# 入射器の現状

#### 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 あるサイラトロ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 ェージング、ビーム軌道調整を行うと共にアップグレード

# 加速器第五研究系研究主幹 惠郷博文 (2023 年 10 月 19 日付け)

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 50 Hz 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、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 が長いためこれ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 一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/VD 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無かった。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きており、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、大電力系の系統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20m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。



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。

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/

# 放射光実験施設長 船守展正 (2023年10月28日付け)

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ています。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-α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 離し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20Kとしていましたが、結果として10K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剝き出 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30K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,アバランシェ・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1/e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なため、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、最近急速に応用が進んでい 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、これまでにない新しい研究が 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。