物構研だより

物質構造科学研究所長　小杉信博

昨年，日本学術会議から「未来の学術振興構想」の策定に向けた「学術の中長期研究戦略」の公募がありました。物構研における直近の最大の課題は学術のための将来放射光源計画ですが，研究所全体の学術振興構想はフォトンサイエンスを包含する量子ビーム科学が基本になっています。そのため，物構研の中長期研究戦略としては「量子ビーム施設統合マルチプローブ学術研究基盤」を提案することにしました。以下で簡単に説明します。

自然界に存在する生命体や無機物，人間によって人工的に生み出された機能性材料や文化財など，広い意味の“物質”には総合知としての情報が蓄積されています。これらの情報を統合的に引き出すことで“物質”の様々な機能の起源が解明できれば，より高性能な機能や新たな機能を生み出すことができるようになると考えられます。このように純粋な理想系から実在の複雑系や不均一系に拡大している現代の物質科学は，各実験手法に適した状態にするため物質を破壊して取り出した試料を要素還元的にそれぞれ分析・解析する時代から，可視光下の我々の目には直接見えない物質内部をいろいろな“新たな目”を駆使して“あるがままに見る”時代に突入していると言えます。この新たな時代を支えるのはＸ線，中性子，ミュオンのような非破壊で物質内部に侵入できる量子ビームの統合的利用であり，統合型量子ビーム科学というものが「未来の学術振興構想」のひとつになると考えられます。

物構研では，放射光，中性子，ミュオン，陽電子の４つの大型加速器施設にクライオ電子顕微鏡設備も加えた学術研究基盤を整備し，国内外の研究者による共同利用研究・開発研究を進めています。統合型量子ビーム科学の動向に世界で唯一，単独で対応できるのが物構研の特徴になっています。物質の３次元構造決定には放射光硬Ｘ線（水素など軽元素に鈍感）と中性子（水素にも敏感）が主に利用されています。低速陽電子は表面近傍の３次元構造決定に利用されます。一方，電子構造決定には放射光軟Ｘ線とミュオンが主に利用されます。このように３次元構造と電子構造の相関関係を統合的に明らかにするには異なる量子ビームをハイブリッド利用（装置的に可能であれば同時利用）する必要があることは自明です。また，Ｘ線以上に透過性の高い中性子，ミュオンは厚い物質でも観測可能です。軽元素と重元素からなる機能性材料である各種電池や触媒の動作中の機能変化のあるがままの理解には統合マルチビーム･マルチプローブ構造解析（電子構造･機能の解析を含む）が重要です。また，細胞などの厚みのある多層構造のあるがままの理解には電子顕微鏡と同じ原理でありながら透過性の高いミュオン顕微鏡やトモグラフィーのハイブリッド利用が必須となります。文化財など厚さ方向に構造が大きく違ってくる観測対象についても構成成分に応じた量子ビームのハイブリッド利用が必須です。このように統合型量子ビーム科学により，物質から引き出せる情報量が豊富になるとともに，それらの多次元相関構造が統合的に解明できるようになると考えられます。“新たな目”を駆使して“あるがままに見る”時代が実現すれば，観測対象とする物質群の拡大も進み，新たな物質観を生み出すことにもつながります。

これまで，非破壊観測法，顕微イメージング法などの新たな実験手法や人材育成（施設系人材と利用者人材）は，量子ビーム別に分かれて発展してきました。しかし，物質の３次元構造と電子構造・機能の多次元相関構造を明らかにするためには，量子ビームの物質との相互作用の違いを相補的に利用し，多次元に相関している情報から物質を統合的に見る必要があります。このような統合型量子ビーム科学が扱う物理現象は，量子ビームの種類によらず，共通の回折・散乱，吸収・反射，それらの二次過程であることから，相互作用パラメータが違うだけでデータ解析を統合することも容易であり，データ科学との相性も優れたものになっています。日本学術会議には，量子ビームの種類に依存しない統合的な手法開発・人材育成をさらに進めるための「量子ビーム施設統合マルチプローブ学術研究基盤（施設計画）」の構築・強化を「学術の中長期研究戦略」として提案しました。

「学術の中長期研究戦略」では今後 10 年で実現すべき具体的な計画を示す必要がありましたので，KEK での国際評価を経て絞り込まれた実施計画 KEK PIP2022 をもとにまとめることにしました。まず，共同利用開始後 40 年を越えたフォトンサイエンスの中核施設として，波長特性・ビームサイズ特性・パルス特性等が異なるマルチビームの同時利用が可能な新放射光施設計画を含めました。顕微鏡への展開では，Ｘ線や電子より遅れていた，透過性の高いミュオンや中性子においても近年ビーム収束技術が進んできましたので，その進歩を見据え，細胞などの非破壊・オペランド観測を可能とする，電子顕微鏡のミュオン版の開発計画を含めることにしました。そのほか，放射光との併用実験の需要が高いが測定が律速となっている低速陽電子のビーム強度を 2 桁向上させる計画と，生命科学や材料科学で需要の高いトランススケールイメージング実現のための研究環境の整備計画を含めました。

以上のように，統合型量子ビーム科学に向けて物構研がやるべきことは山積していますが，着実に前に進めて行きたいと考えていますし，国内外の関連施設との連携も重要と考えています。幸い令和 5 年度概算要求において，統合型量子ビーム科学の推進により新たな研究領域を切り拓いていくための新組織「新領域開拓室」が認められ，今年度から教員人件費と事業費の一部を確保することができました。今後，拡充要求を行い，量子ビーム施設連携部門，AI・DX 開発部門，イメージング・顕微開発部門，非破壊分析開発部門の 4 部門体制の新組織を整備していくことになります。皆様のご理解とご協力をよろしくお願いします。

現　状

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹　惠郷博文
（2023 年 7 月 5 日付け）

運転状況

3 月 13 日に放射光光源加速器へのビーム入射運転終了後，入射器をシャットダウンして春期メンテナンス作業を行なった。光源加速器の要請により，2023 年第 1 期の PF リング運転期間が例年と異なり，連休前の 4 月 25 日から 6 月 16 日となったため, メンテナンス内容の調整を行った。入射器立ち上げ時の RF コンディショニングと運転調整時間を短縮するため，入射器ビームラインの大気暴露作業を控え，新型加速管設置などの大型作業は夏期メンテナンス期間に順延した。4 月 17 日より入射器の立ち上げを行い，4 月 18 日に熱電子銃からのビーム出力確認後に入射器内ビーム軌道を安定化させ，その後，PF-AR 入射用ビーム，PF リング入射用ビームの調整を行った。順調にビーム調整を終えた後，4 月 25 日より PF リングへのビーム入射を再開，4 月 28 日よりユーザー利用運転を開始した。一方，PF-AR は 5 月 10 日より 5 GeV ビームにて運転を開始した。上記の大気暴露作業を控えたことで入射器の高周波運転状態は安定しており，機器ダウン頻度は 35 回 / 週程度，加速管などからの反射波異常によるインターロック発生は 25 回 / 週程度となって，これまでの最低頻度レベルであった。

PF リングおよび PF-AR へのビーム入射運転は 6 月 16 日に終了し，その後，入射器単独スタディと機器データ取りを行って 6 月 20 日に 2023 年第 1 期の全運転を終えた。6 月 20 日より 10 月 1 日まで夏期保守作業を行い，パルスマグネット増設などの入射器アップグレード作業によりビーム性能向上を目論む。2023 年第 2 期は 10 月 2 日より入射器の運転を開始，11 月 7 日まで RF コンディショニングとビーム調整を行う。11 月 7 日より PF リング，11 月 14 日 PF-AR，12 月 11 日からは長期改修期間（LS1）を終える SuperKEKB へのビーム入射を開始する。夏期メンテナンス期間の現在，定例機器メンテナンスに加え，2022 年度より順延された入射器トンネル内空調設備更新，ギャラリー空調，冷却設備更新などの施設工事，および，加速器コンポーネントのアップグレード作業と加速管設置作業を行っている。

ビーム研究の進展

最初に，光源リングへの入射研究について紹介する。PF-AR 5 GeV トップアップ入射を目的として，2023 年度夏季停止期間に PF 入射路（PF-BT）の改造工事が実施される。そこでは偏向電磁石の磁場強度をより高くするために，垂直方向に物理口径の狭い真空ダクトへ交換される。設計段階のビームパラメータではこの狭口径ダクトにビームは当たらないという想定であったが，加速器第六研究系の下崎氏らによる PF-BT 測定結果から実際のビーム形状が設計値と大きく異なることが判明した。現状ではビームの一部が狭口径ダクトに当たることで周囲の機器に放射線損傷を与える可能性がある。そこで狭口径ダクトにビームを通すことを目的とした入射器と PF の合同スタディの 1 回目が，夏季停止前の 2023 年 5 月 24 日（入射器スタディ期間）に実施された。入射器から PF-BT ビームダンプにビームを出射しながら入射器調整を行なった後，入射器内に設置してあるワイヤーモニターでビーム形状の測定を行った。次に，PF-BT 下流に設置してあるビームプロファイルモニターでもビーム形状の測定を行い,「入射器側（上流）で計測したビーム分布」と「PF-BT 側（下流）で計測したビーム分布」の比較を行った。両者が一致すれば,「PF-BT 狭口径ダクトにビームを通すためのビーム形状要求値」と「入射器でビーム形状を整えるためのビーム形状目標値」が一致することになるので，システマティックなビーム調整が可能となる。両者を比較したところ,「入射器側（上流）での計測ビームサイズ」が「PF-BT 側（下流）での計測ビームサイズ」に比べて，概ね 2 倍，大きく見えるとの結果になった（図 1）。この原因として，(1) ワイヤーモニターの一部に不具合がありビーム形状を正しく測定できていなかった可能性と (2) ビームが PF-BT の途中で削れてビーム形状が変わってしまった可能性が考えられる。今後，PF にてビーム解析を進めると共に，夏季停止期間にワイヤーモニターの調整と改修を行う。10 月以降，運転再開後に狭口径ダクトにビームを通すための合同スタディを再開する予定である。今回，入射器と PF の初めての合同スタディにて問題点と取り得る対策が見つかったことは大きな一歩である。今後も Step-by-step で着実にビーム性能向上に寄与する研究を共同で進めていく予定である。

光源加速器へのビーム入射と共に SuperKEKB 用のビーム研究を並行して行った。先ず，RF 電子銃に関して研究成果を紹介する。SuperKEKB への入射では 2 バンチビーム運転の安定化が課題である。レーザー窓位置をスキャンして，第一バンチの電荷量出力が最大となる位置に調整した。第二バンチは全体的に出力低下が見られたが，3 nC ビーム形成を行うことができるようになった。手動でのディスパージョン補正によりビームエミッタンスが B セクターで水平 40 μm/ 垂直 30 μm，5 セクターでは水平 40 μm/ 垂直 80 μm となった。時間の経過とともにディスパージョンが変化していくため，今後，自動補正を行う制

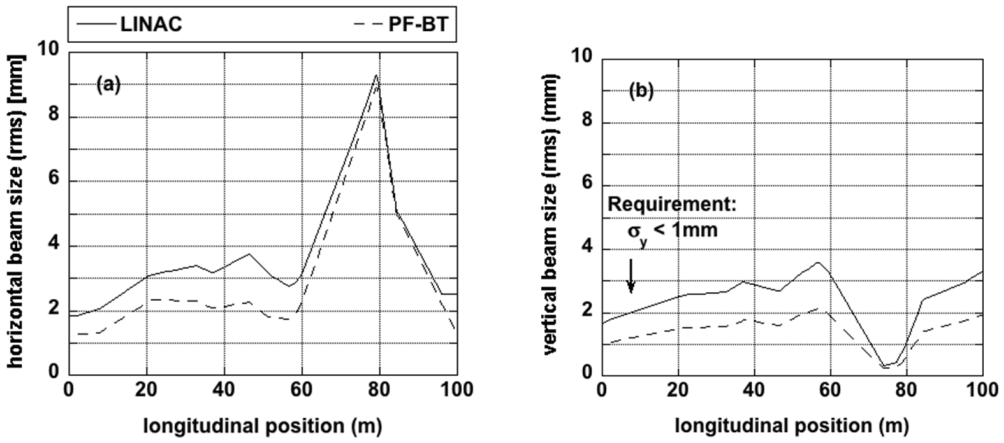

図 1　ビームサイズの比較（下崎氏提供）。左：水平方向，右：垂直方向
（実線）入射器ワイヤモニター結果を下流に転送した場合（破線）PF-BT ビームスクリーンモニターの結果を上流に転送した場合。

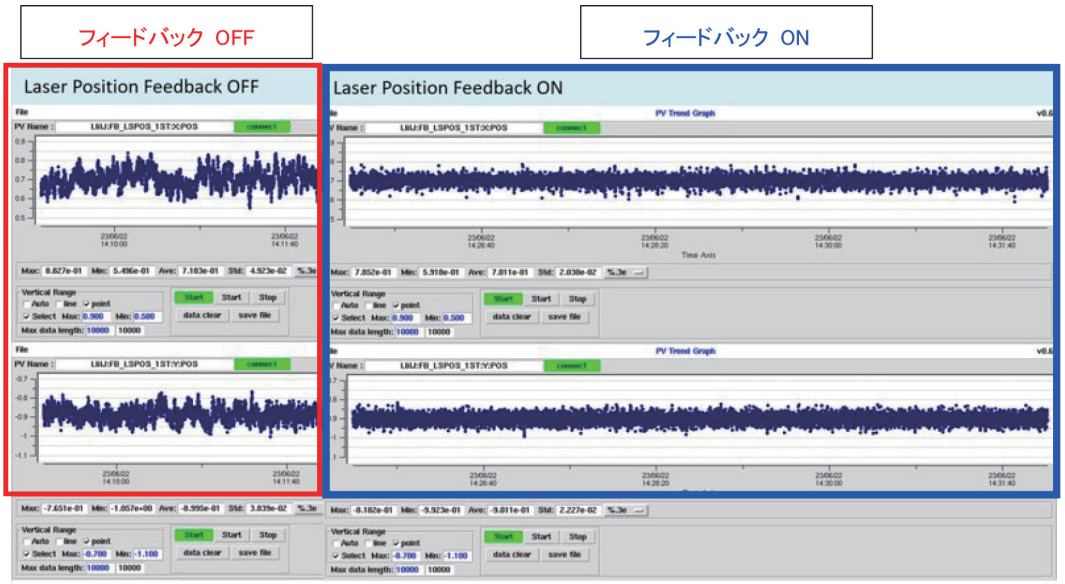

図 2　　RF 電子銃のレーザーポジションフィードバック　上段：水平方向，下段：垂直方向レーザースポット位置の時間変化。

御プログラムを整備する。第一レーザーの高速 25 Hz ポジションフィードバックを導入し，運転パルス毎に位置安定制御をかけられるようにした。これによりレーザーポジションは水平，垂直両方向の変動が 0.02 mm（RMS）程度まで大幅に安定化された（図 2）。しかしながら，RF 電子銃下流のビームライン各所で観測した位置変動は，このフィードバック ON/OFF を切り替えても大きな差は見られなかった。これはレーザースポット照射位置変化以外の要因でビーム軌道変動が生じていることを示唆している。クライストロン高圧電源モジュレータの De-Qing トリガーをローカル設定（モジュレータ内部生成）にするとビーム軌道変動が半減すること，バンチ圧縮に使用している加速ユニットのビーム加速電圧の設定によっても変動が大きく変わることから，ビーム軌道変動は高周波配信系の安定度による寄与が大きいと考えられる。今後，RF 位相測定用のレーザーを用いた新基準信号を用意して，その安定度調査を行なっていく予定である。

次に陽電子ビームの生成電荷量に関する研究成果を紹介する。これまで陽電子ビームの生成量は加速器調整後に徐々に減少していたが，機械学習を取り入れた自動調整を行うと 4 nC まで減少した電荷量は 5 nC，電子陽電子変換効率は 57% まで回復できるようになった。試験的に行った 16 パラメータによる多変量自動調整試験では 30 分程度で安定ビームへ収束する。今後は更にパラメータを増やし，陽電子電荷量を最大にする自動調整制御の最適化試験を行っていく。

このように光源加速器への安定ビーム入射を行うと共にビーム性能向上に向けた入射器改造やビーム解析調整を進めている。

光源の現状

加速器第六研究系研究主幹　帯名　崇
（2023 年 7 月 18 日付け）

PF リングおよび PF-AR の運転概要

例年であれば年度初め第 1 期の運転は 5 月の連休明けから行うことが多かったところ，今年度は 2 週間予定を前倒しして 4 月 25 日から運転を開始しました。これは昨今の光熱費高騰への対策の一環としておこなったものであり，3 月～ 4 月の加速器停止期間をできるだけ短縮して 6 月の運転を早目に終えることを目的としています。実現にあたっては Linac 関係者および PF 関係者の皆様に多大なる協力を頂きました。また，ゴールデンウィーク中も運転を継続したことで，KEK 職員はもちろんのこと放射光ユーザーへの影響は大きかったと思われますが，限られた予算の中でユーザー運転時間を確保する取り組みとして重要と考えており，実現に尽力頂いた皆さまに感謝いたします。

第 1 期の運転において，PF リングでは安全系のトラブルや入射キッカーの不具合，軌道フィードバックシステムの故障などユーザー運転を中断するトラブルがいくつか発生しました（詳細は後述）。PF-AR でも入射不調や単バンチ純度の悪化などが発生しております。今後もできるかぎり安定してユーザー運転を継続できるよう，適切な老朽化対策・メンテナンスを実施していきます。PF-AR ではテストビームライン（AR-TBL）のユーザー運転が正式に始まりました。今後も放射光ユーザーランと両立できる運転モードを拡大していくよう，加速器の調整を進めていきます。

PF リングの運転状況

図 1 に PF リングにおける 4 月 25 日 (火) 9:00 ～ 6 月

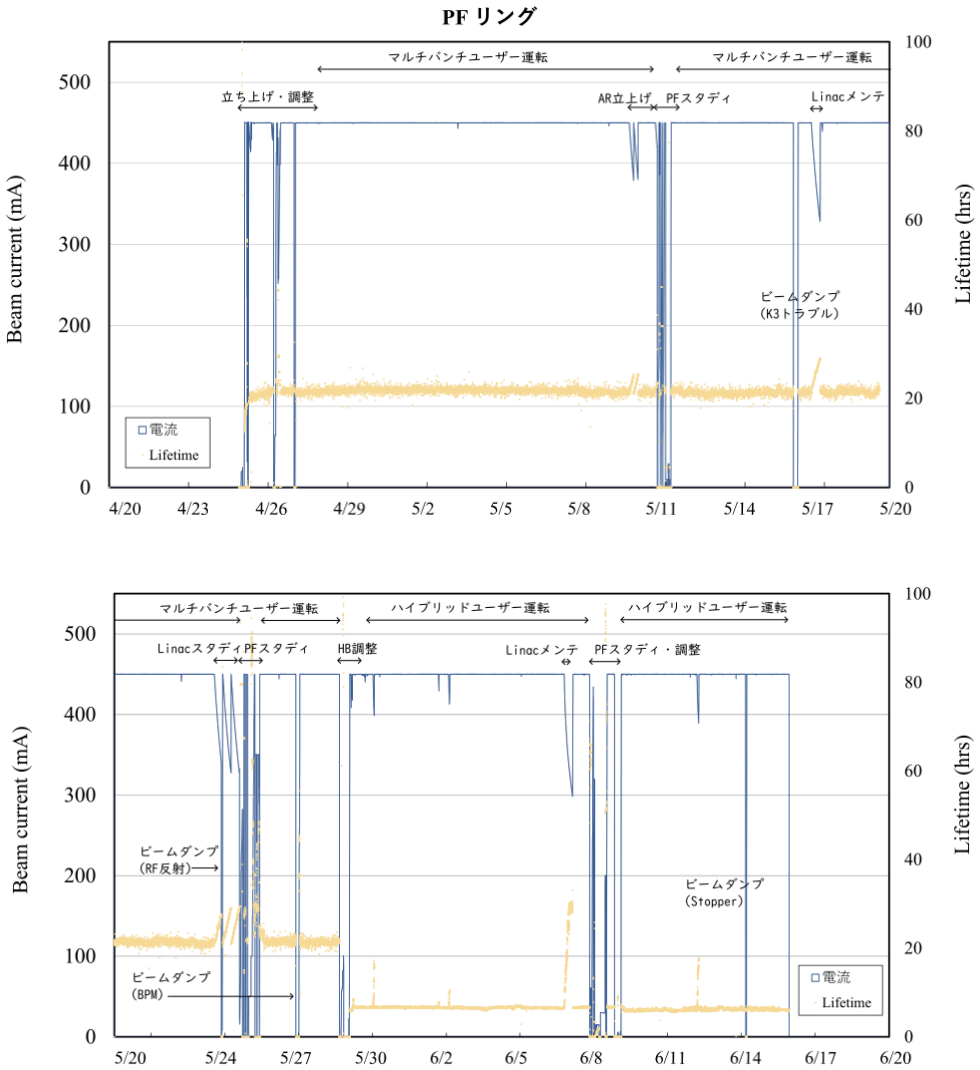

図 1　PF リング第 1 期運転状況。グラフは横幅を 1 ヵ月としてプロットしている。ビーム電流（青線）を左軸，ビーム寿命（黄点）が右軸である。

16 日 (金) 9:00 までの蓄積電流値の推移を示す。立ち上げ調整とマシンスタディ，光焼きだしも順調におこなわれ，4 月 28 日 (金) の光軸確認の後にユーザーランを開始した。GW 連休の間もユーザーランを中断するような大きなトラブルは発生しておらず順調に運転できている。5 月 29 日の朝以降にビーム寿命が短くなっているのは，このときから single bunch 50 mA + multi bunch 400 mA のハイブリッド運転が開始していることを示している。

5 月 16 日 16:25 ビームダンプ。ビームダンプの原因は Kicker#3 (K3) の動作不良。これまで K1-K3-K4 の 3 台で入射してきたが，急遽 K1-K2-K4 の 3 台で入射できるパラメータを計算。K2 の極性切り替えで対応できることが判明したためリング内での作業を実施。このときの設計バンプ軌道を図 2 に示す。ビーム調整の結果，入射・蓄積することができたため，同日 20:57 よりユーザー運転を再開。翌日，メーカーの調査により故障箇所は K3 充電用のサイラトロンとそのソケット部の損傷と判明した。ソケット部の調達に時間がかかるため，K3 の修理は夏期シャットダウン時とする方針とした。さらに，他のキッカーが故障したときの対策として多極電磁石（CCiPM）を併用した入射調整スタディを実施する方針としてマシンスタディを行っている。上記方針で運用していたところ，1 週間後に K2 キッカーの不調が起きた。幸いにも完全な故障ではなく出力電流を下げると運転を継続できることが判明したため，新たに K2 の出力設定を 70% まで低下させたパラメータを策定した。ただし，これは入射ビームの初期振動を大きくさせてしまうため，ユーザーランの間は以下の 2 パターンを用意して運転状態に応じて切り替える方針とした：

① 初期入射用パラメータ：バンプ間のバランスを崩してコヒーレント振動を誘起させ入射効率を上げる設定。
② Top-Up 運転用パラメータ：蓄積ビームの振動を抑制する設定。入射効率は前者にくらべると少し悪化するが Top-Up を維持するには十分な設定。

以上の設定を導入することで，ユーザー運転に影響のないレベルでの入射を実現することができた。

運転停止後の調査により，K2 キッカー電源の不具合は制御基板上にあるコンデンサ容量抜けと判明した。これは予備基板からの部品取りで復旧している。K3 キッカー電源については，充電用サイラトロンのソケット交換が必要であることが判明した。手配を進めるものの海外製で長納期であるため，他の開発用電源から一時的に流用することで対処することを検討している。目下，K1，K4 について同様の不具合は発見されていない。引き続き，秋の立ち上げ時にはキッカー 4 台体制に戻すことを目指して努力している。

5 月 27 日 15:15 に BPM システム異常に起因したビームダンプ発生。11 時頃から BPM の健全性異常のアラームが頻発していたため，測定器当番と相談し 17 時から Ch-close して作業を行う予定であったが，それより前の 15:15 にビームダンプが発生。この時，BL-17 の基幹部で一時的に 5 桁程度の真空度が悪化。BPM 異常のため高速軌道フィードバックが応答し，鉛直方向にビーム軌道が変動して光が BL-17 のマスク近辺に当たったと考えている。ID17 本体に異常は見られなかった。健全性異常については，BPM ステーション 9 番で検波に必要な信号を分配するのに使用している REPEATER モジュールを予備品と交換することで復旧した。同日の 19:12 にはユーザーランを再開した。その後 BL-17 の MBS が開かないとの連絡があったが運転継続を優先し，5 月 29 日のマシンスタディ時間帯 に当該リレーボックスを交換することで BL-17 は復旧した。

6 月 14 日 15:17 安全システムのビームストッパーが動作してビームダンプが発生した。ストッパー本体の電磁弁動作不良が原因である。現場での動作確認で問題が無かったためリセットして復旧し，ユーザー運転を継続する方針とした。運転終了までは再発していない。6 月 16 日の運転停止後に電磁弁の交換を実施した。このほかにも安全系で

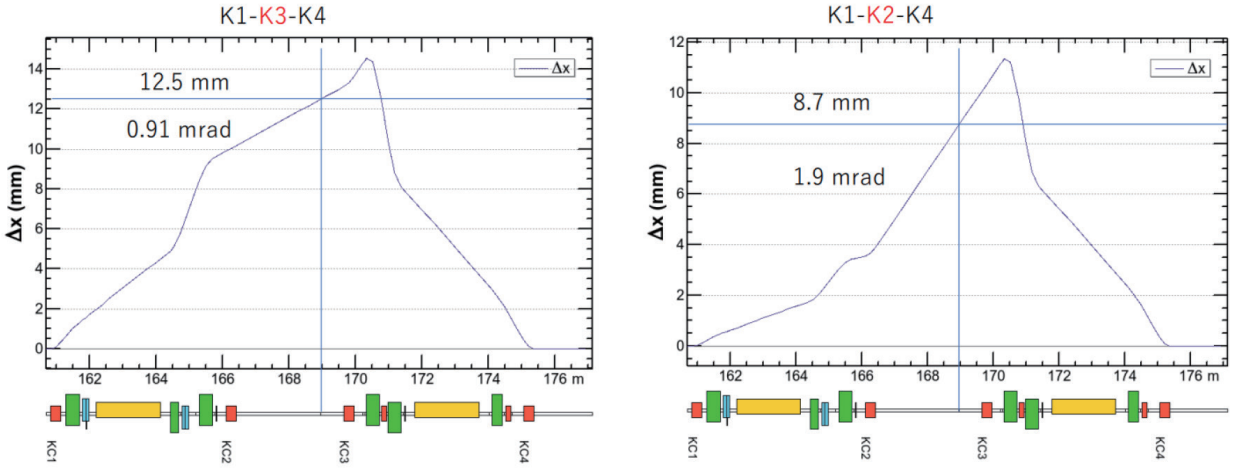

図 2　左：従来の Kicker 1, 3, 4 の 3 台を使用した場合の入射バンプ軌道。右：Kicker 1,2,4 の 3 台を使用した計算例。このほかにもいくつかのパターンを検討した。この例では入射ビームの振動が約 3.8 mm 増大し，セプタム 2 で必要な入射角度が 1 mrad 大きくなるが，トラッキングシミュレーションによると蓄積できると判断できた。これらの計算値をもとに最終的には実ビームでの微調整を行って蓄積に成功した。

はケーブルの接触不要に起因するトラブルが起きている。できるだけ早期に新 PLC システムへの移行と老朽化したモジュール・ケーブル類については更新を実施していく。

PF-AR の運転状況

図 3 に 5 月 10 日（水）9:00 ～ 6 月 16 日（金）9:00 までの蓄積電流値の推移を示す。

5 月 10 日 通常のオプティクスで PF リングと PF-AR の同時入射可能な入射路のパラメータで立ち上げを実施し，17 時からは PF-AR 5 GeV/PF 2.5 GeV の同時連続入射で運転を開始した。翌日の 5 月 11 日 には middle-low emittance オプティクスに切り替え，5 月 15 日 9:00 光軸確認後にユーザーランに入った。今回は実績のある通常オプティクスで立ち上げをおこなっているが，次回以降でどのようにするかは今回の結果をみてから検討する。

5 月 24 日にビーム純度の悪化の連絡があったため，Linac で電子銃のグリッドパルサーのケーブルの反射調整を実施した。この件も含め，PF-AR での純度悪化・調整については次章にて説明する。5 月 29 日 6.5 GeV への切り替えを行い，middle-low emittance オプティクスを適応した。6 月 2 日 22 時過ぎに入射不調が起こり 50 mA を維持できなくなった。様子をみていたが 6 月 3 日の 0 時より調整を開始した。入射位相を調整するが良くなったり悪くなったりを繰り返したが，原因は不明。21 時過ぎの調整後は順調に入射ができるようになった。その後もときおり入射効率の悪化が発生することがあった。その後，PF-AR の入射バンプキッカーのタイミングのずれに影響する入射位相のドリフトが見られ，入射位相の調整により回復することが判明した。この現象は AR-TBL の挿入ワイヤーや挿入光源ギャップの開閉度によるビーム変調とは相関がないことが分かっている。6 月 15 日 14:03 QF Magnet Busbar インターロックによりビームダンプ。リセット後，電磁石の初期化を実施してユーザーラン復帰した。

6 月 1 日より開始された AR-TBL のユーザー運転では，AR-TBL ステージで使用する照射用電源の収量が 1600 counts/s に達した状態で運用が進められ，期間中ワイヤーターゲットを起因とする寿命急落などの不調もなく放射光運転との共立運転に成功した。

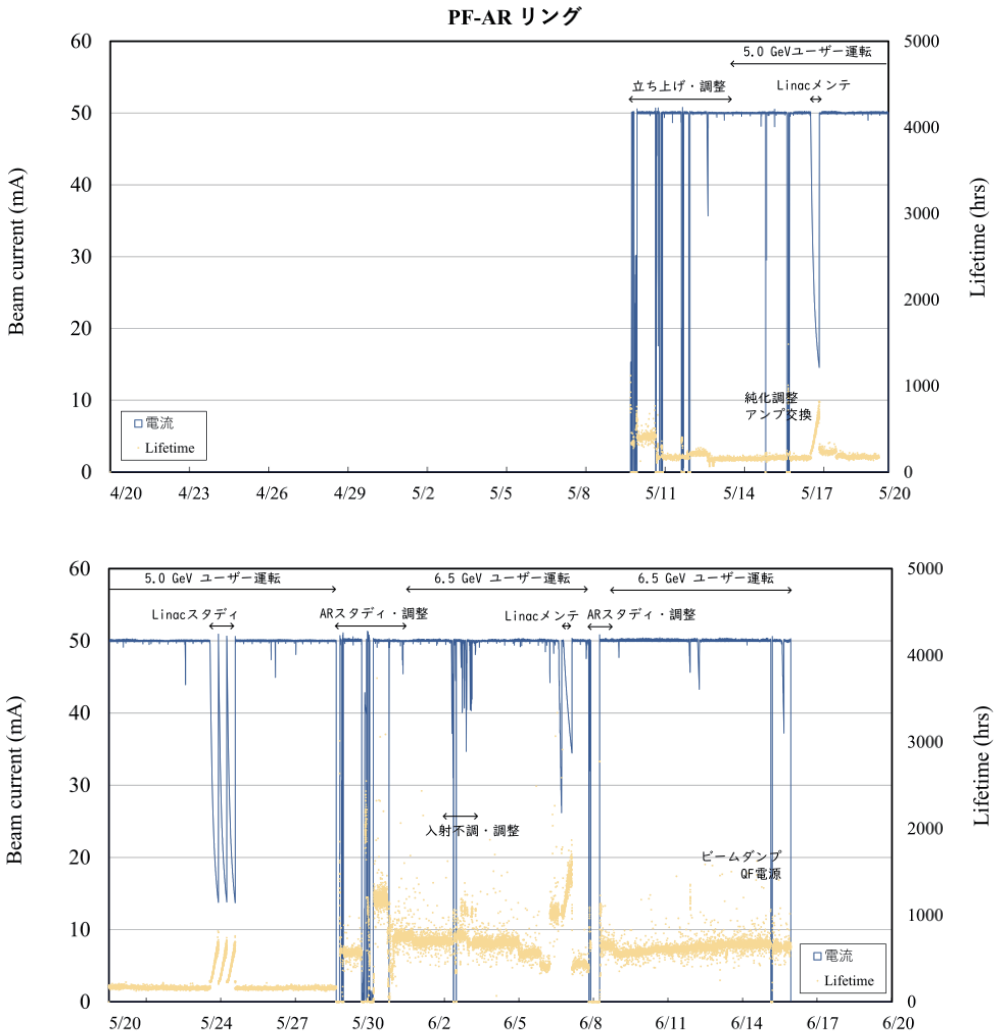

図 3　PF-AR の運転状況。横幅は PF リングと同じ期間で，各グラフは横幅 1 ヵ月に固定してプロットしている。

PF-AR でのバンチ純度悪化現象について

PF-AR は大電流の単バンチ運転を行っていることが大きな特徴である。リング内にバンチ 1 個のみを蓄積して他のバンチには電荷が入らないことが重要であり，特徴づけるパラメータとして主バンチの電荷量に対する不要なバンチ電荷の比率，すなわち単バンチ不純度（single bunch impurity）あるいは単にバンチ純度（purity）が良好であることが求められる。ユーザー実験によって要求される純度は異なるが，典型的には 1×10^{-6} より良いなど，非常に小さい値であることが必要である。例えば，オシロスコープ等で見えるのは 10^{-3}~$^{-4}$ 程度が限界であるため，このレベルの不純度を計測するには光子計測法を使うことが一般的となっている。

今回，PF-AR の立ち上げ後のユーザーランにおいて，不純度が悪化することが頻発した。5 月 15 日 15:30 NE1 で主バンチの後方約 30 nsec に不要ビームが存在することが確認されたため，再入射を行なった。蓄積リング側で調整を行った結果，真空封止アンジュレータのギャップを閉じるなど，運転条件を変えれば問題なく純化できるものの運転条件によっては純化できない状態に陥ることが判明した。5 月 15 日 Linac ヒーター電流値を 5.4 A から 5.0 A に変更などして一時的に改善したが，後日再発したので元に戻している。5 月 16 日には再び純度の低下が確認された。このときの調査によって最終段の電力増幅器（アンプ）4 台のうち 1 台から規定の電圧が出ていないことが判明したため，トンネル内に入域して純化アンプを交換し，純化調整を行なって対応した。さらに 5 月 18 日にはビーム純度に改善が見られないため再び純化調整を実施している。5 月 24 日に Linac で電子銃のグリッドパルサーのケーブルの反射調整が行われ，30 nsec 後ろにビームが入る問題は改善し，その後は再発していない。5 月 30 日 6.5 GeV 運転に対応して純化調整を実施したところ，別のアンプ 1 台（1995 年製）が故障していることが判明した。幸いにも 6.5 GeV ではアンプ 3 台で純化できることが判明したため，ユーザー運転への影響を考慮して今期はこの状態のまま運転を継続する方針とした。

今回は Linac のレーザー反射波形，アンプの故障など，複合的にトラブルが重なったために解決までの時間を要してしまった。既に Linac は対策済みであるため，主バンチの 30 ns 後方にビームが入射されるという特殊な状況は再発しないと期待している。しかしながら，本来ならば不要なバンチが入射されてもリング側で純化できるシステムを構築しているはずであった。今回のようにトラブルが多発したのは，今期の運転から変わったことの 1 つとしてリングの光学関数（オプティクス）の変更（middle-low emittance）が挙げられる。これによって特にキッカー電極が設置されている PF-AR 南直線部における vertical のベータトロン関数が小さくなったことが大きく影響している可能性がある。次回の運転までには①故障した純化アンプの修理を行うほか，② middle-low emittance と純化を両立させるようなオプティクスを検討すること，また現状では真空封止アンジュレータのギャップを閉じると問題なく純化できるため，これをユーザー実験条件に依存せずに純化するために③ vertical 方向にスクレーパーを挿入すること，等の対策を検討している。このほか，任意の運転条件に対応できるようにするため純化アンプを増強することが望ましい。高周波・広帯域アンプを調達できるよう予算確保を目指している。

AR-TBL のビーム調整・運用について

6 月 1 日より AR-TBL ではユーザー運転が開始された。AR-TBL ステージで使用する照射用電源の収量が 1600 counts/s に達した状態で運用が進められ，期間中ワイヤーターゲットを起因とする寿命急落などの不調もなく放射光運転との共立運転に成功した。今後もさまざまな運転モードに対応して安定に運用できるよう，ビーム調整を継続していく。

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が実施される。6 月 16 日（金）の運転停止直後からすでに作業に入っており，9 月までの約 3 ヵ月間を予定している。トンネル及び東南北棟，北東棟の空調が停止する。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て対応するほか，高圧をかける真空ポンプ類はコネクタ部分にカバーと除湿剤（シリカゲル）等を設置することで対処する。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する。このように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が，秋の加速器立ち上げをできるかぎり速やかに実施することを目標にして様々な対処を施設担当者含め各機器担当者間の連携で進めている状況である。今後も状況を監視しつつ対処していく。

マシンスタディ・研究開発関連

・Linac との合同スタディ

PF-AR の 5 GeV トップアップ運転に対応するため，5 月 24 日には Linac からのビームエミッタンス計測スタディを共同で実施した。詳細は入射器からの報告を参照して頂きたい。加速器第五系・六系が連携して調整を行うことは極めて重要と考えており，今後も推進していく方針である。

・ビーム輸送ラインの自動軌道補正

PF リングへ電子ビームを入射する際，まず電子ビームを入射器で 2.5 GeV まで加速した後，パルス電磁石で PF 入射路（PF-BT）へ出射する。電子ビームは PF-BT の設計軌道を通過した後，パルス電磁石で PF リングへ蹴り出され，PF リングの中で時間をかけて蓄積ビームと合流していくことになる。そのため入射器から PF-BT への出射軌道が設計値からずれていると，電子ビームは設計軌道からずれた位置を通過するので，結果として PF リングへの入射効率が悪化しうる。PF リングへの安定なビーム入射を

期待して，2023 年 5 月 11 日に PF-BT における自動軌道補正の試験を行なった。

入射器から出射される電子ビーム 100 パルス分について，PF-BT の各点に設置されたビーム位置検出器（BPM）で軌道誤差の最頻値を算出し，それが設計軌道と重なるように補正電磁石に電流を流した。これが電子ビーム 100 パルスごとに繰り返されるように，自動軌道補正プログラムを構築した。自動軌道補正の効果を調べるためにわざと軌道誤差を作って入射効率を悪化させたところ，軌道が徐々に設計軌道に戻るにつれて，PF リングへの入射効率が回復していくことを確認した。図 4 に結果を示す。PF-BT 自動軌道補正の効果が確認されたので，翌 5 月 12 日から運転停止の 6 月 16 日までの期間，ユーザー運転で PF-BT 自動軌道補正の試験運用を行い，長期期間にわたって入射効率が安定だったことが確認された。図 5 に示すように，自動軌道補正の適用後は入射効率が安定していることが明らかであり，PF リングの安定運用と運転員の負担軽減にもつながったと考えている。

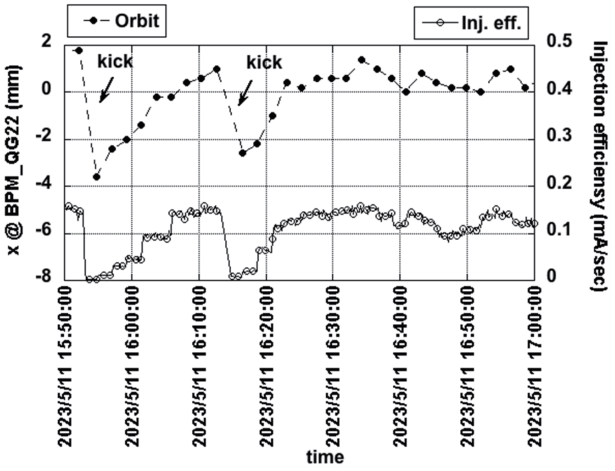

図 4　自動軌道補正に伴う BPM_QG21 で観測した x 方向の電子ビーム軌道（破線）と入射効率（実線）。kick と書いてある位置で意図的に軌道に擾乱を与え，それが自動補正プログラムで軌道が修正されるにしたがって入射効率が回復していることが分かる。

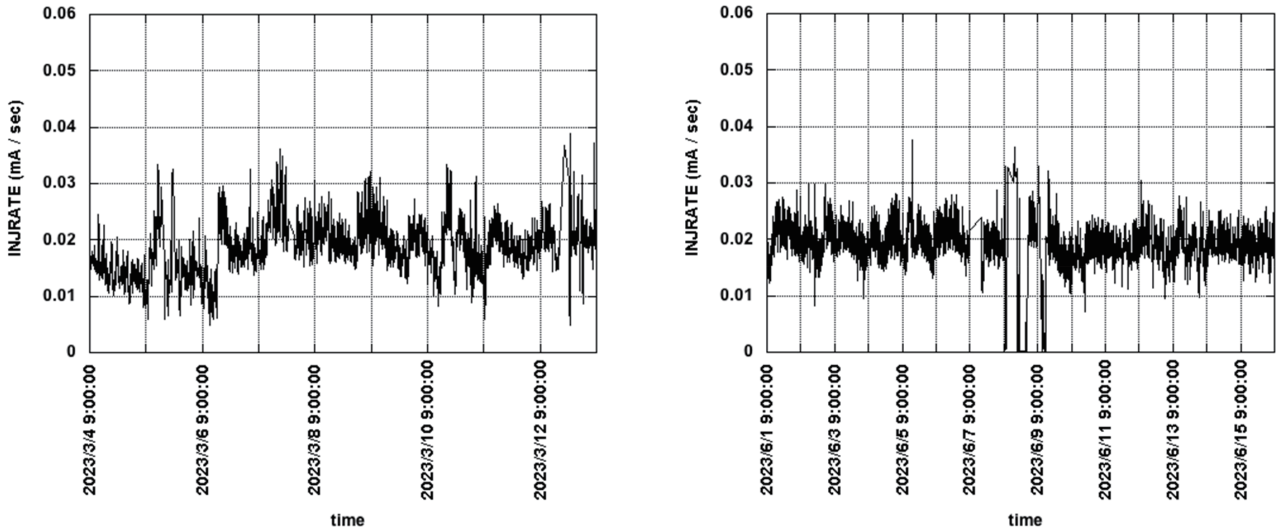

図 5　HB ユーザーランにおける入射効率の電子ビーム 100 パルスごとの平均値。2022 年度第 3 期（PF-BT 自動軌道補正の適用前）（左図）と 2023 年度第 1 期（適用後）（右図）。6 月 8 日は加速器マシンスタディ時間のため入射が無い時間帯が断続的にあった。

その他

PF の RF グループ指導のもと研究開発を行ってきた総研大生の山口孝明さんの論文が Physical Review Accelerators and Beams に掲載され，さらに Editors' suggestion に選ばれた。これは 2023 年 4 月 12 日付けの KEK ニュースでも紹介されている。研究内容に関する詳細は上記 KEK ニュース記事および論文を参照していただきたい。

https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevAccelBeams.26.044401

また，山口氏が執筆した博士論文は総研大・高エネルギー加速器研究科長賞を受賞しており，これも KEK ニュースにて紹介された。卒業後の 2023 年 4 月からは SuperKEKB の博士研究員として引き続き加速器の高周波（RF）関連の研究に従事している。

放射光実験施設の現状

放射光実験施設長　船守展正
（2023 年 8 月 12 日付け）

前号の『施設だより』に注記しましたが，文部科学省から「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 2023）」の募集があり，KEK 機構長を提案者，物構研所長を計画代表者として，『物質・生命科学の研究分野を深化・融合・創成する放射光マルチビーム実験施設』の計画を申請しました。本号の『物構研だより』でも紹介されている日本学術会議による「学術の中長期研究戦略」の募集に続き，KEK として提案することができました。詳細については，次号の『施設だより』で紹介したいと思います。

開発研究多機能ビームライン（BL-11A, -11B）と広波長域軟 X 線ビームライン（BL-12A）の建設については，機構から追加予算の配分を受けて，何とか計画した通りに進んでいます。2023 年度第 2 期の運転では，BL-12A の二結晶分光器側のパスに放射光を導入することが予定されています。9 月 19 日には，PF-UA 主催のサマースクール「放射光分析手法の初学者向け勉強会」がオンラインで開催されます。2 ビーム利用を通じた分野と手法の融合を意識した企画とのことですので，2 ビーム利用の開発研究の場となる BL-11A, -11B の建設に遅延が生じないよう，引き続き努力して参ります。次号の『放射光実験施設の現状』では，担当者に協力してもらい，「BL-11 と BL-12 の再整備」の進捗状況について，2 回目の紹介をしたいと思います。

運転・共同利用関係

2023 年度第 1 期の運転は，無事，6 月 16 日に終了しました。入射器の立ち上げ時の調整運転の時間を短縮（光熱水費を抑制）することなどを目的として，例年より早い日程での運転の開始と終了になりました。改めてご協力に感謝いたします。第 2 期の運転ですが，入射器の加速空洞の工事とその後の調整に時間を要するため，PF は 11 月 7 日に，PF-AR は 11 月 14 日に運転を開始する計画となりました。ともに 12 月 28 日まで運転を継続します。PF のハイブリッドモードは 12 月 7 日から 12 月 28 日の終了までを予定しています。PF-AR は 5 GeV で運転を開始して，12 月 8 日から終了まで 6.5 GeV で運転を行います。なお，運転についても，機構から追加予算の配分を受けて，第 3 期を実施できることになりました。第 3 期の運転スケジュールについては，11 月中旬ごろに決定する見通しです。

PF-PAC の全体会議が 7 月 27 日に Web 会議方式で開催され，課題の評点と採否が審議されました。また，課題採択後の実験ステーション追加の要件と測定器開発テストビームライン（AR-SE2A）の課題募集に関する審議，課題審査における評価基準，S 型課題等の中間・最終評価や開発研究多機能ビームラインの運用制度に関する協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。

実験責任者に作成と提出をお願いしてきた共同利用実験者等登録届兼外来者放射線作業従事願（様式 9-2）ですが，関連する規程の見直しが行われ，実験参加者が共同利用者支援システム（KRS）から用務登録することで代用できることになりました。その他の書類についても，負担の軽減の可能性がないか，共通基盤研究施設・放射線科学センターと検討を進めています。

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。5 月 1 日付で，運営部門の特別准教授として佐藤友子さんが着任しました。放射光に関連する各種の調査研究と情報発信を戦略的に進めることを主務としており，着任して直ぐでしたが，前述のロードマップ 2023 の準備にも貢献してもらいました。なお，元々の専門である高圧力科学分野の利用研究にも主体的に取り組んでもらうこととしています。また，5 月 31 日付で，PF 事務室の石川裕子さんが退職されました。

放射光科学第一，第二研究系の現状

放射光科学第二研究系研究主幹　千田俊哉
（2023 年 7 月 26 日付け）

はじめに

今回は放射光科学第二研究系の担当で，構造生物分野のクライオ電子顕微鏡（クライオ電顕）に関する話題です。約 1 年半前にクライオ電顕実験棟が建設され，昨年度には 300 kV のクライオ電顕も導入されました。単粒子解析を行うための基本的な設備は揃ったといえます。そこで今回は，新しいクライオ電顕実験棟（図 1）や，KEK で進められているクライオ電顕関連の研究状況を紹介しようと思います。

クライオ電顕実験棟

KEK に最初に導入されたクライオ電顕は 200 kV の Talos Arctica（Thermo Fisher 社）でした。当時の構造生物実験準備棟にはクライオ電顕を設置するスペースはありませんでしたので，SuperKEKB リングの内側にある COI 棟に間借りしていました。温度管理等のために COI 棟の内部にプレハブを建設し，良い環境で測定ができていたのですが，生化学実験室から遠いなど，実験上の不都合もありました。また，ユーザーの皆様にとっても生化学実験と組み合わせた実験がやりにくい，構造生物学研究センターの主施設から遠いなどの不便がありました。今回，構造生物実験準備棟の向かいにクライオ電顕実験棟が建設されたことで，利便性が大きく改善されました。新しく建設された実験棟には，COI 棟から移設された 200 kV と 300 kV（Titan Krios G4, Thermo Fisher 社）の 2 台クライオ電顕が設置されていますが，これ以外にもクライオ電顕実験（単粒子解析実験）のサンプル調製のための設備が充実しています。生化学実験室（クライオ電顕実験室）は大きなスペースをとっており，外部からの研究者を受け入れることも可能です（すでに，長期滞在して実験している方もいらっしゃいます）。また，SPR，ITC，SEC-MALS，DLS，CD，Mass Photometry などの装置を備えた分析機器室もあり，こちらも近隣の大学や研究所からのユーザーを受け入れ始めています。また，セミナーなども開催できるデータ解析室，電顕のデータや実験ノートなどを格納するためのデータ保存室も備えており，様々な用途に対応できるようになりました。これらの施設は，クライオ電顕や放射光のユーザーに広く開放していきたいと考えています。今後，これらの施設の利用に関しての決まりなどを整備していく予定です。

クライオ電顕実験棟の建設後，2022 年の年末には 300 kV のクライオ電顕が導入されました。これまで KEK の 200 kV クライオ電顕で十分なデータが取得できない場合は，他施設の 300 kV クライオ電顕をご紹介させていただいていましたが，今後は KEK でも高分解能データを取

図 1　クライオ電顕実験棟

得できるようになりました。何より，200 kV 電顕でスクリーニングを行い，良いグリッドをそのまま隣接する部屋に設置されている 300 kV のクライオ電顕に持っていけるようになり（もちろん，300 kV クライオ電顕が利用できる日であればですが），一連の測定を全て KEK で行えるようになったわけです。

また，以前 AWS との協力関係が始まった旨をお知らせしましたが（PF NEWS Vol 40, No. 2, 2022），クラウド上の解析環境である GoToCloud の開発も順調に進んでいます（https://www2.kek.jp/imss/sbrc/result/media/2022/10/251241.html）。現状は，クライオ電顕を用いた化合物スクリーニングの高分解能構造解析が全自動で計算できるシステムを構築し，まずは（内部的な）利用を開始しているところです。少しずつユーザーの皆様にも使っていただけるようにしていけると思います。ご興味のある方はご一報いただければと思います。また，我々独自の On-the-fly システム（GoToFly）も開発しており，これは順調に稼働しています。これにより，以前は全てマニュアルで行われていたデータ測定のクオリティチェックのための解析が全て自動で行えるようになりました。また，レポート作成機能を備えており，現在ユーザーの皆様に測定後にお送りしているレポートは，この機能を利用したものです。

Micro-ED に関しても少しずつではありますが，国内の様々な方のご協力をいただき解析が可能になってきました。こちらは，まだ正式な形でユーザーを受け入れているわけではありませんが，特に低分子の微小結晶を用いての解析が可能で，成果も出始めています（例えば，JACS, https://doi.org/10.1021/jacs.3c04710 (2023)）。こちらは，タンパク質結晶の解析は行っていませんが，新しいユーザーの開拓や将来に向けた分野を超えた連携という観点からも，推進していこうと考えています。

このように昨年度に大きく環境が変わったわけですが，今年度の 9 月 28 日（木）と 29 日（金）には，新しいクライオ電顕実験棟と 300 kV のクライオ電顕のお披露目として，2 日間のシンポジウムを PF 研究会として開催する予定です。現在，鋭意プログラムを作成中で，近いうちに詳細を皆様にお知らせできるかと思います。将来に向けて，できる限り若い皆さんに話をしてもらう会にしようと考えていますので，奮ってご参加下さい。また，これと合わせて KEK のクライオ電顕のユーザーミーティングを開催する予定です（29 日）。

KEK のクライオ電顕を利用しているユーザー数も，現在ではアカデミアと企業を合わせると 50 グループ近くになっています。クライオ電顕も 2 台に増えました。最大限，ユーザーの皆さんのサポートを続けていきますが，それと同時に早くクライオ電顕の利用も放射光ビームライン利用のような形態，つまりユーザーが自律的にデータを測定し解析できるような形態にしていく必要があります。また，大学共同利用機関として，ユーザーと共同での様々な開発研究を行っていく必要もあります。今後，徐々に新しい体制に移行していく必要性を感じていますので，ユーザーの皆様のご理解とご協力をよろしくお願いいたします。