

RI등의 이용 및 현황

이 글은 1996년 일본아이소토프협회와 관련기관이 공동 개최한 '제22회 일본아이소토프·방사선 종합회의'에서 발표된 논문중 일부를 요약하여 연재중이며, 총4회중 마지막 내용임.

I. 고성능 반도체 제조에의 가속기 이용

반도체는 급속한 기술진보와 응용범위의 확대에 의해 수요가 차츰 증가하여 고성능화, 소형화·저소비전력화 등을 한층 추구하는 시대로 전환하고 있다. 그러므로 LSI를 한층 미세화·高集積化하는 것이 요구되고 있다. 현재는 16Mbit DRAM이 제품으로 시장에 나와 있지만, 256Mbit DRAM 이후의 반도체장치로는 최소 패턴 寸法이 $0.25\mu\text{m}$ 이하가 되어 지금까지의 기술로는 轉寫에 사용하는 光源의 파장에 가까워지므로, 回折의 영향으로 패턴의 解像이 곤란하게 된다. 그러므로 X선을 사용한 패턴 轉寫기술(X선 석판인쇄)이 개발되고 있다. 이 기술을 사용하면 $0.15\mu\text{m}$ 이하의 패턴 轉寫가 가능하며 1Gbit DRAM 이후의 반도체장치에도 대응할 수 있다.

이 X선원으로 이용되는 것이 전자축적 링이다. 이 링은 高에너지 전자빔을 장시간 회전시키는 장치로 전자가 편향자장 안에 굽어질 때 그 접선방향에 방출되는 전자파(Synchrotron Radiation광)가 이용된다. SR광은 종래의 X선원에 비해 강도가 지극히 크고, 발광점의 확산이 적고 지향성이 강하다는 장점을

갖고 있다. 전자축적링은 물성물리 등의 실험용에 개발되어온 장치이지만, 이러한 장점으로 X선 석판인쇄용 광원으로 몇 군데의 메이커가 공업용으로 개발에 착수하여, 현재 X선 석판인쇄의 개발연구에 이용되고 있다.

SR광은 적외선에서 X선까지 폭넓은 연속스펙트럼을 가져, 그 강도가 절정이 되는 파장은 전자에너지와 자장강도에 따라 결정된다. X선 석판인쇄로는 10\AA 근처의 영역이 사용되기 때문에 常電導전자석을 사용한 링에서의 에너지는 1GeV, 초전도전자석을 사용한 링에서는 600MeV 정도가 적당하다. 장치의 공장설치를 고려하면 소형화가 필요하기 때문에 초전도전자석을 사용한 링의 개발이 이루어졌다. 三菱전기에서 개발한 초전도전자축적링의 주 파라미터를 표1에 지시한다. 두 대의 초전도전자석을 사용한 레이스트랙 형으로, 빔 궤도의 周長은 9.2m로 매우 작다. 이 링은 현재 정상적으로 X선 석판인쇄의 연구에 이용되고 있으며 이미 1Gbit DRAM 대응의 패턴 轉寫에 성공하고 있다.

中西哲也(Tetsuya Nakanishi) - 일본 (주)三菱전기 첨단기술종합연구소 그룹매니저

표 1. X선 석판인쇄용 초전도 전자축적링의 주 파라미터

에너지 (MeV)	600	초전도 전자석	
축적전류 (mA)	380	偏向 자장강도 (T)	3.5
偏向반경 (m)	0.59	코일전류 (A)	350
SR광의 피크파장 (Å)	7	축적에너지 (MJ/1대)	4.6
SR광 강도 (mW/Å/mrad ²)	43	액체 헬륨의 소비량 (L/h)	3
빔徑 (σ_x mm)	0.7	전용 헬륨액화기	없음

II. 최근의 중·저에너지 전자가속기의 용도와 이용현황

본사는 1957년에 日新電機로 전자가속기 개발에 착수한 이래, 항상 주도적 메이커로 각종 장치를 여러 분야에 납품하여 왔다.

전자가속기는 폴리에틸렌의 가교반응을 원점으로, 전선의 내열성 향상, 고품질 발포폴리에틸렌·폴리프로필렌의 제조, 자동차용 타이어제조 프로세스에의 적용, 열수축 필름에의 이용 등 가교 프로세스의 일반적 수단으로 정착되어 왔다.

전선의 피복재료의 전자선조사는 가장 많은 전자가속기가 공업적으로 이용되고 있는 분야이다. 전자기기의 배선용 전선, 자동차용 전선 등을 중심으로 전자선이 이용되고 있다. 피복재료는 PE나 PVC가 대상이지만, 일부 ETFE(에틸렌-테트라플루오르에틸렌 共重合체) 등의 불소수지에도 전자선가교가 적용되고 있다. 최근에는 폴리우레탄에도 전자선가교가 적용되고 있다는 보고도 있다.

전자선가교가 된 발포 PE·PP는 자동차용의 내소재나 단열재 등으로 널리 시장에 나와 있다.

타이어제조 프로세스로 이용되고 있는 전자선은 成型 전의 고무시트狀으로서의 예비가교에 이용되고 있다. EB조사에 의해 고무의 未加硫時의 강도를 높임으로써 최종 加硫가 완료될 때까지 형상·치수가 유지될 수 있

으므로 필요 이상의 고무재료를 사용하지 않아 고무 사용량을 감소시킬 수 있는 것으로 되어 있다.

한편 저에너지 전자가속기의 이용은 도포된 수지·도막의 큐어링을 축으로 하여 감압 접착제, 릴리스紙, 전자필름 등 차츰 확대되기 시작하고 있다.

전자선에 의한 경화기술은 UV경화기술과 비교되는수가 많지만 실용화 되어 있는 예는 전자선의 특징을 잘 살리고 있다고 생각된다. 대표적인 장점으로 UV경화에 의한 필요한 반응개시劑가 필요없다는 것을 들 수 있다. 對候性이나 색에 대한 제한 등 UV법에서 문제가 되는 점을 보완하는 기술로써 전자선법을 이용할 수 있다. 또한 높은 고가교 밀도나 기재에 대한 열의 영향이 적다는 것이나 溶劑가 불필요하다는 것 등의 장점을 잘 적용시켜 응용범위가 넓어지고 있다.

또한 석탄 화력발전 등에서 나오는 배연속의 질소산화물(NOx)과 유황산화물(SO₂)의 제거, 의료기구 등의 살균·멸균 등으로도 전자선이 이용되고 있다.

전자선에 의한 배연의 脫硫·脫硝法은 취급의 용이함과 유황산화물과 질소산화물을 동시에 제거할 수 있다는 것과 부산물을 비료로써 이용할 수 있다는 등의 이점을 지니고 있기 때문에, 앞으로 세계의 산성비 대책에 대한 유력한 수단으로 주목된다. 전자선에 의한 살균기술은 잔류물의 안전성이 문제가 되

기 쉬운 가스이용 살균·멸균법의 대체 방법으로서 기대되고 있다.

또한 반도체의 특성개선 등에도 전자선이 이용되고 있다.

日新하이볼티지는 이런 광범위한 이용분야에 적합한 전자가속기를 제작 공급하여 지금까지 220대가 넘는 전자선 가속기를 수요자에게 공급해 왔다.

星康久 (Yasuhisa Hoshi) - 일본 日新하이볼티지 주식회사 EB기술부 영업기술과장

III. 방사광과 구조생물학 측정장치 개발의 입장에서

생체고분자가 만드는 구조체의 3차원구조를 해명하는 것이 구조생물학 이라고 하는 이야기를 들은 적이 있다. 현재 생체고분자의 구조해석 수법으로서는 X선 결정구조해석과 NMR이 있다. Kendrew의 미오글로빈 해석이 있는 후, 많은 단백질의 3차원구조를 해석하여 다대한 성과를 거두어온 X선 결정해석은 구조생물학의 기초로서 문자 그대로 크나큰 연구분야이다. 특히 방사광의 출현에 의해 單色 X선의 이용에서는 데이터精度的 향상과, 수집속도의 비약적 향상이 초래되어, 더 한층 해석에 이상분산효과를 적극적으로 이용할 수 있게 되었다. 또한 백색X선의 이용에 의해 스트로보의 동적 구조해석도 할 수 있게 되어가고 있다. 그 결과 방사광은 정적 및 동적 구조생물학의 발전에 크게 기여하고 있다. 방사광을 사용한 구조생물학의 연구는 세계적으로 보아 이미 4반세기의 역사를 가지고 있다.

일본의 방사광 X선 이용은 1983년 쓰구바 학원도시에 건설된 방사광 실험시설(PF)이 공동이용을 개시한 때부터 비롯된다. PF에 있어서의 단백질결정 구조해석의 비약적 증

가는 일본이 개발한 거대 분자용 와이센베르그 카메라를 1987년에 BL6A에 설치한 때부터이다. 과제수는 지난 해 146에 이르고 그 중 해외는 11개국, 51과제였다. 일본에 있어서의 공동이용 실험자의 증가는 당시까지 結晶학자만으로 실시하고 있었던 단백질결정 구조해석에 최근 생화학자도 참여하게 되었기 때문이며, 결정학자와 생화학자의 협력관계의 증가경향은 구조생물학의 건전한 발전을 뜻하는 것이라 생각된다.

앞에 말한 카메라에 의한 데이터수집 시스템은 精度가 좋아, 高分解能까지 신속하게 데이터수집이 가능하기 때문에 년 2일 밖에 분배되지 아니한 빔타임에 값비싼 여비를 지불하고도 해외로부터 데이터 수집을 위해 오고 있다. 측정속도는 결정의 양호여부, 분해능, 등에 의해 크게 다르지만, 약 2~3시간으로 1軸 회전의 데이터가 수집될 수 있다. 그러나 이 데이터수집 시스템은 자동화되어 있지 않기 때문에 카메라를 조작하는 사람, 이미징 플레이트를 운반하는 사람, 또한 판독장치를 조작하여 그 다음에 데이터를 미디어에 옮기는 사람 등 3인이 필요하다. 게다가 24시간 연속적으로 실험하기 위해서는 교대요원도 필요하다.

이미징 플레이트를 사용하는 자동 回析計는 이미 시판되고 있지만 판독시간이 길고, 방사광과 같은 강력한 光源에 대해서는 극히 효율이 나쁘다. 또한 이것들은 카메라 반경이 짧고, 더욱이 헬륨패스가 장비되어 있지 않기 때문에 배경소음이 크다. 또한 格子定數가 큰 결정의 高分解能데이터는 수집할 수 없는 등의 결점을 가지고 있다. 해외에서는 시판된 이런 것을 방사광과 결합시켜 사용하고 있다. 측정자에게는 편하지만, 효율이 매우 나쁘며 精度도 충분하지 않아 특히 格子定數가 큰 결정에 대해서는 적당하지 않다. 현재 이러한 결점을 모두 해결하는 아주 새로운 아이디어

에 입각한 고성능의 자동데이터 수집시스템이 개발중에 있다.

坂部知平(N. Sakabe) - 일본 쓰쿠바대학 교수

IV. 방사화분석에 의한 환경평가를 위한 원소분포도

● 지구화학도

地圈 환경평가에는 여러가지 국토기본정보가 그 기초가 된다. 그 정보는 각각 물리, 화학, 생물, 지학에 기초를 두고 있어, 물리량을 나타내는 대표로는 지형도(위치, 고저), 생물량을 나타내는 値生圖, 지학정보를 나타내는 지질도 등이 있다. 그리고 지권의 화학정보를 나타내는 것이 지구화학도라 부르는 원소분포 지도이다. 이전은 자원원소의 존재를 추구하기 위한 수단으로 작성되어 국지적인 것이었지만, 최근에는 환경보전을 목적으로 하는 광역적인 것이 만들어지게 되었다. 지구화학도에 의한 환경평가의 연구는 특히 서구 선진국에서 발전되어, 영국, 서독, 오스트리아, 알래스카, 핀란드 등에는 전국토를 커버하는 것이 완성되어 있다. 일본에는 전국토를 커버하는 지구화학도는 없다. 여기서는 필자가 중사한 북관동지역의 지구화학도가 어떻게 작성되었으며, 어떤 해석이 가능한가에 대해, 또한 지금부터 시작하고자 하는 愛知현의 지구화학도에서 어떤 사실이 규명되고 있는가에 대해 소개한다.

● 試料와 분석

河床堆積物은 그것이 모아진 유역 지면의 화학조성을 대표한다. 수 kg의 하상퇴적물을 현지의 흐르는 물로 채를 쳐서 80메쉬(180 μm) 보다도 미세한 것을 10~50 g 수집했다. 시료는 바람에 말린 후 볼밀(분쇄)로 균질화시켜 분석시료로 하였다. 두 지역의 약 4500의 시료를 기기중성자방사화분석에 의해 Na, K, Ca, Sc, Cr, Fe, Co, Ni, Zn, As, Se, Br, Rb, Sr,

Zr, Mo, Ru, Ag, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Dy, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Th, U를 ICP발광분광분석 및 원자 吸光 분석에 의해 Be, F, Na, Mg, Al, P, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Mo, Ag, Cd, Ba, W, Pb 및 Bi를 모니터 하였다.

● 해석과 결과

자연환경으로서의 지질을 반영하는 원소로써 Na, Sr, REE, U, Th, Hf는 화강암 분포지역에, 결정편암이나 반러암 분포지역에는 Cr, Sc, V, Fe, Mg, Co가 많다. 어떤 원소가 상호간에 관계를 가지고 분포하는가에 대해 인자분석을 하였다. 제1인자는 La나 Th에 대표되는 모나즈石, 제2인자는 Fe, V, Ti, Co를 포함한 자철광, 제3인자는 Yb, U, Hf를 포함한 지르콘, 제4인자는 Ca, Sr을 포함한 장석임이 판명되었다. 모두 천연의 암석에 포함된 광물이다. 그렇다면 이것이 환경평가에 어떤 역할을 하는가! 이를테면 Ce의 분포를 보자. Ce는 하이테크소재 원소로써 여러 공업제품으로 사용되고 있다. 阿武隅山 속에는 여기저기 Ce가 매우 많은 곳이 있다. 이것은 자연계의 소작일까, 또는 인위적 오염일까? Ce가 많은 곳은 모두 La도 많다. 이것은 앞의 제1인자에 해당되며, La와 Ce를 일부러 1:2로 버리는 사람은 없을 것이기 때문에 이 고농도의 Ce는 자연계의 소작(所作)이라 추정된다.

● 방사화분석이 유리한 이유

방사화분석은 많은 시료중의 여러 원소를 분석하는데 뛰어난 방법이지만, 최근에는 ICP-AES나 ICP-MS등과 마찬가지로 방사화 분석이 같고, 다시료다원소분석을 그 판매요건으로 삼는 분석기기가 개발되고 있다. 같은 시료를 중성자방사화분석과 ICP-AES의 양방면에서 분석하였다. 만약 두개의 분석결과가 완전히 일치하면 그 상호관계는 원점을 지나 는 직선상에 플롯된다. 그러나 실제의 결과는 Fe와 같이 직선이 되는 것도 있지만, Cr처럼

방사화분석의 값이 큰 것도 존재한다. 후자의 이유는 시료에 포함된 광물의 하나인 크롬스피넬이 불화 수소산에 의해 완전히 분해되어 있지 않다는 것에 기인한다. 시료의 분해처리가 불필요한 방사화분석에 의한 결과가 옳은 것은 명백하다. 동일한 결과는 난용해광물 지르콘과 그것에 포함되는 REE, Zr, Hf, U 등에서도 예상된다. 중성자방사화분석은 이러한 어려움이 없는 비파괴분석이다.

田中 剛(Tsuyoshi Tanaka) - 일본 名古屋 대학 교수

V. RI빔 팩토리 계획과 기대성과

당 시설에는 링사이클로트론이라 부르는 초대형의 사이클로트론이 가동하고 있다. 이 사이클로트론은 1987년에 본격적인 가동을 개시하여, 이후 中高에너지 영역(약 100MeV/핵자)에 있어 세계 최고수준의 중이온 가속기로서 국내외 광범위한 분야의 연구자에게 이용되어, 중이온과학의 종합적 발전에 기여하고 있다. 링사이클로트론에 의한 연구는 원자핵, 원자, 화학, 物性, 생물, 우주 등의 기초과학 영역에서 의료, 환경과 관련된 응용·개발연구 등 다방면에 걸쳐 있다.

당 시설이 창출·개발한 새로운 기초연구분야, 응용분야, 연구수법의 주요한 것은 (1) 큰 강도의 중이온빔을 사용한 - 다중 트레이서 제조와 화학·생물에 응용, 高스핀·아이스머빔 발생과 응용, 고전리 이온빔의 발생과 물질과학에 응용 (2) 큰 강도의 偏極 重陽子빔을 사용한 - 정밀 원자핵물리의 연구 (3) 세계 최대 강도의 「RI(방사성동위원소)빔」을 사용한 - 신동위원소의 발견, 우주에 있어서의 원소합성의 연구, 이그조틱한 원자핵구조의 연구, 편극 RI빔 발생과 응용, 의학이용을 위한 기초연구 등이다. 그 중에 「RI빔」에 의한 연구는 세계 첨단으로 일본이 세계를 리드하는 몇 안되는 기초연구의 하나라 할 수 있다.

RI는 가속기나 원자로에 의해 제조되어 광

범위한 연구분야에서 이용되고 있지만, 링사이클로트론과 같은 高에너지중이온 가속기를 사용하면 이것을 「빔」으로 발생시킬 수 있다. 이 방법은 高에너지중이온(입사핵)을 표적중의 원자핵과 충돌시켜, 충돌에 의해 분쇄된 입사핵의 破碎片을 자기 분석기로 동위체 분리·수집하여 2차적으로 「빔」을 발생시키는 것이다. 이것을 「입사핵 파쇄 반응법」이라 부르며, 이 방법에 의해 효율적으로 RI빔을 발생시키기 위해서는 중이온의 에너지가 100MeV/핵자(광속의 약 40%)를 초과할 필요가 있다. 이런 이유 때문에 당 시설에서 현재 공급할 수 있는 RI빔은 질량수 약 60까지의 가벼운 원소에 국한시키고 있다.

「RI빔 팩토리」 계획은 현재의 시설에 초전도 링사이클로트론과 RI빔 발생장치를 신설하여 모든 원소에 걸쳐 大강도의 RI빔을 발생시켜, 이것을 이중축적링을 비롯한 참신한 실험장치를 사용하여 다각적으로 이용하고자 하는 것이다. 초전도 링사이클로트론은 기존의 링사이클로트론을 입사기로 하여 경원소를 에너지 400MeV/핵자(강도 10^{13} 입자/초), 중원소를 에너지 약 100MeV/핵자 이상(강도 10^{12} 입자/초 이상)까지 가속한다. 이것으로 이때까지 경원소에 국한된 RI빔種을 모든 원소에 확대한다.

이중축적링은 이온빔끼리 또는 이온빔과 RI빔과의 정면 내지 측면충돌 또한 전자빔이나 방사광과 RI빔과의 충돌 등 지금까지 시도된 예가 없는 실험을 가능하게 한다.

「RI빔·팩토리」는 우주, 물질에 관한 기초과학연구, 物性·고분자·생물 등의 마이크로 진단, 재료구조와 공업 프로세스의 분석, 드라이(멀티)트레이서의 응용과학 등을 포함한 「차세대 신RI과학기술」을 창출할 것으로 기대되고 있다.

矢野安重(Yasushige Yano) - 일본 理化學연구소 사이클로트론 연구실 주임연구원