

SPring-8 における X線分光ビームライン群の再編・高度化計画

2026年3月3日 (火)

公益財団法人 高輝度光科学研究センター (JASRI)

分光・イメージング推進室

河村 直己

片山 真祥

世界の第4世代大型放射光施設 (4G-LSR)

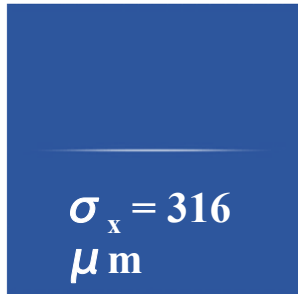
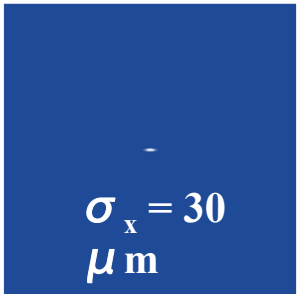
・ 次世代光源の主要国の状況

- ・ 電子ビームを多段階で曲げていくMBAを採用 → 極低エミッタンス光源
- ・ ほとんどが 6 GeV リング + 200 mA → 光源性能の差が小さい

施設	国	運用開始	電子エネルギー (GeV)	リング長 (m)	蓄積電流 (mA)	MBA	エミッタンス (pm·rad)	備考 (XAFS・顕微分光観点)
APS-U	米国	2024~	6	1100	200	H7BA	42	高輝度・高コヒーレンス micro/nano-XAFS、XES/HERFD を強力に推進
SPring-8-II	日本	2028~	6	1436	200	5BA	50	高エネルギー硬X線に強み 高効率XAFS・分光イメージング基盤
PETRA IV	ドイツ	2028~	6	2300	200	H6BA	20	超低エミッタンス 次世代nano-XAFS・コヒーレント手法 の最前線
ESRF-EBS	フランス	2020~	6	844	200	HMBA	130	世界初の4GLSR TXM-XANES・nano分光の先行事例 が豊富
HEPS	中国	2025~	6	1360	200	7BA	60	北京 材料・触媒XAFSを重視、多BL展開
K4GSR	韓国	2029~	4	800	200?	H7BA	62	PAL主導 PLS-II後継、nano分光・イメージング 重視

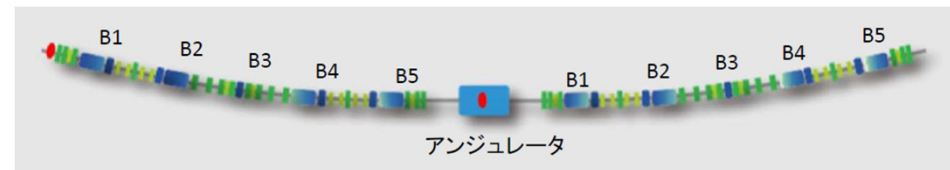
次世代光源に向けた加速器設計・開発

- 5BA + 6 GeV + 永久磁石等
→ 約100倍明るい光を約半分の電力で実現

	SPring-8	SPring-8-II
電子エネルギー (GeV)	8	6
蓄積電流 (mA)	100	200
電子ビームサイズ (発光点)	 $\sigma_x = 316 \mu\text{m}$	 $\sigma_x = 30 \mu\text{m}$



SPring-8: 2BA



SPring-8-II: 5BA

現状より100倍以上明るい世界トップ性能を大幅な省エネと両立させ省コストで実現

世界トップ性能

- 輝度の劇的な向上 (長尺アンジュレータにより輝度世界一)
- 極めて明るい高エネルギーX線の生成 (100倍以上)
- 世界トップのナノビーム・コヒーレント利用技術

加速器テクノロジー

- マルチバンドアクロマット (MBA) 技術による極低エミッタンス
- 極短周期アンジュレータ
- SACLA 線形加速器からのビーム入射

省エネ

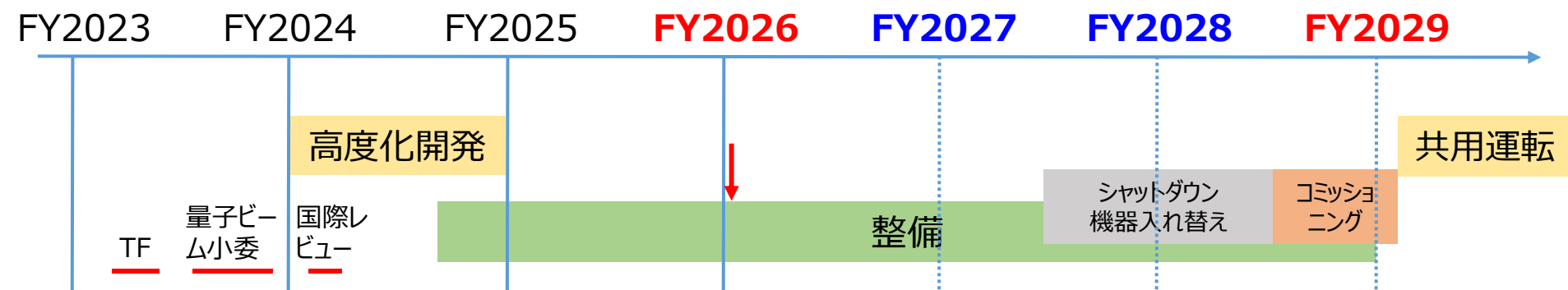
- 加速器エネルギーの低減 (8 GeV → 6 GeV)
- 偏向部の永久磁石化
- 冷却系の負荷低減
- 既存入射器の停止

世界最高性能 (A) と サステナブルな施設 (B) の二兎を追う

- | | |
|--|--|
| <p>(A1) 5BAラティス + 6 GeV
→ 安定的な極低エミッタンス (~110 pm·rad) の実現</p> <p>(A2) 新型のコンパクト・短周期真空封止アンジュレータ (IVU-II)
→ 高エネルギー・高輝度X線の生成</p> <p>(A3) 30m長直線部 (4箇所) の活用
✓ ダンピングウィグラー (最大2箇所) によるエミッタンスの低減 (~50 pm·rad)
✓ 長尺アンジュレータによる世界最高輝度の実現</p> <p>(A4) 世界最高水準のX線光学系・検出器</p> <p>(A5) 偏向磁石BL: 硬X線プロダクションBLとしての活用</p> | <p>(B1) 加速器: 6 GeV + 偏向磁石の永久磁石化
→ 省エネ</p> <p>(B2) 施設系インフラの最適化による省エネ
✓ 冷却系の負荷低減
✓ 液体窒素循環システム</p> <p>(B3) SACLA入射
✓ 高品質な電子ビーム入射
✓ 線形加速器・シンクロトロン¹の廃止</p> |
|--|--|

SPring-8-II: スケジュール

- **整備期間:** FY2024~FY2028 (R6補正予算~)
 - コンポーネントの受入・アライメントのためのスペース整備
→ 線形加速器棟の利用, 中尺実験施設II棟の建設
- **シャットダウン:** FY2027後半~1年間
 - 主として機器の入れ替え
- **利用運転:** FY2029~
 - コミッショニング後に利用開始



4G-LSR & 4G-MSR

• 第四世代放射光施設

- 硬X線領域: SPring-8-II
- 軟X線領域: NanoTerasu

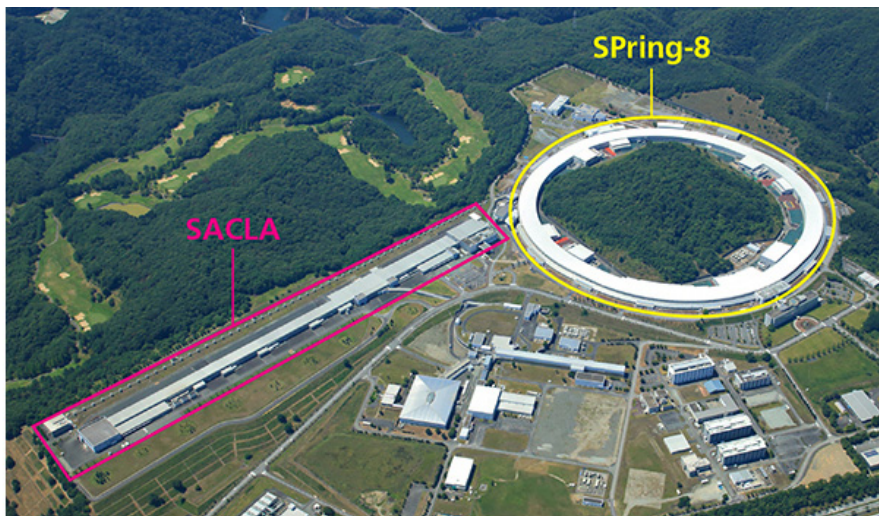
SPring-8-II と NanoTerasu は相補的な関係

SPring-8-II 特設サイト:
<https://new.spring8.or.jp/index.php/component/content/article/829>

6 GeV

電子エネルギー

3 GeV



硬X線 (HX)

X線エネルギー

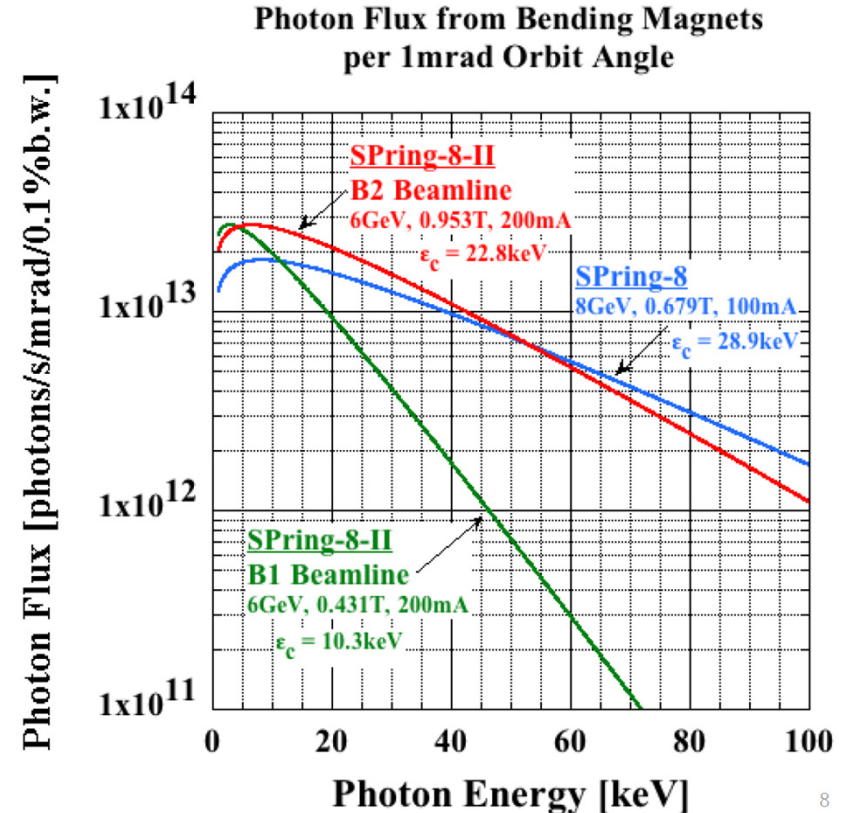
軟X線 (SX)

SP8-II 分光BM-BL群: 光源

• 偏向電磁石 BL 群 → MBA 化 → 偏向(永久)磁石 BL 群

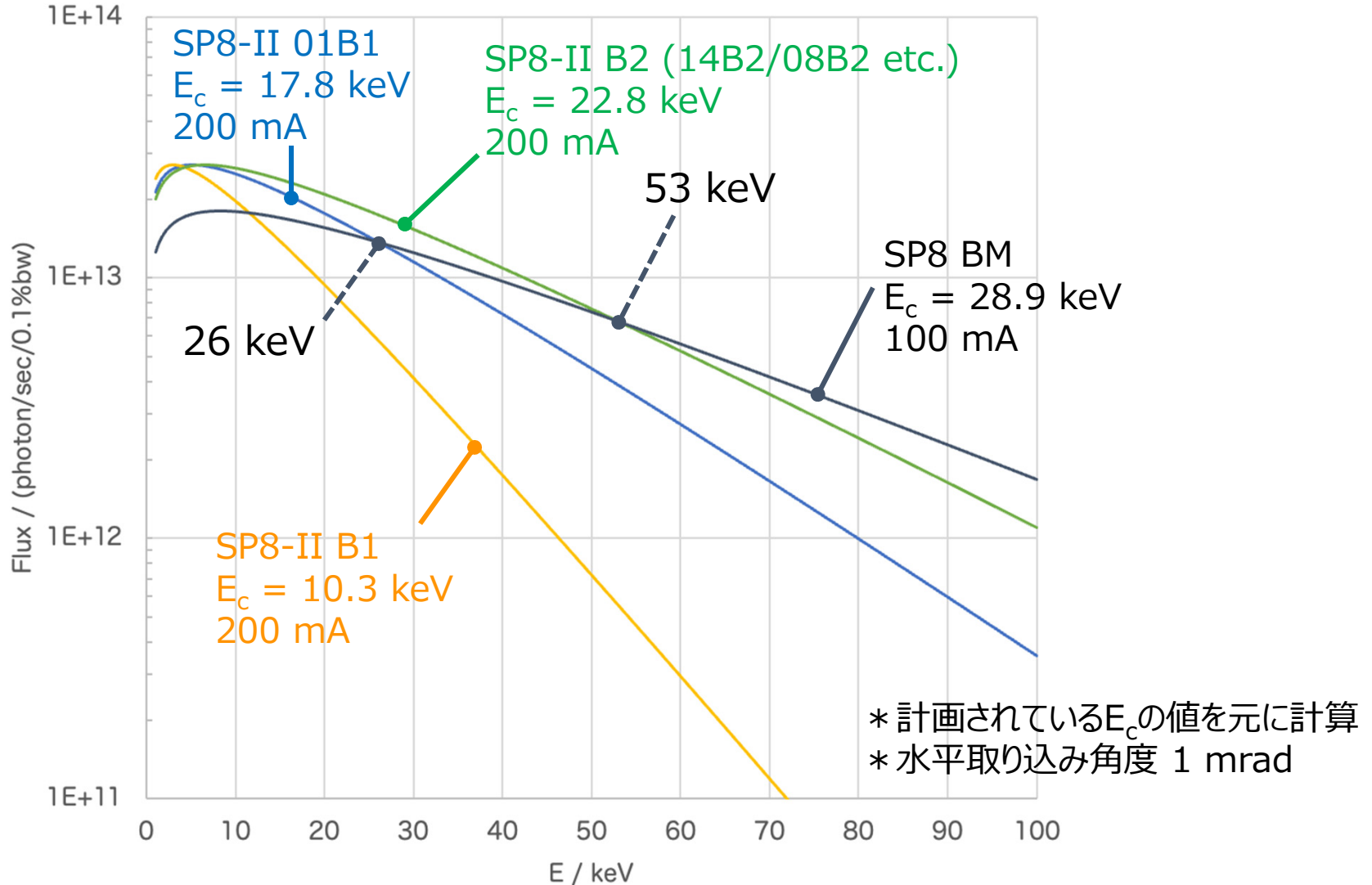
- 諸外国: すべての BM の磁場を弱くすることでエミッタンスを小さくしている
- SP8-II: **B2 相当ラインの磁場を強めに設定**できるようにラティスを工夫
→ 既存の B2-BL をほぼ活かしながら低エミッタンスを実現
 $E_c = 28.9 \text{ keV @ 8 GeV}$
→ **22.8 keV @ 6 GeV**
- B1 相当ラインの磁場は弱い
 $E_c = 10.3 \text{ keV @ 6 GeV}$
→ 20 keV 以下の利用がメイン

- 例外: 01B1 (入射点に近い)
- ✓ 光軸変化はほとんどない (2.5 mm 水平にシフト)
 - ✓ $E_c = 17.8 \text{ keV}$
 - ✓ 最大水平ビームサイズ: 42 mm @ 40 m



SP8-II 分光BM-BL群: BL08B2

SPring-8-II における BM-BL の光子フラックス



・汎用 XAFS ビームライン: BL01B1 & BL14B2



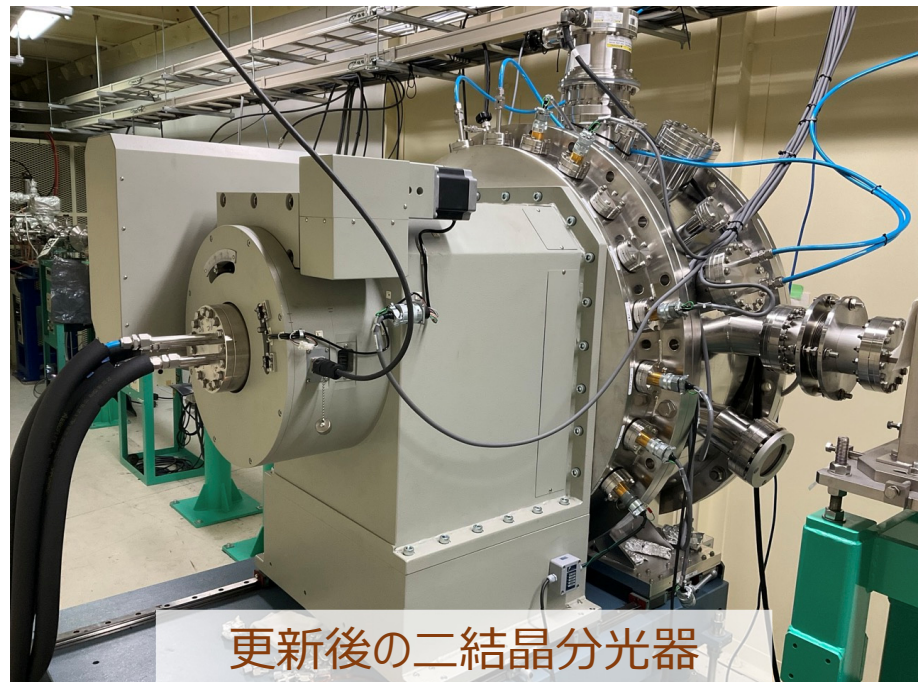
BL01B1 XAFS I



BL14B2 XAFS II

【装置整備関連】

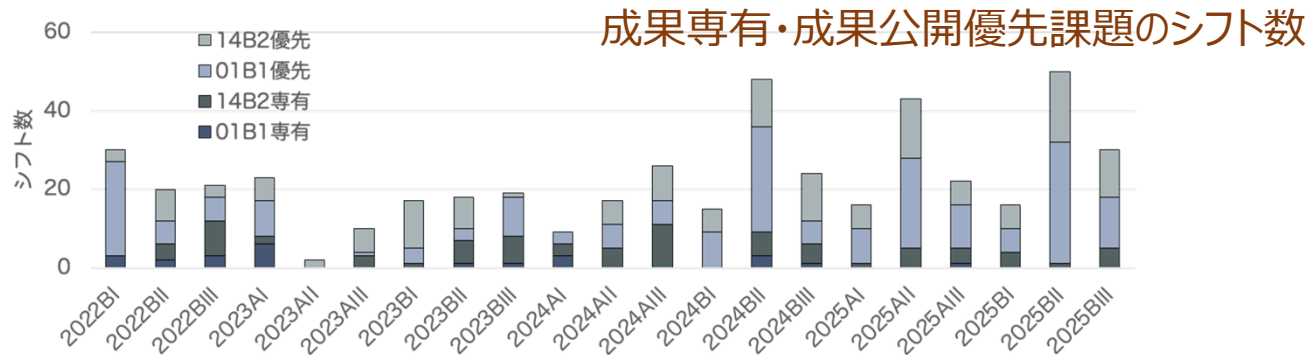
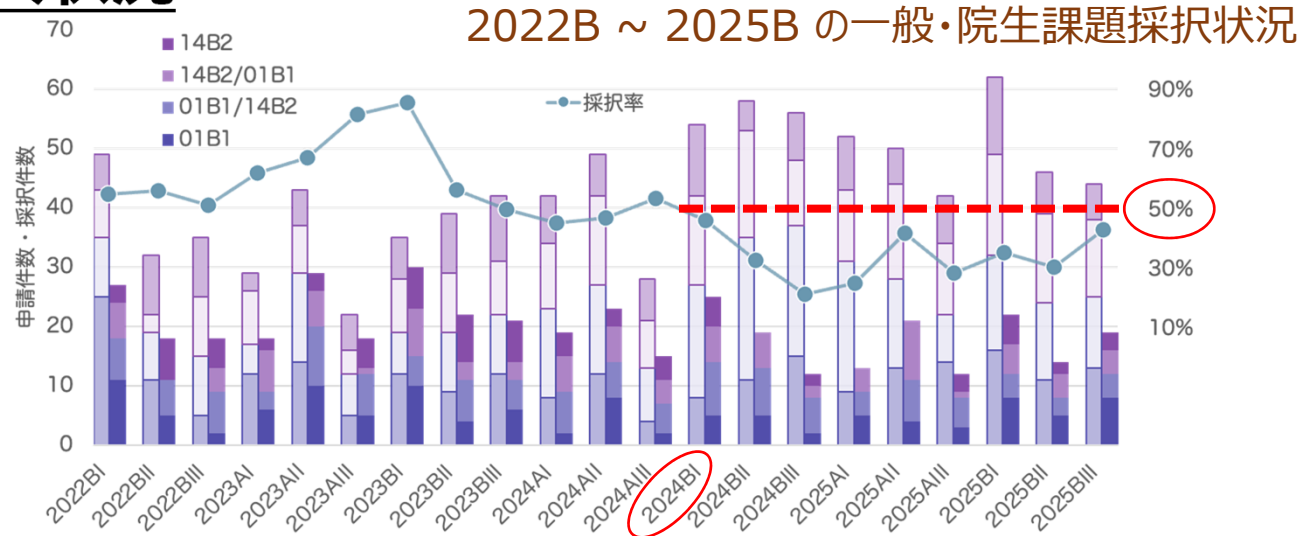
- 2025夏にBL14B2の二結晶分光器を並進切替型 (111 & 311) に更新



更新後の二結晶分光器

- BL01B1の36ピクセルGe SSDは修理中
- BL14B2のXRD用PILATUSは代替機で運用中

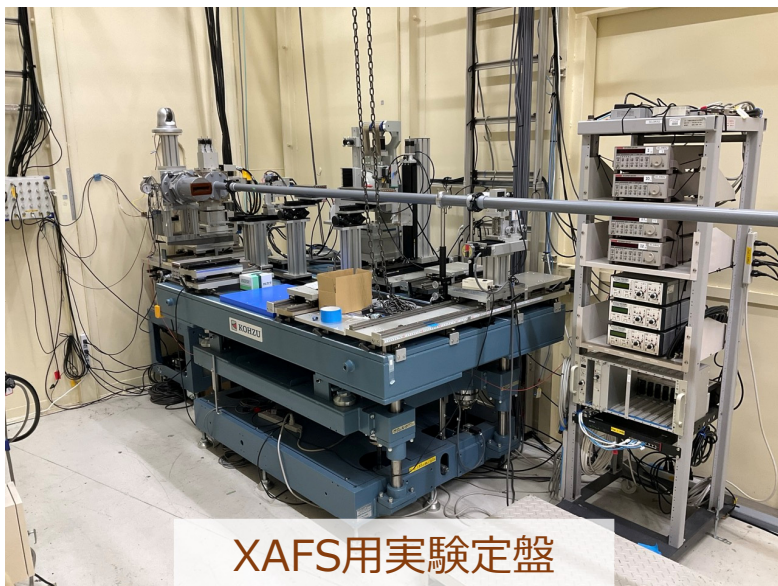
課題受入状況



- 2022B期から01B1で年6回募集・14B2での学術利用を開始
- 2024B期から採択率50%を割り続けており、2025A・B期の一般課題・大学院生課題の採択率は**34%**
- 海外機関からの申請は**約30%程度**

• 自動XAFSステーションの整備 @ BL08B2 (理研BL)

- ✓ 汎用 XAFS BLs の混雑緩和を目的に BL08B2 (旧 兵庫県/現 理研BL) に XAFS ステーションを整備
- ✓ **自動測定に特化**したシステムを構築
- ✓ **代行測定** (XAFS) および一般課題 (**汎用 XAFS 分野**) を受け入れる方向で調整中



XAFS用実験定盤

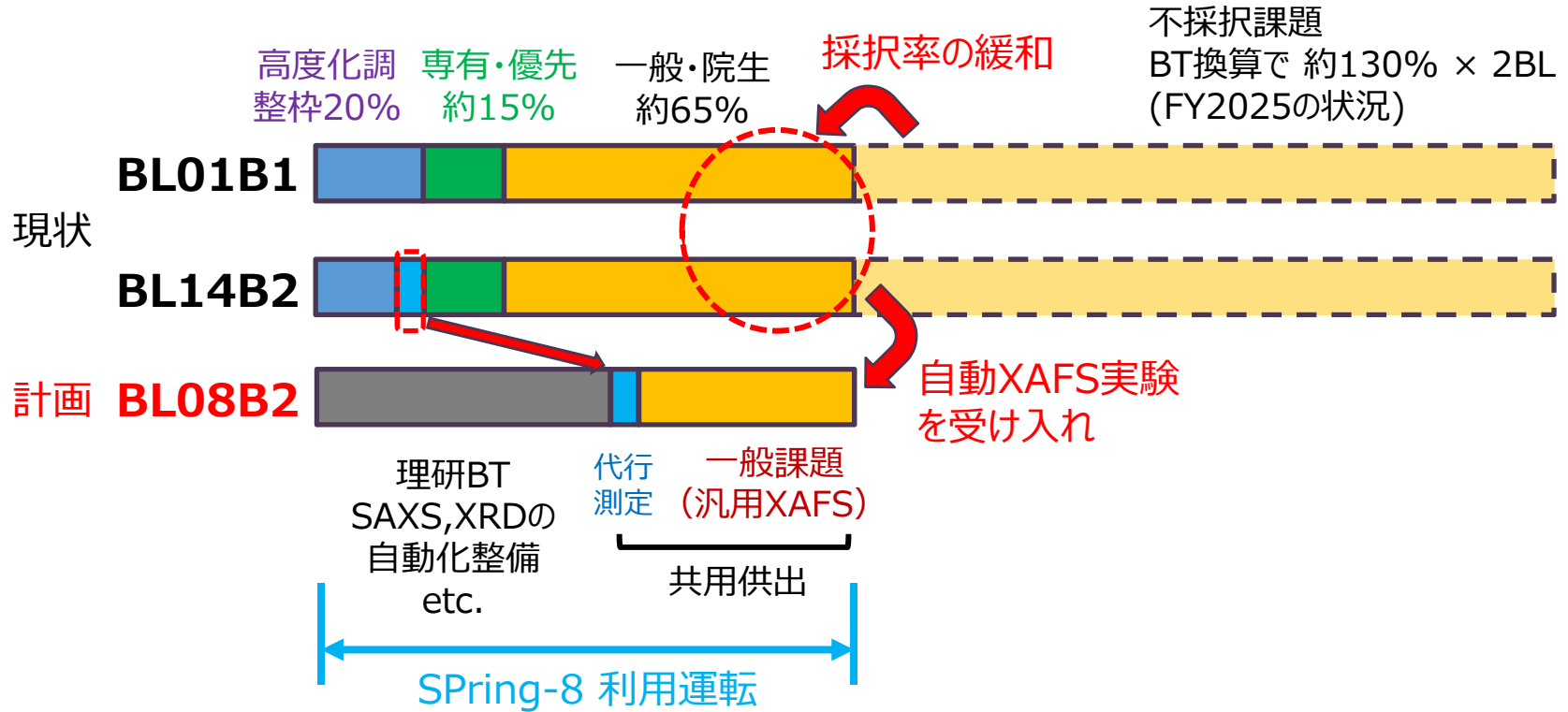
【FY2025進行中】

- ✓ 傾斜架台の制御用PLCを改修
- ✓ 自動試料交換システムを導入
- ✓ 共通化したXAFS計測系に更新

【春期停止期間中の作業予定】

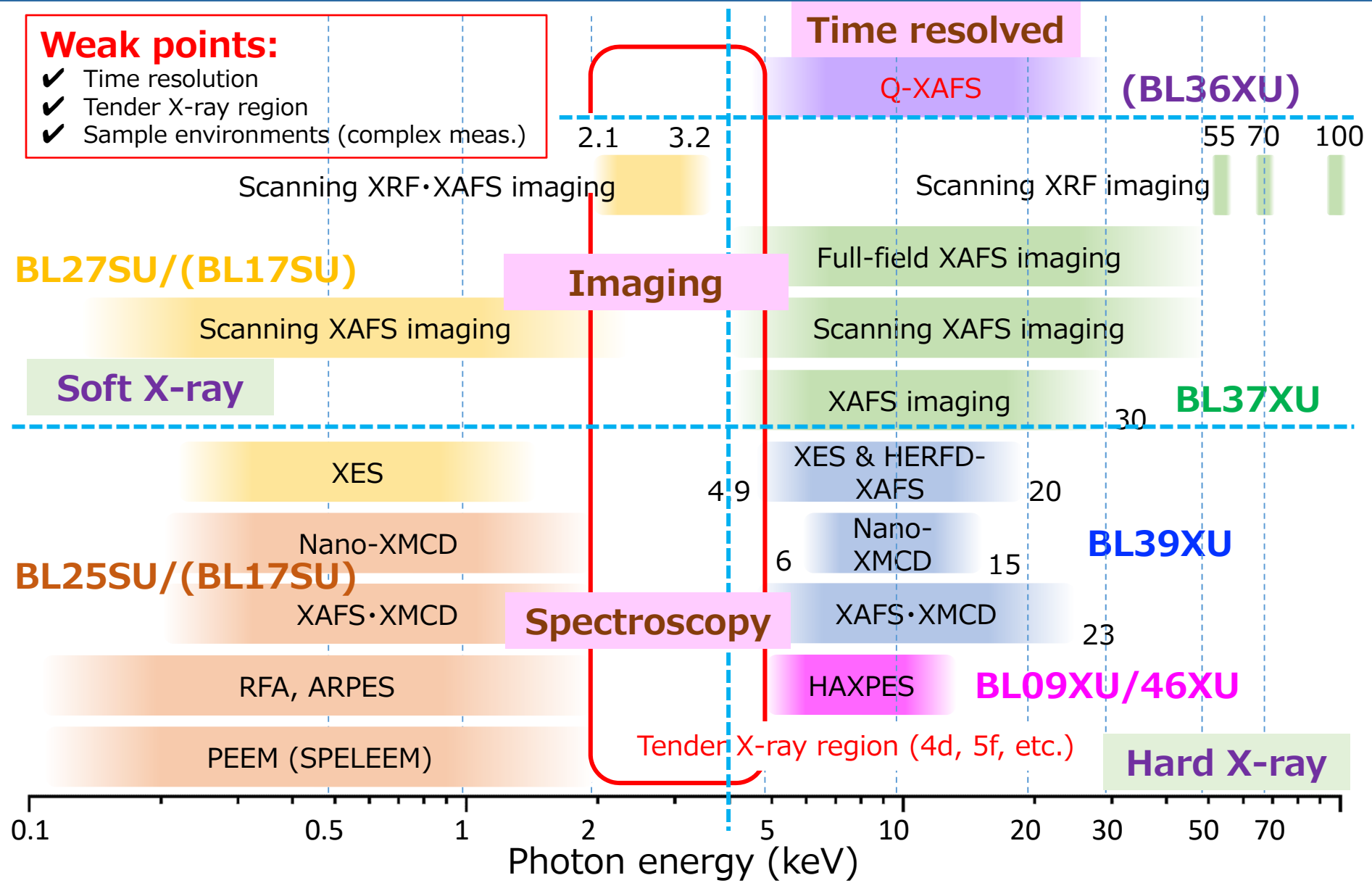
- ✓ 二結晶分光器を並進切替型に更新
- ✓ BL01B1/BL14B2に先行して制御システムをBL-774化

・汎用 XAFS 分野: ビームタイム供給のイメージ



- ✓ FY2026 中の運用開始を目指して鋭意整備中です
- ✓ 運用開始しましたら BL08B2 利用もご検討ください

SPring-8 分光ID-BL群 (現状)



分光ID-BL群: 再編案まとめ

• 軟X線BL群

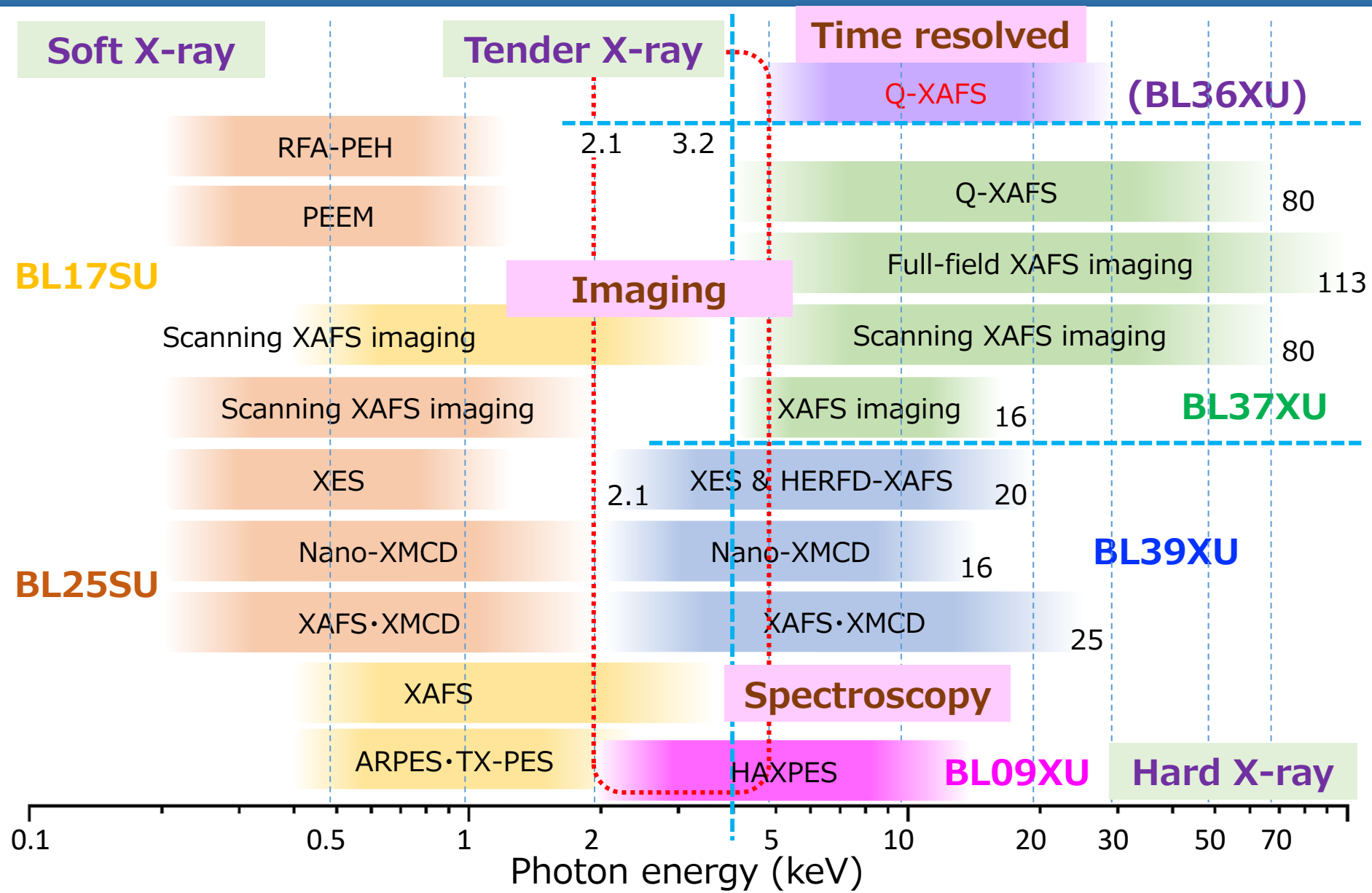
- BL25SU: 光学系はそのまま, 低エネルギー側 (SX のみ) の利用
- BL27SU: 主な機能は BL17SU (光学系を刷新) へ, TX 利用を検討

• 硬X線BL群

- BL37XU: Q-XAFSを追加, イメージング機能を強化, 高エネルギー利用
- BL39XU: アップグレード完了, TX @ SP8-II のための DCM 導入 (2027)

Beamline		Undulator	Energy	設置時期
BL25SU BL27SU	BL25SU	HEU120 (Helical-8: $\lambda_u=120$ mm)	125 eV ~ 2 keV	FY2027(停止期間) (ID17 → ID25)
(BL17SU)	BL17SU	HEU80 (Helical-8: $\lambda_u=80$ mm)	400 eV ~ 3(5) keV	FY2027(停止期間)
BL37XU		Tapered IVU24 (IVU-II: $\lambda_u=24$ mm)	3.7 ~ 80 keV	FY2027(停止期間)
BL39XU		IVU28 (IVU-II: $\lambda_u=28$ mm)	2.1 ~ 37 keV	FY2027(停止期間)

SP8-II 分光ID-BL群 (予定)



軟X線BL群の再編・整備 → アップグレードへ

- ✓ ID: Helical-8 ベース光源
 - ✓ NanoTerasu との共存・共栄
 - ✓ HX-BL との相補性は担保
 - ✓ テンダーX線領域への拡張
 - ✓ 光学素子の開発・評価, および新規手法開発
 - ✓ 老朽化対策: 光学素子の入れ替え (BL17SU)
-
- BL25SU, BL27SU (共用) + BL17SU, BL07LSU (理研)
 - ✓ 統合, 装置整理・集約
 - ✓ BL17SU + BL25SU (共用)

・ SP8-II における光学系の特徴 (まとめ)

※ ID25 (下流) に対する比率

BL	ID			光源特性 (SP8-II/SP8) @ 1 keV※		
	Type	E_{1st} (eV)	設置時期	Angular Flux Density	Brilliance	円偏光度
BL25SU	HEU120 ($\lambda_u=120$ mm)	125~2,800	FY2027(停止期間) (ID17 → ID25)	9.1	102	0.99
BL17SU	HEU80 ($\lambda_u=80$ mm)	400~4,000	FY2027(停止期間) (新設)	15.8	176	0.96

BL	Monochromator				
	Branch	Type	E_{range} (eV)	$E/\Delta E$	特長
BL25SU	A	VLS-PGM	125~2,000	10,000	高分解能
	B	VLS-PGM	200~2,000	3,000	高フラックス
BL17SU	A	c-PGM	400~3,000	40,000	高エネルギー利用・開発 (刷新)
	B	c-PGM	400~2,000	50,000	超高分解能 (刷新)

• BL37XU

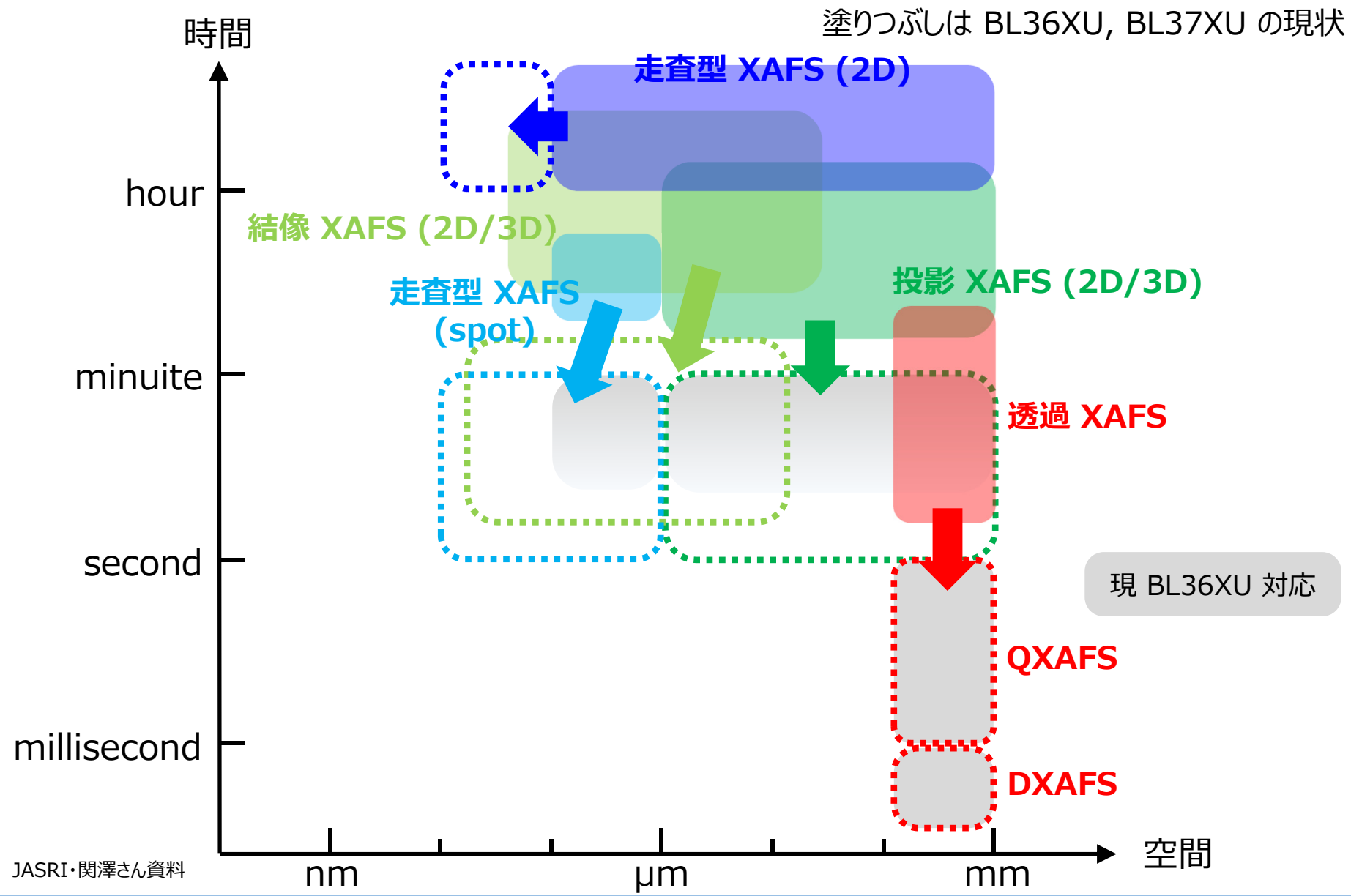
- 光学系刷新 (2027.8~)
- QXAFS を追加 → 時間分解能 (ms~) を強化
- 集光光学系の整備 → イメージング機能を強化
- 高エネルギー利用は継続 (~Pt K-edge)

• BL39XU

- アップグレード完了 (2024.7)
- 光学系刷新, 実験ハッチ2新設, 各実験ハッチに集光光学系整備
- TX @ SP8-II のための DCM 導入 (2027.3)

Beamline	Undulator	Energy	設置時期
BL37XU	Tapered IVU24 (IVU-II: $\lambda_u=24$ mm)	3.7~80 keV	FY2027(停止期間)
BL39XU	IVU28 (IVU-II: $\lambda_u=28$ mm)	2.1~37 keV	FY2027(停止期間)

BL37XU における顕微分光計測



BL37XU: Upgrade 計画

手法 (現状)	エネルギー	時間分解能 (XANES)	空間分解能	視野	備考
高輝度XAFS	4.5~113 keV	10 s (Q) 15 min	-	-	
走査型	4.5~55 keV	15 min (point) 3 h (2D)	100 nm	~10 mm	
投影型	4.5~113 keV	15 min (2D) 1.5 h (3D)	1 μm	1 mm	
結像型	5.5~20 keV	30 min (2D) 3 h (3D)	50 nm	50 μm	色収差有



手法 (計画)	エネルギー	時間分解能 (XANES)	空間分解能	視野	備考
時分割XAFS	4~46 keV	10 ms (Q)	-	-	Ca~Pt K-端
走査型	4~80 keV	1 min (point-Q) 3h (2D)	< 100 nm	~10 mm	
投影型	4~80 keV	5 s (2D-Q) 5min (3D)	1 μm	1 mm	
結像型	4~16 keV	10 s (2D-Q) 10 min (3D)	30 nm	50 μm	色収差無
蛍光結像型	4~40 keV	15 min ~	100 nm?	100um?	Day2~(?)

BL39XU: After upgrade

Commissioning: January 2024~
Public use: July 2024~



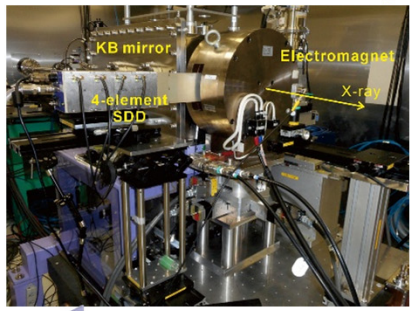
DCM
✓ Si 111/220
HCM → **Co-axis exit**
✓ $\Delta Z \sim 55 \mu\text{m}$
@ $\theta_G = 2 \sim 8 \text{ mrad}$

- ◆ **HCM の導入** → ナノ分光イメージングの強化
- ◆ **DXPR の導入** → 直線・円・楕円偏光の自由度の提供
- ◆ **KB & Wolterミラーの導入** → 分光計測の高効率化
- ◆ **EH2 の新設** → 高ニース & アクティビティXES/HERFD の利便性向上

NEW 36 m
DXPR
✓ 4.92~16 keV
✓ $P_C > 0.9$
✓ 30~100 Hz

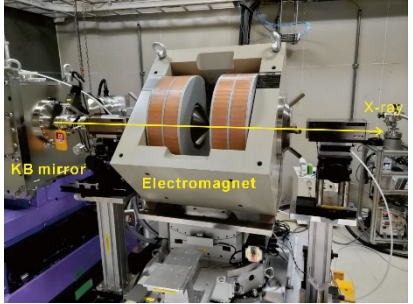
NEW EH2-Wolter → **As designed**
✓ 1 (V) × 15 (H) μm @ 4.92~20 keV
✓ 2.4 (V) × 2.3 (H) μm with virtual slit
✓ 1.5×10^{13} photons/s @ 20 keV

EH3: X線ナノ分光
XAFS・XMCD, XRF, Imaging
✓ Magnetic field
✓ 2D/3D-XAFS・XMCD imaging

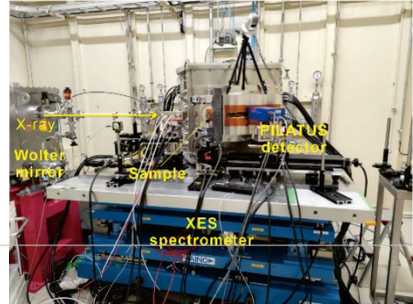


NEW EH1-KB → **As designed**
✓ 1 (V) × 10 (H) μm @ 4.92~30 keV
✓ 1×10^{13} photons/s @ 30 keV
✓ Defocusing: $> \square 30 \mu\text{m}$

EH1: 複合極限環境下X線分光
XAFS・XMCD + XRD
✓ High magnetic field
✓ High pressure



EH2: X線発光分光
XES・HERFD-XAFS・XRS
✓ Low (high) temperature
✓ Operando/in-situ meas.

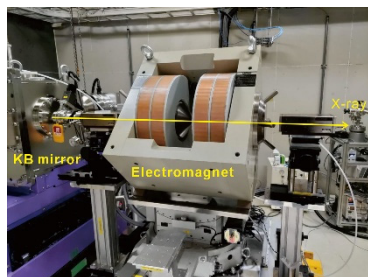


66 m
NEW
76 m

EH3-KB → **No change**
✓ 75 (V) × 107 (H) nm @ 12 keV
✓ $\sim 10^{11}$ photons/s

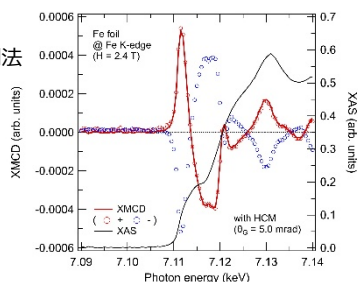
EH1: 複合極限環境下X線分光

- ✓ XAFS・XMCD
- ✓ 入射X線: 4.92 ~ 23 keV
- ✓ 可変偏光
- ✓ 強磁場・低温・高圧
- ✓ 検討中:
 - 高圧 XRD @ 30 keV

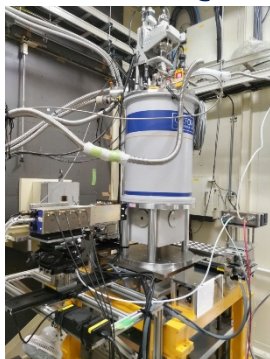


電磁石

円偏光変調法
XMCD

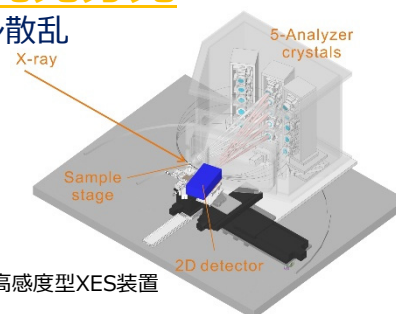


超伝導磁石

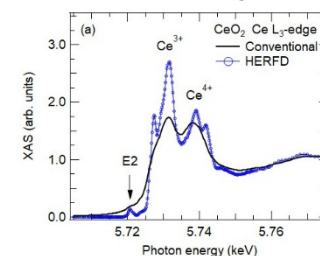
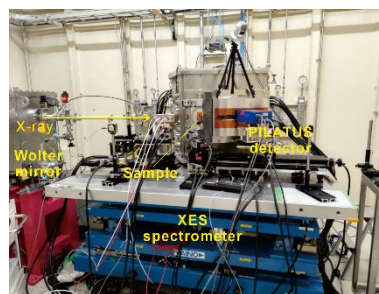


EH2: X線発光分光

- ✓ XES・HERFD-XAFS・X線ラマン散乱
- ✓ 蛍光X線: 4.4 ~ 27 keV
- ✓ 低温 XES・HERFD-XAFS
- ✓ 検討中:
 - 高温測定
 - in-situ/operando 測定
 - ハイスループット自動計測

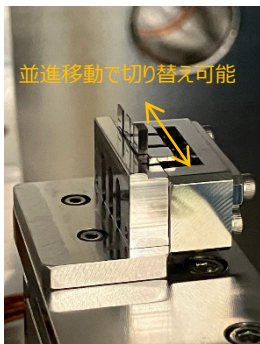
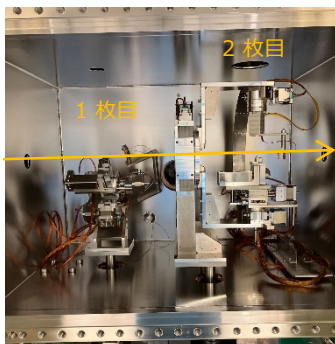


高感度型XES装置

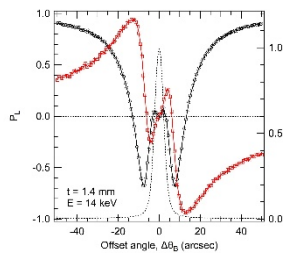


OH: X線移相子

- ✓ 利用可能エネルギー: 4.92 ~ 23 keV
- ✓ 2枚移相子 → 直線偏光面の自由度
- ✓ 最大 6 枚の結晶を真空破断することなく交換可能



ダイヤモンド移相子
Single vs. Double

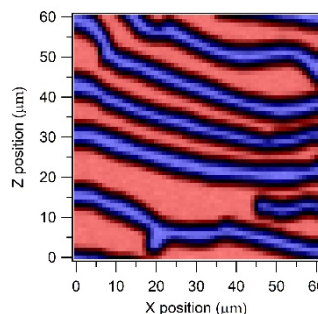


EH3: X線ナノ分光

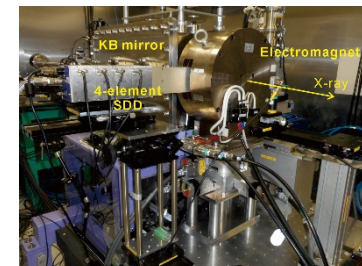
- ✓ ナノXAFS・XMCD
- ✓ 走査型 XRF (< 16 keV)
- ✓ 2D/3D-XAFS・XMCD imaging



高感度 7 素子 SDD



GdFeCo膜のXMCDイメージング
(60 × 60 μm, 1 μm step (15分程度))



SP8-II: 光の特長

- 極低エミッタンス
 - ✓ ビームサイズが小さい
 - 集光
 - ✓ 輝度が高い
 - 時分割測定
- 高コヒーレンス
 - ✓ 回折型イメージング (CDI)

手法拡張

- 複合試料環境
 - ✓ 温度, 電場・磁場
 - ✓ 光・高周波
 - ✓ 反応場, ...
- 複合測定
 - ✓ XRD, SAXS, PES, ...
- マルチビーム計測

多角・多元計測が主流

検出系の拡張

- 高感度・高精度計測
- 高計数率計測
- 高速計測
- 広空間・大面積計測
- 高エネルギー分解能計測

最先端技術

- 自動測定
- ハイスループット測定
- AI 活用
- 画像・データ処理技術

まとめ: SP8-II 分光BL群 (予定)

BL	利用区分	エネルギー (keV)	光源	DCM PGM	CCM	蛍光検出器	主な特徴
BL01B1	共用	3.8~42	BM (Bia)	Si 111 Si 311		36-pixel Ge-SSD 7-element SDD (30-pixel mxDCMOS)	In-situ/operando XAFS-DRIFTS XAFS-XRD
BL14B2	共用	3.8~72	BM (Biii)	Si 111 Si 311		19-element SSD	In-situ/operando XAFS-XRD 自動XAFS
BL08B2	理研 → 共用	3.8~72	BM (Biii)	Si 111 Si 311		(19-element SSD)	自動XAFS 測定代行
BL17SU	理研 → 共用	0.4~3.0	HEU80	c-PGM A: RP = 40,000 B: RP = 50,000		SDD	回折格子を刷新・高分解能化
BL25SU	共用	0.13~2.0	HEU120	VLS-PGM A: RP = 10,000 B: RP = 3,000		SDD	光学系は現状を維持
BL37XU	共用	3.7~80	Tapered IVU-II24	Si 111 Si 220	Si 111 Si 220	7-element SDD Ge-SSD (30-pixel mxDCMOS)	QXAFS AKB 結像光学系
BL39XU	共用	2.1~37	IVU-II28	Si 111 Si 220		7-element SDD (30-pixel mxDCMOS)	Tender X-ray X線移相子 HERFD
BL36XU	理研 (共用枠)	4.5~35	Tapered IVU-II		Si 111 Si 220	4-element SDD CITIUS (30-pixel mxDCMOS)	QXAFS HERFD