

放射光実験施設長としての二期目も残り半年となりました。『施設だより』については、PFの再組織化の準備を進めていた5年前の2018年11月号から隔号で担当しており、今回は11回目になります。読み返してみると、色々なことが思い出され、お世話になった方々への感謝の気持ちが湧き上がります。

2019年11月号(の『施設だより』,以下同様)では、「フォトンファクトリー新体制発足記念講演会～PF REBORN 2019～」の報告をしています。この講演会では、次期計画として推進しているPhoton Factory Hybrid Light Source (PF-HLS)に繋がるPFの将来の方向性が議論されました。その際の想定では、新放射光源施設の10年後の実現を目指すとしており、約半分の年月が経過したことになります。2023年5月号でも述べましたが、実現のためには、文科省の「学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想(ロードマップ)」に掲載されることが重要です。今年度、ロードマップ2023策定のための計画の募集があり、KEK機構長から「研究分野を深化・融合・創成する放射光マルチビーム実験施設」が提案されました。その際、新放射光源施設の呼称についてハイブリッドリングからPF-HLSに変更しています。日本学術会議の「学術の中長期研究戦略」に続いて、文科省のロードマップにKEK機構長から提案が行われたという実績は、採否に関わらず、次期計画の実現に向けた大きな一歩と考えています。

PF REBORN 2019では、PFの使命についても議論されました。大学共同利用機関法人KEKを構成する物質構造科学研究所(大学共同利用機関)が運営する学術施設として、PFは「①開発研究を通じて世界を先導する新技術と若手人材を供給する。②先端基盤施設として物質と生命に関わる多様な利用研究を推進する。」を使命として掲げています。放射光科学を取り巻く時代の変遷に合わせて、主に共用施設との役割分担を意識して策定したのですが、PF-HLS計画の推進にあたっては、放射光学術基盤ネットワークを構成するUVSORやHiSORとの役割分担を明確化していくことも重要になります。両施設とは開発研究多機能ビームライン(BL-11A,-11B)の建設を共同事業として進めているところですが、役割分担の議論を通して、より包括的な連携体制を構築できるのではないかと考えています。

PF-HLS計画を推進する中で肝に銘じていることは、新放射光源施設の実現は手段であって目的ではないということです。研究分野の深化・融合・創成による物質・生命科学の推進が計画の目的です。新放射光源施設は、スタッフとユーザーの能力を最大限に引き出し、持続的に優れた研究成果を創出しながら、技術開発と人材育成を担うことを可能にする研究インフラであり、その実現は目的の達成のための手段です。人員や予算に限りがある中で成果を最大化して、特に長期的な観点から貢献できるよう、必要に応

じてUVSORやHiSORとの役割分担に伴う光源性能の最適化を行うなど、計画のブラッシュアップを継続していきます。

放射光のあらゆる性能を統合的に活用することを謳うPF-HLS計画ですので、新しい挑戦も数多くあります。2023年5月号などでも紹介したBL-12A広波長域軟X線ビームラインとBL-11A,-11B開発研究多機能ビームライン(前述の通り、学術基盤ネットワークの共同事業)で、それぞれ、広波長域利用と2ビーム利用の技術実証と利用研究に取り組みます。前者は2023年度内の完成、後者は2025年度の夏期停止期間中の完成を目指しています。2019年11月号では、PFとして推進するプロジェクトについて説明していますが、2021年度からは、そうしたプロジェクトをPF-S型課題として実施しています。広波長域利用と2ビーム利用に関するプロジェクトは、まさにPF-S型課題の趣旨に沿っており、具体的な準備を始めています。なお、開発研究多機能ビームラインについては、施設内にワーキンググループを設置して運用制度の検討を開始しています。放射光共同利用実験の一般課題(G型課題)として実施するのは困難と考えており、ユーザーの皆さんの意見を伺う機会も設けながら、1年程度の期間で運用制度の検討を進めます。そうした運用制度の検討もPF-HLS計画に反映させたいと考えています。

現時点でのPF-HLS計画の概要は、パンフレット(https://www2.kek.jp/imss/pf/pf-hls/library/PF-HLS_202309_v1.pdf)でご確認いただけます。また、ウェブサイト(<https://www2.kek.jp/imss/pf/pf-hls/>)も随時に更新して参ります。現在、施設内でConceptual Design Report ver. 1を準備しており、今後、半年に1回ぐらいのペースでバージョンアップしていく予定です。ユーザーの皆さんにも、遠くない将来に協力をお願いすることになると思いますので、よろしく願いいたします。

PF REBORN 2019の際に発足したPF同窓会の講演会が、11月4日にKEKつくばキャンパスで初めて現地開催されました。見学会も開催され、20年以上ぶりに実験ホールに入域した元スタッフの方々からは「(1980年代の黎明期に)自分が導入した装置と先端的なビームライン」が共存していることに感激したとのコメントもいただきました。2009年にノーベル化学賞を受賞されたアダ・ヨナット博士(KEK特別栄誉教授)の来訪もありました。ヨナット博士からは、PF-HLS計画のパンフレットの表紙に、Good Luck! Many Great Results, Ada Yonath 27.9.23との直筆メッセージをいただきました。長期間の試行錯誤を経てリボソームの構造を解明されたと伺っていますが、優れた研究成果を創出することこそが大切と改めて説かれた気がしました。この先、色々なことがあるかと思いますが、PF-HLSの実現に向けて、一喜一憂せずに取り組んで参ります。

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 惠郷博文
(2023年10月19日付け)

運転状況

9月29日に2023年夏期保守作業と今年度のアップグレード作業を終了し、10月2日より入射器の立ち上げ運転を開始した。10月2日から2週間は、各機器の定格出力動作試験、加速管やクライストロン・高周波源の大電力RFコンディショニング、電磁石の連続通電などの総合動作運転を行った。今回、新型加速管12台の設置を含めて、水漏れや経年劣化の著しい加速管を含む8つの加速ユニットの交換作業を行ったため、通常より長い約2週間のRFコンディショニングを見込む。また、長期の運転停止によって、クライストロン高圧電源内の大電力スイッチであるサイクロトンの動作タイミングがずれているため、レンジングを行ってジッタ調整を進める。10月16日からはビームを加速し、電子銃のビーム出力最適化、RF加速フェーディング、ビーム軌道調整を行うと共にアップグレード

機器を用いたマシンスタディを進め、11月7日から始まるビーム入射運転に備える。光源加速器に加え、今期よりLS1改修を終えたSuperKEKB蓄積リングの運転が再開される。11月27日から陽電子ダンピングリングとBTライン、12月11日からSuperKEKB陽電子LERの運転が予定されており、これらへのビーム入射に対応するビームチューニングも入射器調整期間に行っておく。来年1月後半からSuperKEKB電子HERの運転も予定されており、年明けの調整から4リング同時入射に必要な50Hz運転に切り替える。

入射器アップグレード2023

今夏の主要アップグレードとして、新開発の大口径パルス4極電磁石をJ-ARC出入口に計7台、1・2セクターに計4台、高速パルスキッカー電磁石を入射器出口と第3スイッチヤード内HER-BTラインに各1台設置した(図1,2)。

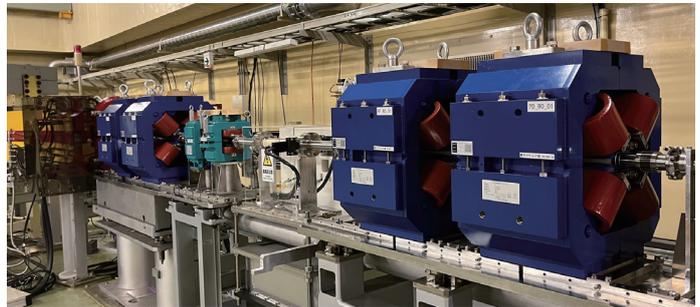
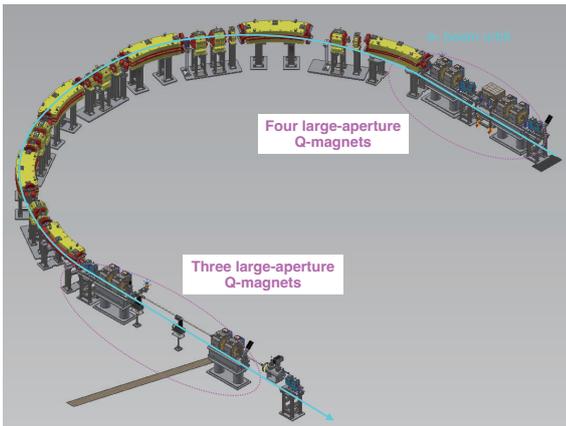


図1 J-ARC部大口径パルス電磁石の配置(左)とJ-ARC入口の実機4台(右)



図2 1・2セクター配置の大口径パルス電磁石(左:水色)、入射器出口に設置された高速パルスキッカー(右)

これらにより、光源系リングのみならず、SuperKEKBリングの入射に要求された設計ビーム性能への到達を目論む。

J-ARCには、電子銃で生成後、1.5 GeVまで加速されたビーム特性の異なる3種類の電子ビーム（RF電子銃で生成される低エミッタンス電子ビーム、熱電子銃で生成されるエミッタンスの大きい陽電子生成用大電荷電子ビームと光源加速器用小電荷電子ビーム）を通す必要がある。今回のパルス4極電磁石の導入によって、これまで使用してきた直流4極電磁石では不可能であった、ビームパルス毎の独立ビームマッチング調整が可能となる。その結果、J-ARC前後でのオプティクス不整合により生じていたビームロスやエミッタンスの悪化が解消される。

一方、1・2セクターにおいては、陽電子生成装置によって作られた低エネルギーの陽電子ビームと3 GeV超で加速されてきた高エネルギー電子ビームをソレノイド電磁石とFODO収束系に内包された同じ加速管群で加速していく必要がある（図3）。これまでは、この陽電子ビーム

に最適化されたビーム収束系を直流電磁石にて構築しており、電子ビームに対しては緩い収束系となっており、ウェイク場などのエミッタンス増大因子に対して脆弱な領域となっていた。新設したパルス4極電磁石を用いることにより、低エネルギー陽電子ビームだけでなく、高エネルギー電子ビームに対してもベータ関数を独立に絞ることができるため、エミッタンス増大の脆弱性が改善される。

高速パルスキッカーは加速器第六研究系の満田氏らと共同開発したものである。96.3 ns 間隔の2バンチ運転において、バンチ毎の独立軌道制御を可能とするもので、昨年J-ARC入口に設置した先行機にて性能は実証済みである。今回、新たに入射器出口、および、第3スイッチヤードに設置したキッカーにより、入射器内で生じた2バンチの軌道変動を個別に修正することができるため、放射光光源リングへの入射ビームには影響を与えず、SuperKEKBリングへの2バンチビーム入射効率の改善と安定化が期待される。

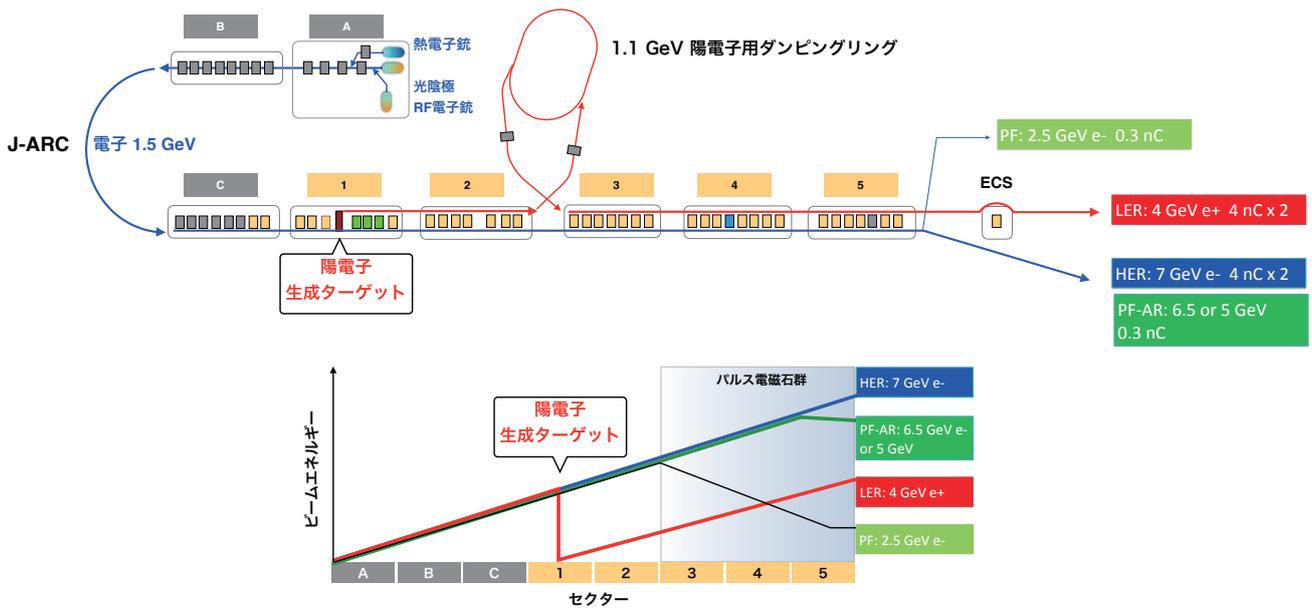


図3 入射器内ビームエネルギー ダイアグラム。横軸：セクター 縦軸：ビームエネルギー

PF リングおよび PF-AR の運転・夏期作業の概要

2023年6月16日9:00にPFリング・PF-ARともに第1期の運転を終了し、夏期の長期停止期間に入った。秋の運転はPFリングが11月7日、PF-ARは11月14日に開始することを予定している。例年にくらべると夏の停止期間が長いことを活用して後述するローレベルRF系の更新やB01電磁石コイル（B01コイル）の交換などのほか、多くの作業を行った。一方で、できるかぎり多くのユーザー運転時間を確保するためにも、11月の加速器立ち上げ調整期間は通常にくらべてかなり短縮している。場合によっては建物や各種機器の温度が安定するまでビーム軌道の安定度に影響が出る可能性は否定できないため、立ち上げ時に注視したい。また、真空作業を行うとリングの焼きだし時間を要するため今期は大規模な蓄積リング側真空作業は実施していない。

夏の作業での重点項目は、PFリングでは水平方向の軌道変動の原因と考えられているB01コイルの交換作業、ローレベルRF系をデジタルシステムへの更新のほか、第1期の運転で問題になったキッカー電源の故障対応などである。PF-ARでは5.0 GeV運転に対応したパルスごとのトップアップ入射切り替えを実現するよう、Linac第3スイッチヤードにおいてPFのビーム輸送ライン（BT）にて改造を行った。そのほか、詳細は以下の節で記載する。

PF リングの夏期作業状況

今期の夏期作業で大規模なものはB01コイル交換とローレベルRF（LLRF）更新であり、それぞれ次節で詳しく述べる。それ以外にも通常の保守・点検作業に加えて様々な改良や老朽化対策を実施している。入射関連では、春季運転中に発生した入射キッカー故障（詳細は前回のPFニュースで報告済み）について原因調査と対策を実施し、秋の運転からはキッカー4台での入射が実現できる予定である。軌道電磁石関係では、これまで進めてきた軌道安定化プロジェクトの一環として、小型ステアリング電源（HD 28台/VVD 42台）の新電源（FastPS）への交換作業を実施した。引き続き、制御系のソフトウェア更新作業を行っている。J-PARC火災（<https://www.kek.jp/ja/notice/202310261400/>を参照）を受けた追加の保守点検項目として、電磁石電源の運転前点検を実施する予定である。ここでは基板、端子、ブスバーなどの外観点検を行うほか、特にナイフスイッチの通電試験で発熱等の異常が無いかの確認を重点的に実施する。RF関連では、後述するLLRF更新の他は通常の保守作業を遅滞なく実施している。ビームモニタ関連では、9月11日～15日にPF-BTスクリーン動作チェック・カメラ調整作業のほか、リング内水漏れ検知ケーブル配線作業を実施した。これは従来の「ポイント」

で検出する方式から「ライン状」のセンサを使用することでトンネル内全域をくまなく監視することを目的としたものであり、異常発生時にいち早く検出することが可能となる。挿入光源関連のトピックスとしては、超伝導ウィグラーの冷凍機保守を行っているほか、ID19にて「その場磁場測定器」のR&Dを実施している。

B01 コイル交換

PFリング運転中に原因不明の水平方向軌道変動が起きることがあった。これまでは2022年度PF News Vol.40 No.2 光源の現状でも報告しているように、軌道フィードバックを高速化することで影響を最低限にするよう対処していた。その後も原因調査を継続した結果、B01コイルに

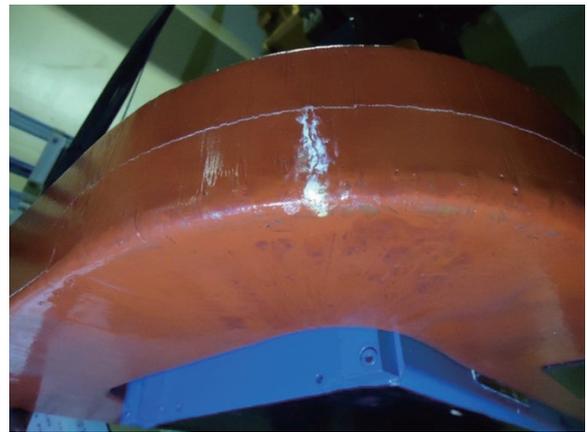


図1 B01コイルで見つかった水漏れらしき形跡の写真。この水漏れ跡を発見した後は加速器運転中もカメラで常時監視していたが、新たに漏れるような現象は発生しなかった。電磁石は1980年に製作されたもの。他のコイルも全て目視点検したが異常は発見されていない。



図2 交換作業風景。画面左側にあるB01電磁石を半割りして、通路側にて上部磁極のコイルを交換しているところ。

水漏れの跡があったこと（図1）と、軌道の single kick パターンから推定すると B01 が原因である可能性が極めて高いと判断できたため、2023 年夏期停止期間中にコイル交換（図2）を行う方針とした。交換作業は無事に終了し、絶縁測定および通電試験で問題無いことを確認したほか、定格電流を流した時の温度上昇も問題はなかった。軌道変化を発生させる磁場変化は微弱であるため通常の磁場測定で観測することは困難であり、運転前に検証することは不可能である。今回のコイル交換でビーム変動が収束するかどうかは、秋の運転開始後に実際の蓄積ビームを使って検証する。

PF リングローレベル RF 系の更新

PF リングで進められている PF 高度化計画の一環として、高周波加速システム（図3）のうちの低電力高周波制御系（ローレベル系）の更新を進めている [1,2]。ローレベル系の主要な役割は、加速空洞で発生する高周波電圧の振幅と位相を安定化すること、加速空洞の同調を制御すること、機器に異常が発生した場合に大電力高周波の投入を停止すること、などである。現状のローレベル系は、図4に示すように多数のモジュール化した高周波回路を NIM ビン（電源付き筐体）に収納し、回路モジュール間をケーブルで接続してシステムを構成している。しかし、近年アナログ部品の調達が難しくなっており、今後安定に運用してゆくことが困難である。これを最先端のデジタル技術を用いた高周波制御系に置き換えることで、より高安定で高性能なローレベル系を構築する予定である。新しいデジタル・ローレベル系は、デジタル通信用途に用いられる MTCA.4 規格に基づく各種回路ボード群と筐体（シェルフ）を組み合わせて構築する。令和3年度補正予算（施設整備補助金）により、2022 年度にデジタル・ローレベル系の中核部分である「PF 低電力高周波デジタル制御システム」の調達を行った。この中核部に各種周辺機器や信号配線等を加えて、新しいデジタル・ローレベル系を構築する。デジタル・ローレベル系を単体で試験している様子を図5に示す。

2023 年 6 月 16 日に PF リングが運転停止した後、既存のアナログ・ローレベル系からデジタル・ローレベル系への移行作業を進めている。図6は高周波源（クライストロ



図4 PF リングの旧ローレベル RF 系



図5 試験中のデジタル・ローレベル RF 系の一部

ン）から大電力を出力した状態でデジタル・ローレベル系を試験するために、大電力系のシステムを組み替えてダミーロードに接続する作業をしている様子である。アナログ/デジタル両方の LLRF 系でスペクトル測定をおこなって比較したほか、各種の信号レベル調整とフィードバックループの応答測定などを実施した。次に、高周波源の出力を加速空洞に接続し、各種の調整を実施している（図7）。これらの大電力試験と並行して、PF リングの運転に使うため

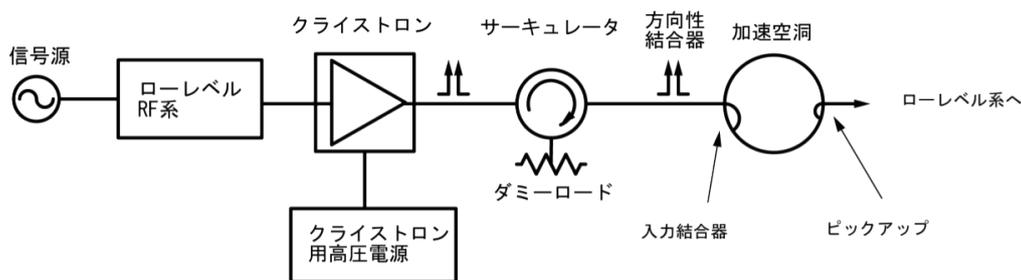


図3 PF リングの高周波加速システムの概念図（4系統のうちの1系統）



図6 ダミーロードへの接続作業



図7 新ローレベル RF 系調整の様子

のソフトウェア（オペレータ用操作パネルや立ち上げシーケンス・プログラムなど）の開発も進めている。新しいローレベル系は、2023年11月から始まるPFリングの運転で使用する予定である。

- [1] 内藤大地, 他 "KEK-PF のローレベル RF 系更新の準備状況とプロトタイプ試験", 第19回日本加速器学会年会, 2022年10月18-21日, オンライン(九州大学), pp. 639-643.
- [2] 内藤大地, 他 "KEK-PF リング用ローレベル RF 系更新の進捗", 第20回日本加速器学会年会, 2023年8月29-9月1日, 日本大学理工学部船橋キャンパス THOB6

PF-AR の夏期作業状況

PF-AR においても各グループとも適切に保守・維持管理作業を行った。電磁石関係では、ニチコン製偏向電磁石電源用屋外トランスヤード高調波フィルター盤の保守点検を実施し高調波ノイズの除去機能が維持されていることを確認した。東芝製偏向電磁石電源の保守点検を実施したところ、点検作業中にゲート回路基板の出力不良が判明した

が、数時間後に自然復旧した。その後の総合動作試験でも安定度・リップルに問題は無かった。当面はAR運転を継続できる見込みであるが、いつ再発するかも不明であり、これは不具合が潜在化しているだけと考えている。類似の電源を使用しているJ-PARC関係者とも相談して同型電源の基板が利用可能か、予備基板作成の可能性があるか、なども含め対応を進めている。QC4N 四極電磁石電源の立ち上げ時にAC受電異常が発生しリセットが効かない状態であったが一日後に自然復旧した。こちらも潜在的な不具合となっており、メーカー調査を進める。このほか、電磁石関係の作業としては通常のメンテナンスとして大型電源のフィルター交換を伴う簡易清掃と内部外観点検を実施し電磁石電源群の健全性を確認した。RF関係では通常のメンテナンス等を実施しているほか、老朽化した導波管の一部を更新する作業を実施した。また、空洞高次モード(HOM)カップラーとHOMケーブルへの空冷強化(ファン増設)が一通り完了したことから、今年秋からの運転でユーザー運転中のビーム電流を現在の50 mAから55 mAに増強できる可能性が出てきた。関係するグループやユーザーとも相談し、秋の運転立ち上げ時に試験をおこなう予定である。モニター関係では、春季運転中に故障した純化アンプの修理を行っている。また、故障していたチューン測定・フィードバック用の大電力アンプを調達するための入札準備を進めており、入射時の蓄積ビーム振動を抑制する(振動の減衰時間を短縮する)ことを目標として来年度から導入することを目指している。

ARテストビームライン(AR-TBL)では、電子ビームエネルギー選別用新偏向電磁石電源のメーカー実負荷調整作業を完了した。長時間連続通電により10 ppmという非常に高い安定度を達成した。定格は140 V/200 A, 28 kW電源である。このほか必要な安全システムの動作試験を実施しており、特に問題は起きていない。旧電源を切り替え可能なバックアップ電源とし秋からの運転では新電源の運用を開始する。秋からの運転でもユーザー運転を実施予定であり必要な整備や電子ビーム収量向上のための準備を進めている。

夏のPF-AR 空調工事について

夏の停止期間において、PF-ARでは大規模な空調更新を実施した。6月16日の運転停止直後から作業に入り、9月20日までの約3ヵ月間で予定通り完工した。トンネル及び東棟、南棟、北棟、北東棟の空調が停止するという、大規模かつ長期間にわたって停止することは経験したことが無いため様々な対策を講じた。トンネル内は空気を環流するための工業扇を約20 m間隔で全周にわたり設置したほか、高圧をかける真空ポンプ類については、図8に示すようにCCGとSIPの高電圧コネクターをビニール袋で覆って中に除湿剤(シリカゲル)を入れることで湿度対策を実施した。実験室については外気の流入を止め、実験機器を停止して対応している。9/14~16には空調の負荷試験とパラメータ調整を行うためリングの電磁石に通電を行い



図8 湿度対策を施した例。筒状にしたビニール袋をかぶせ、中にシリカゲルを配置。定期的に中の状況をチェックして、必要に応じて交換を実施した。

熱負荷を与えた。熱負荷の入り切りによる空調追従性の検証も行い増強された新空調システムで十分に加速器の運転に

対応できていることを確認した。

図9にトンネルおよび制御室の湿度および湿度変化を示す。幸いにも100%を超えて結露するような事態にはなっていない。現在、運転に向けて各種機器の立ち上げおよび機器の健全性確認を行っている。

次期光源の検討

PFリング、PF-ARともに多くの放射光ユーザーに活用されている施設であり、稼働から約40年経過しているものの現在でも競争力のある極めて重要な施設である。しかしながら、これまで随時対策を講じているとはいえ、さらなる性能向上を達成するためには新しいコンセプトに基づく新たな放射光源を開発し建設することが必須であることは言を俟たない。

そこで我々は汎用性と先端性の両方を併せ持つ新たなコンセプトとして、超伝導線形加速器からの高品質ビームと、蓄積リングからのビームの両方を活用できる施設とし

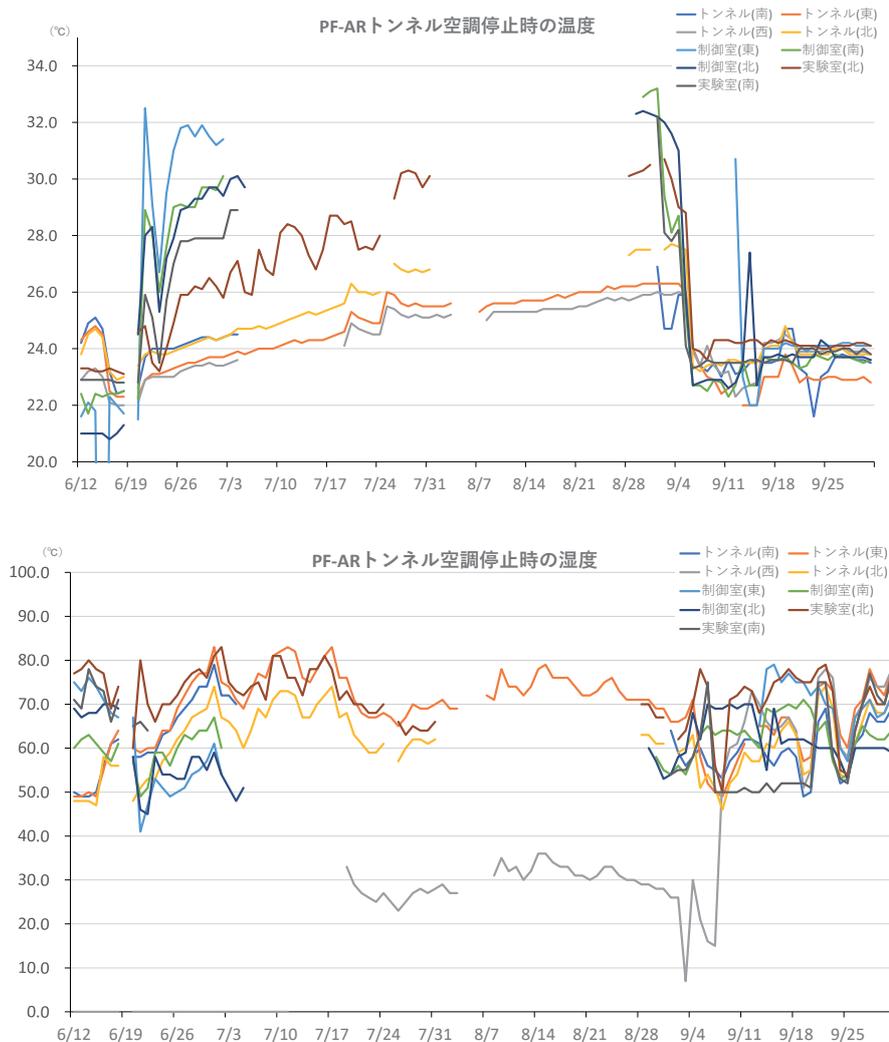


図9 空調停止後のARトンネルおよび地上制御室の温度変化(上図)と湿度変化(下図)。今回の機器更新に合わせてセンサも交換しているため途中でデータが欠損している部分がある。湿度はおおよそ50-80%で推移しており、100%を超えて結露する事態には陥っていない(湿度30%台を示しているセンサは故障であることが判明した)。

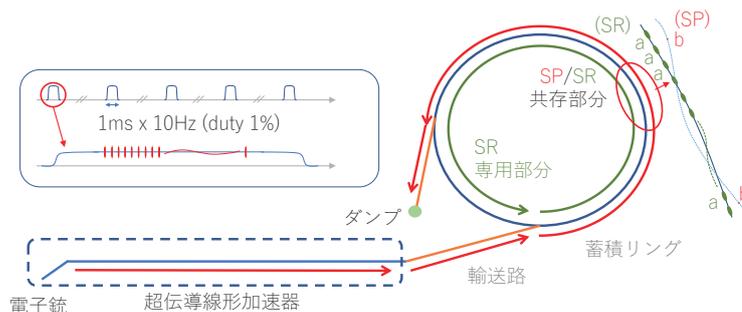


図 10 ハイブリッド光源のコンセプト概念図

て「放射光マルチビーム実験施設計画 (PF-HLS : Photon Factory Hybrid Light Source)」を提案している。既に投稿論文 [3] および加速器学会誌 (2022 年 7 月 ; Vol.19, No.2)[4] 等で紹介しているので、詳細はそちらを参照して頂きたい。あわせて Web での情報公開も行っている [5]。図 10 に PF-HLS の概念図と典型的なビームパターンを示す。

あくまでも暫定的なパラメータとしての光源スペックをいくつか紹介する。ハイブリッド光源を構成する蓄積リング部分は、多岐にわたる放射光ユーザーからの要望をカバーできることと長期にわたる学術研究の基盤となり、拡張性に優れることが求められる。そこで蓄積リングを 2.5 GeV と 5.0 GeV のエネルギー切り替えで運転することによって、建設と運転コストを抑制しながら広波長領域に対応する光源を実現する。リングの周長は約 750 m としてエミッタンスは 5.0 GeV 運転時に 1 nm rad, 2.5 GeV 運転時に 0.25 nm rad である。長直線部に低エネルギー用と高エネルギー用の 2 台の挿入光源をタンデムに配置して 10 eV ~ 100 keV の広波長域の高輝度ビーム利用を可能とする。

このときカバーできる放射光スペクトル領域を図 11 に示す (Brilliance 絶対値はエミッタンスやオプティクス設計、挿入光源設計によって変わるため、あくまでも暫定的な参考値である)。

蓄積リング・超伝導線形加速器ともに開発要素は多く、多岐にわたっている。昨今のエネルギー情勢を反映した省エネ設計も必須であり検討を進めている。超伝導線形加速器のパラメータは基本的には ILC (国際リニアコライダー) 用の加速空洞をもとにしており、このスペックでも十分な成果が得られると考えているが、さらなる性能向上を目指して電子銃開発やビームローディング補償、パワーカップラなど検討すべき項目がある。今後も蓄積リング部分の詳細設計を優先しつつ、全体計画の実現に向けた研究開発を進めていく。

[3] K. Harada *et al.*, “Conceptual design of the Hybrid Ring with superconducting linac”, J. Synchrotron Rad. (2022), 29, 118-124, <https://doi.org/10.1107/S1600577521012753>
 [4] K. Harada *et al.*, “Conceptual Design of the Hybrid Ring”, 「加速器」 Vol. 19, No. 2, (2022) p.62, https://doi.org/10.50868/pasj.19.2_62
 [5] <https://www2.kek.jp/imss/pf/pf-hls/>

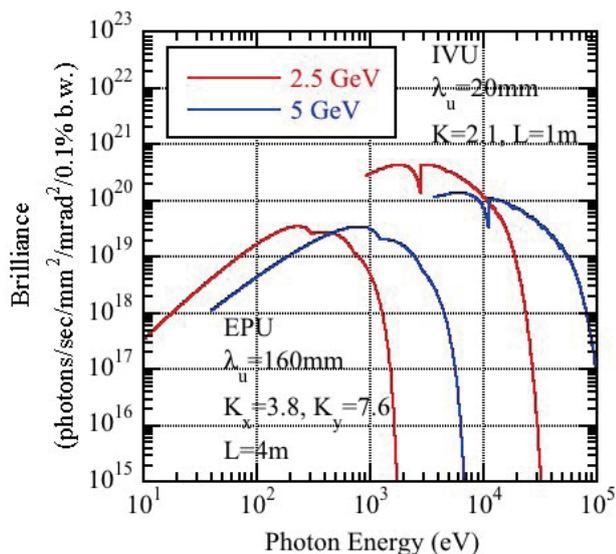


図 11 放射光スペクトル範囲。図の Brilliance 絶対値は暫定パラメータによる参考値であり、この図はカバーする波長領域を検討することが主目的である。

2021年11月号と2022年5月号に続き、本号では、実験施設として推進しているプロジェクト「軟X線領域のコヒーレンスを利用したイメージング手法の技術開発」について紹介します。

「軟X線領域のコヒーレンスを利用したイメージング手法の技術開発」

(プロジェクト責任者：中尾裕則)

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、200~5000 eVでのRXS実験が可能となる真空中X線回折計群を開発し、RXSによる研究を推進してきました[1]。その結果、現在のPFの光源でも、十分にコヒーレンスの利用が可能であることが判明し、コヒーレント回折イメージング(CDI)による磁気スキルミオンなどの観測に成功しました。

さらに、S2型課題(2018S2-006, 2021S2-004)により磁気イメージング研究を推進し、試行錯誤の中から、広視野・低分解能実空間イメージングから狭視野・高分解能CDIまで連続的に変化させる測定手法や、逆空間信号に注目した磁性体中のトポロジカル欠陥構造に対する新たな観測手法などを開拓してきました。このように軟X線領域のコヒーレンスを利用したイメージング手法は、まだまだ大きな発展の可能性を秘めています。

このような背景のもと、S2型課題での利用研究と並行して、様々な測定手法に挑戦することで当初の想定を超えるような先端的なイメージング手法を開発することを目指した本プロジェクトを2021年6月にスタートさせました。基盤技術部門の時間分解チーム・検出系チームとの協力により、様々な時間スケールでの磁気テクスチャの外場応答を広い空間スケールで捉える動的なイメージング手法へと発展させることなど、様々な挑戦をしています。その中で、本稿では、特定の電子・磁気秩序を反映したブラッグ反射を測定する反射型コヒーレント回折実験に向けた装置開発の状況を紹介します。

1) 回折計開発

本プロジェクトで開発する回折計の最大の難関は、コヒーレント光の切り出し部と試料部の分離にあります。これまで行ってきたCDIでは、コヒーレント光を切り出すためのピンホール直下に、集束イオンビーム加工で薄片化した試料を張り付けており、後述の温度ドリフトや振動の影



図1 反射型コヒーレント回折実験に向けて開発した回折計

響を受けません。一方、反射配置の回折実験では、コヒーレント光の切り出し部と試料部の分離が必須となり、どの程度の精度でビーム・試料位置を制御できるのか、またどの程度の影響があるのか評価することなどが、重要となります。

新規に回折計を立ち上げるほどの予算はないため、既存の真空中X線回折計を利用して、位置をnmオーダーで制御可能な回折計と試料上流側のコヒーレント光照明システムの構築を進めました。回折計部は、部品となるピエゾステージ群を購入し、それらを組み上げることで製作しました。既存装置の改造ということで、天井からz軸- ω 軸-x,y軸- χ 軸- ϕ 軸という特異な構成となっています(図1)。そのため、回折計としての精度に不安がありましたが、これまでの予備実験で通常の回折実験は可能であることまで確認しています。コヒーレント光照明システム部は、コヒーレント光の切り出し機構とフレネルゾーンプレート(集光素子)で構成されており、簡便に数ミクロンの集光ビームを得ることができています。

2) 冷凍機開発

物性実験では低温域での温度依存性の実験が欠かせません。しかし、コヒーレント光の切り出し部と試料部を切り離れた回折計の構成であるため、ビームに対して試料部が温度ドリフトする影響は避けられません。また、ピエゾステージで組み上げられているため、ステージにかかるトルクを軽減する必要もありました。これらの理由から、小型冷凍機の開発に着手しました。

まずは、冷凍機(単体)の試作と試験を実施しました(図2)。具体的には、Heフロー型冷凍機本体から銅ワイヤーで回折計(試料)部に熱を伝えることで試料部を冷やすとともに、冷凍機の乗っているピエゾステージ部は室温を保つように冷凍機下部(温調部2)を温度制御することにし



図2 He フロー型冷凍機本体と試料部を分離した小型冷凍機

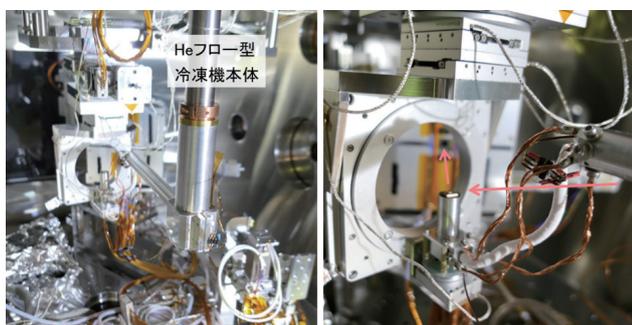


図3 小型冷凍機を回折計に搭載した様子(左)と試料部(右)

ました。試料の温度となる温調部1と室温の温調部2が近い
ため、試料部の到達温度の目標は20 Kとしていましたが、
結果として10 Kを切ることができました。次に、回折計に
設置可能な冷凍機の製作と試験を実施しました(図3)。回
折計の真空チャンバー内の機器を避けつつHeフロー型冷凍
機からの熱を試料部に伝えるため、コールドヘッド部をL
字状にしたり、熱を伝える銅ワイヤーが剥き出しだったり
するなど、実機では到達温度よりも利便性を優先しました。
その結果、試料部の到達温度計は30 K程度となりました。

3) 振動対策

本装置では、振動の影響が大きいことも予想されました。
そこで、回折計を厚めの定盤に設置するとともに、定盤と
真空チャンバーの間をネジで突っ張りしました(図1)。そ
の後、改造に利用した架台部と回折計の振動測定を行いま
したが、振動は両者でほぼ一致しました。振動のモニター
が今後の重要な課題です。特に実験結果を解析する際に見
出された異常と振動イベントの照らし合わせを可能にする
ことが必要です。現在、真空チャンバー内に振動計を設置
して常時モニターするシステムを構築することを検討して
います。

4) X線検出器について

現在、フォトダイオードを用いて、フレネルゾーンプレ
ートの調整などを行っています。しかし、切り出したコヒ
ーレント光を試料部に結像させて照明光とするような実験
には、より感度の高い検出器による調整が必須であり、ア
バランシュ・フォトダイオードの利用を検討しています。
また、CCDと比べて読み出しが早くノイズレベルも低い2
次元X線検出器CMOSの利用を、硬X線領域でPILATUS
が導入されたときのような実験手法の新たな展開が拓かれ
ることを期待しながら検討しています。

2023年度第2期のビームタイムでは、本稿で紹介した
開発中の装置を利用して、実際の試料の観察に挑戦する予
定です。

[1] <https://research.kek.jp/people/hironori/beamlines/rsxs/>

運転・共同利用関係

2023年度第2期の運転ですが、PFは11月7日に、
PF-ARは11月14日に開始する予定です。PFのハイブリ
ッドモードは12月7日から12月28日を予定しています。
PF-ARは5 GeVで運転を開始して、12月8日から12月
28日まで6.5 GeVで運転を行います。第3期の運転スケ
ジュールについては、11月中旬ごろに決定します。

PF-PACの全体会議が9月11日にハイブリッド会議方式
で開催され、課題評価基準の明確化についての審議などが
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。
9月30日付で、測定装置部門の亀沢知夏さんが特別助教
を辞職してご家族とともに中国へ渡航されました。10月1
日付で、基盤技術部門の仁谷浩明さんが助教から技師に異
動しました。引き続き、制御系チームを主務としてインタ
ーロックチームも兼任します。また、10月16日付で、PF
事務室に上野純子さんが着任しました。前職はKEK管理
局です。亀沢さんのご多幸をお祈りするとともに、仁谷さ
んと上野さんの益々の活躍を期待しています。

はじめに

放射光科学第一，第二研究系は，放射光を始めとする量子ビームを駆使して，先端的な物質・生命研究を行うことを主なミッションとしています。その名の通り放射光の利用が中心なのですが，4種類の量子ビームを持つ物構研の強みを活かして，複数のプローブを組み合わせた，いわゆるマルチプローブ利用研究を展開しています。今回はそれらの研究のうち，表面科学研究部門のメンバーが中心になって実施しているものをいくつか紹介します。

薄膜の元素分布，化学状態，磁気状態の深さ分解分析

PFにおいて開発した軟X線領域の深さ分解XAS(XAFS)/XMCD法は，薄膜等の表面付近の化学状態，磁気状態の深さ方向の分布を，ナノメートルを切る深さ分解能で元素選択的に観察できる強力な手法です。特に，XMCDを用いれば，スピン磁気モーメントと軌道磁気モーメントを分離して求めることができ，磁気異方性に関する重要な情報が得られます [例えば，K. Amemiya and K. Sakata, Phys. Rev. B **106**, 134424 (2022)]。一方でXASは，元素分布を調べるのにはあまり適していないため，薄膜の構造（深さ方向の元素分布）がわかっていないと，深さ分解分析の精度が大幅に低下してしまいます。また，ナノメートルを切るような深さ分解能を実現するには，検出深度（シグナルが1eまで減衰する深さ）を1ナノメートル付近で変化させる必要があります。したがって，例えば表面からの深さ10ナノメートルの部分に対して，ナノメートルを切る分解能を実現することは，ほぼ不可能です。したがって，磁性薄膜の上に保護層や電極をつけてしまうと，磁性薄膜の部分の深さ分解能が低下してしまい，十分に有用な情報が得られなくなります。

これらの長所・短所をもつ軟X線深さ分解XAS/XMCDと相補的な手法として，反射率法を用いた研究を進めています。薄膜の構造を調べるには硬X線反射率が多く用いられますが，磁気モーメントの深さ分布も調べるとなると偏極中性子反射率法が有効です。反射率法は表面付近だけではなくある程度深いところにある界面も含めて，高い深さ分解能で分析が可能のため，深さ分解XAS/XMCDでは難しい，いわゆる埋もれた界面の分析に適しています。一方で中性子反射率は，化学状態に対しては鈍感なため，X線で得られる情報と組み合わせることが重要です。将来的にはさらに，最表面付近の原子配列が調べられる低速陽電子回折や，逆にもっと深いところで深さ分解ができるミュオンを用いた分析などを組み合わせて，マルチ深さスケール・マルチモーダルで薄膜研究を展開していきたいと考えています。

水分解触媒における酸素，水素の状態の観察

水を原料とする水素発生は，クリーンなエネルギー媒体として期待される水素の製造手段の一つであり，その効率を高めるための触媒が注目されています。典型的な水素発生は電気化学反応（水の電気分解）によって行い，対となる水素発生電極と酸素発生電極のそれぞれに，金属をベースにした触媒が用いられています。この反応の機構を探るために，最近開発した「蛍光収量波長分散型軟X線吸収分光法」[K. Amemiya *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **91**, 093104 (2020)]を固液界面に適用し，電気化学反応中の触媒表面（固液界面）のリアルタイム観察を実現しました [K. Sakata and K. Amemiya, Chem. Lett. **50**, 1710 (2021)]。この手法を用いると，軟X線吸収スペクトルを数秒ごとに連続測定できるので，我々はまず，反応全体の効率を制限していると言われている酸素発生用の触媒に着目し，CoやRuの酸化物からなる触媒に対して，電気化学反応中の表面を，電位を掃引しながらリアルタイムで観察しました。その結果，反応中間体の一つと考えられる酸素種が，ある特定の電位でのみ出現する様子を観察することに成功し，反応機構に迫る有用な情報が得られると期待しています [K. Sakata and K. Amemiya, submitted]。

一方で水素発生側についても同様の研究を進めたいのですが，残念ながらX線吸収分光では水素自体を観察することはできません。もちろん，水素以外の元素の測定はできるので，反応機構につながる何らかの情報は得られるのですが，肝心の水素の情報がなくては，物足りない感は否めません。そこで着目したのが，最近急速に应用が進んでいる，ミュオンを用いて水素の状態を調べる手法です。これは，物質中に存在する水素をミュオンで観察するわけではなく，打ち込んだミュオンから生成するミュオニウムを疑似的に水素とみなし，その挙動から水素の状態を調べるものです。まだ最初の測定を行ったばかりで，これからどんな結果が得られるか全くわかりませんが，放射光を用いた測定と組み合わせることで，これまでになかった新しい研究が展開できると期待しています。

人事異動

放射光科学第一，第二研究系の人事異動を報告します。10/1に，材料科学研究部門の研究員としてUY, Mayrene Allamさん，構造生物学研究部門のKEK日本学術振興会特別研究員として藤田雅也さんが，それぞれ着任されました。日本学術振興会の特別研究員は従来，KEKとの雇用関係はありませんでしたが，10/1の制度改訂によってKEKで直接雇用することが可能になりました。藤田さんは，2021年4月から特別研究員としてKEKで研究をされていましたが，今回改めてKEKの職員として採用されました。