



NanoTerasu

第7回 特定放射光施設BLsアップグレード検討ワークショップ  
2025年3月2日 9:05-9:20 UDXギャラリーネクスト秋葉原



# 共用ビームライン概要

---

量子科学技術研究開発機構 NanoTerasuセンター

堀場 弘司



# NanoTerasu第一期共用ビームライン



NanoTerasu

## BL08W:

X線構造・電子状態トータル解析  
XAFS, SAX

## BL09U:

X線オペランド分光  
HAXPES

## BL09W:

X線階層的構造解析  
白色CT

## BL10U:

X線コヒーレント  
イメージング  
CDI, タイコグラフィ

## BL13U:

軟X線ナノ吸収分光

## BL14U:

軟X線磁気イメージング  
Scanning XMCD

## BL08U:

軟X線オペランド分光  
Ambient XPS (ISSP)

## BL07U:

軟X線電子状態解析  
NanoESCA, RIXS (ISSP)

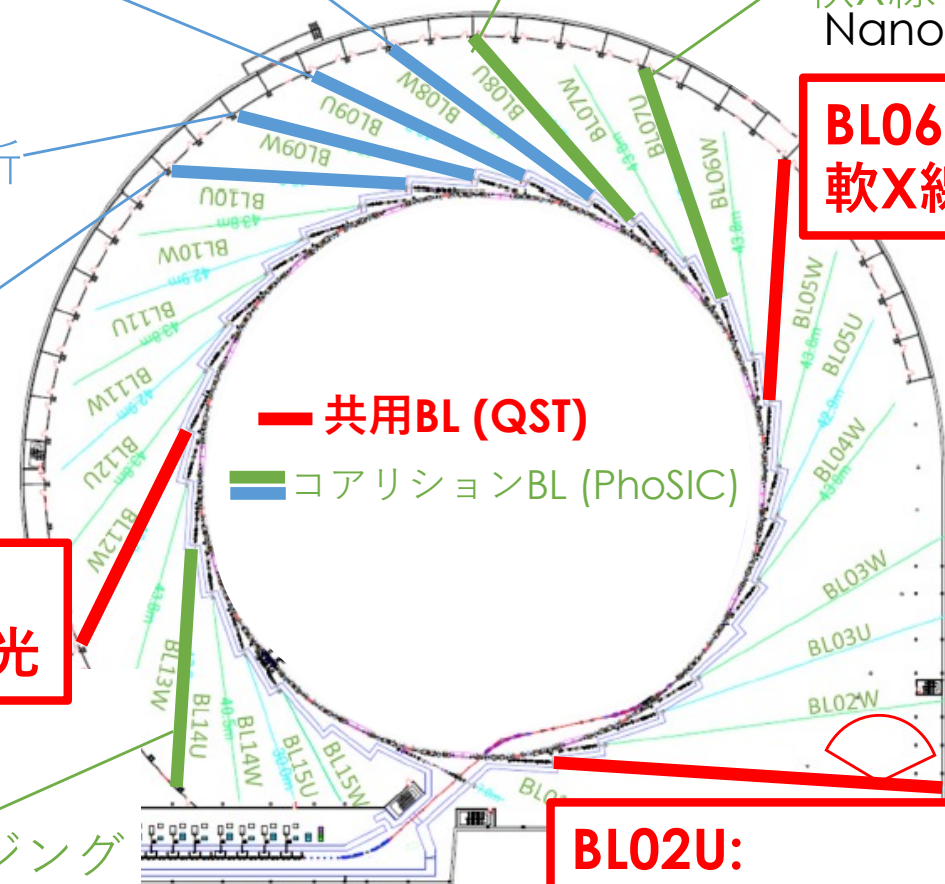
## BL06U:

軟X線ナノ光電子分光

2025年3月3日  
共用開始

## BL02U:

軟X線超高分解能共鳴非弾性散乱





		BL02U 軟X線超高分解能 共鳴非弾性散乱	BL06U 軟X線ナノ光電子分光	BL13U 軟X線ナノ吸収分光
手法		共鳴非弾性散乱 (RIXS)	角度分解光電子分光 (ARPES)	X線吸収分光 (XAS) 磁気円二色性 (XMCD) 磁気線二色性 (XMLD)
光源	構成	APPLE-IIアンジュレータ 56mm×71周期	APPLE-IIアンジュレータ 75mm×53周期	分割APPLE-IIアンジュレータ 56mm×10周期×4台 移相器3台
	偏光	水平直線、垂直直線、左右円	水平直線、垂直直線、左右円	任意 (切替速度>~10Hz)
光学系	分光器	不等刻線間隔平面回折格子 可変偏角分光器	等刻線間隔平面回折格子 入射スリットレス 可変偏角 平行化分光器 (cPGM)	不等刻線間隔平面回折格子 入射スリットレス 可変偏角 Monk-Gillieson型分光器
	エネルギー	250 – 2,000 eV	50 – 1,000 eV	180 – 3,000 eV
	分解能	>150,000 @<1,000eV	> 50,000 @50eV > 30,000 @1,000eV	> 10,000 @全領域
	集光サイズ	< 1 μm × <~5 μm	< 100 nm @A branch < 1 μm @ B branch	< 20 μm × 1 μm (集光鏡) < 20 nm × 20 nm (FZP)
エンドステーション	構成	2D-RIXS 全エネルギー分解能 ΔE<10 meV @ 1,000 eV	スピン分解ナノ集光ARPES マイクロ集光ARPES	顕微X線磁気円二色性 走査型透過X線顕微鏡 フリーポート

電荷・軌道・スピン・格子の素励起のエネルギー分散を世界最高クラスのエネルギー分解能で探る

ビームラインの特徴

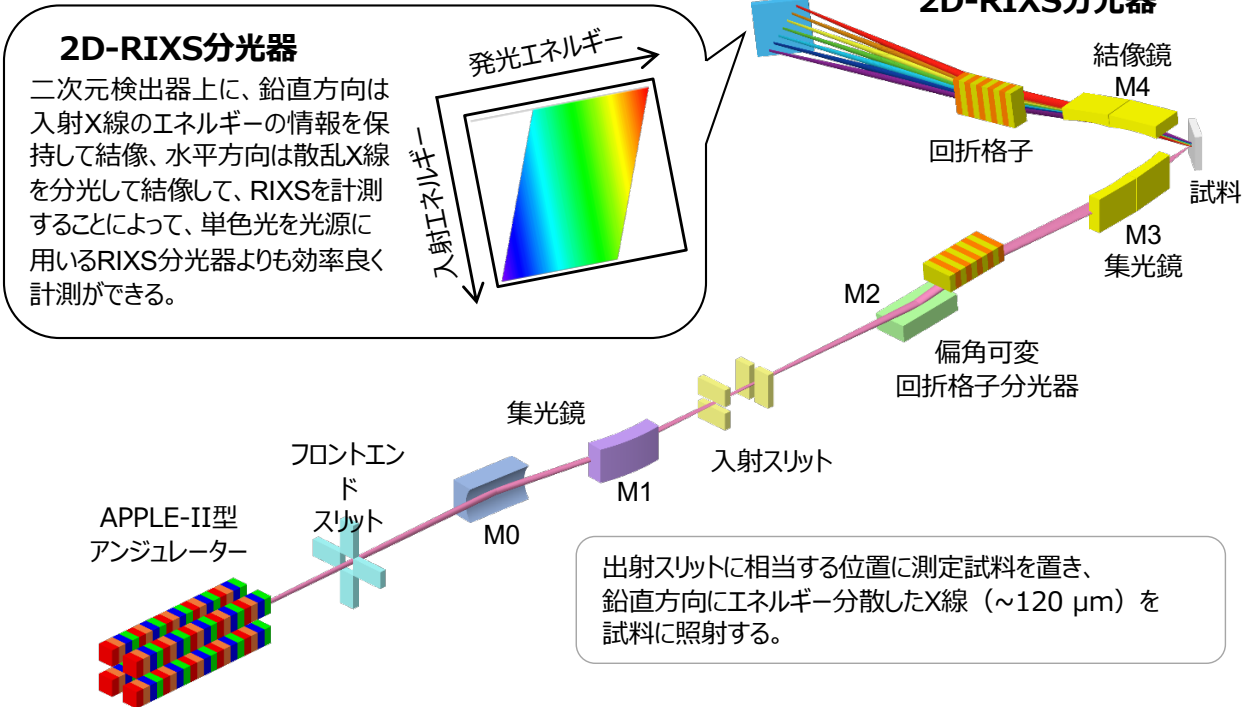
BL02Uは、共鳴非弾性X線散乱(RIXS)を超高エネルギー分解能で測定するためのビームラインであり、超高エネルギー分解能かつ高効率に分光が可能な2D-RIXS分光器に最適化されている。RIXSでは、散乱X線のエネルギーと運動量を測定することにより、電荷・軌道・スピン・格子の素励起や分子振動などの低エネルギー励起のエネルギー・運動量の分散関係を世界最高クラスのエネルギー分解能で知ることができる。

実験技術

1. 共鳴非弾性X線散乱 (RIXS)

諸元

光源	APPLE-II型アンジュレーター 周期長56 mm/周期数71/最小ギャップ値15 mm/最大K値4.62
偏光 (エネルギー範囲)	水平・垂直直線 (250–2000 eV) 左右円 (250–1500 eV)
エネルギー分解能	$E/\Delta E > 150,000 @ < 1000$ eV
試料上フラックス	$> 10^{10}$ photons/s@ $E/\Delta E > 100,000$ (出射スリット2 $\mu\text{m}$ 相当)
試料上ビームサイズ	$< 1 \mu\text{m}$ (H) $\times$ $< \sim 5 \mu\text{m}$ (V)* * $E/\Delta E > 150,000 @ < 1000$ eV時の単色光のサイズ。実際は任意の幅のエネルギー分散光を切り出して利用。
RIXS分光器 エネルギー分解能	$E/\Delta E > 150,000 @ < 1000$ eV ビームラインとあわせて $E/\Delta E > 100,000 @ < 1000$ eV
RIXS分光器散乱角	$30^\circ \leq 2\theta \leq 150^\circ$





# BL02U 立ち上げ状況



NanoTerasu

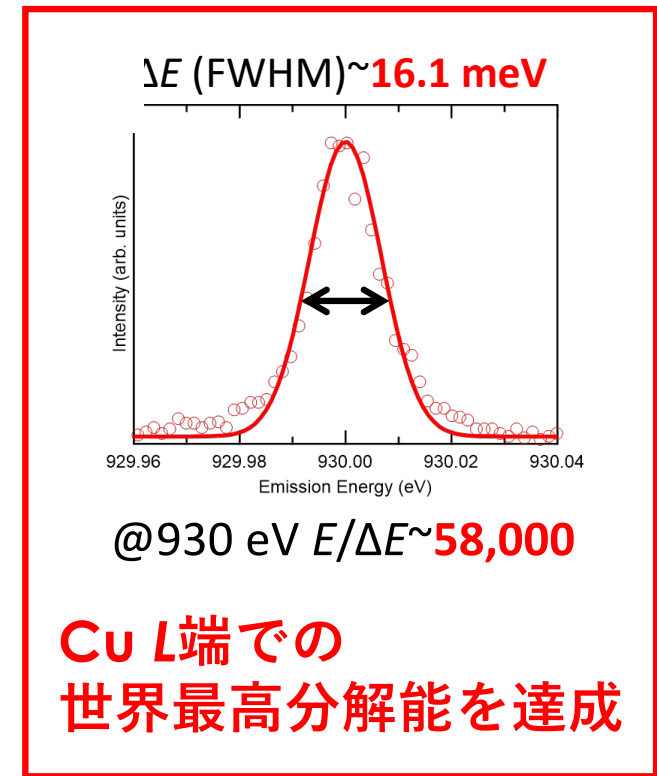
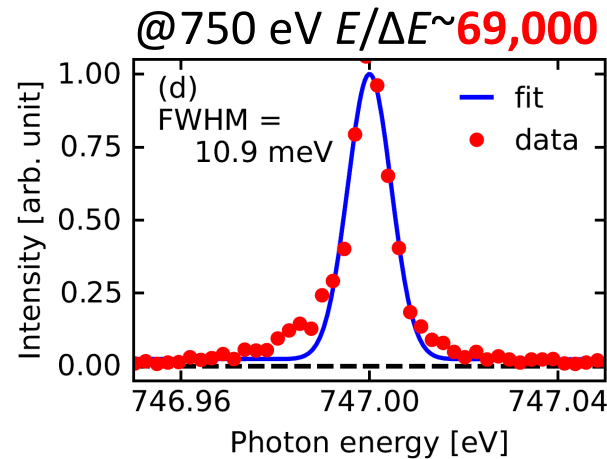
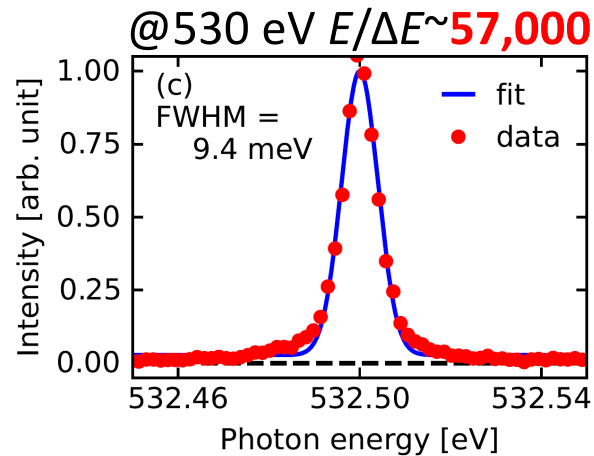
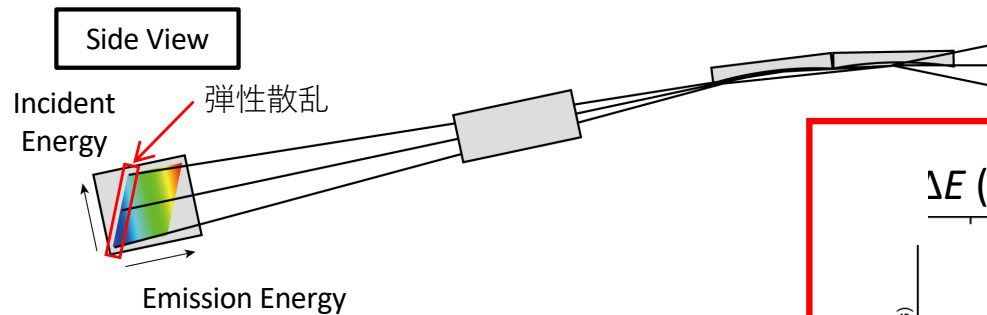


担当者

QST：宮脇 淳  
(山本 航平)

JASRI：菅 大暉

**RIXS分光器エネルギー分解能 (ビームライン含む)**  
7/10  $E/\Delta E > 50,000$ 達成 (930 eV, 多層膜弾性散乱)



- ・ビームライン・RIXS分光器共に動作確認終了
- ・超高分解能 (溜め込み実験) には長時間安定性などが課題。現実的な高分解能実験を共用開始するために整備を継続中

## 物質中の電子のスピンの情報まで分解したバンド構造をナノスケールの空間分解能で探る

### ビームラインの特徴

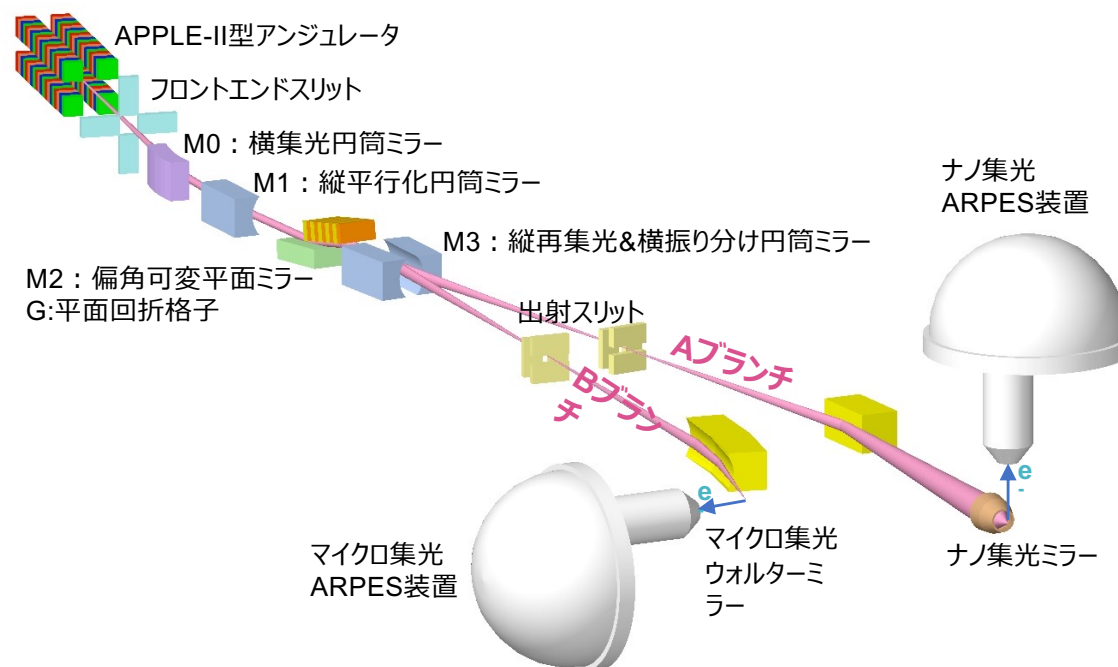
BL06Uでは、超精密加工技術を駆使したミラー集光光学系により、これまでにない高フラックスの軟X線ナノビームを供給し、100 nm以下の空間分解能でのスピン・角度分解光電子分光（SR-ARPES）を実現する。これにより物質中のナノ領域に現れる電子状態をエネルギー・運動量・スピン状態まで分解して直接的に観測することができる。ビームラインは2つのブランチに分かれており、ナノ集光の先端ARPES実験の他に、より汎用的なマイクロ集光ARPES実験を相補的に利用できる環境を備える。

### 実験技術

1. 角度分解光電子分光（ARPES）
2. スピン分解光電子分光（SRPES）

### 諸元

光源	APPLE-II型アンジュレータ 周期長75mm/周期数53/最小ギャップ値15mm/最大K値7.52
偏光 (エネルギー範囲)	水平・垂直直線、左右円 (50-1000eV)
エネルギー分解能	$E/\Delta E > 50,000@50 \text{ eV}$
試料上フラックス	$> 10^{11} \text{ photons/s}$
試料上ビームサイズ	Aブランチ: $< \square 100 \text{ nm}$ Bブランチ: $< \square 1 \mu\text{m}$
ARPES分析器 エネルギー分解能	1.5 meV
ARPES分析器 取り込み角度	$\pm 30^\circ$





# BL06U 立ち上げ状況



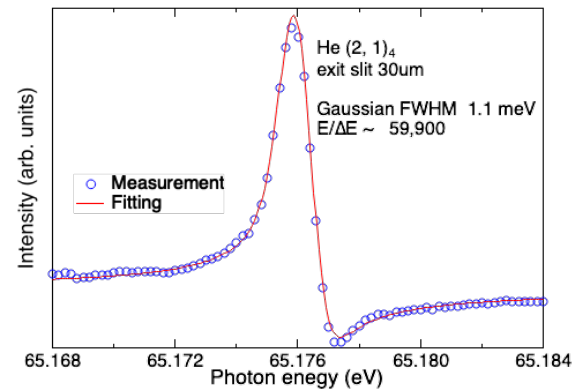
NanoTerasu



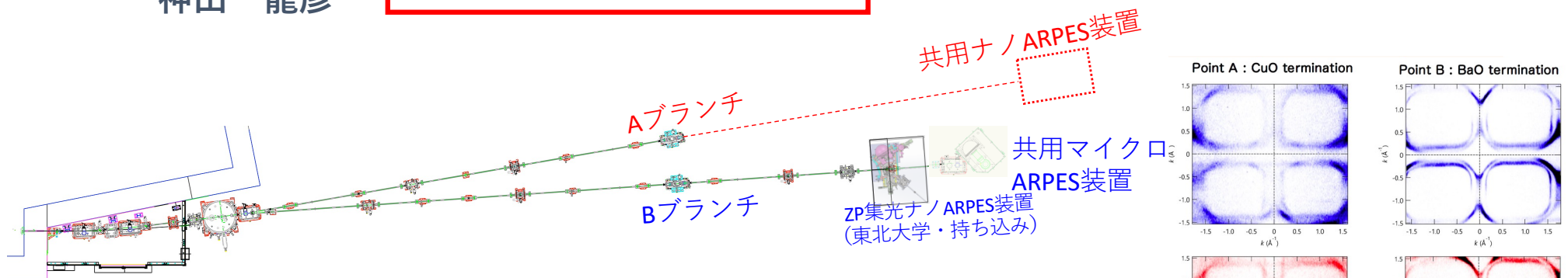
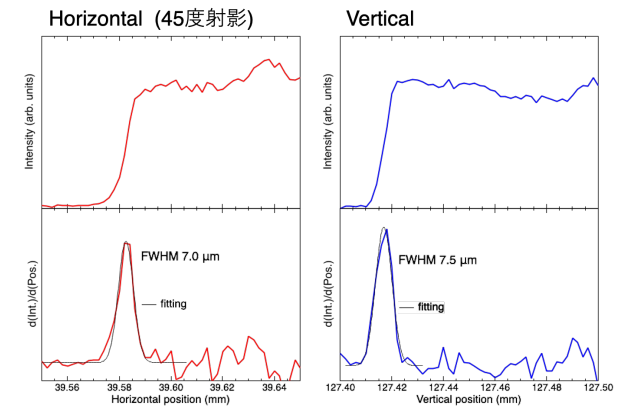
担当者  
 QST: 北村 未歩  
 JASRI: 保井 晃  
 神田 龍彦

ビームライン分解能目標  
 $E/\Delta E > 50,000$ を達成

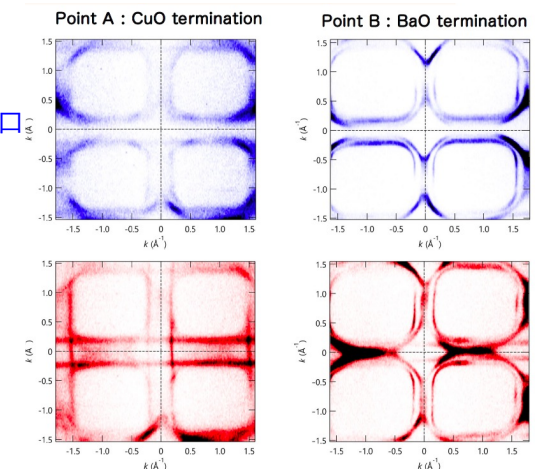
@65 eV  $E/\Delta E \sim 60,000$



マイクロARPES装置スポットサイズ  
 $5 \mu\text{m}(\text{H}) \times 7.5 \mu\text{m}(\text{V})$



- BブランチのマイクロARPES装置を共用装置として整備、 $10\mu\text{m}$ 以下のスポットサイズで実験が可能
- 来年度マイクロARPES装置はDeflector機能付きにアップデート予定、スピン分解検出器も後年整備予定
- AブランチのナノARPES装置は今年度設置、整備開始。



ARPES測定データ例：  
 YBCOの終端面依存フェルミ面

電荷・スピンを同時利用する機能性材料の動作原理をナノメートル単位の空間分解能で探る

ビームラインの特徴

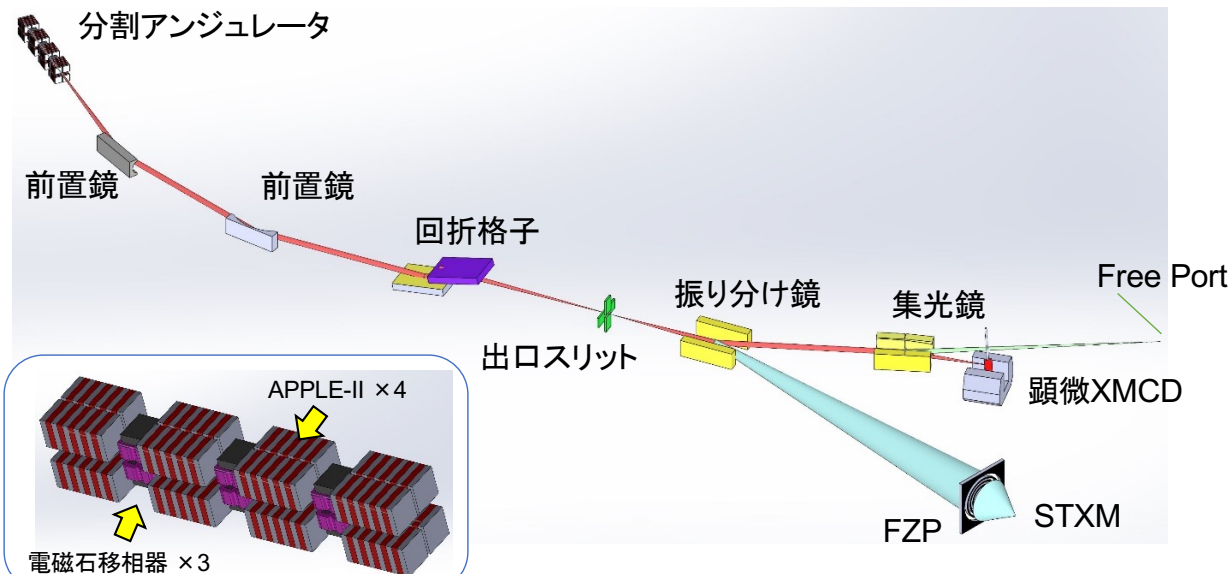
BL13Uでは、多様な偏光を生成・制御できるAPPLE-II型分割アンジュレータを用い、軟X線吸収分光法に基づくX線磁気円二色性(XMCD)等の顕微・ダイナミクス計測を行うことができる。これにより、磁性・スピントロニクス材料・デバイス等の先端材料における「スピン」をキーワードとした基礎学理の解明と研究開発の促進に供することが本ビームラインの目的である。必要な集光サイズやフラックス、試料環境（磁場・電場・温度等）に応じた複数の試料ステーションを使い分けることにより、測定目的に最適化したハイスループット計測環境を提供する。

実験技術

1. 軟X線磁気円二色性 (XMCD)
2. 軟X線磁気線二色性 (XMLD)
3. 走査型透過X線顕微鏡 (STXM)

諸元

光源	APPLE-II型分割アンジュレータ 周期長56mm/周期数11×4/最小ギャップ値15mm/最大K値4.62
偏光 (エネルギー範囲)	水平直線 (180-3000 eV) 垂直直線 (260-3000 eV) 左右円 (180-3000eV)
エネルギー分解能	$E/\Delta E > 10,000$
試料上フラックス	$> 10^{13}$ phs/s/0.01%BW (集光鏡) $> 10^{10}$ phs/s/0.01%BW (FZP)
試料上ビームサイズ	$< 20 \mu\text{m}$ (H) $\times$ $1 \mu\text{m}$ (V) (集光鏡) $< 20 \text{nm}$ (H) $\times$ $20 \text{nm}$ (V) (FZP)
偏光切り替え	DC~10 Hz程度 (左右円切替・直線電場方向360°回転)



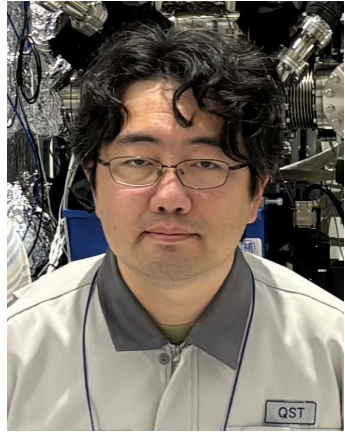
分割アンジュレータ模式図





NanoTerasu

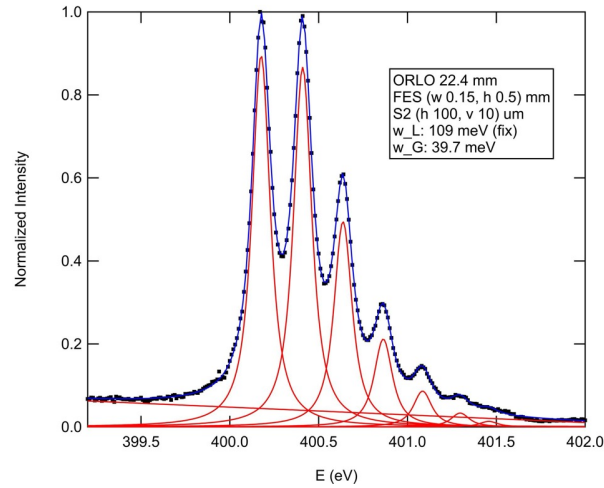
# BL13U 立ち上げ状況



担当者

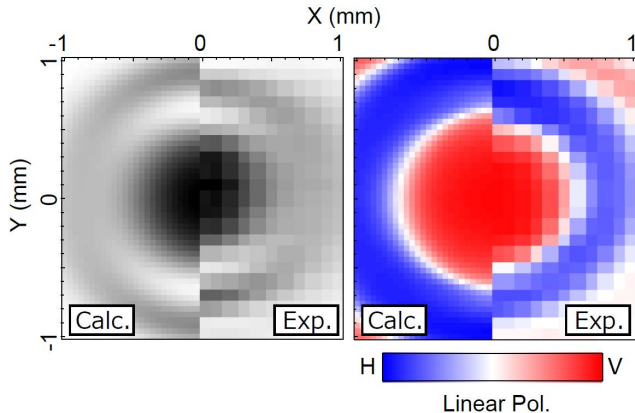
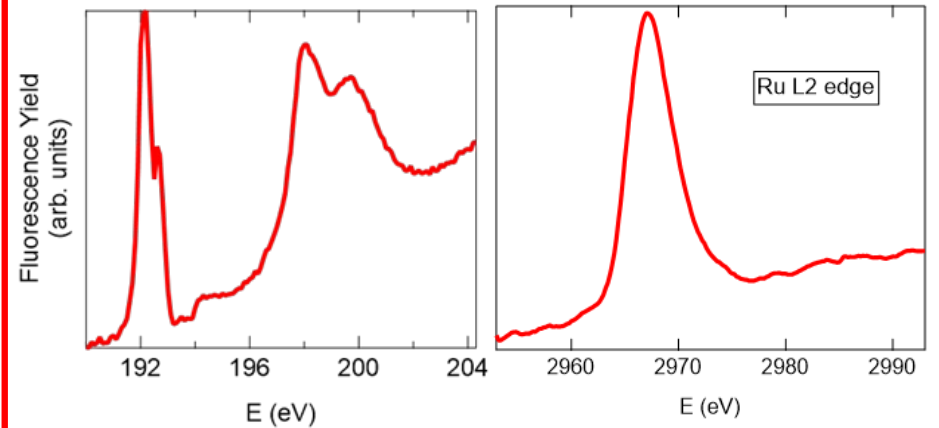
QST: 大坪 嘉之  
JASRI: 小谷 佳範  
脇田 高德

ビームラインエネルギー分解能  
目標分解能  $E/\Delta E > 10,000$  を達成  
(400eV, 窒素)

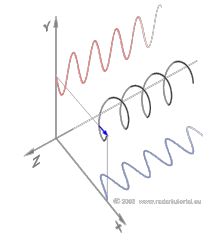
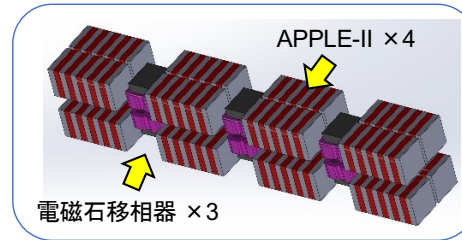


## 広エネルギー帯利用の確認

軟X線~テンダーX線吸収スペクトル  
ホウ素(~190 eV)      ルテニウム(~3,000 eV)



円偏光干渉による直線偏光生成  
光源の空間分布測定



## 分割IDの移相器制御による偏光干渉に成功

- ・ 右円 + 左円 → 水平 or 垂直偏光生成
- ・ 水平 + 垂直 → 右円 or 左円偏光生成

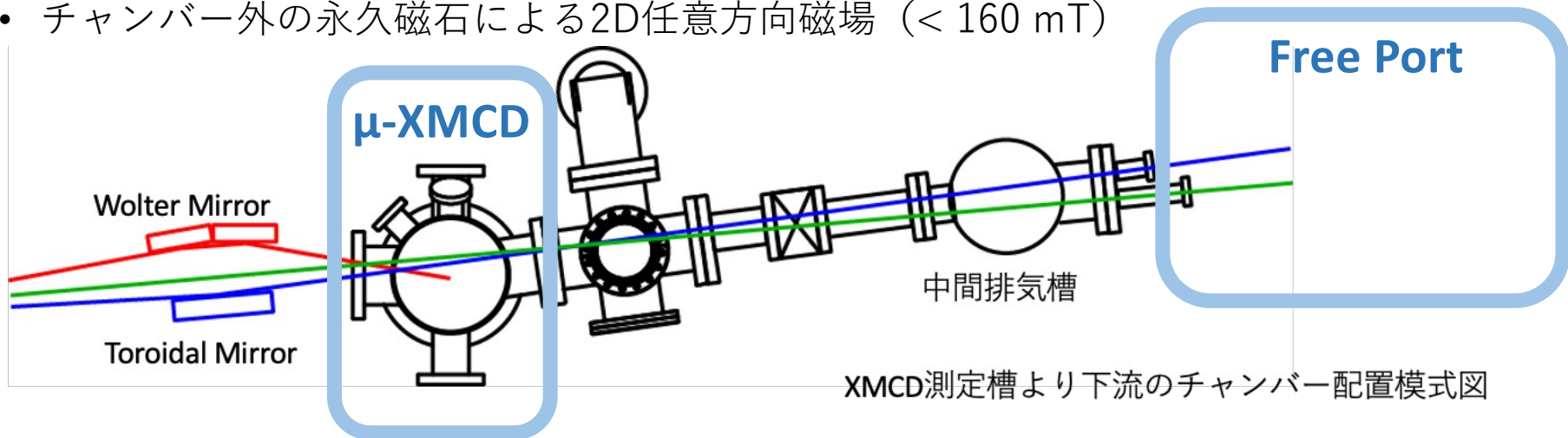


# BL13U 共用開始装置



NanoTerasu

- 放射光利用可能範囲：180-1500 eV (円偏光), 180-3000 eV (直線偏光)
- Wolter Mirror によるsub- $\mu\text{m}$ 集光
- オミクロン型サンプルホルダーによるUHV中搬送
- UHVスーツケース接続によりラボからの搬送も可能 (応相談)
- 加熱、蒸着等の*in-situ*簡易試料処理
- 通電・加熱 (< 500°C) ・冷却 (> 90 K) 条件でのオペランド測定
- チャンバー外の永久磁石による2D任意方向磁場 (< 160 mT)



## フリーポート：

- 後置鏡 (トロイダル) による集光：10-100  $\mu\text{m}$
- 後置鏡無しの非集光： $\sim 3 \text{ mm}^2$

目的に応じた専用チャンバーのユーザーによる持ち込み・測定可能

例) 高磁場 (超伝導電磁石)、液体ジェット、高周波電場 (XFMR)、等

<JASRI> フリーポートで使用できる吸収分光チャンバー (+グローブボックス) を整備中



# 共用ビームライン増設の検討



「NanoTerasu共用ビームライン整備検討委員会」により議論・提言

		フェーズⅠ 2019-2023	フェーズⅡ 2024-2027	フェーズⅢ 2028-2030	フェーズⅣ 2031-
<b>整備期 共用BL (グループ1)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>国内における高輝度軟X線利用研究の空白状態の解消</li> <li>軟X線分光の主要測定手法をカバー</li> </ul>	建設・整備	高度化		
<b>高ユーザー ニーズ共用BL (グループ2)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>全ての研究者への利用機会、需要に応える測定基盤の提供</li> <li>半導体・デジタルなど国の戦略分野における先端シーズ開拓に早期着手</li> </ul>		早期に実現が求められる計画 検討 建設・整備		
<b>応用拡大 共用BL (グループ3)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>拡大する応用範囲への対応</li> <li>フェーズⅡの実施状況を見つつ、フェーズで対応すべき応用範囲を見極める</li> </ul>		状況に応じ随時計画を見直し フィージビリティスタディ	建設・整備	
<b>先端利用 共用BL (グループ4)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>技術開発を要する先端的放射光利用</li> <li>マルチモーダル測定</li> </ul>		既存BLにおける技術開発		建設・整備
<b>R&amp;D BL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>新しい放射光利用の地平を拓く</li> <li>フェーズⅡ～Ⅲにおいて、必要な研究開発に着手する</li> </ul>		研究開発	建設・整備	共用化



# 共用ビームライン（第二期）ラインアップ（案）



NanoTerasu

ポート (例)	分類	光源	エネルギー	エンドステーション	特色・目的	国の戦略分野	ユーザー ニーズ	分野 多様性	Nano Terasu の強み	新規性 開拓
<b>グループ2 高ニーズ共用BL</b>										
1	12W	XAFS	多極 ウィグラー	3- 25 keV	(quick) XAFS	テンダーX線領域 全自動DX 自動試料交換	グリーンイノベーション マテリアル 量子技術 半導体・デジタル産業 バイオ・健康医療	◎	◎	
2	13W	X線回折	多極 ウィグラー	3-25 keV	X線回折・散乱	テンダーX線領域における共鳴 X線回折 全自動DX 自動試料交換	グリーンイノベーション マテリアル 量子技術 半導体・デジタル産業 バイオ・健康医療	◎	◎	
3	11W	イメージ ング	多極 ウィグラー	3-25 keV	X線CT（単色、準単色）、 位相差イメージング	階層イメージング テンダーX線領域における吸収 端コントラスト利用	グリーンイノベーション マテリアル 量子技術 半導体・デジタル産業 バイオ・健康医療	○	◎	
4	12U	イメージ ング	APPLE-II アンジュレータ	250 -3000 eV	A: SXイメージング B: 共鳴軟X線散乱	軟X線コヒーレント回折イメージ ング、タイコグラフィ、 高分子材料・ポリマー小角散 乱、ホログラフィー、共鳴磁気 回折	グリーンイノベーション マテリアル 量子技術 半導体・デジタル産業 バイオ・健康医療	○	○	◎
5	05W	X線分光	多極 ウィグラー	3- 13 keV	HAXPES	テンダーX線領域 全自動DX	グリーンイノベーション マテリアル 量子技術 半導体・デジタル産業 バイオ・健康医療	○	◎	



# 共用ビームラインの増設（令和6年度～令和8年度）



NanoTerasu

## NanoTerasuの共用ビームライン増設

令和6年度補正予算 8億円



### 現状・課題

- 官民地域パートナーシップにより整備され、令和6年度から運用を開始した3GeV高輝度放射光施設 NanoTerasu(ナノテラス)の持つ価値を最大化し、共用促進法に基づき多様なイノベーションの創出に貢献するためには、広範な分野における産学官の多様な研究者等に利用されることが必要である。
- NanoTerasuのビームラインの増設を進め、世界最高水準の軟X線向け放射光施設の性能を最大限生かした魅力的なイノベーション拠点とし、投資促進強化に貢献する。



### 事業内容

○NanoTerasuから生み出される成果を最大化するため、特にユーザーニーズの高い共用ビームラインの整備に着手する。

### ● 共用ビームラインの増設 8億円

**世界最高水準の軟X線向け放射光施設の恩恵を最大限に享受**するため、燃料電池の開発をはじめとした**汎用的かつ広範な研究分野に対応可能な、特にユーザーニーズの高いビームラインの整備に着手する。**


事業実施期間	令和6年度～令和8年度
交付先	(国研) 量子科学技術研究開発機構

**増設するビームラインで想定される成果**  
(燃料電池・リチウムイオン電池の例)

【これまでの課題】  
既存の電池の研究が主で、新しい物質を多数探索することはできない。

↓

【ビームラインの増設で可能になること】  
高速解析により新しい電解質の広範な探索が可能となり、低消費電力の電池開発に貢献。

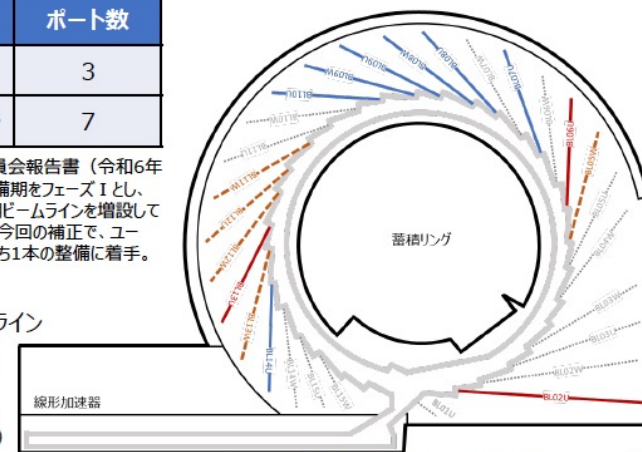


NanoTerasuの現在のビームライン本数

ビームライン		ポート数
フェーズ I * 整備	共用	3
	コアリジョン	7

\*：量子ビーム利用推進小委員会報告書（令和6年5月）にて、NanoTerasu整備期をフェーズ I とし、フェーズ II～IV と段階的に共用ビームラインを増設していくことが望ましいとされている。今回の補正で、ユーザーニーズの高いフェーズ II のうち1本の整備に着手。

- コアリジョンビームライン
- 共用ビームライン
- 共用ビームライン (フェーズ II にて増設検討)



(担当：科学技術・学術政策局研究環境課) 28

第二期増設ビームラインのうち1本（X線回折：多極ウィグラー）を先行で開始



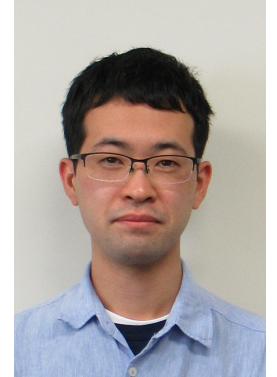
# 増設共用ビームライン：X線回折ビームライン



NanoTerasu

**BL11W:**  
X線回折ビームライン

担当：山本航平（QST）



## ビームライン仕様（検討中）

設置場所：BL11W

光源：多極ウィグラー

エネルギー範囲：2 - 20 keV

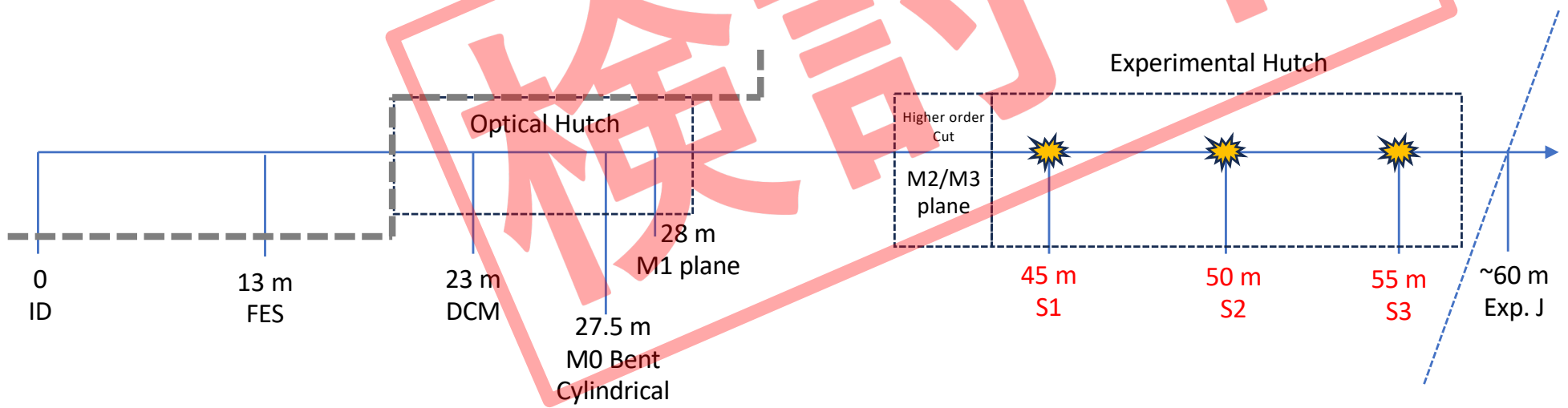
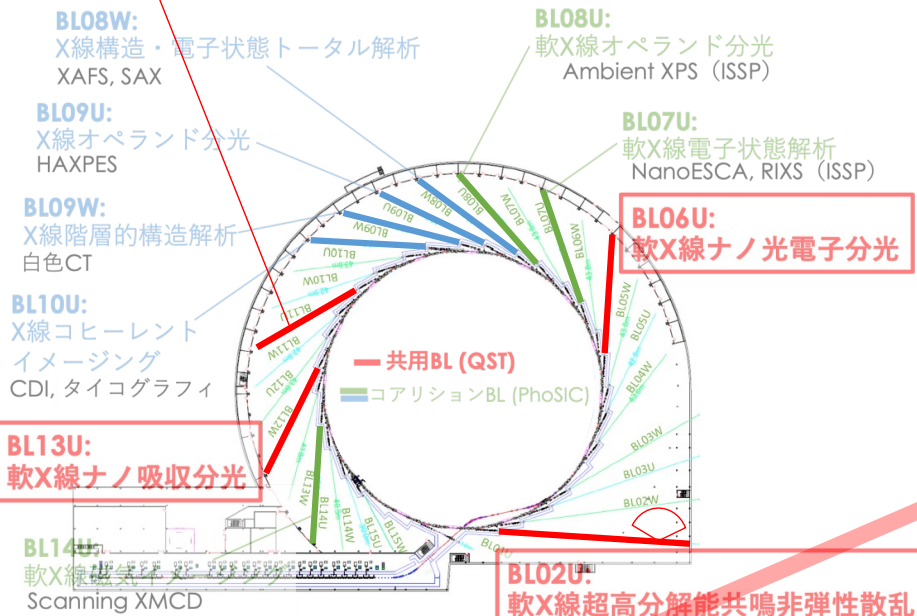
エンドステーション（案）

S1：低エネルギー・テンドーX線回折/散乱

S2：

S3：（S1-S3間で可変）小角散乱

### 低エネルギー・テンドーX線の積極利用





## まとめ



NanoTerasu

○2025年3月3日（明日！）からの本格共用開始に向けて、  
3本の共用ビームラインおよびエンドステーションの整備を進めている。

**BL02U：軟X線共鳴非弾性散乱（超高エネルギー分解能）**

エンドステーションも含めて世界最高のエネルギー分解能を達成

**BL06U：角度分解光電子分光（微小集光）**

目標値を上回るエネルギー分解能を達成。

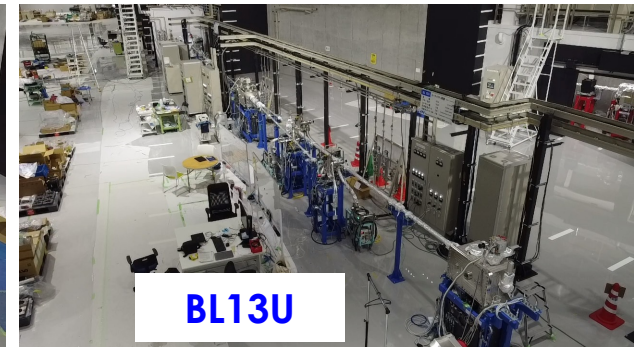
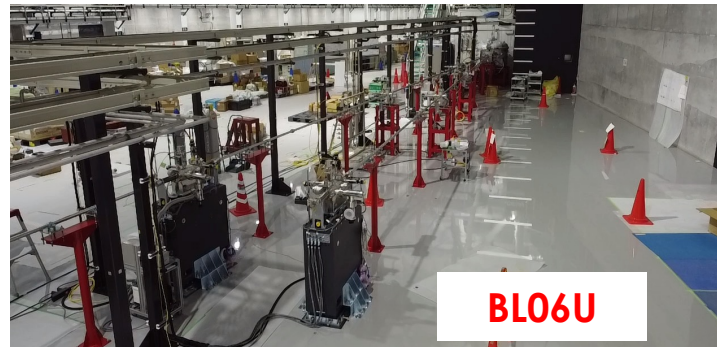
エンドステーションのマイクロ集光ARPES装置も利用可能

**BL13U：軟X線吸収分光（偏光可変）**

広エネルギー帯域利用、移相器制御による任意偏光生成を達成

○4本目の共用ビームラインとしてウィグラー光源を用いたX線回折ビームラインの増設が決定し、現在設計を開始している。（-2026年度）

今後の増設・高度化に向けて利用ユーザーからのフィードバック、要望をお願いします。



立ち上げにご尽力頂いたQSTビームライングループメンバー、試験的共用ユーザーの方々、JASRIのビームライン担当の方々に深く感謝します。