新放射光源施設計画については、これまで施設内外で慎 重に議論を重ね、検討を進めてきましたが、現在その大枠 を決める非常に重要なタイミングとなっています。実現に 向けては大きな課題がいくつかありますが、その中でもサ イエンスケースについては放射光利用の新機軸による新た な研究分野(Leading Field と呼ぶ)を創成することが非常 に重要です。そこで、PFでは新たな利用形態として2ビ ーム同時利用を提案し、ユーザーの皆さまや放射光科学の 専門家とともに様々な検討を重ねてきました。研究会等を 通じて寄せられた数多くの提案をもとに、PF 測定装置部 門を中心に内容を煮詰め、我々の目指す Leading Field の 叩き台をいくつか作成しましたので、この機会に紹介した いと思います。

2ビーム同時利用としては、2種類のプローブ光を利用 する研究と、片方をポンプ光、もう片方をプローブ光とし て利用する研究(ポンプ・プローブ実験)が考えられます。 2種類のプローブ光の同時利用については、一つの試料で 複数ビームラインに持ち込んで複数回の実験で実現できる ことは同時利用の提案には含まれません。期待している研 究対象としては、不均質系の観測、また不均質状態により 発現する機能の研究が新たな2ビーム同時利用のターゲッ トとなると考えています。元素選択的に構造と電子状態を 解明し、それらの空間相関、時間相関、その観測したパラメ ータ間の相関を見てやることで、物質・生命の機能発現、劣化、 破壊の起源・機構の本質に迫れるものと考えています。

ポンプ・プローブ実験では,放射光をポンプ光として用い ることにより,特定の軌道の励起や,場所選択的な照射だ けでなく,パルス特性,構造化された光等の様々な特徴を 活かすことができます。ここではX線ならではの励起効果 の発見,宇宙における物質・生命の化学進化の解明,医療 標的分子のX線反応制御,光ドミノ効果の起源の徴視的な 解明等,様々な分野でこれまでできなかった多様な研究展 開が可能になると考えています。

上述の2ビーム同時利用に加えて,低速陽電子と放射光 を組み合わせた同時利用も放射光利用の新機軸として提案 します。物性・機能の鍵を握る表面構造を低速陽電子で決 定し,電子状態を放射光で観測することで,スピントロニ クス材料等,様々な材料研究に貢献できると考えています。 これは物構研でしかできない非常にユニークな研究展開で あると言えます。

ここで紹介した Leading Field は暫定的な提案であり、 今後ユーザーの皆さまも含めて関係者と意見交換をしなが らブラッシュアップしていきたいと考えています。また、 内容も大事ですが、これらの Leading Field を表現するキ ーワードも大事ですので、皆さんとイメージを共有しなが ら検討したいと思います。皆さま、ご協力のほどよろしく お願いいたします。

もう一つ大事なことは、2ビーム同時利用の実証実験で

す。開発研究多機能ビームライン(BL-11)がこの秋から 稼働しますので、そこで実際に色々な実験を展開すること ができるようになります。実験を展開するためには、ビー ムラインだけでなく実験装置が必要になりますが、今年度 から PF-S 課題「2025PF-S001:2ビーム利用多目的実験シ ステムの構築 | を走らせて、今秋からの実験開始に向けて 並行して開発を進めています。ここで開発する装置は、試 料周りを簡単に交換できるような構造となっており、上 記の Leading Field に繋がるような様々な実験提案を実現 できるようにしたいと考えています。また, BL-11 の運用 については, 今春から, 共同利用実験課題の新たな審査区 分として RD 課題の募集を開始しました。この課題では、 BL-11の利用を必須として、特に2ビーム利用実験や通常 のビームラインでは実施困難な技術開発を行うことを想定 しています。現在審査中ですが、複数の RD 課題が申請さ れており、この秋から着実に進められるように準備を進め ています。2ビーム利用実験のアイディアや興味をお持ち の方は,ぜひビームライン担当者と連絡を取っていただき, RD 課題の申請をご検討ください。

さて, BL-11 の建設作業が最終段階に入って, これか ら様々なコンポーネントの設置作業が予定されています。 BL-11 は要素技術や実験手法の開発だけでなく, 人材育成 も一つ大事なミッションとなっています(RD 課題でも若 手の参加を必須としています)。そこで, 今回初めての取 り組みですが, 他施設の若手スタッフや申請中の RD 課題 の若手に声をかけて, ビームライン建設に参加してもらい, ビームライン技術を学んでもらうことを企画しています。 今後も学術施設や大学等と協力して, 次代の放射光科学を 支える若手人材の育成に繋がる企画を展開したいと考えて いますので, どうぞよろしくお願いいたします。

一方,KEK では予算削減の必要性から,2026 年度以降 共同利用ユーザー向けの旅費支給を廃止する決定がなされ ました。ただし,大学院生等の若手支援と加速器運転協力 への支援については別途検討することとなっており,現在 どのような枠組みで支援するか検討を進めています。非常 に厳しい状況ではありますが,リソースを戦略的に集中さ せるということですので,この機会に若手人材育成の観点 でより良い制度になるよう努力したいと考えています。ユ ーザーの皆さまにもご検討いただき,ぜひ具体的な提案を 寄せていただければと思います。

以上のように、2ビーム同時利用に向けて準備や検討が 進んでいます。次回の PF 計画推進委員会は、7/30 13:30 から Web 会議方式で開催予定です。まだ議題は決まって いませんが、PF シンポジウムで紹介しました、蓄積リン グを先行、あるいはライナックを先行して整備する段階的 整備案も含めて非常に重要な議論が予定されています。ど なたでも傍聴可能ですので、皆さんにもぜひ積極的に参加 してくださるようお願い申し上げます。

# 入射器の現状

### 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

## 加速器第五研究系研究主幹 惠郷博文 (2025 年 4 月 4 日付け)

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



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



2024 年度第 2 期

2024年度第3期

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。

年度	リング運転時	リング調整・ス	ユーザー運転	故障時間(h)	平均故障間
	間(h)	タディ時間(h)	時間(h)		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

表1 2022~2024 年度までの3年間の PF リングの運転統計



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

年度	リング運転時	リング調整・ス	ユーザー運転	故障時間(h)	平均故障間
	間(h)	タディ時間(h)	時間(h)		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

表 2 2022~2024 年度までの 3 年間の PF リングの運転統計



PF-AR運転統計

図6 PF-AR 過去 16 年間分の運転統計。

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%台にくら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。次回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

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

# 放射光実験施設長 五十嵐教之 (2025 年 5 月 28 日付け)

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り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



図1 磁気ブラッグ信号強度の空間分布。

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 ~ 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 µm 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<sub>eff</sub> = 3/2) から生じるキャント反強磁性基底状態を, Dy のL。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<sub>eff</sub>>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([C10mim][NO3]) イオン液体において、冷却/加熱



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 π-π' チャンネルと -π-σ' 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=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



図3 a [C<sub>10</sub>mim]<sup>+</sup> 陽イオンの分子構造。b [C<sub>10</sub>mim][NO<sub>3</sub>]の相転 移の冷却速度依存性。冷却時の転移温度(T<sub>C</sub>)と加熱時の 転移温度(T<sub>CC</sub>)をそれぞれ青丸と赤丸で示す。c 150K 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。 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 $\pi$ 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 $\pi$ 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。 ンプ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、比較的不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てき ました。そのさきがけとなったのが,ポルフィリン(18π 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 較的よく見られ、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).
- 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(デ 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)測定の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

## 低速陽電子実験施設 和田 健 (2025年5月12日付け)

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 µs) において, 陽電子生 成ターゲット部に5kV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 において真空デ ィスターブが発生し, 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ブ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 IF 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-10breakthroughs-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 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。