

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 古川和朗
(2021年1月26日付け)

概要

2020年秋期の運転においては、夏の停止期間における装置や運転機構の改善作業の効果により、ビームの品質と安定度の向上が見られた。放射光施設と SuperKEKB の4つの蓄積リングへの同時トップアップ入射についても、順調に継続されている。陽電子生成標的直後の陽電子収束用フラックスコンソレータの交換やその後の陽電子捕獲部の改造は、陽電子ビームの大きな改善に繋がった。SuperKEKB へのビームパルス割り当てを減らすことも可能となり、結果として放射光施設入射への影響も抑えられている。SuperKEKB メインリングへの入射が最善ではない理由の追求の一環として、ビーム輸送路での OTR スクリーンモニターやワイヤスキャナによるビーム観測の改善にも協力しており、ビーム光学特性の理解が進化した。入射器内老朽化加速管の対策として、2022年度までに一部の劣化の激しい加速管の交換が予定されており、この冬の停止期間において最初の1ユニット4本を交換を実施し、大電力試験も成功した。また、今後パルス電磁石の増設を可能とするために、既存電磁石などの装置の移動を計画的に進めている。さらなる入射ビームの改善として、入射器内のビーム光学関数の補正とその安定化が必要と考えられ、新規の装置も組み合わせて検討を進めている。

陽電子ビームの改善

標的から大きなエミッタンスを持って生成される陽電子について、その収量の向上を狙い、標的直後において強力な磁場で収束させるために、フラックスコンソレータ(FC)と呼ばれるパルスソレノイドを設置している。これまで加工硬化などの複数の対策を施し、試験スタンドにおいてはFCの設計磁場を長時間維持することができても、ビームラインに投入すると放電してしまう状況が2回続いていた。設計磁場の約5テスラは12kAのソレノイド電流と0.2ミリメートルのコイル間間隙を必要とするが、放電のために約4分の1の電流に制限してきた。メインリングの蓄積電流が小さいため、大きな障害にはなっていないが、早い時期の解決が期待されていた。

そこで次の対策として、ソレノイド材質を無酸素銅から銅ニッケル合金に変更し、導電率を少し犠牲にしても硬度を確保することにした。これまで同様に試験スタンドでの長期試験を経て、秋からビーム運転への投入を行った。

また、ビームシミュレーションに比べて、陽電子収量が少ないことがわかっており、まだフラックスコンソレータの直後の加速管の加速電圧が設計値まで上げられてい

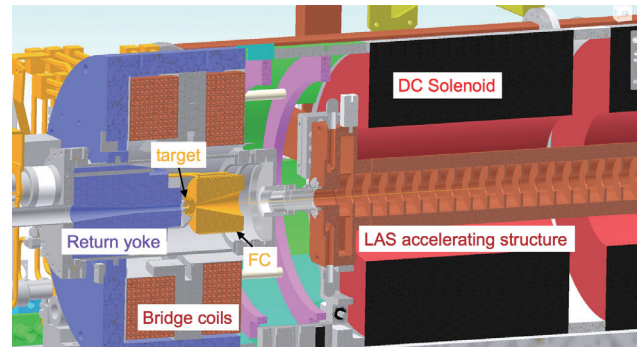


図1 標的、フラックスコンソレータ(FC)、直流ソレノイド、等から構成される陽電子捕獲部

ないものの、他にもいくつかの原因が推測されていた。例えば、加速管の外側に設置されている直流ソレノイドのコイル端面を含めた磁場のアライメントも懸念されていた。さらに、これらの陽電子捕獲部の構造が複雑なため、干渉を恐れて、ビーム位置モニターや軌道補正電磁石が設置されていなかったことも影響していると推測された。

そこで夏の停止期間のフラックスコンソレータの交換に併せて、陽電子捕獲部(図1)を解体し、軌道補正電磁石を4台とビーム位置モニターも2種類4台を設置して、ビーム軌道を最適化することにした。ビーム位置モニターのうち1種類は対生成で生じる陽電子と電子を分離するためのシケイン電磁石の前に設置したために、今後の読み出し技術の開発が期待されている。

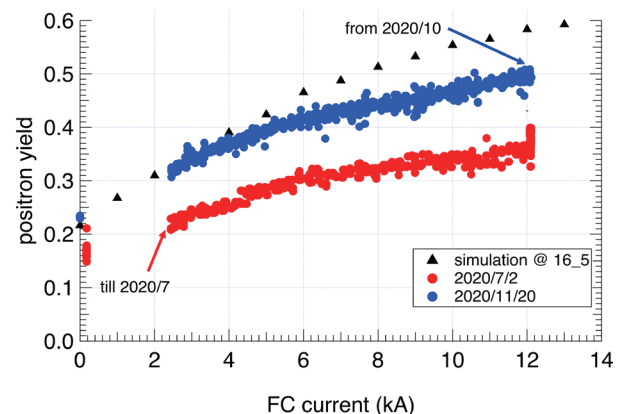


図2 陽電子捕獲部における陽電子の収量、つまり入射一次電子に対する捕獲陽電子の粒子数比。夏以前の運転(赤)、秋の運転(青)、及び加速勾配が少し高いシミュレーション結果(黒)。

秋期の運転を開始してから、慎重に電流を増加させたところ、新しいフラックスコンセントレータには放電を発生させずに設計値の 12 kA を導入できることがわかり、陽電子の収量が増加した。さらにビーム調整を進め、ソレノイド内での生成陽電子の螺旋運動を考慮した軌道調整を行ったところ、大きく陽電子を増加させることができることがわかった。

ビーム開発の時間が十分には確保できていないので暫定の調整ではあるが、双方の改善により、陽電子の収量は約 2.4 倍になっている (図 2)。今後、シミュレーション条件を合致させ、精度を向上させるとともに、遠くないうちにソレノイド中の陽電子の挙動の改善をさらに進めて、陽電子収量の最適化を図る予定である。

新規加速管の設置

入射器に設置されている約 230 本の 2 m 加速管のうち、製造から約 40 年を経過した約 150 本について、KEKB 計画以降は、当初の設計値を大幅に上回る加速電界を発生する状態で運用されてきており、劣化が激しくなっている。SuperKEKB においては高い共鳴状態に到達できないだけでなく、放置すれば現在の衝突エネルギーも維持できなくなったり、PF-AR 6.5 GeV 入射が不可能になることも懸念される。

そこで新しい加速管を製造し、最初の 4 本の加速管を昨夏から試験ベンチにて試験してきたことを既に報告してきたが、予想を上回る成績が得られており、この冬の停止期間に #44 ユニットの老朽加速管を置き換えることになった。現在最初の真空作業を終え、冷却水配管などを進めているところである。取り外した古い加速管はより低い電界でも運用可能な場所に移動させる。

新しい加速管では、精度の高い電磁場設計により、放電などの困難を避けながら加速電界の向上が期待でき、製造方法としてはロウ付けを採用している。以前の加速管は電鍍方式で製造されたが、現在はこの技術は維持されておらず、カプラー周りなどの接合方法が複雑なこともあり、現

在では費用は下げられないことがわかっている。電鍍加速管は外からステンレスのジャケットを被せて冷却水を通していたが、ロウ付け加速管は内部に冷却水路を持っており、また個々の空洞に同調調整用のくぼみがあるので、見栄えが大きく異なっている。

1 月 25 日に現場で最初のマイクロ波の投入を行い、問題なく成功することができた。さらに、2 月 2 日からの立ち上げ運転でビーム性能を確認した上で、他の機器も含めて入射運転向けの動作点の最適化を進める。その後、2 月 15 日からの入射運転を迎える予定であり、7 月までの安定運転を目指すことになる。



図 3 #44 ユニットに設置された 4 本の新規の加速管

光源リングの運転状況

図1に、PFリングにおける11月2日9:00～12月22日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。11月25日9:00まで蓄積電流値450 mAのマルチバンチモード、その後ハイブリッドモードに切り替え、12月9日9:00までユーザー運転、メンテナンスとモード切り替え日を挟み、12月11日9:00～12月22日9:00までマルチバンチモードでのユーザー運転を実施した。

ハイブリッドモードでは、前回と同様シングルバンチの電流値を30 mA、マルチバンチの電流値を420 mA（バンチ数は131）として、マルチバンチモードと同じ蓄積電流値となるよう合計450 mAに設定した。今回はシングルバ

ンチの純度については悪化が見られず順調であった。

この期間に起きた故障等のトラブルについては以下の通りである。11月5日6:54にビームダンプが発生した。入射用キッカー電磁石K3のタイミングずれが原因であった。また、再入射の際に進行方向のビーム不安定性が発生したため、個別バンチフィードバックを調整することによって抑制した。11:22にユーザー運転を再開した。しかしながら、16:30頃高速軌道フィードバックがオフであったことが判明したため、18:00に一旦チャンネルをクローズし、フィードバックをオンする操作を実施した。今後同様のトラブルが起きないように、チャンネルパーミット前のチェックリストの作成や指差確認等の再発防止策を行うこと

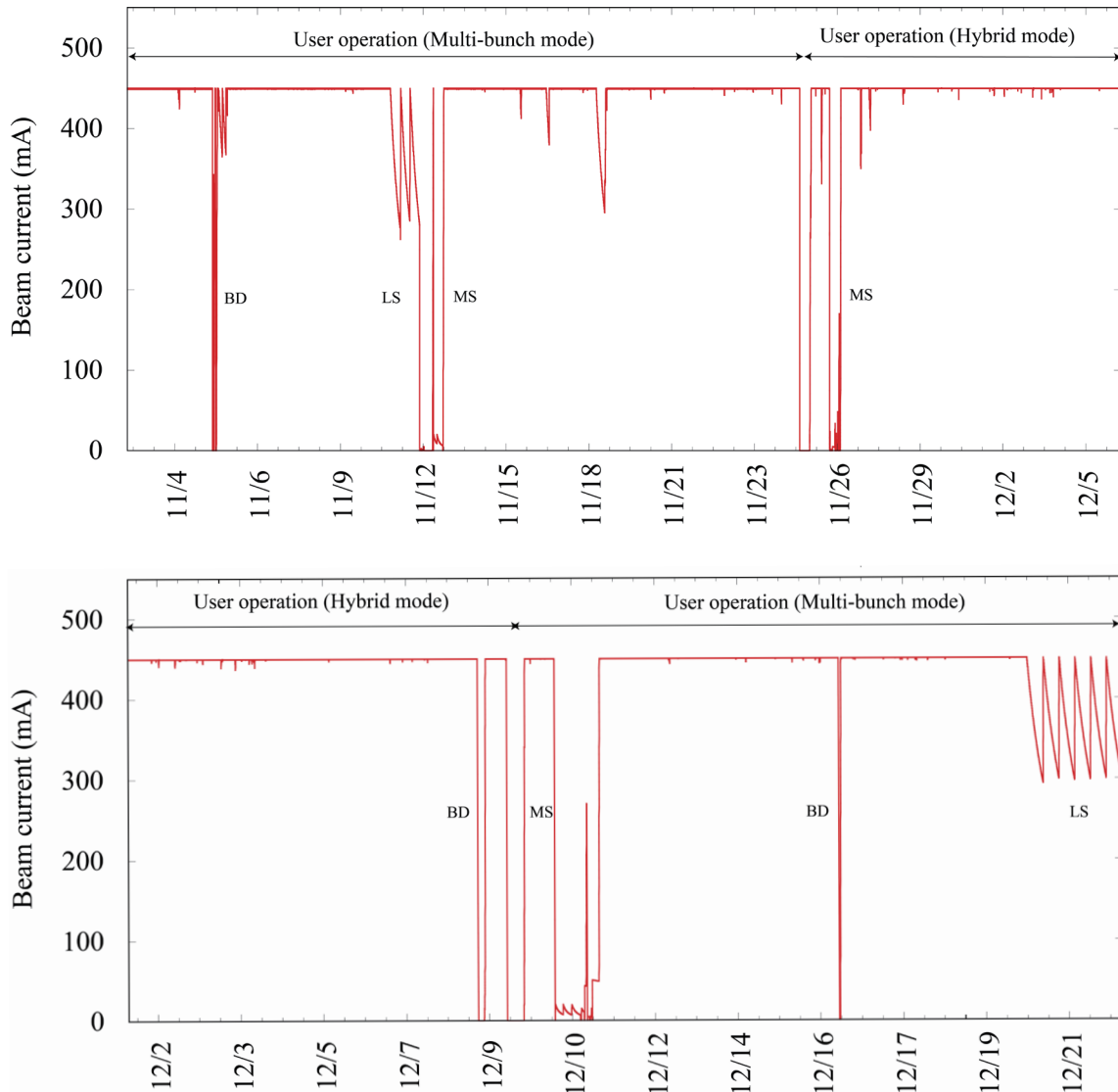


図1 PFリングにおける11月2日9:00～12月22日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。LSは入射器マシン調整日、MSはリングマシン調整日、BDはビームダンプを示す。

とした。なお、K3のタイミングのずれは老朽化によるサイラトロン劣化によって生じていると判断し、冬の停止期間中に新規のサイラトロンと交換した。12月8日18:13に発生したビームダンプは、BL-12基幹チャンネル部に設置している光モニターを冷却している冷却水漏れによるものであった。地下機械室で水漏れを発見し、直ちにビームを落として、冷却水を遮断、除水作業、周辺機器等の確認、故障したと思われる機器の交換を行い、22:33運転を再開した。冷却水漏れは、冷却水供給側のシンフレックスチューブ抜けにより発生したが、抜けの原因は締め付け不良が原因と思われる。今後同様な事象が起こらないよう、継ぎ手取り付け時のチェックの徹底などの再発防止対策を検討し、冬の停止期間に、冷却水配管の入口と出口側両方にインターロック付き流量計を追加し、冷却水量が低下するとインターロックが動作してチャンネルダンプとなるような対策を施した。12月16日9:22 RF A2空洞の反射によるインターロックが働 き、RFがダウンしてビームダンプに

至る事象があった。直ちに調査を行ったが、装置等には異常が確認されなかったため、RFの立ち上げを行い、10:38にユーザー運転を再開した。その後同様のトラブルは発生しなかった。12月20日9:00から12月22日9:00までの2日間は、入射器スタディのためボーナス運転として連続入射を中断、一日3回のビーム入射でユーザー運転を実施した。以上のトラブル以外は概ねユーザー運転は順調で、予定通り12月22日9:00にリングの機器を停止して、冬の停止期間に入った。

図2に、PF-ARにおける11月2日9:00～12月22日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。11月24日9:00までビームエネルギー5.0 GeV、その後24日、25日の2日間でビームエネルギーを6.5 GeVに切り替える調整を行い、12月22日9:00の運転停止まで6.5 GeVでのユーザー運転を実施した。

以下はPF-ARにおける故障等のトラブルについての報告である。11月20日17:25にビームダンプが発生した。

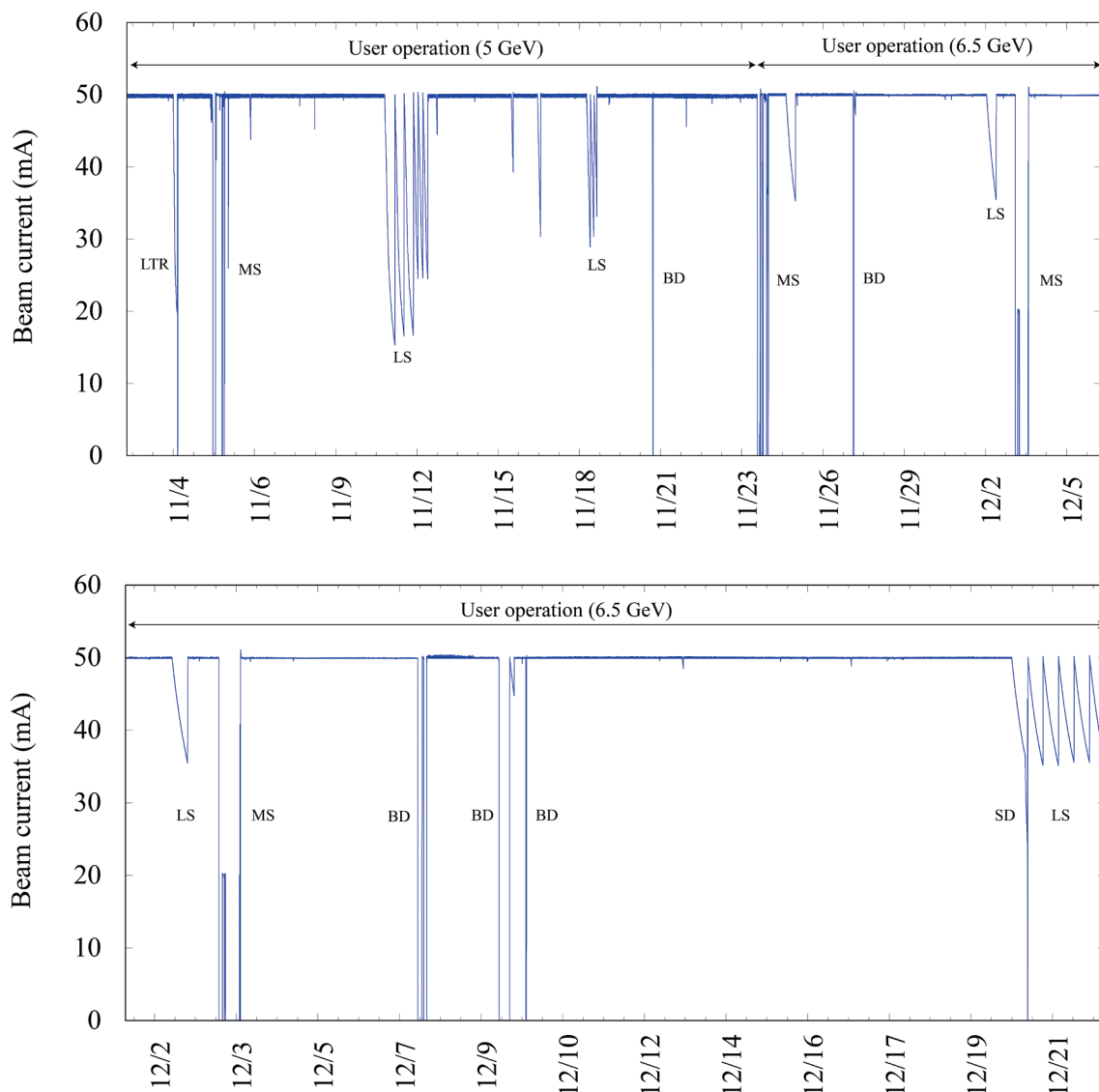


図2 PF-ARにおける11月2日9:00～12月22日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。LTRは入射器故障による中断、LSは入射器マシン調整日、MSはリングマシン調整日、BDはビームダンプ、SDは寿命急落による再入射を示す。

しかし、ビームダンプを引き起こすような装置等の故障は確認されず、再入射も可能であったことからすぐに運転を再開した。その後、同様のビームダンプは発生しなかった。11月27日 アンジュレータ NE3 下流のゲートバルブの開閉コントロール用電磁弁から圧空漏れがあることが判明した。対策のため 17:00-18:00 に運転を中断して、入域して作業を実施した。電磁弁の予備がないので、電磁弁をバイパスするように圧空配管を変更し、このゲートバルブを強制的に開の状態とし、運転を再開した。電磁弁の交換作業は、冬の停止期間中に実施した。12月7日 15:23 RF の HOM 温度スイッチが作動してビームダンプとなった。調査を行い、動作の疑わしいスイッチを交換したものの、18:28 に再発した。そのため再調査を実施して、不具合のあるスイッチを見つけ出して、交換することにより復旧、再発は止まった。12月9日 9:12 偏向電磁石電源の不具合箇所調査点検中に、電源盤の扉を開けたところ、インターロックが作動して電源が停止、ビームダンプとなった。通常は、電源の確認がしやすいように扉の開閉にはインターロックを掛けず、鍵管理をしているのだが、今回の点検箇所である高電圧受電盤はインターロックに入れていたことを失念したことにより発生したものであった。点検はメーカーから調査依頼を受けて行ったものであり、緊急性が高いと判断して実施した。今後は同様なことが起こらないよう注意を喚起することとした。また、この日は入射器メンテナンス日であったため直ちに入射することはできなかったが、入射器スタッフの尽力により 14:51 に入射、ユーザー運転再開となった。同日 23:01 突然のビームダンプ発生事象があった。電磁石電源等の異常は確認されなかった。因果関係は不明であるが、電磁石冷却水の温度調整用ファンのスイッチを入れたタイミングで発生した。すぐに再入射を行い、23:28 に復旧した。PF リングと同様に、PF-AR も 12月20日 9:00 から 12月22日 9:00 までの2日間はボーナス運転を実施し、予定通り 12月22日 9:00 にリングの機器を停止して、冬期の停止期間に入った。

2019年4月の組織改編で、放射光実験施設が再誕生してから2年が経過しようとしています。これまで、『放射光実験施設の現状』では、放射光実験施設内に設置された運営部門、基盤技術部門、測定装置部門の概要と構成メンバーの紹介をしてきました。今回は、組織としての放射光実験施設の機能を維持・向上させるための課題と方策について、実験施設長として考えていることを説明させていただきます。皆さまからのご助言やご意見をお待ちしております。

第一の課題は、運営部門と測定装置部門の人員体制です。組織改編の際の人事異動により、基盤技術部門の人員体制については強化することができましたが、残りの2部門については不十分な状況になっています。運営部門については、もともとビームラインで活動していた研究者が担当しており、大型学術施設としての機能向上とその先にある将来計画の実現に向けて、専門的な知見に基づいて活動する研究者がいないという問題があります。測定装置部門については、10の測定手法グループの約半数に部門のメンバーが存在しないという問題があります。放射光実験施設の他部門や放射光科学第一・第二研究系に所属するビームライン担当者と連携して活動していますが、測定装置部門を十分に機能させるためには、全てのグループに部門のメンバーが必要です。

第二の課題は、定年退職への対応です。放射光実験施設を長期にわたって牽引してきた世代の教員・技術職員の定年退職が、この10年以内に、一気に進みます。この問題は、特に、運営部門と基盤技術部門で深刻です。運営部門では、一般的な意味での研究とは異なる仕事を中心ですので、誰でも担当できるというものではありません。基盤技術部門では、中堅といえる世代の技術職員が極めて少ない年齢構成になっており、経験に応じた役割の分担が難しい状況です。

これらの課題を解決するためには、当然ですが、人員を補強する以外にありません。定員削減の問題もあって厳しい状況ですが、放射光科学第一・第二研究系との役割分担に関する議論が進み、空きポストを放射光実験施設で有効に活用する方針になっています。また、PFプロジェクト経費などを財源として、特別教員や特別技術専門職を雇用することを検討しています。安定な財源でないため、長期的な雇用には不向きですが、定年で空くポストを想定しながら、若手の特別助教（テニュアトラック助教）や中堅の特別技術専門職などの人事を進めることを想定しています。

PFプロジェクト経費の減少が10年ほど続いてきましたが、2021年度に向けての明るいニュースとして、プロジェクト経費の約10%の回復と機構内予算配分における入射器や機構共通設備への負担の減額を報告したいと思いま

す。この数年は、最低限の運転時間に必要な光熱水費を確保することが最優先でしたので、プロジェクト経費を人員体制の強化にあてることは、検討さえもできない状況でした。このタイミングで定員内・外の積極的な人事を行うことにより、負のスパイラルを脱して、上昇流を確実にとらえることが重要と考えています。

運転・共同利用関係

2020年度第3期の運転ですが、PFは2月15日に、PF-ARは2月17日に、それぞれ運転を開始する予定になっています。新型コロナウイルス感染症拡大への対応として、第1期の運転が限定的であったことから、第3期は4月1日まで運転を継続します。PFのハイブリッドモードは3月15日から最後までのご予定です。PF-ARは5GeVで運転を開始して、3月10日以降を6.5GeVで運転します。新型コロナウイルス感染症拡大への対策の徹底にご協力をお願いします。なお、2021年度第1期の運転は、PFは5月6日から、PF-ARは5月13日から、ともに7月5日までの予定です。

1月19日には、PF-PACが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、委員の任期と定員について、PF-PACの規程の改正が承認され、2021年度からの次期委員会から適用されることになりました。詳細については、本誌記事をご参照ください。

第38回PFシンポジウムは、3月11日にWeb会議方式での開催を予定しています。積極的なご参加をお願いいたします。

はじめに

2021年最初の記事は、放射光科学第二研究系の担当です。今回は、生体高分子の結晶構造解析用ビームライン(BL)で進んでいる自動化に関する話です。生体高分子の結晶構造解析用のBLでは、リモート測定や全自動測定などが進んでいるため、施設を訪れなくてもサンプルさえ用意できれば通常と変わらないデータ収集が可能ですが、考えるべきことも多くあります。

生体高分子用結晶構造解析用ビームラインの自動化

生体高分子結晶構造解析用のBLは、他のBLとは随分と様子が違ってきます。例外を除けば、全てのユーザーの実験手法はほぼ同一で、異なるサンプルを持ったユーザーが次々とやってくるBLです。こういう状況ですと、実験操作はルーチンワークとなり自動化への要求は高まります。企業ユーザーが多いのも特徴の一つです。限られた人数で大量のデータを収集して自社の開発研究に活かす必要があり、なるべく時間を有効に使いたいという企業からの要求は強く、企業からの遠隔化や自動化を望む声は自動化を達成する重要なドライビングフォースであったと思います。この様な状況を反映して、PFの生体高分子結晶構造解析BLでは早くから自動化、リモート化が進んでいました。現在、測定条件の細かい最適化はできませんが、ルーチン測定的なものに関しては全自動測定が可能です。

さて、この様にして進歩してきた自動測定とリモート測定ですが、色々なメリット、デメリットがあります。まずメリットですが、なにより時間の節約になることです。リモート測定であれば移動時間も無くなりますし、全自動測定であれば実験に立ちあう時間はゼロですから測定の時間を気にする必要もありません。短時間ではヒトの作業の方が早いかもしれませんが、機械は休まず実験しますので長時間の作業であれば機械の方が効率は高くなります。特にタンパク質と結合する化合物のスクリーニングの場合には、全自動測定の威力は絶大です。また、測定に使っていた時間を有効に使って研究の幅を広げることができるのは素晴らしいことで、まさに進歩と言えると思います。一般の結晶であれば、得られる回折データの質も人が作業した場合となんら変わるところはありません。

一方、デメリットもあります。機械ですのでソフトウェアも含めエラーはつきものです。しかも、機械は人と違って自分でエラーを直すことができません。自動測定は本格化して間もないのでエラーが起きると「やっぱり全自動はだめだよ」となりがちです。このような気持ちはよく分かりますし、エラーが起きない様に我々も努力を続けますが、エラーの報告は開発に大きな貢献をするということをご理解頂き、広い心で積極的な利用をお願いしたいと思います。

ます(尚、エラーが起きて測定ができなかった場合は、補償のビームタイムが与えられます)。もう一点重要なことは、自動化が進むことで開発側とユーザー側との間に知識の溝ができることです。生体高分子結晶構造解析BLユーザーの皆さんは一般には構造生物学が専門ということになりますが、以前はそれが結晶学、NMR、電子顕微鏡などの確固たる知識があるということの意味していたと思います。しかし、現在それが揺らいでいます。もちろん、開発する我々はそのような知識がなくても利用できるようなと思って開発するので、まさに目的を達成しつつある状況とも言えますが、話はそう単純ではありません。まず、ビームラインやソフトウェアの開発は将来的にも続いていくので、そのような開発ができる人材を育てることが難しくなります。さらに、発表される構造データの質の向上を考えれば、最低限の知識は必要です。しかも測定が高度化することで最低限の知識が増える傾向にあります。このような事態は構造解析が一般化した以上ある程度はしかたがないのですが、それでもやはりという部分はあります。この問題は、今に始まったわけでもなく多くの人が懸念を抱いていますが、解決できていません。生体高分子の結晶構造解析分野において、自動化は世界的な流れであって止まることはありません。知識の話をするとは昔は良かった的な話が出がちですが、この状況はタンパク質の結晶構造解析が産業界も含め幅広く利用されるようになったことの帰結です。真に必要な知識は何かを考えてより良い教育を考えていく必要があります。

また、自動測定は途中で人の判断が入りませんので、これまでの実験のやり方に変更を迫ることもあります。例えば、新しく結晶化したサンプルの予備的データの測定や、抗凍結剤の検討方法など、これまでOn siteでやるのが普通だった実験はそのやり方や実験スケジュールを自動測定に合うように最適化していくことも必要です。今後さらに自動測定が広まることで、ユーザーの側だけでなくビームタイム配分の方法など利用制度も含め影響が出てくると思いますが、より良い測定を行うことで大きな成果が出るように、更なる開発をユーザーの皆様との対話を持ちつつ続けていきたいと思っています。

人事異動

Paul Scherrer Instituteのビームラインサイエンティスト、OLIERIC Vincentさんが長期招聘研究員として構造生物学研究センターに加わりました。KEKに今年の11月まで滞在予定です。