

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

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

1. 概要

低速陽電子実験施設 (Slow Positron Facility, SPF) は、陽電子を用いた物質最表面近傍の原子配列 (表面の構造)、および表面の構造と物性の関係の解明、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を目的とした共同利用実験を推進している。SPF では、加速器で加速した電子を重金属 (タンタル) 標的に当てて電子陽電子対生成によって陽電子を得、幅の広いそのエネルギーを、タングステンがもつ負の陽電子仕事関数を利用して一定にしてから再加速し、磁場により各実験ステーションに供給している。このようにして得られるエネルギー単色の陽電子のことを低速陽電子と呼ぶ。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 (現在は Ps のレーザー冷却実験)、Ps 飛行時間 (Ps-TOF) 測定などの研究を行なっている。なお、全反射高速陽電子回折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こるためである。

スタッフは、自身の研究と共に、ビームライン・ステーションの最適化や研究開発を行い、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左欄の通り。

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。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なうことが可能になってきている。

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 [1] 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 [2, 3] を行っている。

実験は、図2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、進行方向に配置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) と方位角変化させながらパターン取得する方法 (方

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明氏が協力
SPF-B2・Ps-TOFステーション	和田 健	

SPF
Slow Positron Facility

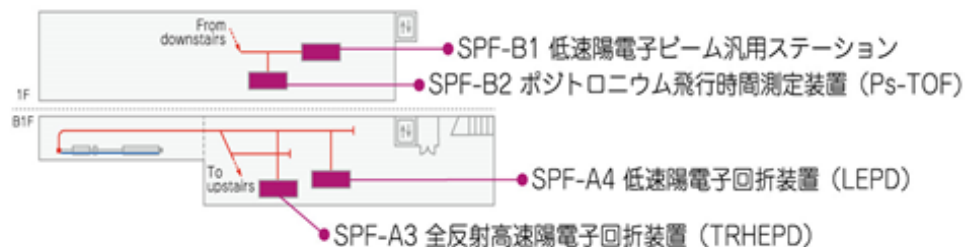


図1 低速陽電子実験施設のビームライン

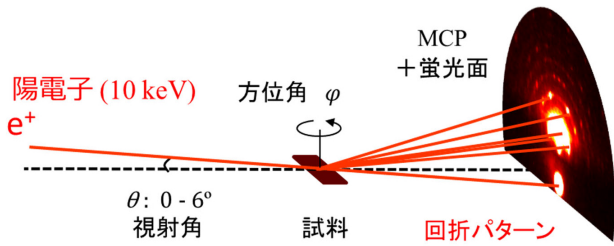


図2 TRHEPD 実験配置

位角プロットと呼ばれる)の自動測定ができる。

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上に搬送できる。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、TRHEPD 測定用の試料準備チェンバも整備が進んでおり、現在以下の設備が常設されている: 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なわれている。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) の陽電子版であり、理想的な表面構造解析手法になり得ると LEED の理論家により予想されている [4]。

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 [5]、現在、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を進めている。また、放射光実験施設における角度分解光電子分光 (ARPES) 等と共通化した試料ホルダの導入を進めている。

【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な

われてきた。

現在は、Ps レーザー冷却実験が行なわれている。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 [6-9]。

パルス状陽電子ビームは 4.2 keV 程度に加速して Ps-TOF 測定装置 (図 3) 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、真空中の寿命が 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

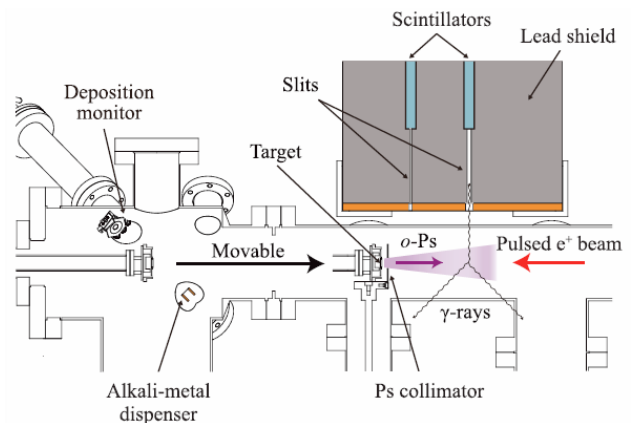


図3 Ps-TOF 実験装置 [6]

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ているので、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。

現在、本ステーションには、Ps-TOF 測定システムの他、以下が常設されている：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。

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。既存のリモートバルブのみによるインターロックシステムを導入した 2020 年度に続き、2021 年度は、B1F/1F 分岐後に各 1 台、SPF-B1 と SPF-B2 の実験ステーション直上流に各 1 台の計 4 台のゲートバルブをリモート制御式に交換し、インターロックシステムに組み込んで運用を開始した。

ビーム輸送コイル用の電源のうち、老朽化およびリモート制御に難のある電源 26 台を新しい電源に置き換え、また、放射光実験施設基盤技術部門の制御系チームによって新電源のリモート制御の整備が行なわれ、運用を開始した。ビームステアリング用の両極性電源 30 台も老朽化により故障が頻発して交換が必要だが、故障した場合には加速器第五研究系（入射器）から不要になった同じ仕様の両極性電源を支給していただくことで当面は対処する予定である。

SPF-A3 (TRHEPD ステーション) では、慢性的なビームタイム不足問題の当面の解決のための試料準備チェンバ整備を進めた。所内公募研究費などにより、AES 測定装置、液体窒素による試料冷却システムを導入した。これらの整備により、共同利用実験におけるユーザー利用が増加傾向にある。今後も、さらに多様な試料作製に対応できるよう継続して整備を進める。

2021 年度は、TRHEPD 法により、二次元準結晶 2 層グラフェンの構造決定 [10] がなされた。また、前年に公開された汎用表面構造解析フレームワーク “2DMAT” [11] において、分散 - 共分散行列の固有値解析による、原子配置の深さ方向に対する手法の感度を正確に見積る手法を確立し、6H-SiC(0001) 基板上に形成された Si₄O₃N₃ 構造で得られる TRHEPD 実験データを用いて実証した [12]。従来の TRHEPD 解析では、熟練した研究者がその経験を活かして原子配置を探索していた。2DMAT は、データ駆動科学的手法を駆使して、その試行錯誤プロセスを自動・高速化し、さまざまな困難（モデル構築の練度、初期配置に依存したローカルミニマムへのトラップ、計算時間など）を

克服し、ユーザーが未知の 2 次元物質の構造を簡便に決定できるようになることを目指している。今回、TRHEPD 法の感度を、客観的かつ定量的に正確に与える手法が確立されたことで、熟練者の経験に頼らず、一般ユーザーが簡便かつ短時間に解析を行うことができるようになりつつある。

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の実験ステーションの整備を進めている。また、放射光実験施設の角度分解光電子分光 (ARPES) 装置と共通化した試料ホルダの設計と導入も進行中である。2020 年度までに開発を進めてきた十字状の不感領域の無い新しい HEX 検出器については、LEED の観測に続いて、2021 年度には LEPD の観測にも成功した。

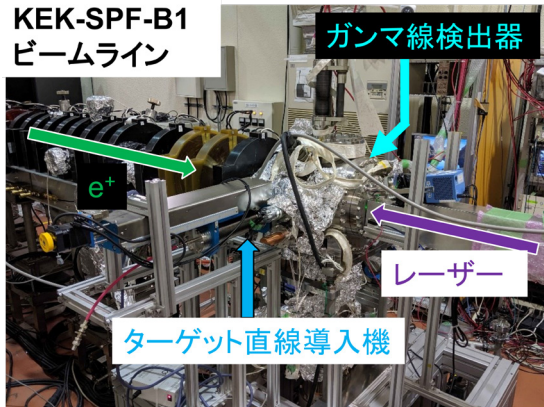
SPF-A4 では、LEPD や全反射高速陽電子回折 (TRHEPD) 実験で用いられているビーム輝度増強システムの改良実験も行なっている。2020 年度までに、高効率で非磁場領域へ陽電子ビームを引き出すことに成功しており、2021 年度はこのビームを陽電子再減速材へ収束するための磁場レンズの設計と製作を行なった。

SPF-B1 (汎用低速陽電子実験ステーション) には、単パルスモードで低速陽電子ビームを供給している。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。これまでの整備 [13-15] に加えて、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 年度には図 4 のセットアップを完成させて Ps レーザー冷却の原理実証実験への挑戦を開始した。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 (~10⁷ e⁺ s⁻¹) 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。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多重反射させ、また Ps はレーザー多重反射面に垂直な鉛直方向にシリカ板で閉じ込め、Ps とレーザー間の相互作用に十分な領域を確保する [14]。Ps 冷却用レーザーは、東京大学にてプロトタイプレーザー [16] を独自に開発し、KEK-SPF-B1 に移設した。この実験では装置内 1 × 10⁻⁶ Pa 程度の真空が維持されている。また、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 [13] を進め、レーザー冷却原理実証に向けた準備を完了しつつある。本セットアップは 2022 年度以降の Ps レーザー冷却実験にも用いる。

SPF-B2 (Ps-TOF ステーション) では、半導体表面における Ps 生成機構に関する研究が進んでいる。また、多孔

(a)

KEK-SPF-B1
ビームライン



(b)

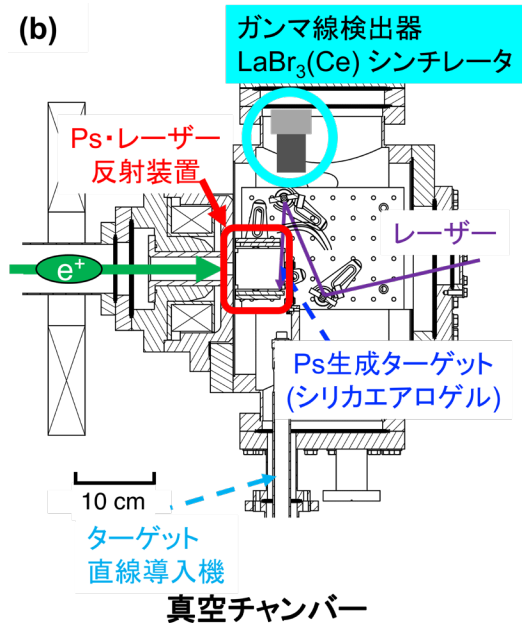


図4 Psレーザー冷却原理実証実験のセットアップ(文献[13]より転載)。(a) KEK-SPF-B1ビームラインに設置した実験装置の写真。(b) 鉛直上から見た真空チャンバー断面図。

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が行なわれている。2020年度は、4H-SiC(0001)表面から放出されるポジトロニウムの飛行時間の測定結果に関する成果[9]などが公表された。

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、新合成の超薄膜物質、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整備が進められているが、根本的な解決

策としては、専用リニアック強化による低速陽電子強度増強を進める必要がある。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。そのために必要となる実験ステーションの再配置とビームライン新分岐の建設などの検討を開始した。また、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、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、微小な試料や平滑性に多少乏しい試料表面も観測も期待できる。LEPDステーションを、全反射高速陽電子回折(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施設利用者に提供できるよう整備を進める。2021年度はLEPD *I-V*の測定による本格的な表面構造解析に必須となる装置類の開発と導入を進めることができたので、2022年度は、これらの新規開発・導入した装置類の立ち上げを行ない、できるだけ早くLEPD *I-V*カーブによる実際の表面構造解析を実施したい。

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。

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り、また、時間分解測定全による表面構造解析も可能となる。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] M. Maekawa *et al.*, *Eur. Phys. J. D* **68**, 165 (2014).
- [2] 兵頭俊夫, *固体物理* **53**, 705 (2018年11月号 p141).
- [3] Y. Fukaya *et al.*, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **52**, 013002 (2019).
- [4] S. Y. Tong, *Surf. Sci.* **457**, L432 (2000).
- [5] K. Wada *et al.*, *e-J. Surf. Sci. Nanotechnol.* **16**, 313 (2018).
- [6] S. Iida *et al.*, *J. Phys.: Condens. Matter* **28**, 475002 (2016).
- [7] A. Kawasuso *et al.*, *Phys. Rev. B* **97**, 245303 (2018)
- [8] A. Kawasuso *et al.*, *J. Phys.: Condens. Matter* **33**, 035006 (2020).
- [9] A. Kawasuso *et al.*, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **54**, 205202 (2021).
- [10] Y. Fukaya *et al.*, *Phys. Rev. B* **104**, L180202 (2021).
- [11] <https://www.pasums.issp.u-tokyo.ac.jp/2dmat/>
- [12] T. Hoshi *et al.*, *Comp. Phys. Commun.* **271**, 108186 (2021).

- [13] 石田明, 日本物理学会 第 77 回年次大会 (2022 年), 2022 年 3 月 16 日, オンライン開催.
- [14] A. Ishida *et al.*, “Laser cooling of positronium (Japanese)”, Photon Factory Activity Report 2019 **37**, 201 (2020).
- [15] 周健治他, 陽電子科学 **16**, 31 (2021).
- [16] K. Yamada, Y. Tajima, T. Murayoshi, X. Fan, A. Ishida, T. Namba, S. Asai, M. Kuwata-Gonokami, E. Chae, K. Shu and K. Yoshioka, Phys. Rev. Applied **16**, 014009 (2021).

PF の活動に関する統計データ（ビームタイム配分状況）

2021 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（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（2021/5-7 月, 2021/10-12 月, 2022/2-3 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）、配分最低評点（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を利用する課題も PF-PAC で審査されており、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、競争率が高い状況となっている。

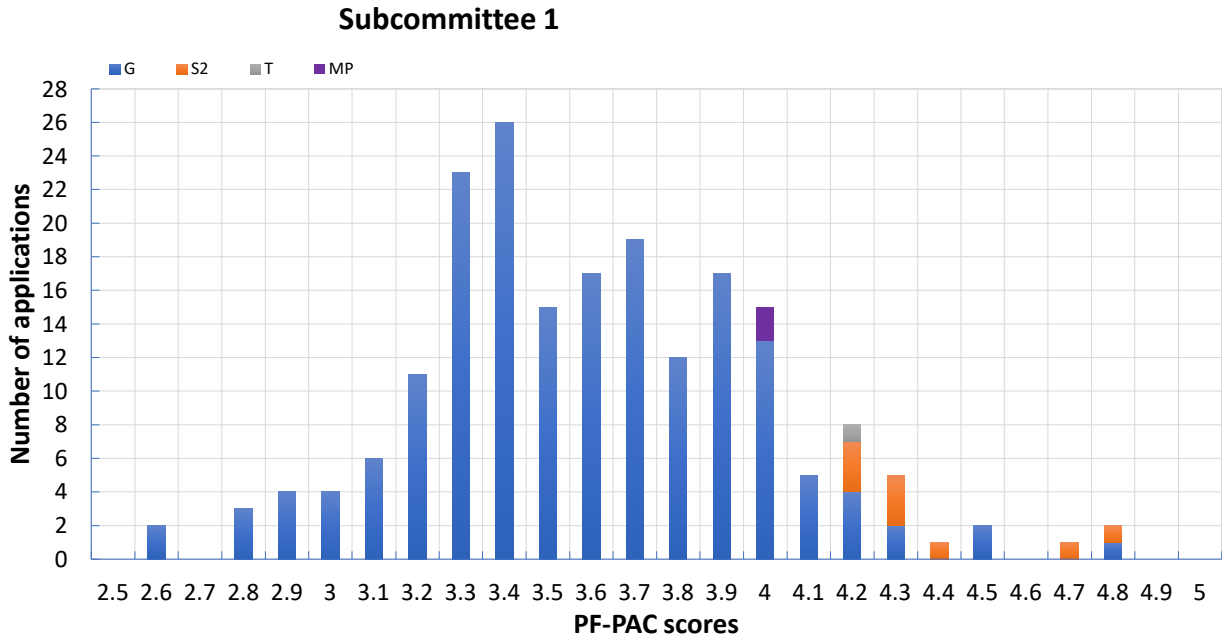


図 1 第 1 分科ビームライン群（真空紫外・軟 X 線ビームラインおよび低速陽電子ビームライン）の有効共同利用実験課題の評点分布

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

Beamline	Light Source	Subcommittee 1								
		2022/2-3			2021/10-12			2021/5-7		
		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	29	66%	3.3	28	66%	3.3	28	56%	3.5
BL-13A/B (VUV and Soft X-ray spectroscopy)	U	28	74%	3.2	26	77%	3.2	29	68%	3.2
BL-16A (Soft X-ray spectroscopy)	U	37	50%	3.3	36	59%	2.9	35	54%	3.0
BL-28A/B (VUV and Soft X-ray spectroscopy)	U	15	71%	3.6	13	81%	3.3	12	99%	3.5
BL-3B (VUV and Soft X-ray spectroscopy)	BM	5	100%	3.4	5	100%	3.4	6	107%	3.3
BL-11A (Soft X-ray spectroscopy)	BM	20	93%	2.9	17	98%	2.9	18	100%	2.9
BL-11B (Soft X-ray spectroscopy)	BM	21	87%	3.1	17	100%	3.1	16	98%	3.1
BL-11D (VUV and SX optics)	BM	9	96%	3.1	9	102%	3.1	10	102%	3.1
BL-19A/B (Soft X-ray Microscopy (STXM) and Spectroscopy)	U	25	96%	2.6	24	95%	2.6	21	87%	3.2
BL-20A (VUV spectroscopy)	BM	5	81%	3.5	5	97%	3.3	6	100%	3.3
BL-27A (Radiation biology and XPS for radioactive samples)	BM	17	100%	2.8	17	99%	2.8	16	100%	2.8
SPF (Slow positron facility)	SP	13	67%	3.5	12	70%	3.5	11	69%	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。

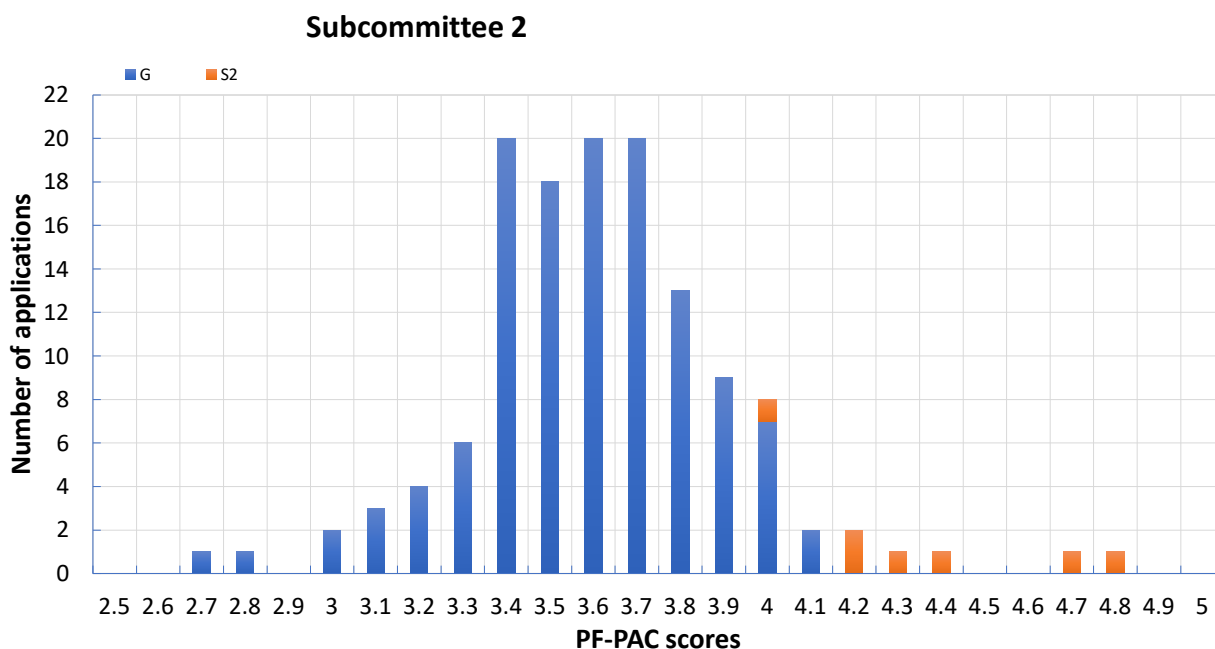


図2 第2分科ビームライン群（硬X線回折・散乱実験用ビームライン）の有効共同利用実験課題の評点分布

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

Beamline	Light Source	Subcommittee 2								
		2022/2-3			2021/10-12			2021/5-7		
		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	29	73%	3.4	29	62%	3.4	27	53%	3.3
BL-4C (X-ray diffraction)	BM	23	87%	3.4	23	90%	3.4	28	82%	3.4
BL-4B2 (X-ray powder diffraction)	BM	8	102%	35.0	8	99%	3.5	7	100%	3.6
BL-6C (X-ray diffraction)	BM	17	55%	2.8	16	65%	2.8	13	69%	3.0
BL-7C (Multipurpose)	BM	9	94%	3.5	9	108%	3.5	9	100%	3.4
BL-8A,8B (X-ray diffraction)	BM	47	97%	2.7	29	98%	2.7	26	100%	3.1
BL-10A (X-ray diffraction)	BM	8	84%	3.0	8	84%	3.0	5	82%	3.0
BL-14A (X-ray diffraction and detector studies)	VW	11	99%	3.2	11	100%	3.1	13	100%	3.1

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-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。

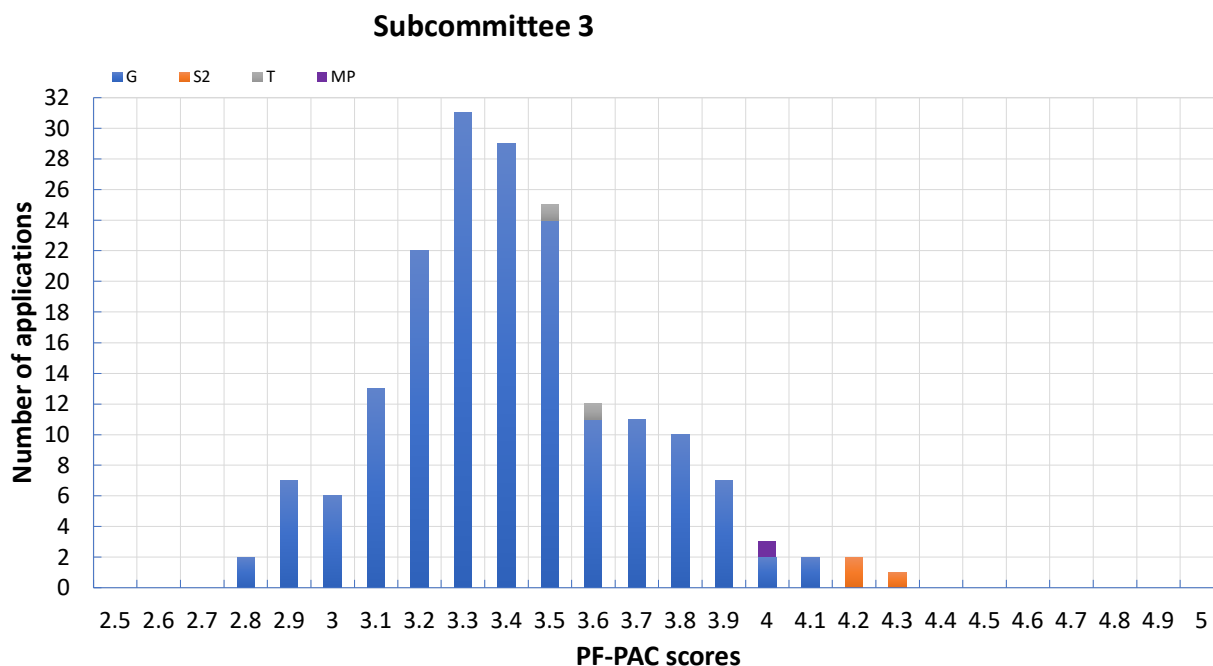


図3 第3分科ビームライン群（硬X線分光ビームライン）の有効共同利用実験課題の評点分布

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								
		2022/2-3			2021/10-12			2021/5-7		
		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	19	49%	2.8	19	101%	2.8	17	100%	2.8
Beamlines for XAFS (BL-9A, 9C, 12C)	BM	123	92%	3.0	118	100%	2.8	110	96%	2.8
BL-15A1 (Microbeam XAFS and XRD)	SGU	15	100%	3.3	12	100%	3.3	16	100%	3.5
AR-NW2A (Time resolved XAFS and XRD)	U	16	84%	3.7	13	96%	3.1	15	92%	3.2
AR-NW10A (High energy XAFS)	BM	123	66%	3.3	51	66%	3.4	110	100%	3.1
BL-27B (Radiation biology and XAFS for radioactive samples)	BM	27	99%	2.9	27	98%	2.9	25	94%	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200件以上の実験課題を実施している。タンパク質結晶

構造解析では、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%に近づいている。

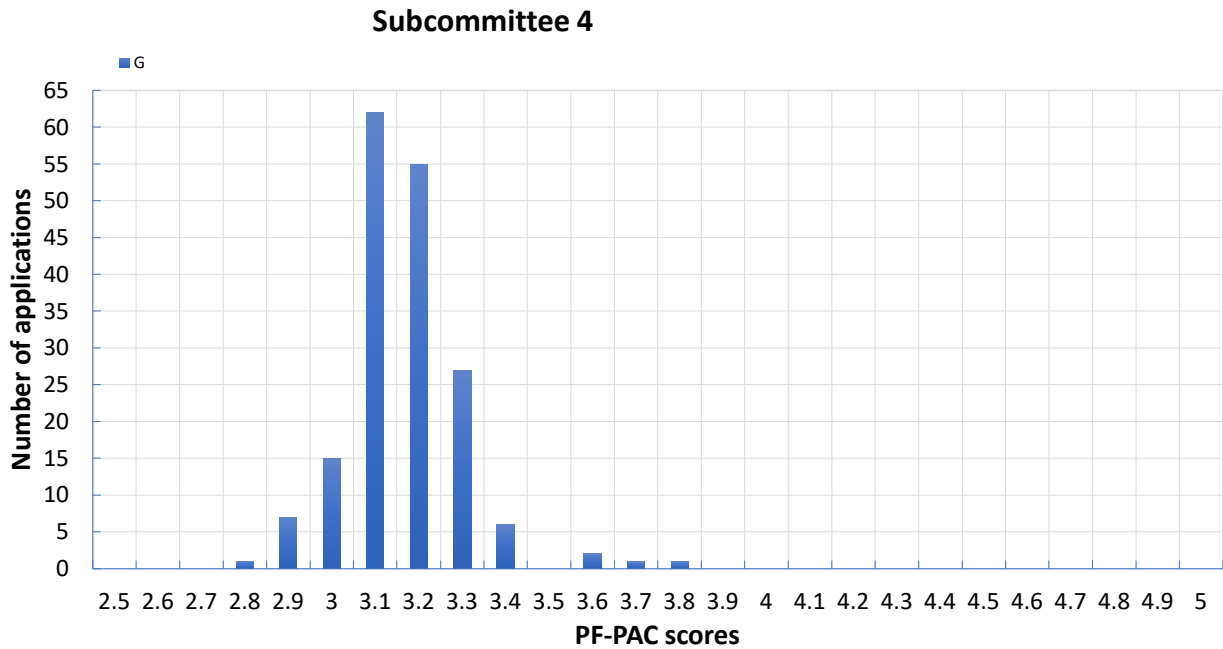


図4 第4分科ビームライン群 (タンパク質結晶構造解析) の有効共同利用実験課題の評点分布

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	2022/2-3			2021/10-12			2021/5-7		
		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	142	97%	2.8	140	95%	2.8	154	100%	2.8

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100件近くの実験課題を実施して

おり、ユーザーニーズが高いが、2021年度は年間の利用
 可能時間が2割程度増加したため、配分率は100%に近く
 なった。

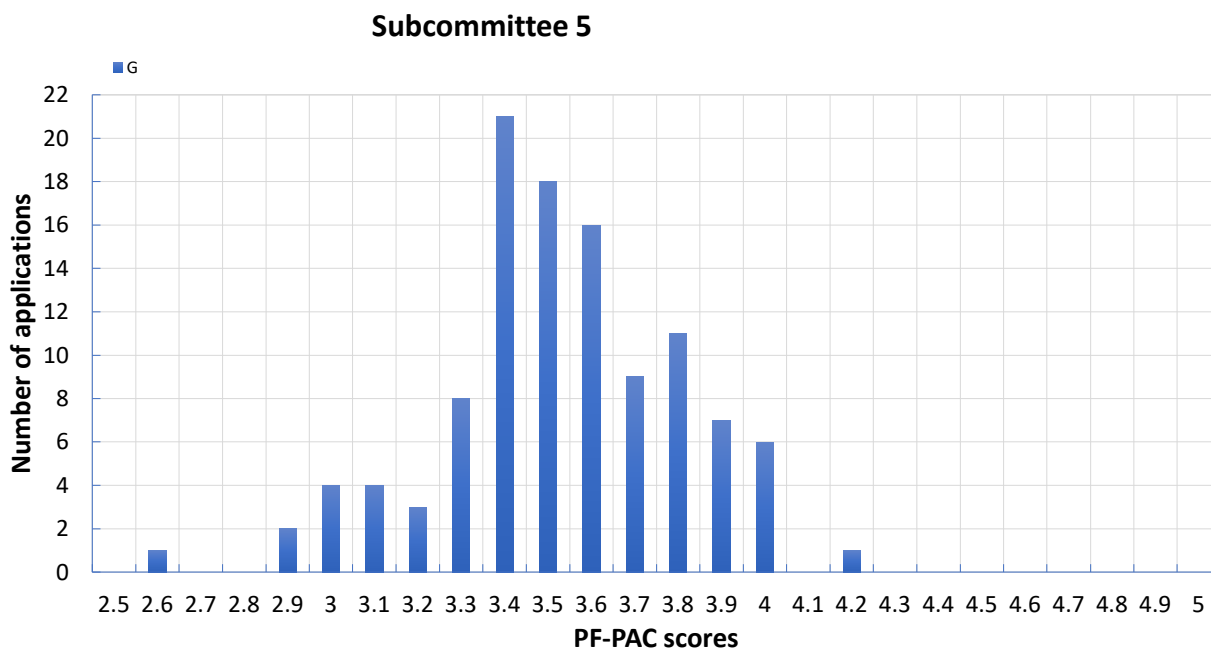


図5 第5分科ビームライン群 (X線小角散乱ビームライン) の有効共同利用実験課題の評点分布

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	2022/2-3			2021/10-12			2021/5-7		
		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	84	96%	2.9	82	100%	2.9	93	99%	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PF-ARの常時シングルバンチ運転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。

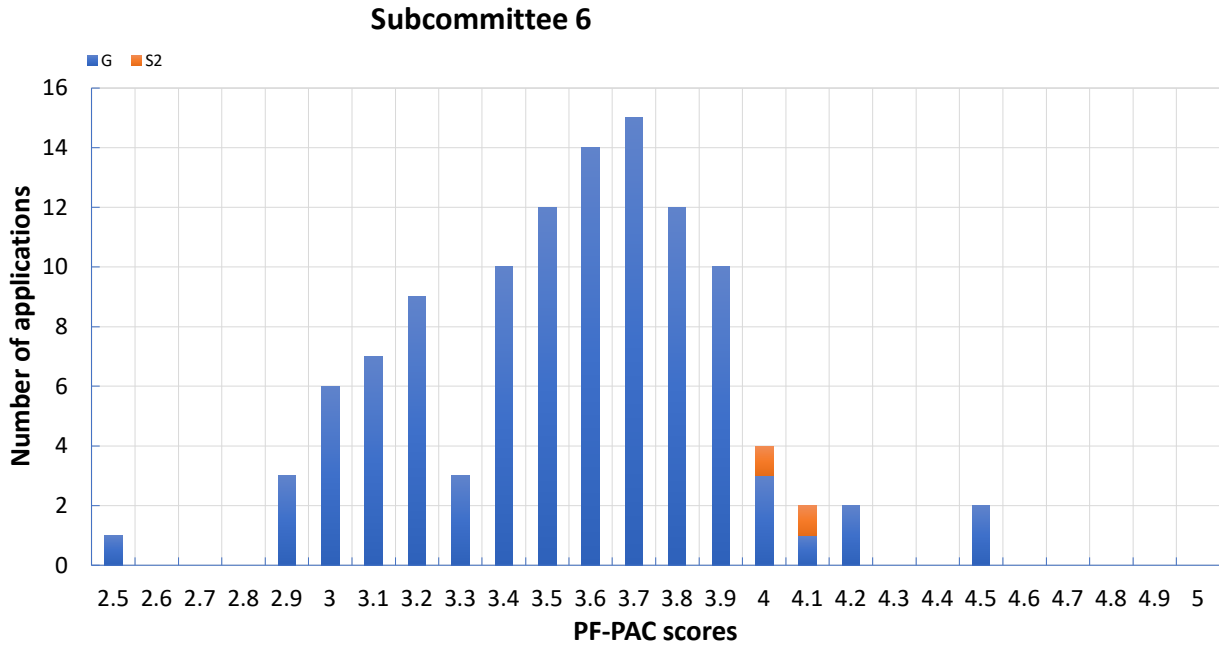


図6 第6分科ビームライン群 (高圧・超高速時間分解・X線イメージングビームライン) の有効共同利用実験課題の評点分布

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	2022/2-3			2021/10-12			2021/5-7		
		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	7	102%	3.5	6	102%	3.1	7	102%	3.1
BL-14B (X-ray optics)	VW	12	68%	3.0	12	93%	2.5	14	84%	2.5
BL-14C (X-ray imaging)	VW	15	73%	2.9	14	98%	2.9	17	102%	2.9
AR-NE7A without high pressure experiment (X-ray imaging)	BM	9	63%	3.6	9	69%	3.6	6	92%	3.6
BL-20B (X-ray topography and diffraction)	BM	8	100%	3.0	7	100%	3.0	7	100%	2.9
BL-18C (High pressure science)	BM	21	100%	3.2	21	98%	3.2	17	95%	2.9
AR-NE1A (High pressure science)	MPW	13	82%	3.5	13	77%	3.5	13	85%	3.5
AR-NESC (High pressure science)	BM	10	90%	3.2	10	69%	3.0	11	80%	3.0
AR-NE7A, high pressure experiment only	BM	9	63%	3.6	9	69%	3.6	6	92%	3.6
AR-NW14A (Time resolved experiment)	U	17	35%	3.5	17	52%	3.3	15	100%	3.6

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 ($\Delta E/E$) $\times 10^{-4}$	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	
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	20

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	21
BL-14B	2.2 (Vertical)	Flat Double Crystal Si(111)	None	10 ~ 57	5×14		2	22
BL-14C	1.96 (Vertical)	Double Crystal Si(111), Si(220)	None	5 ~ 100 or white	6×70		2	23, 24
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	25
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	25, 26
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	27 - 29
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	30
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	31, 32

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

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	33
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	34 - 36
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	37
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	38 - 40
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	41

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] M. Nomura and A. Koyama, KEK Report, 95-15 (1996).
- [21] Y. Satow and Y. Iitaka, Rev. Sci. Instrum. **60**, 2390 (1989).
- [22] M. Ando *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. **A246**, 144 (1986).
- [23] Photon Factory Activity Report 1999, #17, A 92 (2000).
- [24] Photon Factory Activity Report 1999, #17, A 103 (2000).
- [25] N. Igarashi *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **425**, 072016 (2013).
- [26] H. Takagi *et al.*, Appl. Phys. **120**, 142119 (2016).
- [27] N. Igarashi *et al.*, AIP Conf. Proc. **879**, 812 (2007).
- [28] N. Igarashi *et al.*, J. Synchrotron Rad. **15**, 292 (2008).
- [29] Y. Yamada *et al.*, J. Synchrotron Rad. **20**, 938 (2013).
- [30] H. Konishi *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **372**, 322 (1996).
- [31] Y. Yamada *et al.*, AIP Conf. Proc. **1234**, 415 (2010).
- [32] M. Hiraki *et al.*, AIP Conf. Proc. **1234**, 673 (2010).
- [33] T. Kikegawa *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **66**, 1335 (1995).
- [34] T. Mori *et al.*, AIP Conf. Proc. **705**, 255 (2004).
- [35] H. Kawata *et al.*, AIP Conf. Proc. **705**, 663 (2004).
- [36] Y. Inada *et al.*, AIP Conf. Proc. **879**, 1230 (2007).
- [37] M. Nomura *et al.*, AIP Conf. Proc. **882**, 896 (2007).
- [38] L. M. G. Chavas *et al.*, J. Synchrotron Rad. **19**, 450 (2012).
- [39] L. M. G. Chavas *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **425**, 012008 (2013).
- [40] L. M. G. Chavas *et al.*, J. Synchrotron Rad. **20**, 838 (2013).
- [41] 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 $10^{13} \sim 10^9$	10-12
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 $10^{12} \sim 10^{11}$	13, 14
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 $10^{12} \sim 10^8$	15
BL-27A	5 × 0.5	Double Crystal InSb (111)		1800~ 4000		2000	16

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

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] K. Amemiya *et al.*, *AIP Conf. Proc.* **1234**, 295 (2010).
- [14] K. Amemiya *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.* **425**, 152015 (2013).
- [15] K. Ito *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 2119 (1995).
- [16] H. Konishi *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **372**, 322 (1996).

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	100 eV - 35 keV	1.2 μs	≤ 50 Hz	5×10^7 e ⁺ /s (before brightness enhancement)	1, 2, 3
SPF-A4	50 eV - 1 keV	1.2 μs (long-pulse mode), 200 μs - 20 ms (pulse- stretching mode, ≤ 5.2 keV)	≤ 50 Hz	5×10^7 e ⁺ /s (before brightness enhancement)	
SPF-B1	100 eV - 35 keV	1-10 ns	≤ 50 Hz	5×10^6 e ⁺ /s	4, 5
SPF-B2	100 eV - 35 keV	1-10 ns	≤ 50 Hz	5×10^6 e ⁺ /s	6, 7

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. Michishio, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **100**, 254102 (2012).
- [5] K. Michishio, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods* **785**, 5 (2015).
- [6] H. Terabe, *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.* **443**, 012075 (2013).
- [7] S. Iida, *et al.*, *J. Phys.: Condens. Matter* **28**, 475002 (2016).