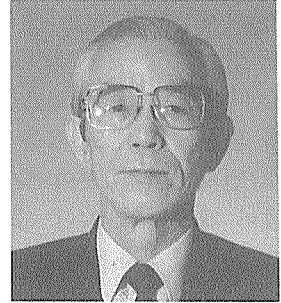


방사선검출의 발전과 전망



서 두 환

한국원자력연구소
책임 연구원

머리말

어느덧 베크렐이 우라늄에서 방출된 방사선을 사진건판으로 발견(1896)한지 100년이 넘었다. 그 동안에 방사선측정기의 연구는 일진월보하여 사진건판 이외의 방사선검출기 및 그에 수반되는 전자회로, 신호처리기술 등이 개발되었다.

이 글은 그 동안의 대표적인 검출기인 가스검출기, 신틸레이션검출기 및 반도체검출기에 대한 최근까지의 성과와 함께, 21세기의 검출기로서 현재 정력적으로 연구되고 있는 초전도검출기, 파이버검출기, 이미징플레이트 등의 연구상황에 대하여 일본원자력학회지 (Vol. 28, No. 9, 1996)에 특집기사로 게재된 것을 발췌한 것이다.

방사선이라는 말은 20세기의 과학기술에 있어서 중요한 용어의 하나이다. 새로운 원자력 세계와의 커뮤니케이션의 도구로서 그 세계의 구조를 인간에게 가르쳐 주는 동시에 그 세계에서 에너지를 끄집어 내기 위해서 사용되고 있다.

방사선센서(Sensor)는 그 커뮤니케이션을 위한 도구이며 사람의 눈과 귀, 촉각의 역할을 하고 있다. 처음에는 사진필름이나 GM계수관이 사용되고 곧 광전자증배관이라는 굉장한 광센서의 개발로 NaI(Tl)신틸레이터 시대로 되었고 현재는 반도체 시대로 들어 왔다.

방사선센서는 그 100년 동안에 각 시대의 기술적 정수를 모아서 만들어진 것이며 광전자증배관, 반도체, 컴퓨터 등의 신재료, 신기술을 센서로서 이용하여 왔다. 현재는 광파이버, 레이저, 초전도재, 미세가공, 원자간력현미경 등에 이용되기 시작하였다.

1. 방사선의 영상화(이미징)

1) 형광판/X선필름에서 이미징플레이트로
이미징플레이트(Imaging Plate : IP)는 방사선강도의 2차원분포 표시판이다. 본래부터 의료용 X선사진필름 대신에 새로운 필름의 제공을 목적으로 개발된 것이다. 현재 생물분야의 오토라디오그래피에 많이 사용되며 의료용에서는 거의 100% IP로 교체중에 있다. 최

근에는 방사선/방사능, 원자력분야에도 이용중에 있다.

IP의 실용 분야로서는 (1)X선사진 분야에서 의료용으로 많은 병원에서 채용중에 있다. 또 X선회절 분야에서도 회절상의 촬영에서 X선필름을 몰아내고 있다. 싱크로트론방사광에 의한 회절에도 실용적으로 사용되고 있다. (2)전자현미경 분야에서도 고분해능의 시스템이 개발되어 많이 사용될 것이다. (3)중성자회절, 중성자 라디오그래피용으로 Gd 또는 Li을 넣은 IP가 개발되어 앞으로 많이 이용될 것이다. (4)고감도성을 이용하여 식품, 암석, 도자기에 함유되어 있는 저준위방사능의 분포를 측정할 수 있다. (5)극미량의 오염검사에서도 유효성이 나타나고 있다.

2) 중성자의 영상화

중성자의 검출에는 ^{10}B 또는 ^3He 기체비례계수관, ^6Li 신틸레이터, Gd사진법, ^{235}U 핵분열 검출기를 사용하고 있다. 중성자를 영상화하기 위하여 오래전부터 중성자 라디오그래피에서 사용되고 있는 것이 Gd+X선필름법이다.

중성자IP는 열중성자 2차원에리어(Area) 검출기이며 원리는 현재 일반적으로 사용하고 있는 가스봉입형 비례계수관을 대체한 것이다. 열중성자회절·산란실험, 중성자반사율계 등의 응용에 시도하고 있다. 중성자IP는 적분형이고 위치 분해능이 우수하기 때문에 직접빔의 고속중성자프로필 측정에 적합하다.

또한, 중성자IP는 한장의 필름이기 때문에 전기노이즈가 전혀 없으므로 이 방면의 응용에도 기대된다. 따라서 환경방사선의 측정이나 방사선차폐의 누설 테스트에도 그 응용의 가능성을 가진 검출기이다.

3) 입사위치검출-Micro Strip Gas 검출기

Micro Strip Gas Chamber(MSGC)는 새로운 검출기이며 수년내에 완전한 실시간(Real

Time) 고위치분해능 X선화상장치로서 실용화중에 있다. MSGC는 원리적으로는 완전히 다선비례계수관(MWPC)이며 새로운 것은 아니다. 다만, MWPC를 IC미세가공기술로 기판(substrate)상에 수 $10\mu\text{m}$ 폭의 양·음전극을 형성시킨 무선형 가스비례계수관과 같다.

MSGC는 고위치분해능 및 압도적인 고계수율 능력으로 대강도 X선빔용의 화상 검출기로서 그 응용이 기대된다. MSGC는 현재 사용되고 있는 필름, IP, X선카메라 등의 적분형 검출기와는 달라서 각 X선의 입사시간 및 에너지정보를 완전히 기록할 수 있는 미분형 검출기이며 완전한 디지털데이터를 공급하는 실시간형 검출기이다. 또한, MSGC는 MWPC와 달라서 임의 형상의 전극을 만들 수 있고 폴리이미드(Polyimide)처럼 유연성 있는 소재를 사용하면 곡면형도 만들 수 있기 때문에 정말로 화상 검출기로서는 가장 적합하다.

4) Si 반도체 검출기를 이용한 공업용X선 CT

물체(인체)를 절단(파괴)하지 않고 그 내부를 관찰하는 것이 X선CT(Computed Tomography)이다. X선CT는 물체(인체)에서 목표한 단면내에 가느다란 X선빔을 투과시켜 그 빔강도의 투과에 따른 감쇠를 측정하여 물체(인체)의 가상적 단면내의 밀도 분포를 영상화 하는 수단이다.

의료용X선CT는 이미 성숙기술로 확립되었지만 공업용CT는 아직 그렇게 보급되어 있지 않다. 그 이유는 인체에 비하면 물체는 ①X선의 투과력, ②공간분해능, ③촬영시간 등의 성능이 다르고, 투과력이 강한 고에너지X선을 효율성 있게 검출할 수 있는 소형의 검출기가 필요하기 때문이다.

그러나, 원자력분야에서 개발된 Si반도체 검출기(SSD)를 이용하여 공업용의 고에너지

X선CT를 가질수 있게 되었다. 종래의 X선 CT에는 신틸레이션 검출기를 사용하였지만 공업용 고에너지 X선CT장치는 SSD를 X선 검출기로 사용한 것이다. 이로써 제품내부를 정밀한 화상으로서 관찰할 수 있는 비파괴검사기술이 발전되고 있다.

5) 원자간력현미경에 의한 미세중이온비 적의 이미징

유리나 플라스틱 등의 판(고체비적 검출기)에 입사한 이온입자가 만든 비적을 검출·해석하는 방법을 고체핵비적 검출법이라 한다.

원자로재료, 우주선, 중입자선에 의한 암치료의 선량측정이나 입자선라디오그래피 등에서는 입자선침투도가 높아서 광학현미경으로 관찰하는 방법으로는 곤란하다.

그러나, 원자간력현미경(AFM: Atomic Force Microscope)의 출현으로 광학현미경의 결점을 극복할 수 있게 되었다. AFM으로는 끝이 뾰족한 탐침으로 물체표면을 3차원 스캐닝할 때, 탐침끝과 시료간의 원자간력을 이용하여 nm의 정밀도로 물체표면의凹凸을 3차원실측할 수 있다.

2. 신소재에 의한 방사선센싱

1) 새로운 신틸레이터

종래 X선이나 γ 선 등의 방사선검출에는 형광출력이 높은 NaI(Tl)신틸레이터가 사용되었다. 그러나 최근에 X선CT나 PET(Positron Emission Computed Tomography, 양전자방출핵종 단층촬영장치) 등의 의료기기 개발에 따라 $CdWO_4$ 나 $Bi_4Ge_3O_{12}$ 등의 고밀도 단결정신틸레이터가 주목되어 실용화 되고 있다. $CdWO_4$ (=CWO), $Bi_4Ge_3O_{12}$ (=BGO)이외의 새로운 신틸레이터로서는 CsF, BaF_2 , Gd_2SiO_5 (Ce)(=GSO), Lu_2SiO_5 (Ce)(=LSO), $YAlO_3$ (Ce)(=YAP), $LuAlO_3$ (Ce)(=LuAP) 등이 있다.

고성능의 신틸레이터를 요구하는 분야로서는 의료기기 이외에 물리학연구(소립자, 원자핵, 우주 등), 산업용CT, 섬유탐사 등의 분야가 있다.

2) 방사선의 판별-Phoswitch 검출기와 광학 필터의 이용

α 선을 함유한 복수의 방사선을 판별하여 동시에 계측하는 모니터용 검출기 Phoswitch의 개발이 진행되고 있다. 이 Phoswitch는 각각의 방사선에 대하여 선택적인 감도를 가지고 있으며 감쇠시간이 적당히 다른 복수의 신틸레이터와 조합시켜 파고 및 파형을 판별하여 동시계측한다. 이 때 광학필터를 이용하여 파고 및 파형을 제어하면 더욱 더 판별을 잘할 수 있다.

예를 들면, α - β (γ) 파형판별에는 감쇠시간이 늦은 α 선검출용 $ZnS(Ag)$ 와 빠른 β (γ)선 검출용 NE102A로 구성된 Phoswitch와 $ZnS(Ag)$ 로 부터의 광량을 ND필터를 사용하여 동시계측한다. 또한, α 선과 열중성자의 판별에는 $ZnS(Ag)$ 와 7Li 유리를 사용한다. 여기서 ND필터를 사용하여 α 선파고를 저하시키고, 열중성자만을 파고판별한다. 한편 α 선은 β (γ)선 및 열중성자에서 파형판별한다.

3) 광파이버에 의한 방사선센싱

유연성이 풍부하고 가볍고 지름이 가늘은 특징을 가진 광파이버는 전송매체뿐만 아니라 방사선센서로도 이용하고자 시도하고 있으며 그 실용화도 높아지고 있다. 그 형태로서는 두가지의 방법이 있다. 하나는 광파이버에 소형신틸레이터를 붙여, 미약한 신호광을 광파이버를 통해서 전송하는 형태이며, 다른 하나는 광파이버자신을 센서요소로 이용하는 형태이다. 어느 것이나 센서 및 전송매체에 전원 없이 신호광을 멀리 전송할 수 있다는 특징을 가진다.

전자의 예로서는 광파이버 끝에 ZnS(Ag) 신틸레이터와 ^6Li 의 화합물인 LiOH를 발라서 열중성자속분포를 측정하는 것이 있고, 후자는 플라스틱신틸레이션파이버(PSF)가 있다. PSF자신이 센서와 전송매체를 겸하고 있기 때문에, TOF법으로 원자력 시설내의 선량분포를 측정할 수 있다.

4) 고분해능화 상온반도체 검출기

방사선센서용 반도체 재료로서는 Si과 Ge이 많이 사용되어 왔다. 그러나 이것들은 밴드갭이 낮기 때문에 상온에서는 열노이즈가 크고 고분해능을 얻기 위해서는 냉각시켜야 한다. 상온에서 사용할 수 있는 밴드갭의 조건을 만족시키기 위해 단원소물질에서 얻을 수 없는 특성을 화합물 반도체에서는 얻을 수 있다. 상온사용이 가능한 대표적인 화합물 반도체로서는 ZnSe, ZnTe, HgI₂, CdSe, Bi₂, AlSb, Cs₃Sb, CdTe, GaAs, WSe₂, InP 등이 있지만 실용화된 것은 GaAs, CdTe 정도이다.

상온반도체 검출기는 결정생성법의 개량이나 다원소계 화합물 반도체의 개발, 그리고 전자회로나 디지털신호처리 기술의 응용에 따라 더욱 고분해능화 되는 동시에 X선의 에너지스펙트럼측정, 위성통신, 휴대전화 등 많은 분야에서 실용화 될 것이다.

3. 차세대 방사선스펙트로스코피

1) 초전도터널접합소자에 의한 X선 검출

에너지분해능이 우수한 방사선검출기로서 반도체검출기가 널리 사용되어 왔지만 그 에너지분해는 신호전기량의 통계적요동(5.9KeV의 X선에 대하여 100eV정도)으로 대폭적인 향상은 기대할 수 없다.

그러나 초전도체에서 통계적요동의 비율은 반도체 경우의 수 10분의 1로 된다. 초전도터널접합에서는 여기 전자를 신호전하로서 끄

집어 낼 수 있으므로, 검출소자로서 이용할 수 있다. 초전도전이온도가 비교적 높은 Nb이나 Ta 등의 초전도체를 이용한 검출기는 소형이며 간단한 ^3He 냉각조로 충분히 냉각시킬 수 있다.

예로서 단접합소자(Nb/Al/AIO_x/Al/Nb)를 사용하여 5.9KeV의 X선에 대하여 36eV라는 고분해능을 얻고 있다. 초전도체 방사선검출기에는 단접합소자를 수십개 직렬한 직렬접합소자를 이용한 것도 있다.

2) Bolometer를 이용한 X선/중성입자검출

중성입자검출기는 입사입자가 검출기와 상호작용할 때 산란 또는 반응으로 발생하는 하전입자의 운동에너지를 어떠한 방법으로 잡아내는 것이다. Bolometer는 방사선이 물질과 상호작용할 때 물질에 준 에너지에 의해 상승한 온도가 시그널로 된다.

Bolometer는 흡수체에서 발생한 열량을 온도계로 측정한다. 흡수체의 소자는 Si, HgTe 등이다. 에너지분해능을 올리기 위해서는 열용량을 작게 하고 되도록이면 저온으로 유지해야 한다. 냉각 방법으로는 ^3He 의 감압, 희석냉동, 단열소자기 등이 있다.

응용분야는 X선천문학이나 Dark Matter(암흑물질) 검출기 등이 있고 특히 X선응용에서는 비분산형X선 검출기로서 고에너지분해능(5.6KeV에 대하여 7eV)이 실현되고 있으며 단결정을 사용한 분산형 분광기도 개발중이다. 그리고 방사광 측정에도 응용될 것이다.

3) 준안정초전도입자를 이용한 중성입자 검출

소립자적 우주물리학에서는 암흑물질, 태양 뉴트리노, 모노폴 등의 검출이 초점이며 새로운 원리에 입각한 검출기가 개발중이다. 새로운 검출기로서는 저에너지영역(<1KeV)을 염두에 두고 검출기를 횡단하는 입자가 잃는

에너지를 온도로 관측하는 수단을 채택하고 있다.

준안정초전도입자(SSG, Superheated Superconducting Granules)에 의한 검출원리는 매우 단순하다. 제1종 초전도체에는 초고온과 초냉온의 두가지 성질이 있으며 이들 사이의 영역에서 미립자는 준안정상태로 된다. 준안정 초전도상에 있는 금속입자(Zn)에 외부에서 적당한 자극을 주면 비가역적으로 상전도상으로 옮겨간다. 이 과정에서 「자기력」, 「열적」과정이 일어나는데 그것을 검출하는 것이다. Bolometer적 방법으로 측정한다.

4. 방사선센싱과 첨단기술의 융합

1) 최근의 광전자증배관과 반도체광전소자
광전자증배관(PMT)은 응답속도가 빠르고 미약광을 검출할 수 있는 우수한 특징을 가지고 있기 때문에 분광분석이나 방사선계측, 의료기기 등 폭 넓게 사용되고 있다. 그러나 종래의 PMT는 유리관이나 전극 형상의 제약으로 소형화는 곤란하였다. 이 요구를 실현하기 위하여 반도체광전소자가 널리 사용되고 있는 TO-8형의 금속패키지를 PMT에 이용할 것이 검토되며 새로운 박형전극(Metal Channel Dynode)과 함께 메탈패키지 PMT가 개발되었다.

메탈패키지 PMT는 컴퓨터시뮬레이션에 의한 전자궤도설계와 최신의 미세가공기술을 구사하여 만든 박형전극을 메탈패키지속에 가지고 있는 PMT이다. 한편 Siphotodiode(SIPD)인 반도체광전소자는 넓은 파장영역에 감도가 높고, 소형이고 값이 싸다는 이유로 공업계측이나 분석장치, 민간용수광소자 등에 널리 사용되고 있다. 또한 SIPD는 광계측뿐만 아니라 X선이나 하전입자도 직접 검출할 수 있다고 알려져 고감도화, 고신뢰성화, 고기능화, 집적화가 진행되고 있다.

2) 소형냉동기를 이용한 전기냉각식 Ge 검출기

Ge검출기는 γ 선 분광에 있어서 없어서는 안될 검출기이지만 사용시 액체질소로 냉각시켜야 하고 그 유지관리에 수고스럽고, 액체질소용기의 소형화도 어렵다. 따라서, 액체질소를 사용하지 않고 보수없이 사용할 수 있는 Ge검출기의 개발연구가 진행되어 왔다.

최근 액체질소를 사용하지 않고 전원만 공급해 주면 사용할 수 있는 소형 냉동기를 이용한 전기냉동식 Ge검출기가 해외에서 개발되었다. 이 전기냉동식 Ge검출기의 개발로 장치의 소형화와 배터리구동화로, 원자로내의 협소한 장소에 대한 방사능측정, 환경모니터링, 바다물속에서의 환경방사능측정, 핵사찰용 휴대식 검출기 등에 이용할 수 있게 되었다.

3) 레이저에 의한 방사능검출

레이저를 탐침(Probe)으로 한 분광분석법은 최근의 광기술의 진전에 따라 검출감도, 스펙트럼분해능이 비약적으로 향상되어 원자·분자검출에 가장 유력한 수단의 하나가 되었다. 분광분석에는 흡광분광법, 형광분광법, 발광분광법의 세가지가 있는데 특히, 파장가변레이저를 구사한 공명여기에 의한 형광분광법 또는 이온화분광법은 검출감도와 원소선택성에 있어서 광검출기의 잠음한계나 단일원자 검출 등의 극한수준에까지 도달하고 있으며 다른 원소분석법에 비하면 신속성, 범용성, 원격조작성 등의 관점에서 방사성동위원소(RI)분석에 대한 많은 이점과 매력을 가지고 있다.

레이저의 방사선센싱과 원자력기술에의 응용에는 (1)핵물리연구(Fe, Ag, Sn, Pt, Au, Hg) 등 희소·단수명핵종의 핵스핀, 자기/4중극모멘트 등의 핵특성과라미터의 측정, (2)환경시료분석(Kr, Xe 등의 희가스나 ^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{97}Tc 등의 장수명핵종의 자연동위원체

조성비의 측정, 핵실험으로 환경속에 방출된 ^{90}Sr , ^{239}Pu 등의 극미량인공RI의 정량, 환경유해 물질인 Hg, Pb, NO_x/SO_x등의 고감도 모니터링, (3)동위체분리기술(U, Th 등의 핵연료 물질의 레이저농축기술)등이 있다.

이상과 같이 레이저공명이온화분광법은 극

저준위핵변환물질의 초고감도/고선택적 검출이 가능케 되어 지금까지 방사선측정을 기반으로 수행해 온 핵계장, 조사선량평가, 개인 피폭관리, 환경방사선모니터링 등의 분야에 기술혁신이 기대된다.

잡편

카브리해의 해적들

본거지 포트 로열...웰시 등 수많은 전설적 두목 명멸

킹스턴에서 남서쪽으로 80km 정도 가다보면 포트 로열(Port Royal)이란 작은 항구도시를 만난다. 조용하고 아름다운 경관을 자랑하는 이곳은 호텔과 유흥업소 등이 밀집한 평범한 모습의 관광 도시.

그러나 3백년 전까지만 해도 포트 로열의 별명은 '세계에서 가장 사악한 인간들이 모여사는 도시'(Wickedest City in the World). 이처럼 불명예스러운 별명이 붙게 된 까닭은 그 유명한 카리브해의 해적 때문이다. 카리브해에 해적이 나타난 것은 17세기 초. 원조는 '부캐너'(Buccannery)라 불리며 에스파냐라 섬을 중심으로 일하던 백인 잡역부들. 이들은 원래 유럽 대륙에서 정처없이 떠돌던 건달들로 신대륙에 가면 일확천금할 수 있다는 소문을 듣고 카리브로 몰린 사람들.

이들이 해적때로 돌변한 직접적 계기는 16세기 중반부터 스페인이 쿠바와 도미니카를 중심으로 시가과 사탕수수를 독점하기 위해 에스파냐라 섬주변을 직접 영향권 안에 두게 되자 바다로 밀려난 부캐너들이 해적으로 바뀌게 된 것. 이들의 성공담은 곧이어 카리브해에 흩어져 있던 수많은 백인 건달과 흑인 노예들에게 즉각 전달, 해적 지원자는 순식간에 늘어났다. 당시 이들의 총 본부가 바로 자메이카의 포트 로열이었다.

이후 1655년 영국에게 자메이카를 뺏긴 스페인이 실지회복을 위해 자메이카를 계속 공격하자 당시 영국 총독 토머스 모디포드가 부캐너들에게 스페인 상선을 공격하게끔 몰래 무기와 자금을 지원하면서 해적들은 번창의 길을 걷게 됐다. 소설에 등장하는 수많은 1세대 해적들이 탄생한 시기도 바로 이때였다. 1671년 파나마 약탈로 유명한 스페인의 애꾸눈 웰시(Welsh) 선장과, '카리브의 검은 안개'라 일컬어졌던 영국의 헨리 모건은 당시 중심 인물. 이들의 약탈과 방화는 결국 카리브에서 네덜란드와 스페인의 힘을 약화시키는 결정적 역할을 했고, 해적왕 헨리 모건은 그 공로로 영국령 자메이카의 고급관료 자리까지 오르게 된다. 1692년 해적들의 본거지 포트 로열은 천벌(?)인지 항구 전체가 파손되는 대지진을 만나게 된다. 그러나 해적 세력은 약화되지 않고 오히려 더욱 강해져만 갔다. 당시 신세대 해적왕으로 유명한 인물은 검은 수염으로 통하던 에드윈 테크, 이탈리아 출신의 칼리오 잭이 있었다.

해적산업이 낱알이 번창, 카리브해는 물론 카리브섬 내부와 대서양에까지 진출하게 되자 영국은 1693년부터 대규모 군함을 카리브에 파견, 이들을 소탕하기 시작했다. 영국군의 공격으로 전설적 해적 에드윈 테크와 칼리오 잭은 각각 1718년과 1720년 체포돼 교수형을 받는다. 이들의 죽음과 함께 이후 카리브해 해적들도 자취를 감추게 되었다.