

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。

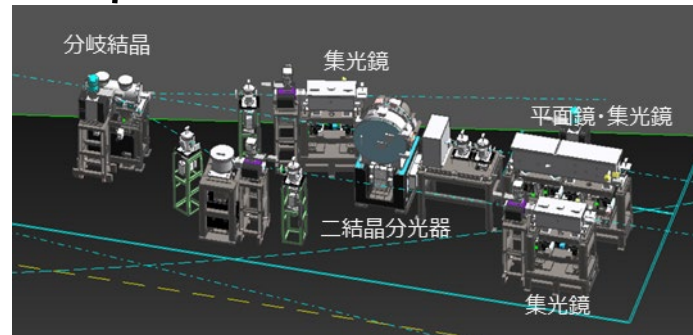
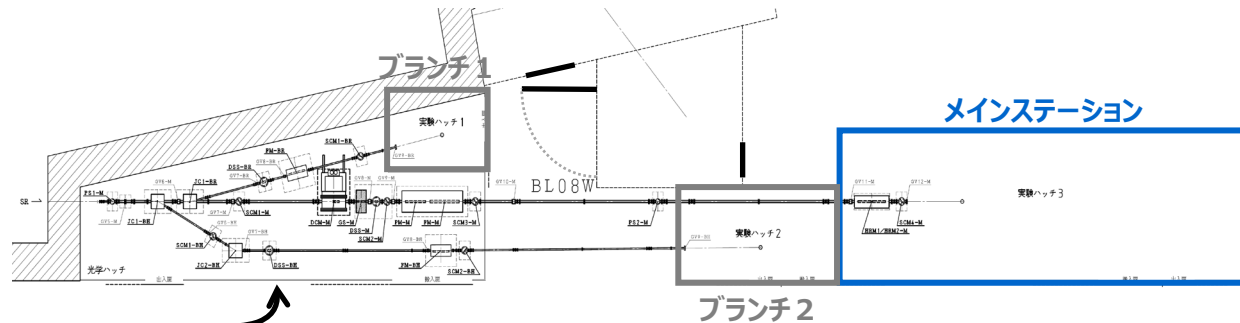
▶ 実験技術

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)



利用できるX線エネルギー

メソッド	エネルギー	特徴
メイン	2.1 ~ 13 keV	(可変)
ブランチ1	8.0, 13.1 keV	(固定)
ブランチ2	17.5, 28.5 keV	(固定)



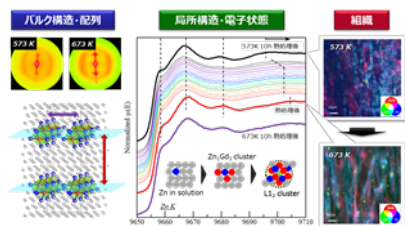
▶ 利活用上の特長

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

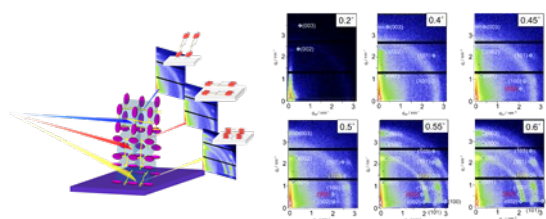
構造・組織形成過程のマルチモーダル解析



⇒ 次世代構造材料の創成

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

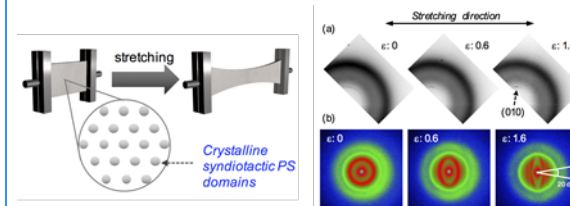
薄膜内部の構造分布解析



⇒ 有機薄膜太陽電池

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

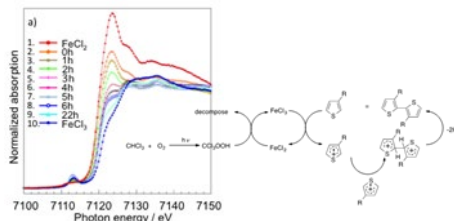
変形過程のその場観察



⇒ 高性能プラスチック材料

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

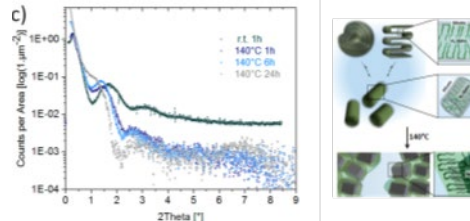
重合反応のその場追跡



⇒ プラスチック材料の再資源化

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

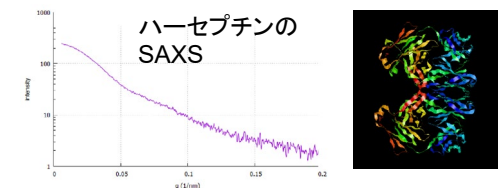
多孔質材料の階層構造その場追跡



⇒ 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のテングー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。

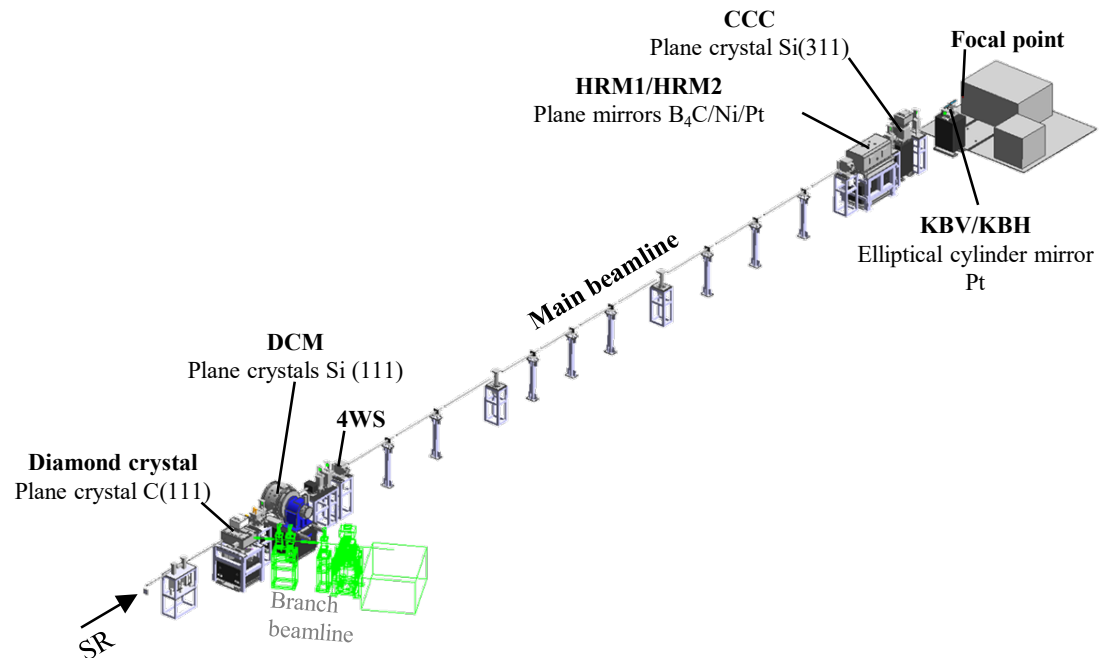
▶ 実験技術

1. 硬X線光電子分光 (HAXPES)

▶ 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	$< 1 \mu\text{m}$ ϕ

- 実験ハッチ内に面積3 m \times 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。



* BL光学系は現時点での設計案であり、今後変更の可能性がります。



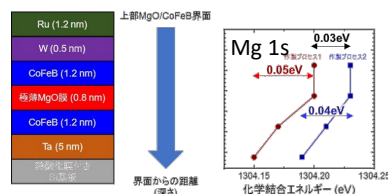
▶ 利活用上の特長

X線オペランド分光ビームライン (BL09U) では、高輝度テングダー-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

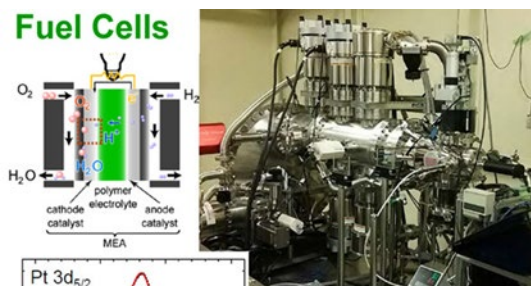
次世代不揮発性メモリにおける極薄絶縁層の化学結合状態を可視化



⇒ 極薄膜創製プロセスの制御

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

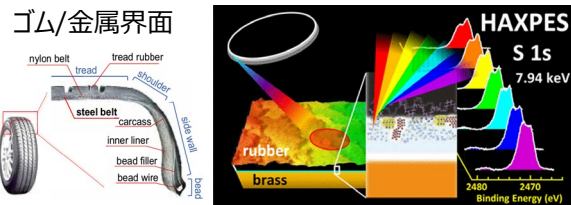
エネルギー材料 (燃料電池) の動作条件下の化学状態を可視化



⇒ 燃料電池反応機構の理解

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

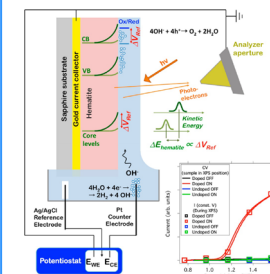
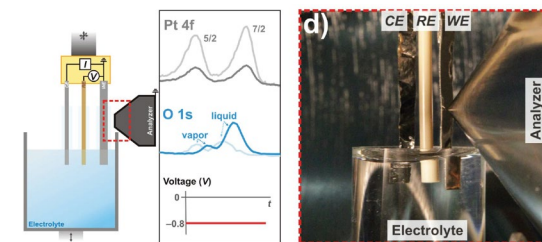
複合材料界面の化学結合状態を可視化



⇒ 高機能複合材料

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

固液界面の電子状態を可視化



電気 (光) 化学反応
電気二重層中のイオン分布
固液界面バンドアライメント

⇒ 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。

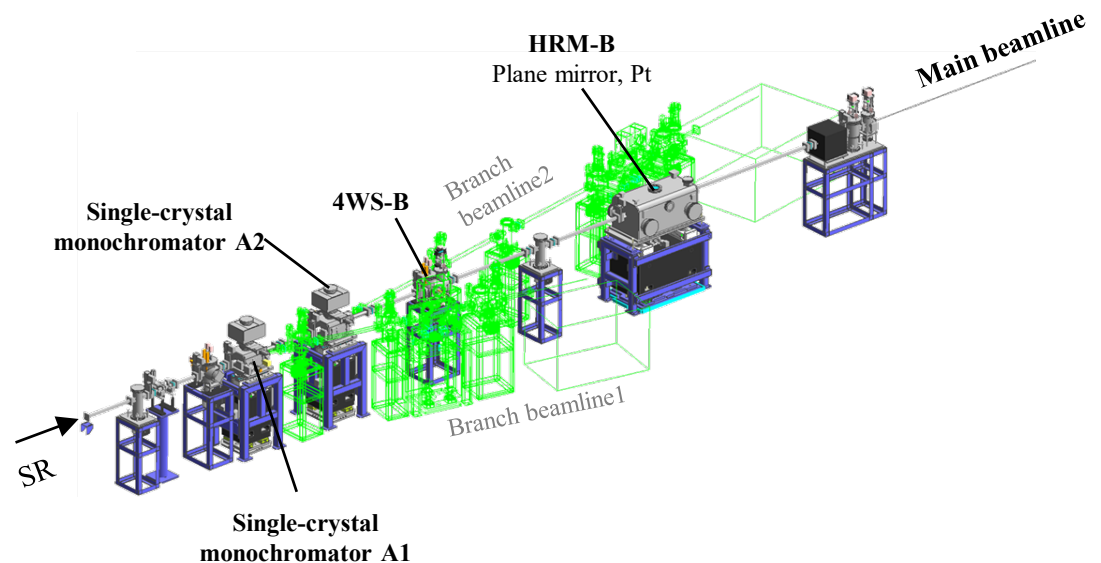
▶ 諸元

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

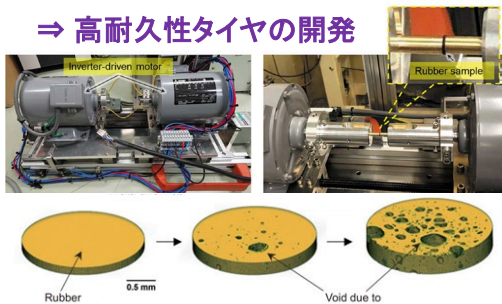
階層構造ビームライン (BL09W) では、大面積、高フラックス、広いエネルギーバンド幅を活かした高時空間分解能計測が可能です。ミリ秒時間分解能のマイクロ4D X線CTの技術は、我が国が世界をリードしており、圧縮センシングなど最先端のデータサイエンス技術との融合により、さらなる高時間分解能化が可能だけでなく、ハイスループット計測による非可逆・非平衡系のビッグデータ取得といった展開も可能で、今後さらなる発展が期待されるブルーオーシャンです。

▶ 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)

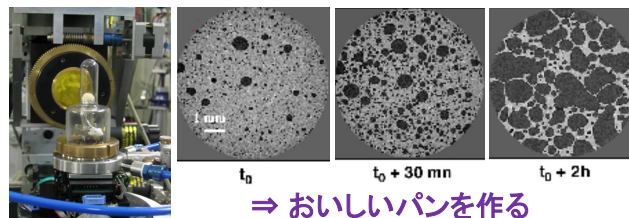
タイヤゴム破壊過程のリアルタイム可視化

⇒ 高耐久性タイヤの開発

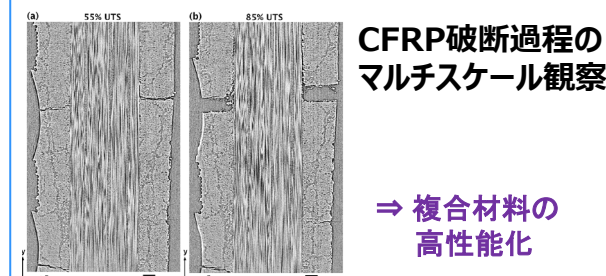


W. Yashiro *et al.*, *Appl. Sci.* **11**, 8868 (2021).
R. Mashita *et al.*, *J. Synchrotron Rad.* **28**, 322 (2021).

パン焼きプロセスの可視化

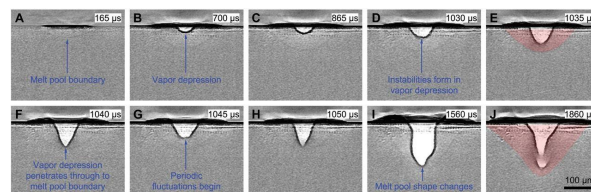


<https://www.esrf.fr/UsersAndScience/Publications/Highlights/2004/Imaging/Ima6>



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

レーザー加工プロセスのリアルタイム観察

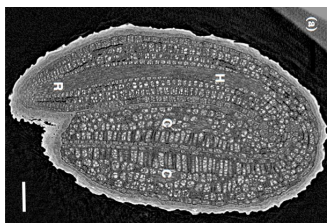


⇒ 精密工学、機械工学

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

シロイヌナズナ種子の高分解能CT

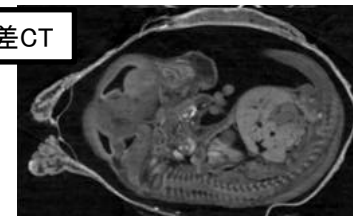
⇒ 発芽過程の観察



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

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の高輝度テングーX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。

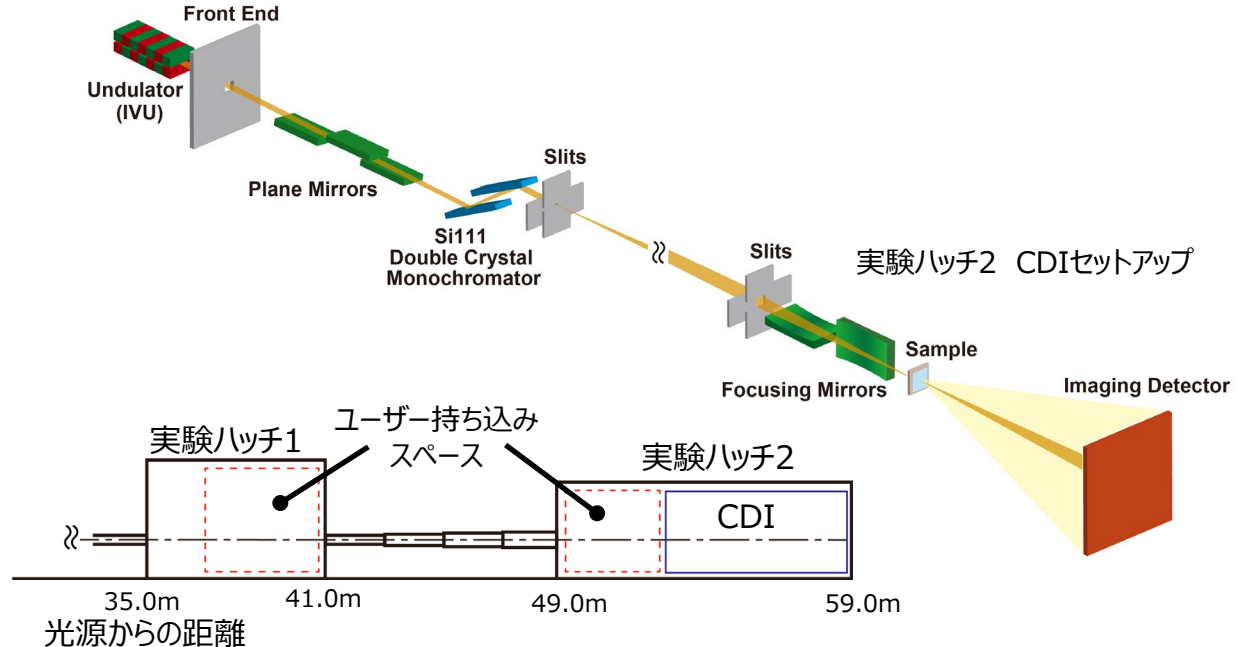
▶ **実験技術**

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)

▶ **諸元**

光源	真空封止アンジュレーター 周期長22mm/周期数166/ 最小ギャップ値5mm/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。





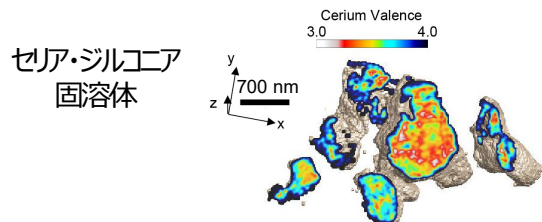
▶ 利活用上の特長

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

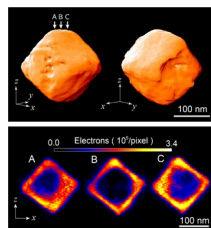


⇒ 触媒反応の直接観測

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

ナノ粒子の電子密度イメージング

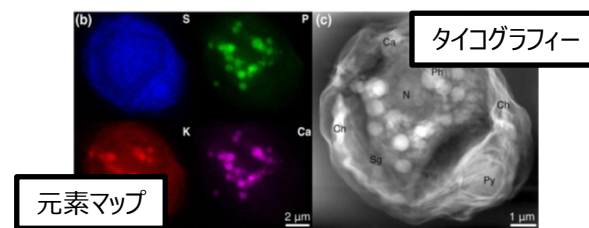
金/銀
ナノボックス



⇒ ナンバイオマーカーの開発

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

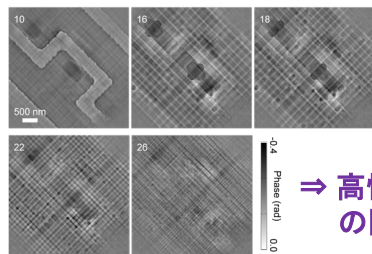
ミジンコの高分解能元素イメージング



⇒ 環境汚染の高感度検出

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

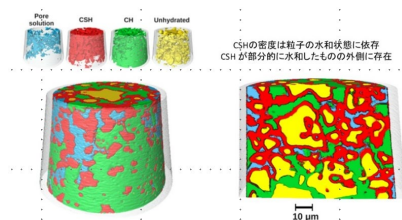
集積回路の非破壊検査



⇒ 高性能素子の開発

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

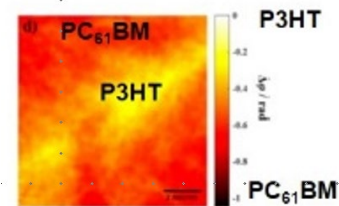
コンクリート中のケイ酸カルシウムの分布



⇒ 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

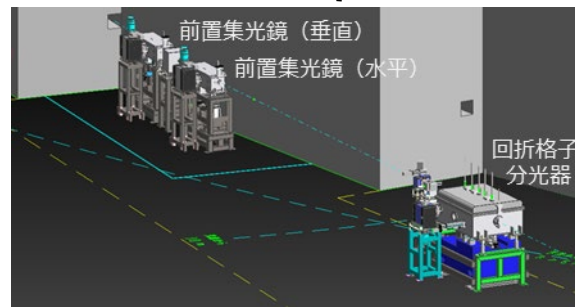
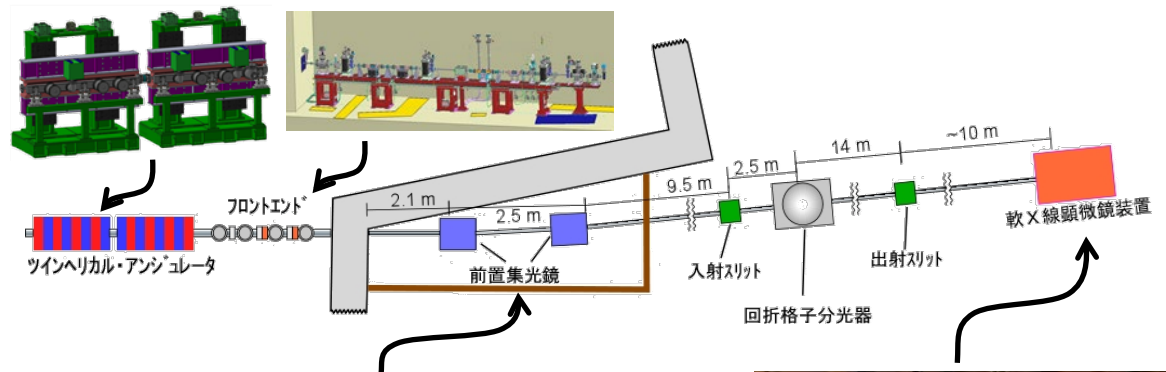
BL14Uは、200 ~ 1400 eVの円偏光軟X線を利用するビームラインです。光源のツインヘリカルアンジュレータにより、右回り円偏光と左回り円偏光を1分以下の短時間で切り替えることが可能になります。非集光条件では光子フラックスが約 3×10^{12} photons/sとなり、集光条件では $\phi 100$ nm以下に集光された高輝度ナノビームを利用できます。さらに、高いコヒーレンスを活用したコヒーレントイメージングへの展開も計画されています。

▶ 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).



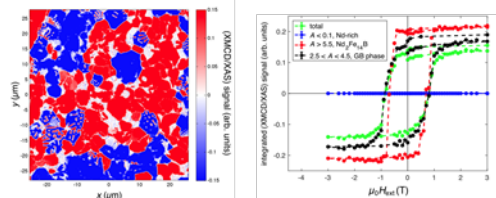
▶ 利活用上の特長

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

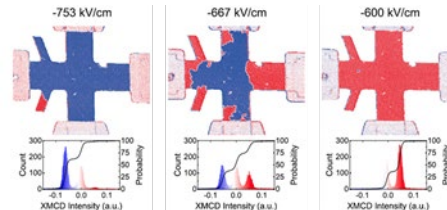
磁石の性質 (磁区構造) を可視化



⇒ ハードディスク, 高性能モーター

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

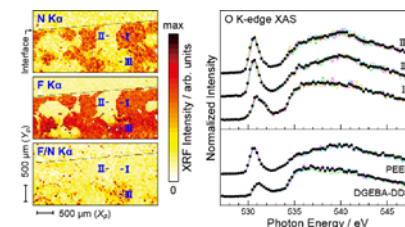
動作中スピントロニクス素子を可視化



⇒ 省電力次世代デバイス

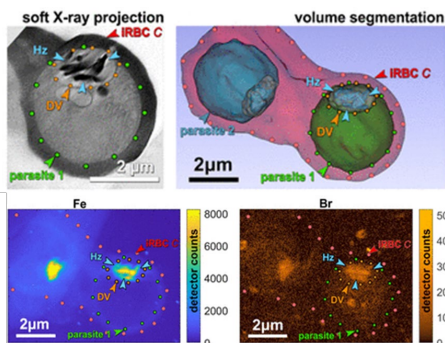
Y. Shiratsuchi *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **113**, 242404 (2018).

複合材料の接着結合界面を可視化

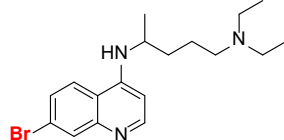


⇒ 次世代モビリティの接着結合技術

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

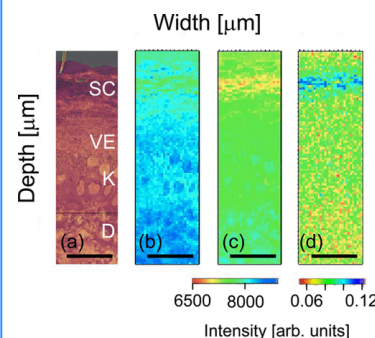


抗マラリア薬の局在を可視化

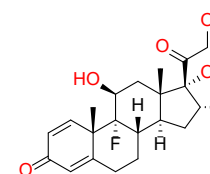


⇒ 薬効メカニズムに基づく創薬

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).