

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 古川和朗
(2018年2月19日付け)

概要

3月8日よりダンピング・リングの試験運転が無事始まっており、入射器とダンピング・リング接続部に位置するエネルギー圧縮装置とバンチ圧縮装置についても、所定の性能の確認が進行している。これらのビーム特性の変換装置については、そのマイクロ波導波管の工作与完成図書の齟齬が10月に見つかり、運転への影響が心配されたが、再製作の上、12月中旬に設置を終え、ダンピング・リング建設作業の合間を縫って大出力コンディショニングを行うことができた。1月18日からのPF入射や2月5日からのPF-ARへの入射と、SuperKEKBに向けたビーム開発も順調に進めることができた。正月前後の短期の運転停止期間には、陽電子捕獲装置内のブリッジ・コイルの運用に向けた電源への交換も終えた。今後、ダンピング・リングを通した低エミッタンス陽電子ビームの調整を終えた上で、フェーズ2・コミショニングを進めて最初の電子・陽電子衝突を目指すことになる。

複数蓄積リングの入射に向けたビーム開発

ダンピング・リングやSuperKEKBのフェーズ2入射に向けて、事前に要求仕様を満たしたビームの準備が必要となる。一方、並行して放射光施設への入射を行うため、工夫が必要となる。近い将来行われる4リング同時入射に関しては、電子銃ビームラインの切り替えなど、全ての機構が揃っているわけではない。それでも、50 Hzでビーム・

パラメータを切り替えるための、マイクロ波・電磁石・制御・診断などの仕組みの構築に取り組んでおり、装置や制御ソフトウェアの試験も進展させてきた。今期から運用を始めた64台のパルス電磁石も貢献を始めている。そこで、この同時入射の機構を積極的にビーム開発にも利用している。

図1には、試験用7 GeV電子ビーム、試験用陽電子ビーム、PF向け2.5 GeV入射ビーム、PF-AR向け6.5 GeV入射ビームを同時に加速している際のビームの水平・垂直位置と電荷を示している。例えば、放射光リング入射を行いながら、陽電子生成フラックス・コンセントレータの耐久試験と電子ビームの低エミッタンス化試験などを並行して行うことができる。

現在は、連続入射を優先的に行っているわけではないが、ビーム開発の内容によっては干渉が小さく、数日間連続的にPFへの入射ができる場合もある。その間にはPF-ARへの入射も同時並行に行われるので、放射光実験へ貢献できている。

マイクロ波システムの更新

電子や陽電子を加速するための電場は、入射器においては高電力のマイクロ波によってもたらされている。Sバンド(2856 MHz)のマイクロ波が、精度の高い加速管の中で方向を整えられ、バンチ化された電子や陽電子のビームの塊を加速することになる。1つの大電力マイクロ波源から約2 mの加速管4本にマイクロ波が供給される。大電力マイクロ波源は、40 kVの高電圧パルスを50 Hzで発生する大電力パルスモジュレータ、中電力のマイクロ波を10万倍ほど増幅する40 MWクライストロン、4 μ sの40 MWマイクロ波パルスを1 μ sに圧縮し、出力を増倍するSLED(マイクロ波パルス圧縮器)などから構成される。これらのマイクロ波発生装置はビーム運転中であっても軽度の保守作業の可能性を確保するために、地上部のクライストロン・ギャラリに設置されている。角型導波管を通じて地下にマイクロ波が導かれると、加速管を通過するビームを約20MV/mの実効加速電場で加速する。

入射器には60台の大電力マイクロ波源が設置されており、それらが協調して動作し、電子を2.5–7 GeV、陽電子を4 GeVに加速し、4つの蓄積リング型加速器に入射する。それらの入射ビームの加減速を50 Hzのパルス毎に切り替えるために、マイクロ波の位相を変更する必要があるが、大電力での位相の変更は困難なため、小電力で位相を変更し、中電力、大電力と増幅する。そのため、60台の大電力マイクロ波源の内、3分の1は独立に小電力で位相を制

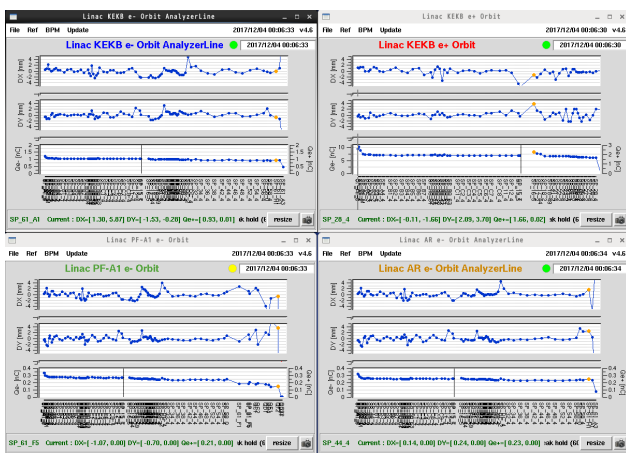


図1 左上から右へ、試験用7 GeV電子ビーム、SuperKEKB向け陽電子ビーム、PF向け2.5 GeV入射ビーム、PF-AR向け6.5 GeV入射ビームを、同時入射機構を用いて加速している様子。それぞれ、上からビームの水平・垂直位置とバンチ当たり電荷を表す。



図2 入射器クライストロン・ギャラリに設置されている大電力パルスモジュール電源とクライストロン。

御し、自由にマイクロ波を調整できるように構成されている。残りの3分の2については数台から8台までの大電力マイクロ波源が中電力のマイクロ波を共有し、まとめて制御されることになる。

以前のKEKB計画においては、入射ビーム特性に対する要求精度が高くなかったため、マイクロ波制御について

の高い精度は要求されなかった。しかし、SuperKEKB計画においては、大電流にもかかわらず数十分の1の低エミッタンスが要求されるため、精度が高く安定なマイクロ波制御が必要とされている。また、ダンピング・リングが増設されるため、既存の複数のエネルギー調節機構に加えて、ダンピング・リング入射エネルギーの調節機構や、エネルギー圧縮装置とバンチ圧縮装置が設置されるため、それぞれ独立なマイクロ波制御の増設が必要となる(図3)。一方、陽電子捕獲装置の増強やパルス電磁石装置、ダンピング・リングの一部の装置などギャラリに設置される装置が増えたため、大きな面積を必要とする旧型の大電力パルスモジュールを約3分の1の面積となる新型のインバータ方式のモジュールに更新した。

このように、SuperKEKB計画に向けたマイクロ波発生装置は大幅な改造を求められることになった。ところで、SuperKEKBのビーム運転は4リング同時入射など高度化しており、パルス毎に切り換えられるビームの入射先に応じて、それぞれのマイクロ波発生装置の動作点は異なり、それぞれ安定な動作が必要とされるため、常時監視することが必須となっている。そのような環境下においても、高度になったマイクロ波システムの信頼性を維持するために、パルス毎のマイクロ波の監視機構も整備されている。

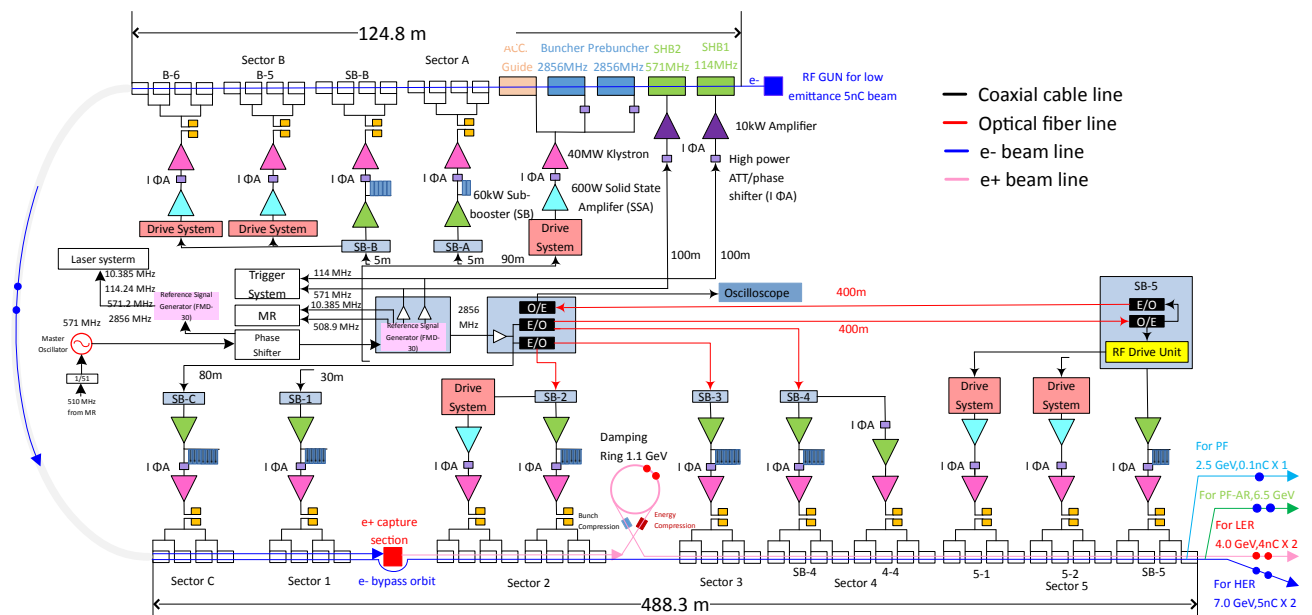


図3 入射器の小電力マイクロ波配信の概念図。薄赤色の箱で示した独立のマイクロ波制御部分(Drive System)が必要に応じて増設され、運転管理は高度化している。

光源リング秋の立ち上げ状況

PF リングは、10月30日(月)9:00から運転を再開した。立ち上げから11月9日(木)9:00までの蓄積電流値の推移を図1に示す。セプタムII真空チャンバー内の冷却水漏れ対策のため、上流に設置した光アブソーバの影響で、ビーム入射・蓄積がうまくいかどうか懸念されていたが、キッカー電磁石のパラメータ調整だけで入射・蓄積が可能となった。そのため、アブソーバの挿入長を変更する真空作業は行なわないこととした。入射効率は5 Hzで0.5 mA/s程度で前期と同程度を達成している。立ち上げ時ビーム不安定性抑制のためのバンチごとフィードバックシステムに使用している高周波アンプ2台のうち1台が故障した。予備のアンプも故障していたため、急遽シングルバンチ運転で純化のために使用していたアンプを転用した。立ち上げ調整時からの真空焼き出しの状況を図2に示す。2017年11月8日17時の時点で、積分電流値は69 A·h、蓄積電流値とビーム寿命の積 $I\cdot\tau$ は250 A·min となってい

る。VW#14の真空ダクト更新に伴う真空作業のため、周辺の真空度の回復が思いのほか遅い。図2のグラフから、夏期停止前の $I\cdot\tau$ 380 A·min に到達するのは、積分電流値 ~100 A·h になるあたりと見込まれ、到達日は11月12日頃(8 A·h/dayで焼出した場合)と予想された。ユーザ運転開始日の11月6日の時点ではビーム寿命が短かったため、1日3回入射の予定を変更し、8:30, 14:30, 20:30, 2:30の6時間おき、1日4回入射にすることとした。ビーム寿命の回復状況に応じて、1日3回入射に戻した。

PF-ARは、11月6日(月)9:00から運転を再開した。立ち上げから11月9日(木)9:00までの約3日間の蓄積電流値の推移を図3に、立ち上げ調整時からの真空焼き出しの状況を図4に示す。立ち上げ前のリング内点検で偏向電磁石の冷却水ゴムホースから水漏れを発見したので、急遽交換作業を行った。ゴムホースはAR高度化改造時に交換したものですでに17年以上経過し、老朽化による水漏れと思われる。作業終了後、入射路のビーム調整を開始し、

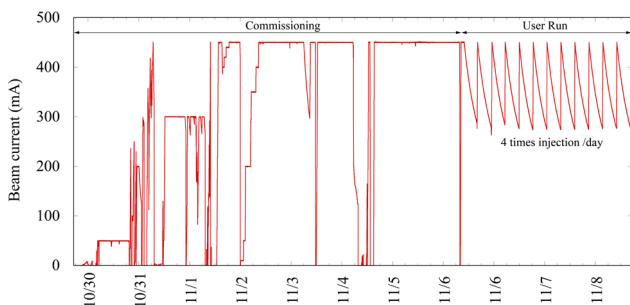


図1 PF リングにおける10月30日9:00から11月9日9:00蓄積電流値の推移を示す。11月6日9:00過ぎからユーザ運転が再開された。

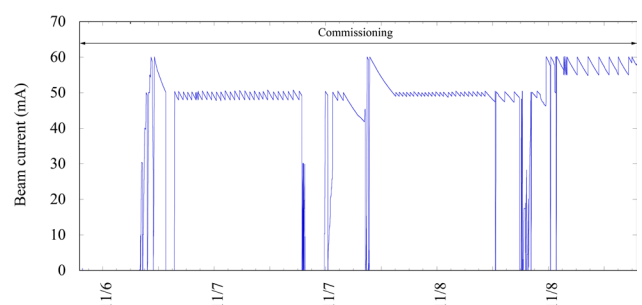


図3 PF-ARにおける11月6日9:00から11月9日9:00蓄積電流値の推移を示す。11月10日9:00過ぎからユーザ運転が再開された。

PF-ring光焼出し状況

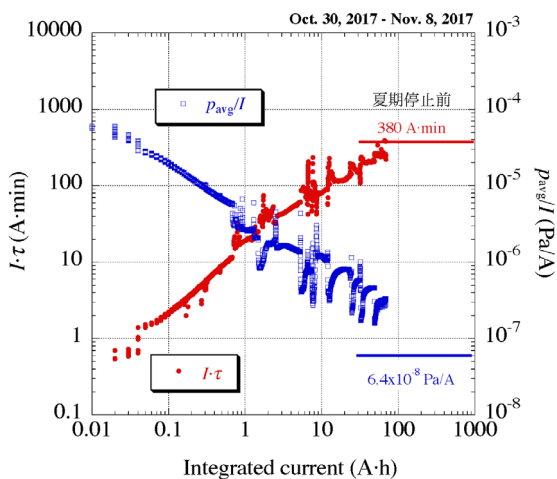


図2 PF リングにおける立ち上げ調整開始日10月30日から11月8日までの真空焼き出しの状況

PF-AR光焼出し状況

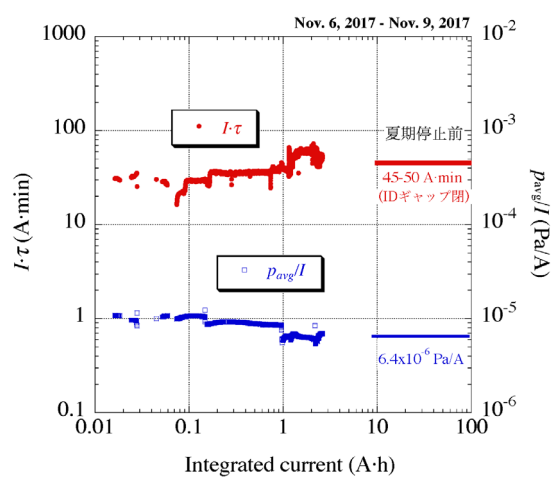


図4 PF-ARにおける立ち上げ調整開始日11月6日から11月9日までの真空焼き出しの状況

入射・蓄積は順調に行われた。今回は休止期間から立上げ期間を通じて特に BPM 測定回路の点検と調整を重点的にを行い、COD 計測の安定性と分解能の改善を図った。その結果、放射光ビームラインの光軸と真空封止アンジュレータの軌道の調整も良好に進められた。図 4 の真空焼き出し状況より、2017 年 11 月 9 日 3 時の時点で、積分電流値は 2.6 A・h、蓄積電流値とビーム寿命の積 $I\cdot\tau$ は 54 A・min となっている。停止期間中に行った RF 空洞周辺の真空作業の影響は小さく、 $I\cdot\tau$ はすでにほぼ夏期停止前の値まで回復した。

光源リングの運転状況

PF リングの立ち上げ後 11 月 9 日 (木) 9:00 から 12 月 27 日 (水) 9:00 までの蓄積電流値の推移を図 5 に示す。11 月 24 日 (金) 9:00 から 11 月 30 日 9:00 までの 6 日間は、ハイブリッドモードでのトップアップ運転を実施した。停止期間中に交換した超伝導ウィグラー (VW14) の真空ダクト付近で急激に真空が悪化したため、シングルバンチ電流値を通常の 50 mA から 30 mA に減らしてユーザ運転することとした。急激な真空悪化については、次節に記述する。ハイブリッドモード運転中に、PF-AR でキッカー電磁石電源のトラブルによる再入射が頻発したため、例年に比べて連続入射の中断が多発した。さらに、11 月 24 日の準夜あたりから、小型電磁石電源制御系の不具合によるビーム軌道変動が頻発した。翌日 25 日の 19 時頃に軌道がずれたまま元に戻らなくなったため、20:50 にユーザ実験を中断し、ビームを落として制御系 VME ボードのコネクタ抜き差しを実施した。21:56 のユーザ運転再開後は一度だけ軌道変動が見られたが、ビーム変動の頻度は格段に減った。

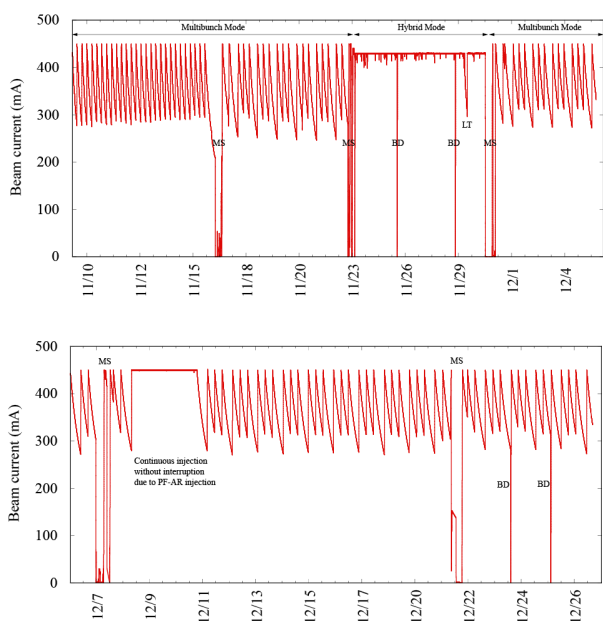


図 5 PF リングにおける 11 月 9 日から 12 月 27 日までの蓄積電流値の推移を示す。11 月 24 日 (金) 9:00 から 11 月 30 日 9:00 までの 6 日間は、ハイブリッドモードでのトップアップ運転。LT は入射器トラブル、MS はマシン調整日、BD はビームダンプを示す。

対処として、11 月 30 日のメンテナンス時に VME 制御系の一部を更新した。更新後ビーム軌道変動は発生しなかった。11 月 28 日 20:08 にビームライン BL14 のインターロックでビームダンプが発生した。インターロック制御系のリセットで復旧し、20:55 にユーザ運転を再開した。インターロック不具合の原因は不明であるが、再発はなかった。PF リングでは入射器の協力の下、12 月 8 日 (金) 17:00 ~ 12 月 11 日 (月) 9:00 までの約 3 日間連続入射によるユーザ運転が行われた。この期間 PF-AR の定時入射 (1 日 3 回) も行われていたが、2 リング同時入射が可能になったことから、PF-AR 入射時に起こっていた PF リングへのビーム入射中断はなくなり、ほぼ一定電流値 450 mA を維持できるようになった。12 月 23 日と 25 日にビームダンプが 2 回発生した。原因は入射用キッカー電磁石 1 台の電源が、過電圧インターロックが動作し OFF になり、入射バンパが形成されず残り 2 台のキッカー電磁石で蓄積ビームを蹴り落としたためであると判明した。インターロックはリセットで解除可能であったことから、すぐに ON にして入射を再開した。その後は、入射開始前に電源の状態を確認し、OFF になっていた場合はリセットで ON にしてから、入射を開始することで対処した。過電圧インターロックが動作する原因調査は冬の停止期間中に行い、原因を突き止め手当てして解決した。

PF-AR における 11 月 9 日 (木) 9:00 から 12 月 27 日 (水) 9:00 までの蓄積電流値の推移を図 6 に示す。ダストトラップによる寿命急落による再入射は、11 月 21 日の未明、11 月 24 日の未明、11 月 29 日の夕方、12 月 1 日の朝、12 月 2 日の朝の計 5 回発生した。また 11 月 23 日から 27 日にかけて、キッカー電磁石電源の誤動作ビームロス、ビームダンプが頻発した (図 6 下)。当初ビームロスの原因がつかめず、25 日朝より初期電流値を 60 mA から 50 mA に下げて運転を行ったが全く頻度が減らないため、ダストトラップによるビームロスではないことがわかり、他の原因を調査したところ、蓄積中に入射用キッカー電磁石のミスファイアが発生していることが原因と判明した。入射時以外はキッカー電源を OFF にしてミスファイアを防止した結果、ビームロスの頻発は解消した。11 月 30 日の保守時にメーカーとともにキッカー電磁石電源の調査を行ったものの、電源自体に異常はみられなかった。トリガー系に電氣的ノイズが混入してミスファイアしている可能性が高く、たとえばトリガー信号の光伝送の活用などでこの課題を解決する予定である。この問題については、冬の停止期間中に原因調査を行ったが、ビーム停止状態では現象は再現せず、原因の特定には至っていない。電源自体には異常はなさそうであるが、とりあえずトリガー系の伝送線にフェライトコアを追加することでノイズ対策を施した。

11 月 30 日のマシンスタディ時に、真空封止型アンジュレータのギャップを閉じた入射を実施した (通常入射時はギャップを全開にしている)。前期の試験では、一部のアンジュレータのギャップを閉じると入射効率が落ちるということがあったが、今回の試験ではすべてのアンジュレー

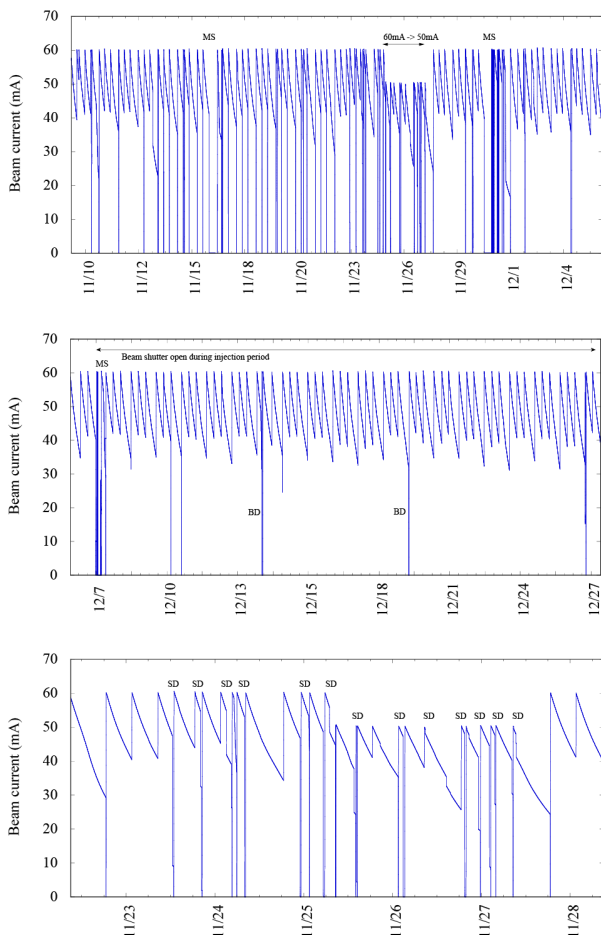


図6 PF-ARリングにおける11月9日から12月27日までの蓄積電流値の推移を示す(上, 中図)。11月23日から11月27日まで(下図)は、キッカー電磁石電源誤動作によるビームロスが頻発した。MSはマシン調整日, SDはビームロス・再入射を示す。

タを最小ギャップにしても、入射効率にはほぼ影響がないことを確認した。12月7日には、アンジュレータのギャップを閉じ、ビームシャッター(MBS)を開いたまま入射を行い、ビームライン側で放射線サーベイを実施した。放射線サーベイに特に問題はなく、12月8日よりPF-ARもPFリングと同様にMBS開での入射が許可された。安全系インターロックの整備も含めPF-ARとしてはトップアップ運転開始の準備がほぼ完了した。しかし、不手際で一部のアンジュレータのギャップを最小ギャップにせず放射線サーベイを行ったため、今年2月の立ち上げ時に再度すべての真空封止型アンジュレータを最小ギャップにして放射線サーベイを実施することとした。

12月8日(金)よりPF-ARもPFリングと同様にメインビームシャッター(MBS)開での入射が許可されて、ユーザ運転を行った。ユーザ運転は概ね順調に推移した。基本的に積み上げ入射を行っているが、ビーム寿命急落が起こった場合は、ダストをトラップした可能性があるため、ビームを一旦捨ててゼロから入射することになっている。12月13日と12月19日にビームダンプが発生した。13日はビームラインNE#7でMBSがタイムアウトで開かなか

ったためと判明した。動作確認を行い、特に問題がないことがわかったため、ユーザ運転を再開した。その後再発は起こらなかった。19日は1台のステアリング電源が故障したため、ビームをダンプして予備の電源と交換する作業を行ったことによる。

両リングとも冬の停止期間中には大きな作業は行わず、冬の運転再開はPFリングが1月18日(木)9:00、PF-ARが2月5日(月)9:00を予定している。

ハイブリッドモード運転中のVW14上流部真空悪化について

11月23日(木)にハイブリッドモードの調整が行われ、12:09ごろに450 mA(マルチバンチ400 mA, 単バンチ50 mA)蓄積が完了した時点では、VW14上流部の真空計bag132の圧力は 3.8×10^{-6} Pa程度であった。PF-AR入射のためトップアップ入射を中断し、13:01ごろトップアップ入射再開後にbag132の圧力が 8.5×10^{-5} Paまで急激に圧力上昇した(図7)。

リング内に入域して真空悪化の原因調査を行ったところ、VW14上流部の可動アブソーバ付ダクト及びVW14につながるペローズダクトで発熱が確認できた。可動アブソーバ付ダクトが50°C程度、ペローズダクトが60°C程度の温度であった(図8:サーモグラフィー画像では40°C以下という表示になっているが、これは光沢のある金属表面の温度が低めに計測されたため)。VW14上流部ダクト全体を空冷するためのファンがあるため、空冷ファンの追加設置などは行わずに運転を再開した。運転再開後はbag132の圧力上昇の状況を見ながら、ハイブリッドの単バンチ電流を40 mA, 30 mAと減らしていき、マルチバンチ400 mA, 単バンチ30 mAの合計430 mAで運転が可能と判断した(図9)。図10にハイブリッドモード運転時(マルチバンチ400 mA, 単バンチ30 mA)の真空棒グラフ、図11に今回のハイブリッドモード運転時(前後1日ずつ含めた9日間)の圧力の推移を示す。

VW14の真空ダクト更新後初めてのハイブリッド運転で、シングルバンチ電流によるビームダクトの発熱がガス放出増加の原因と考えられ、ビーム運転による真空焼き出しを続けることによって圧力には着実な改善がみられた。

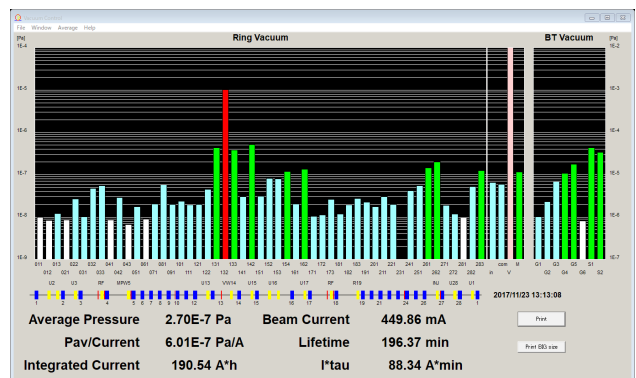


図7 bag132の急激な圧力上昇(最大 8.5×10^{-5} Paまで上昇)

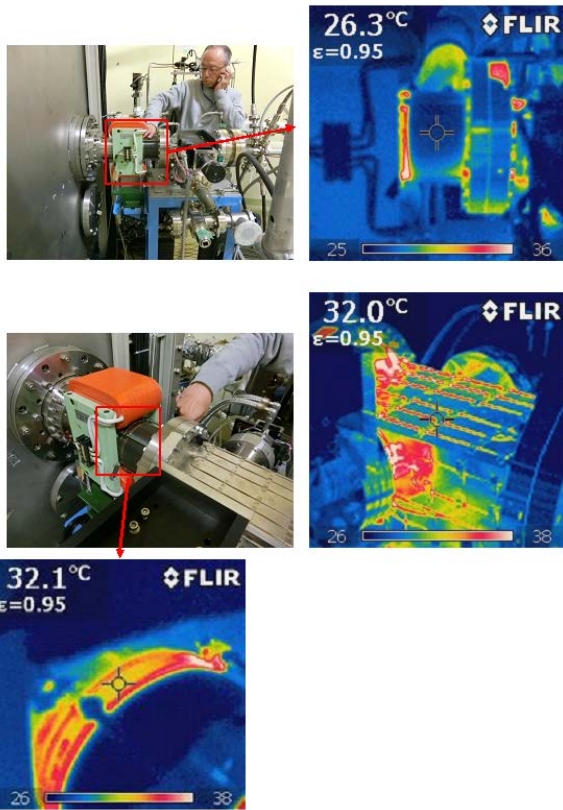


図8 VW14上流部ダクトのサーモグラフィー画像

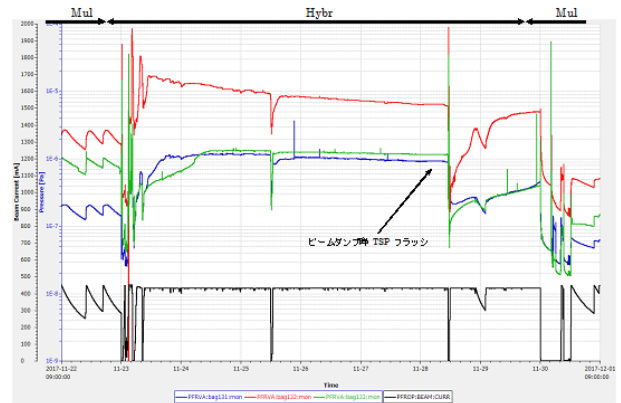


図11 ハイブリッドモード運転時の圧力の推移

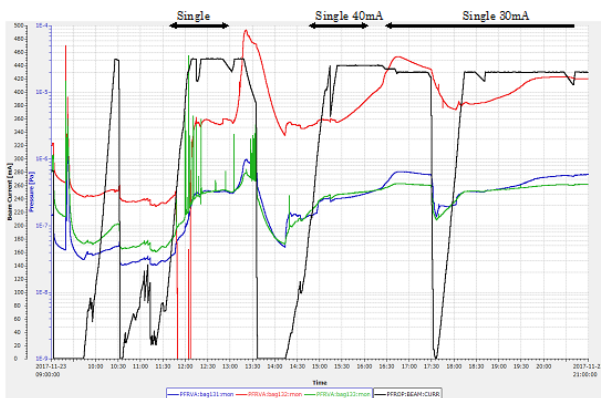


図9 単バンチ電流値と bag132 圧力の様子

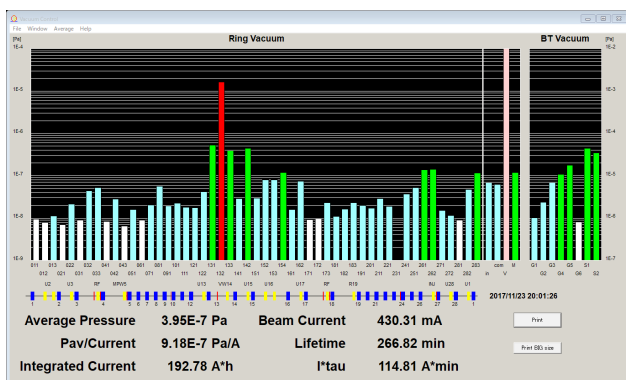


図10 ハイブリッドモード運転時（マルチバンチ 400 mA，単バンチ 30 mA）の真空棒グラフ

PF および PF-AR の運転状況とスケジュール

PF の 2017 年度第 2 期 (11 ~ 12 月) のユーザー運転は、予定通り 12 月 27 日 (水) に終了しました。今年度は KEKB アップグレードに伴う入射器の大規模改修工事のために、PF および PF-AR は 5 月中旬から 10 月下旬まで約 5 ヶ月に渡り長期停止しました。そのため、11 月以降の運転スケジュールは、残りの期間でなるべく長いビームタイムを確保するために、例年に比べてかなりタイトなスケジュールとなっています。クリスマスにも運転し、仕事納め前日に終了するという、例年になく慌ただしい年末の運転となりました。

年が明けて 1 月には、8 ~ 10 日の 3 日間に渡って、恒例の日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウムがエポカルつくばで開催され、PF がホスト機関を務めました。実行委員長の村上施設長をはじめとして、PF スタッフを中心に編成された実行委員会メンバーが、精力的に学会年会の運営に当たりました。実行委員一丸となった学会年会運営は、大変良く組織されており、改めて PF スタッフの実務能力の高さを感じさせるものでした。現場を統括した実行副委員長の清水准教授をはじめとして、年会運営に関わったスタッフ、秘書、関係者の皆さんを労いたいと思います。その後、休む間もなく入射器の立ち上げがスタートし、PF の立ち上げ調整、光軸確認を経て、1 月 23 日から 2017 年度第 3 期の PF ユーザー運転が始まりました。PF の運転は年度末の 3 月 20 日まで続く予定です。(ただし、量子ビームサイエンスフェスタの期間 (3 月 2 ~ 4 日) は、運転停止となります。)

一方、PF-AR については、年度当初は運転経費の不足により、第 3 期の運転時間が確保できていませんでしたが、その後、物構研と機構からの追加予算により、約 2 週間 (2 月 7 日 ~ 2 月 23 日) のユーザー運転を実施することになりました。短期間ではありますが、折角の追加予算で確保できたビームタイムですので、ぜひ有効に活用していただければと思います。

2018 年度は、2017 年度のような 5 ヶ月に渡る長期停止期間は予定されていません。第 1 期はゴールデン・ウィーク明けの 5 ~ 6 月、第 2 期は夏期シャットダウン明けの 11 ~ 12 月、第 3 期は 1 ~ 3 月の運転スケジュールを想定しています。詳細なスケジュールが決まりましたら、適宜 PF ホームページにてお知らせします。特に、ユーザーの皆さんが気にかけておられるトップアップ運転の再開予定ですが、加速器の準備が順調に進めば、2018 年の夏期シャットダウン中に KEK 全リングへの同時入射システムの整備を完了し、11 月以降の第 2 期からは、PF および PF-AR のトップアップ運転を開始 (もしくは再開) する予定です。2018 年度予算も引き続き厳しい状況ですが、

可能な限りビームタイムの確保に努めて参ります。最近の予算状況や今後のビームタイムスケジュールについては、3 月に開催される PF シンポジウムでもご説明させていただきます。

ビームラインの改造、立ち上げ状況

次はビームラインの改造、立ち上げ状況に関する情報です。PF の機能強化のための重点支援事業として「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」が採択されていることを以前にお知らせしましたが、この運営費交付金を原資として、BL-19 の全面更新作業を進めています。このビームラインでは、軟 X 線領域の変調偏光アンジュレータを光源とし、2 つのブランチのうちの片方に走査型透過 X 線顕微鏡 (STXM) の設置、もう片方をフリーポートとするという計画となっています。上記運交金によりアンジュレータ光源の導入を行っていますが、さらにこの BL-19 の全面更新にあたっては、平成 29 年度採択の新学術領域「水惑星学の創成」(領域代表者・東京大学 関根康人先生) による科研費補助金が導入され、主にビームラインコンポーネントの整備が進むこととなりました。これにより、当初の建設予定を大幅に前倒して、平成 30 年度中にビームラインコミッショニングを開始し、立ち上げが順調に進めば、平成 30 年度中の共同利用開始を目指しています。

また、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) プロジェクト (KEK 代表者: 木村正雄教授) の研究資金により、AR の NW2A に大型 X 線顕微鏡装置が導入されました。この装置はミクロンオーダーに整形された試料の 3 次元トモグラフィーを行いながら、X 線エネルギーを走査する XAFS-CT と呼ばれる計測を実現するものです。例えば、航空機に使用されている炭素繊維強化プラスチック (CFRP) などの構造材料の破壊過程のメカニズムを XAFS 情報とともに可視化することができる、これまでにない計測ツールです。すでに試験的な試料を用いた計測で、構造材料の破壊過程に関する興味深いイメージング画像が得られており、今後、様々な計測に利用されることが期待されます。

人事異動

2016 年 10 月から構造生物学研究センターの研究支援員として、主に小角散乱ビームラインのお世話をしてくださっていた米澤健人さんは、2018 年 1 月 1 日付けで、放射光科学第二研究系の研究員として着任されました。引き続き、小角散乱ビームラインを活用した共同利用実験等で活躍いただけることを期待します。