

利用系グループ活動報告

JASRI 分光・イメージング推進室 光電子分光計測チーム

公益財団法人高輝度光科学研究センター

分光・イメージング推進室 光電子分光計測チーム

安野 聡、保井 晃、

高木 康多、Seo Okkyun、唐 佳 藝

1. はじめに

分光・イメージング推進室 光電子分光計測チームでは、BL09XU (HAXPES I)とBL46XU (HAXPES II)の2本のビームラインにおいて、計4つの硬X線光電子分光 (Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy, HAXPES) 装置を運用している。近年のビームライン再編およびアップグレードに伴い、これまで各々異なるビームラインで独自に開発・運用されてきたHAXPESのアクティビティをこれら2本のビームラインに集約し、HAXPES専用ビームラインとして再整備を行ってきた<sup>[1,2]</sup>。当チームでは、SPring-8のHAXPES利用課題における多種多様な分析目的・測定対象に対応可能な体制を構築するとともに、ユーザーニーズに即した技術開発と装置の高度化を進めている。

本稿では、HAXPES装置及びビームラインの光学系の詳細や実際の応用事例等については既報<sup>[3,4]</sup>に譲り、ユーザーがHAXPESの実験計画を立てる際に参考となる各ビームライン及び各装置のスペックと試料測定環境 (温度・電圧印加・雰囲気など)

の対応状況について概説する。併せて、チーム活動として進めているハードウェアおよびソフトウェアの共通化活動と共有の付帯設備についても紹介し、ユーザーが最適な実験装置や手法等を選定する際の手引きとなる情報を提供する。

2. ビームラインスペックと各HAXPES装置の基本性能と試料測定環境

BL09XUとBL46XUでは、高分解能、共鳴計測、偏光利用、微小領域計測、高エネルギー、自動計測、雰囲気環境制御などのそれぞれ異なる特徴を持つHAXPES装置を有し、これらを分析目的に応じて使い分けることで多様なニーズに対応している。また各装置の特徴を最大限に活かすための光学機器を備えている。以下に、各ビームラインの光学系およびHAXPES装置の基本性能のスペックと利用可能な試料測定環境について概説する。

2.1 ビームラインスペック

BL09XUおよびBL46XUのビームラインでは、二

表1 ビームラインスペック

		BL09XU		BL46XU	
		EH1	EH2	EH1	EH2
X線エネルギー (keV)		4.9~12		5.5~21.8	
分光器		Si(111) DCM Si(220, 311) DCCM Si(333, 444, 555) CCM		Si(111) DCM Si(220, 311) DCCM	
偏光		linear/ circular (DXPR) $P_v, P_c > 0.9$		linear/ circular (XPR)	
集光ミラー		Wolter型	long KB型	Wolter型	Wolter型
集光サイズ (μm)	垂直	1.5	1.5	1.5	1.3
	水平	22	1~11 (Depends on FE width)	23	13
フォトンフラックス (photon/s) (7.94 keV, Si(311) DCCM)		$5.6 \times 10^{12}$	FE width=1.2mm $6.3 \times 10^{12}$ FE width=0.03mm $1.3 \times 10^{11}$	$6.0 \times 10^{12}$	$4.6 \times 10^{12}$

結晶分光器 (Double Crystal Monochromator, DCM) に加え、ダブルチャンネルカットモノクロメーター (Double Channel-Cut Crystal Monochromator, DCCM) を導入しており、バンド幅を狭めたX線の定位置出射とエネルギー掃引が可能である。DCCMはSi (220) と Si (311) の2種類の結晶を備えており、分析目的に応じ所望のバンド幅とフラックスに調整したX線の利用が可能である。また、各実験ハッチには各装置に最適な集光ミラーを備え、高フラックスなマイクロ集光ビームが利用できる。両ビームラインにおける光学スペックをまとめたものを表1に示す。

BL09XU

DCCMに加え、高分解能測定に特化した背面反射型のSi (333/444/555) 反射を用いるチャンネルカット結晶分光器 (CCM) も備わっており、より精密な電子状態解析を行う事が可能である。他、2連のダイヤモンド移相子 (Double X-ray Phase Retarder, DXPR) を用いた0.9以上の高い偏光度を有する縦横・円偏光ビームを利用した偏光依存共鳴HAXPES計測が可能である。

また、下流側の実験ハッチ2 (EH2) では、放射光を使用している間でも上流のEH1内に立ち入った作業が可能なアクセスモードを導入している。これにより、EH2実験中に、EH1装置の保守やユーザー実験の事前準備を行うことが可能である。

BL46XU

光学系はBL09XUとほぼ同様の設計思想に基づいた各種光学機器を備えている。高エネルギーHAXPESを実現するための最大21.8 keVまでの高エネルギーに対応できるSi (311) DCCMを備えている。

2.2 試料測定環境 (温度・電圧印加・雰囲気など)

各HAXPES装置は、in situ測定をはじめとする多様なユーザーニーズに応えるため、加熱・冷却や電圧印加などが可能な試料測定環境を制御するためのコンポーネント (試料ステージ等) を備えている。表2に、各装置の特徴や基本性能 (分解能など) と併せて対応可能な測定環境の整備状況を示す。

BL09XU EH1 (共鳴・高分解能HAXPES)

光電子アナライザーは12 keVまでの運動エネルギーの光電子取得が可能であり、より表面から深い領域の電子状態観測が可能である。集光ミラーにWolterミラーを利用することで、高フラックスのマイクロビームを安定的に利用できるだけでなく、タンデム配置されたEH2装置での実験後の再集光においても、非常に高い再現性を持つ。試料位置でのビームサイズは1.5 μm (V) × 22 μm (H) である。

本装置のメインターゲットは、超伝導材料やスピントロニクス材料などの強相関電子系物質である。それらの多くの物質は、わずかな酸素でも劣化が

表2 HAXPES装置の特徴と試料測定環境

		BL09XU		BL46XU	
		EH1	EH2	EH1	EH2
特徴		・高分解能計測 ・共鳴計測	・3次元空間分解計測 ・四端子電圧印加計測	・自動計測 ・高エネルギー	・雰囲気環境制御
HAXPES 測定エネルギー範囲 (keV)		4.9~12	4.9~8	5.5~20	5.5~10
HAXPES 分解能 (meV) (7.94 keV, Si(311) DCCM)		64 (@ 10K) (E <sub>p</sub> 50 eV)	200 (E <sub>p</sub> 100 eV)	200 (E <sub>p</sub> 100 eV)	250 (E <sub>p</sub> 200 eV)
取り込み角度		±7°	±32°	±7°	±13°
測定環境		超高真空 < 3 × 10 <sup>-7</sup>	超高真空 < 5 × 10 <sup>-6</sup>	超高真空 < 5 × 10 <sup>-6</sup>	大気圧、各種ガス 3×10 <sup>-3</sup> ~1×10 <sup>5</sup>
測定温度範囲	高温	~370 K	~370 K	~770 K (Side load型)	~870 K
	低温	20 K	対応可 (要相談)	対応不可	対応不可
電圧印加		可能	可能	可能 (Side load型)	可能
大気非暴露導入		可能	可能	可能	可能
試料劈開		可能	可能	対応不可	可能

激しいため、測定層の真空度は $P < 3 \times 10^{-7}$  Paの超高真空条件での測定環境を提供している。また、低温における温度誘起相転移などの興味深い現象における電子構造変化を追跡するために、ヘリウム循環フローによる試料冷却が可能である。また、蛍光X線検出用のシリコンドリフト検出器を常設しており、光電子と蛍光X線の同時計測が可能である。

本装置では特に、吸収端近傍でエネルギー掃引を実施することで、元素・価数選択性を強化した電子状態解析が可能となる共鳴HAXPES計測を実施している<sup>[5]</sup>。軟X線領域では従来から実施されてきた共鳴光電子分光計測であるが、それを硬X線領域に拡張することで、よりバルク敏感であるだけでなく、励起に用いる電子遷移の特徴を活かした、新たな解析が可能である。さらに、BL09XUの特徴であるDXPRと組み合わせることで、高い縦横円偏光度の偏光ビームを用いた軌道状態・磁気状態を選別した電子状態解析を実現した。これまでに、共鳴HAXPES計測により、希土類化合物の量子臨界現象の解明に重要な役割を果たす、4f-5d電子間のクーロン斥力の高精度解析が初めて可能になった<sup>[6]</sup>だけでなく、鉄鋼材料では、酸化膜・母材金属界面の電子状態抽出に成功している<sup>[7]</sup>。このように本装置は幅広い分野・現象の研究に利用されている。

BL09XU EH2 (3次元空間分解HAXPES)

本装置は、長尺のKirkpatrick-Baez (KB) ミラー

を利用することで、フロントエンドスリットが全開の状態 (0.65 mm (V) × 1.2 mm (H)) でも、ほぼビームの取りこぼし無く、 $6.3 \times 10^{12}$  photon/s以上の極めて明るいマイクロ集光ビーム (1.5 μm (V) × 11 μm (H)) の利用が可能である。さらに、フロントエンドスリット幅を0.03 mmまで狭めることで、集光ビームの横幅を1 μmに縮小できる。その場合でも $1.3 \times 10^{11}$  photon/s程度のフラックスが得られ、1 μm (V) × 1 μm (H) のマイクロ集光ビームを利用した局所HAXPES計測が可能である。また、アナライザーは前段に±32°の広い光電子取込みを可能にする広角対物レンズを有しており<sup>[8]</sup>、角度分解測定を行うことで、表面から深さ数十nmまでの化学結合状態の深さ方向分布を得ることができる特徴を持つ。この深さ分解測定とマイクロ集光ビームとを組み合わせることで三次元空間分解した解析が可能である。さらに、四端子電圧印加などのin situ測定も可能であり、3.3.3項で述べる可搬式試料準備チェーンを利用することで、in situでの試料処理にも対応できる。本装置では、次世代半導体デバイス内の埋もれた電極・半導体界面の化学結合状態分布の可視化<sup>[9]</sup>など幅広い材料の解析に利用が進んでいる。

BL46XU EH1 (自動計測・高エネルギーHAXPES)

本装置はハイスループット計測に特化した自動試料搬送機構を備えており、3.1節で後述するチーム共通の制御ソフトウェアと組み合わせること

表3 BL46XU EH1 HAXPES装置用サンプルストッカー一覧

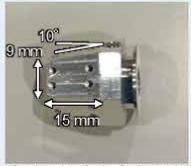
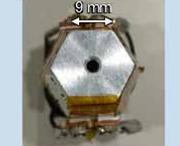
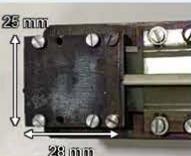
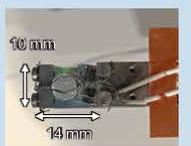
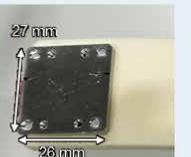
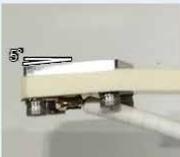
標準タイプ		大型試料用		多試料積載用 (六角形タイプ)
Front view	Side view	Front view	Side view	Front view
				

で、多数の試料の自動交換と連続自動測定が可能である<sup>[2,4]</sup>。試料交換には専用のストッカーを使用している。ストッカーの一覧を表3に示す。標準タイプのストッカーは、3.2節で説明するBL09XUとBL46XUのHAXPES装置間で共通のサンプルホルダーを最大4つ格納できる構造を有している。ロードロックチェンバーは最大で4つのストッカーを一度に真空排気可能な設計となっており、効率的な試料導入と交換を実現している。また、標準タイプ以外にも、ストッカー自体を大型のサンプルホルダーとして機能させるタイプも整備している。これにより、大型あるいは厚みのある試料への対応が可能となる。加えて、多面体形状により試料搭載数を格段に向上させたタイプも用意しており、用途に応じた

使い分けが可能である。

なお、この自動搬送機構（Top load型）で使用するマニピュレーターは自動測定によるハイスループットに特化しているため、温度制御や電圧印加機構は有していない。これに対し、本HAXPES装置では水平方向にマニピュレーターを設置させるSide load型のマニピュレーター機構も併設している。表4にSide load用サンプルホルダー及びサンプルステージの一覧を示す。Side load型では、X線入射角を固定したまま光電子脱出角度を調整できるほか、マニピュレーター自体を交換することで、高温加熱、電圧印加、および高エネルギー計測（～30 keV）への対応が可能である<sup>[10]</sup>。

表4 BL46XU EH1 HAXPES装置 Side load用サンプルホルダー及びサンプルステージ

STYLE	VIEW	
	Top	Side
標準タイプ	 ※入射角度 2°と5°タイプも有り	
電圧印加用		
加熱用 1		
加熱用 2 (電子衝撃加熱)		
高エネルギー 測定用		

### BL46XU EH2（大気圧・実環境HAXPES）

本装置は差動排気系と小径のアパーチャーを備えたアナライザーを有し、ガス雰囲気下の試料に対するHAXPES測定が可能である。従来のXPS装置は真空下の試料に限定されてきたが、本装置はアナライザー先端の小径アパーチャーとアナライザー前段の差動排気部により、試料の周囲のガス圧を上げてもアナライザー内の真空度が維持され、アナライザーを動作させることが可能となっている。

アナライザーにはScienta Omicron社の差動排気型アナライザーR4000 Hipp2を用いている。標準のアパーチャーの開口径はφ300 μmであり、カタログスペックとして5000 Paまでのガス圧の測定に対応している。一方で、独自開発した小径のアパーチャーに交換することで測定圧力を大気圧まで引き上げることが可能である<sup>[4]</sup>。現在は開口径70 μmのアパーチャーを用いることが多い。ビームの集光サイズは装置上流に設置されるWolterミラーにより測定位置において約1 μm (V) × 10 μm (H) である。

本装置を用いた水素ガス雰囲気下の還元反応や真空槽内に電極と電解質を導入したdip & pull法による電気化学反応などのオペランドHAXPES測定が実施されている<sup>[11-13]</sup>。

### 3. 利便性向上に向けた共通化の取り組み

当チームでは、ビームラインおよび、装置間の差異によるユーザーの負担を軽減して利便性を高め、

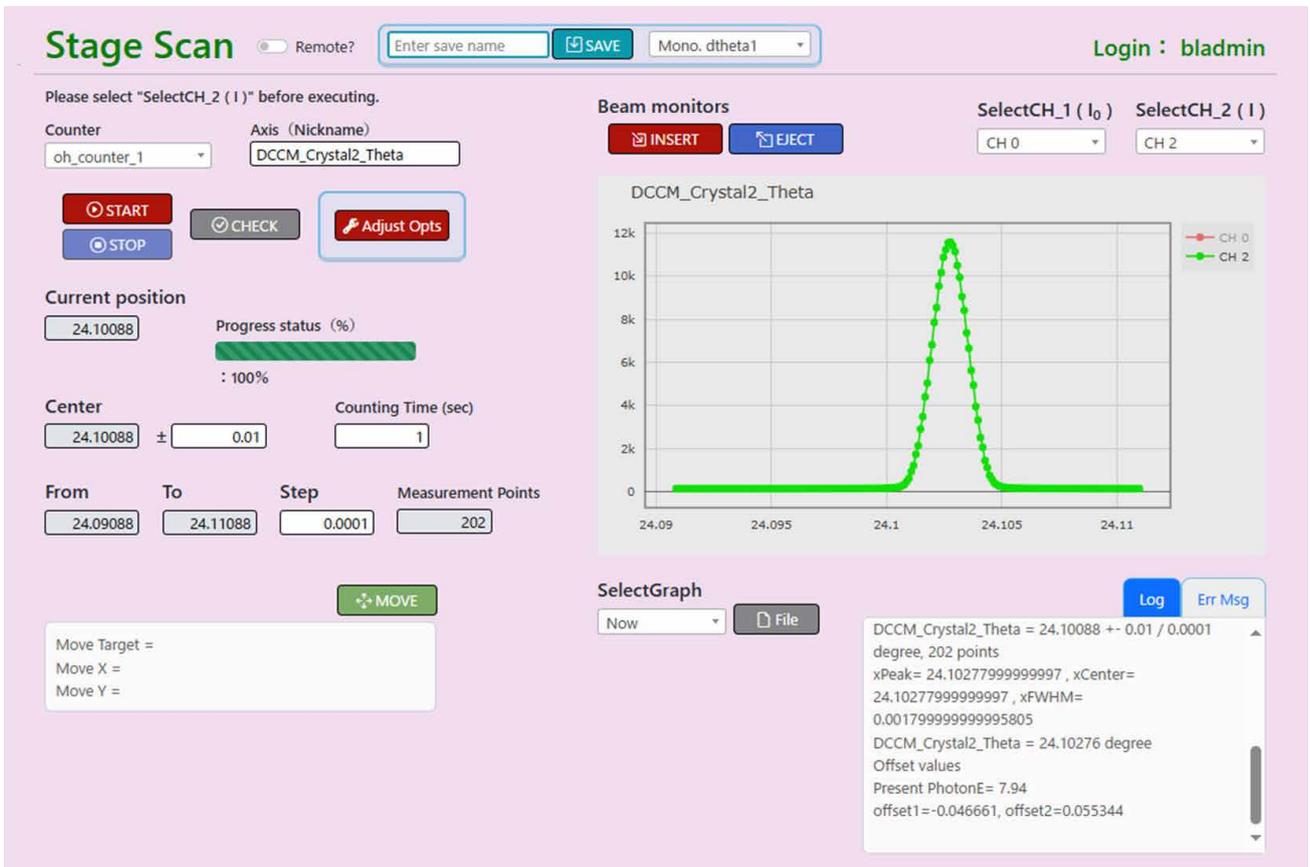
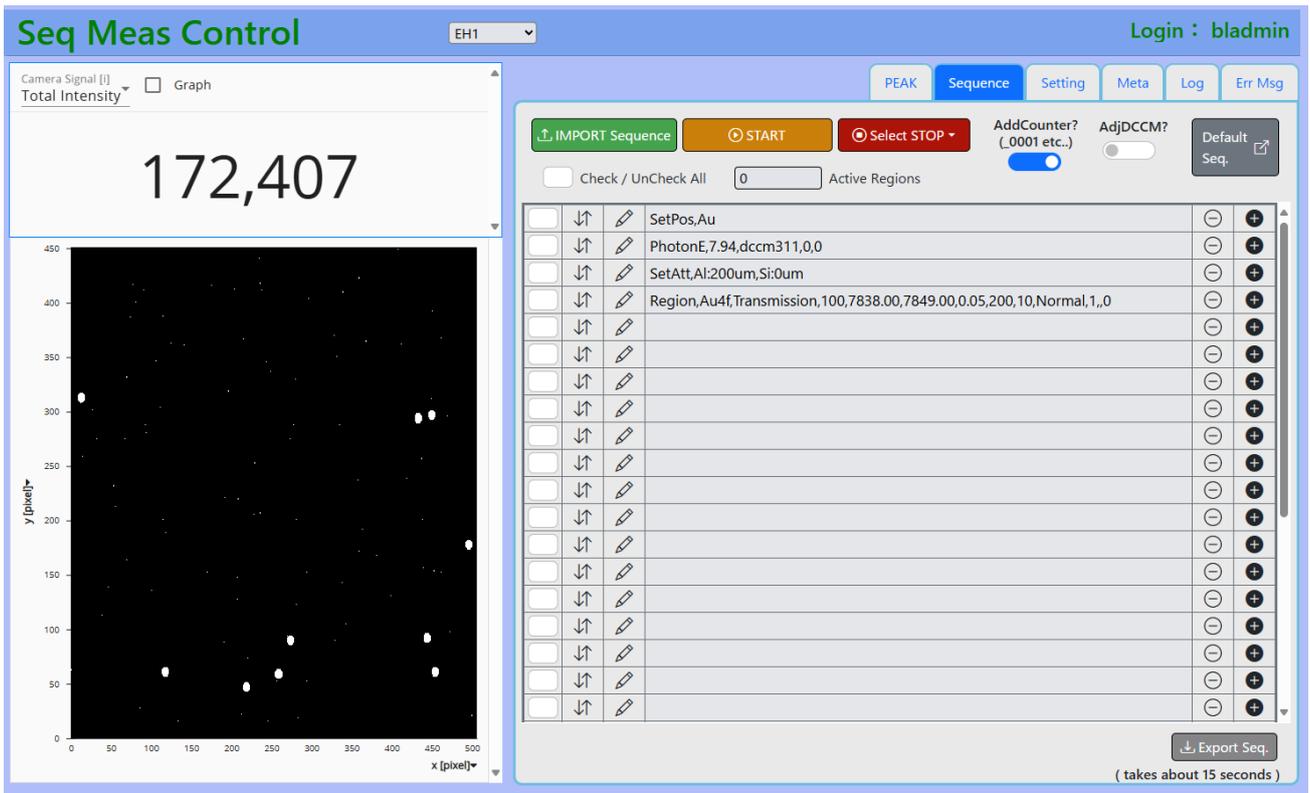


図1 BL09XU及びBL46XUで使用されるWebアプリケーション（Sequence Measurement ControlとStage Scan）の画面

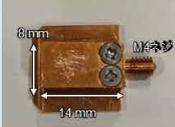
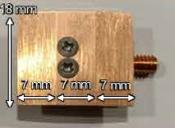
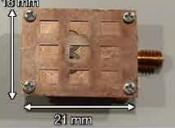
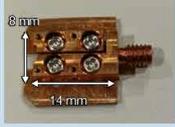
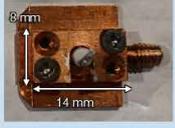
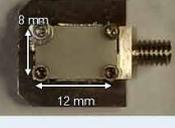
双方の横断利用を促進すべく、ハードウェアとソフトウェアの両面での共通化を進めている。以下に、両ビームラインで利用可能なWeb-APIベースのビームライン制御ソフトウェアの開発状況とサンプルホルダーの共通化、共有の付帯設備（試料準備・周辺

環境）の整備状況について概説する。

### 3.1 制御ソフトウェアの共通化

BL09XUおよびBL46XUの両ビームラインはアップグレードにより、多くの光学系機器、および

表5 BL09XU及びBL46XU HAXPES装置の共通サンプルホルダー一覧

STYLE	VIEW		対応状況			
	Top	Side	BL09XU		BL46XU	
			EH1	EH2	EH1	EH2
標準タイプ			○	○	○	○
ワイドタイプ			○	○	○	○
ワイドタイプ (傾斜付)			○	○	○	○
マスクタイプ (9 試料用)			○	○	○	○
マスクタイプ (1 試料用)			○	○	○	○
電圧印加用			×	○	×	○
電圧印加用 (ワイドタイプ)			×	○	×	○
劈開用			○	○	×	○
加熱用			×	×	×	○

HAXPES装置の位置調整機構がpythonベースで作られたBL-774<sup>[14]</sup>による制御に切り替わった。さらに、HAXPESアナライザーの制御には外部制御が可能な Scienta Omicron 製のソフトウェア PEAK を導入した。そこで、これらを統合的に制御して BL-774 の機能をフルに活かすことのできるビームライン共通の制御ソフトウェアを新たに開発した。開発したソフトウェアは全て BL-774 と同様に python ベースで作られている。複数機器間の連携操作などの主要な機能は BL-774 の枠組みの中で構築することで、その優れたタスク管理機能を利用している。この機能を python の Web フレームワークである FastAPI を用いた Web アプリケーションから呼び出す構成としている。複数の Web アプリを統合制御することで、BL-774 による機器制御と PEAK による測定制御を連動させる事ができ、光学素子の調整やアッテネーター設定から、試料の搬送・交換、自動位置調整、そして HAXPES 測定に至るまでの一連の操作を、統一されたインターフェース上でシームレスに実行できるようになった。また、通常の Web ページと同様に Web ブラウザのタブ機能を用いることで、複数の Web アプリを1つのブラウザ上で切り替えて使用することができる。これは SPring-8 外からのリモート実験時など、多数の Web アプリを用いる場合でも画面表示領域をコンパクトにできる等の利点を有する。図1に BL09XU および BL46XU で使用される光学系機器制御と HAXPES 測定用の Web アプリ画面の一例を示す。

ソフトウェアの詳細は過去の SPring-8/SACLA 年報をご参照いただきたい<sup>[15]</sup>。

開発したソフトウェアは、他のビームラインでも容易に移植できるように、現在も改良を続けている。本ソフトウェアは、2025年3月から共用利用が開始された NanoTerasu の軟X線角度分解光電子分光ビームラインである BL06U でも利用されている<sup>[16]</sup>。今後は、開発したソフトウェアが光電子分光だけでなく、他の分光測定にも展開することを期待している。

### 3.2 サンプルホルダーの共通化

従来、装置ごとに異なっていたサンプルホルダーの規格を統一し、BL09XU と BL46XU における4つ

の HAXPES 装置間で互換性を持たせている。また、この共通の規格（標準タイプ）に基づいた、多数の試料を一度にマウント可能なワイドタイプや、試料をマスクで固定するマスクタイプなどの応用的な治具も整備した。また個々の装置で実施されている in situ 測定を装置間で横断的に利用できれば、より多角的な化学結合状態、電子状態解析が可能になる。そのため、加熱、電圧印加、試料劈開といった特殊な測定環境制御用のホルダーについても順次共通化を進めており、装置間のスムーズな移行と効率的な運用の実現を目指している。

表5に、整備されている共通のサンプルホルダーの一覧を示す。

### 3.3 試料準備・周辺環境の整備

#### 3.3.1 劈開装置

強相関電子系物質など大気中で劣化しやすい試料では、試料表面の電子状態は物質内部の本来のものと異なることが多い。検出深度の大きい HAXPES であっても表面電子状態の影響を無視することができない場合には、真空装置内で試料を劈開して清浄な表面を露出させ、そのまま測定が行われる。BL09XU や BL46XU の HAXPES 装置には図2に示す破断器を有しており、真空中で破断して大気に曝さずに HAXPES 測定することが可能である。



図2 BL09XU 及び BL46XU の HAXPES 装置に設置可能な破断器（但し、BL46XU EH1 の HAXPES 装置は設置不可）

破断器は、BL09XU EH1の高分解能HAXPES装置にはプリパレーションチェンバーに、BL09XU EH2の三次元空間分解HAXPES装置にはロードックチェンバーに常設されている。また、BL46XU EH2の大気圧HAXPES装置ではロードロックチェンバーに取り付けることが可能である。その他、劈開性を有する単結晶試料については、本破断器を用いた劈開も可能である。これらの作業が必要な試料は接着材で固定することがほとんどであり、その固定用に表5に示した劈開用サンプルホルダーを用いている。

3.3.2 グローブボックス

大気非曝露でのHAXPESを行う場合、3.3.1項の様に真空槽内での劈開・破断を行うほかに、グローブボックスを経由してHAXPES装置内に試料を導入する方法をとることができる。例えば各大学の実験室で作成した試料を実験室のグローブボックス内でAr封入し、その状態でSPring-8に輸送して、ビームラインに設置されたグローブボックス内のAr雰囲気環境下で開封してサンプルホルダーに固定し、それを密閉されたトランスファーベッセルを用いて各HAXPES装置に導入する。各ビームラインで利用可能なグローブボックスとトランスファーベッセルを表6にまとめた。

3.3.3 可搬式試料準備チェンバー

実験室で試料を準備しSPring-8に持ち込むだけでなく、真空中で試料を作成できるように、試料準備用の装置を用意している(図3)。本装置はターボ分子ポンプとイオンポンプを備え、真空度は超高真空( $1 \times 10^{-7}$  Pa以下)を維持している。イオン銃を備え、Arスパッタ等の酸化膜の除去や表面の清浄化処理が可能で、またセラミックヒーターによる試料の加熱処理(600℃)も可能である。この他、RFスパッタによる蒸着装置や電子衝撃加熱による真空蒸着設備もあり、真空内での薄膜作製が可能である。この他、作製した薄膜をin situで評価するためのLEED/AES装置を備えている。

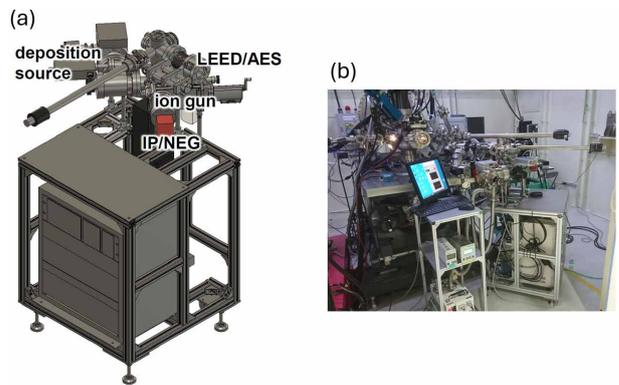


図3 (a) 可搬式試料準備チェンバーの概略図 (b) BL09XU EH2 3次元空間分解HAXPES装置への接続時の写真

表6 BL09XU及びBL46XU グローブボックスおよびトランスファーベッセル

	BL09XU	BL46XU
グローブボックス 外観		
トランスファー ベッセル 外観		
スペック	グローブボックス 型式: GBJF080R (グローブボックス・ジャパン) メインボックスサイズ: 800W×650H×600D パスボックスサイズ: 250W×250H×350L メインボックス容量: 300L 露点: -76°C、酸素濃度 ~0.3ppm トランスファーベッセル 接続径: NW40 収納ホルダ数: 5個	グローブボックス 型式: DBO-1NKP-SKYN (美和製作所) メインボックスサイズ: 1150W × 700H × 700D パスボックスサイズ: 225W × 320H × 522L メインボックス容量: 560L 露点: -80°C、酸素濃度: ~0.5 ppm トランスファーベッセル 接続径: ICF152 収納ホルダ数: 5個

この装置は移動可能で各ビームラインの各HAXPES装置に接続可能な設計になっている。ICF70のゲートバルブを介して各装置に接続し、連結部をポンプで真空排気することで真空接続ができる(図3)。これにより、本試料準備チェンバーで作成した試料を各HAXPES装置に導入し、in situでのHAXPES測定が可能である。

### 3.3.4 各種光源

近年、光触媒や人工光合成などを対象として、光反応過程をその場観察するオペランドHAXPES測定の需要が高まっている。これらに応えるため、当チームではキセノン光源、水銀光源を整備している。試料への光照射については、ビューポートを経由した装置内への照射に加え、真空用のライトガイドや測定チェンバーに設置された専用の集光レンズを通した試料への直接照射も可能である。さらに、BL46XU EH2の大気圧HAXPES装置では導光プローブロッドを用いることで、ガス雰囲気などの

実環境下にある試料に対しても効率的な光照射を実現している(表7, 8)。

## 4. まとめ

当チームでは、BL09XUとBL46XUにおいて計4つのHAXPES装置を運用し、最先端の共鳴、偏光、微小領域、高エネルギー測定から、実環境雰囲気下でのオペランド測定、自動化によるハイスループット測定に至るまで、多様化するユーザーの研究ニーズに幅広く対応可能な体制を整えている。本稿では、各ビームラインと各HAXPESの基本性能に加えて、特にチーム全体で取り組んでいる制御ソフトウェアやサンプルホルダーなどの共通化活動、共有の付帯設備の整備状況について概説した。本取り組みによって、ユーザーが装置ごとの仕様の違いに煩わされることなく、最適な測定手法を選定して効率的な実験が行える環境の構築を目指している。今後は、装置間でのラウンドロビン活動などを通じて、エネルギー軸や分解能、強度といったデータの信頼

表7 利用可能な光源

	キセノン光源	水銀光源
型式	MAX-303 (朝日分光)	REX-250 (朝日分光)
波長	235~1050nm	240~440nm
ランプ	キセノンランプ 300W	超高圧水銀ランプ 250W
ミラーモジュール	UV-VIS 300~600nm	UV 240~440nm
フィルターチェンジャー	φ25mm 8枚	φ25mm 8枚

表8 利用可能な導光装置

	導光ロッドプローブ	石英ライトガイド	真空用ライトガイド
外観			
スペック	素線材質：石英 ロッド径：φ6.5 ロッド長：150mm	素線材質：石英 結束径：φ5 全長：2000mm 許容曲げ半径：100mm	素線材質：石英 結束径：φ5 全長：真空側200mm、大気側1000mm 許容曲げ半径：100mm 接続ポート：ICF34

性に関わる情報を蓄積・共有し、当チーム内におけるHAXPESデータの質的な向上にも取り組んでいきたいと考えている。

## 謝辞

Webアプリケーション開発について、JASRI分光・イメージング推進室 テクニカルスタッフの藤保様に多大な御協力をいただきました。ここに深く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] 保井 晃、高木 康多: SPring-8/SACLA 利用者情報 **26** (2021) 445-447.
- [2] 安野 聡、Seo Okkyun、高木 康多、保井 晃: SPring-8/SACLA 利用者情報 **28** (2023) 434-438.
- [3] A. Yasui *et al.*: *J. Synchrotron Rad.* **30** (2023) 1013-1022.
- [4] S. Yauno *et al.*: *J. Synchrotron Rad.* **32** (2025) 1578-1585.
- [5] 三村 功次郎 他: SPring-8/SACLA 利用者情報 **28 (1)** (2023) 12-18.
- [6] K. Maeda *et al.*: *JPS Conf. Proc.* **30** (2020) 011137.
- [7] 西原 克浩 他: SPring-8/SACLA 利用研究成果集 **11** (2023) 259-267.
- [8] E. Ikenaga *et al.*: *J. Electron Spectrosc. and Relat. Phenom.* **190** (2013) 180-187.
- [9] Y. Shi *et al.*: *ACS Nano* **18** (2024) 9736-9745.
- [10] S. Yasuno *et al.*: *Rev. Sci. Instrum.*, **94**, (2023) 115113
- [11] Oh, S *et al.*: *Chemical Engineering Journal* **500** (2024) 157106.
- [12] H. Shin *et al.*: *ACS Appl. Mater. Interfaces* **17** (2025) 1499-1508
- [13] N. Ochi *et al.*: *J. Phys. Chem. C* **129** (2025) 20583-20592.
- [14] K. Nakajima *et al.*: *J. Phys. Conf. Ser.* **2380** (2022) 012101.
- [15] A. Yasui *et al.*: *SPring-8/SACLA Annual Report FY 2023* (2024) 33-35.
- [16] 保井 晃 他: SPring-8/SACLA/NanoTerasu 利用者情報 **1 (2)** (2025) 126-131

## 安野 聡 YASUNO Satoshi

(公財) 高輝度光科学研究センター  
分光・イメージング推進室  
〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1  
TEL : 0791-58-0833  
e-mail : yasuno@spring8.or.jp

## 保井 晃 YASUI Akira

(公財) 高輝度光科学研究センター  
分光・イメージング推進室  
〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1  
TEL : 0791-58-0833  
e-mail : a-yasui@spring8.or.jp

## 高木 康多 TAKAGI Yasumasa

(公財) 高輝度光科学研究センター  
分光・イメージング推進室  
〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1  
TEL : 0791-58-0833  
e-mail : ytakagi@spring8.or.jp

## ソ オッキュン SEO Okkyun

(公財) 高輝度光科学研究センター  
分光・イメージング推進室  
〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1  
TEL : 0791-58-0833  
e-mail : seo.okkyun@spring8.or.jp

## 唐 佳藝 TANG Jiayi

(公財) 高輝度光科学研究センター  
分光・イメージング推進室  
〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1  
TEL : 0791-58-0833  
e-mail : jiayi.tang@spring8.or.jp