

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 惠郷博文
(2022年4月8日付け)

ご挨拶

古川和朗さんの後任として、4月1日付で加速器第五研究系研究主幹を拝命しました惠郷博文(えごう ひろやす)です。2017年4月に(財)高輝度光科学研究センターより高エネルギー加速器研究機構へ移籍し、第五研究系にて高周波加速の研究開発に従事しています。微力ながら、今後はSPRING-8やKEK入射器での経験を活かして光源型蓄積リングと衝突型蓄積リングへ柔軟に対応できる電子陽電子入射器として更なる安定化や高度化を進めていく所存です。宜しくお申し上げます。

運転状況

1月中旬までの冬期メンテナンス作業(前号参照)を順調に完了し、2022年1月14日からRF電子銃や加速管群のRFコンディショニングを開始、1月31日からのPF運転に備えて1月17日より電子陽電子入射器の本格立ち上げを行いました。調整は順調に進み、2月4日からPF、低速陽電子ユーザーへの利用運転を開始しました。途中、3月10日からハイブリッド運転への切り替えに対応しながら、3月24日予定どおりに光源系加速器へのビーム入射を終了しました。SuperKEKBに対しては、1月24日からDR調整のためのRFコンディショニングを行い、2月21日よりメインリングへの入射を開始しました。

その後、運転は順調に進んでいましたが、2月に入るとトリガー信号抜けによるクライストロンRF出力停止やインターロックで運転がダウンする現象が発症、2月17日より頻発するようになりました。SuperKEKBビームゲートオープン直後に抜けることが多く、原因調査の結果、イベントシステム用光FANOUTボード(VME)の故障と判明、予備品と交換して復旧することができました。下流側光源加速器や測定器の運転、利用実験への影響が懸念されましたが、大きなトラブルにならなかったのは幸いです。3月16日深夜23:34に発生した震度4の地震は、全クライストロン運転をダウンさせ、また、加速器収納トンネルの南端大型遮蔽扉のずれによるインターロックなどを誘発

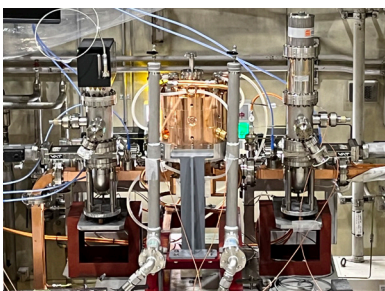


図1
新開発した球形空洞型パルス圧縮器(試作機)

させたため、入射器運転が停止しました。多くの機器は安全確認後に1時間程度で復旧できましたが、翌日、A3ユニットのクライストロンタンクに水漏れが発覚、RF出力が80%以上低下したため、交換作業が必要となりました。しかしながら、PF停止予定の3月24日まで運転継続の要望があり、B7ユニットによる代替加速などの調整を行うことによってビーム品質を損なうことなく運転を継続することができました。A3ユニットはPF運転終了後にクライストロン交換を行い、現在は通常運転に復帰しています。SuperKEKBに関しては、HER入射における入射効率の改善が急務の課題となっています。クライストロン出力位相や入射部セプトラムアングルの調整により、都度、ビーム品質の改善対応を行ってはいますが、悪化の原因について物理的な解釈を探究し、根治的対処を目指すべきと考えています。また、SuperKEKBリングの蓄積電流増強に伴うビーム寿命の短時間化などに対応するため、2バンチ運転における安定入射の課題も取り組んで参ります。今後はT(6S)実験を目論むため、運転開始から40年を経て劣化が進むビーム加速性能を回復することも大きな課題です。その解決法の一つとして、耐電力性能を向上させた新型Sバンド加速管に通常の2倍のマイクロ波を投入し、加速電圧を上げる方法があります。その運転には1ユニットあたり160MWのパルスマイクロ波電力増強が必要ですが、クライストロン増設とともに、近年開発が進んだ球形空洞型パルス圧縮器を応用します。試作機での高電力試験により良好な運転性能を持つことを確認した後、実機製作を進めてきました。今年の夏にインストールを行い、秋以降、エネルギー増強運転が期待されます。

人事異動

冒頭でお知らせしましたように加速器第五研究系主幹の古川和朗さんが3月末日付でご定年退官となりました。2012年から10年に渡って陣頭指揮を執り、五系スタッフを取りまとめて、震災後の復興やSuperKEKBリングへの低エミッタンス・高電荷ビーム入射の実現など数々の難局を乗り越えて来られました。これまでの素晴らしいご功績に感銘いたします。今後はシニアフェローとして入射器制御とビーム品質改善にご指導、ご鞭撻いただくこととなります。また、技師の三川勝彦さんも同日、ご定年退官されました。制御グループに属して、スクリーンモニターやレーザーアライメント機構、電荷計測装置においてPLC主体の制御システム構築に数多くご貢献いただきました。4月よりKEKを離れることになりましたが、新しい門出にあたり、ご多幸とご健勝をお祈り申し上げます。

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くてはならず、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ポ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スイ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。

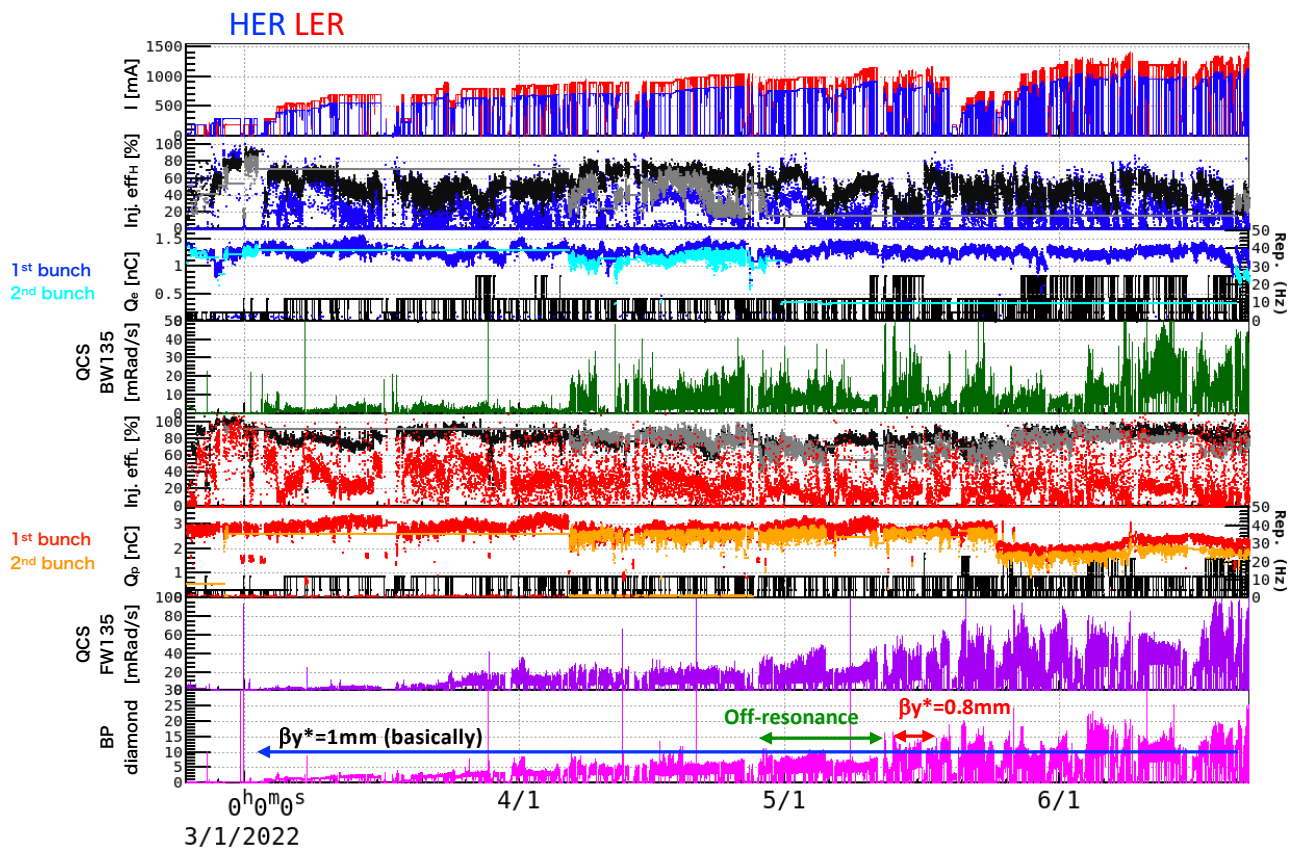


図1 SuperKEKB リング (HER, LER) へのビーム入射状況 (2022b)。QCSFW135, FW135, BP diamond : バックグラウンド評価用放射線モニター。

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 惠郷博文
(2022年10月3日付け)

運転状況

PFリング、PF-ARのトップアップビーム入射によるユーザー運転に関して、PF-ARは7月1日に運転終了、PFリングは7月8日に運転を終了した。SuperKEKBは電力制限のため、6月22日にメインリングの運転を停止した。7月8日から入射器スタディと機器データ取りを行い、7月12日に入射器の運転を終えた。7月12日より9月15日まで夏期保守期間となり、定例の機器メンテナンスと一部機器のアップグレードを行なった。9月16日より入射器の運転を開始、現在はPFリングとPF-ARへのビーム入射に向けた調整運転を行なっている。SuperKEKBは長期改修期間(LS1)に入り、来年の秋まで運転を行わない。

加速電界増強ユニット

加速器アップグレード計画の一つであるビームエネルギー増強ユニットの構築として、AC₄₄ユニットを図1の加速管4本駆動システムから加速管2本駆動システムに改造した。このユニットには新型Sバンド加速管が昨年設置されており、今回の改造によって従来の2倍のRFパワーとなる80 MW駆動が可能となり、約1.4倍の加速電圧増強となる。そのため、クライストロンとパルス圧縮器の増設と導波管立体回路の改造を行なった。新設のパルス圧

縮器は、従来のSLEDタイプではなく、新たに開発を進めてきた新基軸の球形空洞型パルス圧縮器(Spherical-Cavity-type Pulse Compressor: SCPC)である(関連記事PFニュース40-1号)。量産型実機初号器であり、事前に高電力コンディショニングを行なって動作確認をした圧縮器である。SCPCは図2に示すようにSLEDとは大幅に異なる構造を持つ。SLEDは2つの共振空洞を要するのに対して、SCPCは1つの球形共振空洞から成り、この球形空洞は高い無負荷Q値を持つTE₁₁₂モードで共振する。表1に高周波性能を示す。運転条件を考慮して高周波特性はKEK-SLEDと同じ値になるように設計している。SLEDでは2

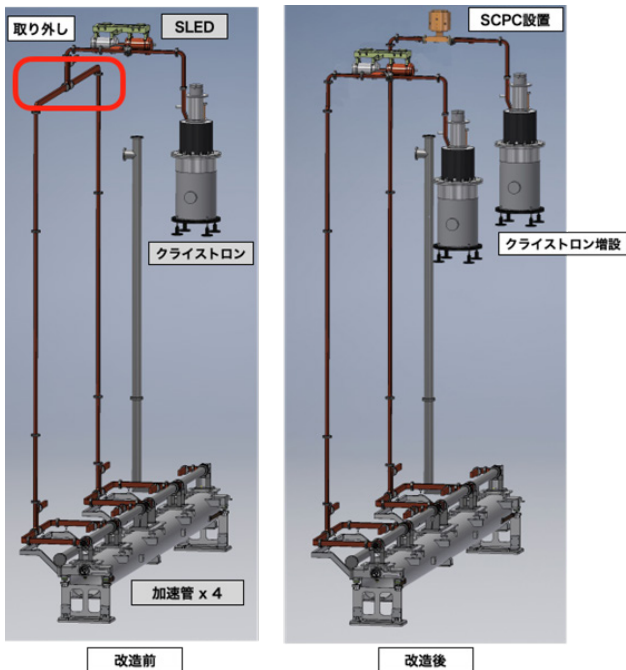


図1 AC₄₄ユニット増強改造

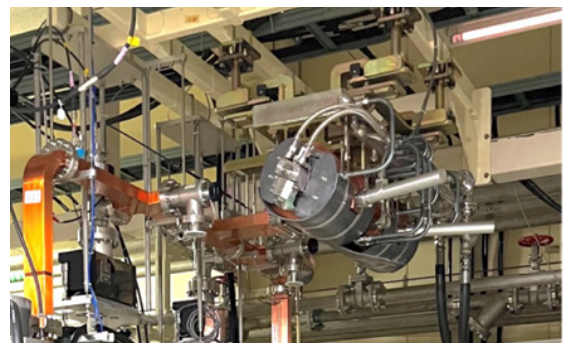


図2 パルス圧縮器新旧比較(上: 現行 SLED 下: 新型 SCPC)

表1 SCPC 高周波特性

周波数 [MHz]	2856
無負荷 Q	100,000
β	6.4
ピークパワー圧縮率	6.2
空洞共振モード	Spherical TE ₁₁₂

空洞へのRFパワー振り分けに3 dBハイブリッドを用いるが、SCPCは3ポート導波管偏極器で球形空洞にRFパワーを供給する。入口の矩形TE₁₁モード高周波は円偏向TE₁₁モードに変換されて球形空洞内に回転するTE₁₁₂モードを励起する。この回転状態は、偏向面が直交し、位相が90°異なる2つのTE₁₁₂モードの縮退状態の励起と見なすことができ、あたかも2空洞あるかのような動作をする。改造を行ったAC_44ユニットは高電力試運転と周波数調整を行なって、今後ビーム運転へ供与していく。

ビーム研究

入射器にはJ-arcと呼ばれている半円(180°偏向アーク)のビームトランスポート部がある(図3)。これは、KEKB計画用入射器としてエネルギーを8 GeVに増強する際、必要量の増設加速管を収容するA, B, Cセクター建設に伴って設けられたものである。このJ-arcは、A, Bセクターで生成された1.5 GeV電子ビームの質を低下させないようにAchromatic(横方向エミッタンス保存: $R_{16}=0$,

$R_{26}=0$)かつIsochronous(ビームのバンチ長保存: $R_{56}=0$)の条件を満たすように建設された。しかし、SuperKEKBでは、加速管のウェイク場による横方向エミッタンスの劣化を防ぐため、バンチ長を4 psまで短くする。そのため、J-arcのIsochronous状態を破り、Bセクターの加速管を用いてバンチ内エネルギー広がりを大きくし、且つ、 $R_{56}=0.3$ mとしてバンチ長圧縮運転を行なっている。最近のSuperKEKBへのビーム入射状況解析から、入射路(Beam transport, BT)で観測されるビームエミッタンス劣化は、J-arc内バンチ長圧縮時のCoherent synchrotron radiation(CSR)発生が原因である可能性が示唆されている。CSR効果は R_{56} 設定値にも依存するので、シミュレーション解析とビームスタディを進めながらビーム入射に最適なバンチ長圧縮条件と運転パラメータを求めていく。参考として入射器スタディで R_{56} の値を0.3 mから0 mに変更した時の規格化エミッタンスの変化を図4に示す。この変更によりHERビームのエミッタンスが変化し、PFリングへのビームエミッタンスは改善される様子がわかる。

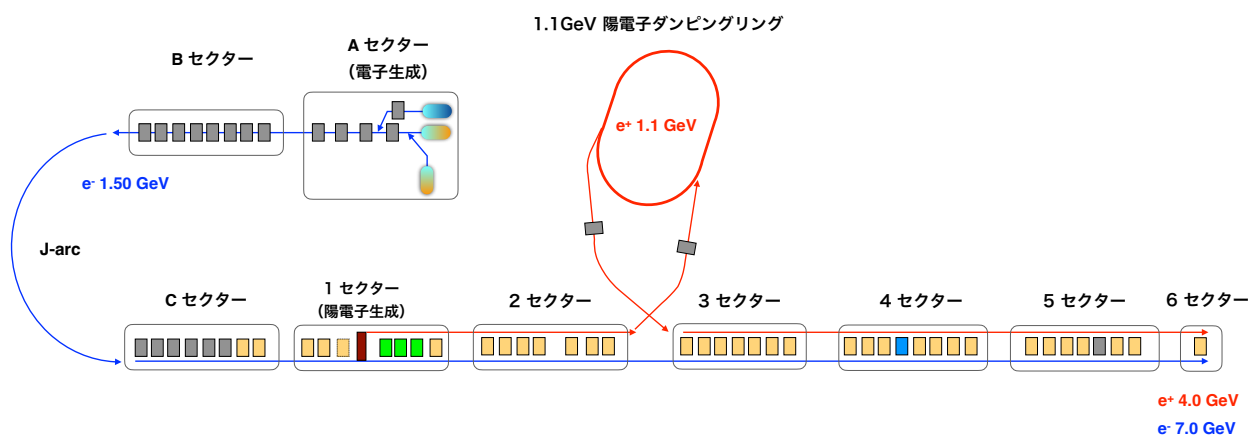


図3 電子陽電子入射器レイアウト

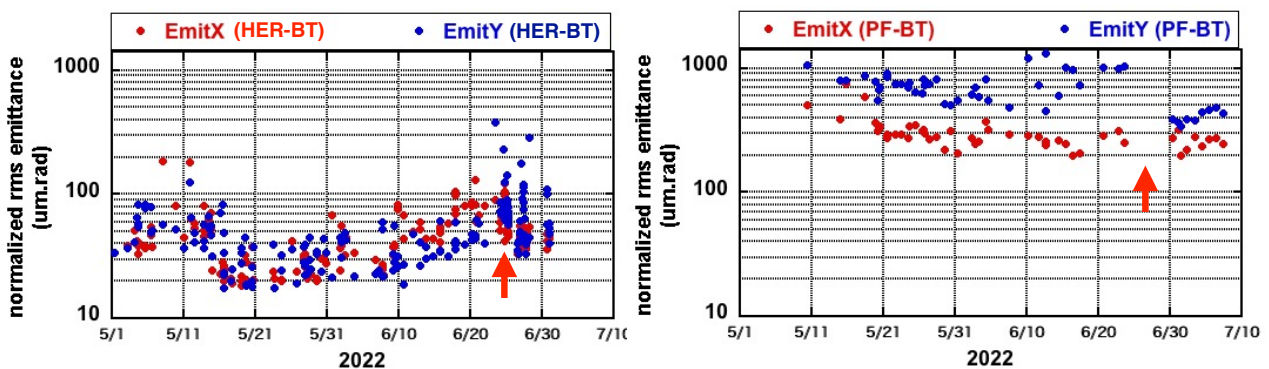


図4 HER-BTとPF-BTにおけるビーム規格化エミッタンスの比較(PF-BTデータ提供: 下崎義人氏)
赤矢印: J-arc R_{56} 変更 (0.3 m \rightarrow 0 m)

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 惠郷博文
(2023年1月5日付け)

運転状況

PF リングに対して10月4日よりビーム入射調整を始め、10月7日からユーザー運転を開始した。PF-ARは10月12日より5 GeVのエネルギー運転調整を始め、10月17日からユーザー運転を行った。節電のため、25 Hz 運転(定格50 Hz)であったが、ユーザー運転中のPFリングおよびPF-ARへの入射は各1 Hzであるため、運転モードをシェアしてRF電子銃の高電荷ビーム出力試験(SuperKEKB HER用)や陽電子生成の調整試験(LER用)も並行して行なった。SuperKEKBは長期改修期間(LS1)に入り、来年の秋までビーム入射運転を行わないため、これらの試験ビームは入射器内のダンプに廃棄する。PF-AR 5 GeV トップアップ入射とPFリング同時入射のスタディを11月7日に行い、全リングに対して同時トップアップ入射が可能であることを確認した。11月8日からPF-ARへの6.5 GeV 運転調整が行われ、11月11日から12月5日まで6.5 GeVのビーム入射を行なった。PFリングは12月2日よりハイブリッド入射に切り換えて12月26日まで運転し、2日間の入射器調整後、12月28日に2022年度第2期の運転を終了した。今期は光源リング主体の調整ができたため、非常に安定したビーム入射となった。しかしながら、入射器が原因となる入射中断があり(約610分:集計期間10月4日-12月15日)、パルスマグネット制御プログラム関連のトラブルが75%を占めた。対策として冬期保守期間以降にパルスマグネットのデータ収集や制御プログラムの改良を行う予定である。

加速電界増強ユニット

夏期保守期間にビームエネルギー増強のため、AC_44ユニットを改造した。加速管4本駆動システムから加速管2本駆動システムとなっており、従来の2倍となる80 MW 駆動によって、このユニットは約1.4倍の加速電圧増となる。新開発の球形空洞型パルス圧縮器(Spherical-Cavity-type Pulse Compressor: SCPC)は周波数調整後、事前試験通りに問題なく高電力運転ができた。図1はAC_44ユニットを改造前と同じ定格電力で調整運転した際、従来型のAC_37ユニット(加速管4本)と比較したエネルギーゲイン測定データである。AC_44ユニットにおいても定格電界20MV/mのビーム加速ができていたことを確認した。ただし、加速管下流に設置したダミーロード(高周波吸収装置)内に損傷があることが判明したため、運転電力の増強はダミーロードの改修後に行う予定である。

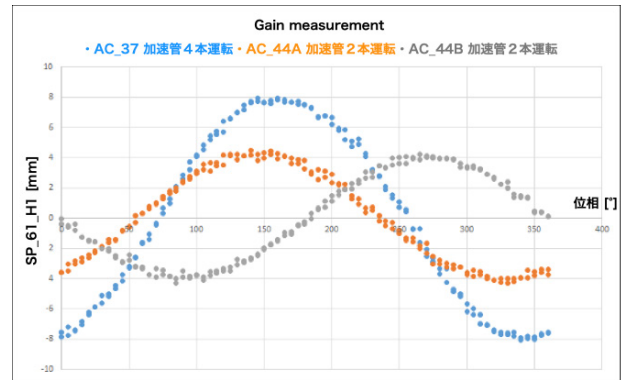


図1 ビームエネルギーゲイン測定
縦軸：偏向電磁石下流の水平方向ビーム位置測定(位置偏差は加速エネルギー増加量に比例)

ビーム研究

RF電子銃の高電荷ビーム出力試験(HER用)では電子銃の陰極に照射するレーザー出力量と2ラインのレーザー合成の調整にて、電子銃直後で5 nC バンチのビーム出力ができた。入射器内のビーム軌道調整を行なった結果、入射器出口で7 GeV 3.9 nC となる設計電荷量のビーム加速に成功した(図2)。ただし、現状では電荷量の変動が大きく、エミッタンスも要求値まで到達できておらず、今後調整を深めていく必要があるが、過去最大の電荷ビーム生成を達成できたことは大きな前進である。大電荷ビーム試験後、バンチの高電荷、高繰り返し運転によるレーザー照射用窓の汚染に関するスタディを実施した。

J-arc に設置している8電極BPM(Beam Position Monitor)とスクリーンモニタとの同期測定を行い、スクリーンで得られたビーム位置・形状と8電極BPMで得られたデータ解析結果との相関を調べた。このBPMで得られるビーム位置データはスクリーン位置と線型関係を持ち、また、四重極モーメントから算出したビームサイズの変化は、スクリーンモニタで得た値と同等であり、定量化が可能となれば、2バンチ運転で非破壊のバンチ独立計測が見込める。

10月31日から11月6日はSuperKEKBの電子ビーム伝送ライン(BTe)を用いたビームスタディを行なった。3セクターから5セクターにかけて電子ビーム軌道にバンパを与え、加速管通過時に生じるウェイク場の影響を軽減させてエミッタンスを最善化させる試験を行なった。J-arc やBTeの第3アーク入口に設置した放射光モニターを使

用してビーム位置や形状、エネルギー分散とバンパ量の相関を確認し、ビーム非破壊計測によるビーム軌道安定化フィードバック制御の見通しを得た。BTeにおいても適正なバンパ軌道を作ることによってCSR (Coherent Synchrotron Radiation) によるエミッタンス増大の抑制が確認された。CSRは大きなビーム劣化を引き起こす要因となっており、今後、シミュレーションと比較してビーム品質改善手法の確立を図る。バンパ電荷量を変えてRF位相と水平方向最小エミッタンスの電荷量依存性も測定した。電荷量とともにエミッタンスは悪化していくが、RF位相が基準値よりもプラス方向でCSRの影響と思われる効果は小さく、マイナス方向で大きくなる傾向があった。また、ビームエネルギー変化によるエミッタンスへの影響も確認した。通常運転で想定される-0.12%から+0.39%の変化量において、垂直方向への影響はなく、水平方向は15%程度変化するが、CSRなどの要因によるエミッタンス増大に比べると小さかった。

このように光源加速器への安定ビーム入射を行うと共にビーム性能向上に向けた入射器改造やビーム解析調整を進めている。

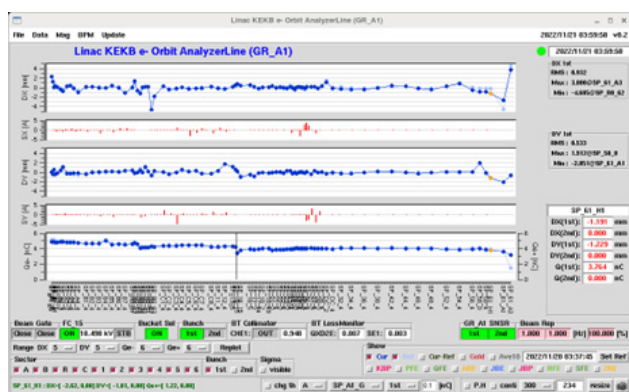


図2 RF電子銃高電荷バンパビーム出力試験(4nCビーム生成)
 上：水平方向軌道、中：垂直方向軌道、下：バンパ電荷量
 左端：RF電子銃出口、右側黄色点：入射器出口