

대형연구시설장비에서 과학적 협력과 합의: 다목적 방사광가속기를 중심으로

김현정

서강대학교 물리학과
한국방사광이용자협회

2021. 6. 9.

방사광 가속기의 원리 및 개요

- 전자를 고에너지로 가속시켜 빛(적외선에서 X-선 영역)을 얻는 장치로 X-선 영역에서 이전에 얻을 수 없었던 고품질의 빛을 얻어 실험, 측정하는 장치

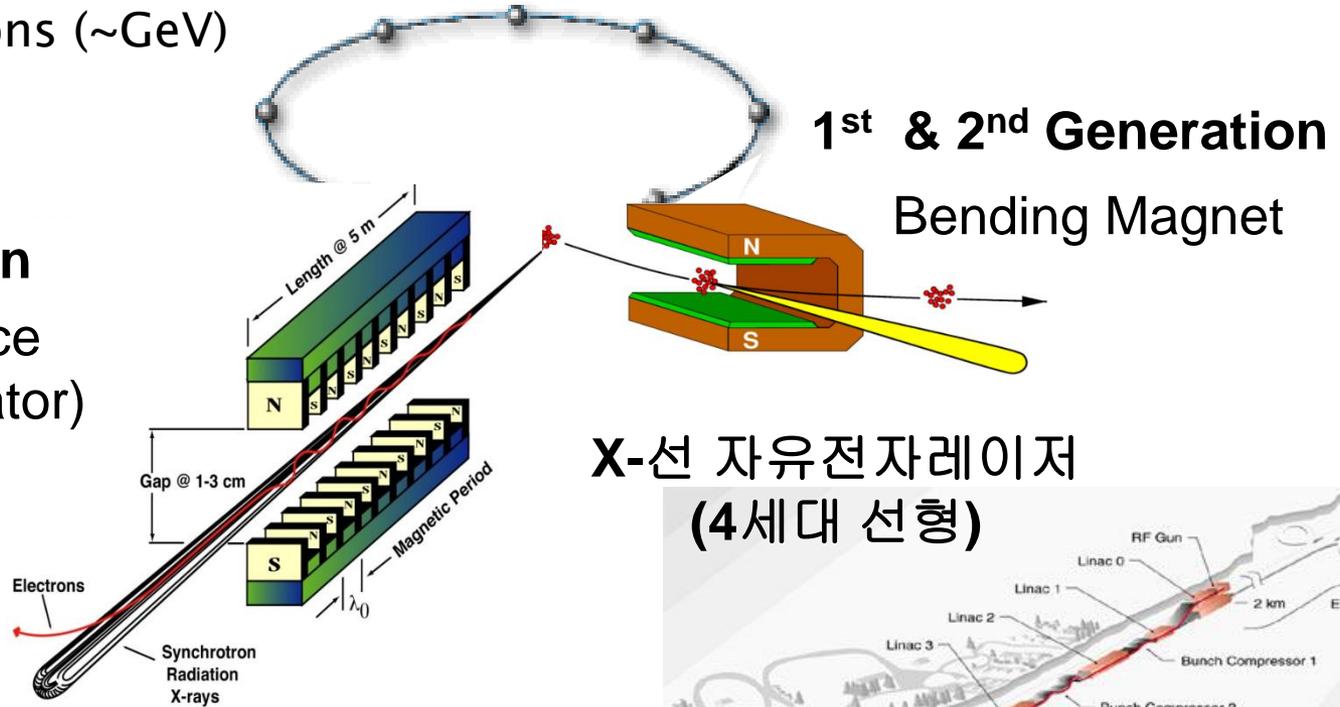


- 여러 개의 빔라인에서 동시에 다른 실험을 수행함.

방사광가속기의 진보

Electrons (\sim GeV)

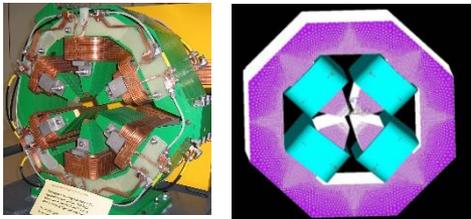
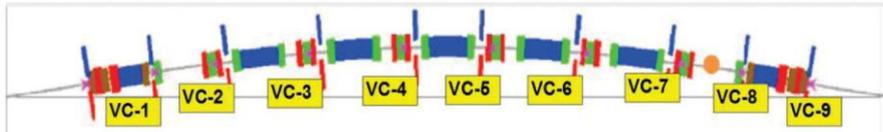
3rd Generation
Insertion Device
(Wiggler, Undulator)



X-선 자유전자레이저
(4세대 선형)



4th Generation (4세대 원형, DLSR)



- 1세대: Parasitic SR mode from existing high-energy machines
- 2세대: Dedicated SR sources (with IDs later)
- 3세대: Fully optimized to adopt insertion devices
- 4세대: Multi-Bend Achromat (MBA)

세계 주요 방사광가속기의 발전

~1985

1990년대 후반

2000-2010

2016~

대형, 3세대

3 GeV, 3세대

3 GeV, 4세대

ESRF(6 GeV)

SLS@Switzerland

MAX IV@Sweden

PLS



PLS-II



NSLS

Diamond@UK

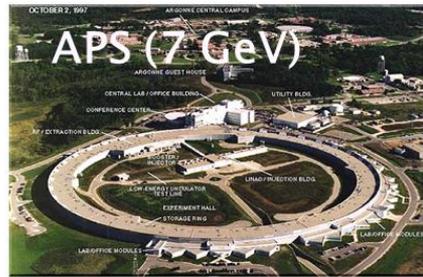
SIRIUS@Brazil

Photon
Factory

APS (7 GeV)



대형가속기의 업그레이드
ESRF-EBS (2020-)
APS-U (2023-)
Spring-8 II (CDR, 2024)
PETRA IV



SOLEIL@France



Spring-8 (8 GeV)



SSRF@China



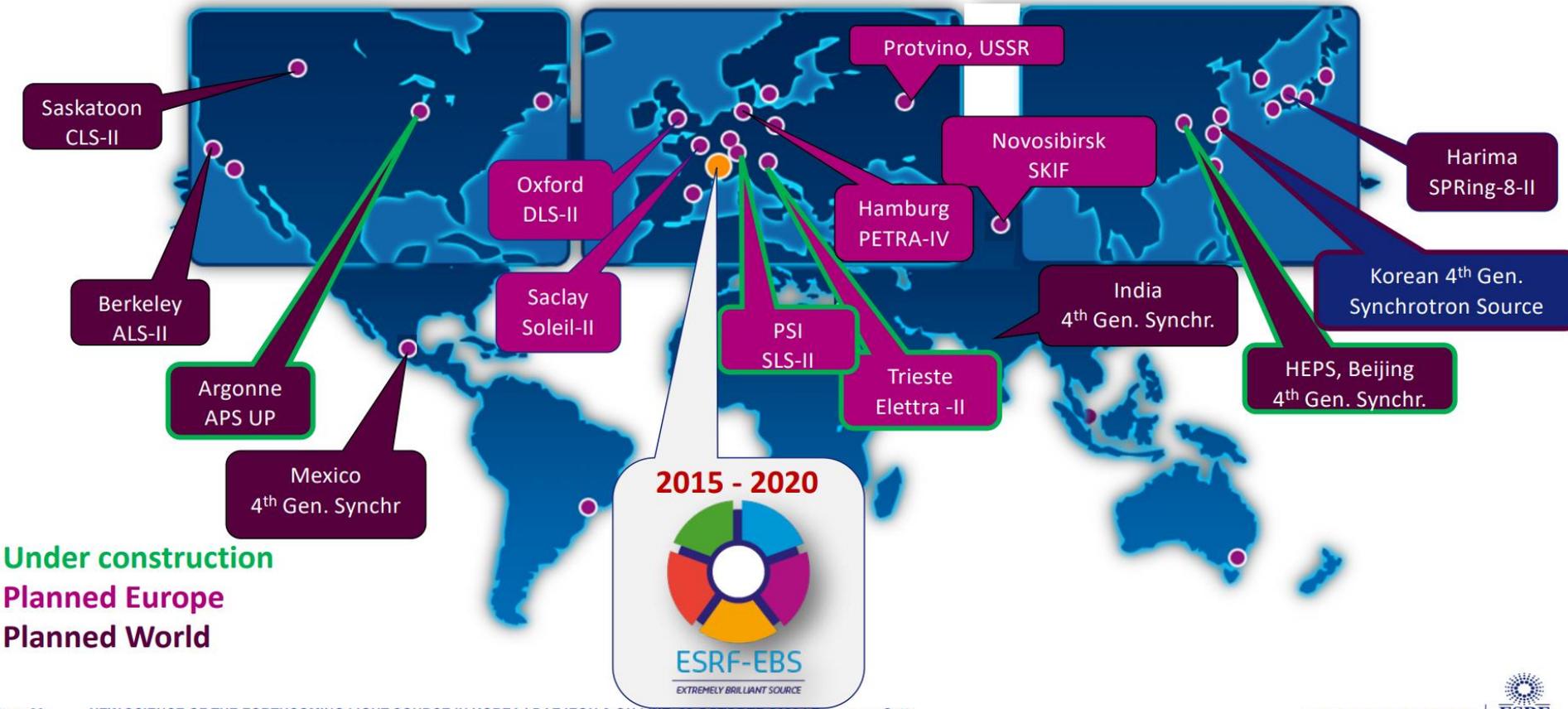
NSLSII@USA



Korea 4GSR



FUTURE FOURTH SYNCHROTRON STORAGE RINGS IN THE WORLD GET INSPIRED BY THE ESRF HMBA CONCEPT AND THE NEW EBS STORAGE RING



Courtesy of Francesco Sette, ESRF
 Oct. 22, 2020

국내 방사광가속기와 XFEL 현황

3세대 방사광가속기



- 포항 PLS-II
- 3 GeV (둘레 280m)
- ~20 keV
- 35 Beamlines
- Emittance: 5800 pm.rad (Hor.)
- 500 MHz
- Pulse duration ~100 ps

4세대 XFEL



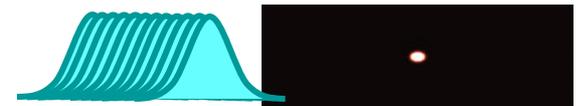
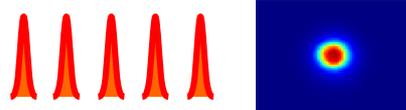
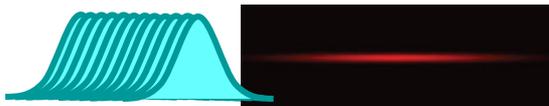
- 포항 PAL-XFEL
- 10 GeV (길이 1.1 km)
- 2-15 keV, 0.25-1.25 keV
- 3 Stations
- ~100% coherence
- Pulse 120Hz
- Pulse duration 10-40 fs

4세대 방사광가속기



- 오창 (2028년 운영 목표)
- 4GeV (둘레 800 m)
- ~30 keV (100 keV 까지도 가능)
- ~40 Beamlines
- Emittance: 58 pm.rad (Hor.)
- 500 MHz
- Pulse duration ~100 ps
- 3세대 대비 수 백배 이상의 휘도

Beam
특성

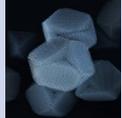
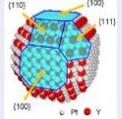
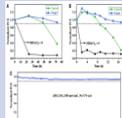
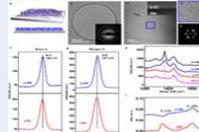


방사광가속기 활용분야 및 성과 [최근 성과]

방사광가속기 활용분야

- ◆ 방사광가속기는 기초과학 및 응용과학, 산업계 등 다양한 분야에서 활용
- ◆ 생명, 재료, 화학, 환경, 의학, 산업 등 전 분야, 전 단계에 걸친 폭넓은 활용

주요 성과 (포항 PLS-II 제공)

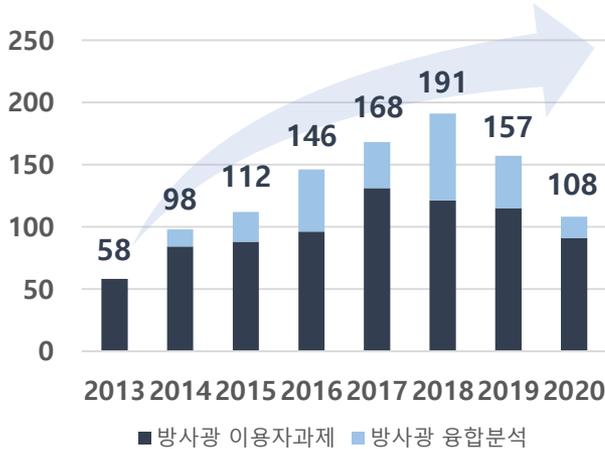
구분	학술지	연구책임자	내용	관련자료
기초	NATURE	IBS (서울대) 현OO	규칙적 배열되어 성능 향상된 나노 다결정 소재 합성	
	NATURE	IBS (KAIST) 유O	합금 작용을 위한 메조포러스 제올라이트의 희토류-백금 합금 나노입자 개발	
	SCIENCE	UNIST 석OO	첨가물 교체를 통한 페로브스카이트 태양전지의 효율성 및 안정성 강화 연구	
	NATURE	화학연 서OO	신개념 페로브스카이트 태양전지 박막기술 'DHA' 개발	
생명 (의학)	NATURE COMMUNICATIONS	셀트리온 (신약분야)	COVID-19 치료제와 COVID-단백질의 결합 구조를 0.27 nm 수준 규명	
산업 (전자)	NATURE	삼성전자 (반도체, 신소재 분야)	반도체 소자 소형화 기술인 '비정질 질화붕소' 절연체 개발	

방사광가속기 산업적 이용 수요 경향

[포항가속기연구소]

- ◆ (산업기술융합센터 운영) 산업체 전담지원기관인 산업기술융합센터를 설립('13)하여 매년 산업체 이용 확대 및 성과 창출 지원 중
- ◆ (방사광 융합분석) 과제수행 절차 간소화, 전문인력이 부족한 중소기업 등 기술지원
- ◆ (국가 주요산업 지원) 반도체, 이차전지, 소재 등 국가 주요 산업체와 전략적 협업관계 구축을 통한 과제 수행 및 산업체 연구회 운영('18~)
- ◆ (장치제작 중소기업 육성) 패밀리기업 위촉('19~), 핵융합·가속기 산업체 상생한마당 개최

산업체 방사광 활용 추이



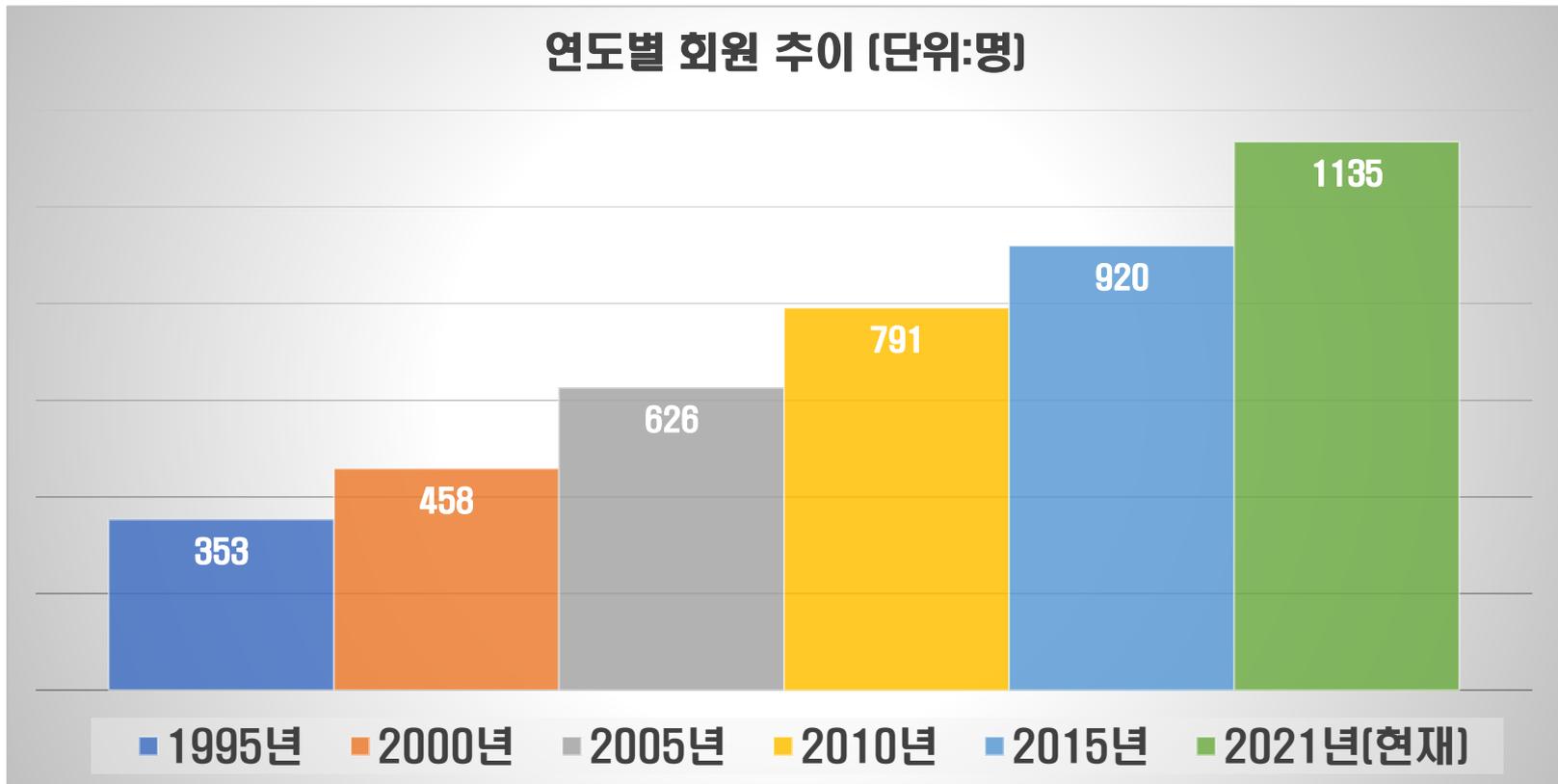
- 산업체 분야 방사광 활용의 지속적인 증가
- '20년 COVID-19로 산업체 지원 일시 저조

[산업체 지원 성과]

구분		'17	'18	'19	'20	
산업체 방사광 이용 저변 확대	기업체 간담회	현장방문 세미나	10	7	12	10
		기업초청 간담회	15	15	17	11
	방사광 융합분석	37	70	42	17	
	방사광 이용자과제	131	121	115	91	
	선도기술 공동개발	8	10	8	14	
산업체 지원 인프라 확충	산업체 특화 실험시설 구축	3	4	5	4	
합계		229	249	228	147	

한국 방사광이용자협회

- 사단법인 한국 방사광이용자협회는 방사광을 이용하는 학문 및 기술 발전을 도모하고, 국내 방사광 이용자의 저변확대 및 상호 교류 촉진을 위해 설립됨. 1989년 8월 발족하여, 2000년 6월 과학기술부에 설립허가 받음.
- 협회 규모 (회원수) : 2021년 5월 현재 1135명



방사광이용자협회에 대한 소개

▪ 협회 주요 사업

1. 방사광 실험시설 이용계획 검토 및 실험제안서 심사 (PLS-II, PAL-XFEL)
(2020년 기준) PLS-II 약 2700여개, PAL-XFEL 약 120여개의 실험제안서 심사
2. 방사광 이용장치 건설에 필요한 기술적인 협조 및 검토
3. 방사광을 이용하는 학문 및 기술 등에 관한 행사 개최
매년 방사광이용자 연구발표회 및 국제심포지움, 방사광 관련 튜토리얼 개최
4. 방사광 과학과 기술 회보 발간 : 연 4회, 약 4400부 발간
5. 심계과학상, 신진학술상, 대학원생우수논문상 추천위원회 운영 및 시상
6. 방사광 관련 위탁 연구과제 수행 (대표 수행 과제)
방사광 이용신청 과제 평가 시스템 개선을 위한 연구(2012년)
3세대 방사광 가속기 빔라인 운영 진단/분석 및 효율적인 운영을 위한 전략 방안 수립(2013년)
4세대 방사광가속기 빔라인 장치 연구 및 실험 기술 구축, 설계(2015년)
4세대 가속기 활용 및 3세대 빔라인 중장기 운영 정책 연구(2016년)
다목적 방사광가속기 활용연구 수요조사 및 제안(2020년)
4세대 방사광가속기 이용자 협력 및 육성 사업(2012년-현재)

다목적 방사광가속기 추진 경과

□ 정책 결정

- '19.8월, 소재·부품·장비 연구개발 투자전략 및 혁신대책(과학기술관계장관회의)
→ 다목적 방사광가속기 추가 검토
* 산업지원 다목적 방사광가속기 개념연구비 정부 예산 반영(15억원)
- '20.3.24, 대형가속기 장기로드맵 및 운영 전략 (과학기술자문회의 심의회의)
→ 에미턴스 0.1nm이하의 다목적 방사광가속기 구축 추진

□ 방사광가속기 부지선정

- 사업공고 및 부지 선정평가위원회 구성.운영, 지자체 유치의향서 접수('20.3.27 ~ 4.8)
* 강원도 - 춘천시, 경상북도 - 포항시, 전라남도 - 나주시, 충청북도 - 청주시
- 부지 평가 및 선정 발표('20.5.8): 지자체 발표 평가 진행(5.6.) 및 현장 확인(5.7.)
* 전라남도 - 나주시, 충청북도 - 청주시(1순위 선정)

□ 예비타당성조사 수행

- 예비타당성 조사 신청('20.5월) 및 기술성 평가 통과(과기혁신본부, '20.6월)
- 본예타 착수('20.7월) 및 예타조사진 검토('20.8-11월)
- 국제자문회의('20.9월) 의견에 따른 빔라인 기술검토 필요성 대두('20.11월)
* 산업전용빔라인 적절성, 다목적 방사광가속기 고사양에 적합한 빔라인 선정, 실험장치 과다로 인한 비효율성 등 지적
- **빔라인 기술검토위원회 운영**(방사광이용자협의회 주관, '20.12월말~'21.1.26)
- 이용자협회장 포함 내.외부 위원 17명이 7가지* 검토기준 마련.검토
* 차세대 가속기의 사양과 적합성, 과학기술적 타당성 및 적정성, 제안된 빔라인의 타당성과 중복성, 포항 3세대와의 차별성,
산업전용빔라인으로서의 적정성, 국제자문회의 의견과 부합성, 예산타당성

다목적 방사광가속기 빔라인 기술검토위원회

■ 기술 검토 의견서

- 제안된 기술 검토 항목으로 논의 (적합성, 타당성, 시급성)
- 적합, 부적합 의견으로 구분
- 빔라인별 부적합 의견을 중심으로 논의
- 빔라인별 논의 사항 및 종합 의견 도출

*예시 - 기술 검토 의견서

빔라인	주요사항	실험기법
① 신약 및 바이오 빔라인 (산업체 전용)	<ul style="list-style-type: none"> 에너지 범위 : 5 - 20keV, 공간분해능 : 1nm이하(MX), 수 nm(SAXS) 	<ul style="list-style-type: none"> Bio-SAXS (Small-angle X-ray scattering) MX (Macromolecular Crystallography)
기술 검토	차세대 (4CSR) 가속기 (4GeV) 사양과의 적합성 및 극대화 여부	<ul style="list-style-type: none"> - 에너지 적합성 - 저에미턴스 (결맞음성) 활용 여부 - 높은 휘도, 작은 빔 크기 등
	향후 확장성과 제안된 빔라인과의 중복성 여부	<ul style="list-style-type: none"> - 제안된 빔라인과의 기법 중복 여부 - 4세대 빔라인으로서의 적합성 (해외 4세대 가속기 (> 3GeV)의 빔라인과 비교 포함) - 제안된 빔라인의 기법의 차별성과 수월성
	PLSII와의 차별성 여부	<ul style="list-style-type: none"> - PLS-II의 빔라인과의 중복성 여부 - PLS-II의 빔라인에 비해 특이성과 예상경쟁률
	산업체 빔라인으로서의 적정성	<ul style="list-style-type: none"> - 주요활용 산업 분야의 적정성 - 실험 기법의 적정성 및 효율성
	국제 지문회의의 의견과 부합성 여부	<ul style="list-style-type: none"> - 가속기 사양과 부합 여부 - 빔라인 당 집중 기술이 필요
	예산 타당성	<ul style="list-style-type: none"> - 예산 적정성 - 필수 부품의 포함 여부

다목적 방사광가속기 빔라인 기술검토위원회 검토 결과

- '다목적 방사광가속기'의 4GSR로서의 사양을 최적화하고 PLS-II와 비교하여 불가능하였던 실험 기법, 실험 영역, 분해능 등이 가능하도록 광원 특성을 극대화한 10기 빔라인 선정
- 산업체에서 필수적인 측정기법을 위주로 한 산업 우선 지원 빔라인 선정
- 빔라인 운영 효율화를 고려한 빔라인 당 집중 기술 선정
- 초기 가속기의 안정적 운전 요소 반영
- 예산 타당성을 위한 필수 부품 명시

우선 구축 10기 빔라인(안)

2021. 1. 다목적 방사광가속기 기술검토위원회

빔라인	주요 사양	실험기법
① 바이오신약 - 바이오소각산란 (BioPharma-BioSAXS) [산업 우선 지원]	<ul style="list-style-type: none"> 에너지 범위 : 5 - 20 keV 	<ul style="list-style-type: none"> Bio-SAXS (Small-angle X-ray scattering)
② 소재 구조 분석 (Material Structure Analysis) [산업 우선 지원]	<ul style="list-style-type: none"> 에너지 범위 : 5 - 40 keV 	<ul style="list-style-type: none"> XRD (Powder X-ray Diffraction) XAFS (X-ray Absorption Fine Structure)
③ 연엑스선 나노프로브 (Soft X-ray Nano-probe) [산업 우선 지원]	<ul style="list-style-type: none"> 에너지 범위 : 0.1 - 5 keV 빔사이즈: 1 micron 이하 	<ul style="list-style-type: none"> XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy) XAS (X-ray Absorption Spectroscopy)
④ 나노스케일 각분해 광전자 분광 (Nanoscale Angle-resolved Photoemission Spectroscopy)	<ul style="list-style-type: none"> 에너지 범위 : 0.1 - 2 keV 빔 사이즈: < [100 x 100] nm² 공간분해능: 30 nm 이하 	<ul style="list-style-type: none"> Nano-ARPES (Angle-resolved Photoemission Spectroscopy)
⑤ 결맞은 엑스선 회절 (Coherent X-ray Diffraction)	<ul style="list-style-type: none"> 에너지 범위 : 3 - 30 keV Focused 빔 사이즈: 1 micron 이하 	<ul style="list-style-type: none"> XRD (X-ray Diffraction) CDI (Coherent diffraction imaging)
⑥ 결맞은 소각 산란 (Coherent Small-angle X-ray Scattering)	<ul style="list-style-type: none"> 에너지 범위 : 4 - 40 keV 	<ul style="list-style-type: none"> SAXS / WAXS (GI 기법 포함) (Small-angle / Wide-angle X-ray Scattering) XPCS (X-ray Photon Correlation Spectroscopy)
⑦ 실시간 엑스선 흡수 분광학 (Real-time X-ray Absorption Fine Structure)	<ul style="list-style-type: none"> 에너지 범위 : 5 - 40 keV 	<ul style="list-style-type: none"> XAFS (X-ray Absorption Fine Structure)
⑧ 생체분자 나노결정학 (BioNanocrystallography)	<ul style="list-style-type: none"> 에너지 범위 : 5 - 20 keV 	<ul style="list-style-type: none"> MX (Macromolecular Crystallography)
⑨ 고에너지 현미경 (High Energy Microscopy)	<ul style="list-style-type: none"> 에너지 범위 : 5 - 100 keV 공간분해능 : 0.1 micron (100m 기준) Super-bend 	<ul style="list-style-type: none"> Projection imaging
⑩ 나노프로브 (Nano-probe)	<ul style="list-style-type: none"> 에너지 범위 : 5 - 25 keV 	<ul style="list-style-type: none"> Ptychography/XRS/XRF (Ptychography/X-ray Scattering/X-ray Fluorescence)

해외 유사 사례

▪ 미국 DOE Basic Energy Sciences Facility Prioritization Report

- 2012. 12-2013. 2 (Report 2013.3)
- Subcommittee on BES Facilities Prioritization (16인)
- 미국 DOE 산하 국립연구소의 이용자 시설(보유 및 제안 시설)에 대한 평가 후 우선순위 결정 (서면, 발표 평가)
(방사광가속기, 자유전자레이저, 중성자 Source, nanoscience center 대상)
- 평가기준
(1) 과학적 중요성, (2) 차별성, (3) 연구 분야의 확장성
(4) 타 시설을 포함한 광범위의 이용자에 의한 필요성, (5) 이용자 수요
- 기존의 시설에 대한 평가 (향후 10년간 world-leading science에 기여할 수 있는)
: Absolutely central, Important, Lower priority 등으로 평가
- 제안되는 프로젝트 평가
: 우선 순위 결정

기술검토위원회 운영 사례의 의의

- 국가단위에서의 대형연구장비시설 구축에서 수요자 등 이해관계자의 의견 수렴 및 합의과정은 필수적임.
- 다소 형식적인 “설문조사”의 범위를 넘어선 “기술검토위원회”와 같은 다른 의견을 가질 수 있는 직접적인 전문가의 기술적 검토 과정을 통한 의견 수렴이 필요.
- 최적의 조건과 최고의 성능을 위해 합의점을 도출하고 위원회를 통해 전체 커뮤니티의 의견을 직접 반영할 수 있는 소통의 창구가 됨.
- 성공적인 구축을 위한 과학적 기술의 필수적인 조건과 부족한 점등을 집중적으로 파악하고 향후 대책 수립에도 도움이 됨.
- 국내의 전문가 그룹 간 공동연구, 네트워크 형성에도 도움.
- 향후 구축을 맡는 그룹과도 지속적인 자문과 의견 소통이 가능.

정책 대안

- 국가 대형 사업 및 장비 구축 사업에서 과학자들이 충분히 논의하고 의견을 줄 수 있는 시스템 구축 필요
 - 장기적인 로드맵 구축 및 실질적인 위원회 운영 필요
- 구축 단계에서도 과학자와 전문가의 의견 반영과 피드백, 기술 검토를 위한 유기적인 시스템 구축 필요
 - 충분한 시간을 가지고 검토 후 피드백을 줄 수 있도록 함.
 - 각 단계별, 항목별 자문과 검토를 위한 위원회 구성 및 운영

감사합니다.