대한민국 미래 100년

새로운 세계를 보여줄 꿈의 **빛**

충북 청주 다목적 방사광가속기

대한민국 과학기술의 도약과 발전을 이끌어 가겠습니다.



※충북 청주 방사광가속기 조감도 당선작

Contents

커버 스토리 Cover Story 01

리포트 Report 02
가속기의 종류 02
가속기별 원리 및 응용분야 03

이슈 페이퍼 Issue Paper 04
충북 청주 방사광가속기의
의학 및 생명과학 분야 이용 활성화 방안
Part 1. 의생명 분야 04
Part 2. 에너지 분야 12
Part 3. 장치응용 분야 16

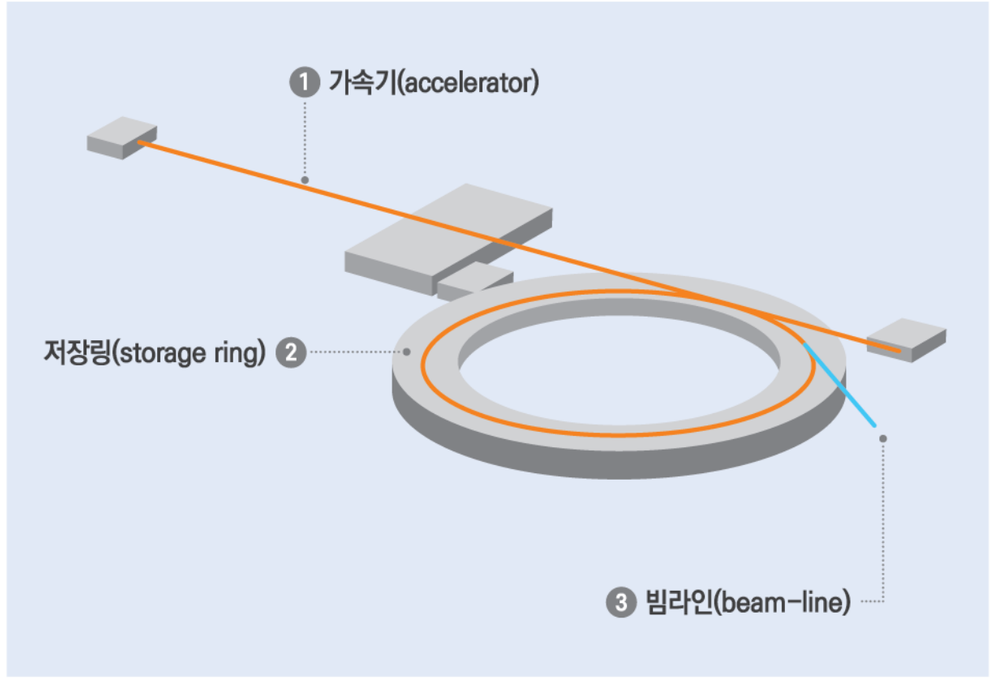
인포 Info 19
기업참여정보

Cover Story

다목적 방사광가속기 필수 3요소

다목적 방사광가속기

전자가 자기장속을 지날 때 궤도가 휘어지면서 접선방향으로 나오는 빛을 이용하여 연구를 수행하는 시설로 **3가지 필수 시설(가속기, 저장링, 빔라인)**로 구성됩니다.



1 가속기(accelerator) 전자총에서 나온 전자의 에너지를 가속기에서 증가시킨다.

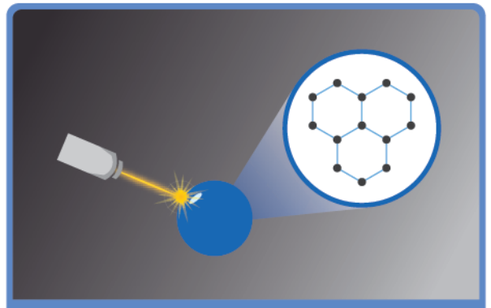
2 저장링(storage ring) 가속기에서 생성된 전자 에너지가 저장링에 저장된다.

3 빔라인(beam-line) 서로 다른 극을 가진 자석이 전자를 휘게 만들며, 이동 방향으로 빛 에너지가 방출된다.

Report

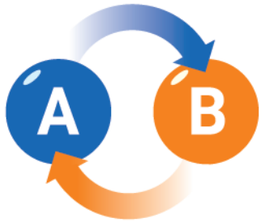
가속기의 종류

전자를 가속시켜 강력한 빛을 얻을 수 있는
방사광가속기



물질의 구조를 분석

다양한 입자를 가속시키는
양성자, 중입자, 중이온가속기



물질의 구조와 성질을 변화

가속기별 원리 및 응용분야



가속입자 · 이용입자 전자

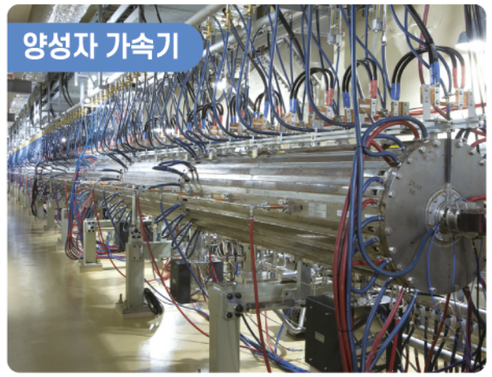
원리 가속된 전자가 방향을 바꿀 때 발생하는 빛(방사광)을 이용

응용분야



생명과학 재료과학 화학 · 물리

주요시설 미국 ALS(LBNL), 영국 DLS
한국 충북 청주(예정)



※ 사진 출처 : 한국원자력연구원 양성자과학연구단

가속입자 · 이용입자 양성자
(수소원자에서 전자를 제거한 이온)

원리 가속한 양성자를 물질에 쏘아 물질을 변화시키거나 중성자 생산

응용분야



동위원소 생산 반도체 암 치료

주요시설 미국 SNS(ORNL), 일본 JSNS(J-PARC),
한국 경북 경주

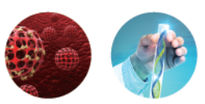


※ 사진 출처 : 연세대학교 의료원

가속입자 · 이용입자 탄소이온
(중입자 중 탄소를 수 천도로 가열해서 음이온을 분리)

원리 탄소이온을 빛의 속도 가까이 가속해 얻은 에너지로 암 치료

응용분야



암 치료 의학 연구

주요시설 독일 HIT, 일본 HIMAC(NIRS),
한국 서울 연세대(예정), 부산 서울대(예정)



※ 사진 출처 : 기초과학연구원 중이온 가속기 연구소

가속입자 · 이용입자 중이온
(수소보다 무거운 입자들을 이온화 (헬륨-우라늄))

원리 중이온-표적의 충돌로 핵반응을 일으켜 다양한 희귀동위원소 생성

응용분야



동위원소 생산 핵물리 연구 신물질, 신품종 개발

주요시설 스위스 HIE-ISOLDE(CERN),
중국 HIRFL(IMP),
미국 FRIB, 한국 대전 라온(예정)

Issue Paper

충북 청주 방사광가속기의 의학 및 생명과학 분야 이용 활성화 방안

Part 1. 의생명 분야

방사광가속기의 의학적 이용



박 우 윤
충북대학교 의과대학 교수, 충북대학교 방사광가속기융합연구소 소장

방사광가속기의 의학적 이용은 방사광가속기에서 만들어진 X(엑스)-선을 이용하여 생명 현상을 이해하고 나아가 영상(이미징; imaging) 진단과 치료기술 개발을 통하여 인류의 건강한 삶에 기여하는데 목적이 있다. 1895년 독일의 과학자 빌헬름 콘라드 뢴트겐(Wilhelm Conrad Röntgen)이 X-선을 발견한 이후 X-선은 현재까지 질병의 진단과 암 치료에 매우 중요하게 이용되고 있으며, 여기에 방사광을 활용하면 새로운 차원의 영상진단 및 치료가 가능하게 되었다. 현재 X-선을 이용한 영상 획득 방법은 공간 해상도(spatial resolution), 대비(contrast) 및 정량화(quantitative scaling)의 한계가 있다. 또한 방사선치료 방법은 방사선량을 종양에 집중시키는 기술, 방사선에 대한 종양과 정상 조직 사이의 반응의 차이를 넓히는 기술 등에 한계가 있다. 지난 40 여년 동안 세계의 여러 연구 그룹에서 방사광 X-선을 활용하여 새로운 영상 및 방사선치료 방법의 개발을 위해 노력해 왔다. 방사광은 싱크로트론에서 전기장을 통해 수 GeV의 에너지로 빛의 속도에 가깝게 가속된 전자가 구부림 자석(bending magnet) 또는 삽입장치(wiggler 또는 undulator) 등에 의해 진행 방향이 꺾일 때 생성되는 전자기 방사선이다. 방사광은 빔의 세기가 강하고, 크기가 작으며, 원적외선에서 X-선에 이르는 연속 에너지 스펙트럼을 가지고 있으며, 평행으로 정렬된 빔의 다발을 얻을 수 있다. 이러한 특성을 이용하면 방사광은 생명-의학 이미징 및 치료에 매우 독특하고 유용한 도구가 될 수 있다 (표 1)[1].

세계적 방사광가속기의 의학 연구용 빔라인 현황

일본의 Spring - 8, 이탈리아의 Elettra, 독일의 PETRA, 프랑스의 ESRF, 캐나다의 CLS, 호주의 AS 등을 중심으로 방사광을 사람에도 적용하고자 노력하고 있다. 의학 연구용 롱 빔라인은 일반적으로 검체의 크기에 따라 빔 소스와 검체, 검체와 검출기 사이의 거리, 조사 범위(FOV; Field of view) 및 에너지를 조정하여 세포, 조직, 곤충 등 작은 검체로 부터 큰 동물, 사람에 이르기까지 영상 및 치료 연구가 가능하도록 설계 및 계획되고 있다 (그림 1) [2]. 또한 부속 시설로 세포 배양실, 분자생물학 연구실, 조직 및 전임상 등의 검체 준비실 등이 갖춰져 있다.

프랑스의 ESRF(European Synchrotron Radiation Facility)에는 25.0-185.0 keV의 의생명 빔라인이 구축되어 있어 다양한 영상 기법, 방사선치료 및 방사선 생물학 연구를 이끌고 있다. 또한 2020년 완공된 4세대 빔 EBS(Extremely Brilliant Source Project)에서는 350 keV의 에너지, 220m 길이의 X-선 영상 빔라인을 구축하여 의료 및 재료, 에너지, 나노, 환경 등 여러

분야에도 활용하고자 한다. 호주의 AS(Australian Synchrotron)에는 135m 길이의 의생명 IMBL(Imaging and Medical Beamline)이 구축되어 있다 (그림 2). IMBL은 15-150 keV의 에너지에, 조사범위(FOV: 최대 500mm x 40mm)가 커서 인체의 영상 및 치료, 대형동물을 이용한 질병 모델의 연구도 가능하다. 중국 북경에 2025년 준공 예정인 HEPS(High Energy Photon Source)에는 의생명용 롱 빔라인을 1차 기본 14개의 빔라인에 포함시켜 구축 중으로 10-300 keV의 에너지에, 길이는 350m 이다.

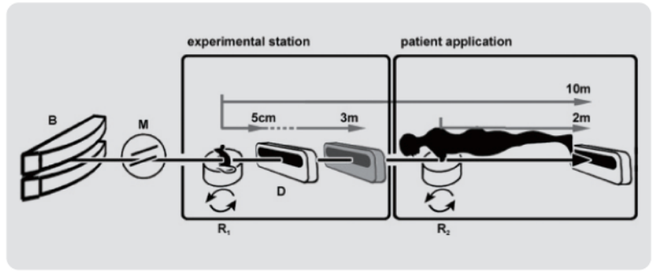
오창 다목적 방사광가속기의 의학 연구 활용 전략

의학 연구용 롱 빔라인은 의학연구, 의료기술 개발 뿐만 아니라 제약, 바이오, 화장품, 식품, 의료기기, 소재, 생명공학 연구 등 여러 분야에서도 활용이 가능하다. 예를 들어 신약 개발은 단백질구조 분석 → 구조기반 약제활성물질개발 → 전임상연구 → 임상연구 → 상용화의 단계로 이루어진다. 포항 방사광가속기에서는 단백질구조 분석은 가능하지만, 빔 조사면적이 작아서 전임상 및 임상연구는 불가능하다. 따라서 오창 다목적 방사광가속기에서 절실히 필요하고 가장 특징적이며 경쟁력있는 빔라인은 포항가속기에서는 구현이 안되는 의학 연구용 롱 빔라인이라고 할 수 있다. 의학연구용 롱 빔라인은 조직, 소동물 등 작은 검체로 부터 큰 동물, 사람에 이르기까지 영상 및 치료의 전임상 및 임상연구가 가능한 조사 범위, 빔에너지 및 X-선 광학계를 갖추어야한다. 또한 빔라인과 더불어 활용지원센터를 설립하여 빔 조사, 분석, 이용 지원, 상담 및 교육 등을 통하여 활용을 극대화하여야 한다. 국내 유일의 큰 조사면적을 갖는 의학 연구용 롱 빔라인과 활용지원센터는 기초과학기술에 기반한 혁신으로 미래 신성장동력인 바이오헬스산업의 지속적인 성장에 기여할 것이다.

※ 참고문헌
1. Suortti P & Thomlinson W. Medical applications of synchrotron radiation. Phys Med Biol 2002;48:R1 - R35.
2. Dullin C, 등. Multiscale biomedical imaging at the SYRMEP beamline of Elettra - Closing the gap between preclinical research and patient applications. Physics Open 2021;6:100050.

검사 또는 치료 명	기법	해부학적 기관 및 질병	현재까지 연구 대상
혈관조영술 (Angiography)	투사영상 (projection image)	심장혈관	사람
기관조영술 (Bronchography)	투사영상, CT	폐, 기도(airways)	동물
전산화단층촬영 (CT ; Computed tomography)	CT 영상	두경부 (head and neck)	동물
미세단층촬영 (Microtomography)	3D CT 영상	뼈 구조	조직
유방촬영술 (Mammography)	흡수, 위상차, 산란 대비	유방	사람
방사선치료 (Radiotherapy)	외부 조사	뇌종양	동물
광자활성화치료 (Photon activation therapy)	외부 조사	뇌	사람
엑스선 현미경 (X-ray microscopy) 미세 형광 (microfluorescence)	투사, CT	세포, 조직	세포 및 조직

(표 1) 방사광을 이용한 의학 연구 현황



(그림 1) 이탈리아 Elettra의 의생명연구용 SYRMEP (SYnchrotron Radiation for MEdical Physics) 빔 라인의 개략도. 굽힘 자석(B)에 의해 생성된 방사광 빔을 모노크로메이터(M)로 필터링하여 원하는 에너지 및 수평 빔을 얻어 검체에 조사한다.
실험 스테이션에서는 검체-검출기(D) 사이의 거리를 5cm에서 3m까지 조정할 수 있다.
실험 스테이션에서 빔 라인을 연장하여 환자에도 적용한다. 큰 검체는 회전자 R1에 장착되고 빔은 환자실로 뻗어나가게 하여 검체에서 검출기까지의 거리를 10m 이상으로 할 수 있다.



(그림 2) 호주 AS(Australian Synchrotron)의 의학 빔라인 (IMBL : Imaging and Medical Beamline) (붉은색 점선 내 긴 관 모양의 구조)

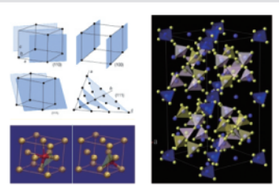
의생명 분야에의 방사광 가속기 분석 기법



신 현 준
충북대학교 물리학과 교수, 충북대학교 방사광가속기융합연구소 부소장

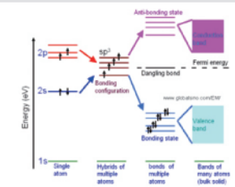
방사광 분석 기법의 기본 원리는 아래의 그림과 같이 산란과 분광이다. 산란을 활용하는 기법은 공간에서의 원자, 분자의 구조를 규명하는데 활용되고 있으며, 분광을 활용하는 기법은 전자에너지 구조, 원소 종류, 산화상태, 화학결합 상태, 자성상태를 규명하는데 활용되고 있다. 이러한 기본 원리들을 공간적인 분해능을 가지고 연구하게 하는 것이 X-선 현미경학 혹은 X-선 영상학이다.

XRD : X-ray diffraction



결정 구조, 원자 배열, 분자 배열, 국부적 원자 결합 구조, ...

XPS : X-ray photoelectron spectroscopy
XAS : X-ray absorption spectroscopy



전자 에너지 구조, 원소 종류, 결합 구조, 산화 상태, 화학 결합 상태, 자성 상태, ...

의생명 분야에의 활용은 위의 기법들을 다양하게 활용하고 있다.

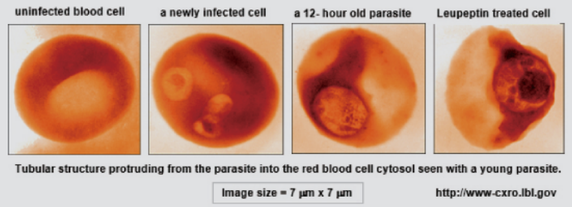
(1) 단백질 결정학

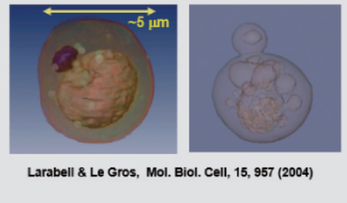
같은 종류의 단백질을 모아 용액 속에 넣고 이를 서서히 결정화시키게 되면, 주기적인 단백질 배열을 갖는 단백질 결정이 만들어진다. 이 단백질 결정에 대해서 산란 기법을 활용하게 되면, 단백질을 구성하는 원자, 분자의 위치 정보를 알 수 있게 된다. 방사광을 활용하는 단백질 결정 분석은 현재 여러 가속기연구소에서 활발히 진행되고 있는 연구분야이며, 생물체의 단백질의 이해 뿐 아니라, 신약 개발을 위해 많은 노력들이 이루어지고 있다.

(2) 세포내 미세구조 연구

X-ray microscopy는 물체의 흡수도 차이를 이용하거나 물체 표면 근처에서 굴절되는 광원이 서로 간섭하면서 발생하는 phase contrast를 이용하여 물체의 미세구조를 관찰할 수 있다. 이 분야에서 먼저 발전한 것이 soft x-ray를 이용한 x-ray microscopy (XM)이다. 이 경우 water window에 해당하는 soft x-ray를 사용함으로써, 수용액 속에 있는 세포의 미세 구조를 밝힐 수 있다. Soft x-ray 영역에서는 집속/확대 렌즈가 크게 발전하여 수십 nm의 공간분해능을 구현하는데 어려움이 없다. 따라서 이를 이용한 세포내 미소기관의 관찰은 큰 연구 주제가 되어왔다. 아래 그림 (왼쪽) 은 미국의 Advanced Light Source에서 실험한 내용으로 말라리아에 감염된 적혈구 및 약물처리한 후의 적혈구에 대한 모양을 모여주고 있다. 2차원적인 연구를 지나, CT

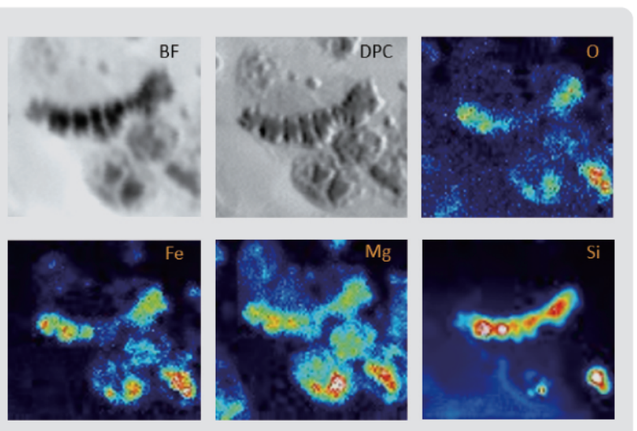
기법을 이용하여 3차원으로 세포를 연구하는 기술이 발전하여 세포의 매우 약한 부분에 대한 연구도 가능하게 해 주었다 (그림의 오른쪽). 이 방법은 전자현미경으로 연구할 때 발생할 수 있는 약한 물질에서의 왜곡, 오랜 연구 시간의 단점을 보완해 주는 기법이다.





(3) 분광현미경 기법을 이용하는 미세 구조 연구

분광학의 장점은 물질의 종류 및 화학적인 상태를 제공하는 것으로 미세구조의 임의의 위치에서의 원소의 종류나 화학적인 상태를 규명하는 연구 또한 활발한 분야이다. 최근 나노 바이오 연구가 활발하게 연구가 되고 있는데, 세포내 나노물질이 들어갔을 경우 어떠한 영향이 일어나는지에 대한 관심이 높다. 이에 대한 규명을 위해서 세포내 나노물질에 대한 원소 종류 뿐 아니라 이 나노물질들의 산화 상태가 어떠한지에 대한 연구가 이루어지고 있다. 예를 들어, FeOx 나노입자를 세포에 넣고 이들 나노입자들에 외부에서 전기장을 인가하여 세포에 대한 영향을 연구하기도 한다 (카톨릭 대학교, 김종기 교수팀). 이탈리아의 Elettra 연구소의 경우에도 미세 물질이 생명체에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구가 활발하다. 예를들어, 석면으로 인해 인체의 폐에 어떠한 영향이 일어났는지에 대한 연구 예가 아래 그림에 있다. 그림에 의하면, 석면이 폐에 침착한 후 오랜 시간이 흘렀을 때 석면 주위에 Mg, Fe, O 원소들이 어떠한 분포를 이루고 있는지에 대한 정보를 제공하고 있다. 이러한 연구는 석면이 인체의 폐에 미치는 영향을 규명하는데 활용될 수 있을 것이다.

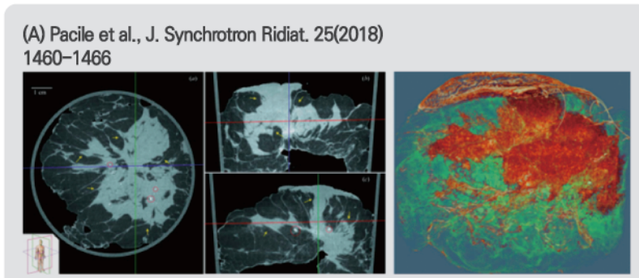


E = 2019 eV, 50mm, 100X100pixel, 15 s/pixel LEXRF, 4 SDDs

L. Pascolo, A. Gianoncelli, et al. Particle and Fibre Toxicology 2011, 8:7.
L. Pascolo, A. Gianoncelli, et al. Scientific Reports 2013, 3., Scientific Reports 2015, 5.

(4) X-선 영상 법을 이용한 생체내 내부 구조 관찰

병원에서 X-선 흉부 사진을 찍거나 CT 찍는 것과 같이 방사광 X-선을 이용하여 물체의 내부를 관측하는 projection imaging 기법은 매우 광범위한 응용 분야를 가지고 있다. X-선의 흡수가 적은 경우 투과 깊이가 길고, 흡수가 잘되는 에너지에서는 투과 깊이가 얕기 때문에 이것들을 잘 활용하면 다양한 응용 결과를 도출할 수 있다.
X-선 영상에서 3차원으로 CT 정보를 얻는 기법이 보다 임팩트 있지만, 실시간으로 연구하는 경우에는 주로 2차원 정보로 연구하게 된다. X-선 영역에서 흡수도의 차이는 크지 않을 수 있기 때문에 phase contrast 기법을 활용하는 것이 일반적이며, 곤충, 식물, 실험용 동물 연구가 활발하다. 1um 혹은 이보다 조금 작은 크기의 공간분해능을 갖는다. 나아가 인체에 활용하기 위한 영상 기법이 호주 등 일부 방사광가속기연구소에서 이루어지고 있다. 아래의 그림은 유방 조형술에 의한 영상이다.



(A) transaxial, coronal and sagittal view of the excised breast and (B) 3D rendered image of the same breast. The parenchymal distortion and speculations are clearly visible along with the tumor into the skin.

인체 내의 검사도 중요하지만, 악성 종양이 있는 장소로 X-선을 집속하여 종양을 효과적으로 파괴하는 연구가 진행 중에 있다. X-선의 경우 comb like한 광원 모양으로 만들고, 가능하면 여러 방향으로 입사하게 하여 종양 부위로 효율적으로 입사하게 함으로써, 치료하는 목적으로 활용된다.

의학 연구용 방사광 빔라인 설계 경향



임 재 홍
포항공과대학교 포항가속기연구소 박사

방사광은 최신 X선 방사선 기법 연구에 활용되는데, 방사광 기술 자체도 이에 못지않게 빠르게 발전하고 있다. 새로이 개발되는 방사광원 특성에 맞추어 의학 연구용 방사광 빔라인(beamline)을 설계하는 주안점도 변하고 있다.

발전 단계에 따라 구분해보면, 2010년 이전에는 낮은 에너지의 휨자석 광원을 이용해 조직 시편에 대해 위상차 영상을 얻었다. 방사광원의 임계에너지 (critical energy)는 10 keV 이하였고, 빔라인의 길이는 30 m 수준이었다. X선 에너지가 낮아서 주로 조직 시편에 대한 고해상도, 고감도 X선 영상 획득이 진행되었다. X선 치료 연구는 소형 동물을 대상으로 했다.

비슷한 시기에 강력한 위글러 광원을 사용해 높은 X선 에너지를 이용한 의학 연구가 시도되었다. 이러한 광원은 임계에너지가 20 keV 이상으로 의학용 연구가 가능했다. 그러나, 초기의 위글러는 광원의 크기가 커서 위상차 영상의 질이 좋지 않았다. 이를 보완하기 위해 단색화-시준화 (monochromator-collimator) 결정을 사용하거나 격자간섭계 (grating interferometry)를 사용해 위상차 효과를 극대화하는 방법이 개발되었다.

2010년 부터는 위글러 광원을 사용한 단색광 X선 영상이 보편화되었다. 임계에너지는 휨자석 보다 높은 수준이었고(>10 keV), 대신 광원의 크기는 작아 위상차 영상 획득이 가능했다. 단색광 사용으로 인해 정량적인 영상 획득 및 위상차 영상의 해상도 개선이 이뤄졌다.

그 다음 발전단계는 임계에너지가 20 keV 이상인 위글러를 광원으로 사용한 긴 빔라인(long beamline)이다. 빔라인의 길이가 100 m 이상이다. 빔라인의 길이가 길면 시료에 조사하는 빔의 크기를 키울 수 있다. 그리고, 시준 정도도 개선되는 효과가 있다. 빔 특성으로 볼 것 같으면 실제로 사람을 대상으로 한 의학 연구가 가능하다. 대표적인 시설은 호주 방사광가속기의 의학영상 빔라인(Imaging and Medical Beamline)이다. 현재 소형 동물에 대한 X선 영상 및 치료 연구를 통해 사전 연구를 활발히 진행 중이며, 이를 토대로 의학 연구를 위한 허가를 받고자 노력하고 있다.

최근에는 4GSR의 휨자석 광원에 긴 빔라인을 뽑는 설계가 제시되었다. 휨자석의 임계에너지가 20 keV 이상이므로 의학용 연구가 가능하다. 여러 가지 장점이 있는데, 광원의 크기가 작아서 고품질의 위상차 영상 획득이 가능하고, 긴 빔라인이라 시료에 조사되는 빔의 크기가 크다. 그 첫 사례인 ESRF의 BM5 빔라인은 적출한 내부 장기 전체 영상과 이를 확대한 고품질의 조직 영상을 얻는 방법을 제시해 주목을 받았다 (Walsh, C. L. et al. Imaging intact human organs with local resolution of cellular structures using hierarchical phase-contrast tomography. Nat Methods 18, (2021)).

ESRF의 BM5 빔라인은 ID18 빔라인으로 이전했는데, 이 빔라인의 길이는 220 m에 이른다. 광원으로부터 시료까지의 위치는 170여 미터이고, 이 위치에서의 빔의 크기는 폭 방향으로 30 cm 이다. 실험허치는 길이가 40 m 이다. 최근 운전을 시작했으며,

다양한 종류의 시편들을 촬영하면서 영상 특성을 파악하고 있다. 사람의 전신을 올려 놓고 촬영할 수 있는 샘플 스테이지가 입고 예정이다.

과거 방사광가속기의 전자에너지가 낮은 시절에는 위글러를 써서 광자 에너지를 높이고 밝은 단색광 X선을 생산하고자 했다. 그러나, 위글러 사용은 광원의 크기가 커서 영상의 질이 손해를 봤다. 단색화는 빔의 밝기를 떨어뜨렸다. 방사광가속기 기술이 발전하면서 휨 자석으로도 임계에너지가 20 keV 이상인 방사광을 생산할 수 있게 되었다. 광원의 크기가 작아 영상의 질도 우수하다. 위상차 효과가 광자 에너지에 반비례하기 때문에, 높은 에너지에서는 백색광을 사용하더라도 위상차 효과가 꽤 균일해 영상의 질을 떨어뜨리지 않는다. 오창의 4GSR의 의학용 빔라인 건설에 고려해 봄 직한 설계 경향이라 하겠다.



(그림 1) 오창 4GSR 방사광가속기의 긴 빔라인 예상 조감도

Part 2. 에너지 분야

에너지 분야에서의 방사광가속기 활용



이 동 주
충북대학교 신소재공학과 교수

방사광가속기는 전자를 고에너지로 가속해 빛(적외선에서 X-선 영역)을 얻는 장치로 X-선 영역에서 이전에 얻을 수 없었던 고품질의 빛을 얻어 지금까지 알려지지 않은 물체의 구조와 특성을 파악할 수 있는 거대한 현미경이라고 볼 수 있다. 특히 에너지 분야에서는 높은 에너지의 X-선 빔이 가능하여 친환경 에너지 생산 및 저장 장치 (이차전지, 연료전지, 수소 저장재료 등) 개발을 위해 필수적인 나노구조에서 일어나는 촉매 물질들의 반응 메커니즘, 원자 수준의 구조 분석이나 실제 작동 상황을 측정할 수 있어 차세대 에너지 소재 개발에 상당한 도움이 될 수 있다.
본 장에서는 방사광가속기가 이차전지를 비롯한 에너지 분야에서 어떻게 활용되고 있는지 살펴보고자 한다.

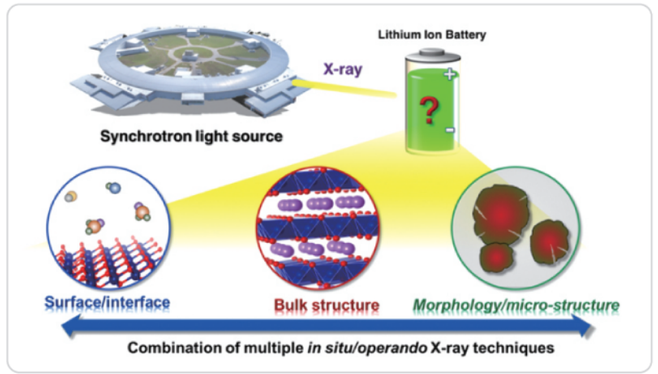
1.방사광가속기를 활용한 이차전지 소재 분석기술[1)]

기존의 이차전지에 비하여 에너지 밀도가 높고 고출력 특성을 가진 리튬이온전지(Li-ion Battery, LIB)는 휴대용 소형 전자기기를 비롯해 전기자동차나 신재생에너지를 저장을 위한 에너지 저장 장치(Energy Storage System, ESS)로 널리 사용되고 있다.
LIB는 여러 번 충전시키고 방전시키는 것이 가능하다. 양극의 활물질에 포함되었던 리튬이온이 전해액을 거쳐 음극으로 이동한 후 층상구조를 이룬 음극의 활물질 사이에 삽입되면 충전이 되고, 음극활물질에 삽입되어 있던 리튬이온이 다시 양극으로 이동하면서 전지가 작동하게 된다. 양극에서 리튬이온이 탈착 시 활물질의 산화수는 반드시 전하가 중성인 상태를 유지할 수 있어야 한다. 그 때문에 일반적으로는 전이금속 산화물이 사용되며, 음극 소재는 리튬이온의 삽입과 탈착이 쉬운 층상구조 흑연이 주로 사용되고 있다.[2)]

LIB의 성능은 핵심 구성 요소인 양극 및 음극 소재와 전해질에 의하여 결정된다. 전해질보다는 전기화학 반응에 실제로 참여하는 양극과 음극의 소재가 전지의 성능에 더 큰 영향을 준다. 따라서 LIB 연구에서는 양극과 음극 소재의 반응 거동, 전자 저장 원리, 열화 메커니즘 및 전극/전해질 계면 등을 이해하는 것이 매우 중요하다. 이러한 것들을 정확히 이해하여 기존의 소재를 개선하고 신소재를 개발하기 위하여 다양한 분석기술을 활용한 연구가 진행되고 있다.
현재 주로 사용되는 분석기술은 이차전지와 관련된 충전이나 방전 또는 전기화학 반응을 일으킨 후에 분석하고자 하는 시료 물질을 분리해서 분석하는 ex-situ 분석법이다. 즉, 전지를 분해하여 양극 및 음극 소재를 회수하여 실험을 진행하고 있다. 이러한 ex-situ 분석법으로 전극 소재가 전기화학 반응을 일으키는 실상황을 직접 볼 수는 없다. ex-situ 분석법을 사용하면, 전극을 회수하고 옮기는 과정에서 전극이 오염되거나 비가역적 반응, 또는 수분이나 산소와 반응하는 등 원치 않는 변화를 동반될 수 있다. 따라서 실제로 전기화학 반응이 일어나고 있는 전극 소재의 상황을 직접 파악하기 위해서는 반드시 실시간(in-situ) 분석기법을 적용하여야 한다. 이 분석기법을 사용하면 상대적으로 시료 준비가 쉽고 오염에 대한 염려도 적다. 실시간 분석기법

중 하나가 방사광 X-선 분석기법이다[그림 1].

방사광 X-선을 이용한 실시간 분석기법을 사용하면 시료의 충·방전 및 열화에 의한 변화 양상을 연속적으로 측정할 수 있고, 전극에서 일어나는 변화를 직접 파악하거나 짧은 시간 동안 존재하고 빠르게 일어나는 변화의 중간상을 높은 정밀도와 신뢰도로 관측할 수 있다.
방사광 X-선 분석기법으로 얻은 전지의 전기화학적 및 열적 거동에 대한 깊이 있는 이해를 바탕으로 하면 새로운 전지 소재 개발은 물론 전지 설계, 전지의 성능 향상시키는 등의 핵심적인 역할을 할 수 있다.[3)4)]

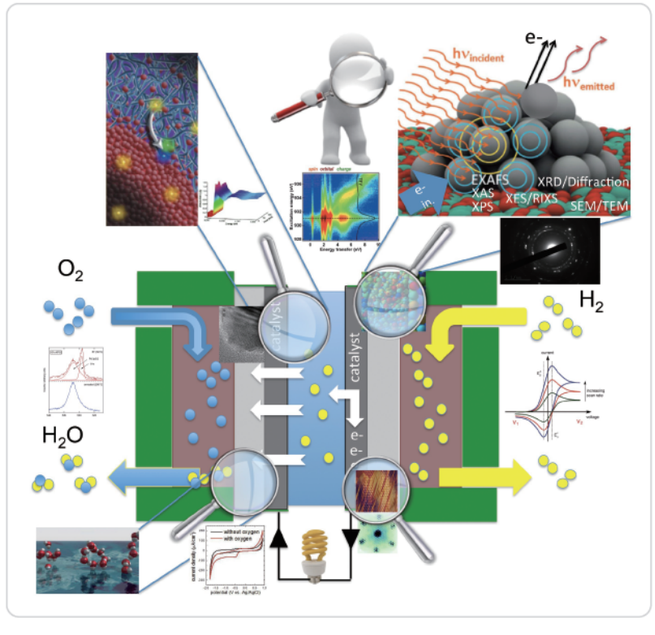


(그림 1) 방사광가속기 기반 이차전지 소재 분석기술.

2. 방사광가속기를 활용한 수소생산/연료전지 소재 분석기술[5)]

최근 세계적인 환경 보호 정책으로 인해 풍력, 태양광과 같은 재생에너지의 개발 규모가 계속 증가하고 있으며, 이에 따라 발생하는 예측 불가능성과 변동성으로 인한 재생 전력 이용률 감소와 같은 문제점을 해결하기 위한 대안으로 에너지 밀도가 높고 안정적으로 오랜 기간 저장할 수 있는 수소 기반 수전해 및 연료전지 기술이 대두되고 있다. 수전해 기술은 물의 전기분해를 통해 수소를 제조하는 기술로써 현재 증가하는 수소 수요에 대응이 가능할 뿐 아니라 풍력, 태양광과 같은 재생에너지를 저장하는 대용량 전력 저장을 목적으로 하는 기술이며, 연료전지는 저장된 수소를 연료로 하여 전기에너지로 전환하는 기술로써 물의 전기분해 반응의 역반응을 이용해 수소와 산소로부터 전기와 물을 만들어 내는 전기화학기술이다.

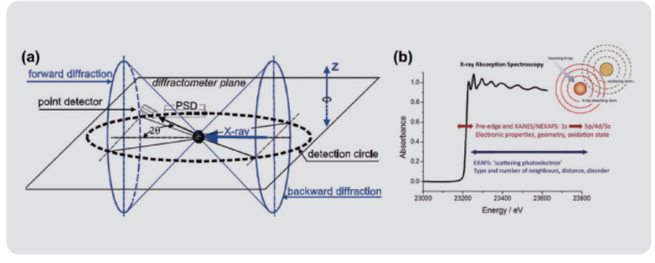
연료전지는 구동 온도와 전해질에 따라 다양한 종류가 있으나, 최근 활발하게 연구되고 있는 분야 중 하나가 세라믹을 전해질로 사용하는 고체산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)이다. 고온에서 작동하기 때문에 연료전지 중 가장 높은 효율을 낼 수 있는 장점이 있으나, 고온에서도 안정적으로 작동할 수 있는 촉매와 이온전도도가 높은 세라믹 전해질을 개발하는 것이 관건이다. 방사광가속기 선원은 높은 에너지의 X-선 이용이 가능하기 때문에 종래의 시설로는 어려웠던 촉매 소재 및 세라믹 전해질 소재에 첨가된 중금속이나 희토류 원소를 포함하여 거의 모든 물질에 대한 분석이 가능하다.[6)] 또한, 촉매 및 세라믹 소재의 고온 안정성, 전도도, 열팽창 등과 깊은 관계가 있는 결정구조와 더불어 다성분계 내의 내부 계면구조 및 결정결함을 실시간 분석을 통해 밝힘으로써 촉매 표면에서의 흡탈착 반응 거동해명 및 새로운 연료전지 재료의 개발과 고성능화에 기여할 수 있다.



(그림 2) 방사광가속기 기반 연료전지 소재 분석기술. [6]

3. 방사광가속기를 활용한 in-situ 분석기술

방사광가속기 기반 이차전지 및 연료전지 소재 분석법으로는 주로 in-situ X-선 near edge 흡수 분광법 (in-situ time-resolved x-ray absorption near edge structure spectroscopy)을 비롯하여 XANES (X-ray Absorption Near Edge Structure) 및 EXAFS (Extended X-ray Absorption Fine Structure)를 포함한 in-situ XAS (X-ray absorption spectroscopy), in-situ XRD (X-ray diffraction) 및 time-resolved XRD 등의 기법이 있으며, 이를 통해 특정 원소의 산화가 변화, 결합 및 배위 환경(coordination environment)에 대한 정보뿐만 아니라 결정학적 정보, 다중 상에 대한 정성 및 정량 분석, 결정립의 크기, 평균 변형률, 적층 결함, 전위 분포 등과 같은 다양한 정보를 얻을 수 있다. 이러한 실시간 X-선 기법들은 기법의 특성상 작동하고 있는 전지를 X-선이 투과하여 X-선 신호를 측정하여야 하기 때문에 적절한 cell의 설계가 필요하며, 실험실용 X-선 장비로도 실험은 가능하나 양질의 데이터를 획득하기 위해서는 강력한 X-선이 발생 되는 가속기를 활용하는 것이 유용하다.



(그림 3)
(a) 2D X-ray diffraction (XRD) 측정 모식도.
(b) X-ray absorption spectroscopy (XAS) 측정 원리 및 에너지 영역.[1]

4. 결론

방사광가속기를 기반으로 한 실시간 고도 분석의 조합을 통하여 고성능 리튬이온전지 소재뿐만 아니라 나트륨이온 전지, 리튬-금속 전지, 리튬-황전지, 리튬-공기전지 등의 차세대 이차전지 및 고성능 연료전지 소재 개발에 있어 그 활용 가치가 두드러질 전망이다.

1) In situ/operando synchrotron-based X-ray techniques for lithium-ion battery research, NPG Asia Materials, 10, 563 - 580 (2018)
2) 리튬이차전지 소재 기술 동향
3) 리튬이온 이차전지의 전극소재 분석기술
4) 방사광 X-선을 이용한 리튬이온전지 소재의 실시간 구조 분석 연구
5) [6] Special issue on Synchrotron- and FEL-based X-ray Methods for Battery Studies
6) [5] 방사광 분광기술의 에너지 기술에의 응용

※ 참고문헌

[1] 리튬이차전지 소재 기술 동향
[2] 리튬이온 이차전지의 전극소재 분석기술
[3] 방사광 X-선을 이용한 리튬이온전지 소재의 실시간 구조 분석 연구
[4] In situ/operando synchrotron-based X-ray techniques for lithium-ion battery research, NPG Asia Materials, 10, 563 - 580 (2018)
[5] 방사광 분광기술의 에너지 기술에의 응용
[6] Special issue on Synchrotron- and FEL-based X-ray Methods for Battery Studies

Part 3. 장치응용 분야

방사광가속기 구축 및 운영에 필요한 기술



김 은 산
고려대학교 가속기과학과 교수

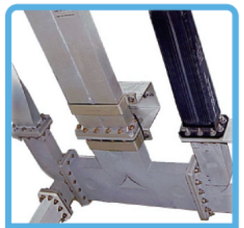
가속기와 같은 거대과학 시설 구축과 운영에는 물리학 뿐만 아니라 다양한 학문과 연구기술이 수반된다. 즉 가속기를 설계하고 제작하여 운영하는 일련의 과정은 가속기를 이용하여 최첨단 과학연구를 진행하는 것만큼 복잡한 일이며 여러 학문의 융합이 필수적이다.

1. 고주파 기술

하전입자를 가속하는 가장 기본적인 방법은 고주파를 이용하는 것이다. 이 방법은 하전입자가 여러 가지 요인으로 가속기 내에서 잃어버린 빔 에너지를 고전압과 고전류를 파장의 형태로 변환시켜 이를 통해 가속하여 보충한다.



클라이스트론



RF 웨이브가이드

2. 진공 기술

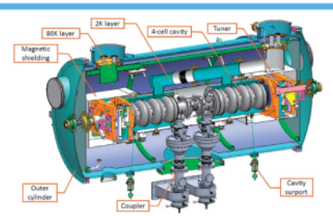
가속된 빔이 지나가는 빔 파이프 내부는 빔의 수명과 질에 큰 영향을 미친다. 그 때문에 부품에 따라 10-9 mbar 이하의 초고진공을 유지해 주어야 한다. 이는 대기압의 1000억 분의 1에 해당한다. 이러한 수준의 초고진공으로 가속기 내부를 유지하기 위해서는 챔버 내부 표면을 특수 처리하고 다양한 진공펌프와 진공 게이지를 사용하여 진공이 새는 곳 없도록 밀폐하여야 한다.



터보분자 펌프

3. 초전도 기술

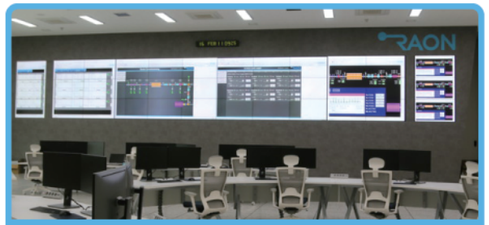
초전도 현상은 매우 낮은 극저온에서 전기저항이 없어지거나 거의 사라지는 현상이다. 이러한 현상을 구현하는 기술을 적용하여 전자석이나 고주파 공동을 제작하면 고주파 전력 손실을 최소로 할 수 있다. 외부와의 열교환, 열전도를 막아 극도로 낮은 온도 상태를 유지하기 위해 특수한 챔버를 사용해야 한다. 이 챔버의 제작 기술은 물론이고 상온에 가까운 온도에서 초전도성을 갖는 고온 초전도 소재를 개발하는 연구도 필요하다.



초전도 가속장치

4. 제어·계측 기술

가속기를 비롯한 거대 연구 시설은 연구자의 수동조작으로는 절대로 운영할 수 없다. 모든 구성품이 하나의 네트워크에서 하나로 동기화된 시간에 정확하게 제어할 수 있어야하며 실험에서 측정값을 오차 없이 모두 저장해야 한다. 아울러 연구자가 가속기를 제어하는 데 필요한 여러 가지 변수를 실시간으로 제공해야 하며 연구자가 장치를 제어할 때에 더 쉽게 처리할 수 있도록 가시화해야 한다.



중이온가속기 중앙 제어실

5. 빔 역학 및 빔 진단 기술

가속기 설계 및 성능과 파라미터를 이해하고 판단하기 위해서는 빔 역학 및 빔 진단장치가 필요하다. 관측 대상과 목적에 따른 수많은 진단장치가 개발되고 있다. 이러한 진단장치는 제어·계측 기술과 융합되어 실시간으로 가속기를 제어하고 빔 위치 등을 미세 조정하는 데 필요하다.

6. 검출장치 기술

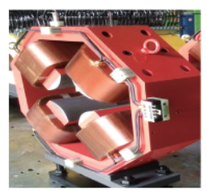
충돌형 가속기에서 가속한 입자를 표적에 충돌시켰을 때 생성된 부산물이 어떤 종류의 입자인지, 질량과 전하량, 에너지와 운동량은 얼마나 가졌는지, 알아보기 위해 검출장치를 사용한다. 검출장치는 입자의 특성에 따라 여러 구성 요소로 이루어져 있다. 검출장치는 핵물리학이나 입자물리학에서 물질을 구성하는 기본입자에 관한 연구 등에 필요하다.



가속기 검출기 (일본 KEK)

7. 전자석 및 삽입장치 기술

전자석과 삽입 장치는 가속기에서 가속되고 있는 입자에 직접적인 영향을 주어서 빔의 방향을 바꾸어 주거나 방사광을 생산한다. 진공 상태에서 두꺼운 빔 파이프 내의 입자에 영향을 주기 위해서 가속기에 배열하여 사용하는 전자석은 지구 자기장보다 100만 배 이상 강한 자기장을 생성한다. 입자들을 하나의 다발로 모아주거나 원하는 위치로 유도하여 가속장치를 지나는 동안 원하는 성능의 빔을 얻기위해 필요한 기술이다.



빔 집속에 사용하는 사극자석

8. 고전압 기술

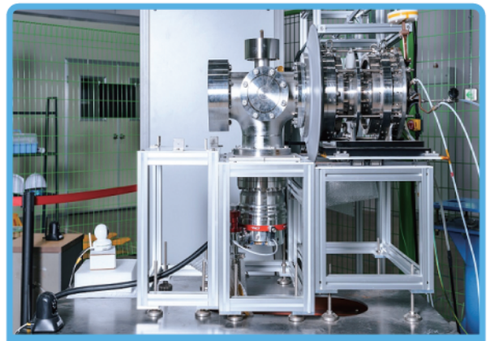
빔의 초기 입사는 주로 고전압을 이용하여 전위차를 발생시켜 전자나 이온을 가속시킨다. 고전압을 사용하려면 저항을 줄이고 절연과 접지 상태를 양호하게 유지해야 한다. 고전압 장치에 사용하는 절연체의 모양과 저항체의 용량에 따라 가속 성능이 달라진다. 또한, 아크방전으로 인해 절연성이 파괴되어 전기가 흐르게 되면 접지 설비를 갖추어 전기를 안전하게 외부로 흘려보내야 한다.



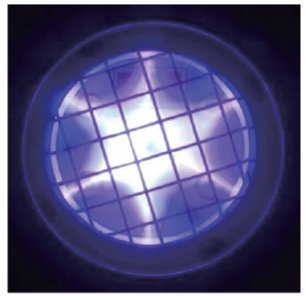
가속기의 고전압 플랫폼 장치

9. 전자총과 이온원

전자총과 이온원은 가속장치에서 가속시킬 입자를 생산하는 장치이다. 방사광가속기와 같은 전자가속기는 전자총으로 발생시킨 전자를 가속 시키며, 중이온가속기는 이온원에서 발생 된 중이온을 가속 시킨다. 전산모사와 빔 인출 실험을 거쳐야 전자총과 이온원을 설계하고 제작할 수 있다.



전자 사이클로트론 공명 이온원



이온 플라즈마

10. 냉각 기술

가속기가 가동되면 이온원, RF 도파관, 전자석, 빔 수집기 등의 장치에서 열이 많이 발생한다. 장치에서 발생한 열은 장치의 성능저하나 변형의 원인이 될 수 있다. 심하면 장치가 파손되는 사고로까지 이어질 수 있다. 이러한 사고를 방지하고 장치의 안정성을 높이기 위해 열을 제거하는 냉각 기술이 필요하다. 절연유나 초순수를 냉매로 사용할 때 냉각 환경에 전기가 흐르지 않도록 하기 위하여 전산모사를 통해서 장치별 발열량을 계산하고 냉매 순환을 유체역학적으로 평가하여야 한다.

11. 정렬 기술

전자총이나 이온원에서 주입된 입자는 가속관 안에서 거의 빛의 속도로까지 움직이기 때문에 가속기의 일부분에서 극미한 오차가 나타나도 가속기의 성능이 급격히 저하 된다. 예를 들어, 가속기가 건설된 부지에 암반지역과 토사지역이 있다면 비가 내려 땅으로 스며들면 토사지역과 암반지역의 지반이 부풀어 오른다. 이러한 경우 미세하지만, 두 곳에서 부풀어 오르는 높이 차가 발생한다. 이로 인해 수 마이크로미터의 이격이 발생하면 장치의 성능이 저하될 수 있다. 이것이 누적되면 나중에는 큰 오차가 나타날 수 있다. 가속기에서 미세하게 일어나는 장치의 변위나 변형을 정밀하게 조정하여야 가속기의 성능을 최대한으로 유지할 수 있다. 이를 위해 필요한 기술이 정렬 기술이다.

Info

기업참여정보

투자 인센티브

중소기업 육성지원

보조금 및 현금지원	• **수도권 이전기업** 입지 최대 40%, 설비투자 최대 24% 지원
	• 지방 신 · 증설기업 설비투자 최대 24% 지원
	• **고용보조금** 50만원(1인-월, 12개월), 기업당 10억원 한도
	• **교육훈련보조금** 50만원(1인-월, 12개월), 기업당 10억원 한도
	• **연구원 고용보조금** 200만원(1인-월, 12개월), 기업당 5억원 한도
세제감면	• **국세 감면** 양도차익 법인세 연기(5년), 그 후 분할납부(3년) 법인세 100 %(7년), 50%(3년)
	• **지방세 감면(지방산업단지)** 취득세 75%, 재산세 75%(5년)
다양한 저리의 자금지원	• 창업 및 경쟁력 강화지금(1,000억원) • 경영안전자금(2,000억원)
	• 영세기업 일자리 안정자금(300억원) • 특별경영안정지원자금(300억원)
행정지원	• 기업민원 One-stop 처리 • 투자기업 전담공무원 지정 운영
	• 투자기반 인프라(전력, 통신, 가스 등) 신속한 지원

지역 여건

저렴한 분양가	오창테크노폴리스산업단지 100-110만원대(3.3㎡당)
	• 서울 · 인천 : 400~1,000만원 / 경기 : 200~500만 / 천안 · 아산 : 120~140만원
	• 입주가능업종 : MT(메카트로닉스첨단), BT(바이오), GT(환경에너지), NT(신소재)
재난 · 재해 없는 안전한 충북	• 전국기후변화 평가 가장 안전한 지역(홍수, 태풍 등)
	• 전국 지진발생 590건 중 6건('16~'18, 규모 2.0이상)
	• 2019 재난관리평가 우수기관 선정
풍부한 공업용수 및 전력공급	• 전국 최대 저수용량(충주댐 2위, 대청댐 3위) 풍부한 공업용수 공급(5,029백만㎥)
	• 안정적인 산업전력 공급 2024년 LNG발전소 2기 가동예정(청주 600㎿, 음성 1100㎿)

모집 공고

충북 청주 방사광가속기 산학연 협의회 참여기관(산, 학, 연) 모집

충청북도와 충북과학기술혁신원에서는 방사광가속기 활용 주체인 기업, 대학, 연구기관이 소통과 교류를 통해 상호 협력하고, 다양한 연구활동을 할 수 있는 산학연 협의회를 구축하고자 합니다.
기업, 대학, 연구기관의 많은 관심과 참여 부탁드립니다.

신청방법	충북과학기술혁신원 누리집 내 공지사항 ▶ 가입신청 서식 다운로드 후 메일로 신청
신청서 작성시 유의사항 주 참여자 선정	• 기 업 : 기업별 1명(대표 또는 기업부설연구소 책임자) • 대 학 : 학과별 1명(교수) • 연구기관 : 기관별 1명(부원장 또는 분원장 등)
제출처	충북과학기술혁신원 융합본부 성과확산부 이동민 선임 E. no20lee@cbist.or.kr / T. 043-210-0836 / F. 043-210-0849 ※ 기업 및 대학, 연구기관별 서식 상이
향후일정	23년 중 협의회 발족식 개최 예정

Vol. 03

ISSUE PAPER

충북 청주 다목적 방사광 가속기

발행일 2022년 11월 30일
발 행 충청북도, 충북과학기술혁신원
기 획 충북과학기술혁신원
디자인 디자인크리포유

본지에 글이나 사진을 충북과학기술혁신원의 허락없이 무단, 복사, 전재하는 것을 금합니다.
본 이슈페이퍼에 수록된 내용은 충북과학기술혁신원의 공식적인 견해와 다를 수 있음을 밝힙니다.