

PAL-XFEL 발전 방안

천세환 팀장 (XFEL 빔라인부 장치개발팀)

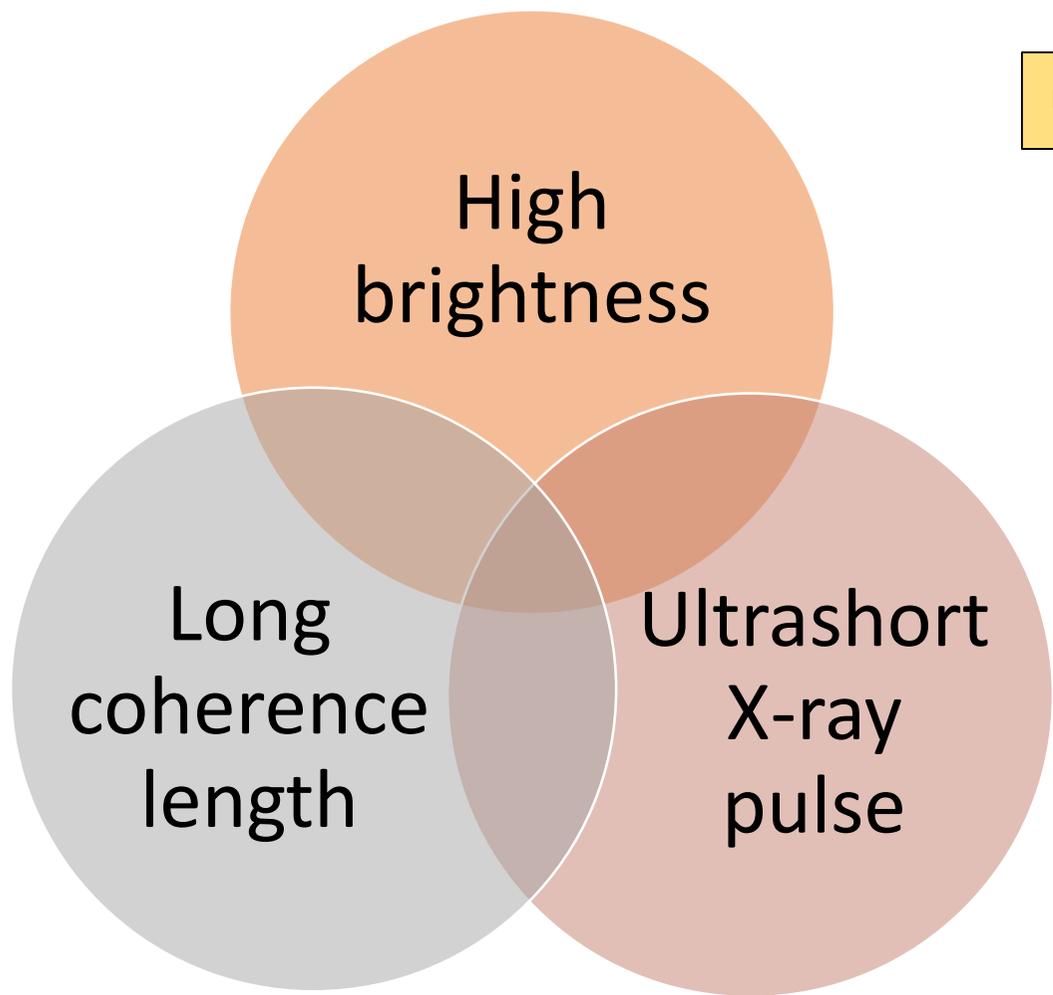
민창기 팀장 (XFEL 가속장치부 선형가속기팀)

2023.10.12(목)



PAL-XEL 활용 연구 동향

XFEL 주요 특성



▪ XFEL 광원 특성 이해 및 개발

▪ X-ray 실험 기법 개발 및 도입

▪ 물질 연구 : Ultrafast light-matter interaction

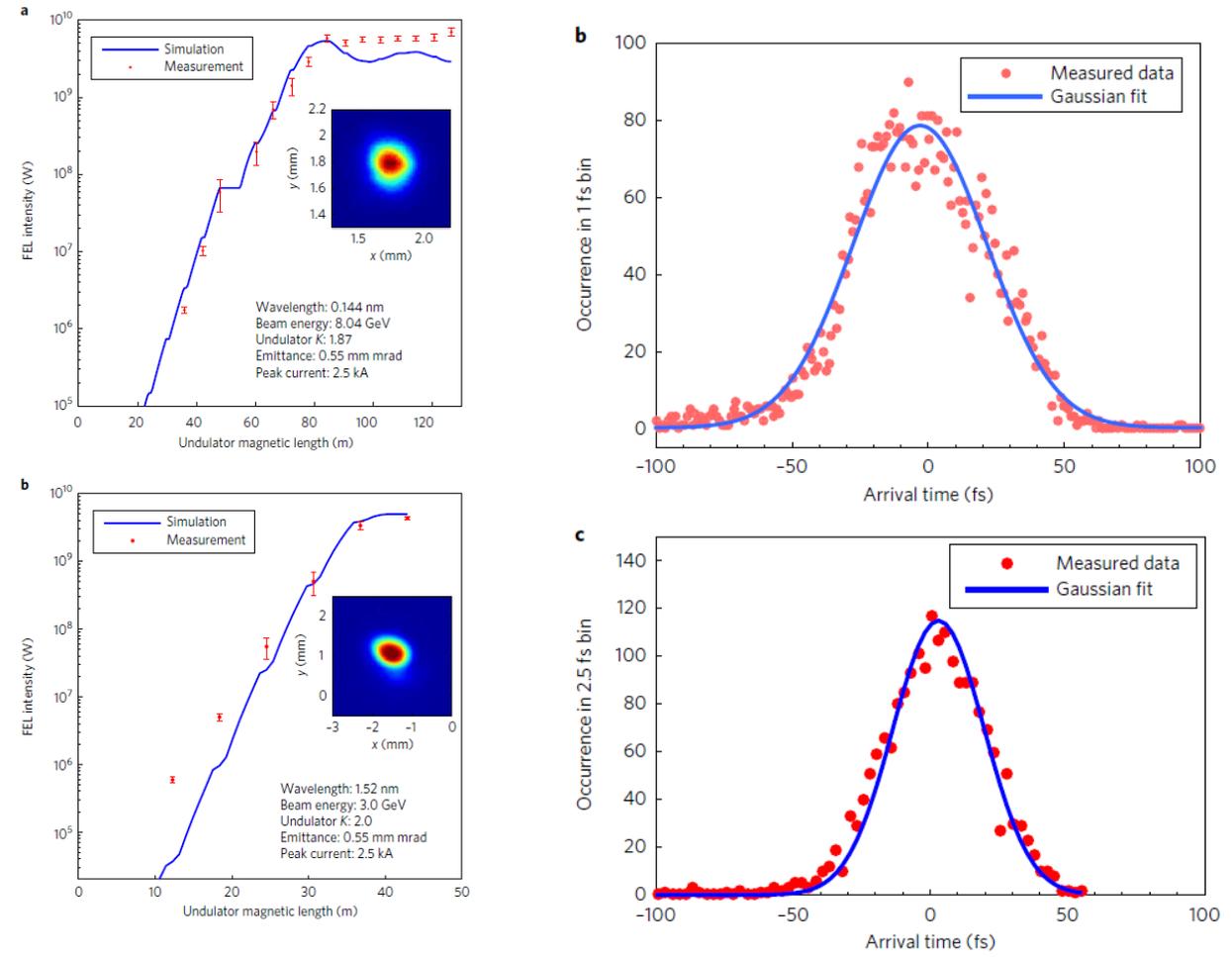


XFEL 광원 특성 이해 및 개발

ARTICLES <https://doi.org/10.1038/s41566-017-0029-8> nature photonics

H.-S. Kang et al., Nat. Photon. 11, 708 (2017)

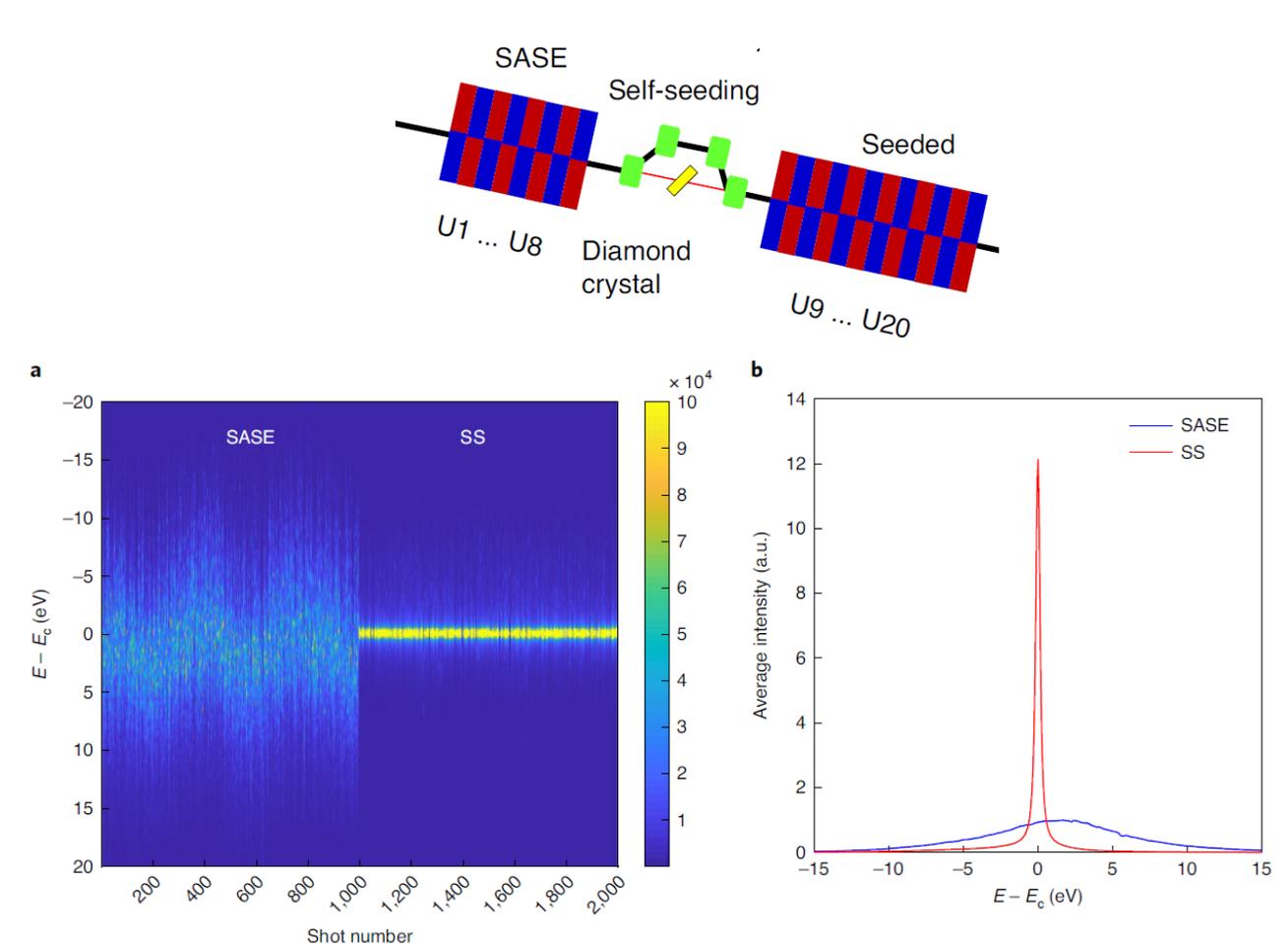
Hard X-ray free-electron laser with femtosecond-scale timing jitter



nature photonics ARTICLES <https://doi.org/10.1038/s41566-021-00777-z> Check for updates

I. Nam et al., Nat. Photon. 15, 435 (2021)

High-brightness self-seeded X-ray free-electron laser covering the 3.5 keV to 14.6 keV range



X-ray 실험 기법 개발 및 도입

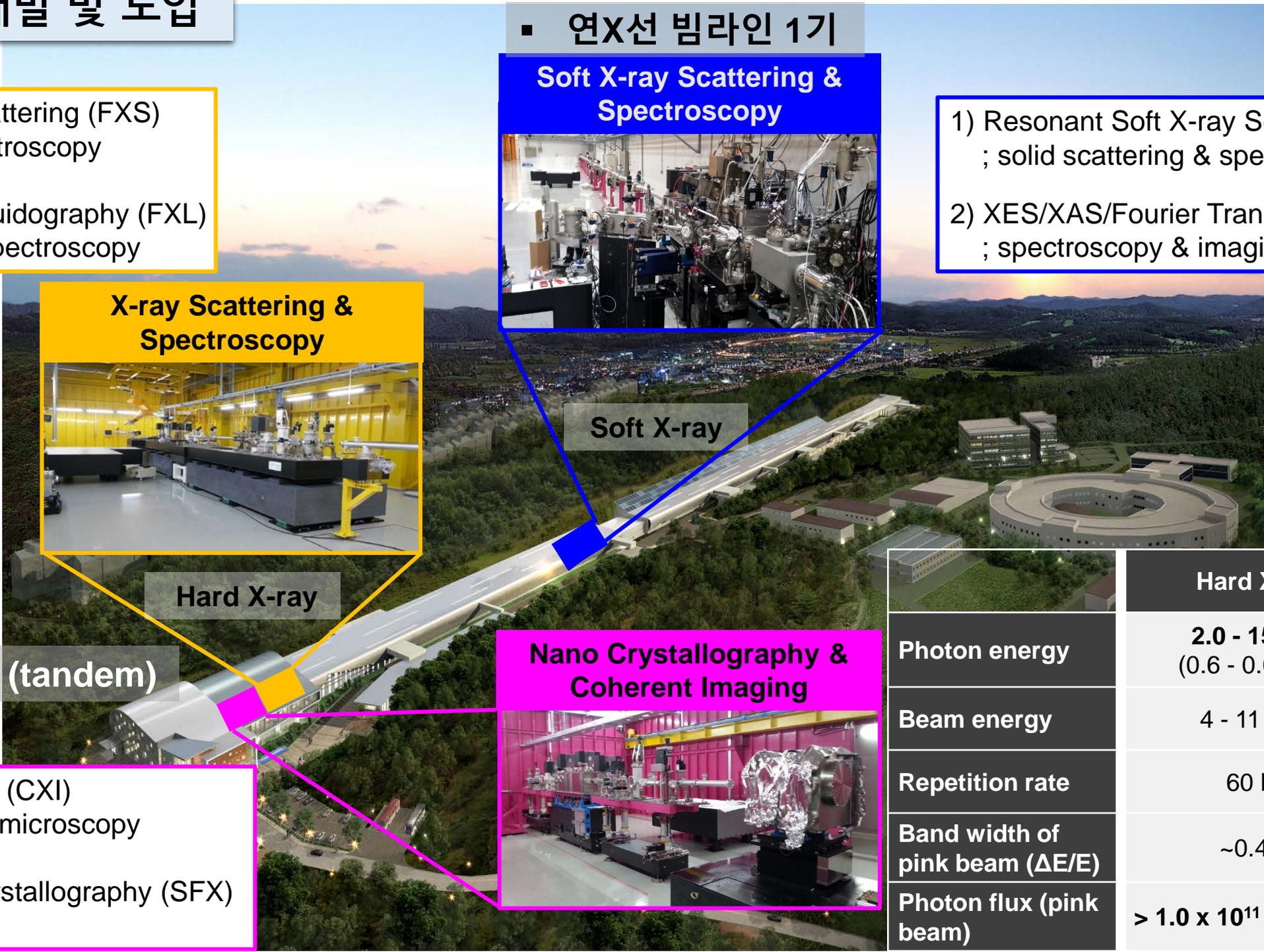
- 1) Femtosecond X-ray Scattering (FXS)
; solid scattering & spectroscopy
- 2) Femtosecond X-ray Liquidography (FXL)
; solution scattering & spectroscopy



연X선 빔라인 1기

Soft X-ray Scattering & Spectroscopy

- 1) Resonant Soft X-ray Scattering (RSXS)
; solid scattering & spectroscopy
- 2) XES/XAS/Fourier Transform Holography (FTH)
; spectroscopy & imaging



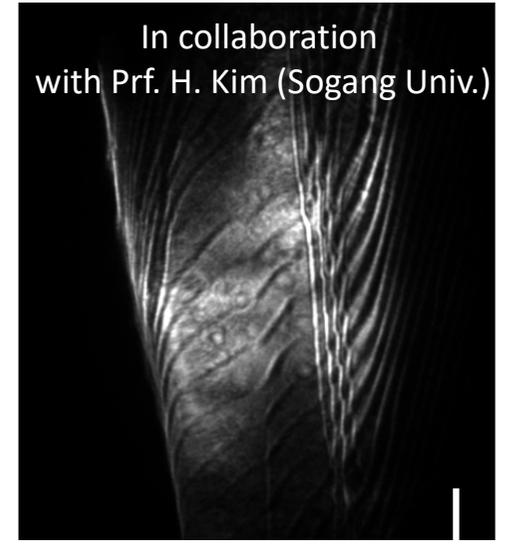
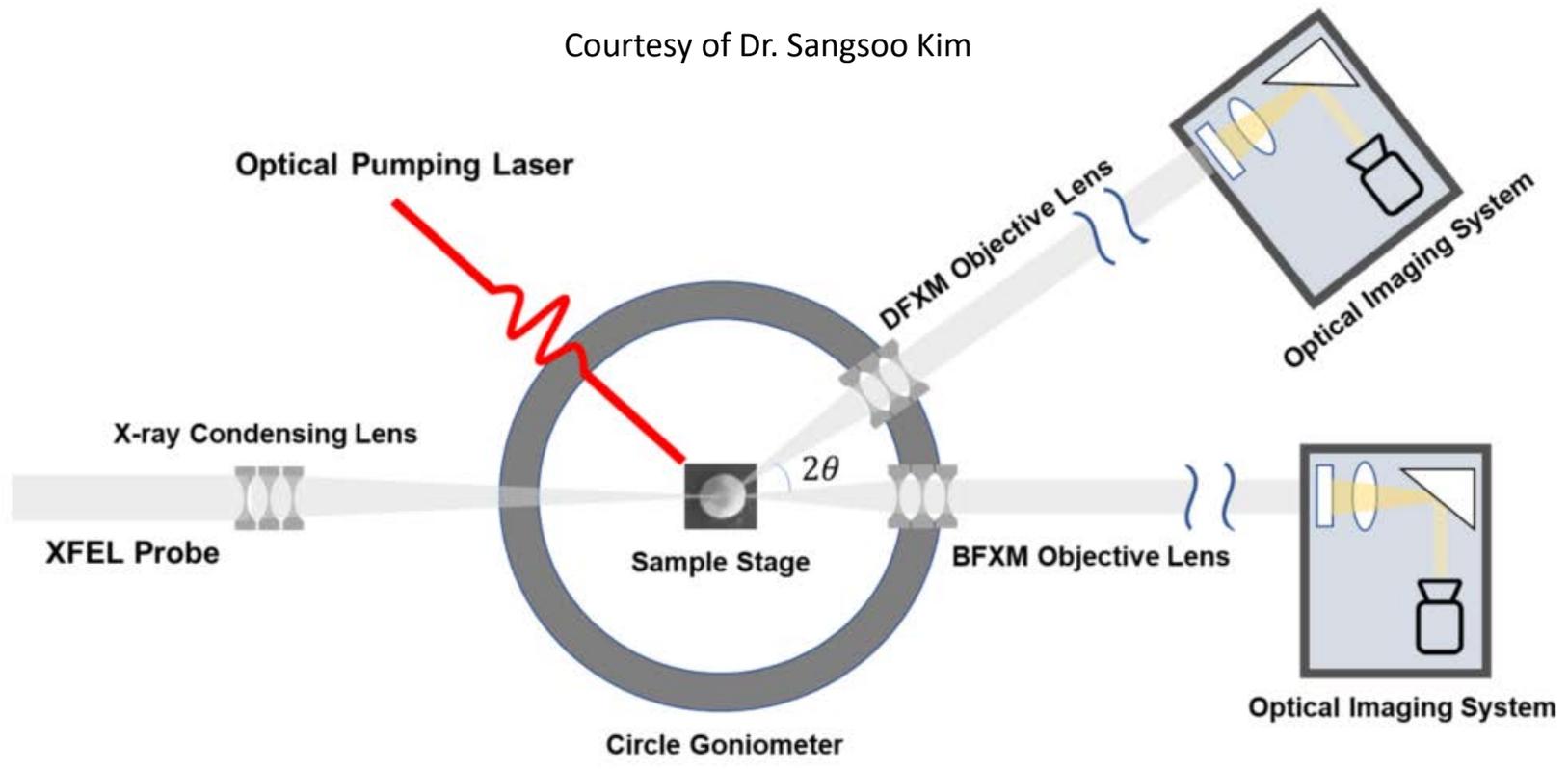
- 경X선 빔라인 2기 (tandem)
- 1) Coherent X-ray Imaging (CXI)
; nanocrystal imaging & microscopy
 - 2) Serial Femtosecond Crystallography (SFX)
; protein crystallography

Nano Crystallography & Coherent Imaging

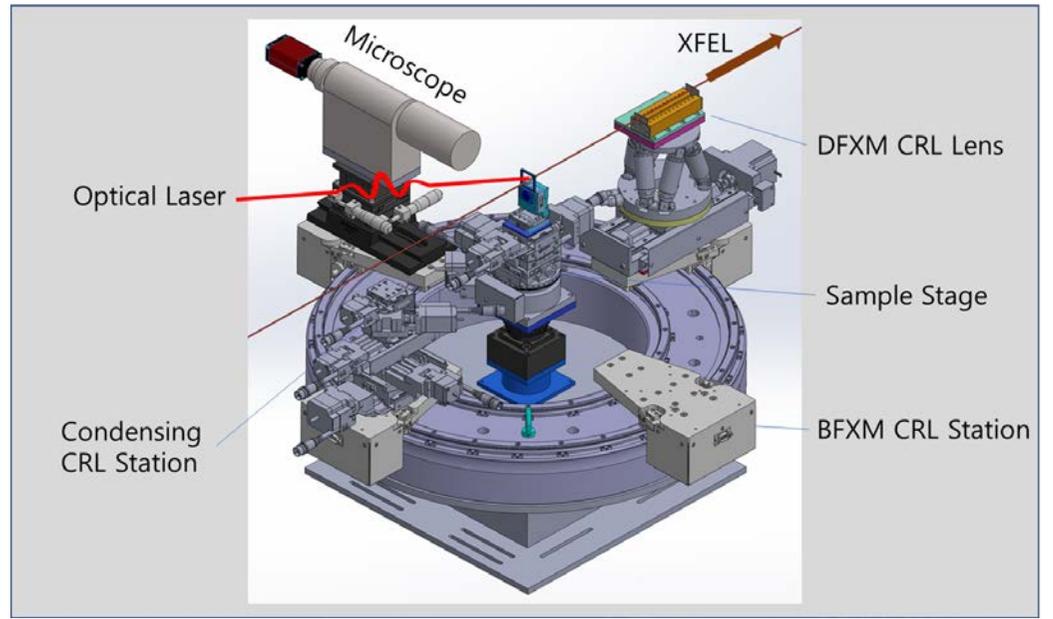
	Hard X-ray	Soft X-ray
Photon energy	2.0 - 15 keV (0.6 - 0.08 nm)	250 - 1250 eV (5 - 1 nm)
Beam energy	4 - 11 GeV	3 GeV
Repetition rate	60 Hz	60 Hz
Band width of pink beam ($\Delta E/E$)	~0.4 %	~0.5 %
Photon flux (pink beam)	> 1.0 x 10 ¹¹ phs/pulse	> 1.0 x 10 ¹² phs/pulse

X-ray 실험 기법 개발 및 도입 (1): Ultrafast X-ray microscopy @ HX-NCI beamline

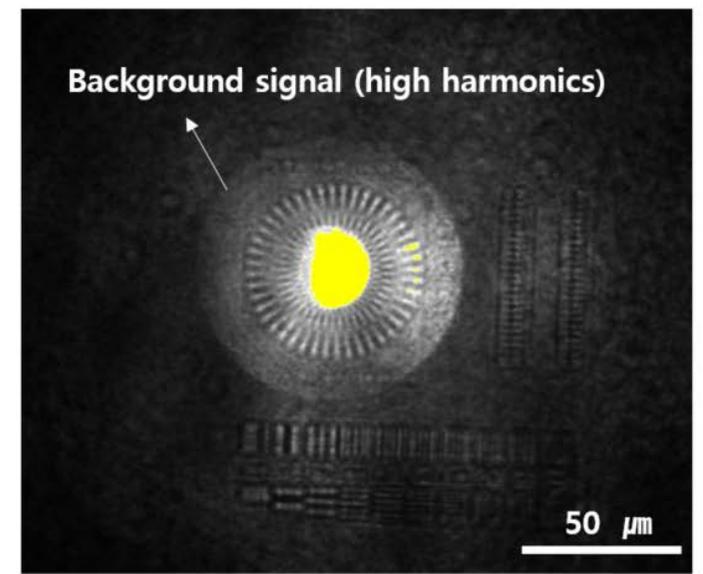
Courtesy of Dr. Sangsoo Kim



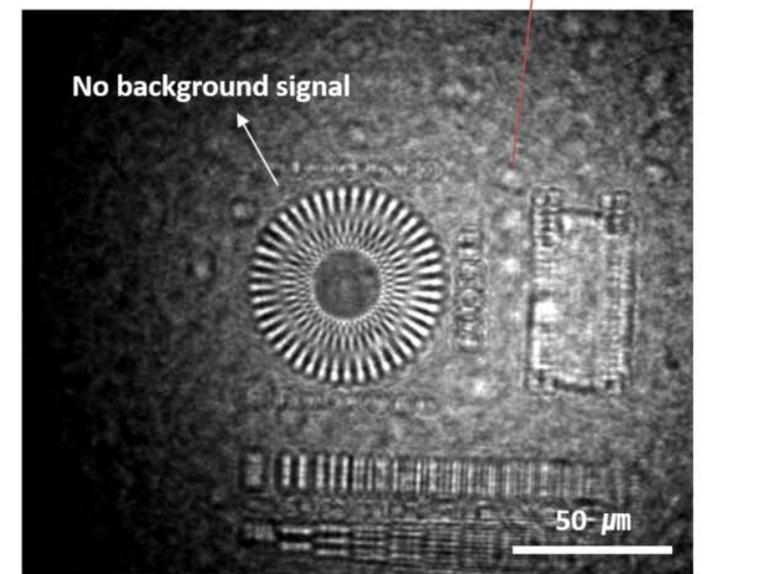
In collaboration with Prf. H. Kim (Sogang Univ.)



▪ Pink beam



▪ Seeded-beam

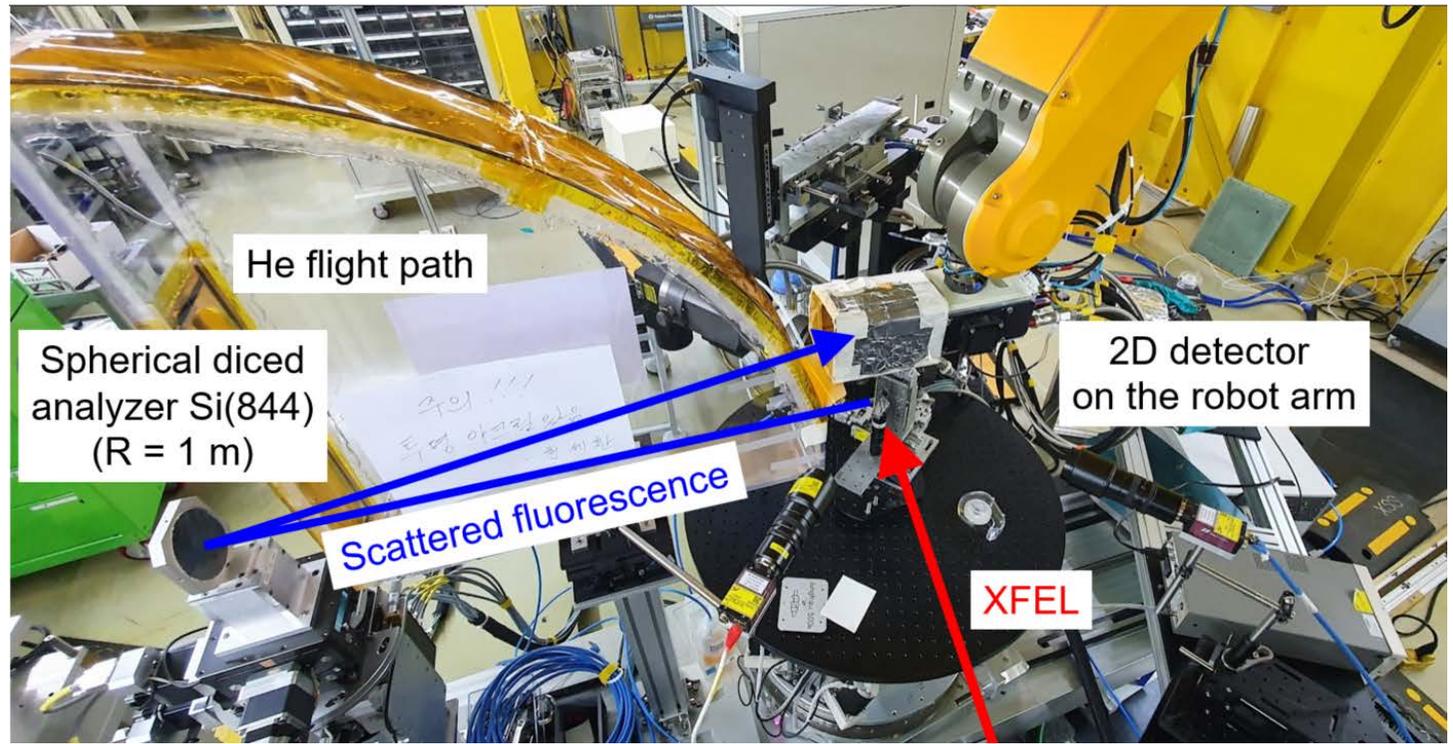


X-ray 실험 기법 개발 및 도입 (2): 시분해 RIXS @ HX-XSS beamline

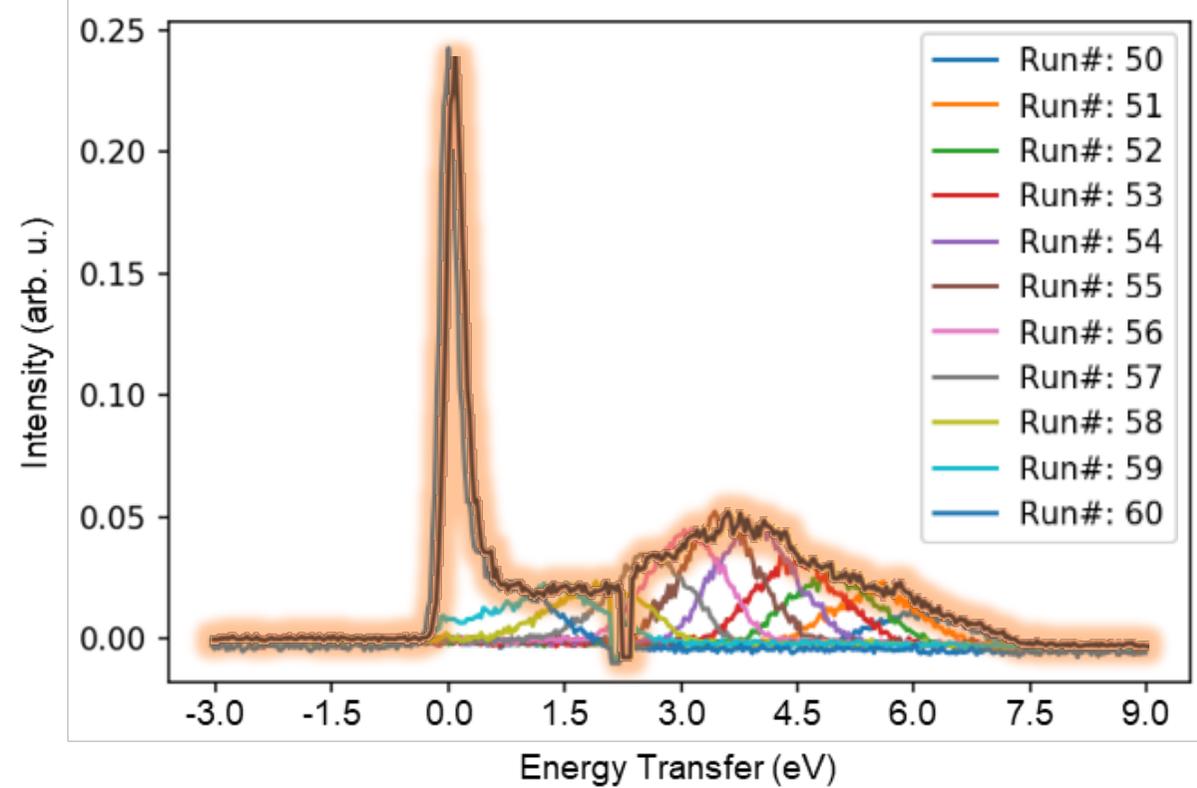
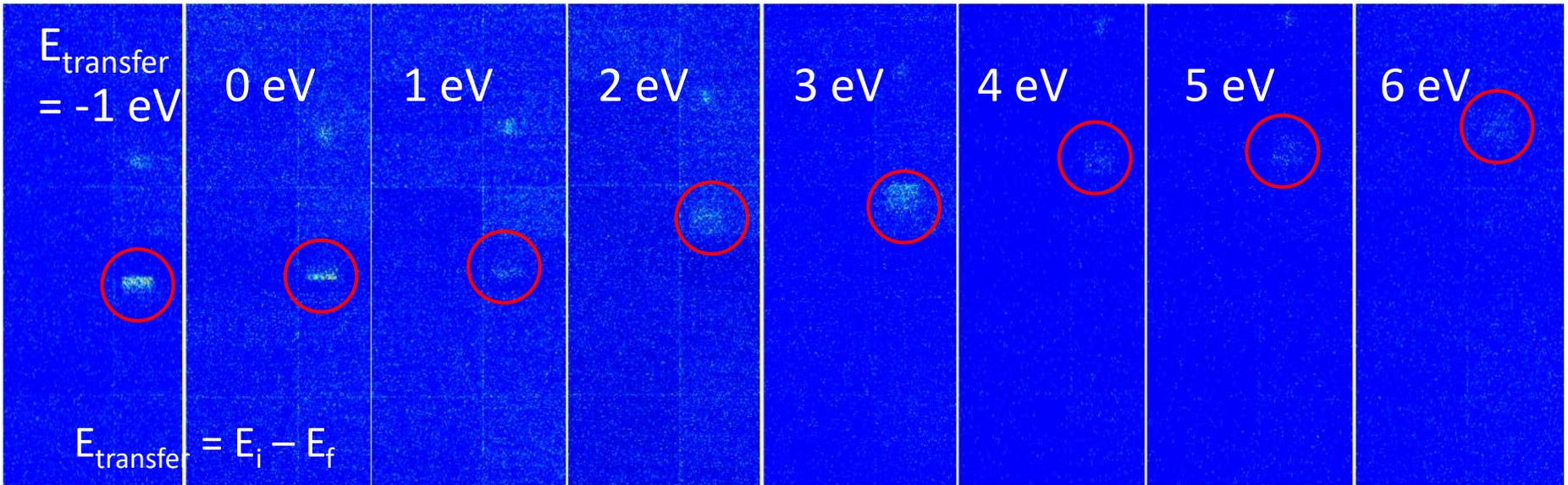
Si (844) spherical analyzer



Bragg angle changed



RIXS data of an Ir-based complex near the Ir L_3 absorption edge



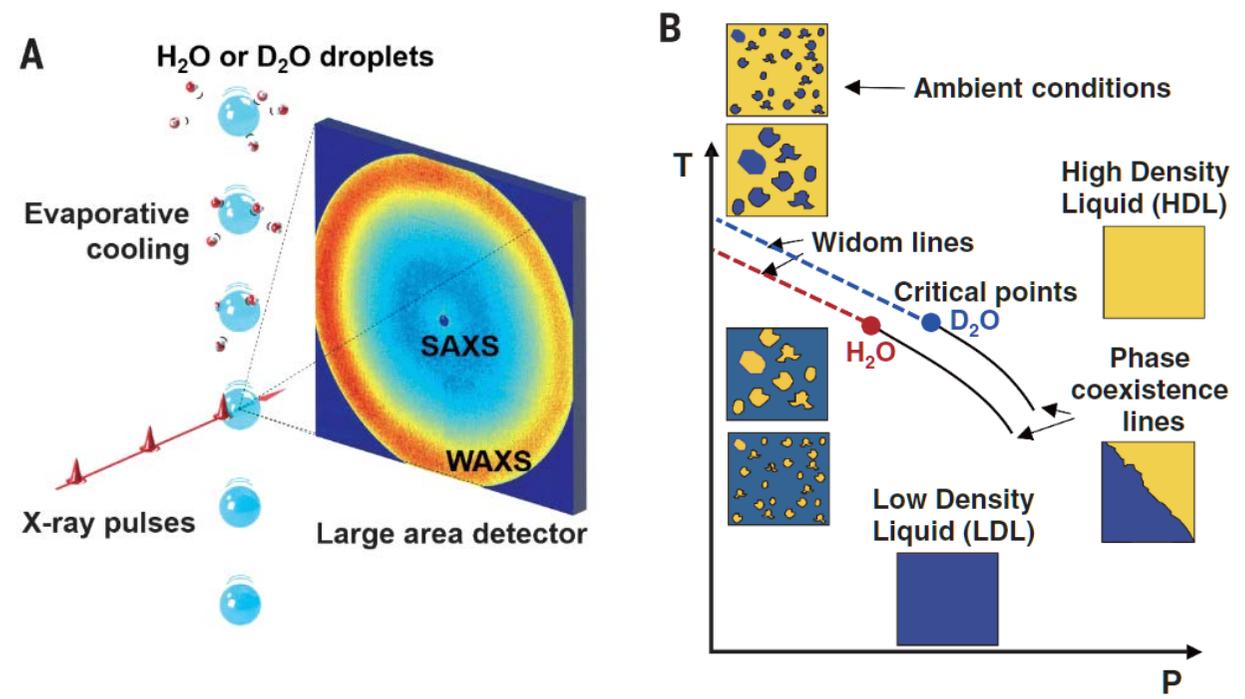
Research highlight (1): 물-얼음 상전이 연구

WATER THERMODYNAMICS

HX-NCI 빔라인

Maxima in the thermodynamic response and correlation functions of deeply supercooled water

K. H. Kim et al., Science 358, 1589 (2017)

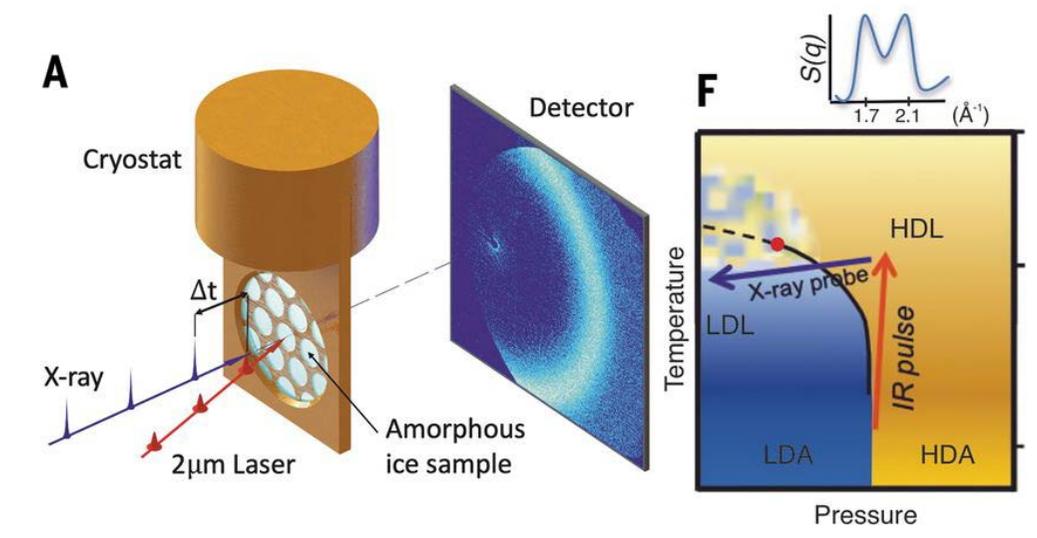


WATER PHASES

HX-XSS 빔라인

Experimental observation of the liquid-liquid transition in bulk supercooled water under pressure

K. H. Kim et al., Science 370, 978 (2020)



nature communications

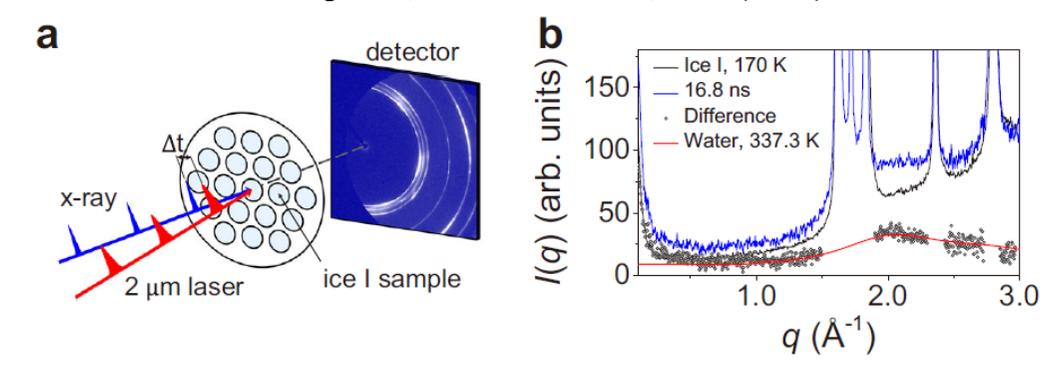
HX-XSS 빔라인

Article

<https://doi.org/10.1038/s41467-023-38551-0>

Melting domain size and recrystallization dynamics of ice revealed by time-resolved X-ray scattering

C. Yang et al., Nat. Commun. 14, 3313 (2023)



Research highlight (2): 빛으로 유도되는 화학 결합 형성 과정 규명

Article HX-XSS 빔라인

Mapping the emergence of molecular vibrations mediating bond formation

J. G. Kim *et al.*, *Nature*. **582**, 520 (2020)

Transient structures in the excited state at $t < 360$ fs

Transient structures in the ground state at $t < 360$ fs

Reaction coordinate diagram showing R_{AB} and R_{BC} axes. The ground state S_0 has a Franck-Condon region $S_0(eq)$ and an equilibrium structure $T_1'(eq)$. Three paths (path 1, path 2, path 3) are shown for bond formation. Harmonic oscillations are indicated near the equilibrium structure.

ARTICLE Check for updates

<https://doi.org/10.1038/s41467-022-28168-0> OPEN HX-XSS 빔라인

Determining the charge distribution and the direction of bond cleavage with femtosecond anisotropic x-ray liquidography

J. Heo *et al.*, *Nat. Commun.* **13**, 522 (2022)

a Atomic Charge distribution

Charge distribution $(I_A, I_B, I_C) = ?$

Electron density scale: High (red) to Low (blue).

b Potential energy surfaces for I_2 . The excited state shows short-bond dissociation leading to $I_2^- + I$. The ground state shows long-bond dissociation leading to $I_2 + I$. Reaction coordinates R_{AB} and R_{BC} are shown.

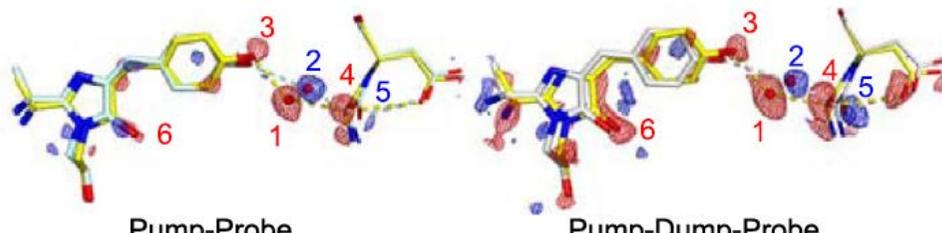
Research highlights in 2023

nature chemistry HX-NCI 빔라인

Article <https://doi.org/10.1038/s41557-023-01275-1>

Optical control of ultrafast structural dynamics in a fluorescent protein

C. D. M. Hutchison *et al.*, *Nat. Chem.* (2023)



Pump-Probe Pump-Dump-Probe

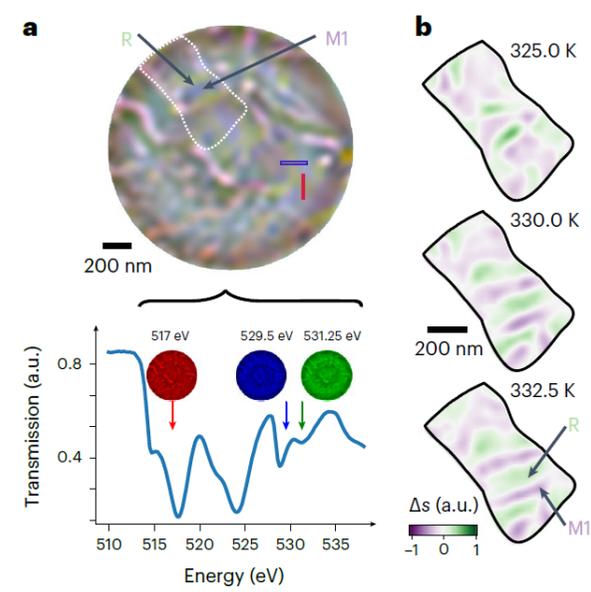
➤ 단백질 결정 구조를 빛으로 초고속으로 제어

nature physics SX-SSS 빔라인

Article <https://doi.org/10.1038/s41567-022-01848-w>

Ultrafast X-ray imaging of the light-induced phase transition in VO₂

A. S. Johnson *et al.*, *Nat. Phys.* **19**, 215 (2023)



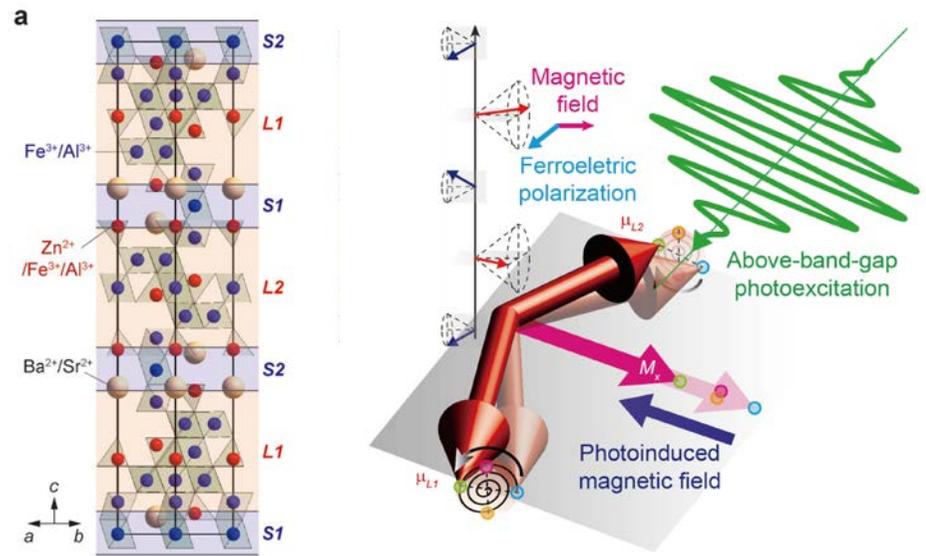
➤ FTH 기법을 적용하여 빛으로 유도되는 구조 상전이 도메인 관측

RESEARCH ARTICLE ADVANCED MATERIALS
www.advmat.de

SX-SSS 빔라인

4D Visualization of a Nonthermal Coherent Magnon in a Laser Heated Lattice by an X-ray Free Electron Laser

H. Jang *et al.*, *Adv. Mater.* (2023)



➤ 빛으로 유도된 양자 스핀 파동의 4차원 시공간 시각화

➤ PAL-XFEL의 모든 빔라인에서 고른 이용자 연구 성과 창출

PAL-XFEL의 연구 시설로서 당면 과제

- x-선 실험 기법 개발 및 고도화
- 연구원 연구 역량 및 이용자 빔타임 지원 효율 증대
→ 머신 스터디/인하우스 빔타임 시간 확보 필요
- 산업체 협력 연구 필요성 증대
→ 새롭게 최적화된 x선 에너지 영역 빔라인 확보 필요

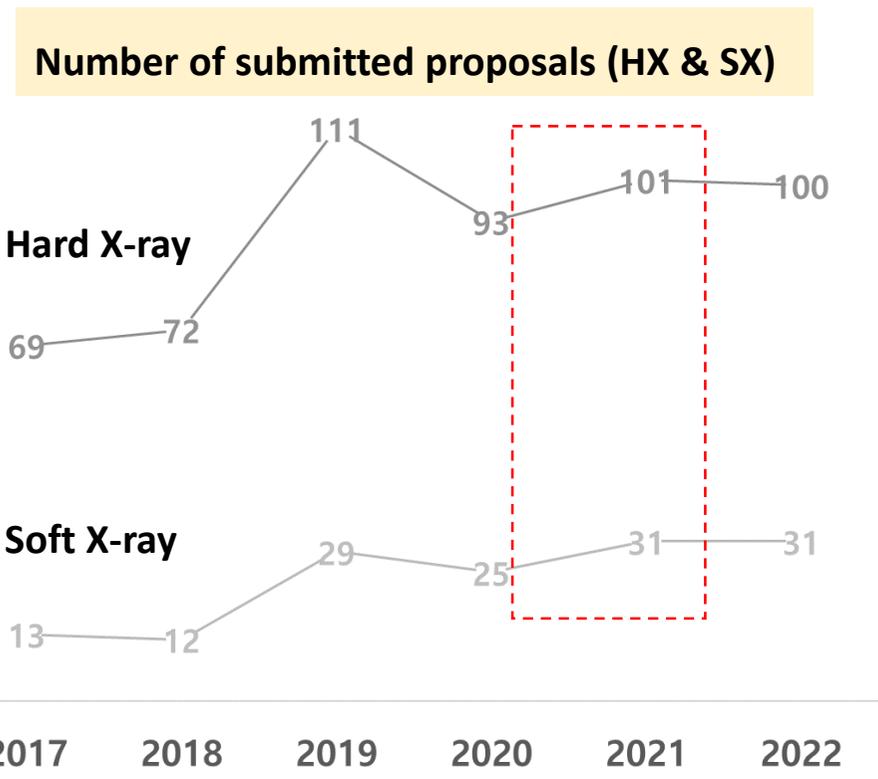
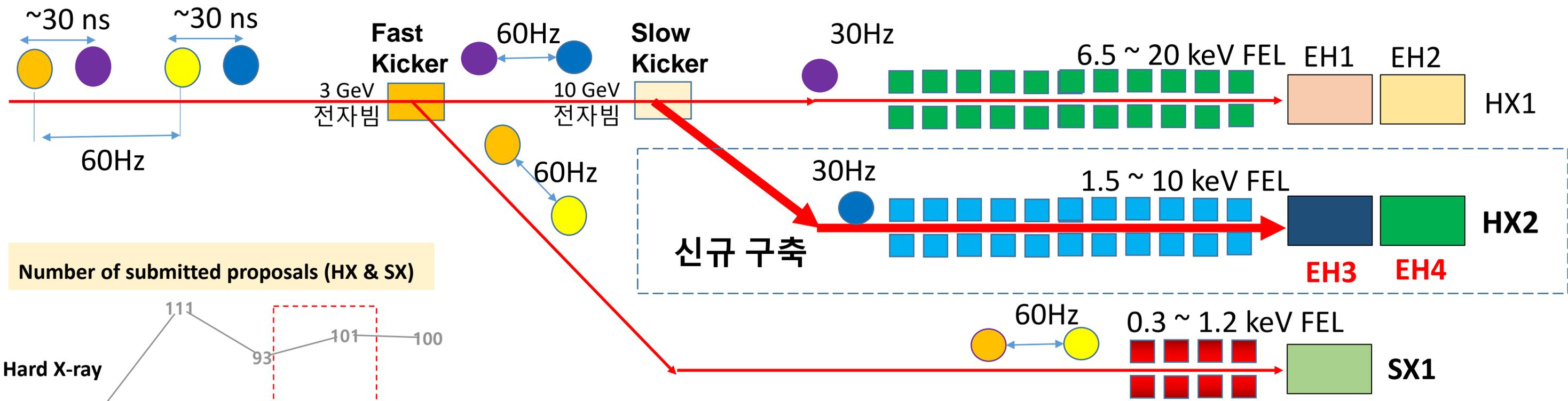


- XFEL 광원 성능 발전
- 새로운 XFEL 광원 개발
→ 머신 스터디 시간 확보 필요

- 창의적 연구 주제 발굴/시도
- 우수한 연구 성과 보고
→ 충분한 이용자 빔타임 시간 확보 필요

▶ PAL-XFEL 활용 연구 그룹들의 지속적 발전을 위해 새로운 빔라인 구축 및 추가 인력 필요

HX2 구축 필요성: 경엑스선 이용자 빔타임 확대

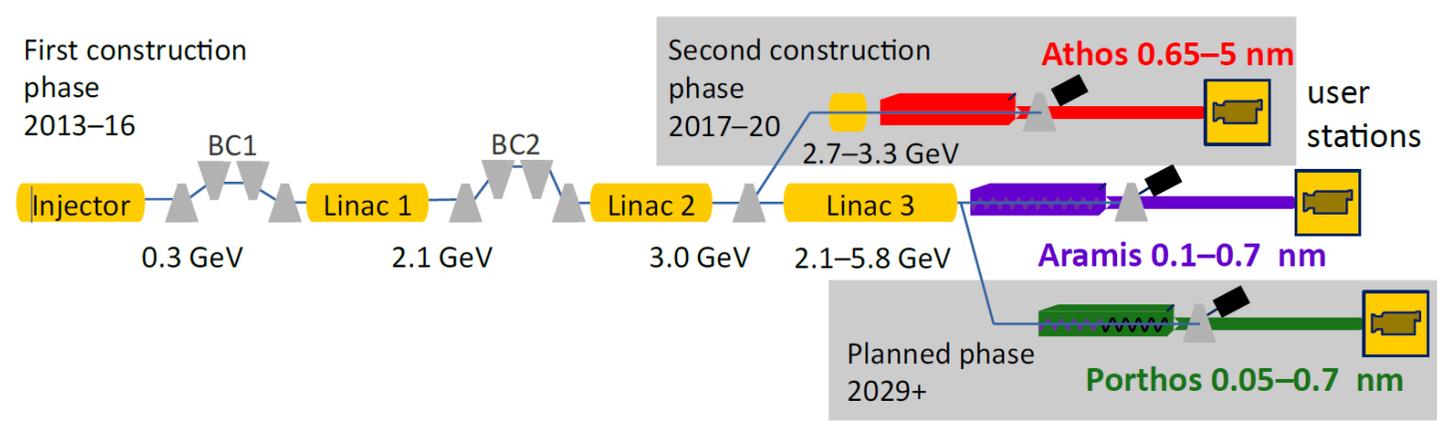


- 이용자빔타임 제안서 제출이 상대적으로 많은 경x선 과제에 대한 수용률 확대 필요 (XFEL 이용자 층 확대, 신규 이용자 유입 유도)
- 허치 별 전용 실험 장치 구축으로 빔라인 장치의 고도화 및 전문화 가능
 - 에너지 연구 특성화 실험, 나노-이미징 실험, 바이오 전용 실험 시설 특화로 심층 분석 실현
- 빔라인 동시운전 확대 적용을 통해 궁극적으로 3개의 독립적인 FEL 라인 운영

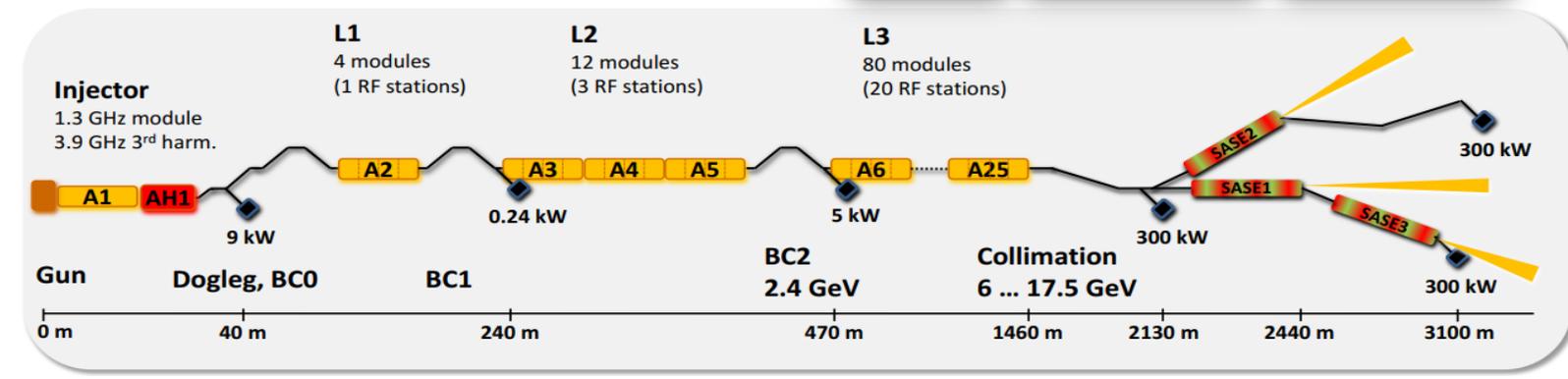
Beamtime approved ratio : 32%

해외 현황

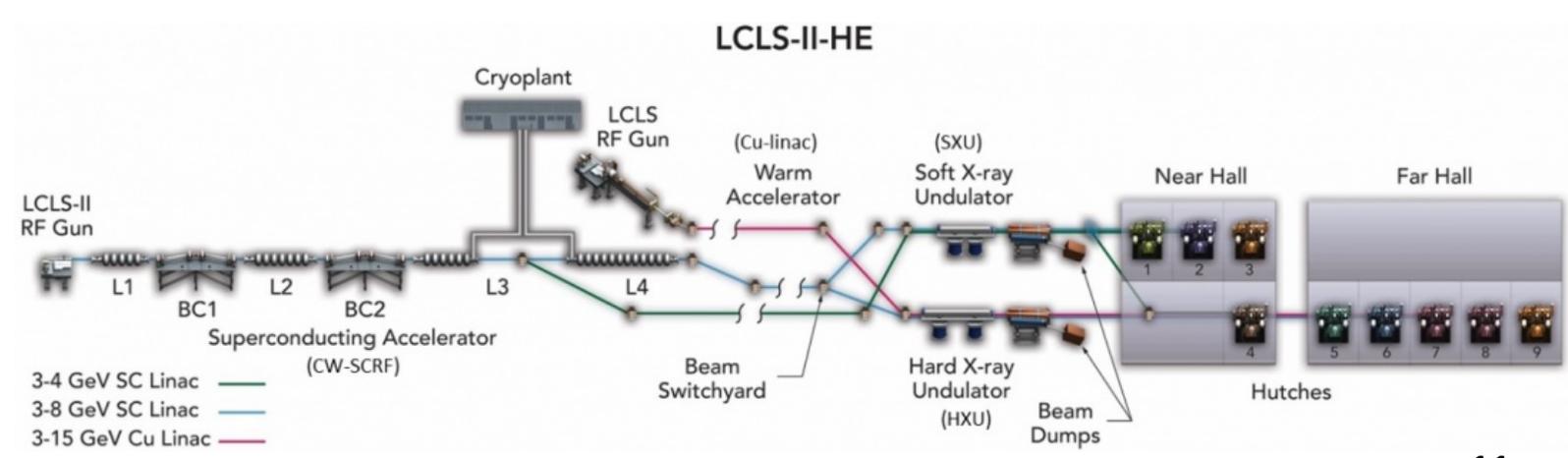
❖ 스위스 FEL: Aramis, Athos (운영중)
Porthos (구축예정)



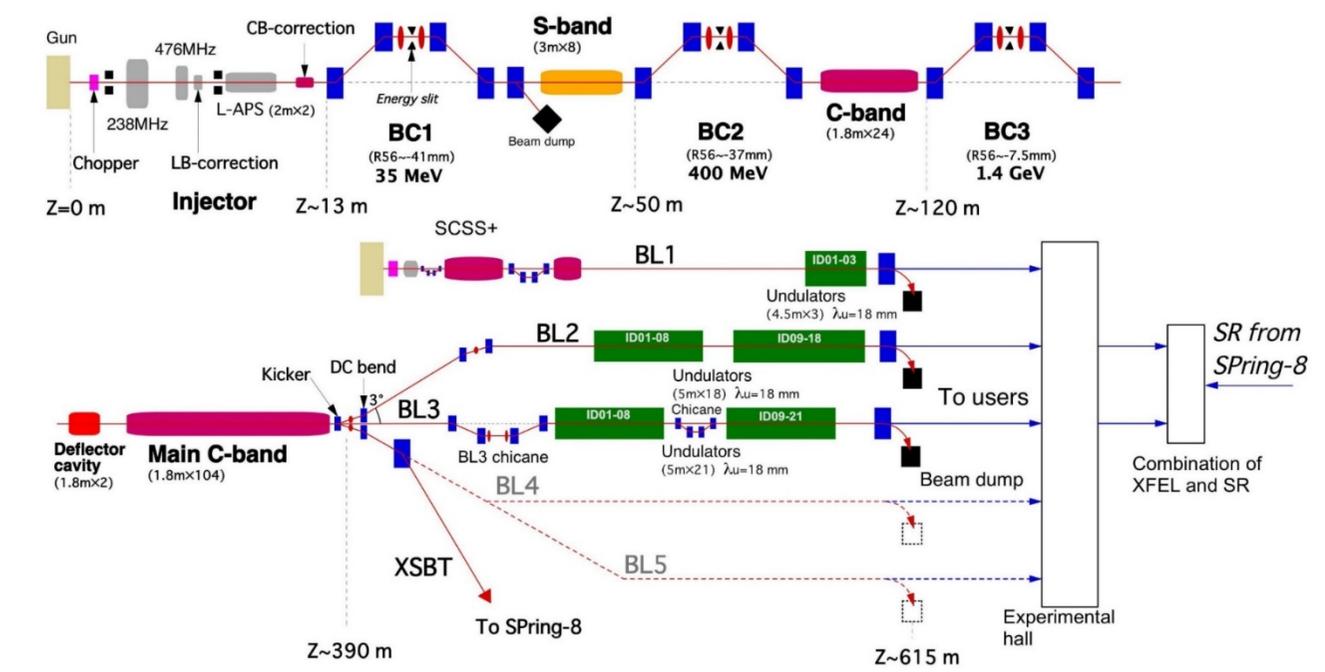
❖ 독일 European XFEL: SASE1, SASE2, SASE3 (운영중),
SASE 4, SASE 5 (구축예정)



❖ 미국 LCLS : LCLS I (운영중)
LCLS II (시운전중), LCLS II-HE (구축예정)



❖ 일본 SACLA: BL1, BL2, BL3 (운영중),
BL4, BL5 (구축예정)

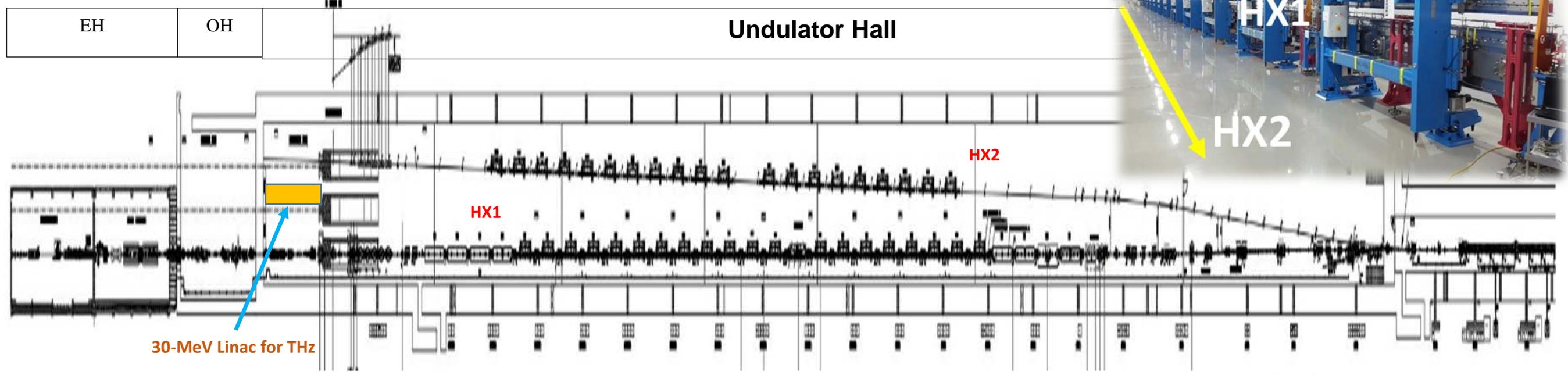


HX2 Undulator parameter

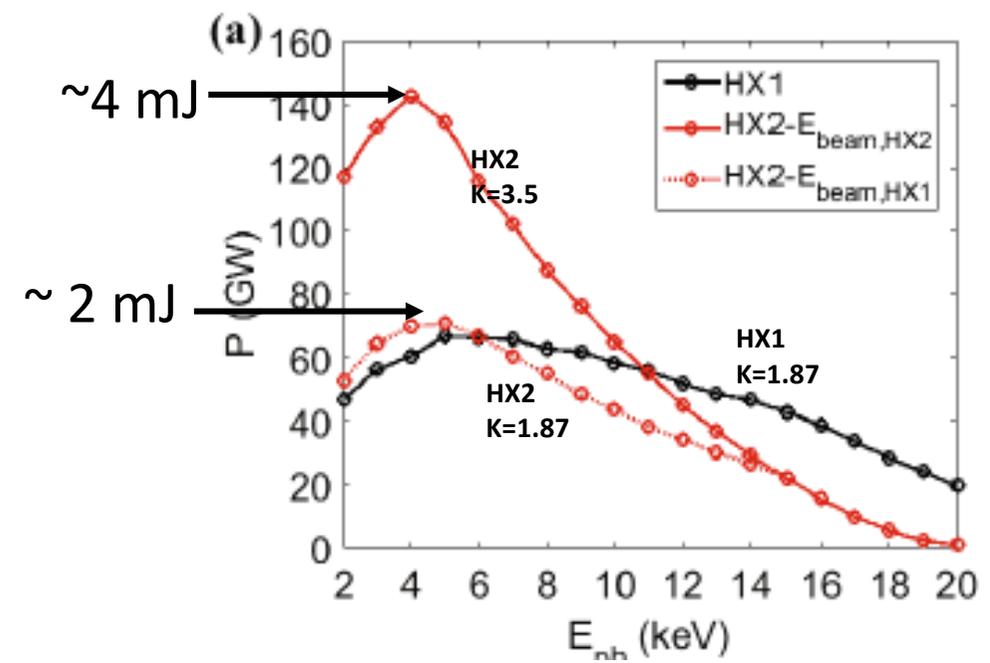
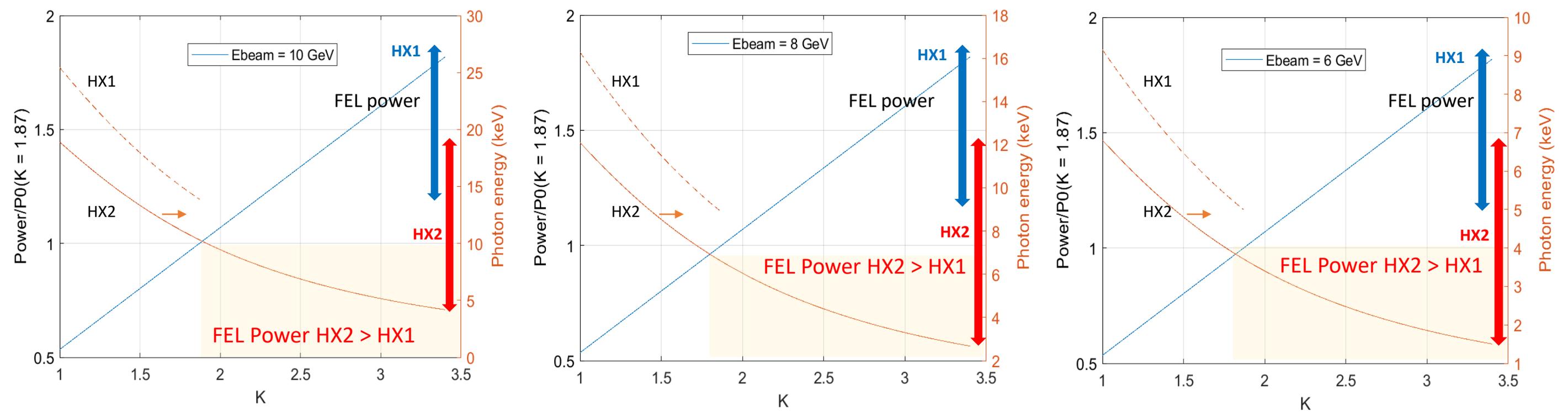
❖ 구축 주안점

- 기존의 장치 설계치를 활용하여 구축 소요 기간 단축
- 저 에너지 영역에 특화된 FEL 라인을 구축

	HX1	HX2	SX1
Undulator period, mm	26	35	35
Undulator K (max)	1.87	3.5	3.5
FEL photon energy, keV	6.5 ~ 20	1.5 ~ 10.0	0.3 ~ 1.2
Specialized range, keV	9 ~ 15 (> 1 mJ)	2 ~ 8 (> 2 mJ)	



HX1, HX2 제공 에너지 범위



- HX1, HX2, 빔라인 모두 2 - 20 keV 는 가능함. (주력 에너지 대역은 다름)
- HX2 의 경우는 12 keV 이상에서는 HX1 보다 에너지가 감소함.

경X선 운전모드	Photon energy 변경 방식
HX1/HX2 교차 운전	K 값 고정. E-beam energy 조정.
HX1/HX2 동시 운전	E-beam energy 고정. K 값 조정

Lattice design

❖ 충분한 언듈레이터 공간 활용하여 향후 advanced scheme 적용 가능토록 설계

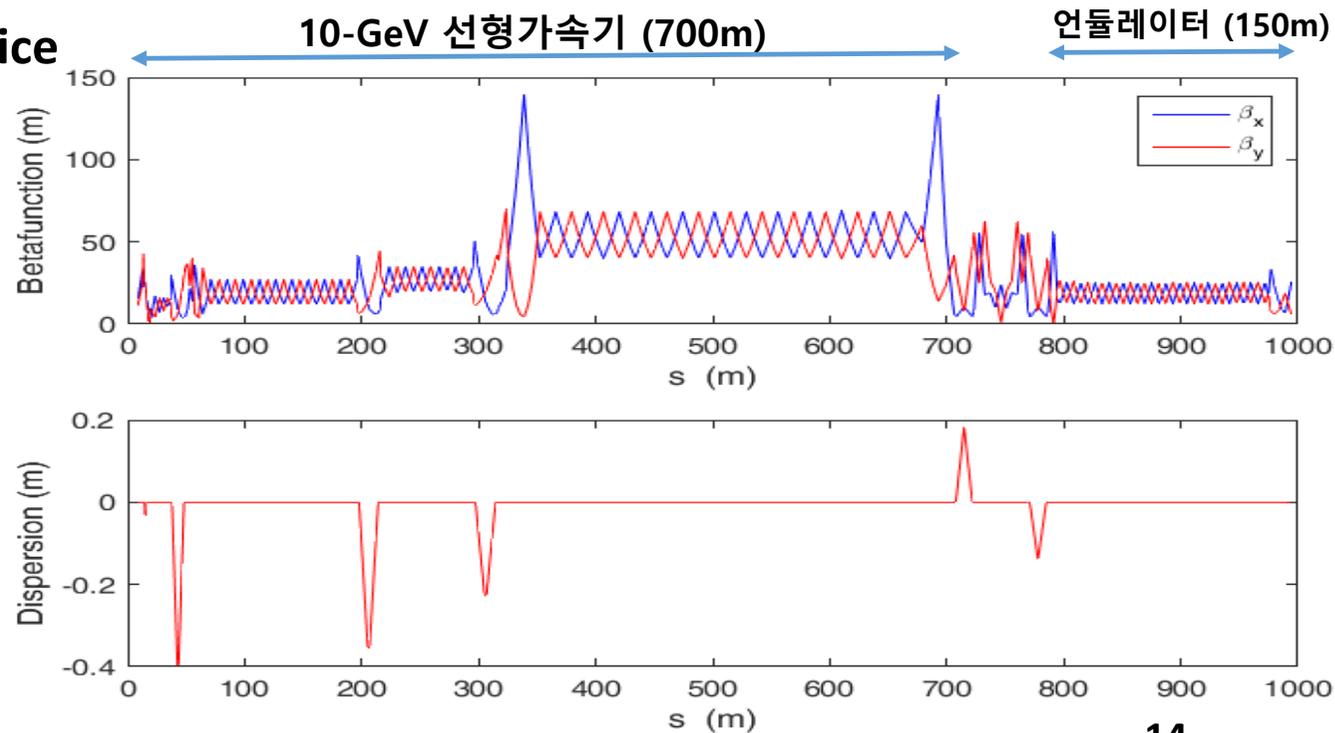
▪ 총 29개의 FODO Drift 구간 (5 m 길이) 확보

→ 언듈레이터: 26개 (본사업: 20 개 설치)

→ Self-seeding 시스템: 1개

▪ (향후) 언듈레이터 6기 추가 구축하여 5 keV 광자에너지에서 펄스길이 2 펨토초, 펄스 에너지 5 mJ (= 2.5 TW) 구현. → 1 nm 이하의 분해능 단분자 이미징 구현.

Linac + HX2 lattice



FODO Drift No.	설치 장치	용도
1	wire scanner	
2	wire scanner	
3	HU201	
4	HU202	
5	HU203	
6	HU204	
7	HU205	
8	HU206	
9	HU207	
10	HU208	
11	Chicane & wire scanner	Self-seeding
12	HU209	 <p>PAL-PUB/2020-00X Apr. 2020</p> <p>PAL-XFEL 의 두번째 경엑스선 FEL 라인 설계</p> <p>김동식, 김규진, 김지희, 김장섭, 남민영, 문건영, 박성열, 서영진, 신동철, 양하윤, 조영훈, 최효진, 권영훈, 김두희, 박종현, 윤성민, 장재현, 최현수, 고준호, 신지현, 김광훈, 김상희, 나동원, 박성수, 박성주, 박종철, 장성훈, 허진열, 홍준호, 김민재, 김승연, 서용석, 오봉기, 이상봉, 이소정, 장성표, 정영규, 이철우, 이훈기, 더 문, 민창기, 한창희, 임민태, 전세환, 이재현, 남대훈, 김경숙, 김성환, 나승우, 이복수</p> <p>Pohang Accelerator Laboratory POSTECH</p>
13	HU210	
14	HU211	
15	HU212	
16	HU213	
17	HU214	
18	HU215	
19	HU216	
20	HU217	
21	HU218	
22	HU219	
23	HU220	
24	HU221, spare	
25	HU222, Spare,	Undulator (TW FEL)
26	HU223, Spare	Undulator (TW FEL)
27	HU224, Spare	Undulator (TW FEL)
28	HU225, spare	Undulator (TW FEL)
29	HU226, spare	Undulator (TW FEL)

동시 운전 계획

❖ 경엑스선 운전계획

- Slow kicker로 60 Hz 빔을 HX1/HX2에서 나누어 사용

	주간	야간
운전모드	HX1: EH1 (50Hz) : 본실험 HX2: EH3 (10 Hz) : 예비실험 or R&D	HX2:EH4 (50Hz) : 본실험 HX1:EH2 (10 Hz) : 예비 실험 or R&D

❖ 예비실험이 활성화되면 본빔타임의 효율성 개선 가능

- 난이도 높은 실험의 경우 사전 테스트 필요성 매우 높음.

→ 실험 조건 찾는 데 과다 시간 소모 (예: 6일 중 5일 소모)

- 예비실험 or R&D 빔타임은 본실험 빔타임에 영향을 주지 않는 조건에서 수행

→ 실험 장치 재셋팅 시간은 예비실험 빔타임에 포함

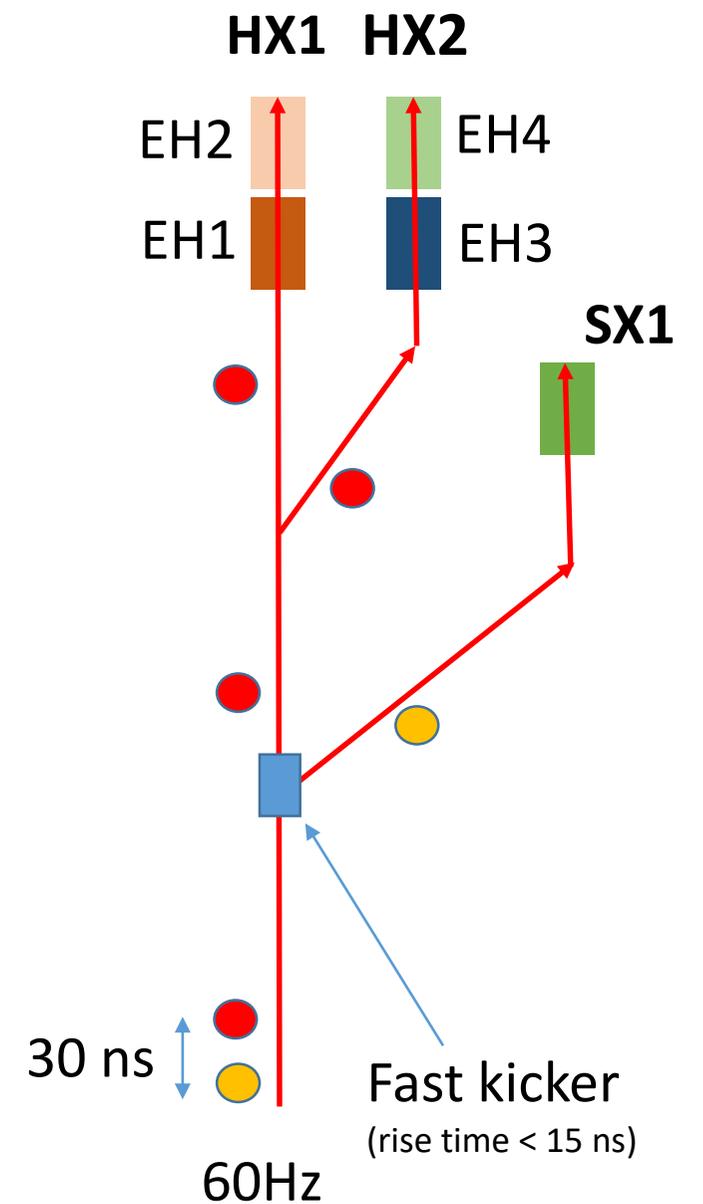
❖ 4개의 허치에 전용 빔라인 설치 빔라인 장치의 고도화와 전문화 가능

- 빔라인 장치 이동이 최소화 되어 실험 준비시간 단축

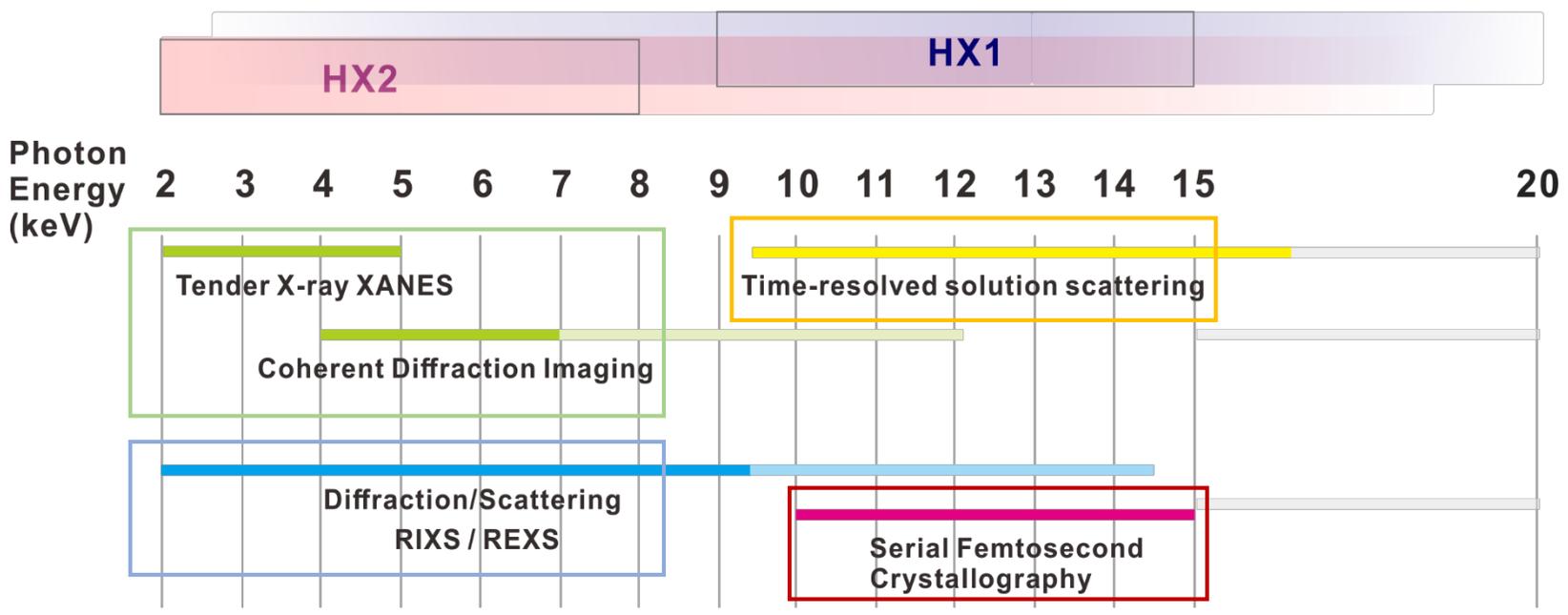
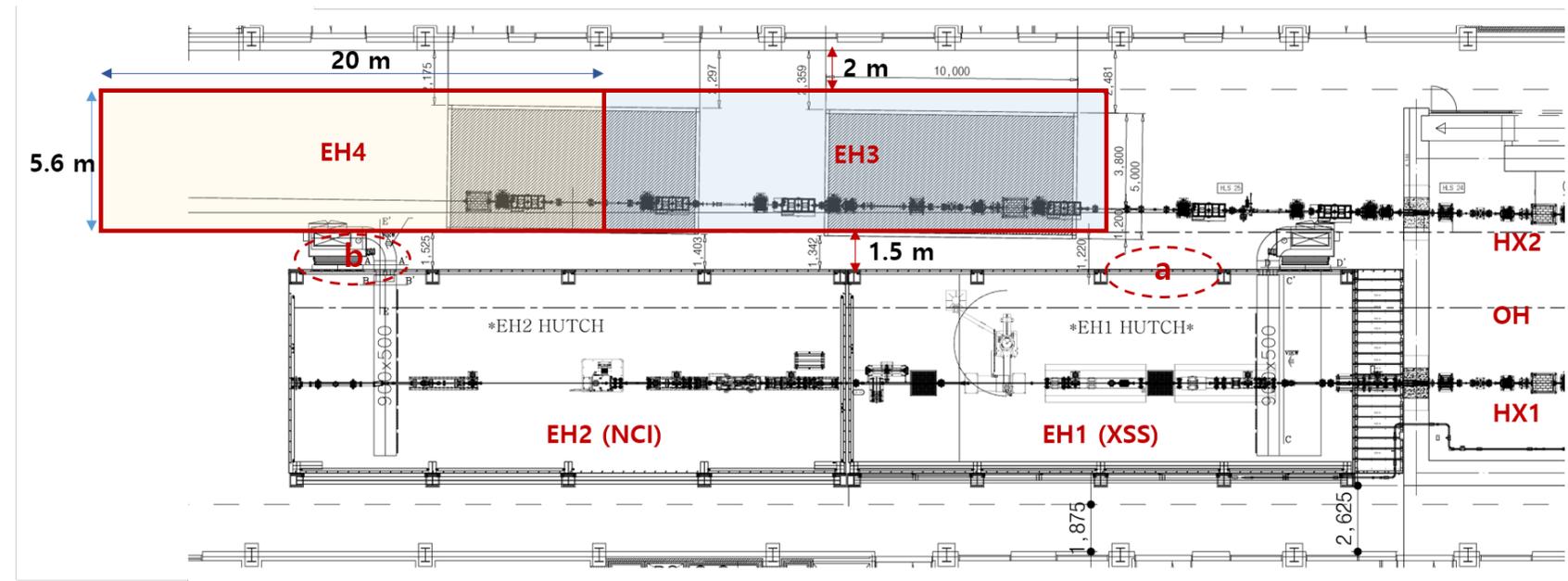
❖ 연엑스선 운전계획

- Two bunch operation(30 ns 간격) 및 fast kicker를 활용

- 독립적인 60Hz 빔으로 24시간 운전



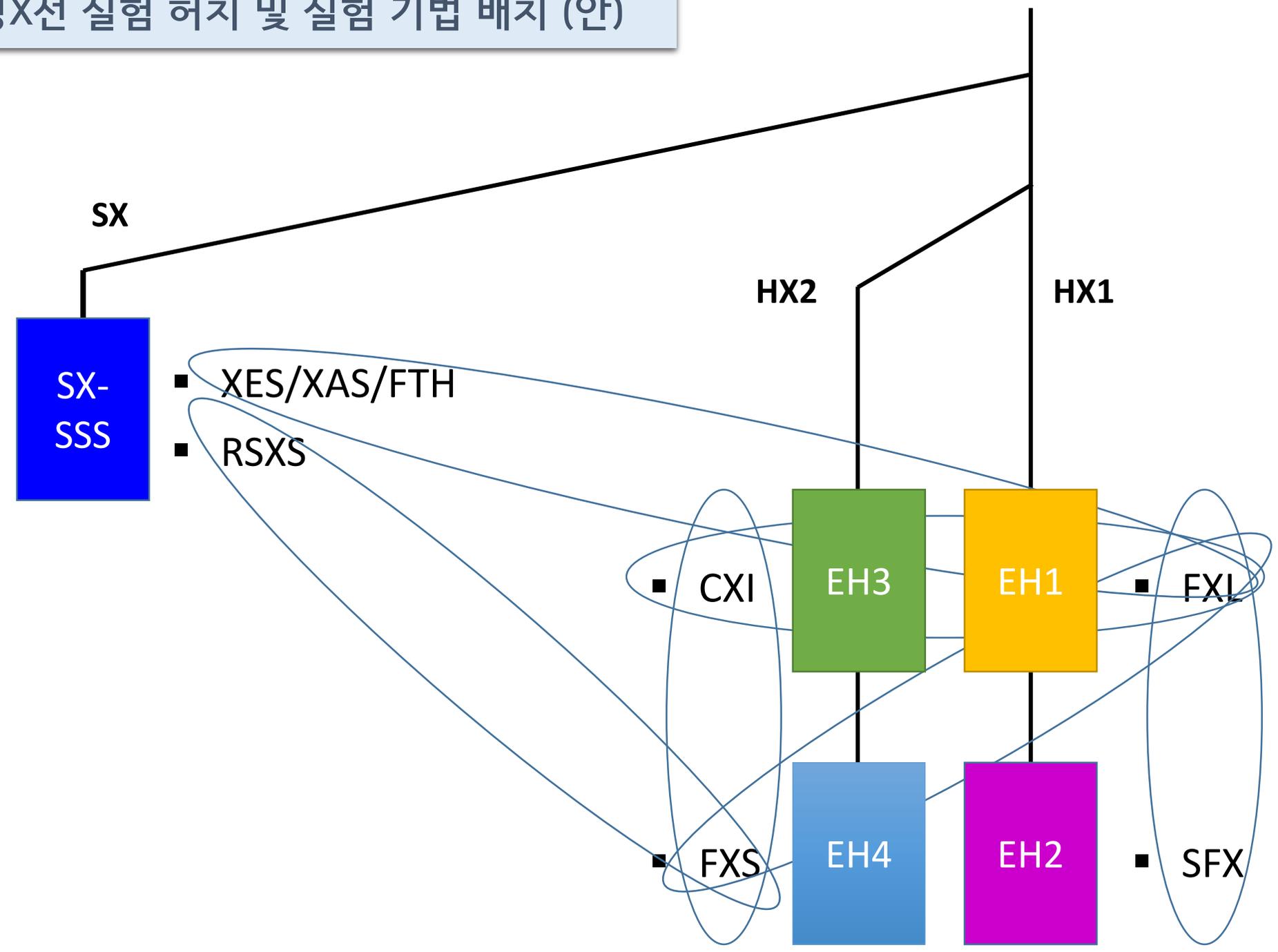
경X선 실험 허치 및 실험 기법 배치 (안)



- 4개의 허치에 실험장치 분산 운영
 - > 빔라인 장치 이동이 최소화 되어 실험 준비시간 단축
 - > 빔라인 장치의 고도화와 전문화, 지속적 성능향상 추구

- 고려사항
 - 기법 별, 주로 사용하는 photon energy 대역
 - 허치 간 실험 전환 시 용이성
 - 필요 시 sample position (interaction point) 2개 이상 구성 (실험 셋업 해체 최소화)
 - Beam size
 - Coherence 영향
 - 빔라인 광학장치 추가 여부: LODCM, Split & delay

경X선 실험 허치 및 실험 기법 배치 (안)



- ▶ 빔라인 장치의 전문화를 추구하나 실제로 endstation 담당자들은 관련된 연구 분야로 역여 있음.
- ▶ 유기적 협력 연구 체계를 구축하여 완성도 높은 연구 수행이 가능케 함.

HX2 사업계획

❖ 기간:4년 (설계(1년), 제작(2년), 구축(1년))

❖ 예산:460억원 (설계비 20억 별도)

■ 3년 내에 구축 및 시운전 완료. 구축사업 종료 후 유저 서비스 운전 시작

- HX2 는 이미 성능이 검증된 HX1의 설계와 제작기술을 그대로 적용.
- 언듈레이터가 SX1 과 동일

■ **구축기간 중 유저서비스운전 정상 유지 가능**

- 구축 전기간 정상적인 유저서비스 운전일정 소화 (HX1 활용).
- 모든 장치의 설치준비를 3차년도 초까지 마침. 4차년도의 7월~9월(3개월) 기간에 장치구축 완료.
: 통상적인 100일의 유지보수기간 (1년에 두 번: 동계 2월, 하계 7월)을 3개월로 합쳐서 필요한 설치작업을 완료함.
- XFEL 시운전 및 빔라인 시운전은 장치구축 완료 후 6개월 이내에 완료.
- 3차년도 유저서비스 운전 (HX1 활용) 중에도 HX2 빔라인 시운전이 가능함. 2개의 FEL 라인 동시운전장치를 활용하여 HX1 에는 58 Hz 빔으로 서비스하고, 2Hz 빔은 HX2 시운전에 활용할 수 있음.

	항 목	460 억
1. 가속기 (280억)	1. 언듈레이터 /전자석	220억
	2. 진단제어	30억
	3. 진공	30억
2. 빔라인 (180억)	1. 광학 레이저	30억
	2. 검출기	25억
	3. X-ray optics	30억
	4. 기계/진공/전기	40억
	5. 진단/제어	15억
	6. DAQ (data storage)	10억
	7. 허치 2기	30억

Thanks to:

All members of PAL-XFEL



보충자료

포항 방사광가속기 중장기 발전계획

구 분	항목		예산	비고
4세대	빔라인 운영 예산 (노후장치 개선 및 경쟁력 유지)		+2.5억원('24), +10억원('25), +20억원('26)	- 이용자 빔타임 확대에 따른 유지비 필요 • 빔 운영일수 증가, 빔라인 동시운전, 주·야간 교차운전, 고반복률 운전모드 제공 등 - 노후화 및 수명 도래 장비의 유지보수비 반영
	동시운전용 고속 번치 분리장치		총 10억원('24~'26)	- 60 Hz 빔라인 동시운전 추진
	연X-선 타원편광 언듈레이터		총 30억원('25~'27)	- 타원편광 실험지원 및 연X-선 출력 증가 도모
	입사기 레이저 성능개선		총 8억원('26~'27)	- 빔라인 장치 성능 고도화에 따른 입사기 레이저 성능개선
	빔타임 개선 및 차세대 바이오/친환경 신소재 연구	저에너지 특화 빔라인 증설	총 460억원('24~'27)	- 세계 최고 성능의 4세대 방사광가속기 활용 확대를 위해 경X-선 빔라인 1기 증설

* 방사광가속기운영위('23.2) 부대의견으로 포항 방사광가속기의 차별화된 발전전략 수립 요구

HX2 추진 경과

- 2018. 07. 12: **4세대 간담회** (HX2 구축 제안) →
- 2019. 11. 11: **International Advisory Meeting** (HX2 설계 결과 발표)
- 2020. 07. 31: **4세대 이용자 간담회** (두 번째 경엑스선 FEL 라인: HX2)
- 2020. 08. 11: 두 번째 경엑스선 FEL 라인 설계 보고서 발간 (PAL-PUB)
- 2021. 04. 22: **춘계 물리학회** (PAL-XFEL 의 성과와 과제)
- 2021. 07. 01: **KAPRA 학회** (PAL-XFEL 의 성과와 과제)
- 2021. 10. 15: **물리학회 플라즈마 분과 가속기 포럼** (PAL-XFEL 활용연구 고도화 사업: 두 번째 경엑스선 FEL 라인 구축)
- 2022. 04. 22: **춘계 물리학회** (PAL-XFEL 경엑스선 빔라인 증설 & 세계 방사광가속기 구축 현황 및 우리의 전략)
- 2022. 05. 25: **PAL-XFEL 발전방향 공청회** (한국방사광이용자협회 주최)



PAL-XFEL 빔라인증설 촉구 이용자 의견서



Institute for Basic Science
55 Expo-ro, Yuseong-gu,
Daejeon, 34126, Korea

Office of the President
president@ibs.re.kr

수신: 포항가속기연구소 및 빔라인 증설 관련 정부 담당자분들

제목: PAL-XFEL 빔라인 증설은 꼭 필요합니다

저는 X-선과학분야 연구를 수행해온 광주과학기술원 물리광학과와 노도영 교수이며 현재는 기초과학연구원(IBS) 원장직을 수행하고 있습니다. 저는 PAL-XFEL 가동 전부터 해외의 SACLA 를 활용하여 XFEL 을 이용한 초고속 시간분해 이미징 연구를 해왔으며 PAL-XFEL 가동이후 국내에서도 실험이 가능하게 되어 다양한 초고속 이미징 및 동력학 연구를 수행하고 있습니다. PAL-XFEL 에서는 포항공대 송창용 교수 연구진과 공동으로 나노 금입자의 녹는 과정의 초고속 이미징(Nature Comm. 2019), 나노입자 3 차원 고속 이미징 기법(ACS NANO, 2021) 등의 다양한 연구를 수행했습니다.

PAL-XFEL 은 세계 최고 수준의 극초단 X-선 펄스빔을 제공하고 있어, 국내에서 세계적 연구를 수행할 수 있는 경쟁력 있는 연구시설입니다. PAL-XFEL 을 활용하여 연구를 수행함에 있어 가장 어려운 점은 지속적 연구를 수행할 수 있는 충분한 빔타임을 확보하지 못한다는 점에 있습니다. 세계 여러 나라 과학자들이 빔타임을 신청하는 상황에서 연구에 필요한 빔타임을 시간에 맞추어 받지 못하는 경우가 많고, 새롭게 초고속 원자 동력학을 연구해 보고자 하는 연구자들은 빔타임을 확보하지 못해 포기하는 경우가 많습니다.

IBS 원장으로서 국가의 미래 기초과학의 성장을 위해서 PAL-XFEL 과 같은 세계적 경쟁력을 갖춘 시설을 존재와 활용은 매우 중요하다고 생각합니다. PAL-XFEL 의 활용도를 높이기 위해서는 현재 보유하고 있는 한 개의 경X-선 빔라인에 더하여 추가적인 빔라인의 증설이 절실하게 필요합니다. 특히 PAL-XFEL 의 우수성으로 전 세계의 연구자들이 모여들고 있는 상황에서는 더욱 필요한 것입니다. 저희 IBS 에서는 PAL-XFEL 을 활용하여 초고속 현상을 연구하는 '첨단반응동역학

PAL-XFEL 경엑스선 빔라인 증설 필요성

작성자: 이효철 교수 (KAIST 화학과 및 IBS)

작성일: 2021년 11월 26일

PAL-XFEL 경엑스선 빔라인 증설을 적극 지지합니다.

저는 KAIST 화학과 교수 및 IBS 연구단 일원으로서 주로 시간분해 엑스선 산란법을 이용한 다양한 분자계의 화학반응 메커니즘 연구를 지속해오고 있습니다. 2017년 PAL-XFEL이 가동함에 따라 국내에서도 실험이 가능하게 되어 다양한 펄초 동력학 연구를 수행하고 있습니다. 예를 들어, PAL-XFEL에서 수집한 데이터를 바탕으로, 금삼합체화합물 내의 화학결합이 형성되는 모든 과정을 관측하는 연구(Nature, 582, 520-524, 2020), 비스무스화합물 내의 로밍메커니즘에 의한 이성질화 현상에 대한 연구(Nat. Commun., 12, 4732, 2021)와 같이 반응 중인 분자의 시간에 따른 구조 변화를 추적하는 연구를 수행하였고, 최근에는 더 나아가 레이저에 의한 용매의 배열효과(optical Kerr Effect)에 대한 연구(J. Am. Chem. Soc., 143, 14261-14273, 2021)까지 수행하여 주로 용질의 변화에 초점을 맞추었던 기존 연구에서 더욱 연구범위를 확장하여 용매의 동력학에 이르기까지 연구의 범위를 확장해가고 있습니다.

세계적으로도 여러 XFEL 연구소들이 가동됨에 따라 이 분야에 더 많은 연구자들이 유입되고 있는 상황이며 그에 따라 좋은 연구 주제를 선정하기 위한 경쟁도 치열해지고 있습니다. 또한, 기존의 실험기법의 태동기에 주목했던 모델시스템 분자계를 넘어 이제는 화학적, 생물학적, 공업적으로 더 중요하고 응용이 가능한 분자계로의 연구 범위 확장이 핵심이 되고 있는 상황에서 점점 더 많은 실험 시간의 확보가 무엇보다 중요해지고 있습니다. PAL-XFEL 연구소 세계 과학 발전의 흐름을 주도하며, 나아가 한국이 최선의 과학 기술 및 지식을 개발하고 확보하기 위해서는 더 많은 연구자들에게 더 많은 연구 기회와 실험 시간이 주어져야 합니다. 제 의견을 아래 더욱 상세하게 붙입니다. PAL-XFEL의 빔라인 증설이 실현되어 많은 연구 기회가 제공되기를 간절히 바랍니다.

1. 국외 XFEL 설비 대비 PAL-XFEL의 경쟁력

엑스선을 이용한 다양한 실험을 성공적으로 수행하기 위해서는 기본적으로 1) 엑스선의 세기가 강할수록 (펄스당 photon의 수가 많을수록), 2) 엑스선 펄스의 시간폭이 짧고, timing jitter가 작을 수록, 3) 엑스선의 안정성이 높을수록 유리합니다. PAL-XFEL은 가동 시기는 국외의 LCLS, SACLA와 같은 XFEL 보다 늦었지만, 위와 같은 성공적 실험을 위한 조건들을 고려해보았을 때 충분한 경쟁력을 갖고 있습니다.

먼저, 엑스선의 세기는 다른 XFEL 연구소와 비교하여 동등한 수준으로 충분히 강한 엑스선 펄스를 제공하고 있고 (표 1), 엑스선 펄스의 시간폭 역시 다른 XFEL 연구소와 동등한 수준으로 짧으며, 더 나아가 timing jitter를 최소화하기 위한 셋업들을 갖추고 있어 결과적으로 얻어지는 시간분해능이 매우 우수합니다. 마지막으로 '엑스선의 안정성' 부분에서 PAL-XFEL은 큰 경쟁력을 갖추고 있습니다. 사실 이 부분은 실제 실험의 성공 여부와 직결되는 부분입니다. XFEL의 경우 엑스선 펄스를 생성하기 위한 SASE (self-amplified spontaneous emission) process의 특성상 엑스선 세기나 position의 fluctuation이 수반됩니다. 이런 엑스선 펄스의 불안정성은 실험 신호의 원치않는 왜곡과 직결되므로 이를 최소화하는 것이 실험 성공을 위해 매우 중요합니다. 본 그룹은 국외 LCLS, SACLA와 같은 XFEL에서도 많은 실험 경험이 있는데, 이들과 비교해서 PAL-XFEL에서 제공하는 엑스선의 안정성이 가장 뛰어나기 때문에 실험 신호를 가장 안정적으로 측정할 수 있었습니다.

이외에도, PAL-XFEL에서는 시간분해 실험을 위한 레이저 셋업이 매우 안정적이고, 데이터 프로세싱 등의 여러 부수적 기반 역시 잘 갖추어져 있습니다. 결론적으로, PAL-XFEL은 이미 세계 최고 수준의 광원 품질 및 부수적 기반 요소들이 잘 확보되어 있는

PAL-XFEL 경엑스선 빔라인 증설은 반드시 필요합니다.

작성자: 김경환 교수 (POSTECH 화학과)

작성일: 2021년 11월 28일

저는 POSTECH 화학과 조교수로, 부임 전부터 현재까지 LCLS와 SACLA 등에서 여러 실험을 수행하였으며, PAL-XFEL에서는 가동 시작 후 가장 첫 번째 이용자 빔타임 실험을 진행하는 등, 현재까지 활발한 연구를 수행해 오고 있습니다. 제가 겪었던 그 동안의 경험을 바탕으로, PAL-XFEL 의 우수성과 추가적인 빔라인 증설의 필요성에 대해 아래와 같이 말씀드리고자 합니다.

1. PAL-XFEL의 우수성

저는 PAL-XFEL 운영이 시작된 이후 첫 번째 이용자 빔타임 실험을 수행하였습니다. 저희 국제 공동연구팀은 당시 실험이 PAL-XFEL이 제공하는 가장 첫 번째 이용자 실험이었음에도 불구하고, X선 펄스의 품질과 안정성, 그리고 빔라인 스태프 분들의 전문성 및 이용자 지원 역량, 더 많은 건설비를 사용했고 더 많은 운영 예산을 사용하며 또 수년 이상의 이용자 지원 경험을 이미 가지고 있던 타 XFEL시설에 비해 전혀 부족하지 않고, 오히려 더 우수한 점이 많다는 사실에 놀라지 않을 수 없었습니다. 이는 단순히 저희의 느낌뿐이었던 것이 아니었습니다. 실제로 당시 저희는 PAL-XFEL에서의 실험을 통해 기존에 LCLS와 SACLA에서 모두 시도 했었으나 얻지 못 하였던 실험 결과를 매우 성공적으로 얻을 수 있었고, 실험 후 단 6개월 만에 Science지에 논문을 출판할 수 있었습니다 (Science, 358, 1589-1593 (2017)). 이후 저희 국제공동연구팀은 물의 변칙적 성질의 근원이라는 세계적인 난제를 해결하는 매우 도전적인 실험을 계속해서 수행하기에 PAL-XFEL이 최적의 장소라는 결론을 내리고, 관련 연구를 PAL-XFEL을 활용하여 현재까지 계속 성공적으로 수행해 오고 있습니다.

2. 빔라인 증설의 필요성

세계적으로 XFEL을 이용한 연구는 더욱 더 다양한 분야로 그 저변이 크게 확대되고 있음과 동시에, 그 각각의 실험 주제는 모델시스템을 이용한 proof-of-principle 타입의 실험에서 벗어나 실제 학계의 중요한 문제들을 다루는, 더 많은 도전과 시행착오를 필요로 하는 것들로 옮겨가고 있습니다. 이는 필연적으로 빔타임 확보의 어려움과 그로 인한 높은 경쟁을 야기하고 있으며, 이는 평균 30%정도에 불과한 빔타임 수용률에서 극명히 나타나고 있다고 생각합니다. 저 또한 다른 분들의 더 우수한 제안서와의 경쟁에서 밀려 PAL-XFEL에서 실험 기회를 얻지 못하기도 합니다. 이는 탈락한 제안서에 대해 받은 리뷰를 바탕으로 향후 실험 계획을 더 꼼꼼히 개선하는 기회가 되기도 하였지만, 계획했던 실험 성과에 대한 출판 (Science, 370, 978-982 (2020))과 이후의 후속 연구가 크게 지연되는 어려움이 있었던 것도 사실입니다. 국내 다양한 분야의 많은 뛰어난

PAL-XFEL 빔라인증설 촉구 이용자 의견서 요약 (1)

노도영 (IBS 원장)

IBS원장으로서 국가의 미래 기초과학의 성장을 위해서 PAL-XFEL과 같은 세계적 경쟁력을 갖춘 시설을 존재와 활용은 매우 중요하다고 생각합니다. PAL-XFEL의 활용도를 높이기 위해서는 현재 보유하고 있는 한 개의 경X-선 빔라인에 더하여 추가적인 빔라인의 증설이 절실하게 필요합니다. 특히 PAL-XFEL의 우수성으로 전 세계의 연구자들이 모여들고 있는 상황에서는 더욱 필요한 것입니다. **PAL-XFEL의 빔라인 증설을 통해 제공할 수 있는 빔타임을 늘릴 수 있게 된다면, 이러한 연구자들이 과학적 난제를 풀어 인류의 지식의 지평을 넓혀가는데 크게 기여할 것으로 생각합니다.**

이효철 (KAIST 화학과)

PAL-XFEL이 세계 최고 수준의 엑스선 퀄리티와 부수적 실험 제반을 확보하였음에도 불구하고 절대적 빔타임 부족이란 제약에 붙잡혀 있는 안타까운 상황입니다. 이미 LCLS 등 다른 가속기의 경우에도 실험 반복률 개선이나 추가 빔라인 설치를 진행 중이며, PAL-XFEL 역시 이러한 흐름에 발맞추어 나갈 필요가 있습니다. 앞서 언급한 LCLS II HE의 경우 2026년 경 업그레이드 완료를 목표로 하고 있는 만큼 PAL-XFEL도 경쟁력 확보를 위해 최대한 빠르게 추가 시설 확보가 필요합니다. **사실 추가 빔라인 증설은 어떻게 보면 늦은 감이 있습니다. 지금이 이것을 추진할 수 있는 기회의 창이 닫히기 전 마지막 때일 수도 있습니다.** PAL-XFEL의 빔라인 증설을 통해 제공할 수 있는 빔타임을 늘릴 수 있게 된다면, 한국이 세계 연구 흐름을 주도하며 다양한 과학 주제에 대한 연구를 선점할 수 있는 기반이 마련될 것으로 확신합니다.

김경환 (포항공대 화학과)

PAL-XFEL과 같은 연구시설의 존재 의의는, 이러한 강력한 시설없이 절대 수행할 수 없는 새롭고 도전적인 연구를 수행할 수 있게 해준다는 것에 있다고 생각합니다. 하지만 현재와 같은 빔타임부족과 높은 경쟁률의 상황이 지속되고 또 오히려 더 심해진다면 더 **risk가 크고 높은 실험난이도를 가지고 있는, 새롭고 도전적이며 세계를 선도하는 연구를 PAL-XFEL에서 시도하기는 점점 더 어려워질 것이라고 우려됩니다.** 극히 제한된 실험 기회만이 주어지는 상황에서는 점점 더 성공확률이 높은 안전한 연구를 선택할 수밖에 없으며, 이는 PAL-XFEL의 존재 의의와는 맞지않는 안타까운 상황이 될 수 있다고 생각합니다.

이동렬 (송실대학교 물리학과)

하지만, 이러한 기대와 다르게 현실은 **PAL-XFEL을 이용할 수 있는 기회가 너무 좁아서, 저처럼 XFEL을 이용한 연구실적이 없이 새롭게 진입하는 연구자에게는 그림의 떡이나 다름없는 상황입니다.** 반면, XFEL실험 방법이 상대적으로 잘 정립되어 가는 분야에서는 새로운 연구자의 진입이 급증하여 매년 국내 연구자들의 빔타임 경쟁률이 치열해지고 있습니다. 만약 이런 상황이 지속된다면 저와 같은 진입시도 이용자들은 결국 PAL-XFEL을 외면할 수 밖에 없고 소위 그들만의 리그로 전락할 수 있습니다.

PAL-XFEL 빔라인증설 촉구 이용자 의견서 요약 (2)

김경현 (고려대학교 생명정보공학과)

제 연구팀의 경우 그동안 빔타임을 받아왔지만, 처음으로 2022년 전반기 빔타임을 받지 못해 큰 충격에 쌓여 있습니다. 왜냐하면 2022년 전반기 6개월을 XFEL 실험을 하지 못하는 상태로 기다리고 있어야 하기 때문입니다. 이런 상황에서 PAL-XFEL에서 빔타임 확보를 위한 두번째 경엑스선 FEL 라인 구축은 외국과의 경쟁에서 최소한 유리한 고지를 선점할 수 있는 매우 시기 적절한 일이라고 하지 않을 수 없습니다. PAL-XFEL의 빔라인증설을 통해 제공할 수 있는 빔타임을 늘릴 수 있게 된다면, 한국이 세계 연구흐름을 주도하며 다양한 과학주제에 대한 연구를 선점할 수 있는 기반이 마련될 것으로 확신합니다.

김범준 (포항공과대학교 물리학과)

PAL-XFEL 빔라인 증설은 저의 연구뿐만 아니라 물리, 화학, 재료 등 여러 분야에 걸쳐 국내 과학기술 발전에 크게 기여할 것으로 확신합니다. PAL-XFEL은 세계에서 몇 군데 밖에 운영 안하는 최첨단 시설입니다. PAL-XFEL은 한국이 세계 연구 흐름을 주도하며 다양한 주제에 대한 연구를 선점하는 기반입니다. 초기 건설에 필요한 막대한 예산에 비하면 빔라인 증설은 그 일부분의 작은 예산으로 빔타임 효율을 2배 이상 늘릴 수 있는 매우 가성비 좋은 사업이 될 것입니다. PAL-XFEL 이용자의 일원으로 빔라인 증설을 적극 지지합니다.

이동일 (연세대학교 화학과)

제 연구 그룹은 지난 3월 PAL-XFEL에서 금 나노클러스터 여기상태의 구조분석 연구를 수행하였고, 수집한 데이터를 바탕으로 매우 흥미로운 예비 결과를 얻을 수 있었습니다. 추가 실험을 통해 결과를 확인하고 논문으로 정리할 계획을 가지고 있었습니다. 하지만 지난 두차례의 빔타임 신청에서 선정이 되지 않아 연구가 진행되고 있지 않는 어려움을 겪고 있습니다. 이런 상황에서 최소한 PAL-XFEL에서 절대적 빔타임을 추가적으로 늘리지 않는다면 이러한 빔타임 부족 상황은 더욱더 심해질 것입니다. 따라서, 조속한 시일 내에 빔라인 증설을 통해 더 많은 실험 시간과 기회를 제공해야만 합니다.

이용재 (연세대학교 지구시스템학과)

PAL-XFEL의 경우 고체 물질의 연구에 특화된 경엑스선 빔라인이 하나밖에 없기 때문에 우수한 빔 특성을 활용하고자 하는 국외의 수요가 증가해가는 상황 속에 국내 이용자들의 활용 기회는 더욱더 제한적이 되어가는 실정입니다. 다행히 빔타임을 배정받아 실험을 진행한 경우에도 보다 우수한 결과물로 인정받기 위해서는 어느 정도 지속적인 활용이 필요한 경우들이 많습니다. 하지만 하나밖에 없는 빔라인을 지속적으로 활용하여 연구 결과의 완성도를 높이고자 하는 시도는 새로운 연구를 도전해보고자 하는 여러 이용자들의 기회와 필요 이상의 경쟁을 초래하게 됩니다.