

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

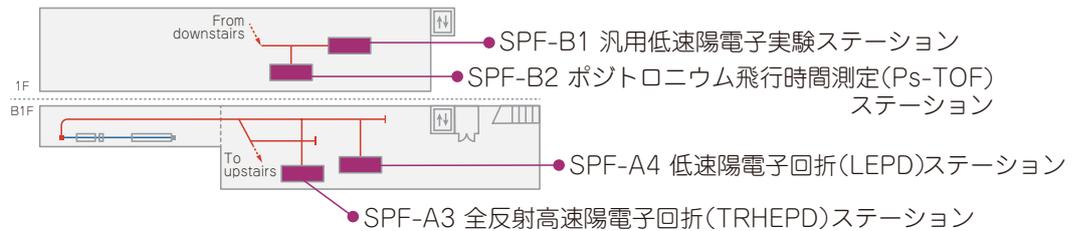
付録 1. 低速陽電子実験施設

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 (表面の位置座標) の解明, 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持つが、負の陽電子仕事関数を持つ物質 (タンゲステン) 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 (タンゲステンの場合は 3 eV) で再放出される。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 [1,2]。

SPF の歴史 [3] は、1989 年度に当時の放射光実験施設入射器系によって、低速陽電子ビームの発生に関する検討が開始されたことに始まる。1991 年度には、リニアック終端 (入射器棟北端) の第 3 スイッチヤードでの SPF 建設計画が KEK の特定研究として認められ、一部装置の製作と据え付けが開始された。そして、1992 年度概算要求の「高輝度低速陽電子源」の建設が認められ、SPF の建設が本格的に進行した。最近、SPF における「低速陽電子の初ビーム観測の日」が調査され、1992 年 12 月 18 日であったことが公式に確認された。SPF の共同利用は 1994 年度から開始され、最初の実験として、ポジトロニウム飛行時間 (Ps-TOF) の実験が行われた。その後、SPF は 1997 年度の入射器棟南端の B セクタへの移設を経て、2001 年度にリニアックアーク部内側のテストホール内への専用加速

器の移設が行われ、現在に至っている。

SPF では、現在、全反射高速陽電子回折 (TRHEPD, 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 (現在は Ps のレーザー冷却実験), 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行っている。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、4m 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。その保守管理・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。

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、リニアックによる低速陽電子ビームの時間構造はリニアックによる加速電子の時間構造を反映する。SPF の場合、パルス幅 1 μ s の長パルスモードと、 ~ 10 ns の単パルスモードの 2 つのパルスモードでの 50 Hz 運転を行っている。

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次頁のとおり。

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

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。整備には東京大学石田氏が協力
SPF-B2・Ps-TOF ステーション	和田 健	

ステーシ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）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すれすれ視射角で試料に打ち込み、進行方向に対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 (θ) と方位角 (ϕ) は PC からリモートでの制御が可能で、視射角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

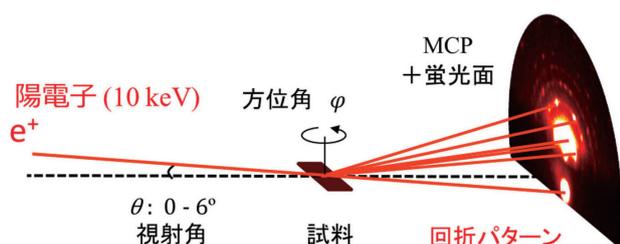


図 1 TRHEPD 実験配置

ターを併用した低温域の温度制御 (15 ~ 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^+ 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_2 ガス導入； H_2 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。

【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、結晶表面構造解析の手法である低速電子回折 (Low-Energy Electron Diffraction, LEED) の陽電子版である。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 の先駆者から提唱されている [7]。また、LEED 同様垂直入射のため、TRHEPD では観測が困難な微小試料や平坦性に乏しい試料表面の構造解析観測が可能と期待できる。

SPF-A4 では、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 [8] た。その際、LEPD 用検出器における多重検出を避けるために、パルス幅 1 μs の長パルスモードのパルス幅を、200 μs 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]。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、多重検出を許さない。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 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 による実際の表面構造解析を行うための共同利用ステーションの整備が進み、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。また、実験データの解析ソフトウェア等の整備を進めている。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 型試料ホルダの導入も進み、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 の低速陽電子ビームの特長 (高強度であること、およびパルス状であること)

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試みている。Psは束縛系量子電磁力学（QED）の精密検証に大変重要な研究対象であるとともに、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。さらに、Psのボース-アインシュタイン凝縮（BEC）が実現できれば、コヒーレンシーを利用して原子干渉計を用いた反物質重力の測定（弱い等価原理の検証）や、対消滅ガンマ線を用いたガンマ線レーザーの可能性を探る実験に応用できると考えられている。

【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短パルスモードの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。

パルス状陽電子ビームは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10 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、試料直前に接地されたグリッドを設置するとともに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γ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γ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）、O₂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

未整備だった2次ビームラインの真空インターロックの導入が2020年度より放射光実験施設基盤技術部門のインターロックチームにより開始された。2022年度は、SPF-A3とSPF-A4の各ステーションの直上流の2台のゲートバルブをリモート制御式に交換すると共に、これら各ステーションに2台のフルレンジゲージを導入し、インターロックシステムに組み込んで運用を開始した。これにより、2020年度より3ヶ年計画で予定していた真空インターロック導入に関する全ての作業が完了した。

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）にビームを収束する。そのための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その後のビームの収束は、ビーム技術開発要素の核心となっている。また、この技術はPsレーザー冷却実験においても同様に重要である。SPFは、ビーム技術開発用ポート（SFP-A1）において、そのための技術開発を2019年度から開始した。2020年度には、ビームライン中心の磁場遮蔽のための磁性体薄膜（磁場遮蔽グリッド）の導入、および磁力線をコイル外側にそって上流側に戻すための磁性体遮蔽構造を導入することで、非磁場領域へのビーム輸送効率を大幅に増大できることが確認できた。ただし、その下流側における静電レンズではビームの収束が困難であることがわかった。ビーム軸に垂直な方向の運動量の分散が想定よりも大きかったことが原因の1つと考えられる。そこで、2021年度には、静電レンズ群の最終段の静電収束レンズにかえて磁場レンズを導入し、ビーム収束の問題は解決された。ただし、その上流側の静電レンズ（アインツェルレンズ）部の存在のために、磁場収束レンズへの陽電子輸送効率が落ちていることが判明した。2022年

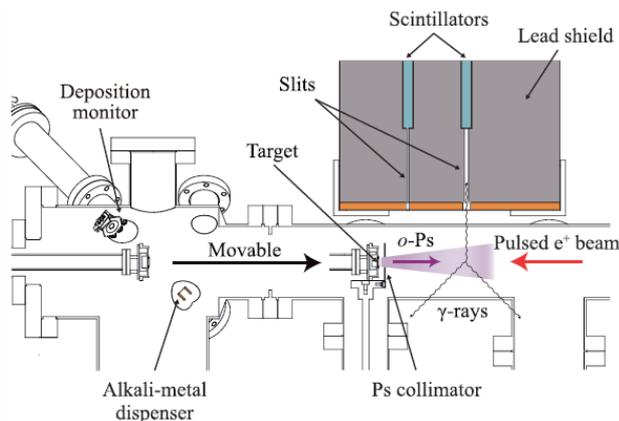


図2 Ps-TOF 実験装置 [10]

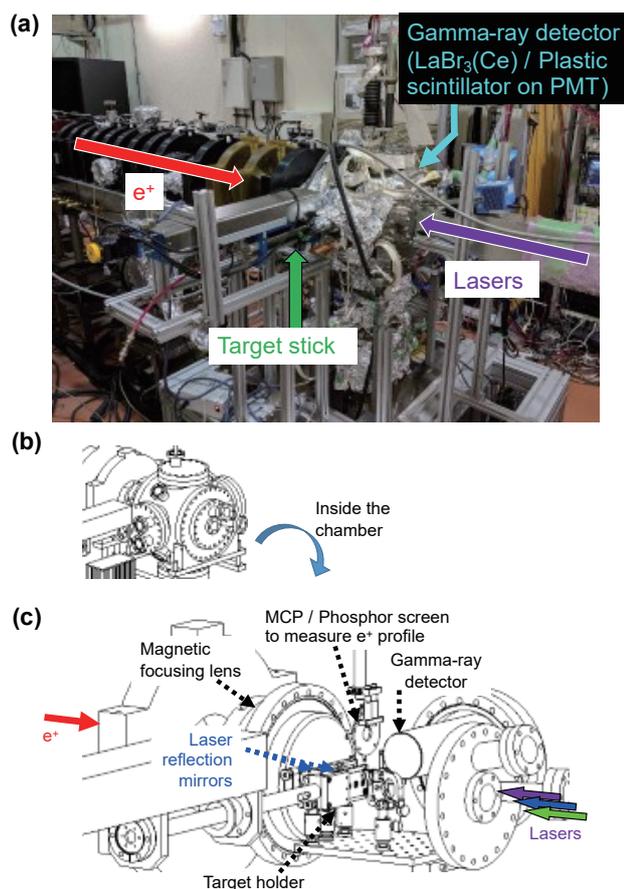


図3 Ps レーザー冷却原理実証実験のセットアップ (文献 [16] より転載)。(a) KEK-SPF-B1 ビームラインに設置した実験装置の写真。(b) 写真とほぼ同じ向きに見た実験装置の鳥瞰図。(c) 真空チェンバ内部の様子。

度は、このアイツェルレンズを省略して磁場収束レンズに導入するよう改良してビーム試験を行った。その結果、輸送効率が数倍に高められたことが確認できた。また、この結果は、上流側の磁場遮蔽グリッドと磁場レンズの距離をさらに詰めることで、より輸送効率を高められることを示唆している。

2022年6月18日にSPFで漏電があり、同じ入射器棟内のメインリニアックのマグネット用電源がおちてSuperKEKB, PF, PF-ARへの連続入射が中断した可能性が高いという指摘があった。このことをきっかけに、漏電を起こさないようより注意を徹底すると共に、仮に漏電があった場合にも上流側の電気系統に影響を与えないよう対策を進めることになった。PFでは既に漏電遮断器の効果的活用によって、漏電事象(上流側の漏電警報機の発報)が1/30程度に激減したとのことで、その詳細をPFの電気安全担当者からご指導いただき、SPFにも同様の対策を導入することにした。まずは最も漏電の可能性の高いベーキング用の漏電遮断器を導入し、ベーキング時には、必ずこれらの漏電遮断器を利用することを周知徹底し、運用を開始した。また、各実験盤の下流側の全ての電源ラインに30 mA以下の漏電遮断器を入れることを基本とすることに

した。漏電遮断器を入れる位置は、停止すると他への影響の大きな真空機器関連は各機器の手元、真空インターロックは他と独立とする方針である。それ以外は次の(1)~(3)のいずれかの対策を行うものとする。(1) 子実験盤の各端子台の過電流遮断器を過電流漏電遮断器に変更、(2) 電源タップを漏電遮断器付きのものに変更、(3) 電源プラグへの簡易漏電遮断器の導入。これらの対策を進めるために、各実験盤からの電気配線の現状を再調査し、最新の配線表を作成した。その上で、全ての配線に対して、漏電遮断器の導入の具体的検討を行った。必要な漏電遮断器はほぼ購入済で、導入できるものから順次導入中である。2023年度夏の停止期間の停電時にほぼ全ての対策を終える計画である。

SPFでは、マイクロチャンネルプレート(MCP)後段に設置した蛍光スクリーンをカメラで撮影することによって、低速陽電子ビームをモニターしている。最近維持管理が困難になっていたアナログカメラを前提としたビームモニターシステムの、デジタルカメラを用いる方式への変更を進めてきた。その際、デジタルカメラとして、ビームの50 Hzのくり返し周期に追従できるPoEネットワークカメラを導入し、実験ホール内のネットワークスイッチをPoEスイッチに交換した。また、PoEカメラの制御にとって不十分な品質のLANケーブルが多数あったため、信頼できるLANケーブルに交換した。また、新しいデジタルカメラの制御用のビームモニタープログラムを開発し、運用を開始した。このプログラムは、ビーム強度のリアルタイム観測が可能で、かつ任意のフレーム数でのアベリッジ表示と強度分布および積分値が表示できるようになっている。このソフトウェアの導入によりビーム調整の効率と精度が格段に向上した。

SPF-A3 (TRHEPDステーション)では、回折パターンの観測に試用しているMCPの劣化が確認され、交換した。2020年の低速陽電子生成部の改良に伴うビーム強度の向上により、TRHEPDの回折ビームでMCPの劣化が急速に進み得ることは予想されていた。時間平均のビーム強度は典型的な電子ビームによる実験と比較して現状の低速陽電子ビームは6桁程度弱く、その強度増大は喫緊の課題である。ところが、20 ms毎に1 μs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倍もの密度になっており、現状のビーム強度におけるTRHEPDの回折ビームでもMCPの許容検出率を超えると考えられていた。すぐに可能な当座の対策として、ビーム強度を意図的に弱めて共同利用を行っていたが、予想より早くMCPの劣化が進んだ。これに対する本質的な対策のために、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、開発を進めている。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6 m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5.2 keVの準DCビームを供給している。これを、TRHEPDに必要な15 keVの準DCビームを供給で

きるようにするためには、15 kV 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。2022 年度は、この特殊電源の設計を進めると共に、放電対策を評価するための新たな試験用電極を作成した。

2021 年度は、TRHEPD 法により、Cu(111) 基板上にホウ素を蒸着した表面構造を解明した。ホウ素化合物は低次元においても多彩な構造をとり、新規な物性や応用材料として期待されているが、解析の難しさからその二次元構造の実験的決定は行われていなかった。この構造については、単原子層の Borophene であるという説と、一次元原子鎖が並んだ二次元ホウ化銅であるという説があった。Cu(111) 基板上に二次元ホウ素材料を大面積で成長させ、TRHEPD と X 線光電子分光 (XPS) 測定により、この構造は Cu 上の二次元ホウ素化合物 (Cu-Boride) であることを確認した [11]。

また、Ag(111) 基板上に成長させた χ_3 -borophene の基板表面に垂直な構造を、TRHEPD で調べ、その構造は平坦で、Ag 基板表面からの距離が 2.4 Å であり、X 線定在波励起光電子分光法の結果と一致した。また、 χ_3 -borophene の面内構造は、理論的な予測と一致することを実証した。これらの構造特性は、 χ_3 -borophene が、グラフェン同様のエピタキシャル単層シート群に属し、基板との相互作用が弱いことを示している [12]。

2020 年度に公開された汎用表面構造解析フレームワーク “2DMAT” [13] において、並列モンテカルロ型ベイズ推定などの解析手法を駆使して、TRHEPD の複雑なデータ構造の中に潜む「真の解」(=正しい原子配列)を短時間で高信頼に見つけ出すことが可能となった [14]。また、“2DMAT” を X 線回折や電子回折など他の量子ビーム計測技術にも適用できるように拡張した。将来的には、それら測定データを相補的に解析することも可能にする予定である。

TRHEPD および RHEED による表面構造決定のためのオープン・ソース・シミュレータ STR (sim-trhepd-rheed) を開発した [14]。STR は、回折データ解析用に、陽電子または電子の波動関数に対する動力学的回折理論の偏微分方程式を解いて、試料の表面構造に対応するロッキング曲線を計算する。さらに、決定した表面構造を用いて、第一原理計算 (QUANTUM ESPRESSO) により電子構造などの物理量を評価するための、ユーティリティソフトも開発した。

SPF-A4 (LEPD ステーション) では、各回折スポット強度の入射ビームエネルギー依存性のデータ (I - V カーブ) を用いた表面構造解析を行うため、実験ステーションの整備を進めた。新しい実験ステーションは、LEPD 観察と試料準備のための 2 つの専用チャンバーで構成されている。試料の位置と角度を正確かつ再現性高く調整できる新しい LEPD 試料マニピュレータを開発した。このマニピュレータは、この LEPD 実験ステーションでの蓄積型実験においても、対称な回折スポットの強度が等しくなるよう、ビームの垂直入射条件を調整することができる。また、試料

を液体窒素により 30 分以内に -181°C まで急速に冷却することができる。これにより、LEED 同様 Debye-Waller 因子の影響を受ける LEPD スポットを冷却によって明瞭に観察することが可能になった。試料準備チャンバー内の試料マニピュレータは試料を通電加熱によって 1200°C 程度まで加熱することができる。試料準備チャンバーには、 Ar^+ スパッタリング、表面薄膜成長用トリプルポケット電子ビーム蒸着装置、3 種類のガス導入システムが装備されており、ユーザーの要望に応じて利用できる追加ポートも用意した。試料表面は LEED-AES 検出器で確認できる。改良した LEPD 実験ステーションにおいて、Cu(001) からの LEPD パターンを 40 eV から 352 eV まで 2 eV ステップで 100 s ずつ観測し、統計的に十分な I - V カーブを得た。リニアックベースの LEPD 装置開発に成功した当初と比較して、測定時間の 2 桁の短縮を達成した。これにより、表面構造解析のための実用的な LEPD 実験が可能となった。

また、改良した LEPD ステーションでは、試料ホルダを、PF で導入が進められている Omicron 型試料ホルダと互換となるように設計した。Omicron 型試料ホルダの通電加熱タイプとの互換性を保ちつつ、通電加熱による高温熱処理と LEED/LEPD 測定に必要な急速冷却を両立するよう配慮した設計で、必要な性能が得られている。また、LEPD ステーションで LEPD 測定に使用した試料を、ロードロックシステムを介して超高真空 (UHV) 搬送容器によって PF の BL-13B の角度分解光電子分光 (ARPES) 実験ステーションに搬送し、ARPES 測定が問題無くできることも確認した。LEPD では、 Ar^+ スパッタリングの際にスパッタリングの電流値の確認のために、試料の両端の電極を接地電位から絶縁できるようになっているが、ARPES 測定の際には試料を接地する必要がある。BL-13B ではこの接地を試料ホルダで行っているため、 Ar^+ スパッタリングの条件出しの終了後に、BL-13B の仕様にあわせ、試料ブロックの片側の電極を試料プレートに接地した。

SPF-B1 (汎用低速陽電子実験ステーション) には、短パルスモードで低速陽電子ビームを供給している。専用リニアックの短パルスモード (~ 10 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、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。現在挑戦している Ps レーザー冷却実験において、この大強度かつ短パルスであるビームの特性が、Ps レーザー冷却に必要なパルスレーザーの時間特性と合致しており、レーザー光と同期した実験が可能となっている。シリカエアロゲル表面から陽電子ビーム上流側の真空中に放出された Ps に、トリプレットの $1S - 2P$ 遷移に相当する 243 nm の紫外レーザー光を照射し、Ps レーザー冷却や Ps 温度測定を行う。このときレーザーはビーム軸に垂直な水平方向に照射する。この実験では装置内に 1×10^{-6} Pa 程度の真空が維持されている。2020 年度に完成させた Ps 冷却用プロトタイプレーザー [16] を SPF-B1 に設置し、2021 年度までに実験装置の自動化・遠隔化による測定の安定性・再現性向上や、深紫外レーザー照射によ

る測定系へのバイアス除去 [17] を進め、レーザー冷却原理実証に向けた図3のセットアップを完成させ、2022年度にPsレーザー冷却の原理実証実験を開始した。2022年度の挑戦によりPs温度測定効率の改善が必要と判明したため、2022年度内に冷却レーザーの改良や検出効率改善を行った。2023年度以降、これらの改善を踏まえた真空中でのPsレーザー冷却原理実証実験や、これまでに見つかった多孔体空孔中におけるPsレーザー冷却阻害現象の解明を行う計画である。

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行っている。2020年度から2022年度にかけて、シリカエアロゲル、ナノプロセッシングを用いて製作した微細構造シリカ、規則配列シリカナノ粒子の3つのサンプルについて測定がなされ、いずれのサンプルにおいてもPs生成を確認し [18]、エネルギー分布の評価が行われている。2023年度には、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する予定である。

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ポロフェン(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。一方で、ビームタイム配分率が低下し、慢性的なビームタイム不足の問題が表面化している。これを当面解決するため試料準備チェンバが整備されて効果的に運用されているが、根本的な解決策としては、最高強度での実験のためにTRHEPD対応のパルスストレッチャーの導入が必要である。また、現在運用中のTRHEPD装置による共同利用実験を継続しながら、もう1つのTRHEPD装置の新規開発によってARPES等と共通化した試料ホルダの導入を進めることを計画している。データ解析ソフトウェアの開発に関して、2DMATの高度化と共に、普及のための利用講習会の開催を継続する。

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、それを用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、微小な試料や表面の平滑性に多少乏しい試料表面の観測も期待できる。

SPF-B1 (汎用低速陽電子実験ステーション) は、Psレーザー冷却の研究を継続する。

SPF-B2 (Ps-TOF ステーション) の共同利用にも引き続

き対応していく。

磁場によって輸送した低速陽電子ビームを高効率で非磁場領域にビームを引出してリモデレータに収束するシステムの開発を引き続き進め、各実験ステーションへの導入を慎重に検討していく。

ユーザーから低速陽電子ビーム強度の1桁~2桁の増大の要求が高まっている。これにより、より微細な試料やより大きな長周期構造の表面構造解析が可能となる。また、時間分解測定による表面構造解析も可能となる。Ps分光実験やPs-BEC関連の研究展開にもビーム強度増大は必須である。実験ステーションに共通の問題として、ビームタイム配分率が窮屈になり、慢性的なビームタイム不足の問題が表面化しているが、ビーム強度増大によってこの問題も解消し得る。

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 *et al.*, *J. Phys.: Condens. Matter* **28**, 475002 (2016).
- [11] Y. Tsujikawa, M. Horio, *et al.*, *Phys. Rev. B* **106**, 205406 (2022).
- [12] Y. Tsujikawa, M. Shoji, *et al.*, *Molecules* **27**, 4219 (2022).
- [13] <https://www.pasums.issp.u-tokyo.ac.jp/2dmat/>
- [14] Y. Motoyama, K. Yoshimi *et al.*, *Comp. Phys. Commun.* **280**, 108465 (2022).
- [15] T. Hanada, Y. Motoyama *et al.*, *Comp. Phys. Commun.* **277**, 108371 (2022).
- [16] K. Yamada, Y. Tajima, *et al.*, *Phys. Rev. Applied* **16**, 014009 (2021).
- [17] A. Ishida, R. W. Gladen, *et al.*, 19th International Conference on Positron Annihilation (ICPA-19), online, Aug. 24 (2022).
- [18] 石田明ほか, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 東京, 9月12日 (2022).

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）

2022 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, T, S2, MP, U）毎に色分けして示している。配分状況（表）には、年度内 3 期（2022 年 5-7 月, 2022 年 10-12 月, 2023 年 2-3 月）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）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。

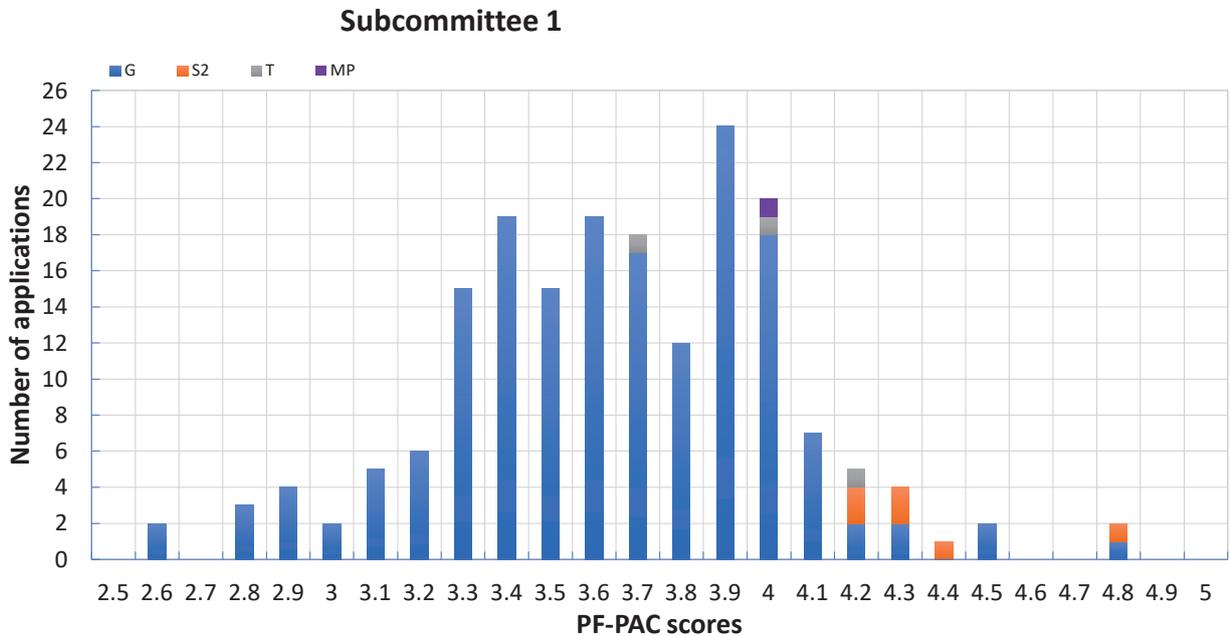


図 1 第 1 分科ビームライン群（真空紫外・軟 X 線ビームラインおよび低速陽電子ビームライン）の有効共同利用実験課題の評点分布

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	2023/2-3			2022/10-12			2022/5-7		
		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	28	44%	3.7	29	81%	3.5	30	57%	3.6
BL-13A/B (VUV and Soft X-ray spectroscopy)	U	27	84%	3.4	28	100%	2.8	26	76%	2.8
BL-16A (Soft X-ray spectroscopy)	U	40	46%	2.8	40	61%	2.8	37	54%	2.8
BL-28A/B (VUV and Soft X-ray spectroscopy)	U	18	52%	3.6	18	88%	3.5	14	95%	3.6
BL-3B (VUV and Soft X-ray spectroscopy)	BM	5	100%	3.4	5	100%	3.4	5	95%	3.4
BL-11A (Soft X-ray spectroscopy)	BM	19	89%	2.8	19	100%	2.8	19	98%	2.8
BL-11B (Soft X-ray spectroscopy)	BM	19	100%	3.0	18	100%	2.9	19	100%	3.0
BL-11D (VUV and SX optics)	BM	7	100%	3.3	8	110%	3.3	7	100%	3.1
BL-19A/B (Soft X-ray Microscopy (STXM) and Spectroscopy)	U	26	38%	4.0	27	74%	3.4	21	88%	2.6
BL-20A (VUV spectroscopy)	BM	5	90%	3.7	5	92%	3.7	4	83%	3.3
BL-27A (Radiation biology and XPS for radioactive samples)	BM	16	97%	3.2	16	100%	3.1	14	100%	3.1
SPF (Slow positron facility)	SP	10	48%	3.5	10	69%	3.5	11	70%	3.5

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

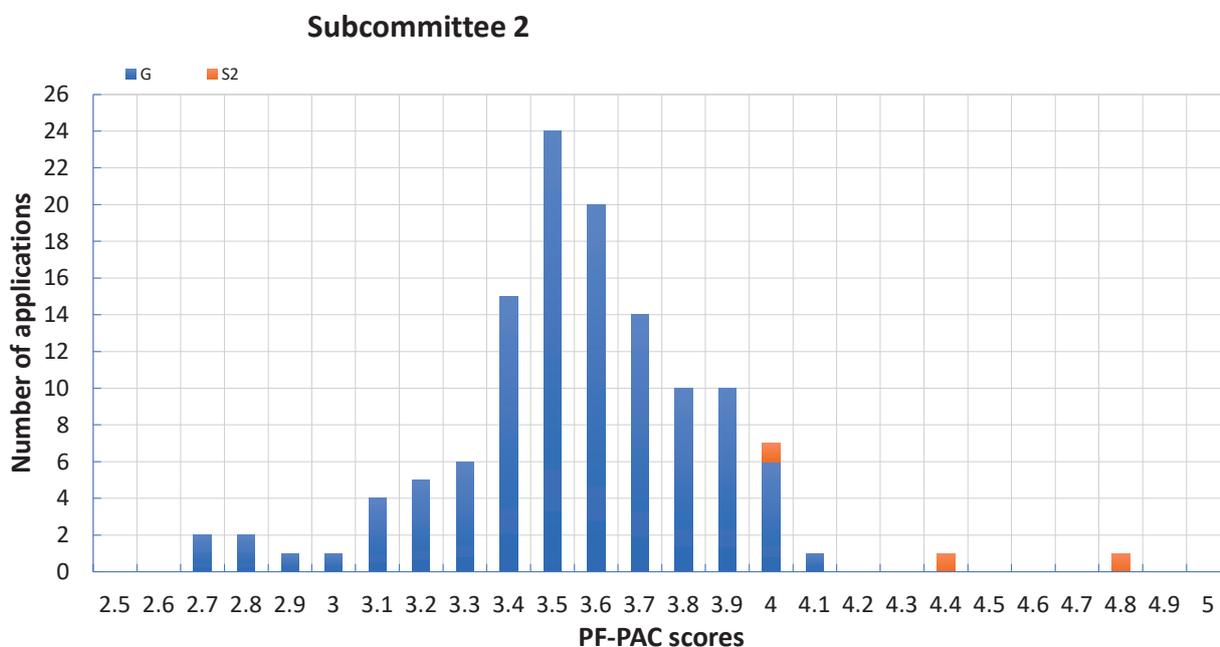


図2 第2分科ビームライン群（硬X線回折・散乱実験用ビームライン）の有効共同利用実験課題の評点分布

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

Beamline	Light Source	Subcommittee 2								
		2023/2-3			2022/10-12			2022/5-7		
		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	30	42%	3.4	30	65%	3.1	31	67%	3.3
BL-4C (X-ray diffraction)	BM	27	55%	3.5	26	89%	3.1	25	88%	3.4
BL-4B2 (X-ray powder diffraction)	BM	8	100%	3.6	8	100%	3.6	8	100%	3.5
BL-6C (X-ray diffraction)	BM	19	50%	2.8	19	64%	2.8	19	50%	2.8
BL-7C (Multipurpose)	BM	8	71%	3.5	8	101%	2.9	7	102%	3.2
BL-8A,8B (X-ray diffraction)	BM	30	87%	2.7	29	99%	2.7	19	99%	2.7
BL-10A (X-ray diffraction)	BM	7	63%	3.4	7	85%	3.4	8	78%	3.0
BL-14A (X-ray diffraction and detector studies)	VW	9	102%	3.2	10	100%	3.2	9	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。2022年度は第3期（2023年2、3月）が非常に短くなったため、BL-15Aは全て第5分科（小角散乱BL-15A2）での利用とし、第3分科（BL-15A1）での利用は行わなかった。

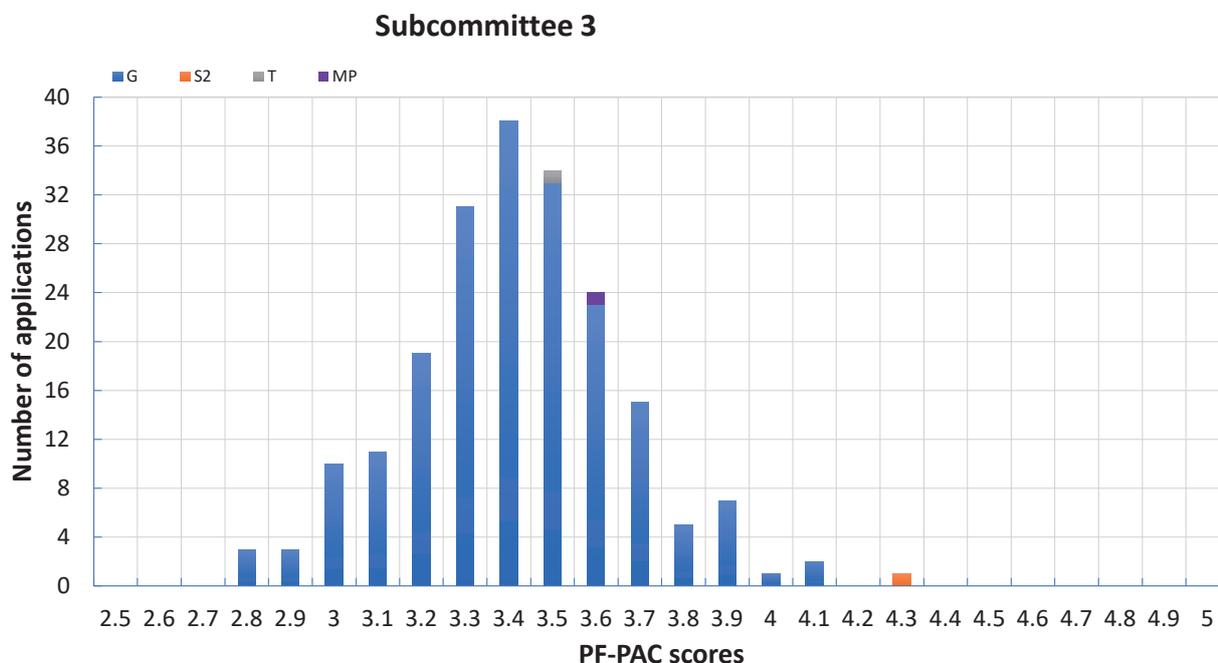


図3 第3分科ビームライン群（硬X線分光ビームライン）の有効共同利用実験課題の評点分布

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

Beamline	Light Source	Subcommittee 3								
		2023/2-3			2022/10-12			2022/5-7		
		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	90%	2.9	14	100%	2.9	18	96%	2.8
Beamlines for XAFS (BL-9A, 9C, 12C)	BM	136	67%	2.9	138	100%	2.9	126	100%	2.8
BL-15A1 (Microbeam XAFS and XRD)	SGU	-	-	-	16	100%	3.3	18	89%	3.3
AR-NW2A (Time resolved XAFS and XRD)	U	10	100%	3.7	10	100%	3.0	13	100%	3.6
AR-NW10A (High energy XAFS)	BM	136	58%	3.4	135	77%	3.3	126	100%	2.9
BL-27B (Radiation biology and XAFS for radioactive samples)	BM	26	100%	3.0	26	100%	3.0	24	100%	3.0

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150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。

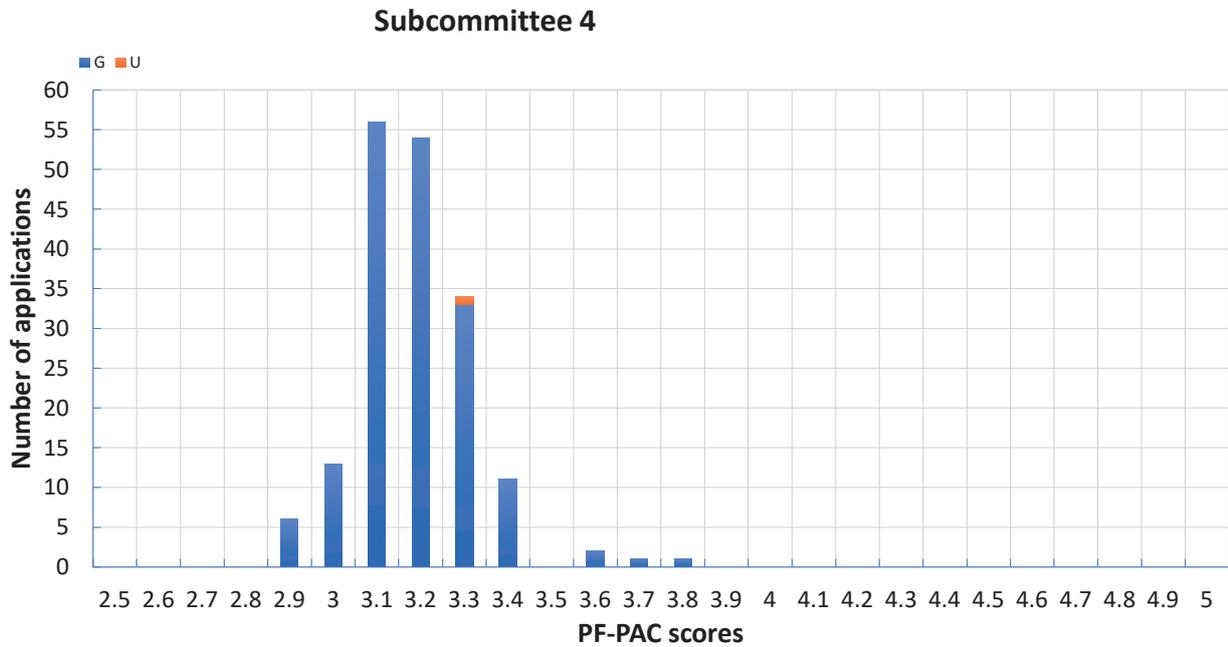


図4 第4分科ビームライン群 (タンパク質結晶構造解析) の有効共同利用実験課題の評点分布

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	2023/2-3			2022/10-12			2022/5-7		
		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	155	96%	3.0	156	105%	2.9	143	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80件の実験課題を実施しており、

ユーザーニーズが高い。2022年度は運転時間が第2期には長めとなり配分率も100%だったが、第3期は非常に短くなったため、配分率が低くなった。

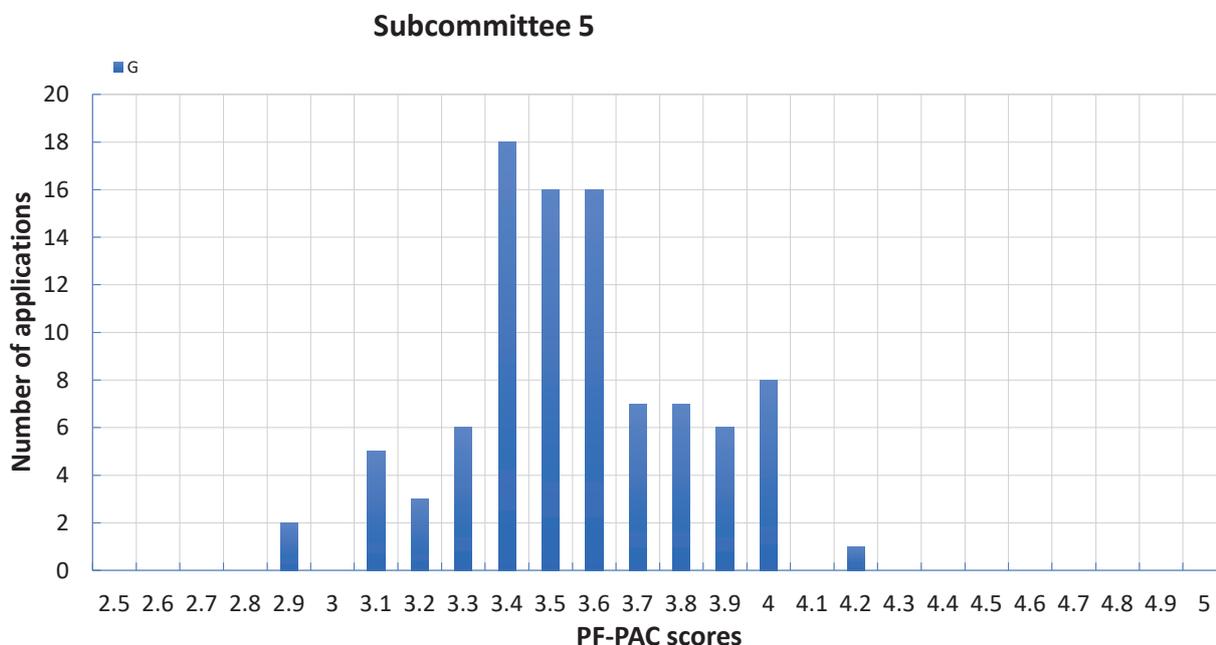


図5 第5分科ビームライン群 (X線小角散乱ビームライン) の有効共同利用実験課題の評点分布

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	2023/2-3			2022/10-12			2022/5-7		
		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	78	55%	3.4	79	100%	2.9	81	89%	2.9

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。

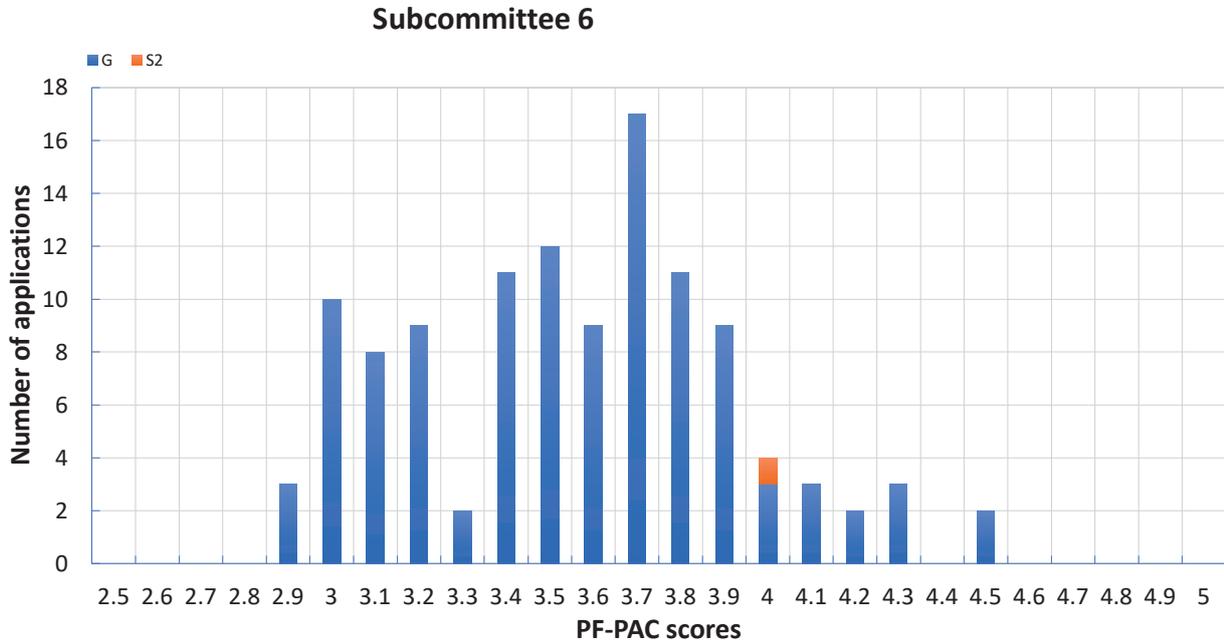


図6 第6分科ビームライン群 (高圧・超高速時間分解・X線イメージングビームライン) の有効共同利用実験課題の評点分布

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	2023/2-3			2022/10-12			2022/5-7		
		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	6	102%	3.5	6	100%	3.5	8	100%	3.1
BL-14B (X-ray optics)	VW	13	53%	3.1	13	100%	3.0	13	96%	3.0
BL-14C (X-ray imaging)	VW	18	38%	2.9	18	100%	2.9	17	100%	2.9
AR-NE7A without high pressure experiment (X-ray imaging)	BM	9	76%	3.6	9	100%	3.6	5	100%	3.6
BL-20B (X-ray topography and diffraction)	BM	6	101%	3.0	6	96%	3.0	8	100%	3.0
BL-18C (High pressure science)	BM	19	82%	3.4	19	100%	2.9	21	99%	3.2
AR-NE1A (High pressure science)	MPW	13	72%	3.5	13	91%	3.5	14	95%	3.5
AR-NESC (High pressure science)	BM	8	100%	3.6	8	92%	3.0	10	95%	21.0
AR-NE7A, high pressure experiment only	BM	9	76%	3.6	9	100%	3.6	5	100%	3.6
AR-NW14A (Time resolved experiment)	U	12	83%	3.3	12	87%	3.3	16	57%	3.3

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 ⁻⁴	参考文献
BL-1A	0.01	Channel-Cut Si(111) Liquid N ₂ Cooling	Bimorph Si Rh-Coated Si Rh-Coated	3.7 ~ 4.5 11.2 ~ 12.9	0.013×0.013	5×10 ¹⁰ @11.2 keV	~2	1, 2
BL-3A	1	Flat Double Crystal Si(111)	Bent Cylinder	4 ~ 14	0.6×0.4	6×10 ¹²	~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 ₂ Cooling	Bent Plane Si Rh-Coated Bent Cylinder Si Rh-Coated	6.5 ~ 17	0.8×0.2	1.3×10 ¹¹ (0.2×0.2 mm ²)	~2	
BL-6A	2	Bent Crystal Ge(111) (α = 8.0°)	Bent Cylinder ULE	8.3 (fixed)	0.5×0.2	1.0×10 ¹² /mm ² (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 ¹⁰ /6 mm ² (8 keV, 300 mA) (1×10 ¹¹ 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 ¹¹ (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 ¹¹ (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 ¹¹ (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 ¹¹ (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 ¹¹ (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 ¹⁰ (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 ($\Delta E/E$) $\times 10^{-4}$	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 ₂ 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 ¹¹ (7.5 keV, 450 mA)	~2	26, 27
BL-15A2	0.2	Double Crystal Si(111) Liquid N ₂ 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 ¹¹ (7.5 keV, 450 mA)	~2	26, 28, 29
BL-17A	0.1 ~ 0.2	Double Crystal Si(111) Liquid N ₂ 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 ¹¹ (12.4 keV, 450 mA, 0.04×0.016 mm ²)	~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 ¹¹ (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 ¹¹ (0.2×0.2mm ²)	~2	
AR-NE3A	H:0.2 V:0.1	Double Crystal Si(111) Liquid N ₂ 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 ¹¹ (0.2×0.2 mm ²)	~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 ₂ Cooling	Bent Cylinder Si Rh-Coated Bent Flat Si Rh-Coated	5 ~ 25	0.6×0.2 ~10×0.06	6×10 ¹² (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 ¹⁰ (22 keV, 60 mA)	~1	40
AR-NW12A	H:0.3 V:0.1	Double Crystal Si(111) Liquid N ₂ Cooling	Pre-Mirror Bent Flat Si Rh-Coated Post-Mirror Bent Cylinder Si Rh-Coated	6.5 ~ 17	1.3×0.3	2×10 ¹¹ (0.2×0.2 mm ²)	~2	41 - 43
AR-NW14A	H:0.3 V:0.1	Double Crystal Si(111) Liquid N ₂ Cooling	Bent Cylinder Rh-Coated Bent Flat Rh-Coated	4.9 ~ 25	0.45×0.25	1×10 ¹²	~2	44

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

REFERENCES

- [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	30 ~ 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	30 ~ 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-11A	5×1	Varied-Included-Angle Varied-Line-Spacing Plane Grating	600 1200	70 ~ 1900	2×1	500 ~ 5000 $10^{12} \sim 10^9$	
BL-11B	4×0.6	Double Crystal InSb (111), Si (111)		1724 ~ 5000	5×2	2000 10^{10}	5-7
BL-11D	4×2	Grazing Incidence Varied Deviation-Angle On-Blaze Mount $R_1 = 52.5$ m $R_3 = 22.5$ m	2400	60 ~ 245 200 ~ 900	1×0.1	2000 10^{11}	8, 9
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 $10^{13} \sim 10^9$	10-13
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 $10^{12} \sim 10^{11}$	14, 15
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 $10^{12} \sim 10^8$	16
BL-27A	5 × 0.5	Double Crystal InSb (111)		1800~ 4000		2000	17

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)

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-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	0.15×0.05	30000 10^{12}	1, 18

REFERENCES

- [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] T. Ohta *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **246**, 373 (1986).
- [6] M. Funabashi *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **60**, 1983 (1989).
- [7] T. Iwazumi *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 1691 (1995).
- [8] Photon Factory Activity Report 1997 #15, A 101 (1998).
- [9] T. Hatano and S. Aihara, *J. Phys.: Conf. Ser.* **425**, 152018 (2013).
- [10] K. Mase *et al.*, *AIP Conf. Proc.* **1234**, 709 (2010).
- [11] A. Toyoshima *et al.*, *J. Vac. Soc. Jpn.* **54**, 580 (2011).
- [12] A. Toyoshima *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.* **425**, 152019 (2013).
- [13] A. Toyoshima *et al.*, *J. Synchrotron Rad.* **22**, 1359 (2015).
- [14] K. Amemiya *et al.*, *AIP Conf. Proc.* **1234**, 295 (2010).
- [15] K. Amemiya *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.* **425**, 152015 (2013).
- [16] K. Ito *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 2119 (1995).
- [17] H. Konishi *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **372**, 322 (1996).
- [18] 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 μ s	≤ 50 Hz	1×10^8 e ⁺ /s (before brightness enhancement)	1, 2, 3
SPF-A4	20 eV - 1 keV	1.2 μ s (long-pulse mode), 200 μ s - 20 ms (pulsstretching mode)	≤ 50 Hz	1×10^8 e ⁺ /s (before brightness enhancement)	4, 5
SPF-B1	100 eV - 35 keV	1-16 ns	≤ 50 Hz	1×10^7 e ⁺ /s	6, 7
SPF-B2	100 eV - 35 keV	1-16 ns	≤ 50 Hz	1×10^7 e ⁺ /s	8, 9

REFERENCES

- [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).