

NanoTerasu共用ビームラインの 現状と展望

量子科学技術研究開発機構 NanoTerasuセンター

堀場 弘司



NanoTerasu

NanoTerasu第一期共用ビームライン



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)

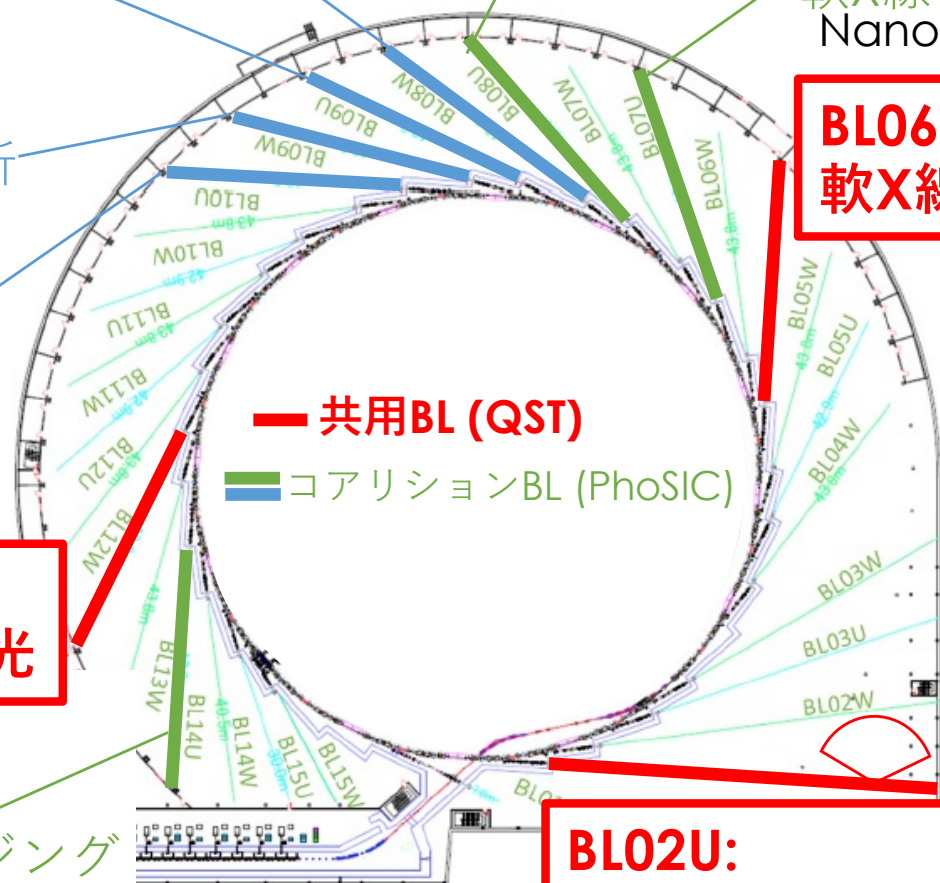
BL06U:

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





NanoTerasu

NanoTerasu第一期共用ビームライン



		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 $\Delta E < 10 \text{ meV}$ @ 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で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

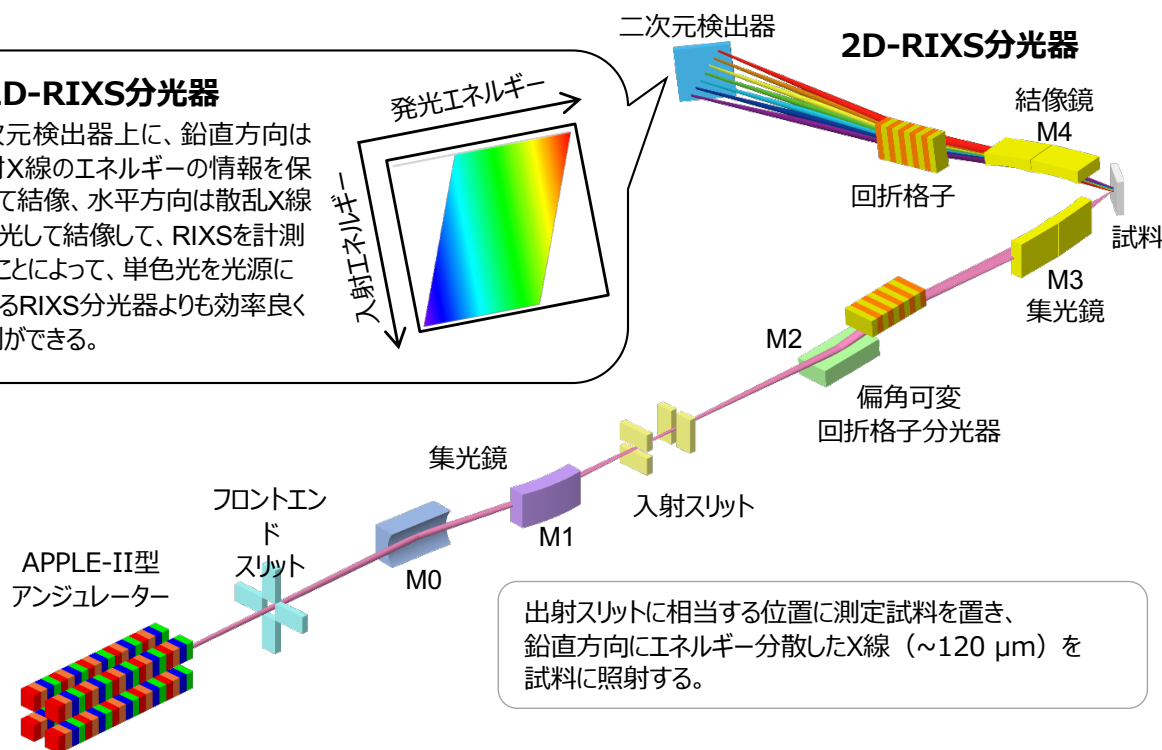
1. 共鳴非弾性X線散乱 (RIXS)

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	$E/\Delta E > 150,000 @ < 1000 \text{ eV}$
試料上フラックス	$> 10^{10} \text{ photons/s} @ E/\Delta E > 100,000$ (出射スリット2 μm 相当)
試料上ビームサイズ	$< 1 \mu\text{m} (\text{H}) \times < 5 \mu\text{m} (\text{V})^*$ * $E/\Delta E > 150,000 @ < 1000 \text{ eV}$ 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	$E/\Delta E > 150,000 @ < 1000 \text{ eV}$ ビームラインとあわせて $E/\Delta E > 100,000 @ < 1000 \text{ eV}$
RIXS分光器散乱角	$30^\circ \leq 2\theta \leq 150^\circ$

2D-RIXS分光器

二次元検出器上に、鉛直方向は入射X線のエネルギーの情報を保持して結像、水平方向は散乱X線を分光して結像して、RIXSを計測することによって、単色光を光源に用いるRIXS分光器よりも効率良く計測ができる。





NanoTerasu

BL02U 運用開始時 立ち上げ状況

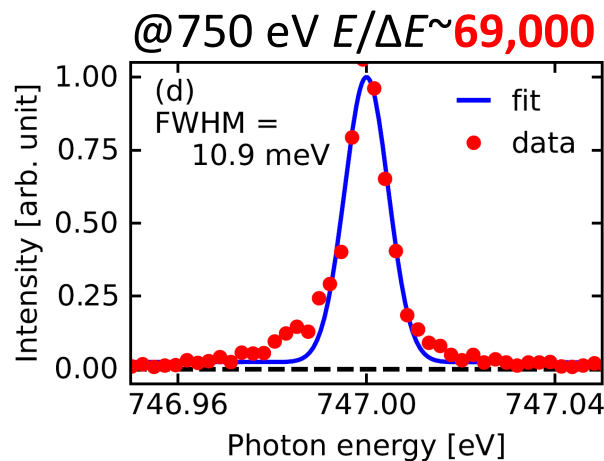
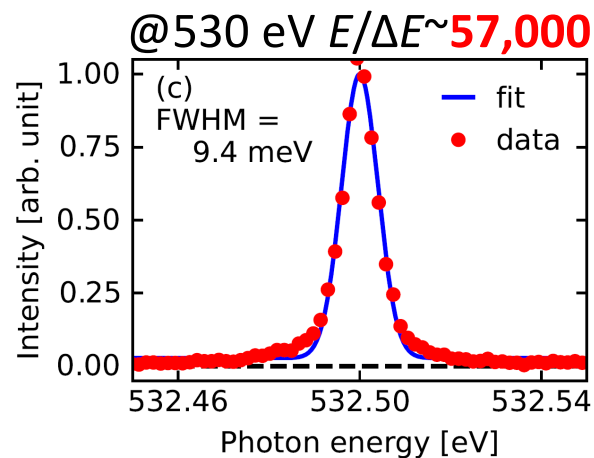
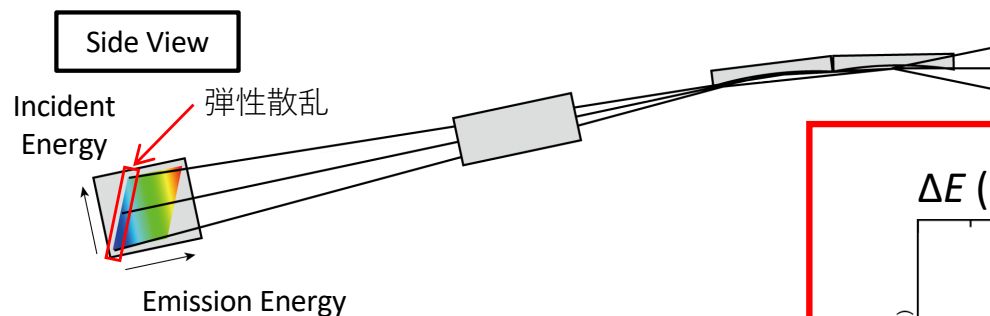


担当者

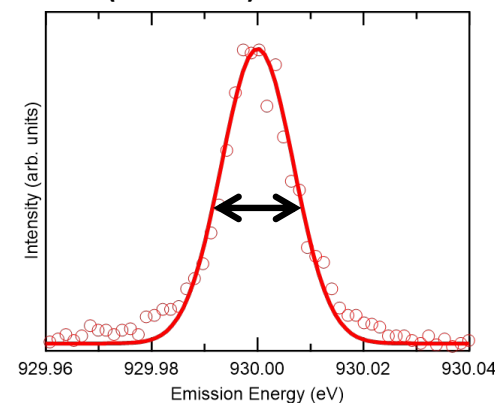
QST : 宮脇 淳
山本 航平

JASRI : 菅 大暉
Daniel Foster

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)



ΔE (FWHM) ~ 16.1 meV



@930 eV $E/\Delta E \sim 58,000$

**Cu L端での
世界最高分解能を達成**

- ・ユーザーに高分解能でのRIXS実験提供している
- ・分光器回転による分散測定での精度向上を開発中



NanoTerasu

BL02U 現在の調整状況

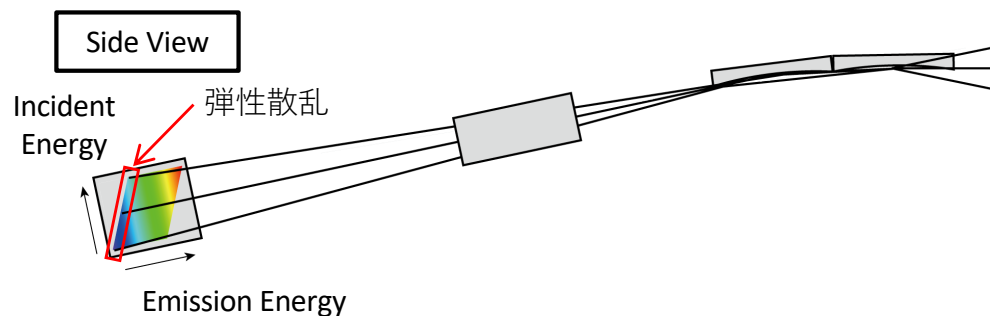


担当者

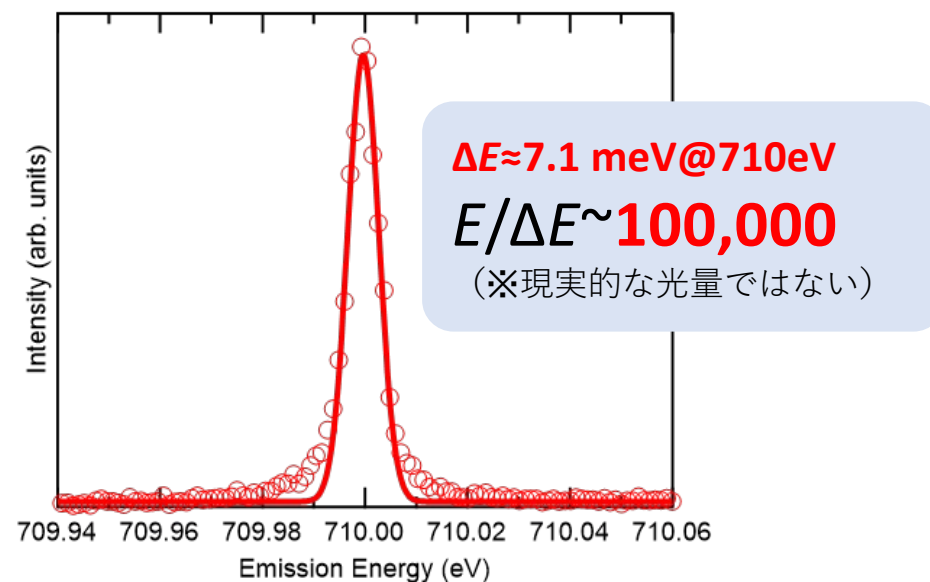
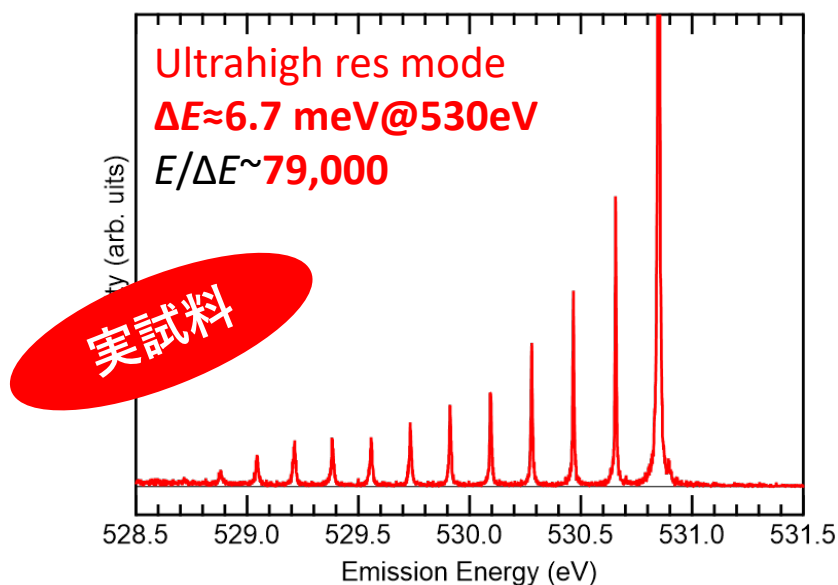
QST：宮脇 淳
倉橋 直也

JASRI：菅 大暉
Daniel Foster

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）



更なる高分解能化への調整



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。

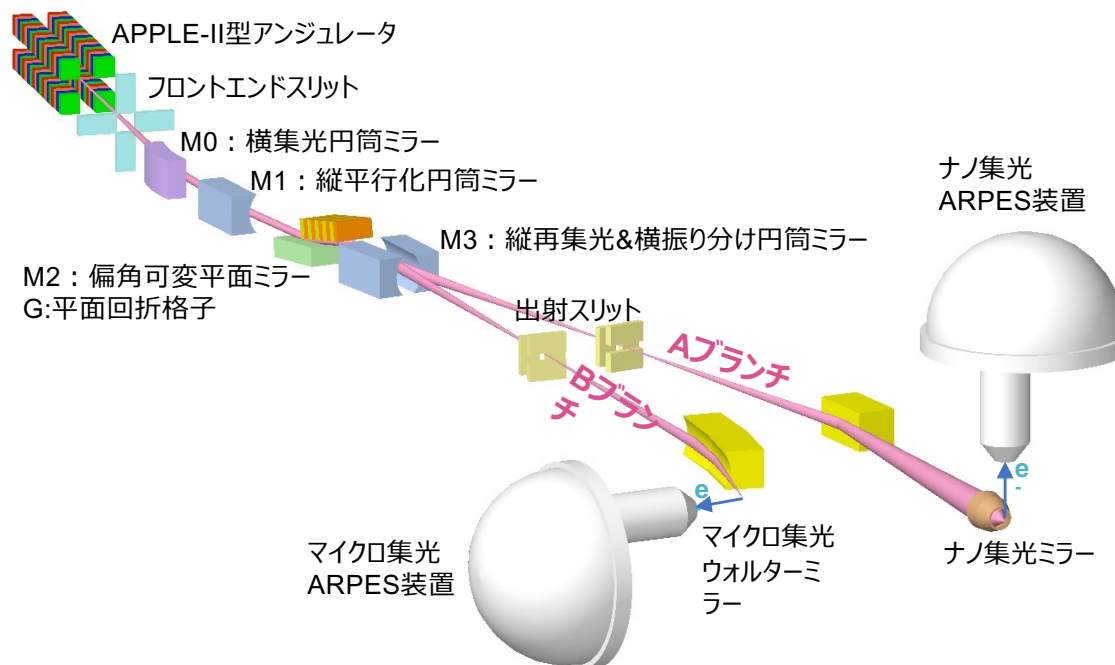
実験技術

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



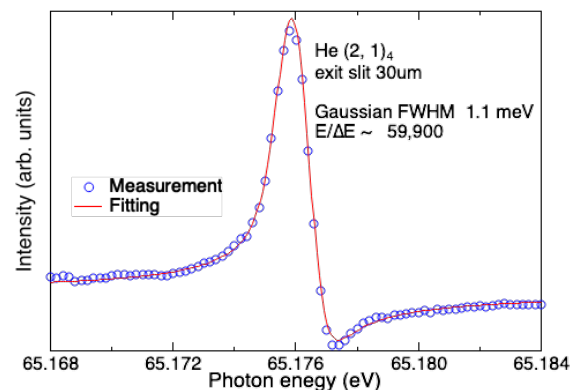
担当者

QST: 北村 未歩
西野 史

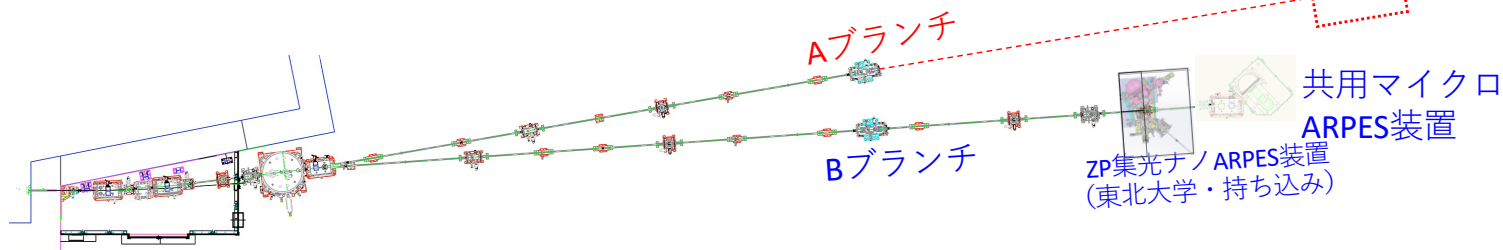
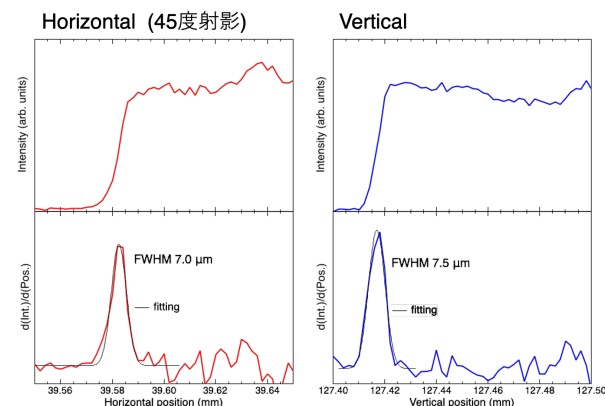
JASRI: 保井 晃
神田 龍彦

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

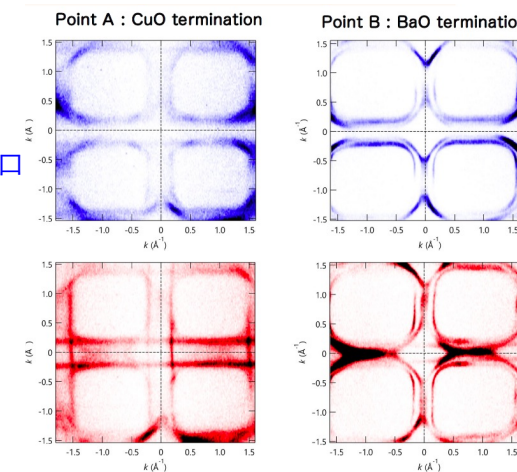
@65 eV $E/\Delta E \sim 60,000$



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
(H. Iwasawa et al., submitted.)

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。

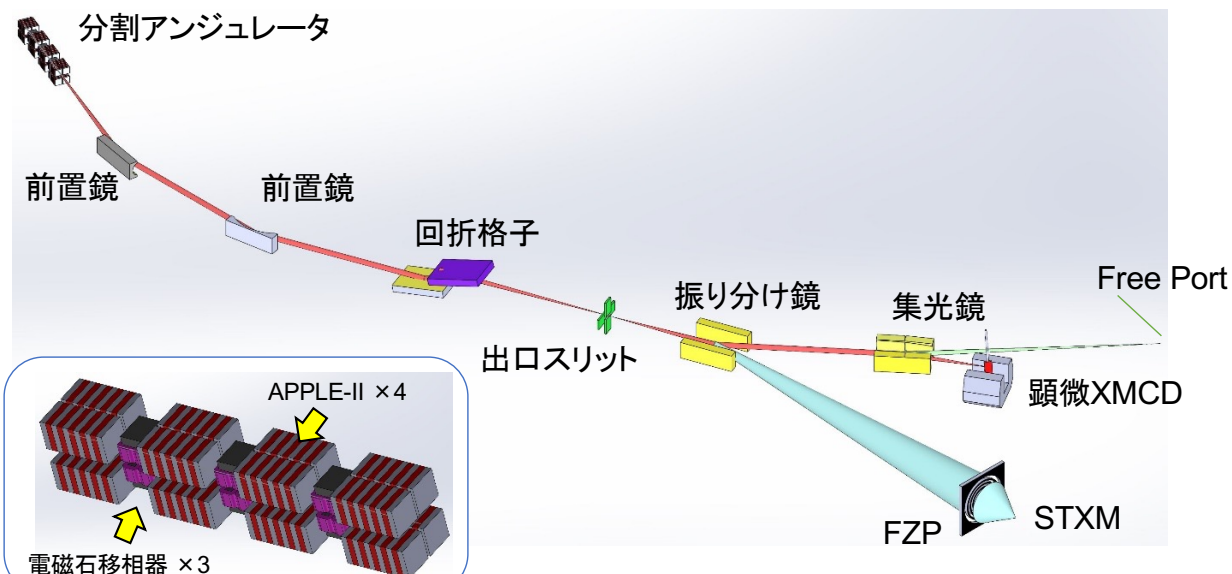
必要な集光サイズやフラックス、試料環境（磁場・電場・温度等）に応じた複数の試料ステーションを使い分けることにより、測定目的に最適化したハイスループット計測環境を提供する。

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) $\times$ 20nm (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)

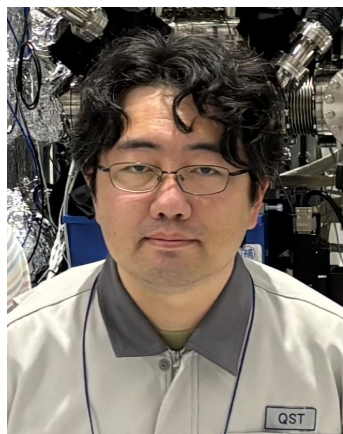


分割アンジュレータ模式図



NanoTerasu

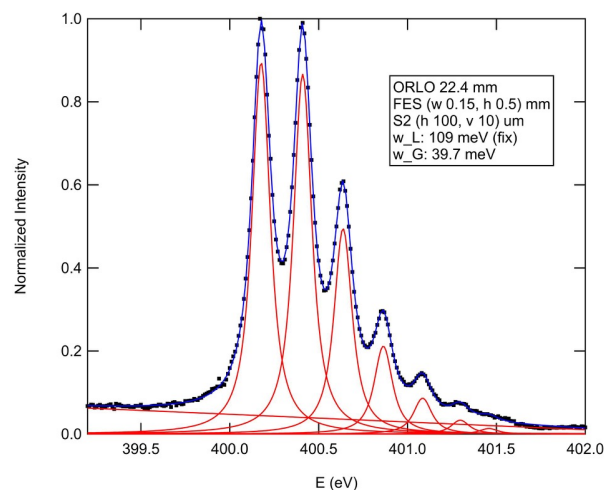
BL13U 立ち上げ状況



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)

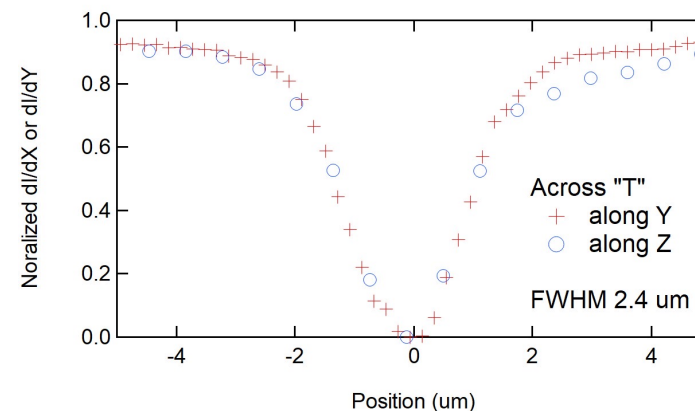
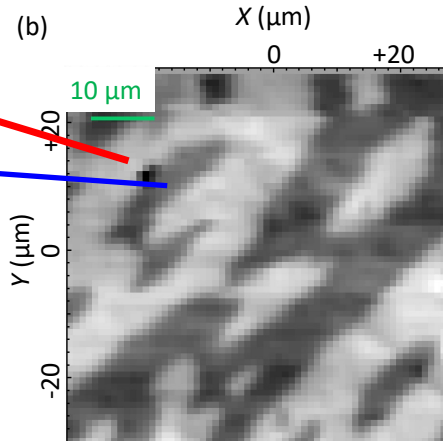
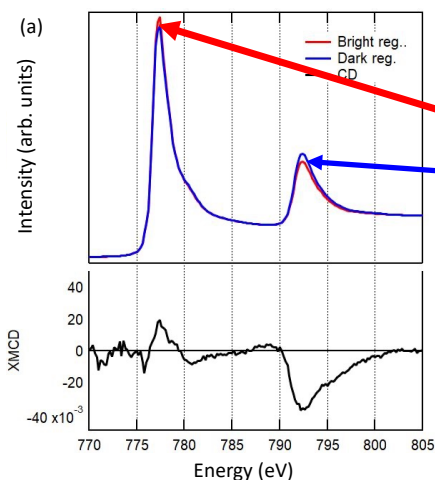
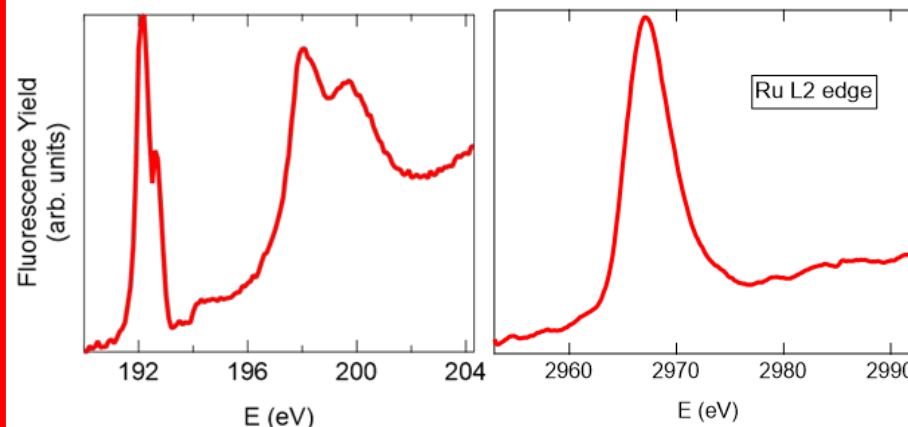


広エネルギー帯利用の確認

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)



SmCo₅磁石 (非着磁) の磁区パターン (Co L₃端、円偏光)
※ 試料提供: 李、境、上野 (QST・敬称略)

空間分解能 $\sim 2 \mu\text{m}$ での
顕微磁気イメージング



NanoTerasu

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-
整備期 共用BL (グループ1)	- 国内における高輝度軟X線利用研究の空白状態の解消 - 軟X線分光の主要測定手法をカバー	建設・整備	高度化		
高ユーザー ニーズ共用BL (グループ2)	- 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 - 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		早期に実現が求められる計画 検討 建設・整備		
応用拡大 共用BL (グループ3)	- 拡大する応用範囲への対応 - 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		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	
先端利用 共用BL (グループ4)	- 技術開発を要する先端的放射光利用 - マルチモーダル測定		既存BLにおける技術開発		建設・整備
R&D BL	- 新しい放射光利用の地平を拓く - フェーズⅡ～Ⅲにおいて、必要な研究開発に着手する		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
グループ2 高ニーズ共用BL											
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 2.1-20 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	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	○	◎		

2027年度運用を目指して建設開始



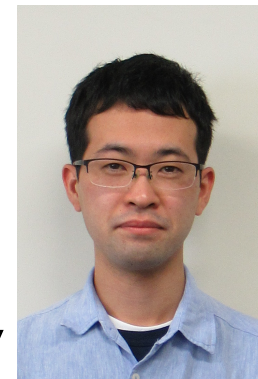
増設共用ビームライン：X線回折ビームライン

NanoTerasu



BL11W:
X線回折ビームライン

担当：山本航平（QST）

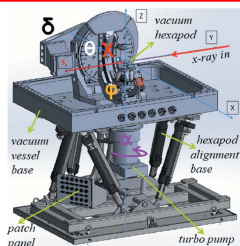
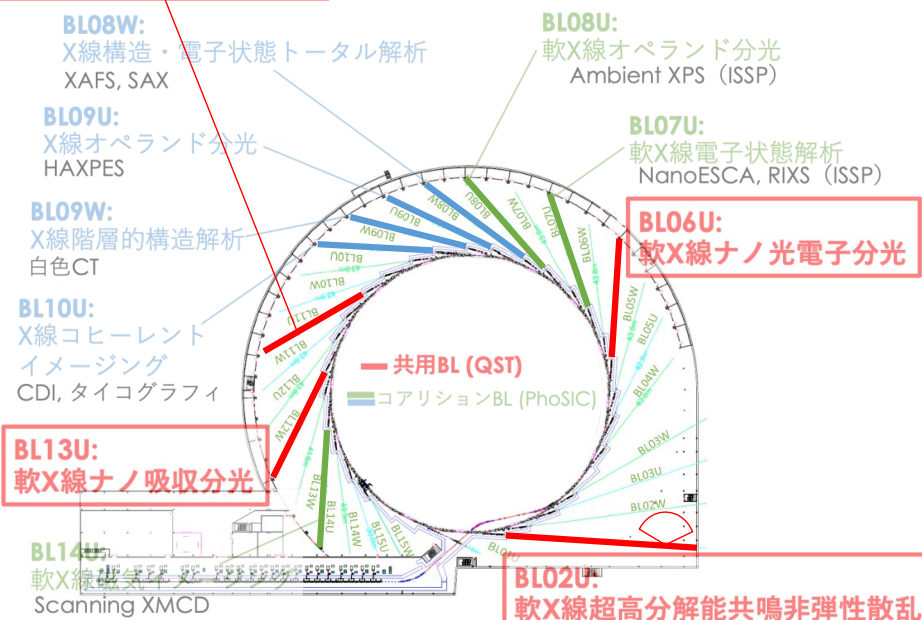


ビームライン仕様（検討中）

設置場所：BL11W

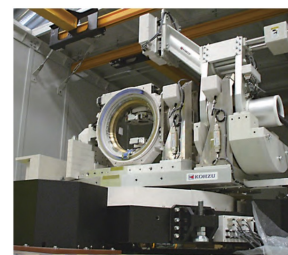
光源：多極ウィグラー

エネルギー範囲：2.1 – 20 keV



G. Ciatto et al. J. Synchrotron Rad. (2019). 26, 1374

真空対応
TX回折装置



神津精機カタログ

HX回折装置

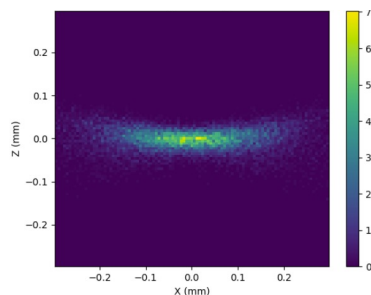


O. Shih et al. J. Appl. Cryst. (2022). 55, 34

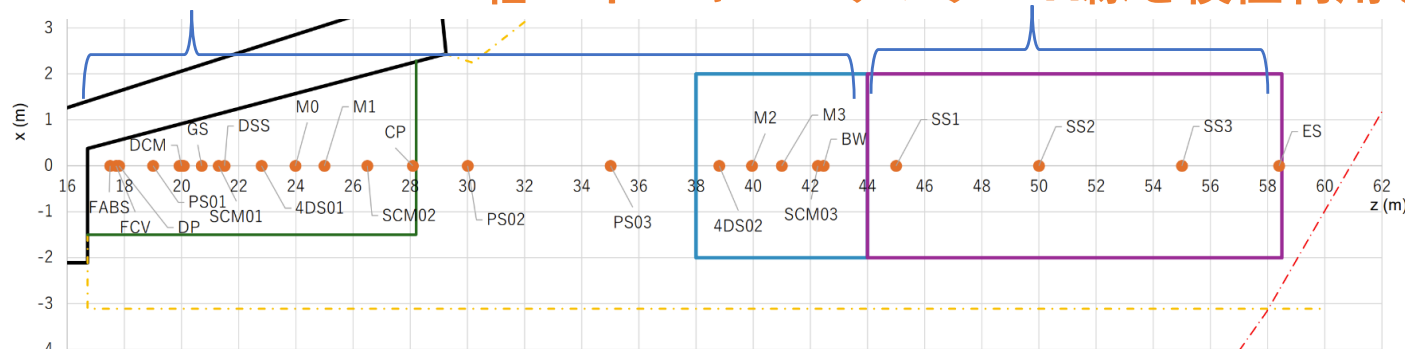
小角散乱装置

低エネルギー・テンダーX線に
最適化された光学系設計

低エネルギー・テンダーX線を積極利用するES計画



集光スポットの
シミュレーション





まとめ

NanoTerasu



○2025年3月3日より3本の共用ビームラインで本格共用を開始した。

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。

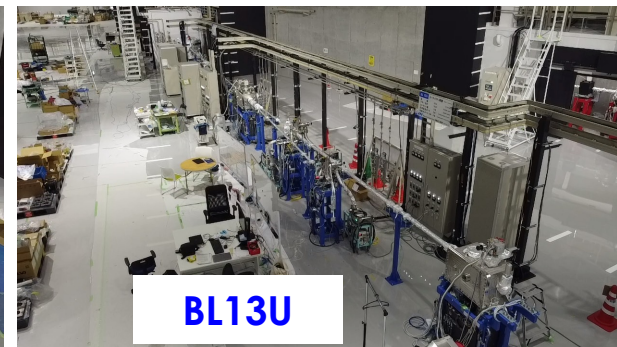
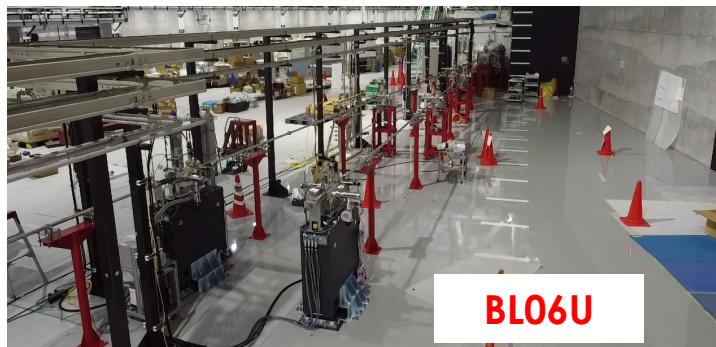
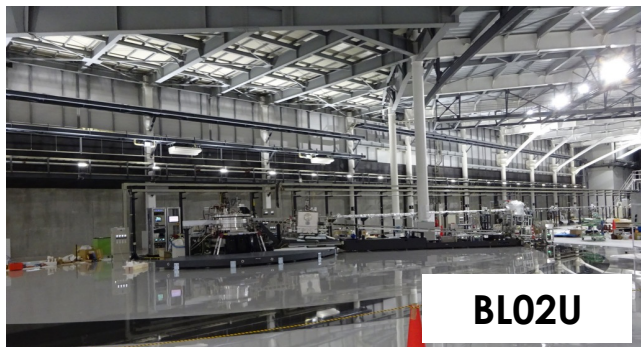
エンドステーションのマイクロ集光ARPES装置も利用可能

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。（2027年度運用開始予定）

今後のさらなる高度化や増設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。