

## 入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 惠郷博文  
(2026 年 7 月 7 日付け)

## 運転状況

SuperKEKB メインリングへのビーム入射は、年度を跨いで 1 月から 6 月末まで連続で行われたため、入射器も同様の連続運転となった。PF リングには 4 月 20 日より入射調整を開始、5 月 1 日よりユーザー運転モードに移行した。6 月 5 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なった。PF-AR は 5 月 11 日より 6.5 GeV ビーム入射を始めて、5 月 14 日からユーザー運転モードに移行、6 月 2 日に 5 GeV に切り替えて 6 月 19 日までビーム入射を行った。PF リングへの入射運転は 6 月 29 日に終了し、翌 6 月 30 日に SuperKEKB メインリングへのビーム入射も終えた。その後、入射器単独運転によるビームスタディと大電力高周波機器の定期データ収集を行って 7 月 6 日に 2026 年度第 1 期の全運転を終了した。7 月 6 日より 9 月 13 日まで夏期メンテナンスを実施する。毎年行っている定期保守作業に加え、停電（後述）によって動作不安定となっている熱電子銃の回復、RF 電子銃の更新（交換する RF 電子銃は事前にテストスタンドにて RF コンディショニング済み）、老朽化した電磁石用電源の更新、第 3 スイッチヤードの ECS 用コリメータ据付、ECS 電磁石用新大型電源の設置などの入射器性能向上作業も行う。特に、昨年度から今年度にかけて、経年劣化による水漏れや放電頻度の高い加速管 12 本を高電界型加速管へ交換し、ビーム加速の安定化を図る。

次に 2026 年度第 1 期の入射器運転状況について述べる。大電力高周波出力を行っているクライストロンダウン頻度は週 100 回未満で推移した。これまでの入射器運転の履歴と比較して、このダウン頻度は低いレベルであり、前期の 2 月後半以降、入射器運転が安定に行われたと言えるであろう。以下、ビーム運転に大きく影響を与えたトラブルについて報告する。

3 月 18 日のメンテナンス時に水漏れが確認された KL\_45 RF ユニットの第一加速管は、ビーム入射中断時に 2 度のリキッドシールによる応急補修を行い、4 月 15 日のメンテナンス時に通水して補修に問題ないことを確認して運転に復帰した。しかしながら、この時、KL\_47 RF ユニットの第一加速管で新たに水漏れが生じていることが判明し、このユニットの加速管冷却水の水抜きと乾燥作業を行なった。そのため、入射器後半の 3～5 セクターにおいてスタンバイユニット（トラブル時に対応する運転待機ユニット）が無い状態となり、他のトラブルが発生した場合に SuperKEKB 陽電子リングへのビーム入射が不全となる懸念があったため、4 月 28 日にビーム運転を中断して KL\_47 ユニットのの水漏れ加速管の補修作業を行なった。5

月 20 日のメンテナンス時に通水を行い、水漏れが回復していることを確認して運転に復帰させた。KL\_44 RF ユニットではクライストロンへの高周波反射異常が多かったことで、異常を検出している導波管方向性結号器を確認したところ、同軸終端部のダミーロードコネクタが破損していた。PF リングへのビーム入射に使用している加速ユニットであるため、水漏れから復帰させた KL\_47 RF ユニットと運転入れ替えを行なってビーム運転を再開した。破損コネクタの修理部品をメーカーに手配し、6 月 17 日のメンテナンス作業にて、このユニットも復旧した。

KL\_62 RF ユニットで、加速管付近の真空悪化のトラブルが 5 月 21 日より頻発した。真空ゲージの故障に加え、イオンポンプの希ガス不安定性が原因と考えられる。真空ゲージ故障はインターロック検出器の調整で処置し、希ガス不安定性については夏期メンテナンスで対応する予定である。直流電磁石やクライストロン集束電磁石などの電源周りの故障も多く発生した。ほとんどが経年劣化によるもので、予備との交換により復旧させた。

今期の最大のトラブルは、6 月 19 日午前 1 時 19 分頃に発生したつくば地区全域の大停電である。入射器内の全機器運転がオフされ、全照明も消灯した（数秒後に復電）。復電後に真空機器の状態と可能な範囲で停止機器の確認と復旧を行ったが、クライストロン周り的高圧機器に異常が多発していたため、入射器の本格的運転復旧作業は日中に行なった。クライストロン用小型励振器、高周波信号モニタ、電磁石電源など多くの機器で故障が生じていたため、早急に回復ができないことが危惧されたが、入射器スタッフの迅速かつ的確な復旧作業により、12 時間後に運転再立ち上げに漕ぎ着けた。その後、ビーム調整を行い、停電から約 17 時間後に PF リングへの入射再開となった。この停電の影響で熱電子銃の出力電荷量が不安定な状態が続いたが、随時調整により 6 月 29 日の PF 運転停止日までビーム入射を継続することができた。

2026 年度第 2 期は 9 月 14 日より入射器運転を開始する予定である。10 月 6 日まで新加速管の RF コンディショニング、および、保守や改造を施した機器の動作確認を行った後、ビーム調整運転を実施する。10 月 5 日より PF リングへ、10 月 26 日より PF-AR にビーム入射を再開し、12 月 24 日まで運転する予定である。SuperKEKB メインリングは 9 月以降も機器メンテナンスを行うため、第 2 期のビーム入射運転は実施しない。ただ、時期はまだ未定であるが、陽電子ダンピングリングと SuperKEKB ビーム伝送ラインを使った 3 週間のビームスタディを実施する予定となっている。

## 2026 年度第 1 期運転の概要

第 1 期（4 月～6 月）の PF リングの運転では、3 月から実施してきた入射部のセプタム真空ダクト改造が所期の成果を示し、入射性能の向上と放射線レベルの大幅な低下を実現した。また、PF では低エミッタンス化に向けたマシンスタディを進め、放射光強度の増加を確認した。一方、期末には PF の電源系インターロック、PF-AR では真空ベローズの損傷に起因するトラブルが発生し、それぞれ応急対策を講じながら運転を継続した。6 月 19 日 1:30 に落雷に起因して約 4 秒間にわたる停電が発生した。PF-AR は同日 9:00 に運転停止予定であったため、そのままユーザー運転終了の判断となった。

## PF リング運転状況

図 1 に PF リング第 1 期の運転状況（ビーム電流およびビーム寿命）のグラフを示す。

春季停止期間中にセプタム真空ダクト改造を実施した。図 2 に改造作業の写真を示す。上側に配置された、絶縁用のカプトンテープが巻かれた真空パイプが入射ビームダクトであり、下側に位置する部分が蓄積ビームダクトである。図 2(b) は更新前の構造を示した図面であり、今回の更新では図中のエアギャップを廃止し、アルミニウム薄膜（30  $\mu\text{m}$ ）により接続する構成とした。これにより、従来の SUS 製構造に比べて、2.5 GeV の入射ビームに対するエネルギー広がり低減が見込まれることをシミュレーションにより確認しており、入射効率の向上および蓄積リン

グでのビーム損失低減の効果が期待される。なお、現状ではビーム輸送ラインと蓄積リング側の真空度差が大きいため、薄膜を介した接続構成としているが、将来の改造では、さらに上流のセプタム 1（図 2(b) の S1）において真空容器内のフェライト磁石を真空外に設置することで、完全な超高真空接続を実現する計画である。まずは今回の S2 更新により効果を確認し、その後 S1 についても老朽化対応を兼ねて順次整備を進める。

改造後の立ち上げ調整を 4 月 20 日から開始し、極めて順調に推移した。シミュレーションによる予測通り、入射ビームのエネルギー広がり抑制され、従来損失の大きかった BL-2 およびその下流ダクトでの損失は、ほぼ観測できないレベルまで改善している。入射ビーム繰り返し 5 Hz 時の入射率は、従来の 0.2 ～ 0.5 mA/s から 1.0 ～ 2.0 mA/s へと大幅に向上している（図 3）。これにより、0 mA から 450 mA までの蓄積時間は、改造前の 15 分程度から 5 ～ 7 分程度と大幅に短縮された。

今回の改造による性能向上について、Linac からの供給電荷量（最大で 0.3 nC/pulse）に基づく、5 Hz 連続入射かつ入射効率 100% の場合の理論的な入射率は 2.4 mA/s となる。現状、Linac と PF との間では RF 周波数の同期関係が無く、入射タイミングの固定が不可能であるため入射率にある程度のばらつきが生じることは不可避な制約条件となっている。今後は、さらなる入射部の物理的改造を検討するとともにキッカー・セプタム電磁石の高性能化を検討する。あわせて Linac 側のタイミング系改良まで視野に入

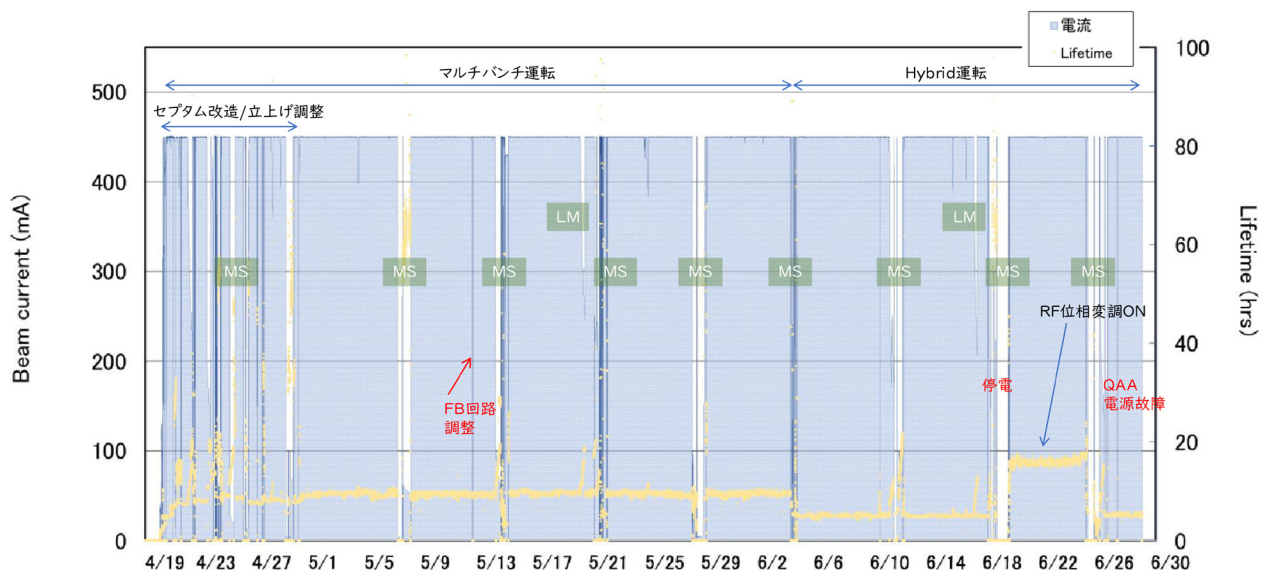
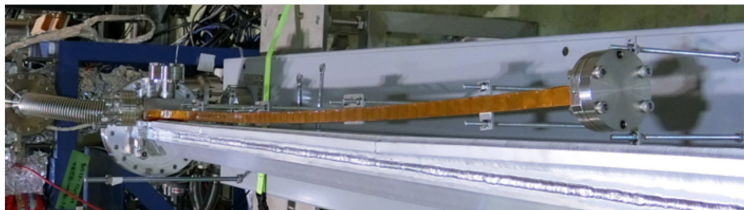
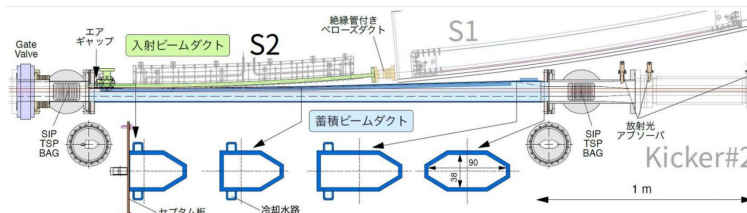


図 1 PF リングのビーム電流とビーム寿命の履歴

(a)



(b)



(c)

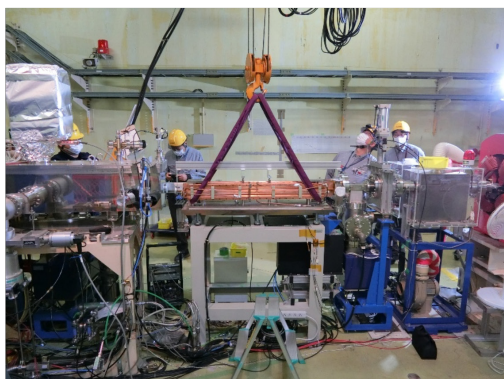


図2 (a) 新規製作した S2 ダクト。(b) 更新前の, BT 側にエアギャップがある状況での機器配置図。新ダクトではエアギャップを廃してアルミニウム薄膜での接続となる。(c) 旧 S2 ダクトの撤去作業の様子。

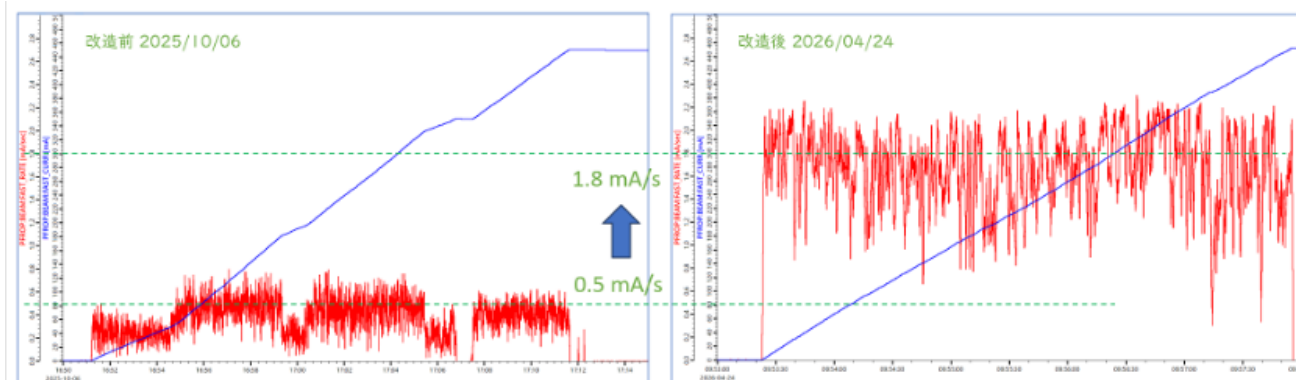


図3 入射ビーム繰り返し 5 Hz での連続入射時に測定した入射率の変化。左図が改造前、右図が改造後の典型的な例である。タイミング系のジッターもあり、入射率にはばらつきがあるものの、典型的には 0.5 mA/s から 3 ～ 4 倍となる 1.8 ～ 2.0 mA/s 近い値を達成できた。

れた最適化を進めていく予定である。

図 4(a) に示す通り、立ち上げ当初は 20 mA の低電流域でも真空圧の上昇が認められたが、真空状態を注視しつつ電流を上げていき、並行して入射・ビーム不安定性・フィルパターン等の各種調整を実施した。その結果、初日の 15:26 には 450 mA の蓄積に成功した。光焼き出しは急速に進行し、4 月 23 日時点では 450 mA 蓄積下においても超高真空が維持可能な状態に達した (図 4(b))。

図 4(c) の指標が示す通り、積分電流の蓄積に伴い、ビーム寿命が平均真空に依存しない領域 (残留ガス散乱以外

の要因が支配的な領域) まで順調に回復している。

今期の立ち上げ期間には、入射調整の他にもビーム不安定抑制に関するマシンスタディや光モニター機器の制御ソフトウェア更新、ビーム位置モニタ (BPM) ソフトウェア更新、挿入光源制御ソフトウェア更新、実ビームによる蓄積リングの応答測定など、多くのマシンスタディを実施した。

高輝度化スタディとして、リングのエミッタンスを 36 nm.rad から 19 nm.rad へ低減するスタディを 4 月 27 日および 28 日に実施した。2025 年度第 3 期に電源トラブルで

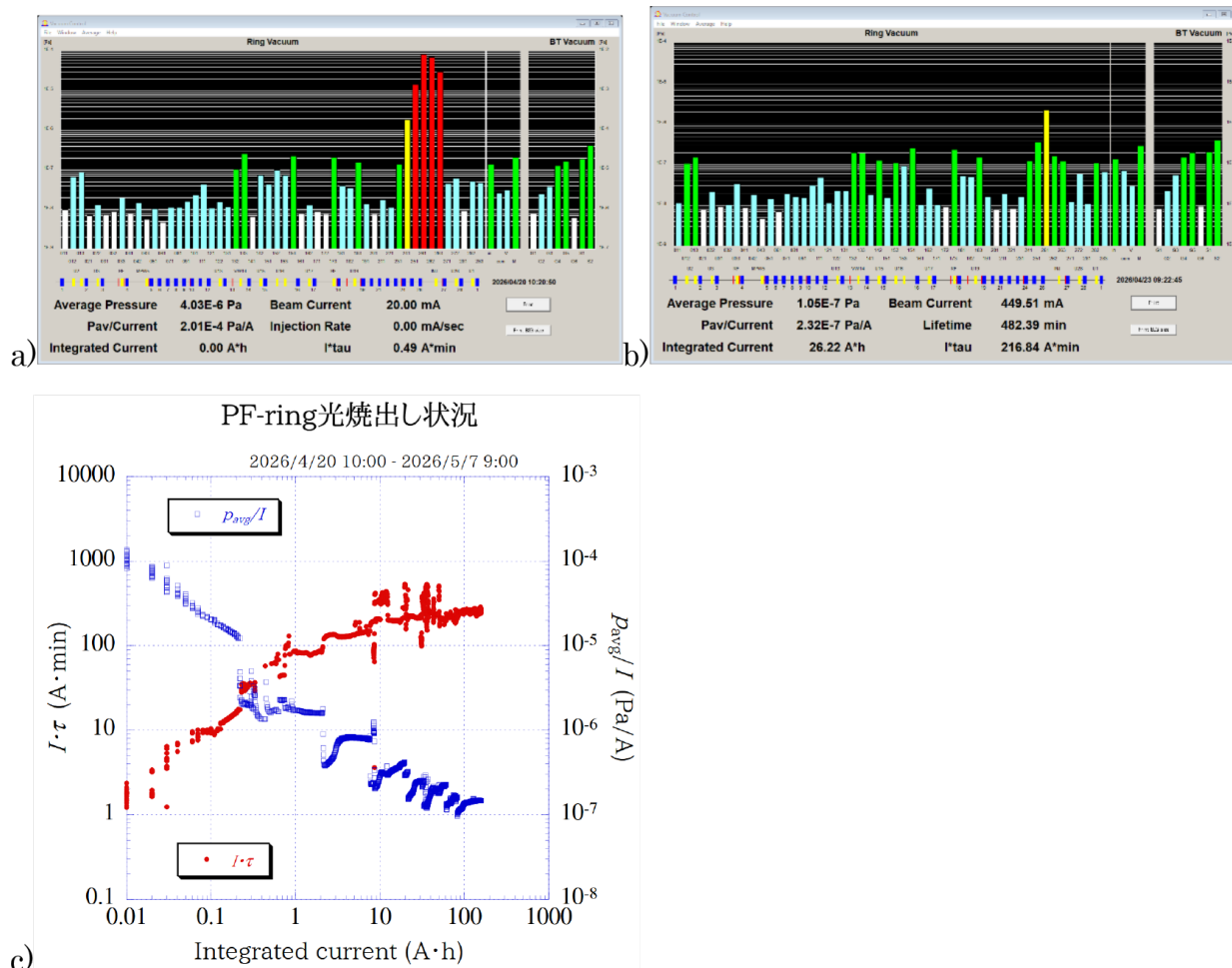


図4 a) 4月20日の入射開始直後にビーム電流20 mA到達した時点での真空分布。b) 4月23日に450 mA蓄積したときの真空分布。c) 光焼き出しの状況を示す指標として、横軸に積分電流値、縦軸に平均真空を電流値で規格化した値と、ビーム寿命と電流との積をプロットしたもの。期間は運転開始から5月7日まで。

延期していた内容であるが、放射光ユーザー側での測定を含め無事に終了した。BL-19では強度が1.7倍に増加していることが確認されたほか、BL-17やBL-1でも強度増加が確認できた。一方で特に強度が変わらないビームラインもあった。原因含めて今後の課題であるが、スタディ時にはまだ入射調整が十分ではなく、入射に同期した蓄積ビーム振動の影響が残っていたことは懸念点である。今後、調整時間をとって改善可能と考えている。

今期はマシンスタディを毎週実施している。5月28日にはモーメントムアクセプタンス測定を実施した。モーメントムアクセプタンスは±1%程度(RF電圧1.4 MV相当)と評価された。Hybridバンチ(HB)運転の試行スタディを複数回実施した。「10バンチ×8トレイン+1バンチ、420+30 mA」のパターンが候補として絞り込まれ、6月4日よりHB運転を開始した。現状、進行方向のビーム不安定を抑制するためにシングルバンチのカレントを下げる必要があることも確認した。

6月19日1:30に落雷に起因して約4秒間にわたる停電が発生した。幸いにも、今回の停電による直接的な機器故障は認められなかった。Linacの立ち上げ調整ののち、夕

方19:00以降にPFリングへの入射が再開された。入射位相をはじめとする各種調整によって定格のビーム電流450 mAまで蓄積することは出来たが、ビーム不安定が抑制できない状態であったため23:00頃にRF位相変調をONにした状態でユーザー運転を再開した。その後6月25日のマシンスタディ時にビーム調整時間を確保してフィードバックのパラメータ調整を実施したところ不安定が抑制できる運転パターンを確立することが出来た。図1のグラフでビーム寿命が伸びている部分である。ユーザーからの情報によるとRF位相変調に起因してビームラインによっては強度低下として影響が出ていることが報告されている。

6月26日夕方、ユーザー運転終了後のシャットダウン作業中にQAA電源が漏水検知インターロックの発報によりダウンし、ビームダンプに至った。拭き掃除やドライヤーによる乾燥、信号線中継箇所の点検等の対処を行ったが再発が続いた。6月27日の再発時に、検知帯固縛部の状態から接触不良の疑いがある箇所を特定し、応急措置を実施して以降は再発していない。原因はセンサー信号側ハーネスの接触不良によるものと考えられ、メーカーによる抜本対策を夏期中に完了させる予定である。

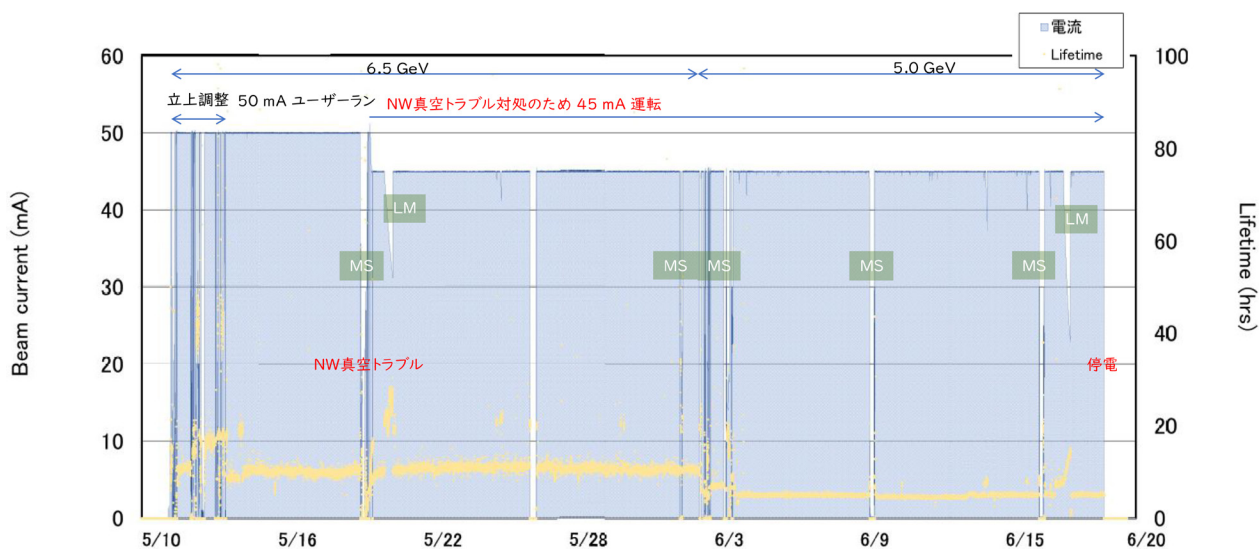


図5 PF-AR リングのビーム電流とビーム寿命の履歴

#### PF-AR 運転状況

図5に第1期のビーム電流および寿命の履歴を示す。

5月20日のマシンスタディの実施中に、NW9 偏向電磁石下流のペローズダクトのRFコンタクト（フィンガー）に損傷が生じた。これは垂直ビーム軌道を大きく変更した際に放射光がダクトに当たったことが原因と考えている。損傷箇所を中心にイオンポンプがインターロックでOFFとなり真空悪化を招き、当該箇所の温度センサーが120℃以上を示した。緊急措置として工業扇2台による強制空冷を開始し、蓄積電流値を50 mA から45 mA へ低減することで温度を85℃程度に抑制した。（図6）

6月19日の停電では、PF-AR もビームダンプした。PFリングと同様に現場の巡視点検をおこなって深刻なトラブルが無いことを確認した。運転スケジュールでは同日の朝9:00に停止する予定であったこと、停電はLinacはじめ機構全体に及んでいたことから早期に入射再開することは非常に困難であると判断してこの時点でユーザー運転終了を宣言した。その後の日中に、機器へのダメージ確認のため順次電磁石電源およびRF関係の機器を立ち上げて通電試験を実施し、RF・リング電磁石電源・BT電磁石電源ともに異常のないことを確認している。



図6 NW9 ダクトの強制空冷



放射光実験施設長 五十嵐教之  
(2026年8月20日付)

開発研究多機能（R&D）ビームライン BL-11

開発研究多機能（R&D）ビームライン BL-11 は、2025 年秋より共同利用を開始し、いよいよ 2 ビーム同時利用研究への挑戦が始まりました。このたび、ビームラインの概要や最初の 2 ビーム同時利用の実証実験についてまとめた論文が Review of Scientific Instruments 誌に受理（アクセプト）され、プレスリリースを実施しました。現在、PF-S 課題に加えて 4 件の RD 課題が採択されており、今後さらに 2 ビーム同時利用研究が活発化することを大いに期待しています。ユーザーの皆さまも、ぜひ 2 ビーム同時利用研究の提案をご検討ください。

また、この夏のシャットダウン中に、残るもう一つの軟X線フリーポートブランチの建設を進めています（図1）。2026年度第1期の運転終了直後から測量等を開始し、コンポーネントや光学素子等の設置を進め、8月3日の週に設置作業を完了しました（図2、3）。今後は、配線・配管作業、真空ベーキング作業、各種検査などを実施し、10月上旬からビームコミッショニングを開始する予定です。完成後は、M3BとM3B'をステージで切り替えることで、2ビーム同時利用実験用のパスと、大面積平行ビームが利用できるブランチへのビームパスを切り替えられるようになります。2ビーム同時利用研究はもちろんのこと、こちらのブランチ利用にご興味のある方も、ぜひ担当者までご連絡ください。

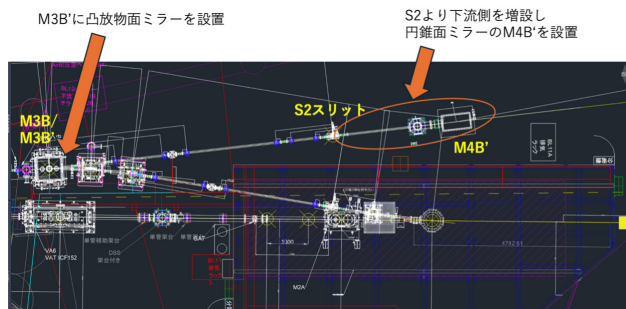


図1 BL-11B 軟X線ブランチの平面図と建設作業内容



図2 BL-11B の M4B' ミラーの設置作業の様子

## 運轉・共同利用関係

2026 年度第 1 期の運転は予定通り、PF-AR は 6 月 19 日、PF は 6 月 29 日に無事終了しました。第 2 期の運転につきましては、PF が 10 月 5 日、PF-AR が 10 月 26 日に運転を開始し、ユーザー利用は PF が 10 月 9 日、PF-AR が 10 月 30 日にスタート、両施設ともに 12 月 24 日に終了する予定です。なお、PF のハイブリッドモードは 11 月 28 日から期末までを予定しています。また PF-AR は、5 GeV で運転を開始し、11 月 27 日以降は 6.5 GeV で運転する予定です。第 3 期の運転につきましては、今年度、機構の特別要求が認められたため実施予定となっており、10 月頃にスケジュールをお知らせできる見込みです。

PF、PF-AR ともに概ね安定して運転できておりますが、懸念点として PF-AR 南実験棟チラーの故障が判明しました。短期的にはバイパス運転等で対応いたしますが、早急な更新が必要なため、来夏の更新に向けて機構へ特別要求を申請しています。

7月31日には、PF-PAC 全体会議がリモート形式で開催されました。課題の評点や採否の審議に加え、今年度から運用開始された「量子ビーム研究奨励旅費」の審査が行われました。また船守所長より、KEK ビジョンやMB-LINQ計画、AI for Scienceに関する取り組みについての報告がありました。その他にも、運転スケジュール、BL-11の整備状況、SPRING-8 ブラックアウト対応、データポリシー策定の必要性などに関する放射光実験施設報告のほか、P型課題の審査状況、PF 課題の実施状況、課題申請書改訂に関するアンケート結果などが報告されました。詳細につきましては、本誌記事をご参照ください。

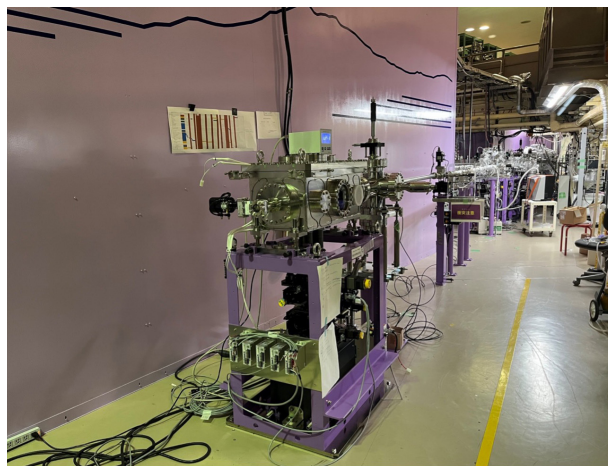


図3 完成したBL-11B軟X線ブランチ

### AI の利用の現在

今回は二系の担当です。これまでも何回か AI について書きましたが、今回も AI です。

#### 1. ロボット科学者 Adam

このところ、国の科学に対する方針には自動化、Big Data、AI という文言が溢れています。当然の流れといえどもそれまでですが、大きな可能性を秘めていることも事実だと思います。このような流れが現実味を帯び始めたのはいつでしょうか？個人的な話をすれば、2009 年の Science 誌に掲載された Adam という自動実験ロボットの論文に (DOI: 10.1126/science.1165620)、衝撃を受けるとともに、大きな可能性を感じました。このシステムは、単にピペット操作を自動で行うだけではありません。酵母の代謝経路に関するゲノム情報から、自らの遺伝子がどの酵素反応に関与しているかという仮説を立て、仮説検証のための実験計画を練り、実際にロボットアームで実験を行い、仮説の正しさを確認して新たな知見を発見するという、まさに自律的なロボット科学者の先駆けとも言える内容でした。しかし、当時の AI は未熟な部分が多く、自動化の際にしばしば必要になる画像認識も汎用化は難しく、手軽にラボで使おうという気にはならないものであったのも事実です。

#### 2. AI が科学の世界にもたらした衝撃

AI の飛躍的な進化を最初に実感したのは、画像認識の質が飛躍的に向上した時期だったと思います。2012 年に Google が YouTube の膨大な動画データから自律的に「猫」の概念を獲得したというニュースは驚きでした。この性能であれば実験操作における画像認識の自動化ができそうだと感じられるものでした。以来、AI はさらに進歩しました。ChatGPT に代表される、LLM (大規模言語モデル) を活用した AI 技術は、Transformer というアーキテクチャを中心として、より複合的で高度な文脈理解を可能にしました。パターンの識別から、言語を通じた推論や生成へと飛躍を遂げたことで、あっという間に研究活動どころか日常生活のあらゆる場面に AI が入り込むことになりました。更に、Gemini、Claude など登場し、これらのサービスを使わない日はないという状況です。当初はハルシネーションの問題に悩まされることも多かったのですが、最近はそれも相当頻度が減ってきているように思います。

この劇的な進化は、私の専門である構造生物学の分野にも大きな影響をもたらしました。その代表格が AlphaFold です (AlphaFold に関しては、PF NEWS Vol. 42 No. 2, 2024 を参照)。現在では、その流れはさらに加速し、LLM の仕組みをそのままタンパク質に応用したタンパク質言語モデル (Protein Language Model: PLM) の開発が進んでおり、

立体構造の予測だけでなく、機能の予測やタンパク質をゼロから設計するといった、より汎用的な基盤技術の確立が目指されています。さらに、AI を用いたツールの開発も大変な勢いで進んでおり、「このようなシステムがあればいいなあ」と思ったら、数ヵ月後にはどこからか欲しかった機能を持つ洗練されたサービスがリリースされるというような状況です。もはや、ユーザー側では自分で作るよりも口を開けて待っているという姿勢が、結果的にもっとも効率がよくなっており、大きな AI の波についていくのが精一杯という状況です。我が国でも、AI for Science という掛け声で色々な整備が急ピッチで進んでいますが、1 ユーザーとしての参戦ではどうにもならず、まさに分野を超えた共同作業が必要になってきたと言えます。

#### 3. SBRC における AI 活用

とはいえ、我々も何もせずにボーっとしているわけにもいきません。構造生物学研究センター (SBRC) においては、画像認識が飛躍的進歩をした頃から自動結晶化スクリーニングロボットに画像認識を組み込むという動きが始まっていますし、AI を使ったユーザーや初心者向けの対話型マニュアルシステムを作るというプロジェクトも進めています。教科書に記載されている基礎的な原理や一般的な知識に関しては、すでに AI は我々専門家より詳しく、かつ正確に答えてくれます。その中で我々がやっているのは、日々の実験の中で蓄積されたコツなどを言語化し、データ化することです。例えば、実験における細かいコツなど、一般の教科書には書かれないような事柄に関して、学生や若手研究者の質問に的確に答えられるようなシステムを作ろうとしています。いずれにしても記録がないことには何も始まりませんので、記録を残すことの重要性が以前に増して大切になってきています (大学共同利用機関でも岡崎を中心に、iLIS (Integrated smart cloud Laboratory for Innovative Science) という大規模集積のための事業が始まりました)。SBRC では、各研究員のノートを現在進行形のものだけではなく、過去にも遡ってデジタル化を進める体制を数年かけて確立しました。さらに、記録の範囲は実験ノートのみならず実験操作を記録したビデオや、研究打合せにも広がっています。始めた当初は、とりあえず記録のデジタル化ということでしたが、現在の AI の進歩を考えれば、(1) 手書きのノートのデジタル化、(2) 実験のコンテキストを考えた難読箇所の推定、(3) 記載を教師データとするための (ある程度の) 処理、などは可能になってきていると思います。これを更に突き詰めると、PF でユーザーが収集したデータに関しても (匿名化は条件だと思いますが)、なんらかの情報を獲得してシステムの向上に役立てるということも視野に入ってきていると思います。

#### 4. AI 時代の審査と、人間の「判断基準」

このような AI の研究での利用が進む一方で、強力な AI ツールをどのように利用すべきかに関して、科学コミュニティでの議論が必要です。例えば、論文や研究費の審査においては、AI を使用することは一般的には禁止されています。しかし、著者（申請者）側では図表の作成や文章の推敲などに AI が広く使われています。そのような現状において、審査に AI を使ってはいけないというルールを維持するのは難しくなることは必至かと思います。最終的な意思決定の際に AI の意見を聞くかは別にして（私は、最終的なジャッジの責任は人が持つものだと思っています）、少なくとも NotebookLM のようなツールや Retrieval-Augmented Generation（RAG）を使うことにはメリットがあると思います。もちろん、未発表のデータをクラウド上の AI に入力することは情報漏洩のリスクがあるのはその通りですが、ローカル環境で動く LLM の進化も凄まじいので、環境が変わるにしたがってルールの変更も必要になってくるでしょう（ただし、先日のニュースにあったように、AI が勝手に脱走したりすると話は変わってきますが・・・）。

どれほど AI が進化し、完璧な要約や問題点の指摘を行ってくれるようになって、**「最終判断は人間（ヒト）が下す」**というのが原則です。しかし、現在の急激な AI の進歩はその原則さえも脅かしかねないものにも思えます。最近では、米国で AI の最新モデルの輸出に関する問題も起きています。我々研究者も、AI の利用だけでなく、社会的な観点も併せて考える必要があります。

#### 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、PEREIRA Junior, Jair さんが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。