

PAL-XFEL 현황보고

허훈 부장 (XFEL 가속장치부)
엄인태 부장 (XFEL 빔라인부)

2023.10.12(목)



XFEL가속장치부 현황

PAL-XFEL 발전 이력

ARTICLES

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

nature
photonics

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

Heung-Sik Kang^{1*}, Chang-Ki Min¹, Hoon Heo¹, Changbum Kim¹, Haeryong Yang¹, GyuJin Kim¹, Inhyuk Nam¹, Soung Youl Baek¹, Hyo-Jin Choi¹, Geonyeong Mun¹, Byoung Ryul Park¹, Young Jin Suh¹, Dong Cheol Shin¹, Jinyul Hu¹, Juho Hong¹, Seonghoon Jung¹, Sang-Hee Kim¹, KwangHoon Kim¹, Donghyun Na¹, Soung Soo Park¹, Yong Jung Park¹, Jang-Hui Han¹, Young Gyu Jung¹, Seong Hun Jeong¹, Hong Gi Lee¹, Sangbong Lee¹, Sojeong Lee¹, Woul-Woo Lee¹, Bonggi Oh¹, Hyung Suck Suh¹, Yong Woon Parc¹, Sung-Ju Park¹, Min Ho Kim¹, Nam-Suk Jung¹, Young-Chan Kim¹, Mong-Soo Lee¹, Bong-Ho Lee¹, Chi-Won Sung¹, Ik-Su Mok¹, Jung-Moo Yang¹, Chae-Soon Lee¹, Hocheol Shin¹, Ji Hwa Kim¹, Yongsam Kim¹, Jae Hyuk Lee¹, Sang-Youn Park¹, Jangwoo Kim¹, Jaeku Park¹, Intae Eom¹, Seungyu Rah¹, Sunam Kim¹, Ki Hyun Nam¹, Jaehyun Park¹, Jaehun Park¹, Sangsoo Kim¹, Soonam Kwon¹, Sang Han Park¹, Kyung Sook Kim¹, Hyojung Hyun¹, Seung Nam Kim¹, Seonghan Kim¹, Sun-min Hwang¹, Myong Jin Kim¹, Chae-yong Lim¹, Chung-Jong Yu¹, Bong-Soo Kim¹, Tai-Hee Kang¹, Kwang-Woo Kim¹, Seung-Hwan Kim¹, Hee-Seock Lee¹, Heung-Soo Lee¹, Ki-Hyeon Park¹, Tae-Yeong Koo¹, Dong-Eon Kim¹ and In Soo Ko¹

The hard X-ray free-electron laser at the Pohang Accelerator Laboratory (PAL-XFEL) in the Republic of Korea achieved saturation of a 0.144 nm free-electron laser beam on 27 November 2016, making it the third hard X-ray free-electron laser in the world, following the demonstrations of the Linac Coherent Light Source (LCLS) and the Spring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser (SACLA). The use of electron-beam-based alignment incorporating undulator radiation spectrum analysis has allowed reliable operation of PAL-XFEL with unprecedented temporal stability and dispersion-free orbits. In particular, a timing jitter of just 20 fs for the free-electron laser photon beam is consistently achieved due to the use of a state-of-the-art design of the electron linear accelerator and electron-beam-based alignment. The low timing jitter of the electron beam makes it possible to observe Bi(III) phonon dynamics without the need for timing-jitter correction, indicating that PAL-XFEL will be an extremely useful tool for hard X-ray time-resolved experiments.

nature
photonics

ARTICLES

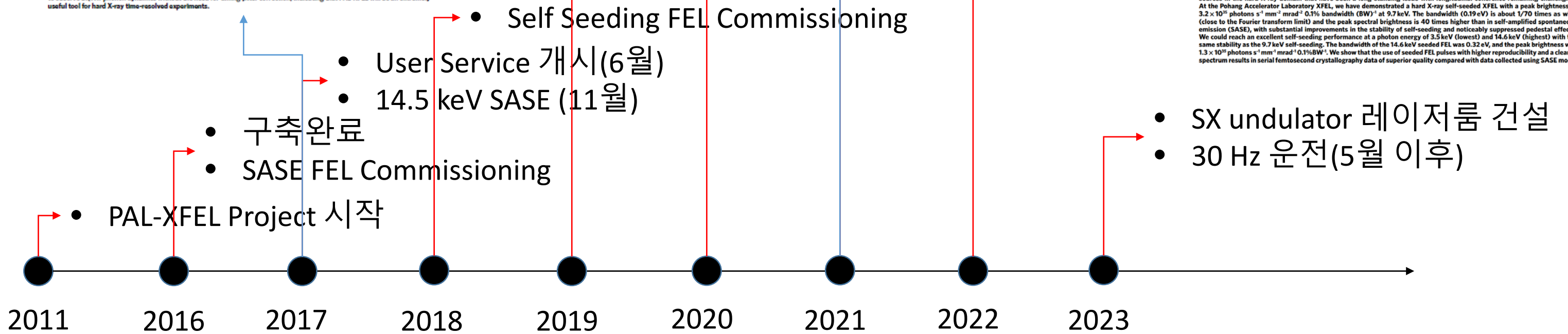
<https://doi.org/10.1038/s41566-021-00777-z>

Check for updates

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

Inhyuk Nam^{1,4}, Chang-Ki Min^{1,4}, Bonggi Oh^{1,4}, GyuJin Kim¹, Donghyun Na¹, Young Jin Suh¹, Haeryong Yang¹, Myung Hoon Cho¹, Changbum Kim¹, Min-Jae Kim¹, Chi Hyun Shim¹, Jun Ho Ko¹, Hoon Heo¹, Jaehyun Park¹, Jangwoo Kim¹, Sehan Park¹, Gisu Park¹, Seonghan Kim¹, Sae Hwan Chun¹, HyoJung Hyun¹, Jae Hyuk Lee¹, Kyung Sook Kim¹, Intae Eom¹, Seungyu Rah¹, Deming Shu², Kwang-Je Kim², Sergey Terentyev³, Vladimir Blank³, Yuri Shvyd'ko^{2,3}, Sang Jae Lee^{1,3} and Heung-Sik Kang^{1,3}

A self-seeded X-ray free-electron laser (XFEL) is a promising approach to realize bright, fully coherent free-electron laser (FEL) sources in the hard X-ray domain that have been a long-standing issue with longitudinal coherence remaining challenging. At the Pohang Accelerator Laboratory XFEL, we have demonstrated a hard X-ray self-seeded XFEL with a peak brightness of 3.2×10^{25} photons $s^{-1} mm^{-2} mrad^{-2} 0.1\%$ bandwidth (BW) $^{-1}$ at 9.7 keV. The bandwidth (0.19 eV) is about 1/70 times as wide (close to the Fourier transform limit) and the peak spectral brightness is 40 times higher than in self-amplified spontaneous emission (SASE), with substantial improvements in the stability of self-seeding and noticeably suppressed pedestal effects. We could reach an excellent self-seeding performance at a photon energy of 3.5 keV (lowest) and 14.6 keV (highest) with the same stability as the 9.7 keV self-seeding. The bandwidth of the 14.6 keV seeded FEL was 0.32 eV, and the peak brightness was 1.3×10^{25} photons $s^{-1} mm^{-2} mrad^{-2} 0.1\%$ BW $^{-1}$. We show that the use of seeded FEL pulses with higher reproducibility and a cleaner spectrum results in serial femtosecond crystallography data of superior quality compared with data collected using SASE mode.



운전 현황

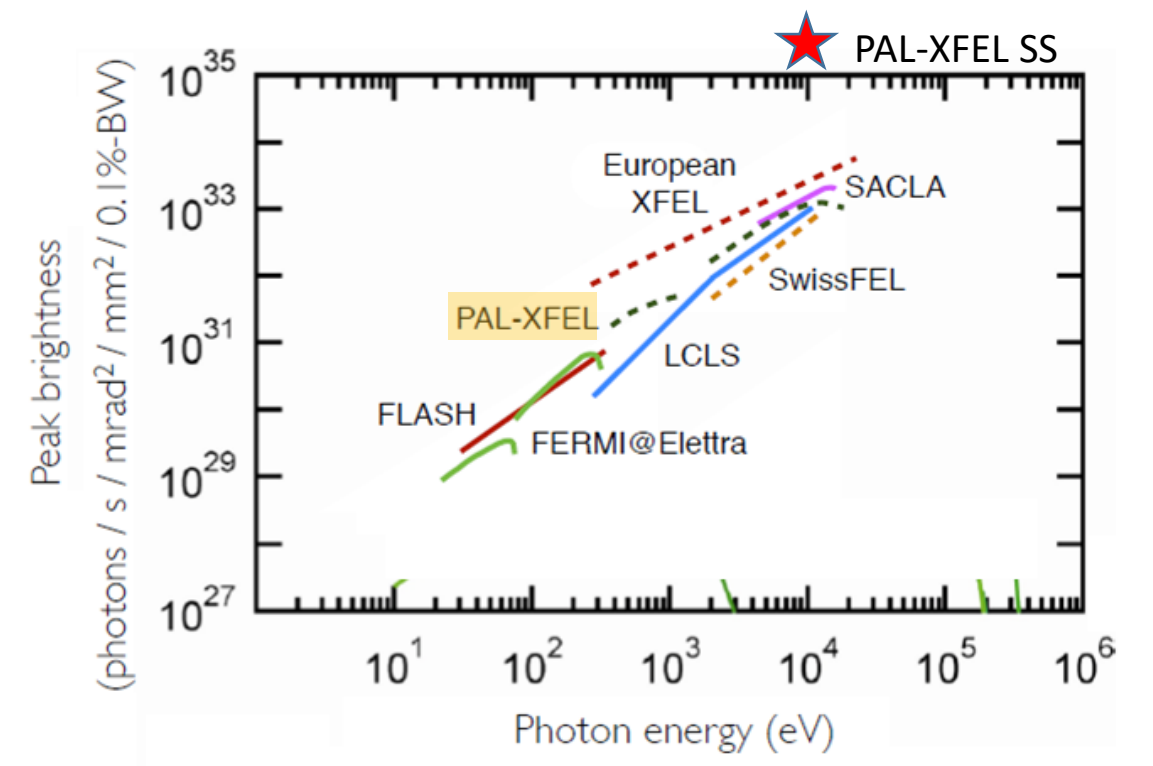
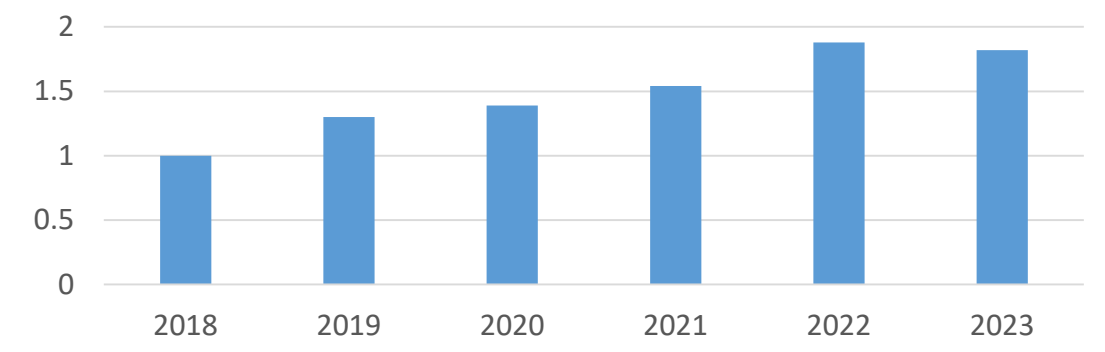
❖ FEL 성능 고도화 달성

- SASE FEL photon range 확대 (2.4 keV ~ 20 keV, 300 eV ~ 1 keV)
- SASE FEL pulse energy 향상 (E-loss 1~2 mJ/pulse)
- Self Seeding FEL 성능 고도화
- Two-color FEL 유저 서비스 개시
- HX/SX FEL 동시 운전 성능 확보

❖ FEL 성능 안정화 및 Energy Scan 기능 완성

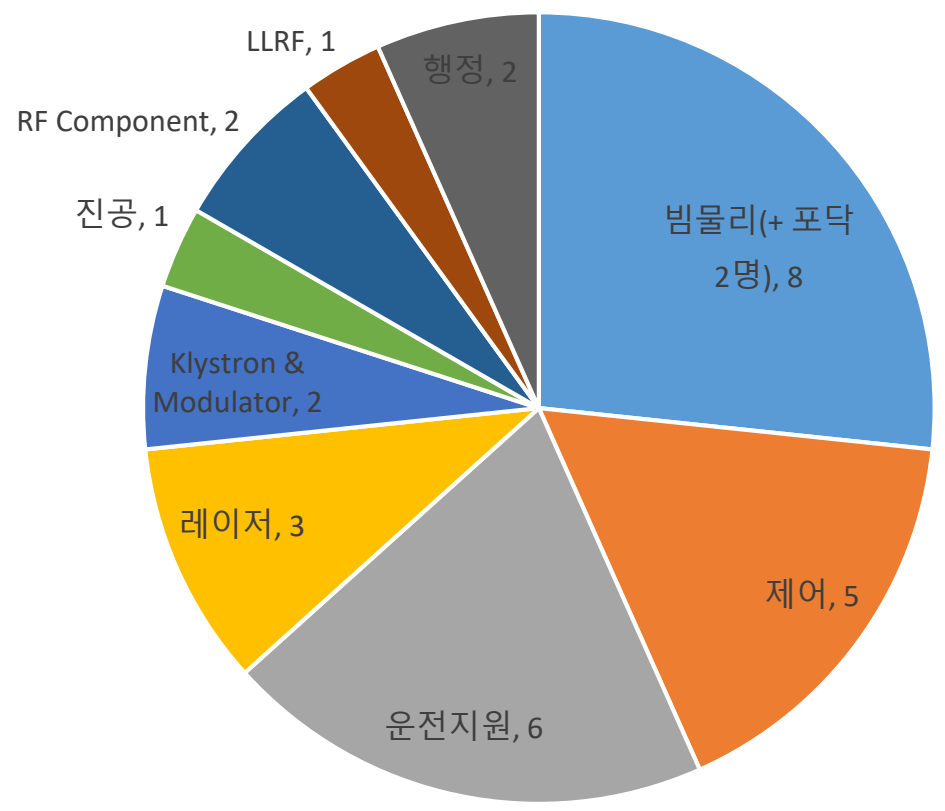
- Long term FEL drift 특성 개선
- FEL 튜닝 최적화 및 편의성 향상
- SASE 및 Self Seeding FEL Energy scan 기능 제공

연평균 제공 HX FEL Pulse Energy [mJ]



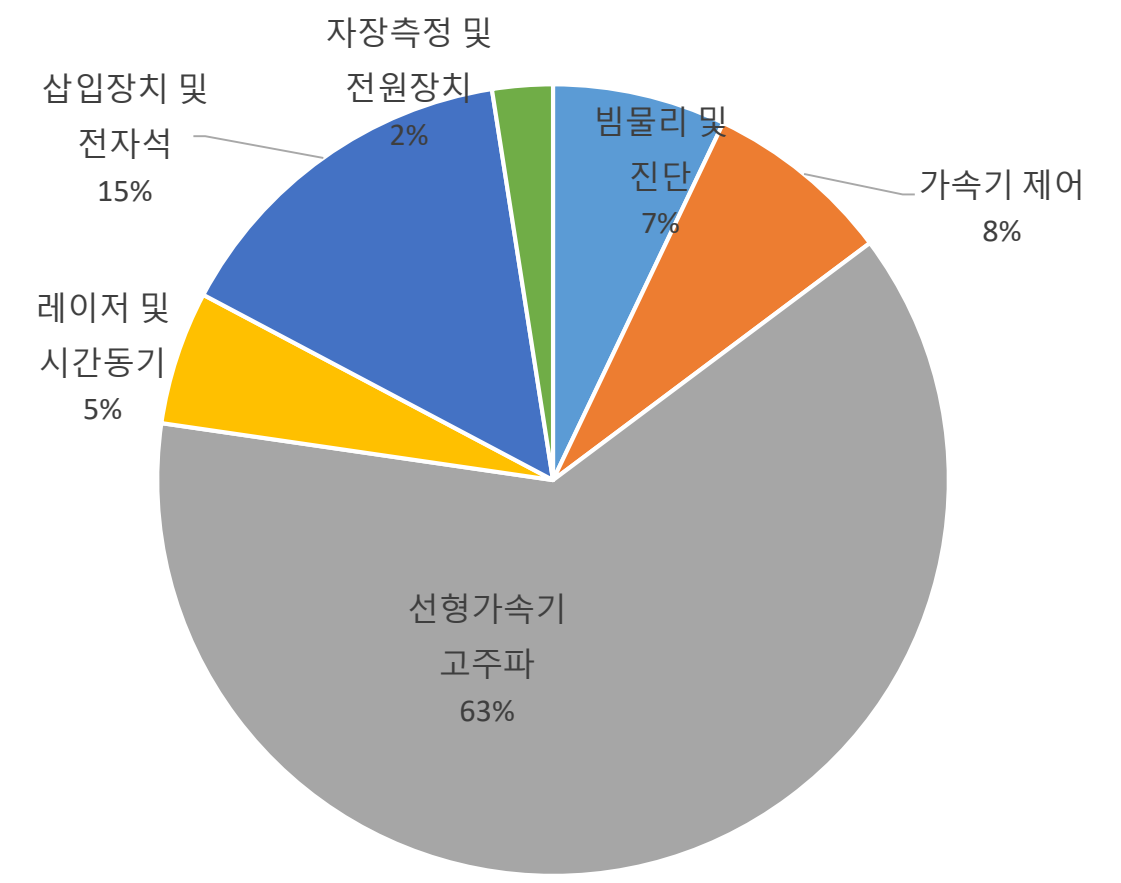
XFEL가속장치부 조직 현황

- ❖ 가속기제어팀
 - 가속기 운전 및 진단 제어장치 운용 및 R&D
- ❖ 선형가속기팀
 - 레이저, RF, 진공 등 운용 및 R&D



예산 현황

- ❖ XFEL 가속장치부 운영 사업비
 - 총 49.8억
 - 별도 PAL-XFEL 전력료 예산: 50억



운전 성능 유지 현안

❖ 단기 소모성 고가 장치 예비품 확보 현황

- Klystron tube 예비품 (55대 운용 12대 예비)
- Thyratron tube (55대 운용 32대 예비)

❖ 운전 연수 10년 도래에 따른 장치 유지 보수 수요 증가 대책

- 모듈레이터 및 각종 전자석 등 고가 장납기 부품에 대한 장기적인 유지 보수 계획 마련 필요
- 부품 및 장치의 단종 경우 대체품 시험 중
- 공급 업체 변동 및 소멸의 경우 대체 업체 협업
- 단기적으로 단종 대비 예비품 확보 계속
- 장기적으로 유사 사양의 대체품 또는 업체 발굴

성능 개선 및 기타 현안

❖ 증설 및 R&D

- 2nd Hard X-ray Line 구축 준비 시작
- UED 관련 시설 유지 보수
- Atto-second SX-FEL R&D (SX undulator 레이저룸 및 시설 구축 중)

❖ 대외 협력

- LLRF 2023 유치 (10/22~10/27)
- Machine Learning workshop 유치 (2024 년)
- EPICS meeting 준비 (2024 년)

❖ 소내 협력

- 4GSR 구축 사업
- PAL-EUV commissioning 지원

XFEL빔라인부 현황

PAL-XFEL 빔라인장치

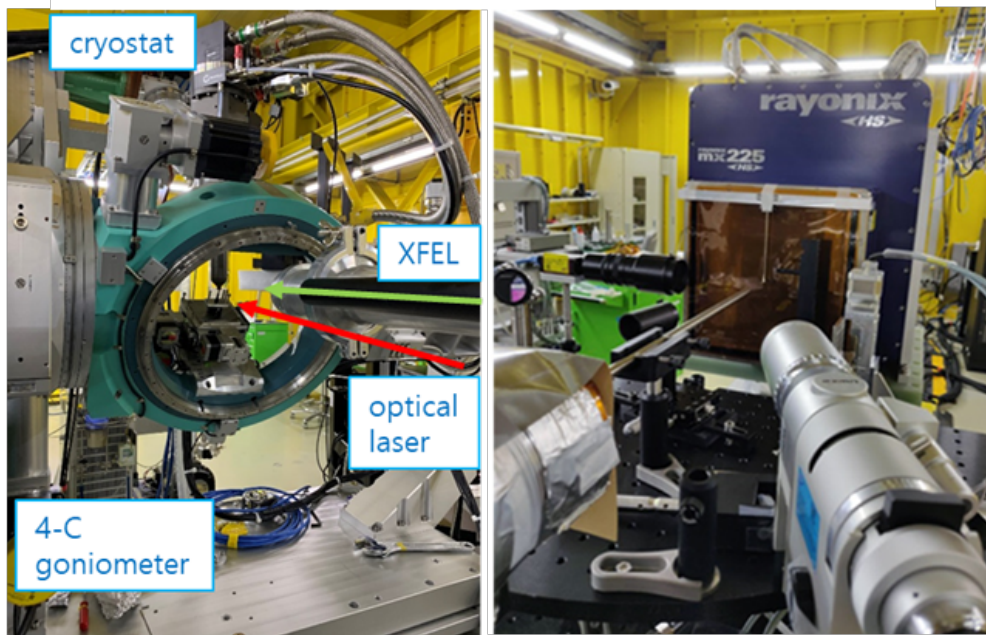
XSS (X-ray Scattering and Spectroscopy)

Instrumentations

Femtosecond X-ray Scattering (FXS)
 Femtosecond X-ray Liquidography (FXL)
 X-ray emission spectroscopies (XES)

Specifications

Focusing optics: Be CRL
 2-circle and 4-circle diffractometers
 Cryostream cryostat: 40 – 300 K
 Sample chamber for vacuum and gas conditions
 Liquid injector (100 um jet)



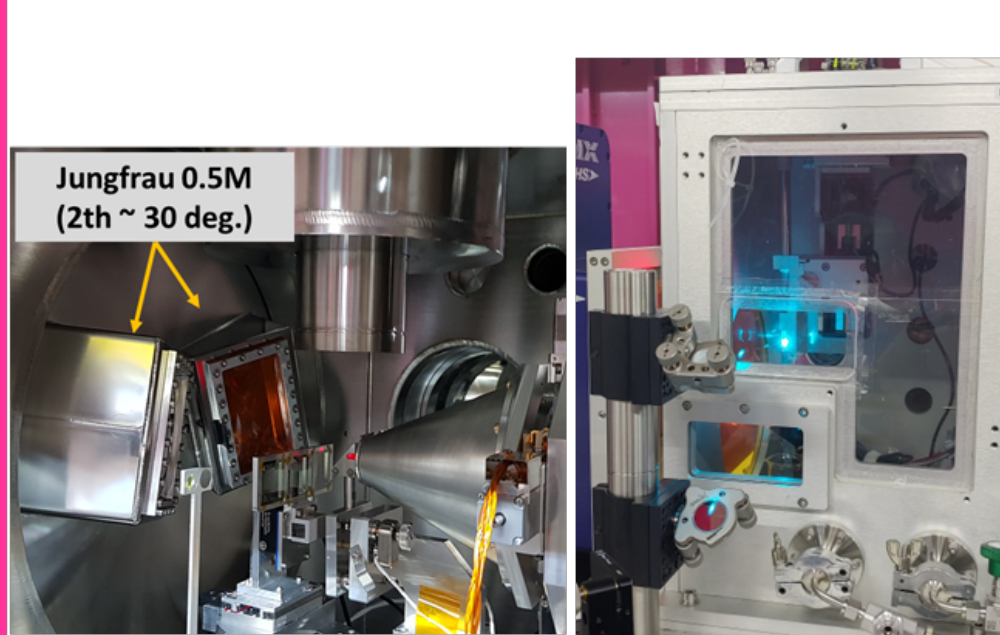
NCI (Nano Crystallography and coherent Imaging)

Instrumentations

Coherent X-ray Imaging / Scattering (CXI)
 X-ray Absorption Near Edge Spectroscopy (XANES)
 Serial Femtosecond Crystallography (SFX)
 Wide angle X-ray scattering (WAXS)

Specifications

Focusing optics: KB mirrors
 Dedicated sample chambers for CXI/SFX/XANES
 with vacuum or He environment
 tunable nanosecond laser for SFX experiments



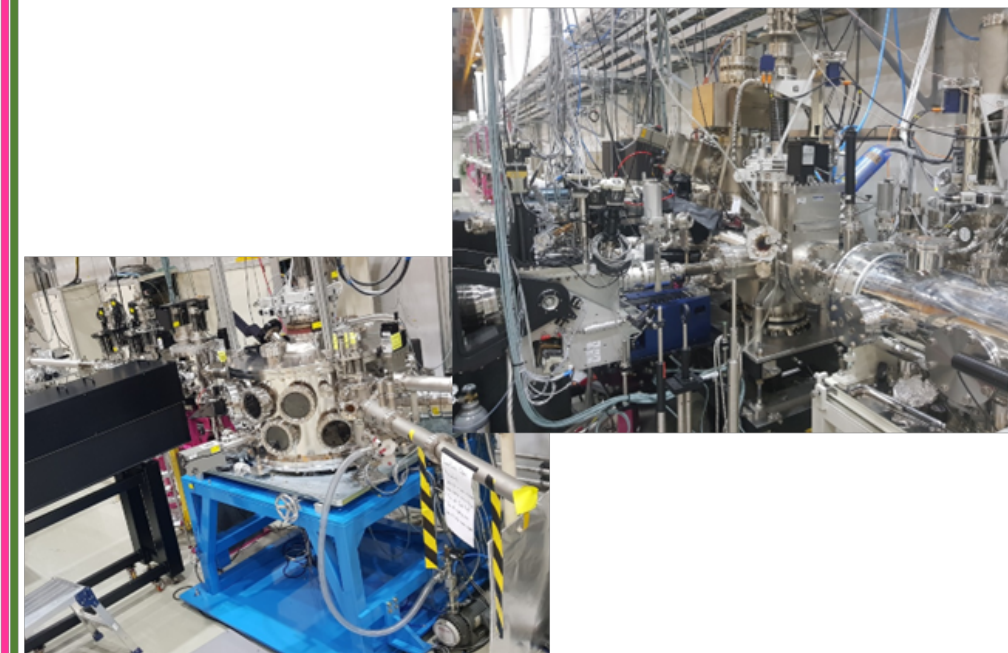
SSS (Soft X-ray Scattering and Spectroscopy)

Instrumentations

Resonant Soft X-ray Scattering (RSXS)
 X-ray Absorption/Emission Spectroscopy (XAS/XES)
 Fourier Transform Holography (FTH)

Specifications

6-axis manipulator with cryostat (RSXS)
 VLS grating for 200 – 1200 eV (XAS/XES)
 Ion/electron time-of-flight (XAS/XES)

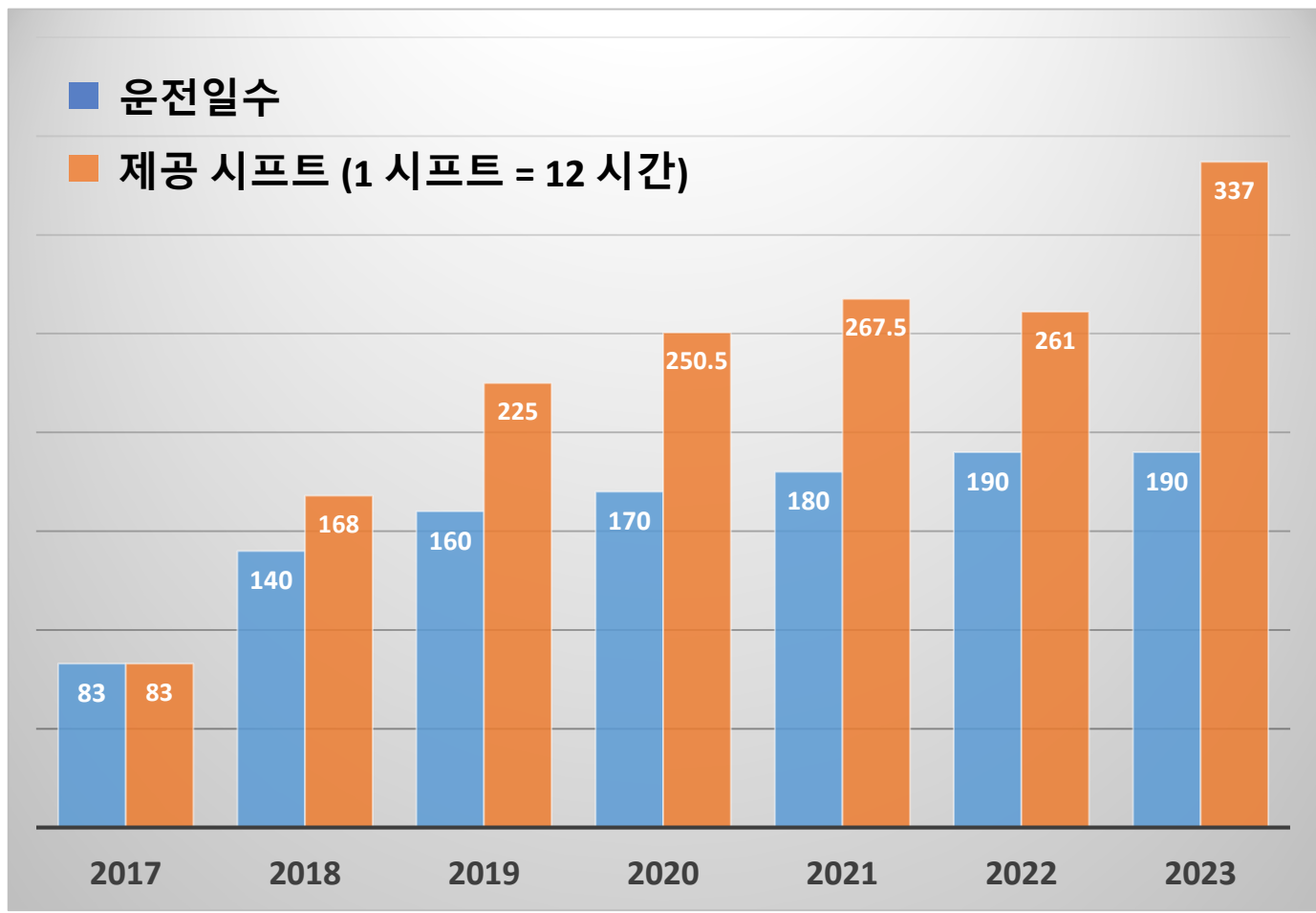


빔라인 주요 연구 분야 및 지원 실험 기법

| | HX | | SX |
|---|---|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | XSS | NCI | SSS |
| Research topics | Instrumentations | | |
| <p>Condensed matter physics and Material sciences</p> <ul style="list-style-type: none"> Thermal / Non-thermal melting dynamics Phase transitions Phonon / Lattice dynamics Spin/Charge/Magnetic properties | <p>FXS</p> <p>RIXS (RXES)</p> <p>Bragg-CDI</p> | <p>CXI</p> <p>WAXS</p> | <p>RSXS</p> <p>FTH</p> |
| <p>Chemical sciences</p> <ul style="list-style-type: none"> Bond dissociation / Formation / Isomerization Charge transfer / Recombination / Localization Chemical reaction / Catalytic reaction | <p>FXL</p> | <p>XANES</p> | <p>XAS/XES</p> |
| <p>Structural biology and Macromolecular dynamics</p> <ul style="list-style-type: none"> Protein ternary structure / Active site of enzyme / Ligand binding site Photo-induced / Mixing-induced macromolecular dynamics Structures at a molecular level | <p>.</p> | <p>SFX</p> | <p>.</p> |

PAL-XFEL 이용자빔타임 운영 통계

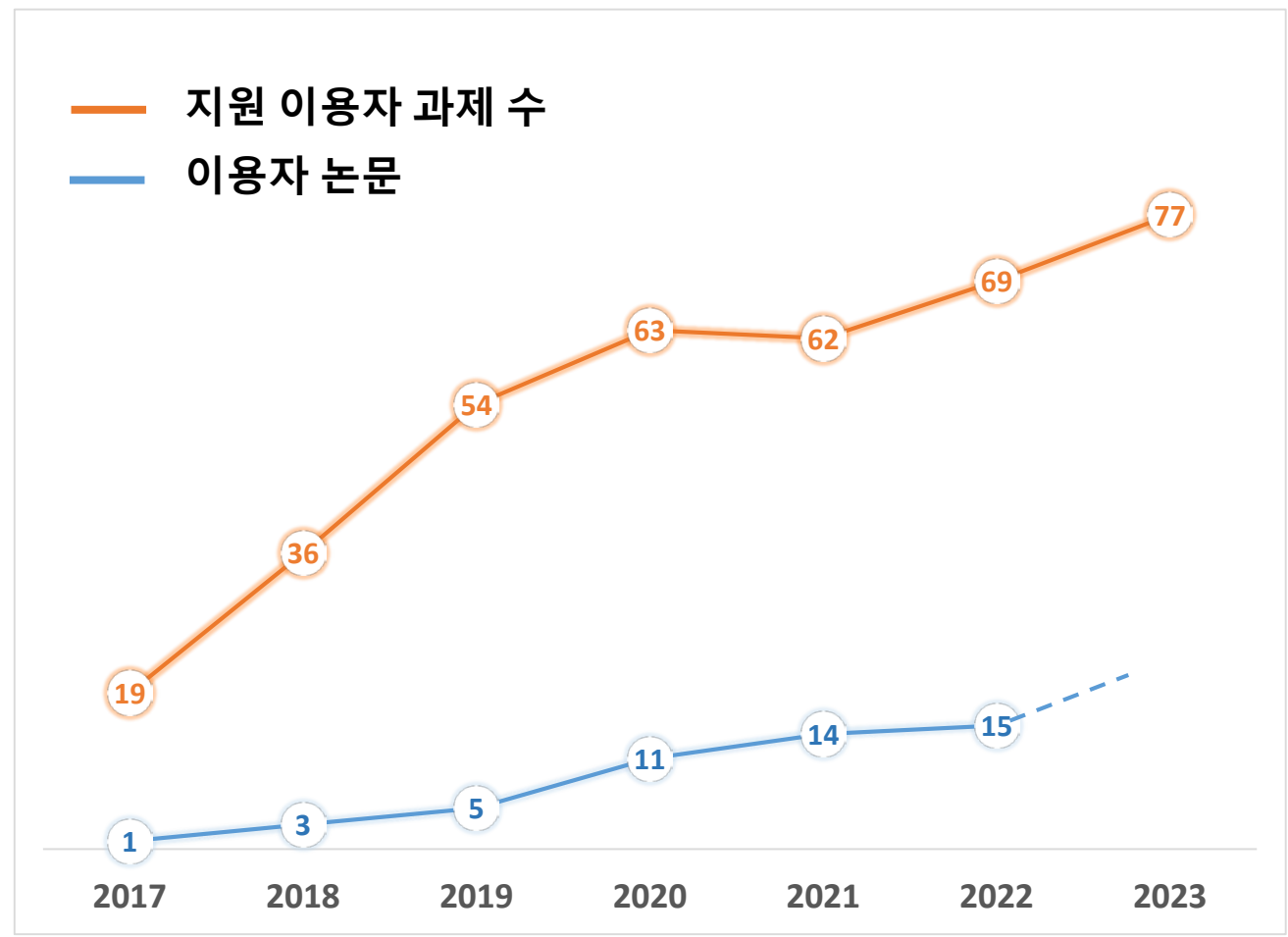
❖ 운전일수 / 제공 시프트 변동 추이



- 야간 빔타임 활용률 증가

| | 18' | 19' | 20' | 21' | 22' | 23' |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 야간 주간 | 20% | 40% | 47% | 49% | 37% | 77% |

❖ 지원 과제 수 / 빔라인 이용자 논문



- 2023년 하반기부터 경X선 24시간 지원 시작

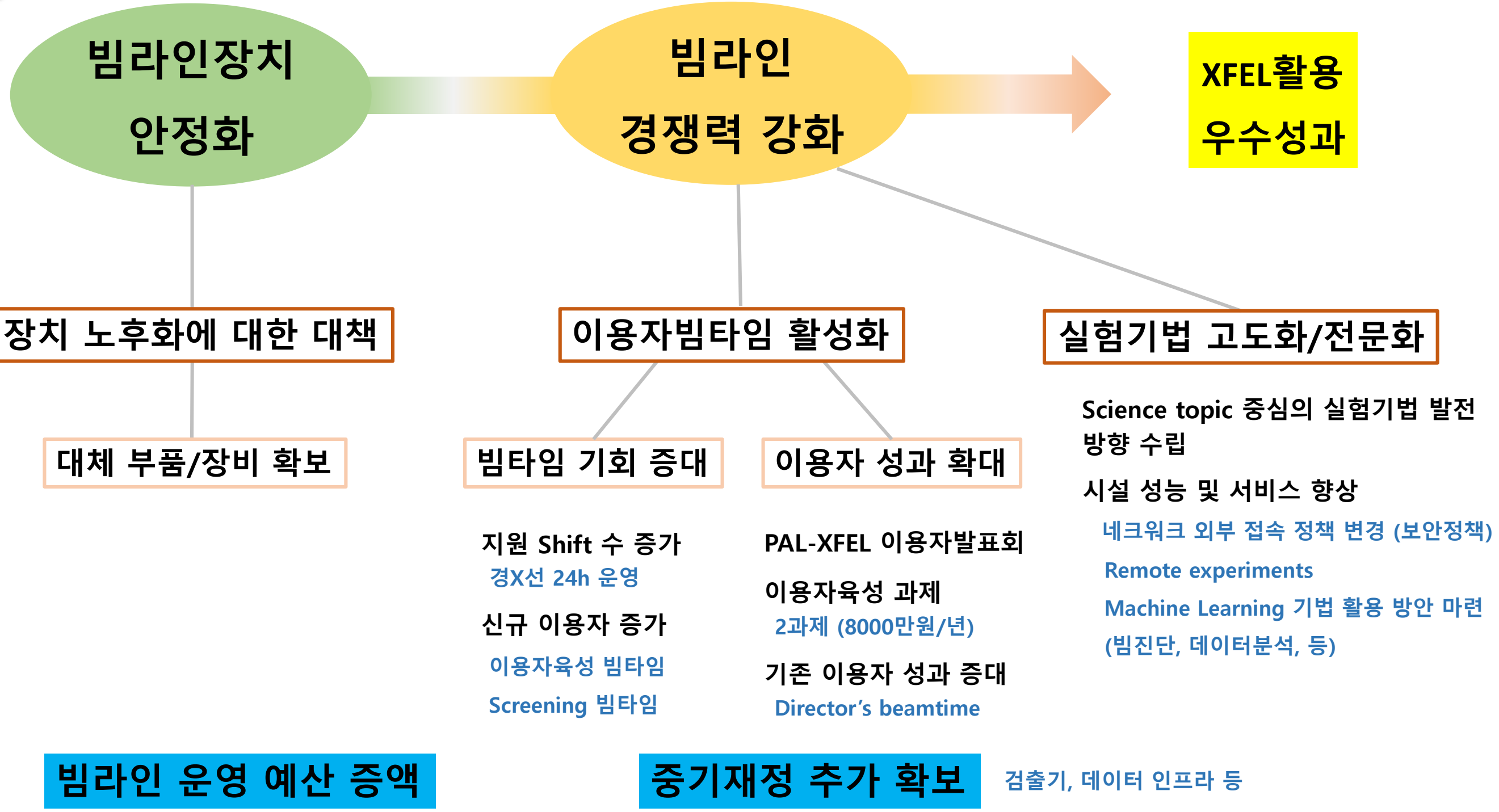
XFEL 빔라인 운영

빔라인 운영
기본 방향

운영현안

제시방안

필요사항



장치 노후화에 대한 대책

대체 부품/장비 확보

빔라인 운영 예산 증액

이용자빔타임 활성화

빔타임 기회 증대

- 지원 Shift 수 증가
경X선 24h 운영
- 신규 이용자 증가
- 이용자육성 빔타임
- Screening 빔타임

중기재정 추가 확보

이용자 성과 확대

- PAL-XFEL 이용자발표회
- 이용자육성 과제
2과제 (8000만원/년)
- 기존 이용자 성과 증대
Director's beamtime

실험기법 고도화/전문화

- Science topic 중심의 실험기법 발전
방향 수립
- 시설 성능 및 서비스 향상
- 네트워크 외부 접속 정책 변경 (보안정책)
- Remote experiments
- Machine Learning 기법 활용 방안 마련
(빔진단, 데이터분석, 등)

검출기, 데이터 인프라 등

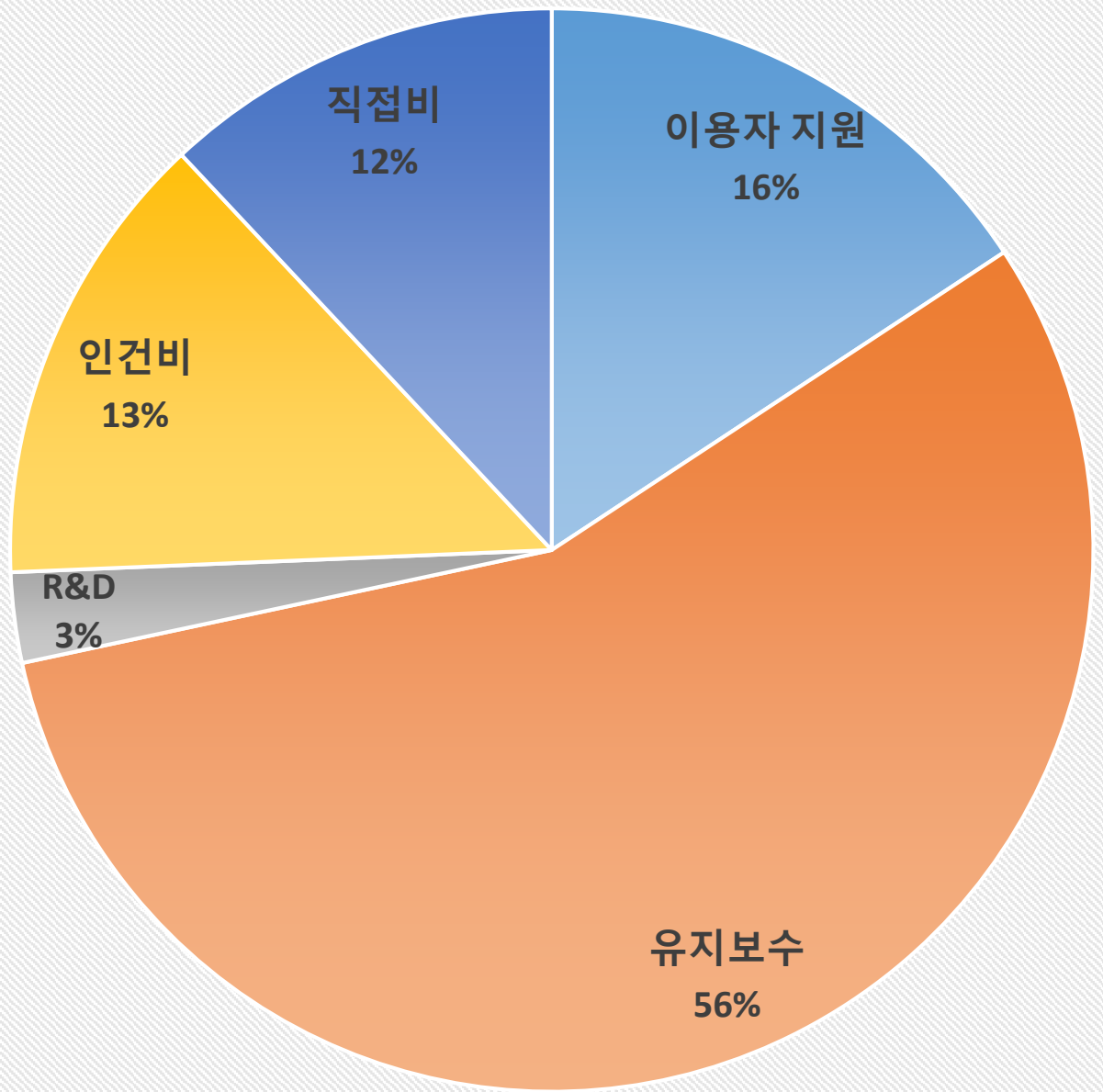
XFEL 빔라인 인력 운영 현황

| XFEL응용과학팀 (20명) | | 비고 |
|---|---|----------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> 인력 구성 박사연구원 16명 Postdoc 4명, (겸직 1: optics) | | 부장 1 팀장 2 휴직 1 |
| HX빔라인매니저 | 8 | |
| | FXS: 2 FXL : 2 CXI : 2 SFX : 2 | 팀장 1 휴직 1 |
| SX빔라인매니저 | 3 | |
| | XAS/XES : 2 RSXS : 1 | |
| 기타 | 레이저 3 DATA 1 UED 1 | 부장 1, 팀장 1 |

| XFEL장치개발팀 (14명) | | 비고 |
|---|-------------------------|----|
| <ul style="list-style-type: none"> 인력 구성 기술원 11명, 박사연구원 2명, Postdoc 1명, (겸직 1: DAQ) | | |
| 기계, 진공 | 3 | |
| 전기전자 | 1 | |
| 제어/DAQ | 4 (제어2, 네트워크1, IT 1) | |
| 검출기 | 2 | |
| 실험지원 | 3 (SFX 1, 레이저 2) | |

XFEL 빔라인 운영 예산 현황

2023년 빔라인부 예산 집행 현황



❖ 빔라인 연간 운영예산

- 총 1,188,500,000 원

(4세대이용자육성과제 1.6억, 빔타임심사비 0.4억 제외)

❖ 예산 항목

- 유지보수: 장치 및 시설 유지보수 비용

- 이용자 지원: 이용자 실험용 기자재 및 소모품 구매 비용

- R&D: 실험기법 및 실험장치 개발 비용

- 인건비: 외부 인건비 및 지원인력 인건비

- 직접비: 연구활동비

XFEL빔타임 지원 및 제공 현황

| 분기 | 2020-2nd | 2021-1st | 2021-2nd | 2022-1st | 2022-2nd | 2023-1st | 2023-2nd |
|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 정규빔타임 시프트 | 107 | 116 | 117 | 118 | 118 | 118 | 140 |
| 정규빔타임 제공률 | 35% | 35% | 34% | 31% | 39% | 40% | 41% |
| 지원자 수 (HX/SX) | 47 (36/11) | 47 (34/13) | 51 (37/14) | 53 (36/17) | 39 (28/11) | 41 (31/10) | 56 (43/13) |

비고

1 shift=12h
정규빔타임 제공일수
: 반기 당 70일

$$\text{제공률} = \frac{\text{제공시프트}}{\text{신청시프트}}$$

- 경x선 지원 과제 수가 연x선에 비해 3배 가량 많은 수준
- 전체 선정 과제 중 신규 이용자 과제 비율은 10~20% 수준
- XFEL 이용자층 확대를 위해 제공 빔타임 증가와 함께 국내 이용자 육성이 병행 되어야 함.

2023년도 PAL-XFEL 빔타임 운영 현황

| 연도 | 연간 운전일수 | 정규이용자 빔타임 | R&D 빔타임 |
|------|---------|----------------------|-------------------|
| 2023 | 190 | 140 (심사주관: KOSUA) | 50 (심사주관: PAL) |

* 장비가동 및 튜닝: 57일,
유지보수: 95일,
가속기 M/S: 10일,
no operation: 13일

배정 시프트

| 빔타임 구분 | 배정 시프트 | |
|--|--|--|
| | 상반기 | 하반기 |
| 정규이용자빔타임 (상하반기 각 70일) | HX 82 shifts (24h 운전 12일) SX 36 shifts | HX 104 shifts (24h 운전 34일) SX 36 shifts |
| R&D빔타임 (상반기 23일, 하반기 27일) | R&D: 12일 (12 shifts) 빔라인 M/S: 11일 (17 shifts) | Director's beamtime: 9일 (18 shifts) 잠재적이용자발굴: 6일 (12 shifts) 빔라인 실험 기법개발: 3일 (6 shifts) Screening 빔타임: 2일 (4 shifts) 튜토리얼 빔타임: 0.5일 (1 shift) 빔라인 M/S: 6.5일 (13 shifts) |

R&D빔타임 프로그램 다양화

감사합니다

