

はじめに

早いもので2021年度最後のPFニュースとなりました。PFニュースの巻頭では、各年度の1, 3号に放射光実験施設長が「施設だより」を、2号に物構研所長が「物構研だより」を、そして4号に物構研副所長(つくば担当)が「物構研つくばキャンパスだより」を執筆することになっています。KEKでは、機構長、所長をはじめとする役職の任期が3年となっており、2021年度から3年間が現在のメンバーの任期となっていますので、今年度からしばらく、私が年一回「物構研つくばキャンパスだより」を執筆することになります。

つくば担当の物構研副所長は、以前は実質的にフotonファクトリーの施設長を兼ねていましたが、ご承知のとおり2019年度の組織改編によって、放射光科学第一、第二研究系に加えて、組織としての「放射光実験施設」が新設され、KEK内の正式な役職として、従来の「研究主幹」とともに「放射光実験施設長」が置かれるようになりましたので、つくば担当の副所長は、所長を補佐する立場として、低速陽電子実験施設(これも2019年度に組織として新設されました)を含むつくばキャンパス全体に関わっています。一方で東海キャンパスについては、副所長の位置づけ自体はつくばと同様なのですが、今期はJ-PARCのMLF(物質・生命科学実験施設)のディビジョン長を兼任しており、MLFの施設長を兼ねていると言えます。それが理由というわけでもありませんが、実験施設長を兼任しない副所長である私は、所内を横断する組織である量子ビーム連携研究センター(CIQUS)のセンター長を兼任しており、センターの性格上、つくばだけではなく東海のことにも関わる立場にあります。

前置きが長くなりましたが、以上のような状況を踏まえ、本稿ではフotonファクトリーを含めたつくばキャンパス全体、さらには東海キャンパスのことも交えて近況をご報告いたします。したがって、「物構研つくばキャンパスだより」という名称から若干の逸脱があることをご了承ください。

近況の報告

PFニュースの読者の皆様には言うまでもないことですが、フotonファクトリーは、放射光利用を通して大学や研究機関等のユーザーの方々の研究・開発に貢献しています。これは大学共同利用機関である物構研にとって当然のミッションですが、最近になって改めて、大学の研究力強化において大学共同利用機関が果たす役割の重要性がクローズアップされていると感じます。例えば、内閣府の「地域中核・特色ある研究大学総合振興パッケージについて」という資料(https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/yusikisha/20211223_1/siryoy1.pdf)では、「世界と伍する研究大学」および「日本全国の大学」に対して、「優秀な研究

者が、所属機関の研究環境に左右されることなく力を発揮できるよう、最先端の研究基盤を活用した世界最高水準の研究基盤を整備」するために、大学共同利用機関、共同利用・共同研究拠点等の共同利用・共同研究機能を強化するという図が示されています。このような動きは、ユーザーの皆様にとっても物構研にとっても、大いにプラスになるものですので、示された図を絵に描いた餅にしないよう、皆様とともに努力していきたいと考えています。

社会全体に目を向けると、新型コロナウイルス感染症を一つのきっかけとして一気に高まったDX推進の機運はもちろんのこと、カーボンニュートラルに代表される持続可能社会の実現を目指す動きが急速に脚光を浴びているのはご承知の通りです。DX推進についてはPFニュースでも何度も言及されていますが、わかりやすい例として、物構研の各施設においてリモート化、自動化のための整備が一段と進んでいます。また2月には、これをマルチプローブ利用に発展させ、放射光と中性子を相補的に利用した分析(機械学習による解析を含む)のリモート講習が開催されました(<https://cupal.kek.jp/archive.html>)。一方、カーボンニュートラルに関しては、KEK機構長のリーダーシップにより、KEK全体でその実現に向けた取り組みが始まっています。加速器の観点からは、消費電力の小さい加速器を開発することが大きな柱となりますが、物構研としては、放射光をはじめとする量子ビームを用いた、カーボンニュートラルに資する材料開発への貢献が重要だと考えています。具体的には、太陽エネルギーの利用(太陽電池、光触媒など)、情報・通信デバイスやパワーデバイスの低消費電力化、水素利用の促進(燃料電池など)、二次電池の高性能・高耐久化など、たくさんの例を挙げることができます。もちろん、物構研だけでこうした材料開発を行うことはできませんので、大学、研究機関、企業などのユーザーの皆様との連携を、これまで以上に推進していきたいと考えています。

これらの動きに関連して、CIQUSの最近の様子を紹介します。CIQUSでは、各プローブ(例えば放射光)のユーザーの皆様が行っている研究の中から、他のプローブ(例えば中性子)を併用することによってさらなる発展が見込まれるものを発掘し、複数のプローブを用いたマルチプローブ利用研究へと誘導・支援する「発掘型共同利用」に取り組んでいます。また、発掘された研究課題をより本格的に進める際には、物構研の共同利用課題の一つである「マルチプローブ課題」を利用していただけるのですが、従来のマルチプローブ課題はPFで言えばS2型課題に相当し、かなりハードルの高いものでした。そこで2021年度の公募からは、従来の方式に近い「エキスパートタイプ」に加えて、PFのG型課題に近い「スタンダードタイプ」を新設しました。その結果、2021年11月の公募では、スタンダードタイプに2件の申請をいただき、そのうちの1件は

発掘型共同利用がきっかけとなったものでした（エキスパートタイプにも2件の申請がありました）。採択課題についてはp34をご覧ください。このような取り組みを通して、ユーザーの皆様をはじめとする大学、研究機関等の研究力強化に貢献していきたいと考えています。さらにCIQuSでは、所内スタッフが主体となってイノベーションに貢献できるテーマを設定し、マルチプローブを利用した産学官連携・国際連携によって課題を解決する「テーマ設定型共同研究」を推進しています。現在実施しているのは2020年度の初めに設定した11テーマと2021年度に追加した1テーマですが、そのうちの2/3程度が、カーボンニュートラルに関連するものになっています。これらの研究テーマにおける産学官連携を大きく広げ、研究を一気に加速することで、カーボンニュートラルの実現に貢献していきたいと考えています。

KEKでは、来年度から始まる第4期中期目標・中期計画期間（6年間）に向けて、KEK Project Implementation Plan (KEK-PIP) の策定を進めています。PIPは、KEKで今後取り組んでいく研究の方針を示した「KEKロードマップ2021」(https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2021/06/KEKroadmap2021_J.pdf)で挙げられた研究計画を具体的に進めるために、予算確保の枠組みと優先順位を明確にした研究実施計画です。KEK-PIPのドラフトについては、1月11日〆切で意見募集が行われましたが(<https://kds.kek.jp/event/40395/>)、最終的には3月7日から11日にかけて行われるKEK国際諮問委員会(KEK-SAC)における議論を経て確定します。KEK-SACでは特に、優先順位をつけて新たに予算要求を行う項目に関する議論が行われます。現在、候補として挙げられているのは以下の9件(順不同)で、これらのうち3, 4, 6, 8が物構研に関わるプロジェクトになります。

1. Extension of the J-PARC Hadron Experimental Facility
2. Strengthening the cooperation with CERN in projects including HL-LHC
3. Transmission muon microscope
4. New Synchrotron Light Source Facility
5. LiteBIRD
6. Intensity upgrade of the Slow Positron Facility
7. KISS II
8. Expansion of the Structural Biology Research Center
9. Expansion of applied research using superconducting accelerators

なお、新放射光源については、第4期中期目標・中期計画期間には、建設自体ではなく建設に向けたR&Dを行うという計画ですが、第5期での建設を見据えて、“R&D”ではなく、“New Synchrotron Light Source Facility”というタイトルになっています。また、J-PARC MLFの第二ターゲットステーション計画は、第4期中期計画・中期計画期間に予算要求を行うプロジェクトの候補としては挙げられていませんが、第5期での実現を目指してJAEAとの間で議論

を行い、準備を進めることとなります。

最後に最近のトピックスとして、はやぶさ2が小惑星リュウグウから持ち帰った試料の分析について紹介します。物構研では、東北大学の中村智樹教授がリーダーを務める「石の物質分析チーム」と、広島大学の藪田ひかる教授をリーダーとする「固体有機物分析チーム」が、2021年の6月から分析を行っています。PFニュースの読者の皆様の中には、放射光を用いた分析についてお聞きになっている方も多くいらっしゃると思いますが、物構研では放射光だけでなく、ミュオンを用いた分析も行っています。物構研における分析については、テレビ番組等でも紹介されていますし、間もなく最初の分析結果が公表されると伺っています。最新の情報は物構研の特設サイト(<https://www2.kek.jp/imss/news/hayabusa2/>)からご覧ください。

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 古川和朗
(2022年1月24日付け)

概要

秋の入射運転は2021年12月23日に無事に終了し、27日までの入射器の単独運転において、大電力装置の保守作業と性能改善のためのビームを用いた開発が行われた。秋のSuperKEKB運転においては、ビーム輸送路でのビーム挙動の解析とビーム輸送路及びリング入射点の光学整合で改善が見られ、今後の入射効率の進展が期待される。通常よりも高いエネルギーの10.75 GeVを中心とした衝突実験も無事3週間弱で実施することができた。その後の冬の停止期間が短かかったために大きな改造は行われていないが、主要な変更点を列挙すると、RF電子銃向け第2レーザーの一部増幅器の交換による増強、レーザー窓の汚れを避ける光軸角度の変更、Rセクタ(J-ARC)部のすべてのスクリーンモニタの交換、ビームダクトの拡大、一部の電磁石電源制御のcRIOから20ビットDACを持つRaspberry Piコントローラへの移行、マイクロ波源停止時に次のビームパルスを阻止する機構の試験導入、低速陽電子向けビーム位置モニタ読み出し装置更新、などが挙げられる。1月14日からマイクロ波コンディショニングを始め、31日のPF入射開始以前に放射光2施設とSuperKEKBを含めた4リングの入射ビームの特性を調停して入射条件の確立を急ぐ。SuperKEKBの運転を次年度へ連続させるため、SuperKEKB入射開始は2月21日を予定しており、それまでの期間を利用して放射光入射と共存可能なビーム試験を行う。SuperKEKBと放射光施設のそれぞれの理由により運転期間の重なりが小さくなっているため、入射器の運転期間は年間9ヶ月近くと長くなっており、今後の長期運転にも保守時間が充分であるかどうか検討を進めているところである。

SuperKEKB 高度化に向けた入射器の改善作業の検討

KEK電子陽電子入射器は、SuperKEKB素粒子衝突実験とPFリング及びPF-ARでの放射光科学実験の両分野を支えるために、2019年から4リング同時トップアップ入射を開始し、トップアップ入射開始前後を比較すると237%という比率でSuperKEKB衝突実験の効率を向上させることに成功した。SuperKEKB蓄積リングの特に陽電子リングのビーム寿命が短く、2021年には10分を割るような条件で実験を続けており、この同時トップアップ入射機構は不可欠である。この入射機構を基礎として、入射器は徐々に入射性能を高めており、SuperKEKBの衝突性能の世界記録の達成にも貢献している。

蓄積衝突リングにおいては、衝突性能の向上のためにビ

ームビーム効果が増大するとともに力学口径が小さくなり、ビーム寿命が当初の設計値よりも大幅に小さくなるようになってきた。ビーム寿命の減少に対抗するために、蓄積ビームの力学口径を広げる努力とともに、入射ビームの大電流化の実現が急がれることになった。単純にバンチあたりの電荷を増大させれば、航跡場効果により入射ビームのエミッタンスが急激に悪化し、蓄積リングの入射物理口径を超えてしまうため、並行して低エミッタンス化を進める必要がある。このような蓄積リングにおける衝突性能向上の進展に合わせて、入射器の性能向上を計画しており、前回に引き続き装置の改造・増設を含めた計画の概要について述べてみたい。

低エネルギー拡がり

大電流でありながら小さなエネルギー拡がりの電子ビームを加速するために、当初の計画では、時間方向に方形のビームをRF電子銃から供給する予定であった。そのために、周波数応答の優れたイッテルビウム添加のYAGレーザーのファイバーレーザーと固体レーザーの開発を行い、時間方向の波形整形を進めていた。低電流においてはビーム試験が進展したが、残念ながら現在のところ安定した大電流ビーム加速には至っていない。

光陰極としてはアルカリ金属を避け、東日本大震災の教訓から震災時に真空が破れても回復が容易であるように、真空悪化に耐性があり量子効率も高い合金を探し、現在のところイリジウム・セリウム合金を採用している。アルカリ金属よりも量子効率が低いために大出力のレーザーを必要とすることになっているが、安定性を重視して使用を継続している。

そこで、ネオジム添加のYAGレーザーを固体レーザーの媒体として採用し、電流を向上させてきた。しかし、時間方向の波形整形が可能となる応答が無いので、生成したビームは時間方向にガウシアン形状を持ち、結果として大電流においてはエネルギー幅が大きく拡がると思われる。現在はバンチあたりの電荷が2 nC以下なので、入射は可能であるが、早い内に解決策を用意する必要がある。

エネルギー圧縮システム

陽電子ビームはダンピング・リングとバンチ圧縮システムを経由して加速され、入射器終端においてはエネルギー幅が大きくなっているため、当初から6台の偏向電磁石によるシケインと加速管を配置したエネルギー圧縮システムを利用している。上に述べたように大電流の電子について

もエネルギー圧縮システムが必要と考えられる。そこで、入射器からビーム輸送路に入った区域の偏向電磁石による R56 光学係数を利用して、エネルギー圧縮システムの構築を計画している。

先に述べたビーム輸送路でのエミッタンス悪化の原因が完全には特定できていないため、CSR の影響などさまざまな可能性を考慮した上で、蓄積リングの時間方向の口径ともバランスを取りながら、設計を進めている。さらにマイクロ波源から設置場所への距離が大きくなるために、マイクロ波の減衰をできるだけ抑えた円形断面導波管を使用した伝送路を構築すべく計画している。

大電流陽電子ビーム

低エミッタンスと低エネルギー拡がりを実現することができれば、前号で示した要求仕様に基づく SuperKEKB 入射ビームを用意できるものと期待しているが、今後の衝突運転の進み方によっては、特に陽電子ビームの寿命が短くなる可能性もあり、将来の可能性として、バンチあたり 6 nC 程度までの陽電子ビームを加速することも想定しなくてはならないかもしれない。

先に述べたように、陽電子捕獲磁場を発生させるフラックスコンセントレータの放電の問題が解決され、さらに陽電子ビーム損失を減らすべく標的直後で直ちに高電界で加速するために電界を上げる必要がある。加速管の高周波終端器における放電が懸念されており、その改善により設計値電圧に近づけるよう正常化できると期待している。

陽電子標的部では、標的脇の直径 2 mm の穴に電子を通過させて加速管に通す際に、航跡場効果を抑えるために電子ビームが加速管の中心を通るように装置を配置している。つまり、直径 4 mm の陽電子標的自体は中心からの偏差が 3.5 mm となっており、これを中心に近づけることが好ましい。標的直後に設置可能なビーム位置モニタが最近開発されたので、このモニタを利用して高磁場ソレノイド中に螺旋軌道を描く陽電子を観測しながら調整を行えば、陽電子の収量を上げられるかと期待される。

最大エネルギー

SuperKEKB の衝突実験は、通常 B 中間子のうち T (4S) 状態を生成するようなエネルギーで行っているが、重心エネルギーで 440 MeV ほど高い T (6S) 状態での実験にも期待がある。

入射器に設置されている約 230 本の加速管のうち、約 150 本は製造から 40 年経過したものであり、また当初の設計加速勾配は 8 MeV/m であったところ、現在は 20 MeV/m で使用されている。そのため劣化が激しく、徐々に印加電圧を下げざるを得なくなっており、また電子ビーム溶接部から水漏れを起こすものも多くなっている。そこで、2023 年までに全体の 7% に当たる 16 本の加速管を交換し、T (6S) 状態での実験にも備えようとしている。しかし、今後も劣化は進むと考えられ、どの程度の数の加速管の交換が必要か見極めようとしている。

また、大電力パルス・クライストロン電源に使用されているパルス形成回路のコンデンサが製造から 30 年を超えており、微量の PCB を含んでいる可能性があり、さらに破壊検査が必要となるために、対象の約 700 台の交換を予定している。これらのコンデンサは性能と安全のためにセラミック容器を使用しているため、製造に時間を要することに注意を払い、交換を始めているところである。

KEK の電子陽電子入射器は、前号と今号で述べたように、大きく分けて 7 項目の装置の更新を行いながら、素粒子物理と放射光科学の両分野の実験を支えていく予定である。ビーム性能の向上を図るために引き続きさまざまな技術研究開発をもって、貢献したいと考えている。

PF リングの運転状況

図1に、PFリングにおける運転開始日2021年10月14日9:00～運転停止日12月23日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。立ち上げ調整は、順調に行われた。リングの真空度を確認しながら、徐々に電流値を上げていき、初日に450 mAに到達し、真空光焼きだしとなった。2日目以降の調整も順調で、予定されていたスケジュール通り、10月19日9:00からの光軸確認後ユーザー運転が開始された。

10月31日12:33にビームダンプが発生した。リング6

極電磁石電源(SFD)が「制御回路異常」でダウンしたことが原因であった。調査を行ったところ、制御回路基板の中のデジタルインターフェース基板の故障と判明し、予備基板と交換することで復旧した。

11月に入ってから100 μm程度の水平方向の振動が不定期に発生するという現象が起こった。特に、11月6日以降その振動の頻度が増えてきた。この状況の中、11月12日10:32水平方向の軌道が約150 μm変動した。調査の結果、この軌道変動については、挿入光源ID#19の補正電

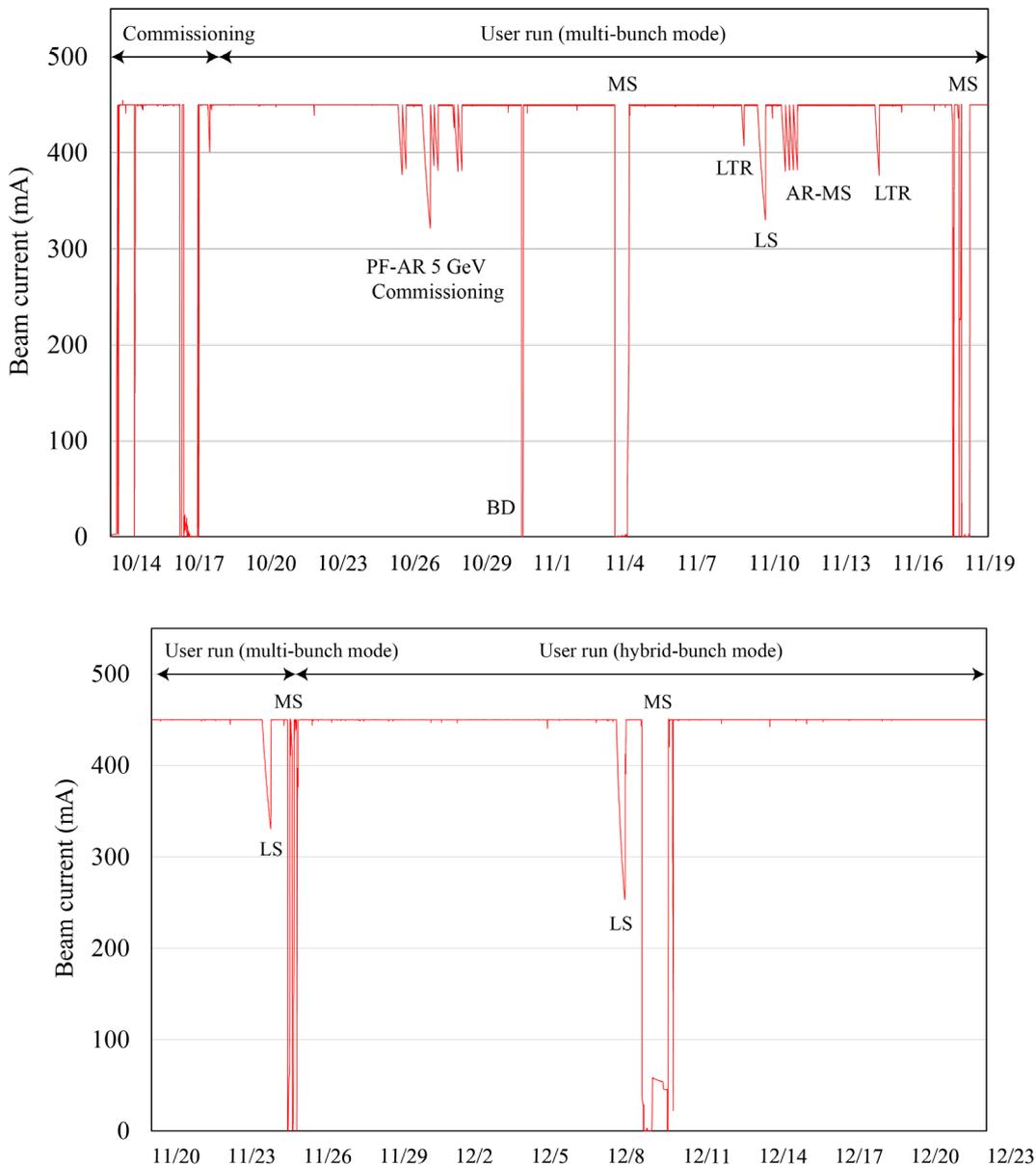


図1 PFリングにおける運転開始日10月14日9:00～運転停止日12月23日9:00までの積電流値の推移を示す。MSはPFリングマシン調整日、AR-MSはPF-ARマシン調整日、LSは入射器マシン調整日、BDはビームダンプ、LTRは入射器トラブルによる入射中断を示す。

磁石電源の故障が原因であることが特定され、予備の電源と交換して復旧した。一方断続的な軌道変動については、変動時の軌道パターンからビームを水平方向にキックしていると推定された B#01 および B#28 のステアリング電磁石の電源を 11 月 18 日のマシン調整日に交換した。しかし軌道変動は抑制されなかったため、B#01 および B#28 のステアリング電磁石電源に起因するものではないことが判明した。引き続き原因調査・監視を続け、 $100\ \mu\text{m}$ を超えるような軌道変動があった場合は測定器当番にその都度連絡することとした。結果的に運転停止まで断続的に発生する振動の原因は特定できなかった。

11 月 25 日のマシン調整日に、マルチバンチモードからハイブリッドモードに切り替える作業を行った。切り替え作業は順調に実施され、翌日 11 月 26 日 9:00 からの光軸

確認後ユーザー運転となった。運転直後シングルバンチの純度が悪化していることが判明した。調査したところ純化に使用している 2 台の高周波アンプのうち 1 台が故障していたためであることが判り、故障した 1 台を外し、残りのアンプ 1 台の出力を上げる対応を行い、純度の悪化を抑制した。ハイブリッドモードでのユーザー運転は、ビームダンプを伴う大きなトラブルは発生せず順調に実施され、12 月 23 日 9:00 で予定通り運転を停止して冬の停止期間となった。

PF-AR の運転状況

図 2 に、PF-AR における運転開始日 10 月 25 日 9:00 ~ 運転停止日 12 月 7 日 9:00 までの蓄積電流値の推移を示す。PF-AR は、10 月 25 日 9:00 から立ち上げ作業が開始された。

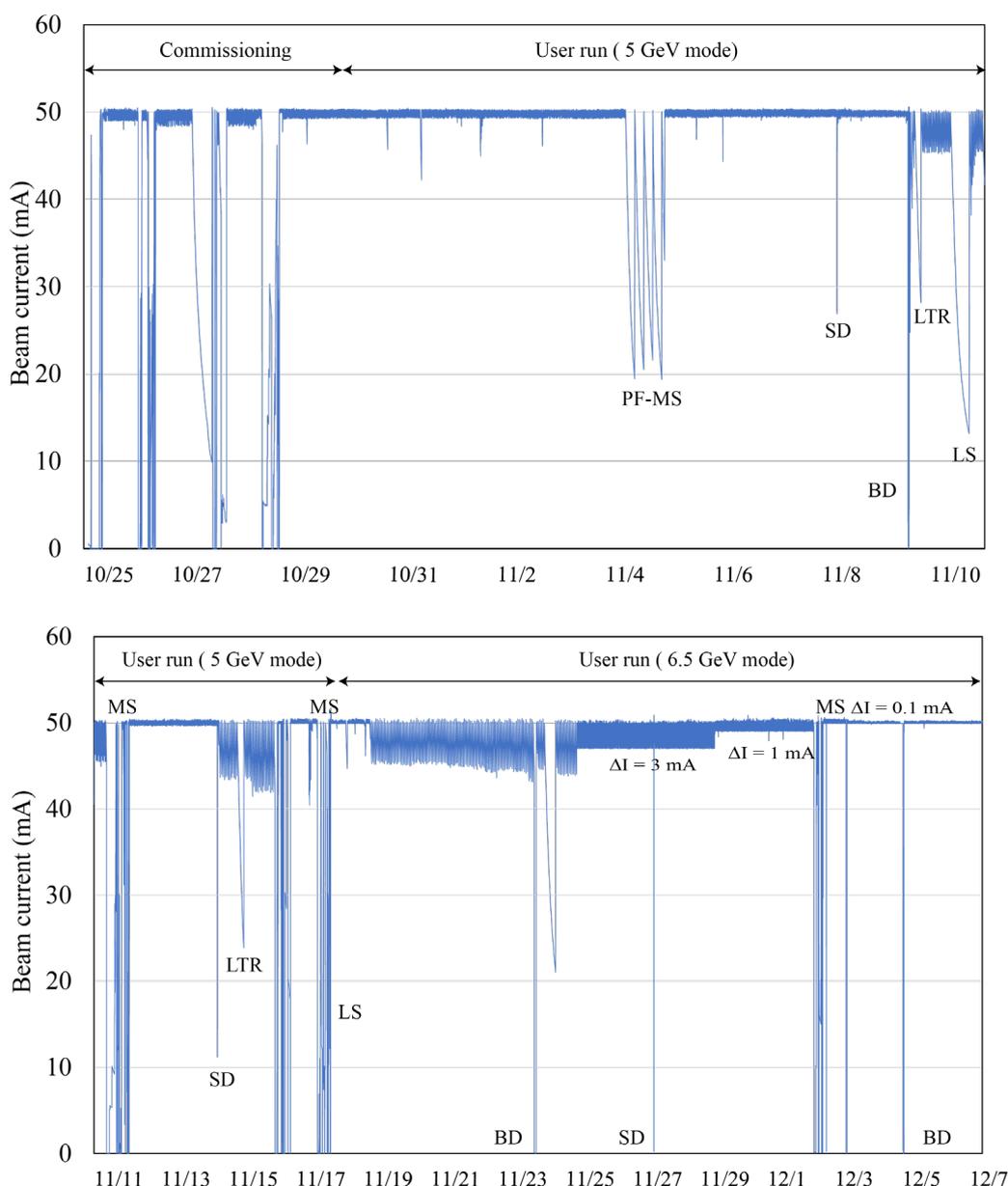


図 2 PF-AR における運転開始日 10 月 25 日 9:00 ~ 運転停止日 12 月 7 日 9:00 までの蓄積電流値の推移を示す。MS は PF-AR マシンスタディ調整日、PF-MS は PF リングマシン調整日、LS は入射器マシン調整日、BD はビームダンプ、SD はビーム寿命急落によるビームロス、LTR は入射器トラブルによる入射中断を示す。

立ち上げ当日に偏向電磁石の冷却水系で水漏れトラブルがあったが、パッキンなどを交換して復旧した。立ち上げ初日は 6.5 GeV、蓄積電流値 50 mA で真空焼きだしを行い、翌日 5 GeV に切り替えて各種調整を行った。立ち上げ調整は概ね順調に進み、10月29日 17:00 より光軸確認を行った後、トップアップによるユーザー運転を開始した。

ユーザー運転になってから、時折ビーム寿命急落や微小なビームロスが起り、しばらくすると回復するという現象が発生していたが、11月8日 6:36 に蓄積ビーム電流値が半分になるビームロスが発生した。原因を調査したところ、入射用キッカー電磁石 K2 の暴発によるものであると判明した。入射のタイミングでないときに K2 だけが励磁されていた。とりあえずの対処として、入射時における蓄積ビームの振動が大きくなるが、K2 を OFF してキッカー電磁石 2 台運転 (K1, K3) とした。この問題以外はこの期間のユーザー運転は順調であった。

11月16日に 5 GeV 運転から 6.5 GeV 運転に切り替える作業を実施した。11月17日 17:00 から予備光軸確認、11月18日 9:00 から光軸確認を行い、ユーザー運転を再開した。

11月16日入射用キッカー電磁石電源を 3 台 (K1, K2, K3) に戻して運転していたが、18日に K2 が誤動作してビームロスが発生したため、やはり K2 を OFF して、K1 と K3 の 2 台で運転を行った。ところが、K3 も誤作動してビームロスを引き起こしていることが判明した。キッカー電磁石 1 台ではビーム入射はできないため、連続入射によるトップアップ運転を断念して、11月19日から 30 分毎の定時入射に切り替えて、入射時以外はキッカー電磁石電源を OFF しておくことで誤動作によるビームロスを回避することとした。11月25日からビーム入射方法を定時ではなく電流値により制御 (自動切換) することとして、蓄積電流値 50 mA-47 mA ($\Delta I=3$ mA) によるトップアップ運転を実施した。さらに 11月29日からは、より一定電流値に近づけるため、蓄積電流値 50 mA-49 mA ($\Delta I=1$ mA) のトップアップ運転とした。12月2日 低エミッタンスモードでのマシンスタディを実施した。スタディ時に連続入射による誤動作が発生しなかったことから、12月3日より再度通常の連続入射によるトップアップ運転 (50 mA-49.9 mA: $\Delta I=0.1$ mA) を運転停止 12月7日 9:00 まで実施したが、誤動作は発生しなかった。

キッカー電磁石の暴発現象以外のトラブルでは、11月24日に激しい軌道変動が観測された。調査の結果、変動の原因は 4 極電磁石電源 QC8_N に起因すると判明した。ビームを落とし QC8_N の電源ブレーカーを入れ直した。この操作をすると電流値のふらつきが見られたため、該当する制御基板を交換したところ、正常に戻ったので運転を再開した。

11月27日 14:54 激しい寿命急落によるビームロスが発生した (0 mA まで減少)。この現象はキッカー電磁石の誤動作ではないと判明したため、ダストトラップの寿命急落によるものと推測されている。

12月4日 22:51 RF がダウンしてビームダンプが発生したにもかかわらず、ビーム電流値がゼロになっていないという状況が起こった。DCCT の故障を疑い調査したところ、DCCT の LAN/GPIB モジュールが原因であることが判明し、IOC をリポートして復旧した。なお、ビームダンプの原因は RF 空洞の反射によるもので、RF を再立ち上げて運転再開となった。

PF-AR は予定通り、12月7日 9:00 で運転を停止して、冬の停止期間に入った。停止期間中に、入射用キッカー電磁石電源の暴発現象について原因調査を実施した。まれに起こる現象なので運転中には原因の特定には至っていなかった。電源 3 台 (K1, K2, K3) をそれぞれ運転状態と同程度の電圧に設定し、暴発現象が発生するかどうかを観察した。すると、放電トリガーがない状態で、K3 が励磁するということが 2 度発生した。そこで、放電トリガーに関連する制御基板 1 枚を K1 と交換して観察したところ、暴発の症状が K1 に移ったことを確認した。その結果、入射用キッカー電磁石の暴発の原因がトリガー制御基板であることが判明し、基板の交換を含めた対策を行うこととした。

今後の予定

第 3 期のリング運転開始は、PF リングが 1 月 31 日 9:00、PF-AR が 2 月 7 日 9:00 を予定している。

1年前のPFニュース2月号で、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について説明しました。第一の課題として、運営部門と測定装置部門の人員体制、第二の課題として教員・技術職員の世代交代を挙げました。放射光実験施設には、運営部門、基盤技術部門、測定装置部門の3部門があります。それぞれについて、簡単に説明したいと思います。

運営部門については、第一・第二の両方の課題を抱えています。運営部門長の兵藤一行教授が今年度末で定年を迎えます。2年間の再雇用が予定されていますが、2022年度より、後任の部門長に、北島義典特別教授（現講師）が着任する予定です。運営部門には、若手を入れる必要がありますので、そのための人事をどのように進めるか検討しています。

基盤技術部門については、第二の課題が特に技術職員において顕著です。2021年度の途中で丹羽尉博技師が測定装置部門の特別助教に採用されて異動したことで、年齢構成の二極化（中間層不在）が進みました。有望な若手が多くいますので、あまり心配はしていませんが、経験者採用の制度なども利用して、適正な構成にしていくことが望ましいと考えています。教員についても、各専門チームに1名の現状では、10年後には破綻をきたします。複数専門チームに複数の教員を配置するなどして対応していく考えです。

測定装置部門については、第一の課題への対応が緊急かつ重要です。野澤俊介准教授が放射光科学第二研究系に異動したことにより、2021年度当初には10の測定手法グループの内、6グループに測定装置部門メンバーが0名という状況になりました。この状況を改善すべく、2021年度に若干名募集の2件の公募を実施して、これまでに小澤健一准教授（12/1 着任、光電子分光）、丹羽尉博特別助教（12/16 着任、X線吸収分光）、大東琢治准教授（2/1 着任、軟X線吸収分光）が着任、新年度には奥山大輔准教授（回折・散乱、現東北大学助教）が着任の予定です。残る2グループの内、X線光学・イメージングについて、人事をどのように進めるか検討しています。測定装置部門も各測定手法グループに1名ですが、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することで、世代交代に対応していく考えです。

1年前にも書きましたが、定員ポストの増を期待することはできませんので、PFプロジェクト経費を財源として、特別教員を雇用することも検討しています。定年で空くポストを想定しながら、若手の特別教員（テニュアトラック教員）の人事を進めることで、実質的なポスト増を可能にする考えです。技術職員についても、機構の新人・経験者採用に加え、PFプロジェクト経費を財源とする特別技術

専門職の活用も進める考えです。

PFの共同利用の推進が、とてもやり甲斐のある職務であることは、PFニュース読者の皆さまにはご理解をいただけるものと思います。公募の際には、ご自身の応募や有力候補への声掛けをよろしく願いいたします。

2022年度のPFのプロジェクト経費ですが、運営費は2021年度と同額、加えて光源の老朽化対策・高度化のための設備整備費が措置されました。合計で約10%の増額となっていますが、光熱水費の高騰により、この運営費だけでは十分な運転時間を確保できません。現在、運転時間を確保する方策を機構と協議中です。

運転・共同利用関係

2021年度第3期の運転ですが、PFは1月31日に運転を開始しました。PF-ARは2月7日に運転を開始します。PFは3月24日まで、PF-ARは3月7日までの予定です。PFのハイブリッドモードは3月10日から最後までです。PF-ARは5 GeVで運転を開始して、2月24日以降を6.5 GeVで運転します。引き続き、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、2022年度第1期の運転は、PFは5月6日から7月8日まで、PF-ARは5月12日から7月1日までの予定です。

1月20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。その他、開発研究多機能ビームラインの整備などについての協議が行われました。詳細については、本誌記事をご参照ください。

人事異動

前述のように、測定装置部門に3名が着任しました。小澤健一さんは東京工業大学の助教からの異動、大東琢治さんは分子科学研究所 UVSOR の助教からの異動です。丹羽尉博さんは実験施設内での異動です。

第39回PFシンポジウムは、3月9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

今回は放射光科学第二研究系の担当で、構造生物学研究センター（SBRC）が関わってきたプロジェクトと、それにより高度化されてきた結晶構造解析技術の変遷について書いてみたいと思います。現在、SBRCの活動の多くはBINDS事業（2017年度-2021年度）というAMED（日本医療研究開発機構）のプロジェクトによりサポートされています。BINDS事業は、タンパク3000プロジェクト（2002年度-2006年度）から数えて4つ目の構造生物学分野のプロジェクトです。プロジェクトの変遷とともに生体高分子の構造解析の世界も大きく変わりました。クライオ電子顕微鏡の登場は、これまで結晶構造解析では手の届かなかった超分子複合体などの構造解析を現実のものとし、その勢いはとどまることを知りません。SBRCでも、クライオ電子顕微鏡のアクティビティは益々活発になっています。しかし、結晶構造解析のハイスループット性は、まだまだクライオ電顕の及ばないところで、創薬における放射光を用いた結晶構造解析の重要性は依然高いと言えます。そして構造解析技術も、この20年でプロジェクトの変遷とともに大きく進歩してきました。

閉じたプロジェクトから開かれたプロジェクトへ

構造生物学分野の大型プロジェクトの始まりはタンパク3000プロジェクトでした。当時は、タンパク質の立体構造の決定はまだ困難があったものの、放射光利用が軌道に乗り構造解析が以前に比べれば容易になってきた頃でした。それでもタンパク質の立体構造を3000個決定するというのは、相当に野心的なプロジェクトでした。この数値目標については国際的にも議論が巻き起こりましたが、このプロジェクトは日本において構造生物学を広く行き渡らせることに多大な貢献をしました。この頃は、検出器がイメージングプレートからCCD検出器に置き変わりつつあったころでもあり、測定のスループットが数倍になっています。結晶構造解析の関門である位相決定に関しても、セレンメチオニン（タンパク質に通常含まれているメチオニンというアミノ酸の硫黄原子をセレンに置換したもの）含有タンパク質を使う異常分散法が主力になりつつありました。放射光を使って最適な波長を選んで異常分散効果を最大化して測定をするのですが、位相決定はそれほど簡単ではありませんでした。それでも、重原子に結晶をソーキングして重原子同型置換体を作るという手法は徐々に使われなくなっていたと思います。2007年度には、タンパク3000プロジェクトを引き継ぐ形で、ターゲットタンパク研究プログラムが開始されました。このプロジェクトは構造の数ではなく、ライフサイエンスとして重要なタンパク質の構造解析を、いくつかの重点分野を決めて解析しよう

という構造生物学の本流ともいべきものでした。容易になってきた構造解析の技術を駆使して、このプロジェクトでは多くの重要な構造が決定されています。

ここまでは、構造生物学者と一部のライフサイエンス研究者によりプロジェクトが推進されるいわば“閉じた”プロジェクトでしたが、次のPDIS事業（2012年度-2016年度）からプロジェクトの性格が大きく変わり、一般の研究者に開かれた形になりました。つまり、2つの先行プロジェクトにより高度化された構造解析技術を使い、プロジェクトの実施者がプロジェクト外部の研究者（特に構造生物学の専門家ではないライフサイエンス研究者）の依頼に応じて構造解析などを行うという形になったのです。構造生物の成果を一般のライフサイエンス研究者に広く使ってもらうというのがプロジェクトの大目標になったわけですが、同時に自動化やリモート化が以前に増して重要な高度化の課題になったのです。

PDISおよびBINDS事業と自動化、Native SAD法の実現

PDIS事業は、私がKEKに赴任した年に開始され、前任の若槻先生の後を引き継ぐ形でプロジェクトの推進に関わりました。この頃の構造解析技術はタンパク3000の頃と比べると非常に進歩していました。PDIS事業が始まった頃には、セレンメチオニンを使った位相決定は容易になっただけでなく、硫黄原子のわずかな異常分散シグナルを使って位相決定するNative SAD法のルーチン的な利用を目標として高度化を行うことが現実的になってきました。これには光源やビームラインの高度化とピクセルアレイ型の検出器（PAD）の導入により大きく測定精度が向上したことに加え、長波長X線を用いた回折実験に最適化されたBL-1Aが稼働を始めたことが大きく貢献しています。測定の自動化も進み、多くの測定プロセスが自動で行われるようになるとともに、PADの導入により測定の高速化（シャッターレス測定が可能になりました）が進み、一定時間に収集できるデータ数が文字通り桁違いに増大しました。このことにより回折データの精度を統計的に向上させることが容易になりました。また、PDIS事業では結晶のセンタリングが可能な全自動測定システムも完成し、全自動測定が通常のことになる一歩手前まできました。

PDIS事業の後継であるBINDS事業になると、自動化やロボット利用はさらに進むこととなります。皮肉なことに、コロナ禍によりこれらの需要が大きく増えたことも事実です。現在では全自動測定やロボットを使ったりリモート測定は通常のことになっています。24時間寝ずにビームラインで奮闘しデータを測定していたのは過去の話です。現在のPFでは、結晶をUnipuckという専用のカセットにセットしておけば、全自動で200セットほどの回折データを1

日で集めることが可能になっています。また、結晶整形装置（SPring-8 から移設）により結晶を整形した上で測定することで、結晶や溶媒によるX線の吸収を抑えることで極めて精度の高い回折データを収集することが可能になりました。その結果、Native SAD 法が通常の解析法になりつつあります。事実、SBRC 内ではセレノメチオニンを使った位相決定はあまり行われなくなってきました。また、分子置換法と Native SAD 法を組み合わせた MR-Native SAD 法も、迅速な位相決定と良質なモデル構築に大きな威力を発揮しています。このような高度化のおかげで、全自動で Native SAD 法に利用できるような高精度データ測定が可能になっただけでなく、測定に続く構造解析までを AI なども活用して全自動で行う目処も立ってきました。結晶構造解析の完全自動化は夢ではなくなってきましたので、ますます多くのライフサイエンス研究者が結晶構造情報を使えるような未来が来るはずですし、それを目指して高度化を進めています。

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。12/16 付けで Kim Youngmin さんが研究員として採用されました。また、12/31 付けで、武市泰男さん（大阪大学大学院工学研究科、助教）、千田美紀さん（筑波大学医学医療系、研究員）が転出されました。新しい職場での活躍を祈念いたします。