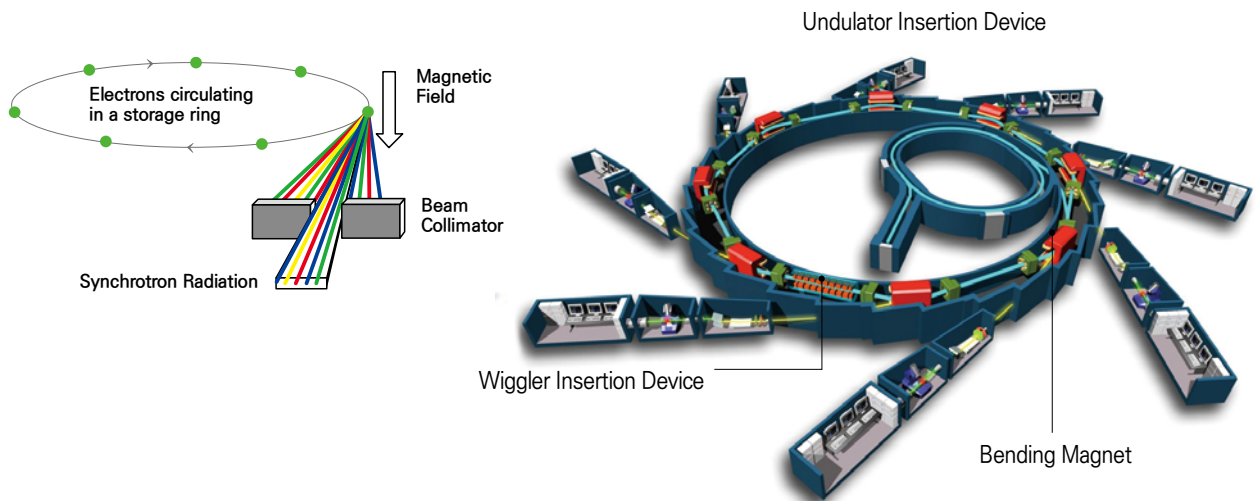

방사광가속기 활용 개요

- I. 방사광이란 무엇인가요?
- II. 방사광은 어떻게 활용하나요?
- III. 방사광을 이용한 연구 분야와 활용도는?
- IV. 기업이 방사광가속기를 활용하려면?
- V. 충북 청주(오창) 다목적 방사광가속기는 어떻게 건설되나요?

I 방사광이란 무엇인가요?

- 방사광은 한자로 놓을 방(放), 쏘 사(射), 빛 광(光)이며, 광원(光源)으로부터 빛을 내보낸다는 사전적 의미를 가지고 있습니다. 예를 들어 전구라는 광원에서 빛을 내고 있다면 전구가 빛을 방사하고 있으며 방사광을 내보낸다고 할 수 있으나 일반적으로 사용하는 말은 아닙니다.
- 그러나 거대한 가속기를 다루는 분야에서는 인공적으로 만들어지는 빛을 방사광이라고 하며 명사적 의미로 자주 사용하고 있습니다. 즉, 가속기에서 인공적으로 만들어 낸 빛을 '방사광'이라고 하며, 이러한 방사광을 만들어내는 가속기를 '방사광가속기'라고 합니다.



<그림>. 방사광가속기의 구조
(출처). <http://seminet.kr/page/technology02>

II 방사광은 어떻게 만들어지나요?

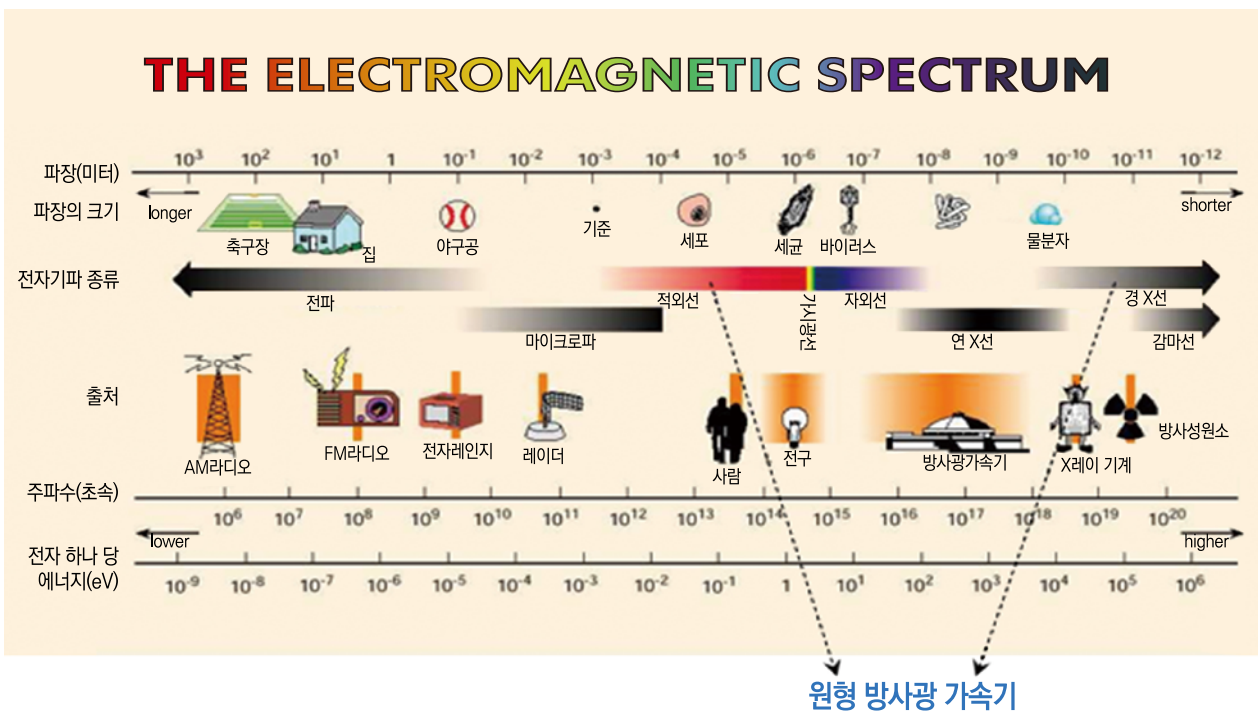
- 방사광은 전하를 띤 가벼운 입자 중 하나인 전자를 빛의 속도와 같은 빠른 속도로 가속 시키고, 이 전자가 지나가는 길에 자석을 두면 자장에 의해서 전자가 원운동을 합니다. 이때 원주의 접선 방향으로 강하고 집속된 빛이 나오는데 이를 방사광(放射光: Synchrotron Radiation)이라고 합니다.
- 방사광가속기는 전자를 만들어 내는 전자총, 전자를 가속하는 가속 장치, 전자를 원운동 시키는 각종 자석 장치, 자석을 통과할 때 발생하는 방사광을 활용하는 빔라인 장치로 구성됩니다.

3세대 방사광가속기(PLS-II) 구성



방사광은 어떤 특성이 있나요?

- 방사광은 빛의 일종입니다. 방사광은 태양빛보다 약 1조 배 이상 밝으며, 파장이 매우 짧아 물질의 미세 구조와 결함을 분석하는데 유용합니다. 방사광은 다양한 파장을 가지고 있어, 물질의 종류와 상태에 따라 적절한 파장을 선택하여 분석할 수 있으며 물질의 구조와 특성을 더욱 정확하게 파악할 수 있습니다. 또한, 방사광은 빛의 속도로 움직이므로, 실시간으로 물질의 변화를 관찰할 수 있어 화학 반응이나 생물학적 현상 등을 연구하는데 효과적입니다.
- 물리학적으로 ‘빛’이라 하면 전자기파(electromagnetic wave)라 합니다. 전자기파는 파장의 길이에 따라서 여러 가지로 종류로 분류합니다. 파장이 수백 미터 이상인 전자기파를 AM 방송파라고 합니다. 수십 미터 정도의 전자기파는 FM 방송파라 하며, 집에서 사용하는 마이크로웨이브라고도 부르는 전자레인지는 약 100마이크로미터(μm) 정도 파장의 전자기파를 사용합니다.
- 우리가 일반적으로 빛이라 하면 가시광선 영역의 전자기파를 말합니다. 파장의 길이는 $0.38\sim 0.78\mu\text{m}$ 로 매우 짧은 영역이고 흔히 이야기하는 빨강, 파랑, 노랑 등의 색을 내는 눈으로 볼 수 있는 전자기파입니다. 더 짧은 파장의 전자기파에는 자외선(UV), 연 X-선(soft x-ray), 경 X-선(hard x-ray) 등이 있습니다.
- 방사광가속기는 가시광선보다 긴 적외선에서부터 파장이 가장 짧은 경 X-선까지 넓은 전자기파의 방사광을 만들어 내어 여러 분야에 활용하도록 하는 거대한 장치입니다.



<그림>. 전자기파 스펙트럼

세계의 방사광가속기 운영 현황은?

- 우리나라는 경북 포항에 1995년부터 운영하고 있는 3세대방사광가속기 PLS-II가 있으며, 충북 청주(오창)에 PLS-II 보다 더 높은 성능을 내는 4세대 다목적 방사광가속기를 구축하고 있습니다.

구분	3세대 원형 방사광가속기	4세대 선형 방사광가속기
운영	미국(4), 일본(3), 프랑스(2), 중국(2), 캐나다(1), 브라질(2), 이탈리아(1), 스페인(1), 스위스(1), 영국(1), 러시아(1), 스웨덴(1), 대만(2), 태국(1), 한국(1), 호주(1), 인도(1), 폴란드(1), 요르단(1)	미국(1) 일본(1) 한국(1) 독일(1)

<표>. 세계적으로 운영되고 있는 3세대 원형 방사광가속기와 4세대 선형 방사광가속기 현황

- 방사광가속기는 활용도가 높아서 전 세계적으로 빔에너지 1GeV 이상의 대형가속기가 약 47기(구축 중 포함)가 운영되고 있습니다.
- 또한 국가 경쟁력 강화를 위해서 많은 국가에서 경쟁적 신규 구축 및 성능향상 사업을 진행하고 있습니다. 스웨덴에서 4세대 최신형인 MAX-IV가 운영되고 있으며, 우리나라를 포함하여 세계적으로 4기가 구축 추진 중에 있습니다.

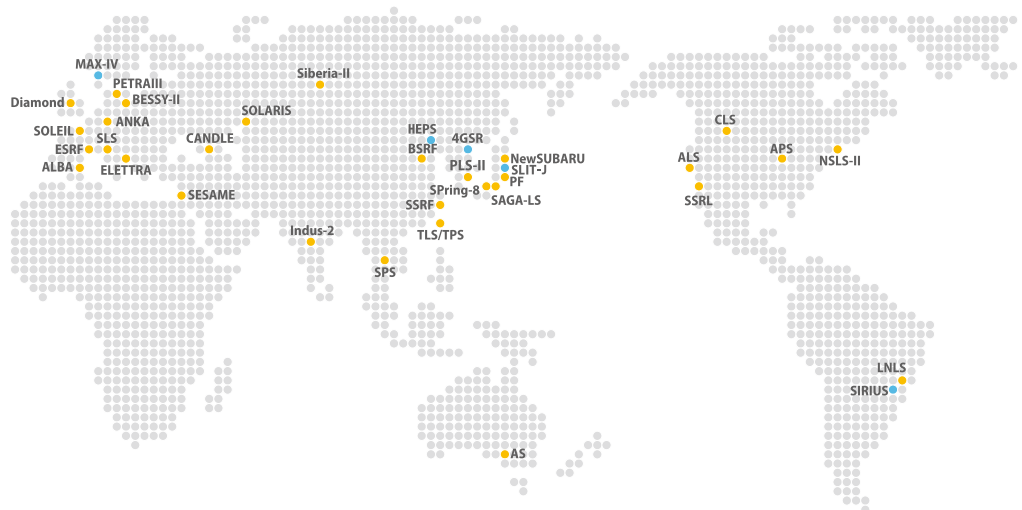
	국가	명칭	에너지	연도
신규	스웨덴	MAX-IV	3.0GeV	2016
	브라질	SIRIUS	3.0GeV	2021
	중국	HEPS	6.0GeV	2025
	일본	NanoTerasu	3.0GeV	2024
	한국	다목적방사광가속기	4.0Gev	2029
성능 향상	미국	APS-U	6.0GeV	2023
	영국	Daimond II	3.5GeV	2026
	유럽	ESRF-EBS	6.0GeV	2026
	독일	PETRA-IV	6.0GeV	2029

<표>. 대표적인 4세대 원형가속기의 구축 현황

세계의 방사광가속기

Generation light source in the world

- 3세대방사광가속기
- 4세대방사광가속기

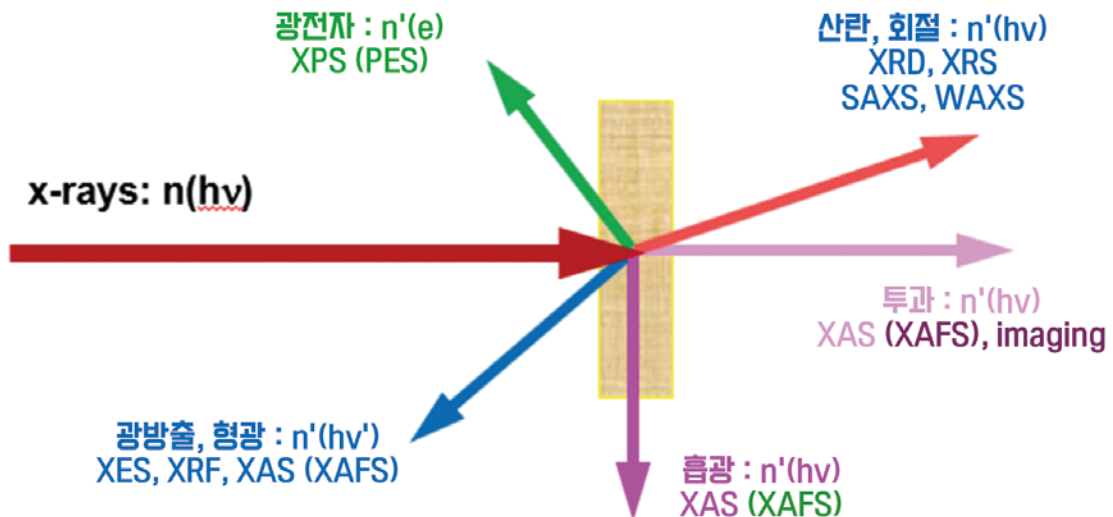


<그림>. 세계의 방사광가속기 구축·운영 현황

II

방사광은 어떻게 활용하나요?

- 방사광의 넓은 파장 중에서 이용자가 많이 사용하는 영역은 연 X-선에서 경 X-선입니다. 간단하게 표현하면 방사광은 X-선을 이용하여 알고자 하는 시료를 분석한다고 이해하면 됩니다.
- 그림과 같이 X-선을 시료에 비추어주면 여러가지 현상이 발생합니다. 시료가 X-선을 흡수 하기도 하며, 일부는 흡수되고 나머지는 투과될 수도 있습니다. 입사된 X-선은 시료 물질의 구조에 따라 산란, 회절이 되어 나오기도 합니다. 또한 입사된 X-선에 의해서 시료에서 전자가 튀어나오거나 시료의 특성에 따라서 형광빛이 나오기도 합니다.



<그림>. 방사광을 시료에 조사할 때 발생하는 여러가지 현상

- 이러한 현상은 시료의 특성에 따른 것으로 흡수, 투과, 산란, 회절, 광전자, 형광 등의 데이터를 분석하면 알고자 하는 시료의 정보를 얻을 수가 있습니다.
- 흡수 현상을 이용한 실험 기법을 XAS(X-ray Absorption Spectroscopy: X-선 흡수 분광학), 산란과 회절 현상을 XRS(X-ray Scattering: X-선 산란)과 XRD(X-ray Diffraction: X-선 회절)이라 합니다. 광전자를 이용한 실험은 XPS(X-ray Photoelectron Spectroscopy: 광전자 분광학)라고 합니다. 이러한 여러가지 실험 기법 중에서, 분석하고자 하는 시료의 정보에 따라서 방법을 선택하여 연구를 수행합니다.
- 그런데 위와 같은 실험 기법의 원리는 방사광가속기가 만들어지면서 새롭게 개발된 기법은 아닙니다. 오래전부터 개발된 실험 기법이며 이미 많은 부분이 우리가 중·고등학교에서 배웠던 현상과 실험 방식을 기반으로 합니다. 그중에서 우리가 일상생활에서도 많이 접하고 있는 X-선 영상기법과 X-선 회절기법에 대해서 알아보겠습니다.

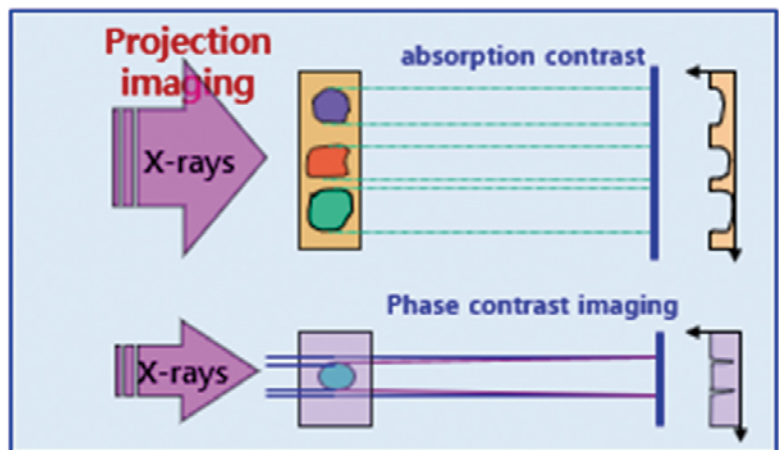
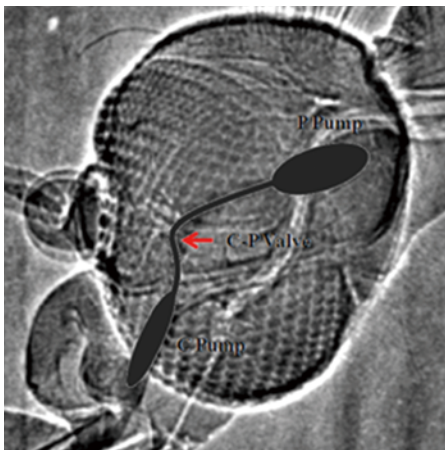
X-선 영상 기법의 활용

- 우리는 병원에서 X-선 촬영을 한 번 이상 해본 경험이 있을 것입니다. X-선은 건강과 치료를 위해서 절대적인 존재가 되었습니다. 1901년에 X-선의 발견으로 노벨상을 받은 뢰트겐은 물리학 분야뿐만 아니라 의학 발전에 상당한 기여를 했습니다. 그림은 당시 반지를 낀 부인의 손 X-선 영상입니다.



<사진> X-선을 발견한 뢰트겐 사진(좌)과 반지를 낀 아내의 X-선 촬영 사진(우)
 <출처> <https://post.naver.com/viewer/postView.nhn?volumeNo=11050257&memberNo=35743453>

- X-선은 짧은 파장의 빛으로 투과성이 우수합니다. 그러나 인체의 뼈는 X-선이 투과하기 어렵고 근육은 상대적으로 투과가 잘됩니다. 이러한 흡수량의 차이로 얻어지는 영상 촬영 기법이 흡수차이 영상기법이며 병원에서 우리 인체를 검사하는 X-선 촬영의 기본 원리입니다.
- 그림은 모기가 흡혈하는 모습을 방사광을 이용하여 촬영한 사진입니다. 앞서 이야기한 X-선 흡수량의 차이를 이용한 영상기법은 아닙니다. 모기를 구성하는 물질의 흡수계수는 별 차이가 없어서 일반 병원의 X-선 장치로는 촬영할 수가 없습니다. 흡수량이 비슷하고 작은 크기 물질의 영상을 얻기 위해서는 위상차이에 의한 영상기법을 활용합니다.

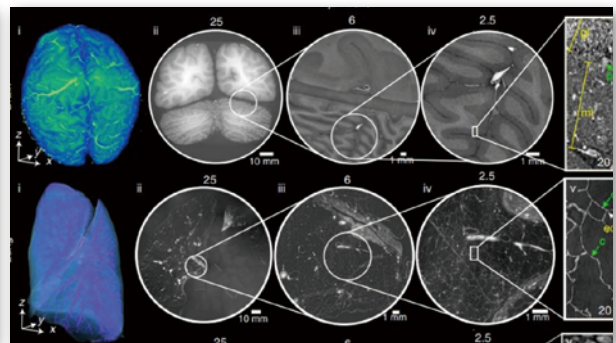


<영상> 위상차 영상기법을 활용하여 촬영한 모기의 흡혈과정의 영상 <그림> 흡수차에 의한 영상 기법(상)과 위상차에 의한 영상 기법(하)의 원리

- 방사광을 이용한 영상기법은 많은 발전을 이루어 왔습니다. 병원에서 MRI나 X-선 3차원 CT(computed tomography)로 촬영하면 3차원의 영상을 얻어서 더 정확한 정보를 알 수 있듯이, 방사광을 이용하면 나노 크기의 시료를 3차원으로 볼 수 있는 CT 기술도 가능합니다.
- 최근에는 반도체 칩을 비파괴 방식을 사용하여 내부 구조를 3차원으로 촬영하고 15nm의 분해능을 보이고 있습니다. 방사광을 이용한 영상기법은 나노 크기의 시료에서 나노급의 분해능에 도달하려고 노력합니다. 그러나 반대로 의생명공학 분야에서는 수십 cm 이상 크기의 시료를 μm 이하의 분해능을 가지는 영상을 필요로 합니다.
- 충북 청주(오창) 다목적 방사광가속기 조감도를 보면 원형의 건물에서 길게 뻗어 나온 장치를 볼 수 있습니다. 이것을 롱(long) 빔라인이라 부릅니다. 의학 연구용 롱 빔라인은 고해상도의 영상을 얻을 수 있으며, 의학연구, 의료기술 개발 뿐만 아니라 제약, 바이오, 화장품, 생명공학 등 여러 분야에서도 활용이 가능합니다. 아래우측 사진은 프랑스의 유럽연합 가속기에서 인간의 뇌와 폐를 고해상도로 촬영한 영상입니다.



<조감도>. 충북 청주(오창) 다목적방사광가속기 조감도
아래의 막대형이 3개의 롱 빔라인을 보여줌

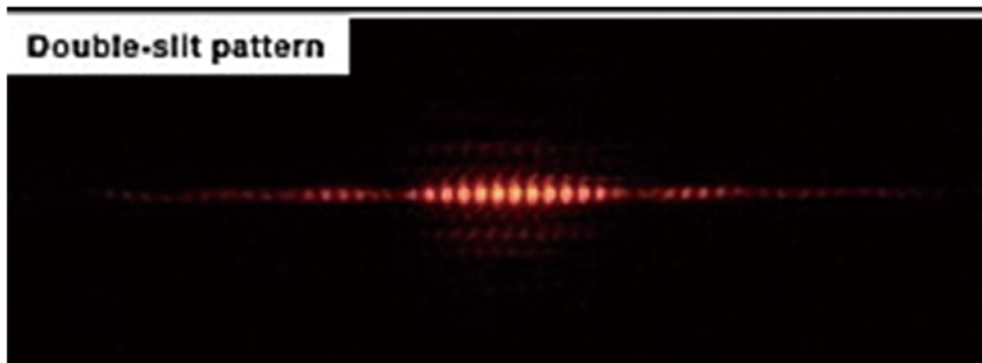
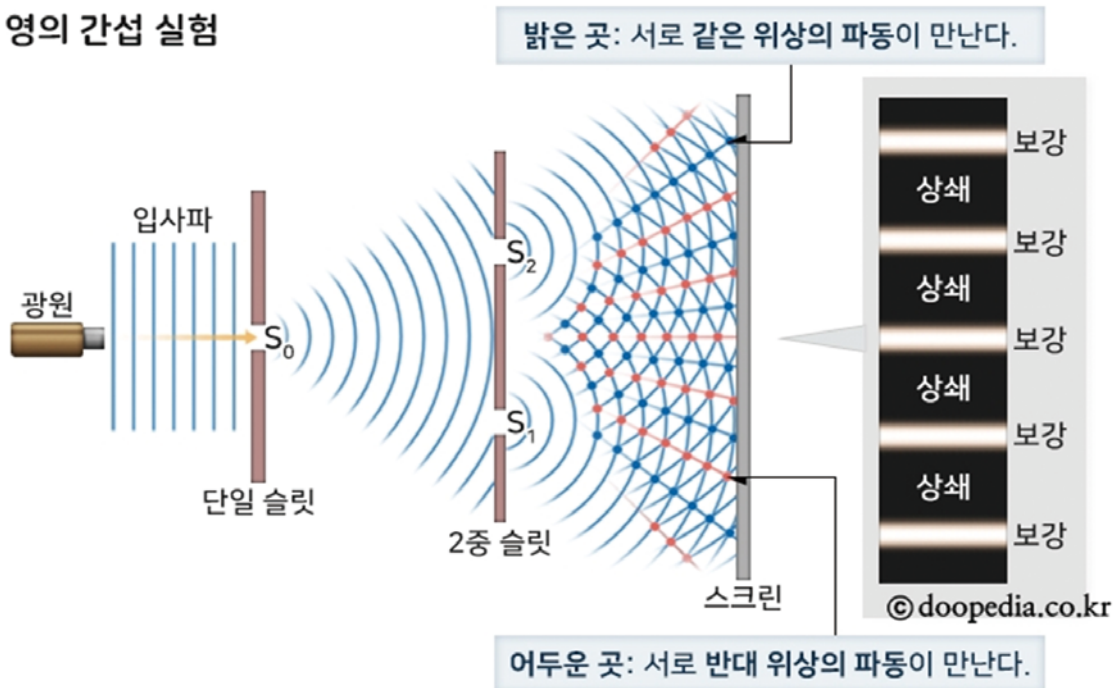


<영상>. 유럽 ESRF 가속기의 롱 빔라인에서 촬영한
인체의 뇌와 폐의 장기의 고해상도의 영상

X-선 회절 기법의 활용

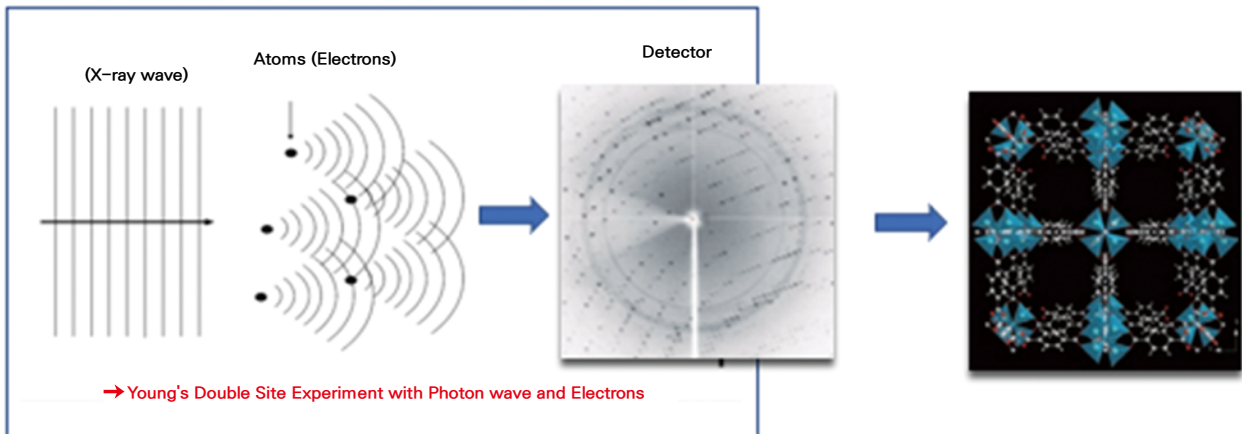
- 1801년 Thomas Young이라는 과학자가 200년간 논쟁이 되어온 빛의 파동설과 입자설에서 빛은 파동성이라는 쪽으로 기울게 한 실험 결과를 보여주었습니다. 물론 현대과학에서는 빛은 입자성과 파동성을 동시에 가지고 있음을 밝혔습니다.
- 빛이 입자성이면 그림에서처럼 단일 슬릿을 통과하더라도 2중 슬릿은 통과 하지 못하면서 스크린에는 밝은 부분이 생기지 않을 것입니다. 그러나 빛이 파동성이면 단일 슬릿에서 회절 현상으로 빛이 사방으로 퍼져나가고 따라서 2중 슬릿을 통과하면서 다시 회절에 의해 빛이 퍼져나가게 되며 스크린에서는 광로차에 의한 간섭으로 밝은 부분과 어두운 부분이 생기는 회절 패턴이 만들어질 것입니다. Young이라는 과학자가 파동의 회절 성질로 빛의 파동성을 이렇게 보여준 것입니다.

영의 간섭 실험



<그림>. Young의 이중슬릿을 이용한 빛의 회절 원리(상)와 간섭무늬(하)
 <출처>. <https://terms.naver.com/entry.naver?docId=1261268&cid=40942&categoryId=32238>

- 그런데 여기서 다음과 같은 생각을 해봅시다. 스크린에 회절 현상에 의해서 생긴 회절 패턴을 수학적으로 계산을 한다면 아마 우리는 슬릿의 모양, 슬릿 상호 간의 거리 등을 분석해 낼 수가 있을 것입니다. 이러한 실험 기법이 XRS, XRD의 기본 원리입니다.
- 가시광선을 이용한 Young의 실험처럼 X-선을 물질에 쏘이면 물질을 구성하고 있는 원자들에 의해서 회절이 생깁니다. 각각의 원자에서 회절된 X-선은 일정한 법칙에 의해서 간섭되며 검출기에 회절 패턴을 형성합니다. 이 회절 패턴에 대한 수학적 계산을 수행하면 물질을 구성하고 있는 원자의 배열 상태, 결합 상태 등 시료 결정의 구조를 알 수 있게 됩니다.



<그림>. X-선 회절 현상을 이용하여 물질의 구조를 밝혀내는 기술의 원리 설명

- 이러한 현상을 처음 관측한 과학자 Max Von Laue은 ZnS 결정을 이용하여 회절 패턴을 관측하였고 1914년에 노벨상을 받았습니다. 다음해 1915년에는 아버지 William Henry Bragg와 아들 William Lawrence Bragg가 NaCl 등 결정의 구조를 XRD기법으로 해석하였고 노벨상을 받았습니다.



<사진>. X-선 회절 기법으로 물질의 결정구조 해석 원리로 노벨상을 받은 브래그 부자

- 우리가 알고 있는 이중나선구조를 갖는 DNA 분석도 XRD기법으로 해석하였습니다. 그리고 더 강하고 작은 방사광을 이용하여 더 복잡한 물질의 구조를 해석하는 중요한 기술로 발전하고 있습니다.



<사진>. 1962년 DNA 구조를 함께 밝혀낸 제임스 왓슨,
프랜시스 크릭 모리스 윌킨스 노벨 생리의학상 수상
<출처>. <https://horizon.kias.re.kr/20346/>

- 또한 질병을 치료하기 위한 신약 개발 분야에서 XRD 기법은 매우 중요한 역할을 합니다. 질환 단백질의 구조를 풀고 여기에 맞는 약물을 개발하여 질환 단백질과 약물이 잘 결합되었는지 여부를 XRD로 해석합니다. 이렇게 해석된 약물은 임상 실험을 통하여 신약으로 만들어집니다. 우리가 잘 알고 있는 신종플루 치료제인 타미플루가 이러한 방법으로 방사광을 활용하여 개발되었습니다.

Ⅲ

방사광을 이용한 연구 분야와 활용도는?

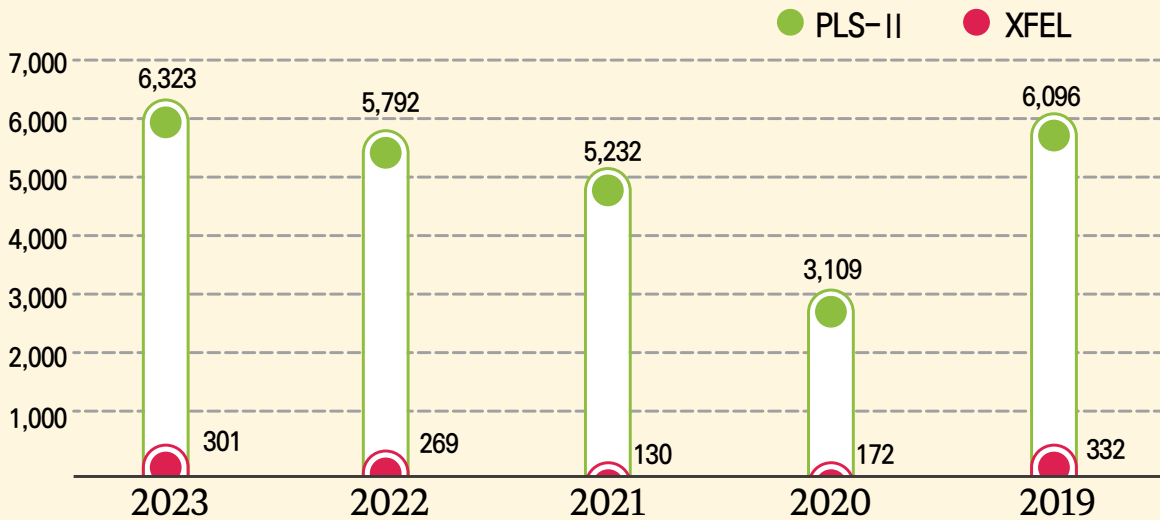
- 앞서 X-선 영역의 방사광을 활용한 X-선 영상 기법과 X-선 회절 기법에 관해서 이야기 했습니다. 이외에도 다양한 실험 기법을 활용하여 분석하고자 하는 시료에 대해 원하는 정보를 얻을 수 있습니다. 예를 들면 최근 많은 관심을 가지는 리튬 이차전지의 경우 양극재로 사용되는 물질의 구조 연구를 위하여 흡수분광학 실험 및 영상학 기법을 많이 사용합니다. 또한 반도체의 신소재 물질의 분석을 위해서 광전자분광학 실험 및 soft X-선 영상 기법을 사용하여 신물질의 전기적 특성, 전자구조 및 특정원소의 3차원 분석을 수행하기도 합니다.
- 방사광을 활용하는 분야는 다양합니다. 바이오 의학, 첨단 신소재, 반도체, 태양전지, 이차전지, 자성 물질 등 여러 분야에서 활용되고 있습니다. 그림은 방사광의 다양한 활용 분야를 보여줍니다.



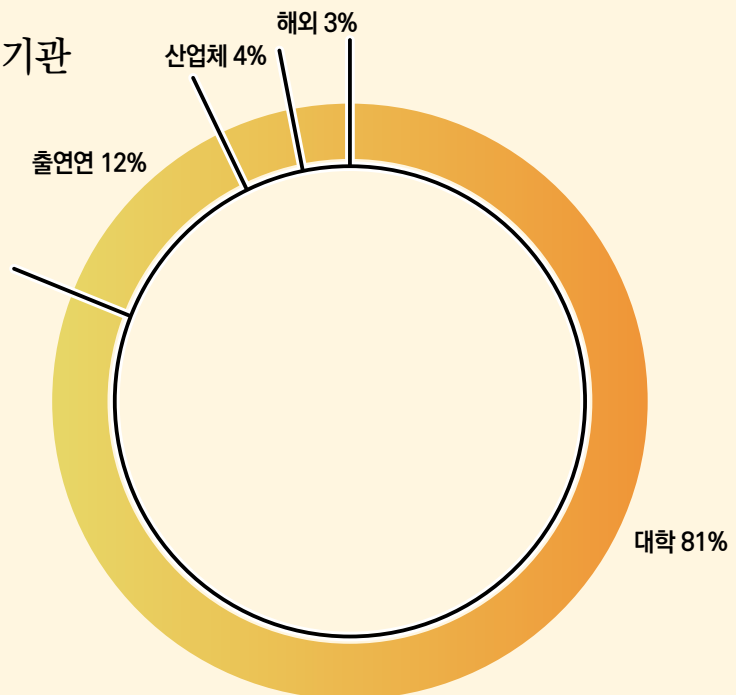
<그림>. 방사광의 다양한 활용 분야

- 방사광가속기를 활용하는 연구분야는 매우 다양합니다. 물리, 화학, 생명과학 분야가 주종을 이루며 재료, 전기·전자, 에너지 등 다양한 분야에서 활용하고 있습니다. 최근에는 2차전지 분야의 활용 비중이 높습니다.
- 방사광을 이용하는 기관은 대부분 대학에서 활용하고 있습니다. <표> 포항방사광가속기 활용 현황을 보면, 연 1,800여 개 실험 수행 중에 대학이 80% 이상을 활용하고 있습니다. 산업체의 활용은 4% 정도로 적은 수입이지만 산업체의 활용을 높이기 위해서 산업과학지원센터의 역할을 키우고 산업체를 위한 운영 방식의 변화를 준비하고 있습니다.

■ 최근 5년 방사광가속기 이용자 수



■ 2023년 유형별 주요 활용 기관

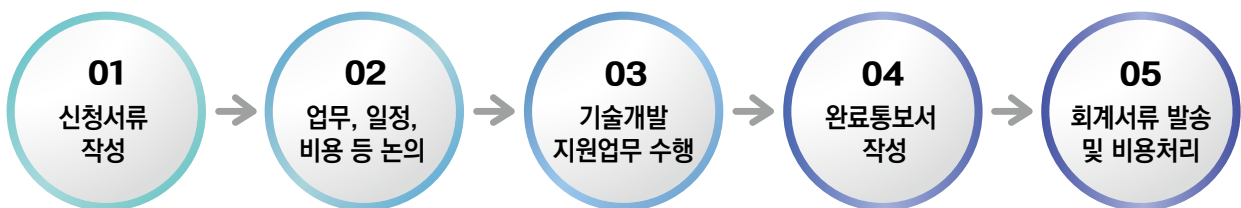


<표>. 포항방사광가속기 활용현황

IV

기업이 방사광가속기를 활용하려면?

- 산업체가 제품을 생산하거나 개발할 때 문제가 있으면 그 이유를 알고 싶어 할 것입니다. 우리가 몸이 아프면 병원을 방문하여 왜 아픈지 알고 싶은 것과 비슷합니다. 병원에 가면 의사가 진료하고 필요한 검사도 안내해주고 처방도 해줍니다. 방사광가속기도 어떻게 사용할지 모르는 기업을 위해서 진단도 해주고, 실험에 필요한 장치도 알려주고, 원인과 결과도 분석해 주면 얼마나 좋을까요?
- 현재 국내에서 방사광가속기가 운영되고 있는 유일한 시설은 포항가속기입니다. 그러면 산업체가 포항가속기를 이용하고 싶으면 어떻게 해야 할까요?
- 방사광가속기를 활용한 실험을 하기 위해서는 빔타임을 받아야 합니다. 기본적으로 1년에 3번, 이용자를 대상으로 빔타임을 배정하기 위한 신청을 받습니다. 신청한 내용은 한국방사광이용자협회에서 심사하고 합격하면 빔타임을 배정받습니다. 이 방식은 신청에서 실험까지 3~4개월이 소요되기에 신속하게 결과를 알고 싶은 산업체 입장에서는 바람직하지 못합니다.
- 그렇다고 가속기를 전혀 이용할 수 없는 것은 아닙니다. 이러한 중소기업을 위해서 산업과학지원센터를 운영하고 있습니다. 센터를 통해서 신청하면 상담과 함께 지원 여부를 논의하고, 가능하면 분석까지 진행하여 지원합니다. 분석료는 지원 내용에 따라 정해집니다. 본 과정을 통하면 방사광가속기 이용과 분석 능력이 부족해도 기업이 원하는 결과를 지원받을 수 있습니다. 그러나 이 방식은 이용할 수 있는 빔타임이 한정되어 있어서 기업이 원하는 만큼 배정받기는 어려운 상황입니다. 향후 충북 청주(오창)에 다목적 방사광가속기가 구축되면 많은 산업체가 다양한 분야에서 가속기를 쉽게 이용하고, 결과를 활용할 수 있기를 기대합니다. 그림은 포항가속기연구소 산업과학지원센터에 빔타임을 신청하는 과정을 보여줍니다.

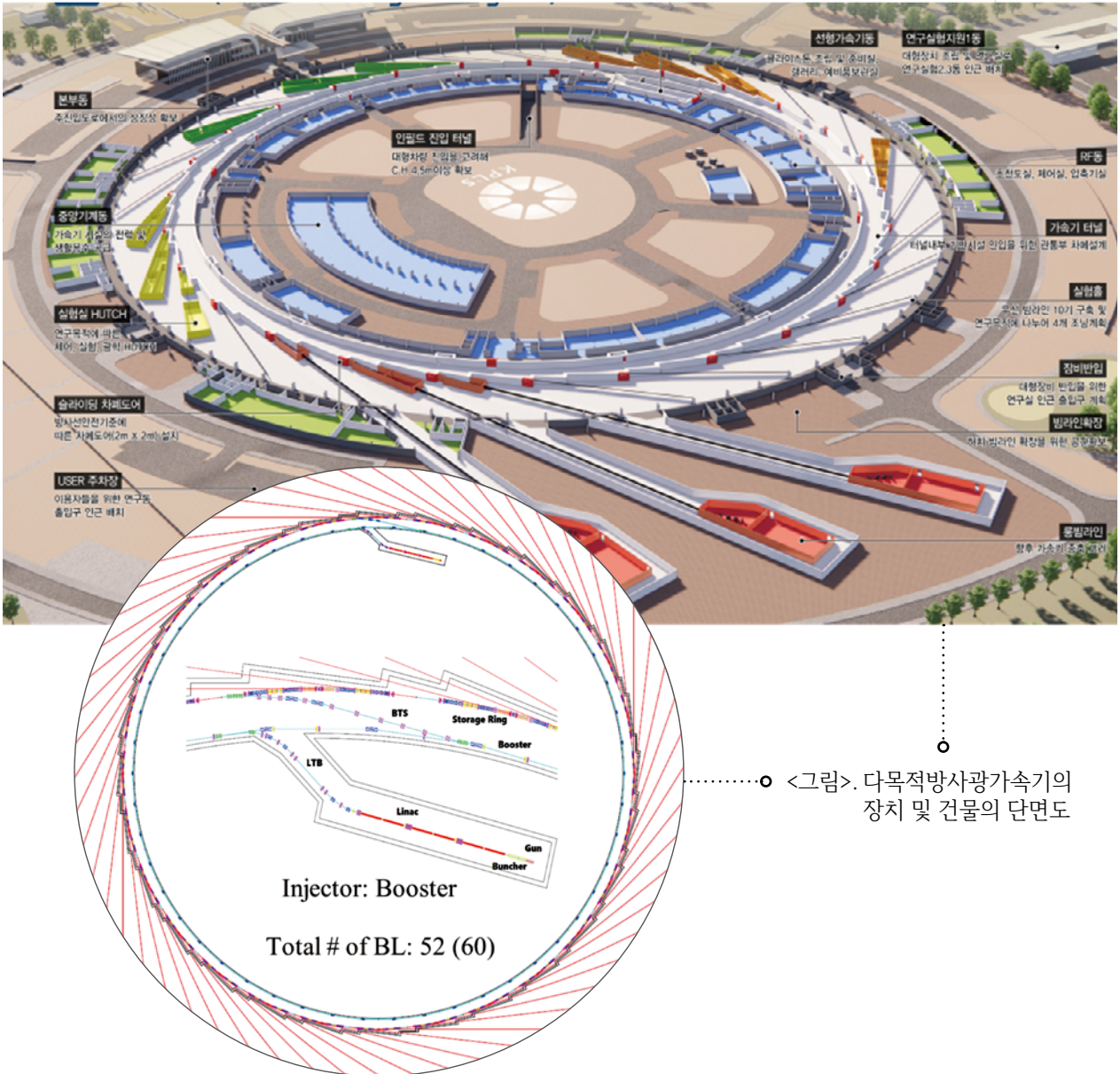


<그림>. 산업과학지원센터의 빔타임 신청 과정

V

충북 청주(오창) 다목적 방사광가속기는 어떻게 건설되나요?

- 충북 청주(오창) 다목적 방사광가속기는 포항 방사광가속기의 수요 증가에 대응하고, 산업계 활용 활성화를 위한 고성능 빔라인 시설 확충 요구가 증대함에 따라 주요 선진국과 대등한 성능을 가진 다목적방사광 가속기 구축으로 미래 첨단 연구와 산업 수요를 충족하며 국가 과학기술 경쟁력을 강화하기 위해 추진하게 되었습니다.
- 2020년 3월 과학기술자문회의에서 대형가속기 장기로드맵 및 운영전략을 심의, 확정하면서 다목적 방사광가속기 신규 구축을 의결하였습니다. 그해 5월 부지 공모를 통해 충북 청주시 오창읍 후기리 일원을 다목적 방사광가속기 구축 부지로 선정했으며, 2021년 4월 다목적 방사광가속기 예비타당성조사를 완료하여 본격적으로 구축 사업이 시작되었습니다.
- 총사업비는 정부가 9,643억원, 충청북도와 청주시가 2,000억원, 총 1조 1,643억원의 예산으로 2029년 완공을 목표로 추진하고 있습니다. 방사광을 만들어 내는 전자빔의 에미턴스는 $0.1\text{nm} \cdot \text{rad}$ 이하로 설계되고 빔에너지는 4GeV에 저장링의 둘레는 약 800m입니다. 방사광의 밝기는 포항 3세대 원형가속기 보다 약 100배 이상으로 강한 방사광을 만들어 낼 것입니다. 빔라인은 초기 10기, 최종 40기를 구축할 예정입니다.
- 여기서 빔에너지를 4GeV라고 하였는데 일반인에게는 생소한 단위입니다. 간단히 설명을 하면 마이너스 전하를 띤 전자를 플러스 1V의 전압을 걸어 주면 전자는 플러스 전극으로 가속되어 운동에너지를 얻습니다. 그때 얻은 운동에너지를 eV(일렉트론 볼트)라는 단위를 사용하며 그래서 1eV의 에너지를 얻었다고 합니다. 만약 1,000V를 걸어주면 1,000eV 혹은 1keV(킬로 일렉트론 볼트)의 에너지를 얻었다고 할 수 있습니다. 백만 볼트 전압을 걸어주면 백만eV 혹은 1MeV(메가 일렉트론 볼트)가 되며 10억 볼트 전압을 걸어주면 10억 eV 혹은 1GeV(기가 일렉트론 볼트)라고 합니다. 따라서 4GeV이면 40억 볼트를 걸어주었을때 얻어지는 전자의 운동에너지가 됩니다.
- 이렇게 eV는 가속기의 규모를 보여주는 단위입니다. 포항의 PLS-II는 3GeV이며 충북 청주(오창) 다목적 방사광가속기는 4GeV입니다. 그래서 더 밝고 더 높은 에너지의 X-선을 제공하게 됩니다. 그림은 다목적 방사광가속기의 조감도와 장치 및 건물의 단면도입니다.



- 충북 청주(오창) 다목적 방사광가속기 구축사업은 한국기초과학지원연구원(KBSI)이 주관 하며, 포항가속기연구소(PAL)를 공동연구기관으로 하여 추진하고 있습니다. 정부기관인 과학기술정보통신부는 장비 및 연구시설 구축 비용을 지원하고 충청북도와 청주시는 부지 제공과 기반 시설(전력, 용수, 도로망 등) 구축을 지원합니다.
- 충북 청주(오창) 다목적 방사광가속기 부지에는 방사광가속기 실험분석 및 활용에 어려움을 겪는 산업체 지원을 위해 '방사광가속기 활용지원센터'를 구축할 예정이며, 가속기를 활용 하여 얻어지는 데이터를 효율적으로 저장·분석·공유함으로써 기초과학연구 및 산업화 연구 역량 강화를 지원하기 위한 '방사광가속기 데이터센터' 구축을 계획하고 있습니다. 그 외에 유럽의 그르노블 GIANT와 같은 방사광가속기 R&D 사이언스파크를 조성하여 산학연 공동 프로그램 및 산업기술 연구개발 지원 등을 추진하기 위한 연구단지 개발을 계획하고 있습니다.

충북 청주(오창) 다목적 방사광가속기 초기 구축 빔라인(10기)

	구분	실험 기법	활용 분야
1	① 바이오 소각산란 빔라인 (Bio Pharm-Bio SAXS) (산업 우선 지원)	소각산란법(SAXS) 각 X-선 산란(WAXS)	바이오(신약)
2	② 소재 구조 분석 빔라인 (산업 우선 지원)	X-선 흡수분광법(XAFS) X-선 흡수 미세구조(XAFS)	소재, 에너지 (이차전지, 태양전지 등)
3	③ 연 X-선 나노프로브 빔라인 (Soft X-ray Nano-probe) (산업 우선 지원)	X-선 흡수 분광법(XAS) X-선 광전자 분광법(XPS)	반도체, 소재
4	④ 나노스케일 각분해 광전자 분광 빔라인 (Nanoscale Angle-resolved Photoemission Spectroscopy)	나노스케일 각분해능 광전자 분광 (Nano-ARPES) (고체 내 전자구조를 직접적으로 측정할 수 있게 해주는 실험기법)	반도체, 소재 (나노)
5	⑤ 결맞음 X-선 회절 빔라인 (Coherent X-ray Diffraction)	결맞음 X-선 회절 (Coherent X-ray Diffraction)	반도체, 지질, 소재, 화학
6	⑥ 결맞은 소각산란 빔라인 (Coherent Small-angle X-ray Scattering)	소각 X-선 산란(SAXS) → GI 기법 포함(GISAXS) 각 X-선 산란(WAXS) X-선 광자 상관분광법(XPCS)	소재, 화학
7	⑦ 실시간 X-선 흡수 분광학 빔라인 (Real-time X-ray Absorption Fine Structure)	X-선 흡수분광법(XAFS) Quick-scanning XAFS(QXAFS) X-선 방출분광학(XES) 고에너지 분해능 형광 탐지 X-선 흡수분광법(HERFD-XAS) (High Energy Resolution Fluorescence Detected)	에너지(배터리, 전기축매, 태양 전지 등) 반도체(메모리) 바이오 (나노의약품) 환경, 지질
8	⑧ 생체분자 나노 결정학 빔라인 (BioNanocrystallography)	생체 고분자 결정학(MX) 극저온 및 상온 결정학 실험	바이오(단백질)
9	⑨ 고에너지 현미경 빔라인 (High Energy Microscopy)	Projection Imaging 고에너지빔을 이용한 소재 및 산업 응용 비파괴 2D/3D 이미징 영상 진단	소재, 에너지, 바이오
10	⑩ 나노프로브 빔라인 (Nano-probe)	티코그래피(Ptychography) 나노X-선 광학(Nano-XDM) 나노X-선 형광 현미경(Nano-XFM) 나노 X-선 흡수분광 분석법 (Nano-XANES) 단층 촬영(Tomography)	반도체, 소재, 에너지, 환경, 화학