

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 惠郷博文
(2024年1月9日付け)

運転状況

10月2日より入射器の立ち上げ運転を開始した。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確認を行った後、10月16日から電子銃のビーム出力最適化、RF加速フェージング、ビーム軌道調整とアップグレード機器を用いたマシンスタディを行った。11月7日よりPFリング、11月14日よりPF-ARへ入射運転を行い、12月28日に両リングへの入射と入射器運転を終了した。この間、PFリングへのトップアップ入射は1～5 Hzの繰り返しで行い、11月27日から陽電子用ダンピングリングへの入出射調整、11月30日からはSuperKEKBビームトランスポートラインに電子、陽電子を通してビーム調整を実施した。当初は12月11日よりSuperKEKB陽電子リングへの入射が予定されていたが、Belle IIのQCS不具合改修のため、SuperKEKBへのビーム入射開始は2024年1月29日へ延期された。

2023年夏期メンテナンスにて大幅な機器改造を行なったため、秋の運転では入射器でのインターロックダウン頻度が多めに推移した。多くは加速管への高周波系の反射異常に起因するものであるが、大電力運転継続によるコンディショニング効果によって徐々に頻度は下がってきている。図1に加速管交換作業を行なったユニットの大電力反射異常(VSWR)週間回数の推移を表す。加速管を交換し

たのは8ユニットであるが、加速管の入力パワーを強化した44A、44Bユニットのデータも掲載した。凡例の赤字番号は新型加速管を設置したユニットを表す。図1からわかるように、加速管を交換した場合、4週間程度の昼夜連続運転で安定してくる。

入射器は12月28日運転停止から1月14日まで冬期メンテナンスを行なっており、4リング同時入射に必要な50 Hz運転に切り替える。メンテナンス終了後、1月15日に立ち上げ、1月28日までビーム調整を行なっており、1月29日よりSuperKEKBへの入射を開始する。PFリングには2月5日より、PF-ARには2月13日よりビーム入射予定である。

ビーム研究

・電子ビーム

熱電子銃は夏期メンテナンスにて、カソードを2016年製から2019年製に交換、ヒーター電流を調整して、6月の停止前と同等の電荷量が生成されることを確認した。RF電子銃もカソード交換(材質は交換前と同じIr₇Ce₂)した。このカソードは量子効率が高く、電荷量は停止前測定2倍程度出しており、1stレーザー、2ndレーザー、それぞれ片打ちで、4.5 nC、4.7 nCの出力を確認した。ただし、レーザースポット径を調整する光学素子が大電荷用でないため、大電荷出力時のエミッタンスは十分でない。冬期メ

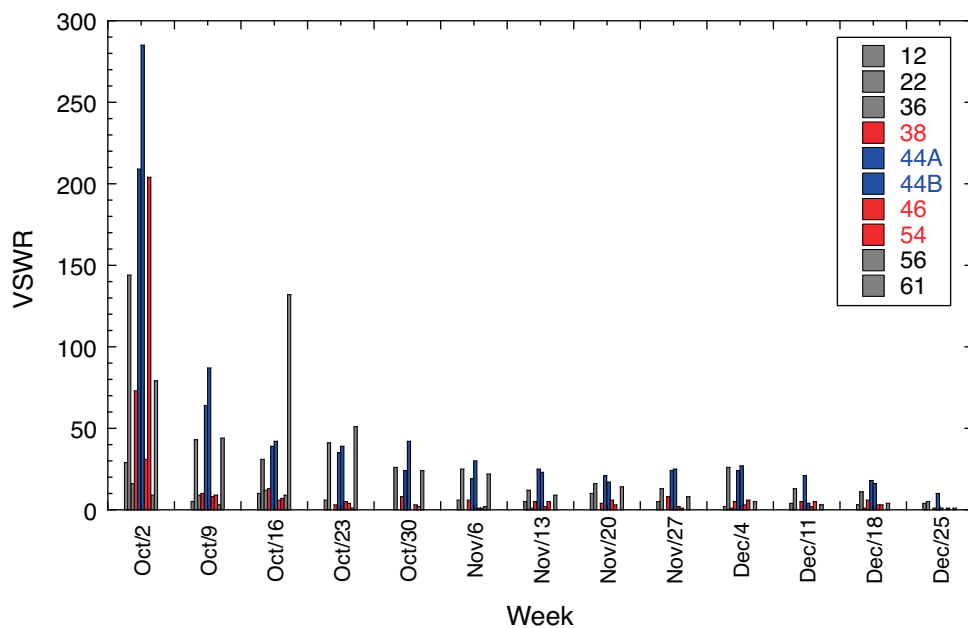


図1 加速管設置・交換ユニットの反射異常(VSWR)発生回の週間推移。凡例は加速ユニット番号を表す。

メンテナンスにて最適レーザースポットを生成する光学素子 (DOE) の導入作業を行なっている。高周波電子銃にて電子生成を行うレーザー運転は安定に推移したが、外気温低下の影響によってレーザーハット内温度も変化してレーザー出力に変動が生じた。そのため、空調機の PID 調整を行い、室内温度の安定化を進めた。

今期はレーザーパルススタッキングによる低エミッタンスビーム生成を目論んだ。2つのレーザーパルスを時間方向にずらして重ね合わせ (スタッキング)、時間方向に出力がフラットになる部分を作り出す。このフラット部によってカソードから引き出された電子ビームを圧縮することによって高電荷、低エミッタンスのビームが生成されるシミュレーション結果を得ている。実際のビームにはフラット部の前後にテールがあるため、電子銃直下に設置したスリットを使用してテール部分を除去し、フラットビームコア部を取り出す調整を行なった。今期の調整ではパルススタッキング方法によるエミッタンスの改良は設計値まで到達できなかったため、来期は空間電荷効果によるビーム拡がり抑制して、大電荷量ビームを生成する新 DOE を使用したビーム生成を行う。

・陽電子ビーム

SuperKEKB-LER 用の陽電子生成とビーム伝送に係る RF 加速位相、100 台以上のステアリング電磁石、四極

電磁石に対して機械学習を用いた自動調整により、シングルバンチ運転において、入射器内の第 2 セクター終端にあるビームダンプ前で、これまでの最高となる 5.4 nC の大電荷ビーム生成を行うことができた (図 2)。この結果には、昨夏 J-ARC 出入口に導入した大口徑四極電磁石によるビームマッチング性能の向上も大きく寄与しており、図 2 右図に示すように、電荷ロスがほとんどなく 1 次電子ビームが J-ARC を周回している。現状の機械学習制御で 1 度に調整する機器パラメータは 16 個であるため、機器区分毎に最適化を行なった。今回、バイズ法とダウンヒルシンプレックス法の 2 つの最適化法を併用したビーム調整を導入している。2 バンチビーム運転の初期調整では、1st, 2nd 各バンチの電荷量はそれぞれ、5.1 nC, 4.2 nC となり 2 バンチ間に大きな電荷量の差が生じていた。これを解消するため、まずは機械学習によって電荷量が下がる 2nd バンチを最適化する調整を行い、第 2 セクター終端での電荷量向上を確認した後、入射器上流部 1st, 2nd バンチ間の軌道乖離を回復するように直流ステアリングを調整した。その結果、両バンチ同時に 5 nC を超えるビーム生成に成功した。このように人の手では不可能な大量の機器を精密調整することにより、設計値と遜色ないビーム生成が可能となった。これにより PF, PF-AR ビーム軌道が影響を受けるが、入射器下流のパルスステアリングを用いて、問題なく自動補正される。

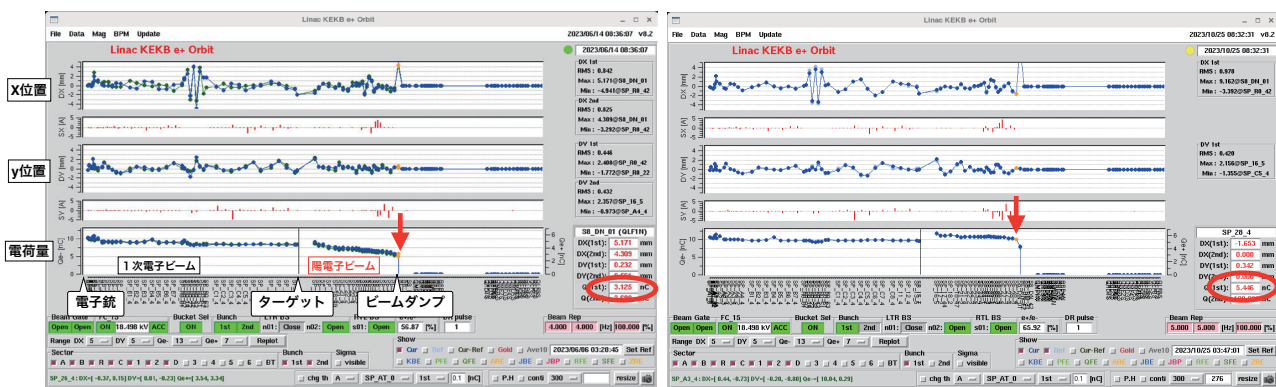


図 2 陽電子生成用 1 次電子ビームと生成された陽電子ビームの軌道と伝送電荷量。各図の左半分が 1 次電子ビーム、右半分が陽電子ビームの状態を表す。(左) 入射器改造前 (右) 改造後。

PF リングおよび PF-AR の運転概要

2023年度第2期の運転は、PF リング 11月7日、PF-AR 11月14日に開始した。両リングともに立ち上げからユーザー運転までの期間は通常に比べて短期間であったため、従来のユーザー運転開始状態に比べると各種の調整や安定度といった点において十分ではなかった面はあったものの、おおむね予定通りのスケジュールで運転を開始した。その後、両リングとも12月28日(木)9:00に予定通り運転を終了し、冬季のメンテナンス期間に入っている。

PF リングの運転詳細

図1に11月7日から12月28日までのビーム電流と寿命の履歴を示す。12月6日までは通常のマルチバンチ運転、それ以降は単バンチ+マルチバンチのハイブリッド運転モードである。総電流値は同じだがハイブリッド運転ではビーム寿命が短くなっていることが分かる。

PF リングでは夏の停止期間にローレベル RF 系を従来のアナログシステムからデジタルシステムへ移行するという大きな改造を実施しており、今回は新システムによる初めての立ち上げとなった。低電流での調整にはじまり、ビーム電流を増やしていきながら各種フィードバックパラメータ調整を実施している。細かいトラブルはあったものの比較的短時間で450 mAでの運転が実現できた。

今夏以前のユーザー運転で問題になっていた水平方向軌道変動への対処として、夏期停止期間に偏向電磁石 B01

コイルの交換を実施した。作業の詳細は前号(Vol. 41 No. 3)の光源報告を参照していただきたい。図2上に交換前の水平方向軌道、図2下に秋の運転開始後の軌道を示す。いずれも変動が生じたときに大きく動く代表的な位置での軌道差を例としてプロットしている。運転開始してから現在まで、従来起きていたパターンでの軌道変動は観測されておらず、夏の作業での対処が功を奏したと考えている。

12月6日からハイブリッド運転調整を実施し、当初は単バンチ 50 mA + マルチバンチ 400 mA で開始したが、ビーム入射時に ID02 付近での放射線量が上昇することが観測された。ビーム寿命が短いと入射頻度が上がるため単バンチ部分の電流値を 30 mA まで下げ、マルチバンチ部分を 420 mA まで増やす運転パターンに変更するとともに、トップアップ運転の電流許容範囲を従来の 499.9 mA ~ 500.0 mA から 499.5mA ~ 500.0 mA と入射間隔を広げることで対処する方針とした。2月からの第3期運転では立ち上げ時に調整を行って入射ビーム損失を減らすための調整を行う予定である。あわせて、停止期間中には問題となっている箇所のシールド増強を行うことでビームライン側への安全を担保する。

以下では PF ユーザーラン中の主なトラブルをいくつか挙げる。11月19日 02:52 には挿入光源 ID19 の上下流にあるゲートバルブが閉じてビームダンプする事象が発生した。コントローラの AC200V コンセントの不具合が原因と判断し、現在は分電盤から直接接続し対処している。こ

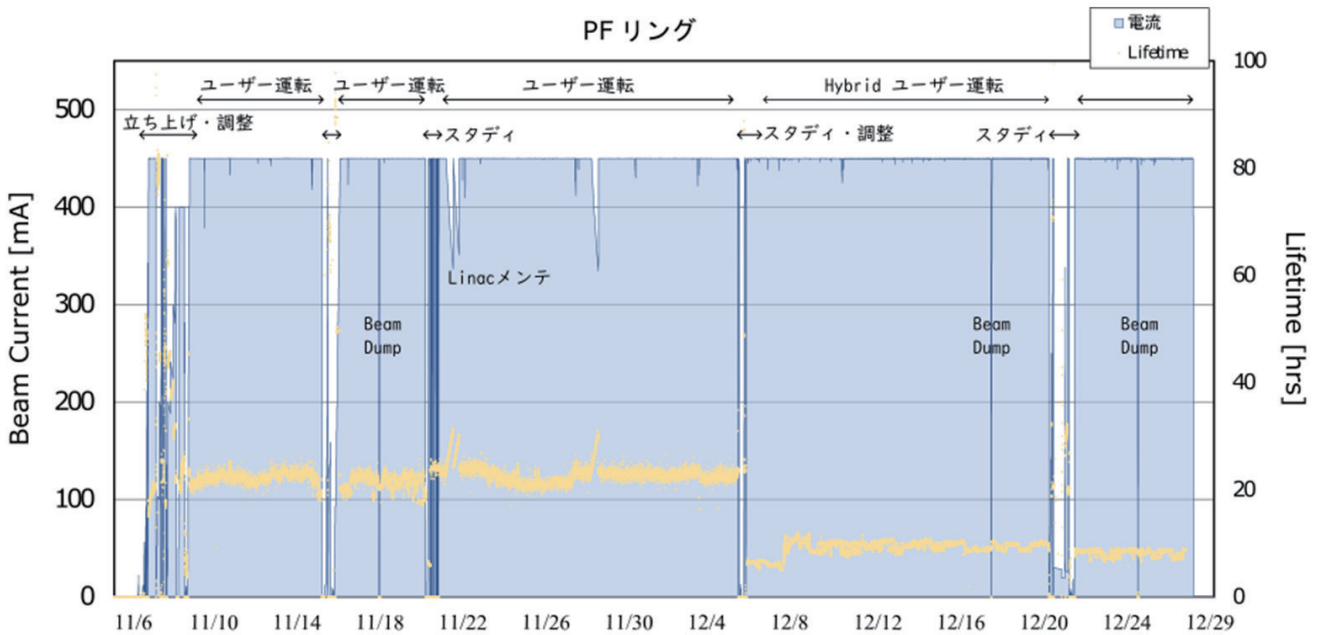


図1 PF リングのビーム電流とビーム寿命の履歴。横軸は11月6日～12月29日までを示す。

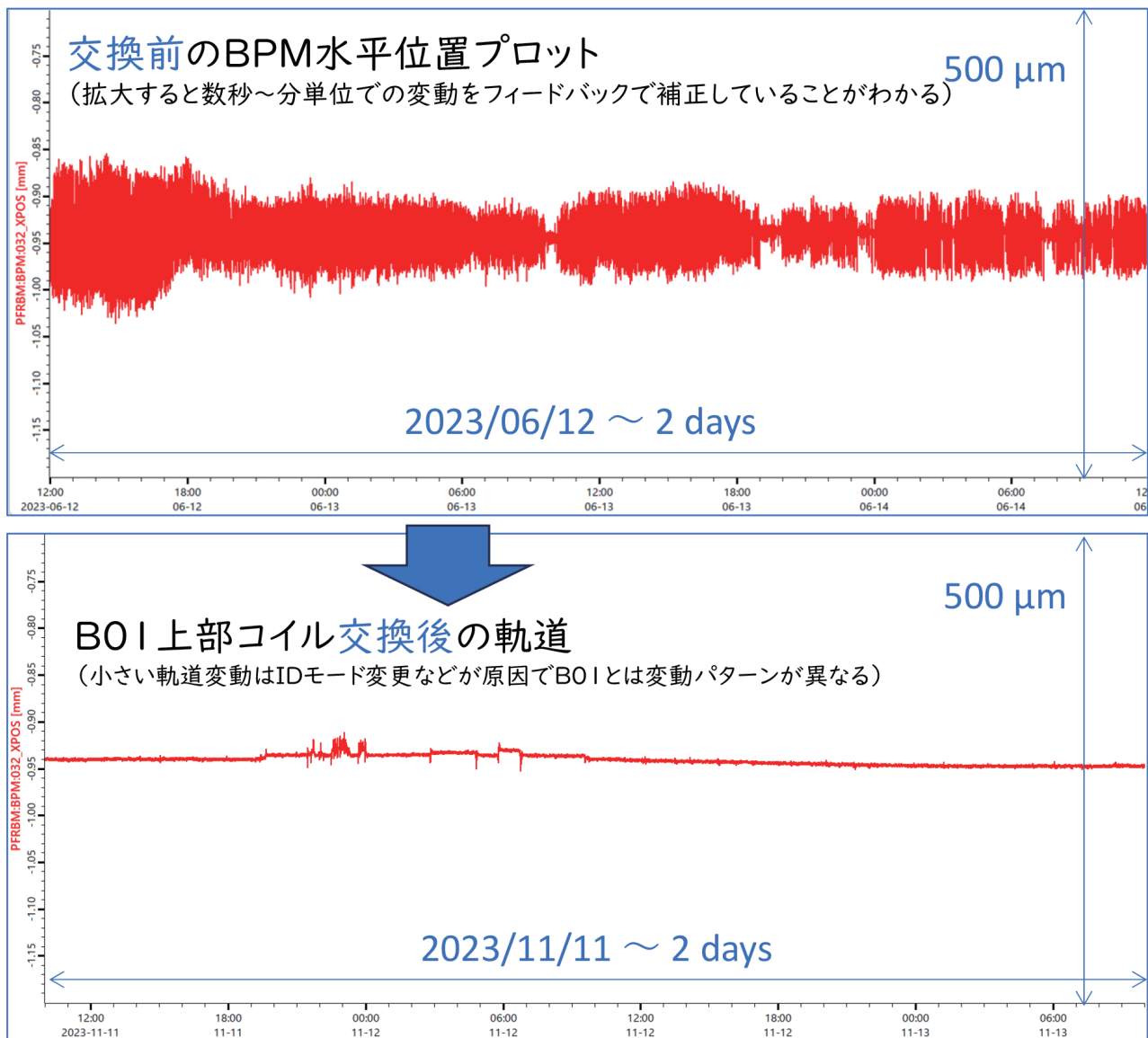


図2 B01 コイル交換前後での水平ビーム振動。実際の軌道変動はリング全周にわたっているが、そのうち代表的な BPM1 個 (BPM032) の位置での振動を示す。コイル交換によって大幅に改善したことがわかる。

れまでに再発はしていない。12月18日にはRF#1の反射によるビームダンプが起きた。その後の調査によって周辺で作業していた人の静電気で誤動作した可能性があることが判明したためラックのアースなどを見直している。12月25日にはKEKB外周3M機械棟付近の草むらから煙が出たことにより消防署に出動要請をしたことに対応して加速器を停止している。28日9:00に予定通りビーム停止して冬季メンテナンス作業に入った。

PF-ARの運転詳細

図3に11月14日から12月28日までのビーム電流・寿命の履歴を示す。

夏期停止期間中に空洞高次モード(HOM)カップラーとHOMケーブルへの空冷強化を行ったことを受け、今期から55mAでのユーザー運転を目指して立ち上げ調整を

実施した。ビーム蓄積時のHOMケーブル温度上昇も想定通りであった。しかしながら、ユーザー運転の直前になって真空封止アンジュレータを最小ギャップ値にしたときに蓄積電流値を維持することが困難であることが判明した。そのため55mAでのユーザー運転を断念し、前期までの実績がある50mAでのユーザー運転とすることとしている。これら再調整作業のためユーザー運転開始が約15時間遅れることとなった。本稿の最初で述べた通り、今期は加速器立ち上げ時間を短く設定せざるを得ず、ユーザーラン開始まで3日間という極めて短期間であったため運転パラメーターを最適化することが困難であったことも一因と考えている。

12月6日から6.5GeV運転に対応するための調整に入った。このとき電磁石の初期化(標準化)等をおこなっているがその後の運転でビーム電流モニタ(DCCT)の読み

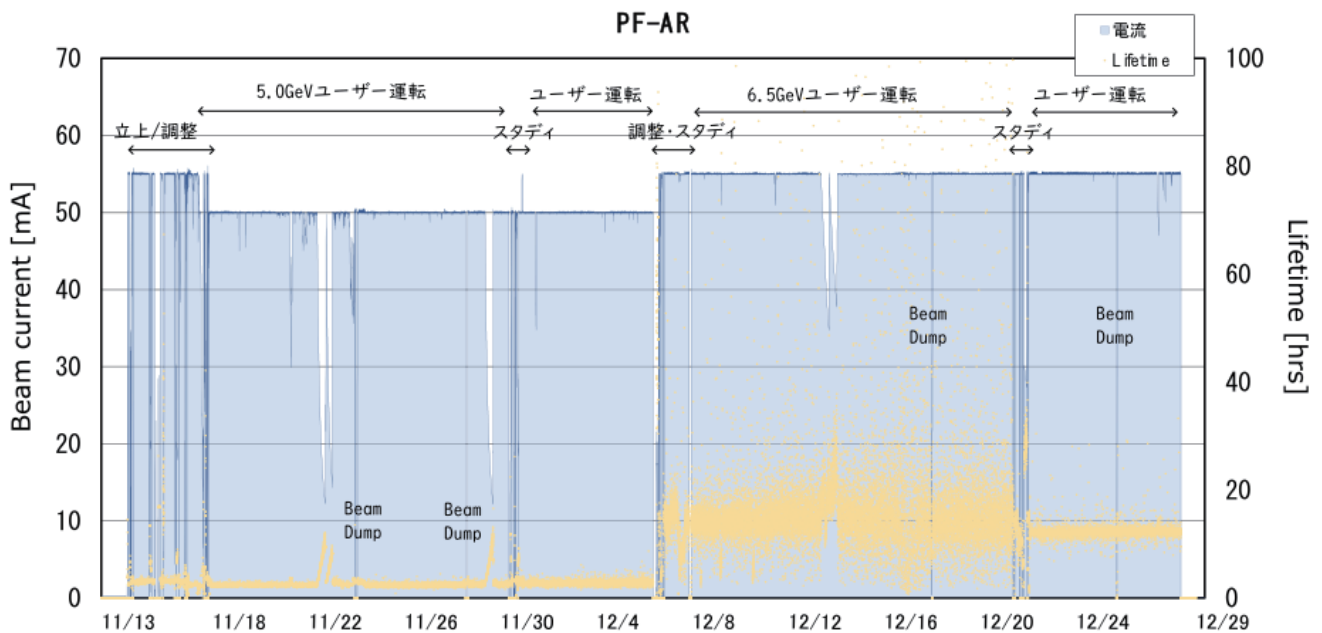


図3 PF-ARのビーム電流履歴。横軸は11月13日～12月29日まで。

取り値が不安定となった。ビーム安定度等への影響は無いためそのまま運転を継続し、12月21日のマシンスタディ時に消磁作業を実施した。この影響で図3の12月6日から21日までの期間はビーム寿命の幅が広がってプロットされているが、実際のビーム寿命が不安定になったわけではない。

測定器開発テストビームライン (AR-TBL) では5.0 GeVでの正式なユーザー運転を開始出来ている (第1期まではテスト運用)。夏期停止期間中に判明した電磁石の極性間違いが修正され電子収量が期待値に準ずるものとなった。6.5 GeV運転時にもコンバータ位置最適化調整, TBL輸送路optics調整, ワイヤ位置最適化再調整を実施し, 電子収量最大化に向けての調整・スタディを行った。現状で1400 Hz程度のレートとなっている。

運転上のトラブルとして、今期のユーザーラン中には入射不調がたびたび発生したことが挙げられる。Linacの調整, ビーム輸送ライン調整, 入射位相調整等で対処しているが11月24日22:56には一度ビームを落として再入射を

実施することも行った。その後は比較的入射効率は安定している。11月24日00:07にはAR-NE3インターロック電源故障によってビームダンプが発生した。また、11月28日13:30～15:37の間, AR-NE1A真空系のリング作業のため, 測定器側と相談の上一時リングを停止した。そのほか, 入射が一時中断した事象としては, 11月21日の5:34, 7:13の2回にわたって放射線YELLOW Monitorの誤作動が発生している。エリアモニター交換作業を実施し, その後は再発していない。12月7日, 予備光軸確認をおこなっているときにRF空洞W2のチューナー不具合が起きたためトンネルに入域して作業を行った。今回はユーザーランへの深刻な影響は無かったが引き続きメンテナンスを適切に実施する。12月18日00:36頃, 補正電磁石 (ZHB_NE13) の電源にトラブルが起きたためビームを落として対処した。12月25日にはPFと同様に消防署への出動要請に対応したものである。

1年前の『放射光実験施設の現状』の原稿には、PF研究会「開発研究多機能ビームラインの建設と利用」の報告と開発研究多機能ビームライン（BL-11A, -11B）および広波長域軟X線ビームライン（BL-12A）の建設スケジュールが書かれています。

2023年度には、PF-UA主催でサマースクール「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した。このサマースクールはPF研究会を受けて企画・開催されました。開発研究多機能ビームラインよりも先行して建設の進んでいる広波長域軟X線ビームラインですが、1本のビームラインで広い波長領域をカバーするという特長を持っています。2024年度には、この広波長域利用と2ビーム利用の両方をターゲットとした次のPF研究会を企画したいと考えています。

ビームラインの建設については、1年前の計画に比べて少し遅れているものの、おおむね順調に進んでいます。広波長域軟X線ビームラインの建設は2024年の夏期停止期間に完了する見通しです。このビームラインの二結晶分光器パスでは、幾つかのコンポーネントに問題が見つかりましたが、すでに原因も解明されて問題解消のための作業が始まっています。回折格子分光器パスについては、問題は見つかっていません。開発研究多機能ビームラインについては、光源加速器やビームライン基盤技術に関する開発研究に利用しながら建設を進め、2025年の夏期停止期間の完成を目指しています。現在、施設内にWGを設置して、このビームラインの利用制度に関する検討を進めています。建設スケジュールについては、各種の要因で変更になる可能性があります。ご理解とご協力をお願いいたします。

運転・共同利用関係

2023年度第3期ですが、PFは2月5日から3月25日まで、PF-ARは2月13日から3月18日まで、運転を実施することになりました。PFのハイブリッドモードは3月8日から3月25日を予定しています。PF-ARは5 GeVで運転を開始して、3月1日から3月18日まで6.5 GeVで運転を行います。短い運転期間ですが、ビームタイムを有効にご活用ください。2024年度ですが、KEK内の変電設備工事のため第3期の運転開始が遅れる可能性があります。光熱水費の確保の問題はありますが、PF3600時間・PF-AR2400時間の利用運転のため、PFの第1期の運転開始を4月下旬とする方向で検討しています。2024年度第1期の運転については2月中旬に決定します。

PF-PACの全体会議が1月22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。課題審査の過程で内容に関する重複の指摘があり、「原則として内容の重複は認めない」ことを確認しました。また、これまで継

続的に議論してきた課題審査における評価基準の明確化について審議され、議論が完結しました。あくまでも評価基準の明確化であって、評点分布については維持されることを期待しています。課題審査システムの改修に時間を要するため、2025年度後期の課題募集からの導入を予定しています。次回のPF-PAC全体会議は3月に開催され、3年任期の委員会の最終回となります。この場を借りて委員の皆さまのご協力に感謝を申し上げます。

人事異動

放射光実験施設に関する人事異動はありませんでした。

第41回PFシンポジウムは、3月5日に水戸市民会館で開催されます。施設報告や次期光源計画に関するセッション、総合討論、PF-UA総会などが予定されています。総合討論では、前述のPF研究会の企画や開発研究多機能ビームラインの運用制度の検討などについて、参加者の皆さんからご意見をいただきたいと考えています。また、昨年度のシンポジウムにて試験的に実施されたPF-S型課題に加え、今年度からS型課題とT型課題のショート・プレゼンテーション（口頭発表）も実施されます。積極的なご参加をお願いいたします。

はじめに

今回は放射光科学第二研究系の担当で、生体高分子の結晶構造解析の分野における解析の自動化に関して書いてみたいと思います。今回の内容はユーザーグループの集まりや、講習会で話している内容と被る部分もありますが、大切なことだと思っているので、書いておきたいと思います。

測定の自動化と解析の自動化

放射光実験における生体高分子の結晶構造解析分野においては、測定の大部分が自動化されており、人の手を殆ど介することなく高精度のデータ測定が可能になったことは何度か報告してきました。しかしながら、自動化されているのは測定装置だけではありません。データを収集したらそれらを解析するわけですが、その解析過程に関して優れたプログラムが出回っており、多くのプロセスがほぼ自動になっています。結晶構造解析の分野においては、収集した回折データを処理して構造解析の計算に供することができる形にまで処理することが必要になりますが、この部分もビームラインで測定をすれば、晶系、格子定数、消滅則、空間群の決定も含め自動で行われることになります。これは、PFでの生体高分子の結晶構造解析に限ったことではなく、世界の主要な放射光施設のビームラインにおいても標準的な機能です。このような自動化は構造生物学者の手間を省き仕事の効率を上げるのみならず（徹夜実験に続いて徹夜でのデータ処理などは過去の遺物となりました）、構造生物学を専門としない生化学者や分子生物学者にも構造解析の道を拓いたわけで、構造科学がライフサイエンス分野に浸透していく助けになっています。もちろん、全てを自動解析に任せてしまうのはいかがなものか、という向きもあるかとは思いますが、このような進歩の仕方はライフサイエンスとしては一般的なものです。例えば、一昔前にはDNAのシーケンスは各研究室で実験を行うのが一般的でしたが、現在では多くが外注で、どのようにシーケンスが行われているかに関しては、特別な場合を除き気にする人はいないでしょう。問題は、このようなプログラムを開発する研究者（グループ）とそれを使うユーザー（一般的な構造生物学者）が分離してしまうことによって、理論を真面目に学ぶ人が少なくなり、結晶学のレベルが全体として下がってしまうことです。すると、次世代のプログラム開発などを担う人材の不足や、得られた結果に対する理解が不十分になるなどの問題が生じてきます。これは、結晶構造解析に限ったことではなく、近年発展が目覚ましいクライオ電顕による単粒子解析でも同じことです。その結果、解析の過程で生じるトラブル（というか困難）にユーザーが弱くなってきていることも事実です。それでも、PFのみならず世界中の放射光施設で多くの結晶構造解析が以

前にも増した勢いで進められているのは、プログラムの高度化が非常な速度で進んでいるためでしょう。プログラムの進歩により、以前は解析が難しかった様々な“トラブル”に対する自動的な対処が可能になっており、人の手（頭？）を借りることが減っていますし、ビッグデータやAIなどの活用が計算機によるトラブル対処を改善していくことは確実です。しかしながら、測定の質や結果は最終結果に影響を及ぼすわけですから、すべての過程に研究者が無関心もしくは無知で良いわけではありません。全員が詳細な結晶学の理論を学ぶ必要はないとは思いますが、それでも最低限の知識は身につけて欲しいものです。結晶構造解析の結果は座標という形で公的データベース（Protein Data Base (PDB)）に蓄積されていき、その結果を多くの研究者が利用することになるわけですから、構造解析する研究者の責任は大きいと言わざるを得ませんし、その自覚を持つことが大切です。そこで問題は、一般ユーザーは何をどこまで勉強すべきか、という点です。ライフサイエンスの分野では分業が進んではいるものの、それぞれの研究者が果たす役割は多く、利用する技術に関して全てを深く勉強するのは困難なことも事実です。ですから必要なことを明確に認識し伝えていくことは重要だと考えています。

構造生物学研究センターでは、BINDSプロジェクトを通じて多くの研究者に構造解析技術のトレーニングをしていますが、結晶構造解析の場合には最後の結晶学的精密化を共同研究者と一緒に進めていくことが多くなっています。これは、共同研究者に構造生物学的な手法を学んでもらいたいという我々の希望だけではなく、得られた座標の意味や限界を理解してもらいたいと考えているからです。結晶学的精密化を覚えるということは、得られた座標を使う時の注意点や限界を勉強するには良い方法だと思っています。座標を利用する際には、その信頼性や限界を知ることが必須なことですし、これらの知識はその後の実験計画や実験結果の解釈にも影響を及ぼすでしょう。研究において、得られた結果の限界を知るといのは当然のことではあるのですが、一旦座標になってきれいなグラフィクスを見せると、限界を超えて議論が進みがちで、注意が必要です。時代とともに、必要な知識や教育が変わっていくのは必然だと思いますが、初心者や構造解析に関わる研究者に対するトレーニングの内容を含め、信頼のおける結果を出す手助けし、その利用法に関しても伝えていければと考えています。

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です。第二研究系では、12月1日付けでSBRCの安達成彦さんが筑波大の准教授に、1月1日付けでSBRCの加藤かざし

さんが筑波大の助教に、2月1日付けでSBRCの稲葉理美さんが北海道大学の助教として採用されました。また、第一研究系では、11月30日付けで研究員の藤津悟さんが任期満了につき退職されました。新しい環境での活躍を祈念いたします。