은 배경계수가 적은 검출기를 제작할 때 많이 쓰이고 있다. 검출기가 쓰이는 환경에 따라서 온도에 따른 검출기의 안정성 역시 설계에서 고려되어야 할 중요한 사항이다. 중성자와 함께 발생하는 감마선이 비례검출기내에서 잃어버리는 에너지가 중성자에 의한 에너지 보다 낮으므로 중성자와 감마선을 쉽게 구분할 수 있다. 그러나 감마선 배경계수가 상당히 큰 경우, 감마선의 pile-up 효과로 인하여 감마선과 중성자의 구분이 힘들어지는 경우가 발생하기도 한다. 또한 감마선에 의하여 검출기내의 화학적 성분이 바뀌어서 중성자에 의한 peak의 크기가 줄어들기도 하며, 이 때 감마선과 중성자의 구분이 힘들어진다.

BF_3 를 가스검출기 내부 벽에 코팅하고 일반적으로 비례계수기에 많이 쓰이는 가스를 이용하는 방식도 쓰이는데, 이는 BF_3 가스가 아닌 보다 효율적인 가스를 사용할 수 있

는 장점이 있다. 특히 검출기의 빠른 시간분해능이 필요한 경우나 높은 감마선 선속에 의한 가스의 화학적 성분 변화를 막을 수 있는 검출기가 필요한 경우 많이 쓰이는 설계 형태이다. BF_3 코팅의 두께는 중성자와 붕소 핵반응에 의하여 발생하는 리튬과 알파 입자의 에너지를 고려하여 결정할 수 있다.

(2) Fission Chamber

열중성자와 핵분열 반응에 의하여 생기는 하전입자의 에너지(~ 160 MeV)는 다른 중성자 반응에 의한 하전 입자의 에너지보다 상당히 크기 때문에, 핵분열 반응을 중성자 검출에 이용할 경우 감마선 배경계수를 상당히 줄일 수 있다는 장점이 있다. 기본적인 설계 방법은 ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu 등의 물질을 검출기 내부 벽에 바르는 방법이다.

fission chamber를 펄스 모드로 사용할 경우 핵분열 반응에 의하여 발생하는 하전입자의 에너지 분포는 코팅된 물질의 두께에 크게 의존한다. 열중성자에 의해 발생하는 두 하전입자는 검출기내에서 서로 반대 방향으로 나아가게 되며 대부분의 검출기에서는 하나의 하전입자만을 검출할 수 있다. 그러나 두 개의 하전입자를 모두 검출할 수 있는 fission chamber가 설계되기도 하였다. 또한 핵융합 물질의 자연 붕괴에 의하여 발생하는 알파선 배경 계수를 없애기 위하여 동시 측정법(coincidence method)이 사용되기도 한다.[1] ^{239}Pu 를 사용할 경우 알파선에 의한 pile-up 효과가 나타나며 이를 줄이기 위하여 펄스의 폭이 짧은 검출기가 개발되었다.

fission chamber는 current mode로 핵발전기의 노심 내 검출기로 많이 쓰이고 있다. 이 때 검출기는 노심 내에 부착하기 위하여 소형으로 제작되며 stainless steel로 튜브를 제작하고 아르곤이 주로 검출기내의 가스로 쓰인다. 장기간 높은 방사선 선속아래에서 사용하기 때문에 다양한 설계상의 고려가 필요하다.

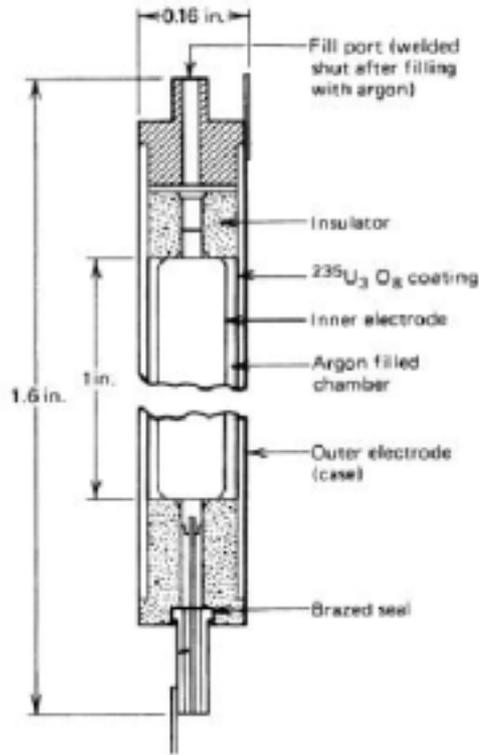


그림 4-1 중성자 측정에 쓰이는 전형적인 fission chamber 설계.[1]

(3) 이외의 검출기

^3He 는 열중성자와 핵반응에 의하여 573 keV 양성자와 191 keV 삼중수소가 만들어진다. 이 때 하전입자들의 에너지가 중성자와 붕소 핵반응에 의하여 만들어지는 하전입자 에너지에 비하여 작으며, 헬륨기체 내에서 하전입자의 에너지 손실이 적으므로 감마 배경계수에 의하여 만들어지는 낮은 에너지의 peak과 구분을 위한 고려가 필요하다. 즉, 핵반응에 의하여 만들어지는 하전입자가 검출기내의 가스로 인하여 에너지를 모두 잃지 않고 검출기의 벽에서 에너지를 잃을 경우, 긴 tail을 에너지 스펙트럼 상에 만들어 주는데(Wall 효과), 이를 막기 위하여 검출기의 크기를 충분히 크게 하거나 검출기내의 압력을 높여주든지 크립톤(krypton)등의 에너지 손실이 큰 가스를 헬륨 가스에 섞어주기도 한다. 가스의 순도가 제작 시 중요한 요소 중 하나인데, 장기간 사용 시 공기가 튜브내로 새어 들어가는 것을 막을 수 있는지 여부도 반드시 고려하여야 한다.

높은 에너지 중성자 검출에도 ^3He 비례계수기가 쓰이는데 이 때 중성자와 ^3He 의 탄성산란에 의한 ^3He 의 되튐(recoil) 에너지 분포 역시 스펙트럼 상에 $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$ 핵반응에 의하여 발생하는 수소와 삼중수소의 에너지 분포와 함께 나타난다. 검출기에서 나오는 시그널의 rise time을 통하여 탄성산란에 의한 peak과 감마선에 의한 peak을 구분하는 방법 역시 시도되었다.

SPND(Self Powered Neutron Detector)는 노심내의 중성자 검출기로 많이 쓰이며, 중성자와 반응하여 발생하는 베타선이나 감마선을 측정한다. 다른 중성자 검출기에 비하여 작은 크기이며, 제작 비용이 적게 들고, 간단한 구조를 가지는 장점이 있다. 단점으로는 검출기로부터의 출력 전류가 작으며, 중성자 에너지에 대하여 민감하지 못하고, 반응 시간이 느린 점을 들 수 있다.

설계 시 가장 주의하여야 할 점은 어떤 물질로 emitter를 만들까하는 점이다. 베타선 방출을 이용할 경우 가장 많이 쓰이는 물질로는 로듐(rhodium)이나 바나듐(vanadium) 등이 있는데, emitter로 적합한 물질은 중성자 포획 반응율과 방출 베타선의 에너지와 반감기를 고려하여야 한다.

베타선방출을 이용할 경우 검출기의 반응시간이 느린 단점이 있는데 이를 보완하기 위하여 감마선 방출을 이용하는 검출기가 제작되기도 한다. 가장 많이 쓰이는 물질로는 코발트나 카드뮴 등이 있다.

(4) 최근 연구동향

Knott는 이차원 PSD(Position-Sensitive Detector)를 MWPC를 이용하여 제작하였는데, 이 때 ^3He 과 CF_3 혼합가스를 사용하였다.[20] 검출기의 반응영역은 $640 \times 640 \text{ mm}^2$ 이며 검출기의 위치분해능은 $5 \times 5 \text{ mm}^2$ 이다. Weyrauch는 중성자 탄성산란을 이용하는 검출기로 ^4He 가스를 이용한 비례계수기를 사용하고 중성자에너지에 대한 반응함수를 측정하였다.[21] 알파선에 의한 배경계수 문제, 감마선속이 높은 환경아래에서의 검출기의 설계 등은 지속적으로 연구되어지고 있는 분야이다. 최근에는 MSGC나 GEM을 이용한 중성자 검출기의 연구가 시작되고 있으며, 이러한 검출기는 비교적 높은 선속아래에서의 사용 가능성, 높은 공간 분해능, 큰 효율 등의 장점을 보이고 있다.[19] 중성자 검출을 위한 다양한 물질의 개발이 최근 연구의 한 분야이다. Vellettaz는 열중성자 검출에 ^3He 을 이용하는 이차원 중성자 검출기를 MS(Micro Strip) plate를 이용하여 설계하였으며,[22] Gebauer는 $^{157}\text{Gd}/\text{CsI}$ 다층막을 이용하는 중성자 검출기를 개발하였다.[23,24] Bertalot은 팔라듐(Palladium)을 이용한 검출기를 핵융합반응 연구에 이용하였다.[25]

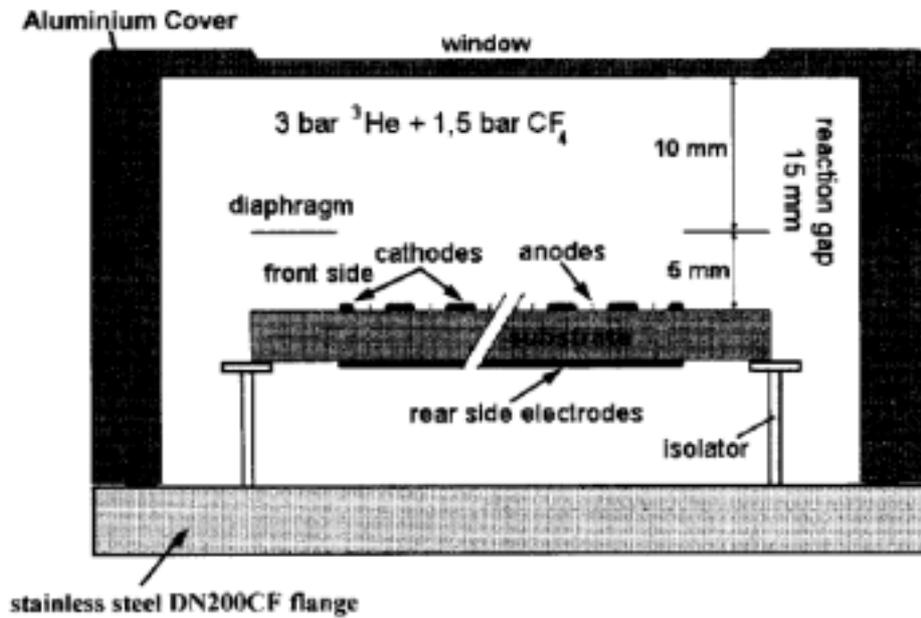


그림 4-2 MS(Micro Strip) plate를 이용한 이차원 중성자 검출기.[22] 1.3 mm 공간적 분해능을 가진 중성자 영상을 얻을 수 있다.

2. 섬광체형 중성자 검출기

섬광체 검출기를 이용한 중성자의 측정은 최근 활발히 연구되는 분야이다. 일반적인 섬광체 검출기의 장점은 빠른 시간분해능, 높은 반응 효율, 그리고 효과적인 감마선 배경계수 구분가능성 등을 들 수 있다.

(1) 무기 섬광체 중성자 검출기

대표적인 무기 섬광체 검출기로는 리슘 아이오다이드 검출기를 들 수 있다. 이 때 미량의 유로피움(europium)이 함유되며 검출기의 decay time은 약 0.3 μ s 이다. 섬광체 내에서 감마선 역시 모든 에너지를 잃을 수 있으므로 에너지 크기를 통한 감마배경 계수와 중성자와의 구분 능력은 가스 검출기에 비하여 떨어진다. 이 검출기는 열중성자 검출에 쓰이며, 상온에서의 높은 에너지 중성자 검출에는 낮은 에너지 분해능으로 인하여 장애가 있다.

근래에는 섬광체 검출기 자체의 개발보다는 radiography나 diffractometry 등을 위한 장비 개발이 많이 이루어지고 있다. 전형적인 시스템은 중성자 검출 섬광관, 광학 장비, CCD(Charge Coupled Device)카메라로 이루어져 있다. Rhodes는 ${}^6\text{Li}/\text{ZnC}$ 섬광체 검출기와 12개의 PMT를 광섬유로 연결하여 총 348 pixel을 구분할 수 있는 검출장비에 관하여 논의하였다.[26]

(2) 유기 섬광체 중성자 검출기

리튬 함유 유리 섬광체는 높은 에너지 중성자 검출에 쓰이고 있다. 이 검출기는 비선형성으로 인하여 직접적인 중성자 에너지 검출에는 쓰이지 않고 비행시간 측정법(time of flight)에 쓰이고 있다. 붕소를 함유한 섬광체 검출기 역시 중성자 비행시간 측정법에 쓰이고 있는데, 이러한 검출기는 섬광체가 비교적 불투명하기 때문에 얇게 만들어 진다.

유기 섬광체 검출기는 중성자와 수소의 탄성 산란에 의한 수소의 되튐 에너지를 이용한 검출에 많이 이용된다. 특히 액체 섬광체 검출기나 플라스틱 검출기는 비교적 가격이 저렴하고 쉽게 원하는 모양으로 가공할 수 있으며 방향성이 없으므로 높은 에너지의 중성자 검출에 널리 쓰이고 있다.

질량과 전하가 각각 다른 하전 입자가 섬광체에서 만드는 펄스의 시간특성은 다르다. 이를 이용하여 감마선과 중성자를 분류할 수 있는 방법은 유기 섬광체의 매우 유용한 성질이다.

최근 많이 이루어지는 플라스틱 검출기를 이용한 연구로는 핵융합 연구, 핵분열 연구, 기초과학 연구를 위한 장치 개발 등이 있다. 특히, 광섬유를 이용한 연구가 활발히 이루어지고 있는 추세이다. Singkarat 등은 광섬유의 방향과 평행한 방향으로 진행되는 14.1 MeV 중성자에만 민감하게 반응하는 섬유다발을 제작하였는데, 이 때 방향이 다른 중성자와 감마선은 이 검출기에 대한 반응효율이 적도록 하였다.[27] Ress등은 ICF(Inertial Confinement Fusion) 표적으로부터 나오는 중성자 선속의 이미지를 얻기 위하여 광섬유, MCP(MicroChannel Plate), CCD 카메라를 이용하는 검출기를 설계하였다.[28] Los Alamos National Laboratory에서는 중성자 동시 측정법에 이용하기 위하여 검출 시간이 줄어든 붕소가 함유된 플라스틱 검출기를 개발하였다.[29] Miller는 붕소가 함유된 플라스틱 검출기와 BGO 검출기를 이용하여 중성자만을 검출할 수 있는 장비를 설계하였다.[30] 즉, 붕소에 의한 중성자 포획반응에 의하여 발생하는 478 keV 감마선과 하전입자를 동시 측정하여 중성자만을 검출하였다. 액체 유기 섬광체를 이용한 장치의 개발은 주로 기초과학과 연관된 분야에서 많은 연구가 이루어지고 있다. GANIL에서는 160 cm 지름의 섬광체로부터 발생하는 펄스와 6개의 PMT를 이용하여 5 cm의 위치정확도를 구현하였다.[31] 액체 섬광체로부터 나오는 펄스의 모양에 의하여 감마선과 중성자를 구분하는 방법은 계속 개발되고 있다. Takada는 액체 섬광체와 플라스틱 섬광체를 이용하여 감마선, 중성자, 양성자를 구분할 수 있는 검출기를 우주과학용으로 개발하였다.[32] 이때 각각의 반응에 대한 두 섬광체의 decay time constant가 다르다는 사실을 이용하여 각 입자를 구분하였다.

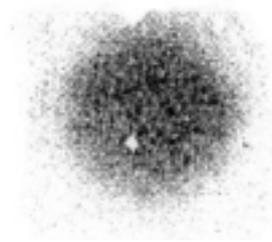
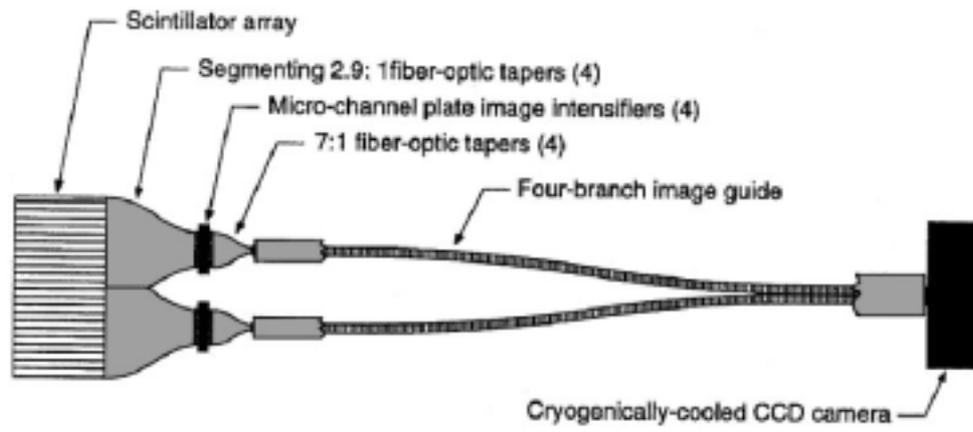


그림 4-3 Ress *et al.* [28]에 의하여 개발된 14 MeV 중성자 영상화 장치와 ICF 플라즈마 영상.

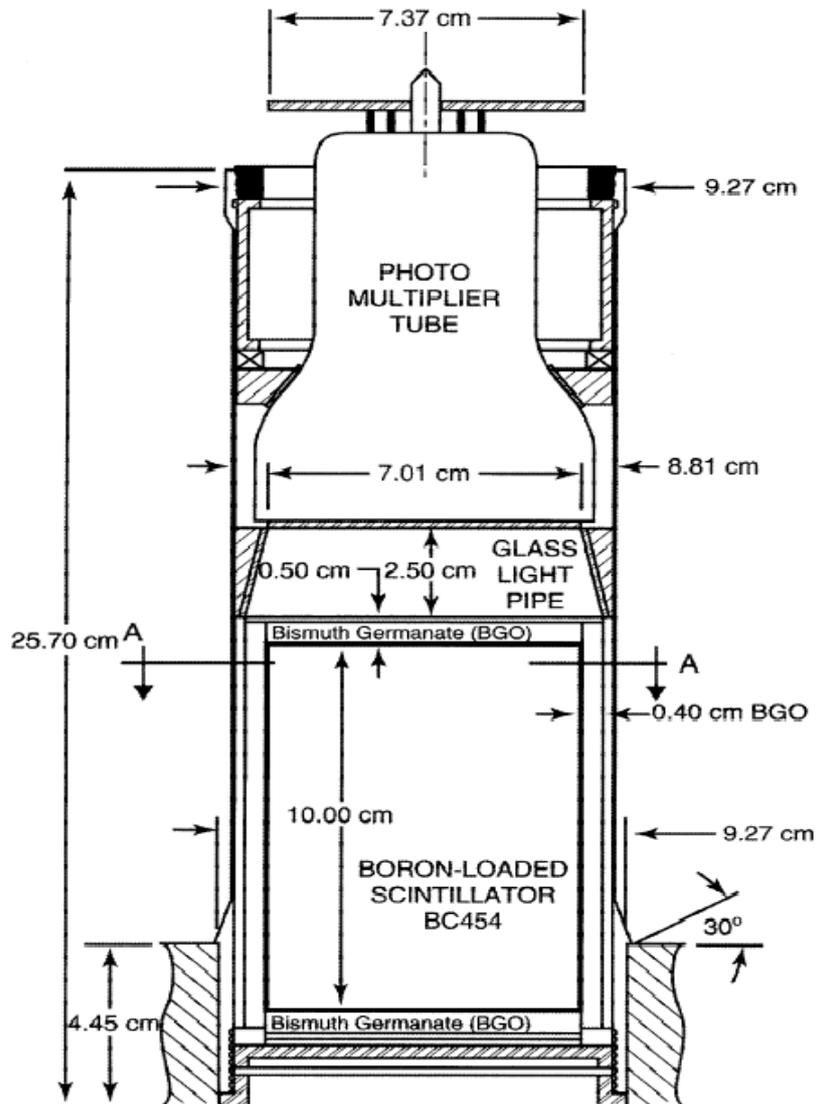


그림 4-4 붕소와 중성자 핵반응에서 발생하는 478 keV 감마선과 중성자를 BGO와 BC454 섬광체로 동시 측정함으로써 감마선 배경계수를 제거하는 검출기 설계.[30]

(3) 최근 연구 분야

Yamane과 Mori는 ^{232}Th 와 $\text{ZnS}(\text{Ag})$ 섬광체를 광섬유 끝에 부착하여 14.1 MeV 중성자를 검출하는 장비를 개발하였다.[33,34]

^6Li 유리 섬광체는 계속적으로 연구되는 분야로써 Aryaeinejad는 손바닥 크기의 중성자 센서를 개발하였는데, ^6Li 으로부터의 시그널과 ^7Li 으로부터의 시그널을 구분함으로써 중성자와 감마선을 구분하였다.[35]

Uozumi와 Konish는 GSO(gadolinium orthosilicate) 섬광체를 이용한 열중성자 측정

에 대하여 연구를 계속하고 있다.[36,37] 이 연구의 목적은 gadolinium의 큰 반응단면적을 이용하여 높은 효율을 가진 검출기를 개발하는 것이다.

CsI와 NaI 섬광체로부터의 시그널 파형에 의하여 검출입자를 구분하는 방법은 계속하여 연구가 진행 중이다.[38,39]

Wagner는 BaF₂를 이용하여 100 MeV 이상의 중성자를 검출하는 방법에 대하여 연구를 하였다.[40]

Delft University of Technology 연구팀은 LiBaF₃ 섬광체를 이용한 PSD(Pulse Shape Discrimination) 방법에 대한 연구를 하였다.[41,42]

3. 반도체형 중성자 검출기

반도체와 리튬을 결합한 검출기는 중성자를 검출할 수 있는 하나의 방법이다. 즉, 리튬을 포함한 화합물을 반도체 검출기의 사이에 두고, 중성자와 리튬의 반응에 의하여 발생하는 하전 입자를 검출하는 방식이다.

반도체 검출기를 이용하여 중성자를 검출하는 방식은 계속적으로 연구가 되고 있는 분야이다. 최근 연구는 실리콘과 다이아몬드를 이용한 검출기 개발이 많이 연구되고 있으며 게르마늄, CdZnTe, GaAs를 이용한 연구 역시 진행 중이다.

다이아몬드 검출기는 선속이 높고 방사선이 높은 환경아래에서 안정적인 것으로 알려져 있다. 이 검출기의 에너지 분해능은 2 % 정도이나 효율은 상당히 떨어져서(2.5×10^{-5} counts/neutron/cm²) 강한 중성자원에 대하여서만이 효과적인 단점이 있다. CVD 다이아몬드 필름이나 합성 다이아몬드를 이용한 검출기의 개발도 진행 중이다.

실리콘 역시 중성자 검출에 이용되고 있다. 특히 위치 분해능이 100 μ m 이내인 검출기의 개발이 진행 중이다. ⁶Li이나 Gd 등을 이용한 영상 검출기의 개발 역시 연구되고 있으며, 이 외의 다른 여러 물질들이 중성자 선량계를 위한 중성자 변환자(neutron converter)로 시도되고 있다. 특히 Ndoye는 오직 중성자에만 민감한 선량계를 리튬과 실리콘을 이용하여 설계하였다.[43] ²⁸Si(n, α)²⁵Mg 반응과 ²⁸Si(n,p)²⁸Al 반응을 이용하여 핵융합에서 나오는 14.1 MeV 중성자 검출기도 제작되었다. 이 때 이 반응들은 중성자의 운동 에너지가 7 MeV 이상에서만 가능하므로 2.5 MeV 핵융합 중성자는 자연스럽게 검출하지 않는다.[44] Kawai는 ⁶Li/Ti의 중성자 변환자 다층막을 이용하여 열중성자를 검출하였다.[45]

다른 여러 종류의 반도체들이 중성자 검출기로 개발되고 있다. Chao는 중성자와 게르마늄과의 비탄성 산란에서 나오는 596 keV 와 691 keV 감마선을 측정하여 중성자 선속을 측정하였다.[46] 이 때 이 peak의 모양을 분석함으로써 중성자 에너지 스펙트럼에 대한 정보를 얻기 위한 연구도 이루어지고 있다. McGregor는 GaAs를 써서 열중성자를 이용한 영상 장비의 개발을 시도하였다.[47] CdZnTe 반도체를 열중성자 검출기로 사용하고자 하는 연구 역시 McGregor에 의하여 이루어 졌다.[48]

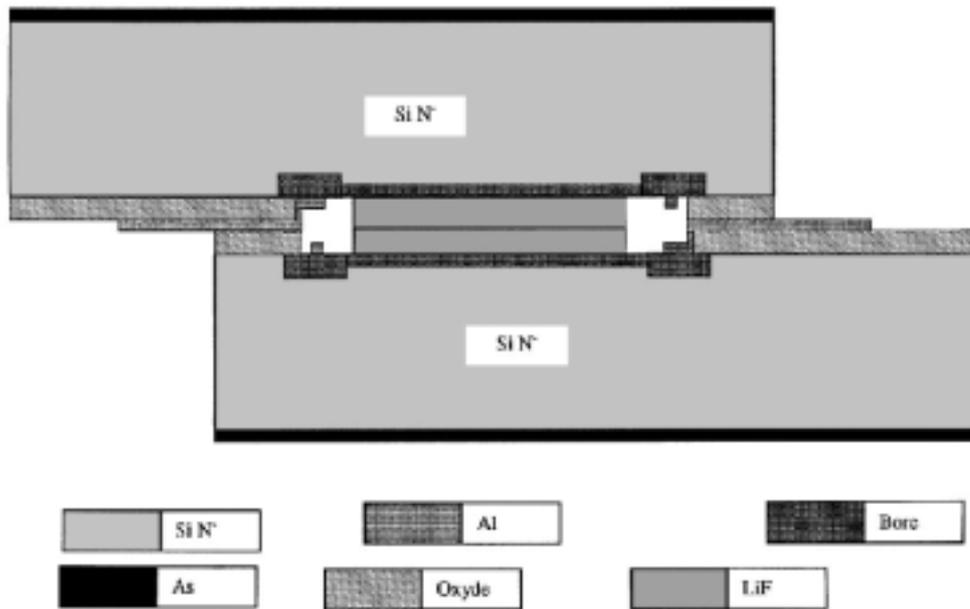


그림 4-5 Ndoye *et al.* [43]에 의하여 설계된 반도체 검출기를 이용한 중성자 선량계. 중성자와 리튬의 핵반응에 의하여 발생하는 삼중수소와 헬륨을 실리콘다이오드로 동시 측정한다. 리튬이 실리콘 다이오드로 퍼지는 것을 막기 위하여 리튬 화합물을 사용하였다.

4. 감속 검출기(Moderating Detector)

감속 검출기(moderating detector)는 중성자의 운동에너지가 작아질수록 검출효율이 높아진다는 점을 이용한 중성자 검출기이다. 일반적으로 수소를 포함한 폴리에틸렌 (polyethylene) 등의 물질을 ^3He 비례계수기, $^{10}\text{BF}_3$ 비례 계수기, 혹은 ^6Li 유리 섬광체 등의 열중성자 검출기 외부를 싸서, 높은 에너지의 중성자가 에너지가 감속된 후 검출 되도록 한 장치이다. 대체적으로 검출 효율은 10 % 정도이다.

Bramblett, Ewig, Bonner는 구형 폴리에틸렌 중성자 감속제의 두께를 변화하면서 리튬아이오다이드 섬광체를 이용한 중성자 검출을 연구하였다.[49] 이때 감속제의 두께가 12 “ 인 경우 검출기의 반응함수가 중성자에 의한 조사량(dose)과 유사함이 발견되었다. 이를 이용한 검출기를 Bonner구라고 한다.

검출효율이 중성자의 에너지에 거의 무관한 검출기 역시 같은 원리를 이용하여 제작 되고 있는데 이를 flat detector라고 한다.

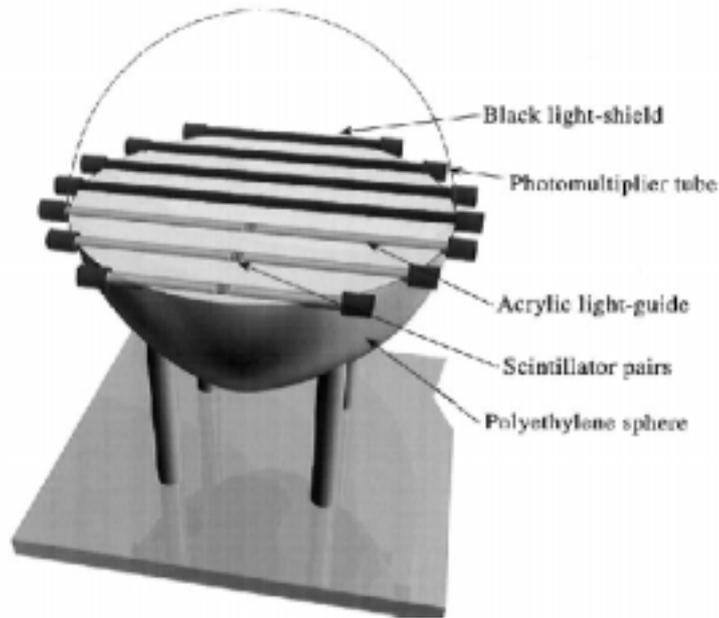


그림 4-6 Yamaguchi *et al.* [51]가 우주공간의 열중성자 분포를 측정하기 위하여 설계한 감속 검출기. 지름 30 cm의 구형 폴리에틸렌 감속제 내부에 19 쌍의 ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ 유리 섬광체를 x, y, z 방향으로 배치하였다.

새로운 형태의 감속 검출기 역시 현재 개발되고 있으나, 대부분의 연구는 기존의 감속 검출기 특성 검사와 최적화가 주로 이루어지고 있다. Aroua는 Bonner구 검출기 설계를 바탕으로 하여 1 ~ 100 keV 영역의 중성자에 적합한 검출기를 설계하였다.[50] 중성자의 방향성과 스펙트럼에 대한 정보를 동시에 주는 검출기 역시 개발되고 있는데, 위치에 민감한 검출기를 구형 감속기의 x, y, z 세 개의 축에 배치하였다.[51]

5. 수소 되튐(Recoil)을 이용한 검출기

이 검출기는 수소를 포함한 얇은 물질에서 중성자의 탄성산란에 의한 양성자의 되튐 에너지를 측정함으로써 중성자의 에너지와 방향을 측정하는 장비이다. 이 장비는 상당히 넓은 영역의 중성자 에너지에 대하여 비교적 적합한 에너지 분해능을 보인다. 14.1 MeV 중성자에 대하여 1 - 3 % 정도의 에너지 분해능을 보이며, 1 MeV 이하와 1 GeV 이상의 중성자를 검출하기도 하였다. 핵융합 반응을 제외한 경우 검출효율이 낮다는 것이 이 검출기의 문제점이다.

최근의 연구는 핵융합 반응에 대한 중성자 검출기의 개발에 주로 치중되고 있다. 몇몇의 설계는 자기 분광기(magnetic spectrometer)를 이용하여 양성자의 에너지를 측정하고 있다. 되튐 양성자가 검출기에 도달하기 이전에 일정한 방향의 양성자만을 골라주는 구조나 다양한 반도체 검출기를 통한 양성자의 검출이 시도되고 있다.

섬광체 플라스틱 섬유를 쌓아서 만든 검출기는 되튐 양성자의 궤적을 측정함으로써

중성자의 에너지와 방향을 검출할 수 있도록 하였다.[52,53] 이 때 각층의 섬광체는 위 아래 층의 섬광체와 수직으로 놓이도록 설계하였다. 이 검출기는 14 MeV 이하의 중성자는 양성자의 에너지가 작아서 검출하기가 어렵고 95 MeV 중성자에 대하여 4 %의 에너지 분해능이 보고된 바가 있다.

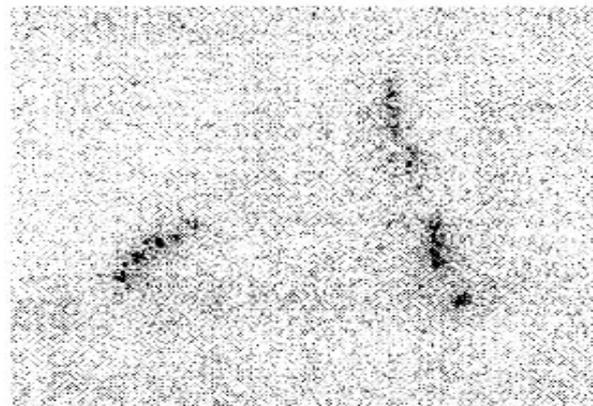
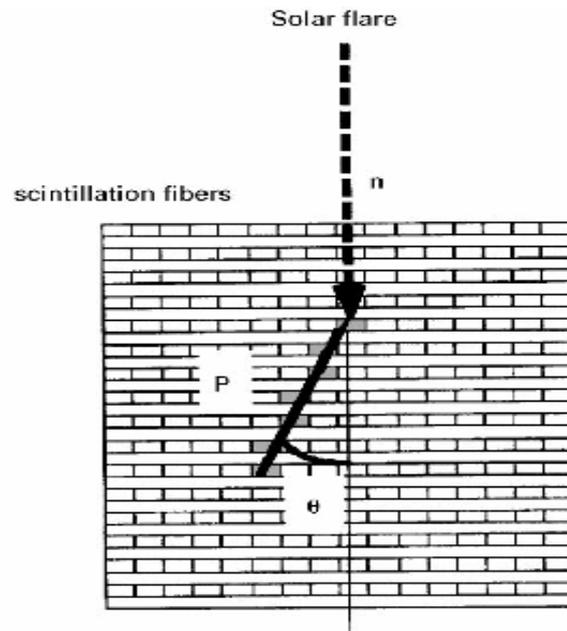


그림 4-7 플라스틱 섬광체 섬유를 쌓아 만든 중성자 검출기.[52] 중성자와 산란에 의한 수소의 경로를 영상화할 수 있다.

6. 물방울 검출기(Bubble Detector)

물방울 검출기는 폴리머(polymer)내에 과열(superheated)된 물방울이 모여 있는 구조이다. 이 때 중성자가 각각의 방울이 기화되는 것을 막고 있는 표면 장력 보다 큰 에너

지를 가해줌으로 검출기의 역할을 하며 감마선은 기화하기에 충분한 에너지를 가해줄 수 없으므로 감마선에 대하여서는 반응하지 않는다. 이 때 중성자는 핵자의 되튐이나 $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}$ 핵반응을 통하여 에너지를 액체에 전달한다.



그림 4-8 중성자 물방울 검출기 사진.[65]

최근의 물방울 검출기에 대한 연구는 선량측정(dosimetry)을 위한 검출기의 특성 조사와 최적화가 주로 이루어지고 있다. 특히 다양한 에너지의 중성자를 구분할 수 있는 선량측정계의 연구가 이루어지고 있다.[54] 또한 열중성자에 특히 민감하게 반응하거나 전혀 반응하지 않는 검출기가 개발되고 있다.[55] 물방울 검출기를 배경복사가 특히 적어야 하는 암흑물질(dark matter) 연구에 쓰일 수 있는 가능성이 최근 제기되기도 하였다.[56,57] 이 때 중성자 배경복사와 다른 배경복사를 줄이기 위하여 검출기는 땅 밑에 설치되며 검출기주위는 차폐하게 된다.

7. Activation 검출기

activation 검출기는 특정한 영역의 중성자 선속과 에너지 분포를 중성자 표적 물질에 유도된 방사선을 측정함으로써 검출하는 장비이다. 최근의 연구는 핵융합로와 핵분열로에서 나오는 중성자와 관련된 연구가 주로 이루어지고 있다. 이 검출기의 장점은 제작비용이 적게 들고 보정이 쉽다는 점을 들 수 있다.

Antropov는 중성자 선속이 1000 n/cm^2 이상에서 NaI(Tl) 섬광체를 이용한 중성자

선속을 조사하였다.[58] 이 때 아이오다인의 높은 반응 단면적, 적합한 반감기(25 min.), 높은 에너지 베타 붕괴 등의 성질이 고려되었다. Kolbe는 $^{164}\text{Dy}(n,\nu)^{165\text{m}}\text{Dy}$ 반응을 이용하여 중성자 영상화를 시도하였다.[59] 이 때 1.26 분의 반감기를 가진 생성 방사성 물질은 X-선 영상판(image plate)을 이용하여 빠르게 영상을 얻을 수 있게 한다. Esposito는 $^{54}\text{Fe}(n,2n)^{53}\text{Fe}$ 반응을 이용하여 핵융합 플라즈마의 온도를 측정할 수 있는 장비를 개발하였다.[60] 이 때 이 핵반응은 중성자의 운동에너지가 13.9 MeV 이상에서 일어나므로 14.1 MeV의 핵융합에서 나오는 중성자 스펙트럼 모양의 변화가 반응율에 민감하게 반응하게 된다.

8. 영상판(Image Plate)

열중성자를 이용하여 반응 면적이 크고($> 1000 \text{ cm}^2$), 높은 분해능을 가진 중성자에 민감한 영상판(image plate)이 최근 개발되고 있다. 판은 대체적으로 Eu^{2+} 를 함유한 BaFBr을 형광체로 사용하며 Gd_2O_3 나 ^6LiF 를 중성자 변환자로 사용한다. Gd의 높은 중성자 반응률은 큰 검출효율을 가진 판 제작에 용이하며, ^6Li 과 중성자와의 반응에 의하여 높은 에너지를 가지는 하전입자가 발생하므로 감마선과의 구분이 용이하다. 이 때 판에 생긴影상은 넓은 중성자 에너지 영역에서 선형성을 보인다.

최근의 연구는 radiography와 diffractometry를 위한 영상판의 최적화가 주로 이루어지고 있다. 특히 판의 화학적 구성과 두께에 따른 성능에 대한 연구가 많이 행해지고 있다.[61]

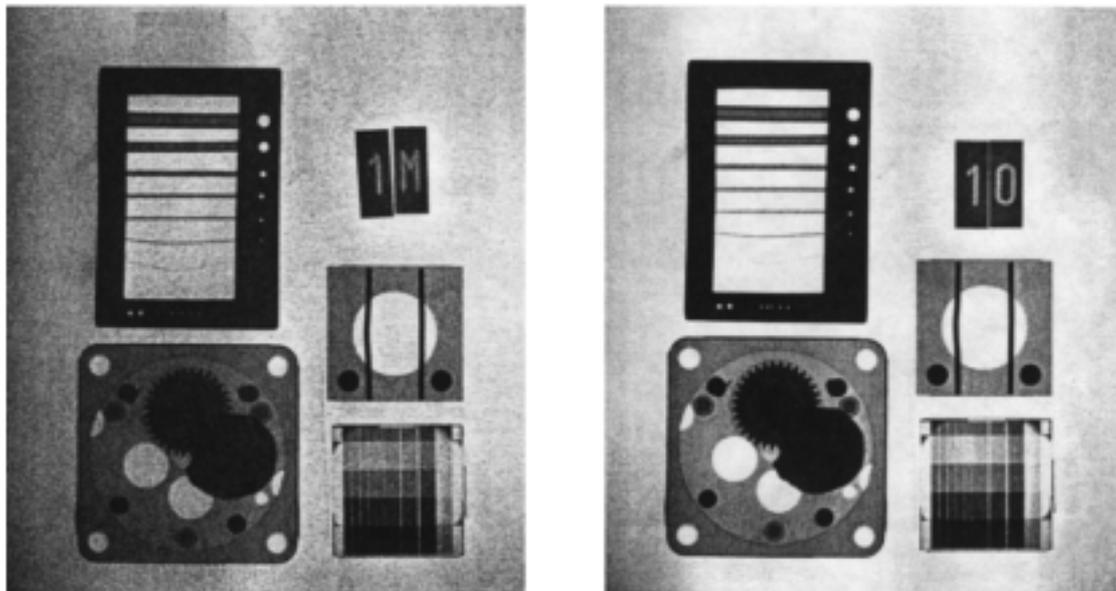


그림 4-9 영상판을 이용하여 중성자 조사량을 달리한 영상.[66] 좌측 사진은 $2.0 \times 10^{-7} \text{ ncm}^{-2}$ 의 중성자가 조사되었으며, 우측 사진은 $2.0 \times 10^{-8} \text{ ncm}^{-2}$ 의 중성자가 조사되었다.

9. 궤적 검출기(Track detector)

궤적 검출기는 하전 입자가 고체 물질 내를 지나갈 때 손상에 의하여 생기는 화학적 etch를 이용한다. 전자에 의한 물질 내에서의 에너지 손실은 궤적을 만들 정도로 크지 않기 때문에, 이 검출기를 이용한 감마선과 중성자의 구분이 가능하다. 여러 종류의 중성자 변환자가 쓰이는데, 핵자의 되튐(recoil)에 의한 에너지만으로 충분한 경우도 있다.

중성자의 에너지와 방향에 따른 궤적 검출기의 반응이 주로 연구되고 있으며, 또한 컴퓨터 프로그램을 통한 궤적의 예측이 이루어지고 있다.[62] 궤적 검출기의 연구는 주로 넓은 영역에서 정확하게 반응하는 선량계의 개발에 대하여 이루어지고 있다. Luszik-Bhadra는 궤적 검출기와 실리콘 다이오드 검출기를 이용하여 보다 정확한 선량계를 설계하였다.[63] Yulan은 궤적 검출기의 탄소와 수소 핵자의 되튐에너지를 정밀하게 검사하여 중성자의 에너지 스펙트럼을 구하는 방법에 대하여 연구하였다.[64]

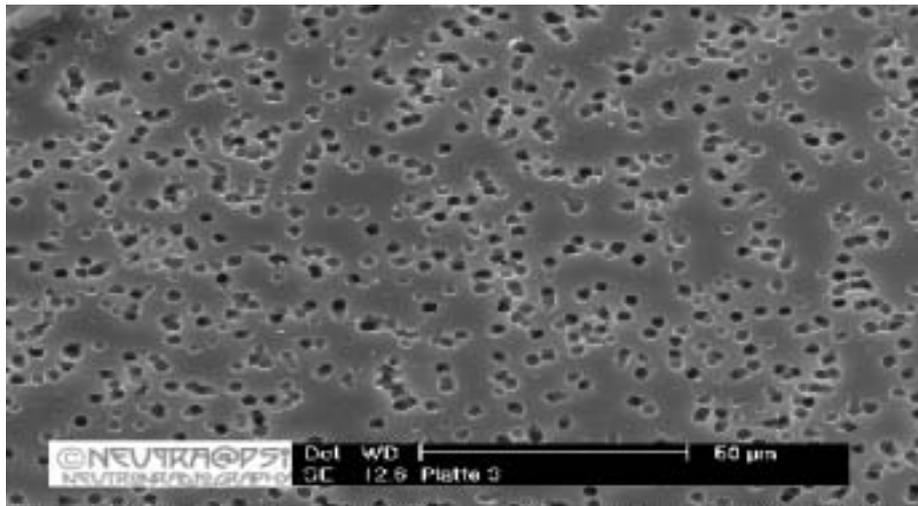


그림 4-10 ^{10}B 중성자 포획 반응에 의하여 만들어진 etch.[67]

참 고 문 헌

- [1] G. F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement", 2nd ed. (J. Wiley & Sons, New York, 1989).
- [2] N. Tsoufanidis, "Measurement and Detection of Radiation", 2nd ed. (Taylor & Francis, 1995).
- [3] 한국원자력연구소 방사선안전관리실 자료, "http://www.kaeri.re.kr/hpd/detec_1.htm".
- [4] 문병수 외, "방사선 계측 및 이용장비 개발", KAERI/RR-1997/99, 2000. 3
- [5] Bicorn Crystal Products, "Physical Properties of Common Inorganic Scintillators", 2000. 2
- [6] EG&G ORTEC, "Experiments in nuclear Science AN34", Lab. Manual 3rd ed.
- [7] W. R. Leo, "Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiment, A How-to Approach", 2nd Revised Edition, (Springer-Verlag, Berlin, 1994).
- [8] 주인철 외, "DVI 실험장치 강수관내 기포율 측정을 위한 감마선 밀도계의 적용", KAERI/TR-1671/2000, 2000. 11
- [9] IAEA, RCA/UNDP 5th Training-Demonstration Workshop on the Use of Nucleonic Control system in Paper Industry", 1986, SIAM Kraft Paper Mill, Thailand.
- [10] 이철용 외, "DUPIC 핵연료의 조사시험을 위한 계장기술", KAERI/TR- 1484/2000, 2000. 2
- [11] 김희중, "단일광자방출전산화 단층촬영장치의 물리와 응용", 물리학과 첨단기술
- [12] 강세식 외, "방사선 진단기기학", 청구문화사, 2000.
- [13] 박수성 외, "진단방사선원리", 대학서림, 1985.
- [14] 김용균 외, "고에너지 방사선 입자 측정기 연구 (II)", KAERI/RR- 1927/98, 1999. 8
- [15] INPC 2001, Nuclear Physics in the 21st Century, LBNL-48247.
- [16] Bulletin of the American Physical Society Vol. 44, No. 5, 1999.
- [17] Oak Ridge National Laboratory Review Vol. 32, No. 2, 1999.
- [18] Accelerator Astrophysics, Physical Review Focus, July 1999.
- [19] A. J. Peurrung, Nucl. Inst. and Meth. A 443 (2000) 400.
- [20] R. B. Knott *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A. 392 (1997) 62.
- [21] M. Weyrauch *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A. 403 (1998) 442.
- [22] N. Vellettaz *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A 392 (1997) 73.
- [23] B. Gebaur *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A 392 (1997) 68.
- [24] B. Gebaur *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A 409 (1998) 56.
- [25] L. Bertalot *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A 409 (1998) 20.
- [26] N. J. Rhodes *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A 392 (1997) 315.
- [27] Singkarat *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A 384 (1997) 463.
- [28] D. Ress *et al.*, Rev. Sci. Instr. 66 (1995) 4943.

- [29] R. F. Grazioso *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A 422 (1999) 59.
- [30] M. C. Miller *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A 422 (1999) 89.
- [31] E. Liénard *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A 413 (1998) 321.
- [32] M. Takada *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-45 (1998) 888.
- [33] Y. Yamane *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A 416 (1998) 371.
- [34] C. Mori *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A 422 (1999) 129.
- [35] R. Aryaeinejad *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-43 (1996) 1539.
- [36] Y. Uozumi *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol. 34 (1997) 80.
- [37] D. Konishi *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A 420 (1999) 467.
- [38] C.M. Bartle, R.C. Haight, Nucl. Inst. and Meth. A 422 (1999) 54.
- [39] A.V. Bogomolov *et al.*, Instr. Exp. Tech. 39 (1996) 1.
- [40] V. Wagner *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A 394 (1997) 332.
- [41] C. M. Combes *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A 416 (1998) 364.
- [42] M. J. Knitel *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A 374 (1996) 197.
- [43] A. Ndoye *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A 423 (1999) 414.
- [44] E. Ruskov *et al.*, Rev. Sci. Instr. 66 (1995) 910.
- [45] T. Kawai *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A 378 (1996) 561.
- [46] J. -H. Chao, H. Niu, Nucl. Inst. and Meth. A 385 (1997) 161.
- [47] D. S. McGregor *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A 380 (1996) 271.
- [48] D. S. McGregor *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A 381 (1996) 498.
- [49] R. L. Bramblett *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. 9 (1960) 1.
- [50] A. Aroua *et al.*, Radiat. Prot. Dosim. 70 (1997) 285.
- [51] S. Yamaguchi *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A 422 (1999) 600.
- [52] I. Imaida *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A 421 (1999) 99.
- [53] J. M. Ryan *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A 422 (1999) 49.
- [54] V. P. Bamblevski *et al.*, Prot. Dosim. 64 (1996) 309.
- [55] H. Ing *et al.*, Radiat. Meas. 27 (1997) 1.
- [56] J. I. Collar, Phys. Rev. D 54 (1996) R1247.
- [57] L. A. Hamel *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A 388 (1997) 91.
- [58] S. Yu. Antropov, V. P. Yaryna, Meas. Tech. 38 (1995) 125.
- [59] H. Kolbe *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A 424 (1999) 40.
- [60] B. Esposito *et al.*, Rev. Sci. Instr. 70 (1999) 1130.
- [61] K. Takahashi *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A 377 (1996) 119.
- [62] Y. Nakane *et al.*, Radiat. Meas. 27 (1997) 445.
- [63] M. Luszik-Bhadra *et al.*, Radiat. Meas. 28 (1997) 473.
- [64] W. Yulan *et al.*, J. Appl. Phys. 37 (1998) 4164.
- [65] Bubble Technology Industries, "<http://www.magma.ca/~bubble/bubbles1.htm>".
- [66] S. Fujine *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A 424 (1999) 200.
- [67] PSI(Paul Scherrer Institute), "<http://neutra.web.psi.ch/What/detector.html>".

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/AR-636/2002					
제목 / 부제	방사선 계측기술 및 중성자 계측기 기술 개발 현황				
연구책임자 및 부서명 (AR,TR 등의 경우 주저자)	김용균 (MMIS팀)				
연구자 및 부서명	송무형, 박세환, 문병수, 정종은, 홍석봉, 황인구, 이우교, 한상효(MMIS팀) 하장호(사용후핵연료기술개발팀)				
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2002년
페이지	62 p.	도표	있음(○), 없음()	크기	A4
참고사항					
공개여부	공개(○), 비공개()		보고서종류	기술현황분석보고서	
비밀여부	대외비(), __ 급비밀				
연구위탁기관			계약번호		
초록 (15-20줄내외)	<p>이 보고서는 방사선 검출기술과 응용 계측기 및 중성자 검출기의 개발 현황을 이용 현황 및 신기술 내용과 함께 기술하고 있다. 방사선 검출기는 입사 방사선과 검출물질과의 상호작용으로 발생하는 관측 가능한 2차 효과를 측정하는 원리를 이용하는데, 그 2차 효과로는 전리, 여기, 형광, 화학작용 등이 있다. 이들 효과를 이용한 검출기와 주요용도에 따라 방사선 검출기는 크게 가스형 검출기, 섬광체 검출기, 반도체 검출기로 분류한다. 이 보고서는 이들 검출기의 동작 원리와 기술 현황을 포함하고 있다. 또한, 방사선 응용 계측기는 산업용 응용계측기, 노심 핵계측, 의료용 방사선 진단장비, 비파괴 검사 장비, 환경 방사선 및 우주선 측정, Security System, 기초 과학 실험, 방사선 측정 표준화 등으로 나눌 수 있으며 이들 계측기의 기술 개발 현황에 대한 내용을 포함하고 있다.</p>				
주제명키워드 (10단어내외)	방사선 검출기, 응용 계측기, 중성자 검출기, 가스형 검출기, 섬광체 검출기, 반도체 검출기, 노심 핵계측				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET							
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.		INIS Subject Code	
KAERI/AR-636/2002							
Title / Subtitle		Status of Radiation Detector and Neutron Monitor Technology					
Project Manager and Department (or Main Author)		Y.K. Kim (MMIS Team)					
Researcher and Department		M.H. Song, S.H. Park, J.H. Ha, B.S. Moon, C.E. Chung, S.B. Hong, I.K. Hwang, W.G. Lee, S.H. Han (KAERI)					
Publication Place	Daejeon	Publisher	Korea Atomic Energy Research Institute	Publication Date	May 2002		
Page	62 p.	Ill. & Tab.	Yes(<input type="radio"/>), No (<input type="radio"/>)	Size	A4		
Note							
Open	Open(<input type="radio"/>), Closed(<input type="radio"/>)		Report Type	State-of-the-Art Report			
Classified	Restricted(<input type="checkbox"/>), ___Class Document						
Sponsoring Org.			Contract No.				
Abstract (15-20 Lines)	<p>In this report, we describe the current states of the radiation detection technology, detectors for industrial application, and neutron monitors. We also survey the new technologies being applied to this field. The method to detect radiation is the measurement of the observable secondary effect from the interaction between incident radiation and detector material, such as ionization, excitation, fluorescence, and chemical reaction. The radiation detectors can be categorized into gas detectors, scintillation detectors, and semiconductor detectors according to major effects and main applications. This report contains the current status and operational principles of these detectors. The application fields of radiation detectors are industrial measurement system, in-core neutron monitor, medical radiation diagnostic device, nondestructive inspection device, environmental radiation monitoring, cosmic-ray measurement, security system, fundamental science experiment, and radiation measurement standardization. The status of the technology development of these fields are also described.</p>						
Subject Keywords (About 10 words)	<p>radiation detector, detectors for industrial application, neutron detector, gas detector scintillation detector, semiconductor detector, in-core neutron monitor</p>						