

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 惠郷博文
(2024年4月14日付け)

運転状況

入射器は2023年12月28日に2023年度第2期の運転を終了し、2024年1月14日まで冬期メンテナンスを行なった。1月15日に第3期入射器立ち上げを行い、運転再開される SuperKEKB メインリングを含めた4リング同時トップアップ入射に必要な50 Hz 運転に切り替えた。50 Hz 運転でのサイクロtron レンズ (クライストロン電源内大電流スイッチの調整)、高周波パルス圧縮器の運転周波数・パルス幅調整を行なって大電力高周波出力の最適化をした後、1月28日までビーム加速とエミッタンスの調整を行なった。1月29日より SuperKEKB へ、PF リングは2月5日よりビーム入射を開始した。3月5日からは PF リングの運転がハイブリッドモードに変更され、入射条件を切り替えた。PF-AR は2月13日より5 GeV にてビーム入射を開始、2月28日より6.5 GeV 入射に切り替えて運転を行った。3月18日に PF-AR、3月25日に PF リングへのビーム入射運転を終了、SuperKEKB はビーム入射を継続して、2024年度第1期運転に移行している。PF リングは4月22日、PF-AR は5月9日よりビーム入射を再開する。インターロックダウンによる運転停止頻度はリングへの入射を始めた2月初旬、約300回/週あったが、その後、加速管運転電圧の調整やコンディショニング効果で高周波系の反射異常が改善され、現在では60回/週程度まで減少している。

ビーム研究の進展

・電子ビーム

PF リングへ入射している電子ビームの軌道と電荷量を図に示す。電子ビームは熱電子銃で生成され、入射器内で2.5 GeV まで加速される。入射器出口電荷量は安定的に0.4 nC を供給する。PF リングのビームトランスポート (PF-BT) で電荷量変動が生じる場合、ビーム加速位相やエネルギーノブの調整を実施するが、PF-BT ラインの機器状態によって電荷量が減少している場合もある。ビーム安定化において光源リング側と協調を進めるため、昨年より、加速器第六研究系の下崎氏を中心として、PF リング、PF-AR、入射器の運転関係者で情報共有を定期的に行なっている。これにより光源リングへのビーム入射に関する問題点を深いレベルで共有できるようになった。今後は、入射効率改善および安定化に向けた種々の共同ビームスタディを進める予定である。

SuperKEKB 電子リング用 RF 電子銃のカソード材質として Ir_7Ce_2 を使用している。このカソードは長寿命で量子効率が高く、レーザー片側ラインで4 nC 以上の電荷量を発生することができる。冬期メンテナンスにおいて、レーザースポット径を口径8 mm にする光学素子 (DOE: アルゴンガス封入) を導入した。これにより、レーザースポットがカソード全域をカバーするため、カソード出力電子の空間電荷効果を抑えることができ、今後のビームスタディ

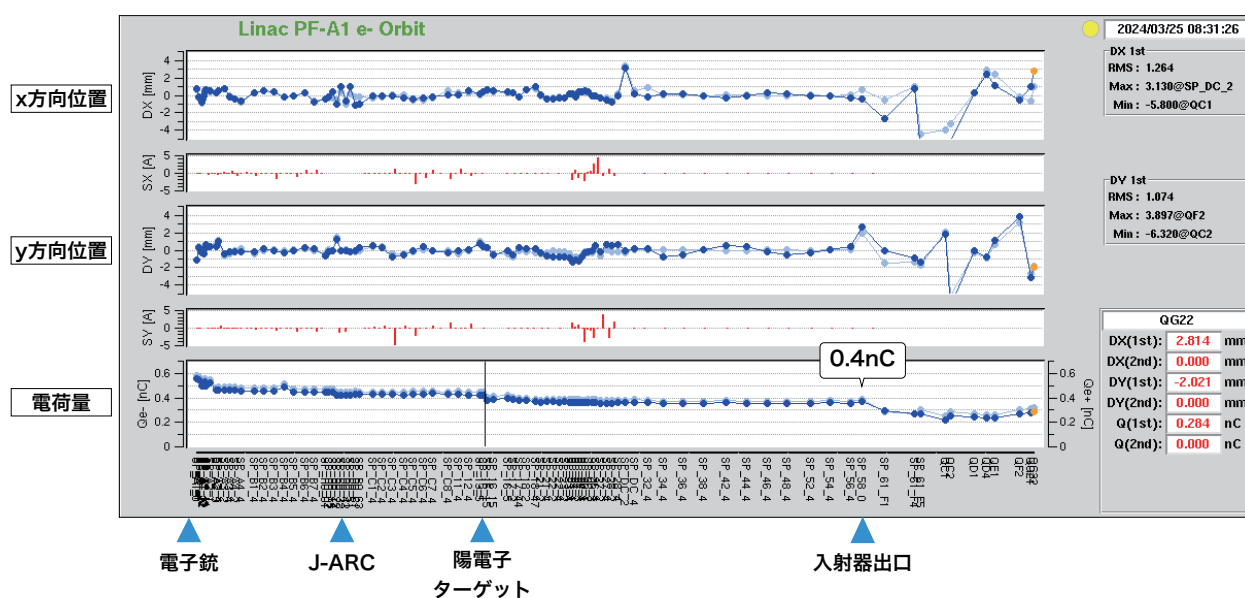


図 PF リング入射電子ビームの入射器内軌道と電荷量

を経て大電荷出力時のエミッタンス向上を目指す。試験では 1st レーザー、2nd レーザー、それぞれ片打ちで、6 nC、3.5 nC の出力を確認した。1st 側レーザー導入窓の劣化は小さく、照射方向を変えても出力電荷量の変化はなかった。しかしながら、2nd 側の窓は劣化しているため、生成量は 1st 側に比べて少なく、照射方向によっても出力電荷量が増える。ただし、現状必要な出力電荷量は 2 nC であるため、電荷量に関して運転の問題はない。一方、レーザーは斜め方向からカソード全面に照射されるため、電子放出時間差が生じてバンチ長が若干伸びる。電子銃下流に設置したシケインでのスリットにてビームテールを一部取り除いて、ビーム形状を整形した状態でビーム加速を行なっている。

前期後半より RF 電子銃内で放電が発生するようになり、3-4 時間に 1 回程度の頻度で運転が数分中断している。ビーム運転継続によるコンディショニング効果により、停止頻度は減少傾向にあるが、抜本的対策としては、電子銃加速空洞の内部構造を改善したものに交換する必要がある。この放電の原因となっているチョーク構造を取り除いた電子銃空洞を製作中で今夏のメンテナンス期間に入れ替えを行なう。

入射器立ち上げ当初、入射器から SuperKEKB-HER へのビームトランスポート部 (BT) での電子ビームのエミッタンスは 60 μm 程度で、垂直方向にテールを引いたビーム形状をしていた。BT に設置されている放射光モニタ (SRM) のビームスポットを確認しながら、ステアリング電磁石やビーム加速位相の調整を進めることによって 30 μm 程度まで改善されている。しかしながら、BT の途中よりエミッタンスが大きく悪化しており、リングへの入射効率に影響を及ぼしている。2024 年度第 1 期運転の停止前に行なう入射器単独運転スタディにて、この原因を調査する。

2 バンチ運転において第 1 バンチ、第 2 バンチの短期的な電荷量変動に差はないが、第 1 バンチにおいて長期的な電荷量変動を生じさせていた。2023 年第 2 期に行なったパルススタッキング試験運転で第 1 バンチの電荷量をポッケルセルのタイミングで調整していたが、そのジッターが今期の運転に影響しており、そのタイミングの再調整にて電荷変動量を減少させることができた。現在、バンチ電荷量はレーザー出力を調整するフィードバックにて 2 nC に維持させている。

エミッタンス改善のため、3-5 セクターにかけてビーム軌道フィードバックを適用している。SRM 測定結果からビーム軌道にオフセットを設けて加速管ウェイク場の影響を低減させ、エミッタンス悪化を抑えるものである。原理的には 2 箇所 (SRM 信号があれば (現在は 1 箇所))、安定に非破壊でフィードバック制御ができる。今後、SRM の増設を検討していく。

・陽電子ビーム

陽電子生成とビーム転送に関係する高周波加速位相、

100 台以上のステアリング電磁石、四極電磁石に対して機械学習を用いた自動調整を行なっている。前回報告したように、2 バンチ同時に 5 nC を超えるビーム生成に成功している。入射器で生成された陽電子ビームは、第 2 セクターから分離されてダンピングリングに入射され、ダンピングリング内での放射減衰によりエミッタンスは水平 76 μm 、垂直 0.3 μm 程度まで向上する。しかしながら、ダンピングリングから出射され、入射器に戻された陽電子は第 3 セクター以降から SuperKEKB-HER リングへのビームトランスポート部にかけて、エミッタンスが水平 150 μm 、垂直 30 μm 程度まで大きく悪化する。

エミッタンス増大の原因究明スタディを行なった結果、BT 第三アークにある偏向電磁石の多極成分がエミッタンス悪化を引き起こしていることがわかった。この電磁石の磁場測定値を入れたシミュレーションの結果、エミッタンス悪化の状態を再現した。今後、この偏向電磁石の多極成分対策が必要である。水平方向エミッタンスはダンピングリングから入射器までのビームトランスポート (RTL) を経て入射器出口まで加速させる過程でも悪化しており、この原因の調査も今後行なっていく。

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く。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換を行う第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。

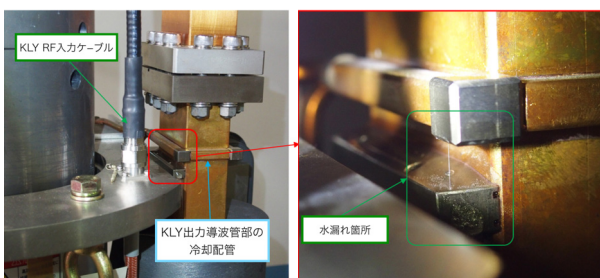


図1 KL_B2 ユニットの RF 出力導波管部の水漏れ

4月20日頃から KL_B4 ユニットの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、経年劣化のためメカ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ったため、同日夕方にサイラトロンを交換して復旧した。KL_22 ユニットの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 出力運転は行い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 ユニットのビーム加速運転を交替させた。B2 ユニットの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 セクタのサブブラスター（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。

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 惠郷博文
(2024 年 10 月 18 日付け)

運転状況

7 月 12 日から 9 月 13 日までの 2024 年夏期保守作業を行い、9 月 17 日より入射器の立ち上げ運転を開始した。10 月 2 日から 2 週間は、各機器の定格出力動作試験、加速管やクライストロン・高周波源の大電力 RF コンディショニング、電磁石の連続通電などの総合動作運転を行った。各蓄積リングに対して、10 月 7 日から PF リングへ、10 月 9 日より SuperKEKB、10 月 17 日から PF-AR ヘビーム入射運転を開始した。

夏期保守

入射部においては、PF リング、PF-AR、そして陽電子生成用電子ビームを発生する熱電子銃のビーム出力が低下していたため、カソードの交換を行い、8 月 28 日トンネルを閉鎖してビーム出力を確認した。

2 月に第 2 セクター第 2 ユニット第 3 加速管 (AC22_3) の上流側カプラー接合部から水漏れを生じた。リキッドシールによる応急修理を数度試みたが回復せず、2024 年度第 1 期の運転に使用することができなかった。そのため、昨年実施した新型加速管設置の際に取り出して、保守用として保管していた旧型加速管と交換した。現在、新品の予備加速管は手持ちになく、逼迫した状況にある。そのため、2023 年度より 3 年計画にて新型加速管 12 本を製作中である。昨年度は材料手配を行い、現在 6 本を製作中で 12 月より納入される。残り 6 本の製作は来年度に行う。製作した加速管は順次、高周波テストスタンドで 80 MW 電力投入試験を行って、性能確認とコンディショニングを完了させた後にビームラインへ設置する。旧型加速管は、経年劣化によって年間 2~3 本の割合で水漏れが生じている。安定運転を行っていくためには、新型加速管の製作を今後も進めていく必要がある。

入射器内にはビーム運転モード毎に設定切り換えができるパルス電磁石の他に 630 台に及ぶ直流電磁石が使用されている。この直流電磁石用電源の 2 割近くが 1980 ~ 1990 年代に製作されたものである。耐用年数を超えて経年劣化しており、これらの電源に対しても 3 年計画で更新中である。今期のメンテナンスでは、50 台の電源交換作業を行なった。これらの新電源はネットワーク制御タイプに変更されているため、制御システムの更新も行なった。また、第 6 セクターに設置している陽電子 ECS (エネルギー圧縮システム) 用電磁石の電源群は 40 kW から 100 kW 出力の大型電源で 1990 年代に製作されたものである。運転には支障はないものの、今年の定期点検ではメーター表示ドリフトなどが生じていた。加えて保守や故障対応部品の手配な

ども難しくなっているため、この大型電源の更新にも着手しており、本年度は新電源の設計を進めている。

パルス電磁石の制御系は当初、Windows ベースの制御システムで運用していたが、長期運転中に動作不安定になることが多く、データベースファイル破損などが生じて停止し、ビーム運転中断の主因の一つとなっていた。このパルス電磁石制御システムは入射器内に 18 ヶ所あり、昨年度、その一部を新開発の Linux ベース制御システムに置き換えた。半年以上の連続運転で新制御システムは安定に動作することが実証されたため、全てのパルス電磁石制御を新システムに入れ替えた。

SuperKEKB の各蓄積リングには 2 バンチモードでビーム入射を行なっているが、第 2 バンチの垂直軌道が不安定になることがある。入射効率の悪化を防ぐには、その軌道を安定させる必要がある。そのため、第 1 バンチには影響を与えず、第 2 バンチのみ軌道修正を行うことができる高速パルスキッカー電磁石を A セクターに 2 台増設した。この装置の高速キック性能は、J-ARC や入射器出口に設置された先行機で実証されており、増設機によって更なる軌道安定化ができるようになる。また、J-ARC 出口に水冷タイプに改良した大口径パルス四極電磁石を 1 台追加した。これで J-ARC の出入口に各 4 台のパルス四極電磁石セットが揃うことになり、設計どおりのビームオプティクスのマッチングが可能になる。水冷化パルス四極電磁石の運転性能、及び、安定性を確認し、今冬の長期保守期間には既設の空冷タイプ (ファンによる強制空冷) も水冷化して運転の安定性を向上させる。

SuperKEKB-HER ビームトランスポートラインに電子ビーム用 ECS 新設作業を開始した。今夏は、地下トンネル内の冷却水パイプや導波管の貫通孔作業や敷設工事、第 6 セクタークライストロンギャラリーへの大電力高周波源や励振系の整備、パルスコンプレッサー設置などを実施した。ビームラインの大気暴露が必要となる加速管設置と高周波源との接続工事は冬期保守期間に行なって工事を完了させる予定である。2025 年度第 1 期より RF コンディショニングとビームコミッショニングを開始し、2025 年度第 2 期より ECS 運用を目論む。

RF 関連はクライストロン高圧電源筐体の確認と清掃、小型励振器や LLRF モジュール用恒温槽の保守作業を行なった。また、クライストロン出力を安定化させるため、励振系を高出力半導体アンプに置き換えている。

ビーム調整

上流より動作調整を終えた加速ユニットを順次使用してビーム加速を始め、電子銃のビーム出力最適化、RF 加速フェージング、ビーム軌道とエミッタンス調整を行う。PF リング、PF-AR への入射ビーム調整は、熱電子銃のビーム出力調整から取りかかり、ビームエネルギーの校正、必要電荷量、主要ポイントでのビームスポット形状と入射器全体に渡るビーム軌道の調整を終えて（図 1）、10 月 7 日より PF リング用ビームトランスポートから PF リングへの入射調整を始めた。

今夏のアップグレードとして入射器出口の第 6 セクター 第 3 スイッチャード（SY3）に高精度ビーム診断ラインを

設置した。このラインには、図 2 のようにパルスベンド電磁石、高精度ビーム位置モニタ（位置精度 7～30 μm 、エネルギー解像度 0.01%）、スクリーンモニタ（解像度 25 μm ）が増設されている。蓄積リングへの入射に影響することなく、このラインにビームを定期的に振り分けることによって、ビーム性能を定期的に診断、管理できるようになる。実際に 7 GeV まで加速した電子ビームを診断ラインに導き、ベンド電磁石群の調整、プロファイルモニタによるビーム形状・位置の相関確認、ビーム位置モニタの動作試験などを行い、設計どおりにビーム性能診断できることを確認した。

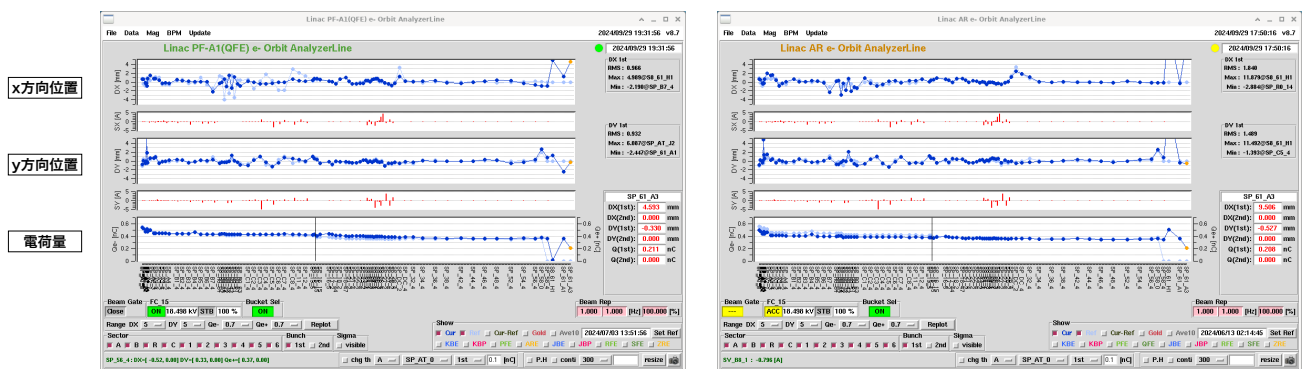


図 1 調整された（左）PF リング、（右）PF-AR 入射用電子ビーム軌道の状態。注）表示データ右端近くの変動はビームダンプ付近のため。

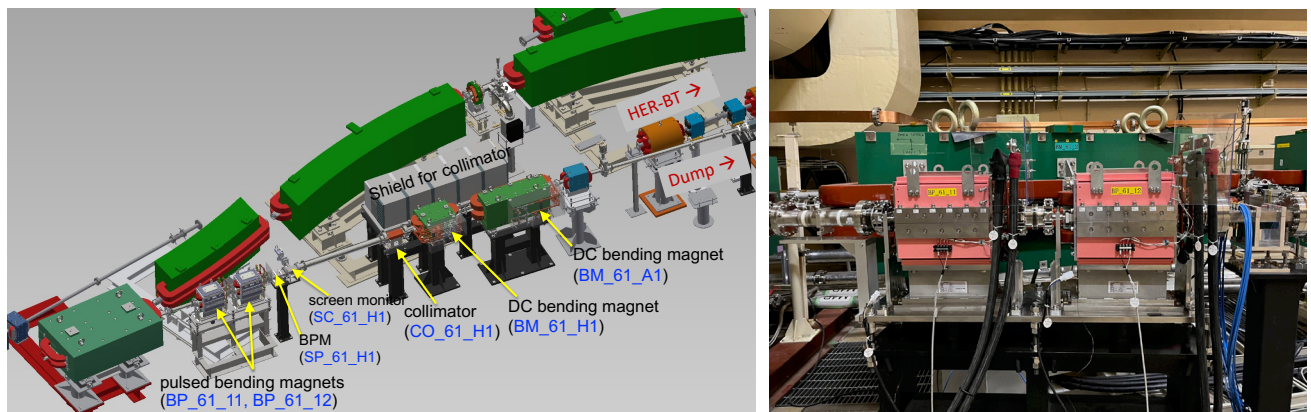


図 2 SY3 新設の高精度ビーム診断ライン（左）機器配置図、（右）パルスベンド電磁石。

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 惠郷博文
(2025 年 1 月 22 日付け)

運転状況

電子陽電子入射器は、10 月より PF リング、PF-AR、SuperKEKB メインリングのビーム蓄積状況に応じた同時トップアップ運転を実施した。PF-AR は 12 月 16 日、その他の 3 リングは 12 月 27 日にビーム入射を終了し、入射器は冬期メンテナンスを実施している。メンテナンス終了後、2 月 12 日に立ち上げ、2 月 25 日までビーム調整を行なって、2 月 25 日から PF リング、3 月 3 日より PF-AR にビーム入射を再開する。SuperKEKB は運転期間の連続が望ましいこと、気温上昇による機器負荷増を考慮して 2025 年第 1 期(春)の運転は行わず、第 2 期(秋)から立ち上げて、できるだけ長期にわたりビーム入射を行う予定である。

次に 2024 年度第 2 期の運転で生じたトラブルについて報告する。12 月 9 日以降、17 ユニットの直流四極電磁石電源の通信異常が多発するようになった。シリアル通信制御によるレガシータイプの電源であったため、Ethernet 制御タイプ電源と交換して復旧した。また、61 ユニットの直流四極電磁石電源に出力電圧不良の故障が生じたため、代替電源と交換した。このユニットに組み込まれている電磁石電源群は 1990 年代製で耐用年数を超えて経年劣化が進んでいる。交換した電源自体も旧式であるため、来年度に 61 ユニット電磁石電源全体の更新を行う。近年、老朽化した電源の故障頻度が高く、ビーム運転に支障を来すようになっているため、3 年計画にて電源更新を実施している(PF ニュース 42-3 号参照)。

光源リング入射ビームや陽電子生成 1 次電子ビームを生成している熱電子銃の電荷量変動が 11 月末より大きくなった。電荷量の変動はビームの軌道変動によって生じることも多く、陽電子ビームは機械学習制御により、A セクターのパルスステアリング電磁石でビーム垂直方向の軌道を常時自動調整して安定化制御がかけられているが、この電

荷量変動は軌道補正では改善できなかった。調査の結果、熱電子銃の高圧ステーション内の温度変化が通常より大きく、カソードを熱しているヒーターの電圧出力に影響を与えていることがわかった。熱電子銃を設置している室内は精密空調で安定化されているため、高圧ステーション内の排熱不良などが考えられる。そのため、冬期メンテナンスにて高圧ステーションの機器調査と改善を行う。

一方、11 月 27 日から生じた SuperKEKB-HER 用低エミッタンスビームを生成する RF 電子銃の放電は、ビーム運転最終日まで完全に回復することではなく、この電子銃に投入する RF 電力を制限したシングルバンチ運転となった。2 バンチ運転回復のため、入力 RF パルス幅を調整しながらコンディショニングを行い、安定性改善を図った。しかしながら、反射異常が生じた後の電子銃空洞の真空回復が悪く、コンディショニングに時間がかかるため、HER ビーム運転時間の確保を優先して今期の 2 バンチ運転は断念した。現在、放電を大幅に軽減させる新設計 RF 電子銃を製作中である。製作完了後に入射器の RF テストスタンドで十分に大電力コンディショニングを行い、今年の夏期メンテナンスにてインストールする予定である。また、RF 電子銃カソードに照射している第 1 レーザーの 5 段階目アンプが温度異常となって出力電荷量に変動を生じたため、アンプの交換作業を行なった。RF 電子銃の不調によりシングルバンチに制限した運転であったが、ビームのエミッタンスは 40 ~ 60 μm の範囲で調整され、HER ビーム伝送路での入射調整により入射効率是比较的高く維持され、60 ~ 80% であった。

ビーム研究

・放射光光源用電子ビーム

PF リング、PF-AR の両光源リングへの入射において、

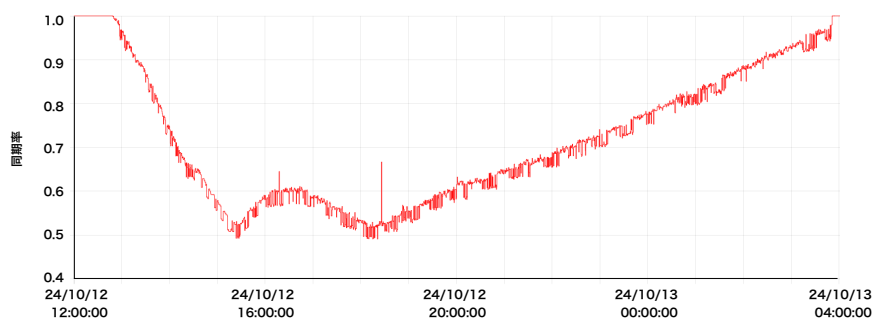


図 1 三重同期システムによる同期率の日時変化例。縦軸は 50 Hz 約 5 分間の同期出力比を表す。

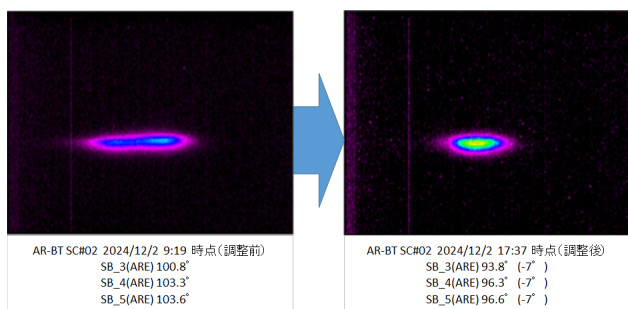


図2 3～5セクターのRF位相調整によるAR-BTでのビームプロファイル改善例

ビームロスタイムによる入射停止率は1%未満となり、安定に行われた。光源リングは入射器と単純な整数比にないビーム加速周波数で運転されており、光源リングへの入射タイミングを取るため、三重同期モジュールを使用している。ビームのリング周回周波数、入射器基準RF、商用50 Hzを監視して同期が取れたタイミングでビーム出射トリガーを発生する。潮汐の影響や気温などによって蓄積リングの周長が変化してRF周波数が調整されるので、それに応じて同期率も変わる(図1)。同期率が低下してくるとトリガー抜けが生じてくるが、通常、時間と共に同期率は回復する。また、大きな変動が生じた場合は、PFリング側で稼働している入射位相自動フィードバックで修正されるため、ビーム入射への大きな障害にはなっていない。また、PFリングへのビーム入射路(PF-BT)においても、ビーム位置モニター(BPM)を使用したエネルギーフィードバックを行っている。しかしながら、PF-BT内を通過するビームには位置変動とエネルギー変動が混成されているため、エネルギーフィードバックのみでは安定性は不十分である。その解消に向けてPF加速器スタッフと協議しており、新たな補正を行って更なる入射安定化を図る。

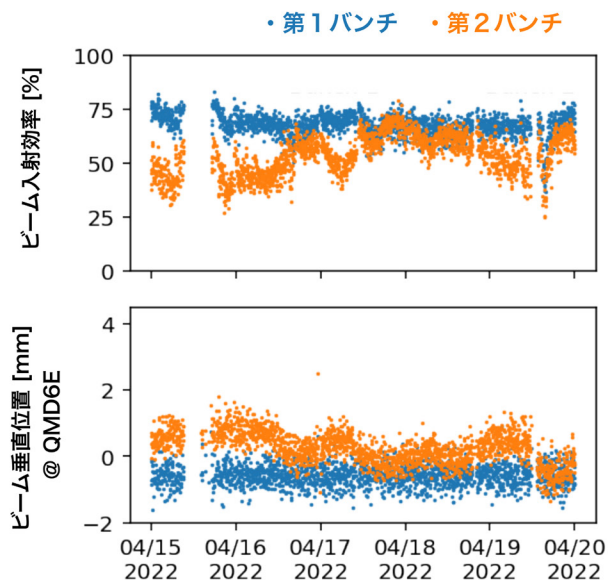


図3 3～5ビーム垂直方向位置と入射効率の比較

PF-ARにおいては、ビーム伝送路(AR-BT)でのビーム形状が水平方向に広がり、AR-BT 終端での電荷量が変動してビーム蓄積率が低下することがある。このような場合は3～5セクターのRF加速位相を調整する。これによりエネルギー広がりが小さくなり、入射率も改善する(図2)。

・低エミッタンス電子ビーム

入射器上流Aセクターに今夏新たに設置した垂直方向高速パルスキッカー2台(FY_A2_2, FYA4_4)のビーム運転コミショニングを行なった。これまでの2バンチビーム運転において、第2バンチの垂直方向軌道がずれると入射効率が低下することがわかっている(図3)。よって、立ち上がり時間が2つのバンチ間隔(96.3 ns)より早い、

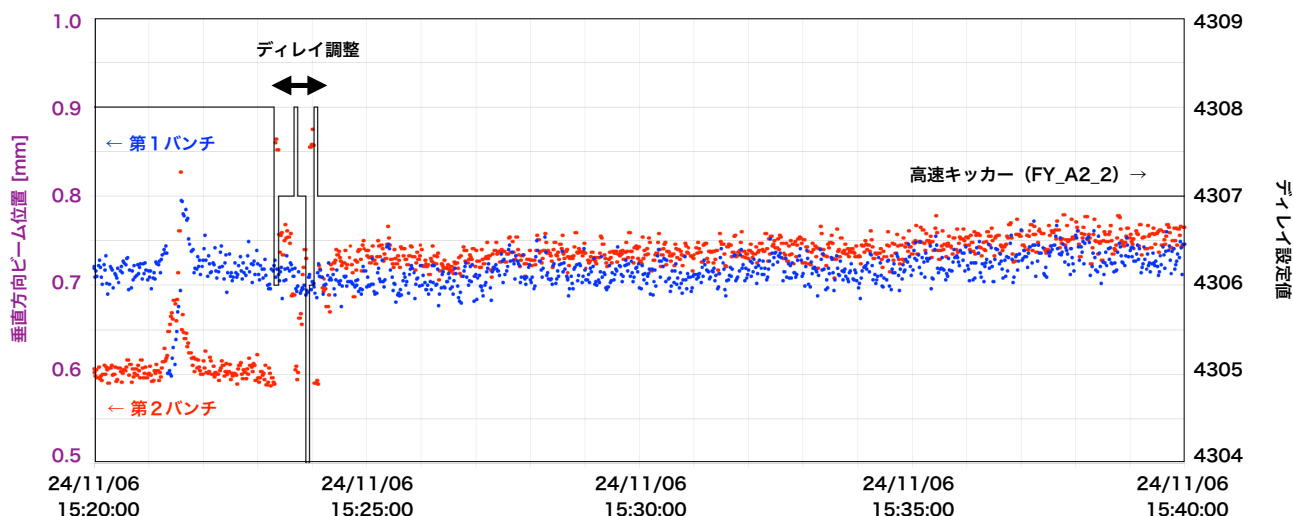


図4 垂直方向高速パルスキッカー(FY_A2_2)によるビーム調整状況。青点：第1バンチ垂直方向位置，赤：第2バンチ軌道垂直方向位置，黒：設定タイミングディレイ。

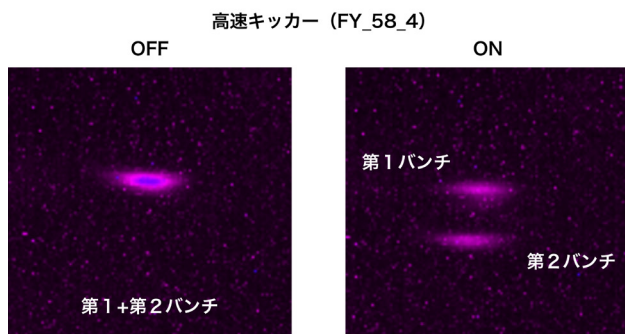


図5 高速パルスキッカー (FY_58_4) による2バンチビームプロファイルの変化。左: 高速キッカー OFF 時 右: 高速キッカー ON 時。

高速キッカーを使用すれば、第2バンチ軌道のみ修正することができる。図4に示すように今回のビーム適用試験で、第2バンチを独立にキックできることを確認、キッカー動作タイミングのディレイ値に応じて垂直方向軌道を精密に制御できることがわかった。位置のジッターは十分小さく、BPM 分解能 $10\ \mu\text{m}$ の範囲内であった。キッカー出力ピーク時、立ち上がり時、キッカー動作オフ時の3つの状態においてジッターの有意差はなかった。これらの高速キッカーを自動調整することにより第2バンチの垂直方向ドリフトは解消された。また、高速キッカーによる第2バンチ独立軌道補正を活かして、HER-BT での第2バンチのエミッタンスが測定できるようになった。これまでは、第1、第2バンチの軌道が重なるため、エミッタンスの測定はできなかった。しかし、入射器出口の FY_58_4 高速パルスキッカーにより第2バンチのみ垂直方向に大きく軌道差を与えて、第1バンチとの軌道分離を行い、HER-BT 第2セクションにあるビーム形状モニタを使用して両バンチのエミッタンスを測定した(図5)。測定したエミッタンスは、第1バンチ: 水平 $133\ \mu\text{m}$ ・垂直 $135\ \mu\text{m}$ 、第2バンチ: 水平 $145\ \mu\text{m}$ ・垂直 $91\ \mu\text{m}$ であった。HER-BT 第1セクションでの両ビームのエミッタンスが垂直、水平ともに $40\ \mu\text{m}$ 程度であることから、ビーム伝送途中でエミッタンスが大きく悪化していることが改めて確認された。

・陽電子ビーム

2バンチ運転時のエネルギー安定性を上げるため、エネルギー圧縮システム (ECS) の加速ユニット (KL_61) を調整してビーム加速位相をゼロクロスに設定した。エネルギー圧縮効果によりビーム幅が適正に狭くなっているのを確認し、陽電子ビーム入射路 (LER-BT) にて BPM で測定したビーム形状がまとまるように調整した。これによりエネルギージッターが改善した。

3～5セクターにおいて陽電子ビームのエミッタンスが悪化している原因を調査した。陽電子は $1.1\ \text{GeV}$ ダンピングリング (DR) によって水平方向エミッタンスが $70\ \mu\text{m}$ 程度まで減衰されて入射器へ戻り、 $4\ \text{GeV}$ まで加速される。これまで入射器での測定では水平方向エミッタンスが

$150\ \mu\text{m}$ 程度に悪化した状態であった。調査により入射器内で $10\ \text{cm}$ 程度のディスパージョンが発生しており、エミッタンス増大に無視できない量であった。DR から入射器へのビーム帰路 (RTL) の収束電磁石を調整し、ディスパージョンを $2\ \text{cm}$ まで小さくすることができた。これにより、水平方向エミッタンスも $110\ \mu\text{m}$ まで下がった。ただし、第2バンチに水平方向振動が残っており、これにより第2バンチのエミッタンスが LER-BT 内で悪化し、LER 入射効率が悪くなっている。今後は、残るエミッタンス悪化原因と水平振動の原因調査と解決を図っていく。