X선 공학에 있어서의 이용의 역사와 전망

小林 昌敏
Massatoshi Kobayashi : 東海대학 원자력공학과 강사

1895년에 X선의 발견자 렌트겐 자신이 렌트겐 사진촬영을 시작한 이래 100년이 되었으므로 이 기회에 X선 공학에 있어서의 이용의 역사와 전망에 대해 논하여 보고자 한다.

머리말

렌트겐에 의한 X선 발견의 역사에 대해서는 여기서 생략하지만, 1895년 독일의 뷸쓰부르그에서의 X선 발견의 뉴스가 프랑스에 전해지자 경악한 보앙카레가 프랑스 과학자들에게 "격문을 보냈다"고 하는 이야기가 있다.

X선 이용에 대해서는 렌트겐 자신이 촬영한 "렌트겐 사진"이 남아 있지만, 제1차 세계대전에서 큐리 부인이 렌트겐 장치를 전선으로 운반하여 부상병의 진단에 임했다고 한다. 이야기가 좀 옆으로 흘렀지만, 라돈가스를 캡슐에 봉입시켜 최초로 치료에 이용한 것도 큐리 부인이였다.

X선 이용의 역사를 더듬는데는 X선을 이용하기 위한 원리가 어떤 순서로 언제 발견되었는가를 보면 쉽게 알 수 있다. Table 1에 그것을 위한 연표를 제시했지만, 당시의 큰 사건도 함께 표시했다. X선 발견 이듬해인 1896년에 東京 제국대학의 야마가와(山川)씨, 쓰루다(鶴田) 씨에 이어 X선 사진 촬영에 성공한 무라오카(村岡)씨, 시마즈(島津) 씨를 들 수 있겠으나 당시 京都의 구제 제3 고등학교의 무라오카(村岡) 교수가 시마즈 제작소(주) 2대 사장의 협력을 얻어 촬영을 실시했는데, 당시에 촬영한 X선 사진이 Fig 1이다.

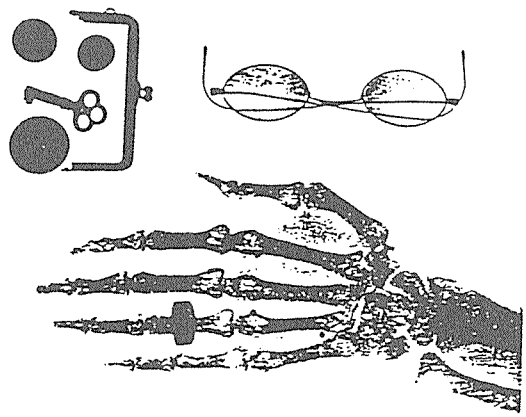


Fig 1. 1896년 일본에서 촬영된 X선 사진의 한예 (제공 시마즈 제작소)

X선 이용의 원리

1911년 바클라에 의해 특성 X선이 발견되

Table 1. X선이용 발전의 역사

연 도	
1859	음극선(陰極線)의 발견(J. 블류카)
1888	광전 효과의 발견(W.L.F. 홀왁크스)
1895	렌트겐 X선을 발견
1896	무리오카, 시마즈 X선 사진촬영
1902	큐리부인 라듐 발견
1905	광양자설(광양자 아인슈타인)
1909	의료용 X선장치의 실용(일본)
1911	바클라 특성 X선 발견
1912	블라그 X선회절(回折)을 발견
1914	라우에 X선에 의한 결정(結晶)의 해석(노벨상)
1915	아인슈타인 상대성 원리 발표
1924	시그번 X선 분광학(分光學) (노벨상)
1925	오제 전자의 발견(P. 오제)
1938	데바이 X선, 전자선 회절에 의한 분자구조의 결정(노벨상) 방사선 측정기 제조개시(일본)
1947	전자 현미경의 제조개시
1951	이메이지 인텐시파이어의 개발(캐스턴)
1956	이메이지 인텐시파이어 제조개시 형광 X선 분석장치제조개시(일본 원자력 연구소 설립)
1961	X선 텔레비의 제조개시
1963	X선 칸트미터의 제조개시
1964	전자선 마이크로 애너라이저의 제조개시
1965	2차 이온 질량분석법의 개발(스로지안)
1967	X선광전자 분석법의 개발(시그번)
1982	오제 전자분석법의 개발(R.웨버) STM주사(走査)터널현미경의 개발(비니히)

었지만, 이것이 형광 X선 분석이나 PLXE 분석법, 방사광 이용의 하나이기도 했다.

1912년에는 블라그가 X선의 회절 현상을 발견하고, 1914년에는 라우에가 X선에 의한 결정 해석으로 노벨상이 수여되고 있다. X선 회절의 이용은 이후 오늘날까지 물질의 구조 연구에 있어 중요한 수법으로 이용되어 왔지만, 장치, 수단의 진보에 따라 현저한 발전을 이루었다. 1924년에는 시그번이 X선 분광학의 연구로, 1936년에는 데바이가 X선, 전자선 회절에 의한 분자 구조의 결정에 의해 각각 노벨상이 수여되어, X선 분광학에서 전자선과 기타에 의한 회절법의 개발의 길이 열려졌다.

X선 회절

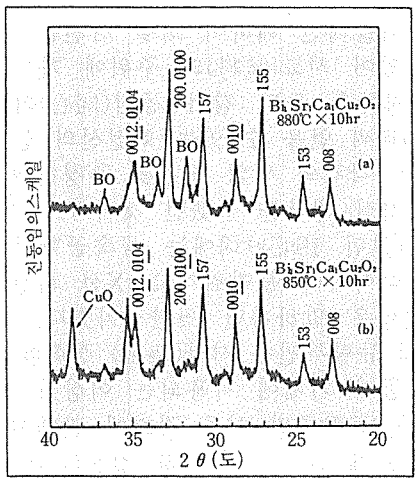
X선 발견이 있은지 얼마 안 되어 X선 파장의 크기에서 결정격자(結晶格子)에 의한 회절이 일어날 것이 예상되었다. 1945년대까지는 이를테면 데바이 회절 사진을 촬영하는데 있어 시료(試料)의 주위에 가늘고 긴 X선 필름을 둘러 감아 동심(同心)의 원고(円孤)로써 얻을 수 있는 회절선의 상(像)을 만들어, 각각의 원의 직경을 측정하여 회절의 방정식 해답을 구했던 것이다. 저자들이 학생이였던 1945년대에는 금속공학의 학과는 야금학과라 불리워지고, X선 회절의 학생 실험은 말하자면 첨단적이였다. Al-Cu 합금의 듀랄루민은 시항(時項) 경화합금으로서 항공기 기체에 사용되는 이상적 합금이였으나, 듀랄루민 시효 경화에 관해서는 기니에, 프레스턴 등에 의해 절출(折出) 경화 직전에 중간상의 절출이 확인되어 기니에·프레스턴·존이라 호칭되었다. 중간상의 확인에는 X선 회절에 의해 회절선의 희미함과 새로운 회절선의 출현이 나타났다. 그후 전자선 회절도 실용화되어, 필자가 프랑스 유학중에 학회 발표에서 큰 천정에 비친 전자선 회절상을 처음 보았을 때 별이 총총한 하늘과 같은 회절상에 경탄을 느낀 기억이 있다.

그후 고니오미터를 사용하여 연속적으로 회절의 각도를 변화시켜, X선 필름대신 비례계수관과 같은 방사선 측정기로 회절 X선속을 측정하여, 이러한 데이타를 컴퓨터가 처리하여 결정의 격자 상수정수나 분자의 구조를 결정할 수 있게 되었다.

Fig 2.는 최근의 응용예의 하나로 초전도의 성질을 나타내는 페로부스카이트 결정(Bi_1, Si_1, Ca_1, Cu_2, O_x)의 X선 회절도형과 결정의 층상(層狀) 모델을 나타낸 것이다.

X선에 의한 원소분석

특성 X선의 존재는 금세기초 무렵부터 알려졌지만, 형광 X선 분석은 특성 X선의 에너지와 그 강도에서 시료중(試料中)의 원소의 동정(同定)과 정량(正量)을 행하는 것으로, 일찍부터 실용화되었다. 1955년대가 되자 저(低)에너지의 방사선을 방출하는 방사선 동위원소를 여기(勵起)선원으로서 사용하는 RI 여기형광X선분석도 실용화되어, 현장에서의 온라인 분석에 위력을 발휘하게되었 다. 최근에는 형광 X선분석장치도 자동화와 콤퓨터화가 되어, r선 스펙트로미터와 콤퓨터를 편성하여 특성 X선의 측정, 원소



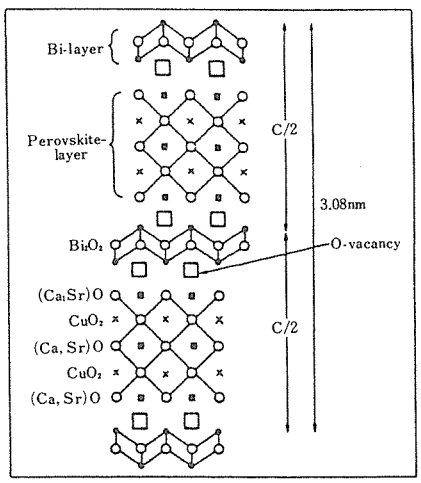
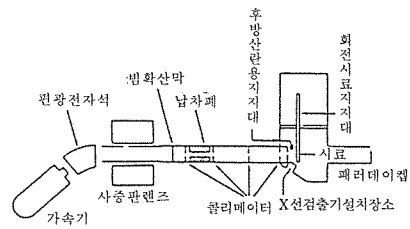


Fig 2. 초전도체 페로부스카이트의 X선 회절상과 층상구조(마에다 히로시(前田弘)등:금속 No.5, 1988)



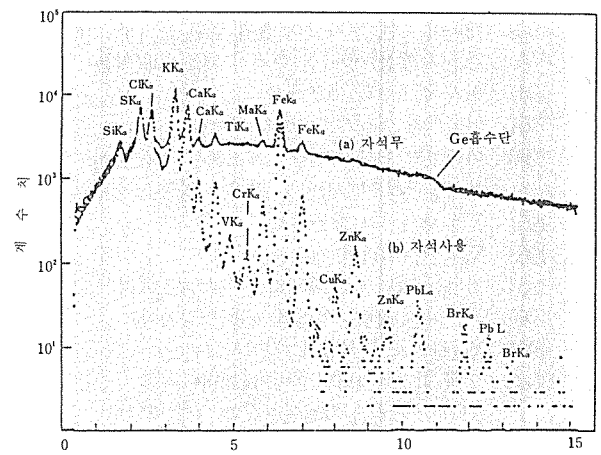


Fig 3. PIXE장치의 구성과 측정례(카지야 도카이(鍛治東海):핵현상과분석화학, 화학총설, 1980, 일본 화학회편)

의 동정, 함유량의 결정이 자동적으로 가능하게 되었다. 1960년대에는 전자선 마이크로애너라이저도 개발되어, 시료면을 전자선으로 주사하는 것에 의해 특정 원소의 분포를 측정하는 것도 가능하게 되었다.

X선으로 원자를 여기하는 대신 프로톤 등의 입자선으로 여기하는 분석법은 PIXE (Particle Induced Xray Emission)법이라 불러지지만, 제동방사 X선에 의한 방해가 없

기 때문에 정도가 높은 분석이 가능하다. Fig. 3은 가속기를 사용한 PIXE 장치의 구성과 측정례로서 대기 부유진의 스펙트르를 나타낸 것으로, 자석의 사용에 의해 제동 X선에 의한 방해를 방지할 수 있음을 알 수 있다.

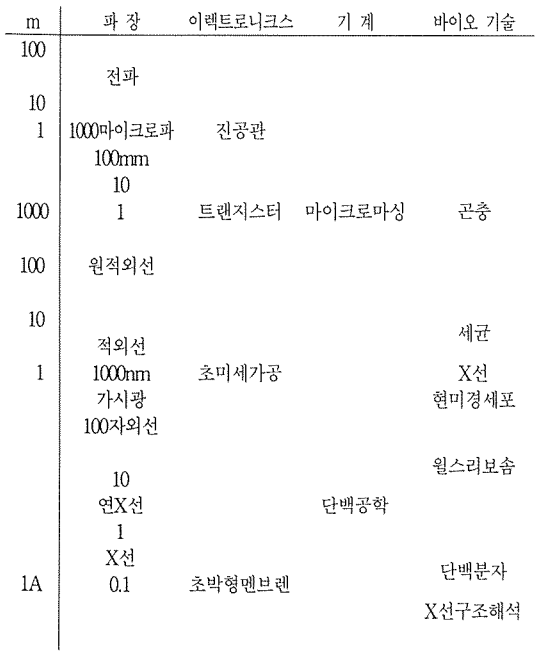


Fig 4. 방사광(SOR)의 파장영역과 응용기술

싱크로트론 가속기로 가속한 전자선을 거대한 스토리지 링 속에 입사시켜 축적한 대전류를 전자석으로 소각도의 산란을 일으킬 때 발생하는 방사광에는 빛에서 X선에 이르는 파장이 포함되며, 각파장에 따라 여러 이용방법이 고려되고 있지만, 방사광에 포함된 대선량을 사용하여 형광X선분석을 실시하는 이용방법도 그중의 하나이다. Fig 4는 방사광의 파장영역에 여러 분야에서의 응용면을 나타낸 것이다.

최근 가속입자나 X선을 입사하여 방출하는 입자, 전자파를 측정하는 여러 분석법이 이용되어, 특히 신소재 개발을 위한 측정법

Table 2. 신소재 개발을 위한 해석수법과 기대되는 새정보(사토 고류(佐藤公隆):분석, 88/4 금속임시 증간호)

분야	해석수법	새 정보
파인세라믹스	마이크로포커스 X선탐상기(探傷機) X선 CT 터널 효과 현미경 고감도 EPMA 레이저 응용 포토 포텐셜 측정 광열분광(PTS) 이온 슈퍼 마이크로 애너라이저 하이드로 다이나믹스크로마토그래피	미소 내부 결함의 검출 재료단면의 도시(圖示) 원자의 관찰 미량 화합물의 분포, 입계농도측정 반응의 동적측정 열적 완화과정의 직접측정 개재물, 미분의 분석 새입자의 분급법
고기능성고분자재료	저에너지 X선레이저 비접촉전도도 측정(마이크로액) 불 명 불 명 박막의 고감도 편광 측정장치 고압시차 주사 열량계 레이저 마이크로 애너라이저	저원자량 원자에게 생긴 막의 해석 미소시료 대상 아모르파스한 것의 구조해석 도빙원자(할로겐 등)의 분포 분자 배향(配向) 고압하에서의 반응성 미소점 깊이 분석, 대분자량 분자의 측정
복합재료	X선CT 연 X선 투과 현미경 STEM-Auger 복합장치 TG-가스분석 복합장치 레이저반사적의 마이크로 분석 주사레이저 음향현미(SLAM) 비접촉고정도 미시왜(歪)측정장치 고온/전자장하의 TEM 필드 플로 프랙셔네이션 분리	재료내부 구조 층진재의 분석 원소분석, 원자위치, 결합해석 프로세스 해석 마이크로 영역의 분자구조 미소결함의 비파괴검출 가열/냉각시의 국부변형 사용상태에 근접한 곳에서의 결정해석 고분자의 분자량 분포분리
기타	액소 전자검출 전자선 초음파 현미경 초고온란성계수 측정장치 분자전압계 원자 직시 현미경 RBS-SEM-PAS복합장치	재료피로상태의 관찰 재료내부 결함의 탐색 재료의 고온 특성 미크로영역의 전압측정 초미크로 영역 관찰 불투명 시료의 고차원 구조해석

으로 이용하게 되었다. Table 2는 해석수법과 그것에 의해 얻는 정보를 분류한 것이

지만, X선을 입사시키거나 또는 입자충격으로 방출되는 X선을 측정하는 경우도 많다.

비파괴 검사

비파괴 검사의 역사도 오랜 것이여서, 제1차 세계대전중(1914-1918) 복엽 전투기의 지주나 비행기 화물의 검사에 X선 라디오그래피가 응용되었다고 하는 기록이 있다. 제2차 세계대전경(1943-1945)부터 선박의 계수(繼手)가 대갈못에서 용접으로 바뀌어, 용접부의 결함검사에 X선이 자주 사용하게 되었다.

1913년에 미국 GE사의 쿠리지에 의해 열음극 X선관이 발명되어 장기간의 연속운전이 가능하게 되었다.

일본에서도 제2차 세계대전중부터 X선을 사용한 비파괴 검사가 자주 실시하게 되어, 고전압, 대전류의 X선장치 개발이 진행되었다.

1955년에는 일본 비파괴검사 협회가 설립되어, 방사선 투과시험을 담당하는 제1분과는 당시의 도쿄 대학 생산기술 연구소 교수 히도이로 사다부미(一色夏文) 선생, 전 오사카 대학 교수 고 센다 도미오(仙田富男) 선생 등이 중심이 되어 추진되었지만, 특히 비파괴 검사업계의 레벨 향상에 주력하여 기량 인정제도의 확립에 의해 결실을 맺었다.

[redacted]비파괴 검사용 X선장치는 1931년[redacted]성되어 1951년경에는 코발트-60을[redacted]선 라디오 그래피도 실용화되고, 1960년대에는 이리듐-192선원의 국산화와 실용화도 이루어지게 되었다.

1959년에 필자는 도쿄 도립 아이소토프 종합연구소에서 15MeV 베타트론에 의한 비파괴검사의 연구를 시작했지만, 사실상 국산 제1호의 비파괴 검사용 베타트론은 산업용 가속기의 시작이였고 그 성공에 의해 가속기에 의한 비파괴검사가 이루어지게 되었다. 베타트론에 비해 라이내크 쪽이 전자류가 크고 X선 선량도 크기 때문에 그후 라이내크가 주류가 되었다.

1958년경에 형광 증배관(이미지 인텐시파이어)가 개발되어 이어서 X선 텔레비젼·시스템이 완성되었다.

X선 필름을 대신한 투시법의 실용화는 전자공학의 매개에 의해 데이타 처리를 가능하게 했지만, 더욱이 컴퓨터의 도입에 의해 방사선 영상의 발전을 촉진했다.

의학에 있어서의 X선 CT나 PCT는 이런 흐름의 여파로 탄생하게 되었는데, 1990년대에는 가속기를 이용한 공업용 CT와 공업용 X선장치를 이용한 CT에 의한 정밀측정을 실시하게 되었다. Fig. 5는 라이내크를 이용한 공업용 CT장치의 구성을 나타낸 것이다.

특수한 형광체를 사용한 이메이징 플레이트도 컴퓨터 처리에 의해 화질을 자유로 처리할 수 있는 화상 처리장치이지만, X선사진의 기억, 재현, 화질처리 등으로 유용한 것이 되고 있다.

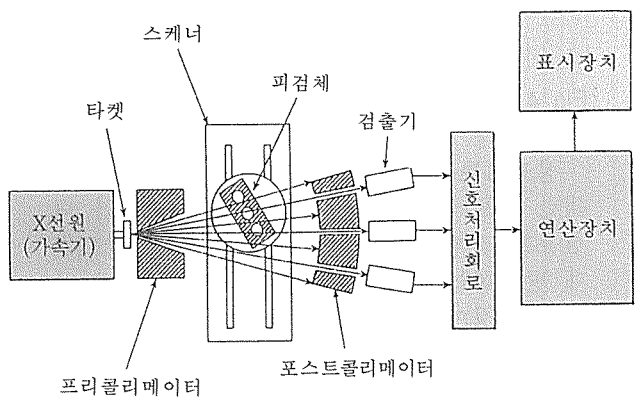


Fig 5. 고에너지-X선 CT장치의 구성(제공:히다치 제작소)

전자현미경에 있어서의 X선 이용

일본에 있어서의 전자현미경 개발은 전후

얼마 안있어 시작되어, 패전에 의한 폐허 속에서 선배들의 피나는 노력으로 성공을 거둘 수 있었다. 필자도 당시 미다카(三鷹)시에 있었던 현재의 일본전자 K.K.의 전신이였던 공장을 방문한적이 있지만, 판자집과 같은 느낌의 바라크 건물 안에 완성한지 얼마 되지 않은 전자현미경이 눈부실 정도로 빛나고 있었다.

이 회사는 해군의 제대군인이였던 가제도 켄지(風戶健二)씨가 중심이 되어 창립한 것으로, 일본전자 K.K.에 의하면 그는 아직도 건재하다고 한다. 전자현미경 개발은 여러 기업과 많은 학자들의 협력에 의해 실현되었는데, 이 학자들 중에 필자의 스승인 세토(瀨藤), 다니(谷) 두 선생의 이름을 발견했을 때의 감개는 잊을 수 없다. 1958년에 필자가 프랑스 사크레 원자력연구소 직원이 되어 프랑스에 귀화, 노후를 보내고 있다 한다.

최근의 전자현미경에는 가속전압이 높은 것과 동시에 X선 마이크로애너라이저와 전자선 회절의 기능도 갖춘 것들이 많다. 1940년대 후반에서 1960년대 초기에 걸쳐 X선 현미경의 개발이 시도되어, 연X선용 존 플레이트와 광파장역용 월터밀러의 개발에 의한 방사광 주사형 형광X선 현미경도 제작하게 되었다. X선을 이용한 분석법에는 이 밖에도 X선으로 시료중인 원자에서 방출되는 광전자의 각도와 에너지를 측정함으로서 전자의 결합 에너지와 화학결합의 상태를 측정하는 ESCA(X선광정자 분광법) 등이 있다.

기 타

방사선화학 분야에서는 종래 전자선 r선이 사용되어 왔지만, Co-60의 r선 대신 전자가속기에서 얻어지는 제동방사 X선을 이용하는 경향이 나타나게 되었다.

1949-50년 무렵이지만, 필자들의 대학에서 X선 금상학(金相學)의 대가인 시무라 시게다카(志村繁隆) 선생이 X선을 조사한 벼를 교실의 창가에 심어 실험을 하고 계신 기억이 난다.

농부가 피땀을 흘려 얻는 작물이 그렇게 간단히 될 리가 없어 성공을 거두지 못한 것 같았지만, 벼의 품종개량에 뜻을 둔 그의 연구는 선견지명이 있었다고 하겠다. 벼의 신품종 「레이메이:여명」은 그 뒤의 r선에 의한 품종개량으로 만들어진 것이다. 싱크로트론 방사광 응용의 하나인 리소그래피도 X선의 이용이다.

최근에 화제가 된 천체관측용 X선망원경은 인공위성에도 답재되어 위력을 나타내고 있다.

이상 X선 이용의 발전을 역사적인 관점에서 간단히 설명했지만, X선이 오늘날 이토록 광범위하게 더구나 고도의 기술로서 이용되게 된 것은 X선의 발견자인 렌트겐 자신도 예상하지 못한 것이였음에 틀림없다. X선 발견에서 100년이 지났지만 X선은 현재에도 스타의 자리를 지키고 있는 듯이 생각된다.