

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

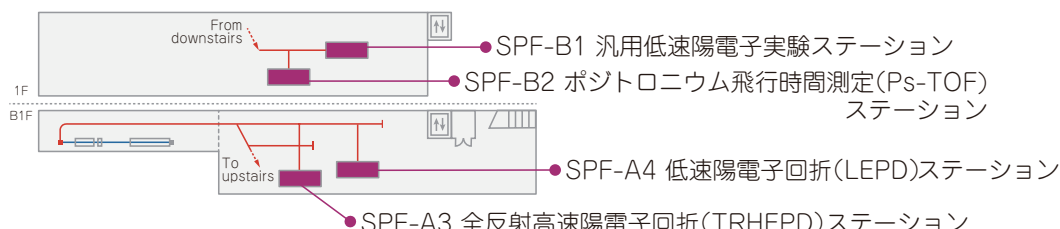
和田 健

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、加速器により生成した高強度低速陽電子ビームを用いた物質最表面および表面直下数原子層の原子配列の精密決定、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。陽電子は、専用加速器によって 50 MeV 程度に加速した電子を重金属 (タンタル) 標的に入射し、制動放射 X 線からの電子陽電子対生成によって得ている。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、エネルギーを失った (熱化した) 後にそのごく一部が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のために厚さ 25 μm のタングステン薄膜を井桁状に組んだものを用いている (タングステンの陽電子仕事関数は -3 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]。

共同利用実験は、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実施している。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。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。

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 μs のロングパルスモードと、14 ns のショートパルスモードの 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、輸送ラインの途中の異なる場所で 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

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	

の実験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）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、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 (θ) 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 (ϕ) 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。

構造解析では、可能性のある様々な原子座標を仮定したロッキング曲線や方位角プロットの計算データセットを、得られた実験データと比較して、最も適合する原子座標を探索する。計算は多重散乱を考慮した回折理論が用いられる。

測定試料の標準的な大きさは 10 mm × 4 mm × 0.5 mm (t) 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 K ~ 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がオフラインに設置され、現在以下のプローブ・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; O₂ ガス導入; H₂ ガス導入; 試料通電 / 電子衝撃加熱機構; 試料冷却 / 温

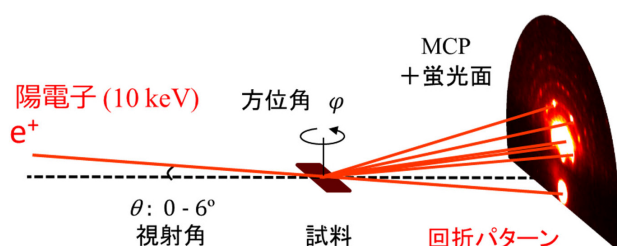


図 1 TRHEPD 実験配置

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; 四重極形質量分析計など。

【SPF-A4: 低速陽電子回折 (LEPD) ステーション】

SPF-A4 ステーションでは、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、試料表面への垂直入射による低速陽電子回折 (Low-energy positron diffraction, LEPD、レプト) の開発と実験を行っている。LEPD は、低速電子回折 (Low-energy electron diffraction, LEED) の陽電子版である。

実験は、図 2 に示すように、数十から数百 eV の高輝度陽電子ビームを試料表面に主に垂直に入射し、後方散乱によって得られる回折パターンを観測する。近年微小表面領域の観測ニーズが高まっており、例えば角度分解光電子分光 (ARPES) 実験では顕微鏡的装置開発が急速に進展している。陽電子回折においても、微小領域観測のためには、垂直入射による回折手法の開発が重要である。

LEED 装置は、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の関数として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探索する。計算には多重散乱を考慮した回折理論が用いられる。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、LEED の計算精度には限界があり、構造解析がうまくいかないことがある。

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で、電子よりも浅い最表面および表面直下 3-4 原子層にのみ感度がある。

LEPD 実験では、パルス幅 1.2 μs のロングパルスモードの低速陽電子ビームを、パルスストレッチャーにより、200 μs から 20 ms の間の任意のパルス幅まで伸長する [7]。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、準連続ビームへ

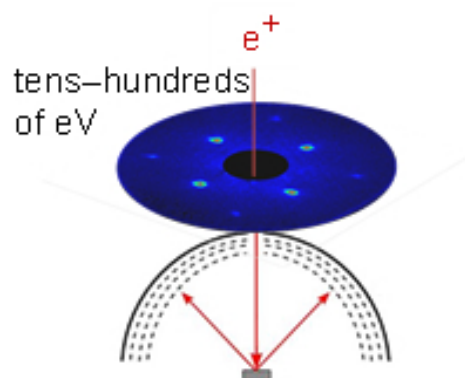


図 2 TRHEPD 実験配置

の変換が必要だからである。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。2017 年度に、加速器ベースの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]。

LEPD 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。現在、様々な金属表面における実験データの蓄積とデータ解析を進めている。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 型試料ホルダが導入されており、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、ショート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 の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、ショート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 (スピン三重項のオルソポジトロニウム) 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 $1^3S_1-2^3P_J$ ($J=0, 1, 2$) 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 (ここで 1^3S_1 および 2^3P_J は原子物理で一般に用いられる項記号 $n^{2S+1}L_J$ (ただし、 $L=0, 1, 2, \dots$ を S, P, D, ... と表記) に従って表したエネルギー準位である。 n は主量子数、 J は軌道角運動量 (L) とスピン角運動量 (S) を合わせた全角運動量を表す)。

【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、ショート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。

Ps-TOF 装置の概略を図 3 に示した。試料位置でのショートパルスモードのパルス幅は 14 ns 程度である。試料に対する陽電子入射エネルギーは、低速陽電子ビームの輸送エネルギー、あるいは、試料への印可電圧を調整することによって行う。なお、試料直前には接地されたグリッドが設置されている。

このビームを試料に打ち込み、試料表面から放出される

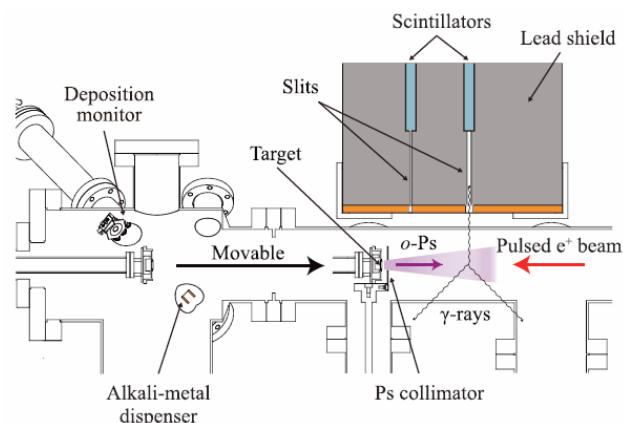


図 3 Ps-TOF 実験装置 [9]

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各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 測定システムその他、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

2024 年 2 月 11 日未明に、2 次ビームラインの最上流から 2 番目に位置するビーム輸送用ソレノイドコイルへの電流供給配線において、接地電位と短絡する事象が発生した。運転中は現場近辺の線量が高くなることから、長期的な放射線照射によって配線被覆が劣化したことが原因と考えられる。これを受けて、2024 年春の休止期間中に、放射線シールド内に設置されている当該コイルを含む 4 つのコイルへの配線を耐放射線性が比較的高いと思われるポリイミドテープ巻きガラス編組電線に交換した。当初は、納期の都合により抵抗値が高めのワイヤを一時的に使用したが、2024 年夏の休止期間に、あらためてより低抵抗のワイヤに交換した。

2024 年度第 2 期より、SPF 専用リニアックの加速電子パワーを増強しての運転が開始された。それまでは、加速電子パワーを 530 W 以下に制限した運転を行っていた。

その理由となっていた加速器上階のクライストロンギャラリー実験室における線量率について再測定を実施したところ、値が十分に低いことが確認された。これにより、加速電子パワーを増強しても問題が無いと判断され、放射線管理室より上限 1.2 kW での条件運転が認められた。2024 年度第 1 期のユーザー運転終了後のスタディ期間中に、加速電子パワーを 950 W 程度まで引き上げての試運転が実施された。2024 年度第 2 期および第 3 期のユーザー運転では、加速電子パワー 930 W 程度での運転を実施した。

2024 年度第 2 期の運転において、低速陽電子ビームに変動が生じ、それと連動して陽電子生成ターゲット部の電位モニター出力にも大きな変動が観測された。この現象は、ロングパルスモードにおいて、陽電子生成ターゲット部に 5 kV を印加して運転する場合に確認され、同じロングパルスモードでも 15 kV 印加時 (TRHEPD 用) や、ショートパルスモードでの運転時にこうした変動は確認されなかった。5 kV ロングパルスモードで変動が生じた際には、加速器のビーム軌道やカレントの調整によって一時的に安定する条件を見出すことができたものの、半日ほど経過すると再び変動が発生するという傾向が見られた。変動の原因は現時点でも特定されていないが、LEPD 以外の実験に対する影響は無いことから、状況を注視しつつ共同利用実験を継続した。なお、第 3 期の運転では同様の変動は確認されなかったが、安定化した要因については明らかになっていない。

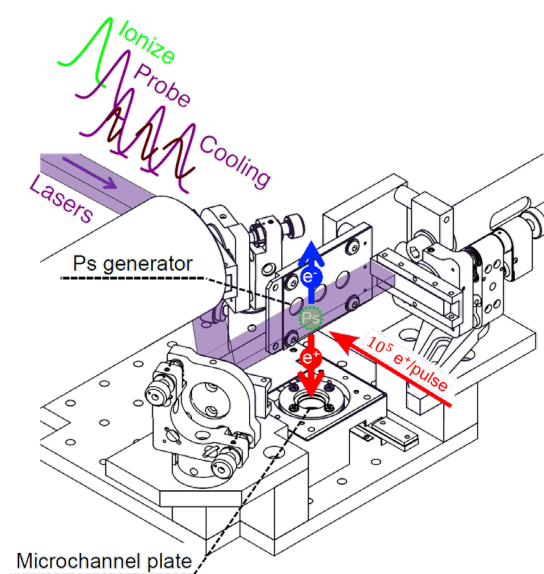
2024 年 11 月に、2 次ビームライン最上流部に設置されている真空インターロック用ゲージ GAB1 において真空ディスタープが発生し、それに連動して、2 次ビームラインのメインビームシャッター (MBS) として使用しているゲートバルブが閉じ、ビームが停止する事象が複数回発生した。調査の結果、原因は GAB1 のゲージコントローラの老劣化によるものであることが判明した。具体的には、真空値のログ取得コマンドを受信した際にエラーが発生し、その際、仕様上リレー接点が OFF 状態となることで、インターロック信号が変化しディスタープが惹き起こされていた。応急処置として、当該ゲージに対する真空値ログ取得コマンドの送信を停止し、真空インターロック機能のみに専念させる設定とした。その後、当該ゲージコントローラを新品と交換し、真空値のログ取得を再開した。以降は同様の問題は発生していない。

低速陽電子実験施設 1F のクライストロンギャラリー実験室では、Ps のレーザー冷却および精密分光実験などの共同利用実験を効率的に進めるため、同室南側の実験スペース全体をレーザー用に間仕切りで囲い、レーザーブースとして運用する模様替えを実施した。この措置は、安全性と利便性を両立する方法として、以前より安全衛生室およびレーザー安全担当者から推奨されていた方式である。2024 年 11 月には、安衛室、施設部、放射線管理室、PF 安全担当による現場確認および指導を経て、加速器および PF の運転当番向け説明会を実施し、運用を開始した。

2024 年度第 2 期の運転から専用リニアックのビームモ

ニターシステムに不調が生じていた。ビームカレントの値は正常にモニターできていたものの、ビームポジションの確認に支障があった。この問題に対し、2024 年度冬の停止期間中に加速器シールドを開けて現場での確認作業が行われ、専用リニアックビームのスクリーンモニター用のカメラに不具合があることが判明し、当該カメラの交換が実施された。カメラの不具合の原因として、放射線損傷が疑われたため、カメラの周囲をシールドで覆い、今後は定期的に放射線損傷の影響を確認することとなった。また、2024 年度夏の休止期間中に電流モニター (CoreMonitor2, CM2) 本体とケーブルが交換されたことに伴いゲインが数倍変化した。これに対応し、上流側の CM1 の電荷測定値に合わせるかたちで、較正が実施された。

2023 年 5 月に実施された共同利用ユーザーによる実験において、電子と陽電子から成る水素原子様束縛状態であるポジトロニウム (Ps) のレーザー冷却に世界で初めて成功した。この成果は、2024 年 9 月に論文として公表された (図 4)。Ps はレプトンのみで構成される特異な「原子」



A narrow component corresponding to ~1 K

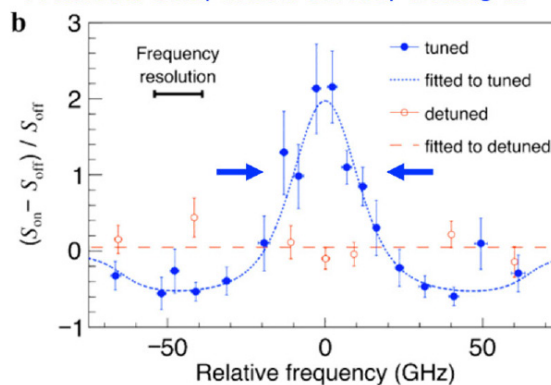


図 4 (上図) Ps レーザー冷却の実験配置図。(下図) Ps レーザー冷却によるドップラープロファイルの変化 (文献 [10] より転載)。

であり、束縛系量子電磁力学（QED）を高精度に検証するための理想的な系と考えられる。しかし、その寿命の短さ（スピン三重項の基底状態で 142 ns）と、質量の軽さ（水素原子の 1/900 程度）に起因する広いドップラー広がりのため、長年にわたり精密分光が困難とされてきた。この課題に対し、中心周波数が逐次的に変化するパルス列を出力する革新的なレーザーシステムが、共同利用ユーザーによって開発された。このレーザーを、低速陽電子汎用実験ステーション（SPF-B1）におけるショートパルスモードの高強度低速陽電子ビームによる Ps 生成と組み合わせることで、Ps の 1 次元冷却が実現した。これにより、分光できる Ps のうちおよそ 10% を 600 K から 1 K 程度にまで冷却することに成功した [10]。

この成果は、Ps を用いた高精度分光や反物質の基礎物理に新たな進展をもたらすものと期待されており、英国物理学会（Institute of Physics, IOP）が発行する Physics World 誌において、「Top 10 Breakthroughs of the Year in physics for 2024」の 1 つに選出された [11]。

次の段階として、Ps の 3 次元冷却実験に向けた準備が進められている。SPF-B1 のある低速陽電子実験施設 1F のクライストロンギャラリ実験室では、前述のレーザーブースの整備に加え、実験ステーションの全面刷新が進められた。新実験ステーションでは、ソレノイド磁場によって輸送された低速陽電子ビームを、Ps 生成およびレーザー分光が行われる非磁場領域に取り出すための新しいレンズ系を導入した。このレンズ系は、もともと陽電子回折実験用に開発を進めてきたものを、Ps レーザー冷却・精密分光実験に転用した。

LEPD ステーションの改良を進め、2023 年度から 2024 年度にかけて桁違いの高速化を実現し、 I - V 曲線による構造解析に必要な約 100 枚の回折パターンを 2 時間程度で取得できるようになった。また、SPF-A4 の LEPD ステーションと PF BL-13B の角度分解光電子分光（ARPES）ステーションの双方で共通に使用可能な新設計の試料ホルダを開発し、PF で開発された超高真空搬送ベッセルにより、同一試料・同一試料表面作成条件のもとで LEPD と ARPES 測定を連携して行う環境を整備した。現在、新 LEPD 実験ステーションによる構造解析の検証が Cu(001) 表面をベンチマークに用いて進行中であり、既に LEED を越えた実験と計算の高度な一致が得られることが確認できている。

解析には、TRHEPD 向け開発が開始され、その後さまざまな量子ビーム計測手法の汎用データ解析プラットフォームとして整備された「2DMAT」（ツーディーマット）を用いている。2DMAT は、ポピュレーションアニーリングモンテカルロ（PAMC）法などを取り入れた大域探索型の逆問題解析プラットフォームであり、局所解に陥ることなく正しい大域解を見出すことが可能な解析フレームワークである [12,13]。そのことが保証されているために、物理的に妥当でない解が得られたとき、それが局所解である可能性にあまりとらわれることなく、効率的に、実験データ

あるいは解析コードも含めた広い視点から原因の特定と改良ができる。これは、2DMAT の可能性が本来想定された以上に広いことを示す大きな利点で、実際に LEPD 解析においては、実験データにおける系統的なずれ（くり返し実験によって明らかにすることのできない不確かさ）を見出し、多数の検出器と測定法の改良を行った。さらに、計算コードや計算条件の見直しや最適化を効率的に進めている。

陽電子回折実験（TRHEPD と LEPD）では、磁場によって輸送された低速陽電子ビームを、ビーム輸送用ソレノイド磁場から開放したのち、透過型減速材（リモデレータ）に収束させて輝度を増強している。透過型リモデレータとして、TRHEPD 用に厚さ 100 nm の W 結晶、LEPD 用に厚さ 150 nm の Ni 結晶を用いており、輝度を増強したいビームをこれらへ高効率に収束入射することは、ビーム技術開発の核心をなす要素である。これまでの開発により、磁性体薄膜による磁場遮蔽構造と磁場収束レンズの組合せによって、ビームの輸送効率と収束性能の向上を実現した。さらに、磁場遮蔽構造と磁場収束レンズの距離をつめた光学系の改造を行い、最終段の磁場収束レンズによって形成されるビーム径は、改造前の 1.7 mm から 1.0 mm へと大幅に縮小され、中心強度も桁違いに増大した。ビーム内の単位面積あたりの陽電子密度としては約 2 桁の向上が達成されており、これに対応する下流側の静電レンズシステムの開発によって、陽電子回折装置全体の革新的な性能向上が期待される。この新レンズ系は、すでに前述の 3 次元 Ps レーザー冷却実験ステーションにも導入し、使用が開始されている。さらに、磁場遮蔽グリッドと磁場収束レンズとの距離を可能な限り詰めた新たな光学系を開発した。

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 で実施中の Ps レーザー冷却実験においては、実験

を開始した3次元レーザー冷却の実現と、それによるPsのエネルギー準位や質量の精密な測定を通して、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, 「KEK 低速陽電子実験施設の現状と最近の研究」*陽電子科学* **3**, 11 (2014).
- [3] 和田健, 「低速陽電子ビームの生成と物質研究への応用」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, 「全反射陽電子回折 (TRHEPD) による表面構造解析」*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] K. Wada, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **975**, 164161 (2020).
- [8] K. Wada, T. Shirasawa, *et al.*, *e-J. Surf. Sci. Nanotechnol.* **16**, 313 (2018).
- [9] S. Iida, K. Wada, *et al.*, *J. Phys.: Condens. Matter* **28**, 475002 (2016).
- [10] K. Shu, Y. Tajima, *et al.*, *Nature* **633**, 793 (2024).
- [11] <https://physicsworld.com/a/top-10-breakthroughs-of-the-year-in-physics-for-2024-revealed/>
- [12] <https://www.pasums.issp.u-tokyo.ac.jp/2dmat/>
- [13] Y. Motoyama, K. Yoshimi, *et al.*, *Comp. Phys. Commun.* **280**, 108465 (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）

2024 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（2024 年 4-7 月、2024 年 10-12 月、2025 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。

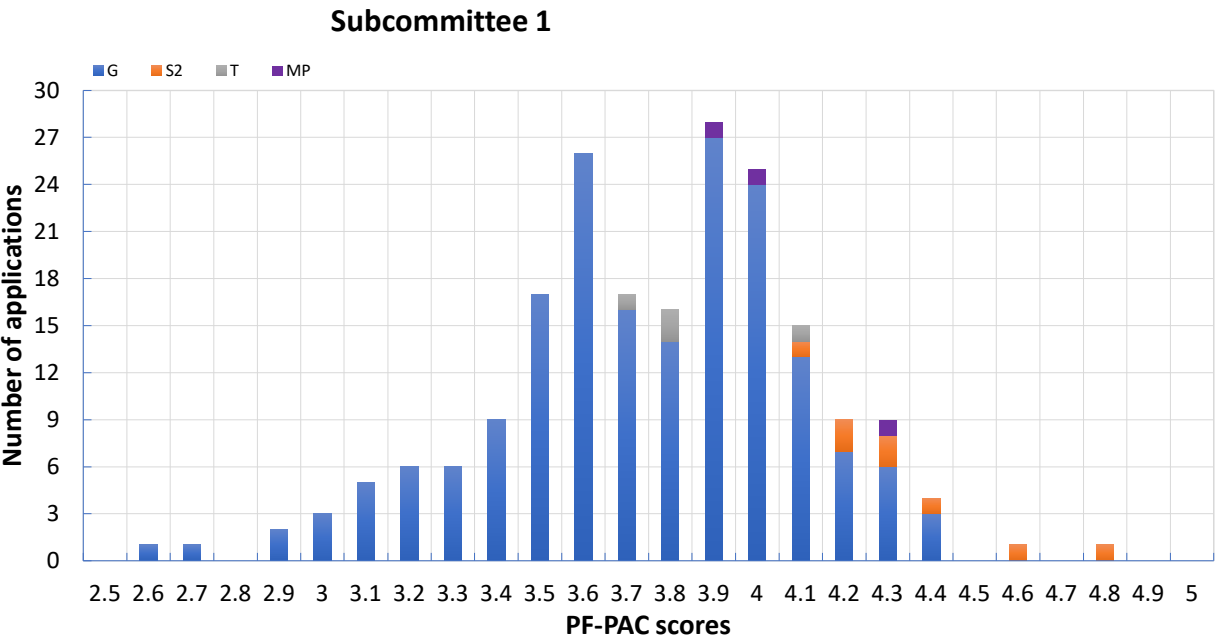


図 1 第 1 分科ビームライン群（真空紫外・軟 X 線ビームラインおよび低速陽電子ビームライン）の有効共同利用実験課題の評点分布

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	2025/2-3			2024/10-12			2024/4-7		
		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	31	61%	3.5	31	100%	2.9	30	99%	2.9
BL-13A/B (VUV and Soft X-ray spectroscopy)	U	38	43%	3.0	37	100%	1.0	37	89%	3.0
BL-16A (Soft X-ray spectroscopy)	U	40	38%	3.6	39	64%	2.6	42	69%	2.7
BL-28A/B (VUV and Soft X-ray spectroscopy)	U	25	33%	3.8	25	73%	3.1	24	74%	3.2
BL-3B (VUV and Soft X-ray spectroscopy)	BM	3	0%	0.0	3	100%	3.5	3	99%	3.5
BL-11A (R&D Beamline in planning)	BM	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BL-11B (R&D Beamline in planning)	BM	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BL-12A (Soft and Tender X-ray Beamline under construction)	BM	19	72%	2.7	19	100%	2.7			
BL-19A/B (Soft X-ray Microscopy (STXM) and Spectroscopy)	U	45	37%	3.9	41	75%	3.4	33	100%	3.4
BL-20A (VUV spectroscopy)	BM	6	90%	3.3	6	101%	3.9	6	93%	3.9
BL-27A (Radiation biology and XPS for radioactive samples)	BM	15	89%	3.0	15	100%	3.0	15	100%	3.0
SPF (Slow positron facility)	SP	14	37%	3.7	14	68%	3.3	15	67%	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。

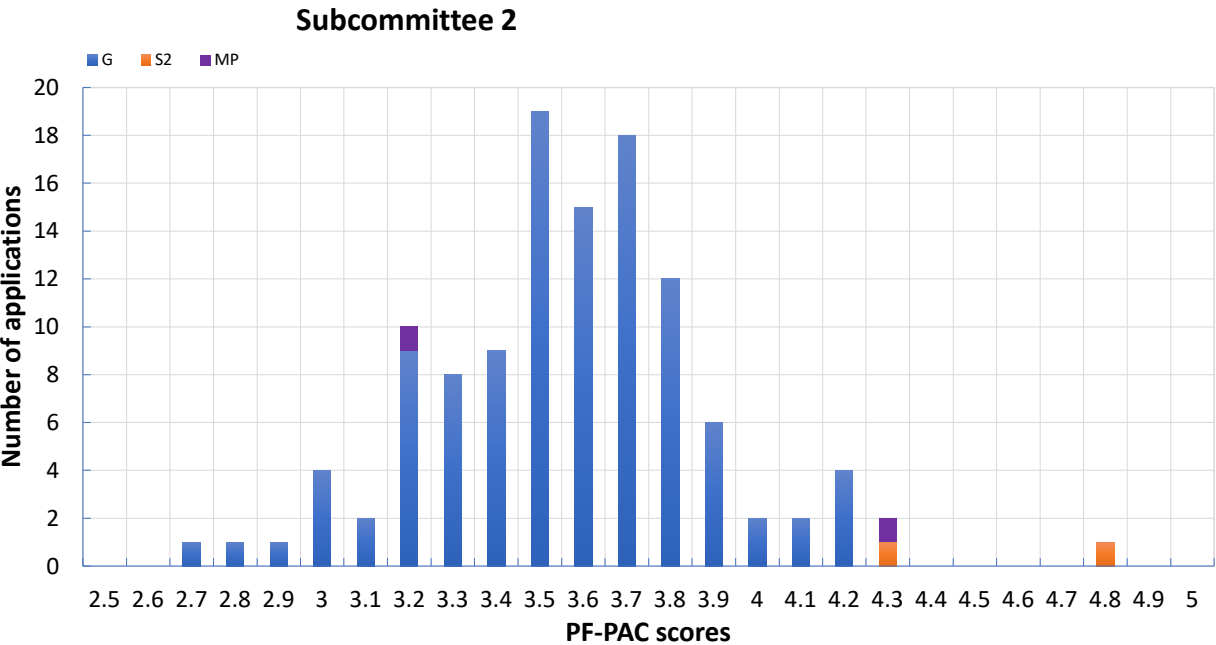


図2 第2分科ビームライン群（硬X線回折・散乱実験用ビームライン）の有効共同利用実験課題の評点分布

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	2025/2-3			2024/10-12			2024/4-7		
		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	27	37%	3.6	27	73%	3.2	33	94%	3.2
BL-4C (X-ray diffraction)	BM	21	52%	3.4	20	87%	3.0	25	98%	3.2
BL-4B2 (X-ray powder diffraction)	BM	8	101%	3.2	8	100%	3.2	7	100%	3.5
BL-6C (X-ray diffraction)	BM	15	49%	3.0	15	79%	3.0	15	65%	3.0
BL-7C (Multipurpose)	BM	9	65%	3.4	8	101%	2.8	9	100%	2.8
BL-8A,8B (X-ray diffraction)	BM	34	79%	3.2	34	100%	3.2	32	100%	3.2
BL-10A (X-ray diffraction)	BM	9	72%	3.2	9	88%	3.2	7	82%	3.3
BL-14A (X-ray diffraction and detector studies)	VW	4	100%	0.0	4	100%	3.4	4	99%	3.4

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。

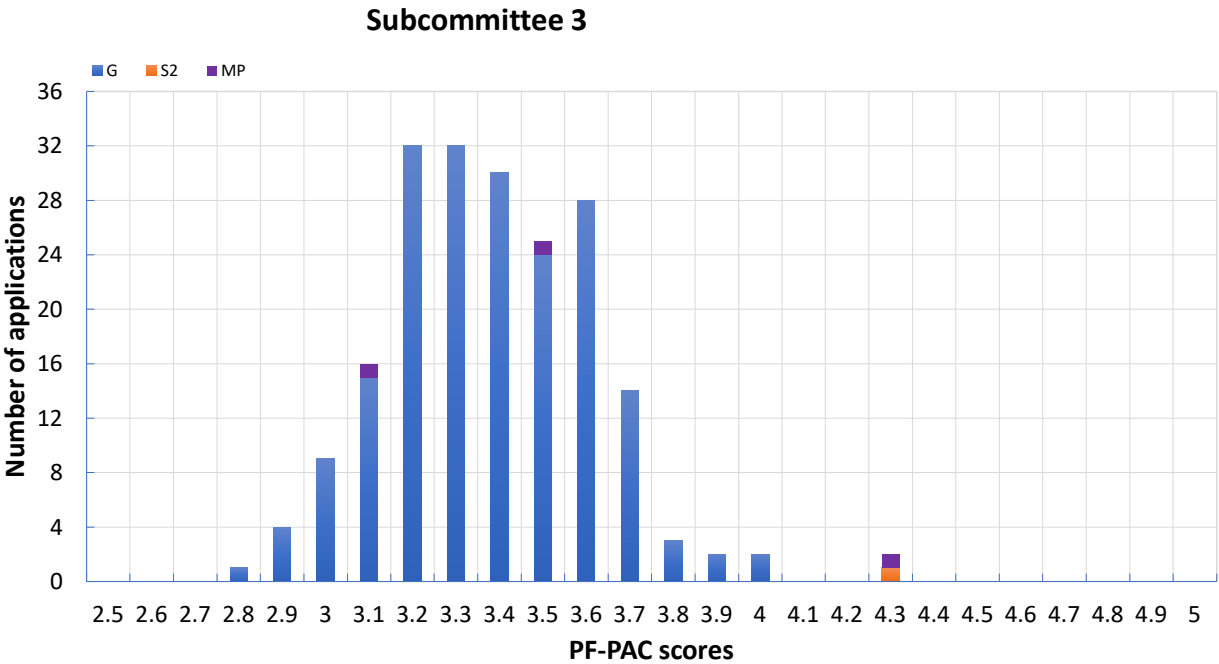


図3 第3分科ビームライン群（硬X線分光ビームライン）の有効共同利用実験課題の評点分布

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	2025/2-3			2024/10-12			2024/4-7		
		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	13	60%	3.1	13	101%	3.1	14	100%	3.1
Beamlines for XAFS (BL-9A, 9C, 12C)	BM	128	59%	3.3	126	99%	2.9	125	100%	2.9
BL-15A1 (Microbeam XAFS and XRD)	SGU	18	0%	0.0	18	100%	3.3	14	100%	3.5
AR-NW2A (Time resolved XAFS and XRD)	U	9	92%	3.6	8	100%	3.5	8	100%	3.0
AR-NW10A (High energy XAFS)	BM	127	46%	3.3	127	96%	3.0	124	86%	3.1
BL-27B (Radiation biology and XAFS for radioactive samples)	BM	22	95%	3.0	22	100%	3.0	25	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件程度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。

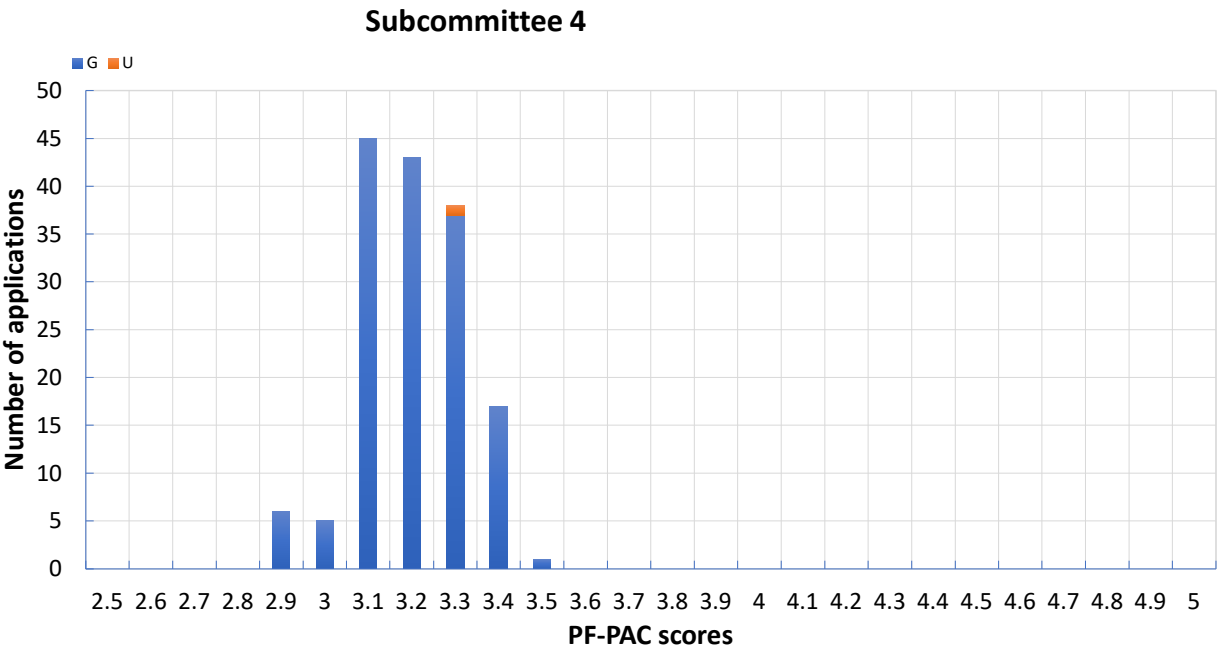


図4 第4分科ビームライン群 (タンパク質結晶構造解析) の有効共同利用実験課題の評点分布

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

Beamline	Light Source	Subcommittee 4								
		2025/2-3			2024/10-12			2024/4-7		
		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	131	96%	2.9	130	96%	2.9	126	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 90 件以上の実験課題を実施しており、ユーザーニーズが高い。

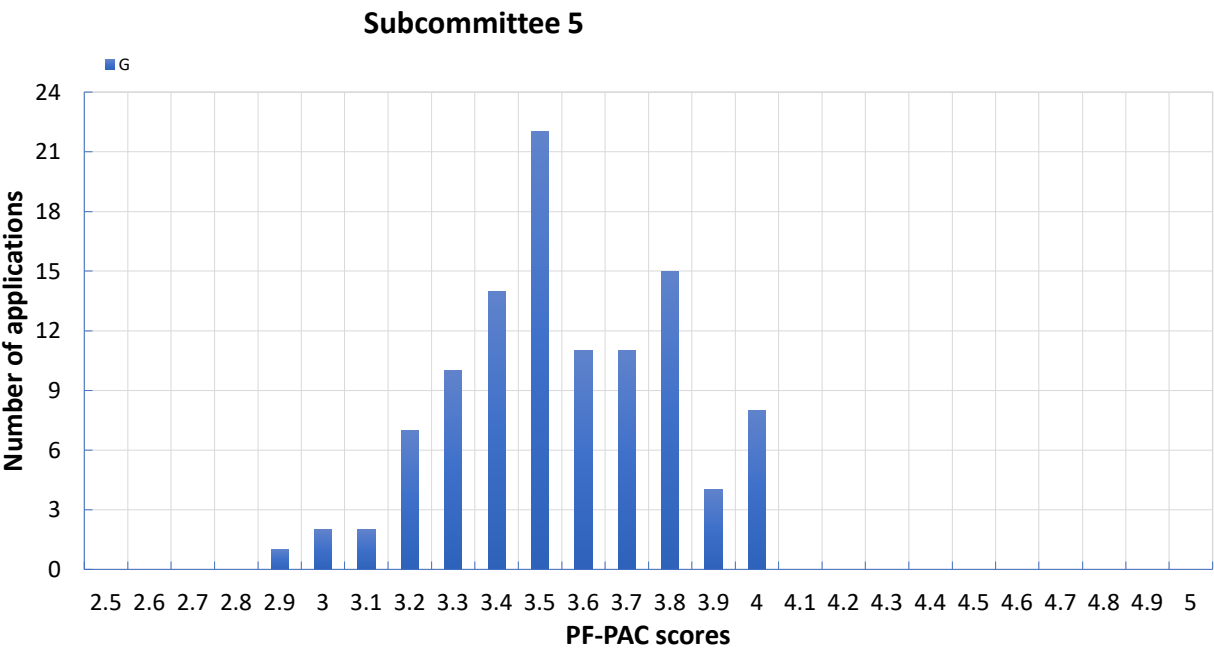


図 5 第5分科ビームライン群（X線小角散乱ビームライン）の有効共同利用実験課題の評点分布

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	2025/2-3			2024/10-12			2024/4-7		
		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	97	51%	3.5	98	92%	2.9	93	100%	3.0

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。

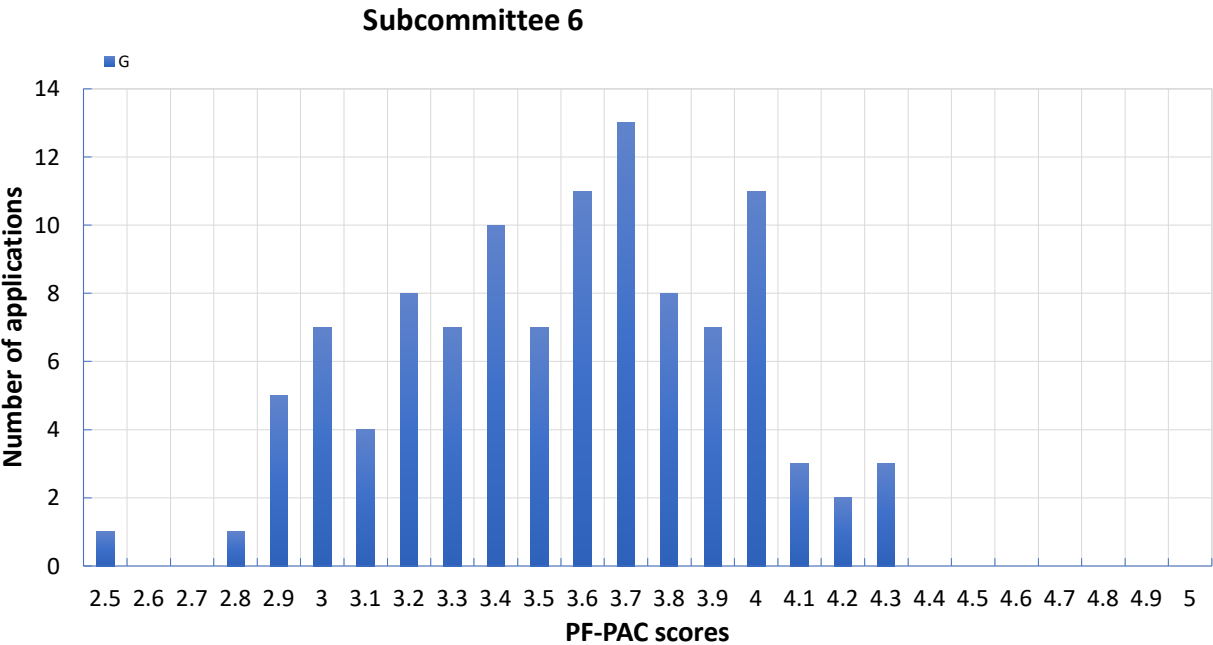


図6 第6分科ビームライン群（高圧・超高速時間分解・X線イメージングビームライン）の有効共同利用実験課題の評点分布

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	2025/2-3			2024/10-12			2024/4-7		
		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	8	95%	3.5	8	100%	3.3	8	100%	3.5
BL-14B (X-ray optics)	VW	16	63%	2.9	15	96%	2.5	14	100%	2.5
BL-14C (X-ray imaging)	VW	20	44%	2.9	19	100%	2.9	18	99%	2.9
AR-NE7A without high pressure experiment (X-ray imaging)	BM	8	0%	0.0	8	99%	2.8	9	71%	2.8
BL-20B (X-ray topography and diffraction)	BM	6	66%	3.2	6	100%	3.2	6	100%	3.2
BL-18C (High pressure science)	BM	20	56%	3.3	19	99%	3.3	21	100%	3.3
AR-NE1A (High pressure science)	EMPW	9	54%	3.9	9	95%	3.5	10	80%	3.5
AR-NE5C (High pressure science)	BM	7	98%	3.8	7	90%	3.7	7	86%	3.7
AR-NE7A, high pressure experiment only	BM	8	77%	3.2	8	100%	3.2	9	100%	3.2
AR-NW14A (Time resolved experiment)	U	12	48%	3.4	12	80%	3.4	12	76%	3.4

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 ($\Delta E/E$)×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) ($\alpha = 8.0^\circ$)	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) ($\alpha \sim 4^\circ, 8^\circ$)	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-12A (T-path)	5	Double Crystal Si(111) or InSb(111)	Bent Cylinder Ni-coated	1.7 ~ 5	0.9×1.9	6.3 × 10 ¹¹ (3 keV, 450 mA)	~2	

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 ⁻⁴	参考文献
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
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

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-NE5C	3	Double Crystal Si(111)	None	30 ~ 100 or white	60×5		5	36
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)

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-12A (S-path)	30×10 mm	Variable-Included-Angle Varied-Line-Spacing Plane Grating	800	80 ~ 2000	0.7×0.75	~3000 9.0×10^{10} @800 eV	
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. A **372**, 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 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 (pulsestretching mode)	≤ 50 Hz	1×10^8 e ⁺ /s (before brightness enhancement)	4, 5, 6
SPF-B1	100 eV - 35 keV	1-16 ns	≤ 50 Hz	1×10^7 e ⁺ /s	7, 8, 9
SPF-B2	100 eV - 35 keV	1-16 ns	≤ 50 Hz	1×10^7 e ⁺ /s	10, 11

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] R. Ahmed *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **1073**, 170270 (2025).
- [7] K. Michishio *et al.*, Appl. Phys. Lett. **100**, 254102 (2012).
- [8] K. Michishio *et al.*, Nucl. Instrum. Methods **785**, 5 (2015).
- [9] K. Shu *et al.*, Nature **633**, 793 (2024).
- [10] H. Terabe *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **443**, 012075 (2013).
- [11] S. Iida *et al.*, J. Phys.: Condens. Matter **28**, 475002 (2016).