

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 恵郷博文
(2025 年 4 月 4 日付け)

運転状況

2024 年 12 月 27 日に 2024 年度第 2 期の運転を終了し、2025 年 2 月 10 日まで冬期メンテナンスを実施した。老朽化による故障リスクの高い直流電磁石電源の交換、発熱が多いパルス電磁石のコイル水冷化、PCB 対策としてのクライストロンタンク内コンデンサ交換、高精度ビーム診断ラインへのコリメータ設置などが主な作業である。2 月 10 日に全メンテナンス作業を終え、2 月 12 日から第 3 期運転の入射器立ち上げを行なった。PF リングには 2 月 25 日よりビーム入射を開始、3 月 18 日からハイブリッドモードに入射運転を切り替えた。PF-AR は 3 月 3 日より 6.5 GeV にてビーム入射を開始した。今期、入射器において大きなトラブルはなく、インターロックによる運転停止頻度はリングへの入射を始めた 2 月中旬には約 300 回/週あったが、その後、RF 調整やコンディショニング効果により大電力高周波系の反射異常が改善され、3 月後半には 60 回/週程度まで減少した。光源リングへのビーム入射と低速陽電子加速器の運転は 3 月 24 日に停止、これで 2024 年度の入射器運転は終了となった。

SuperKEKB は 2024 年第 2 期運転終了後から 2025 年秋までメンテナンス作業を実施しているため、2025 年度第 1 期も光源リングへの入射運転のみで再開となる。その立ち上げ日となる 4 月 21 日まで春期メンテナンス作業を実施中である。SuperKEKB 電子ビーム用に新たに構築しているエネルギー圧縮システムの導波管立体回路の組立、大電力高周波源の高圧電源整備を実施中である。これらの整備作業後、入射器を立ち上げ、PF リングは 5 月 7 日、PF-AR は 5 月 13 日にビーム入射を開始する予定である。

2024 年度の運転記録

月間機器保守に要した 30 時間を除くと 2024 年度入射器の総運転時間は 5,439 時間、ビーム加速に必要な大電力高周波出力時間は 5,429 時間であった。4 つの蓄積リングへの入射に要した時間は 4,160 時間で総運転時間の 76% である。PF リングへの入射時間は 691 時間、PF-AR へは 201 時間を要した。マシンダウンタイムは 227 時間で故障率は 4.2%、ビームロスタイムは 171 時間で停止率は 3.2% となった。図 1 にマシンダウンタイム（上）とビームロスタイム（下）の内訳を示す。電子ビームを生成する入射部が主要因となっているが、これは SuperKEKB 用のフォトカソード低エミッタンス RF 電子銃の放電などによるものである。

光源リングのみへ入射運転を行なった 2024 年度第 3 期に目を向けると運転時間は 954 時間、マシンダウンタイム

は 11 時間で故障率 1.2%、ビームロスタイムは 4 時間で停止率 0.4% であった。4 リング同時トップアップ運転時に比べてトラブル頻度は低くなっている。ただ、入射するリングに応じて我々の入射器は仮想マシンとして動作しているため、各リング入射の運転独立性は高く、SuperKEKB 入射運転の状態（RF 電子銃の不調など）が、極力、光源リングの入射へ影響しないようになっている。

1982 年から、これまでの入射器運転統計を図 2 に示す。故障率、停止率は正確な記録を取り始めた年度からの記載である。TRISTAN、KEKB など大型加速器の立ち上げ時には、入射器にも改造が加えられるため、初期不良などによって故障率が高くなるが、それらが改善されると故障率は下がり、ビーム停止率も 1% 未満となって安定運転状態となる。ところが、SuperKEKB への高電荷量・低エミッタンスビーム生成に対応する入射器改造後、故障率は 2～4% で高止まりしており、停止率も 1% を超えて時間とともに増加している。これは機器改造による影響のみならず、入射器コンポーネントの経年劣化や老朽化が積み重なってきているためである。加速管の経年劣化による水漏れ、電磁石電源故障、電子銃不具合などは故障と同時にビームロスを生じるため、影響が大きい。現在、新型高電界加速管の製作、新電源への交換など、劣化対策を進めている。

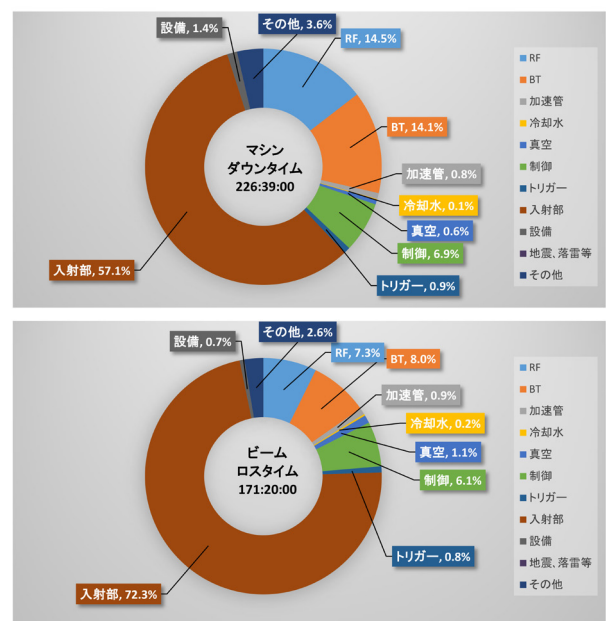


図 1 マシンダウンタイム（上）とビームロスタイム（下）の発生原因内訳

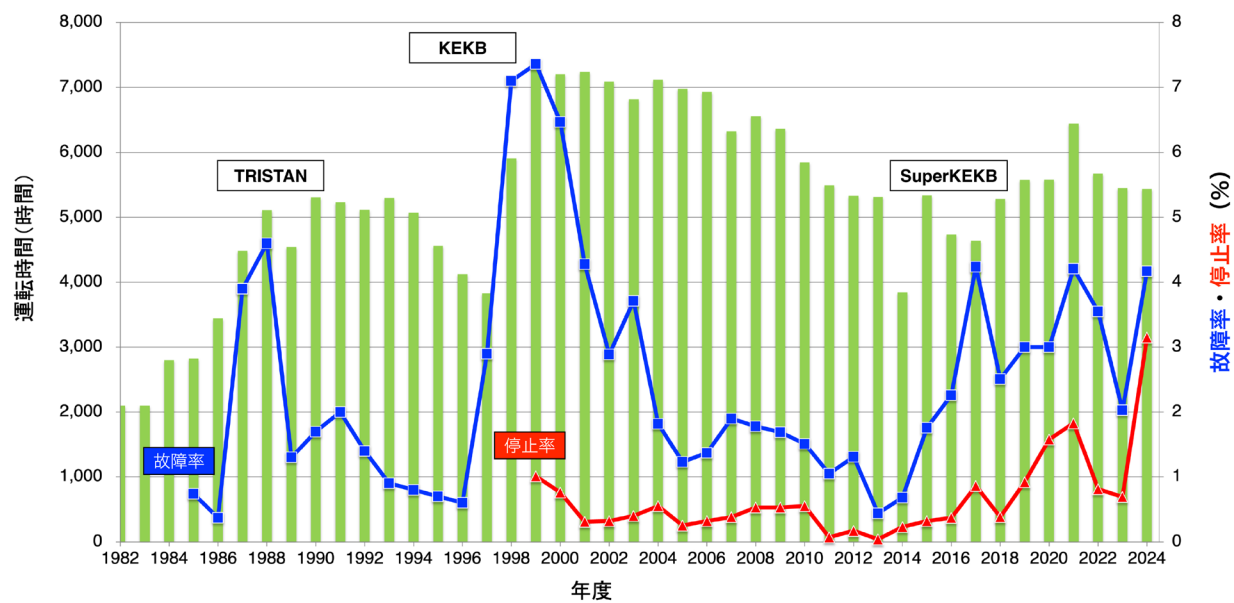


図2 年間運転時間と故障率、停止率の推移

光源リングの運転状況

図 1 に 2024 年度第 3 期 (2 月 25 日 9:00 ~ 3 月 24 日 9:00 まで) の PF リングの蓄積電流値およびビーム寿命の推移を示す。2024 年 12 月 20 日(金)に発生した RF 不調(A1 ステーションのクライストロン不調)のため第 2 期運転終盤には RF4 台から 3 台に減らしてビーム電流を下げた運転を実施してきたが、冬期停止期間中に集束コイルのパラメータを変えることで 4 台運転に復帰することができた。

2 月 25 日 (火) 朝の立上げ時に、中型電源 (4 極電磁石 Q5B) が不調となったため、急遽、予備電源へ配線変更を実施して運転を実施する方針とした。この影響でビーム入射開始が遅れて準夜帯となったものの、無事に入射・蓄積が可能となった。その後の調査で、電源内部 PLC 制御系の不具合であることが判明したため、対処の上、3 期の運転終了後に戻す方針とした。当該電源は前週に実施した連続通電試験では問題は起きておらず、運転開始当日にトラブルが起きたことは典型的な老朽化現象の 1 つと考えている。

3 月 2 日 (日) 22:10, 4 極電磁石電源 (Q3) のファン異常で停止。深夜帯に職員を呼び出して対応し、インターロック経路系含め現場での対処を実施した。当該空冷ファンは電源の内部深くにあるため簡単な対処は困難であるが、外部空冷の強化など必要な対処をすることで当面の運転継続は可能と判断した。その後、3 月の運転終了まで問題は再発していない。2025 年度 1 期の運転では気温上昇も見込まれるため、停止期間に必要な対処を実施する。こちらも老朽化の一例であり、深刻である。

このほか、3 期の PF リング立ち上げ当初より、Linac か

らのビーム入射タイミングが大きく変動する現象が発生した。従来の運転状態にくらべて凡そ 30 倍程度大きい変動であったがこの段階では原因不明であり、リング側での入射位相および入射バケットタイミング調整を急遽作成した自動調整プログラムを実行することで当面の対処とした。最終的に Linac で動かしている入射タイミング計算プログラムが正常に動作していなかったことが判明したため、3 月 3 日 (月) 10:00 にタイミング系のリセットおよび調整を実施した。その後、同様の減少は発生しておらず従来通りの変動幅となった。今後、立上げ時のチェックは行うことはもちろん、同様のトラブル時に迅速に気づくことが出来るよう、Linac でのアラームプログラムの整備などを実施した。その他の重要な項目についても、アラーム登録から漏れが無いかのチェックを行う。

入射に使用する複数台のキッカー磁場波形を完全に相似形にすることが困難であることに起因して、入射時に蓄積ビームに少し擾乱を与えてしまう。通常は各期の運転開始時やモード変更時に調整していたのに対して、今期より、キッカーの電圧モニター波形 (ピークタイミングと電圧) が一定になるような自動プログラムを運用開始した。図 2 に示すように、前期にくらべてユーザーからみた強度変動を抑制し、安定に運用できることが分かった。引き続き運転に活用していく。

また、3 月 14 日 (金) には Linac と PF での合同マシンスタディを実施した。最終的な目標は PF-BT での入射ビーム位置がパルス毎に変化しないようにすることであるが、今回はそのための環境整備と基礎データ取得が主目的

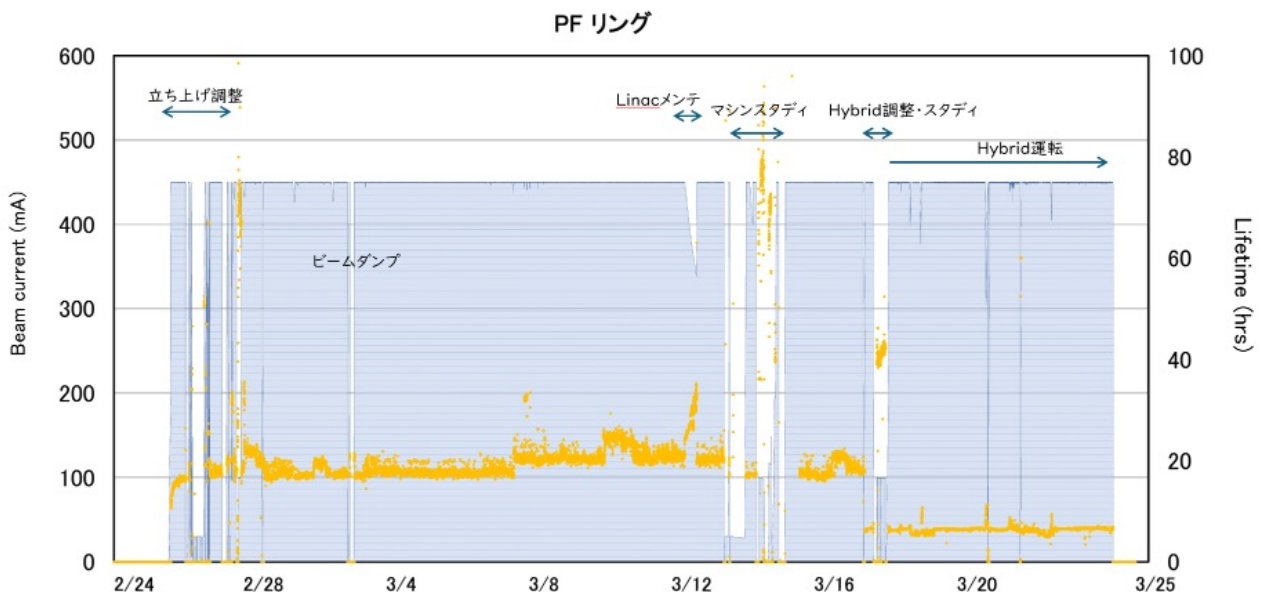


図 1 2024 年度第 3 期運転期間における PF リングビーム電流および寿命の履歴

である。これまでのスタディにより、第3スイッチヤードのアナライザーラインでのデータと PF-BT でビームの挙動が大きく変わっていることが判明しているため、キッカー波形への依存性測定や、コリメータの影響などを測定した。あわせて、上流の J-ARC 部でのエネルギーフィードバック試行などを実施した。

PF リングでは、第3期の立上げから新しい BPM 回路での位置測定および高速軌道フィードバックシステムの運用を開始した。新旧システムでの表示例を図3に示す。ユーザー運転への影響を最小にするため、基準軌道をうまく引き継げるように段階的に切り替えていった。あわせて真空封止アンジュレータのギャップを最小値(4 mm)まで閉じたときにビーム寿命への影響が無いことを検証した。また、新システムでのビームレスポンス測定と理論値(設計値)との比較も実施し、問題無いことが確認できた。その

後、新 BPM システムでのユーザー運転に入っている。

図3(右)の新システムで画面中央付近に見えている山は ID16 のバンプ軌道であり、これは従来のシステムでは除外されていて見えていなかった部分である。新システムでは BPM 数も増えており、よりビーム軌道の安定化に寄与すると考えている。

現時点でも、従来に比べて高速周期での軌道フィードバックが実現できているが、新システムではさらなるパラメータ最適化が可能であるため、今後のマシンスタディを通して最適化を実施する予定である。

図4に PF-AR のビーム電流および寿命の履歴を示す。今期は運転期間が短いこともあり、すべてビームエネルギー 6.5 GeV での運転としている。2025 年 3 月 3 日(月)に偏向電磁石電源絶縁油トランスの油面計から微量の油が漏出していることが判明した。ビーム調整を中断して容器

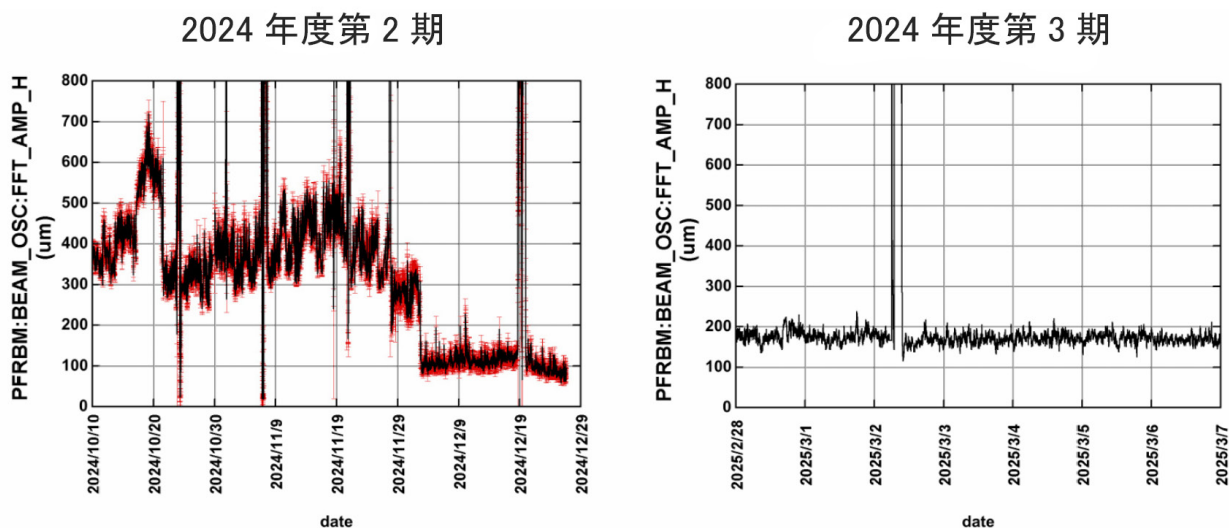


図2 入射時の蓄積ビーム振動(水平方向)の振幅履歴。自動調整の結果、右図のように一定の値を維持できていることがわかる。

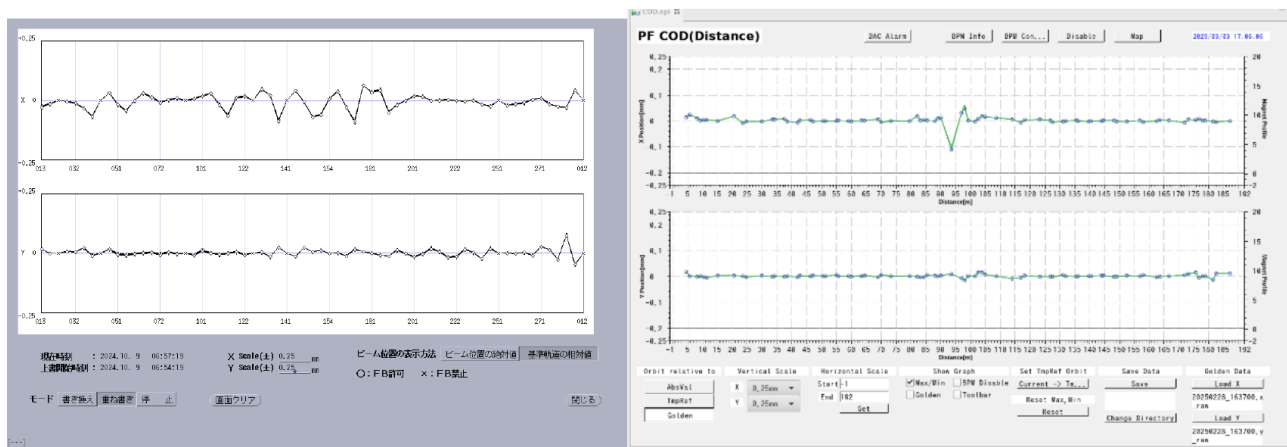


図3 旧 BPM システムでのビーム位置表示例(左)と、新システムでの表示例(右)。いずれも基準軌道からの差分を表示している。

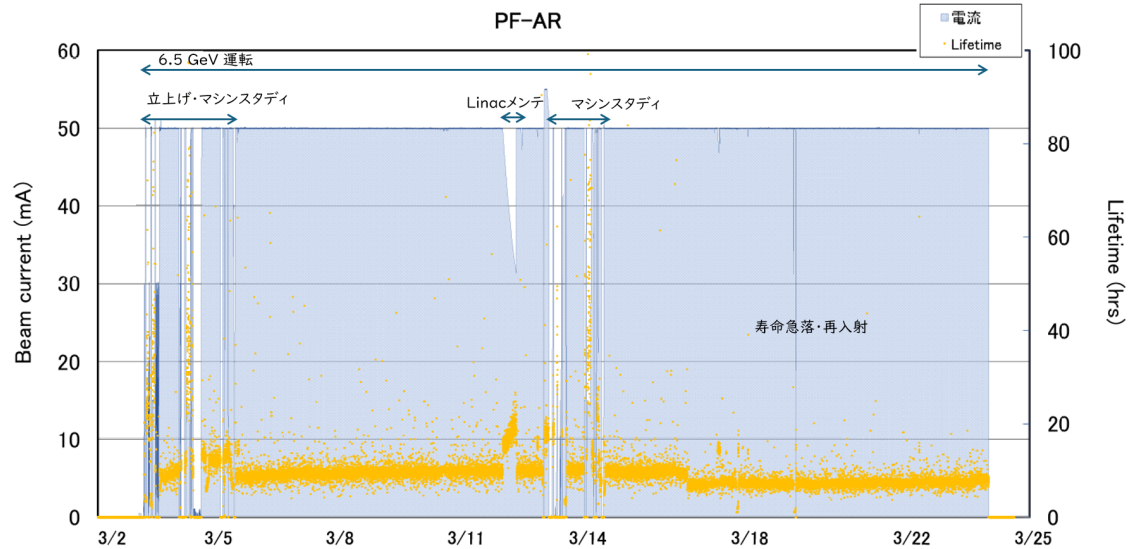


図4 2024年度第3期運転期間におけるPFリングビーム電流および寿命の履歴。

表1 2022~2024年度までの3年間のPFリングの運転統計

年度	リング運転時間(h)	リング調整・スタディ時間(h)	ユーザー運転時間(h)	故障時間(h)	平均故障間隔(MTBF)(h)
2022(R04)	4,128	512	3,590	25.8	144.6
2023(R05)	3,648	552	3,081	15.2	172.0
2024(R06)	4,440	592	3,820	27.5	192.4

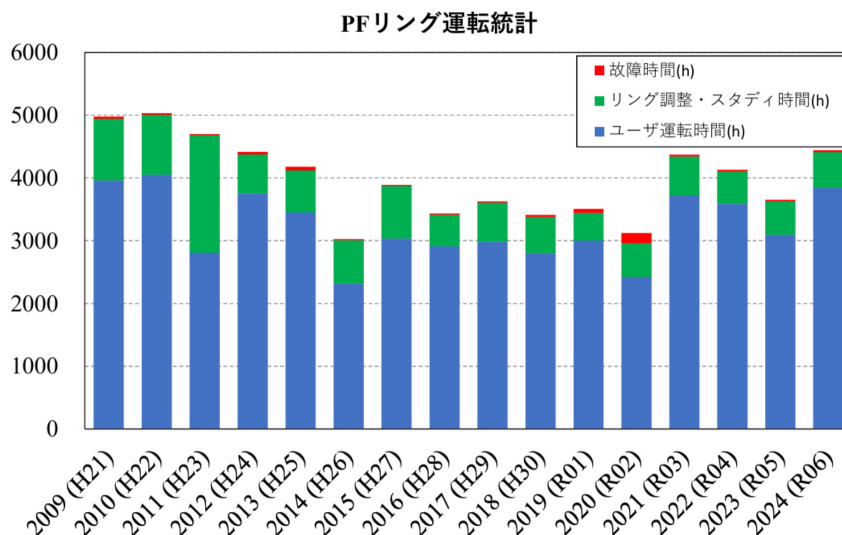


図5 PFリング過去16年間分の運転統計。縦軸は時間 [Hour] 単位である。

外装の拭き取り清掃し、周辺をカバーして漏出状態の監視を開始した。メーカー工場とも相談し、応急処置を4月に実施・夏に恒久的処置という方針としている。

2024年度の運転まとめ

表1に2022年度から2024年度まで3年間のPFリングの運転統計を示す。図5は過去16年間のグラフである(2009

表2 2022~2024年度までの3年間のPFリングの運転統計

年度	リング運転時間(h)	リング調整・スタディ時間(h)	ユーザー運転時間(h)	故障時間(h)	平均故障間隔(MTBF)(h)
2022(R04)	3,000	560	2,418	21.7	143.5
2023(R05)	2,760	576	2,154	30.3	136.5
2024(R06)	2,976	552	2,413	10.8	173.1

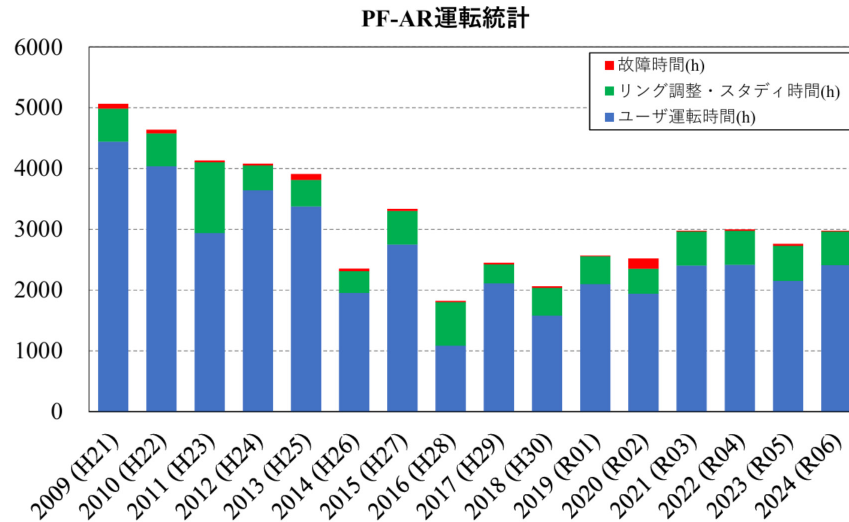


図6 PF-AR 過去 16 年間の運転統計。

年～2021年度の統計数値は過去のPF Newsに記載している)。2024年度は近年の目安であったPF 3,600時間、PF-AR 2,400時間のユーザー運転時間を達成することができている。

故障時間は昨年度27.5時間、故障率は約0.7%、平均故障間隔時間(MTBF)は約192.4時間で良好な値を維持できている。故障の内訳を調べてみると2024年度は電磁石システム関連が約34.3%、RF系が27.6%となりこの2つが大部分を占めている。これは電磁石電源の冷却インターロックによる停止が頻発したことが主要因であり、老朽化が進んでいることが要因と考えている。電源によってはメーカーによる定期的な保守点検作業が出来ていなかった部分があったため、優先順位をつけて段階的に見直している状況であり、今後も継続していく。RF関連による故障率については、クライストロンの不調による運転停止や、3台運転の実施などトラブルが続いたため、ここ数年の故障率4～7%台に比べると増加している。今後も各グループとも老朽化対策を推進していく。このとき、単なる故障品の交換ではなく、性能・機能向上をともなった更新を心がけていく。

2025年2月～3月期のハイブリッド運転時に、進行方向のビーム不安定現象が断続的に発生することがあった。RFに位相変調をかけることで抑制可能ではあるものの、手動でおこなっていたため対応が遅れることもあった。そこで、不安定が発生したときに自動で位相変調を行う対処をおこない、運転を継続した。次の運転立ち上げ時には

フィルパターン変更など別の方法を検討している。今後もより安定なビームが供給できるよう改善を進めていく。

表2にPF-ARの過去3年間の運転統計数値を、図6に過去16年間の運転統計をグラフにしたものを示す。2024年度のユーザー運転時間は2,413時間となり、PFリングと同様に目安を達成できている。故障時間は約10.8時間、故障率も0.4%、平均故障間隔(MTBF)は約173.1時間でいずれも良好な状態を達成できている。故障の内訳は約62.5%がビーム入射関連BTの電磁石電源であった。また、第2期は蓄積電流55mAで運転を開始したが、HOMケーブルの発熱により途中で50mAに移行している。こちらについては原因調査を進めており、電流増加への挑戦は慎重に行う予定である。

加速器第6研究系内の人の動きについて

2025年3月31日をもって本田融さんが定年退職となりました。本田さんは真空グループのリーダーとして各種の研究開発から現場での作業に至るまで幅広く活躍されてこられました。PFの直線部改造、ARの高度化、テストビームライン建設などでは中心的な役割を果たされています。また、総研大でも長年にわたって後進の指導にもあたってこられました。これまでの貢献に深く感謝するとともに今後も特別教授として引き続き御指導・ご鞭撻いただきます。

新人採用については、2025年4月1日付で、齊藤寛峻さんが助教として採用されました。光源第7グループの一員として挿入光源に関する研究開発および運転保守まで幅

広く担っていただくほか、新光源に向けた超伝導ウィグラー関係でも活躍頂きます。また、おなじく4月1日付で團優菜さんが技術職員として新規採用となりました。光源第5グループ（基幹チャンネル・安全担当）の一員として、主に安全・制御系を中心とした業務を担当頂きます。

技術職員については、4月1日付で濁川和幸さんが主任技師、下ヶ橋秀典さんが先任技師、田中窓香さんが技師、本村新さんが准技師にそれぞれ昇任されました。これまで同様に関連する装置の保守・管理・維持、ならびに技術開発を担当していただきます。

最後に、本田融さんの退職にともなって今年度から真空グループリーダーを谷本育律さんに努めていただきます。運転に直結する維持管理はもちろん、次期光源に関連する研究開発にもこれまで同様に尽力いただく予定です。

放射光実験施設の現状

放射光実験施設長 五十嵐教之
(2025 年 5 月 28 日付け)

開発研究多機能 (R&D) ビームライン BL-11 については、学術放射光 4 施設の連携のもと、建設作業が進められてきました。2025 年冬の停止期間中に硬 X 線ブランチの光学系ハッチまで完成させ、2024 年度第 3 期には、軟 X 線領域集光白色ビームと光学ハッチ内で硬 X 線領域非集光単色 / 白色ビームを利用できる R&D 実験スペースが利用開始となりました。2025 年春のシャットダウン中には、いよいよ実験ハッチの建設作業が開始され、2025 年夏の完成に向けて急ピッチに作業を進めているところです。ちなみにこの大きな実験ハッチは、フォトンファクトリー先端化寄附金により建設されています。皆さまのご支援に心より感謝申し上げます。建設作業と並行して、R&D 利用に向けた測定システムの開発を、PF-S 課題を利用して進めています。また、BL-11 での R&D 用の実験利用制度も 2025 年 3 月の PF-PAC 全体会議で承認され、2025 年 5 月締め切りの実験課題公募から申請可能となりました。このように着々と準備が進んでおりますので、ユーザーの皆様にもぜひ積極的に参加していただくよう、よろしくお願いいたします。

運転・共同利用関係状況

2024 年度の運転は、機構の支援を受けて年間の運転時間 (PF3600 時間, PF-AR2400 時間) を確保することができ、施設工事や加速器改造等の影響も少なかったため、久しぶりに定常の運転スケジュールとなりました。2025 年度の運転に関しても同じように定常運転を目指したいと思いますが、現時点では第 2 期の運転分までしか予算は確保できておらず、今後定常運転に向けて機構側と相談を進めたいと考えています。2025 年度の第 1 期運転については、PF は 5 月 7 日に、PF-AR は 5 月 13 日から運転を開始しています。PF-AR は 6 月 30 日まで、PF は 7 月 7 日まで運転を継続します。PF のハイブリッドモードは 6 月 6 日から最後まで、PF-AR は 6.5 GeV で運転を開始していますが、6 月 12 日以降は 5 GeV で運転します。第 2 期の運転スケジュールは現在検討中ですが、PF に関しては 10 月初旬から、PF-AR の方は、アジア・オセアニア放射光科学フォーラムスクール (AOFSRR School 2025) を PF で開催する関係で、11 月初旬からの運転開始を目指す予定です。

PF-PAC の全体会議が、久しぶりに現地とオンラインのハイブリッド方式で開催されました。現地での参加はあまり多くなかったのですが、やはり対面での意見交換の重要性を再認識しました。PF-PAC 全体会議は、PF の運営や高度化、次期計画を議論する大切な場ですので、今後できるだけ対面での開催としたいと思います。委員の皆様大変お忙しいとは思いますが、何卒ご協力のほどお願い申し上げます。今回の全体会議では、課題の進捗状況評価や開発研

究多機能ビームラインの利用制度、課題申請書の改訂等について審議されました。また、S2 型課題の説明の見直しや液体ヘリウムの対応、新放射光源施設計画に関する協議等が行われました。詳細については、本誌記事をご参照ください。

人事異動

最後に、放射光実験施設に関する人事異動を報告します。4 月 1 日付で、成田千春さんが技術員から准技師に昇任されました。今後より一層の活躍を期待しています。同日付で、運営部門長が北島義典さんから宇佐美徳子さんに、技術副主幹が内田佳伯さんから菊地貴司さんに交代となりました。北島さん、内田さんは継続して PF 所属となりますので、引き続きご協力をお願いしたいと思います。また、同日付で、小菅隆さんと金子直勝さんがシニアフェローとなりました。これからは特に後進の指導にご尽力いただくことを期待しています。最後に、PF の運営や共同利用関係の業務を支えて下さった、PF 事務室の外山久子さんが 3 月末で退職されました。長く業務にあたってください本当に感謝申し上げます。後任には、5 月 1 日付で、小谷野美紗さんが赴任されました。今後の活躍を期待しています。

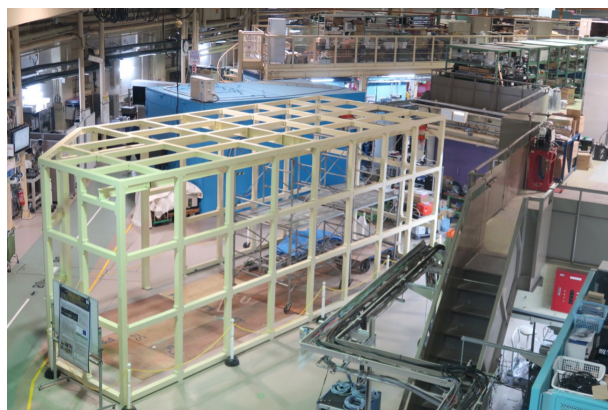


図 1 5/28 現在の BL-11 建設作業の様子 (実験ハッチの建設が進んでいる)。

昨年 11 月発行の PF ニュース (Vol. 42, No. 3) に引き続き、今回は放射光科学第一研究系の固体物理学研究部門における最近の研究の進展を紹介します。

走査型共鳴軟 X 線回折装置の開発

回折・散乱の空間相関の測定と、X 線吸収分光や X 線磁気円二色性といった電子・磁気状態の測定を組み合わせた共鳴 X 線散乱 (RXS) は、吸収端を利用することで元素・軌道選択的に電子・磁気状態の空間相関を決定できるユニークな実験手法です。特に軟 X 線領域には、多彩な物性を示すことで注目される 3d 遷移金属や 4f 希土類金属などの吸収端が存在することもあり、これまでに軟 X 線領域 (200-5000 eV) での RXS 実験のための真空中 X 線回折計群 [1] を開発し、RXS の利用研究を推進してきました。様々な利用展開の中で、最近注力しているのが走査型共鳴軟 X 線回折装置の開発です。研究ターゲットの 1 つである「アシンメトリ量子物質」[2] では、空間反転対称性の破れにより交差相関物性が発現します。しかしながら、対称性の破れに伴い結晶ドメインが必然的に形成されるため、発現した物性がドメインの影響で打ち消されて観測できなかったり、観測できたとしてもその定量評価が困難になったりします。このように交差相関物性の測定にはドメインの制御が必須であり、開発中の走査型共鳴軟 X 線回折装置を用いることで、ドメインの可視化や、物性測定へのフィードバック、さらにドメイン観測と物性測定の同時測定を目指し、S 型課題 (2024S2-002 松村武，広島大学 [3]) のもと研究を進めています。

開発中の回折計は単純な構成であり、入射 X 線をフレネルゾーンプレートで集光し、試料部を走査することで

RXS 信号の強度分布、つまりドメインを測定できます。図 1 に磁気ブラッグ信号強度の空間分布の測定結果を示します。 $z \sim 0.055$ などに存在する青色の帯の部分は、温度変化により消失し、単一のドメインになる様子が観測されています。このように、 $1 \mu\text{m}$ 程度の空間分解能での磁気ドメイン観測が実現できつつあります。一方、測定を通じて改善すべき点が多々あることも明らかになってきました。今後も、装置の改良を進めるとともに、電子・磁気秩序状態のドメイン観測の利用研究を推進していきます。

共鳴磁気 X 線回折を用いた非自明な磁気状態の観察

フラストレート磁性体における非自明な磁気秩序状態とその外場応答は現代の物性物理における中心的なテーマの一つであり、これまで放射光 X 線回折や中性子散乱を用いて研究を行ってきました。具体例として、幾何学的なフラストレーションに強いスピン軌道相互作用が導入された系に関する研究を紹介します [4]。希土類金属間化合物 DyAuGe の三角格子中の 4f 電子の準四重縮退状態 ($S_{\text{eff}} = 3/2$) から生じるキャント反強磁性基底状態を、Dy の L_3 端近傍の放射光共鳴磁気 X 線回折を用いて明らかにしました (図 2)。磁気モーメントと電気四重極モーメントは密接に連動しており、反強誘電性電気四重極 (AFQ) 秩序によって磁気 - 双極子の非平行配列が誘起されます。AFQ 秩序は面内磁場によって抑制され、コリニアなアップアップダウン磁気状態へのメタ磁性転移につながります。これらの発見は、 $S_{\text{eff}} > 1/2$ のフラストレート三角格子系における非自明な磁気状態の出現に関する洞察を与えてくれます。

マルチプローブ研究のための環境整備

放射光科学研究系では、放射光をはじめとする様々なプローブを用いて研究を推進しており、多くのスタッフが量子ビーム連携研究センター (CIQuS) を併任しています。

CIQuS では大型ピクセルアレイ型検出器 PILATUS3S 1M を導入し、マルチプローブ研究の環境整備を進めています。読み取り時間が短いためシャッターレス測定が可能になり、In situ 測定や連続三次元計測などに威力を発揮しています。これまでに BL-8B において検出器位置を広く電動制御できる回折計を開発し、低次元有機金属錯体の散漫散乱等について研究を行ってきました。さらに垂直偏光 X 線が利用可能な BL-14A においても同様に整備を進め、現在はモノクロメーター等の光学系の改修を行っています。成果の具定例として阿部グループ (防衛大) により実施された時間分解放射光実験の結果を図 3 に示します [5]。単成分の 1- デシル -3- メチルイミダゾリウムナイトレート ($[\text{C}_{10}\text{mim}][\text{NO}_3]$) イオン液体において、冷却 / 加熱

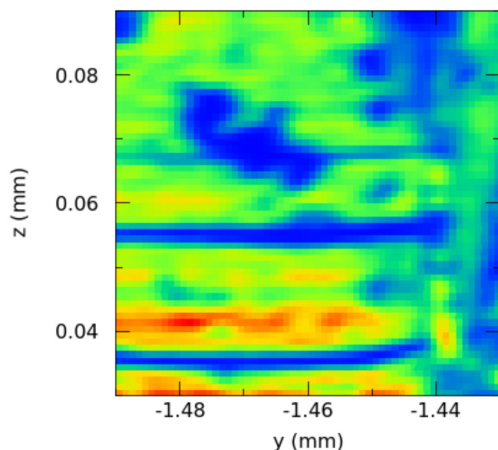


図 1 磁気ブラッグ信号強度の空間分布。

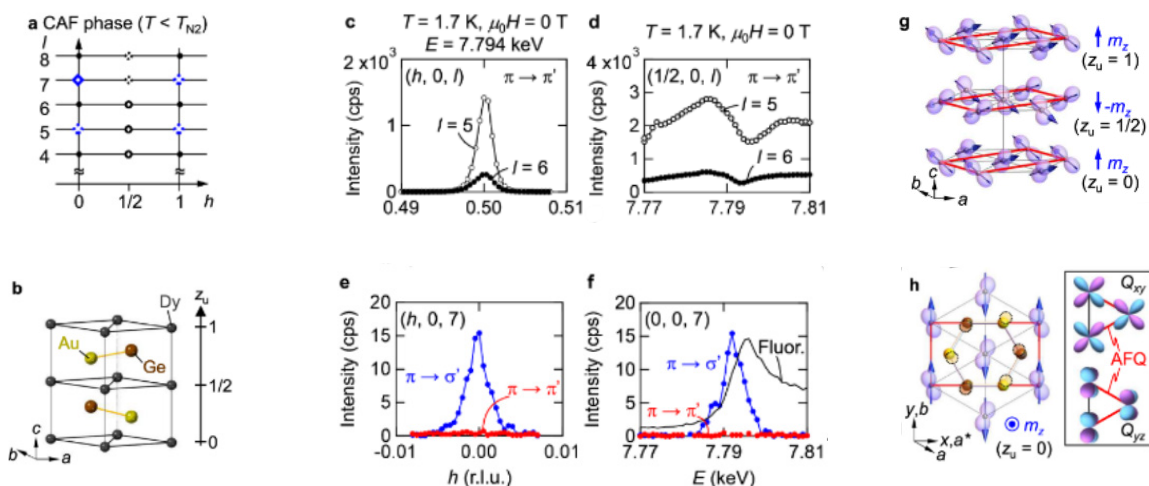


図2 a (h, 0, l) 面内のブラッグピークの位置。b DyAuGe の結晶構造。c, d (h, 0, 6) と (h, 0, 5) の h スキャンプロファイルと、h = 1/2 におけるブラッグ散乱のエネルギー依存性。e, f $\pi\pi'$ チャンネルと $\pi\sigma'$ チャンネルで測定された (h, 0, 7) の散乱強度の h スキャンプロファイルとエネルギー依存性。g, h DyAuGe の傾角反強磁性相の磁気構造と四極子秩序の模式図と $z_u=0$ の上面図。

速度に依存する複雑な構造変態をX線回折実験により観測しました。1 K/min の冷却過程では、トランス型と無秩序型のハイブリッド層状結晶が現れ、より早い冷却プロセス (8-9 K/min) では、イオン液体結晶 (ILC), 六方最密充填構造 (hcp) を含む多相共存が観測されました。早い冷却プ

ロセスは準平衡効果として新しい hcp 相を誘起し、さらに ILC 相へつながることが明らかになりました。

反芳香族における電子密度の観察

有機化学では、6 つの π 電子をもつベンゼンに代表される $(4n+2)\pi$ 電子系 (n: 自然数) が芳香族化合物として有名です。一方、環状不飽和有機物のなかでも、 $4n$ 個の π 電子をもつ $4n\pi$ 電子系は反芳香族とよばれ、非常に安定な芳香族とは異なり不安定で反応性が高いものが多く、ペンタレンやビフェニレンなどが知られています。なお、最もシ

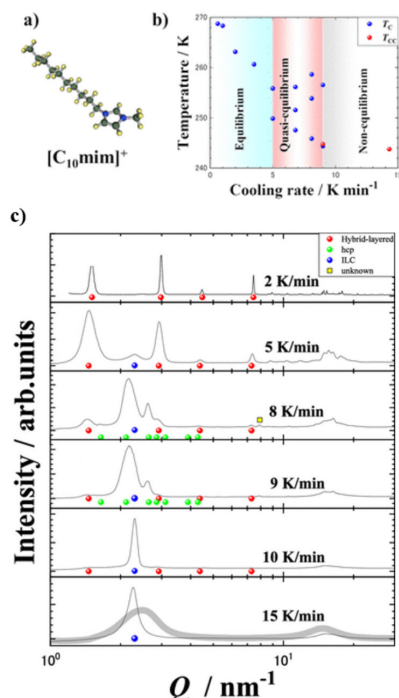


図3 a $[C_{10}mim]^+$ 陽イオンの分子構造。b $[C_{10}mim][NO_3]$ の相転移の冷却速度依存性。冷却時の転移温度 (T_c) と加熱時の転移温度 (T_{cc}) をそれぞれ青丸と赤丸で示す。c 150 K での一次元化されたX線回折プロファイル、冷却速度は上から 2 K/min, 5 K/min, 8 K/min, 9 K/min, 10 K/min, 15 K/min。赤、緑、青の円は、それぞれ層状結晶相、六方最密充填 (hcp) 構造、イオン液体結晶相に対応する。

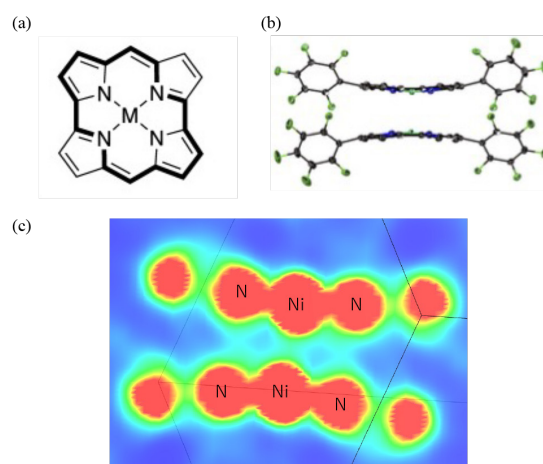


図4 (a) ノルコロール分子。太い線で示した部分の π 電子数が 16 となる。(b) Ni(II) ペンタフルオロフェニルノルコロール結晶におけるノルコロール分子 2 量体の積層。(c) 2 量体部分の電子密度分布。4 つの窒素原子がつくる平面での断面図。

ンブルな反芳香族と考えられていた4つの π 電子をもつシクロブタジエンは、 π 電子が非局在化しておらず、反芳香族性よりも構造の歪みによるものが分子の不安定性に大きく寄与していることが2010年代に入って示されています。このように、比較的安定だと思われてきた反芳香族ですが、近年になって、安定に単離できる物質が合成されました。そのさきがけとなったのが、ポルフィリン(18 π 電子系)のメソ位の炭素を2つ取り除いてピロール環を直結させたノルコロール[6]です。中心にNi(II)を配位したNi(II)ノルコロール(図4a)は、16個の π 電子からなる環状平面分子ですが、室温で安定に存在し、様々な測定から反芳香族特有の性質を示すことが知られています。ノルコロール骨格を有する分子では、分子どうしが近接して2量体あるいは3量体を形成する結晶構造をとることが比較的良好に見られ、なかでもペンタフルオロフェニル基をもつ分子では、分子が完全に対面し、分子間の距離が2.97 Åと通常の平面 π 分子の積層に比べて非常に接近した2量体を形成します(図4b)。このような反芳香族分子同士の近接は分子間で電子共役することにより安定化しているのではないかと予想されています。このことを確認するために、前述のペンタフルオロ置換基をもつNi(II)ノルコロール分子の単結晶を用いて、PFの放射光を利用した精密構造解析を実施しました[7]。よく知られているように、X線の散乱波は物質中の電子密度のフーリエ変換なので、観測されたX線の散乱波を位相を考慮して逆フーリエ変換することで空間全体の電子密度を導出することが可能です。もちろん様々な理由ですべての散乱波を観測することは難しいのですが、得られた回折強度を用いて最大エントロピー法(MEM)を用いることで、結晶における電子密度の空間分布を解析することができます。図4cに示すように、分子間積層において、電子雲の広がりが大きなNi原子間だけでなく、ピロールの窒素間にも電子密度が存在していることがわかります。分子軌道計算によると、2つの分子のHOMOとHOMO-1の両方に結合性の相互作用が働いていることが明らかになっています。これ以外にも、ピロールの炭素原子間にも小さいながらも電子密度が観測されており、明確な共有結合というわけではありませんが、多中心多電子結合のようなものが形成されているのではないかと考えられます。分子どうしを近接させることと、結合が生じたことは、卵と鶏のような関係かもしれませんが、近接した分子による新たな物性の開拓や、化学結合の本質とは何か、といった新たな研究のきっかけとなるのではないかと思います。

- [1] <https://research.kek.jp/people/hironori/beamlines/rsxs/>
- [2] <https://asymmetry.hiroshima-u.ac.jp/>
- [3] 「アシンメトリ量子物質における奇パリティ多極子の観測と非対角物性応答」<https://www2.kek.jp/imss/pf/approach/proj/stype/2024S2-002.html>
- [4] T. Kurumaji, M. Gen, S. Kitou, K. Ikeuchi, H. Sagayama, H. Nakao, T. R. Yokoo, T. Arima, *Nature Commun.* **16**,

2176 (2025).

- [5] H. Abe, S. Maruyama, H. Kishimura, M. Uruichi, D. Okuyama, H. Sagayama, *J. Phys. Chem. Lett.* **15**, 10668 (2025).
- [6] T. Ito, Y. Hayashi, S. Shimizu, J.-Y. Shin, N. Kobayashi, H. Shinokubo, *Angew. Chem. Int. Ed.* **51**, 8542 (2012).
- [7] S. Kino, S. Ukai, N. Fukui, R. Haruki, R. Kumai, Q. Wang, S. Horike, Q. M. Phung, D. Sundholm, H. Shinokubo, *J. Am. Chem. Soc.* **146**, 9311 (2024).

人事異動

新年度を迎えて多くの人事異動がありました。

4/1に、構造生物学研究部門の研究員のMILLER, Simonさんが特任准教授として、材料科学研究部門の特別助教(テニュアトラック相当)の城戸大貴さんが助教として、それぞれ採用され、5/1には固体物理学研究部門の助教として深谷亮さんが着任されました。

また、放射光科学第一、第二研究系に関連する人事異動として、4/1に、CIQuSの博士研究員として、三上力久さん、安部美季さん、SONG, Fangzhouさんが着任されました(SONGさんは東海勤務)。6/1には、新領域開拓室の准教授として武市泰男さん、特任専任URAとして藤井恵美さんが着任されます。

皆さんの今後の活躍を期待しています。

はじめに

低速陽電子実験施設 (Slow Positron Facility, SPF) では、専用リニアックで加速された電子ビーム (～ 50 MeV) によって高強度低速陽電子ビームを生成し、共同利用実験に供給している。本施設で実施されている主な研究は、物質最表面および表面直下の原子配列の解明、陽電子やポジトロニウム (Ps), Ps 負イオンといったエキゾチックな粒子や粒子系の基礎物理ならびにそれらと物質との相互作用の解明である。共同利用実験には、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), 低速陽電子汎用実験 (現在は Ps のレーザー冷却実験を実施中), ポジトロニウム飛行時間 (Ps-TOF) 測定 of 4 つの実験ステーションが利用されている。TRHEPD は電子による反射高速電子回折 (RHEED) の陽電子版, LEPD は低速電子回折 (LEED) の陽電子版である。なお「低速陽電子」とは、負の陽電子仕事関数を使う特殊な方法でエネルギーを単色化した陽電子を指す呼称であり、その後に加速しても同じ呼称で扱われる。TRHEPD のビームも同様だが、この実験手法の呼称については、歴史が長い RHEPD と名称を揃えて「高速」陽電子回折と呼ばれる。さらに「全」反射が追加されているのは、電子にはない全反射が陽電子には起きるためである。

専用リニアックの管理・運転は、加速器研究施設第 5 研究系によってなされ、低速陽電子生成部から下流側の管理・運転は物構研 SPF と PF が行っている。共同利用は放射光共同利用実験の一環として実施されており、2024 年度の共同利用実施課題数は 15 課題、有効課題の実ユーザー数は 53 名、ユーザー実験の配分時間は 4,088 時間であった。なお、SPF では、ビームタイム毎のタイムシェア方式で共同利用実験に供している (ビームを同時に複数の実験ステーションに供給することはできない)。

ビームラインの状況

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。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。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からである。春の休止期間中は、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 期は、加速電子パワー 930 W 程度でのユーザー運転を実施した。

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 (パルス幅 1.2 μ s) 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 (LEPD 実験用) にのみ確認され、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 (パルス幅 14 ns) での運転時には変動は確認されなかった。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、安定化の要因については明らかになっていない。

2024 年度 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 において真空ダイスタールが発生し、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ダイスタールが引き起こされていた。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伴う運用を再開した。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生じた。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あけて、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。

実験ステーションの状況

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。Psはレプトンのみで構成される特異な「原子」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（スピントリプレットの基底状態で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、中心周波数が段階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。

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（<https://physicsworld.com/a/top-10-breakthroughs-of-the-year-in-physics-for-2024-revealed/>）。

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ー実験室では、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であり、Psレーザー冷却・精密分光実験にも適合している。実際にこの新レンズ系による試験を実施したところ、Psレーザー分光の信号の取得レートが、従来と比較して約1桁向上していることが確認された。

低速陽電子回折（low-energy positron diffraction, LEPD）は、低速電子回折（LEED）の陽電子版にあたる手法であり、数10～数100 eVの陽電子ビームを主に垂直に試料表面へ入射し、回折パターンを取得するものである。LEPDは、X線と同様に単純な散乱因子を持つとともに、電子に比べて多重散乱の影響が小さく、表面感度が高いという特徴を備えており、試料表面の原子配列を高精度に決定できると期待されている。過去には、アイソトープ由来の陽電子を用いたLEPDによる構造解析が試みられていたが、ビーム強度が不十分であり、実験の遂行は困難であった。低速陽電子実験施設では、加速器ベースの高強度低速陽電子ビームを用いたLEPD実験ステーション（SPF-A4）を独自に開発し、LEPDの観測に成功していた。

その後、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、構造解析に必要なI-V曲線（回折スポット強度の入射ビームエネルギー依存性）取得の桁違いの高速化を実現し、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、新たに設計された試料ホルダーは、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使用可能となっており、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が整備された。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。

この解析には、全反射高速陽電子回折（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」（ツーディーマツ）を用いている。2DMATは、ポピュレーションアニ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画期的な解析フレームワークである。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。これは大きな利点である。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、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。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中である。

人事異動

低速陽電子実験施設の博士研究員だった Rezwan Ahmed 氏が、2025 年 1 月 1 日付で放射光科学第 1 研究系・表面科学研究部門の特別助教に異動した。Ahmed 氏は、光電子分光や軟 X 線吸収分光といった放射光利用実験に加え、次期放射光源の活用も視野に入れつつ、低速陽電子をはじめとする他の量子ビームも組み合わせた多様な手法による表面科学研究の推進が期待されている。また、物構研量子ビーム連携研究センター(CIQus)の博士研究員として、三上力久(りき)氏が 2025 年 4 月 1 日付で着任した。物構研 SPF の准教授だった本稿執筆者の和田健が、2025 年 4 月 1 日付で同施設の教授に昇任した。