

1年前の『物構研だより』において、次期計画の実現に向けては、予算の検討と特長の強化が重要であると述べました。本稿では、第8回フォトンファクトリー計画推進委員会（2025年7月30日開催）において議論した「量子マルチビーム施設計画：超伝導ライナック中核案」の紹介から始めたいと思います。

KEK ロードマップ 2021 と KEK 研究実施計画 (KEK-PIP) 2022 では、自由度を格段に向上させた新光源施設を目指すとしており、Hybrid Ring [1] や Energy Switchable Storage Ring [2] の検討を進めてきました。電子ビームが定常状態で周回する蓄積リングのエミッタンスは、およそ周長の三乗に反比例します。したがって、蓄積リングでは高性能な放射光の発生のために十分な周長を確保する必要がありますが、想定される予算の制約の中では難しく、アップグレードの際などにも周長の変更は不可能です。一方、ライナックでは予算に応じた拡張（や縮小）も可能です。「量子マルチビーム施設計画：超伝導ライナック中核案」では、Hybrid Ring の入射器に採用予定であった超伝導加速技術を応用した High Repetition Rate Free Electron Laser (HRR-FEL) を中心に据えています。現時点では、2.5 GeV ロングパルスモード（バーストモード）による軟X線域までの FEL 光を検討しており、超伝導加速による高フラックス特性を活用したフォトンハングリー研究（微弱信号の測定が必要な研究）を始め、放射光より約 10 桁も高い FEL 光のピーク輝度特性を活用した量子マルチビーム研究（放射光や陽電子との同時利用による研究）や FEL 光のアト秒域までのパルス特性を活用した高速ダイナミクス研究（電子と原子のダイナミクスの研究）などが可能になると期待されます。

日本国内に未整備の HRR-FEL を中心に据えた量子マルチビーム施設には、単に自由度を格段に向上させた KEK の新光源施設ということに留まらない価値があると考えています。まず、FEL 光の利用のクリティカルマスの観点が挙げられます。放射光の状況とは大きく異なり、軟X線域以上の高エネルギーの FEL 光を発生可能な国内の施設は SACLA のみ、世界的にも建設中を含め約 10 施設しかありません。相対的に低いコストで建設と運営が可能な軟X線域の FEL 光源を整備して、FEL 光の発生と利用に関する技術開発と人材育成を行うことは、この問題の改善に大きく貢献します。また、波長域とコヒーレンスの特性から、軟X線域の FEL 光は高次高調波レーザー光と放射光を接続する位置にあり、それらの研究者コミュニティ間の求心力として機能すると期待されます。さらに、社会的な観点からは、半導体リソグラフィ技術の高度化を担う Beyond EUV 大強度光源として貢献することも可能です。本提案では、より広範な研究者コミュニティとともに、研究分野の深化・融合・創成を進めます。

日本学術会議の未来の学術振興構想の改訂にあたり、学

術の中長期研究戦略の公募が行われており、前回の 2023 年に採択された「量子ビーム施設統合マルチプローブ学術研究基盤」の改訂を準備しています。ポイントは、前回の内容を更に進めて（次期計画とも調和的に）、順次利用から同時利用への方向性と物構研の 4 ビーム以外の新ビーム利用への方向性を打ち出すことです。新ビームとしては、前述の FEL 光や高次高調波レーザー光の他、小型加速器からの中性子ビームを挙げる予定です。前回の申請では、放射光の学術連携施設として UVSOR と HiSOR を挙げていますが、今回の申請では、東大物性研の ISSP-SOR とレーザー施設 (LASOR)、中性子施設 (NSL) にも加わっていただく予定です。

開発研究多機能ビームライン (PF BL-11A, -11B) の建設が、お盆休みもなく進められています。2020 年に長期的な成果創出のための開発研究と開発研究を通じた若手人材の育成を目的とする開発研究専用ビームラインとして提案され、2022 年に軟X線と硬X線の同時利用（量子マルチビーム研究）の試験が目的に追加されるとともに名称が変更され、現在に至っています。BL-11 と BL-12 の再整備が開始されたのも 2022 年です。2025 年の夏期停止期間中に完成、完成報告会を 11 月 8 日に開催する予定です。このビームラインの実験ハッチは、様々な開発研究に対応する必要から PF/PF-AR で最大級となっています。紫峰筑波山にあやかり紫色に塗装した巨大な実験ハッチには、製作設置の費用（約 1000 万円）を支援いただいた「フォトンファクトリー先端化寄附金」の寄附者の銘板を掲示し、寄附者を完成報告会にご招待します。KEK 一般公開の開催される 9 月 23 日までの寄附者を対象としていますので、この機会にご支援をお願いいたします。（Web より、1000 円からクレジットカードでご寄附いただけます。）

軟X線域の HRR-FEL を中心に据えた新施設と開発研究多機能ビームラインの完成を目前にした現施設は、量子マルチビーム研究の両輪とも言える関係ですが、新施設の計画を実現するためにも、現施設で優れた成果を挙げることが重要です。現施設では、そろそろ、軟X線と硬X線の次を決定すべきタイミングになってきています。新施設と現施設を一体と捉え、量子マルチビーム研究の推進という観点でアイデアを出し合い、新しい研究に挑戦していきましょう！

- [1] K. Harada *et al.*, J. Synchrotron Radiat. (2022).
<https://doi.org/10.1107/S1600577521012753>
- [2] T. Sato *et al.*, J. Synchrotron Radiat. (2025).
<https://doi.org/10.1107/S1600577525005363>

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 惠郷博文
(2025 年 7 月 14 日付け)

運転状況

3 月 24 日に 2024 年度の全入射器運転が終了し、4 月 18 日まで春期メンテナンスを実施した。メンテナンス終了後、4 月 21 日に入射器を立ち上げた。ビーム調整を終えて、5 月 7 日より PF リングへ入射を開始、5 月 12 日よりユーザー運転モードに移行した。6 月 6 日からハイブリッドモードへ切り替えてビーム入射を行なった。PF-AR は 5 月 13 日に 6.5 GeV ビーム入射を始めて、5 月 16 日よりユーザー運転モードに移行、6 月 12 日から 5 GeV に切り替えて 6 月 30 日までビーム入射を行った。PF リングへの入射運転は 7 月 7 日に終えて、7 月 14 日までビームスタディと大電力高周波機器の定期データ取りを行って 2025 年度第 1 期の運転を終了した。SuperKEKB は 2025 年秋まで長期メンテナンス作業を実施しているため、前期同様、2025 年度第 1 期のビーム入射は放射光リングのみであった。7 月 14 日より 9 月 5 日まで夏期メンテナンスを実施する。定期保守作業に加え、パルスマグネット改修、老朽化マグネット電源更新、高速キッカー改修などの入射器アップグレード作業も行う。特に、SuperKEKB の HER 電子ビーム輸送ラインに 3 年かけて新設したエネルギー圧縮システムのコミッショニングとビーム調整運転を行い、電子ビーム入射性能向上を図る。

2025 年度第 2 期は 9 月 8 日より入射器運転を開始して 10 月 6 日まで RF コンディショニングと改造機器の立ち上げ調整運転を行う。10 月 6 日より PF リング、11 月 4 日より PF-AR、11 月 5 日からは長期メンテナンスを終える SuperKEKB リングへのビーム入射を開始する予定である。

次に今期の主なトラブルを述べる。直流電磁石電源、クライストロン高圧電源内のインバータ電源、クライストロン集束電磁石電源などが故障した。ほとんどが経年劣化によるもので、予備電源との交換により復旧した。今期は冷却水施設関連の不具合も目立った。各蓄積リングへのビーム出射切換を行う入射器出口第 3 スwitchヤードに設置した高精度ビーム診断ラインの冷却水流量が不安定で流量低下のインターロックが多発した。施設部担当と原因を調査中である。また、7 月 6 日に冷却水用冷凍機が 1 台故障し、冷水温度が上昇していたが、7 月 7 日に PF リングの運転が終了したため、負荷が減少して冷水温度は通常値に戻った。

今期の最大のトラブルは、5 月 16 日深夜に生じた高周波加速管の水漏れである。これによってビーム入射運転が約 86 時間停止した。このトラブルについて詳細を述べたい。5 月 16 日 23:04 に KL_56 RF ユニット（入射器第 5 セクター第 6 RF ユニット）の真空悪化によるインターロックが働いて真空ゲートバルブが閉じ、光源リングへのビーム入射運転が停止された。その後、真空回復することなく、真空度は悪化をたどり、1 Pa を超えた。該当ユニット機器の外観異常は見当たらず、入射器建設当時から使用している PF 型と呼ばれる高周波加速管の経年劣化による真空異常が危惧された。加速管冷却水の運転停止を行ったところ、真空度が変動したため、加速管真空側に水漏れが生じていると判断した。図 1 に RF ユニットの機器構成と加速管の断面図を示す。

これまでも複数の PF 型加速管において、カップラーと呼ばれる大電力高周波入出力部と加速管本体の接合部が経年

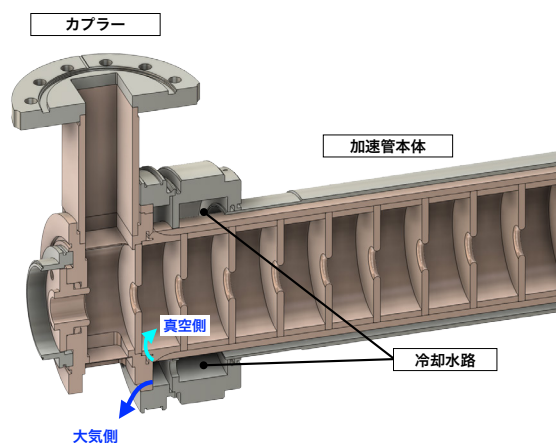
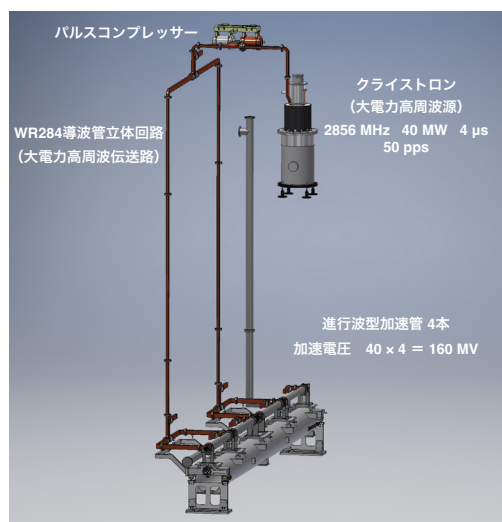


図 1 RF ユニット（左）と加速管断面図（右）

劣化して水漏れが生じてきた。接合部は非常に複雑な構造となっており、亀裂が生じた場合は修復不能である。加速管水漏れは大気側に多く（図1参照）、この場合は液体シール材の塗布・乾燥による応急処置で運転可能となる場合がある。ただ、一旦止水できても水漏れが再発することも多い。図2の写真は、昨年2月に別の加速管で生じた大気側水漏れの様子である。

一方、真空側水漏れは応急処置ができず、加速管の撤去交換しか運転の回復ができない。また、図1に示すようにRFユニットには加速管が4本設置されているが、どの加速管で真空側水漏れが生じているか、特定するには時間を要すること、また、交換可能な予備加速管がなかったため、このユニットの加速管4本すべてを撤去し、ストレート真空パイプとの交換で対応した（図3）。5月17日から5月18日にかけて撤去・交換作業を行い、ストレートパイプ接続部に設けた真空ポンプで排気を開始した。5月20日正午にはビーム運転可能な真空状態に回復したため、大電力高周波運転とビーム調整を実施して光源リングへのビーム入射を再開した。近年、PF型加速管は、経年劣化によって年間2本前後の割合で水漏れが生じている。加速管水漏れはビーム運転に甚大が影響を与えるので安定運転を

行っていくために、新型加速管の製作を進めている。今回、休日中のトラブルにも関わらず、迅速に復旧作業にあたった入射器スタッフ及びオペレータ諸氏、また、光源リングへの長時間ビーム入射停止にも関わらず、利用運転継続にご尽力いただいた光源リング関係各位に謝意を申し上げます。

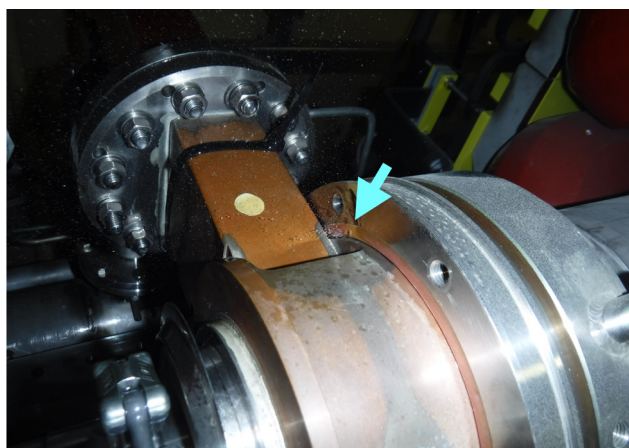


図2 別の加速管で生じた大気側水漏れ（2024年2月）



図3 KL56 RFユニット加速管撤去後の真空配管作業の様子

光源リング (PF リングおよび PF-AR) の運転概要

PF リングおよび PF-AR とともに 2025 年度第 1 期の運転をおこない、後述するいくつかのトラブルはあったものの無事に終了している。図 1 に PF リングの、図 2 に PF-AR の蓄積電流値およびビーム寿命の推移を示す。

両リングとも立ち上げ調整は順調に推移したが、5 月 16

日 (金) 23:04 に Linac の加速管真空トラブルにより入射が停止した。これは真空ダクト内部への水漏れをともなう深刻なトラブルであった上に週末深夜という対応するには悪い条件であったものの、加速器五系関係者の尽力により迅速に対応がすすめられた。最終的には加速管を撤去して $\phi 40$ 直管と入れ替える作業を実施し、5 月 20

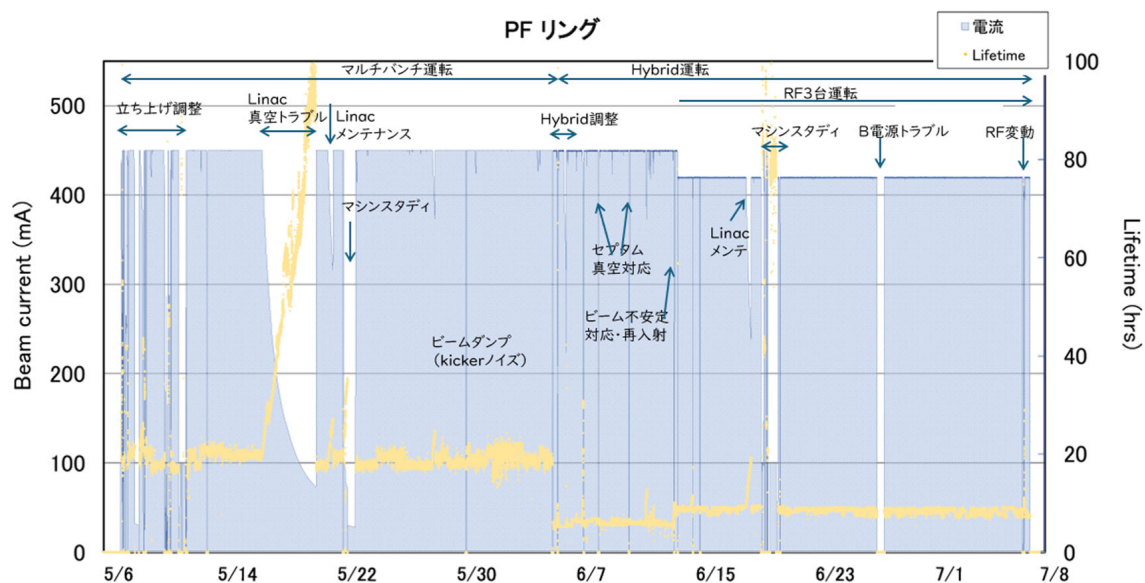


図 1 2025 年度第 1 期運転期間における PF リングビーム電流および寿命の履歴

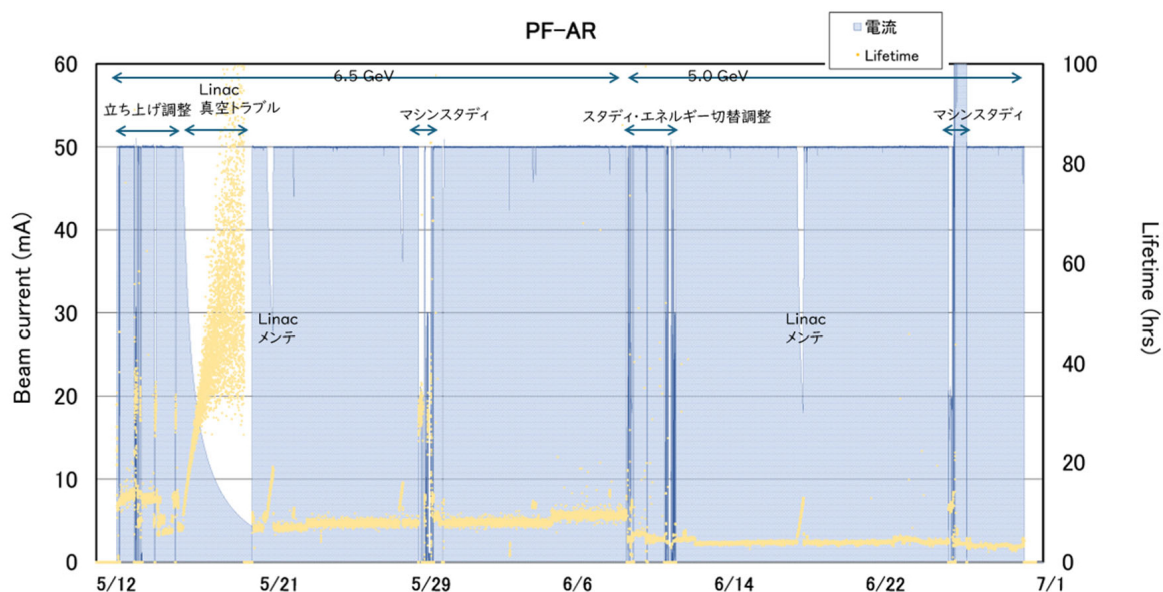


図 2 2025 年度第 1 期運転期間における PF-AR ビーム電流および寿命の履歴

(火) 13:35 より入射を再開した。この間、PF リングおよび PF-AR の蓄積電流はかなり減少したものの、放射光基幹チャンネルはオープン状態としてユーザー運転を継続した。図 1, 2 に示すように、運転再開時には両リングともかなり電流が減少していることが分かるが、この期間でビームダンプにつながるような事象は起きず、ビーム不安定現象も無く安定した運転であった。PF リングのビーム寿命がステップ的に変化しているのは挿入光源のギャップ変更に伴う事象である。運転再開後は同時トップアップ運転に入った。

以下では各リングの運転状況について説明する。

PF リングでは立ち上げ時にはマルチバンチモードで運転し、その後、6月6日(金) 17:00 以降にはハイブリッドモード (single 50 mA + multi 400 mA) での運転に切り替えている。図 1 でビーム寿命が短くなっている期間がハイブリッド運転である。図 3 に各運転モードでの典型的なビーム電流分布を示す。残念ながらハイブリッド運転開始後に、進行方向のビーム不安定現象が時折発生するという状況がおきたため、主空洞の RF に位相変調をかけることで不安定を抑制する対処を行った。このビーム不安定現象は大電流・単バンチが誘起する真空ダクト発熱と関係していると考えており、特にトップアップ入射を停止してビーム電流が減る際に顕著に表れる。しかしながら発生条件に再現性が無く、いまだに根本的な原因究明と解決に至っていない。今期の運転では 4 台の RF ステーションのうち 1 台のクライストロン出力が短時間 (100 ~ 200 μ s) 変動する現象が発生していることが判明したが、ビーム不安定との相関は見られなかった。当面の対処として、6月13日(金) 17:00 より RF を従来の 4 台運転から 3 台運転に切り替え、電流も 420 mA に下げる対処をおこなったところ運転終了までの間で進行方向不安定現象は起きず、安定したユーザー運転が維持できた。今後も原因調査と対策を強化する。

6月27日(金)の早朝 03:12 に偏向電磁石電源チョッパー過電流のためビームダンプが発生した。現場でのリセットを試みるが復帰しなかったため担当職員を呼んで対応・故障診断をおこなった。当該ユニットを予備品と交換する

作業を実施するとともに電源メーカーと対応を検討した結果、別件で J-PARC に来所していた技術部隊につくばキャンパスに移動して頂き、ユニット交換後の調整作業を行う方針とした。最終的にチョッパー相間バランスの調整などを実施したほか各種の健全性確認を完了し、14:00 過ぎに運転を再開した。今回交換したユニットは、以前の故障時に対応して製作した新品である。また、当該チョッパーユニットは陽子シンクロトロン (PS) で使用していた電源と同型であるため、部品取りとしての予備品は存在している。また、このビーム停止にともない、同じ磁石の補正用コイル (バックレグコイル) に接続されている小型補正電源 28 台のうち 2 台が故障した。これは、偏向電磁石がインターロックで停止した際の急激な磁場変化により発生した誘導起電力が原因であると考えている。

7月6日(日) 20:52 にビームダンプが発生した。調査の結果、RF3 台の入力電力がインターロックによるトリガー発生前に同時に下がっていることが判明した。例えば瞬時電圧降下など RF の受電電圧が変動した場合にはこのような事象が起きる可能性はあるが、施設部の監視では当該時間帯に電圧低下は起きていない。RF の 3 系統共通部分とすれば、マスター発振器や分配系の不具合という可能性もある。老朽化が著しい部分でもあり今後も調査と対策を検討していく。

PF リングでのマシンスタディとしては、挿入光源フリーチューニングや光モニタ調整などユーザー運転に必須である調整のほか、前回の報告で述べたビーム位置モニタ (BPM)・軌道安定化のスタディ、低エミッタンス調整、RF 空洞のビーム負荷補償スタディ等を実施している。Linac と合同でのビーム輸送路でのスタディも引き続き実施している。7月7日(月) 9:00 に第 1 期の運転を終了し、夏期メンテナンス期間に入った。

PF-AR は 5月13日(火)の立上げ時に 6.5 GeV で運転を開始し、6月11日(水)からは 5.0 GeV への運転切替を実施した。これは夏に向けて気温上昇することに備えて、消費電力の大きい 6.5 GeV 運転を先に行う方針のもとに決定したスケジュールである。最初に述べた Linac トラブル

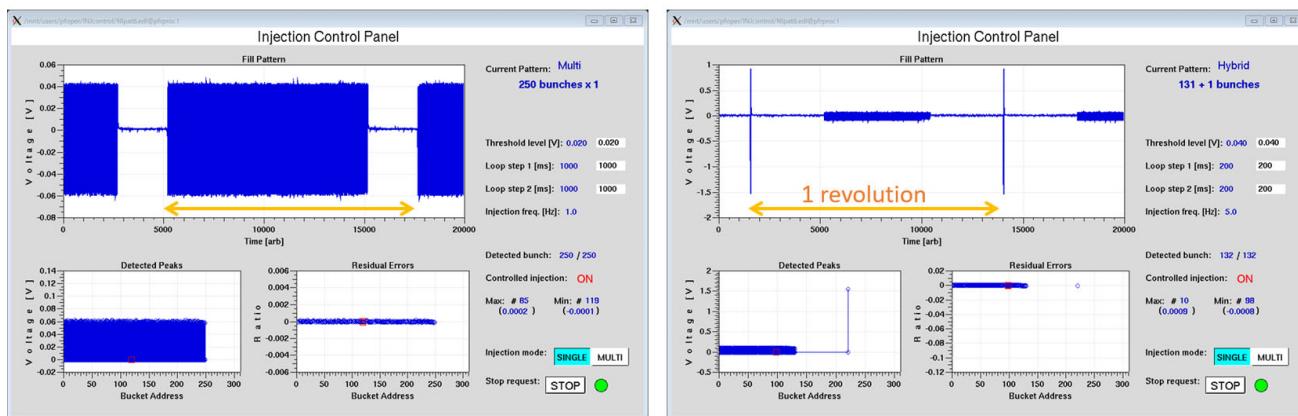


図 3 マルチバンチ運転 (左) と、ハイブリッド運転 (右) のビーム電流例

の他、ビーム輸送路の電磁石電源トラブルなどいくつか老朽化に起因するトラブルはあったものの、おおむね順調に運転を継続することが出来た。マシンスタディではテストビームライン調整、NW14 放射線対策、単バンチ純度調整などのほか、通常は1バンチ 50 mA 運転であるところ、2バンチ 60 mA を目指す加速器運転調整などを実施している。PF-AR は6月30日(月)9:00 に第1期の運転を終了し、夏期メンテナンス期間に入った。

運転終了直後の7月1日の夕方、つくば地区に大きな影響を与えた豪雨・落雷の影響により、PF-AR 北部エリアでは空調用チラーが浸水により故障した。もともと3台中2台で運転していた状態で1台が故障したため、結果として全ての空調冷却機能が停止する状態となった。現在は2台を稼働させることで空調機運転を再開している。故障修理用の部品取り寄せには月単位の期間を要する見込みである。そのほか、北西棟では空調機操作パネルが雨漏りにより故障（屋外へ伝送するケーブルを伝わり大量に浸水したことが原因）した。こちらは部品対応を開始している。北東実験棟ではマグネットコイル故障のため、長期間の対応になる可能性がある。北西・北東実験室は、加速器トンネル内からの空気を扉開放で取り込むことで対応している。

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 8 月 19 日付け)

2025 年秋からの軟 X 線と硬 X 線の 2 ビーム利用開始を目指して、開発研究多機能 (R&D) ビームライン BL-11 の建設が急ピッチで進められています。さまざまな R&D 利用実験が可能な巨大な実験ハッチも完成し、現在各種ビームラインコンポーネントの設置作業が進められているところです (図 1)。これらの設置作業には、若手人材の育成を目的として、他の放射光施設の若手スタッフや、RD 課題を申請した実験グループの学生および若手スタッフにも参加していただき、ビームライン技術を学んでもらっています。BL-11 での R&D 用の実験課題 (RD 課題) も 2 件採択が決定し、既に採択されている PF-S 課題 (2025PF-S001: PF 2 ビーム利用多目的システムの構築) と併せて、これから 2 ビーム利用実験の実験手法や装置の R&D を本格的に推進する予定です。ユーザーの皆様にも 2 ビーム利用実験の新しい取り組みに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。

若手人材の育成に関しては、10 月 19 日から 25 日までの予定で、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) が PF で開催されます。これは毎年 AOFSRR の加盟国が持ち回りで開催している国際スクールで、2023 年はタイ、2024 年はオーストラリア、そして今年は日本で開催することになり、PF が担当することになりました。日本を含む AOFSRR の加盟国から 52 名の若手研究者を受け入れて講義や実習などを行う予定で準備を進めています。ユーザーの皆様には講義や実習などへのご協力、またビームタイムや宿舍利用などで影響があるかと思いますが、ご諒解のほど何卒よろしくお願い申し上げます。

運転・共同利用関係

2025 年度第 1 期の運転は、予定通り、PF-AR は 6 月 30 日に、PF は 7 月 7 日に終了することができました。5 月 16 日に発生した入射器の加速管水漏れにより、5 月 20 日まで入射が停止し、蓄積モードでユーザー実験を継続しましたが、最終的に PF は 73 mA、PF-AR では 5 mA を切るところまで電流値が下がり、ユーザーの皆様には大変ご迷惑をおかけしました。また、PF では 6 月 6 日からのハイブリッド運転においてビームのインスタビリティが頻発し、最終的に 6 月 13 日から電流値を 420 mA に下げて運転することにより改善しましたが、こちらもご迷惑をおかけしました。どちらも第 2 期の運転に向けて対策する予定です。第 2 期の運転については、PF は 10 月 6 日に、PF-AR は 11 月 4 日に運転を開始し、ともに 12 月 24 日に終了する計画となりました。PF のハイブリッドモードは 11 月 28 日から最後まで予定です。PF-AR は、5 GeV で運転を開始して、12 月 4 日以降を 6.5 GeV で運転します。

第 3 期の運転については現時点で予算が確保されておらず、今後運転に向けて機構と相談を進めます。

PF-PAC の全体会議が 7 月 28 日に、現地とオンラインのハイブリッド方式で開催され、課題の評点と採否が審議されました。今回は早めに日程調整を行い、現地での対面参加を増やそうとしたのですが、結果として現地参加は増えませんでした。次回からの開催方式については検討したいと思いますが、一方で委員の方からは、対面での意見交換の重要性を指摘するご意見をいただいています。例えば、課題審査のある会議ではリモート方式、それ以外の会議では対面もしくはハイブリッド方式で、各分科から 1~2 名は最低限対面で出席していただき、審議事項を徹底して議論するなどの運用が考えられると思います。委員の皆様のご負担を考えつつ、効果的に意見交換ができる方式を検討したいと思いますので、ご協力のほど何卒よろしくお願い申し上げます。今回の全体会議では、共同利用ユーザー向け旅費支給、量子マルチビーム計画について船守所長から報告がありました。その他、運転スケジュール、課題申請書の改訂、BL-11 の建設等の放射光実験施設報告、P 型及び U 型課題の採択、PF 課題の実施状況等の報告がありました。また、共同利用ユーザー向け旅費支給については時間を取って意見交換を行いました。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。7 月 1 日付で、砂口尚輝さんが名古屋大学から測定装置部門の准教授として赴任されました。測定装置部門では X 線光学・イメージンググループの担当となりますが、これまでの豊富な研究開発の経験を生かし、関係するビームライン群の整備・高度化だけでなく、広く分野間の融合を推進し、新しい放射光利用研究を創成していただけることを期待しています。



図 1 8/18 現在の BL-11 建設作業の様子
(巨大な実験ハッチが完成)

今回は 2 系の担当ですが，今年度末に定年を迎える木村正雄教授，ご本人に KEK での研究を振り返っていただきました。以下の部分（人事異動の部分以外）は，木村教授の執筆となります。

物構研・物質化学 Gr ～材料科学研究部門での ここ 10 数年を振り返る 木村正雄

私が 2013 年 10 月に物質化学 Gr，そして 2019 年より材料科学研究部門の総括になってから，PF における材料科学分野の研究展開について振り返ってみたいと思います。

1. 材料反応観察のための様々な計測法の高度化

放射光施設のスタッフには、「良質の放射光ビームを安定して使える環境を整える役割」と、それを用いた計測法の高度化や応用研究を進めることで「放射光利用研究のあり方を示す役割」の両方が求められると考えています。具体的に，物質化学 Gr（現在は，放射光実験施設・測定装置部門と材料科学研究部門の連携）の場合には，前者の役割が，硬 X 線吸収分光のビームラインの維持・高度化，後者の役割として産業利用を含む材料科学分野への放射光利用研究の新展開，があると考え，関係のメンバーが協力してビームライン運営と研究展開を進めてきました。特に，私自身の前職が民間企業の基盤的研究所であり，ユーザーとして 20 年以上の長年に亘り PF をはじめとして内外の放射光施設を利用した研究をしていたこともあって，「こんなビームラインや設備が欲しい」というユーザー視点からビームライン整備や研究を展開してきました。

着任と同時に手がけた BL-15A の建設はまさにその最初で，ユーザーとして好き勝手な要望：XAS と XRD の同時 or 同視野計測，そこそこの空間分解能かつ広視野で材料の不均一の計測をしたい！を，ユーザーコミュニティの一員として PF に提案したものが元になっています。（提案した時は，まさか，その後 PF に移ってそれを実現する立場になるうとは思ってもいなかったことでしたが）。ちょうど，当 Gr に助教として着任した武市泰男氏を中心とした関係者の努力で，20 μm の(セミ)マイクロビームをスキャンしながら，XAS，XRF，XRD の同視野測定ができるビームラインが完成しました。数 cm サイズの試料の測定も可能で，*ex situ* 実験はもちろん，ユーザーが持ち込んだ様々な *in situ* 環境システムと組み合わせてユニークな研究が多く行われています。

ビームラインの高度化や新たな研究を行うためにはリソース（お金，人）が必要になりますが，PF では運転時間を最大化することに力点が置かれていることもあり，リソースの確保は外部資金をとってくるしかありません。そうした中で，いろいろな苦勞の末に国プロである SIP「革新的構

造材料」(2014.10 ～ 2019.3, 研究総括:岸輝雄フェロー(東大))に参画できたことで，当 Gr でのビームライン環境整備や新たな研究展開を大きく進めることができました。航空機に使われる構造材料（CFRP, 耐熱合金，セラミックス基複合材料）について，材料研究～マテリアルズインテグレーションまでの広い範囲を対象として産官学 60 以上の機関が参画する大型プロジェクトに，TIA 5 機関で連携して「先端計測」のチームを形成して参画しました（なんと TIA 連携で国プロに分担者として参加したのは初だと聞きました）。そのおかげで，NW2A への X 線顕微鏡装置（XAFS-CT および imaging XAFS）の導入や，XAFS ビームラインの高度化（超高温での XRD-XAFS 同時観察システム開発，計測機器更新等）を進め，さらに放射光利用研究に不可欠な実験室系での装置類（X-CT 装置，XRD 装置，高温レーザー顕微鏡）等の環境整備を一気に進めることができました（図 1）（武市氏，丹羽尉博氏には特に尽力頂きました）。X 線顕微鏡—特に顕微分光—の分野は世界に較べて取り組みが周回遅れだった日本（PF）でしたが，国プロを活用して短期間に高度化を進めることができたのは大きなことでした。XAFS-CT では 50 nm の空間分解能で化学状態の三次元分布を計測することができます（但し視野は数 10 μm ）。imaging XAFS は二次元ですが広い視野（数 cm 以上）の化学状態を観察できます（空間分解能 10 μm → さらに向上可能）。これらを組み合わせてマルチスケールの化学状態を観察できる環境を整備でき，現在では，電池，鉱物，CFRP 等の様々な材料の反応観察に展開しています。

その後，東大・高橋嘉夫教授をはじめとした先生方のご尽力のおかげで，新学術領域「水惑星の創成」(2017.10 ～ 2022.3, 代表：関根康人教授(東京科学大))に参画することができました。そうして同タイミングで獲得できた機能強化「イノベーション創出」(2017 ～ 2019)の支援とも合わせて，BL-19A/B に STXM 専用ビームラインを建設することができました（それまで BL-13 の間借り利用だった）。武市氏，山下翔平氏をはじめ多くの方の協力で非常に使い勝手の良い STXM 装置が整備され，様々なデバイスや材料はもちろんのこと，はやぶさ 2 のリターンサンプルの分析に代表されるように地球科学（化学）や資源関連物質に至るまで，幅広い材料研究に適用されています。

こうした X 線顕微鏡の研究基盤がベースとなり，新たな国プロへの参画につながりました。そのひとつが，未来社会創造事業「CFRP の疲労劣化の機構解明と余寿命推定法の確立」(2022.4 ～ 2027.3, 代表：荒井政大教授(名大))です。もうひとつの学術変革領域研究「データ記述科学」については後述します。

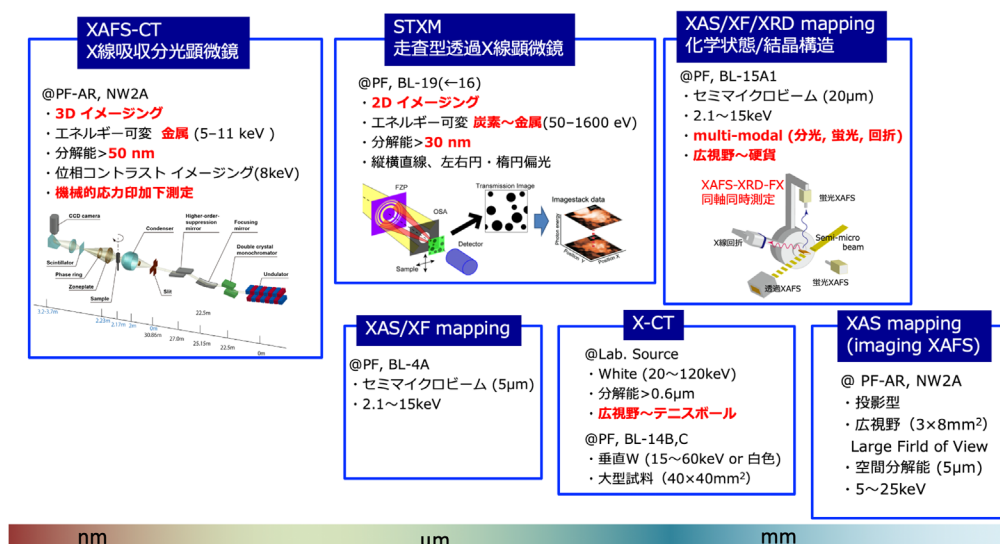


図1 当Grを中心に整備を進めた様々なX線顕微鏡

時分割計測の分野では、QXAFSを用いることで時間分解能 $\Delta t = s \sim \text{min}$ スケールの観察がルーチン的に可能な環境を整備しました。さらに短時間スケールの観察法として、PF-ARの単バンチ運転を活かしたNW2AでのDispersive XAFS法 ($\Delta t = \mu\text{s}$) があります。丹羽氏を中心にして技術開発を行い、DXAFSとレーザ急加熱・冷却の組み合わせによる相転移現象の観察 (ms), DXAFSとパルスレーザの組み合わせによる金属破壊 (ns) の観察といった、ナノ秒からサブナノ秒で生じる単発現象の研究基盤を確立しました。これは世界でも極めて珍しい常時シングルバンチ運転であるPF-ARならではのものです。これらの成果の一部は日本金属学会論文賞 (2022年) を受賞することができました。また最近では、2023年に当Grに特別助教として着任した城戸大貴氏を中心にBL-15A1においてポンプ・フロー・プローブ法による光触媒反応 ($\Delta t = \mu\text{s}$) の観察も進めています。

新たな計測技術としては、阿部氏を中心に外部資金 (科研費若手B, 若手A, 基盤C) を活用して、硬X線領域であっても表面敏感 ($\sim 2\text{nm}$) なXAFS測定手法の開発を進めて来ました。全反射スペクトルをKramers-Kronig変換することで通常のXAFSと同等の情報を得る手法で、TREXS (Total REflection X-ray Spectroscopy) と命名しました。現在はTREXSの固液界面系への適用を目指して高度化開発を進めているところです。

また、触媒や新物質の分野で、当Grのメンバーが分担者として国プロに参加して、ビームラインの高度化と利用研究を展開してきました。

触媒分野では、阿部仁氏を中心にACCEL (2013.10～2018.3, 代表: 細野秀雄教授 (東京科学大)) に参画しました。アンモニア合成触媒を中心に研究を行う一方、*in situ* ガス自動化システム (NW10A) 等の実験環境の整備を進めました。その後、他の物質群も巻き込んだ形で発展させるべく学術変革領域研究A「イオン渋滞学」(2024.4～2029.3, 代表: 一杉太郎教授 (東大)) に参画しています。触媒だけでなく、

イオン伝導体や電池材料の新物質開発と放射光計測の連携を進展させて行きます。

新物質分野では、君島堅一氏を中心にCREST「自由配列システム」(2021.10～2027.3, 代表: 君塚信夫教授 (九州大学)) に参画しています。有機金属クラスタによるCO₂から炭化水素への直接変換を目指して、吸収分光によるクラスタの構造解析や反応進行条件での電子状態の測定を進めています。そのために特殊条件下での測定環境整備や電気化学 *in situ* XAFS測定技術の開発などを進めており、研究の過程で得られた測定技術は、順次共同利用に展開していきます。

2. 整備した計測環境の展開と将来への期待

これらの技術はPFとして初のことばかりで、その計測技術の確立には大変苦労しました (今もしている)。こうしたチャレンジが成功したのは、言うまでもなく、関係したメンバーの協力のお陰です。光学系に強い、計測手法に強い、トラブルの即解決能力が高い、対象材料のツボを良く知っている、お金をとってこられる、そして強運である、といった色々な強みを持ったメンバーが協力して研究を進めたことが大きな要因だったかと思います。

確立することができた計測技術は、共同利用ユーザーとの共同研究はもちろん、民間企業の方にも共同研究で利用頂ける様になっています。企業利用としては、当初、文科省の先端研究基盤共用・プラットフォーム形成事業 (光プラットフォーム事業, 2013～2期8年) に参画できたこともあって、産業利用Grを立ち上げて、産業利用を進めました。言うまでも無く企業は、放射光を使うのが目的でなく、材料研究のための情報を得るのが目的です。そのため、色々と工夫をして、病院でいう総合診療科、すなわちどの手法をどのように使うのかを、コンサルティングできる環境整備につとめました。そのための人材育成の重要性を再認識しました。新たな組織であるCIQuS (2020年～) や新領域開拓室 (2023年～) も、それを実現するためのひとつの

かたちかと思っています。

また、XAFSによる化学状態観察やX-CT、X線顕微技術は、期せずして文理融合プロジェクトにつながっていきました。現在、東京大学史料編纂所との共同研究で、古文書料紙の産地、製法を解明するための研究を共同で行い、科研費の採択につながりました。これには軽元素（主に炭素）の集合体である料紙でさえもクリアな三次元画像が取得可能なX-CT計測法が大いに力を発揮しています。X-CTは非破壊分析であるため、文化財に登録されているような貴重な古文書料紙にもこの分析を適用できるのが大きなメリットことです。

こうした計測技術の高度化を進めてきたわけですが、現在ではAIや自律的研究ロボット等、研究（者）そのもののあり方が大きく変わりつつあります。「モノを見る（分析）のは研究の第一歩」であるのは間違い無いのですが、見るための方法（ハード）の高度化が優先であった時代から、見た結果からどのように情報を引き出すか（ソフト）に重点がおかれている時代にパラダイムシフトしていることを実感する毎日です。PFでの今後の材料研究も、これに応じて、高度化した計測法から得られた実験結果から、他の計測結果やデータベースを含めて“考察を深め”、如何に情報を引き出すかがポイントになっていくと考えています。特に、整備を進めたX線顕微鏡（顕微分光）から得られたデータを解析するにあたりそのことを強く実感しました。

X線顕微鏡（顕微分光）によるその場観察で計測される「多次元ビッグデータ」からどのように情報を引き出すかは、先行する世界の当該分野の研究者も直面している大きな課題です。そこで新たな解析法として数理的アプローチに注目し、数学の研究者と一緒に、「パーシステントホモロジーによる顕微鏡で観察される‘かたち’と‘うごき’を定量化する」ことに挑戦してきました（2016年頃～）。そしてそれをベースにした提案が、学術変革領域「データ記述」（2022.6～2027.3、領域代表：平岡裕章教授（京大））の材料科学グループとして採択され、整備を進めてきたX線顕微鏡（顕微分光）をさらに高度化しフル活用して研究展開しています。数理学や情報科学の手法を積極的に取り入れたデータの解析環境の整備はこれからの放射光施設に必須です。学術変革をはじめとした研究で確立した解析手法は広くユーザーに利用してもらえよう、物質構造科学研究所の新領域開拓室やCIQuSと協力して進めて行きたいと考えます。

このように、先端計測から得られたビッグデータを解析し、“考察を深める”ときに、AI等の情報科学の活用が不可欠であるのは間違い無いのですが、そうしているうちに研究者（人間）の“考察を深める”力がドンドン衰えていくのでは危惧しております。その意味で、新たな視点での「人材育成」—例えば実体験を通して考えることの重要性を再認識する—が必要かもしれません。（AI分野でも‘身体性’の必要性が議論されていますが）

「ある材料が壊れたので計測してその結果の解析をAIに頼んだけど解答が得られない。どうしたら良いか誰も全く

何も分からない。対策を打てずに被害はドンドン拡大する」というようなSFの様なことにならないことを祈るばかりです。（「そんな心配は杞憂だ。フツウの人はネットで情報がどのように伝わっているか知らなくても問題ないだろう、誰かが知っているだけで充分だよ。」という意見があるのも重々承知していますが）

PFでの材料科学分野のビームラインの高度化や応用研究について、ここ10年あまりの取り組み内容を振り返ってみました。私はPFや大学育ちではないため伝統的な方法とは違った発想やアプローチだったかもしれませんが、大きく変化する環境に対応しようと私なりにもがいてきました。上述したように研究環境が急変している昨今ですから、今後はさらに大きな変化が求められると思いますが、新しい世代の発想で何がでてくるのかとても楽しみでもあります。

最後になりましたが、ここで紹介した様々な展開ができたのは、一緒に研究と苦勞を共にしてくれた物構研内外の先生方や関係者の皆様のおかげです。特に物構研スタッフ（当時所属を含む）の以下の方々には大変お世話になりました。改めて感謝いたします。

阿部仁、石井友弘、伊藤麻衣、河邊宏暢、北澤留弥、城戸大貴、君島堅一、高橋慧、武市泰男、仁谷浩明、丹羽尉博、野口慎平、堀晶子、山下翔平、吉田一貴、渡邊稔樹、Mayrene Uy（五十音順、敬称略）

人事異動

最後に、放射光科学第一、第二研究系に関連する人事異動を報告します。6月以降には以下の人事異動がありました。6/1に構造生物学研究部門へChandrima Jashさんが研究員として着任されました。6/30には、材料科学研究部門のMayrene Uyさんが退職されています。皆様の今後の活躍を祈念いたします。