

毎年度最後の PF ニュースでは、物構研副所長（つくばキャンパス担当）より「物構研つくばキャンパスだより」として、物構研あるいは KEK 全体に関する様々な話題を、つくばキャンパスに限定せずに幅広くお伝えしています。

まず、新領域開拓室に関する近況をご報告します。新領域開拓室は、統合型量子ビーム科学の構築に向けて、量子ビーム施設を連携・統括し、量子ビームの種類によらない共通技術開発と人材育成を行うとともに、国内外の各施設にも展開を図ることで、新領域開拓機能を強化することを目的に、2023 年度に発足しました。現在、量子ビーム施設連携部門、AI・DX 開発部門、イメージング・顕微開発部門、および非破壊分析開発部門の 4 部門で活動しています。このたび、2026 年度概算要求において教育研究活動充実のための予算が認められたことを受けて、「量子ビーム研究開拓部門」の新設を検討しています。この新部門は、異種ビームを同時利用する手法を開拓して分野と手法の融合による新領域の創出を図ることを目的とし、昨年完成した BL-11 におけるマルチビーム利用研究を強力に推進するとともに、超伝導加速器を用いた量子ビーム源などの新ビームを利用する手法の開拓を担います。なお、施設間連携を強化してこうした取り組みを加速するために、東京大学物性研究所（ISSP）附属中性子科学研究施設の益田隆嗣教授、および同研究所附属極限コヒーレント光科学研究センターの板谷治郎教授が、クロスアポイントメントとして物構研に着任されます。関連して、2026 年 1 月 5 日に東京大学柏キャンパスにおいて、第 1 回 ISSP-IMSS 研究会「レーザー、放射光、陽電子ビームの融合による物質・生命科学の新展開」を開催し、物性研と物構研の互いの強みを最大限に活かした量子ビーム融合に向けたキックオフを行いました。なお、第 2 回研究会は中性子、ミュオンを中心とした内容で開催することを検討しています。

量子ビームの融合による新たなフロンティア開拓を目指す新施設として検討を行っている「量子マルチビーム施設」については、文部科学省「ロードマップ 2026」への申請（4 月下旬公募メ切）に向けて準備を進めています。この計画は、超伝導線形加速器による自由電子レーザー、放射光、陽電子、さらには高次高調波レーザーなど、最先端の量子ビームを有機的に活用して、極限的な量子現象を理解することで、物質・生命の機能の根源の解明を目指すものです。このたび、施設の愛称を暫定的に MB-LINQ (Multi quantum-Beam facility with superconducting LINac for material-Quantum-life sciences) と定め、2026 年 1 月 1 日に Web ページを開設しました (<https://www2.kek.jp/imss/mb-linq/>)。新施設 MB-LINQ と既存施設 PF の相乗効果によって、つくばキャンパスにおける統合型量子ビーム科学を大きく発展させることができると期待しています。

PF-UA の集い等でお伝えしている通り、共同利用実験のための旅費について大きな変更があり、KEK 全体の方

針として、従来のような形での支給は行わないことになりました。ただし、大学共同利用機関として、将来を担う人材を育成することは極めて重要なミッションですので、学生や若手研究者を対象に、新たな仕組みによる支援を行います。詳細はまだ検討中ですが、対象となる方に自ら申請していただき、選考を行った上で旅費を支給することを予定しています。また、加速器やビームラインの運用に携わる方、およびそれらの装置の性能向上に関わる方や一般課題への支援を行う方、あるいは、一時的に研究室に外部資金がないなど緊急性が高いと判断される場合について、旅費の支給を検討しています。大きな方針転換になりますが、対象とする若手の範囲を広げるなど、少しでもプラスになるような方策を実施していきたいと考えていますので、ご協力のほどよろしくお願いたします。

続いて、KEK 内での表彰について紹介します。今年度から、機構長賞として「研究活性化表彰」と「機構運営高度化表彰」が創設されました。詳細な内容は「ユーザーとスタッフの広場」に記載されていますが、ここでは特に「機構運営高度化表彰」について紹介します。これは、基盤技術や装置の改善、省エネルギー化、あるいは先進的な工夫や挑戦を通じて KEK の運営の高度化に貢献した職員に授与されるもので、今年度は「J-PARC MLF NOVA における持続可能な運営戦略」に対して、物構研の本田孝志さん、大下英敏さん、大友季哉さんが受賞しました。内容としては、MLF の高強度中性子全散乱装置 (NOVA) の多目的化と研究を通じて、業務の効率化や合理化を進めるとともに、特定の担当者に頼らない「脱・属人化」という観点を取り入れた活動とその成果が評価されたものです。近年、研究の多様化が急速に進行する中で、物構研の量子ビーム施設では、限られたマンパワーでいかに研究のダイバーシティを確保するかを模索しています。それぞれのビームライン、あるいはビームライン群において、程度の差こそあれ、自動化や DX による業務の効率化や合理化を進めているところですが、本田さんたちが徹底して推進した「脱・属人化」は、そのための重要なポイントの一つになると思います。なお、KEK 技術賞については、加速器第 6 研究系の塩澤真未さん、田中窓香さん、加速器第 5 研究系の設楽暁さんが「放射線量測定フィルムの加速器分野への応用と測定支援」に対して、共通基盤研究施設の牛谷唯人さんが「超冷中性子源用極低温熱交換器の製作」に対して、それぞれ受賞しました。

KEK の教員（承継職員）は 63 歳が定年となっており、物構研では特別教員もそれに準ずる扱いとしています。2025 年度末で該当するのは、放射光実験施設の間瀬一彦さん、宇佐美徳子さん、杉山弘さん、放射光科学第二研究系の木村正雄さん、加藤龍一さん、そして中性子科学研究系の伊藤晋一さんです。皆さんの今までの貢献に感謝するとともに、今後も引き続き活躍されることを祈ります。

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 惠郷博文
(2026年1月5日付け)

運転状況

電子陽電子入射器は10月6日よりPFリング、11月4日よりPF-AR、11月5日よりSuperKEKBメインリングへ同時トップアップ入射運転を実施した。SuperKEKBメインリングは12月22日、PFリング及びPF-ARは12月24日にビーム入射を停止して、2025年第2期運転を終了した。PF地区基幹整備に伴う年末年始の冷却系切替通水作業があり、2025年度第3期の入射器立ち上げが2026年1月7日であるため、今冬期はメンテナンス日数が少なく、簡易作業と故障対応に留める。立ち上げ後、1月26日までビーム調整を行なってPFリングとSuperKEKBメインリングへのビーム入射を開始、2月2日にPF-ARにビーム入射を再開する予定である。

入射器調整

今期はSuperKEKB HER (7 GeV 電子ビーム蓄積リング) へのビーム入射に用いられる新型RF電子銃やビーム伝送ライン (HER-BT) に設置したエネルギー圧縮システム (ECS: Energy Compression System) などの新装置の立ち上げ調整を行った。これらの機器はRF加速空洞を用いるため、RFコンディショニングを先に行なって定格電力での安定運転が行えるようにした後、他の入射器機器と協調させて設計ビーム性能を引き出すビームコミッションを行った。入射器はビーム運転モードを各リングの要請に応じて50 Hzで切り替えることができるため、SuperKEKB LER (4 GeV 陽電子ビーム蓄積リング) やPFリング、PF-ARへのビーム入射と並行して、これらの新機器の調整を行うことができる。

放射光光源用電子ビーム対応

PFリング入射ビームのエネルギージッターが大きくなることもあり、その原因調査を行ったところ、熱電子銃のグリッドパルサーのグリッド電圧が最適値から外れていることがわかった。通常、PFリングへの入射運転中には電子銃の診断を行うことができない。そのため、熱電子銃による模擬7 GeVビームを作成して、第3ビームスイッチヤード (SY3: 入射器出口のビーム入射先切替部) に整備した高精度ビーム診断ライン (通常、HER 7 GeV ビーム診断に使用) に導き、ビーム状態を解析して得られたものである。グリッドパルサーの調整によりエネルギージッターは約40%改善したが、最適値への調整はLERへのビーム入射にも影響するため、次期のビーム立ち上げ時に行う予定である。

10月7日、9日に第5セクター後半部でビーム電荷量の

損失が多く、PFリングへの入射ができなくなった。ビーム軌道フィードバックが誤作動し、第5セクターのパルス電磁石による水平方向軌道調整が過度になっていた。フィードバックを一時停止して、この電磁石の運転パラメータを手動調整して復旧させた。

10月20日、PFリングへのビーム伝送ライン (PF-BT) でビーム電荷量が削れているようにみえる事象が発生した。PF-BT内ビームモニタの制御装置でHER-BTビーム位置モニタの調整も行なっており、EPICS-入出力コントローラを再起動した際にPF-BT用パラメータが異常になったと考えられる。再調整により正常にビーム運転が再開できた。

11月26日、入射器定期メンテナンス時の作業でトンネル内入射器側からPF-BTへの扉を誤って開いたため、安全系のインターロックが作動し、PFリングのビームダンプが発生した。再発を防ぐため、リング加速器運転時における入射器内作業の重要注意事項として教育を徹底する。

11月28日、PF-BTでビーム電荷量損失が発生してBT終端までビームが通らないようになった。PF-BTでのエネルギーフィードバック状態を確認するとエネルギーを上げる方向に動作し続けていた。原因を調査したところ、Bセクター第2加速ユニットのクライストロン受電部のIVR (Induction Voltage Regulator) が動作異常となってクライストロンのRF出力が低下していた。IVRの調整によってクライストロン出力が安定し、エネルギーフィードバックと電荷量が回復した。

今期は、運転に伴う熱電子銃の出力電荷量の減少が顕著であった。電子銃用高圧ステーション内の冷却ファンやヒーター電源を交換しても改善されなかったため、カソード製作ロットに起因するカソード固有の特性変化であると考えられる。次期運転ではカソードヒーターを調整して出力電荷量を回復させ、また、電荷量が一定となるように電子銃の適宜調整ができるようにする予定である。また、イベントジェネレータ (EVG) の不調によりトリガー抜けが発生し、ビーム入射が停止することが数度あった。時刻補正後の割り込みエラーや地震が原因で発生していたようで、EVGを再起動で復旧した。

現在、多くの入射器機器の経年劣化やシステム複雑化により、ビーム運転の停止頻度が上昇傾向にある。今後は機器の近代化や制御の高度化によりビーム運転の自動安定化を目指す。

PF リングおよび PF-AR 第 2 期運転の概要

第 2 期のユーザーランとして PF リングは 10 月 6 日(月) から立ち上げを開始し 10 月 10 日(金) よりユーザーランに入り、PF-AR は 11 月 4 日(火) から立ち上げを開始して 11 月 7 日(金) にユーザーランに入った。両リングともに 12 月 24 日(水) 9:00 に運転を停止して冬季メンテナンス期間に入っている。この期間、PF リングでは 4 極電磁石電源故障など老朽化に起因するトラブルが散発した。詳細は次節にて記載する。PF-AR では、いくつかのトラブルはあったものの、長時間のユーザーラン停止に至る深刻な障害は起きていない。PF リングおよび PF-AR ともに、既存のハードウェアを大きく変更することなく低エミッタンス化するためのマシンスタディを継続的に実施している。それぞれについて詳細を記述する。

PF リングの運転状況

図 1 に PF リング第 2 期の運転状況(ビーム電流およびビーム寿命)のグラフを示す。立ち上げ直前に超伝導ウィグラーの液体ヘリウム移送管(トランスファーチューブ)の断熱真空トラブルによって冷却が出来なくなったため、第 2 期はウィグラーを励磁せず当該ビームラインは閉鎖となった。その後、2026 年 1 月には修理が完了したため第 3 期は運転再開の見込みとなっている。

超伝導ウィグラーにより放射減衰効果が小さくなったことに起因して、従来はハイブリッド運転時のみで問題になっていた進行方向 4 極ビーム不安定現象がマルチバンチ運転時に発生することが判明した。そこで、加速器立ち上げ

期間中に急遽ビーム調整時間を確保して原因調査と抑制手法調整を実施した。その結果、ビームのフィルパターン調整(250 → 130 bucket)と、RF 電圧の調整によって不安定現象を回避できることが判明したためこの状態でユーザー運転に入ることを決定した。その後、ハイブリッド運転時にも進行方向ビーム不安定はほぼ起きておらず、この手法が効果的であることも確認できた。バンチ電流が増えることで従来と比較してビーム寿命が短くなり入射頻度が上がることになったが、これに伴う放射線レベル上昇は許容範囲であった。今後、不安定現象を根本的に抑制するためにはフィルパターン調整の他にフィードバック系のうち信号発生器からデジタル信号処理装置までの経路の改善と、最終段の電力増幅器およびキッカー空洞からなるハイパワー系の見直しを計画している。第 3 期の運転のビーム測定を通して根本原因の調査を引き続き実施する。

第 2 期運転期間中には、蓄積リング老朽化に起因する大きなトラブルが 2 件発生した。11 月 21 日(金) ビーム輸送路の偏向電磁石電源(BT-BM)を制御している CAMAC 電源の故障でビーム停止した。電源交換を実施して復帰している。11 月 24 日(月・祝) 11:26 には 4 極電磁石電源(Q3)のインターロックによりビームダンプした。これは冷却 FAN が停止したことによる温度上昇インターロックであることが判明したため、電源前面からスポットクーラーを使用した冷却増強や工場扇で強制排気する対処をおこなった。この仮復旧状態のままユーザー運転を継続し、第 2 期終了後に本格的な交換を実施する方針とした。周辺および本体の安全確保には十分注意を払って対処しており

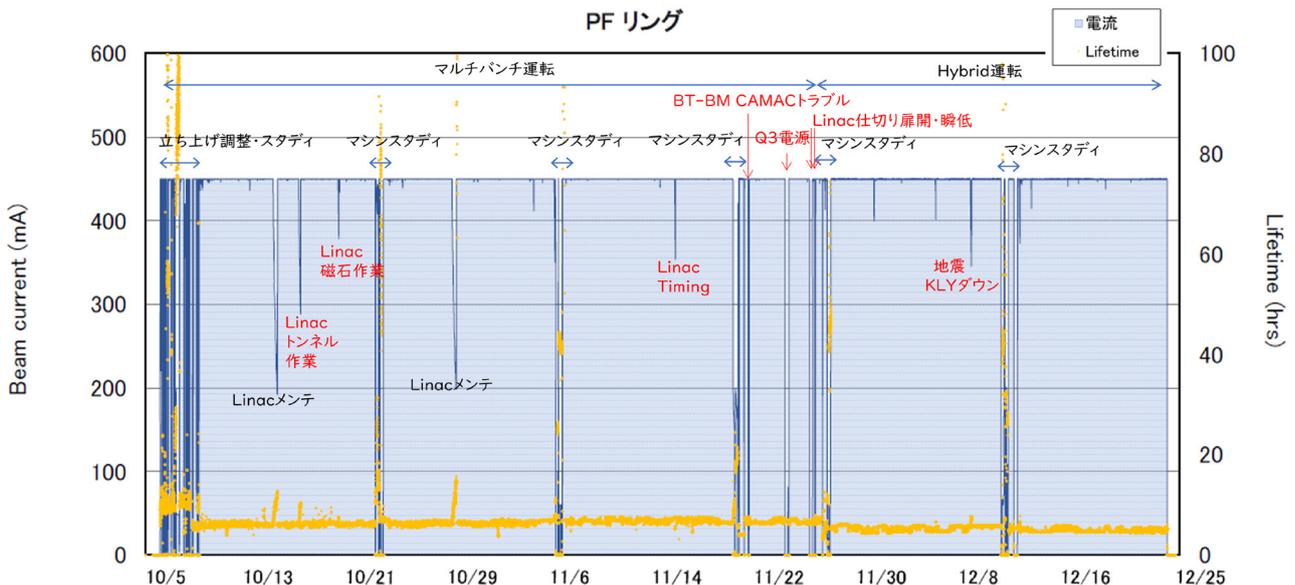


図 1 PF リングの運転状況。

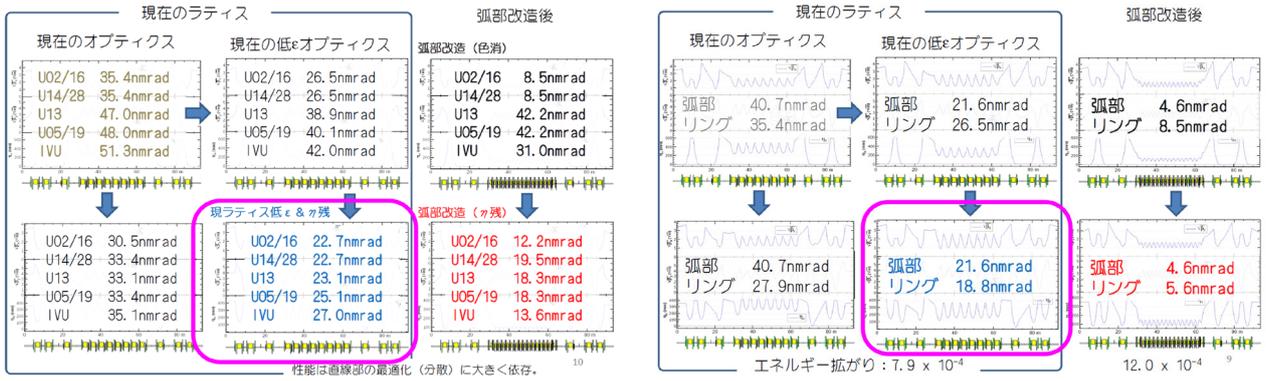


図2 現在のラティス（磁石配列）のままオプティクス（光学関数）を変更した場合に達成可能なエミッタンスと、ビームラインごとの実効エミッタンス計算値。上段は直線部の分散関数をゼロにする通常的设计であり、下段が分散関数を残して実効的なエミッタンスを下げる設計。マゼンダ色で囲った部分を目指して調整を行っている。

問題は無い。

11月26日（水）9:00からLinacメンテナンスに入りPFリングはボーナス運転中であつたところ、9:23に作業員が第3スイッチヤードからPF-BTにつながる鉄扉を開けたためPFリングがインターロックにより停止した。これは放射線安全の面では正しい動作であるが、PF運転中に可能な作業範囲の確認や鍵の貸し出し手続きに不備があつたことが原因である。Linacにはできるだけ早期にPFユーザー運転を再開できるようメンテナンス項目を調整していただき、13:30から調整開始して14:00から入射再開、14:30にはユーザー運転を再開することができた。再発防止策については今後も検討する。

同日11月26日18:43に東京電力からの受電電力に瞬時電圧低下（16.8%程度、約290ms）が発生し、PFリングとPF-ARが同時にビームダンプした。このときPFリングの真空インターロックPLCが停止しPF-Ring Ready信号が

落ちたことによりLinac運転にも影響が出ている。

PFリングのエミッタンスを現在の36nm.radから約19nm.radまで低減して高輝度化するマシンスタディを実施している。これは昨年度に老朽化した中型電源に変わる新電源を導入できたことが功奏している。リングの弧部（アーク部分）でのベータatron位相進みを増やしてビームサイズを減少させることと、直線部に分散関数を意図的に残すことの両方の組み合わせによって「実効的」なエミッタンス低減を目指した設計である。図2に示すように各ビームラインによってそれぞれ効果は異なる。このオプティクス（光学関数）でビーム蓄積および入射が出来ることは第2期のユーザー運転で確認できたため、第3期では試験的にユーザービームラインでの測定を実施することを計画している。今後も進めていきたい。参考のため、図2ではアーク部分のラティス（磁石配列）を変更した場合のエミッタンスも記載している。

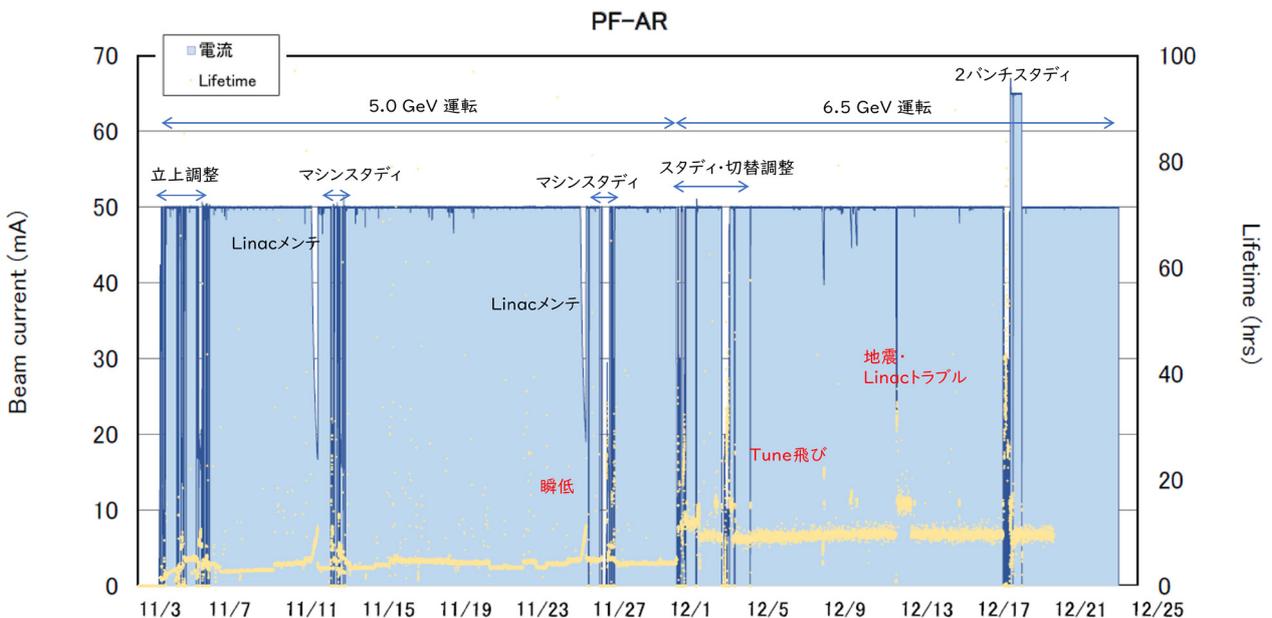


図3 PF-ARの立ち上げ開始。

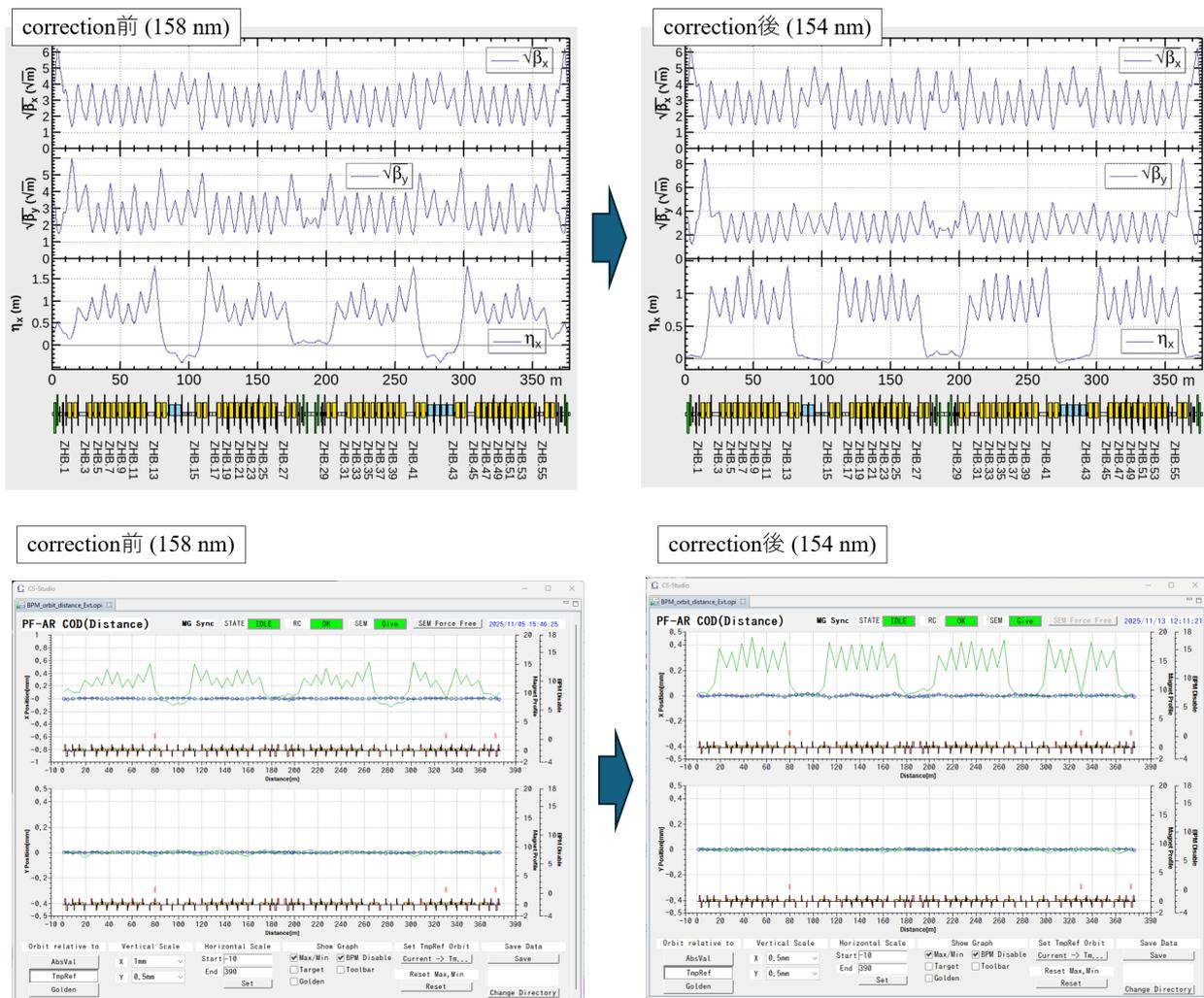


図4 オプティクス補正前後の計算値(上)と、分散関数の測定値(下)。実測データのプロットでは水平軌道の縦軸が異なっており、ここでは形状のみに着目する。補正後は計算値に近い応答になっている。

PF-ARの運転状況

図3に第2期のビーム電流および寿命の履歴を示す。立ち上げ直前に4極電磁石電源の故障が発生したものの、職員とメーカーの協力によって修理を完了し、予定通りに運転開始することができた。立ち上げ調整は11月4日(火)から開始して順調に進行し、11月7日(金)からユーザーに入っている。

11月4日(火)から立ち上げ調整時にテストビームラインのターゲット調整をしたところ、最初に試行したオプティクスでは想定していた収量が得られなかった。その後のマシンスタディによって、実際のオプティクスと設計値との間に差異があることが判明したため、補正を行い想定通りのビーム応答となることが確認できた。結果を図4に示す。次回の5 GeVユーザー運転(2026年度第1期に予定)ではこのパラメータでテストビームライン運転が可能になる見込みである。6.5 GeVでのテストビームライン運転は想定通りの収量で問題無く実施できている。

11月20日(木)には現在の“middle-low”エミッタンス

からさらにエミッタンスを下げた“low emittance”オプティクスへ向けたビーム調整スタディを実施した。詳細は後日の報告とするが、新オプティクスでもビーム入射と蓄積が可能であることが実証された。今後も調整を進めてより高輝度なビームをユーザーに提供できるよう進めていく。

人事異動

2026年1月1日付けで、Bian Baoyuan氏が広島大学の博士研究員として採用された。これまでの研究を活かして加速器の真空に関する研究に従事する予定である。

放射光実験施設の現状

放射光実験施設長 五十嵐教之
(2026年1月21日付け)

本号では、これまで各所にご協力をいただきながら建設を進めてまいりました、開発研究多機能ビームライン BL-11A, -11B の現状について紹介したいと思います。

開発研究多機能ビームライン BL-11A, -11B の建設 (プロジェクト責任者：若林大佑)

PF では、高度化および次期光源計画を見据えた長期的な基盤技術の開発を目的として、開発研究多機能 (R&D) ビームライン BL-11A, -11B の建設を進めてきました。本ビームラインは、将来の放射光施設を支える技術基盤の確立とともに、開発研究を通じた人材育成の場となることを目指しています。R&D ビームラインの検討は 2020 年度に開始され、HiSOR, UVSOR, ISSP-SOR と協力しながら R&D ビームライン検討会を定期的に開催してきました。検討会では、建設に向けた技術的課題の整理や、具体的な開発プロジェクトの提案が行われてきました。また、2022 年度および 2024 年度には PF 研究会を開催し、ユーザーの皆さまとともに、R&D ビームラインおよび将来光源で展開されるべきサイエンスについて議論を重ねてきました。2023 年度に本格的な建設を開始してから約 2 年半、上流側から順に設置・調整を進め、ようやく 2025 年秋にビームラインが完成を迎えました。本紹介記事では、建設の概要と初期調整、ならびに試験測定の結果についてご紹介します。

R&D ビームラインでは、開発研究を進める中でビームライン基盤技術の高度化を図るとともに、放射光施設に関わる人材育成に貢献することを重要な目標としています。そのため建設に当たっては、可能な限り業者に頼らず、測量や光学素子の設置・調整、ダクトの接続などを自分たちの手で行いながら進めてきました。なかでも最も厳しい工程となったのが、2025 年度夏期の加速器停止期間中の作業です。この期間だけで、回折格子とシャッター、8 枚のミラー、6 台のスリットを集中的に設置・調整しました。限られた期間での作業となりましたが、若手スタッフ

を中心に PF の多くの職員に加え、HiSOR, UVSOR, 慶應義塾大学のスタッフ・学生の皆さんにも協力いただきました。業務委託スタッフを除いても、2025 年度夏期だけで計 27 名が建設作業に参加しました。その結果、2025 年度第 2 期運転からの調整開始を無事に達成することができました。この場を借りて、建設に関わってくださったすべての方々に感謝申し上げます。

R&D ビームラインの大きな特長の一つが、2 ビーム同位置同時利用が可能な点です。本ビームラインは、偏向電磁石を光源とした硬 X 線 (HX) ブランチと軟 X 線 (SX) ブランチから構成されています。SX ブランチの光学素子を切り替えることにより、HX と SX の 2 本のビームを同位置に同時に照射することができます。2 ビーム利用実験システムは、2025PF-S001 「2 ビーム利用多目的実験システムの構築」プロジェクトにおいて整備されました。SX ビームは、出射スリット下流に設置したミラーによって HX ビーム光軸との交点に集光されます。HX および SX ブランチ双方のミラーを調整することで、2 本のビームが同位置に集光されていることを確認しました(図 1)。また、HX・SX ブランチそれぞれについて、シャッターと分光器を連動させた制御系を独立に構築し、電子収量法および蛍光収量法による X 線吸収分光測定を可能にしています。特に蛍光収量法では、SX と HX を同時にエネルギースキャンすることで、同一試料から異なる元素の吸収スペクトルを同時に取得できることを実証しました。

2 ビーム利用実験は、大きく「プローブプローブ」と「ポンププローブ」の 2 種類に分類できます。プローブプローブ実験では、HX と SX の両方をプローブ光として用い、多くの元素に対して、侵入深さの異なる情報を同時に取得します。一方、ポンププローブ実験では、いずれか一方のビームで現象を励起し、もう一方のビームでその応答を観測します。R&D ビームラインは、「RD 課題」という新しい課題区分で運用を開始しており、最初の 2 件の課題 (2025RD001, 2025RD002) が採択されています(図 2)。

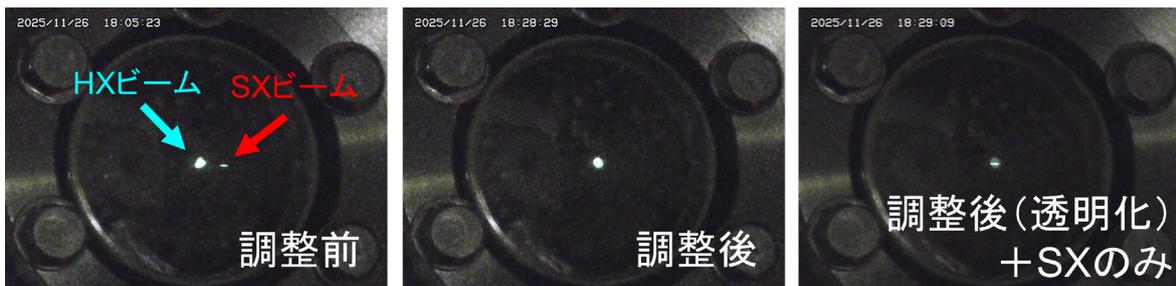


図 1 2 ビーム調整の様子。ビューポートに塗られた蛍光剤を発光させて 2 つのビームを可視化し、ミラーを調整して同位置に合わせている。右端図では、2 つのビームの重なりが見やすいように、SX ビームのみの写真に透明化させた調整後の写真を重ねている。

これらの課題は、それぞれプローブプローブ、ポンププローブに対応する内容となっています。両課題とも 2025 年度第 2 期運転の後半から実験を開始し、実際に最初のデータ取得に成功しました。現在は、新たに 2 件の RD 課題が申請されており、今後さらに 2 ビーム利用実験が活発化していくことを期待しています。RD 課題の申請に当たっては、担当者との事前相談が必要となります。2 ビーム利用に興味のある方、利用提案を検討されている方は、ぜひお気軽に担当者までご連絡ください。本ビームラインの詳細や最新情報については、Web ページもあわせてご参照ください (<https://www2.kek.jp/imss/pf/apparatus/bl/bl11a11b.html>)。

運転・共同利用関係

2025 年度第 3 期の運転ですが、PF は 1 月 26 日から 3 月 10 日まで、PF-AR は 2 月 2 日から 3 月 2 日までの予定です。また、PF ハイブリッドモードは 2 月 27 日からの開始を予定しています。なお、今回期間が短いので、PF-AR は 6.5 GeV のみで運転します。第 2 期は、ヘリウム移送管の真空断熱不良により BL-14 のウィグラーを立ち上げることができず、BL-14A,-14B,-14C の全ビームタイムがキャンセルとなり、ユーザーの皆様大変ご迷惑をおかけしましたが、移送管の修理は完了し、冬の停止期間中に光源担当者により立ち上げ作業が進められており、第 3 期は問題なく利用できる予定です。2026 年度の運転についても議論が進められており、2 月初旬には第 1 期の運転予定が決定される予定です。2025 年度末の運転終了後に、PF 入射路のセプタム更新作業が予定されている関係で、2026 年度第 1 期の PF 運転開始後に光源の焼き出し調整作業が必要になります。そのため、PF は 4 月の下旬から立ち上げを開始することになり、ユーザー運転は 5 月 1 日になる可能性が高いです。ビームタイム開始が黄金週間中となりご迷惑をおかけしますが、何卒ご理解いただきますようよろしくお願いいたします。さて、2025 年度は、関係各所からの支援により、ほぼ定常的な運転スケジュールを確保することができ、目標の利用運転時間を確保できました。光熱水費や諸物価の高騰の影響から今後も厳しい状況が続

きますが、PF3600 時間、PF-AR2400 時間の利用運転に向けて機構側と相談を進めたいと考えています。

PF-PAC の全体会議は 1 月 27 日に Web 会議方式での開催を予定しています。課題の評点と採否の審議の他、共同利用実験旅費や量子マルチビーム施設計画などについて協議が行われる予定です。速報記事が今号に掲載される予定ですのでご確認ください。

第 43 回 PF シンポジウムは、3 月 11 日に水戸市民会館で開催されます。午前中に施設報告、午後は PF-UA 総会や学生論文賞の受賞講演、次期光源計画に関するセッションがあり、最後に総合討論となっています。総合討論では、文科省ロードマップ 2026 への申請を目指している量子マルチビーム施設計画や、既存施設の活用、共同利用実験旅費等について、参加者の皆さんからご意見をいただきたいと考えています。ぜひ積極的に意見交換にご参加ください。

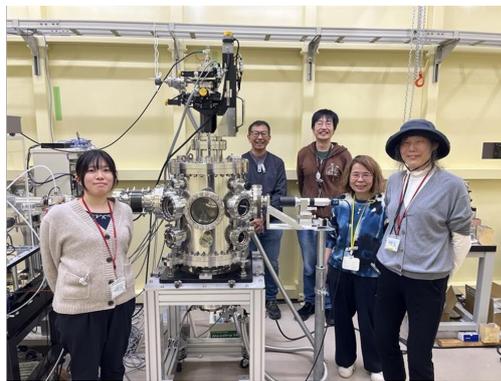
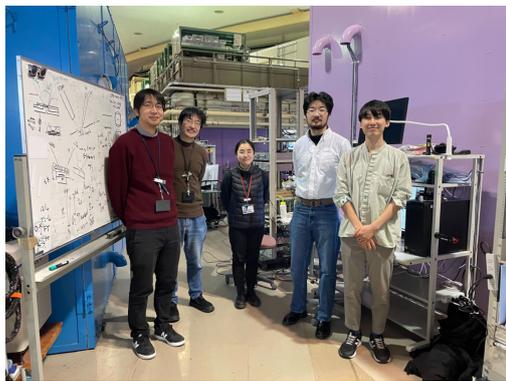


図 2 RD 課題メンバーと (左: 2025RD001, 右: 2025RD002)。

今回は二系の担当ですが、昨年の10月にお亡くなりになられた坂部知平先生について、書かせていただきました。

坂部知平先生を偲んで —PF が築いた一時代と生体高分子結晶学の歩み

2025年10月9日、放射光構造生物学の先駆者である坂部知平先生が逝去されました。91歳でした。

先生は名古屋大学を経て、高エネルギー物理学研究所(KEK)(現 高エネルギー加速器研究機構(KEK))において、タンパク質結晶構造解析のための回折データ収集装置(いわゆる坂部カメラ)の開発に心血を注がれました。先生の業績については、既に他でも語られているところですが[1], 本稿では私(千田)の個人的な思い出も含め、当時の空気感を振り返ってみたいと思います。

「世界一の性能」を誇った坂部カメラの衝撃

私が東京大学薬学部の修士課程に進学し、初めてBL-6A2を利用したのは、まさに坂部先生が開発された生体高分子結晶用の回折データ収集用のカメラ[2]が世界の最前線に躍り出るその時期だったと思います。当時、私の周りでは、生体高分子結晶の回折データ収集の主流は4軸回折計でした。回折点を一つずつ測定するその手法では、数千の回折強度を測定するのに数日を要するのが当たり前でした。しかも結晶を収めたキャピラリーの中で結晶が僅かでも動けば、回折点を一つずつ捕捉する4軸回折系ではすぐに測定が中断してしまうため、東大薬学部の我々のグループでは回折計のある部屋にデッキチェアを持ち込み、一日中回折計の隣につききりで装置を「監視」していたものです。もちろん、監視していても結晶が動くときは動くので監視自体に意味はないのですが、見張ってないと動くような“気”がして気が気ではなかったわけです。さらに面倒だったのは結晶方位の決定(指数付け)でした。あらかじめプレセッション写真をもとに作成したミラー指数、2θの値、そして、大雑把な回折強度の表を片手に、「手当たり次第」に回折点を拾い、指数を推定していくという今では考えられない作業でした。測定に入る前は、ドキドキしながら結晶方位を決めていたものですが、それでもなんとかキチンと結晶の方位を決めることは可能でした。

そこに登場したのが、富士フィルムの開発したイメージングプレート(IP)を利用した坂部カメラ(正式には、巨大分子用ワイセンベルグカメラ)です。このカメラは、当時採用されていた振動写真法ではなく、ワイセンベルグ方式を採用しており、一枚のIPに膨大な回折点を記録することができました。また、X線のフィルムの代わりにIPを採用することで、現像や定着という作業が不要となり、回折データの取得に要する時間も大幅に短縮されました。

もちろん結晶方位の決定も容易になりましたし、何よりも測定のスPEEDが激的に早くなったのは衝撃的でした。それまで数日かかっていた測定が数時間で終わるようになったわけです。当時の資料によると、私が解析をしていたマウス由来のインターフェロンβの結晶では、1枚のIP上に2,500程度の回折点が記録されていたようです。一つずつしか回折点を測定できない4軸回折計とは比べようもない数です。当時は二次元的に回折点を記録可能なX線フィルムを使った測定法としては、振動写真法が主流でしたが、結晶を振動させると同時にフィルムを結晶の回転軸に沿った方向に動かすワイセンベルグ法では、振動写真法にくらべて遥かに多い回折点を1枚のIPに記録できましたし、一度に回転できる角度も振動写真法の10倍近くになっており、放射光による結晶へのダメージ低減にも役立っていました。このため、私が学部生だったころは、データの完全度(Completeness)は70%程度あれば十分という(それでも構造決定は可能です)今では考えられないような状況であったものが、最低でも90%以上は必要というような時代に突入していく一つのきっかけにもなったと思います。

このような画期的な装置を我々は使っていたわけですが、我々が測定に向くと、坂部先生はしばしばbeamラインまで来てくださり、結晶学の基本的なことから食事場所やお勧めメニューまで直接教えていただきました。色々と思い出すことはあるのですが、特に覚えているのが測定に入る前の軸立てなどの操作に関することです。現在では、結晶方位の決定は自動で行われるわけですが、当時は手動の作業でした。まずは格子定数を決定し、どこに逆空間の軸が現れているのかを知っておく必要がありました(前提として、結晶の外形と格子軸の関係も知っておく必要がありました)。そこで、格子定数を求めるために物差しで回折点の間隔を測る必要があるわけです。その時に、1つの間隔だけを測っていたために値がバラつき困っていた我々に、坂部先生が「こうやって測るんだよ」と、10個程度の格子間隔をまとめて測定して割り算するやり方を直々に手ほどきしてくださいました。当たり前のやり方ではありますが、それを知らない無知な学生に、ひとつひとつの基本的な操作を実に丁寧に教えてくださいました。さらに軸立てに手間取る私達を見かねてか、測定に手を貸していただいたことが懐かしく思い出されます。とは言っても、こちらは逆空間と実空間の関係がまだボヤッとしている学生でしたので、正直な話、先生の言っていることがわかったような、わからなかったような感じではありはしました。しかし、何回も教えてもらううちにわかるようになっていきました。

当時の装置は、現在の洗練された自動化システムとは異

なり、手作り感に溢れていました。カメラ内部をヘリウム置換するため、後方はセロハンで封じられていたのですが、扱いが悪いと破けてしまいます。恐る恐る先生に報告すると、「修理しておいて」と一言。必死にあちこち資材を探して修理したのも、今となっては良い思い出です。また、これは研究とは無関係のことですが、私の恩師である三井幸雄先生が最初の頃は測定に同行していたのですが、坂部先生がよく三井先生のところにきて、「三井くん、三井くん」と言っていたのを思い出します。別になんということもない日常風景なのですが、なぜか非常に印象深く、いまだに耳に残っています。坂部先生に親しみを持つ一つの要因になっていたのかもしれない。

黎明期の熱気と技術の変遷

当時、坂部カメラは世界一の性能を誇り、ノーベル賞を受賞したアダ・ヨナット博士だけではなく、文字通り世界中から PF に研究者が集まってきていました。1988 年から 1991 年までに、BL-6A2 の利用登録をした人は、日本人 209 名、外国人 170 名であったと坂部先生が書いておられます [3]。いかに多くの国外ユーザーが坂部カメラを使い PF に来ていたかがわかります。当時の PF の生体高分子の結晶構造解析のアクティビティはそれにとどまらず、BL-14 には佐藤能雅先生のビームラインがあり、Wayne Hendrickson 博士らが Multi-wavelength anomalous diffraction 法 (MAD 法) の実験で先端的な成果を上げるなど、まさに生体高分子の結晶構造解析の世界の中心の一つとして一時代を築いていました。

その後、PF の高輝度化などに加え、検出器は IP から CCD へ、そして Pixel Array Detector (PAD) へと進化し、測定時間は数時間から数分へと短縮されるとともに測定精度も向上していくのですが、坂部カメラはこのような流れの先駆けでした。そして徐々に世界各地に放射光施設が建設され、それぞれにハイスループットの生体高分子結晶構造解析用のビームラインが作られていくことになるわけです。

坂部先生は退官後も KEK で精力的に活動を続けられました。私が KEK に赴任した後は、若手研究者のために結晶学の講義をお願いしていました。ブラックボックス化が進む現代だからこそ、構造生物学研究センター (SBRC) で構造解析や技術開発に関わる人には最低限の基礎を理解してほしいということで講義をお願いしたのですが、先生は快く引き受けてくださいました。当時の丁寧な講義プリントは、今でもどこかで共有できればと考えている貴重な財産です。

効率化の先にある「科学の進歩」

近年の自動化の進展により、深い専門知識がなくとも構造解析が可能な時代になりました。この原稿に書いた軸立てやら結晶方位の決定などは自動で行われるようになり、若い構造生物学の研究者はそれらの単語すら知らないことがあるのではないかと想像します。もちろん、知っているに越したことはないですし、この現状を嘆くことも簡単なのですが、私はこれをむしろ喜ばしいことだと考えるよう

にしています。装置開発を生業としないのであれば、先人が心血を注いで築き上げた自動化システムを最大限に活用し、「構造生物学者」というのであれば、より本質的な生物学的課題の解決に時間を割くべきだと思うからです。この 30 年あまりの間に機械化や自動化が進むことで、生体高分子の構造解析は多くの人が行うことが可能になり、そして産業にも大きく貢献するまでに発展しました。これを利用する人は、得られる情報をどのように使って研究を進めるかを真剣に考えるべきです。何から何まで原理を理解しないとダメだと言っているのは（もちろん、程度問題ではありますが）一歩も先に進むことはできないでしょう。構造生物学、結晶構造解析に限らず、クライオ電子顕微鏡の分野でも開発者と利用者が明確に分離している状況で、それを前向きに考える必要があります。ただ、忘れて欲しくないのは、今日の圧倒的な効率化や自動化の「先駆け」の重要な一つが坂部カメラであったという事実です。坂部カメラは測定時間を数日から数時間へ短縮し、データの多重度 (Multiplicity) を劇的に向上させ、統計的に回折強度を扱う道を切り拓き、構造解析に新しい一歩を記しました。その一歩は今日の構造生物学に欠かせない一歩でした。

最後に、坂部知平先生のこれまでのご指導に深く感謝し、謹んでご冥福をお祈りいたします。

人事異動

最後に、放射光科学第一・第二研究系に関連する 11 月以降の人事異動を報告します。佐賀山基さんが 12 月 31 日付で名古屋大学に転出されました。稲葉理美さんが 1 月 1 日付で特任助教として着任され、1 月 16 日には HOSSAIN, Shahadat さんが CIQuS 兼第一研究系博士研究員として着任されました。皆様の今後のご活躍をお祈りいたします。

参考文献

- [1] 中川敦史 日本結晶学会誌 **67**, 247-248 (2025)
- [2] N. Sakabe Nucl. instr. Methods phys. Res **303**, 448-463 (1991).
- [3] 坂部知平 理学電機ジャーナル **23**, 3 (1992)