

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 惠郷博文
(2022 年 7 月 1 日付け)

運転状況

5 月 6 日より PF リング、5 月 12 日より PF-AR のビーム入射調整を開始した。運転調整は順調に進み、PF リングは 5 月 10 日より、PF-AR は 5 月 16 日よりトップアップによるユーザー運転へビーム供与となった。PF-AR は 6 月 7 日から 5 GeV から 6.5 GeV へ運転エネルギーを切り替え、PF リングは 6 月 14 日よりハイブリッド運転を行っている。途中、光源リングへの入射に関する特異なトラブルが 2 件あった。5 月 24 日に入射パターン制御パネルがビーム繰り返し設定の変更を検知できず、PF リングと PF-AR の入射が一時停止した。6 月 19 日には三重同期モジュールの同期外れが生じ、蓄積電流の積み上げが停滞して定格の 450 mA まで蓄積されなくなったため、ゲート幅を調整して回復させた。

SuperKEKB においては Off-momentum での物理運転を 5 月 11 日に終え、5 月 16 日よりビーム衝突点の β 関数 (β_y^*) を 1.0 mm から 0.8 mm に絞り、ルミノシティ向上を目指す試験運転調整を行った。5 月 26 日より再び $\beta_y^* = 1.0$ mm に戻して電流増強による運転に切り替えてビーム入射を行った。リングのオプティクス補正に合わせて、LER 3 nC 2 バンチ、HER 1.3 nC シングルバンチで入射調整し、LER エミッタンス $\epsilon_x/\epsilon_y = 119/4$ mm (MR-BT でのワイヤースキャナ測定値)、HER エミッタンス $\epsilon_x/\epsilon_y = 21/20$ mm となり、エミッタンスの大幅改善と過去最高となる入射効率 90% を達成した。運転繰り返しを 12.5 Hz から 25 Hz に変更してもエミッタンスは良好であった。また、この時期、入射器内の VSWR ダウン頻度も最小状態を維持することができ、入射器運転は安定に推移した。しかしながら、電力制限のため、6 月 22 日に SuperKEKB メインリングの運転は停止となった。図 1 に運転停止までの入射状況の推移を示す。

途中、A_1(A) ユニットのクライストロンモジュレータ用インバータ充電機が故障し、電流過多インターロックで入射中断が多発したが、予備機と交換にて復旧した。今期よりクライストロン関連のインターロック発生時にはクライストロンギャラリー内に設置したモジュレータ監視カメラによってコントロール室から遠隔にて状態確認ができるようになった。軽微異常に対して遠隔リセットを行い、復帰対応時間の短縮が可能となった。なお、遠隔リセットができない重故障や異常の場合は、これまで通り現場確認にて対処する。

また、日時は異なるが 2 つの加速ユニット (AC_12, AC_22) で経年劣化による加速管カプラー部から冷却水漏

れが発生した。この場合、ユニット全体を運転停止しなければならず、1 ユニットあたり約 150 MeV のエネルギー減となるが、スタンバイユニットを代用することによりビーム運転に支障を与えることはなかった。しかしながら、止水処置には、排水・水路乾燥作業、リキッドシール塗布、乾燥後の通水確認などの工程を踏む必要があるが、2 週間毎のメンテナンス時間内で対応しなければならないため、復旧には 1 ヶ月を要する。劣化が大きく、上記の処置で水漏れ修理ができない場合は加速管の交換となるため、今後、計画的な新型加速管の調達が必要である。

5 月後半より気温が上昇、1 日の気温差が大きくなって各機器の動作へ影響した。入射ビームの軌道変動やエミッタンス劣化が大きくなり、入射効率が悪化した。そのため、3 セクターから 5 セクターのクライストロン RF 出力の位相調整や、バンチ電荷量と均等化を図る A、B セクター調整を、入射の合間に手動にて行い、ビーム品質改善に努めた。ただし、連続入射中は、パラメータ変更によるビームアバートを引き起こす危険性があるため、これらの手動調整作業を行うことができない。機械学習などを導入した自動制御の高度化が今後の課題である。

一方、M2D 系統 (陽電子生成部 FC など を冷却) の冷却水温制御用二方弁が故障し、一時的に水温が 30°C から 45°C へ上昇したため、インターロックが発生した。二方弁および三方弁バルブを共に手動調整にて全開 (冷却能力最大) させて対処した。M2A 系統 (加速管 AC_16, AC_17, AC_18 および SB_2 用冷却水) の水温不安定も発生しており、今後、施設側にて冷却系異常の調査と修理が必要である。それ以外にも空調機故障による RF 電子銃用レーザーハット内温度、定盤温度の変化が大きく、これも手動にて状態調整中である。しかしながら、SuperKEKB のルミノシティ向上運転を優先させるため、5 月 25 日、6 月 8 日、6 月 15 日の定期メンテナンスを中止して 6 週間連続運転となり、施設側トラブルは未対応の状態である。暫定対処としてアラーム監視を強化して、状態変化時への対応に備えている。

入射器の運転において重篤なトラブルが 5 月 30 日に発生した。入射器ネットワークのコアスイッチ 4 台中 1 台に不調が発生し、一部の電磁石電源、SuperKEKB 制御ネットワーク、入射器 NAS 間の通信が不通となった。これにより SuperKEKB は運転できなくなったが、PF リングと PF-AR はトップアップを継続できていた。該当の電磁石電源配下の電源と該当するコアスイッチを再起動させて復旧した。原因はコアスイッチのファームウェアの不具合で

運転状況によってメモリにスローリークが発生し、メモリ使用率 97% 超となってネットワーク通信が不良となる。6 月 13 日にも同様の不具合が別のコアシッチで発生したため、再起動で対応、夏期保守期間中にファームウェアのアップデートによる改修を行う予定である。

6 月 18 日午後、低速陽電子テストホールでの機器ベキング作業の際に漏電が 3 度発生、2 回目の事象により

J-Arc 部と C セクターの電磁石電源のブレーカーがオフとなって 1 時間以上入射器の運転が停止した。入射器運転スタッフが通常感知していない場所でのヒーター線露出による地絡が原因であったため、原因究明が遅れた。今後、再発防止の施作を進めると共に、入射器棟内の各作業、機器運転状態の情報共有と連絡体制の強化に努めていく。

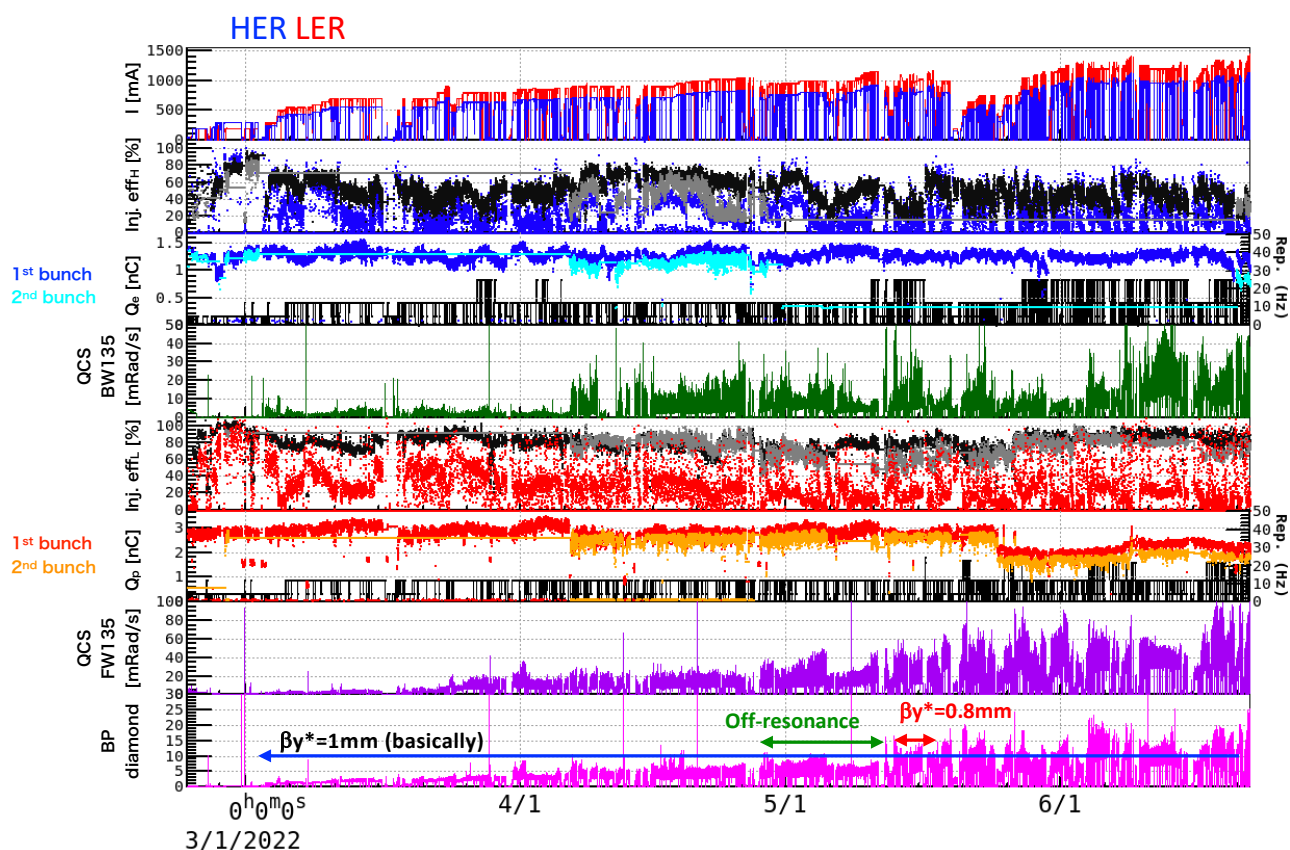


図1 SuperKEKB リング (HER, LER) へのビーム入射状況 (2022b)。QCSFW135, FW135, BP diamond : バックグラウンド評価用放射線モニター。

PF リングの運転状況

図 1 に、PF リングにおける 5 月 6 日 9:00 ～ 7 月 8 日 9:00 までの蓄積電流値の推移を示す。5 月 6 日 9:00 からリングの立ち上げを開始、5 月 10 日 9:00 からの光軸確認を経て、予定通りマルチバンチモードでのユーザ運転を開始した。

5 月 20 日 10:36 4 極電磁石 (Q264) の冷却水が流量低下

しインターロックが動作して、ビームダンプとなった。リングトンネル内に入域し、電磁石を保護しているストレーナを交換することで復旧した (図 2)。同様の現象が 5 月 22 日 21:46 4 極電磁石 (Q011) でも発生し、周辺の 4 極電磁石の冷却水量を確認したところ、軒並み低下していたため、インターロックの閾値を下げて様子を見ることとした。5 月 23 日 1:12 瞬停により RF がダウンしてビームダンプ

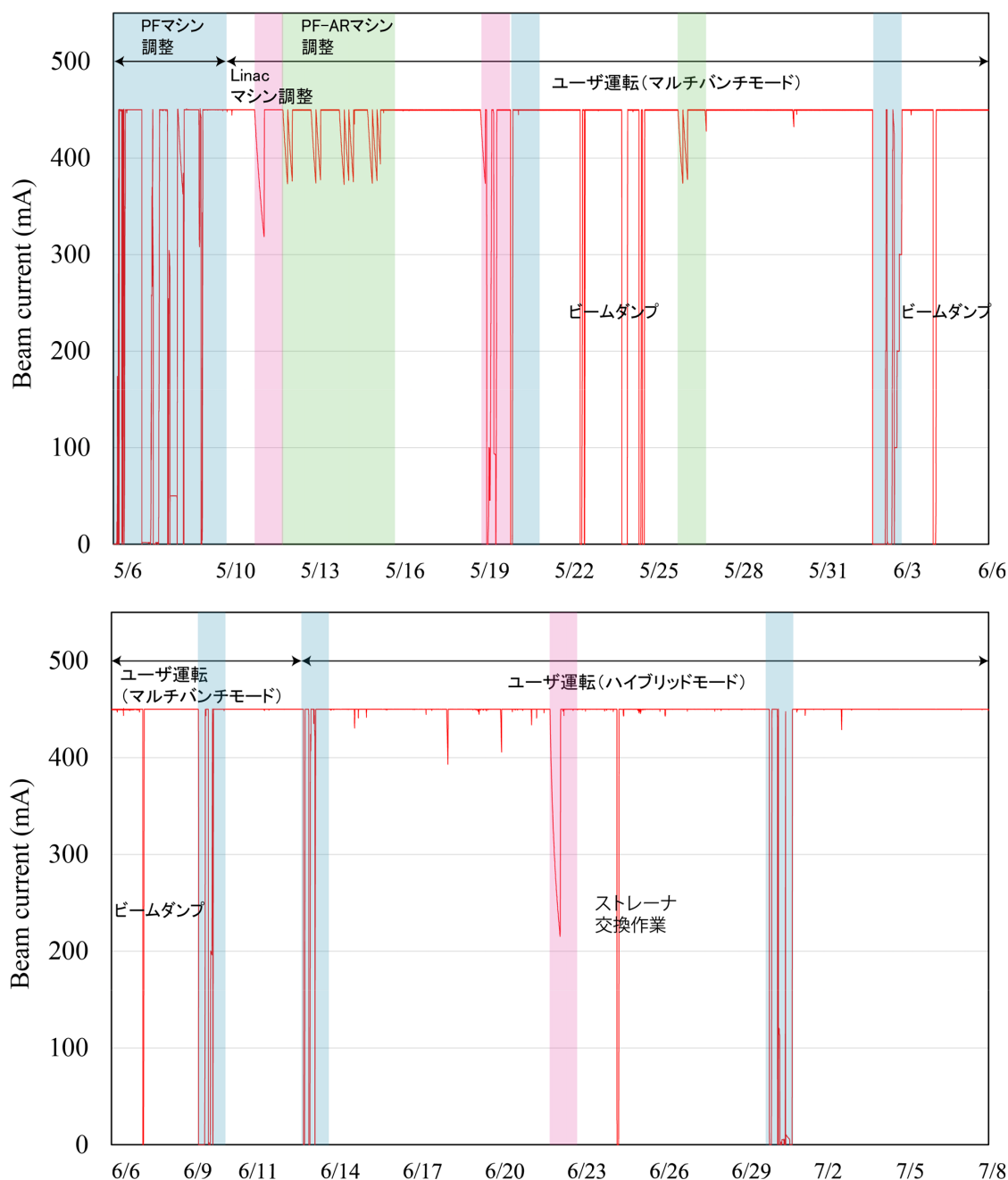


図 1 PF リングにおける 5 月 6 日 9:00 から 7 月 8 日 9:00 までの蓄積電流値の推移を示す。



図2 メッシュが目詰まりして冷却水量低下を招いた4極電磁石 (Q264) のストレーナの写真

となった。RFを含め他の機器にも異常はなく、2:03にユーザ運転を再開した。

5月24日9:00から13:45まで、4極電磁石冷却水トラブルへの対応のため、ユーザ運転を中断して、流量の低下している電磁石のストレーナの交換作業を実施した。しかしながら、その後立て続けに2回4極電磁石 (Q024, Q281) の冷却水トラブルによるビームダンプが発生してしまった。流量を確認した段階ではこれらの電磁石の流量は低下

していなかったにもかかわらず、1日も立たずに急激に低下して閾値を下回るといった状況であった。その後はしばらく安定していたが、6月2日6:24 4極電磁石 (Q033)、6月4日9:47 4極電磁石 (Q163) において、流量低下が原因となった2回のビームダンプが発生した。いずれもストレーナの交換作業で復旧している。これまではトラブルが発生していたのは主にリング北側に設置している4極電磁石であったが、Q163は南側に設置してある電磁石であった。そこで念のため、6月9日のマシン調整日に南側の4極電磁石すべてのストレーナの交換および清掃作業を実施した。一部のストレーナで目詰まりが進行しているものも確認された。根本的な対策として、循環冷却水の入れ替え作業に期待するところであるが、作業におよそ1週間程度要するため、ユーザ運転の停止後を予定している。それまでは、マシン調整日に流量低下が懸念される箇所のストレーナの交換・清掃作業を行って対処する方針とした。

一方、PFリングにおけるもう一つの懸案となっている水平方向の軌道変動であるが、5月19日のマシン調整日に Slow Orbit Feedback を高速化 (軌道補正の時間間隔を20秒から2秒とした) してから、スパイク的な $100\ \mu\text{m}$ を超える変動の頻度が少なくなった (図3)。しかしながら、頻度は減少したものの、この振動は完全に抑制されたわけではなく、引き続き振動原因の調査を行うこととした。

6月13日にハイブリッドモードへの切り替えを行ない、

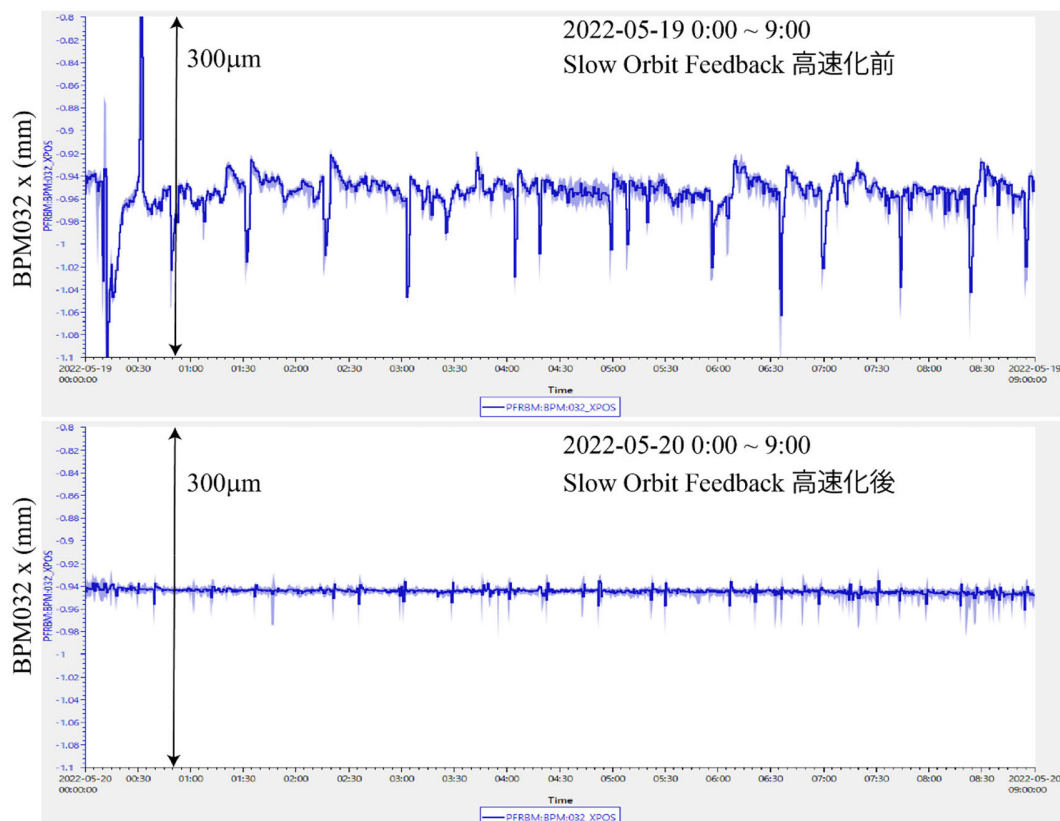


図3 PFリングにおける水平方向軌道変動の時間推移 (振動の振幅が比較的大きい場所のビーム位置モニター BPM032 で観測した軌道の水平位置) を示す。上図は Slow Orbit Feedback 高速化前、下図は高速化後の約9時間の推移を示している。

6月14日9:00から光軸確認を行った後、ユーザ運転を再開した。ハイブリッドモードでは、シングルバンチ部30 mA、マルチバンチ部420 mA、計450 mAの蓄積電流値で運転している。このモードにおける蓄積電流値とビーム寿命の積 ($I \cdot \tau$) は、平均180 A・min程度であった。原因不明の水平方向の変動は、ハイブリッドモードでも発生しているが、数10 μm 程度の変動が断続的に起きて、たまに大きく跳ねるという状態が続いた。

6月16日9:00過ぎ、垂直方向でおよそ100 μm の断続的な変動が発生した。10:15にチャンネルをクローズして調査したが、原因特定には至らないまま、変動が収まってしまった。再発の恐れはあるものの、11:11にユーザ運転を再開した。結果的に、垂直方向の変動は運転停止まで再発しなかった。

6月22日3:30水平・垂直方向の両方で大きめの軌道変動が発生し、同時にシングルバンチの純化ができなくなるという現象が発生した。原因調査を行ったところ、垂直方向のベータトロンチューンが通常に比べて20 kHzほどずれていることが判明した。このチューンのずれを4極電磁石 (QD) で調整したところ、純化が可能となりバンチ純度も元に戻った。結果的に、原因は多極ウィグラー (MPW#5) のメインエンコーダが故障し、ギャップ値が正常な値を示さず、それを受けてチューン補正機構が動作して、チューンのずれが生じたと判明した。故障したエンコーダのままでは、再発の恐れがあるため、同日17:00にチャンネルをクローズし、サブのエンコーダへ切り替え正常なギャップ値を確認して、ユーザ運転を再開した。

6月23日22:30監視していた4極電磁石 (Q282) の流量計で、冷却水流量低下が見られたため、翌日6月24日19:30からユーザ運転を中断して、Q282を含めた4カ所のストレーナ交換作業およびリング全周の流量計の確認を実施した。4カ所のストレーナはかなり汚れていたが、交換作業により流量低下が改善された。

PFリングでは、猛暑の中であったがビームダンプもなく比較的安定に運転が続けられ、7月8日9:00に運転を停止して、夏期の停止期間となった。秋の運転再開は、10月4日9:00を予定している。

PF-ARの運転状況

図4に、PF-ARにおける5月12日9:00～7月1日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。5月12日9:00から5 GeVで立ち上げを開始し、5月16日9:00から光軸確認を実施して、予定通り5 GeVモードでのユーザ運転を開始した。

5月19日14時から15時の間にバンチ純度が悪化した。その時間に“Master Oscillator FB OFF/ON” (SKEKBでリングの周波数を振っている時に出るメッセージ)が出ていた。この場合、LINACの周波数の設定も変わるので、それが原因でバンチのずれが発生したと推測された。20:11に再入射で復旧したが、“Master Oscillator FB OFF/ON”が出る時は、入射を行わないように制御系を改修した。

5月25日2:24 4極電磁石電源 (QC2N) が停止しビームダンプとなった。原因は、冷却水インターロックが動作したためであるが、リセットにより復旧した。流量計センサーの誤動作と推察された。

6月7日9:00から6.5 GeVへの切り替え作業を行った。各種調整は順調に進み、6月10日9:00から光軸確認を行った後、ユーザ運転再開となった。

6月10日17:00ビームロスが発生した。原因はビーム入射用キッカー電磁石 (K#3) が動作していないためであった。担当者により故障原因の調査を行ったが、K#3の早急な復旧は困難と判断し、キッカー電磁石電源 (K#2とK#3) を入れ替えて、K#1とK#2の2台のキッカー電磁石で入射することとした。入れ替え作業および入射調整が順調に進み、22:42ユーザ運転再開となった。

6月19日16:30頃からビーム入射が不調となり調整を行ったところ、メインバンチの隣のバンチにビームが入ってしまったため、一端ビームを捨てて再入射を行った。

6月25日11:28西電源棟のビーム入射路4極電磁石電源 (QF3, QF5) が温度インターロックでダウンした。これらの電源はリセットで対処したが、電源復旧中に同じく西電源棟のリング4極電磁石電源 (QC1N) が出力過電流インターロックでダウンし、ビームダンプとなった。最初はリセットが効いたので何度か立ち上げを試みたが、途中でリセットが効かなくなったため、メーカーに故障調査を依頼した。調査の結果、出力過電流を検出しているメタリレーの故障が原因であることが判明し、予備品と交換して復旧した。

6月26日14:47故障から復旧したQC1N電源が、今度はトランス温度異常のインターロックが動作してダウンし、ビームダンプとなった。筐体を開け、スポットクーラで冷風を当てることでトランスを冷却し復旧となった。

6月27日13:30ビームロスが発生した。ビーム入射路QF3電源がダウンしたため、冷却ファンにより冷却をさらに増強して対処した。

同日14:30再度ビームロスが発生した。今度は、水平方向のビーム不安定性が発生したためであることが判り、再入射を試みた。しかし、積み上げ途中でRFの反射でビームダンプとなった。原因を調査したところ、RF空洞の冷却水温度が上がり過ぎて不安定性を誘発していると推察された。調整中に水温が下がったことから、不安定性が収まり50 mAまで積み上げることができて、ユーザ運転再開となった。

6月28日17:11RF反射によるビームダンプが発生したが、このときは、ビーム不安定性は起きていなかったことからダンプの原因は不明であるが、すぐに再入射ができてユーザ運転再開となった。

6月29日15:00リング偏向電磁石電源のトランスの油温が上昇、温度インターロックが動作してダウンし、ビームダンプとなった。屋外に設置したトランスであるが、ファンを設置して冷却を試みたところ、油温が下がり復旧した。今回生じた一連のトラブルは、西電源棟室内の電磁石電源

および RF で起きており、猛暑のため電源棟内が高温になったためではないかと推察される。空冷式の冷却塔で冷却水を冷やしているため、今年のような猛暑となると冷却が追いつかなくなることも要因の一つと考えられる。

PF-AR は、7 月 1 日 9:00 に運転を停止して、夏期の停止期間となった。秋の運転再開は、10 月 12 日 9:00 を予定している。

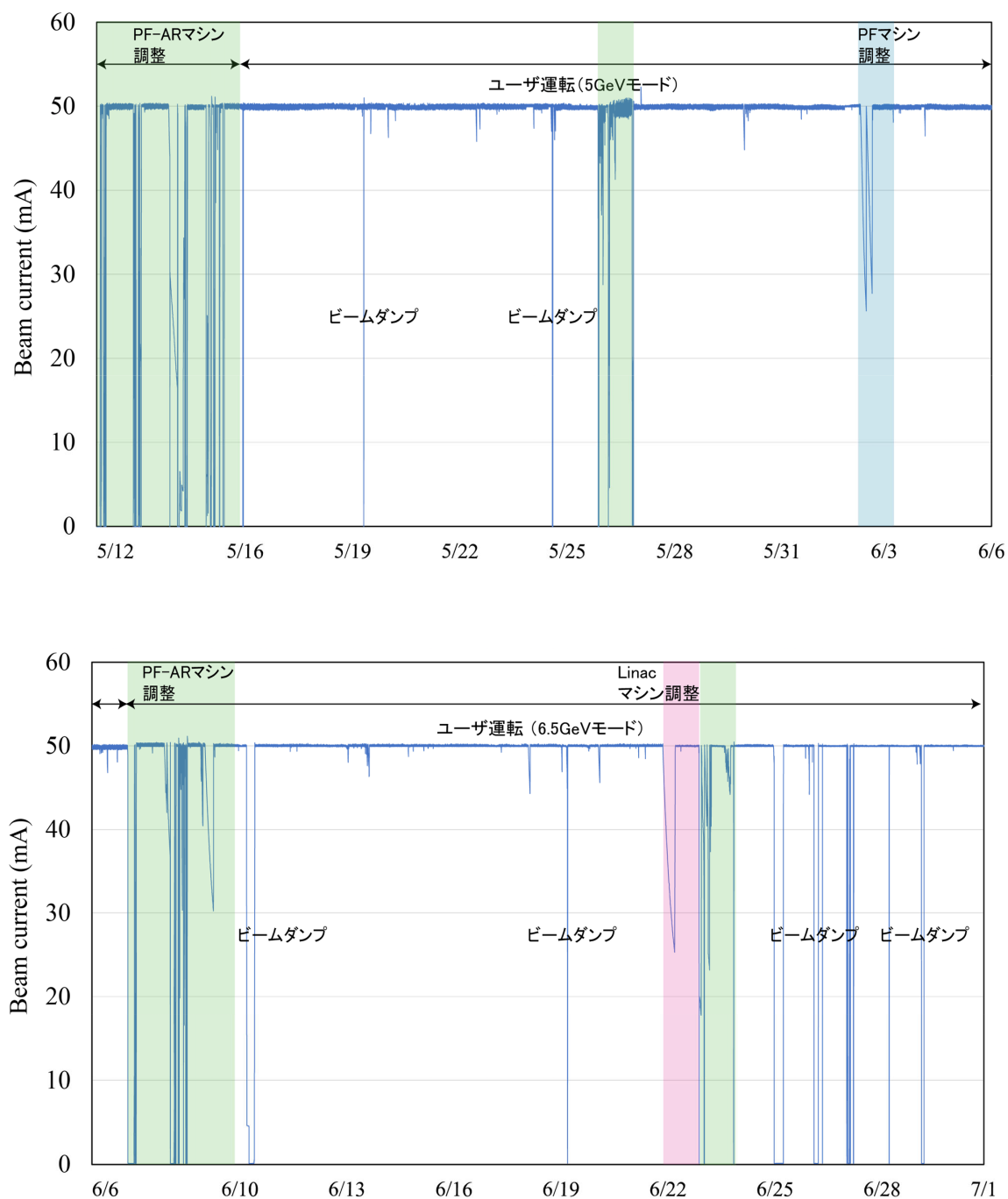


図4 PF-ARにおける5月12日9:00から7月1日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。

前号の『施設だより』でもお伝えしましたが、PF の将来計画は、新放射光源施設の実現に向けて、新しいフェーズに入ったと考えています。2 ビーム利用をはじめとする革新的なアイデアの試行を可能にする開発研究多機能ビームラインを BL-11 に建設することが決定しています。これに伴い、現在の BL-11A, BL-11B, BL-11D のアクティビティについては、50 eV から 5000 eV の広いエネルギー領域をカバーする新しいビームラインを BL-12A に建設して（仮称：広波長域軟 X 線ビームライン）、この新ビームラインと既存のビームライン群で継続することになります。現在、BL-11A, BL-11B, BL-11D の利用を 2022 年度末で停止、BL-12A の利用を 2023 年度後半から開始するスケジュールで進めています。夏期の運転停止期間に入り、BL-12 基幹部と BL-12C の改造工事を開始しました。次号以降、各ビームラインの構成や仕様、工事の様子など、担当者に協力してもらって紹介したいと思います。

本号では、今年度後半に開催する予定の PF 研究会「開発研究多機能ビームラインの建設と利用」について簡単に紹介します。内容としては、「本研究会では、施設側からビームラインの検討の状況を説明し、それを受けて利用者側からサイエンスの提案を行う。また、ビームラインで実施する開発研究やビームラインの運用方法に関する議論を行う。提案や議論を検討に反映させることで、開発研究多機能ビームラインにおいて、放射光 2 ビーム利用による画期的なサイエンスの成果の創出を可能にすることを目的とする。（提案書抜粋）」ということになります。本研究会では、特に、試料を 2 本のビームラインに持ち込んで測定することでは対応できない、1 本のビームラインで 2 ビームを利用して測定することが本質的に重要なサイエンスケースについて、多数の提案と活発な議論をお願いしたいと思います。現在、PF-UA の高橋会長、UVSOR の解良施設長、HiSOR の島田センター長と相談しながら準備を進めていますが、研究会を前半と後半に分けて開催することで、施設側からの説明と利用者側からの提案の間に、十分な検討の期間を設ける方向で考えています。

運転・共同利用関係

2022 年度第 1 期の運転は、無事、7 月 8 日に終了しました。第 2 期の運転ですが、PF は 10 月 4 日に、PF-AR は 10 月 12 日に運転を開始する予定です。PF のハイブリッドモードは 12 月 2 日から 12 月 26 日を予定しています。PF-AR は 5 GeV で運転を開始して、11 月 11 日から 12 月 5 日まで 6.5 GeV で運転を行います。第 1 期と第 2 期の合計で、一昨年度までと同様の PF 3000 時間・PF-AR 2000 時間の利用運転となる見通しです。しかしながら、第 1 期と第 2 期の運転のため、KEK から高額の支援を受けており、電

気料金下落もしくは KEK 外部からの支援がなければ、第 3 期（1 月～3 月）の運転は厳しい状況にあります。第 3 期の運転の可否は、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 19 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、G 型課題への博士後期課程学生の申請や課題審査におけるレフェリーによる総合評価廃止の影響などについて協議されました。詳細については、本誌記事をご参照ください。

人事異動

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 15 日付で、PF 事務室の沼崎沙織さんが退職されました。また、8 月 1 日付で、足立純一さんが機構内公募により研究機関講師から講師に昇任しました。足立さんは、基盤技術部門・時間分解チームのチームリーダーとして、前号で紹介した「多目的時間分解 X 線計測法の開発」プロジェクトをはじめとする開発研究を推進するのに加え、引き続き、PF の運転調整を担当します。

はじめに

今回は放射光科学第二研究系の担当です。これまで、多くの場合は測定装置に関しての話題を取り上げてきましたが、今回は少し違った視点、収集したデータを処理する部分に関して、最近になって盛んに利用するようになったクラウド計算機環境に関して書いてみたいと思います。

オンプレミスからクラウドへ

私たちは放射光などを利用して日々実験データを集め、その解析をしています。実験データの収集はもちろん重要なことで、これがないと何も始まりませんが、実験データの解析も結果を導くものとして無くてはならないものです。近年は、光源性能の向上とともに検出器の性能が飛躍的に良くなることで、一昔前では考えられなかったほど大量のデータを集められるようになっていきます。生体高分子の結晶構造解析分野においても、1日に200セットほどのデータを収集することが可能になっています(30年前は、1日10セットのデータを集めることもできませんでした)。また、大量のデータを収集することで、以前の感覚では信じられないような計算量の解析も可能になっています。その一例がクライオ電子顕微鏡(クライオ電顕)を用いた単粒子解析です。このように大量のデータを収集、解析することで、進展する科学もあるわけですが、これと同時に必要とされるコンピューターパワーも飛躍的に上がってきました。例えば、結晶構造解析に関して言えば、一つのデータを処理するのに必要なコンピューターパワーはたいしたことはないのですが、これが一度に数百もあると話が変わってきます。一日で収集したデータを処理するのに一年近くかかってしまうというのもあながちあり得ない話ではありませんが、これでは何のために実験を高速化したのか分かりません。それを解決するために、自身の研究室にたくさんのコンピューターを買い込んで処理をするのも一つの解決方法です(オンプレミス)。しかし、今度はコンピューターの管理という問題が生じてきます。例えば、構造生物学研究センターにはクライオ電顕のデータ解析のために、GPU BOXと呼ばれる高性能パソコンを10台近く保有していますが、自前で管理することが極めて困難になっています。つまり、GPU BOXを購入した時期によってソフトウェアのバージョンが違いトラブルが起きる、常にGPU BOXのどれかが調子がおかしいなどという状態に陥りがちです。もちろん、このようなトラブル処理も含めて解析を学ぶ、コンピューター処理を学ぶというのも当然であっても良い話ではありますが、解析結果に基づいて次にやる実験をデザインして実行する場合には、果たして解析部分にどれだけ注力すべきなのか悩まれる方も多いかと思います。また、研究室単位で考えた場合でも、解析の計算が

常に必要というわけでもなく、計算資源の利用率に大きなムラが発生しがちです。かといって大枚叩いて購入した計算機資源を有効活用するために、解析のみを“生業”にするというのもおかしな話です。これは、何も計算機に限ったことではなく、そのような実験機器は他にもあります。ライフサイエンス分野では遺伝子合成や遺伝子暗号の解読(シーケンスと呼ばれます)がそうで、以前はそれなりの高額機器を研究室ごとで購入していましたが、通常の実験室では利用率にムラのある機器であったと思います。しかし最近ではそれらを請け負う外注業者が成長し、多くの場合これらの実験は外部に委託して行われていますし、医学分野においては必須の技術になっています。簡単に言えば、産業化に成功したということです。

このような状況を鑑みて、構造生物学研究センターでは構造解析分野においてもシーケンス分野のように産業化を目指そうと考え、商用のクラウドサービスを用いた解析環境の開発を始めました。その一環として、今年の5月にタンパク質構造解析分野におけるクラウド活用に関してKEKとAWS(アマゾンウェブサービス)は覚書を締結し、より強力な協力関係を築いていくことを公表しました(5月25日プレスリリース)。生体高分子の構造解析分野は、成功率、必要なコストと時間などを考えると、まだまだシーケンス分野のようなレベルで産業化されているとは言えません。また、商用クラウドを使うわけですから開発コストはオンプレミスを使っただけの開発とは違った形で必要です。しかし、コンピューターの管理から解放される、無尽蔵とも言える計算資源を使える、利用に関するサポートも受けられるなど、産業化に向けたメリットも多くあります。我々としては少しずつでも前進して、“上がり”を目指していきたいと考えています。また、このような開発の中に新しい研究の芽(アルゴリズム開発や自動化などを含む)もありますし、新たな環境(手軽に大量の解析が可能となる環境)ができることで初めて可能になる研究もあります。それこそ次世代の研究でしょう。このような開発は単一の研究室で進めるというよりは、我々のような大学共同利用機関でこそ進めるべきことのように感じています。できれば、このような開発に興味のある研究者の方には積極的に開発に参加していただければと思います。

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。6月30日付けで一柳光平さんが退職されました。また、7月1日付けで千田美紀さんが研究員として採用され、8月1日付けで岩野薫さんが講師に昇任されました。新しい環境での活躍を祈念いたします。