

## 付録

---

付録 1. 低速陽電子実験施設

付録 2. PF の活動に関する統計データ (ビームタイムの配分状況 評点別データ)

付録 3. ビームラインの性能仕様一覧

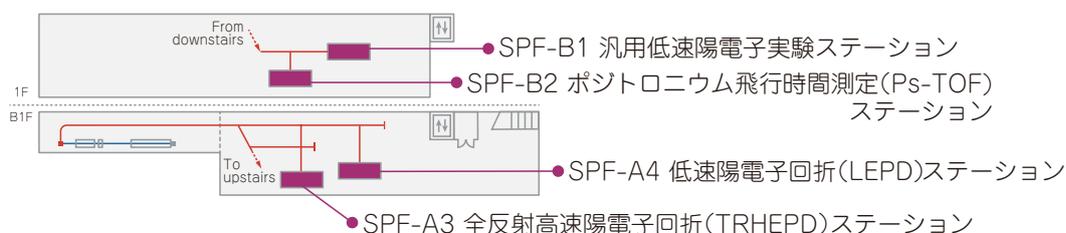
## 付録 1. 低速陽電子実験施設

和田 健

物質構造科学研究所 低速陽電子実験施設

ビームライン

**SPF**  
Slow Positron Facility



### 1. 概要

低速陽電子実験施設 (Slow Positron Facility, SPF) では、陽電子を用いた物質表面数原子層の原子配列 (原子の位置座標) の精密決定、ポジトロニウム (Ps) や Ps 負イオンといったエキゾチック粒子の基礎的性質の解明、およびそれらの粒子と物質との相互作用の解明等を目的とした共同利用実験を推進している。SPF では、専用加速器によって 55 MeV に加速した電子を重金属 (タンタル) 標的に入射し、電子陽電子対生成によって陽電子を得ている。対生成によって得られる陽電子は幅の広いエネルギー分布をもつが、負の陽電子仕事関数を持つ物質に入ると、そのごく一部がエネルギーを失った (熱化した) 後に表面から負の仕事関数に対応するエネルギーで再放出される。当施設ではその目的に厚さ 25  $\mu\text{m}$  のタンゲステン薄膜を井桁状に組んだものを用いている (タンゲステンの陽電子仕事関数は  $-3\text{ eV}$ )。このエネルギーの揃った再放出陽電子を再加速して得られる、エネルギー可変単色陽電子ビームのことを低速陽電子ビームと呼ぶ。SPF では、0.1 ~ 35 keV の任意のエネルギーに再加速した低速陽電子ビームを、磁場により各実験ステーションに供給している [1-3]。

SPF では、現在、全反射高速陽電子回折 (TRHEPD, トレプト)、低速陽電子回折 (LEPD, レプト)、汎用ステーションにおける低速陽電子利用実験、Ps 飛行時間測定 (Ps-TOF) の 4 つの実験ステーションで共同利用実験を実施している (汎用ステーションでは、現在、Ps のレーザー冷却実験が行われている)。なお、全反射高速陽電子回折 (TRHEPD) においても上で説明した方法でエネルギーを単色化した「低速陽電子」を用いるが、電子による反射高速電子回折 (RHEED) の陽電子版なので、それとの対応から「高速」陽電子回折と呼ばれる。さらに「全」反射と呼ばれるのは、電子にはない全反射が起きるためである。専用加速器は、電子銃と 30 MW クライストロン 1 本からプレバンチャー、バンチャー、4 m の S バンド加速管 1 本

にマイクロ波を供給する構成の電子線形加速器 (リニアック) である。電子陽電子対生成と低速陽電子ビーム生成の過程はナノ秒以下のオーダーで終了してしまうため、低速陽電子ビームのパルス時間幅はリニアックによる加速電子のパルス時間幅を反映する。SPF では、パルス幅 1.2  $\mu\text{s}$  の長パルスモードと、14 ns の短パルスモードの 2 つのパルスモードでの 50 Hz 運転を行っている。

専用リニアックの保守管理・運転は、加速器第 5 研究系 (入射器) が担当している。陽電子生成標的から下流側のビームラインの保守管理・運転および共同利用実験は、物構研 (低速陽電子実験施設と放射光実験施設) が担当している。

スタッフは、自身の研究と共に、ビームライン・ステーションの管理・運用と研究開発を行い、共同利用研究を推進している。構成ビームライン・実験ステーション名と担当者は下表のとおり。

SPF では、一台の専用リニアックで生成した低速陽電子ビームを、輸送ラインの途中で 4 本 (SPF-A3, A4, B1, B2) に分岐して、ビームタイム毎のタイムシェア方式で共同利用実験に供している (ビームを同時に複数の実験ステーシ

BL・実験ステーション	担当者	備考 (ユーザー運営, 大学運営など)
SPF-A3・TRHEPDステーション	和田 健	
SPF-A4・LEPDステーション	和田 健	
SPF-B1・汎用低速陽電子実験ステーション	和田 健	現在は Ps のレーザー冷却実験に用いられている。
SPF-B2・Ps-TOFステーション	和田 健	

ョンに供給することはできない)。共同利用のビームタイムは、放射光共同利用実験審査委員会 (PF-PAC) の評点に基づいて配分される。どの課題も計測時間を要する蓄積型実験で、1 課題に対して、1 期あたり概ね 3-4 日間程度割り振られる。ビーム輸送パラメータのセットアップはスタッフが対応しているが、経験のあるユーザーは、輸送パラメータ変更などを各自で行うことが可能である。

各実験ステーションの概要は以下のとおり。

### 【SPF-A3: 全反射高速陽電子回折 (TRHEPD) ステーション】

SPF-A3 ステーションでは、SPF の専用リニアックで生成されたロングパルスモードの高強度・高輝度低速陽電子ビームを用いて、全反射高速陽電子回折 (total-reflection high-energy positron diffraction, TRHEPD, トレプト) 実験 [4-6] を行っている。

実験は、図 1 に示すように、10 keV に加速した高輝度陽電子ビームを試料表面にすれすれの視射角で入射し、進行方向に對面したスクリーンに現れる回折パターンを撮影する。入射陽電子ビームに対する試料の視射角 ( $\theta$ ) を変化させながらパターン取得する方法 (ロッキング曲線と呼ばれる) と、方位角 ( $\phi$ ) を変化させながらパターン取得する方法 (方位角プロットと呼ばれる) の自動測定が可能である。

測定試料の標準的な大きさは 10 mm × 4 mm × 0.5 mm である。試料は、ロードロック室を経由して、超高真空を破らず測定チェンバ内の試料マニピュレータに搬送できる。試料温度は、直接通電加熱もしくは電子衝撃加熱による高温域の温度制御 (500 ~ 1500 K 程度) と、GM 冷凍機とヒーターを併用した低温域の温度制御 (15 K ~ 250 K 程度) が可能である。

また、独立した TRHEPD 測定用の試料準備チェンバも設置され、現在以下のプローブや設備が整備されている: LEED/AES 装置; RHEED 装置; Ar<sup>+</sup> イオンスパッタ装置; 蒸着源用ポート (ICF70 × 4); 電子衝撃 (最大印加電圧 2 kV) 加熱型 3 源エバポレータ; O<sub>2</sub> ガス導入; H<sub>2</sub> ガス導入; 試料通電/電子衝撃加熱機構; 試料冷却/温度制御機構; 試料ストッカー × 5; 試料交換用ロードロック室; 超高真空維持型試料トランスファーベッセル; 試料ホルダ × 6; 試料温度測定用放射温度計など。

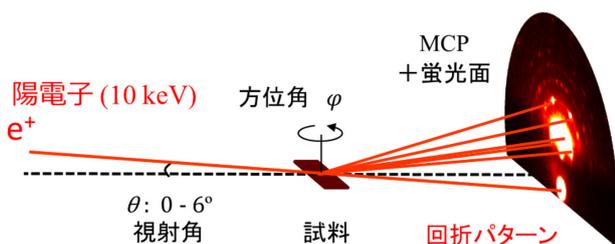


図 1 TRHEPD 実験配置

### 【SPF-A4: 低速陽電子回折 (LEPD) ステーション】

SPF-A4 では、SPF の専用リニアックのロングパルスモードで生成された高輝度・高強度低速陽電子ビームを用いた、低速陽電子回折 (Low-energy positron diffraction, LEPD, レプト) ステーションの開発と実験が行われている。LEPD は、低速電子回折 (Low-energy electron diffraction, LEED) の陽電子版である。LEED は、清浄表面や表面結晶の対称性などの確認に用いられることが多いが、定量的な  $I$ - $V$  解析によって、精密な表面構造決定にも使用される。この解析では、入射ビームのエネルギーを変化させながら各回折スポット強度を測定し、可能性のある様々な原子座標を仮定した計算データセットと比較して、最も適合する原子座標を決定した構造として採用する。この LEED  $I$ - $V$  解析は、表面構造解析の確立された手法であるが、多重散乱を考慮した計算の精度には限界があり、構造解析がうまくいかないこともある。陽電子は電子との交換相互作用が無く原子との散乱因子が単純となることなどから、LEPD は理想的な表面構造解析手法として LEED の先駆者から推奨されている [7]。また、LEED 同様垂直入射のため、微小試料表面の構造解析観測が可能になっていくことが期待できる。

すでに、加速器で生成した高強度低速陽電子ビームを用いた LEPD パターンの観測に世界で初めて成功した [8]。その際、パルス幅 1.2  $\mu$ s の長パルスモードのパルス幅を、200  $\mu$ s から 20 ms の間の任意のパルス幅まで伸長するパルスストレッチャーを開発した [9]。これが必要なのは、LEPD 観測に用いる位置敏感検出器 (Delay-line detector, DLD) は、1 つ 1 つの陽電子の時間情報と共に記録できるが、多重検出の処理能力には限界があるためである。このパルスストレッチャーは、各陽電子パルスを長さ約 6 m の Penning-Malmberg トラップにトラップした後、その 20 ms 秒後 (50 Hz 運転の場合) に次のパルスが来る前に、トラップした陽電子を一定エネルギーで徐々に下流側に放出するものである。LEPD 実験では、このパルスストレッチャーによる 5.2 keV の準 DC ビームを用いている。

LEPD の共同利用ステーションの整備が進み、いよいよ表面構造解析のための実用的な回折実験が可能となった。現在、実験データ解析を進めている。また、放射光実験施設 (PF) における角度分解光電子分光 (ARPES) 等と共通化した Omicron 型試料ホルダを導入した。超高真空搬送容器を用いて試料を搬送することにより、PF の一部の実験ステーションとの間で同一試料を用いた測定が可能となっている。

### 【SPF-B1: 汎用低速陽電子実験ステーション】

SPF-B1 は汎用ステーションで、SPF の当施設における短パルスモードのビームの特長を利用した種々の研究のために用意されている。レーザー設置用の定盤を置くスペースが確保されており、これまでにレーザーを用いた Ps 負イオンの光脱離の研究やそれを応用したエネルギー可変 Ps ビームの生成実験などが行われてきた。

現在は、Ps レーザー冷却実験が行われている。直線導入機に取付けた Ps 生成ターゲット（シリカエアロゲル）を真空チェンバ内に設置し、短パルスモードの低速陽電子ビームをターゲットに入射をすると、ターゲットで生成された Ps がビーム上流側に放出される。この Ps にレーザーを照射してトリプレットの 1S-2P 遷移を引き起こすことによって、Ps のレーザー冷却および温度の測定を行っている。Ps は束縛系量子電磁力学 (QED) の精密検証に理想的であるとともに、反粒子を含むシンプルな系であるため、物質・反物質非対称性（なぜ現在の宇宙に物質だけが残ったのか）の解明に有用と考えられている。

## 【SPF-B2：ポジトロニウム飛行時間測定 (Ps-TOF) ステーション】

SPF-B2 では、SPF の専用リニアックで生成されたショートパルスモードの短パルス低速陽電子ビームを用いて、ポジトロニウムの飛行時間測定 (Positronium time-of-flight, Ps-TOF) 実験を行っている。

ショートパルスモードの陽電子ビームを、4.2 keV 程度に加速して Ps-TOF 装置 (図 2) まで輸送する。試料位置でのパルス幅は 14 ns 程度である。試料に対する陽電子入射エネルギーの調整は、試料直前の接地されたグリッドに対して試料に必要な電圧を印加することによって行う。

このビームを試料に打ち込み、試料表面から放出されるスピン三重項のオルソポジトロニウムの飛行時間を測定する。測定チェンバ上流部には、試料位置から水平距離にして 40 mm および 120 mm の位置に鉛スリットとシンチレーション検出器が設置されており、真空中の寿命 142 ns のオルソポジトロニウムがこれらの検出器の真下を通る時に自己消滅して発生した  $\gamma$  線のうち 1 本を検出する。検出器の光電子増倍管からの信号を高速デジタイザに入力し、リニアックのタイミング信号をトリガーとして飛行時間スペクトルを得る。陽電子の入射時刻は、入射後 200 ps 程度の時間内に試料内で消滅した陽電子からの消滅  $\gamma$  線がスリットの鉛シールドを抜けたものがプロンプト信号として同じ飛行時間スペクトルに検出されるので、それを利用し

て知る。

測定試料の標準的な大きさは 15 mm × 15 mm × 2 mm (t) である。試料の背面には電子衝撃による加熱機構が備えられている。

本ステーションには、Ps-TOF 測定システムの他、RHEED 装置、蒸着源用ポート (ICF70 × 1)、O<sub>2</sub> ガス導入、試料温度測定用放射温度計等が備えられている。ただし現在は、GM 冷凍機によって試料を冷却しながらの Ps-TOF 実験実施のために、これらの設備は一時的に取外している。

## 2. 活動内容

各実験ステーションの実験装置の高度化が進んだことから、ビーム強度やビーム位置の微妙な変化に対する実験への影響が徐々に顕在化してきた。特に精緻な光学系を用いている LEPD 実験において、ビーム強度のランダムな変動が観測されたことから調査を進めたところ、原因として低速陽電子生成ターゲット部の電位の変動とパルスストレッチャー用の出口ゲート電極の電位変動が疑われた。ターゲット部の高電圧フローティング電源 (特注) における陽電子モデレータへの出力電圧の時定数を計算したところ 330 秒と非常に長く、チャージアップ時の正常電位への回復が遅れていることが推測されたため、電源内部の抵抗の交換によって時定数を 3.3 秒にした。さらに、陽電子コンバータ部に対しても、ターゲット部そばに既設の 30 nF 程度のキャパシタに並列に 120 M $\Omega$  のシャント抵抗を追加することで、220 秒だった時定数を 4.2 秒にした。パルスストレッチャーのゲート電極に対しては、47 M $\Omega$  のシャント抵抗をつけた。これによりビーム強度のランダムな変動が抑えられると共に、異なる実験ステーションへのビーム供給パラメータの切り替え後すぐにビームが安定するようになった。以前は安定するまでに数時間要していた。

SPF の短パルスモードにおける低速陽電子ビーム強度に 10 Hz と 25 Hz の 1-2% 程度の強度変動 (強度の 2 値化) があることが、Ps レーザー冷却実験のデータ解析から判明した。SPF のある入射器棟内の他の加速器モジュール由来の電源ノイズによるものと思われる。SPF の専用加速器のタイミングを入射器棟メインリニアックに対して相対的に 8.0 ms 遅らせると共に、クライストロンの加速電圧を上げることでこのビーム強度の 2 値化の問題を解決した。

低速陽電子ビームラインの加速器フェンス上流側におけるステアリングコイルで地絡 (配線の接地電位への短絡) が続発した。これらは、かつて KEKB の陽電子用リングに導入されたものと同タイプのソレノイドコイルの内部に張られた、ビーム輸送用真空配管の上下方向および左右方向に磁場を発生させるコイルである。その目的は、磁場に沿ってガイドされていく低速陽電子のビーム軌道の調整、あるいは地磁気による偏向の補正である。地絡部の接触抵抗の変動によりビーム位置が安定せず、低速陽電子回折のような精緻な光学系を用いた実験に著しい影響が出た。ソレノイド内部をファイバースコープで観測したものの、問題のステアリングコイルのどこで地絡をしているかは判別

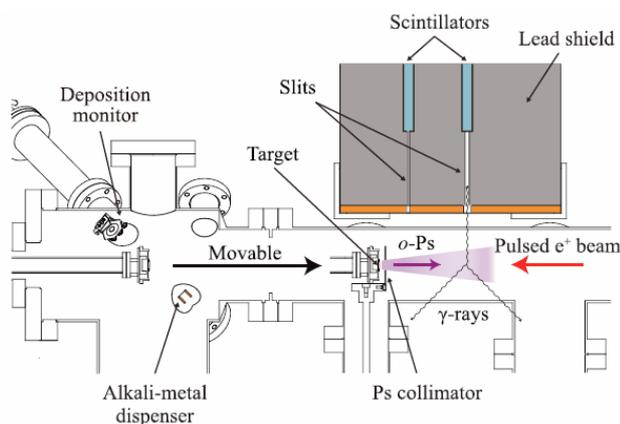


図 2 Ps-TOF 実験装置 [10]

がつかなかった。熱による膨張と収縮によってコイル配線の被覆が固定治具のエッジではがれてきて同時期に次々地絡しはじめたのではないかと推測している。これらのステアリングコイルの交換にはビームラインの解体が必要となるためそれは行わずに、ソレノイドコイル外側から新たにステアリングコイルを6セット設置して解決した。また、2023年度第3期の運転中の2024年2月11日未明に、ビーム強度の著しい低下があった。調査したところ、最上流から2番目のビーム輸送用ソレノイドコイルへの配線で地絡が見つかった。問題のコイルはコンクリートシールド内部にあって、これ以上の調査と対策はシールドを大規模に開けて中に入ってから作業が必要だが、それも加速器停止から1ヶ月程度線量が下がるのを待つ必要がある。問題のコイルのみをバイパスしビーム調整を試みたところ、1/10程度の強度であればビームが輸送できることがわかった。そのため、対応は次年度に行うことにして、予定されていたユーザー運転終了日の3月25日まで1/10のビーム強度で運転を継続した。

TRHEPD対応パルスストレッチャーの開発を進めた。ロングパルスモードでは、20ms毎に1 $\mu$ sのパルス幅のビームで供給されるため、パルス中では時間平均強度に対して20,000倍もの瞬間強度になっており、TRHEPDの回折ビーム強度がMCPの許容検出レートの限界に達している。この問題の解決のために、LEPD用に開発し稼働中のパルスストレッチャーをTRHEPDでも使用できるよう、改造を検討している。パルスストレッチャーで使用しているPenning-Malmbergトラップの電極は、真空配管内の長さ約6mのトラップ電極およびその両端のゲート電極と接地電極から構成されており、現在は5.0keVの1 $\mu$ sのパルスビームを5.2keVの準DCビームに変換してLEPD実験に供給している。TRHEPDに必要な15keVの準DCビームを供給できるようにするためには、15kVを超える電圧の印加のための特殊パルス電源の開発と、各電極の放電対策を進める必要がある。このための特殊電源を開発し、放電対策の評価用試験電極を組み込んだテスト用ビームライン・ダクトを作製して、電圧印加試験を行った。特殊電源については、入口ゲート電極用のパルス電源回路へのコンデンサの追加と、電極に接続した場合のインピーダンス整合をとり、かつ電極で放電が起こった時の電源保護のための抵抗を追加すれば必要とする性能が達成できることが確認できた。また、電極本体の高電圧印加に関しては、ゲート電極と接地電極との間の放電が疑われるので、その対策を検討しているところである。

陽電子回折実験(TRHEPDとLEPD)では、磁場によって輸送した低速陽電子ビームを非磁場領域にビームを引出してから減速材(リモデレータ)位置にビームを収束する。そのビーム技術開発要素の核心である、磁場から非磁場への低速陽電子ビームの効率的な取り出しとリモデレータ位置へのビーム収束のシステムの改良に取り組んでいる。これまでに、磁性体遮蔽構造および磁性体薄膜と新規磁場収束レンズを組み合わせることで、輸送効率とビーム収束力が

高められることがわかっていた。2023年度は、より高効率となることが予想された、磁場遮蔽グリッドと磁場収束レンズの距離を短くする光学系の改造を行った。ビーム試験の結果、改造前と比較してビーム径は以前の1.7mmから1.0mmまで小さくなり、中心強度も桁違いに強くなった。また、磁場遮蔽グリッドと磁場収束レンズの距離をさらに短くすることは設計上可能であるため、その距離を可能な限りつめた、磁場遮蔽体と磁場収束レンズのヨークを一体化した新たな光学系の開発を開始した。

TRHEPD法により、金属基板上グラフェンの積層制御による材料研究が行われた[11]。グラフェンの物性を下地基板を利用して制御する試みは、グラフェン材料開拓における新たな自由度をもたらす。Co(0001)面上のグラフェンと基板との間に貴金属原子を挿入したときの積層構造の変化が、TRHEPD法で明らかになった。グラフェンとCo基板との層間距離(2.04Å)は、Ag, Au原子挿入により、3.24Å(Ag)、3.32Å(Au)へと広がり、デバイ温度は430K(Co)から320K(Ag)、368K(Au)に変化した。下地基板と強く相互作用しているCo上のグラフェンを、貴金属原子の挿入により、次段落で説明する擬フリースタンディングな状態へとリバーシブルに作り換えられることが分かった。

TRHEPD法により、擬フリースタンディング単層グラフェン(QFMLG)の構造決定が行われた[12]。H終端されたSiC基板上グラフェンは、「擬フリースタンディング単層グラフェン(quasi-freestanding monolayer graphene, 通称QFMLG)」と呼ばれる。この原子スケールレベルで平坦なグラフェンシートを高品質・大面積に作れば、次世代超高速応答電子デバイスやパワー半導体デバイスの材料として有望である。本研究では、ポリマーアシスト昇華成長(polymer-assisted sublimation growth, PASG)法により、6H-SiC(0001)基板上に成膜した高品質・大面積のQFMLGを、TRHEPD法によって構造決定した(図3)。本研究から決定されたグラフェンと基板間の層間距離( $d_{\text{QFMLG}} = 4.18 \pm 0.06 \text{ \AA}$ )は、他の実験手法による報告( $d_{\text{QFMLG}} = 4.22 \pm 0.06 \text{ \AA}$ )よりやや小さな値となり、密度汎関数法による第一原理計算の結果( $d_{\text{QFMLG}} = 4.16 \text{ \AA}$ )とも良く一致した。

SPF-A4における加速器ベースの高強度低速陽電子ビームを用いたLEPD初観測に成功した時は、1つの回折パターンの観測に数時間要していた(Ge(001)-2 $\times$ 1表面)。その後、ビーム輸送の改良や試料作成等の環境整備を進め、装置性能が飛躍的に向上し、Cu(001)表面において1パターンあたり1分程度で観測できるようになった。これにより、各回折スポット強度の入射ビームエネルギー依存性( $I$ - $V$ カーブ)を用いた表面構造解析に十分な品質のデータが得られるようになり、構造解析を開始した。低速電子回折(LEED)の解析コードを陽電子用に改造したコードによる解析の結果、LEPDでは実験と計算の一致がLEEDと比較して驚くほど良いことがわかった。LEEDでは、計算と実験の一致度を評価するPendry R-factorと呼ばれる指標を最

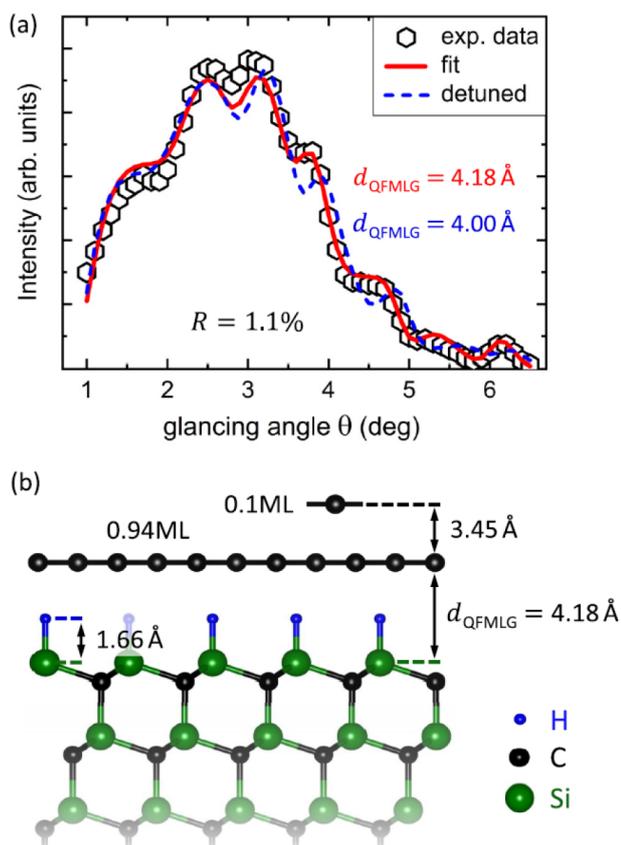


図3 (a) TRHEPDによる擬フリースタANDING単層グラフェン(QFMLG)の一波条件におけるロッキング曲線の解析結果。計算は(b)に示された構造に基づいており、6つのフィッティングパラメータ、すなわち、QFMLGとグラフェン二層構造の占有率と間隔、水素原子の間隔、および最上部のSi層の格子緩和を含む。各構造パラメータの数値による計算結果は、(a)に赤線で示している。ロッキング曲線は層間距離 $d_{\text{QFMLG}}$ に特に敏感である。0.18Åずれた場合(青い破線)、R因子は1.1%から1.7%に増加し、ロッキング曲線の形状が変化する(文献[12]より転載)。

小化する原子位置を探索する解析が行われている。Pendry R-factorはI-Vカーブにおけるピーク強度の一致についてはあまり問題にしないかわりに、ピーク位置をあわせるよう工夫されたものであり、I-Vカーブの対数関数の微分によって評価している。これは、LEEDの計算精度に限界があるために工夫された解析手法であるが、LEPDの場合には、I-Vカーブのピーク位置だけではなく、ピーク強度も含めて理論と実験の一致が良い。そこで、Pendry R-factor以外の指標の選択も含めたLEPDに特化した解析法を模索している。その模索のために、TRHEPD用に開発してきた、先端量子ビーム計測技術向けの大域型逆問題解析フレームワーク「2DMAT」[13,14]に新たにカイ二乗による評価関数を導入することなどの機能強化を進めている。2DMATは、理論モデルが解析的な関数で与えられない場合でも、実験データから最尤パラメータを、局所解に陥ることなく大域的に探索できる優れた解析プラットフォームである。最近、LEPDの構造解析への拡張を進め、PCやスーパーコンピュータによる解析を試行している。

SPF-B1(汎用低速陽電子実験ステーション)には、専用リニアックの短パルスモード(14 ns, 50 Hz)で生成された高強度( $\sim 10^7$  slow- $e^+$ /s)の低速陽電子ビームを供給している。そのビームをレーザー冷却用に試作した開放孔をもつシリカエアロゲルに入射してPsを生成する。Pレーザー冷却実験のために、高強度の低速陽電子パルスビームを高効率で供給し、かつレーザーを照射する空間への漏れ磁場を最小限にすることを両立する磁場の空間分布を周到に設計し、その設置と調整を行ってビームを供給した。Psは水素原子の900分の1の質量しかないため、同一温度に対する速度分布が非常に広く、また、真空中の寿命が142 nsと非常に短いため、通常のレーザー冷却の手法が使えない。このため、波長が急速に変化するパルス列のレーザー光を開発し、対消滅が起きるより早く1 Kまで急冷することに世界で初めて成功した[15]。3次元レーザー冷却の実現に向けて、主に測定チェンバや磁場コイルの装置開発設計、および実験スペースを大規模に改装してのレーザーブース設置の作業を、安衛室およびPF安全担当のアドバイザーを得ながら慎重に進めている。

SPF-B2(Ps-TOFステーション)では、シリカ多孔体表面から真空中に放出されるPsのエネルギー分布の測定を継続した。GM冷凍機を設置し、低温にしたサンプル表面から真空中に放出されるPsのエネルギー分布を測定している。また、レーザー光によってPsを長寿命状態に励起することによる新たな飛行時間測定装置開発の検討が開始された。

### 3. 今後の展望

SPF-A3(TRHEPDステーション)は、本格的に共同利用実験を開始した2013年以降、認知度も上がりユーザーは増加している。引き続き、TRHEPDの表面超感受性を活かして、表面特性が重要なグラフェンやボロフェン(ホウ素の単原子シート)などの原子層状物質、もしくはそれらを複合した多原子層状物質や化合物、新たに合成された超薄膜物質、機能性触媒物質などの構造解析の研究を推進する。これまでよりも長周期の表面構造の解析のニーズも高まっており、コヒーレンス長のより長いビームの生成を検討している。SPF-A4(LEPDステーション)は、全面改良により、表面構造解析のための実用的な実験ステーションとなった。得られた実験データの解析ソフトウェアの開発と、それをういた実際の構造解析の実証を進め、TRHEPDに加え、もう1つの表面構造解析の基盤ツールとしてKEK施設利用者に提供していく。LEPDはLEEDによる解析が困難な重元素を含む表面の構造解析に特に有用であると考えられている。また垂直入射方式のため、微小な試料表面の観測も可能になる。将来的には、狙った微小結晶ドメインに対する、放射光による角度分解光電子分光(ARPES)との2ビーム利用実験への発展が期待できる。SPF-B1におけるPsレーザー冷却実験においては、今後光によるエネルギー準位や質量の精密な測定が可能となり、物理学の基礎理論の検証や反物質の性質の理解など、物理

学が抱える謎を解くための研究分野が大きく進展することが期待できる。

#### 引用文献

- [1] K. Wada, T. Hyodo, *et al.*, *Eur. Phys. J. D* **66**, 37 (2012).
- [2] 和田健, 陽電子科学 **3**, 11 (2014).
- [3] 和田健, 第40回高エネルギー加速器セミナー OHO'23 講義テキスト (2023).
- [4] M. Maekawa, K. Wada, *et al.*, *Eur. Phys. J. D* **68**, 165 (2014).
- [5] 兵頭俊夫, 固体物理 **53**, 705 (2018年11月号 p141).
- [6] Y. Fukaya, A. Kawasuso, *et al.*, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **52**, 013002 (2019).
- [7] S. Y. Tong, *Surf. Sci.* **457**, L432 (2000).
- [8] K. Wada, T. Shirasawa, *et al.*, *e-J. Surf. Sci. Nanotechnol.* **16**, 313 (2018).
- [9] K. Wada, M. Maekawa, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **975**, 164161 (2020).
- [10] S. Iida, K. Wada, *et al.*, *J. Phys.: Condens. Matter* **28**, 475002 (2016).
- [11] Y. Fukaya, S. Entani, *et al.*, *Phys. Rev. B* **108**, 155422 (2023).
- [12] M. Dodenhöft, I. Mochizuki, *et al.*, *Phys. Rev. B* **108**, 155438 (2023).
- [13] <https://www.pasums.issp.u-tokyo.ac.jp/2dmat/>
- [14] Y. Motoyama, K. Yoshimi, *et al.*, *Comp. Phys. Commun.* **280**, 108465 (2022).
- [15] K. Shu, Y. Tajima, *et al.*, arXiv:2310.08761.

## 付録 2. PF の活動に関する統計データ（ビームタイム配分状況）

2023 年度に有効であった共同利用実験課題の評点分布（5 点満点）と、ビームライン毎のビームタイムの配分状況をビームライン群毎に図と表で示す。評点分布（図）では実験課題カテゴリー（G、S2、U、T、MP）毎に色分けして示している。配分状況（表）には、年度内 3 期（2023 年 4-6 月、2023 年 11-12 月、2024 年 2-3 月）に毎に、有効課題数（共同利用実験以外も含む）、ビームタイム配分率（Allocated Beamtime）=（配分ビームタイムの総和）／（利用希望ビームタイムの総和）、ビームタイムの配分が可能であった最低の評点（Cutoff Score）をまとめた。

### 1) 第 1 分科ビームライン群（真空紫外・軟 X 線ビームライン、低速陽電子ビームライン）

第 1 分科ビームライン群は、PF リングの電子エネルギー（2.5 GeV）の特徴を活かした真空紫外・軟 X 線のエネルギー領域を用いた光電子分光、吸収分光、軟 X 線顕微鏡などの手法を用いた実験研究をカバーしている（低速陽電子実験施設のビームラインも第 1 分科に含めている）。特に PF リングの直線部増強により整備された挿入光源ビームライン（BL-2、BL-13、BL-16、BL-19、BL-28）の利用ニーズは引き続き高く、多くの S2 型課題が実施されていることもあって競争率が高い状況となっている。

### Subcommittee 1

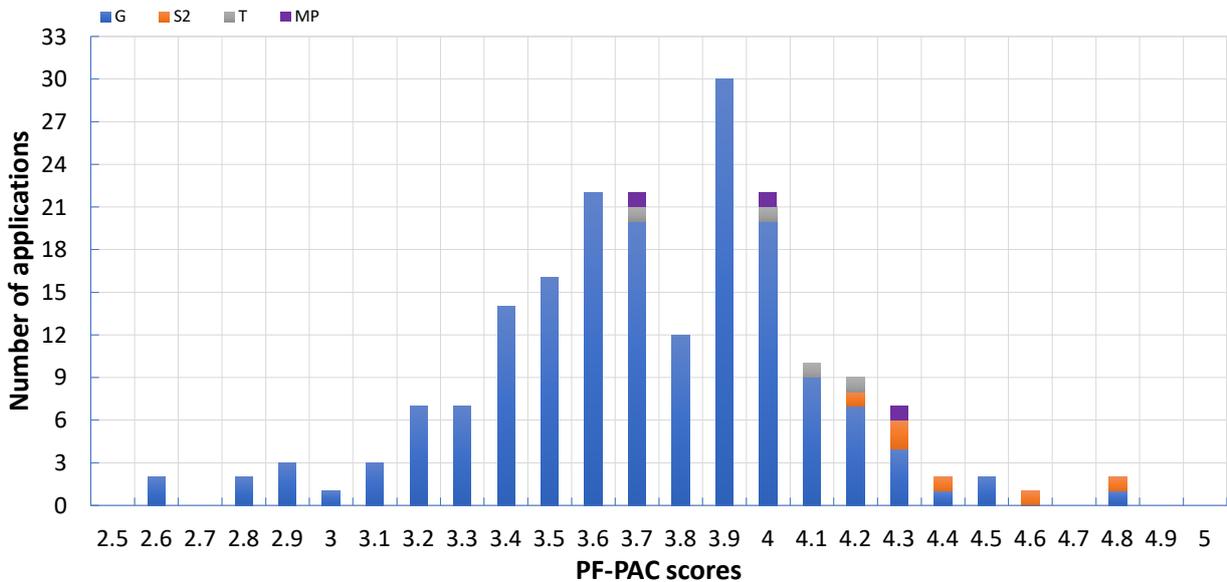


図 1 第 1 分科ビームライン群（真空紫外・軟 X 線ビームラインおよび低速陽電子ビームライン）の有効共同利用実験課題の評点分布

表 1 第 1 分科ビームライン群（真空紫外・軟 X 線ビームラインおよび低速陽電子ビームライン）の 3 期分のビームタイム配分率

Subcommittee 1										
Beamline	Light Source	2024/2-3			2023/11-12			2023/4-6		
		No. of Proposals	Allocated Beamtime	Cutoff Score	No. of Proposals	Allocated Beamtime	Cutoff Score	No. of Proposals	Allocated Beamtime	Cutoff Score
BL-2A/B (VUV and Soft X-ray spectroscopy)	U	32	78%	3.2	33	58%	3.6	31	52%	3.2
BL-13A/B (VUV and Soft X-ray spectroscopy)	U	35	63%	3.0	34	54%	2.8	31	59%	2.8
BL-16A (Soft X-ray spectroscopy)	U	38	57%	2.8	39	42%	3.5	45	53%	2.9
BL-28A/B (VUV and Soft X-ray spectroscopy)	U	20	61%	3.5	20	51%	3.1	18	55%	3.5
BL-3B (VUV and Soft X-ray spectroscopy)	BM	3	100%	3.5	3	100%	3.5	4	141%	3.5
BL-12A (Soft and Tender X-ray Beamline under construction)	BM	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BL-19A/B (Soft X-ray Microscopy (STXM) and Spectroscopy)	U	33	67%	3.4	35	70%	3.6	32	60%	3.6
BL-20A (VUV spectroscopy)	BM	6	86%	3.7	6	88%	3.7	6	99%	3.3
BL-27A (Radiation biology and XPS for radioactive samples)	BM	16	100%	3.2	16	99%	3.1	16	91%	3.1
SPF (Slow positron facility)	SP	12	62%	3.3	12	63%	3.3	12	58%	3.3

2) 第2分科ビームライン群（硬X線回折・散乱実験用ビームライン）

第2分科ビームライン群は、硬X線エネルギー領域での回折・散乱実験により、単結晶や粉末の構造解析を行う構

造物性分野を主な対象としており、特に単結晶構造解析とX線回折測定用のビームライン（BL-3A、4C、8A、8B）の利用ニーズが高く、それぞれ30件程度の実験課題を実施している。

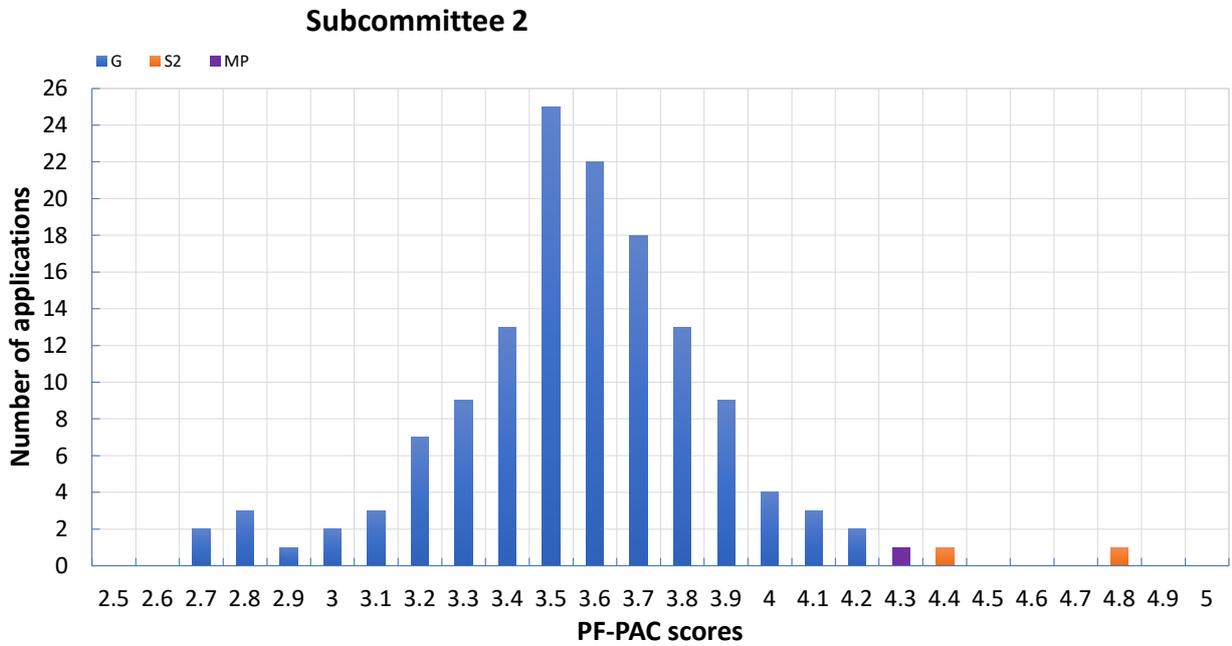


図2 第2分科ビームライン群（硬X線回折・散乱実験用ビームライン）の有効共同利用実験課題の評点分布

表2 第2分科ビームライン群（硬X線回折・散乱実験用ビームライン）の3期分のビームタイム配分率

Subcommittee 2										
Beamline	Light Source	2024/2-3			2023/11-12			2023/4-6		
		No. of Proposals	Allocated Beamtime	Cutoff Score	No. of Proposals	Allocated Beamtime	Cutoff Score	No. of Proposals	Allocated Beamtime	Cutoff Score
BL-3A (X-ray diffraction)	SGU	29	51%	3.1	30	50%	3.5	31	47%	3.3
BL-4C (X-ray diffraction)	BM	25	89%	3.0	26	68%	3.2	26	85%	3.1
BL-4B2 (X-ray powder diffraction)	BM	7	100%	3.6	6	97%	3.6	8	100%	3.6
BL-6C (X-ray diffraction)	BM	17	61%	3.0	17	64%	3.0	19	62%	2.8
BL-7C (Multipurpose)	BM	10	100%	2.8	10	99%	2.8	6	107%	2.9
BL-8A,8B (X-ray diffraction)	BM	30	99%	3.2	29	85%	3.2	35	93%	3.2
BL-10A (X-ray diffraction)	BM	6	81%	3.3	6	77%	3.3	8	85%	3.4
BL-14A (X-ray diffraction and detector studies)	VW	5	100%	3.4	5	99%	3.4	8	100%	3.2

### 3) 第3分科ビームライン群（硬X線分光ビームライン）

第3分科ビームライン群は、硬X線分光測定による物質・材料の化学状態、分子構造の研究等を対象としており、対象となるビームライン群は学術・産業界の広範なユーザーに利用されている。特にX線吸収微細構造（XAFS）ビームライン（BL-9A、9C、12C、AR-NW2A、AR-NW10A）

は多数の実験課題を実施しており、高い利用ニーズを有している。

BL-15A1は、マイクロビームを必要とする実験に特化されているため課題数は多くはないが、小角散乱（第5分科）のBL-15A2と時間を分けた利用となっていて配分率が少し低くなっている。

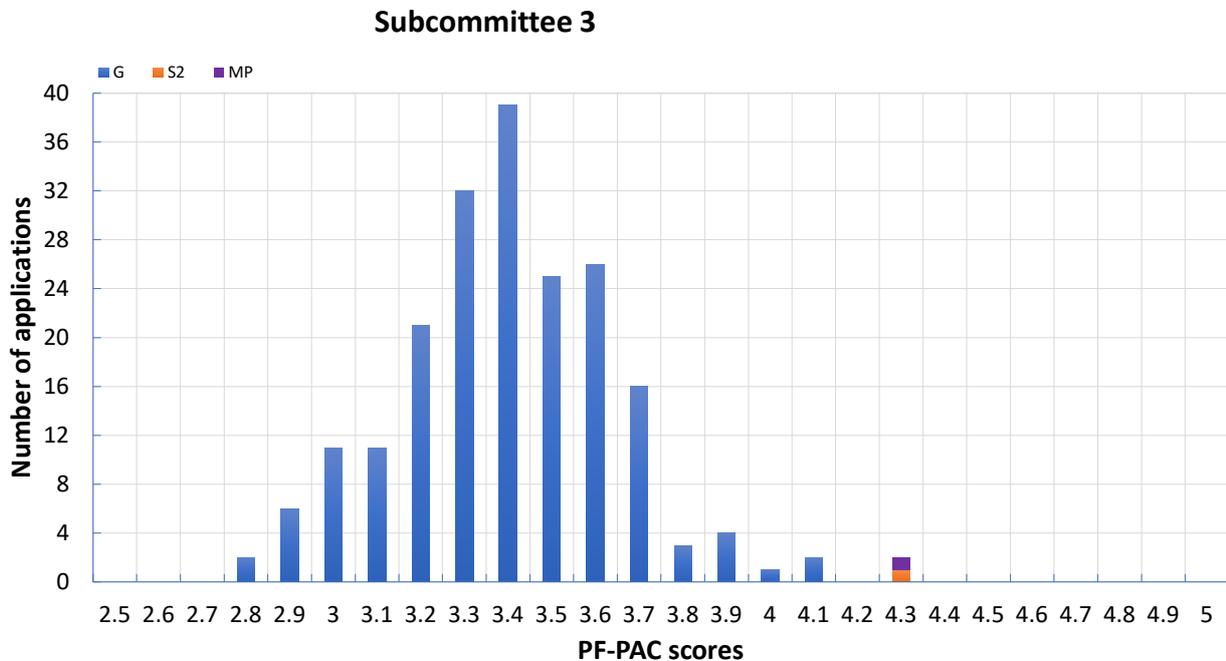


図3 第3分科ビームライン群（硬X線分光ビームライン）の有効共同利用実験課題の評点分布

表3 第3分科ビームライン群（硬X線分光ビームライン）の3期分のビームタイム配分率

Subcommittee 3										
Beamline	Light Source	2024/2-3			2023/11-12			2023/4-6		
		No. of Proposals	Allocated Beamtime	Cutoff Score	No. of Proposals	Allocated Beamtime	Cutoff Score	No. of Proposals	Allocated Beamtime	Cutoff Score
BL-4A (X-ray fluorescence and microbeam)	BM	14	100%	3.3	14	98%	3.3	11	100%	3.4
Beamlines for XAFS (BL-9A, 9C, 12C)	BM	137	100%	2.8	137	68%	3.2	135	94%	2.8
BL-15A1 (Microbeam XAFS and XRD)	SGU	16	88%	3.6	15	81%	3.4	14	76%	3.4
AR-NW2A (Time resolved XAFS and XRD)	U	10	100%	3.5	10	95%	3.5	9	68%	3.7
AR-NW10A (High energy XAFS)	BM	135	68%	2.8	136	62%	3.2	135	42%	3.4
BL-27B (Radiation biology and XAFS for radioactive samples)	BM	26	100%	2.9	26	98%	2.9	26	100%	2.9

#### 4) 第4分科ビームライン群 (タンパク質結晶構造解析)

第4分科ビームライン群 (タンパク質結晶構造解析ビームライン: BL-1A, 5A, 17A, AR-NE3A, AR-NW12A) は130件以上の実験課題を実施している。タンパク質結晶

構造解析の測定試料は規格標準化が進めやすく、計測自動化により短時間で多くの実験課題を実施できる環境が整備されていることもあり、ビームタイム配分率は100%に近くなっている。

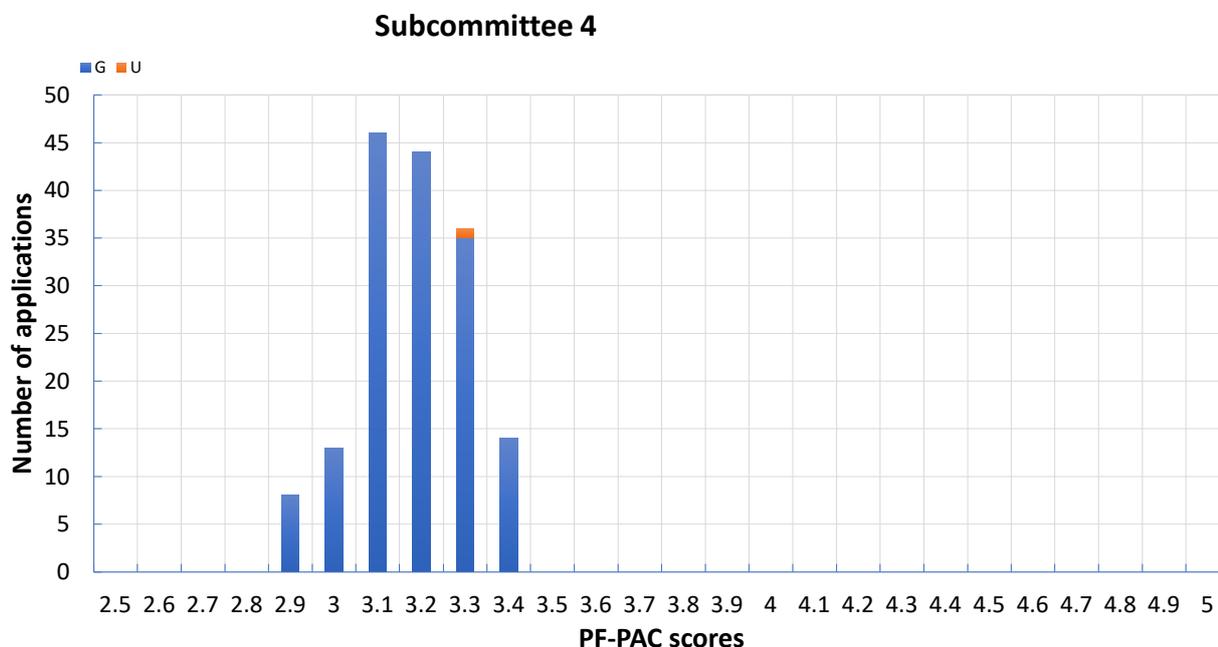


図4 第4分科ビームライン群 (タンパク質結晶構造解析) の有効共同利用実験課題の評点分布

表4 第4分科ビームライン群 (タンパク質結晶構造解析) の3期分のビームタイム配分率

Subcommittee 4										
Beamline	Light Source	2024/2-3			2023/11-12			2023/4-6		
		No. of Proposals	Allocated Beamtime	Cutoff Score	No. of Proposals	Allocated Beamtime	Cutoff Score	No. of Proposals	Allocated Beamtime	Cutoff Score
Beamlines for protein crystallography (BL-1A, 5A, 17A, NE3A, NW12A)	SGU, MPW, U	134	96%	2.9	133	95%	2.9	129	96%	2.9

5) 第5分科ビームライン群 (X線小角散乱ビームライン)  
 第5分科ビームライン群 (X線小角散乱ビームライン：  
 BL-6A、10C、15A2) も約90件の実験課題を実施しており、

ユーザーニーズが高い。2023年度は運転時間が第2期例  
 年よりも短くなったため、配分率が低くなった。

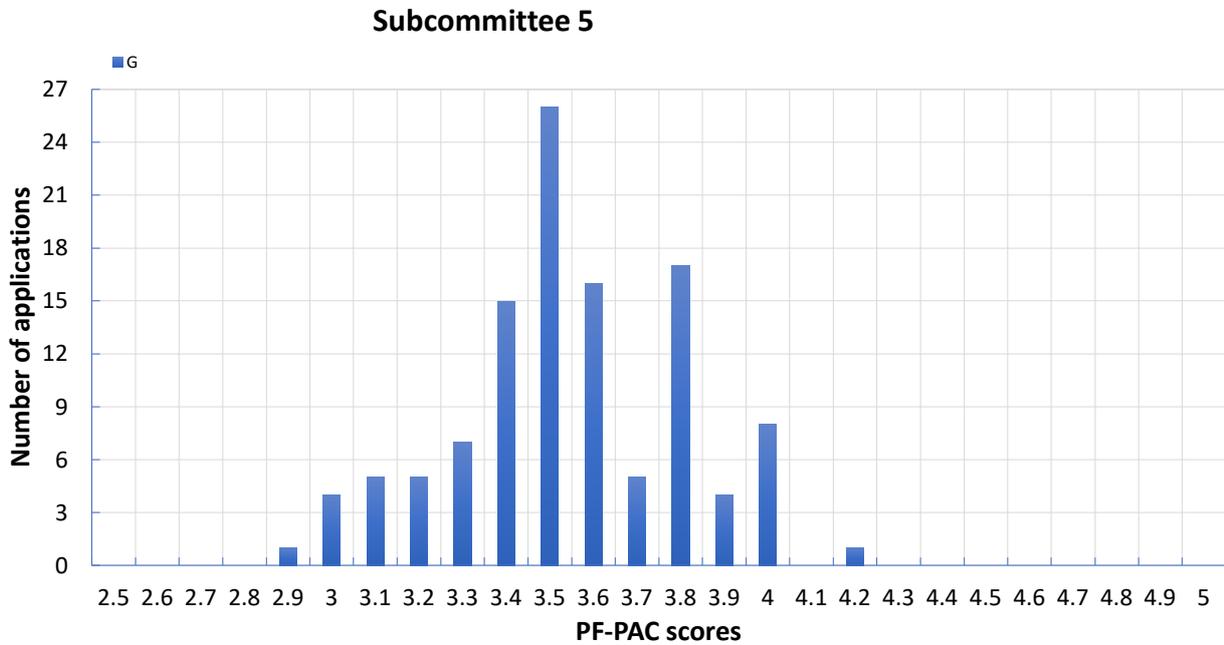


図5 第5分科ビームライン群 (X線小角散乱ビームライン) の有効共同利用実験課題の評点分布

表5 第5分科ビームライン群 (X線小角散乱ビームライン) の3期分のビームタイム配分率

Subcommittee 5										
Beamline	Light Source	2024/2-3			2023/11-12			2023/4-6		
		No. of Proposals	Allocated Beamtime	Cutoff Score	No. of Proposals	Allocated Beamtime	Cutoff Score	No. of Proposals	Allocated Beamtime	Cutoff Score
Beamlines for SAXS (BL-6A, 10C, 15A2)	BM, SGU	93	85%	2.9	96	63%	3.4	86	76%	3.2

6) 第6分科ビームライン群（高圧・超高速時間分解・X線イメージングビームライン）

第6分科ビームライン群（高圧・超高速時間分解・X線イメージングビームライン）は、PFリングに設置されて

いる世界唯一の垂直偏向超伝導ウィグラーや常時シングルバンチ運転のPF-ARの特徴を活かした手法でユニークな研究が行われている。

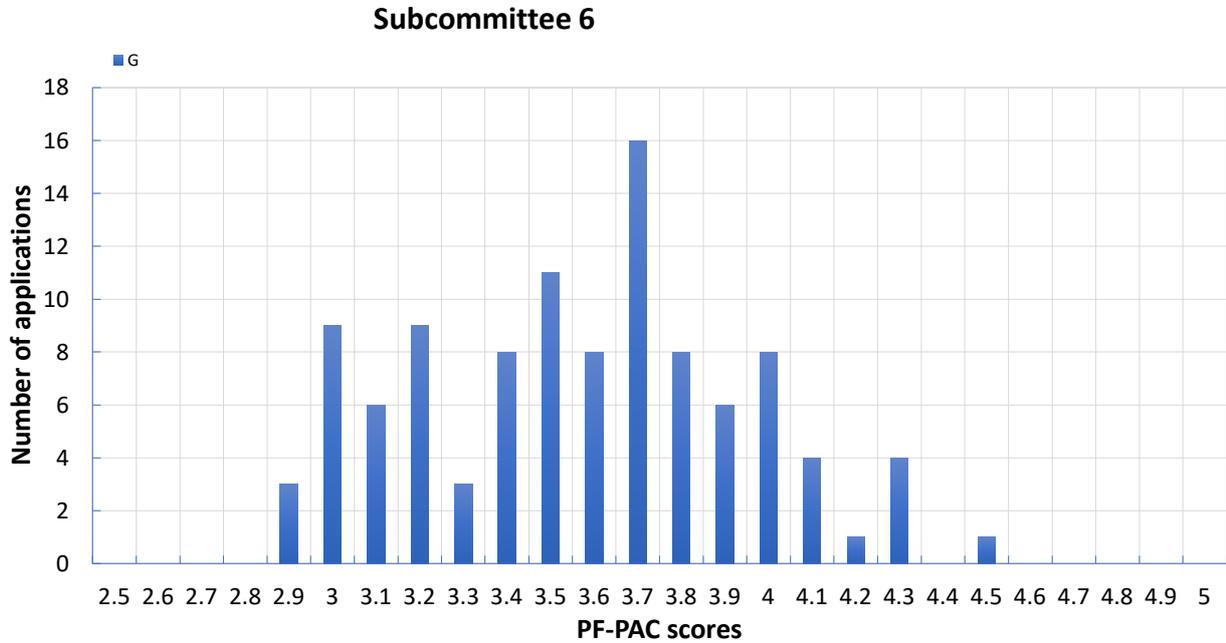


図6 第6分科ビームライン群（高圧・超高速時間分解・X線イメージングビームライン）の有効共同利用実験課題の評点分布

表6 第6分科ビームライン群（X線小角散乱ビームライン）の3期分のビームタイム配分率

Subcommittee 6										
Beamline	Light Source	2024/2-3			2023/11-12			2023/4-6		
		No. of Proposals	Allocated Beamtime	Cutoff Score	No. of Proposals	Allocated Beamtime	Cutoff Score	No. of Proposals	Allocated Beamtime	Cutoff Score
BL-3C (Multipurpose)	BM	8	100%	3.2	8	88%	3.2	7	97%	3.5
BL-14B (X-ray optics)	VW	14	90%	2.9	15	81%	3.0	13	95%	3.0
BL-14C (X-ray imaging)	VW	20	97%	2.9	21	90%	2.9	18	100%	3.0
AR-NE7A without high pressure experiment (X-ray imaging)	BM	8	100%	3.0	8	100%	3.3	9	100%	3.3
BL-20B (X-ray topography and diffraction)	BM	6	100%	3.2	6	99%	3.2	6	104%	3.0
BL-18C (High pressure science)	BM	18	85%	2.9	18	82%	3.3	22	91%	3.3
AR-NE1A (High pressure science)	EMPW	10	79%	3.5	10	90%	3.5	11	66%	3.5
AR-NE5C (High pressure science)	BM	7	100%	3.6	7	89%	3.6	6	86%	3.5
AR-NE7A, high pressure experiment only	BM	8	91%	3.2	8	93%	3.2	9	76%	3.6
AR-NW14A (Time resolved experiment)	U	10	69%	3.4	10	100%	4.0	13	54%	4.0

### 付録 3. ビームラインの性能仕様一覧

表 1 硬X線実験ステーションの性能表

ステーション名	水平取込角 (mrad)	分光器	ミラー	光のエネルギー範囲 (keV)	ビームサイズ (H×V) (mm)	試料位置での光子数 (photons/s)	エネルギー分解能 (ΔE/E)×10 <sup>-4</sup>	参考文献
BL-1A	0.01	Channel-Cut Si(111) Liquid N <sub>2</sub> Cooling	Bimorph Si Rh-Coated Si Rh-Coated	3.7 ~ 4.5 11.2 ~ 12.9	0.013×0.013	5×10 <sup>10</sup> @11.2 keV	~2	1, 2
BL-3A	1	Flat Double Crystal Si(111)	Bent Cylinder	4 ~ 14	0.6×0.4	6×10 <sup>12</sup>	~5	3, 4
BL-3C	1.75	Double Crystal Si(111)	None	4 ~ 20 or white	20×6 (mono) 0.1×0.1 (white)		~2	
BL-4A	6	Double Crystal Si(111)	KB mirror polycapillary	4 ~ 17	0.005×0.005 0.03×0.03		~2	5, 6
BL-4B2	4.5	Flat Double Crystal Si(111)	Bent Cylinder	6 ~ 20	13×2		~2	7, 8
BL-4C	2	Flat Double Crystal Si(111)	Bent Cylinder	5 ~ 18	0.8×0.6		~5	9, 10
BL-5A	0.125	Double Crystal Si(111) Liquid N <sub>2</sub> Cooling	Bent Plane Si Rh-Coated Bent Cylinder Si Rh-Coated	6.5 ~ 17	0.8×0.2	1.3×10 <sup>11</sup> (0.2×0.2 mm <sup>2</sup> )	~2	
BL-6A	2	Bent Crystal Ge(111) (α = 8.0°)	Bent Cylinder ULE	8.3 (fixed)	0.5×0.2	1.0×10 <sup>12</sup> /mm <sup>2</sup> (Slit full-open)	~10	11, 12
BL-6C	2	Flat Double Crystal Si(111)	Bent Cylinder	5 ~ 20 (~25 non- Focus)	0.5×0.3			
BL-7C	4	Double Crystal Si(111) Sagittal Focusing	Double Mirror Fused Quartz Focusing	4 ~ 20 (4 ~ 13)	5×1	1×10 <sup>10</sup> /6 mm <sup>2</sup> (8 keV, 300 mA) (1×10 <sup>11</sup> when focused)	~2	13 - 15
BL-8A	2.22	Flat Double Crystal Si(111)	Bent Cylinder	5 ~ 19	0.82×0.52	3.2×10 <sup>11</sup> (12.4 keV, 400 mA)	~5	16
BL-8B	2.21	Flat Double Crystal Si(111)	Bent Cylinder	5 ~ 19	0.75×0.45	2.2×10 <sup>11</sup> (12.4 keV, 400 mA)	~5	16
BL-9A	3	Double Crystal Si(111)	Collimating and Focusing Bent Conical Mirrors Rh-Coated Double Flat Mirror Ni-Coated	2.1 ~ 15	0.5×0.3	6×10 <sup>11</sup> (7 keV, 450 mA)	2	17, 18
BL-9C	3.5	Double Crystal Si(111)	Bent Cylinder Rh-Coated	4 ~ 20	0.8×0.6	1×10 <sup>11</sup> (8 keV, 450 mA)	~2	
BL-10A	1	Si(111), Si(311) Quartz(100) PG(002) Curved Si(111) (α~ 4°, 8°)	Plane Pt Coated Fused Quartz	5 ~ 25	10×3		10~5	19
BL-10C	2.1	Fix-Exit Double Crystal Si(111)	Bent Cylinder Rh-Coated	6 ~ 14	0.63×0.18	1.5×10 <sup>11</sup> (8 keV)	2	20
BL-12C	2	Double Crystal Si(111)	Bent Cylinder Rh-Coated, Double Flat Mirror Ni-Coated	4 ~ 23	0.6×0.6	9×10 <sup>10</sup> (8 keV, 450 mA)	~2	21

ステーション名	水平取込角 (mrad)	分光器	ミラー	光のエネルギー 範囲 (keV)	ビームサイズ (H×V) (mm)	試料位置での光子数 (photons/s)	エネルギー 分解能 ( $\Delta E/E$ )×10 <sup>-4</sup>	参考文献
BL-14A	1.28 (Vertical)	Double Crystal Si (111) Si (311) Si (553)	Bent Cylinder Rh-Coated Fused Quartz	5.1 ~ 19.1 9.9 ~ 35.6 22.7 ~ 84.5	2×1 at focus 5×38		2	22
BL-14B	2.2 (Vertical)	Flat Double Crystal Si(111)	None	10 ~ 57	5×14		2	23
BL-14C	1.96 (Vertical)	Double Crystal Si(111), Si(220)	None	5 ~ 100 or white	6×70		2	24, 25
BL-15A1	0.2	Double Crystal Si(111) Liquid N <sub>2</sub> Cooling	Horizontal: Bent Plane Si Bimorph Silica Rh-Coated Vertical: Bent Plane Si Rh-Coated Double Flat Si Ni-Coated	2.1 ~ 15	0.02×0.02	3.5×10 <sup>11</sup> (7.5 keV, 450 mA)	~2	26, 27
BL-15A2	0.2	Double Crystal Si(111) Liquid N <sub>2</sub> Cooling	Horizontal: Bent Plane Si Bimorph Silica Rh-Coated Vertical: Bent Plane Si Rh-Coated Double Flat Si Ni-Coated	2.1 ~ 15	0.6×0.04	3.5×10 <sup>11</sup> (7.5 keV, 450 mA)	~2	26, 28, 29
BL-17A	0.1 ~ 0.2	Double Crystal Si(111) Liquid N <sub>2</sub> Cooling	Horizontal: Bent Plane Si Rh-Coated Bimorph Silica Rh-Coated Vertical: Bent Plane Si Rh-Coated Bimorph Silica Rh-Coated	6 ~ 13	0.08×0.016	3.1×10 <sup>11</sup> (12.4 keV, 450 mA, 0.04×0.016 mm <sup>2</sup> )	~2	30 - 32
BL-18B [India, DST]	2	Double Crystal Si(111)	Plane and Bent Cylinder	6 ~ 20			~2	
BL-18C	1	Double Crystal Si(111)	Cylinder Fused Quartz Pt-Coated	6 ~ 25	0.07×0.04		~2	
BL-20B	2	Double Crystal Si(111)	None	5 ~ 25 or white	26×5	1×10 <sup>11</sup> (12 keV, 450 mA)	~2	
BL-27B	4	Double Crystal Si(111)	None	4 ~ 20	100×6		~2	33
AR-NE1A	0.28	Micro-Channel Double Crystal Si(111), High- Resolution Channel Cut Si(4,2,2)&(12,2,2)	Bent Plane W/C Multilayer Coated Si	6 ~ 50	0.8×0.2	8×10 <sup>11</sup> (0.2×0.2mm <sup>2</sup> )	~2	
AR-NE3A	H:0.2 V:0.1	Double Crystal Si(111) Liquid N <sub>2</sub> Cooling	Pre-Mirror Bent Flat Si Rh-Coated Post-Mirror Bent Cylinder Fused Quartz Rh-Coated	6.5 ~ 17	0.8×0.2	8×10 <sup>11</sup> (0.2×0.2 mm <sup>2</sup> )	~2	34, 35
AR-NE5C	3	Double Crystal Si(111)	None	30 ~ 100 or white	60×5		5	36

ステーション名	水平取込角 (mrad)	分光器	ミラー	光のエネルギー 範囲 (keV)	ビームサイズ (H×V) (mm)	試料位置での光子数 (photons/s)	エネルギー 分解能 ( $\Delta E/E$ ) $\times 10^{-4}$	参考文献
AR-NE7A	4	Double Crystal Si(111)		25 ~ 50 or white	80×3		5	
AR-NW2A	H:1.0 V:0.2	Double Crystal Si(111) Liquid N <sub>2</sub> Cooling	Bent Cylinder Si Rh-Coated Bent Flat Si Rh-Coated	5 ~ 25	0.6×0.2 ~10×0.06	6×10 <sup>12</sup> (12 keV, 60 mA)	~2	27, 37 - 39
AR-NW10A	1.2	Si(311)	Bent Cylinder Pt-Coated, Double Flat Mirror Rh-Coated	8 ~ 42	2.2×0.5	1×10 <sup>10</sup> (22 keV, 60 mA)	~1	40
AR-NW12A	H:0.3 V:0.1	Double Crystal Si(111) Liquid N <sub>2</sub> Cooling	Pre-Mirror Bent Flat Si Rh-Coated Post-Mirror Bent Cylinder Si Rh-Coated	6.5 ~ 17	1.3×0.3	2×10 <sup>11</sup> (0.2×0.2 mm <sup>2</sup> )	~2	41 - 43
AR-NW14A	H:0.3 V:0.1	Double Crystal Si(111) Liquid N <sub>2</sub> Cooling	Bent Cylinder Rh-Coated Bent Flat Rh-Coated	4.9 ~ 25	0.45×0.25	1×10 <sup>12</sup>	~2	44

India DST: インド政府科学技術省 (Department of Science & Technology)

## 引用文献

- [1] Liebschner *et al.* Acta Cryst. D **72**, 728 (2016).  
[2] M. Hiraki, N Matsugaki, Y. Yamada and T. Senda. AIP Conf. Proc. **1741**, 030029 (2016).  
[3] Photon Factory Activity Report 2006, #24, A 64 (2008).  
[4] Photon Factory Activity Report 2006, #24, A 104 (2008).  
[5] A. Iida, X-Ray Spectrom. **26**, 359 (1997).  
[6] A. Iida, X-Ray Spectrom. **40**, 376 (2011).  
[7] Powder Diffraction User Group, KEK Report 94-11 (1995).  
[8] H. Toraya, H. Hibino, and K. Ohsumi, J. Synchrotron Rad. **3**, 75 (1996).  
[9] H. Iwasaki *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **60**, 2406 (1989).  
[10] Photon Factory Activity Report 1995 #13, E-1 (1996).  
[11] N. Shimizu *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **425**, 202008 (2013).  
[12] H. Takagi *et al.*, AIP Conf. Proc. **1741**, 030018 (2016).  
[13] M. Nomura and A. Koyama, KEK Internal, 93-1 (1993).  
[14] M. Nomura *et al.*, KEK Report, 91-1 (1991).  
[15] M. Nomura and A. Koyama, in "X-ray Absorption Fine Structure", ed. by S. S. Hasnain, Ellis Horwood, Chichester, **667** (1991).  
[16] A. Nakao *et al.*, AIP Conf. Proc. **1234**, 367 (2010).  
[17] M. Nomura and A. Koyama, J. Synchrotron Rad. **6**, 182 (1999).  
[18] M. Nomura and A. Koyama, Nucl. Instrum. Meth. A **467-468**, 733 (2001).  
[19] S. Sasaki, Rev. Sci. Instrum. **60**, 2417 (1989).  
[20] N. Shimizu *et al.*, AIP Conf. Proc. **2054**, 060041 (2019).  
[21] M. Nomura and A. Koyama, KEK Report, 95-15 (1996).  
[22] Y. Satow and Y. Iitaka, Rev. Sci. Instrum. **60**, 2390 (1989).  
[23] M. Ando *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **246**, 144 (1986).  
[24] Photon Factory Activity Report 1999, #17, A 92 (2000).  
[25] Photon Factory Activity Report 1999, #17, A 103 (2000).  
[26] N. Igarashi *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **425**, 072016 (2013).  
[27] Y. Niwa *et al.*, AIP Conf. Proc. **2054**, 050003 (2019).  
[28] H. Takagi *et al.*, Appl. Phys. **120**, 142119 (2016).  
[29] H. Takagi *et al.*, AIP Conf. Proc. **2054**, 060038 (2019).  
[30] N. Igarashi *et al.*, AIP Conf. Proc. **879**, 812 (2007).  
[31] N. Igarashi *et al.*, J. Synchrotron Rad. **15**, 292 (2008).  
[32] Y. Yamada *et al.*, J. Synchrotron Rad. **20**, 938 (2013).  
[33] H. Konishi *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **372**, 322 (1996).  
[34] Y. Yamada *et al.*, AIP Conf. Proc. **1234**, 415 (2010).  
[35] M. Hiraki *et al.*, AIP Conf. Proc. **1234**, 673 (2010).  
[36] T. Kikegawa *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **66**, 1335 (1995).  
[37] T. Mori *et al.*, AIP Conf. Proc. **705**, 255 (2004).  
[38] H. Kawata *et al.*, AIP Conf. Proc. **705**, 663 (2004).  
[39] Y. Inada *et al.*, AIP Conf. Proc. **879**, 1230 (2007).  
[40] M. Nomura *et al.*, AIP Conf. Proc. **882**, 896 (2007).  
[41] L. M. G. Chavas *et al.*, J. Synchrotron Rad. **19**, 450 (2012).  
[42] L. M. G. Chavas *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **425**, 012008 (2013).  
[43] L. M. G. Chavas *et al.*, J. Synchrotron Rad. **20**, 838 (2013).  
[44] S. Nozawa *et al.*, J. Synchrotron Rad. **14**, 313 (2007).

表2 真空紫外・軟X線実験ステーションの性能表

ステーション名	スリットサイズ H×V (mrad) または アンジュレータの パラメータ	分光器	溝密度 (/mm)	光のエネルギー 範囲 (eV)	ビームサイズ H×V (mm)	エネルギー分解能 (E/ΔE) 光子数 (photons/s)	参考文献
BL-2A ID02-1: Planer Undulator ID02-2: Variable Polarized Undulator	ID02-1: $K_{\max} = 2.3$ , $\lambda_u = 6$ cm ID02-2: $K_{\max} = 4.93$ , $\lambda_u = 16$ cm	Variable-Included-Angle Varied-Line-Spacing Plane Grating	400 600 1000	35 ~ 2000	~0.5 × 0.1	2000 ~ 20000 $10^{13} \sim 10^{11}$	1
BL-2B ID02-1: Planer Undulator ID02-2: Variable Polarized Undulator	ID02-1: $K_{\max} = 2.3$ , $\lambda_u = 6$ cm ID02-2: $K_{\max} = 4.93$ , $\lambda_u = 16$ cm	Variable-Included-Angle Varied-Line-Spacing Plane Grating Double Crystal InSb(111), Ge(111), Si(111)	400 600 1000	35 ~ 4000	~0.5 × 0.1	2000 ~ 20000 $10^{13} \sim 10^{11}$	1
BL-3B	10×2	Grazing Incidence R = 24 m $\alpha+\beta = 165^\circ$ 1800	200 600	10 ~ 280	< 2φ	200 ~ 3000 $10^{12} \sim 10^9$	2, 3
BL-7A [RCS]	6×1	Varied-Line-Spacing Plane Grating	150 300 650	50 ~ 1300	2.5×0.5	1000 ~ 9000 $10^{12} \sim 10^9$	4
BL-13A/B Variable Polarized Undulator	$K_{\max} = 5.28$ (Horizontal Linear Polarization) $K_{\max} = 3.65$ (Vertical Linear Polarization) $\lambda_u = 7.6$ cm	Variable-Included-Angle Varied-Line-Spacing Plane Grating	300 1000	50 ~ 330 100 ~ 2000	~0.22×0.05	4000 ~ 12000 $10^{13} \sim 10^9$	5-9
BL-16A ID16-1 & ID16-2: Variable Polarized Undulator	$K_{\max} = 2.37$ (Circular Polarization) $K_{\max} = 3.12$ (Horizontal Linear Polarization) $K_{\max} = 1.98$ (Vertical Linear Polarization) $K_{\max} = 1.73$ (45-deg Linear Polarization) $\lambda_u = 5.6$ cm	Variable-Included-Angle Varied-Line-Spacing Plane Grating	100, 250, 500, 1000	250 ~ 1500	~0.2 × 0.1	4000 ~ 8000 $10^{12} \sim 10^{11}$	10, 11
BL-19A/B Variable Polarized Undulator	$K_{\max} = 4.50$ (Horizontal Linear Polarization) $K_{\max} = 2.87$ (Vertical Linear Polarization) $K_{\max} = 2.42$ (Circular Polarization) $\lambda_u = 6.8$ cm	Variable-Included-Angle Varied-Line-Spacing Plane Grating	600 1200	90 ~ 2000	0.2×0.05(19B)	>5000 $10^{13}$	1
BL-20A	28 × 5	3 m Normal Incidence	1200 2400	5 ~ 40	2×1	300~30000 $10^{12} \sim 10^8$	12
BL-27A	5 × 0.5	Double Crystal InSb (111)		1800 ~ 4000		2000	13
BL-28A/B Variable Polarized Undulator	$K_{\max} = 4.93$ (Horizontal Linear Polarization) $K_{\max} = 4.93$ (Vertical Linear Polarization) $\lambda_u = 16.0$ cm	Variable-Included-Angle Varied-Line-Spacing Plane Grating	400	30 ~ 300	0.1×0.04 0.01×0.012	30000 $10^{12} \sim 10^{11}$	1, 14

RCS: 東京大学大学院理学系研究科附属スペクトル化学研究センター (Research Center for Spectrochemistry)

## 引用文献

- [1] K. Amemiya and T. Ohta, *J. Synchrotron Rad.* **11**, 171 (2004).  
 [2] A. Yagishita *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **306**, 578 (1991).  
 [3] S. Masui *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **63**, 1330 (1992).  
 [4] K. Amemiya *et al.*, *J. Elec. Spectrosc. Relat. Phenom.* **124**, 151 (2002).  
 [5] K. Mase *et al.*, *AIP Conf. Proc.* **1234**, 709 (2010).  
 [6] A. Toyoshima *et al.*, *J. Vac. Soc. Jpn.* **54**, 580 (2011).  
 [7] A. Toyoshima *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.* **425**, 152019 (2013).  
 [8] A. Toyoshima *et al.*, *J. Synchrotron Rad.* **22**, 1359 (2015).  
 [9] K. Ozawa *et al.*, *J. Synchrotron Rad.* **29**, 400 (2022).  
 [10] K. Amemiya *et al.*, *AIP Conf. Proc.* **1234**, 295 (2010).  
 [11] K. Amemiya *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.* **425**, 152015 (2013).  
 [12] K. Ito *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 2119 (1995).  
 [13] H. Konishi *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth.* **A372**, 322 (1996).  
 [14] M. Kitamura *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **93**, 033906 (2022).

表3 低速陽電子実験ステーションの性能表

ステーション名	ビームエネルギー	パルス幅	繰り返し周波数	ビーム強度	参考文献
SPF-A3	10 keV	1.2 $\mu$ s	$\leq 50$ Hz	$1 \times 10^8$ e <sup>+</sup> /s (before brightness enhancement)	1, 2, 3
SPF-A4	20 eV - 1 keV	1.2 $\mu$ s (long-pulse mode), 200 $\mu$ s - 20 ms (pulsestretching mode)	$\leq 50$ Hz	$1 \times 10^8$ e <sup>+</sup> /s (before brightness enhancement)	4, 5
SPF-B1	100 eV - 35 keV	1-16 ns	$\leq 50$ Hz	$1 \times 10^7$ e <sup>+</sup> /s	6, 7
SPF-B2	100 eV - 35 keV	1-16 ns	$\leq 50$ Hz	$1 \times 10^7$ e <sup>+</sup> /s	8, 9

## 引用文献

- [1] K. Wada, *et al.*, *Eur. Phys. J. D* **66**, 37 (2012).  
 [2] K. Wada, *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.* **443**, 012082 (2013).  
 [3] M. Maekawa, *et al.*, *Eur. Phys. J. D* **68**, 165 (2014).  
 [4] K. Wada *et al.*, *e-J. Surf. Sci. Nanotechnol.* **16**, 313 (2018).  
 [5] K. Wada *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **975**, 164161 (2020).  
 [6] K. Michishio *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **100**, 254102 (2012).  
 [7] K. Michishio *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods* **785**, 5 (2015).  
 [8] H. Terabe *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.* **443**, 012075 (2013).  
 [9] S. Iida *et al.*, *J. Phys.: Condens. Matter* **28**, 475002 (2016).