

## 入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 古川和朗  
(2018年11月5日付け)

### 概要

夏の停止期間中の保守・建設・試験作業を終え、10月22日から入射器の立ち上げ作業を進めており、新規・改造装置の動作試験も進んでいる。上流部は装置の調整が先に進んでおり、熱電子銃、RF電子銃双方のビームの調整を開始したところである。秋に予定している放射光施設、PFとPF-AR、に向けた入射ビームを用意できる目処を付けることができた。夏前のSuperKEKBフェーズ2・コミッションングについては、入射器からもほぼ予定されたビーム品質の入射を達成することができたが、来年開始するフェーズ3・コミッションングに向けては、必要とされる入射ビームはまだ完全には実現できておらず、秋の放射光施設入射と並行して調整する予定である。同時入射機構を利用することにより、放射光入射用のビームと試験開発用のビームを並行して加速し、特にビームの低エミッタンス化と安定化を図るために、さまざまな試験・検討が進められる予定である。また、PF-AR向けの5 GeVの電子入射の試験も進め、電力消費量の削減を狙うことになる。

### 複数電子銃の利用

今回の改造においては、熱電子銃とRF電子銃を高速で切り替え、同時入射を実現するためのパルス電磁石が追加設置された。これらの電子銃の整備については、2010年からの入射器改造における課題の一つであったが、SuperKEKBのフェーズ3・コミッションングを控えて一区切りを迎えたことになる。

2010年から2011年にかけては、まずSuperKEKB向けの改造と、さらには予定していなかった震災復旧を、放射光入射と独立に進めるために、仮の熱電子銃をダンピング・リング接続部の下流側に建設した。当時はPF-ARの入射エネルギーが3 GeVであったので、PFの2.5 GeV入射と併せて、この仮電子銃と入射器の下流部8分の3を暫定復旧することにより、震災から3ヶ月後には入射を再開することができた。この仮電子銃を用いることによって、入射

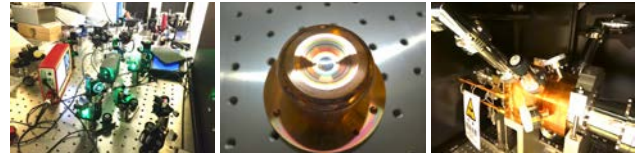


図1 RF電子銃向けに開発された、高強度レーザーシステムの試験時の最終段、高安定光陰極、及び高電界擬似進行波型空洞

器の上流8分の5の震災復旧・改造やビーム開発については、放射光施設入射とは独立に行えることとなった。仮電子銃は、PF-ARの直接入射路が完成し、6.5 GeVの入射が始まる2017年まで使用された。

SuperKEKBでの衝突性能、ルミノシティをKEKBの40倍に高めるためのナノビーム衝突方式を実現するためには、電子・陽電子入射ビームについても4倍強の電流増強と同時に、横方向と縦方向のビーム拡がり（エミッタンスとエネルギー拡がり）の大幅な縮小が重要な目標となっている。電子の入射には、新しいタイプのRF電子銃の開発の必要があり、2通りの方式の光陰極RF電子銃の開発を開始したが、後にひとつにまとめることになった。高強度レーザー、光陰極、空洞のそれぞれに新しい技術を導入し（図1）、最上流部にRF電子銃の建設を開始した。

RF電子銃のレーザーとしては、Yb:YAGファイバー発振器とファイバー増幅器、Yb:YAGまたはNd:YAGの固体増幅器を組み合わせ、エネルギー幅の小さいビームを作るための矩形パルスの生成を目指している。光陰極としてはイリジウム・セリウム合金が非常に安定した中程度の量子効率を持つことを見出し、空洞としては大きな電荷を空間電荷効果の影響を避けつつ高電界で加速するために擬似進行波型空洞が有効であることがわかっている。

陽電子を生成するための一次電子としては、低エミッタンスは必要ないが、電子の3倍近い電荷のビームを必要とするため、現在のところKEKBで使用された熱電子銃とバンチング系を可能な限り再利用することとしている。入

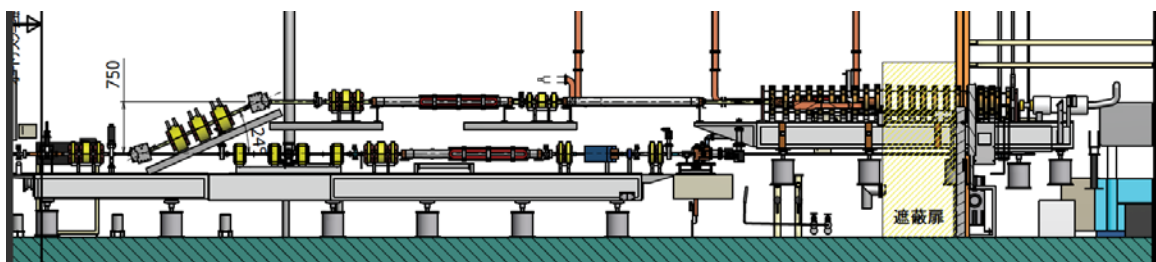


図2 下段の低エミッタンスRF電子銃と、上段の大電流熱電子銃の再配置・構成

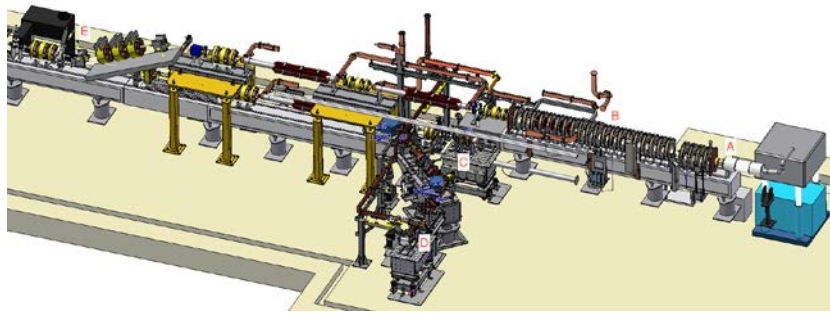


図3 入射部の構成。A: 上段熱電子銃, B: バンチング・セクション, C: 下段 RF 電子銃, D: 第二 RF 電子銃, E: 24 度合流部。

射器のトンネルとクライストロン・ギャラリーの大きさの制限があるため、RF 電子銃のビームラインの 750 mm 上部に熱電子銃のバンチング系を配置することにして、24 度の合流ビームラインと共に 2015 年に建設を行った (図 2)。

SuperKEKB の電子入射には下段の RF 電子銃を使用し、PF と PF-AR の電子入射、及び SuperKEKB 向けの陽電子生成には上段の熱電子銃を使用する。SuperKEKB のフェーズ 1 及びフェーズ 2・コミッションングにおいては、電子入射の条件が厳しくなかったため、切り替え速度等を考え、実際には熱電子銃を使用することも多かった。

2017 年に 5 ヶ月の連続停止期間を割り当てられたため、入射器の下流部向けに既に製造していた 64 台のパルス電磁石を設置することが可能となり、それらは期待したとおりに動作した。さらに、その結果を用いて 2018 年の夏の建設期間には、上流部にパルス電磁石を増設し、2 つの電子銃の合流部の偏向電磁石やビーム光学マッチング用の収束電磁石がパルス化されたため、他の装置や安全システムの改造とも併せて、50 Hz のパルス毎に電子銃を切り替えることが可能となった。これらによって、入射器全体の同時入射の準備がほぼ整った。また、2017 年には第二 RF 電子銃も設置し、信頼性の向上を図っている (図 3, 4)。

2008 年から 2010 年までは、PF、KEKB HER、LER の 3 リングへの同時入射を、当時のビーム品質仕様に従って行うことができた。来年から開始する SuperKEKB フェーズ 3 コミッションングにおいては、格段に厳しいビーム要求仕様に合わせて、パルス毎に精度の高いビーム制御を行いながら、SuperKEKB と放射光の 4 つの蓄積リング、さらにはダンピング・リングへのビームの供給を行うことになる。

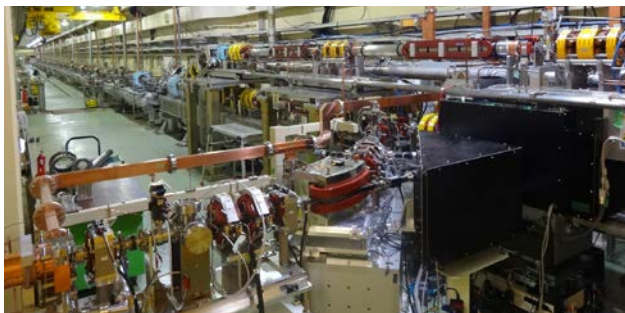


図4 入射部の現在の様子。合流部近辺の水色の電磁石が最近設置されたパルス電磁石。

### 入射器のエミッタンス管理

入射器の SuperKEKB に向けた改造においては、電子・陽電子の 4 倍強の電流増強と横方向と縦方向のビーム拡がりの縮小 (エミッタンス約 20 mm・mrad とエネルギー拡がり 0.07%) が重要な目標となっている。それぞれの間には強い関係があり、単純にバンチあたりの電流を増やすとビーム拡がりは急速に悪化してしまう。

エミッタンス悪化の一つの原因は加速管中に発生する横方向の電場が主要要因となる。例えば、図 5a のように、集束電磁石の中心からずれたビームが通ると、四重極磁場によりビーム軌道が横方向に曲がり、さらにビームが加速管の中心からずれると、ビームバンチの先頭が横方向の航跡電場を誘起し、バンチの後方を曲げてしまう。その結果投影したビームバンチの大きさが大きくなってしまふ。図 5b のシミュレーション結果が示すようにバンチがバナナのような形状を持つことになる。これからわかるように加速器装置が精度良く並べてあること (アライメント) が重要になる。

図 6a は加速器装置のアライメントによって、エミッタンスがどの程度悪化するか見たプロットで、横軸は装置がランダムにずれていた時のずれの標準偏差で、縦軸が 100 通りの計算をした時の悪化したエミッタンスの平均と標準

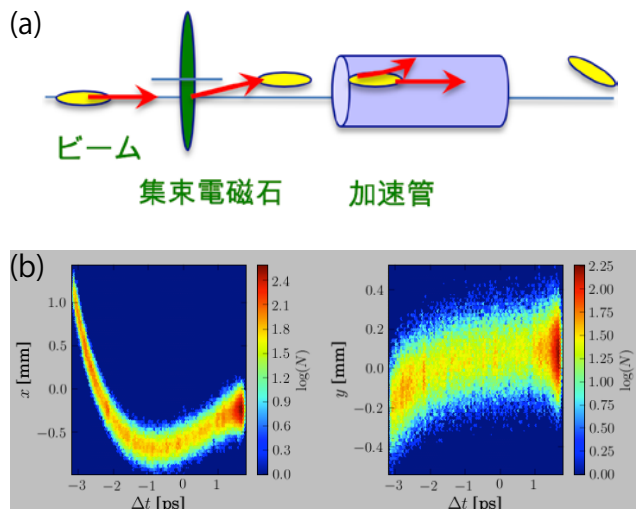


図5 (a) エミッタンスの悪化。装置の設置位置がずれた場合のビーム (黄色) の変形。(b) シミュレーション例。ビームバンチの縦方向 (横軸) と水平・垂直方向 (縦軸) の拡がり。

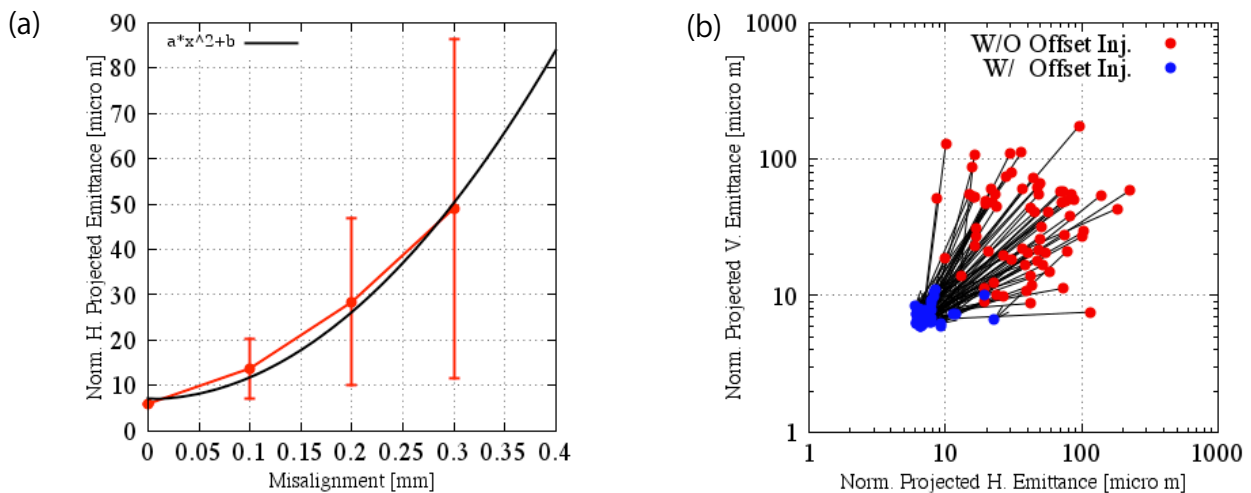


図 6 (a) アライメントを悪化させた場合のエミッタンスの悪化。100 とおりの場合の標準偏差。(b) 悪化したエミッタンス (赤点) を初期のビーム位置と角度を調整して回復した例 (青点)。

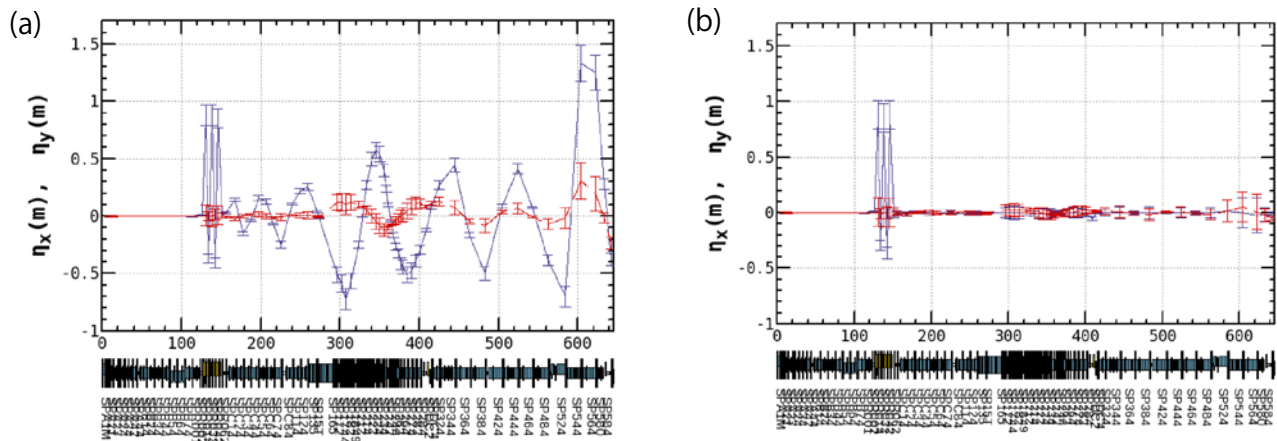


図 7 (a) J-ARC 部以降の水平 (青) と垂直 (赤) 方向の分散関数の漏れ。(b) J-ARC 部の収束電磁石の調整により、分散関数を最小化することに成功した。

偏差である。アライメントの悪化によりエミッタンスが急激に悪化することがわかる。35 年前に最初に装置が設置される前に 0.1 mm の精度で設置する仕組みが構築されたが、2011 年の大震災によって、場所によっては装置が 10 mm 以上動いてしまい、回復は容易ではなかった。

もしも、アライメント精度 0.1 mm を達成することができれば、目標とするエミッタンスが実現できそうであるが、現実にはその精度の達成は困難と思われた。しかし、ずれが大きくなると、二次の効果が小さければ、適当なビーム軌道を作ると誘起航跡電場の効果を上下・左右方向に打ち消させることができる。そのような軌道を見つける方法の一つとして、最初のビーム位置と角度を調整することが考えられる。図 6b はそのような考えを適用して、アライメント精度 0.3 mm の場合 100 とおりに対して、悪化したエミッタンスを回復してみた例である。図 6a, 6b は単純化したシミュレーション結果であるが、もう少し現実的なシミュレーションにより、入射器全体のアライメント精度が 0.3 mm で、10 m 程度の短い区間で 0.1 mm が達成されていると、軌道制御により目標のエミッタンスを得ること

が可能であることがわかってきた。

夏のビーム試験においては、この前段階として、入射器に沿ったビームの光学特性の調査が行われた。その結果、ビームの分散関数が設計上ゼロである場所において、有限の値になっている場所が複数見つかった。エネルギー広がりエミッタンスの増大に見えてしまうので、修正することが望ましい。

例えば、エネルギー 1.5 GeV の J-ARC 部の後で、図 7a のように分散関数の漏れが見つかった。収束電磁石と偏向電磁石の磁場が想定した値からずれているための問題と考えられたため、分散関数の測定値から収束電磁石の磁場がずれていると考えた場合のずれの大きさを求め、補正を行ったところ、図 7b のように分散関数を最小化することができた。同様の調整を、ダンピング・リングから入射器への接続部や、入射器からメイン・リングへのビーム輸送路においても行った。

今後は、このようなビーム光学関数の管理を精度高く行うことによって、適切なビームを入射する必要があると考えている。

### 夏期停止期間中の作業状況

PF リングは7月6日(金) 9:00、PF-AR は6月29日(金) 9:00 に運転を停止して、夏期の停止期間となった。

PF リングにおける今夏の重要な作業は、BL-19 の増強計画に伴うアンジュレータの更新作業であった。これまで使用していた古いアンジュレータ (R#19) を撤去して、新しいアンジュレータ (U#19) と入れ替えを行うとともに、U#19 を設置する B18-B19 間直線部の床補強工事を行った。

運転停止後ただちに、R#19 撤去のための真空パージ作業を行なった。さらに、上流下流のコンポーネントの切り離し、配線撤去などを行なった。7月18日～19日にR#19をリングトンネルから地下機械室のプラットフォームへ移動し、7月20日にR#19を支えていた補強用H鋼の撤去を行った。図1にR#19撤去前後のB18-B19間直線部の様子を示す。プラットフォームへ移動したR#19の磁



図2 内面にNEGコーティングされたU#19用の新しい真空チャンバー

石の放射線量を計測したところ問題ないレベルであることがわかり、磁石の取り外し作業を行った。磁石はドラム缶に入れてしばらく保管した後、再度線量を計測し問題ないことを確認して廃棄した。7月31日にU#19用の新しい真空チャンバーが納品され、リング北搬入口から地下機械室へ搬入し、真空引き等の作業を行った。図2に新しい真空チャンバーを示す。この真空チャンバーは内面に排気作用を持つ非蒸発型ゲッター (NEG) コーティングを施したチャンバーで、PFリングでは初めてインストールされることになる。



図1 R#19撤去前後のB18-B19間直線部の様子を示す。R#19設置のために補強していたH鋼も撤去され、B18-B19間のトンネル内側がフラットな状態になった。



図3 PF-AR 北棟挿入光源準備室で磁場調整中の新しいアンジュレータ (U#19)



図4 U#19のPFリング加速器室内搬入作業の様子を示す。(上左図)リング内側を時計回りに移動、(上右図)B18-19間直線部前で真空チャンバーの設置、(下左図)ビーム軌道に合わせるように押し込む、(下右図)U#19の真空チャンバーをリング側のチャンバーに接続。

新しいアンジュレータ U#19 の PF-AR 北棟挿入光源準備室における磁場調整 (図 3) が終了し、9 月 25 日の週に PF リングへの搬入を実施した。U#19 は PF リング北のシールド扉から加速器室内へ、さらに B27-B28 直線部 (U#28 はあらかじめ移動してあった) からリング内側に引き込まれ、時計回りにリング内を移動、B18-B19 間の直線部まで運ばれた。リング内側で真空チャンバーを磁石列のギャップに挟み込み固定、直線部に押し込まれた。その後、アンジュレータの磁石の中心とビーム軌道をあわせるための精

密アライメントおよびリング真空チャンバーとの接続作業が実施された。一連の作業の様子を図 4 に示す。同時に、U#28 を所定の位置に戻す作業も行われた。

U#19 更新作業以外にも、PF リングおよび PF-AR において、電磁石、RF、真空、基幹チャンネル、モニター・制御などの定期的な保守維持点検作業などが行われた。

秋の運転再開については、PF リングが 11 月 9 日 (金) 9:00、PF-AR が 11 月 16 日 (金) 9:00 を予定している。

### 運転，共同利用関係

PF および PF-AR は，夏季シャットダウン中の作業を予定通り終えて，それぞれ11月16日，11月20日から2018年度第2期のユーザー運転を開始します。シャットダウン中の入射器の改造作業により，今期からPFのトップアップ運転が全面的に再開されるとともに，PF-ARでもトップアップ運転が開始される見込みです。これに伴い，PFでは12月7日から12月19日の間，ハイブリッド運転を実施します。この運転モードは，リング1周の約半分に合計約400 mAに相当する電子バンチをほぼ連続的に蓄積し，残り半分に50 mA程度に相当する大電荷のバンチを一つだけ入れるものです。したがって，孤立バンチ部分からのパルス放射光を用いた時間分解測定が行える一方，全体としての電流値は通常の運転と同程度ですので，時間分解を必要としない実験との両立が可能です。ハイブリッド運転では孤立バンチ部分の寿命が短くトップアップ運転が必須なため，ここ数年はあまり実施できませんでしたが，今後は常時トップアップ運転が可能になることで，運転モードの自由度が増すこととなります。

第3期については，引き続き厳しい予算状況ではありますが，PFは2月中旬から3月下旬まで運転を行う予定です（量子ビームサイエンスフェスタの開催中は停止します）。一方，現時点でPF-ARの第3期のユーザー運転は予定されていません。PF-ARについては，運転経費の節約のために5 GeV 運転の検討を進めています。電子エネルギーを従来の6.5 GeV から5 GeV に下げることによって，仮に電流値を従来の2倍程度に上げたとしても，消費電力を6割程度に抑制できることが見込まれます。第1期に加速器のスタディを行い，5 GeVでの電子ビーム蓄積が可能なが確認できましたので，11月29日にビームラインを含めたスタディを行い，電流値の上限やビーム強度の変化などを確認する予定です。5 GeV 運転が可能なが確認できれば，第3期に1週間程度のテスト運転を行うことを検討しています。もちろん，5 GeV 運転では高エネルギー領域のビーム強度が低下しますので，今後，従来の6.5 GeV 運転とのバランスをとりながら運転を行っていきたいと考えています。

### ビームライン改造等

大学共同利用機関法人に係る重点支援「放射光施設ビームラインを活用した産業界等におけるイノベーション創出の推進」および，新学術領域「水惑星学の創成」の予算によって建設を進めている軟X線ビームラインBL-19については，これまでも繰り返し報告を行ってきましたが，いよいよ第2期よりビームを用いた立ち上げ調整を開始します。ビームラインの詳細については，Web ページを

ご参照ください ([http://pfwww.kek.jp/users\\_info/station\\_spec/bl19/](http://pfwww.kek.jp/users_info/station_spec/bl19/))。スケジュールとしては，2019年度から部分的に共同利用実験を開始することを目指しており，これに伴い，2019年度前期実施分より，BL-19を利用した共同利用実験課題の公募を開始しました。ビームラインの立ち上げ状況については，引き続きホームページ等でお知らせしてまいります。

### 人事関連

構造生物学研究センターの特任准教授として，守屋俊夫さんが9月1日付で着任され，クライオ電子顕微鏡による構造解析のためのプログラム開発と研究支援に従事されます。また，同センターの研究員として，小林淳さんが8月16日付で着任され，X線結晶構造解析を用いた構造生物学研究に従事されます。一方，電子物性グループの助教として，軟X線吸収分光法の開発と薄膜界面の研究をされてきた鈴木（旧姓：酒巻）真粧子さんが，10月1日付で群馬大学に異動されました。構造生物学研究センターの研究員として，蛋白質のX線結晶構造解析を用いた研究をされてきた吉田尚史さんが，10月1日付で横浜市立大学に異動されました。また，構造物性グループの研究員として共鳴X線散乱を用いた研究を推進されてきた田端千紘さんが，11月1日付で京都大学に異動されました。