

## 入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 古川和朗  
(2017年11月13日付け)

### 概要

5月15日から10月10日までの連続5ヶ月弱、SuperKEKB 向けの建設のために長期の運転停止を行った。この期間を利用して、集中的に古い装置の撤去と SuperKEKB 入射に向けた新規装置の設置を進めることができた。特に、ダンピング・リング (DR) 接続部と3-5セクタにおける収束電磁石及び軌道補正電磁石の更新に関しては、放射光入射にも使用してきた古い装置を撤去しないと新しい装置を設置できないため、長期の建設期間が必要となった。10月10日からは、入射器の立ち上げ調整を進めており、まずは10月30日からのPF及びPF-AR放射光施設への入射に向けた調整を終えたところである。

### パルス電磁石群の設置

SuperKEKB 向けの建設が始まった2010年以降、震災復旧の期間を含めて、長期の停止期間を確保することができなかったため、放射光施設関係者と相談し、今回初めて連続5ヶ月弱の停止期間を確保することができた。KEKBの建設時期の1997年にも、光源の改造時期と合わせることで、9ヶ月連続の停止期間をいただいております。複数のプロジェクトに対する入射器の更新の難しさを感じるところである。部品・装置の事前・分割調達を追求するなどスケジュールの最適化を行うことよって、多数の機器の設置を進めることができた。また、装置の詳細設計や図面作成を内部で行い、資源節減をさらに進めてきた。これらの作業の内、まずはパルス電磁石を紹介する。

SuperKEKBの運転が本格化すると、KEKB計画の後半で行われた3蓄積リング同時入射を、PF-ARを含めた4蓄積リングに拡大する必要がある。KEKBでは入射ビームに対するエミッタンスの要求が緩かったために、エネルギーの低いビーム向けのビーム光学設定をエネルギーの高いビームにも使用し、入射器では共通のビーム輸送電磁石設定でビームを加速することができた。より正確なビーム光学調整はそれぞれの蓄積リングへのビーム輸送路で行われた。しかし、SuperKEKBの入射ビームに対する横方向エミッタンスや縦方向エネルギー分散は厳しく制限されるため、それぞれの入射ビームに対して独立に、600mにわたって約100 $\mu\text{m}$ の精度の高い軌道制御を行わないと、ビーム航跡場によるエミッタンス悪化が顕著になってしまう。

そのために、少なくともそれぞれのビームエネルギーの差分が特に大きい入射器の後半部分においては、パルス毎にビーム軌道と光学関数を正確に制御できるよう、電磁石をパルス運転可能にする必要があった。パルス収束電磁石30台とパルス補正電磁石36台を今年度当初までに製造

し、長期停止期間中にDC電磁石と電磁石電源を撤去し、さらに新しいパルス電磁石と電源を設置、そして試験を行った。昨年度、試作パルス電磁石の試験を行うことができたが、量産機のビーム運転は初めてとなるので、慎重に設置計画を立案し、9月上旬から約1ヶ月間の試験期間の確保に努めた。

パルス電源は、収束電磁石向けには1mH、330A、340V、0.5msフラットトップ、約2ms幅、補正電磁石は3mH、10Aという仕様で、それぞれ系内で設計が行われた。収束電磁石についてはコイルに送られた電力の約75%を電源で回収できると考えており、これにより、入射器の供給電力を大きく追加する必要がなくなった。電源は13の筐体に分散して配置され、50Hzのパルス毎の精度の高い動作を保証するために、50Hzのモニタ機構も構築された。また、パルス動作のためにビームの3ミリ秒前にタイミング信号が必要となり、パルスごとの電磁石励磁の情報も必要のために、全ての筐体にイベント制御・タイミング信号発生機構が組み込まれている。

現在のところ長期の安定度として、暫定の仕様である0.1%を充分下回る安定度が得られている。

図1に典型的な筐体の写真を示すが、左の2列の上段から、パルス電源用DC電源、収束電磁石用パルス電源、パルス電源用DC電源、補正電磁石用パルス電源、インタロック制御装置(cRIO)、信号変換・接続盤、右の1列には制御装置(PXI)、CPU、商用電源接続盤、などが並んでいる。パルス収束電磁石4台、及びパルス補正電磁石4台がこの筐体に接続される。

図2には地下に設置されたパルス電磁石本体を示す。



図1 パルス電磁石電源が設置された筐体



図2 加速器トンネルに設置されたパルス電磁石と架台

架台も今回新しく設計され、1  $\mu\text{m}$  のアライメント調整が可能となっており、Phase 3 運转向けのアライメント時に性能を発揮すると期待されている。

0.1% 以下の精度の高い磁場の発生のために、精度の高いタイミング信号がビーム加速の3ミリ秒前に必要となる。それぞれの蓄積リングは気圧・潮汐・温度による周長の変化をクロック周波数の連続補正によって吸収している。その内 SuperKEKB リングは30ピコ秒の高い同期精度を求められるため、設計上入射器と完全同期したクロックで動作しており、1ナノ秒以下の精度の3ミリ秒遅延信号の生成は困難ではない。ところが、蓄積リングの地下深度が異なるために、PF・PF-ARの周長補正の年較差・日較差の大きさは SuperKEKB の数十倍になり、3ミリ秒前にパルス電磁石向けの信号を発生した上で、数百ピコ秒精度で同期したビーム入射信号を発生することは容易ではない。そこで試験を繰り返し、クロックの差分を観測することで信号発生予測精度を高めている。

9月の電源試験と10月のビーム試験においては、今のところ仕様を充分上回る安定度を示しており、エネルギーが2.5 GeV と6.5 GeV と大きく異なるが、同じ電子銃設定を使う、PFとPF-ARのビームを問題なく高速に切り替え、独立なビーム調整を実現することができている。残念ながら、電子銃の切り替えの高速化は少し先になるが、将来の放射光運転と SuperKEKB 運転の間の干渉を最小限とする目処が付いたと考えている。

### ダンピング・リング接続部のエネルギー圧縮装置とバンチ圧縮装置

ダンピング・リング接続部への入射用ビームエネルギー圧縮装置と出射用バンチ圧縮装置の設置も今期の建設の中で大きな作業の一つであった。入射器内では、ビーム・バンチ長を数ピコ秒から十ピコ秒の適度な長さに維持して加速を行う必要がある。一方、ダンピング・リングに入射するためにはバンチ長の制限は厳しくないが、エネルギー分散を縮小させる要求が厳しい。そこで、ダンピング・リン

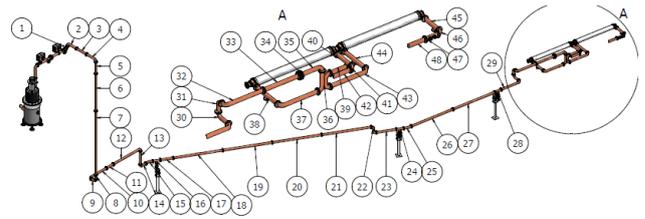


図3 ダンピング・リング入射路の ECS のために、マイクロ波が導波管を通じてクライストロン（左端）から地下に導かれた後、入射路の途中に置かれたエネルギー圧縮用の加速管（右端 A 部）に送られる。

グへの入射路に粒子到達時間と粒子エネルギーの間の光学収差を発生させた上で、加速装置を置くことによって、エネルギー分散を圧縮する（Energy Compression System – ECS）。さらに、出射路には全く逆の役割をもたせた加速装置を置き、バンチ長を圧縮する（Bunch Compression System – BCS）。

これらの新設装置の大電力パルス電源は入射器のクライストロン・ギャラリに置かれ、入射路の加速装置へはマイクロ波用方形導波管で接続する。経路が複雑であるため、ECS と BCS のそれぞれについて、数十 cm から 2 m の導波管を約 50 本組み合わせて、約 45 m の経路を接続することになる。

図3には入射路の ECS 用の導波管の設置の様子を示す。出射路の BCS 用の導波管も同様に設置されている。これらの方形導波管内は真空となっており、導波管同士を接続するためのフランジは、真空シールとしての役割と同時に、マイクロ波を伝えるための電気的な接続も実現する必要がある。入射器では建設当初より、オス・メスの無い対称なフランジを独自に設計し使用してきた。

図4のようなフランジの方形開口部の外側のヘリコフレックス・ガスケットで真空を封止した上で、方形開口部の特に電流の流れる長辺で電気的接触をさせる。今回複数のフランジにおいて図面通りの工作がされず、約 100  $\mu\text{m}$  の誤りがあり、大電力マイクロ波を通すことができなかったため、再工作を行っている。ダンピング・リングの試験運転には大きな影響を与えない予定である。

陽電子標的の後方の陽電子捕獲部においては、できるだけ多くの陽電子を捕獲したいわけだが、設計が適切でなければ品質の悪い陽電子の割合が増えてしまう。一方、ダン

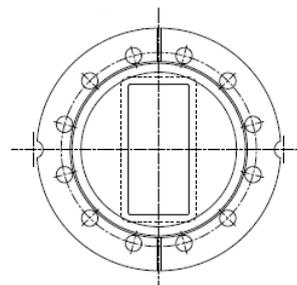


図4 内面 34 mm × 72 mm の方形導波管を接続する特殊フランジ

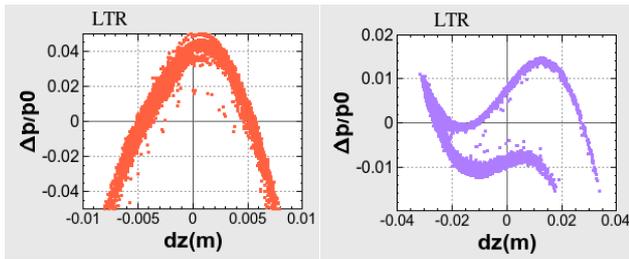


図5 ECS 前後の時間・エネルギー空間でのビームの広がり

ピング・リングにおいてはビーム損失を放射線管理上許される範囲に抑えなくてはならない。加速管と電磁石による陽電子の捕獲，コリメータによるビームの制限，ECS によるエネルギー圧縮などの調整パラメータをシミュレーションによって最適化しており，試験運転においては小電流から確認を進めていくことになる。BCS においても同様の手順を踏むことになる。

例えば，図5には ECS 前後の時間・エネルギー空間でのビームの広がりを示している。エネルギー広がりが大きなビームを左図のようにコリメータにより±5%のエネルギー広がりに制限する。ECS を通すことによって，右図のように時間方向にはビームが広がるが，エネルギー広がりはダンピング・リングの口径の±1.5%に抑えることができていることがわかる。

### 超伝導ウィグラー真空ダクト更新作業

真空リーク問題を抱える PF リング超伝導ウィグラーの真空ビームダクト交換作業は7月18日～7月21日にかけて行われた。初日7月18日には現ビームダクトの取り外しと新ビームダクト挿入までを行った。2日目7月19日に1箇所目の溶接とそのリークチェックを行った。3日目7月20日に2箇所目の溶接とそのリークチェックおよび3箇所目の溶接を行った。最終日7月21日に3箇所目のリークチェックと作業範囲全体のリークチェックを行った。作業中、断熱真空の真空引きがなかなか進まないのと、溶接ではなくフランジ締結部でリークがあったが、これらの問題もすぐに解決し、ほぼ予定していた工程通りに作業が完了した。超伝導ウィグラーに更新用の真空ビームダクトを挿入し、フランジを溶接して、下流のビームダクトを取り付けた様子を図1に示す。

なお、今回のビームダクト更新作業に付随して、超伝導ウィグラー直下流部に接続されているビームダクトのベローズ(3箇所に及んだ)のRFシールドフィンガーに、超伝導ウィグラーの放射光による溶融や破損が発見された。損傷程度は軽微で電子ビームの蓄積は十分可能と判断し、10月運転に備えて一旦ビームダクトの組立てを完了した。RFシールドの損傷なのでビーム不安定の発生に影響をしている可能性もあり、放射光アブソーバの配置の見直しも含め損傷原因を分析したのち、損傷したビームダクトの交換部品を製作して修理に備える方針である。



図1 超伝導ウィグラーに更新用の真空ビームダクトを接続(左図)し、溶接を行って下流のビームダクトを復旧(右図)した様子を示す。

### セプタム2水漏れ対策(S2上流ダクト改造)

PFリングの入射点に設置されているセプタム2(S2)チェンバは1988年より運転に使用されてきたが、老朽化により2015年4月に蓄積リング側の冷却水配管からリークが発生し、液体シール材による補修を施して運転を継続してきた[1]。しかしながら、2017年3月に再びリークが発覚し、春期停止期間中に2度目の液体シール材による補修を施した。その後の運転ではリークを抑えることができたが、このままでは運転中に重大トラブルを引き起こしかねないことから、夏期停止期間中にS2上流側のビームダクト(S26-1)を改造し、問題の冷却水配管を真空引きして運転できるように対処を施した。

問題の冷却水配管は、上流にある偏向電磁石B26からS2内の銅板に照射される390W(450mA蓄積時)の放射光パワーを除去する目的で取り付けられている。今回、銅板への入熱を大幅に低減させる目的で、S2直上流にある長さ459mmのビームダクトに放射光アブソーバを追加できる改造を行った(図2)。これにより、銅板への入熱は30W程度になると計算され、問題の配管から冷却水を抜いて真空引きした状態で運転できるようになる。また、入射スキームや入熱パワーの予測を確実なものとするため、S2チェンバの位置の精密測量も行った。

今回の改造による懸念事項として、追加したアブソーバの先端が蓄積ビーム位置から15mmまで近づくことになるため、入射時にビームロスを引き起こす可能性が高くなる。したがって、10月30日のPF立上げ時には入射スキームを調整する必要があると予想され、調整を施しても入射が困難と判断されれば、1日を真空作業と真空立上げに充てて、アブソーバ位置の調整を行う予定である。調整によりアブソーバをビームから20mmまで遠ざければ、入熱は許容限界とされる90W程度まで上昇するが、アブソーバ位置は入射点での銅板(21mm)と同程度となり入射に支障はなくなると考えられる。

本改造はあくまで一時的なものであり、根本的な解決策として、できるだけ早い時期に更新できるように新S2ダクトの設計を進めている。

[1] PF NEWS Vol. 33 No. 1 May, 2015, Page 7.

[http://pfwww.kek.jp/publications/pfnews/33\\_1/genjo.pdf](http://pfwww.kek.jp/publications/pfnews/33_1/genjo.pdf)

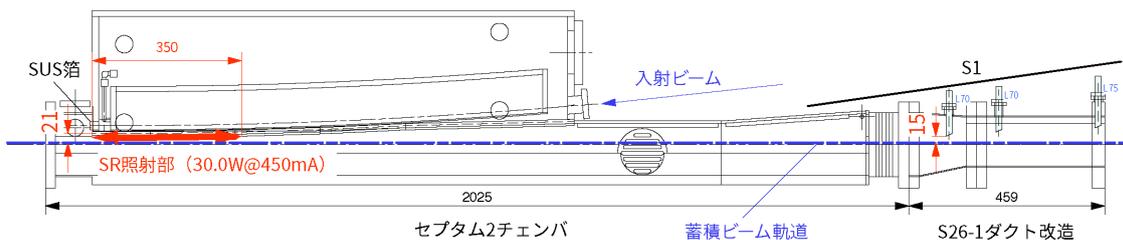


図2 S26-1ダクト改造によるS2へのSR入熱の低減(390W→30W)

### 運転，共同利用関係

5月にPFおよびPF-ARの運転を停止した後，5カ月以上にわたって入射器の大規模な改造工事が行われてきましたが，入射器を担当する加速器第五系をはじめとする加速器スタッフの尽力により，PFについては11月6日から，PF-ARは11月10日から，それぞれ第2期のユーザー運転を開始することができました。なるべく長い運転時間を確保するために，PF，PF-ARともに12月27日の朝まで運転を行う予定です。また第3期は，PFについては1月23日から3月20日の朝までユーザー運転を行う予定ですが，3月2日から4日に開催される量子ビームサイエンスフェスタに合わせて，3月2日の朝に一旦運転を停止し，ユーザー運転再開は3月6日を予定しています。PF-ARについては，年度当初の段階では第3期の運転予算が確保できていませんでしたが，物構研および機構全体の内部努力によって予算を捻出し，2月7日から2月23日の間，ユーザー運転を行うことができるようになりました。このように今年度は変則的な運転スケジュールとなり，ユーザーの皆様にはご不便をおかけしておりますが，入射器の改造によって，PF，PF-ARに加えてSuperKEKBの2つのリング(HER, LER)の合計4リング全てに対して，任意のタイミングでビーム入射が可能になり，PFだけでなくPF-ARに対してもトップアップ入射が実現できると期待されますので，どうぞご理解のほど，よろしく願います。なお，トップアップ入射に向けたマシンスタディは，第3期より開始される予定です。

PFの利用には一般の共同利用実験の他にも様々な形態がありますが，このたび有償利用制度に関して2件の変更がありました。優先施設利用は，国又は国が所管する独立行政法人その他これに準ずる機関が推進するプロジェクトにより採択された研究課題の実施のために，施設を優先的に利用することができる制度で，従来，科学研究費助成事業(科研費)は対象外とされていましたが，近年の競争的資金をとりまく状況の変化を受けて，10月より科研費でも利用が可能になりました(<http://www2.kek.jp/imss/pf/use/program/>)。また，放射光科学研究施設を初めて利用する企業等の方のために試行施設利用制度が新設され，優先施設利用と同じ料金で利用できるようになりました(<http://www.kek.jp/ja/ForBusiness/Cooperative/UsingFacility/>)。利用を希望される方は，PF利用相談窓口(pfexconsult@pfqst.kek.jp)またはビームライン担当者までお問い合わせください。

### ビームライン改造等

すでにお知らせしております通り，縦偏光した高エネルギーX線を供給しているPF BL-14の超伝導ウィグラーに

おいて，蓄積リングに設置されているビームダクト，および，超伝導電磁石を冷却する液体ヘリウム断熱真空部の2か所にリークが繰り返し発生したため，2016年度第3期よりビームラインを閉鎖し，この夏にダクト全体の交換作業を行いました。長期のシャットダウンによりユーザーの皆様にはご迷惑をおかけしましたが，2017年度第2期よりユーザー実験を再開することができました。

また，老朽化によって雨漏りが問題となっていたPF光源棟の屋根について，ここ数年間要求してきた予算が認められ，夏季シャットダウン中に大規模な防水改修工事を行いました。工事中は騒音等でご迷惑をおかけしましたが，これで安心して実験を行っていただくことができます。PF，PF-ARには他にも老朽化によって問題が生じつつある場所がありますが，順次予算を確保して改修を行い，安定・安全な運転を確保していきたいと考えております。

### 人事関連

低速陽電子グループの教授として東北大学金属材料研究所の永井康介(ながい やすよし)さんが着任し，低速陽電子を物構研の4つの柱の一つとなるプローブとして確立すべく，グループの立ち上げに尽力されます。なお，永井さんは東北大学とのクロスアポイントメントとなります(東北大80%，KEK20%)。電子物性グループの研究員の湯川龍さんが，元素戦略電子材料プロジェクトの特任助教として着任され，引き続き電子物性グループにおいて，革新的電子材料の研究に従事されます。また，主幹秘書室の濱松千佳子さんが退職され，王坤(ワン クン)さんが着任されました。