

## 入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 古川和朗  
(2019年11月5日付け)

### 概要

7月1日から9月23日までの夏の保守期間においては、例年の保守作業と、改善作業の他に4月の火災の復旧作業が行われた。9月の一般公開に関しては、入射器棟に火災に伴う臭気が残留していたために、来年度の公開を目指すことになった。7月に開催された SuperKEKB 加速器諮問委員会の報告が公表され、主要勧告の対象に入射器に直接関わる案件は無かったが、入射器関連の8つの発表に対する個々の勧告について、対応策の検討を始めている。保守期間終了後の9月24日からマイクロ波装置のコンディショニングを開始し、10月15日には SuperKEKB HER/LER、17日から PF、23日から PF-AR への入射をそれぞれ再開した。それぞれの蓄積リングに向けて順調な入射運転を継続しながら、同時入射機構を有効に利用して、性能向上の試みも実施している。

### 火災復旧

電子陽電子入射器棟に隣接する加速管組立室において4月に発生した火災の煤によって、入射器関連の機器も大きな影響を受けたが、当時は早期のビーム入射再開を優先し、一部の作業は夏に持ち越していた。その後、一度清掃した装置にも再度煤や液状の付着物が見られるようになり、装置の健全性が懸念されるようになっていた。

火災直後の回復作業においては、時間的な制約から、壁

などの付着物や高所の煤の撤去を充分に行うことができなかった。徐々に機器へ影響を与えていると考えられるので、入射器棟内については、夏の保守期間に回復作業を行い、クライストロンギャラリーとトンネル、クライストロン組立ホールについては、高所作業も含めて秋の運転前に回復作業をほぼ終えることができた。火災が発生した加速管組立室については慎重な準備を進めている。

クライストロン組立ホールには入射器運転用の装置も配置されていたが、一部はすぐには回復できなかった。対応策を検討したところ、当面の入射ビームの性能を大きくは損なわない範囲で、装置を停止させることが可能であることがわかり、大型の偏向電磁石電源1台と、大電力マイクロ波電源2台について、当時は回復を諦めて、夏期停止期間に回復作業を行った。秋の運転開始時には、機器の健全性をひとつひとつ確認しながら慎重にビーム運転を進め、通常運用に戻すことができた。

加速管組立室自体については、被災機器の検証を行い、かなりの機器が使用不能とわかったため、撤去を行った。来年1月までに建物の回復作業を行い、5月までには加速管試験を開始できるような準備を整えたいと考えている。今後の入射器の運転に使用される S-バンド加速管の試験を行うつもりである。



図1 被災直後のクライストロン組立ホール（左上），と回復作業の進んだ最近のホール（右下）



図2 火災直後の加速管組立室、焼損した電源は奥で見えていない（上）。被災機器を撤去・廃棄し高所回復作業の準備が進んだ最近の状況（下）。

光源リング運転状況

今年度も夏期の停止期間中に、各種装置の定期的な点検保守を行い、PFリングおよびPF-ARともに立ち上げへ向けて準備を行ってきた。特に、PF-ARにおいては、次節で詳述するが、高周波加速空洞の高次モード減衰ケーブルの全数交換という大がかりな作業を約3ヶ月間に渡って行った。

図1に、PFリングの秋の立ち上げ日10月17日9:00～11月1日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。PFリングでは今夏は真空チャンバーを大気暴露するような大がかりな作業がなかったため、立ち上げにおけるビーム寿命の回復は順調で、早い段階で蓄積電流値450 mAにおける $I \cdot \tau$ が600 A・minを超えるまでになった。立ち上げ時における各種調整も順調に進み、予定通り10月28日9:00からの光軸確認後ユーザー運転を開始した。11月22日からの

ハイブリッドモードでの運転までは、250バンチのマルチバンチ運転となる。

図2に、PF-ARの立ち上げ日10月23日9:00～11月1日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。SKEKBの陽電子入射路において10月21日夕方に発生した電磁石トラブルの影響により、予定していた立ち上げスケジュールに変更があったものの、立ち上げ調整およびビーム寿命の回復も順調にすすみ、10月28日9:00からの光軸確認後、ビームエネルギー5 GeVでのユーザー運転を開始した。新規に設置した高次モード減衰ケーブルの温度も安定していて問題ないものの、ケーブルに使用している絶縁ポリエチレンに不安があるため、安全を考慮して蓄積電流値の最大値を50 mAにして運転を行なうこととした。11月11日9:00に予定されている6.5 GeVへエネルギー切り替えまでは、5 GeV 運転となる。

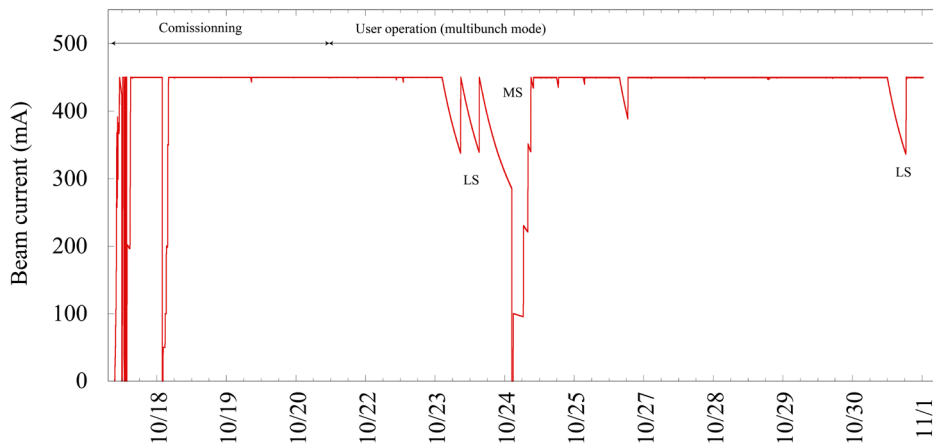


図1 PFリングの立ち上げ日10月17日9:00～11月1日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。LSは、入射器マシン調整日、MSはリングマシン調整日を示す。

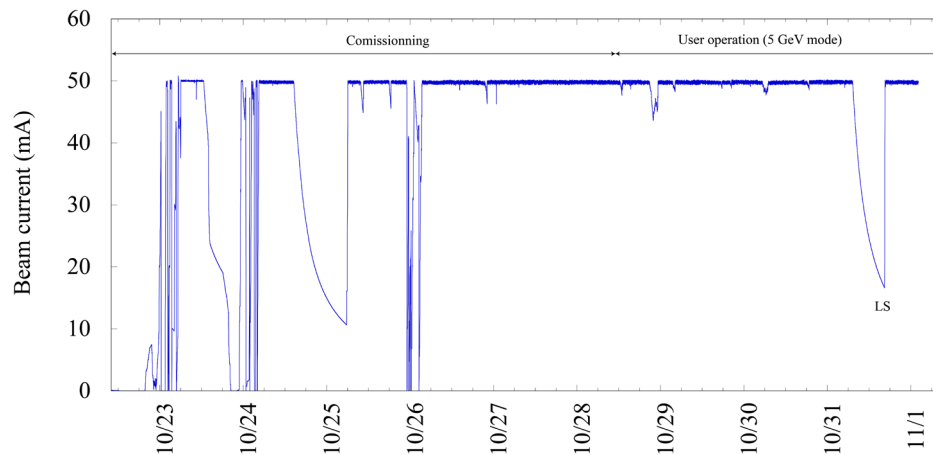


図2 PF-ARにおける立ち上げ日10月23日9:00～11月1日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。LSは入射器マシン調整日を示す。

### PF-AR 加速空洞の高次モード減衰用ケーブルの更新

大強度放射光リング PF-AR では、6 台の APS (Alternating Periodic Structure) 型加速空洞を用いてビームを加速している。ちなみに APS 構造とは、高エネルギー物理学研究所第 2 代所長の故西川哲治先生が考案された加速構造である [1]。PF-AR では、TRISTAN 計画の加速空洞として 1985 年頃に開発された APS 型加速空洞 [2,3] を現在でも現役で使用している (図 3)。

PF-AR の加速空洞では、各加速セル (空洞当たり 11 個ある) に高次モード結合器 (HOM カップラー) [4] という一種のアンテナが取り付けられていて、ビームが空洞内に誘起する余分な電磁場 (Higher Order Mode; HOM) を引き出し、ビーム不安定性を起し難くしてある。高次モード結合器から引き出された電磁波は、同軸ケーブルを通してダミーロードに導かれ、そこで消費される。これらの機器の写真を図 4 に示す。

PF-AR では 2017 年 2 月に直接入射路が完成し、フルエネルギー (6.5 GeV) でのビーム入射を開始した。2018 年 11 月からは、蓄積電流を一定に保つトップアップ入射を開始した。これらによりビーム電流を高い値 (50 ~ 55 mA 程度) に維持できるようになり、放射光の平均強度が



図 3 PF-AR の APS 型加速空洞 (東直線部に設置された 4 台)

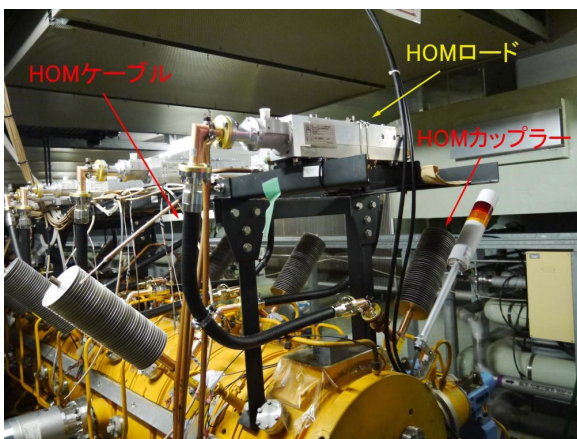


図 4 PF-AR 加速空洞の高次モード (HOM) 減衰器。更新後の 2019 年 9 月に撮影。

大幅に向上した。一方で、蓄積電流が向上したのと同時期の 2018 年 5 月頃から、上記の高次モード引き出し用ケーブル (HOM ケーブル) が発熱するトラブルが急増した。2018 年 5 月 ~ 2019 年 6 月の期間に、ユーザー運転を中断して HOM ケーブルまたはその周辺機器を交換した事例が 4 件起きている。取り外した HOM ケーブルを観察すると、ケーブルのポリエチレン絶縁体が黒色に変色し、溶けている事例もあった (なお、HOM ケーブルの温度が上昇した場合には、温度スイッチにより加速用高周波が停止されるため、火災に至る事はない)。

この HOM ケーブルの発熱トラブルの原因は、ビーム電流の向上に伴って高次モード電力が増加したことに加えて、HOM ケーブル等に使われているポリエチレン絶縁体が劣化したことが原因と考えられる。HOM ケーブルは前回更新してから 10 年以上が経過している。その間 PF-AR の偏向電磁石から放出される放射光の散乱 X 線に晒され続け、劣化しているものと思われる。このため、2019 年夏の停止期間中に HOM ケーブル等の更新を行っている。

HOM ケーブル等の更新では、放射線により劣化していると考えられるポリエチレン部品を全て交換する。具体的には、1) 70 台の 3 kW ダミーロードを工場に運びオーバーホール、2) 70 台の HOM カップラーに使われているポリエチレン絶縁体を交換、3) 70 本の HOM ケーブルを更新、を実施する。また、HOM ケーブルの温度モニターに用いているデータロガーも更新し、温度モニターも 70 点を増設する。作業工程としては、まずダミーロードを取り外し、工場に運んでオーバーホールする。ダミーロードの保守中に HOM カップラーの点検および部品交換を、真空リークを起こさないよう注意して行う。ダミーロードの保守が完了した後、それらを加速器トンネル内に再設置し、その後新しい HOM ケーブルを設置する。HOM ケーブルは硬いうえに比較的短い (長さ約 80 cm) ため、設置場所に合わせて形状を微調整する必要がある、1 本設置するのに 1 時間程度かかる。HOM ケーブルの設置が完了した後、温度スイッチ (計 280 個)、温度センサー (計 140 本) の取り付けを行い、温度インターロック等の動作確認を行う。こ



図 5 高次モード (HOM) 引き出し用ケーブルの更新作業の様子

これらの作業を PF-AR が停止する 6 月下旬から 10 月下旬までの約 4 ヶ月間で完了する必要がある、工期を短縮するための様々な工夫をした。現時点（9 月末）で全ての HOM ケーブルの取り付けが完了し、10 月 23 日からの PF-AR の運転再開に向け、仕上げの作業を急ピッチで進めている。この HOM ケーブル更新等により、HOM ケーブルが発熱するトラブルを回避でき、PF-AR の安定な運転に貢献できると期待される。図 5 に HOM ケーブル取り付け作業の様子を示す。

## 参考文献

- [1] T. Nishikawa, S. Giordano, and D. Carter, *Dispersion relation and frequency characteristics of Alternating Periodic Structure for Linear Accelerators*, Rev. Sci. Instrum. **37**, 652 (1966).
- [2] 例えば, T. Higo, Y. Yamazaki, T. Kageyama, M. Akemoto, H. Mizuno, and K. Takata, *Development of an APS cavity for TRISTAN Main Ring*, IEEE Trans. on Nucl. Sci. **NS-32** (1985) 2834.
- [3] (注釈) 正確には, TRISTAN AR 用は 11 セル APS 空洞, MR 用は 9 セル APS 空洞 (が 2 台連結された空洞) という違いがある。
- [4] Y. Morozumi, T. Higo, and Y. Yamazaki, *Higher order mode damper with self-cooled coupler*; Part. Accel. **29**, 85 (1990).

## セラミックチェンバー一体型パルスマグネットの開発

加速器第六研究系では、次世代放射光源加速器に適用が可能なセラミックチェンバー一体型パルスマグネット (Ceramics Chamber with integrated Pulsed Magnet : CCiPM) の開発を進めている [5]。開発を進めるパルスマグネットは空芯型であり、パルスマグネットに必須なセラミック真空ダクトと磁石コイルを完全一体化する世界に類のない新たな構造を有している (図 6)。新構造ではマグネットコイルである銅コイルを円筒セラミックの壁面に開けた貫通溝に埋め込み銀ロウ付けで接合することにより完全一体化を実現している。完全一体化には、銅コイルとセラミックの間の大きな熱膨張差に対して、長手方向の 0.3m に渡り銀ロウ付け接合をするための高度な技術開発を必要

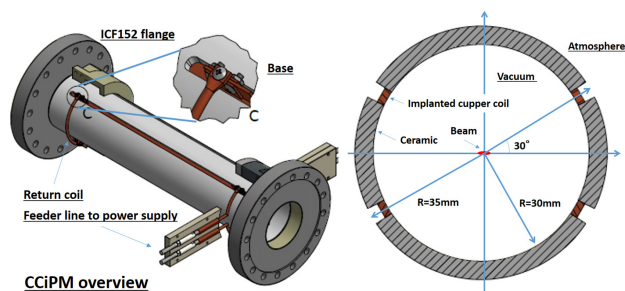


図 6 CCiPM 概念設計

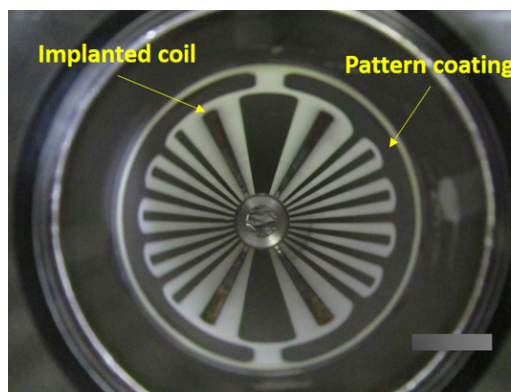


図 7 精密ラインコーティングの実装

とするが、現在、口径 60 mm の円筒セラミックスにコイルを埋め込む技術開発に成功しており、コイルへ電流を導入する口金構造の構築技術も完成している (図 6 中拡大図)。この技術開発と同時に、円筒内表面には、コイルを避けたビーム壁電流路としての精密なコーティングを施す必要があるが、その発想から、パターンコーティングの着想を得て、ビーム壁電流路として機能しながら、パルス磁場に対する渦電流を生成しない精密な櫛形ラインコーティングの実装技術が確立された (図 7)。

完全一体化することで、非常に簡潔な構造となっていることは一目瞭然であるが、セラミックスは真空隔壁でもあると同時に、コイル治具でありコイル間の電気的絶縁体でもあるため、機械的・熱的構造強度は向上し、電気的に安定している。磁極面はビームインピーダンスに影響を与えない円筒内面と同一レベルまで、ビームに近づけられており、将来光源のような低エミッタンスリングで要請される小口径の真空ダクトでは、セラミックダクト厚み分の磁場強度の増加は相対的に有効である。空芯型であることから飽和がなく磁場の追従性や線形性がよいため、パルス磁場の高速性能化、少ないコイル数でも磁極配置と電流方向の組み合わせで多極磁場の高磁場化が可能である。一体型による利点と空芯型の利点を兼ね備えた CCiPM は、次世代光源で要求される高速高繰り返しキッカーとしての利用、8 極以上の多極パルス電磁石入射への利用などが提案されている。特に、次世代放射光源のような回折限界エミッタンスリングで極小化するビームダイナミックアパーチャーに対応するための要となる新たな入射技術の開発として、PF でのパルス六極電磁石入射のパイオニアとしての知見と実績に基づき CCiPM を多極パルス電磁石入射に適用することを推進している。これまでの開発で、CCiPM のテストベンチでの耐久性能、真空性能などは着実に実証がなされてきた。2018 年度からは、ビーム性能の実証段階へと加速器実装の開発を進めている。実証試験は、まず比較的運転リスクの少ない PF リングビームトランスポートのダンプリン (BT-dump) に試験路を建設しビーム性能評価を行い、結果が良好であれば PF リングの六極パルス電磁石と入れ替え、リングを周回するビーム暴露試験及び模擬入射試験へと段階を踏んで進めて行く計

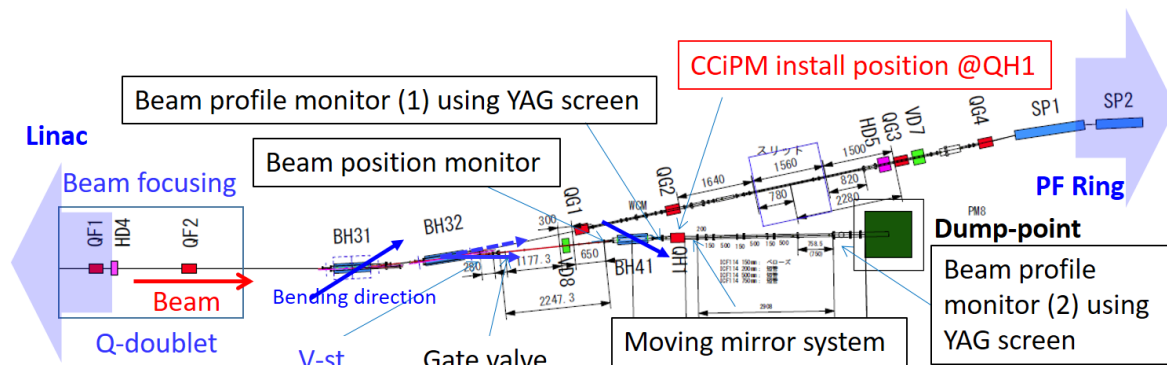


図8 PF-BT ダンプラインに構築された CCiPM ビーム試験路

画である。2018年度に始まった BT-dump 試験路構築のための改造計画は、2019年度1月末に完成した(図8)。試験路には、CCiPMの蹴り角をビーム位置の移動で正確に評価する YAG スクリーンのビームプロファイルモニターを CCiPM の直上流、ダンプ点に設置し、内面コーティングの健全性を視認できる駆動ミラーを導入している。試験中のビーム位置の誤差を非破壊で監視するビーム位置モニターも新たに CCiPM より上流に設置した。2019年の2月13日、2月28日の2回に分けてビームスタディーを実施した。図9にビーム試験路へ設置した CCiPM の様子を示す。新構造キッカーの世界で初のビーム試験である。試験目的は、ビーム暴露のコーティングへの影響の有無、励磁特性、磁場分布をビーム蹴り角で再現することである。水平磁場分布は上流にある振り分け偏向電磁石の補正コイルによりビームを CCiPM に平行に水平掃引することで行った。結果の速報の一例としてビーム初観測時の CCiPM 出力によるビームの水平シフト(図10)、パルス励磁電流に対する蹴り角の励磁特性の結果(図11)を示す。YAG スクリーン及び CCiPM の設置傾きからわずかな垂直シフトが見られるが、誤差内で磁場測定から求められる電流値に対する蹴り角の期待値  $7.4 \times 10^{-4}$  mrad/A 通りであることが実証された。また、2カ月にわたる Linac からのビーム

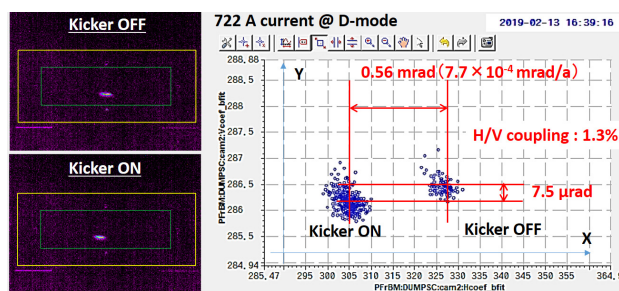


図10 CCiPM 出力によるビーム水平シフト初観測

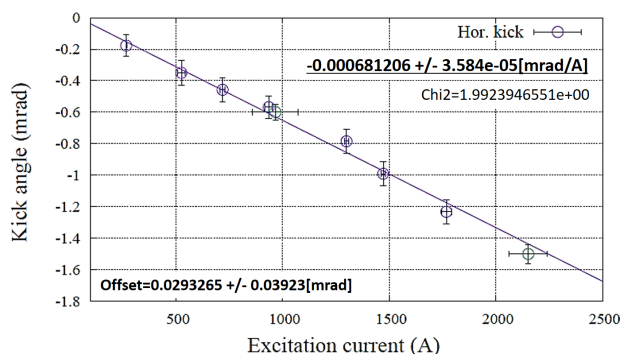


図11 励磁特性曲線

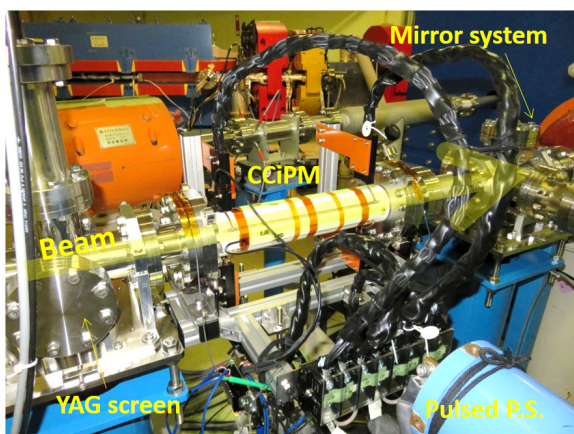


図9 CCiPM 設置の様子

暴露に対してはコーティング損傷もなかった。総じて新たなパルスマグネット構造のビーム性能が実証された結果となった。今後、結果の再現性の確認試験を進めることと並行し、蓄積リングでのビーム性能実証試験へ移行していく予定である。同時に、超小口径 30 mm で磁極数を増加させた多極 CCiPM の開発が並行して進行しており、順次ビーム性能実証試験が進められていく計画である。

#### 参考文献

- [5] C. Mitsuda *et al.*, “Accelerator Implementing Development of Ceramics Chamber with Integrated Pulsed Magnet for Beam Test”, Proc. IPAC2019, Melbourne, Australia, 4164 (2019).

### 基盤技術部門の紹介

<https://www2.kek.jp/imss/pf/section/beamline/>

今回は、3つの内部組織の中から運営部門について紹介しました。今回は、基盤技術部門についてご紹介します。基盤技術部門は、放射光を実験装置（エンドステーション）に導くビームラインの整備と高度化を目的として設置されています。この部門は、放射光科学第一・第二研究系や加速器研究施設加速器第六研究系とともに、最先端の放射光技術の開発研究プロジェクトの中核を担います。開発項目はハードからソフトまで広範かつ多岐にわたるため、光学系、X線光学、基盤設備、インターロック、真空系、制御系、検出系、時間分解、試料環境の専門チームで検討を行い、外部とも適切に連携しながらビームラインの整備と高度化を推進しています。構成メンバーは、基盤技術部門長の五十嵐教之教授を含めて22名、技術職員は、全員がこの部門に所属しています。メンバーの多くは、複数のチームを兼務しています。今回は、光学系、X線光学、基盤設備を主務とするメンバーを紹介します。残りは、次回以降で紹介させていただきます。

光学系チームを主務とするのは、若林大佑特別助教（チームリーダー）、森丈晴専門技師、内田佳伯専門技師、田中宏和技師の4名です。光学系チームは、各種シミュレーションを行うことで光学系を設計して実装します。若林さんは、高圧科学分野の博士研究員を経て、2018年4月にBL-19A/B建設の特別助教として採用されました。X線光学も兼任しています。森さんは、光学系の他、高圧ガスと寒剤を担当しています。内田さんは弁理士の資格を持っておられ、光学系の他、機構の知財関係も担当しています。田中さんは、BL-19A/Bの設計において中心的な役割を担った軟X線ビームライン建設の専門家です。真空系を兼務しています。PFの前はJ-PARC加速器の所属でした。

X線光学チームを主務とするのは、平野馨一准教授（チームリーダー）、杉山弘助教、鈴木芳生研究員の3名です。X線光学チームは、光学素子の新しい利用方法の開発や新しい機能をもった光学素子の開発とその応用を推進します。平野さんは、伝統ある高良研究室の流れをくむ菊田・石川研究室の出身で、結晶移相子の開発など、X線光学の分野で多くの成果を挙げておられ、利用者の方もよくご存知の放射光ビームライン光学技術入門（日本放射光学会）の編集もされました。『施設だより』でご紹介した「3次元X線ズーム顕微鏡の開発」のプロジェクトリーダーでもあります。杉山さんは、トポグラフィの専門家であるとともに、光学結晶の加工にも精通しています。鈴木さんは、SPring-8を定年された顕微イメージングの専門家です。アドバイザーとして、かつての研究の場であったPFに、週1回の頻度で来て頂いています。

基盤設備チームを主務とするのは、小山篤前任技師、豊島章雄専門技師（チームリーダー）、松岡垂衣准技師の3名です。基盤設備チームは、建物やインフラ設備から付帯設備まで、広い範囲の保守・整備と運用を担当しています。小山さんは、物構研の技術調整役も務めており、技術職員全体のリーダーです。豊島さんは、放射光実験施設の技術副主幹2人の内の1人で、真空系を兼務しています。松岡さんは、小山さんや豊島さんから、知識と経験を引き継ぎ、次世代を担う存在です。

### 運転・共同利用関係

2019年度第2期の運転は、予定通り、PFは10月17日に、PF-ARは10月23日に開始しました。ともに12月12日までの予定です。PFの通常モードとPF-ARの5 GeVの組み合わせで開始して、PFは11月22日にハイブリッドモードに、PF-ARは11月13日に6.5 GeVに切り替えます。

2019年度第3期の運転は、予算（運転に必要な光熱水費）の確保が遅れ、ご心配をお掛けしましたが、ようやくスケジュールが確定しました。PFは2月3日から3月9日まで、PF-ARは2月10日から2月25日までの予定です。PFは通常モードで開始して、2月28日にハイブリッドモードに切り替えます。PF-ARの運転は5 GeVのみになります。

PF-PACは、『施設だより』でご紹介した通り、10月2日に開催されました。詳細については、本誌報告記事をご参照ください。

### はじめに

今年度より，放射光科学第一研究系と第二研究系で交互に報告記事を担当しておりますので，第3号となる今号では再び私が現状の報告をいたします。第1号では，第一研究系の全体像を紹介しましたが，今回はその中の二つの研究部門のうち，表面科学研究部門について，もう少し掘り下げて紹介したいと思います。もう一つの研究部門である固体物理学研究部門については，2020年度の第1号で紹介する予定です。

### 表面科学研究部門の紹介

第1号で紹介した通り，表面科学研究部門では私と堀場弘司准教授が，それぞれ中心になって研究グループを形成して活動を行っています。現時点では承継職員が二人しかおりませんが，2018年3月末までは組頭広志教授（現在は東北大学教授，クロスアポイントメントとして物構研特別教授）が堀場さんと，2018年9月末までは当時助教だった鈴木（酒巻）真粧子さん（現在は群馬大学准教授，物構研客員准教授）が私と，それぞれグループを形成していました（当時は改組前なので，表面科学研究部門ではありませんでした）。以下，これら二つの研究グループの研究内容とメンバーを紹介します。

堀場グループは，「表面・界面で新しい電子状態を創り出す」をキーワードに，放射光を始めとする量子ビームを駆使した表面・界面の電子状態の観測と，主にレーザーMBE（Molecular Beam Epitaxy）を用いた薄膜の作製を融合させて，表面・界面における新たな電子状態の創製を目指した研究を展開しています。測定手法としては，VUV・軟X線領域の角度分解光電子分光（ARPES），X線吸収分光（XAS），およびX線磁気円二色性（XMCD）を中心に，中性子・ミュオン・陽電子といったプローブも視野に入れています。メンバーは堀場さん，北村未歩さん（特別助教），組頭さん，客員准教授として相馬清吾さん（東北大学准教授），そして連携大学院生の志賀大亮さん（東北大学，D2）という構成になっています。なお，湯川龍さんと小畑由紀子さんもメンバーでしたが，後述のように最近転出されました。

雨宮グループは，「働く表面・界面をその場で観る」をスローガンに，磁性薄膜や触媒などの機能を持った表面・界面の化学状態や磁気状態を，それらが動作している状態で観る（オペランド観察する）ことを目指して，深さ分解XAS/XMCD法，波長分散型XAS法など，新たな発想に基づく表面・界面観察手法を開発しています。これらは主に軟X線領域の放射光を利用した手法ですが，その他にも電場や磁場などの外場中での測定を得意とする硬X線XAFSや偏極中性子反射率も，しばしば利用しています。メンバ

一は，雨宮の他に，鈴木さん，近藤寛さん（慶応大学教授，物構研客員教授），そして連携大学院生の山本涼輔さん（東京大学，M2）と受託学生の渋谷昂平さん（東京理科大学，B4）です。

いずれのグループも，表面・界面を「観る」ことと「創る」ことを車の両輪としつつ，マルチプローブを意識しながら「観る」ための手法の幅を広げるとともに，それぞれの手法のさらなる高度化を目指しています。特に最近では，表面・界面の状態を保ったままで一つの試料を様々な手法で観察できるような工夫を進めています。このような研究・開発活動を通じて，最先端の表面科学を切り拓いていくことが，表面科学研究部門の目標です。

### 人事異動

最後に，放射光科学第一，第二研究系に関する人事異動を報告します。表面科学研究部門の博士研究員の小畑由紀子さんと構造生物学研究センターの研究員の原田彩佳さんが9月末に，表面科学研究部門の湯川龍さんが10月末に，それぞれ転出され，斉藤耕太郎さんが材料科学研究部門の研究員として9月に着任されました。また，材料科学研究部門の研究員の山本樹さんが8月より特任教授に，特任助教の福本恵紀さんが10月から特任准教授に，そして構造生物学研究センターの特別助教の安達成彦さんが9月から特任准教授に，それぞれ昇任されました。転出・着任された方，昇任された方ともに，今後のますますのご活躍を期待しています。