



방사선 및 방사성 핵종의 이용 기술과 전망

이 재 기

한양대학교 원자력공학과 교수

18 96년 텀트겐이 X선을 발견한 직후부터 X선의 이용은 병원을 중심으로 매우 빠르게 확산되었다. 골절 환자의 뼈의 파손 상태나, 흉상 환자의 종양의 정확한 위치를 X선 투과 사진으로 파악할 수 있다는 것은 의학의 측면에서 보면 분명히 신이 내린 선물과 같은 것이었다.

그 후 1세기가 지나는 동안 인공으로 다양한 종류의 방사성 핵종의 생산이 가능해지고 여러 종류의 방사선 발생 장치들이 개발되었을 뿐만 아니라, 방사선을 검출하여 유용한 형태의 정보를 제공하도록 하는 장치들이 속속 개발됨으로써 오늘날 방사선이나 방사성 핵종의 용도는 실로 다양해졌다.

병원에서는 전통적인 흉곽 사진이나 골격 사진 또는 치아 사진 외에도 위장 촬영, 척추 촬영, X선 CT, 간이나 뇌의 스캐닝, 양전자 방출 단층 촬영(PET) 등 질병의 진

단을 위한 고도의 라디오그래피 기술이 이용되는가 하면, 간염의 검사 등 면역학적 분석 기술이 핵의학 부문에서 보편화되어 있다.

또한 암종의 치료나 갑상선 기능 개선을 위한 치료 방사선 분야도 괄목하게 발전하였고, 중재 방사선학도 외과학적 시술의 보조 수단으로 이용되고 있다.

생명과학 부문에서도 DNA 염기 서열 결정, 유전자의 작용 등 분자 생물학 또는 세포생물학 분야의 필수적인 연구 수단이 되고 있으며, 방사선 육종을 통한 식품종의 개발이나 물질이나 영양소의 이동을 추적할 수 있게 함으로써 생리학 또는 약리학 분야에서도 빼놓을 수 없는 요긴한 수단이 되고 있다.

또 다른 쪽에서는 방사선이나 방사성 핵종의 이공학적 또는 산업적 이용도 괄목하게 이루어지고 있다. 투과 사진의 원리를 이용한 비파괴 검사·수준계·밀도계·수분계·

두께계 등 각종 공정 제어용 게이저 활용, 극미량 시료의 분석, 물질 성분 및 구조의 분석, 유량률이나 물질 수지의 분석, 화학적 공정의 촉매, 신소재 개발, 살충 또는 해충 구제, 멸균, 식품 보존, 지층이나 유물의 연대 측정, 지하수 수리 연구, 공해 물질 등 환경 중 물질의 이동, 배기 및 하수의 처리 등 환경 기술 부문 이용, 정전기 제거, 화재 감시, 점화 촉진 등을 예로 들 수 있다.

원자력 발전과 같은 정통적인 원자력의 이용도 결국은 핵분열 또는 핵융합 과정에서 방출되는 방사선 에너지를 열 에너지로 변환하고 이를 다시 전기 에너지로 바꿔 이용하는 것이므로 넓게는 방사선 이용의 한 부문으로 볼 수 있다.

이러한 원자력 또는 방사선의 동력 이용은 그 규모가 방대한 특성으로 인해 일반적인 방사선 이용과는 별개의 영역으로 취급되어 왔을 뿐

만 아니라, 우리 나라의 경우 이 부문이 마치 원자력산업의 전부인 것처럼 정부 정책의 중심이 원자력 발전에 치중되어 있었다.

그런데 동력원의 확보라는 상대적으로 단순한 산업 공정에 비해 위에서 열거한 것과 같은 다양한 방사선 이용 기술은 높은 부가 가치를 창출하는 잠재력을 지니고 있다.

최근에는 우리 정부도 이러한 특성을 이해하여 원자력 중장기 연구 개발비의 20% 이상을 방사선 이용 부문에 투입할 계획을 수립하여 추진하고 있는데 이는 바람직한 방향이다.

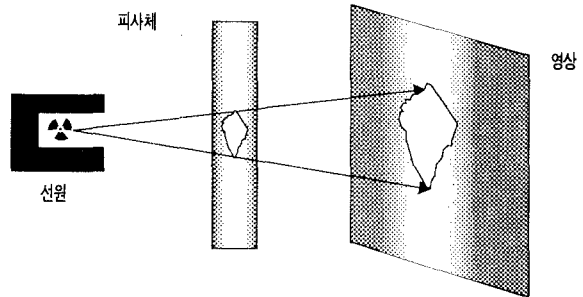
99년이 저물어가는 현시점에서 지구촌 곳곳의 화두는 새로운 밀레니엄의 전망과 그 준비이다.

방사선 문제는 그 발전으로부터 1세기가 지나 둘째 세기로 접어들면서 새로운 밀레니엄으로의 진입이 되고 있어 다음 세기에서 방사선의 가치와 위상이 어떠할지가 의문이 아닐 수 없다.

이 글의 목적은 방사선 이용의 과거와 현재를 살펴봄으로써 21세기의 방사선 이용을 전망하려는 것이다.

방사선 및 방사성 핵종 이용 기술

방사선의 유용한 가치뿐만 아니라 그 부작용인 방사선의 위험에 대해서도 널리 알려진 지금에도 방사선 이용을 고집하고 있을 뿐만 아니라



〈그림 1〉 라디오그래피의 원리. 방사선의 투과 능력에 의해 피사체(인체를 포함)의 내부 형상을 영상으로 만들수 있다. 영상은 필름, 형광 스크린, 또는 검출 소자를 이용한 디지털 이미지로의 처리도 가능하다.

그 용도가 나날이 확대되어 가는 원동력은 어디에 있는 것인가?

그것은 방사선을 이용하는 기술이 다른 기술이 갖지 못하는 기능을 가졌거나 같은 기능이 있는 다른 기술에 비해 상대적으로 비용이 적게 든다는 것을 암시하는 것이다.

방사선의 이러한 기능적 특질은 ① 물질을 투과할 수 있는 능력 ② 전리·핵반응·여기·산란 등 원자 단위의 반응 능력 ③ 유전자 변이 등 생물학적 작용 능력 ④ 극히 민감한 검출성 ⑤ 화학 작용의 능력 ⑥ 고유 에너지 등 지문 특성과 같은 몇 가지 기본적 특성에서 비롯한다.

이러한 기본 특성들의 하나 또는 둘 이상을 목적에 맞게 응용함으로써 다양한 이용 기술이 실현 가능하게 되므로, 방사선의 이용 분야는 위에서 예시적으로 보인 것에 한정되지 않으며 앞으로도 얼마든지 새로운 부문에 적용할 수 있는 기회가

있다. 특히 급속히 발전하고 있는 컴퓨터 기술과 접목함으로써 방사선 이용 기술은 그 범위가 넓어질 뿐만 아니라 정교함을 더할 수 있다.

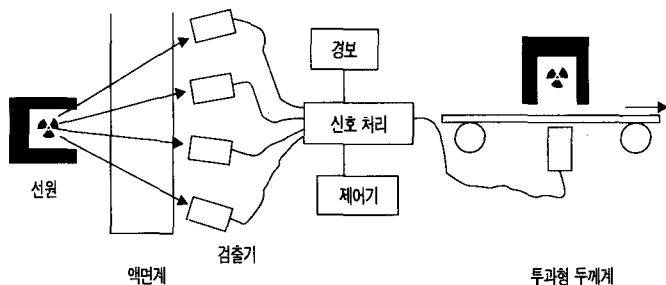
1. 투과 능력의 이용

방사선이 가장 먼저 이용되기 시작한 것이 바로 X선의 투시적 능력이었는데 이는 X선의 강한 물질 투과 능력에서 기인하는 것이다.

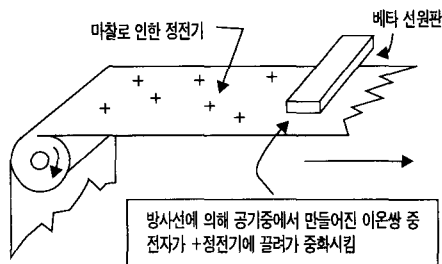
이 능력에 추가하여 방사선이 사진 필름을 감광시키거나 형광 스크린을 빛나게 만드는 감광 능력이 결합되어 방사선 영상 기술(라디오그래피)이 발전하게 되었다.

라디오그래피는 크게 인체에 대한 것과 기타 사물에 대한 것으로 구분할 수 있는데, 병원에서 질병의 진단을 위해 사용하는 진단 방사선과 부문의 이용이 대부분 이를 응용하는 것이다.

여기에는 X선이 가장 널리 이용



〈그림 2〉 투과형 방사선 게이지의 원리. 물체를 투과하는 방사선의 강도에 따라 액면의 위치나 시편의 두께를 감시하고 필요하면 경보를 울리거나 제어 회로에 신호를 보낸다.



〈그림 3〉 방사선을 이용한 정전기 제거. 공기 불로워의 공기통로에 방사선원을 장치하여 이온화된 공기를 불어주는 방법이 좁은 틈새의 정전기 제거에 사용된다.

되지만 체내에 핵의약품을 투여한 후 외부에서 방사선을 검출하여 영상을 만드는 감마 카메라·PET 등의 신티그래피도 기본적으로는 방사선의 투과력을 근거로 한다.

영상은 필름으로 사진을 만드는 것이 전통적인 기술이지만 투사판과 TV 카메라를 이용하여 실시간으로 영상을 관찰하는 플루로그래피도 있다. 근래에는 미소 검출기 배열을 이용하여 디지털로 이미지를 구성하는 기술도 발전하고 있다.

물체를 투시하는 것은 비파괴 검사 기술로서 주로 용접부나 주물의 결합 검사에 이용된다.

X선 발생 장치나 수 십GBq 정도의 ^{192}Ir 이 많이 사용되지만 두터운 물체에 대해서는 100GBq 단위의 ^{60}Co 도 사용된다. 항만의 물품 검색기도 X선 라디오그래피 기술이다. X선 또는 감마선 라디오그래피 외에 중성자 또는 전자선이 사용되기도 한다.

중성자 라디오그래피는 원자 번호나 밀도가 비슷하여 X선에 대해서는 투과력이 차별화되지 않는 물체를 투시하는 데에 특별한 능력을 가진다. 중성자는 직접 필름을 감광시키지 않으므로 Cd·Gd 등 변환판을 사용해야 한다.

자발 핵분열 핵종인 ^{252}Cf , 알파 핵반응을 이용한 ^{241}Am -Be 중성자선원, 나아가 가속기를 이용한 중성자 발생 장치를 사용할 수 있지만 충분한 강도의 중성자선을 얻기 위해서는 실험용 원자로를 사용해야 한다는 것이 이용의 일반화를 제한하는 요소가 된다. 한편 전자선은 화폐·우표 등과 같이 얇은 물체의 검사에 사용된다.

라디오그래피 외에 방사선의 투과력을 이용하는 기술로는 투과형 두께계·밀도계·수준계 등의 방사선 게이지와 연기 감지기를 들 수 있다. 이들은 물체의 두께나 밀도가 높을수록 방사선의 투과력이 저하

되는 성질을 이용하는 것이다. 수준계 등이 최대 또는 최소치만 감시하도록 설계한 것을 '방사선 스위치'라고도 부른다.

또 특정한 에너지를 갖는 이온이 물체를 투과하는 깊이가 거의 일정함을 이용하여 가속기를 이용한 이온의 주입으로 첨단 반도체를 제조하기도 한다.

얇은 시료층에서 구성 성분, 특히 원자 번호가 큰 물질의 존재비의 차이에 따른 베타 입자 또는 연질 X선(^{109}Cd 등 방사성 핵종에서 방출되는 특성 X선)의 투과도 차이를 이용하여 원유 중의 유황 농도, 수소 함유도, 모터 오일 첨가제 등을 분석하고 있다.

2. 전리 등 원자 단위 반응 능력의 이용

알파 입자·베타 입자 등을 '전리 방사선'이라고 부르는 이유가 물질에서 원자들과 작용하여 +인

이온과 -인 전자로 분리시키는 전리 능력이 있기 때문이다.

일반적으로 방사선의 매우 민감한 검출 능력도 이 전리 능력에서 비롯하는데, 방사선에 의해 만들어진 정전기를 그대로 또는 증폭하여 수집함으로써 전기적 신호로 변환이 용이하기 때문이다.

만들어지는 전하를 직접 이용하는 예는 정전기 제거 기술로서 제지 산업이나 섬유 산업 공정에서 발생하는 정전기를 방사선이 생성하는 이온이나 음전자를 이용하여 중화시키는 것이다.

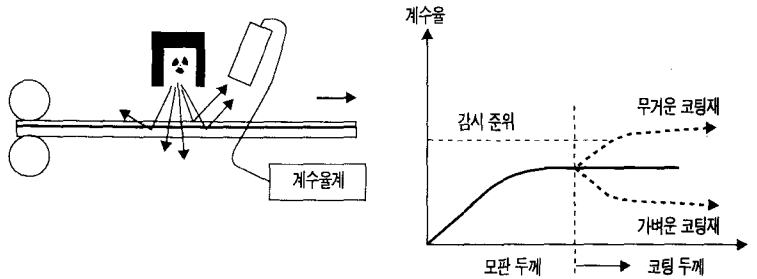
이러한 처리는 제품의 품질 관리 뿐만 아니라 화재를 예방하는 역할도 있다. 형광등의 점등 속도를 높이고 용접선의 균질성 향상에도 방사선에 의한 이온의 발생이 이용된다.

핵반응을 일으키는 성질을 이용한 대표적인 경우가 원자료이다. 즉 중성자가 우라늄에 포획되어 핵분열을 촉발함으로써 대량의 에너지를 내는 연쇄 반응이 가능하게 된다.

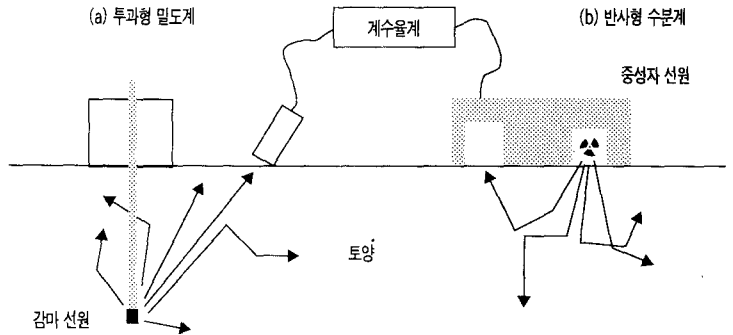
베타 입자가 물질을 구성하는 원자와 산란하는 정도의 차이를 이용하여 도금처럼 얇은 층의 두께를 감시하는 것이 반사형 두께계이다.

수분계는 중성자가 수소와 산란 반응을 잘 일으키는 성질을 이용하여 토양이나 곡물의 수분 함량을 측정하는 것이다.

지질학 연구나 광물의 탐사에서



〈그림 4〉 반사형 두께계의 원리. 모판과 코팅재의 밀도 차이에 따른 베타 입자의 후방 산란을 차이를 감시한다.



〈그림 5〉 투과형 밀도계와 산란형 수분계의 원리의 비교. 토양에 중성자 산란을 잘 일으키는 수분(수소 함유)이 많을수록 계수율이 증대된다.

시추공에 방사선원과 검출기를 넣어 산란 방사선을 분석함으로써 시추공 주변의 밀도 등 지층 구조를 이해할 수 있다.

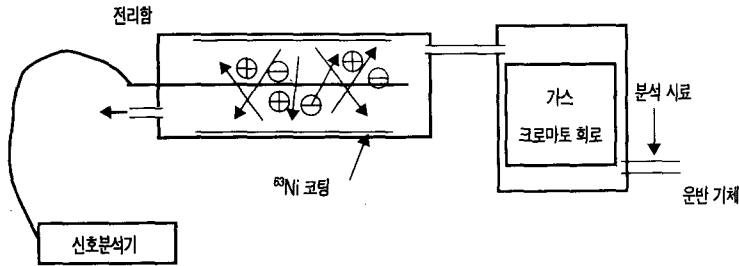
또 X선이 고체의 결정격자에 반사될 때 결정 격자층의 간격에 따라 간섭이 발생하는 성질을 이용하여 결정의 구조를 분석하는 X선 회절 분석(XRD)도 방사선의 산란을 이용하는 기술이다.

방사선이 원자나 분자를 여기시키고 여기 상태에서 기저 상태로 천

이할 때 나오는 2차 방사선을 이용하는 것도 있다.

이때 방출되는 2차 방사선이 가시 광선이며, 발생 기전에 따라 형광·섬광 또는 TL 등 빛이 방출되는데, 이를 이용하여 야광 물질·섬광 검출기·TL 검출기 등을 만든다.

특히 야광 물질은 방사성 물질의 이용 초기에 라듐과 형광 물질을 혼합하여 시계 다이얼 등에 널리 사용되었으나 라듐의 독성, 감마선 방출



〈그림 6〉 가스 크로마토그래피와 결합한 전자 포획 검출기(ECD)의 원리. 전자 친화도가 큰 물질이 유입되면 베타 입자에 의해 전리된 이온쌍의 재결합률이 높아 전리함 전류가 감소한다.

등의 이유로 현재는 ^3H 또는 ^{147}Pm 이 사용되며, 그 용도도 항공기나 선박의 필수 계기판·비상구 표시·군용 야간 장비 등에 제한적으로 사용되고 있다.

특히 방출되는 베타의 에너지가 낮아 생물학적 위해도가 작고 자연계에도 다량으로 존재하고 있는 ^3H 를 가스 상태로 봉입한 GTLS(Gaseous Tritium Light Source)가 가장 많이 사용되는 야광 물질이다.

섬광 검출기는 높은 감도를 가지므로 방사선 검출 분야에 널리 이용되고 있으며 TL 검출기는 주로 개인 선량계로 이용된다.

물질의 종류에 따른 전자 친화도의 차이를 이용하는 전자포획검출기(ECD)는 가스 크로마토그래피와 결합하여 기체 시료 중의 미량 원소 분석에 이용되는데, 산업계에서는 공정 폐수 중의 PCB 분석에 많이 이용되고 있다. 이때 방사선원으로는 순수 베타 방출 핵종인 ^{63}Ni 이 주로 사용된다.

3. 생물학적 작용 능력의 이용

방사선의 위험이 제기되는 이유도 인체가 방사선에 피폭할 경우 생물학적 작용의 결과로써 세포 사멸을 초래하거나 돌연변이로부터 암 위험이 증가하기 때문이지만 이러한 생물학적 작용 능력을 이용하기도 한다.

가장 전형적인 예가 식물에 의도적으로 방사선을 조사함으로써 돌연변이를 유발하고, 그 변이의 결과 가치 있는 유전자를 갖는 개체를 선별하여 육종함으로써 수확이 높은 작물, 병충해에 강한 작물 등을 얻는 방사선 육종 분야이다.

이미 우리나라에서도 이 기술을 이용하여 벼(원농1호)·참깨(안산깨)·보리(방사6호)·콩(KEX-2), 무궁화(백설·원농4호) 등 가치 있는 여러 신품종을 개발하였다.

돌연변이에 의한 새로운 품종이 아니라도 씨앗을 1Gy 내외의 방사선으로 자극함으로써 당대에만 유용한 효과를 나타내게 활성화할 수

도 있는데, 이러한 기법은 작은 씨앗을 갖는 식물(예: 무우·배추·깨·담배·토마토 등)에 주로 이용할 수 있다.

곤충의 불임화를 통해 해충을 구제하는 기술도 주목받고 있다.

많은 개체의 수컷 곤충을 길러 교접기 직전에 X선을 조사하여 불임으로 만든 다음 자생지에 산포하면 이들이 수정기의 암컷들과 교접함으로써 알의 수정에 실패하도록 만들면 다음 세대의 해충 발생이 줄어들게 된다.

이 기술은 사람이나 가축의 살충제 피해는 물론, 환경 오염 없이 해충을 구제한다는 큰 장점이 있다.

방사선의 생물학적 작용을 이용하는 또 하나의 큰 분야는 식품 조사이다.

식품 조사는 두 가지 부류의 효과를 이용한다. 첫째는 식품 중의 미생물을 죽임으로써 기생충이나 세균의 감염을 방지하거나 벌레의 발생을 방지하는 것이며, 둘째는 근채류·견과류 등의 발아를 억제하여 농산물의 저장성을 높이고 품질 변화를 방지하는 것이다.

첫째 범주의 처리로써 쇠고기나 닭고기를 조사하여 살모넬라균이나 E-콜리(혹은 O-157)균의 감염을 예방하며, 고추·깨 등의 조미료류의 벌레 발생을 억제한다.

둘째 범주의 처리로는 양파·감자·밤·마늘 등에 방사선을 조사

함으로써 장기간 저장시 밭아로 식품으로서 품질이 저하되는 정도를 크게 완화한다.

치료 방사선 과학 분야에서 암종에 방사선을 조사하여 암을 치료하는 것은 말할 것도 없이 생물학적 작용의 이용이다.

그 외에도 꿀수나 이식 장기의 거부 반응 완화를 위해 X선으로 전처리하기도 하며, 일화용 주사기·봉대·거즈 등 의료용품의 멸균에도 감마선 조사가 이용된다.

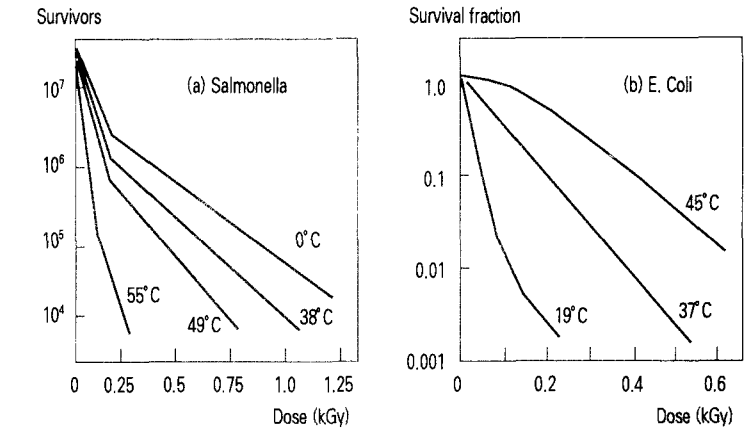
방사선 멸균은 전통적인 방법에 비해 열에 약한 재료에 대해서도 적용할 수 있고, 완전 포장된 상태에서 멸균하므로 재감염의 우려가 작은 장점을 지니고 있다.

4. 민감한 검출성의 이용

방사성 핵종은 원자 하나 하나가 방사선을 방출한다. 극미량의 방사성 물질이라도 거기에 들어있는 방사성 원자의 수는 대단히 많아 용이하게 검출될 수 있다.

예를 들어 반감기가 1년인 핵종의 무게가 1fg(10^{-15} g)이면 그 방사능은 13Bq인데, 여기서 나오는 베타 입자를 계수 효율 20%인 검출기로 계측하더라도 156cpm으로서 백그라운드 계수율과 충분히 구분할 수 있는 정도가 된다.

그런데 1fg 정도의 극미량은 다른 측정 기술로는 측정이 불가능한 양이다. 그만큼 방사능 검출은 민감



〈그림 7〉 감마 방사선에 의한 (a) 살모넬라 및 (b) E. Coli 살상 효과. 살모넬라는 온도가 높을수록, E. Coli는 온도가 낮을수록 멸균 효과가 증대되고 있다.

하다.

방사성 핵종에 대한 이렇게 높은 검출 감도는 물질을 분석하는 유용한 수단을 제공한다.

방사화 분석은 분석할 시료를 원자량과 같은 중성자 빔 환경에 노출하여 방사화된 시료를 감마선 분광 분석 등의 방법으로 계량함으로써 본래 핵종의 함량을 얻는 방법이다. 방사화 분석법은 ICP 질량 분석 기법과 함께 현대 분석 화학 분야의 첨단 기술을 이루고 있다.

미량의 물질을 쉽게 검출할 수 있는 기술은 추적자 이용을 용이하게 한다. 추적자는 공정의 제어, 환경 중 물질의 이동이나 인체 내 신진 대사 등을 연구할 때 본래의 물질 이동에 영향을 주지 않으면서 표지 능력이 있는 물질을 투입하여 이를 추적하는 것이므로, 가능하면 작은 양이 사용되어야 하기 때문에 검출

감도가 높은 방사성 핵종을 이용하는 것이 특히 적합하다.

추적자는 방사성 핵종을 직접 이용할 수도 있고 방사성이 아닌 핵종을 투입 후 채취된 시료를 방사화 분석법으로 분석하는 후방사화 추적자 기술을 이용할 수도 있다.

추적자 기술은 위에서 예로 든 분야 이외에도 하저토 및 해저토의 이동, 곤충의 생태 추적, 화학 반응 기전의 규명, 지하수계의 탐사 등에 이용된다.

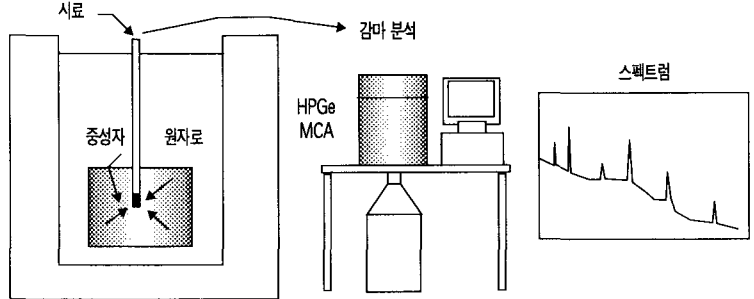
방사능의 높은 검출 감도는 직접 계량이 어려운 물질의 양을 계량하는 데에도 이용된다.

동위원소 희석법으로 불리는 이 기술은, 계량하고자 하는 미지의 양에 방사능 농도를 알고 있는 소량의 시료를 첨가하여 잘 섞은 다음 시료를 채취하여 방사능 농도를 측정함으로써 그 희석비로부터 미지량을



평가하는 방법이다.

분자생물학 분야에서 DNA의 인산 원자를 ^{32}P 로 표지하고 이를 염기별로 절단한 다음, 전기영동을 거침으로써 DNA 파편들의 크기별로 배열한 다음, 자가 라디오그래피로 영상을 만들어 염기 서열을 분석하는 기법도 넓게 볼 때 방사성 추적자 이용 기술이라고 볼 수 있다.



〈그림 8〉 실험용 원자로를 이용한 방사화 분석 개요. 원자로에서 방출된 시료는 감마 스펙트로메트리에 앞서 필요한 화학적 전처리를 거칠 수도 있다.

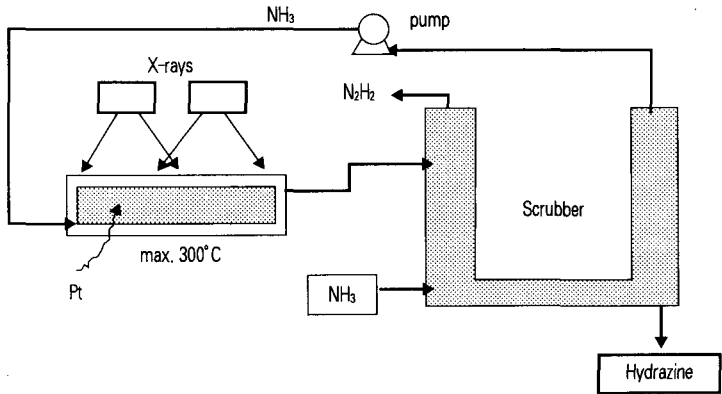
5. 화학 반응 등의 이용

방사선에 피폭하는 물질은 방사선의 에너지 부여에 의해 때로는 분자·결정 등에 손상될 수 있고 또는 방사선에 의해 생성된 이온이나 여기된 분자들이 분해함으로써 활성이 큰 화학 기단들을 형성하고 이들이 기단이 화학 반응에 참여함으로써 물성을 변화시킬 수 있다.

물론 이러한 변화는 개개 분자 단위로 발생하므로 어떤 가속 인자가 작용하지 않는다면 많은 경우 그 변화를 관측하기 어려운 수준이 된다.

따라서 방사선에 의한 화학 반응이나 재료의 손상은 일반적으로 100Gy 이상의 매우 높은 선량에서나 관찰된다.

즉 100Gy라는 선량은 물질 1kg 당 100J의 에너지가 흡수된 것으로서 1g당 0.1J 또는 $6.3 \times 10^{17}\text{eV}$ 의 에너지가 흡수되며 에너지 100eV 흡수당 변화 수를 나타내는 G값이 1.0 부근이라 하면 물질 1g당 6×10^{15} 개의 변화가 일어나는 셈이다.



〈그림 9〉 하이드라진의 방사 화학적 합성 공정 개요도

일반적으로 고체 또는 액체 물질 내에는 $10^{22} \sim 10^{23}$ 개의 분자들이 존재하므로 100Gy의 방사선에 의한 변화율은 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ 또는 $10 \sim 100\text{ppb}$ 정도가 되어 정밀 분석으로 검출될 수 있는 수준이 되기 때문이다.

화학적 반응을 산업에 이용하는 예는 고체 연료인 하이드라진을 합성할 때 배금 촉매 위에서 X선을 조사함으로써 수율을 높이고 있다.

살충제 제조에 널리 사용되는 염화 공정에 방사선이 효과를 내며 에틸모리마이드 생산에도 감마선 전처리가 공정 효율을 높인다.

탄화 수소의 황산화 반응은 G값이 5,000 정도로서 비교적 높은 수율로 생분해성 세제를 합성하는 데에 이용될 수 있다.

또 합성 수지 계열은 방사선 조사에 의해 분해 또는 중합 반응이 일어나는데 대체로 산소 환경에서는

분해가, 무산소 환경에서는 중합이 선호적이 된다.

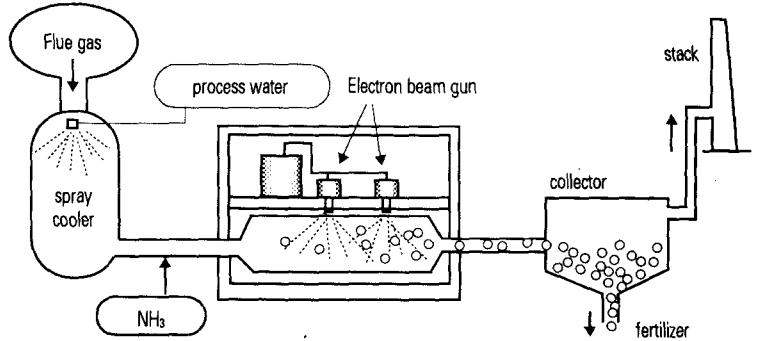
이에 따른 수지의 경화, 그래프팅, 가교 반응을 이용하여 재료의 물성을 개선하는 공정들이 개발되어 사용되고 있다.

기능 섬유의 개발, 페인트 표면 처리, 타이어 성능 개선, 고절연 플라스틱, 형상 기억 플라스틱 또는 열수축성 플라스틱의 생산 등이 그 예이다.

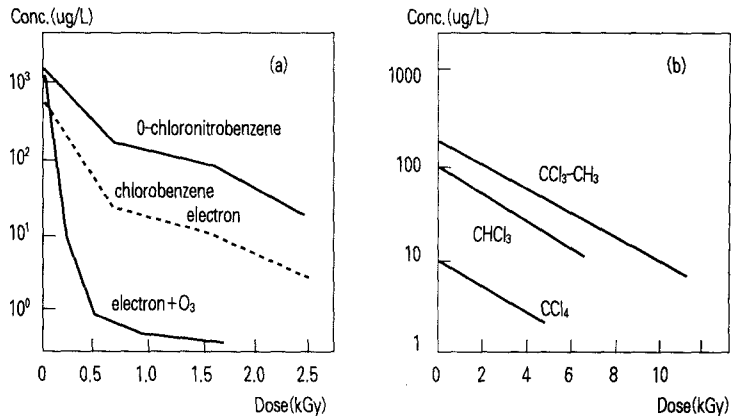
이러한 방사선 처리 공정을 관리하기 위해서는 조사하는 선량이 적절히 조절되어야 함은 물론인데, 이때 재료의 선량을 측정하는데 사용되는 플리케 선량계 또는 쉐릭 선량계 등의 화학 선량계도 결국은 방사선에 의한 화학 반응의 정도를 분광학적 방법으로 측정하는 기술이다.

방사선의 화학 작용의 이용에서 주목받는 분야가 환경 보호 목적의 이용으로 주로 전자 가속기를 이용한다.

에바라(Ebara) 공정으로 불리는 이 처리에서는 배기 가스를 전자선으로 조사하면 공기 중의 $N_2 \cdot O_2 \cdot H_2O \cdot CO_2$ 등의 분자가 여기되거나 분해되어 생성되는 활성 기단들이 배기 가스 중에 함유된 SO_x 및 NO_x 와 반응하여 각각 황산과 질산으로 변환시킨다. 여기에 암모니아를 부가하면 분말상의 $(NH_4)_2SO_4$ 또는 $(NH_4)_2SO_4 \cdot 2NH_4NO_3$ 로 변환할 수 있는데 이들은 비료로 사용



〈그림 10〉 전자선으로 배기 가스를 정화하고 부산물로 비료를 얻는 Ebara 공정의 개요



〈그림 11〉 수중 염화벤젠류(a) 및 염화알케인류(b)의 전자선에 의한 분해. 염화벤젠류에서는 전자선과 오존을 병행하면 시너지 효과를 얻을 수 있으나 염화알케인류에서는 오존의 효과는 관찰되지 않았다.

될 수 있다.

연구 결과에 의하면 SO_x 와 NO_x 를 동시에 제거할 경우 다른 제거 공정에 비해 경제적인 기술로 평가되었다.

폐수를 전자선으로 처리하면 폐수 중의 유기 화합물의 분해, 박테리아 등 병원체의 살균, 입자들의 응집 등을 유발하여 효과적인 정화

가 가능함이 시범 시설의 운영 경험 등에서 밝혀졌다.

같은 원리가 상수원의 정화에도 이용될 수 있다. 오늘날 비료나 농약의 사용 증대와 산업 폐수의 관리 소홀로 인해 지하수나 지표수 오염이 우려할 수준에 이르고 있음을 고려하면 발전시켜야 할 분야임이 분명하다.



6. 지문 특성의 이용

방사성 핵종은 방출하는 방사선이 고유한 에너지를 갖거나 반감기가 불변인 성질을 가지고 있는데, 이런 특성도 방사선의 이용 동기를 제공하고 있다.

앞서 언급된 방사화 분석도 방사화된 핵종이 방출하는 감마선의 에너지가 고유하므로 감마 스펙트로메트리에 의해 매우 작은 양까지 용이하게 측정할 수 있다는 데에 근거하고 있다.

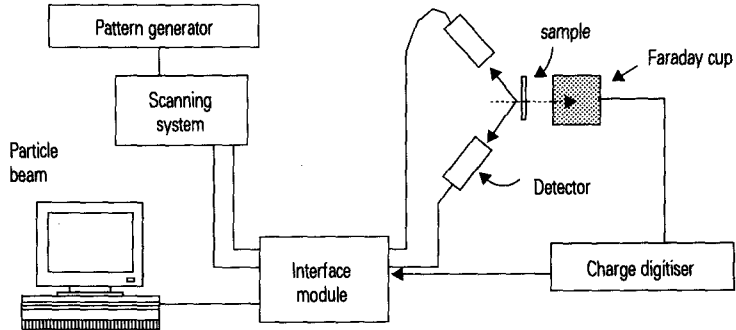
또 핵종마다 방출하는 특성 X선이 고유한 에너지를 가짐을 이용한 형광 X선 분석 기술이 첨단 분석 장치에 이용되고 있다.

이때 분석할 시료에 조사하는 일차 방사선은 어떤 종류를 사용하느냐에 따라 XRF·IXRF·PIXE·PIGE 등으로 구분된다.

XRF는 X선을 일차 방사선으로 조사하여 시료에서 광전 효과나 콤프톤 산란 반응으로 K각 전자를 축출하면 상위 궤도 전자가 천이하면서 고유한 에너지의 2차 특성 X선을 방출하므로 이를 분석하여 구성 원소의 종류와 농도를 평가하는 것이다.

IXRF는 일차 방사선으로 방사성 핵종에서 방출되는 감마선을 사용하므로 선원 장치가 매우 단순화될 수 있다는 장점이 있다.

PIXE는 일차 방사선으로 가속기에서 얻은 입자를 사용하는 것으로



〈그림 12〉 마이크로 PIXE의 개념도

써 중하전입자의 물질과의 반응을 이 높으므로 양성자 빔 등을 매우 가늘게 입사시켜도 형광 X선을 충분히 얻을 수 있다는 장점이 있다.

따라서 오늘날 발달된 영상 처리 기술과 접목하여 극미한 표면의 구성 분포를 2차원 또는 3차원으로 구성할 수 있는 능력을 가진다.

이러한 마이크로 PIXE 기술은 하나의 세포 내 물질의 분포까지 측정할 수 있는 분해능을 가지므로 생명 과학 및 의학 분야에서 활용이 기대된다. PIGE는 PIXE와 유사하나 특성 X선이 아닌 즉발 감마선을 분석한다.

반감기가 고유하다는 특성은 지층이나 유물의 연대를 측정하는 데에 이용된다.

생태계와 탄소의 교류가 이루어지지 않는 탄소를 함유한 물체의 ¹⁴C 농도를 측정하여 평형 농도와 비교함으로써 경과 시간을 평가할 수 있는데 주로 고고학 분야에서 사

용된다.

미량의 ¹⁴C 분석 기술은 액체 섬광 계수가 전통적으로 사용되었으나 근래에는 보다 정확도가 높은 ICP 질량 분석기를 사용할 수 있다.

지질의 연대 측정에는 U 시리즈 외에도 Ru-Sr·Sm-Nd·Pb·Nd-Sr·Lu-Hf·La-Ce·K-Ar 등이 활용된다.

신체의 일부인 체모·손톱 등에 함유된 성분 원소의 구성이 미소하게는 사람마다 특징이 있다는 점에 착안하여 방사화 분석 등의 방법으로 이들 시료를 분석하여 일치 여부를 판정하는 기법들이 법의학 분야에서 널리 사용되고 있다.

방사선 이용의 전망

방사선을 위험한 것으로 보는 인식이 확산되어 가는 상황에서도 방사선의 이용은 의학 분야를 제외하고도 산업 현장에서 여러모로 사용

되고 있다는 사실은 그만큼 방사선의 강점을 입증하는 것이라고 볼 수 있다.

물론 새로운 기술들이 개발됨으로써 지금까지는 전리 방사선을 이용하던 분야가 새로운 기술로 대체될 수도 있겠지만, 한편으로는 방사선의 새로운 응용 기술이 개발될 잠재적 기회도 충분하다고 본다.

이러한 시각에는 방사선이 하나의 특유한 성질만이 이용되는 것이 아니라 미시적으로 그리고 거시적으로 다양한 성질들이 이용될 수 있는 소지가 크기 때문이다.

방사선 이용의 흐름을 본다면 기존의 상대적으로 단순한 이용 기술이 컴퓨터와 나노 테크놀로지 기술의 도움으로 정교해지고 더욱 복잡한 시스템에 적용되는 방향이 될 것이다.

방사선 검출기도 마이크로 스트라이프 다이오드 검출기·섬광 광검출 유 등 공간 분해능을 높이는 소형 검출기들이 속속 발전할 것이며, 양질의 이미지를 얻기 위한 픽셀간의 보간 기술이 보편적으로 사용될 것이다.

그렇다고 모든 방사선 이용 기술이 신기술로 대체된다는 것은 아니다.

방사선 게이지류는 재래 기술이지만 그 투시성과 편이성(특히 비접촉성)으로 인해 여전히 공정 관리의 유용한 수단으로 이용될 것이다.

방사선을 이용한 분석 기술 역시 결과를 해석하는 소프트웨어의 인공 지능화 등 사용자 친화도를 높여 지속적으로 사용될 것이다.

민감한 마모도 분석을 위해 가속기를 이용한 박막 방사화 기술의 사용이 증가할 것이다.

고성능이면서 소형화된 감마 분석기 덕분에 시추공 분석 등 현장 분석에 방사선 이용이 활발해질 것이다.

특히 중성자원을 이용한 즉발 감마 분석을 수행함으로써 전통적인 방사화 분석에 비해 분석 가능 핵종의 범위나 분석 정밀도를 한 단계 확대할 수 있을 것이다.

비파괴 검사 부문에서도 CT 기술의 일반화와 분해능의 정밀화가 이루어져 재료의 부식 상태까지 밝힐 수 있는 기술이 개발될 것으로 보이는데, 이 기술의 수요가 큰 분야는 콘크리트의 철근과 항공기 주요 구조재의 부식 상태를 검사하는 것이다.

방사선 가공을 통한 재료의 물성 개선은 신소재의 개발이 높은 부가 가치를 창출할 수 있어 다른 공정을 통해서도 지속적으로 연구되고 있는데, 그만큼 방사선을 이용한 소재 개발의 기회도 지속된다고 볼 수 있다.

특히 광물 자원의 한계와 합성 재료의 다양성은 수지의 이용에 초점을 맞추도록 하는데, 방사선 가공이

수지에 높은 효과를 나타냄은 그 가능성을 예측할 수 있게 한다.

의료에서 방사선이나 방사성 핵종의 이용 추세는 여전할 것으로 보이지만, 획기적으로 새로운 기술보다는 기존 개념의 기술을 더욱 정교하게 이용하는 방향이 될 것이다.

이미 상용화되고 있지만 과거에 사용되던 2차원적 평면 영상은 컴퓨터의 도움으로 3차원 입체 영상으로 발전하고 있다.

더욱이 이를 실시간으로 수행함으로써 중재 방사선 분야에서 유용하게 사용될 것이다.

치료 방사선 분야에서는 붕소 중성자 포획 치료(BNCT)를 위시하여 단수명의 알파 또는 낮은 에너지 베타 방출 핵종을 함유하는 특정한 운반체 화합물을 개발함으로써 크루즈 미사일과 같이 표적 조직에 정확히 도달하여 암을 치료하는 기술이 발전하게 될 것이다.

그러나 방사선에 의한 암 치료는 보다 효과적이고 위해가 작은 새로운 치료 기술의 출현으로 위협받을 수 있다.

복잡한 시스템 분야의 이용으로 우선 손꼽을 수 있는 것이 생명과학 분야의 이용이다.

전술한 크루즈 미사일과 같은 표지 화합물을 이용하거나 또는 구형 탄소 구조(fullerence, 예: C₆₀) 등 마이크로 물체에 방사능을 실어 보냄으로써 정밀 추적자로 사용될

수 있다.

이러한 추적자들은 특정 세포군의 활성화, 단백질이나 효소의 거동, 생리 및 약리 작용 등 생명과학 연구에 강력한 수단을 제공할 수 있다.

또 다른 복잡계의 하나로서 환경 및 생태계 연구에도 방사성 추적자 또는 후방사화 추적 기술의 사용이 늘어날 전망이다.

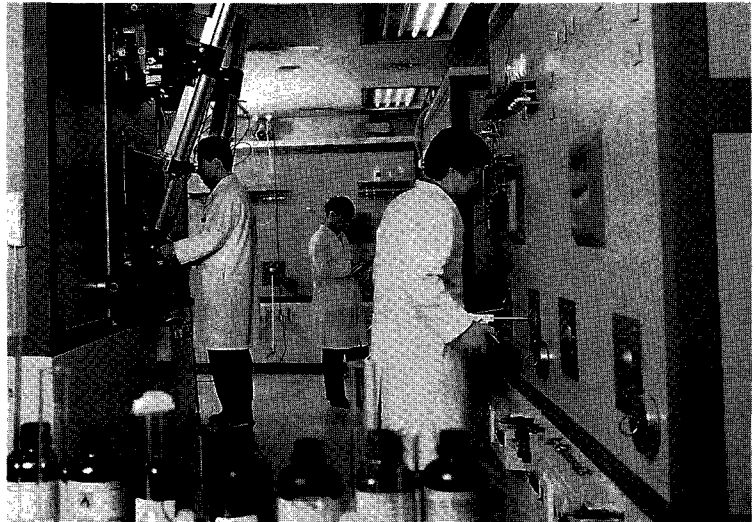
20세기 후반의 급속한 환경 악화를 인지함으로써 인류가 환경 현상의 이해와 그 치유에 높은 우선 순위를 부여할 것이기 때문이다.

방사선의 생물학적 작용을 이용하는 연구와 개발도 확대될 것으로 보인다. 식물의 방사선 육종을 통한 우수 유전자 개발도 지속될 것이며, 방사선 멸균이나 식품 보존을 위한 방사선 가공이 확대될 전망이다.

특히 해충의 구제에는 수컷 불임 기법에 추가하여 천적 살포도 대안인데, 이러한 천적 곤충을 기르는 인공 먹이를 감마선으로 살균함으로써 성공률을 높일 수 있다.

공해 방지 기술은 21세기에 인류가 풀어야 할 중대한 과제이다. 전자선을 이용한 배기 및 배수물의 처리가 경제적이며 효과적이라는 사실이 이미 시범 사업들을 통해 밝혀지고 있는 만큼 이러한 장치 및 시설들의 대량 활용이 예상된다.

고급 이용 기술 부문에서는 마이크로 PIXE·방사광 등의 고에너지



방사성 동위원소 제조 Hot Cell. 방사선을 위험한 것으로 보는 인식이 확산되어 가는 상황에서도 방사선의 이용은 의학 분야를 제외하고도 산업 현장에서 여러모로 사용되고 있다는 사실은 그만큼 방사선의 강점을 입증하는 것이라고 볼 수 있다.

입자 가속기를 이용하는 기술, 중성자 미세 산란 반응 등의 냉중성자 이용 기술 등이 첨단 분석 또는 가공 분야에 역할을 확대해 갈 것이다.

그러나 이러한 것들은 소요되는 비용과 규모로 인해 범용 기술로 보기는 어렵다.

맺음 말

이 글의 내용이 가치있기 위해서는 방사선 이용 기술의 현황을 살펴보는 것보다 앞으로 어떻게 될 것인가에 대해 최소한이라도 유용한 정보가 제공되어야 했다. 이런 점에서 이 글을 쓰면서도 필자의 아둔함이 눈앞을 가림을 어찌할 수 없었다.

미래를 전망하는 우리의 예측 능

력은 지극히 제한되어 있고, 또 미래는 과거와 현재의 연장선상에 있는 것이 아니라는 주장이 있음을 위안으로 삼아야 할 것 같다.

인간이 가진 특유한 능력은 상상력이며, 상상력은 단순히 이를 그리려는 사람의 머릿속에만 존재하는 것이 아니라 그것이 이루어지게 하는 힘을 가졌다고도 한다.

방사선은 종류도 여러이고 일으키는 현상은 다양하다. 아직 우리가 알지 못하는 방사선이나 작용도 있을 법도 하니 우리의 상상력을 발휘해 볼만한 대상이다.

방사선 이용의 가능성은 널리 열려 있으며 미래의 방사선 이용 기술이란 우리가 만들어 가는 것이다. 그러니 열심히 궁리하자. ☞