

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 古川和朗
(2020年2月9日付け)

概要

秋の入射器運転期間においては、大きな障害なく12月12日に無事運転を終えることができた。昨年春のSuperKEKB フェーズ3の初期運転において、Belle II 検出器へのビーム・バックグラウンドが大きな影響を持っていることが分かり、秋の立ち上げ時から入射バックグラウンドの低減には注意が払われてきた。エネルギー圧縮装置の加速管の位置における分散関数の低減や、ビーム輸送路における水平垂直結合の低減などビーム光学精度の対策を施した結果、大きな改善が見られた。RF電子銃の電流については、立ち上げ時に比べて終盤には1/3程度まで低下してしまっただけで、蓄積リングでのビーム寿命または入射効率の低下と相まって、蓄積電流に影響があった。PFとPF-ARの2つの放射光施設も含め、5月から開始した4+1蓄積リングの同時トップアップ運転については、特に問題なく継続できており、運転の終盤にはパルス内2バンチ入射の試験も大きな問題なく行われた。

年末から年初にかけて評価を試みたRF電子銃のイリジウム・セリウム光陰極については、昨夏から利用した陰極が優れているとの確証が得られなかったため、知見を増やすためにも、一昨年の夏から一年間利用した陰極と同じ素材を使用することにして、調整を続けている。並行して、SuperKEKB入射ビームを基礎として、PF、PF-AR入射を視野に入れたビーム品質の調整も行われた。入射器棟に受けた火災の影響については夏の保守期間に回復させることができたが、加速管組立室、加速管準備室の回復については作業を継続しており、来年度の早いうちの復旧を目指している。

加速管

電子陽電子入射器は1978年にPF放射光施設への入射に向けて建設を始め、その後TRISTAN計画、KEKB計画、PF-AR放射光計画、さらに現在コミッショニング中のSuperKEKB計画へ対応するために改造が加えられてきた。さまざまな機器がそれぞれの計画の要求性能に合わせて更新されたが、一部の機器は40年を超えて使われていることになる。

入射器は60の加速ユニットから構成されており、一つの加速ユニットは10mの長さを持ち、マイクロ波源としての40MWクライストロン、マイクロ波パルス圧縮器SLEDと、それぞれ2mの長さを持つ4本の加速管などから構成される(図1)。ほとんどの加速ユニットはもちろん電子の加速に用いられるが、一部はバンチ圧縮やエネルギー圧縮など、電子の特性を調整するために用いられ

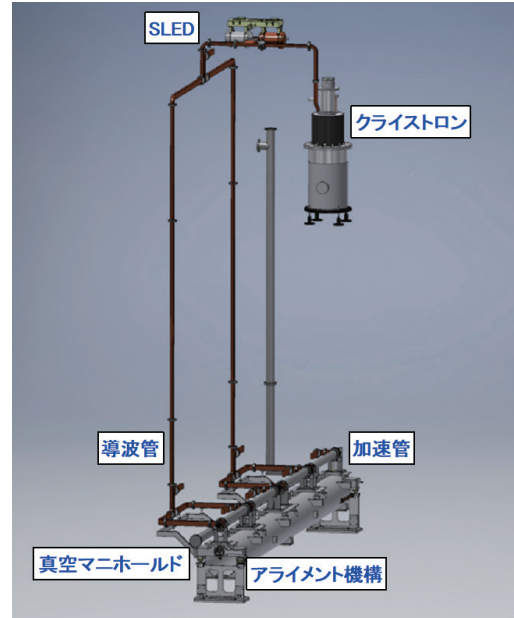


図1 マイクロ波源クライストロン、マイクロ波圧縮器SLED、4本のSバンド加速管などから構成される加速ユニット。



図2 縦に切断して断面が見えるようにした2mの2/3πモード定加速勾配進行波型加速管。

る。このうち加速管については、PF向け建設時に約160本が設置され、さらにKEKB計画に向けて約100本が追加されたが、SuperKEKB計画に向けては10本のみ追加されたのみで、他は継続使用されている(図2)。当初のPF向け加速管は8MV/mの加速勾配で設計されたが、KEKB計画では最大電子エネルギーを2.5倍以上に高める必要があり、加速器部の長さを400mから600mへ延長するとともに、新設した加速管は20MV/mの加速勾配で設計され、当初のPF加速管についても加速勾配を向上させて20MV/mで運用された。

KEKB計画においては、PF加速管も含めて大きな問題なく運用されていたが、SuperKEKBに向けた改造において再検討すると、加速管の劣化が問題になってきた。KEKB計画の11年間で大電流ビームを加速し続けたこと、

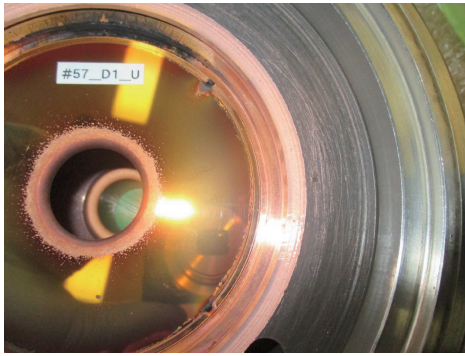


図3 劣化した加速管の開口部の例，梨子地になり放電しやすくなっている。

東日本大震災で全体の真空が長期間破れたことに加えて，特に PF 加速管が低加速勾配で設計されていたことも影響していると考えられる。

入射器内には電子陽電子のエネルギーが規定されている場所が3ヶ所あり，それぞれで，放電や故障などによりエネルギーが不足する場合には，その区間で加速に供していない加速ユニットを利用してエネルギーを補填する。このような加速ユニット組み替えは月に数回行われる。ところで，現在 SuperKEKB において最も興味のある B 中間子の共鳴状態 $\Upsilon(4S)$ に向けた 4 GeV の陽電子と 7 GeV の電子の加速を続けている。しかし，一部の研究者が興味を持っている励起状態 $\Upsilon(6S)$ の生成を行うためにはエネルギーが不足し，加速ユニット組み替えが成り立たないことがわかってきた。加速に供しない加速ユニットが残されておらず，故障時にはビーム運転の回復のために長い時間を要する可能性がある。

一部の加速管の長年の運用においては，放電によって銅の表面が痛んだために電子放出が起きやすくなり，そのために暗電流が増えるとともに放電が起きやすくなっている(図3)。放電が起るとマイクロ波のエネルギーが電子陽電子に伝えられず加速ができなくなる。1つの加速ユニットの4本の加速管のうち1本の放電が増えると，そのユニットの加速エネルギーを下げざるを得ない。それらの合計加速エネルギーが大幅に下がってしまえば，衝突実験は成り立たなくなる。また，6.5 GeV のエネルギーの PF-AR の入射にも影響が生じる。40年を経過した当初の PF 加速管から構成されている33ユニットのうちでは，残念ながら19ユニットで SuperKEKB 向けに期待する加速勾配を得られなくなっている。

また，銅の加速管の周囲には31度の冷却水を通して加速管の温度を一定に保持しているが，金属の腐食により冷却水が漏れる場合がある。カプラー部の冷却水路の電子溶接は特殊なため，その部分から漏れが生じると，残念ながら修復が非常に難しい。40年を経過した PF ユニットのうち，現在6ユニットで水漏れの問題を抱えており，暫定措置で運用しているため，再度の水漏れがあれば，停止して交換の必要が生じる。

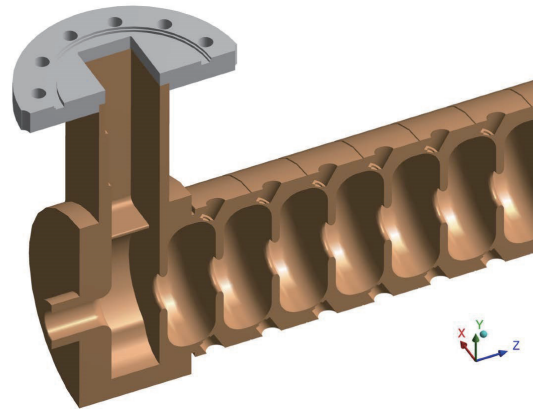


図4 新しく設計された加速管は放電や漏水に対して適切な対策を講じている。

上の2つの理由により，既に複数の加速管の交換を余儀なくされ，予備の加速管がほとんどない状態となっている。停止した他の加速器施設の加速管の再利用も検討されたが，設置形態に適合させることは容易ではない。一方，入射器の加速管は多数製造する場合に有利な電鋳法で製造されてきたが，当初の工場はもはや存在しない。そのため，新しい加速管を設計し，製造を進めているところである。

新しい加速管の設計においては，放電や漏水に対してそれぞれ対策を講じている(図4)。以前は電子溶接を利用していた冷却水路についても，溶接を避けた設計とした。精度の高い設計計算により，開口部やカプラー接合部は特に形状を工夫して，放電を避けており，KEKB 加速管よりも8%加速勾配を高くすることができる。

製造においては価格を抑える工夫も試み，年度末に最初の納入がされる予定となっている。納入後は，小電力性能検査や大電力試験，さらにコンディショニングを進め，夏の停止期間に設置が可能になると期待している。次の製造も検討されており，少なくとも3年間継続製造が必要と考えている。大電力試験やコンディショニングにおいては，4月の火災で影響を受けた加速管試験設備の復旧が重要であり，来年度の早い時期の回復を進めているところである。

光源リングの運転状況

図1に、PFリングにおける11月1日9:00～12月12日9:00（運転停止）までの蓄積電流値の推移を示す。この期間のユーザー運転は概ね順調であった。11月22日までは蓄積電流値450 mAのマルチバンチモードで運転を行い、その後ハイブリッドモードに切り替えて、12月12日9:00の運転停止までハイブリッドモードでの運転となった。今期のハイブリッドモードでは、シングルバンチの電流値を30 mA、マルチバンチの電流値を420 mA（前回までは400 mAであった）として、マルチバンチモードと同じ蓄積電流値となるよう合計450 mAに設定した。ハード

ウェアによるビームダンプはなく運転自体は順調であったが、シングルバンチの純度が悪化するということが、12月1日1:16に発生した。純化作業は定期的に行っていたが、純度モニターでシングルバンチの1バケット後方にビームが入っていることを確認した。純化のタイミングを微調整することによって後方に入ったビームを強制的に落とすことで対処した。また、同日20:58に進行方向のビーム不安定性が発生し、ビームライン側では光の強度変動が観測された。不安定性を抑制するべくRF位相変調を実施したが、抑制されなかったため、次の対処として一旦ビームを落として、ゼロから積み上げることとした。22:30にチャンネ

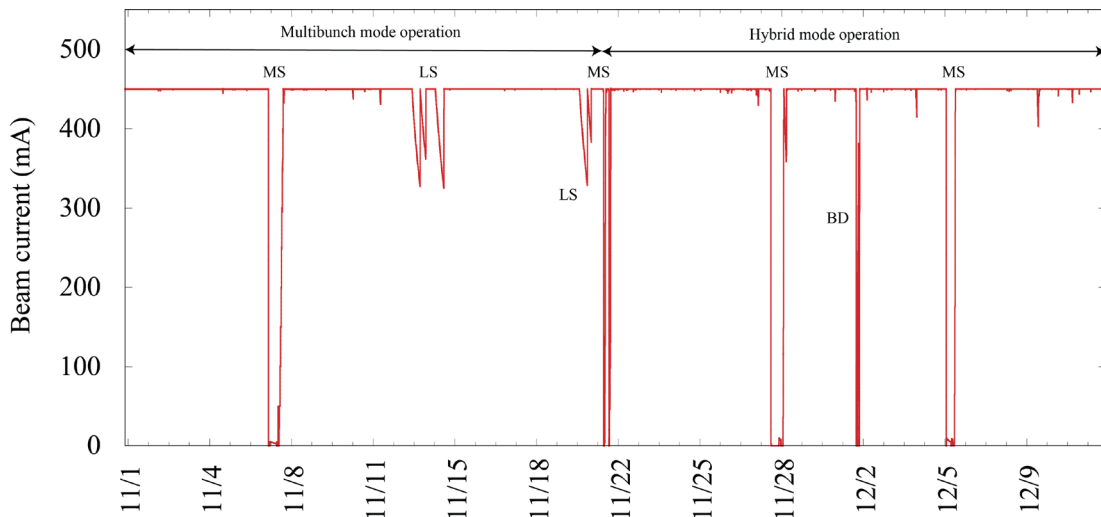


図1 PFリングにおける11月1日9:00～12月12日9:00（運転停止）までの蓄積電流値の推移を示す。LSは入射器マシン調整日、MSはリングマシン調整日、BDはビームダンプを示す。

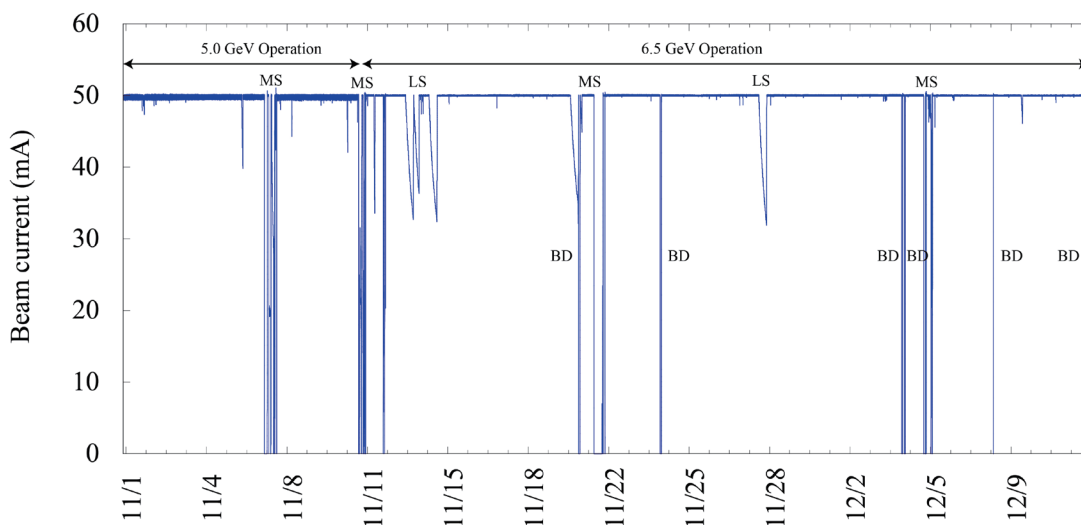


図2 PF-ARにおける11月1日9:00～12月12日9:00（運転停止）までの蓄積電流値の推移を示す。LSは入射器マシン調整日、MSはリングマシン調整日、BDはビームダンプを示す。

ルクローズして再入射を試みた。その際に、RF 立ち上げ操作で不具合が発生し回復に時間を要したが、翌日 12 月 2 日 2:25 ユーザー運転を再開した。その後、幸いにも運転停止までビーム不安定性の再発はなかった。突発的に発生する進行方向ビーム不安定性の原因は不明であるため、発生してしまったときの対処法をマニュアル化して実施している。12 月 12 日 9:00 に冬の停止期間にはいったが、この期間には真空作業を伴う大きな作業は行っていない。運転再開は、2020 年 2 月 3 日 9:00 を予定している。

図 2 に、PF-AR における 11 月 1 日 9:00 ~ 12 月 12 日 9:00 (運転停止) までの蓄積電流値の推移を示す。11 月 11 日 9:00 までは、ビームエネルギー 5.0 GeV でユーザー運転を行った。その後 11 日、12 日の 2 日間でビームエネルギーを 6.5 GeV に切り替える調整を行い、11 月 13 日 9:00 から 12 月 12 日 9:00 の運転停止まで 6.5 GeV でのユーザー運転となった。この期間ビームダンプが 6 回発生したものの、復旧は概ね迅速に行われた。1 回目のビームダンプは、11 月 20 日 17:27 に発生した。東 RF 空洞の HOM ケーブルの温度スイッチが働き RF がダウン、ビームダンプとなった。リング内に入域し調査したところ、スイッチ自身の接触不良が原因と判明し、予備のスイッチと交換して復旧した。接触不良となった原因が、夏の停止期間中に実施した作業に係る可能性があり、運転停止後に全数チェックすることとした。2 回目のビームダンプは、11 月 24 日 4:16 に発生した。PF-AR トンネル純水冷却水ポンプ 1 台が故障し、電磁石冷却水インターロックで電磁石電源がダウンし、ビームダンプとなった。ポンプを切り替えて復旧したが、滅多に起きないトラブルであったため、電磁

石の立ち上げに多少手間取ったことから、マニュアルを整備して今後の対策とすることとした。3 回目のビームダンプは、12 月 4 日 10:39 に発生した震度 3 の地震によるもので、AR 南棟シールド扉のインターロックが動作して、ビームダンプした。現場で問題ないことを確認して、約 1 時間後に復旧した。4 回目は、同じく 12 月 4 日 13:23 に発生した。1 回目と同様に温度スイッチの不具合によるもので、予備と交換して復旧した。5 回目は 12 月 8 日 7:49、西 RF 空洞の反射によりインターロックが動作してビームダンプとなった。その他に異常がないことを確認して、約 20 分後に運転を再開した。6 回目のビームダンプは、12 月 12 日 2:34 に発生した。トップアップによる連続入射を行っていたが、突然ビームが積み上がらなくなり、電流が減少していくという現象が発生した。これはダストトラップによる寿命急落現象と推測されたため、一旦ビームを捨てて再入射することとした。再入射によりこの現象はなくなり、4:16 にユーザー運転を再開した。

PF-AR も PF リングと同様に、12 月 12 日 9:00 に冬の停止期間に入った。こちらも停止期間中に大きな作業は実施されていない。運転再開は、2020 年 2 月 10 日 9:00 を予定している。

同時トップアップ運転の現状

図 3 に、PF-AR 6.5 GeV 運転 (上図) と PF リング 2.5 GeV 運転 (下図: マルチバンチモード) における 2019 年 11 月 18 日 0:00 ~ 1:00 までの 1 時間の蓄積電流値の推移を示す。PF-AR が 6.5 GeV 運転の時は、PF リングと PF-AR の入射路にある 1 台の共通偏向電磁石の電流値を

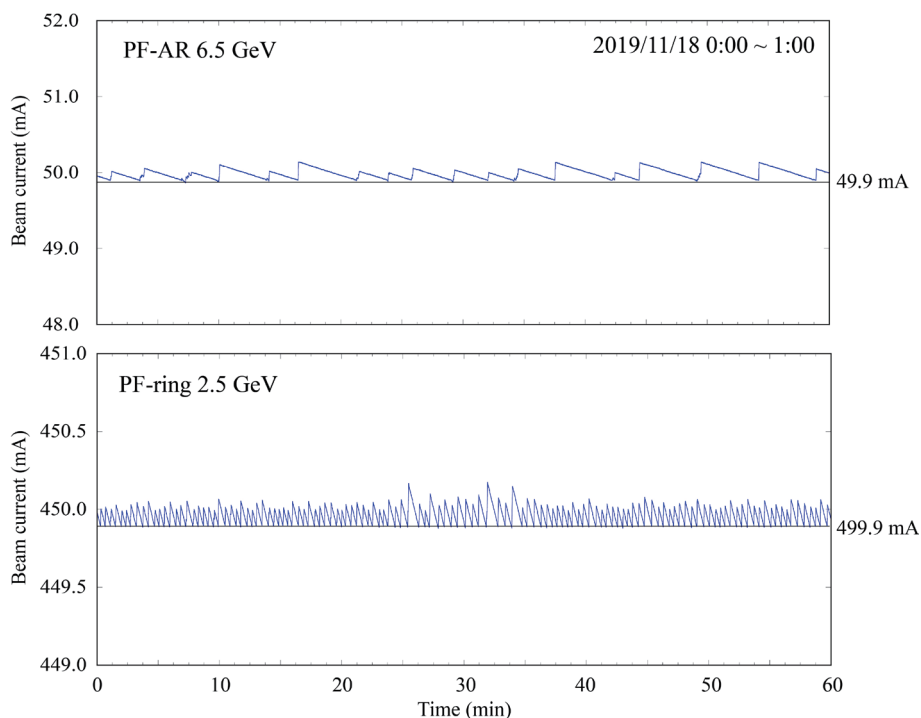


図 3 PF-AR 6.5 GeV 運転 (上図) と PF リング 2.5 GeV 運転 (下図: マルチバンチモード) における 2019 年 11 月 18 日 0:00 ~ 1:00 までの 1 時間の蓄積電流値の推移を示す。

固定にすることができ、2リングの入射ビームの切り替えは入射器の電子銃で切り替えるだけでよく、最速 50 Hz (20 ミリ秒) で行うことが可能である。そのため、図に示すように、PF-AR と PF リングのビーム入射はお互いに停止することなく随時行うことができ、蓄積電流値が約 0.1 mA 減衰した時点で積み上げ入射 (通常は 1 Hz の繰り返しで入射する) を行い、それぞれ 450.0 mA ± 0.1 mA, 50.0 ± 0.1 mA を維持してユーザー運転を実施している。

一方、PF-AR のビームエネルギーを 5.0 GeV に下げて省エネルギー運転 (約 6 割の電気代となる) を行う場合は、図 4 のようになる。図は、PF-AR 5.0 GeV 運転 (上図) と PF リング 2.5 GeV 運転 (下図: マルチバンチモード) における 2019 年 10 月 29 日 0:00 ~ 1:00 までの 1 時間の蓄積電流値の推移である。PF-AR を 5.0 GeV で運転する場合、入射路最上流にあるパルス偏向電磁石と 1 台の直流型共通偏向電磁石の電流値をそれぞれのエネルギーに合わせた電流値に切り替えを行わなければならない。パルス電磁石の

切り替えは高速で可能であるが、直流型電磁石の切り替えにはおよそ 8 秒程度の時間を要する。そのため PF-AR の電流値に合わせて入射している時間、PF リングの方は入射を中断せざるを得なくなる。この条件の下、昨年秋の運転では、PF-AR を 90 秒、PF リングを 150 秒、切り替え後は約 8 秒の待ち時間を見て、自動切り替えを行うことにした。図 4 で参照されるように、この取り決めによりビーム入射の切り替えは概ね順調に実施することができ、それぞれ 450.0 mA - 0.6 mA + 0.1 mA, 50.0 mA - 0.6 mA + 0.1 mA を維持して、ユーザー運転を実施することができた。

PF-AR 5.0 GeV 運転時でも 6.5 GeV 運転時と同様に高速で切り替えることを可能にするには、共通偏向電磁石を直流型電磁石からパルス電磁石に交換するなどいくつかアイデアはある。しかし、いずれにしても交換に必要な予算と改造期間がかかることから、しばらくは上述した取り決めによる自動切り替えで対応していくことになる。

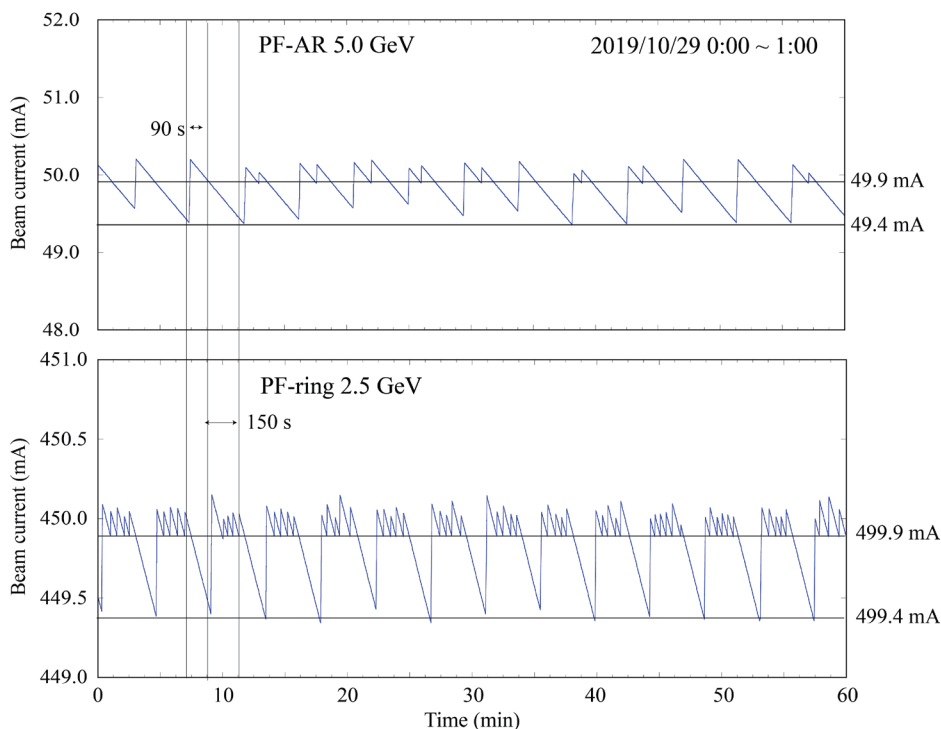


図 4 PF-AR 5.0 GeV 運転 (上図) と PF リング 2.5 GeV 運転 (下図: マルチバンチモード) における 2019 年 10 月 29 日 0:00 ~ 1:00 まで 1 時間の蓄積電流値の推移を示す。

基盤技術部門の紹介 (第2回)

<https://www2.kek.jp/imss/pf/section/beamline/>

前々回から、放射光実験施設を構成する3部門(運営、基盤技術、測定装置)について紹介をしています。今回は、実験施設最大の部門である基盤技術部門の第1回として、部門の概要、および、光学系、X線光学、基盤設備を主務とするメンバーを紹介しました。今回は、インターロック、真空系、制御系を主務とするメンバーを紹介させていただきます。残る3チームについては、次回、紹介したいと思います。

インターロックチームを主務とするのは、小菅隆前任技師(チームリーダー)、齋藤裕樹技師、石井晴乃技術員の3名です。インターロックチームは、放射光実験の安全の要ですが、安全を確保した上で、制御・測定システムとの連動やビームラインログ情報の活用などが可能な次世代インターロックシステムの開発を進めています。小菅さんは、PFスタッフの最古参で、放射光実験施設の技術副主幹2人の内の1人です。ビームライン制御用のアプリケーションフレームワークSTARSの開発者で、制御系を兼務しています。齋藤さんは、インターロック関係のプログラミングと現場対応を担当しています。石井さんは、最若手で意欲も高く、2019年5月からKEKの長期海外派遣プログラムでドイツのDESYに1年間の留学中です。

真空系チームを主務とするのは、間瀬一彦准教授(チームリーダー)と菊地貴司技師の2名です。真空系チームは、ビームライン真空技術の開発と普及、施設の真空機器の共通化などに取り組んでいます。超高真空を必要とする軟X線ビームライン用に開発してきたNEG(Non Evaporable Getter)ポンプの各ビームラインへの実装も始まり、他施設や真空関連企業からも注目を集めています。間瀬さんは、NEGポンプの開発を主導する他、真空に関する教育啓蒙も進めています。菊地さんは、NEGポンプの開発を地道に進めて優れた性能を実現し、2018年度のKEK技術賞を受賞しています。また、基盤設備を兼務し、PF-ARを担当しています。

制御系チームを主務とするのは、仁谷浩明助教(チームリーダー)と永谷康子特別技術専門職の2名です。制御系チームは、施設の情報技術全般を担当しています。また、ビームラインや実験装置の制御・測定システムの開発も担当します。仁谷さんは、施設の情報基盤の整備と運用を主導する他、今後の施設の高度化に向けて重要な高速高精度なモーションコントロールの実現に向けた開発研究も進めています。インターロックを兼務していて、ビームラインのトラブルの際の迅速な対応に助けられた利用者も多いのではないのでしょうか。永谷さんは、各種制御のソフトウェアを作成して実装するシステムエンジニアで、多くのビームラインで、彼女の作成したソフトウェアが利用されてい

ます。

運転・共同利用関係

予算の確保が遅れご心配をお掛けした2019年度第3期の運転ですが、予定通り、2月3日にPFの運転を開始しました。PFの運転は3月9日までの予定です。2月28日以降はハイブリッドモードでの運転です。PF-ARについては、2月10日から2月25日まで、5 GeV 運転の予定です。2020年度も、引き続きPF 3000時間、PF-AR 2000時間の利用運転を実施できるよう、機構執行部との折衝を行っています。2020年度第1期の運転については、ゴールデンウィーク明けの5月8日にPFの立ち上げ、約1週間後の5月14日にPF-ARの立ち上げ、ともに7月1日に停止の予定です。なお、来年度のPFの産業利用促進運転日を12日間とし、第1期については、期末の4日間とする方向で検討しています。運転スケジュールの詳細については、確定し次第、お知らせします。第2期以降の運転についても、なるべく早期に確定させたいと考えています。

PF-PACは、1月30日に開催されました。詳細については、本誌速報をご参照ください。

今年度のPFシンポジウムは、3月14日に開催の予定です。施設報告や将来計画のセッションなどを予定しています。当日は、活発な議論をよろしく願いいたします。

はじめに

2020年最初の記事は、放射光科学第二研究系の担当です。以前にも書いた通り、第二研究系は、材料科学研究部門と構造生物学研究部門の2つの部門から成り立っています。今回は、構造生物学研究部門の紹介をしたいと思います。今回は材料科学研究部門の紹介をしたいと思います。材料科学研究部門の部門長は、木村正雄教授です。XAFSをはじめとして、様々な分析手法を用いて広い意味での材料機能の可視化・反応の動的観察を中心に研究を展開していらっしゃいます。今回は、材料科学研究部門の紹介記事を木村教授に書いていただきましたので、そのまま掲載させていただきます。

材料科学研究部門の紹介

37-2号でも紹介したように、材料科学研究部門においては、(a) multi-scale & multi-modal のX線顕微鏡 (STXM, XAFS-CT, XAS/XRD/XF-mapping, X-CT等) を活用した材料機能可視化、(b) multi-range の時分割計測 (Dynamic XRD, D-XAFS等) を活用した化学反応/プロセスのメカニズム解明、(c) 触媒、エネルギー材料、地球惑星環境/有機材料、磁性材料、構造材料の“trigger sites”，を特定する研究を進めています。

今号では、(a) の分野の研究について少し紹介させていただきます。BL-19ではSTXM (Scanning Transmission X-ray Microscopy) を用いて、地球惑星環境、有機材料、磁性材料、炭素材料、電池材料、等様々な材料系について、数10nmの高分解能で化学状態マッピングを行いマクロ特性との関連性を調べる研究が進められています。従来からのユーザーに加えて、新学術領域「水惑星学の創成」のメン

バー、自動車や素材を扱う民間企業、等、様々な分野の研究者への利用が広がっています。

BL-15A1ではセミマクロビームを用いたXAS/XRF/XRD同視野観察、NW2AでのXAFS-CT (X-ray Absorption Fine Structure-Computed Tomography) を用いた数10 μ m～数mmのマルチスケールでの視野で金属等の化学状態マッピング (二次元、三次元) が可能です。これらを組み合わせて、例えば、構造材料のき裂進展の三次元観察、電池の充放電サイクルでの構造変化、といった反応の *in situ* & *operando* 観察を行い、劣化や反応の“trigger sites”を調べています。材料系毎に反応させながら放射光観察するための特別な反応チャンバー開発やその計測手法を最適化するためには様々な苦勞と時間が必要ですが、反応に伴う化学状態の変化を可視化できた時の喜びは何事にも代え難いものです。

今回は、材料科学研究部門の特にX線顕微鏡に関して、木村教授に簡単に紹介していただきました。当然のことですが、これらの装置はユーザーの皆様が利用することも可能です。ご自身の研究に利用したいという方がいらっしゃいましたら、遠慮せず担当者までご連絡いただければと思います。新しい測定法を取り入れることで研究の幅を広げていただければと思います。

次回は、構造生物学研究部門の中から最新の測定方法などの紹介をさせていただければと思います。

人事異動

最後に、放射光科学第一，第二研究系に関する人事異動を報告します。一柳光平さんが12月1日付けで放射光科学第二研究系・材料科学研究部門の연구원として赴任されました。今後の活躍を期待します。



図1 BL-19A (右), 19B (左) の様子 (19Aにクリーンブースを設置する前)