

## 入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 古川和朗  
(2021年3月26日付け)

### 概要

2021年1月の複数の作業の一部として、劣化した加速管4本の交換が実施され、25日には設置場所における初めての大電力投入試験が無事終了した。今後数年で交換される合計16本（総数のうちの7%）の加速管の先駆けとなり、ビームによる性能確認も進んでいる。2月2日から入射器全体の立ち上げ・調整作業を進め、15日からPFリング、16日からSuperKEKB、17日からPF-ARにそれぞれ入射を開始した。放射光施設向けには3月末まで、SuperKEKB向けには7月5日まで連続で入射運転を行う予定である。SuperKEKBの昨年秋の運転において、リングの黒鉛コリメータによるインピーダンスの課題が判明したが、その交換により今期は蓄積電流と衝突性能の向上が期待されており、入射ビームの改善も予定されている。これまでのところ大きな障害は無いが、長期安定運転のためには、RF電子銃空洞の放電対策、さらにはさまざまな装置やビームの安定化機構とその自動監視の充実も進めているところである。

### 低速陽電子実験施設

低速陽電子実験施設は2019年にあらためて体制が整備され、物質構造科学研究所の下で共同利用実験を推進しており、放射光、中性子、ミュオンを含むマルチプローブ共同利用実験の一つのプローブとしても取り入れられている。1992年から入射器関係者が中心となって低速陽電子実験の活動を開始してから、現在もその加速器部分は一貫して入射器が担当しているので、これまでの活動を概観してみたい。

電子陽電子入射器施設においては、電子線形加速器を用いて1982年からPFリング入射、1986年からTRISTAN入射を行っていたが、さらに電子線形加速器が基礎科学に貢献できる領域を拡大する試みを探していた。実際、入射器では原子核研究などの可能性を考慮し、その終端部の第3ビームスイッチヤードは余裕を持って建設されていた。そして、このスイッチヤードを利用して、これまでに、ビームダンプにおけるアクシオン粒子探索実験、陽電子ビームによるチャネリング効果の研究、マイクロ波アンジュレータの開発、SSC加速器向けカロリメータ検出器の開発、結晶標的内チャネリング効果による陽電子生成機構の開発研究、などの様々な実験研究が行われてきた。さらには、第1スイッチヤードや第2スイッチヤードから電子ビームを引き出し、真空紫外領域の放射光施設を建設する計画もあったようだが、これについては残念ながら陽の目を見ず、第2スイッチヤードはSuperKEKB向けダンピングリング

のビーム接続点として利用された。

電子は物質構造研究の典型的なプローブであるが、原子核が正電荷を持つことから、負の電荷を持つ電子ではなく、正の電荷を持つ陽電子をプローブとして用いることで、研究領域を大きく拡大できる可能性がある。また、素粒子物理学に対しても電子と陽電子の対称性の研究機会を提供できる可能性がある。TRISTAN実験が行われていた頃、PF入射は1日2回程度、TRISTAN入射は2時間に1回程度行われていたが、入射が行われない時間も、いつでもビームが加速できるように入射器は待機していた。その時間を利用した貢献として低速陽電子源の開発の概算要求が行われ、1992年から第3スイッチヤードにおいて低速陽電子実験施設の建設が行われた。

最近関係者の努力で、この施設での低速陽電子の初ビーム観測の日が調査され、1992年12月18日であったことが公式に確認された。その後も整備が続けられ、図1のような構成を持つ第一世代の施設を用いた共同利用実験が

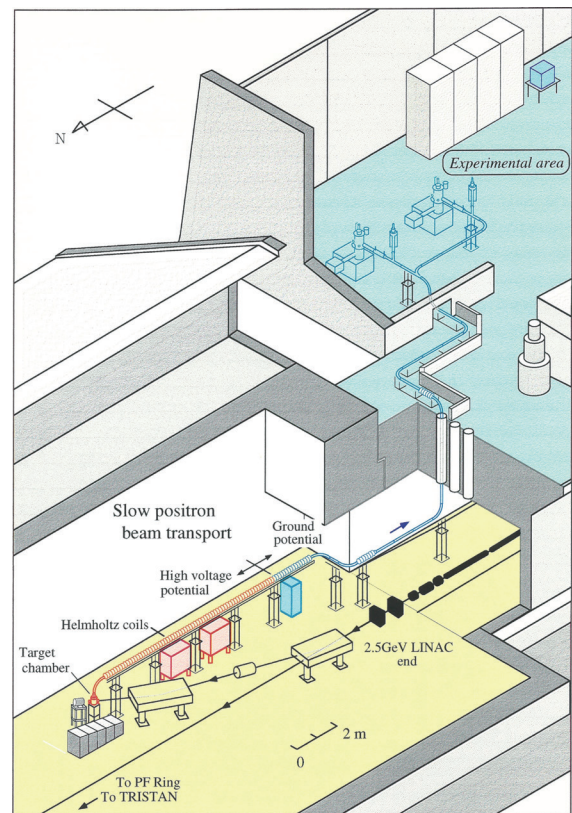


図1 地下トンネル第3スイッチヤード内の低速陽電子発生装置とクライストロン・ギャラリ北端の測定設備、そしてそれらを結ぶソレノイド陽電子輸送路の鳥瞰図（白川明広氏提供）。

1994年から1996年まで行われた。特にポジトロニウムの飛行時間測定実験や、稀崩壊観測実験などに成果を上げた。

しかし、TRISTAN 実験の後、素粒子物理実験分野において B ファクトリ KEKB 実験計画が認められ、KEKB 実験が頻繁なビーム入射を必要とすることが予想されたため、第3スイッチヤードにおける第一世代の低速陽電子実験は、残念ながら1996年に終了することになった。そこで、既に確立しつつあった低速陽電子実験の可能性を失わないために、KEKB 建設時期には、主線形加速器の上流 B セクタ部の脇に短い線形加速器を併設し、トンネルの南端に低速陽電子生成標的を設置し、実験が計画された。ここでさらに残念なことには、この第二世代の低速陽電子施設の加速管内で漏水が起り、KEKB の入射ビーム開発のために数週間トンネルへの入域ができない事情により、加速管を劣化させてしまった。この事情から、本格的な低速陽電子実験を行うためには、低速陽電子用加速器を KEKB 入射も行う主線形加速器トンネル内に併設して共存させることは現実的ではないことがわかった。

KEKB 計画向けに拡張された主線形加速器の B セクタと C セクタに囲まれた部分に屋根を掛けることによって、低速陽電子専用の加速器と測定設備を整備できることがわかり、KEKB 向けの入射器建設が終わった後、2001年に第3世代の低速陽電子実験施設の移設・建設が行われ、現在までに図2のように発展してきた。このころまでは、低速陽電子研究は入射器研究系が推進してきたが、さらなる発展を期待して、一次電子用加速器部分を入射器が担当し、低速陽電子発生標的部から実験測定装置は物構研にお願いすることになった。

2003年からは本格的な共同利用実験を開始し、リニアック加速器部分は加速器研究施設の第五研究系に、ビームライン・測定器は物質構造科学研究所に分担され、実験課題審査は放射光実験課題審査の一部として運用されている。測定装置も、地下部・地上部の双方に複数整備され、最近は特に全反射高速陽電子回折法による多数の成果が得られている。

既に世界的にも強度の高い低速陽電子施設として成果を挙げているが、さらに利用者の期待に答えるために、増強も計画されている。現在も専用加速器は、主線形加速器で60ユニット用いられているものとはほぼ同じ加速ユニットを使用しているが、この加速ユニットを増設することにより、低速陽電子の収量を数倍から数十倍に増強することが可能となる。北側には拡張可能な空間があるので、予算を獲得して加速器を拡張する計画を立案しているところである。得られる研究成果を考えると、対費用効果は非常に高いとも考えられ、支援を期待したいと考える。

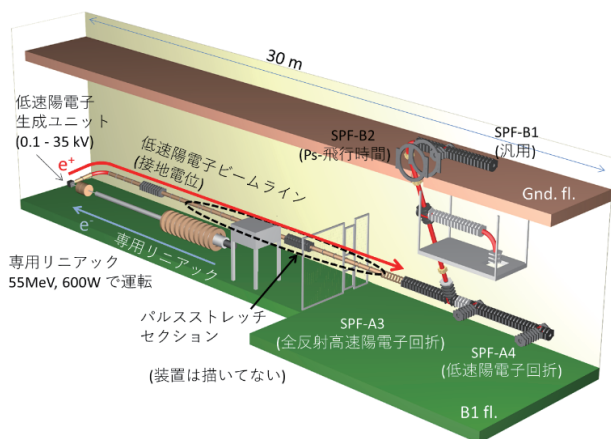


図2 低速陽電子専用の地上・地下の空間に建設された実験設備の鳥瞰図 (和田健氏提供)。

## 入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 古川和朗  
(2021年7月9日付け)

### 概要

夏の停止期間までの今年の加速器運転(2021ab)においては、放射光実験施設と SuperKEKB の4つの蓄積リング加速器へ向けての同時入射が順調に継続し、典型的には、2つの放射光施設に最大1Hzずつ、SuperKEKB HER にバンチあたり1.3nC 最大25Hz、LER にバンチあたり2.6nC パルスあたり2バンチ最大25Hzの入射を行った(図1)。SuperKEKB の衝突性能については、ピークルミノシティと1日あたりの積分ルミノシティの世界記録を更新した。運転期間の最後に2日間の入射器専用運転を行い、大電力を伴う検査保守作業、ビーム改善開発などを行い、その後9月17日までの予定で、夏の停止期間中の作業に取り掛かっている。今期の運転においては、電子ビームの特性の悪化、ビーム輸送路におけるエミッタンスの増大、ビーム輸送路から蓄積リングへの光学的整合性など、HER への電子入射の安定化が課題であった。ビーム輸送路内での期待しないビームバンチ圧縮が発生し、コヒーレント・シンクロトロン放射(CSR)によりビームエミッタンスが増大

する可能性の指摘もある。秋には後に述べる改善作業により解決を目指しているが、その確認のためにも、秋の加速器本体立ち上げ直前にはRF電子銃専用の立ち上げ調整時間を確保し、その後の入射器全体の立ち上げ調整に必要な時間を割り当てられるよう計画している。

### 電子系加速器入射タイミング生成と商用周波数

電子陽電子入射器とPFリング、PF-AR、SuperKEKBの入射タイミングは商用周波数50Hzに約1ミリ秒程度に緩く同期して動作している。これは、古い設計の装置は商用周波数に依存して設計されていたものが多かったためであるが、実際KEKB計画開始前に、商用周波数に同期しない正確な50Hzを基本とするビーム生成を行うと、ビームエネルギーの変動が大きくて使えないことが確認されていた。

今期、商用周波数の変動が大きくなり、イベントタイミング制御機構(図2)のバケット選択ソフトウェアが対応できなくなり、入射運転に影響する頻度が一桁以上高くな



図1 入射運転の典型例として、運転停止直前7月4日24時間について、上段から SuperKEKB HER、LER、PFリング、PF-ARの4蓄積リングへの入射の様子を蓄積電流(赤mA)、入射電荷(青nC)、入射率(緑mA/s)で示す。

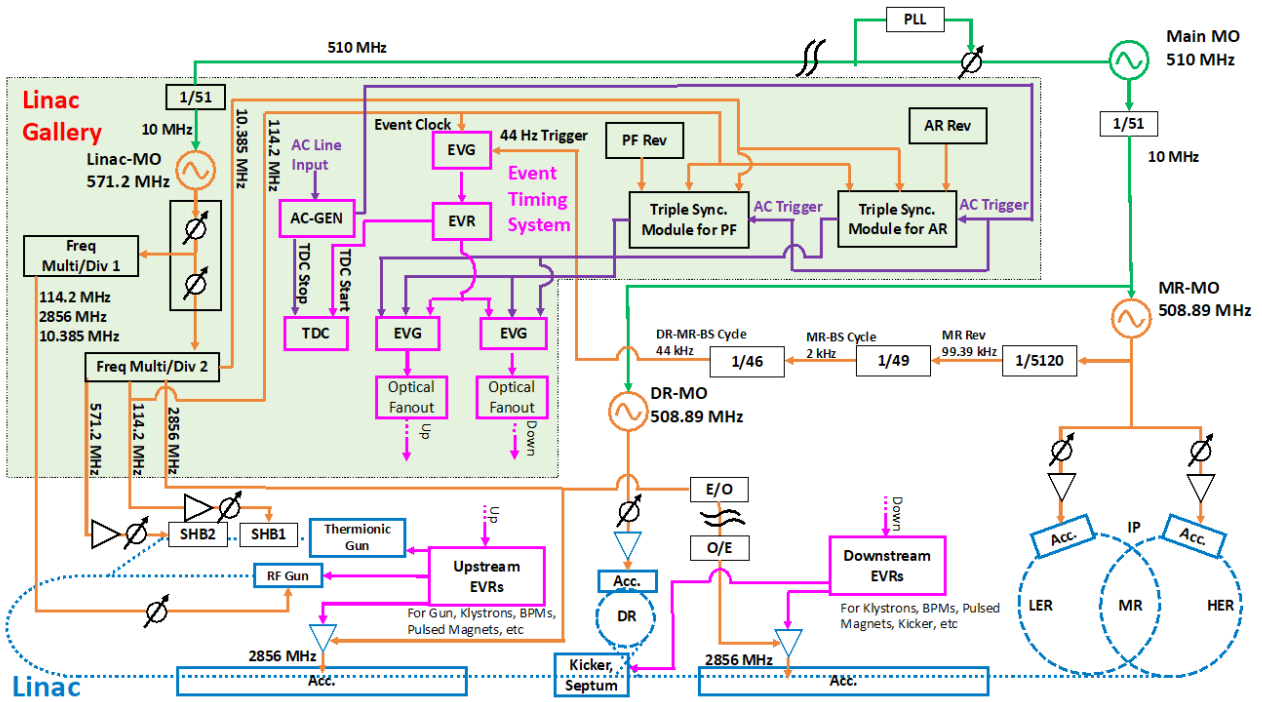


図2 パケット選択を含む入射器のタイミング同期機構の概略図。中央左にある時間測定器（TDC）で商用周波数の位相を監視し，信号発生に反映させている。

った。タイミング信号が生成できなくなることで，例えば大電力パルス変調器を含めたパルス電源が動作できなくなるとともに，装置を保護するために突然電源を停止することになり，入射運転は停止してしまふ。突然の停止により，連続運転する加速装置に様々な問題が引き起こされ，特に加速管内の放電の発生による真空の悪化からの回復に長時間を要する場面が，1日に一回ほど起こるようになった。なお，このような問題は以前から知られていたが，3月までは10日に1度以下の頻度であったため，他のソフトウェアの改修が優先され心配されていた。優先順位の捉え方についても，関係者で調整を進めているところである。

以上のことから，20年前のKEKB開始時に比べ性能が

改善している電源やクライストロンの特性を慎重に検討した上で，暫定対策措置として4月14日に正確な50 Hzを基本とするビーム生成を始めざるを得なくなった。問題がなければ，電力会社の周波数制御に依存せずに加速器の運用が可能となる可能性もあったが，ビーム軌道やエネルギーの安定度が5割ほど悪化し（図3），現在のSuperKEKB入射には耐えるものの，将来の性能向上との整合は難しいと思われた。さらに，現在はPFリングの入射キッカーが商用周波数に同期しないと安定度が悪く，短期間で改善は困難であることがわかった。

そこで，連休後のPFリングの入射開始に合わせて，5月6日に更なる暫定対策措置として，商用周波数の信号を

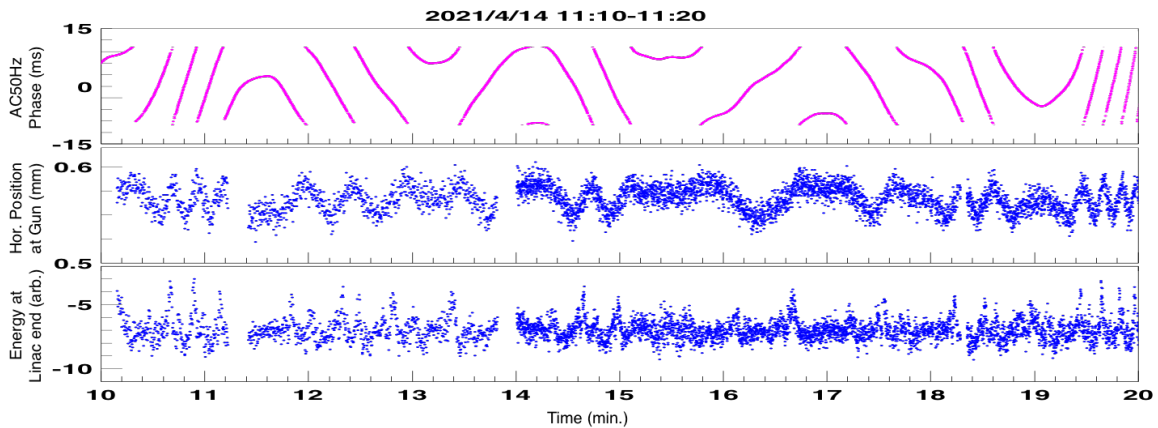


図3 商用周波数非同期運転時のビームの挙動。上から，商用周波數位相（20ミリ秒で360度），入射器最上流部でのビーム位置変動（ミリメートル），入射器終端部でのビームエネルギー（任意の単位）。

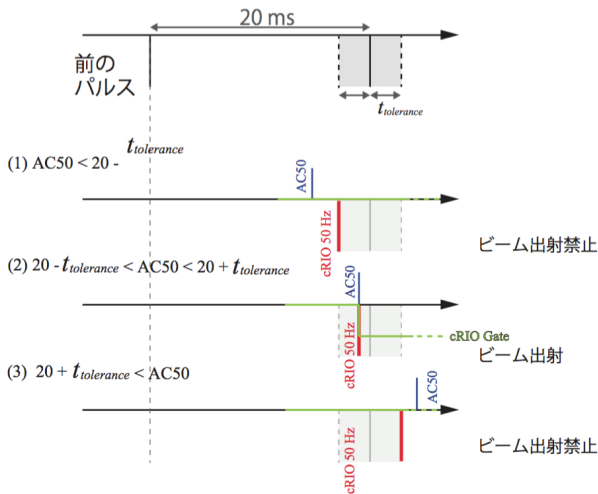


図4 第2の暫定対策措置として用意したタイミング調整機構。ACS50 から生成された cRIO 50 Hz 信号がイベントタイミング制御機構に接続され、cRIO Gate が PF リングへの入射許可信号として送られる。

イベントタイミング制御機構に伝える前に、タイミングを調整することを始めた。つまり図4のように、

- ・ 商用周波数が正常な場合は、商用周波数に緩く同期して SuperKEKB, PF, PF-AR に入射
- ・ 商用周波数が大きく外れたら、PF 入射を止め、SuperKEKB, PF-AR には商用周波数非同期入射を継続というような動作をする回路を cRIO FPGA 上に組み、設置した。

今回の複数の暫定対策措置については、準備期間の短い対応であったが、多数の関係者がそれぞれ発想を持ち寄り、それらを組み合わせて設置することになり、良い結果を得ることができた。長期的にはイベントタイミング機構で複数の解決策が検討されており、早ければ秋には暫定措置が不要になると期待される。

### 本年度夏の改善計画

この夏の停止期間には、通常の保守作業と並行して、RF 電子銃、パルス電磁石、マイクロ波中電力分配系、電子陽電子分離位置モニタ、劣化導波管、劣化スクリーンモニタ、などに複数の改善作業が予定されている。

RF 電子銃に関しては、第2レーザーに第1レーザーと同様の回折光学素子 (DOE) と増幅器を整備導入し、2つのレーザーを対称にして同時照射することにより、出力が2倍以上となり、十分な余裕を持てると考えられる。第1レーザーは DOE の利用により図5のようにビーム形状が安定しており、第2レーザーにも DOE を導入することにより、今期のように思わぬ小さなサイズのビームを作り出すことが避けられて、放電を引き起こす要因が無くなると期待される。この放電事象によりマイクロ波の時間幅を広げることが難しくなったため、96 ns 離れた2バンチ目の特性が改善しなかったが、秋にはこれらの当面の課題は解決すると期待している。また、放電によって汚れたと考えられる蛍石窓や光陰極の交換を行う。さらに、真空度の改善を狙った空洞の開発試験を予定している。

パルス電磁石について、これまでに入射対象リング (ビームモード) によってエネルギーが大きく異なる入射器下流部の整備を終えているので、上流部の軌道補正とビーム光学整合を狙って、10台のパルス電磁石の投入を予定している。上流部においてもビームモード毎に軌道が大きく異なってしまい、SuperKEKB 向けに徐々に大きくなってきたバンチ電荷のために航跡場によるビーム品質劣化があらわになってきたが、今回の上流部へのパルス補正電磁石の投入により、ビームモード毎の補正を行い、ビーム品質劣化を抑えられると期待している。装置の増設により、クライストロンギャラリー内の電源装置の配置が今後は困難になると考えられ、旧型の大電力マイクロ波パルス電源のインバータ電源利用による小型化の検討も必要となるかもしれない (図6)。

電子陽電子分離位置モニタは、陽電子生成標的直後において電子陽電子を分離して測定しようとするもので、基本的な実証試験を終え、運転に貢献させるよう準備を進めている。標的において電子陽電子対生成し 10 MeV 近傍の広いエネルギー範囲を持った正負両電荷の粒子は、直後の S バンド加速管によってバンチングされる。その際に電荷の違いにより 180 度異なるマイクロ波位相に乗ることになるが、その間隔が 175 ピコ秒と小さいため、簡単な測定を行おうとすると正負電荷が打ち消しあって何も見えない。しかし、ビームモニタから結合器やケーブルを通した信号の伝送特性パラメータを測定した上で、広帯域の測定器で測

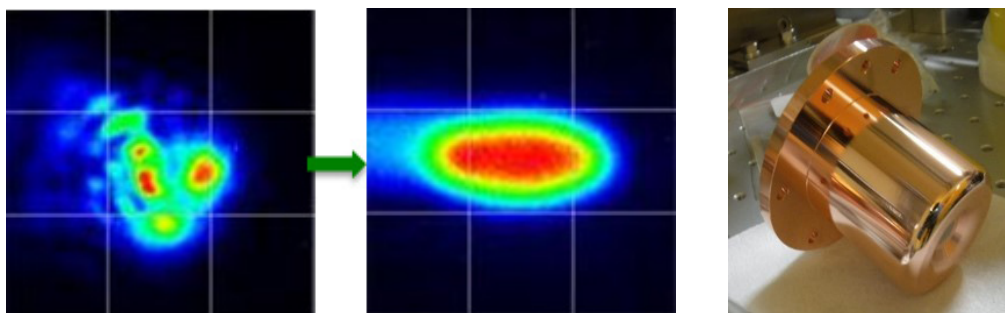


図5 回折光学素子によるレーザービーム形状整合と安定化 (左)、イリジウム・セリウム光陰極 (右)。



図6 パルス収束電磁石, パルス補正電磁石 (左), 電源とコントローラを収めた筐体 (右)。

った信号波形を逆変換すれば, 粒子の信号を図7のように再現できる可能性がある。そのような機能をFPGA上に構築し, 高速に波形を再現できるデジタルオシロスコープが入手できる。昨年, 信号を効果的に検出できるモニタを開発して, 狭隘な陽電子捕獲収束部にどうにか割り込ませて設置し, これまでに2回ビーム試験を行った。期待した測定結果が得られており, 近いうちに運用が可能になると思われる。陽電子の捕獲効率を向上させるためと, 隣のバンチに漏らさないために, 最初の加速管では陽電子を減速し, バンチング効率を上げる方が好ましいことがシミュレーションにより分かっており, そのことを直接測定して最適化が可能となることの効果が大きいと期待される。ちなみに

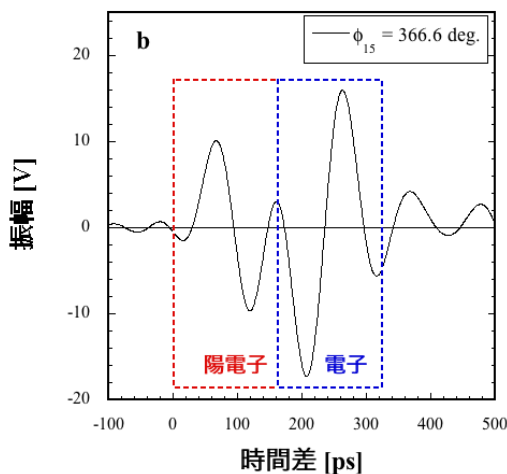
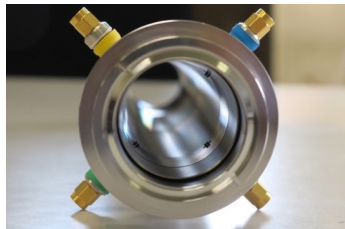


図7 粒子信号アンテナを持ったビーム位置モニタ (上), モニタ位置で再現された電子陽電子の測定波形 (下)。

隣のバンチに陽電子が漏れると, その全てが加速周波数が異なるダンピングリングでは失われることになり, ダンピングリングでは放射線遮蔽が薄いためビーム運転が継続出来なくなる可能性があるため, できるだけ漏らさないことが重要である。

### 運転体制

今年度, ミシガン大学 FRIB のコミッショニングを経験した由元崇氏が, 特別助教として加速管陽電子グループに着任し, 現在更新を進めている加速管の性能測定や設置準備などと共に, 運転の検討にも参加している。また, 総研大においてミュオン g-2 実験のミュオン蓄積検証実験を電子ビームで行ったムハマド・アブドウル・レーマン氏が, 制御ビームモニタグループに所属し, 上に述べた陽電子標的直後の陽電子電子分離型のビーム位置モニタの開発を開始している。いずれも SuperKEKB の運転にも参加し, 装置の開発が直結するビーム特性や実験効率を肌で感じてもらっている。

## 入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 古川和朗  
(2021年10月31日付け)

## 概要

夏の作業が7月7日から9月16日までの停止期間に行われ、通常の保守作業と並行して、先に報告したようにRF電子銃、パルス電磁石、マイクロ波中電力分配系、電子陽電子分離位置モニタ、劣化導波管、劣化スクリーンモニタ、などに改善作業が行われた。9月17日からRF電子銃を中心として大電力マイクロ波装置のコンディショニングを開始し、24日から入射器全系を立ち上げ、先に立ち上がるPF向けの調整を含めビーム確認は順調に進んだ。立ち上げ時期のSuperKEKBのリング内の作業のためにビーム輸送路の調整が進まなかったのは残念であった。春には手違いから状況を悪化させてしまったRF電子銃の状態について、さまざまな安定化対策が行われたが、特に第2レーザーに導入した回折光学素子が有効となっている。パルス補正電磁石7台を増設し、分散関数の残余低減や航跡場効果によるエミッタンス増大を抑制しやすくなる。また中電力用サブブースタ・クライストロンの複数の半導体増幅器への置き換えを、今年度は第2セクタで進めて、信頼性を向上させている。このような調整を踏まえ、14日からは放射光入射が滞り無く開始された。

SuperKEKB向けの電子はバンチ当たり2 nC、陽電子は3 nCを基本に、少なくとも1バンチ入射においては夏の保守期間以前より電荷量、エミッタンスとも良好な入射が期待できる。今期中には通常のウプシロン中間子T(4S)よりも高い10.75 GeVを中心としたエネルギーでの衝突も予定されており、立ち上げ期間中のエネルギー変更手順の確認も進められている。SuperKEKB加速器評価委員会などから提案されたSuperKEKB国際タスクフォースの入射器サブグループを作成し、参加者を募っているところである。このサブグループにおいては来年度から予定されている入射器の更新について議論を行うことが期待される。

2年前に入射器棟の南端に隣接する加速管組立室において火災が発生し、関係者の献身的な回復作業により、入射器本体は3週間で運転を再開し、その年の夏の保守期間において本格復旧が達成された。しかし、火災発生源となったXバンド技術開発設備Nextefについては、被害が大きく復旧作業が続けられてきた。その結果10月7日に、自動消火装置を含む安全設備の慎重な試験の後、2年半ぶりに高電圧の印加が行われ、実験の再開が可能となった。

## SuperKEKB 高度化に向けた入射器の改善作業の検討

KEK電子陽電子入射器は、SuperKEKB素粒子衝突実験とPFリング及びPF-ARでの放射光科学実験の両分野を支

えるために、2019年から4リング同時トップアップ入射を開始し、トップアップ入射開始前後を比較すると237%という比率でSuperKEKB衝突実験の効率を向上させることに成功した。SuperKEKB蓄積リングの特に陽電子リングのビーム寿命が短く、2021年には10分を割るような条件で実験を続けており、この同時トップアップ入射機構は不可欠である。この入射機構を基礎として、入射器は徐々に入射性能を高めており、SuperKEKBの衝突性能の世界記録の達成にも貢献している。

蓄積衝突リングにおいては、衝突性能の向上のためにビームビーム効果が増大するとともに力学口径が小さくなり、ビーム寿命が当初の設計値よりも大幅に小さくなることがわかって来た。ビーム寿命の減少に対抗するために、蓄積ビームの力学口径を広げる努力とともに、入射ビームの大電流化の実現が急がれることになった。単純に入射バンチあたりの電荷を増大させれば、航跡場効果により入射ビームのエミッタンスが急激に悪化し、蓄積リングの入射物理口径を超えてしまうため、並行して低エミッタンス化を進める必要がある。このような蓄積リングにおける衝突性能向上の進展に合わせて、入射器の性能向上を計画しており、装置の改造・増設を含めた計画の概要について述べてみたい。

## KEK複合加速器群における入射器

PFリングとPF-ARの2つの放射光実験施設への電子入射を維持しながら、SuperKEKBに向けての入射を実現するために、入射器の改造を2011年から続けてきた。低エミッタンス大電流電子ビームの実現のために、擬似進行波型軸外結合空洞、イリジウム・セリウム合金光陰極、及び大出力個体レーザーを組み合わせて用いたRF電子銃を開発し、その安定化を進めている。電子銃近傍での電流値としてはバンチあたり5 nCも実現しているが、下流でエミッタンスが悪化するため入射ビームとしては現在のところバンチあたり2 nCが最大である。大電流陽電子ビームについては、熱電子銃で発生させた大電流電子ビームをタンダステン標的に照射し、対生成により発生した陽電子をフラックスコンセントレータの約5 Tのパルス高磁場と0.5 Tのソレノイド磁場で捕獲し、大口径Sバンド加速管で減速バンチングした上でダンピングリングまで加速する。当初フラックスコンセントレータの0.2 mm間隙での放電が発生し心配されたが、材質として無酸素銅に変えて銅ニッケル合金を採用することによって問題を解決し、さらに加速管の高周波終端器の改善により電流を増強しよう

表1 入射器に要求されるビーム

Beam	Positron	Electron	
Beam energy	4.0	7.007	GeV
Normalized emittance $\gamma_{e,x,y}$	100/15	40/20	$\mu\text{m}$
Energy spread	0.16	0.07	%
Bunch charge	4	4	nC
No. of bunches/pulse	2	2	
Repetition rate		50	Hz

としている。

SuperKEKB 入射の要求仕様を表1に示す。生成された電子陽電子ビームの特性、特にエミッタンスとエネルギー拡がり、縦方向横方向の航跡場効果やコヒーレント放射光によって悪化させずに蓄積リングまで導いて入射させるためには、バンチあたりの電荷の大きさにより工夫が必要となる。既に低い電荷においても悪化現象は生じており、これまでの研究成果を適用して影響を最小限に抑える必要がある。放射光科学実験を継続しながら SuperKEKB 向けの入射ビームを改善することは容易ではないが、同時入射機構を最大限活用することによって、放射光実験への影響を与えずに運転中にビーム開発を行うことも可能となる。

### 低エミッタンス保持

先に述べたように、大電流のビームの低エミッタンスビームを長距離導くためには、エミッタンスを悪化させる要因を取り除いておく必要がある。ビームが加速管の中心を通過しなかった場合の航跡場による横方向エミッタンス悪化が評価されており、加速管のアライメントの誤差を短距離区間では 0.1 mm に、長区間では 0.3 mm に抑える必要がある。東日本大震災によって 1 cm 以上アライメントがずれてしまった後、精力的に測定と補正が行われ、現在では、アライメントは改善されてきた。下流区間ではエネルギー差を補正する必要からパルス電磁石の設置が進んでいるので、4リング同時トップアップ入射時のビーム軌道も比較的整っているが、特に上流部では加速管の中心から 1 mm 以上の軌道のずれがあり、パルス電磁石の増設による改善が必要と考えられる。

ビーム軌道の悪化の一つの要因としては、建物の歪みが疑われている。入射器の建物はエクспанション・ジョイントで接合された 8 つの区域から構成されているが、年間を通した測量により、ジョイント部で年間 1-2 mm の主に垂直方向の位置偏差が観測されている。

また、ビーム光学関数の誤差により、思わぬ位置で分散関数が大きくなってしまい、加速によりエミッタンスの増大を招く場合がある。特に、180度アーク部、入射器・ダンピングリング接合部、エネルギー圧縮システムなどで誤差をできるだけ抑制し、エミッタンスの悪化を防ぐ努力を続けている。

ビーム輸送路では、航跡場効果が無視できるのでエミッタンス増大が小さいと期待されていたが、現在のところ大

きく増大してしまっている。陽電子輸送路では、KEKB での入射エネルギーの 3.5 GeV から SuperKEKB の 4 GeV へ変更になったために、偏向電磁石の間隙を狭めることによって磁場の増強が行われた。この際に上下対称に修正できなかったために、発生した 6 極成分がエミッタンスを悪化させていることがわかり、ビームの観測結果を用いて、永久磁石による補正が行われている。

電子輸送路では偏向電磁石の修正は行われていないが、エミッタンスの悪化が大きい。エミッタンス測定上の障害により、ビームサイズが正しく測定できていなかったことがわかり一部は説明がついたが、未だ大きな食い違いが解明されていない。期待しない R56 の値によりビームバンチが圧縮され、コヒーレント放射光 (CSR) によるビーム不安定が引き起こされているとの指摘もあるが、暫定的な実験では確認できておらず、検討を続けている。蓄積リングの入射効率も低く、エミッタンスの悪化だけでは説明が付かないと思われ、入射点においても何か解明できていないことがあると考えられている。

さらに、1パルス内2バンチの運転においても、96 ns 離れた2バンチ目の入射効率が悪く、この解明も急がれる。1バンチ目の作る航跡場の影響が観測されており、両バンチの軌道差を抑える方策も必要となる。上流の適当な場所でマイクロ波のタイミングを調整し、エネルギー差を積極的に付けることで軌道を揃え、入射器終端での両バンチの均質化を図ってはいるが、この方策だけでは安定な運転は困難と思われる。

現在のところ衝突調整が続いており要求ビーム電流が仕様値の半分程度であるために、これらの課題は致命的にはなっておらず、衝突実験データ取得に時間を割くことが優先されているが、遠くない将来解決が必要である。

### パルス電磁石

入射器内の下流部分においては、4つの蓄積リング加速器の入射エネルギーが、2.5 GeV から 7 GeV と大きく異なり、ビーム光学整合を取るためには異なるビーム収束力が必要となるため、パルス四重極電磁石の運用が重要となる。ちなみに KEKB 計画時には蓄積リングの入射条件が厳しくなかったために、入射器内では曖昧な光学条件でビーム輸送を行い、各蓄積リングへのビーム輸送路に別れてから光学整合を確立し直していた。しかし、SuperKEKB の入射光学条件の精度要求が高く、さらに航跡場の影響も避けなければならず、KEKB 時と同じ戦略を取ることはできない。

SuperKEKB 運転開始時には、バンチあたりの電荷が小さかったため、まずは下流部のビームサイズの小さい領域で、ボア径が小さい、つまりインダクタンスの小さく設計できるパルス四重極電磁石を 30 台ほど、軌道補正を行うパルス補正電磁石を 40 台ほど設置した。しかし、電流が徐々に大きくなるに従い、エネルギー差の小さい上流部においてもビーム整合やビーム軌道の精度を上げる必要があり、パルス電磁石の増設を進めている (図1)。ビーム光学整合の精度が高くないと、ビーム分散関数の設計値から





図1 入射器に設置されたパルス電磁石

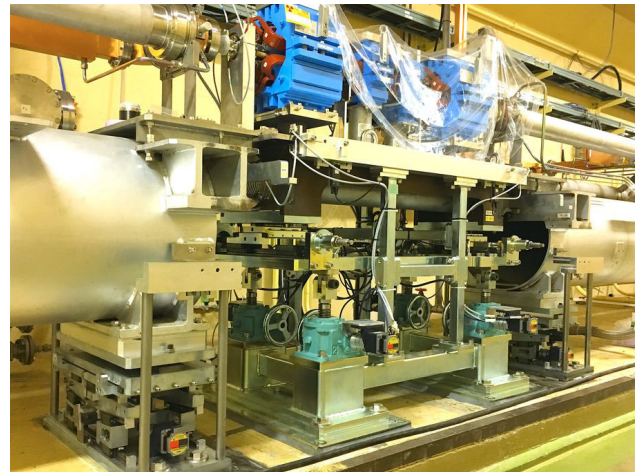


図2 入射器向けに開発された架台駆動機構

差異によって、予想以上のビームエミッタンスと軌道への影響が現れることがある。上流部においてはビームサイズが大きいため、ボア径が大きくインダクタンスも大きな電磁石に対応する電源が開発された。

当面の設計目標の4 nCのビームについて、エミッタンスを悪化させないためには、100  $\mu\text{m}$ 以下の精度でビーム軌道を制御する必要がある。さまざまな機器の安定性から軌道の変動が観測されており、パルス電磁石の増設によりビームの安定化が計画されている。

### 高速補正電磁石

パルス電磁石は20 ms間隔の入射器のビームパルス毎に異なる磁場を発生し、ビームの光学整合や軌道を制御するために用いられる。そのため、パルス幅約1 msの磁場を発生する（四重極電磁石については、電力の80%がパルス毎に回収されている）。一方、1パルス2バンチの加速運転において、2バンチ目の軌道を制御するためには、さらに高速のキッカー補正電磁石が必要となる。そこで、PF入射用に開発された技術の協力をいただき、セラミクス埋め込み電極を用いるキッカー電磁石とパルス電源の開発を始めている。96 ns間隔の2バンチを区別して補正するために、100 ns程度の立ち上がりを期待している。

### 架台駆動機構

先に述べたように、エクспанション・ジョイントでの年間2 mmに及ぶ装置の偏差は影響が大きいと考えられ、電磁石による軌道補正を施しても、影響が残るかもしれない。そこで、加速管と収束電磁石の架台を1  $\mu\text{m}$ 精度で5軸を遠隔操作する駆動架台を内製して用意している（図2）。今後、必要性を見極めながら設置を進める予定である。

このようにKEKの電子陽電子入射器は、今後も複数装置の更新を行いながら、素粒子物理と放射光科学の両分野の実験を支えていく予定である。

## 入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 古川和朗  
(2022年1月24日付け)

## 概要

秋の入射運転は2021年12月23日に無事に終了し、27日までの入射器の単独運転において、大電力装置の保守作業と性能改善のためのビームを用いた開発が行われた。秋のSuperKEKB運転においては、ビーム輸送路でのビーム挙動の解析とビーム輸送路及びリング入射点の光学整合で改善が見られ、今後の入射効率の進展が期待される。通常よりも高いエネルギーの10.75 GeVを中心とした衝突実験も無事3週間弱で実施することができた。その後の冬の停止期間が短かったために大きな改造は行われていないが、主要な変更点を列挙すると、RF電子銃向け第2レーザーの一部増幅器の交換による増強、レーザー窓の汚れを避ける光軸角度の変更、Rセクタ(J-ARC)部のすべてのスクリーンモニタの交換、ビームダクトの拡大、一部の電磁石電源制御のcRIOから20ビットDACを持つRaspberry Piコントローラへの移行、マイクロ波源停止時に次のビームパルスを阻止する機構の試験導入、低速陽電子向けビーム位置モニタ読み出し装置更新、などが挙げられる。1月14日からマイクロ波コンディショニングを始め、31日のPF入射開始以前に放射光2施設とSuperKEKBを含めた4リングの入射ビームの特性を調停して入射条件の確立を急ぐ。SuperKEKBの運転を次年度へ連続させるため、SuperKEKB入射開始は2月21日を予定しており、それまでの期間を利用して放射光入射と共存可能なビーム試験を行う。SuperKEKBと放射光施設のそれぞれの理由により運転期間の重なりが小さくなっているため、入射器の運転期間は年間9ヶ月近くと長くなっており、今後の長期運転にも保守時間が充分であるかどうか検討を進めているところである。

## SuperKEKB 高度化に向けた入射器の改善作業の検討

KEK電子陽電子入射器は、SuperKEKB素粒子衝突実験とPFリング及びPF-ARでの放射光科学実験の両分野を支えるために、2019年から4リング同時トップアップ入射を開始し、トップアップ入射開始前後を比較すると237%という比率でSuperKEKB衝突実験の効率を向上させることに成功した。SuperKEKB蓄積リングの特に陽電子リングのビーム寿命が短く、2021年には10分を割るような条件で実験を続けており、この同時トップアップ入射機構は不可欠である。この入射機構を基礎として、入射器は徐々に入射性能を高めており、SuperKEKBの衝突性能の世界記録の達成にも貢献している。

蓄積衝突リングにおいては、衝突性能の向上のためにビ

ームビーム効果が増大するとともに力学口径が小さくなり、ビーム寿命が当初の設計値よりも大幅に小さくなるようになってきた。ビーム寿命の減少に対抗するために、蓄積ビームの力学口径を広げる努力とともに、入射ビームの大電流化の実現が急がれることになった。単純にバンチあたりの電荷を増大させれば、航跡場効果により入射ビームのエミッタンスが急激に悪化し、蓄積リングの入射物理口径を超えてしまうため、並行して低エミッタンス化を進める必要がある。このような蓄積リングにおける衝突性能向上の進展に合わせて、入射器の性能向上を計画しており、前回に引き続き装置の改造・増設を含めた計画の概要について述べてみたい。

## 低エネルギー拡がり

大電流でありながら小さなエネルギー拡がりの電子ビームを加速するために、当初の計画では、時間方向に方形のビームをRF電子銃から供給する予定であった。そのために、周波数応答の優れたイッテルビウム添加のYAGレーザーのファイバーレーザーと固体レーザーの開発を行い、時間方向の波形整形を進めていた。低電流においてはビーム試験が進展したが、残念ながら現在のところ安定した大電流ビーム加速には至っていない。

光陰極としてはアルカリ金属を避け、東日本大震災の教訓から震災時に真空が破れても回復が容易であるように、真空悪化に耐性があり量子効率も高い合金を探し、現在のところイリジウム・セリウム合金を採用している。アルカリ金属よりも量子効率が低いために大出力のレーザーを必要とすることになっているが、安定性を重視して使用を継続している。

そこで、ネオジウム添加のYAGレーザーを固体レーザーの媒体として採用し、電流を向上させてきた。しかし、時間方向の波形整形が可能となる応答が無いので、生成したビームは時間方向にガウシアン形状を持ち、結果として大電流においてはエネルギー幅が大きく拡がると思われる。現在はバンチあたりの電荷が2 nC以下なので、入射は可能であるが、早い内に解決策を用意する必要がある。

## エネルギー圧縮システム

陽電子ビームはダンピング・リングとバンチ圧縮システムを経由して加速され、入射器終端においてはエネルギー幅が大きくなっているため、当初から6台の偏向電磁石によるシケインと加速管を配置したエネルギー圧縮システムを利用している。上に述べたように大電流の電子について

もエネルギー圧縮システムが必要と考えられる。そこで、入射器からビーム輸送路に入った区域の偏向電磁石による R56 光学係数を利用して、エネルギー圧縮システムの構築を計画している。

先に述べたビーム輸送路でのエミッタンス悪化の原因が完全には特定できていないため、CSR の影響などさまざまな可能性を考慮した上で、蓄積リングの時間方向の口径ともバランスを取りながら、設計を進めている。さらにマイクロ波源から設置場所への距離が大きくなるために、マイクロ波の減衰をできるだけ抑えた円形断面導波管を使用した伝送路を構築すべく計画している。

### 大電流陽電子ビーム

低エミッタンスと低エネルギー拡がりを実現することができれば、前号で示した要求仕様に基づく SuperKEKB 入射ビームを用意できるものと期待しているが、今後の衝突運転の進み方によっては、特に陽電子ビームの寿命が短くなる可能性もあり、将来の可能性として、バンチあたり 6 nC 程度までの陽電子ビームを加速することも想定しなくてはならないかもしれない。

先に述べたように、陽電子捕獲磁場を発生させるフラックスコンセントレータの放電の問題が解決され、さらに陽電子ビーム損失を減らすべく標的直後で直ちに高電界で加速するために電界を上げる必要がある。加速管の高周波終端器における放電が懸念されており、その改善により設計値電圧に近づけるよう正常化できると期待している。

陽電子標的部では、標的脇の直径 2 mm の穴に電子を通過させて加速管に通す際に、航跡場効果を抑えるために電子ビームが加速管の中心を通るように装置を配置している。つまり、直径 4 mm の陽電子標的自体は中心からの偏差が 3.5 mm となっており、これを中心に近づけることが好ましい。標的直後に設置可能なビーム位置モニタが最近開発されたので、このモニタを利用して高磁場ソレノイド中に螺旋軌道を描く陽電子を観測しながら調整を行えば、陽電子の収量を上げられるかと期待される。

### 最大エネルギー

SuperKEKB の衝突実験は、通常 B 中間子のうち T (4S) 状態を生成するようなエネルギーで行っているが、重心エネルギーで 440 MeV ほど高い T (6S) 状態での実験にも期待がある。

入射器に設置されている約 230 本の加速管のうち、約 150 本は製造から 40 年経過したものであり、また当初の設計加速勾配は 8 MeV/m であったところ、現在は 20 MeV/m で使用されている。そのため劣化が激しく、徐々に印加電圧を下げざるを得なくなっており、また電子ビーム溶接部から水漏れを起こすものも多くなっている。そこで、2023 年までに全体の 7% に当たる 16 本の加速管を交換し、T (6S) 状態での実験にも備えようとしている。しかし、今後も劣化は進むと考えられ、どの程度の数の加速管の交換が必要か見極めようとしている。

また、大電力パルス・クライストロン電源に使用されているパルス形成回路のコンデンサが製造から 30 年を超えており、微量の PCB を含んでいる可能性があり、さらに破壊検査が必要となるために、対象の約 700 台の交換を予定している。これらのコンデンサは性能と安全のためにセラミック容器を使用しているため、製造に時間を要することに注意を払い、交換を始めているところである。

KEK の電子陽電子入射器は、前号と今号で述べたように、大きく分けて 7 項目の装置の更新を行いながら、素粒子物理と放射光科学の両分野の実験を支えていく予定である。ビーム性能の向上を図るために引き続きさまざまな技術研究開発をもって、貢献したいと考えている。