

次世代放射光施設ビームライン概要

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構
量子ビーム科学部門
次世代放射光施設整備開発センター

本資料の利用は、Web上もしくは一時的なダウンロードによる閲覧に限定されます。
改変の有無にかかわらず、本資料の全部または一部を無断で複製・再配布することはできません。

次世代放射光施設とは？

最先端の科学技術は、物質・生命の高度な「機能理解」へと向かっており、従来の物質構造に加え、機能に影響を与える「電子状態」、「ダイナミクス」等の詳細な解析が可能な放射光の活用が国内外で進んでいます。近年、我が国で開発された放射光光源技術を基盤に3GeV程度の比較的コンパクトな加速器でもX線領域の放射光を得ることが可能になり、さらに高輝度化を進めることにより、高コヒーレンスな次世代型の放射光施設が誕生、海外ではこの次世代型の放射光施設が相次いで建設されています。次世代型放射光光源には、触媒化学や生命科学、磁性・スピントロニクス材料、高分子材料など、学術・産業の両面において高い利用ニーズが見込まれ、我が国の研究力強化と生産性向上への貢献が期待されるため、我が国においても、2024年度中に利用を開始することを目指し、「官民地域パートナーシップによる役割分担」に基づき、次世代放射光施設の整備が進められています。



提供：光科学イノベーションセンター

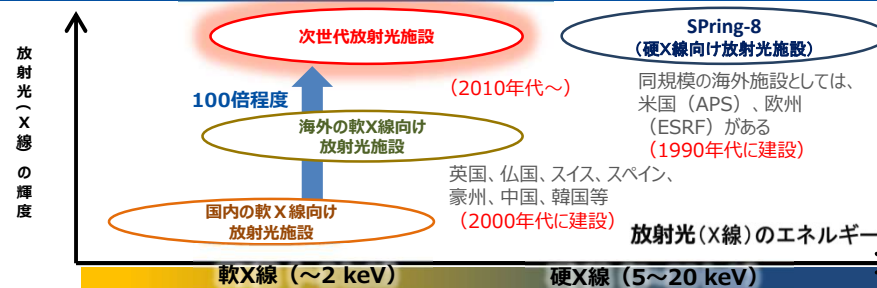
官民地域パートナーシップによる次世代放射光施設の推進

官民地域パートナーシップによる次世代放射光施設の整備は、右のような役割分担の下で進められています。国の整備・運用主体は、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構（QST）、パートナーは公募の結果、一般財団法人光科学イノベーションセンター(PhoSIC)を代表機関とする、同財団、宮城県、仙台市、東北大学、及び東北経済連合会が選定され、2019年3月より東北大学青葉山新キャンパスにおいて施設の建設が開始されました。パートナーには、このほか、コアリション（有志連合）形成等による産学連携・分野融合の推進も期待されています。

項目	内訳	役割分担
加速器	ライナック、蓄積リング、輸送系、制御・安全	国において整備
ビームライン	当初10本	国（3本）及びパートナー（7本）で分担
基本建屋	建物・附帯設備	パートナーにおいて整備
整備用地	土地造成	

日本初の次世代の高輝度 3 GeV光源

最新加速器技術を採用した低エミッタンス蓄積リング（3 GeV, 1.1nmrad）により、軟X線からテnder X線領域において国内既存施設を凌駕する高コヒーレンス・高輝度の光が得られ、さらに硬X線領域も利用可能です。また、蓄積リング周長349mと世界の同様施設と比較してコンパクトな設計ながら世界トップレベルの光源性能を発揮します。



様々な分野の研究開発に貢献するイノベーション・インフラを目指して

次世代放射光施設では、設置可能な最大28本のビームラインのうち、**国が整備する共用ビームライン3本、パートナーが整備するコアリションビームライン7本の運用を2024年度中に開始します**。高輝度コヒーレント軟X線・タンダーX線を用いた物質の機能を可視化する技術によって産み出される大量の高精度測定データを、AI・ビッグデータ技術で解析することにより、我が国の研究開発力を抜本的に強化します。この先端計測技術は、従来の放射光利用研究の枠を越えた広範な学術・産業分野での活用が期待されます。

【次世代放射光施設のビームラインナップ（詳細は次頁以降参照）】

共用ビームライン		BL08U	軟X線オペランド分光
BL02U*	軟X線超高分解能共鳴非弾性散乱	BL08W*	構造解析
BL06U	軟X線ナノ光電子分光	BL09U	X線オペランド分光
BL13U	軟X線ナノ吸収分光	BL09W	階層構造
コアリションビームライン		BL10U	X線コヒーレントイメージング
BL07U	軟X線電子状態解析	BL14U	軟X線イメージング

U：アンジュレーター（undulator）波長可変の準単色高輝度放射光が得られる挿入光源。小さいビーム径やコヒーレンスを活かした測定に適する。

W：ウィグラー（wiggler）大強度の白色放射光が得られる挿入光源。高エネルギー光や連続スペクトル光が必要な測定に適する。

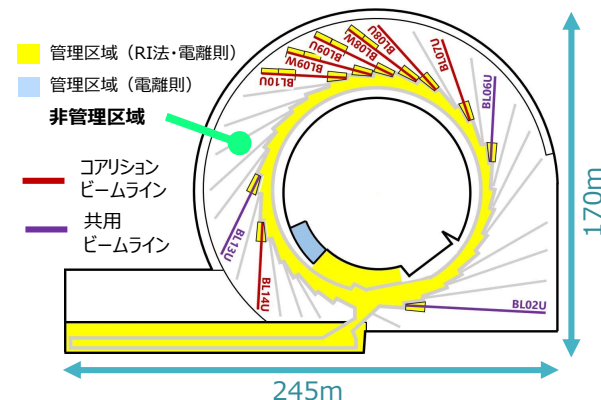
これまで国内の放射光施設では、実験ホールは放射線管理区域となっており、事前の放射線従事者登録等、利用上の様々な制約がありました。次世代放射光施設では、加速器トンネル、遮蔽ハッチ内部などを除き、**実験ホール(右写真)の大部分が非管理区域**となり、利用者の利便性が大きく向上します。

利便性の高い立地

次世代放射光施設は、東北大学青葉山新キャンパス内に整備されています。キャンパス内の地下鉄・青葉山駅から仙台駅まで、乗車時間9分で到着し、国内各地から非常にアクセスの良い放射光施設となります。東北大学では施設に隣接する敷地に、将来、産学連携の拠点となるサイエンスパークを設置予定であり、次世代放射光施設を核にしたリサーチコンプレックスが形成されることも期待されています。



提供：東北大学



お問合せ

- 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構
次世代放射光施設整備開発センター

代表電話：022-785-9480
E-mail: 3gev-info@qst.go.jp

- 一般財団法人 光科学イノベーションセンター

代表電話：022 - 752 - 2210
E-mail: info@phosic.or.jp

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

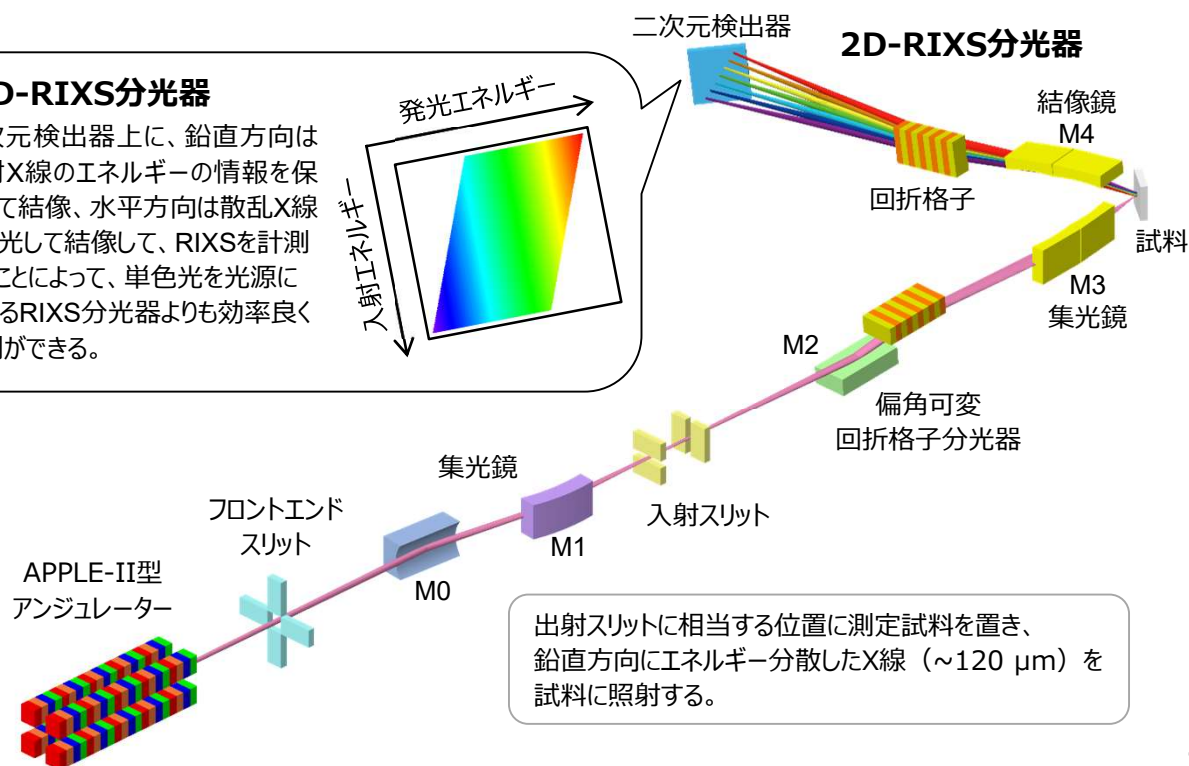
1. 共鳴非弾性X線散乱 (RIXS)

▶ 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	$E/\Delta E > 150,000 @ < 1000 \text{ eV}$
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	$< 1 \mu\text{m} (\text{H}) \times < \sim 5 \mu\text{m} (\text{V})^*$ * $E/\Delta E > 150,000 @ < 1000 \text{ eV}$ 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。





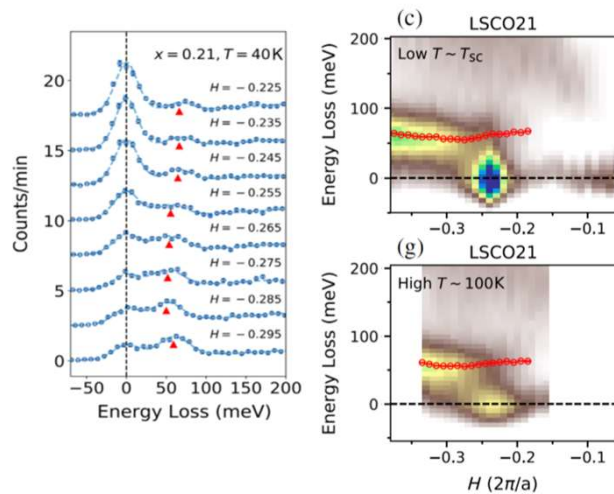
▶ 利活用上の特長

超高エネルギー分解能により、固体中のマグノン・フォノン・オービトン等の準粒子の観測が可能となり、電子物性・磁性研究への展開が期待される。また、原子・分子の微細な電子状態観測による分子クラスターの構造の同定や、振動励起の観測によるポテンシャルエネルギー面の取得など、基礎物理・化学への貢献のほか、オペランド計測によるデバイス中の電子状態やスピン秩序などの微小変化の解明により、先端機能材料の開発にも寄与することが期待される。

▶ 得られる情報

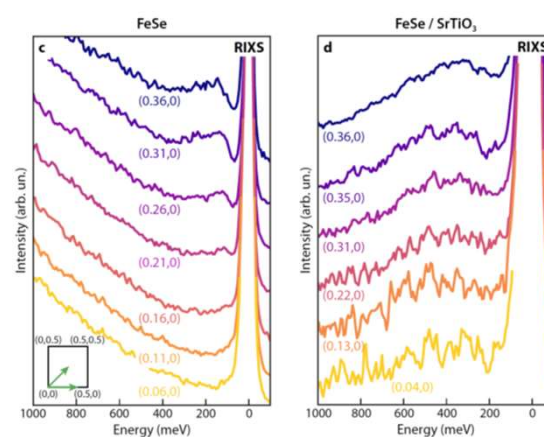
1. 元素選択的、バルク敏感な電子状態
2. マグノン、フォノン等の準粒子のエネルギー分散
3. 振動のエネルギー準位

固体 – 高温超伝導体、半導体、マルチフェロイクス物質、トポロジカル絶縁体等での素励起の観測



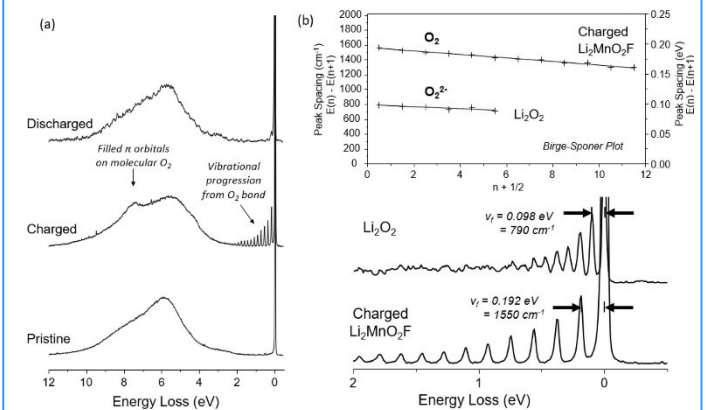
J. Q. Lin, et al., *Phys. Rev. Lett.* **124**, 207005 (2020).

バルクに限らず薄膜中のオービトン・マグノン・フォノン等の準粒子の分散を観測可能



J. Pelliciari et al., *Nat. Commun.* **12**, 3122 (2021).

原子・分子 – 軌道の電子状態、振動のエネルギー準位の観測



R. Sharpe et al., *J. Am. Chem. Soc.* **142**, 21799 (2020).

振動準位からポテンシャルエネルギー面を取得可能

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

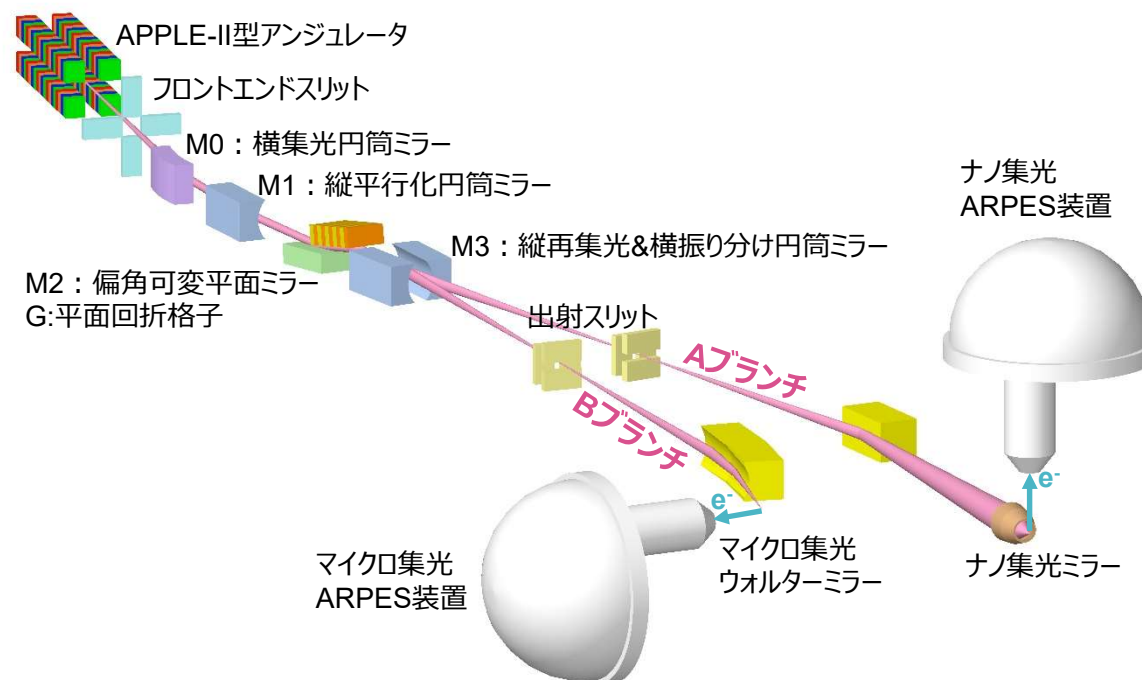
BL06Uでは、超精密加工技術を駆使したミラー集光光学系により、これまでにない高フラックスの軟X線ナノビームを供給し、100 nm以下の空間分解能でのスピン・角度分解光電子分光（SR-ARPES）を実現する。これにより物質中のナノ領域に現れる電子状態をエネルギー・運動量・スピン状態まで分解して直接的に観測することができる。ビームラインは2つのブランチに分かれており、ナノ集光の先端ARPES実験の他に、より汎用的なマイクロ集光ARPES実験を相補的に利用できる環境を備える。

▶ 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: $< 100 \text{ nm} \times 100 \text{ nm}$ Bブランチ: $< 1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$
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	$\pm 30^\circ$



物性物理

無機化学

有機化学

エレクトロニクス

フォトニクス

超伝導

誘電体

磁性

金属・鉄鋼

機械

エネルギー
変換・貯蔵グリーン
ケミストリー
環境科学

複合材料

薄膜・表面

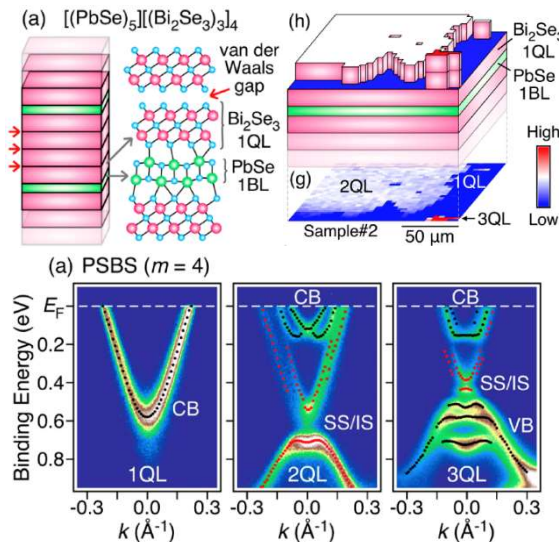
▶ 利活用上の特長

100 nm以下の空間分解能で、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。均一な単結晶表面を得ることが困難な物質においても局所的な清浄表面を選別して本質的な電子状態を得ることができる。また電子相分離やトポロジカルエッジ状態などの空間依存性が本質的な物理現象にもアクセスすることが可能となる。さらにナノデバイス構造のオペランド計測により動作中の電子状態変化を直接観測することが可能であり、基礎物理のみならず産業応用にも寄与することが期待される。

▶ 得られる情報

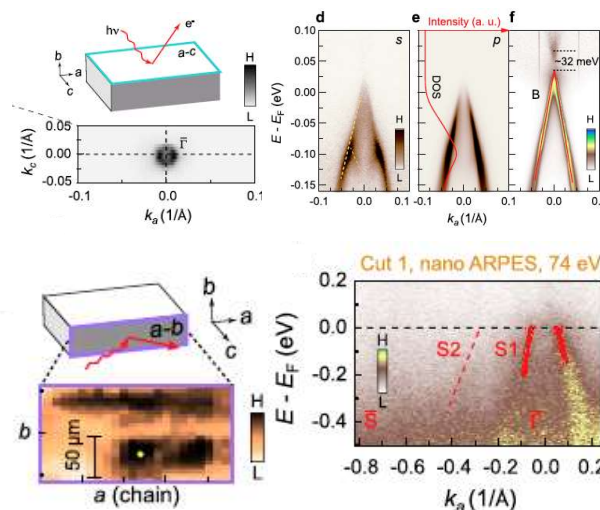
1. 固体のspin分解したバンド構造
2. 不均一な電子状態の空間分布
3. 結晶の局所的に現れる特異な電子状態の実証
4. ナノ結晶・構造体やナノデバイス構造の電子状態

結晶表面の不均一な電子状態の空間分布



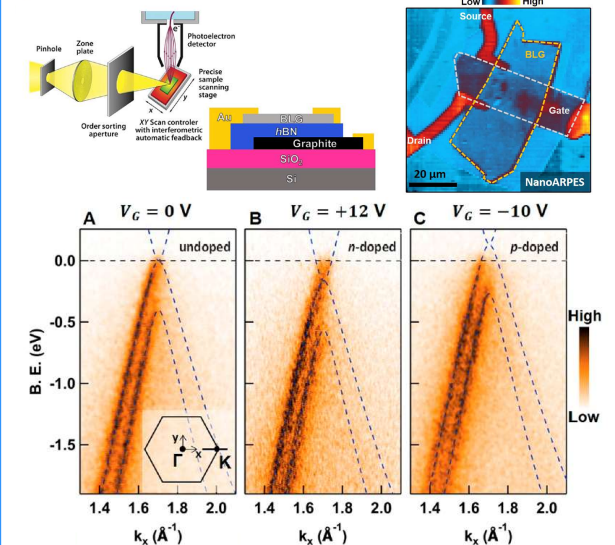
単結晶劈開面に偶発的に分布した原子層数依存性
K. Nakayama et al., *Nano Lett.* **19**, 3737 (2019).

局所的に現れる特異な電子状態の実証



弱いトポロジカル絶縁体ZrTe₅の側面電子状態
P. Zhang et al., *Nat. Commun.* **12**, 406 (2021).

ナノデバイス構造の動作中電子状態



2層グラフェンデバイスの電圧印加下測定
F. Joucken et al., *Nano Lett.* **19**, 2682 (2019).

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。

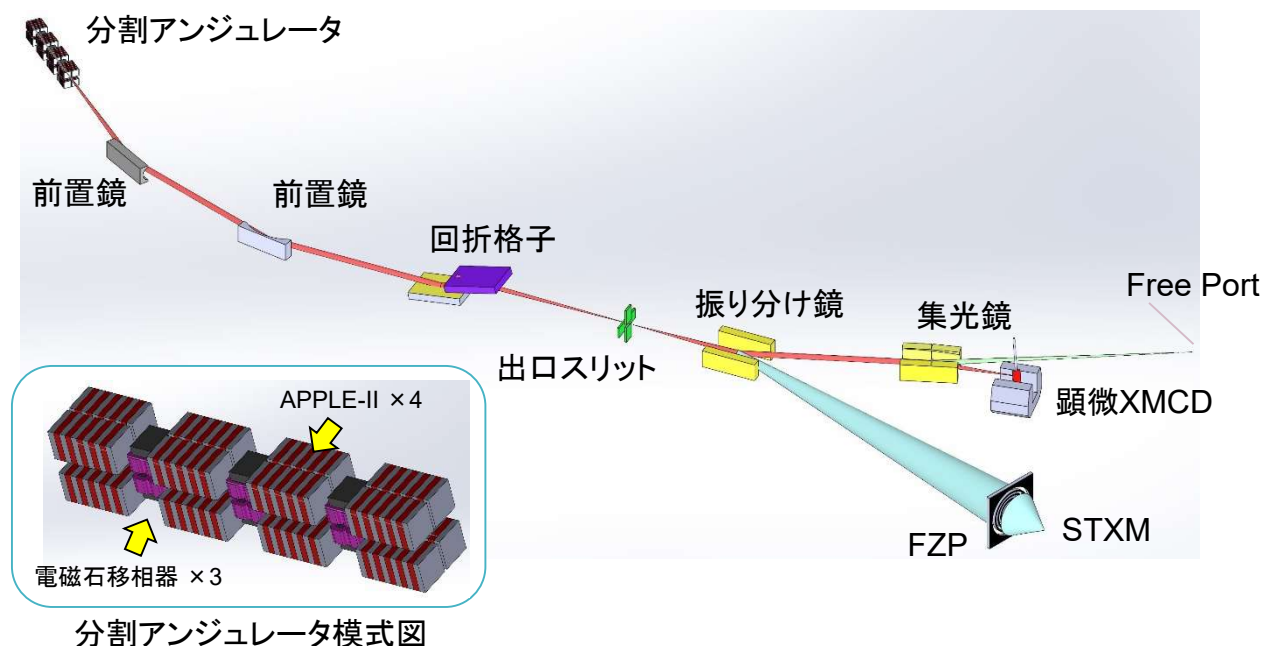
必要な集光サイズやフラックス、試料環境（磁場・電場・温度等）に応じた複数の試料ステーションを使い分けることにより、測定目的に最適化したハイスループット計測環境を提供する。

▶ 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 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)



物性物理



無機化学



エレクトロニクス



磁性



金属・鉄鋼



複合材料



薄膜・表面



生命科学



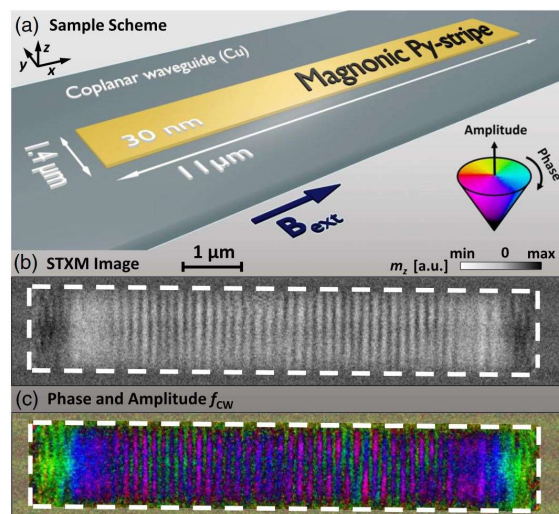
▶ 利活用上の特長

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と新型蓄積リングの低エミッタンス電子ビームの特長を活かした顕微磁気分光測定を行う。フレネルゾーンプレート(FZP)を用いたSTXMステーションでは10 nmオーダーの顕微集光により単一素子・単一磁区内の磁気構造の観測を行う。より光子数を要するダイナミクス測定等においては、高フラックスを供給可能な集光鏡によるマイクロ集光ステーションを利用できる。いずれの場合も分割光源による放射光の時間構造を利用したロックイン検出により、DC検出よりも低ノイズ・短時間測定が可能である。

▶ 得られる情報

1. 試料構成元素・原子軌道毎の磁性（スピン軌道偏極）、配向、対称性、価数分布
2. 磁場・電場下での磁気構造ダイナミクス
3. 1素子（ $<1\ \mu\text{m}$ ）・1磁区（ $<100\ \text{nm}$ ）内部の微細磁気構造

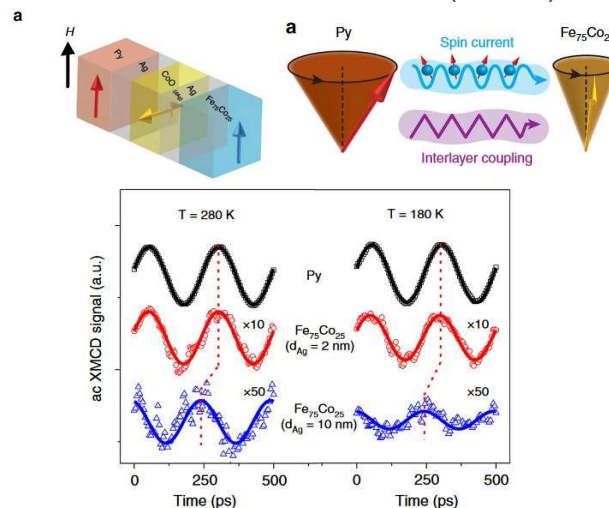
マグノン伝播の顕微スナップショット



量子化したスピン波（マグノン）が微小試料内を伝播する様子の時空間分解イメージ

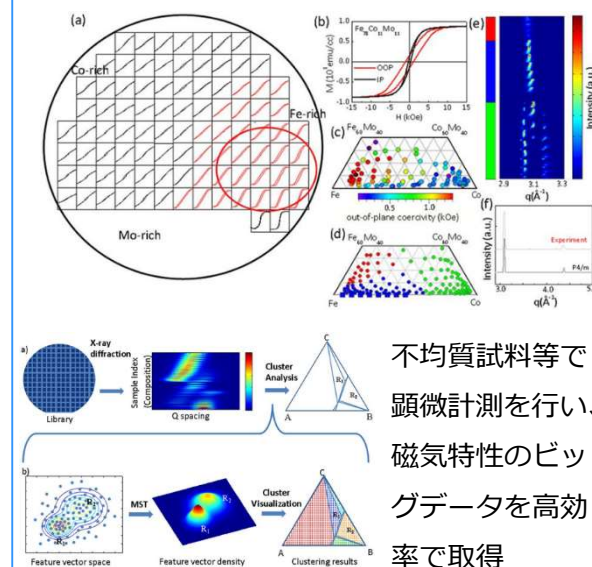
N. Träger et al. *Phys. Rev. Lett.* **126**, 057201 (2021).

スピン流ダイナミクスの観測(XFMR)



- ・ 純スピン流のAC成分を直接観測
 - ・ 班強磁性体・薄膜層間の伝播も観測可能
- Q. Li et al., *Nature Commun.* **10**, 5265 (2019).

ハイスループット顕微磁気計測



不均質試料等で
顕微計測を行い、
磁気特性のビッグ
データを高効率
で取得

A. G. Kusne et al., *Sci. Rep.* **4**, 6367 (2014).

固体、液体、固液界面などの電子状態や化学状態を試料の制約を受けずに解析する

▶ ビームラインの特徴

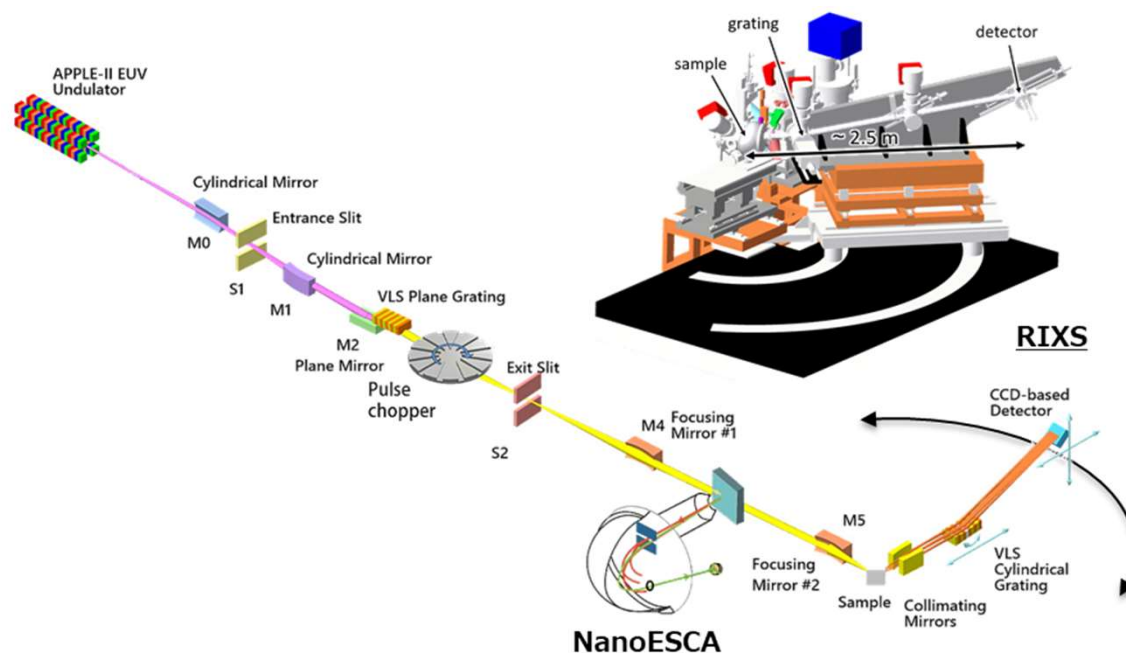
BL07Uは、50 ~ 1000 eVの軟X線を利用するビームラインです。APPLE-II型アンジュレーターによって、垂直・水平直線偏光や左右円偏光を利用することができます。また、新しい光学設計の採用により、軟X線共鳴非弾性散乱 (RIXS) やナノ光電子分光 (NanoESCA) における高エネルギー分解能モードや高フラックス（走査型イメージング）モードでの運用が可能となります。

▶ 諸元

光源	APPLE-II型アンジュレーター 周期長75 mm／周期数53／ 最小ギャップ値15 mm／最大K値7.98
偏光 (エネルギー範囲)	水平直線 (100~1000 eV) 左右円 (50~1000 eV)
エネルギー分解能	$E/\Delta E = 10000 \sim 30000$
試料上フラックス	$> 10^{12}$ photons/s
試料上ビームサイズ	RIXS: $50 \mu\text{m}$ (H) $\times$ $0.5 \mu\text{m}$ (V) → $100 \text{ nm}\phi$ (将来計画) NanoESCA: $50 \text{ nm}\phi$
RIXS検出角	$45^\circ \leq \theta \leq 135^\circ$

▶ 実験技術

1. 共鳴軟X線非弾性散乱 (RIXS)
2. 軟X線吸収分光 (XAS)
3. ナノX線光電子分光 (NanoESCA)



※光学配置の詳細は変更が生じる可能性があります。



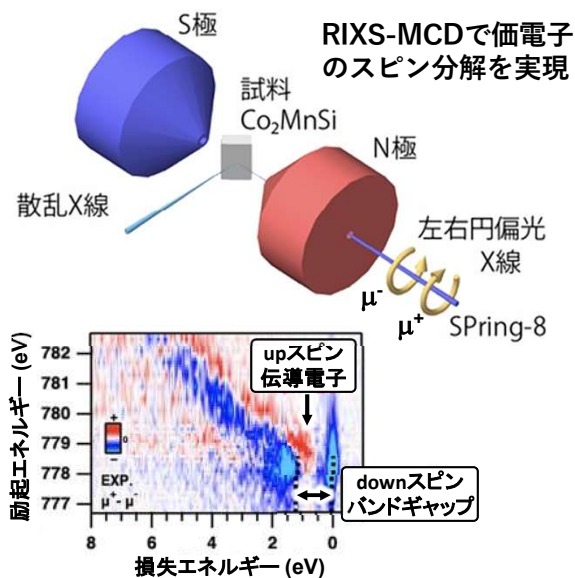
▶ 利活用上の特長

軟X線電子状態解析ビームライン (BL07U) では、共鳴軟X線非弾性散乱 (RIXS) 装置が整備され、任意雰囲気において物質 (固体、液体、気体) の機能に関わる電子の状態、局所結合状態を分析することができます。また、ナノX線光電子分光装置では、微細構造を有する物質の局所化学状態分析が可能です。これらの特長から、化学、物性物理、電池、エネルギー材料、医学、創薬、といった分野における電子状態、化学状態分析への活用が期待されます。

▶ 得られる情報

1. 固体や液体、気体の電子状態・化学状態
2. 任意ガス雰囲気中の物質の電子状態・化学状態
3. 電場や磁場を印可した物質の電子状態・化学状態
4. 機能材料・触媒材料のオペランド電子状態マッピング

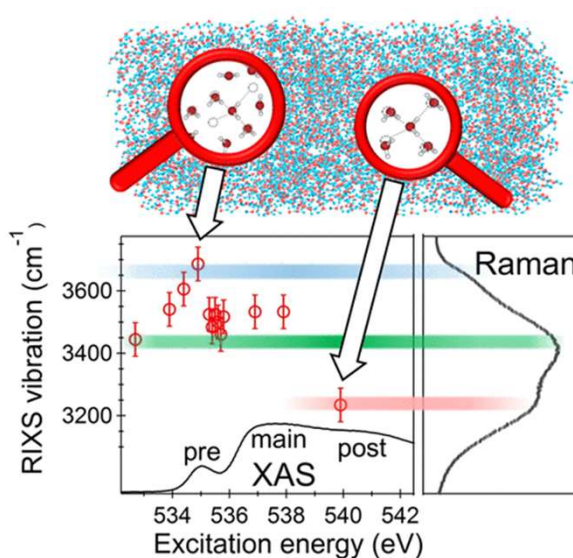
スピントロニクス材料の機能電子を可視化



⇒ 高性能記憶材料、熱電材料

H. Fujiwara et al., *Sci. Rep.* **11**, 18654 (2021).

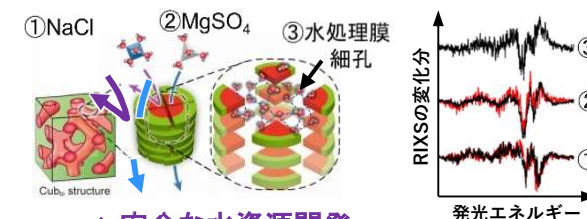
水や溶液のミクロ不均一性に迫る



⇒ より美味しい飲料へ

Y. Harada et al., *J. Phys. Chem. Lett.* **8**, 5487 (2017).

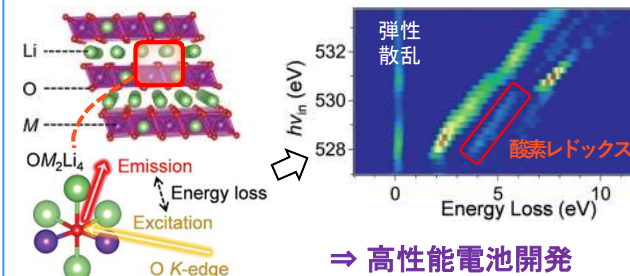
水処理膜の機能発現メカニズムを解明



⇒ 安全な水資源開発

R. Watanabe et al., *Angew. Chem. Int. Ed.* **59**, 23461 (2020).

蓄電における酸素レドックスの直接観測



⇒ 高性能電池開発

T. Sudayama et al., *Energy Environ. Sci.* **13**, 1492 (2020).

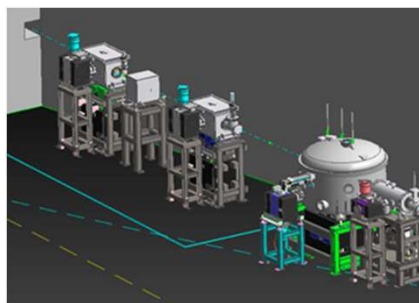
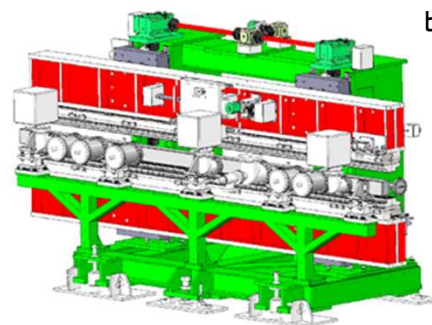
不均一試料を精密に化学分析し、非平衡な動作環境下で材料の機能性をオペランド観測する。

▶ ビームラインの特徴

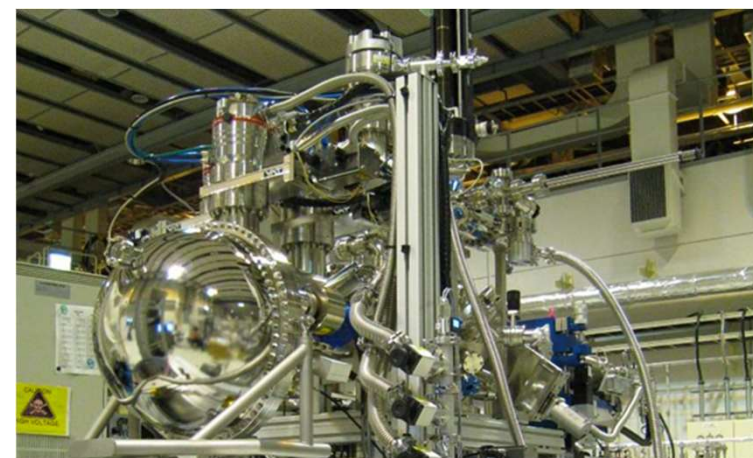
BL08Uは180 ~ 2000 eVの軟X線を、垂直・水平直線偏光や左右円偏光に切り換えて利用できます。光学系として任意偏角タイプを採用するため、実験の目的に応じて高エネルギー分解能モードや高フラックスモードを選択できます。そのためX線吸収分光(NEXAFS)・光電子分光(XPS)による精密な化学分析から分子配向決定や、雰囲気光電子分光 (AP-XPS) による動作環境下でのオペランド計測など、試料の物性と機能性を分析することができます。現在、インフォマティクス技術とロボット制御を組み合わせ、これら「先端分析」と「合成法開発」を融合させた新たなビームタイム利用の実験システム開発も実施しています。

▶ 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4.90
偏光 (エネルギー範囲)	直線偏光 (180~2000 eV) 円偏光 (180~1400 eV)
エネルギー分解能	$E/\Delta E > 10000$
試料上フラックス	$> 10^{12}$ photons/s
試料上ビームサイズ	AP-XPS $< 10 \mu\text{m(H)} \times < 10 \mu\text{m(V)}$ 高分解能XPS $< 10 \mu\text{m(H)} \times < 10 \mu\text{m(V)}$ ナノ集光NEXAFS $< 1 \mu\text{m(H)} \times < 1 \mu\text{m(V)}$
試料周り雰囲気圧力	高分解能XPS, AP-XPS : 10^{-10} mbar ~ 100 mbar (従来) → 1023 mbar (大気圧)



ビームライン光源 (APPLE-II型アンジュレータ)

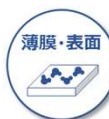


雰囲気光電子分光 (AP-XPS)ステーション

任意偏角タイプビームライン (Collimated PGM)

▶ 実験技術

1. 雰囲気(軟X線)光電子分光 (AP-XPS)
2. 高分解能(軟X線)光電子分光 (XPS)
3. 汎用型nm~ μm 集光軟X線分光
4. (軟X線)吸収端近傍微細構造 (NEXAFS)
5. インフォマティクス・ロボット制御



▶ 利活用上の特長

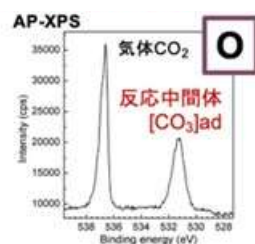
試料物質を構成する元素と化学状態(電子状態)を定量的に分析するX線吸収分光(NEXAFS)と光電子分光(XPS)の精密測定をナノ〜マイクロ空間分解で実施します。さらに試料周りをガス雰囲気で満たした固気界面における化学反応をリアルタイムで観測するオペランド実験も可能です。触媒やエネルギー材料などの機能性分析や、化学・物理の先端物質の物性評価などが実施できます。現在、これら「試料の精密オペランド計測」にインフォマティクス・ロボット技術を組み合わせることで「試料の合成法開発」も可能な準備を進めています。

将来的には「分析」と「開発」を跨いだ新たな放射光利用が本ビームラインで実現されます。

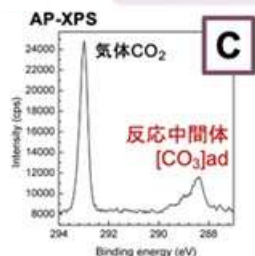
▶ 得られる情報

1. 構成元素、化学状態、分子振動の定量分析
2. 未知試料の物質同定
3. 化学反応再現下における表面リアルタイム観察と反応中間体の特定
4. 不均一試料の元素・化学状態の空間マップ
5. 材料合成法条件の最適化 (開発中)

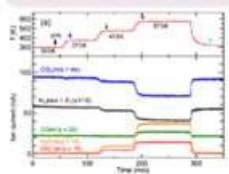
材料表面(化学反応)の トータルオペランド化学分析



表面反応分子

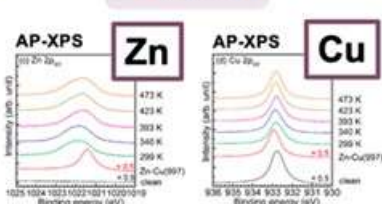


反応物・生成物



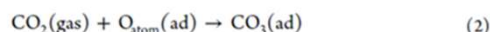
反応中の気体質量分析

触媒表面



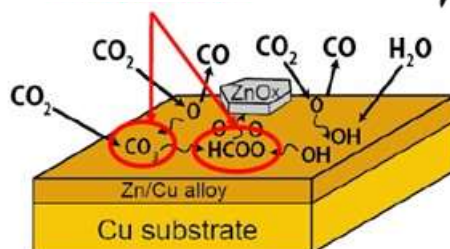
⇒ 準大気圧下での表面化学反応の解明

反応機構の解決



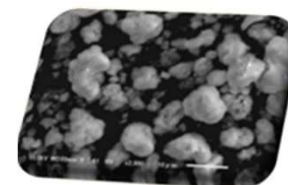
学理の構築

反応中間体の特定



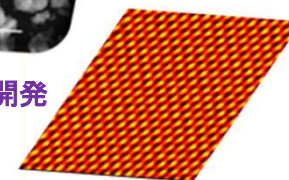
T. Koitaya et al., ACS Catalysis 9, 4539 (2019).

不均一試料の微小空間化学分析

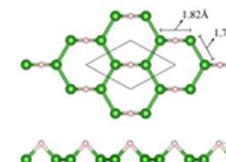
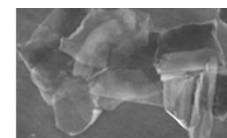


実触媒
固/気界面

⇒ モデル触媒の開発



材料の合成法開発



⇒ マテリアルズインフォマティクスの応用

H. Nishino et al., J. Am. Chem. Soc. 139, 13761 (2017).

物質・材料の電子状態から局所～マクロな構造まで、いろいろ測れるオールラウンダー

▶ ビームラインの特徴

BL08Wは、2.1 ~ 13 keVのテンダーX線および硬X線をシームレスに利用できるビームラインです。水平方向に幅広い形状をもつX線ビームの一部を結晶分光器で分岐し、メインビームラインと2つのブランチビームラインを同時に利用する設計になっています。メインビームラインでは二結晶分光器によりエネルギーが可変なため、PやSといった機能材料に重要な元素に着目したX線吸収分光や小角／広角X線散乱などの利用が可能です。

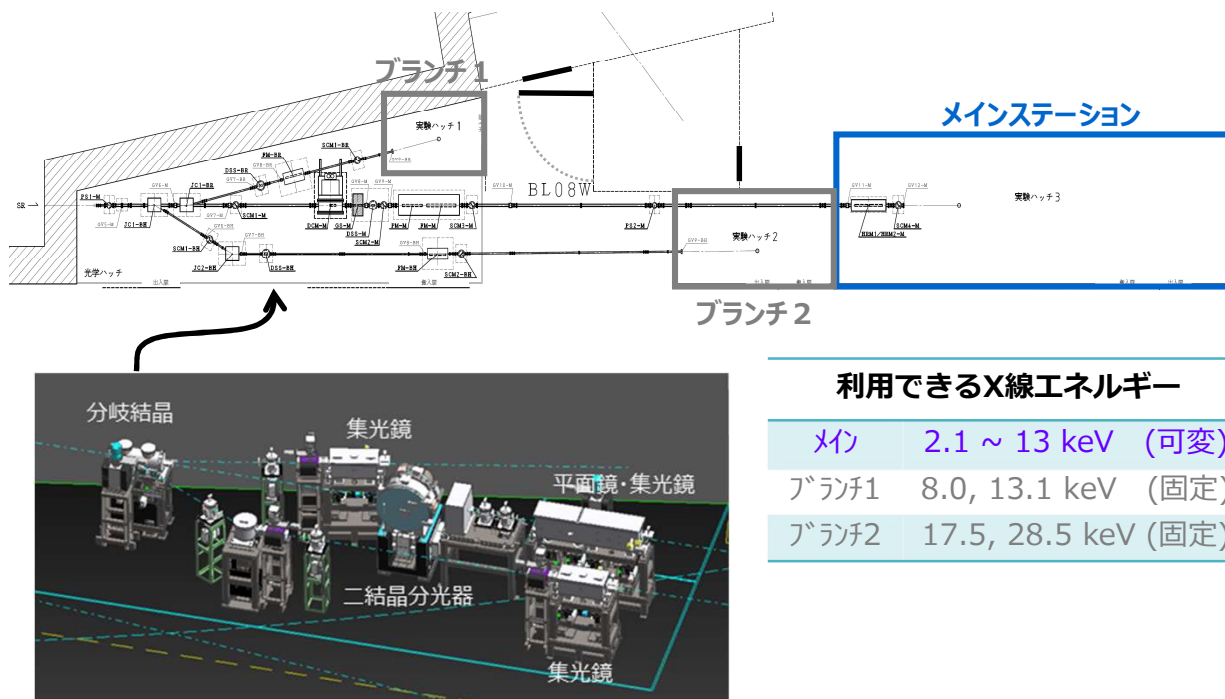
▶ 実験技術

1. X線吸収微細構造 (XAFS)
2. 小角X線散乱 (SAXS)
3. 広角X線散乱 (WAXD)

▶ 諸元

光源	マルチポールウィグラー 周期長120 mm／周期数5／ 最小ギャップ値15 mm
偏光 (エネルギー範囲)	水平直線 (2.1~13 keV)
エネルギー分解能	$E/\Delta E = 1600 \sim 13000$
試料上フラックス	$> 10^{12}$ photons/s
試料上ビームサイズ	150 μm (H) $\times$ 50 μm (V)

・XAFS時間分解能：10sec～（クイックXAFS利用） ・USAXS：6 keV, カメラ長10mで$q=10^{-3} \text{ nm}^{-1}$をカバー ・引っ張り試験機等の大型装置の持ち込みを想定 ・ブランチに自動計測ステーションを整備 (粉末X線回折、汎用小角X線散乱を予定)	
---	--





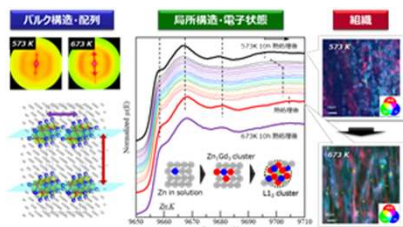
▶ 利活用上の特長

構造解析ビームライン（BL08W）では、材料・デバイス開発において重要な手法であるX線吸収微細構造（XAFS）、広角／小角X線散乱（SAXS／WAXD）などの測定が可能です。メインエンドステーションにはユーザー持ち込み装置を設置するスペースを確保しており、製造現場を再現した測定を行うことができます。また、XAFSとWAXDを単一試料で測定することで、機能と構造を同時に調べることができます。これらの特長から、材料を問わず様々な分野での活用が期待されます。

▶ 得られる情報

1. 電子・化学状態
2. 局所構造
3. 結晶構造・メゾ構造
4. 熱・光・応力など外場印加下での変化

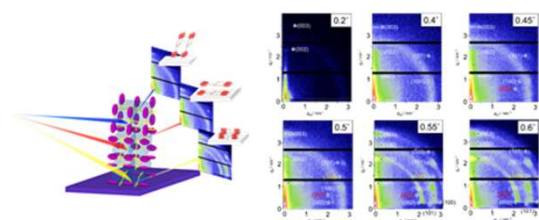
構造・組織形成過程のマルチモーダル解析



⇒ 次世代構造材料の創成

<http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/nishibori/>

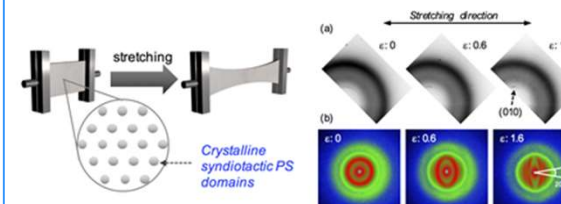
薄膜内部の構造分布解析



⇒ 有機薄膜太陽電池

K. Kamitani et al., *Langmuir* **34**, 8516 (2018).

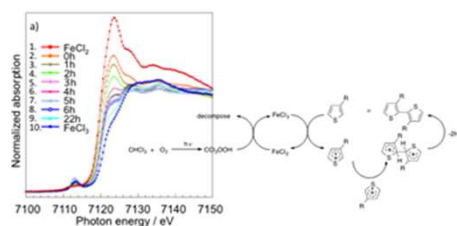
変形過程のその場観察



⇒ 高性能プラスチック材料

Y. Higaki et al., *Macromolecules* **50**, 6184 (2017).

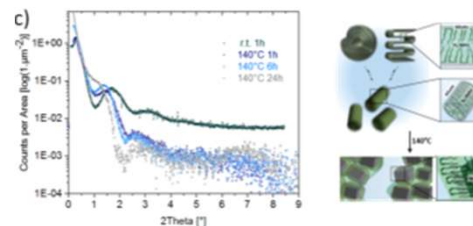
重合反応のその場追跡



⇒ プラスチック材料の再資源化

T. Hirai et al., *J. Polym. Sci. A* **53**, 2075 (2015).

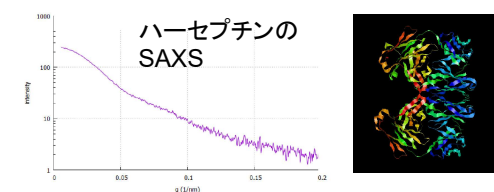
多孔質材料の階層構造その場追跡



⇒ CO₂の分離・回収

M. Castro et al., *Chem. Mater.* **30**, 2676 (2018).

タンパク質・ミセルの溶液構造



⇒ 抗体医薬品・mRNAワクチンの開発

高輝度光科学研究センター 八木直人コーディネータ提供
[参考: X. Tian et al., *J. Pharmac. Sci.* **103**, 1701 (2014).]

高エネルギーX線を利用して材料内部や埋もれた界面の電子状態・化学状態を探る

▶ ビームラインの特徴

BL09Uは、2.1~15 keVのテンダーX線および硬X線を利用するビームラインです。真空封止アンジュレーターから高輝度なX線が得られるため、サブμmオーダーまで集光しても十分な強度のX線を利用することができます。エンドステーションには硬X線光電子分光（HAXPES）装置が整備され、硬X線を利用したバルク敏感な電子状態解析が可能であり、将来的にはオペランド観測技術を導入します。

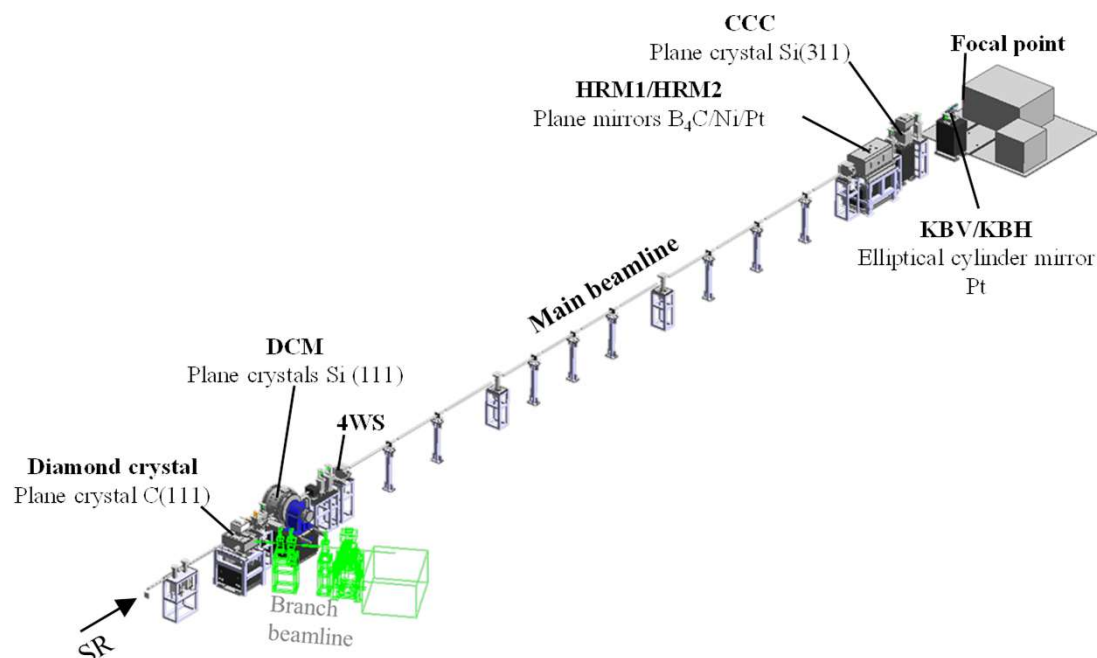
▶ 諸元

光源	真空封止アンジュレーター 周期長22 mm／周期数166／ 最小ギャップ値5 mm／最大K値2.51
偏光 (エネルギー範囲)	水平直線 (2.1~15 keV)
エネルギー分解能	$E/\Delta E = 7,000 \sim 36,000$
試料上フラックス	$> 10^{12}$ photons/s
試料上ビームサイズ	$< 1 \mu\text{m} \phi$

- 実験ハッチ内に面積3 m×3 m、高さ3.5 mのスペースが準備され、ユーザーによる大型装置持込が可能です。
- ダイヤモンド薄膜結晶を用いたビーム分岐技術を将来的に導入し、メインとブランチビームラインでのエネルギー固定X線同時利用を可能にします。

▶ 実験技術

1. 硬X線光電子分光 (HAXPES)



* BL光学系は現時点での設計案であり、今後変更の可能性あります。



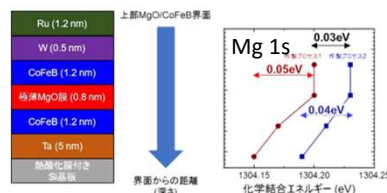
▶ 利活用上の特長

X線オペランド分光ビームライン（BL09U）では、高輝度テnder-X線・硬X線を用いた硬X線光電子分光（HAXPES）実験が可能です。HAXPESのバルク感応性を活かし、材料内部や埋もれた界面の電子状態・化学結合状態を可視化します。メインBLではガス雰囲気下での計測が可能な(Ambient Pressure HAXPES)を将来的に導入し、エネルギー材料や固液界面における反応過程のオペランド計測を可能にします。ブランチBLでは、自動計測やロボット技術を活用したHAXPES装置によりハイスループット計測を行います。

▶ 得られる情報

1. 材料内部・埋もれた界面の電子状態
2. ガス雰囲気・固体界面の電子状態
3. 液体・固体界面の電子状態
4. 外場（電圧、光、応力、熱など）を印可した表面界面の電子状態

次世代不揮発性メモリにおける 極薄絶縁層の化学結合状態を可視化

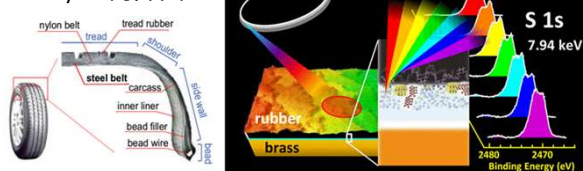


⇒ 極薄膜創製プロセスの制御

M. Niwa et al., *J. Appl. Phys.* **125**, 203903 (2019).

複合材料界面の化学結合状態を可視化

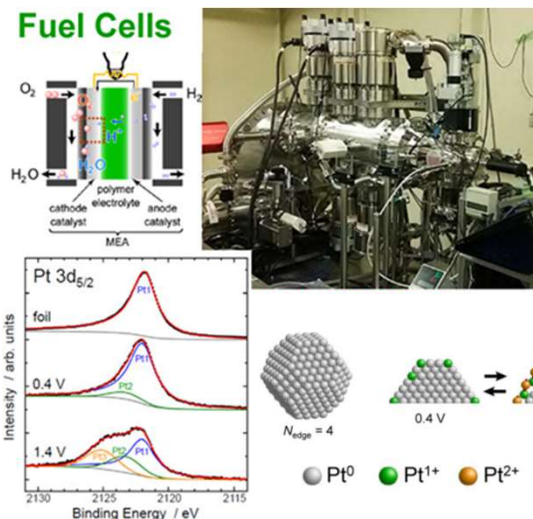
ゴム/金属界面



⇒ 高機能複合材料

K. Ozawa et al., *Langmuir* **33**, 9582 (2017).

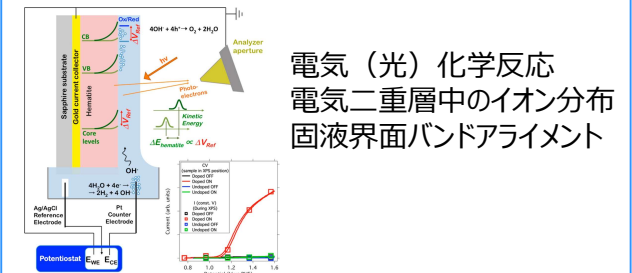
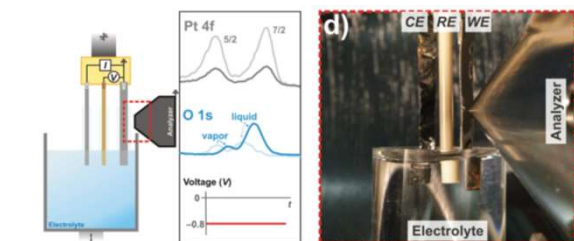
エネルギー材料（燃料電池）の 動作条件下の化学状態を可視化



⇒ 燃料電池反応機構の理解

Y. Takagi et al., *Acc. Chem. Res.* **51**, 719 (2018).

固液界面の電子状態を可視化



⇒ 太陽光による電気分解

S. Axnanda et al., *Sci. Rep.* **5**, 9788 (2015).

S. Shavorskiy et al., *J. Phys. Chem. Lett.* **8**, 5579 (2017).

ミリ秒の時間分解能で内部構造を可視化する

▶ ビームラインの特徴

BL09Wは、4.4 ~ 30 keVの硬X線を利用するビームラインです。水平方向に幅広いビーム形状を有するX線ビームが得られるため、将来的にはブランチビームラインへの分岐技術が適用できる設計になっています。メインビームラインには水平方向50 mm、垂直方向4mm程度の大きさをもつ白色ビームが導入され、高時間分解能で白色・単色X線トモグラフィー（CT）や波長分散型XAFS、波長分散型表面・界面構造解析（SXRD）などを行うことが可能になっています。

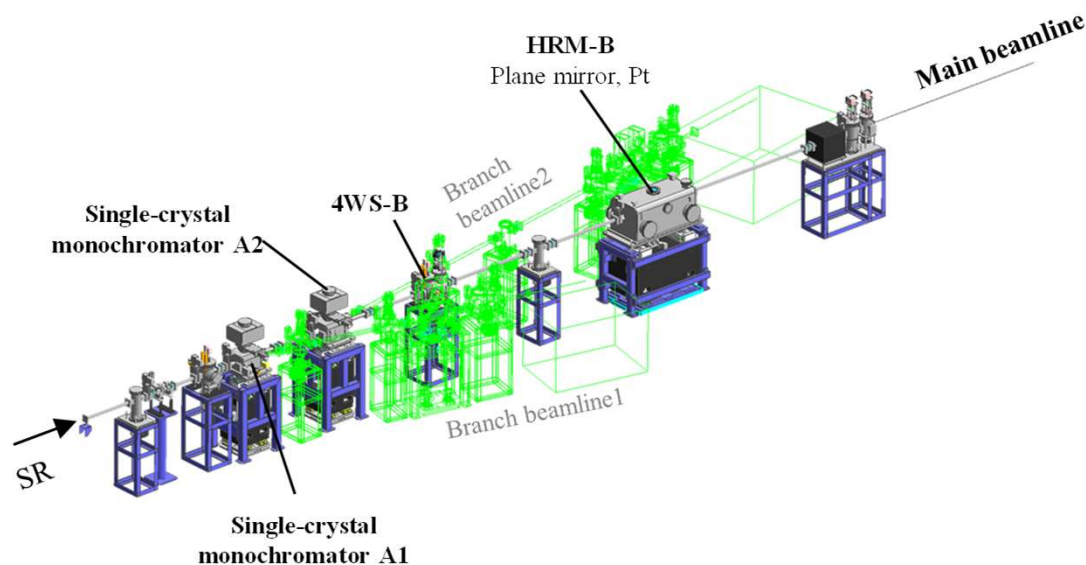
▶ 諸元

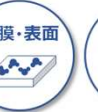
光源	マルチポールウィグラー 周期長120 mm／周期数5／ 最小ギャップ値15 mm
偏光 (エネルギー範囲)	水平直線（4.4~30 keV）
エネルギー分解能	$E/\Delta E \sim 1$ （白色光）
試料上フラックス	$> 10^{11}$ photons/s
試料上ビームサイズ	49 mm (H) × 4 mm (V)

- ・ユーザーの大型装置持ち込みのため面積3 m×3 m、高さ3.5 mのスペースがエンドステーション内に確保されています。
- ・干渉計による位相コントラストイメージングも可能で、吸収を利用するよりも高感度なイメージングが実現できます。

▶ 実験技術

1. 白色X線4DCT（サブミリ秒）
2. 白色X線イメージング（マイクロ秒）
3. 単色X線CT
4. 単色X線イメージング
5. 分散型XAFS
6. 分散型SXRD





▶ 利活用上の特長

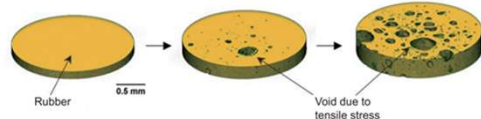
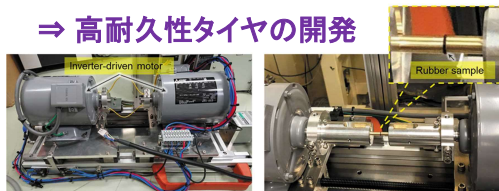
階層構造ビームライン（BL09W）では、大面積、高フラックス、広いエネルギーバンド幅を活かした高時空間分解能計測が可能です。ミリ秒時間分解能のマイクロ4D X線CTの技術は、我が国が世界をリードしており、圧縮センシングなど最先端のデータサイエンス技術との融合により、さらなる高時間分解能化が可能だけでなく、ハイスループット計測による非可逆・非平衡系のビッグデータ取得といった展開も可能で、今後さらなる発展が期待されるブルーオーシャンです。

▶ 得られる情報

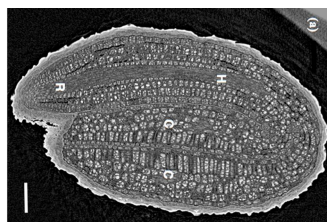
1. 3D構造変化（4D時空間情報）
（サブミリ秒時間分解能・10 μm空間分解能）
2. 元素、弾性率などの3D分布
3. 局所化学結合（ミリ秒時間分解能）
4. 表面・界面構造（ミリ秒時間分解能）

タイヤゴム破壊過程のリアルタイム可視化

⇒ 高耐久性タイヤの開発



W. Yashiro *et al.*, *Appl. Sci.* **11**, 8868 (2021).
R. Mashita *et al.*, *J. Synchrotron Rad.* **28**, 322 (2021).

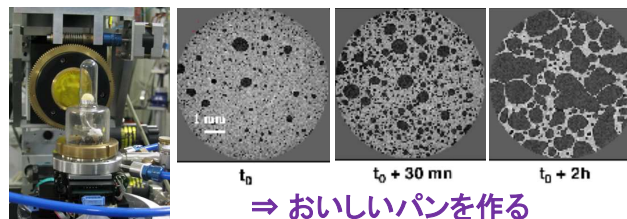


シロイヌナズナ種子の高分解能CT

⇒ 発芽過程の観察

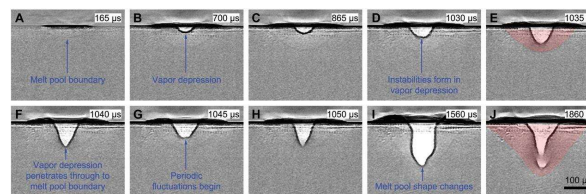
D. Yamauchi *et al.*, *AIP Conf. Proc.* **1466**, 237 (2012).

パン焼きプロセスの可視化



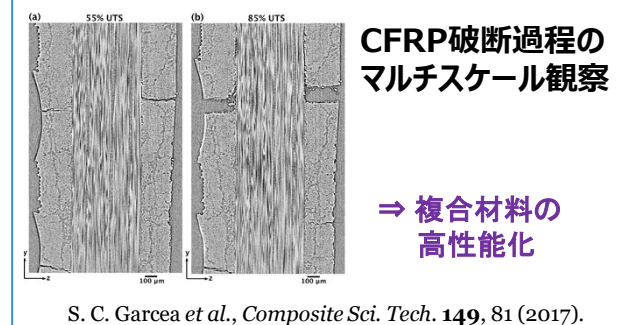
<https://www.esrf.fr/UsersAndScience/Publications/Highlights/2004/Imaging/Ima6>

レーザー加工プロセスのリアルタイム観察



⇒ 精密工学、機械工学

R. Cunningham *et al.*, *Science* **363**, 849 (2019).



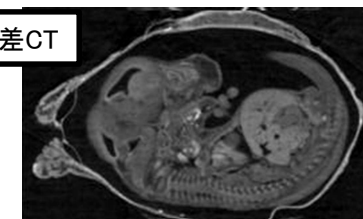
CFRP破断過程のマルチスケール観察

⇒ 複合材料の高性能化

S. C. Garcea *et al.*, *Composite Sci. Tech.* **149**, 81 (2017).

マウス胎児の高コントラスト撮影

位相差CT



⇒ 再生・発生医学

M. Hoshino *et al.*, *Biol. Open* **1**, 269 (2012).

X線のコヒーレンスを活用し、**三次元ナノ構造・化学状態**を可視化する▶ **ビームラインの特徴**

BL10Uは、真空封止アンジュレーターを採用しており、2.1 ~ 15 keVの高輝度テnderX線および硬X線を利用することができるビームラインです。次世代放射光の高い空間コヒーレンスを最大限に活用できる光学系を採用しており、高強度コヒーレントX線を提供可能であることから、コヒーレント回折イメージング(タイコグラフィを含む)やX線光子相関分光測定が計画されています。また、一般的なXAFS測定に加え、タイコグラフィやX線顕微鏡とXAFS測定を組み合わせた顕微XAFSイメージングも計画されています。

▶ **諸元**

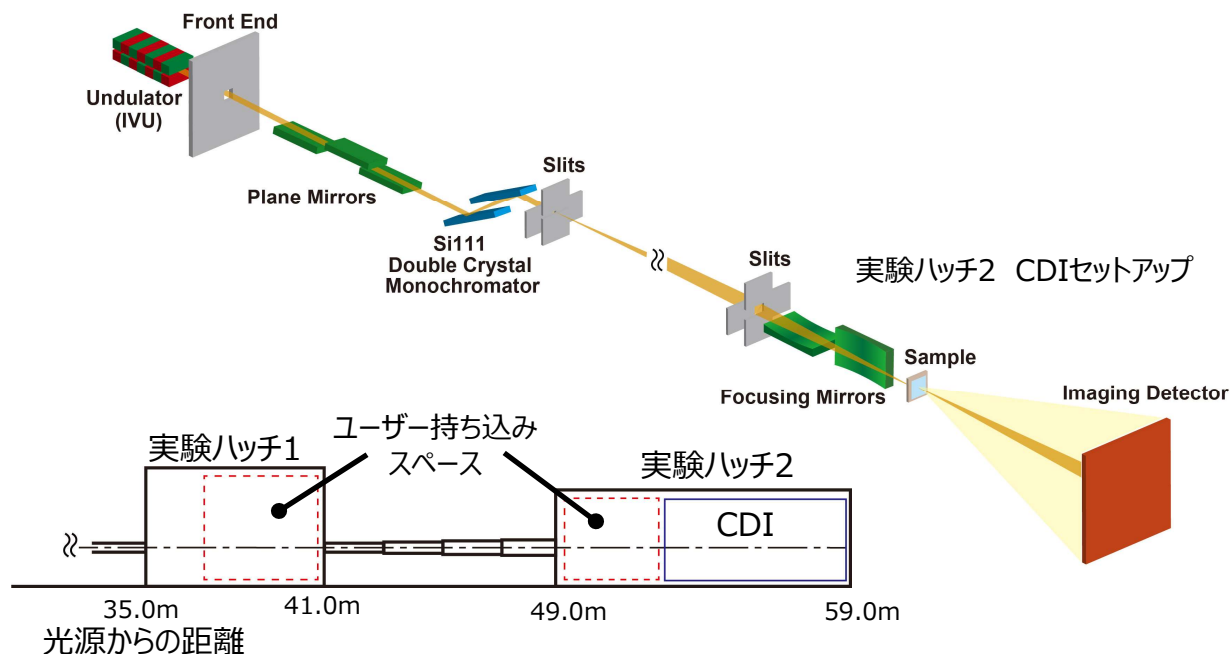
光源	真空封止アンジュレーター 周期長22 mm／周期数166／ 最小ギャップ値5 mm／最大K値2.51
偏光 (エネルギー範囲)	水平直線 (2.1~15 keV)
エネルギー分解能	$E/\Delta E \sim 7000$
試料上フラックス	$10^{11} \sim 10^{13}$ photons/s
試料上ビームサイズ	200 nm ~ 50 μ m

・タンデムに配置された二つの実験ハッチを有し、それぞれのハッチにユーザー持ち込み装置のためのスペースが確保されています。

・二つの実験ハッチを同時利用することで8m以上のカメラ長(試料-検出器間距離)でのセットアップが可能です。

▶ **実験技術**

1. コヒーレント回折イメージング (CDI)
2. X線吸収微細構造(XAFS)
3. 結像型透過X線顕微鏡 (TXM)
4. 走査型蛍光X線顕微鏡 (SXFM)
5. X線光子相関分光 (XPCS)





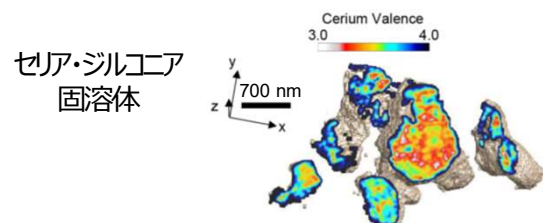
▶ 利活用上の特長

X線コヒーレントイメージングは、X線領域では未踏であったシングルナノメートルの空間分解能を達成可能です。これを用いることで、電子顕微鏡やプローブ顕微鏡では観察の難しいバルク内部の微細構造・化学状態の三次元ナノイメージを試料を壊すことなく取得することが可能です。触媒・電池材料をはじめとする各種機能性材料の構造・機能相関解析、電子デバイスの故障解析、細胞内小器官の観察など様々な分野への適用が可能です。

▶ 得られる情報

1. 三次元電子密度分布
2. 三次元化学状態イメージ
3. 微量元素の二次元マップ
4. 動的構造

触媒材料の化学状態イメージング

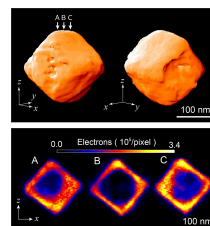


⇒ 触媒反応の直接観測

M. Hirose *et al.*, *Communications Chemistry* **2**, 50 (2019).

ナノ粒子の電子密度イメージング

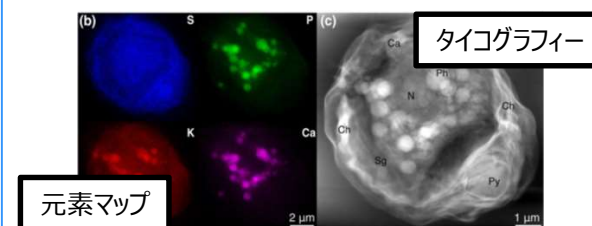
金/銀
ナノボックス



⇒ ナノバイオマーカーの開発

Y. Takahashi *et al.*, *Nano Lett.* **10**, 1922-1926 (2010).

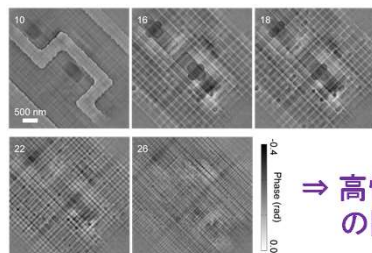
ミジンコの高分解能元素イメージング



⇒ 環境汚染の高感度検出

J. Deng *et al.*, *Sci. Rep.* **7**, 445 (2017).

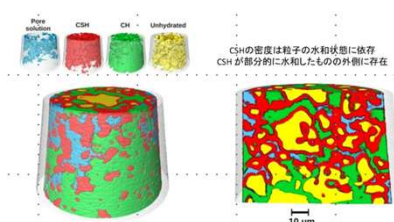
集積回路の非破壊検査



⇒ 高性能素子の開発

K. Shimomura *et al.*, *Opt. Express* **26**, 31199-31208 (2018).

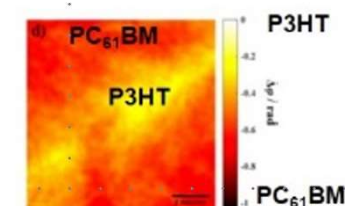
コンクリート中のケイ酸カルシウムの分布



⇒ 構造材料の低炭素化

J. C. Da Silva *et al.*, *Langmuir* **31**, 3779-3783 (2015).

薄膜太陽電池のドメイン観察



⇒ 有機太陽電池の高効率化

N. Patil *et al.*, *ACS Appl. Polymer Materials* **1**, 1787 (2019).

物質の元素、化学状態、磁区の分布をナノメートルレベルで可視化する

▶ ビームラインの特徴

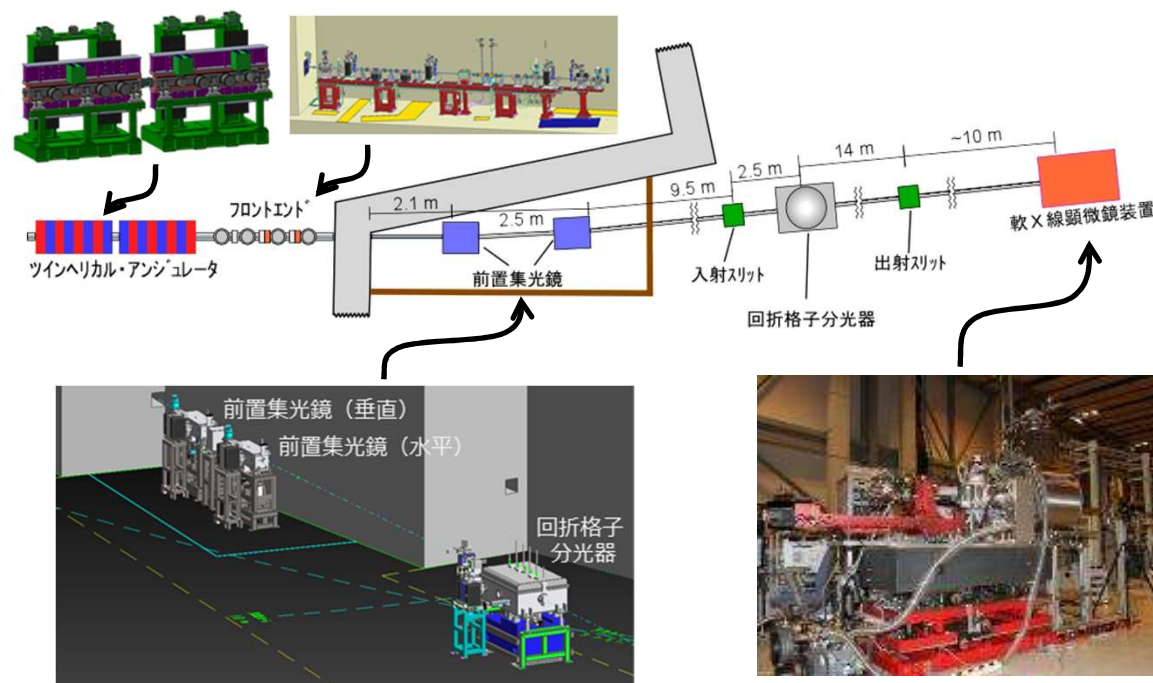
BL14Uは、200 ~ 1400 eVの円偏光軟X線を利用するビームラインです。光源のツインヘリカルアンジュレータにより、右回り円偏光と左回り円偏光を1分以下の短時間で切り替えることが可能になります。非集光条件では光子フラックスが約 3×10^{12} photons/sとなり、集光条件では $\phi 100$ nm以下に集光された高輝度ナノビームを利用できます。さらに、高いコヒーレンスを活用したコヒーレントイメージングへの展開も計画されています。

▶ 実験技術

1. 軟X線イメージング (SXM, STXM)
2. 軟X線吸収分光 (XAS)
3. 軟X線磁気円二色性分光 (XMCD)

▶ 諸元

光源	ツインヘリカルアンジュレーター 周期長56 mm / 周期数33×2 / 最小ギャップ値15 mm / 最大K値3.11
偏光 (エネルギー範囲)	左右円 (200 ~ 1400 eV)
エネルギー分解能	$E/\Delta E = 3000 \sim 10000$
試料上フラックス	$10^{12} \sim 10^{13}$ photons/s
試料上ビームサイズ	50 nm ~ 10 μ m
最大印加磁場	8 T



Kotani et al., *J. Synchrotron Rad.* **25**, 1444 (2018).



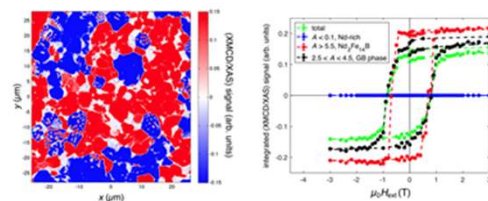
▶ 利活用上の特長

軟X線イメージングビームライン（BL14U）では、軟X線顕微鏡を用いることにより、様々な物質の元素や化学状態の分布を μm ～ nm スケールで可視化することができます。また、本ビームラインでは、円偏光軟X線を利用できる特徴を活かし、きわめて高感度に物質の磁気特性を調べることができます。これらの特長から、スピントロニクス、電池、エネルギー材料、複合材料、創薬、といった様々な分野での活用が期待されます。

▶ 得られる情報

1. 元素分布、化学状態分布
2. 磁区とダイナミクス
3. 表面・界面磁性
4. 強磁場物性

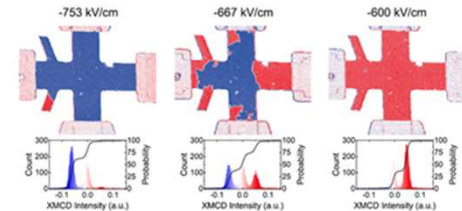
磁石の性質（磁区構造）を可視化



⇒ ハードディスク、高性能モーター

D. Billington *et al.*, *Phys. Rev. Mater.* **2**, 104413 (2018).

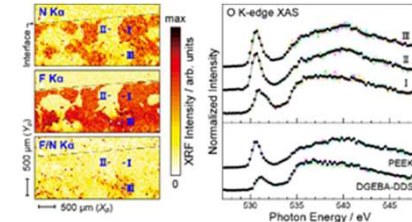
動作中スピントロニクス素子を可視化



⇒ 省電力次世代デバイス

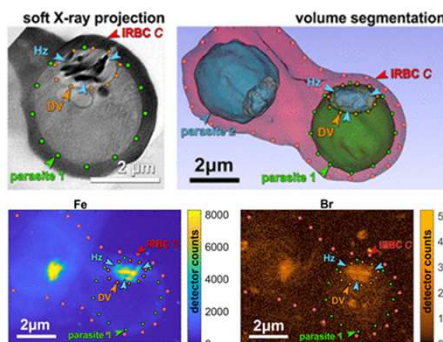
Y. Shiratsuchi *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **113**, 242404 (2018).

複合材料の接着接合界面を可視化

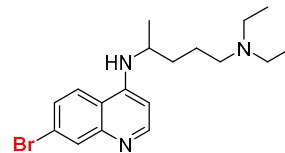


⇒ 次世代モビリティの接着接合技術

H. Yamane *et al.*, *Commun. Mater.* **2**, 63 (2021).

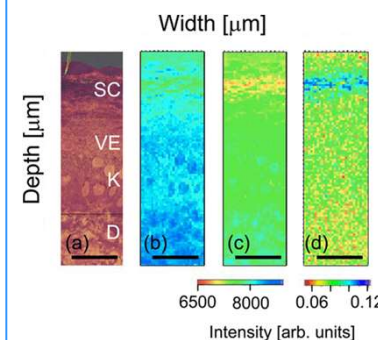


抗マラリア薬の局在を可視化

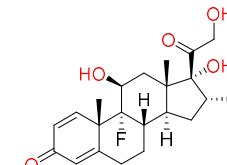


⇒ 薬効メカニズムに基づく創薬

S. Kapishnikov *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **116**, 22946 (2019).



ステロイドの人肌への浸透を可視化



⇒ 経皮吸収剤、保湿クリーム

K. Yamamoto *et al.*, *Anal. Chem.* **87**, 6173 (2015).