

ビームラインカタログ

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？

2022年2月更新

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・産業ともに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。



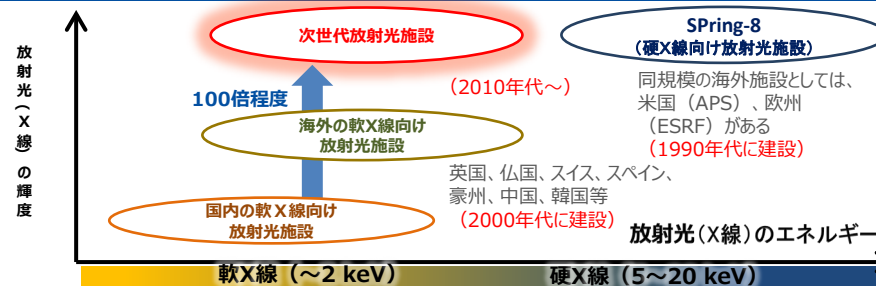
官民地域パートナーシップによる次世代放射光施設の推進

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・テnder-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）】

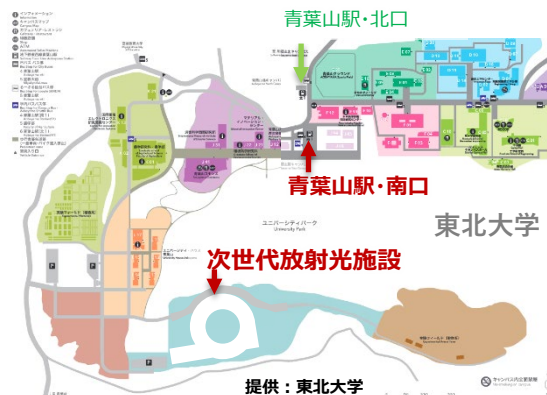
共用ビームライン		BL08U	軟X線オペランド分光
BL02U*	軟X線超高分解能共鳴非弾性散乱	BL08W*	構造解析
BL06U	軟X線ナノ光電子分光	BL09U	X線オペランド分光
BL13U	軟X線ナノ吸収分光	BL09W	階層構造
コアリションビームライン		BL10U	X線コヒーレントイメージング
BL07U	軟X線電子状態解析	BL14U	軟X線イメージング

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ベクトル光が必要な測定に適する。

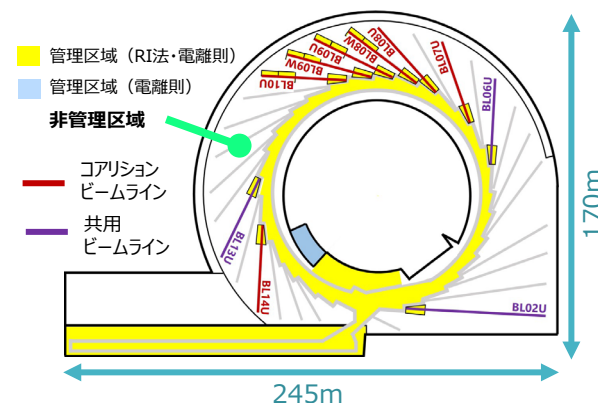
これまで国内の放射光施設では、実験ホールは放射線管理区域となっており、事前の放射線従事者登録等、利用上の様々な制約がありました。次世代放射光施設では、加速器トンネル、遮蔽ハッチ内部などを除き、**実験ホール(右写真)の大部分が非管理区域**となり、利用者の利便性が大きく向上します。

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



提供：光科学イノベーションセンター

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。

▶ 諸元

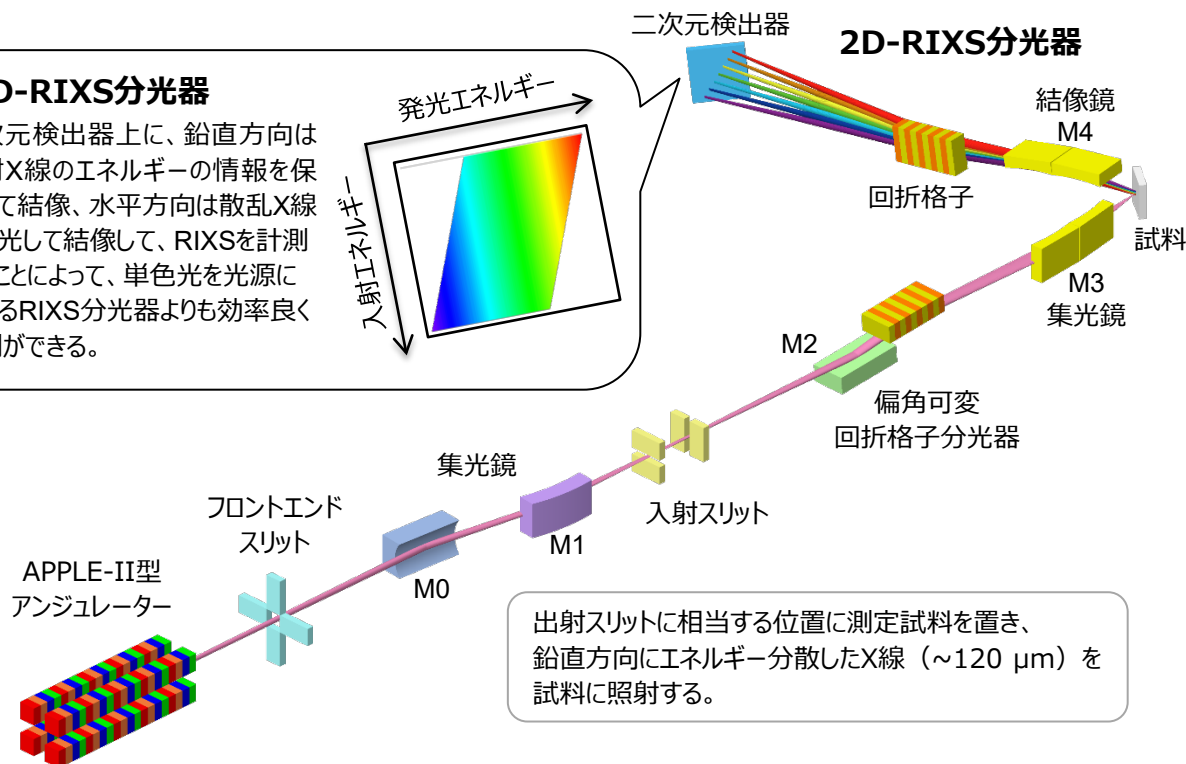
光源	APPLE-II型アンジュレーター 周期長56 mm／周期数71／最小ギャップ値15 mm／最大K値4.62
偏光 (エネルギー範囲)	水平・垂直直線 (250–2000 eV) 左右円 (250–1500 eV)
エネルギー分解能	$E/\Delta E > 150,000 @ < 1000 \text{ eV}$
試料上フラックス	$> 10^{10} \text{ photons/s} @ E/\Delta E > 100,000$ (出射スリット2 μm 相当)
試料上ビームサイズ	$< 1 \mu\text{m} (\text{H}) \times < \sim 5 \mu\text{m} (\text{V})^*$ * $E/\Delta E > 150,000 @ < 1000 \text{ eV}$ 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	$30^\circ \leq 2\theta \leq 150^\circ$

▶ 実験技術

1. 共鳴非弾性X線散乱 (RIXS)

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。





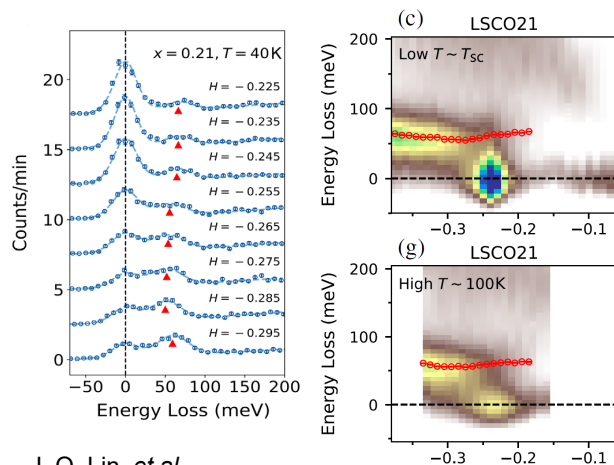
▶ 利活用上の特長

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。

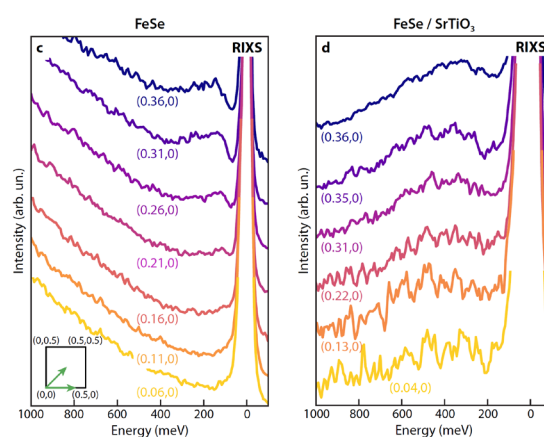
▶ 得られる情報

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



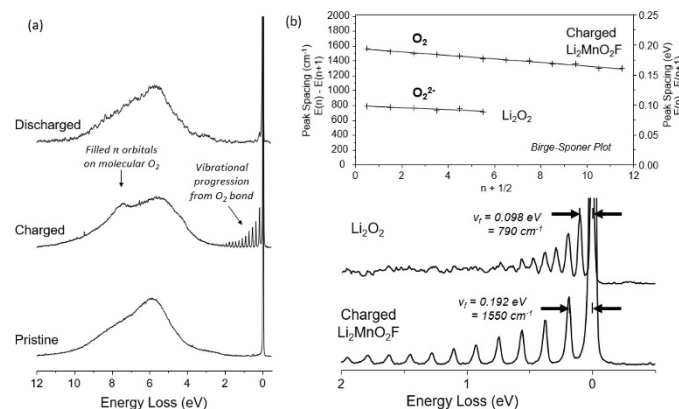
J. Q. Lin, *et al.*,
Phys. Rev. Letters **124**, 207005 (2020). H (2 π/a)



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

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

原子・分子 – 軌道の電子状態、振動のエネルギー準位の観測



振動準位からポテンシャルエネルギー面を取得可能

R. Sharpe *et al.*, JACS **142**, 21799 (2020).

物質中の電子のスピ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

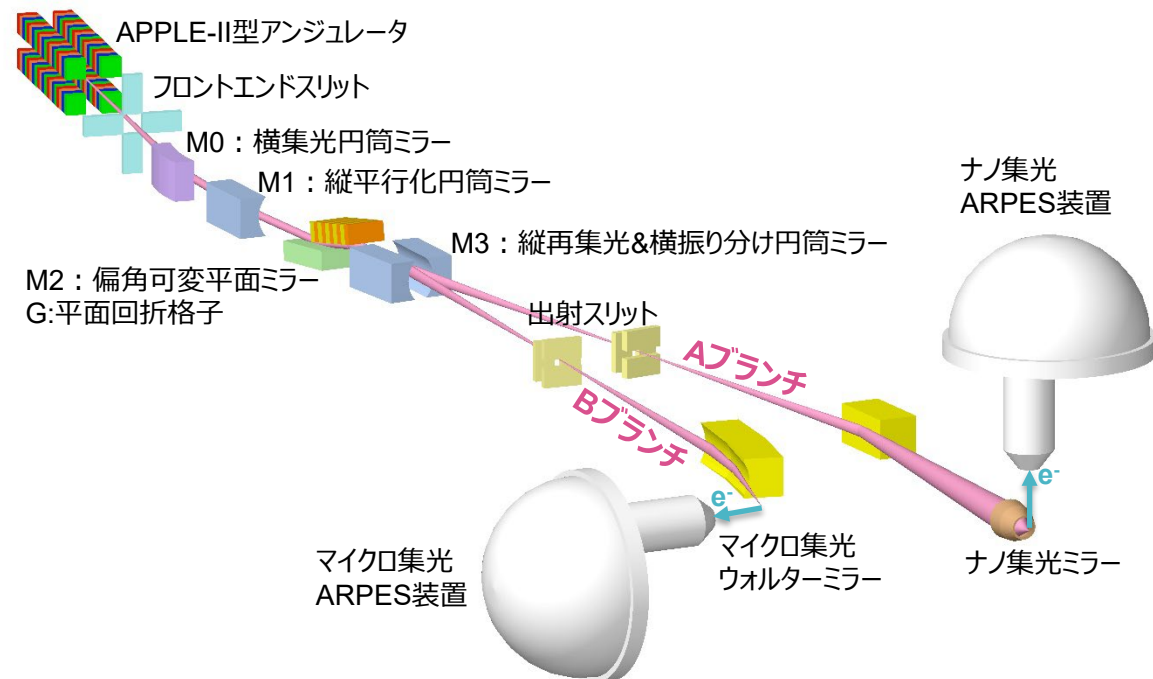
BL06Uでは、超精密加工技術を駆使したミラー集光光学系により、これまでにない高フラックスの軟X線ナノビームを供給し、100 nm以下の空間分解能でのスピン・角度分解光電子分光（SR-ARPES）を実現する。これにより物質中のナノ領域に現れる電子状態をエネルギー・運動量・スピン状態まで分解して直接的に観測することができる。ビームラインは2つのブランチに分かれており、ナノ集光の先端ARPES実験の他に、より汎用的なマイクロ集光ARPES実験を相補的に利用できる環境を備える。

▶ 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: $< \square 1 \text{ }\mu\text{m}$
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

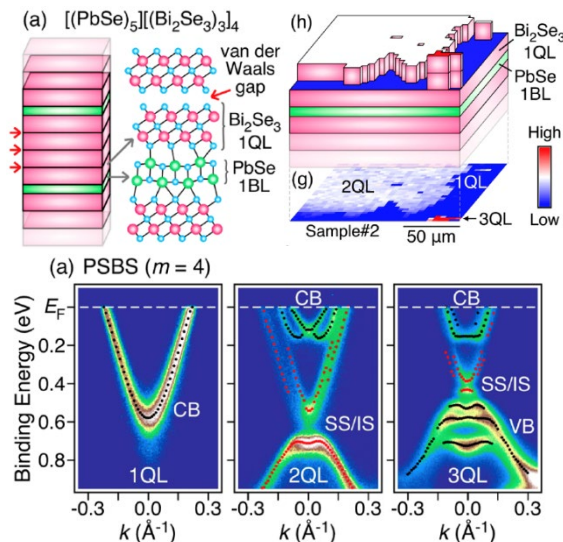
▶ 利活用上の特長

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

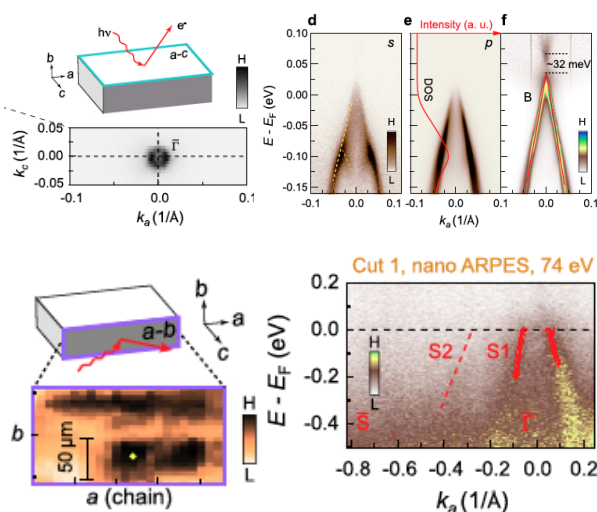
1. 固体のスピン分解したバンド構造
2. 不均一な電子状態の空間分布
3. 結晶の局所的に現れる特異な電子状態の実証
4. ナノ結晶・構造体やナノデバイス構造の電子状態

結晶表面の不均一な電子状態の空間分布



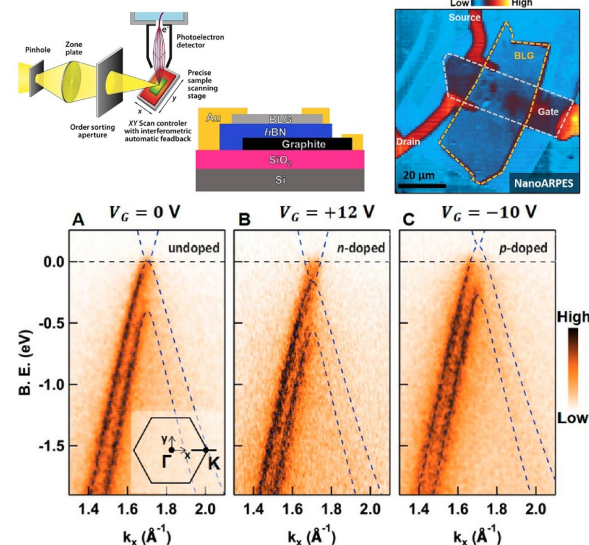
単結晶劈開面に偶発的に分布した原子層数依存性
K. Nakayama *et al.*, Nano Lett. **19**, 3737 (2019).

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。

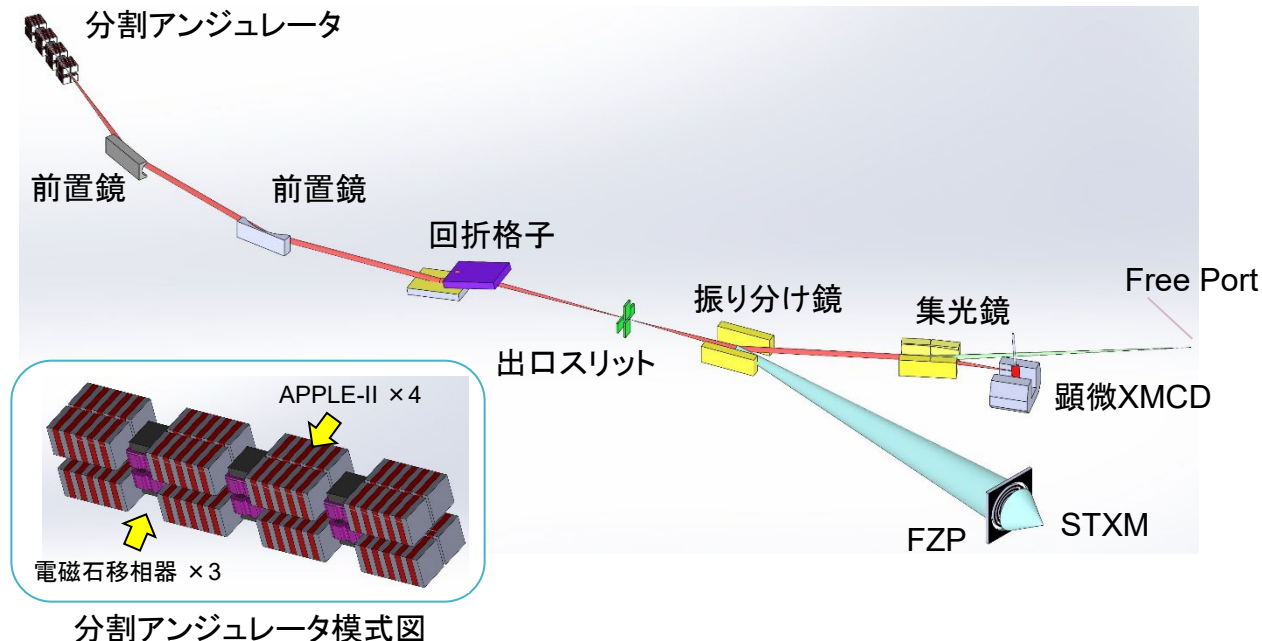
必要な集光サイズやフラックス、試料環境（磁場・電場・温度等）に応じた複数の試料ステーションを使い分けることにより、測定目的に最適化したハイスループット計測環境を提供する。

▶ 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) $\times 20 \text{nm}$ (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）



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



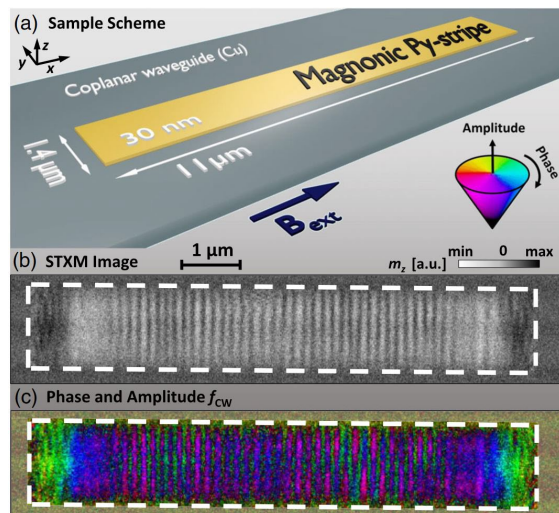
▶ 利活用上の特長

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

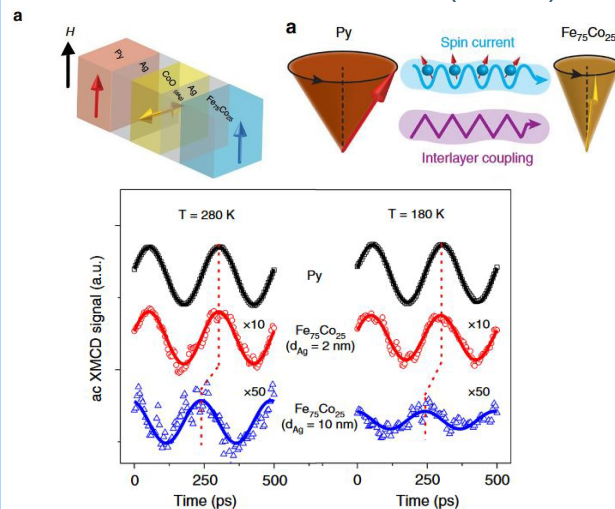
マグノン伝播の顕微スナップショット



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).

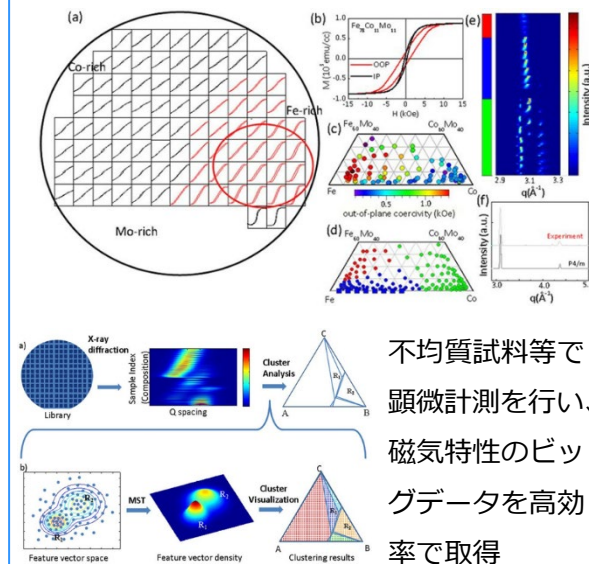
スピン流ダイナミクスの観測(XFMR)



- 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

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

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

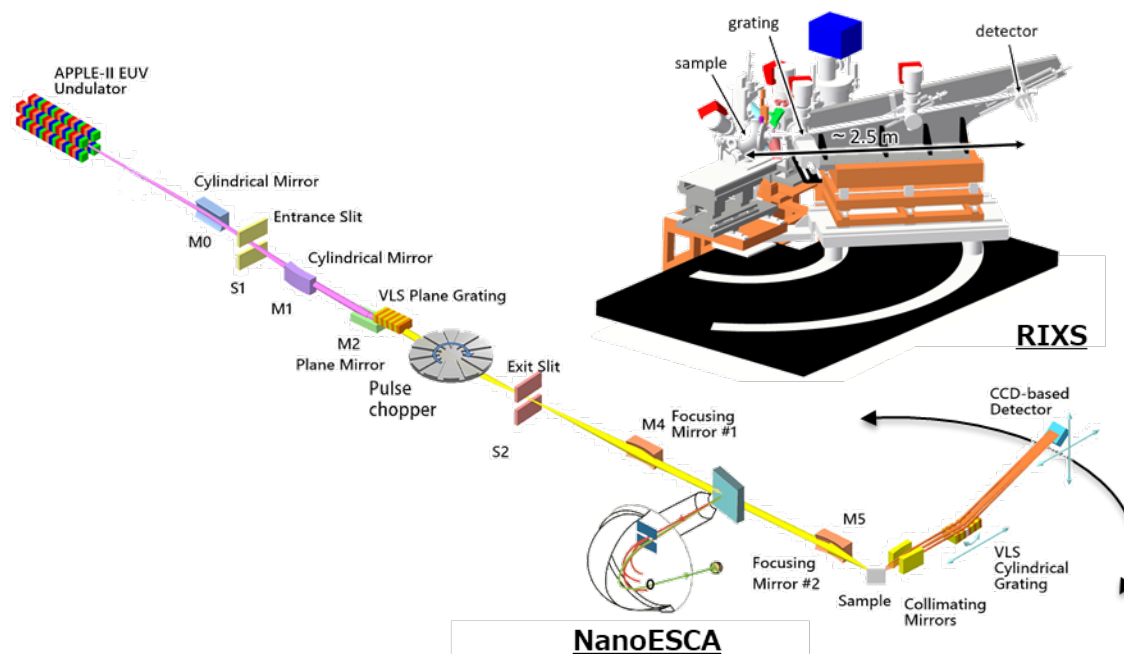
BL07Uは、50 ~ 1000 eVの軟X線を利用するビームラインです。APPLE-II型アンジュレータによって、垂直・水平直線偏光や左右円偏光を利用することができます。また、新しい光学設計の採用により、軟X線共鳴非弾性散乱 (RIXS) やナノ光電子分光 (NanoESCA) における高エネルギー分解能モードや高フラックス（走査型イメージング）モードでの運用が可能となります。

▶ 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。



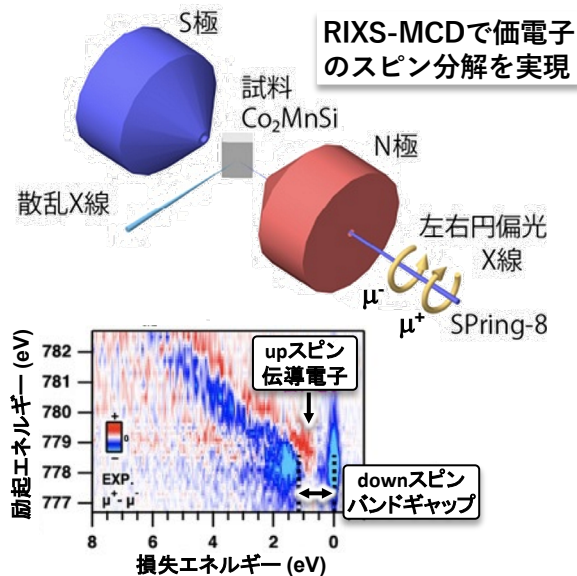
▶ 利活用上の特長

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

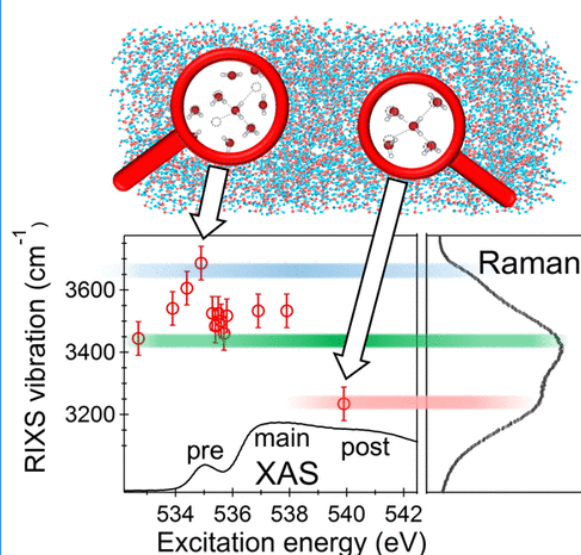
スピントロニクス材料の機能電子を可視化



⇒ 高性能記憶材料, 熱電材料

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

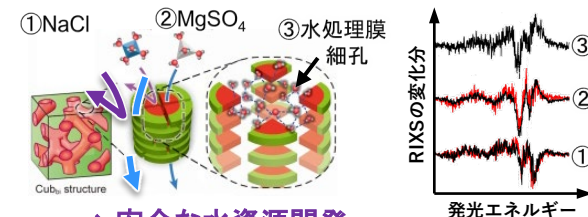
水や溶液のマイクロ不均一性に迫る



⇒ より美味しい飲料へ

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

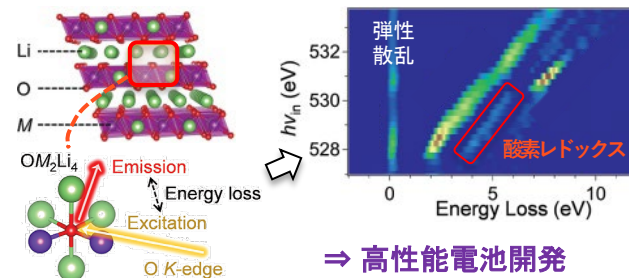
水処理膜の機能発現メカニズムを解明



⇒ 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。

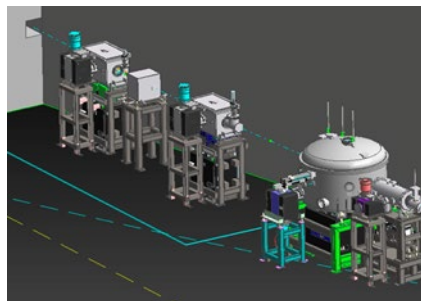
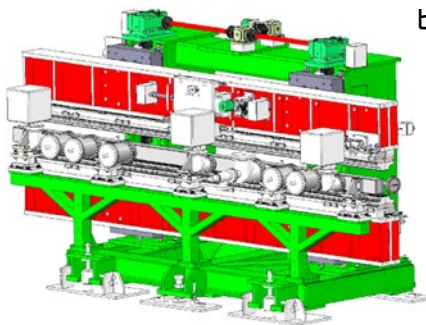
現在、インフォマティクス技術とロボット制御を組み合わせ、これら「**先端分析**」と「**合成法開発**」を融合させた**新たなビームタイム利用**の実験システム開発も実施しています。

▶ 実験技術

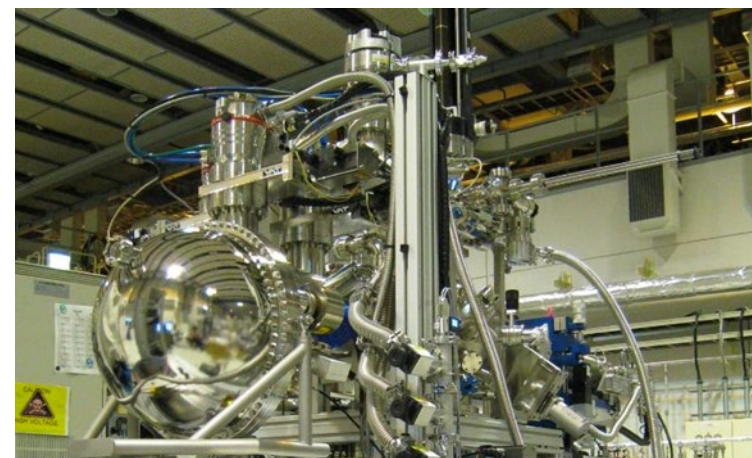
1. 雰囲気(軟X線)光電子分光 (AP-XPS)
2. 高分解能(軟X線)光電子分光 (XPS)
3. 汎用型nm~ μ m集光軟X線分光
4. (軟X線)吸収端近傍微細構造 (NEXAFS)
5. インフォマティクス・ロボット制御

▶ 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)

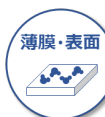


ビームライン光源 (APPLE-II型アンジュレーター)



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)



▶ 利活用上の特長

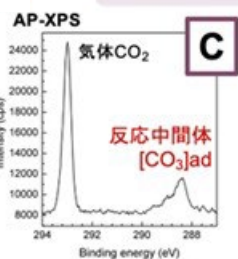
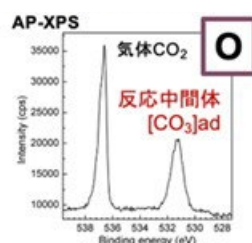
試料物質を構成する元素と化学状態(電子状態)を定量的に分析するX線吸収分光(NEXAFS)と光電子分光(XPS)の精密測定をナノ〜マイクロ空間分解で実施します。さらに試料周りをガス雰囲気で満たした固気界面における化学反応をリアルタイムで観測するオペランド実験も可能です。触媒やエネルギー材料などの機能性分析や、化学・物理の先端物質の物性評価などが実施できます。現在、これら「試料の精密オペランド計測」にインフォーマティクス・ロボット技術を組み合わせることで「試料の合成法開発」も可能な準備を進めています。

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

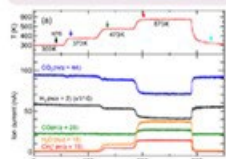
1. 構成元素、化学状態、分子振動の定量分析
2. 未知試料の物質同定
3. 化学反応再現下における表面リアルタイム観察と反応中間体の特定
4. 不均一試料の元素・化学状態の空間マップ
5. 材料合成法条件の最適化 (開発中)

材料表面(化学反応)の トータルオペランド化学分析



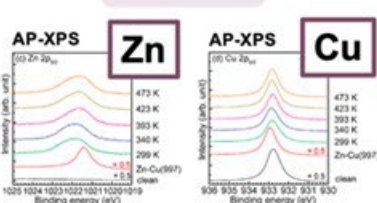
表面反応分子

反応物・生成物

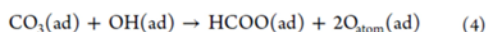


反応中の気体質量分析

触媒表面



反応機構の解決



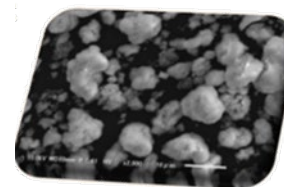
学理の構築

反応中間体の特定



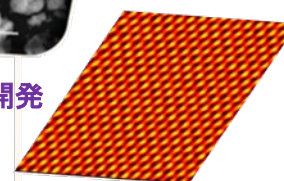
T. Koitaya et al., ACS Catalysis 9, 4539 (2019).

不均一試料の微小空間化学分析

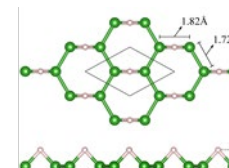
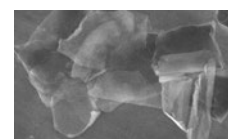


実触媒
固/気界面

⇒ 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).

⇒ 準大気圧下での表面化学反応の解明