

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 惠郷博文
(2024年7月16日付け)

運転状況

PFリングは4月22日よりビーム調整を始め、4月26日よりユーザー運転モードでのビーム入射を開始、6月11日からはハイブリッドモードへ切り替えてビーム入射を行った。PF-ARは5月9日より6.5 GeVビーム調整を始めて5月13日よりユーザー運転モードでのビーム入射を開始、6月5日から5 GeVに切り替えて6月21日までビーム入射を行った。PFリングへの入射運転は7月8日に終え、7月8日から7月12日はSuperKEKB入射に関連するビームスタディと機器データ取りを行った。7月12日より9月13日まで夏期保守作業を行い、9月17日より入射器の運転を開始して10月7日まで入射器機器調整、改造後の立ち上げ調整運転を行い、ビーム性能向上を行っている。SuperKEKBは蓄積リングの状態に応じてビーム調整を行いながら、4月に2024年度第1期運転に連続移行し、7月1日まで入射運転を行った。今夏、各蓄積リングへのビーム切替を行う第3スイッチヤードにSuperKEKB電子蓄積リング(HER)用ビーム診断ラインを新設する。

今期は、経年劣化が原因と考えられる、ビームの長時間停止を要したトラブルが多く発生した。以下、その内容について述べる。

4月17日KL_61(第6セクター第1クライストロンの略号、以下同様)ユニットのインバータ電源が故障した。予備品との交換で復旧、作業に約3時間を要した。インバータの運転時間が数万時間をこえると内部回路に使用している共振コンデンサが寿命に達する。入射器はパルス運転しているため、コンデンサの充放電を繰り返し、運転時間がおおむね3万時間を超えるとコンデンサの容量減少が大きくなっていく。コンデンサ分解検査では内部の絶縁シートが損傷していることがわかった。寿命を10万時間に延ばすにはコンデンサ電位傾度を下げる必要があるが、電位傾度を下げたコンデンサは寸法が大きくなるため、実装方法の検討が必要となる。

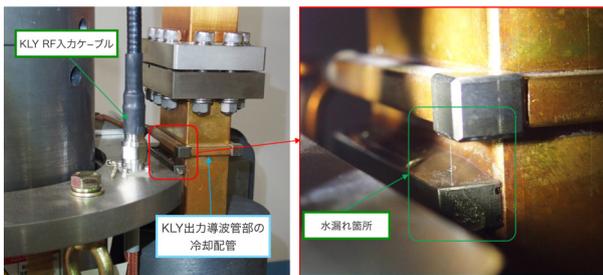


図1 KL_B2ユニットRF出力導波管部の水漏れ

4月20日頃からKL_B4ユニットにおいて1日あたりの高周波出力のパルス欠け発生回数が増加傾向となり、それまで発生頻度10回/日前後であったが、40~70回/日程度になった。原因調査したところ、クライストロンのビーム集束用コイル電源の出力電流が一部低下していることがわかった。ビームアポート要因にはなっておらず、交換と調整に時間を要するため、5月15日のメンテナンスにて集束コイル電源を交換した。

5月15日の定期メンテナンスにて、5セクター以降のクライストロンやマグネット関連用冷却塔冷却コイルのファン故障が判明した。モーター絶縁不良による漏電が原因で、この設備は1998年に設置されたもので、経年劣化のためメーカー修理ができない状態にある。現在、施設部にて代替修理案を検討中である。夏場の気温上昇によっては運転に支障が出る可能性があったが、昨年、この冷却システムの機械室プレート熱交換器を能力の大きいものに交換していたため、冷却水温度は維持された。5月23日、KL_B2ユニットのクライストロン出力導波管冷却部より配管劣化による水漏れが生じたため(図1)、シール材で補修後、動作試験で確認後に復旧した(故障発生から1週間後)。

6月1日、KL_24ユニットのクライストロン電源内にある高圧大電流スイッチのサイラトロンが不調となり、約6時間半に渡って充電系電流インターロックが41回発生した。サイラトロンのリザーバ電圧調整では運転の安定化はできなかつたため、同日夕方にサイラトロンを交換して復旧した。KL_22ユニットは2月に生じた加速管水漏れのため運転停止しており、第2セクターにおいてスタンバイユニットがなくなり、SuperKEKB入射へ支障を生じた。

6月3日、パッケージエアコン(PAC1-2)が故障し、A、B、Cセクターのクライストロンギャラリー室温が2~3℃程度上昇しており、機器動作に影響を与えた。近年、施設の空調や冷却装置に重故障が多く発生しており、入射器の健全動作への障害となっている。

6月16日、KL_B2のクライストロンRF出力が低下した。このクライストロンは5月にもRF出力低下を発生させたが、今回は、ビーム集束コイル自体に水漏れが生じて絶縁不良を起こしていた。人の手が届かない部分からの水漏れであるため、ビーム運転中に修理はできず、このクライストロンの今期使用を断念した。対応として、スタンバイ状態(RF出力運転は行うがタイミングをずらして加速運転に寄与させない状態)にしていたKL_B7ユニットとビーム加速運転を交替させた。B2ユニットクライストロンの交換修理は夏期メンテナンスで行う。このビーム加速ユニットの交換により、Bセクタ出口での電子ビームエネルギー

ーは規定値の 1.5 GeV に維持されるが、B セクタ内の電磁石群を通過するビームのエネルギーゲイン状態が変化することになる。これによりビーム収束力が変化し、エミッタンスやエネルギージッタへ影響した。ビーム調整により、迅速な回復とビーム入射運転の継続を行えるようにはしたが、上流部の動作機器変更はビームパラメータへの影響が大きいため、今後は体系的な回復調整手法を確立しておくことが重要である。

6 月 20 日、SuperKEKB-HER 入射専用の RF 電子銃にて大きな放電が発生し、約 8 時間、HER へのビーム運転が中断した。RF 電子銃は、光陰極を装着した高電界 RF 加速空洞を用いており、この光陰極交換部にあるチョーク構造部で放電が生じたと考えられる。通常はコンピュータ制御によって電子銃部の真空状態を確認しながら自動復帰するが、今回の放電では真空悪化の回復時間が長く、また、RF パワー再投入の際にも反射異常が多発したため、運転 RF 電力を下げるとともに、RF 駆動パルス幅を短くし、徐々に幅を広げながら、コンディショニングを行うことによって復旧した。

6 月 24 日から 6 月 30 日にかけて、C セクタのサブブースター（セクタ内クライストロン群の入力高周波生成部）イベントレシーバ部の不具合によるビーム中断が頻発、特に 6 月 30 日は 6 時間に及んでビーム入射不調を招いた。入射器はイベント駆動により、各リングへのトップアップ入射運転を切り替えているため、イベント信号系トラブルは広範囲へ影響する。調査の結果、イベント信号を伝送する光ファイバー用 FANOUT ボードの故障であることが判明、モジュールの交換により復旧した。

PF リングの運転状況

図1に2024年度第1期(4月22日9:00～7月8日9:00まで)のPFリングの蓄積電流値およびビーム寿命の推移を示す。立ち上げと運転調整は順調に進行し、4月26日(金)からユーザーランに入った。

5/10 15:42 RF #3のクライストロン不調のためビームダンプした。クライストロン内の真空悪化も起きており、深刻な状況と判断されること、短時間で復旧することが困難であったため、これまでのRF4台運転から3台運転に移行した。あわせて蓄積電流値を450 mA → 420 mAまで減らして運転を再開している。夏の運転停止までは3台運転を継続し、予備品との交換作業に入った。クライストロンはいわゆる真空管の一種であり、寿命がある。今回故障したものは約10万時間以上も運転できた、比較的「当たり」と呼ばれる管であったといえる。今回の更新で予備品が無くなるため、ユーザー運転を着実に維持するためにも早急に予備品の製作が必要な状況である。

5/24 PFの大型電磁石Q3電源トラブルのためビームダンプした。早期のユーザーラン再開を目指して電源筐体内部をスポットクーラーやファンにて外部から送風して冷却で対処して通電できることを確認した。その後、15:29にユーザー運転再開したものの15:31に再び過熱インターロックが発生してビーム停止した。さらに詳細な原因調査を行った結果、スイッチング用パワー半導体ユニットの空冷ファンが動いていないことが判明したため、当該ユニットの電源裏側パネルを取り外し追加で冷却措置を実施した

(図2)。その後再発はしていないが、応急措置であり本格的な対処は運転停止後に実施する。

その他、セプタム電磁石の不発による入射中断や、キッカー電磁石のOIL FLOWインターロックによる入射停止などが発生している。それぞれ監視強化や予備品との交換などで対処しているが老朽化対策が必要な状況である。

6/5 21:54にBL-21 Failによるビームダンプが発生した。同時刻に発生した地震(つくば震度2)により、ハッチの開閉状態を監視するマイクロスイッチの接点が一瞬離れたことが原因と考えられる。担当職員が来所して調査し、パネルを止めているねじを増し締めして対処し、23:33にユーザー運転を再開した。2024年夏期停止期間に再発防止のための改造作業を実施する。本件ではユーザーランの中断およびLinacの運転まで停止する事態となった。関係者にお詫びする。

6/10 これまでのマルチバンチ運転から、ハイブリッド運転への切り替え調整を実施、RF3台運転という条件でマルチバンチ370+孤立バンチ50 mAでビームの安定蓄積を達成した。これは前回のハイブリッド運転では不安定であった空洞応答が、昨年夏のデジタル低電力高周波制御(LLRF, Low-Level RF)システム更新で新規導入された空洞電圧安定化フィードバック機能によって改善したことが要因の一つだと考えている。PFの運転終了時までこの条件で連続運転した。

6/24, 6/29, 6/30にかけてビーム電流が減っている時間帯が多くある。これはLinacのタイミングシステム(Event

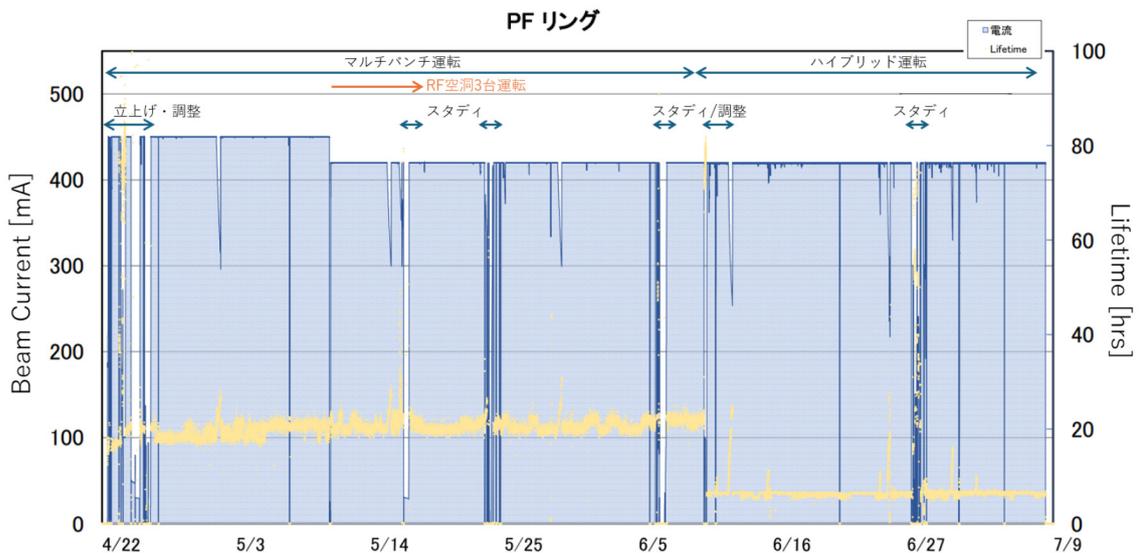


図1 PFリング4月22日9:00～7月8日9:00までの蓄積電流値の推移(グラフ横軸は4月21日～7月9日としている)。



(a) 前面



(b) 背面

図2 IGBTのファン故障のため、加熱インターロックで停止した四極電磁石電源。一時対処として、外部より強制空冷することで運転を継続した。その後、粉塵の侵入対策としてフィルターを設置するなどの対処を実施した。

Timing System)の不具合が原因で入射が中断したことに起因している。最終的には光信号を分配している fanout board の交換で改善した。そのほか、6/25 Linac ネットワークトラブルのためパルス電磁石制御用 CompactRIO システムが停止した。ビーム運転再開時に入射タイミングが12バケット分後ろにずれる事象が起きた。ハイブリッド運転時にはこのようなタイミングで入射するビームは純化システムで除去するため、ビームが蓄積できない。最終的には Linac のタイミング調整で復旧したが、通常は発生し

ない事象であるため原因追及に時間を要した。

PF-AR の運転状況

図3に、PF-ARにおける5月9日9:00～6月21日9:00までの蓄積電流値の推移を示す。立ち上げは順調に推移し、予定通りオプティクス最適化、テストビームラインのターゲット位置調整、ビーム輸送路のオプティクス測定などのスタディを実施した。ビーム電流55 mAでの調整も実施している。その後、予定通り5/13の光軸確認後にユーザ

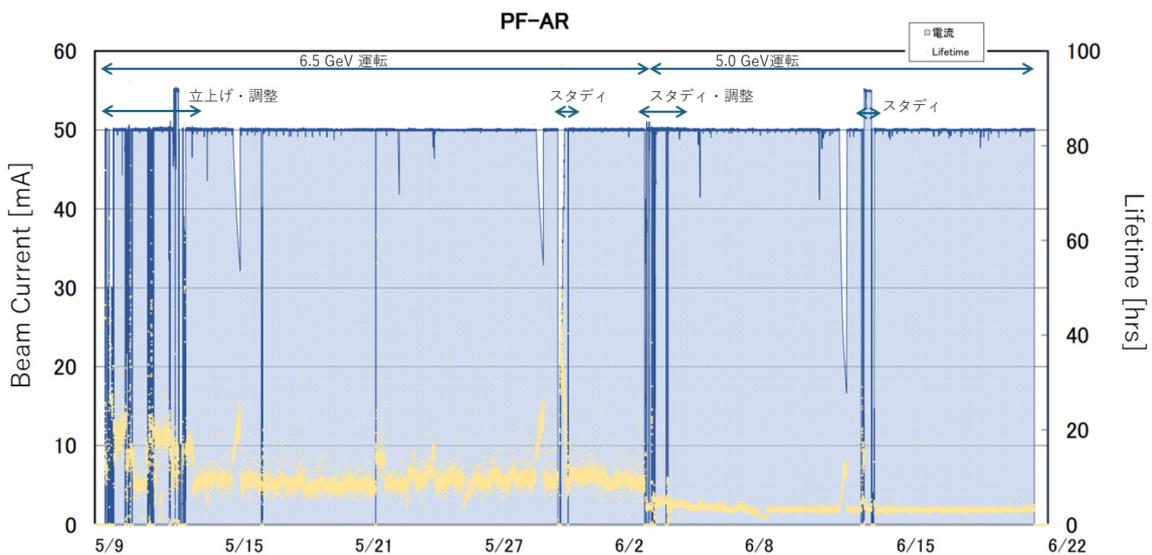


図3 PF-AR 5月9日9:00～6月21日9:00までの蓄積電流値の推移(グラフ横軸は5月8日～6月22日としている)。

ーランに入った。

5/16 ビームダンプ発生により1時間強停止した。これは、電磁石電源電流値監視用のデジタルマルチメータ（AR 西棟大型電源、AR 東棟ステアリング電源）が複数台同時期に不調であったことに対処する一連の作業をおこなっている途中で発生した事象である。モニター交換作業中のため電磁石電源の電流値をモニターできておらず正確なことは分からないが、AR 西棟にある古い電源はノイズに弱く、作業時のノイズ混入により電源が不調となりビームダンプを起こしたと推察している。

5/17 冷却水チラー（AR 東棟真空系統）の能力が不足しているとの連絡が施設部よりあった。かねてより2台のうち1台が故障で止まっている状況であること、老朽化と外気温上昇により冷却能力が低下していることなどから、現場対応として散水により負荷を緩和することで対応した。現状ではユーザー実験への直接的な影響は無いが、予備の無い状況が続いているため早急な予算措置が望まれる。6/3 からは5.0 GeV 運転となり熱負荷は軽減する状況となった。

そのほか、5.0 GeV でのバンチ純化調整ではリングの光学関数を変更してより効果的にキックできるようになった。これにより、真空封止アンジュレータのギャップの開閉に関わらず、常時バンチの純化が出来る状態となった。

6/13 マシンスタディでは蓄積電流 55 mA での調整やテストビームライン関係、入射調整等を実施している。

前号の「放射光実験施設の現状」で少し詳しく報告しましたが、開発研究多機能ビームライン (BL-11) と広波長領域軟X線ビームライン (BL-12A) の建設が進んでいます。

BL-11 については、2024年春の停止期間中に、メインハッチ内の Be 窓なし非集光白色ビームを利用できる開発研究 (R&D) 実験スペースが完成し、2024年度第1期の運転で、ビームライン R&D として、低炭素ミラーチャンバ R&D や第一ミラー光電子遮蔽 R&D を実施しました。これらの結果については別の機会に適宜報告する予定です。2024年度第2期運転後の停止期間中に硬X線ブランチの光学ハッチまで完成させ、2024年度第3期運転中に、軟X線領域集光白色ビームと硬X線領域非集光単色/白色ビームを利用できる R&D 実験スペースがそれぞれ公開になる予定です。その後も建設作業を進め、最速で2026年夏の完成を目指しています。ビームラインの R&D 利用制度についても、PF-PAC で協議を進めており、2025年春の課題公募から申請受付ができるよう準備を進めています。

BL-12A については、2024年度第1期の運転で、低エネルギー用パス (S パス; 50 - 2000 eV) のビーム調整作業を進めました。調整後のビーム性能については、PF のウェブページに掲載しています (<https://www2.kek.jp/imss/pf/apparatus/bl/bl12a.html>)。高エネルギー用パス (T パス; 1700 - 5000 eV) については、問題が見つかったコンポーネントの改修作業を進めており、2024年度第2期の運転で調整作業を進め、2024年中には S パス、T パス両方を使った利用実験が可能になる予定です。

BL-11、BL-12A とともに、いよいよ利用開始となりますので、2ビーム利用実験や広波長領域軟X線利用実験などの提案をぜひご検討ください。また、2022年度後半に開催した PF 研究会の第二弾、「放射光2ビーム利用と広波長領域実験が切り拓く学術フロンティア」を2024年11月17日(日)～18日(月)に開催することに決まりました。ご多用中かと思いますが、ユーザーの皆様にはぜひ積極的なご参加をお願いいたします。

運転・共同利用関係

2024年度第1期の運転は、予定通り、PF-AR は6月21日に、PF は7月8日に終了することができました。PF-AR では、昨秋故障した PF-AR 東実験棟のチラーの影響で、気温が上がってからの冷却能力不足が心配されましたが、KEK 施設部の協力もあり、何とか最後まで無事運転できました。このチラーについては、機構から追加予算の配分を受けて今年度中に更新することができるようになり、来年度からは安定に運転できるものと考えています。PF の方も、クライストロン故障による RF 3 台運転や、大型電磁石電源の冷却ファン故障によるビームダンプ等でご

迷惑をおかけしました。クライストロンに関しては運転停止後の予備機への交換作業がうまく進み、今秋からは RF 4 台運転に復帰の見込みです。また、これで予備機が無くなったのですが、機構からの追加配分が認められ、新しい予備機の手配も進めているところです。大型電磁石電源についても、今夏に交換が予定されており、今秋からは通常通りの運転が可能になる予定です。また、PF 研究棟の計算機サーバー室の空調も故障し、一時的に一部のサーバー機能を停止した他、排熱対策のために通路の交通障害や騒音等でご迷惑をおかけしました。こちらも夏の停止期間中に更新作業を実施し、今秋からは定常状態に戻る予定です。第2期の運転については、PF は10月7日に、PF-AR は10月17日に運転を開始する計画となりました。PF-AR は12月16日まで、PF は12月27日まで運転を継続します。PF のハイブリッドモードは11月29日から最後まで予定です。PF-AR は、5 GeV で運転を開始して、11月20日以降を 6.5 GeV で運転します。第3期の運転スケジュールについては、11月のなるべく早い時期に決定したいと考えています。

PF-PAC の全体会議が7月12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、2024年度後期 PF 研究会、マルチプローブ共同利用実験課題に関する申し合わせの改正に関する審議、開発研究多機能ビームラインの運用制度や審査基準改定への対応状況、課題申請書の改訂、レフェリーから PAC 委員長へのコメントに関する協議等が行われました。詳細については、本誌記事をご参照ください。

関連イベント

9月28日(土)に、フォトンファクトリー同窓会が主催する、第3回 PF 同窓会講演会がハイブリッド (KEK 小林ホール) で予定されています。PF の OB/OG が旧交を温めるだけでなく、現役も交えて相互にコミュニケーションをとる場として PF 見学会や講演、懇親会が企画されていますので、ぜひ積極的にご参加いただけたらと思います。10月4日(金)には、PF-UA が主催する、第2回 PF-UA サマースクール「放射光の特長を活かした分析手法」がオンラインで開催されます。放射光の基礎だけでなく、2ビーム同時利用を含む PF の将来計画についても学べる企画ということで、特に次世代を担う若手の皆さんにぜひ参加いただけたらと思います。

はじめに

今回は放射光科学第二研究系の担当です。今回は、構造生物分野における AI 利用に関する話題を取り上げます。Alpha Fold (AF) が発表されて以来、大きな変化が起きている構造生物分野ですが、最近是一般でも様々な AI ツールが利用できるようになってきているので、これらに関する話です。

AI と構造生物学

構造生物学の分野では X 線結晶構造解析が長らく中心的な位置を締めていましたが、10 年ほど前にクライオ電子顕微鏡 (クライオ電顕) が登場し、その適用範囲が大きく広がるとともに分野にも大きな変化が現れました。ところが、2020 年に DeepMind 社が開発した Alpha Fold2 (AF2) が登場し、さらに大きな変化が起きています。新聞やネットなどでもしばしば報道されているので、分野外の方でもご存知の方はいらっしゃると思いますが、簡単に説明すると、AF2 (現在は、Alpha Fold3 が出ています) はタンパク質の立体構造をアミノ酸配列だけから高精度に予測することが可能な三次元構造予測アルゴリズムです。高精度の立体構造予測が可能なることから、登場当時は構造解析の分野に大きな衝撃が走ったわけです。もちろん、予測構造は予測構造ですから実験的に決定された構造とはその意味合いは違ふとは言ふものの、構造を利用するという立場からすれば、予測構造で十分な場合も多くあるわけです。もちろん、構造予測の精度が上がったから実験的な構造決定が不要かという、そういう訳でもありませんし、かといって予測構造は予測構造でしかないなどと軽視するのも適切ではないでしょう。

現在では、AF2 を利用することが構造解析分野でも一般的になりつつあります。特に結晶構造解析における分子置換法では、AF2 の予測構造を用いて実験的な 3 次元構造の決定を迅速化するような手法も一般的になっています (このことから、その精度の高さが窺い知れると思います)。またクライオ電顕の単粒子解析におけるモデリングでも AF2 のモデルは積極的に使われています。更に AF3 においては、複合体の予測も可能になったということで、ますます AI の果たす役割が大きくなってきています。もちろん、これらの優れた結果は AI の進歩や優れた手法を適用していることに依存しているわけですが、タンパク質データバンク (PDB) の蓄積なくしては達成できなかったのも事実です。このことから、構造解析に関わる我々は、自分たちのデータがどのように利用されるかを以前にもまして真面目に認識する必要があります。PDB に登録される構造データは、AF だけでなく多くの AI ツールにおいて教師データとして使用されているわけですから、正確で信頼

性の高いデータを提供することが求められます。質の高いデータを提供することで AI の予測精度も向上し、さらなる科学的発見が期待できるはずです。構造生物学研究センターでも AI を積極的に利用して高効率かつ高信頼性の解析システムを構築したいと思っています。

さて、AF2 の登場は構造生物学における重要なマイルストーンではありますが、他の AI 技術も次々と現れ、研究現場に大きな影響を与えています。例えば、生成 AI や大規模言語モデルの顕著な進歩により、我々のデータ解析や研究結果のまとめをサポートすることが可能になりつつあります。これらを利用することで、研究論文の自動要約やデータの可視化、複雑なデータセットの解析も可能となり、研究効率を大幅に向上させることもできるでしょう。かく言う私も、とある AI サービスが過去の構造解析プロジェクトのノート (Word 文書にして 200 ページ程度のもの) を見事に時系列でまとめてくれることを見出し、衝撃を受けると共に非常に大きな変化を感じています。現在、オープンサイエンスが一つの掛け声になっているわけですが、これが AI と結びつくことによって新しい形の共同研究の形が生まれることになるでしょう。単に結果を蓄積するだけでなく、それらに付随するメタデータの重要性も大きくなっています。その結果、研究者の仕事効率化、高精度化するのみならず、我々の実験の記録の方法も、単なる個人の記録からある程度の一般性を持った記録へ変えていく必要があることを示していると思います。

このように急速に進歩した AI ですが、その利用に関して研究者がどのように AI と向き合えばよいのかも大切で、既に議論は始まっています。数年前、筆者が出席したライフサイエンスの国際誌の Editor 会議でも、研究論文作成に AI を利用することに関して議論がなされました。しかし、現在では一般人が利用できる AI の性能ですら当時の予想をはるかに超えていますし、利用範囲やアクセスが大幅に改善されており、考えるべきことが既に数年前とは大きく異なっています。議論のスピードが技術進歩に追いついていない状況かと思えます。特に、ライフサイエンス分野では、膨大なデータが日々生成されており、これを効率的かつ統合的に解析するためには AI の利用が不可欠で、もはや特別な技術ではなくなっています。今後も新しい技術が大変な勢いで現れてくることが予想されます。

このように、AI の利用が急速に広まっていますが、AI 時代における若手の教育を含め考えないといけないことが山積みです。今後、ユーザーの皆様との意見交換もしながら、適切な利用環境を整えていきたいと考えています。今回は AI に関して色々雑駁なことを書きましたが、サイエンスを進めるに当たってお互いが顔を合わせて議論することの重要性も非常に強く感じていますので、なるべく直

接の意見交換を積極的に行っていきたいと考えています。

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。第一研究系では，6月7日付けで DEY Sourav Kumar さんが退職され，7月1日付けで特任准教授の阪田薫穂さんが准教授に採用されました。第二研究系では，5月31日付けで FAN Donxiao さんが退職され，7月16日付けでパデュー大学より中村司さんが SBRC に研究員として採用されました。新しい環境での活躍を祈念いたします。